



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)

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

平本 正行 小林 保之 大久保 誠介*

Masayuki HIRAMOTO, Yasushi KOBAYASHI and Seisuke OKUBO*

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

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは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/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
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
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

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

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
平本 正行[※], 小林 保之, 大久保 誠介^{*}

(2008年1月7日 受理)

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、岩石の「強度回復特性」および「一般化応力緩和挙動」について検討した。

2章では、岩石の「強度回復特性」について検討した。本研究で使用した供試体は、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である。強度回復の評価にあたって、押し込み試験後に円筒形の型から取り出した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。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結果となった。また、HDB-10孔とHDB-11孔の試料を比較すると、一軸圧縮強度が小さいHDB-10孔の方が強度回復が大きい結果となった。ただし、試料としてまだ2地点のみの結果であるため、試料の採取場所による影響を定量的に評価することは現段階では困難であり、今後さらなるデータの蓄積が必要であると考え。この「強度回復特性」は、長期にわたる地下構造物の安定性にとって極めて重要であり、原位置試験を含む本格的な検討を早期に実施する必要があると考える。

3章では、岩石の「一般化応力緩和挙動」について検討した。本研究で使用した供試体は、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である。その結果、稚内層硬質頁岩は、三城目安山岩 および 河津凝灰岩の示す挙動と定性的には同じであった。しかし、試験片の違いによる試験結果のばらつきが大きく、定量的に評価することは現段階では困難であり、今後さらなるデータの蓄積が必要であると考え。この「一般化応力緩和挙動」は、従来のクリープ試験や応力緩和試験では得られない情報を追加し、コンプライアンス可変型構成方程式の検証 および 高度化に役立つと考える。

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17,18年度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

※ 技術開発協力員

* 東京大学 教授

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

Masayuki HIRAMOTO[※], Yasushi KOBAYASHI and Seisuke OKUBO^{*}

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

(Received January 7, 2008)

This study was conducted to increase the reliability of evaluation methods for assessing the long-term stability of near-field rock mass.

In Chapter 2, strength recovery characteristic of rocks was examined. The sample rock was Wakkanai-formation shale (HDB-10 and HDB-11) gathered in Horonobe underground research project. It was found that strength recovery increases with increase of testing time or load-holding time. It was interesting that the sample (HDB-10) with relatively small unconfined compressive strength showed higher strength recovery. These results were obtained for only two sample rocks. Therefore, the accumulation of the data is needed in future to evaluate the influence of the boring places quantitatively. It can be said that strength recovery is very important for long-term stability of underground structures. It is urgent to start the investigation program including an in-situ test to clarify the mechanism of strength recovery.

In Chapter 3, the generalized relaxation behavior of rock was examined. The sample rock was Wakkanai-formation shale (HDB-10 and HDB-11) gathered in Horonobe underground research project. As a result, the behavior of the Wakkanai-formation shale in the generalized relaxation test was found to be very close to the behavior of Sanjome-andesite and Kawazu-tuff. The obtained data shows large variability, so the accumulation of the data is needed in future to understand rightly the complicated generalized relaxation behavior. It is believed the results are still valuable for the future examination and improvement concerning constitutive equations and expectation models.

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.

※ Collaborating Engineer

* The University of Tokyo

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.....	4
2. 3 試料岩石.....	5
2. 4 試験方法.....	7
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.....	31
3. 岩石の一般化応力緩和挙動に関する検討.....	32
3. 1 はじめに.....	32
3. 2 これまでの研究成果.....	33
3. 3 一般化応力緩和挙動とは	34
3. 4 試料岩石と試験方法.....	41
3. 5 試験結果 および 考察	43
3. 6 まとめ および 今後の課題.....	57
4. おわりに	59
参考文献.....	60

CONTENTS

1. Introduction	1
2. Examination on the characteristics of strength recovery	2
2.1 Introduction	2
2.2 Former results of research	4
2.3 Sample rock	5
2.4 Testing method	7
2.5 Testing results and discussion	15
2.6 Conclusion and future subject	31
3. Examination on the behavior in general relaxation	32
3.1 Introduction	32
3.2 Former results of research	33
3.3 Behavior in generalized relaxation	34
3.4 Sample rock and testing method	41
3.5 Testing results and discussion	43
3.6 Conclusion and future subject	57
4. Conclusion	59
Reference	60

表目次

表 2-1	試験片の緒元 (HDB-10 孔)	6
表 2-2	試験片の緒元 (HDB-11 孔)	6
表 2-3	押し込み試験結果 (HDB-10 孔)	15
表 2-4	押し込み試験結果 (HDB-11 孔)	15
表 2-5	取り出し後の一軸圧縮試験結果 (HDB-10 孔)	23
表 2-6	取り出し後の一軸圧縮試験結果 (HDB-11 孔)	23

図目次

図 2-1	坑道周辺の模式図	3
図 2-2	坑道の安定性の模式図	3
図 2-3	稚内層硬質頁岩のコアの写真 (HDB-10 孔)	5
図 2-4	稚内層硬質頁岩のコアの写真 (HDB-11 孔)	5
図 2-5	サーボ試験機の写真	7
図 2-6	試験手順の概略図	9
図 2-7	強度回復試験の写真	10
図 2-8	押し込み試験における応力—歪曲線	17
図 2-9	荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化 (保持時間 4 時間)	19
図 2-10	荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化 (保持時間 24 時間)	20
図 2-11	押し込み試験終了時の写真 (HDB-11 孔)	21
図 2-12	押し込み試験終了時の写真 (HDB-10 孔)	22
図 2-13	取り出し後の一軸圧縮試験時の応力—歪曲線	24
図 2-14	取り出し後の一軸圧縮試験終了時の写真 (HDB-11 孔)	26
図 2-15	取り出し後の一軸圧縮試験終了時の写真 (HDB-10 孔)	27
図 2-16	保持時間による取り出し後の一軸圧縮強度の変化	29
図 2-17	荷重を一定にしてからのクリープ歪と取り出し後の一軸圧縮強度の関係	30
図 3-1	一般化応力緩和試験の概念図	35
図 3-2	一般化応力緩和試験の分類	35
図 3-3	強固な上下盤に一定の力 F を加え続ける場合	37
図 3-4	強固な上下盤に一定の力 F を加え続ける場合の変形	38
図 3-5	縦に重ねて置かれた 2 本の試験片の応力緩和試験	39
図 3-6	縦に重ねて置かれた 2 本の試験片の応力緩和	40
図 3-7	一般化した応力緩和試験の概念図と γ^*	42
図 3-8	一般化応力緩和試験を開始する直前までの応力—歪曲線	44
図 3-9	緩和応力 および 歪の経時変化 (緩和方向係数: $-\infty$)	46
図 3-10	緩和応力 および 歪の経時変化 (緩和方向係数: -2.0)	47
図 3-11	緩和応力 および 歪の経時変化 (緩和方向係数: -0.7)	48
図 3-12	緩和応力 および 歪の経時変化 (緩和方向係数: 0)	49
図 3-13	試験開始 10 ⁴ s 後の応力—歪曲線上での位置	51
図 3-14	一般化応力緩和試験終了後の応力—歪曲線	53
図 3-15	試験開始 10 ⁴ s 後の正規化した応力—歪曲線上での位置	55

1. はじめに

本研究では、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、岩石の「強度回復特性」および「一般化応力緩和挙動」について検討した。

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、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」に関する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。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、クリープと応力緩和の中間的な挙動を「一般化応力緩和挙動」と名付けて、荷重と変位を組み合わせる量を制御変数とし、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蓄積した。

2. 岩石の強度回復特性に関する検討

2. 1 はじめに

坑道などの地下空洞を掘削すると、空洞周辺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損傷を受ける。このような損傷や応力状態が変化した領域は、掘削影響領域（Excavation Disturbed Zone, 以下 EDZ）と呼ばれ、強度の低下や透水性の増加等が生じると考えられている。しかし一方で、十分な強度・剛性を持つ支保工が施された場合には、EDZ に対して坑道内部からは支保工反力が内圧として、周辺岩盤からは地圧が外圧として作用する。この圧密効果により、EDZ 内における岩盤の強度が回復するとした場合には、空洞の安定性は大きく低下しないとも考えられる。（図 2-1, 図 2-2 参照）

本章では、岩盤の「強度回復特性」は、地下構造物の長期安定性にとって極めて重要であると考え、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。

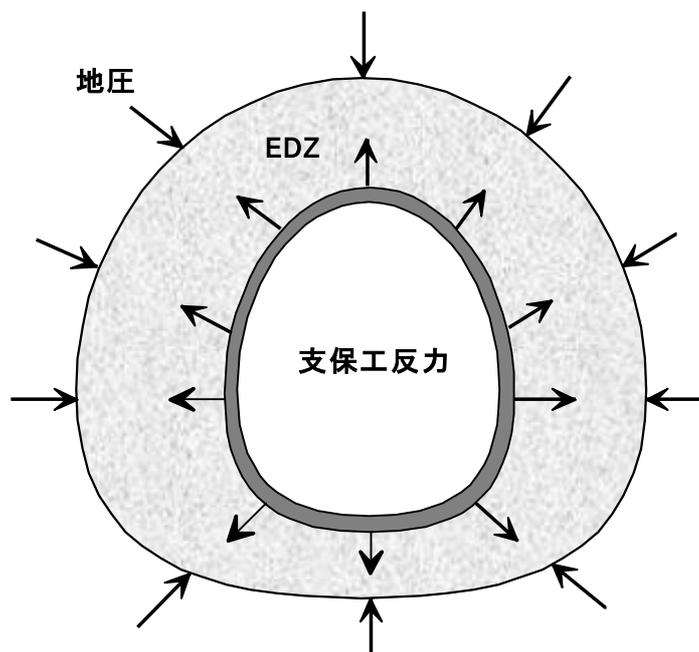


図 2-1 坑道周辺の模式図

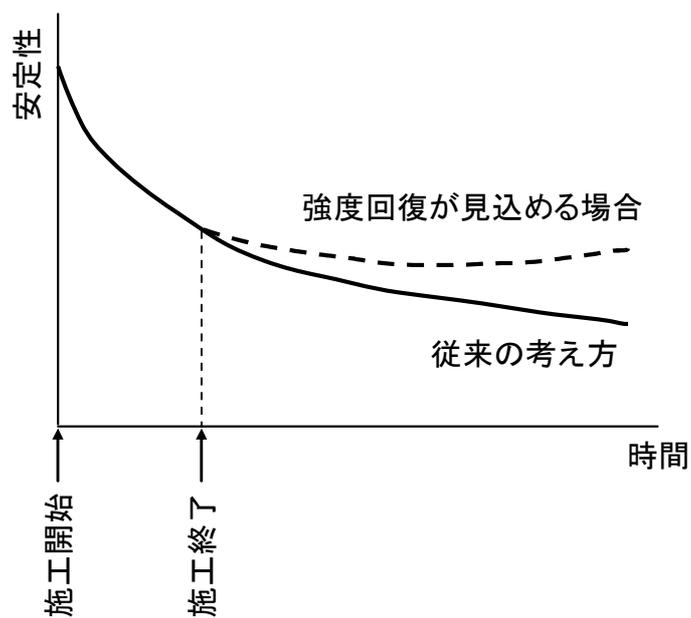


図 2-2 坑道の安定性の模式図

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、土丹、田下凝灰岩、来待砂岩では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、側圧と関係があることが判明した。特に土丹は、押し込み最大荷重が大きいと試料岩石の強度を越えていた。一方、三城目安山岩については、押し込み最大荷重を100kN以上にしても強度回復の傾向はほとんど見られず、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ており、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、どの程度強度回復特性があるかを調べた。具体的には、押し込み最大荷重を9.8, 19.6, 39.2, 58.8kNの4条件（これらの荷重を試験片の初期断面積で割ると、約20, 40, 80, 120MPaとなる）とし、強度回復における押し込み最大荷重の影響を調べた。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。

(2) 本研究の内容

強度回復には、押し込み荷重の保持時間が大きな影響を与えていると想定されるため、本研究では、押し込み最大荷重を一定の39.2kN（試験片の初期断面積で割ると、約80MPa）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。また、同一岩種で採取場所の異なる試料を用いた場合にどのような違いがあるかを調べた。

なお、深さ1000mの地中で土被りから計算される初期応力は25MPa程度であり、加えた押し込み最大荷重はそれよりもかなり大きめであるが、強度回復の有無をできるだけ短時間で調べるためにこのように設定した。

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-10孔，HDB-11孔）で採取した稚内層硬質頁岩を用いた。図2-3，図2-4に直径80mmのコアの写真を示す。いずれのコアも多数のクラックが観察された。試験片は以下の手順で作成した。表2-1，表2-2に試験片の緒元を示す。試験はHDB-10孔で2本，HDB-11孔で3本，同一条件で行った。

- 手順1 : コアを長さ約200mm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。

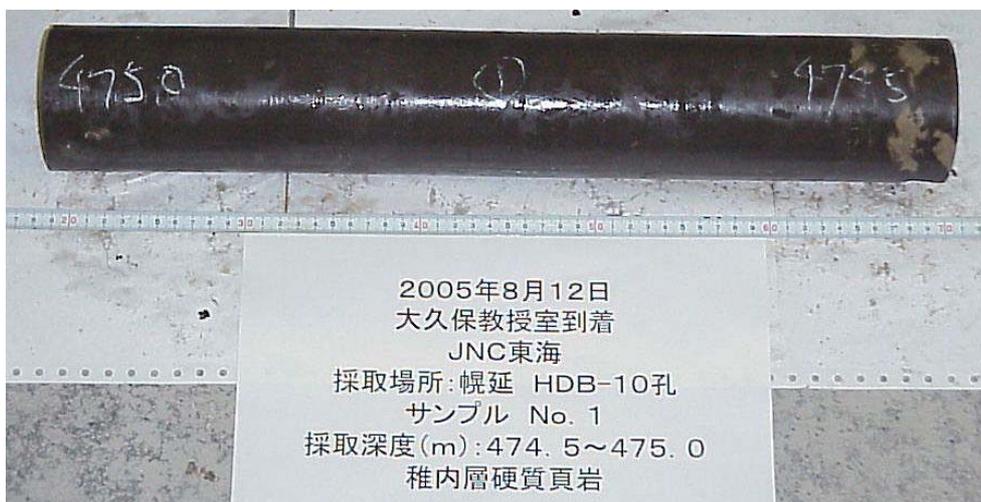


図2-3 稚内層硬質頁岩のコアの写真（HDB-10孔）



図2-4 稚内層硬質頁岩のコアの写真（HDB-11孔）

表 2-1 試験片の緒元 (HDB-10 孔)

採取場所 および深度	試料番号	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	重量 (g)	密度 (g/cm ³)	圧密過程	
							荷重 (kN)	保持時間 (s)
HDB-10 (474.50m ~475.00m)	HDB-10-1	24.75	25.10	12.08	23.702	1.96	39.2	10
	HDB-10-2	24.70	25.45	12.19	23.473	1.92		10
	HDB-10-3	24.80	24.90	12.03	23.227	1.93		14400
	HDB-10-4	24.75	25.20	12.12	23.518	1.94		14400
	HDB-10-5	24.70	25.10	12.03	23.305	1.94		86400
	HDB-10-6	24.75	25.45	12.24	23.681	1.93		86400

表 2-2 試験片の緒元 (HDB-11 孔)

採取場所 および深度	試料番号	直径 (mm)	高さ (mm)	体積 (cm ³)	重量 (g)	密度 (g/cm ³)	圧密過程	
							荷重 (kN)	保持時間 (s)
HDB-11 (727.25m ~727.85m)	HDB-11-1	24.90	25.00	12.17	22.99	1.89	39.2	10
	HDB-11-2	24.90	25.05	12.20	23.12	1.90		10
	HDB-11-3	24.90	25.05	12.20	23.15	1.90		10
	HDB-11-4	24.90	25.00	12.17	22.35	1.84		14400
	HDB-11-5	24.90	25.05	12.20	23.31	1.91		14400
	HDB-11-6	24.90	25.05	12.20	23.09	1.89		14400
	HDB-11-7	24.90	25.05	12.20	22.88	1.88		86400
	HDB-11-8	24.90	25.05	12.20	22.36	1.83		86400
	HDB-11-9	24.90	25.05	12.20	23.16	1.90		86400

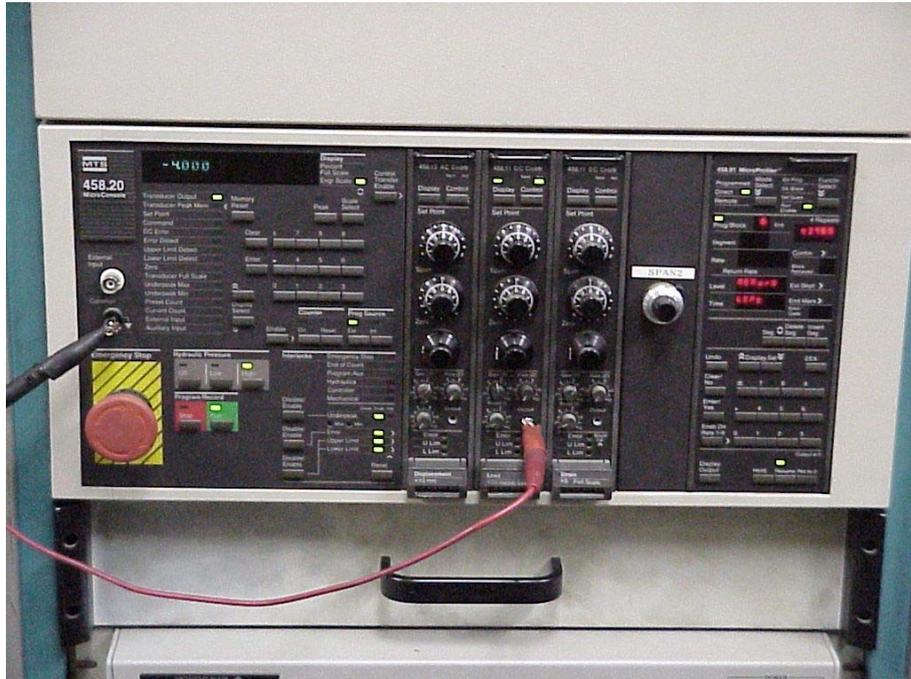
2. 4 試験方法

試験機は、容量 1500kN の MTS 社製のサーボ試験機を用いた。図 2-5 に試験機の写真を示す。



(a) 載荷装置

図 2-5 サーボ試験機の写真



(b) 制御装置



(c) 油圧源

図 2-5 サーボ試験機の写真の続き

図 2-6、図 2-7 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, 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 : 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。

