JAEA-Research 2014-006



瑞浪超深地層研究所計画における クラックテンソル理論に基づく 等価連続体モデル化手法の検討

A Study on the Method of an Equivalent Continuous Body Modelling Using Crack Tensor Theory in the Mizunami Underground Research Laboratory Project

> 真田 祐幸 佐藤 稔紀 丹野 剛男 引間 亮一 多田 浩幸 熊坂 博夫 石井 卓 櫻井 英行

Hiroyuki SANADA, Toshinori SATO, Takeo TANNO, Ryoichi HIKIMA Hiroyuki TADA, Hiroo KUMASAKA, Takashi ISHII and Hideyuki SAKURAI

> 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

Tono Geoscientific Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate

June 2014

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根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 Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency. 2-4 Shirakata Shirane, 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, 2014

瑞浪超深地層研究所計画における

クラックテンソル理論に基づく等価連続体モデル化手法の検討

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 東濃地科学研究ユニット

真田 祐幸、佐藤 稔紀、丹野 剛男^{*1}、引間 亮一^{*2}、多田 浩幸^{*3}、 熊坂 博夫^{*3}、石井 卓^{*3}、櫻井 英行^{*3}

(2014年3月27日受理)

日本原子力研究開発機構では、結晶質岩を対象とした深部地質環境の調査・解析・評価技術の 基盤の整備と、深地層における工学技術の基盤の整備を目標として、岐阜県瑞浪市において超深 地層研究所計画を進めている。

超深地層研究所計画における岩盤力学分野の研究では、地上からの調査予測研究段階(第1段 階)において、研究坑道の掘削に伴い周辺岩盤中に生じる掘削影響の評価方法の構築を課題の一 っとして設定している。その一環として、本研究では、等価連続体モデル化手法の検討のために、 深度 500m までの立坑および水平坑道の研究坑道の壁面観察や力学試験データ等を使用してクラ ックテンソルの算定を行った。そして、深度 500m におけるクラックテンソルを用いて、換気立 坑の深度 500m および深度 500m 予備ステージの 2 次元掘削解析を行った。また、第1段階の調 査結果に基づいて算出した深度 500m のクラックテンソルの検証を本研究で算定したクラックテ ンソルを基に行った。さらに、換気立坑の深度 170~500m および深度 500m 予備ステージを対象 に、基準領域および観察領域を設定し、クラックテンソルの相対誤差を算出するとともに、観察 領域の大きさに伴う相対誤差の変動の様子を調べた。

その結果、深度 500m を対象に算定したクラックテンソルを用いた掘削解析結果は、初期応力 および割れ目の卓越方向を反映した挙動を示した。第1段階の調査結果に基づいて算出した深度 500m のクラックテンソルのトレースは、壁面観察結果によって得られたクラックテンソルより 小さく、深度 500m の坑道掘削による挙動予測への適用性は低いものと考えられた。換気立坑に おけるクラックテンソルの相対誤差は、観察区間長を長くするとその変動幅が小さくなった。

東濃地科学センター(駐在):〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

- *1 3D 地科学研究所(元 技術開発協力員)
- *2 西松建設株式会社(元 技術開発協力員)
- *3 清水建設株式会社

A Study on the Method of an Equivalent Continuous Body Modelling Using Crack Tensor Theory in the Mizunami Underground Research Laboratory Project

Hiroyuki SANADA, Toshinori SATO, Takeo TANNO^{*1}, Ryoichi HIKIMA^{*2}, Hiroyuki TADA^{*3}, Hiroo KUMASAKA^{*3}, Takashi ISHII^{*3} and Hideyuki SAKURAI^{*3}

Tono Geoscientific Research Unit Geological Isolation Research and Development Directorate Japan Atomic Energy Agency Akiyo-cho, Mizunami-shi, Gifu-ken

(Received March 27, 2014)

Japan Atomic Energy Agency has been implementing the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project in order to develop comprehensive investigation techniques for the geological environment and engineering techniques to construct deep underground structures in crystalline rock. In the rock mechanical study in the MIU Project, the development of the evaluation method for the excavation damaged zone due to excavation of shafts and research galleries is one of the important issues. In this report, crack tensor was calculated using the tunnel wall mapping and rock mechanical test results in the shaft and research galleries in the MIU in order to consider the method of an equivalent continuous modelling. Two dimension excavation analysis was conducted at the Ventilation Shaft and GL -500 m Sub Stage using the calculated crack tensor at GL -500 m. Based on calculated crack tensor at GL-170 m to -500 m (granite area) and GL -500 m Sub stage, the validity of the crack tensor at GL -500 m estimated during Phase I was verified. Relative error of crack tensor was calculated in order to examine variation of relative error to the scale of observation areas. Excavation analysis results using crack tensor at GL-500 m showed rock mass behaviour reflecting in situ stress and fracture distributions. Since the trace of crack tensor calculated at GL-500m based on Phase I investigation results was smaller than the trace obtained by tunnel wall mapping results, applicability for excavation prediction could be little. Relative error of crack tensor in the Ventilation Shaft showed small variation of relative error under long observation areas.

Keywords: Crack Tensor, Mizunami Underground Research Laboratory Project, Numerical Analysis

^{*1 3}D Geoscience, Inc. (Former Collaborating Engineer)

^{*2} Nishimatsu Construction Co., Ltd. (Former Collaborating Engineer)

^{*3} Shimizu Corporation

目次

	··· 1
2. 実施内容	·· 2
3. クラックテンソルの概要	3
3.1 クラックテンソルを求める算定式	3
3.2 クラックテンソルモデルによる応力ひずみ関係	5
4. 坑道掘削時の壁面観察および力学試験結果を用いたクラックテンソルの算定	7
4.1 算定対象	7
4.2 壁面観察図	7
4.2.1 換気立坑	7
4.2.2 深度 500m 予備ステージ	10
4.3 算定手順	11
4.4 算定結果 ····································	19
4.4.1 換気立坑	19
4.4.2 深度 500m 予備ステージ	36
 4.5 クラックテンソルの鼻足のまとめ 5. 深度 500m におけるクラックテンソルに基づく掘削解析	46
	60
5.1 解析の概要	60 60
5.1 解析の概要	60 60 71
5.1 解析の概要	60 60 71 71
 5.1 解析の概要	60 60 71 71 71
 5.1 解析の概要 5.2 解析結果 5.2.1 岩盤の変位 5.2.2 岩盤の応力 5.2.3 支保工の応力 	60 60 71 71 71 74 81
 5.1 解析の概要 5.2 解析結果 5.2.1 岩盤の変位 5.2.2 岩盤の応力 5.2.3 支保工の応力 5.3 掘削解析のまとめ 	60 60 71 71 74 81 84
 5.1 解析の概要 5.2 解析結果 5.2.1 岩盤の変位 5.2.2 岩盤の応力 5.2.3 支保工の応力 5.3 掘削解析のまとめ 	60 60 71 71 74 81 84
 5.1 解析の概要 5.2 解析結果 5.2.1 岩盤の変位 5.2.2 岩盤の応力 5.2.3 支保工の応力 5.3 掘削解析のまとめ 6. 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第1段階で算出したクックテンソルの比較	60 60 71 71 74 81 84 ラ 85
 5.1 解析の概要… 5.2 解析結果… 5.2.1 岩盤の変位 5.2.2 岩盤の応力 5.2.3 支保工の応力 5.3 掘削解析のまとめ 6. 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第1段階で算出したクックテンソルの比較 6.1 第1段階で算出したクラックテンソルと解析結果	60 60 71 71 74 81 84 ラ 85 85
 5.1 解析の概要 5.2 解析結果 5.2.1 岩盤の変位 5.2.2 岩盤の応力 5.2.3 支保工の応力 5.3 掘削解析のまとめ 6. 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第1段階で算出したクックテンソルの比較 6.1 第1段階で算出したクラックテンソルと解析結果 6.2 深度 500m のクラックテンソルとの比較に上ろ第1段階で算出したクラックテンソル	60 60 71 71 74 81 84 ラ 85 85 の
 5.1 解析の概要 5.2 解析結果 5.2.1 岩盤の変位 5.2.2 岩盤の応力 5.2.3 支保工の応力 5.3 掘削解析のまとめ 6. 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第1段階で算出したクックテンソルの比較 6.1 第1段階で算出したクラックテンソルと解析結果 6.2 深度 500m のクラックテンソルとの比較による第1段階で算出したクラックテンソル 適用性の検討 	60 60 71 71 74 81 84 ラ 85 の 86
 5.1 解析の概要 5.2 解析結果 5.2.1 岩盤の変位 5.2.2 岩盤の応力 5.2.3 支保工の応力 5.3 堀削解析のまとめ 6. 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第1段階で算出したクックテンソルの比較 6.1 第1段階で算出したクラックテンソルと解析結果 6.2 深度 500m のクラックテンソルとの比較による第1段階で算出したクラックテンソル 適用性の検討 7. 平成 21 年度に実施したクラックテンソルの予察的な算出手法の妥当性の検証	60 60 71 71 74 81 84 ラ 85 85 85 86 89
 5.1 解析の概要 5.2 解析結果 5.2 1 岩盤の変位 5.2.1 岩盤の変位 5.2.2 岩盤の応力 5.3 支保工の応力 5.3 掘削解析のまとめ 6. 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第1段階で算出したクックテンソルの比較 6.1 第1段階で算出したクラックテンソルと解析結果 6.2 深度 500m のクラックテンソルとの比較による第1段階で算出したクラックテンソル 適用性の検討 7. 平成 21 年度に実施したクラックテンソルの予察的な算出手法の妥当性の検証 7.1 平成 21 年度に実施したクラックテンソルの予察的な算出手法 	60 60 71 71 71 74 81 84 ラ 85 の 86 89 89

8. 瑞浪超深地層研究所におけるクラックテンソルに基づく相対誤差の算出
8.1 算出対象
8.2 算出方法
8.3 算出結果および考察 ····································
8.3.1 換気立坑のスキャンラインの相対誤差とその深度方向分布94
8.3.2 深度 500m 予備ステージの各スキャンラインにおける相対誤差とその分布 99
8.3.3 換気立坑 UHFD と LAFZ 区間における相対誤差とその深度方向分布 102
8.3.4 換気立坑と深度 500m 予備ステージにおける相対誤差とその深度方向分布 105
9. まとめ
9.1 坑道掘削時の壁面観察および力学試験結果を用いたクラックテンソルの算定 108
9.2 深度 500m におけるクラックテンソルに基づく掘削解析
9.3 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第1段階で算出したク
ラックテンソルの比較
9.4 平成 21 年度に実施したクラックテンソルの予察的な算出手法の妥当性の検証 108
9.5 瑞浪超深地層研究所におけるクラックテンソルに基づく相対誤差の算出 108
参考文献
付録

CONTENTS

1. Objective of this research
2. Content of this report ······ 2
3. Overview of crack tensor
3.1 Calculation formula of crack tensor
3.2 Stress-strain relationship based on crack tensor model
4. Calculation of crack tensor using tunnel wall mapping and rock mechanics test results
4.1 Target for calculation 7
4.2 Tunnel wall mapping
4.2.1 Ventilation Shaft
4.2.2 GL-500m Sub Stage
4.3 Calculation procedures
4.4 Calculation results 19
4.4.1 Ventilation Shaft
4.4.2 GL-500m Sub Stage
4.5 Summary of this chapter 46
5. Excavation analysis using crack tensor at GL-500m
5.1 Overview of excavation analysis
5.2 Excavation analysis results 71
5.2.1 Rock displacement 71
5.2.2 Rock stress
5.2.3 Stress in concrete lining
5.3 Summary of this chapter
6. Comparison of crack tensor during Phases I and II at GL-500m
6.1 Analysis results
6.2 Evaluation of applicability of crack tensor based on comparison results
7. Evaluation of validation of calculation method of crack tensor conducted in FY2009
7.1 Calculation method of crack tensor conducted in FY2009
7.2 Evaluation of validation of calculation method based on comparison results at 500m Level ···· 90
8. Calculation of relative error of crack tensor at the MIU
8.1 Target for calculation 92

8.2 Calculation method 93
8.3 Results and discussion 94
8.3.1 Relative error and depth distribution on the scan line of Ventilation Shaft94
8.3.2 Relative error and depth distribution on the scan line of GL-500m Sub Stage99
8.3.3 Relative error and depth distribution on UHFD and LSFD in Ventilation Shaft 102
8.3.4 Relative error and depth distribution in Ventilation Shaft and GL-500m Sub Stage 105
9. Conclusions ······ 108
9.1 Calculation of crack tensor using tunnel wall mapping and rock mechanics test results 108
9.2 Excavation analysis using crack tensor at GL-500m
9.3 Comparison of crack tensor during Phases I and II at GL-500m 108
9.4 Evaluation of validation of calculation method of crack tensor conducted in FY2009108
9.5 Calculation of relative error of crack tensor at the MIU
References ······ 110
Appendix ······ 111

図リスト

义	3.2-1	クラックテンソルモデルの概念6
义	4.2-1	換気立坑の深度170.2~200.2mの壁面観察による割れ目の状況(左)と岩盤等級区
	分(ス	右)8
义	4.2-2	換気立坑の深度 459.8~500.2m の壁面観察による割れ目の状況(左)と岩盤等級区
	分(ス	右)8
义	4.2-3	換気立坑の掘削断面
义	4.2-4	深度 500m 予備ステージの壁面観察による割れ目の状況 (左) と岩盤等級区分(右)
义	4.2-5	水平坑道の掘削断面
义	4.3-1	換気立坑の深度170.2~200.2mを対象とした場合の割れ目の密度、トレース長、ク
	ラッ	クテンソルの算定手順
义	4.3-2	換気立坑の深度 170.2~200.2m を対象とした場合の岩盤等級ごとの割れ目の密度、
	トレー	ース長、クラックテンソルの算定手順
义	4.3-3	換気立坑のスキャンラインの位置
义	4.3-4	水平坑道のスキャンラインの位置
义	4.3-5	換気立坑において投影された割れ目の概念18
义	4.3-6	水平坑道における割れ目の投影の概念
义	4.4-1	換気立坑の深度 170.2~200.2m における割れ目のステレオネット(下半球投影)
义	4.4-2	深度 170.2~200.2m において NW 方向のスキャンラインに交わった割れ目20
义	4.4-3	深度 170.2~200.2m において SW 方向のスキャンラインに交わった割れ目22
义	4.4-4	深度 170.2~200.2m において SE 方向のスキャンラインに交わった割れ目23
义	4.4-5	深度 170.2~200.2m において NE 方向のスキャンラインに交わった割れ目23
义	4.4-6	換気立坑の深度 459.8~500.2m における割れ目のステレオネット(下半球投影)
义	4.4-7	深度 459.8~500.2m において NW 方向のスキャンラインに交わった割れ目30
义	4.4-8	深度 459.8~500.2m において SW 方向のスキャンラインに交わった割れ目32
义	4.4-9	深度 459.8~500.2m において SE 方向のスキャンラインに交わった割れ目33
义	4.4-10	深度 459.8~500.2m において NE 方向のスキャンラインに交わった割れ目33
义	4.4-11	深度 500m 予備ステージにおける割れ目のステレオネット(下半球投影)36
义	4.4-12	深度 500m 予備ステージにおいて左側壁のスキャンラインに交わった割れ目…37
义	4.4-13	深度 500m 予備ステージにおいてアーチ左側のスキャンラインに交わった割れ目
义	4.4-14	深度 500m 予備ステージにおいてアーチ右側のスキャンラインに交わった割れ目
义	4.4-15	深度 500m 予備ステージにおいて右側壁のスキャンラインに交わった割れ目…40
义	4.5-1	5m区間ごとのクラックテンソルのトレース F ₀ と割れ目密度の深度方向分布48
义	4.5-2	NW 方向のスキャンラインの割れ目密度と岩盤等級区分の深度方向分布49

义	4.5-3	SW 方向のスキャンラインの割れ目密度と岩盤等級区分の深度方向分布50					
义	4.5-4	4.5-4 NE 方向のスキャンラインの割れ目密度と岩盤等級区分の深度方向分布51					
义	4.5-5	5-5 SE 方向のスキャンラインの割れ目密度と岩盤等級区分の深度方向分布52					
义	4.5-6	5m区間ごとのクラックテンソルのトレース Foと割れ目密度の延長方向分布53					
义	4.5-7	左側壁のスキャンラインの割れ目密度の延長方向分布					
义	4.5-8	アーチ左側のスキャンラインの割れ目密度の延長方向分布					
义	4.5-9	右側壁のスキャンラインの割れ目密度の延長方向分布					
义	4.5-10	アーチ右側のスキャンラインの割れ目密度の延長方向分布					
义	4.5-11	換気立坑の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン					
	ソルの	のトレースとスキャンラインの関係					
义	4.5-12	水平坑道の坑道ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン					
	ソルの	のトレースとスキャンラインの関係					
义	5.1-1	ケース1、2の換気立坑の解析メッシュ63					
义	5.1-2	ケース3の換気立坑の解析メッシュ					
义	5.1-3	ケース4、5の水平坑道の解析メッシュ65					
义	5.1-4	ケース6の水平坑道の解析メッシュ					
义	5.1-5	掘削解析の手順					
义	5.2-1	ケース1における周辺岩盤の変形および変位量コンター図					
义	5.2-2	ケース2における周辺岩盤の変形および変位量コンター図					
义	5.2-3	ケース3における周辺岩盤の変形および変位量コンター図					
义	5.2-4	ケース4における周辺岩盤の変形および変位量コンター図					
义	5.2-5	ケース5における周辺岩盤の変形および変位量コンター図					
义	5.2-6	ケース6における周辺岩盤の変形および変位量コンター図					
义	5.2-7	ケース1における周辺岩盤の主応力分布					
义	5.2-8	ケース2における周辺岩盤の主応力分布					
义	5.2-9	ケース3における周辺岩盤の主応力分布					
义	5.2-10	ケース4における周辺岩盤の主応力分布					
义	5.2-11	ケース 5 における周辺岩盤の主応力分布					
义	5.2-12	ケース6における周辺岩盤の主応力分布80					
义	5.2-13	ケース1における覆工コンクリートの最大主応力分布81					
义	5.2-14	ケース2における覆工コンクリートの最大主応力分布82					
义	5.2-15	ケース3における覆エコンクリートの最大主応力分布82					
义	5.2-16	ケース4における吹付けコンクリートの最大主応力分布83					
义	5.2-17	ケース5における吹付けコンクリートの最大主応力分布83					
义	5.2-18	ケース6における吹付けコンクリートの最大主応力分布84					
义	6.1-1	立坑解析結果 Case1 (CH 級、基本ケース)85					
义	6.1-2	水平坑道解析結果 Case14 (CH 級、90°展開方向)86					
义	6.2-1	クラックテンソルの主値ベクトル87					
义	7.1-1	立坑解析結果 Case a (CH 級、基本ケース)					
义	7.1-2	水平坑道解析結果 Case j (CH 級、90°展開方向)					

