

JNC TJ8400 2005-004

軟岩の長期安定性に関する検討

(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

2005年2月

前田建設工業株式会社

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

電話：029-282-1122（代表）

ファックス：029-393-7980

電子メール：jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184, Japan

© 核燃料サイクル開発機構

(Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2005

軟岩の長期安定性に関する検討
(核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書)

吉野尚人※ 宮野前俊一※ 井上博之※ 梨本裕※

要 旨

本委託業務では、以下の2つの項目に関する検討・評価を行った。

- (1) ニアフィールド環境が堆積軟岩の力学挙動に及ぼす影響に関する検討
- (2) 幌延幌延を条件とした岩盤の長期力学挙動評価

ニアフィールド環境が堆積軟岩の力学挙動に及ぼす影響に関する検討では、廃棄体からの熱の影響に着目し、幌延地域で採取した岩石試料を用いて、異なる温度下(80℃と20℃)で室内試験を実施した。その結果、コンプライアンス可変型モデルの時間依存性パラメータを取得し、試験環境が80℃と20℃におけるクリープ特性について比較を行った。また、廃棄体周辺の熱、乾燥、再冠水などの環境条件が堆積軟岩の長期安定性に与える影響について既存の文献をもとに一般的な堆積岩における知見を整理した。その結果をもとに、原位置試験における検証方法についてまとめた。

幌延を条件とした岩盤の長期力学的挙動評価では、これまでに幌延の試錘調査より得られている情報を用いて、試験孔の掘削時および長期の力学的安定性について解析的に検討した。掘削時の検討では、深度や研究坑道の配置方向の違いにより安定性に差が生じることを示した。長期安定性検討では条件により安定性に差が生じるものの、変形や緩み領域の発生が時間の経過とともに徐々に収束していく傾向は変わらないことを示した。また地山強度比により掘削時および長期の安定性の目安を得ることができることを述べた。

本報告書は、前田建設工業株式会社が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務成果に関するものである。

機構担当課室：東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 システム解析グループ

※ 前田建設工業株式会社

A Study about the Long-Term Stability of Sedimentary Rock
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Contract)

Naoto Yoshino^{*}, Shun-ichi Miyanomae^{*}, Hiroyuki Inoue^{*},
Yutaka Nashimoto^{*}

Abstract

In this paper, following two issues were examined and estimated,

- (1) The influence of near field condition factor to the dynamical behavior of sedimentary soft rock
- (2) The long term estimation of the dynamical behavior considering the condition of Horonobe area

As the study about the influence of near field condition factor to the dynamical behavior of sedimentary soft rock, the thermal factor was focused on and the laboratory tests using test pieces which were sampled in Horonobe area were carried out under the water temperature were 20 degrees and 80 degrees. As a result, the time dependence parameter in variable-compliance-type constitutive-equation could be obtained. And comparison between creep property under 20 degrees and 80 degrees was conducted. In addition, the general properties of sedimentary soft rock under several conditions were identified by the survey of the literature. And the way how to confirm the dynamical properties of sedimentary soft rock with in-situ test were presented.

For the study on the short-term and long-term stability of rock surrounding buffer materials, numerical simulations were carried out assuming several conditions. The direction of disposal tunnels and the ratio of rock strength by initial stress were estimated to be the main factor affecting the short-term stability of rock. Time dependency of rock and the stiffness of buffer material were estimated to be the main factor affecting the long-term stability of rock.

This Work was performed by Maeda Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute

JNC Liaison : Repository System Analysis Group, Waste Isolation Research Division,
Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

※Maeda Corporation

目 次

1. はじめに	1
2. ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす影響検討	2
2. 1 大久保モデルの概略	2
2. 1. 1 一軸圧縮試験時の大久保モデルの理論曲線導出方法	2
2. 1. 2 クリープ試験時の大久保モデルの理論曲線導出方法	5
2. 2 試験概要	6
2. 2. 1 ボーリングコア採取	6
2. 2. 2 試験体の作成	7
2. 2. 3 歪み速度を変化させた一軸圧縮試験の概要	12
2. 2. 4 多段階載荷式クリープ試験の概要	14
2. 3 試験結果と考察	16
2. 3. 1 大久保モデルの検証	16
2. 3. 2 熱が大久保モデル定数に及ぼす影響	62
2. 3. 3 熱がクリープに及ぼす影響	71
2. 4 文献収集・原位置試験方法の検討	76
2. 4. 1 環境要因が長期安定性に与える影響	76
2. 4. 2 原位置試験における検証方法の提案	78
2. 5 ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす影響検討のまとめ	83
3. 幌延を条件とした岩盤の長期力学挙動評価	84
3. 1 検討概要	84
3. 2 掘削解析	84
3. 2. 1 解析条件	84
3. 2. 2 解析結果（研究坑道掘削時）	89
3. 2. 3 解析結果（試験孔が1本のみ掘削される場合）	91
3. 2. 4 解析結果（試験孔が3本掘削される場合）	95
3. 2. 5 解析結果のまとめ	99
3. 3 試験孔の長期解析	101
3. 3. 1 解析条件	101
3. 3. 2 解析結果	105
3. 3. 3 補足検討	111
3. 3. 4 解析結果のまとめ	115

4. おわりに	122
• 参考文献	124
• 付録ー 1 試験状況および試験体の写真	付-1(1)
• 付録ー 2 幌延深度 450m の支保条件の検討	付-2(1)

表 目 次

表 2.1-1	α と m/n の関係	4
表 2.2-1	試験体概要その1 (計測値)	10
表 2.2-2	試験体概要その2 (算出値)	11
表 2.2-3	一軸圧縮試験の試験条件等	13
表 2.2-4	クリープ試験の試験条件等	15
表 2.3-1	大久保モデル検証用に使用した試験体の概要	17
表 2.3-2	大久保モデル検証結果のまとめ	60
表 2.3-3	熱が大久保モデル定数に及ぼす影響 に関する検討に使用した試験体の概要	62
表 2.3-4	熱が大久保モデル定数に与える影響に関する試験結果	70
表 2.3-5	熱がクリープに及ぼす影響に関する検討に使用した試験体の概要	71
表 3.2-1	岩盤物性	85
表 3.2-2	初期応力	85
表 3.2-3	解析ケース	86
表 3.2-4	研究坑道の支保工	88
表 3.2-5	限界せん断ひずみ	91
表 3.3-1	想定した n_0 および m	103
表 3.3-2	人工バリアの物性	105
表 3.3-3	岩盤物性 (硬岩)	114
表 3.3-4	初期応力 (硬岩)	114
付録表-1	幌延深度 450m における岩盤物性	付-2(1)
付録表-2	初期応力	付-2(2)
付録表-3	支保工	付-2(3)
付録表-4	限界せん断ひずみ	付-2(4)

目 次

図 2.1-1	一軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線の一例	3
図 2.1-2	応力-歪み曲線から m を求めるときの考え方	4
図 2.2-1	試験体寸法の計測位置	9
図 2.2-3	一軸圧縮試験装置の概念図	12
図 2.3-1 (a)	一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.78B 20°C	20
図 2.3-1 (b)	一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.78B 20°C	20
図 2.3-1 (c)	クリープ試験結果 応力-時間 438.78C 20°C	21
図 2.3-1 (d)	クリープ試験結果 変位-時間 438.78C 20°C	21
図 2.3-1 (e)	クリープ試験結果 歪み-時間 438.78C 20°C	22
図 2.3-1 (f)	クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.78C 20°C	22
図 2.3-1 (g)	クリープ試験結果 歪み-補正時間 438.78C 20°C	23
図 2.3-1 (h)	クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 438.78C 20°C	23
図 2.3-2 (a)	一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.78D 20°C	25
図 2.3-2 (b)	一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.78D 20°C	25
図 2.3-2 (c)	クリープ試験結果 応力-時間 438.78A 20°C	26
図 2.3-2 (d)	クリープ試験結果 変位-時間 438.78A 20°C	26
図 2.3-2 (e)	クリープ試験結果 歪み図-時間 438.78A 20°C	27
図 2.3-2 (f)	クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.78A 20°C	27
図 2.3-2 (g)	クリープ試験結果 歪み-補正時間 438.78A 20°C	28
図 2.3-2 (h)	クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 438.78A 20°C	28
図 2.3-3 (a)	一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.70B 80°C	30
図 2.3-3 (b)	一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.70B 80°C	30
図 2.3-3 (c)	クリープ試験結果 応力-時間 438.70D 80°C	31
図 2.3-3 (d)	クリープ試験結果 変位-時間 438.70D 80°C	31
図 2.3-3 (e)	クリープ試験結果 歪み-時間 438.70D 80°C	32
図 2.3-3 (f)	クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.70D 80°C	32
図 2.3-3 (g)	クリープ試験結果 歪み-補正時間 438.70D 80°C	33
図 2.3-3 (h)	クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 438.70D 80°C	33
図 2.3-4 (a)	一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.70A 80°C	35
図 2.3-4 (b)	一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.70A 80°C	35
図 2.3-4 (c)	クリープ試験結果 応力-時間 438.70C 80°C	36
図 2.3-4 (d)	クリープ試験結果 変位-時間 438.70C 80°C	36
図 2.3-4 (e)	クリープ試験結果 歪み-時間 438.70C 80°C	37
図 2.3-4 (f)	クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.70C 80°C	37

