



岩石の強度回復特性・一般化応力緩和挙動
に関する研究(Ⅱ) (委託研究)

Studies about Strength Recovery and Generalized Relaxation Behavior
of Rock(Ⅱ) (Contract Research)

大久保 誠介* 林 克彦 小林 保之 平本 正行*

Seisuke OKUBO*, Katsuhiko HAYASHI, Yasushi KOBAYASHI
and Masayuki HIRAMOTO*

地層処分研究開発部門
ニアフィールド研究グループ

Near-Field Research Group
Geological Isolation Research and Development Directorate

February 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Research

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

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

岩石の強度回復特性・一般化応力緩和挙動に関する研究()
(委託研究)

日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット
大久保 誠介^{*1}, 林 克彦, 小林 保之, 平本 正行^{*2}

(2008年12月16日受理)

坑道掘削により、岩盤の初期地圧が解放されると、坑道壁面付近では偏差応力が増大し、岩盤の強度特性や初期地圧の大きさによっては岩盤の破壊が生ずる。NATM (New Austrian Tunneling Method) では、吹付けコンクリートやロックボルト等の支保部材により、岩盤に対し支保内圧を付与することによって破壊領域の抑制や岩塊の崩落を抑止し、本来岩盤が保有している空洞支持能力を最大限に発揮させることを基本的な考えとしている。

堆積岩系の軟岩においては、その強度特性から比較的大きな規模の支保工が設置されるが、破壊領域の岩盤に対しては支保内圧と地圧の双方が作用し、このような応力条件下では、時間の経過に伴い強度が回復するという特性がある。この強度回復特性は、空洞の安定性や処分場閉鎖後の長期力学挙動の評価において配慮すべきものと考えられる。

岩盤のクリープ挙動については、従来、クリープ試験によって検討されることが多いが、実際の岩盤では、支保工の存在や岩盤の力学的な不均一性により、クリープと応力緩和が同時に進行していると考えられる。このような挙動の検討にあたっては、荷重と変位の双方を一定に制御する一般化応力緩和試験が有効と考えられる。また、処分場の閉鎖後、地下水の再飽和の過程において進展することが想定される緩衝材の膨張や炭素鋼オーバーパックの腐食生成物の蓄積に伴い発生する膨張圧により、処分孔や処分坑道近傍の岩盤に対して引張応力が生じる可能性があるため、岩盤の引張応力下での強度特性を把握しておくことが重要となる。

上記特性については、これまで幌延深地層研究計画で採取されたボーリングコアを基に検討を進め定性的な傾向までは把握できているものの、試料のバラツキにより定量的な評価やモデル化にまでは至っていない。本研究では、今後の定量化に向け、「強度回復特性」、「一般応力緩和挙動」、「引張特性」について、稚内層硬質頁岩のコア試料を基に実験的な検討を行い、データの蓄積と分析に着手した。その結果、強度回復特性について深度による差異はほとんどみられないことが判明した。また、弾性波速度が強度回復の指標として適用できる見通しが得られた。この結果により、今後室内試験のみならず原位置においても直接強度回復特性を確認できることが期待される。さらに引張特性についても、深度に応じた差異はわずかであったという結果が得られた。

本報告書は、東京大学が日本原子力研究開発機構との契約により、平成 19 年度に実施した研究成果および一部平成 18 年に実施した研究成果を取りまとめたものである。

核燃料サイクル工学研究所 (駐在): 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

*1 東京大学 教授

技術開発協力員

*2 前田建設工業株式会社 (2008年3月31日まで技術開発協力員として在籍)

Studies about Strength Recovery and Generalized Relaxation Behavior of Rock ()
(Contract Research)

Seisuke OKUBO*¹, Katsuhiko HAYASHI , Yasushi KOBAYASHI
and Masayuki HIRAMOTO*²

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 16, 2008)

Rock failure occurs due to the increasing deviatoric stress near the cavern with stress release after tunnel excavation, although it depends on the rock strength and the rock pressure. The NATM (New Austrian Tunneling Method) design concept allows the supporting pressure formed by shotcrete and rockbolt to prevent the rock failure or falling from occurring and thereby to maximize the use of capability of rock mass in terms of tunnel stability.

For tunnel excavation in sedimentary soft rock, relatively large-scale support members are needed to cover up its weak strength. It is however known that the rock mass failure under both pressures of support and rock has the property of strength recovery by elapse of time. This property is thus worth taking into account for evaluation of tunnel stability and long-term mechanical behavior of rock mass after closure of a repository for high level radioactive waste (HLW).

In many cases, rock creep is studied through a creep test but, it is considered that the creep of rock occurs simultaneously with a process of stress relaxation in an actual rock system due to existence of rock supports and heterogeneity of rock mechanical properties. It is considered that the experiment of generalized stress relaxation is effective for study of such a behavior, which can control both load and displacement. It is also important to understand characteristics of rock strength under a field of tensile stress because the surrounding rock of a deposition hole and tunnel may have certain amount of tensile stress induced by swelling process of bentonite saturation and volume expansion of overpack corrosion products after the repository closure.

These above issues have been studied so far using the boring core samples obtained from the Horonobe Underground Research Laboratory, and treated at a level of qualitative manner but, not yet in quantitative or for mechanistic modeling because of large amount of variations of test samples. In this study, experimental studies on the strength recovery, the generalized stress relaxation behavior and the tensile strength were conducted using samples obtained from the Wakkanai-formation shale. As the result, it was found that the degree of strength recovery does not depend on the depth, and the elastic wave velocity is expected to be available for an index of the strength recovery. This may lead to be available for direct measurement of the strength recovery not only in laboratory but also in situ. It was also found that the tensile strength has a little bit dependency on the depth.

Keywords : Strength Recovery , Generalized Relaxation Behavior , Creep , Relaxation

This research was performed by the University of Tokyo under contract with Japan Atomic Energy Agency in the fiscal year 2005 and 2006.

* 1 The University of Tokyo, Collaborating Engineer, * 2 Maeda Corporation

目 次

1 . はじめに.....	1
2 . 岩石の強度回復特性に関する検討.....	2
2 . 1 はじめに.....	2
2 . 2 これまでの研究成果と本研究の内容.....	3
2 . 3 試料岩石.....	7
2 . 4 試験方法.....	12
2 . 5 試験結果および考察.....	15
2 . 6 まとめおよび今後の課題.....	55
3 . 岩石の一般化応力緩和挙動に関する検討.....	57
3 . 1 はじめに.....	57
3 . 2 試料岩石と試験方法.....	58
3 . 3 試験結果および考察.....	62
3 . 4 まとめおよび今後の課題.....	79
4 . 引張応力下での力学特性.....	80
4 . 1 はじめに.....	80
4 . 2 試験岩石と試験方法.....	81
4 . 3 試験結果および考察.....	82
5 . おわりに.....	89
参考文献.....	91

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Examination on the characteristics of strength recovery	2
2.1 Introduction	2
2.2 Findings so far and context of the test	3
2.3 Sample rock	7
2.4 Testing method	12
2.5 Test results and discussion	15
2.6 Summary and open issues for further R&D	55
3. Examination on the behavior in general relaxation	57
3.1 Introduction	57
3.2 Sample rock and testing method	58
3.3 Test results and discussion	62
3.4 Summary and open issues for further R&D	79
4. Mechanical characteristics in tensile stress field	80
4.1 Introduction	80
4.2 Sample rock and testing method	81
4.3 Test results and discussion	82
5. Concluding remarks	89
Reference	91

表 目 次

表 2-1	試験片の緒元および圧密過程条件（HDB11 孔採取深度 500 m 付近）	11
表 2-2	試験片の緒元および圧密過程条件（HDB11 孔採取深度 1000 m 付近）	11
表 2-3	押し込み試験結果（採取深度 500 m 付近）	15
表 2-4	押し込み試験結果（採取深度 1000 m 付近）	15
表 2-5	取り出し後の弾性波速度及び一軸圧縮試験結果（500m 付近）	34
表 2-6	取り出し後の弾性波速度及び一軸圧縮試験結果（1000m 付近）	34
表 2-7	健全な試験片の弾性波速度測定結果	53
表 2-8	健全な試験片の一軸圧縮強度	56
表 3-1	一般化応力緩和試験終了後の一軸圧縮強度試験の結果	73
表 4-1	圧裂引張試験結果	82
表 4-2	別途実施した一軸圧縮試験結果	88
表 4-3	強度結果の累積確率	88

目 次

図 2-1	ボーリング調査など位置図	4
図 2-2	地質・地質構造平面図	4
図 2-3	地質・地質構造断面図	5
図 2-4	稚内層硬質頁岩（深度 500m 付近）のコアの写真	
	（ a ） HDB11, No.4, 採取深度 518.5 ~ 518.9 m	7
	（ b ） HDB11, No.13, 採取深度 527.65 ~ 528 m	8
	（ c ） HDB11, No.14, 採取深度 543 ~ 543.3 m	8
図 2-5	稚内層硬質頁岩（深度 1000m 付近）のコアの写真	
	（ a ） HDB11, No.8, 採取深度 975 ~ 975.3 m	9
	（ b ） HDB11, No.9, 採取深度 975.3 ~ 975.6 m	9
	（ c ） HDB11, No.12, 採取深度 983 ~ 983.4 m	10
図 2-6	サーボ試験機（載荷装置）の写真	12
図 2-7	P 波弾性波速度測定に使用した装置	12
図 2-8	試験手順の概略図	13
図 2-9	強度回復試験の写真（試験片番号：No.4-9）	
	（ a ） 試験片	14
	（ b ） 押し込み試験中の様子	14
	（ c ） 押し込み試験終了後の試験片	14
	（ d ） 一軸圧縮試験中の様子	14
	（ e ） 一軸圧縮試験終了後の様子	14
図 2-10	押し込み試験における応力 - 軸歪曲線（深度 500 m 付近）	
	（ a ） 保持時間 10 秒間	17
	（ b ） 保持時間 4 時間	17
	（ c ） 保持時間 24 時間	18
図 2-11	押し込み試験における応力 - 軸歪曲線（深度 1000 m 付近）	
	（ a ） 保持時間 10 秒間	19
	（ b ） 保持時間 4 時間	19
	（ c ） 保持時間 24 時間	20
図 2-12	荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化 （深度 500 m 付近，保持時間 4 時間）	
	（ a ） 時間を普通軸で表示した場合	22
	（ b ） 時間を対数軸で表示した場合	22
図 2-13	荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化 （深度 500 m 付近，保持時間 24 時間）	
	（ a ） 時間を普通軸で表示した場合	23
	（ b ） 時間を対数軸で表示した場合	23
図 2-14	荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化	

(深度 1000 m 付近 , 保持時間 4 時間)	
(a) 時間を普通軸で表示した場合	24
(b) 時間を対数軸で表示した場合	24
図 2-15 荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化	
(深度 1000 m 付近 , 保持時間 24 時間)	
(a) 時間を普通軸で表示した場合	25
(b) 時間を対数軸で表示した場合	25
図 2-16 押し込み試験終了時の試験片の写真 (深度 500 m 付近)	
(a) 保持時間 10 秒間	27
(b) 保持時間 4 時間	28
(c) 保持時間 24 時間	29
図 2-17 押し込み試験終了時の試験片の写真 (深度 1000 m 付近)	
(a) 保持時間 10 秒間	30
(b) 保持時間 4 時間	31
(c) 保持時間 24 時間	32
図 2-18 取り出し後の一軸圧縮試験時の応力 - 軸歪曲線 (深度 500 m 付近)	
(a) 保持時間 10 秒間	35
(b) 保持時間 4 時間	35
(c) 保持時間 24 時間	36
図 2-19 取り出し後の一軸圧縮試験時の応力 - 軸歪曲線 (深度 1000 m 付近)	
(a) 保持時間 10 秒間	37
(b) 保持時間 4 時間	37
(c) 保持時間 24 時間	38
図 2-20 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の試験片の写真 (深度 500 m 付近)	
(a) 保持時間 10 秒間	39
(b) 保持時間 4 時間	40
(c) 保持時間 24 時間	41
図 2-21 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の試験片の写真 (深度 1000 m 付近)	
(a) 保持時間 10 秒間	42
(b) 保持時間 4 時間	43
(c) 保持時間 24 時間	44
図 2-22 保持時間による取り出し後の一軸圧縮強度の変化 (HDB-11 深度 500 m 付近)	
(a) 保持時間を普通軸で表示した場合	46
(b) 保持時間を対数軸で表示した場合	46
図 2-23 保持時間による取り出し後の一軸圧縮強度の変化 (HDB-11 深度 1000 m 付近)	
(a) 保持時間を普通軸で表示した場合	47
(b) 保持時間を対数軸で表示した場合	47
図 2-24 保持時間による取り出し後の一軸圧縮強度の変化	
(a) 保持時間を普通軸で表示した場合	48

(b) 保持時間を対数軸で表示した場合	48
図 2-25 クリープ歪と一軸圧縮強度の関係 (HDB-11)	
(a) 深度 500 m 付近	50
(b) 深度 1000 m 付近	50
図 2-26 クリープ歪と一軸圧縮強度の関係	51
図 2-27 保持時間による弾性波速度の変化 (HDB-11)	
(a) 深度 500 m 付近	54
(b) 深度 1000 m 付近	54
図 3-1 鉋柱に支保工を打設した場合	57
図 3-2 試験に用いたサーボ試験機の写真	60
図 3-3 一般化応力緩和試験の概念図	61
図 3-4 一般化応力緩和試験の分類	61
図 3-5 一般化応力緩和試験直前までの応力 - 歪曲線	
(a) 深度 500 m 付近	63
(b) 深度 1000 m 付近	63
図 3-6 緩和応力および歪の経時変化 (深度 500 m 付近, 緩和方向係数 - ∞)	
(a) 緩和応力	65
(b) 歪	65
図 3-7 緩和応力および歪の経時変化 (深度 500 m 付近, 緩和方向係数 0)	
(a) 緩和応力	66
(b) 歪	66
図 3-8 緩和応力および歪の経時変化 (深度 500 m 付近, 緩和方向係数 - 2.0, -0.7)	
(a) 緩和応力	67
(b) 歪	67
図 3-9 緩和応力および歪の経時変化 (深度 1000 m 付近, 緩和方向係数 - ∞)	
(a) 緩和応力	68
(b) 歪	68
図 3-10 緩和応力および歪の経時変化 (深度 1000 m 付近, 緩和方向係数 0)	
(a) 緩和応力	69
(b) 歪	69
図 3-11 緩和応力および歪の経時変化 (深度 1000 m 付近, 緩和方向係数 - 2.0, - 0.7)	
(a) 緩和応力	70
(b) 歪	70
図 3-12 一般化応力緩和試験開始から 10^3 秒後の応力 - 歪線図上での位置	
(a) 深度 500 m 付近	72
(b) 深度 1000 m 付近	72
図 3-13 一般化応力緩和試験終了後の応力 - 歪曲線	
(a) 深度 500 m 付近	74
(b) 深度 1000 m 付近	74

図 3-14	一般化応力緩和試験開始から 10^4 秒後の正規化した応力 - 歪線図上での位置	
	(a) 深度 500 m 付近 . 赤線は(3-5)式による計算結果	77
	(b) 深度 1000 m 付近 . 赤線は(3-6)式による計算結果	77
図 3-15	一般化応力緩和試験開始から 10^4 秒後の正規化した応力 - 歪線図上での位置	
	(a) 2005 年度の結果 . 赤線は(3-7)式による計算結果	78
	(b) 2006 年度の結果 . 赤線は(3-8)式による計算結果	78
図 4-1	10kN 万能試験機の写真	81
図 4-2	圧裂引張試験後の試験片の写真	
	(a) 深度 500 m 付近	83
	(b) 深度 700 m 付近	84
	(c) 深度 1000 m 付近	85
図 4-3	正規確率紙に図示した強度のばらつき	
	(a) 圧裂引張強度	87
	(b) 一軸圧縮強度	87

This is a blank page.

1. はじめに

本研究は、ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法についての信頼性向上を目的としており、今年度は昨年度³⁾に引続き岩石の「強度回復特性」、「一般化応力緩和挙動」について検討を行うとともに、「引張強度特性」についても新たに検討に加えた。

2章では、岩石の「強度回復特性」について検討した。これまで地下構造物の長期挙動について多くの議論がなされてきているが、そのときに見逃してならないのが岩盤の「強度回復特性」である。堆積岩は、元々強度を持たない粒子が集まって、一定期間応力を受け続けた結果、現在の高い強度となっている性質を有している。よって、一旦破壊した岩石片においても、適当な条件下で応力を受け続けるならば、次第に強度が回復していくことが考えられる。実際のトンネルや坑道においても、掘削直後に発破などの影響で破碎された岩盤が、適当な支保工を打設した状態で一定期間放置されると、かなりの強度を持つようになることは多くの現場技術者の間で言い伝えられてきた。しかしながら、強度回復の現象は認知されているとは言い難く、原位置でのデータや実験室での検証結果もほとんど見受けられないのが現状である。そこで本研究では、昨年度³⁾同様稚内層硬質頁岩を用いて室内試験を実施し、一部の堆積岩で特性が認められている「強度回復特性」についての基礎データを蓄積した。

3章では、岩石の「一般化応力緩和挙動」について検討した。岩盤のクリープ試験では、荷重を一定に保って歪の経時変化を観測する。一方、応力緩和試験では、変位を一定に保って応力の経時変化を観測する。岩盤の時間依存性挙動を明らかにしようとする場合、両者は有効な試験である。しかし、実際の地下構造物では、荷重と変位がともに経時変化していると考えるのが自然であり、従来行われてきた試験では、岩盤の挙動を正確に予測するのは困難である。そこで本研究では、荷重と変位を組み合わせた量を制御変数とし、稚内層硬質頁岩を用いて室内試験を実施し、「一般化応力緩和挙動」に関する基礎データを昨年に引続き蓄積した。

4章では、引張応力下での強度特性について稚内層硬質頁岩を用いて実験的に調べた。高レベル放射性廃棄物処分場における処分孔や処分坑道の周辺岩盤には、地圧（外圧）のほかに、オーバーバックの腐食生成物の蓄積による体積膨張や地下水の飽和過程に伴い発生する緩衝材の膨潤圧（内圧）が作用する。地下深部では一般に外圧が大きいいため、内圧が外圧を上回る可能性は小さいが、理論的には内圧が外圧を上回った場合には、坑道の周辺岩盤には引張応力が生ずる。引張応力は、坑道壁面に亀裂を生じさせるとともにこれを広げる方向に作用し、ニアフィールド岩盤の透水性に影響を及ぼす可能性が懸念される。従って、岩盤の引張応力下での強度特性を把握するとともに、これを適切に評価して設計に反映することが重要である。

2．岩石の強度回復特性に関する検討

2.1 はじめに

トンネルや坑道などの地下構造物を構築したとき、その周辺の岩盤は初期地圧の解放により、応力の再配分やせん断破壊などが生じ、何らかの損傷を受ける。この損傷を受けた部分は掘削影響領域（Excavation Disturbed Zone、以下 EDZ）と呼ばれ、これまでの認識では、わずかずつではあるが、時間の経過にともなって次第に拡大していき、その結果、坑道の安定性は低下し、周辺の地下水流動も活発になると考えられてきた。十分に注意して設計された地下構造物では、時間経過にともなう EDZ の拡大や安定性の低下は、多くの場合、充分小さなものであると考えられる。しかしながら、周辺の岩盤が次第に劣化していくと考える限り、構築した地下構造物をかなりの期間にわたって監視する必要がある、何年か後にどのような状態になるかを問われたとき、正確に回答することは困難である。

実際にトンネルや鉱山の坑道をはじめとする地下構造物では、時間の経過にともなって次第に安定性が低下する場合もあるが、充分な強度・剛性を持つ支保が施された場合には、一旦緩んだ坑道周辺の岩盤に、内からは支保の反力が加わり、外からは地圧が加わって、EDZ の強度回復が進行する可能性が考えられる。高レベル放射性廃棄物の地層処分では、長期に亘る周辺岩盤からの影響を評価することは非常に重要で、この強度回復特性は支保工の長期応力の算定や周辺岩盤自体の長期挙動を予測する上で重要な要素と考えられる。支保工の場合には、強度回復特性を考慮することで、現状より支保工仕様を小さく出来る可能性や現状の設計でより高い安全性が得られる可能性がある。また、周辺岩盤については、EDZ の強度が回復することで高レベル放射性廃棄物処分場システムの周辺岩盤への影響や地下水への影響を軽減できる可能性がある。処分場のレイアウトに関しても、坑道間隔を詰められる可能性がある。

本章では、岩石の「強度回復特性」を、地下構造物の長期安定性にとって極めて重要な要因であると考え、昨年度の幌延深地層研究計画におけるボーリング調査（HDB-10 孔の深度 500 m 付近と HDB-11 孔の深度 700 m 付近）³⁾ に引き続き、HDB-11 孔の深度 500 m 付近と 1000 m 付近で採取した稚内層硬質頁岩を用いて室内試験を実施し、岩石の「強度回復特性」に関する基礎データを蓄積した。

2.2 これまでの研究成果と本研究の内容

(1) これまでの研究成果

大久保ら¹⁾は、「強度回復特性」に関する研究の第一歩として、岩石試験片(土丹, 田下凝灰岩, 来待砂岩, 三城目安山岩)を一度圧縮破壊させた後に再度 厚肉円筒中で圧縮し, その後, 厚肉円筒から取り出した試験片の一軸圧縮強度, 圧裂引張強度 および 破断面の状況等について調べた。その結果, 強度回復の程度は岩石ごとに大きく異なる結果であることを示した。

また, 大久保²⁾は, 幌延深地層研究計画におけるボーリング調査(HDB-6 孔)で採取した稚内層硬質頁岩を用いて同様の試験を実施し, 稚内層硬質頁岩が土丹, 田下凝灰岩, 来待砂岩, 三城目安山岩と比較してどの程度強度回復特性があるかを調べた。その結果, 稚内層硬質頁岩は, 田下凝灰岩, 来待砂岩と同程度の強度回復が確認でき, その程度は押し込み試験における最大荷重, 軸歪と密接な関係があることを示した。

さらに, 平本ら³⁾は, 同地層の平面的な位置の差異を把握するため, 幌延深地層研究計画におけるボーリング調査(HDB-10 孔, HDB-11 孔)で採取した稚内層硬質頁岩を用いて岩石の強度回復に関する同様の試験を実施した。押し込み試験では, 最大荷重を一定の 39.2kN とし, 最大荷重に達したら一定時間(10 秒, 4 時間, 24 時間の 3 通り)荷重を保持し, 強度回復における荷重の保持時間の影響を調べた。その結果, 押し込み試験時の荷重の保持時間が長いほど強度回復が大きいことを示した。図 2-1 にボーリング調査など位置図を, 図 2-2, 図 2-3 に調査で明らかになった地質・地質構造平面図と断面図を示す。この調査結果から明らかなように, HDB-6, HDB-10, HDB-11 での稚内層は断層を挟んではいるもののほぼ水平な層を形成しており, 上載荷重はほぼ同様と考えられ, 平面的位置の違いや深さの違いを比較できる。そこで, 深さは異なるが同一岩種で採取場所の異なる試料の結果を比較した結果, HDB-10 孔と HDB-11 孔の試料では, 一軸圧縮強度が小さい HDB-10 孔の方が強度回復は大きい, 時間による強度回復効果は同じであることを示した。

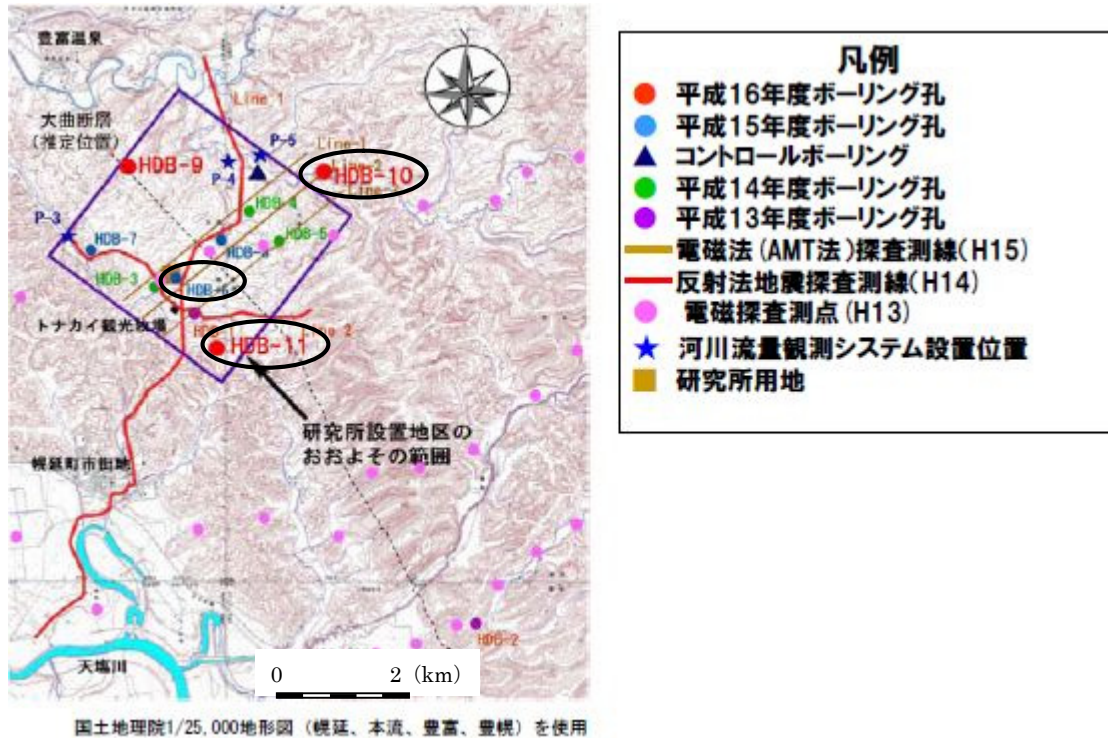


図 2-1 ボーリング調査など位置図 (出典 : JNC TN5400 2005-002 一部加筆)

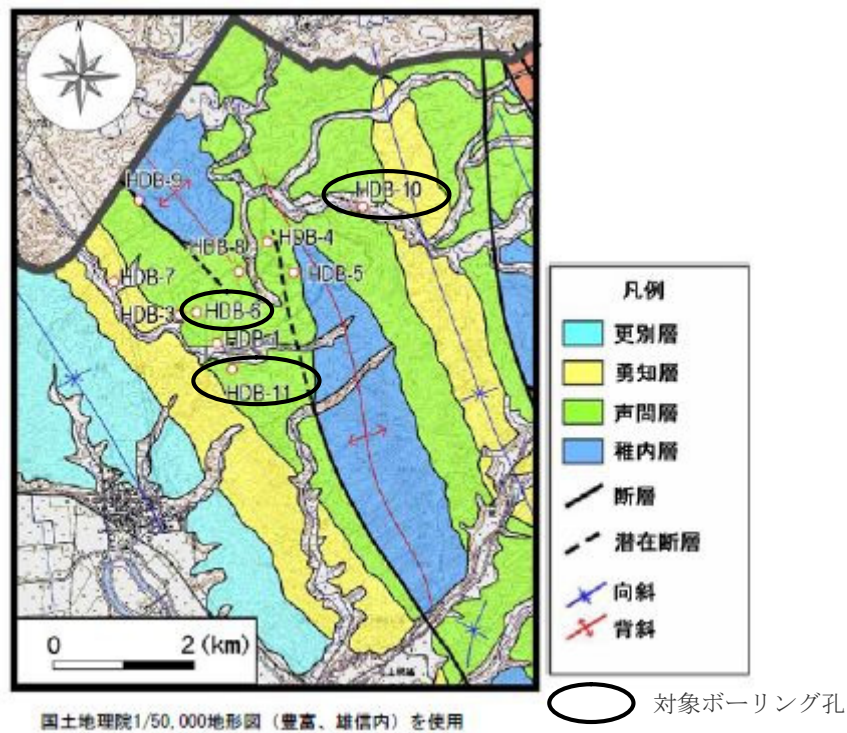


図 2-2 地質・地質構造平面図 (出典 : JNC TN5400 2004-007 一部加筆)

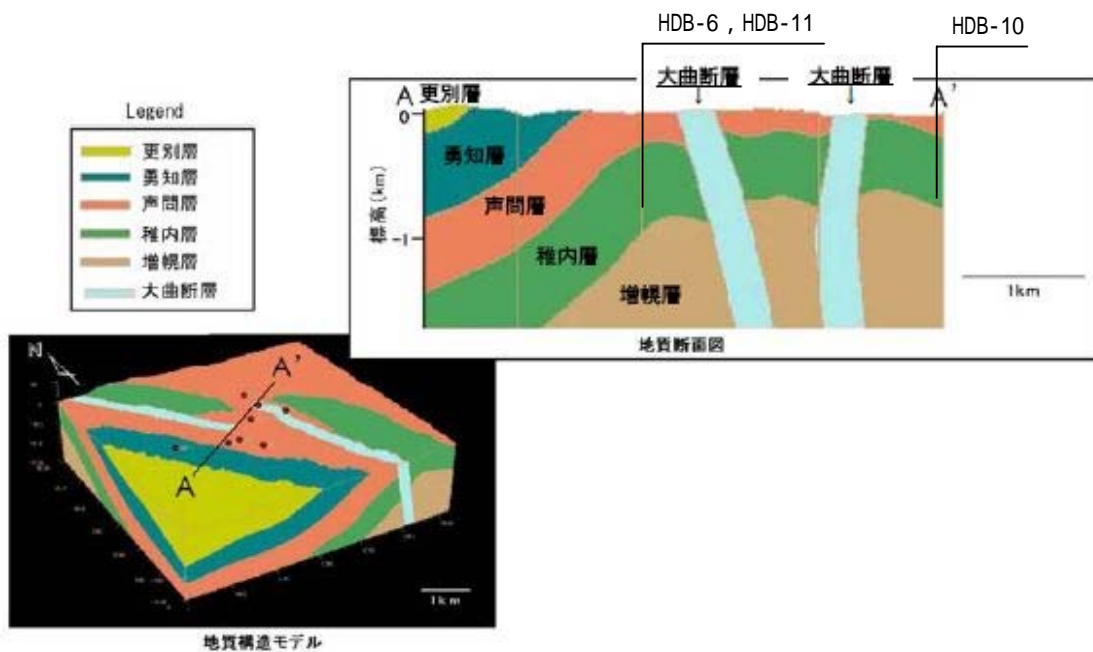


图 2-3 地質・地質構造断面図 (出典：JNC TN5400 2005-001 一部加筆)