义	7.2-1	クラックテンソルの主値ベクトル
义	8.3-1	換気立坑における区間長と相対誤差(自己)の関係
义	8.3-2	換気立坑における区間長 10m の相対誤差(自己)の深度方向の分布96
义	8.3-3	換気立坑における区間長 50mの相対誤差(自己)の深度方向の分布97
义	8.3-4	換気立坑における区間長 100m の相対誤差(自己)の深度方向の分布98
义	8.3-5	深度 500m 予備ステージにおける区間長と相対誤差(自己)の関係100
义	8.3-6	深度 500m 予備ステージにおける区間長 10m の相対誤差(自己)の分布101
义	8.3-7	換気立坑の UHFD-NE 区間の計算結果
义	8.3-8	換気立坑の LAFZ-NE 区間の計算結果104
义	8.3-9	水平坑道 LW を基準としたときの換気立坑 NE スキャンラインの相対誤差106
义	8.3-10	水平坑道 RW を基準としたときの換気立坑 NE スキャンラインの相対誤差107

表リスト

5向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定25 方向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定26 向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定27 句のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定34 句のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定35 500m 予備ステージにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定41 をのスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定42 本左側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定43 をのスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定43 をのスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定43 がのスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定43 た面のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定43
「向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定26 向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定27 向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定34 のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定35 500m予備ステージにおけるクラックテンソルの算定41 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定42 上左側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 43 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 44 上右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 広切の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定27 向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定28 59.8~495.2mにおけるクラックテンソルの算定34 可のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定35 500m予備ステージにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定42 差のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定42 差面のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 43 そのスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定44 方側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 44 方側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 た切の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定28 459.8~495.2mにおけるクラックテンソルの算定34 可のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定35 500m 予備ステージにおけるクラックテンソルの算定41 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定42 一左側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 43 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定44 一右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 て坑の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
159.8~495.2mにおけるクラックテンソルの算定 34 回のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 35 500m予備ステージにおける力ラックテンソルの算定 41 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 42 二左側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 43 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 43 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 43 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 44 古側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 広坑の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン 45
回のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定35 500m 予備ステージにおけるクラックテンソルの算定41 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定42 生在側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 43 ぎのスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定44 生右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 た広の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
500m 予備ステージにおけるクラックテンソルの算定41 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定42 一左側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定43 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定44 一右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 広切の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定42 左側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 43 きのスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 44 右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 広切の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
 左側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 43 査のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 広坑の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
43 達のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定44 右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 広坑の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
きのスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定44 一右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定
-右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定 45 Z坑の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
45 Z坑の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
Z坑の区間ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
ースとスキャンラインの関係
江道の坑道ごとにおける割れ目の密度、トレース長の平均値、クラックテン
ースとスキャンラインの関係
6年度の予察的解析の立坑の解析ケース
6年度の予察的解析の水平坑道の解析ケース
1 年度の予察的解析の立坑の解析ケース
1年度の予察的解析の水平坑道の解析ケース61
ケースの設定
ニ用いた初期応力
監 質部のヤング係数とポアソン比
1の垂直剛性とせん断剛性に関するパラメータ67
·35~465m 区間におけるクラックテンソルの算定
1のクフックテンソル
1のクラックテンソル
1のクラックテンソル
1のクラックテンソル
1のクラックテンソル······69 この仕様および物性値······70 D結果の比較······88 T道の結果の比較·····88 D結果の比較·····92
ŀ

1. 研究の目的

日本原子力研究開発機構では、結晶質岩を対象とした深部地質環境の調査・解析・評価技術の 基盤の整備と、深地層における工学技術の基盤の整備を目標として、岐阜県瑞浪市において超深 地層研究所計画を進めている。

超深地層研究所計画における岩盤力学分野の研究では、地上からの調査予測研究段階(第1段 階)において、研究坑道の掘削に伴い周辺岩盤中に生じる掘削影響の評価方法の構築を課題の一 っとして設定している。その一環として、深度 500m までの立坑および水平坑道(ただし、平成 22 年度に実施した深度約 200~460m の範囲を除く)の研究坑道の壁面観察や力学試験データ等を使 用してクラックテンソルの算定を行った^{1,2)}。そして、深度 500m におけるクラックテンソルを用 いて、換気立坑の深度 500m および深度 500m 予備ステージの 2 次元掘削解析を行った。また、 深度 500m のクラックテンソルを基に、第1段階の調査結果に基づいて算出した深度 500m のク ラックテンソルの検証ならびに平成 21 年度に実施した深度 500m におけるクラックテンソルの予 察的な算出手法の検証を行った。さらに、換気立坑の深度 170~500m および深度 500m 予備ステ ージを対象に、基準領域および観察領域を設定し、クラックテンソルの相対誤差を算出し、観察 領域の大きさに伴う相対誤差の変動の様子を調べた。

2章では、本報告での実施内容を述べた。3章では、クラックテンソルの算定方法などの概要を 述べた。4章では、坑道掘削時の壁面観察および力学試験結果を用いたクラックテンソルの算定 結果を述べた。5章では、深度 500m でのクラックテンソルを用いた坑道掘削解析結果を述べた。 6章では、深度 500m を対象に第1段階で求めたクラックテンソルの検証を述べた。7章では、第 2段階で実施したクラックテンソルの予察的な算出手法の妥当性の検証を述べた。8章では、観察 領域ごとに基準領域に対するクラックテンソルの相対誤差を算出し、観察領域の大きさに伴う相 対誤差の変動の様子を検討した。9章では、本報告で実施した内容をまとめた。

2. 実施内容

- (1) 坑道掘削時の壁面観察および力学試験結果を用いたクラックテンソルの算定
 - ・瑞浪超深地層研究所の結晶質岩部分のうち、過年度^{1),2)}までに算定していない下記の部位
 ①②について、a)割れ目密度、b)割れ目の走向傾斜のステレオネット、c)推定される
 割れ目のトレース長、d)岩盤のクラックテンソル(3次元)を算定した。
 - ① 換気立坑の深度約 170~200m および約 460~500m の区間
 - ② 深度 500m 予備ステージ
 - クラックテンソルの算定と整理は、下記のように行った。
 - ・クラックテンソルは、換気立坑については深度約 170~200m、深度約 460~500m をそれぞ れ一区間として算定した。また、深度 500m 予備ステージについては一括で算定した。
 - ・算出されたクラックテンソル、クラックテンソルのトレース、割れ目の分布特性について は、壁面観察で得られた電中研式の岩盤等級および割れ目帯(LAFZ: Low Angle Fractured Zone、UHFD: Upper Highly Fractured Domain)ごとに整理した。
- (2) 深度 500m におけるクラックテンソルを用いた掘削解析
 - ・上記(1)で算出した深度 500m におけるクラックテンソルを用いて、換気立坑の深度 500m および深度 500m 予備ステージの 2 次元掘削解析を実施し以下の①~③の解析結果を得た。
 - ① 周辺岩盤の変形量
 - ② 周辺岩盤の主応力分布
 - ③ 吹付コンクリートの主応力分布
- (3) 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第 1 段階で算出した クラックテンソルの比較
 - ・ 上記(1)で算出した深度 500m のクラックテンソルを基に、第1段階の調査結果に基づいて 算出した深度 500m のクラックテンソル^{1,2)}の検証を行った。
 - ・検証はクラックテンソルの比較および換気立坑の深度 500m と深度 500m 予備ステージの2 次元変形解析結果の比較を基に行った。
- (4) 平成 21 年度に実施したクラックテンソルの予察的な算出手法の妥当性の検証
 - ・ 上記(1)で算出した深度 500m のクラックテンソルを基に、平成 21 年度に実施した深度 500m におけるクラックテンソルの予察的な算出手法²⁾の検証を行った。
 - ・なお、検証は上記(3)に記述するものと同様な方法で行った。
- (5) 瑞浪超深地層研究所におけるクラックテンソルに基づく相対誤差の算出
 - 換気立坑の深度 170~500m および深度 500m 予備ステージを対象に、基準領域および観察 領域を設定し、それぞれの観察領域ごとに基準領域に対するクラックテンソルの相対誤差 を算出し、観察領域の大きさに伴う相対誤差の変動の様子を検討した。さらに、電中研式 の岩盤等級および割れ目帯(LAFZ、UHFD)ごとのクラックテンソルの整理も行った。

3. クラックテンソルの概要

3.1 クラックテンソルを求める算定式

クラックテンソルとは、統計的に均質な岩盤領域における割れ目の密度、大きさ、方向などの 幾何学的特性を表現するテンソル量である^{3),4)}。

対象としている三次元空間に割れ目が任意に分布していて、面積*S*を持つ割れ目を等価な円で 置き換えたときの直径を*D*とすると、2 階、4 階のクラックテンソル *F_{ij}、F_{ijkl}*は、以下のように 定義される。

ここで、 ρ は割れ目の密度、 D_m はDの最大値、 n_i は割れ目の単位法線ベクトルnの基準軸 x_i への成分、E(n, D)は単位法線ベクトルnと代表長さDの統計的分布を与える確率密度関数、 Ω は全立体角を示している。また、式(3.1-1)と式(3.1-2)を総和形式にて表すと、以下のようになる。

ここで、Vは統計的に均一と見なせる領域の体積で、Mは割れ目の総数である。

割れ目の代表長さと方向が統計的な意味で独立しているとすると、*E*(*n*, *D*)=*E*(*n*)*f*(*D*)とすることができ、式(3.1-1)と式(3.1-2)は、以下のようになる。

$$F_{ij} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^{D_m} D^3 f(D) dD \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega$$

= $F_0 N_{ij}$ $(3.1-5)$

$$F_{ijkl} = \frac{\pi \rho}{4} \int_0^{D_m} D^3 f(D) dD \int_{\Omega} n_i n_j n_k n_l E(\mathbf{n}) d\Omega$$

$$= F_0 N_{ijkl}$$
 (3.1-6)

ただし、

$$F_0 = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{D_m} D^3 f(D) dD \qquad \text{ If } (3.1-7)$$

ここで、*f*(*D*)は割れ目の代表長さ*D*の確率密度関数、*E*(*n*)は単位法線ベクトル*n*の確率密度関数、*F*₀は割れ目の密度を示す量、*N_{ij}*および*N_{ijkl}*は割れ目の方向分布によって定まる2階および4階の割れ目の構造テンソルである。そして、式(3.1-8)と式(3.1-9)を総和形式にすると、次式のようになる。

$$N_{ij} = \frac{1}{M} \sum_{L=1}^{M} n_i^{(L)} n_j^{(L)}$$
 $\ \ \vec{x} \ (3.1-10)$

また、三次元空間中にスキャンラインを設定して、それに平行な単位ベクトルをq、この単位 ベクトルqに交わる割れ目の個数を $N^{(q)}$ 、ある観測平面に現れる割れ目のトレースの長さをtとす ると、式(3.1-7)は、以下のように表わされる⁴⁾。

ここで、 $\langle t^n \rangle$ はトレース長tのn次のモーメントである。

3.2 クラックテンソルモデルによる応力-ひずみ関係

本節では、3.1 で述べたクラックテンソルを用いた岩盤の応力一ひずみ関係について述べる。ク ラックテンソルを用いることで割れ目を多く含む岩盤を等価な連続体として取り扱うことができ る。多くの割れ目を含む岩盤が巨視的な応力 σ を受けて変形をするとき、発生する巨視的なひず み ε は、基質部に生じるひずみと割れ目に生じるひずみの和で与えられる。割れ目に生じるひず みは、割れ目の垂直およびせん断方向に発生する相対変位の総和から得られる。そして、割れ目 によるひずみと巨視的な応力 σ の関係は、図 3.2-1に示されたように割れ目をスプリングで連結 された平行板でモデル化することと、割れ目群の幾何学的特性を表すクラックテンソルを導入す ることによって求められる。

巨視的なひずみ ε が基質部の弾性ひずみと割れ目の存在による付加的な弾性ひずみの二つの成分の和であるとすると、 ε と σ の関係は、次式のように示されている。

$$\varepsilon_{ij} = (M_{ijkl} + C_{ijkl})\sigma_{kl}$$

$$= \left[\frac{1}{E} \{(1+\nu)\delta_{ik}\delta_{jl} - \nu\delta_{ij}\delta_{kl}\} + \left(\frac{1}{h} - \frac{1}{g}\right)F_{ijkl} + \frac{1}{4g} (\delta_{ik}F_{jl} + \delta_{jk}F_{il} + \delta_{il}F_{jk} + \delta_{jl}F_{ik})\right]\sigma_{kl}$$

$$\exists (3.2-1)$$

ここで、 M_{ijkl} は基質部のコンプライアンステンソル、 C_{ijkl} は割れ目によるコンプライアンステン ソル、 $E \ge v$ は基質部のヤング係数とポアソン比、 $h \ge g$ は割れ目の垂直剛性とせん断剛性に関す るパラメータ、 δ_i はクロネッカーのデルタを示す。

個々の割れ目が、図 3.2-1のように二つのスプリングで連結された平行板でモデル化され、ス プリングによって垂直応力*σ*^{*n*} とせん断応力*τ*が伝達されるものとすれば、割れ目の垂直剛性 *H*、 せん断剛性 *G* はそれぞれのスプリングの剛性で表され、次式で表現される。

ここで、h₀、g₀、およびg₁は実験で求めるパラメータ、Cは割れ目のアスペクト比である。

式(3.2-2)、式(3.2-3)の垂直剛性 *H* とせん断剛性 *G* は、全割れ目について平均化した剛性であ り、割れ目の大きさ *r* に反比例し垂直応力 σ_n に依存するパラメータである。ただし、割れ目の剛 性に関して、その応力依存性を考慮しない場合、式(3.2-2)と式(3.2-3)中の *h*、*g* は応力の次元を 持つ定数となる。





4. 坑道掘削時の壁面観察および力学試験結果を用いたクラックテンソルの算定

4.1 算定対象

割れ目密度、トレース長、クラックテンソルの算定、およびステレオネットの作図を行う対象 は、以下の通りである。

· 換気立坑(深度約 170~200m および約 460~500m の区間)

・ 深度 500m 予備ステージ

換気立坑については、深度約 170~200m、深度約 460~500m をそれぞれ一区間として算定し、 深度 500m 予備ステージについては一括で算定した。

4.2 壁面観察図

4.2.1 換気立坑

瑞浪超深地層研究所では換気立坑の掘削時に坑道の壁面観察を実施している。本研究で必要な 深度 170.2~200.2m、深度 459.8~500.2m の割れ目の状況と岩盤等級区分を図 4.2-1、図 4.2-2 に 示す。なお、換気立坑の壁面観察図の掘削断面の形状を直径 5.3m の円形として取り扱っている。 換気立坑の壁面観察図における掘削断面の形状を図 4.2-3に示す。



図 4.2-1 換気立坑の深度 170.2~200.2m の壁面観察による割れ目の状況(左)と岩盤等級区分(右)



図 4.2-2 換気立坑の深度 459.8~500.2m の壁面観察による割れ目の状況(左)と岩盤等級区分(右)



図 4.2-3 換気立坑の掘削断面

4.2.2 深度 500m 予備ステージ

深度 500m 予備ステージの割れ目の状況と電中研式の岩盤等級の区分を図 4.2-4に示す。坑道軸 の方向は、主立坑側から換気立坑側を望んだときに、S39°46'10"W 方向となっている。

また、各水平坑道の壁面観察図における掘削断面の形状を図 **4.2-5**に示す。なお、この図において、拡幅部とは主立坑と水平坑道が接続している部分の断面形状を示している。



図 4.2-4 深度 500m 予備ステージの壁面観察による割れ目の状況(左)と岩盤等級区分(右)



図 4.2-5 水平坑道の掘削断面

4.3 算定手順

本報告では、クラックテンソル F_{ij} 、 F_{ijkl} を求めるために、割れ目の代表長さと方向が統計的な 意味で独立していると仮定して、式(3.1-5)と式(3.1-6)を適用することにした。そして、クラッ クテンソルのトレース F_0 を得るために、三次元空間中にスキャンラインを設定して、それに交わ った割れ目に対して式(3.1-12)を適用することにした。

以上のことを考慮して、換気立坑の深度 170.2~200.2m を対象とした場合の割れ目の密度、トレース長、クラックテンソルの算定手順を図 4.3-1に示す。なお、構造テンソル N_{ij}、N_{ijkl}、およびクラックテンソル F_{ij}、F_{ijkl}の指標1はE方向、指標2はN方向、指標3は鉛直上向きを示すものとする。

