JAEA-Technology
2015-039
DOI:10.11484/jaea-technology-2015-039

瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成26年度）
－設計・施工計画および施工対策技術の開発－
（委託研究）

Study on Engineering Technologies
in the Mizunami Underground Research Laboratory (FY 2014)
- Development of Design and Construction Planning
and Countermeasure Technologies -
(Contract Research)

小林 伸司　新美 勝之　辻 正邦　山田 俊子
青柳 芳明　佐藤 稔紀　見掛 信一郎　大澤 英昭

Shinji KOBAYASHI, Katsuyuki NIIMI, Masakuni TSUJI, Toshiko YAMADA
Yoshiaki AOYAGI, Toshinori SATO, Shinichiro MIKAKE and Hideaki OSAWA

バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター
地層科学研究部

Geoscientific Research Department
Tono Geoscience Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management

February 2016
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency.
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2016

JAEA-Technology 2015-039

瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討（平成 26 年度）
－設計・施工計画および施工対策技術の開発－
（委託研究）

日本原子力研究開発機構　バックエンド研究開発部門
東濃地科学センター　地層科学研究部

小林　伸司*、新美　勝之*、辻　正邦*、山田　俊子*、
青柳　芳明※、佐藤　稔紀+1、見掛　信一郎+2、大澤　英昭

（2015 年 11 月 25 日受理）

超深地層研究所計画における工学技術に関する研究は、①「研究坑道の設計・施工計画技術の開発」、②「研究坑道の建設技術の開発」、③「研究坑道の施工対策技術の開発」、④「安全性を確保する技術の開発」および⑤「掘削影響の修復・軽減技術の開発」の 5 項目に分類して進めている。これまでは、「第 2 段階」の調査研究として、研究坑道掘削工事で取得される計測データや施工データを用いた評価に基づく設計の妥当性についての検討などを中心に進めてきた。

本研究では、平成 25 年度に引き続き、研究坑道の設計・施工計画技術の開発および施工対策技術の開発を目的として､瑞浪超深地層研究所に設置した地震計等の計測結果を分析し、大深度における地震動特性に関する知見を得るとともに、施工対策技術としての湧水抑制対策技術に関する検討を行った。

大深度における地震動に関する検討では、地表および深度 100m、深度 300m、深度 500m 地点に設置した地震計等の計測結果を分析し、岩盤及び覆工コンクリートの地震時挙動を把握するとともに、地表からの調査予測研究段階で実施した耐震設計手法の妥当性について検討した。対象とする地震は 2008 年 11 月 24 日～2014 年 12 月 3 日に観測された地震とし、震源の位置や深さ、地震の規模などと、各深度の方向ごとの計測データや地質状況との関係を総括的に評価した。

湧水抑制対策技術に関する検討では、平成 25 年度に立案した施工試験計画に基づいて実施された、深度 500m 研究アクセス南坑道のポストグラウチングの施工結果を評価した。さらに、平成 25 年度に実施した、ポストグラウチング手法についての既往の情報の収集・整理結果と併せ、ポストグラウチングの課題を整理し、今後の研究計画を立案した。

本報告書は、清水建設が日本原子力研究開発機構との委託研究により実施した研究成果に関するものである。
東濃地科学センター：〒509-6132　岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64
+1　幌延深地層研究センター　深地層研究部
+2　東濃地科学センター　施設建設課
※　技術開発協力員
＊　清水建設株式会社

JAEA-Technology 2015-039

Study on Engineering Technologies in the Mizunami Underground Research Laboratory (FY 2014) - Development of Design and Construction Planning and Countermeasure Technologies - (Contract Research)

Shinji KOBAYASHI*, Katsuyuki NIIMI*, Masakuni TSUJI*, Toshiko YAMADA*, Yoshiaki AOYAGI※, Toshinori SATO+1, Shinichiro MIKAKE+2 and Hideaki OSAWA

Geoscientific Research Department, Tono Geoscience Center
Sector of Decommissioning and Radioactive Waste Management
Japan Atomic Energy Agency
Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received November 25, 2015)

The study on engineering technology in the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) project consists of (1) development of design and construction planning technologies, (2)development of construction technology, (3)development of countermeasure technology, (4)development of technology for security, and (5) development of technologies regarding restoration or reversal and mitigating of the excavation effect. The researches on engineering technology such as verification of the initial design were being conducted by using data obtained during Construction phase of the MIU project.

The purpose of the study is to develop design and construction planning technologies, and countermeasure technology. And the analysis of data measured during earthquakes was performed to characterize the seismic movement at deep underground; also applied grouting methods were examined.

As for “Study on seismic movements at deep underground”, all the data obtained from November 24th, 2008 to December 3rd, 2014 by measurement equipment, e.g. seismometers installed at ground level, and at 100m, 300m and 500m depth were analyzed to characterize the behavior of concrete lining and rock mass and to verify the earthquake-resistant design of the shafts in Phase I (Surface-based Investigation Phase). Overall evaluation of the relation between the geological condition and the seismic data obtained at each depth was performed.

As for “Study on grouting method at deep underground”, post-grouting was conducted at the research gallery-south at 500m depth based on the test construction scheme established in FY2013 and its results were evaluated. Taking account of the task of the post-grouting method, further research plan was established.

Keywords : Earthquakes, Shafts, Deep Underground, Post-grouting, Grouting Method

---

The following performed the work under contract with Japan Atomic Energy Agency.
+1 Horonobe Underground Research Department, Horonobe Underground Research Center
+2 Geoscience Facility Construction Section, Tono Geoscience Center
※ Collaborating Engineer
＊ Shimizu Corporation

目次

1. 研究の目的 1
2. 研究の概要 2
2.1 実施項目 2
2.1.1 大深度における地震動に関する検討 2
2.1.2 湧水抑制対策技術に関する検討 2
3. 大深度における地震動に関する検討 3
3.1 地震観測結果の分析と地震時挙動の把握 3
3.1.1 地震観測の概要 3
3.1.2 観測地震 7
3.1.3 地震観測記録の補正 9
3.1.4 地震観測記録 15
3.1.5 微動観測に基づく表層地盤振動特性の推定 40
3.1.6 地震観測記録の分析 46
3.2 耐震設計の妥当性検討 72
3.2.1 検討条件 72
3.2.2 検討方法 73
3.2.3 解析結果 73
3.2.4 まとめ 74
4. 湧水抑制対策技術に関する検討 75
4.1 目的および概要 75
4.1.1 検討目的 75
4.1.2 平成 26 年度の実施概要 76
4.2 ポストグラウチングの施工結果の評価 78
4.2.1 検討概要 78
4.2.2 平成 25 年度の検討結果のまとめ 79
4.2.3 ポストグラウチング実施のための事前検討 86
4.2.4 ポストグラウチングの施工結果の評価 120
4.3 課題の整理と今後の研究計画立案 153
4.3.1 ポストグラウチングの課題の整理 153
4.3.2 今後の研究計画の立案 155
5. 研究のまとめ 160
5.1 大深度における地震動に関する検討 160
5.1.1 研究のまとめ 160
5.1.2 今後の課題 160
5.2 湧水抑制対策技術に関する検討 161
5.2.1 研究のまとめ 161
5.2.2 今後の課題 163
参考文献 164
付録 165

CONTENTS

1. OBJECTIVE OF STUDY 1
2. OUTLINE OF STUDY 2
2.1 Subject 2
2.1.1 Study on seismic movements at deep underground 2
2.1.2 Study on grouting method at deep underground 2
3. STUDY ON SEISMIC MOVEMENTS AT DEEP UNDERGROUND 3
3.1 Analysis of seismic behaviors of measured data during earthquake, and validation of seismic design 3
3.1.1 Overview of observing earthquakes 3
3.1.2 Obsereved earthquakes 7
3.1.3 Correction of records of observed data 9
3.1.4 Records of observed data 15
3.1.5 Estimation of surface geological condition based on observing microtremor 40
3.1.6 Analysis of observed data 46
3.2 Validation of seismic design 72
3.2.1 Analytical conditions 72
3.2.2 Method 73
3.2.3 Results 73
3.2.4 Conclusions 74
4. STUDY ON GROUTING METHOD AT DEEP UNDERGROUND 75
4.1 Objectives and outline 75
4.1.1 Objectives 75
4.1.2 Outline 76
4.2 Evaluation of post-groutng results 78
4.2.1 Overview 78
4.2.2 Summary of previous study 79
4.2.3 Pre-study for post-grouting works 86
4.2.4 Evaluation of post-grouting results 120
4.3 Summary of the future issues and research plans 153
4.3.1 Future issues for the post-grouting 153
4.3.2 Research plans 155
5. CONCLUSIONS 160
5.1 Study on seismic movements at deep underground 160
5.1.1 Summary 160
5.1.2 Future issues 160
5.2 Study on grouting method at deep underground 161
5.2.1 Summary 161
5.2.2 Future issues 163
REFERENCES 164
Appendix 165

図リスト

図 3.1-1　換気立坑と主立坑における加速度計設置位置 4
図 3.1-2　地表の加速度計の設置状況 5
図 3.1-3　加速度計と動ひずみ計の設置状況 5
図 3.1-4　地下の計測器配置（換気立坑連接部、GL-100m、GL-300m、GL-500m） 6
図 3.1-5　地下の計測器配置（主立坑連接部、GL-300m） 6
図 3.1-6　観測記録の軌跡の比較（地表加速度計 A と K-NET 土岐） 10
図 3.1-7　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-100m と地表、補正前 11
図 3.1-8　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-100m と地表、補正後 11
図 3.1-9　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-300m と地表、補正前 12
図 3.1-10　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-300m と地表、補正後 12
図 3.1-11　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-500m No.1 と GL-300m No.1 13
図 3.1-12　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-500m の No.1 と No.2,3、補正前 ... 14
図 3.1-13　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-500m の No.1 と No.2,3、補正後 ... 14
図 3.1-14　2014 年伊予灘：地上 A 加速度計の記録 16
図 3.1-15　2014 年伊予灘：GL-100m 地点の加速度波形 16
図 3.1-16　2014 年伊予灘：GL-100m 地点の変位波形 17
図 3.1-17　2014 年伊予灘：GL-100m 地点の加速度応答スペクトル 17
図 3.1-18　2014 年伊予灘：GL-300m 地点の加速度波形 18
図 3.1-19　2014 年伊予灘：GL-300m 地点の変位波形 18
図 3.1-20　2014 年伊予灘：GL-300m 地点の加速度応答スペクトル 19
図 3.1-21　2014 年伊予灘：主立坑 GL-300m 地点の加速度波形 19
図 3.1-22　2014 年伊予灘：主立坑 GL-300m 地点の変位波形 20
図 3.1-23　2014 年伊予灘：主立坑 GL-300m 地点の加速度応答スペクトル 20
図 3.1-24　2014 年伊予灘：GL-500m 地点の加速度波形 21
図 3.1-25　2014 年伊予灘：GL-500m 地点の変位波形 21
図 3.1-26　2014 年伊予灘：GL-500m 地点の加速度応答スペクトル 22
図 3.1-27　2014 年茨城県南部：地上 B 加速度計の記録 23
図 3.1-28　2014 年茨城県南部：GL-100m 地点の加速度波形 23
図 3.1-29　2014 年茨城県南部：GL-100m 地点の変位波形 24
図 3.1-30　2014 年茨城県南部：GL-100m 地点の加速度応答スペクトル 24
図 3.1-31　2014 年茨城県南部：GL-300m 地点の加速度波形 25
図 3.1-32　2014 年茨城県南部：GL-300m 地点の変位波形 25
図 3.1-33　2014 年茨城県南部：GL-300m 地点の加速度応答スペクトル 26
図 3.1-34　2014 年茨城県南部：主立坑 GL-300m 地点の加速度波形 26
図 3.1-35　2014 年茨城県南部：主立坑 GL-300m 地点の変位波形 27
図 3.1-36　2014 年茨城県南部：主立坑 GL-300m 地点の加速度応答スペクトル 27
図 3.1-37　2014 年茨城県南部：GL-500m 地点の加速度波形 28
図 3.1-38　2014 年茨城県南部：GL-500m 地点の変位波形 28

図 3.1-39　2014 年茨城県南部：GL-500m 地点の加速度応答スペクトル 29
図 3.1-40　2014 年長野県北部：地上 A 加速度計の記録 30
図 3.1-41　2014 年長野県北部：地上 B 加速度計の記録 30
図 3.1-42　2014 年長野県北部：GL-100m 地点の加速度波形..... 31
図 3.1-43　2014 年長野県北部：GL-100m 地点の変位波形 31
図 3.1-44　2014 年長野県北部：GL-100m 地点の加速度応答スペクトル 32
図 3.1-45　2014 年長野県北部：GL-300m 地点の加速度波形..... 32
図 3.1-46　2014 年長野県北部：GL-300m 地点の変位波形 33
図 3.1-47　2014 年長野県北部：GL-300m 地点の加速度応答スペクトル 33
図 3.1-48　2014 年長野県北部：主立坑 GL-300m 地点の加速度波形..... 34
図 3.1-49　2014 年長野県北部：主立坑 GL-300m 地点の変位波形 34
図 3.1-50　2014 年長野県北部：主立坑 GL-300m 地点の加速度応答スペクトル..... 35
図 3.1-51　2014 年長野県北部：GL-500m 地点の加速度波形..... 35
図 3.1-52　2014 年長野県北部：GL-500m 地点の変位波形 36
図 3.1-53　2014 年長野県北部：GL-500m 地点の加速度応答スペクトル 36
図 3.1-54　2014 年愛知県西部：地上 B 加速度計の記録 37
図 3.1-55　2014 年茨城県南部：GL-300m 地点の動ひずみ時刻歴 38
図 3.1-56　2014 年長野県北部：GL-100m 地点の動ひずみ時刻歴 39
図 3.1-57　微動観測実施地点..... 40
図 3.1-58　常時微動観測状況、H(c) 41
図 3.1-59　常時微動観測記録の H/V スペクトル..... 41
図 3.1-60　直線アレイ観測..... 42
図 3.1-61　F-k スペクトルの例..... 42
図 3.1-62　微動アレイ観測実施状況、P(b) 43
図 3.1-63　推定した位相速度..... 43
図 3.1-64　伝達関数とフーリエスペクトル比 45
図 3.1-65　観測された地震の震央距離と震源の深さの位置関係 47
図 3.1-66　フーリエスペクトル（2008 年岐阜県美濃東部、M3.9、σ 23km） 47
図 3.1-67　フーリエスペクトル（2009 年静岡県西部、M4.7） 48
図 3.1-68　スペクトル比（2009 年静岡県西部、GL-300m 基準、σ 89km） 48
図 3.1-69　フーリエスペクトル（2009 年岐阜県美濃東部、M3.5） 49
図 3.1-70　スペクトル比（2009 年岐阜県美濃東部、GL-300m 基準、σ 4km） 49
図 3.1-71　フーリエスペクトル（2009 年愛知県西部、M4.0） 50
図 3.1-72　スペクトル比（2009 年愛知県西部、GL-300m 基準、σ 33km） 50
図 3.1-73　フーリエスペクトル（2009 年駿河湾、M6.5） 51
図 3.1-74　スペクトル比（2009 年駿河湾、GL-300m 基準、σ 133km） 51
図 3.1-75　フーリエスペクトル（2011 年三陸沖、M9.0） 52
図 3.1-76　スペクトル比（2011 年三陸沖、GL-300m 基準、σ 587km） 52
図 3.1-77　フーリエスペクトル（2011 年茨城県沖、M7.6） 53
図 3.1-78　スペクトル比（2011 年茨城県沖、GL-300m 基準、σ 471km） 53

図 3.1-79　フーリエスペクトル（2011 年長野県北部、M6.7） 54
図 3.1-80　スペクトル比（2011 年長野県北部、GL-300m 基準、σ 217km） 54
図 3.1-81　フーリエスペクトル（2011 年静岡県東部、M6.4） 55
図 3.1-82　スペクトル比（2011 年静岡県東部、GL-300m 基準、σ 135km） 55
図 3.1-83　フーリエスペクトル（2011 年福島県浜通り、M7.0） 56
図 3.1-84　スペクトル比（2011 年福島県浜通り、GL-300m 基準、σ 356km） 56
図 3.1-85　フーリエスペクトル（2011 年駿河湾、M6.2） 57
図 3.1-86　スペクトル比（2011 年駿河湾、GL-300m 基準、σ 141km） 57
図 3.1-87　フーリエスペクトル（2011 年岐阜県美濃東部、M5.1） 58
図 3.1-88　スペクトル比（2011 年岐阜県美濃東部、GL-300m 基準、σ 2km） 58
図 3.1-89　フーリエスペクトル（2012 年愛知県西部、M4.3） 59
図 3.1-90　スペクトル比（2012 年愛知県西部、GL-300m 基準、σ 21km） 59
図 3.1-91　フーリエスペクトル（2013 年愛知県西部、M4.1） 60
図 3.1-92　スペクトル比（2013 年愛知県西部、GL-300m 基準、σ 19km） 60
図 3.1-93　フーリエスペクトル（2013 年遠州灘、M4.9） 61
図 3.1-94　スペクトル比（2013 年遠州灘、GL-300m 基準、σ 85.7km） 61
図 3.1-95　フーリエスペクトル比の最大値と震央距離との関係 63
図 3.1-96　スペクトル比と位相差（2011 年岐阜県美濃東部、EW、GL-300m） 65
図 3.1-97　スペクトル比と位相差（2011 年岐阜県美濃東部、EW、GL-100m） 66
図 3.1-98　スペクトルと位相差（2012 年愛知県西部、EW） 68
図 3.1-99　フーリエスペクトル（2011 年三陸沖、地表 A） 69
図 3.1-100　抽出した Radial 成分と UD 成分の変位軌跡（2011 年三陸沖、地表 A） 70
図 3.2-1　地盤物性値の深度分布 72
図 3.2-2　観測記録のスペクトル比と解析結果の伝達関数の比較（深度 300m 基準） 73
図 4.1-1　瑞浪超深地層研究所におけるグラウチング実績および工学技術における検討の概要 75
図 4.1-2　プレグラウチング（左）とポストグラウチング（右）の例 76
図 4.1-3　深度 500m の研究アクセス南坑道（ポストグラウチング実施前） 76
図 4.1-4　平成 26 年度の湧水抑制対策技術に関する検討フロー 77
図 4.2-1　ポストグラウチングの施工結果に関する検討フロー 78
図 4.2-2　改良目標値に応じた研究アクセス南坑道掘削時の概算予測湧水量（左：CM 級区間、右：CH 級区間） 82
図 4.2-3　先行ボーリング調査に基づく地質概要とプレグラウト施工位置 83
図 4.2-4　底盤の地質スライス図と湧水の発生箇所 83
図 4.2-5　CM 級区間の基本計画図（案）（左：縦断図、右：横断面図） 84
図 4.2-6　施工箇所集約の概要（平面図） 86
図 4.2-7　地質概要、湧水発生箇所、プレグラウト区間によるポストグラウト施工位置の選定 87
図 4.2-8　SKB のフォルシュマルク処分場で想定するポストグラウト孔の基本設計 88

図 4.2-9　プレグラウト⑥近傍の地質概要を上方向が北の方角になるよう回転した図（左）および壁面調査から得た割れ目のステレオネット（右） 88
図 4.2-10　先行ボーリング孔のコア観察から得られた割れ目のステレオネット..... 89
図 4.2-11　改良範囲の変更概要（換気立坑側から見た横断面図）..... 90
図 4.2-12　規定注入孔の配置図（換気立坑側から見た横断面図）..... 90
図 4.2-13　注入孔（グラウトリング）配置平面図..... 92
図 4.2-14　活性シリカコロイド系（コロイダルシリカ）の溶液型グラウト..... 93
図 4.2-15　注入方式による浸透距離の経時変化（室内試験結果）..... 95
図 4.2-16　複合動的注入設備の構成概要..... 96
図 4.2-17　脈動発生装置（左）および動的管理装置（右） 96
図 4.2-18　深度 300m のボーリング横坑で実施した試験施工のグラウチング概要..... 97
図 4.2-19　グラウト浸透における孔間のラップ長の考え方（孔間 3m、50%ラップ長の例）..... 98
図 4.2-20　溶液型グラウトの注入時間に対する粘性および浸透距離の関係..... 99
図 4.2-21　ゲルタイムに応じたグラウト浸透距離の検討..... 100
図 4.2-22　ゲルタイムと硬化促進剤の添加量の関係（深度 500m 坑内での試験結果） .. 102
図 4.2-23　各リングの仕様および断面内の仕様の区分けについて..... 103
図 4.2-24　深度 500m 研究アクセス南坑道のポストグラウト設計図..... 105
図 4.2-25　ポストグラウト施工区間における湧水量測定計画の概要（平面図）..... 107
図 4.2-26　深度 300m 研究アクセス坑道掘削時の湧水量低減目標の設定（理論解析の考え方）..... 108
図 4.2-27　深度 500m 研究アクセス南坑道における湧水量結果からプレグラウチング範囲の透水係数を算定する考え方（理論解析）..... 109
図 4.2-28　深度 500m 研究アクセス南坑道のポストグラウト対象区間（16.2m）における改良幅に応じたプレグラウチングによる湧水量の低減効果の事後分析結果 ...110
図 4.2-29　深度 500m 研究アクセス南坑道におけるプレグラウチングおよびポストグラウチングに伴う湧水量予測（理論解析）の考え方【プレグラウチング範囲の外側範囲を改良する場合】.....111
図 4.2-30　改良目標に応じたポストグラウチング後の湧水量低減効果の予測【プレグラウチング範囲の外側範囲を改良する場合】（改良範囲：坑道壁面より 3-6m） .112
図 4.2-31　改良目標および改良幅に応じたポストグラウチング後の湧水量低減効果の予測【プレグラウチング範囲の外側を改良する場合（改良幅 1m、3m、6m)】（施工後の実測湧水量と推定ルジオン値も赤色にて併せて表示）.....113
図 4.2-32　深度 500m 研究アクセス南坑道におけるプレおよびポストグラウチングに伴う湧水量予測（理論解析）の考え方【プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する場合】.....114
図 4.2-33　改良目標に応じたポストグラウチングによる湧水量低減効果の予測【プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する場合（坑道壁面より 1-4m の改良)】 114
図 4.2-34　今回施工のポストグラウト孔配置について湧水量予測のための区分け（換気立坑側から見た横断面図）.....115

図 4.2-35　改良目標に応じたポストグラウチング後の湧水量低減効果の予測【今回施工】
（施工後の実測湧水量と推定ルジオン値も赤色にて併せて表示）.....116
図 4.2-36　ポストグラウチングの改良目標および改良範囲に応じた湧水量低減率の予測 116
図 4.2-37　今回の施工におけるポストグラウトの改良目標に応じた湧水量低減率の予測
（グラウト注入材料の改良限界に応じた低減予測）.....117
図 4.2-38　ポストグラウチングの実績概要図 120
図 4.2-39　ポストグラウチングの施工状況 120
図 4.2-40　No.1 リングの注入結果概要 121
図 4.2-41　No.2 リングの注入結果概要 123
図 4.2-42　No.3 リングの注入結果概要 125
図 4.2-43　No.4 リングの注入結果概要 127
図 4.2-44　No.5 リングの注入結果概要 129
図 4.2-45　No.6 リングの注入結果概要 131
図 4.2-46　深度約 3m 以深の削孔粉に混じる黒色の破片
（プレグラウト注入材料と推定）..... 135
図 4.2-47　No.1 リング左上部に認められた注入孔からの滴水
（注入区間より手前から発生）..... 135
図 4.2-48　パッカー設置位置の変更概要（断面図）..... 136
図 4.2-49　壁面リーク発生によりパッカー位置を深部に変更した事例
（No.1 リングの 2-4 孔）..... 136
図 4.2-50　130L/min の湧水が発生した注入孔の止水状況（No.2 リング 1-7 孔）..... 137
図 4.2-51　糊状にゲル化した溶液型グラウト 138
図 4.2-52　溶液型グラウトの配合および複合動的注入の設定値の変更フローの概要 139
図 4.2-53　各リングの単位湧水量およびルジオン値の最終平均値の一覧..... 140
図 4.2-54　各リングのルジオン値の左右での比較
（平面図、右・左は換気立坑から見て）..... 143
図 4.2-55　深度 500m 研究アクセス南坑道における超微粒子セメントの注入実績
（ルジオン値と単位セメント注入量の比較）..... 147
図 4.2-56　溶液型グラウトの注入実績：ルジオン値と単位注入量の比較..... 149
図 4.2-57　湧水抑制効果の実績（区間計測および排水量の概算結果）..... 151
図 4.2-58　ポストグラウト工事完了直後（No.6 リング付近より No.1 リング側を撮影）151
図 4.3-1　今回工事の延長となるポストグラウチングの施工計画案（平面図）..... 156
図 4.3-2　交差部近傍のポストグラウトの基本計画図（案）（平面図）..... 158

表リスト

表 3.1-1　地震観測装置設置状況 4
表 3.1-2　観測した地震の一覧 8
表 3.1-3　加速度計の設置方位のまとめ 15
表 3.1-4　2014 年に観測した地震の一覧 15
表 3.1-5　表層地盤振動特性 44
表 3.1-6　地盤解析モデル 44
表 3.1-7　検討に用いた地震観測記録 44
表 3.2.1　地盤物性値 72
表 4.2-1　グラウチングの事前検討や施工試験に向けた検討課題リスト 80
表 4.2-2　深度 500m 研究アクセス坑道における注入結果の概要 83
表 4.2-3　ポストグラウチングの基本仕様（案） 85
表 4.2-4　注入範囲を踏まえた 1 リングあたりの削孔数量および孔配置の詳細 91
表 4.2-5　溶液型グラウトの仕様 93
表 4.2-6　注入方式の比較 94
表 4.2-7　深度 300m の施工試験について、北欧の浸透理論に基づいた浸透距離の推定 ... 98
表 4.2-8　岩盤の透水性（ルジオン値：Lu）に応じたゲルタイムと注入圧から算定した
浸透距離およびその照査 101
表 4.2-9　各孔の地質状況に応じた溶液型グラウトの注入仕様 102
表 4.2-10　ポストグラウチングの仕様の概要 104
表 4.2-11　研究アクセス南坑道掘削後のプレグラウト改良範囲の透水係数の推定
（設定値） 109
表 4.2-12　プレグラウト改良範囲の透水係数の推定（推定結果） 110
表 4.2-13　ポストグラウチング後の湧水量の推定結果
（改良範囲：坑道壁面より 3-6m） 112
表 4.2-14　ポストグラウチング後の湧水量の推定結果
（坑道壁面より 1-4m 範囲の改良） 114
表 4.2-15　ポストグラウチング後の湧水量の推定結果【今回施工】 115
表 4.2-16　瑞浪の換気立坑におけるグラウチング実績（改良限界） 117
表 4.2-17　グラウト注入材料に応じた湧水低減量および排水処理費の節減効果の予測....118
表 4.2-18　No.1 リングにおける各孔の注入実績一覧 122
表 4.2-19　No.2 リングにおける各孔の注入実績一覧 124
表 4.2-20　No.3 リングにおける各孔の注入実績一覧 126
表 4.2-21　No.4 リングにおける各孔の注入実績一覧 128
表 4.2-22　No.5 リングにおける各孔の注入実績一覧 130
表 4.2-23　No.6 リングにおける各孔の注入実績一覧 132
表 4.2-24　ポストグラウトリング（No.1～6 リング）の注入実績のまとめ 134
表 4.2-25　湧水が大量に発生し、再注入を実施した注入孔（2 孔）の湧水量の変化 137
表 4.2-26　No.1～3 リングの単位湧水量とルジオン値の低減図（平均値入り） 141

表 4.2-27　No.4～6 リングの単位湧水量とルジオン値の低減図（平均値入り） 142
表 4.2-28　No.1～3 リングのルジオン値の低減図（平均値入り）
【注入範囲による比較】 144
表 4.2-29　No.4～6 リングのルジオン値の低減図（平均値入り）
【注入範囲による比較】 145
表 4.2-30　No.1 リングの外側範囲改良部（左部）における単位湧水量とルジオン値の
低減図（平均値入り）【グラウト注入材料の比較】 146
表 4.2-31　No.2 リングにおける単位湧水量とルジオン値の低減図（平均値入り）
【注入方式比較】 148
表 4.2-32　ポストグラウチング前後における区間湧水量の変化 150
表 4.2-33　グラウト注入材料に応じた湧水低減量の予測および今回の施工結果..... 152
表 4.3-1　ポストグラウチングの適用結果と今後の課題の一覧 153
表 4.3-2　グラウチングの検討計画（案）の概要 155
表 4.3-3　今後のポストグラウチングの仕様（案） 157

This is a blank page.

1. 研究の目的

超深地層研究所計画における工学技術に関する研究は、①「研究坑道の設計・施工計画技術の開発」、②「研究坑道の建設技術の開発」、③「研究坑道の施工対策技術の開発」、④「安全性を確保する技術の開発」および⑤「掘削影響の修復・軽減技術の開発」の 5 項目に分類して進めている。これまでは、「第 2 段階」の調査研究として、研究坑道掘削工事で取得される計測データや施工データを用いた評価に基づく設計の妥当性についての検討などを中心に進めてきた。

本研究では、平成 25 年度に引き続き、研究坑道の設計・施工計画技術の開発および施工対策技術の開発を目的として、瑞浪超深地層研究所（以下、瑞浪と表記する）に設置した地震計等の計測結果を分析し、大深度における地震動特性に関する知見を得るとともに、施工対策技術としての湧水抑制対策技術に関する検討を行う。

2. 研究の概要

2.1 実施項目

これまでに工学技術に関する研究では、「研究坑道の設計・施工計画技術の開発」、「研究坑道の建設技術の開発」、「研究坑道の施工対策技術の開発」、「安全性を確保する技術の開発」、「掘削影響の修復・軽減技術の開発」に関する個々の研究開発を行ってきた。平成 26 年度は、その結果を考慮しつつ、以下の項目に対する研究を実施する。

- 大深度における地震動に関する検討
- 湧水抑制対策技術に関する検討

2.1.1 大深度における地震動に関する検討

地表および深度 100m、深度 300m、深度 500m 地点に設置した地震計等の計測結果を分析し、岩盤及び覆工コンクリートの地震時挙動を把握するとともに、地上からの調査研究段階で実施した耐震設計手法の妥当性について検討する。対象とする地震は 2008 年 11 月 24 日～2014 年 12 月 3 日に観測された地震とし、震源の位置や深さ、地震の規模などと、各深度の方向ごとの計測データや地質状況との関係を総括的に評価する。

2.1.2 湧水抑制対策技術に関する検討

換気立坑等の掘削工事では、湧水処理の低減と安全な施工の観点から、坑道周辺の湧水抑制対策（グラウチング）を行いつつ坑道掘削を進めている。しかし、大深度地下における坑道掘削工事では、高水圧と低透水性岩盤といった既往の実績がほとんどない条件下でのグラウチングを必要とする場合が想定されることから、それに必要な技術の抽出と施工技術等の開発を行う。

平成 25 年度の瑞浪超深地層研究所における工学技術に関する検討－設計・施工計画および施工対策技術の開発－では、結晶質岩を対象としたポストグラウチング手法について既往の情報を収集・整理するとともに、瑞浪超深地層研究所内において施工試験を行うための基礎的検討を実施した。また、平成 25 年度は瑞浪超深地層研究所深度 500m 研究アクセス南坑道の掘削が終了し、ほとんどの区間で掘削に先立ちプレグラウチングが実施された。

平成 26 年度には、研究坑道掘削工事（B 工区その 6）では、これらの区間においてポストグラウチングが予定され、平成 25 年度に立案した施工試験の計画に基づいて実施された。そのため、本検討ではポストグラウトの施工結果を評価する。

さらに、平成 25 年度に実施した、ポストグラウチング手法についての既往の情報の収集・整理結果と併せ、ポストグラウチングの課題を整理し、今後の研究計画を立案する。

3. 大深度における地震動に関する検討

3.1 地震観測結果の分析と地震時挙動の把握

地震発生時に、地表と換気立坑の深度 100m、300m、500m の連接部、および主立坑の深度 300m の連接部に設置した地震計（加速度計）と動ひずみ計で観測された結果を分析し、岩盤及び覆工コンクリートの地震時挙動を把握する。対象とする地震は 2008 年 11 月 24 日～2014 年 12 月 3 日に観測された地震とし、震源の位置や深さ、地震の規模などと、各深度の方向ごとの計測データや地質状況との関係を総括的に評価する。

3.1.1 地震観測の概要

瑞浪超深地層研究所では、地表と換気立坑の深度 100m、300m、500m の連接部、および主立坑の深度 300m の連接部に地震計（加速度計）が設置されており、地震時の加速度が観測されている。また、換気立坑の深度 100m、300m、500m の連接部の覆工コンクリートには、動ひずみ計が設置されている。本検討では、地震発生時にこれらの計測器で観測された記録を分析して、岩盤及び覆工コンクリートの地震時挙動を把握して、地下深部の地震動の伝播特性を評価する。

地表の地震計（加速度計）は、これまで換気立坑やぐら基礎に設置されていたが、新たに換気立坑巻上機建屋脇にも設置して、両方で観測している。また、深度 100m、300m、500m には、地震計（加速度計）は 3 セット設置されている。

地震計（加速度計）の設置状況を図 3.1-1～図 3.1-5 と表 3.1-1 に示す。

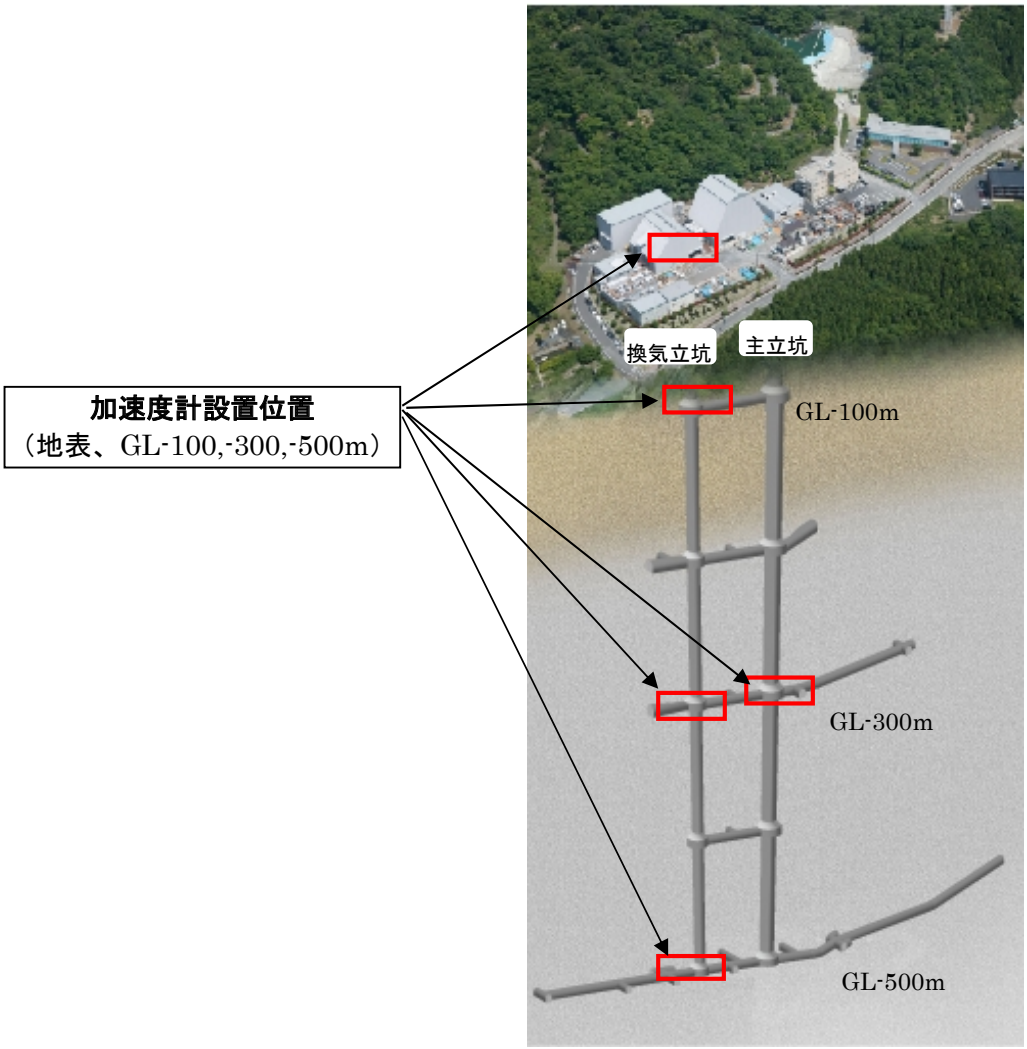


図 3.1-1　換気立坑と主立坑における加速度計設置位置

表 3.1-1　地震観測装置設置状況

設置位置	加速度計	動ひずみ計	備考
地表面	2 箇所（3 成分）	－	換気立坑やぐら基礎（地表 A） 換気立坑巻上機建屋脇（地表 B）
GL-100m	3 箇所（3 成分）	2 箇所(2 成分)	換気立坑連接部
GL-300m	3 箇所（3 成分）	2 箇所(3 成分)	換気立坑連接部
GL-500m	3 箇所（3 成分）	－	換気立坑連接部
GL-300m	3 箇所（3 成分）	2 箇所(3 成分)	主立坑連接部

(a)設置位置

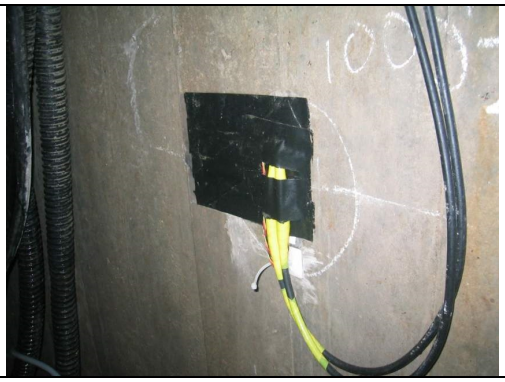
(b)設置状況

(1) 地表 A、換気立坑やぐら基礎

(2) 地表 B、換気立坑巻上機建屋脇

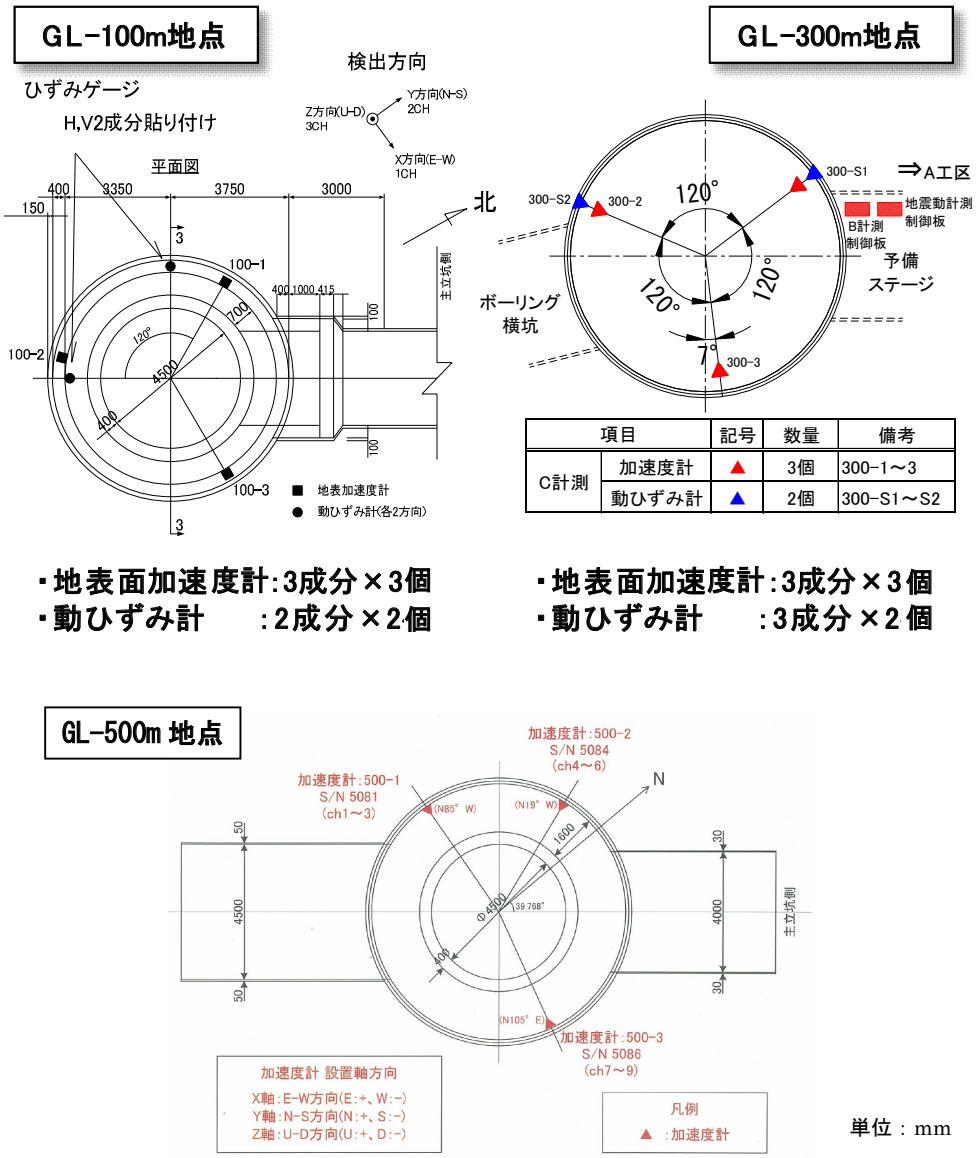
図 3.1-2　地表の加速度計の設置状況

(1) 加速度計の設置状況



(2) 動ひずみ計の設置状況

図 3.1-3　加速度計と動ひずみ計の設置状況



項目		記号	数量	備考
C計測	加速度計	▲	3個	300-1～3
	動ひずみ計	▲	2個	300-S1～S2

図 3.1-4　地下の計測器配置（換気立坑連接部、GL-100m、GL-300m、GL-500m）

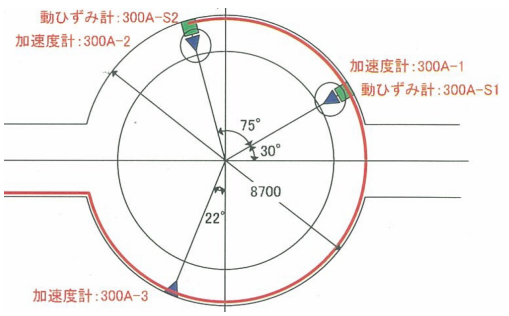


図 3.1-5　地下の計測器配置（主立坑連接部、GL-300m）

3.1.2 観測地震

地震観測を開始した 2008 年からこれまでに観測した 19 の地震の一覧を、表 3.1-2 に示す。

2014 年は、2014 年 3 月 14 日の伊予灘の地震と、2014 年 9 月 16 日の茨城県南部の地震、2014 年 11 月 22 日の長野県北部の地震、2014 年 12 月 3 日の愛知県西部の地震の 4 地震を観測した。

なお、新たに換気立坑巻上機建屋脇に設置した加速度計では、2014 年 5 月 14 日に観測を開始している。また、2014 年 9 月 16 日の茨城県南部の地震では、換気立坑やぐら基礎の地表加速度計 A では観測加速度が小さくイベントトリガーレベルに達しなかったため、記録されていない。同様に、2014 年 12 月 3 日の愛知県西部の地震では、地表加速度計 A と地下の加速度計では記録されていない。

表 3.1-2　観測した地震の一覧

No	発生日時*	震源*	瑞浪市の震度*	最大加速度** [Gal]、方向				
				地表 A	地表 B	GL-100m	GL-300m	GL-500m
1	2008.11.24 06:15	岐阜県美濃東部 深さ 11km、M3.9	1	12.0 EW	－	6.6 EW	－	－
2	2009.5.25 20:26	静岡県西部 深さ 26km、M4.7	2	5.6 EW	－	3.1 EW	1.8 NS	－
3	2009.7.14 03:57	岐阜県美濃東部 深さ 50km、M3.5	2	6.5 EW	－	3.2 EW	1.9 NS	－
4	2009.7.27 09:44	愛知県西部 深さ 41km、M4.0	2	8.2 NS	－	3.1 NS	1.9 EW	－
5	2009.8.11 05:07	駿河湾 深さ 23km、M6.5	3	30.8 EW	－	14.7 NS	6.6 EW	－
6	2011.3.11 14:46	三陸沖 深さ 24km、M9.0	3	10.4 NS	－	7.7 NS	5.0 UD	－
7	2011.3.11 15:15	茨城県沖 深さ 43km、M7.6	2	2.3 EW	－	2.0 NS	1.3 UD	－
8	2011.3.12 03:59	長野県北部 深さ 8km、M6.7	2	4.8 NS	－	2.4 NS	1.0 NS	－
9	2011.3.15 22:31	静岡県東部 深さ 14km、M6.4	2	9.1 EW	－	4.2 NS	1.8 NS	－
10	2011.4.11 17:16	福島県浜通り 深さ 6km、M7.0	1	1.3 NS	－	1.0 NS	0.58 NS	－
11	2011.8.1 23:58	駿河湾 深さ 23km、M6.2	2	－	－	5.7 EW	1.9 UD	－
12	2011.12.14 13:01	岐阜県美濃東部 深さ 49km、M5.1	3	66.6 EW	－	39.6 EW	28.6 EW	－
13	2012.5.5 18:56	愛知県西部 深さ 45km、M4.3	2	12.0 EW	－	4.9 EW	4.4 NS	2.3 NS
14	2013.2.6 13:42	愛知県西部 深さ 48km、M4.1	1	7.9 EW	－	4.6 EW	3.9 NS	1.9 EW
15	2013.8.3 09:56	遠州灘 深さ 34km、M4.9	2	8.3 NS	－	3.4 NS	1.5 EW	0.88 NS
16	2014.3.14. 02:06	伊予灘 深さ 78km、M6.2	1	2.8 NS	－	1.8 EW	0.46 NS	0.24 NS
17	2014.9.16 12:28	茨城県南部 深さ 47km、M5.6	2	－	2.6 NS	0.97 EW	0.43 NS	0.21 NS
18	2014.11.22 22:08	長野県北部 深さ 5km、M6.7	2	4.5 NS	5.1 NS	2.1 NS	0.88 UD	0.0022 EW
19	2014.12.3 23:19	愛知県西部 深さ 45km、M4.2	2	－	13.4 NS	－	－	－

*　「発生日時」「震源」「瑞浪市の震度」は気象庁ホームページ（http://www.data.jma.go.jp）「震度データベース検索」より引用。

** No.16～19 の地震の「最大加速度」は、「3.1.3 地震観測記録の補正」に示した方法で、補正したあとの値で評価。

***GL-300m のデータは換気立坑連接部を使用。

3.1.3 地震観測記録の補正

瑞浪超深地層研究所での地震観測では、前述のとおり観測点に設置した加速度計によって加速度が計測されている。加速度計を設置する際は、方位磁石等を用いて方角を把握してそれに合わせて加速度計を設置するが、その際特に地中に設置する加速度計では、設置する際の方位の精度確保が困難なことが多い。そのため、方位毎の加速度成分を正確に把握する必要がある場合には、設置後に観測された観測記録を利用して、他の観測点や加速度計の記録などと比較して加速度計の正しい方位を確認して、観測記録を正しい方位に補正することがある。

佐藤ら[1]は、複数の埋設加速度計を用いて高密度アレイ観測をした際に、加速度計の埋設方位を、地震観測記録から推定している。観測した地震のうち振幅が比較的大きな地震を対象に、主要動に続く比較的周期の長い成分の地震動の加速度を積分して変位を評価し、比較する二つの加速度計間の相対変位を最小にする角度を算出する方法で、方位差を推定した。

また、植竹ら[2]は、加速度強震計の観測記録にバンドパスフィルターを適用して周期数秒～十数秒の成分を抽出して、水平面内のオービットを作成して方位を推定している。

本検討では、観測点と震源との位置関係を把握して地震動伝播現象を分析するため、設置方位を把握して、必要に応じて観測記録を補正することとする。

なお、今回は主立坑連接部 GL-300mの加速度計については設置方位の補正は対象外とした。

(1) 加速度計の設置方位の把握

地表の加速度計は、既往の地震観測記録を比較的近傍に設置されている防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET）の観測点 GIF023（K-NET 土岐）の記録と比較して、設置方位を把握することとする。地下の加速度計は、同じく既往の地震観測記録を利用して、地表の加速度計との相対的な方位差を評価して、設置方位を把握することとする。

(i) 地表加速度計の設置方位の把握

地表加速度計の設置方位を、近傍に設置されている防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET）の観測点 GIF023（K-NET 土岐）の地震観測記録と同じ地震で比較して把握した。これまでの観測記録の中から、比較的長周期の地震動成分を多く含み変位が大きいと考えられる 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を対象に、水平 2 方向の加速度をそれぞれ積分して変位を評価した。そして水平面内での動きを示す変位オービット（軌跡）を作成し、両者を比較した。その結果、地表加速度計 A の設置方位は-35°、すなわち真北から西側に 35° の差があるものと判断した。観測記録を補正した場合の、変位のオービットを図 3.1-6 に示す。両者の変位オービットは良く対応しており、方位の補正は適切であるものと考えられる。

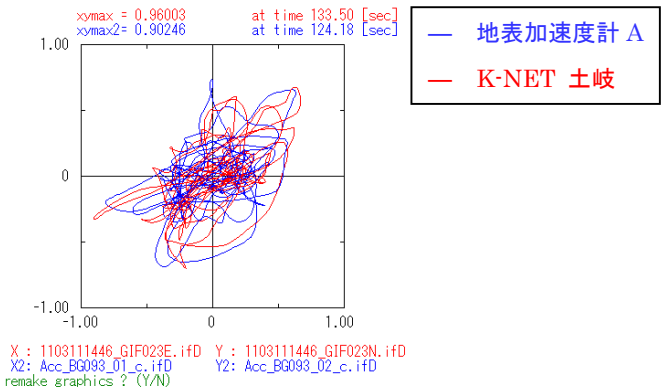
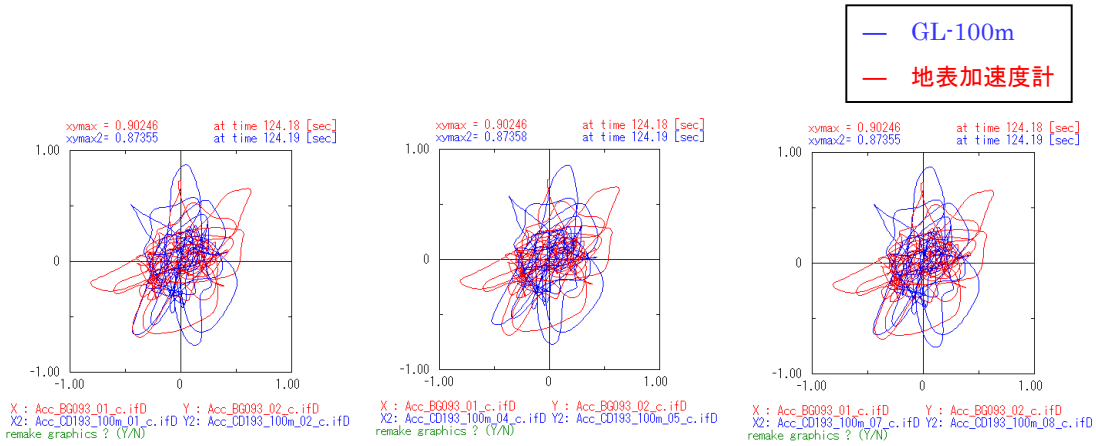


図 3.1-6　観測記録の軌跡の比較（地表加速度計 A と K-NET 土岐）

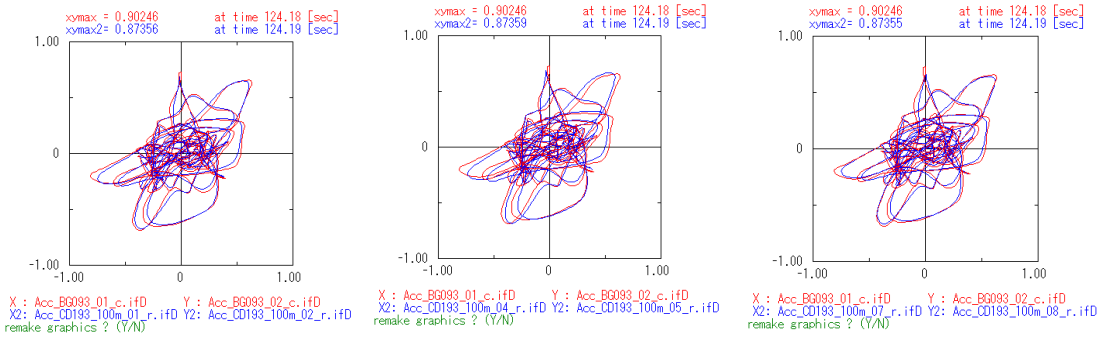
(ii) 深度 100m（GL-100m）の加速度計の設置方位の把握

地下の深度 100m の加速度計は、既往の地震観測記録を利用して、地表の加速度計との相対的な方位差を評価して、設置方位を把握することとする。深度 100m に設置された 3 基の加速度計について、これまでの観測記録の中から、比較的長周期の地震動成分を含み変位が大きいと考えられる 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録を対象に、水平 2 方向の加速度を積分して変位を評価して変位オービット（軌跡）を作成し、それぞれを地表の加速度計の観測記録に基づく変位オービットと比較した。変位のオービットを図 3.1-7 に示す。図より、深度 100m の加速度計 3 基と地表の加速度計との観測記録に、方位のずれが認められる。深度 100m の地表加速度計に対する方位のずれを、それぞれ+40°、+30°、+40°と図より読み取り、その方位で補正した変位オービットを図 3.1-8 に示す。深度 100m の加速度計 3 基と地表の加速度計の変位オービットはほぼ一致していることが確認できる。これにより、方位の補正量は適切であると考えられる。



(1) No.1　　(2) No.2　　(3) No.3

図 3.1-7　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-100m と地表、補正前



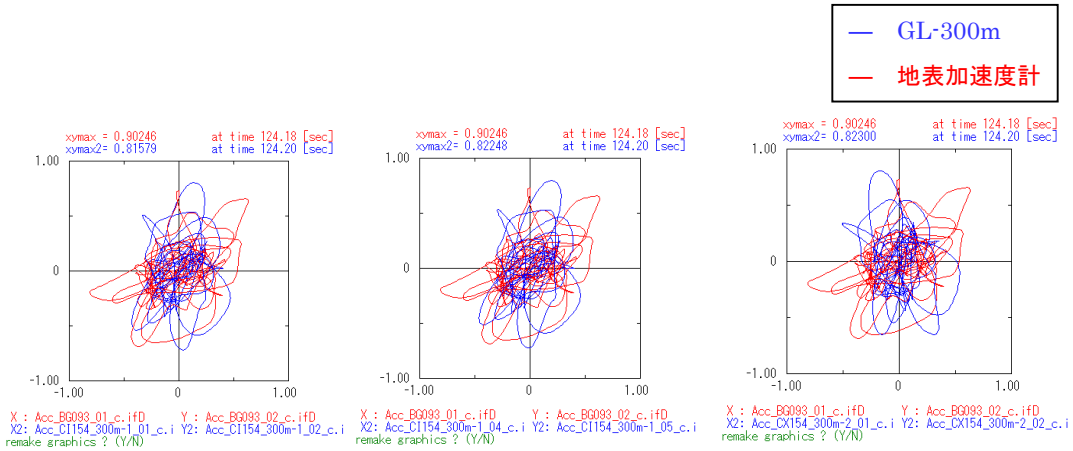
(1) No.1：+40°　　(2) No.2：+30°　　(3) No.3：+40°

図 3.1-8　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-100m と地表、補正後

(iii) 深度 300m（GL-300m）の加速度計の設置方位の把握

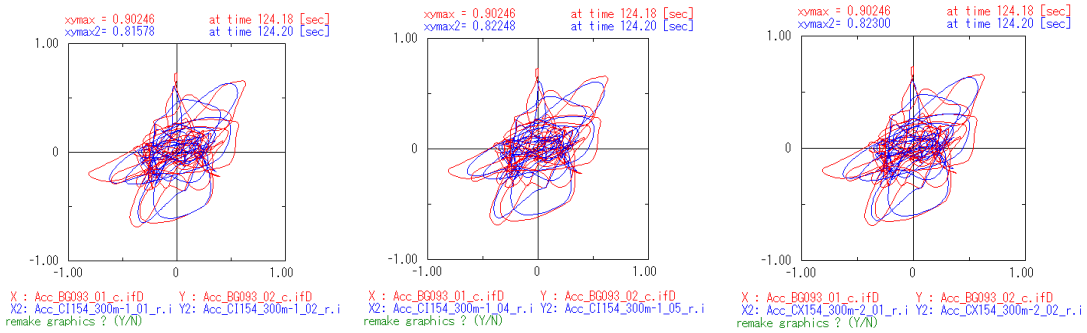
地下の深度 300m の加速度計についても深度 100m の加速度計の場合と同様に、既往の地震観測記録を利用して、地表の加速度計との相対的な方位差を評価して、設置方位を把握することとする。

深度 300m に設置された 3 基の加速度計について、 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録に基づく変位のオービットを図 3.1-9 に示す。図より、深度 300m の加速度計 3 基と地表の加速度計との観測記録に、方位のずれが認められ、そのずれの量はそれぞれ+40°、+30°、+40°と読み取ることができる。その方位で補正した変位オービットを図 3.1-10 に示す。深度 100m の加速度計 3 基と地表の加速度計の変位オービットはほぼ一致していることが確認できる。これにより、方位の補正量は適切であると考えられる。



(1) No.1　　(2) No.2　　(3) No.3

図 3.1-9　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-300m と地表、補正前



(1) No.1：+30°　　(2) No.2：+30°　　(3) No.3：+55°

図 3.1-10　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-300m と地表、補正後

(iv) 深度 500m（GL-500m）の加速度計の設置方位の把握

地下の深度 500m の加速度計は、既往の地震観測記録を利用して、深度 300m の加速度計との相対的な方位差を評価して、設置方位を把握することとする。深度 500m に設置された 3 基の加速度計のうち、No.1 加速度計について、これまで深度 500m の加速度計での観測記録の中から、比較的長周期の地震動成分を含み変位が大きいと考えられる 2014 年茨城県南部地震の観測記録を対象に、水平 2 方向の加速度を積分して変位を評価して変位オービット（軌跡）を作成した。そして、それを深度 300m の No.1 加速度計の観測記録に基づく変位オービットと比較した。なお、深度 300m の No.1 加速度計の変位オービットは、地表の加速度計と対応するように+30°補正した記録を対象とした。変位のオービットを図 3.1-11 に示す。図より、両者の方位は一致していると判断できる。

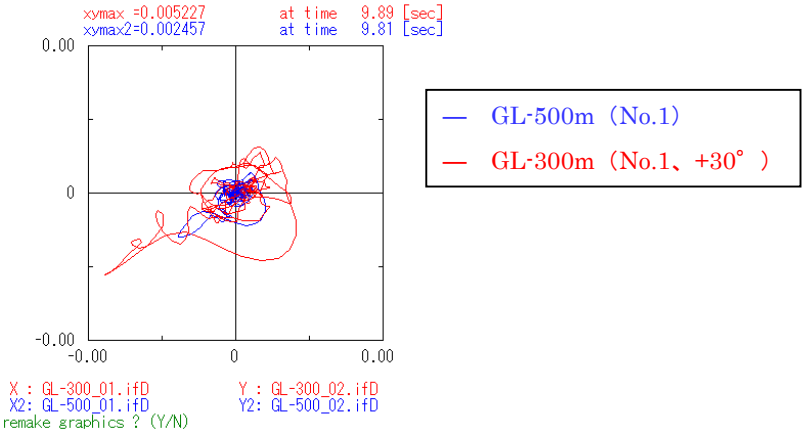
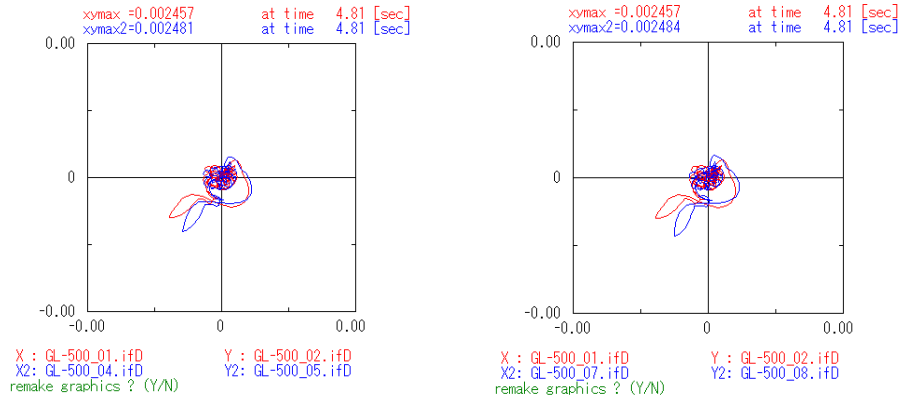


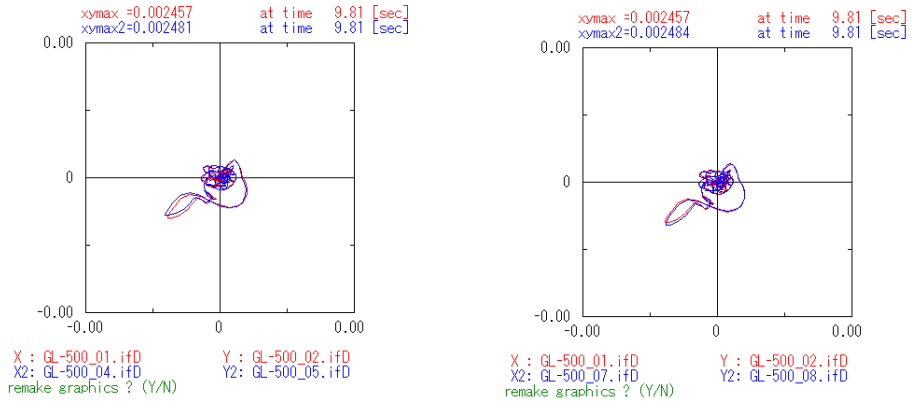
図 3.1-11　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-500m No.1 と GL-300m No.1

次に、深度 500m の No.1 加速度計と、深度 500m の他の加速度計との方位のずれ量を、同じく 2014 年茨城県南部地震の観測記録に基づく変位オービットで比較した。変位のオービットを図 3.1-12 に示す。図より方位のずれが認められ、それは両方とも+20° と図より読み取ることができる。その方位で補正した変位オービットを図 3.1-13 に示す。補正した記録の変位オービットはほぼ一致していることが確認できる。これにより、方位の補正量は適切であると考えられる。



(1) No.2　　(2) No.3

図 3.1-12　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-500m の No.1 と No.2,3、補正前



(1) No.2：+20°　　(2) No.3：+20°

図 3.1-13　観測記録に基づく変位の軌跡の比較、GL-500m の No.1 と No.2,3、補正後

⑵ 地震観測記録の補正

加速度計の設置方位には、表 3.1-3 に示すようなずれがあることが把握できた。

したがって、各加速度計で観測された地震観測記録を、正規の方位で評価する際には、表 3.1-3 に示した設置方位のずれの角度と式(3.1-1)を用いて補正するものとする。

$$\begin{Bmatrix} a_{EW} \\ a_{NS} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & -\sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} a_x \\ a_y \end{Bmatrix} \qquad (3.1\text{-}1)$$

ここに、

a_x, a_y ：加速度計で観測された加速度

a_{EW}, a_{NS} ：方位補正後の加速度成分

ϕ ：設置方位の角度差

表 3.1-3 加速度計の設置方位のまとめ

	No.1	No.2	No.3
地表 A	-35°	—	—
地表 B	-22°	—	—
GL-100 m	+5°	-5°	+5°
GL-300 m	-5°	-5°	+20°
GL-500 m	-35°	-15°	-15°

3.1.4 地震観測記録

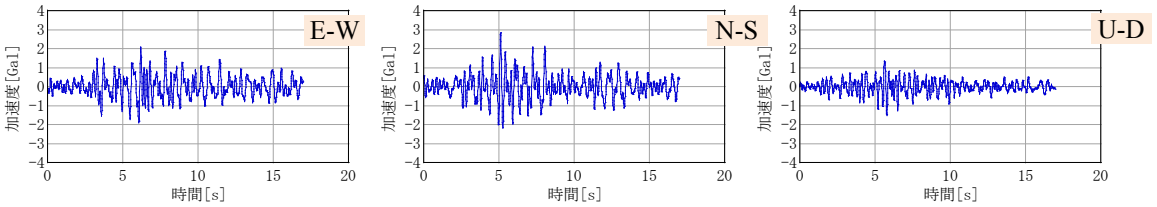
2014 年には、表 3.1-4 に示す 4 地震を観測した（表 3.1-2 より抜粋）。

これらの地震の加速度計での観測記録に基づいて評価した加速度と変位の時刻歴と加速度応答スペクトルを、図 3.1-14 から図 3.1-54 に示す。なお、これらのデータは、前述の方位補正をしたものである。また、動ひずみの時刻歴を、図 3.1-55 と図 3.1-56 に示す。

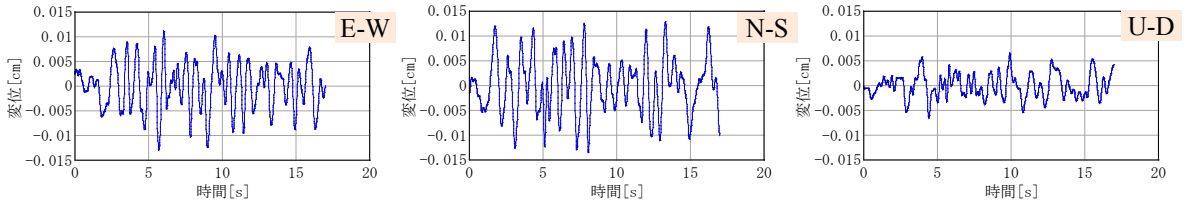
なお、前述のとおり、新たに換気立坑巻上機建屋脇に設置した地表 B 加速度計では、2014 年 5 月 14 日に観測を開始しているため、No.17 以降の地震について、観測記録が得られている。また、No.17 の地震では、換気立坑やぐら基礎の地表加速度計 A では観測加速度が小さくイベントトリガーレベルに達しなかったため、記録されていない。同様に、No.19 の地震では、地表加速度計 A と地下の加/速度計では記録されていない。また、動ひずみ計に関しては、No.16 と No.19 の地震と、No.17 の地震の深度 100m、No.18 の地震の深度 300m が欠測となっている。

表 3.1-4 2014 年に観測した地震の一覧

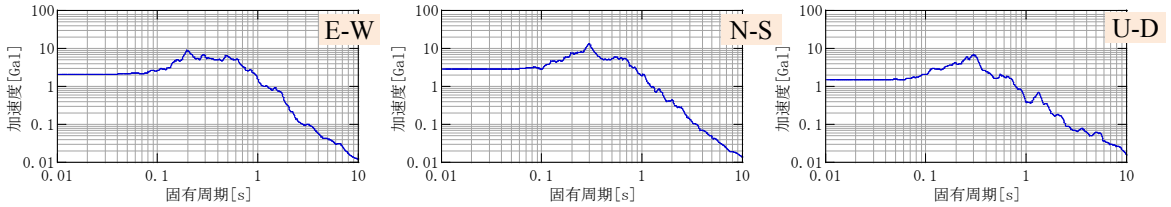
No	発生日時	震源	瑞浪市の震度	最大加速度 [Gal]、方向				
				地表 A	地表 B	GL-100m	GL-300m	GL-500m
16	2014.3.14 02:06	伊予灘 深さ 78km、M6.2	1	2.8 NS	—	1.8 EW	0.46 NS	0.24 NS
17	2014.9.16 12:28	茨城県南部 深さ 47km、M5.6	2	—	2.6 NS	0.97 EW	0.43 NS	0.21 NS
18	2014.11.22 22:08	長野県北部 深さ 5km、M6.7	2	4.5 NS	5.1 NS	2.1 NS	0.88 UD	0.0022 EW
19	2014.12.3 23:19	愛知県西部 深さ 45km、M4.2	2	—	13.4 NS	—	—	—



（Ⅰ） 加速度波形

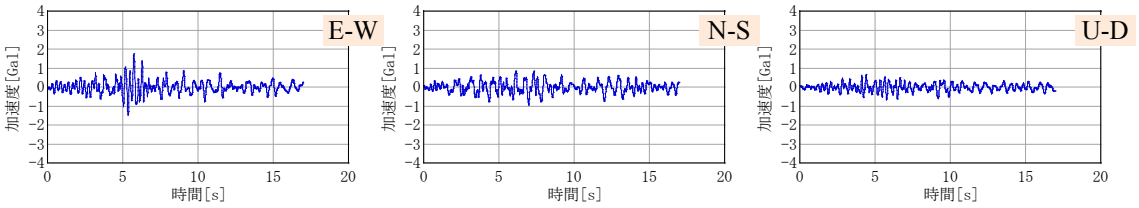


（Ⅱ） 変位波形

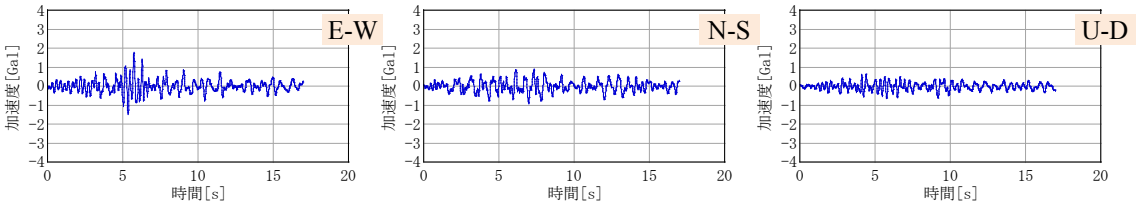


（Ⅲ） 加速度応答スペクトル

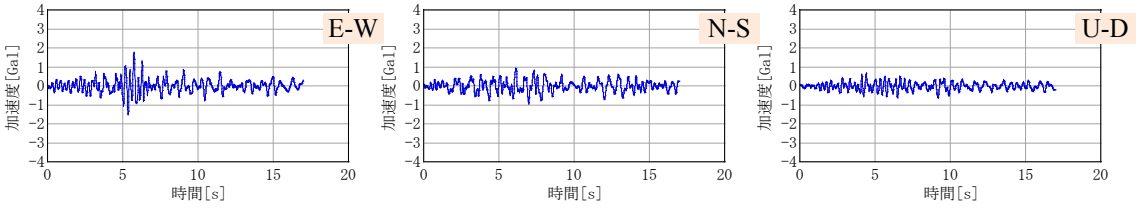
図 3.1-14 2014 年伊予灘：地上 A 加速度計の記録



(1) 加速度計 100m-1



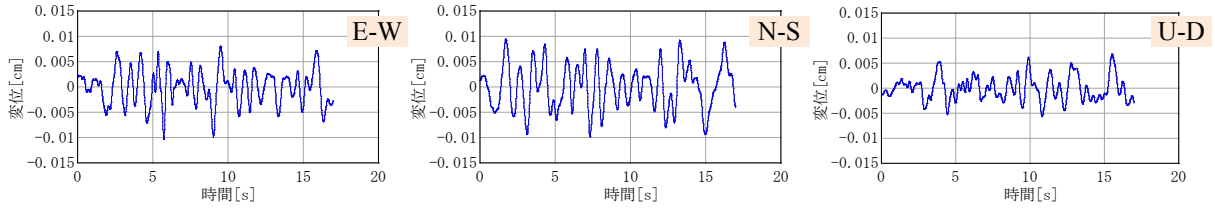
(2) 加速度計 100m-2



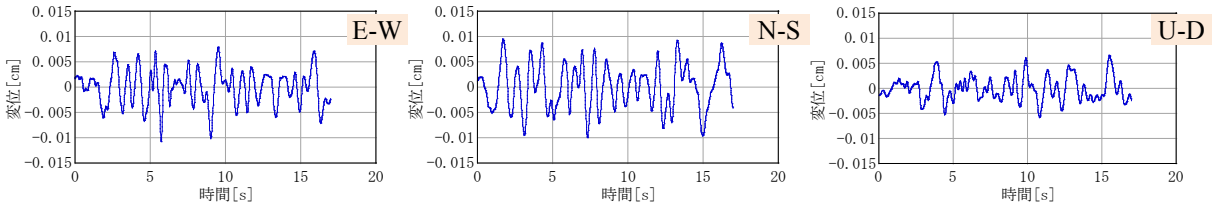
(3) 加速度計 100m-3

（※ -1、-2、-3 は図 3.1-4 の設置位置に対応、以下同様）

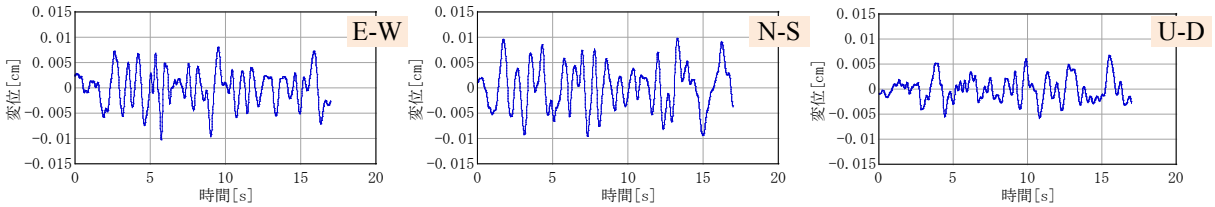
図 3.1-15 2014 年伊予灘：GL-100m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 100m-1

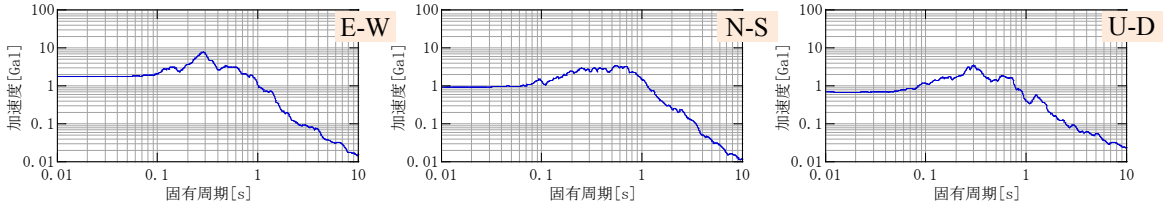


(2)　加速度計 100m-2

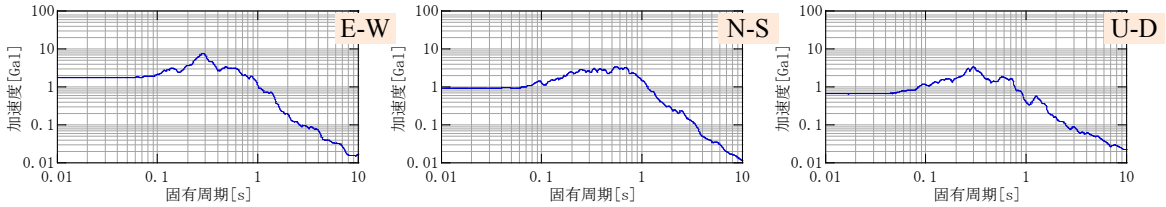


(3)　加速度計 100m-3

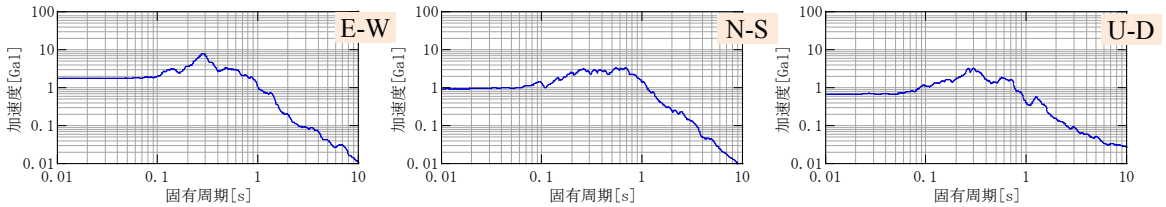
図 3.1-16　2014 年伊予灘：GL-100m 地点の変位波形



(1)　加速度計 100m-1

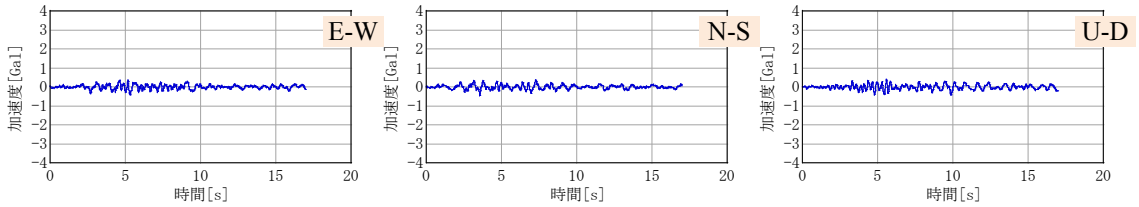


(2)　加速度計 100m-2

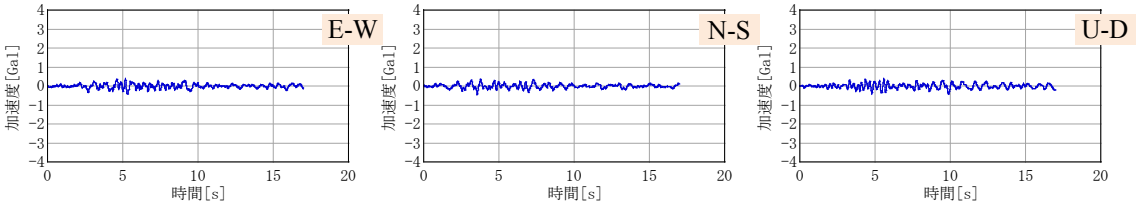


(3)　加速度計 100m-3

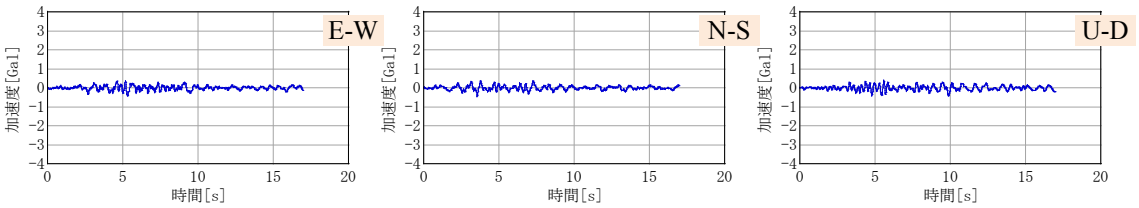
図 3.1-17　2014 年伊予灘：GL-100m 地点の加速度応答スペクトル



(1)　加速度計 300m-1

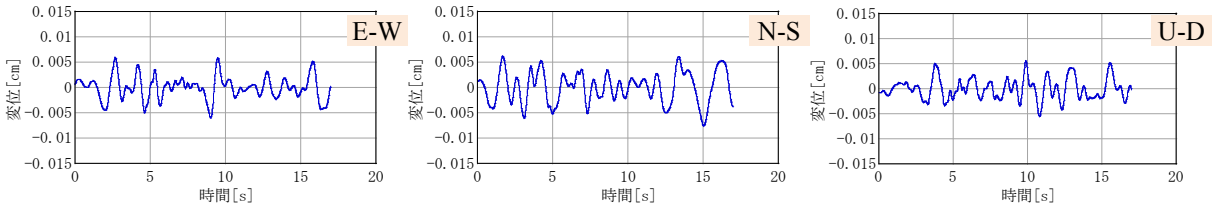


(2)　加速度計 300m-2

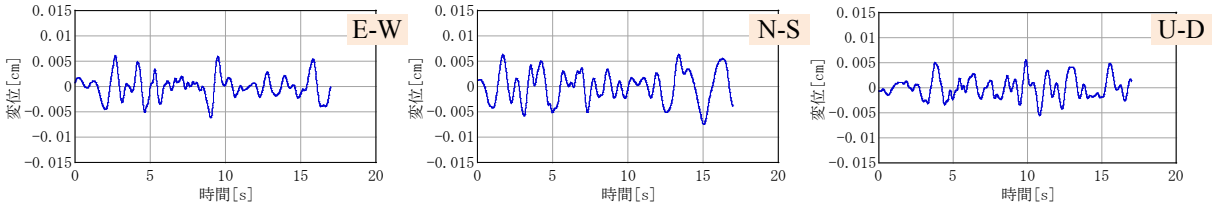


(3)　加速度計 300m-3

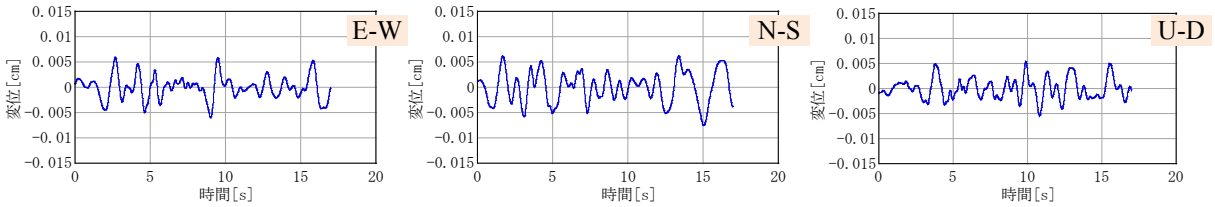
図 3.1-18　2014 年伊予灘：GL-300m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 300m-1