(2) 本研究の内容

本研究では、幌延深地層研究計画におけるボーリング調査(HDB-11 孔の深度 500 m 付近と 1000 m 付近)で採取した稚内層硬質頁岩を用いて平本ら³⁾と同条件下で実験を行い、稚内層硬質頁岩の強度回復特性に関するデータを蓄積すると共に、採取場所や採取深度の異なる試料の結果と比較検討した。さらにまた、押し込み試験後の試験片の弾性波速度を測定し、強度回復特性に対する指標の1つとして弾性波速度の適用性について、新たに検討を行った。

なお、今回の試験で押し込み力は 39.2 kN としているが、この理由は以下に示す通りである。大久保²⁾は押し込み荷重を 9.8 (深度 800m での地中初期応力相当) 19.6、39.2、58.8 kN と変化させ押し込み荷重の違いによる影響を検討した。この結果、押し込み荷重の大きさに比例して押し込み後の試料の一軸圧縮強度も大きくなることがわかった。平本ら³⁾は、押し込み時間によって強度回復特性に影響があるか検討した。このとき押し込み力は 39.2 kN と固定しているが、これは、強度回復特性が押し込み荷重の大きさと比例関係にあり、実際に作用する荷重にこだわる事が無いこと、押し込み試験後の試料の取り扱いが容易であることなどから 39.2 kN としている。押し込み時間の強度回復特性に及ぼす影響は、押し込み時間を 10 秒間、4 時間、24 時間と変化させて検討した。これは、押し込み時間の影響を普通軸と対数軸で比較する場合のバランスと実験の効率性を考えて決めたものである。今回の実験は、平本ら³⁾で扱った HDB-10 深度 500m 付近、HDB-11 深度 700m 付近との比較を行うため、HDB-11 深度 500m 付近、深度 1000m 付近の試料について平本ら³⁾と同条件で実験した。

2.3 試料岩石

試料岩石として、幌延深地層研究計画におけるボーリング調査（HDB-11 孔の深度 500 m 付近と 1000 m 付近）で採取した稚内層硬質頁岩を用いた。図 2-4、図 2-5 に直径 80mm の今回実験に使用したコアの写真を示す。試験対象とするコアは、亀裂が少なく、連続性の高いものを極力選定するよう努めたが、試験室搬入後、多くのコアにおいて微細なクラックが観察された。ここでの微細なクラックは、目視では開口が認められず密着しているマイクロクラックであった。また、ある程度の規則性が認められる部分もあったことから、このマイクロクラックはコア運搬時に生じたものではなく、元々の岩盤が有しているものと推察された。ただし、試験片の作製、あるいは試験結果に対し、このマイクロクラックが影響を与えることも考えられることから、今後はコア選定時に十分留意する必要がある。深度 500 m 付近では No.4, 13, 14, 深度 1000 m 付近では No.8, 9, 12 のボーリングコアより、次のような手順で試験片を作製した。表 2-1, 表 2-2 に試験片の緒元および圧密過程条件を示す。

- 手順 1 : コアを長さ約 200 mm に切断した後、セメントモルタルで固定してボーリングする。
- 手順 2 : ボーリングの後、端面をターンテーブルによって研磨し、所定の長さにする。
- 手順 3 : 乾燥を防ぐため、ラップで覆った後、水中で保存する。



(a) HDB11, No.4, 採取深度 518.5 ~ 518.9 m

図 2-4 稚内層硬質頁岩（深度 500m 付近）のコアの写真(1/2)



(b) HDB11 , No.13 , 採取深度 527.65 ~ 528 m



(c) HDB11 , No.14 , 採取深度 543 ~ 543.3 m

図 2-4 稚内層硬質頁岩 (深度 500m 付近) のコアの写真(2/2)

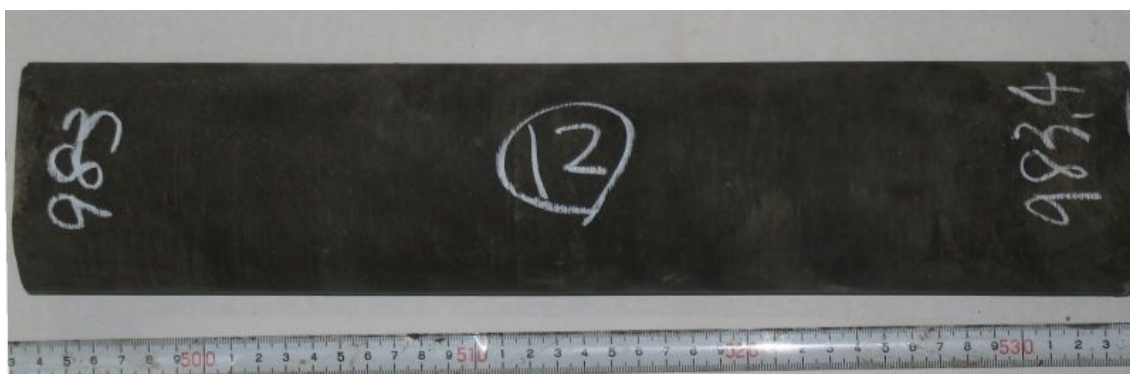


(a) HDB11 , No.8 , 採取深度 975 ~ 975.3 m



(b) HDB11 , No.9 , 採取深度 975.3 ~ 975.6 m

図 2-5 稚内層硬質頁岩 (深度 1000m 付近) のコアの写真(1/2)



(c) HDB11 , No.12 , 採取深度 983 ~ 983.4 m

図 2-5 稚内層硬質頁岩 (深度 1000m 付近) のコアの写真 (2/2)

表 2-1 試験片の緒元および圧密過程条件 (HDB11 孔採取深度 500 m 付近)

試験片番号	深度 (m)	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	重量 (g)	湿潤密度 (g/cm ³)	圧密過程	
							荷重 (kN)	保持時間 (s)
4-9	518.5~518.9	25.02	25.01	12.30	23.26	39.2	10	
4-10		25.03	24.99	12.30	23.21			
4-24		25.04	25.03	12.33	23.40			
13-8	527.65~528	25.02	24.85	12.22	23.21			
13-17		25.02	24.85	12.22	23.21			
14-8	543~543.3	25.03	24.98	12.29	23.53			
14-22		25.02	24.98	12.28	23.46			
4-11	518.5~518.9	25.02	25.00	12.29	24.88			
13-9	527.65~528	25.02	24.48	12.22	23.22		86400	
14-9	543~543.3	25.02	24.99	12.29	23.52			
4-12	518.5~518.9	25.04	25.01	12.32	24.64			
4-25		25.04	25.03	12.33	23.44			
13-16	527.65~528	25.02	24.84	12.21	23.16			
13-18		25.02	24.84	12.21	23.20			
14-10	543~543.3	25.03	24.99	12.30	23.46			
14-23		25.03	24.97	12.29	23.48			

表 2-2 試験片の緒元および圧密過程条件 (HDB11 孔採取深度 1000 m 付近)

試験片番号	深度 (m)	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	重量 (g)	湿潤密度 (g/cm ³)	圧密過程		
							荷重 (kN)	保持時間 (s)	
8-11	975~975.3	25.04	25.00	12.31	25.04	39.2	10		
8-21		25.03	25.01	12.31	24.96				
9-10	975.3~975.6	25.04	25.05	12.34	24.96				
9-19		25.05	24.98	12.31	25.00				
12-12	983~983.4	25.04	25.00	12.31	23.23				14400
12-15		25.02	24.98	12.28	23.17				
8-12	975~975.3	25.05	25.01	12.33	25.19				
9-11	975.3~975.6	25.03	25.00	12.30	23.23		86400		
12-13	983~983.4	25.03	24.99	12.30	23.22				
8-13	975~975.3	25.05	25.00	12.32	25.15				
8-23		25.04	25.04	12.33	25.01				
9-12	975.3~975.6	25.03	24.99	12.30	23.18				
9-20		25.04	25.04	12.33	27.79				
12-14	983~983.4	25.03	24.99	12.30	23.07				
12-28		25.02	25.04	12.31	23.28				

2.4 試験方法

試験機は、容量 1500kN の MTS 社製サーボ試験機を用いた。図 2-6 に試験機の写真を示す。また、弾性波速度測定装置の写真を図 2-7 に示す。



図 2-6 サーボ試験機（载荷装置）の写真

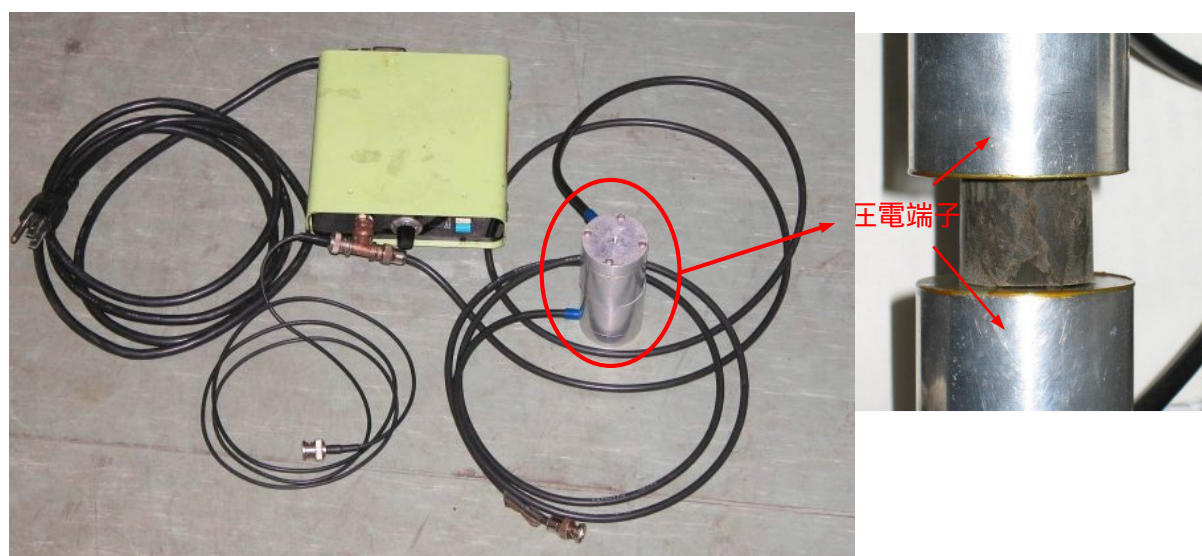


図 2-7 P 波弾性波速度測定に使用した装置

図 2-8, 図 2-9 に試験手順の概略図 および 写真を示す。

- 手順 1 : 試験片 (直径 24.7~24.9mm, 高さ 25mm 程度) を外径 50mm, 内径 27mm の鋼製厚肉円筒に入れ, 直径 25 mm の押し棒を試験片の上部に置く。
- 手順 2 : 変位速度一定制御 (5.0×10^{-4} mm/s) で押し棒を押し込む。試験開始時の試験片側面と厚肉円筒内壁の間には十分な隙間があるので, 試験片は一軸圧縮応力下で載荷され, やがて一軸圧縮強度に達し, 破壊後応力が低下していく。
- 手順 3 : 手順 2 が終了した段階からさらに押し棒を押し込む。すると, 試験片は横に膨らんでいき, やがて試験片側面が厚肉円筒内壁と接触し荷重が増加する。そこで, 荷重速度一定制御 (2.5N/s) にて押し込み荷重が最大の 39.2kN に達するまで押し棒を押し込み続け, 最大荷重に達したら一定時間 (10 秒間, 4 時間, 24 時間の 3 通り) 荷重を保持し, その後 試験機を止めて試験片を取り出す。
- 手順 4 : 一軸圧縮試験を行う前に一部の試料で弾性波速度測定を行う。測定は, 試験片の両端面に圧電端子を押し当て, パルス電圧発生装置 (昭和電気研究所製, MODEL 4701) により発振周波数 100 Hz でパルス状に電圧を発生させ, 一方の圧電端子により試験片に縦振動を与え, 他方の圧電端子で試験片を伝播した縦振動をとらえ, その時間差から P 波 (縦波) 弾性波速度を求める。
- 手順 5 : 取り出した試験片を用いて歪速度一定 (10^{-4} s^{-1}) で一軸圧縮試験を行う。なお, 強度回復の評価は, 取り出した試験片の一軸圧縮強度をもって主たる指標とする。

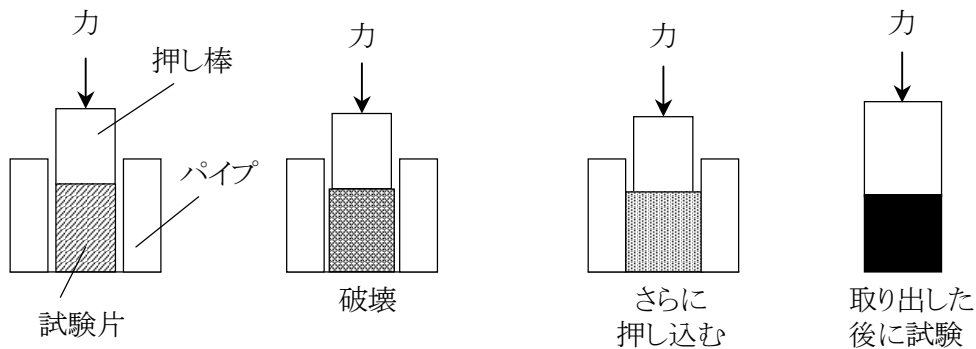


図 2-8 試験手順の概略図

なお, この試験では, 厚肉円筒と押し棒との間に十分な隙間 (初期値 1mm) があるので, 試験片に含まれていた水がこの隙間を通過して排出されるため, 排水条件下での試験とみなすことができる。



(a) 試験片



(b) 押し込み試験中の様子



(c) 押し込み試験終了後の試験片



(d) 一軸圧縮試験中の様子



(e) 一軸圧縮試験終了後の様子

図 2-9 強度回復試験の写真 (試験片番号 : No.4-9)

2.5 試験結果および考察

2.5.1 押し込み試験結果

表 2-3, 表 2-4 に試験結果を示す。今回の試料では, 押し込み試験前に比べ, 試験後の試験片の直径は 9%程度増加し, 高さは 10%程度減少した。それより計算される体積の増加率は 6%程度である。

表 2-3 押し込み試験結果 (採取深度 500 m 付近)

試験片番号	深度 (m)	押し込み試験後						荷重を一定にしてからのクリープ歪 (%)	圧密過程	
		直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	重量 (g)	密度 (g/cm ³)	軸歪 (%)		荷重 (kN)	保持時間 (s)
4-9	518.5~518.9	27.36	23.06	13.56	19.92	1.47	7.8	0.04	39.2	10
4-10		27.26	23.21	13.55	22.48	1.66	7.1	0.03		
4-24		27.22	22.68	13.20	22.72	1.72	9.4	0.05		
13-8	527.65~528	27.16	22.73	13.17	22.62	1.72	8.5	0.03		
13-17		27.21	22.41	13.03	22.55	1.73	9.8	0.04		
14-8	543~543.3	27.20	22.54	13.10	22.89	1.75	9.8	0.03		
14-22		27.17	22.60	13.10	22.94	1.75	9.5	0.04		
4-11	518.5~518.9	27.16	22.34	12.94	23.65	1.83	10.6	0.55		14400
13-9	527.65~528	27.15	22.54	13.05	22.41	1.72	9.3	0.59		
14-9	543~543.3	27.21	22.20	12.91	22.53	1.75	11.2	0.76		
4-12	518.5~518.9	27.14	22.44	12.98	23.41	1.80	10.3	0.91		86400
4-25		27.18	21.89	12.70	22.06	1.74	12.5	1.23		
13-16	527.65~528	27.17	22.01	12.76	21.75	1.70	11.4	1.03		
13-18		27.18	21.93	12.72	22.34	1.76	11.7	1.23		
14-10	543~543.3	27.22	22.17	12.90	22.09	1.71	11.3	1.28		
14-23		27.20	21.99	12.78	22.21	1.74	11.9	1.04		

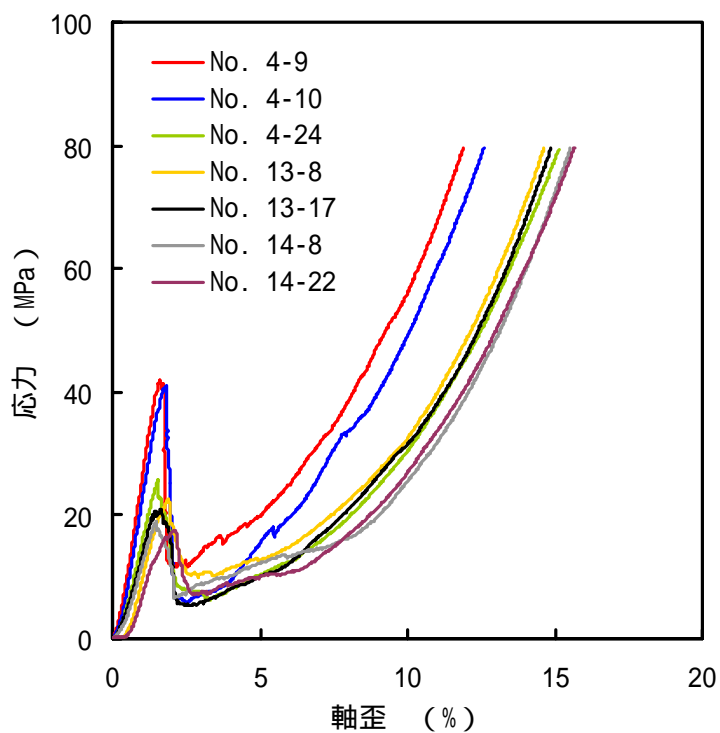
表 2-4 押し込み試験結果 (採取深度 1000 m 付近)

試験片番号	深度 (m)	押し込み試験後						荷重を一定にしてからのクリープ歪 (%)	圧密過程	
		直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	重量 (g)	密度 (g/cm ³)	軸歪 (%)		荷重 (kN)	保持時間 (s)
8-11	975~975.3	27.16	22.54	13.06	24.20	1.85	9.84	0.02	39.2	10
8-21		27.15	22.62	13.10	24.13	1.84	9.56	0.02		
9-10	975.3~975.6	27.24	22.61	13.18	24.50	1.86	9.74	0.04		
9-19		27.12	22.62	13.07	24.10	1.84	9.45	0.03		
12-12	983~983.4	27.26	23.08	13.47	22.62	1.68	7.68	0.02		
12-15		27.18	23.05	13.37	22.25	1.66	7.73	0.02		
8-12	975~975.3	27.16	22.21	12.87	24.35	1.89	11.20	0.47		14400
9-11	975.3~975.6	27.21	22.90	13.32	22.54	1.69	8.40	0.68		
12-13	983~983.4	27.19	22.71	13.19	22.51	1.71	9.12	0.56		
8-13	975~975.3	27.15	22.23	12.87	24.12	1.87	11.08	0.83		86400
8-23		27.16	22.24	12.88	23.82	1.85	11.18	0.80		
9-12	975.3~975.6	27.27	22.78	13.30	22.62	1.70	8.84	1.22		
9-20		27.18	22.39	12.99	24.06	1.85	10.58	0.66		
12-14	983~983.4	27.21	22.97	13.36	22.26	1.67	8.08	0.70		
12-28		27.18	22.97	13.33	22.72	1.70	8.27	0.82		

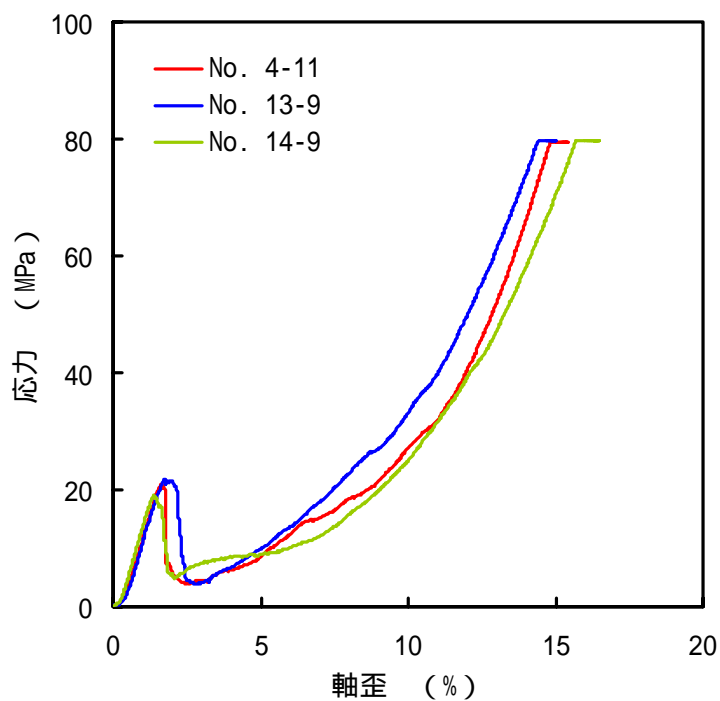
図 2-10 と図 2-11 に押し込み試験における応力 - 軸歪曲線を示す。試験片は大変形するが、簡明さを重んじて、軸歪は初期長さを基準とし、応力は初期断面積を基準として計算した。すなわち、微小変形の時と同じ計算方法で軸歪と応力をもとめた。従って、みかけの軸歪、みかけの応力と称するのが正しいが、煩雑さを避けるため以下では単に軸歪、応力とする。

図 2-10 は深度 500 m 付近の試料から得られた結果である。図 2-10(a)には、押し込み荷重が設定の 39.2 kN (応力：81.5 MPa) に達した後、10 秒間荷重を保持した条件で得られた 7 つの試験結果を示した。ごく初期の間、応力は上昇し、軸歪 1.5 %程度で 17~42 MPa の一軸圧縮強度に達した後、応力は低下し、軸歪が 3 %付近で応力は最低値 5~13 MPa をとる。その後は軸歪が増加するに従って、線図上で応力は下に凸の傾向で増加している。荷重が 39.2 kN に達したときの軸歪は 11~16 %であり、かなり大きく変形している。荷重を 10 秒間保持した間のクリープ歪は 0.03~0.05 %とわずかであった。図 2-10(b)は、押し込み荷重を 4 時間(14,400 秒間)保持した条件で得られた 3 つの試験結果である。荷重を一定にするまでは図 2-10(a)とほぼ同様であり、クリープ状態となってから 4 時間の間に生じたクリープ歪は 0.5~0.8 %であった。図 2-10(c)は、押し込み荷重を 24 時間(86,400 秒間)保持した条件で得られた 6 つの試験結果である。この場合も荷重を一定にするまでは図 2-10(a)、(b)とほぼ同様であり、クリープ状態となってから 24 時間の間に生じたクリープ歪は 0.9~1.3 %であった。

図 2-11 は深度 1000 m 付近の試料から得られた結果である。図 2-11(a)には、押し込み荷重が設定の 39.2 kN (応力：81.5 MPa) に達した後、10 秒間荷重を保持した条件で得られた 6 つの試験結果を示した。深度 500 m 付近の結果と同様に、ごく初期の間、応力は上昇し、軸歪 1.5 %程度で 18~33 MPa の一軸圧縮強度に達した後、応力は低下し、軸歪が 3 %付近で応力は最低値 5~13 MPa をとる。その後は軸歪が増加するに従って、応力は下に凸の傾向で増加している。荷重が 39.2 kN に達したときの軸歪は 12~15 %であり、かなり大きく変形している。荷重を 10 秒間保持した間のクリープ歪は 0.02~0.04 %であった。図 2-11(b)は、押し込み荷重を 4 時間(14,400 秒間)保持した条件で得られた 3 つの試験結果である。荷重を一定にするまでは図 2-11(a)とほぼ同様であり、クリープ状態となってから 4 時間の間に生じたクリープ歪は 0.4~0.7 %であった。図 2-11(c)は、押し込み荷重を 24 時間(86,400 秒間)保持した 6 つの試験結果である。この場合も荷重を一定にするまでは図 2-11(a)、(b)とほぼ同様であり、クリープ状態となってから 24 時間の間に生じたクリープ歪は 0.6~1.2 %であった。

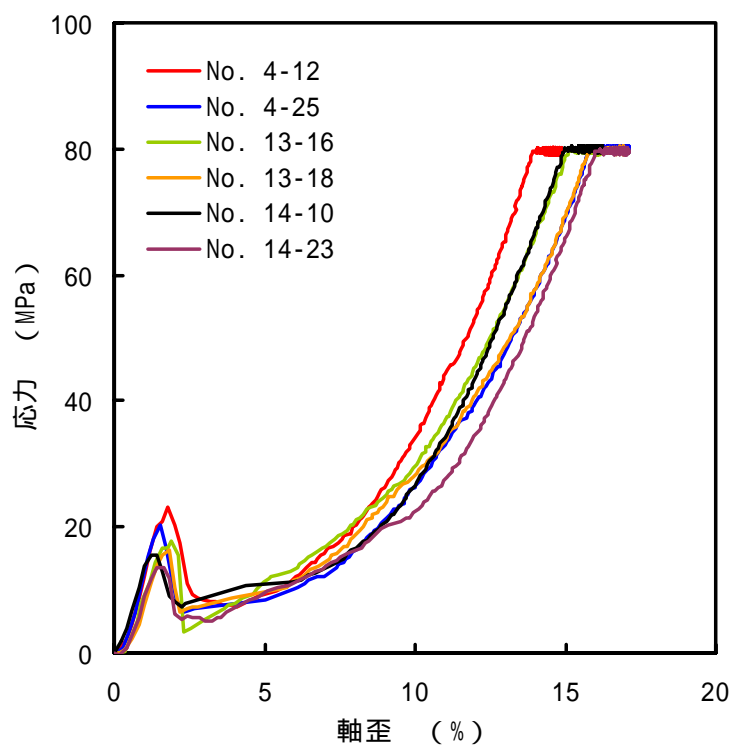


(a) 保持時間 10 秒間



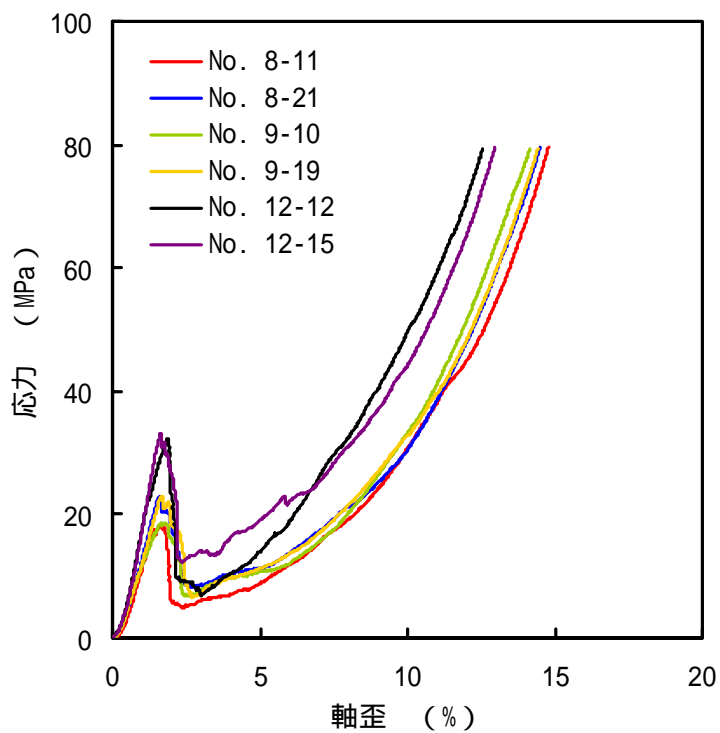
(b) 保持時間 4 時間

図 2-10 押し込み試験における応力 - 軸歪曲線 (深度 500 m 付近) (1/2)

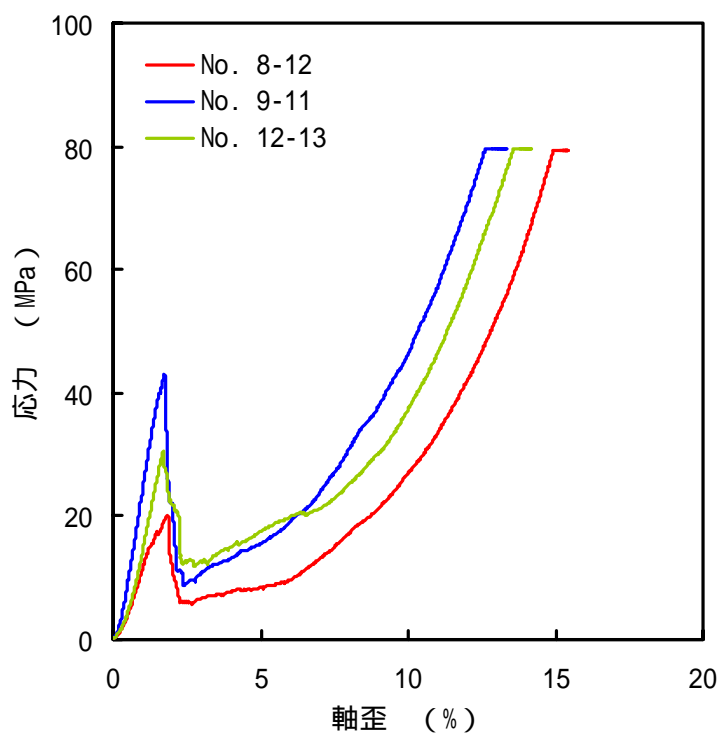


(c) 保持時間 24 時間

図 2-10 押し込み試験における応力 - 軸歪曲線 (深度 500 m 付近) (2/2)