図 2.3-4 (g)	クリープ試験結果	歪み-補正時間	438.70C	80°C	38
図 2.3-4 (h)	クリープ試験結果	歪み速度-補正時間	438.70C	80°C	38
図 2.3-5 (a)	一軸圧縮試験結果	歪み-時間	438.62C	20°C	40
図 2.3-5 (b)	一軸圧縮試験結果	応力-歪み	438.62C	20°C	40
図 2.3-5 (c)	クリープ試験結果	応力-時間	438.62A	20°C	41
図 2.3-5 (d)	クリープ試験結果	変位-時間	438.62A	20°C	41
図 2.3-5 (e)	クリープ試験結果	歪み-時間	438.62A	20°C	42
図 2.3-5 (f)	クリープ試験結果	歪み速度-時間	438.62A	20°C	42
図 2.3-5 (g)	クリープ試験結果	歪み-補正時間	438.62A	20°C	43
図 2.3-5 (h)	クリープ試験結果	歪み速度-補正時間	438.62A	20°C	43
図 2.3-6 (a)	一軸圧縮試験結果	歪み-時間	438.62D	80°C	45
図 2.3-6 (b)	一軸圧縮試験結果	応力-歪み図	438.62D	80°C	45
図 2.3-6 (c)	クリープ試験結果	応力-時間	438.62B	80°C	46
図 2.3-6 (d)	クリープ試験結果	変位-時間	438.62B	80°C	46
図 2.3-6 (e)	クリープ試験結果	歪み-時間	438.62B	80°C	47
図 2.3-6 (f)	クリープ試験結果	歪み速度-時間	438.62B	80°C	47
図 2.3-6 (g)	クリープ試験結果	歪み-補正時間	438.62B	80°C	48
図 2.3-6 (h)	クリープ試験結果	歪み速度-補正時間	438.62B	80°C	48
図 2.3-7 (a)	一軸圧縮試験結果	歪み-時間	334.28B	20°C	50
図 2.3-7 (b)	一軸圧縮試験結果	応力-歪み	334.28B	20°C	50
図 2.3-7 (c)	クリープ試験結果	応力-時間	334.28A	20°C	51
図 2.3-7 (d)	クリープ試験結果	変位-時間	334.28A	20°C	51
図 2.3-7 (e)	クリープ試験結果	歪み-時間	334.28A	20°C	52
図 2.3-7 (f)	クリープ試験結果	歪み速度-時間	334.28A	20°C	52
図 2.3-7 (g)	クリープ試験結果	歪み-補正時間	334.28A	20°C	53
図 2.3-7 (h)	クリープ試験結果	歪み速度-補正時間	334.28A	20°C	53
図 2.3-8 (a)	一軸圧縮試験結果	歪み-時間	334.28D	80°C	55
図 2.3-8 (b)	一軸圧縮試験結果	応力-歪み	334.28D	80°C	55
図 2.3-8 (c)	クリープ試験結果	応力-時間	334.28C	80°C	56
図 2.3-8 (d)	クリープ試験結果	変位-時間	334.28C	80°C	56
図 2.3-8 (e)	クリープ試験結果	歪み-時間	334.28C	80°C	57
図 2.3-8 (f)	クリープ試験結果	歪み速度-時間	334.28C	80°C	57
図 2.3-8 (g)	クリープ試験結果	歪み-補正時間	334.28C	80°C	58
図 2.3-8 (h)	クリープ試験結果	歪み速度-補正時間	334.28C	80°C	58
図 2.3-9	クリープ試験での想定寿命と実測寿命				61
図 2.3-10 (a)	一軸圧縮試験結果	歪み-時間	438.26A	20°C	63

図 2.3-10 (b)	一軸圧縮試験結果	応力-歪み	438.26A	20°C	63
図 2.3-11 (a)	一軸圧縮試験結果	歪み-時間	438.26C	80°C	65
図 2.3-11 (b)	一軸圧縮試験結果	応力-歪み	438.26C	80°C	65
図 2.3-12 (a)	一軸圧縮試験結果	歪み-時間	438.26D	20°C	67
図 2.3-12 (b)	一軸圧縮試験結果	応力-歪み	438.26D	20°C	67
図 2.3-13 (a)	一軸圧縮試験結果	歪み-時間	438.26B	80°C	69
図 2.3-13 (b)	一軸圧縮試験結果	応力-歪み	438.26B	80°C	69
図 2.3-14	時間と最小歪み速度の関係				73
図 2.3-15	寿命で基準化した時間と最小歪み速度で基準化した歪み速度の関係				75
図 2.3-16	寿命で基準化した時間と最小歪み速度で基準化した歪み速度の関係				75
図 2.4-1	試験坑の掘削方法				79
図 2.4-2	岩盤三軸クリープ試験装置の例				80
図 3.2-1	解析モデル				87
図 3.2-2	初期応力				87
図 3.2-3	結果の表示範囲				89
図 3.2-4	塑性化領域の分布 (研究坑道掘削完了時)				90
図 3.2-5	最大せん断ひずみの分布 (研究坑道掘削完了時)				90
図 3.2-6	塑性化領域の分布 (試験孔が1本のみ掘削される場合)				91
図 3.2-7	最大せん断ひずみの分布 (試験孔が1本のみ掘削される場合)				92
図 3.2-8	試験孔壁面変位の測線				93
図 3.2-9	試験孔壁面の変位 (試験孔が1本のみ掘削される場合)				93
図 3.2-10	塑性化領域の分布 (試験孔が3本掘削される場合)				95
図 3.2-11	最大せん断ひずみの分布 (試験孔が3本掘削される場合)				96
図 3.2-12	試験孔壁面の変位 (試験孔①掘削完了時)				96
図 3.2-13	試験孔壁面の変位 (試験孔②掘削時)				97
図 3.2-14	試験孔壁面の変位 (試験孔③掘削完了時)				98
図 3.2-15	局所安全率の分布 (試験孔が3本掘削される場合)				100
図 3.3-1	岩石試験結果				103
図 3.3-2	想定した物性から得られる応力-ひずみ関係				103
図 3.3-3	解析モデル				104
図 3.3-4	解析ステップ				104
図 3.3-5	初期応力状態 (A 軸沿い)				105
図 3.3-6	初期応力状態 (B 軸沿い)				105
図 3.3-7	試験孔壁面変位の経時変化				106
図 3.3-8	試験孔壁面変位の経時変化 (当初 10 年間)				106
図 3.3-9	緩み領域の分布				106

図 3.3-10	岩盤の応力状態 (A 軸沿い)	108
図 3.3-11	岩盤の応力状態 (B 軸沿い)	108
図 3.3-12	局所安全率 (A 軸沿い)	109
図 3.3-13	局所安全率 (B 軸沿い)	109
図 3.3-14	緩衝材の応力状態	110
図 3.3-15	着目要素の応力履歴	110
図 3.3-16	緩衝材の剛性の違いによる試験孔壁面変位の比較	111
図 3.3-17	緩衝材の剛性の違いによる試験孔壁面変位の比較 (当初 10 年間)	111
図 3.3-18	緩衝材の剛性の違いによる 10 年後の緩み領域の比較	112
図 3.3-19	支保工の有無による試験孔壁面変位の比較 (HOR0450_EW)	113
図 3.3-20	支保工の有無による 10 年後の緩み領域の比較 (HOR0450_EW)	113
図 3.3-21	吹付けコンクリート応力 (HOR0450_EW)	113
図 3.3-22	試験孔壁面変位 (硬岩)	115
図 3.3-23	緩み領域の分布 (硬岩)	115
図 3.3-24	応力の卓越方向と緩み領域および変形の関係	120
図 3.3-25	σ_1 と $4\sigma_3$ の比較	120
図 3.3-26	緩衝材の荷重状態の想定図	121
図 3.3-27	緩衝材の応力経路の想定図	121
付録図-1	解析モデル	付-2 (2)
付録図-2	初期応力	付-2 (3)
付録図-3	最大せん断ひずみの分布	付-2 (4)
付録図-4	吹付コンクリート発生応力	付-2 (5)

写 真 目 次

写真-1	超音波弾性波速度測定器	その1	付-1 (1)
写真-2	超音波弾性波速度測定器	その2	付-1 (1)
写真-3	一軸圧縮試験風景	20°C	付-1 (2)
写真-4	一軸圧縮試験風景	80°C	付-1 (2)
写真-5	一軸圧縮試験の試験体	438.78B 20°C	付-1 (3)
写真-6	クリープ試験の試験体	438.78C 20°C	付-1 (4)
写真-7	一軸圧縮試験の試験体	438.78C 20°C	付-1 (5)
写真-8	クリープ試験の試験体	438.78A 20°C	付-1 (6)
写真-9	一軸圧縮試験の試験体	438.70B 80°C	付-1 (7)
写真-10	クリープ試験の試験体	438.70D 80°C	付-1 (8)
写真-11	一軸圧縮試験の試験体	438.70A 80°C	付-1 (9)
写真-12	クリープ試験の試験体	438.70C 80°C	付-1 (10)
写真-13	一軸圧縮試験の試験体	438.62C 20°C	付-1 (11)
写真-14	クリープ試験の試験体	438.62A 20°C	付-1 (12)
写真-15	一軸圧縮試験の試験体	438.62D 80°C	付-1 (13)
写真-16	クリープ試験の試験体	438.62B 80°C	付-1 (14)
写真-17	一軸圧縮試験の試験体	334.28B 20°C	付-1 (15)
写真-18	クリープ試験の試験体	334.28A 20°C	付-1 (16)
写真-19	一軸圧縮試験の試験体	334.28D 80°C	付-1 (17)
写真-20	クリープ試験の試験体	334.28C 80°C	付-1 (18)
写真-21	一軸圧縮試験の試験体	438.26A 20°C	付-1 (19)
写真-22	一軸圧縮試験の試験体	438.26C 80°C	付-1 (20)
写真-23	一軸圧縮試験の試験体	438.26D 20°C	付-1 (21)
写真-24	一軸圧縮試験の試験体	438.26B 80°C	付-1 (22)

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構殿は「原子力の研究，開発及び利用に関する長期計画」で示された深地層の研究施設計画の一つとして，堆積岩を対象に深地層処分技術に関する総合的な研究を行うことを目的として，北海道幌延町（幌延地域）に深地層研究所の建設を進めている。深地層処分技術のうち，人工バリア設計ではニアフィールド岩盤の長期的な諸特性を把握して，設計に適切に反映させる必要がある。そのため，幌延地域に分布する堆積岩の長期的な諸特性を把握し，深地層処分技術に関する研究に資するデータを蓄積することが望まれている。

