



幌延深地層研究センター東立坑140m 小型試錐座における水圧破碎法による初期地圧の評価

In Situ Stress Measurements at 140m Niche around
East Shaft in Horonobe Underground Research Laboratory

中村 隆浩 真田 祐幸 杉田 裕 加藤 春實

Takahiro NAKAMURA, Hiroyuki SANADA, Yutaka SUGITA and Harumi KATO

地層処分研究開発部門
幌延深地層研究ユニット

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate

July 2010

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 (<http://www.jaea.go.jp>)
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

幌延深地層研究センター東立坑 140m 小型試験座における 水圧破砕法による初期地圧の評価

日本原子力研究開発機構

地層処分研究開発部門 幌延深地層研究ユニット

中村 隆浩^{*}、真田 祐幸、杉田 裕、加藤 春實^{*}

(2010 年 4 月 15 日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分技術開発として北海道幌延町で進めている幌延深地層研究計画は、平成 12 年度から開始した地上からの調査研究段階が平成 17 年度に終了し、現在、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階に移行している。地上からの調査研究段階では、地上物理探査、地質調査、ボーリング調査などを実施し、この地区内の地質環境のモデル化や安全評価手法の適用性確認などを試みた。一般に、地下には、土壌や岩盤の自重のほか、地殻変動などにより初期地圧と呼ぶ応力が生じている。初期地圧は、地下構造物の設計を行う上で必須の情報であり、また、坑道周辺岩盤中に発生する掘削影響領域の広がりやその力学的性状に密接な関係があることから、地上からのボーリング調査において研究所設置地区内に分布している水平面内(2 次元)の初期地圧の評価を試みている。

坑道掘削（地下施設建設）時の調査段階においては、地上からのボーリング調査において評価した初期地圧の妥当性の確認ならびに更新を目標の一つとしている。そこで、本研究は東立坑の深度 140m の小型試験座において 3 本のボーリング孔を掘削し、水圧破砕法と呼ばれる方法で小型試験座周辺に作用している初期地圧の 3 次元評価を試みた。また、この 3 本のボーリング孔では、水圧破砕法から得られた型取の記録よりボアホールブレイクアウトと考えられる孔壁の断続的な破壊が認められた。そこで、ボアホールブレイクアウトの情報による初期地圧の評価も試みた。初期地圧測定の結果は次のようである。

(1) 水圧破砕法：3 本のボーリング孔の 11 深度でおこなった高剛性水圧破砕試験で、ボーリング孔軸を含む縦き裂はどこにも生じなかった。これは、当該岩盤に潜在の天然き裂が多く含まれていることが一つの原因と考えられた。応力状態が測定位置によらず一様であると仮定し、き裂面の法線応力と初期地圧の関係から小型試験座まわりの初期地圧状態を評価した。評価された初期地圧の最確値に対する確率誤差はかなり大きかった。これは、ほぼ同じ走向・傾斜のき裂に作用する法線応力が測定されたため、独立した観測方程式の数が減少したことによると考えられた。

(2) ブレイクアウト：一般的な 3 次元初期地圧場に掘削されたボーリング孔壁面内に生じる最大圧縮応力を孔壁の破壊基準とする逆解析モデルを提案した。この解析手法を東立坑 140m 小型試験座で測定した横き裂に作用する法線応力とブレイクアウトのデータに適用した結果、調査地点の初期地圧環境は横ずれ断層型であり、最大主応力は ENE 方向でほぼ水平に、最小主応力は NNW 方向でやはりほぼ水平にあると評価された。換気立坑深度 140m の小型試験座で測定された観測データにも同様の解析手法を適用し、初期地圧環境が横ずれ断層型であることを確認した。

幌延深地層研究センター（駐在）：〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2

※ 技術開発協力員（幌延深地層研究センター）

* ジオテクノス株式会社

In Situ Stress Measurements at 140m Niche around East Shaft in Horonobe Underground Research Laboratory

Takahiro NAKAMURA[※], Hiroyuki SANADA, Yutaka SUGITA and Harumi KATO^{*}

Horonobe Underground Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Horonobe-cho, Teshio-gun, Hokkaido

(Received April 15, 2010)

From FY2000 to FY2005, JAEA had been making research at ground surface of Horonobe town for repository of high-level radioactive waste. During this period, geological investigation, hydrogeology investigation, rock mechanics investigation, geochemical investigation using boreholes were carried out in Hokushin area which is about 3km×3km in surface area of Horonobe town in order to construct a geological environment model and to confirm the methodology for safety assessment. Now the research program proceeds to the next stage where the underground drifts and shafts are under construction. In the underground rock mass, in situ stress is the sum of tectonic stress as well as overlying stress due to gravity. In situ stresses enter into excavation design and are required in order to predict the response of rock masses to the disturbance associated with those structures. For these reasons, JAEA has carried out in situ stress measurements using vertical boreholes drilled from ground surface to evaluate the state of horizontal stress in the area.

In the research during the underground construction, comparison between the stress measurements carried out at surface and at underground is conducted. And if inconsistency between these two measurements is found, the stress state will be updated based on more reliable information. In order to study the 3D in situ stress state around Horonobe Underground Research Laboratory, hydraulic fracturing tests were conducted at the 140m niche located near the bottom of the east shaft. Three 20.0m long boreholes, 08-E140-M01(slightly downwards), 08-E140-M02(slightly downwards) and 08-E140-M03 (inclined), were drilled from the niche using 76mm diameter bit. Spalling of the walls of the boreholes due to the stress concentration was detected on plastic films wrapped on an impression packer. Then the analysis of borehole wall breakouts was performed to estimate the orientation and magnitude of in situ state of stress. The results of the measurements are summarized as follows:

(1) Hydraulic fracturing technique

Hydraulic fracturing technique using the test equipment with sufficiently small compliance was carried out in the three boreholes. Evaluation of stress in a plane perpendicular to the borehole axis was impossible because transverse fractures which developed along a pre-existing plane of weakness were created at eleven depths. Therefore, the relation between the shut-in pressure of a transverse fracture and the in situ stress was used to obtain the in situ stress state on the assumption that all of the target zones of hydraulic fracturing were in a uniform stress state. The determined in situ stress state showed considerable large probable error of the stress components. This may be due to the fact that the shut-in pressure of transverse fracture with similar strike and dip were measured and the total number of independent observation equation was reduced.

(2) Breakouts analysis

The analysis of borehole wall breakouts was carried out for the purpose of estimating the in situ stress on the assumption that breakouts were formed at a point on the borehole wall where the maximum compressive stress was reached. The in situ stress state obtained both from breakouts and shut-in pressure of transverse fractures revealed strike-slip faulting regime where the maximum principal stress was almost horizontal with azimuth of ENE orientation and the minimum principal stress was also horizontal with azimuth of NNW orientation. The stress state obtained by the analysis of breakout and hydraulic fracturing data obtained at 140m niche at URL ventilation shaft also yielded the same stress regime.

Keywords: In Situ Stress State, Hydraulic Fracturing Technique, Breakouts

※ Collaborating Engineer (Horonobe Underground Research Center)

* Geotechnos Co., Ltd.

目 次

1. はじめに	1
1.1 概要	1
1.2 測定位置	2
1.3 原位置調査期間	2
2. ボーリング孔掘削	3
2.1 ボーリング孔孔口の位置	4
2.2 ボーリング資機材の搬入	5
2.3 ボーリング資機材の設置	6
2.4 ボーリング孔口切	7
2.5 ボーリング孔掘削（深度 1.5m～深度 20.0m）	7
2.6 掘削の経過	7
3. 地質記載	11
3.1 コアの採取	11
3.2 コア記載	11
3.2.1 コアの地質	13
3.2.2 岩盤等級区分	13
3.2.3 RQD	13
3.2.4 コア回収率	14
3.2.5 割れ目	18
4. 水圧破碎法による初期地圧測定	29
4.1 試験装置	30
4.2 試験方法	31
4.3 解析方法	34
4.3.1 従来の初期地圧評価手順	34
4.3.2 き裂開口圧力と初期地圧の関係	35
4.3.3 真のき裂開口圧力を測定するための水圧破碎システム	35
4.4 試験結果	36
4.4.1 水圧破碎システムのコンプライアンス C の評価	36
4.4.2 水圧破碎試験	38
4.4.3 水圧破碎試験によって生じたき裂	50
4.5 初期地圧の評価	55
4.5.1 き裂開口圧と初期地圧の関係	56
4.5.2 横き裂の方向余弦	57
4.5.3 横き裂のき裂閉口圧	57
4.5.4 解析結果	61
4.6 結言	63
5. ブレイクアウトによる初期地圧評価	64
5.1 解析モデル	66
5.2 ブレイクアウトの形状	68

5.3	解析結果	69
5.3.1	ブレイクアウトのデータのみを用いた解析結果	69
5.3.2	横き裂のき裂閉口圧とブレイクアウトのデータを用いた解析結果	73
5.4	結言	78
6.	コア物性測定試験	79
6.1	試験概要	79
6.2	力学試験方法	79
6.2.1	一軸圧縮試験	84
6.2.2	圧裂引張試験	84
6.3	力学試験結果	86
6.3.1	一軸圧縮試験	86
6.3.2	圧裂引張試験	95
7.	おわりに	103
	参考文献	104

CONTENTS

1. Introduction	1
1.1 Summary	1
1.2 Location of the site	2
1.3 Duration of the study	2
2. Borehole drilling for the in situ stress measurements	3
2.1 Location of the mouths of the borehole	4
2.2 Transportation of the boring machine to the 140m niche	5
2.3 Placing of the boring machine	6
2.4 Drilling of the borehole mouths	7
2.5 Borehole drilling (the depths from 1.5m to 20.0m)	7
2.6 Drilling logs	7
3. Geology	11
3.1 Sampling of the drilling core	11
3.2 Description of the drilling core	11
3.2.1 Geology of the drilling core	13
3.2.2 Classification of the drilling core	13
3.2.3 RQD	13
3.2.4 Core recovery	14
3.2.5 Fissures	18
4. In situ stress measurements by hydraulic fracturing method	29
4.1 Equipments	30
4.2 Procedure of the test	31
4.3 Process of the data analysis	34
4.3.1 Conventional procedure of the in situ stress evaluation	34
4.3.2 The relation between the shut-in pressure and in situ stress	35
4.3.3 Hydraulic fracturing equipment required to measure the true re-opening pressure	35
4.4 Results	36
4.4.1 Evaluation of the compliance of the hydraulic fracturing equipment	36
4.4.2 Hydraulic fracturing test	38
4.4.3 Fractures induced by hydraulic fracturing tests	50
4.5 Evaluation of the in situ stress	55
4.5.1 The relationship between the shut-in pressure and the in situ stress	56
4.5.2 Orientation of transverse fractures	57
4.5.3 The shut-in pressure of the transverse fractures	57
4.5.4 Results of the analysis	61
4.6 Summary	63

5. In situ stress evaluation using breakout data	64
5.1 The model of the analysis	66
5.2 Measurements of breakout configuration	68
5.3 Results of the analysis	69
5.3.1 Results obtained from breakouts data	69
5.3.2 Results obtained both from breakouts and shut-in pressure	73
5.4 Summary	78
6. Measurement of the mechanical properties of the drill core	79
6.1 Mechanical tests using boring core	79
6.2 Procedure of the mechanical tests	79
6.2.1 Uniaxial compression test	84
6.2.2 Brazilian tensile test	84
6.3 Results of the test	86
6.3.1 Uniaxial compression test	86
6.3.2 Brazilian tensile test	95
7. Conclusion	103
References	104

表目次

表 2.1	東立坑 140m 小型試錐座に掘削したボーリング孔	3
表 2.2	使用機材一覧表	5
表 3.1	1m 区間ごとのコアデーター一覧表 (08-E140-M01 孔)	11
表 3.2	1m 区間ごとのコアデーター一覧表 (08-E140-M02 孔)	12
表 3.3	1m 区間ごとのコアデーター一覧表 (08-E140-M03 孔)	12
表 3.4	割れ目データー一覧表 (08-E140-M01 孔)	22
表 3.5	割れ目データー一覧表 (08-E140-M02 孔)	25
表 3.6	割れ目データー一覧表 (08-E140-M03 孔)	27
表 4.1	測定機器一覧	30
表 4.2	高剛性水圧破碎システムのコンプライアンス測定結果	37
表 4.3	水圧破碎試験深度	38
表 4.4	水圧破碎試験によって開口した横き裂の法線方向余弦 (E-N-V 座標系) およびき裂閉口圧	60
表 4.5	横き裂の垂直応力から評価した初期地圧状態	62
表 5.1	ブレイクアウトの破壊開始位置 $\theta_b^{(l)}$ および破壊中央の位置 $\theta_{\min}^{(m)}$	68
表 5.2	ブレイクアウトから評価した初期地圧状態	70
表 5.3	換気立坑 140m 小型試錐座におけるブレイクアウトの破壊開始位置 $\theta_b^{(l)}$ および破壊中央の位置 $\theta_{\min}^{(m)}$	71
表 5.4	再評価した換気立坑 140m 小型試錐座の初期地圧状態	72
表 5.5	水圧破碎法とブレイクアウトから評価した初期地圧状態	74
表 5.6	換気立坑 140m 小型試錐座における水圧破碎試験によって開口した 横き裂の法線方向余弦 (E-N-V 座標系) およびき裂閉口圧	76
表 5.7	換気立坑 140m 小型試錐座におけるブレイクアウトの破壊開始位置 $\theta_b^{(l)}$ および破壊中央の位置 $\theta_{\min}^{(m)}$	76
表 5.8	換気立坑 140m 小型試錐座における水圧破碎法とブレイクアウトから 評価した初期地圧状態	77
表 6.1	ボーリングコアの力学試験	79
表 6.2	一軸圧縮試験の試験方法	85
表 6.3	一軸圧縮試験結果	91
表 6.4	一軸圧縮試験結果	92
表 6.5	圧裂引張試験結果	96
表 6.6	圧裂引張試験結果	98

図目次

図 2.1	初期地圧測定用ボーリング孔の配置図	3
図 2.2	ボーリング掘削完了状況	4
図 2.3	ボーリング資機材の設置平面図	6
図 2.4	08-E140-M01 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重および スピンドル回転数と掘削深度との関係	8
図 2.5	08-E140-M02 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重および スピンドル回転数と掘削深度との関係	9
図 2.6	08-E140-M03 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重および スピンドル回転数と掘削深度との関係	10
図 3.1	総合柱状図 (08-E140-M01 孔)	15
図 3.2	総合柱状図 (08-E140-M02 孔)	16
図 3.3	総合柱状図 (08-E140-M03 孔)	17
図 3.4	割れ目の傾斜角度の頻度分布図 (08-E140-M01 孔)	19
図 3.5	割れ目の傾斜角度の頻度分布図 (08-E140-M02 孔)	19
図 3.6	割れ目の傾斜角度の頻度分布図 (08-E140-M03 孔)	19
図 3.7	条線のレイク角度の頻度分布図 (08-E140-M01 孔)	20
図 3.8	条線のレイク角度の頻度分布図 (08-E140-M02 孔)	20
図 3.9	条線のレイク角度の頻度分布図 (08-E140-M03 孔)	20
図 3.10	スリッケンステップの変位方向の頻度分布図 (08-E140-M01 孔)	21
図 3.11	スリッケンステップの変位方向の頻度分布図 (08-E140-M02 孔)	21
図 3.12	スリッケンステップの変位方向の頻度分布図 (08-E140-M03 孔)	21
図 4.1	コンプライアンス C の小さな高剛性水圧破碎システム	30
図 4.2	可塑性のチューブによって被覆した型取パッカーの挿入	31
図 4.3	ストラドルパッカー	32
図 4.4	破碎後の型取で得られたき裂のトレースの例	33
図 4.5	水圧破碎システムのコンプライアンス測定状況	36
図 4.6	高剛性水圧破碎システムを用いた鋼管内における加圧試験の例	37
図 4.7	M01 孔の深度 11.8m における圧力・流量・時間曲線	39
図 4.8	M01 孔の深度 14.0m における圧力・流量・時間曲線	40
図 4.9	M01 孔の深度 15.9m における圧力・流量・時間曲線	41
図 4.10	M01 孔の深度 17.9m における圧力・流量・時間曲線	42
図 4.11	M02 孔の深度 13.0m における圧力・流量・時間曲線	43
図 4.12	M02 孔の深度 14.1m における圧力・流量・時間曲線	44
図 4.13	M02 孔の深度 16.0m における圧力・流量・時間曲線	45
図 4.14	M02 孔の深度 17.8m における圧力・流量・時間曲線	46
図 4.15	M03 孔の深度 12.0m における圧力・流量・時間曲線	47
図 4.16	M03 孔の深度 14.1m における圧力・流量・時間曲線	48
図 4.17	M03 孔の深度 15.0m における圧力・流量・時間曲線	49

図 4.18	(a)M01 孔の深度 11.8m、(b)M01 孔の深度 14.0m および(c)M01 孔の 深度 15.9m で採取したき裂の型取の記録	51
図 4.19	(a)M01 孔の深度 17.9m、(b)M02 孔の深度 13.0m および(c)M02 孔の 深度 14.1m で採取したき裂の型取の記録	52
図 4.20	(a)M02 孔の深度 16.0m、(b)M02 孔の深度 17.8m および(c)M03 孔の 深度 12.0m で採取したき裂の型取の記録	53
図 4.21	(a)M03 孔の深度 14.1m および(b)M03 孔の深度 15.0m で採取した き裂の型取の記録	54
図 4.22	ボーリング孔と座標系の関係	56
図 4.23	型取パッカーから得られたき裂のトレースに最小二乗法によって 平面を当てはめた例	57
図 4.24	step-rate pressurization における圧力と流量の関係	58
図 4.25	圧力-時間曲線からき裂閉口圧を決定したときの例	60
図 4.26	(a)水圧破碎法によって評価された主応力の下半球投影図および (b)水平面内の主応力分布	62
図 5.1	ボーリング孔軸と直交する面内に示したボアホールブレイクアウトと 初期地圧の関係の模式図	65
図 5.2	(a)円筒座標系および(b)ブレイクアウトの位置	67
図 5.3	(a) ブレイクアウトから評価された主応力の下半球投影図および (b)水平面内の主応力分布	70
図 5.4	(a)再評価した換気立坑 140m の主応力の下半球投影図および (b)水平面内の主応力分布	72
図 5.5	(a)水圧破碎法とブレイクアウトから評価された主応力の下半球投影図および (b)水平面内の主応力分布	74
図 5.6	換気立坑 140m 小型試験座における(a)主応力の下半球投影図および (b)水平面内の主応力分布	77
図 6.1	一軸圧縮試験片	80
図 6.2	圧裂引張試験片	82
図 6.3	力学試験における試験装置および測定系統	85
図 6.4	一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線	87
図 6.5	各ボーリング孔から採取した試験片の一軸圧縮強度分布	91
図 6.6	珪藻質泥岩の堆積構造面に対する載荷方向と引張強度の関係	97
図 6.7	珪藻質泥岩の堆積構造面のトレース (白線)	97

This is a blank page.

1. はじめに

1. 1 概要

独立行政法人日本原子力研究開発機構は、北海道天塩郡幌延町において新第三紀堆積岩を対象として幌延深地層研究計画と称する地下施設建設を伴う研究プロジェクトを進めている。この計画は、平成 12 年度から開始し、全体で約 20 年間の研究プロジェクトであり、地上からの調査研究段階、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階および地下施設での調査研究段階の 3 つの段階から構成される。地上からの調査研究段階は平成 17 年度に終了し、現在、坑道掘削（地下施設建設）時の調査研究段階に移行している。地上からの調査研究段階では、幌延町北進地区に 3km 四方程度の領域を研究所設置地区として選定し、この領域およびその周辺を対象に地上物理探査、地質調査、ボーリング調査などを実施した。一般に地下には、土壌や岩盤の自重のほか、地殻変動などにより初期地圧と呼ぶ応力が生じている。初期地圧は、地下構造物の合理的で安全な設計・施工法の検討や坑道周辺岩盤中に発生する掘削影響領域の性状と密接な関係があることから、地上からのボーリング調査において研究所設置地区内に分布している初期地圧の評価を試みている。

初期地圧の測定方法は、主に応力解放法や水圧破碎法などのボーリング孔を利用した原位置での計測と、AE 法・DSCA 法・DRA 法などのボーリング孔から採取したコアを利用した計測（コア法と呼ばれる）とに大別される。地表から実施される水圧破碎法の場合、主応力の 1 つがボーリング孔軸に等しく、原位置に作用する土被り圧と等しいと仮定され解析されるため、水平面内の主応力のみが同定され地下深部に作用する正確な初期地圧状態を知ることが出来ない。地下深部に作用する三次元的な応力状態を評価可能な手法である応力解放法は、深部に位置する調査坑道などからの水平ボーリング孔を利用した計測がほとんどを占めており、地表からの計測は技術的な困難さからほとんどなされていない。そのため、坑道掘削（地下施設建設）時の調査段階においては、地下施設を利用した三次元初期地圧状態の正確な評価を実施し、さらに地上からのボーリング調査において評価した初期地圧の妥当性の確認ならびに更新を目的としている。

初期地圧の測定方法は、一般的に地下深部の硬岩を対象にすることが多く、幌延地域に見られる新第三紀堆積岩である軟岩に対する実施例は硬岩の実施例と比較して少ない。そのため、初期地圧測定法のうちどの方法が幌延地域の新第三紀堆積岩に最適であるか適用性の検討が必要である。しかしながら、幌延地域特有の地質環境条件のため、適用性を確認できる測定手法は限られる。また、初期地圧は一般的に深度依存性が認められるとともに、その地域特有の地質構造の存在や地形の影響の他、地殻変動などによりその状態が変化する。そのため、ある対象領域の初期地圧状態を評価する場合、地質構造や地形に着目し複数の地点において初期地圧測定を行い、バラツキを含めて総合的に評価する必要がある。以下、初期地圧状態の検討内容と得られた結果の利用方法について示す。

① 新第三紀堆積岩の原位置における初期地圧測定法の適用性の検討

初期地圧測定法の検討では、ボーリング孔壁面から水が浸出するような新第三紀堆積岩に適用可能な初期地圧測定方法を選定するため、岩盤とひずみゲージの接着性能、最適なボーリング掘削径・掘削方向の決定、ボーリング孔内での設置位置の決定等、必要に応じて予備実験・解析等を実施し適用性を事前に確認し、その後原位置での適用を図る。

② 声問層、遷移帯、稚内層の3つの地層における初期地圧状態の検討

初期地圧状態の検討では、各地層においてそれぞれ数カ所の地点で初期地圧測定を実施し、初期地圧結果のバラツキの程度・掘削時の情報化施工で得られるA/B計測結果・掘削時の切羽観察・三次元地質構造モデル・地上からの調査研究段階で得られた初期地圧状態との比較検討等を含めて総合的に評価する。得られた結果については、必要に応じ既存の岩盤力学モデルの確認・更新、地下構造物の応力・変形解析の初期地圧入力パラメーターの見直し、地下施設の合理的で安全な設計・施工法の見直しおよび周回坑道配置の適否等に適宜反映する予定である。

本報告は、平成20年度に幌延深地層研究センターの東立坑深度140m小型試験座から直径76mmの3本のボーリング孔を掘削し、水圧破碎法およびボアホールブレイクアウト法による地下施設周辺岩盤の初期地圧の評価について取りまとめ、さらに平成19年度実施した初期地圧についても再評価を実施した。

1. 2 測定位置

幌延深地層研究センター東立坑深度140m小型試験座

1. 3 原位置調査期間

自) 平成21年1月7日

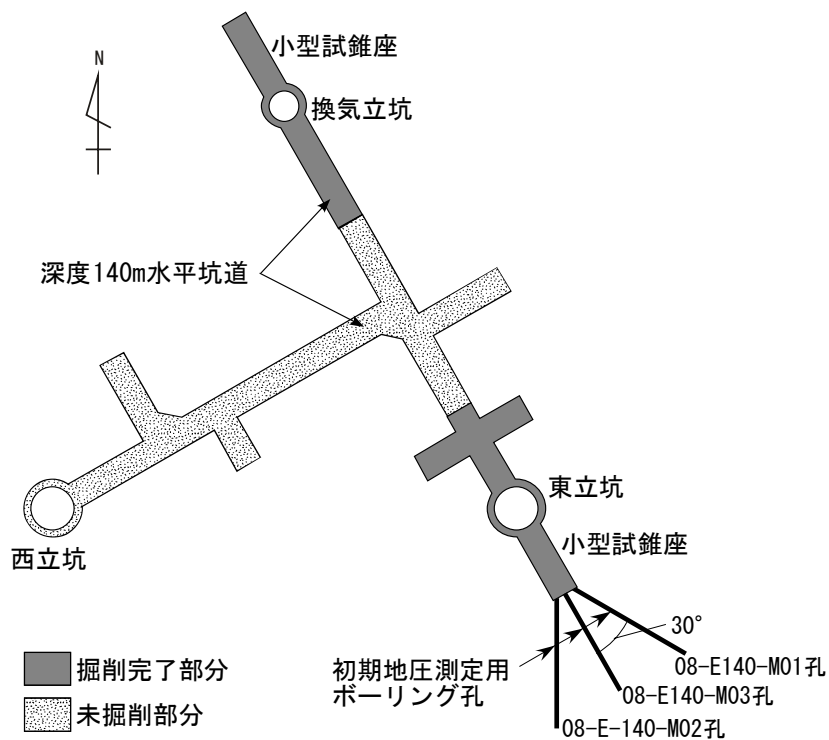
至) 平成21年1月29日

2. ボーリング孔掘削

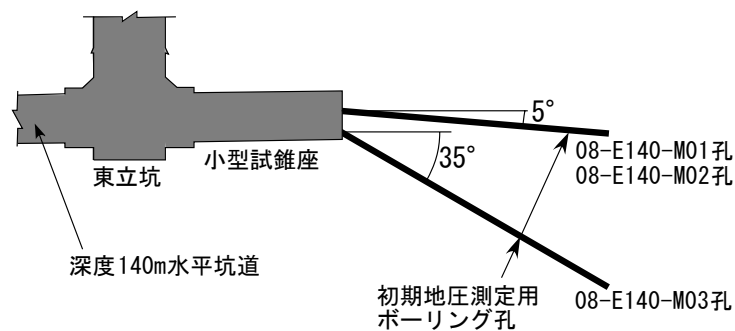
水圧破碎法による初期地圧の評価を目的として、東立坑 140m 小型試験座に 08-E140-M01 孔、08-E140-M02 孔および 08-E140-M03 孔を掘削した。これら 3 本のボーリング孔の方位傾斜、掘削深度などは表 2.1 に示すとおりである。図 2.1 は、各ボーリング孔の配置図である。

表 2.1 東立坑 140m 小型試験座に掘削したボーリング孔

孔 名	方位・傾斜	掘削深度(m)	備 考
08-E140-M01 孔	S60° E、水平から下向き 5°	20.0	・ $\phi 76$ コアパック使用 ・ 水圧破碎法を適用
08-E140-M02 孔	S、水平から下向き 5°	20.0	
08-E140-M03 孔	S30° E、水平から下向き 35°	20.0	



(a)平面図



(b)側面図

図 2.1 初期地圧測定用ボーリング孔の配置図

2. 1 ボーリング孔孔口の位置

各ボーリング孔孔口は、図 2.1 の配置図の様に、08-E140-M01 孔と 08-E140-M02 孔の孔口位置は切羽に向かって左右の隅部に、そして 08-E140-M03 孔の孔口は切羽中央の床付近に設定した。図 2.2 に各ボーリング孔の孔口位置を示す。



図 2.2 ボーリング掘削完了状況

2. 2 ボーリング資機材の搬入

ボーリング資機材は、東立坑坑口まで 2t トラックで運搬し、東立坑のキブルによって坑内に搬入した。キブルの最大収納寸法には制約があるので、搬入資機材はすべてキブルの最大収納寸法以下に梱包した。表 2.2 に使用機材の一覧を示す。搬入時期は他の工事と重なり合わないよう調整した。

表 2.2 使用機材一覧表

資機材名称	メーカー・型式	公称能力および規格	寸法 (H×W×L) (mm)	重量あるいは数量
試錐機	TEC-1	5.5kW	1400×730×1205	500 kgf
2”水中ポンプ		1.5kW		2 台
配電盤			1100×600×890	20 kgf
ドラム缶	100ℓ			1 缶
92 シールド管			1500	3 本
92 メタルクラウン			150	1 個
40.5 ロッド			1000	22 本
40.5 ロッド			500	2 本
40.5 ロッド			300	1 本
76 コアパック			1500	1 本
アウターチューブ他	掘削ツール		400×500×2500	1 個
コア箱		5m/箱		13 箱
水圧破碎試験装置 押し込み器具他			300×200×1800	1 個
水圧破碎パッカー	ジオテクノス㈱		3500	2 本
小型プランジャ ポンプ	日本精密科学㈱	400cc/min、最高吐 出圧力 30MPa	570×380×320	50kgf

2. 3 ボーリング資機材の設置

キブルから資機材設置場所までの運搬・設置作業は、キブルから東立坑への機材の取り出し・引き込み、東立坑から小型試錐座への運搬・設置の２段階でおこなった。その作業手順は次の通りである。

- (１) 小型試錐座への資機材の搬入・設置は、ボーリングの資機材、タンクおよび試錐機の順におこなう。
- (２) キブルから小型試錐座側への試錐機の取り出し・引き込みは、主にモノレールホイストのチェーンブロックを利用する。
- (３) モノレールホイストの下から試錐機をチェーンブロックで吊り上げ、小型試錐座にいったん仮置きする。他の資機材はすべて人力によって小型試錐座まで運搬する。
- (４) 所定の位置に試錐機、タンク等を据える。図 2.3 に小型試錐座における資機材配置の例を示す。

試錐機のベースは、アンカーボルトによってコンクリート床面に固定した。電気配線は、小型試錐座に配電盤を設置し、試錐機、試錐ポンプ等の電気設備に配電した。配線は歩行や小資材運搬の障害にならないように配慮した。

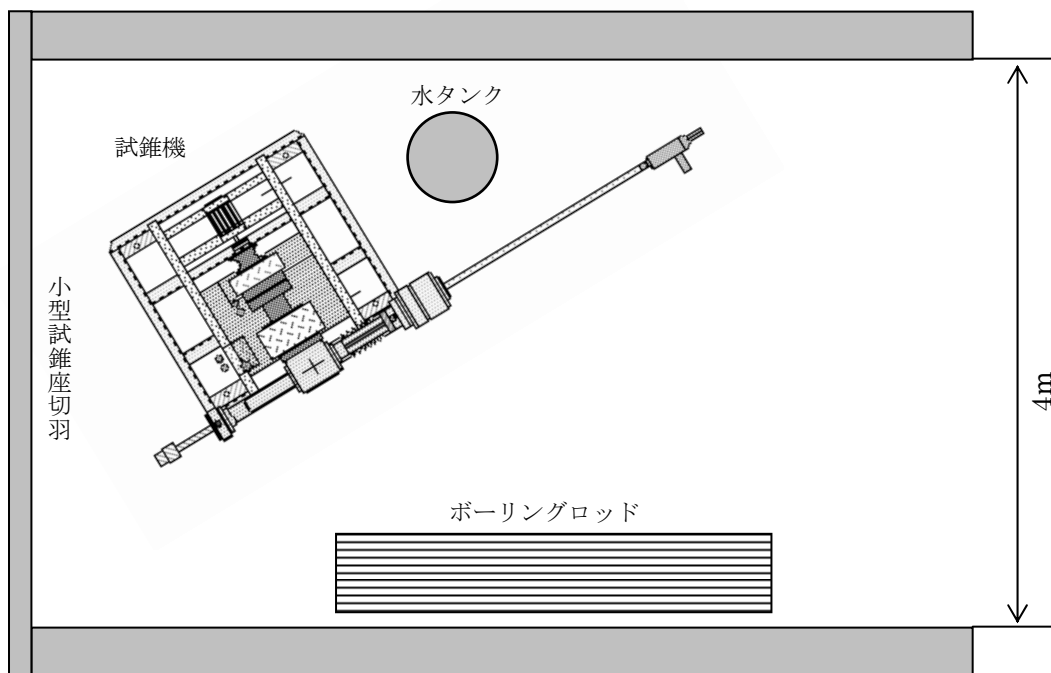


図 2.3 ボーリング資機材の設置平面図

2. 4 ボーリング孔口切

試錐機のスピンドルを所定の方位および傾斜角度に設定し、小型試錐座切羽の吹き付けコンクリートを 92mm シールド口切ビット（メタルクラウン）によって約 1.5m 掘削した。1.5m 以深のボーリング孔を掘削する前に、孔口に長さ 1.5m の片側ねじ切りのケーシングを挿入し、ケーシング外周と孔壁の間隙をセメントモルタルで充填・固定した。

08-E140-M01 孔、08-E140-M02 孔および 08-E140-M03 孔の傾斜角度は、表 2.1 に示すように、それぞれ水平から下向き 5° 、 5° および 35° とし、掘削方位は、それぞれ $N60^{\circ} W$ 、NS および $N30^{\circ} W$ とした。

2. 5 ボーリング孔掘削（深度 1.5m～深度 20.0m）

深度 1.5m～20m の掘削は、76mm 二重管掘削（コア径 55mm）装置のコアパックを使用しておこなった。掘削編成は、76mm メタルクラウンビット＋アウターチューブ＋40.5mm ロッドを基本とした。40.5mm ロッドは、狭い坑内で作業しやすいように原則として長さ 1.5m ものを使用した。掘削水は、坑内の給水設備の水をドラム缶に溜め、試錐機に内蔵した給水ポンプでビット先端に送水するとともに、孔口から還流した掘削水を 2" 水中ポンプでくみ上げ、再度ドラム缶に送水して循環させた。掘削作業終了後、湧水・ガスの発生を低減させるため、ケーシング先端にステンレス製のキャップをねじ込んでボーリング孔口を密閉した。

2. 6 掘削の経過

各ボーリング孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重およびスピンドル回転数を図 2.4、図 2.5 および図 2.6 に示す。

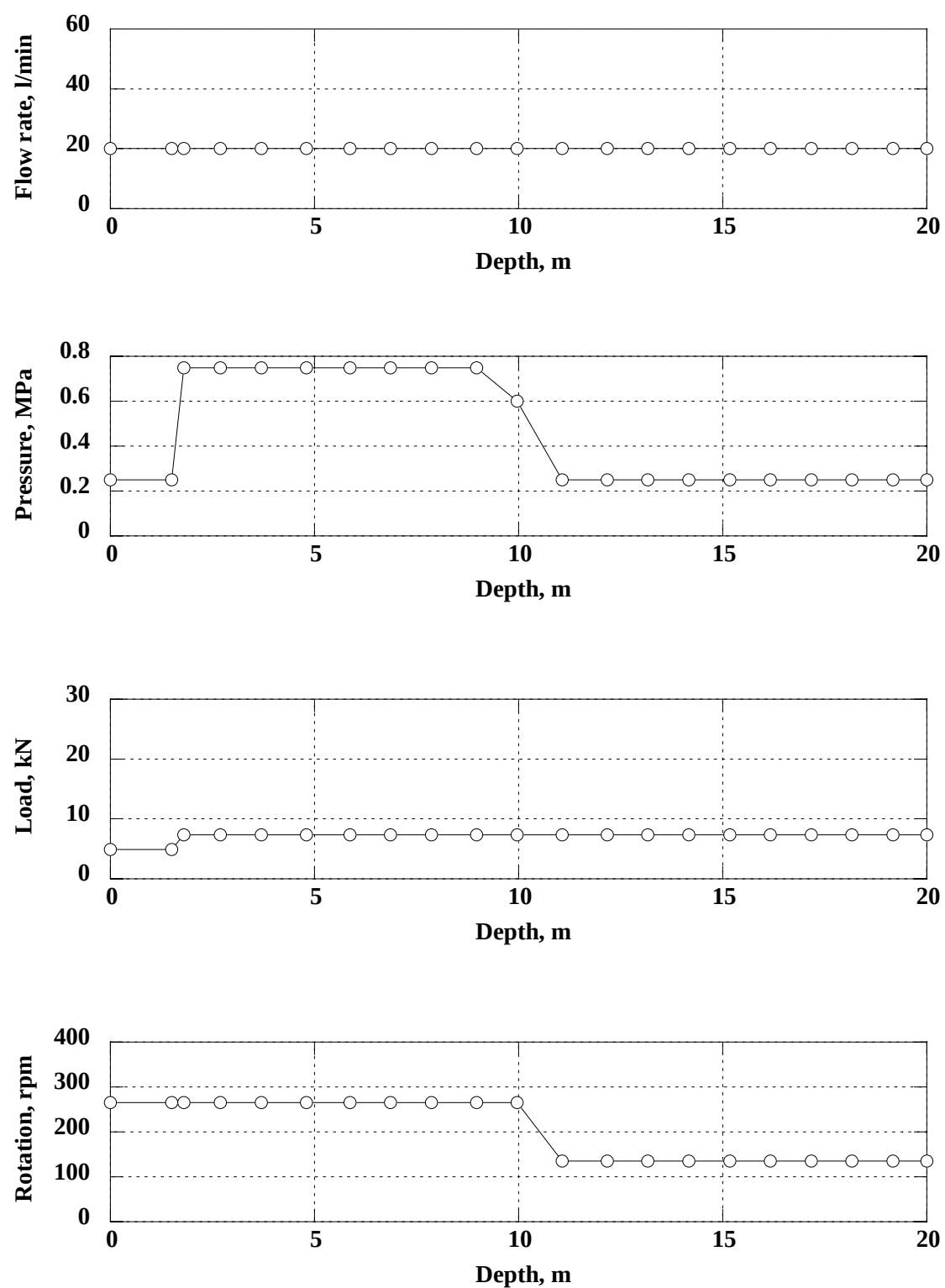


図 2.4 08-E140-M01 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重およびスピンドル回転数と掘削深度との関係

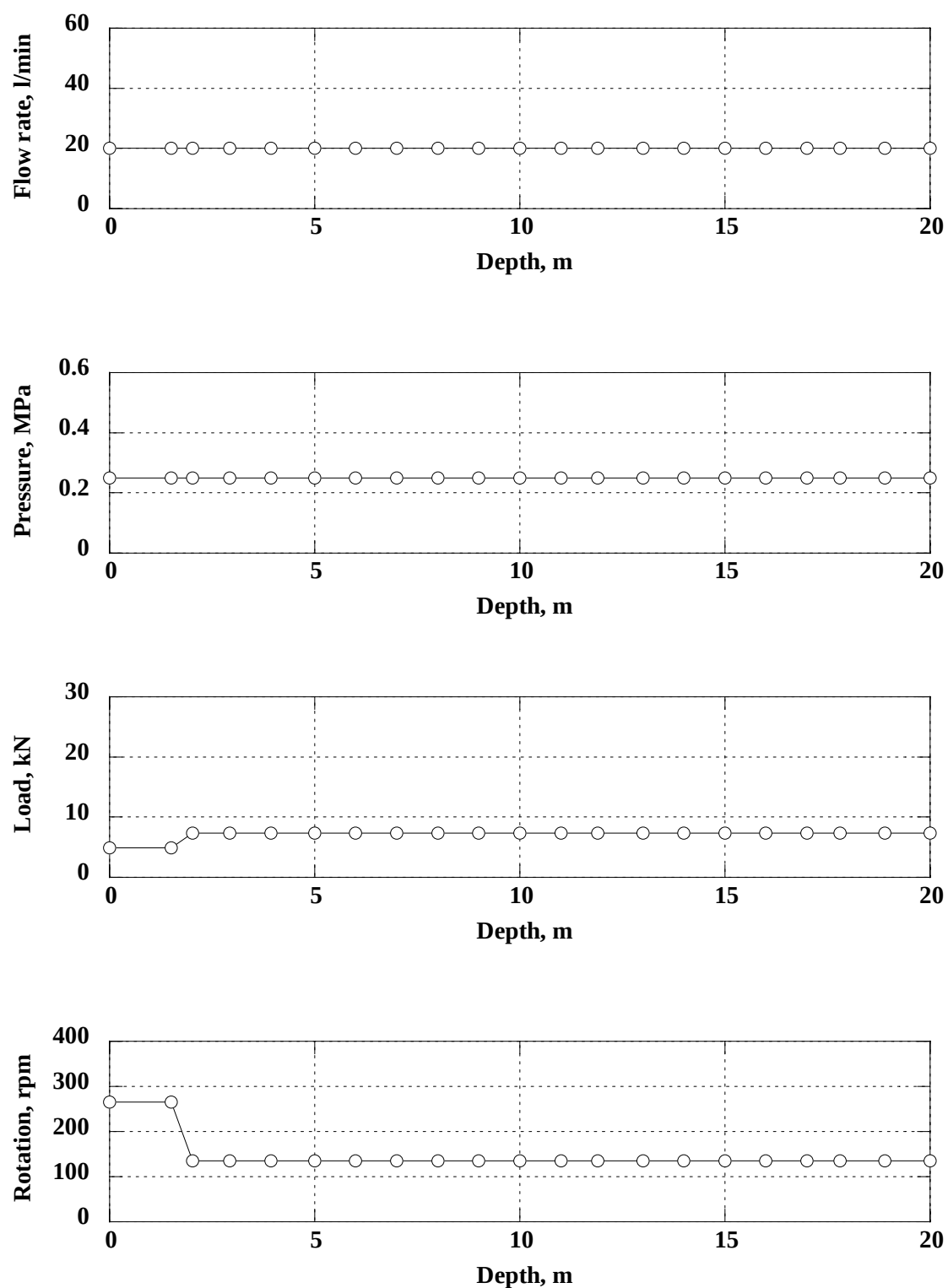


図 2.5 08-E140-M02 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重およびスピンドル回転数と掘削深度との関係