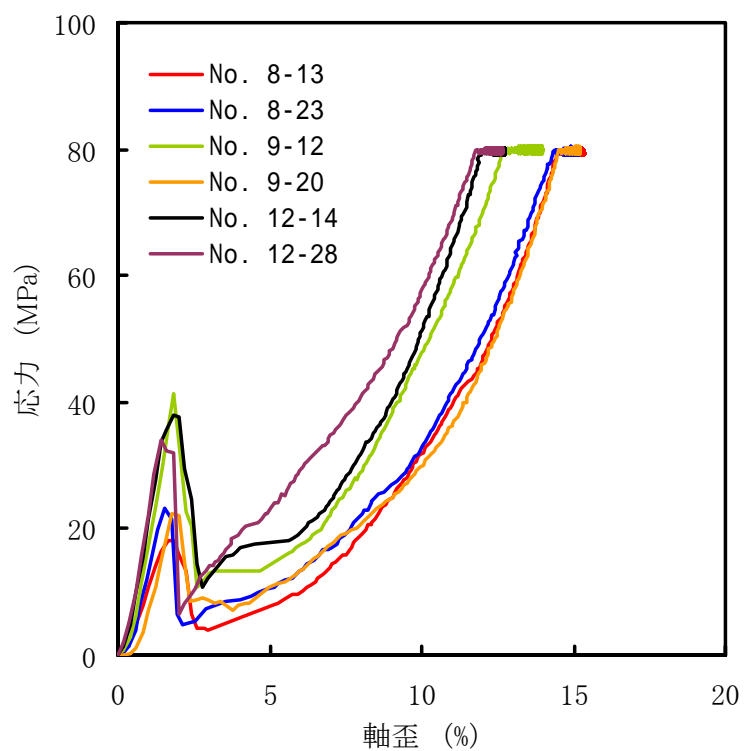


(a) 保持時間 10 秒間



(b) 保持時間 4 時間

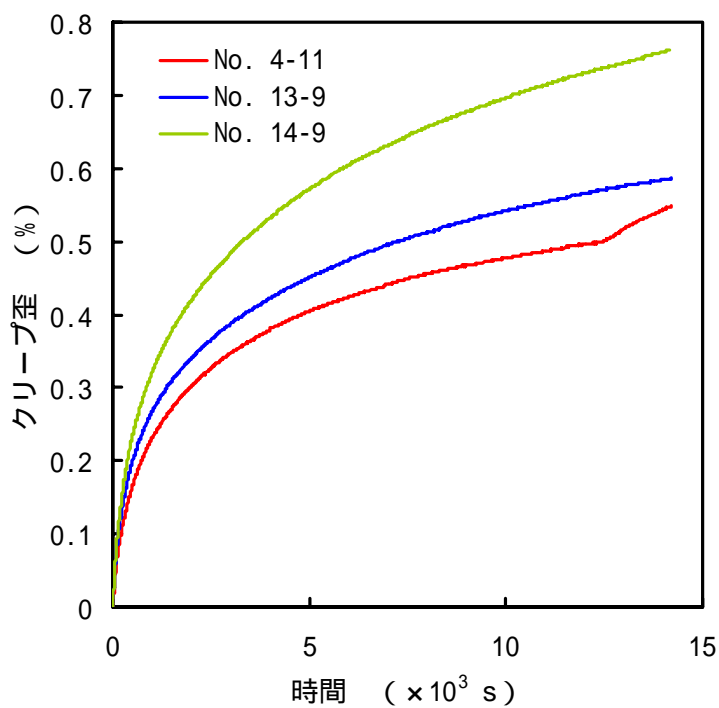
図 2-11 押し込み試験における応力 - 軸歪曲線 (深度 1000 m 付近) (1/2)



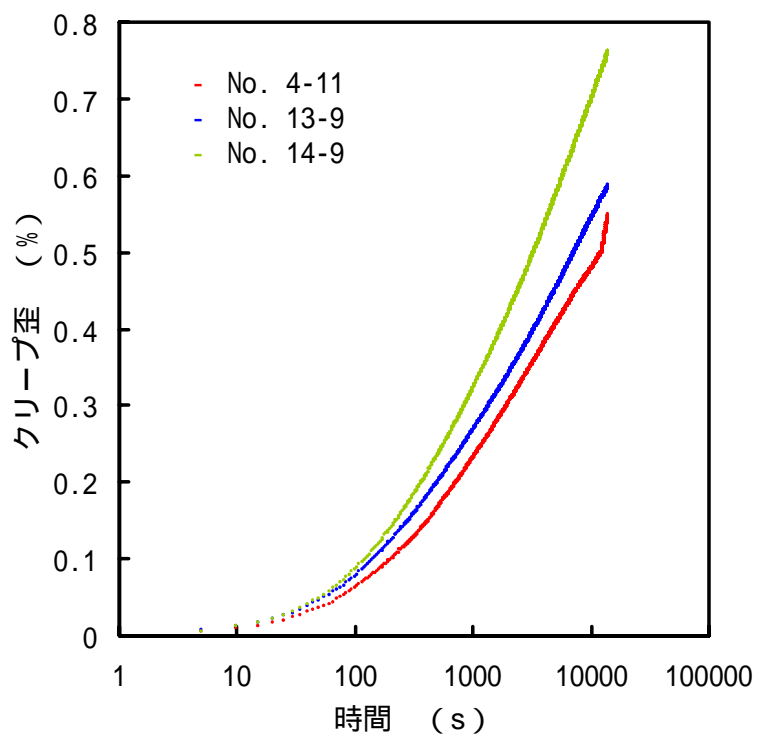
(c) 保持時間 24 時間

図 2-11 押し込み試験における応力 - 軸歪曲線 (深度 1000 m 付近) (2/2)

図 2-12 と図 2-13 に、深度 500 m 付近の試料から得られた、押し込み荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化を示す。いずれの図でも(a)は横軸の経過時間を普通軸で示したもので、(b)は横軸の経過時間を対数軸にしたものである。図 2-12 は保持時間 4 時間の結果であり、図 2-12(a)より最初の 5,000 秒までは急激にクリープ歪が増加して、その後、クリープ歪の増加速度は小さくなっていることがわかる。図 2-12 (b)を見ると、最初の 100 秒までは下に凸の傾向がやや強い。この原因として、クリープに至るまでの荷重速度が 2.5 N/s と遅いため、福井ら⁴⁾に示されているように、初期速度が遅いことの影響が現れたと考えられる。その後は若干下に凸の傾向が見られるものの直線に近い。この結果は通常のクリープ試験における一次クリープと比較的似ており、破碎した後の圧密過程でも対数クリープ則に近い関係が存在することがわかる。図 2-13 には、押し込み荷重を 24 時間保持した時の結果を示すが、図 2-12 の結果と同じような傾向を示している。図 2-14 と図 2-15 には、深度 1000 m 付近の試料から得られた、押し込み荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化を示すが、これらの結果も、深度 500 m 付近の試料での結果とほぼ同じような傾向を示している。ただし、どちらの場合にも大きなバラツキがある。これは、表 2-7 健全な試験片の弾性派速度には現れていないが、表 2-8 に示すように、健全な試験片の強度を比較してみると、深度 500m 付近では、No.4 試料は No.13、14 試料に比べて 2 倍程度の強度があり、深度 1000m 付近では、No.12 試料は No.9 試料に比べて 1.7 倍程度の強度がある。この強度のバラツキが押し込み試験後のクリープ歪のバラツキとして現れていると思われる。

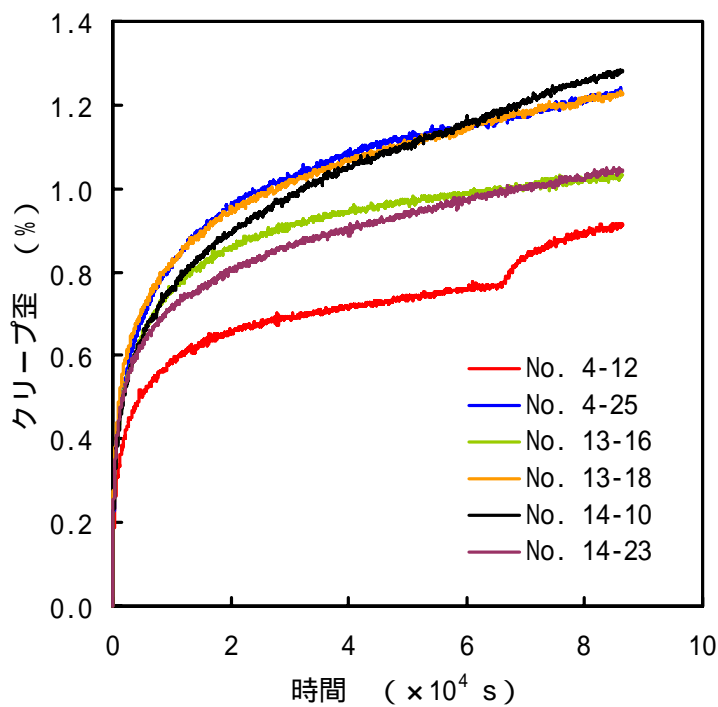


(a) 時間を普通軸で表示した場合

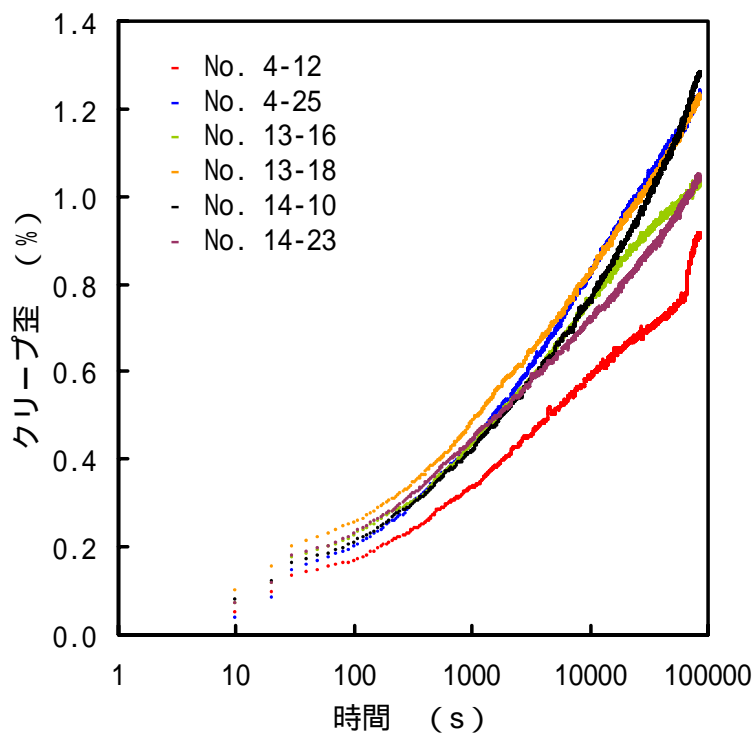


(b) 時間を対数軸で表示した場合

図 2-12 荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化
(深度 500 m 付近, 保持時間 4 時間)

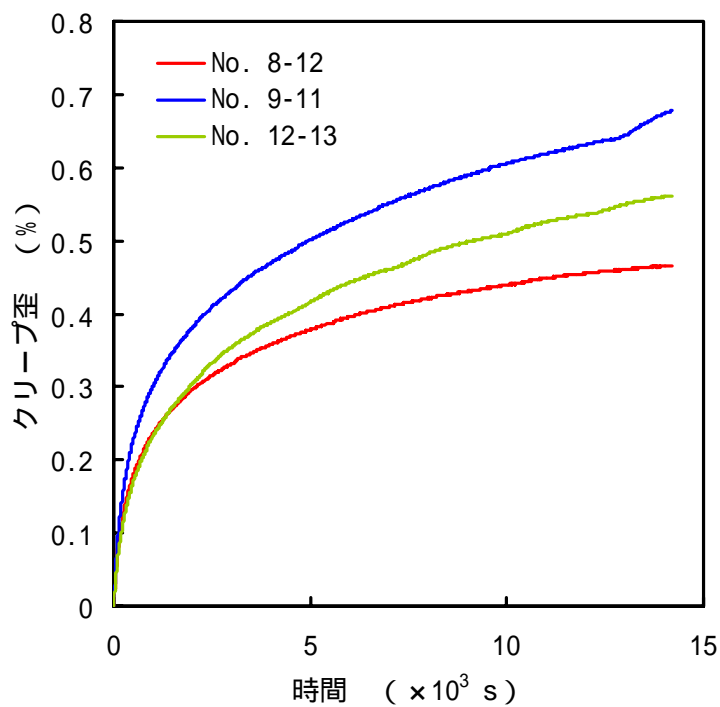


(a) 時間を普通軸で表示した場合

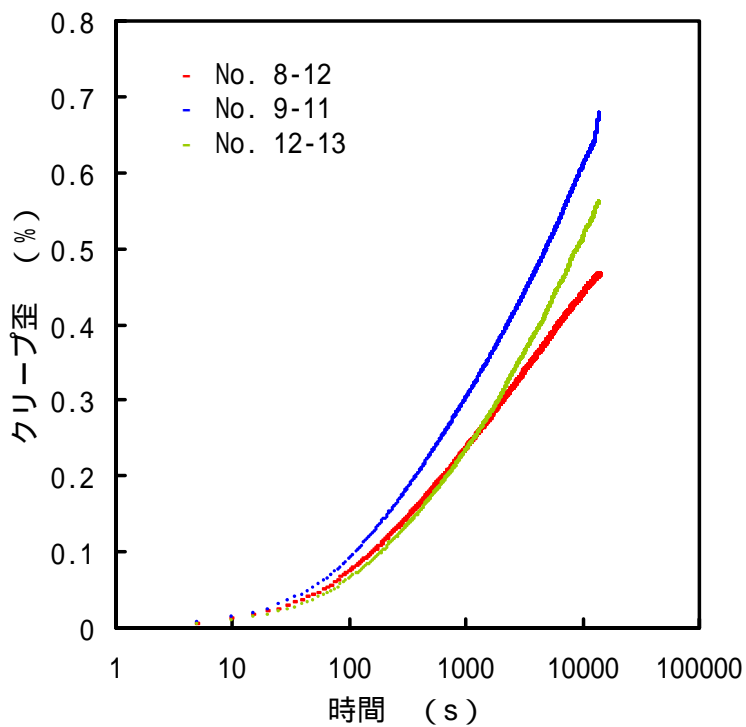


(b) 時間を対数軸で表示した場合

図 2-13 荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化
(深度 500 m 付近, 保持時間 24 時間)

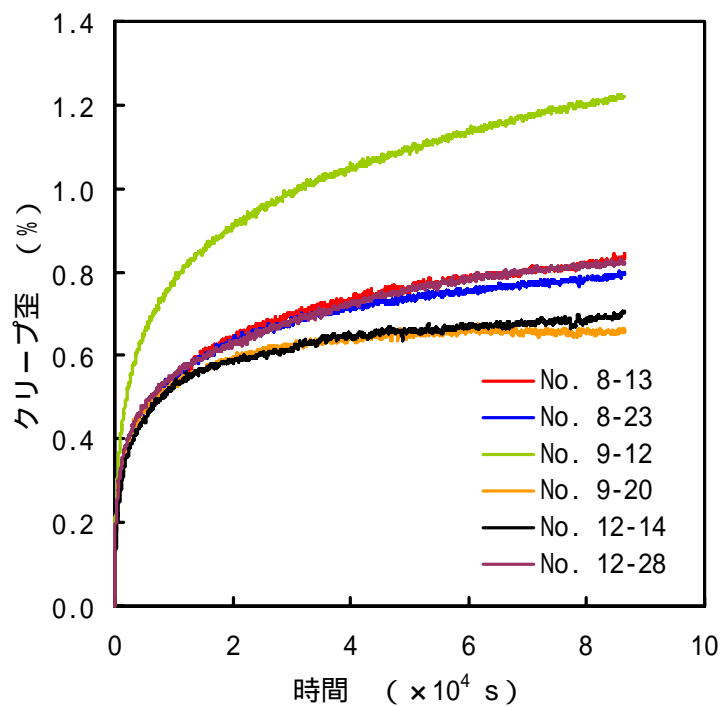


(a) 時間を普通軸で表示した場合

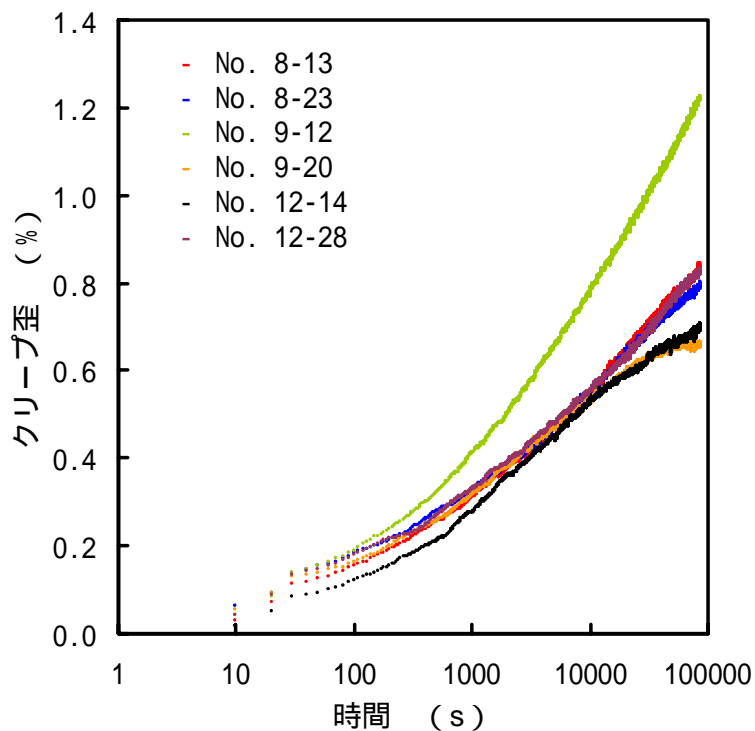


(b) 時間を対数軸で表示した場合

図 2-14 荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化
(深度 1000 m 付近, 保持時間 4 時間)



(a) 時間を普通軸で表示した場合



(b) 時間を対数軸で表示した場合

図 2-15 荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化
(深度 1000 m 付近, 保持時間 24 時間)

図 2-16 と図 2-17 には、押し込み試験後に取り出した試験片の写真を示した。写真からわかるように、試験片側面は若干の光沢があり滑らかで、細かいひび割れが多い。上面の周縁は、面取りをしたような状況で、上面及び下面にもひび割れが見られる場合がある。大久保ら¹⁾の結果と比べると、土丹に比較的似ているが、稚内層硬質頁岩は黒色で亀裂は白っぽいので、亀裂がはっきり観察し易い点は土丹と異なる。図 2-16 と図 2-17 にはすべての試験片を示したが、目視による観察では保持時間による影響の差は明らかではなかった。



(a) 保持時間 10 秒間

図 2-16 押し込み試験終了時の試験片の写真
(深度 500 m 付近) (1/3)



(b) 保持時間 4 時間

図 2-16 押し込み試験終了時の試験片の写真
(深度 500 m 付近) (2/3)



(c) 保持時間 24 時間

図 2-16 押し込み試験終了時の試験片の写真
(深度 500 m 付近) (3/3)



(a) 保持時間 10 秒間

図 2-17 押し込み試験終了時の試験片の写真
(深度 1000 m 付近) (1/3)



(b) 保持時間 4 時間

図 2-17 押し込み試験終了時の試験片の写真
(深度 1000 m 付近) (2/3)



(c) 保持時間 24 時間

図 2-17 押し込み試験終了時の試験片の写真
(深度 1000 m 付近) (3/3)

2.5.2 取り出し後の一軸圧縮試験結果

厚肉円筒から取り出した試験片を用いて、一軸圧縮試験を行った。表 2-5、表 2-6 に一軸圧縮強度を示す。図 2-18 は、深度 500 m 付近の試料の一軸圧縮試験によって得られた応力 - 軸歪曲線である。図 2-18(a) は保持時間 10 秒間の結果であるが、載荷開始直後は軸歪の増加による応力の増加は小さい。これは押し込み試験後の試験片端面の平行度が崩れているためである。それ以降は、いずれの試験片でもほぼ直線的に応力と軸歪は増加していき、若干上に凸の曲線になった後に一軸圧縮強度に達している。強度破壊点以降はほとんどの試験片で軸歪の増加とともに応力は減少したが、軸歪の増加とともに応力が徐々に増加する場合や、応力がほぼ一定の場合もあり、試験片ごとのばらつきがかなり大きいことがわかる。図 2-18(b) は保持時間 4 時間の結果であるが、強度破壊点までは図 2-18(a) とほぼ同じような曲線である。一軸圧縮強度は 1.99 MPa ~ 2.28 MPa と比較的ばらつきが小さい。いずれの試験片でも強度破壊点以降は比較的緩やかに応力が減少している。図 2-18(c) は保持時間 24 時間の結果であるが、一軸圧縮強度のばらつきが大きく、強度破壊点以降は比較的急激に応力が減少していることがわかる。

図 2-19 には、深度 1000 m 付近の試料の一軸圧縮試験によって得られた応力 - 軸歪曲線を示した。図 2-19(a) は保持時間 10 秒間の結果であり、強度破壊点までは図 2-18(a) とほぼ同じような曲線である。一軸圧縮強度のばらつきは大きいですが、いずれの試験片でも強度破壊点以降は応力が徐々に減少している。図 2-19(b) は保持時間 4 時間の結果である。一軸圧縮強度はばらつきが大きいものの、残留強度は 1.0 ~ 1.3 MPa とばらつきが小さい。図 2-19(c) は保持時間 24 時間の結果であるが、強度が大きい試験片ほど、強度破壊点以降の応力の低下が急激であることがわかる。

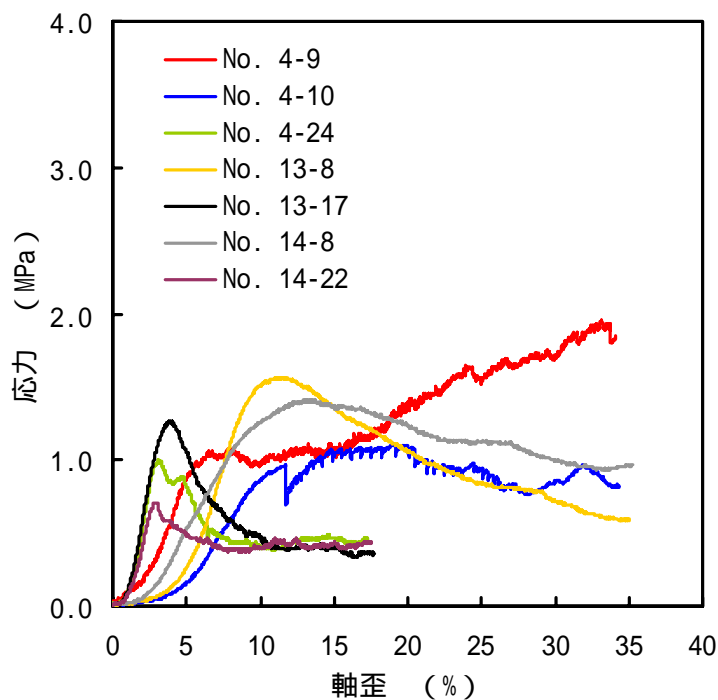
図 2-20 と図 2-21 に一軸圧縮試験終了時の写真を示すが、目視による差はみられなかった。

表 2-5 取り出し後の弾性波速度及び一軸圧縮試験結果 (500m 付近)

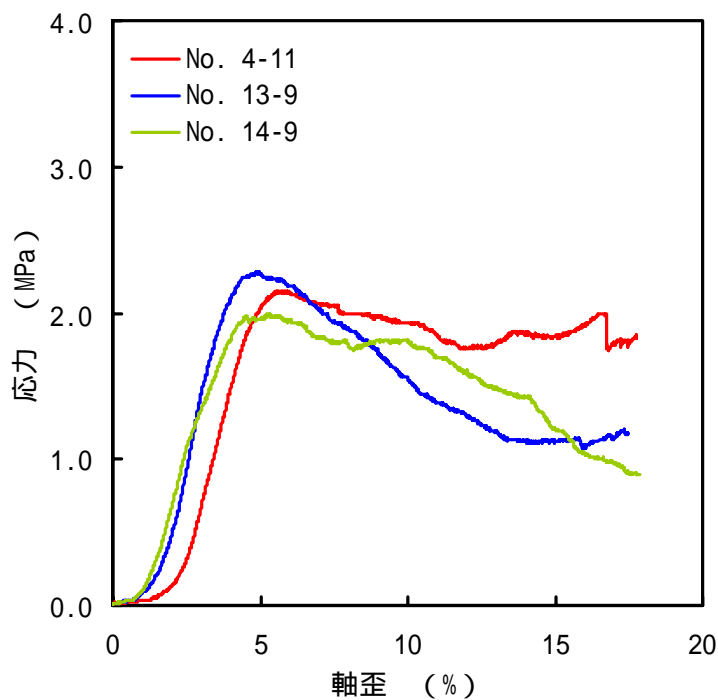
試験片番号	深度 (m)	取り出し後の 弾性波速度 (m/s)	取り出し後の 一軸圧縮強度 (MPa)	圧密過程		
				荷重 (kN)	保持時間 (s)	
4-9	518.5~518.9		0.27	39.2	10	
4-10			1.11			
4-24		1632	1.00			
13-8	527.65~528		1.57			
13-17		1366	1.26			
14-8	543~543.3		1.41			
14-22		1517	0.71			
平均値		1505	1.05			
4-11	518.5~518.9		2.15			14400
13-9	527.65~528		2.28			
14-9	543~543.3		1.99			
平均値			2.14			
4-12	518.5~518.9		3.43		86400	
4-25		1765	2.12			
13-16	527.65~528		1.98			
13-18		1769	2.14			
14-10	543~543.3		3.44			
14-23		1773	1.92			
平均値		1769	2.51			

表 2-6 取り出し後の弾性波速度及び一軸圧縮試験結果 (1000m 付近)

試験片番号	深度 (m)	取り出し後の 弾性波速度 (m/s)	取り出し後の 一軸圧縮強度 (MPa)	圧密過程	
				荷重 (kN)	保持時間 (s)
8-11	975~975.3		2.21	39.2	10
8-21		1688	1.38		
9-10	975.3~975.6		2.51		
9-19		1627	1.45		
12-12	983~983.4		1.44		
12-15		1288	0.44		
平均値		1534	1.57		
8-12	975~975.3		3.09		14400
9-11	975.3~975.6		1.60		
12-13	983~983.4		2.02		
平均値			2.24		
8-13	975~975.3		3.68	86400	
8-23		1951	1.70		
9-12	975.3~975.6		2.01		
9-20		1879	1.60		
12-14	983~983.4		1.79		
12-28		1475	0.76		
平均値		1768	1.92		

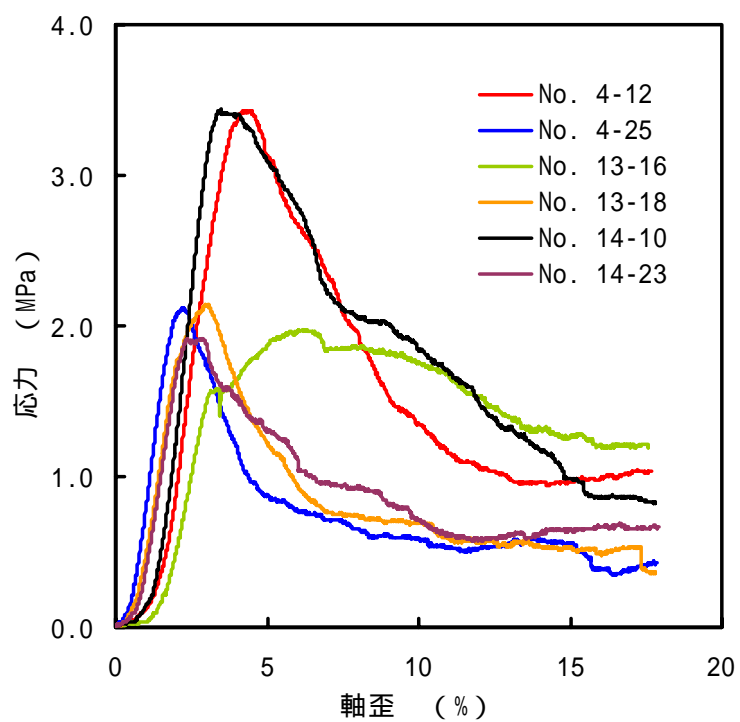


(a) 保持時間 10 秒間



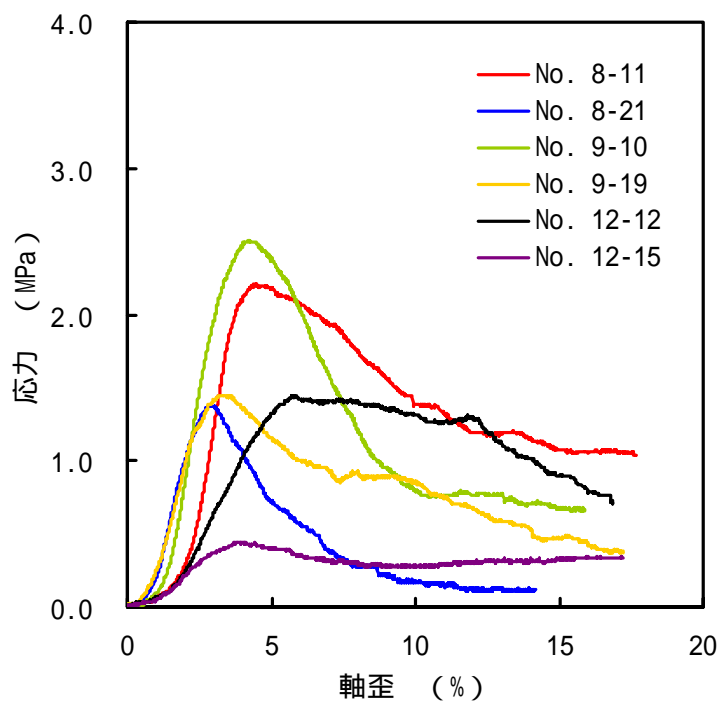
(b) 保持時間 4 時間

図 2-18 取り出し後の一軸圧縮試験時の応力 - 軸歪曲線
(深度 500 m 付近) (1/2)