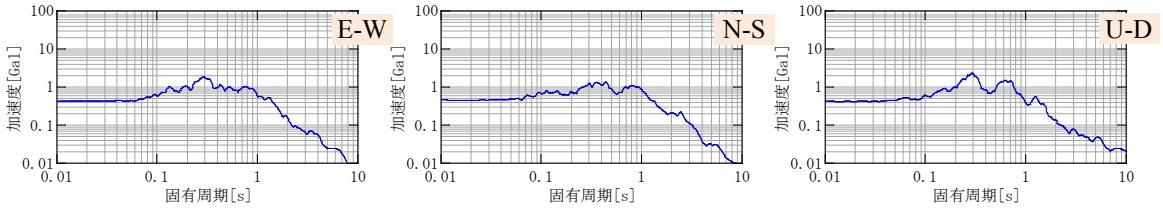


(2)　加速度計 300m-2

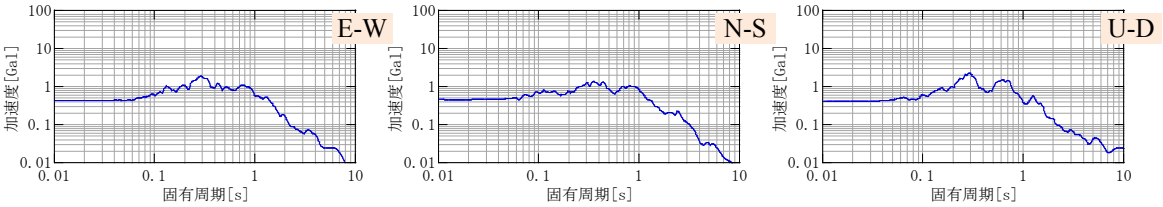


(3)　加速度計 300m-3

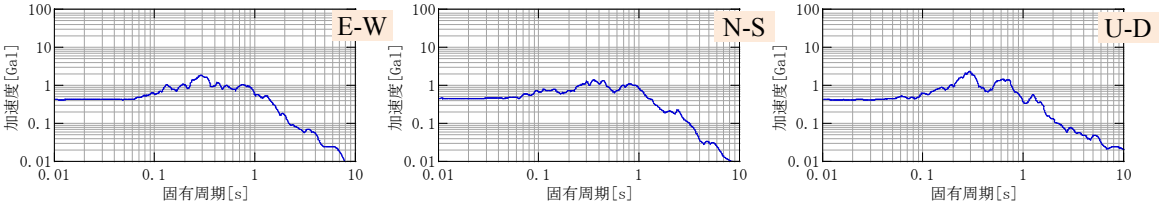
図 3.1-19　2014 年伊予灘：GL-300m 地点の変位波形



(1)　加速度計 300m-1

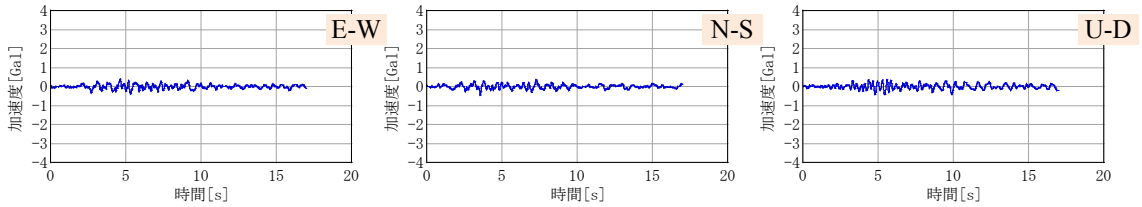


(2)　加速度計 300m-2

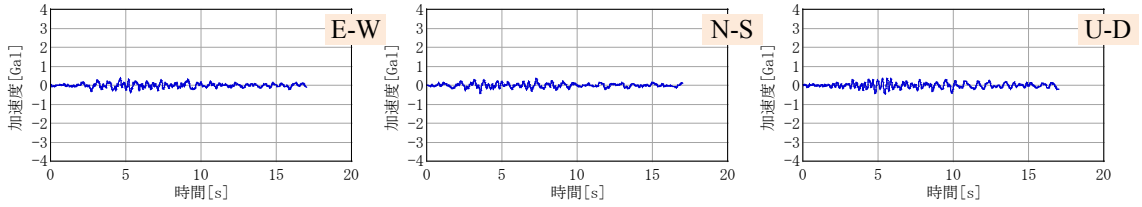


(3)　加速度計 300m-3

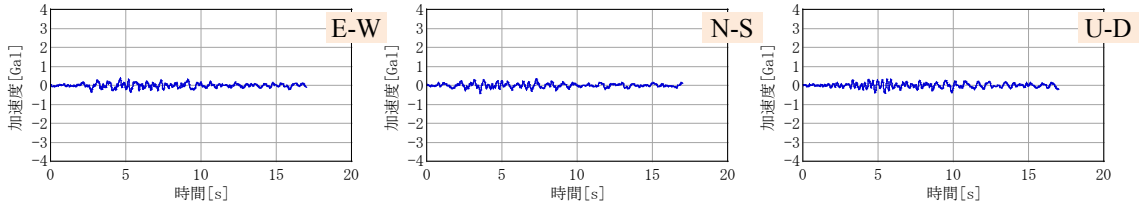
図 3.1-20　2014 年伊予灘：GL-300m 地点の加速度応答スペクトル



(1)　加速度計 300m-1

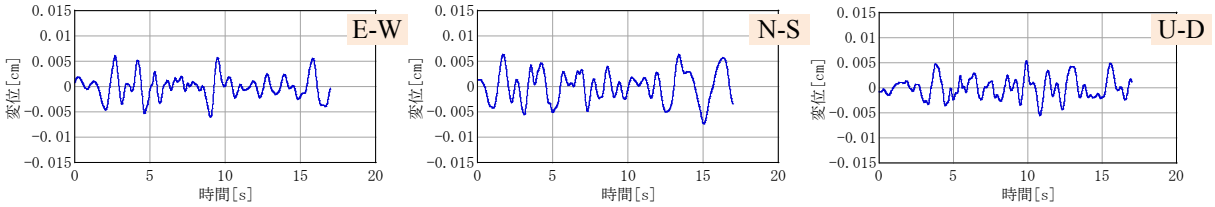


(2)　加速度計 300m-2

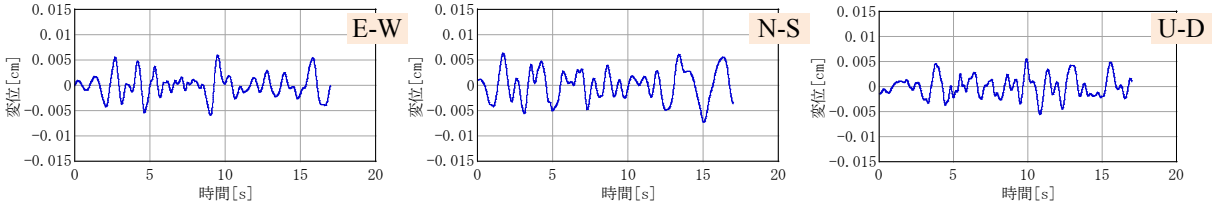


(3)　加速度計 300m-3

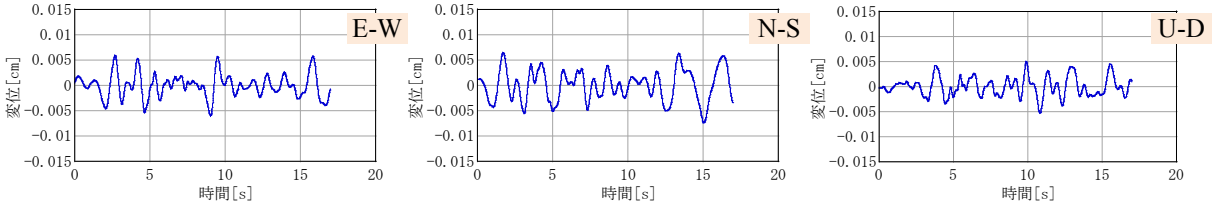
図 3.1-21　2014 年伊予灘：主立坑 GL-300m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 300m-1

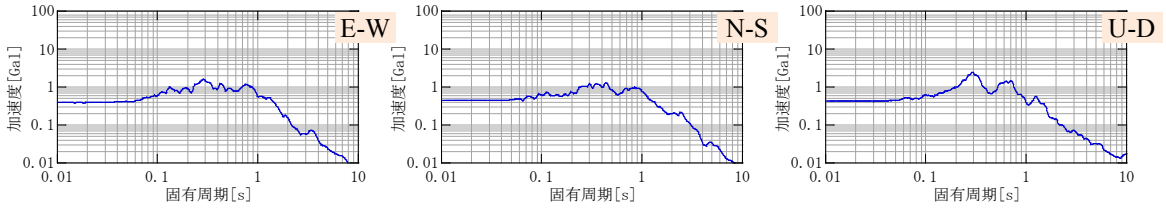


(2)　加速度計 300m-2

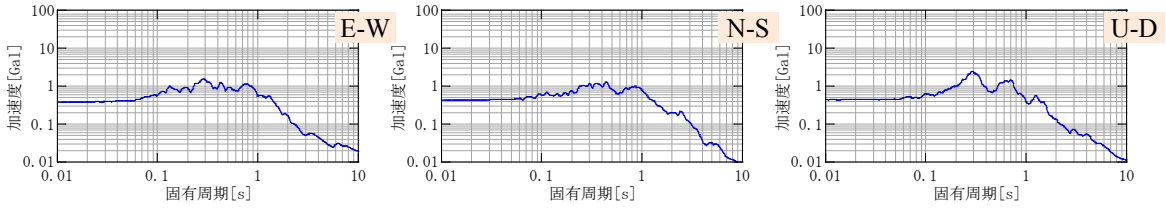


(3)　加速度計 300m-3

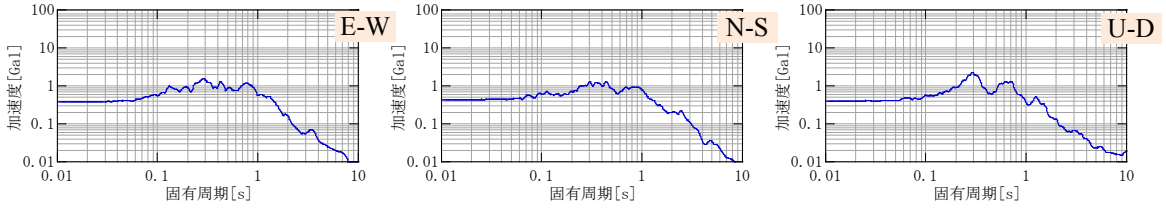
図 3.1-22　2014 年伊予灘：主立坑 GL-300m 地点の変位波形



(1)　加速度計 300m-1

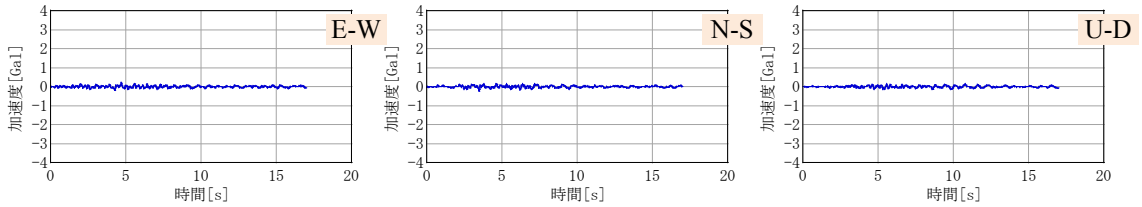


(2)　加速度計 300m-2

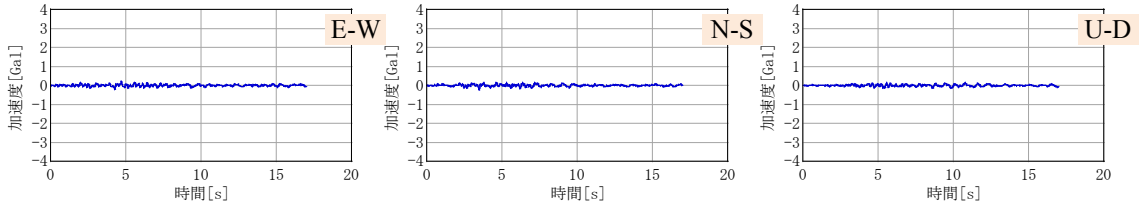


(3)　加速度計 300m-3

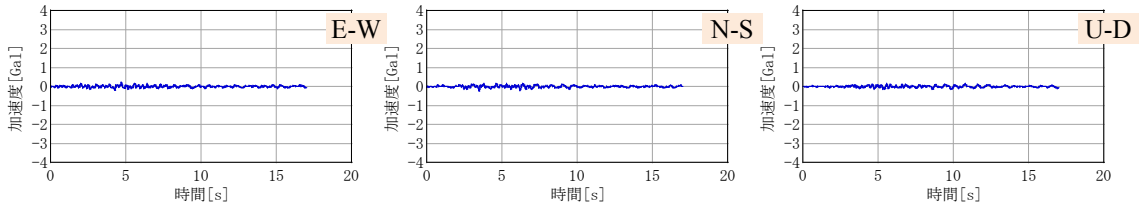
図 3.1-23　2014 年伊予灘：主立坑 GL-300m 地点の加速度応答スペクトル



(1)　加速度計 500m-1

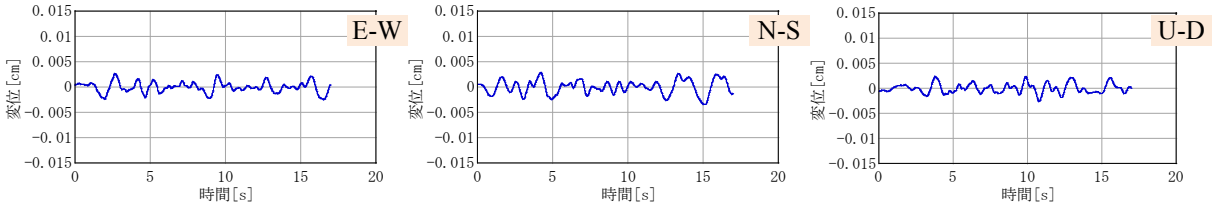


(2)　加速度計 500m-2

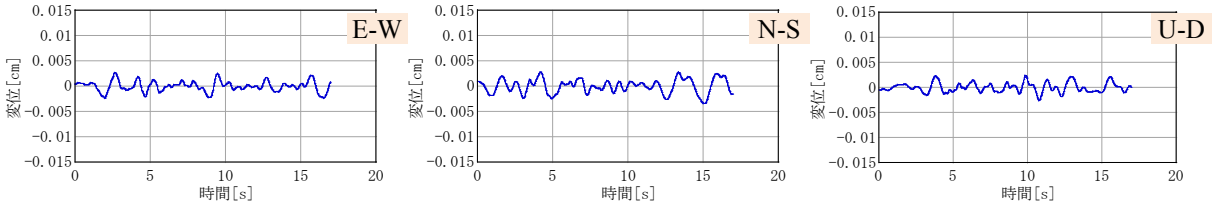


(3)　加速度計 500m-3

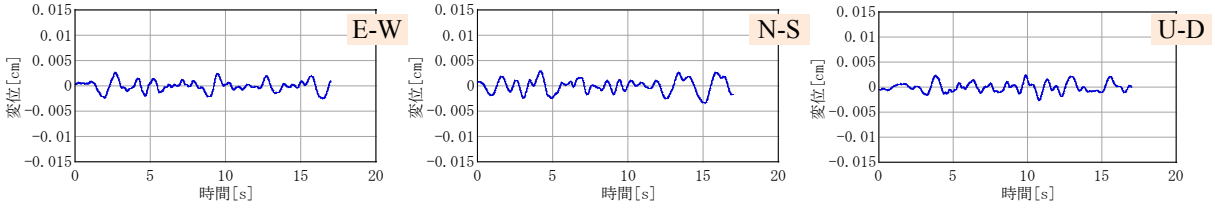
図 3.1-24　2014 年伊予灘：GL-500m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 500m-1

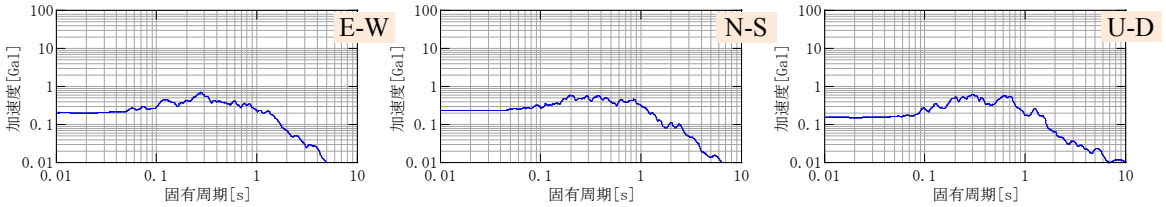


(2)　加速度計 500m-2

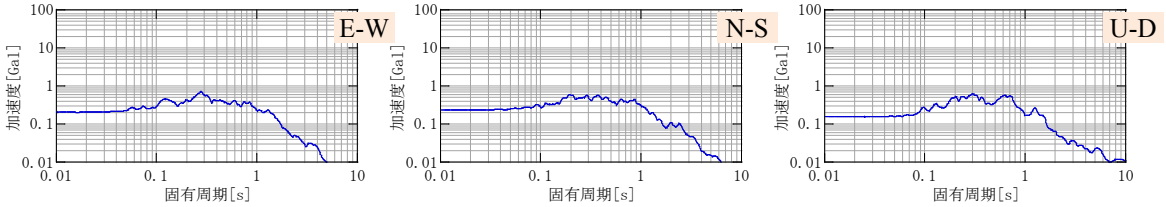


(3)　加速度計 500m-3

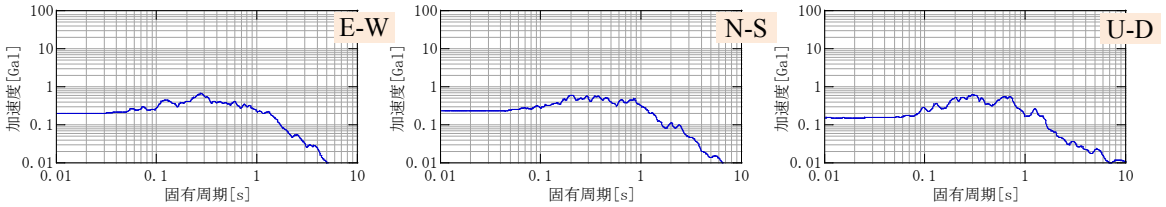
図 3.1-25　2014 年伊予灘：GL-500m 地点の変位波形



(1)　加速度計 500m-1

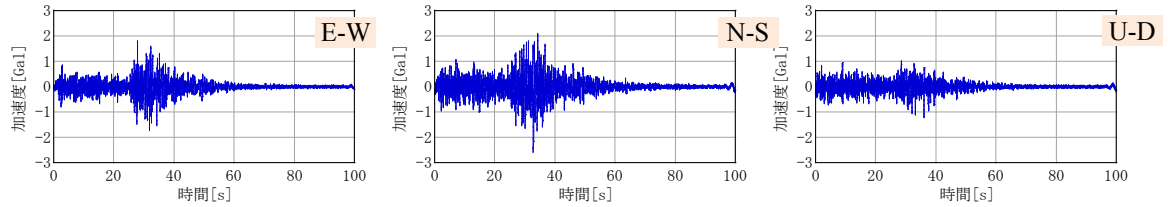


(2)　加速度計 500m-2

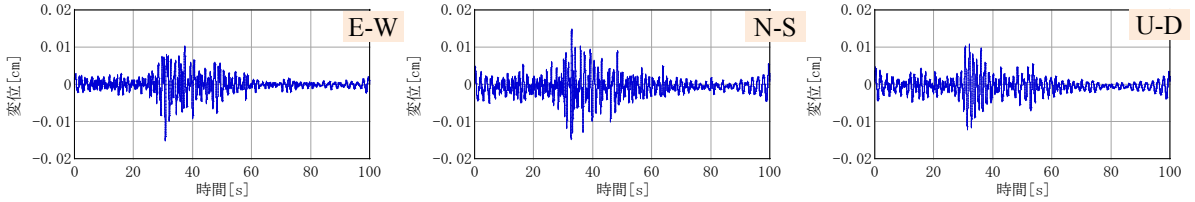


(3)　加速度計 500m-3

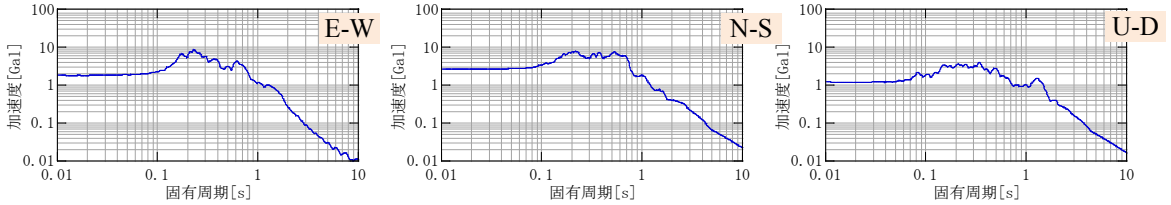
図 3.1-26　2014 年伊予灘：GL-500m 地点の加速度応答スペクトル



（Ⅰ） 加速度波形

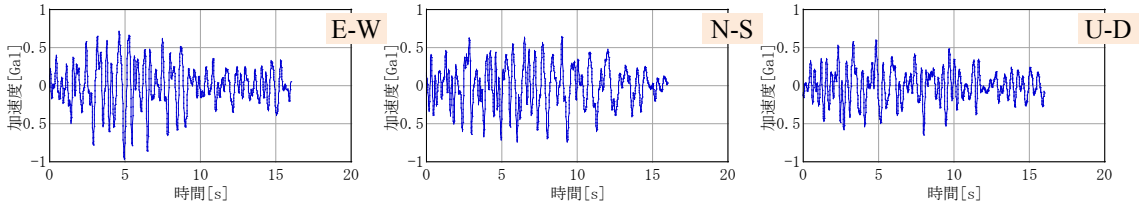


（Ⅱ） 変位波形

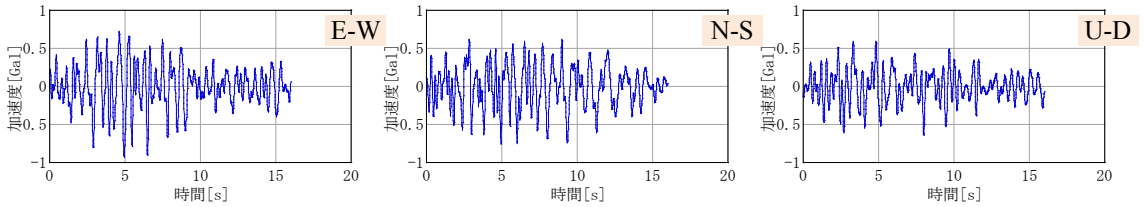


（Ⅲ） 加速度応答スペクトル

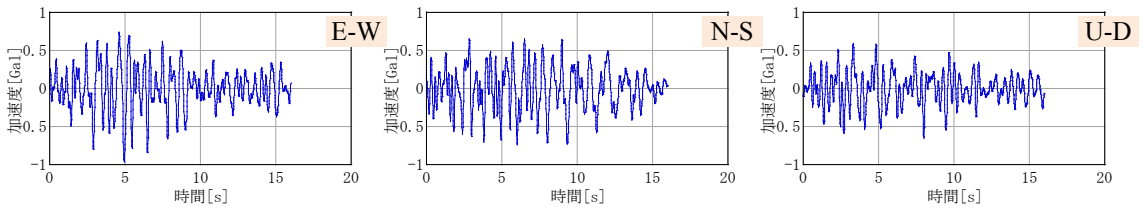
図 3.1-27 2014 年茨城県南部：地上 B 加速度計の記録



(1) 加速度計 100m-1

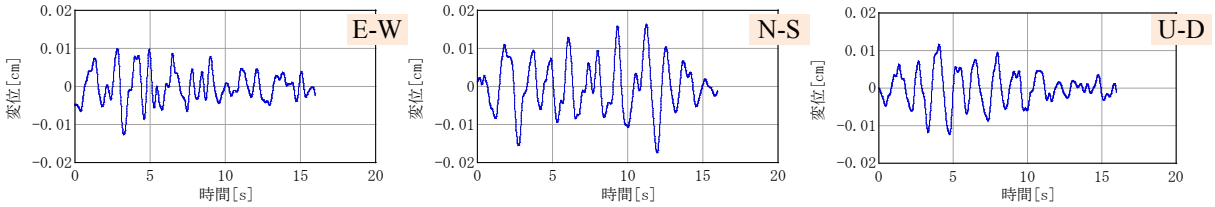


(2) 加速度計 100m-2

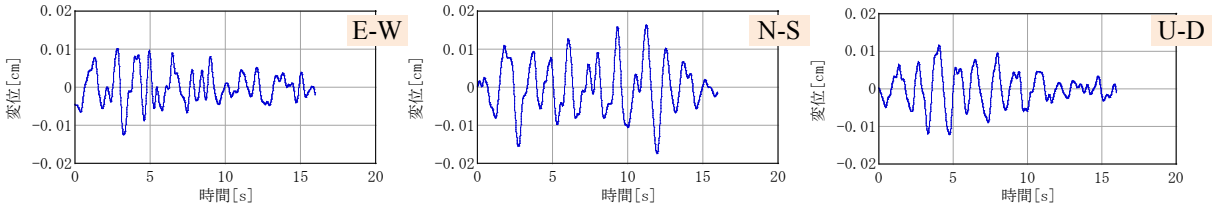


(3) 加速度計 100m-3

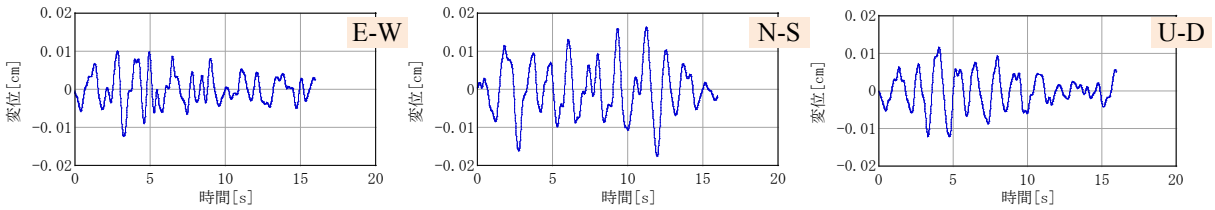
図 3.1-28 2014 年茨城県南部：GL-100m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 100m-1

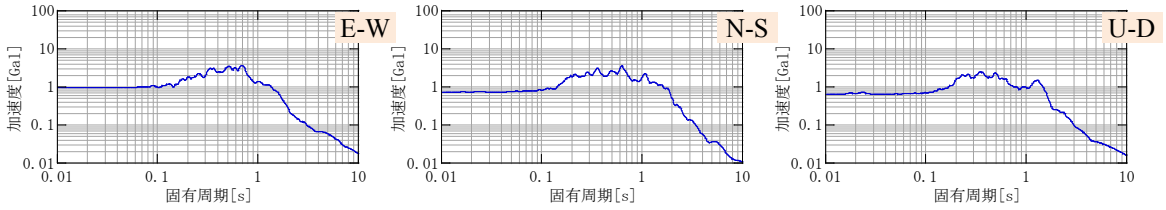


(2)　加速度計 100m-2

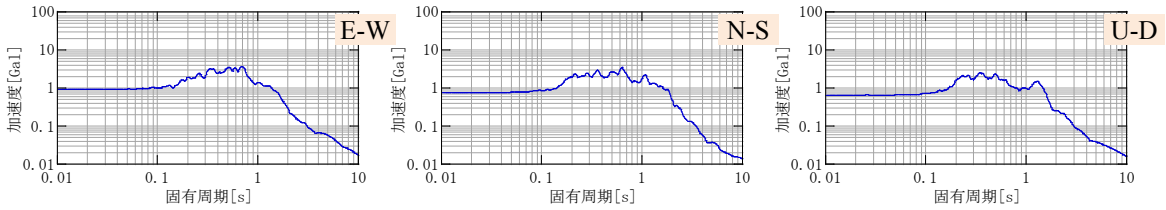


(3)　加速度計 100m-3

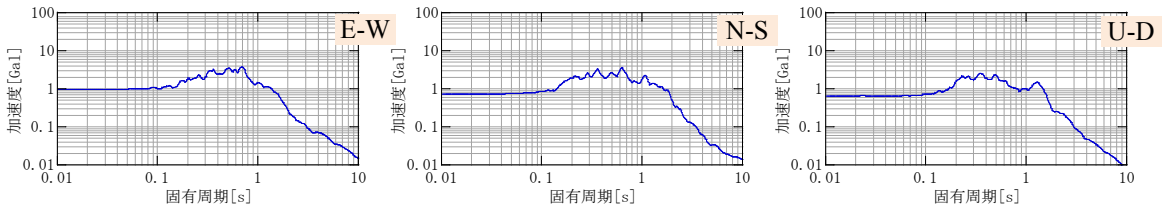
図 3.1-29　2014 年茨城県南部：GL-100m 地点の変位波形



(1)　加速度計 100m-1

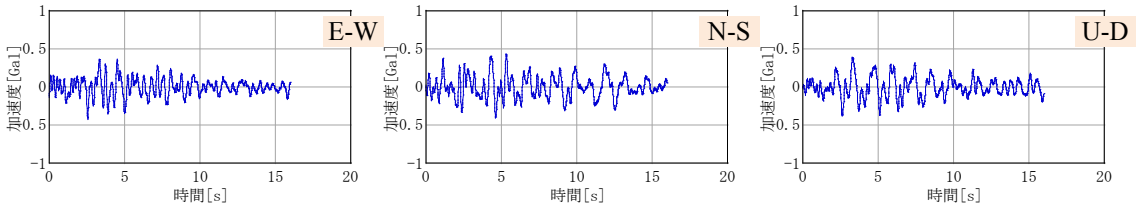


(2)　加速度計 100m-2

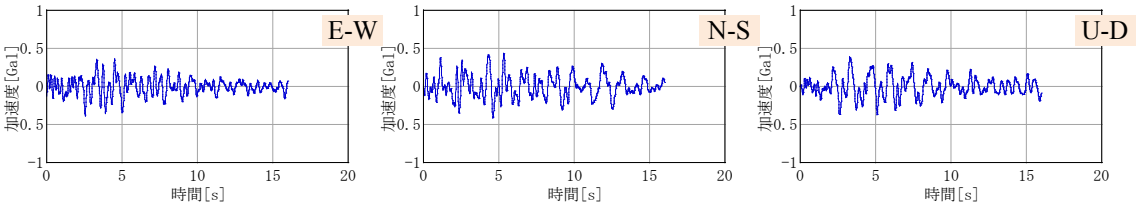


(3)　加速度計 100m-3

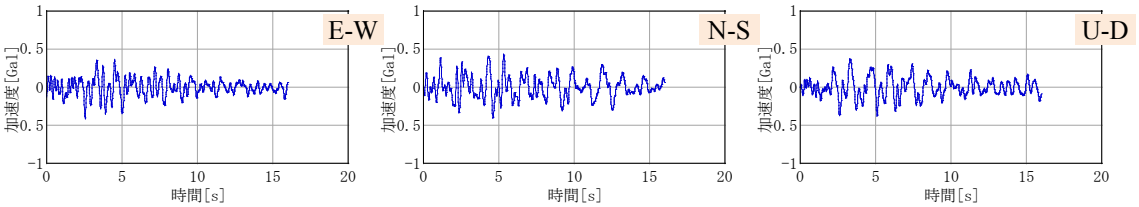
図 3.1-30　2014 年茨城県南部：GL-100m 地点の加速度応答スペクトル



(1)　加速度計 300m-1

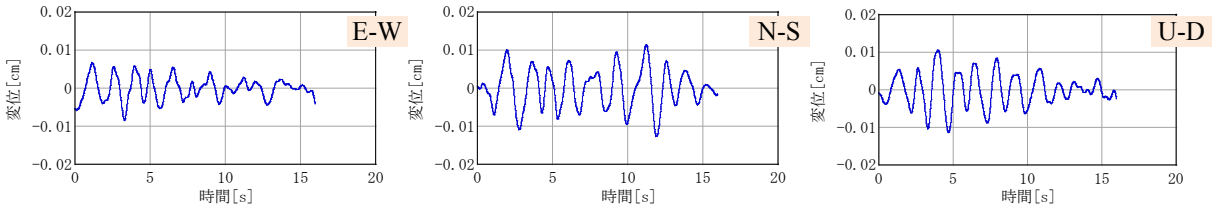


(2)　加速度計 300m-2

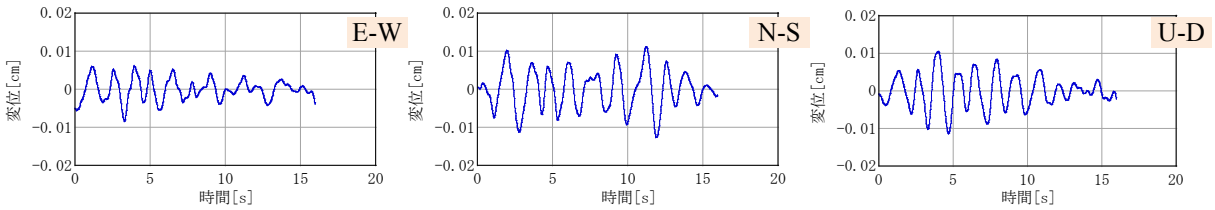


(3)　加速度計 300m-3

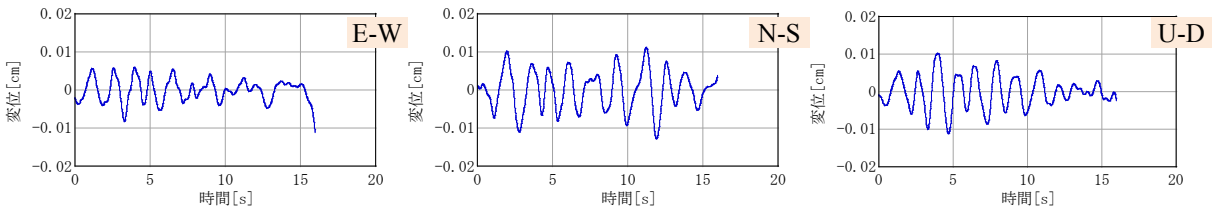
図 3.1-31　2014 年茨城県南部：GL-300m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 300m-1

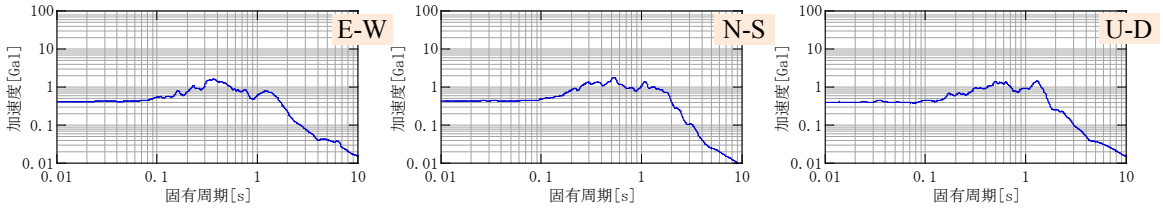


(2)　加速度計 300m-2

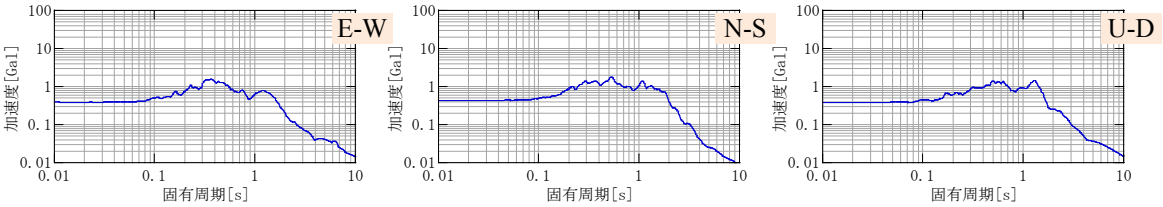


(3)　加速度計 300m-3

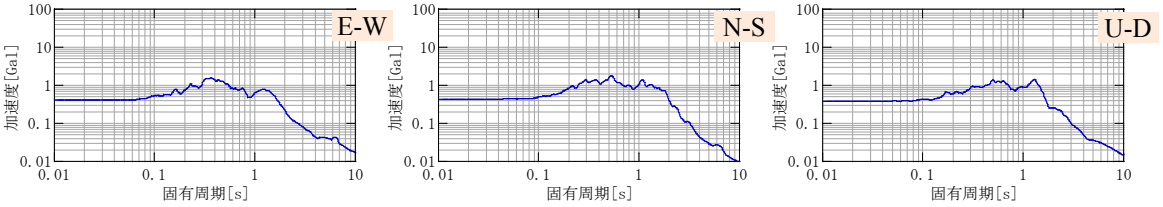
図 3.1-32　2014 年茨城県南部：GL-300m 地点の変位波形



(1)　加速度計 300m-1

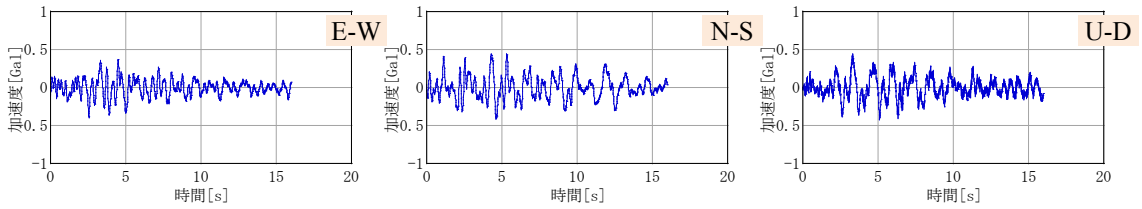


(2)　加速度計 300m-2

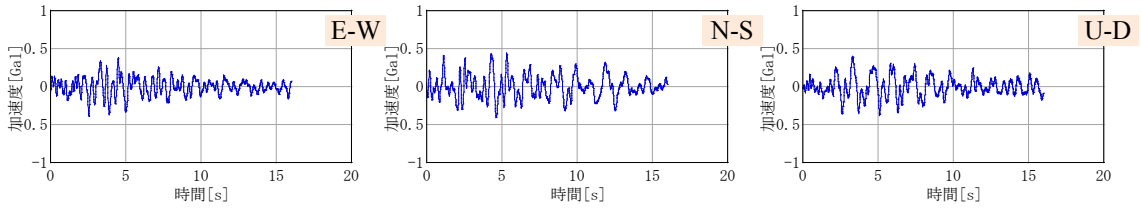


(3)　加速度計 300m-3

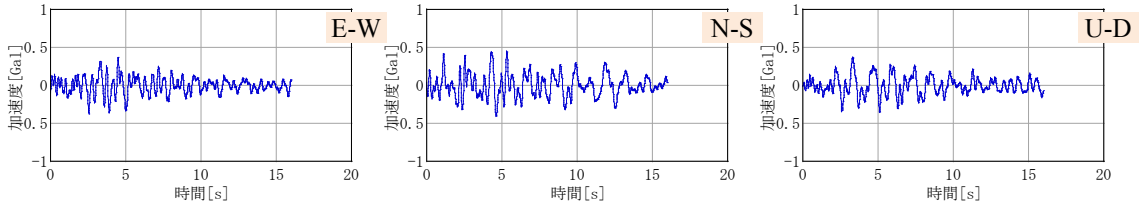
図 3.1-33　2014 年茨城県南部：GL-300m 地点の加速度応答スペクトル



(1)　加速度計 300m-1

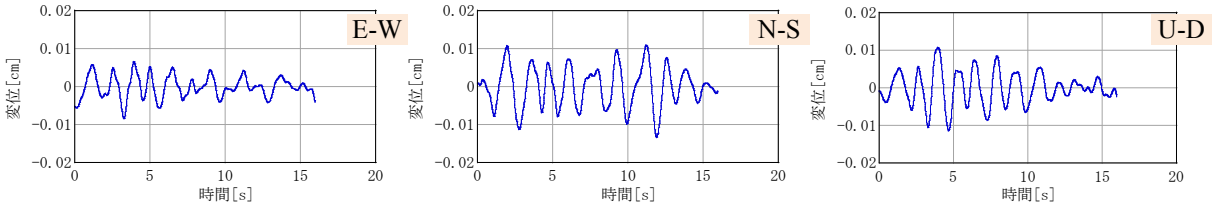


(2)　加速度計 300m-2

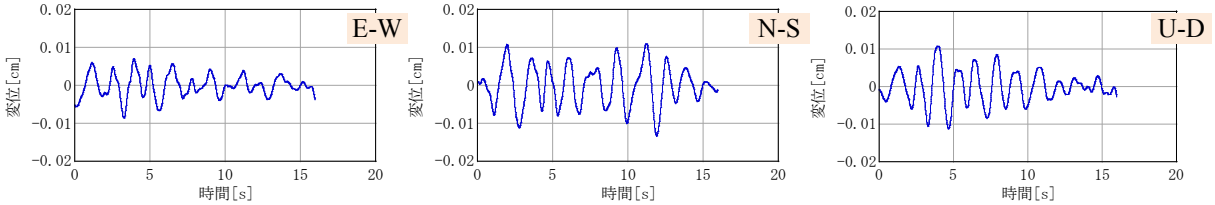


(3)　加速度計 300m-3

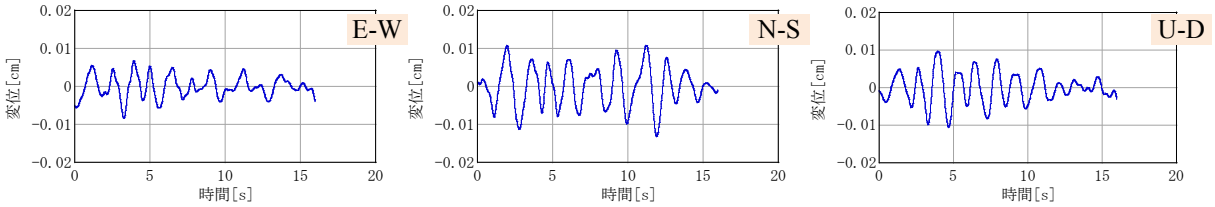
図 3.1-34　2014 年茨城県南部：主立坑 GL-300m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 300m-1

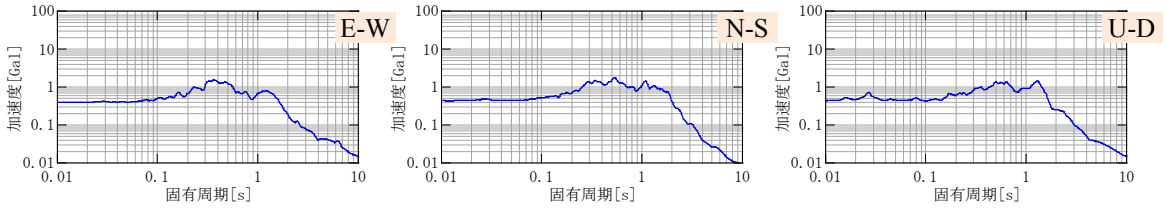


(2)　加速度計 300m-2

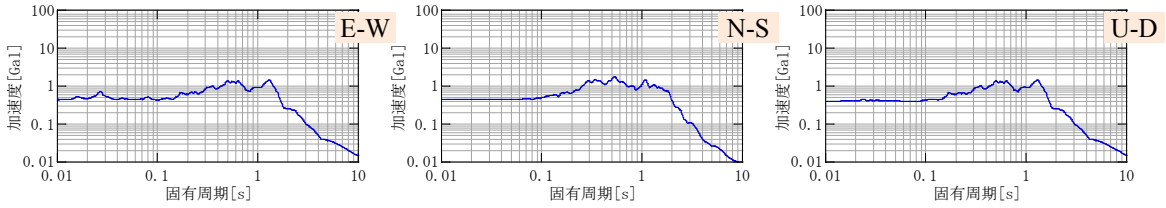


(3)　加速度計 300m-3

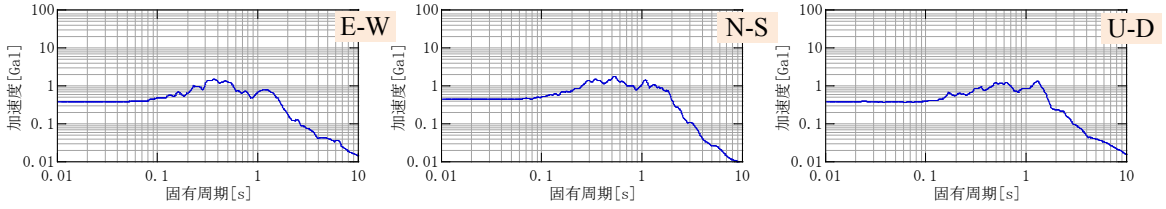
図 3.1-35　2014 年茨城県南部：主立坑 GL-300m 地点の変位波形



(1)　加速度計 300m-1

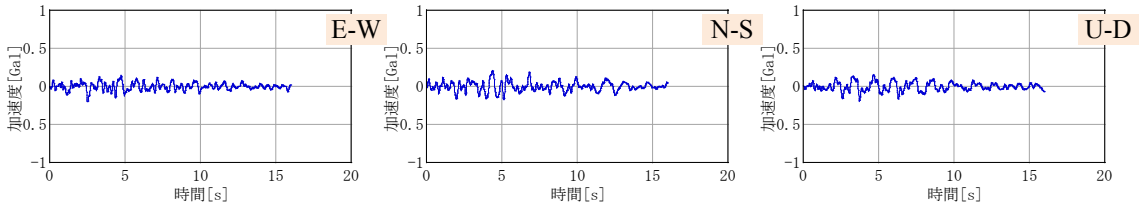


(2)　加速度計 300m-2

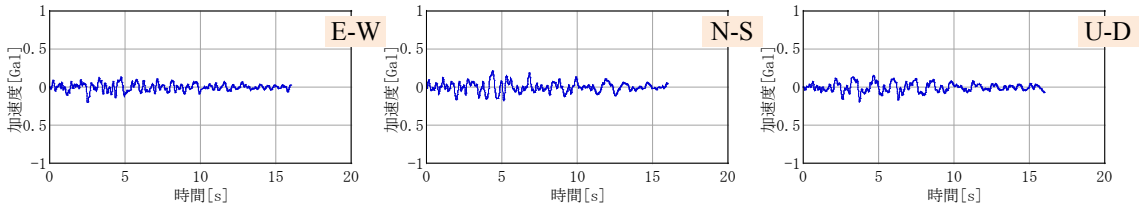


(3)　加速度計 300m-3

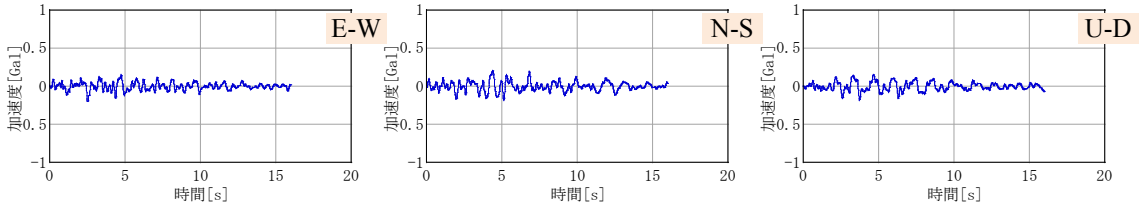
図 3.1-36　2014 年茨城県南部：主立坑 GL-300m 地点の加速度応答スペクトル



(1)　加速度計 500m-1

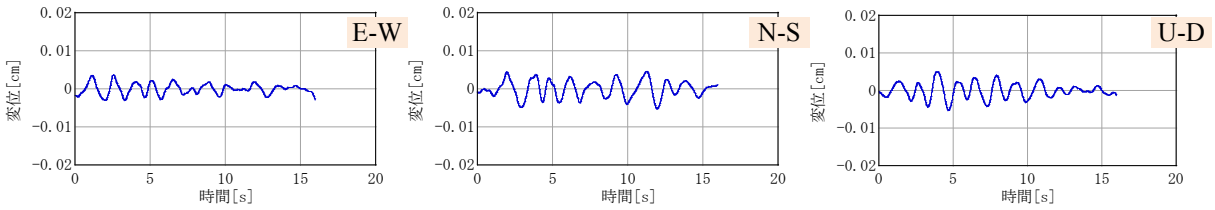


(2)　加速度計 500m-2

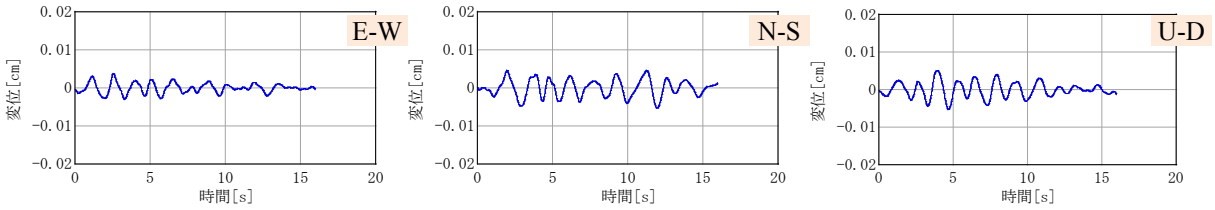


(3)　加速度計 500m-3

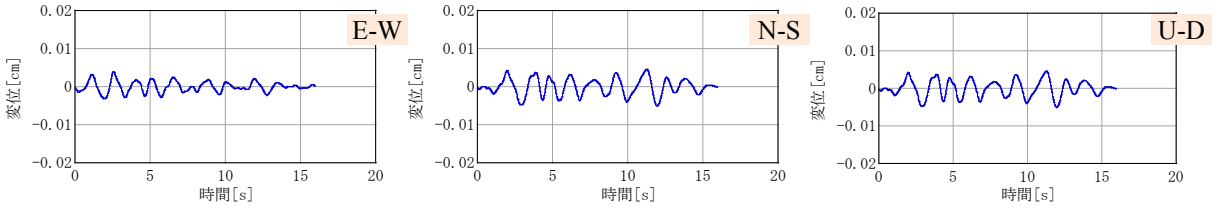
図 3.1-37　2014 年茨城県南部：GL-500m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 500m-1

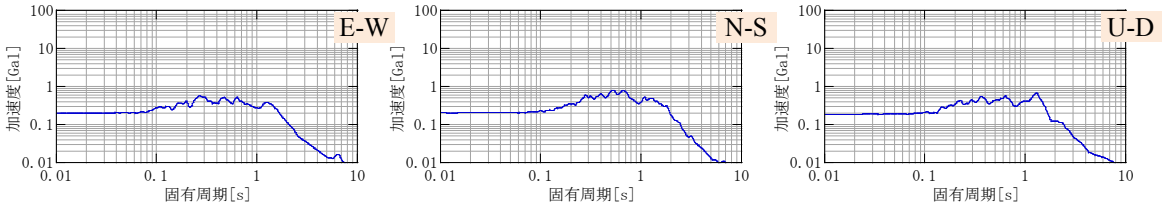


(2)　加速度計 500m-2

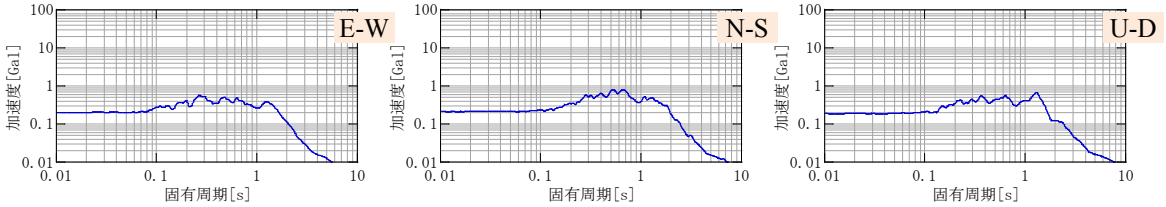


(3)　加速度計 500m-3

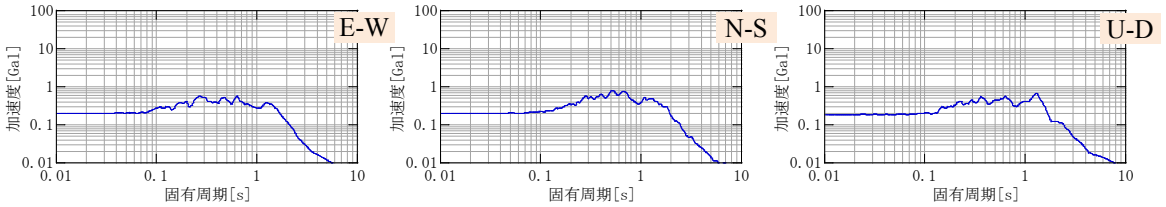
図 3.1-38　2014 年茨城県南部：GL-500m 地点の変位波形



(1)　加速度計 500m-1

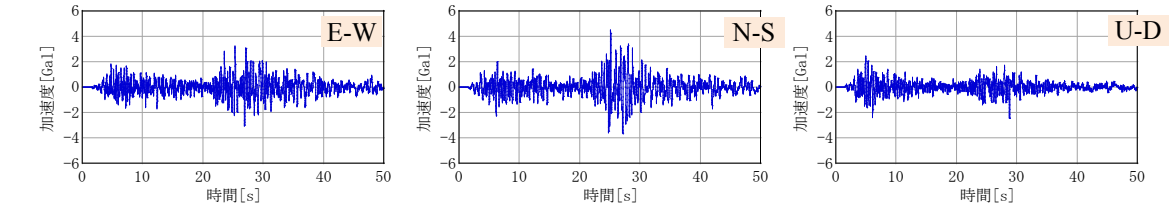


(2)　加速度計 500m-2

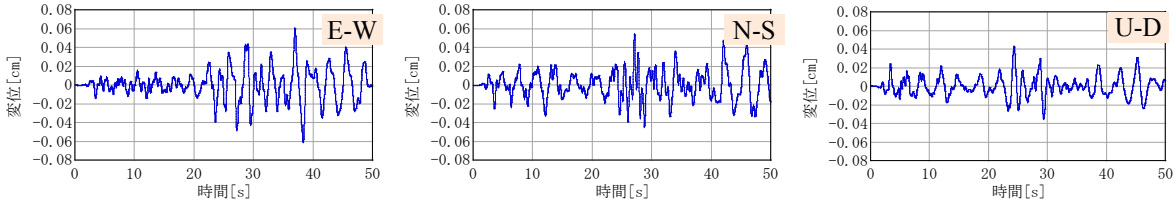


(3)　加速度計 500m-3

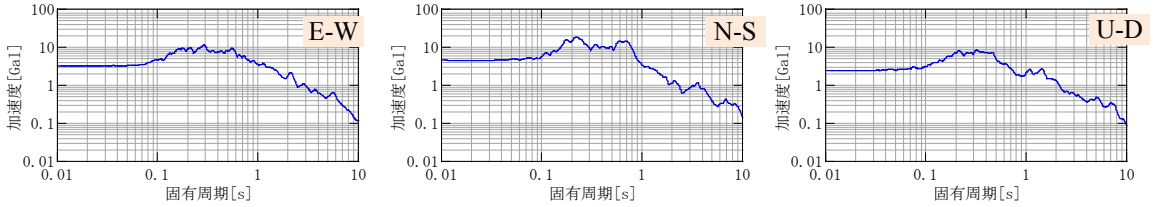
図 3.1-39　2014 年茨城県南部：GL-500m 地点の加速度応答スペクトル



（Ⅰ） 加速度波形

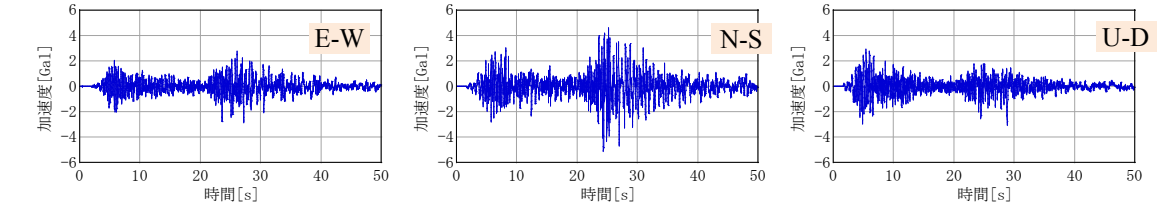


（Ⅱ） 変位波形

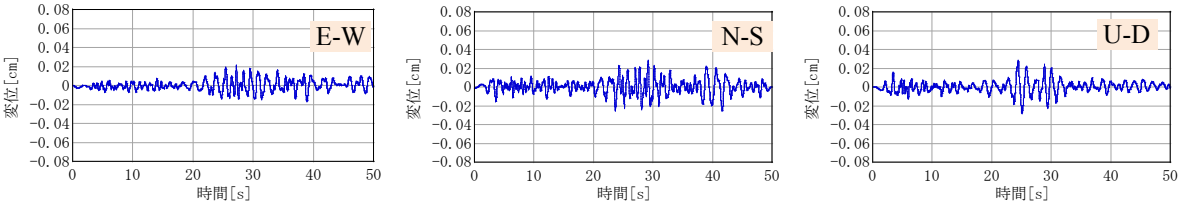


（Ⅲ） 加速度応答スペクトル

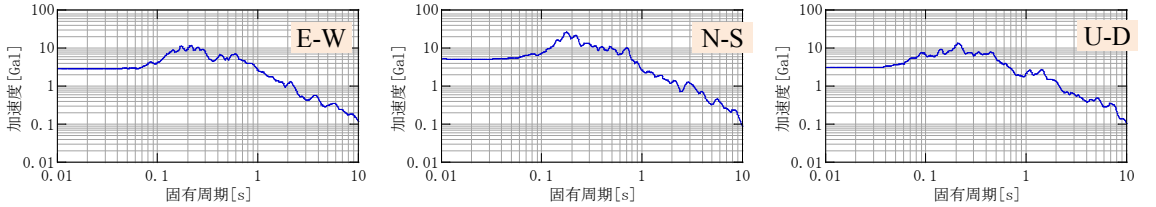
図 3.1-40 2014 年長野県北部：地上 A 加速度計の記録



（Ⅰ） 加速度波形

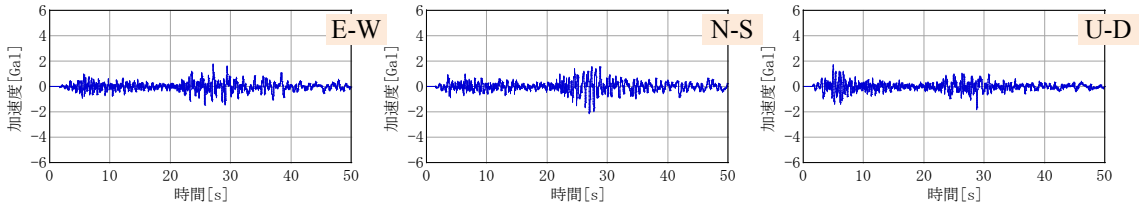


（Ⅱ） 変位波形

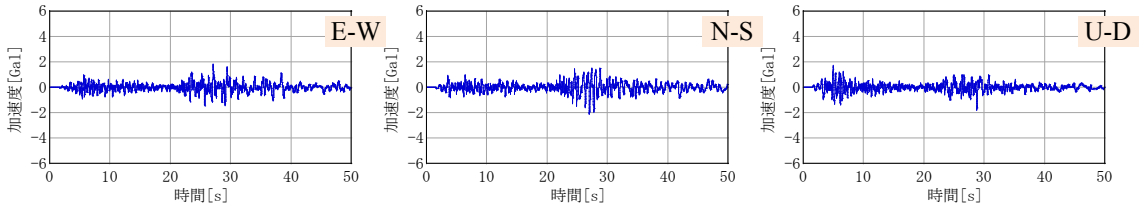


（Ⅲ） 加速度応答スペクトル

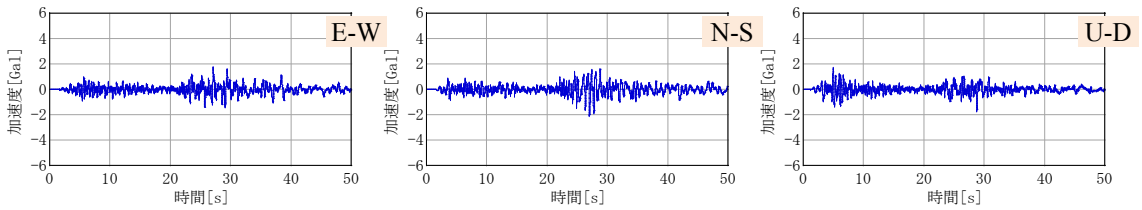
図 3.1-41 2014 年長野県北部：地上 B 加速度計の記録



(1)　加速度計 100m-1

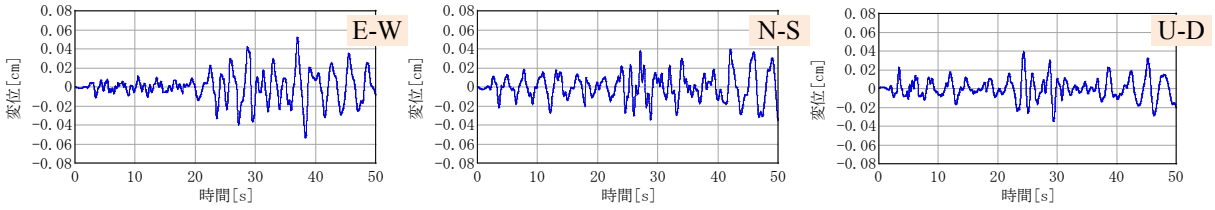


(2)　加速度計 100m-2

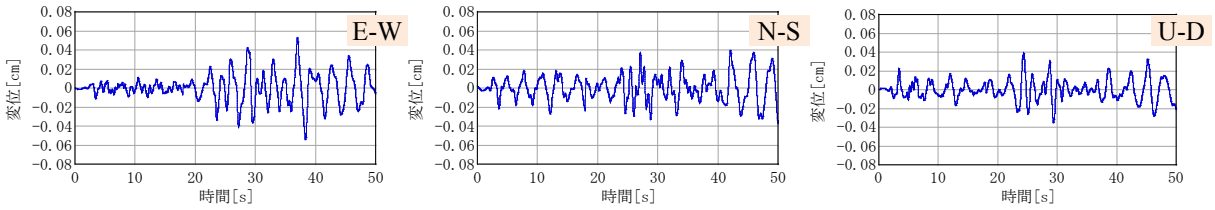


(3)　加速度計 100m-3

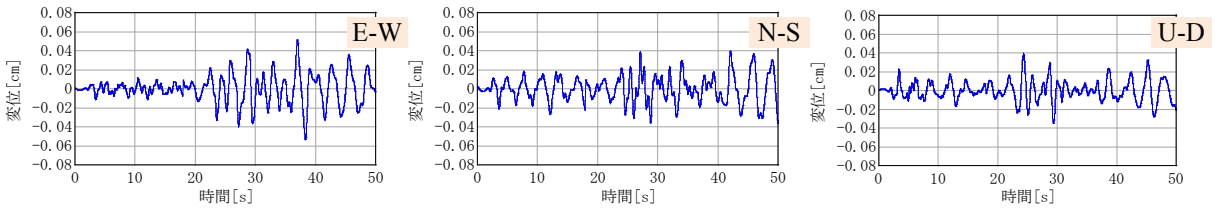
図 3.1-42　2014 年長野県北部：GL-100m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 100m-1

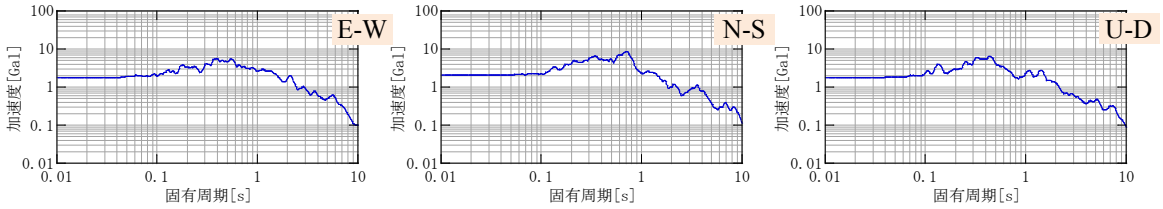


(2)　加速度計 100m-2

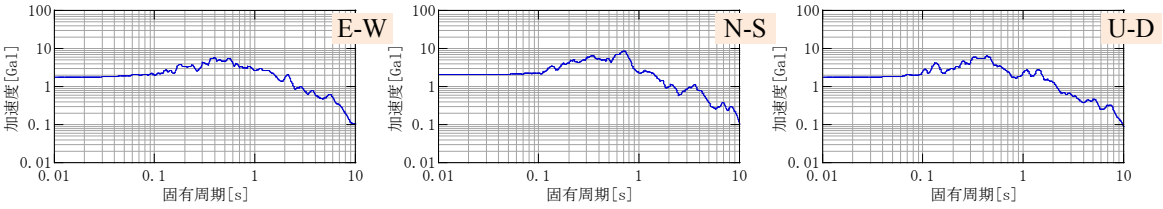


(3)　加速度計 100m-3

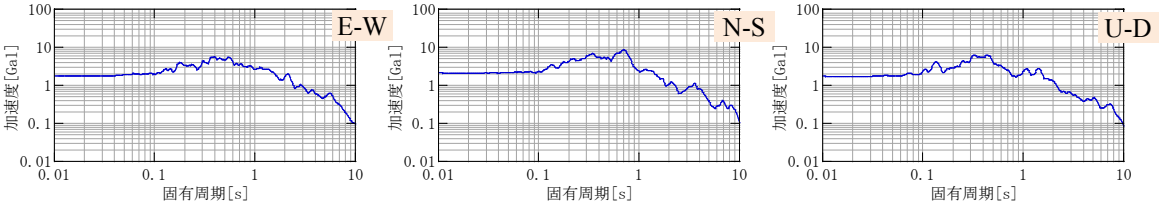
図 3.1-43　2014 年長野県北部：GL-100m 地点の変位波形



(1)　加速度計 100m-1

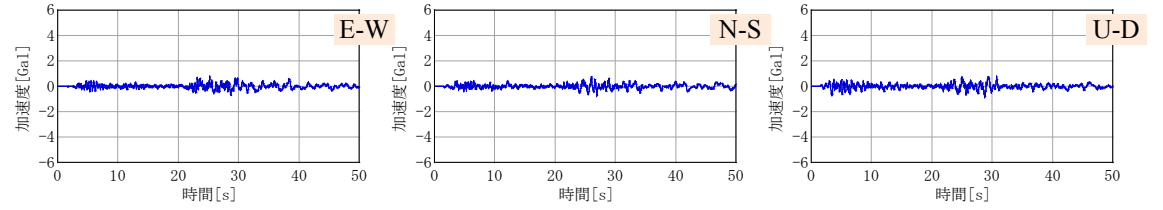


(2)　加速度計 100m-2

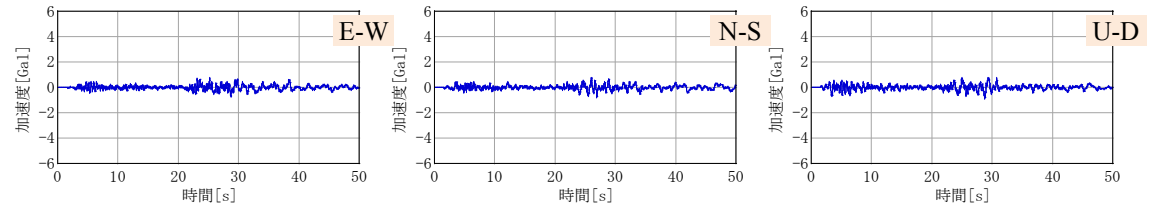


(3)　加速度計 100m-3

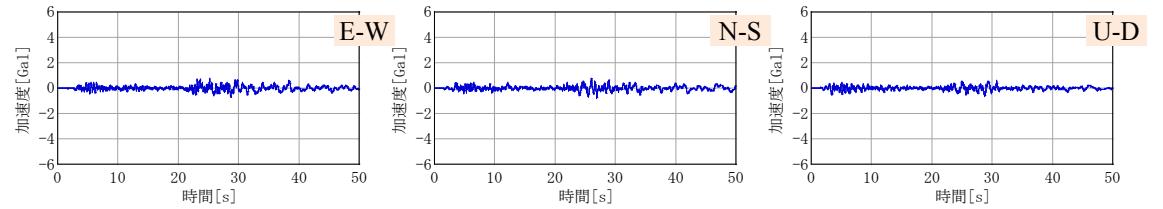
図 3.1-44　2014 年長野県北部：GL-100m 地点の加速度応答スペクトル



(1)　加速度計 300m-1

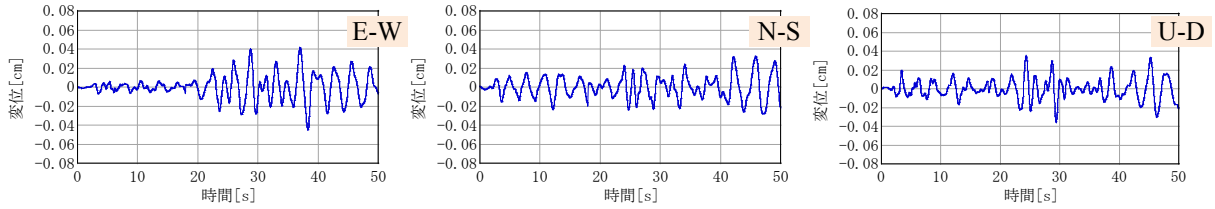


(2)　加速度計 300m-2

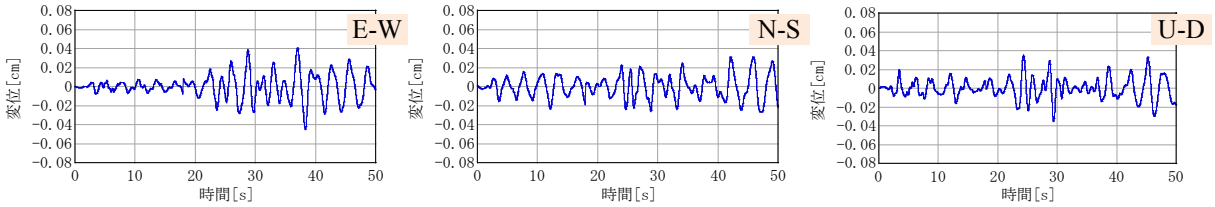


(3)　加速度計 300m-3

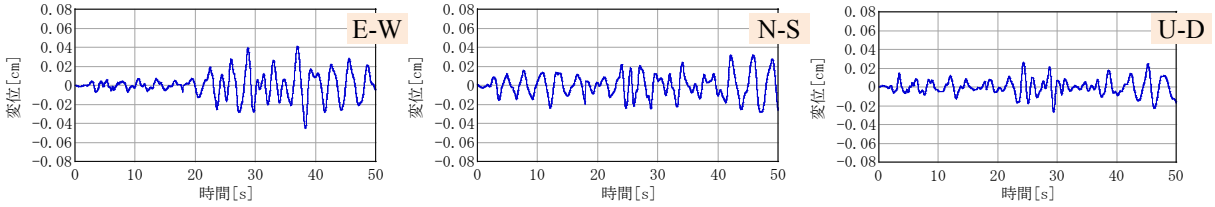
図 3.1-45　2014 年長野県北部：GL-300m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 300m-1

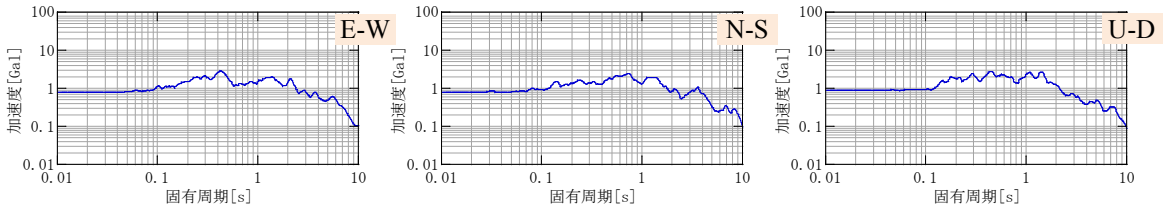


(2)　加速度計 300m-2

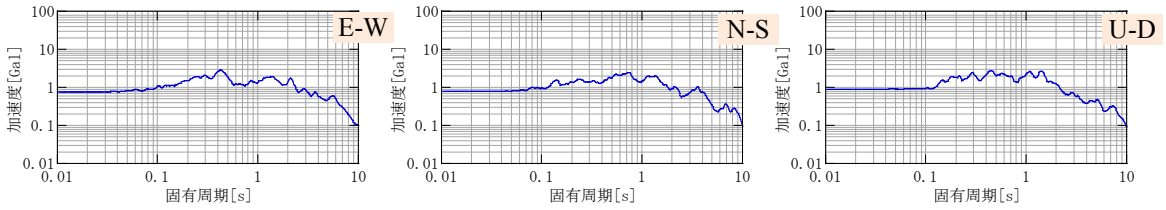


(3)　加速度計 300m-3

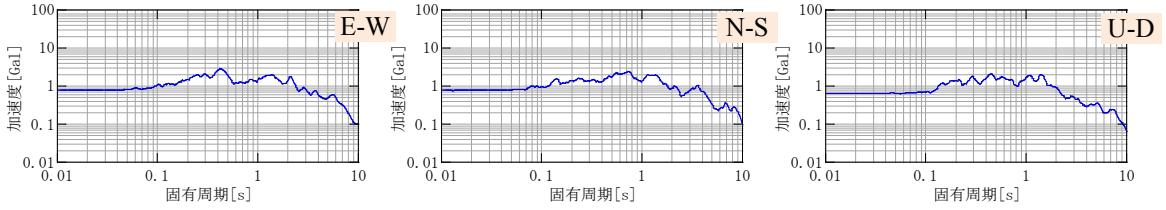
図 3.1-46　2014 年長野県北部：GL-300m 地点の変位波形



(1)　加速度計 300m-1

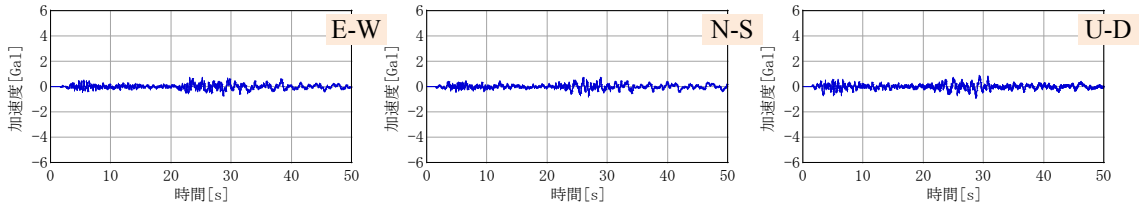


2)　加速度計 300m-2

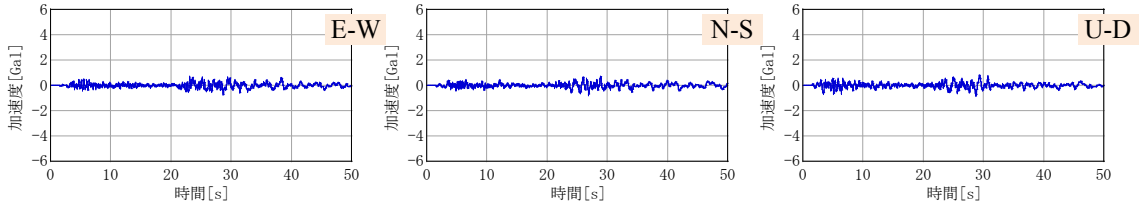


(3)　加速度計 300m-3

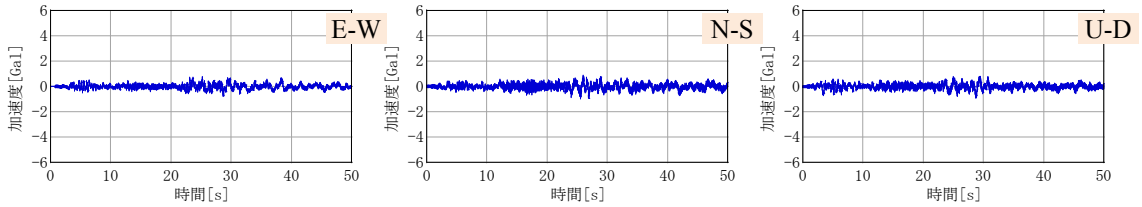
図 3.1-47　2014 年長野県北部：GL-300m 地点の加速度応答スペクトル



(1)　加速度計 300m-1

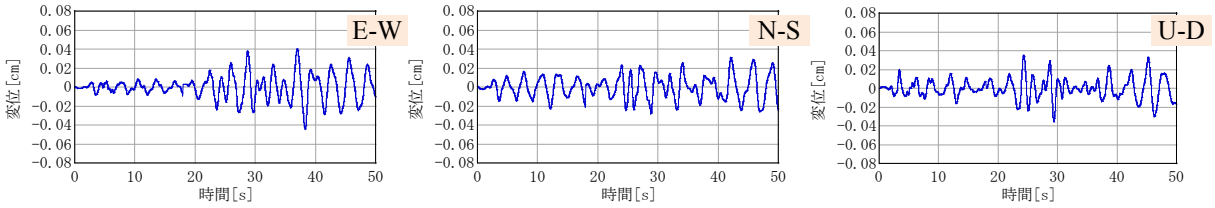


(2)　加速度計 300m-2

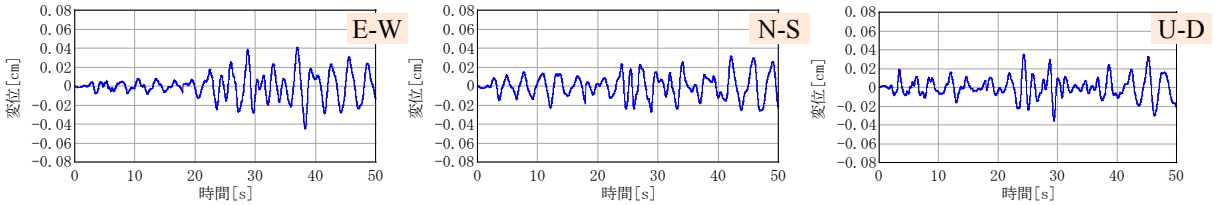


(3)　加速度計 300m-3

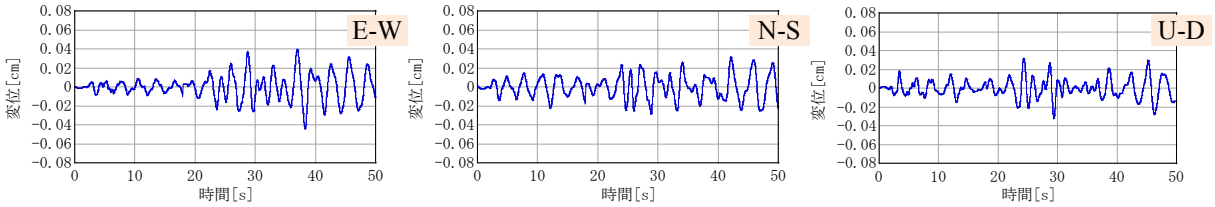
図 3.1-48　2014 年長野県北部：主立坑 GL-300m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 300m-1