また、一掘進長ごとに壁面観察図に岩盤等級が記されているので、図 4.3-1にて求めた割れ目 の単位法線ベクトル n とトレース長 t に対して、岩盤等級ごとに集計し直すことによって、岩盤 等級ごとの割れ目の密度、クラックテンソルを求めた。換気立坑の深度 170.2~200.2m を対象と して、電中研式の岩盤等級ごとに割れ目の密度、クラックテンソルを整理する手順を図 4.3-2に 示す。

平成22年度は、換気立坑の深度335~360mの壁面観察図に対して、8本のスキャンラインを設定してクラックテンソルの算定を行っている¹⁾。このときの壁面観察図を見てみると、SE方向に設定されたスキャンラインが最も多くの割れ目と交わったことがわかった。平成22年度と同様、本報告においても、換気立坑におけるスキャンラインの位置をSE方向から、90°ごとに振り分けて、SW方向、NW方向、NE方向、SE方向に対して坑道軸方向に平行な位置に、計4本のスキャンラインを設定した。換気立坑のスキャンラインの位置を図4.3-3に示す。また、水平坑道については、両側壁部の中間高さとアーチ部を三等分する位置に対して、坑道軸方向に計4本のスキャンラインを設定した。水平坑道のスキャンラインの位置を図4.3-4に示す。そして、主立坑から見て左手側の側壁を左側壁、右手側の側壁を右側壁とした。また、アーチ部も主立坑から見て左手側をアーチ左側、右手側をアーチ右側と称することにした。

本報告では、壁面にスキャンラインを設定して、それに交わった割れ目に対して、割れ目のトレース長を計測することにしたが、換気立坑の壁面や水平坑道のアーチ部などの曲面上に現れた 割れ目に対しては、補正が必要となる。具体的には、曲面上に現れた割れ目に関して、スキャン ラインの接平面が仮想の壁面であるとして、この仮想の壁面に現れる割れ目のトレースの長さを 測ることにした。換気立坑において壁面上に現れた割れ目を投影する方法の概念を図 4.3-5に示 す。割れ目は三次元空間中において平面であるとする。そして、割れ目の単位法線ベクトルをn、 接平面の単位法線ベクトルをmとすると、割れ目と接平面との交線 C の単位法線ベクトル1は、 以下のように求められる。

$$l = \frac{n \times m}{|n \times m|}$$

式(4.3-1)

そして、換気立坑の壁面上に現れた割れ目の端点間のベクトルを *p* とすると、このベクトル *p* と単位法線ベクトル *l* との内積が交線 *C* 上に投影された割れ目の長さとなるので、仮想の壁面上に現れたトレース長 *t* は、以下のように求められる。

$$t = |\boldsymbol{p} \cdot \boldsymbol{l}| \qquad \qquad \vec{\mathbf{x}} \quad (4.3-2)$$

このとき、壁面上に現れる端点間のベクトルpは、交線C上に投影された長さが最長になるよ に選ぶものとした。

スキャンラインによって抽出された割れ目には、壁面観察での割れ目詳細記載シート作成時に 走向・傾斜を求めていないものが一部ある。それについては、壁面観察図上の割れ目の座標から 三次元空間中の割れ目の座標を求めて、最小自乗法により平面に近似して、その近似された平面 から単位法線ベクトル n を求めた。

水平坑道の壁面上に現れた割れ目に対しても、換気立坑の場合と同様に扱うものとした。水平 坑道においてスキャンラインが左側壁に設定された場合、スキャンラインの接平面は図 4.3-6(a) のようになる。そして、坑道の壁面に現れた割れ目は、この接平面に投影されることにした。ス キャンラインが側壁部にあって、割れ目が側壁部のみに現れてアーチ部に現れなかった場合、最 小自乗法によって平面を決めることができない。このような割れ目に対しては、側壁のみに現れ た割れ目は平面上にあることから、壁面観察図上の長さをそのままトレース長 t とした。

また、スキャンラインがアーチ左側に設定された場合、スキャンラインの接平面は図 4.3-6(b) のようになり、壁面に現れた割れ目は、この接平面に投影することにした。







図 4.3-2 換気立坑の深度 170.2~200.2m を対象とした場合の岩盤等級ごとの割れ目の密度、トレース長、クラックテンソルの算定手順



図 4.3-3 換気立坑のスキャンラインの位置



図 4.3-4 水平坑道のスキャンラインの位置



図 4.3-5 換気立坑において投影された割れ目の概念



(a) スキャンラインを左側壁に設定した場合 (b) スキャンラインをアーチ左側に設定した場合



4.4 算定結果

4.4.1 換気立坑

(1) 深度 170.2~200.2m

深度 170.2~200.2m において壁面観察の割れ目詳細シートに記載された走向・傾斜を集計した。 その結果、走向・傾斜がわかった割れ目は 310 本であった。深度 170.2~200.2m における割れ目 のステレオネットを図 4.4-1に示す。



図 4.4-1 換気立坑の深度 170.2~200.2m における割れ目のステレオネット(下半球投影)

そして、**図 4.4-1**の 310 本の割れ目の走向・傾斜から得られた構造テンソル *N_{ij} と N_{ijkl}*は、以下 のようになった。

$$N_{ij} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ N_{22} & N_{23} \\ sym. & N_{33} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} 4.520 \text{E} \cdot 01 & 1.713 \text{E} \cdot 01 & 3.044 \text{E} \cdot 02 \\ & 3.369 \text{E} \cdot 01 & 2.455 \text{E} \cdot 02 \\ sym. & & 2.111 \text{E} \cdot 01 \end{bmatrix}$$

式 (4.4-1)

$$N_{ijkl} = \begin{bmatrix} N_{1111} & N_{1122} & N_{1133} & N_{1112} & N_{1123} & N_{1131} \\ N_{2222} & N_{2233} & N_{2212} & N_{2223} & N_{2231} \\ N_{3333} & N_{3312} & N_{3323} & N_{3331} \\ N_{1212} & N_{1223} & N_{1231} \\ N_{2323} & N_{2331} \\ sym. & & N_{3131} \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{f}_{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 3.319E \cdot 01 & 1.027E \cdot 01 & 1.731E \cdot 02 & 1.058E \cdot 01 & 6.295E \cdot 03 & 1.939E \cdot 02 \\ 2.193E \cdot 01 & 1.491E \cdot 02 & 6.088E \cdot 02 & 7.172E \cdot 03 & 5.093E \cdot 03 \\ 1.789E \cdot 01 & 4.618E \cdot 03 & 1.108E \cdot 02 & 5.960E \cdot 03 \\ 1.027E \cdot 01 & 5.093E \cdot 03 & 6.295E \cdot 03 \\ 1.491E \cdot 02 & 4.618E \cdot 03 \\ 1.491E \cdot 02 & 4.618E \cdot 03 \\ 1.731E \cdot 02 \end{bmatrix}$$

次に、NW 方向の壁面に対して坑道軸方向に平行な方向にスキャンラインを設定したとき、ス キャンラインに交わった割れ目を図 4.4-2に示す。



図 4.4-2 深度 170.2~200.2m において NW 方向のスキャンラインに交わった割れ目

図 4.4-2より、交わった割れ目の数は 37 本であることから、深度 170.2~200.2m の割れ目の密度 N⁽⁹⁾は、

$$N^{(q)} = 1.233$$
 (本/m) 式 (4.4-3)

となった。

また、スキャンラインに交わった割れ目の内、走向・傾斜がわかったものは 16 本、最小自乗法 により方向を求めたものが 21 本であった。そして、それらの単位法線ベクトル n と、スキャンラ インの単位法線ベクトル q との内積の絶対値の平均値 $\langle |n \cdot q| \rangle$ は、以下のようになった。

$$\left< |\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{q}| \right> = 0.7747 \qquad \qquad \boldsymbol{\vec{x}} \quad (4.4-4)$$

また、スキャンラインに交わった 37 本の割れ目のトレース長の平均値 $\langle t \rangle$ と、トレース長の2乗の平均値 $\langle t^2 \rangle$ は、以下のようになった。

$$\langle t \rangle = 2.2409$$
 (m) 式 (4.4-5)

$$\langle t^2 \rangle = 8.1676 \ (m^2)$$
 ੜ (4.4-6)

式(3.1-12)、式(4.4-3)~式(4.4-6)より、深度 170.2~200.2mの F₀は、以下のようになった。

$$F_0 = 6.836$$
 式 (4.4-7)

そして、図 4.3-1のフローにより求めた深度 170.2~200.2m の NW 方向のクラックテンソル F_{ij} 、 F_{ijkl} は、以下のようになった。

$$\begin{split} F_{ij} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{22} & F_{23} \\ sym. & F_{33} \end{bmatrix} \\ & \texttt{\texttt{x}} \texttt{T}$ (4.4-8) \\ = \begin{bmatrix} 1.089\text{E} + 00 & 2.656\text{E} \cdot 01 & 1.198\text{E} \cdot 01 \\ 9.967\text{E} \cdot 01 & 4.072\text{E} \cdot 01 \\ sym. & 4.750\text{E} + 00 \end{bmatrix} \end{split}$$

$$F_{ijkl} = \begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1133} & F_{1112} & F_{1123} & F_{1131} \\ F_{2222} & F_{2233} & F_{2212} & F_{2223} & F_{2231} \\ F_{3333} & F_{3312} & F_{3323} & F_{3331} \\ F_{1212} & F_{1223} & F_{1231} \\ F_{2323} & F_{2331} \end{bmatrix}$$

$$\texttt{T} \quad \texttt{Sym.} \quad \texttt{F}_{3131} \end{bmatrix}$$

$$\texttt{T} \quad \texttt{(4.4-9)}$$

$$= \begin{bmatrix} 5.672\texttt{E} \cdot \texttt{01} & 2.215\texttt{E} \cdot \texttt{01} & 3.003\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -9.943\texttt{E} \cdot \texttt{02} & 2.455\texttt{E} \cdot \texttt{02} & -2.985\texttt{E} \cdot \texttt{02} \\ 4.389\texttt{E} \cdot \texttt{01} & 3.363\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -1.221\texttt{E} \cdot \texttt{01} & 6.260\texttt{E} \cdot \texttt{02} & -4.117\texttt{E} \cdot \texttt{02} \\ 4.114\texttt{E} + \texttt{00} & -4.407\texttt{E} \cdot \texttt{02} & 3.200\texttt{E} \cdot \texttt{01} & 1.908\texttt{E} \cdot \texttt{01} \\ 2.215\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -4.117\texttt{E} \cdot \texttt{02} & 3.363\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -3.945\texttt{E} \cdot \texttt{02} \\ 3.363\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -4.407\texttt{E} \cdot \texttt{02} & 3.003\texttt{E} \cdot \texttt{01} \\ 3.003\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -3.945\texttt{E} \cdot \texttt{02} & -3.935\texttt{E} \cdot \texttt{02} \\ 3.363\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -4.407\texttt{E} \cdot \texttt{02} & -3.935\texttt{E} \cdot \texttt{02} \\ 3.363\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -4.407\texttt{E} \cdot \texttt{02} & -3.935\texttt{E} \cdot \texttt{02} \\ 3.363\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -4.407\texttt{E} \cdot \texttt{02} & -3.935\texttt{E} \cdot \texttt{02} \\ 3.363\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -4.407\texttt{E} \cdot \texttt{02} & -3.935\texttt{E} \cdot \texttt{01} \\ 3.003\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -3.935\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -3.935\texttt{E} \cdot \texttt{01} \\ 3.003\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -3.935\texttt{E} \cdot \texttt{01} \\ 3.003\texttt{E} \cdot \texttt{01} & -3.935\texttt{E} \cdot \texttt{01} \end{bmatrix}$$

同様の方法により、SW 方向、SE 方向、NE 方向のスキャンラインに対して割れ目を抽出した 結果を図 4.4-3~図 4.4-5に、クラックテンソルを算定した結果を表 4.4-1 に示す。計算の都合に より、以降の表では各パラメータの有効数字を下三桁までで表示している。



図 4.4-3 深度 170.2~200.2m において SW 方向のスキャンラインに交わった割れ目



図 4.4-4 深度 170.2~200.2m において SE 方向のスキャンラインに交わった割れ目



図 4.4-5 深度 170.2~200.2m において NE 方向のスキャンラインに交わった割れ目

スキャンライン	NW	\mathbf{SW}	NE	SE
本数(本)	37	32	37	40
区間長 (m)	30.000	30.000	30.000	30.000
$N^{(q)}$ (本/m)	1.233	1.067	1.233	1.333
$ < n \cdot q >$	0.775	0.760	0.825	0.715
< t > (m)	2.241	2.157	2.356	2.441
$< t^2 > (m^2)$	8.168	7.387	8.166	8.133
F_0	6.836	5.662	6.107	7.320
F_{11}	1.089E+00	9.852E-01	8.265E-01	1.400E+00
F_{12}	-2.656E-01	5.219E-01	5.375E-01	-3.257E-01
F_{13}	1.198E-01	3.616E-02	3.066E-01	3.484E-01
F_{22}	9.967E-01	8.329E-01	5.879E-01	1.128E+00
F_{23}	4.072E-01	-1.934E-01	4.336E-01	4.755E-01
F ₃₃	4.750E+00	3.844E+00	4.693E+00	4.792E+00
F_{1111}	5.672E-01	5.442E-01	3.786E-01	8.056E-01
F ₁₁₂₂	2.215E-01	2.220E-01	1.894E-01	3.666E-01
F ₁₁₃₃	3.003E-01	2.190E-01	2.585E-01	2.278E-01
F ₁₁₁₂	-9.943E-02	1.423E-01	2.296E-01	-9.502E-02
F ₁₁₂₃	2.455E-02	-7.172E-02	3.500E-02	3.463E-02
F ₁₁₃₁	-2.985E-02	-2.525E-02	8.819E-03	1.102E-01
F ₂₂₂₂	4.389E-01	4.032E-01	1.906E-01	5.318E-01
F ₂₂₃₃	3.363E-01	2.077E-01	2.079E-01	2.294E-01
F ₂₂₁₂	-1.221E-01	2.163E-01	1.688E-01	-2.076E-01
F ₂₂₂₃	6.260E-02	-6.582E-02	4.797E-02	5.392E-02
F ₂₂₃₁	-4.117E-02	-7.487E-02	1.554E-02	-7.824E-03
F_{3333}	4.114E+00	3.417E+00	4.226E+00	4.335E+00
F ₃₃₁₂	-4.407E-02	1.633E-01	1.390E-01	-2.304E-02
F ₃₃₂₃	3.200E-01	-5.591E-02	3.506E-01	3.870E-01
F_{3331}	1.908E-01	1.363E-01	2.823E-01	2.460E-01

表 4.4-1 深度 170.2~200.2m におけるクラックテンソルの算定

(2) 深度 170.2~200.2m における岩盤等級ごとの算定

換気立坑の地質記載シートには、一掘進長ごとに電中研式の岩盤等級が記載されている。そして、地質記載シートに記載された岩盤等級を整理した結果、換気立坑の深度 170.2~200.2mの区間では、CL-CM 級、CL-CM-CH 級、CM-CH 級、CM-CH-B 級、CH 級、CH-B 級に分類されることがわかった。なお、CL-CM-CH 級とは、一掘進長ごとに行っている壁面観察において、CL 級、CM 級、CH 級の3つの岩盤等級に判断された場所であることを示している。

図 4.3-2に示された手順に基づいて、岩盤等級ごとに割れ目の走向・傾斜や NW 方向のスキャンラインに交わった割れ目を集計しなおして、深度 170.2~200.2m における各方向のスキャンラインの岩盤等級ごとの割れ目の密度、トレース長の平均値やクラックテンソルを算定した。算定した結果を表 4.4-2~表 4.5-5 に示す。

岩盤等級	CL-CM-CH	CM-CH-B	СН	CH-B
本数(本)	11	7	18	1
区間長 (m)	10.000	5.000	10.000	5.000
$N^{(q)}$ (本/m)	1.100	1.400	1.800	0.200
$ < n \cdot q >$	0.766	0.856	0.773	0.342
< t > (m)	2.942	2.098	1.817	3.149
$< t^2 > (m^2)$	14.235	6.984	4.823	9.916
F_0	8.191	6.412	7.282	2.169
F_{11}	1.216E+00	7.097E-01	1.091E+00	1.713E+00
F ₁₂	3.324E-01	-2.936E-01	-7.424E-01	5.897E-01
F ₁₃	-2.322E-01	8.968E-01	1.154E-01	-6.592E-01
F ₂₂	1.396E+00	6.563E-01	1.097E+00	2.030E-01
F_{23}	-3.262E-01	9.296E-01	7.006E-01	-2.270E-01
F ₃₃	5.579E+00	5.046E+00	5.094E+00	2.538E-01
F_{1111}	6.968E-01	3.640E-01	4.506E-01	1.352E+00
F ₁₁₂₂	1.720E-01	1.686E-01	2.873E-01	1.603E-01
F_{1133}	3.470E-01	1.771E-01	3.535E-01	2.003E-01
F_{1112}	1.599E-01	-2.377E-01	-2.864E-01	4.655E-01
F_{1123}	-2.140E-02	-6.865E-02	1.291E-01	-1.792E-01
F_{1131}	1.152E-01	1.597E-01	-1.014E-01	-5.204E-01
F_{2222}	6.860E-01	1.596E-01	5.143E-01	1.900E-02
F_{2233}	5.375E-01	3.282E-01	2.949E-01	2.375E-02
F_{2212}	2.079E-01	-1.127E-01	-3.408E-01	5.519E-02
F_{2223}	-2.000E-01	1.065E-01	2.027E-01	-2.125E-02
F ₂₂₃₁	-2.673E-03	7.174E-02	-1.089E-01	-6.170E-02
F_{3333}	4.695E+00	4.541E+00	4.446E+00	2.969E-02
F_{3312}	-3.544E-02	5.687E-02	-1.152E-01	6.898E-02
F_{3323}	-1.049E-01	8.918E-01	3.688E-01	-2.655E-02
F ₃₃₃₁	-3.448E-01	6.654E-01	3.258E-01	-7.712E-02