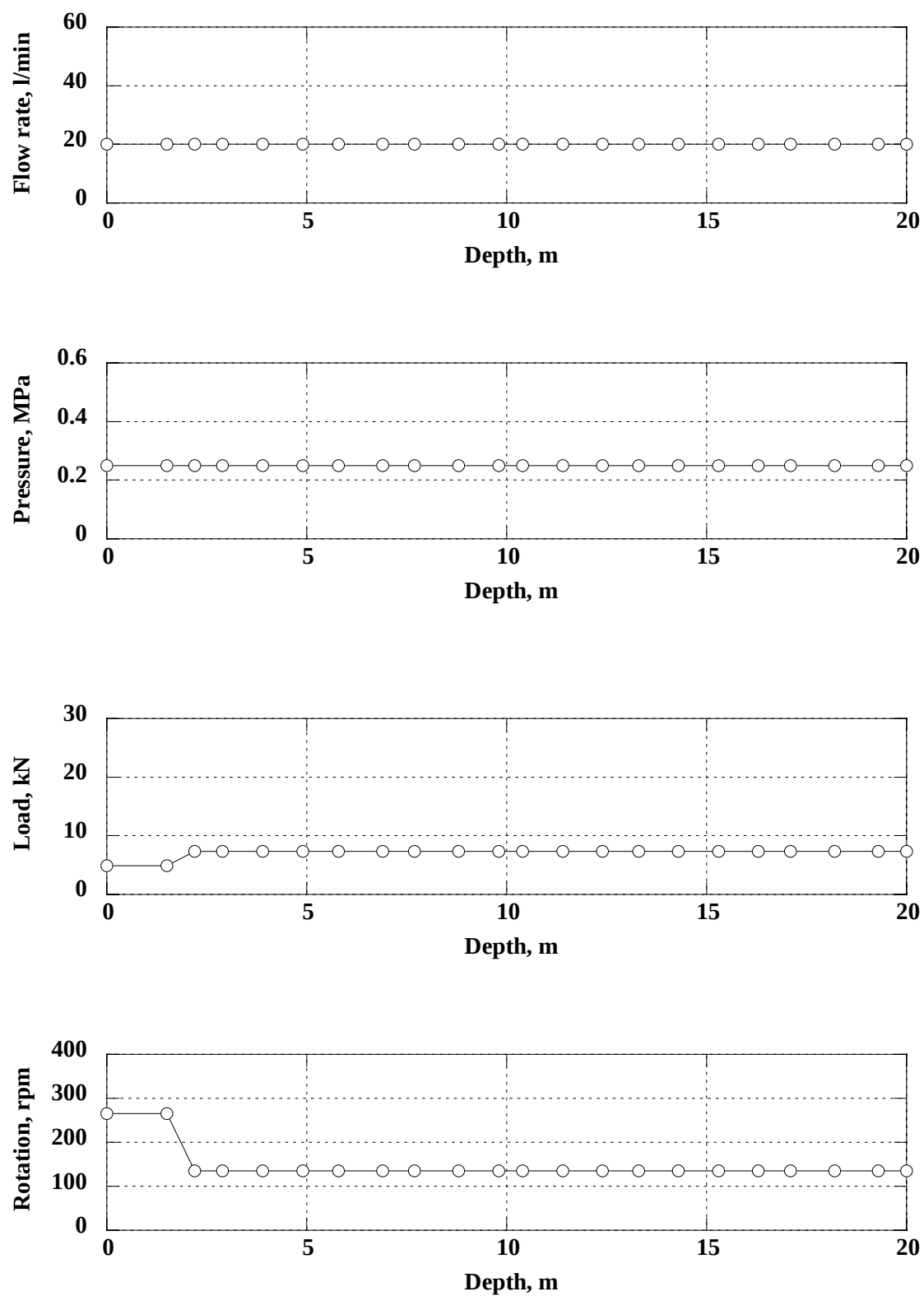


図 2.6 08-E140-M03 孔掘削時のポンプ流量、ポンプ圧力、掘進荷重およびスピンドル回転数と掘削深度との関係

3. 地質記載

3. 1 コアの採取

各孔とも、深度1.50mまではφ92mmシールドロ切ビット（メタルクラウン）によって掘削を行い、深度1.50m以深はφ76mm二重管掘削（コア径55mm）装置のコアパックによりコアを採取した。採取したコアは、深度1mの区切りで切断し、コア箱に収納した。

3. 2 コア記載

ボーリングコアは、幌延深地層研究センターの“コアの記載要領”^[1]に基づいて記載した。コア記載の項目は、深度、岩石名、岩相、岩盤等級区分、RQD、コア回収率、割れ目模式断面図、割れ目番号、割れ目の傾斜角度、割れ目のタイプ、割れ目面の特徴、断層岩、割れ目の成因等である。

総合柱状図を図 3.1～図 3.3 に示す。1m 区間ごとのコアデータ一覧を表 3.1～表 3.3 に示す。

表 3.1 1m 区間ごとのコアデータ一覧表（08-E140-M01 孔）

深度 (m)	地層名	岩石名	岩相	RQD (%)	コア回収率 (%)	岩盤等級 区分	割れ目本数（本/m）			
							h-f	f	o-f	計
0 ～ 1	声問層	珪藻質泥岩	暗灰色・均質・新鮮	24	92	CL-M	0	6	0	6
1 ～ 2				13	55	CL-L, M	0	6	0	6
2 ～ 3				60	100	CL-L, H	0	7	0	7
3 ～ 4				58	100	CL-H, L	0	5	0	5
4 ～ 5				13	100	CL-L, M	0	4	0	4
5 ～ 6				48	100	CL-H, L	0	3	0	3
6 ～ 7				59	100	CL-H, M	0	4	0	4
7 ～ 8				53	100	CL-H, M, L	0	5	0	5
8 ～ 9				53	100	CL-L, H	1	5	0	6
9 ～ 10				0	100	CL-L	0	2	0	2
10 ～ 11				0	100	CL-L	0	15	0	15
11 ～ 12				25	100	CL-L, M	0	5	0	5
12 ～ 13				27	100	CL-H, L	0	7	0	7
13 ～ 14				26	100	CL-H, M, L	0	6	0	6
14 ～ 15				30	100	CL-L, M, H	0	5	0	5
15 ～ 16				69	100	CL-H	0	4	0	4
16 ～ 17				43	100	CL-H, M	0	8	0	8
17 ～ 18				54	100	CL-L, H, M	0	3	0	3
18 ～ 19				20	100	CL-M, L	0	7	0	7
19 ～ 20				0	100	CL-L	0	3	0	3
平均				97.4	計	1	110	0	111	

h-f：癒着割れ目

f：非癒着割れ目

o-f：開口割れ目

表 3.2 1m 区間ごとのコアデーター一覧表 (08-E140-M02 孔)

深度 (m)	地層名	岩石名	岩相	RQD (%)	コア回収率 (%)	岩盤等級 区分	割れ目本数 (本/m)			
							h-f	f	o-f	計
0 ~ 1	声問層	珪藻質泥岩	暗灰色・均質・新鮮	34	97	CL-M	0	2	0	2
1 ~ 2				12	60	CL-L, M	0	8	0	8
2 ~ 3				58	100	CL-M, H	0	5	0	5
3 ~ 4				36	100	CL-M	0	10	0	10
4 ~ 5				12	100	CL-M, L	0	7	0	7
5 ~ 6				13	100	CL-L, M	0	4	0	4
6 ~ 7				24	100	CL-L, M	0	5	0	5
7 ~ 8				0	100	CL-L	0	3	0	3
8 ~ 9				0	100	CL-L	0	0	0	0
9 ~ 10				45	100	CL-L, H	1	2	0	3
10 ~ 11				78	100	CL-H	0	1	0	1
11 ~ 12				32	100	CL-M, L, H	1	6	0	7
12 ~ 13				74	100	CL-H	0	2	0	2
13 ~ 14				44	100	CL-H, M	0	3	0	3
14 ~ 15				37	100	CL-H, L	0	1	0	1
15 ~ 16				31	100	CL-L, M	0	4	0	4
16 ~ 17				0	100	CL-M, L	0	5	0	5
17 ~ 18				45	100	CL-L, H	0	4	0	4
18 ~ 19				39	100	CL-H, M, L	0	4	0	4
19 ~ 20				42	100	CL-H, L	0	3	0	3
平均				97.9	計	2	79	0	81	

h-f : 癒着割れ目

f : 非癒着割れ目

o-f : 開口割れ目

表 3.3 1m 区間ごとのコアデーター一覧表 (08-E140-M03 孔)

深度 (m)	地層名	岩石名	岩相	RQD (%)	コア回収率 (%)	岩盤等級 区分	割れ目本数 (本/m)			
							h-f	f	o-f	計
0 ~ 1	声問層	珪藻質泥岩	暗灰色・均質・新鮮	0	98	CL-L, M	0	5	0	5
1 ~ 2				52	100	CL-M, L	0	4	0	4
2 ~ 3				19	100	CL-M, L	0	1	0	1
3 ~ 4				66	100	CL-L, H	0	3	0	3
4 ~ 5				55	100	CL-H, L	0	2	0	2
5 ~ 6				31	100	CL-L, H	0	5	0	5
6 ~ 7				36	100	CL-H, L	0	4	0	4
7 ~ 8				40	100	CL-L, H	0	5	0	5
8 ~ 9				92	100	CL-H	0	4	0	4
9 ~ 10				51	100	CL-H	0	4	0	4
10 ~ 11				44	100	CL-L, H, M	0	5	0	5
11 ~ 12				56	100	CL-H, M	0	1	0	1
12 ~ 13				21	100	CL-M, L	0	3	0	3
13 ~ 14				0	100	CL-L	0	5	0	5
14 ~ 15				0	100	CL-L	0	4	0	4
15 ~ 16				29	100	CL-L, M	0	3	0	3
16 ~ 17				40	100	CL-M, L	0	6	0	6
17 ~ 18				36	100	CL-M	0	6	0	6
18 ~ 19				32	100	CL-H, L, M	0	4	0	4
19 ~ 20				52	100	CL-M, H	0	6	0	6
平均				99.9	計	0	80	0	80	

h-f : 癒着割れ目

f : 非癒着割れ目

o-f : 開口割れ目

3. 2. 1 コアの地質

各孔とも地質は、声間層に属する珪藻質泥岩である。暗灰色を呈し、均質、新鮮である。

(1) 08-E140-M01 孔

深度 0.00～0.03m はケーシングロのためノンコアである。深度 0.03～0.15m は吹付けコンクリートである。深度 0.15m 以深はすべて泥岩である。長さ 5～20cm 程度の短柱状コアあるいは径 5cm 以下の岩片状～土砂状コアを主体とし、長さ 20cm 以上の長柱状コアの区間は少ない。特に深度 8.92～11.25m の大部分、19.00～19.82m では岩片状～土砂状コアが発達し、柱状コアをなさない。

(2) 08-E140-M02 孔

深度 0.00～0.03m はケーシングロのためノンコアである。深度 0.03～0.37m は吹付けコンクリートである。深度 0.37m 以深はすべて泥岩である。長さ 5～20cm 程度の短柱状コアあるいは径 5cm 以下の岩片状～土砂状コアを主体とし、長さ 20cm 以上の長柱状コアの区間は少ない。特に深度 5.03～5.64m の大部分、6.82～9.50m の大部分、16.23～17.17m の大部分では岩片状～土砂状コアが発達し、柱状コアをなさない。

(3) 08-E140-M03 孔

深度 0.00～0.02m はケーシングロのためノンコアである。深度 0.02～0.20m は吹付けコンクリートである。深度 0.20m 以深はすべて泥岩である。長さ 5～20cm 程度の短柱状コアあるいは径 5cm 以下の岩片状～土砂状コアを主体とし、長さ 20cm 以上の長柱状コアの区間は少ない。特に深度 4.60～5.57m、6.41～7.60m の大部分、12.62～15.32m の大部分では岩片状～土砂状コアが発達し、柱状コアをなさない。

3. 2. 2 岩盤等級区分

各孔の岩盤等級区分は、すべて CL 級であり、割れ目の状態によって CL-L～CL-H と変化する。

一つの等級が数mにわたって連続することは少なく、変化が著しい。比較的連続する区間としては、08-E-140-M01 孔では深度 2.08～3.86m の CL-H、8.92～11.25m の CL-L、14.90～16.11m の CL-H、18.61～20.00m の CL-L があげられる。08-E140-M02 孔では深度 2.45～4.16m の CL-M、6.82～9.50m の CL-L、9.50～10.99m の CL-H、11.90～13.09m の CL-H があげられる。08-E140-M03 孔では深度 1.64～2.69m の CL-M、3.27～4.60m の CL-H、6.41～7.60m の CL-L、7.60～9.95m の CL-H、11.51～12.62m の CL-M、12.67～15.32m の CL-L、15.32～16.72m の CL-M があげられる。

3. 2. 3 RQD

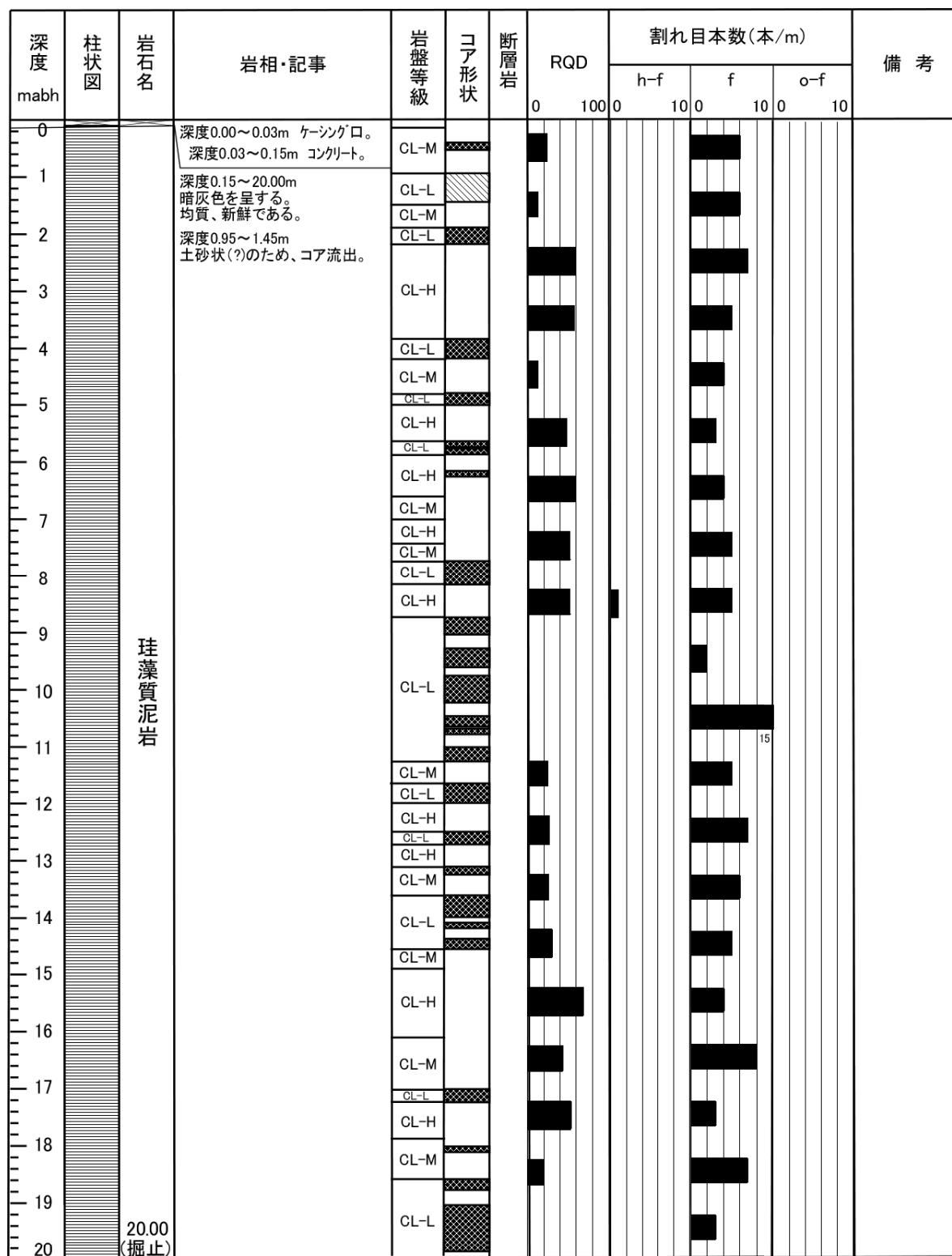
RQD(Rock Quality Designation)は、1 m の区間長のうち、長さ 10 cm 以上の柱状コアの比率(%)である。

各孔とも岩盤等級区分が CL-H を含む区間では、RQD はほぼ 50 以上を示す。08-E140-M02 孔の深度 10～11m 間で 78、12～13m 間で 74、08-E140-M03 孔の深度 8～9m 区間で 92 と高い値を示す。CL-M と CL-L を含む区間では、RQD は 20～40 前後と低い。CL-L 区間が卓越する 08-E-140-M01 孔の深度 9～11m 間、19～20m 間、08-E140-M02 孔の深度 7～9m 間、16～17m

間、08-E140-M03 孔の深度 0～1m 間、13～15m 間はゼロである。

3. 2. 4 コア回収率

コア回収率は 08-E140-M01 孔が 97.4%、08-E140-M02 孔が 97.9%、08-E140-M03 孔が 99.9% であり、各孔ともほぼ 100%に近い。



(コア形状)

 破碎状コア(岩片状～土砂状)

 ノンコア

(断層岩)

 断層角礫

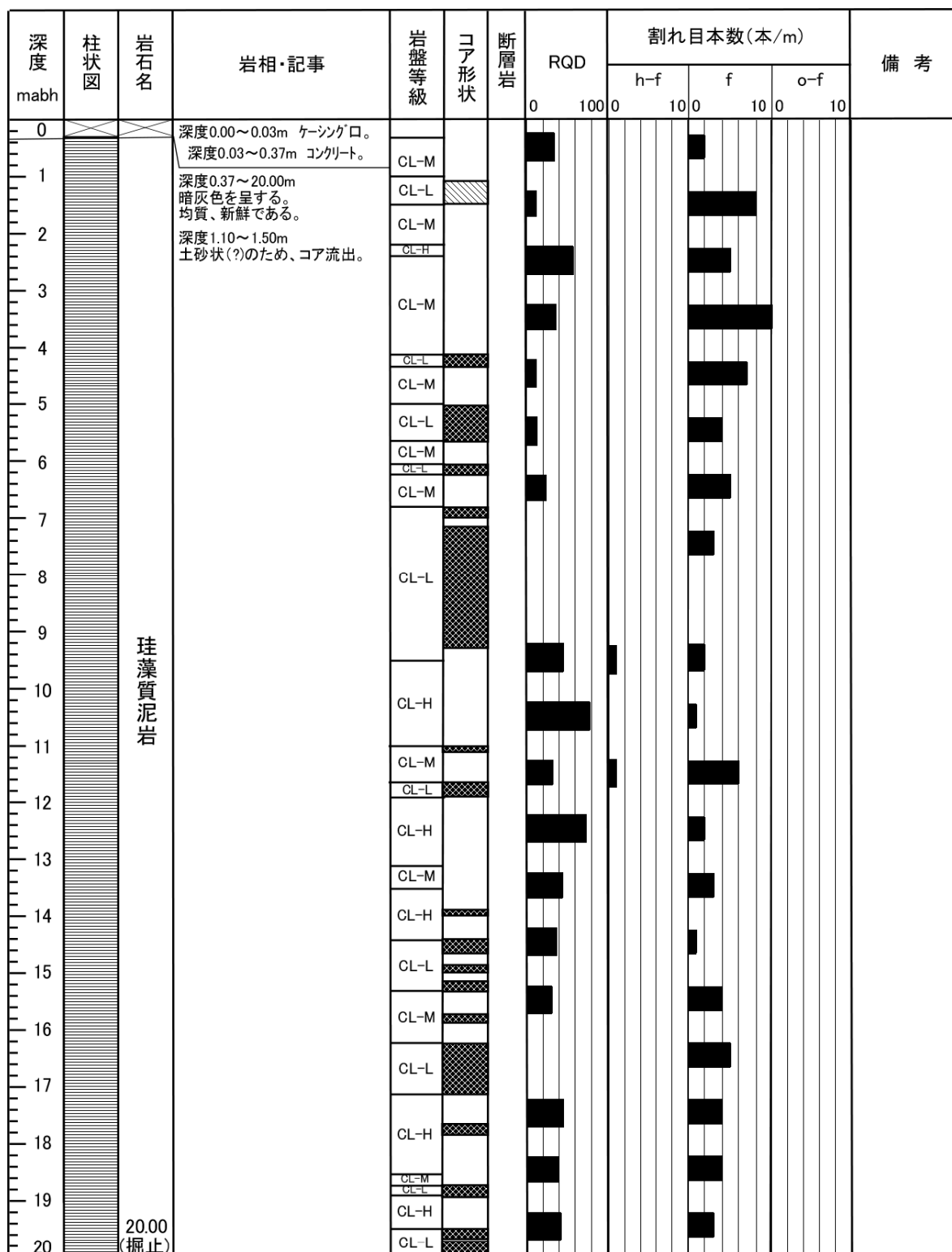
(割れ目本数)

h-f : 癒着割れ目

f : 非癒着割れ目

o-f : 開口割れ目

図 3.1 総合柱状図 (08-E140-M01 孔)



(コア形状)



破砕状コア(岩片状~土砂状)



ノンコア

(断層岩)



断層角礫

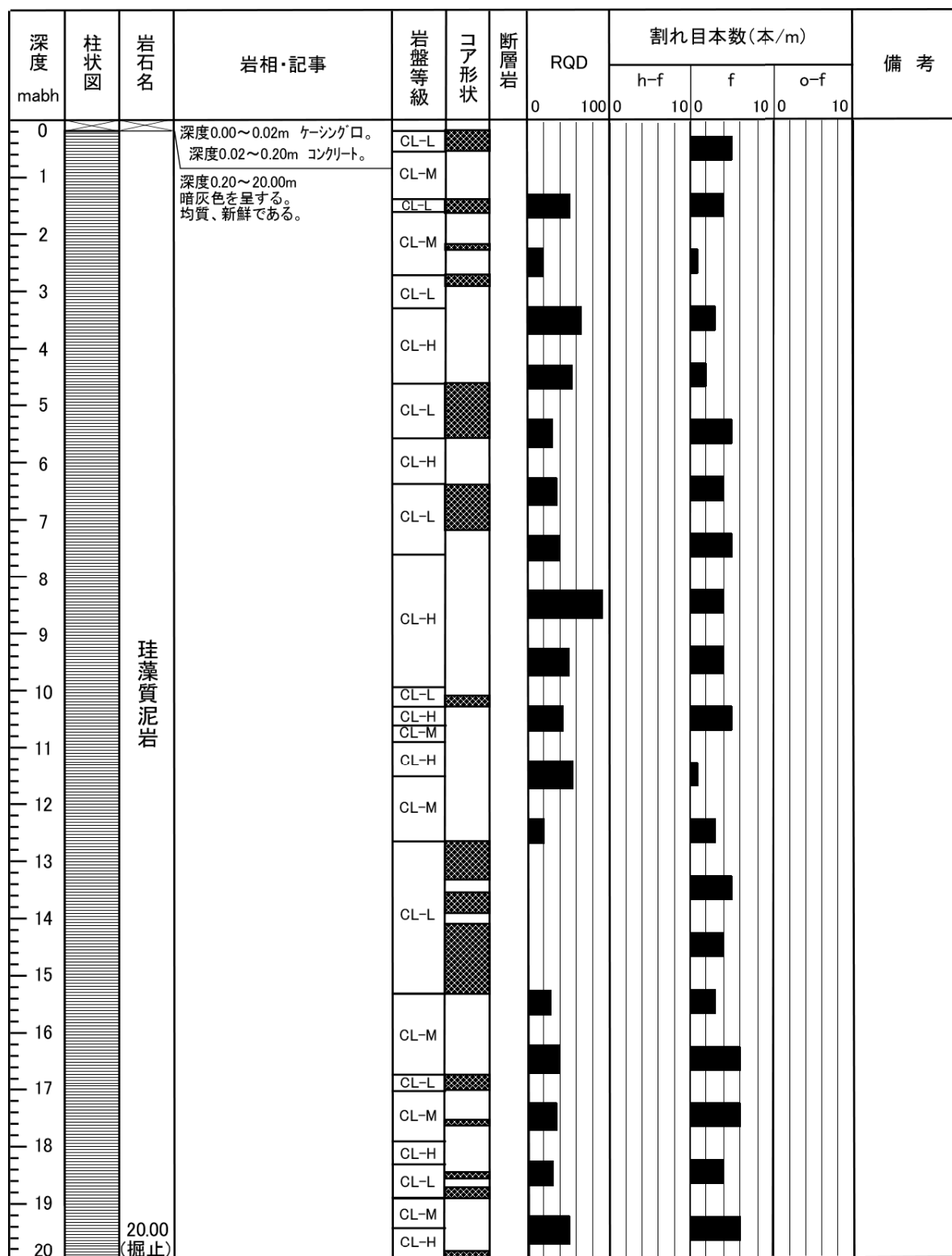
(割れ目本数)

h-f : 癒着割れ目

f : 非癒着割れ目

o-f : 開口割れ目

図 3.2 総合柱状図 (08-E140-M02 孔)



(コア形状)

 破砕状コア(岩片状～土砂状)

 ノンコア

(断層岩)

 断層角礫

(割れ目本数)

h-f : 癒着割れ目

f : 非癒着割れ目

o-f : 開口割れ目

図 3.3 総合柱状図 (08-E140-M03 孔)

3. 2. 5 割れ目

割れ目（機械割れをのぞく）のデータ一覧を表 3.4～表 3.6 に示す。

（1）割れ目の状況

割れ目は、08-E140-M01 孔で 111 本、08-E140-M02 孔で 81 本、08-E140-M03 孔で 80 本認められた。これらの割れ目タイプは、非癒着割れ目 (f) がほとんどである。癒着割れ目 (h-f) は極まれで、開口割れ目 (o-f) はコア観察の段階で確実なものは認められなかった。

（2）割れ目の傾斜角度

コアに垂直な面からの割れ目の傾斜角度の頻度分布を図 3.4～図 3.6 に示す。40° 前後の中角度の割れ目が多く、70° を超える割れ目は少ない。08-E140-M01 孔では 10° 以下の割れ目も多い。

（3）割れ目面の特徴

非癒着割れ目はいずれも鏡肌 (SS) を有する。

これらにはしばしば条線構造 (SL) が認められた。そのレイク角度（割れ目の走向線（短軸）からの時計回りの角度）は、08-E140-M01 孔では 60～120° 前後の縦方向のものが多く、08-E140-M02 孔と 03-E140-M03 孔では 0～30° あるいは 150～180°（M03 孔）の横方向のものが多く（図 3.7～図 3.9）。

また、しばしばスリッケンステップ構造 (ST) も認められた。その変位方向（割れ目の走向線（短軸）からの時計回りの角度）は、08-E140-M01 孔では 90～150° あるいは 240～330° の縦方向のものが多く、08-E140-M02 孔と 03-E140-M03 孔では 180～240° あるいは 330～360°、0～30°（M03 孔）の横方向のものが多く（図 3.10～図 3.12）。

（4）断層岩

今回の割れ目には、断層角礫、断層粘土等を伴うなどの明確な断層は認められなかった。しかし、岩片状～土砂状コアが発達する区間（08-E140-M01 孔の深度 8.92～11.25m、19.00～19.82m、08-E140-M02 孔の深度 5.03～5.64m、6.82～9.50m、16.23～17.17m、08-E140-M03 孔の深度 4.60～5.57m、6.41～7.60m、12.62～15.32m 等）は、岩盤の弱部であり、破碎帯などの可能性が考えられる。

（5）割れ目の成因

割れ目の主体をなす非癒着割れ目は、鏡肌を有し、条線あるいはスリッケンステップ構造も認められることから、剪断割れ目である。また、岩片状コアのなかにも鏡肌、条線、スリッケンステップ構造が認められることがある。

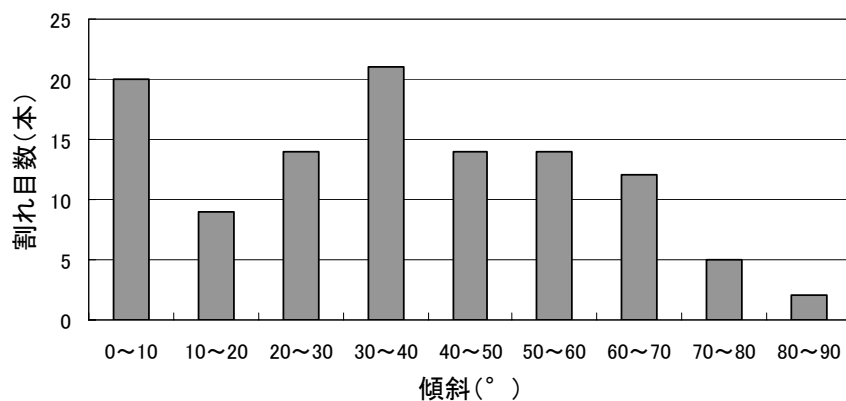


図 3.4 割れ目の傾斜角度の頻度分布図 (08-E140-M01 孔)

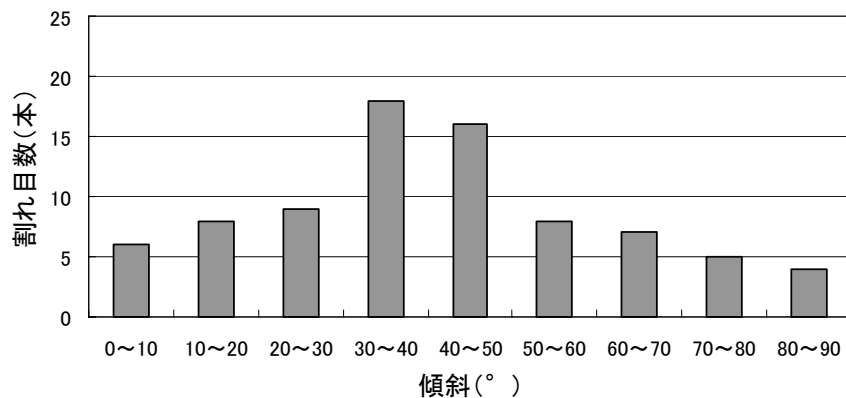


図 3.5 割れ目の傾斜角度の頻度分布図 (08-E140-M02 孔)

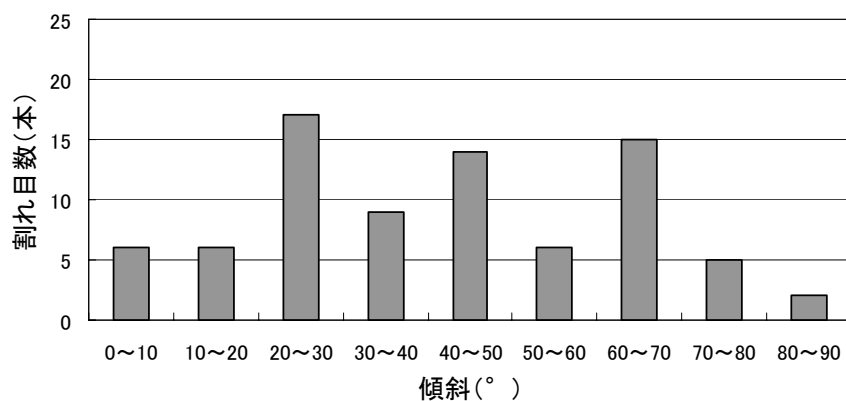


図 3.6 割れ目の傾斜角度の頻度分布図 (08-E140-M03 孔)

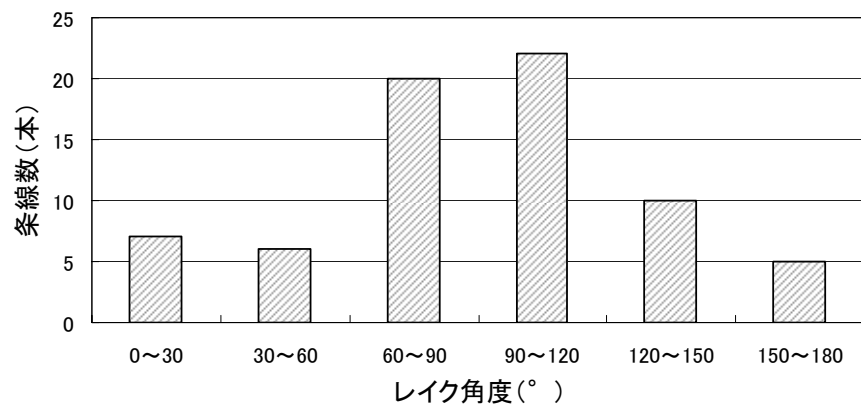


図 3.7 条線のレイク角度の頻度分布図 (08-E140-M01 孔)

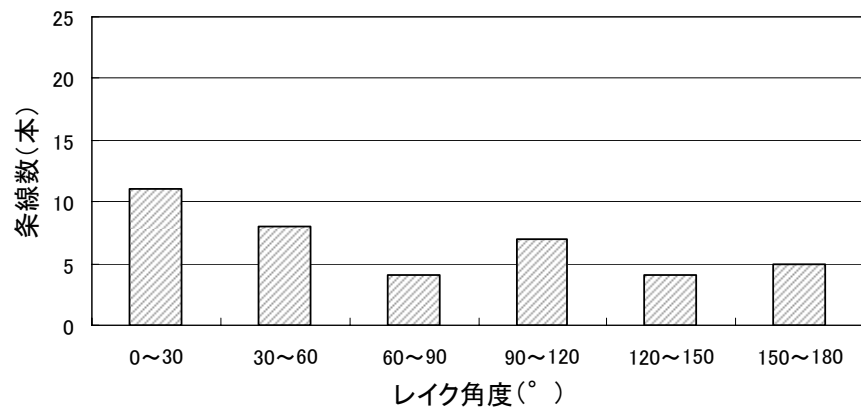


図 3.8 条線のレイク角度の頻度分布図 (08-E140-M02 孔)

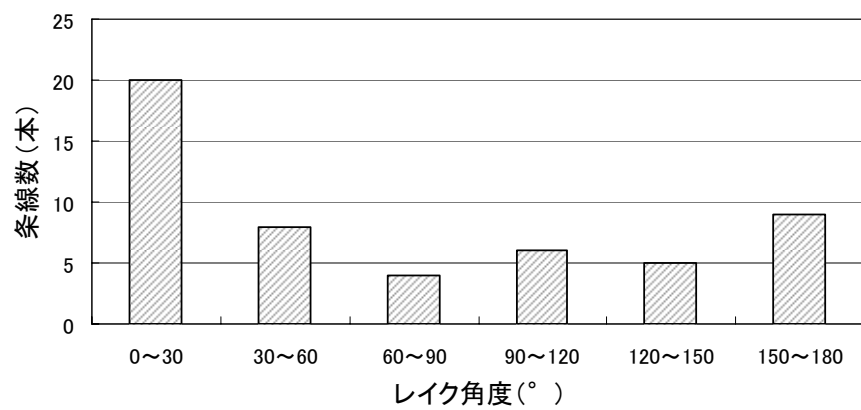


図 3.9 条線のレイク角度の頻度分布図 (08-E140-M03 孔)

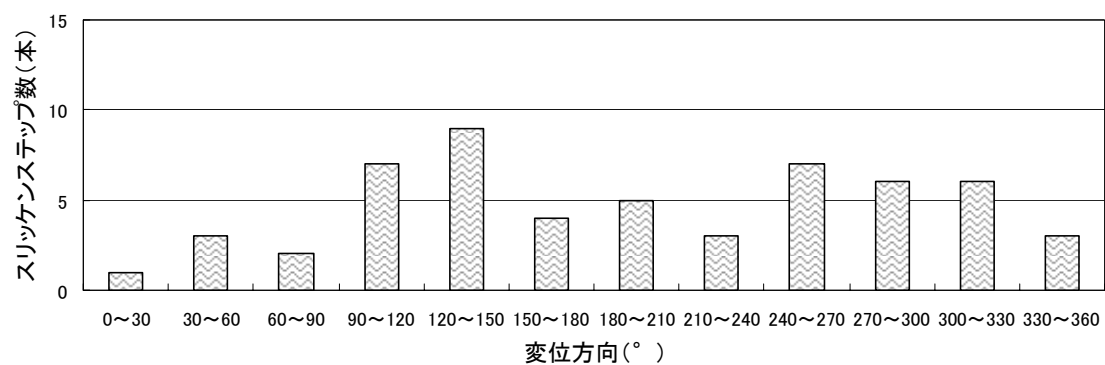


図 3.10 スリッケンステップの変位方向の頻度分布図 (08-E140-M01 孔)

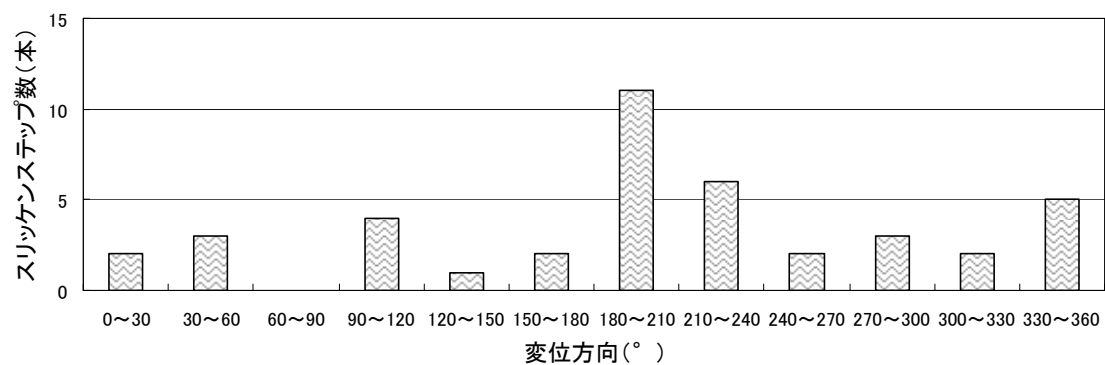


図 3.11 スリッケンステップの変位方向の頻度分布図 (08-E140-M02 孔)