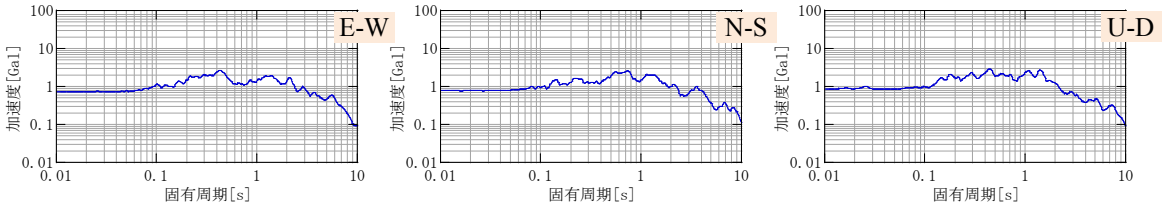


(2)　加速度計 300m-2

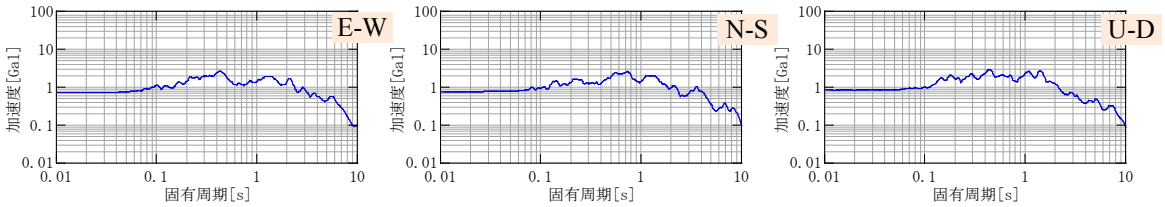


(3)　加速度計 300m-3

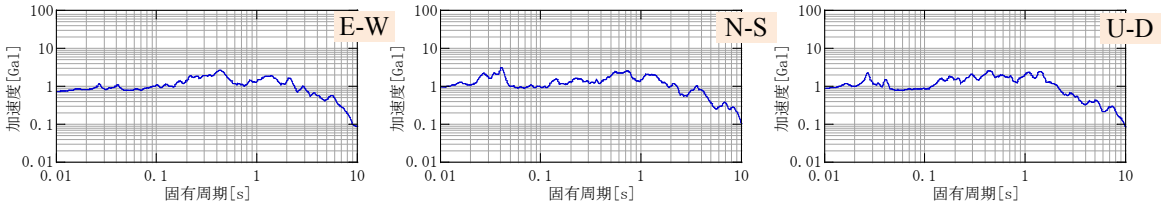
図 3.1-49　2014 年長野県北部：主立坑 GL-300m 地点の変位波形



(1)　加速度計 300m-1

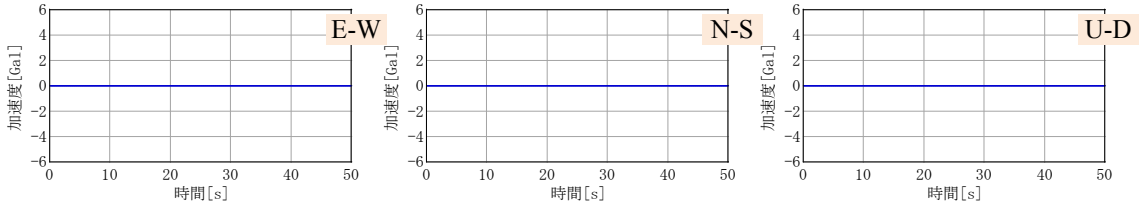


(2)　加速度計 300m-2

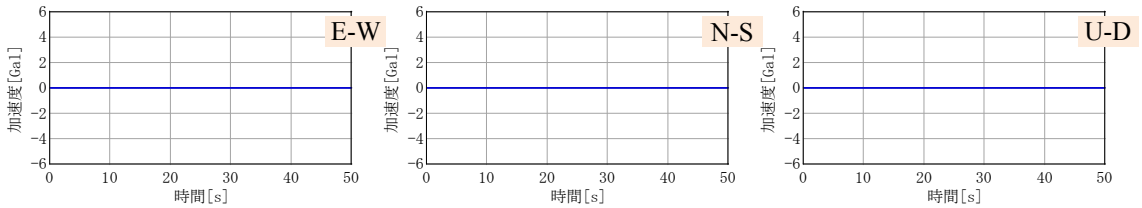


(3)　加速度計 300m-3

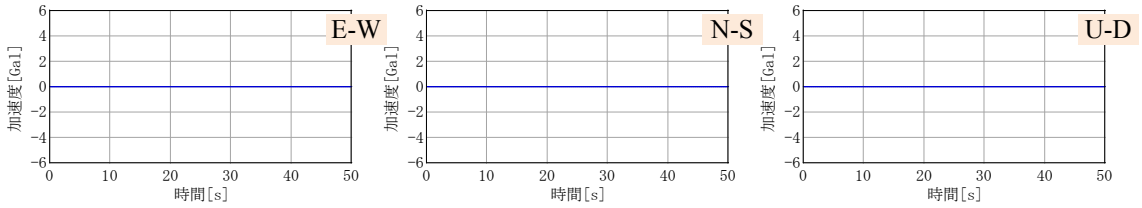
図 3.1-50　2014 年長野県北部：主立坑 GL-300m 地点の加速度応答スペクトル



(1)　加速度計 500m-1

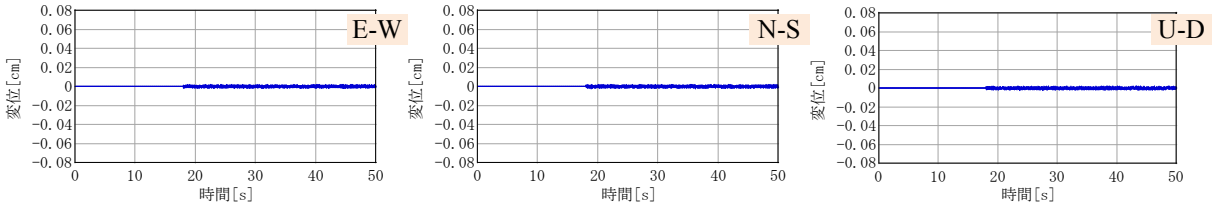


(2)　加速度計 500m-2

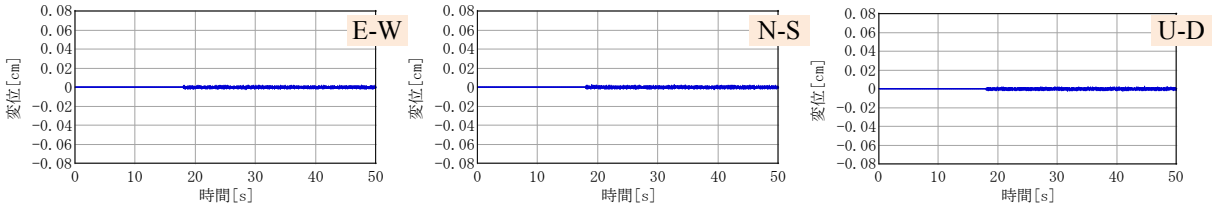


(3)　加速度計 500m-3

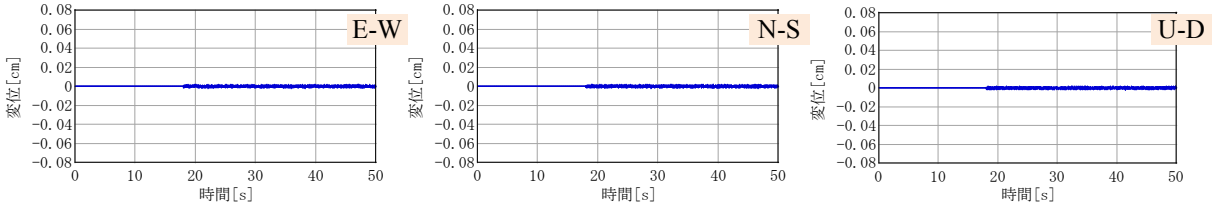
図 3.1-51　2014 年長野県北部：GL-500m 地点の加速度波形



(1)　加速度計 500m-1

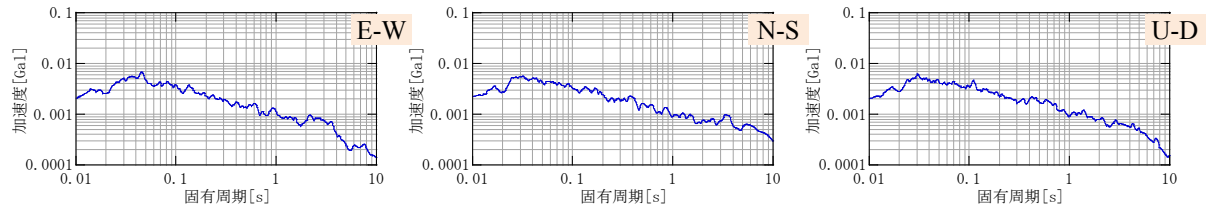


(2)　加速度計 500m-2

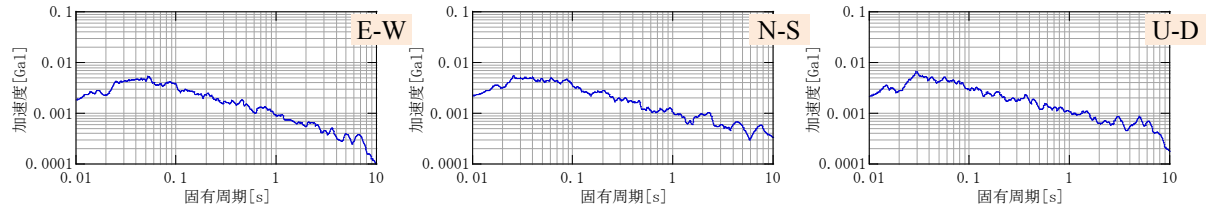


(3)　加速度計 500m-3

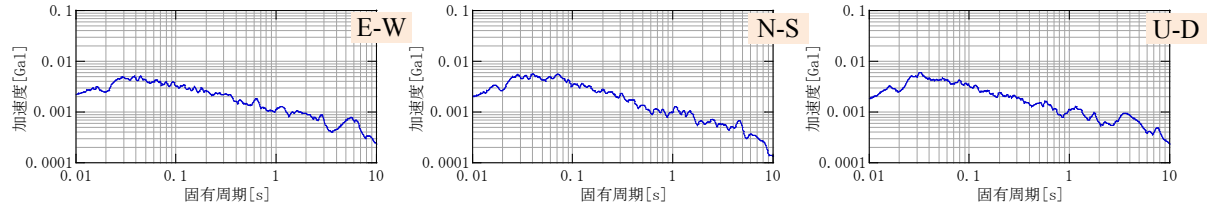
図 3.1-52　2014 年長野県北部：GL-500m 地点の変位波形



(1)　加速度計 500m-1

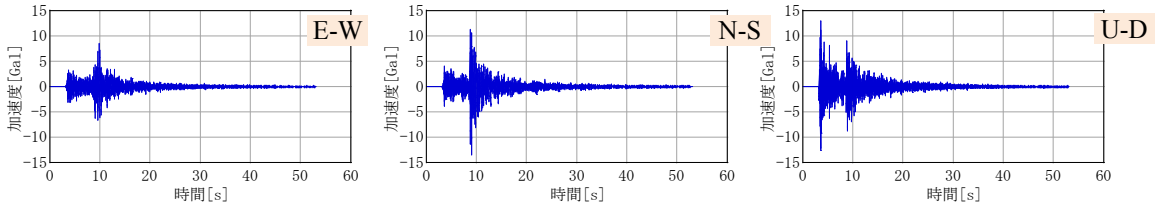


(2)　加速度計 500m-2

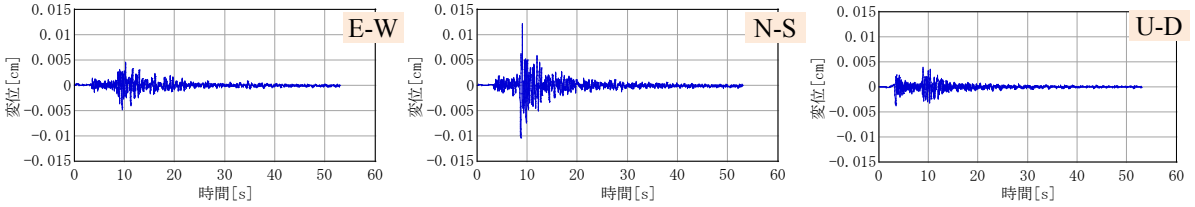


(3)　加速度計 500m-3

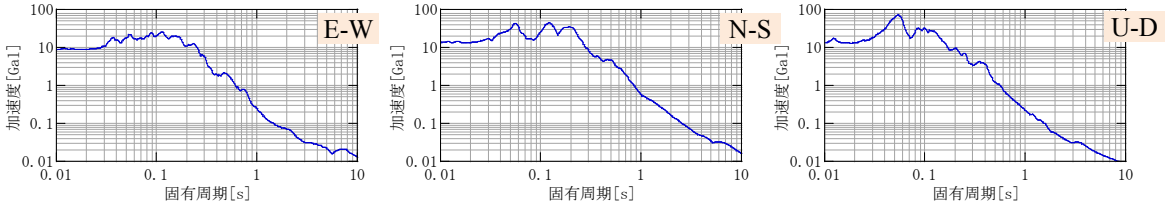
図 3.1-53　2014 年長野県北部：GL-500m 地点の加速度応答スペクトル



（Ⅰ） 加速度波形

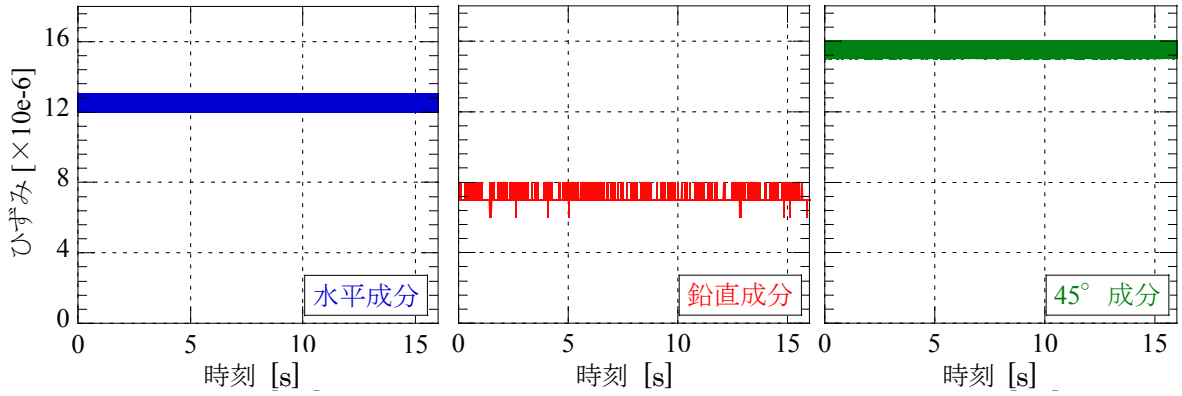


（Ⅱ） 変位波形

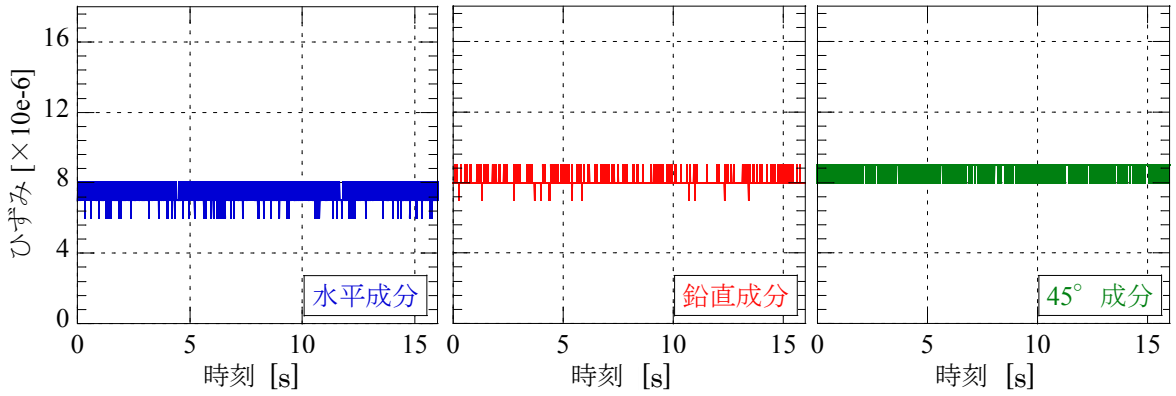


（Ⅲ） 加速度応答スペクトル

図 3.1-54　2014 年愛知県西部：地上 B 加速度計の記録

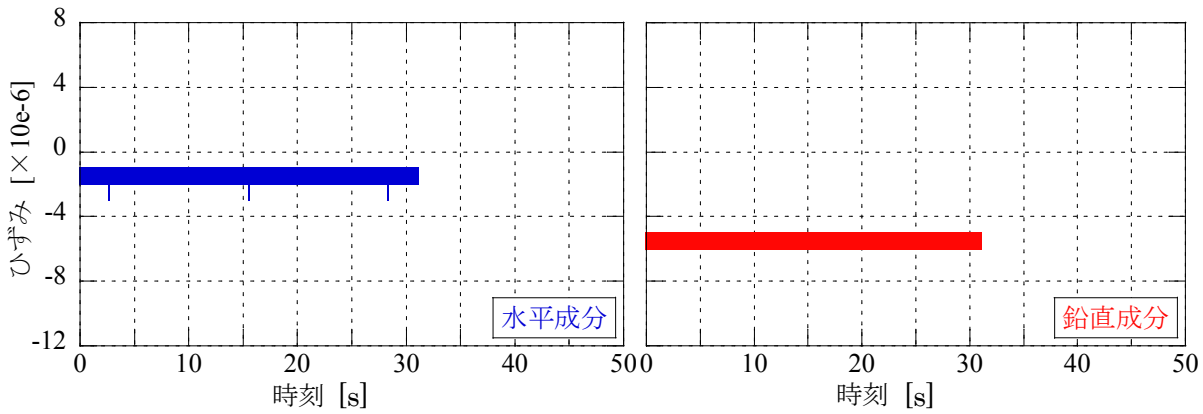


(1) 動ひずみ計 300 -1

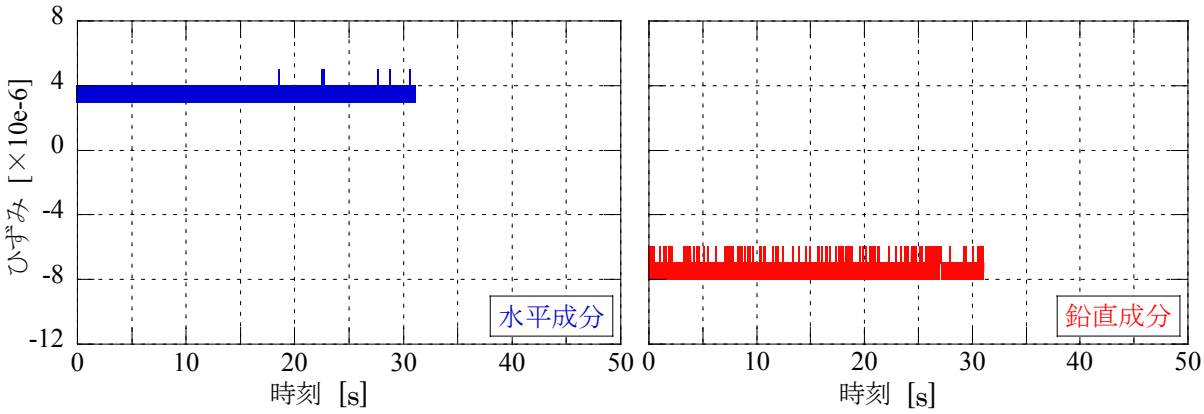


(2) 動ひずみ計 300 -2

図 3.1-55 2014 年茨城県南部：GL-300m 地点の動ひずみ時刻歴



(1) 動ひずみ計 100 -1



(2) 動ひずみ計 100 -2

図 3.1-56 2014 年長野県北部：GL-100m 地点の動ひずみ時刻歴

3.1.5 微動観測に基づく表層地盤振動特性の推定

地震観測記録の分析において、地震動の伝播状況を数値解析によって把握しようとする際には、解析モデルを作成するために地下の地質構造の情報が必要になる。既往のボーリング調査等によって表層から概ね 8m 以深の堆積層や花崗岩層については、地盤の弾性波速度や密度が把握されているが、表層地盤に関しては調査がなされておらず把握できていない。より詳細かつ精緻に地震観測記録を分析するためには、表層地盤の厚さや弾性波速度等を調査して把握することが重要である。

表層地盤の弾性波速度を把握する方法として、ボーリング調査の他には、地表で微動を観測して推定する方法等がある。特に、微動計を複数利用するアレイ観測により、振動数毎のせん断波速度を推定する手法も提案されている。

本検討では、常時微動観測と、人工的に発生させた振動による直線アレイ観測を用いて、表層地盤の特性を推定した。観測は、図 3.1-57 に示す常時微動観測 3 地点、直線アレイ観測 2 地点で実施した。

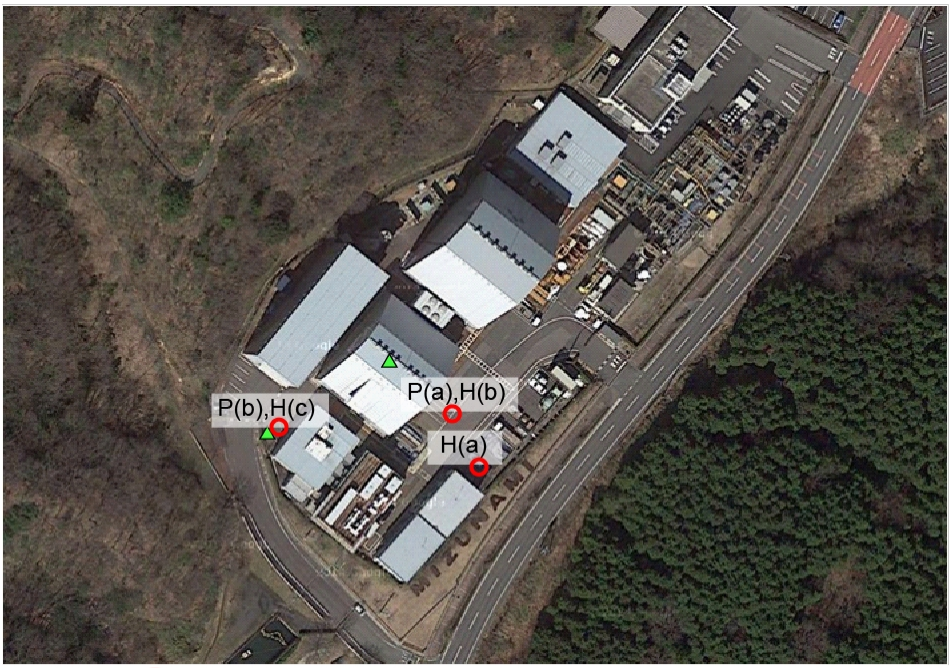


図 3.1-57　微動観測実施地点

(1) 常時微動観測による表層地盤の固有周期の推定

地表面の常時微動観測で得られた加速度記録から、水平動と上下動のフーリエスペクトルをそれぞれ算出して、それらの比として H/V スペクトルを評価する。フーリエスペクトルとは、観測加速度をさまざまな周波数の振動の集まりととらえ、周波数ごとの加速度の強さに分解して表したものである。このとき、表層地盤の固有周期で H/V スペクトルが卓越する。

換気立坑周辺の 3 地点で常時微動観測を実施し、その結果を分析して表層地盤の固有周期を推定した。換気立坑巻上機建屋脇での常時微動観測 H(c)の実施状況を、図 3.1-58 に示す。

常時微動観測で得られた加速度記録から評価した H/V スペクトルを、図 3.1-59 に示す。スペクトルのピークは周期 0.1s 付近に見られる。これより、表層地盤の固有周期は、約 0.1s と推定する。

図 3.1-58　常時微動観測状況、H(c)

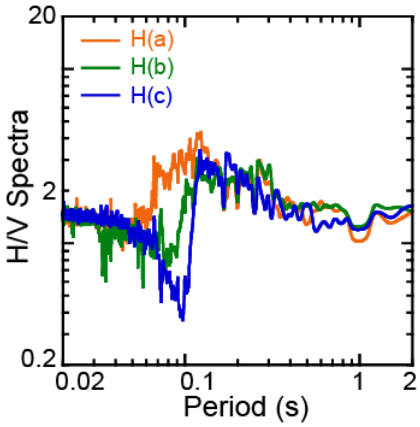


図 3.1-59　常時微動観測記録の H/V スペクトル

⑵ 直線アレイ観測による位相速度の推定

次に、表層地盤の位相速度を、直線アレイ観測を用いて評価する。

表面波の直線アレイ観測による位相速度の推定は、最尤法を用いており尤度関数である規準化された F-k パワースペクトルの算出手順は次のとおりである。

(1) 人工的に起振を行い、表面波を発生させる。このとき、図 3.1-60 に示すように、表面波（レイリー波）の伝播方向に平行に並べたセンサーにより地表での鉛直動を観測する。

(2) 観測された波形に対してスペクトル解析を行い、各センサー間のクロススペクトル $S_{ij}(f)$ を求める。（i, j はセンサーの番号、f は振動数）

(3) ある特定の振動数において、アレイセンサー間を伝播する表面波の波数 k を変数とした規準化した F-k パワースペクトルを次式で求める。

$$P(f,k) = \frac{1}{N^2}\sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} S_{ij}(f)\cdot\exp[-ik(x_j - x_i)]$$

ここに、

N : センサー個数、

x_i : センサーi の座標（直線配置であるため、$x_j - x_i$ はセンサー間の距離となる）

F-k スペクトルは図 3.1-61 に示す例のように得られるが、対象とする振動数 f および F-k スペクトルが卓越する波数 k から次式を用いて位相速度 $c(f)$ を振動数の関数として求める。

$$c(f) = \frac{2\pi f}{k}\left(\frac{rad/s}{rad/m}\right)$$

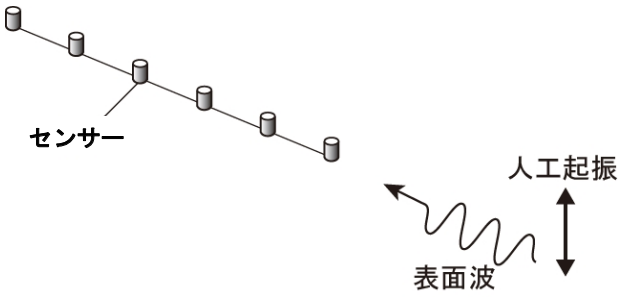


図 3.1-60　直線アレイ観測

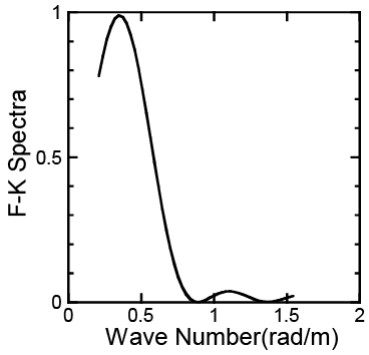


図 3.1-61　F-k スペクトルの例

微動アレイ観測の実施状況を図 3.1-62 に、直線アレイ観測記録より求めた位相速度を図 3.1-63 に示す。これより、表層地盤のせん断波速度は 300m/s 程度と推定できる。

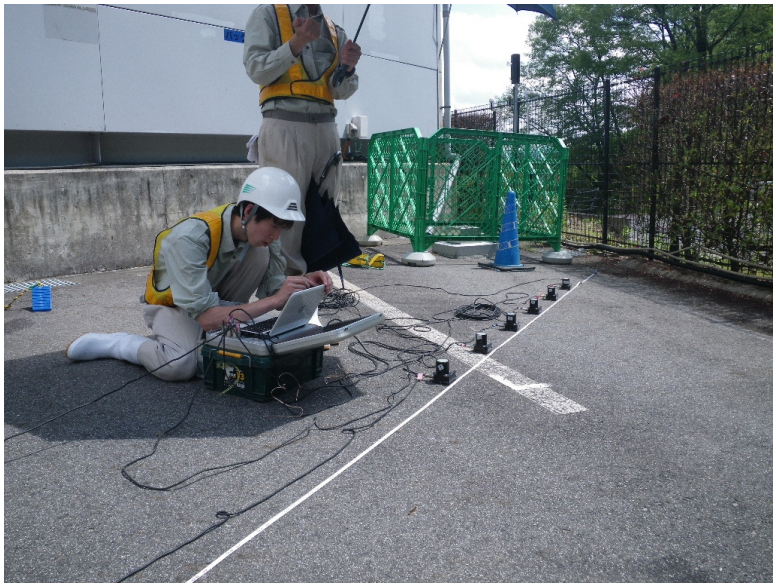


図 3.1-62　微動アレイ観測実施状況、P(b)

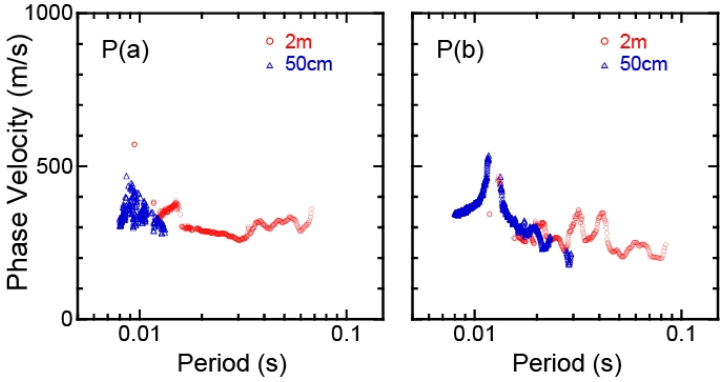


図 3.1-63　推定した位相速度

(3) 評価した表層地盤振動特性とその妥当性の確認

前述した微動観測に基づいて評価した表層地盤振動特性を、表 3.1-5 に示す。

表 3.1-5 表層地盤振動特性

項目	記号	値	備考
固有周期	T	0.1 s	
せん断波速度	Vs	300 m/s	
表層地盤厚さ	H	7.5 m	$\frac{TV_S}{4}=\frac{0.1\times300}{4}=7.5$

この特性を、地上からの調査研究段階で実施した耐震設計に用いた一次元重複反射解析の解析モデルに反映させて伝達関数を評価し、既往の地震観測記録と比較することで、妥当性を確認する。検討は、表 3.1-6 に示すように「3.2 耐震設計の妥当性検討」のオリジナルの解析モデルと、表層地盤の振動特性を変更した解析モデルの 2 ケースに対して伝達関数を評価して、地震観測記録から得られたスペクトル比と比較する。Case1 は、調査研究段階で実施した耐震設計に用いた重複反射解析の解析モデルであり、Case2 は表 3.1-5 に示した表層地盤特性を反映させたモデルである。地震観測記録は、表 3.1-7 に示す比較的地震の規模と最大加速度が大きい 4 地震を選定した（表 3.1-2 より抜粋)。

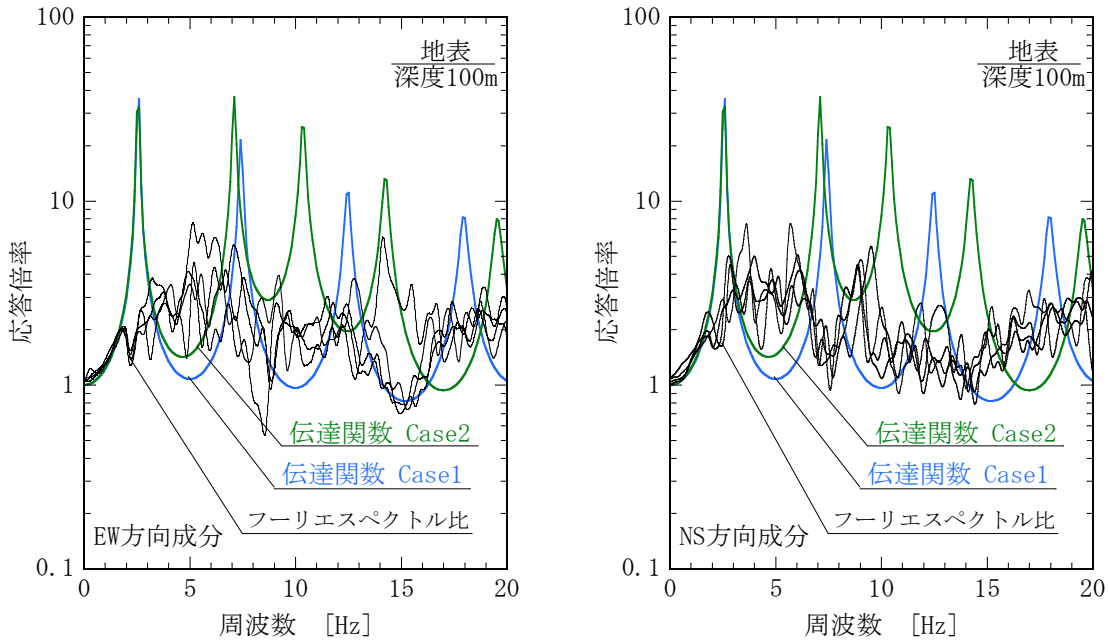
表 3.1-6 地盤解析モデル

No	地層レベル [m]		岩種	せん断波速度 [km/s]	
	上端	下端		Case 1 オリジナル	Case 2 本検討
1	0.0	7.5	砂岩・泥岩	1.0	0.3
2	7.5	15.0			1.0
3	15.0	63.2			1.0
4	63.2	79.2	礫岩	1.1	1.1
5	79.2	124.2	砂岩・泥岩	1.0	1.0
6	124.2	175.2	礫岩	1.1	1.1
7	175.2	－	花崗岩	2.3	2.3

表 3.1-7 検討に用いた地震観測記録−

No	発生日時	震源	瑞浪市の震度	最大加速度 [Gal]、方向		
				地表 A	GL-100m	GL-300m
5	2009.8.11 05:07	駿河湾 深さ 23km、M6.5	3	30.8 EW	14.7 NS	6.6 EW
8	2011.3.12 03:59	長野県北部 深さ 8km、M6.7	2	4.8 NS	2.4 NS	1.0 NS
9	2011.3.15 22:31	静岡県東部 深さ 14km、M6.4	2	9.1 EW	4.2 NS	1.8 NS
12	2011.12.14 13:01	岐阜県美濃東部 深さ 49km、M5.1	3	66.6 EW	39.6 EW	28.6 EW

深度 100m を基準とした地表の伝達関数を、地震観測記録から得られたフーリエスペクトル比と比較して図 3.1-64 に示す。表層地盤の振動特性を変更した Case2 の伝達関数は、7Hz 付近のピークが低周波数側に移ると共に、表層地盤の固有周期の 10Hz 付近に新たにピークが現れており、特に NS 方向成分で、観測記録との整合性が改善した。これにより、表層地盤特性の推定結果の妥当性を確認した。



(1) EW 方向　　(2) NS 方向

図 3.1-64 伝達関数とフーリエスペクトル比

3.1.6 地震観測記録の分析

2008 年から 2013 年までに観測された 15 地震を対象に、地震観測記録を分析した。対象とした地震の、震央距離と震源の深さの位置関係を、図 3.1-65 に示す。

地震観測記録の分析では、観測加速度の時刻歴からフーリエスペクトルを算出して、観測地震動の周波数特性を把握する。同じ地震の記録で観測地点の深度が異なるフーリエスペクトルの比を算出することで、深度間の波動伝播特性を評価することができる。地盤が水平成層で、地震動が鉛直上昇波の場合には、このフーリエスペクトル比は一次元重複反射解析で得られる伝達関数と対応することとなる。しかし、実際の観測では、震源と観測点の位置関係から、観測される加速度は鉛直上昇波によるものだけではなく、斜め上昇波や反射や屈折をした波動、表面波などが含まれることとなる。これらを定性的に分析し、地下深部での地震動の伝播について検討する。

まずそれぞれの地震の加速度観測記録を対象に、方向毎にフーリエスペクトルを算出する。そして、地震による地震動伝播の違いを調べるために、深度 300m（換気立坑連接部）のフーリエスペクトルを基準として、地表面と深度 100m のフーリエスペクトルの比を算出し、地震動の増幅特性を把握する。なお、地下の加速度計は、深度 100m と 300m、500m には 3 セット設置されているが、横坑との位置関係を考慮して横坑の影響が最も少ないと考えられる加速度計（100-2、300-3、500-3）の記録を、検討に用いることとする。また、フーリエスペクトルを算出する際には、0.5Hz の Parzen window[3] で平滑化する。

フーリエスペクトルとスペクトル比を、地震毎に図 3.1-66 から図 3.1-94 に示す。なお、フーリエスペクトル比の水平方向成分には、「3.2 耐震設計の妥当性検討」の一次元波動伝播解析で得られた伝達関数を、併せて記載する。また、フーリエスペクトルは、加速度観測記録を「3.1.3 地震観測記録の補正」の方法によって方位を補正したデータに基づいて算出した。

フーリエスペクトル比は、震央距離が短い地震ほど、ピークが明瞭に表れていて、周波数によるスペクトル比の変化が大きい傾向が見られる。例えば、2009 年岐阜県美濃東部の地震（δ 4km）や 2009 年愛知県西部の地震（δ 33km）では、応答倍率のピークが 30 を超えているが、1 から 2 程度の周波数帯もある。一方、震央距離が長い 2011 年三陸沖の地震（δ 587km）や同じく茨城県沖の地震（δ 471km）などでは、周波数による応答倍率の変化は小さく、ピークの値も小さい。

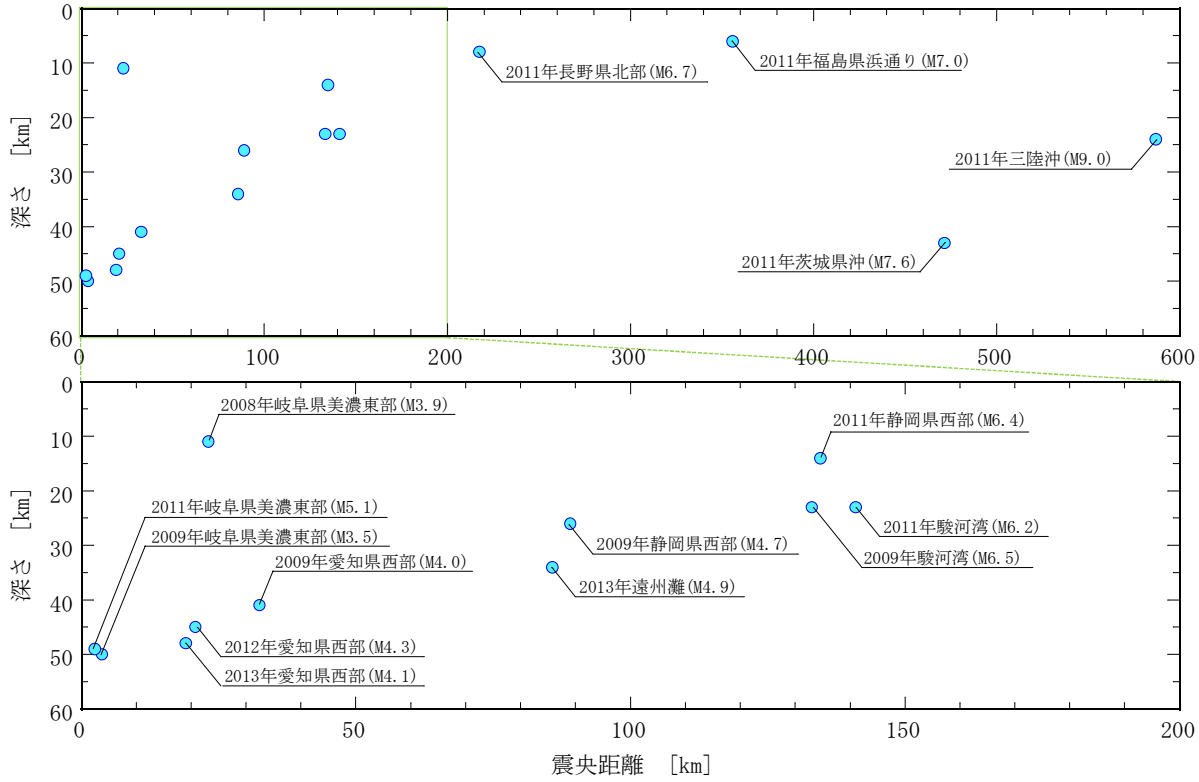
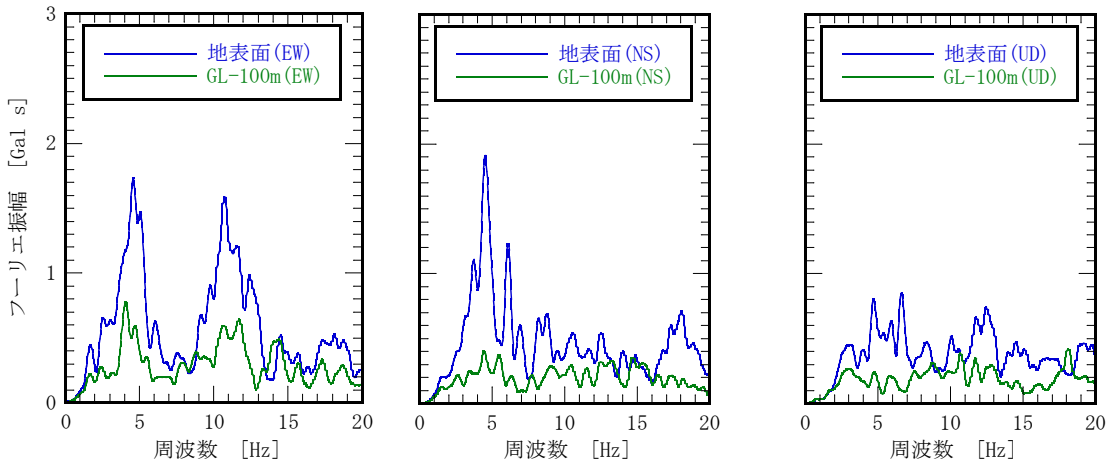


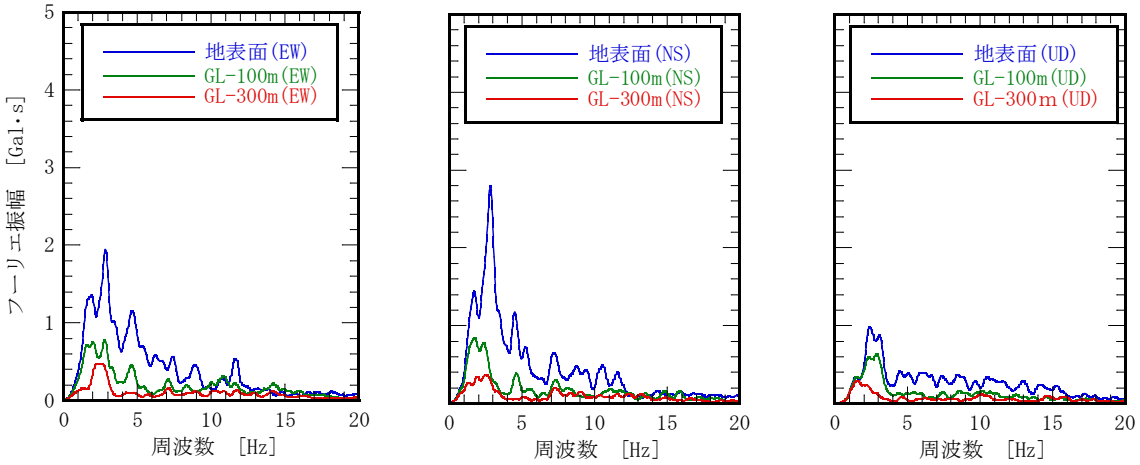
図 3.1-65　観測された地震の震央距離と震源の深さの位置関係



(1)　E-W 方向　　(2)　N-S 方向　　(3)　U-D 方向

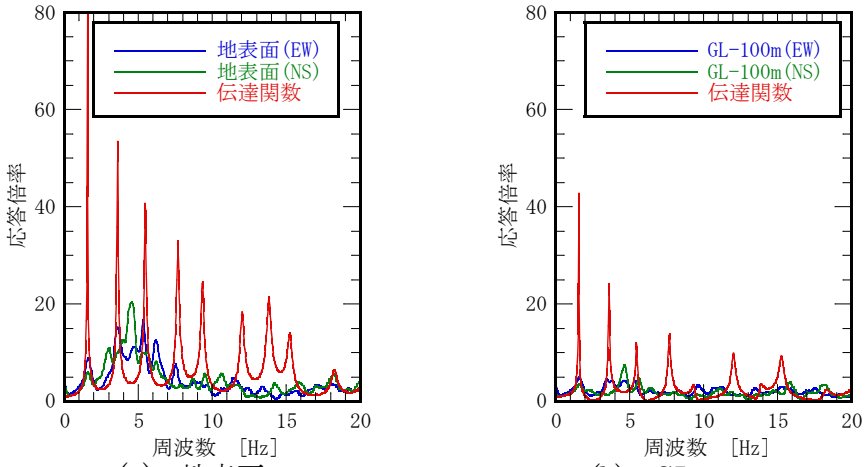
図 3.1-66　フーリエスペクトル（2008 年岐阜県美濃東部、M3.9、δ 23km）

（δは瑞浪超深地層研究所から震源地までの水平距離を示す。）



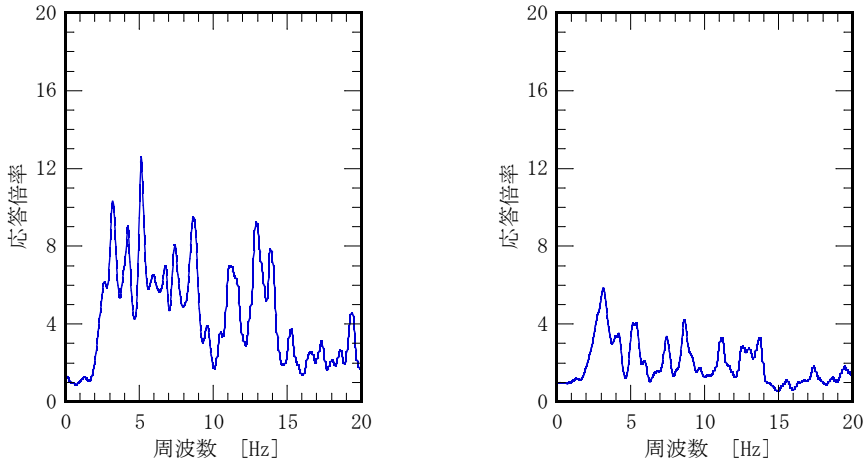
(1) E-W 方向　(2) N-S 方向　(3) U-D 方向

図 3.1-67 フーリエスペクトル（2009 年静岡県西部、M4.7）



(a) 地表面　(b) GL-100m

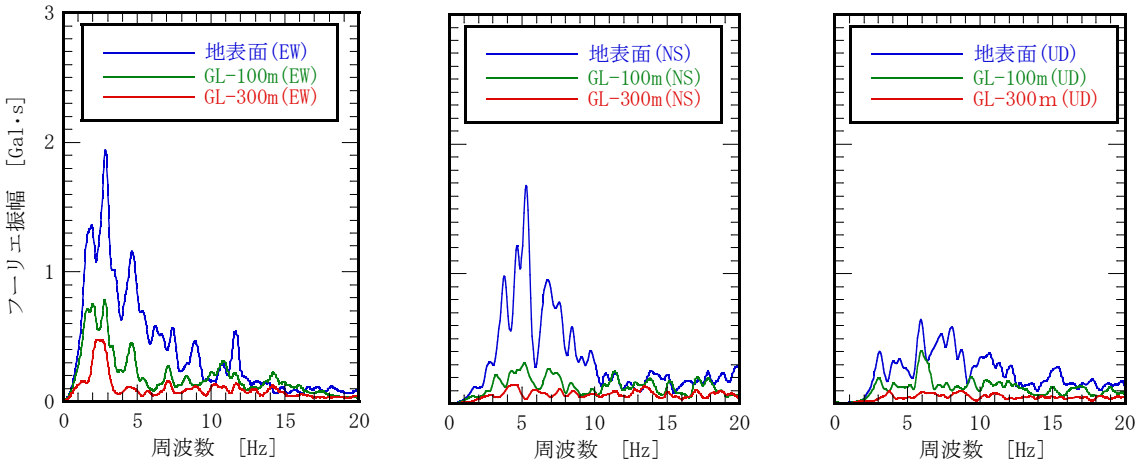
(1) 水平方向



(a) 地表面　(b) GL-100m

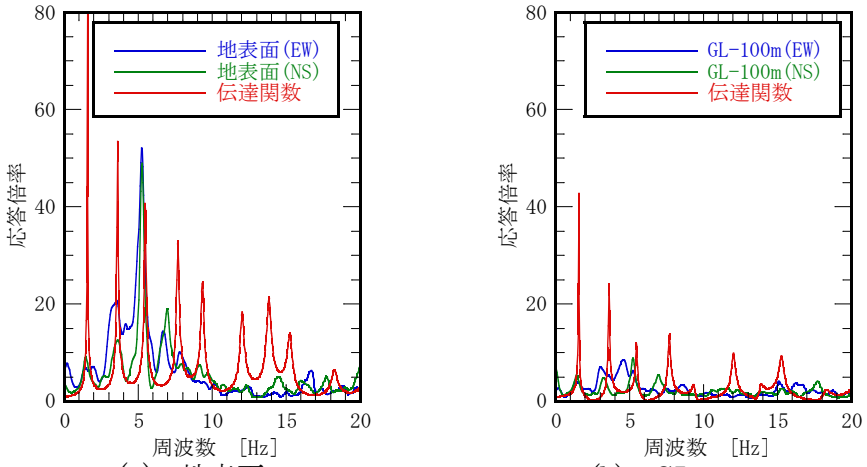
(2) 上下方向

図 3.1-68 スペクトル比（2009 年静岡県西部、GL-300m 基準、δ 89km）



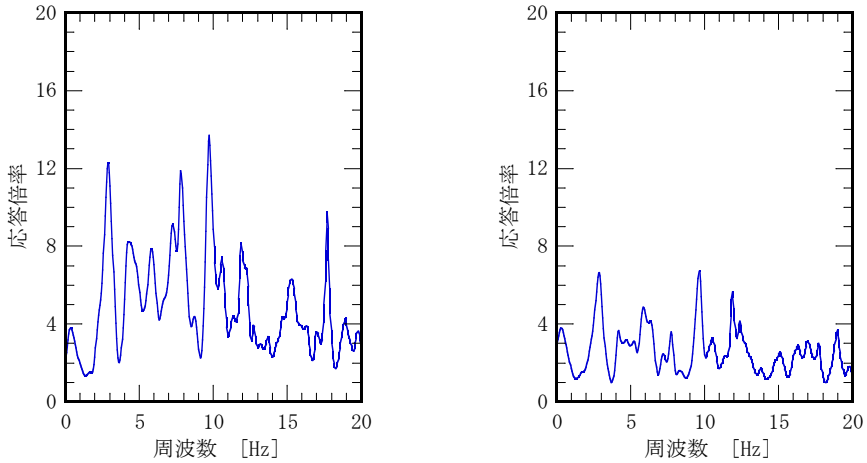
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-69 フーリエスペクトル（2009 年岐阜県美濃東部、M3.5）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

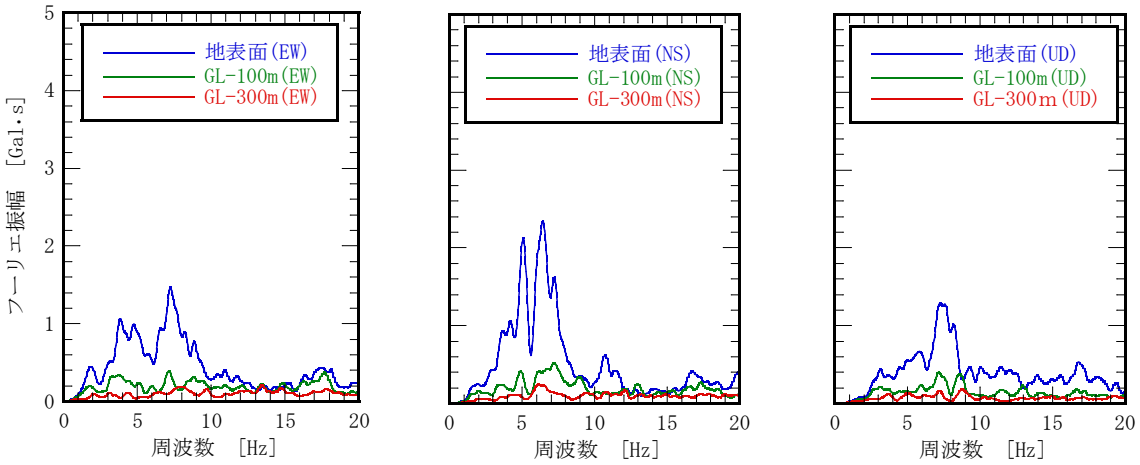
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

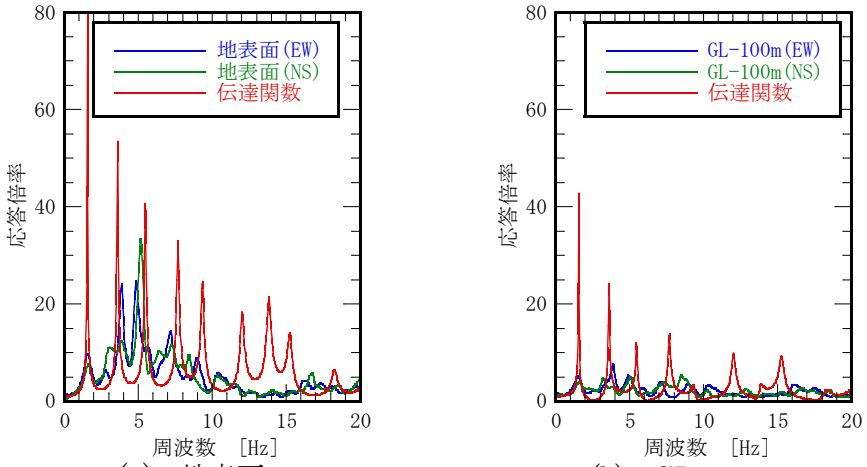
(2) 上下方向

図 3.1-70 スペクトル比（2009 年岐阜県美濃東部、GL-300m 基準、δ 4km）



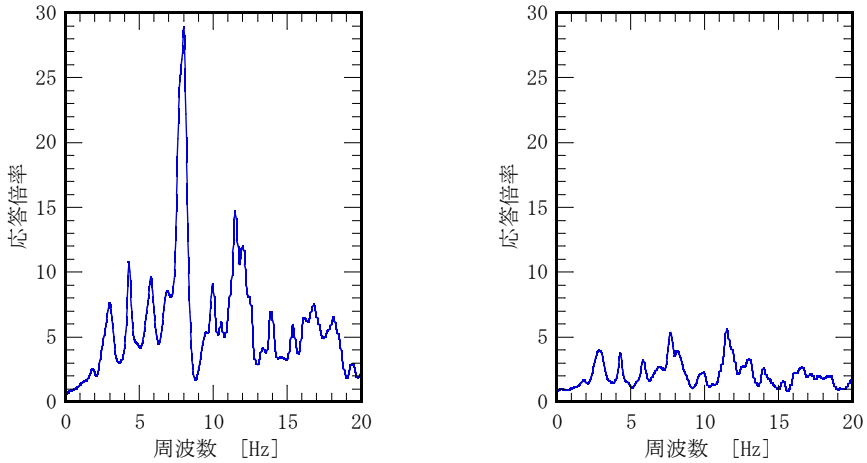
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-71 フーリエスペクトル（2009 年愛知県西部、M4.0）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

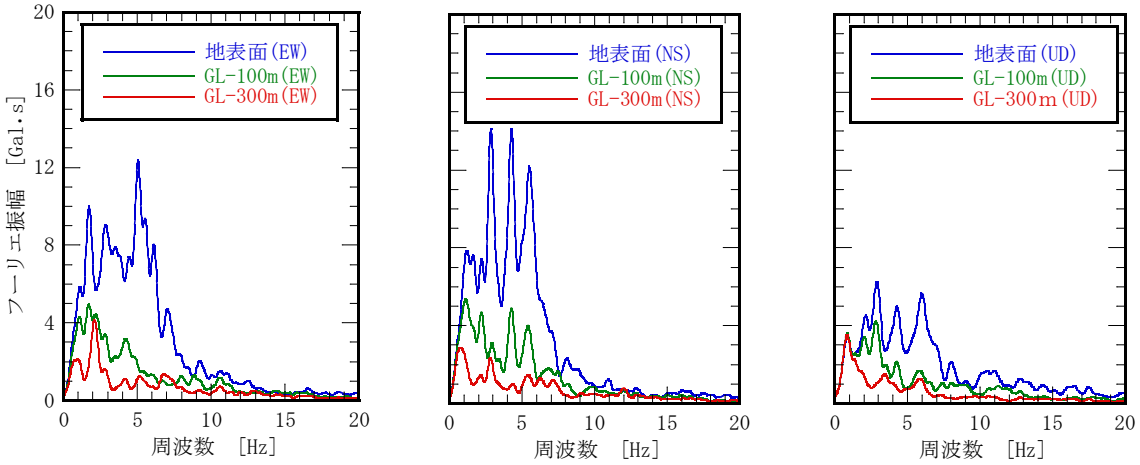
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

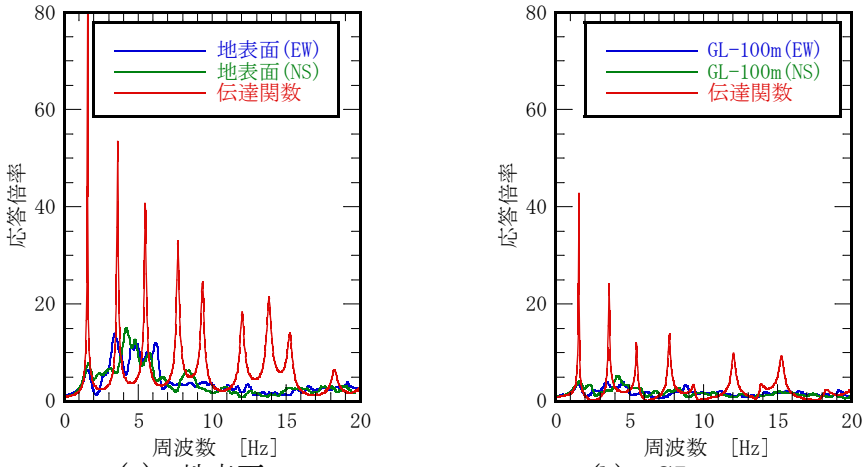
(2) 上下方向

図 3.1-72 スペクトル比（2009 年愛知県西部、GL-300m 基準、δ 33km）



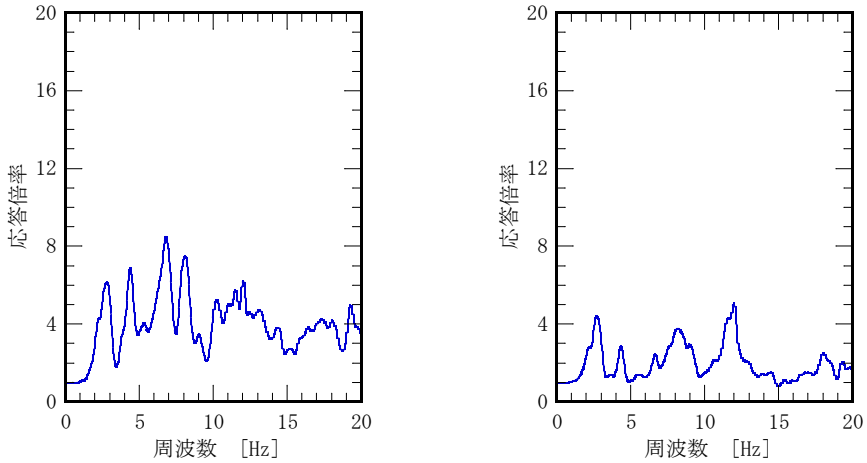
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-73 フーリエスペクトル（2009 年駿河湾、M6.5）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

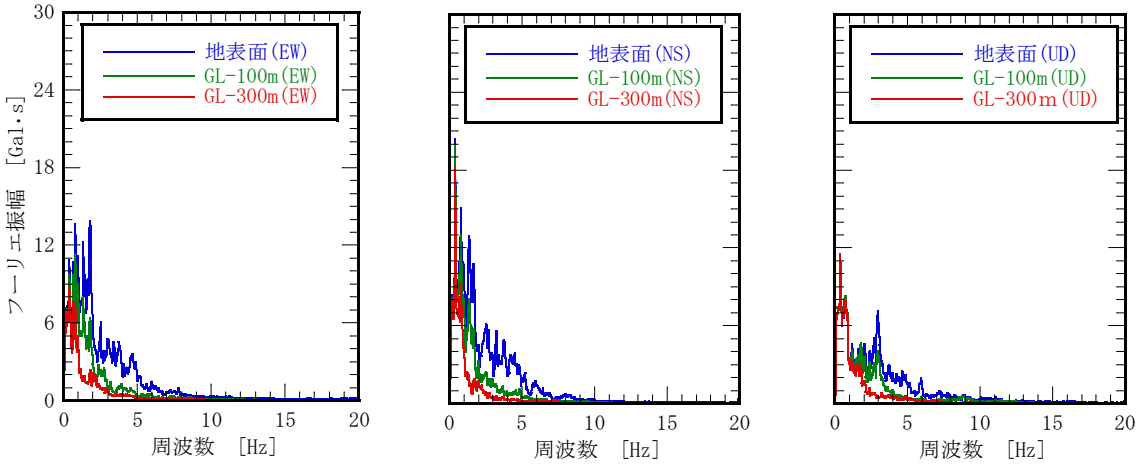
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

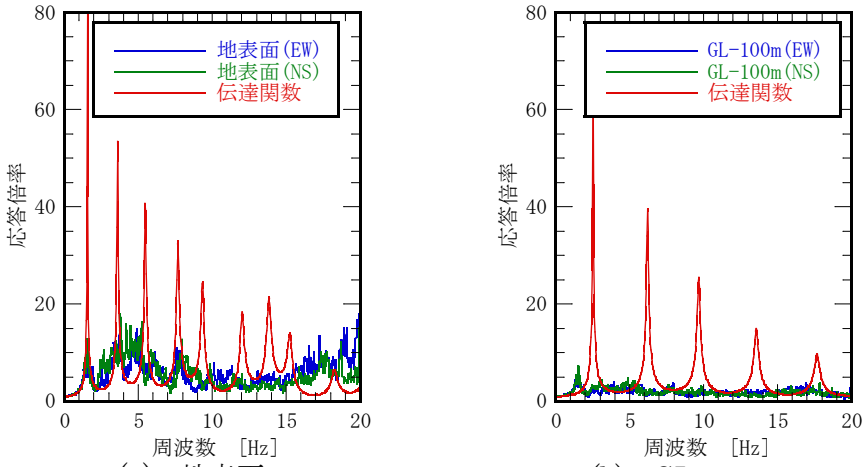
(2) 上下方向

図 3.1-74 スペクトル比（2009 年駿河湾、GL-300m 基準、δ 133km）



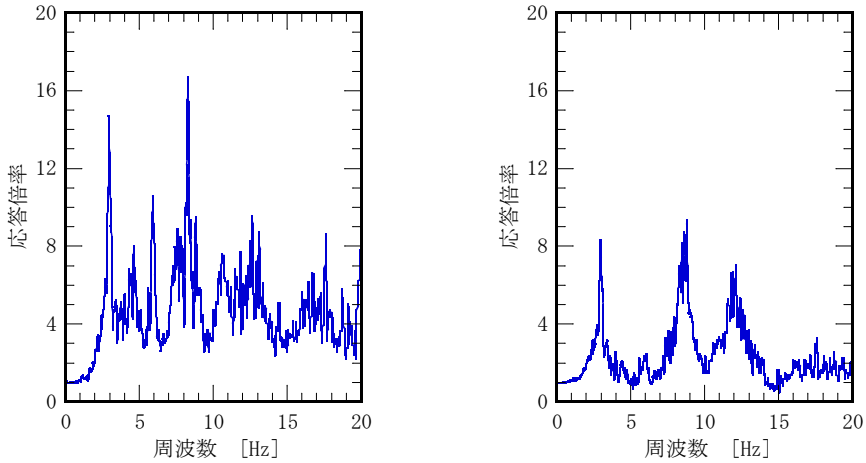
(1) E-W 方向　(2) N-S 方向　(3) U-D 方向

図 3.1-75 フーリエスペクトル（2011 年三陸沖、M9.0）



(a) 地表面　(b) GL-100m

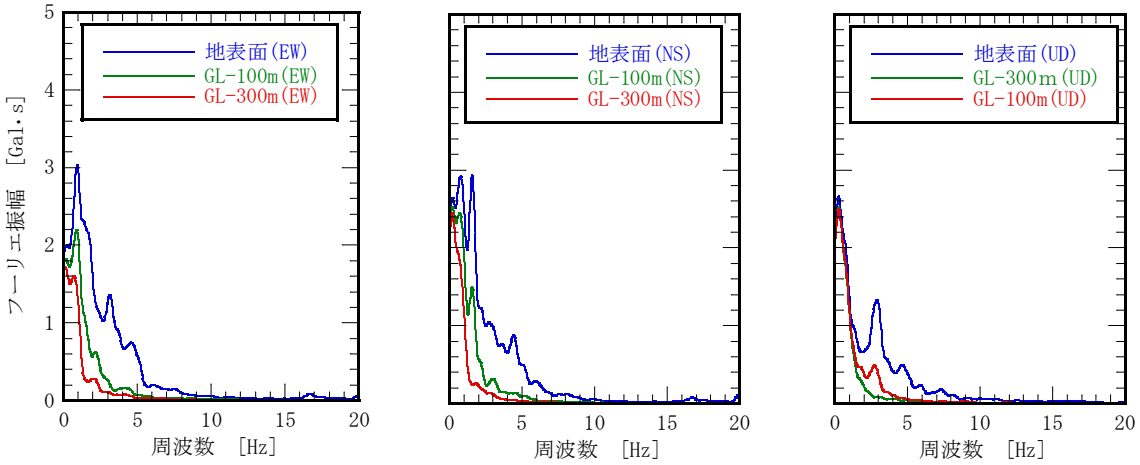
(1) 水平方向



(a) 地表面　(b) GL-100m

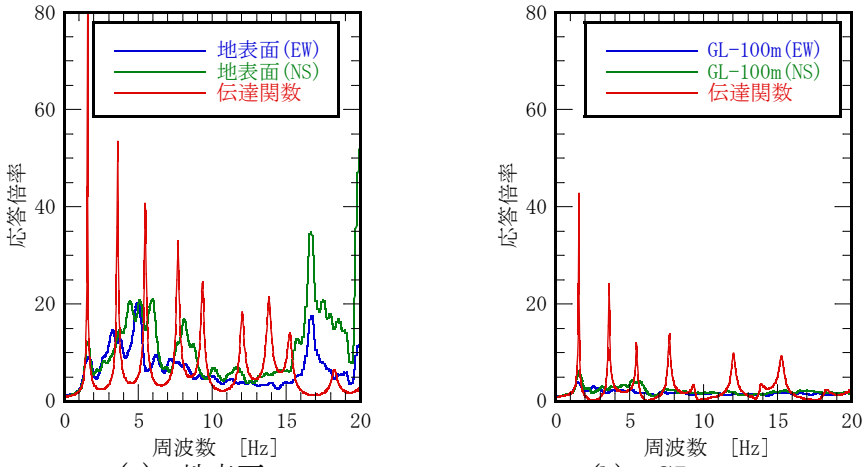
(2) 上下方向

図 3.1-76 スペクトル比（2011 年三陸沖、GL-300m 基準、δ 587km）



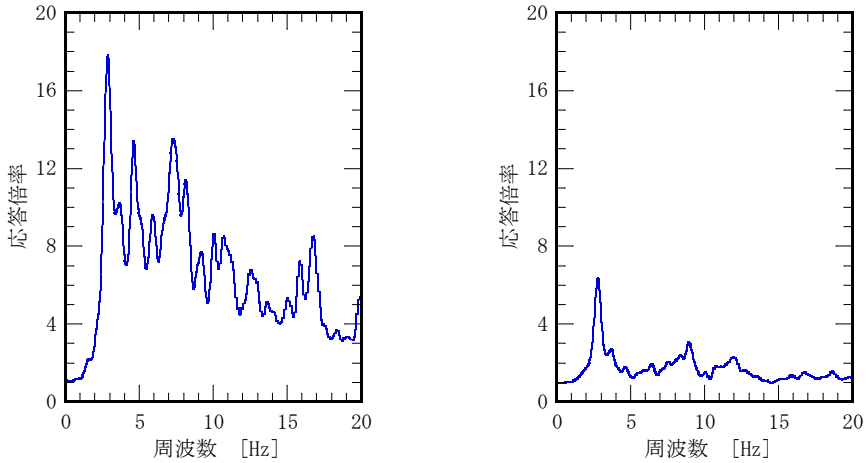
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-77 フーリエスペクトル（2011 年茨城県沖、M7.6）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

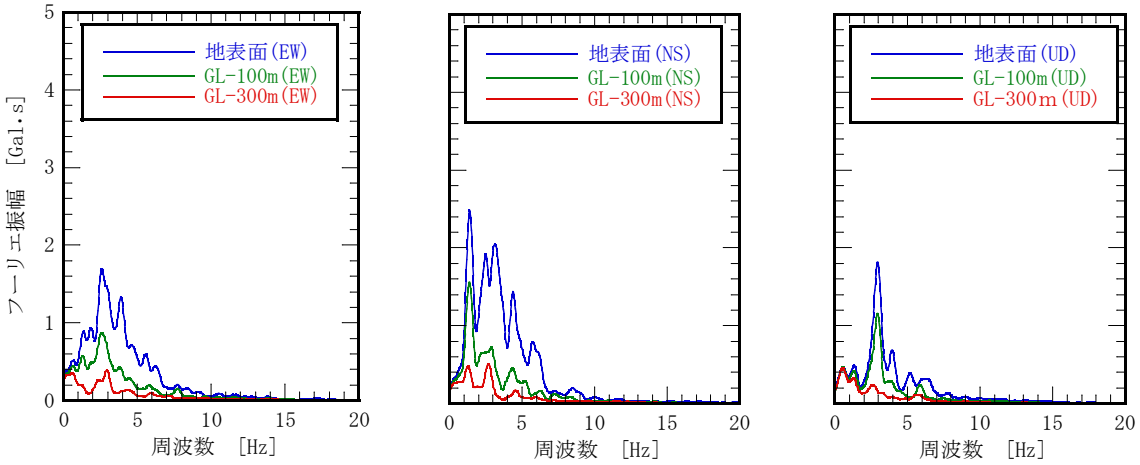
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

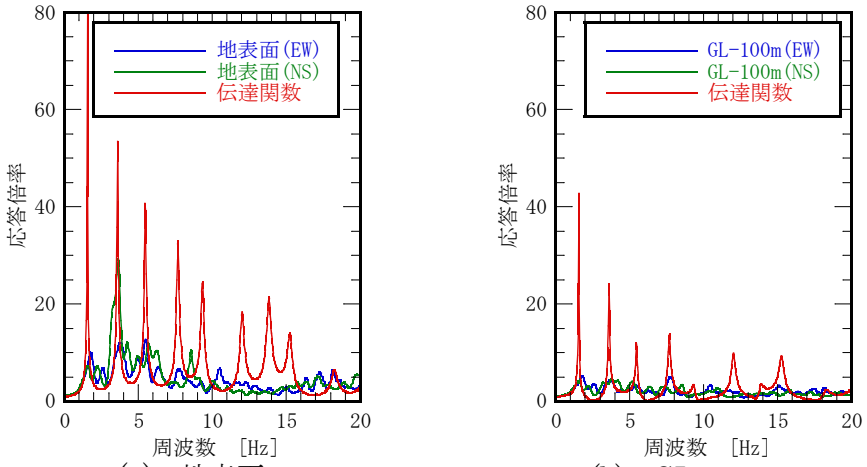
(2) 上下方向

図 3.1-78 スペクトル比（2011 年茨城県沖、GL-300m 基準、δ 471km）



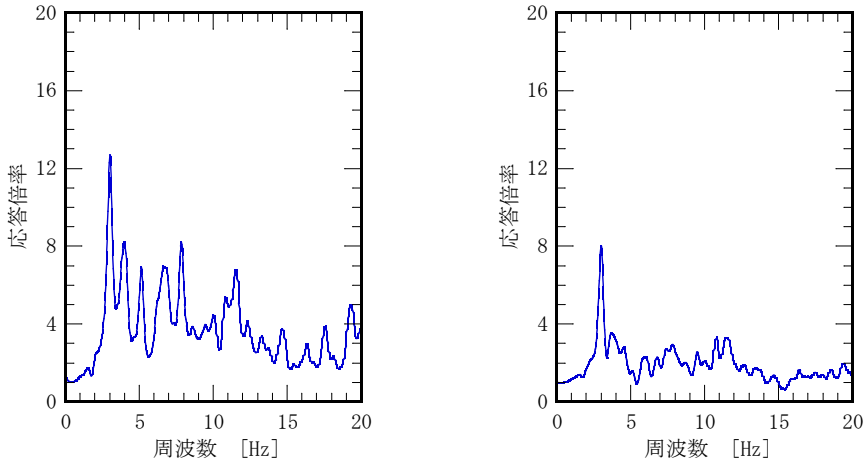
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-79 フーリエスペクトル（2011 年長野県北部、M6.7）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

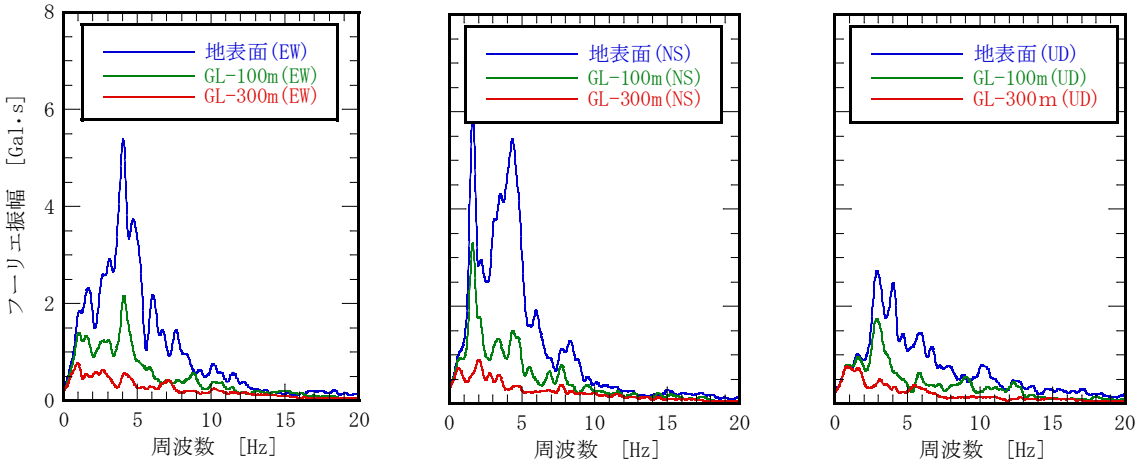
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

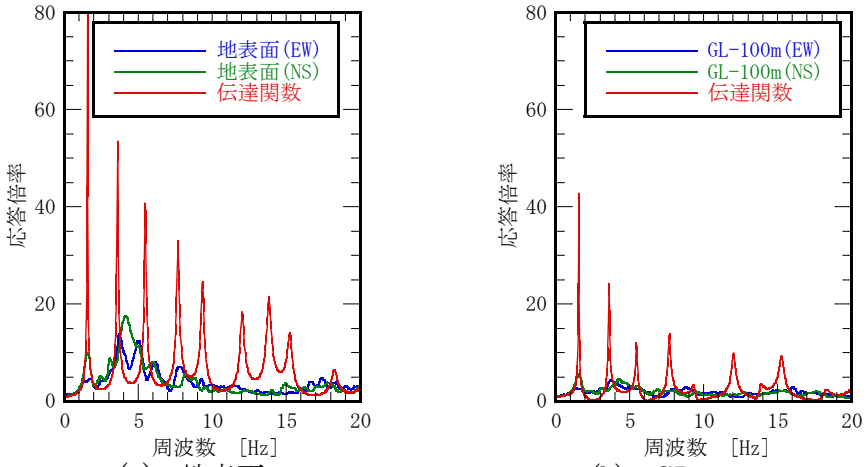
(2) 上下方向

図 3.1-80 スペクトル比（2011 年長野県北部、GL-300m 基準、δ217km）



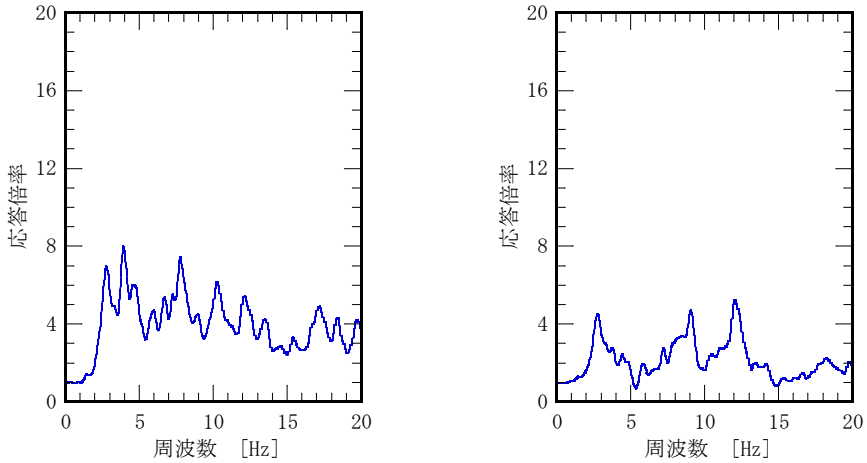
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-81 フーリエスペクトル（2011 年静岡県東部、M6.4）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

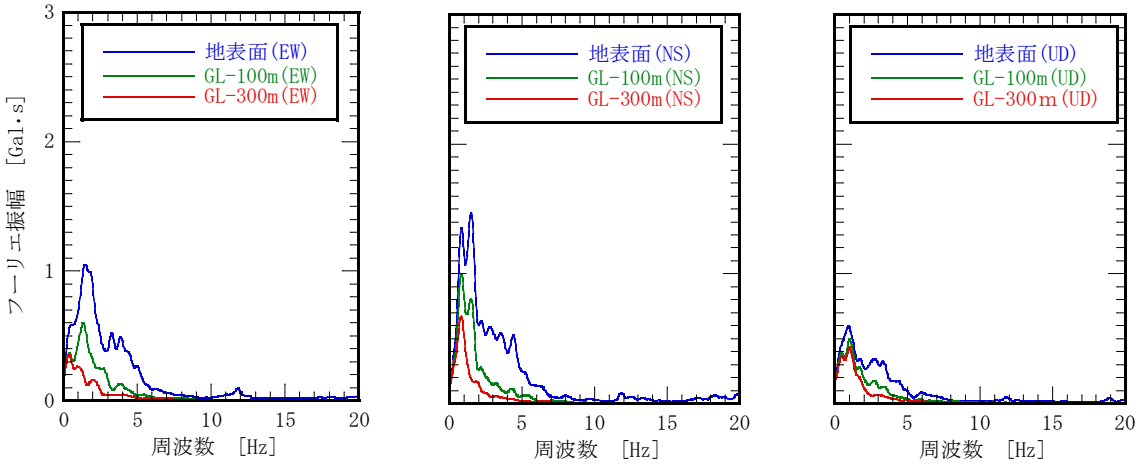
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

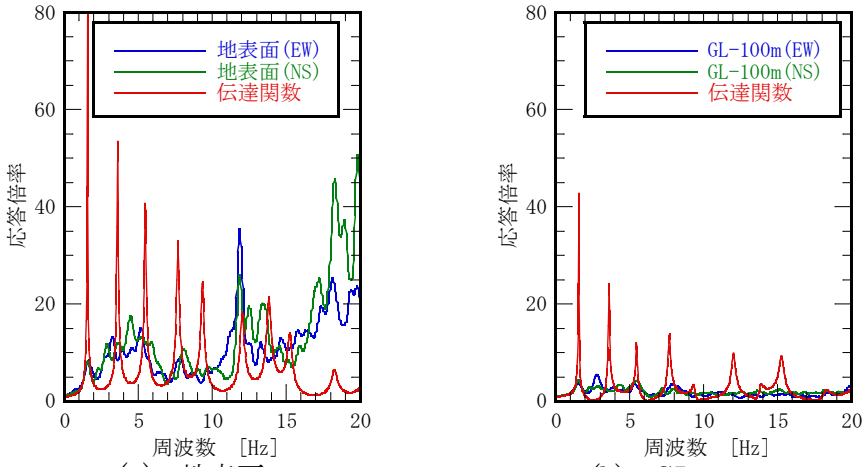
(2) 上下方向

図 3.1-82 スペクトル比（2011 年静岡県東部、GL-300m 基準、δ 135km）



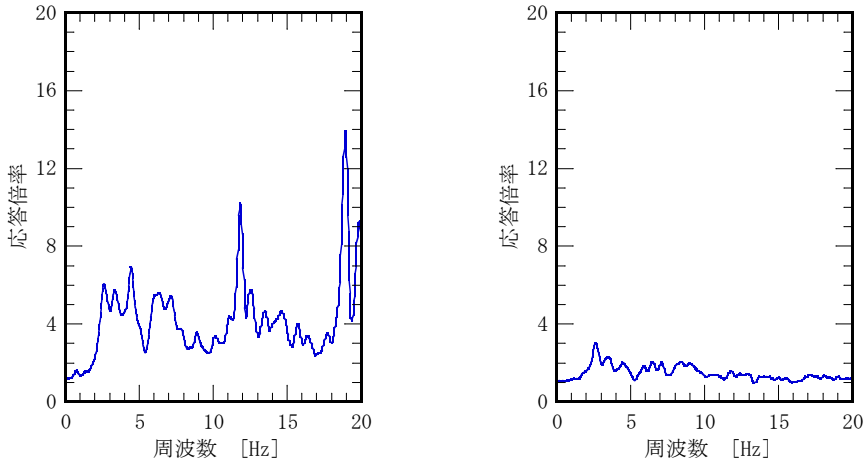
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-83 フーリエスペクトル（2011 年福島県浜通り、M7.0）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