上記の課題に対して，サイクル機構殿は廃棄体からの熱と操業中の乾燥と閉鎖後の再冠水，緩衝材や支保からの反力といった拘束圧依存性に着目し，室内試験より基礎データを取得してきた。（井上・野田，2002；井上・南，2003；井上ら，2004；大久保，2004）。また，時間依存性挙動を考慮した構成則を用いた大久保モデル（大久保，1987）の堆積軟岩に対する適用性を確認するとともに，長期力学的挙動に関する解析を行った。

本研究では，基礎データ蓄積を目的の一つとして，幌延地域のコアを使用した室内試験を行った。また，廃棄体からの熱が岩盤の長期力学的挙動に及ぼす影響の有無を確認することを目的とした検討を詳細に行った。また，これまでに試錐調査で得られている岩盤物性や初期応力を使用して，深度や研究坑道の配置方向の違いによる試験孔掘削時の力学的安定性の差について解析的に検討した。また，人工バリア定置後の試験孔の長期力学的安定性について解析的な検討を行った。

2. ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす影響検討

ニアフィールドの環境条件が岩盤の長期力学的挙動に及ぼす影響を検討するにあたって、コンプライアンス可変型クリープ構成則(大久保モデル)を使用して検討を行った。

2. 1 大久保モデルの概略

大久保モデルは式(2.1-1)で表される。

$$\frac{d\lambda}{dt} = a\lambda^m \sigma^n \quad (2.1-1)$$

ただし、 λ ($= \varepsilon / \sigma$) はコンプライアンス[MPa], σ は载荷応力[MPa], ε は軸歪み[-], t は時間[sec]であり、 a [MPa \cdot sec], m [-], n [-]は大久保モデルの定数である。

以下に一軸圧縮試験、クリープ試験時の大久保モデル理論曲線の導出方法をそれぞれ示す。

2. 1. 1 一軸圧縮試験時の大久保モデルの理論曲線導出方法

歪み速度一定の一軸圧縮試験を想定して、歪み速度=C [1/sec], 初期コンプライアンス= λ_1 [MPa], 初期ひずみ=0 [-]として式(2.1-1)を解くと式(2.1-2)が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma^* &= (1 + \beta t^*)^{\frac{1}{\beta}} \\ \sigma^* &= \sigma / (\varepsilon / \lambda_1) \\ t^* &= -\frac{aC^n t^{n+1}}{(n+1)\lambda_1^{n-m+1}} \\ \beta &= m - n - 1 \end{aligned} \quad (2.1-2)$$

ただし、式(2.1-2)の適用範囲は $\beta \neq 0, m > 0, m \neq n + 1$ である。

式(2.1-2)を σ と ε の関係の式に書き直すと式(2.1-3)となり、大久保モデルでの応力-歪み曲線を得る。

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{\left(\frac{\varepsilon^{n+1}}{C \left(\frac{n+1}{a(n-m+1)} \right)} + \lambda_1^{n-m+1} \right)^{\frac{1}{n-m+1}}} \quad (2.1-3)$$

次に、式(2.1-3)中の大久保モデルの各定数 (λ_1 , n , m , a) の算出方法を、図 2.1-1 に示す応力-歪み曲線の一例を使用して説明する。

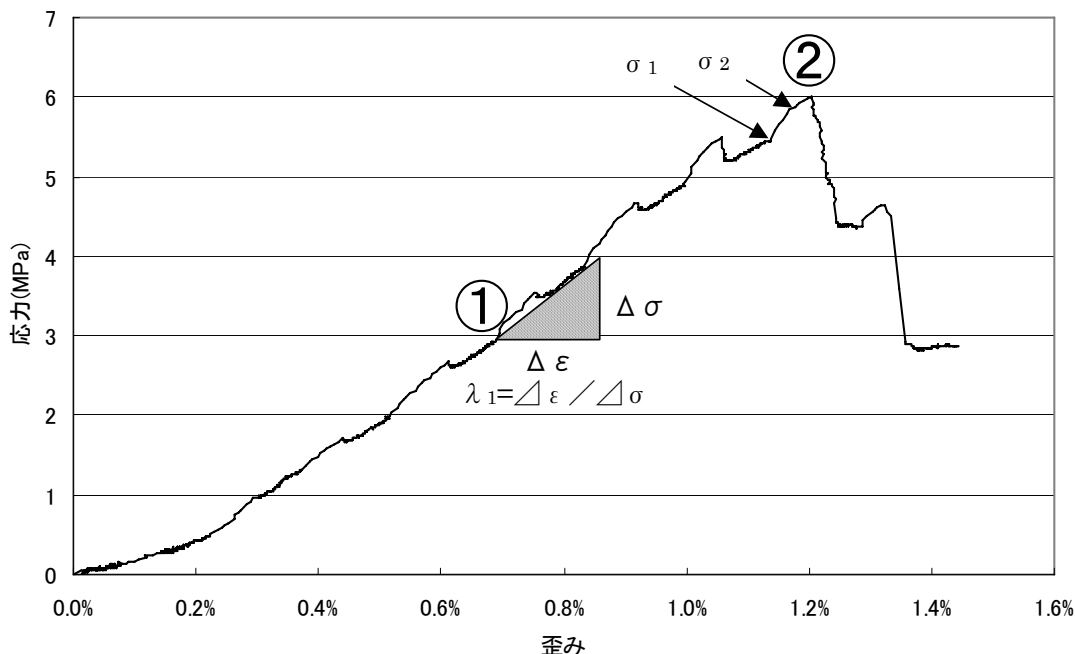


図 2.1-1 一軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線の一部

(1) 初期コンプライアンス (λ_1) について

初期コンプライアンスは一軸圧縮強度の約 50%の応力を示す点で得られる接線ヤング率の逆数から求める。図 2.1-1 では①にあたる。

(2) n について

一軸圧縮強度と n の間には式(2.1-4)が成り立つ。

$$\sigma_v \propto C^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.1-4)$$

ただし、 σ_v は一軸圧縮強度 [MPa]、 C は定歪み速度 [1/sec]である。厳密に n を求める場合には、歪み速度を幾段階にも変えた定歪み速度試験を実施し、歪み速度と破壊強度の関係を把握することが必要となる。しかしながら、そのためには強度特性のほぼ等しい試験体を多数用意する必要があり、実際の岩盤を対象とした場合には困難な場合が多い。そこで今回の試験では、便宜的に以下に示すような方法での試験を実施した。

式(2.1-4)は、強度破壊点すなわち応力-歪み曲線の傾きが 0 となったときの応力に対して成り立つ。しかし、強度破壊点以前でも、応力-歪み曲線の傾きが同じときの応力に対して同様な関係が近似的に成り立つのではないかと仮定した。すなわち、低歪み速度と高歪み速度（低歪み速度の 10 倍の歪み速度）を交互に設定した一軸圧縮試験を実施し、破壊点付近において式(2.1-5)により n を求める。

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 10^{\frac{1}{n+1}} \quad (2.1-5)$$

ただし、 σ_1 は歪み速度を上げる直前の応力 [MPa]、 σ_2 はひずみ速度を上げた後の応力[MPa]である。図 2.1-1 では②にあたる。

(3) mについて

mは一軸圧縮強度以降の応力-歪み曲線の挙動から求める。ここでも便宜的に以下に示すような方法でmを算出した。図 2.1-2 に示すように応力-歪み曲線で初期勾配 = θ [degree]、一軸圧縮強度以降の傾き = α' [degree]として式(2.1-6)で表される α を求める。

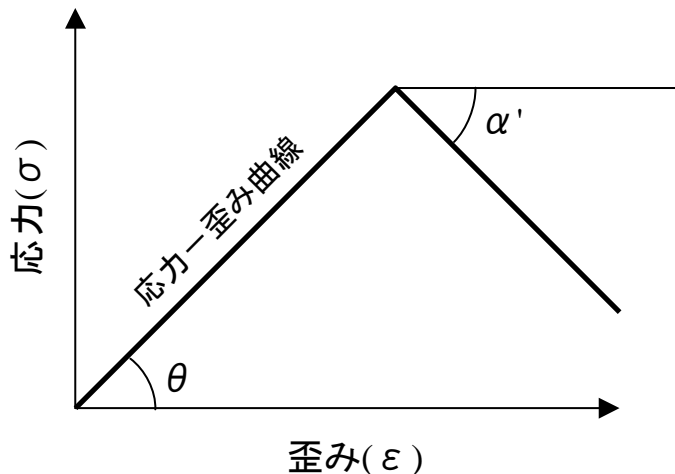


図 2.1-2 応力-歪み曲線から m を求めるときの考え方

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\tan \alpha'}{\tan \theta}\right) \quad (2.1-6)$$

このようにして求めた α と m/n の間には相関があり、概略的には表 2.1-1 のようになる。

表 2.1-1 α と m/n の関係

α [degree]	m/n
90 度付近	1
60 度付近	0.75
45 度付近	0.5
30 度付近	0.25
0 度付近	0

本研究では、表 2.1-1 に従い、m を求めることにした。

(4) aについて

上記(1)～(3)で求めた λ_1 , n , m と、一軸圧縮強度時の定ひずみ速度 C および一軸圧縮強度 σ_v より、 a は式(2.1-7)で算出される。

$$a = \left(\frac{m}{n+1} \right)^{\frac{m}{n-m+1}} \lambda_1^{-m} \sigma_v^{-(n+1)} C \quad (2.1-7)$$