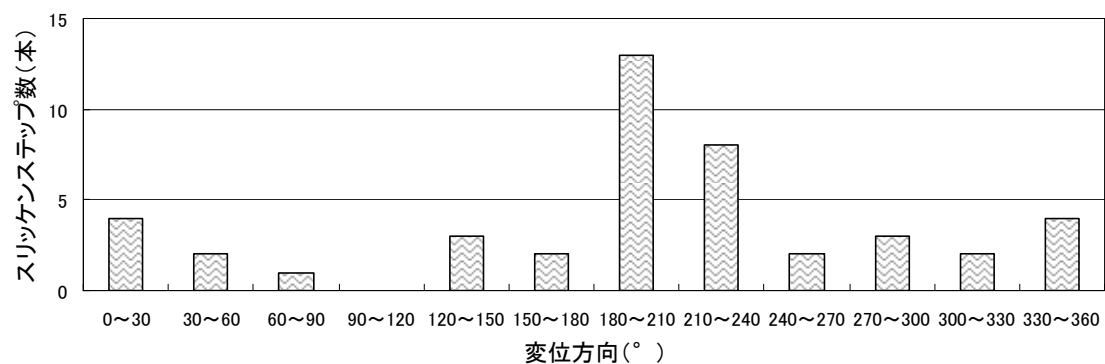


図 3.12 スリッケンステップの変位方向の頻度分布図 (08-E140-M03 孔)

表 3.4 割れ目データ一覧表(08-E140-M01 孔) (1/3)

No.	割れ目深度(m)			割れ目 番号	タイプ	傾斜	鏡肌	条線	スリッペン ステップ	断層岩	成因
	上端	下端	中間			(°)	有無	レク(°)	変位(°)	有無	
1	0.28	0.29	0.29	0-1	f	10	有	10	-	-	S
2	0.32	0.32	0.32	0-2	f	5	有	120	-	-	S
3	0.52	0.59	0.56	0-3	f	65	有	50	230	-	S
4	0.58	0.59	0.59	0-4	f	5	有	200	-	-	S
5	0.65	0.66	0.66	0-5	f	10	有	100	-	-	S
6	0.79	0.80	0.80	0-6	f	30	有	80	-	-	S
7	1.62	1.64	1.63	1-1	f	40	有	70	-	-	S
8	1.64	1.70	1.67	1-2	f	50	有	70	-	-	S
9	1.69	1.76	1.73	1-3	f	80	有	-	-	-	S
10	1.72	1.77	1.75	1-4	f	40	有	-	130	-	S
11	1.76	1.83	1.80	1-5	f	60	有	120	-	-	S
12	1.87	1.92	1.90	1-6	f	70	有	30	-	-	S
13	2.00	2.15	2.08	2-1	f	75	有	70	250	-	S
14	2.13	2.19	2.16	2-2	f	50	有	70	70	-	S
15	2.27	2.35	2.31	2-3	f	70	有	130	310	-	S
16	2.53	2.54	2.54	2-4	f	30	有	70	-	-	S
17	2.68	2.72	2.70	2-5	f	60	有	120	120	-	S
18	2.75	2.77	2.76	2-6	f	10	有	70	-	-	S
19	2.79	2.80	2.80	2-7	f	20	有	-	-	-	S
20	3.38	3.39	3.39	3-1	f	10	有	70	-	-	S
21	3.39	3.40	3.40	3-2	f	20	有	140	320	-	S
22	3.64	3.66	3.65	3-3	f	30	有	140	320	-	S
23	3.65	3.70	3.68	3-4	f	40	有	30	30	-	S
24	3.81	3.90	3.86	3-5	f	60	有	80	-	-	S
25	4.39	4.40	4.40	4-1	f	40	有	-	-	-	S
26	4.51	4.54	4.53	4-2	f	45	有	120	120	-	S
27	4.67	4.70	4.69	4-3	f	40	有	-	-	-	S
28	4.68	4.72	4.70	4-4	f	60	有	-	-	-	S
29	5.28	5.31	5.30	5-1	f	30	有	80	80	-	S
30	5.40	5.41	5.41	5-2	f	30	有	-	-	-	S
31	5.52	5.54	5.53	5-3	f	50	有	-	-	-	S
32	6.42	6.43	6.43	6-1	f	10	-	-	-	-	?
33	6.79	6.80	6.80	6-2	f	30	有	80	260	-	S
34	6.79	6.87	6.83	6-3	f	90	?	-	-	-	S?
35	6.87	7.00	6.94	6-4	f	70	有	100	280	-	S
36	7.40	7.45	7.43	7-1	f	50	有	100	280	-	S
37	7.57	7.59	7.58	7-2	f	30	有	120	120	-	S
38	7.70	7.71	7.71	7-3	f	10	有	70	250	-	S
39	7.73	7.77	7.75	7-4	f	50	有	90	270	-	S
40	7.74	7.79	7.77	7-5	f	40	有	160	340	-	S
41	8.29	8.30	8.30	8'-1	h-f	10	-	-	-	-	-
42	8.29	8.31	8.30	8-1	f	90	有	100	100	-	S
43	8.49	8.50	8.50	8-2	f	10	有	-	210	-	S
44	8.58	8.63	8.61	8-3	f	40	有	110	290	-	S
45	8.75	8.81	8.78	8-4	f	60	有	110	-	-	S
46	8.90	8.93	8.92	8-5	f	50	有	30	-	-	S
47	9.23	9.30	9.27	9-1	f	50	有	140	140	-	S
48	9.63	9.68	9.66	9-2	f	50	有	90	-	-	S
49	10.10	10.15	10.13	10-1	f	60	有	150	150	-	S
50	10.18	10.24	10.21	10-2	f	60	有	150	150	-	S

タイプ h-f : 癒着割れ目
f : 非癒着割れ目

成因 S : 剪断割れ目

表 3.4 割れ目データ一覧表(08-E140-M01 孔) (2/3)

No.	割れ目深度(m)			割れ目 番号	タイプ	傾斜	鏡肌	条線	スリッケン ステップ	断層岩	成因
	上端	下端	中間			(°)	有無	レイク(°)	変位(°)	有無	
51	10.30	10.31	10.31	10-3	f	10	有	120	300	-	S
52	10.32	10.33	10.33	10-4	f	10	有	110	290	-	S
53	10.37	10.37	10.37	10-5	f	10	有	160	160	-	S
54	10.44	10.44	10.44	10-6	f	10	有	140	140	-	S
55	10.53	10.61	10.57	10-7	f	60	有	150	330	-	S
56	10.61	10.62	10.62	10-8	f	20	有	90	290	-	S
57	10.67	10.68	10.68	10-9	f	20	有	80	260	-	S
58	10.67	10.79	10.73	10-10	f	70	有	-	-	-	S
59	10.74	10.78	10.76	10-11	f	50	有	-	140	-	S
60	10.83	10.88	10.86	10-12	f	50	有	-	110	-	S
61	10.87	10.87	10.87	10-13	f	0	有	-	-	-	S
62	10.91	10.91	10.91	10-14	f	10	有	120	-	-	S
63	10.95	10.98	10.97	10-15	f	40	有	-	-	-	S
64	11.21	11.28	11.25	11-1	f	60	有	80	-	-	S
65	11.40	11.42	11.41	11-2	f	40	有	90	270	-	S
66	11.43	11.47	11.45	11-3	f	60	有	-	-	-	S
67	11.52	11.52	11.52	11-4	f	0	有	-	-	-	S
68	11.66	11.66	11.66	11-5	f	10	有	80	260	-	S
69	12.05	12.10	12.08	12-1	f	50	有	-	340	-	S
70	12.27	12.28	12.28	12-2	f	30	有	160	160	-	S
71	12.45	12.47	12.46	12-3	f	40	有	20	200	-	S
72	12.50	12.78	12.64	12-4	f	70	有	120	120	-	S
73	12.71	12.72	12.72	12-5	f	10	有	10	190	-	S
74	12.78	12.80	12.79	12-6	f	20	有	170	350	-	S
75	12.89	13.00	12.95	12-7	f	75	有	-	-	-	S
76	13.00	13.05	13.03	13-1	f	50	有	-	-	-	S
77	13.13	13.14	13.14	13-2	f	30	有	10	190	-	S
78	13.26	13.29	13.28	13-3	f	40	有	110	-	-	S
79	13.53	13.55	13.54	13-4	f	30	有	-	-	-	S
80	13.55	13.59	13.57	13-5	f	45	有	120	-	-	S
81	13.60	13.64	13.62	13-6	f	40	有	120	-	-	S
82	14.37	14.40	14.39	14-1	f	40	有	-	310	-	S
83	14.56	14.58	14.57	14-2	f	30	有	-	-	-	S
84	14.61	14.63	14.62	14-3	f	30	有	-	-	-	S
85	14.70	14.78	14.74	14-4	f	65	有	-	160	-	S
86	14.81	14.85	14.83	14-5	f	40	有	100	-	-	S
87	15.26	15.31	15.29	15-1	f	70	有	-	150	-	S
88	15.33	15.39	15.36	15-2	f	60	有	-	-	-	S
89	15.39	15.48	15.44	15-3	f	70	有	-	-	-	S
90	15.80	15.82	15.81	15-4	f	50	有	-	190	-	S
91	16.10	16.11	16.11	16-1	f	40	有	100	-	-	S
92	16.11	16.14	16.13	16-2	f	40	有	40	-	-	S
93	16.22	16.27	16.25	16-3	f	60	有	-	130	-	S
94	16.27	16.27	16.27	16-4	f	10	有	60	60	-	S
95	16.32	16.40	16.36	16-5	f	80	?	-	-	-	S?
96	16.70	16.73	16.72	16-6	f	50	有	60	240	-	S
97	16.75	16.88	16.82	16-7	f	70	?	-	-	-	S?
98	16.80	16.88	16.84	16-8	f	60	有	-	-	-	S
99	17.64	17.67	17.66	17-1	f	40	有	-	-	-	S
100	17.88	17.88	17.88	17-2	f	30	有	110	110	-	S

タイプ h-f : 癒着割れ目
f : 非癒着割れ目

成因 S : 剪断割れ目

表 3.4 割れ目データ一覧表(08-E140-M01 孔) (3/3)

No.	割れ目深度(m)			割れ目 番号	タイプ	傾斜	鏡肌	条線	スリッペン ステップ	断層岩	成因
	上端	下端	中間			(°)	有無	レク(°)	変位(°)	有無	
101	17.94	17.97	17.96	17-3	f	45	有	-	-	-	S
102	18.28	18.30	18.29	18-1	f	20	有	-	-	-	S
103	18.25	18.40	18.33	18-2	f	70	有	140	140	-	S
104	18.49	18.50	18.50	18-3	f	20	有	-	220	-	S
105	18.52	18.70	18.61	18-4	f	80	有	40	40	-	S
106	18.66	18.77	18.72	18-5	f	60	有	170	160	-	S
107	18.77	18.78	18.78	18-6	f	20	有	40	40	-	S
108	18.97	19.00	18.99	18-7	f	45	有	-	-	-	S
109	19.81	19.83	19.82	19-1	f	30	有	150	330	-	S
110	19.84	19.98	19.91	19-2	f	70	有	70	-	-	S
111	19.91	19.92	19.92	19-3	f	20	有	120	-	-	S

タイプ h-f : 癒着割れ目
f : 非癒着割れ目

成因 S : 剪断割れ目

表 3.5 割れ目データ一覧表(08-E140-M02 孔) (1/2)

No.	割れ目深度(m)			割れ目 番号	タイプ	傾斜 (°)	鏡肌 有無	条線 レク(°)	スリッペン ステップ		断層岩 有無	成因
	上端	下端	中間						変位(°)			
1	0.71	0.77	0.74	0-1	f	40	有	50	－	－	－	S
2	0.79	0.80	0.80	0-2	f	20	有	100	－	－	－	S
3	1.01	1.05	1.03	1-1	f	40	有	70	－	－	－	S
4	1.07	1.10	1.09	1-2	f	50	有	100	－	－	－	S
5	1.62	1.65	1.64	1-3	f	70	?	－	－	－	－	S?
6	1.66	1.69	1.68	1-4	f	20	有	－	－	－	－	S
7	1.69	1.76	1.73	1-5	f	50	有	60	60	－	－	S
8	1.77	1.78	1.78	1-6	f	50	有	－	－	－	－	S
9	1.81	1.82	1.82	1-7	f	40	有	160	340	－	－	S
10	1.91	1.95	1.93	1-8	f	60	有	50	－	－	－	S
11	2.03	2.04	2.04	2-1	f	30	有	－	－	－	－	S
12	2.44	2.46	2.45	2-2	f	50	有	110	290	－	－	S
13	2.46	2.48	2.47	2-3	f	40	有	90	270	－	－	S
14	2.61	2.72	2.67	2-4	f	65	有	20	200	－	－	S
15	2.82	2.84	2.83	2-5	f	40	有	100	280	－	－	S
16	3.00	3.03	3.02	3-1	f	40	有	－	260	－	－	S
17	3.14	3.25	3.20	3-2	f	60	有	170	350	－	－	S
18	3.24	3.30	3.27	3-3	f	60	有	20	200	－	－	S
19	3.50	3.52	3.51	3-4	f	40	有	－	300	－	－	S
20	3.52	3.56	3.54	3-5	f	45	有	30	210	－	－	S
21	3.60	3.62	3.61	3-6	f	20	有	140	－	－	－	S
22	3.66	3.68	3.67	3-7	f	40	有	－	－	－	－	S
23	3.68	3.78	3.73	3-8	f	60	有	10	190	－	－	S
24	3.83	3.84	3.84	3-9	f	30	有	－	－	－	－	S
25	3.90	4.00	3.95	3-10	f	70	有	10	－	－	－	S
26	4.10	4.16	4.13	4-1	f	70	有	10	210	－	－	S
27	4.48	4.50	4.49	4-2	f	40	有	－	－	－	－	S
28	4.52	4.54	4.53	4-3	f	60	有	－	－	－	－	S
29	4.56	4.62	4.59	4-4	f	70	有	－	190	－	－	S
30	4.68	4.71	4.70	4-5	f	50	有	－	－	－	－	S
31	4.76	4.78	4.77	4-6	f	40	有	－	340	－	－	S
32	4.78	4.82	4.80	4-7	f	50	有	150	150	－	－	S
33	5.16	5.20	5.18	5-1	f	40	有	50	230	－	－	S
34	5.21	5.24	5.23	5-2	f	50	有	－	－	－	－	S
35	5.63	5.64	5.64	5-3	f	20	有	120	120	－	－	S
36	5.98	6.00	5.99	5-4	f	30	有	－	－	－	－	S
37	6.22	6.23	6.23	6-1	f	10	有	50	50	－	－	S
38	6.31	6.33	6.32	6-2	f	20	有	－	－	－	－	S
39	6.44	6.45	6.45	6-3	f	10	有	－	－	－	－	S
40	6.49	6.50	6.50	6-4	f	20	有	－	－	－	－	S
41	6.55	6.56	6.56	6-5	f	30	有	－	－	－	－	S
42	7.00	7.03	7.02	7-1	f	75	有	20	200	－	－	S
43	7.00	7.08	7.04	7-2	f	85	有	170	170	－	－	S
44	7.12	7.16	7.14	7-3	f	60	有	10	10	－	－	S
45	9.27	9.37	9.32	9-1	f	85	有	160	340	－	－	S
46	9.44	9.56	9.50	9-2	f	85	有	160	340	－	－	S
47	9.56	9.70	9.63	9'-1	h-f	85	－	－	－	－	－	－
48	10.97	11.00	10.99	10-1	f	60	有	－	60	－	－	S
49	11.10	11.17	11.14	11-1	f	50	有	－	－	－	－	S
50	11.10	11.19	11.15	11-2	f	75	有	20	200	－	－	S

タイプ h-f : 癒着割れ目
f : 非癒着割れ目

成因 S : 剪断割れ目

表 3.5 割れ目データ一覧表(08-E140-M02 孔) (2/2)

No.	割れ目深度(m)			割れ目 番号	タイプ	傾斜	鏡肌	条線	スリッケン ステップ	断層岩	成因
	上端	下端	中間			(°)	有無	レイク(°)	変位(°)	有無	
51	11.30	11.34	11.32	11-3	f	40	有	110	110	－	S
52	11.40	11.52	11.46	11-4	f	80	有	－	－	－	S
53	11.50	11.55	11.53	11'-1	h-f	80	－	－	－	－	－
54	11.60	11.70	11.65	11-5	f	75	有	－	160	－	S
55	11.66	11.70	11.68	11-6	f	70	有	－	－	－	S
56	12.77	12.81	12.79	12-1	f	50	有	－	－	－	S
57	12.95	12.96	12.96	12-2	f	10	有	－	－	－	S
58	13.29	13.32	13.31	13-1	f	45	有	－	210	－	S
59	13.32	13.37	13.35	13-2	f	60	有	－	220	－	S
60	13.40	13.41	13.41	13-3	f	40	有	60	240	－	S
61	14.70	14.72	14.71	14-1	f	30	有	－	－	－	S
62	15.15	15.19	15.17	15-1	f	30	有	－	－	－	S
63	15.86	15.89	15.88	15-2	f	30	有	－	－	－	S
64	15.92	15.92	15.92	15-3	f	10	有	－	－	－	S
65	15.96	16.03	16.00	15-4	f	50	有	－	－	－	S
66	16.11	16.15	16.13	16-1	f	40	有	70	－	－	S
67	16.18	16.20	16.19	16-2	f	40	有	－	220	－	S
68	16.21	16.24	16.23	16-3	f	40	有	－	－	－	S
69	16.32	16.36	16.34	16-4	f	30	有	－	－	－	S
70	16.36	16.44	16.40	16-5	f	65	有	30	30	－	S
71	17.11	17.17	17.14	17-1	f	40	有	40	220	－	S
72	17.46	17.46	17.46	17-2	f	10	有	90	－	－	S
73	17.50	17.51	17.51	17-3	f	30	有	100	100	－	S
74	17.54	17.56	17.55	17-4	f	50	有	－	190	－	S
75	18.06	18.07	18.07	18-1	f	50	有	60	240	－	S
76	18.50	18.51	18.51	18-2	f	10	有	150	330	－	S
77	18.58	18.60	18.59	18-3	f	20	?	－	－	－	S?
78	18.63	18.66	18.65	18-4	f	40	有	－	－	－	S
79	19.44	19.45	19.45	19-1	f	20	有	150	330	－	S
80	19.60	19.65	19.63	19-2	f	50	有	30	210	－	S
81	19.73	19.76	19.75	19-3	f	50	有	－	110	－	S

タイプ h-f : 癒着割れ目
f : 非癒着割れ目

成因 S : 剪断割れ目

表 3.6 割れ目データ一覧表(08-E140-M03 孔) (1/2)

No.	割れ目深度(m)			割れ目 番号	タイプ	傾斜 (°)	鏡肌 有無	条線 レク(°)	スリッペン ステップ 変位(°)	断層岩 有無	成因
	上端	下端	中間								
1	0.20	0.28	0.24	0-1	f	50	有	0	-	-	S
2	0.28	0.37	0.33	0-2	f	80	有	355	-	-	S
3	0.76	0.77	0.77	0-3	f	30	有	-	-	-	S
4	0.80	0.83	0.82	0-4	f	50	有	170	-	-	S
5	0.82	0.85	0.84	0-5	f	30	有	120	-	-	S
6	1.07	1.08	1.08	1-1	f	40	有	70	-	-	S
7	1.22	1.30	1.26	1-2	f	45	有	-	300	-	S
8	1.73	1.75	1.74	1-3	f	20	有	-	-	-	S
9	1.97	2.00	1.98	1-4	f	40	有	-	-	-	S
10	2.88	2.90	2.89	2-1	f	40	有	-	-	-	S
11	3.06	3.08	3.07	3-1	f	45	有	130	310	-	S
12	3.27	3.29	3.28	3-2	f	30	?	-	-	-	S?
13	3.89	3.90	3.90	3-3	f	20	有	80	260	-	S
14	4.70	4.75	4.73	4-1	f	60	有	-	-	-	S
15	4.70	4.80	4.75	4-2	f	70	有	170	10	-	S
16	5.04	5.28	5.16	5-1	f	80	有	10	190	-	S
17	5.76	5.77	5.77	5-2	f	40	有	20	-	-	S
18	5.79	5.81	5.80	5-3	f	40	有	170	-	-	S
19	5.83	5.83	5.83	5-4	f	10	有	130	310	-	S
20	5.86	5.87	5.87	5-5	f	10	有	-	-	-	S
21	6.13	6.15	6.14	6-1	f	30	有	120	-	-	S
22	6.15	6.18	6.17	6-2	f	40	有	60	240	-	S
23	6.17	6.21	6.19	6-3	f	40	有	80	80	-	S
24	6.39	6.43	6.41	6-4	f	60	有	50	50	-	S
25	7.25	7.32	7.29	7-1	f	90	有	90	270	-	S
26	7.32	7.32	7.32	7-2	f	30	有	130	130	-	S
27	7.35	7.35	7.35	7-3	f	30	有	40	220	-	S
28	7.43	7.44	7.44	7-4	f	30	有	60	60	-	S
29	7.48	7.56	7.52	7-5	f	70	有	-	350	-	S
30	8.10	8.13	8.12	8-1	f	30	有	160	160	-	S
31	8.15	8.19	8.17	8-2	f	40	有	10	220	-	S
32	8.36	8.38	8.37	8-3	f	30	有	20	-	-	S
33	8.55	8.66	8.61	8-4	f	70	有	0	0	-	S
34	9.05	9.07	9.06	9-1	f	20	有	170	-	-	S
35	9.41	9.41	9.41	9-2	f	10	有	-	-	-	S
36	9.67	9.75	9.71	9-3	f	90	有	-	-	-	S
37	9.85	9.86	9.86	9-4	f	20	有	-	-	-	S
38	10.07	10.08	10.08	10-1	f	20	有	-	-	-	S
39	10.08	10.17	10.13	10-2	f	70	有	40	220	-	S
40	10.61	10.63	10.62	10-3	f	60	有	30	210	-	S
41	10.64	10.68	10.66	10-4	f	50	有	20	20	-	S
42	10.71	10.75	10.73	10-5	f	50	有	10	190	-	S
43	11.70	11.72	11.71	11-1	f	30	有	-	-	-	S
44	12.24	12.26	12.25	12-1	f	50	有	-	-	-	S
45	12.41	12.43	12.42	12-2	f	30	有	-	-	-	S
46	12.57	12.67	12.62	12-3	f	70	有	10	190	-	S
47	13.27	13.30	13.29	13-1	f	50	有	10	190	-	S
48	13.30	13.38	13.34	13-2	f	70	有	10	190	-	S
49	13.48	13.50	13.49	13-3	f	30	有	-	-	-	S
50	13.52	13.56	13.54	13-4	f	50	有	-	-	-	S

タイプ h-f : 癒着割れ目
f : 非癒着割れ目

成因 S : 剪断割れ目

表 3.6 割れ目データ一覧表(08-E140-M03 孔) (2/2)

No.	割れ目深度(m)			割れ目 番号	タイプ	傾斜	鏡肌	条線	スリッケン ステップ	断層岩	成因
	上端	下端	中間			(°)	有無	レク(°)	変位(°)	有無	
51	13.85	13.91	13.88	13-5	f	30	有	－	－	－	S
52	14.28	14.33	14.31	14-1	f	70	有	160	340	－	S
53	14.28	14.35	14.32	14-2	f	70	有	10	190	－	S
54	14.35	14.41	14.38	14-3	f	70	有	10	190	－	S
55	14.39	14.43	14.41	14-4	f	70	有	－	－	－	S
56	15.31	15.33	15.32	15-1	f	50	有	－	－	－	S
57	15.87	15.88	15.88	15-2	f	30	有	－	－	－	S
58	15.93	15.94	15.94	15-3	f	40	有	－	－	－	S
59	16.07	16.14	16.11	16-1	f	60	有	20	200	－	S
60	16.43	16.50	16.47	16-2	f	70	有	30	210	－	S
61	16.50	16.51	16.51	16-3	f	5	有	－	－	－	S
62	16.60	16.61	16.61	16-4	f	20	有	－	－	－	S
63	16.70	16.73	16.72	16-5	f	65	有	20	200	－	S
64	16.84	16.91	16.88	16-6	f	70	有	180	180	－	S
65	17.00	17.02	17.01	17-1	f	50	有	10	190	－	S
66	17.40	17.41	17.41	17-2	f	30	有	130	130	－	S
67	17.45	17.49	17.47	17-3	f	45	有	120	300	－	S
68	17.65	17.66	17.66	17-4	f	10	有	50	230	－	S
69	17.76	17.77	17.77	17-5	f	70	有	40	220	－	S
70	17.79	17.86	17.83	17-6	f	70	有	－	30	－	S
71	18.44	18.48	18.46	18-1	f	80	有	170	350	－	S
72	18.52	18.61	18.57	18-2	f	80	有	－	－	－	S
73	18.67	18.72	18.70	18-3	f	60	有	160	340	－	S
74	18.95	19.00	18.98	18-4	f	50	有	120	－	－	S
75	19.05	19.07	19.06	19-1	f	50	有	10	220	－	S
76	19.08	19.10	19.09	19-2	f	60	有	20	200	－	S
77	19.22	19.25	19.24	19-3	f	30	有	150	150	－	S
78	19.29	19.30	19.30	19-4	f	10	有	60	240	－	S
79	19.92	19.93	19.93	19-5	f	30	有	120	300	－	S
80	19.93	19.99	19.96	19-6	f	80	有	110	－	－	S?

タイプ h-f : 癒着割れ目
f : 非癒着割れ目

成因 S : 剪断割れ目

4. 水圧破碎法による初期地圧測定

水圧破碎法は、応力解放法と異なりオーバーコアリングを必要とせず、ボーリング孔さえあれば適用できるため、これまで地下深部の初期地圧の計測および評価に最も一般的に用いられてきた。また、水圧破碎法は直接に応力を測定するので、物性の評価の誤りに基づく誤差が原理的に存在しないことが応力解放法と比較して特に優れた点のひとつである。この方法は、岩盤内に掘削したボアホールの所要区間を二つの詮（パッカーエレメント）により仕切り、この区間（以下、加圧区間）に高水圧を負荷して岩盤内に人工き裂を作成し、このときに観察されるき裂開口圧およびき裂閉口圧という二つのボアホール水圧からボアホール軸と直交する面内に作用する二つの主応力の大きさを決定する。最近の研究によれば、き裂への加圧水の侵入を無視した従来の水圧破碎法によるき裂開口圧の観測方程式は誤りであり、また、同式から求められるき裂開口圧は、通常の水圧破碎試験で観測されるき裂開口圧（見かけのき裂開口圧 $P(a)_r$ ）とは異なり、実際にき裂が開き始めるときの水圧（真のき裂開口圧 P_{ro} ）にも一致しないことが指摘されている^{[2][3]}。さらに、コンプライアンス C の小さな水圧破碎システムを用いれば、見かけのき裂開口圧 $P(a)_r$ から真のき裂開口圧 P_{ro} を近似的に測定できるとされている^{[2][3]}。水圧破碎システムのコンプライアンス C とは、流量計よりも下流の圧力を単位量だけ上昇させるのに必要な水の量のことである。

以上の知見に鑑み、東立坑 140m 小型試錐座では、できるだけコンプライアンス C の小さい配管系を用いた高剛性水圧破碎法を実施した。なお、以下では 08-E140-M01 孔、08-E140-M02 孔および 08-E140-M03 孔を、それぞれ M01 孔、M02 孔および M03 孔と呼ぶ。

4. 1 試験装置

試験に使用した水圧破碎システムの配管および配線図は図 4.1 のようである。また、試験に用いた主要機器名をまとめて表 4.1 に示す。見かけのき裂開口圧から真のき裂開口圧を近似的に評価して孔軸と直交する平面内の最大応力 S_H の大きさを評価するには、測定システムのコンプライアンスを小さくするために、流量計から加圧区間までの加圧系の体積をできるだけ小さくする必要がある。そこで、流量計とストラドルパッカーをコンプライアンスの小さい長さ 30m、内径 2mm のステンレスパイプで接続した。加圧区間への水の圧入は、最大吐出量 400ml/min の小型高圧プランジャーポンプによっておこなった。加圧区間の水圧はストラドルパッカーの直上に設置した圧力変換器によって測定し、地表で測定された流量とともに A/D 変換し、5Hz のサンプリング周波数でパーソナルコンピュータに記録した。

表 4.1 測定機器一覧

測 定 機 器	メーカー	数量
φ 76mm ストラドルパッカー、ウレタンゴム、耐圧 30MPa	ジオテクノス(株)	1 本
φ 76mm インプレッションパッカー、ウレタンゴム、耐圧 30MPa	ジオテクノス(株)	1 本
高圧ポンプ、NP-GXL-400、400cc/min、最高吐出圧力 30MPa	日本精密科学(株)	1 台
システムコントローラー、Sony VAIO	Sony	1 台
シグナルコンディショナー、CDA-230C	(株)共和電業	1 台
圧力変換器、PGM-200KD、測定範囲 20MPa	(株)共和電業	1 台
流量計、MF 30、測定範囲 500cc/min	Japan Flow Control Co.	1 台
坑井方位傾斜儀計 (デジタルコンパス)、最小読取り精度 0.1 度	ジオテクノス(株)	1 台

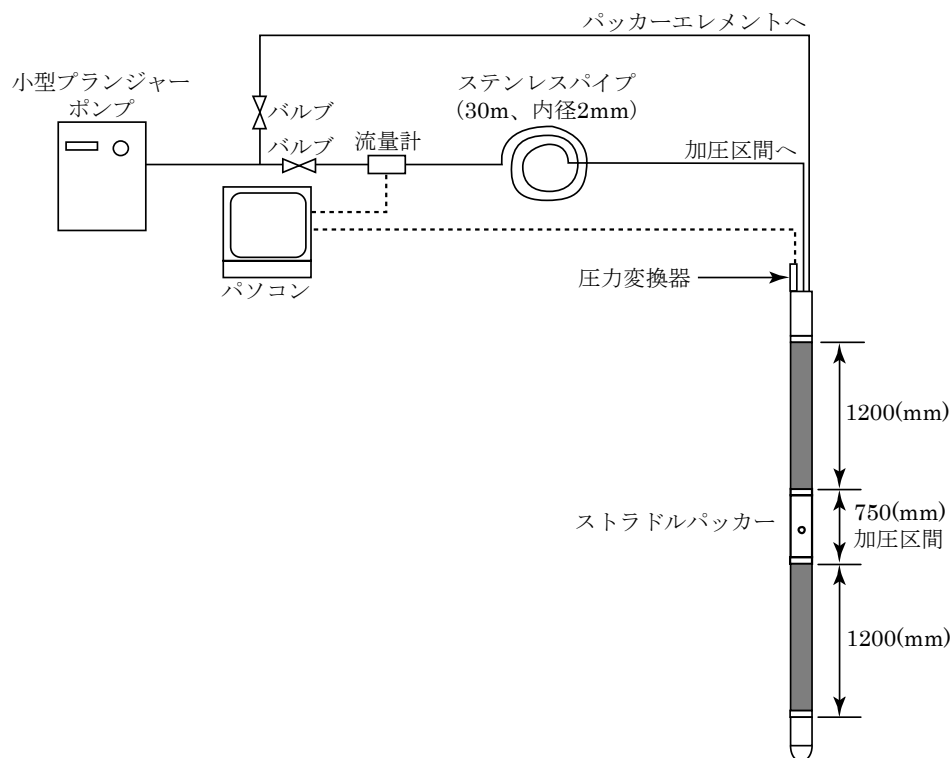


図 4.1 コンプライアンス C の小さな高剛性水圧破碎システム

4. 2 試験方法

水圧破碎法によって初期地圧を評価する手順は、以下の通りである。

(1) 水圧破碎前の孔壁の型取り

水圧破碎法は、等方均質弾性体中の円孔まわりの応力分布に基礎を置いて解析理論が構築されているので、加圧区間は岩盤に割れ目のない均質な位置を選定する必要がある。そこで、ボーリングコアの目視による鑑定結果を総合的に判定し、天然き裂が少なく孔壁の安定した区間を選定する（図 4.2 参照）。このようにして選定した位置で、インプレッションパッカー（型取りパッカー）を用いた水圧破碎前の孔壁の型取りをおこない、天然き裂の状態をさらに詳しく調査する。インプレッションパッカーの表面は可塑性のチューブによって被覆されているので、所定の深度でパッカーエレメントを膨張させ、その表面をボアホール壁面に押し付けることで壁面の凹凸がチューブの表面に記録される。加圧予定区間に天然き裂が認められた場合は、さらに別の深度で型取をおこない、適切な加圧区間を探す。



図 4.2 可塑性のチューブによって被覆した型取パッカーの挿入

(2) 水圧破碎試験

孔口付近に設置した小型プランジャーポンプとコンプライアンスの小さいステンレスパイプで接続したストラドルパッカーを、ボアホール内の測定対象深度まで挿入する（図 4.3 参照）。その後、ストラドルパッカーのパッカーエレメントに水を圧入してそれを膨らませ、ボアホール壁面に密着させることにより、二つのパッカーエレメントによってはさまれた加圧区間を隔離する。以上のセットアップ終了後、①加圧配管を通して地表の電動小型プランジャーポンプから加圧区間に一定の流量（200ml/min あるいは 400ml/min）で水を圧入する、②プランジャーポンプと流量計の間にあるバルブを閉じ、水の圧入を停止する（以下、この操作をシャットインと呼ぶ）、③加圧系の圧力を開放する等の操作を行うことにより、加圧区間のボアホール壁面からき裂が発

生、進展し、またそのき裂が開口、閉口する。最初の加圧サイクルにおいて水を圧入してボアホール内の水圧を上昇させていくと、破碎圧 (breakdown pressure) と呼ばれる水圧 P_b を越えた直後にボアホール内の水圧は急激に減少する。そこでシャットインして水の圧入を停止すると、ボアホール内の水圧は下降し、やがて、き裂閉口圧 (shut-in pressure) と呼ばれる水圧 P_s に落ちつく^[4]。一方、二回目以降の加圧サイクルにおいて、き裂開口圧 (reopening pressure) と呼ばれる水圧 P_r に達したところでボアホール内の水圧と時間の関係が線形から非線形に変わる^[5]。このようにして水の圧入、シャットイン、水の排出を数回繰り返し、三種類の水圧データ、すなわち破碎圧、き裂閉口圧、ならびにき裂開口圧を測定する。



図 4.3 ストラドルパッカー

(3) 破碎後の型取りによる人工き裂の方位測定

水圧破碎後、再びインプレッションパッカーを用いて加圧区間の型取りをおこない、(1)で得られたき裂のトレースと比較することにより新たに造成されたき裂を判定する。このインプレッションパッカーの先端には坑井方位傾斜儀計が取り付けられており、熱収縮チューブの表面に印された基準線の方位が測定される。この方位とき裂のトレースから、造成された新たなき裂の走向・傾斜を決定することができる。図 4.4 は、破碎後の型取で得られたき裂のトレースの例である。

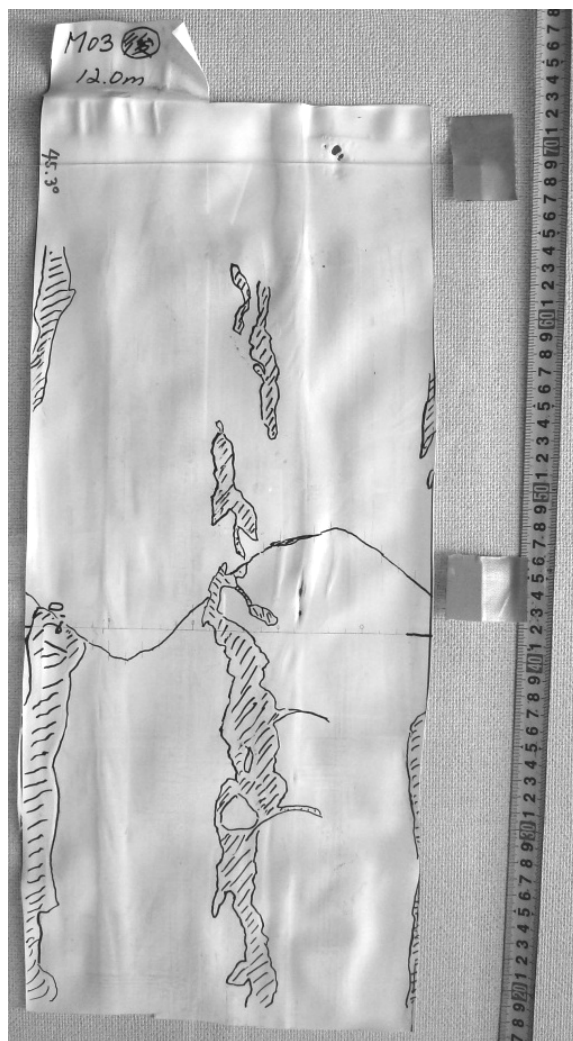


図 4.4 破碎後の型取で得られたき裂のトレースの例

4. 3 解析方法

4. 3. 1 従来の初期地圧評価手順

水圧破碎試験によって測定した各観測データから、初期地圧の大きさおよび方向を評価する手順は次のとおりである。ただし、初期地圧の主軸の一つがボアホール軸に一致しており、かつ、水圧破碎によりボアホール軸と平行ないわゆる縦き裂が形成された場合を考える。また、岩盤中の間隙水圧は0であるものとする。このとき、ボアホール内の水圧が破碎圧 P_b に達したときに、ボアホール壁に作用する周方向引張応力が岩盤の引張強度 T に達してボアホール壁面からき裂が発生するものと考え、また、シャットイン後、き裂内水圧とき裂面垂直方向の初期圧縮応力が平衡したときにボアホール内の水圧の降下が停止すると考えれば、 P_b および P_s と初期地圧との関係がそれぞれ次式のように与えられる^{[4][6]}。

$$P_b = 3S_h - S_H + T \cdots \cdots \cdots (4.1)$$

$$P_s = S_h \cdots \cdots \cdots (4.2)$$

ここに、 S_H および S_h ($S_H \geq S_h$) はボアホールと直交する面内に作用する初期主応力である。なお、式(4.1) と式(4.2) を含め、以下、初期地圧は圧縮を正とする。式(4.1) と式(4.2) において T を既知とすると、未知量は初期圧縮応力 S_H および S_h の二つになる。したがって、両式の間係を用いれば、 P_b と P_s の測定値から S_H および S_h の大きさを決定できる。ここで、ボアホール中心から見たときのき裂の方向が S_H の作用方向である。

ところで、岩盤は天然物でありその特性は場所ごとに異なる。この傾向は引張強度 T について特に顕著であるため、式(4.1) を用いて初期地圧を正しく評価するためには、き裂を作成した原位置岩盤の T を正確に評価することが前提となる。しかし、ボーリングコアの回収にはマイクロクラックの進展など、必ず不可逆的なプロセスを伴うことから、原位置岩体の T を正確に評価することは容易でない。一方、もし、再加圧時にボアホール内の水圧がき裂再開口圧 P_r に達したときにき裂が開き始め、このき裂の開口が $T = 0$ のボアホール壁からき裂が発生する現象と等価であるものと仮定すると次式が成立する^{[7][8]}。

$$P_r = 3S_h - S_H \cdots \cdots \cdots (4.3)$$

したがって、破碎圧 P_b の代わりにき裂開口圧 P_r を用い、上式と式(4.2) の関係を利用すれば、引張強度 T と無関係に S_H および S_h の大きさを決定できることになる。このため、式(4.3) が Zoback ら^[9] および Bredehoeft ら^[8] によって提案されて以来、水圧破碎法では式(4.2) と式(4.3) に基づいて初期地圧を評価することが一般的になり、さらに、初期地圧の評価に原位置岩盤の物性値を必要としないことが水圧破碎法の大きな特長とされてきた。