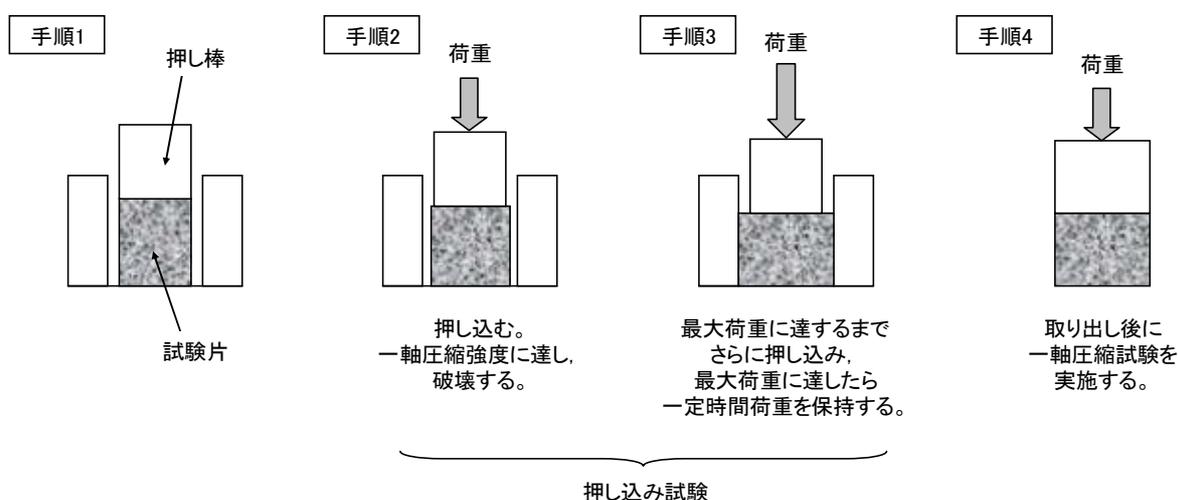


図 2-6 試験手順の概略図

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) 载荷前（手順1）の様子

図 2-7 強度回復試験の写真



(c) 载荷中 (手順2) の様子



(d) 押し込み試験 (手順2~3) 終了後の様子

図 2-7 強度回復試験の写真 の続き

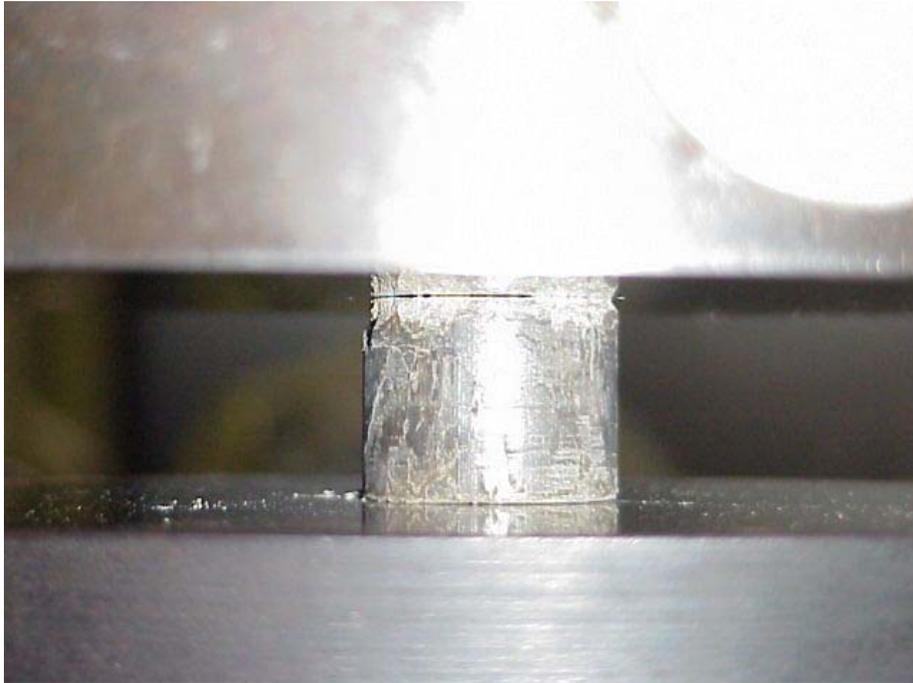


(e) 押し込み試験（手順2～3）終了後の押し棒と構成厚肉円筒

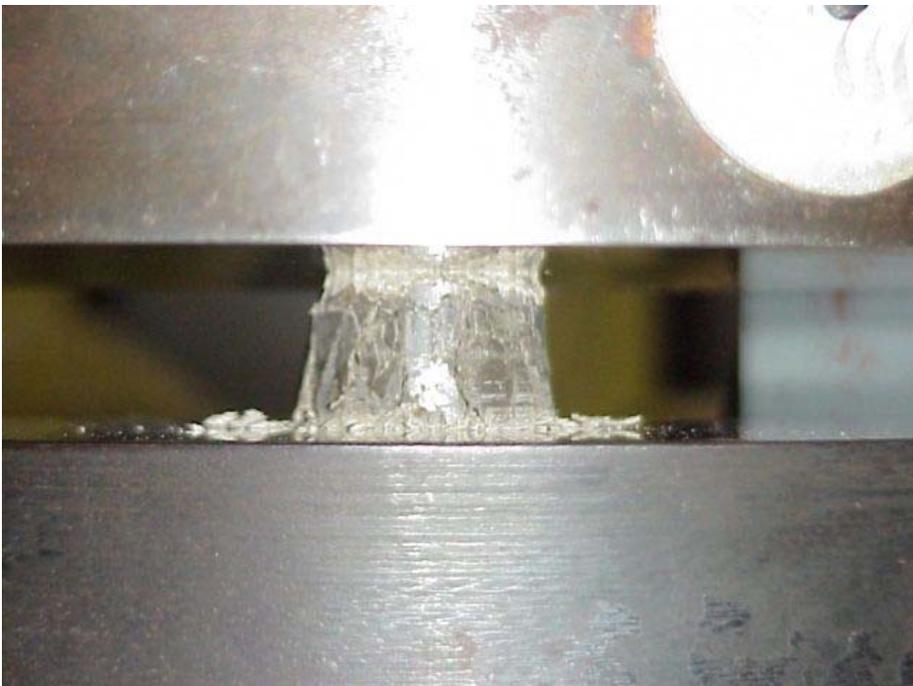


(f) 押し込み試験（手順2～3）終了後の試験片

図2-7 強度回復試験の写真の続き

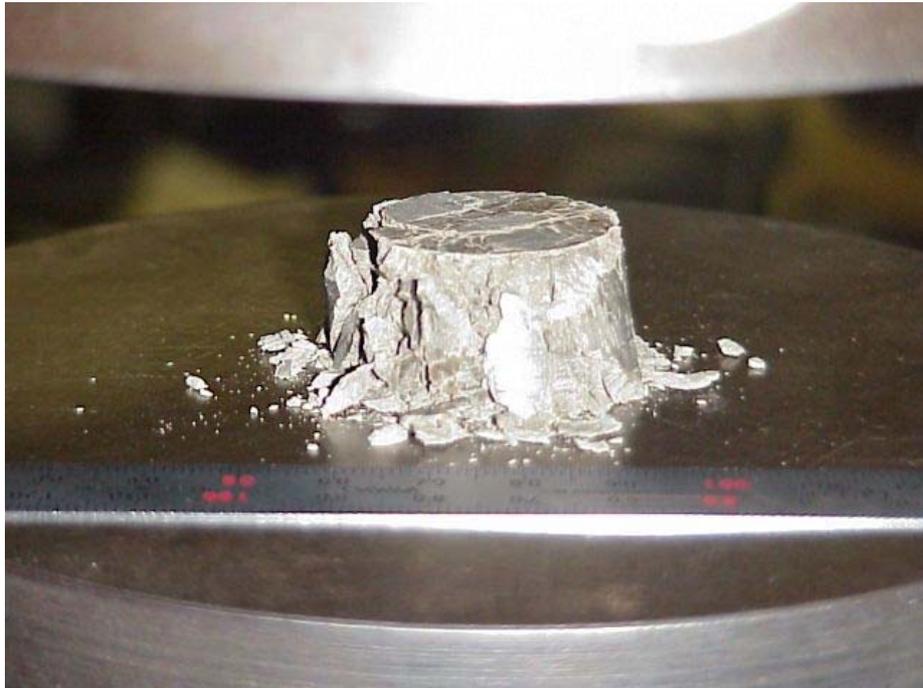


(g) 一軸圧縮試験（手順4）前の様子



(h) 一軸圧縮試験（手順4）中の様子

図 2-7 強度回復試験の写真の続き



(i) 一軸圧縮試験（手順4）後の様子（その1）



(j) 一軸圧縮試験（手順4）後の様子（その2）

図 2-7 強度回復試験の写真の続き

2. 5 試験結果 および 考察

2. 5. 1 通常の一軸圧縮試験結果

別途、高さ 52mm、直径 25mm の円柱形に整形した試料を用いて一軸圧縮試験を実施した。歪速度を 10^{-4} s^{-1} とした定歪速度試験における一軸圧縮強度の平均値は、HDB-10 孔の試料で 10.0MPa、HDB-11 孔の試料で 16.2MPa であった。(3 章の結果を引用)

2. 5. 2 押し込み試験結果 (手順 2~3)

表 2-3、表 2-4 に試験結果を示す。HDB-10 孔の試料では、押し込み試験前に比べ、試験後の試験片の直径は 10%程度増加し、高さは 14%程度減少した。それより計算される体積は 3%程度増加した。また、HDB-11 孔の試料では、押し込み試験前に比べ、試験後の試験片の直径は 10%程度増加し、高さは 11%程度減少した。それより計算される体積は 7%程度増加した。

表 2-3 押し込み試験結果 (HDB-10 孔)

採取場所 および深度	試料番号	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)
HDB-10 (474.50m ~475.00m)	HDB-10-1	27.15	21.40	12.39	22.846	1.84	14.7	0.03	39.2	10
	HDB-10-2	27.25	22.05	12.86	22.927	1.78	13.4	0.03		10
	HDB-10-3	27.15	20.90	12.10	21.989	1.82	16.1	0.87		14400
	HDB-10-4	27.20	21.45	12.46	22.316	1.79	14.9	0.77		14400
	HDB-10-5	27.15	20.95	12.13	21.821	1.80	16.5	1.08		86400
	HDB-10-6	27.15	21.60	12.50	22.324	1.79	15.1	1.30		86400

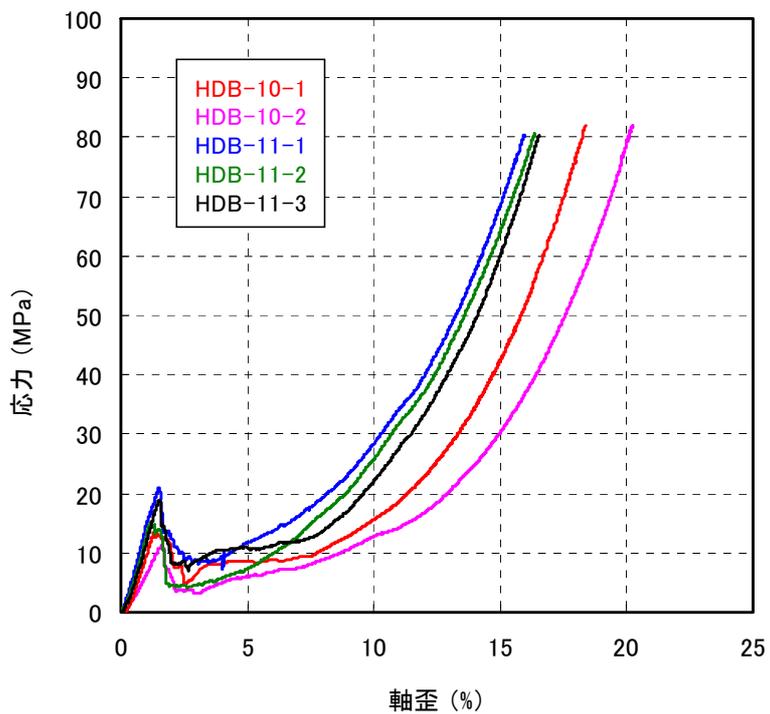
表 2-4 押し込み試験結果 (HDB-11 孔)

採取場所 および深度	試料番号	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)
HDB-11 (727.25m ~727.85m)	HDB-11-1	27.25	22.40	13.06	22.41	1.72	10.4	0.03	39.2	10
	HDB-11-2	27.30	22.15	12.97	22.17	1.71	11.6	0.04		10
	HDB-11-3	27.25	22.45	13.09	22.74	1.74	10.4	0.02		10
	HDB-11-4	27.35	22.35	13.13	21.81	1.66	10.8	0.50		14400
	HDB-11-5	27.25	21.95	12.80	22.55	1.76	12.4	0.63		14400
	HDB-11-6	27.25	22.25	12.98	22.48	1.73	11.2	0.59		14400
	HDB-11-7	27.35	22.20	13.04	21.75	1.67	11.2	1.08		86400
	HDB-11-8	27.20	22.60	13.13	21.33	1.62	9.8	0.97		86400
	HDB-11-9	27.25	22.00	12.83	21.83	1.70	12.2	0.98		86400

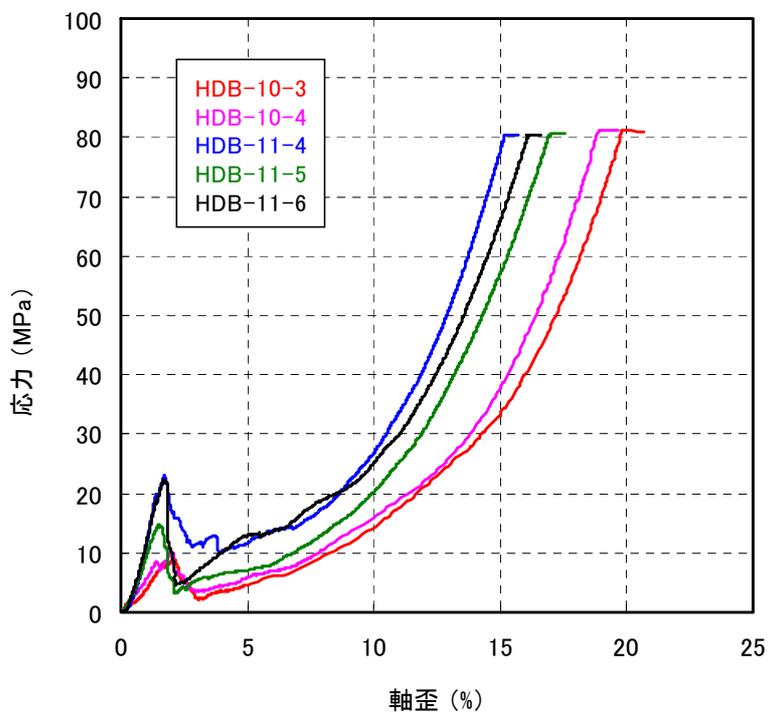
図 2-8 に、押し込み試験における応力—歪曲線を示す。ここでは簡明さを重んじて、軸歪は初期長さを基準とし、応力は初期断面積を基準として計算した。すなわち、微小歪の時と同じ計算方法で軸歪と応力を求めた。従って、見掛けの軸歪、見掛けの応力と称するのが正しいが、煩雑さを避けるために、以下では単に軸歪、応力とする。

図 2-8 (a) は、押し込み荷重が設定の 39.2kN (応力 : 81.5MPa) に達した後、10s 間荷重を保持した条件で得られた応力—歪曲線である。ごく初期の間、軸圧は上昇し、軸歪 1.5%程度で 15~20MPa の一軸圧縮応力に達した後、軸圧は低下し、軸歪が 3%付近で軸圧は最低値 5~10MPa をとる。その後は軸歪が増加するに従って、軸圧は下に凸の傾向で増加している。荷重が 39.2kN に達したときの軸歪は 15~20%程度であり、かなり大きな変形を受けている。荷重を 10s 間保持した間のクリープ歪は 0.03%とわずかであった。図 2-8 (b) は、押し込み荷重を 4 時間 (14400s) 保持した条件で得られた応力—歪曲線である。荷重を一定にするまでは図 2-8 (a) と同様の傾向であり、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、HDB-10 孔で 0.77%, 0.87%, HDB-11 孔で 0.50%, 0.59%, 0.63%であった。図 2-8 (c) は、押し込み荷重を 24 時間 (86400s) 保持した条件で得られた応力—歪曲線である。この場合も荷重を一定にするまでは、図 2-8 (a), (b) と同様の傾向であり、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、HDB-10 孔で 1.08%, 1.30%, HDB-11 孔で 0.97%, 0.98%, 1.08%であった。

図 2-9 に、押し込み時間を 4 時間保持した時の荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化を示す。図 2-9 (a) は、横軸の経過時間を普通軸で示したものである。最初 5000s 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分かる。図 2-9 (b) は、横軸の経過時間を対数軸で示したものである。100s までは下に凸の傾向がやや強いが、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判明した。ここで、最初の 100s 間 下に凸の挙動を示すのは、福井ら³⁾ が示すように、クリープに至るまでの載荷速度が 2.5N/s と遅いため、初期速度の影響であると考えられる。図 2-10 に、押し込み荷重を 24 時間保持した時の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、図 2-9 と同様の傾向であった。