表 4.4-2 NW 方向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定

岩盤等級	CL-CM	CM-CH	СН	CH-B
本数(本)	6	6	16	4
区間長 (m)	5.000	5.000	15.000	5.000
$N^{(q)}$ (本/m)	1.200	1.200	1.067	0.800
$ < n \cdot q >$	0.922	0.886	0.691	0.606
< t > (m)	2.598	1.942	2.487	0.495
$< t^2 > (m^2)$	8.920	4.486	9.682	0.257
F_0	5.261	3.685	7.083	0.808
F_{11}	5.077E-01	3.718E-01	1.433E+00	2.317E-01
F_{12}	2.578E-01	2.986E-01	4.819E-01	2.184E-01
F_{13}	1.197E-01	1.371E-01	2.512E-01	-1.460E-01
F ₂₂	2.448E-01	2.580E-01	1.320E+00	2.074E-01
F_{23}	-5.708E-01	2.774E-01	-8.634E-02	-1.412E-01
F ₃₃	4.508E+00	3.055E+00	4.330E+00	3.690E-01
F_{1111}	1.323E-01	1.713E-01	9.631E-01	9.502E-02
F ₁₁₂₂	2.909E-02	9.781E-02	2.782E-01	8.772E-02
F_{1133}	3.463E-01	1.027E-01	1.918E-01	4.893E-02
F_{1112}	5.864E-02	1.293E-01	3.361E-02	9.115E-02
F_{1123}	7.767E-03	-6.527E-02	-2.146E-02	-5.242E-02
F_{1131}	8.223E-02	-9.051E-02	8.370E-02	-5.620E-02
F ₂₂₂₂	1.922E-02	5.713E-02	7.785E-01	8.189E-02
F ₂₂₃₃	1.965E-01	1.030E-01	2.632E-01	3.783E-02
F ₂₂₁₂	1.795E-02	7.434E-02	2.930E-01	8.465E-02
F ₂₂₂₃	-4.520E-02	-2.791E-02	-1.993E-02	-4.647E-02
F ₂₂₃₁	-1.781E-02	-4.528E-02	-3.788E-02	-4.921E-02
F_{3333}	3.966E+00	2.850E+00	3.875E+00	2.823E-01
F_{3312}	1.812E-01	9.497E-02	1.553E-01	4.263E-02
F_{3323}	-5.334E-01	3.706E-01	-4.495E-02	-4.232E-02
F_{3331}	5.526E-02	2.729E-01	2.053E-01	-4.060E-02

表 4.4-3 SW 方向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定
岩盤等級	CL-CM	CM-CH-B	СН	CH-B
本数(本)	6	8	19	4
区間長 (m)	5.000	5.000	15.000	5.000
$N^{(q)}$ (本/m)	1.200	1.600	1.267	0.800
$ < n \cdot q >$	0.929	0.725	0.850	0.748
< t > (m)	3.926	1.169	2.672	0.876
$< t^2 > (m^2)$	16.496	1.679	9.820	0.789
F_0	6.393	3.733	6.455	1.136
F_{11}	4.705E-01	7.871E-01	6.576E-01	2.679E-01
F_{12}	2.794E-01	5.279E-01	5.103E-01	1.025E-01
F_{13}	3.743E-01	2.426E-01	1.806E-01	1.292E-01
F ₂₂	3.882E-01	3.962E-01	7.493E-01	4.063E-02
F ₂₃	4.010E-01	3.513E-02	6.431E-01	8.021E-02
F ₃₃	5.534E+00	2.550E+00	5.048E+00	8.272E-01
F_{1111}	6.094E-02	4.339E-01	1.793E-01	2.212E-01
F ₁₁₂₂	3.406E-02	2.118E-01	1.895E-01	2.942E-02
F_{1133}	3.755E-01	1.414E-01	2.888E-01	1.729E-02
F ₁₁₁₂	4.303E-02	3.006E-01	1.436E-01	8.063E-02
F ₁₁₂₃	3.213E-02	9.198E-03	4.959E-02	4.610E-03
F_{1131}	7.367E-02	2.083E-02	-3.332E-02	1.071E-02
F ₂₂₂₂	3.852E-02	1.099E-01	2.954E-01	3.952E-03
F ₂₂₃₃	3.156E-01	7.452E-02	2.644E-01	7.257E-03
F ₂₂₁₂	2.270E-02	1.511E-01	2.174E-01	1.076E-02
F ₂₂₂₃	2.825E-02	2.934E-03	8.625E-02	1.125E-03
F ₂₂₃₁	-5.477E-03	7.387E-03	2.576E-02	2.163E-03
F ₃₃₃₃	4.843E+00	2.334E+00	4.495E+00	8.026E-01
F ₃₃₁₂	2.136E-01	7.619E-02	1.493E-01	1.107E-02
F ₃₃₂₃	3.406E-01	2.300E-02	5.073E-01	7.447E-02
F_{3331}	3.061E-01	2.143E-01	1.882E-01	1.163E-01

表 4.4-4 NE 方向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定

岩盤等級	CL-CM-CH	CM-CH-B	СН	CH-B
本数(本)	13	7	17	3
区間長 (m)	10.000	5.000	10.000	5.000
$N^{(q)}$ (本/m)	1.300	1.400	1.700	0.600
$ < n \cdot q >$	0.907	0.484	0.776	0.076
< t > (m)	3.553	1.755	2.063	1.369
$< t^2 > (m^2)$	13.543	5.314	6.245	1.972
F_0	6.436	10.322	7.813	13.359
F ₁₁	5.157E-01	3.250E+00	9.096E-01	1.080E+01
F ₁₂	3.188E-01	-2.112E+00	-5.488E-01	9.019E-01
F ₁₃	2.012E-01	-3.359E-01	6.980E-01	9.189E-01
F ₂₂	3.880E-01	2.789E+00	1.348E+00	2.474E+00
F ₂₃	4.949E-01	1.102E+00	3.752E-01	1.550E-01
F ₃₃	5.532E+00	4.284E+00	5.556E+00	8.348E-02
F_{1111}	1.780E-01	2.139E+00	2.800E-01	8.830E+00
F_{1122}	1.167E-01	8.866E-01	3.396E-01	1.904E+00
F_{1133}	2.211E-01	2.242E-01	2.900E-01	6.850E-02
F_{1112}	1.411E-01	-7.758E-01	-2.388E-01	1.075E+00
F_{1123}	8.253E-02	1.310E-01	-4.587E-02	1.491E-01
F_{1131}	9.598E-02	-3.666E-02	1.212E-01	7.533E-01
F ₂₂₂₂	8.739E-02	1.577E+00	7.056E-01	5.555E-01
F ₂₂₃₃	1.840E-01	3.247E-01	3.027E-01	1.430E-02
F ₂₂₁₂	9.288E-02	-1.126E+00	-2.368E-01	-1.912E-01
F ₂₂₂₃	6.781E-02	3.963E-01	-5.141E-02	3.726E-03
F ₂₂₃₁	5.231E-02	-2.131E-01	-1.820E-02	1.590E-01
F_{3333}	5.127E+00	3.735E+00	4.963E+00	6.759E-04
F_{3312}	8.481E-02	-2.093E-01	-7.327E-02	1.848E-02
F ₃₃₂₃	3.446E-01	5.751E-01	4.725E-01	2.191E-03
F_{3331}	5.295E-02	-8.613E-02	5.949E-01	6.626E-03

表 4.4-5 SE 方向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定

(3) 深度 459.8~495.2m

深度 459.8~500.2m において割れ目詳細シートに記載された走向・傾斜を集計した。その結果、 走向・傾斜が記載されている割れ目は 583 本であった。深度 459.8~500.2m における割れ目のス テレオネットを図 4.4-6に示す。



図 4.4-6 換気立坑の深度 459.8~500.2m における割れ目のステレオネット(下半球投影)

そして、**図 4.4-6**の 583 本の割れ目の走向・傾斜から得られた構造テンソル N_{ij} と N_{ijkl}は、以下のようになった。

$$N_{ij} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & N_{13} \\ N_{22} & N_{23} \\ sym. & N_{33} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} 4.862 \text{E} \cdot 01 & -1.287 \text{E} \cdot 01 & 7.521 \text{E} \cdot 02 \\ 4.025 \text{E} \cdot 01 & -7.667 \text{E} \cdot 02 \\ sym. & 1.113 \text{E} \cdot 01 \end{bmatrix}$$

式 (4.4-10)

$$N_{ijkl} = \begin{bmatrix} N_{1111} & N_{1122} & N_{1133} & N_{1112} & N_{1123} & N_{1131} \\ N_{2222} & N_{2233} & N_{2212} & N_{2223} & N_{2231} \\ N_{3333} & N_{3312} & N_{3323} & N_{3331} \\ N_{1212} & N_{1223} & N_{1231} \\ N_{2323} & N_{2331} \\ sym. & & N_{3131} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{\vec{x}} \quad \mathbf{\vec{x}} \quad$$

つぎに、NW 方向の壁面に対して坑道軸方向に平行な方向にスキャンラインを設定したとき、 スキャンラインに交わった割れ目を図 4.4-7に示す。なお、クラックテンソルの算定では、深度 459.8~495.2mの一般部断面区間における割れ目を対象とした。



図 4.4-7 深度 459.8~500.2m において NW 方向のスキャンラインに交わった割れ目

図 4.4-7より、交わった割れ目の数は 14 本であることから、深度 459.8~495.2m の割れ目の密度 N^(g)は、

$$N^{(q)} = 0.400 \ (\text{$/$m$})$$
 式 (4.4-12)

となった。

また、スキャンラインに交わった割れ目の内、走向・傾斜が記載されているのは13本、最小自 乗法により方向を求めたものが1本であった。そして、それらの単位法線ベクトルnと、スキャ ンラインの単位法線ベクトルqとの内積の絶対値の平均値 $\langle |n \cdot q| \rangle$ は、以下のようになった。

また、スキャンラインに交わった 14本の割れ目のトレース長の平均値 $\langle t \rangle$ と、トレース長の2乗の平均値 $\langle t^2 \rangle$ は、以下のようになった。

$$\langle t \rangle = 2.0269$$
 (m) 式 (4.4-14)
 $\langle t^2 \rangle = 6.0453$ (m²) 式 (4.4-15)

式(3.1-12)、式(4.4-12)~式(4.4-15)より、深度 459.8~495.2mの F₀は、以下のようになった。

$$F_0 = 6.617$$
 式 (4.4-16)

そして、図 4.3-1のフローにより求めた深度 459.8~495.2mの NW 方向のクラックテンソル F_{ij} 、 F_{iikl} は、以下のようになった。

$$\begin{split} F_{ij} = \begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} & F_{13} \\ F_{22} & F_{23} \\ sym. & F_{33} \end{bmatrix} & \\ & \\ \Xi & (4.4-17) \\ = \begin{bmatrix} 2.165 \pm 00 & -1.154 \pm 00 & 7.520 \pm 01 \\ & 4.064 \pm 00 & -2.649 \pm 01 \\ & sym. & 3.877 \pm 01 \end{bmatrix} \end{split}$$

$$F_{ijkl} = \begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1133} & F_{1112} & F_{1123} & F_{1131} \\ F_{2222} & F_{2233} & F_{2212} & F_{2223} & F_{2231} \\ F_{3333} & F_{3312} & F_{3323} & F_{3331} \\ F_{1212} & F_{1223} & F_{1231} \\ F_{2323} & F_{2331} \\ sym. & F_{3131} \end{bmatrix} \qquad \vec{\mathbf{t}} (4.4-18)$$
$$= \begin{bmatrix} 1.127\text{E}+00 & 9.122\text{E}\cdot01 & 1.267\text{E}\cdot01 & 5.574\text{E}\cdot01 & -1.865\text{E}\cdot01 & 3.204\text{E}\cdot01 \\ 2.933\text{E}+00 & 2.179\text{E}\cdot01 & -5.171\text{E}\cdot01 & -5.123\text{E}\cdot02 & 3.658\text{E}\cdot01 \\ 4.311\text{E}\cdot02 & -7.903\text{E}\cdot02 & -2.715\text{E}\cdot02 & 6.583\text{E}\cdot02 \\ 9.122\text{E}\cdot01 & 3.658\text{E}\cdot01 & -1.865\text{E}\cdot01 \\ 2.179\text{E}\cdot01 & -7.903\text{E}\cdot02 \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & \\ & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & \\ \end{array}$$

同様の方法により、SW 方向、SE 方向、NE 方向のスキャンラインに対して割れ目を抽出した 結果を図 4.4-8~図 4.4-10に、クラックテンソルを算定した結果を表 4.4-6 に示す。



図 4.4-8 深度 459.8~500.2m において SW 方向のスキャンラインに交わった割れ目



図 4.4-9 深度 459.8~500.2m において SE 方向のスキャンラインに交わった割れ目



図 4.4-10 深度 459.8~500.2m において NE 方向のスキャンラインに交わった割れ目

スキャンライン	NW	SW	NE	SE
本数(本)	14	21	20	23
区間長 (m)	35.000	35.000	35.000	35.000
$N^{(q)}$ (本/m)	0.400	0.600	0.571	0.657
$ < n \cdot q >$	0.212	0.499	0.360	0.332
< t > (m)	2.027	1.917	3.188	2.147
$< t^2 > (m^2)$	6.045	9.060	14.828	9.758
F_0	6.617	6.692	8.705	10.600
F_{11}	2.165E+00	2.425E+00	3.973E+00	5.073E+00
F_{12}	-1.154E+00	4.666E-01	-6.338E-01	-1.595E+00
F_{13}	7.520E-01	4.602E-01	1.621E+00	2.807E-01
F ₂₂	4.064E+00	1.924E+00	3.228E+00	3.496E+00
F_{23}	-2.649E-01	-8.983E-02	-7.307E-01	8.904E-02
F_{33}	3.877E-01	2.343E+00	1.505E+00	2.030E+00
F_{1111}	1.127E+00	1.456E+00	2.398E+00	3.564E+00
F ₁₁₂₂	9.122E-01	6.365E-01	9.894E-01	1.180E+00
F_{1133}	1.267E-01	3.329E-01	5.854E-01	3.297E-01
F ₁₁₁₂	-5.574E-01	7.754E-02	-2.717E-01	-1.325E+00
F ₁₁₂₃	-1.865E-01	-1.077E-01	-2.161E-01	-1.522E-01
F ₁₁₃₁	3.204E-01	7.013E-02	9.931E-01	3.979E-01
F ₂₂₂₂	2.933E+00	8.830E-01	1.981E+00	1.852E+00
F ₂₂₃₃	2.179E-01	4.040E-01	2.574E-01	4.640E-01
F ₂₂₁₂	-5.171E-01	1.715E-01	-3.184E-01	-7.195E-02
F_{2223}	-5.123E-02	-1.487E-01	-5.539E-01	-2.302E-02
F ₂₂₃₁	3.658E-01	1.131E-01	2.541E-01	5.588E-03
F ₃₃₃₃	4.311E-02	1.606E+00	6.618E-01	1.237E+00
F ₃₃₁₂	-7.903E-02	2.176E-01	-4.373E-02	-1.981E-01
F_{3323}	-2.715E-02	1.665E-01	3.925E-02	2.643E-01
F ₃₃₃₁	6.583E-02	2.769E-01	3.740E-01	-1.228E-01

表 4.4-6 深度 459.8~495.2m におけるクラックテンソルの算定

(4) 深度 459.8~495.2m における岩盤等級ごとの算定

地質記載シートに記載された岩盤等級を整理した結果、換気立坑の深度 459.8~495.2mの区間では、一部 B 級を含む CH-B 級が主体であることから、この区間は全長 CH-B 級であると判断した。 したがって、上記で算定した結果が、岩盤等級ごとの算定結果となる。深度 459.8~495.2m の各 スキャンラインにおける岩盤等級ごとの割れ目の密度、トレース長の平均値やクラックテンソル の算定結果を表 4.4-7に示す。

表 4.4-7 各方向のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定

スキャンライン	NW	SW	NE	SE
岩盤等級	CH-B	CH-B	CH-B	CH-B
本数(本)	14	21	20	23
区間長 (m)	35.000	35.000	35.000	35.000
$N^{(q)}$ (本/m)	0.400	0.600	0.571	0.657
$ < n \cdot q >$	0.212	0.499	0.360	0.332
< t > (m)	2.027	1.917	3.188	2.147
$< t^2 > (m^2)$	6.045	9.060	14.828	9.758
F_0	6.617	6.692	8.705	10.600
F_{11}	2.165E+00	2.425E+00	3.973E+00	5.073E+00
F ₁₂	-1.154E+00	4.666E-01	-6.338E-01	-1.595E+00
F ₁₃	7.520E-01	4.602E-01	1.621E+00	2.807E-01
F ₂₂	4.064E+00	1.924E+00	3.228E+00	3.496E+00
F_{23}	-2.649E-01	-8.983E-02	-7.307E-01	8.904E-02
F_{33}	3.877E-01	2.343E+00	1.505E+00	2.030E+00
F_{1111}	1.127E+00	1.456E+00	2.398E+00	3.564E+00
F_{1122}	9.122E-01	6.365E-01	9.894E-01	1.180E+00
F_{1133}	1.267E-01	3.329E-01	5.854E-01	3.297E-01
F ₁₁₁₂	-5.574E-01	7.754E-02	-2.717E-01	-1.325E+00
F ₁₁₂₃	-1.865E-01	-1.077E-01	-2.161E-01	-1.522E-01
F ₁₁₃₁	3.204E-01	7.013E-02	9.931E-01	3.979E-01
F_{2222}	2.933E+00	8.830E-01	1.981E+00	1.852E+00
F ₂₂₃₃	2.179E-01	4.040E-01	2.574E-01	4.640E-01
F_{2212}	-5.171E-01	1.715E-01	-3.184E-01	-7.195E-02
F_{2223}	-5.123E-02	-1.487E-01	-5.539E-01	-2.302E-02
F_{2231}	3.658E-01	1.131E-01	2.541E-01	5.588E-03
F ₃₃₃₃	4.311E-02	1.606E+00	6.618E-01	1.237E+00
F ₃₃₁₂	-7.903E-02	2.176E-01	-4.373E-02	-1.981E-01
F ₃₃₂₃	-2.715E-02	1.665E-01	3.925E-02	2.643E-01
F ₃₃₃₁	6.583E-02	2.769E-01	3.740E-01	-1.228E-01