4. 3. 2 き裂開口圧力と初期地圧の関係

これまで数多くのフィールド実験や室内実験が実施されてきた結果、き裂開口圧が圧入流量の大きさに依存して変化すること^{[10][11]}、その一方で本来異なるはずのき裂閉口圧とき裂開口圧が計測実施地域によらず常に近い傾向にある^{[12][13]}といった従来の理論に反する実験事実が徐々に明らかになってきた。さらに、式(4.3)の背景にはき裂が開口するまで加圧水はき裂内に進入しないという仮定があるのに対して、Cornet^[11]およびZobackら^[14]は、水圧破碎室内実験の結果から、き裂が閉じていても加圧水がき裂内に浸入し得ることを明らかにした。これは、き裂が閉じていても、向かい合うき裂面上の凹凸が完全にかみ合わず、かみ合わない部分が連なって水の通路となるためである。このため伊藤ら^[15]は、Cornet^[11]およびZobackら^[14]の実験結果を基に、き裂開口以前よりボアホールからき裂内に加圧水が進入することを考慮した数値解析および室内実験を実施してき裂開口圧の物理的意味を再検討し、その結果から次のことを明らかにしている。すなわち、再加圧時にき裂が開口し始めるときのボアホール内の水圧（以下、真のき裂開口圧と呼ぶ）は、初期地圧および圧入流量によらず従来の理論、つまり、式(4.3)で与えられているき裂開口圧の半分となることである。したがって、式(4.3)の代わりに次式を用いて初期地圧を評価すれば良いことになる。

$$P_{ro} = (3S_h - S_H) / 2 \dots\dots\dots (4.4)$$

ここに、 P_{ro} は真のき裂開口圧である。

4. 3. 3 真のき裂開口圧力を測定するための水圧破碎システム

伊藤ら^[15]は、き裂が開口してもすぐにはボアホール内の水圧と時間の関係に顕著な変化は現れず、き裂開口圧、つまりボアホール内の水圧と時間との関係が明らかに非線形になり始めるときのボアホール内の水圧（以下、見かけのき裂開口圧と呼ぶ）は真のき裂開口圧よりも大きくなること、そして、見かけのき裂開口圧は本質的にき裂閉口圧に等しい水圧であることを明らかにしている。これらのことは、測定のむずかしい岩盤物性値 T を用いないことを前提とすると、き裂閉口圧の測定値と式(4.2)から S_h の大きさを評価できても、何らかの方法で真のき裂開口圧を測定できなければ、き裂線方向に作用する初期地圧 S_H の大きさを評価できないことを意味する。

このため、伊藤ら^{[15][16]}は真のき裂開口圧を用いて初期地圧を評価することを目的として、数値シミュレーションに基づき、真のき裂開口圧と見かけのき裂開口圧との間に差が生じる原因について詳細に検討した。この結果、見かけき裂開口圧力が真のき裂開口圧よりも大きく、き裂閉口圧に近くなるのは主に加圧システム内の水の体積が大きいことが原因であり、その体積を適切に選択すれば、見かけのき裂開口圧から真のき裂開口圧を近似的に評価できることを明らかにした。さらに、見かけのき裂開口圧から式(4.3)あるいは式(4.4)によって初期地圧 S_H の大きさを評価した場合について、見かけのき裂開口圧が式(4.3)で与えられる圧力あるいは真のき裂開口圧に等しくないために生じる S_H の評価結果の誤差の範囲を明らかにした。例えば、流量調整バルブより下流側でき裂が閉じた状態での加圧系内の水の体積 V が $2 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ (=2000 ml) であるような水圧破碎システムを用いる場合、ボアホールを $2 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}$ (=120ml/min) の一定流量 Q で加圧すると、 S_h/S_H が 2 以下の範囲では、約 20% 以下の誤差の範囲内で真のき裂開口圧を評価できる。したがって、き裂閉口圧を使って S_h の大きさを決定するものとすれば、その結果と、加圧系体積 V の十分小さい水圧破碎システムを用いて十分に小さい圧入流量で測定した見かけのき裂開口圧（≡真のき裂開口圧）から、式(4.4)の関係に従って S_H の大きさを評価できる。

4. 4 試験結果

4. 4. 1 水圧破碎システムのコンプライアンス C の評価

図 4.1 に示した水圧破碎システムの、流量計から加圧区間までのコンプライアンス C を測定するために、工場においてき裂のない鋼管内にストラドルパッカーを設置して加圧試験をおこなった（図 4.5 参照）。水圧破碎システムのコンプライアンス C とは、流量計よりも下流の圧力を単位量だけ上昇させるのに必要な水の量のことである。パッカー圧を 10MPa に設定しておこなった加圧試験の結果の一部を示すと図 4.6 のようである。ここで、横軸は総圧入流量 Q_{total} 、縦軸は加圧区間の圧力 P である。加圧区間の圧力がパッカー圧を越えるとパッカーが変形を開始し、加圧区間の体積は増加する。このため、水圧破碎システムのコンプライアンスが増加し圧力曲線の勾配は小さくなる。このことから、水圧破碎試験においては、測定しようとする水圧よりもパッカー圧を十分に高く設定する必要がある。加圧区間の圧力がパッカー圧に達する前の Q_{total} と P の直線の傾きからコンプライアンスを測定した結果をまとめると表 4.2 のようである。本水圧破碎システムのコンプライアンスの平均値は、 $4.50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{MPa}$ である。

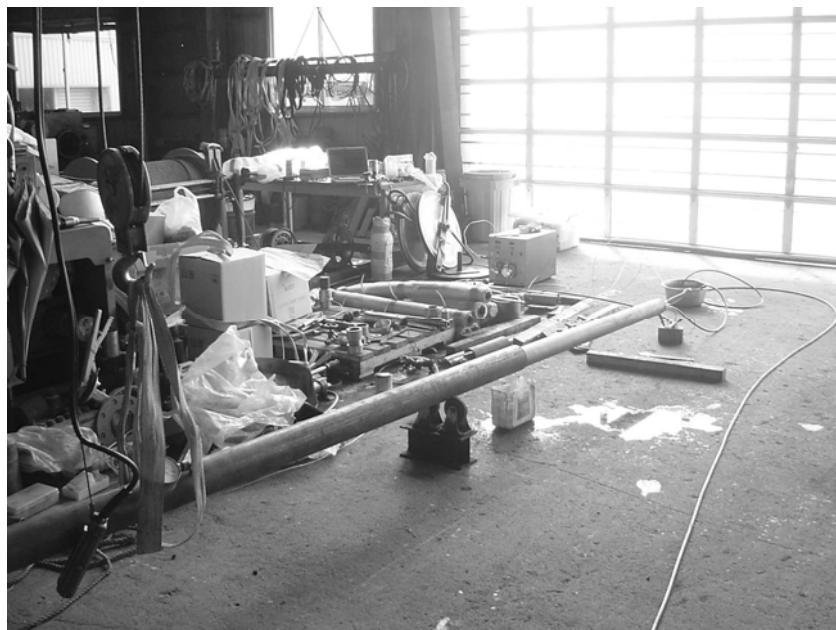


図 4.5 水圧破碎システムのコンプライアンス測定状況

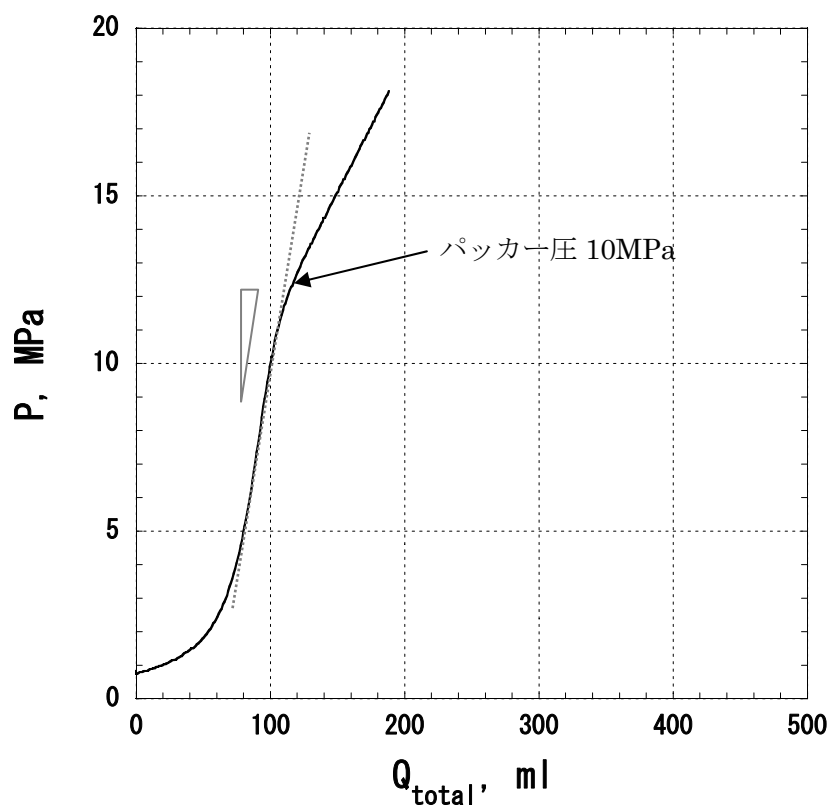


図 4.6 高剛性水圧破砕システムを用いた鋼管内における加圧試験の例

表 4.2 高剛性水圧破砕システムのコンプライアンス測定結果

加圧流量 (m ³ /sec)	パッカー圧 (MPa)	コンプライアンス (m ³ /MPa)
5.0×10 ⁻⁶	20	4.14×10 ⁻⁶
5.0×10 ⁻⁶	20	4.27×10 ⁻⁶
5.0×10 ⁻⁶	10	*9.85×10 ⁻⁶
5.0×10 ⁻⁶	10	6.06×10 ⁻⁶
5.0×10 ⁻⁶	10	5.63×10 ⁻⁶
5.0×10 ⁻⁶	15	4.15×10 ⁻⁶
5.0×10 ⁻⁶	15	3.88×10 ⁻⁶
5.0×10 ⁻⁶	15	3.93×10 ⁻⁶
平均値		4.50×10 ⁻⁶

*加圧区間に空気があったので、平均値の算定に用いなかった。

4. 4. 2 水圧破碎試験

水圧破碎試験は、M01 孔、M02 孔および M03 孔の 16 深度で実施した。各ボーリング孔の試験深度は表 4.3 に示すとおりである。ここで、M01 孔の深度 8.0m と深度 10.0m では、孔壁の一部が岩盤に向かって大きくえぐれていたため、加圧・膨張したパッカーエレメントが局所的に大きく変形して破裂した。また、M02 孔の深度 12.1m と M03 孔の深度 10.0m では、ボーリング孔まわりの応力集中でできたブレイクアウトとパッカーエレメントの間隙から加圧水がリークし、孔口から流れ出した。さらに、M02 孔の深度 15.0m では、加圧水のリークは確認できなかったが、圧力がほとんど上昇しなかったことから、加圧区間に透水性の大きい天然の潜在き裂が存在すると考えられた。そこで、以下ではこれらの 5 深度を除く、残り 11 深度の測定データを用いて初期地圧の評価をおこなう。

残り 11 深度における圧力・流量－時間曲線は、図 4.7 から図 4.17 のようである。ここで、横軸は測定開始後の時間である。下段の曲線はストラドルパッカー直上に設置した圧力変換器で測定した加圧区間の圧力（左縦軸）、上段の曲線は地表の高圧ポンプ吐出口で測定した加圧区間に圧入される水の流量（右縦軸）である。各グラフの上部中央に記載されたタイトルは、最初の 3 文字が孔名、ハイフンの次の数値が試験深度、そして最後のアルファベットが加圧サイクルの順序を表す。すなわち、a は第 1 回目のき裂発生試験、b、c、d などは、それぞれ第 2 回目、第 3 回目、第 4 回目のき裂再開口試験であることを意味する。圧入流量を 200ml/min に設定したときの加圧区間の定常圧力は、下段の圧力－時間曲線において時間軸に平行な破線で示すとともに、その近傍に値を表示した。

なお、最後の加圧サイクルにおいては、圧入流量を 50ml/min から 400 ml/min まで 50ml/min ずつ増加させ、各圧入流量で加圧区間の圧力がほぼ定常になるまで加圧を続ける“step-rate pressurization”^{[12][17]}を実施した。この試験は、加圧区間の定常圧力を圧入流量に対してプロットしたときの折れ曲がり点、あるいは圧入流量ゼロにおける圧力軸の切片からき裂閉口圧力を求めるためである。

表 4.3 水圧破碎試験深度

孔名	方位・傾斜	試験深度 (m)	備 考	解析に採用 (○) か 不採用 (×) か
M01	S60° E、 水平から 下向き 5°	8.0	パッカー破裂	×
		10.0	パッカー破裂	×
		11.8		○
		14.0	破碎圧有り	○
		15.9	破碎圧有り	○
		17.9	破碎圧有り	○
M02	S、水平か ら下向き 5°	12.1	ブレイクアウトからリーク	×
		13.0	破碎圧有り	○
		14.1		○
		15.0	圧力上昇せず	×
		16.0	圧力上昇せず、加圧区間から湧水	○
		17.8	破碎圧有り	○
M03	S30° E、 水平から下 向き 35°	10.0	圧力上昇せず、ブレイクアウトからリーク	×
		12.0		○
		14.1	破碎圧有り	○
		15.0		○