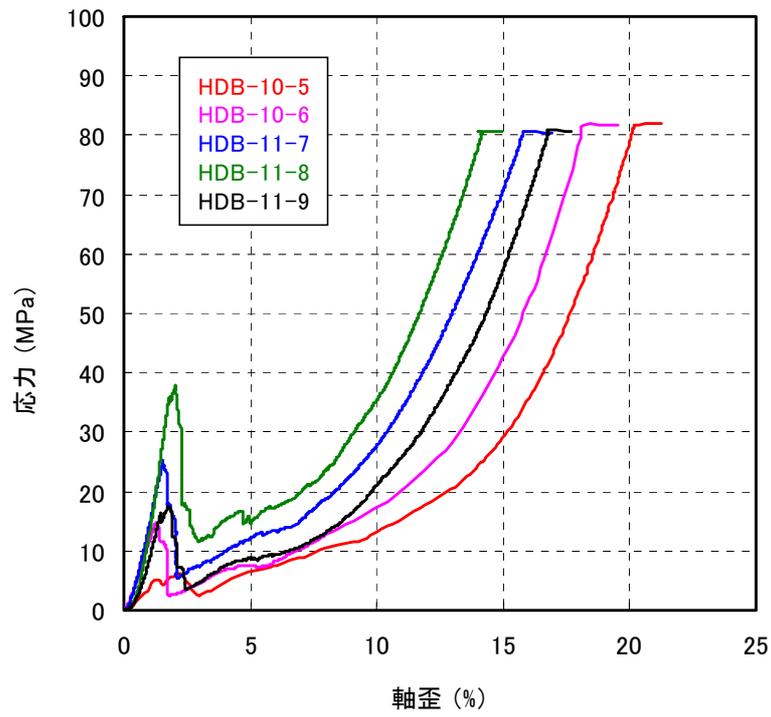


(a) 保持時間 10s



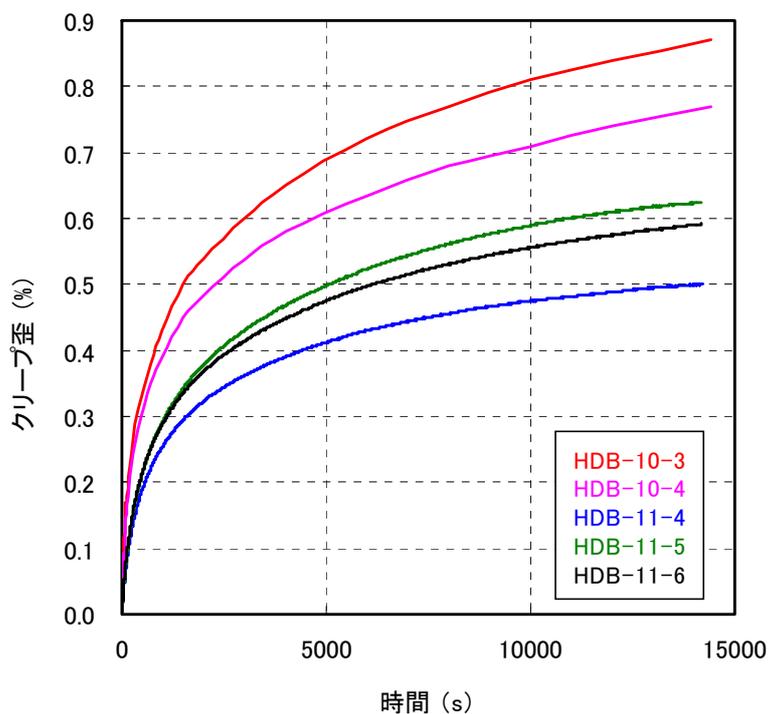
(b) 保持時間 4 時間

図 2-8 押し込み試験における応力—歪曲線

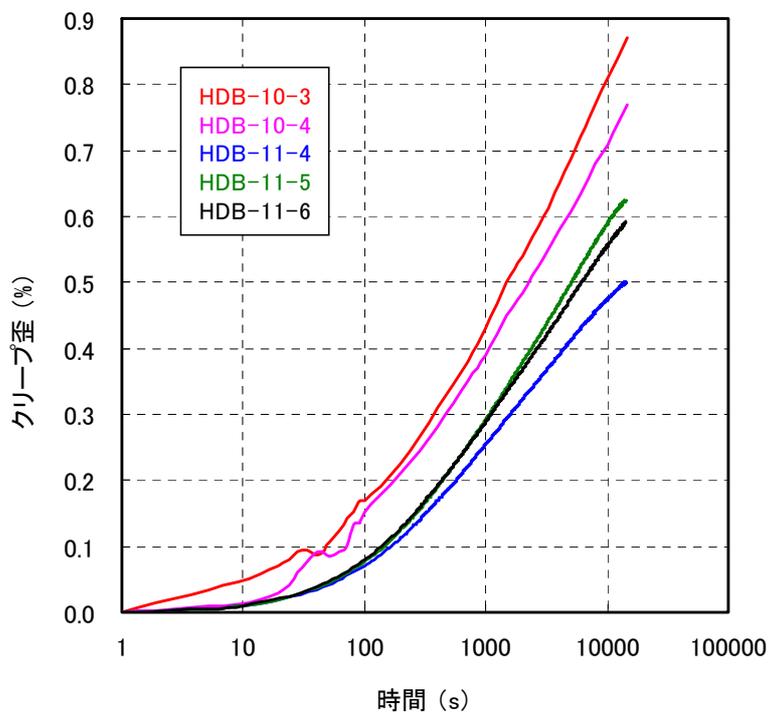


(c) 保持時間 24 時間

図 2-8 押し込み試験における応力—歪曲線 の続き

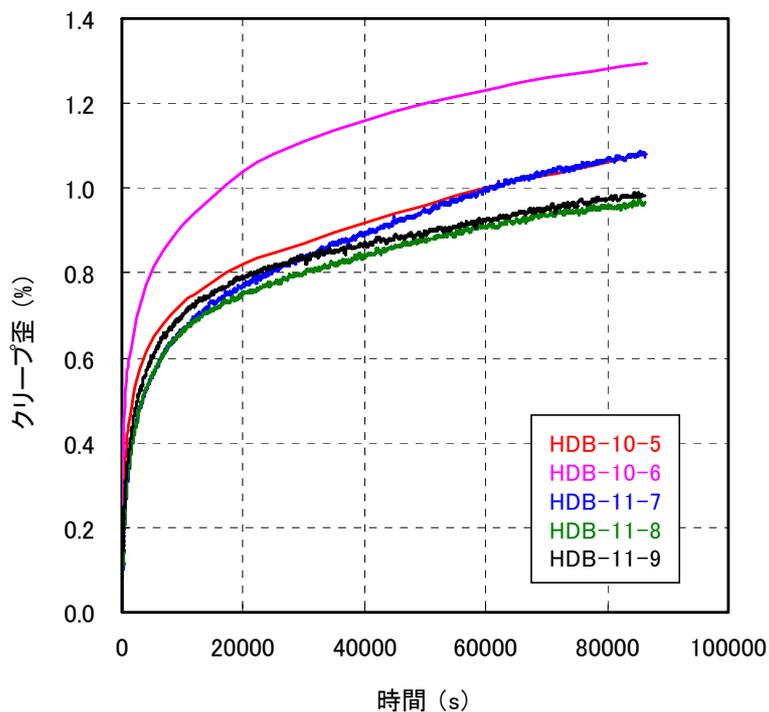


(a) 時間を普通軸で表示した場合

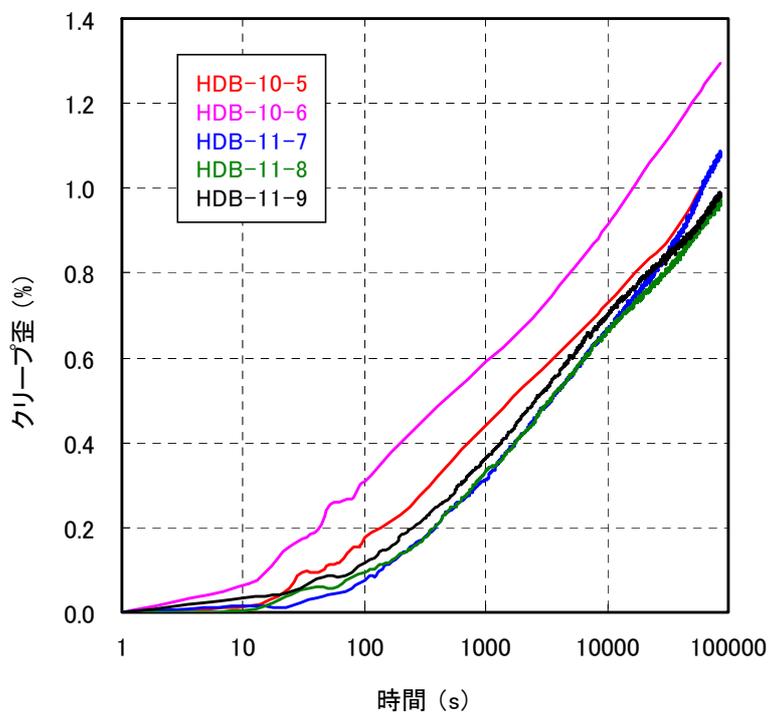


(b) 時間を対数軸で表示した場合

図 2-9 荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化 (保持時間 4 時間)



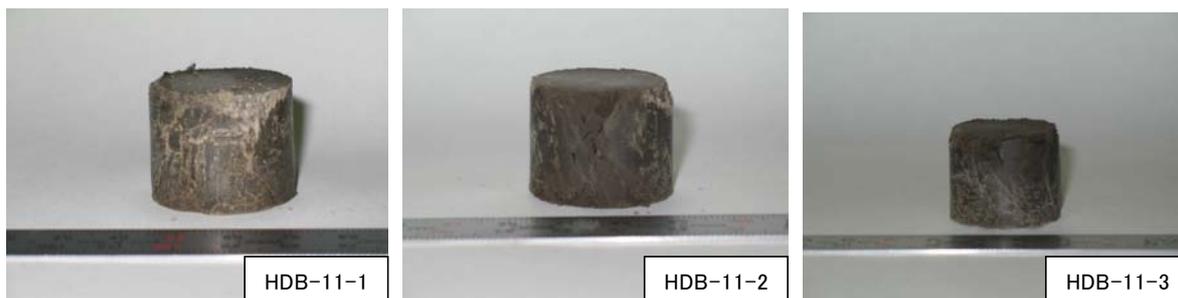
(a) 時間を普通軸で表示した場合



(b) 時間を対数軸で表示した場合

図 2-10 荷重を一定にしてからのクリープ歪の経時変化 (保持時間 24 時間)

図 2-11, 図 2-12 に押し込み試験後に取り出した試験片全ての写真を示す。写真から分かるように、試験片の側面は光沢があり滑らかで、細かいひび割れが多い。また、上面の周縁は面取りをしたような状況で上面 および 下面にもひび割れが見られるものがある。大久保ら¹⁾の結果と比べると、比較的土丹に似ているが、稚内層硬質頁岩は黒色で亀裂は白っぽいため、亀裂がはっきり観察しやすい点は土丹と異なる。目視による観察では、荷重の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 10s

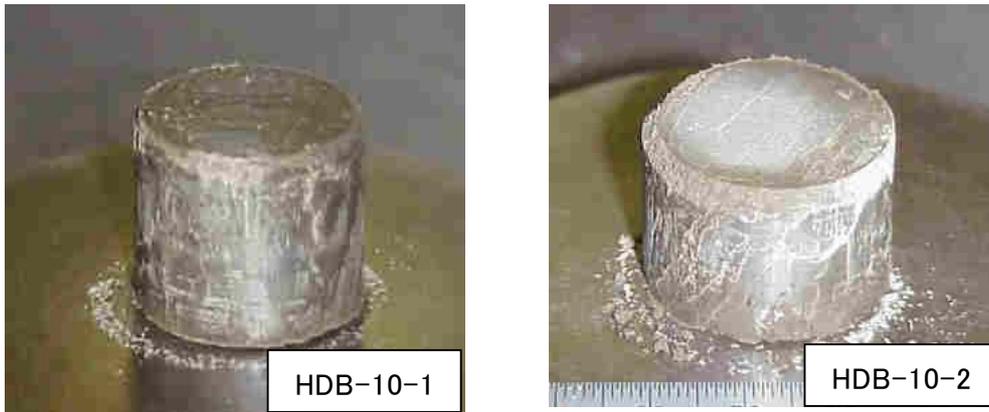


(b) 保持時間 4 時間

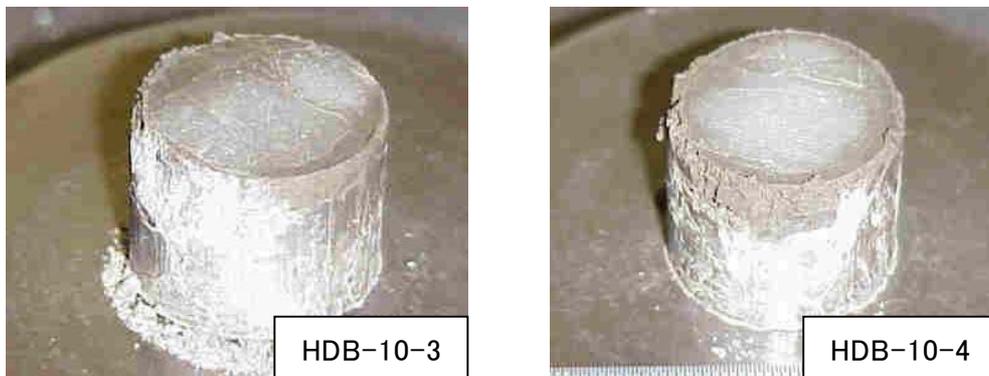


(c) 保持時間 24 時間

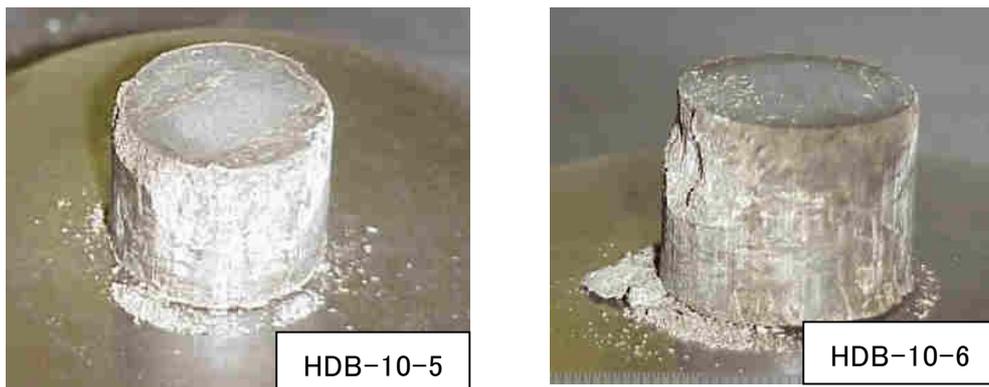
図 2-11 押し込み試験終了時の写真 (HDB-11 孔)



(a) 保持時間 10s



(b) 保持時間 4 時間



(c) 保持時間 24 時間

図 2-12 押し込み試験終了時の写真 (HDB-10 孔)

2. 5. 3 取り出し後の一軸圧縮試験結果（手順 4）

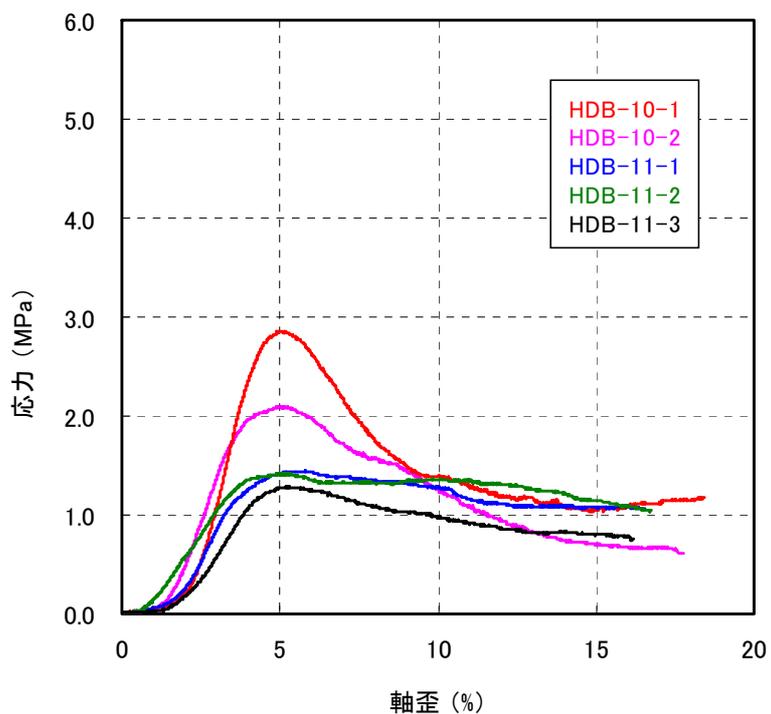
厚肉円筒から取り出した試験片を用いて一軸圧縮試験を行った。表 2-5、表 2-6 に取り出し後の一軸圧縮強度を、図 2-13 に取り出し後の一軸圧縮試験により得られた応力—歪曲線を示す。図 2-13 より、軸歪 2.5%以降では、ほぼ直線的に応力と軸歪は増加し、軸歪 5%程度で一軸圧縮強度に達している。応力—歪曲線にばらつきが見られるものの、保持時間が長いほど、一軸圧縮強度が大きくなる傾向が見られ、保持時間が 10s の時に比べ、14400s および 86400s の時には一軸圧縮強度は、HDB-10 孔では 1.5 倍、1.9 倍に、HDB-11 孔では 1.25 倍、1.5 倍となっている。なお、軸歪 2%以下では、軸歪の増加による応力の増加は小さいが、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たためと考えられる。図 2-14、図 2-15 に一軸圧縮試験終了時の写真を示す。試験片は、かなり破碎された状態であるが、目視による差は明らかではなかった。