4.4.2 深度 500m 予備ステージ

(1) 深度 500m 予備ステージ

深度 500m 予備ステージの割れ目詳細シートを集計した結果、走向・傾斜が記載されている割れ 目は 443 本であった。深度 500m 予備ステージにおける割れ目のステレオネットを図 4.4-11に示 す。



図 4.4-11 深度 500m 予備ステージにおける割れ目のステレオネット(下半球投影)

そして、**図 4.4-11**の 443 本の割れ目の走向・傾斜から得られた構造テンソル N_{ij} と N_{ijkl} は、以下 のようになった。

$$N_{ij} = \begin{bmatrix} 4.917 \text{E} \cdot 01 & -1.479 \text{E} \cdot 01 & 3.424 \text{E} \cdot 02 \\ 4.002 \text{E} \cdot 01 & -7.025 \text{E} \cdot 02 \\ sym. & 1.082 \text{E} \cdot 01 \end{bmatrix} \qquad \vec{\text{zt}} \quad (4.4-19)$$

$$N_{ijkl} = \begin{bmatrix} 3.435 \text{E} \cdot 01 & 1.147 \text{E} \cdot 01 & 3.344 \text{E} \cdot 02 & -6.192 \text{E} \cdot 02 & -1.711 \text{E} \cdot 02 & 1.743 \text{E} \cdot 02 \\ 2.537 \text{E} \cdot 01 & 3.175 \text{E} \cdot 02 & -7.643 \text{E} \cdot 02 & -4.378 \text{E} \cdot 02 & 1.953 \text{E} \cdot 02 \\ 4.298 \text{E} \cdot 02 & -9.592 \text{E} \cdot 03 & -9.365 \text{E} \cdot 03 & -2.717 \text{E} \cdot 03 \\ 1.147 \text{E} \cdot 01 & 1.953 \text{E} \cdot 02 & -1.711 \text{E} \cdot 02 \\ 3.175 \text{E} \cdot 02 & -9.592 \text{E} \cdot 03 \\ 3.344 \text{E} \cdot 02 \end{bmatrix}$$
 $\overrightarrow{\textbf{x}}$ (4.4-20)

主立坑側から換気立坑側に向いたとき、左側壁の中間の高さに対して坑道軸方向に平行な方向 にスキャンラインを設定したとき、スキャンラインに交わった割れ目を図 4.4-12に示す。



図 4.4-12 深度 500m 予備ステージにおいて左側壁のスキャンラインに交わった割れ目

図 4.4-12より、スキャンラインに交わった割れ目の数は 86 本であり、スキャンラインの延長が 30.6m であることから、深度 500m 予備ステージの割れ目の密度 N^(q)は、

となった。

また、スキャンラインに交わった 86 本の割れ目のうち、走向・傾斜が記載されているものは 54 本、最小自乗法により方向を求めたものが 18 本、方向が不明なものが 14 本であった。そして、 それらの走向・傾斜から単位法線ベクトル n を求めて、スキャンラインの単位法線ベクトル q と の内積の絶対値 $|n \cdot q|$ を算定すると、その平均値 $\langle |n \cdot q| \rangle$ は、以下のようになった。

$$\left\langle \left| \boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{q} \right| \right\rangle = 0.6632 \qquad \qquad \boldsymbol{\vec{\pi}} \quad (4.4-22)$$

そして、トレース長の平均値 $\langle t \rangle$ とトレース長の2乗の平均値 $\langle t^2 \rangle$ は、以下のようになった。

$$\langle t \rangle = 2.076$$
 (m) 式 (4.4-23)

$$\langle t^2 \rangle = 5.291$$
 (m²) 式 (4.4-24)

式(3.1-12)、式(4.4-21)~式(4.4-24)より、深度 500m 予備ステージの F_0 は、以下のようになった。

$$F_0 = 10.652$$
 式 (4.4-25)

そして、図 4.3-1のフローにより求めた深度 500m 予備ステージの左側壁のクラックテンソル F_{ij} 、 F_{ijkl} は、以下のようになった。

		$F_{ij} = \begin{bmatrix} 6.10\\ s \end{bmatrix}$	97E+00 6.1 3.9 sym.	178E-01 2 934E+00 -	2.187E-01 8.380E-01 3.108E-01		式	(4.4-26)
$F_{ijkl} =$	[4.883E+00 <i>sym</i> .	9.707E-01 2.699E+00	2.536E-01 2.639E-01 9.334E-02	3.094E-01 2.875E-01 2.093E-02 9.707E-01	-1.504E-01 -5.768E-01 -1.108E-01 -2.395E-03 2.639E-01	1.890E-01 -2.395E-03 3.204E-02 -1.504E-01 2.093E-02 2.536E-01	式	(4.4-27)

同様の方法により、アーチ左側、アーチ右側、右側壁のスキャンラインに対して割れ目を抽出 した結果を図 4.4-13~図 4.4-15に、クラックテンソルを算定した結果を表 4.4-8 に示す。



図 4.4-13 深度 500m 予備ステージにおいてアーチ左側のスキャンラインに交わった割れ目



図 4.4-14 深度 500m 予備ステージにおいてアーチ右側のスキャンラインに交わった割れ目



図 4.4-15 深度 500m 予備ステージにおいて右側壁のスキャンラインに交わった割れ目

スキャンライン	左側壁	アーチ左側	右側壁	アーチ右側
本数(本)	72	47	55	37
区間長 (m)	30.600	30.000	30.000	30.000
$N^{(q)}$ (本/m)	2.353	1.567	1.833	1.233
$ $ < $ $ $n \cdot q $ >	0.663	0.600	0.638	0.640
< t > (m)	2.076	3.123	1.971	2.664
$< t^2 > (m^2)$	5.291	11.850	4.946	9.271
F_0	10.652	11.670	8.499	7.899
F_{11}	6.107E+00	7.136E+00	4.336E+00	3.289E+00
F ₁₂	6.178E-01	5.941E-01	5.046E-01	8.890E-01
F ₁₃	2.187E-01	3.060E-01	-1.018E-01	-3.232E-01
F ₂₂	3.934E+00	2.902E+00	3.504E+00	3.223E+00
F_{23}	-8.380E-01	-4.900E-01	-2.156E-01	-2.721E-01
F_{33}	6.108E-01	1.632E+00	6.594E-01	1.387E+00
F_{1111}	4.883E+00	5.516E+00	3.032E+00	2.103E+00
F ₁₁₂₂	9.707E-01	1.045E+00	1.078E+00	9.106E-01
F ₁₁₃₃	2.536E-01	5.751E-01	2.262E-01	2.757E-01
F ₁₁₁₂	3.094E-01	1.764E-01	1.204E-01	3.723E-01
F ₁₁₂₃	-1.504E-01	-2.426E-01	-6.998E-02	-1.414E-01
F ₁₁₃₁	1.890E-01	2.312E-01	-1.746E-02	-9.981E-03
F ₂₂₂₂	2.699E+00	1.468E+00	2.261E+00	2.084E+00
F ₂₂₃₃	2.639E-01	3.895E-01	1.649E-01	2.286E-01
F ₂₂₁₂	2.875E-01	3.779E-01	3.152E-01	4.559E-01
F ₂₂₂₃	-5.768E-01	-5.045E-02	-1.401E-01	-2.093E-01
F ₂₂₃₁	-2.395E-03	-1.112E-03	-4.771E-02	-5.084E-02
F ₃₃₃₃	9.334E-02	6.676E-01	2.682E-01	8.827E-01
F ₃₃₁₂	2.093E-02	3.990E-02	6.900E-02	6.083E-02
F ₃₃₂₃	-1.108E-01	-1.969E-01	-5.511E-03	7.854E-02
F ₃₃₃₁	3.204E-02	7.584E-02	-3.663E-02	-2.623E-01

表 4.4-8 深度 500m 予備ステージにおけるクラックテンソルの算定

(2) 深度 500m 予備ステージにおける岩盤等級ごとの算定

地質記載シートに記載された岩盤等級を整理した結果、深度 500m 予備ステージでは、D-CL-CM 級や CL-CM-CH 級、CM-CH-B 級のように、D 級、CL 級、CM 級、CH 級、B 級の各等級が組み 合わさった岩盤等級となっている。なお、CL-CM-CH 級とは、一掘進長ごとに行っている壁面観 察において、CL 級、CM 級、CH 級の3つの岩盤等級に判断された場所であることを示している。

図 4.3-2に示された手順に基づいて、左側壁のスキャンラインにおける岩盤等級ごとに割れ目の 走向・傾斜や各スキャンラインに交わった割れ目を集計しなおして、深度 500m 予備ステージの 各スキャンラインにおける岩盤等級ごとの割れ目の密度、トレース長の平均値やクラックテンソ ルを算定した。算定した結果を表 4.4-9~表 4.4-12 に示す。

表 4.4-9 左側壁のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定

岩盤等級	D-CL-CM	D-CL-CM-CH	CL-CM-CH-B	СМ-СН-В	CH-B
本数(本)	33	20	14	4	3
区間長 (m)	10.000	5.000	5.000	5.000	5.000
$N^{(q)}$ (本/m)	3.300	4.000	2.800	0.800	0.600
$ < n \cdot q >$	0.605	0.684	0.693	0.615	0.647
< t > (m)	1.818	2.448	1.968	2.444	1.068
$< t^2 > (m^2)$	4.394	6.713	5.093	6.533	1.411
F_0	15.536	18.881	12.323	4.096	1.444
<i>F</i> ₁₁	7.989E+00	1.194E+01	6.139E+00	3.242E+00	7.341E-01
<i>F</i> ₁₂	-1.916E-01	1.331E+00	2.383E+00	9.413E-02	1.799E-01
F ₁₃	5.422E-01	-1.279E+00	5.120E-01	6.727E-01	2.130E-01
F_{22}	6.562E+00	5.839E+00	3.957E+00	6.835E-01	6.272E-01
F_{23}	-1.423E+00	-1.862E+00	-4.439E-01	-1.036E-01	-3.125E-02
F ₃₃	9.853E-01	1.102E+00	4.661E-01	1.704E-01	8.268E-02
F_{1111}	5.981E+00	1.058E+01	4.850E+00	2.792E+00	4.103E-01
F_{1122}	1.582E+00	1.164E+00	9.488E-01	3.293E-01	2.732E-01
F_{1133}	4.250E-01	1.902E-01	3.406E-01	1.205E-01	5.054E-02
F_{1112}	3.300E-01	-1.181E-01	8.682E-01	3.404E-01	9.455E-02
F_{1123}	-3.443E-01	-2.086E-01	-6.782E-02	9.927E-03	1.494E-03
F_{1131}	2.874E-01	-7.717E-01	6.046E-01	5.342E-01	1.328E-01
F ₂₂₂₂	4.547E+00	4.042E+00	2.918E+00	3.138E-01	3.290E-01
F ₂₂₃₃	4.326E-01	6.331E-01	9.031E-02	4.044E-02	2.497E-02
F ₂₂₁₂	-4.936E-01	1.298E+00	1.465E+00	-2.307E-01	8.539E-02
F ₂₂₂₃	-9.332E-01	-1.267E+00	-3.577E-01	-1.037E-01	-3.214E-02
F ₂₂₃₁	1.766E-01	-4.117E-01	-1.644E-01	1.069E-01	6.117E-02
F_{3333}	1.277E-01	2.791E-01	3.522E-02	9.399E-03	7.167E-03
F ₃₃₁₂	-2.800E-02	1.503E-01	5.003E-02	-1.548E-02	5.810E-07
F_{3323}	-1.450E-01	-3.864E-01	-1.839E-02	-9.763E-03	-6.004E-04
F ₃₃₃₁	7.817E-02	-9.572E-02	7.179E-02	3.161E-02	1.900E-02

岩盤等級	D-CL-CM	D-CL-CM-CH	CM-CH-B	CH-B
本数 (本)	19	17	10	1
区間長 (m)	10.000	5.000	10.000	5.000
$N^{(q)}$ (本/m)	1.900	3.400	1.000	0.200
$ < n \cdot q >$	0.449	0.673	0.732	0.902
< t > (m)	3.139	3.188	3.045	2.502
$< t^2 > (m^2)$	12.159	11.772	11.956	6.260
F_0	19.290	21.978	6.318	0.654
<i>F</i> ₁₁	1.132E+01	1.436E+01	3.657E+00	4.530E-01
F_{12}	-1.283E+00	2.302E+00	9.327E-01	2.615E-01
F_{13}	1.422E+00	-1.362E+00	4.143E-01	1.500E-01
F_{22}	3.988E+00	5.958E+00	1.845E+00	1.510E-01
F_{23}	-2.364E+00	-3.685E-01	3.210E-01	8.659E-02
F_{33}	3.980E+00	1.663E+00	8.159E-01	4.966E-02
F_{1111}	8.548E+00	1.102E+01	3.024E+00	3.139E-01
F ₁₁₂₂	1.627E+00	2.381E+00	3.814E-01	1.046E-01
F_{1133}	1.147E+00	9.516E-01	2.512E-01	3.441E-02
F_{1112}	-1.143E+00	6.128E-01	6.853E-01	1.812E-01
F_{1123}	-9.074E-01	-4.205E-01	9.484E-02	6.001E-02
F_{1131}	7.622E-01	-1.216E+00	6.079E-01	1.039E-01
F ₂₂₂₂	1.677E+00	3.226E+00	1.081E+00	3.488E-02
F ₂₂₃₃	6.835E-01	3.516E-01	3.828E-01	1.147E-02
F ₂₂₁₂	1.063E-01	1.379E+00	1.631E-01	6.041E-02
F_{2223}	-5.813E-01	8.177E-02	1.741E-01	2.000E-02
F ₂₂₃₁	3.266E-01	-1.455E-01	-1.685E-01	3.465E-02
F_{3333}	2.149E+00	3.596E-01	1.819E-01	3.773E-03
F ₃₃₁₂	-2.467E-01	3.103E-01	8.425E-02	1.987E-02
F_{3323}	-8.757E-01	-2.984E-02	5.207E-02	6.579E-03
F_{3331}	3.331E-01	-3.387E-04	-2.514E-02	1.139E-02

表 4.4-10 アーチ左側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定

岩盤等級	D-CL-CM	D-CL-CM-CH	CM-CH-B	CH-B
本数 (本)	25	16	9	5
区間長 (m)	10.000	5.000	5.000	5.000
$N^{(q)}$ (本/m)	2.500	3.200	1.800	1.000
$ < n \cdot q >$	0.498	0.815	0.744	0.576
< t > (m)	1.581	2.584	1.819	2.233
$< t^2 > (m^2)$	3.093	7.092	4.418	8.294
F_0	11.563	12.696	6.922	7.602
F_{11}	6.576E+00	5.952E+00	3.166E+00	3.379E+00
F_{12}	-1.256E+00	3.091E+00	1.546E+00	1.133E-01
F_{13}	-3.925E-01	-1.817E-01	3.638E-01	-8.228E-02
F ₂₂	4.276E+00	5.880E+00	2.788E+00	3.642E+00
F ₂₃	-5.436E-02	-3.972E-01	-3.299E-01	-5.294E-01
F ₃₃	7.111E-01	8.637E-01	9.688E-01	5.803E-01
F_{1111}	4.790E+00	4.024E+00	2.335E+00	1.758E+00
F ₁₁₂₂	1.518E+00	1.568E+00	6.785E-01	1.267E+00
F ₁₁₃₃	2.683E-01	3.596E-01	1.521E-01	3.543E-01
F ₁₁₁₂	-6.324E-01	1.233E+00	4.508E-01	1.018E-02
F_{1123}	-2.787E-02	-6.821E-02	-8.594E-02	-2.963E-01
F_{1131}	-3.042E-01	6.585E-02	4.685E-01	-2.243E-01
F ₂₂₂₂	2.499E+00	4.009E+00	2.071E+00	2.259E+00
F ₂₂₃₃	2.591E-01	3.028E-01	3.799E-02	1.157E-01
F ₂₂₁₂	-6.813E-01	1.613E+00	1.074E+00	1.248E-01
F ₂₂₂₃	-1.204E-01	-2.104E-01	-2.123E-01	-1.597E-01
F ₂₂₃₁	-9.311E-02	-9.785E-02	-1.232E-01	2.677E-01
F_{3333}	1.837E-01	2.013E-01	7.787E-01	1.103E-01
F ₃₃₁₂	5.803E-02	2.446E-01	2.077E-02	-2.171E-02
F_{3323}	9.396E-02	-1.186E-01	-3.158E-02	-7.344E-02
F_{3331}	4.770E-03	-1.497E-01	1.844E-02	-1.257E-01