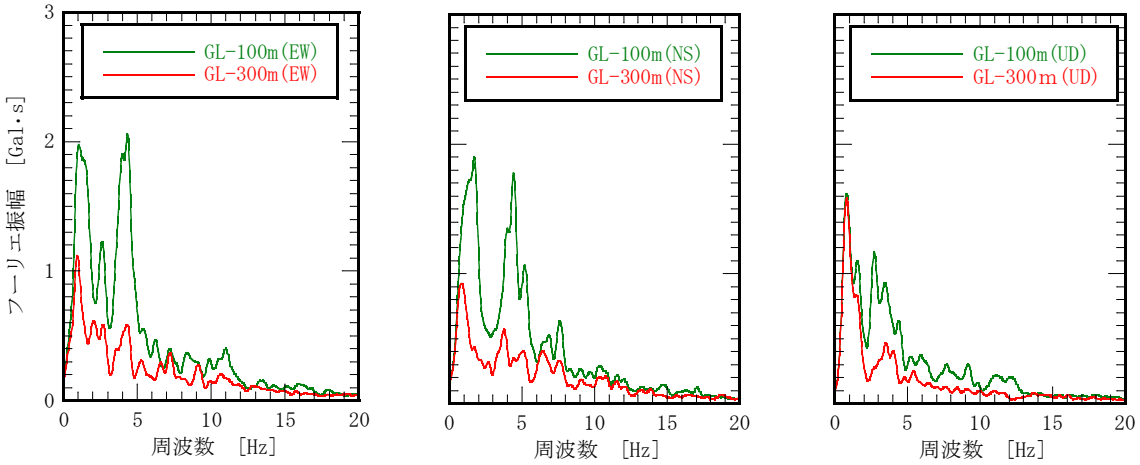
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

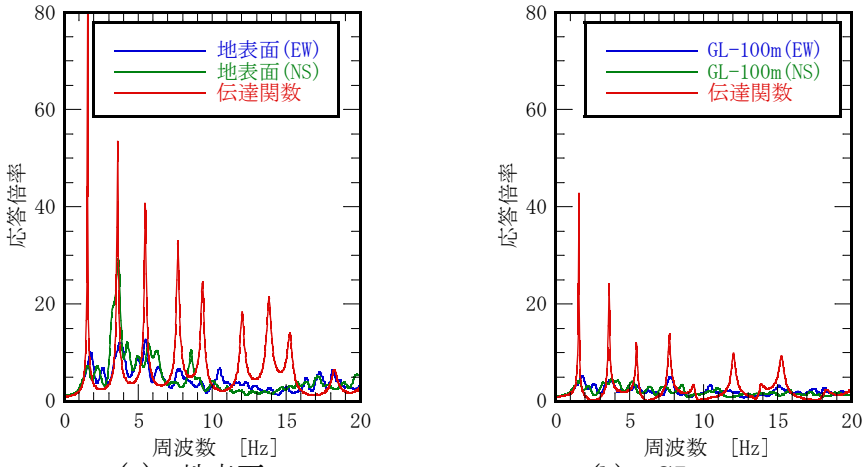
(2) 上下方向

図 3.1-84 スペクトル比（2011 年福島県浜通り、GL-300m 基準、δ356km）



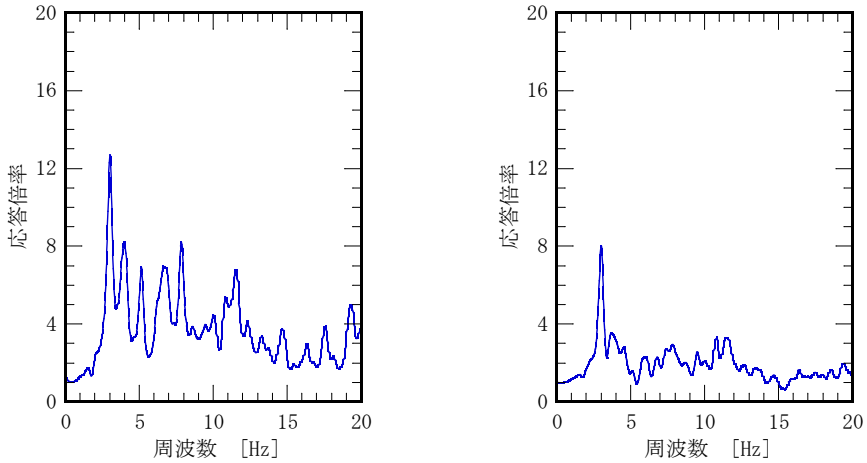
(1) E-W 方向　(2) N-S 方向　(3) U-D 方向

図 3.1-85 フーリエスペクトル（2011 年駿河湾、M6.2）



(a) 地表面　(b) GL-100m

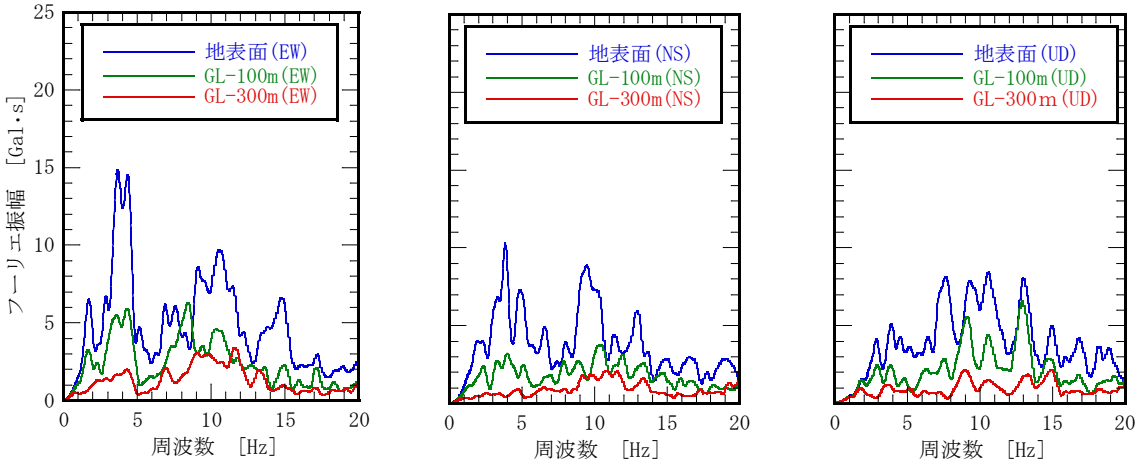
(1) 水平方向



(a) 地表面　(b) GL-100m

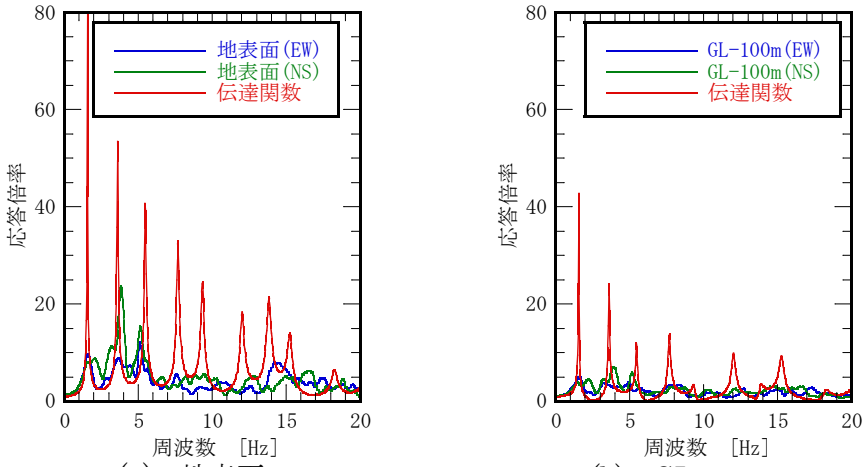
(2) 上下方向

図 3.1-86 スペクトル比（2011 年駿河湾、GL-300m 基準、δ141km）



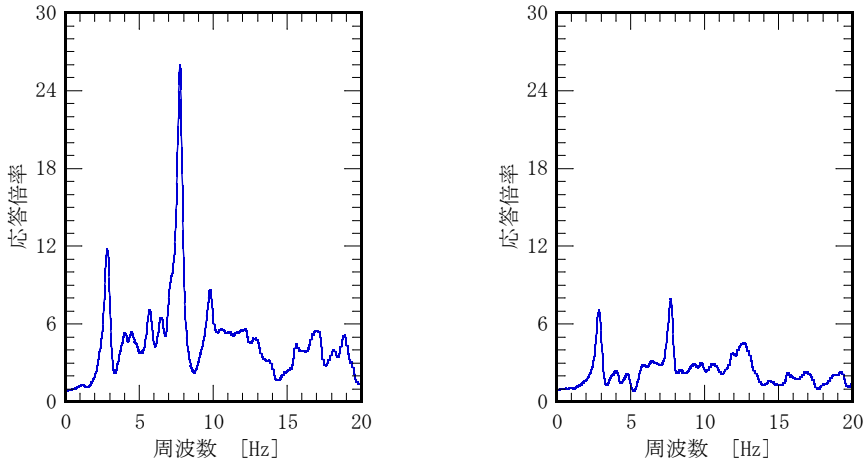
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-87 フーリエスペクトル（2011 年岐阜県美濃東部、M5.1）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

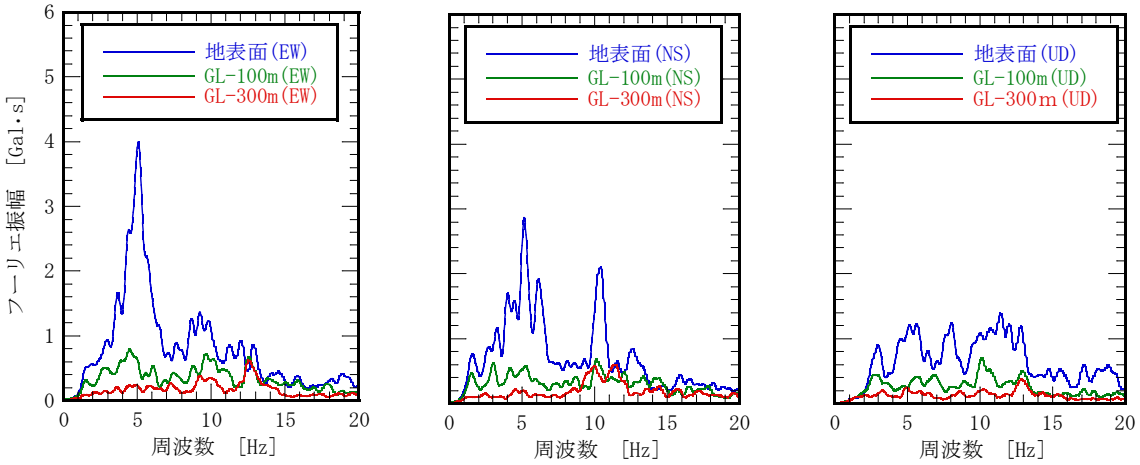
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

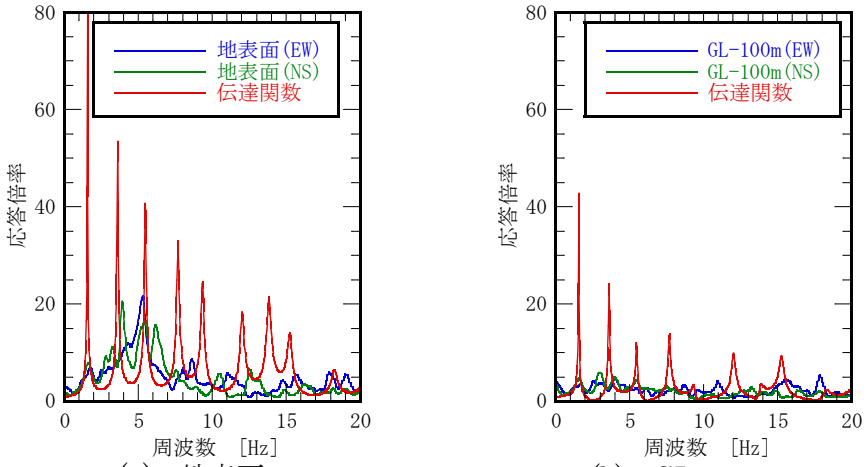
(2) 上下方向

図 3.1-88 スペクトル比（2011 年岐阜県美濃東部、GL-300m 基準、δ2km）



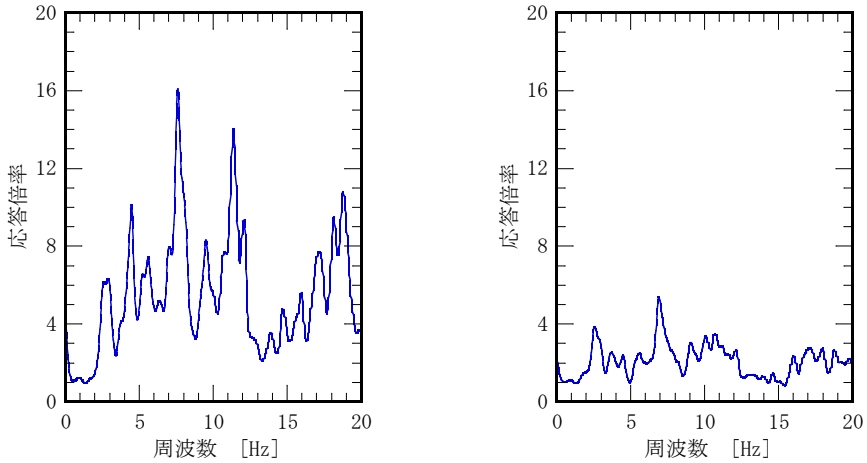
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-89 フーリエスペクトル（2012 年愛知県西部、M4.3）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

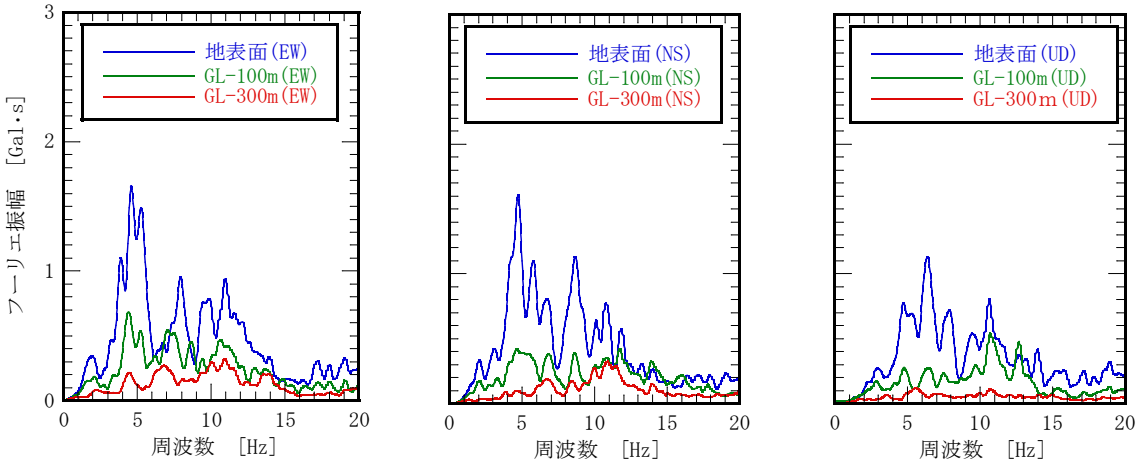
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

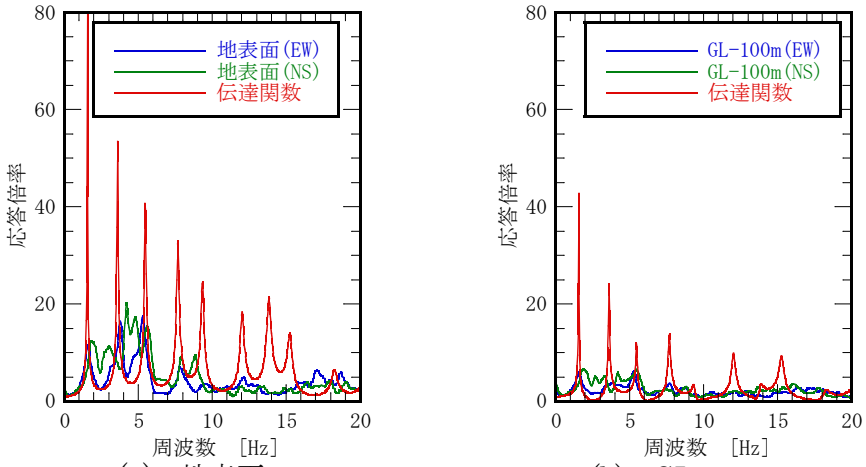
(2) 上下方向

図 3.1-90 スペクトル比（2012 年愛知県西部、GL-300m 基準、δ21km）



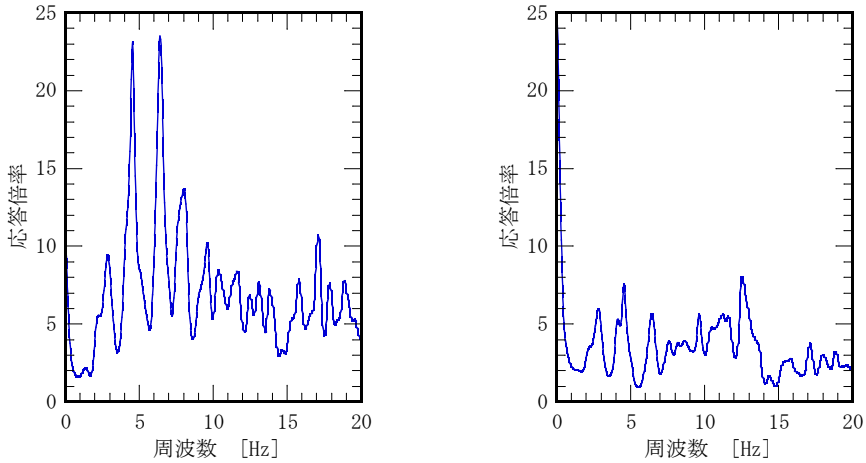
(1) E-W 方向　　(2) N-S 方向　　(3) U-D 方向

図 3.1-91 フーリエスペクトル（2013 年愛知県西部、M4.1）



(a) 地表面　　(b) GL-100m

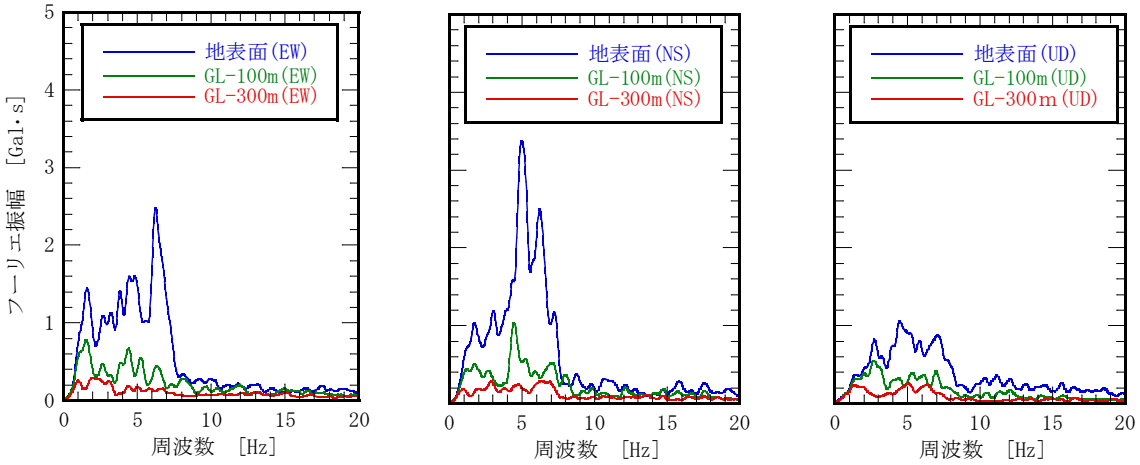
(1) 水平方向



(a) 地表面　　(b) GL-100m

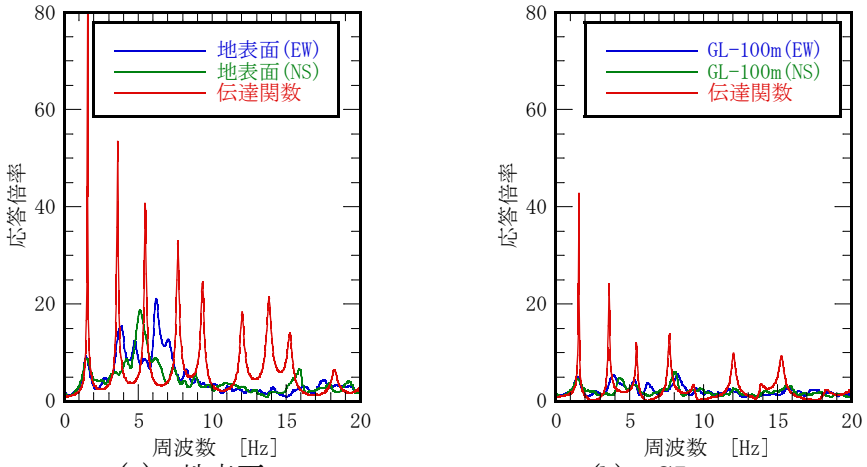
(2) 上下方向

図 3.1-92 スペクトル比（2013 年愛知県西部、GL-300m 基準、δ19km）



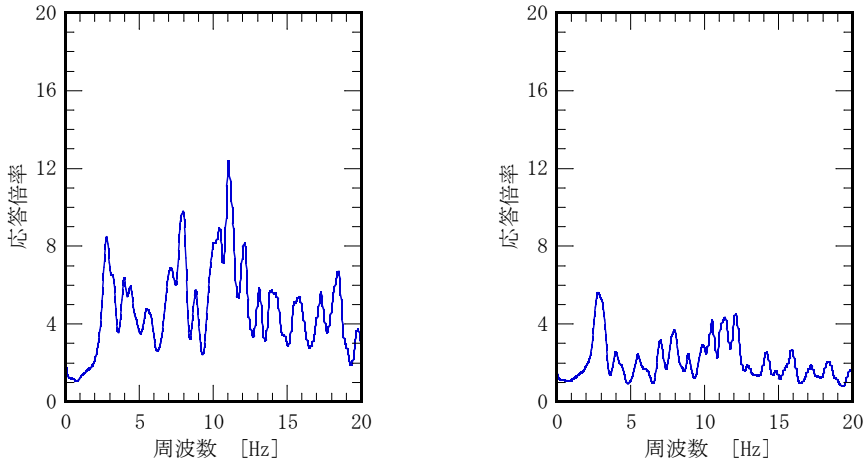
(1) E-W 方向　(2) N-S 方向　(3) U-D 方向

図 3.1-93 フーリエスペクトル（2013 年遠州灘、M4.9）



(a) 地表面　(b) GL-100m

(1) 水平方向



(a) 地表面　(b) GL-100m

(2) 上下方向

図 3.1-94 スペクトル比（2013 年遠州灘、GL-300m 基準、δ85.7km）

次に、フーリエスペクトル比の最大値に着目して、震央距離との関係を図 3.1-95 に示す。地表面の場合は、震央距離が 200km 以下の地震では震央距離が短いほどフーリエスペクトル比の最大値も大きくなる傾向が認められる。一方、震央距離が 200km 以上の震源が遠方の地震では、震央距離の違いによる傾向は認められないが、全体的に水平方向成分のスペクトル比が大きい。深度 100m の場合には、特徴的な傾向が認められない。

これらの地震を震央距離によって次のような 3 種類に分類して、震央距離と地震動伝播現象の観点から、観測記録を分析する。それぞれの地震の地震動伝播は、定性的に次のような特徴を持つものと考えられる。

1) 震源が直下の地震

震央距離が 10km 以下と非常に短く、震源が観測地点の直下にある地震では、地震動が観測地点の直下からまっすぐに上昇してくることとなり、波動伝播現象としては比較的単純で、耐震設計の地震動評価の際に一般的に用いられている一次元重複反射理論に基づく波動伝播との整合性が高いものと考えられる。したがって、観測記録から地層構成や弾性波速度などを高い精度で推定することができるものと考えられる。

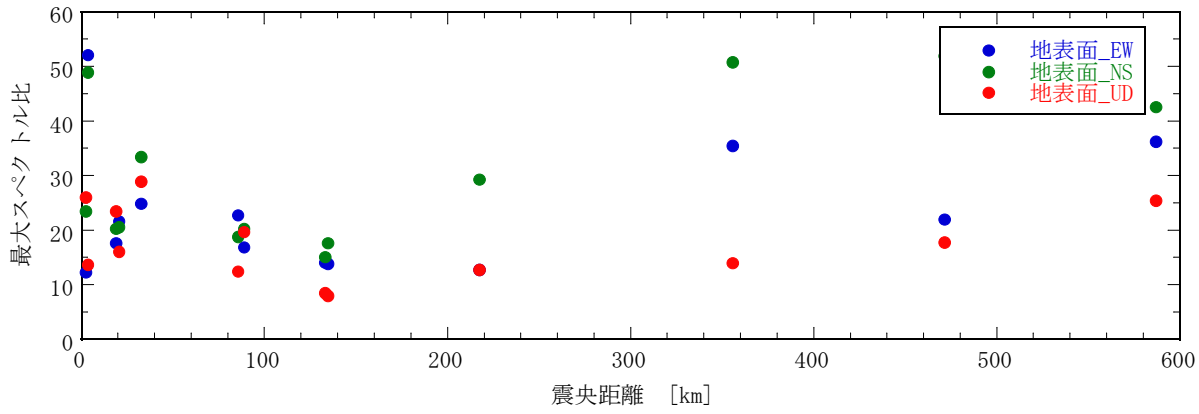
2) 震源が近距離の地震

震央距離が 10～50km 程度と、直下ではないが比較的近い地震では、観測地点に斜め下方から入射する直達の波動が、観測地震動に支配的であるものと考えられる。観測記録から、この斜め入射の状況を把握し、その影響について検討する。

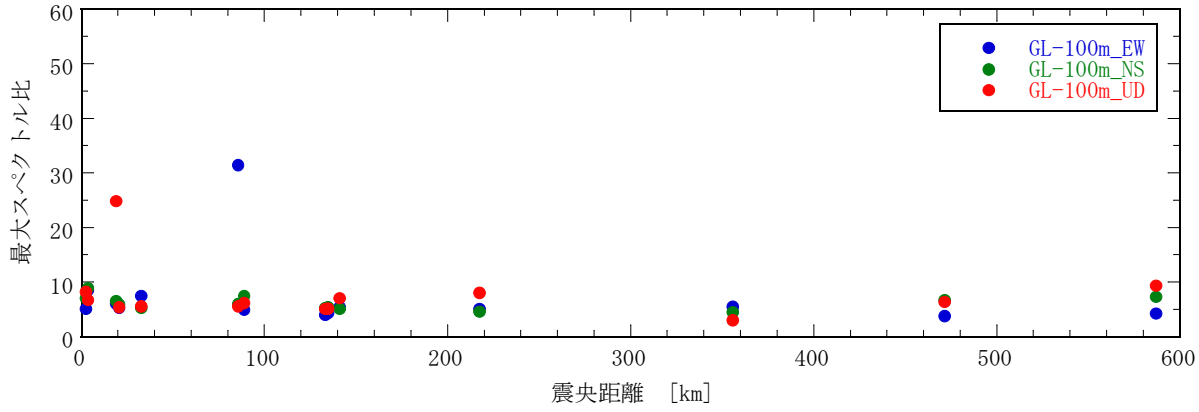
3) 震源が遠方の地震

震源の深さに比べて震央距離が長い遠方の地震では、直達の実体波は拡散などにより減衰し、その他の直達ではない実体波や反射波、表面波が重なり合って観測されるものと考えられる。特に、震央距離が数百 km 以上の巨大地震では、表面波が支配的であるとされている。

以下に、既往の観測記録を用いて、上記のような地震動伝播の特徴を分析する。



(1) 地表面／GL-300m



(2) GL-100m／GL-300m

図 3.1-95 フーリエスペクトル比の最大値と震央距離との関係

(4) 震源が観測地点の直下の地震

震源が観測地点のほぼ直下にある地震のうち、地震の規模が最も大きい 2011 年岐阜県美濃東部の地震の観測記録を用いて検討する。

検討は、観測された加速度の時刻歴データのうち EW 方向成分について、それぞれの深度の観測加速度の時刻歴からフーリエ変換を用いてフーリエスペクトルを評価して、深度の異なるフーリエスペクトル同士からフーリエスペクトル比を算出するとともに、位相差にも着目して、深度間の地震動の伝播特性を把握する。また、設定したモデル地盤の理論解とも比較して、波動伝播特性の特徴を確認する。スペクトルの比較は、深度 100m と深度 300m の観測記録を基準として、地表 A 加速度計の観測記録との間で評価した。

深度 300m と地表とのスペクトル比を図 3.1-96 に、深度 100m と地表とのスペクトル比を図 3.1-97 に示す。深度 300m の方は、設定した地盤モデルの理論曲線に対して、比較的良く対応した結果となっている。位相差では、周期 0.4 秒前後で観測記録に反転が見られるが、この原因は不明である。

深度 100m では、深度 300m ほど理論と観測の良い対応が見られていないが、0.2s～1s 前後とそこから長周期側では、良い一致が見られる。

これらのことからも、地震動が直下からまっすぐに上昇してくる単純な波動伝播現象が卓越しており、一次元重複反射理論に基づく波動伝播との整合性が高いことが確認できた。

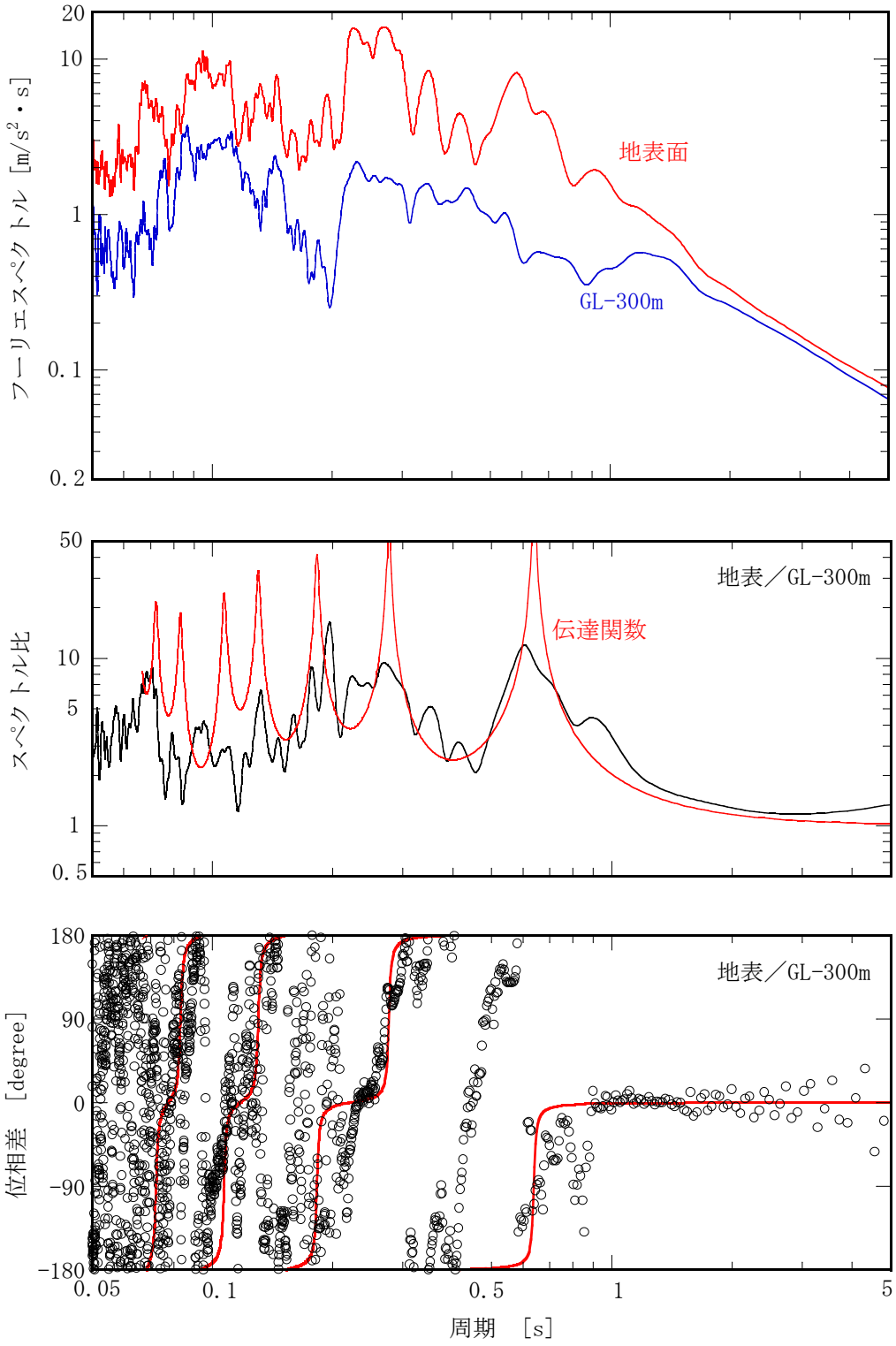


図 3.1-96　スペクトル比と位相差（2011 年岐阜県美濃東部、EW、GL-300m）

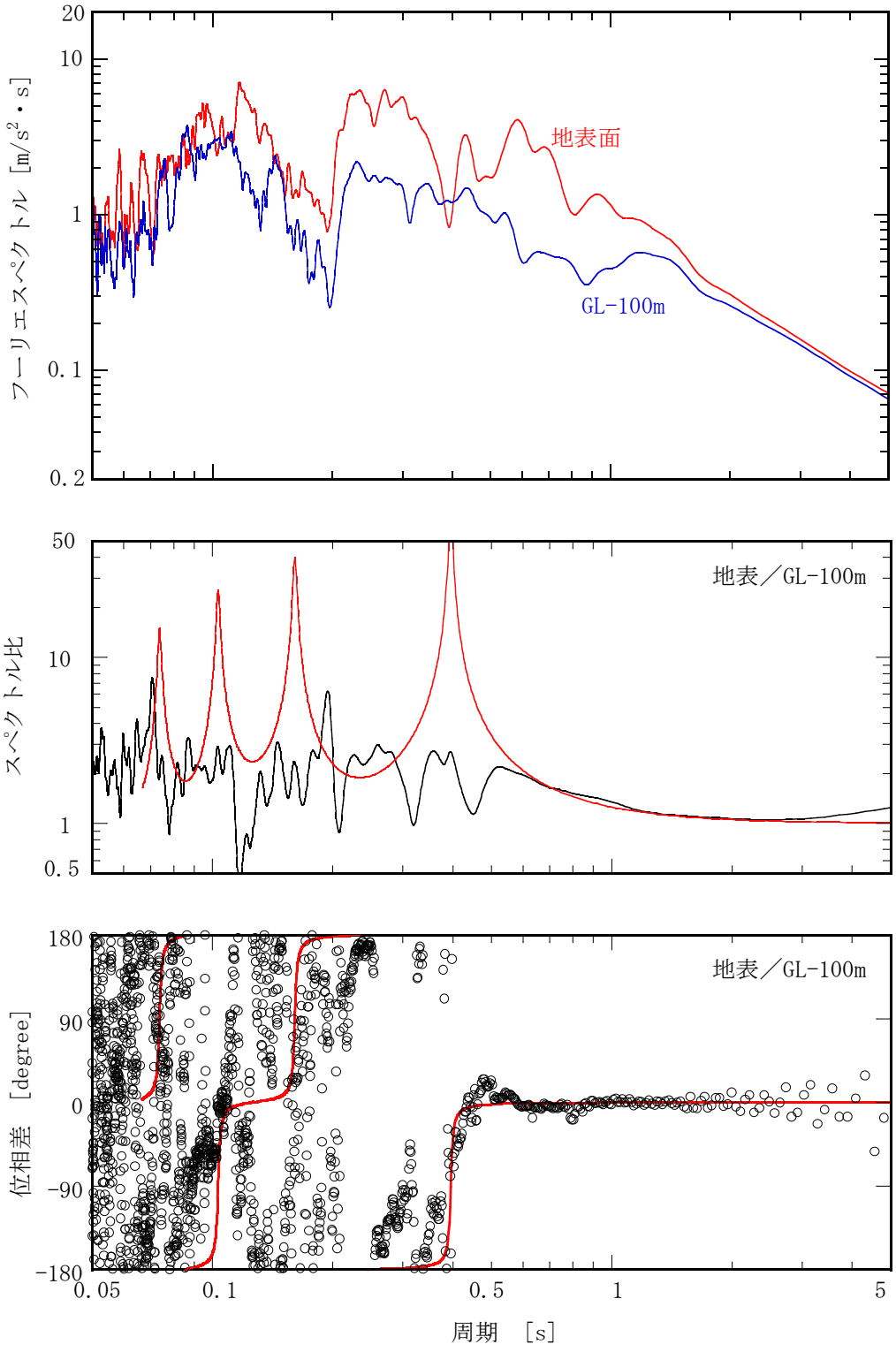


図 3.1-97　スペクトル比と位相差（2011 年岐阜県美濃東部、EW、GL-100m）

(5) 震源が近距離の地震

震央距離が 20km 程度と、震源が比較的近い距離の地震のうち、地震の規模が比較的大きい 2012 年愛知県西部の地震の観測記録を用いて検討する。

検討は、震源が直下の地震の場合と同様に、観測された加速度の時刻歴データのうち EW 方向成分について、それぞれの深度の観測加速度の時刻歴からフーリエ変換を用いてフーリエスペクトルを評価する。そして、深度の異なるフーリエスペクトルの位相差に着目して、深度間の地震動の伝播特性を把握する。また、設定したモデル地盤の理論解とも比較して、波動伝播特性の特徴を確認する。スペクトルの比較は、深度 100m と深度 300m の観測記録を基準として、地表加速度計 A の観測記録との間で評価することとした。

各深度の観測記録のスペクトルと、深度 100m に対する地表面の位相差、深度 300m に対する地表面の位相差を図 3.1-98 に示す。

直下震源地震の場合とは異なり、位相差のばらつきが大きくなっており、理論曲線との相違が大きくなっている。特に 1s 以上の長周期側でのばらつきが大きいことが、直下震源地震の場合との大きな違いである。これは、直達の実体波以外にも、直達でない実体波や表面波、反射波といったものの影響によるものと考えられる。

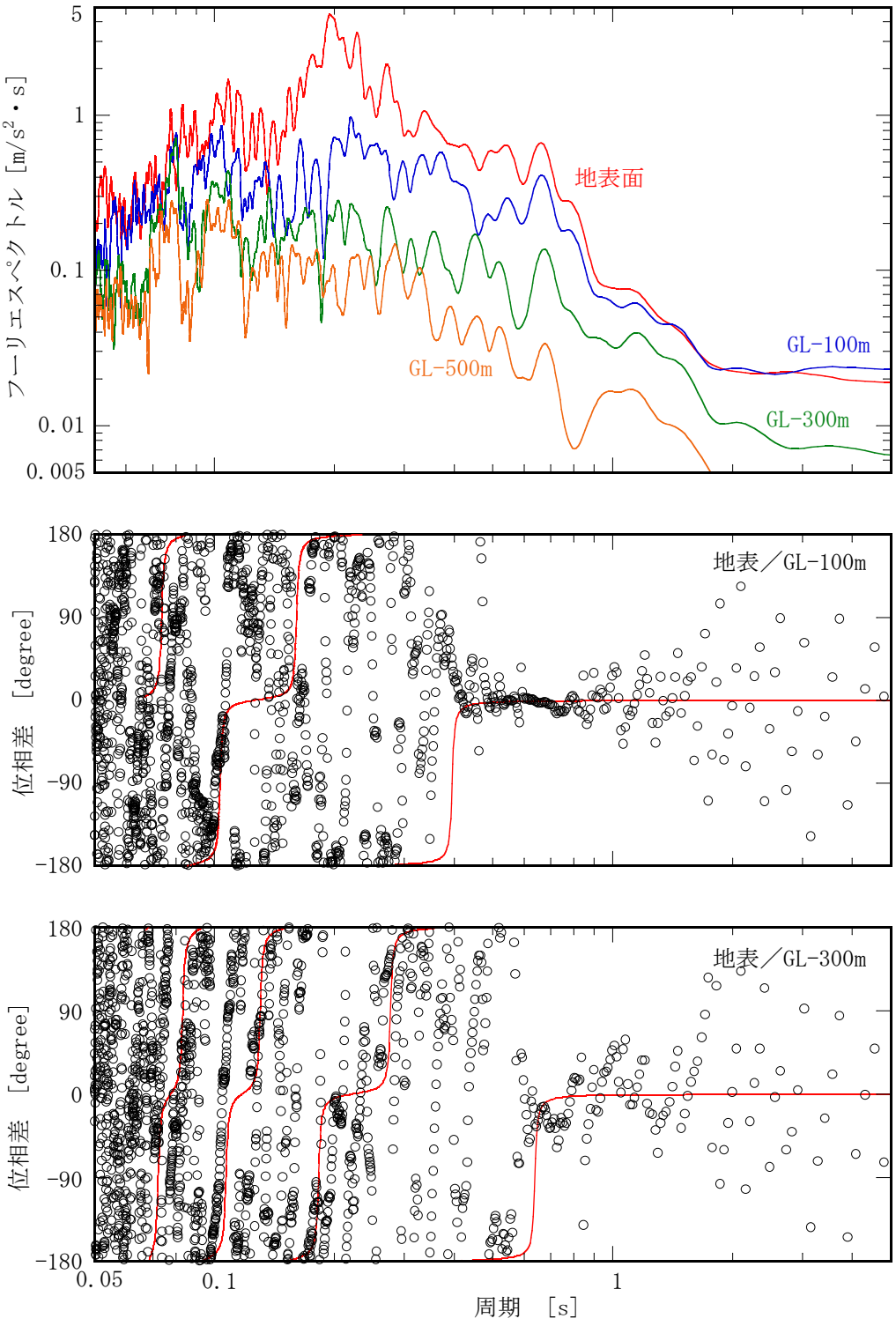


図 3.1-98　スペクトルと位相差（2012 年愛知県西部、EW）

(6) 震源が遠方の地震

震央距離が長い遠方の地震では、直達の実体波は拡散などにより減衰し、その他の直達ではない実体波や反射波、表面波が重なり合って観測されるものと考えられる。特に、震央距離が数百 km 以上の巨大地震では、表面波が支配的であるとされている。そこで、2011 年三陸沖の地震の観測記録から表面波（レイリー波）の粒子軌跡を抽出し、地下深部での表面波の影響の把握を試みた。

地表 A の地震観測記録の水平方向 2 成分から、震源地方向の成分（Radial 成分）を抽出して、特定の周波数でバンドパスフィルターをかける。これらを用いて Radial 成分および鉛直成分（UD 成分）の変位軌跡を描くと、レイリー波の粒子軌跡が得られる。抽出に用いた東北地方太平洋沖地震のフーリエスペクトルを図 3.1-99 に示す。成分で比較すると、周期約 7s 以降の長周期側で、UD 成分が Radial 成分および Transverse 成分より卓越しているため、この周期帯では表面波が卓越していると考えられる。よって周期 7s 以降でバンドパスフィルターの範囲が 2s、1s、0.1s と異なる 3 ケースについて、変位軌跡を抽出した。

抽出した Radial 成分および UD 成分の 0～201 秒の変位軌跡を、図 3.1-100 に示す。

変位軌跡は、(1)から(6)まで全て楕円になっており、レイリー波の粒子軌跡の抽出には至らなかった。(1)～(4)は様々な楕円が組み合わされている様子が確認できる。また(5)と(6)に関しては、バンドパスフィルターによって非常に狭い範囲の周波数のみ抽出したため、変位が一定の楕円になってしまっていると考えられる。レイリー波が抽出できていれば、これらのような斜めの楕円になることはなく、縦方向に細長く一定の渦を巻く楕円になる。この結果から観測点においては純粋な表面波以外の様々な波による振動が観測されたものと推測される。

このように、地表面の観測記録で表面波を抽出できなかったことから、地下深部での表面波の影響についても把握することはできなかった。

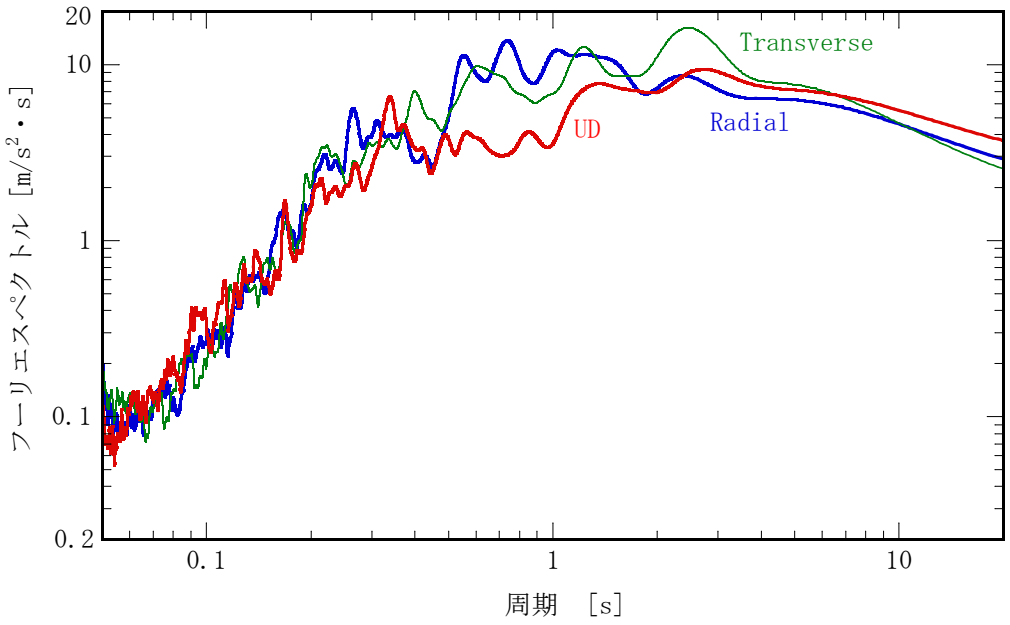
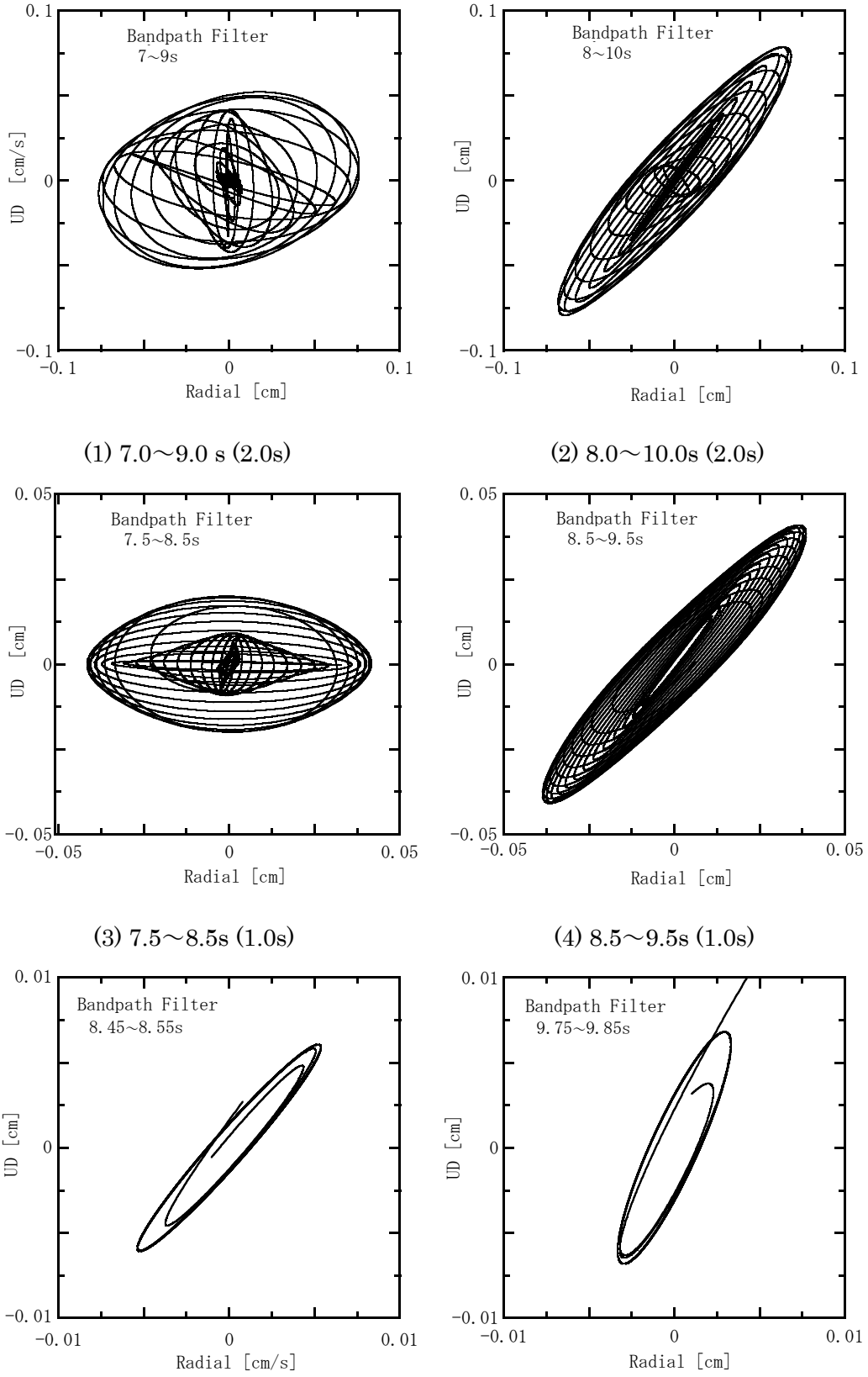


図 3.1-99 フーリエスペクトル（2011 年三陸沖、地表 A）



(1) 7.0～9.0 s (2.0s)　(2) 8.0～10.0s (2.0s)

(3) 7.5～8.5s (1.0s)　(4) 8.5～9.5s (1.0s)

(5) 8.45～8.55s (0.1s)　(6) 9.75～9.85s (0.1s)

図 3.1-100　抽出した Radial 成分と UD 成分の変位軌跡（2011 年三陸沖、地表 A）

(7) 地震観測記録の分析のまとめ

本検討では、震央距離と波動伝播現象の関係に着目して、観測記録を分析した。

震央距離が非常に小さい直下震源地震では、地震動が観測地点へまっすぐに上昇してくることとなり、波動伝播現象としては比較的単純で、一次元重複反射理論に基づく波動伝播との整合性が高い結果が得られた。このような直下震源地震では、地震観測記録を活用することで、地層構成や弾性波速度などの地盤物性値の推定が可能になるものと考えられる。

一方、震源の深さが約 50km に対して震央距離が約 20km というような近距離震源地震では、観測記録を分析すると斜め下方からの入射によると思われる影響が見られた。このように直達の実体波の影響が支配的ではあるが、周期帯によっては、特に長周期で斜め入射に伴って発生した表面波によるものと思われる影響が顕著に表れていることを確認した。

また、震源が遠方の地震を対象に、地震観測記録を分析して表面波の一種のレイリー波の抽出を試みた。しかし、レイリー波の成分が卓越するとされる地表面の地震観測記録を用いた分析で、レイリー波を抽出することができず、地下深部での表面波の影響についても把握することはできなかった。

今回の分析によって、地下深部の地震動の伝播に関して、耐震設計の地震動評価の際に一般的に用いられている一次元重複反射理論に基づく波動伝播だけでは考慮できない伝播現象の影響があることを確認した。一般に地上構造物の耐震設計では、地震動の伝播はスネルの法則による波動の屈折により、鉛直上昇波が卓越するものとされている。しかし、地下深部に構築する地層処分施設では、震源方向から直接地震動が入射することも考慮する必要がある。今後さらに分析を進めて、斜め入射の影響の大きさ等について検討することが、地下深部の構造物の耐震設計に役立つものと考えられる。

3.2 耐震設計の妥当性検討

事前検討で実施した耐震設計の妥当性を検証するために、設計時に設定した地盤物性値等の条件を用いた解析モデルで地震動の一次元重複反射解析を実施し、地震観測記録の分析結果と比較する。

3.2.1 検討条件

検討は、加速度計が設置されている深度 500m までの地盤を対象とする。地盤物性値と層構成は、設計時に設定したものを用いる。地盤物性値と層構成を、表 3.2-1 と図 3.2-1 に示す。

表 3.2-1　地盤物性値

地層レベル [m]		岩種	単位体積重量 [kN/m³]	弾性波速度 [km/s]		減衰定数 [%]
上端	下端			V_P	V_S	
0.0	63.2	砂岩・泥岩	18.6	2.4	1.0	
63.2	79.2	礫岩	21.6	2.8	1.1	
79.2	124.2	砂岩・泥岩	18.6	2.4	1.0	1.0
124.2	175.2	礫岩	21.6	2.8	1.1	
175.2	－	花崗岩	25.5	4.6	2.3	

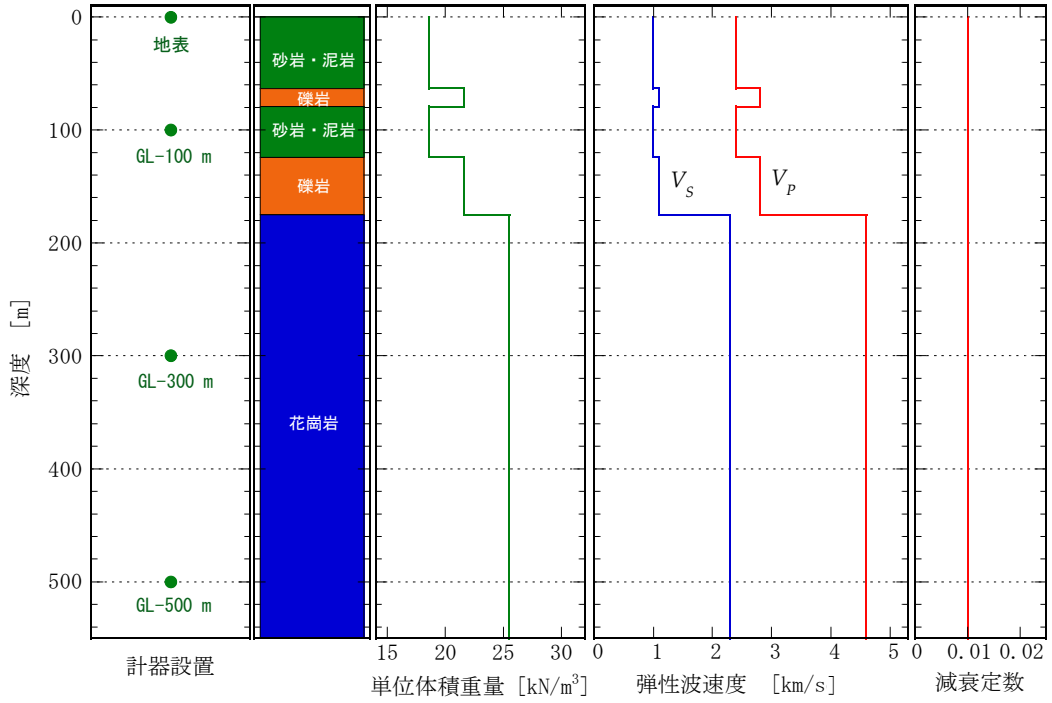


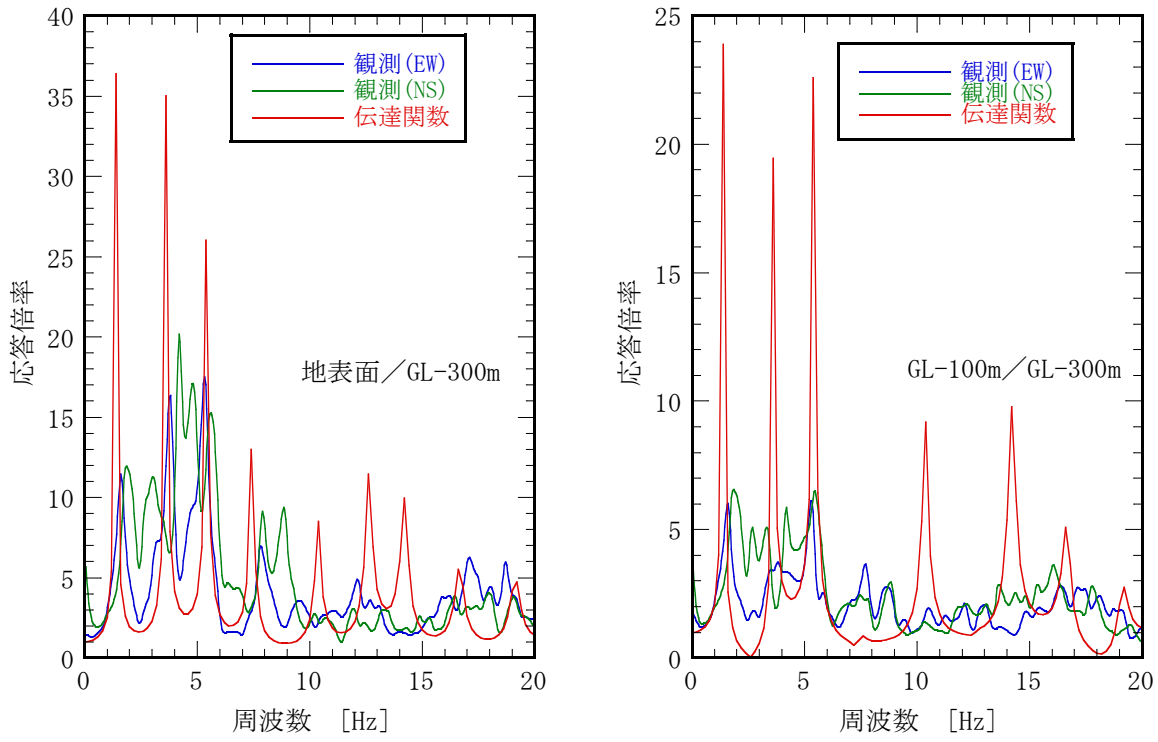
図 3.2-1　地盤物性値の深度分布

3.2.2 検討方法

解析には、1 次元成層地盤の重複反射応答解析プログラム（SHAKE）を用いる。地盤を地表から深度 500m までモデル化し、深度 300m（換気立坑連接部）を基準にして、深度 100m と地表面に対する伝達関数を算出する。その結果を、2013 年愛知県西部の地震の地震観測記録から評価したスペクトル比と比較して検討する。 なお、本検討では、「3.1.3 地震観測記録の補正」に示した方法で加速度計の設置方位を補正したデータを用いた。

3.2.3 解析結果

解析で得られた伝達関数を、2013 年愛知県西部の地震の地震観測記録から評価したスペクトル比と比較して、図 3.2-2 に示す。解析で得られた伝達関数は、ピークの大きさは観測記録から評価したスペクトル比より大きい。これは、解析で設定した減衰が、実際よりも小さいためと考えられる。一方、ピークが現れる周波数は、概ね一致しており、地盤の土層構成や層厚、せん断波速度の設定は、実際と合致しているものと考えられる。特に EW 方向では、6Hz 程度の 3 次までが良く一致している。そのため、事前に実施した耐震設計において設定した条件は、ほぼ妥当なものであったと考えられる。なお、観測記録から評価した地表のスペクトル比に関して EW 方向と NS 方向を比較すると、EW 方向は 2～3Hz で応答倍率が著しく小さくなっていることが確認できる。これは、換気立坑のやぐらの EW 方向固有振動数が 2.3Hz であることから、やぐらの基礎上面に設置した地表の加速度計の観測記録が、やぐらの固有振動の影響を受けているためと考えられる。



(1) 地表面　　(2) 深度 100m

図 3.2-2 観測記録のスペクトル比と解析結果の伝達関数の比較（GL-300m 基準）

3.2.4 まとめ

耐震設計の条件に基づいて行った波動伝播解析の結果を、2013 年 2 月 6 日の愛知県西部の地震の地震観測記録を用いた分析と比較して、耐震設計の妥当性を検討した。解析で得られた伝達関数と観測記録から評価したスペクトル比を比較したところ、ピークの現れる周波数は概ね一致していることが確認できた。このことから、事前に実施した耐震設計において設定した地盤物性値等の条件は、ほぼ妥当なものであったものと考えられる。

4. 湧水抑制対策技術に関する検討

4.1 目的および概要

4.1.1 検討目的

瑞浪超深地層研究所の換気立坑等の掘削工事では､湧水処理費の低減と安全な施工の観点から、坑道周辺の湧水抑制対策（グラウチング）を行いつつ坑道掘削を進めている。しかし、大深度地下における坑道掘削工事では、高水圧と低透水性岩盤といった既往の実績がほとんどない条件下でのグラウチングを必要とする場合が想定されることから、それに必要な技術の抽出と施工技術等の開発を目的として工学技術に関する検討を行ってきた。

これまでのグラウチング実績および並行して実施した工学技術に関する検討実績を図 4.1-1 に示す。平成 24 年度と 25 年度の検討では、結晶質岩を対象としたポストグラウチング手法（図 4.1-2[4] 参照）についての基礎的検討を実施しており、平成 25 年度の坑道掘削工事（B 工区その 5）では、深度 500m 研究アクセス南坑道の掘削においては、ほとんどの区間で掘削に先立ちプレグラウチングが実施された。平成 26 年度の工事（B 工区その 6）では、平成 25 年度の検討に基づいて本坑道にてポストグラウチングが実施された。

以上のことから、平成 26 年度の検討では、当該のポストグラウト工事について検討を行い、特にポストグラウチング技術の開発を行うことを目的とした。

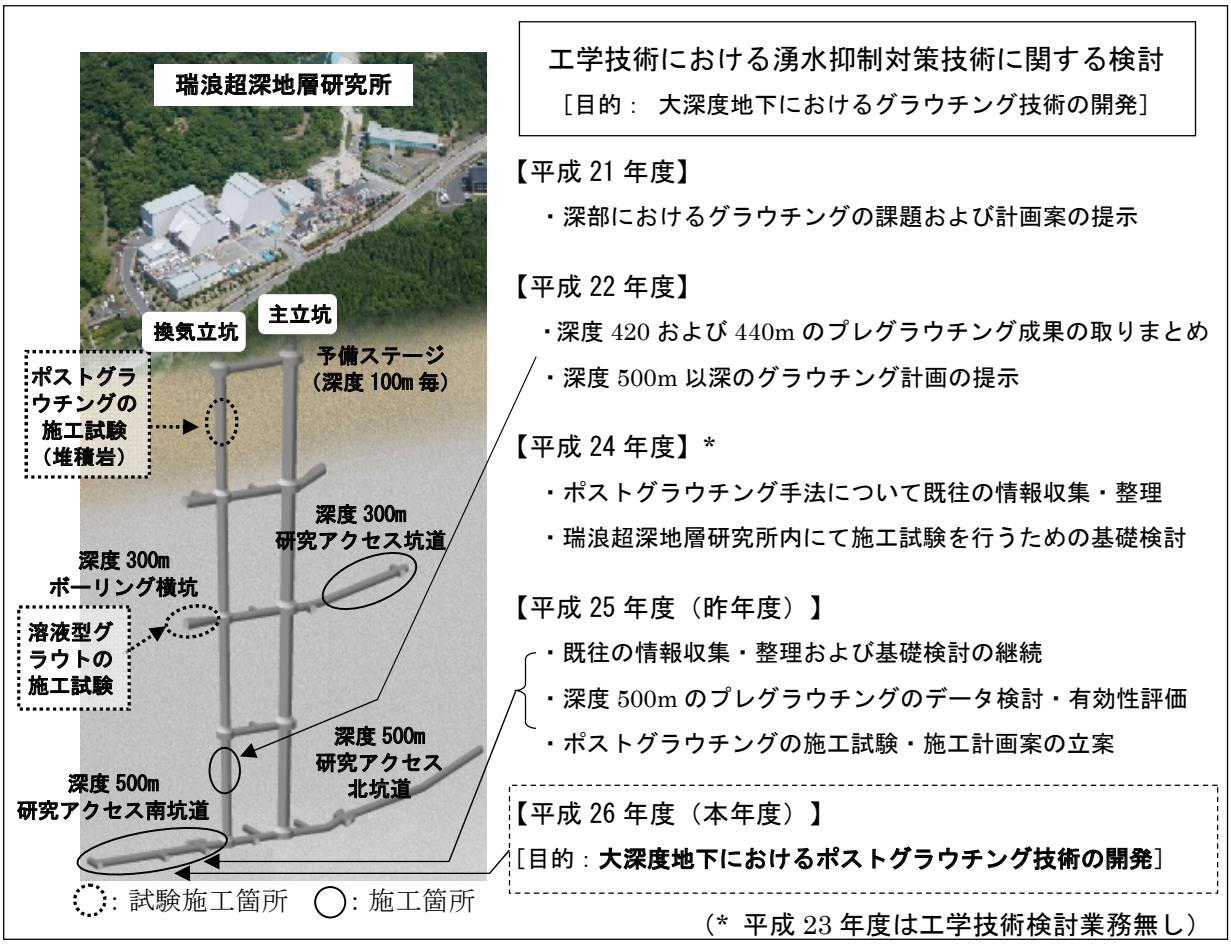


図 4.1-1 瑞浪超深地層研究所におけるグラウチング実績および工学技術における検討の概要

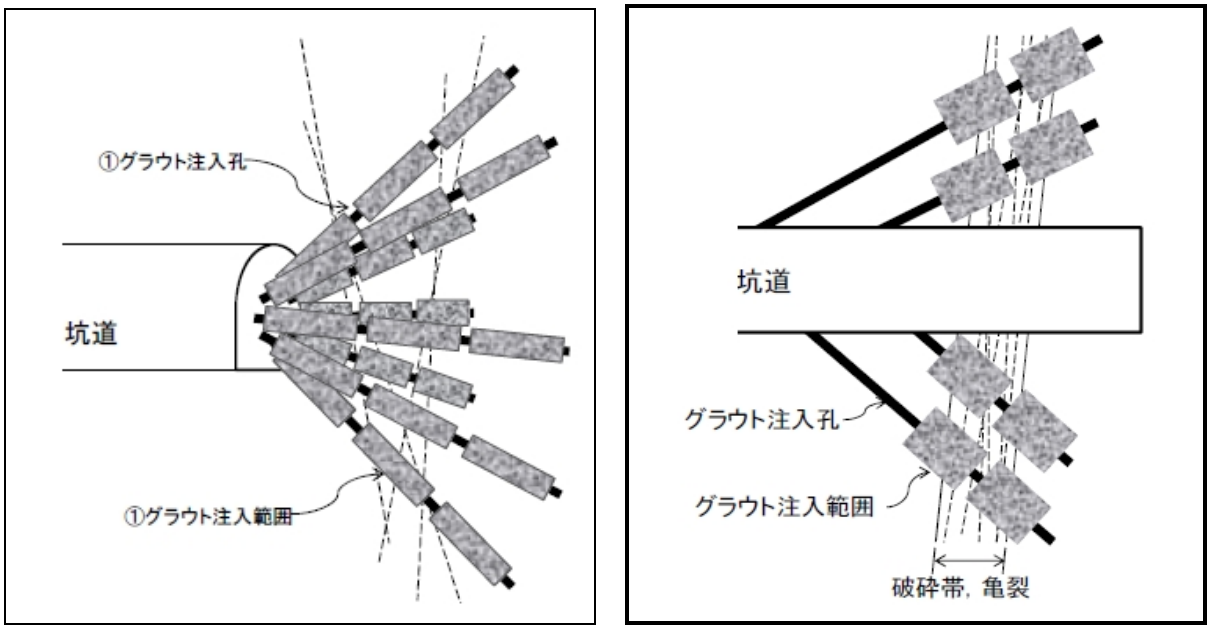


図 4.1-2　プレグラウチング（左）とポストグラウチング（右）の例 [4)]

4.1.2 平成 26 年度の実施概要

平成 25 年度の検討では、深度 500m 研究アクセス南坑道（図 4.1-3）のプレグラウチング実施区間を対象とし、ポストグラウチングの施工試験計画および施工計画を立案した。平成 26 年度の B 工区その 6 工事では、平成 25 年度に立案した計画に基づいて同区間においてポストグラウチングが実施された。そのため、平成 26 年度の検討では前節の目的に従い下記項目を実施した。

4.2　ポストグラウチングの施工結果の評価
4.3　課題の整理と今後の研究計画立案

平成 26 年度の具体的な検討フローを図 4.1-4 に示す。

図 4.1-3　深度 500m の研究アクセス南坑道（ポストグラウチング実施前）

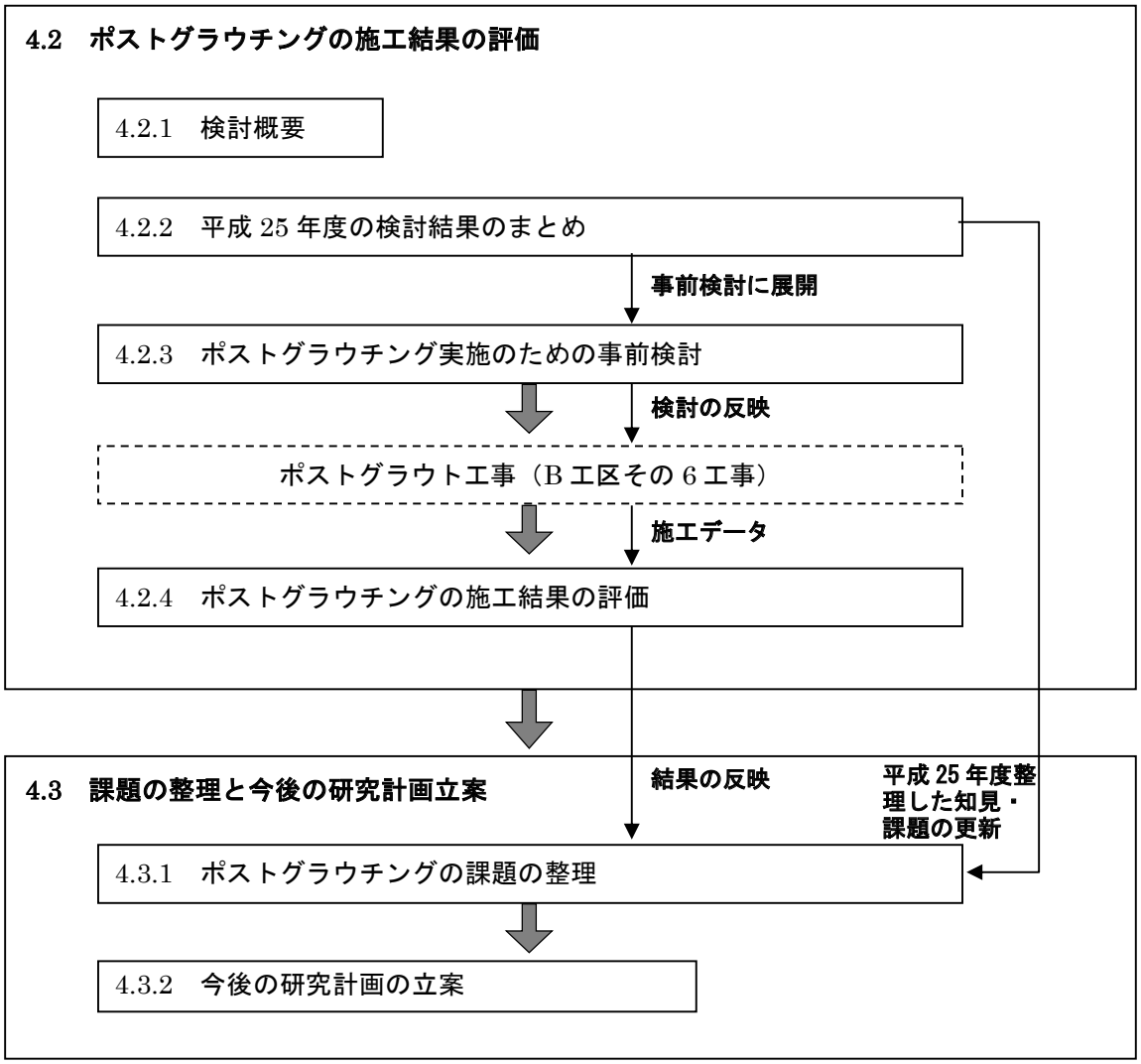


図 4.1-4　平成 26 年度の湧水抑制対策技術に関する検討フロー

4.2 ポストグラウチングの施工結果の評価

4.2.1 検討概要

本節の検討では、冒頭に平成 25 年度の検討結果の概要をまとめ、これに基づいてポストグラウチングの仕様および効果の予測に関する事前検討を行い、その仕様に基づいて実施したポストグラウチングの施工結果を評価した。検討フローを図 4.2-1 に示す。

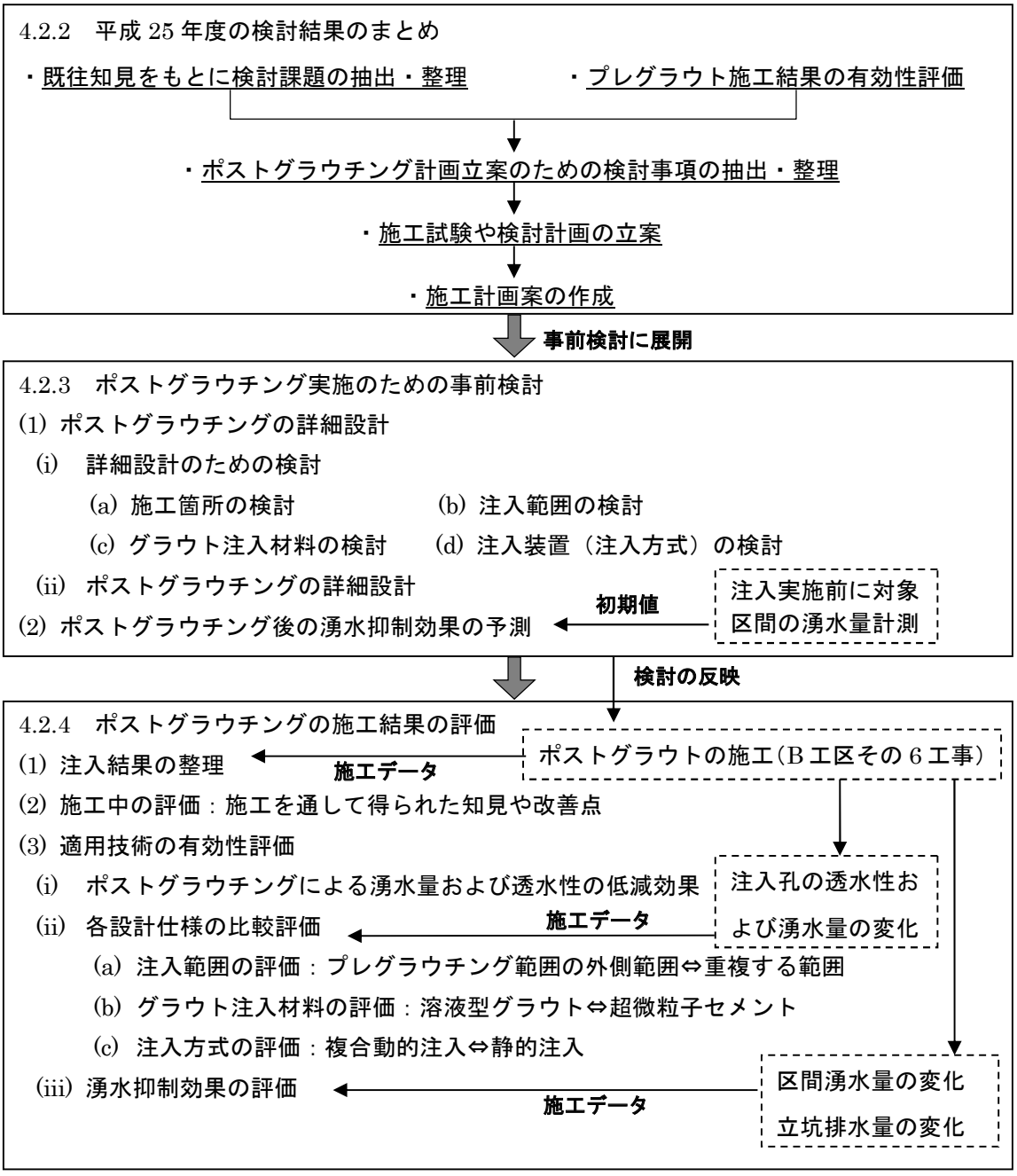


図 4.2-1 ポストグラウチングの施工結果に関する検討フロー

4.2.2 平成 25 年度の検討結果のまとめ

(1) ポストグラウチング手法についての情報収集・整理および施工試験のための基礎的検討

平成25年度の検討では、文献調査で得られたグラウチングに関する最新情報を整理した。調査対象は、グラウト設計や技術的課題を検討した事例、溶液型グラウトを使用した実績、および最新の研究事例や実績が記載されている国内外の文献とし、瑞浪におけるグラウチングの具体的な施工計画立案に有用な情報を調査した。

国内文献については、倉敷LPG貯槽建設工事（以下、倉敷と表記する）におけるグラウチング実績、および瑞浪におけるポストグラウト施工の事例を詳しく調査した。海外文献については、注入理論に基づいてポストグラウチングが検討された北欧でのグラウチング実績や、溶液型グラウトの大深度への適用に向けて研究開発が進むスウェーデンのChalmers工科大学（以下、CTHと表記する）およびフィンランドの実施主体のPOSIVA社の研究事例を主に調査した。

2年間継続した情報収集・整理の結果から、湧水抑制対策技術の高度化に向けて検討すべき様々な課題を抽出し、項目ごとに整理した（表 4.2-1参照）。その際、深度500mの研究アクセス南坑道におけるポストグラウト施工や施工試験に限らず、今後の瑞浪内におけるその他のグラウト工事を計画する際にも参照できるよう、適用性や必要性を加味した判定（「瑞浪における適用性」の列に記載）を追記した。各判定記号の意味は下記に示す通りである。

◎：今後の適用可能性がある項目
○：条件によって、今後の適用可能性がある項目
△：今後の適用可能性が低い項目
×：今後の適用が望ましくない項目
－：現在適用済みであり、特に検討が不要な項目