表 2-5 取り出し後の一軸圧縮試験結果（HDB-10 孔）

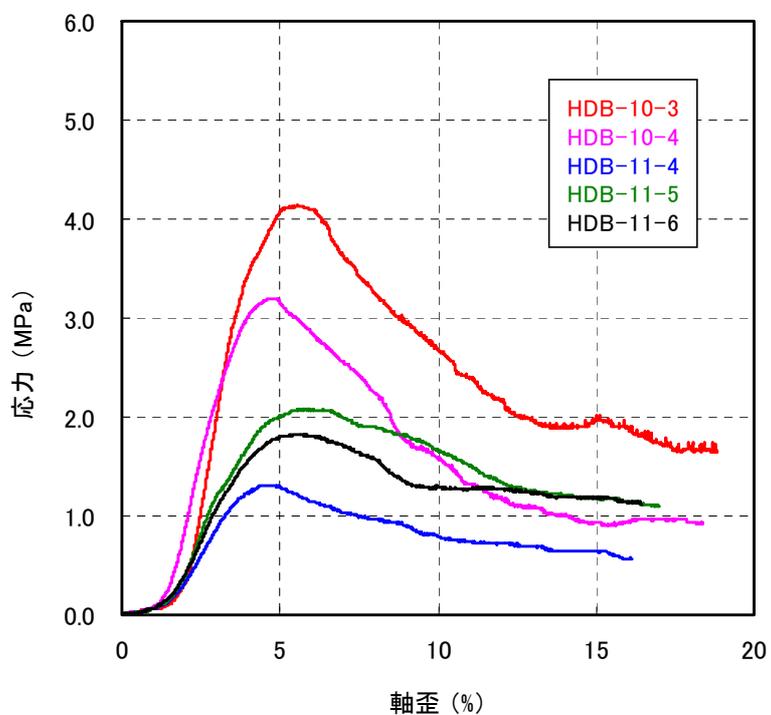
採取場所 および深度	試料番号	取り出し後の 一軸圧縮強度 (MPa)	圧密過程	
			荷重 (kN)	保持時間 (s)
HDB-10 (474.50m ~475.00m)	HDB-10-1	2.9	39.2	10
	HDB-10-2	2.1		10
	HDB-10-3	4.1		14400
	HDB-10-4	3.2		14400
	HDB-10-5	5.3		86400
	HDB-10-6	4.2		86400

表 2-6 取り出し後の一軸圧縮試験結果（HDB-11 孔）

採取場所 および深度	試料番号	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)
HDB-11 (727.25m ~727.85m)	HDB-11-1	1.45	39.2	10
	HDB-11-2	1.42		10
	HDB-11-3	1.29		10
	HDB-11-4	1.32		14400
	HDB-11-5	2.08		14400
	HDB-11-6	1.83		14400
	HDB-11-7	2.44		86400
	HDB-11-8	1.48		86400
	HDB-11-9	2.29		86400

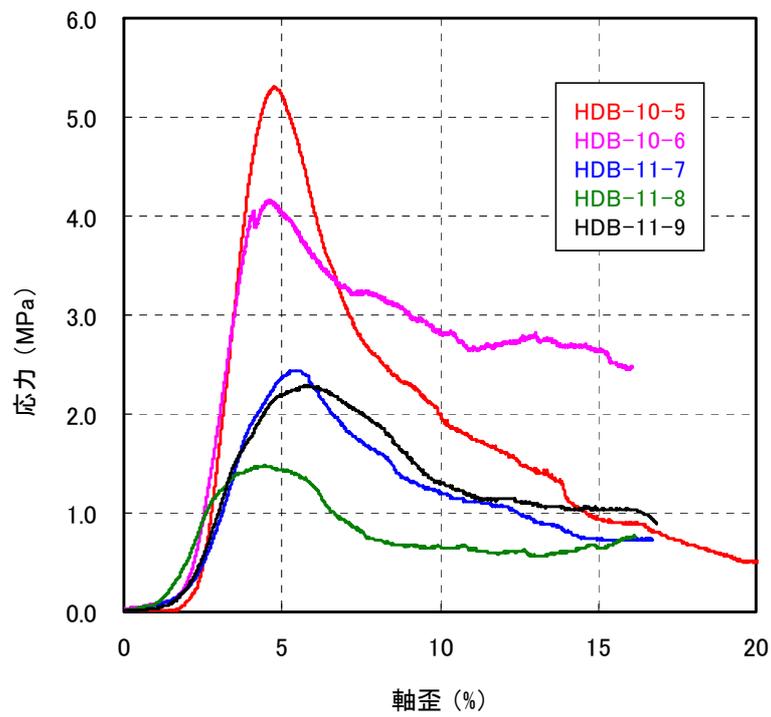


(a) 保持時間 10s



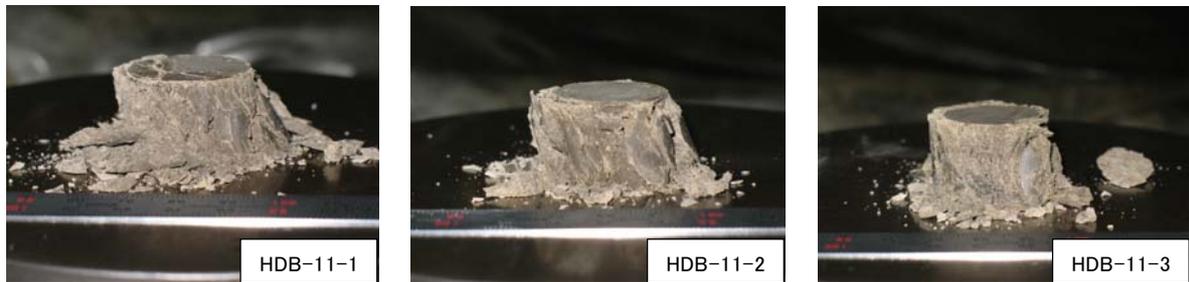
(b) 保持時間 4 時間

図 2-13 取り出し後の一軸圧縮試験時の応力—歪曲線

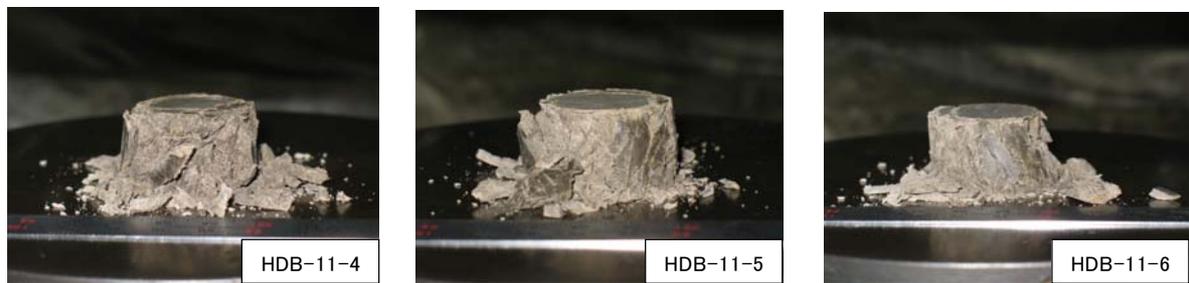


(c) 保持時間 24 時間

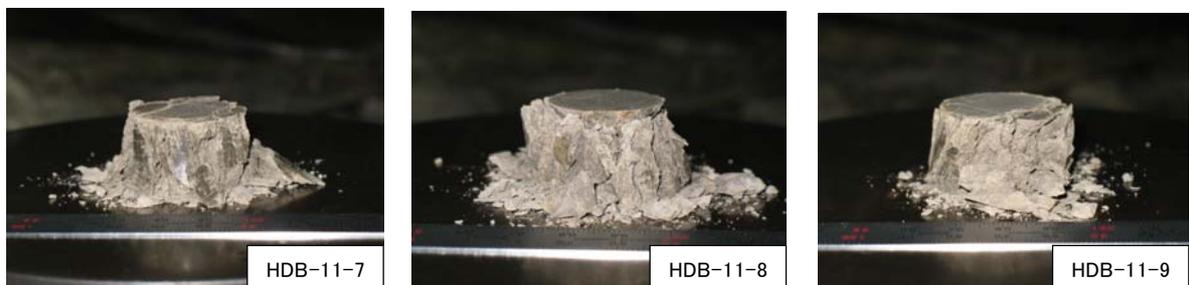
図 2-13 取り出し後の一軸圧縮試験時の応力—歪曲線 の続き



(a) 保持時間 10s

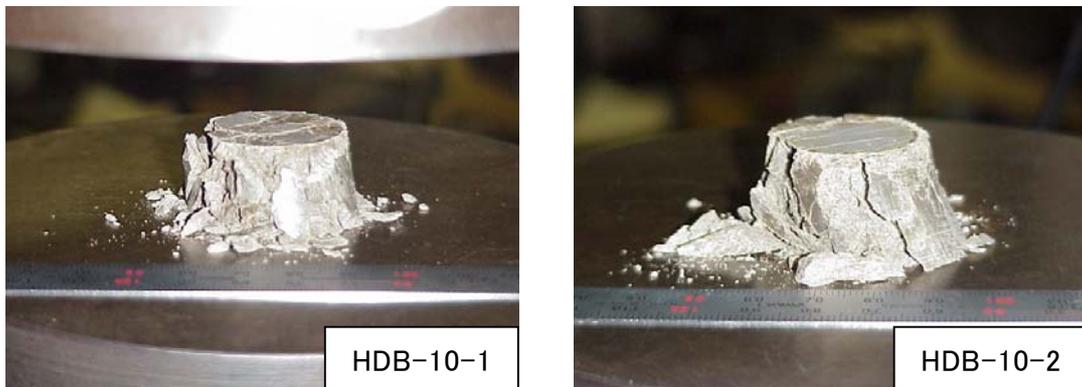


(b) 保持時間 4 時間

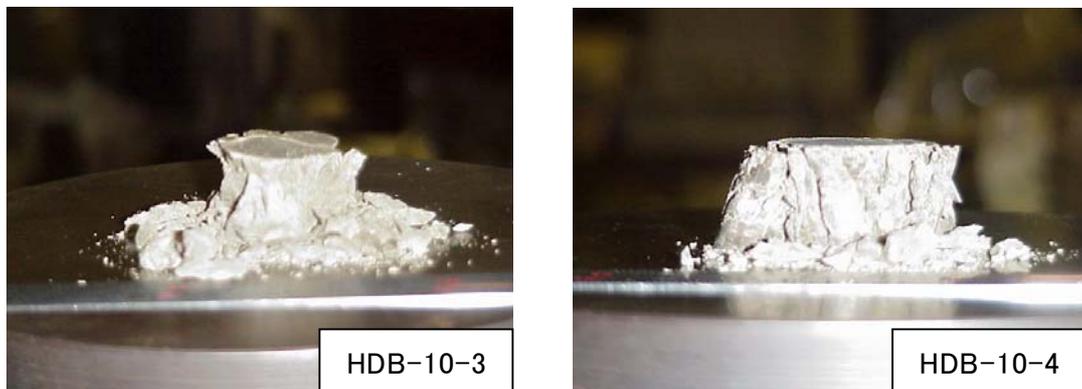


(c) 保持時間 24 時間

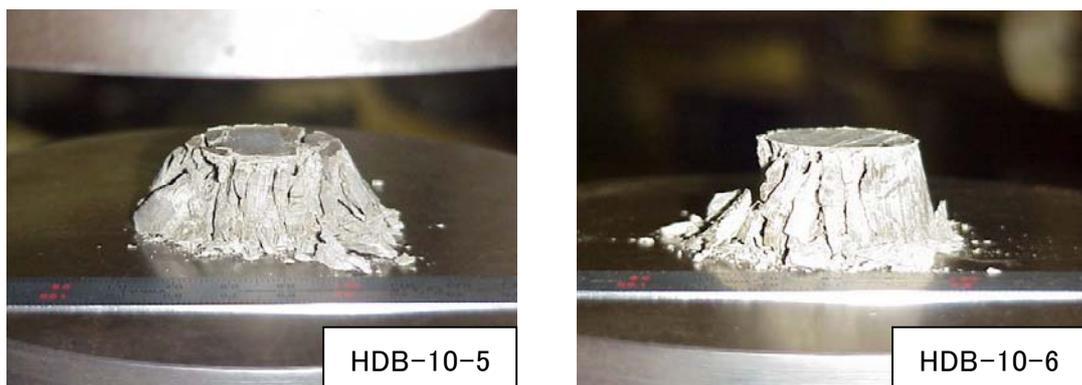
図 2-14 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の写真 (HDB-11 孔)



(a) 保持時間 10s



(b) 保持時間 4 時間



(c) 保持時間 24 時間

図 2-15 取り出し後の一軸圧縮試験終了時の写真 (HDB-10 孔)

図 2-16 に保持時間と一軸圧縮強度の関係を示す。図 2-16(a) は、横軸の保持時間を普通軸とした場合であるが、保持時間の増加に伴い、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 2-16(b) は、横軸の保持時間を対数軸とした場合であるが、図 2-16(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。

ここで、保持時間 t (s) における一軸圧縮強度を σ_t とし、以下のような式で近似する。

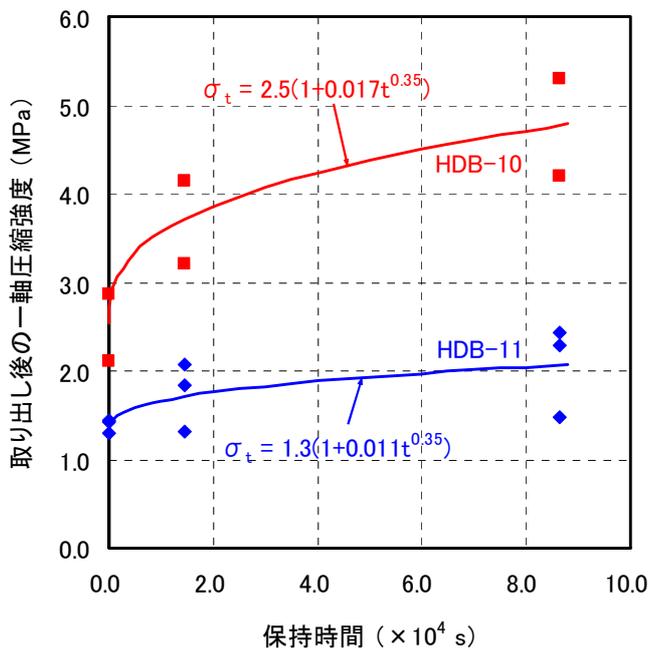
$$\sigma_t = \sigma_0 \times (1 + at^b) \quad \text{式(2-1)}$$

試験結果を上式にて近似すると各定数は、HDB-10 孔では $\sigma_0=2.5\text{MPa}$, $a=0.017$, $b=0.35$, HDB-11 孔では $\sigma_0=1.3\text{MPa}$, $a=0.011$, $b=0.35$ となる。

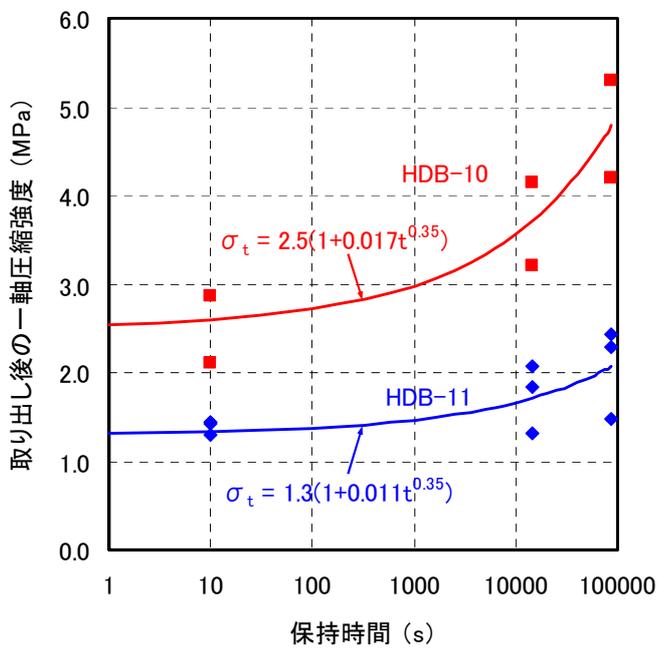
$$\text{HDB-10 孔} : \sigma_t = 2.5 (1 + 0.017t^{0.35}) \quad \text{式(2-2a)}$$

$$\text{HDB-11 孔} : \sigma_t = 1.3 (1 + 0.011t^{0.35}) \quad \text{式(2-2b)}$$

これら近似式による曲線を図 2-16 に重ねているが、ある程度再現できることが分かる。データ数が少なく誤差が大きいものの、例えば t に 1 年後 ($365 \times 24 \times 60 \times 60$ s) を当てはめると、一軸圧縮強度 σ_t は、HDB-10 孔では $\sigma_t=20.4\text{MPa}$, HDB-11 孔では $\sigma_t=7.3\text{MPa}$ となる。1 年間でこれほど一軸圧縮強度が大きくなることは想像しにくいですが、保持時間を長くすることによってかなりの強度回復が期待できると考える。



(a) 保持時間を普通軸とした場合



(b) 保持時間を対数軸とした場合

図 2-16 保持時間による取り出し後の一軸圧縮強度の変化

図 2-17 に押し込み試験時の荷重を一定にしてからのクリープ歪 ϵ_c と取り出し後の一軸圧縮強度 σ_t の関係を示す。図ではばらつきは見られるものの、クリープ歪 ϵ_c と一軸圧縮強度 σ_t に正の相関が見られる。直線近似を行うと次式となる。

$$\text{HDB-10 孔} : \sigma_t = 2.4 + 1.85 \epsilon_c \quad \text{式(2-3a)}$$

$$\text{HDB-11 孔} : \sigma_t = 1.3 + 0.75 \epsilon_c \quad \text{式(2-3b)}$$

また、図 2-10 から保持時間が 100s 以上の場合のクリープ歪 ϵ_c は、次式で近似できる。

$$\text{HDB-10 孔} : \epsilon_c = 0.3 \cdot \log(t) - 0.3 \quad \text{式(2-4a)}$$

$$\text{HDB-11 孔} : \epsilon_c = 0.3 \cdot \log(t) - 0.5 \quad \text{式(2-4b)}$$

ここで、式(2-4)を式(2-3)に代入すると、式(2-5)を得る。

$$\text{HDB-10 孔} : \sigma_t = 0.54 \cdot \log(t) + 1.87 \quad \text{式(2-5a)}$$

$$\text{HDB-11 孔} : \sigma_t = 0.23 \cdot \log(t) + 0.93 \quad \text{式(2-5b)}$$

先ほど同様に、 t に 1 年後 (365×24×60×60 s) を当てはめてみると HDB-10 孔では $\sigma_t = 5.9\text{MPa}$ 、HDB-11 孔では $\sigma_t = 2.7\text{MPa}$ となり、式(2-2)ほどの増加は見込まれないが、経過時間の対数に比例して、強度が徐々に回復していくことになる。