表 4.4-11 右側壁のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定

岩盤等級	D-CL-CM	D-CL-CM-CH	CM-CH-B	CH-B
本数(本)	15	14	7	1
区間長 (m)	10.000	5.000	5.000	5.000
$N^{(q)}$ (本/m)	1.500	2.800	1.400	0.200
$ < n \cdot q >$	0.408	0.832	0.710	0.941
< t > (m)	2.469	2.356	3.647	3.009
$< t^2 > (m^2)$	7.979	7.111	16.391	9.057
F_0	13.987	11.962	10.441	0.754
F_{11}	5.178E+00	4.285E+00	6.197E+00	5.142E-01
F ₁₂	-7.595E-01	2.938E+00	1.636E+00	3.340E-01
F_{13}	-1.023E+00	-8.206E-01	5.966E-01	1.081E-01
F_{22}	4.085E+00	7.017E+00	3.308E+00	2.169E-01
F_{23}	-8.215E-03	-5.852E-01	-1.006E+00	7.021E-02
F_{33}	4.724E+00	6.603E-01	9.356E-01	2.273E-02
F_{1111}	3.241E+00	2.380E+00	4.657E+00	3.508E-01
F_{1122}	1.326E+00	1.602E+00	1.151E+00	1.479E-01
F_{1133}	6.110E-01	3.028E-01	3.894E-01	1.551E-02
F_{1112}	-1.082E-01	1.033E+00	5.193E-01	2.278E-01
F_{1123}	-1.962E-01	-3.445E-01	-1.674E-01	4.790E-02
F_{1131}	-1.378E-01	-5.091E-01	8.934E-01	7.375E-02
F ₂₂₂₂	2.281E+00	5.142E+00	1.811E+00	6.239E-02
F ₂₂₃₃	4.775E-01	2.720E-01	3.455E-01	6.539E-03
F ₂₂₁₂	-5.587E-01	1.709E+00	9.048E-01	9.607E-02
F_{2223}	-3.642E-01	-1.682E-01	-6.258E-01	2.020E-02
F ₂₂₃₁	9.344E-02	-1.765E-01	-2.580E-01	3.110E-02
F_{3333}	3.636E+00	8.553E-02	2.006E-01	6.854E-04
F ₃₃₁₂	-9.254E-02	1.956E-01	2.116E-01	1.007E-02
F_{3323}	5.522E-01	-7.240E-02	-2.123E-01	2.117E-03
F_{3331}	-9.782E-01	-1.351E-01	-3.883E-02	3.260E-03

表 4.4-12 アーチ右側のスキャンラインにおける岩盤等級ごとのクラックテンソルの算定

4.5 クラックテンソルの算定のまとめ

4.4において、換気立坑の深度 170.2~200.2m、深度 459.8~500.2m、および深度 500m 予備ステ ージの区間ごとにステレオネットを作成した。また、スキャンラインごとに割れ目の頻度、トレ ース長の平均値、クラックテンソルの算定も行った。これらの結果をまとめると以下のようであ る。

平成 22 年度に作成した換気立坑のステレオネットにおいて、深度 200.2~250.2m では、NW 方 向の走向で高傾斜の割れ目と水平方向の割れ目が卓越しているが、深くなるにしたがって NE 方 向の走向で高傾斜の割れ目の頻度が多くなり、深度 400.2~459.8m では、NE 方向の走向で高傾斜 の割れ目が卓越していることがわかった。また、深度 200m 予備ステージのステレオネットでは、 NW 方向の走向で高傾斜の割れ目と水平方向の割れ目が卓越しているが、深くなるにしたがって NE 方向の走向で高傾斜の割れ目が現れ、深度 400m 予備ステージでは NE 方向の走向で高傾斜の 割れ目が卓越する結果となり、換気立坑と同様の傾向を示した。これに関して、本検討の結果に おいても、深度 170.2~200.2m、深度 459.8~500.2m および深度 500m 予備ステージのステレオネ ットから同様の傾向となることがわかった。

つぎに、平成 22 年度に実施した換気立坑の深度 200.2~459.8m におけるクラックテンソルの算 定結果¹⁾と本検討で得られた結果を合わせて、5m 区間ごとのクラックテンソルのトレース F₀と割 れ目密度の深度方向の分布を整理した。5m 区間ごとのクラックテンソルのトレース F₀と割れ目 密度の深度方向の分布の一覧を図 4.5-1に、各方向のスキャンラインごとの割れ目密度の深度方 向分布と岩盤等級の関係を図 4.5-2~図 4.5-5に示す。同様に、深度 500m 予備ステージにおける 5m 区間ごとのクラックテンソルのトレース F₀と割れ目密度の延長方向の分布の一覧を図 4.5-6 に、各スキャンラインごとの割れ目密度の延長方向分布と岩盤等級の関係を図 4.5-7~図 4.5-10 に示す。

さらに、平成 22 年度に実施した換気立坑の区間ごとおよび水平坑道の坑道ごとにおけるクラックテンソルの算定結果¹⁾と本検討で得られた結果を合わせた割れ目の密度 $N^{(q)}$ 、トレース長の平均値、クラックテンソルのトレース F_0 とスキャンラインの関係を表4.5-1、図4.5-11 および表4.5-2、図 4.5-12 に示す。

換気立坑の割れ目の密度 N^(q)に関して、区間ごとに集計した結果の平均値は、0.557~1.855(本/m) となっている。これに関して、本検討の深度 170.2~200.2mの N^(q)は 1.217(本/m) となり、 平成 22 年度の算定結果(深度 200~460m)の平均値の範囲内にあるが、深度 459.8~495.2mの N^(q)は 0.557(本/m) となり、平成 22 年度の算定結果(深度 200~460m)の平均値よりも小さくな った。換気立坑の割れ目の密度 N^(q)は、459.8m 以深で小さくなる傾向を示した。

換気立坑のトレース長の平均値 $\langle t \rangle$ に関して、区間ごとに集計した結果の平均値は、1.695~2.540 (m) となっている。本検討の深度 170.2~200.2m のトレース長の平均値 $\langle t \rangle$ は 2.299 (m)、深度 459.8~495.2m のトレース長の平均値 $\langle t \rangle$ は 2.320 (m) となり、平成 22 年度の算定結果(深度 200 ~460m)の平均値の範囲内の値となった。なお、深度 459.8~495.2m の NE 方向のスキャンライ ンではトレース長の平均値 $\langle t \rangle$ が 3.188 と卓越しているが、これは同スキャンライン上において高 角度の割れ目が他のスキャンラインよりも多く抽出されたことによるものと考えられる。

換気立坑のクラックテンソルのトレース F₀ に関して、区間ごとに算定した結果の平均値は、 F₀=5.460~13.614 となっている。これに対して、本検討の深度 170.2~200.2m のクラックテンソル のトレース F₀は 6.481、深度 459.8~495.2m のクラックテンソルのトレース F₀は 8.154 となり、 平成 22 年度に算定した換気立坑の隣接する深度区間のトレース F₀の平均値よりも小さくなった。 換気立坑のクラックテンソルのトレース F₀は、深度 300~460m の区間で大きく、それよりも上部 や下部で小さくなる傾向を示している。

一方、水平坑道に関して、坑道ごとに集計した割れ目の密度 N^(q)の平均値は、1.747~4.311(本/m)の範囲にあり、本検討の深度 500m 予備ステージの N^(q)の 1.747(本/m)は、平成 22 年度の算 定結果(深度 200~400m までの各坑道)の平均値よりも小さく最小となった。

水平坑道のトレース長の平均値に関して、坑道ごとに集計した平均値は、1.851~2.459(m)の 範囲にあり、深度 500m 予備ステージのトレース長の平均値の 2.459(m)は、平成 22 年度の算定 結果(深度 200~400m までの各坑道)の平均値よりも大きく最大となった。

水平坑道のクラックテンソルのトレース F₀に関して、坑道ごとに集計した平均値は、F₀=9.680 ~17.743 の範囲にあり、深度 500m 予備ステージのクラックテンソルのトレース F₀の 9.680 は、 平成 22 年度の算定結果(深度 200~400m までの各坑道)の平均値よりも小さく最小となった。



- 48 -



図 4.5-2 NW 方向のスキャンラインの割れ目密度と岩盤等級区分の深度方向分布



図 4.5-3 SW 方向のスキャンラインの割れ目密度と岩盤等級区分の深度方向分布



図 4.5-4 NE 方向のスキャンラインの割れ目密度と岩盤等級区分の深度方向分布









図 4.5-7 左側壁のスキャンラインの割れ目密度の延長方向分布



図 4.5-8 アーチ左側のスキャンラインの割れ目密度の延長方向分布



図 4.5-9 右側壁のスキャンラインの割れ目密度の延長方向分布



図 4.5-10 アーチ右側のスキャンラインの割れ目密度の延長方向分布

	割れ	目密度	(本/m)		
換気立坑	SW	NW	NE	SE	平均
170~200m	1.067	1.233	1.233	1.333	1.217
$200\sim 250$ m	1.480	1.980	1.940	2.020	1.855
$250 \sim 300 \text{m}$	1.300	1.100	1.300	1.340	1.260
$300 \sim 350 \text{m}$	1.220	1.220	1.560	1.220	1.305
350~400m	1.300	0.740	1.300	1.540	1.220
400~460m	1.007	0.604	1.124	1.057	0.948
460~495m	0.600	0.400	0.571	0.657	0.557
170~495m	1.163	1.043	1.320	1.329	1.214
	トレース	長の平均	匀値 <t></t>	(m)	
換気立坑	SW	NW	NE	SE	平均
170~200m	2.157	2.241	2.356	2.441	2.299
$200{\sim}250\text{m}$	2.888	2.757	2.213	2.302	2.540
$250\sim300$ m	1.805	1.889	1.553	1.531	1.695
$300{\sim}350{\rm m}$	2.949	1.959	1.796	2.270	2.244
$350{\sim}400$ m	2.704	2.569	1.805	2.462	2.385
$400{\sim}460{\rm m}$	2.005	1.991	1.886	1.840	1.931
$460{\sim}495{\rm m}$	1.917	2.027	3.188	2.147	2.320
$170{\sim}495{ m m}$	2.424	2.284	1.982	2.144	2.209
ク	ラックラ	テンソル	のトレー	-スF ₀	
換気立坑	SW	NW	NE	SE	平均
$170\sim 200$ m	5.662	6.836	6.107	7.320	6.481
$200{\sim}250\text{m}$	7.300	9.510	7.853	12.945	9.402
$250\sim300$ m	5.146	6.622	4.104	5.968	5.460
$300{\sim}350$ m	17.778	10.149	7.935	10.501	11.591
$350{\sim}400$ m	21.427	7.925	12.222	12.883	13.614
$400{\sim}460{\rm m}$	15.394	4.647	11.455	10.022	10.380
460~495m	6.692	6.617	8.705	10.600	8.154
170~495m	9.960	6.722	7.786	9.721	8.547

表 4.5-1 換気立坑の区間ごとにおける割れ目の 密度,トレース長の平均値,クラックテンソルの トレースとスキャンラインの関係



図 4.5-11 換気立坑の区間ごとにおける割れ 目の密度,トレース長の平均値,クラックテン ソルのトレースとスキャンラインの関係

表	4.5	-2	水平坑道の坑道ごる	とにおける割れ目の
密	度,	۲	レース長の平均値,	クラックテンソルの
۲	レー	ス	とスキャンラインの)関係

割れ目密度(本/m)					
水平坑道	左側壁	アーチ左側	アーチ右側	右側壁	平均
200m 予備	3.300	2.800	3.033	2.500	2.908
300m 予備	4.107	5.047	3.856	4.232	4.311
400m予備	4.201	2.915	2.821	4.639	3.644
300m アクセス	2.985	2.569	2.194	3.068	2.704
500m 予備	2.353	1.567	1.233	1.833	1.747
	トレー	ス長の平均	匀値 <t>(</t>	m)	
水平坑道	左側壁	アーチ左側	アーチ右側	右側壁	平均
200m 予備	1.926	1.880	1.648	1.950	1.851
300m 予備	2.040	1.959	2.216	1.900	2.029
400m予備	2.077	2.277	2.172	1.901	2.107
300m アクセス	2.082	2.382	2.578	2.005	2.262
500m 予備	2.076	3. 123	2.664	1.971	2.459
クラックテンソルのトレース F ₀					
水平坑道	左側壁	アーチ左側	アーチ右側	右側壁	平均
200m 予備	12.660	9.926	10.090	9.457	10.533
300m 予備	15.070	21.740	19.200	14.960	17.743
400m予備	15.550	13.300	12.310	17.420	14.645
300m アクセス	12.940	14.290	12.150	12.420	12.950
500m 予備	10.652	11.670	7.899	8.499	9.680



(c) クラックテンソルのトレース 図 4.5-12 水平坑道の坑道ごとにおける割れ 目の密度, トレース長の平均値, クラックテン ソルのトレースとスキャンラインの関係

5. 深度 500m におけるクラックテンソルに基づく掘削解析

本章では、第4章で算出した深度 500m におけるクラックテンソルを用いて、換気立坑の深度 500m および深度 500m 予備ステージの2次元掘削解析を実施した。ここでは、クラックテンソル 以外のパラメータは平成 16 年度 ⁵⁾および平成 21 年度 ²⁾の予察的解析と同じものを用いた。

5.1 解析の概要

これまでに実施された平成16年度および平成21年度の予察的解析の解析ケースを表 5.1-1~表 5.1-4に示す。

Case	深度(m)	岩盤等級	支保工	掘削損傷領域の 有無	備考
1		СН	СН		基本ケース
2	CI 500	В	В	なし	
3	GL-300	CM	CM		
4		СН	СН	あり	
5		СН	СН		基本ケース
6	GL 1000	В	В	なし	
7	GL-1000	CM	CM		
8		СН	СН	あり	

表 5.1-1 平成 16 年度の予察的解析の立坑の解析ケース

表 5.1-2 平成 16 年度の予察的解析の水平坑道の解析ケース

Case	深度(m)	岩盤等級	支保工	掘削損傷領域の 有無	坑道展開方向 (°)	備考
9		СН	СН			基本ケース
10]	В	В	なし	0	
11		СМ	CM			
12	GL-500			あり		
13		СН	СН	なし	45	
14					90	
15			なし		0	
16		СН	СН			基本ケース
17	GL-1000	В	В	なし	0	
18		СМ	CM			
19				あり		
20		СН	СН	なし	45	
21					90	
22			なし		0	

Case	岩盤等級	支保工	掘削損傷領域の 有無
a	СН	СН	なし
b	В	В	なし
с	СМ	СМ	なし
d	СН	СН	あり

表 5.1-3 平成 21 年度の予察的解析の立坑の解析ケース

表 5.1-4 平成 21 年度の予察的解析の水平坑道の解析ケース

Case	岩盤等級	支保工	掘削損傷領域 の有無	坑道展開方向 (°)	備考
e	СН	СН	なし	0	展開方向は N45°W方向
f	В	В	なし	0	
g	СМ	СМ	なし	0	
h	СН	СН	あり	0	
i	СН	СН	なし	45	展開方向はN 方向
j	СН	СН	なし	90	展開方向は N45°E方向
k	СН	なし	なし	0	

換気立坑の深度 500m および深度 500m 予備ステージの 2 次元掘削解析を実施するにあたり、換 気立坑の深度 500m については、計測断面との対応を考慮して深度 450m 付近の岩盤を解析対象と した。また、後述の第6章と第7章では本解析結果と平成16年度および平成21年度の予察的解 析との比較検討を実施した。これらの条件を考慮して本解析における解析ケースを表 5.1-5に示 覆工厚 0.4m となるが、平成 16 年度の解析では内径 φ 6.5m、覆工厚 0.4m として解析を行っている ことから、内径 🖕 4.5m と内径 🆕 6.5m の 2 ケースの坑道断面ケースを設定した。 クラックテンソル については、四つのスキャンラインのうち、クラックテンソルのトレース Fo が最小と最大の2ケ ースを設定した。一方、深度 500m 予備ステージについては、平成 16 年度および平成 21 年度の 解析結果との比較を考慮して、深度 500m 予備ステージの坑道軸方向とほぼ方向が一致する水平 坑道の展開方向が 90°のケースと同様の条件を設定した。坑道断面は平成 16 年度および平成 21 年度の予察的解析と同様の 3.5m×3.5m の幌形と深度 500m 予備ステージの一般部の 4.0m×3.2m の幌形の2ケースの坑道断面ケースを設定した。クラックテンソルについては、四つのスキャン ラインのうち、左側壁と右側壁の 2 ケースを設定した。各ケースの解析メッシュ図を図 5.1-1~ 図 5.1-4に示す。なお、岩盤は換気立坑と水平坑道の予察的解析と同様の断面ケースが CH 級、深 度 500m 予備ステージの断面ケースが CM 級を対象とし、掘削影響領域は考慮しなかった。

ケース	坑道断面	岩盤等級 支保工	クラック テンソル	備考
1	立坑・内径 ø 4.5m	СН	F_0 最小	450m 付近の断面・岩盤条件に 対応、平成 21 年度の解析と比 較
2	立坑・内径 ø 4.5m	СН	F_0 最大	450m 付近の断面・岩盤条件に 対応、スキャンラインの設定 位置の影響を検討
3	立坑・内径 φ 6.5m	СН	F ₀ 最小	平成16年度の解析と比較
4	水平坑道・4.0m×3.2m 幌形	СМ	左側壁	500m 予備ステージの断面・岩 盤条件に対応
5	水平坑道・4.0m×3.2m 幌形	СМ	右側壁	500m予備ステージの断面・岩 盤条件に対応、スキャンライ ンの設定位置の影響を検討
6	水平坑道・3.5m×3.5m 幌形	СН	左側壁	平成 16 年度および平成 21 年 度の解析と比較

表 5.1-5 解析ケースの設定


図 5.1-1 ケース 1、2 の換気立坑の解析メッシュ



図 5.1-2 ケース3の換気立坑の解析メッシュ





図 5.1-4 ケース6の水平坑道の解析メッシュ

初期応力、岩盤等級ごとの岩石の物性値、割れ目の剛性に関するパラメータは平成 16 年度の予察的解析⁵⁾と同じとした。

解析に用いた初期応力を表 5.1-6に示す。なお、表 5.1-6に示された *x* 軸、*y* 軸の方向は、図 5.1-1 ~図 5.1-4に示した通りである。

また、岩盤基質部の CH 級および CM 級のヤング係数とポアソン比を表 5.1-7に示す。さらに、 割れ目の剛性に関するパラメータを表 5.1-8に示す。

表 5.1-6 解析に用いた初期応力

坑道	展開方向	σ_x (MPa)	σ_y (MPa)	τ_{xy} (MPa)
換気立坑	—	16.5	16.5	-4.80
水平坑道	90°	21.3	12.7	0