ただし式(2.1-7)の適用範囲は $m > 0, m \neq n+1$ である。

2. 1. 2 クリープ試験時の大久保モデルの理論曲線導出方法

まず、載荷応力が変化しない場合のクリープ試験の解析解を導出する。載荷応力を σ_1 、初期コンプライアンスを λ_1 、初期ひずみを ε_1 とし、式(2.1-1)を解くと式(2.1-8)が得られる。

$$\begin{aligned} \varepsilon^* &= (1 + \beta t^*)^{\frac{1}{\beta}} \\ \varepsilon^* &= \varepsilon / \varepsilon_1 \\ t^* &= -a \lambda_1^{m-1} \sigma_1^n t \\ \beta &= 1 - m \end{aligned} \quad (2.1-8)$$

ただし、 $\beta \neq 0, m > 1$ である。式(2.1-8)を ε と t の関係の式に書き直すと式(2.1-9)となり、大久保モデルでのクリープ時の歪み-時間曲線を得る。

$$\varepsilon = \sigma_1 \left((-m+1)a \sigma_1^n t + \lambda_1^{-m+1} \right)^{\frac{1}{-m+1}} \quad (2.1-9)$$

大久保モデルでは、クリープ破壊までの所要時間(寿命)を予測することが可能となる。3次クリープでは歪みは無限大に大きくなる($\varepsilon \rightarrow \infty$)と仮定して式(2.1-9)を解くと、寿命 t_c は式(2.1-10)のように表される。

$$t_c = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{m-1} \right) \lambda_1^{1-m} \sigma_1^{-n} \quad (2.1-10)$$

ただし、 $m > 1$ である。

2. 2 ボーリングコアを用いた試験

本研究での一連の試験は以下の手順に従い実施した。

- ① ボーリングコア採取
- ② 試験体の作成と選別
- ③ 歪み速度を変化させた一軸圧縮試験
- ④ 多段階載荷式クリープ試験

以下の項には上記各段階の説明を示す。

2. 2. 1 ボーリングコア採取

幌延地域では深地層研究所設置地区選定のため 2001 年度に HDB-1 孔と HDB-2 孔の 2 孔による試錐調査を行い、深地層研究所設置地区の概略的な位置を決定している（サイクル機構，2002）。また、深地層研究所設置地区の今後の試錐調査をはじめとする各種調査の基礎となる場の概念構築や更新，地質環境モデルの構築のためのデータ取得と調査技術の改良を目的として 2002 年度は HDB3～5 孔，2003 年度は HDB6～8 孔による試錐調査を実施している（サイクル機構，2003；サイクル機構，2004）。

本研究では，このうち HDB6 孔のコア（直径 8.3cm，稚内層）を試験体として使用した。また，HDB6 孔より，水理試験の際にパッカーで閉じられた区間（ハッチング）内に岩盤を通して溜まった水をポンプで吸い上げることにより水を採取した。この水は，試験体の養生や一軸圧縮試験，クリープ試験に使用している。これは，試験体の水環境をできるだけ現地の状態と同一にするためである。

2. 2. 2 試験体の作成

(1) 試験体コア抜き方法

採取したボーリングコアから試験体のコア抜きを行った。試験体のコア抜き方法を以下に示す。

- ① 岩石カッターによりボーリングコアを適当な長さ（約 8cm）に切断する。
- ② 試験体コア抜きを容易にするために、ボーリングコアの周囲を直径約 15cm の円筒形のモルタル（早強ポルトランドセメント（太平洋セメント）：再骨材：水＝1：2：0.65（重量比））で固定する。
- ③ 内径 25mm、外形 30mm のビットを使用して試験体コア抜きを行う。なお、ボーリングコアは直径約 83mm であり、1 本のコアから最大 4 個の試験体が採取可能であった。
- ④ 岩石カッターにより試験体コアの長さを 5cm 強の長さに切断する。
- ⑤ 試験体コアの端面平行度を得るため、摺りガラス上で#2000 研磨剤を使用して端面整形を行った。なお、端面整形の基準としては、ISRM 指針（岩の力学連合会，1982）に則ることとし、端面で直交する 4 点の高さの最小値と最大値の差が 0.1mm 以下となることを目標とした。

(2) 試験体のナンバリング

試験体は全て採取深度によるナンバリングを行って管理した。なお、同一深度から最大 4 個の試験体が採取されることから、同一深度で採取された試験体は英字(A～D)により区別した。たとえば、試験体番号 438.62A は試験体の底面位置が採取深度 438.62m でのサンプル A を示している。

(3) 試験体の寸法と重量

試験体の寸法はノギスにより 0.01mm 単位まで計測した。重量は電子秤で 0.001g 単位まで計測した。

(4) 弾性波（超音波）速度試験

一般に、クリープ試験結果は、応力レベル（载荷応力／一軸圧縮強度）に大きく依存する。一軸圧縮試験結果をもとに 3 次クリープまでのクリープ現象を予測するためには、クリープ試験に供する試験体の一軸圧縮強度を事前に予測する必要がある。そのため、一軸圧縮試験で使用した試験体とほぼ同様な力学特性を示す試験体を使用してクリープ試験を実施し、応力レベルの設定を精度良く行うことが重要となる。

弾性波速度には「 V_P 」と呼ばれる縦波速度、「 V_S 」と呼ばれる横波速度がある。それぞれの速度は、発信点から受信点までの到達に要した時間と距離によって算出される。弾性波速度は対象物の空隙率などに影響され、一軸圧縮強度などの力学的特性と

のおおまかな相関が認められている。本研究では、弾性波速度を参考にして試験体の選別を行った。具体的な選定方法については、試験結果の頁で詳述する。

(5) 用途別試験体の作成方法

試験体はコア抜き後に寸法計測などを行った後速やかに水中に浸し、24時間以上の真空脱気を行って各試験に供した。各試験の試験条件は①水中常温、②水中80℃の2種類である。なお、試験体作成の際に使用した水は、幌延地域で採取した水を使用した。

以下に試験条件ごとの試験体作成方法等について示す。

① 水中20℃

水中、20℃、一軸状態での試験である。

② 水中80℃

上記①の試験条件に加えて、水温を80℃に設定した試験である。これは、高レベル放射性廃棄物処分後の人工バリア（緩衝材の外縁）と岩盤の境界付近で予想される最高温度を想定している（サイクル機構，1999）。なお、熱衝撃による試験体の崩壊を防ぐため、試験体を常温の水に浸した状態から、約24時間かけて徐々に加温して設定温度である80℃にした。

(6) 試験体概要のまとめ

一軸圧縮試験およびクリープ試験のために用意した試験体の概要について記述する。表 2.2-1 には試験体の寸法および重量などの計測値を、表 2.2-2 には計測値から算出される試験体の平均直径や平均高さなどの算出値を示す。表中の各値の説明を以下に列挙する。

- ① 重量 [g] : 湿潤重量
- ② 直径 (D11~D32) [cm] : 図 2.2-1 に示す位置での計測結果
- ③ 高さ (H1~H4) [cm] : 図 2.2-1 に示す位置での計測結果
- ④ T_p [μ sec] : 縦波弾性波到達時間
- ⑤ T_s [μ sec] : 横波弾性波到達時間
- ⑥ 平均直径 [cm] : D11~D32 の平均値
- ⑦ 断面積 [cm^2] : 平均直径から算出した断面積
- ⑧ 平均高さ [cm] : H1~H4 の平均値
- ⑨ 体積 [cm^3] : 断面積 \times 平均高さ
- ⑩ 湿潤密度 [g/cm^3] : 重量 \div 体積
- ⑪ V_p [m/sec] : 縦波弾性波速度 = 平均高さ $\div T_p$
- ⑫ V_s [m/sec] : 横波弾性波速度 = 平均高さ $\div T_s$
- ⑬ 含水比 [%] : 試験終了後に試験体の破片で湿潤後含水比を測定した。湿潤後含水比と湿潤前後の試験体重量から湿潤前含水比を算出した。

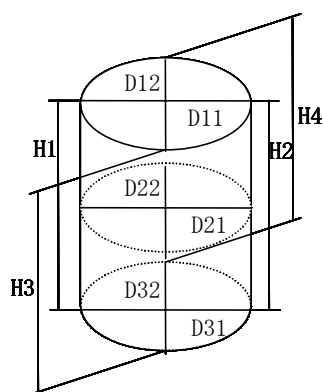


図 2.2-1 試験体寸法の計測位置

表 2.2-1 試験体概要その1 (計測値)