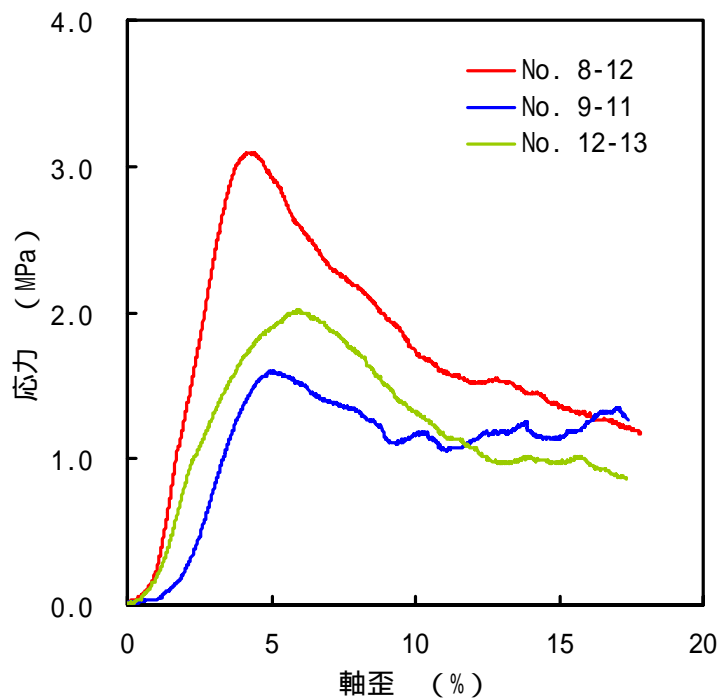


(c) 保持時間 24 時間

図 2-18 取り出し後の一軸圧縮試験時の応力 - 軸歪曲線
(深度 500 m 付近) (2/2)

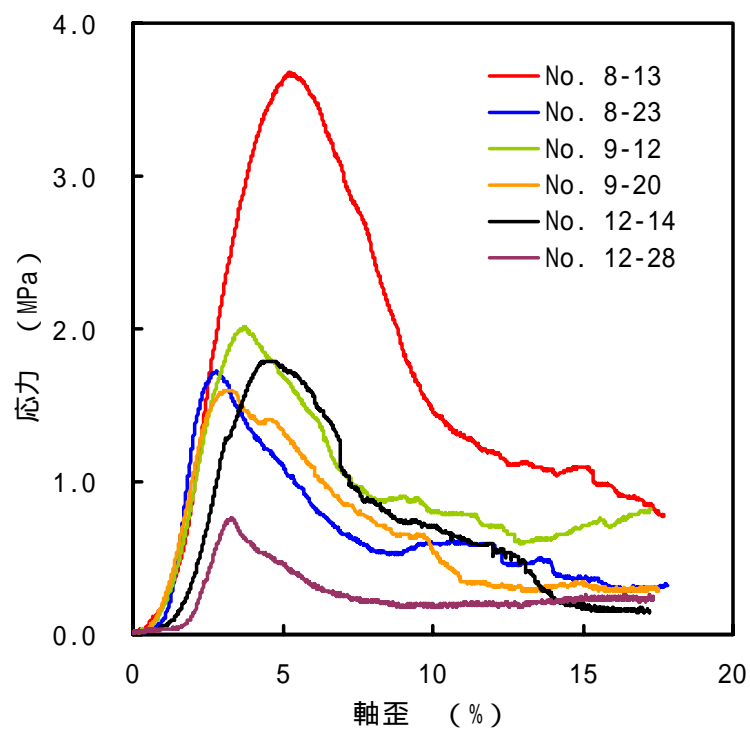


(a) 保持時間 10 秒間



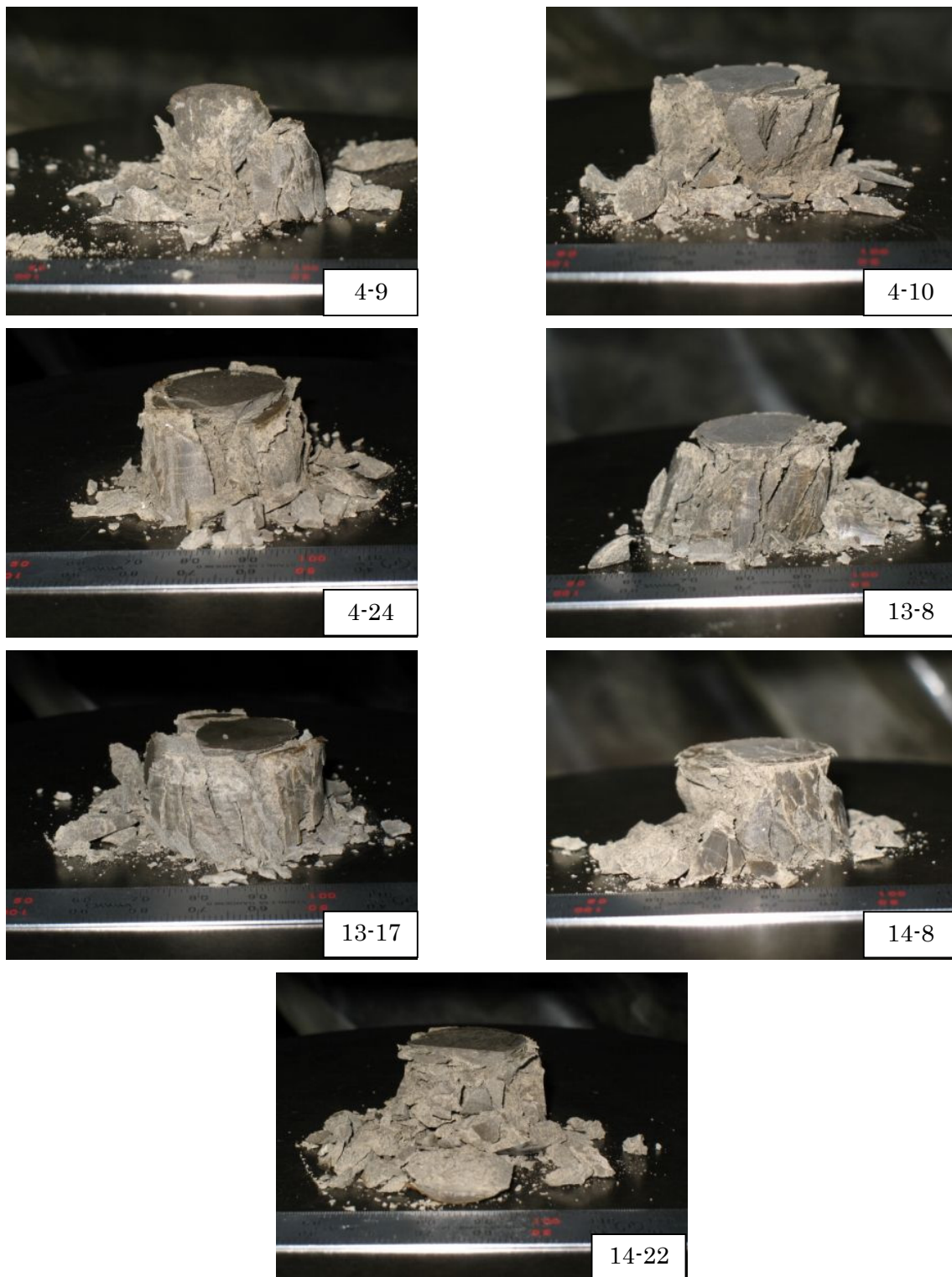
(b) 保持時間 4 時間

図 2-19 取り出し後の一軸圧縮試験時の応力 - 軸歪曲線
(深度 1000 m 付近) (1/2)



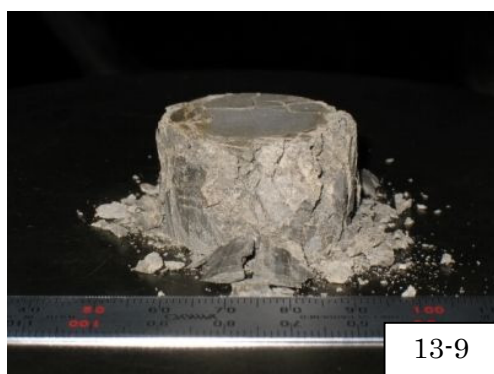
(c) 保持時間 24 時間

図 2-19 取り出し後の一軸圧縮試験時の応力 - 軸歪曲線
(深度 1000 m 付近) (2/2)



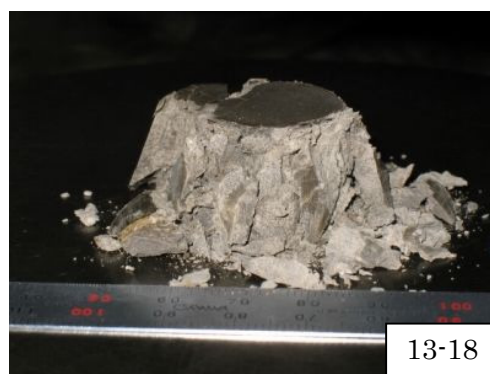
(a) 保持時間 10 秒間

図 2-20 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の試験片の写真(深度 500 m 付近)(1/3)



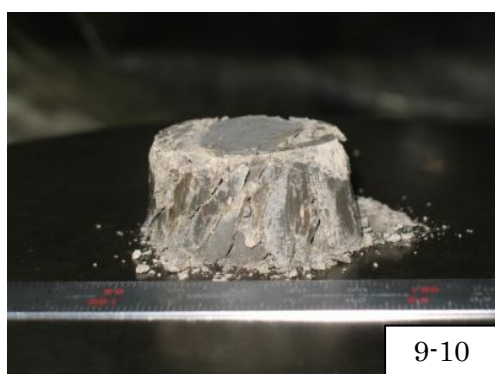
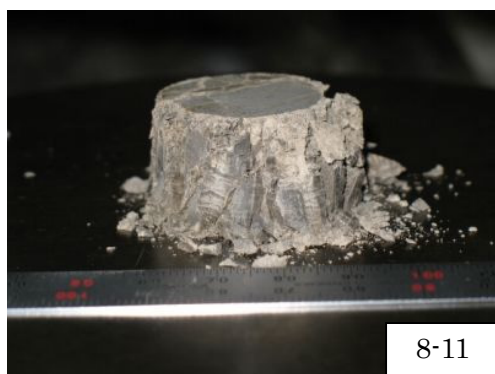
(b) 保持時間 4 時間

図 2-20 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の試験片の写真(深度 500 m 付近)(2/3)



(c) 保持時間 24 時間

図 2-20 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の試験片の写真（深度 500 m 付近）(3/3)



(a) 保持時間 10 秒間

図 2-21 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の試験片の写真（深度 1000 m 付近）(1/3)



(b) 保持時間 4 時間

図 2-21 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の試験片の写真（深度 1000 m 付近）(2/3)



(c) 保持時間 24 時間

図 2-21 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の試験片の写真 (深度 1000 m 付近) (3/3)

図 2-22 と図 2-23 に保持時間と一軸圧縮強度の関係を示した。図 2-22(a)は横軸の保持時間を普通軸とした場合であるが、いずれの採取深度でも、保持時間の増加に従い一軸圧縮強度は上に凸の曲線を描きながら増加する傾向が見られる。図 2-22(b)は横軸の保持時間を対数軸とした場合であるが、図 2-22(a)と異なり、一軸圧縮強度は下に凸の曲線を描きながら増加する傾向が見られる。

昨年度の研究³⁾HDB-10 深度 500 m 付近および HDB-11 深度 700 m 付近と同様に、保持時間 t (s)の一軸圧縮強度を σ_t とし、以下のような実験式で近似してみる。

$$\sigma_t = \sigma_0 (1 + at^b) \quad \text{式 (2-1)}$$

試験結果はかなりばらついているが、式(2-1)を用いて回帰すると、各係数は、深度 500 m 付近の結果では $\sigma_0 = 1.2$ MPa, $a = 0.022$, $b = 0.35$, 深度 1000 m 付近の結果では $\sigma_0 = 1.6$ MPa, $a = 0.005$, $b = 0.35$ と同定された。

$$\text{HDB-11 深度 500 m 付近 : } \sigma_t = 1.2 (1 + 0.022 t^{0.35}) \quad \text{式 (2-2)}$$

$$\text{HDB-11 深度 1000 m 付近 : } \sigma_t = 1.6 (1 + 0.005 t^{0.35}) \quad \text{式 (2-3)}$$

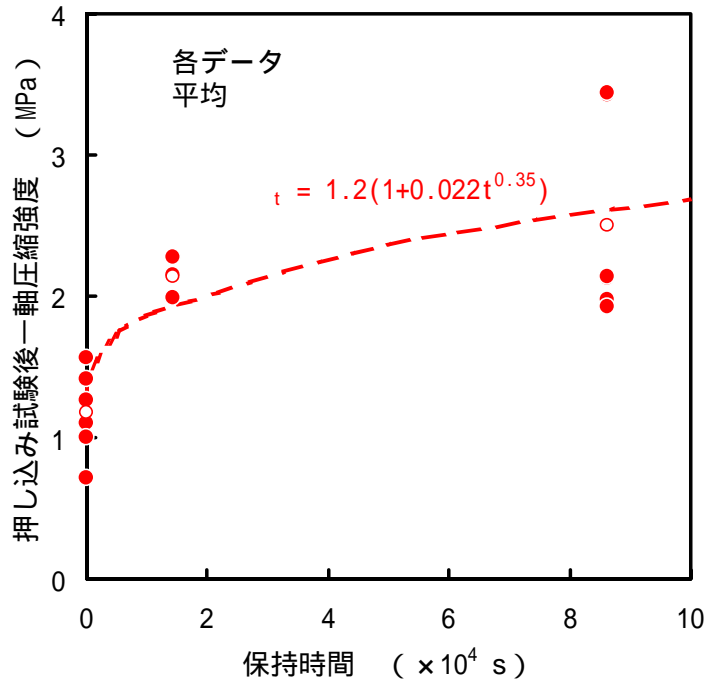
式(2-2)と式(2-3)による曲線を図 2-22 と図 2-23 に破線で示した。この式より、保持時間を長くすることによって、強度回復が期待できる可能性があると考えられる。

図 2-24 には、図 2-22 と図 2-23 さらに HDB-10 深度 500 m 付近と昨年度の研究³⁾HDB-11 深度 700 m 付近の結果の近似式による計算結果を重ねた。なお、HDB-10 深度 500 m 付近と HDB-11 深度 700 m 付近の試料を用いた試験結果から次に示す近似式が得られている。

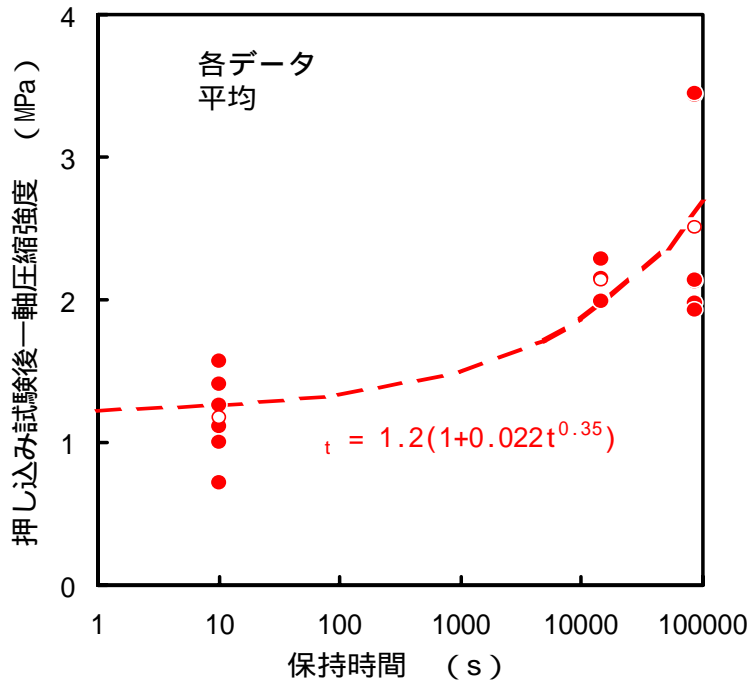
$$\text{HDB-10 深度 500 m 付近 : } \sigma_t = 2.5 (1 + 0.017 t^{0.35}) \quad \text{式 (2-4)}$$

$$\text{HDB-11 深度 700 m 付近 : } \sigma_t = 1.3 (1 + 0.011 t^{0.35}) \quad \text{式 (2-5)}$$

図 2-24 より、本年度実施した HDB-11 の深度 500 m 付近と深度 1000 m 付近の結果は、HDB-11 の深度 700 m 付近の結果と良く一致していることがわかる。一方、HDB-10 の深度 500 m 付近の試料は、本年度や HDB-11 の深度 700 m 付近の試料に比べて強度が大きい。しかしながら、式(2-1)の時間のべき数は同じ 0.35 で表されることがわかった。このことから強度回復特性に関しては、深さの違いによる差異は無いが、場所の違いによる差異があることがわかった。また、式(2-1)の時間のべき数は同じ 0.35 で表されることがから、強度回復特性の時間依存性に関しては、深さの違い、場所の違いによる差異は無いことがわかった。

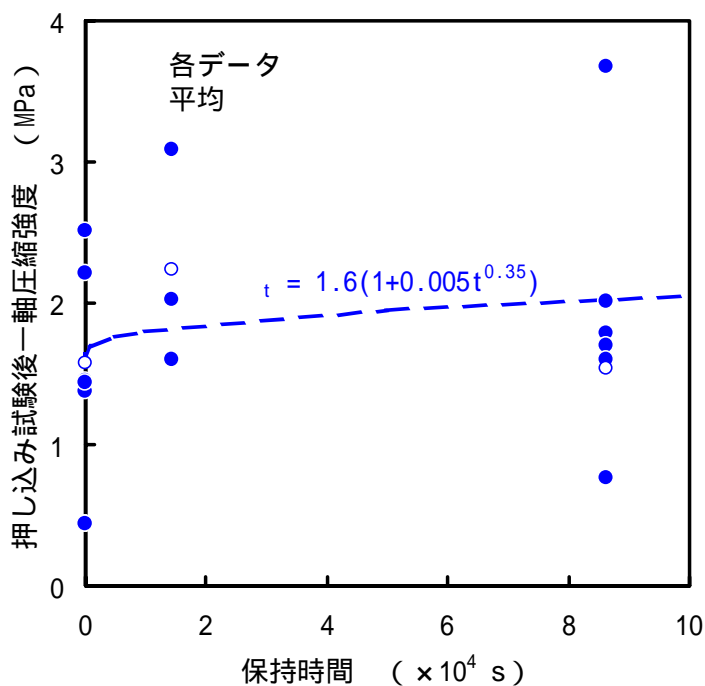


(a) 保持時間を普通軸で表示した場合

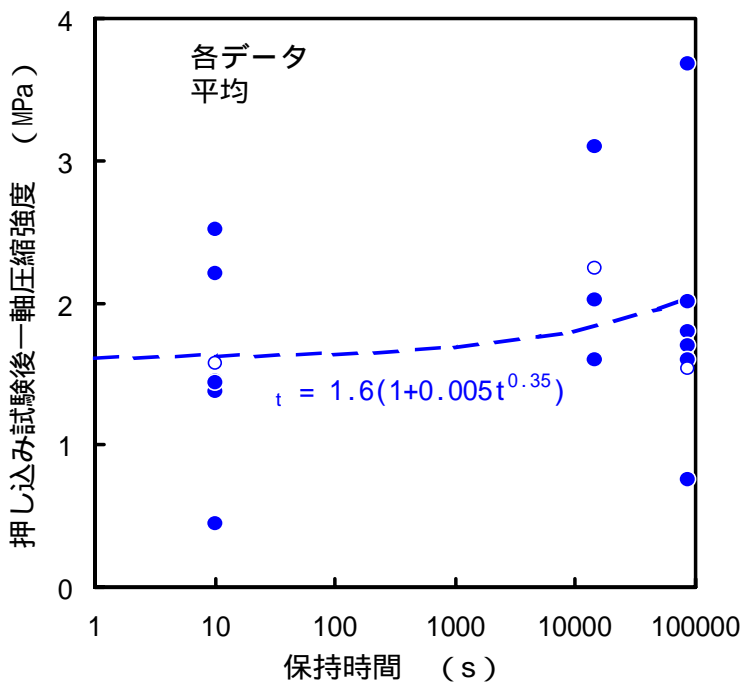


(b) 保持時間を対数軸で表示した場合

図 2-22 保持時間による取り出し後の一軸圧縮強度の変化
(HDB-11 深度 500 m 付近)

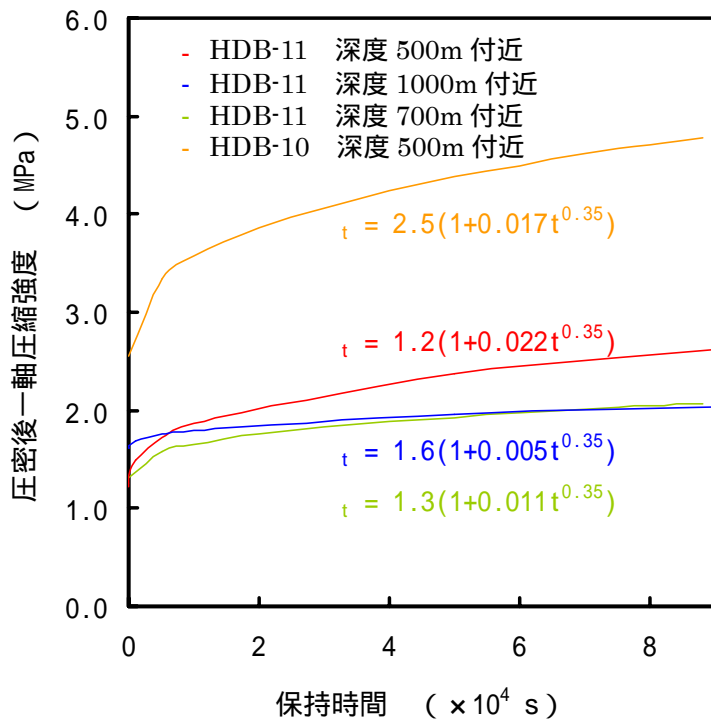


(a) 保持時間を普通軸で表示した場合

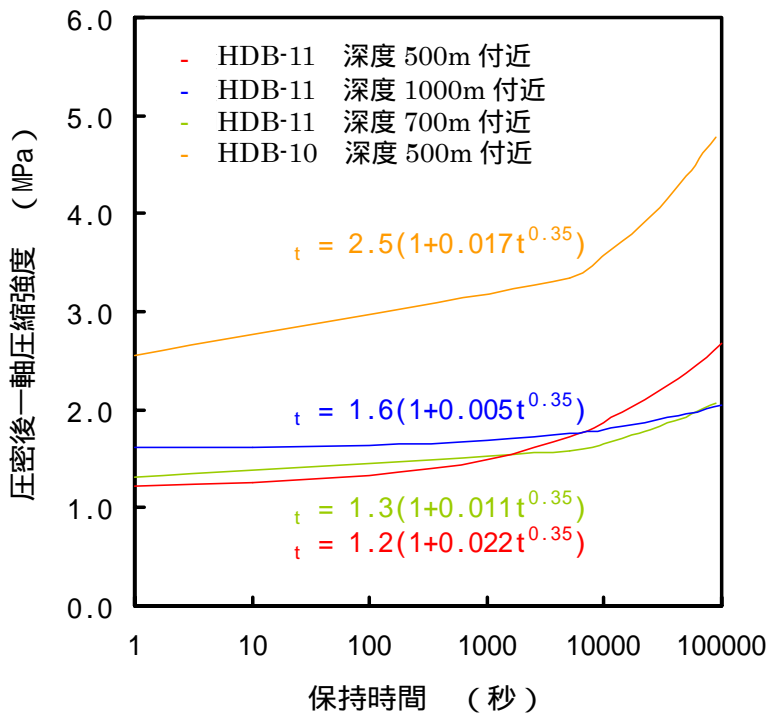


(b) 保持時間を対数軸で表示した場合

図 2-23 保持時間による取り出し後の一軸圧縮強度の変化
(HDB-11 深度 1000 m 付近)



(a) 保持時間を普通軸で表示した場合



(b) 保持時間を対数軸で表示した場合

図 2-24 保持時間による取り出し後の一軸圧縮強度の変化

図 2-25 に押し込み試験におけるクリープ歪と一軸圧縮強度の関係を示した。図 2-25(a)は深度 500 m 付近，図 2-25(b)は深度 1000 m 付近の結果である。いずれの結果ともかなりのばらつきが見られるが，HDB-10 深度 500 m 付近と HDB-11 深度 700 m 付近と同じように，最小二乗法により直線で近似してみると次式となり，図中の実線で表される。

$$\text{HDB-11 深度 500 m 付近} : \quad \sigma_t = 1.0 + 1.50 \quad \epsilon_c \quad \text{式 (2-6)}$$

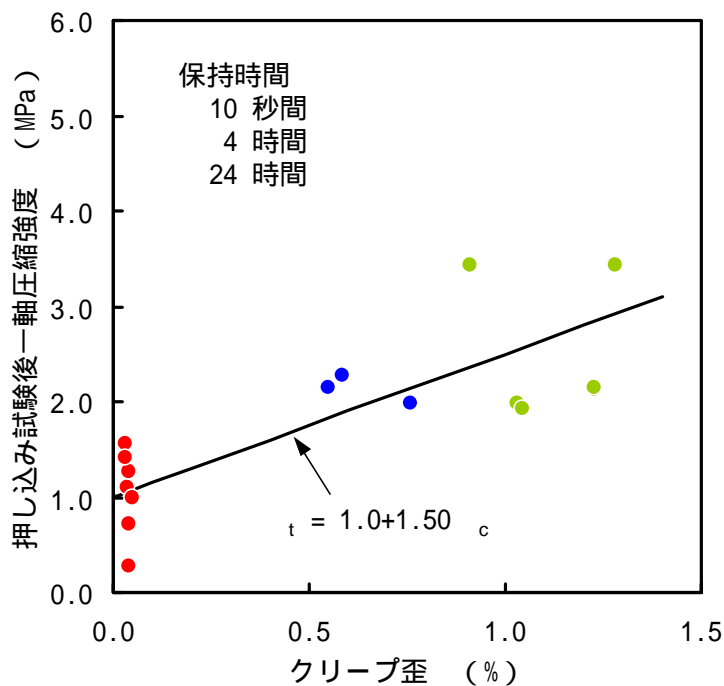
$$\text{HDB-11 深度 1000 m 付近} : \quad \sigma_t = 1.5 + 1.00 \quad \epsilon_c \quad \text{式 (2-7)}$$

なお， σ_t (MPa)は一軸圧縮強度， ϵ_c (%)はクリープ歪である。図 2-26 には，図 2-25(a)と図 2-25(b)さらに HDB-10 深度 500 m 付近と HDB-11 深度 700 m 付近の結果の近似式による計算結果を重ねた。なお，HDB-10 深度 500 m 付近と HDB-11 深度 700 m 付近の試験結果からそれぞれの試料では次式が成り立つことがわかっている。

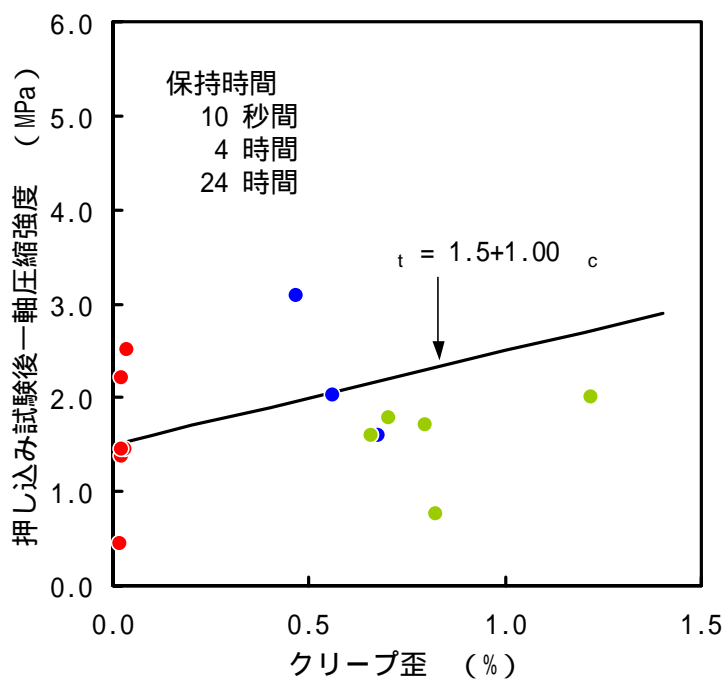
$$\text{HDB-10 深度 500 m 付近} : \quad \sigma_t = 2.4 + 1.85 \quad \epsilon_c \quad \text{式 (2-8)}$$

$$\text{HDB-11 深度 700 m 付近} : \quad \sigma_t = 1.3 + 0.75 \quad \epsilon_c \quad \text{式 (2-9)}$$