※) 初期応力は圧縮が正、座標軸は図 5.1-1~図 5.1-4を参照

表 5.1-7 岩盤基質部のヤング係数とポアソン比

岩盤等級	ヤング係数(GPa)	ポアソン比
CH 級	55.8	0.27
CM 級	53.7	0.18

表 5.1-8 割れ目の垂直剛性とせん断剛性に関するパラメータ

坑道	展開方向	垂直剛性に関する パラメータ h (MPa)	せん断剛性に関する パラメータg(MPa)	
		天然割れ目	天然割れ目	
換気立坑	—	24700	11500	
水平坑道	90°	25300	11800	

クラックテンソルは、換気立坑と深度 500m 予備ステージにおいてそれぞれ設定した。換気立 坑については、深度 450m 付近の岩盤を解析対象とすることから、第 4 章と同様の方法により、 各方向のスキャンラインの割れ目情報から深度 435~465m 区間を対象にクラックテンソルを算定 した。算定したクラックテンソルを表 5.1-9に示す。その結果、クラックテンソルのトレース F_0 が最小となるのは NW 方向、最大となるのは NE 方向となった。解析における F_0 最小および F_0 最大のクラックテンソルはこれらのクラックテンソルを用いた。深度 500m 予備ステージについ ては第 4 章で算定したクラックテンソルを用いた。ただし、それらは三次元空間における値であ り、解析は二次元平面にて行うことから、座標変換して解析用の断面に現れた値を解析用のクラ ックテンソルとした。得られたクラックテンソル F_{ij} と F_{ijkl} を表 5.1-10に示す。ここに、指標 1 は図 5.1-1~図 5.1-4に示された x 軸方向、2 は y 軸方向を表している。

スキャンライン	NW	SW	NE	SE
本数(本)	18	24	35	37
区間長 (m)	30.000	30.000	30.000	30.000
$N^{(q)}$ (本/m)	0.600	0.800	1.167	1.233
$ < n \cdot q >$	0.461	0.314	0.485	0.400
< t > (m)	2.011	1.810	1.983	2.027
$< t^2 > (m^2)$	5.492	7.384	8.870	6.249
F_0	4.186	12.240	12.679	11.194
F_{11}	1.862E+00	6.724E+00	4.808E+00	5.891E+00
F ₁₂	-4.119E-01	-4.894E-01	5.113E-01	-1.945E+00
F ₁₃	6.939E-01	1.649E+00	1.379E+00	1.505E+00
F ₂₂	9.966E-01	3.469E+00	3.348E+00	2.592E+00
F ₂₃	-2.408E-01	-7.227E-01	-1.063E+00	-7.586E-01
F ₃₃	1.327E+00	2.048E+00	4.523E+00	2.711E+00
F ₁₁₁₁	1.077E+00	4.586E+00	3.081E+00	3.987E+00
F ₁₁₂₂	4.313E-01	1.709E+00	1.138E+00	1.043E+00
F ₁₁₃₃	3.544E-01	4.284E-01	5.887E-01	8.615E-01
F_{1112}	-3.067E-01	-4.641E-01	7.399E-02	-1.282E+00
F ₁₁₂₃	-1.880E-01	-3.134E-01	-3.201E-01	-4.250E-01
F ₁₁₃₁	2.607E-01	9.426E-01	6.671E-01	8.129E-01
F_{2222}	4.529E-01	1.390E+00	1.709E+00	1.229E+00
F ₂₂₃₃	1.125E-01	3.692E-01	5.018E-01	3.201E-01
F ₂₂₁₂	-5.135E-02	3.110E-02	5.521E-01	-3.782E-01
F ₂₂₂₃	-9.302E-02	-1.708E-01	-4.269E-01	-1.769E-01
F ₂₂₃₁	8.382E-02	4.483E-01	1.712E-01	1.116E-01
F ₃₃₃₃	8.603E-01	1.250E+00	3.432E+00	1.530E+00
F ₃₃₁₂	-5.384E-02	-5.636E-02	-1.147E-01	-2.850E-01
F ₃₃₂₃	4.026E-02	-2.385E-01	-3.164E-01	-1.567E-01
F_{3331}	3.494E-01	2.586E-01	5.403E-01	5.805E-01

表 5.1-9 深度 435~465m 区間におけるクラックテンソルの算定

解析ケース	$\begin{bmatrix} F_{11} & F_{12} \\ sym. & F_{22} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} F_{1111} & F_{1122} & F_{1112} \\ & F_{2222} & F_{2212} \\ sym. & & F_{1212} \end{bmatrix}$
1、3 (立坑:NW方向)	$\begin{bmatrix} 1.862E+00 & -4.119E-01 \\ sym. & 9.966E-01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.077E+00 & 4.313E-01 & -3.067E-01 \\ & 4.529E-01 & -5.135E-02 \\ sym. & & 4.313E-01 \end{bmatrix}$
2 (立坑:NE方向)	$\begin{bmatrix} 4.808E+00 & 5.113E-01 \\ sym. & 3.348E+00 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 3.081\text{E}+00 & 1.138\text{E}+00 & 7.399\text{E}-02 \\ & 1.709\text{E}+00 & 5.521\text{E}-01 \\ sym. & 1.138\text{E}+00 \end{bmatrix}$
3、6 (坑道:左側壁)	$\begin{bmatrix} 4.601E+00 & 7.062E-01 \\ sym. & 6.108E-01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.963E+00 & 2.372E-01 & 4.061E-01 \\ & 9.334E-02 & 9.576E-02 \\ sym. & & 2.372E-01 \end{bmatrix}$
4 (坑道:右側壁)	$\begin{bmatrix} 3.495E+00 & 6.060E-02\\ sym. & 6.594E-01 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2.603E+00 & 1.329E-01 & 6.325E-02\\ & 2.682E-01 & -2.452E-02\\ & sym. & & 1.329E-01 \end{bmatrix}$

表 5.1-10 解析用のクラックテンソル

※指標の1はx軸方向、2はy軸方向

換気立坑、水平坑道の支保工の物性値については、平成16年度の予察的解析⁵と同様とした。支保工の仕様と物性値を表 5.1-11に示す。また、立坑の覆工の打設時期も平成 16 年度の予察的解析 ⁵と同様に、応力解放率 80%時として、水平坑道の支保工の設置時期は 60%とした。掘削解析の手順を図 5.1-5に示す。

			B 級	CH 級	CM 級	備考
換		厚さ(mm)	400			
気	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	ヤング係数	2.5×10^4		e -24MD-	
立	復上	(MPa)	2.5 × 10			$\int ck - 24$ MPa
坑		ポアソン比	0.2			
		厚さ (mm)	30	5	0	
	吹付けコン	ヤング係数		2.4×10^{3}		$\ell = 19 MD_{2}$
	クリート	(MPa)	3.4×10^{-5}			$\int ck - 18 MPa$
		ポアソン比	0.2			
水		長さ (mm)	—	- 1500		CH 級は延長
平		打款問(mm)		周方向:3000	周方向:1500	方向に千鳥配
坑				延長方向:1500	延長方向:1500	置
道	ロックボル	ヤンガ係数			_	SD345、D25
	F	(MP_2)	—	2.1×10^{5}		降伏荷重:
		(IVII d)				120.5kN
		断面積		5.07	$\times 10^2$	
		(mm ² /本)		5.07 ~ 10		

表 5.1-11 支保工の仕様および物性値



図 5.1-5 掘削解析の手順

5.2 解析結果

5.2.1 岩盤の変位

ケース 1~6 における坑道周辺岩盤の変形および変位量コンターを図 5.2-1~図 5.2-6に示す。 換気立坑の変形モードは、ケース 1~3 ともに NW-SE 方向に押された形状となった。これは、初 期応力の最大主応力方向が NW-SE 方向であったことを反映した結果であると考えられる。クラッ クテンソルが異なるケース 1、2 では、最大変位量が大きく異なり、F₀が最大のクラックテンソル を設定したケース 2 は F₀が最小のクラックテンソルを設定したケース 1 の 2 倍の最大変位量とな った。

一方、ケース4~6の水平坑道の変形モードは、水平方向に押された形状となった。これは、初 期応力の水平成分が鉛直成分より大きいこと、高角度の割れ目が卓越することの影響を受けた結 果であると考えられる。クラックテンソルが異なるケース4、5では、左側壁のクラックテンソル を設定したケース4の方が右側壁のクラックテンソルを設定したケース5よりも最大変位量が1.3 倍程度大きくなった。



(a) 変形図(倍率 30 倍)
 (b) 変位量コンター図
 図 5.2-1 ケース1における周辺岩盤の変形および変位量コンター図

JAEA-Research 2014-006



図 5.2-2 ケース2における周辺岩盤の変形および変位量コンター図



図 5.2-3 ケース3における周辺岩盤の変形および変位量コンター図





5.2.2 岩盤の応力

ケース 1~6 における周辺岩盤の主応力分布を図 5.2-7~図 5.2-12に示す。換気立坑のケース 1~3 において、最大主応力は NW-SE 方向の壁面近傍で高い応力が生じている。また、ケース 1~3 の応力分布に変化は見られなかった。一方、ケース 4~6 の水平坑道において、最大主応力は隅角部と天端部に高い応力が発生した。これらは、初期応力の卓越方向の影響を受けた結果であると考えられる。ケース 4~6 の応力分布に変化は見られなかった。



図 5.2-7 ケース1における周辺岩盤の主応力分布



(b)最小主応力分布

図 5.2-8 ケース2における周辺岩盤の主応力分布



図 5.2-9 ケース3における周辺岩盤の主応力分布



図 5.2-10 ケース4における周辺岩盤の主応力分布



図 5.2-11 ケース5における周辺岩盤の主応力分布



図 5.2-12 ケース6における周辺岩盤の主応力分布

5.2.3 支保工の応力

ケース 1~6 における覆工コンクリートおよび吹付けコンクリートの最大主応力分布を図 5.2-13~図 5.2-18に示す。ケース 1~3 では、覆工コンクリートに発生する圧縮応力の最大値は、 NE-SW 方向の要素で発生した。クラックテンソルの異なるケース 1、2 では、ケース 1 が 11.48MPa、 ケース 2 が 16.54MPa となり、ケース 2 の方が高い値となった。これは、変形挙動と整合した結果 となっている. 断面の異なるケース 1、3 ではケース 1 が 11.48MPa、ケース 3 が 12.50MPa となり、 ケース 2 の方が若干高い値となった。

ー方、ケース 4~6 の吹付けコンクリートに発生する圧縮応力の最大値は、右下端部の要素で発生した。クラックテンソルの異なるケース 4、5 では、ケース 4 が 17.97MPa、ケース 5 が 14.58MPa となり、ケース 4 の方が高い値となった。これは、変形挙動と整合した結果となっている。断面の異なるケース 4、6 ではケース 4 が 17.97MPa、ケース 6 が 12.29MPa となり、ケース 6 の方が低い値となった。



図 5.2-13 ケース1における覆エコンクリートの最大主応力分布



図 5.2-14 ケース2における覆エコンクリートの最大主応力分布



図 5.2-15 ケース 3 における覆エコンクリートの最大主応力分布



図 5.2-16 ケース4における吹付けコンクリートの最大主応力分布



図 5.2-17 ケース5における吹付けコンクリートの最大主応力分布



図 5.2-18 ケース6における吹付けコンクリートの最大主応力分布

5.3 掘削解析のまとめ

第4章で算出した深度 500m におけるクラックテンソルを用いて、換気立坑の深度 500m および 深度 500m 予備ステージの 2 次元掘削解析を実施した。ここでは、クラックテンソル以外のパラ メータは平成 16 年度 ⁵⁾および平成 21 年度 ²⁾の予察的解析と同じものを用いた。その結果、岩盤の 変位、応力および支保工の応力は初期応力および割れ目の卓越方向を反映した挙動を示した。ま た、スキャンラインの設定位置が異なるケースで解析結果に違いが生じ、水平坑道よりも換気立 坑の解析でスキャンラインの位置設置が解析結果に大きな影響を及ぼすことがわかった。これら の解析結果は、平成 21 年度の予察的解析 ²⁾の結果とも対応するものであるが、深度 500m 予備ス テージについては、高角度の割れ目が卓越するのに対して、既往の予察解析では低角度の割れ目 が卓越したクラックテンソルを用いていることから異なる挙動となっている。

6. 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第1段階で 算出したクラックテンソルの比較

本章では、第4章で算出した深度 500m のクラックテンソルを基に、第1段階の調査(MIZ-1号 孔)結果に基づいて算出した深度 500m のクラックテンソルの検証を行う。検証はクラックテンソ ルの比較および換気立坑の深度 500m と深度 500m予備ステージの2次元変形解析結果の比較をも とに行う。

6.1 第1段階で算出したクラックテンソルと解析結果

第1段階で算出したクラックテンソル *F_{ij}*を数式 6.1-1 に、深度 500m を対象とした掘削解析の 解析結果を図 6.1-1と図 6.1-2に示す。第1段階で算出したクラックテンソルは MIZ-1 孔の深度 300~600m における割れ目の情報から CH 級岩盤を対象として算出したものである。



(数式 6.1-1)





6.2 深度 500m のクラックテンソルとの比較による第 1 段階で算出したクラックテンソルの適 用性の検討

本検討で得られた換気立坑の深度 459.8~500.2m と解析用の深度 450m 付近および深度 500m 予備ステージと第1段階で算出したクラックテンソル *F_{ij}*の主値ベクトルを図 6.2-1に示す。ここに、 X 軸方向は指標 1、Y 軸方向は指標 2、Z 軸方向は指標 3 を表している。第1段階で算出したクラ ックテンソル *F_{ij}のトレース F*₀は 1.470 となり、本検討で得られた深度 500m のクラックテンソル より小さい。また、第1主値の方向は指標 2 の N 方向にあり、EW 方向が割れ目の主要な走向と なっている。



 F₀=4.186
 F₀=1.470

 (c) 解析用の深度 450m 付近
 (d) 第1段階で算出

 ※X軸方向は指標1、Y軸方向は指標2、Z軸方向は指標3を表す

図 6.2-1 クラックテンソルの主値ベクトル

つぎに、第5章で得られた解析結果と第1段階での予察的解析の結果との比較を行う。立坑の 結果として、ケース3と平成16年度のCase1との比較を表 6.2-1に示す。また、水平坑道の結果 として、ケース6と平成16年度のCase14との比較を表 6.2-2に示す。 **表 6.2-1**と表 6.2-2より、本検討での解析は、クラックテンソルのトレース *F*₀が第1段階より も増加したことから、最大変位量や支保工に作用する応力が増加する結果となった。水平坑道に ついては、深度 500m 予備ステージのクラックテンソルの第1主値が EW 方向に卓越する点が解 析に用いたクラックテンソルに反映され *F*₂₂成分よりも *F*₁₁成分が大きくなるが、第1段階のクラ ックテンソルには、このような特徴は表現できていない。

表 6.2-1 立坑の結果の比較

	ケース3	平成 16 年度の Case1
解析に用いたクラックテンソル	$\begin{bmatrix} 1.862 & -0.412 \\ sym. & 0.997 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.434 & 0.076 \\ sym. & 0.546 \end{bmatrix}$
最大変位量	12.0mm	4.5mm
覆工の最大応力	12.5MPa	5.98MPa

表 6.2-2 水平坑道の結果の比較

	ケース6	平成 16 年度の Case14
解析に用いたクラックテンソル	$\begin{bmatrix} 4.601 & 0.706 \\ sym. & 0.611 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.562 & 0.131 \\ sym. & 0.418 \end{bmatrix}$
最大変位量	16mm	2.9mm
吹付けコンクリートの最大応力	12.3MPa	4.14MPa

7. 平成 21 年度に実施したクラックテンソルの予察的な算出手法の妥当性の検証

本章では、第4章で算出した深度 500m のクラックテンソルを基に、平成 21 年度²⁾に実施した 深度 500m におけるクラックテンソルの予察的な算出手法の検証を行う。検証は、第6章と同様、 クラックテンソルの比較および換気立坑の深度 500m と深度 500m 予備ステージの2次元変形解析 結果の比較をもとに行う。

7.1 平成 21 年度に実施したクラックテンソルの予察的な算出手法

平成 21 年度に推定したクラックテンソル *F_{ij}を*数式 7.1-1 に、深度 500m を対象とした掘削解析 の解析結果を図 7.1-1と図 7.1-2に示す。平成 21 年度に推定したクラックテンソルは、パイロッ トボーリング(06MI03 号孔)のデータから深度 350m と深度 500m における割れ目の統計量の関 係について調べ、その関係が壁面観察に基づくクラックテンソルにも当てはまるものと仮定する ことによって、深度 500m の壁面観察に相当するクラックテンソルを推定したものである。



図 7.1-1 立坑解析結果 Case a (CH 級、基本ケース)



7.2 深度 500m のクラックテンソルとの比較による予察的な算出手法の適用性の検討

本検討で得られた換気立坑の深度 459.8~500.2m と解析用の深度 450m 付近および深度 500m 予備ステージと平成 21 年度に推定したクラックテンソル F_{ij} の主値ベクトルを図 7.2-1に示す。ここで、X 軸方向は指標 1、Y 軸方向は指標 2、Z 軸方向は指標 3 を表している。平成 21 年度に推定したクラックテンソル F_{ij} のトレース F_0 は 5.237 となり、本検討で得られた深度 500m のクラックテンソルのうちの解析用の深度 450m 付近のクラックテンソルの F_0 よりは大きく、深度 459.8~500.2m と深度 500m 予備ステージのクラックテンソルの F_0 よりは小さくなっている。また、第 1 主値の方向は指標 3 の上方向にあり、低角度の割れ目が卓越する主値構造となっている。