試験体番号	採取深度 [m]	重量		直径						高さ				Tp [μ sec]	Ts [μ sec]
		湿潤前 [g]	湿潤後 [g]	D11 [cm]	D12 [cm]	D21 [cm]	D22 [cm]	D31 [cm]	D32 [cm]	H1 [cm]	H2 [cm]	H3 [cm]	H4 [cm]		
438.62 A	438.62	45.1	45.1	2.433	2.437	2.429	2.438	2.425	2.434	5.388	5.389	5.388	5.389	27.4	57.2
438.62 B	438.62	44.6	44.6	2.438	2.430	2.439	2.429	2.436	2.424	5.341	5.339	5.338	5.338	25.6	54.4
438.62 C	438.62	44.4	44.4	2.438	2.432	2.434	2.428	2.429	2.421	5.299	5.298	5.297	5.298	25.8	56.0
438.62 D	438.62	44.3	44.4	2.439	2.436	2.437	2.433	2.439	2.437	5.300	5.298	5.300	5.297	25.3	56.0
438.7 A	438.7	43.4	43.4	2.427	2.420	2.424	2.418	2.424	2.422	5.252	5.249	5.249	5.251	25.1	55.6
438.7 B	438.7	43.3	43.3	2.435	2.433	2.430	2.430	2.431	2.429	5.203	5.204	5.204	5.205	24.2	53.4
438.7 C	438.7	43.2	43.2	2.426	2.433	2.422	2.431	2.419	2.431	5.187	5.187	5.191	5.184	24.4	56.2
438.7 D	438.7	42.9	42.9	2.424	2.428	2.419	2.426	2.415	2.425	5.161	5.162	5.163	5.161	24.2	55.2
438.78 A	438.78	44.3	44.3	2.439	2.437	2.435	2.433	2.435	2.434	5.321	5.318	5.319	5.317	24.9	56.0
438.78 B	438.78	43.3	43.3	2.440	2.437	2.437	2.434	2.439	2.435	5.177	5.177	5.177	5.177	23.9	54.4
438.78 C	438.78	43.0	43.0	2.431	2.435	2.431	2.435	2.433	2.436	5.140	5.150	5.140	5.148	23.9	54.0
438.78 D	438.78	43.6	43.6	2.437	2.439	2.435	2.439	2.431	2.435	5.223	5.224	5.222	5.223	24.9	55.4
334.28 A	334.28	45.2	45.3	2.433	2.434	2.435	2.434	2.435	2.433	5.344	5.344	5.346	5.343	25.8	59.0
334.28 B	334.28	43.4	43.4	2.434	2.436	2.431	2.434	2.431	2.433	5.149	5.146	5.149	5.146	24.7	61.6
334.28 C	334.28	44.7	44.7	2.434	2.434	2.432	2.433	2.434	2.434	5.277	5.280	5.278	5.281	25.6	62.4
334.28 D	334.28	44.1	44.2	2.434	2.436	2.432	2.433	2.434	2.433	5.215	5.216	5.218	5.214	25.2	60.6
438.26 A	438.26	43.7	43.8	2.438	2.441	2.433	2.436	2.432	2.434	5.190	5.185	5.190	5.186	24.6	55.2
438.26 B	438.26	44.3	44.3	2.430	2.432	2.429	2.433	2.426	2.432	5.271	5.265	5.266	5.267	25.2	59.2
438.26 C	438.26	44.6	44.6	2.442	2.440	2.439	2.435	2.437	2.433	5.274	5.274	5.272	5.279	25.1	57.4
438.26 D	438.26	43.7	43.7	2.437	2.433	2.437	2.432	2.437	2.432	5.198	5.198	5.198	5.198	24.8	56.4

表 2.2-2 試験体概要その2 (算出値)

試験体番号	採取深度 [m]	重量 [g]	平均直径 [cm]	断面積 [cm ²]	平均高さ [cm]	体積 [cm ³]	湿潤密度 [g/cm ³]	Vp [m/sec]	Vs [m/sec]	含水比	
										湿潤前 [%]	湿潤後 [%]
438.62 A	438.62	45.1	2.433	4.648	5.389	25.045	1.801	1967	942	30.6	30.6
438.62 B	438.62	44.6	2.433	4.648	5.339	24.815	1.797	2086	981	30.9	30.9
438.62 C	438.62	44.4	2.430	4.639	5.298	24.577	1.807	2053	946	30.6	30.6
438.62 D	438.62	44.4	2.437	4.664	5.299	24.712	1.793	2094	946	30.6	30.9
438.7 A	438.7	43.4	2.423	4.609	5.250	24.199	1.793	2092	944	31.3	31.3
438.7 B	438.7	43.3	2.431	4.643	5.204	24.161	1.792	2150	975	32.0	32.0
438.7 C	438.7	43.2	2.427	4.626	5.187	23.998	1.800	2126	923	30.8	30.8
438.7 D	438.7	42.9	2.423	4.610	5.162	23.798	1.803	2133	935	26.5	26.5
438.78 A	438.78	44.3	2.436	4.659	5.319	24.779	1.788	2136	950	31.2	31.2
438.78 B	438.78	43.3	2.437	4.664	5.177	24.148	1.793	2166	952	30.0	30.0
438.78 C	438.78	43.0	2.434	4.651	5.145	23.927	1.797	2153	953	26.8	26.8
438.78 D	438.78	43.6	2.436	4.661	5.223	24.342	1.791	2098	943	31.7	31.7
334.28 A	334.28	45.3	2.434	4.653	5.344	24.867	1.818	2071	906	31.3	31.5
334.28 B	334.28	43.4	2.433	4.650	5.148	23.935	1.813	2084	836	31.9	31.9
334.28 C	334.28	44.7	2.434	4.651	5.279	24.553	1.821	2062	846	30.3	30.3
334.28 D	334.28	44.2	2.434	4.652	5.216	24.262	1.818	2070	861	31.1	31.3
438.26 A	438.26	43.8	2.436	4.659	5.188	24.172	1.808	2109	940	30.8	31.1
438.26 B	438.26	44.3	2.430	4.639	5.267	24.435	1.813	2090	890	31.6	31.6
438.26 C	438.26	44.6	2.438	4.667	5.275	24.617	1.812	2101	919	31.8	31.8
438.26 D	438.26	43.7	2.435	4.656	5.198	24.199	1.806	2096	922	30.4	30.4

2. 2. 3 歪み速度を変化させた一軸圧縮試験の概要

大久保モデルの各定数を求めるためには、歪み速度を変化させた一軸圧縮試験を実施する必要がある。ここではその概要と試験結果を示す。以降特に断らない場合には「一軸圧縮試験」は「歪み速度を変化させた一軸圧縮試験」を表す。

(1) 試験手順

- ①各条件に合わせて試験体を圧縮試験機に据える。
- ②歪み速度を所定の値に設定し、定歪み速度の一軸圧縮を開始する。
- ③所定の時間経過後に歪み速度を変化させ、定歪み速度の一軸圧縮を継続する。
- ④②～③を繰り返し、一軸圧縮強度発現後の応力歪み曲線が得られるまで試験を継続する。
- ⑤試験終了

(2) 試験装置

図 2.2-2 に示すようにサーボコントロール方式の岩石三軸圧縮試験機（型式 T0-20-3:坂田電機株式会社）を使用して、歪み速度制御方式で一軸圧縮試験を行った。計測器として、変位計（型式 LV-51 : 坂田電機株式会社 : 容量 5mm）、荷重計（型式 PV-200SL : 坂田電機株式会社 : 容量 5tf, 20tf）を使用した。

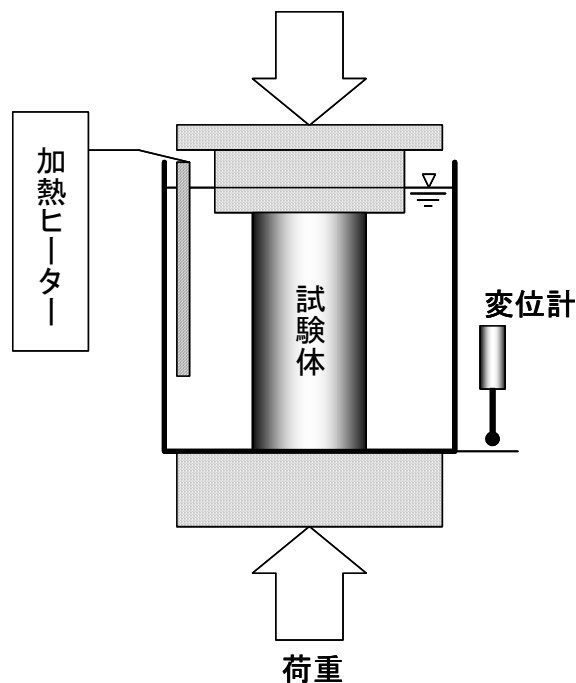


図 2.2-3 一軸圧縮試験装置の概念図

(3) 一軸圧縮試験条件

一軸圧縮試験の試験条件を表 2.2-3 にまとめて示す。

表 2.2-3 一軸圧縮試験の試験条件等

使用岩石	堆積岩（硬質頁岩）
採取地点	幌延地域（HDB6 孔）
载荷方法	歪み速度を変化させた定歪み速度試験 設定ひずみ速度 継続時間 ① $1.7 \times 10^{-6}/\text{sec}$: 10min ② $1.7 \times 10^{-5}/\text{sec}$: 1min
供試体の状態	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水中 20℃・・・真空飽和→試験 ・ 水中 80℃・・・真空飽和→24 時間の 80℃保温→試験 ※試験前に 24 時間の真空飽和による強制湿潤状態とし、その後、各条件に合わせて試験体を設定した。 ※真空飽和および試験には幌延地域で採取した水を使用した。
供試体寸法	直径約 25mm×高さ約 50mm
試験機の仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩石三軸圧縮試験機：型式 T0-20-3（坂田電機株式会社） ・ 変位計：型式 LV-51（坂田電機株式会社：容量 5mm） ・ 荷重計：型式 PV-200SL（坂田電機株式会社：容量 5tf, 20tf） ・ データロガー：TDS-602（東京測器研究所）

2. 2. 4 多段階載荷式クリープ試験の概要

本研究では、多段階載荷式クリープ試験（マルチクリープ試験）を実施した。これは、多段階載荷式クリープ試験に供した試験体において想定した一軸圧縮強度などの各定数が実際の値と大きく異なっていた場合、試験結果が得られないことを避けるためである。多段階載荷式クリープ試験では、原則として想定圧縮強度を基準とし、応力レベルを 25%、50%、60%、70%、80%、90%、100%・・・と段階的に増加させ、各段階の載荷時間は約 1 時間とした。以降、特に断らない場合には「クリープ試験」は「多段階載荷式クリープ試験」を表す。

(1) クリープ試験手順

クリープ試験の試験手順を以下に示す。

- ① 各条件に合わせて試験体を試験機に据える。
- ② 所定の応力レベルを負荷させてクリープ試験を開始する。
- ③ 1 時間経過後に応力レベルを変化させ、クリープ試験を継続する。
- ④ ③を繰り返し、試験体が破壊するまで試験を継続する。
- ⑤ 試験終了

(2) クリープ試験機

試験装置は、一軸圧縮試験と同じくサーボコントロール方式の岩石三軸圧縮試験機（型式 T0-20-3：坂田電機株式会社）を使用した。計測器として、変位計（型式 LV-51：坂田電機株式会社：容量 5mm）、荷重計（型式 PV-200SL：坂田電機株式会社：容量 5tf, 20tf）を使用した。