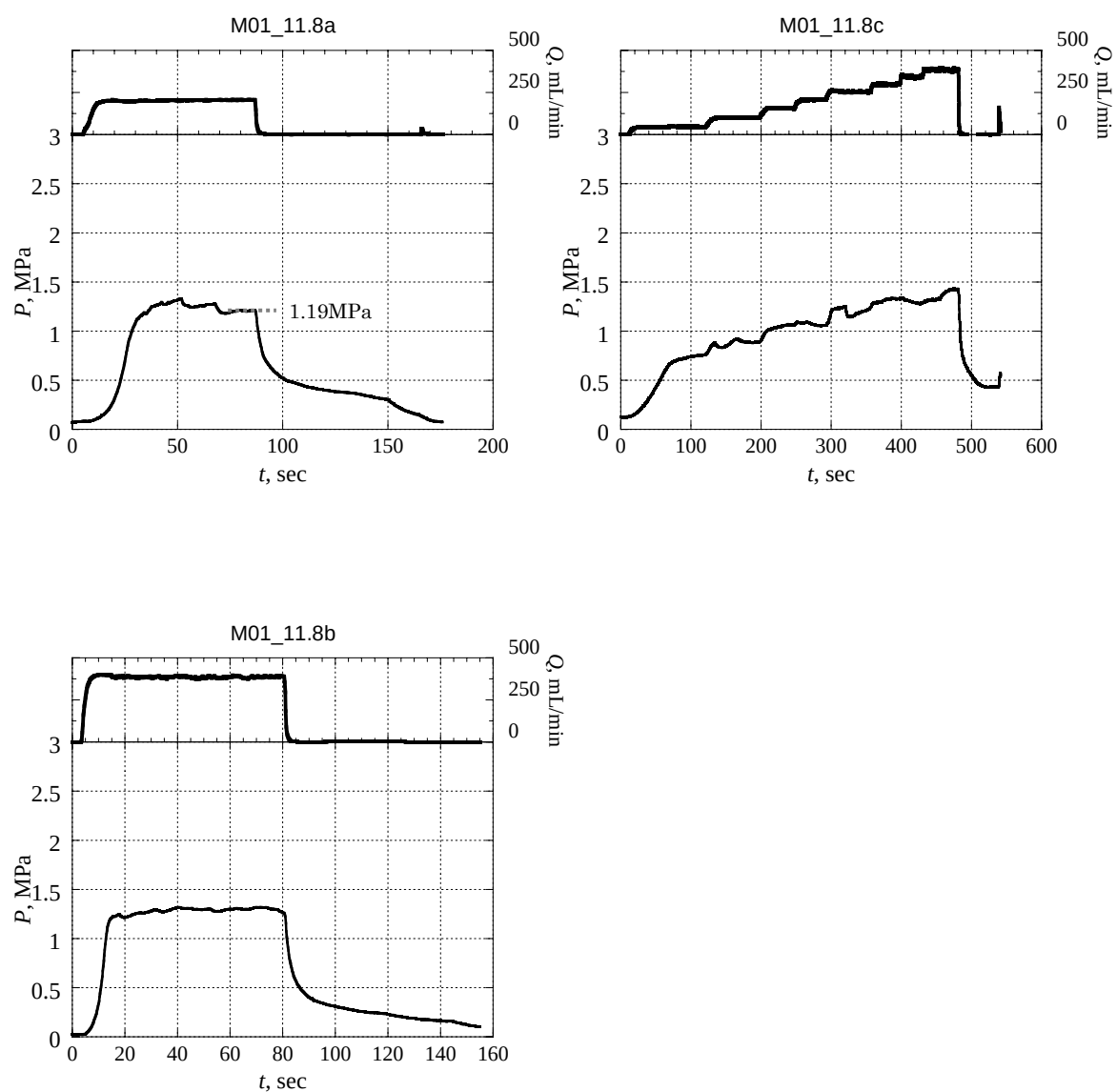


図 4.7 M01 孔の深度 11.8m における圧力・流量・時間曲線

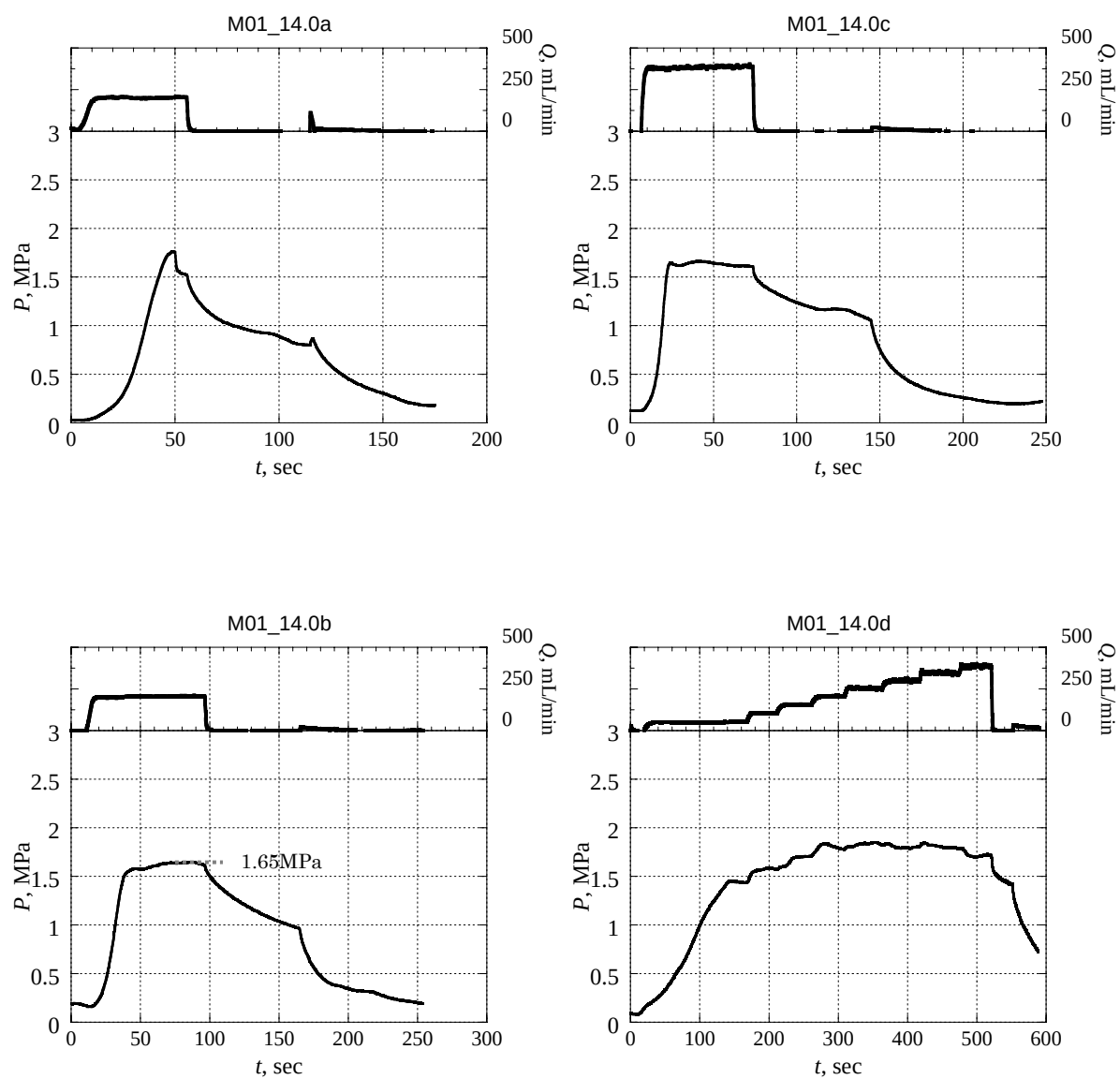


図 4.8 M01 孔の深度 14.0m における圧力・流量-時間曲線

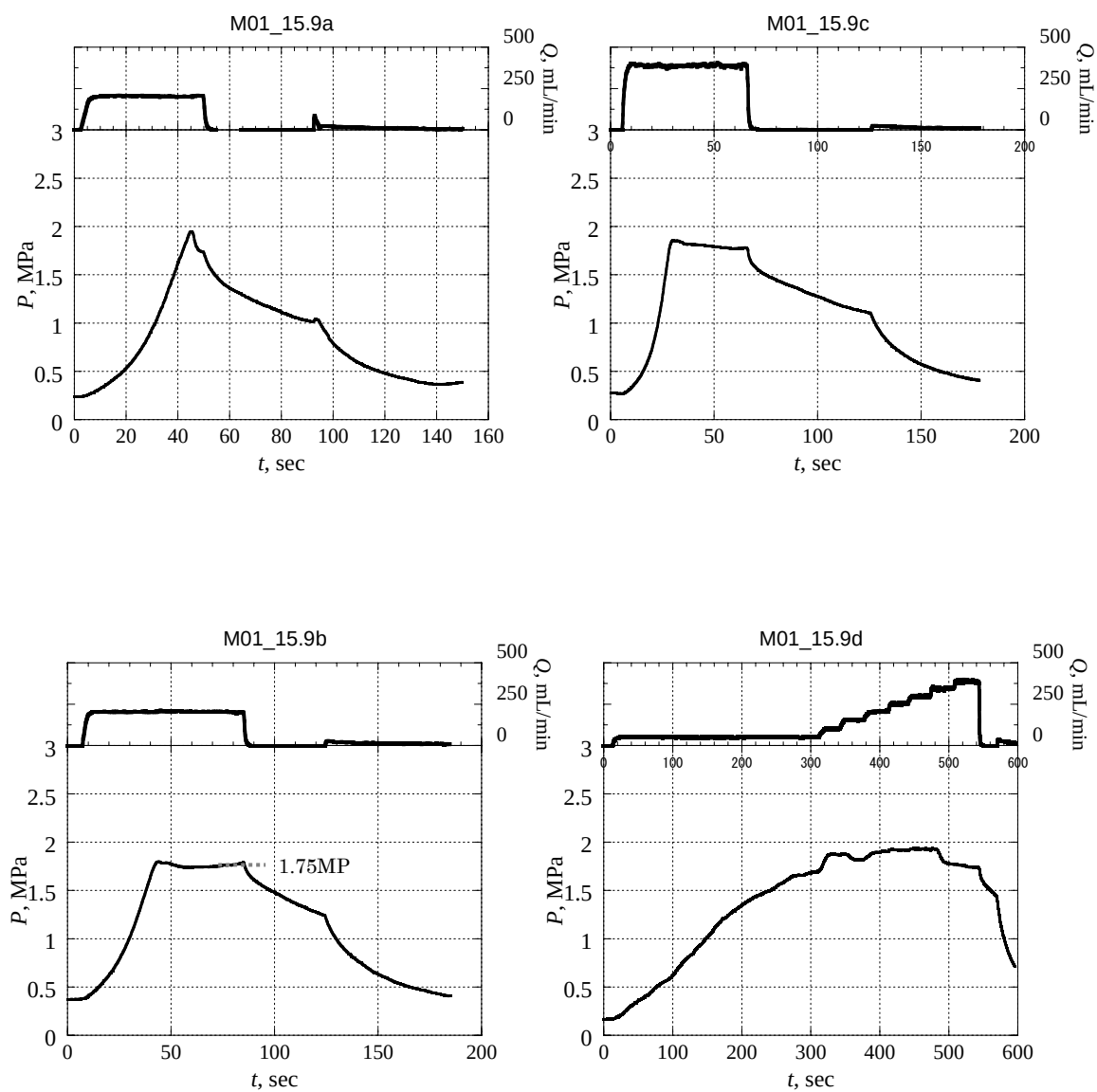


図 4.9 M01 孔の深度 15.9m における圧力・流量・時間曲線

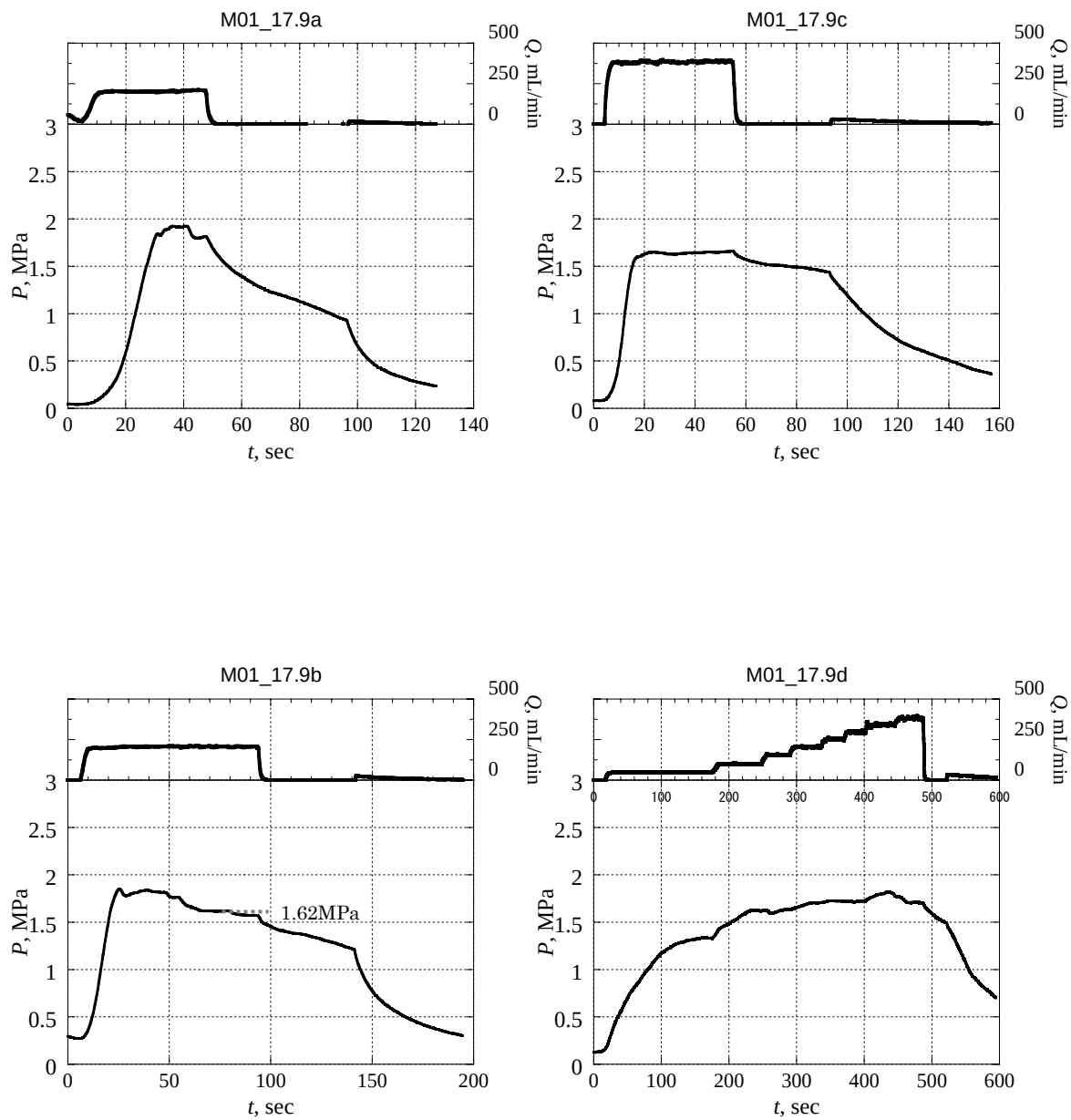


図 4.10 M01 孔の深度 17.9m における圧力・流量・時間曲線

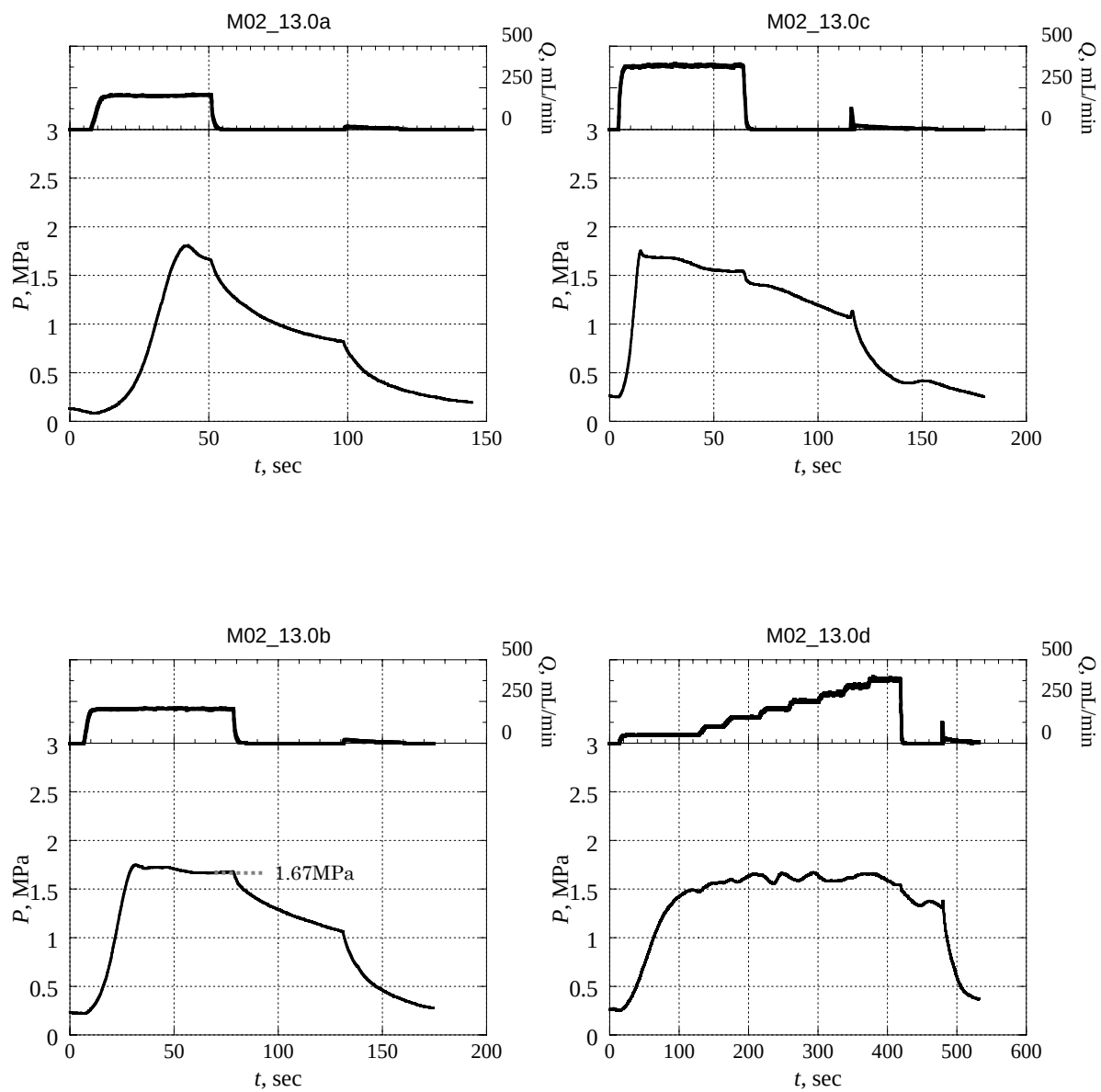


図 4.11 M02 孔の深度 13.0m における圧力・流量-時間曲線

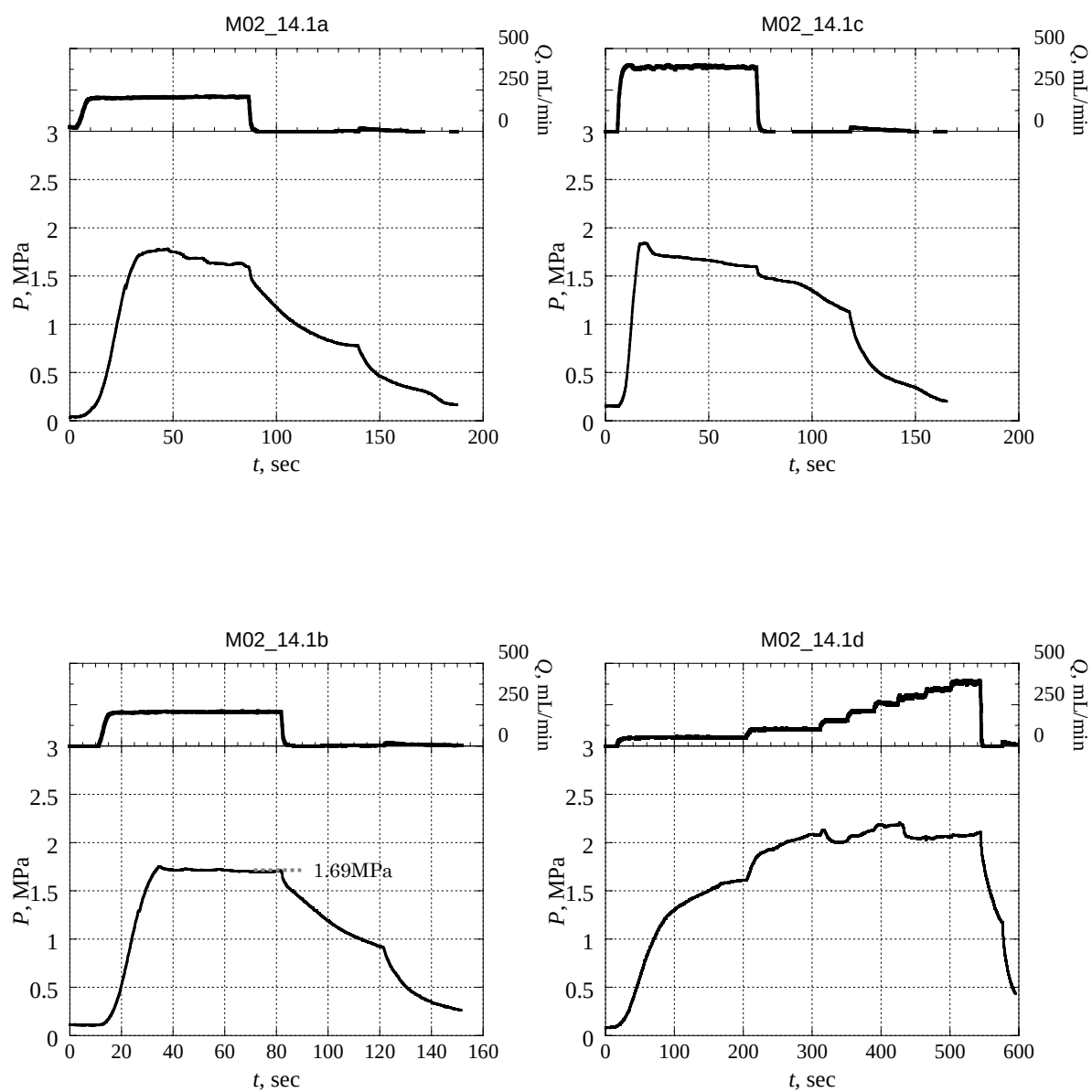


図 4.12 M02 孔の深度 14.1m における圧力・流量-時間曲線

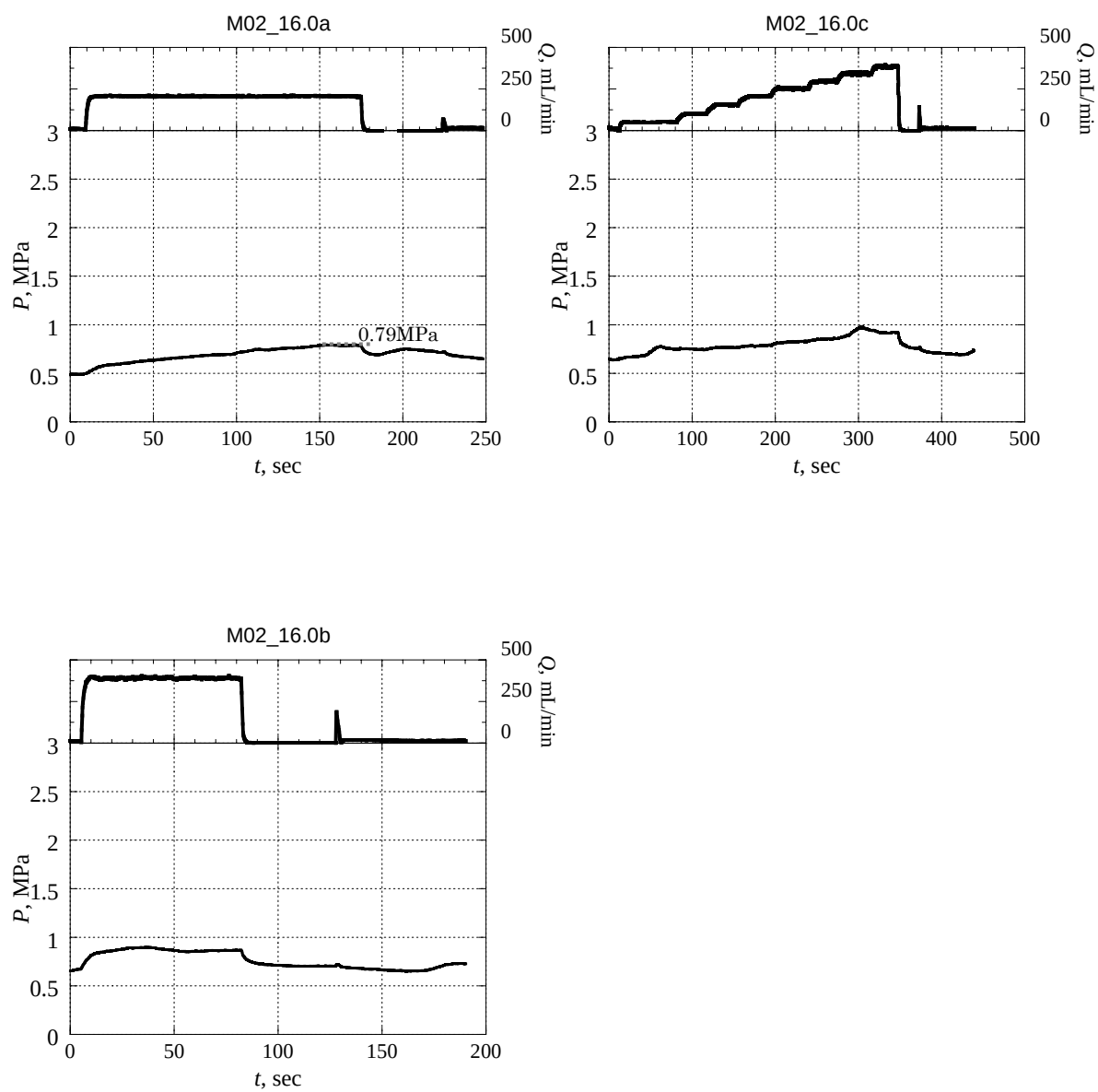


図 4.13 M02 孔の深度 16.0m における圧力・流量・時間曲線

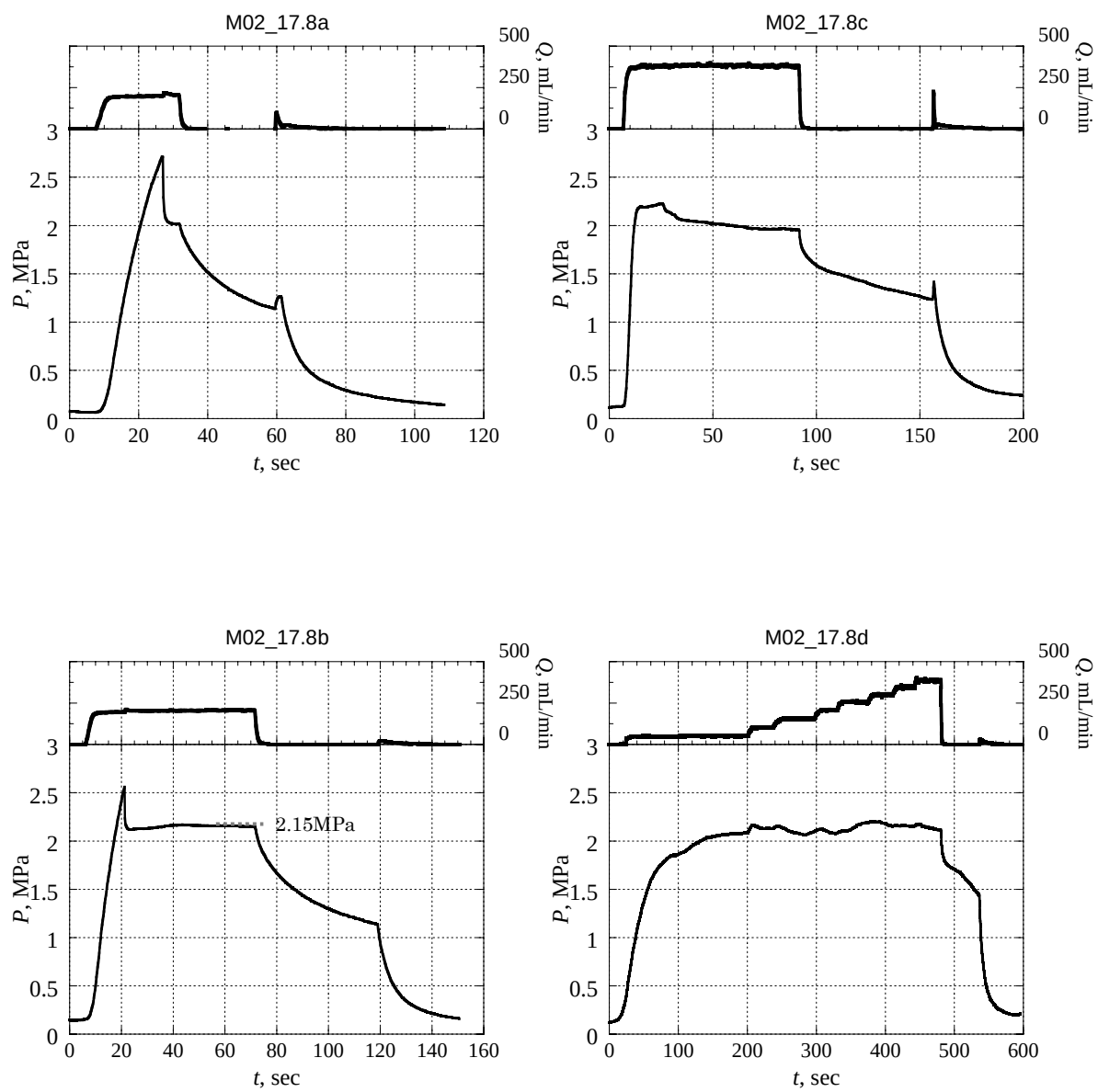


図 4.14 M02 孔の深度 17.8m における圧力・流量-時間曲線

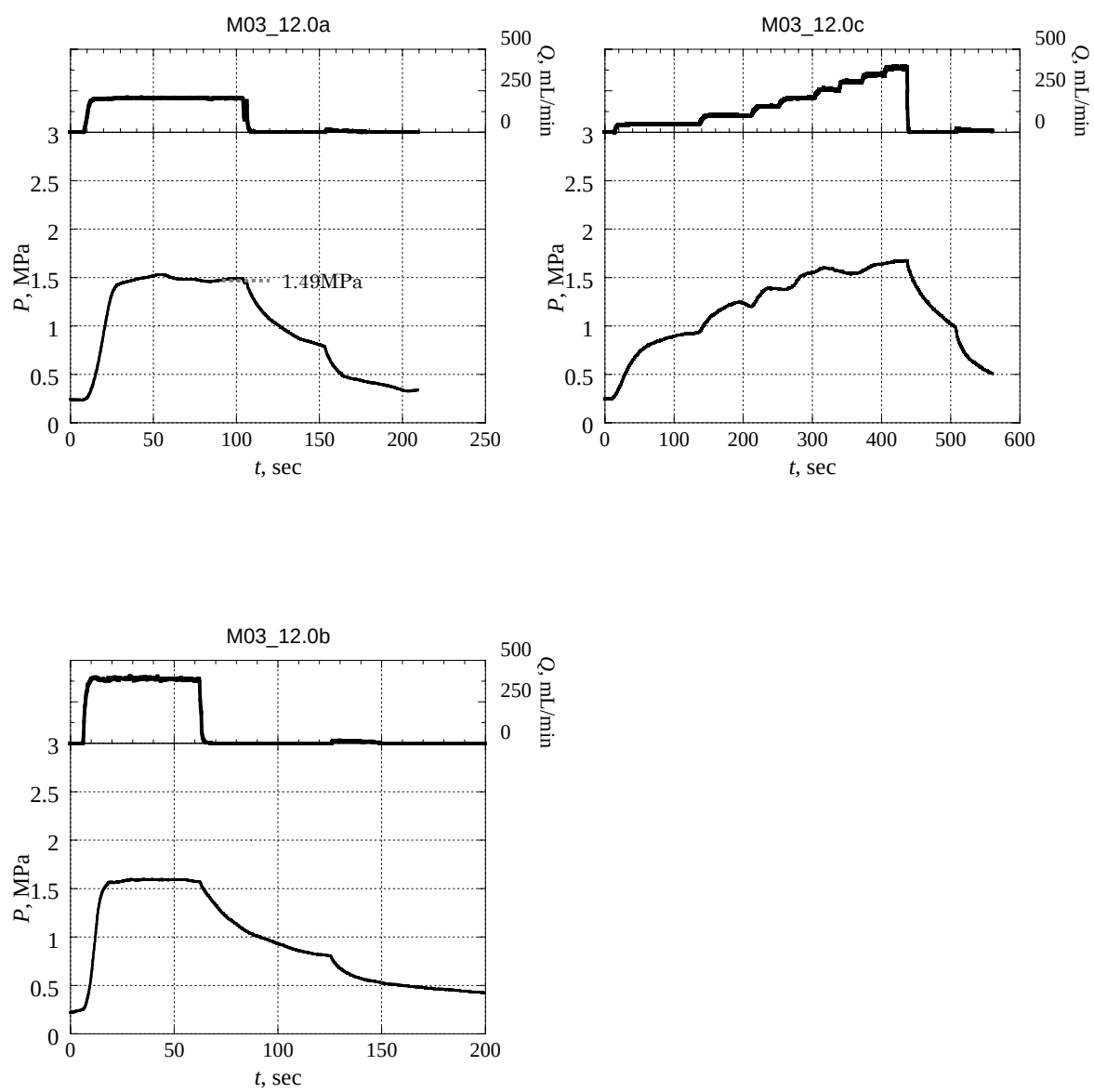


図 4.15 M03 孔の深度 12.0m における圧力・流量-時間曲線

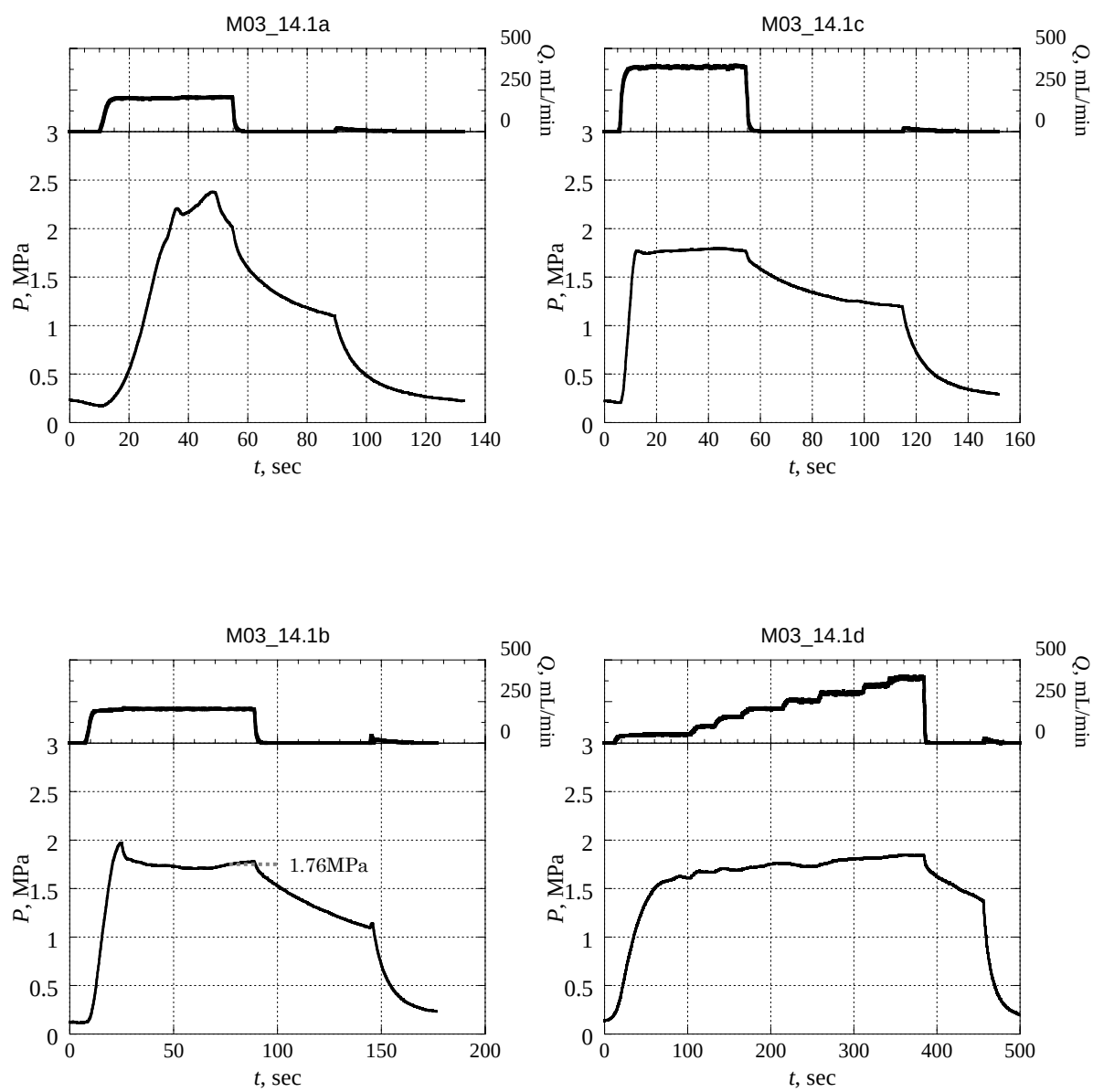


図 4.16 M03 孔の深度 14.1m における圧力・流量-時間曲線

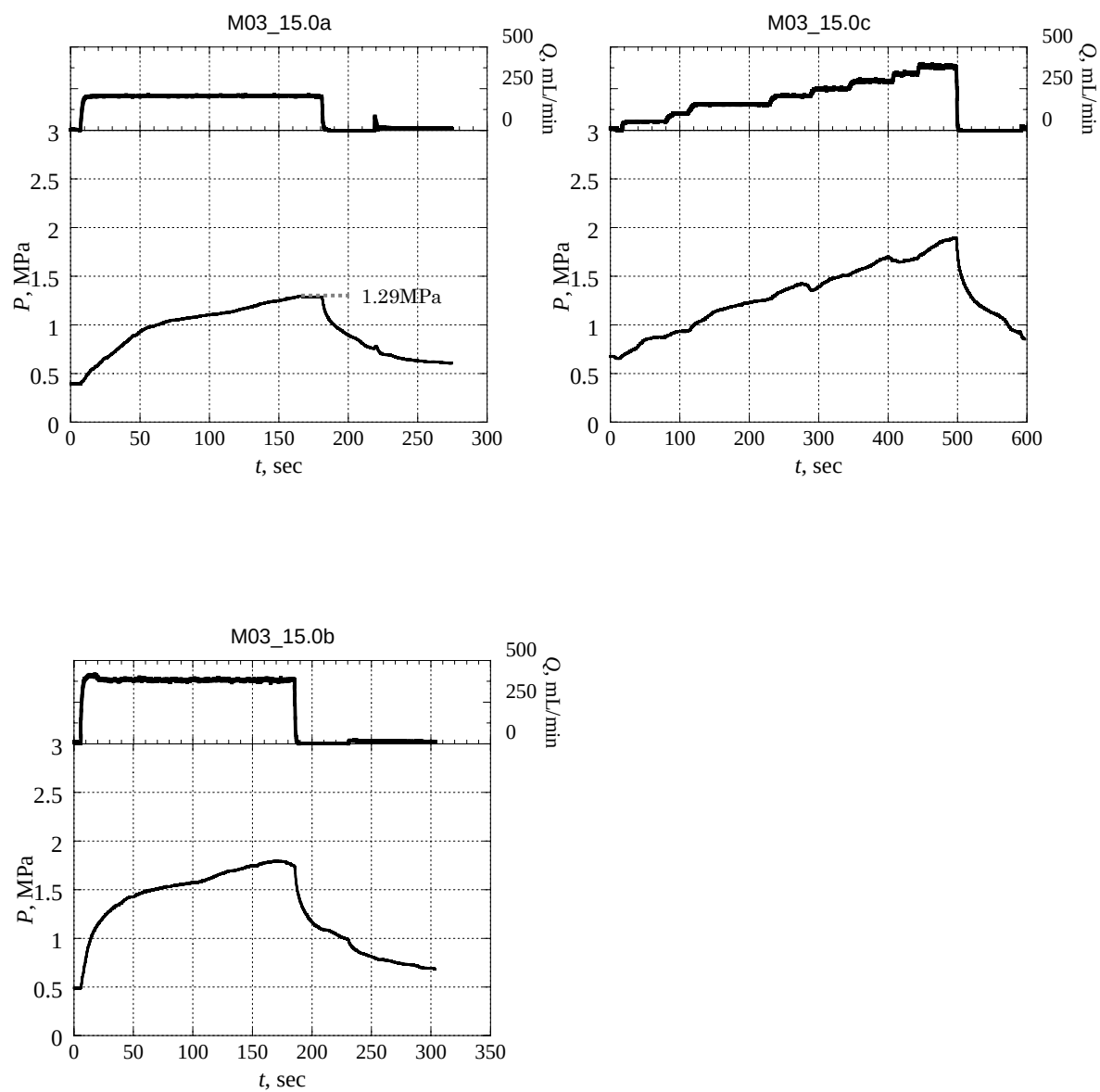


図 4.17 M03 孔の深度 15.0m における圧力・流量・時間曲線

4. 4. 3 水圧破碎試験によって生じたき裂

水圧破碎試験をおこなう前に実施した孔壁の型取によって、表 4.3 に示す 16 深度の加圧区間が選定された。水圧破碎後、これらの加圧区間で採取したインプレッションパッカーによるき裂の型取の記録を図 4.18 から図 4.21 に示す。これらの型取の記録は、パッカーエレメントに熱収縮チューブを巻きつけてき裂の型取りをした後、そのチューブに軸方向の切れ目を入れてパッカーからはがし、それを周方向に展開したものをトレースした結果である。ここで、紙面の上側が孔口、下側が孔底側である。薄墨で示した領域は、ボーリング孔壁が破壊してはく離した部分を表している。各トレースの左下には、孔口から孔底を見たとき、切れ目の向きを鉛直上向きから時計方向に計った角度が示されている。図中の白矢印（）は、横き裂の方向余弦を算定するために用いたき裂のトレースである。また、黒矢印（）は、次章で述べるブレイクアウトを指し示している。なお、先に述べたように、孔径の拡大によってパッカーが破裂した深度と加圧区間の圧力が上昇しなかった深度では、き裂に作用する初期地圧の情報が得られないので孔壁の型取はおこなわなかった。

これらの型取の記録をみると、ボーリング孔軸を含む縦き裂はどこの試験深度にも生じていない。すべてボーリング孔軸と交差する横き裂である。これは、当該岩盤に多くの潜在き裂が含まれているため、水圧破碎によって孔壁の周方向引張応力が岩盤の引張強度に達する前に天然き裂が開口したことによると考えられる。このことは、東立坑 140m 小型試験座で実施した水圧破碎試験から、4.3 で述べた手法にしたがってボーリング孔軸と直交する面内の初期地圧を評価できないことを意味する。なお、孔壁の周方向に 180° 離れた位置に分布する破壊は、孔壁の集中応力が岩盤の強度を越えてできたボアホールブレイクアウトであると考えられる。

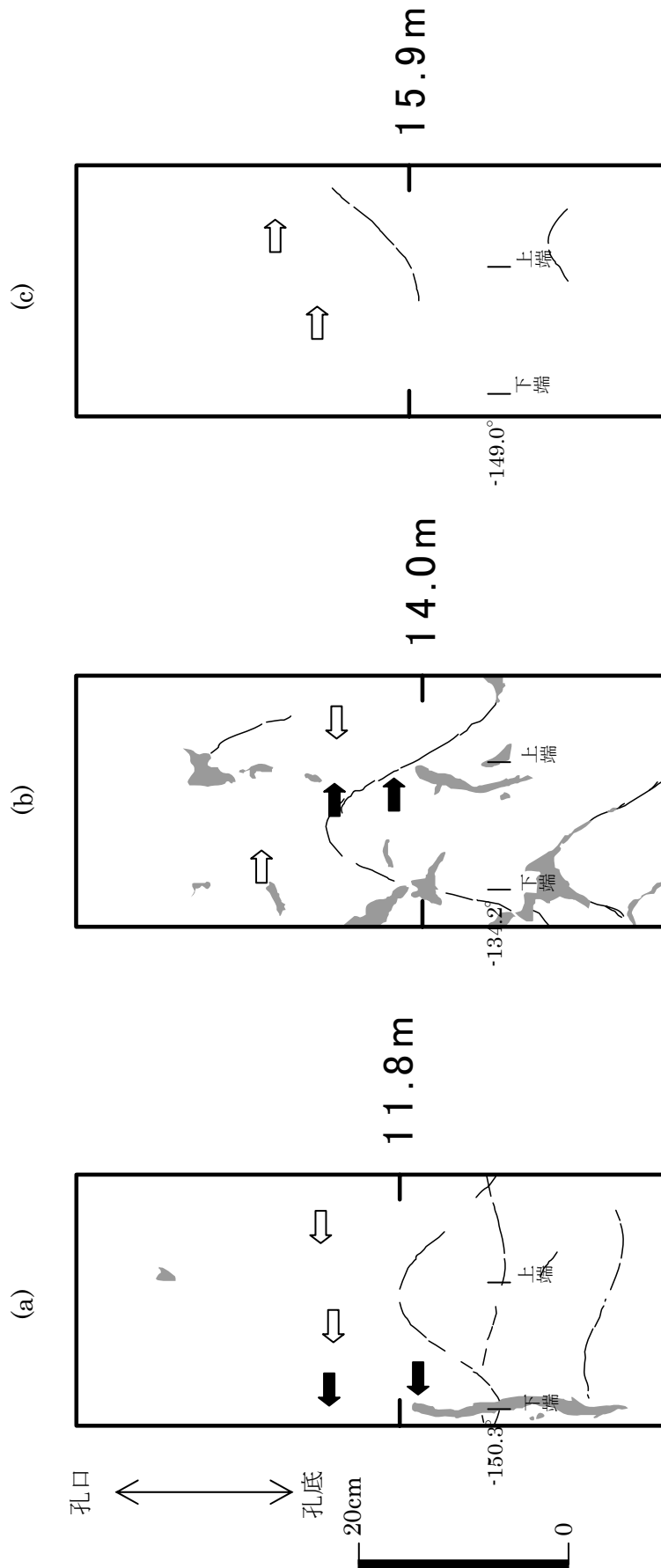


図 4.18 (a)M01 孔の深度 11.8m、(b)M01 孔の深度 14.0m および(c)M01 孔の深度 15.9m で採取したき裂の型取の記録

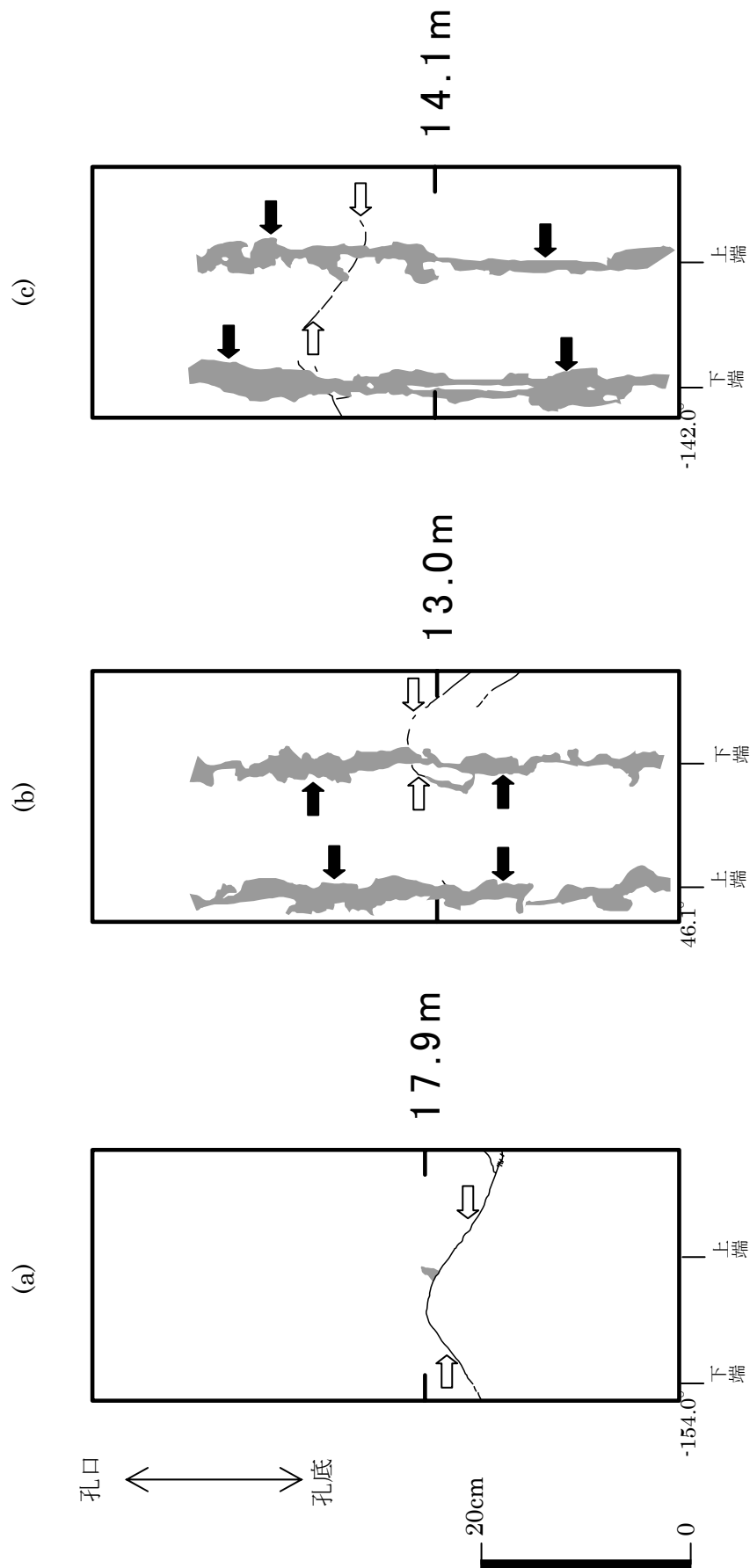


図 4.19 (a)M01 孔の深度 17.9m、(b)M02 孔の深度 13.0m および(c)M02 孔の深度 14.1m で採取したき裂の型取の記録

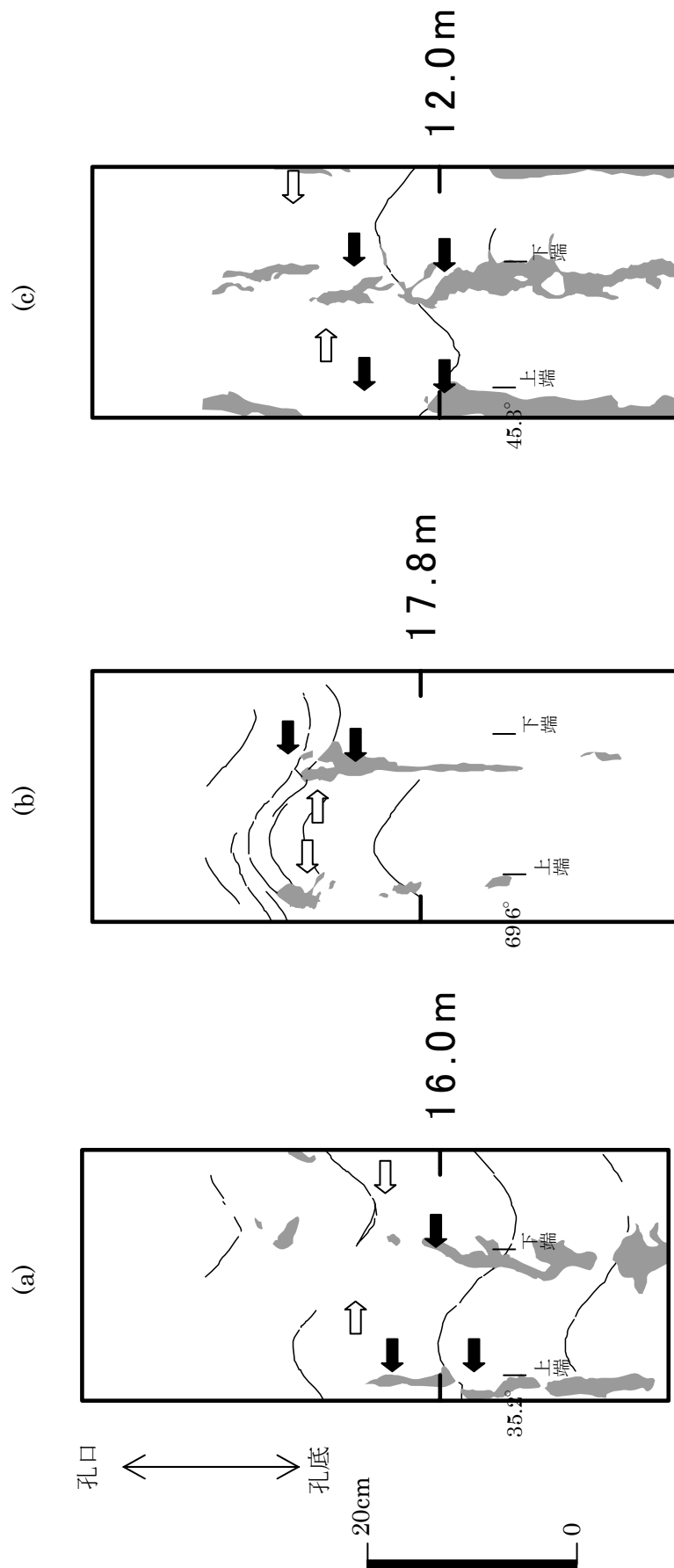


図 4.20 (a)M02 孔の深度 16.0m、(b)M02 孔の深度 17.8m および(c)M03 孔の深度 12.0m で採取したき裂の型取の記録

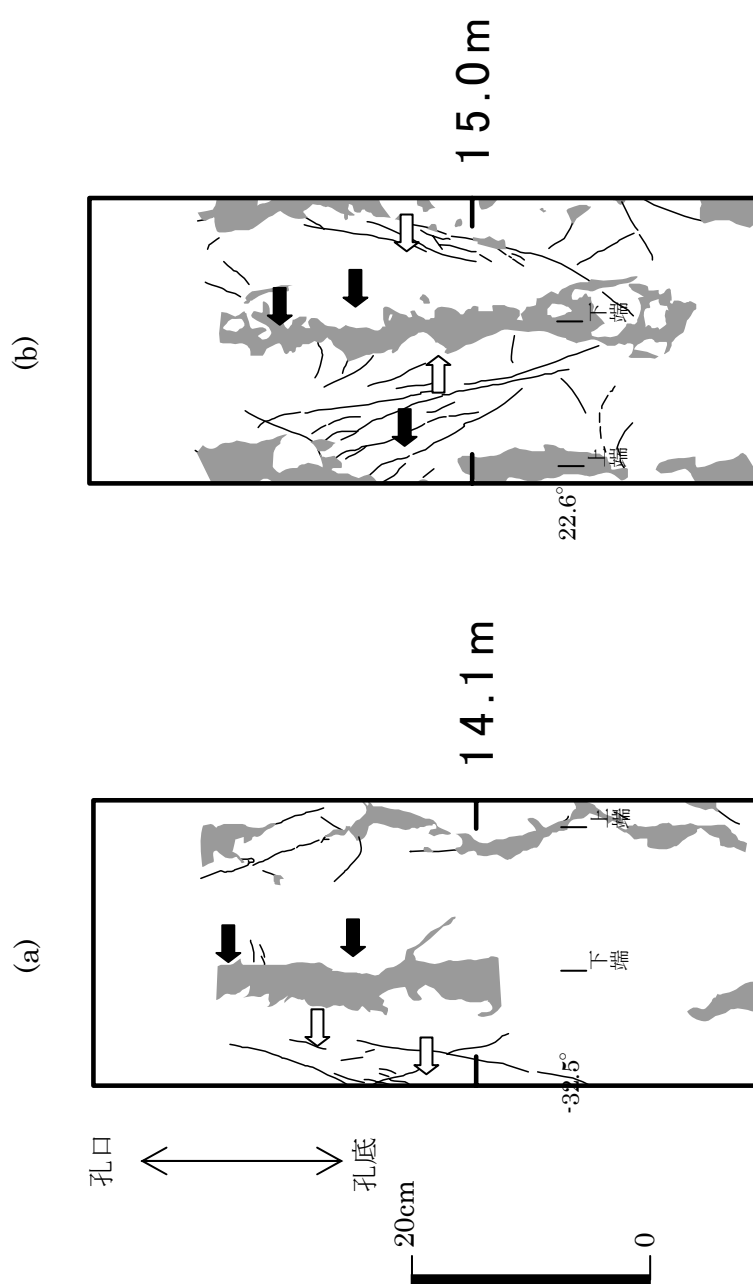


図 4.21 (a)M03 孔の深度 14.1m および(b)M03 孔の深度 15.0m で採取したき裂の型取の記録

4. 5 初期地圧の評価

一般に、水圧破碎試験をおこなうと縦き裂あるいは横き裂という 2 種類のき裂が誘起される。縦き裂とはボーリング孔軸に平行に進展するき裂であり、横き裂とは既存の弱面あるいは岩脈などに沿って進展するき裂である。小型試錐座まわりの岩盤のように、多くの弱面を有する岩盤で水圧破碎試験をおこなうと、誘起されるき裂はほとんどが横き裂であり、縦き裂が生じることはまれである。たとえ縦き裂が生じたとしても、多くの弱面を含む岩盤では容易に弱面と連結するため、縦き裂のき裂閉口圧 P_s の信頼性は低い。しかし、よく知られているように、横き裂のき裂閉口圧はき裂に垂直な圧縮応力に等しい⁴⁾。そこで、ここでは、まず走向・傾斜の異なる複数の横き裂のき裂閉口圧から初期地圧を評価するために、横き裂のき裂閉口圧と初期地圧との関係について述べる。次に、小型試錐座に掘削した 3 本のボーリング孔でおこなった水圧破碎試験で開口した横き裂の法線ベクトルを求め、最後に横き裂に作用する法線応力とき裂の法線ベクトルの関係から初期地圧を評価する。

4. 5. 1 き裂閉口圧と初期地圧の関係^[18]

ボーリング孔を掘削する前の岩盤の応力状態は、いたるところで一様であると仮定する。この一様な応力場を、図 4.22 に示すカーテシアン座標系 $(x_i : i=1,2,3)$ に関して $\tau_{ij} (i, j=1,2,3)$ と表記する。ここで、圧縮応力を正とする。水圧破碎試験をおこなって生じた横き裂のき裂閉口圧は、横き裂に作用する法線応力成分であると考えられるので、次式が得られる。

$$\sum_{i,j=1}^3 \tau_{ij} \lambda_i^{(k)} \lambda_j^{(k)} = P_s^{(k)} \quad (k=1, 2, \dots, K) \dots\dots\dots (4.5)$$

ここで、 K は水圧破碎試験によって生じた横き裂の総数、 $P_s^{(k)}$ は k 番目のき裂のき裂閉口圧力、そして $\lambda_i^{(k)}$ は k 番目のき裂面の外向きの単位法線ベクトルである。式(4.5)は、次のような単純な式に書き換えることができる。

$$\sum_{l=1}^6 a_{kl} s_l = P_s^{(k)} \quad (k=1, 2, \dots, K) \dots\dots\dots (4.6)$$

ここに、

$$a_{k1} = \lambda_1^{(k)} \lambda_1^{(k)}, \quad a_{k2} = \lambda_2^{(k)} \lambda_2^{(k)}, \quad a_{k3} = \lambda_3^{(k)} \lambda_3^{(k)}, \quad a_{k4} = 2\lambda_1^{(k)} \lambda_2^{(k)}, \quad a_{k5} = 2\lambda_2^{(k)} \lambda_3^{(k)}, \\ a_{k6} = 2\lambda_1^{(k)} \lambda_3^{(k)} \dots\dots\dots (4.7)$$

$$s_1 = \tau_{11}, \quad s_2 = \tau_{22}, \quad s_3 = \tau_{33}, \quad s_4 = \tau_{12}, \quad s_5 = \tau_{23}, \quad s_6 = \tau_{13} \dots\dots\dots (4.8)$$

式(4.6)は 6 つの応力成分を未知数とする線形連立方程式である。したがって、走向・傾斜の異なる 6 つ以上の横き裂に関して式(4.6)が得られれば、初期地圧を評価することができる。

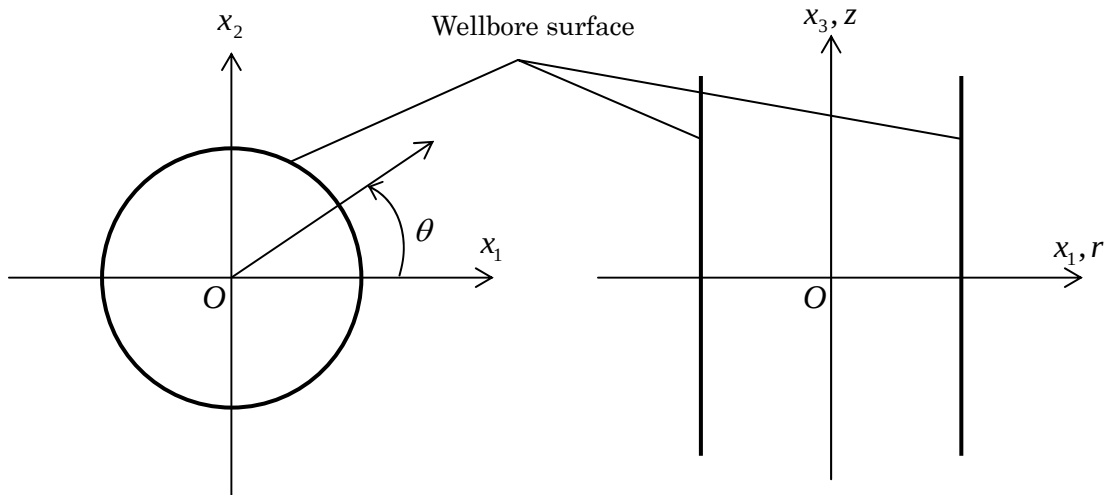


図 4.22 ボーリング孔と座標系の関係^[18]

4. 5. 2 横き裂の方向余弦

図 4.18 から図 4.21 に示した横き裂の法線の E-N-V 座標系（V 軸は鉛直上向き）における方向余弦を表 4.4 に示す。横き裂の方向余弦は、図 4.23 に示すように、トレースの全幅、き裂のトレースのピークが現れる位置 S_m およびその振幅 A との幾何学的な関係から決定される^{[12][18]}。図 4.18 から図 4.21 には、方向余弦の算定に用いた横き裂のトレースを矢印（ $\Rightarrow$ ）で指し示して表示した。

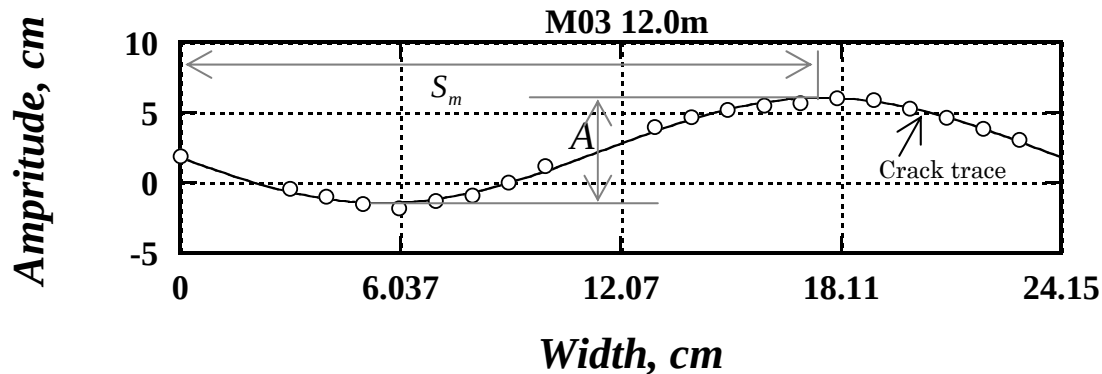


図 4.23 型取パッカーから得られたき裂のトレースに最小二乗法によって平面を当てはめた例

4. 5. 3 横き裂のき裂閉口圧

水圧破碎試験の最後の加圧サイクルにおける圧力と流量の関係を、測定深度ごとにまとめると図 4.24 に示すとおりである。“step-rate pressurization”^{[12][17]}では、圧力と流量のプロットにおける折れ曲がり点、あるいは圧入流量ゼロにおける圧力軸の切片からき裂閉口圧を評価する。しかし、図 4.24 の圧力-流量プロットには必ずしも明瞭な折れ曲がりが見出せない場合や、高流量域で圧力が低下する結果も認められる。このことから、圧力-流量プロットを用いて客観的にき裂閉口圧を評価することは容易でないと思われる。また、2008 年に換気立坑 140m 小型試験錐座で実施した水圧破碎試験のデータとの解析手法の整合性から、ここでは図 4.7 から図 4.17 の 200ml/min で加圧したときの定常圧力をき裂閉口圧とした。すなわち、き裂面内に水圧勾配ができない程度に小さい流量で加圧し、加圧区間の圧力がほぼ一定になったときの圧力からき裂面に垂直な応力を評価する方法^{[19][20]}を採用した。図 4.25 は、M02 孔の深度 17.8m で測定された圧力-時間曲線から、前述の方法でき裂閉口圧を決定したときの例である。同様に、図 4.7 から図 4.17 の圧力-時間曲線には、評価されたき裂閉口圧を記入して表示した。結果は、表 4.4 に示すとおりである。