 F₀=4.186
 F₀=5.237

 (c)解析用の深度 450m 付近
 (d) 平成 21 年度に推定

 ※X 軸方向は指標 1、Y 軸方向は指標 2、Z 軸方向は指標 3 を表す

図 7.2-1 クラックテンソルの主値ベクトル

つぎに、第5章で得られた解析結果と平成21年度に推定したクラックテンソルによる予察的解析の結果との比較を行う。立坑の結果として、ケース1と平成21年度のCase a との比較を表 7.2-1 に示す。また、水平坑道の結果として、ケース6と平成21年度のCase j との比較を表 7.2-2に示

す。

表 7.2-1と表 7.2-2より、本検討での解析は、クラックテンソルのトレース F₀が平成 21 年度に 推定したクラックテンソルとほぼ同等であることから、最大変位量や支保工に作用する応力は同 等の結果となった。水平坑道については、深度 500m 予備ステージのクラックテンソルの第 1 主 値が EW 方向に卓越する点が解析に用いたクラックテンソルに反映され、F₂₂成分よりも F₁₁成分 が大きくなるが、平成 21 年度に推定したクラックテンソルには低角度の割れ目が卓越することか ら F₁₁成分よりも F₂₂成分のほうが大きくなり、深度 500m 予備ステージのクラックテンソルとは 異なる特徴を示している。このような相違は、パイロットボーリング(06MI03 号孔)のデータか ら深度 350m と深度 500mにおける割れ目の統計量の関係を推定する際に高角度の割れ目の情報が 反映されていなかったことが影響していると考えられる。

表 7.2-1 立坑の結果の比較

	ケース1	平成 21 年度の Case a
解析に用いたクラックテンソル	$\begin{bmatrix} 1.862 & -0.412 \\ sym. & 0.997 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.484 & -0.316 \\ sym. & 0.446 \end{bmatrix}$
最大変位量	8.8mm	7.8mm
覆工の最大応力	11.5MPa	10.6MPa

表 7.2-2 水平坑道の結果の比較

	ケース6	平成 21 年度の Case j
解析に用いたクラックテンソル	$\begin{bmatrix} 4.601 & 0.706 \\ sym. & 0.611 \end{bmatrix}$	[1.281 1.847] sym. 3.307]
最大変位量	16mm	8.5mm
「吹付けコンクリートの最大応力	12.3MPa	14.3MPa

8. 瑞浪超深地層研究所におけるクラックテンソルに基づく相対誤差の算出

本章では、換気立坑の深度 170~500m および深度 500m 予備ステージを対象に、基準領域およ び観察領域を設定し、それぞれの観察領域ごとに基準領域に対するクラックテンソルの相対誤差 を算出し、観察領域の大きさに伴う相対誤差の変動の様子を検討した。さらに、割れ目帯(LAFZ、 UHFD)ごとの整理も行った。

8.1 算出対象

換気立坑の深度 170.2~459.8m と深度 500m 予備ステージとした。

8.2 算出方法

第4章において得られた換気立坑の深度170.2~459.8mと深度500m予備ステージ30m区間の割 れ目の情報に対して、観測区間長(10m、50m、100m、150m、200m、全区間)を対象に、割れ目 の密度やトレース長などの割れ目の統計量を求めた(添付資料参照)。その後、観測区間ごとのク ラックテンソル *F_{ij}を*算定した。換気立坑における観測区間を10m、50m および100m として、深 度方向に 5m 間隔で各観測区間を移動させて、観測区間ごとのクラックテンソル *F_{ij}を*算定した。 同様に、深度500m予備ステージについても観測区間を5m および10m として、坑道延長方向に 5m 間隔で各観測区間を移動させて、観測区間ごとのクラックテンソル *F_{ij}を*算定した。そして、 換気立坑および深度500m予備ステージの全長ならびに各割れ目帯の区間全長を基準領域として クラックテンソルの相対誤差を算出した。

観測区間長を様々に変えたときのクラックテンソルが基準となるクラックテンソルとどの程度 の差があるのかを定量的に比較するために、相対誤差による比較を行うことにした。

基準となるクラックテンソルを $\overline{F_{ij}}$ 、基準との差を求めたい観察領域のクラックテンソルを f_{ij} とすると、誤差テンソル δF_{ii} は、以下のように定義される。

$$\partial F_{ij} = \overline{F_{ij}} - f_{ij}$$
 式 (8.2-1)

そして、相対誤差 RE は、以下のように定義される。

相対誤差が小さいほど、2つのクラックテンソルは近い成分を有していることを示している。

8.3 算出結果および考察

8.3.1 換気立坑のスキャンラインの相対誤差とその深度方向分布

換気立坑の各スキャンライン NE、NW、SE、SW における区間長と各々の全区間から得られる クラックテンソルを基準テンソルとしたときの観察領域(区間長 10、50、100、150、200m)におけ る相対誤差を図 8.3-1に示す。また、この各スキャンラインの観察領域(区間長 10、50、100m)に おける相対誤差の立坑深度方向分布を図 8.3-2~図 8.3-4に示す。なお、図中の相対誤差は、観察 領域が異なることにより一つのグラフに対して複数の深度分布がある(後述の相対誤差分布は全 て同様)。これらの図は、これらの図から、以下のことが明らかになった。

- ・立坑の対角位置にあるスキャンラインNEとSWおよびNWとSEの結果を比較すると類似性、 相似性が小さくクラックの分布特性に相違がみられる。
- ・換気立坑の各スキャンラインにおける区間長と相対誤差の関係より、相対誤差 RE は区間長が 10m と短いと大きな変動幅で分布し、区間長が長くなるに伴いその変動幅は小さくなる。ただ し、区間長 200m においても相対誤差 RE は 0.5 程度となった。これは、クラックテンソルのト レース F₀の深度方向分布の特徴(付録参照)と同様に、割れ目の局所的なバラツキの影響を受 けるためと考えられる。
- ・観測区間長 50、100m の相対誤差 RE の分布は、平均化されることにより、割れ目のバラツキ による局所的な影響が小さくなるため、その変動は帯状(バンド状)で区間ごとに変動する。



図 8.3-1 換気立坑における区間長と相対誤差(自己)の関係



図 8.3-2 換気立坑における区間長 10m の相対誤差(自己)の深度方向の分布



図 8.3-3 換気立坑における区間長 50m の相対誤差(自己)の深度方向の分布




8.3.2 深度 500m 予備ステージの各スキャンラインにおける相対誤差とその分布

同様に深度 500m 予備ステージの各スキャンライン(LA、LW、RA、RW)における区間長と各々 の全区間から得られるクラックテンソルを基準としたときの観察領域(区間長 10m)における相対 誤差を図 8.3-5に示す。また、この各スキャンラインの観察領域(区間長 10m)における相対誤差 の坑道軸方向の分布を図 8.3-6に示す。これらの図から、換気立坑の結果と比較すると相対誤差 RE は小さく、これは基準領域、観察領域が短いことが影響している可能性が考えられる。



図 8.3-5 深度 500m 予備ステージにおける区間長と相対誤差(自己)の関係



図 8.3-6 深度 500m 予備ステージにおける区間長 10m の相対誤差(自己)の分布

8.3.3 換気立坑 UHFD と LAFZ 区間における相対誤差とその深度方向分布

観察領域の大きさに伴う相対誤差 RE の変動の様子を検討するため、換気立坑のスキャンライン NE を用いて、UHFD と LAFZ に対する区間長とクラックテンソルのトレース F₀の関係、相対 誤差 RE とその深度方向分布を図 8.3-7と図 8.3-8に示す。

なお、スキャンライン NE を用いたのは全区間のクラックテンソルのトレース F₀の中間値に近いため、4 つのスキャンラインの中で平均的な特徴をもつと考えて選定した。これらの図から以下のことが明らかになった。

- ・UHFDは8.3.1項の換気立坑の全区間の結果とほぼ同様の結果となった。
- ・ただし、相対誤差 RE は若干小さくなった。これは全区間から類似性の高い区間として絞られた効果と考えられる。
- ・LAFZ は区間長が短く、8.3.2 項の深度 500m 予備ステージと同様に相対誤差 RE は小さくなる 傾向がみられる。



図 8.3-7 換気立坑の UHFD-NE 区間の計算結果



区間長10mの相対誤差と立坑位置

図 8.3-8 換気立坑の LAFZ-NE 区間の計算結果

8.3.4 換気立坑と深度 500m 予備ステージにおける相対誤差とその深度方向分布

深度 500m 予備ステージの各スキャンライン(LW、RW)を基準領域とし、換気立坑のスキャンライン NE を観察領域として用いたときの区間長と相対誤差の関係、区間長と深度方向分布をそれ ぞれ図 8.3-9と図 8.3-10に示す。その結果、以下のことが明らかになった。

- ・相対誤差 RE は、区間長が 10m の場合、0.5 から 2.0-2.5 と大きな変動幅で分布し、区間長が 長くなるに伴いその変動幅は小さくなり、全区間の相対誤差(換気立坑と深度 500m 予備ス テージ) RE として約 1.0 に収束する。
- ・相対誤差 RE の深度方向分布は、深度 230、400-410、490m 付近で変動がみられるが、他の 区間長 50、100m の場合を含めて、基準とした深度 500m 予備ステージに近づく位置では相対 誤差 RE は小さくなる傾向が見られた。



図 8.3-9 水平坑道 LW を基準としたときの換気立坑 NE スキャンラインの相対誤差



図 8.3-10 水平坑道 RW を基準としたときの換気立坑 NE スキャンラインの相対誤差

9. まとめ

9.1 坑道掘削時の壁面観察および力学試験結果を用いたクラックテンソルの算定

換気立坑の深度 170.2~200.2m、深度 459.8~495.2m、および深度 500m 予備ステージを対象にク ラックテンソルの算定を行った。換気立坑のクラックテンソルのトレース F_0 は、深度 170.2~ 200.2m では 6.481、深度 459.8~495.2m では 8.154 となり、平成 22 年度に算定した換気立坑の隣 接する深度区間のトレース F_0 の平均値よりも小さくなった。換気立坑のクラックテンソルのトレ ース F_0 は、深度 300~460mの区間で大きく、それよりも上部や下部で小さくなることがわかった。 一方、深度 500m 予備ステージのクラックテンソルのトレース F_0 は 9.680 となり、平成 22 年度に 算定した深度 200~400m までの水平坑道の F_0 よりも小さくなった。

9.2 深度 500m におけるクラックテンソルに基づく掘削解析

第4章で算出した深度 500m におけるクラックテンソルを用いて、換気立坑の深度 500m およ び深度 500m 予備ステージの 2 次元掘削解析を実施した。その結果、岩盤の変位、応力および支 保工の応力は初期応力および割れ目の卓越方向を反映した挙動を示した。また、スキャンライン の設定位置が異なるケースで解析結果に違いが生じたことから、クラックテンソルの設定にあた って、スキャンラインの位置選定が重要であることがわかった。深度 500m 予備ステージについ ては、高角度の割れ目が卓越するのに対して、既往の予察解析では低角度の割れ目が卓越したク ラックテンソルを用いていることから異なる挙動となっていることがわかった。

9.3 壁面観察結果に基づいて求めた深度 500m のクラックテンソルと第1段階で算出したクラッ クテンソルの比較

深度 500m のクラックテンソルを基に、第1段階の調査(MIZ-1号孔)結果に基づいて算出した深度 500m のクラックテンソルの検証を行った。その結果、第1段階で算出したクラックテンソル のトレース F₀は深度 500m のクラックテンソルよりも小さく、深度 500m の坑道掘削による挙動 予測への適用性は低いものと考えられた。

9.4 平成 21 年度に実施したクラックテンソルの予察的な算出手法の妥当性の検証

深度 500m のクラックテンソルを基に、平成 21 年度に実施した深度 500m におけるクラックテ ンソルの予察的な算出手法の検証を行った。その結果、換気立坑については、平成 21 年度に推定 したクラックテンソルのトレース F₀が深度 450m 付近のクラックテンソルとほぼ同等となったこ とから、立坑掘削に伴う岩盤の変形や支保工に作用する応力の挙動予測への適用性は高いと考え られた。一方、深度 500m 予備ステージについては、平成 21 年度に推定したクラックテンソルが 低角度の割れ目が卓越することを反映したテンソルであるのに対して、深度 500m 予備ステージ では高角度の割れ目が卓越することから、500m 予備ステージの掘削に伴う挙動予測への適用性は あまり高くないと考えられた。

9.5 瑞浪超深地層研究所におけるクラックテンソルに基づく相対誤差の算出

換気立坑の深度 170~500m および深度 500m 予備ステージを対象に、基準領域および観察領域 を設定して、観察領域の大きさに伴うクラックテンソルの相対誤差の変動の様子を検討した。そ の結果、換気立坑における相対誤差は、観測区間長を長くすると、その変動幅が小さくなるが、 区間長 200m においても 0.5 程度の相対誤差が生じることがわかった。これは、割れ目の局所的な バラツキの影響を受けるためと考えられた。これに対して、深度 500m 予備ステージにおける相 対誤差は、換気立坑の結果よりも小さくなり、基準領域、観察領域が短いことが影響している可 能性が考えられた。また、割れ目帯 UHFD の相対誤差は、換気立坑の全区間の相対誤差よりも若 干小さくなり、類似性の高い区間として絞られた効果によると考えられた。割れ目帯 LAFZ の相 対誤差は、区間長が短く、深度 500m 予備ステージと同様に相対誤差は小さくなる傾向が見られ た。

参考文献

- 1) 丹野剛男, 佐藤稔紀, 真田祐幸, 引間亮一, 松井裕哉, 多田浩幸, 郷家光男, 熊坂博夫, 石井 卓: "結晶質岩を対象としたクラックテンソルによる等価連続体モデル化手法に関する研究", 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2012-002 (2012).
- 2) 松井裕哉,丹野剛男,平野享,郷家光男,熊坂博夫,多田浩幸,石井卓: "クラックテンソル による瑞浪超深地層研究所研究坑道の掘削影響予測解析(2009 年度)",日本原子力研究開発 機構, JAEA-Research 2010-043 (2010).
- M. Oda: "An experimental study of the elasticity of mylonite rock with random cracks", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Vol.25, No.2, pp.59-69 (1988).
- 4) M. Oda: "A method for evaluating the representative elementary volume based on joint survey of rock masses", Canadian Geotechnical Journal, Vol.25, pp.440-447 (1988).
- 5) 郷家光男, 堀田政國, 若林成樹, 中谷篤史: "クラックテンソル・仮想割れ目モデルによる瑞 浪超深地層研究所研究坑道の掘削影響予測解析", サイクル機構技術資料(契約業務報告書 清 水建設株式会社), JNC TJ7400 2005-058 (2005).

付録

This is a blank page.



図-1 換気立坑における区間長とクラックテンソルのトレース F₀の関係



図-2 換気立坑におけるクラックテンソルのトレース F₀の深度方向の分布(区間長 10m)



図-3 換気立坑におけるクラックテンソルのトレース F₀の深度方向の分布(区間長 50m)



図-4 換気立坑におけるクラックテンソルのトレース Foの深度方向の分布(区間長 100m)



図-5 換気立坑における割れ目密度の深度方向の分布(区間長 10m)



図-6 換気立坑における割れ目密度の深度方向の分布(区間長 50m)



図-7 換気立坑における割れ目密度の深度方向の分布(区間長 100m)



図-8 500m 水平坑道における区間長とクラックテンソルのトレース Foの関係



図-9 500m 水平坑道におけるクラックテンソルのトレース F₀の分布(区間長 5m)



図-10 500m 水平坑道におけるクラックテンソルのトレース Foの分布(区間長 10m)



図-11 500m 水平坑道における割れ目密度の分布(区間長 5m)



図-12 500m 水平坑道における割れ目密度の分布(区間長 10m)

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
盔半里	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	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
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					
SI 基本単位	SI 基本単位					
和立里 名称	記号					
面 積 平方メートル	m ²					
体 積 立法メートル	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パ	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 ⁸					
質量濃度 キログラム毎立法メートル	kg/m ³					
輝 度 カンデラ毎平方メートハ	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	では物質濃度					
(substance concentration) ともよげれろ						

(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

			SI租工甲位	
組立量	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	Ν		m kg s ⁻²
压力,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	С		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	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^1$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$\text{kg s}^{2} \text{A}^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^{-2} A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光東	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

酸素活性(カタール) kat [s¹ 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 ュ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及び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。
 (a)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。
 (a)へルツは周頻現象についてのみ、ペラ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。
 (a)やレ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。やレシウス度とケルビンの
 (b)からさは同一である。したがって、温度差や理慮問摘を決す数値はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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

	S	I 組立単位	
組立量	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
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 力	リ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 sA
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
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 sA
吸収線量率	ダレイ毎秒	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	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с		
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n		
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р		
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f		
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z		
10^{1}	デカ	da	$10^{\cdot 24}$	ヨクト	v		

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=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

衣される剱値が美缺的に侍られるもの					
名称				記号	SI 単位で表される数値
電	子 オ	ベル	ŀ	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダ	ル	ŀ	\sim	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統-	一原子	質量単	单位	u	1u=1 Da
天	文	単	位	ua	1ua=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=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=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	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーバ	Np	の単位しの教徒的な関係は
ベル	В	対数量の定義に依存。
デジベル	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	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$		
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$		
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹		
(c) 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。

		ā	長10.	SIに 尾	禹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
+	ユ	IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	ン	トゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ			ĸ	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$			ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		\sim	7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	T.	N	111		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系カラ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
ŀ			N	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	進	大 気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力		IJ	ļ	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	カ	17	~		$1 = 1 = 10^{-6}$ m