(3) クリープ試験条件

クリープ試験の試験条件等をまとめて示す。

表 2.2-4 クリープ試験の試験条件等

使用岩石	堆積岩（硬質頁岩）
採取地点	幌延地域(HDB6 孔)
載荷方法	応力レベルを原則として 25%,50%,60%,70%,80%,90%,100%…とした。載荷継続時間は各応力レベルで約 1 時間とした。応力レベルの変更時は歪み速度制御(1.7×10^{-5} [/sec])で設定応力になるまで載荷応力を増加させた。
試験体の状態	<ul style="list-style-type: none"> ・ 水中 20℃…真空飽和→試験 ・ 水中 80℃…真空飽和→24 時間以上の 80℃保温→試験 ※試験前に 24 時間の真空飽和による強制湿潤状態とし、その後各条件に合わせて試験体を設定した。 ※試験には幌延地域で採取した水を使用した。
供試体寸法	直径約 25mm×高さ約 50mm ※試験体の平行度は、端面で直行する 4 点の高さの最小値と最大値の差が 0.1mm 以下となることを目標とした。
試験機の仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・ 岩石三軸圧縮試験機：型式 T0-20-3（坂田電機株式会社） ・ 変位計：型式 LV-51（坂田電機株式会社：容量 5mm） ・ 荷重計：型式 PV-200SL（坂田電機株式会社：容量 5tf, 20tf） ・ データロガー： TDS-602（東京測器研究所）

2. 3 試験結果と考察

一軸圧縮試験およびクリープ試験は、検討項目別に試験体を選定した。試験の検討項目は、以下の3種類である。

- ① 大久保モデルの検証
- ② 熱が大久保モデル定数に及ぼす影響
- ③ 熱がクリープに及ぼす影響

以下の項では、上記の検討項目別に試験体選定方法、試験結果とその考察を示す。

2. 3. 1 大久保モデルの検証

(1) 試験体選別方法

表 2.3-1 に大久保モデルの検証用に使用した試験体の概要を示す。大久保モデルのパラメータは一軸圧縮試験から得ることができる。取得した大久保モデルのパラメータを用いてクリープ試験での寿命を予測する。その後、クリープ試験を行い、予測した寿命と実測の寿命の差を比較することで、大久保モデルの妥当性の検証を行う。そのため、一軸圧縮試験とクリープ試験で使用する試験体はなるべく力学的特性の揃った試験体を使用する必要がある。ここでは、コア採取位置が同一深度の試験体を使用することで、力学的特性の揃った試験体を得るようにした。

同一深度内の試験体は4本とることができる。試験体番号 438.78A~D と 438.70A~D では、同一深度内で弾性波速度 V_p が最も大きい試験体と最も小さい試験体で一軸圧縮試験を行った。その後、残り2つの試験体でクリープ試験を行った。このとき、クリープ試験の試験体の想定一軸圧縮強度は、弾性波速度が近い値を示す一軸圧縮試験の試験体の一軸圧縮強度を採用し、各応力レベルの載荷応力を決定した。例えば、438.78B の一軸圧縮試験結果をもとに 438.78C のクリープ試験時の応力レベルごとの載荷応力を設定した。なお、438.78A~D は水中 20°Cでの試験であり、438.70A~D は水中 80°Cでの試験である。

438.62A~D は同一深度内で 20°Cと 80°Cの試験を行ったものである。ここでは、20°Cの試験として、弾性波速度が最も大きい試験体で一軸圧縮試験を行い、その結果をもとに2番目に弾性波速度が大きい試験体でクリープ試験を行った。次に、80°Cの試験として、弾性波速度が3番目に大きい試験体で一軸圧縮試験を行い、その結果をもとに弾性波速度が4番目に大きい試験体でクリープ試験を行った。

334.28A~Dは、粘土鉱物の含有量が比較的多いと考えられる試験体での試験である。ここでも、20°Cの試験として弾性波速度が最も大きい試験体で一軸圧縮試験を行い、その結果をもとに2番目に弾性波速度が大きい試験体でクリープ試験を行った。次に、80°Cの試験として、弾性波速度が3番目に大きい試験体で一軸圧縮試験を行い、その結果をもとに残りの弾性波速度が4番目に大きい試験体でクリープ試験を行った。

表 2.3-1 大久保モデル検証用に使用した試験体の概要

試験体 番号	採取深度	重量	平均直径	平均高さ	V _p	V _p の 順位	試験種 類	試験温 度	基準の一 軸圧縮試 験	備考
	[m]	[g]	[cm]	[cm]	[m/sec]			[°C]		
438.78B	438.78	43.3	2.437	5.177	2166	1	一軸	20		
438.78C	438.78	43.0	2.434	5.145	2153	2	クリープ	20	438.78B	
438.78D	438.78	43.6	2.436	5.223	2098	4	一軸	20		
438.78A	438.78	44.3	2.436	5.319	2136	3	クリープ	20	438.78D	
438.70B	438.7	43.3	2.431	5.204	2150	1	一軸	80		
438.70D	438.7	42.9	2.423	5.162	2133	2	クリープ	80	438.70B	
438.70A	438.7	43.4	2.423	5.250	2092	4	一軸	80		
438.70C	438.7	43.2	2.427	5.187	2126	3	クリープ	80	438.70A	
438.62C	438.62	44.4	2.430	5.298	2053	3	一軸	20		
438.62A	438.62	45.1	2.433	5.389	1967	4	クリープ	20	438.62C	
438.62D	438.62	44.3	2.437	5.299	2094	1	一軸	80		
438.62B	438.62	44.6	2.433	5.339	2086	2	クリープ	80	438.62D	
334.28B	334.28	43.4	2.433	5.148	2084	1	一軸	20		粘土鉱 物有り
334.28A	334.28	45.2	2.434	5.344	2071	2	クリープ	20	334.28B	
334.28D	334.28	44.1	2.434	5.216	2070	3	一軸	80		
334.28C	334.28	44.7	2.434	5.279	2062	4	クリープ	80	334.28D	

(2) 試験結果とその考察

図 2.3-1(a)と図 2.3-1(b)は、試験体番号 438.78B (試験条件：20℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-1(a)は歪み-時間図であり、経過時間に対して歪みが規則的に変化しており、歪み速度を変化させた一軸圧縮試験が設定どおり実施されていることが確認できる。図 2.3-1(b)は応力-歪み図であり、大久保モデルの定数を得ることができる。同図より、歪み速度が変化した部分で応力が変化しているため応力歪み曲線が鋸状になっていることがわかる。一軸圧縮強度は 19.71[MPa]であり、破壊強度後は階段状になりながら応力が低下している。この階段状に応力が急激に低下している部分は歪み速度の変化時と一致していた。大久保モデルの定数 m を算出する際には、破壊強度後の傾きが必要であるが、同図から明瞭にはその傾きを読み取ることは困難である。

図 2.3-1(c)～図 2.3-1(h)は試験体番号 438.78C (試験条件：20℃) のクリープ試験結果である。試験体番号 438.78C は 438.78B の一軸圧縮試験結果をもとに各応力レベルの荷重値を設定している。図 2.3-1(c)は応力-時間図であり、図中には想定強度に対する応力レベルを示している。同図より設定した応力で保持されていることが確認できる。図 2.3-1(d)、図 2.3-1(e)はそれぞれ変位-時間図、歪み-時間図であり、最初の応力レベルでの変位の変化が 0.3[mm]から 0.4[mm]に変化していることがわかる。この原因は明らかではなく、本試験は参考値とする必要がある可能性がある。なお、破壊時の応力レベルは 100[%]であった。図 2.3-1(f)は、歪み速度-時間図である。今回の試験の変位計の最小読み取り値は 0.001[mm]であり試験体の高さは約 50[mm]であることから最小読み取り歪みは約 2×10^{-5} [-]となるが、実際の計測では変位 0.001[mm]程度の測定誤差があることから、誤差を含んだ最小読み取り歪みは約 4×10^{-5} [-]となる。仮に 10[sec]で誤差を含んだ最小読み取り歪みの歪みが生じた場合、最小読み取り歪み速度は約 4×10^{-6} [-]となる。同様に 100[sec]で誤差を含んだ最小読み取り歪みの歪みが生じた場合、最小読み取り歪み速度は約 4×10^{-7} [/sec]となる。このため、クリープ試験の寿命にもよるが、歪み速度が 10^{-6} [/sec]程度以下は測定限界であると考えられる。測定限界の問題はあるものの、同図より各応力レベルで歪み速度は徐々に低減しているようにみえる。図 2.3-1(g)は、破壊時の応力レベルでの歪み-時間図である。同図の時間軸は設定荷重に達した直後を 0[sec]として補正している。図中には大久保モデルでの理論曲線も併記している。同図より、歪みの初期値は実測値の方が理論値よりも約 0.7[%]大きくなっていることがわかる。この原因としては、応力-歪み図(図 2.3-1(a)参照)での初期コンプライアンスの読み取り誤差があげられる。初期コンプライアンスは破壊強度の 50%時の応力位置での弾性係数の逆数として与えられる。図 2.3-1(a)より、試験開始時から破壊強度時までの応力-歪み曲線の勾配は下に凸になっており、破壊強度の 50%時の応力位置でのコンプライアンスは実際のコンプライアンスよりも小さいのではないかと考えられる。同図で例えば応力値が 10[MPa]

での歪みの実測値と理論値を比較すると、理論値の歪みの方が小さくなっており、初期クリープ歪みの実測値と理論値の傾向（図 2.3-1 (g) 参照）と同様であることがわかる。なお、寿命の誤差は 1 オーダー以内であった。図 2.3-1 (h) は、破壊時の応力レベルでの歪み速度-補正時間図である。同図では、誤差を含んだ歪みの最小読み取り値（約 4×10^{-7} [/sec]）だけ歪みが変わったときの時間と歪み値を取り出して歪み速度を算出している。同図より、最小歪み速度が約 9×10^{-7} [/sec] であることがわかる。