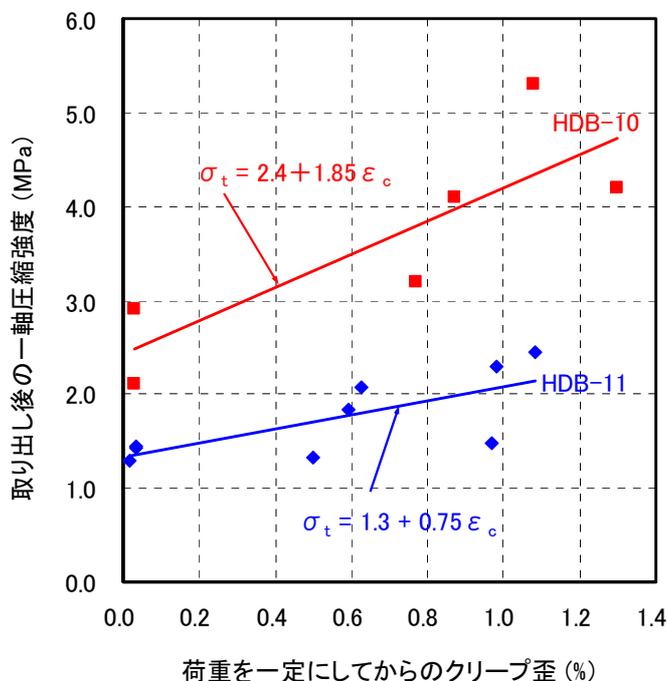


図 2-17 荷重を一定にしてからのクリープ歪と取り出し後の一軸圧縮強度の関係

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（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「強度回復特性」に関する室内試験を実施した。押し込み試験では最大荷重を 39.2kN とし、一定時間（10 秒，4 時間，24 時間の 3 通り）押し込み荷重を保持した。強度回復の評価は，押し込み試験後に円筒形の型から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した。なお，別途作成した試験片（高さ 52mm，直径 25mm の円柱形）を用いた通常の一軸圧縮強度は，以下の通りであった。

HDB-10 孔：10.0 MPa

HDB-11 孔：16.2 MPa

図 2-16 に示した保持時間と取り出し後の一軸圧縮強度の関係では，保持時間の増加に伴い，次式に示すように，一軸圧縮強度の増加が現れた。

$$\text{HDB-10 孔} : \sigma_t = 2.5 (1 + 0.017 t^{0.35}) \quad \text{式(2-2a)}$$

$$\text{HDB-11 孔} : \sigma_t = 1.3 (1 + 0.011 t^{0.35}) \quad \text{式(2-2b)}$$

上式を見比べると，通常の一軸圧縮強度が小さい試料 HDB-10 孔の方が，取り出し後の一軸圧縮強度が大きい結果となった。ただし，時間のべき数はともに 0.35 であり，時間による強度回復効果は同じであった。

図 2-17 に示した荷重を一定にしてからのクリープ歪と取り出し後の一軸圧縮強度の関係では，押し込み試験でのクリープ歪が増加するに従い，次式に示すように，一軸圧縮強度の増加が現れた。

$$\text{HDB-10 孔} : \sigma_t = 2.4 + 1.85 \varepsilon_c \quad \text{式(2-3a)}$$

$$\text{HDB-11 孔} : \sigma_t = 1.3 + 0.75 \varepsilon_c \quad \text{式(2-3b)}$$

上式からも分かるように，通常の一軸圧縮強度が小さい試料 HDB-10 孔の方が，強度回復が大きい結果となった。

以上より，同一岩種で採取場所の異なる試料を用いて室内試験を実施した結果，どちらの試料も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結果となった。また，通常の一軸圧縮強度が小さい試料 HDB-10 孔の方が，強度回復が大きい結果となった。ただし，試料としてまだ 2 地点のみの結果であるため，試料の採取場所による影響を定量的に評価することは現段階では困難であり，今後さらなるデータの蓄積が必要であると考えられる。

また，時間の影響が式(2-2)と式(2-5)のどちらの影響が大きいのかを今後詳細に検討していく必要がある。その方法としては，今回の試験のようなサーボ試験機では，数ヶ月あるいは数年の試験は難しいため，圧力容器などの密閉した空間に押し込み試験を終了させた試験片を長期間保存し，試験を行うことなどが考えられる。

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

クリープ試験では、試験片に加わる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、荷重と変位が共に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。福井ら⁴⁾は、このような一般化した荷重条件での挙動を「一般化応力緩和挙動」と名付けて、三城目安山岩 および 河津凝灰岩を用いて理論的、実験的に議論した。本章はこれを受け継いだものである。

本章では、岩盤の「一般化応力緩和挙動」は、従来のクリープ試験や応力緩和試験では得られない情報を追加し、コンプライアンス可変型構成方程式の検証 および 高度化に役立つと考え、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室内試験を実施し、岩石の「一般化応力緩和挙動」に関する基礎データを蓄積した。

3. 2 これまでの研究成果

クリープ試験は従来から盛んに行われてきており、数多くの報告がなされている⁵⁾が、応力緩和試験は、岩石試験片の変位を一定に保つことが難しいため、比較的報告が少ない。

そのような現状の中、山口⁶⁾は、一軸 および 三軸圧縮荷重下で三城目安山岩の応力緩和試験を行い、応力低下は経過時間の対数に比例すると報告している。Hudson ら⁷⁾は、クラス I 岩石を用いて強度破壊点以降で応力緩和試験を行い、時間が経過するにつれて応力低下速度は減少したと報告している。Wawersik ら⁸⁾は、クラス II 岩石を用いて応力緩和試験を行い、応力低下速度が次第に増加し、破壊する場合があることを指摘している。また、応力緩和とクリープの関係⁹⁾、応力緩和と一軸圧縮強度の载荷速度依存性の関係¹⁰⁾が定性的な議論ではあるが、報告されている。福井ら⁴⁾は、三城目安山岩 および 河津凝灰岩を用いた一般化応力緩和試験を行い、理論的、実験的に議論している。

なお、クラス II 岩石とは、一定値以上のエネルギーないし歪を加えると、自分の持っているエネルギーだけで破壊(自己崩壊)してしまうような岩石を言う。これに対してクラス I 岩石とは、エネルギーないし歪が加えられるに従って、徐々に破壊が進行する岩石を言う。多くの岩石はクラス I 岩石であり、強固で脆性的な花崗岩のようなものが、例外的にクラス II 岩石に分類される。

3. 3 一般化応力緩和挙動とは

クリープ試験や応力緩和試験の応用として、鉦柱などの地下構造物の安定解析が挙げられる^{11),12)}。例えば、天盤を介して一定の荷重を受けている鉦柱に、弾性挙動を示す支保を打設した場合を考える。鉦柱に荷重が作用しているため、鉦柱は時間の経過とともに変形する。鉦柱の変形に伴い、支保には弾性変形が生じて支保荷重が増加する一方で、鉦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、鉦柱の変位は増加していくが、荷重は減少する。この時の鉦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だと言える⁴⁾。この例のように、実際の岩盤では荷重、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や応力緩和試験では、その挙動を正確に予測するのは困難であると考えられる。この点はある程度認識されてきた⁷⁾と思われるが、適当な実験方法がなかったため、不明な点が多い。

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。一方、応力緩和試験では、歪 ε が一定 (= C) に保たれる。

$$\sigma = C$$

$$\varepsilon = C$$

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 ($\sigma - \gamma \varepsilon$) を一定 (= C) に保ち、応力 および 歪の経時変化を調べる試験である。本研究では、式(3-1)に従う一般化応力緩和試験を提案する。ただし、 γ は定数である。

$$\sigma - \gamma \cdot \varepsilon = C \tag{3-1}$$

図3-1に示すように、原点0から強度試験を開始して、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 $\sigma_A - \gamma \cdot \varepsilon_A = C$ 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、時間の経過に伴ってAからBへと移動していく。式(3-1)から分かるように、A点を起点とした応力と歪の変化量 $\delta\sigma$ と $\delta\varepsilon$ の間には次式が成り立つ。なお、 ϕ は直線ABの傾きである。

$$\delta\sigma = \gamma \cdot \delta\varepsilon \tag{3-2}$$

$$\gamma = \tan \phi \tag{3-3}$$

図3-1に示すように、 $\phi=0^\circ$ の時はクリープであり、 $\phi=-90^\circ$ の時は応力緩和である。図3-2に示すように、A点から一般化応力緩和を開始したとして、歪と応力の両者ともに増加する場合をCase I、歪は増加するが応力が低下する場合をCase II、歪と応力の両者が減少する場合をCase IIIと名付けることとする。地下構造物周辺の岩盤の時間依存性挙動は、Case I から Case IIIのいずれかに分類できると考える。以下では簡単な例を示して、これを説明することにする。

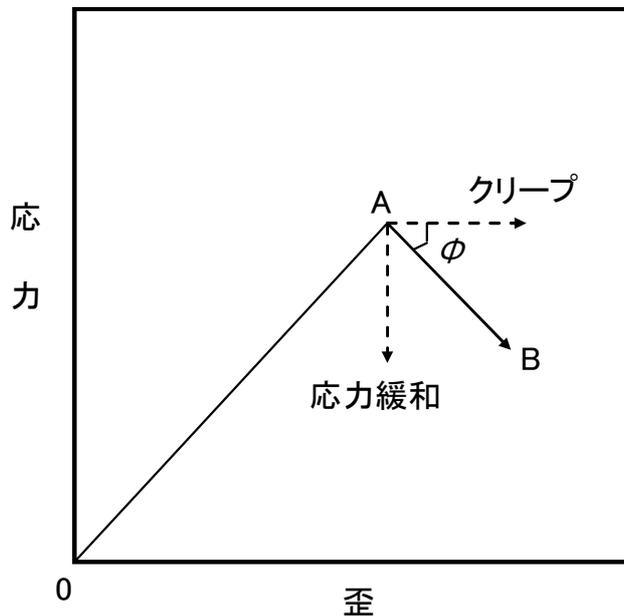


図 3-1 一般化応力緩和試験の概念図

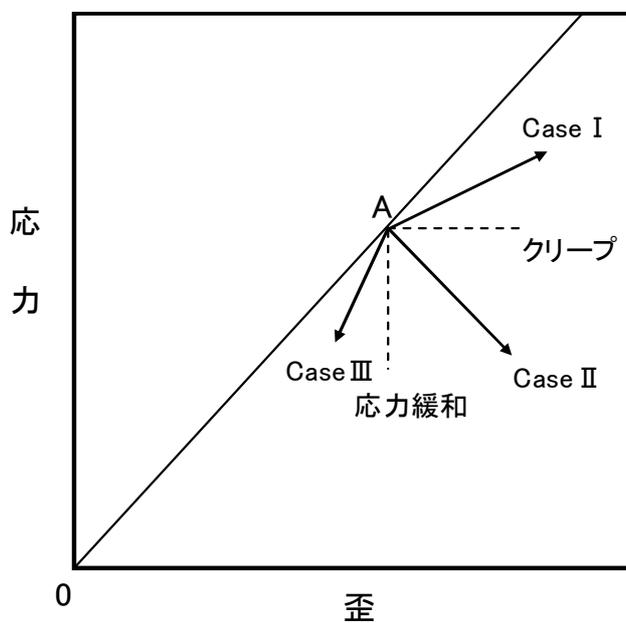


図 3-2 一般化応力緩和試験の分類

図 3-3 (a) に示すように、2 本の試験片に剛性の高いプラテンを介して、一定の力 F を加え続ける場合を考える。2 本の試験片が同じ特性であれば、図 3-4 (a) に示すように、2 本とも通常のクリープをすることになり、応力一定のまま歪が増加していくことになる。一方、2 本の試験片の特性が異なるとすれば、図 3-4 (b) に示すように、時間経過に伴って変形しにくい試験片は Case I となり、変形のしやすい試験片は Case II となる。すなわち、弱い方の試験片は、変形に伴って応力が減少し、この応力の減少分を強い方の試験片が新たに負担することになる。もう少し一般化して、図 3-3 (b) に示すように、ある岩盤中に時間経過に伴って変形しにくい部分と変形しやすい部分が存在する場合、変形しにくい部分が Case I、変形しやすい部分が Case II の挙動を示すことになる。

次に図 3-5 に示すように、2 本の試験片を縦に積み重ねて、変形を一定に保つ場合を考える。2 本の試験片が同じ特性であれば、図 3-6 (a) に示すように、2 本ともに通常の応力緩和をすることになり、歪一定のまま応力が減少していくことになる。一方、2 本の試験片の特性が異なるとすれば、図 3-6 (b) に示すように、時間経過に伴って変形しやすい試験片が Case II となり、変形しにくい試験片が Case III となる。

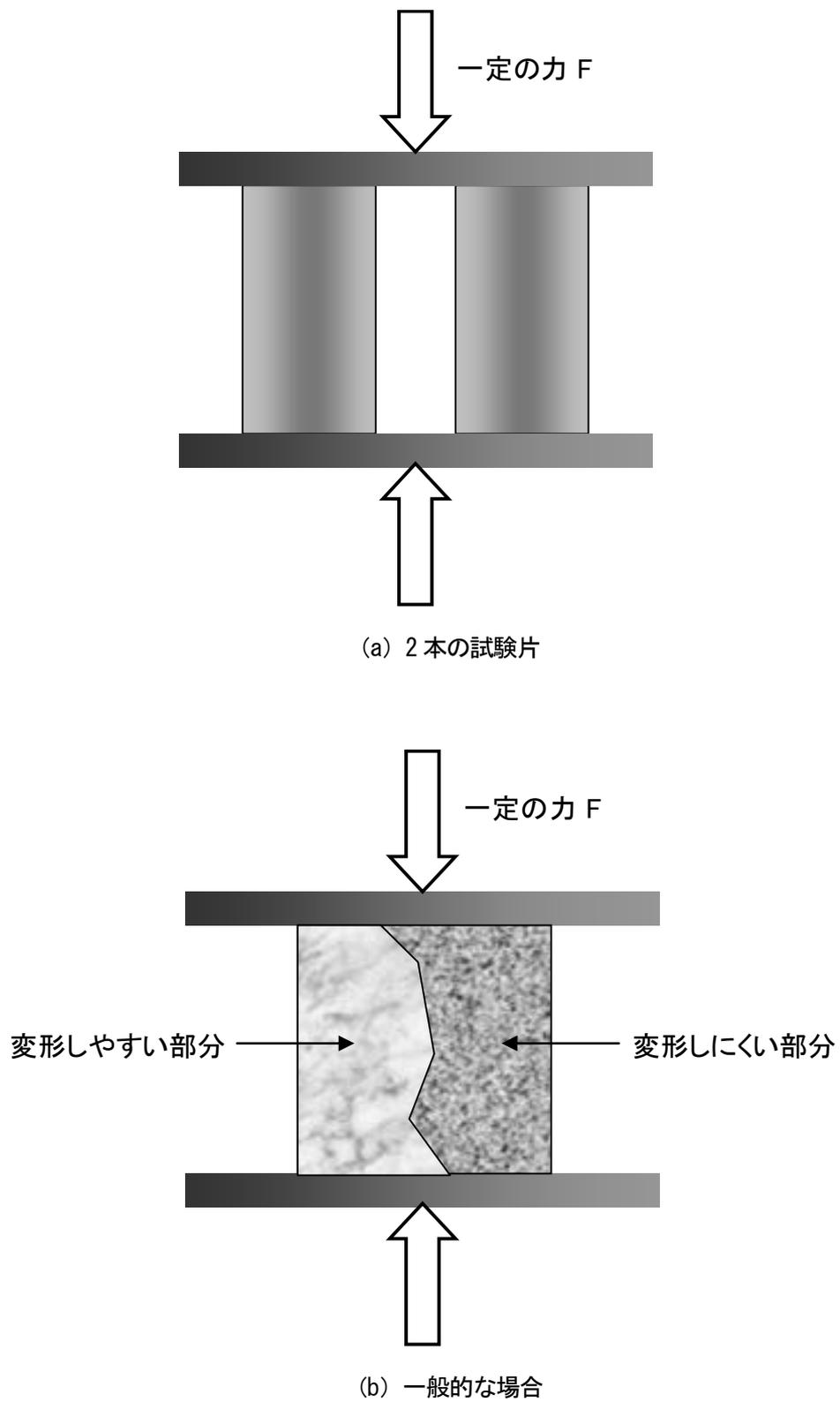
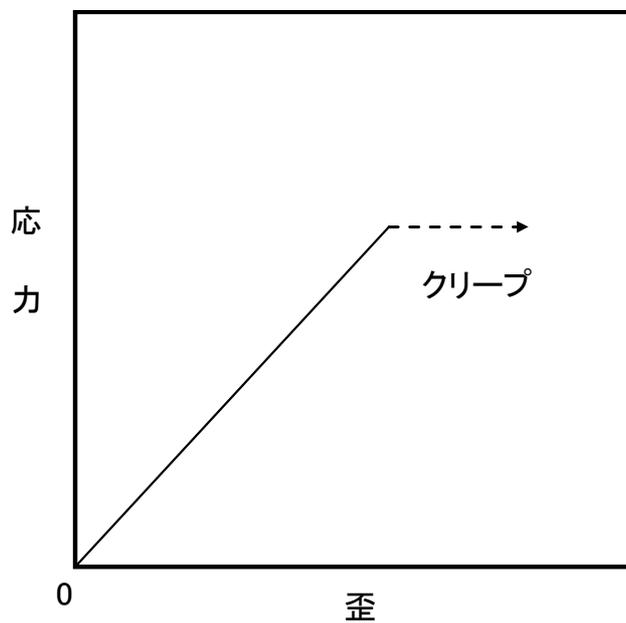
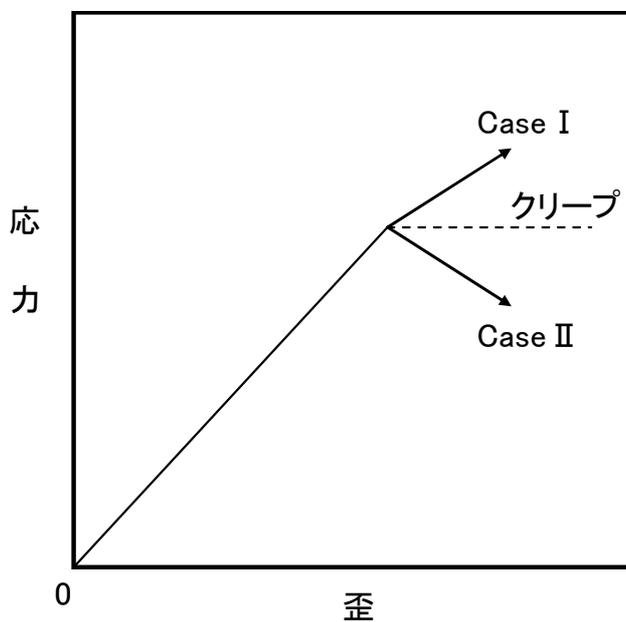