今後のグラウト施工の詳細な事前検討計画や施工計画に際して、本検討課題のリストを活用することとし、平成25年度の瑞浪内における施工試験の考え方とした。

表 4.2-1　グラウチングの事前検討や施工試験に向けた検討課題リスト（1/2）

項目			国内/海外	検討課題	瑞浪における適用性	設定根拠・備考
岩盤地質評価			国内	・ 水理試験：透水係数・ルジオン値の評価	-	（瑞浪における従来の手法）
			海外	・ 水理試験：透水量係数・亀裂開口幅の評価	○	・亀裂性岩盤での適用性あり ・北欧の注入思想によるグラウト設計の適用
許容湧水量			海外	・ 極めて低い許容湧水量基準の適用性（1.7L/min/100m：スウェーデンの処分坑道）	◎	・瑞浪の大深度でどこまで湧水抑制が可能かの検証
プレグラウト設計・実績	グラウト材料		共通	・ 普通セメント	-	（瑞浪における従来の手法）
			国内	・ LW（水ガラス＋セメント）	×	・水ガラスの耐久性により適用不可
			共通	・ 超微粒子OPC	-	（瑞浪における従来の手法）
			共通	・ 溶液型グラウト	◎	・国内外で実績、微小亀裂への改良に期待
			海外	・ 普通セメントと溶液型グラウトの併用	◎	・プレグラウトの高い止水性効果確保に期待
	配合	セメントグラウト	国内	・ 低濃度配合からの切替え配合【加圧脱水に期待して改良範囲の亀裂中に硬化体を形成】	-	（瑞浪における従来の手法）
			海外	・ 高濃度配合（0.8～2.0）が主流【亀裂中に密実な硬化体を形成】	○	・岩盤強度が高い箇所において改良効果の高い可能性あり（高圧注入・孔埋め無しとセット）
		溶液型グラウト	国内	・ゲルタイム90～120分程度	◎	・倉敷における実績あり
			海外	・ ゲルタイム30～60分程度	○	・注入設備を整えれば、短くても可
	注入圧		国内	・ 低圧注入	-	（瑞浪における従来の手法）
			海外	・ 湧水圧＋数MPa（最大10MPa程度の高圧注入）	○	・地山強度と安全性、注入設備を検討により適用可能（高濃度注入・孔埋め無しとセット）
	注入装置	セメントグラウト	国内	・ 複合動的注入	◎	・倉敷における実績あり ・瑞浪における通常の注入より効果的な浸透、止水効果に期待
			国内	・ 止水性を有するロックボルトの適用	◎	
		溶液型グラウト	海外	・ Water grouting	◎	・グラウト材の希釈防止はゲルタイムによる変動（品質の不確実性）の低減に期待 ・設備の導入や開発検討の必要性あり
			海外	・ 空気圧入による孔内の水抜き	◎	
			共通	・温度管理（リターンポンプの場合、冷却装置が必要）	◎	・ゲルタイムの再現性向上による施工確実性の向上に期待
	浸透距離		国内	・ 1.5～3倍の改良範囲	-	（瑞浪における従来の手法）
			海外	・ 孔間距離の3/4倍（50%以上のオーバーラップ）	○	・亀裂評価と北欧の注入理論に基づく注入仕様の適用性検討
	グラウト材の流出	セメントグラウト	国内	・ セメント硬化体の強度に期待	-	（瑞浪における従来の手法）
			国内	・ グラウト孔の孔埋め	-	（瑞浪における従来の手法）
			海外	・ グラウト流出に抵抗する配合選定	○	・高濃度・高圧注入とセットで適用性の検討 ・グラウトの降伏値が水の粘性力より高い場合に流出防止できる北欧の注入理論の適用性確認
		溶液型グラウト	海外	・ ゲルタイムに応じた注入時間の設定	○	・北欧の注入理論に基づく設計の適用性検討 ・溶液型グラウトはゲルタイムに近い注入時間の確保で流出防止に有利という知見
			海外	・硬化不良、施工終了後のグラウト材流出	◎	・北欧で見られた施工不確実性が発生するかの確認
			海外	・十分な養生時間の確保（オンカロでは3日間パッカーを閉鎖）	◎	・高圧注入時にゲルタイム遅延の可能性あり
	孔配置		国内	・ 注入率・注入範囲に準拠	×	・亀裂性岩盤の場合、不適当
			海外	・卓越した岩盤亀裂に交差する配置	◎	・綿密な事前調査・亀裂評価に基づく注入仕様の適用性検討
			海外	・削孔（鉛直）精度の向上	△	・長孔の場合に検討必要
			共通	・一般に2~4mの孔間隔	-	（瑞浪における既往実績）
	注入停止基準		国内	・規定注入量やダメ押し注入到達後	-	（瑞浪における既往実績）
			海外	・浸透理論に準拠（改良すべき亀裂幅が浸透距離に到達する時間に到達）	○	・高濃度・高圧注入の適用性とセットで検討

※瑞浪：瑞浪超深地層研究所
　倉敷：倉敷LPG貯槽建設工事

表 4.2-1　グラウチングの事前検討や施工試験に向けた検討課題リスト（2/2）

項目			国内/海外	検討課題	瑞浪における適用性	設定根拠・備考
ポストグラウト特有の設計・実績・評価	設計手法		国内	・ 施工試験の実施	◎	・検討課題と適用性の確認
			海外	・ セメントと溶液型グラウトの併用	◎	・高い止水性効果確保に期待
			海外	・ パイロット孔等による事前の詳細調査	◎	・湧水亀裂に確実に注入するための検討
			海外	・ 動水勾配に抵抗する仕様の開発	○	・湧水亀裂の密度が少ない場合適用性あり
	グラウト材料		共通	・ 普通セメント	△	・微細亀裂の改良可能な材料に期待
			共通	・ 溶液型グラウト	◎	・国内外で実績、微細亀裂への改良に期待
			国内	・ 超微粒子セメント	◎	・プレグラウトで超微粒子セメントを用いた場合は超微粒子から開始が適当
			国内	・ シラクソル	△	・瑞浪の換気立坑のポストグラウチングで実績あり ・溶液型グラウトより浸透性に劣る
			国内	・ LW（水ガラス＋セメント）	×	・水ガラスの耐久性により適用不可
			海外	・ ポリウレタングラウト	×	・国内では適用不可
	配合	溶液型グラウト	国内	・ ゲルタイム120分、180分	◎	・瑞浪の深度300mで適用済み
			海外	・ ゲルタイム10分～120分	○	・短いゲルタイムは注入設備や設計の検討が必要
	注入圧		国内	・ 最大0.01～2MPa	×	・補強注入の用途の実績であり、瑞浪では不適当
			国内	・ 4.2MPa	○	・カバーロックによる高注入圧 ・倉敷における実績あり
			海外	・ 湧水圧＋1～2MPaが主流	◎	・プレグラウト注入圧より低圧注入（但し、北欧の水準）
	浸透距離		国内	・ 1.5～3倍の改良範囲	-	（瑞浪における従来の手法）
			海外	・グラウト材の流出を考慮した設計	○	・亀裂開口幅・動水勾配の評価し、注入理論に基づく設計の適用性検討
	孔配置		共通	・全周かつ連続的な注入範囲・区間	◎	・一部分のみの改良では、水みちが変化するのみ、坑道全体の湧水抑制効果の効果が少ない
			国内	・ 注入率・注入範囲に基づいた仕様	×	・亀裂性岩盤の場合、不適当
			国内	・ マイクロフラクチャ部に接触面積が高くなる配置（溶液型グラウト）	○	・ ヘアクラック密集部には孔延長など適用可能性あり
			海外	・ プレグラウチングより短い孔間隔および孔長	◎	・ 湧水亀裂に交差しにくい可能性があり、削孔本数の増加が必要可能性あり
			海外	・ 深部にパッカーを設置	○	・ 表面リークの低減対策
			海外	・ アンブレラ注入（坑道周囲と奥側の2段階）	○	・ 表面リークの低減対策
			海外	・ プレグラウトの外側を注入範囲に設定	◎	・ プレグラウトの改良範囲が十分改良されている場合に適当
	安全管理		海外	・ 安全対策のための注入手法 （低圧注入、剥落防止吹付、パッカーの深部設置、立入禁止措置）	○	・ 岩盤に直接圧がかかるため、特にプレグラウトの改良範囲内を施工する場合、プレグラウト以上の安全対策の必要性あり
	施工完了の基準		共通	・改良効果が確認できるまで注入（削孔本数の増加）	◎	・ 初期湧水量が高いほど亀裂ネットワークによる高い浸透・改良効果の可能性あり ・ネットワークがない場合、削孔本数増加の懸念
	注入効果・止水効果の評価		共通	・ 止水効果の確認手法	◎	・ 改良区間および坑道全体の湧水抑制効果の確認方法を確立する必要性あり
	専門家の参画		海外	・ 専門家（経験者）の参画	◎	・ 課題の多いポストグラウトにおいて、経験豊富な北欧のアドバイザーの参画の必要性あり

※瑞浪：瑞浪超深地層研究所
　倉敷：倉敷LPG貯槽建設工事

⑵ 研究アクセス南坑道における施工データ検討、適用技術の有効性評価

研究アクセス南坑道の掘削前に実施した先行ボーリングの調査結果をもとに、プレグラウチングの種類に応じた坑道掘削時の湧水量低減効果を算定した（図 4.2-2 参照）。CM 級区間と CH 級区間について検討し、CM 級区間についてはプレグラウチングを実施しない場合は約 2,500L/min と非常に湧水量が多く、実施した場合は湧水量の低減効果が高いことが分かった。一方、CH 級区間においては、プレグラウチングを実施しない場合は 300L/min 程度であるが、効果的な低減のためには小さいルジオン値となるまでプレグラウチングを行う必要がある。以上のことから、CH 級区間および CM 級区間について、探り削孔で湧水状況を確認しながらプレグラウチングを実施する方針とした。

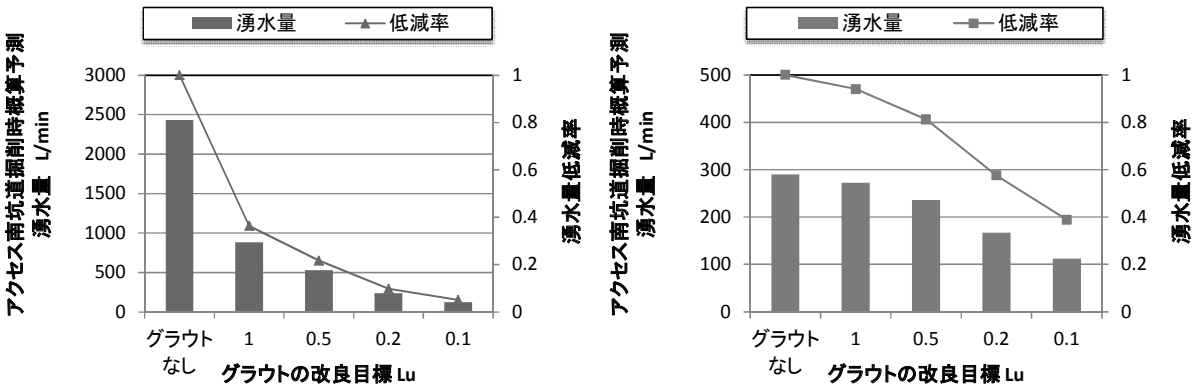


図 4.2-2　改良目標値に応じた研究アクセス南坑道掘削時の概算予測湧水量
（左：CM 級区間、右：CH 級区間）

プレグラウト③～⑦の 5 回のプレグラウチングを評価した結果から、適用したプレグラウチング技術が、おおむねセメントグラウトの改良限界についての換気立坑での実績（普通セメント：0.7～1.0Lu、超微粒子セメントの下限値：0.2～0.5Lu）と同等の止水効果があり、現在適用しているプレグラウチング技術は妥当であると評価した（図 4.2-3、表 4.2-2 参照）。ただし、プレグラウト③を実施した「横坑との交差部近傍」とプレグラウト⑥～⑦を実施した「CM 級区間」は比較的湧水発生箇所が多いことが確認された（図 4.2-4 参照）。本坑道は、大深度で 3.5MPa を超える高湧水圧のため、これまでと同等の改良効果（施工後の岩盤の透水性）であっても小さい亀裂からの湧水が比較的多くなったものと考えられる。瑞浪では排水処理費の観点からできる限り湧水を抑制することが求められているため、これらの区間についてポストグラウト等の湧水抑制対策を実施することとした。

また、プレグラウト⑥～⑦の区間については、超微粒子セメントの材料選定だけでは湧水抑制効果に限界があると考えられるため、超微粒子セメントより浸透性が高く改良限界値が低い溶液型グラウトなどを使用材料として検討することとした。

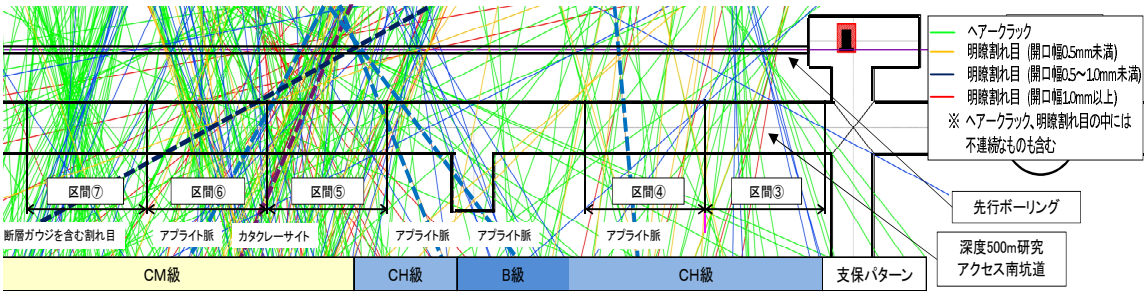
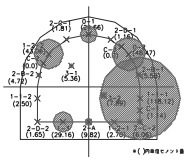
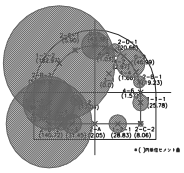
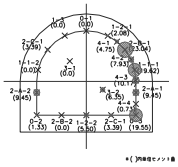
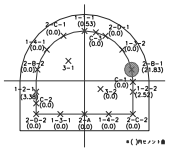
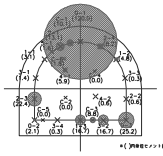


図 4.2-3　先行ボーリング調査に基づく地質概要とプレグラウト施工位置

表 4.2-2　深度 500m 研究アクセス坑道における注入結果の概要

区間	グラウト⑦	グラウト⑥	グラウト⑤	グラウト④	グラウト③
支保ﾊﾟﾀｰﾝ	CM 級	CM 級	CM+CH 級	CH 級	CH 級
予測した割れ目の概要	ﾍｱｰｸﾗｯｸの密集部	明瞭割れ目密集部 ﾍｱｰｸﾗｯｸも密集	明瞭割れ目密集部	明瞭割れ目あり	明瞭割れ目あり
実施期間	2013/11/16～12/1	2013/10/16～11/4	2013/9/18～10/5	2013/6/17～6/23	2013/5/7～5/25
施工位置	TD90.6m～106.6m	TD77.6m～93.6m	TD66.8m～82.8m	TD32.1m～48.1m	TD19.1m～35.1m
注入仕様の概要	区間長：13m（削孔 16m、区間ラップ 3m）、改良範囲：坑道より外側 3m、注入圧：湧水圧＋1MPa、配合：低濃度より切替（最大 3000L）				
探り削孔結果	0-1：　15.4L/min 0-2：　95.0L/min 合計 ＞50L/min	0-1：　46.0L/min 0-2：　60.0L/min ＞30L/min	0-1：　0.0L/min 0-2：　3.6L/min 0-3：80.0L/min> 30L/min	先行ボーリング結果より注入実施決定 探り削孔なし	0-1：60.0L/min 0-2：10.2L/min 0-3：　8.3L/min
注入孔本数	0 次孔～3 次孔：16 本 ﾁｪｯｸ孔：3 本 合計：19 本	0～4 次孔：22 本 ﾁｪｯｸ孔：3 本 合計：25 本	0～4 次孔：20 本 ﾁｪｯｸ孔：4 本 合計：24 本	1～3 次孔：16 本 ﾁｪｯｸ孔：3 本 合計：19 本	0～4 次孔：17 本 ﾁｪｯｸ孔：6 本 合計：23 本
使用材料	超微粒子セメント	超微粒子セメント	普通セメント	超微粒子ｾﾒﾝﾄ	超微粒子セメント
注入量 【ｾﾒﾝﾄ量】	11,998L 【4,157kg】	22,843L 【9,330kg】	9,437L 【2,012kg】	1,637L 【377kg】	12,390L 【3,617kg】
注入実績図（※円の大きさは単位セメント量）					
各注入次孔の最大ルジオン値（Lu）	0 次:2.9　1 次:5.0 **2 次:0.2　3 次:0.2*** ﾁｪｯｸ:0.1	0 次:2.9　1 次:25.0 2 次:4.3　3 次:0.9 4 次:0.4　**ﾁｪｯｸ:0.2***	0 次:0.3　1 次:3.8 2 次:1.9　3 次:1.0 4 次:1.7　**ﾁｪｯｸ:0.7***	1 次:0.1　2 次:0.1 3 次:0.0　ﾁｪｯｸ:0.0	0 次:3.4　1 次:1.0 2 次:1.0　3 次:0.5 4 次:0.5　ﾁｪｯｸ:0.8

＊ 太字は既往の改良限界値（超微粒子セメント：0.2Lu，普通セメント：0.7Lu）と一致

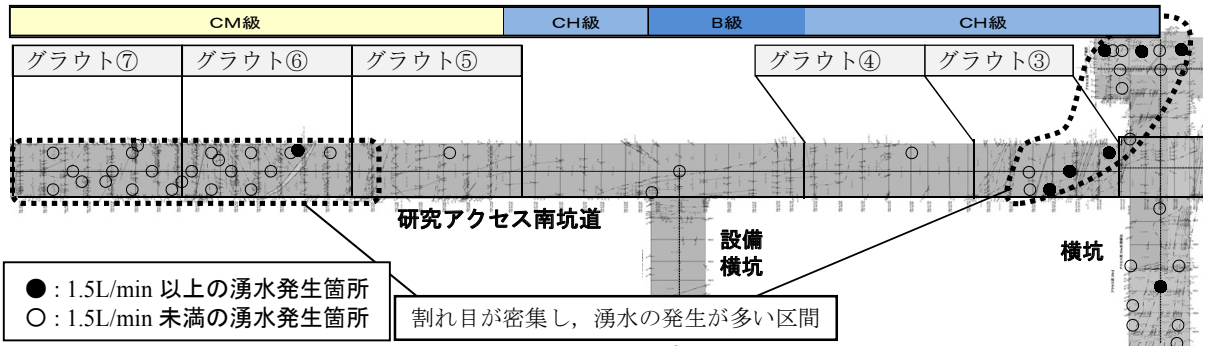


図 4.2-4　底盤の地質スライス図と湧水の発生箇所

(3) ポストグラウチングの施工計画立案

情報収集および整理結果から、ポストグラウチングは国内外においてプレグラウチングより事例が少なく、プレグラウチングより動水勾配が高い条件にあるためグラウト注入材料が流出しやすいこと、深部に浸透しにくいこと、表面リークが発生しやすいこと、また壁面に近いため注入圧を上げられないこと、さらに労力の割にはプレグラウチング程の止水効果が望めないことなど、様々な課題があることが判明した。このように技術的課題が多いポストグラウチングの施工計画立案にあたり、効果的かつ効率的な施工の観点から、整理した検討項目について（施工試験を含む）事前検討を実施し、技術の適用性や最適な手法を事前に確かめる必要があった。

そこで、(1)の基礎的検討結果をもとに、深度 500m の研究アクセス南坑道においてポストグラウチングの計画を立案するための検討事項を再度整理し、(2)のプレグラウチングの分析および評価結果から施工計画を立案する区間として「CM 級区間」および「交差部近傍」を設定した。次に、施工試験を含む検討計画をいくつか立案した。いずれの検討計画においても、1～2 リングの施工試験を実施した後に本施工に反映する方針とした。このため、おおむね全ての施工試験を網羅する場合、「最低でも数リングの施工試験」が必要である。

これらの検討を踏まえ、当該の 2 区間における施工計画を立案した。そのうち、CM 級区間における基本計画図案を図 4.2-5 に、基本仕様案を表 4.2-3 に示す。主な仕様として、検討計画で示した「標準案」に基づき、現時点で最も効果的かつ効率的と考えられる下記の項目を設定した。

- プレグラウチング範囲の外側範囲を改良
- トンネル延長方向に 10m 程度改良
- 全周かつ連続的な施工区間（リング）の確保
- 1 次孔：超微粒子セメントの適用
- 2 次孔以降：亀裂状況に応じて溶液型グラウトの適用
- 1 次孔の孔間距離を 6m とし、中央内挿法で最大 4 次孔までの施工

詳細計画の立案には、原位置における施工試験を踏まえた事前検討の結果を反映する必要がある。また、施工試験は、評価が複雑にならないように、交差部近傍ではなく CM 級区間の最初のリングで行う必要がある。

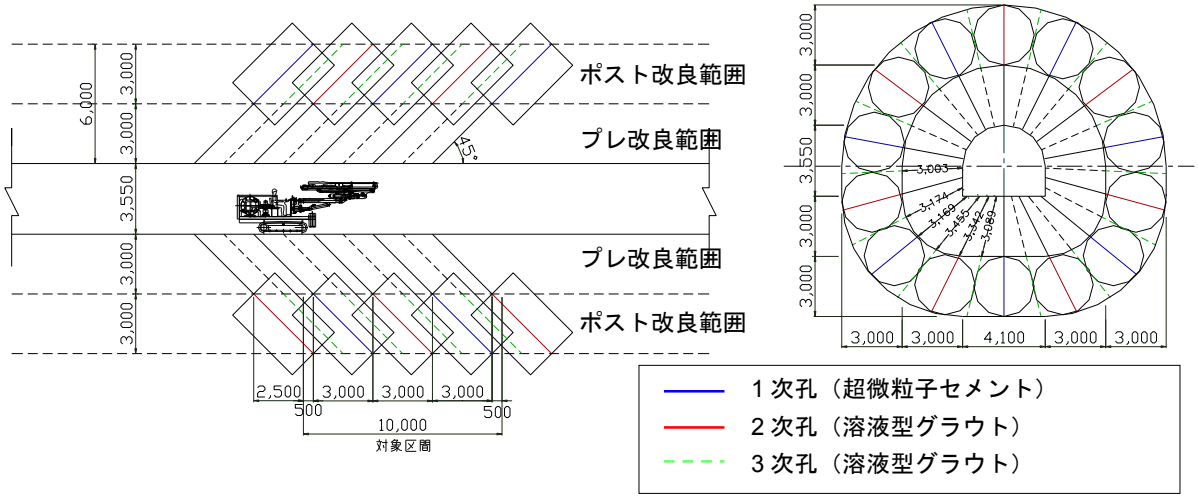


図 4.2-5　CM 級区間の基本計画図（案）（左：縦断図、右：横断面図） 単位：mm

表 4.2-3　ポストグラウチングの基本仕様（案）

<table>
<tr><th colspan="2">項目</th><th colspan="2">詳細</th><th>備考</th></tr>
<tr><td colspan="2">準備工</td><td colspan="2">・パイロット孔による詳細調査の実施
・施工試験の実施による仕様の検討</td><td>事前検討の実施</td></tr>
<tr><td rowspan="11">注入工</td><td>注入範囲</td><td colspan="2">・改良範囲は坑道外側 3m より 6m までを対象
・孔間隔は 6m（1 次孔）、4 次孔まで削孔
・孔角度をプレグラウト孔と逆向きに 45 度</td><td>施工試験より決定（施工中に変更の可能性あり）</td></tr>
<tr><td>注入方式</td><td colspan="2">・湧水量および湧水圧測定、水押し試験でルジオン値の確認
・ステージ注入または定量注入</td><td rowspan="2">既往のプレグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td>注入装置</td><td colspan="2">・複合動的注入の適用
・ロックボルト止水の適用
・溶液型グラウトに特有の装置の適用</td></tr>
<tr><td>注入管理圧</td><td colspan="2">・湧水圧 +1.5～2.5MPa 程度（5～6MPa 程度）</td><td rowspan="3">既往のプレグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td>注入速度</td><td colspan="2">・基本速度：10L/min
・最大注入速度：20L/min</td></tr>
<tr><td>ダメ押し注入</td><td colspan="2">・注入管理圧で 1L/min に到達後の 30 分間</td></tr>
<tr><td rowspan="3">注入材料</td><td colspan="2">・超微粒子セメント＋分散剤＋水
（1 次孔のみに適用、亀裂状況に応じて変更）</td><td rowspan="2">施工試験より決定</td></tr>
<tr><td colspan="2">・溶液型グラウト
（1 次孔のみに適用、亀裂状況に応じて変更）</td></tr>
<tr><td colspan="2">・水ガラス（ゲルタイム調整）
（全面リークの場合のカバーロック）</td><td>既往のプレグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td rowspan="4">基本配合</td><td colspan="2">・水押し試験のルジオン値より開始配合の決定
・セメント系グラウトは低濃度より配合切替
・溶液型グラウトは 120 分のゲルタイム</td><td>溶液型グラウトの配合は施工試験より決定</td></tr>
<tr><td>セメントグラウト配合例</td><td colspan="2"><table><tr><th>区分</th><th>W/C (%)</th><th>超微粒子セメント (kg)</th><th>早期硬化型混和剤 (kg)</th><th>水 (L)</th></tr><tr><td>グラウト</td><td>400</td><td>230</td><td>3.2</td><td>922</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>溶液型グラウト配合例</td><td colspan="2"><table><tr><th>ゲルタイム</th><th>Hi シリカ (L)</th><th>硬化促進剤 (kg)</th><th>水道水 (kg)</th><th>比重 (L)</th></tr><tr><td>120 分</td><td>80</td><td>1.250</td><td>19.37</td><td>1.17</td></tr></table></td></tr>
<tr><td rowspan="2">カバーロック配合例</td><td colspan="2">中結　　A 液[C:60kg 分散剤:0.6kg W:180L]
400L 当り B 液[水ｶﾞﾗｽ:80L W:120L]</td></tr>
<tr><td colspan="2">瞬結　　A 液[C:100kg 分散剤:1kg W:180L]
400L 当り B 液[硬化剤:100L ゲルタイム調整剤 2.5kg W:112L]</td></tr>
<tr><td rowspan="2">孔埋め工</td><td>使用材料</td><td colspan="2">・ドライモルタル</td><td rowspan="2">既往のプレグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td>方法</td><td colspan="2">・モルタルポンプを使用し、圧送ﾎｰｽを孔内に挿入し引き抜きながら充填</td></tr>
<tr><td colspan="2">その他</td><td colspan="2">・専門家（経験者）の参画</td><td>（参考）北欧仕様や溶液型グラウト適用のアドバイス（CTH や POSIVA 社など）</td></tr>
</table>

4.2.3 ポストグラウチング実施のための事前検討

(1) ポストグラウチングの詳細設計

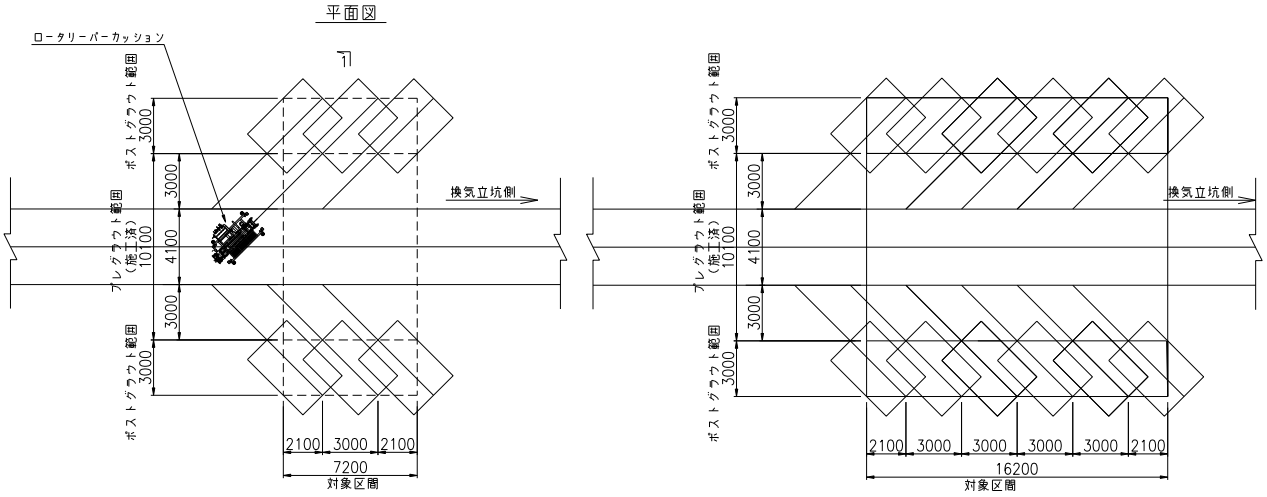
これまで瑞浪では、換気立坑の堆積岩部にポストグラウチングの試験施工が実施されているが（図 4.1-1 参照）、大深度かつ亀裂性の結晶質岩部へのポストグラウチングは初施工である。

ポストグラウチングは前述の通り技術的な課題が多いことから、平成 25 年度までの検討で「施工試験を含む事前検討項目」をリストアップした。更に、これらの検討項目にかかる技術の適用性や最適な手法を確かめたうえで、効果的かつ効率的な施工計画を立案する必要がある。その一方で、平成 26 年度ポストグラウチングを施工する B 工区その 6 工事にかかる予算や工期等の制約条件を考慮する必要があるため、合理的な仕様を目指して設計を実施した。

(i) 詳細設計のための検討

(a) 施工箇所の検討

B 工区その 6 工事におけるポストグラウチングの当初の設計では、坑道延長方向に連続 3 リング（対象区間 7.2m）を 2 箇所施工する仕様であった。しかし、平成 25 年度の検討から、「ポストグラウチングによる止水効果を得るためには、十分な改良区間や改良範囲を確保する必要がある」としており、当初の仕様では各箇所の区間長が十分でないことが懸念される。このため、より効果的な注入および有効性評価ができるよう、3 リング 2 箇所から、連続した 6 リング 1 箇所の施工に変更する（図 4.2-6 参照）。これにより、当初の 2 箇所をつなぐ範囲も改良ゾーンとなり、施工区間長が 7.2m×2＝14.2m から 16.2m に増加するため、十分な改良区間が確保できる。



【当初の基本仕様：2 箇所施工】　　【変更案：1 箇所施工】

図 4.2-6　施工箇所集約の概要（平面図）　　単位：mm

平成 25 年度の検討では、研究アクセス南坑道の「横坑との交差部近傍」および「CM 級区間」の 2 区間を施工箇所の候補に挙げたが、前者は形状が複雑であるため、比較的一様な滴水が見られる後者を施工対象の候補とする。

当該区間の底盤スライス図に、先行ボーリング孔（12MI32 号孔）に基づく地質概要およびプレグラウチングの区間を重ね合わせたものを図 4.2-7 に示す。このうち、プレグラウト⑥の施工区間 TD+77.6～93.6 は湧水発生箇所が多く、カタクレーサイトが交差するうえ、開口割れ目とヘアークラックが密集する。このため、プレグラウト⑥区間を覆う形となる TD+77.6～93.8 の 16.2m 区間を今回のポストグラウチングの施工位置に選定する。

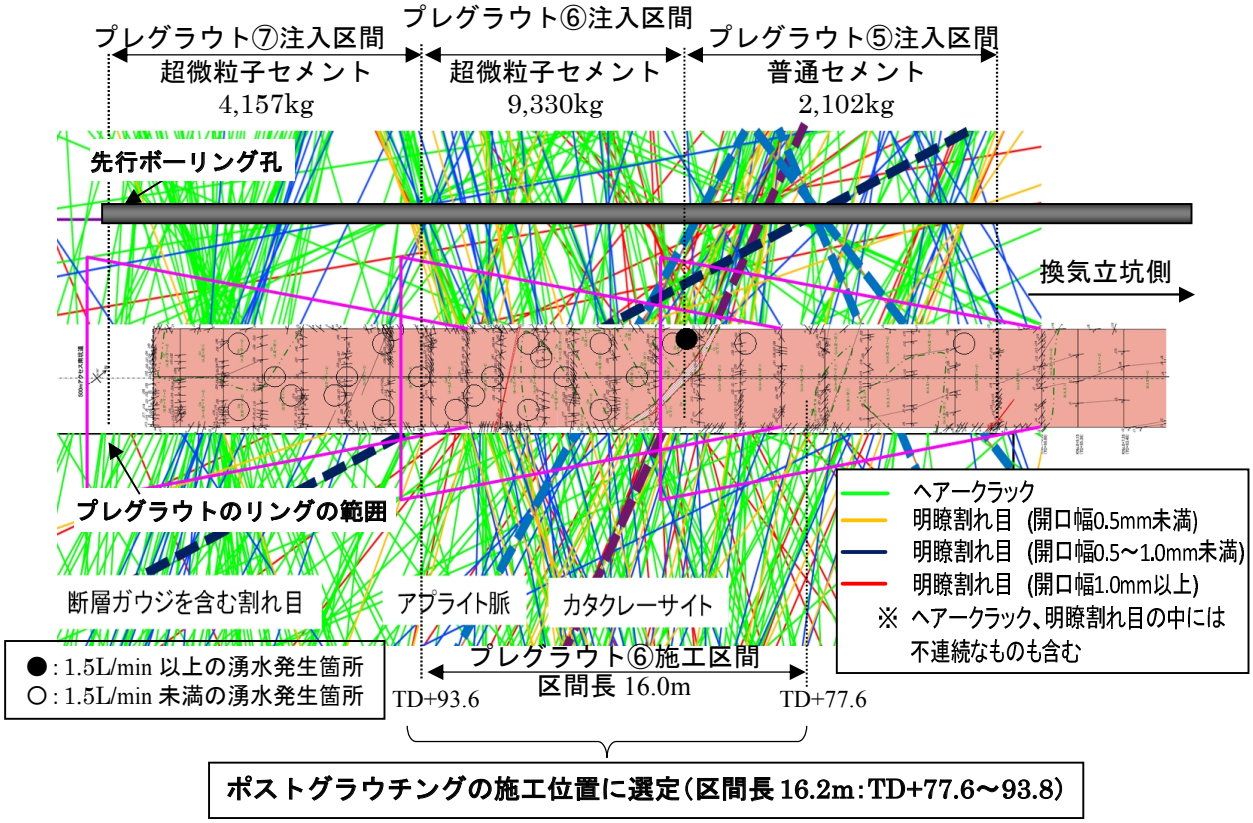


図 4.2-7　地質概要、湧水発生箇所、プレグラウト区間によるポストグラウト施工位置の選定

(b) 注入範囲の検討

1) 注入孔の削孔角度の検討

平成 25 年度の検討では、ポストグラウト孔の壁面に対する削孔角度は、プレグラウト孔の角度（12.5 度）方向と逆向きに孔壁に対して 45 度方向（図 4.2-8[5]参照）として基本計画を立案した。ただし、この角度は暫定的であり、SKB（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）のフォルシュマルク地下施設のグラウト設計（D2 設計）に示されている、「ポストグラウト孔は、原則としてプレグラウト孔に対して相対的に高角度に、約 45 度に配置する設計を基本とする（和訳）」という記述[5]を根拠に設定した。

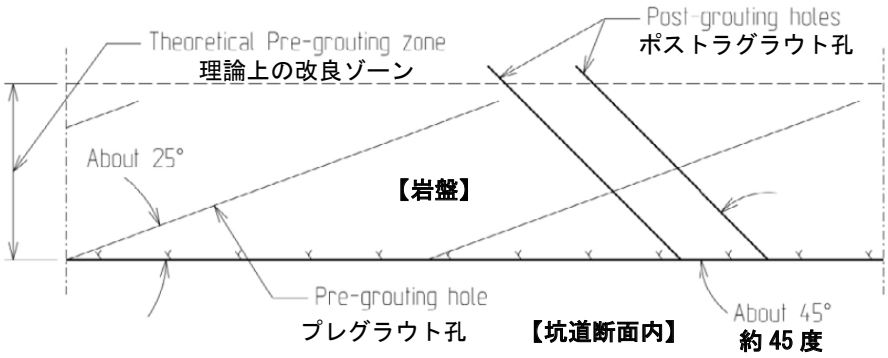


図 4.2-8　SKB のフォルシュマルク処分場で想定するポストグラウト孔の基本設計 [5)]

そこで、研究アクセス南坑道の地質観察結果から、施工対象となるプレグラウト⑥の区間およびその近傍（TD+74.0～99.1）における割れ目状況を分析し、45度の削孔角度方向の妥当性を検討する。

検討区間の亀裂情報を基に作成したステレオネットを図 4.2-9に示す。これによれば、割れ目は特定の走向に偏ることなく、大部分が高角度傾斜である（付録資料1.1 ポストグラウトにかかる設計検討資料参照)。参考までに、坑道掘削前の先行ボーリング調査から得られたステレオネットを図 4.2-10に示す。先行ボーリングの結果においても高角度傾斜の割れ目が多いことが分かる。

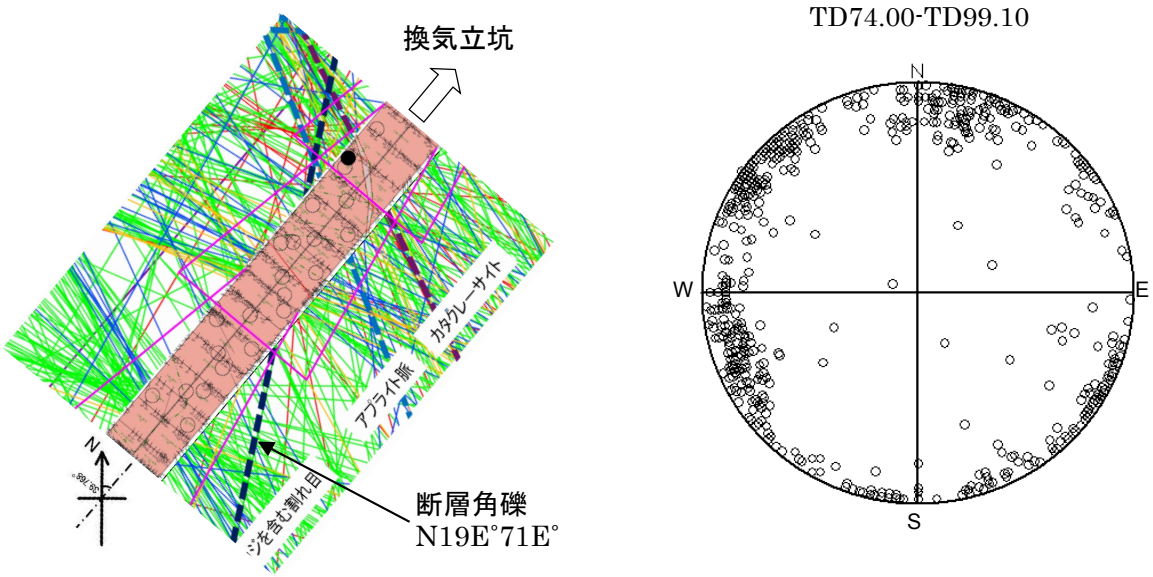


図 4.2-9　プレグラウト⑥近傍の地質概要を上方向が北の方角になるよう回転した図（左）および壁面調査から得た割れ目のステレオネット（右）

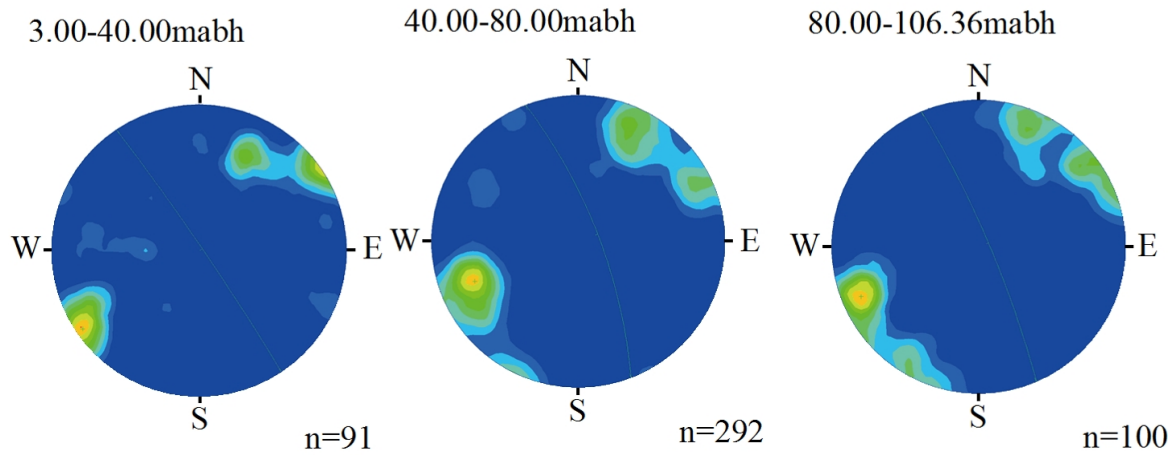


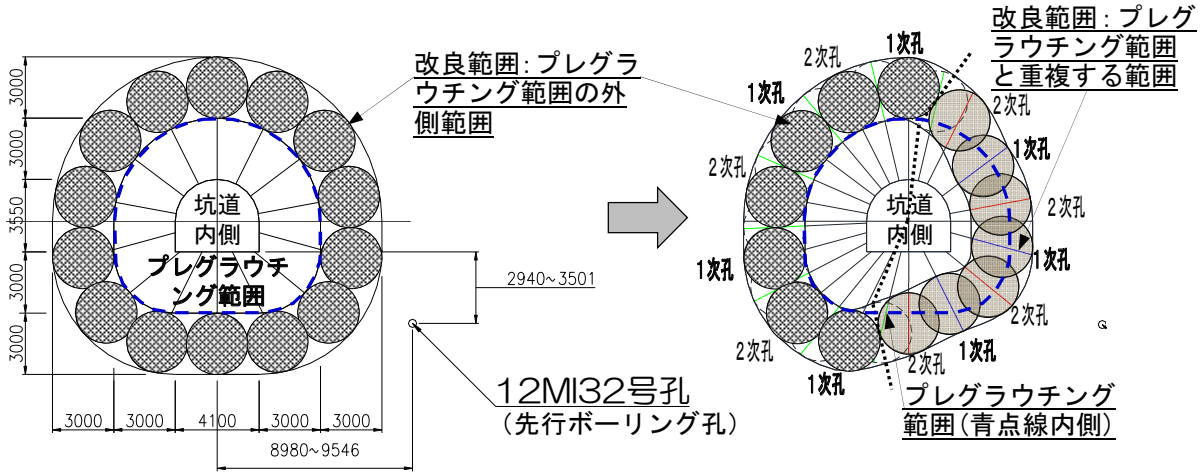
図 4.2-10　先行ボーリング孔のコア観察から得られた割れ目のステレオネット

このように、本施工区間では高角度傾斜の割れ目が卓越するため、壁面に対してあまりに高角度の孔配置では割れ目と交差しにくい可能性が高い。一方、低角度の場合は削孔長が増加して非効率な施工となる。このため、削孔角度の 45 度を妥当と評価する。

2）改良範囲および注入孔配置の検討

B工区その6工事の当初の基本的なポストグラウチングの改良範囲は、既往のプレグラウト設計と同様にグラウト注入材料が1.5m浸透して直径3mの改良体を形成するとし、平成25年度の検討成果に基づいてプレグラウチング範囲の外側（奥側）3mとしていた。すなわち、坑道壁面より深度3-6mが改良範囲であり、1リングあたりの規定注入孔は図 4.2-11の左側に示す通り14本であった。

内挿法による注入がより効果的であることから、14本の規定注入孔のうち1本置きの7本を1次孔、内挿する7本を2次孔として取り扱う仕様とする。また、プレグラウチング範囲の外側を改良する効果を評価できる仕様とするため、規定注入孔のうち半数の7本について改良範囲をプレラウト範囲と重複する範囲に変更する。具体的には、削孔長を短くし、パッカーを手前に設置することで改良範囲を坑道内側に変更する。その際、近傍の先行ボーリング孔12M132号への影響を考慮し、先行ボーリング孔に近い7本を内側に変更する対象とした。図 4.2-11の右側に変更後の仕様を示す。これにより、同一リング内において改良範囲について比較評価ができる仕様とする。



【当初の基本仕様】　　単位：mm　　【改良範囲を変更後の仕様】

図 4.2-11　改良範囲の変更概要（換気立坑側から見た横断面図）

2次孔までの規定注入孔14本のうち、ポストグラウチングの改良範囲を坑道内側に変更した右側7本については、改良範囲同士が重なる見込みであるが、左側7本（当初の改良範囲）については重なりがなく、十分な止水効果を発揮できないことが懸念された。

そこで、綿密な注入により途切れない止水リングを形成すべく、左側の1・2次孔7本およびその両脇の2本を内挿する8本を3次孔として追加する。すなわち、規定注入孔を14本から22本に増加した。以上をまとめた規定注入孔の基本配置図（横断面図）を図 4.2-12に示す。

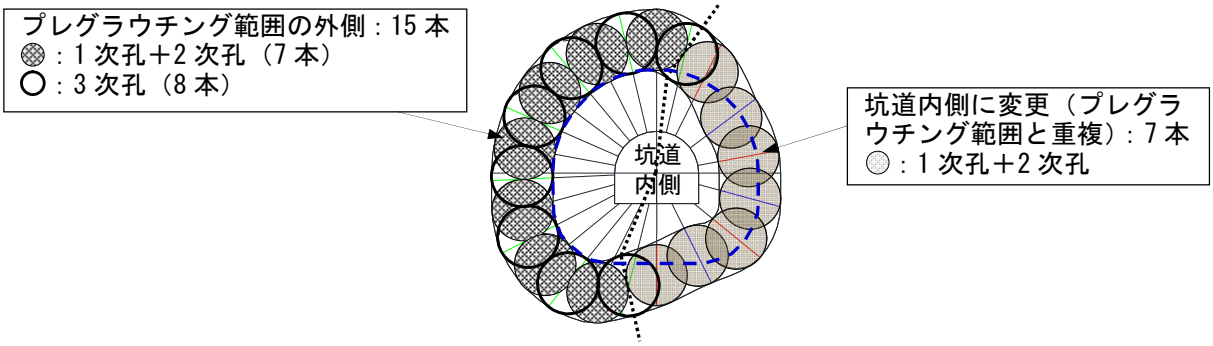
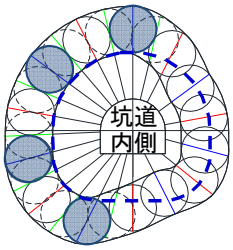


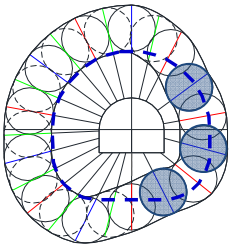
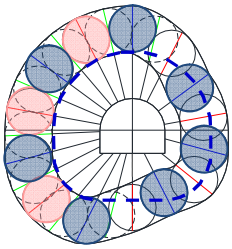
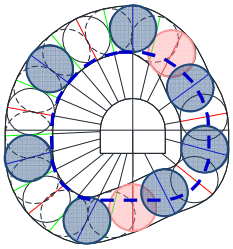
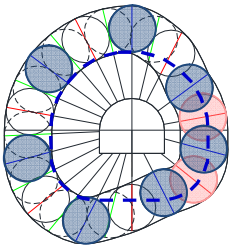
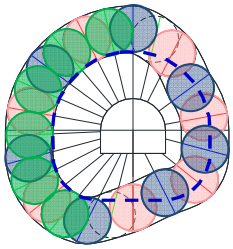
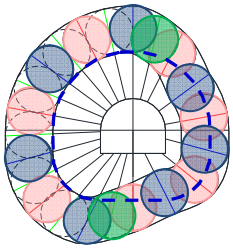
図 4.2-12　規定注入孔の配置図（換気立坑側から見た横断面図）

チェック孔については、3 次孔完了後に 4 本施工する仕様とする。施工位置は、リング内の左右および上下の 4 区画において、それぞれ湧水量が多い箇所の近傍とする。また、今回は工事の制約条件を考慮し、3 次孔までの規定注入孔およびチェック孔の施工完了で各リングのポストグラウチングを終了する（追加孔なし）。

更に、施工の合理化の観点から、2 次孔終了後の 4 本が「いずれも 0.1Lu 以下またはいずれも湧水が発生しない場合」、その 4 本をチェック孔として取扱い 3 次孔を省略する仕様とする。これは、当該リングが 2 次孔完了時に溶液型グラウトの改良限界の水準（0.1Lu）に到達したと考えられるためである。以上の検討結果を踏まえ、1 リングあたりの削孔数量および孔配置の詳細を表 4.2-4 に示す（詳細については付録資料 1.2 ポストグラウトにかかる設計検討資料を参照）。

表 4.2-4　注入範囲を踏まえた 1 リングあたりの削孔数量および孔配置の詳細

<table>
<tr><th>種類</th><th colspan="2">削孔数量および孔配置
（削孔本数および削孔長、配置図は換気立坑側から見た横断面図）</th></tr>
<tr><td rowspan="5">規定注入孔</td><td colspan="2">●1 次孔 7 本：削孔長 52.1m
 

削孔長 8.6m**（4 本）
 
削孔長 5.9m（3 本）</td></tr>
<tr><td colspan="2">●2 次孔 7 本：削孔長 51.6m
 
削孔長 8.6m（3 本）
 
削孔長 7.1m（2 本）
 
削孔長 5.8m（2 本）</td></tr>
<tr><td colspan="2">●3 次孔 8 本：削孔長 67.2m（省略の可能性あり）
 
削孔長 8.6m（6 本）
 
削孔長 7.8m（2 本）</td></tr>
<tr><td>2 次孔で終了時の小計*</td><td>3 次孔で終了時の小計</td></tr>
<tr><td>14 本：削孔長 103.7m</td><td>22 本：削孔長 170.9m</td></tr>
<tr><td>チェック孔</td><td colspan="2">4 本：削孔長 32.0m（8.6m×3 本 ＋5.5m×1 本）</td></tr>
<tr><td>合計</td><td>18 本：削孔長 135.7m</td><td>26 本：削孔長 202.9m</td></tr>
</table>

*　2 次孔完了後の 4 本について、いずれもルジオン値 0.1Lu 以下またはいずれも湧水が発生しない場合。

**　横断面図上の削孔長は 6m であるが、削孔角度が 45 度のため、実削孔長は√2 倍して 8.6m である。その他の削孔長についても、全て同様に横断面図上の寸法の√2 倍に算定した。

注入孔の配置平面図を図 4.2-13 に示す。なお、今回のポストグラウト工事の施工性向上のため、対象区間の底版コンクリート打設（工事契約で実施）はポストグラウト工事が完了してから行うこととした。

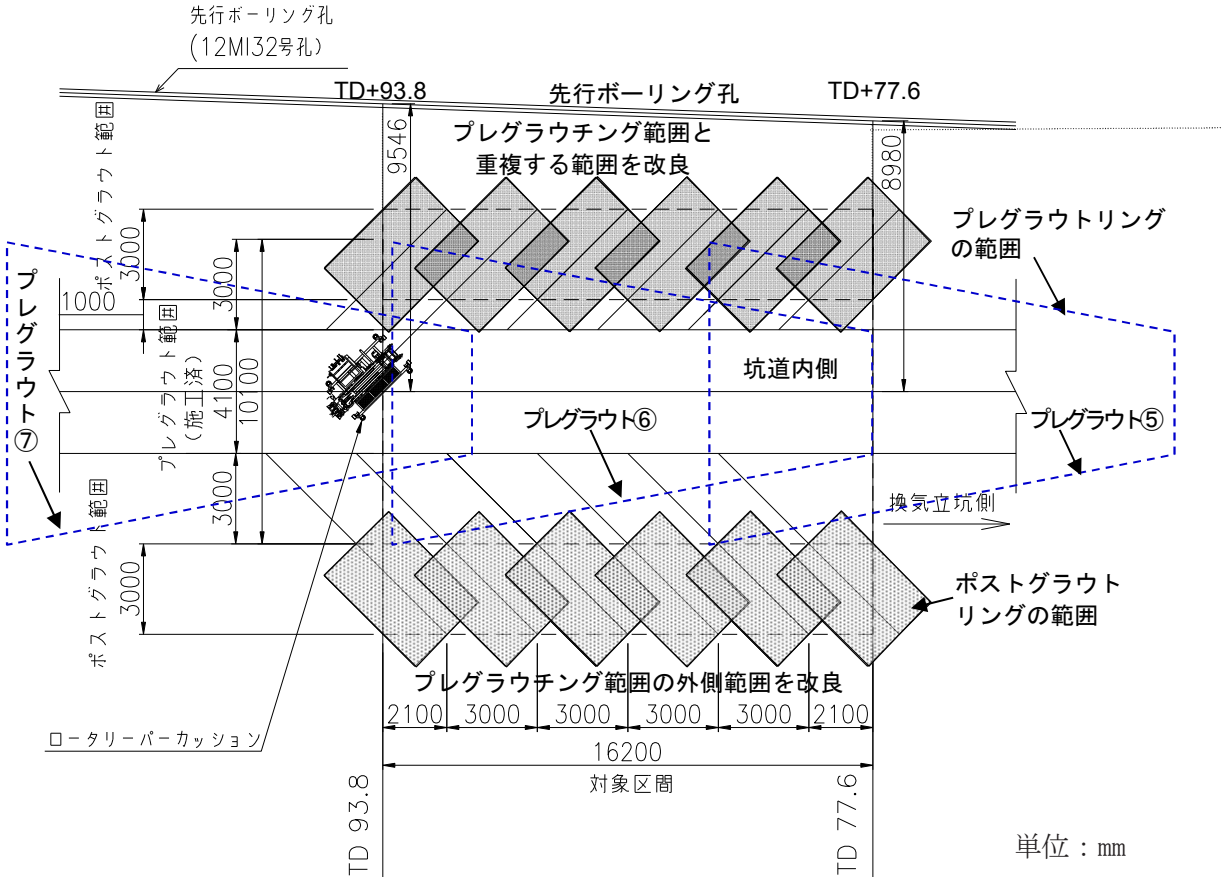


図 4.2-13　注入孔（グラウトリング）配置平面図

(c) グラウト注入材料の検討

平成25年度の検討におけるプレグラウチング結果の評価から、今回の施工区間は微細な亀裂が多く、超微粒子セメントの注入により岩盤の透水性はセメント材の改良限界近くに到達していると推察した。このため、今回のポストグラウチングでは、超微粒子セメントより浸透性が高く、セメント粒子が浸透できない微細な亀裂が改良可能となるグラウト注入材料の適用を検討する。その候補として、活性シリカコロイド系（コロイダルシリカ）の「溶液型グラウト」を挙げる（図 4.2-14参照）。

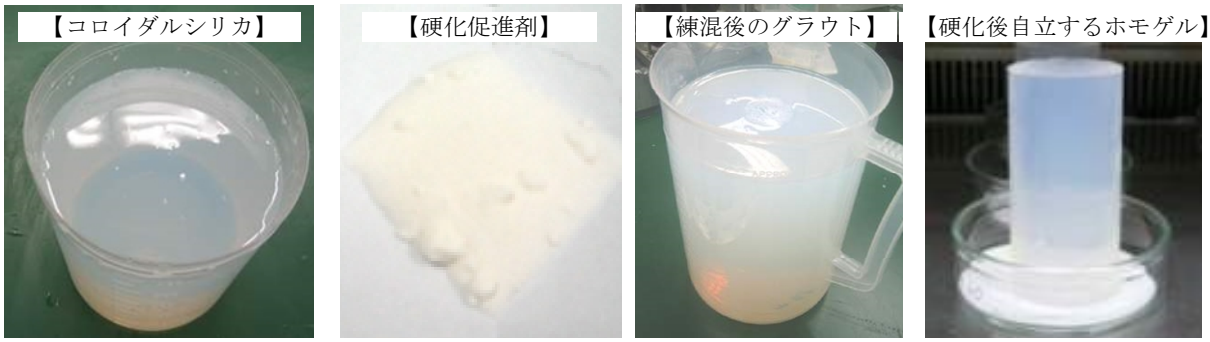


図 4.2-14　活性シリカコロイド系（コロイダルシリカ）の溶液型グラウト

溶液型グラウトは、粒径が10～20nm程度（超微粒子セメント材の1/1000程度）であることから非常に浸透性に優れる。また、イオン交換法によりNaイオンを除去しているため耐久性にも優れている。このため、一般に国内では「恒久グラウト」と呼ばれて砂地盤の液状化対策等の本設注入に使用され、国内外において土木工事として十分な実績がある。また、平成25年度までの情報収集で得られたように、岩盤グラウト工事としての実績が増え始めているグラウト注入材料である。国内では、倉敷のグラウト工事でマイクロフラクチャと呼ばれる改良困難部に採用された実績があり、瑞浪においても、2010年に深度300mのボーリング横坑において施工試験が実施され、その適用性が認められた。海外では、スウェーデンやフィンランドの地下研究所において、大深度高湧水圧下における非常に厳しい許容湧水量を満足するために不可欠な注入材料として適用されている。このため、今後のグラウチング技術の高度化に資するためにも、今回の工事で溶液型グラウトを適用することとする。

ただし、最初のリング（No.1）は仕様確認の位置づけとし、溶液型グラウトと従来の超微粒子セメントの併用によりその効果を比較評価できる仕様とする。以降のリング（No.2～No.6リング）については、透水性が高い場合を除いて全て溶液型グラウトを用いることとする。

適用する溶液型グラウトの仕様は表 4.2-5 に示す通りとする。コロイダルシリカと硬化促進剤の配合比により硬化時間を数分～数時間に調整することが可能であり、配合設計の詳細については 4.2.3 (1) (ii) (a) 溶液型グラウトの配合設計に示す。また、ポストグラウチング後の湧水量予測については、4.2.3 (2) ポストグラウチング後の湧水抑制効果の予測にて事前検討を実施する。

表 4.2-5　溶液型グラウトの仕様

材料名	製品名	物性・主成分・規格など	配合例* （1000L 当り）	備考
コロイダルシリカ	Hi シリカ-R	SiO_2 濃度 30%相当、比重 1.2、pH9～10（透明性乳白色液体）	800　L	溶液型グラウト主材
硬化促進剤	反応剤 NS	中性の無機塩、比重 2.0（白色粉体）	10.75 kg	練混ぜ水に溶かして反応材とする。
練混ぜ水	－	現場処理水、pH8～9	194.63 L	－

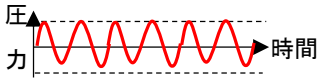
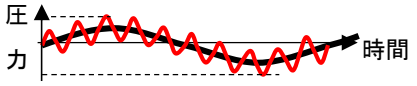
*グラウト液温 28℃一定、ゲルタイム 120 分の条件で室内試験により取得した。この他に温度上昇を考慮して 35℃の条件下でもゲルタイムに応じた配合を取得した。実配合は、注入実施前に現場でビーカー試験により決定した。

(d) 注入装置（注入方式）の検討

削孔機械や注入設備（ポンプ・電磁流量計・高圧パッカー）については、既往のプレグラウチング実績で用いたものと同様のものを用いることとする。注入方式については、従来以上の注入効果を図るため、平成25年度の情報収集から得られた動的注入方式の導入を検討する。

表 4.2-6に通常注入である静的注入および二種類の動的注入方式の概要を比較する。

表 4.2-6 注入方式の比較

	静的注入 （通常注入）	単動的注入	複合動的注入
注入波形	 （一定圧で注入）	 短波（または長波）による動的変動	 長波（低周波）と短波（高周波）の複合波による動的変動
特長	・注入速度を一定に保って注入する。 ・在来の注入方式であり、施工実績は多い。 ・機材や設備の追加費用が発生しない。	・グラウト注入材料に短波（または長波）の脈動を与えることにより、注入効果の向上が期待できる。 ・室内実験によりその効果が示されている[6]。 ・追加孔などの注入孔数（削孔数）の減少が期待できる。	・振動数の異なる2種（長波、短波）の脈動を与えることにより、注入効果の向上が最も期待できる。 ●短波：注入材料の凝集抑制効果（微細亀裂への浸透性向上） ●長波：脈動到達範囲の延伸効果（浸透距離の増加） ・室内実験および実証試験によりその効果が示されている[6]。 ・ヘアークラックが密集する場合や、透水性が小さい場合ほど改良効果が発揮しやすい。 ・注入効果向上により追加孔などの注入孔数（削孔数）の減少が最も期待できる。
備考	・今回のように動水勾配が高いポストグラウト工事や限られた孔数での施工では、十分な改良効果が出ない可能性がある。 ・すなわち、十分な止水効果発揮のためには、追加孔が多く必要となる可能性が最も高い。	・静的注入に比べて、脈動発生装置や管理装置の機械設備費用が生じる。 ・岩盤グラウト工事への採用実績が少ない。	・静的注入に比べて、脈動発生装置や管理装置の機械設備費用が生じる。 ・岩盤グラウト工事への採用実績が少ないが、倉敷での採用実績あり ・倉敷では溶液型グラウトを注入時にも採用された。

※倉敷：倉敷LPG貯槽建設工事

静的注入は従来の注入方式であり、リターンバルブの効果により流量を変化させずに一定圧で注入する方式である。注入にかかる追加の設備費用は発生しないが、動水勾配が高いポストグラウチングという条件や、今回のような限られた孔数の施工では、静的注入では十分な止水効果が出ない可能性が考えられる。

単動的注入は、脈動発生装置の流路遮断板を回転させることにより流量を変化させて1～30Hzの短波を発生させ、グラウト粒子の分散性向上により粘性低下を促し、目詰まりを抑制させる注入方式である。これにより、静的注入での浸透限界よりも小さい亀裂への浸透が可能となり、同時に浸透距離が拡大することで改良効果の向上が可能となる。十分な改良が確保できた場合、追加孔などの孔数を減らせる可能性がある。また、既存のグラウト設備に接続して使えるため、導入コストは機械設備装置の使用料程度である。ただし、岩盤グラウト工事への採用実績は少ない。

複合動的注入は、注入ポンプに設置した動的周波数設定器（インバータ）の周波数を変えることで流量を変化させ、脈動の到達範囲の延伸効果のある0.5Hz以下の長波を発生させ、短波と組み合わせて複合波を伝播させる注入方式である。複合波の効果により、単動的注入よりも浸透距離の延伸効果を期待できることが室内実験や実証試験により示されている（図 4.2-15[6]参照）。すなわち、複合動的注入の適用により追加孔などの孔数を単動的注入より減らせる可能性がある。したがって、亀裂開口幅が小さいヘアークラックが密集する場合や、亀裂が少なくて透水性が低い場合においても最も有効であると考えられる。導入コストは単動的注入と同様に機械設備装置の使用料程度である。岩盤グラウト工事への採用実績は少ないが、倉敷では超微粒子セメントおよび溶液型グラウトの双方で導入された実績がある。

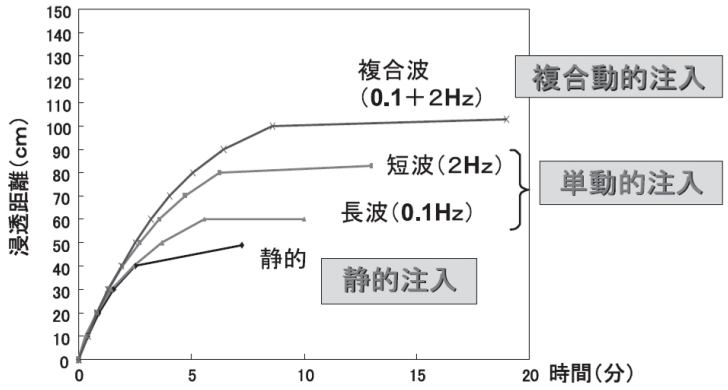


図 4.2-15　注入方式による浸透距離の経時変化（室内試験結果）[6]

複合動的注入設備の構成概要を図 4.2-16[6]に、脈動発生装置などの写真を図 4.2-17に示す。

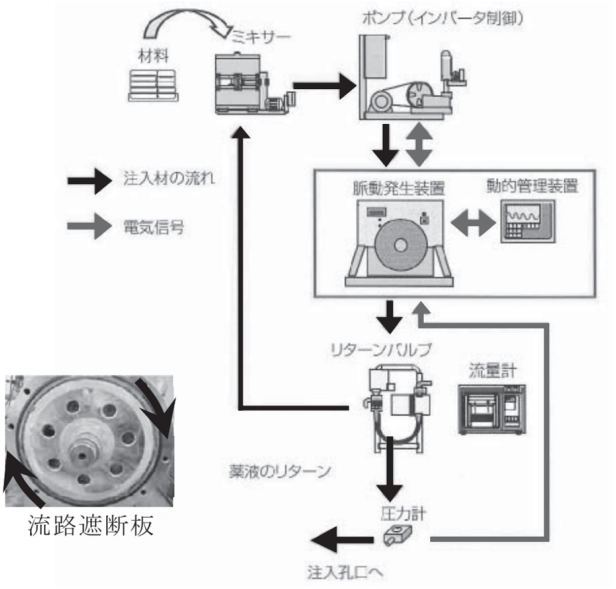


図 4.2-16　複合動的注入設備の構成概要 [6)]

図 4.2-17　脈動発生装置（左）および動的管理装置（右）

前述のとおり今回の工事は難しいとされるポストグラウチングであることを鑑み、グラウト浸透効果が最も期待できる複合動的注入方式を導入し、高水圧かつ溶液型グラウトを使用する条件下においてその適用性と注入効果を確認することする。

長波および短波の圧力振動の設定値は、倉敷での施工実績をもとに暫定的に下記の仕様を設定し、注入状況に応じて変更することとする。

・ 長波：周波数 0.06Hz、振幅±5%
・ 短波：周波数 6.00Hz、振幅±5%

また、No.1リングでは（グラウト注入材料の比較評価を行うため）通常注入とし、No.2リングにおいて仕様確認の位置づけとして複合動的注入の適用時と非適用時を併用し、適用効果を比較評価できる仕様とする。以降のリング（No.3～6）については、特定の場合（リークが発生時、一定圧で流量増加時、チェック孔注入時）を除いて全注入孔に複合動的注入を用いる仕様とする。

(ii) ポストグラウチングの詳細設計

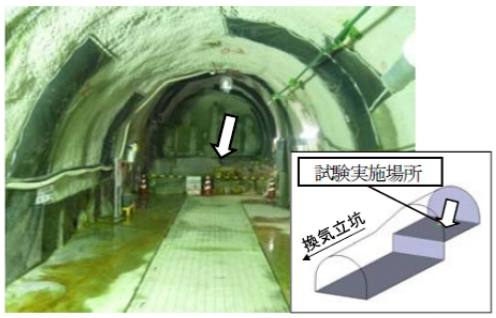
(a) 溶液型グラウトの配合設計

1) ゲルタイムの設定

溶液型グラウトは硬化促進剤の添加量により数分から数時間のゲルタイムの調整が可能である。グラウト浸透距離はこのゲルタイムに依存することが分かっており、長い場合は十分なグラウト浸透が期待できるが、注入時間が長くなることや地下水に希釈されることによる硬化不良が懸念される。一方、ゲルタイムが短い場合は、効率的な施工が可能であるが十分なグラウト浸透が確保できないことや注入配管やホース内にてゲル化し始めて施工性が低下する懸念がある。

倉敷の事例では、マイクロフラクチャと呼ばれる微細な亀裂への十分な浸透を優先したことから長時間のゲルタイムを妥当として 180 分の配合が採用されていた。その一方で、スウェーデンやフィンランド（北欧）では、20～60 分程度の短いゲルタイムの配合が採用されている。北欧のゲルタイムが短い理由として、北欧ではグラウト浸透理論に基づいて必要な浸透距離を確保する設計を実施しており、一般に高圧注入を実施していることから、短いゲルタイムで十分満足する（必要浸透距離に到達する）ことが挙げられる。そこで、今回の配合設計では、瑞浪の深度 300m における溶液型グラウトの試験施工の実績および北欧の注入理論を基に適切なゲルタイムと注入圧を検討する。

深度 300m のボーリング横坑における試験施工の実績（図 4.2-18[7]参照）では、ゲルタイム 120 分と 180 分の配合を採用し、最終的に 120 分で十分な施工性と改良効果が確認した。注入範囲は深度 3～6m であり、今回の工事においても、プレグラウチング範囲の外側範囲を改良する場合は壁面からの深度 3～6m であり同等である。ただし、今回は改良範囲を壁面側に寄せた注入孔もあり、浸透性が高過ぎると壁面リークの発生が懸念される。このことから、ゲルタイムを最長 120 分と設定し、120 分以下のゲルタイムにおけるグラウト浸透距離について検討する。



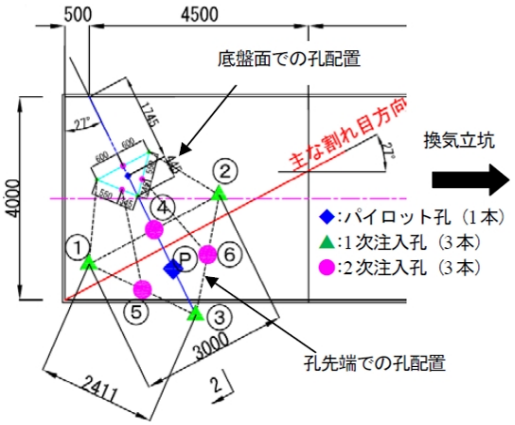
試験実施場所（試験前，立坑側から撮影）

施工試験状況（試験中，立坑側から撮影）

試験に使用した配合

ゲルタイム	Hiシリカ (L)	硬化促進剤 (kg)	水道水 (L)	アミノG酸* (L)	比重
180分	80	1.094	19.05	0.40	1.17
120分	80	1.250	19.37	0.01	1.17

*180分配合を注入した際にリークが発生したため，排水への影響を考慮して，アミノG酸の添加量を大幅に減らし，さらにゲルタイムを120分に変更している．



グラウト孔配置図（平面図）

図 4.2-18　深度 300m のボーリング横坑で実施した試験施工のグラウチング概要 [7]

2) 北欧のグラウト浸透理論に基づくグラウト浸透距離の検討

瑞浪の深度 300m と、スウェーデンのエスポ硬岩研究所の深度 450m の双方において、溶液型グラウト注入について比較評価した研究[8]によると、瑞浪の注入範囲の亀裂開口幅の分布は 10～48μm に推定とされている。10μm は北欧では溶液型グラウトの浸透限界とされる亀裂開口幅である。表 4.2-7[8]は瑞浪の 10μm の亀裂におけるグラウト浸透距離を北欧の浸透理論に基づいて事後評価した結果である。推定した浸透距離が $I_{max,2D}$= 3.37m（ゲルタイムが 180 分の配合）または 2.69m（120 分の配合）であり、注入孔間の距離のうち 50%がラップする距離が必要浸透距離 I_{req} である。ここでは、I_{req} =2.25m であることから、いずれも $I_{max,2D}$ 以上である。（孔間距離 d =3m より 50%のラップ長は 1.5m、よって I_{req}= 3/4×d =2.25m、図 4.2-19 参照）。

表 4.2-7　深度 300m の施工試験について、北欧の浸透理論に基づいた浸透距離の推定 [8]

Table 4 Penetration length calculated in MIU-300m-niche by means of the Swedish design method

Input parameter and output (a) 180 min gel time, (b) 120 min gel time			Reference
Smallest hydraulic fracture aperture to be sealed (b)	10 μm		Fig.7
Bore hole distance (d)	3 m		Fig. 2
Overlap	50 %		Same condition applied in TASS-tunnel
Required Penetration (I_{req})	2.25 m		I_{req}=3/4×d (Table 3)
Grouting overpressure (Δp)	2 MPa		Table 3
Viscosity (μ_0)	(a) 2.14 mPas	(b) 2.24 mPas	Measured during the grouting experiment
Gel induction time (t_G)	(a) 60 min	(b) 40 min	1/3 of gel time (Funehag, 2008a)
Theoretical penetration length (I_{max-2D})	(a) 3.37 m > I_{req} (2.25 m)	(b) 2.69 m > I_{req}	Equation 2

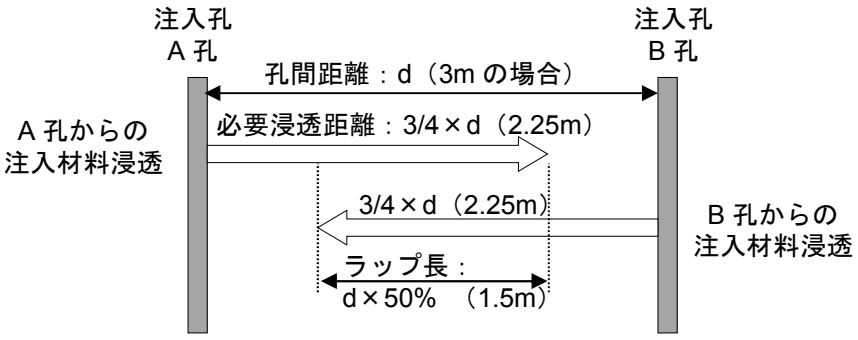


図 4.2-19　グラウト浸透における孔間のラップ長の考え方（孔間 3m、50%ラップ長の例）

北欧では一般に、CTH で開発された溶液型グラウトのグラウト浸透理論に基づき、この 50%のラップ長が確保できるようゲルタイムが設計されている[9]。瑞浪の深度 300m の実績では、ゲルタイムが長い配合を用い、ダメ押し注入による注入停止基準を採用したため、結果的に（北欧の設計における）必要浸透距離を十分確保し、北欧の設計仕様より相対的に長い注入時間および浸透距離を確保したといえる。すなわち、瑞浪の試験施工の実績は北欧より安全側の注入仕様であることが判明した。

更に、瑞浪の深度 300m の実績では、十分な止水性とともにその後のモニタリングからグラウト注入材料の耐久性が確認されている。この止水性が北欧の設計（浸透理論）で説明がつくことから、瑞浪のような亀裂頻度が多い岩盤においてもこの浸透理論を用いた配合設計の適用性があると考えられる。

このため今回のポストグラウト工事の配合設計においても、北欧の浸透理論をベースに、亀裂開口幅とゲルタイムと注入圧に応じた浸透距離の検討を行う。なお、注入圧については、注入差圧（湧水圧を超える注入圧）＝1.5MPa を基本とする。湧水圧が約 3.5MPa のため、注入差圧＝1.5MPa でも注入管理圧が 5MPa におよぶ超高圧注入である。

具体的には、「最大亀裂の想定による最大浸透距離抑制の照査（ゲルタイムまたは注入圧の制限)」および「最小亀裂における必要浸透距離到達の照査（最短ゲルタイムの設定)」の二種類の検討を実施する。検討結果の概要を表 4.2-8[11]に示す。

ここで、グラウト浸透距離は、同表中に示した理論式に各種算定条件を入力して算出するが、特筆すべきはゲルタイムに応じて決まる Gel induction time（ゲルインダクションタイム）を注入時間として設定することである。Gel induction time とは、粘性が配合時の 2 倍になる時間であり、Gel induction time 以降は理論上わずかしか浸透距離が増加しない（図 4.2-20[10]参照）。このため、Gel induction time 到達時の浸透距離が、設計上の（最終）浸透距離である。更に、北欧の注入停止基準では、未硬化のグラウト注入材料の流出防止の観点から、注入を開始してから「ゲルタイムの半分」以上の時間が経過してから注入停止する。すなわち、ゲルタイムに応じた規定注入時間を設定している。ただし、注入流量が減少していない状態で停止する可能性があるため、日本では一般的なダメ押し注入の停止基準より危険側の停止基準であると考えられる。

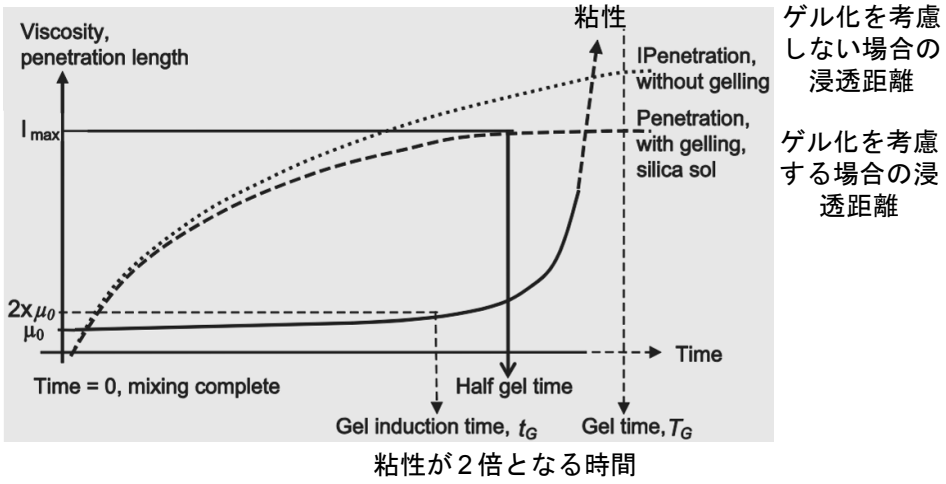


図 4.2-20　溶液型グラウトの注入時間に対する粘性および浸透距離の関係 [10]

i）最大亀裂の想定による最大浸透距離の抑制（ゲルタイムまたは注入圧の制限）

今回の注入区間はプレグラウチングが実施されており、坑道掘削後に岩盤内部の地質調査は実施されていない。このため亀裂開口幅およびその分布の推定は困難であるが、仮に亀裂を 1 本と仮定すれば、水押し試験の結果から当該孔における理論上の（水理学的）最大亀裂開口幅（b_{hyd}）および最大のグラウト浸透距離を求めることが可能である。透水性が高い注入孔については、最大亀裂開口幅が大きくなるためグラウト浸透距離(すなわち注入量)が過大となる可能性があり、

ゲルタイムが 120 分より短い配合への変更や注入差圧を 1.5MPa より下げることを検討する。そこで、1Lu の透水性の岩盤で注入差圧＝1.5MPa で注入時の浸透距離 $I_{2d\,bhyd}$=36.02m（CTH の浸透理論に基づいて算出、表 4.2-8[11] 参照）を上限とした。

これにより、2Lu の場合はゲルタイム 120 分から 80 分の配合へ変更し、3Lu 以上の場合は同じく 80 分の配合で注入圧を 1.0MPa に下げる仕様とする。また、5Lu 以上の場合は透水性が極めて高いため、浸透距離がさらに過大となり周辺岩盤への影響だけでなく表面リークも懸念されることから、グラウト注入材料を溶液型グラウトから超微粒子セメントに変更することとする。

ii）最小亀裂における必要浸透距離到達の照査（最短ゲルタイムの設定）

次に､溶液型グラウトが浸透可能とされる最小の亀裂開口幅 10μm に対してゲルタイム 120 分、80 分、50 分、35 分の配合におけるグラウト浸透距離を算定し、「①今回の設計仕様である改良範囲の半径 1.5m に到達するか」および「②北欧の設計仕様の 50%のラップ長 2.25m に到達するか」を照査する。なお、ゲルタイム 35 分未満の配合は施工性が低いため検討しない。

その結果、①については、注入差圧＝1.5MPa および 1.0MPa の両方において、全配合で満足することが分かる。一方、②については、注入差圧＝1.5MPa において 120 分、80 分、50 分の配合、1.0MPa において 80 分、50 分の配合で満足する（図 4.2-21 および表 4.2-8[11] 参照）。

すなわち、「注入差圧＝1.5MPa で 35 分の配合」または「注入差圧＝1.0MPa で 50 分または 35 分の配合」にて注入する場合、設計仕様の 3m の改良体構築は可能であるが、理論上のラップ長が形成されないため、3 次孔の注入が不可欠である。

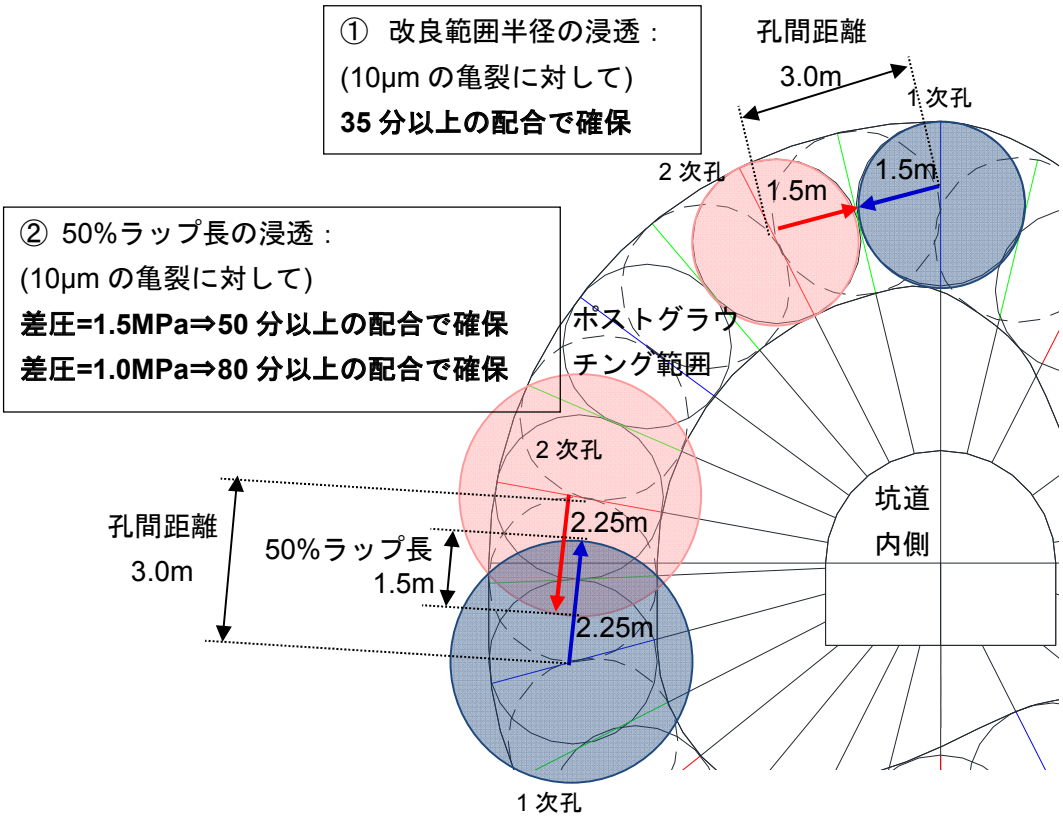


図 4.2-21　ゲルタイムに応じたグラウト浸透距離の検討

表 4.2-8　岩盤の透水性（ルジオン値：Lu）に応じたゲルタイムと注入圧から算定した浸透距離およびその照査 [11)]