図 2-26 からわかるように，クリープ歪と一軸圧縮強度の関係に関しても，本年度実施した HDB-11 の深度 500 m 付近と深度 1000 m 付近の結果は，HDB-11 の深度 700 m 付近の結果と良く一致している。また，HDB-10 の深度 500 m 付近の試料は，本年度や HDB-11 の深度 700 m 付近の試料に比べて，クリープ歪の増加に対する一軸圧縮強度の増加割合が大きいことがわかる。これにより，クリープ歪に関しては，深さの違いによる差異は無いが，場所の違いによる差異はあることがわかった。



(a) 深度 500 m 付近



(b) 深度 1000 m 付近

図 2-25 クリープ歪と一軸圧縮強度の関係 (HDB-11)

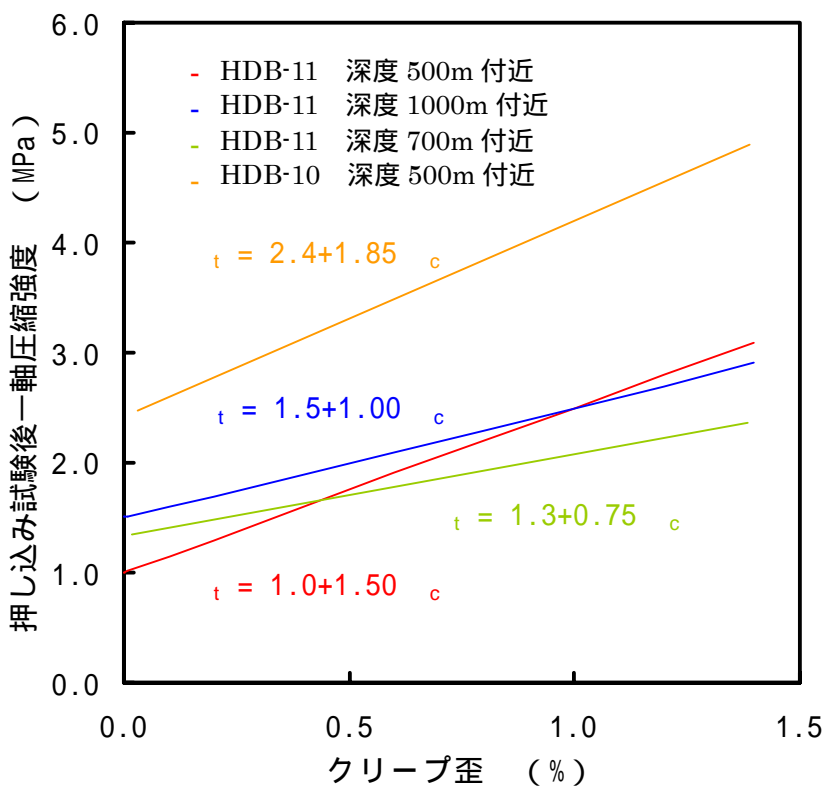


図 2-26 クリープ歪と一軸圧縮強度の関係

2.5.3 取り出し後の弾性波速度測定

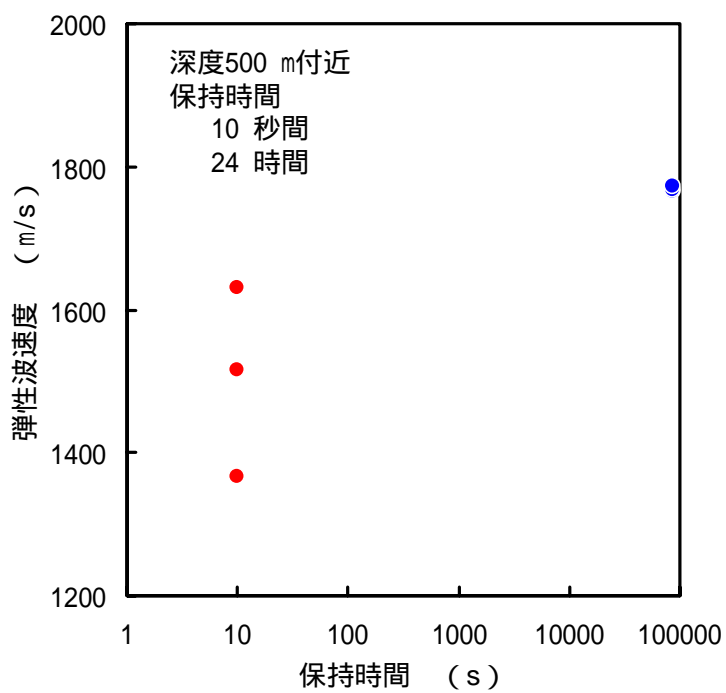
保持時間 10 秒間と 24 時間の押し込み試験後，一軸圧縮試験を行う前に，深度 500 m 付近と深度 1000 m 付近のそれぞれ 3 本の試験片を用いて，弾性波速度測定を行った。

表 2-5, 表 2-6 に試験結果を示す。試験を行う前の健全な試験片の弾性波速度は，深度 500 m 付近と深度 1000 m 付近ともに 2400 m/s 程度であった。表 2-7 にその測定結果を示す。図 2-10 や図 2-11 に示したように，押し込み試験では，一軸圧縮強度に達した後，応力は低下し，軸歪が 3 % 付近で応力は最低値をとる。この時点での試験片の弾性波速度は，試験前の値に比べてかなり小さくなっていることが予想される。しかし，この時点での弾性波速度は測定していないため，保持時間 10 秒間の押し込み試験時の値と保持時間 24 時間の値を比較する。表 2-5, 2-6 からわかる様に，弾性波速度は，深度 500m 付近では平均値 1505m/s が 1769m/s と 18%，深度 1000m 付近では平均値 1534m/s が 1768m/s と 15% 回復していることが分かる。表 2-7 に示す試験前の健全な試験片の弾性波速度と比較すると深度 500m 付近保持時間 10 秒間では 2437 m/s が 1505m/s と 62%，保持時間 24 時間では 1769m/s の 73% で，深度 1000m 付近保持時間 10 秒間では 2417 m/s が 1534 m/s と 63% , 保持時間 24 時間では 1768 m/s の 73% であった。

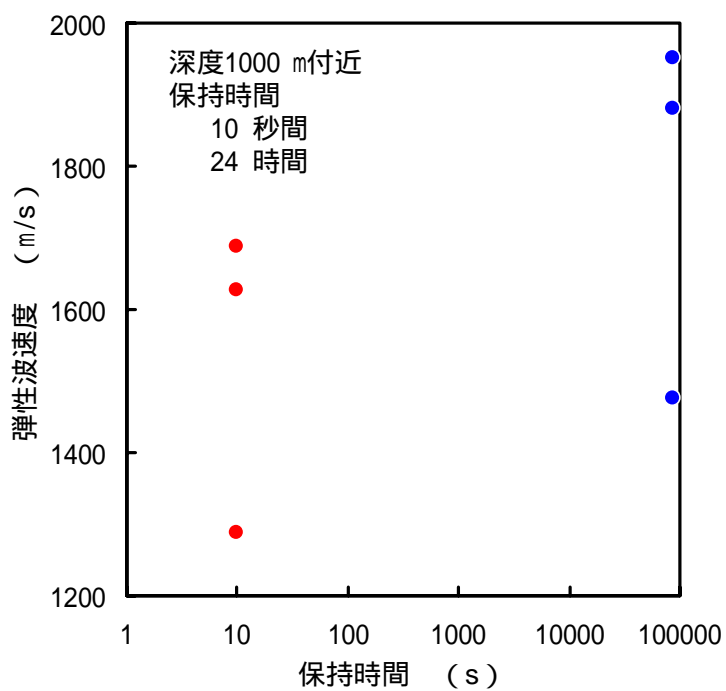
図 2-27 には保持時間と弾性波速度の関係を示した。図 2-27(a) は深度 500 m 付近での結果であり，保持時間 24 時間の 3 本の結果はほぼ一致している。試験結果は少ないものの，保持時間 10 秒間に比べると保持時間 24 時間の方が弾性波速度が大きいことがわかる。図 2-27(b) は深度 1000 m 付近での結果であるが，試験結果が少なくばらつきが比較的大きいものの，保持時間が長い方が弾性波速度が大きくなっている様子が認められる。この傾向は，強度回復特性と同様であるが，強度回復特性が健全な試料と比較すると 5~13% 程度の低いレベルの回復なのに対して，弾性波速度の方は 62~73% 程度の高いレベルの回復を示している。

表 2-7 健全な試験片の弾性波速度測定結果

試験片番号	深度 (m)	高さ (mm)	重量 (g)	比重	測定 (μ s)	弾性波速度 (m/s)	備考
3-1	494.7~494.85	50.01	44.384	1.80	22.0	2451	引張試験のみに使用
4-1	518.5~518.9	50.01	46.466	1.89	21.5	2513	
4-14		50.01	46.731	1.90	22.0	2451	
13-1	527.65~527.8	50.01	46.887	1.91	22.5	2393	
14-1	543~543.15	50.00	47.142	1.92	22.5	2392	
8-1	975~975.2	50.03	50.083	2.03	22.0	2452	
8-2		50.01	50.268	2.04	22.0	2451	
9-1	975.3~975.5	50.03	49.900	2.03	22.0	2452	
12-1	983~983.4	50.01	46.962	1.91	23.0	2337	
12-19		50.01	46.962	1.91	22.5	2393	
浅い試験片平均		50.01	46.322	1.88	22.10	2440	全体平均値
		50.01	46.807	1.91	22.13	2437	3-1を除いた平均値
深い試験片平均		50.02	48.835	1.98	22.30	2417	
全体平均		50.01	47.579	1.93	22.20	2429	



(a) 深度 500 m 付近



(b) 深度 1000 m 付近

図 2-27 保持時間による弾性波速度の変化 (HDB-11)

2.6 まとめおよび今後の課題

本章では、幌延深地層研究計画におけるボーリング調査で採取した HDB-10 深度 500 m 付近および HDB-11 深度 700 m 付近の試料の調査に引続き、HDB-11 深度 500 m 付近および HDB-11 深度 1000 m 付近の試料を用いて、岩石の「強度回復特性」に関する試験を行った。押し込み試験では最大荷重を 39.2 kN とし、一定時間（10 秒間、4 時間、24 時間の 3 通り）押し込み荷重を保持し続けた（クリープ）。強度回復の評価にあたって、押し込み試験後の試験片の一軸圧縮強度をもって強度回復の主たる指標とした。また、いくつかの試験片では押し込み試験後に弾性波速度を測定した。

HDB-10 深度 500 m 付近、HDB-11 深度 700 m 付近、HDB-11 深度 500 m 付近、HDB-11 深度 1000 m 付近の結果より、保持時間と一軸圧縮強度の関係は概ね次式で表されることがわかった。

$$\text{HDB-10 深度 500 m 付近} : t = 2.5 (1 + 0.017 t^{0.35}) \quad \text{式 (2-4)}$$

$$\text{HDB-11 深度 500 m 付近} : t = 1.3 (1 + 0.022 t^{0.35}) \quad \text{式 (2-2)}$$

$$\text{HDB-11 深度 700 m 付近} : t = 1.3 (1 + 0.011 t^{0.35}) \quad \text{式 (2-5)}$$

$$\text{HDB-11 深度 1000 m 付近} : t = 1.6 (1 + 0.005 t^{0.35}) \quad \text{式 (2-3)}$$

なお、健全な試験片から得られた一軸圧縮強度は表 2-8 に示す通りである。

本年度用いた試料 HDB-11 深度 500 m 付近と 1000 m 付近の一軸圧縮強度は、HDB-11 深度 700 m 付近の試料と比較的近い値であった。

また、式(2-2)、式(2-3)、式(2-5)からわかるように強度回復の程度もほぼ同じであった。すなわち、HDB-11 孔では採取深度の影響は比較的小さい結果となった。一方、HDB-10 深度 500 m 付近の試料は一軸圧縮強度は小さいものの、強度回復の程度は HDB-11 の試料よりも大きい結果となった。すなわち、採取場所によって若干異なる結果が得られた。ただし、いずれの試料でも時間のべき数は 0.35 であり、このパラメータに関しては採取深度や採取場所の影響はあまり現れなかった。

本年度用いた試料の一軸圧縮強度は、HDB-11 深度 700 m 付近の試料と比較的近い値であった。

クリープ歪と一軸圧縮強度の関係を検討した結果、押し込み試験でのクリープ歪が増加するに従い、次式のように押し込み試験後の一軸圧縮強度の増加が現れた。

$$\text{HDB-10 深度 500 m 付近} : t = 2.4 + 1.85 c \quad \text{式 (2-8)}$$

$$\text{HDB-11 深度 500 m 付近} : t = 1.0 + 1.50 c \quad \text{式 (2-6)}$$

$$\text{HDB-11 深度 700 m 付近} : t = 1.3 + 0.75 c \quad \text{式 (2-9)}$$

$$\text{HDB-11 深度 1000 m 付近} : t = 1.5 + 1.00 c \quad \text{式 (2-7)}$$

表 2-8 健全な試験片の一軸圧縮強度

ボーリング番号	試験片番号	深度 (m)	直径 (mm)	高さ (mm)	重量 (g)	0.00	強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	備考
HDB-10	1-7	474.5~475.0					12.0		
	1-8					8.6			
	1-10					12.0			
	1-11					11.9			
	1-12					9.9			
	1-13					8.3			
	1-14					10.2			
	1-15					6.9			
HDB-11	3-1	494.7~494.85	25.03	50.01	44.384	1.80	49.3	3.7	引張試験でのみ使用
	4-1	518.5~518.9	25.03	50.01	46.466	1.89	28.3	2.8	
	4-14		25.03	50.01	46.731	1.90	26.1	2.3	
	13-1	527.65~527.8	25.03	50.01	46.887	1.91	14.3	1.8	
	14-1	543~543.15	25.02	50.00	47.142	1.92	10.1	2.0	クラック有←このクラックと別の所から破壊
	1-1	727.25~727.85	24.88	50.01	46.083	1.90	15.0	1.9	破壊時, 破壊音有, 大きなクラックが入る
	1-2		24.88	50.01	46.063	1.90	16.1	2.1	破壊時, 破壊音有, 大きなクラックが入る
	1-5		24.89	50.02	46.179	1.90	11.6	1.6	
	1-6		24.88	50.02	44.665	1.83	25.8	3.4	
	1-7		24.89	50.01	46.073	1.90	12.6	1.6	
	8-1	0	25.04	50.03	50.083	2.03	12.0	1.9	
	8-2		25.05	50.01	50.268	2.04	15.5	1.9	
	9-1	975.3~975.5	25.05	50.03	49.900	2.03	13.1	1.9	変色部有
	12-1	983.2~983.4	25.03	50.02	46.669	1.90	33.5	2.8	
	12-19		25.03	50.01	46.962	1.91	25.5	2.6	変色部有
HDB-10, 500m付近							10.0		
HDB-11, 500m付近			25.03	50.01	46.322	1.88	25.6	2.5	全体平均値
HDB-11, 700m付近			25.03	50.01	46.807	1.91	19.7	2.2	3-1を除いた平均値
HDB-11, 1000m付近			24.88	50.01	45.813	1.89	16.2	2.1	
HDB-11, 1000m付近			25.04	50.02	48.776	1.98	19.9	2.2	
全体平均			24.98	50.01	46.970	1.92	16.9	2.3	

この結果からも, HDB-11 深度 500 m 付近, HDB-11 深度 1000 m 付近の試料は HDB-11 深度 700 m 付近の試料と同じような傾向を示し, HDB-10 深度 500 m 付近の試料に比べて強度回復の程度が小さいことがわかった。

保持時間と弾性波速度の関係を検討した結果, 試験数は少なかったものの, 保持時間が長いほど弾性波速度が大きくなる傾向が認められた。すなわち, 一軸圧縮強度だけではなく, 弾性波速度も強度回復の重要な指標となる可能性があることがわかった。弾性波速度測定は, 測定対象を破壊することのない非破壊測定であるため, 同一箇所を複数回測定できる利点を有しており, その方法も簡便なため原位置試験において有効なツールの一つになりうると考える。

本年度は強度回復特性に関するデータを蓄積し, 昨年度³⁾のデータと比較検討した。採取場所や採取深度の影響に関してある程度の知見は得られたが, 稚内層硬質頁岩は試験片ごとの物性値のばらつきが大きく, 詳細な検討を行うことは難しかった。今後も, 一軸圧縮強度や弾性波速度と強度回復の関係に関するデータ蓄積の必要性を感じる。

3. 岩石の一般化応力緩和挙動に関する検討

3.1 はじめに

岩石の時間依存性挙動を調べるため、古くからクリープ試験や応力緩和試験などが行われてきている。両者は貴重な試験であり、トンネル、地下構造物、鉱山などの現場でも、両者に似た荷重条件に置かれた場所を発見できる。しかしながら、実際の荷重条件はより複雑であり、荷重と変位が共に変化していると考えられる。例えば図3-1のように、天盤を介して一定の荷重を受けている鉱柱に、弾性挙動を示す支保を打設した時を考えてみる。鉱柱に荷重が作用しているので、鉱柱は時間の経過とともに変形していく。鉱柱の変形にともない、支保には弾性変形が生じて支保荷重が増加する一方で、鉱柱の受け持つ荷重は減少していく。すなわち、時間の経過に伴い鉱柱の変位は増加していくが荷重は減少する。このときの鉱柱の受ける応力履歴は、荷重一定のクリープと変位一定の応力緩和のいわば中間といえる。福井ら⁵⁾は、この例のような一般化した荷重条件での挙動を一般化応力緩和と名付けて、理論的また実験的に議論した。

本章では、幌延地下研究施設における原位置試験予定深度付近に堆積している稚内層硬質頁岩のボーリングコアを用いて、一般化応力緩和挙動に関する室内試験を行った。

昨年度³⁾は、HDB-10孔の深度500m付近から採取した試料を用いて一般化応力緩和挙動に関する試験を行い、他の岩石（三城目安山岩と河津凝灰岩）⁴⁾との比較を行った。また、HDB-11孔の深度700m付近から採取した試料を用いて試験を行い、データを蓄積した。本年度は、HDB-11孔の深度500m付近と1000m付近の試料を用いて試験を行った。稚内層硬質頁岩の一般化応力緩和挙動に関するデータを蓄積するとともに、採取場所や採取深度の異なる試料の結果と比較検討した。さらに、一般化応力緩和挙動を表現できる予測モデルについて検討を行った。

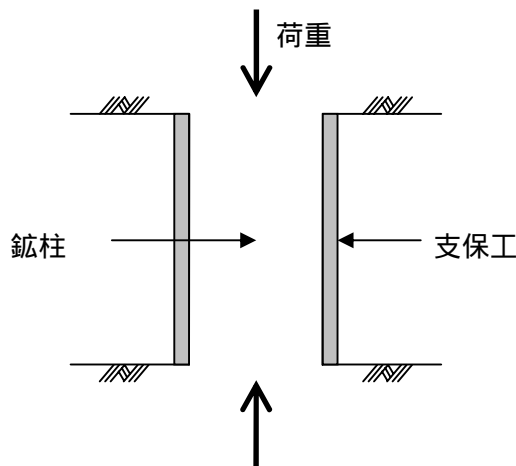


図3-1 鉱柱に支保工を打設した場合

3.2 試料岩石と試験方法

昨年度³⁾は、試験装置として容量 100 kN のサーボ試験機を用いたが、試験途中に振動が生じ、試験片が破壊してしまうことがあった。そこで本年度は、図 3-2 に示す容量 30 kN のサーボ試験機（通称 1ton サーボ試験機）を用いることにした。試験には、2 章で示した HDB-11 孔の深度 500 m 付近から採取したボーリングコア No.4, 13, 14 と、深度 1000 m 付近から採取したボーリングコア No.9, 12 を用いた。試験片は直径 25 mm, 長さ 50 mm の円柱形に整形し、平面研削盤により両端面は平行度 ±0.01 mm 以内に仕上げた。整形後は水中で保存し、湿潤状態のまま試験に供した。事前に行った一軸圧縮強度試験（表 2-8 参照）によると、深度 500 m 付近の試料の一軸圧縮強度およびヤング率の平均値は、それぞれ 25.6 MPa と 2.5 GPa であった。また、深度 1000 m 付近の試料では、それぞれ 19.9 MPa と 2.2 MPa であった。

よく知られているように、クリープ試験では応力 σ が一定 (= C) に保たれる。

$$\sigma = C$$

他方、応力緩和試験では、歪 ϵ が一定に保たれる。

$$\epsilon = C$$

一般化応力緩和試験は、応力と歪を線形に組み合わせた値 ($\sigma - \epsilon$) を一定に保ち、応力および歪の経時変化を調べる試験である。ただし、 C は定数である。

$$\sigma - \epsilon = C \tag{3-1}$$

図 3-3 に示すように、O 点から荷重を開始して A 点から一般化応力緩和試験を行ったとする。この場合、A 点の応力と歪をそれぞれ σ_A と ϵ_A とすれば $C = \sigma_A - \epsilon_A$ となる。試料岩石は粘弾性体とみなせるので、応力 - 歪線図上の位置は、時間の経過にともなって A 点から B 点へと移動していく。式(3-1)からすぐにわかるように、A 点を起点とした応力と歪の変化量 $\Delta\sigma$ と $\Delta\epsilon$ の間には次式が成り立つ。

$$\Delta\sigma - \Delta\epsilon = 0 \tag{3-2}$$

$$\Delta\sigma = \Delta\epsilon \tag{3-3}$$

なお、図からわかるように、 $\tan \theta$ は直線 AB の傾きである。

式(3-1)を図 3-3 の A 点における接線ヤング率 E で割って無次元化すると次式となる。

$$\frac{\Delta\sigma}{E} = \frac{\Delta\epsilon}{E} + C^* \tag{3-4}$$

ただし, $\alpha = \sigma/E$, $\beta = \delta/E$, $C = C/E$ である。ここで, α を緩和方向係数と呼ぶことにする。 $0 < \alpha < 1$ は図 3-4 の Case 1 に対応し, 応力と歪の両者とも増加する場合に相当する。 $\alpha = 1$ は応力 - 歪曲線に沿って移動し, $\alpha = 0$ は通常のクリープとなる。 $\alpha < 0$ は Case 2 に対応し, 応力は増加するが歪は減少する場合に相当する。 α が -1 に近づくに従って通常の応力緩和に近付いていく。 $\alpha > 1$ は Case 3 に対応し, 応力と歪の両者とも減少する場合に相当する。

試験では, 岩石試験片をまず図 3-3 の O 点より A 点まで一定の歪速度 (10^{-4} /s) で載荷した。その後, A 点より式(3-4)の関係を保つように荷重と変位を制御し, 荷重と変位の経時変化を計測した。

一般化応力緩和試験を開始する A 点の応力は 12 MPa としたが, 一軸圧縮強度が小さかった No.14 のコアから作製した試験片では 6 MPa とした。緩和方向係数は昨年度³⁾と同様に, -2.0, -0.7, 0 (クリープ) の 4 通りとした。

稚内層硬質頁岩は試験片ごとの物性値のばらつきが大きいため, 一般化応力緩和試験終了後, 歪速度 10^{-4} /s で一軸圧縮強度試験を行った。

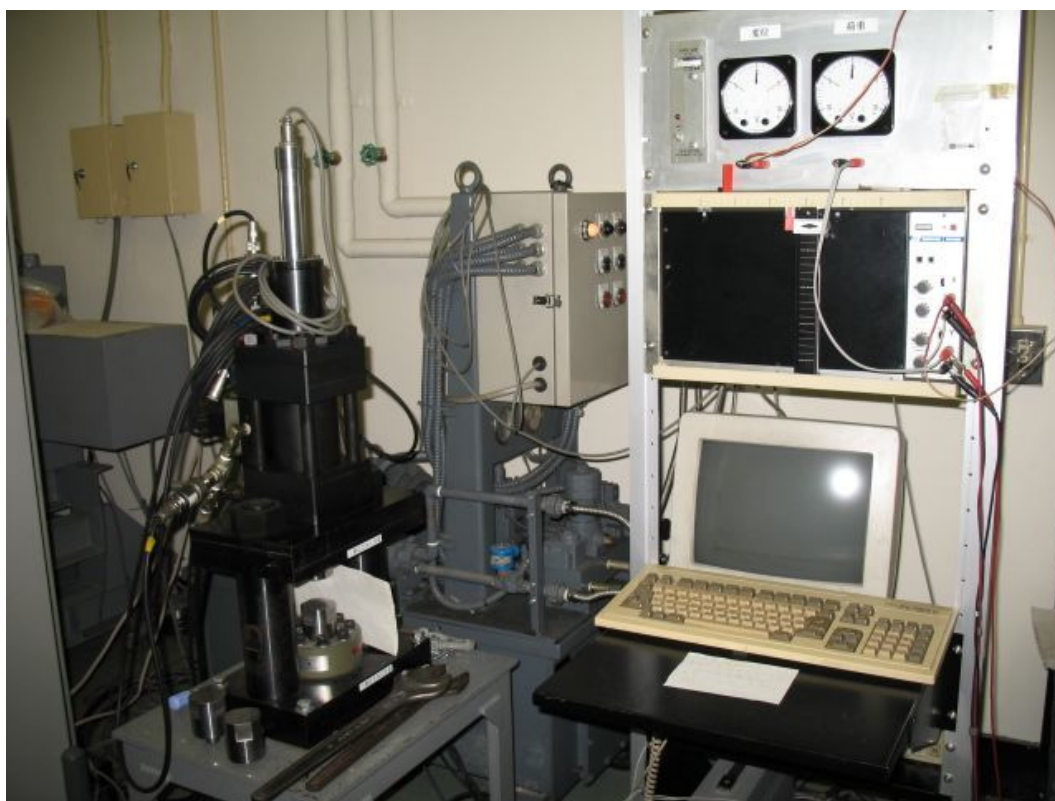


図 3-2 試験に用いたサーボ試験機の写真

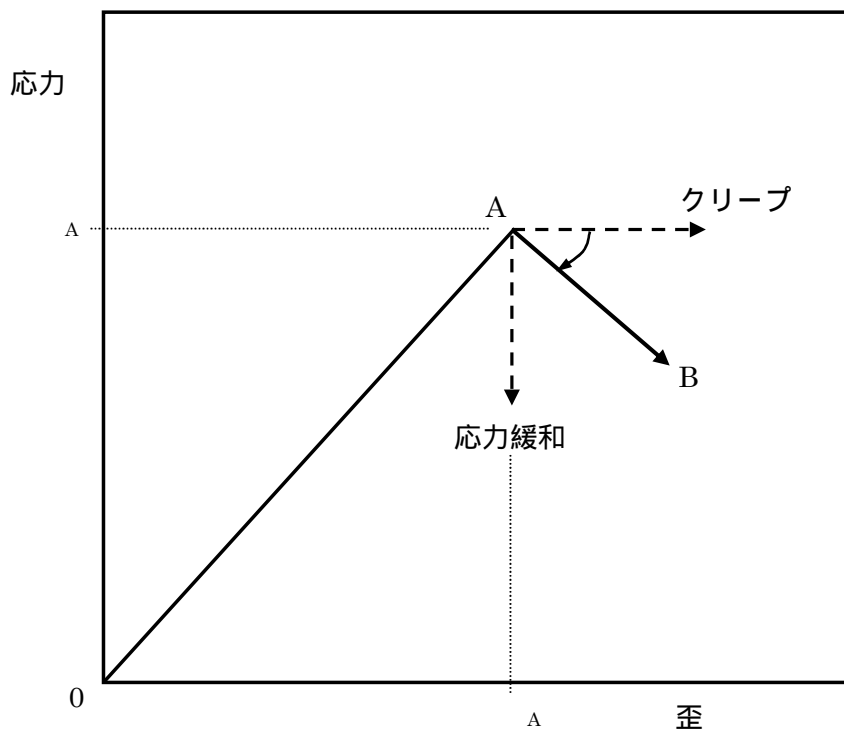


図 3-3 一般化応力緩和試験の概念図

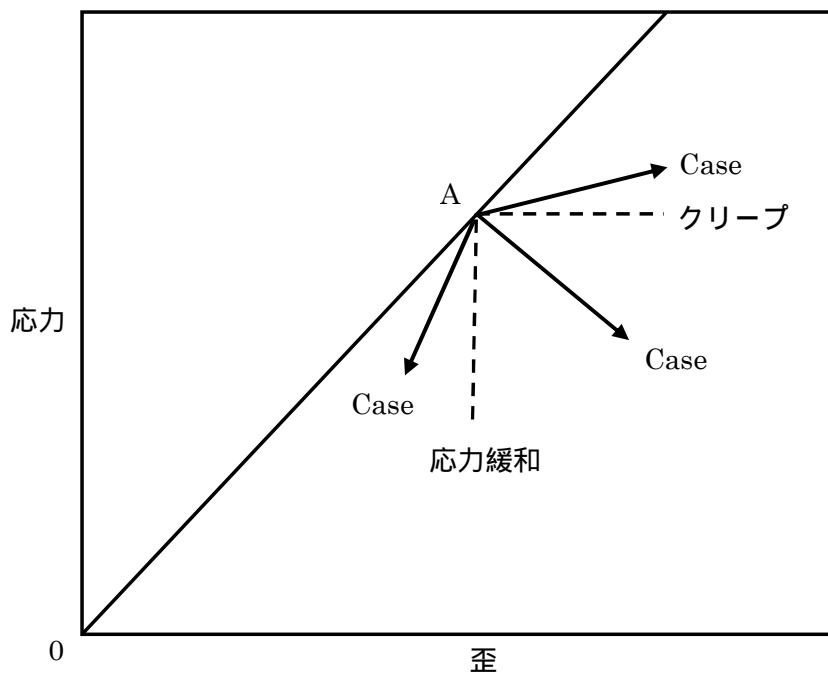
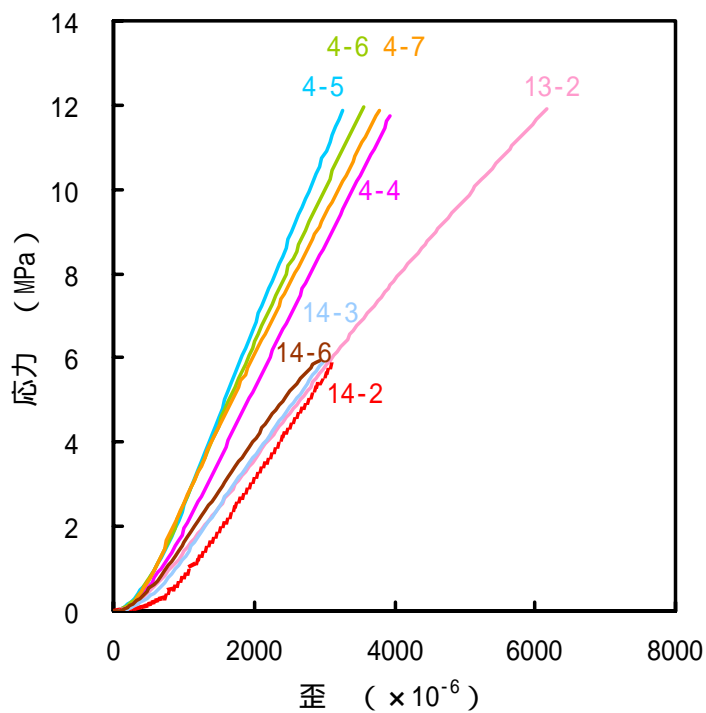