図 3-3 強固な上下盤に一定の力 F を加え続ける場合



(a) クリープ



(b) Case I および Case II

図 3-4 強固な上下盤に一定の力Fを加え続ける場合の変形

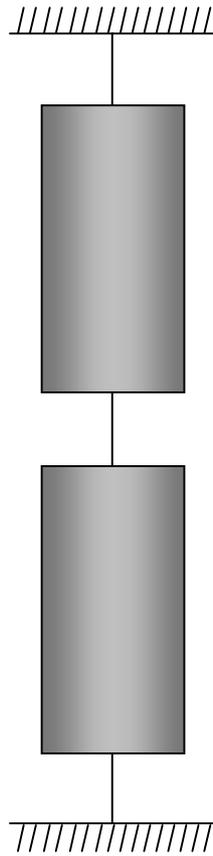
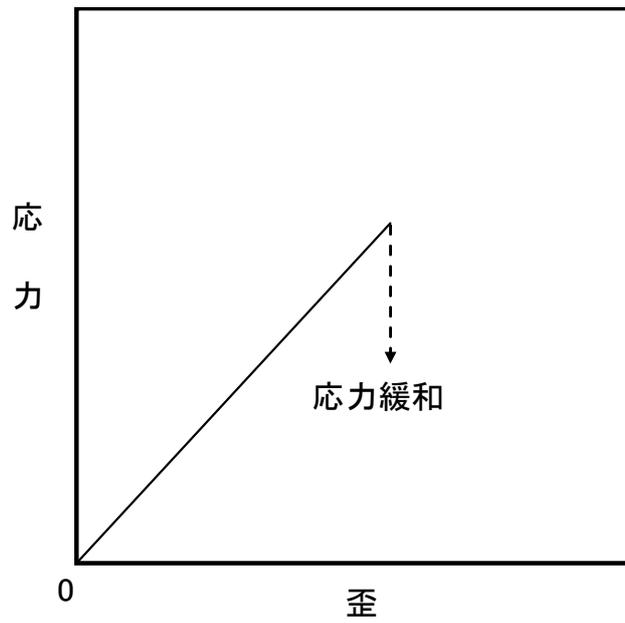
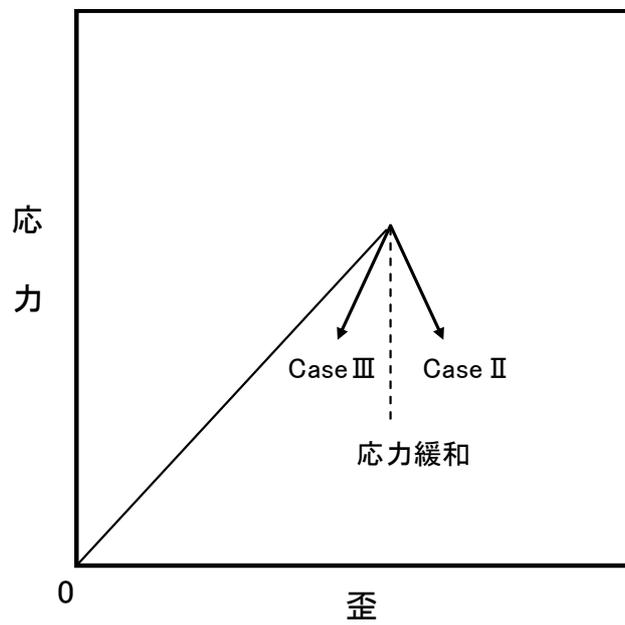


図 3-5 縦に重ねて置かれた 2 本の試験片の応力緩和試験



(a) 応力緩和



(b) Case II および Case III

図 3-6 縦に重ねて置かれた 2 本の試験片の応力緩和

3. 4 試料岩石と試験方法

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-10 孔，HDB-11 孔）で採取した稚内層硬質頁岩を用いた。試験片は、高さ 52mm，直径 25mm の円柱形に整形したものをを用い，試験片の両端面は，平面研削盤により平行度±0.01mm 以内に仕上げ，2 章と同様に湿潤状態に保ったまま使用した。歪速度を 10^{-4} s^{-1} とした定歪速度試験における一軸圧縮強度は，HDB-10 孔，HDB-11 孔でそれぞれ 10.0MPa，16.2MPa であり，ヤング率は，それぞれ 1.5GPa，2.1GPa であった。

式(3-1)を図 3-1 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になる。

$$\sigma^* = \gamma^* \cdot \varepsilon + C^* \quad \text{式(3-4)}$$

$\sigma^* = \sigma/E$ ， $\gamma^* = \gamma/E$ ， $C^* = C/E$ である。ここで， γ^* を緩和方向係数と呼ぶ。この緩和方向係数 γ^* の値によって，応力-歪線図上の A 点の位置が時間経過に伴ってどのように変化していくかを図 3-7 に示す。これから分かるように， $0 < \gamma^* < 1$ は Case I に， $\gamma^* < 0$ は Case II に， $\gamma^* > 1$ は Case III に対応する。また， $\gamma^* = 0$ は通常のクリープであり， γ^* が $-\infty$ に近づくに従い，通常の応力緩和に近づく。

本研究では，クラス II 特性を示す岩石の強度破壊点以降の破壊現象を調べるために，変位だけを制御変数とするのではなく，荷重と変位を組み合わせる量を制御変数とする制御方式を提案した^{13),14)}。その制御方式の基礎式は，基本的には式(3-4)と同じであるが，一般化応力緩和試験では，図 3-1 の A 点に達した後に， C^* を一定値に保つ。よって，この一般化応力緩和試験は，先に提案した制御方式の延長線上にあると言える。

試験では，岩石試験片をまず図 3-7 の 0 点より A 点まで一定の歪速度 (10^{-4} s^{-1}) で載荷し，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。データの採取間隔は 1s とし，試験開始後 3 時間 (10⁴s) で試験を打ち切った。

一般化応力緩和試験を開始する応力レベルを一軸圧縮強度の 60% (HDB-10 孔では 6.0MPa，HDB-11 孔では 9.7MPa) とし，緩和方向係数 γ^* は， $-\infty$ (応力緩和)， -2.0 ， -0.7 ， 0 (クリープ) の 4 通りとし，同一条件で 2 本ずつ試験を行った。ただし，HDB-11 孔のクリープ試験 ($\gamma^* = 0$) のみ，3 本の試験を行った。(HDB-10 孔：全 8 本，HDB-11 孔：全 9 本，)

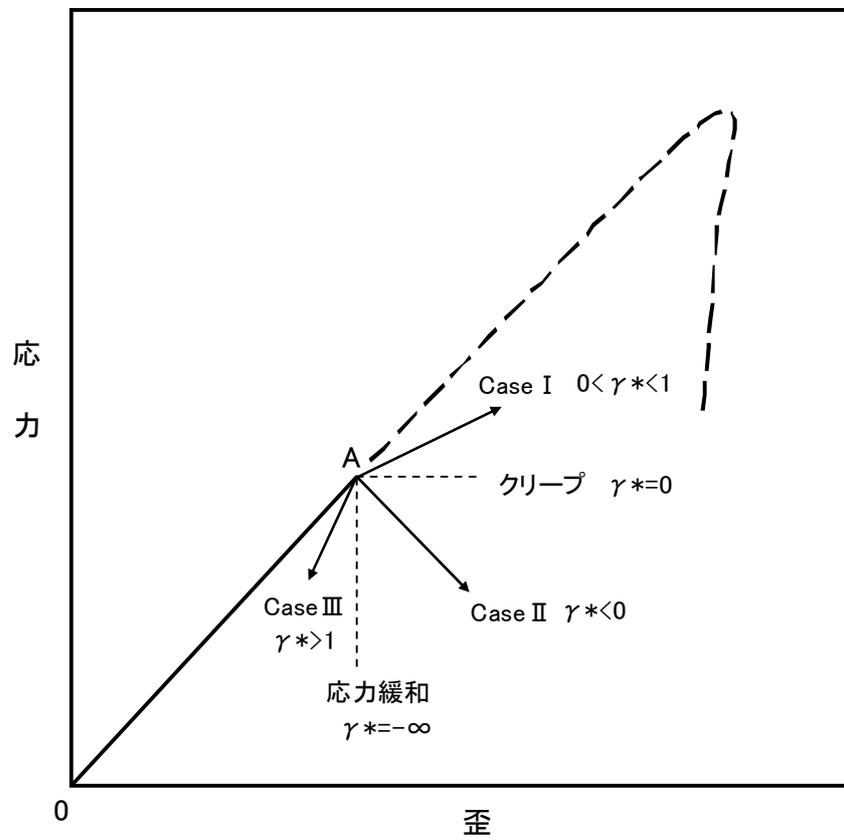


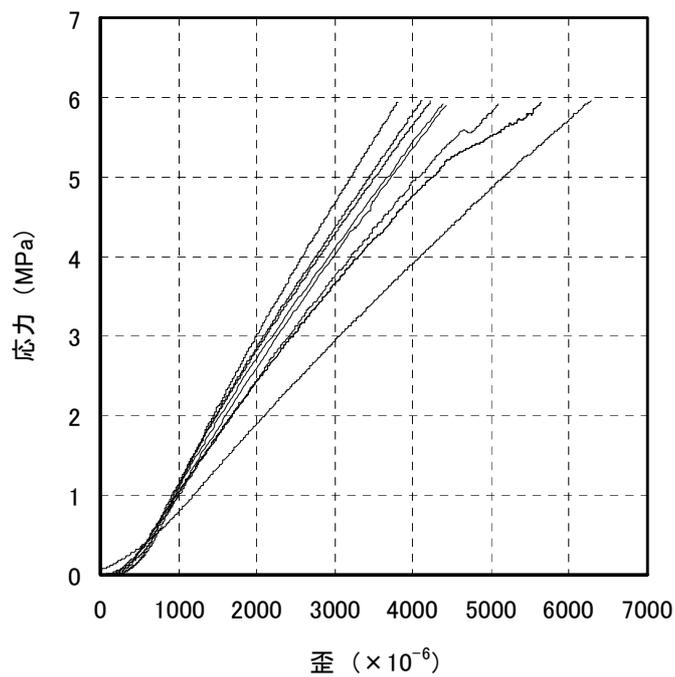
図 3-7 一般化した応力緩和試験の概念図と γ^*

3. 5 試験結果 および 考察

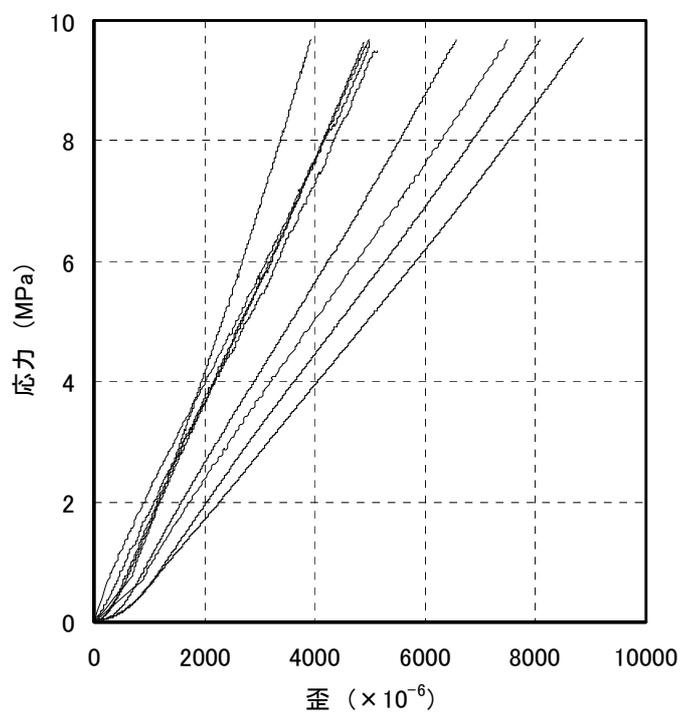
一般化応力緩和試験を開始する直前（HDB-10 孔では 6.0MPa, HDB-11 孔では 9.7MPa）までの応力—歪曲線を図 3-8 に示す。

図 3-8 (a) は, HDB-10 孔の応力—歪曲線であり, 8 本のうち 1 本のヤング率 (傾き) は, 1.0GPa と他の試験片に比べ, かなり小さくなっている。他の 7 本は, 応力 1MPa まではほぼ同じような特性であるが, 応力が 1MPa を超えたあたりから徐々に差が現れ始め, 一般化応力緩和試験を開始する直前の歪は, かなりの差が生じている。また, 図 3-8 (b) は, HDB-11 孔の応力—歪曲線であり, ヤング率 (傾き) にかなりのばらつきが見られ, 一般化応力緩和試験を開始する直前の歪は, 最大で 2 倍程度のかかなり大きなばらつきが生じている。

以上のように, 一般化応力緩和試験を開始する直前の応力—歪曲線には, HDB-10 孔, HDB-11 孔の試料ともに, 試験片の違いによるばらつきが見られた。



(a) HDB-10 孔 (全 8 本)



(b) HDB-11 孔 (全 9 本)

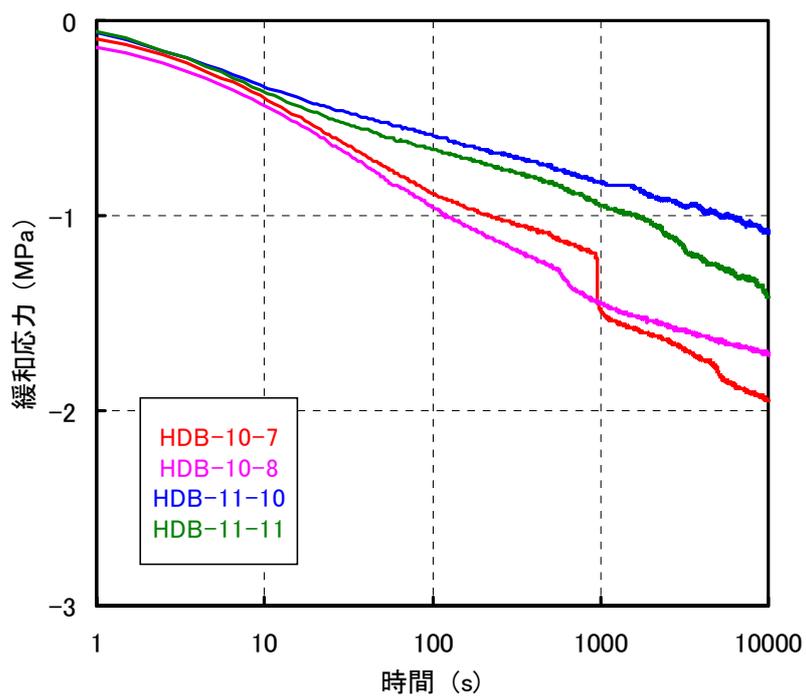
図 3-8 一般化応力緩和試験を開始する直前までの応力—歪曲線

図3-9～図3-12に、一般化応力緩和試験で得られた緩和応力 および 歪の経時変化を示す。今回の結果から、一般化応力緩和試験で得られた緩和応力 δ_σ と歪変化 δ_ε は、経時変化 t の対数にほぼ比例しており、式で表すと式(3-5)のようになる。式(3-5)は、クリープ試験において、対数クリープ則として成り立つことが従来から知られており³⁾、三城目安山岩 および 河津凝灰岩の結果⁴⁾と同様に、稚内層硬質頁岩を用いた一般化応力緩和試験においても、対数クリープ則に類似した関係が成り立つことが判明した。

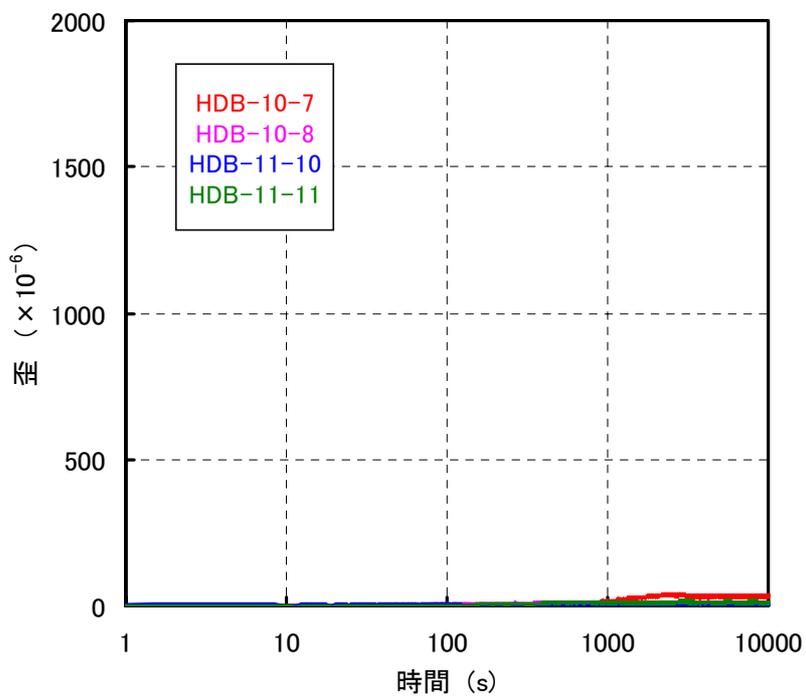
$$\delta_\sigma = a \gamma \cdot \log(t) \quad \text{式(3-5a)}$$

$$\delta_\varepsilon = a \cdot \log(t) \quad \text{式(3-5b)}$$

(ただし、 a は定数)