		1Lu	2Lu				3Lu					備考
算定条件												
湧水量 Q	(L/min)	20.21	40.43	40.43	40.43	40.43	60.64	60.64	60.64	60.64	60.64	
	(m^3/s)	0.0003	0.0007	0.0007	0.0007	0.0007	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	
水頭 dh	(m)	357.1	357.1	357.1	357.1	357.1	357.1	357.1	357.1	357.1	357.1	最大湧水圧 3.5MPa より
透水量係数 $T \fallingdotseq Q/dh$	(m^2/s)	9.4E-07	1.9E-06	1.9E-06	1.9E-06	1.9E-06	2.8E-06	2.8E-06	2.8E-06	2.8E-06	2.83E-06	透水量係数の近似式より [11)]
水理学的最大亀裂開口幅 $b_{hyd}=(12\mu T/g\rho)^{(1/3)}$	(m)	1.05E-04	1.3E-04	1.3E-04	1.3E-04	1.3E-04	1.5E-04	1.5E-04	1.5E-04	1.5E-04	1.51E-04	1 本の亀裂と仮定した場合
	(μm)	105	132	132	132	132	151	151	151	151	151	
ゲルタイム	(min)	120	120	80	50	35	80	50	80	50	35	**ゲルタイムのパラメータ分析**
Gel induction time t_G	(min)	66	66	44	27.5	19.25	44	27.5	44	27.5	19.25	t_G = 初期粘性が倍になる時間
(=粘性が 2 倍になる時間)	(s)	3960	3960	2640	1650	1155	2640	1650	2640	1650	1155	室内試験よりゲルタイム 55%
改良可能な最小亀裂 b_{req}	(m)	1E-05	1E-05	1E-05	1E-05	1E-05	1E-05	1E-05	1E-05	1E-05	1E-05	海外知見の浸透限界（10μm）
注入差圧 Δp	MPa	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1.5	+1	+1	+1	**注入圧によるパラメータ分析**
	Pa	2E+06	2E+06	2E+06	2E+06	2E+06	2E+06	2E+06	1E+06	1E+06	1E+06	
グラウト初期粘性 μ_0	(Pas)	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	0.0017	坑内温度 28℃
グラウト浸透距離の算定 $(I_{2\text{-}D}=0.45*b*(\Delta p*t_G/6\mu_0)^{0.5})$												CTH の浸透理論に基づく [9)]
最大亀裂 b_{hyd} の浸透距離	(m)	36.02	45.39	37.06	29.30	24.51	42.42	33.54	34.64	27.38	22.91	1 本の亀裂と仮定した場合
$I_{2D,\ byd}$		☆	△	☆			△		☆			△:過大の可能性、☆:開始配合
最小亀裂 $b_{10\mu m}$ の浸透距離 $I_{2D,\ 10\mu m}$	(m)	**3.43**	**3.43**	**2.80**	**2.22**	**1.85**	**2.80**	**2.22**	**2.29**	**1.81**	**1.51**	10μm の亀裂を最小と仮定
グラウト浸透距離の照査												
孔間距離 d (2 次孔まで施工時)	(m)	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	2.94	坑道中心より 6.55m 外側に 1 次孔と 2 次孔で 14 本の等配置
①改良体の必要半径 $d/2$	(m)	**1.47**	**1.47**	**1.47**	**1.47**	**1.47**	**1.47**	**1.47**	**1.47**	**1.47**	**1.47**	
②50%ラップ長 $I_{req}=0.75d$	(m)	**2.20**	**2.20**	**2.20**	**2.20**	**2.20**	**2.20**	**2.20**	**2.20**	**2.20**	**2.20**	
①改良体半径到達の照査 $I_{2D,\ 10\mu m} > d/2$		◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	○	改良体形成の浸透距離に到達
②50%ラップ到達の照査 $I_{2D,\ 10\mu m} > I_{req}$		◎	◎	◎	○	×	◎	○	○	×	×	浸透理論によるグラウト設計

3) 溶液型グラウトの注入仕様

検討結果を踏まえ、溶液型グラウトの注入仕様は、各注入孔のルジオン値（Lu）に応じてゲルタイム 120 分または 80 分の配合で開始し、規定圧に到達できない場合、リーク発生時や定圧注入時に流量が増加する場合などはゲルタイムの短い配合に 35 分まで変更することとする。

注入停止基準については、北欧のグラウト理論に基づく流出防止の観点からゲルタイムの 3/4 倍以上、すなわち 120 分の 3/4 倍の 90 分以上の注入時間の確保したうえで、既往の瑞浪でのグラウチング実績および北欧より安全側の設計を考慮し、「規定流量（流量低下時のダメ押し注入）」および「規定注入量」を採用する。以上、今回の注入仕様を表 4.2-9 にまとめて示す。

表 4.2-9　各孔の地質状況に応じた溶液型グラウトの注入仕様

<table>
<tr><td rowspan="2">水押し試験結果</td><td colspan="4">開始配合（1000L 当り）</td><td rowspan="2">注入差圧</td><td rowspan="2">備考</td></tr>
<tr><td>ゲルタイム</td><td>Hi-シリカ R</td><td>反応剤 NS</td><td>現場処理水</td></tr>
<tr><td>Lu＜2</td><td>120 分</td><td>800L</td><td>10.75kg</td><td>194.63L</td><td>湧水圧 +1.5MPa</td><td rowspan="3">・リーク発生時や定圧注入時に流量増加時、段階的に 120 分⇒80 分⇒50 分⇒35 分までゲルタイムの短い配合に変更 (※)。
・温度上昇時は図 4.2-22 に基づき、ゲルタイムを補正（ゲルタイムより 8*⊿t（min）ゲルタイムの短い配合に切り替え）</td></tr>
<tr><td>2≦Lu<3</td><td>80 分</td><td rowspan="2">800L</td><td rowspan="2">11.50kg</td><td rowspan="2">194.25L</td><td>+1.5MPa</td></tr>
<tr><td>3≦Lu<5</td><td>80 分</td><td>+1.0MPa</td></tr>
<tr><td>5≦Lu</td><td colspan="4">（超微粒子セメントに変更）</td><td>+1.0MPa</td><td>・既往のプレグラウチング実績に基づく</td></tr>
<tr><td rowspan="2"></td><td>50 分</td><td>800L</td><td>12.50kg</td><td>193.75L</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">・(※)により配合の変更時。</td></tr>
<tr><td>35 分</td><td>800L</td><td>1.300kg</td><td>193.50L</td></tr>
<tr><td colspan="7">注入停止基準</td></tr>
<tr><td colspan="7">最低注入時間を 90 分*とし、それ以降に(1)または(2)の規定により完了する。
(1) 規定流量：流量が 0.5L/min に低下⇒10 分間のダメ押し注入後に完了
(2) 規定注入量：500L 到達時に完了
*ただし、90 分未満でも流量がゼロ（0.0L/min）の場合はダメ押し注入後に完了</td></tr>
</table>

なお、ゲルタイムは温度依存性があり、注入設備のリターンの機構によりポンプ熱を受けてゲルタイムが早まる可能性がある。このため、温度上昇が認められる場合は高温時でも所定のゲルタイムが得られるように配合を調整することとした。具体的には、室内試験よりグラウト温度が 1℃上昇すると約 8 分ゲルタイムが短くなることが判明したため、坑内温度からの上昇が⊿t（min）の場合、所定のゲルタイムより 8*⊿t（min）ゲルタイムの短い配合に切り替える計画とした。その際、深度 500mの研究アクセス南坑道内で取得した添加量とゲルタイムの関係（図 4.2-22）を基に、補正した添加量を設定することとした。例えば、5℃上昇する場合は 40 分ゲルタイムを増加させた配合になるよう添加剤量を減少させる。

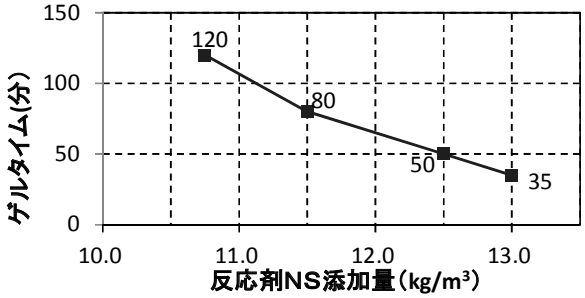
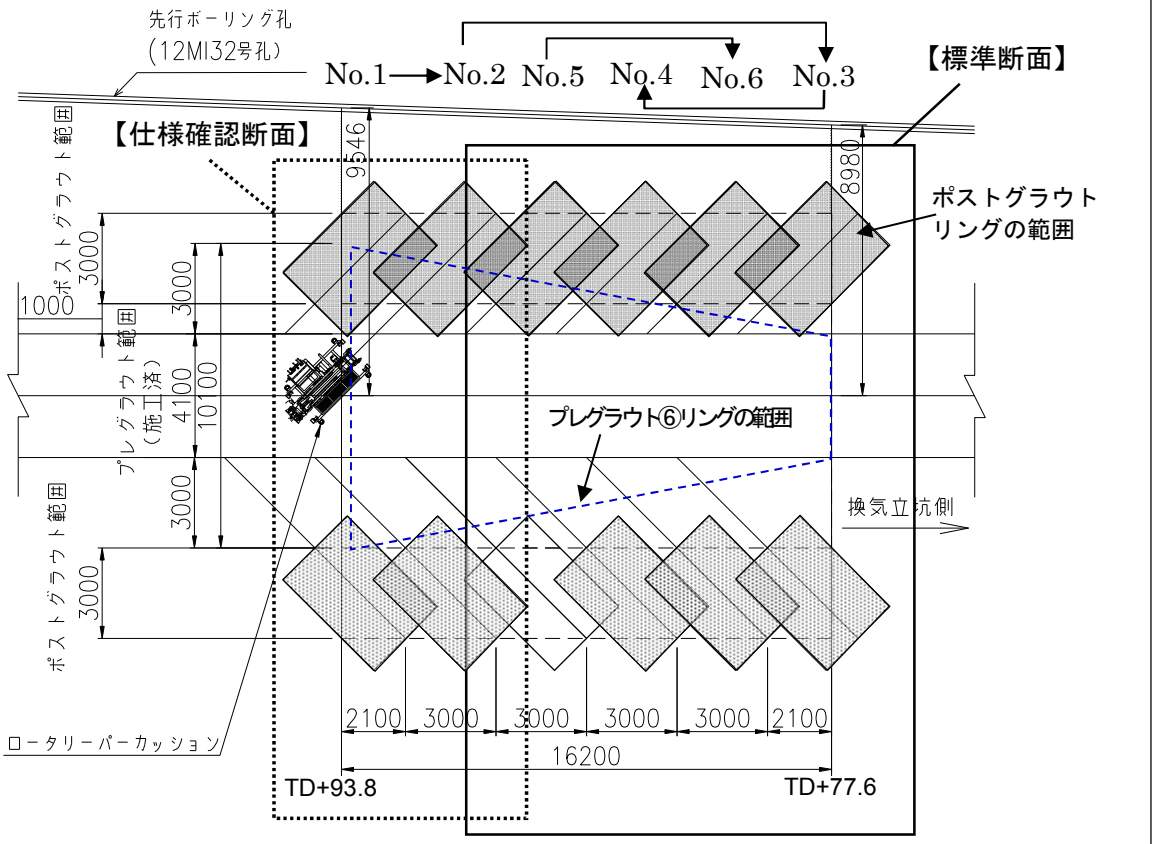


図 4.2-22 ゲルタイムと硬化促進剤の添加量の関係（深度 500m 坑内での試験結果）

(b) 注入リング毎の設計

これまでの施工箇所・注入範囲・注入材料および注入装置の検討結果を踏まえ、6 リングのうち、最初の 2 リングを仕様確認断面として比較評価ができる仕様とし、残り 4 リングを標準断面とする（図 4.2-23 参照）。仕様確認断面では、溶液型グラウトの適用効果または複合動的注入の導入効果を効率的に評価できるよう、上下で異なる仕様に分ける。また、効率的に水みちを減らすべく、完了したリングを内挿する順序で次リングを施工する仕様とする（図中の No.1→6 の順）。



	ﾘﾝｸﾞ	区分	グラウト注入材料	注入方式
仕様確認	No.1	上部	超微粒子セメント	静的注入（通常注入）
		下部	1・2 次：超微粒子ｾﾒﾝﾄ 3 次：溶液型グラウト	
	No.2	上部	溶液型グラウト	1 次：静的注入 2 次・3 次：複合動的注入
		下部		静的注入
標準	No.3～6	―	溶液型グラウト	複合動的注入

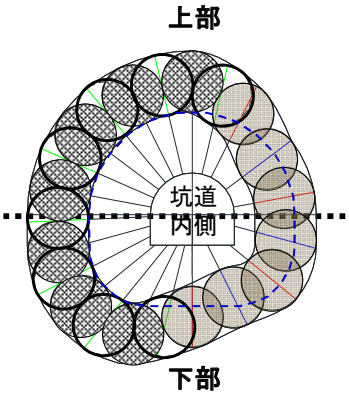


図 4.2-23　各リングの仕様および断面内の仕様の区分けについて

(c) 注入仕様のまとめ

今回のポストグラウチング仕様の概要を表 4.2-10 に、設計図面を図 4.2-24 に示す。

表 4.2-10　ポストグラウチングの仕様の概要

<table>
<tr><th colspan="2">項目</th><th>詳細</th><th>備考</th></tr>
<tr><td rowspan="2">削孔工</td><td>削孔仕様</td><td>・発破削孔用ジャンボを使用し、削孔径φ66
・孔間隔は1次孔間で6m、内挿法で最大3次孔まで
・孔角度はプレグラウト孔と逆向きに45度</td><td>既往のプレグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td>削孔本数および削孔長</td><td>
<table>
<tr><th>次数</th><th>ｸﾞﾗｳﾄ注入材</th><th>本数</th><th>削孔長</th></tr>
<tr><td rowspan="2">1次</td><td>超微粒子ｾﾒﾝﾄ</td><td>7本</td><td>52.1m</td></tr>
<tr><td>溶液型ｸﾞﾗｳﾄ</td><td>35本</td><td>260.5m</td></tr>
<tr><td rowspan="2">2次</td><td>超微粒子ｾﾒﾝﾄ</td><td>7本</td><td>51.6m</td></tr>
<tr><td>溶液型ｸﾞﾗｳﾄ</td><td>35本</td><td>258.0m</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3次</td><td>超微粒子ｾﾒﾝﾄ</td><td>4本</td><td>33.6m</td></tr>
<tr><td>溶液型ｸﾞﾗｳﾄ</td><td>最大44本</td><td>369.6m</td></tr>
<tr><td>ﾁｪｯｸ</td><td>溶液型ｸﾞﾗｳﾄ</td><td>24本</td><td>192.0m</td></tr>
<tr><td>合計</td><td>－</td><td>最大156本</td><td>1217.4m</td></tr>
</table>
</td><td>2次孔終了後の4本が全て0.1Lu未満の場合は、チェック孔として取扱い、3次孔の省略</td></tr>
<tr><td rowspan="11">注入工</td><td>注入範囲</td><td>・先行ボーリング孔側：壁面より3～6m
・先行ボーリング孔と反対側：壁面より1～4m</td><td>注入範囲による比較評価の実施</td></tr>
<tr><td rowspan="2">注入方式
注入装置</td><td>・湧水量および湧水圧測定
・水押し試験でルジオン値の確認
・シングルパッカーによるステージ注入</td><td>既往のプレグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td>・複合動的注入の適用</td><td>複合動的注入適用による比較評価の実施（No.2リング）</td></tr>
<tr><td>注入管理圧</td><td>・湧水圧+1.5MPaまたは1.0MPa（5～6MPa程度）</td><td rowspan="4">既往のプレグラウチング仕様に準拠し、溶液型グラウトの注入詳細については表4.2-9参照</td></tr>
<tr><td>注入速度</td><td>・基本速度：10L/min、最大注入速度：20L/min</td></tr>
<tr><td>規定注入量</td><td>・1300L（超微粒子セメント）
・500L（溶液型グラウト）</td></tr>
<tr><td>規定流量（ダメ押し）</td><td>・注入圧で1L/minに到達後、30分間（超微粒子セメント）または10分間（溶液型グラウト）</td></tr>
<tr><td rowspan="3">注入材料</td><td>・超微粒子セメント＋分散剤＋水（No.1リング）</td><td rowspan="2">溶液型グラウト適用による比較評価の実施（No.1リング）</td></tr>
<tr><td>・溶液型グラウト（No.1リング3次孔より）
（注入材料の仕様は表 4.2-5 参照）</td></tr>
<tr><td>・水ガラス（ゲルタイム調整）
（全面リークの場合のカバーロック）</td><td>既往のプレグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td rowspan="3">基本配合</td><td>・水押し試験のルジオン値より開始配合の決定
・セメント系グラウトは低濃度より配合切替</td><td>溶液型グラウトの詳細は表 4.2-9 参照</td></tr>
<tr><td>超微粒子セメント配合例（m³あたり）
<table>
<tr><th>W/C (%)</th><th>超微粒子セメント (kg)</th><th>早期硬化型混和剤 (kg)</th><th>水 (L)</th></tr>
<tr><td>400</td><td>230</td><td>3.2</td><td>922</td></tr>
</table>
</td><td></td></tr>
<tr><td>溶液型グラウト配合例（m³あたり）
<table>
<tr><th>ゲルタイム</th><th>Hiシリカ-R</th><th>反応剤NS</th><th>現場処理水</th></tr>
<tr><td>120分</td><td>800 L</td><td>10.75 kg</td><td>194.63 L</td></tr>
</table>
</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">孔埋め工</td><td>使用材料</td><td>・ドライモルタル</td><td rowspan="2">既往のプレグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td>方法</td><td>・モルタルポンプを使用し、圧送ホースを孔内に挿入し引き抜きながら充填</td></tr>
</table>

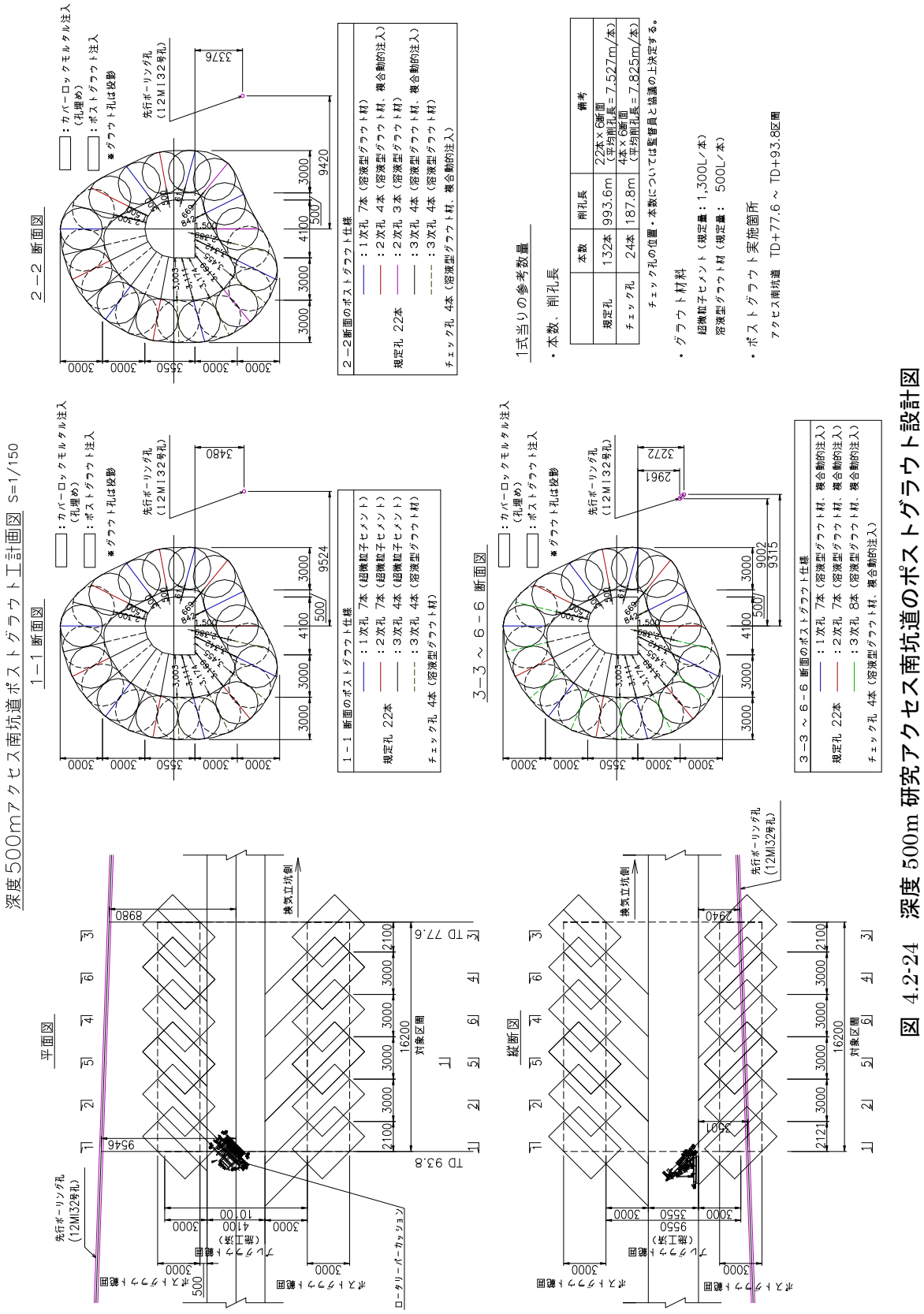


図 4.2-24 深度 500m 研究アクセス南坑道のポストグラウト設計図

(iii) 詳細設計のまとめ

ポストグラウチングの詳細設計のための検討および詳細設計の結果について以下にまとめる。

- ポストグラウチングは技術的な課題が多いとされるため、技術の適用性や最適な手法を確かめたうえで、効果的かつ効率的な施工計画を立案する必要があるとし、その一方で、ポストグラウチングを施工する B 工区その 6 工事にかかる予算や工期等の制約条件を考慮する必要があるため、合理的な仕様を目指して設計を実施した。
- 当初の 3 リング 2 箇所から、連続した 6 リング 1 箇所の施工区間を集約した。
- プレグラウト⑥区間を覆う形となる TD+77.6～93.8 の 16.2m 区間を今回のポストグラウチングの施工位置に選定した。
- 壁面に対するポストグラウト孔の角度は、プレグラウト孔の角度（12.5 度）と逆向きに 45 度の仕様とし、その妥当性を確認した。
- 2 次孔までの規定注入孔 14 本のうち、先行ボーリング孔に近い 7 本を内側に寄せ、同一リング内において改良範囲について比較評価ができる設計仕様とした。
- 3 次孔 8 本を追加して規定注入孔を合計 22 本とした。ただし、2 次孔終了後の次の 4 孔がいずれも 0.1Lu 以下またはいずれも湧水が発生しない場合、その 4 孔をチェック孔として取扱い 3 次孔を省略する仕様とした。
- グラウト注入材料の検討として、今後のグラウチング技術の高度化に資するためにも、国内外で実績のある溶液型グラウトを適用することとした。最初のリング（No.1 リング）は仕様確認の位置づけとし、溶液型グラウトと従来の超微粒子セメントの併用によりその効果を比較評価できる仕様とした。以降のリング（No.2～No.6）については、透水性が高い場合を除いて全て溶液型グラウトを用いることとした。
- グラウト浸透効果の向上が最も期待できる複合動的注入方式を導入し、高水圧かつ溶液型グラウトを使用している条件下においてその適用性と注入効果を確認することとした。No.1 リングでは静的注入（通常注入）とし、No.2 リングにおいて仕様確認の位置づけとして複合動的注入適用時と静的注入時を併用し、その適用効果を比較評価でき仕様とした。以降のリング（No.3～6）については、特定の場合（リーク発生時、一定圧で流量増加時、チェック孔注入時）を除いて全注入孔に複合動的注入を用いる仕様とした。
- 溶液型グラウトの配合設計の検討を行い、各注入孔のルジオン値（Lu）に応じてゲルタイム 120 分または 80 分の配合で開始し、リーク発生時や定圧注入時に流量が増加する場合などはゲルタイムの短い配合に 35 分まで変更することとした。注入停止基準については、90 分の注入時間の確保とともに、「規定流量によるダメ押し注入」および「規定注入量」を採用した。
- 6 リングのうち最初の 2 リングを仕様確認断面として比較評価ができる仕様とし、残り 4 リングを標準断面とした。仕様確認断面では、溶液型グラウトの適用効果または複合動的注入の導入効果を効率的に評価できるよう、上下で異なる仕様に分けた。また、効率的に水みちを減らすべく、完了したリングを内挿する順序で各リングを施工する仕様とした。

⑵ ポストグラウチング後の湧水抑制効果の予測

⑴ 施工前の区間湧水量（初期値）

B 工区その 6 工事では、研究アクセス南坑道のポストグラウチングに際し、図 4.2-25 に示すように 16.2m の対象区間の境界に土嚢による堰を設置し、施工前から施工終了にかけて区間湧水量を継続して計測する計画が立てられた。

平成 26 年 7 月 14 日より、第 1 リングの削孔が開始されたが、施工開始直前の 7 月 11 日～14 日の期間に実測された区間湧水量が平均 35.3L/min（約 50m³/d）であった。本検討では、この 35.3L/min を区間湧水量の初期値として設定する。

なお、平成 25 年度の工学技術検討では当該区間の概算湧水量を 25.8L/min と推定した。これは壁面および天端の滴水調査と坑道全体の排水量から概算した湧水量であるが、今回の実測値と比較して概ね妥当な値であったと考えられる。

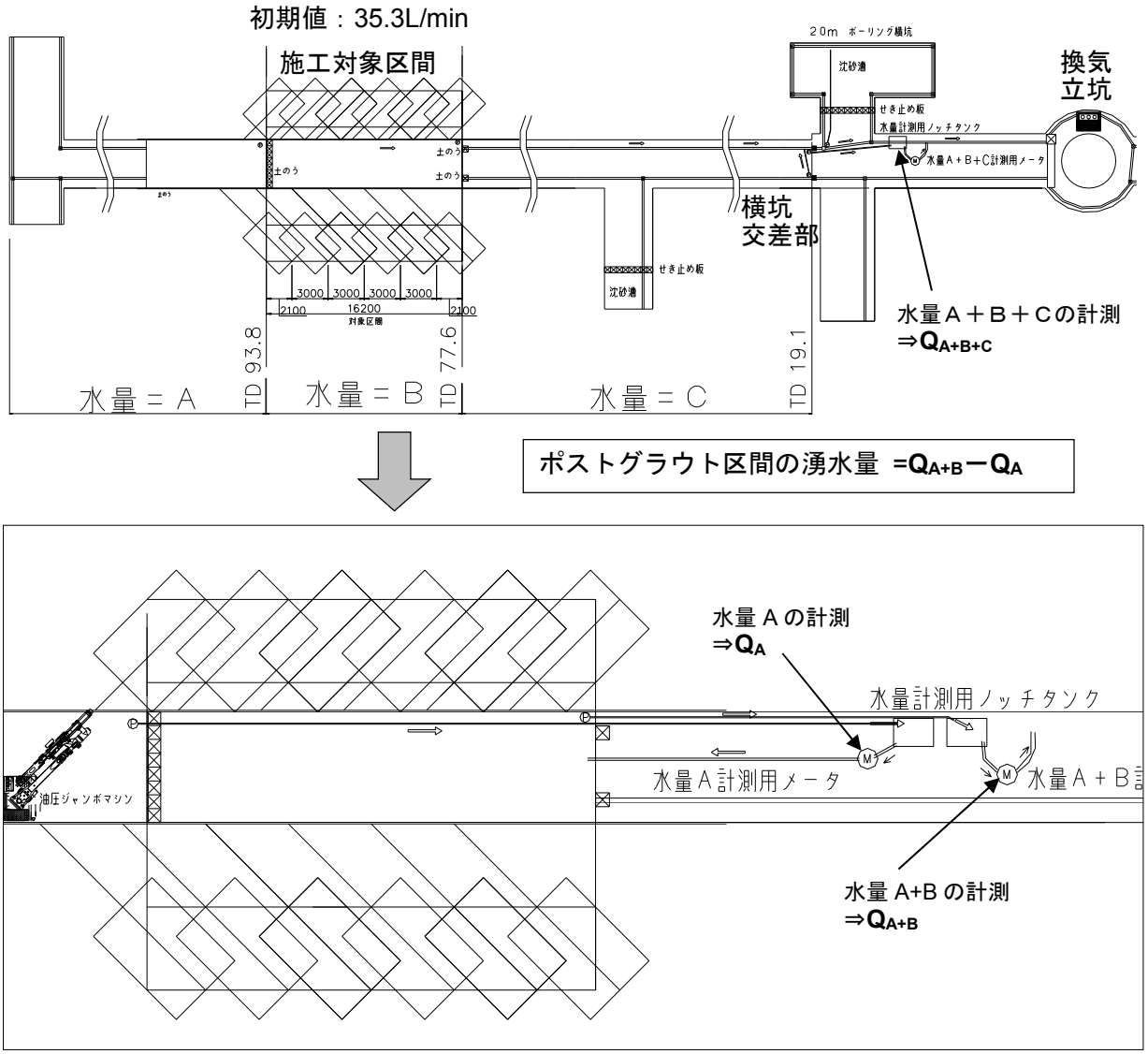


図 4.2-25　ポストグラウト施工区間における湧水量測定計画の概要（平面図）

(ii) 坑道への湧水量の算定手法

本坑道のプレグラウチングの施工時は、先行ボーリング孔の調査結果をもとに、瑞浪のグラウチング計画時に使用された理論解析の考え方（図 4.2-26[12]）に準じて坑道掘削時の湧水量を推定した。本検討においても同様の手法に基づいてグラウチングに伴う湧水量を予測する。

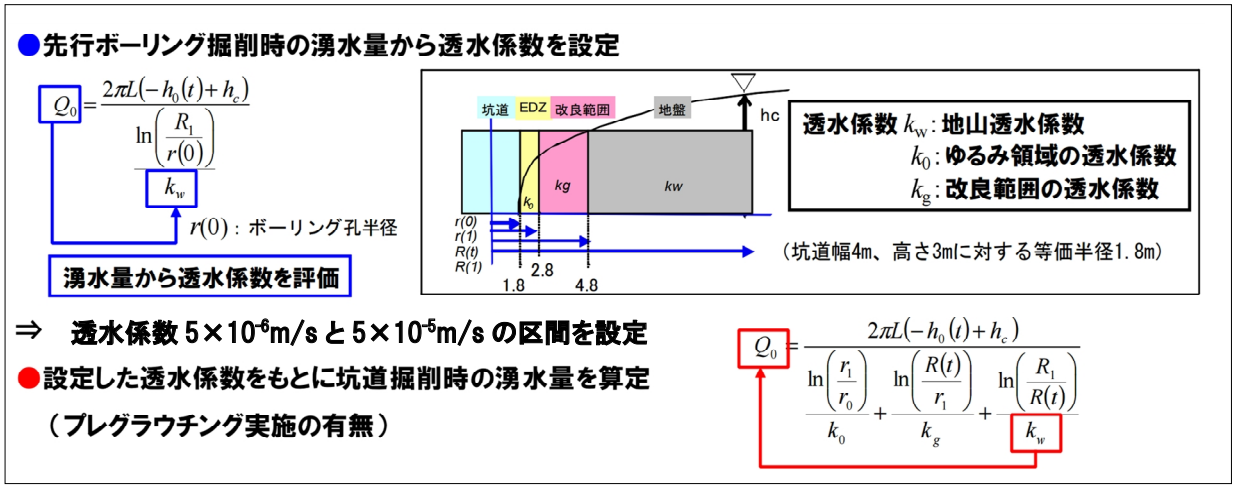


図 4.2-26　深度 300m 研究アクセス坑道掘削時の湧水量低減目標の設定（理論解析の考え方）[12]

(iii) プレグラウト改良範囲の事後分析

(a) プレグラウト改良範囲の透水性の算定

ポストグラウチングによる湧水量予測のための前提条件として、対象区間におけるプレグラウト改良範囲の透水性を、(数式 1) を用いて湧水量の実測結果から推定する。(数式 1 は、図 4.2-26 中の算定式から k_g の記号表記を k_{gpre} に変更)

$$Q_0=\frac{2\pi L(-h_0(t)+h_c)}{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)/k_0+\ln\left(\frac{R(t)}{r_1}\right)/k_{gpre}+\ln\left(\frac{R_1}{R(t)}\right)/k_w} \qquad \text{（数式 1）}$$

ここで、Q_0：掘削後湧水量（L/min）、L：区間長（m）、$-h_0(t)+h_c$：水頭低下量（m）、r_0：坑道掘削半径（m）、r_1：緩み領域の半径（m）、$R_{(t)}$：プレグラウチング範囲の半径（m）、R_1：影響圏半径半径（m）、k_0：緩み領域の透水係数（m/s）、k_w：地山透水係数（m/s）、k_{gpre}：プレグラウチング範囲の透水係数（m/s）とする（図 4.2-27 参照）。

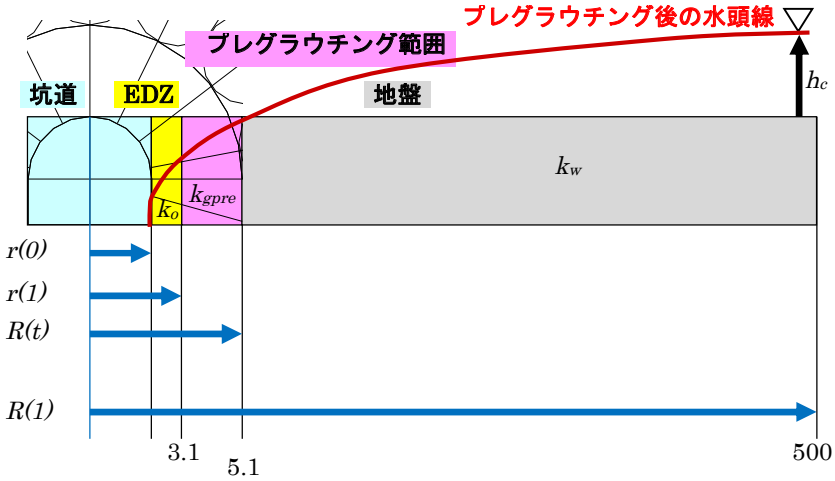


図 4.2-27 深度 500m 研究アクセス南坑道における湧水量結果からプレグラウチング範囲の透水係数を算定する考え方（理論解析）

プレグラウト改良範囲の透水係数算定のための設定値を表 4.2-11に示す。緩み領域の透水係数k_0はk_{gpre}の10倍と仮定した。（数式1）から誘導した（数式 2）に各設定値を代入し、今回施工区間におけるプレグラウト改良範囲の透水係数k_{gpre}を9.17×10^{-9}m/s（0.071Lu）と推定した（表 4.2-12）。

表 4.2-11 研究アクセス南坑道掘削後のプレグラウト改良範囲の透水係数の推定（設定値）

	単位	グラウト⑥区間	備考
掘削後湧水量 Q_0	L/min	35.3	湧水量の実測結果
水頭低下量 $-h_0(t)+h_c$	m	350	湧水圧と同等と仮定
区間長 L	m	16.2	計測区間長（ポストグラウト施工区間）
影響圏半径 R_1	m	500	深度相当と仮定
坑道掘削半径 $r(0)$	m	2.1	等価半径と仮定
緩み領域の半径 r_1	m	3.1	緩み領域の幅は 1m と仮定
プレグラウチング範囲の半径 $R(t)$	m	5.1	掘削面より 3m と仮定
緩み領域の透水係数 k_0	m/s	k_{gpre} の n 倍	仮定条件
緩み領域の透水係数比 n (k_{gpre}/k_0)	-	10	
地山透水係数 k_w	m/s	2.3×10^{-6}	先行ボーリングの調査結果に基づく CM 級区間の推定値（約 17.7Lu*）

* 1Lu=1.3×10^{-7}m/s として計算 [12)]

$$k_{gpre}=\frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_0}\right)+n\cdot\ln\left(\frac{R(t)}{r_1}\right)}{n\cdot\left(\frac{2\pi L\left(-h_0(t)+h_c\right)}{Q_0}-\frac{\ln\left(\frac{R_1}{R(t)}\right)}{k_w}\right)} \qquad \text{（数式 2）}$$

表 4.2-12　プレグラウト改良範囲の透水係数の推定（推定結果）

	単位	プレグラウト⑥区間	備考
プレグラウト改良範囲の透水係数 k_{gpre}	m/s	9.17×10^{-9}	表 4.2-11 および（数式 2）より
同範囲のルジオン値	Lu*	0.071 Lu	

* 1Lu=1.3×10^{-7}m/s として計算 [12)]

(b) プレグラウチングによる湧水量低減効果の事後分析

次に、今回の対象区間（16.2m）におけるプレグラウチングの改良と改良値に応じた湧水量低減量（低減率）の算定結果を図 4.2-28 に示す。

この結果、この区間でプレグラウチングが実施されていなかった場合の掘削時の湧水量は約 1,000L/min と非常に大きいことから、プレグラウチングの実施が有効であったといえる。また、プレグラウチングによる改良幅が 1m であった場合は、低減率が著しく低かったことが想定される。この理由は、改良幅が 1m では改良範囲と EDZ が（理論上）完全に重なってしまうためである。さらに、プレグラウト改良範囲の透水性が今回想定した 0.07Lu より低い場合は、改良幅が 3m と 5m では低減効果がほとんど変わらないことが示される。

以上のことから、平成 25 年度実施したプレグラウチングは 3m の改良幅で十分かつ効率的な湧水量低減効果があったと考えられる。

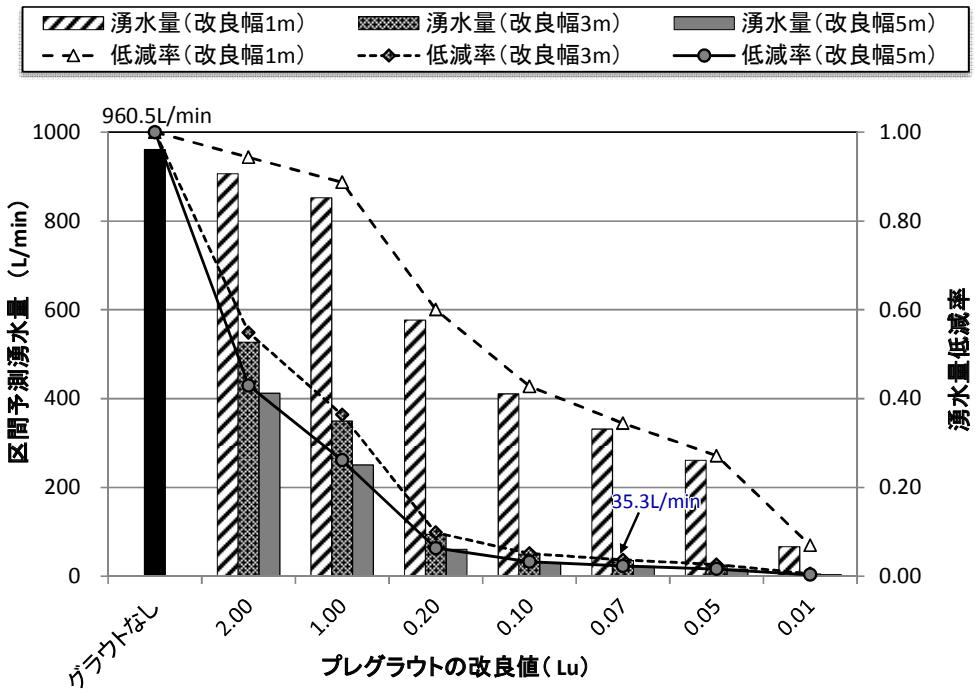


図 4.2-28　深度 500m 研究アクセス南坑道のポストグラウト対象区間（16.2m）における改良幅に応じたプレグラウチングによる湧水量の低減効果の事後分析結果

(iv) ポストグラウチング後の湧水量予測

ポストグラウチング後の湧水量予測については、下記のパターンについて検討を実施した。

(a) プレグラウチング範囲の外側範囲を改良する場合
　1) 改良範囲：坑道壁面より 3-6m（幅 3m）
　2) 改良範囲の比較：坑道壁面より 3-4m（幅 1m）、3-6m（幅 3m）、3-8m（幅 5m）
(b) プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する場合：改良範囲が坑道壁面より 1-4m
(c) 【今回施工】プレグラウチング範囲と外側範囲を（断面あたり）半数ずつ改良する場合

(a) プレグラウチング範囲の外側範囲を改良する場合

1) 改良範囲：坑道壁面より 3-6m

ポストグラウチングでプレグラウト改良範囲の外側を改良する場合の湧水量算定式として、数式 1 に境界条件を追加し、支配方程式に基づいて（数式 3）を誘導する。

$$Q_1 = \frac{2\pi L\left(-h_0(t)+h_c\right)}{\dfrac{\ln\left(\dfrac{r_1}{r_0}\right)}{k_0}+\dfrac{\ln\left(\dfrac{R(t)}{r_1}\right)}{k_{gpre}}+\dfrac{\ln\left(\dfrac{R(\alpha t)}{R(t)}\right)}{k_{gpost}}+\dfrac{\ln\left(\dfrac{R_1}{R(\alpha\cdot t)}\right)}{k_w}} \qquad \text{（数式 3）}$$

ここで、Q_1：外側範囲を改良する場合のポストグラウチング後の湧水量、$R(at)$：ポストグラウチング範囲の半径、k_{gpost}：ポストグラウチング範囲の透水係数とする（図 4.2-29 参照）。

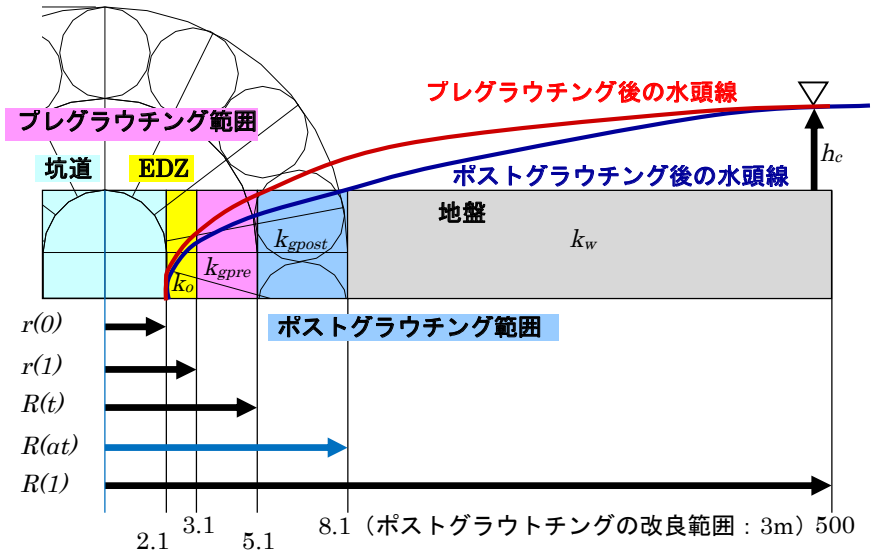


図 4.2-29　深度 500m 研究アクセス南坑道におけるプレグラウチングおよびポストグラウチングに伴う湧水量予測（理論解析）の考え方
【プレグラウチング範囲の外側範囲を改良する場合】

ポストグラウチングの改良目標値に応じて湧水量を推定した結果を表 4.2-13 に、湧水量低減効果の予測結果を図 4.2-30 に示す。

表 4.2-13　ポストグラウチング後の湧水量の推定結果（改良範囲：坑道壁面より 3-6m）

	単位	ポストグラウチングあり グラウチング範囲の改良目標						グラウチングなし
改良目標	Lu	0.01	0.05	0.1	0.2	1.0	2.0	－
透水係数* k_{gpost}	m/s	1.3×10^{-9}	6.5×10^{-9}	1.3×10^{-8}	2.6×10^{-8}	1.3×10^{-7}	2.6×10^{-7}	k_w
湧水量								
グラウト区間	L/min	5.1	16.3	22.3	27.4	33.4	34.4	35.3
坑道 1m あたり	L/min/m	0.32	1.00	1.38	1.69	2.06	2.12	2.18

* 1Lu=1.3×10^{-7}m/s として計算 [12)]

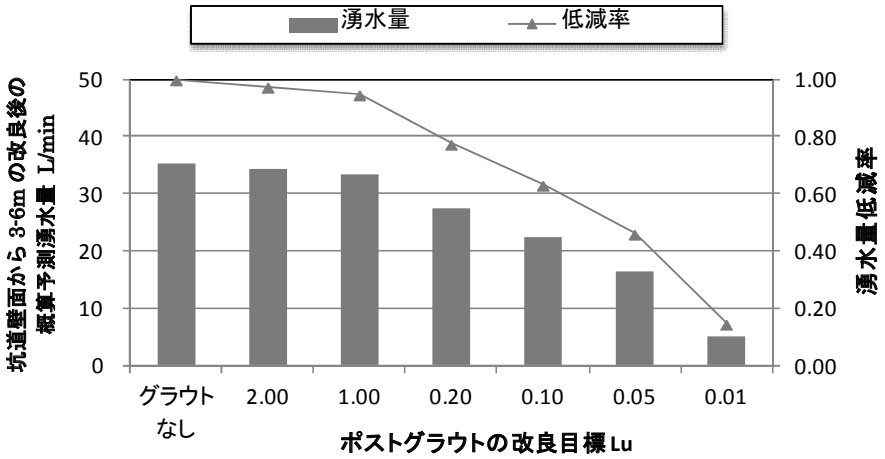


図 4.2-30　改良目標に応じたポストグラウチング後の湧水量低減効果の予測
【プレグラウチング範囲の外側範囲を改良する場合】
（改良範囲：坑道壁面より 3-6m）

2) 改良範囲の比較：坑道壁面より 3-4m、3-6m、3-8m

坑道壁面からの改良範囲を 3-4m（改良幅 1m）、3-6m（改良幅 3m）、3-8m（改良幅 5m）とポストグラウチングの改良幅を変化させた場合の算定結果を図 4.2-31 に示す。

この結果、例えば湧水量を 2/3（低減率 0.67）以下にするためには、改良幅 1m の場合で 0.05Lu 以下に改良が必要なのに対し、改良幅 3m または 5m の場合は 0.10Lu で達成できることが分かる。すなわち、改良幅が 5m と 3m の場合の低減率の差より、3m と 1m の差の方が大きい。また、改良目標値が 0.05Lu より低い場合は、5m と 3m の場合の低減率の差が小さい。すなわち、改良幅増加による費用体効果が少ないといえる。このことから、今回の設計改良幅 3m が合理的であることが判明した。

なお、今回のポストグラウト施工後に計測した実際の湧水量を図 4.2-31 に合わせて示す（結果の詳細は表 4.2-32 参照）。11.3L/min まで低減できたことから、全て 3-6m（改良幅 3m）で改良していた場合は 0.0275Lu の改良で今回の湧水量に到達することが確認できた。

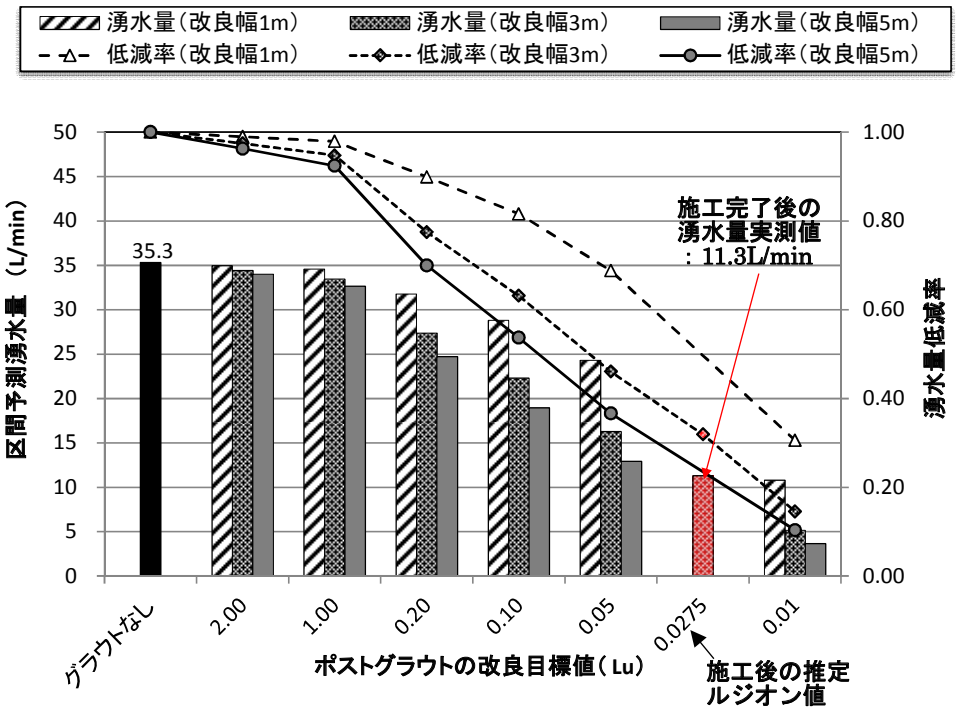


図 4.2-31　改良目標および改良幅に応じたポストグラウチング後の湧水量低減効果の予測
【プレグラウチング範囲の外側を改良する場合（改良幅 1m、3m、6m）】
（施工後の実測湧水量と推定ルジオン値も赤色にて併せて表示）

(b) プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する場合：改良範囲が坑道壁面より 1-4m

プレグラウト改良範囲と重複して改良する場合、ポストグラウチング実施時の湧水量算定式として、（数式 1）に境界条件を追加し、支配方程式に基づいて（数式 4）を誘導した。

$$Q_2 = \frac{2\pi L\left(-h_0(t)+h_c\right)}{\dfrac{\ln\left(\dfrac{r_1}{r_0}\right)}{k_0}+\dfrac{\ln\left(\dfrac{R(t)}{r_1}\right)}{k_{gboth}}+\dfrac{\ln\left(\dfrac{R(\alpha\cdot t)}{R(t)}\right)}{k_{gpost}}+\dfrac{\ln\left(\dfrac{R_1}{R(\alpha\cdot t)}\right)}{k_w}} \qquad \text{（数式 4）}$$

ここで、Q_2：プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する場合のポストグラウチング後の湧水量、k_{gboth}：プレグラウチングとポストグラウチングが重複する範囲の透水係数とする（図 4.2-32 参照）。なお、ポストグラウチングの改良値が高い透水性の場合でも、プレグラウチング範囲の透水性に推定した $k_{gpre}=9.17\times10^{-9}$m/s（0.071Lu）を上限とする。

ポストグラウチングの改良目標値に応じて施工後の湧水量を推定した結果を表 4.2-14 に、湧水量低減効果を予測した結果を図 4.2-33 に示す。

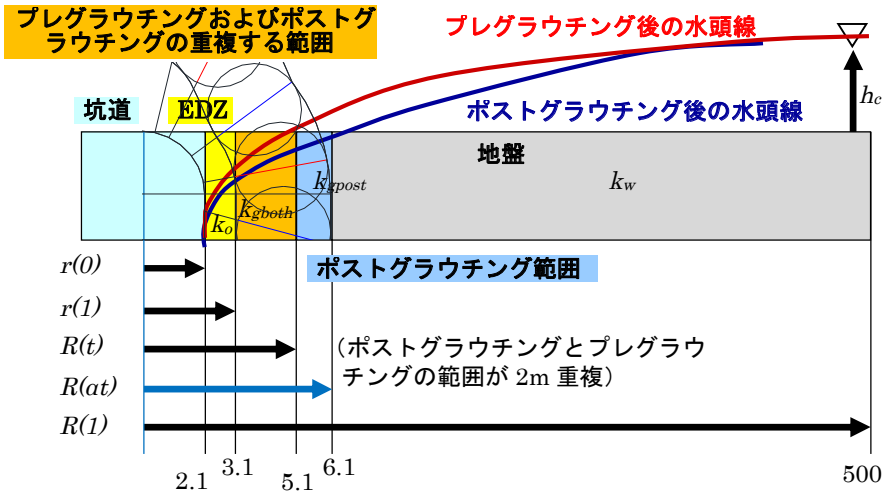


図 4.2-32 深度 500m 研究アクセス南坑道におけるプレおよびポストグラウチングに伴う湧水量予測（理論解析）の考え方【プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する場合】

表 4.2-14 ポストグラウチング後の湧水量の推定結果（坑道壁面より 1-4m 範囲の改良）

	単位	グラウチングあり グラウチング範囲の改良目標						グラウチングなし
改良目標	Lu	0.01	0.05	0.1	0.2	1.0	2.0	―
透水係数* k_{gpost}	m/s	1.3×10^{-9}	6.5×10^{-9}	1.3×10^{-8}	2.6×10^{-8}	1.3×10^{-7}	2.6×10^{-7}	k_w
湧水量								
グラウト区間	L/min	4.1	19.4	28.8	31.7	34.6	34.9	35.3
坑道 1m あたり	L/min/m	0.25	1.20	1.78	1.96	2.13	2.16	2.18

* 1Lu=1.3×10^{-7}m/s として計算 [12)]

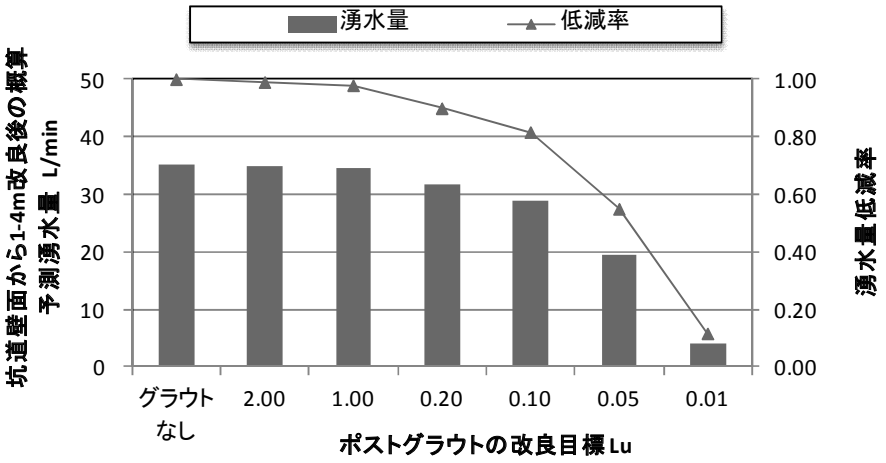


図 4.2-33 改良目標に応じたポストグラウチングによる湧水量低減効果の予測【プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する場合（坑道壁面より 1-4m の改良）】

この結果、重複した範囲の改良は、外側改良の場合（図 4.2-30）と比較して、改良目標が低くならないと、ほとんど湧水量低減効果がないことが分かる。

このように、プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する場合の湧水抑制の難しさは、このような理論上の簡易算定でも示唆される。実際の施工では、プレグラウチング範囲と重複する範囲の注入は外側の注入に比べて理論上は想定できない壁面リークなども懸念されやすいため、さらに湧水抑制が困難であることが予想される。

(c) 【今回施工】プレグラウチング範囲と外側範囲を（断面あたり）半数ずつ改良する場合

今回のポストグラウチングでは、およそ半数の注入孔についてはプレグラウチング改良範囲の外側に、残り半数についてはプレグラウチング改良範囲と重複して配置されると捉えることができる（図 4.2-34 参照）。よって、これまでの検討結果から、(a) 1) 改良範囲：坑道壁面より 3-6m の予測湧水量の 50%と、(b) プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する場合：改良範囲が坑道壁面より 1-4m の結果（坑道壁面より 1-4m 改良時）の予測湧水量の 50%の合計を、今回のポストグラウチング後の湧水量として推定する。

湧水量の推定結果を表 4.2-15 に、湧水量低減効果の予測結果を図 4.2-35 に示す。なお、今回のポストグラウト施工後に計測した実測湧水量も合わせて示す（詳細は表 4.2-32 参照）。湧水量が 11.3L/min まで低減したことから、今回の改良範囲が 0.0281Lu に到達したことが推定された。

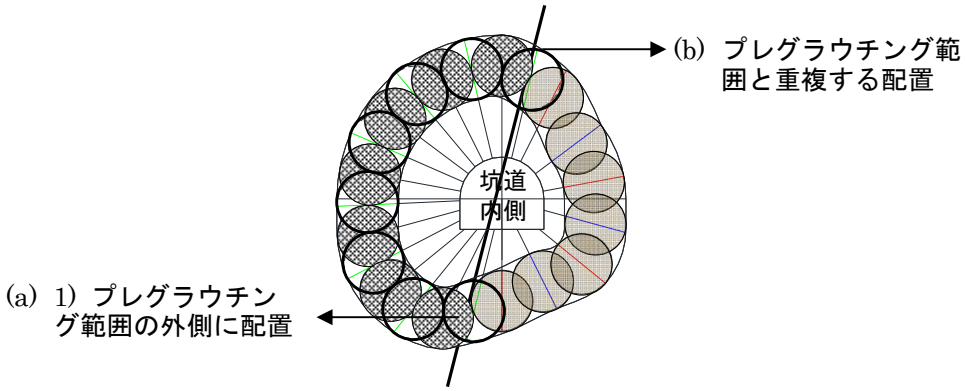


図 4.2-34 今回施工のポストグラウト孔配置について湧水量予測のための区分け（換気立坑側から見た横断面図）

表 4.2-15 ポストグラウチング後の湧水量の推定結果【今回施工】

	単位	グラウチングあり グラウチング範囲の改良目標							グラウチングなし
改良目標	Lu	0.01	0.0281*	0.05	0.1	0.2	1.0	2.0	―
透水係数** k_{gpost}	m/s	1.3×10^{-9}	3.7×10^{-9}	6.5×10^{-9}	1.3×10^{-8}	2.6×10^{-8}	1.3×10^{-7}	2.6×10^{-7}	k_w
湧水量									
グラウト区間	L/min	4.6	11.3*	17.8	25.5	29.5	34.0	34.7	35.3
坑道 1m あたり	L/min /m	0.28	0.70*	1.10	1.58	1.82	2.10	2.14	2.18

* 施工後の実測湧水量と推定ルジオン値も併せて表示

** $1Lu=1.3\times10^{-7}$m/s として計算 [12)]

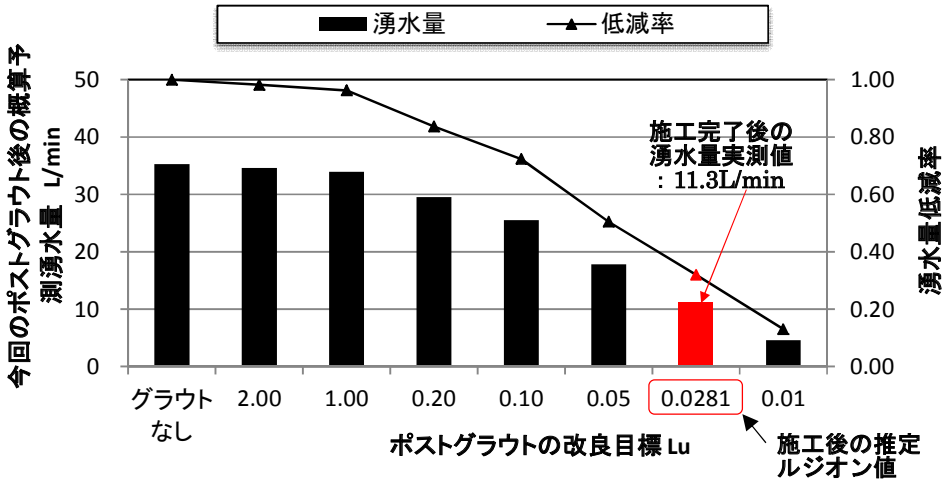


図 4.2-35　改良目標に応じたポストグラウチング後の湧水量低減効果の予測【今回施工】
（施工後の実測湧水量と推定ルジオン値も赤色にて併せて表示）

(v) ポストグラウチングによる湧水低減量目標についての考察

これまでの検討結果から得られた、ポストグラウチングの改良目標および改良範囲に応じた推定湧水量の低減率を図 4.2-36 にまとめて示す。

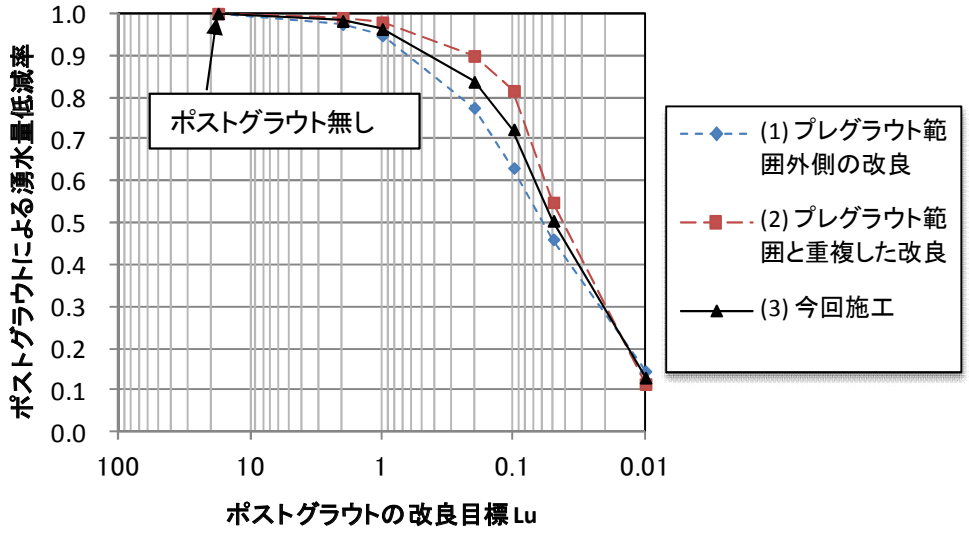


図 4.2-36　ポストグラウチングの改良目標および改良範囲に応じた湧水量低減率の予測

この結果から、ポストグラウチング範囲が1.0Lu以下に改良できた場合、(1)（◆：プレグラウチング範囲の外側範囲の改良）が(2)（■：プレグラウチング範囲と重複する改良）より明らかに低減率が高いことが分かる。(3)（▲：今回施工）の低減率は、(1)と(2)の平均値となる。

また、いずれの場合においても、1.0Lu程度の改良目標では十分な湧水抑制効果が得られないため、十分な効果を得るためには改良目標を0.1Lu以下とする必要がある。1.0Lu程度の改良で十分な効果が得られない要因として、本節の初めに概算および設定したプレグラウチング範囲の透水性が0.071Luとかなり低いことや、ポストグラウチング前の区間湧水量（35.3L/min/16.2m＝2.18L/min/m）がプレグラウチングの効果により高水圧下にしては十分低い水準にまで抑えられ

ていることが挙げられる。

なお、既往の換気立坑におけるグラウチングの実績では、超微粒子セメントのグラウチングによる改良限界の下限が0.2Lu程度である（表 4.2-16参照）プレグラウト⑥を実施した本区間では、4次孔までの綿密なプレグラウチングによりチェック孔における透水性が0.2Luまで低下しており、この限界値は妥当である。一方、本検討で評価したプレグラウチング範囲の透水性k_{gpre}は0.07Luであり0.2Luの半分～1/3程度である。これは、k_{gpre}が、亀裂を含まない岩盤の透水係数も含めた「平均した」岩盤の透水性として算定されているため、改良限界より低く算出されたと考えられる。

表 4.2-16　瑞浪の換気立坑におけるグラウチング実績（改良限界）

グラウト注入材料	適用箇所	改良限界 ルジオン値
普通セメント	深度 200～220m 換気立坑	1.0～0.7Lu
超微粒子セメント	深度 400～450m 換気立坑	0.5～0.2Lu
溶液型グラウト	深度 300m 水平坑道	0.2～0.1 Lu

そこで、ポストグラウチング後の「平均的な改良範囲の透水性（k_{gpost}）」においても、既往の改良限界の「半分」の透水性に低下すると仮定する。この仮定に基づいてグラウト注入材料別の改良限界の範囲を図 4.2-36に追記したものを図 4.2-37に示す。

今回の仕様では大部分で溶液型グラウトを用いるため、表 4.2-16 に示す改良限界の 0.2～0.1Lu の半分として、k_{gpre} = 0.1～0.05Lu まで透水性の低下を想定した。これにより、現状よりちょうど 40%の湧水量低減を予測する（約 14L/min の低減：初期値 35L/min⇒21L/min）。

また、溶液型グラウトを採用せずに超微粒子セメントを用いる場合の低減量は 20%であり、今回の予測の半分程度である。このため、超微粒子セメントでは湧水抑制効果が低いと想定した。

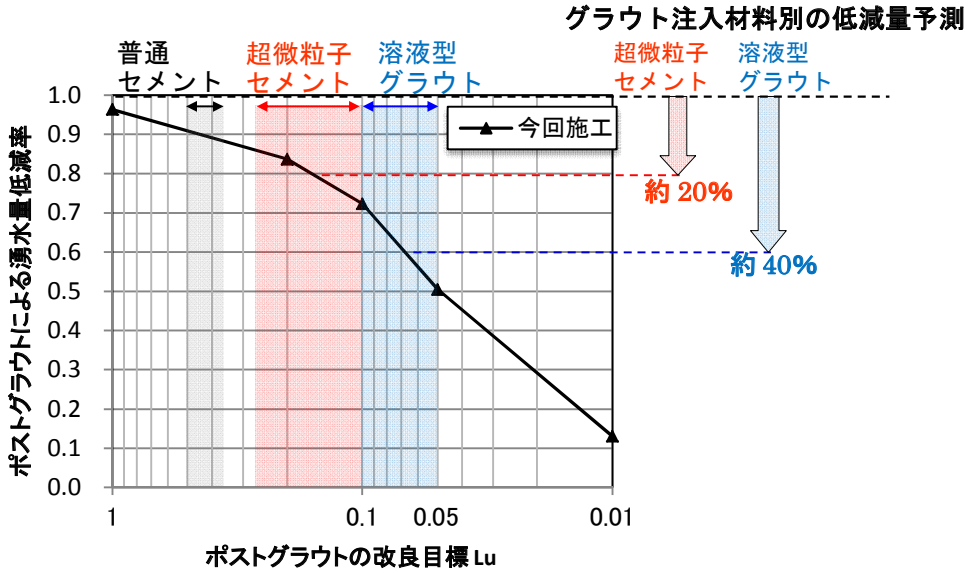


図 4.2-37　今回の施工におけるポストグラウトの改良目標に応じた湧水量低減率の予測
（グラウト注入材料の改良限界に応じた低減予測）

参考までに、グラウト注入材料に応じた排水処理費の節減効果を、今回推定した湧水低減量に基づいて概算した（表 4.2-17 参照）。溶液型グラウトを適用した場合の節減効果は年間約 600 万円であり、超微粒子セメントを適用した場合より 300 万円多い節減効果が期待できる。

なお、今回の施工範囲は透水性の低い亀裂性岩盤であり、プレグラウチングが実施されていることにより湧水亀裂が更に不均質に分布している可能性もある。このため、理論解析の適用が難しいことも想定されるうえ、プレグラウチング範囲と重複する範囲のポストグラウチングについては、カバーロックが少なく動水勾配の高い環境下にあるためリークの懸念があり、既往の実績通りに改良できない可能性もある。

以上のことから、後述の施工結果の評価において、本節における理論解析による湧水量予測の妥当性を検証することとする。

表 4.2-17　グラウト注入材料に応じた湧水低減量および排水処理費の節減効果の予測

使用材料	初期値 （L/min）	湧水量低減率 （%）	湧水低減量 （L/min）	排水処理費の 節減効果（※）
普通セメント材	35.3	10	3.5	約 150 万円/年
超微粒子セメント材	35.3	20	7.1	約 300 万円/年
溶液型グラウト	35.3	40	14.1	約 600 万円/年

（※）排水処理費を 800 円/m^3（薬剤費用のみ）と設定

(vi) 湧水抑制効果の予測のまとめ

ポストグラウチングによる湧水抑制効果の予測結果について、以下にまとめる。

- 施工対象区間のポストグラウチング開始前の湧水量を計測したところ、平均 35.3L/min（約 50m³/d）であったため、この湧水量を本検討における施工前の初期値として設定した。
- 施工対象区間におけるプレグラウチング範囲の透水性を、既往の理論式により 9.17×10^{-9}m/s（0.07Lu）と推定した。
- 平成 25 年度実施したプレグラウチングを事後評価したところ、湧水量が大幅に低減されたと予測できたことからプレグラウチングの実施が有効であったこと、また 3m の改良幅が十分かつ効率的な湧水量低減効果があったことが判明した。
- ポストグラウチング後の湧水量予測については、プレグラウチングの改良範囲の外側範囲を改良する場合（改良幅 1m、3m、5m）、重複する範囲を改良する場合、今回工事のように半分ずつ改良する場合についてそれぞれ検討した。
- その結果、改良幅 3m およびプレグラウチング範囲外側の改良が合理的であることが判明した。また、プレグラウチング範囲と重複する範囲をポストグラウチングする場合は改良目標値を低く設定しないと低減率が大きくならないため、ポストグラウチングによる湧水抑制の難しさが、このような理論上の簡易算定でも示唆された。
- ポストグラウチング後の「平均的な改良範囲の透水性」が、既往の改良限界の「半分」の透水性に低下すると仮定し、グラウト注入材料別の湧水量の低減率を推定した。今回の仕様では溶液型グラウトを主として用いるため、表 4.2-16 に示す改良限界の 0.2～0.1Lu の半分として、0.1～0.05Lu まで透水性の低下を見込んだ。これにより、現状より約 40%の湧水量低減を予測した。（約 14L/min の低減：初期値 35L/min⇒21L/min）。
- 参考までに、グラウト注入材料に応じた排水処理費の節減効果を概算したところ、溶液型グラウト適用時の節減効果は年間約 600 万円であり、超微粒子セメント適用時よりも 300 万円多く削減が期待できた（排水処理費を 800 円/m³（薬剤費用のみ）と設定）。
- なお、今回の施工範囲は透水性の低い亀裂性岩盤であり、プレグラウチングが実施されていることにより湧水亀裂が更に不均質に分布している可能性もあり、カバーロックが少ない範囲ではリークの懸念があり、既往実績通りに改良できない可能性もある。このことから、施工結果の評価において、本節における理論解析による湧水量予測の妥当性を検証することとした。

なお、今回のポストグラウト施工後は湧水量が 35.3L/min から 11.3L/min まで低減したことから（結果の詳細は後述の表 4.2-32 参照）、理論解析をもとに逆算すると、改良範囲が約 0.03Lu に到達していたことが推定された。

4.2.4 ポストグラウチングの施工結果の評価

(1) 注入結果の整理

(i) 各リングの注入実績概要

事前検討および設計した通り、TD+77.6～TD+93.8 の 16.2m 区間に No.1～6 の番号順に 6 リングのポストグラウチングを実施した。実績概要図を図 4.2-38 に、施工状況を図 4.2-39 に示す。

続いて、各リングの注入実績の概要を(a) ～(f) に順に示す。

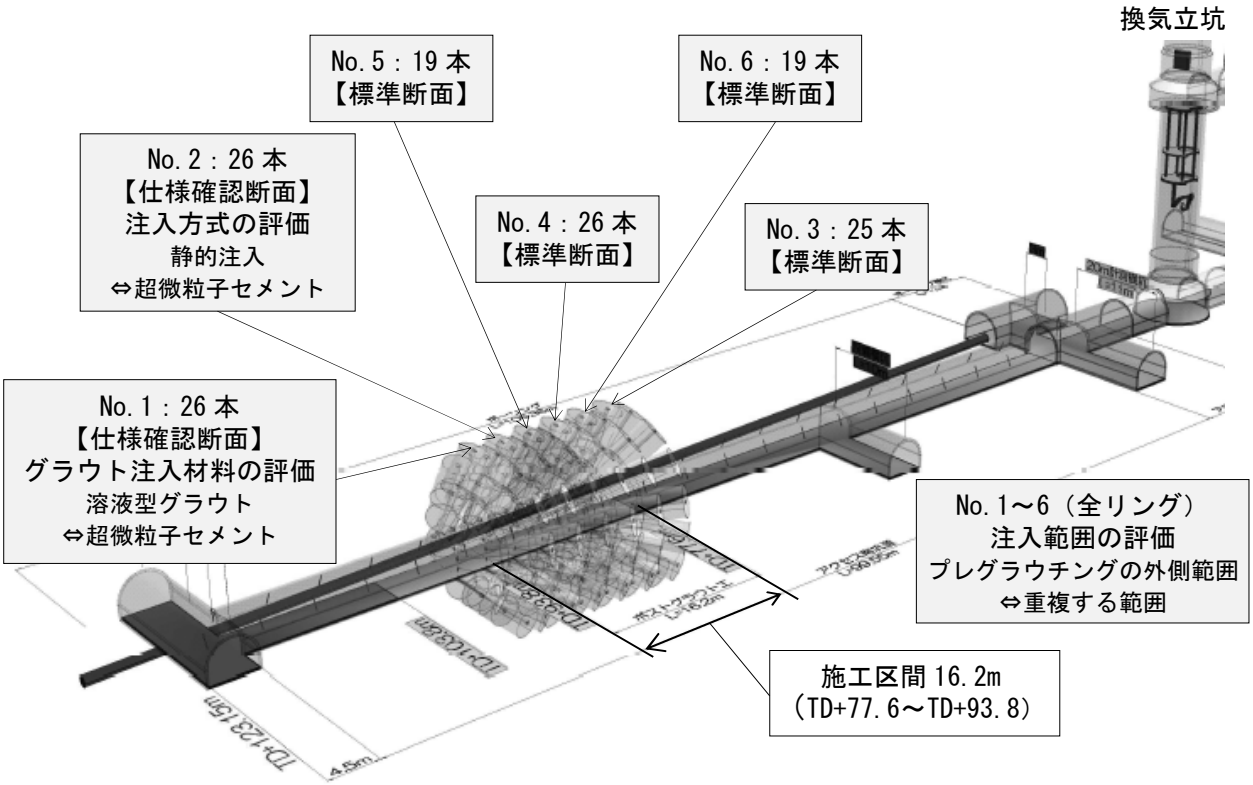


図 4.2-38　ポストグラウチングの実績概要図

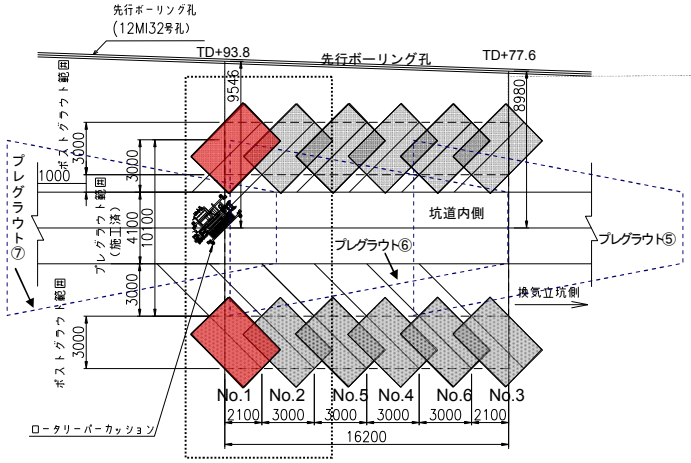
図 4.2-39　ポストグラウチングの施工状況

(a) No.1 リングの注入実績概要

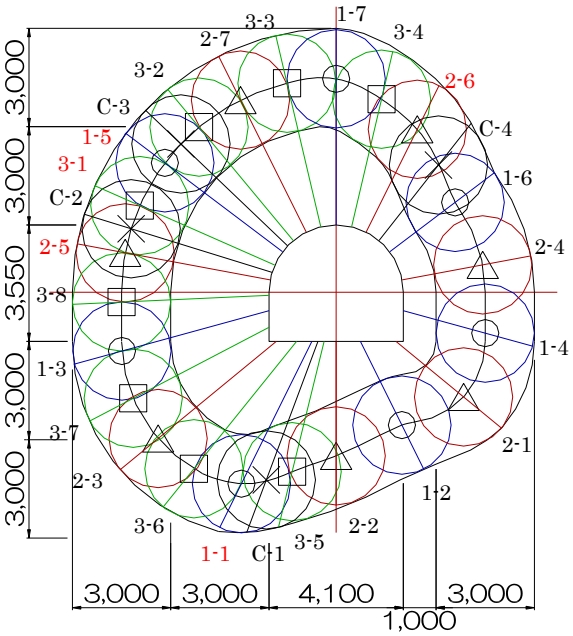
No.1 リングの注入結果の概要を図 4.2-40 に、各孔における注入実績を表 4.2-18 に示す。このリングは超微粒子セメントと溶液型グラウトの比較評価を実施する断面である。設計仕様通りに 2 次孔までは超微粒子セメントによる注入を実施し、3 次孔では上半分の 4 本は超微粒子セメントのままとし、下半分の 4 本について溶液型グラウトの注入に切り替えた。

本リングの（換気立坑から見て）左上部の注入孔からは、注入後も滴水が認められた。プレグラウチング範囲とポストグラウチング範囲の境界が水みちとなる懸念があったため、次リング以降は、パッカーを 1m 手前に設置することとした（後述の 4.2.4 (2) (ii) 参照）。

また、プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する 2-4 孔は、亀裂が密集して、水押し試験時に注水圧を上げられず、水みちが表面亀裂に短絡してリークが発生したため、パッカーを深部に設置した（後述の 4.2.4 (2) (iii) 参照）。



単位：mm



記号	注入孔	本数	使用材料	注入方式
●	1次孔	7	超微粒子セメント	静的注入
▲	2次孔	7		
■	3次孔（上部）	4		
■	3次孔（下部）	4	溶液型グラウト	
×	チェック孔	4		
合計		26		

ハッチングなしの孔：注入省略
赤字の孔：単位セメント量 7.5kg/m 以上
または湧水量 3L/min 以上

図 4.2-40　No.1 リングの注入結果概要

表 4.2-18　No.1 リングにおける各孔の注入実績一覧

区間	日付	孔番号	湧水量 (L/min)	湧水圧 (MPa)	単位湧水量 (L/min/m)	換算ルジオン値(Lu)	ルジオン値(Lu)	区間長 (m)	超微粒子セメント			溶液型グラウト				
									注入量（L）	単位注入量 (kg/m)	単位注入量 (L/m)	注入量 (L)	単位注入量 (L/m)	混合量 (L)	廃棄量 (L)	廃棄率 (%)
ポストグラウト① 1次孔 超微粒子セメント　静圧	7月15日	1-1	4.5	3.5	1.06	0.30	0.75	4.24	329	14.8	77.59					
	7月15日	1-2	1.0	2.5	0.24	0.09	0.49	4.24	86	3.2	20.28					
	7月17日	1-3	0.2	0.4	0.05	0.12	0.04	4.24	31.7	1.2	7.48					
	7月16日	1-4	0.0	0	0.00		0.01	4.24								
	7月17日	1-5	4.1	3.5	0.97	0.27	2.99	4.24	410.3	19.9	96.77					
	7月17日	1-6	1.5	0	0.35			4.24	186.5	7.0	43.99					
	7月18日	1-7	0.8	0.8	0.19	0.23	0.25	4.24	153.3	5.8	36.16					
ポストグラウト① 2次孔 超微粒子セメント　静圧	7月22日	2-1	0.1	0	0.02		0.15	4.24	91.2	3.4	21.51					
	7月22日	2-2	0.2	0.5	0.05	0.09	0.14	4.24	35.4	1.3	8.35					
	7月22日	2-3	0.5	0.4	0.12	0.29	0.15	4.24	24.2	0.9	5.71					
	7月23日	2-4	0.4	0	0.15		2.48	2.66	90.8	5.5	34.14					
	7月23日	2-5	0.2	0.3	0.05	0.15	0.67	4.24	499.2	28.9	117.74					
	7月24日	2-6	6.0	2.0	1.42	0.69	1.66	4.24	365.4	16.9	86.18					
	7月24日	2-7	1.0	0.2	0.24	1.16	0.28	4.24	222	8.8	52.36					
ポストグラウト① 3次孔 超微粒子セメント　静圧	7月28日	3-1	5.6	1.9	1.32	0.68	0.92	4.24	146.2	5.5	34.48					
	7月28日	3-2	1.3	0.5	0.31	0.60	0.26	4.24	150.5	5.7	35.50					
	7月28日	3-3	1.0	0.2	0.24	1.16	0.51	4.24	138.5	5.2	32.67					
	7月28日	3-4	0.7	0.2	0.17	0.81	0.18	4.24	91.2	3.4	21.51					
ポストグラウト① 3次孔 溶液型　静圧	7月30日	3-6	1.2	1.0	0.28	0.28	0.42	4.24				178.3	42.1	300.0	121.7	40.6%
	7月30日	3-8	1.3	0.8	0.31	0.38	0.56	4.24				176.0	41.5	300.0	124.0	41.3%
	7月30日	3-5	0.3	0.3	0.07	0.23	0.18	4.24				12.6	3.0	100.0	87.4	87.4%
	7月30日	3-7	0.6	0.5	0.14	0.28	0.21	4.24				24.2	5.7	100.0	75.8	75.8%
ポストグラウト① チェック孔 溶液型　静圧	7月31日	C-1	0.8	1.2	0.19	0.15	0.19	4.24				28.6	6.7	200.0	171.4	85.7%
	7月31日	C-3	1.2	0.6	0.28	0.46	0.17	4.24				31.3	7.4	200.0	168.7	84.4%
	8月1日	C-2	0.4	0	0.09		0.67	4.24				324.3	76.5	400.0	75.7	18.9%
	8月1日	C-4	0.1	0	0.02		0.14	4.24				26.0	6.1	200.0	174.0	87.0%
ポストグラウト①　合計	7/15-8/1		25	35.0				108.7	3051.4	8.1	43.1	801.3	23.6	1800	998.7	55.5%