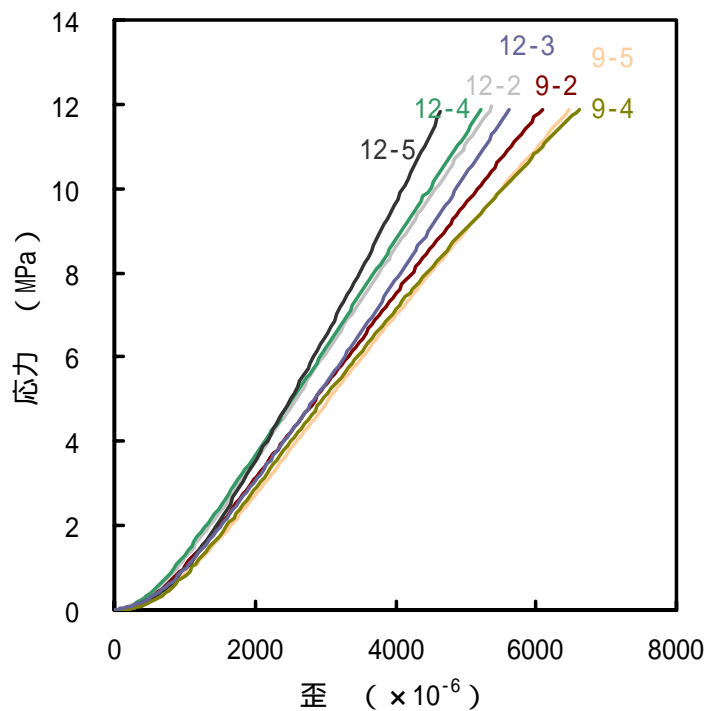
図 3-4 一般化応力緩和試験の分類

3.3 試験結果および考察

一般化応力緩和試験直前までの応力 - 歪曲線を図 3-5 に示す。(a)は深度 500 m 付近の 8 本の結果, (b)は深度 1000 m 付近の 7 本の結果である。深度 500 m 付近の試料では, No.4 のコアから作製した試験片のヤング率が大きく, No.13 や No.14 の 2 倍程度である。深度 1000 m 付近の試料では, No.12 のコアから作製した試験片のヤング率が No.9 よりも若干大きい。ヤング率に関してはコア間で若干の差が見られたが, 一般化応力緩和挙動に関しては大きな差異はなかったので, 以下では深度 500 m 付近と深度 1000 m 付近の結果を, それぞれまとめて示す。



(a) 深度 500 m 付近



(b) 深度 1000 m 付近

図 3-5 一般化応力緩和試験直前までの応力 - 歪曲線

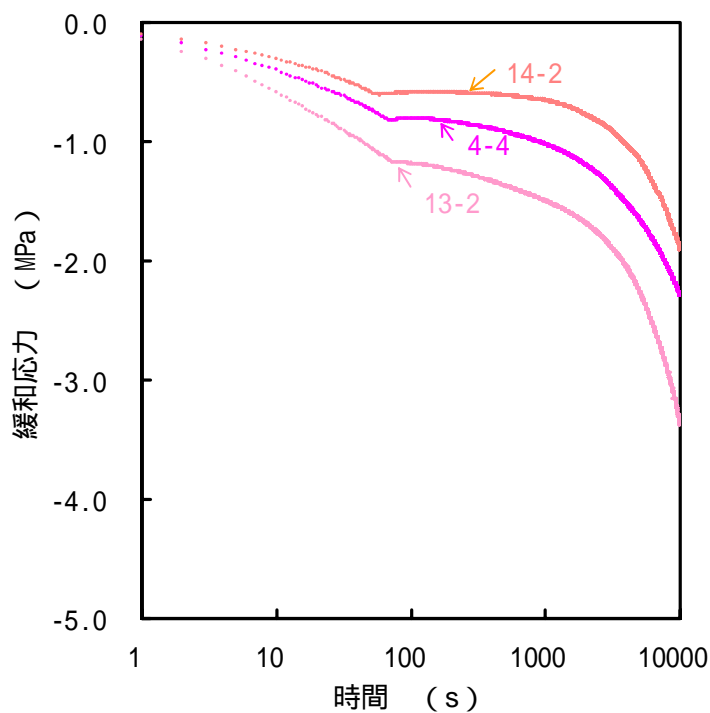
深度 500 m 付近の試料で得られた、一般化応力緩和試験での緩和応力と歪の経時変化を図 3-6～図 3-8 に示す。図 3-6 は $n = -$ (応力緩和) であり歪を一定に保つ試験であるが、歪に若干の変化が見られる。試験開始後の約 10^2 秒間は、応力はほぼ経過時間の対数に比例して低下している。その後グラフは屈曲し、上に凸の曲線を描きながら応力が低下していく。図 3-7 は $n = 0$ (クリープ) で応力を一定とした結果である。歪は試験開始後の約 10^2 秒間は経過時間の対数にほぼ比例して増加し、その後グラフは屈曲している。図 3-8 は $n = -2.0$ と -0.7 の結果であり、括弧内に緩和方向係数を示した。 $n = -$ と同様に、試験開始後の約 10^2 秒間の応力はほぼ経過時間の対数に比例して低下しているが、その後グラフはやや屈曲し、上に凸の曲線を描きながら応力が低下していくことがわかる。歪は試験開始後の約 10^2 秒間は経過時間の対数にほぼ比例して増加している。その後グラフは屈曲し、下に凸の曲線を描いている。

図 3-9～図 3-11 には、深度 1000 m 付近の試料で得られた結果を示すが、いずれの条件下でも深度 500 m 付近の試料と同じような結果となった。すなわち、試験開始後 10^2 秒程度で緩和応力や歪のグラフが若干屈曲する現象が見られたり、ある程度の時間が経過するとグラフが上もしくは下に凸になったりしている。

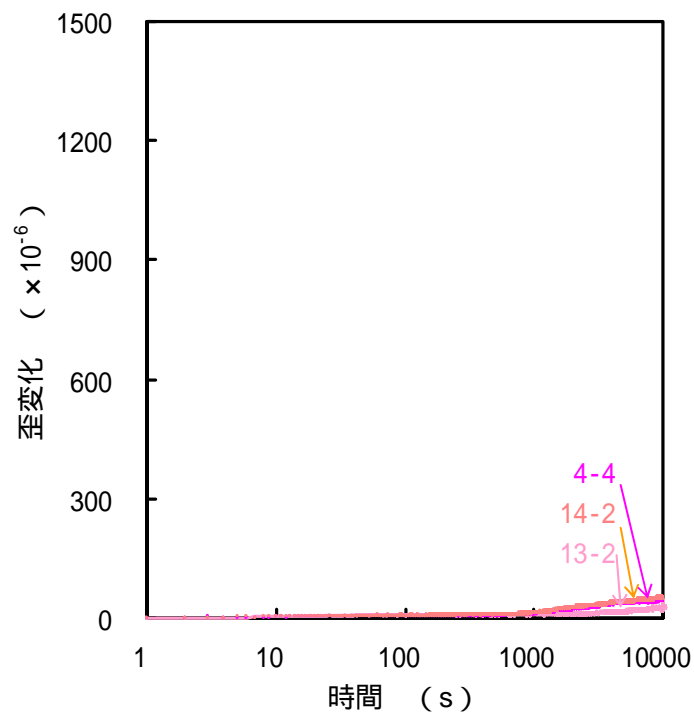
本年度の試験結果を概観すると、まず、試験開始から 10^2 秒程度経過した時点でグラフが屈曲する場合があった。2005 年度と 2006 年度の試験でも、試験片によっては似たような現象が生じる場合があった。この原因の一つとして、間隙水の排水の影響が考えられる。一般化応力緩和試験開始直後は、岩石のマトリックスの変形と間隙水の排水の影響により、変形速度が大きくなることが予想される。ある程度時間が経過すると、間隙水の排水の影響が小さくなり、岩石のマトリックスの変形が主体となるので、変形速度が低下しグラフが屈曲する可能性がある。しかし、これは一つの仮説であり、今後も検討が必要と考えている。

次に、本年度の試験では、ある程度の時間が経過するとグラフが上もしくは下に凸になったりする場合があった。緩和方向係数 n の試験で歪に若干の変化が見られたことから考えると、式(3-1)の C が時間変化している可能性がある。本年度はより安定した試験結果を得るために、稚内層硬質頁岩に適した低容量の試験装置を用いて試験を行ったが、制御性については今後改善が必要である。

その他にも、図には示さなかったが、試験開始からある程度の時間が経過したときに、応力と歪が急に変化し振動するようなことがあった。なお、昨年度³⁾にもこのような現象がたびたび見られたが、他の岩石では過去にこのような現象は生じていない。これまでに本研究室で一般化応力緩和試験を行ってきた岩石に比べると、稚内層硬質頁岩は強度やヤング率が小さく、多孔質なため試験中に試験片からの水の出入りなども生じる。そのため、試験装置には高い安定性や反応性が要求されるといえよう。比較的強度が小さい多孔質な岩石を用いた一般化応力緩和試験の実績はそれほど多くはなく、今後適切な試験装置や試験方法についての検討が必要である。

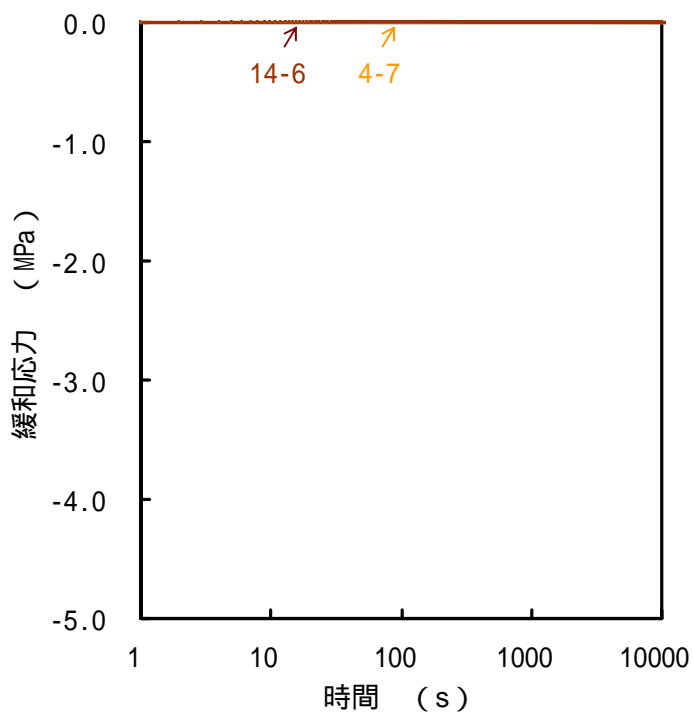


(a) 緩和応力

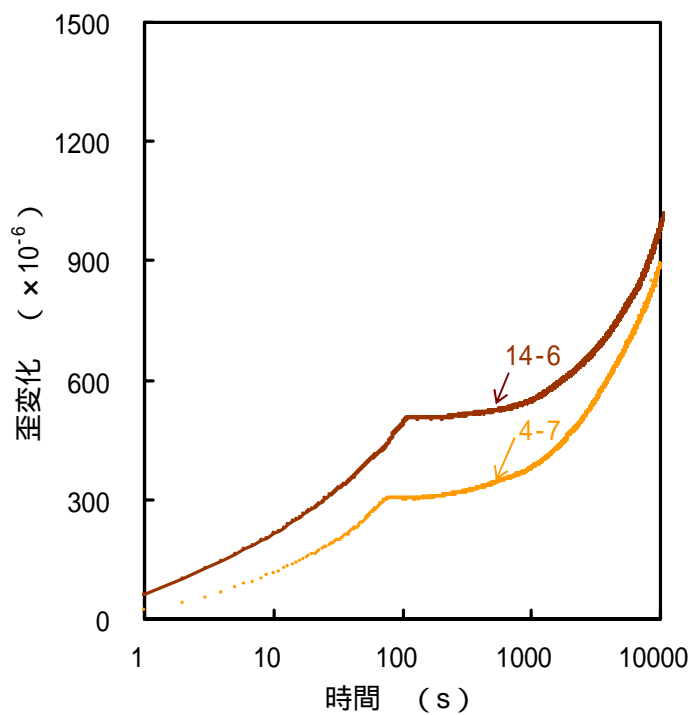


(b) 歪

図 3-6 緩和応力および歪の経時変化 (深度 500 m 付近, 緩和方向係数 -)

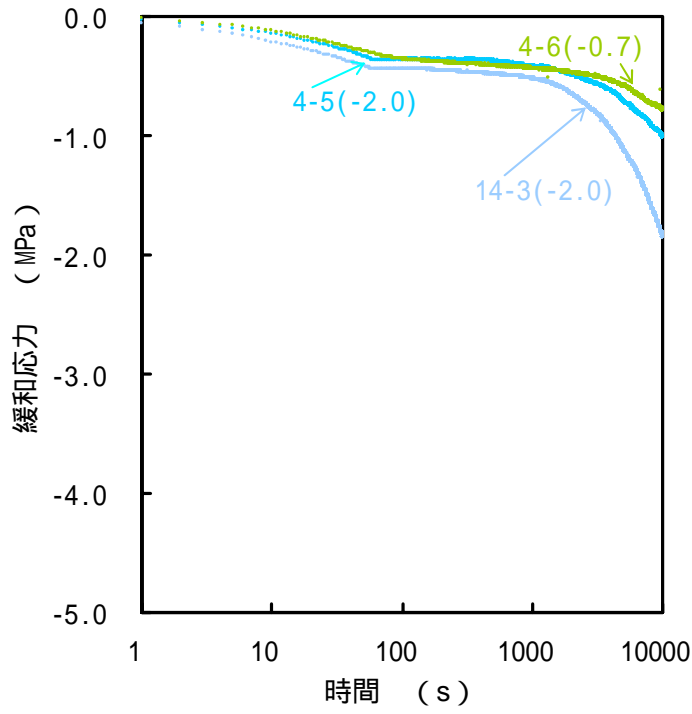


(a) 緩和応力

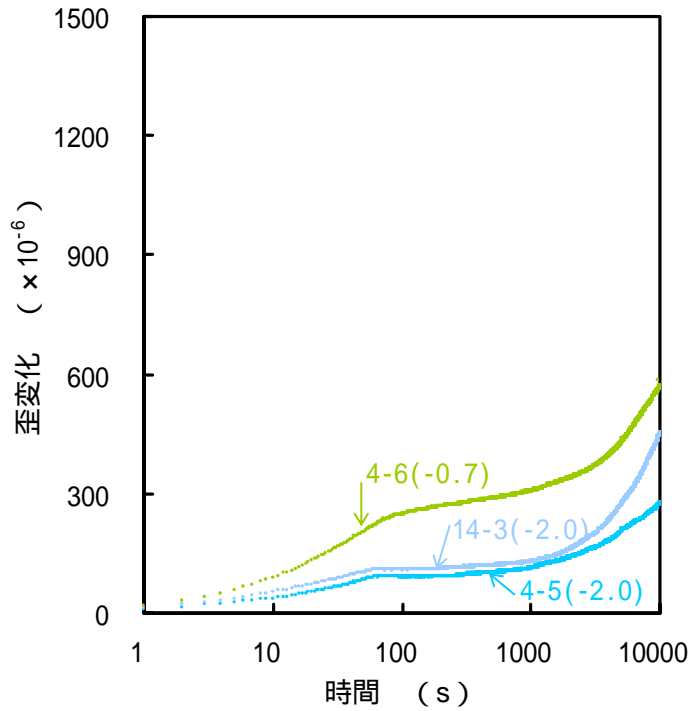


(b) 歪

図 3-7 緩和応力および歪の経時変化 (深度 500 m 付近, 緩和方向係数 0)



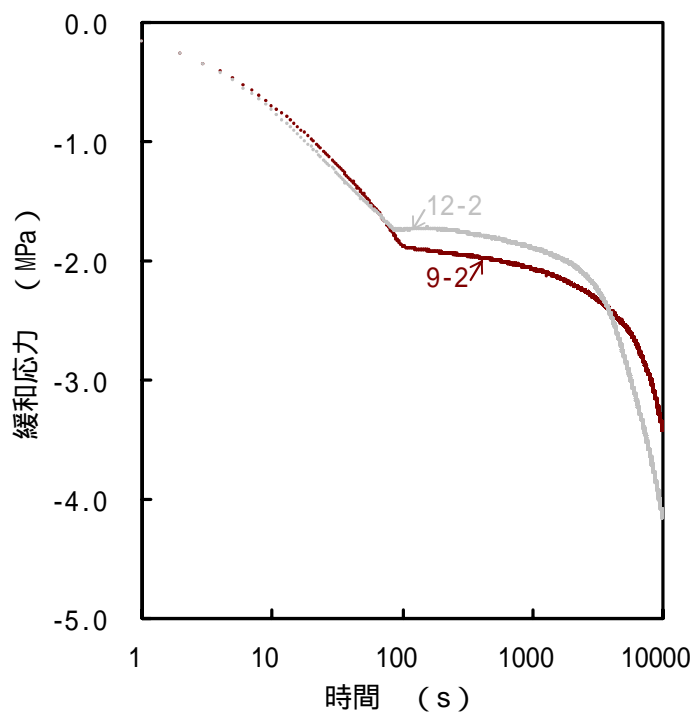
(a) 緩和応力



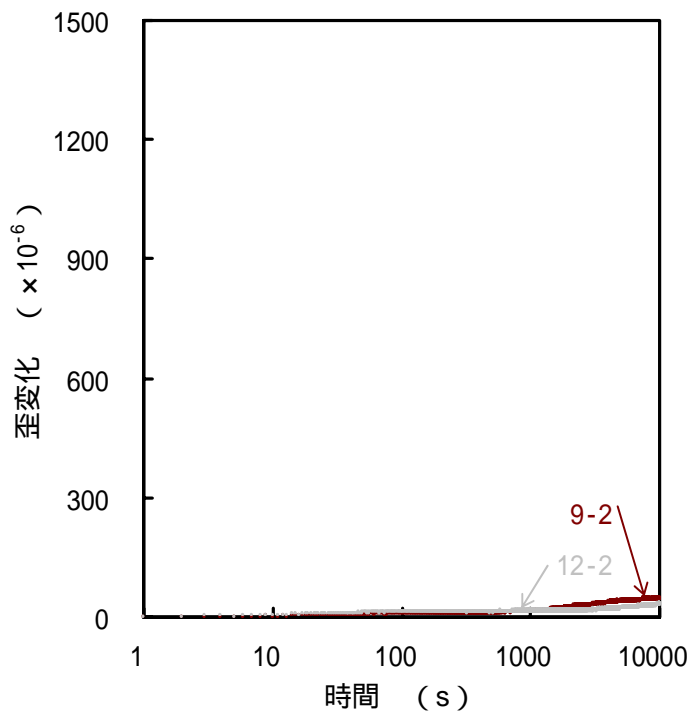
(b) 歪

()は緩和方向係数を表す

図 3-8 緩和応力および歪の経時変化 (深度 500 m 付近, 緩和方向係数 - 2.0, -0.7)

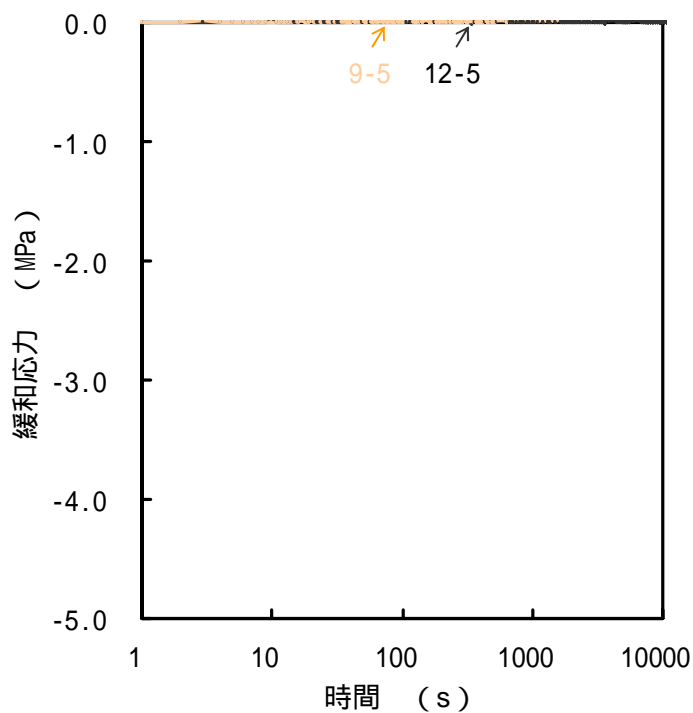


(a) 緩和応力

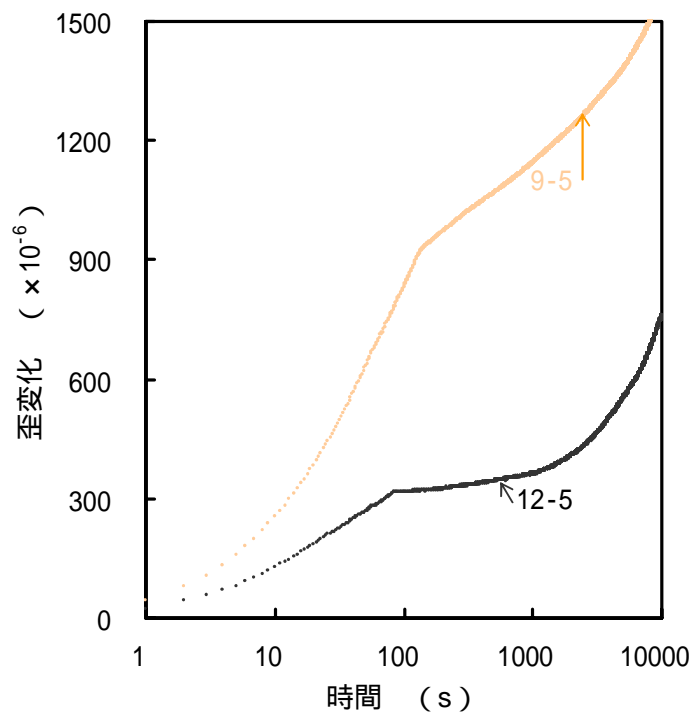


(b) 歪

図 3-9 緩和応力および歪の経時変化 (深度 1000 m 付近, 緩和方向係数 -)

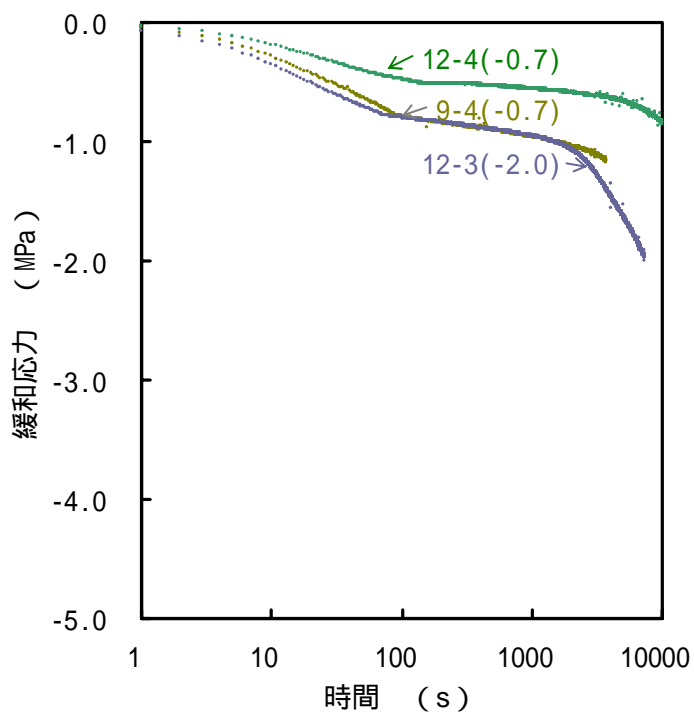


(a) 緩和応力

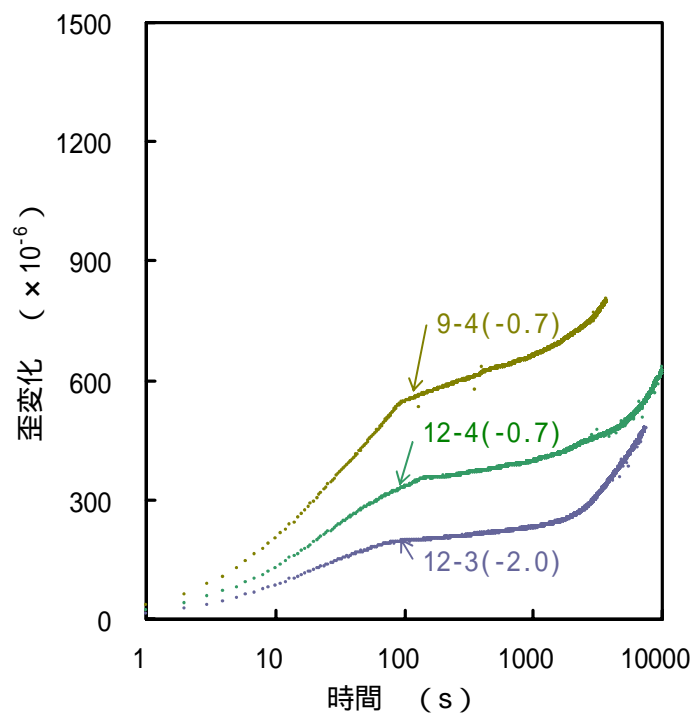


(b) 歪

図 3-10 緩和応力および歪の経時変化 (深度 1000 m 付近, 緩和方向係数 0)