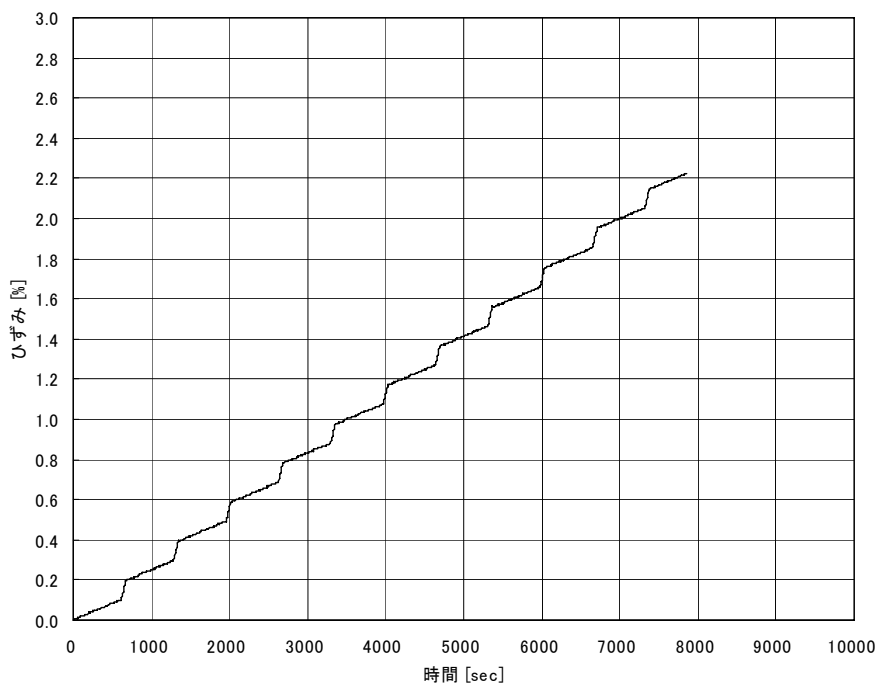


図 2. 3-1 (a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438. 78B 20°C

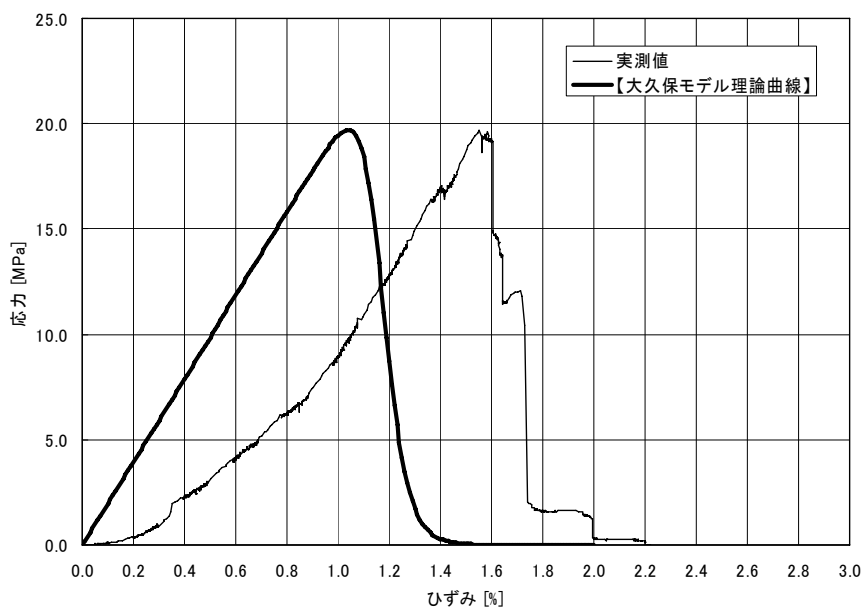


図 2. 3-1 (b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438. 78B 20°C

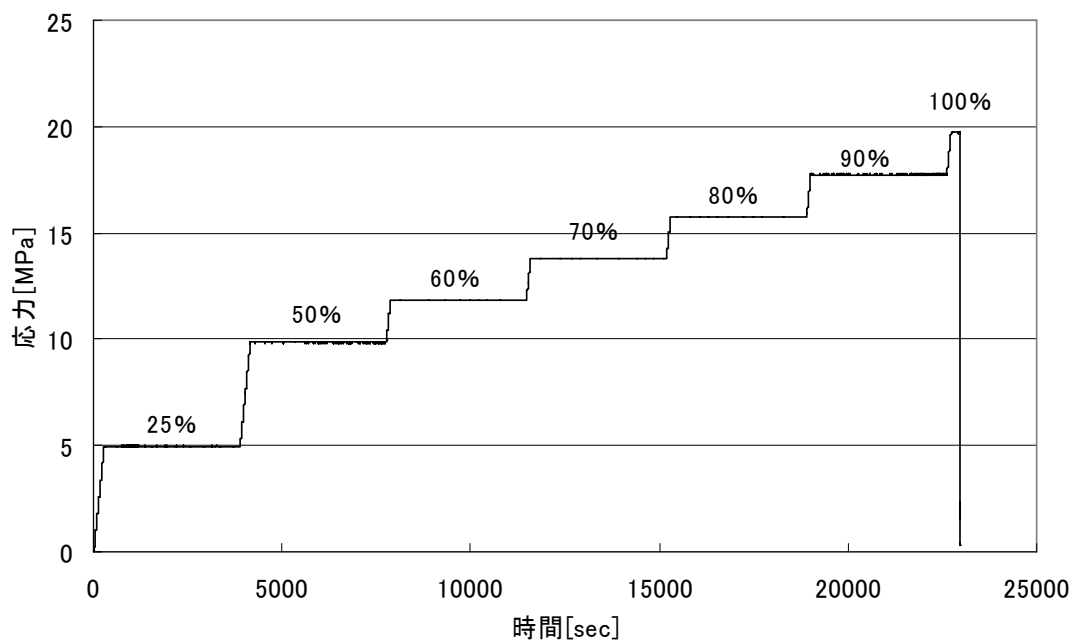


図 2.3-1(c) クリープ試験結果 応力-時間 438.78C 20°C

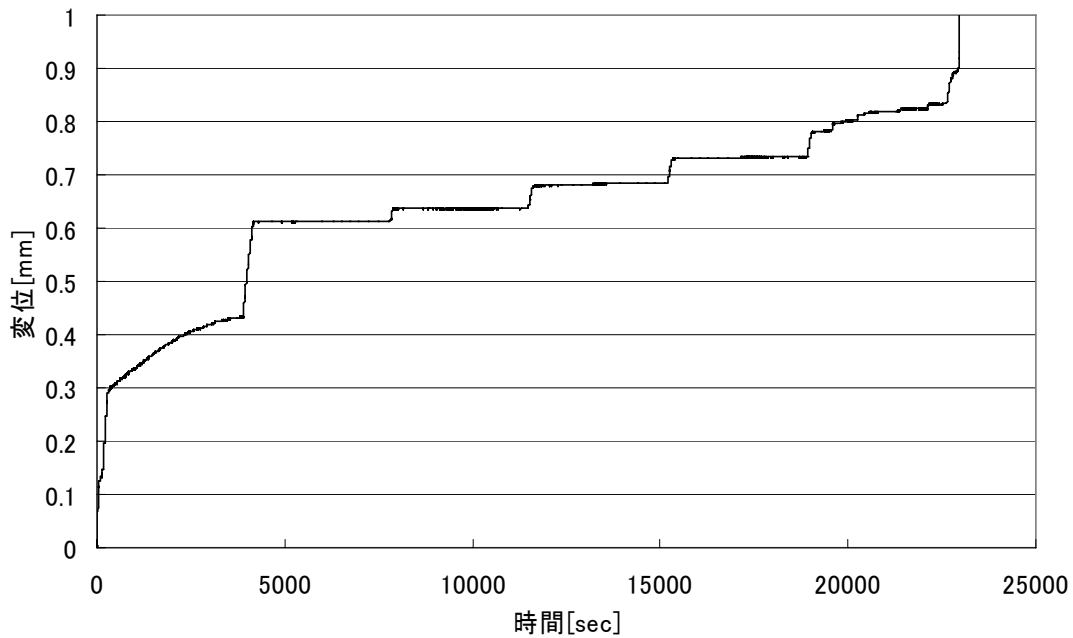


図 2.3-1(d) クリープ試験結果 変位-時間 438.78C 20°C

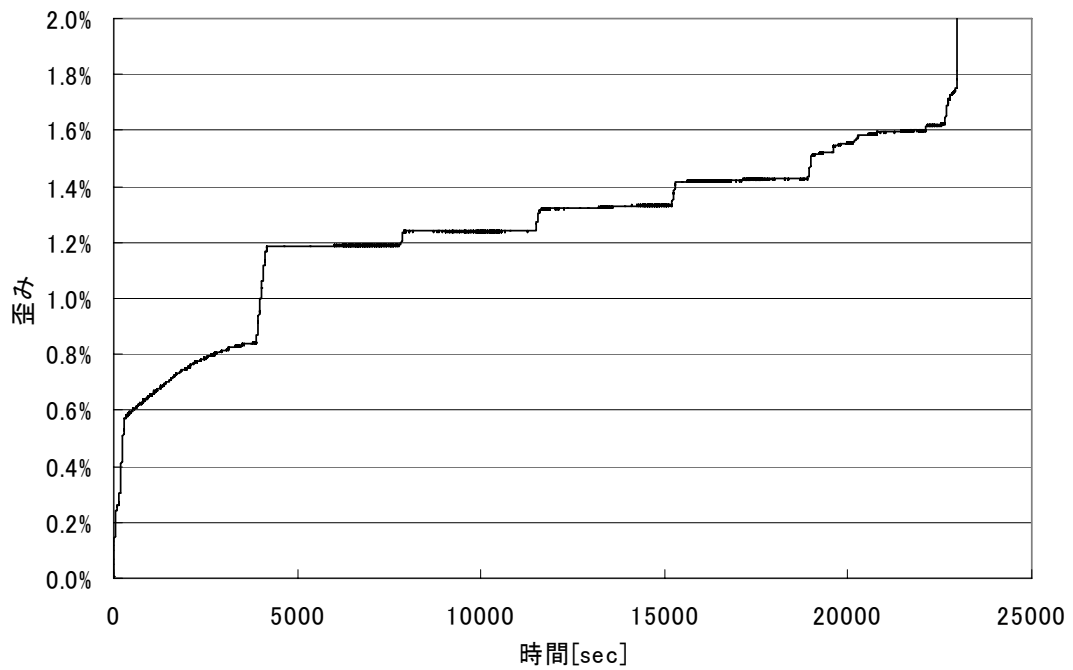


図 2.3-1(e) クリープ試験結果 歪み-時間 438.78C 20°C

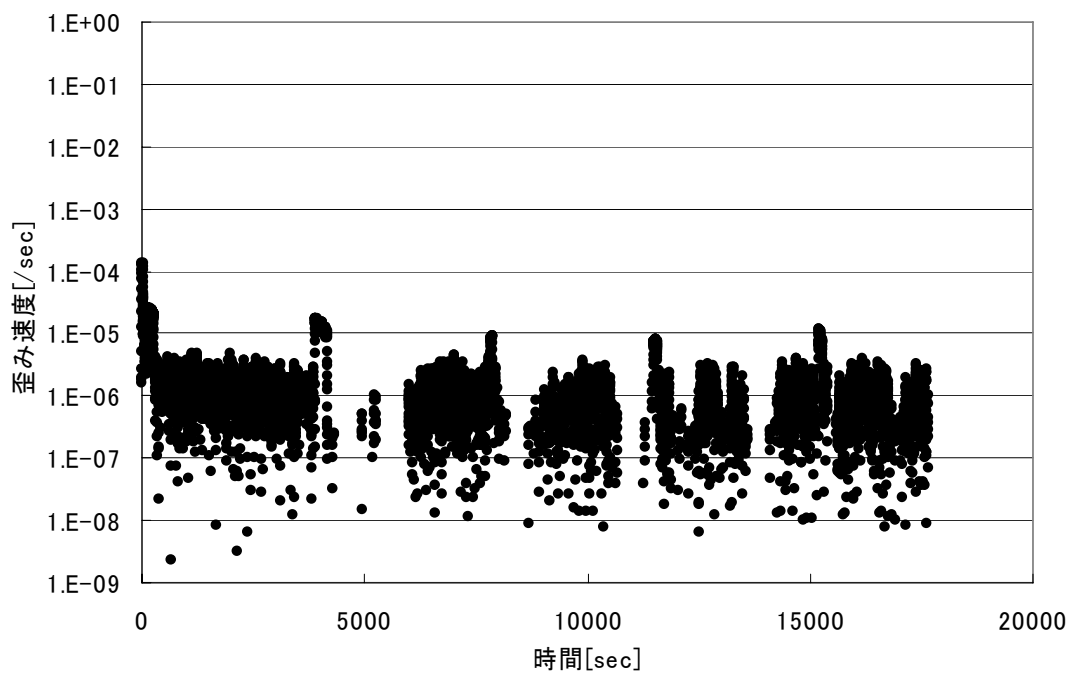


図 2.3-1(f) クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.78C 20°C

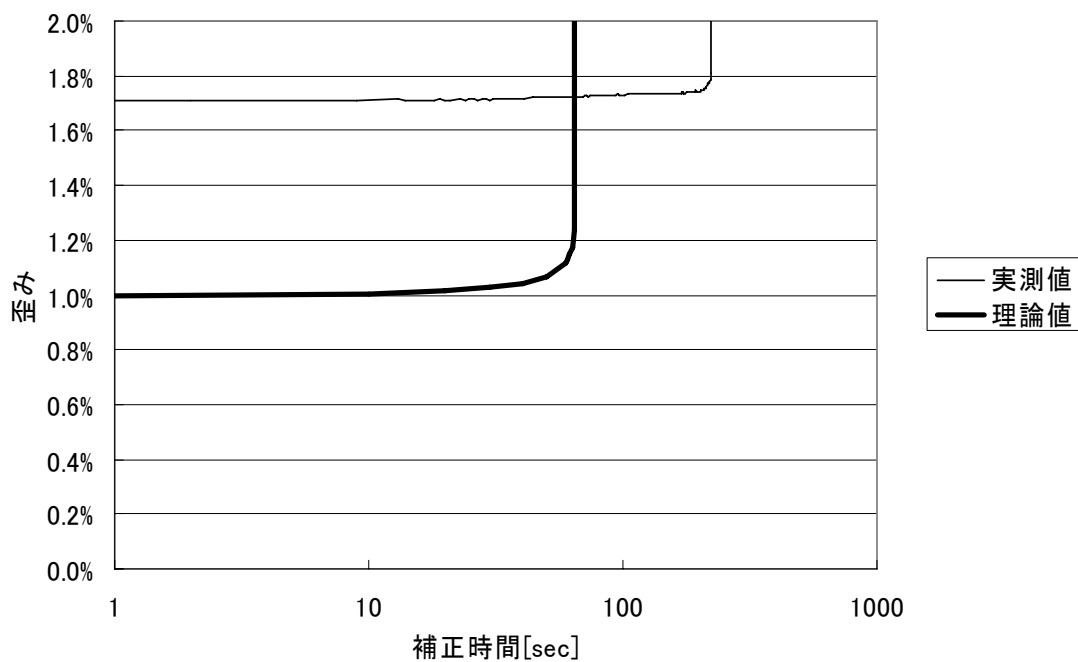


図 2.3-1(g) クリープ試験結果 歪み-補正時間 438.78C 20°C

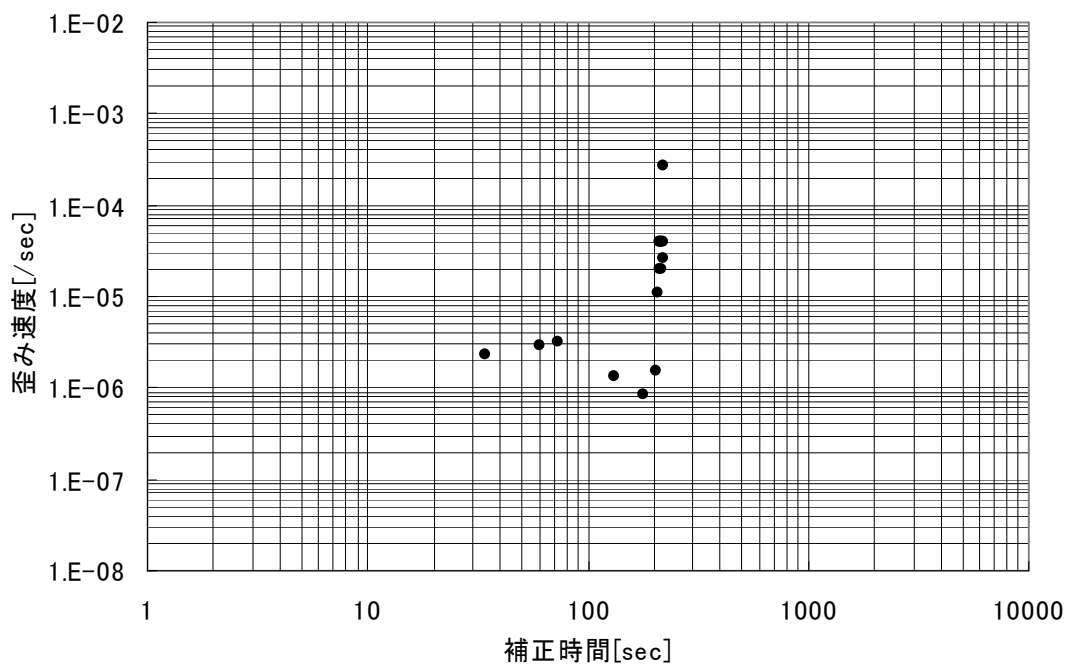