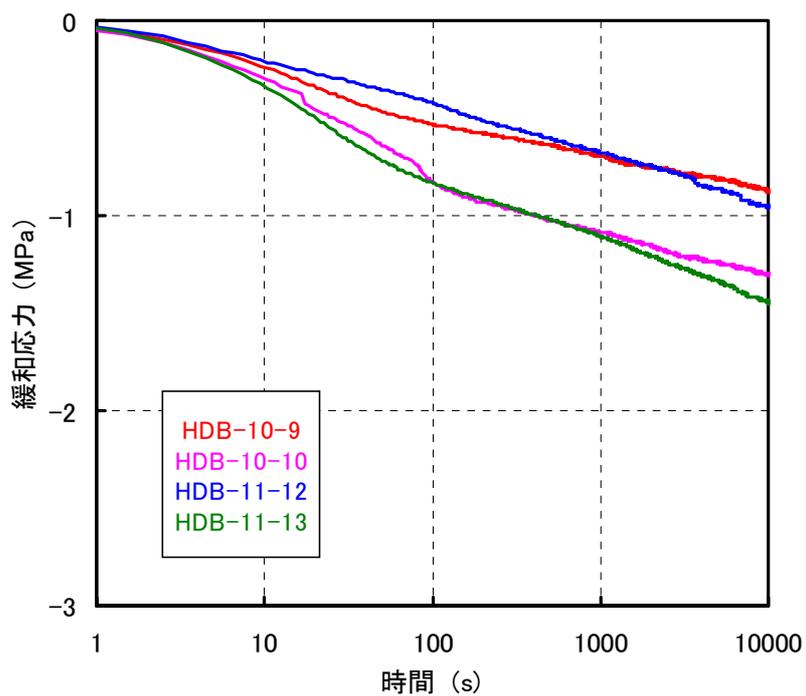


(a) 緩和応力の経時変化

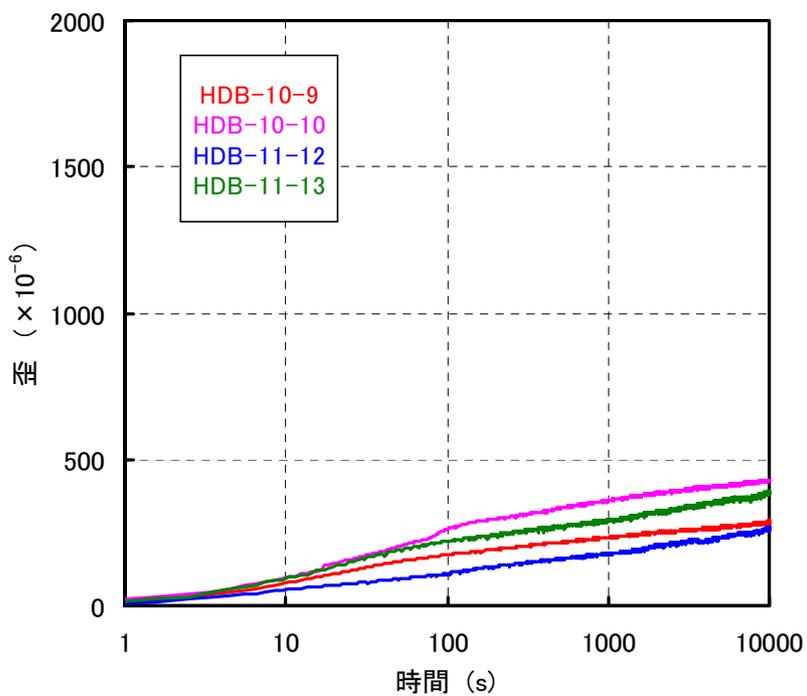


(b) 歪の経時変化

図 3-9 緩和応力 および 歪の経時変化 (緩和方向係数 : $-\infty$)

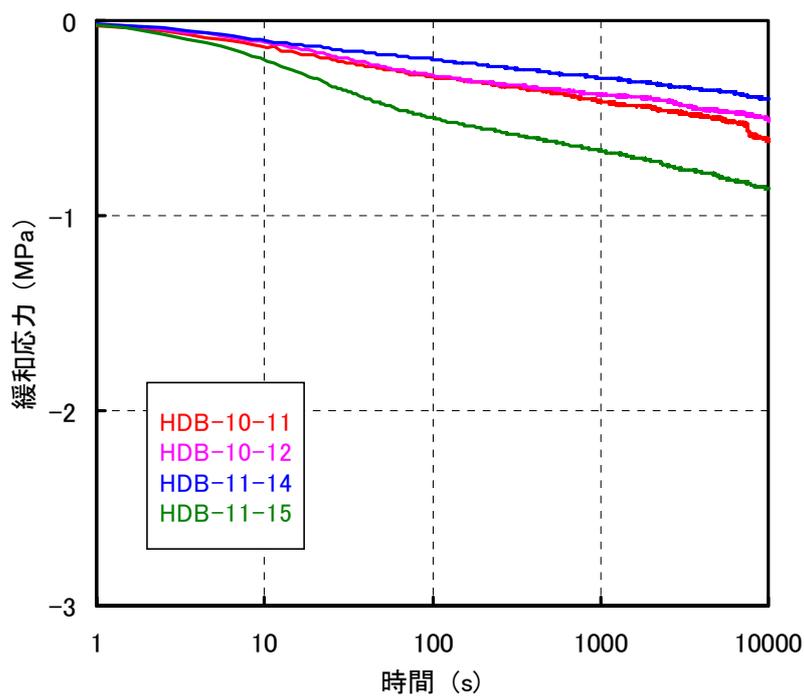


(a) 緩和応力の経時変化

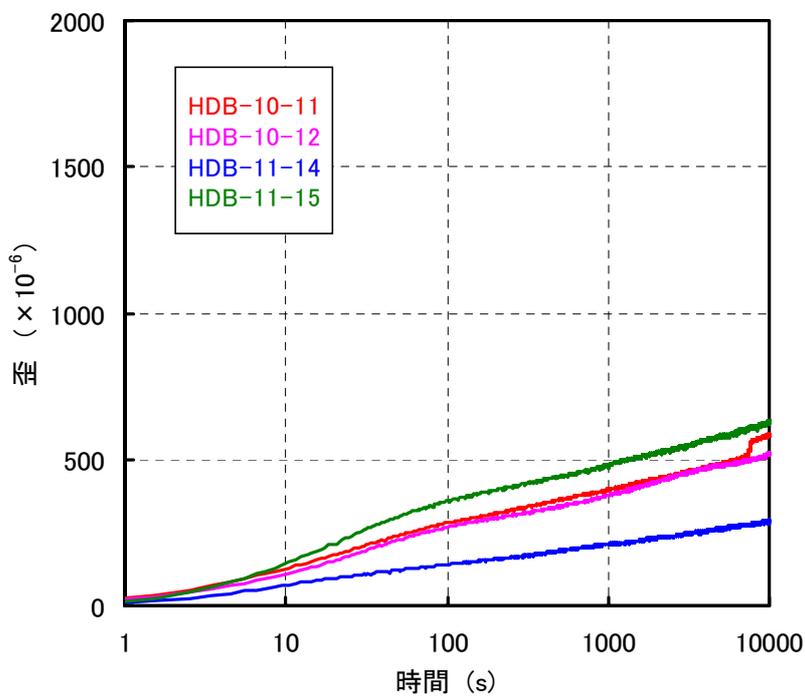


(b) 歪の経時変化

図3-10 緩和応力 および 歪の経時変化 (緩和方向係数 : -2.0)

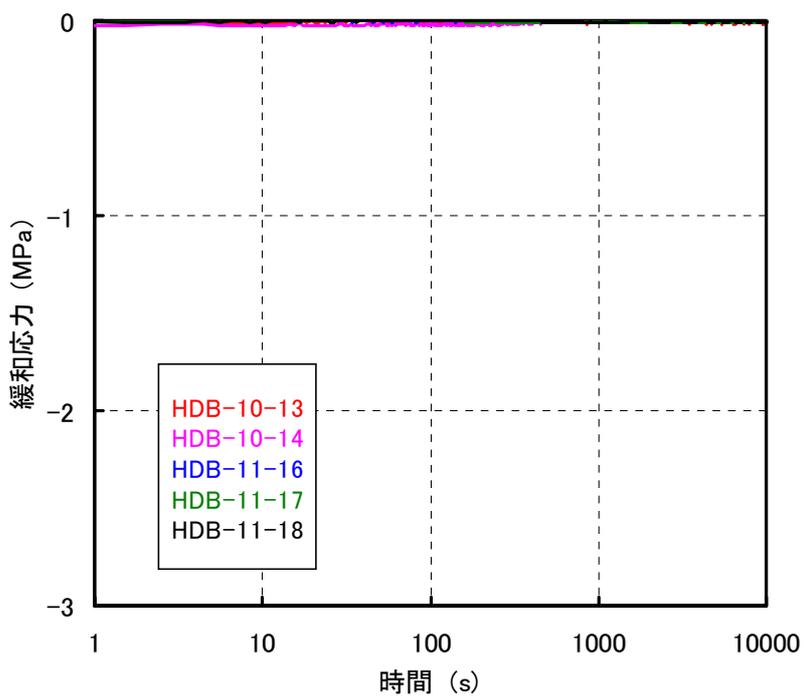


(a) 緩和応力の経時変化

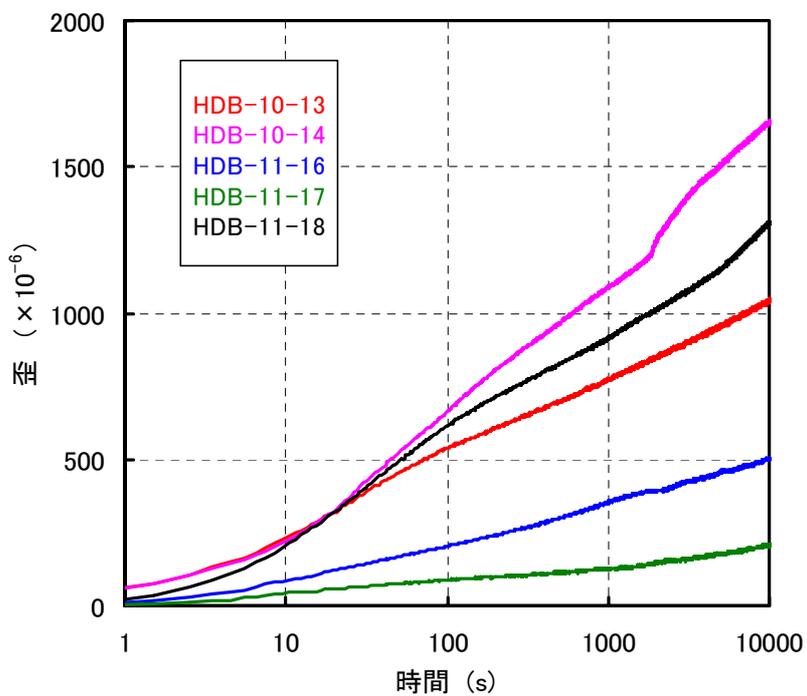


(b) 歪の経時変化

図3-11 緩和応力 および 歪の経時変化 (緩和方向係数 : -0.7)



(a) 緩和応力の経時変化



(b) 歪の経時変化

図 3-12 緩和応力 および 歪の経時変化 (緩和方向係数 : 0)

図 3-13 に試験開始 10⁴s 後の応力と歪の位置を応力—歪曲線上にプロットしたものを示す。実線は、10⁻⁴ s⁻¹ の定歪速度試験で得られた平均的な応力—歪曲線であり、実線上の黒丸を出発点とし、 γ^* を様々に変えて試験したときの結果である。三城目安山岩 および 河津凝灰岩の結果⁴⁾ では、プロットした点は応力—歪曲線とほぼ平行な破線上に存在していたが、今回の稚内層硬質頁岩ではばらつきが大きく、破線上に乗っているとは断定し難い結果となった。

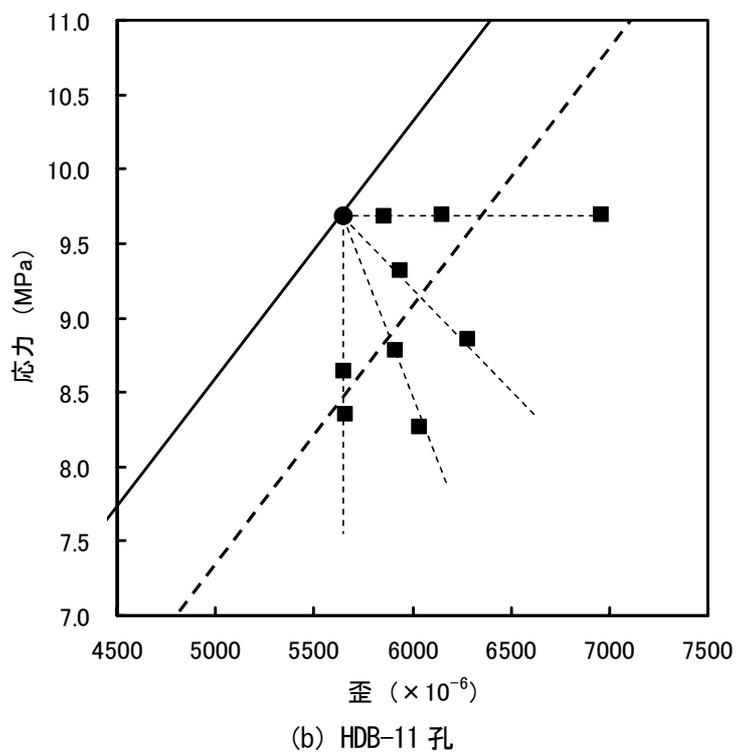
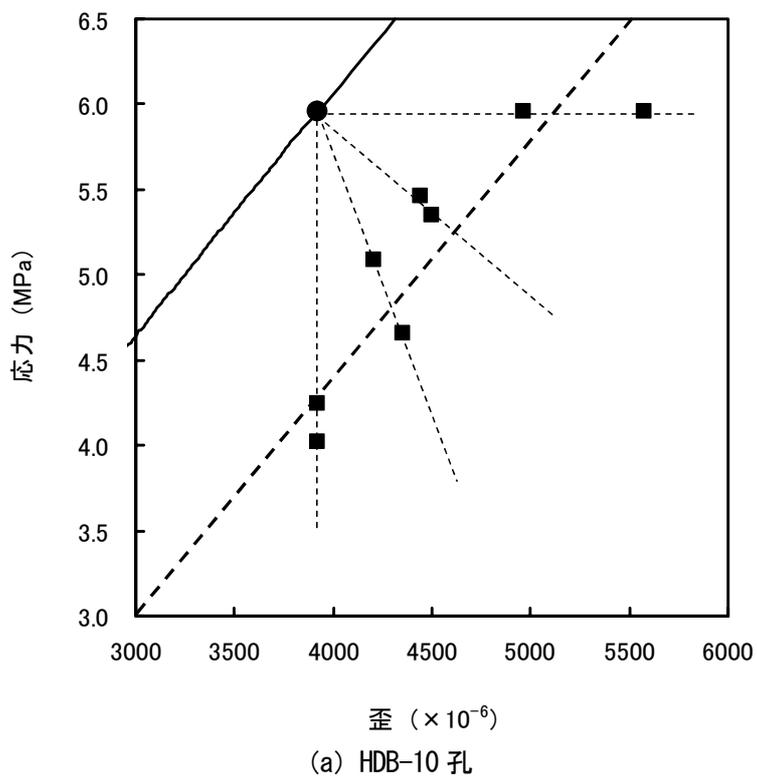
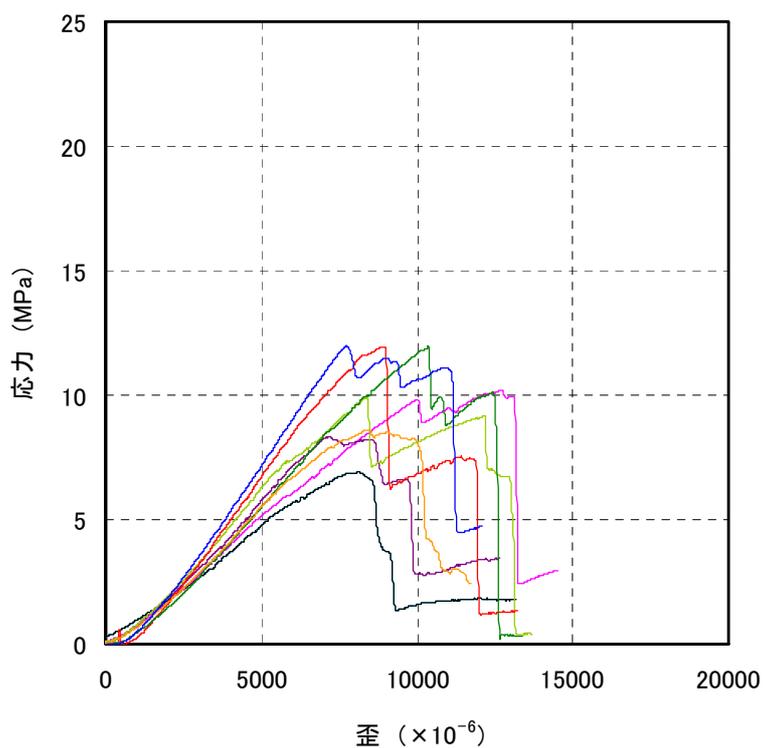
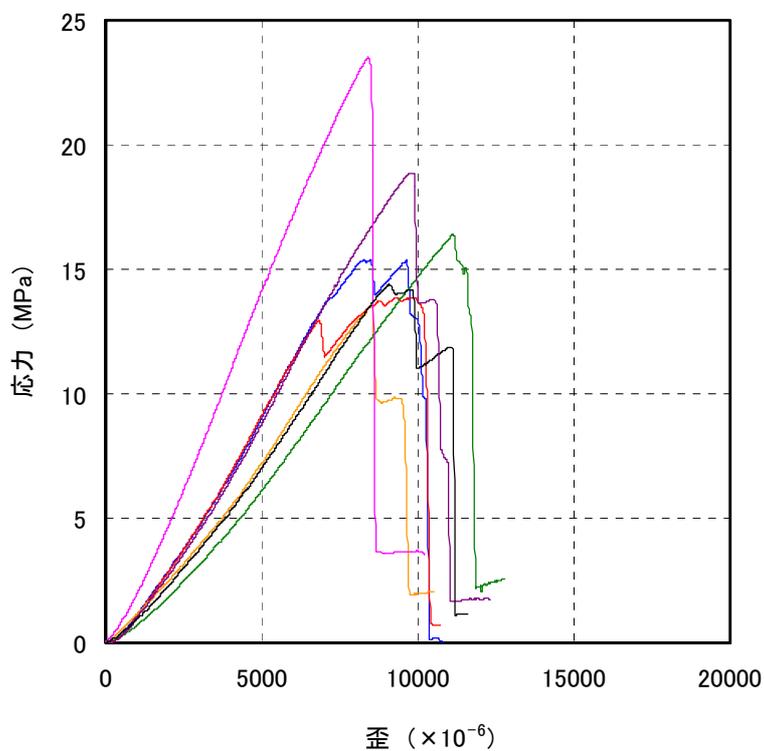