※単位湧水量：単位長さあたりの湧水量
　換算ルジオン値：単位湧水量と湧水圧から注入差圧＝0.98MPa 時に換算したときの流量
　ルジオン値：水押し試験の結果から、注水差圧=0.98MPa 時の単位長さあたりの流量

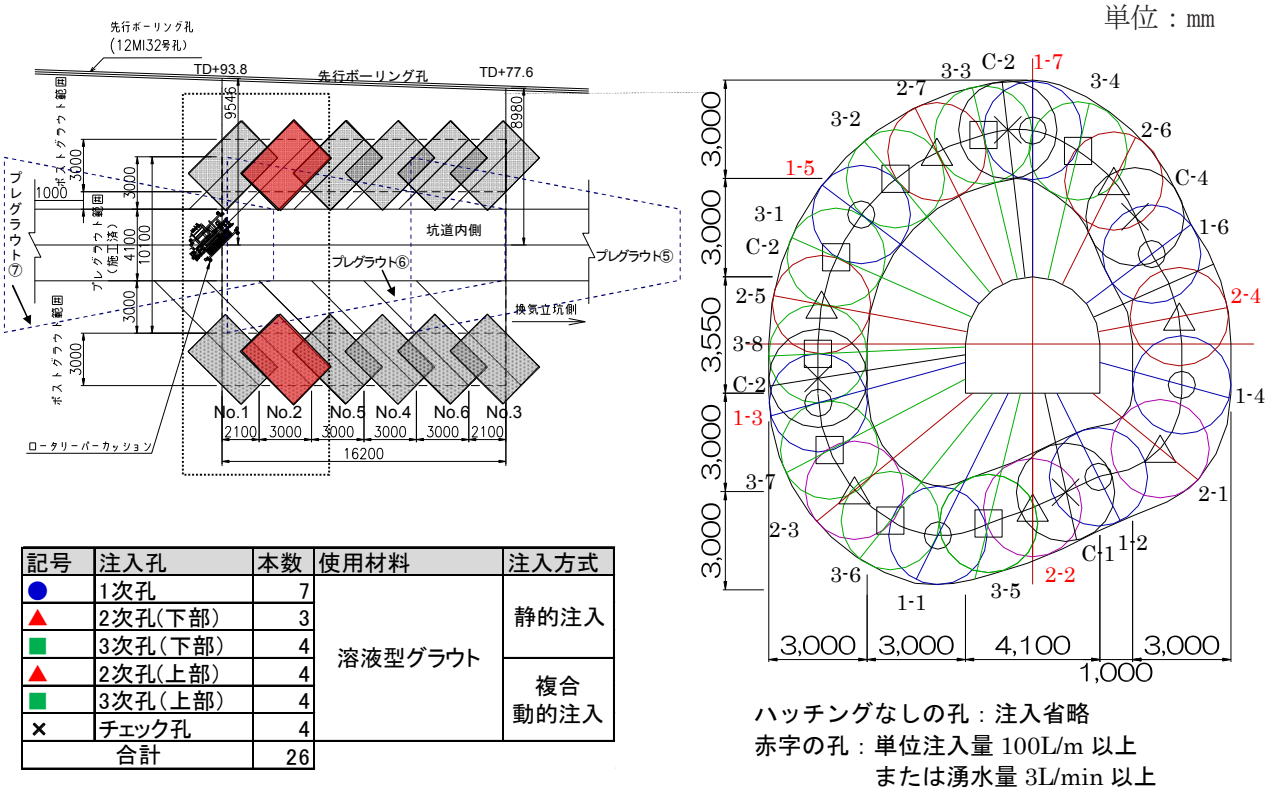
(b) No.2 リングの注入実績概要

No.2 リングの注入結果の概要を図 4.2-41 に、各孔における実績を表 4.2-19 に示す。このリングは複合動的注入と静的注入（通常注入）を比較評価する断面である。設計仕様通りに 1 次孔の 7 本は全て静的注入を実施し、2 次孔と 3 次孔では下半分の 7 本について静的注入のままとし、上半分の本について複合動的注入を開始した。

上部の 1-7 孔からは 130L/min と大量の湧水が発生したが、溶液型グラウトのみの注入により完全に止水することができた。その際、規定注入量では十分な止水ができなかったため、グラウト注入材料の流出防止を目的としてダメ押し注入による注入停止を目標として再注入を実施した。この 1-7 孔の施工以降は、基本的にダメ押し注入で停止する方針とし、施工を通して最適な規定注入量を再設定した。（後述の 4.2.4 (2) (iv) 参照）。

また、このリングにおいてもプレグラウチング範囲と重複する範囲を改良する 1-4 孔および 2-4 孔について、表面リークが発生したため、パッカーを深部に設置した。

単位：mm



記号	注入孔	本数	使用材料	注入方式
●	1次孔	7	溶液型グラウト	静的注入
▲	2次孔(下部)	3		
■	3次孔(下部)	4		
▲	2次孔(上部)	4		複合動的注入
■	3次孔(上部)	4		
×	チェック孔	4		
合計		26		

ハッチングなしの孔：注入省略
赤字の孔：単位注入量 100L/m 以上
または湧水量 3L/min 以上

図 2.1-41　No.2 リングの注入結果概要

表 4.2-19　No.2 リングにおける各孔の注入実績一覧

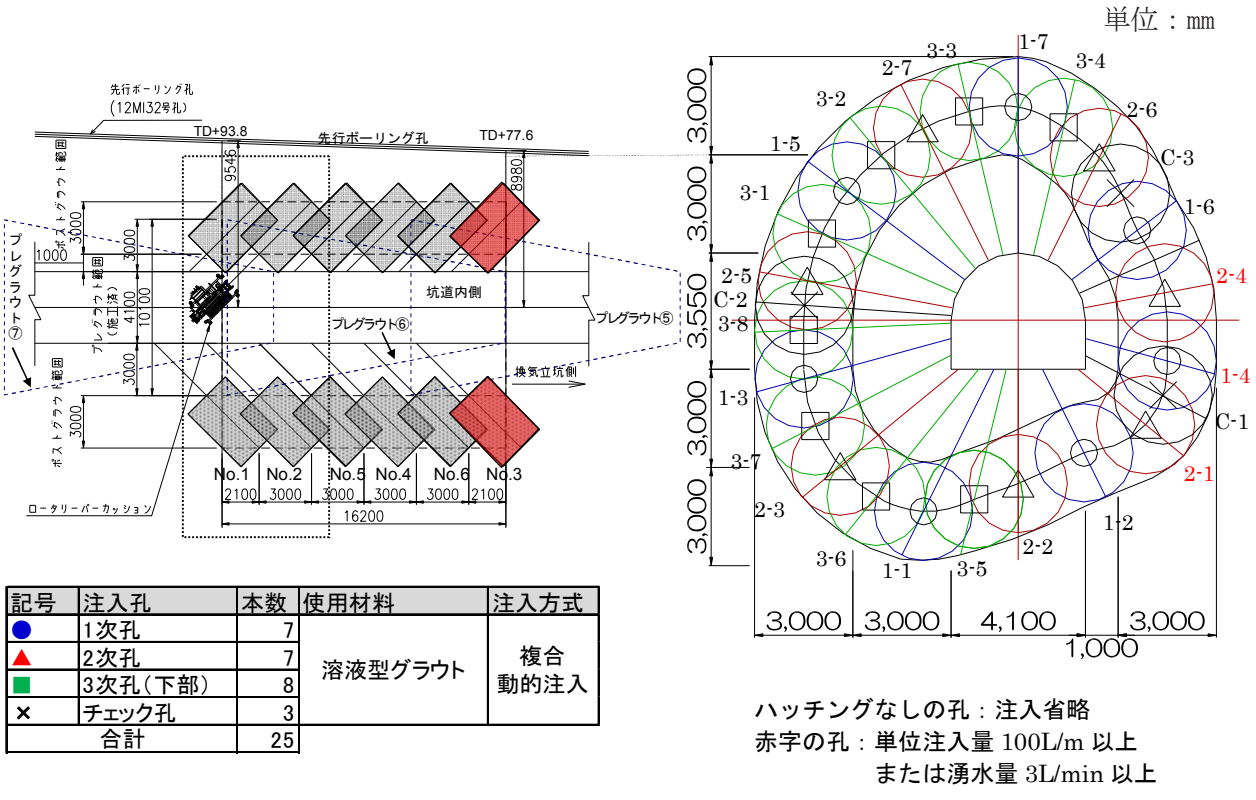
区間	日付	孔番号	湧水量 (L/min)	湧水圧 (MPa)	単位湧水量 (L/min/m)	換算ルジオン値(Lu)	ルジオン値(Lu)	区間長 (m)	超微粒子セメント			溶液型グラウト				
									注入量（L）	単位注入量 (kg/m)	単位注入量 (L/m)	注入量 (L)	単位注入量 (L/m)	混合量 (L)	廃棄量 (L)	廃棄率 (%)
ポストグラウト② 1次孔 静圧	8月4日	1-7(1)	130.0	3.5	22.97	6.43	2.78	5.66				700.0	123.7	800.0	100.0	12.5%
	8月4日	1-3(1)	17.9	2.5	3.08	1.21	2.97	5.81				700.0	120.5	800.0	100.0	12.5%
	8月5日	1-5	6.0	1.9	1.06	0.55	0.67	5.66				598.5	105.7	800.0	201.5	25.2%
	8月5日	1-4	1.1	0.1	0.40	3.93	0.19	2.74				25.7	9.4	200.0	174.3	87.2%
	8月7日	1-7(2)	60.0	3.5	10.60	2.97	2.78	5.66				1856.0	327.9	2000.0	144.0	7.2%
	8月7日	1-3(2)	6.0	2.5	1.06	0.42	2.97	5.66				1543.2	272.7	1600.0	56.8	3.6%
	8月7日	1-6	1.4	0.4	0.33	0.81	0.32	4.24				65.1	15.4	200.0	134.9	67.5%
	8月18日	1-1	3.3	1.8	0.58	0.32	0.63	5.66				87.9	15.5	300.0	212.1	70.7%
	8月18日	1-2	0.5	0.3	0.12	0.39	0.15	4.24				33.9	8.0	200.0	166.1	83.1%
ポストグラウト② 2次孔 静圧	8月19日	2-2	14.0	3.2	3.30	1.01	4.65	4.24				857.1	202.1	1000.0	142.9	14.3%
	8月19日	2-3	2.9	1.3	0.51	0.39	0.37	5.66				33.0	5.8	200.0	167.0	83.5%
	8月19日	2-1	0.2	0	0.05		0.14	4.24				4.2	1.0	200.0	195.8	97.9%
ポストグラウト② 2次孔 複合動的	8月20日	2-6	0.1	0	0.02		0.01	4.24				67.2	15.8	200.0	132.8	66.4%
	8月20日	2-4	0.5	0	0.18		0.54	2.75				776.6	282.4	900.0	123.4	13.7%
	8月21日	2-5	0.8	0.4	0.14	0.35	0.41	5.66				2117.3	374.1	2200.0	82.7	3.8%
	8月21日	2-7	0.5	0	0.09		0.17	5.66				191.6	33.9	300.0	108.4	36.1%
ポストグラウト② 3次孔 静圧	8月21日	3-5	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	8月21日	3-6	2.1	1.0	0.37	0.36	0.38	5.66				49.2	8.7	200.0	150.8	75.4%
	8月21日	3-7	1.6	0.9	0.28	0.31	0.28	5.66				17.7	3.1	200.0	182.3	91.2%
	8月22日	3-8	0.5	0.2	0.09	0.43	0.30	5.66				226.8	40.1	300.0	73.2	24.4%
ポストグラウト② 3次孔 複合動的	8月22日	3-1	0.3	0	0.05		0.20	5.66				262.4	46.4	400.0	137.6	34.4%
	8月22日	3-2	0.3	0	0.05		0.09	5.66				91.3	16.1	200	108.7	54.4%
	8月22日	3-3	0.2	0	0.04		0.16	5.66				187.7	33.2	300.0	112.3	37.4%
	8月22日	3-4	0.1	0	0.02		0.10	4.24				65.2	15.4	200.0	134.8	67.4%
ポストグラウト② チェック孔 複合動的	8月23日	C-1	0.0	0	0.00		0.03	4.24								
	8月23日	C-2	0.3	0.1	0.05	0.52	0.26	5.66				149.0	26.3	300.0	151.0	50.3%
	8月23日	C-3	0.0	0	0.00		0.03	5.66								
	8月23日	C-4-1	0.7	0	0.26		0.09	2.74				69.9	25.5	200.0	130.1	65.1%
	8月25日	C-4-2	3.6	1.5	1.31	0.86	0.01	2.74				981.0	358.0	1200.0	219.0	18.3%
ポストグラウト②　合計	8/4-8/25		23	254.9				141.3				11757.5	95.6	15400	3642.5	23.7%

※単位湧水量：単位長さあたりの湧水量
　換算ルジオン値：単位湧水量と湧水圧から注入差圧＝0.98MPa 時に換算したときの流量
　ルジオン値：水押し試験の結果から、注水差圧=0.98MPa 時の単位長さあたりの流量

(c) No.3 リングの注入実績概要

No.3 リングの注入結果の概要を図 4.2-42 に、各孔における実績を表 4.2-20 に示す。このリングから、全注入孔に対して溶液型グラウトを適用して複合動注入も同時に実施した。ただし、チェック孔の注入時は注入完了したグラウト注入材料を乱さないよう静的注入とした。

本リングは換気立坑側の B 級区間に近くて水みちと繋がっていないためか、またはこれまでのグラウト注入材料が浸透しているためか、透水性が低いことにより注入省略した孔が多い。



記号	注入孔	本数	使用材料	注入方式
●	1次孔	7	溶液型グラウト	複合動的注入
▲	2次孔	7		
■	3次孔（下部）	8		
×	チェック孔	3		
合計		25		

ハッチングなしの孔：注入省略
赤字の孔：単位注入量 100L/m 以上
または湧水量 3L/min 以上

図 4.2-42 No.3 リングの注入結果概要

表 4.2-20　No.3 リングにおける各孔の注入実績一覧

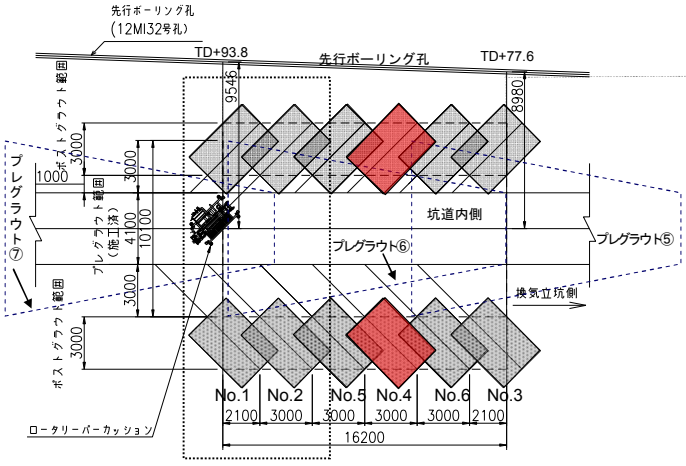
区間	日付	孔番号	湧水量 (L/min)	湧水圧 (MPa)	単位湧水量 (L/min/m)	換算ルジオン値(Lu)	ルジオン値(Lu)	区間長 (m)	超微粒子セメント			溶液型グラウト				
									注入量（L）	単位注入量 (kg/m)	単位注入量 (L/m)	注入量 (L)	単位注入量 (L/m)	混合量 (L)	廃棄量 (L)	廃棄率 (%)
ポストグラウト③ １次孔 複合動的	8月26日	1-1	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	8月26日	1-2	0.3	0.1	0.07	0.64	0.13	4.60				137.4	29.9	300.0	162.6	54.2%
	8月26日	1-3	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	8月27日	1-4	16.0	3.0	3.77	1.23	1.89	4.24				267.5	63.1	400.0	132.5	33.1%
	8月27日	1-5	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	8月27日	1-6	0.1	0.1	0.02	0.23	0.07	4.24				164.8	38.9	300.0	135.2	45.1%
	8月27日	1-7	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
ポストグラウト③ ２次孔 複合動的	8月28日	2-1	9.5	2.0	2.24	1.10	1.70	4.24				240.6	56.7	400.0	159.4	39.9%
	8月28日	2-2	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	8月28日	2-3	0.7	0.3	0.12	0.40	0.18	5.66				187.1	33.1	400.0	212.9	53.2%
	8月29日	2-4	11.5	3.5	2.71	0.76	1.92	4.24				436.0	102.8	600.0	164.0	27.3%
	8月29日	2-5	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	8月29日	2-6	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	8月29日	2-7	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
ポストグラウト③ ３次孔 複合動的	8月30日	3-1	0.0	0	0.00		0.05	5.66				49.3	8.7	200.0	150.7	75.4%
	9月2日	3-2	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	8月30日	3-3	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月2日	3-4	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月2日	3-5	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月2日	3-6	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	8月30日	3-7	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月2日	3-8	0.1	0.1	0.02	0.17	0.03	5.66				42.9	7.6	200.0	157.1	78.6%
ポストグラウト③ チェック孔 静圧	8月30日	C-1	2.5	0.3	0.59	1.93		4.24				59.8	14.1	300.0	240.2	80.1%
	9月3日	C-2	0.0	0	0.00		0.01	5.66								
	9月3日	C-3	0.3	0.1	0.07	0.69	0.00	4.24								
ポストグラウト③　合計	8/26-9/3		9	41.0				126.2				1585.4	39.4	3100	1514.6	48.9%

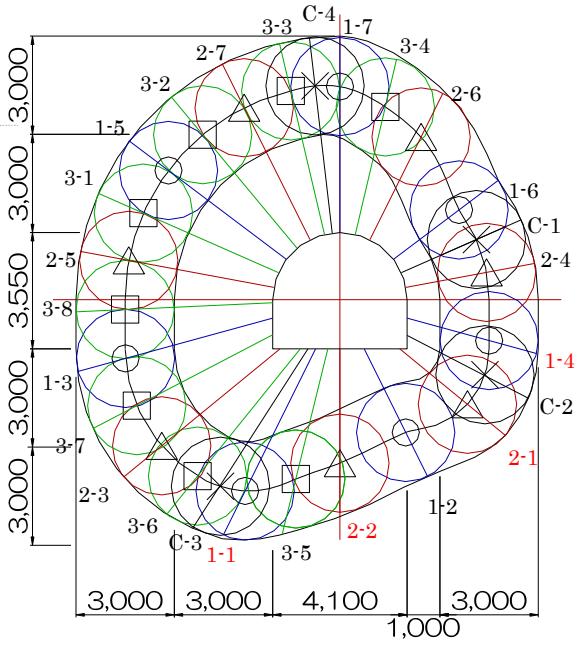
※単位湧水量：単位長さあたりの湧水量
　換算ルジオン値：単位湧水量と湧水圧から注入差圧＝0.98MPa 時に換算したときの流量
　ルジオン値：水押し試験の結果から、注水差圧=0.98MPa 時の単位長さあたりの流量

(d) No.4 リングの注入実績概要

No.4 リングの注入結果の概要を図 4.2-43 に、各孔における実績を表 4.2-21 に示す。再び仕様確認断面に近いリングのためか、No.3 リングより総じて注入量が多い結果となった。ただし、換気立坑から見て左半分は注入省略できる孔が発生している。No.2 リングの 1-7 孔、1-3 孔をはじめとし、No.2 リングではプレグラウト範囲の外側の注入量が多かったことから、プレグラウトの外側に止水ゾーンが形成され始めたと考えられる。

単位：mm





記号	注入孔	本数	使用材料	注入方式
●	1次孔	7	溶液型グラウト	複合 動的注入
▲	2次孔	7		
■	3次孔(下部)	8		
×	チェック孔	4		
合計		26		

ハッチングなしの孔：注入省略
赤字の孔：単位注入量 100L/m 以上
　　または湧水量 3L/min 以上

図 4.2-43　No.4 リングの注入結果概要

表 4.2-21　No.4 リングにおける各孔の注入実績一覧

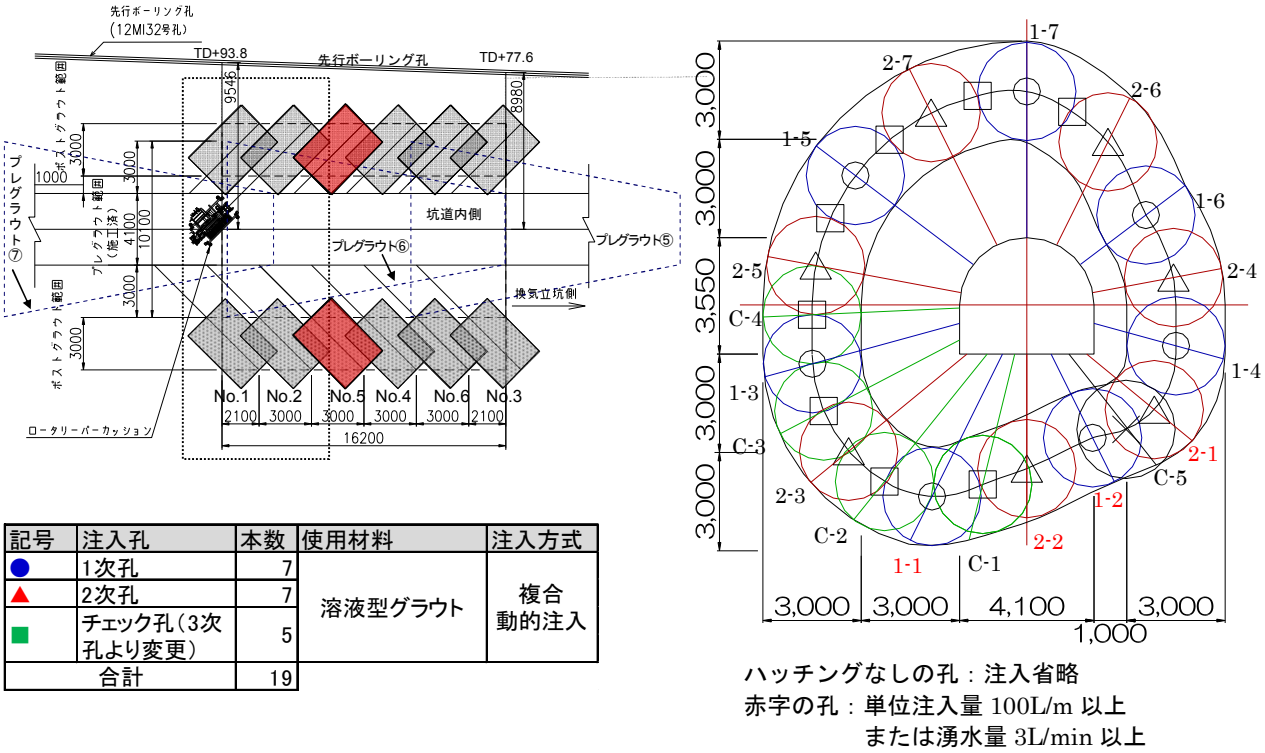
区間	日付	孔番号	湧水量 (L/min)	湧水圧 (MPa)	単位湧水量 (L/min/m)	換算ルジオン値(Lu)	ルジオン値(Lu)	区間長 (m)	超微粒子セメント			溶液型グラウト				
									注入量（L）	単位注入量 (kg/m)	単位注入量 (L/m)	注入量 (L)	単位注入量 (L/m)	混合量 (L)	廃棄量 (L)	廃棄率 (%)
ポストグラウト④ １次孔 複合動的	9月４日	1-1	3.2	1.5	0.57	0.37	0.64	5.66				171.2	30.2	300.0	128.8	42.9%
	9月４日	1-2	1.9	1.8	0.45	0.24	0.45	4.24				74.7	17.6	200.0	125.3	62.7%
	9月４日	1-3	0.3	0.1	0.05	0.52	0.29	5.66				148.0	26.1	200.0	52.0	26.0%
	9月５日	1-4	4.8	1.5	1.13	0.74		4.24				206.2	48.6	300.0	93.8	31.3%
	9月５日	1-5	0.5	0.1	0.09	0.87	0.09	5.66				193.8	34.2	300.0	106.2	35.4%
	9月５日	1-6	0.4	0.1	0.09	0.92	0.27	4.24				114.4	27.0	300.0	185.6	61.9%
	9月５日	1-7	0.1	0.1	0.02	0.17	0.11	5.66				203.1	35.9	300.0	96.9	32.3%
ポストグラウト④ 2次孔 複合動的	9月６日	2-1	6.1	2.0	1.44	0.70	1.28	4.24				85.0	20.0	200.0	115.0	57.5%
	9月６日	2-2	2.3	1.4	0.54	0.38	0.39	4.24				154.4	36.4	300.0	145.6	48.5%
	9月６日	2-3	1.1	1.1	0.19	0.17	0.16	5.66				93.3	16.5	200.0	106.7	53.4%
	9月８日	2-4	2.0	0.2	0.73	3.58	1.07	2.74				161.0	58.8	300.0	139.0	46.3%
	9月８日	2-5	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月８日	2-6	0.1	0	0.02		0.03	4.24				141.7	33.4	300.0	158.3	52.8%
	9月８日	2-7	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
ポストグラウト④ 3次孔 複合動的	9月９日	3-5	0.4	1.2	0.09	0.08	0.10	4.24				39.6	9.3	200.0	160.4	80.2%
	9月９日	3-6	1.7	1.8	0.30	0.16	0.31	5.66				164.3	29.0	200.0	35.7	17.9%
	9月９日	3-7	0.1	0.1	0.02	0.17	0.00	5.66				11.4	2.0	200.0	188.6	94.3%
	9月10日	3-8	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月10日	3-1	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月10日	3-2	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月10日	3-3	0.1	0.1	0.02	0.17	0.07	5.66				219.9	38.9	300.0	80.1	26.7%
	9月10日	3-4	0.1	0.1	0.02	0.23	0.19	4.24				203.8	48.1	300.0	96.2	32.1%
ポストグラウト④ チェック孔 静圧	9月11日	C-1	0.2	0.1	0.05	0.46	0.97	4.24				110.0	25.9	300.0	190.0	63.3%
	9月11日	C-2	0.6	0.2	0.14	0.69	0.21	4.24				20.5	4.8	200.0	179.5	89.8%
	9月11日	C-3	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月11日	C-4	2.1	0.2	0.37	1.82	0.21	5.66				157.5	27.8	300.0	142.5	47.5%
	9月25日	C-4-2	-	-				5.66				27.0	4.8	200.0	173.0	86.5%
ポストグラウト④　合計	9/4-9/11		20	28.1				135.7				2700.8	27.4	5400	2699.2	50.0%

※単位湧水量：単位長さあたりの湧水量
　換算ルジオン値：単位湧水量と湧水圧から注入差圧＝0.98MPa 時に換算したときの流量
　ルジオン値：水押し試験の結果から、注水差圧=0.98MPa 時の単位長さあたりの流量

(e) No.5 リングの注入実績概要

No.5 リングの注入結果の概要を図 4.2-44 に、各孔における実績を表 4.2-22 に示す。本リングは、No.2 リングと No.4 リングを内挿するリングであった。換気立坑から見て左、右の両側に注入省略される孔が発生し、特に左側については 3 次孔を省略することができた（3 次孔の 4 本を削孔したものの、湧水が発生しないためチェック孔 C-1 孔～C-4 孔に変更）。C-5 孔については若干の湧水が発生したことと比較すると、左側については、2 次孔までで十分な止水ゾーンが形成されたと考えられる。

単位：mm



記号	注入孔	本数	使用材料	注入方式
●	1次孔	7	溶液型グラウト	複合 動的注入
▲	2次孔	7		
■	チェック孔（3次孔より変更）	5		
合計		19		

ハッチングなしの孔：注入省略
赤字の孔：単位注入量 100L/m 以上
または湧水量 3L/min 以上

図 4.2-44　No.5 リングの注入結果概要

表 4.2-22　No.5 リングにおける各孔の注入実績一覧

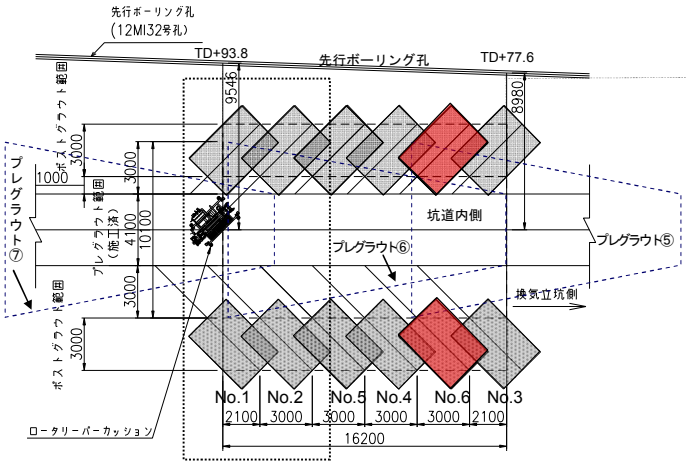
区間	日付	孔番号	湧水量 (L/min)	湧水圧 (MPa)	単位湧水量 (L/min/m)	換算ルジオン値(Lu)	ルジオン値(Lu)	区間長 (m)	超微粒子セメント			溶液型グラウト				
									注入量（L）	単位注入量 (kg/m)	単位注入量 (L/m)	注入量 (L)	単位注入量 (L/m)	混合量 (L)	廃棄量 (L)	廃棄率 (%)
ポストグラウト⑤ １次孔 複合動的	9月12日	1-1	3.0	1.3	0.53	0.40	0.34	5.66				130.1	23.0	200.0	69.9	35.0%
	9月12日	1-2	0.4	0.1	0.09	0.92	0.25	4.24				1527.4	360.2	1700.0	172.6	10.2%
	9月12日	1-3	0.7	0.2	0.12	0.61	0.45	5.66				233.8	41.3	400.0	166.2	41.6%
	9月15日	1-4	1.5	0.7	0.35	0.50	0.66	4.24				123.0	29.0	200.0	77.0	38.5%
	9月15日	1-5	0.2	0.1	0.04	0.35	0.18	5.66				187.7	33.2	300.0	112.3	37.4%
	9月15日	1-6	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月15日	1-7	0.3	0.1	0.05	0.52	0.18	5.66				123.2	21.8	200.0	76.8	38.4%
ポストグラウト⑤ 2次孔 複合動的	9月16日	2-1	3.2	1.4	0.75	0.53	1.66	4.24				178.8	42.2	400.0	221.2	55.3%
	9月16日	2-2	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月16日	2-3	2.3	0.2	0.41	1.99	1.00	5.66				508.2	89.8	700.0	191.8	27.4%
	9月17日	2-4	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月17日	2-5	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月17日	2-6	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月17日	2-7	0.3	0.1	0.05	0.52	0.35	5.66				53.1	9.4	200.0	146.9	73.5%
ポストグラウト⑤ 3次孔→チェック孔 静圧	9月18日	C-1	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月18日	C-2	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月18日	C-3	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月18日	C-4	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
⑤追加チェック孔　静圧	9月25日	C-5	0.1	0.1	0.02	0.23	0.29	4.24				17.8	4.2	200.0	182.2	91.1%
ポストグラウト⑤　合計	9/12-9/18		10	12.0				94.8				3083.1	65.4	4500	1416.9	31.5%

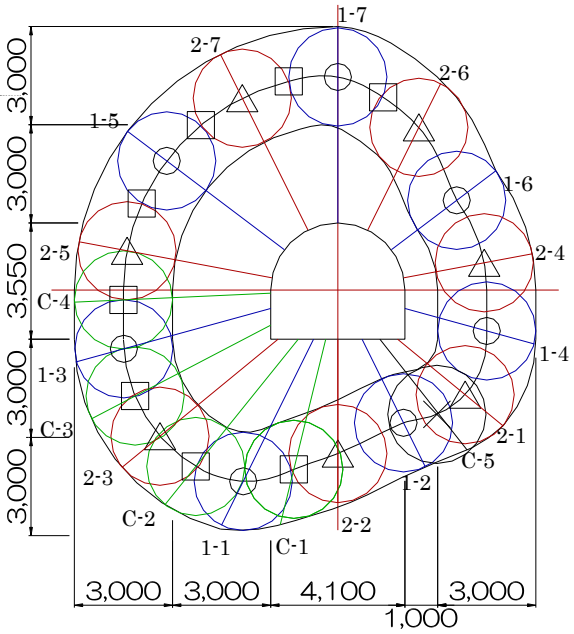
※単位湧水量：単位長さあたりの湧水量
　換算ルジオン値：単位湧水量と湧水圧から注入差圧＝0.98MPa 時に換算したときの流量
　ルジオン値：水押し試験の結果から、注水差圧=0.98MPa 時の単位長さあたりの流量

(f) No.6 リングの注入実績概要

No.6 リングの注入結果の概要を図 4.2-45 に、各孔における実績を表 4.2-23 に示す。ルジオン値が計測できて注入した孔はわずか 6 本であった。換気立坑から見て左側は 1 本も注入できる孔がなく、特にプレグラウチング範囲の外側範囲は十分に改良されたといえる。最終リングのため、注入範囲の周囲が十分に止水された結果と考えられる。

単位：mm





記号	注入孔	本数	使用材料	注入方式
●	1次孔	7	溶液型グラウト	複合 動的注入
▲	2次孔	7		
■	チェック孔（3次孔より変更）	5		
合計		19		

ハッチングなしの孔：注入省略
赤字の孔：単位注入量 100L/m 以上
または湧水量 3L/min 以上

図 4.2-45　No.6 リングの注入結果概要

表 4.2-23　No.6 リングにおける各孔の注入実績一覧

区間	日付	孔番号	湧水量 (L/min)	湧水圧 (MPa)	単位湧水量 (L/min/m)	換算ルジオン値(Lu)	ルジオン値(Lu)	区間長 (m)	超微粒子セメント			溶液型グラウト				
									注入量（L）	単位注入量 (kg/m)	単位注入量 (L/m)	注入量 (L)	単位注入量 (L/m)	混合量 (L)	廃棄量 (L)	廃棄率 (%)
ポストグラウト⑥１次孔 複合動的	9月19日	1-1	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月19日	1-2	1.7	1.0	0.40	0.39	0.68	4.24				151.6	35.8	300.0	148.4	49.5%
	9月19日	1-3	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月20日	1-4	1.5	0.7	0.35	0.50	0.96	4.24				93.2	22.0	200.0	106.8	53.4%
	9月20日	1-5	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月20日	1-6	0.3	0.1	0.07	0.69	0.04	4.24				27.2	6.4	200.0	172.8	86.4%
	9月20日	1-7	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
ポストグラウト⑥2次孔 複合動的	9月22日	2-1	1.3	0.9	0.31	0.33	0.27	4.24				140.4	33.1	300.0	159.6	53.2%
	9月22日	2-2	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月22日	2-3	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月23日	2-4	0.6	0.1	0.14	1.39	2.18	4.24				133.5	31.5	300.0	166.5	55.5%
	9月23日	2-5	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月23日	2-6	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月23日	2-7	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
ポストグラウト⑥ 3次孔→チェック孔 静圧	9月24日	C-1	0.0	0	0.00		0.00	4.24								
	9月24日	C-2	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月24日	C-3	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
	9月24日	C-4	0.0	0	0.00		0.00	5.66								
⑥追加チェック孔　静圧	9月25日	C-5	0.5	0.4	0.12	0.29	0.21	4.24				19.3	4.6	200.0	180.7	90.4%
ポストグラウト⑥　合計	9/19-9/24		6	5.9				94.8				565.2	26.9	1500	934.8	62.3%

※単位湧水量：単位長さあたりの湧水量
　換算ルジオン値：単位湧水量と湧水圧から注入差圧＝0.98MPa 時に換算したときの流量
　ルジオン値：水押し試験の結果から、注水差圧=0.98MPa 時の単位長さあたりの流量

(ii) 注入実績の総括

No.1～6 リングの注入実績のまとめを表 4.2-24 に、考察結果を以下に示す。

- No.1 リングでは、換算ルジオン値の全注入孔の平均値（0.42Lu）が、水押し試験で得たルジオン値の平均値（0.58Lu）より低い（表 4.2-24 参照）。これは、水押し試験時に不飽和の亀裂に注水されることなどにより注水流量が増加し、湧水量から換算したルジオン値より高く算定されたことが考えられる。
- 一方、No.2 リング以降は逆転し、換算ルジオン値の平均値の方がルジオン値より高い。これは、地下水が湧出する透水性の方が、亀裂に注水するときの透水性より高いことを意味する。湧水が壁面に流れる方向と逆方向の圧力では亀裂内で目詰まりが発生して透水性が下がるなど、逆止弁のような機構となっている可能性があると考えられる。
- No.2 リングの総湧水量（254.9L/min）が顕著に高いのは、130L/min の孔が出現したためである。また、このリングから複合動的注入を開始し、グラウト注入量が最も多い。このため、他リングへもグラウト注入材料が浸透して影響を与えた可能性が最も高い。
- No.3 リングは総湧水量（41.0L/min）であり No.2 リングに続いて 2 番目に高いが、溶液型グラウトの総注入量は（254.9L/min）と 2 番目に少ない（セメントを注入した No.1 リングは除く）。B 級区間に近くて透水性が低いことや、No.2 リングのグラウト注入材料が浸透した影響が要因として考えられる。
- No.5 リングと No.6 リングの削孔本数が少ないのは 3 次孔が省略できたためであり、リングの施工を内挿した効果により、周囲の水みちが塞がれたと考えられる。
- 最後の No.6 リングは最も総注入量（565.2L）が少ないリングであり、水みちとつながっていないことや、十分に周囲リングからのグラウト注入材料が浸透して No.6 リングで浸透可能な領域が少ない可能性がある。
- 溶液型グラウトは少量で練混ぜることが困難であったため、透水性が低い孔を主として一定量のロスが発生し、全注入孔で平均して練混ぜ量に対して 1/3 程度の廃棄量があった。

表 4.2-24　ポストグラウトリング（No.1～6 リング）の注入実績のまとめ

リングＮo.	期間	削孔本数	注入本数	総湧水量(L/min)	平均単位湧水量（L/min/m）	平均換算ルジオン値(Lu)	平均ルジオン値(Lu)	総注入区間長(m)
ポストグラウト①　合計	7/15-8/1	26	25	35.0	0.32	0.42	0.58	108.7
ポストグラウト②　合計	8/4-8/25	26	23	254.9	1.62	1.25	0.75	141.3
ポストグラウト③　合計	8/26-9/3	25	9	41.0	0.38	0.80	0.25	126.2
ポストグラウト④　合計	9/4-9/11	26	20	28.1	0.24	0.66	0.27	135.7
ポストグラウト⑤　合計	9/12-9/18	19	10	12.0	0.13	0.66	0.28	94.8
ポストグラウト⑥　合計	9/19-9/24	19	6	5.9	0.07	0.60	0.23	94.8
合計	7/15-9/24	141	93	376.9	0.52	0.73	0.42	701.4

※単位湧水量、換算ルジオン値、ルジオン値は、区間毎または全体の「平均値」

リングNo.	超微粒子セメント			溶液型グラウト				
	総注入量（L）	単位注入量（kg/m）	単位注入量（L/m）	注入量(L)	平均単位注入量(L/m)	混合量(L)	廃棄量(L)	廃棄率(%)
ポストグラウト①　合計	3051.4	8.1	43.1	801.3	23.6	1800	998.7	55.5%
ポストグラウト②　合計				11757.5	95.6	15400	3642.5	23.7%
ポストグラウト③　合計				1585.4	39.4	3100	1514.6	48.9%
ポストグラウト④　合計				2700.8	27.4	5400	2699.2	50.0%
ポストグラウト⑤　合計				3083.1	65.4	4500	1416.9	31.5%
ポストグラウト⑥　合計				565.2	26.9	1500	934.8	62.3%
合計(単位注入量は平均)	3051.4	8.1	43.1	20493.3	54.9	31700	11206.7	35.4%

※総湧水量：各孔に発生した湧水量の合計
　平均単位湧水量：各孔の単位湧水量についてのリング毎または全体の平均値
　（単位湧水量：単位長さあたりの湧水量）
　平均換算ルジオン値：各孔の換算ルジオン値についてのリング毎または全体の平均値
　（換算ルジオン値：単位湧水量と湧水圧から注入差圧＝0.98MPa 時に換算したときの流量）
　平均ルジオン値：各孔のルジオン値についてのリング毎または全体の平均値
　（ルジオン値：水押し試験の結果から、注水圧=0.98MPa 時の単位長さあたりの流量）
　平均単位注入量：各孔の注入量についてのリング毎または全体の平均値

⑵ 施工中の評価：施工を通して得られた知見や改善点

今回の施工を通して得られた知見や、施工中に実施した改善点などについてまとめる。

(i) プレグラウト注入材料（プレグラウチング範囲）の確認

上向きに削孔時は、削孔粉から黒色の破片が確認できる孔が多く認められた（図 4.2-46 参照）。本区間のプレグラウト注入材料（超微粒子セメント）には黒色の色粉を混入していたため、亀裂または空隙に充てんされたグラウト材であったと推察できる。また、削孔深度が 4～5m までの範囲に確認でき、壁面に対して 45 度の削孔角度を考慮すると、坑道壁面から約 3m までの深度となる。このため、プレグラウチングはおおむね設計通りの範囲に浸透していたことが確認できた。

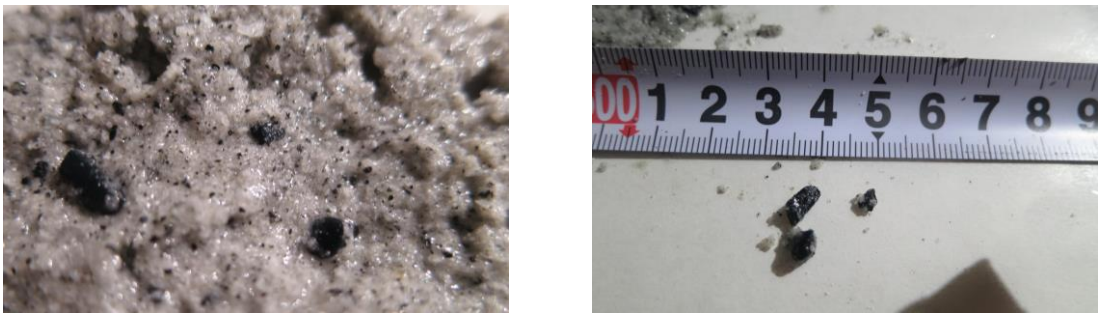


図 4.2-46　深度約 3m 以深の削孔粉に混じる黒色の破片（プレグラウト注入材料と推定）

(ii) 注入孔からのリーク発生（プレグラウチング範囲の外側範囲を改良時）

No.1 リングでは、プレグラウチング範囲の外側範囲に超微粒子セメントを注入する孔（換気立坑から見て左上部位）においてパッカーの手前部（未注入範囲）から湧水が発生する傾向にあった。このため、当該の注入孔からの滴水は止水できなかった（図 4.2-47 参照）。この原因として、既に超微粒子セメントによる改良限界に到達していることと、プレグラウチング範囲（坑道壁面より鉛直方向に 0-3m を改良）とポストグラウチング範囲（同 3-6m を改良）の境界付近、すなわち坑道壁面より 3m 付近が改良されずに水みちとなったことが考えられた。

図 4.2-47　No.1 リング左上部に認められた注入孔からの滴水（注入区間より手前から発生）

このため、No.2 リング以降はプレグラウチング範囲の外側範囲を改良する孔に対して、パッカーを 1m 手前に設置（注入範囲を手前側に 1m 延長）し、プレグラウチングとポストグラウチングの改良範囲が理論上 1m 以上重複するよう変更した（図 4.2-48 参照）。すなわち、削孔長は変更せずに改良区間長を 3m から 4m に拡張した。これに伴い、規定注入量も 500L→700L に変更

した。これ以降、パッカー手前部からの湧水が減少したことから、効果的な対策であったといえる。さらに、No.1 リングで湧水が発生した当該の注入孔も、No.2 リング以降の施工が進むにつれて、湧水量が減少した。これは、その後のグラウト注入材料が浸透してきたことと、周辺の止水ゾーンが形成され始めたことにより周囲の水みちが減少したことが要因として考えられる。

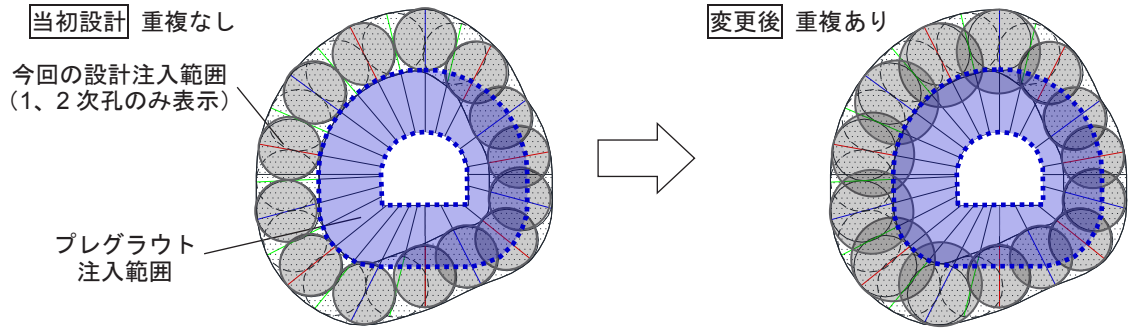


図 4.2-48　パッカー設置位置の変更概要（断面図）

(iii) 水押し時の表面リーク発生（プレグラウチング範囲と重複する範囲を改良時）

プレグラウチング範囲と重複する範囲を注入時には、水押し試験の時点で表面に大量に水押しの水がリークし、注水圧を上げられないグラウト孔があった。掘削損傷領域付近にパッカーをかけ、注入区間が密集する亀裂と交差して注水の水みちが壁面に短絡したためと考えられる。こういった場合、パッカー位置を奥部に変更することで施工可能となった（図 4.2-49）。また、プレグラウチング範囲の外側範囲を改良する場合は、このようなリーク発生はなかった。

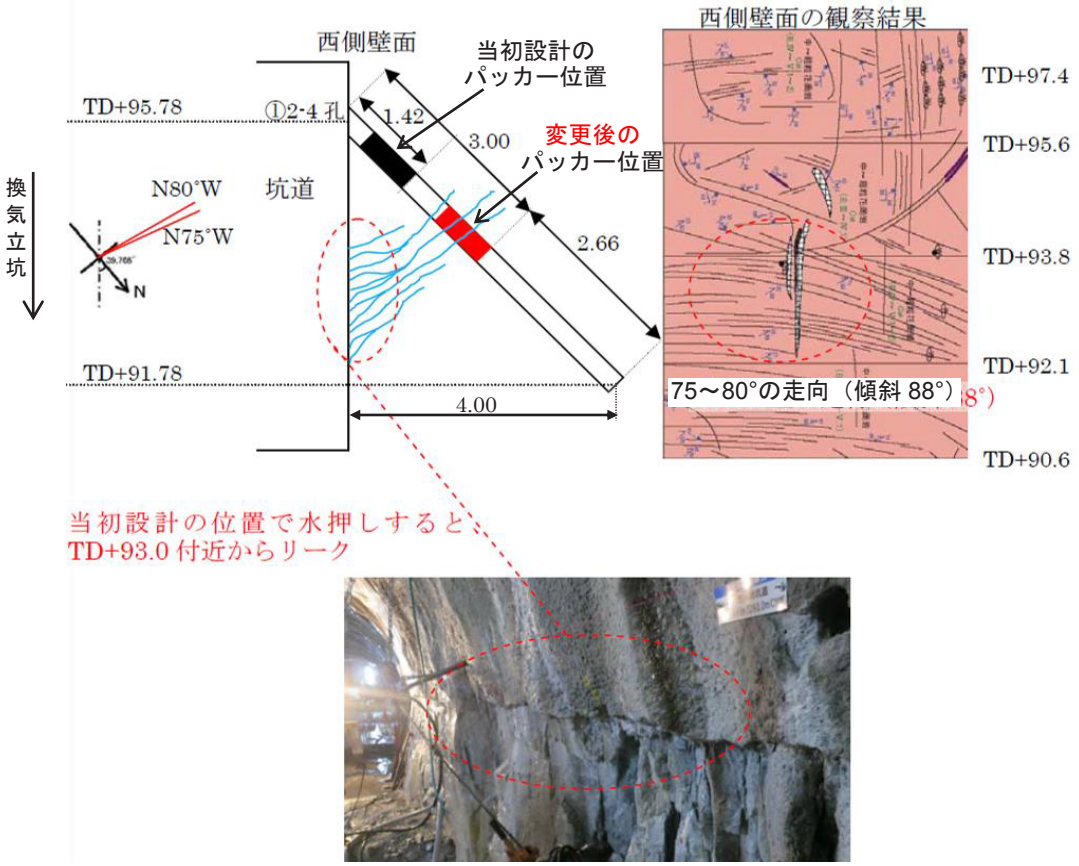


図 4.2-49　壁面リーク発生によりパッカー位置を深部に変更した事例（No.1 リングの 2-4 孔）

(iv) 大量湧水の発生

No.2 リングの 1-7 孔では 130L/min 以上湧水が発生した。ルジオン値が 2.78Lu（換算ルジオン値は 6.43Lu）であったため、計画通りに溶液型グラウトを注入した。注入完了後は湧水量をわずか0.06L/min まで低下させることができ、その後に周辺のポストグラウチングが進むにつれて、完全にドライとなった。すなわち、当該の注入孔は大量湧水が発生したにもかかわらず、溶液型グラウトのみの注入により完全に止水することが可能であった（図 4.2-50 参照）。

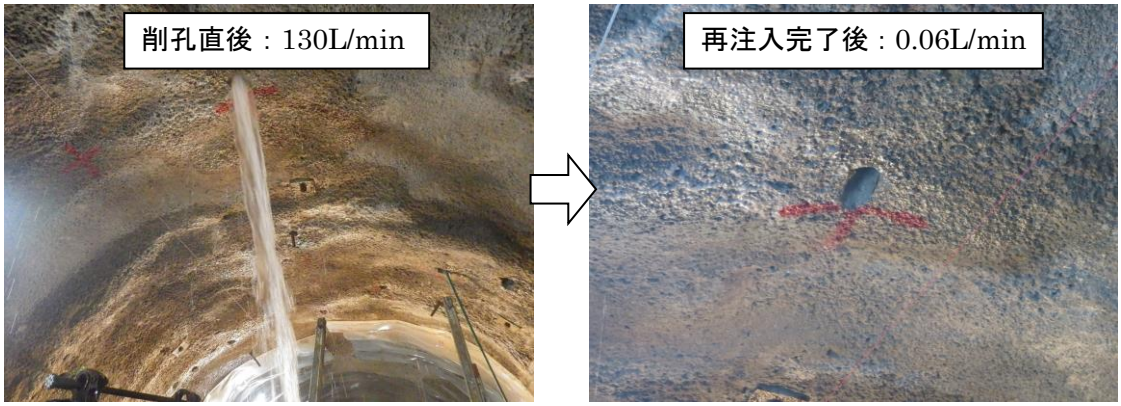


図 4.2-50　130L/min の湧水が発生した注入孔の止水状況（No.2 リング 1-7 孔）

表 4.2-25　湧水が大量に発生し、再注入を実施した注入孔（2 孔）の湧水量の変化

日付	湧水量（L/min）		備考
	No.2 リング 1-3 孔	No.2 リング 1-7 孔	
8 月 4 日	17.6	130	注入前：削孔後
8 月 7 日	6.0	60	注入後：規定注入量 700Ｌによる終了
8 月 18 日	0.20	0.06	再注入後：ダメ押し完了 （盆休みの間パッカー設置） 1-7 孔はその後完全に止水

ただし、当該の注入孔を含む 2 孔は、当初に定めた規定注入量（パッカー位置を変更して改良区間を広げたことにより 500L→700L に変更済み）では止水ができなかった。そこで、再注入を実施してダメ押し注入の基準に到達するまで注入を継続したことにより、止水することが可能であった（表 4.2-25 参照）。その後の施工から、ダメ押し注入での停止基準を基本方針とし、現実的な規定量を探りながら施工を実施した。その結果、注入区間長に比例したおよそ 350L/m となる知見が得られた（図 4.2-56 参照）。それ以降、350L/m を規定注入量として設定した。

さらに、これらの注入孔の再注入は現場が夏季休暇に入る直前であったため、夏季休暇中はパッカーをかけたままにして 1 週間以上の養生を実施した。平成 25 年度の検討で得られた北欧の知見では、溶液型グラウトは養生時間が長い方が望ましいとされているため、今後の施工でも養生時間の検討が必要と考えられる。

(v) 溶液型グラウトの施工について

溶液型グラウトの注入については、瑞浪の深度 300m のボーリング横坑における試験施工の実績からゲルタイム程度の注入時間で流量が低下して注入が完了すると予想していたが、今回はゲルタイム 2 時間に対して 3 時間を超える注入時間となる孔が多く見られ、特に、1Lu を超える孔にその傾向が強かった。この要因として、注入を継続しながら新しいバッチを練り続けたことにより注入設備内および孔内近傍ではフレッシュなグラウト注入材料が供給され続け、ゲル化することなく（新しい）亀裂内に浸透し続けたことが考えられる。逆に、透水性が低いグラウト孔については、ゲルタイムに近づくと流量の低下が早まり、ゲルタイム内にダメ押し注入開始となる場合が多かった。

注入設備にはリターンの機構があるため（図 4.2-16 参照）、ポンプ熱によるグラウト温度上昇に伴うゲルタイム減少を懸念し、温度による配合補正を計画した（表 4.2-9 参照）。グラウトタンク内の液温を計測しながら施工したが、温度上昇は殆ど見られなかった。これは、低流量で長時間注入する孔が少なかったためである。このため、今回は温度による配合補正をしていない。

また、ゲル化し始めるまで注入することがダメ押し完了および亀裂内のグラウト注入材料の流出防止の観点から望ましい一方で、ゲル化するとホースやパッカー内でグラウト注入材料が閉塞することが懸念された。しかし、図 4.2-51 の糊状にゲル化した状態でも、圧を上げて水送りすることでホース内の残存グラウト注入材料を完全に除去することができた。このため、溶液型グラウトが注入設備に詰まるようなトラブルは一切発生しなかった。

また、溶液型グラウトは少量で練混ぜることが困難であったため、透水性が低い孔では一定量のロスが発生した（表 4.2-24 参照）。この廃棄量を減らすことが今後の課題である。

図 4.2-51　糊状にゲル化した溶液型グラウト

(vi) 複合動的注入の施工について

複合動的注入は、高圧注入のためか倉敷での圧力変動よりも大きい傾向にあり、周波数の設定値（初期値）を変更する必要があった。

（当初設定値）		（最終的に設定した初期値）
・ 長波：周波数 0.06Hz、振幅±5%	→	長波：周波数 0.10Hz、振幅±5%
・ 短波：周波数 6.00Hz、振幅±5%		長波：周波数 6.00Hz、振幅±5%

注入中に一定圧で注入量が増加する場合、複合波の脈動の制御により増加した注入流量が元に戻ることが分かり、脈動を段階的に制限して最終的には脈動を切断するというフローを追加した。溶液型グラウトの配合変更フローと合わせたフローの概要を図 4.2-52 に示す。

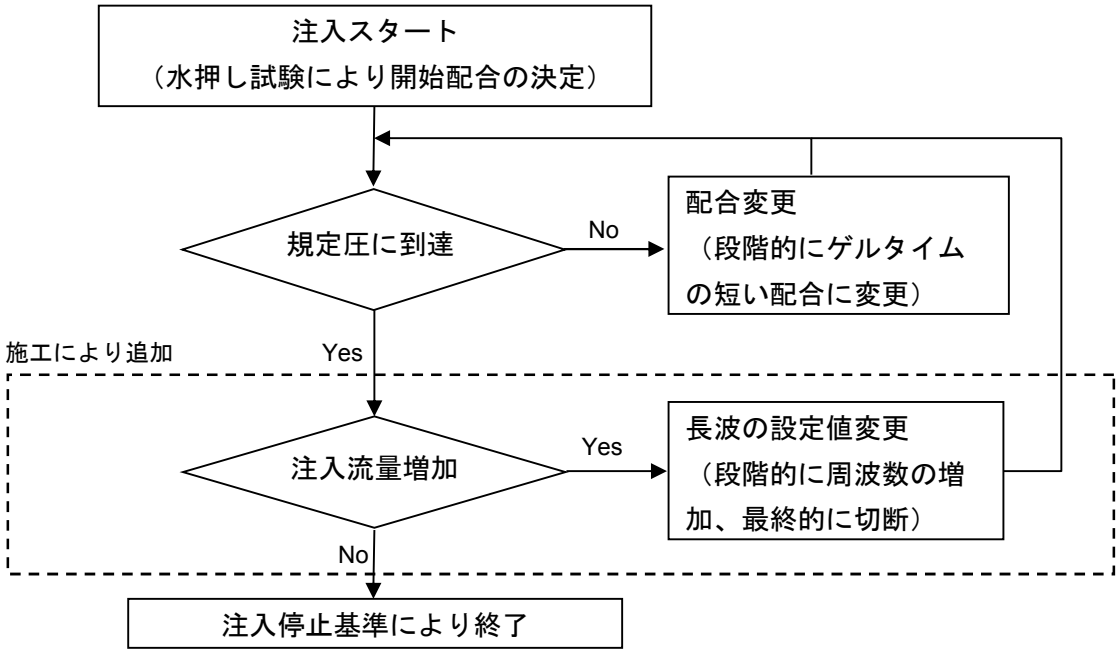


図 4.2-52　溶液型グラウトの配合および複合動的注入の設定値の変更フローの概要

注入流量が急増したときは、表面リークが発生するケースが多かった。この場合も同様に脈動を制限することで、リークが即座に止まる傾向にあった。よって、リークしない限りまたは発生するまでは、複合動的注入は亀裂の浸透および充填に対して効果的であると考えられる。

更に、浸透性が非常に高い溶液グラウトにも関わらず、壁面のコーキング処理で表面リークが完全に止まることが多かった。コーキング材と溶液型グラウトが反応して部分的に瞬結した可能性が要因として考えられる。

なお、プレグラウチング範囲の外側範囲を施工した孔は、複合動的注入を用いてリークが発生することは殆どなかったため複合動的注入の設定値を変更することも少なく、効果的であったといえる。よって、カバーロックが十分に取れるプレグラウチングから複合動的注入を適用すれば、大いに止水効果が期待できるものと考えられる。

また、複合動的注入の適用時は注入圧に振動があり、瞬間的には 1.5MPa～7MPa 程度を示すことがあった。すなわち、注入差圧が±3.5MPa である。ポストグラウチングという壁面が近い条件下であっても大部分の孔でリークを発生させることなく注入が可能であった。今後は複合動的だけでなく、高圧注入の検討が期待できる。既往の瑞浪でのプレグラウチングでは最大注入圧が 5MPa 程度であるが、今後の特にプレグラウチングでは従来以上の高圧により効率的な注入を実施することが望ましい。

(3) 適用技術の有効性評価

(i) ポストグラウチングによる湧水量および透水性の低減効果

今回削孔した各リングの単位湧水量およびルジオン値の次数ごとの変化を表 4.2-26 および表 4.2-27 に示す。

各リングともに、注入次数の増加に伴いおおむね単位湧水量およびルジオン値が低減するため、ポストグラウチングが効果的であることが判明した。また、リング毎の最終平均値（図 4.2-53）で比較すると、単位湧水量はリング数の増加に従い確実に減少しており、ルジオン値も No.4 は高いものの、概ね減少していることが判明した。

No.1 リング（溶液型グラウトと超微粒子セメントを併用）と No.2 リング（動的注入と静的注入を併用）は仕様確認断面のため、標準断面の No.3 リング以降でルジオン値を確認すると、0.1Lu 以下への改良が確認できた。すなわち、既往知見の溶液型グラウトの改良限界 0.2～0.1Lu（表 4.2-16 参照）より十分に低い値まで改良できたといえる。

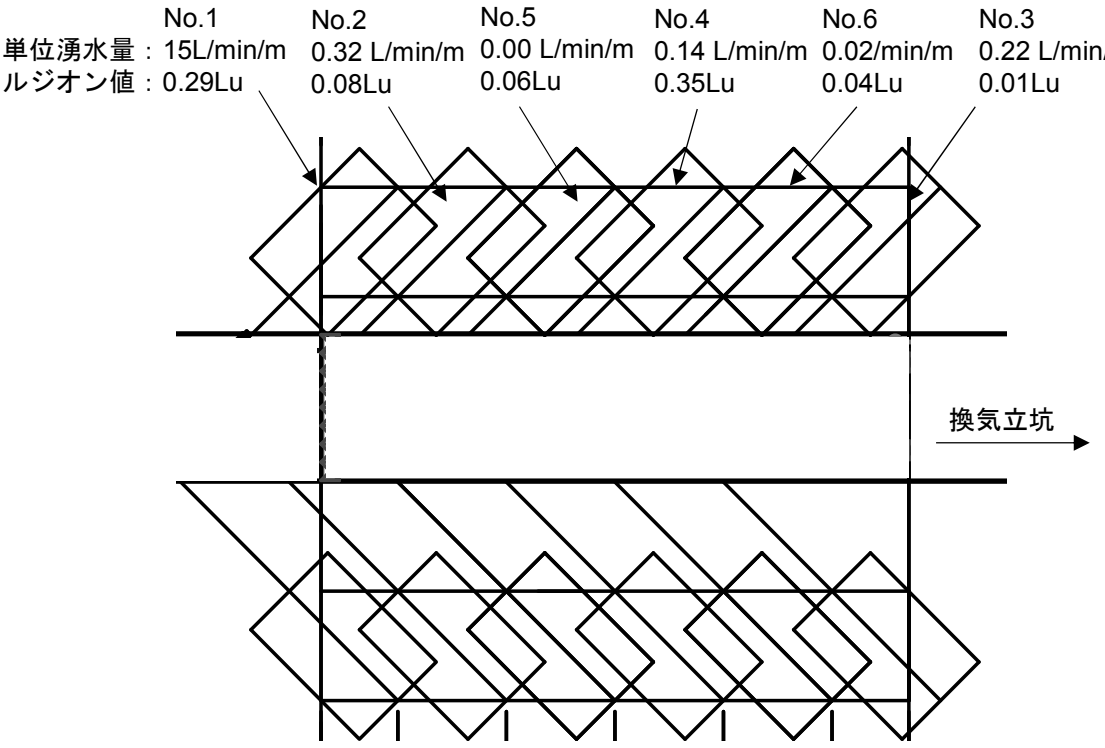


図 4.2-53　各リングの単位湧水量およびルジオン値の最終平均値の一覧

表 4.2-26　No.1～3 リングの単位湧水量とルジオン値の低減図（平均値入り）

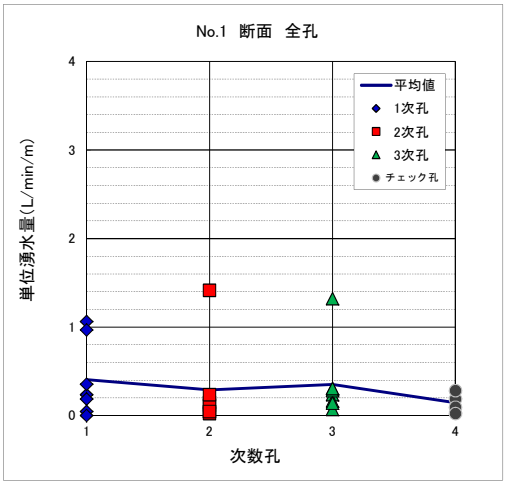
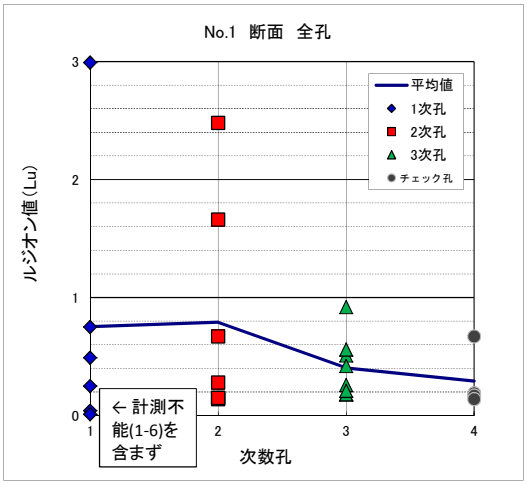
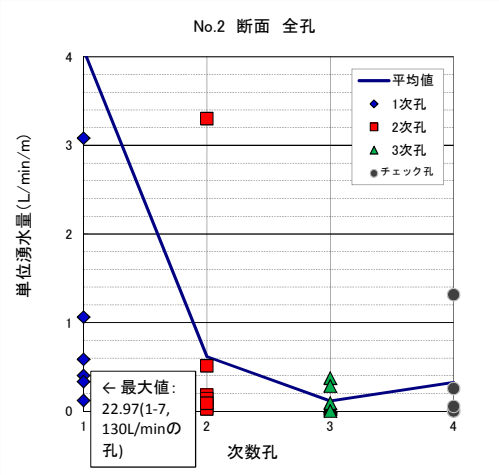
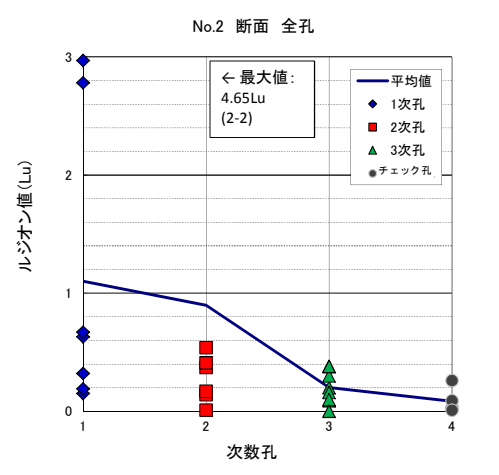
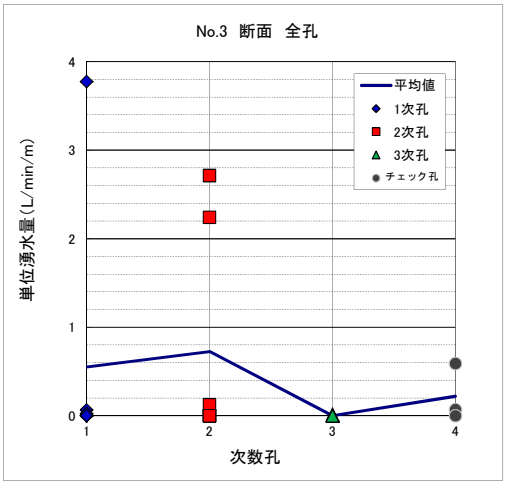
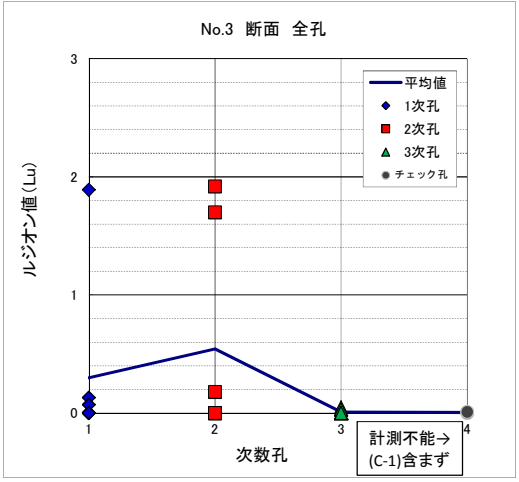
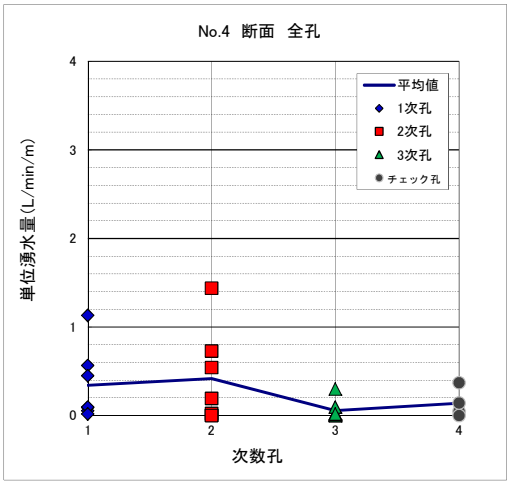
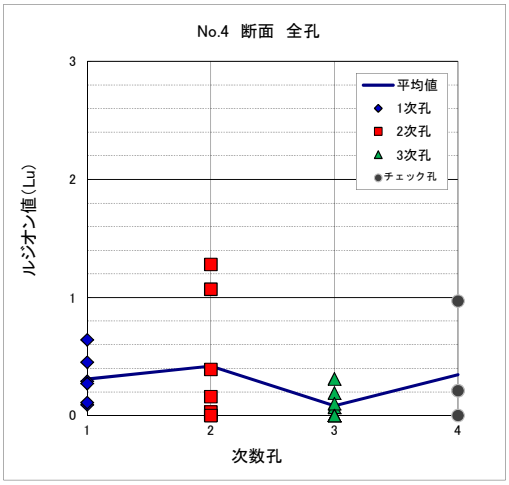
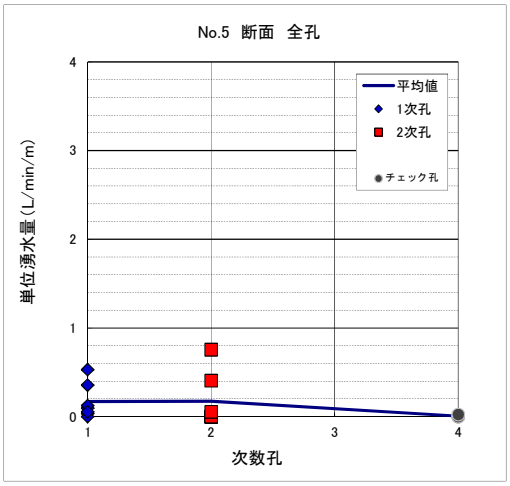
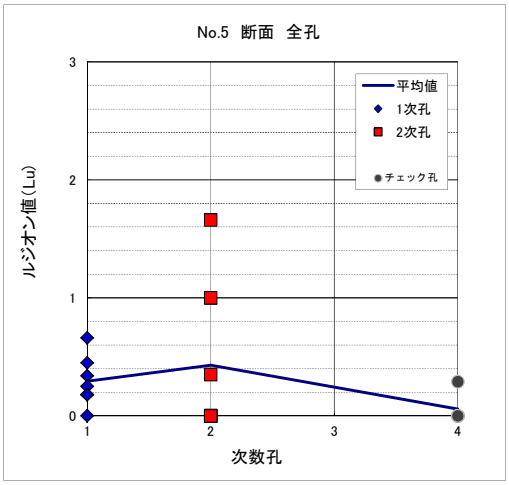
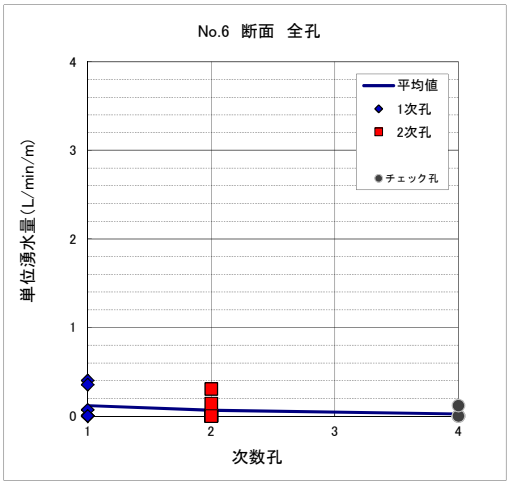
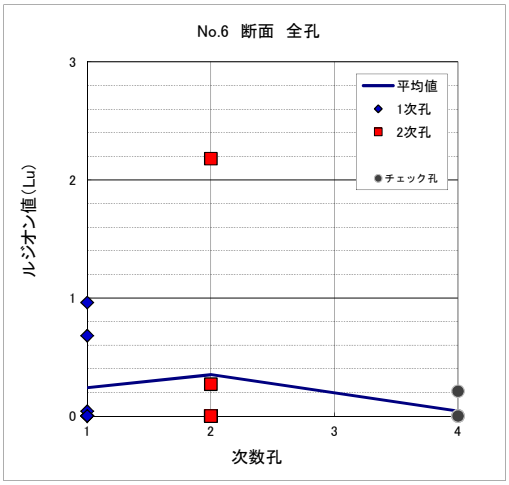
リング	単位湧水量	ルジオン値
No.1 仕様確認 断面 ：注入材料	 最終平均値：0.15L/min/m	 最終平均値：0.29Lu
No.2 仕様確認 断面 ：複合動的注入	 最終平均値：0.32L/min/m	 最終平均値：0.08Lu
No.3 標準断面	 最終平均値：0.22L/min/m	 最終平均値：0.01Lu

表 4.2-27　No.4～6 リングの単位湧水量とルジオン値の低減図（平均値入り）

リング	単位湧水量	ルジオン値
No.4 標準断面	 最終平均値：0.14L/min/m	 最終平均値：0.35Lu
No.5 標準断面	 最終平均値：0.00/min/m	 最終平均値：0.06Lu
No.6 標準断面	 最終平均値：0.02L/min/m	 最終平均値：0.04Lu

(ii) 各設計仕様の比較評価

今回の設計で設定した比較評価の項目について、低減図等の実績をもとに評価する。

(a) 注入範囲の評価（全リング対象）：プレグラウチング範囲の外側範囲⇔重複する範囲

各リングにおけるルジオン値の次数ごとの低減図を、プレグラウチング範囲の外側範囲を改良した孔と重複する範囲を改良した孔に分割して示したものを表 4.2-28 および表 4.2-29 に示す。

No.1 と No.2 リングでは、プレグラウチング範囲の外側範囲（換気立坑から見て左側）の方が重複する範囲より最終の平均値が高いが、それ以降のリングでは逆転している（図 4.2-54）。この 2 リングは仕様確認断面であったこと、外側範囲の周辺リング（改良ゾーン）が形成できていないことから、外側範囲の改良が他リングほど十分にできなかったことが推察される。

一方、それ以降の No.3 リング以降では逆転し、重複する範囲の方が外側範囲より最終平均値が高い。外側範囲では注入孔が水みちと当らなかった可能性もあるが、No.1 と No.2 リングの改良ゾーンと換気立坑側の湧水亀裂が少ない B 級区間に挟まれたことにより、設計の改良範囲にしっかりとグラウト注入材料が充填できたことが考えられる。また、重複する範囲では、次数を増加しても平均ルジオン値が低下しない傾向にあった（No.4 リングの最終 0.59Lu、No.5 リングの最終 0.29Lu）。この原因として、表面リークの発生等によりパッカーを設計より奥に設置変更したこと、ゲルタイムを短くしこと、複合動的注入の設定を弱めたことなどから、外側範囲の改良と比べて設計仕様を満足する条件で注入ができなかったことにより、(既に実施されているプレグラウチングよりも）十分な止水ゾーンが形成できなかったことが考えられる。