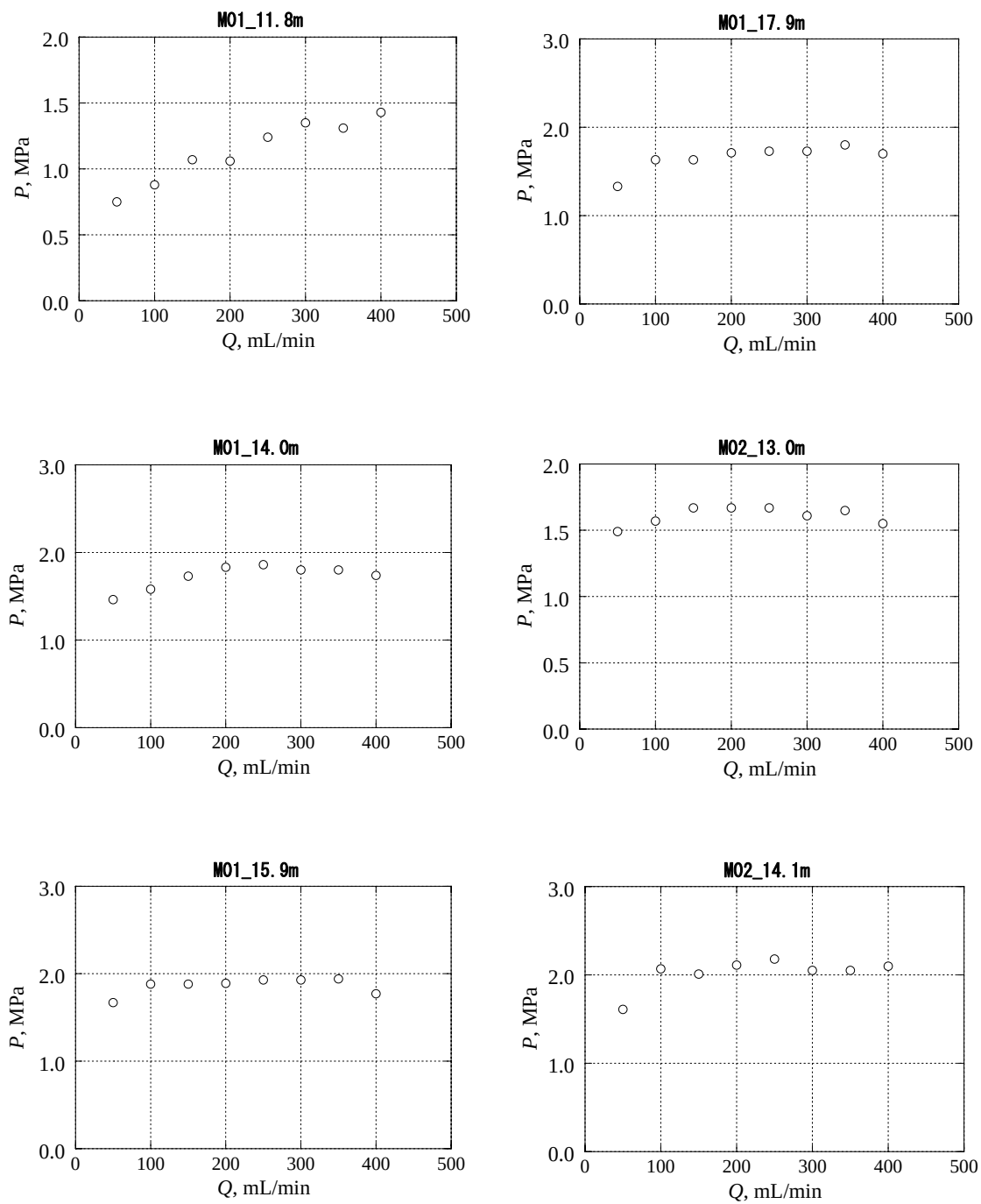


図 4.24 step-rate pressurization における圧力と流量の関係(1/2)

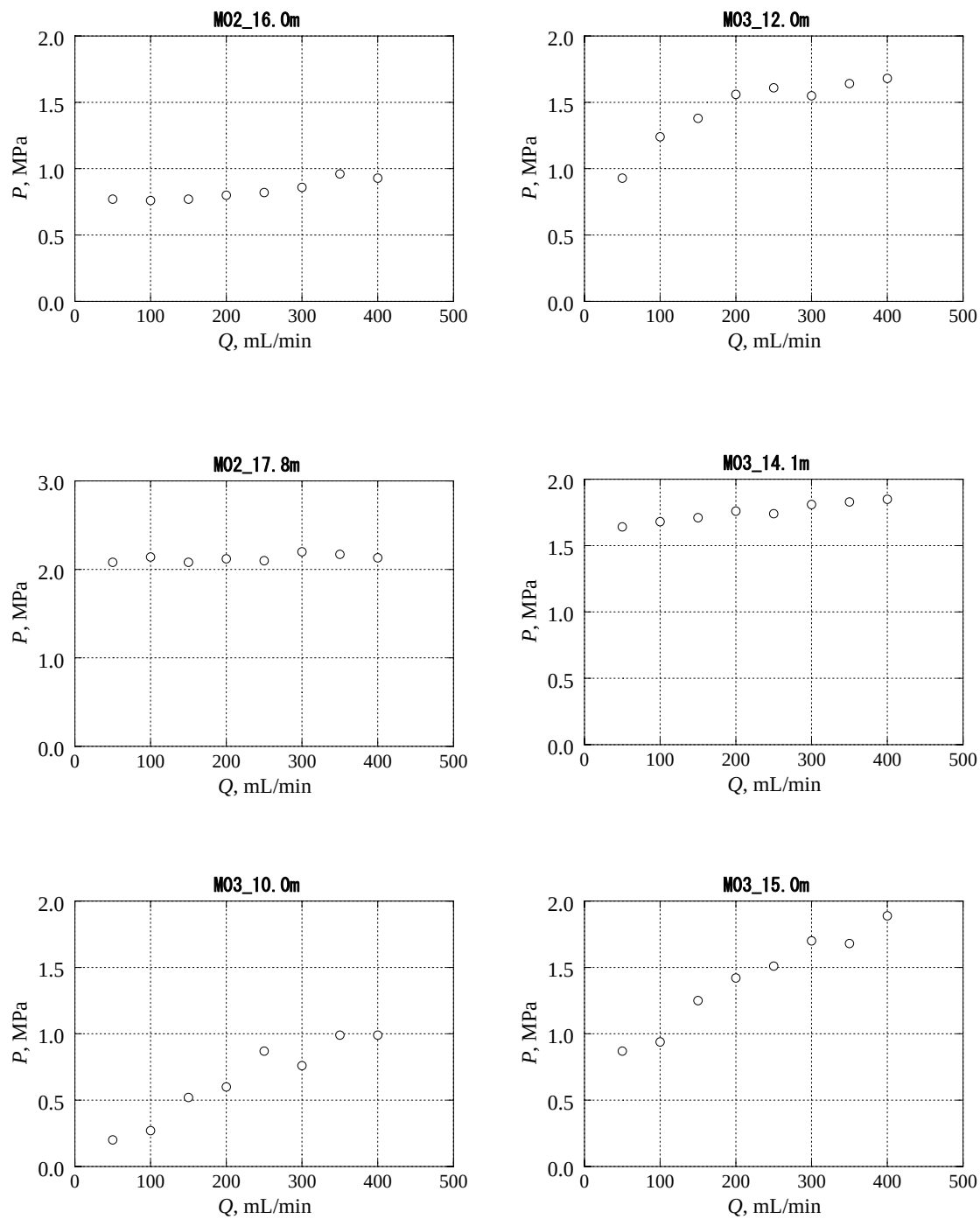


図 4.24 step-rate pressurization における圧力と流量の関係(2/2)

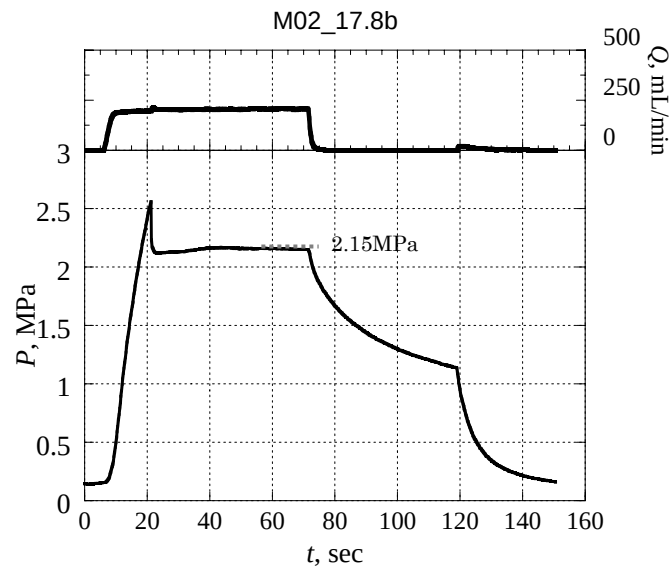


図 4.25 圧力-時間曲線からき裂閉口圧を決定したときの例

表 4.4 水圧破碎試験によって開口した横き裂の法線方向余弦（E-N-V 座標系）およびき裂閉口圧

孔名	方位・傾斜	試験深度 (m)	方向余弦（E-N-V 座標系）			き裂閉口圧 (MPa)
			λ_1	λ_2	λ_3	
M01	S60° E、 水平から 下向き 5°	11.8	0.488309	-0.528417	0.694500	1.19
		14.0	-0.055946	-0.992358	0.109982	1.65
		15.9	-0.742330	-0.042678	0.668674	1.75
		17.9	0.406647	-0.897437	0.171013	1.62
M02	S、水平 から下向き 5°	13.0	0.268034	0.566343	0.779367	1.67
		14.1	0.306102	0.728813	0.612481	1.69
		16.0	-0.480511	0.761362	-0.435244	0.79
		17.8	0.588816	-0.668313	0.454590	2.15
M03	S30° E、 水平から 下向き 35°	12.0	0.231177	0.442135	0.866645	1.49
		14.1	0.156143	-0.388973	0.907920	1.76
		15.0	-0.455880	0.564246	-0.688331	1.29

4. 5. 4 解析結果

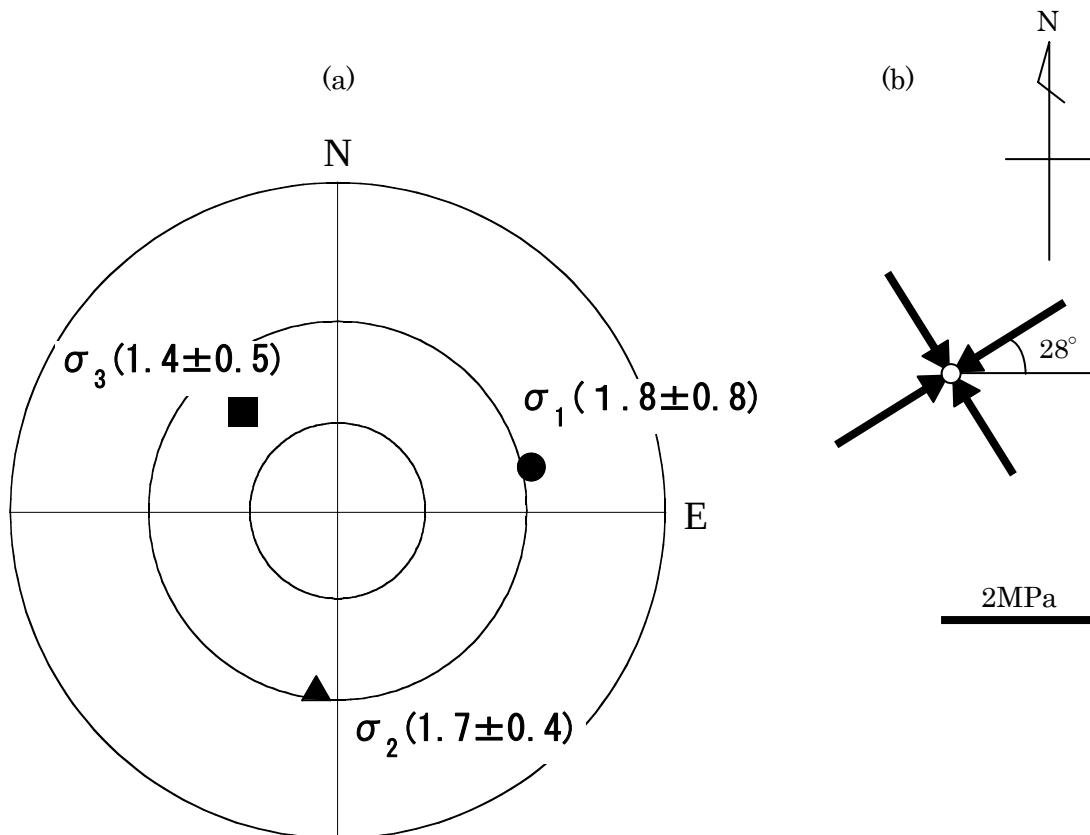
式(4.6)の $P_s^{(k)}$ として表 4.4 のき裂閉口圧を、式(4.7)の $\lambda_i^{(k)}$ として表 4.4 の方向余弦を代入し、6 つの応力成分と主応力を求めた。結果は表 4.5 のとおりである。応力成分の最確値に対する確率誤差はかなり大きいことが認められる。すなわち、二次形式の曲面で表現される初期地圧分布と、測定された法線応力分布との適合性はあまりよくない。この理由は次のように考えることができる。まず、表 4.4 の方向余弦を各試験深度について比較すると、M02 孔の試験深度 13.0m、試験深度 14.1m および M03 孔の試験深度 12.0m の横き裂の方向余弦は近似している。すなわち、これらの横き裂は、ほぼ同一の走向・傾斜を有するといえる。また、M01 孔の試験深度 11.8m および M03 孔の試験深度 15.0m における横き裂の方向余弦はほぼ異符号同値であることから、2 つの法線ベクトルは原点を対称にして逆向きである。すなわち、これらの 2 深度の横き裂の走向・傾斜も近似している。言い換えれば、これら 5 箇所のき裂閉口圧は、岩盤内部の 2 方向の法線応力成分に関する情報を与えるにすぎない。したがって、表 4.4 に示した 11 深度の測定結果から得られる独立した線形方程式の数は、6 つの未知数に対して 8 本であるとみなすことができる。走向・傾斜の異なる 6 つ以上の横き裂に関して式(4.6)が得られれば、原理的には初期地圧を評価することは可能であるが、独立した観測方程式の数が未知数と比較して多くないことから、得られた結果の信頼性はあまり高くないと思われる。

図 4.26 は、走向・傾斜の異なる横き裂の法線応力の解析から評価した主応力の下半球投影図である。主応力差が小さい上に最確値に対する確率誤差も大きいので、主方位は入れ替わる可能性があるとして解釈できる。したがって、主方位の分布傾向ははっきりしない。特定の走向・傾斜を有する天然き裂が卓越している岩盤では、掘削するボーリング孔の方位・傾斜を変化させても、走向・傾斜の異なるき裂と交差する確率は低いので、き裂閉口圧力の情報だけから精度よく初期地圧を評価することは容易でないと思われる。

表 4.5 横き裂の垂直応力から評価した初期地圧状態

応力成分	σE	1.73 ± 0.90
	σN	1.61 ± 0.26
	σV	1.58 ± 0.40
	τEN	0.09 ± 0.58
	τNV	0.08 ± 0.29
	τVE	-0.15 ± 0.37
3次元主応力	σ_1 (方位/傾斜)	1.83 ± 0.77 (77° / 28°)
	σ_2 (方位/傾斜)	1.67 ± 0.35 (187° / 33°)
	σ_3 (方位/傾斜)	1.42 ± 0.54 (316° / 45°)
平面応力	σH	1.78 ± 0.85
	σ_h	1.56 ± 0.57
	Eから σH までの角度	28°

(応力の単位は MPa)

図 4.26 (a)水圧破碎法によって評価された主応力の下半球投影図
および(b)水平面内の主応力分布

4. 6 結言

小型試験座に掘削した方向の異なる 3 本のボーリング孔において、コンプライアンス C の小さな配管系を用いた高剛性水圧破碎法を実施した。3 本のボーリング孔の 11 深度でおこなった水圧破碎試験で、ボーリング孔軸を含む縦き裂はどこにも生じなかった。これは、当該岩盤に潜在の天然き裂が多く含まれていることが一つの原因と考えられた。そこで、応力状態が測定位置によらず一様であると仮定し、き裂面の法線応力と初期地圧の関係から小型試験座まわりの初期地圧状態を評価した。評価された初期地圧の最確値に対する確率誤差はかなり大きかった。これは、ほぼ同じ走向・傾斜を有するき裂に作用する法線応力が測定されたため、独立した観測方程式の数が減少したことによると考えられた。

5. ブレイクアウトによる初期地圧評価

小型試験座の水圧破碎試験から得られたき裂の型取には、孔軸方向に伸びた孔壁の破壊およびはく離が記録されていた。これは、初期地圧を受けている岩盤に掘削されたボーリング孔まわりの応力集中によって孔壁の弾性ひずみエネルギーが局所的に増加し、それがある限界値に達したために生じたボアホールブレイクアウト^[21]であると考えられる。

図 5.1 は、初期地圧の主軸のいずれかがボーリング孔軸と一致している場合を例にとってブレイクアウトの状況を模式的に示したものである。ここで、 σ_{max} を最大圧縮応力、 σ_{min} を最小圧縮応力とし、岩盤は等方均質性を有すると仮定する。ボーリング孔壁の接線応力は孔軸と垂直な最大圧縮応力 σ_{max} の方向で最小となり、 σ_{min} の方向で最大となる。すなわち、ボーリング孔中心から見た σ_{min} の作用方向に応力が集中し、その応力が岩盤の強度を越えた部分にブレイクアウトが生じるとされている。このように、ブレイクアウトが初期地圧の影響を受けて発生することに着目し、ブレイクアウトの観測データを利用して初期地圧を評価する方法が提案されている。すなわち、ブレイクアウトの発生方向からボーリング孔と直交する面内に作用する最大および最小圧縮応力を評価する方法^[22]、ブレイクアウトの開き角度から最大圧縮応力の大きさを評価する方法^[23]等である。

ただし、これらの方法は、ボーリング孔軸といずれかの初期主応力軸が一致していると仮定している。地表からの深度が大きくなると初期主応力軸の一つが鉛直に近くなる場合が多いことから、大深度の鉛直ボーリング孔であれば上記の仮定は妥当であると考えられる。しかし、小型試験座に掘削した 3 本のボーリング孔のように、土被りの小さい地下坑道から斜めに掘削したボーリング孔の孔軸と初期主応力軸が一致する可能性はほとんどないと考えられる。ボーリング孔軸と初期主応力軸のひとつが一致しない場合、孔壁で発生する最大圧縮応力の方向および大きさと、孔軸と直交する面内で発生するそれらとの間にずれが生じる。ボーリング孔軸と初期主応力軸が一致しないと仮定してブレイクアウトのデータから初期地圧を評価する問題は、非線形の逆解析問題^[24]となる。

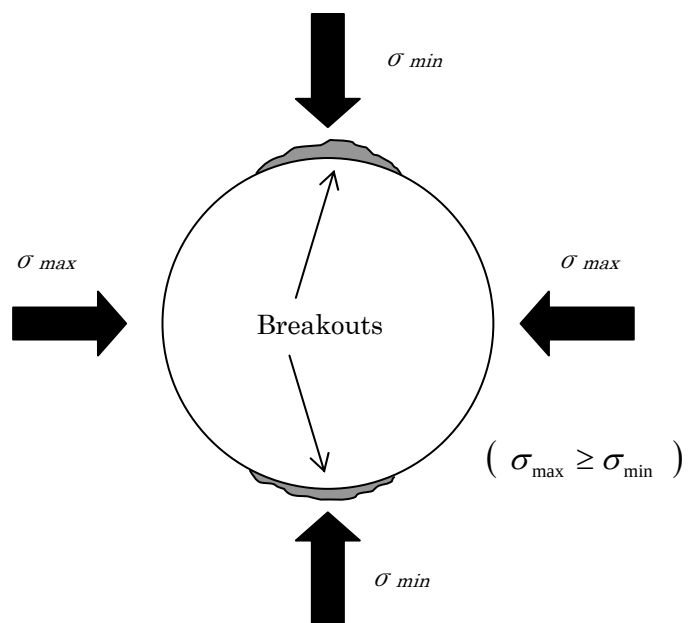


図 5.1 ボーリング孔軸と直交する面内に示したボアホールブレイクアウトと初期地圧の関係の模式図

5. 1 解析モデル^[25]

横き裂のき裂開口圧はき裂に垂直な圧縮応力に等しいので、4 章で述べたように坑内から比較的短いボーリング孔を掘削して水圧破碎をおこない、走向・傾斜の異なる 6 つ以上の横き裂に作用する垂直応力を測定することができれば、一様な応力場を仮定して 3 次元初期地圧を評価できる。ただし、対象岩盤に含まれる弱面の走向・傾斜が大きく違う場合は、ボーリング孔の方向とは無関係にほぼ同じ走向・傾斜のき裂に作用する法線応力が測定されるため、評価される初期地圧の信頼性は低くなることが考えられる。しかし、ボアホールまわりの応力集中によって孔壁が破壊するボアホールブレイクアウトが生じた場合は、その発生条件を積極的に利用することによって初期地圧に関するデータベースを拡張し、水圧破碎データだけを用いるよりも信頼性の高い初期地圧評価をおこなうことができる。そこで、ここではボーリング孔軸と初期主応力軸の方向の間に制約条件を設けずに、横き裂のき裂開口圧とボアホールブレイクアウトのデータから 3 次元初期地圧を評価する方法について述べる。

(1) き裂開口圧

ボーリング孔を掘削する前の岩盤の応力状態は、いたるところで一様であると仮定する。この応力場を、任意に定めた直角座標系 $(x_i : i=1,2,3)$ に関して $\tau_{ij}(i, j=1,2,3)$ と表記する。ただし、圧縮応力を正とする。水圧破碎試験をおこなって生じた横き裂のき裂開口圧は、横き裂に作用する法線応力成分であると考えられるので次式が得られる^[18]。

$$\sum_{i,j=1}^3 \tau_{ij} \lambda_i^{(k)} \lambda_j^{(k)} = P_s^{(k)} \quad (k=1,2,\dots,K) \quad \dots\dots\dots (5.1)$$

ここで、 K は水圧破碎によって開口した横き裂の総数、 $P_s^{(k)}$ および $\lambda_i^{(k)}$ は k 番目のき裂のき裂開口圧および単位法線ベクトルの方向余弦である。

(2) ボアホールブレイクアウト

図 4.22 に示すような円筒座標系 (r, θ, z) および直交座標系を導入すると、ボーリング孔壁面の応力は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \tau_{11} + \tau_{22} - 2(\tau_{11} - \tau_{22})\cos 2\theta - 4\tau_{12} \sin 2\theta \\ \sigma_z &= -2\nu(\tau_{11} - \tau_{22})\cos 2\theta - 4\nu\tau_{12} \sin 2\theta + \tau_{33} \quad \dots\dots\dots (5.2) \\ \sigma_\theta &= -2\tau_{31} \sin \theta + 2\tau_{23} \cos \theta, \quad \sigma_r = \sigma_{r\theta} = \sigma_{rz} = 0 \end{aligned}$$

ここで、 ν はポアソン比、そして σ_r 、 σ_θ 、 σ_z 、 $\sigma_{r\theta}$ 、 σ_{rz} および σ_θ は円筒座標系 (r, θ, z) に関する応力成分である。図 5.2(a) に示すようなボーリング孔壁の任意の位置に作用する最大圧縮応力 σ_c は、上記の応力の円筒座標表示を用いて次式で与えられる。

$$\sigma_c = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_\theta + \sigma_z + \sqrt{(\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + 4\sigma_\theta^2} \right\} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

本報ではブレイクアウトが Mohr-Coulomb の破壊基準にしたがって起こるものと仮定するので、 C_0 を岩石の一軸圧縮強度とすると、 $\sigma_c \geq C_0$ を満足する位置にブレイクアウトができる。したがって、ブレイクアウトの発生位置に関して次式が得られる。

$$\sigma_c|_{\theta=\theta_0^{(l)}} = C_0^{(l)} \quad (l=1,2,\dots,L) \quad \dots\dots\dots (5.4)$$

さらに、ブレイクアウトの方向に関して次式が得られる。

$$\left. \frac{\partial \sigma_c}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_{\min}^{(m)}} = 0 \quad (m=1,2,\dots,M) \dots\dots\dots (5.5)$$

ここで、 $\theta_b^{(l)}$ および $\theta_{\min}^{(m)}$ は図 5.2(b)に示すように、それぞれブレイクアウトが開始する位置および破壊域中央の方向である。また、 L と M は、それぞれ $\theta_b^{(l)}$ および $\theta_{\min}^{(m)}$ が既知であるブレイクアウトの総数である。

(3) 逆解析

式(5.1)、式(5.4)および式(5.5)から初期地圧を評価するために、以下のような逆解析の問題を考える^[18]。まず、観測方程式として $d_k (k=1,2,\dots,N; N=K+L+M)$ を定義する。横き裂の場合、 $d_k (k=1,2,\dots,K)$ は k 番目のき裂閉口圧 $P_s^{(k)}$ に等しく、ブレイクアウト縁部までの角度 $\theta_b^{(k)}$ が既知の場合は、 $d_k (k=K+1,\dots,L)$ は $C_0^{(k)}$ に等しい。そして、ブレイクアウトの方向 $\theta_{\min}^{(k)}$ が既知の時、 $d_k (k=L+1,\dots,N)$ はゼロである。したがって、次のような非線形の観測方程式が得られる。

$$d_k = f_k(\lambda_1^{(k)}, \lambda_2^{(k)}, \lambda_3^{(k)}, \tau_{11}, \tau_{22}, \dots, \tau_{13}) \dots\dots\dots (5.6)$$

式(5.6)を先験的に推定した応力 $\tau_{ij}^0 (i,j=1,2,3)$ のまわりに Taylor 展開し、二次以上の項を省略して線形に引き直し、逐次近似法によって初期地圧 $\tau_{ij} (j=1,2,3)$ の最確値を求める。

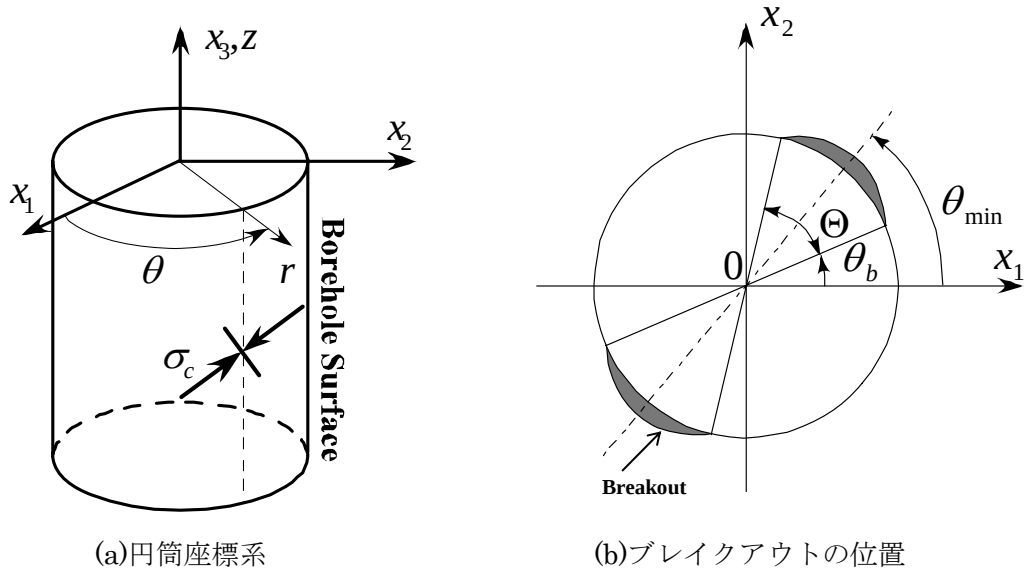


図 5.2 (a)円筒座標系および(b)ブレイクアウトの位置

5. 2 ブレイクアウトの形状

水圧破碎試験後の 11 深度における型取の記録のうち、9 深度でブレイクアウトが認められた(図 4.18 から図 4.21 の黒矢印 () 参照)。ブレイクアウトは、孔壁の周方向に 180° 離れた位置に発生し、孔軸方向に比較的連続性を持って分布する。熱収縮チューブの左の切れ目からブレイクアウト縁部までの距離を孔軸方向に約 1cm 間隔で測定し、その平均値からブレイクアウトの破壊開始位置と破壊中央の位置を求めた。結果は表 5.1 に示すとおりである。ここで、 $\theta_b^{(l)}$ は鉛直下向きの X 軸からブレイクアウトの破壊開始位置まで反時計回りに測定した角度、 $\theta_{\min}^{(m)}$ はブレイクアウトの破壊中央までの角度である。ブレイクアウトは、3 本のボーリング孔とも孔軸を含む鉛直面と孔壁のなす母線のまわりに分布していることがわかる。なお、表 5.1 の一軸圧縮強度とポアソン比は、第 6 章で述べる岩石の力学試験から求めた平均値である。

表 5.1 ブレイクアウトの破壊開始位置 $\theta_b^{(l)}$ および破壊中央の位置 $\theta_{\min}^{(m)}$

孔名	方位・傾斜	試験深度 (m)	$\theta_b^{(l)}$ (deg)	$\theta_{\min}^{(m)}$ (deg)	一軸圧縮強度 C_0 (MPa)	ポアソン比
M01	S60° E、水平か ら下向き 5°	11.8	348.3	355.6	5.37	0.26
		14.0	159.4	167.5		
M02	S、水平から 下向き 5°	13.0	165.2	179.8	4.72	0.22
		14.1	163.5	174.8		
		16.0	148.7	161.3		
		17.8	330.4	335.4		
M03	S30° E、水平か ら下向き 35°	12.0	127.6	147.1	4.45	0.27
		14.1	316.8	340.4		
		15.0	159.4	178.7		

5. 3 解析結果

前節で述べた逆解析の手法によれば、横き裂に作用する法線応力成分、ブレイクアウトの発生位置およびブレイクアウトの方向のいずれか単独、あるいはそれらを組み合わせて、独立した観測方程式を 6 本以上得ることができれば初期地圧を評価できる。ここでは、ブレイクアウトのデータのみを用いた解析方法および初期地圧に関する情報量が最も多いと考えられる横き裂に作用する法線応力とブレイクアウトのデータとを組み合わせる解析方法を、それぞれ本調査および換気立坑 140m 小型試験座から得られた測定データに適用した結果について述べる。

5. 3. 1 ブレイクアウトのデータのみを用いた解析結果

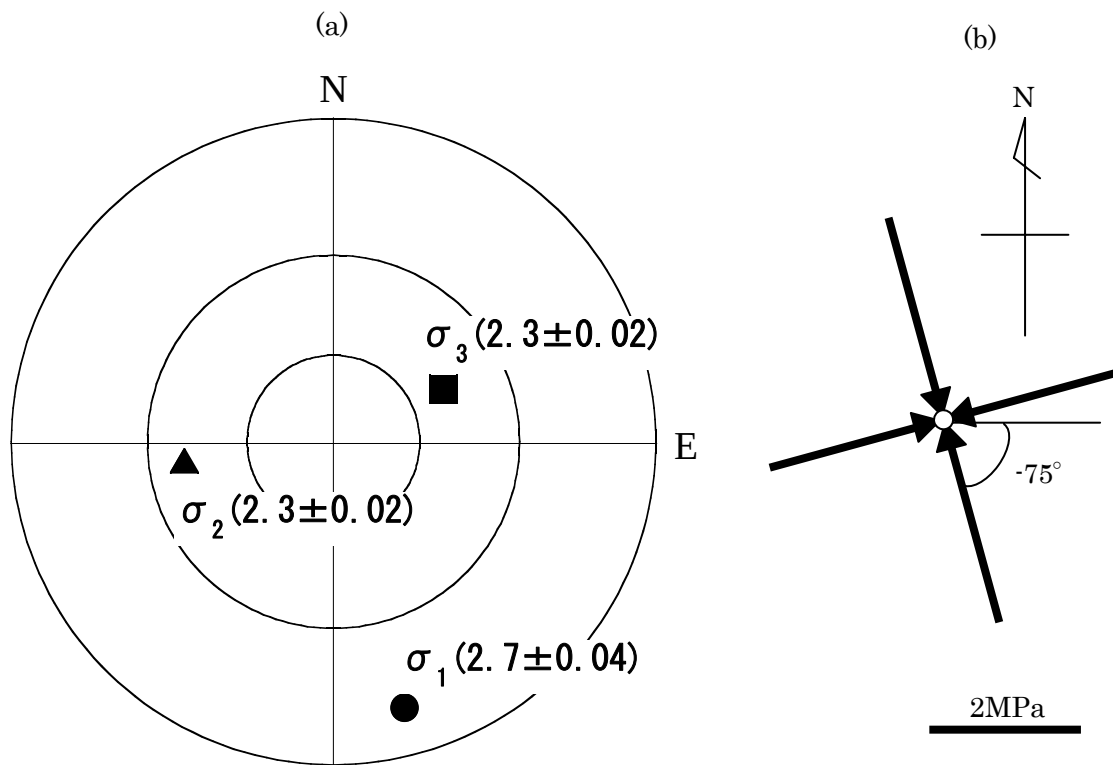
(1) 東立坑 140m 小型試験座における初期地圧

表 5.1 に示した各深度におけるブレイクアウトのデータ、ボーリング孔の方位・傾斜および岩盤の一軸圧縮強度とポアソン比から、逆解析によって E-N-V 座標系に関する 6 つの応力成分と主応力を求めた。結果は表 5.2 および図 5.3 の通りである。表 5.2 をみると、評価された応力成分の最確値に対する確率誤差はかなり小さい。この理由は次のように説明できると思われる。すなわち、表 5.1 の $\theta_b^{(i)}$ と $\theta_{\min}^{(m)}$ から明らかなように、同一のボーリング孔であれば、深度がちがっていてもブレイクアウトの生じる孔壁上の方向に大きな差はない。このことは、同一ボーリング孔の複数の深度で観察されたブレイクアウトの形状から得られる独立した観測方程式が、式(5.3)と式(5.4)の 2 本のみであるとみなせることを意味する。したがって、3 本のボーリング孔の合計 9 深度のき裂の型取りでブレイクアウトが観察されたにもかかわらず、独立した観測方程式の数は求めるべき未知数の数と等しい 6 本であったと考えることができるであろう。独立した観測方程式と未知数の数が等しければ、最確値に対する誤差はゼロである。以上の考察は定性的で数学的な厳密さを欠くといわざるを得ないが、確率誤差が小さく見積もられたのは、このような統計的な理由によるものと思われる。

表 5.2 ブレイクアウトから評価した初期地圧状態

応力成分	σ_E	2.32 ± 0.02
	σ_N	2.66 ± 0.04
	σ_V	2.29 ± 0.02
	τ_{EN}	-0.10 ± 0.02
	τ_{NV}	0.07 ± 0.01
	τ_{VE}	0.00 ± 0.01
3次元主応力	σ_1 (方位/傾斜)	2.70 ± 0.04 ($165^\circ / 9^\circ$)
	σ_2 (方位/傾斜)	2.31 ± 0.02 ($263^\circ / 40^\circ$)
	σ_3 (方位/傾斜)	2.27 ± 0.02 ($65^\circ / 49^\circ$)
水平面応力	σ_H	2.69 ± 0.04
	σ_h	2.29 ± 0.02
	E から σ_H までの角度	-75°

(応力の単位は MPa)

図 5.3 (a)ブレイクアウトから評価された主応力の下半球投影図
および(b)水平面内の主応力分布

(2) 換気立坑 140m 小型試験座における初期地圧

2008 年に換気立坑深度 140m の小型試験座から 07-V140-M01 孔、07-V140-M02 孔および 07-V140-M03 孔を掘削し、今回とほぼ同一の仕様で水圧破碎試験を実施している。各ボーリング孔の長さは 20.5m である。東立坑 140m 小型試験座での水圧破碎試験と同様に、すべての加圧区間でボーリング孔軸と交差する横き裂が見出されるとともに、表 5.3 に示すとおりボアホールブレイクアウトが 3 本のボーリング孔で発生した。

初期地圧の評価にあたっては、ボーリング孔軸といずれかの初期主応力軸が一致し、ブレイクアウトはボーリング孔軸と直交する面内の最小主応力方向に生じると仮定した。しかし、土被りの小さい地下坑道から鉛直方向に対して斜めに掘削したボーリング孔軸と初期主応力軸とが一致する可能性はほとんどないと思われる。そこで、ボーリング孔軸と初期主応力軸の方向の間に制約条件を設けない非線形の逆解析手法を適用して初期地圧を再度評価しなおした。すなわち、表 5.3 のデータに 5.1(2)で述べた解析手法を適用して初期地圧を評価した。結果は表 5.4 および図 5.4 のようである。中間主応力の方位 (▲印) は鉛直方向に近く、初期応力環境は横ずれ断層型であり、水平面内の最大主応力方向は N46° E であると評価された。

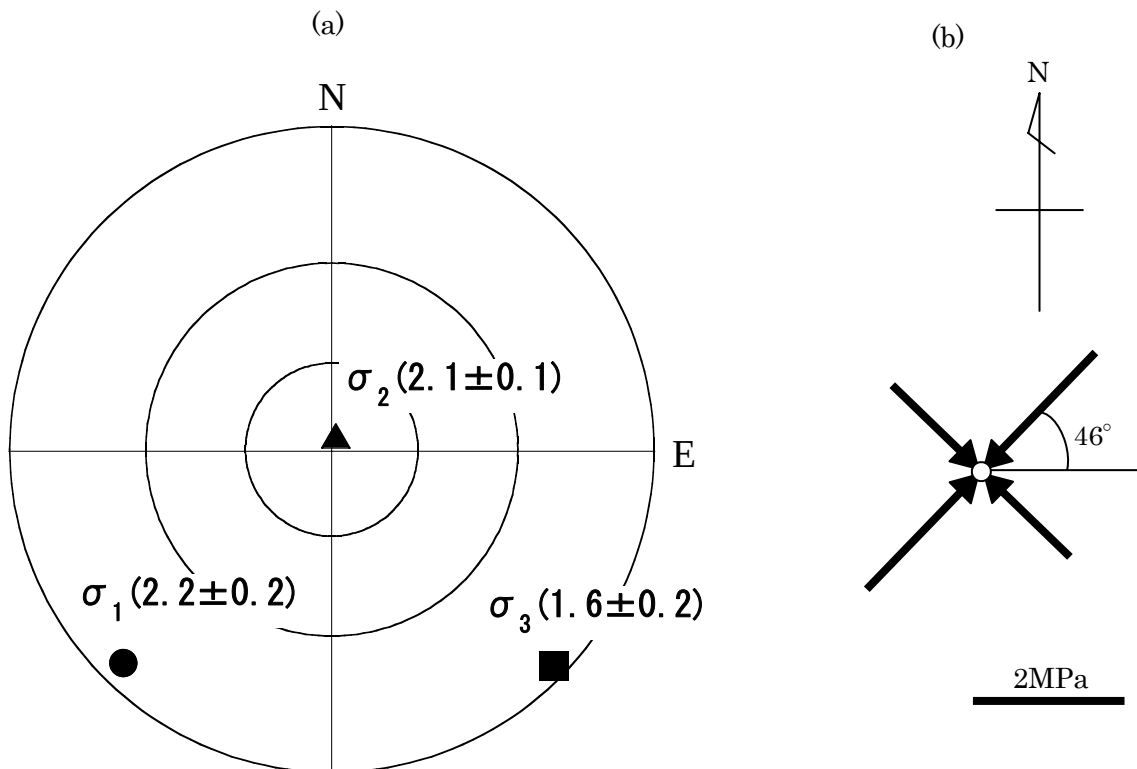
表 5.3 換気立坑 140m 小型試験座におけるブレイクアウトの破壊開始位置 $\theta_b^{(l)}$ および破壊中央の位置 $\theta_{\min}^{(m)}$

孔名	方位・傾斜	試験深度 (m)	$\theta_b^{(l)}$ (deg)	$\theta_{\min}^{(m)}$ (deg)	一軸圧縮強度 C_0 (MPa)	ポアソン比
07-V140-M01	N60° W、水平から上向き 5°	6.3	191.7	198.4	4.48	0.32
07-V140-M02	N、水平から上向き 5°	8.9	187.7	193.4	3.39	0.35
		12.0	156.9	170.6		
		15.0	178.5	182.4		
		16.5	170.6	179.1		
07-V140-M03	N30° W、水平から下向き 30°	6.3	166.3	177.5	4.96	0.32
		13.5	204.5	210.6		
		15.0	199.6	206.2		