(a) 緩和応力

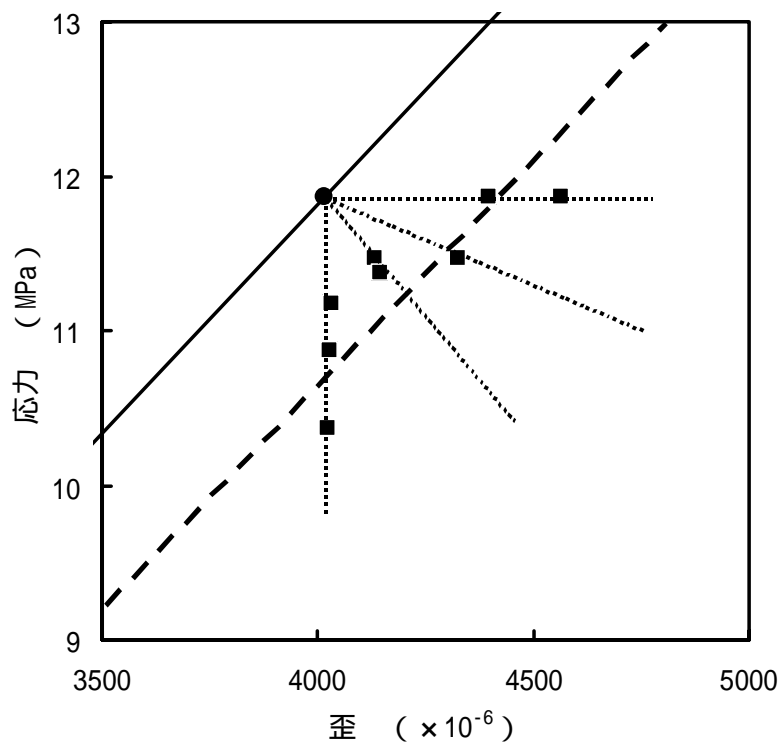


(b) 歪

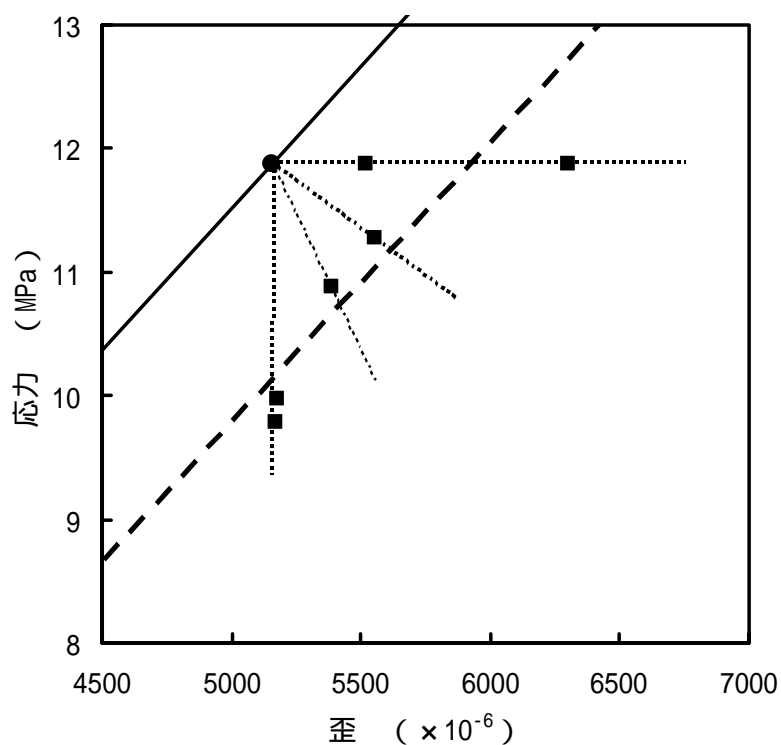
()は緩和方向係数を表す

図 3-11 緩和応力および歪の経時変化 (深度 1000 m 付近, 緩和方向係数 - 2.0, - 0.7)

図 3-12 は、試験結果が比較的安定している試験開始 10^3 秒後の応力と歪の位置を応力 - 歪線図上に示したものである。ただし、実線は 10^{-4} /s の定歪速度試験で得られた平均的な応力 - 歪曲線である。実線上の黒丸を出発点とし σ を 0 、 -2 、 -0.7 、 0 に変えた時の結果である。図には応力 - 歪曲線と平行な曲線を破線で描いた。いずれの深度の試料でも、試験結果は概ね破線の近傍に位置しているが、2006 年度と同様にばらつきが大きい。



(a) 深度 500 m 付近



(b) 深度 1000 m 付近

図 3-12 一般化応力緩和試験開始から 10^3 秒後の応力 - 歪線図上での位置

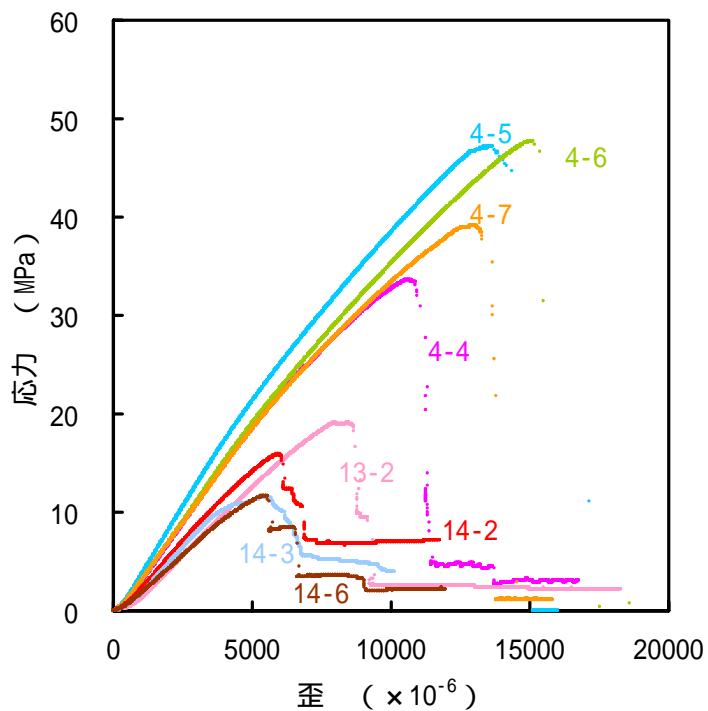
表 3-1 に、ばらつきの影響を検討するために一般化応力緩和試験終了後に行った一軸圧縮強度試験の結果を示す。図 3-13(a)は深度 500 m 付近の 8 本の結果、図 3-13 (b)は深度 1000 m 付近の 7 本の結果である。応力 - 歪曲線に大きなばらつきが見られ、深度 500 m 付近では、強度の平均値が 28.3 MPa であるのに対して、その標準偏差および変動係数は 14.3 MPa , 51 % であった。また深度 1000 m 付近では、強度の平均値が 28.6 MPa であるのに対して、その標準偏差および変動係数は 8.1 MPa , 28 % であった。事前を取得した一軸圧縮強度よりも大きいのが、これは、一般化応力緩和試験の開始 (図 3-2 の A 点) までに破壊が生じないように、比較的強度が大きかった No.4 と No.12 のコアから作製した試験片を多く用いたためである。

表 3-1 一般化応力緩和試験終了後の一軸圧縮強度試験の結果

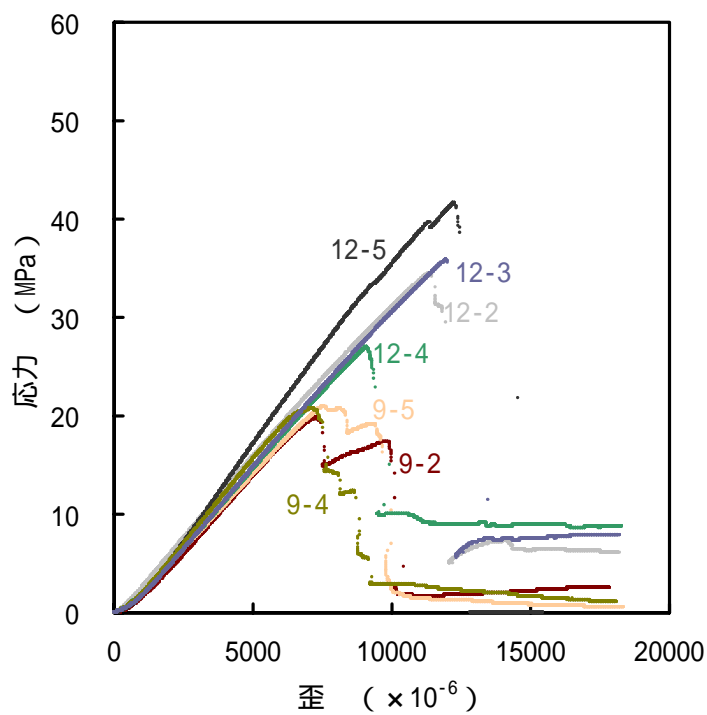
試験片 番号	深度 (m)	緩和開 始応力 (MPa)	載荷過程 ヤング率 ※1 (GPa)	緩和方向 係数 $\gamma^*(\alpha)$	応力緩和後一軸圧縮試験		備考
					強度 (MPa)	ヤング率※2 (GPa)	
4-4	518.5~518.9	12	3.4	$-\infty(0.0)$	33.6	3.7	
4-5		12	4.3	-2.0(-0.5)	47.1	3.7	以後relax2.pas使用.一軸圧縮試験時.激しく破壊.
4-6		12	3.8	-0.7(-1.43)	47.7	3.4	一軸圧縮試験時.激しく破壊.
4-7		12	3.4	0(-1000)	39.1	3.4	一軸圧縮試験時.破片飛ぶ.
13-2	527.65~527.8	12	2.1	$-\infty(0.0)$	19.1	2.8	
14-2	543~543.15	6	2.5	$-\infty(0.0)$	15.8	3.1	白色部有り.
14-3		6	2.4	-2.0(-0.5)	12.5	3.1	白色部有り.
14-6		6	2.4	0(-1000)	11.7	2.6	
9-2	975.3~975.5	12	2.2	$-\infty(0.0)$	19.7	3.2	応力緩和の際に.クラックから試験片表面に水滴がしみ出
9-4		12	2.1	-0.7(-1.43)	20.7	3.5	る.応力緩和の際に.クラックから試験片表面に水滴がしみ出
9-5		12	2.1	0(-1000)	20.9	3.1	る.応力緩和中に振動あり.XYチャート紙上円弧を描くノイ
12-2	983.2~983.4	12	2.5	$-\infty(0.0)$	34.5	3.2	曇.応力緩和の際に.クラックから試験片表面に水滴がし
12-3		12	2.4	-2.0(-0.5)	35.8	3.3	み出る.一軸圧縮試験時.破片飛ぶ.
12-4		12	2.6	-0.7(-1.43)	26.9	3.3	曇.応力緩和の際に.試験片表面から水分がしみでる.
12-5		12	3.0	0(-1000)	41.6	3.9	応力緩和の際に.試験片表面から水分がしみ出る.
浅い平均		-	3.0	-	28.3	3.2	クリープの際に.クラックから水分がしみ出る.クリープ中振
深い平均		-	2.4	-	28.6	3.3	動有り.一軸圧縮試験時.激しく破壊.
全平均			2.7		28.5	3.3	

※1 応力緩和開始応力の40%-60%割線から求めた

※2 破壊応力の40%-60%割線から求めた



(a) 深度 500 m 付近



(b) 深度 1000 m 付近

図 3-13 一般化応力緩和試験終了後の応力 - 歪曲線

このような強度のばらつきが、図 3-12 の一般化応力緩和試験でのばらつきを生んだものと考え、2006 年度と同様に次のような正規化を行うこととした。まず応力は、それぞれの試験片の強度で正規化し、応力レベルとした。歪は、図 3-3 の A 点での歪（ここでは、応力 / ヤング率として計算した）で割った後、応力レベルを掛けることによって正規化した。すなわち、強度とヤング率の値がともに 1 になるように正規化した。このように正規化して、図 3-12 を書き直した結果を図 3-14 に示す。図 3-14 の は試験開始後 10^4 秒経過時点での応力と歪の位置を表し、破線は一般化した応力緩和試験の経路を表す。図 3-12 と比べるとばらつきはある程度減少し、 の位置は 2006 年度と同じ形の次式で示す赤線の近傍に存在していることがわかる。

$$\text{HDB-11 深度 500 m 付近 : } \quad = 0.4 \quad 2.1 \quad \text{式(3-5)}$$

$$\text{HDB-11 深度 1000 m 付近 : } \quad = 0.5 \quad 2.1 \quad \text{式(3-6)}$$

なお、式(3-5)と式(3-6)中の定数は - の関係から最小二乗法により計算した。2005 年度と 2006 年度の結果を図 3-15 に示すが、試験結果は次式で表される赤線で示した曲線上に存在している。

$$\text{HDB-10 深度 500 m 付近 : } \quad = 0.7 \quad 2.3 \quad \text{式(3-7)}$$

$$\text{HDB-11 深度 700 m 付近 : } \quad = 0.3 \quad 2.3 \quad \text{式(3-8)}$$

式(3-5)～式(3-8)を比べると、時間経過に伴う変位の応力依存性を表すべき数は比較的近い値であることがわかる。

2006 年度と同様に、岩盤の長期挙動予測の際に従来から使用してきたコンプライアンス可変型構成方程式⁷⁾を用いて検討してみる。

$$\frac{d}{dt} \epsilon^* = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\epsilon^* - 1)^{-m_1} + a_3 (\sigma^*)^{n_3} (\epsilon^*)^{m_3} \quad \text{式(3-9)}$$

式(3-9)は歪 と応力 の比であるコンプライアンス $\epsilon^* = \epsilon / \epsilon_0$ が徐々に増加すると考えたものである。取り扱い易いように、 ϵ_0 を初期値 ϵ_0 で正規化した値を、 $\epsilon^* (= \epsilon / \epsilon_0)$ とした。また、 σ_c を一軸圧縮強度 σ_c で正規化した値を、 σ^* とした。これは図 3-14 で行った正規化と同様である。この構成方程式の右辺第 1 項は一次クリープ（歪硬化現象）を、第 2 項は三次クリープ（破壊現象）を表す。

初期段階のクリープでは、 σ^* が 1 より少しだけ大きな値をとるので、式(3-9)の右辺第 1 項が第 2 項に比べて大きくなり、式(3-9)は次式で近似できる。

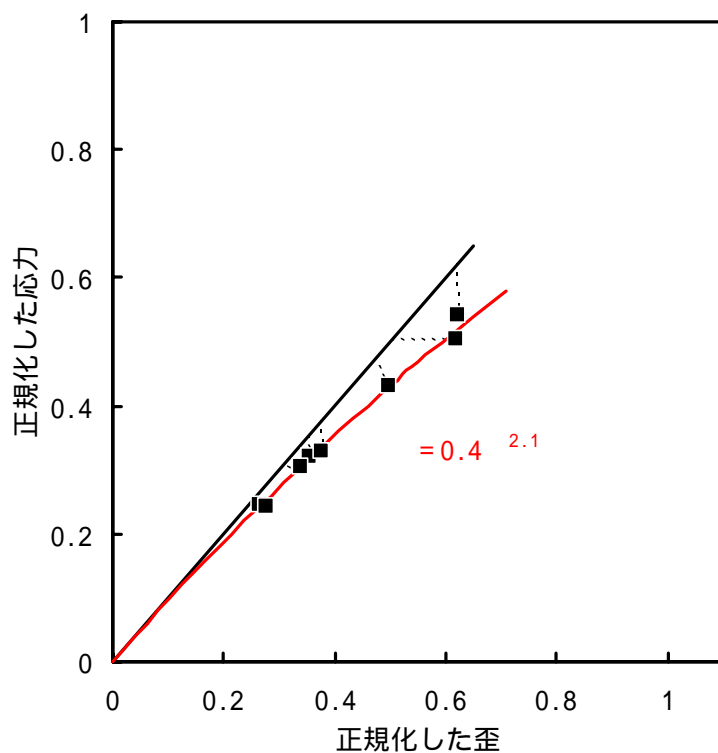
$$\frac{d}{dt} \epsilon^* = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\epsilon^* - 1)^{-m_1} \quad \text{式(3-10)}$$

この式は解析的に解くことができ、弾性歪を差し引いたクリープ歪 $\varepsilon^* = \varepsilon^* (\sigma^* - 1)$ と歪速度は次のようになる⁷⁾。

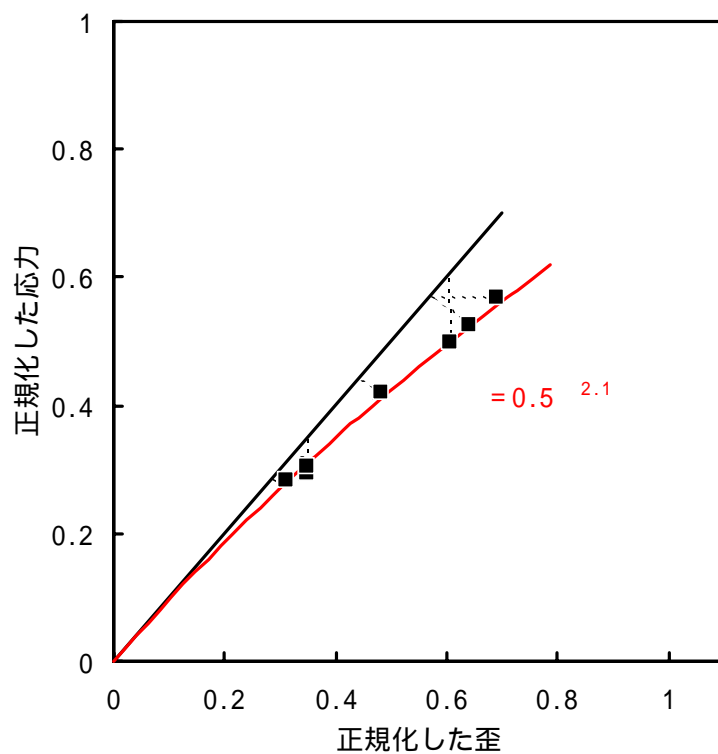
$$\text{クリープ歪} \quad \varepsilon^* = a_1 \frac{1}{m_1+1} (m_1 + 1)^{\frac{1}{m_1+1}} (\sigma^*)^{1+\frac{n_1}{m_1+1}} t^{\frac{1}{m_1+1}} \quad \text{式(3-11)}$$

$$\text{クリープ歪速度} \quad \frac{d\varepsilon^*}{dt} = a_1 \frac{1}{m_1+1} (m_1 + 1)^{-\frac{m_1}{m_1+1}} (\sigma^*)^{1+\frac{n_1}{m_1+1}} t^{-\frac{m_1}{m_1+1}} \quad \text{式(3-12)}$$

式(3-15)の応力にかかるべき数は $1+n_1/(m_1+1)$ であり、これが式(3-5)～式(3-8)の応力にかかるべき数に対応する。過去の研究により、稚内層硬質頁岩の n_3 は 27～53 程度であることがわかっている。 n_1 については、低応力レベルでの信頼すべきデータが少ないので確たることはわかっていないが、大久保・福井⁷⁾ は、 n_1 と n_3 が等しいとして田下凝灰岩の低応力レベルの一次クリープをある程度説明できるとしている。この指摘を拠り所にするとも n_1 も 27～53 程度となる。式(3-5)～式(3-8)の応力のべき数の平均値として $1+n_1/(m_1+1) = 2.2$ を採用すると、 m_1 は 22～43 になる。この値の妥当性は、今後数値シミュレーションなどにより検証する必要がある。

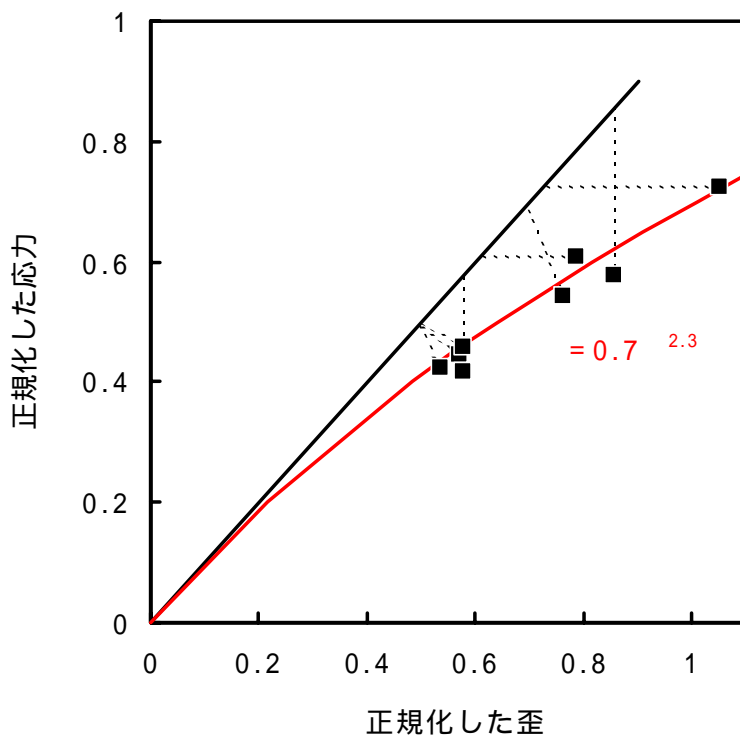


(a) 深度 500 m 付近 . 赤線は(3-5)式による計算結果

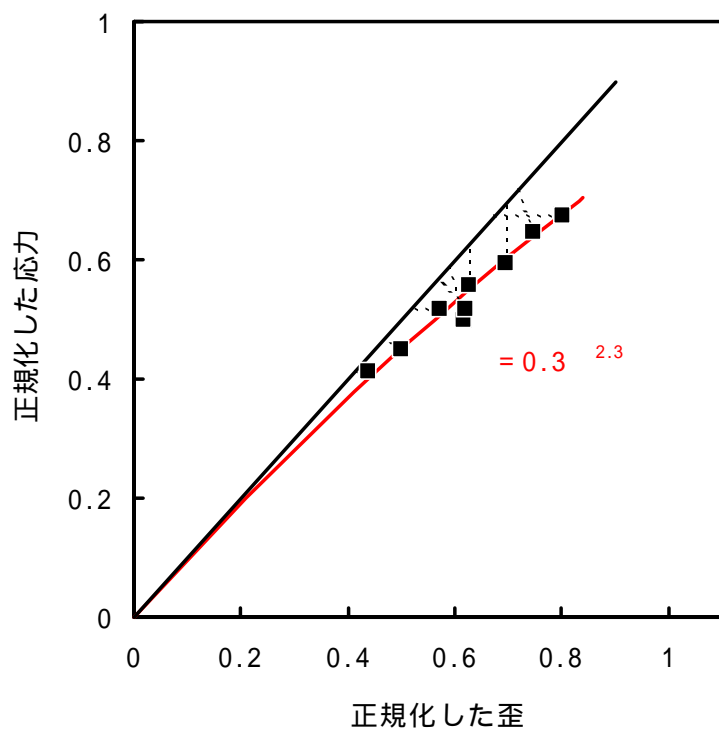


(b) 深度 1000 m 付近 . 赤線は(3-6)式による計算結果

図 3-14 一般化応力緩和試験開始から 10^4 秒後の正規化した応力 - 歪線図上での位置



(a) 2005 年度の結果 . 赤線は(3-7)式による計算結果



(b) 2006 年度の結果 . 赤線は(3-8)式による計算結果

図 3-15 一般化応力緩和試験開始から 10^4 秒後の正規化した応力 - 歪線図上での位置

3.4 まとめおよび今後の課題

実際の地下構造物の周辺岩盤では、荷重、変位とも経時変化するはずであり、従来行われてきたクリープ試験あるいは応力緩和試験だけで、その挙動を正確に予測するのは困難と考えられる。この点はある程度認識されてきたと思われるが、適当な実験方法がなかったため未だ不明な点が多い。

そこで、本章では昨年度³⁾に引き続き、稚内層硬質頁岩を用いて、一般化応力緩和挙動に関する検討を行った。過去3年間の試験結果を比較検討したところ、稚内層珪質泥岩では、試験開始から10²秒程度経過した時点でグラフが若干屈曲する場合があることがわかった。この原因の一つとして、間隙水の排水の影響が考えられるが、今後も引き続き検討していく必要があると考えている。次いで、一般化応力緩和挙動と応力-歪曲線との関係について検討した。2005年度および2006年度と同様に、強度とヤング率がともに1になるように応力と歪を正規化することで、次式のような関係のあることが確認された。

2005年度 HDB-10 深度 500 m 付近 :	2.3 (3-7)
本年度 HDB-11 深度 500 m 付近 :	2.1 (3-5)
2006年度 HDB-11 深度 700 m 付近 :	2.3 (3-8)
本年度 HDB-11 深度 1000 m 付近 :	2.1 (3-6)

これらの式からわかるように、時間経過に伴う変位の応力依存性を表すべき数は、採取場所や採取深度によらず比較的近い値をとることがわかった。

さらに、この結果を強度破壊点以前の時間依存性挙動を表す、次式に示す構成方程式を用いて検討した。

$$d \sigma^* / dt = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\sigma^* - 1)^{-m_1} \quad (3-10)$$

この式中の n_1 を 27~53 程度、 m_1 を 22~43 程度とすると、2005年度、2006年度、本年度の一般化応力緩和試験結果を概ね説明できることがわかった。強度破壊点以前の時間依存性挙動は、地下構造物の長期安定性を評価するための重要な情報である。しかし、これらのパラメータの妥当性については得られている知見が少なく、今後、数値シミュレーションなどにより検証していく必要があると考える。

強度破壊点以前の時間依存性挙動の解明は、坑道掘削時~閉鎖までの坑道空間維持のための支保工設計の信頼性向上、閉鎖後~数万年までのニアフィールド岩盤の安定性評価の高度化にとって、極めて重要である。冒頭でも述べた通り、地下構造物に実際に作用する荷重条件は複雑であり、荷重と変位が共に変化していると考えられ、荷重一定のクリープと変位一定の応力緩和の中間の挙動と考えられる。これまでに得られた稚内層硬質頁岩の挙動を現しているコンプライアンス可変型構成方程式を用いた解析を行い、実際の計測結果とフィッティングさせることで、より信頼性を高められる。

4 . 引張応力下での力学特性

4 . 1 はじめに

坑道の周辺岩盤には、地圧（外圧）とオーバーパックスの腐食膨張や緩衝材の膨潤圧（内圧）が作用する。地下深部では外圧が大きいので、内圧が外圧を上回る可能性は小さいが、理論的には内圧が外圧を上回った場合には、坑道の周辺岩盤には引張応力が生ずる。引張応力は、坑道壁面に亀裂を生じさせるとともにこれを広げる方向に作用し、ニアフィールド岩盤の透水性に影響を及ぼす可能性が懸念される。従って、岩盤の引張応力下での強度特性を把握するとともに、これを適切に評価して設計に反映することが重要である。

本章では、稚内層硬質頁岩のボーリングコアを用いた圧裂引張試験を実施した。引張応力下での力学特性に関するデータを蓄積するとともに、採取深度の異なる試料の結果と比較検討を行った。

4.2 試験岩石と試験方法

試験装置として、図 4-1 に示す 10 kN 万能試験機を用いた。試験片は、2 章に示した HDB-11 孔の深度 500 m 付近から採取したボーリングコア No.3, 4, 13, 14 と、深度 700 m 付近から採取したボーリングコア No.1 と、深度 1000 m 付近から採取したボーリングコア No.8, 9, 12 から作製した。試験片は直径 25.0 mm、長さ 13 mm 程度の円柱形であり、整形後は水中で保存し、湿潤状態のまま試験に供した。



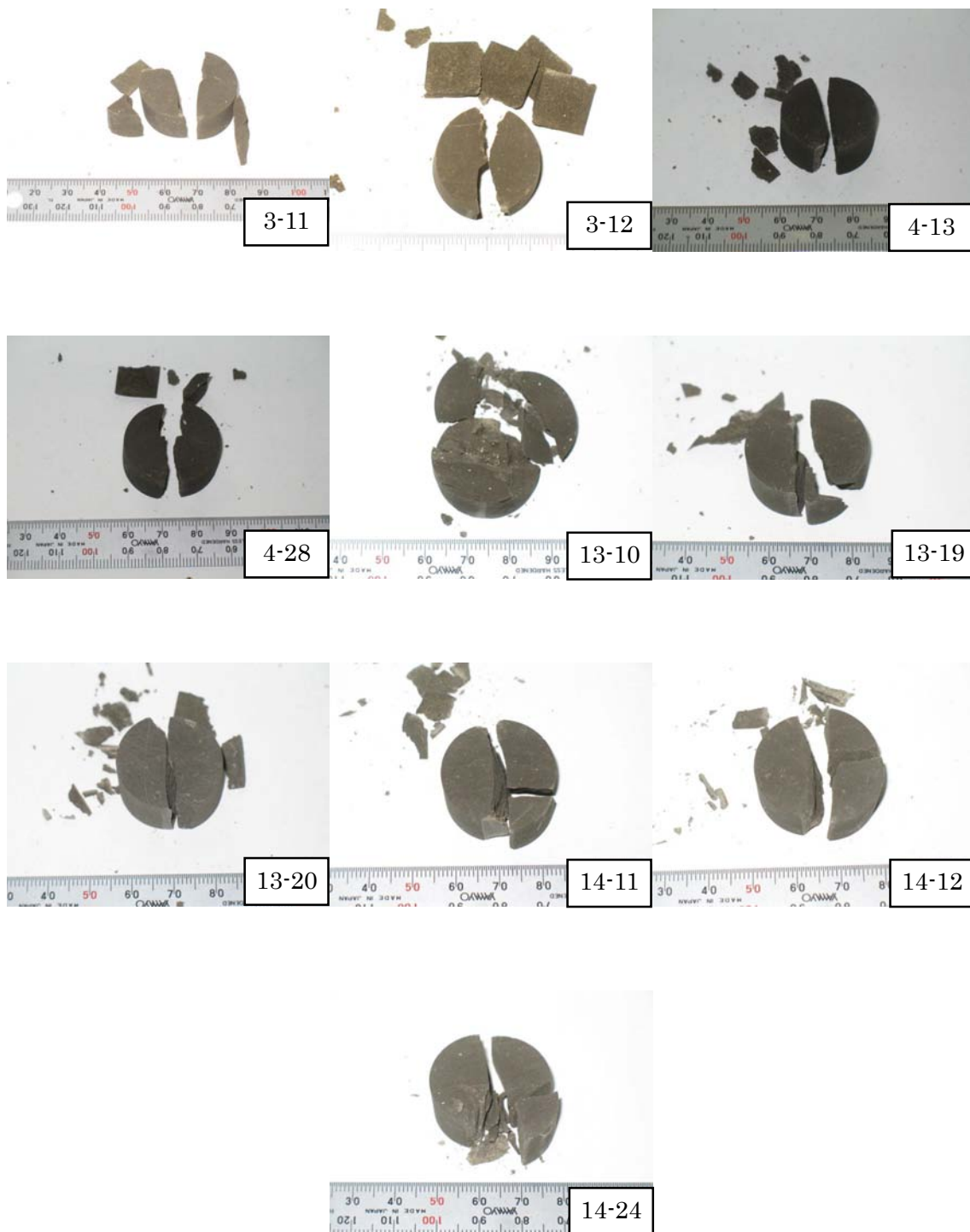
図 4-1 10kN 万能試験機の写真

4.3 試験結果および考察

試験結果を表 4-1 に、圧裂引張試験終了後の試験片の写真を図 4-2 に示した。深度 700 m 付近の試験では、中心線からずれたところで亀裂が発生するなど、複雑な破壊様式を示す試験片が 10 本中 5 本あった。一方、深度 500 m 付近の試料では、10 本中 9 本の試験片がほぼ中心線上に引張亀裂が発生し破壊した。試験片 13-10 ではかなり複雑な亀裂が生じ、試験片の一部が薄く剥がれた状態で破壊した。深度 1000 m 付近の試料では、すべての試験片がほぼ中心線上に亀裂が発生し破壊した。ただし、試験片 12-17 のように表面の一部が薄く剥がれたり、試験片 12-18 のように破断面が単純な平面ではなかったりする場合もあった。