以上のことから、今回のポストグラウチングでは、プレグラウチング範囲の外側範囲を改良する方が、重複する範囲を改良するよりも止水効果が高いと評価する。

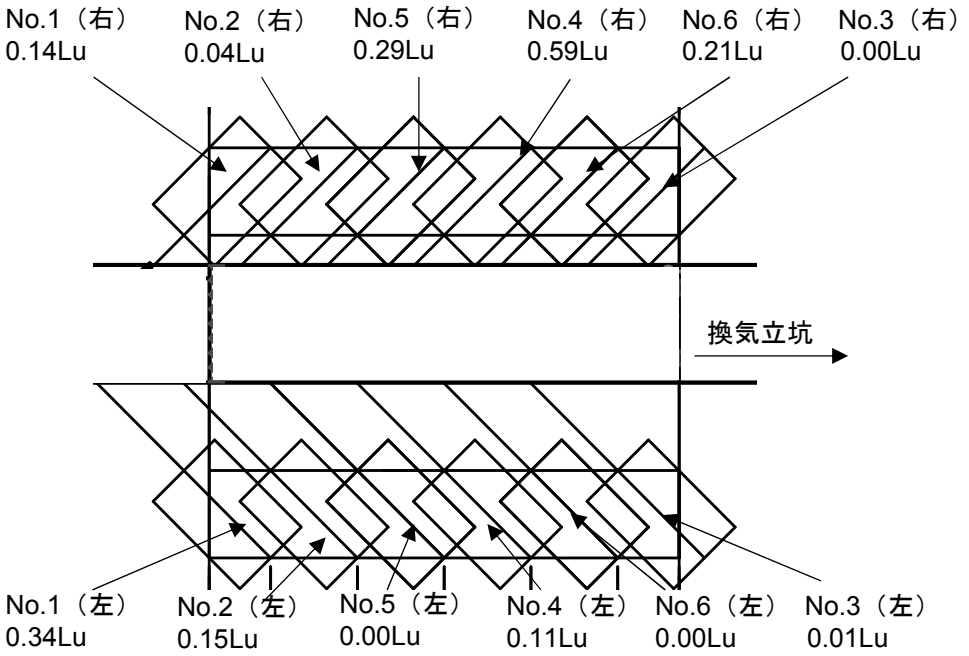


図 4.2-54　各リングのルジオン値の左右での比較（平面図、右・左は換気立坑から見て）

表 4.2-28　No.1～3 リングのルジオン値の低減図（平均値入り）【注入範囲による比較】

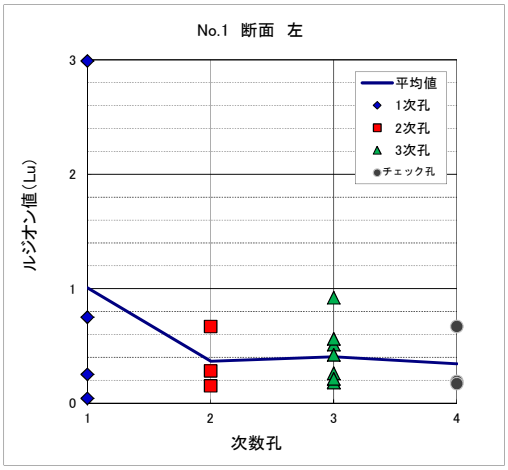
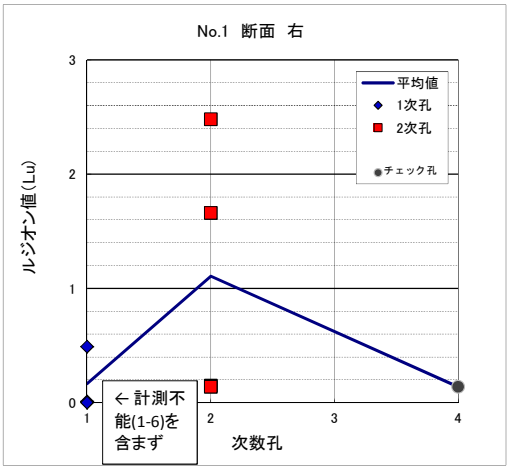
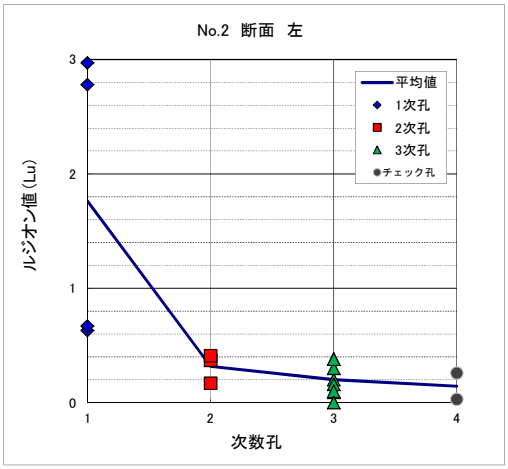
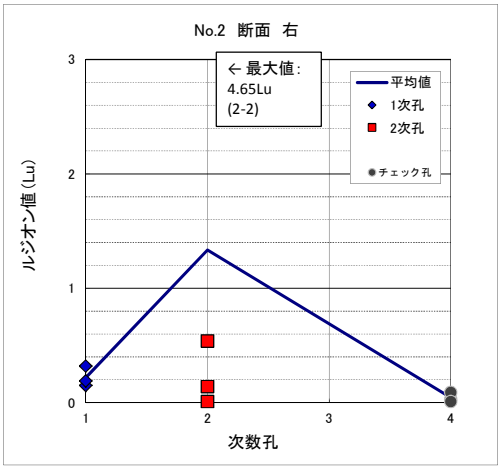
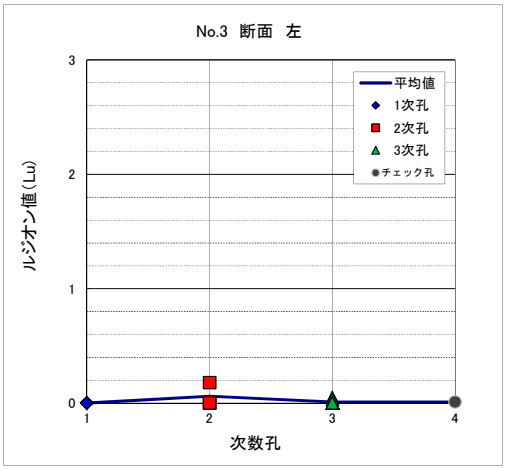
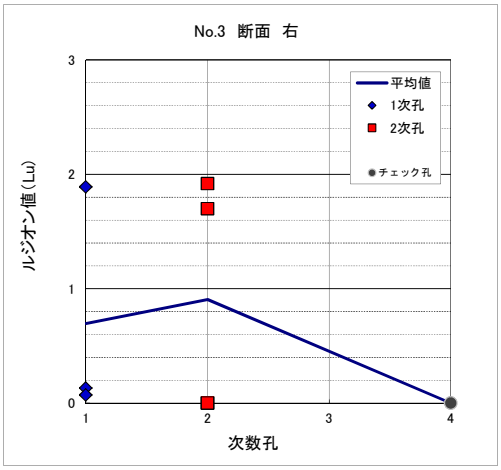
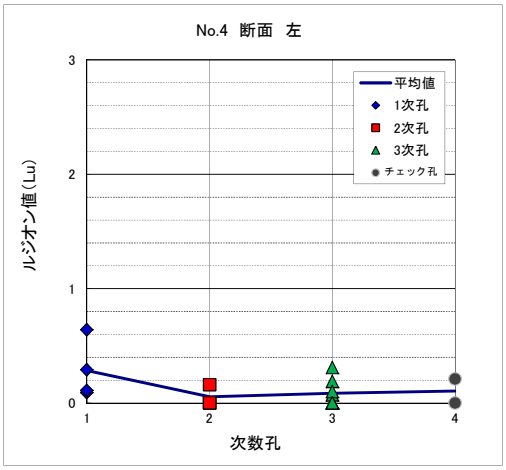
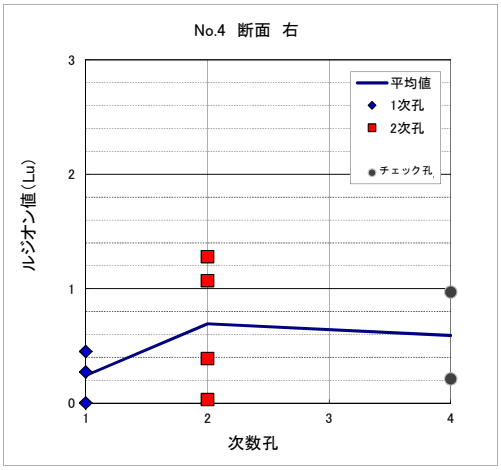
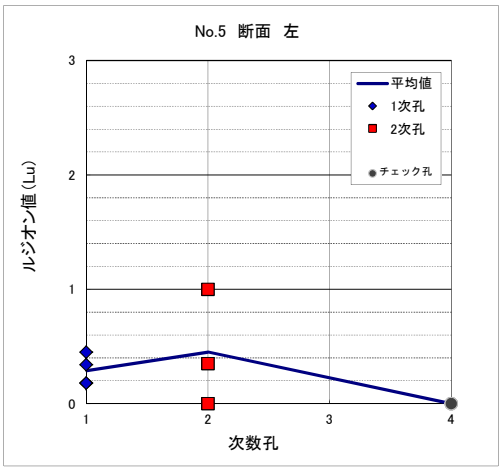
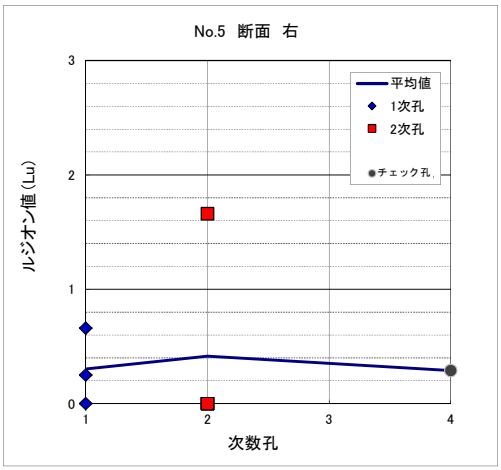
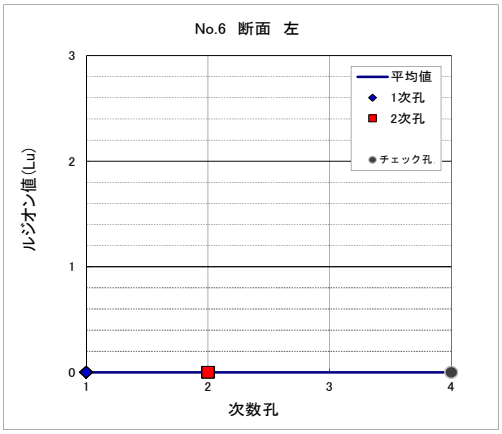
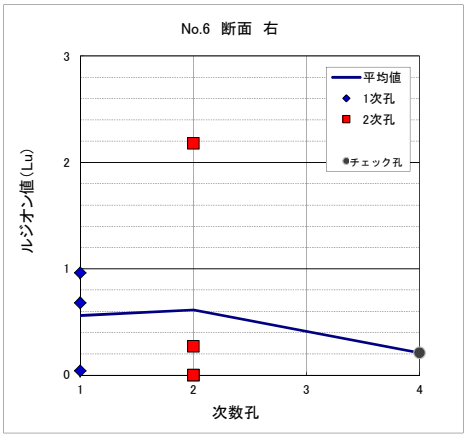
リング	改良範囲：プレグラウチング範囲の外側（換気立坑より見て左側半分）	改良範囲：プレグラウチング範囲と重複（換気立坑より見て右側半分）
No.1 仕様確認断面 ：注入材料	 最終平均値：0.34Lu	 最終平均値：0.14Lu
No.2 仕様確認断面 ：複合動的注入	 最終平均値：0.15Lu	 最終平均値：0.04Lu
No.3 標準断面	 最終平均値：0.01Lu	 最終平均値：0.00Lu

表 4.2-29　No.4～6 リングのルジオン値の低減図（平均値入り）【注入範囲による比較】

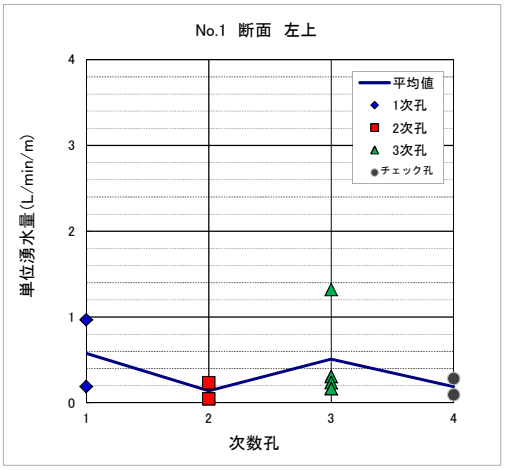
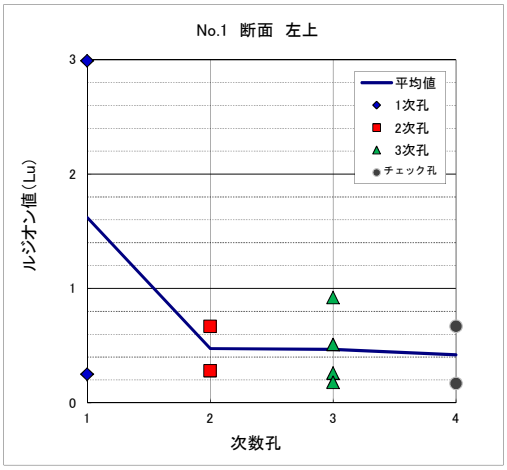
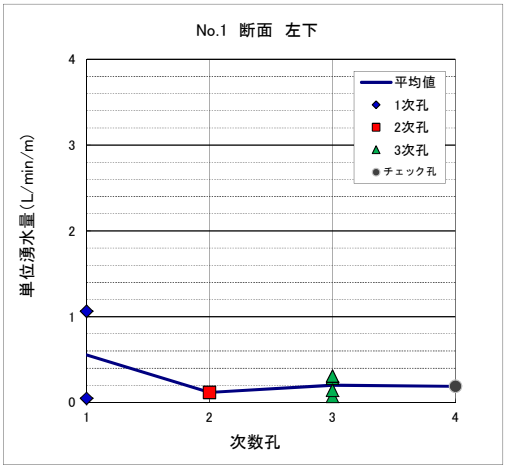
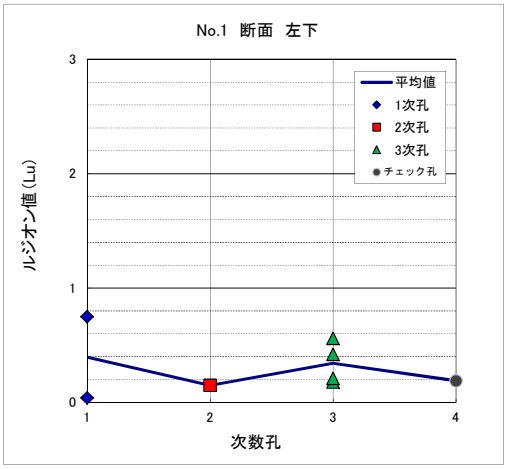
リング	改良範囲：プレグラウチング範囲の外側 （換気立坑より見て左側半分）	改良範囲：プレグラウチング範囲と重複 （換気立坑より見て右側半分）
No.4 標準断面	 最終平均値：0.11Lu	 最終平均値：0.59Lu
No.5 標準断面	 最終平均値：0.00Lu	 最終平均値：0.29Lu
No.6 標準断面	 最終平均値：0.00Lu	 最終平均値：0.21Lu

(b) グラウト注入材料の評価（No.1 リング対象）：溶液型グラウト⇔超微粒子セメント

グラウト注入材料を比較評価する No.1 リング（換気立坑から見て左側の上部と下部）における、単位湧水量およびルジオン値の次数ごとの変化を表 4.2-30 に示す。

単位湧水量の最終平均値はともに 0.19L/min/m で違いが見られなかった。ルジオン値の最終平均値で比較すると、超微粒子セメント（0.42Lu）よりも溶液型グラウト（0.19Lu）を用いた方が低い結果となった。更に、3 次孔からチェック孔にかけては、超微粒子セメントを用いた左上部ではほとんどルジオン値が低下しなかったのに対し、溶液型グラウトを用いた左下部では低下した。

表 4.2-30　No.1 リングの外側範囲改良部（左部）における単位湧水量とルジオン値の低減図（平均値入り）【グラウト注入材料の比較】

	単位湧水量	ルジオン値
区分け	改良範囲：プレグラウチング範囲の外側 （換気立坑より見て左側半分の 18 本）	
超微粒子セメント（上部 10 本）		
	最終平均値：0.19L/min/m	最終平均値：0.42Lu
3 次孔から溶液型グラウト（下部 8 本）		
	最終平均値：0.19L/min/m	最終平均値：0.19Lu

次に、超微粒子セメントによる注入結果に着目して分析する。深度 500m でのプレグラウチング時のルジオン値に対する単位セメント注入量の実績に、今回のポストグラウチングの実績をプロットしたものを図 4.2-55 に示す。今回のポストグラウチング結果も、プレグラウチング結果と同等の範囲上に分布しており、プレグラウチング時と遜色のない注入実績が得られたと考えられる。

ただし、次数の増加に従って分布が左下側に推移すれば改良効果があったといえるが、今回の実績では次数を上げると最大ルジオン値が減少し、最低ルジオン値は増加した、すなわち、ルジオン値の分布が狭い範囲に推移した。よって、注入次数を増やしても 0.2Lu 程度以下となる可能性は低い。つまり、今回のようなポストグラウト工事では、超微粒子セメントを用いても新たな水みちに当たってもプレグラウト時ほどに改良できない（超微粒子では止水できない）可能性があり、削孔本数を増やしても改良効果を見込めないどころか、逆に湧水が増加することが示唆される。

以上のことから、今回の条件のポストグラウチングでは、溶液型グラウトを用いる方が超微粒子セメントを用いるよりも止水効果が高いと評価する。

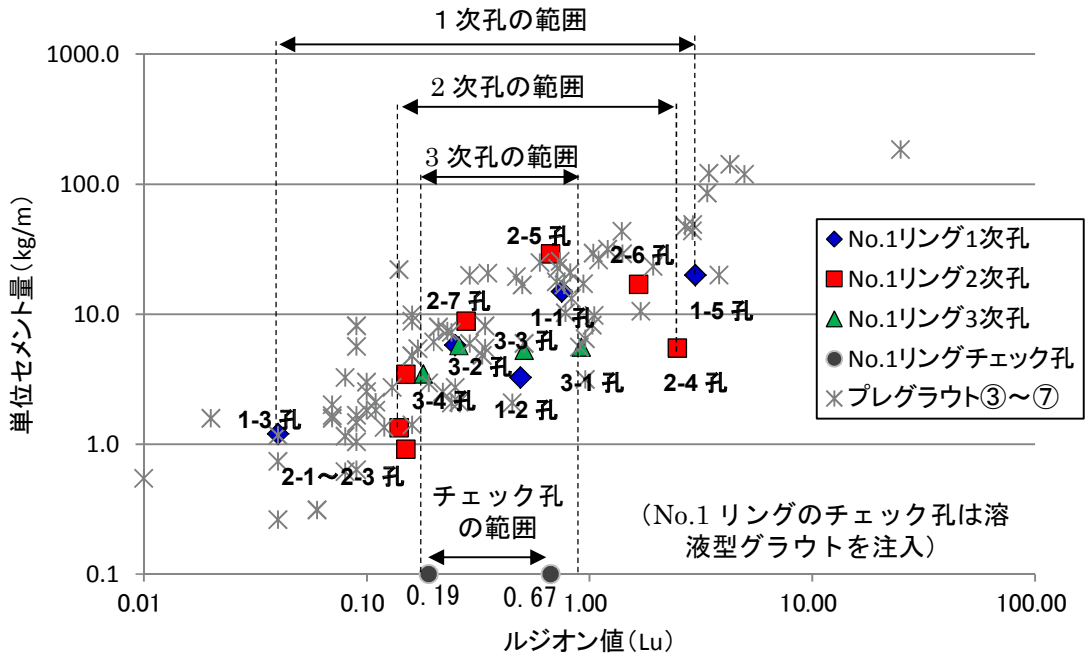


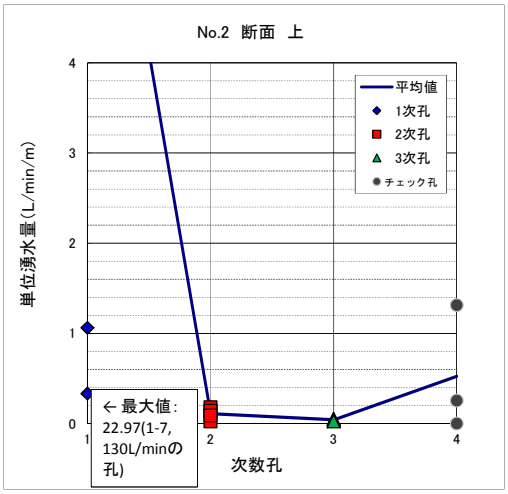
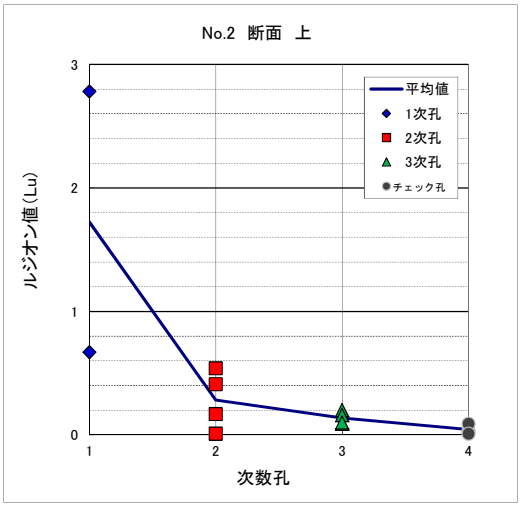
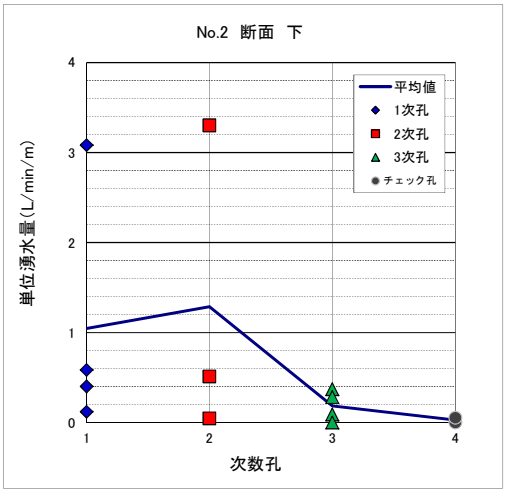
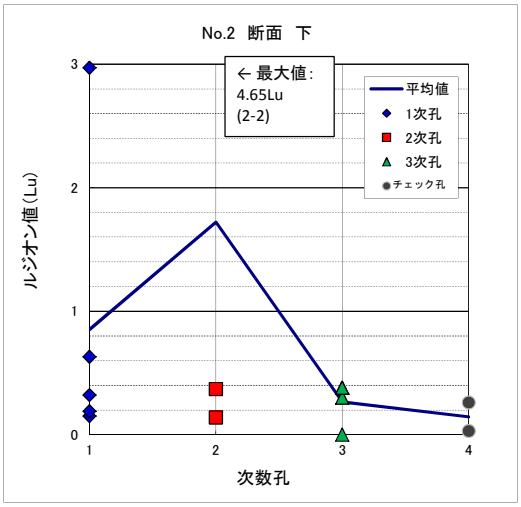
図 4.2-55　深度 500m 研究アクセス南坑道における超微粒子セメントの注入実績
（ルジオン値と単位セメント注入量の比較）

(c) 注入方式の評価（No.2 リング対象）：複合動的注入⇔静的注入

注入方式を比較評価する No.2 リング（上部と下部）における、単位湧水量およびルジオン値の次数ごとの変化を表 4.2-31 に示す。

単位湧水量の最終平均値は、複合動的注入を適用した上部（0.52L/min/m）の方が静的注入を行った下部（0.03L/min/m）よりも高い。一方、ルジオン値については、複合動的注入を適用した上部（0.04Lu）の方が下部（0.15Lu）より低い結果となった。ルジオン値はチェック孔の結果から、3 次孔の施工までで十分に低下することが分かったため、No.3 リング以降はチェック孔について複合動的注入を使わず、静的注入を実施することとした。

表 4.2-31　No.2 リングにおける単位湧水量とルジオン値の低減図（平均値入り）【注入方式比較】

	単位湧水量	ルジオン値
2 次孔より複合動的注入の適用（上部 13 本）	 最終平均値：0.52L/min/m	 最終平均値：0.04Lu
全て静的注入（下部 13 本）	 最終平均値：0.03L/min/m	 最終平均値：0.15Lu

また、比較評価のリングだけではなく、溶液型グラウトを注入した全リングに対して注入効果を分析するため、ルジオン値と単位注入量の相関図を作成した（図 4.2-56 参照）。複合動的注入を採用することにより、（特に）低ルジオン値の注入孔において注入量が増加する傾向にあるため、浸透距離増加の効果があることが確認できた。

以上のことから、今回のポストグラウチングでは、複合動的注入を用いる方が静的注入に比べて改良効果が高いことが確認できた。

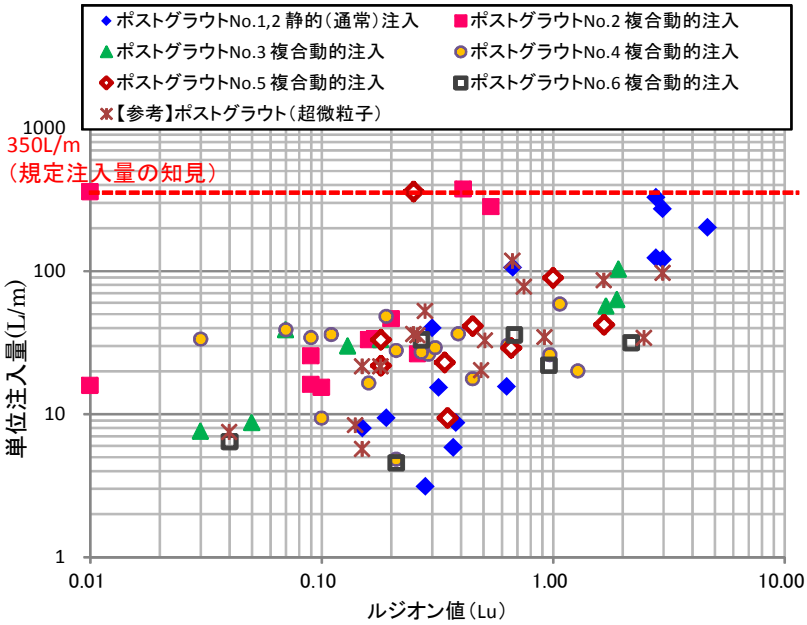


図 4.2-56　溶液型グラウトの注入実績：ルジオン値と単位注入量の比較

(iii) 湧水抑制効果の評価

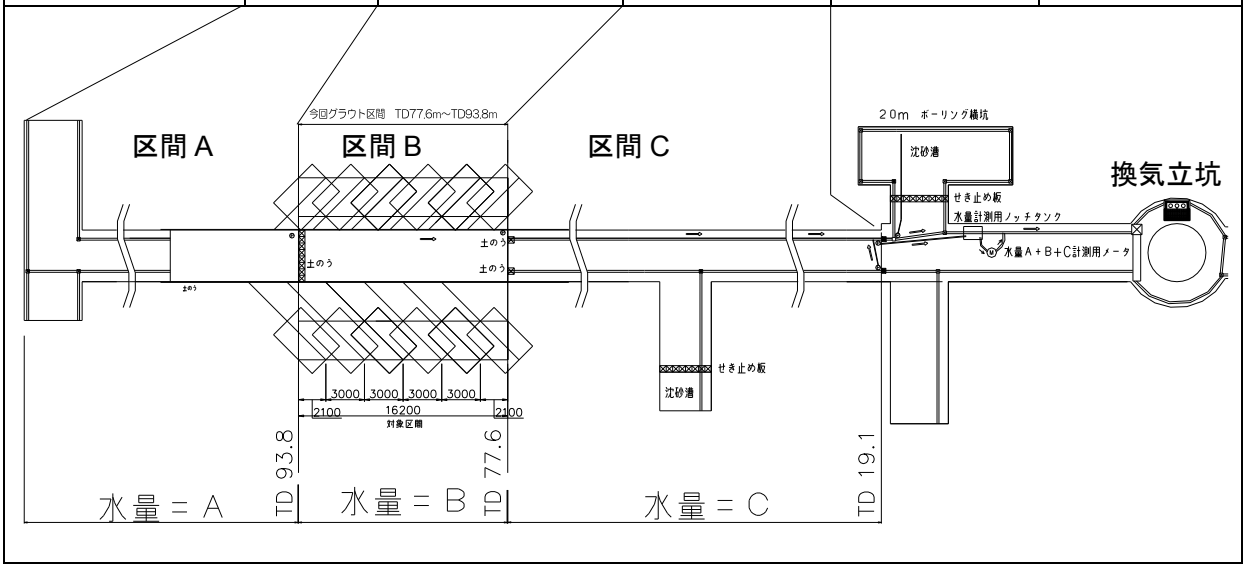
ポストグラウト工事の前後における区間湧水量の計測結果を表 4.2-32 に示す。工事完了後の施工対象区間の湧水量は 11.3L/min であり、初期値の 35.3L/min から 24.0L/min の減少が確認できた。湧水量低減率にして 68%であり、事前予測の 40%（表 4.2-17）より大きい低減効果を確認できた。この要因として、溶液型グラウトによる改良効果が十分に高かったこと、複合動的注入の導入により浸透距離が向上したこと、リングの内挿法が効果的であったこと、理論式による湧水予測が安全側に算出される可能性があること、などが挙げられる。

施工対象区間において十分な湧水抑制効果があった一方で、対象区間外の湧水量が合計で 9.1L/min 増加した。この原因として今回の施工により対象区間外への水みちが増えたことが考えられる。すなわち、対象区間以外も含めた計測区間全体での湧水量は 14.9L/min の減少であった。

滴水が比較的多く確認されたのは換気立坑からみて一番奥の No.1 リングであった（図 4.2-47 参照）。当該リングの上部は超微粒子セメントを注入したことから、既に改良限界に到達して止水効果が望めないこと（図 4.2-55 参照）がその一因ではあるが、連続する止水リングの端部に位置するため、リングの外側から地下水が回り込んだことが主原因として考えられる。このため、連続するポストグラウトリングを施工する際は、端部をカバーロック注入することや、水みちが途切れる区間まで施工区間を延長（リングの追加延長）することが対策として考えられる。

表 4.2-32　ポストグラウチング前後における区間湧水量の変化

計測日時	区間湧水量（L/min）			区間 A～C 合計湧水量（L/min）	備考
	区間 A【奥側】	区間 B【施工対象区間】	区間 C【換気立坑側】		
H.26.7.11 ～H.26.7.14	36.1	35.3	27.6	99.0	施工開始前の週末
H.26.9.26 ～H.26.9.29	38.5	11.3	34.3	84.1	施工終了後の週末
施工前後の増減	+2.4 (+7%)	-24.0 (-68%)	+6.7 (+24%)	-14.9 (-15%)	区間 B 以外では+9.1L/min



換気立坑における 400m 以深の排水ポンプ・給水ポンプの排水メーターから概算した湧水量の変化によると、今回の施工前後でおよそ 25L/min の湧水量が減少した。これは今回施工した区間における低減量の 24.0L/min とほぼ同等である。換気立坑の排水量が計測区間全体の減少量 14.9L/min より多い原因は、ポストグラウチングが浸透した影響とは限らないが、今後継続的に立坑の排水量を確認する必要がある（図 4.2-57、図 4.2-58 参照）。

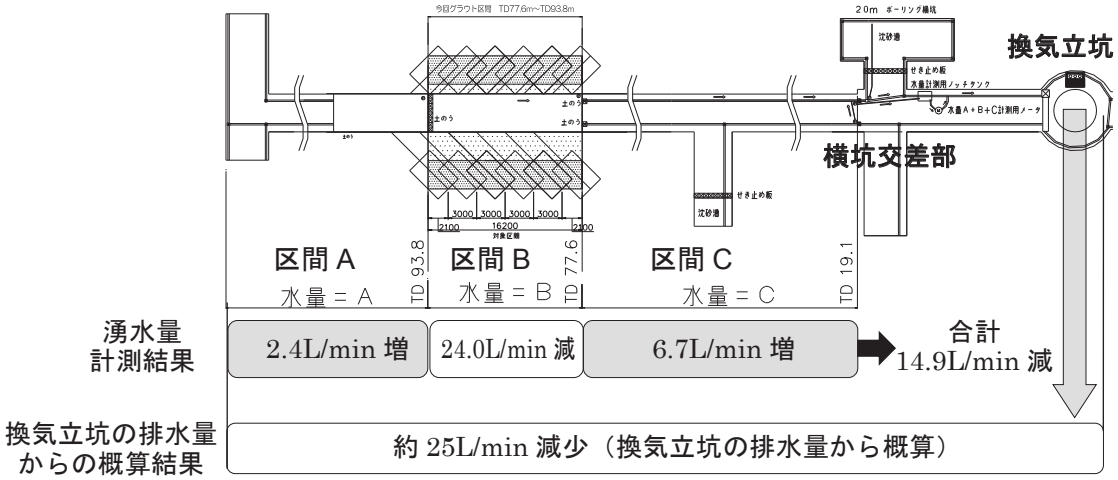


図 4.2-57　湧水抑制効果の実績（区間計測および排水量の概算結果）

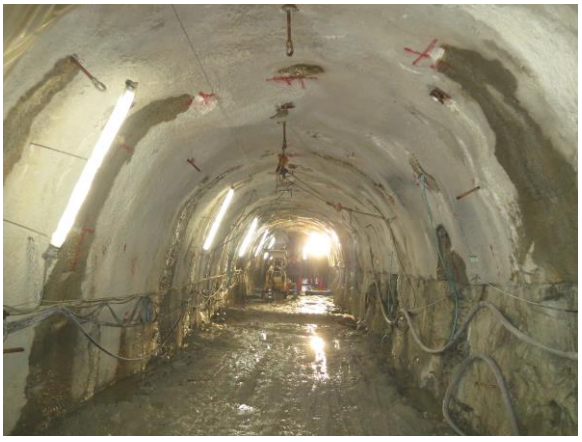


図 4.2-58　ポストグラウト工事完了直後（No.6 リング付近より No.1 リング側を撮影）

参考までに、今回の 16.2m 区間の施工実績による排水処理費の節減効果を推定する。湧水量が 24.0L/min 減少したことから、年間約 1,000 万円（約 62 万円/m）に及ぶ排水処理費の節減効果が期待できる（排水処理費を 800 円/m³ と設定時)。これは、予測した年間 600 万円をはるかに凌ぐ節減効果である（表 4.2-33)。

表 4.2-33　グラウト注入材料に応じた湧水低減量の予測および今回の施工結果

	使用材料	初期値（L/min）	湧水量低減率（%）	湧水低減量（L/min）	期待される排水処理費の節減効果（※）	備考
事前予測	普通セメント	35.3	10	3.5	約 150 万円/年	表 4.2-17 参照
	超微粒子セメント	35.3	20	7.1	約 300 万円/年	
	溶液型グラウト	35.3	40	14.1	約 600 万円/年	
施工実績	溶液型グラウト（一部超微粒子セメント）［1m あたり］	35.3 ［2.18］	68	24.0 ［1.48］	約 1,000 万円/年 ［約 62 万円/年/m］	図 4.2-57 参照
	（参考）立坑排水量			湧水量 約 25	処理費用 約 1,050 万円/年	

（※）排水処理費を 800 円/m³（薬剤費用のみ）と設定

4.3 課題の整理と今後の研究計画立案

4.3.1 ポストグラウチングの課題の整理

今回のポストグラウチングについて、各検討項目に対する適用結果と残された課題について、また今後の検討項目としての優先度（☆：最重要かつ引続き取組むべき、◎：最重要、○：重要、＊：課題とまで行かないが確認が望ましい項目）も合わせて、表 4.3-1 に整理して示す。今後の瑞浪におけるグラウチング計画ではこのリストを参考に立案することとする。

表 4.3-1　ポストグラウチングの適用結果と今後の課題の一覧（1/2）

検討項目		今回の適用結果	残された課題など	優先度
許容湧水量（スウェーデンの処分坑道：100m あたり 1.7L/min）		・施工区間 16.2m あたり 35.3L/min⇒11.3L/min となった。 ・100m に換算すると、220 L/min⇒70L/min である。	・北欧の水準に及ばないと予想されるため、（グラウト注入以外の対策も含め）日本のでどこまで止水可能か検討が必要である。	☆
			・地層処分技術への適用性の観点から、体系的にグラウト技術をまとめる必要がある。	☆
			・今回は比較評価を含むため、最善の仕様で統一すれば更なる湧水抑制効果を望める。	◎
			・初期段階から綿密施工（プレグラウチングから溶液型グラウト適用など）が望ましい。	○
設計手法	パイロット孔による事前詳細調査	・今回は未適用である。	・岩盤亀裂の評価をベースとした確度の高い設計施工手法の確立が期待される。	◎
			・一方、今回のプレグラウチングとポストグラウチングの双方の事後評価のためにボーリング孔調査による検討が期待できる。	○
	施工試験の実施	・仕様確認断面を、施工試験の位置づけとし、良好な結果が得られた。	・残された課題について、施工試験または次期工事の中で確かめることが望ましい。	☆
	超微粒子セメントと溶液型グラウトの併用	・今回はプレグラウチングで十分な改良が行われていたため、溶液型グラウトのみの注入で良好な施工性と止水結果が得られた。	・超微粒子セメントによるプレグラウチングが実施されていなければ、効率施工の観点から併用が望ましい。	＊
			・今後、プレグラウチングから異なるグラウト注入材料を併用することで効率化と高い止水効果が期待できる。	＊
	北欧浸透理論（亀裂開口幅による材料選定）	・溶液型グラウトの設計で適用した。 ・施工ではルジオン値による配合選定基準を設けた。	・今回の施工結果をさらに評価し、亀裂性岩盤のための効率的な設計手法の構築が期待できる。	◎
	理論式による湧水量予測	・プレグラウチング時の評価と同様に、ポストグラウチング時も安全側に算定されることが確認できた。	・更に事後評価することで、設計施工のための理論式としての高度化が期待できる。	☆
			・その際、精度向上のために、EDZ の幅や透水係数の設定値等の把握が必要である。	＊
			・今回のプレおよびポストグラウチングの一連の注入に対して数値解析による評価手法での確認が望ましい。	◎
	動水勾配に対する仕様の開発	・ダメ押し注入の採用により溶液型グラウトのゲルタイム近くまで注入し、理論上は流出に抵抗する十分な強度が発現したといえる。 ・130 L/min の孔を完全に止水できたが、一方で自孔リークする孔も見られた。	・既往の海外知見や今回の 130 L/min の孔が止水できたことから、長期養生が流出防止に効果的である可能性が高い。	◎

表 4.3-1　ポストグラウチングの適用結果と課題の一覧（2/2）

検討項目		今回の適用結果	残された検討課題など	優先度
注入材料	溶液型グラウト	・十分な適用性が確認できた。	・透水性が低い孔では廃棄率が多い。	△
		・国内でのゲルタイムの実績（120 分～180 分）より短い配合（最短 35 分）で十分な施工性と止水性を確認できた。 ・ポンプ熱による液温上昇は問題ならず。	・更なる止水効果の向上のため、プレグラウチングからの適用が望まれる。	△
	超微粒子セメント	・理論式による予測上も、今回の適用実績からも、溶液型グラウトと比較して効果が低い（逆効果の可能性も示唆された）。 ・ポストグラウチングでは既往の改良限界ほど改良できない可能性がある。	・ポストグラウチングでも透水性が非常に高い孔が出現した場合は超微粒子セメントの配合からの開始が望ましいと考えられる。	*
注入装置	複合動的注入	・十分な適用性とその効果が確認できた。また、脈動の設定方法に関する実績が得られた。	・更なる止水効果向上のため、プレグラウチングからの適用が望まれる。	*
	溶液型グラウト特有の装置	・今回は特に適用せず。	・廃棄率を低減できる手法や装置の開発が課題である。	○
	止水性ロックボルトの適用	・今回はポストグラウチングのため未適用	・ロックボルトからの湧水（滴水）が止まり切らないため、今後のプレグラウチングでは適用が期待きる。	*
	パッカー	・表面リーク発生時にパッカーを奥に設置変更することでリークが防止できた。	・注入孔の滴水については、使い捨ての機械式パッカー等の適用により滴水が減らすことが期待できる。	*
			・更なる高圧注入時には、超高圧パッカーなどの設備が必要である。	*
孔配置	ポストグラウトの注入範囲	・プレグラウチング範囲の外側範囲で効果的であることを確認。 ・プレグラウチング範囲と 1m 重複させることで自孔リークを減らせた。	・（比較評価ではなく）全注入孔を外側範囲の注入にしていればリング内での水路も遮断でき、湧水抑制効果は一層高まったと考えられる。	*
	注入孔間隔	・前半のリングは滴水が多く見られたため、改良の余地がある。 ・後半は 2 次孔で終了したため、十分であったと考えられる。	・前半のリングでは周囲に止水ゾーンがないため、より綿密に孔間距離を短くするか注入次数を増やした方が、リングの仕上がりが良かった可能性がある。	○
	削孔角度	・プレグラウト孔と逆向きの 45 度方向で十分な効果があった。	・パイロット孔調査が実施される場合は、更に妥当な角度を検討することが望ましい。	○
	全周かつ連続的な範囲・区間の孔配置	・後半のリングの透水性が低く、十分な止水効果を確認できた。	・プレグラウチング範囲の外側施工のため、区間端部は地下水が回りこんだため、その対策を検討する必要がある。	*
			・端部のカバーロック注入や水みちの途切れるゾーンまで施工区間を延長することなどの対策が必要である。	*
注入圧	湧水圧＋1 MPa～2MPa	・今回の施工で適用性を確認。更に複合動的注入の適用時は瞬間的には 7MPa 程度（湧水圧＋3.5MPa）の圧力も示した。 ・配合変更と動的注入の制御により、表面リークが発生しても抑えることができた。	・ポストグラウチングでも高圧注入が可能であったため、今後の高圧注入が期待できる。少なくともプレグラウチングでは従来（注入差圧=1.5MPa）以上の高圧注入による効率的な注入が望ましい。	*
施工完了基準（改良効果の確認）		・今回の削孔本数で概ね既往のルジオン値以下への完了が可能であった。	・初期のリングは注入効果が低かったため、更に綿密に注入するなど、リングごとに仕様を分けることが望ましい。	○

4.3.2 今後の研究計画の立案

今後の研究計画として、前節の表 4.3-1 で抽出した残された検討課題について、優先度が高い項目について（☆、◎、○）について検討や施工試験などを実施し、各技術細目の適用性や有用性を検証するとともに最適な手法を開発する計画とする。湧水抑制対策技術向上の観点から二項目に分けて立案する。

(1) グラウチング研究計画の立案

(2) 大深度のウォータータイトトンネルの構築に関する研究計画の立案

(1) グラウチング研究計画の立案

(i) グラウチングの検討計画（案）

今後のプレグラウチングおよびポストグラウチングの調査・設計・施工技術の高度化に向けた検討計画の概要を表 4.3-2 に示す。また、今回のポストグラウチング工事で実施したように、原位置でのグラウチング計画に組み入れてそれらの検討を効率的に実施することとする。

表 4.3-2　グラウチングの検討計画（案）の概要

検討計画	概要
湧水量予測式の高度化研究	・【目的】亀裂性岩盤における現実的な湧水量予測手法として理論式を高度化し、グラウト設計のためのツールとして確立する。 ・【概要】平成 26 年度と平成 25 年度のグラウチング前に実施した予測検討および実際の湧水抑制効果について再度事後評価を実施し、理論式向上のためのパラメータスタディなどを行う。
グラウチング結果の数値解析評価の研究	・【目的】今回の一連のグラウチング効果を解析のアプローチで検証する。 ・【概要】平成 26 年度および平成 25 年度に得られた施工データをもとに、深度 500m のグラウチング状況およびその結果を数値解析により評価する。
グラウト注入材料の流出防止に関する研究	・【目的】今回多く発生した自孔リークの発生防止を含め、グラウチング効果向上による品質向上を目指す。 ・【概要】ゲルタイムや養生時間と、グラウト注入材料の流出の関係を室内試験や原位置試験または今後のグラウチング（試験）施工にて実証し、最適な注入方式や養生時間などを検討する（フィンランドの POSIVA 社は地下坑道で溶液型グラウト注入後の養生時間を 3 日に設定した）。
浸透理論によるグラウト設計の研究（超微粒子セメント）	・【目的】今回の溶液型グラウトのように、セメント系グラウトにおいても亀裂に応じた配合や注入圧などを設計・施工・評価し、その適用性を検討する。 ・【概要】原位置試験または今後のグラウチング（試験）施工にて、亀裂開口幅に応じたグラウト設計および施工を実施する。その際、北欧の浸透理論で用いられるような高濃度・高圧注入の手法を適用する。
ボーリング孔調査	・【目的】今後のグラウト設計高度化のためのフィードバックとして岩盤内部の地質調査により情報を入手する。 ・【概要】今回のプレグラウチングとポストグラウチングの双方の事後評価のためにボーリング孔調査を実施する。注入された超微粒子セメント、溶液型グラウトの双方の浸透範囲、掘削浸透領域の範囲や充填状況などを観察・評価し、今回の設計・施工を有効性・効率性などを検証する。
効率的なグラウト注入設備・手法の開発	・【目的】グラウトの廃棄率や不必要な注入孔の削孔が低減できるように最適な注入仕様、施工手法、設備などを開発する。 ・【概要】例えば、溶液型グラウトでは注入時にホース内で主材・硬化促進剤の２液を混合する機構や、少量で練混ぜられる装置または地質評価（水押し試験）に基づき最適な練混ぜ量や注入方式を決定する手法を開発する。

(ii) ポストグラウチングの施工計画（案）

大深度のグラウチング技術の継続的な開発を目的として、深度 500m におけるポストグラウチング計画を引続き立案する。施工区間の候補として、今回実施したポストグラウト区間を延長する形でその（換気立坑より）奥側を挙げる。例えば、今回と同様に 6 リング（16.2m）の施工区間とした場合の計画図の概要を図 4.3-1 に示す。今回の知見をもとに、プレグラウチング範囲の外側範囲の改良を実施し、溶液型グラウトの注入と複合動的注入の適用を基本とする。また、その他の残された検討課題（優先度が＊の項目）について併せて評価できるよう設計する。

その一例として、この計画では、端部のカバーロックの効果について検討する。新しい No.③リングでは今回のポストグラウチング範囲と止水ゾーンが途切れないような改良範囲とし、No.①リングについては、連続するリングの端部のカバーロック注入とするために、内側と奥側の 2 ステージ注入を検討する。なお、カバーロックの注入材料については、施工の合理化と注入材料の耐久性の観点から、従来の水ガラスではなくゲルタイムの短い配合の溶液型グラウトを検討する。ポストグラウチングの基本仕様（案）を表 4.3-3 に示す。

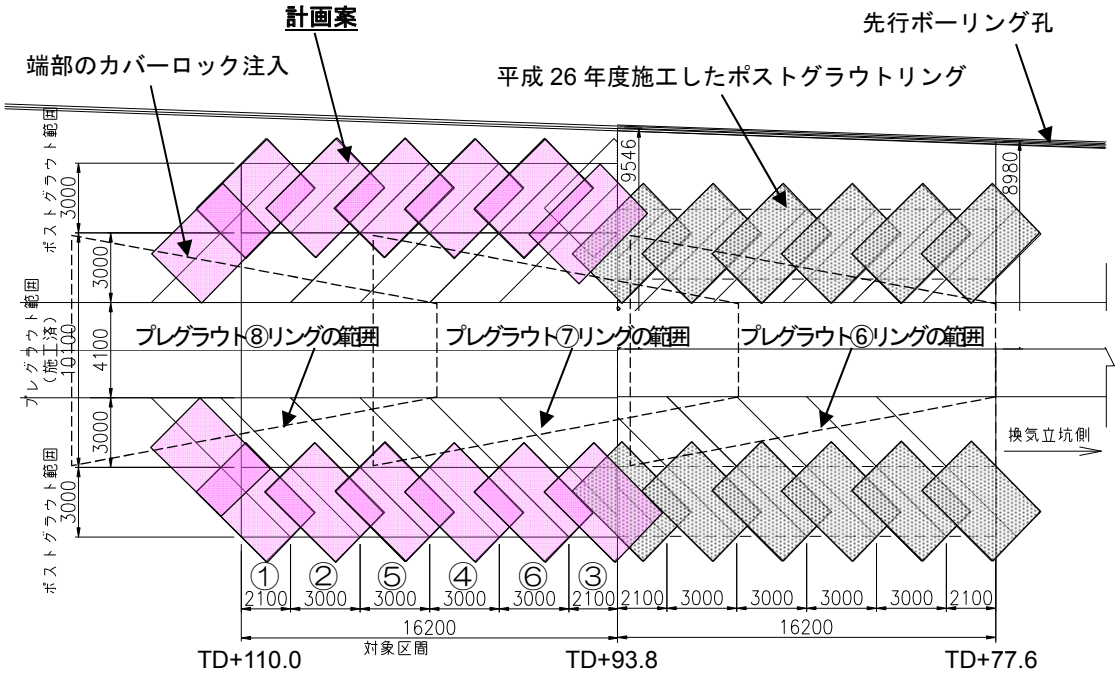


図 4.3-1　今回工事の延長となるポストグラウチングの施工計画案（平面図）

表 4.3-3　今後のポストグラウチングの仕様（案）

<table>
<tr><th colspan="2">項目</th><th>詳細</th><th>備考</th></tr>
<tr><td rowspan="10">注入工</td><td>注入範囲</td><td>・改良範囲は坑道外側 2m～6m まで 4m を対象
（端部は溶液型グラウトによるカバーロック注入）
・孔間隔は 6m（1 次孔）、3 次孔まで削孔
・孔角度をプレグラウト孔と逆向きに 45 度</td><td>平成 26 年度の施工結果を反映</td></tr>
<tr><td>注入方式</td><td>・湧水量および湧水圧測定、水押し試験でルジオン値の確認
・ステージ注入または定量注入</td><td>既往のグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td>注入装置</td><td>・複合動的注入の適用
・ロックボルト止水の適用
・溶液型グラウトに特有の装置の開発・適用</td><td rowspan="4">平成 26 年度の施工結果を反映、下線部は表 4.3-2 の検討計画を参照</td></tr>
<tr><td>注入管理圧</td><td>・湧水圧 +1.5～3.5MPa 程度（5～7MPa 程度）</td></tr>
<tr><td>注入速度</td><td>・基本速度：10L/min
・最大注入速度：20L/min</td></tr>
<tr><td>注入停止基準</td><td>・最低注入時間：ゲルタイムの 3/4 倍以上
・ダメ押し注入：注入管理圧で 1L/min に到達後の 10 分間
・規定注入量：注入区間長×350L</td></tr>
<tr><td rowspan="2">注入材料</td><td>・超微粒子セメント＋分散剤＋水
（5Lu 以上の孔に適用）</td><td rowspan="2">平成 26 年度の施工結果を反映</td></tr>
<tr><td>・溶液型グラウト</td></tr>
<tr><td rowspan="3">基本配合</td><td>・水押し試験の亀裂評価により開始配合の決定
・セメント系グラウトの適用時は亀裂評価による配合設計の導入
・溶液型グラウトは 120～35 分のゲルタイム</td><td>平成 26 年度の施工結果を反映、下線部は表 4.3-2 の検討計画を参照</td></tr>
<tr><td>セメントグラウト配合例</td><td colspan="2"><table><tr><th>区分</th><th>W/C (%)</th><th>超微粒子セメント (kg)</th><th>早期硬化型混和剤 (kg)</th><th>水 (L)</th></tr><tr><td>グラウト</td><td>400</td><td>230</td><td>3.2</td><td>922</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>溶液型グラウト配合例</td><td colspan="2"><table><tr><th>ゲルタイム</th><th>Hi シリカ-R</th><th>反応剤 NS</th><th>現場処理水</th></tr><tr><td>120 分</td><td>800 L</td><td>10.75 kg</td><td>194.63 L</td></tr></table></td></tr>
<tr><td rowspan="2">孔埋め工</td><td>使用材料</td><td>・ドライモルタル</td><td rowspan="2">既往のプレグラウチング仕様に準拠</td></tr>
<tr><td>方法</td><td>・モルタルポンプを使用し、圧送ホースを孔内に挿入し引き抜きながら充填</td></tr>
<tr><td colspan="2">その他</td><td>・専門家（経験者）の参画</td><td>（参考）北欧の仕様や溶液型グラウト適用のアドバイス（CTH や POSIVA 社など）</td></tr>
</table>

また、平成 25 年度立案した横坑との交差部近傍も湧水発生箇所が多いため、施工計画区間の候補とする（図 4.3-2 参照）。この区間は湧水発生量や箇所も多いため、北欧で実施されているように 1 次孔を超微粒子セメント、2 次孔以降を溶液型グラウトの材料選定を基本として計画する。その他の注入仕様については表 4.3-3 を参考とする。

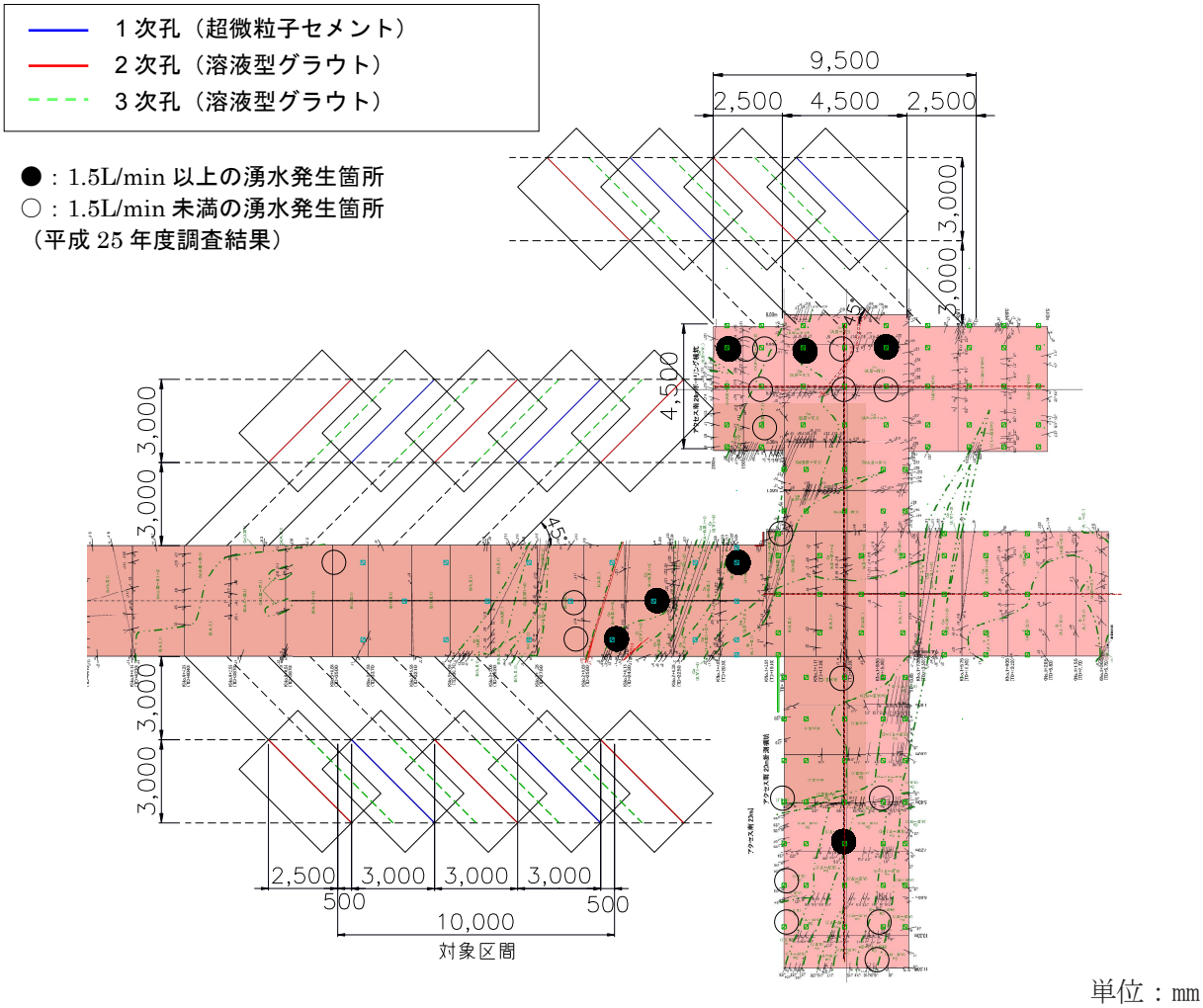


図 4.3-2　交差部近傍のポストグラウトの基本計画図（案）（平面図）

⑵ 大深度のウォータータイトトンネルの構築に関する研究計画の立案

表 4.3-1 の許容湧水量の検討項目で示したように、今回のポストグラウチング後の湧水量は 100m あたりに換算すると、約 70L/min である。これは北欧の地下研の処分坑道で目標とする 1.7L/min よりはるかに大きい値である。

今回のポストグラウチングは、仕様確認断面を設けるなど、技術開発をしながらの設計施工であったため、全リングに最適な仕様を採用した場合や、プレグラウチングから溶液型グラウトや複合動的注入を適用した場合は更なる改良の余地があったと考えられる。しかし、北欧の水準に到達することは困難であると推察される。また一方で、将来の最終処分場の処分坑道については、日本でも厳しい許容湧水量が要求される可能性があり、グラウチングのみによらずコンクリートライニングや水貫きボーリングなどを視野にいれてウォータータイトトンネルの構築を検討する必要がある。

よって今後の研究計画として、グラウチングだけでは限界が示唆される日本の湧水抑制対策に対し、水抜きボーリング等によるトンネル壁面への水圧を低下させる技術、覆工や防水シートによる漏水を抑制する技術、シールドトンネル技術などの技術を導入してウォータータイトなトンネルを構築するための技術開発を行う。

まずはこれらの既往の技術について文献調査から開始し、適用した際の湧水抑制効果について予測するとともに、大深度におけるウォータータイトトンネル構築に向けた技術の抽出および有効性評価を行うこととする。

5. 研究のまとめ

5.1 大深度における地震動に関する検討

5.1.1 研究のまとめ

換気立坑の地震観測システムで 2014 年に観測された 3 月 14 日の伊予灘の地震と、9 月 16 日の茨城県南部の地震、11 月 22 日の長野県北部の地震、12 月 3 日の愛知県西部の地震の 4 地震を対象に、地震観測記録を整理した。なお、2014 年 5 月に新たに換気立坑巻上機建屋脇に設置して観測を開始した地表の加速度計についても、観測記録を整理した。観測記録の整理に当たっては、既往の地震観測記録を利用して加速度計の水平方向の設置方位を把握し、観測された記録に対してその設置方位のずれを補正して、水平の EW 方向成分と NS 方向成分を評価した。

また、地震観測記録の分析の精度を高める目的で、地表で微動観測を実施して、表層地盤振動特性を調査した。その結果、表層地盤の厚さは 7.5m、せん断波速度は 300m/s と推定できた。この結果を地震動伝播解析の解析モデルに反映させて地震観測記録を分析したところ、観測記録との対応が以前より改善した。これにより、表層地盤特性の推定結果の妥当性を確認した。

次に、2008 年から 2013 年までに観測された 15 地震を対象に、深度の異なる観測記録間でスペクトル比を評価し、震央距離と増幅特性の関係を検討した。その結果、深度 300m を基準にした場合、地表に対する増幅特性に関しては一定の傾向が見られたものの、深度 100m に対しては有意な傾向は認められなかった。この様な傾向について、観測記録に基づいて定性的に検討を加えた。

また、震央距離と波動伝播現象の関係に着目して、観測記録を分析した。その結果、震央距離が非常に小さい直下震源地震では、一次元重複反射理論に基づく波動伝播との整合性が高い分析結果が得られた。一方、震央距離が近距離の地震では、観測記録の分析で斜め下方からの入射によると思われる影響が見られ、また斜め入射に伴って発生した表面波によるものと思われる影響も顕著に表れていることを確認した。

次に、事前に実施した耐震設計の条件に基づいて波動伝播解析を実施して、地震観測記録を用いた分析と比較して、事前に実施した耐震設計の妥当性を検討した。検討には、2013 年愛知県西部の地震の地震観測記録を、方位補正したものを利用した。解析で得られた伝達関数と観測記録から評価したスペクトル比を比較したところ、ピークの現れる周波数は概ね一致しており、両者の波動伝播特性は概ね対応することを確認した。このことから、事前に実施した耐震設計において設定した条件は、ほぼ妥当なものであったと考えられる。

5.1.2 今後の課題

地下深部の地震動および地震動の伝播状況を把握するために、今後も地震観測を継続して、有意な観測記録を収集することが重要である。換気立坑巻上機建屋外西側の地表に新たに設置した加速度計についても、既設の地表面加速度計ともあわせて記録を収集する。

加速度計の設置方位を把握したことを受けて、地上構造物（やぐら）の基礎に設置された既設の地表面加速度計についても、観測記録を構造物の軸方向に角度補正してその影響を考慮することも考えられる。既往の観測記録を補正することで、分析の精度向上が期待できると考えられる。

また、既往の地震観測記録を対象にした検討では、今回検討した震央距離と深度 300m 以浅の増幅特性の関係以外の別の観点からの分析、例えば深部での増幅特性や減衰特性に関することが考えられる。さらに、地下深部では震源方向から直接地震動が入射する斜め入射の影響等についても、より詳細に検討する必要がある。これらは、地下深部に構築する地層処分施設等の構造物の耐震設計法を検討する際に、重要な知見になるものと考えられる。

さらに、地下深部に対する地震動の影響については、力学的な作用に伴って生じる水理学的な変化についても、評価する必要があると考えられる。これまでの先行研究では地震動による岩盤の体積変化に伴う地下水圧の変化だけでなく、岩盤の透水性に変化が生じる可能性を示唆する研究・検討結果がデータ分析や解析などにより報告されているが、現象のメカニズムについては未解明な点が多い。このため、地下深部の地震時の地下水挙動について地震動の研究とともに推進し、評価方法を確立する必要があると考えられる。

5.2 湧水抑制対策技術に関する検討

5.2.1 研究のまとめ

(1) ポストグラウチング実施のための事前検討・詳細設計

瑞浪超深地層研究所では、換気立坑の堆積岩部においてポストグラウチングの試験施工の実績はあるが、大深度かつ亀裂性の結晶質岩部へのポストグラウチングは初施工となった。平成 25 年度までの検討結果から、ポストグラウチングは技術的な課題が多いことが判明したため、「施工試験を含む事前検討項目」をリストアップした。また、これらの検討項目にかかる技術の適用性や最適な手法を確かめたうえで、効果的かつ効率的な施工計画を立案する必要があるとした。一方、平成 26 年度のポストグラウチングを施工する B 工区その 6 工事にかかる予算や工期等の制約条件を考慮する必要があったため、合理的な仕様を目指して事前検討および設計を実施した。

ポストグラウチング実施のための詳細検討では、施工箇所の設定、注入範囲の検討、グラウト注入材料および注入装置の検討を実施し、詳細設計では溶液型グラウトの配合設計およびリング毎の設計を行った。これにより、北欧のグラウト浸透理論に基づいてゲルタイム 120 分～35 分の配合を選定し、各リングの設計では、全 6 リングのうち最初の 2 リングは仕様確認断面とし、残りの 4 リングを標準断面と設定した。

続いて、ポストグラウチング後の湧水抑制効果について、既往の理論式を展開して算定した。これにより、現状より約 40%の湧水量低減を予測した（初期値 35.3L/min に対して予測値が 21L/min、すなわち約 14L/min の低減）。ちなみに、この事前予測では、排水処理費を 800 円/m^3（薬剤費用のみ）と設定すれば溶液型グラウト適用時の節減効果は年間約 600 万円であり、超微粒子セメント適用時よりも 300 万円多い効果を期待した。

(2) ポストグラウチングの施工結果の評価

ポストグラウチングの施工結果の評価では、各リングの注入実績および全リングの総括をまとめ、施工を通して得られた知見や今後の改善点を示した。

施工結果の有効性評価として、各リングの次数ごとの（単位湧水量とルジオン値の）改良効果を評価し、標準断面では既往の知見の溶液型グラウトの限界（0.2Lu～0.1Lu）より低い透水性にまで改良されていることが判明した。次に設計仕様に組み込んだ比較評価について検証し、注入範囲については「プレグラウチング範囲の外側」、グラウト注入材料については「溶液型グラウト」、

注入方式については「複合動的注入」の効果が高いことが分かった。

湧水抑制効果は、施工対象区間では68%の湧水量低減（初期値35.3L/minに対して11.3L/min、すなわち約24.0L/minの低減）であったことから、事前予測の40%より低減率が大きい結果となった。この理由として、溶液型グラウトによる改良効果が想定以上に高かったこと、複合動的注入により注入範囲が拡大したこと、リングの内挿法が効果的であったこと、などにより理論式に基づく湧水量より減少したことが挙げられる。

ただし、施工対象区間において十分な湧水抑制効果あった一方で、対象区間外の湧水量が合計で9.1L/min増加した。この原因として今回の施工により対象区間外への水みちが増えたことが考えられる。

また、換気立坑からみて一番奥側のNo.1リング付近では滴水が比較的多く確認された。このリングは超微粒子セメントの注入箇所であり、既に改良限界に到達してこれ以上の改良が望めないことと、連続する止水リングの端部に位置するためにリングの外側から今回改良していないプレグラウチング範囲に水が回り込んだことが原因として考えられる。一方、換気立坑における排水メーターから概算した湧水量は、施工前後でおよそ25L/min減少した。これは今回施工した区間における低減量の24.0L/minとほぼ同等である。換気立坑の排水量が計測区間全体の減少量14.9Lより多い原因については、ポストグラウチングが浸透した影響とは限らないが、今後継続的に立坑の排水量を確認する必要がある

ちなみに、今回の16.2m区間の実績では湧水量が24.0L/min減少したことから、年間約1,000万円（約62万円/m）に及ぶ排水処理費の節減効果が推定できた（排水処理費を800円/m^{3}と設定）。これは、事前予測の年間600万円をはるかに凌ぐ節減効果である。

(3) 課題の整理と今後の研究計画立案

今回のポストグラウチングの施工結果と残された課題について項目毎に整理して優先度を付記して一覧表を作成した。今後のグラウチング計画ではこのリストを参考に立案する。今後の研究計画は優先度の高い項目について、湧水抑制対策技術向上の観点から二項目の計画に分けて立案することとした。

・グラウチングの研究計画立案
・大深度のウォータータイトトンネルの構築に関する研究計画の立案

・グラウチングの研究計画立案

今後のグラウチングの検討計画では、グラウチングおよびポストグラウチングの調査・設計・施工技術の高度化に向けて、抽出した残された課題について検討や施工試験などを実施し、その技術の適用性や最適な手法を開発することとした。また、今回のポストグラウチングで実施したように、原位置でのポストグラウチング計画に組み入れてそれらの検討を効率的に実施することとする。具体的には、「湧水量予測式の高度化研究」「グラウチング結果の数値解析評価の研究」「グラウト注入材料の流出防止に関する研究」「浸透理論によるグラウト設計の研究」「ボーリング孔調査」「効率的な溶液型グラウト注入設備・手法の開発」に関する計画の概要を示した。

また、大深度のグラウチング技術の継続開発を目的として、深度500mにおけるポストグラウチング計画を引続き立案した。施工箇所として、今回実施したポストグラウト区間を奥側に延長

する区間を候補に挙げた。今回の知見をもとに、プレグラウチング範囲の外側の改良を実施し、溶液型グラウトの注入と複合動的注入の適用を基本とした。その他、残された検討課題について併せて評価できるよう設計する方針とした。

その一例として、この計画では端部のカバーロックの効果について検討する。なお、カバーロックの注入材料については、端部のみの適用のため、施工の合理化と耐久性の観点から従来の水ガラスではなくゲルタイム短い配合の溶液型グラウトを検討する。

・大深度のウォータータイトトンネルの構築に関する研究計画の立案

許容湧水量の検討項目で示したように、今回のポストグラウチングの適用後の湧水量は 100m あたりに換算すると、約 70L/min である。これは北欧の地下研の処分坑道で目標としている数 L/min/100m よりはるかに大きい値である。

今回のポストグラウチングは、仕様確認断面を設けるなど、技術開発をしながらの設計施工であったため、プレグラウチングから溶液型グラウトや複合動的注入を適用した場合は更なる改良の余地があったと考えられる。しかし、北欧の水準に到達することは困難であると推察される。また一方で、将来の最終処分場の処分坑道については、日本でも厳しい許容湧水量が要求される可能性があり、グラウチングのみによらずコンクリートライニングや水貫きボーリングなどを視野にいれてウォータータイトトンネルの構築を検討する必要がある。

よって今後の研究計画として、グラウチングだけでは限界が示唆される日本の湧水抑制対策に対し、既往の各種トンネル技術を導入してウォータータイトなトンネルを構築するための技術開発を行う。まずはこれらの既往の技術について文献調査から開始し、技術の抽出および有効性評価を行うこととする。

5.2.2 今後の課題

これまでの瑞浪での工学技術検討では、主に瑞浪超深地層研究所内における「坑道掘削に伴う湧水量低減の観点から」グラウチングを検討および評価してきた。特に平成 26 年度のポストグラウチングでは比較評価ができる仕様にするなど､今後の技術の高度化につながるよう注力した。その結果、多くの知見が得られたことに加えて、残された課題や新たな課題が判明した。

今後も引続き技術検討、原位置試験、施工試験、そして施工評価を通して更なる湧水抑制技術の高度化を図る必要がある。また、地層処分の観点を含めて大深度における湧水抑制対策技術の更なる高度化を図るためには、ウォータータイトトンネルを始めとして「工学的な研究の観点から」止水性が高いトンネルの施工可能性について検討する必要がある。

参考文献

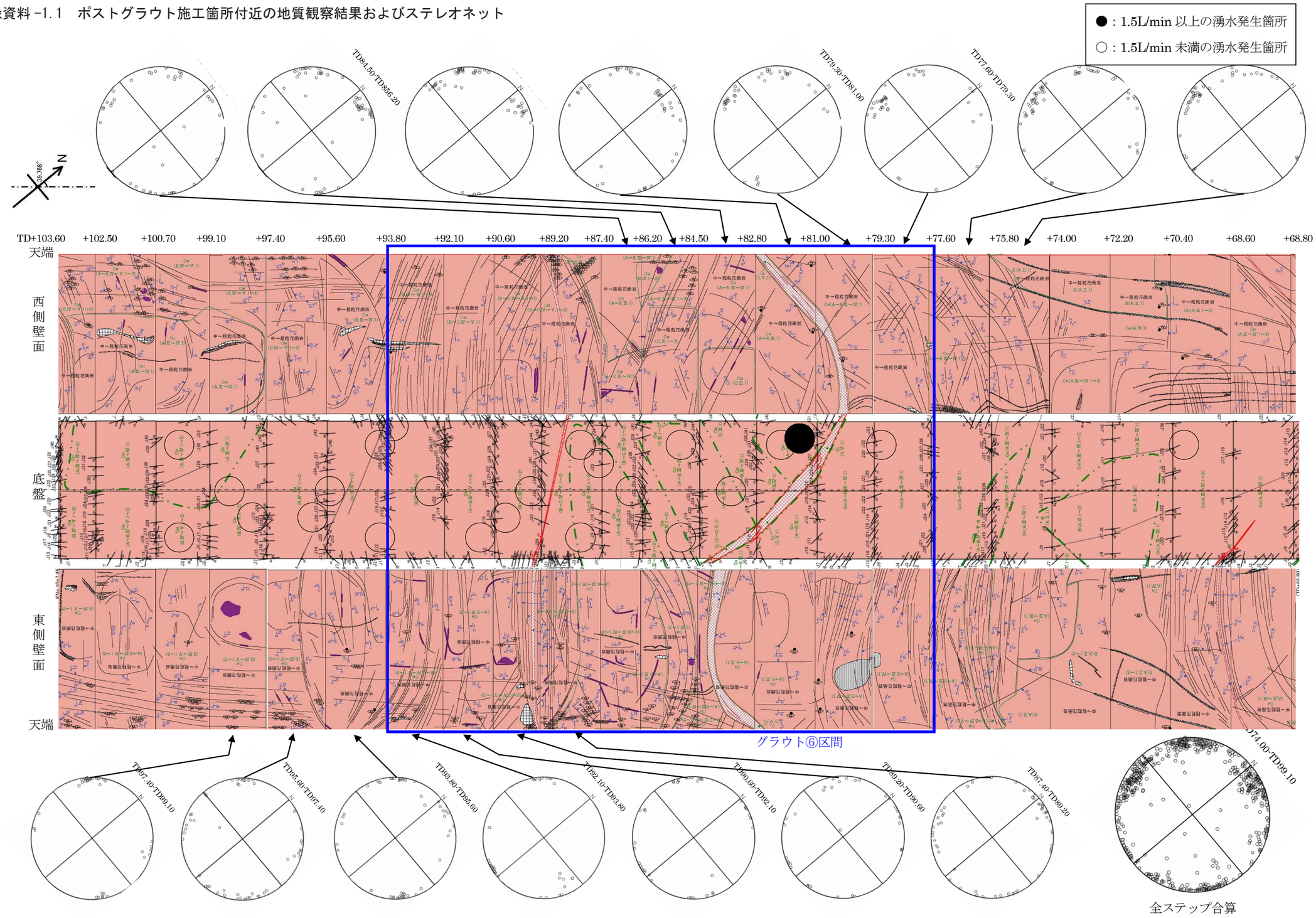
1) 佐藤暢彦, 片山恒雄:地中地震計の埋設方位の推定, 土木学会第 17 回地震工学研究発表会講演概要, (1983), pp.115-118.
2) 植竹富一、真下貢、天池文男:やや長周期地震動を用いた地中埋設地震計の方位推定、日本地震学会, 地震, 第 2 報, 第 44 巻, (1991), pp.151-154.
3) 大崎順彦:新・地震動のスペクトル解析入門、(1994), 299p.
4) 日本原子力研究開発機構:平成 21 年度地層処分技術調査等委託費高レベル放射性廃棄物処分関連, 地下坑道施工技術高度化開発報告書, (2010), pp.99-136.
http://www.enecho.meti.go.jp/rw/library/21-08/21fy8.pdf
5) Brantberger M., Janson T.:Underground Design Forsmark, Layout D2 Grouting, SKB、R-08-114, (2009), p.53.
6) 横澤圭一郎, 近藤亮:トンネル補助工法に適用する複合動的注入の研究, 建設の施工企画, 日本建設機械施工協会, (2009), pp.75-77.
7) 延藤遵, 辻正邦, 草野隆司, 見掛信一郎, 神谷晃, 石井洋司:瑞浪超深地層研究所深度 300m における耐久性に優れた溶液型グラウトの試験施工, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (2011), pp.179-184.
8) Masakuni Tsuji, Johan Funehag, Shinji Kobayashi, Toshinori Sato and Shin-ichiro Mikake:Comparison of grouting with silica sol in the Äspö Hard Rock Laboratory in Sweden and Mizunami Underground Research Laboratory in Japan, 8th Asian Rock Mechanics Symposium, (2014).
9) Johan Funehag:Grouting of Fractured Rock with Silica Sol. Grouting Design Based on Penetration Length. Doctor thesis, Department of geology, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, (2007), 90p.
10) Johan Funehag:Guide to grouting with silica sol – for sealing in hard rock, Befo Report 118, (2012), p.8.
11) Åsa Fransson: Grouting predictions based on hydraulic tests of short duration, Analytical, numerical and experimental approaches, Licentiate thesis, Department of geology, Chalmers University of Technology, (1999), 86p.
12) 見掛信一郎, 山本勝, 池田幸喜, 杉原弘造, 竹内真司, 早野明, 佐藤稔紀, 武田信一, 石井洋司, 石田英明, 浅井秀明, 原雅人, 久慈雅栄, 南出賢司, 黒田英高, 松井裕哉, 鶴田忠彦, 竹内竜史, 三枝博光, 松岡念幸, 水野崇, 大山卓也:結晶質岩を対象とした坑道掘削における湧水抑制対策の計画策定と施工結果に関する考察, JAEA-Technology 2010-026, (2010), p.83.

付録 1 ポストグラウトにかかる設計検討資料

1.1　ポストグラウト施工箇所付近の地質観察結果およびステレオネット
1.2　ポストグラウトにかかる削孔数量計算書

This is a blank page.

付録資料 -1.1　ポストグラウト施工箇所付近の地質観察結果およびステレオネット

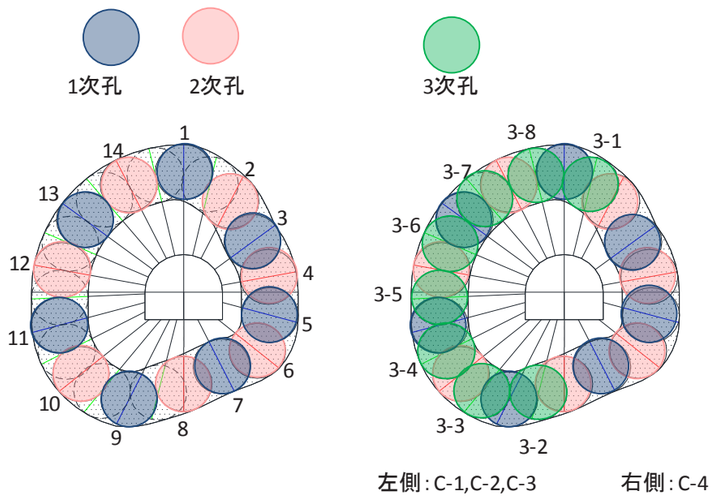


付録資料 -1.2：ポストグラウトにかかる削孔数量計算書

孔の種類	No.	当初設計				変更案											備考
		横断面上の削孔長(m)			実削孔長①	横断面上の削孔長(m)			実削孔長(各次数孔)(m)						実削孔長(合計)(m)		
									1次孔		2次孔			3次孔			
		パッカー位置	注入長	削孔長		パッカー位置	注入長	削孔長	左	右	左	中	右	左	中	2次孔 終了時②	3次孔 終了時③	
規定孔	1	3.000	3.000	6.000	8.485				8.485							8.485	8.485	
規定孔(追加)	3-1					2.500	3.000	5.500							7.778		7.778	当初設計より横断面上0.5m内側にパッカー配置
規定孔	2	3.000	3.000	6.000	8.485	2.000	3.000	5.000				7.071				7.071	7.071	当初設計より横断面上1.0m内側にパッカー配置
規定孔	3	3.000	3.000	6.000	8.485	1.000	3.000	4.000		5.657						5.657	5.657	当初設計より横断面上2.0m内側にパッカー配置
規定孔	4	3.000	3.000	6.000	8.485	1.000	3.000	4.000					5.657			5.657	5.657	当初設計より横断面上2.0m内側にパッカー配置
規定孔	5	3.111	3.000	6.111	8.642	1.111	3.000	4.111		5.814						5.814	5.814	当初設計より横断面上2.0m内側にパッカー配置
規定孔	6	3.169	3.000	6.169	8.724	1.169	3.000	4.169					5.896			5.896	5.896	当初設計より横断面上2.0m内側にパッカー配置
規定孔	7	3.342	3.000	6.342	8.969	1.342	3.000	4.342		6.141						6.141	6.141	当初設計より横断面上2.0m内側にパッカー配置
規定孔	8	3.000	3.000	6.000	8.485	2.000	3.000	5.000				7.071				7.071	7.071	当初設計より横断面上1.0m内側にパッカー配置
規定孔(追加)	3-2					2.589	3.000	5.589							7.904		7.904	当初設計より横断面上0.5m内側にパッカー配置
規定孔	9	3.342	3.000	6.342	8.969				8.969							8.969	8.969	
規定孔(追加)	3-3					3.455	3.000	6.455						9.129			9.129	
規定孔	10	3.169	3.000	6.169	8.724						8.724					8.724	8.724	
規定孔(追加)	3-4					3.174	3.000	6.174						8.731			8.731	
規定孔	11	3.111	3.000	6.111	8.642				8.642							8.642	8.642	
規定孔(追加)	3-5					3.003	3.000	6.003						8.490			8.490	
規定孔	12	3.000	3.000	6.000	8.485						8.485					8.485	8.485	
規定孔(追加)	3-6					3.000	3.000	6.000						8.485			8.485	
規定孔	13	3.000	3.000	6.000	8.485				8.485							8.485	8.485	
規定孔(追加)	3-7					3.000	3.000	6.000						8.485			8.485	
規定孔	14	3.000	3.000	6.000	8.485						8.485					8.485	8.485	
規定孔(追加)	3-8					3.000	3.000	6.000						8.485			8.485	
平均長		3.089	3.000	6.089	8.611				8.645	5.870	8.565	7.071	5.776	8.634	7.841			
丸め					8.6				8.6	5.9	8.6	7.1	5.8	8.6	7.8			
本数					14				4	3	3	2	2	6	2			
削孔長合計(1断面)					120.4				34.4	17.7	25.8	14.2	11.6	51.6	15.6	103.7	170.9	
削孔長合計(1か所3断面)					**361.2**				103.2	53.1	77.4	42.6	34.8	154.8	46.8	**311.1**	**512.7**	
削孔長合計(2か所6断面)					722.4				206.4	106.2	154.8	85.2	69.6	309.6	93.6	622.2	1025.4	

孔の種類	No.		実削孔長				備考
			当初設計④	変更案			
				左	右	合計⑤	
ﾁｪｯｸ孔	C-1	左側	8.611	8.611		8.611	当初設計の実削孔長の平均長
ﾁｪｯｸ孔	C-2	左側	8.611	8.611		8.611	当初設計の実削孔長の平均長
ﾁｪｯｸ孔	C-3	左側	8.611	8.611		8.611	当初設計の実削孔長の平均長
ﾁｪｯｸ孔(追加)	C-4	右側			6.187	6.187	No.2-8の平均長
平均長			8.611	8.611	6.187		
丸め			8.6	8.6	6.2		
本数			3	3	1		
削孔長合計(1断面)			25.8	25.8	6.2	32.0	
削孔長合計(1か所3断面)			**77.4**	77.4	18.6	**96.0**	
削孔長合計(2か所6断面)			154.8	154.8	37.2	192.0	

全孔合計	実削孔長		
	当初設計 ①+④	変更案	
		2次孔 終了時 ②+⑤	3次孔 終了時 ③+⑤
削孔長合計(1断面)	146.2	135.7	202.9
削孔長合計(1か所3断面)	**438.6**	**407.1**	**608.7**
削孔長合計(2か所6断面)	877.2	814.2	1217.4



国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立方メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度(a)，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率(b)	（数字の） 1	1
比透磁率(b)	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン(b)	rad	1 (b)	m/m
立体角	ステラジアン(b)	sr(c)	1 (b)	m^2/m^2
周波数	ヘルツ(d)	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		m kg s^{-2}
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	m^{-1} kg s^{-2}
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	m^2 kg s^{-2}
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	m^2 kg s^{-3}
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	m^2 kg s^{-3} A^{-1}
静電容量	ファラド	F	C/V	m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m^2 kg s^{-3} A^{-2}
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	m^2 kg s^{-2} A^{-1}
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	kg s^{-2} A^{-1}
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m^2 kg s^{-2} A^{-2}
セルシウス温度	セルシウス度(e)	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr(c)	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m^{-2} cd
放射性核種の放射能(f)	ベクレル(d)	Bq		s^{-1}
吸収線量，比エネルギー分与，カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m^2 s^{-2}
線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量	シーベルト(g)	Sv	J/kg	m^2 s^{-2}
酸素活性	カタール	kat		s^{-1} mol

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号radおよびsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m^{-1} kg s^{-1}
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m^2 kg s^{-2}
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s^{-2}
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m^{-1} s^{-1}=s^{-1}
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	m m^{-1} s^{-2}=s^{-2}
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	kg s^{-3}
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m^2 kg s^{-2} K^{-1}
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m^2 s^{-2} K^{-1}
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m^2 s^{-2}
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s^{-3} K^{-1}
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	m^{-1} kg s^{-2}
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s^{-3} A^{-1}
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	m^{-3} s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} s A
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m^{-2} s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s^{-2} A^{-2}
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m^2 kg s^{-2} mol^{-1}
モルエントロピー，モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	kg^{-1} s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m^2 s^{-3}
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m^4 m^{-2} kg s^{-3}=m^2 kg s^{-3}
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2$ sr)	m^2 m^{-2} kg s^{-3}=kg s^{-3}
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	m^{-3} s^{-1} mol

表５．SI 接頭語

乗数	名称	記号	乗数	名称	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60 s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10 800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm^2=10^4m^2
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm^3=10^3cm^3=$10^{-3}m^3$
トン	t	1 t=10^3 kg

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10^{-19}J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10^{-27}kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10^{11}m

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10^5Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	1 b=100fm^2=(10^{-12}cm)^2=$10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デシベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10^{-7} J
ダイン	dyn	1 dyn=10^{-5}N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm^{-2}=0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm^2 s^{-1}=$10^{-4}m^2$ s^{-1}
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm^{-2}=10^4cd m^{-2}
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm^{-2} =10^4lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s^{-2}=$10^{-2}ms^{-2}$
マクスウエル	Mx	1 Mx = 1G cm^2=10^{-8}Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm^{-2} =10^{-4}T
エルステッド(a)	Oe	1 Oe ≙ (10^3/4π)A m^{-1}

(a) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10^{10}Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10^{-4}C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10^{-2}Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10^{-2}Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10^{-9}T
フェルミ		1 フェルミ=1 fm=10^{-15}m
メートル系カラット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10^{-4}kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1 cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー），4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10^{-6}m

（第8版，2006年）