図 3-13 試験開始 10^4 s 後の応力—歪曲線上での位置

図 3-13 に示すように、試験片ごとのばらつきが大きかったため、一般化応力緩和試験終了後、ばらつきを詳細に調べることを目的とし、別途 一軸圧縮試験を行った。図 3-14 に応力-歪曲線を示す。図 3-14 (a) には HDB-10 孔の全 8 本の結果、図 3-14 (b) には HDB-11 孔の全 9 本の結果を示す。その結果、応力-歪曲線に大きなばらつきが見られ、一軸圧縮強度の平均値が HDB-10 孔では 10.0MPa、HDB-11 孔では 17.1MPa であるのに対して、その標準偏差 および 変動係数は HDB-10 孔では 1.9MPa, 19%, HDB-11 孔では 3.4MPa, 20%であった。また、ほとんどの試験片でピーク強度後、数回急激に応力が低下する現象が見られたが、これは試験中の観察により、亀裂が急激に発達したときに生じていた。



(a) HDB-10 孔 (全 8 本)



(b) HDB-11 孔 (全 9 本)

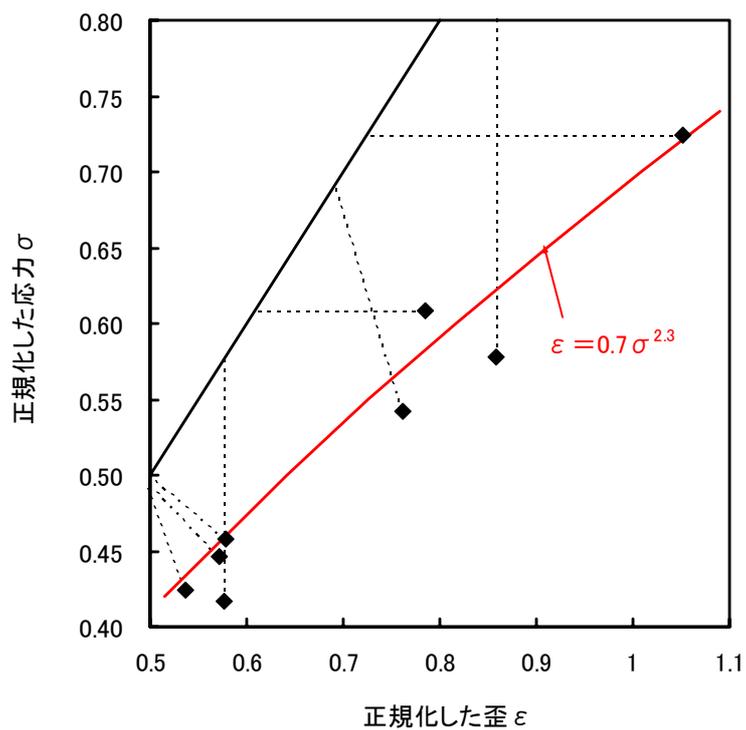
図 3-14 一般化応力緩和試験終了後の応力—歪曲線

図 3-14 に示すように、一軸圧縮強度のばらつきが一般化応力緩和試験でのばらつきを生んだものと考え、正規化を行うこととした。応力は強度で、歪はヤング率／応力レベルでそれぞれ正規化した。このように正規化して図 3-13 を書き直した結果を図 3-15 に示す。図 3-15 の■は、試験開始 10⁴s 後の応力と歪の位置を示す。図 3-13 と異なり、ばらつきは減少し、■の位置は、ほぼ次式で表す曲線上に存在していることが分かる。

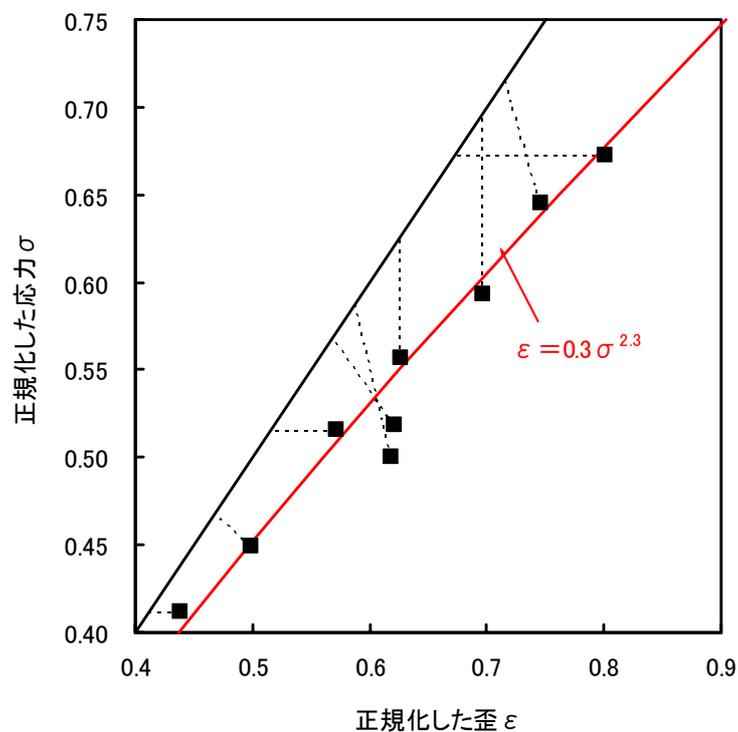
$$\text{HDB-10 孔} : \varepsilon = 0.7 \sigma^{2.3} \quad \text{式 (3-6a)}$$

$$\text{HDB-11 孔} : \varepsilon = 0.3 \sigma^{2.3} \quad \text{式 (3-6b)}$$

両者を比べると、前にかかる係数は異なるが、応力にかかるべき数は同じである。すなわち、HDB-10 孔と HDB-11 孔で応力依存性は同じであるが、HDB-10 孔の方が変形性が大きいと言える。



(a) HDB-10 孔



(b) HDB-11 孔

図 3-15 試験開始 10^4 s 後の正規化した応力—歪曲線上での位置

ここで、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¹⁵⁾により、式(3-6)を検討してみる。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} + a_3 (\sigma^*)^{n_3} (\lambda^*)^{m_3} \quad \text{式(3-7)}$$

式(3-7)は、歪 ε と応力 σ の比であるコンプライアンス $\lambda = \varepsilon / \sigma$ が徐々に増加すると考えたものである。取り扱いやすいように、 λ を初期値 λ_0 で正規化した値を $\lambda^* (= \lambda / \lambda_0)$ とした。また、 σ 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3-15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、 λ^* が1より少しだけ大きな値をとるので、式(3-7)の右辺第1項が第2項に比べて大きくなり、式(3-7)は式(3-8)で近似できる。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} \quad \text{式(3-8)}$$

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 $\varepsilon^* = \sigma^* (\lambda^* - 1)$ と歪速度は次のようになる¹⁶⁾。

$$\text{クリープ歪} \quad \varepsilon^* = a_1 \frac{1}{m_1 + 1} (m_1 + 1)^{\frac{1}{m_1 + 1}} (\sigma^*)^{1 + \frac{n_1}{m_1 + 1}} t^{\frac{1}{m_1 + 1}} \quad \text{式(3-9)}$$

$$\text{クリープ歪速度} \quad \frac{d\varepsilon^*}{dt} = a_1 \frac{1}{m_1 + 1} (m_1 + 1)^{-\frac{m_1}{m_1 + 1}} (\sigma^*)^{1 + \frac{n_1}{m_1 + 1}} t^{-\frac{m_1}{m_1 + 1}} \quad \text{式(3-10)}$$

式(3-9)の応力にかかるべき数は、 $1 + n_1 / (m_1 + 1)$ であり、これが式(3-6)の応力のべき数に対応する。試験の途中で載荷速度を変化させる実験を行い、 n_3 を求めた結果、 $n_3 = 54$ であった。 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分かっていないが、大久保ら¹⁶⁾は、一次クリープに関わる n_1 と高応力レベルのクリープ試験から求めた n_3 が等しいとにおいて、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。この指摘を基に、今回も n_1 と n_3 が等しいと考えて、 $n_1 = 54$ とすると、 $m_1 = 41$ となる。式(3-10)に $m_1 = 41$ を代入すると、クリープ歪速度は時間の $-41/42$ に比例することとなり、ほぼ対数クリープ則が成立することとなり、図3-9～図3-12の結果を満足する。

3. 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（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「一般化応力緩和挙動」に関する室内試験を実施した。一般化応力緩和試験を開始する応力レベルを一軸圧縮強度の 60%（HDB-10 孔では 6.0MPa，HDB-11 孔では 9.7MPa）とし，緩和方向係数 γ^* は， $-\infty$ （応力緩和）， -2.0 ， -0.7 ， 0 （クリープ）の 4 通りとした。

その結果，式(3-5)に示すように，一般化応力緩和試験で得られた緩和応力 および 歪は，経過時間の対数にほぼ比例して変化することが判明した。式(3-5)は，クリープ試験において，対数クリープ則として成り立つことが従来から知られており³⁾，三城目安山岩 および 河津凝灰岩の結果⁴⁾と同様に，稚内層硬質頁岩を用いた一般化応力緩和試験においても，対数クリープ則に類似した関係が成り立つことが判明した。

$$\delta_{\sigma} = a \gamma \cdot \log(t) \quad \text{式(3-5a)}$$

$$\delta_{\varepsilon} = a \cdot \log(t) \quad \text{式(3-5b)}$$

しかし，強度のばらつきの影響で，緩和方向係数による変化が不明瞭な結果となった。そこで，応力を強度で，歪をヤング率/応力レベルでそれぞれ正規化し，式(3-6)の関係があることを示した。

$$\text{HDB-10 孔} : \varepsilon = 0.7 \sigma^{2.3} \quad \text{式(3-6a)}$$

$$\text{HDB-11 孔} : \varepsilon = 0.3 \sigma^{2.3} \quad \text{式(3-6b)}$$

すなわち，HDB-10 孔と HDB-11 孔で応力依存性は同じであるが，HDB-10 孔の方が変形性が大きい結果となった。この結果を式(3-8)に示すコンプライアンス可変型構成方程式と比較検討した。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a_1 (\sigma^*)^{n_1} (\lambda^* - 1)^{-m_1} \quad \text{式(3-8)}$$

式(3-8)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 $\varepsilon^* = \sigma^* (\lambda^* - 1)$ と歪速度は，式(3-9) および 式(3-10)となる。

$$\text{クリープ歪} \quad \varepsilon^* = a_1 \frac{1}{m_1 + 1} (m_1 + 1)^{\frac{1}{m_1 + 1}} (\sigma^*)^{1 + \frac{n_1}{m_1 + 1}} t^{\frac{1}{m_1 + 1}} \quad \text{式(3-9)}$$

$$\text{クリープ歪速度} \quad \frac{d\varepsilon^*}{dt} = a_1 \frac{1}{m_1 + 1} (m_1 + 1)^{-\frac{m_1}{m_1 + 1}} (\sigma^*)^{1 + \frac{n_1}{m_1 + 1}} t^{-\frac{m_1}{m_1 + 1}} \quad \text{式(3-10)}$$

式(3-9)の応力にかかるべき数は， $1 + n_1 / (m_1 + 1)$ であり，これが式(3-6)の応力のべき数に対し， $n_1 = 54$ ， $m_1 = 41$ とすれば，今回の結果を説明できることを示した。

以上より、稚内層硬質頁岩は、三城目安山岩 および 河津凝灰岩の示す挙動と定性的には同じであったが、試験片の違いによる試験結果のばらつきが大きく、定量的に評価することは現段階では困難であり、今後さらなるデータの蓄積が必要であると考ええる。

また、今後は試験時間を長くした試験を行う必要がある。本研究で行った試験も、試験開始後 3 時間 (10⁴s) で打ち切っており、歪や応力の変化が小さい時を主たる対象としたものである。つまり、次式で示す線形な式で表される場合のみ考えた。

$$\sigma = \gamma \varepsilon + C \quad \text{式(3-12)}$$

最近の油圧サーボ試験機は、計算機を用いたデジタル制御方式のものが多く、その場合はさらに式(3-12)を一般化して、

$$\sigma = f(\varepsilon) \quad \text{式(3-13)}$$

なる関係式を検討したい。

4. 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、岩石の「強度回復特性」および「一般化応力緩和挙動」について検討した。

2章では、岩石の「強度回復特性」について検討した。本研究で使用した供試体は、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である。強度回復の評価にあたって、押し込み試験後に円筒形の型から取り出した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。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結果となった。また、HDB-10孔とHDB-11孔の試料を比較すると、一軸圧縮強度が小さいHDB-10孔の方が強度回復が大きい結果となった。ただし、試料としてまだ2地点のみの結果であるため、試料の採取場所による影響を定量的に評価することは現段階では困難であり、今後さらなるデータの蓄積が必要であると考え。この「強度回復特性」は、長期にわたる地下構造物の安定性にとって極めて重要であり、原位置試験を含む本格的な検討を早期に実施する必要があると考える。

3章では、岩石の「一般化応力緩和挙動」について検討した。本研究で使用した供試体は、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である。その結果、稚内層硬質頁岩は、三城目安山岩 および 河津凝灰岩の示す挙動と定性的には同じであった。しかし、試験片の違いによる試験結果のばらつきが大きく、定量的に評価することは現段階では困難であり、今後さらなるデータの蓄積が必要であると考え。この「一般化応力緩和挙動」は、従来のクリープ試験や応力緩和試験では得られない情報を追加し、コンプライアンス可変型構成方程式の検証 および 高度化に役立つと考える。

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, pp.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) 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, pp.521-526, (1989)
- 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一般化した応力緩和特性”, 資源・素材学会誌, Vol.108, No.7, pp.543-548, (1992)
- 5) Shin K, Okubo S, Fukui K, Hashiba K : Variation in Strength and Creep Life of Six Japanese Rocks, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech, Abstr, Vol.42, pp.251-260, (2005)
- 6) 山口勉: 東京大学学位論文, pp.203-211, (1980)
- 7) Hudson, J. A. and Brown, E.T. : Studying Time-Dependent Effects in Failed Rock, A.S.C.E., pp.25-34, (1973)
- 8) Wawersik, W. R. and Brace, W. F. : Post-Failure Behavior of a Granite and a Diabase., Rock Mech., Vol.3, pp.61-85, (1971)
- 9) Peng, S. S. : Time-Dependent Aspects of Rock Behavior as Measured by a Servocontrolled Hydraulic Testing Machine., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.10, pp.235-246, (1973)
- 10) Peng, S. and Podnieks, E. R. : Relaxation and the Behavior of Failed Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.9, pp.699-712, (1972)
- 11) Munson DE. : Constitutive Model of Creep in Rock Salt Applied to Underground Room Closure., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol.34, pp.233-247., (1997)
- 12) Diederrichs MS, Kaiser PK. : Tensile Strength and Abutment Relaxation as Failure Control Mechanism in Underground Excavations., Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., Vol.36, pp.69-96., (1999)
- 13) Okubo, S., Nishimatsu, Y. : Uniaxial compression testing using a linear combination of stress and strain as the control variable, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.22, No.5, pp.323-330, (1985)
- 14) 福井勝則・大久保誠介: “サーボ試験機の力・変位制御プログラム”, 第4回ソフトウェアコンファレンス, pp.223-226, (1988)
- 15) 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, pp.737-744, (2002)
- 16) 大久保誠介・福井勝則: “田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式”, 資源・素材学会誌, Vol.118, No.1, pp.36-42, (2002)

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
物質の量	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
体積	立方メートル	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
質量体積 (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
(物質量の)濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の)1	1

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

表3. 固有の名称とその独自の記号で表される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 ^(a)	rad		m ² ・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻¹ ・cd=m ² ・cd
(放射性核種の)放射能	ベクレル	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 質量エネルギー当量	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, 組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作る際のいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 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“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含む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 ⁻¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg ⁻¹ ・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ² ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ² ・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 ⁻¹ ・s ⁻³
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム	J/K	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・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 ² ・kg ⁻¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・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 ¹ ・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 ⁴ ・m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ⁻¹ ・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 ⁻¹ ・s ⁻³ =kg ⁻¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

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=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位で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 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
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 =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G=10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe=10 ⁴ (1000/4π)A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx=10 ⁻⁸ Wb
スチル	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X unit	1 X unit=1.002×10 ⁻¹¹ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fem	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット	carat	1 metric carat = 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	
マイクロン	μ	1 μ = 1μm=10 ⁻⁶ m