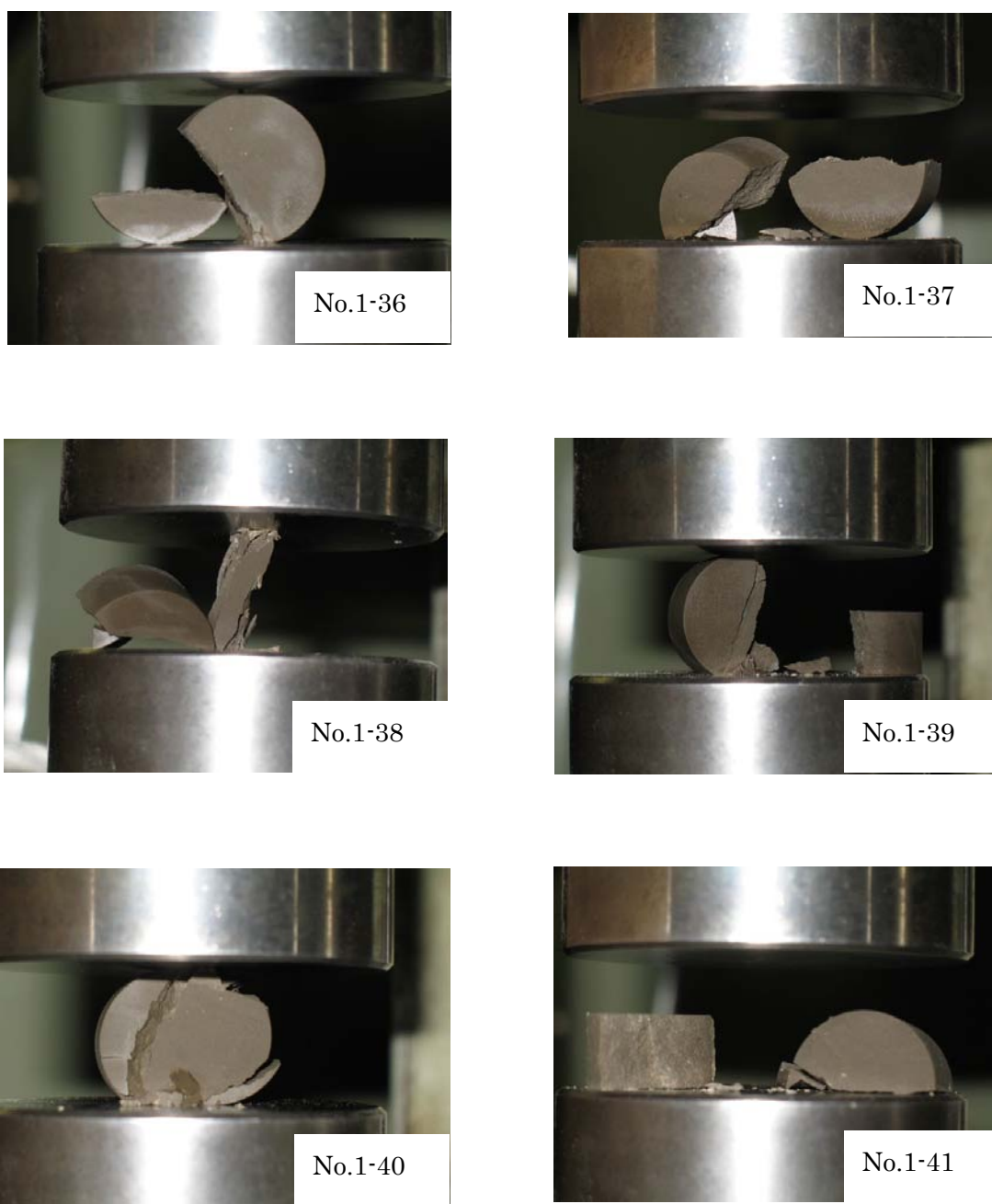
表 4-1 圧裂引張試験結果

試験片番号	深度 m	直径 mm	高さ mm	重量 g	比重	破壊荷重 kgf	強度 MPa	備考 全体的に白色の小異物有り
3-11	494.7-494.85	25.03	13.33	11.615	1.771	188.2	3.5	破壊までの時間4'50", 200kgレンジ
3-12	494.7-494.85	25.03	13.23	11.603	1.782	290.5	5.5	3'5", 500kgレンジ, 破壊時薄い板状の破片4枚出た
4-13	518.5-518.7	25.03	13.22	12.299	1.891	188.2	3.6	4'30", 200kgレンジ
4-28	518.7-518.9	25.03	12.94	11.979	1.881	161.0	3.1	1'45", 500kgレンジ
13-10	527.65-527.8	25.02	12.84	11.93	1.89	140.0	2.7	1'20", 500kgレンジ, 中心から外れて破壊, 薄く剥がれた状態
13-19	527.8-528	25.02	12.64	11.628	1.871	132.5	2.6	1'20", 500kgレンジ
13-20	527.8-528	25.02	13.08	12.176	1.893	166.0	3.2	1'50", 500kgレンジ
14-11	543-543.15	25.02	12.71	11.927	1.909	148.5	2.9	1'35", 500kgレンジ, 1/2, 1/4が2個に分割
14-12	543-543.15	25.01	12.49	11.599	1.89	149.5	3.0	1'40", 500kgレンジ, 1/2, 1/4が2個に分割
14-24	543.15-543.3	25.04	12.74	11.972	1.908	148.0	2.9	1'40", 500kgレンジ, 1/2, 1/4が2個に分割
1-36	727.25-727.45	24.88	12.02	10.987	1.88	57.0	1.2	中心からずれた所で破壊
1-37	727.25-727.45	24.88	12.27	11.177	1.874	57.8	1.2	
1-38	727.25-727.45	24.89	12.26	11.139	1.867	91.8	1.9	
1-39	727.25-727.45	24.88	12.14	11.053	1.873	61.0	1.3	中に変色部有り
1-40	727.25-727.45	24.89	12.16	11.152	1.895	119.2	2.5	全体的に破壊
1-41	727.25-727.45	24.89	12.26	11.214	1.847	104.6	2.1	
1-42	727.25-727.45	24.89	12.03	11.019	1.881	31.4	0.7	中心からずれた所で破壊
1-43	727.45-727.65	24.89	11.89	11.009	1.927	83.6	1.8	
1-44	727.45-727.65	24.89	12.13	11.15	1.863	52.6	1.1	小欠け有り
1-45	727.45-727.65	24.89	11.89	10.998	1.901	20.4	0.4	
8-15	975-975.2	25.04	12.96	12.868	2.016	132.0	2.5	小欠有, 1'25", 500kgレンジ
8-16	975-975.2	25.05	12.87	12.766	2.013	123.0	2.4	小欠有, 1'20", 500kgレンジ, 3/8の破片2個, 1/8の破片2個くらいに分割
9-22	975.5-975.6	25.05	12.6	12.533	2.018	131.0	2.6	1'25", 500kgレンジ
12-16	983-973.2	25.03	12.81	11.855	1.881	236.5	4.6	2'35", 500kgレンジ
12-17	983-983.2	25.03	13.13	12.176	1.885	162.0	3.1	小傷有, 1'40", 500kgレンジ
12-18	983-983.2	25.03	12.53	11.684	1.895	255.0	5.1	2'45", 500kgレンジ
12-33	983.2-983.4	25.02	13.01	12.255	1.916	157.0	3.0	1'45", 500kgレンジ
12-34	983.2-983.4	25.02	12.96	12.028	1.888	160.5	3.1	1'45", 500kgレンジ, 1/2, 1/4が2個に分割
浅い試験片平均	25.025	12.922	11.8728	1.869	171.2	3.3		
中間の試験片平均	24.887	12.105	11.0898	1.881	67.9	1.4		
深い試験片平均	25.034	12.859	12.2706	1.939	169.6	3.3		
全体平均	24.978	12.612	11.7068	1.893	133.9	2.6		



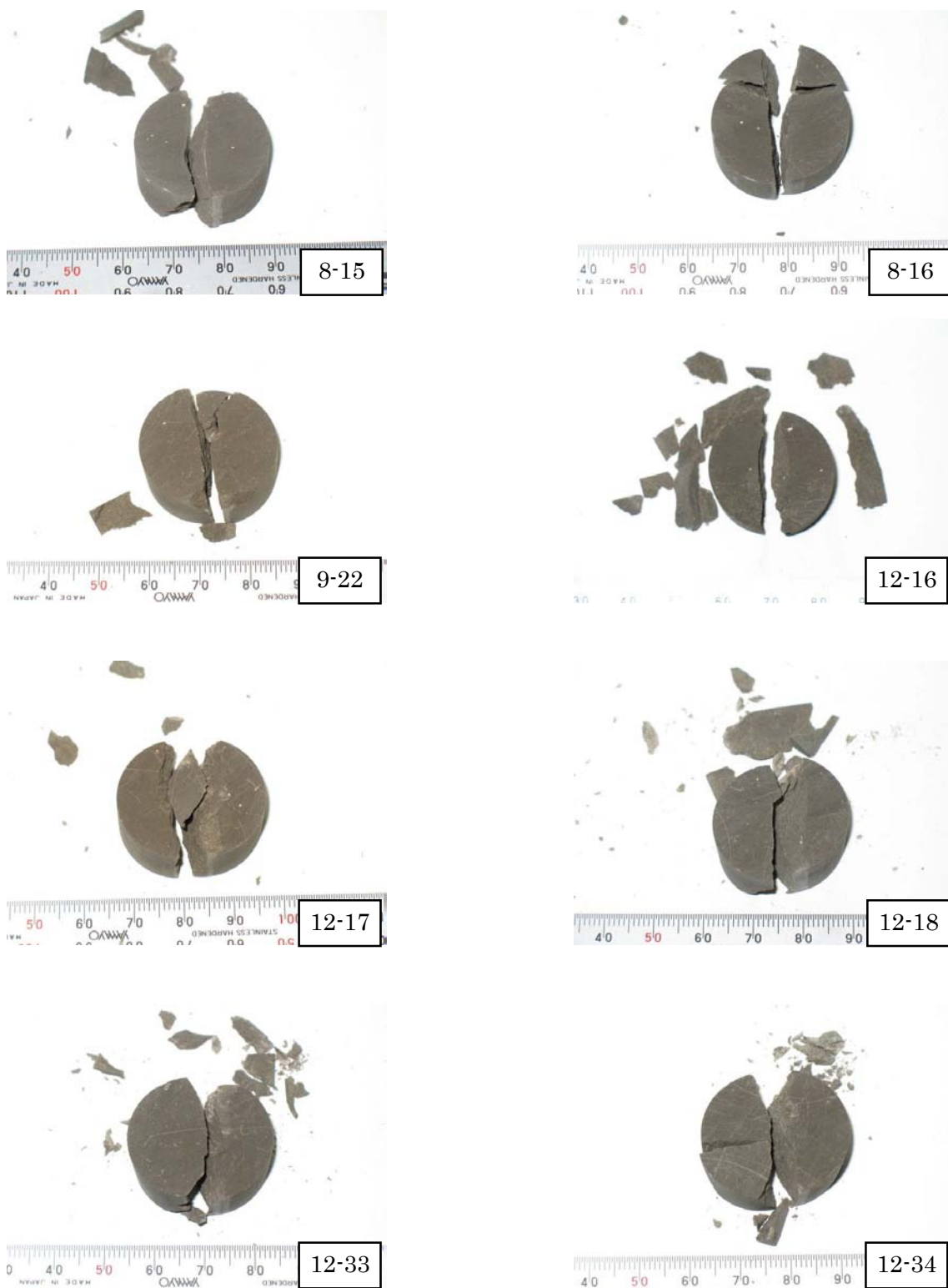
(a) 深度 500 m 付近

図 4-2 圧裂引張試験後の試験片の写真 (1/3)



(b) 深度 700 m 付近

図 4-2 圧裂引張試験後の試験片の写真 (2/3)



(c) 深度 1000 m 付近

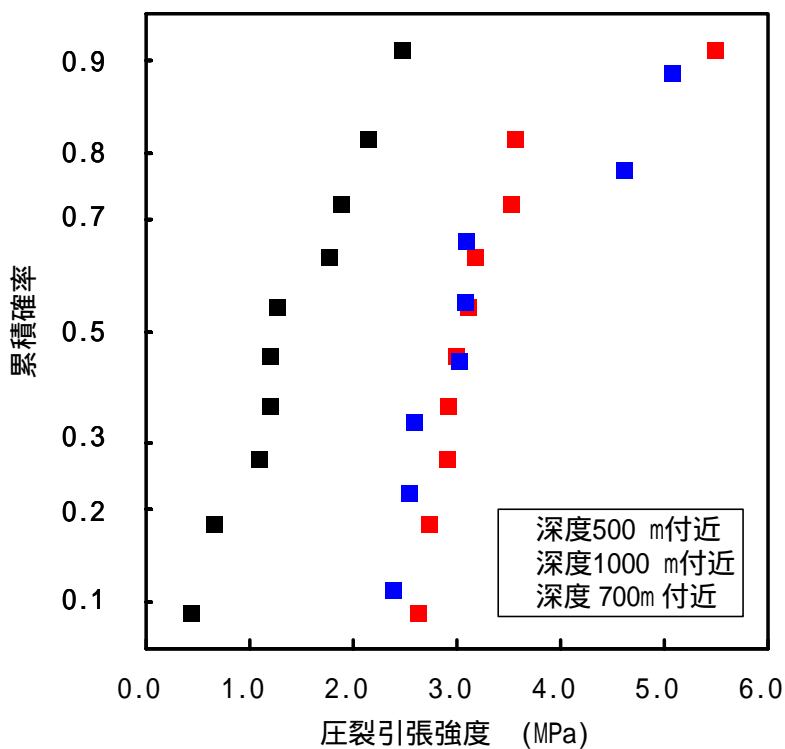
図 4-2 圧裂引張試験後の試験片の写真 (3/3)

図 4-3(a)には、圧裂引張強度の累積確率を正規確率紙に示した。いずれの結果とも、強度の大きい 1, 2 本の結果を除いては正規確率紙上でほぼ直線上に並んでおり、概ね正規分布をしていることがわかる。また、深度 700 m 付近の圧裂引張強度の平均値は 1.40MPa、深度 500 m 付近と深度 1000 m 付近の平均値は 3.3 MPa と等しかった。深度 700 m 付近の結果と比較すると、深度 500 m 付近と深度 1000 m 付近の圧裂引張強度の平均値は 2 倍程度大きいものの、試験結果を直線で近似した場合の傾きはほぼ等しいことがわかる。表 4-2 に別途実施した一軸圧縮試験を、表 4-3 にその結果の累積確率を示す。図 4-3(b)には、一軸圧縮試験で得られた強度の累積確率を正規確率紙に示した。深度 700 m 付近の結果は比較的ばらつきが少なかったが、深度 500 m 付近と深度 1000 m 付近の結果はばらつきが大きく、深度 700 m 付近では見られなかった一軸圧縮強度が 30 MPa を越えるような試験片もあった。

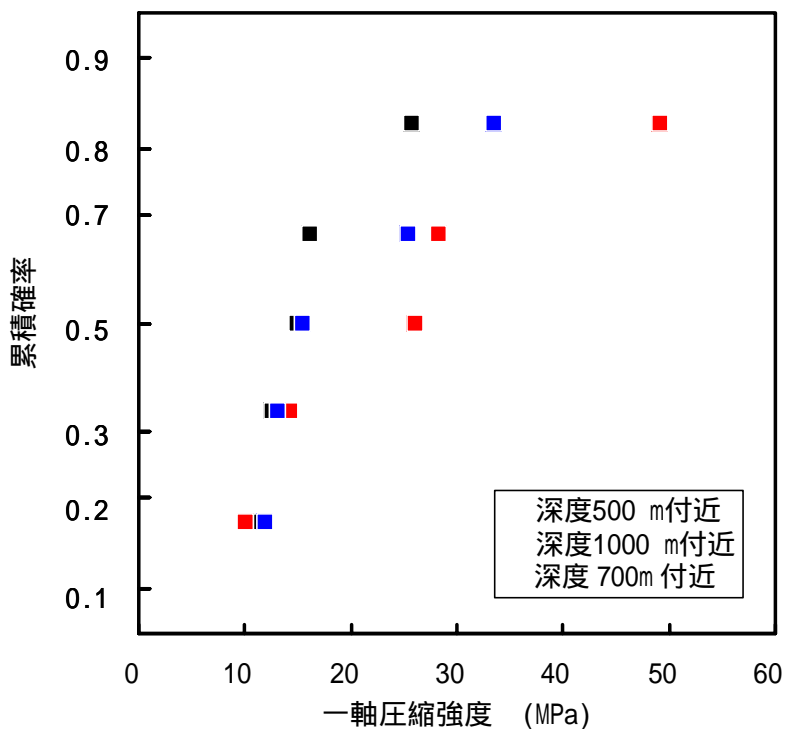
試験結果をまとめると以下ようになる。なお括弧内の値は変動係数であり、脆性度は一軸圧縮強度 / 圧裂引張強度で計算した。

	圧裂引張強度	一軸圧縮強度	脆性度
HDB-11 深度 500 m 付近	: 3.3 MPa(24%)	25.6 MPa(53%)	7.8
HDB-11 深度 700 m 付近	: 1.4 MPa(44%)	16.2 MPa(20%)	11.6
HDB-11 深度 1000 m 付近	: 3.3 MPa(28%)	19.9 MPa(42%)	6.0

他の多くの岩石と比べると、稚内層硬質頁岩の脆性度は 6~12 であり標準的な範囲⁸⁾にあるといえる。強度のばらつきはかなり大きいので確たることはいえないが、本年度と 2006 年度の結果を比較すると、本年度の結果では比較的脆性度が小さかった。この理由は判然としないが、理由の一つとして層理面の影響の可能性があり⁶⁾、今後も引き続き検討が必要と考えている。



(a) 圧裂引張強度



(b) 一軸圧縮強度

図 4-3 正規確率紙に図示した強度のばらつき

表 4-2 別途実施した一軸圧縮試験結果

ボーリング番号	試験片番号	深度 (m)	直径 (mm)	高さ (mm)	重量 (g)	比重	強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	備考
HDB-11	3-1	③	4.50	50.01	44.384	1.80	49.3	3.7	
	4-1	518.5~518.9	3.33	50.01	46.466	1.89	28.3	2.8	
	4-14		2.83	50.01	46.731	1.90	26.1	2.3	
	13-1	527.65~527.8	2.93	50.01	46.887	1.91	14.3	1.8	
	14-1	543~543.15	2.46	50.00	47.142	1.92	10.1	2.0	クラック有←このクラックと別の所から破壊
	1-1	727.25~727.85	0.00	50.01	46.083	1.90	15.0	1.9	破壊時, 破壊音有, 大きなクラックが入る
	1-2		0.00	50.01	46.063	1.90	16.1	2.1	破壊時, 破壊音有, 大きなクラックが入る
	1-5		0.00	50.02	46.179	1.90	11.6	1.6	
	1-6		0.00	50.02	44.665	1.83	25.8	3.4	
	1-7		0.00	50.01	46.073	1.90	12.6	1.6	
	8-1	0	0.00	50.03	50.083	2.03	12.0	1.9	
	8-2		0.00	50.01	50.268	2.04	15.5	1.9	
	9-1	975.3~975.5	0.00	50.03	49.900	2.03	13.1	1.9	変色部有
	12-1	983.2~983.4	0.00	50.02	46.669	1.90	33.5	2.8	
	12-19		0.00	50.01	46.962	1.91	25.5	2.6	変色部有
	HDB-11, 500m付近			3.21	50.01	46.322	1.88	25.6	2.5
HDB-11, 700m付近			0.00	50.01	45.813	1.89	16.2	2.1	
HDB-11, 1000m付近			0.00	50.02	48.776	1.98	19.9	2.2	
全体平均			1.07	50.01	46.97	1.92	20.59	2.29	

表 4-3 強度結果の累積確率

ボーリング番号	試験片番号	深度	一軸圧縮強度	累積確率	正規分布
HDB-11	14-1	500m 付近	10.05	0.17	-0.97
	13-1		14.34	0.33	-0.43
	4-14		26.14	0.50	0.00
	4-1		28.30	0.67	0.43
	3-1		49.28	0.83	0.97
	1-5	700m 付近	11.60	0.17	-0.97
	1-7		12.60	0.33	-0.43
	1-1		15.00	0.50	0.00
	1-2		16.10	0.67	0.43
	1-6		25.80	0.83	0.97
	8-1	1000m 付近	12.03	0.17	-0.97
	9-1		13.13	0.33	-0.43
	8-2		15.47	0.50	0.00
	12-19		25.47	0.67	0.43
	12-1		33.52	0.83	0.97

5 . おわりに

ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の信頼性向上を目指した研究を実施し、その結果を第2章から第4章に述べた。検討した岩石は稚内層硬質頁岩である。

第2章では、HDB-10 孔深度 500m 付近、HDB-11 孔深度 700m 付近に引き続き、稚内層硬質頁岩の HDB-11 深度 500 m 付近、HDB-11 深度 1000 m 付近を用いて強度回復特性に関する試験を行った。その結果より、保持時間 t と一軸圧縮強度(強度回復試験後)の関係式を式(2-2)から式(2-5)に示したように得た。HDB-11 深度 500 m 付近、HDB-11 深度 1000 m 付近試料の一軸圧縮強度は、HDB-11 深度 700 m 付近と比較的近い値であった。また、式(2-2)、式(2-3)、式(2-5)からわかるように強度回復の程度も HDB-11 深度 700 m 付近の試料とほぼ同じであった。すなわち、HDB-11 孔では採取深度の影響は比較的小さい結果となった。一方、HDB-10 深度 500 m 付近の試料は一軸圧縮強度が小さいものの、強度回復の程度は HDB-11 孔の試料よりも大きい結果となった。すなわち、採取場所によって若干異なる結果が得られた。ただし、いずれの試料でも時間 t のべき数は 0.35 であり ($t^{0.35}$ に比例して強度が回復)、このパラメータに関しては採取深度や採取場所の影響はあまり現れなかった。保持時間と弾性波速度の関係を検討した結果、試験数は少なかったものの、保持時間が長いほど弾性波速度が大きくなる傾向が明瞭に認められた。すなわち、一軸圧縮強度だけではなく、弾性波速度も強度回復の重要な指標となる可能性があることがわかった。また、原位置試験において岩盤の強度回復特性を検討する際にも、弾性波速度測定は簡便で有効なツールの一つになりうると考える。本年度は強度回復特性に関するデータを蓄積し、過去2年間のデータと比較検討した。採取場所や採取深度の影響に関してある程度の知見は得られたが、稚内層硬質頁岩は試験片ごとの物性値のばらつきが大きく、詳細な検討を行うことは難しかった。今後も、一軸圧縮強度や弾性波速度と強度回復の関係に関するデータの蓄積の必要性を感じる。

第3章では HDB-10 孔深度 500m 付近、HDB-11 孔深度 700m 付近に引き続き、HDB-11 深度 500 m 付近、HDB-11 深度 1000 m 付近の稚内層硬質頁岩を用いて、一般化応力緩和特性に関する検討を行った。過去3年間の試験結果を比較検討したところ、稚内層硬質頁岩では、試験開始から 10^2 秒程度経過した時点でグラフが若干屈曲する場合があることがわかった。この原因の一つとして、間隙水の排水の影響が考えられるが、今後も引き続き検討していく必要があると考えている。次いで、一般化応力緩和挙動と応力 - 歪曲線との関係について検討した。HDB-10 孔深度 500m 付近、HDB-11 孔深度 700m 付近と同様に、強度とヤング率がともに 1 になるように応力と歪を正規化することで、次式のような関係のあることが確認された。

HDB-10 深度 500 m 付近 :	2.3	式(3-7)
HDB-11 深度 500 m 付近 :	2.1	式(3-5)
HDB-11 深度 700 m 付近 :	2.3	式(3-8)
HDB-11 深度 1000 m 付近 :	2.1	式(3-6)

これらの式からわかるように、時間経過に伴う変位の応力依存性を表すべき数は、採取場所や採取深度によらず比較的近い値をとることがわかった。さらに、この結果を強度破壊点以前の時間依存性挙動を表す構成方程式を用いて検討した。

$$d \sigma^* / dt = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\sigma^* - 1)^{-m_1} \quad \text{式(3-10)}$$

この式中の n_1 を 27～53 程度、 m_1 を 22～43 程度とすると、HDB-10 深度 500 m 付近、HDB-11 深度 500 m 付近、HDB-11 深度 700 m 付近、HDB-11 深度 1000 m 付近の一般化応力緩和試験結果を概ね説明できることがわかった。強度破壊点以前の時間依存性挙動は、地下構造物の長期安定性を評価するための重要な情報である。しかし、これらのパラメータの妥当性については得られている知見が少なく、今後、数値シミュレーションなどにより検証していく必要があると考える。

第 4 章では引張応力下での岩盤挙動を議論すべく、圧裂引張強度試験を実施した。HDB-11 の深度 500 m 付近、深度 700 m 付近、深度 1000 m 付近の結果をまとめると以下ようになる。なお括弧内の値は変動係数であり、脆性度は一軸圧縮強度 / 圧裂引張強度で計算した。

	圧裂引張強度	一軸圧縮強度	脆性度
HDB-11 深度 500 m 付近	: 3.3 MPa(24%)	25.6 MPa(53%)	7.8
HDB-11 深度 700 m 付近	: 1.4 MPa(44%)	16.2 MPa(20%)	11.6
HDB-11 深度 1000 m 付近	: 3.3 MPa(28%)	19.9 MPa(42%)	6.0

他の多くの岩石と比べると、稚内層硬質頁岩の脆性度は 6～12 であり標準的な範囲⁸⁾にあるといえる。強度のばらつきはかなり大きいので確たることはいえないが、本年度と 2006 年度の結果を比較すると、本年度の結果では比較的脆性度が小さかった。この理由は判然としないが、理由の一つとして層理面の影響の可能性があり⁶⁾、今後も引き続き検討が必要と考えている。

昨年度³⁾と今年度にわたって実施した結果をまとめてみると、稚内層硬質頁岩の強度回復特性や一般応力緩和特性は場所や深度によって明瞭に変化することは認められなかった。一軸圧縮強度と圧裂引張強度についても場所や深度によって激変することは認められなかった。ただし、これまでに得られたのは限られた場所や深度での結果であり、不明な点が多く残されているため今後も多面的かつ継続的な研究が必要である。

参考文献

- 1) 大久保誠介, 福井勝則, 杉田隆博:“ 緩み領域の強度回復に関する基礎研究”, 資源・素材学会誌, Vol.117, No.8, p.631-638, (2001)
- 2) 大久保誠介:“ ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法に関する研究(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”, JNC TJ8400 2004-018, (2005)
- 3) 平本正行, 小林保之, 大久保誠介:“ 岩石の強度回復特性・一般化応力緩和挙動に関する研究”, JAEA-Research 2008-002, (2008)
- 4) 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一:“ 一軸圧縮荷重下での岩石のクリープ特性”, 資源・素材学会誌, Vol.105, No.7, p.521-526, (1989)
- 5) 福井勝則, 大久保誠介, 西松裕一:“ 一軸圧縮荷重下での岩石の一般化した応力緩和特性”, 資源・素材学会誌, Vol.108, No.7, p.543-548, (1992)
- 6) 日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター:“ 幌延深地層研究計画平成 18 年度調査研究成果報告”, 第 3 章, (2007)
- 7) 大久保誠介・福井勝則・羽柴公博:“ コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ試験結果による検討”, 資源・素材学会誌, Vol.118, No.12, p.737-744, (2002)
- 8) 山口梅太郎・西松裕一:“ 岩石力学入門”, p.134, 東京大学出版社(東京)(1991)

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
物質質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
	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
比誘電率 ^(b)	(数字の)	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) とよばれる。
(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	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 ^(b)	1 ^(b) m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	1 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	ワット	W	J/s m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C	s A 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
光強度	ルーメン	lm	cd sr ^(f) 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	1 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み、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g) 単位シーベルト (PV.2002.70.205) についてはCIPM勧告2 (CF-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
粘り度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷密度	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ³ m ⁻² kg s ⁻³ = m kg s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼンタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	zepto	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	yocto	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=1 l=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
バトン	b	1 b=100 fm=(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。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	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
ステルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガール	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 ₀ =(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「 $\hat{=}$ 」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	fm	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
カロリー	cal	1 cal=4.185 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)