表 5.4 再評価した換気立坑 140m 小型試験座の初期地圧状態

応力成分	σE	1.89 ± 0.20
	σN	1.91 ± 0.26
	σV	2.08 ± 0.09
	τEN	0.27 ± 0.10
	τNV	-0.01 ± 0.07
	τVE	0.02 ± 0.03
3次元主応力	σ_1 (方位/傾斜)	2.17 ± 0.19 ($224^\circ / 4^\circ$)
	σ_2 (方位/傾斜)	2.08 ± 0.09 ($16^\circ / 85^\circ$)
	σ_3 (方位/傾斜)	1.63 ± 0.19 ($134^\circ / 2^\circ$)
水平面応力	σH	2.17 ± 0.19
	σ_h	1.63 ± 0.19
	E から σ_H までの角度	46°

(応力の単位は MPa)

図 5.4 (a)再評価した換気立坑 140m の主応力の下半球投影図および
(b)水平面内の主応力分布

5. 3. 2 横き裂のき裂閉口圧とブレイクアウトのデータを用いた解析結果

(1) 東立坑 140m 小型試験座における初期地圧

配向性の天然き裂が発達した岩盤では、水圧破碎試験によって孔軸を含む縦き裂が発生せず、近似した走向・傾斜を有する天然き裂が開口することが多い。このため、方位・傾斜の異なるボーリング孔を掘削して水圧破碎試験をおこなうことが、必ずしも初期地圧の測定精度を向上させることに寄与するとは限らない場合がある。また、ボーリング孔壁面の破壊現象であるボアホールブレイクアウトから高い精度で初期地圧を評価するためには、方位・傾斜が大きく異なる多くのボーリング孔からブレイクアウトの情報を収集することが望まれる。しかし、原位置試験で利用できるボーリング孔の数には制約があるのが普通である。そこで、ここでは横き裂に作用する法線応力（き裂閉口圧）とボアホールブレイクアウトの発生条件とを用いて 3 次元初期地圧の評価を試みた。すなわち、表 4.4 の横き裂の方向余弦と作用する法線応力成分および表 5.1 のブレイクアウトの形状データおよび岩盤の力学データを式(5.6)に代入し、逐次近似法によって初期地圧を求めた。表 5.5 および図 5.5 に結果を示す。

最大主応力（●印）は ENE 方向でほぼ水平にあり、最小主応力（■印）は NNW 方向でやはりほぼ水平にある。したがって、初期地圧の応力環境は横ずれ断層型である。鉛直応力 σ_v は 2.3MPa と評価され、当該岩盤の単位体積重量（1.47gf/cm³）と 140m の被りから求めた被り圧 2.0MPa に近い。

表 5.5 水圧破碎法とブレイクアウトから評価した初期地圧状態

応力成分	σE	2.15 ± 0.09
	σN	1.27 ± 0.17
	σV	2.29 ± 0.09
	τEN	0.57 ± 0.08
	τNV	-0.17 ± 0.08
	τVE	0.08 ± 0.08
3次元主応力	σ_1 (方位/傾斜)	2.43 ± 0.10 ($244^\circ / 0^\circ$)
	σ_2 (方位/傾斜)	2.32 ± 0.09 ($335^\circ / 82^\circ$)
	σ_3 (方位/傾斜)	0.96 ± 0.15 ($154^\circ / 8^\circ$)
水平面応力	σH	2.43 ± 0.10
	σ_h	0.99 ± 0.15
	E から σH までの角度	26°

(応力の単位は MPa)

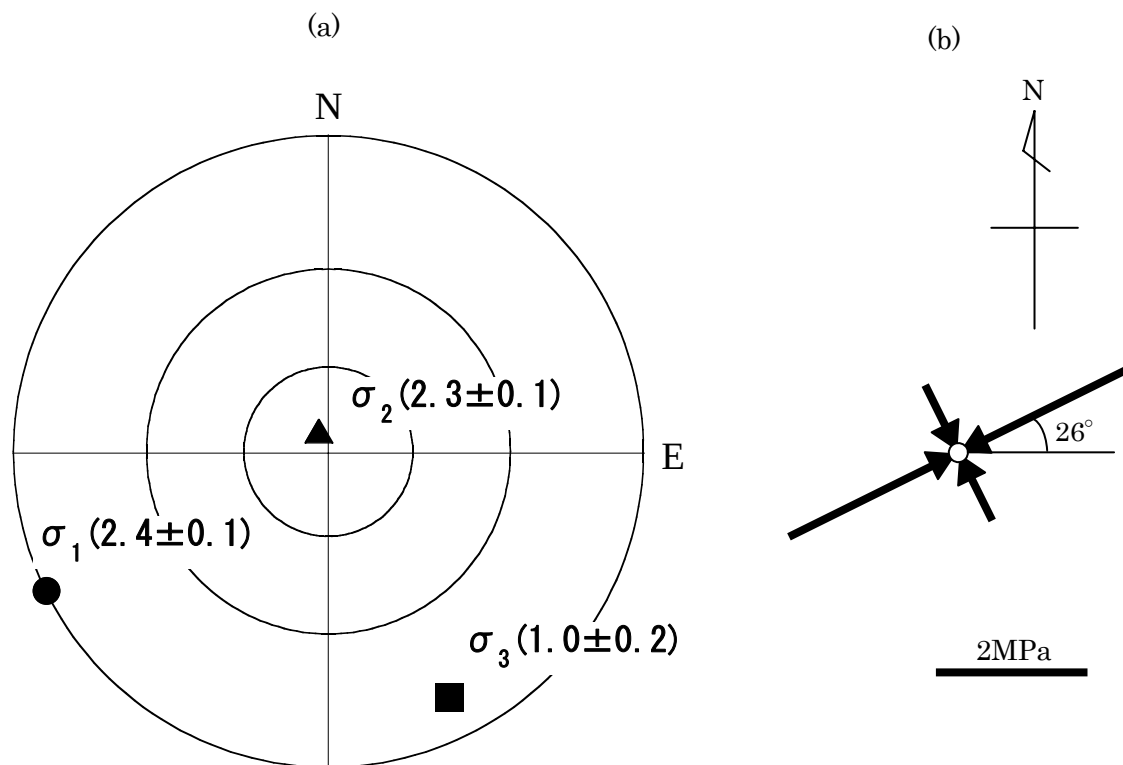


図 5.5 (a)水圧破碎法とブレイクアウトから評価された主応力の下半球投影図および(b)水平面内の主応力分布

(2) 換気立坑 140m 小型試験座における初期地圧

2008 年に換気立坑深度 140m の小型試験座からボーリングした 3 本のボーリング孔の横き裂とブレイクアウトのデータは表 5.6 と表 5.7 に示すとおりである。小型試験座の応力集中の影響を避けるため、深度 10m 以浅で得られたデータは除外した。これらのデータを式(5.6)に代入し、逐次近似法によって求めた初期地圧を表 5.8 と図 5.6 に示す。

図 5.6 の主応力の方位分布をみると、最小主応力（■印）は N-W 方向ではほぼ水平にあり、中間主応力（▲印）は鉛直方向に近く、東立坑 140m 小型試験座と同様に初期地圧の環境は横ずれ断層型であることがわかる。最大主応力と最小主応力の主方位が、それぞれ NE 方向および NW 方向に分布する傾向は、図 5.5 の東立坑の結果と類似しているようにみえる。鉛直応力 σ_v は 2.1MPa と評価され、当該岩盤の単位体積重量（1.49gf/cm³）と 140m の被りから求めた被り圧 2.0MPa とほぼ等しい。

表 5.6 換気立坑 140m 小型試験座における水圧破碎試験によって開口した横き裂の
法線方向余弦 (E-N-V 座標系) およびき裂閉口圧

孔名	方位・傾斜	試験深度 (m)	方向余弦 (E-N-V 座標系)			き裂閉口圧 (MPa)
			λ_1	λ_2	λ_3	
07-V140- M01 孔	N60° W、水平 から上向き 5°	14.2	0.493706	-0.553553	-0.670696	1.45
		17.5	0.059563	-0.778365	-0.624980	0.94
07-V140- M02 孔	N、水平から 上向き 5°	12.0	-0.277202	-0.073080	-0.958028	1.94
		15.0	0.777662	-0.420286	0.467548	1.63
		16.5	0.715498	-0.269292	0.644627	1.73
07-V140- M03 孔	N30° W、水平 から下向き 30°	11.8	0.674199	-0.655098	-0.341031	1.56
		13.5	0.031041	-0.999457	0.011068	1.69
		15.0	0.703428	-0.600247	-0.380648	1.38

表 5.7 換気立坑 140m 小型試験座におけるブレイクアウトの破壊開始位置 $\theta_b^{(l)}$ および
破壊中央の位置 $\theta_{\min}^{(m)}$

孔名	方位・傾斜	試験深度 (m)	$\theta_b^{(l)}$ (deg)	$\theta_{\min}^{(m)}$ (deg)	一軸圧縮強度 (MPa)	ポアソン比
07-V140- M02 孔	N、水平から 上向き 5°	12.0	156.9	170.6	3.39	0.35
		15.0	178.5	182.4		
		16.5	170.6	179.1		
07-V140- M03 孔	N30° W、水平 から下向き 30°	13.5	204.5	210.6	4.96	0.32
		15.0	199.6	206.2		

表 5.8 換気立坑 140m 小型試験座における水圧破碎法とブレイクアウトから評価した初期地圧状態

応力成分	σE	1.65 ± 0.13
	σN	1.68 ± 0.17
	σV	2.11 ± 0.08
	τEN	0.52 ± 0.06
	τNV	-0.01 ± 0.12
	τVE	0.06 ± 0.03
3次元主応力	σ_1 (方位/傾斜)	2.20 ± 0.12 (225° / 21°)
	σ_2 (方位/傾斜)	2.10 ± 0.10 (36° / 68°)
	σ_3 (方位/傾斜)	1.14 ± 0.12 (136° / 3°)
水平面応力	σH	2.19 ± 0.12
	σh	1.14 ± 0.16
	E から σH までの角度	46°

(応力の単位は MPa)

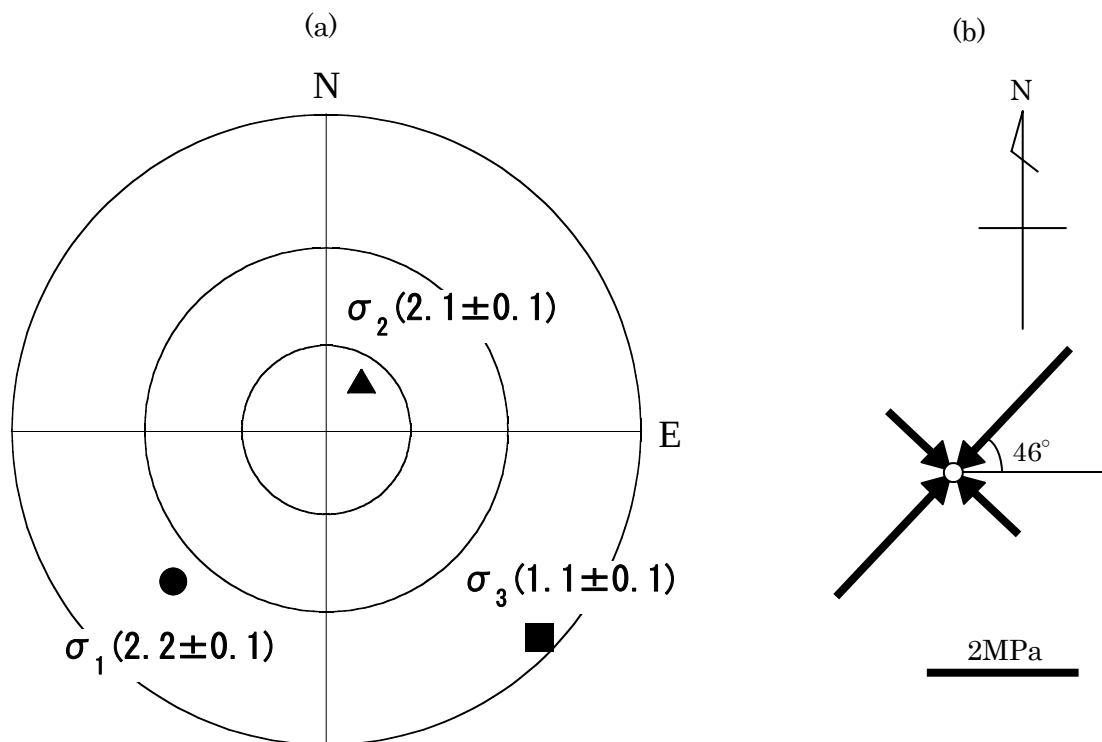


図 5.6 換気立坑 140m 小型試験座における(a)主応力の下半球投影図および(b)水平面内の主応力分布

5. 4 結言

小型試錐座に掘削した3本のボーリング孔では、ブレイクアウトと考えられる孔壁に沿う連続的な破壊が認められた。ブレイクアウトの発生位置は、初期地圧によるボーリング孔まわりの応力集中を反映した孔壁の応力状態によって主に支配されるので、ブレイクアウトの観測データを初期地圧の評価に利用することができる。そこで、本報告ではボーリング孔軸と主応力軸との関係は任意であると仮定して、一般的な3次元初期地圧場に掘削されたボーリング孔壁面内に生じる最大圧縮応力を孔壁の破壊基準とする逆解析モデルを提案した。東立坑140m小型試錐座で測定した横き裂に作用する法線応力とブレイクアウトのデータに本手法を適用した結果、調査地点の初期地圧環境は横ずれ断層型であり、最大主応力はENE方向でほぼ水平に、最小主応力はNNW方向でやはりほぼ水平にあると評価された。換気立坑深度140mの小型試錐座で測定された観測データにも同様の解析手法を適用し、初期地圧環境は横ずれ断層型であり、主方位の分布傾向が東立坑140m小型試錐座の測定結果と類似していることを確認した。

6. コア物性測定試験

6. 1 試験概要

水圧破碎試験実施深度近傍のボーリングコアのうち、できるだけ天然き裂を含まないインタクトなコアを用いて、表 6.1 に示す力学強度測定試験をおこなった。

表 6.1 ボーリングコアの力学試験

試験名	測定項目	数量	備 考
力学試験	一軸強度試験	21 個	自然乾燥状態、ポアソン比測定を含む
	圧裂引張強度試験	22 個	自然乾燥状態

6. 2 力学試験方法^{[26][27][28][29]}

一軸圧縮試験に用いる試験片を製作するときは、まずボーリングコアの長軸方向と垂直に切断し、次にその両端面を平面研削盤によって成形した。当該ボーリングコアは、湿潤した状態で表面を摩擦すると容易に溶解するので、カーボランダムによる端面の研磨仕上げはおこなわなかった。一軸圧縮試験では、試験結果におよぼす端面拘束の影響を避けるため、一般に直径に対する長さの比を 2～2.5 とする。しかし、当該岩盤には比較的多くのき裂が含まれていたため、この寸法比よりも小さい試験片になる場合もあった。成形した試験片は、湿潤状態のままポリプロピレンシートで被覆・保管し、試験開始前にシートから取り出して室内で 1 日間自然乾燥させ、表面が乾燥した段階で測寸、重量測定および箔ひずみゲージの貼付をおこない、その後すぐに試験に供した。図 6.1 は一軸圧縮試験片の画像である。

圧裂引張試験に用いる試験片は、ボーリングコアをその軸方向と垂直に切断したあと、両端面を平面研削盤によって成形した。成形した試験片は、一軸圧縮試験片と同様、湿潤状態のままポリプロピレンシートで被覆・保管し、試験開始前にシートから取り出して室内で 1 日間自然乾燥させたあと測寸および重量測定をおこない、試験に供した。試験片の画像を図 6.2 に示す。

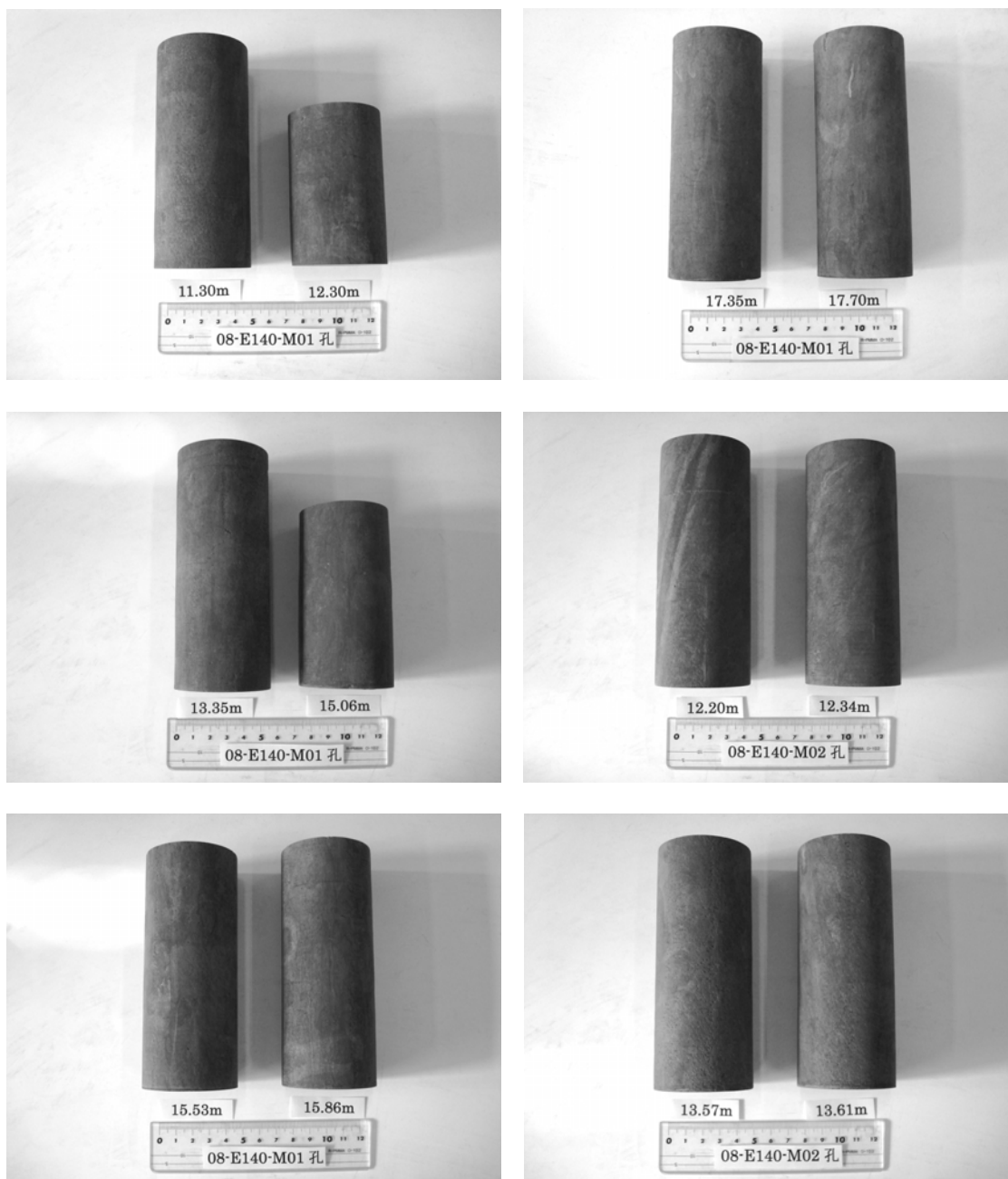


図 6.1 一軸圧縮試験片(1/2)

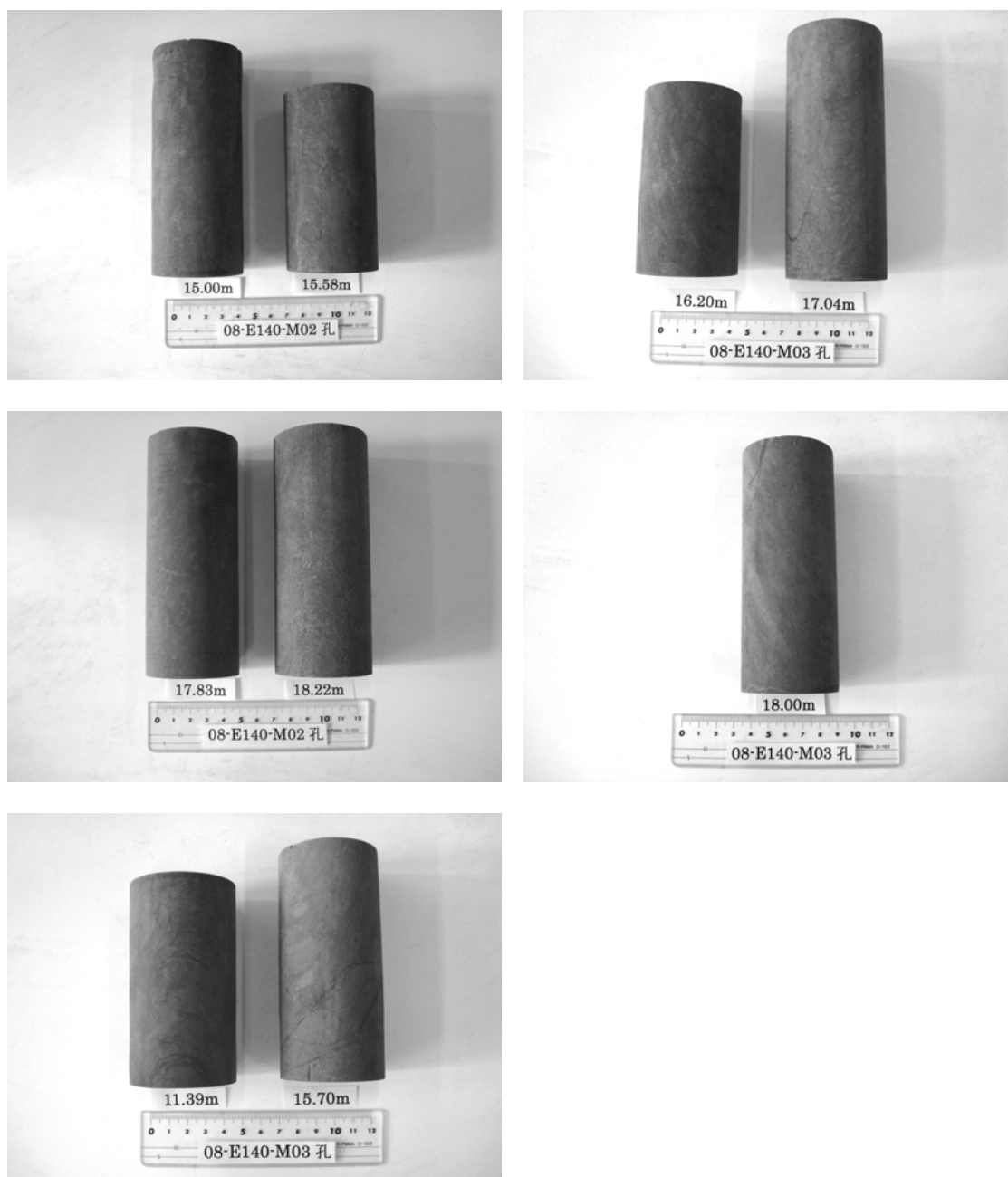


図 6.1 一軸圧縮試験片(2/2)



図 6.2 圧裂引張試験片(1/2)



図 6.2 圧裂引張試験片(2/2)

6. 2. 1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験における試験装置および測定系統の概念図は図 6.3 の通りである。試験片をセットするときは試験片、エンドピースおよび球座の中心を一致させ、アムスラー型材料試験機（島津製作所製 Universal Testing Machine、RH-100T.V、最大荷重 100 tf）によって約 1.3MPa/min の荷重速度で軸圧を加えた。エンドピースと材料試験機の間に取り付けたロードセル（共和電業製 LC-10TF、容量 10 tf）によって軸圧を検出し、試験片の軸ひずみと横ひずみは円柱型試験片の側面に 180° 間隔に接着した 2 枚の 2 軸直交ひずみゲージ（ゲージ長 10 mm）で検出した。各ひずみゲージは 1 ゲージ 3 ワイヤ法でホイートストンブリッジの一辺に組み込んだ。軸圧とひずみはデータロガー（NEC 三栄製、DC3100）によって検出し、パーソナルコンピュータに記録した。本一軸圧縮試験の試験方法を、表 6.2 に示す。なお、ひずみゲージの接着にはシアノアクリルレート系の瞬間接着剤（共和電業製 CC-33A）を使用した。試験片を構成する鉱物粒子の結合力が弱いと、ひずみゲージ接着後にゲージベースを持ち上げると簡単にはく離した。

6. 2. 2 圧裂引張試験

圧裂引張試験の試験装置、測定系統および試験方法は、一軸圧縮試験と基本的に同じである。円板形の岩石試験片の中心と球座の中心を荷重軸に一致させ、アムスラー型材料試験機（島津製作所製 Universal Testing Machine、RH-100T.V、最大荷重 100 tf）によって約 0.3MPa/min の荷重速度で円板の中心線に沿って荷重した。エンドピースと材料試験機の間に取り付けたロードセル（共和電業製 LC-10TF、容量 10 tf）の出力をデータロガー（NEC 三栄製、DC3100）によって検出し、パーソナルコンピュータに記録した。

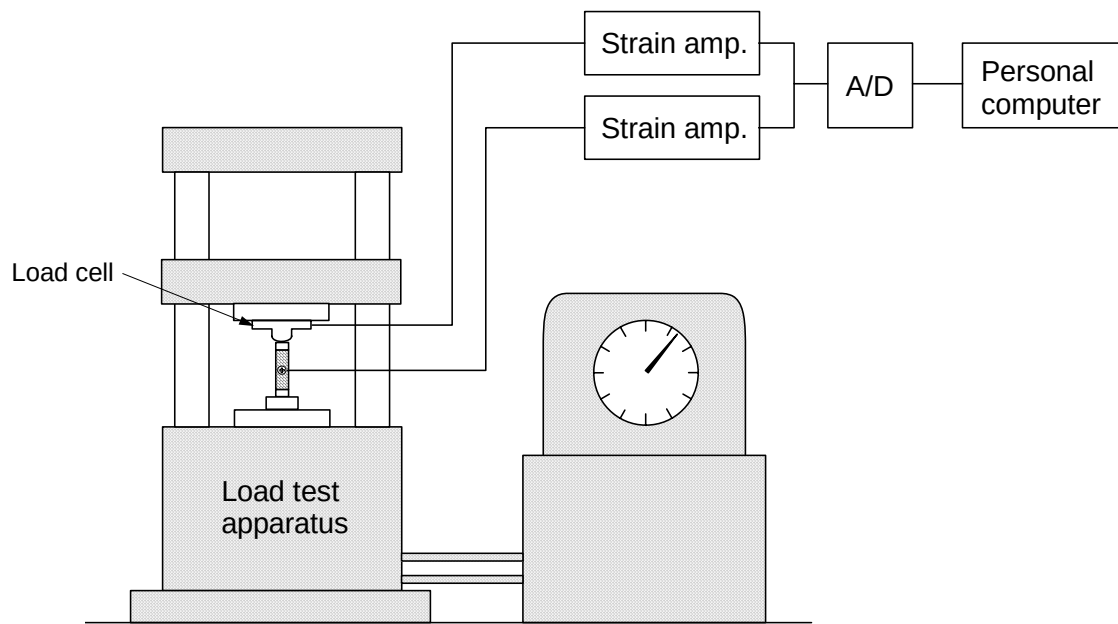


図 6.3 力学試験における試験装置および測定系統

表 6.2 一軸圧縮試験の試験方法

試験片	形状	円柱形
	平均寸法	直径 5.3cm×高さ 12.3cm
	成形の仕方、 精度	側面：未処理 端面：ダイヤモンドホイール付平面研削盤、1/20 mm 以下
	乾燥状態	端面成形後、24 時間室内自然乾燥
試験機の型式	アムスラー型 材料試験機	許容最大荷重 100ton
試験方法	制御方式	軸圧力：材料試験機、手動調整
	載荷速度	平均 1.3MPa/min
測定法および 計算法	ひずみ	軸ひずみ：試験片にひずみゲージを貼付 横ひずみ：試験片にひずみゲージを貼付 体積ひずみ：軸ひずみと横ひずみから求める
	軸圧力	ひずみゲージ式ロードセル

6. 3 力学試験結果

6. 3. 1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線は、図 6.4 に示すとおりである。各グラフの上部中央に記載したタイトルは、最初の 3 文字が孔名、次の数値は試験片が採取されたボアホール深度を表し、試験片の上端面の深度と一致する。 ε_a 、 ε_θ および ε_v は、それぞれ軸ひずみ、横ひずみおよび体積ひずみである。横ひずみ ε_θ は、軸荷重が破断荷重に達するまでほぼ線形に増加するが、軸ひずみ ε_a は破断荷重に達する前に減少に転じる応力-ひずみ曲線がいくつか認められる。例えば、図 6.4 の M01 孔の深度 13.35m から採取された試験片の応力-ひずみ曲線をみると、軸応力が 2.5MPa に達すると軸ひずみは -2700 マイクロひずみから急激に減少する。一方、横ひずみは軸応力が破断応力に達する直前までほぼ線形に増加する。これは、軸ひずみが -2700 マイクロひずみに達したとき、軸方向の箔ゲージが試験片からはく離れたためであると考えられる。なお、M02 孔の深度 12.20m から採取した試験片の一軸圧縮試験では、データロガーの設定トラブルのため応力-ひずみ曲線が記録されなかった。

一軸圧縮試験の結果を、試験片を採取したボーリング孔別にまとめると表 6.3 のようである。ここで、破断荷重 P_c とは圧縮試験における最大荷重である。 S_c は一軸圧縮強度であり、破断荷重 P_c を試験片の初期の断面積 A で除した値である。 E_{50} は、 S_c の 1/2 の応力における応力-軸ひずみ曲線上の接線ヤング率である。Poisson 比 ν は、原点と最大荷重の近傍を除いた中間部分の応力-軸ひずみおよび横ひずみ曲線から、次式にしたがって計算される。

$$\nu = -(\Delta\sigma_a / \Delta\varepsilon_a) / (\Delta\sigma_a / \Delta\varepsilon_\theta) \cdots \cdots (6.1)$$

ここで、 $\Delta\sigma_a$ は選定された応力-ひずみ曲線の範囲における軸方向の応力の増分、 $\Delta\varepsilon_a$ および $\Delta\varepsilon_\theta$ は同一の範囲における軸ひずみおよび横ひずみの増分である。なお、軸応力が S_c の 1/2 に達する前に箔ゲージがはく離した場合は、はく離する直前の応力-ひずみ曲線から接線ヤング率と Poisson 比を求めた。

各ボーリング孔から採取した試験片の一軸圧縮強度を、ボーリング孔別にプロットすると図 6.5 のようである。ここで、○印は試験片の一軸圧縮強度、■印は一軸圧縮強度の平均値、そして縦軸に平行な線分は標準偏差を表している。一軸圧縮強度の平均値は、M01 孔から採取した試験片が 5.37MPa と最も大きく、M03 孔の試験片が 4.45MPa と最も小さい。表 6.4 は、一軸圧縮試験後の試験片のスケッチである。ここで、点線は試験片に含まれていた既存のき裂が分離面となったことを示している。天然き裂を含まない試験片は、珪藻質泥岩の堆積構造面に沿って破壊する場合が多かった。

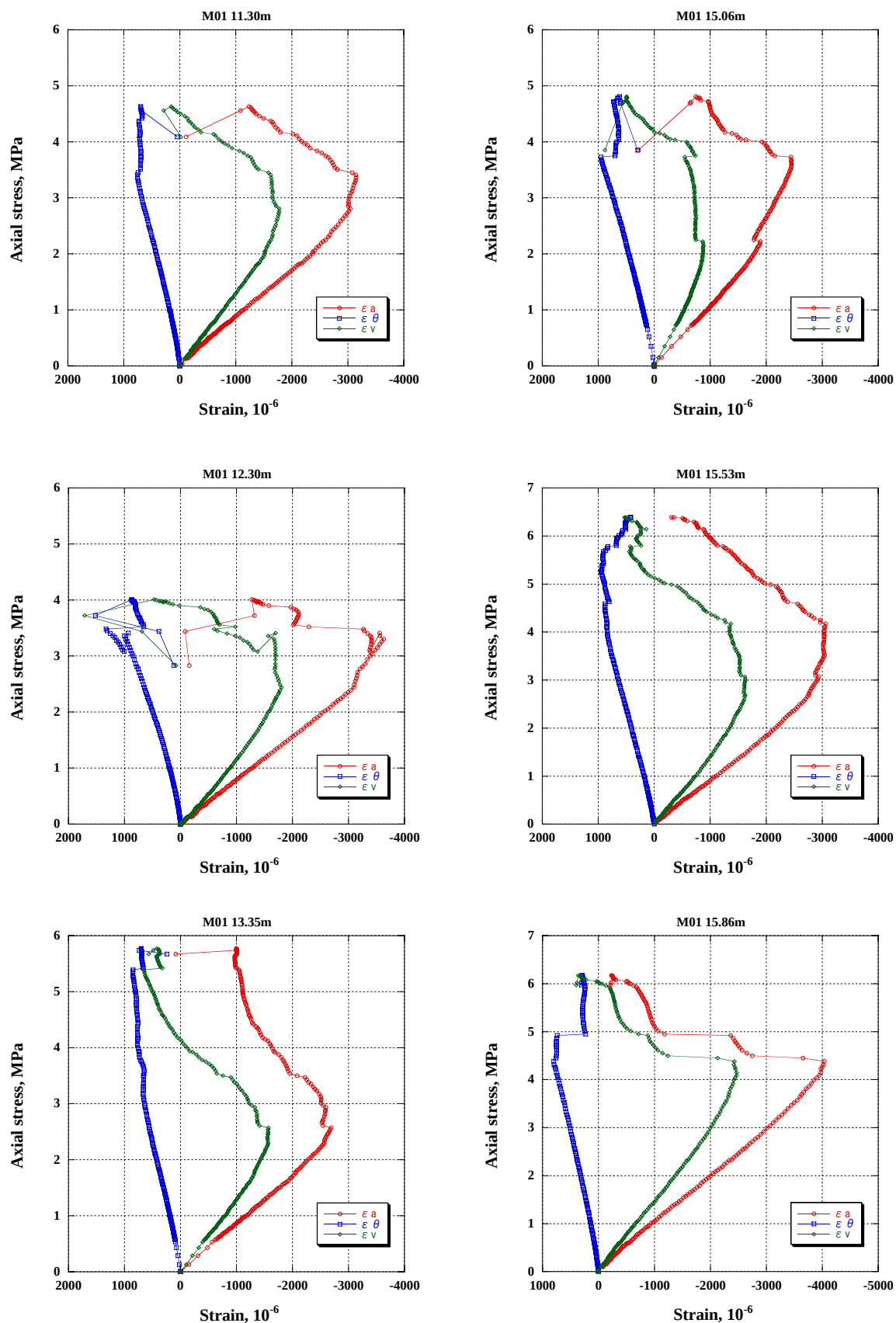


図 6.4 一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線(1/4)

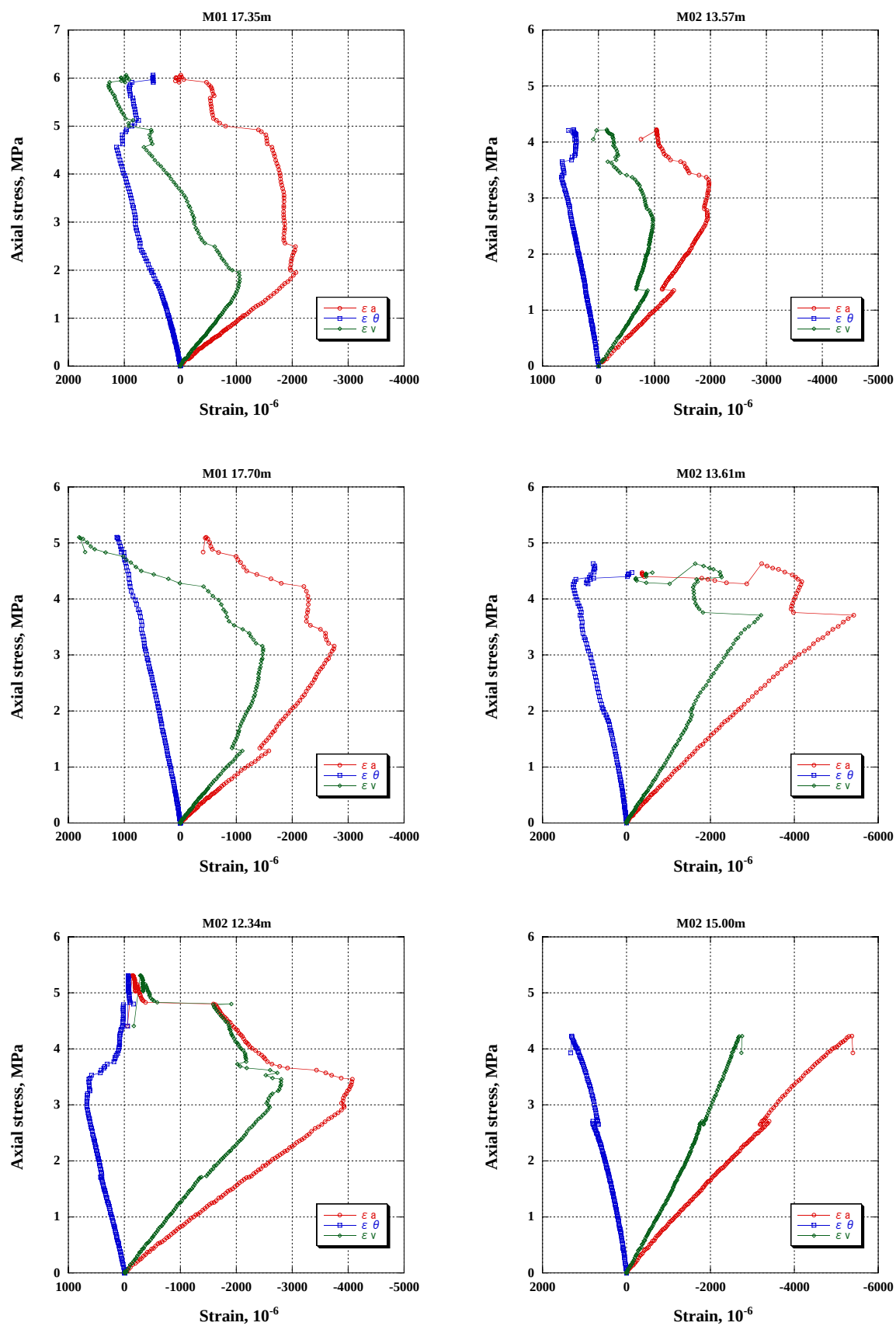


図 6.4 一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線(2/4)

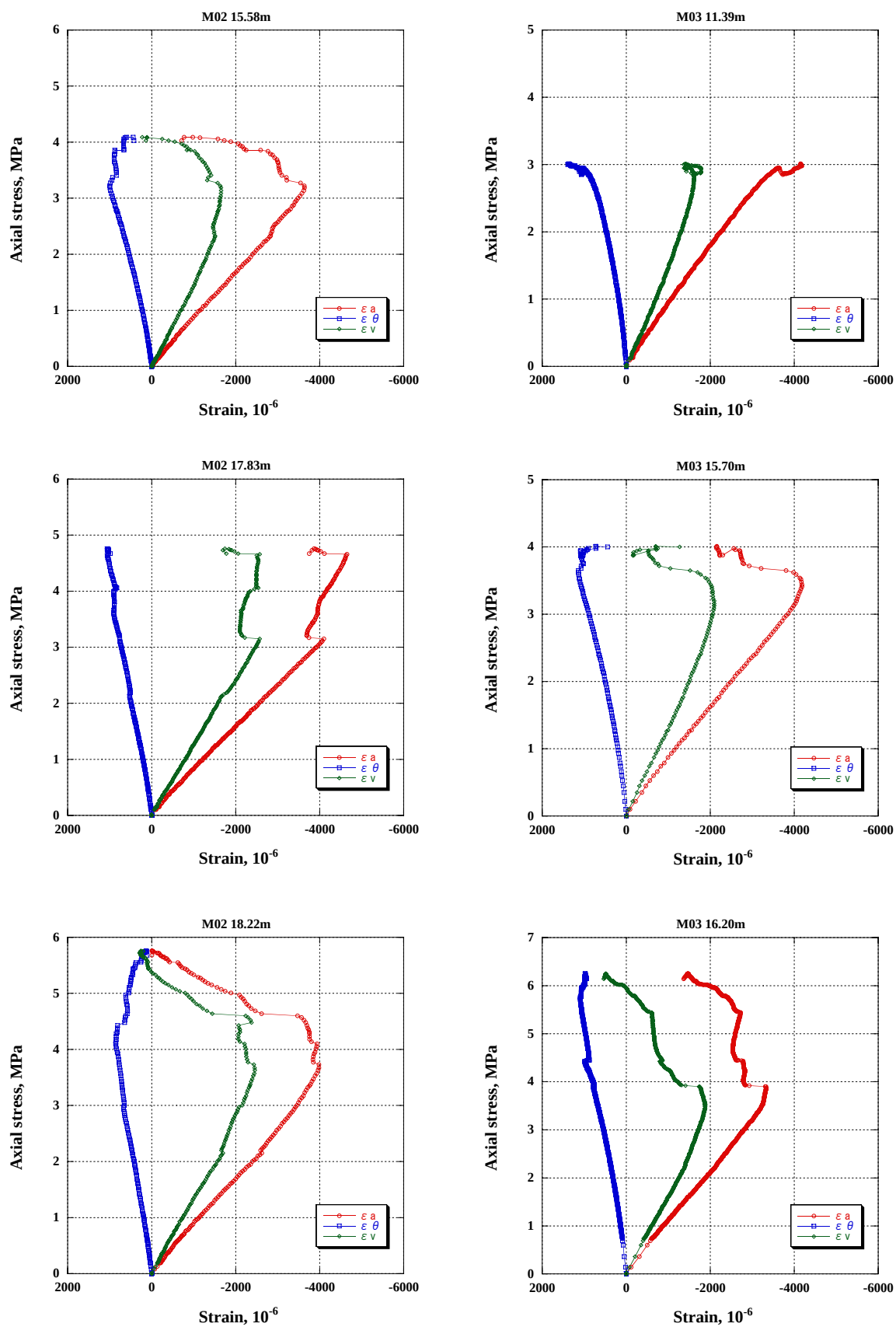


図 6.4 一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線(3/4)

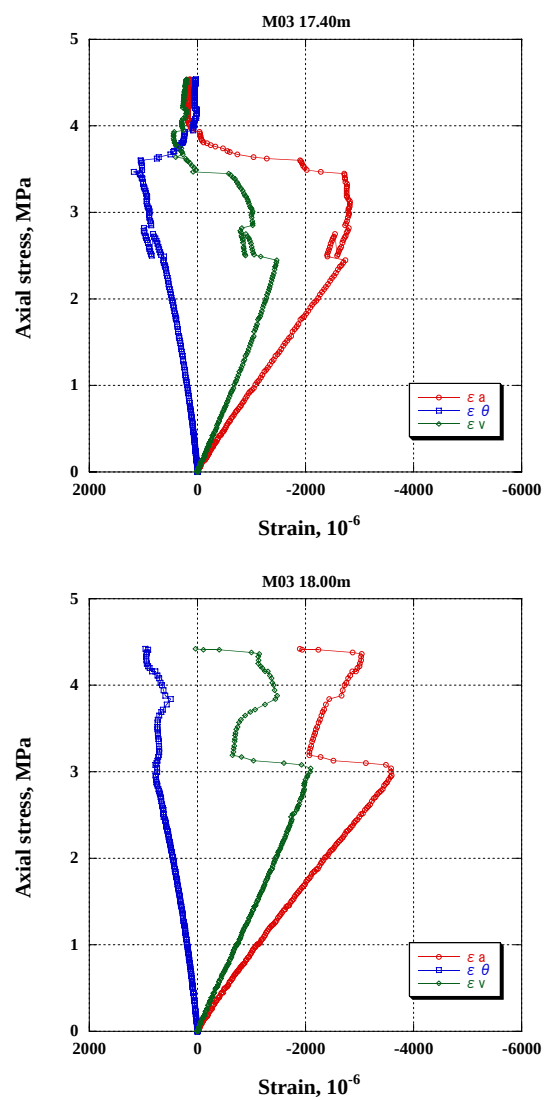


図 6.4 一軸圧縮試験における応力-ひずみ曲線(4/4)

表 6.3 一軸圧縮試験結果

孔名	採取 深度(m)	直径 (mm)	長さ (mm)	見かけ 質量(g)	破断荷重 P_c (kN)	一軸圧縮 強度 S_c (MPa)	$S_c/2$ 時の接線 ヤング率 E_{50} (GPa)	ポアソン比 ν
M01	11.30	53.00	125.25	412.37	10.2	4.63	1.12	0.29
	12.30	53.30	85.75	280.06	8.9	4.01	0.81	0.28
	13.35	52.95	133.75	429.95	12.7	5.77	0.99	0.25
	15.06	52.30	98.50	316.67	10.3	4.81	1.17	0.30
	15.53	52.40	133.55	422.26	13.8	6.39	1.10	0.26
	15.86	52.10	133.40	429.81	13.2	6.17	1.10	0.22
	17.35	51.20	132.40	396.76	12.5	6.06	0.96	0.32
	17.70	52.50	133.35	414.96	11.0	5.10	0.74	0.15
	平均値					5.37	1.00	0.26
	標準偏差					0.85	0.15	0.05
M02	12.20	52.30	133.15	398.60	***	***	***	***
	12.34	51.75	131.20	394.73	11.2	5.31	0.75	0.16
	13.57	53.10	133.80	422.80	9.4	4.22	1.54	0.32
	13.61	53.15	133.40	424.29	10.3	4.63	0.70	0.21
	15.00	52.45	129.65	409.73	9.1	4.23	0.77	0.28
	15.58	52.10	102.70	332.62	8.7	4.09	0.80	0.27
	17.83	52.00	131.55	407.46	10.1	4.76	0.74	0.14
	18.22	52.85	132.05	430.77	12.6	5.76	0.99	0.15
	平均値					4.72	0.90	0.22
	標準偏差					0.62	0.30	0.07
M03	11.39	53.25	99.25	330.22	6.7	3.01	0.81	0.25
	15.70	52.40	114.70	372.33	8.7	4.01	0.75	0.26
	16.20	53.55	98.05	335.82	14.1	6.25	1.10	0.29
	17.04	53.95	134.15	450.88	10.4	4.54	0.87	0.31
	18.00	52.40	133.90	417.79	9.5	4.42	0.75	0.25
	平均値					4.45	0.86	0.27
	標準偏差					1.17	0.14	0.03

*** : 応力-ひずみ曲線記録されず

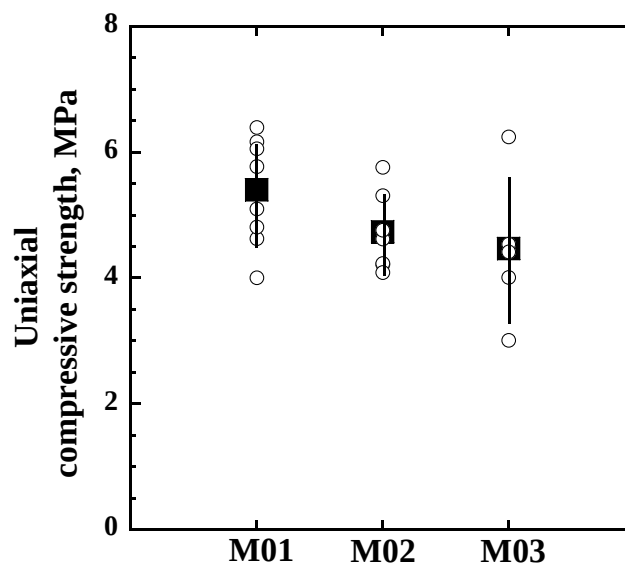
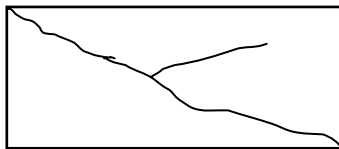
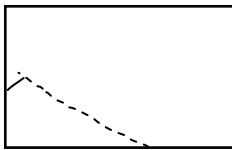
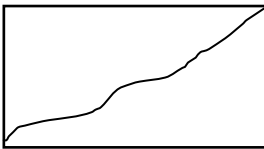
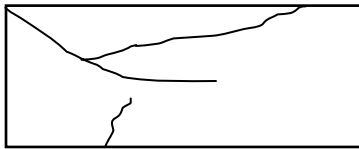
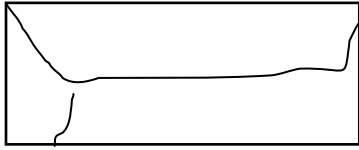


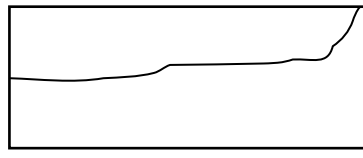
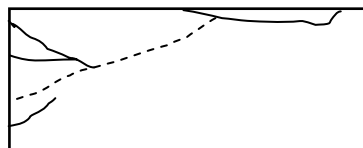
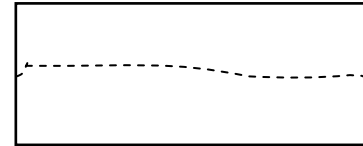
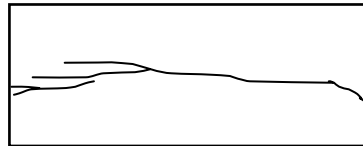
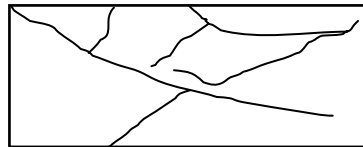
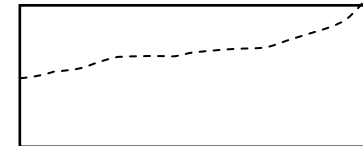
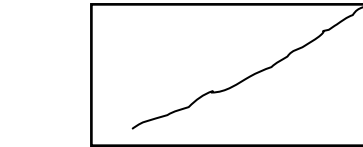
図 6.5 各ボーリング孔から採取した試験片の一軸圧縮強度分布

表 6.4 一軸圧縮試験結果(1/3)

孔名	M01	M01	M01	M01	M01	M01	M01
採取深度(m)	11.30	12.30	13.35	15.06	15.53	15.86	17.35
試験後の状態							
	き裂なし	天然き裂有	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし
	せん断	天然き裂で分離	せん断	せん断、堆積面に沿って割れ	せん断、堆積面に沿って割れ	せん断、堆積面に沿って割れ	堆積面に沿って割れ
	破断荷重(kN)	10.2	8.9	12.7	10.3	13.8	13.2
破断角度(度)	30		20	30		35	
備考							

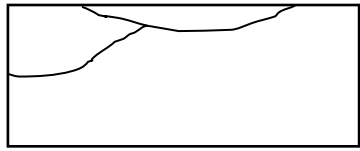
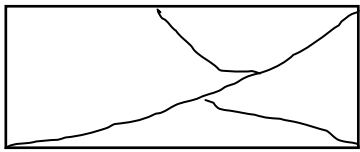
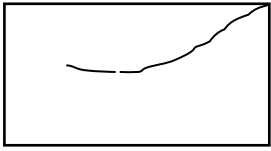
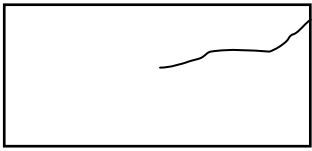
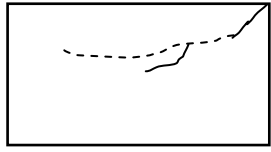
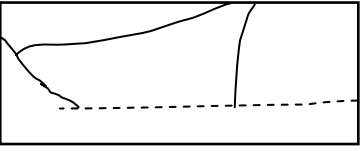
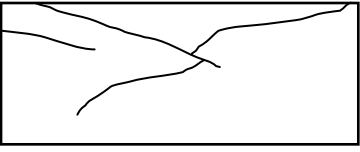
* : 点線は分離した既存のき裂を示す。

表 6.4 一軸圧縮試験結果(2/3)

孔名	M01	M02	M02	M02	M02	M02	M02
採取深度(m)	17.70	12.20	12.34	13.57	13.61	15.00	15.58
試験後の状態							
	き裂なし	天然縦き裂有	天然縦き裂有	き裂なし	き裂なし	天然縦き裂有	き裂なし
	堆積面に沿って割れ	天然き裂で分離	天然き裂で分離	堆積面に沿って割れ	堆積面に沿って割れ	天然き裂で分離	せん断
	11.0	—	11.2	9.4	10.3	9.1	8.7
破断角度(度)					25		25
備考		ひずみデータなし					

* : 点線は分離した既存のき裂を示す。

表 6.4 一軸圧縮試験結果(3/3)

孔名	M02	M02	M03	M03	M03	M03	M03
採取深度(m)	17.83	18.22	11.39	15.70	16.20	17.04	18.00
試験後の状態							
試験前	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし	天然き裂有	天然き裂有	き裂なし
試験後	堆積面に沿って割れ	せん断、堆積面に沿って割れ	せん断、堆積面に沿って割れ	せん断	天然き裂で分離	天然き裂で分離	堆積面に沿って割れ
破断荷重(kN)	10.1	12.6	6.7	8.7	14.1	10.4	9.5
破断角度(度)		25	20	20			
備考							

*：点線は分離した既存のき裂を示す。

6. 3. 2 圧裂引張試験

引張強度 S_t は、円板形の岩石試験片を上下から圧縮し、円板の中心線にそって生じる引張応力によって引張破壊が起きたときの応力であり、このときの破断荷重 P 、円板の直径 d および円板の厚み l から次式で与えられる。

$$S_t = 2P/\pi dl \quad \cdots \cdots \cdots (6.2)$$

圧裂引張試験の結果は、表 6.5 に示すとおりである。試験片は 2 本一組で採取深度が接近するようにサンプリングし、端面で観察された珪藻質泥岩の堆積構造面に対してそれぞれ垂直（⊥印）および平行（//印）に載荷した。一軸圧縮強度と同様に、引張強度の平均値は M01 孔から採取した試験片が 0.56MPa と最も大きく、M03 孔の試験片が 0.33MPa と最も小さい。珪藻質泥岩の圧裂引張強度を、試験片に対する載荷方向で整理しなおすと図 6.6 のようである。ここで、○印は圧裂引張強度、■印は引張強度の平均値、そして縦軸に平行な線分は標準偏差である。ばらつきはあるものの、堆積構造面に垂直に載荷したときの引張強度は、平行に載荷したときの約 1.7 倍であり、当該珪藻質泥岩に顕著な強度異方性があることを示している。圧裂引張試験後の試験片のスケッチは、表 6.6 に示すとおりである。

図 6.7 は一軸圧縮試験片の表面に現れた堆積構造面の一部を白線でトレースした結果である。このような珪藻質泥岩の堆積構造は、強度異方性ととも弾性異方性をもたらす原因となりうる。当該岩盤を完全な等方性体とみなせない場合には、測定データの解釈を等方弾性体の解に基づいておこなうと、評価される初期地圧にある程度の誤差が含まれることになる。この誤差の大きさは異方性の程度に依存し、それが顕著な岩盤では必然的に誤差も増加する。したがって、異方性岩盤内で生じた水压破砕き裂およびブレイクアウトを等方弾性体の解に基づいて評価する場合は、それらの発生位置などにどの程度の誤差が生じるかを検討する必要があるように思われる。

表 6.5 圧裂引張試験結果

孔名	採取 深度(m)	直径 (mm)	長さ (mm)	見かけ 質量(g)	破断荷重 P_b (kN)	引張強度 S_t (MPa)	載荷 方向	備 考
M01	11.55	53.50	53.70	169.03	2.10	0.47	⊥	天然き裂で割れ
	12.19	52.65	54.95	176.21	0.97	0.21	//	
	14.20	52.10	51.05	169.03	3.47	0.83	⊥	
	14.80	51.50	54.05	176.21	1.69	0.39	//	
	15.67	53.05	50.90	170.26	3.91	0.92	⊥	
	16.00	52.45	53.40	176.90	3.28	0.74	//	
	17.55	53.70	54.40	181.60	2.96	0.65	⊥	
	18.12	53.60	47.60	154.70	1.10	0.27	//	
	平均値					0.56		
	標準偏差					0.26		
M02	12.48	51.30	53.10	163.16	1.20	0.28	⊥	
	12.54	53.15	53.30	175.60	1.74	0.39	//	
	14.15	52.70	53.90	176.94	3.40	0.76	⊥	
	14.21	51.90	53.00	173.60	2.18	0.50	//	
	15.36	53.10	51.30	167.72	3.47	0.81	⊥	表面にうねり有り
	16.02	51.85	50.80	164.06	1.41	0.34	//	表面にうねり有り
	18.13	53.15	52.45	173.68	3.65	0.83	⊥	
	18.36	52.70	52.80	176.56	1.69	0.39	//	
	平均値					0.54		
	標準偏差					0.23		
M03	11.58	50.70	54.75	163.10	2.10	0.48	⊥	
	11.73	51.60	54.70	166.74	1.39	0.31	//	
	15.34	53.00	55.05	185.31	2.44	0.53	⊥	天然き裂有り
	16.60	53.70	54.00	172.85	1.17	0.26	//	
	18.14	53.00	56.70	180.52	0.61	0.13	⊥	天然き裂有り
	18.21	53.75	53.85	177.79	1.10	0.24	//	天然き裂有り
	平均値					0.33		
	標準偏差					0.15		

⊥ : 堆積構造面に垂直に載荷

// : 堆積構造面に平行に載荷

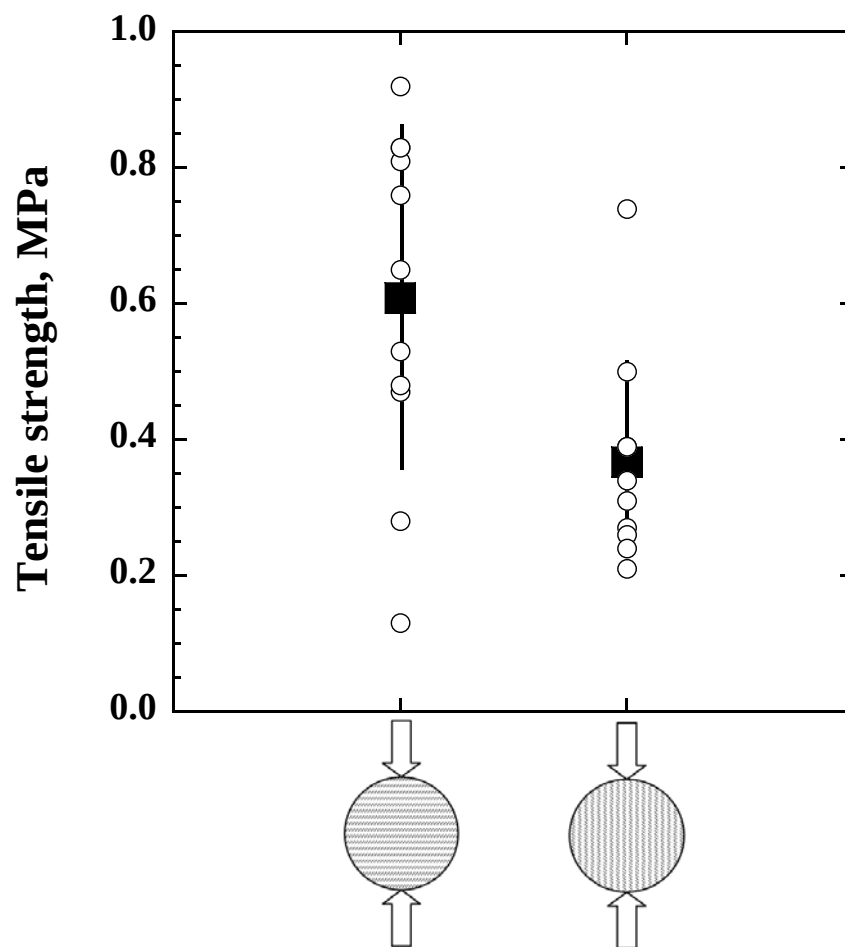


図 6.6 珪藻質泥岩の堆積構造面に対する载荷方向と引張強度の関係

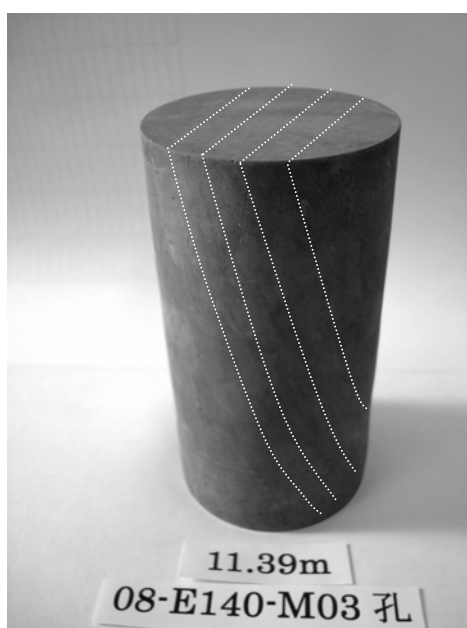


図 6.7 珪藻質泥岩の堆積構造面のトレース（白線）

表 6.6 圧裂引張試験結果(1/5)

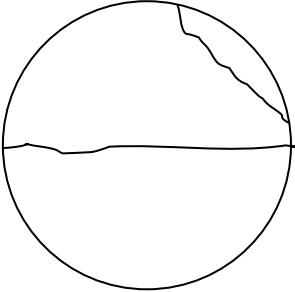
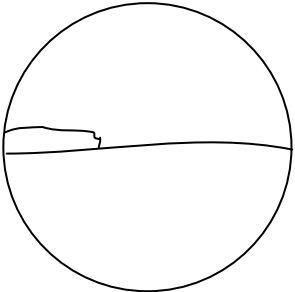
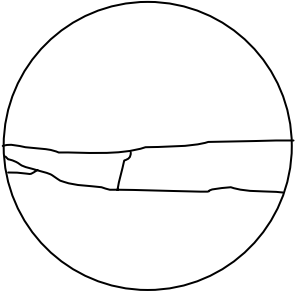
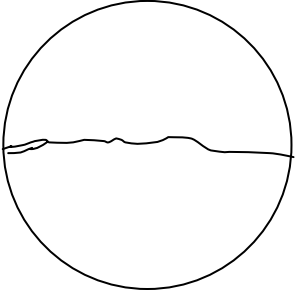
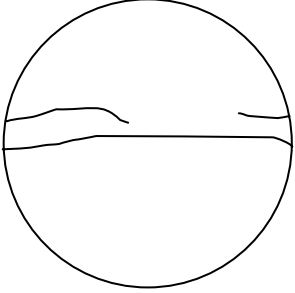
孔名	M01	M01	M01	M01	M01
採取深度(m)	11.55	12.19	14.20	14.80	15.67
試験後の状態					
	き裂有り	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし
試験前					
破断加重(kN)	2.10	0.97	3.47	1.69	3.91
備考	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷	層理面に垂直に載荷

表 6.6 圧裂引張試験結果(2/5)

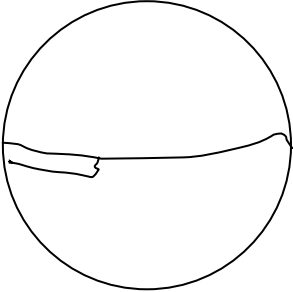
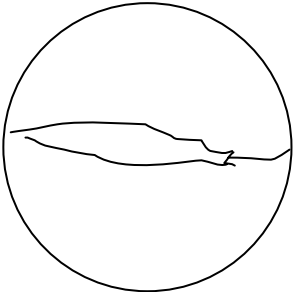
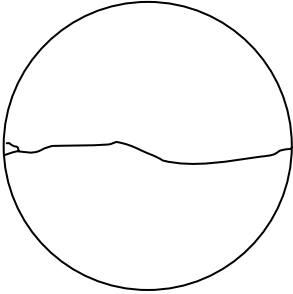
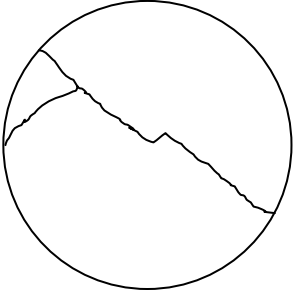
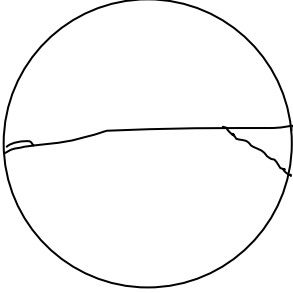
孔名	M01	M01	M01	M02	M02
採取深度(m)	16.00	17.55	18.12	12.48	12.54
試験後の状態					
試験前	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし	き裂なし
破断加重(kN)	3.28	2.96	1.10	1.20	1.74
備考	層理面に平行に載荷	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷

表 6.6 圧裂引張試験結果(3/5)

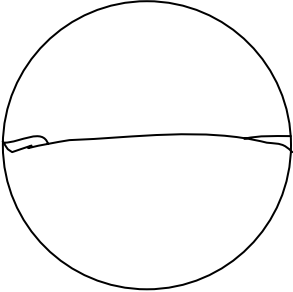
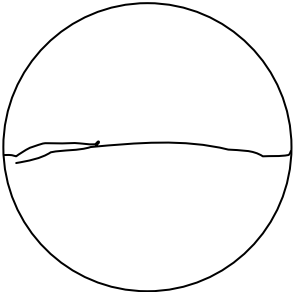
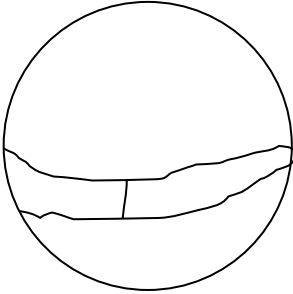
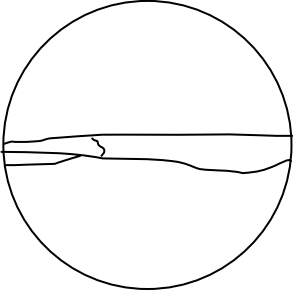
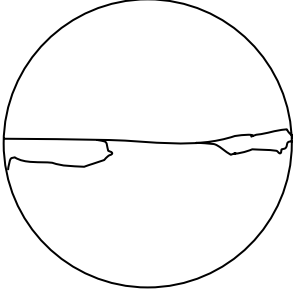
孔名	M02	M02	M02	M02	M02
採取深度(m)	14.15	14.21	15.36	16.02	18.13
試験後の状態					
	き裂なし	き裂なし	き裂有	き裂有	き裂有
試験前					
破断加重(kN)	3.40	2.18	3.47	1.41	3.65
備考	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷	層理面に垂直に載荷

表 6.6 圧裂引張試験結果(4/5)

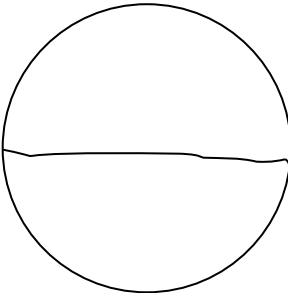
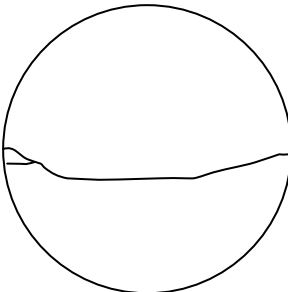
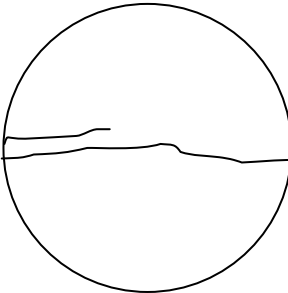
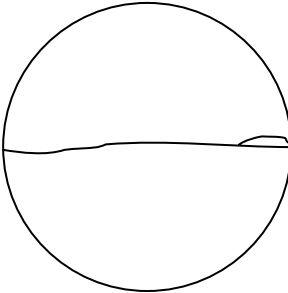
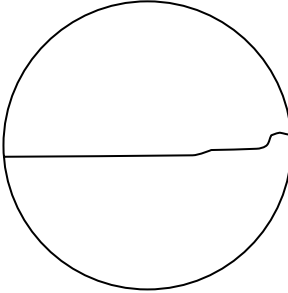
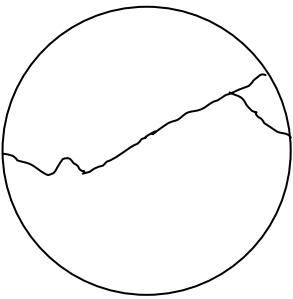
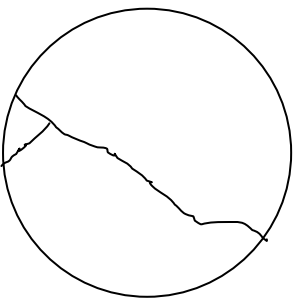
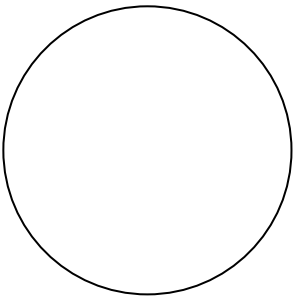
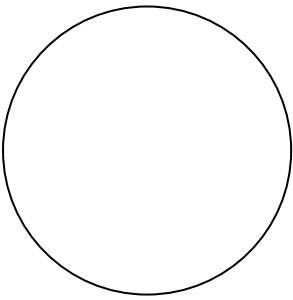
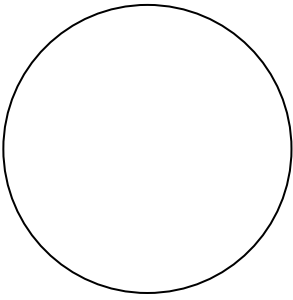
孔名	M02	M03	M03	M03	M03
採取深度(m)	18.36	11.58	11.73	15.34	16.60
試験後の状態					
試験前	き裂有	き裂有	き裂有	き裂なし	き裂有
破断加重(kN)	1.69	2.10	1.39	2.44	1.17
備考	層理面に平行に載荷	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷

表 6.6 圧裂引張試験結果(5/5)

孔名	M03	M03	M03		
採取深度(m)	18.14	18.21			
試験後の状態					
試験前	き裂有	き裂なし			
破断加重(kN)	0.61	1.10			
備考	層理面に垂直に載荷	層理面に平行に載荷			

7. おわりに

幌延深地層研究センターの地下施設周辺岩盤の応力場を把握するため、東立坑深度 140m 小型試錐座から直径 76mm、長さ 20m のボーリング孔である 08-E140-M01 孔（水平）、08-E140-M02 孔（水平）および 08-E140-M03 孔（傾斜）を掘削し、水圧破碎法による 3 次元初期地圧測定を実施した。これら 3 本のボーリング孔では、ボーリング孔まわりの応力集中によって孔壁が破壊するボアホールブレイクアウトが観測されたので、ブレイクアウトの情報から初期地圧を評価する試みもおこなった。得られた結果は次のようである。

（1）水圧破碎法

3 本のボーリング孔の 11 深度でおこなった高剛性水圧破碎試験で、ボーリング孔軸を含む縦き裂はどこにも生じなかった。これは、当該岩盤に潜在の天然き裂が多く含まれていることが一つの原因と考えられた。応力状態が測定位置によらず一様であると仮定し、き裂面の法線応力と初期地圧の関係から小型試錐座まわりの初期地圧状態を評価した。評価された初期地圧の最確値に対する確率誤差はかなり大きかった。これは、方向・傾斜の異なるボーリング孔でほぼ同じ走向・傾斜のき裂に作用する法線応力が測定されたため、独立した観測方程式の数が減少したことによると考えられた。

（2）ブレイクアウト

一般的な 3 次元初期地圧場に掘削されたボーリング孔壁面内に生じる最大圧縮応力を孔壁の破壊基準とする逆解析モデルを提案し、この解析手法を東立坑 140m 小型試錐座で測定した横き裂に作用する法線応力とブレイクアウトのデータに適用した。その結果、調査地点の初期地圧環境は横ずれ断層型であり、最大主応力は ENE 方向でほぼ水平に、最小主応力は NNW 方向でやはりほぼ水平にあると評価された。換気立坑深度 140m の小型試錐座で測定された観測データにも同様の解析手法を適用し、初期地圧環境が横ずれ断層型であることを確認した。

これまで、幌延深地層研究計画の一環として、3km×3km 程度の調査領域内で鉛直な深層ボーリング調査をおこない、各ボーリング孔で水圧破碎試験をおこなっている。しかしながら、これまでに水圧破碎試験が実施された試験深度は、最も浅い深度でも 185.0m であり、140m 小型試錐座の深度レベルにおける初期地圧の測定は 2 回目の実施である。さらに、地表から掘削した鉛直孔を利用した水圧破碎試験では、ボーリング孔軸はひとつの主応力軸と一致すると仮定するのに対して、今回の初期地圧評価法ではボーリング孔軸と主応力軸との関係は任意である。このため、これまでおこなわれた鉛直孔を利用した水圧破碎試験の測定結果と 140m 小型試錐座の測定結果とは単純に比較できない。しかしながら、これまでの地表からおこなわれた水圧破碎試験の結果によれば、水平面内の最大応力はほぼ東西方向である。一方、140m 小型試錐座で評価された 3 次元初期地圧状態から水平面内の主応力状態を評価した結果は図 5.5、5.6 の通りであり、最大水平応力は東北東方向である。したがって、両者の間には比較的よい一致が認められるといえる。

参考文献

1. 舟木泰智, 常磐哲也, 石井英一, 羽出山吉裕, 松尾重明, 津田和康, 小泉朗, 石川泰己, 大條裕一, 杉山和稔, 幌延深地層研究計画換気立坑先行ボーリング (PB-V01 孔) 調査報告書－地質調査－, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Data/Code 2008-013, (2008)
2. Ito T., Igarashi A., Kato H., Ito H. and Sano O., Crucial effect of system compliance on the maximum stress estimation in hydrofracturing method : Theoretical considerations and field-test verification, *Earth Planets Space*, 58, 963-971, (2006)
3. Ito, T., Evans, K., Kawai, K., and Hayashi, K., Hydraulic Fracture Reopening Pressure and the Estimation of Maximum Horizontal Stress, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 36, p.811-826, (1999)
4. Kehle, R.O., The Determination of Tectonic Stresses through Analysis of Hydraulic Well Fracturing, *J. Geophys. Res.*, 69, p.259-273, (1964)
5. Hardy, M.P. and Asgian, M.I., Fracture Reopening During Hydraulic Fracturing Stress Determinations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.489-497, (1989)
6. Hubbert, M.K. and Willis, D., Mechanics of Hydraulic Fracturing, *AIME Trans.*, 210, p.153-168, (1957)
7. Hayashi, K., et al., In Situ Stress Determination by Hydraulic Fracturing – A Method Employing an Artificial Notch, *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.197-202, (1989)
8. Breadhoeft, J.D., et al., Hydraulic Fracturing to Determine the Regional In Situ Stress Field, *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 87, p.250-258, (1986)
9. Zoback, M.D., et al., Preliminary Stress Measurements in Central California Using the Hydraulic Fracturing Technique, *Pure Appl. Geophys.*, 115, p.135-152, (1977)
10. Ikeda, R. and Tsukahara, H., Hydraulic Fracturing Technique in Deep Wells and In Situ Stress at Depth, *Proc. 2nd Int. Wkshp Hydr. Fract. Stress Measur.*, Minneapolis, p.141-165, (1988)
11. Cornet, F.H., Analysis of Injection Tests for In Situ Stress Determination, *Proc. Wkshp Hydr. Fract. Stress Measur.*, Menlo Park, p. 414-443, (1982)
12. Lee, M.Y. and Haimson, B.C., Statistical Evaluation of Hydraulic Fracturing Stress Measurement Parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.447-456, (1989)
13. Cheung, L.S. and Haimson, B.C., Laboratory Study of Hydraulic Fracturing Pressure Data – How Valid is Their Conventional Interpretation? , *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 26, p.595-604, (1989)
14. Zoback, M.D., et al., Laboratory Hydraulic Fracturing Experiments in Intact and Pre – fractured Rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 14, p.49-58, (1977)
15. 伊藤高敏, 林一夫, 水圧破碎地殻応力計測における縦き裂開口挙動の解析, 日本機械学会論文集(A編), 57, p.1715-1719, (1991)
16. 伊藤高敏, 林一夫, 水圧破碎地殻応力計測における縦き裂のき裂開口圧と地殻応力の関係, 日本機械学会論文集(A編), 25, p.72-77, (1992)
17. Rutqvist, J and Stephansson, O., A Cyclic Hydraulic Jacking Test to Determine the in situ

- Stress Normal to a Fracture, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 33, p.695-711, (1996)
18. Hayashi K., Sato A. and Ito T., In situ stress measurements by hydraulic fracturing for a rock mass with many plane of weakness, *Int. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 34, p.45-48, (1997)
 19. Hickman S.H. and Zoback M.D., The interpretation of hydraulic fracturing pressure-time data for in situ stress measurement, *Proc. Workshop on Hydraulic Fracturing Stress Measurements*, ed. Zoback M.D. and Haimson B.C., Vol.1, p.103-146, (1982)
 20. Cornet F.H. and Vallette B., In situ stress determination from hydraulic injection test data, *J. Geophys. Res.*, Vol.89, p.11527-11537, (1984)
 21. Zoback M.D., Moos D. and Mastin L., Well bore breakouts and in situ stress, *J. Geophys. Res.* 90(B7), p.5523-5530, (1985)
 22. Bell J.S. and Gough D.I., Northeast-southwest Compressive Stress in Alberta: Evidence from Oil Wells, *Earth Planet Sci. Lett.*, 45, p.475-482, (1979)
 23. Haimson B.C., Improved In Situ Stress Determination in the KTB Ultra Deep Hole from Logged Breakouts and a Truly-Triaxial Rock Strength Criterion, *Proc. 8th Int. Symp. on the Observation Continental Crust Through Drilling*, p.194-199, (1996)
 24. Qian W. and Pedersen L.B., Inversion of borehole breakout orientation data, *J. Geophys. Res.* 96(NB12), p.20093-20107, (1991)
 25. 加藤春實, 中村隆浩, 真田祐幸, 杉田裕, 伊藤高敏, 水圧破砕およびボアホールブレイクアウトのデータを用いた初期地圧の算出, *資源・素材 2008 (仙台) A31-6*, p.93-94, (2008)
 26. 山口梅太郎, 西松裕一, *岩石力学入門(第3版)*, 東京大学出版会, (1991)
 27. R.D. Lama & V.S. Vutukuri, *岩の力学的性質IV*, 古今書院, (1992)
 28. 日本材料学会編, *岩の力学ー基礎から応用までー*, 丸善
 29. I.W. ファーマー, *岩盤工学の基礎と応用*, 鹿島出版会

This is a blank page.

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량	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 基本単位	
	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	キログラム毎立法メートル	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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	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
セルシウス度 ^(e)	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照射度	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
酸素活性化	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。
(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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。
(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
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ 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	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	ヨ	Y	10 ⁻¹	デ	d
10 ²¹	ゼ	Z	10 ⁻²	セ	c
10 ¹⁸	エ	E	10 ⁻³	ミ	m
10 ¹⁵	ペ	P	10 ⁻⁶	マイ	μ
10 ¹²	テ	T	10 ⁻⁹	ナ	n
10 ⁹	ギ	G	10 ⁻¹²	ピ	p
10 ⁶	メ	M	10 ⁻¹⁵	フェ	f
10 ³	キ	k	10 ⁻¹⁸	ア	a
10 ²	ヘ	h	10 ⁻²¹	ゼ	z
10 ¹	デ	da	10 ⁻²⁴	ヨ	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=60s
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/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=11=1 dm ³ =10 ³ cm 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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm 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。
ベレル	B	
デジベール	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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ 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。

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=1 cGy=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	f	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=200 mg=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	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー), 4.184 J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