図 2.3-1(h) クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 438.78C 20°C

図 2.3-2(a)と図 2.3-2(b)は、試験体番号 438.78D (試験条件：80℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-2(a)は歪み-時間図であり、歪み速度が規則正しく変化しており、歪み速度を変化させた一軸圧縮試験が設定どおりに実施されたことが確認できる。図 2.3-2(b)は、応力-歪み図であり、歪みが約 1.1[%]のときに応力が急激に低下している箇所があることがわかる。これは、試験体の一部分が破壊したことを示唆していると考えられる。一軸圧縮強度は 16.98[MPa]で、破壊強度後は急激に応力が低下しほぼ 0[MPa]になっていた。

図 2.3-2(c)～図 2.3-2(h)は試験体番号 438.78A (試験条件：80℃) のクリープ試験結果である。試験体番号 438.78A は 438.78D の一軸圧縮試験結果をもとに各応力レベルの荷重値を設定している。図 2.3-2(c)は応力-時間図であり、応力レベルを併記している。同図より応力の設定が良好になされたことが確認できる。図 2.3-2(d) , 図 2.3-2(e) はそれぞれ変位-時間図, 歪み-時間図であり、それぞれの応力レベルで歪み曲線が得られており、破壊時の段階 (応力レベル：90%) では、変位および歪みが急激に大きくなっていることが確認できる。図 2.3-2(f) は、歪み速度-時間図であり、測定精度の問題はあるものの各応力レベルで歪み速度が徐々に小さくなっている傾向がわかる。図 2.3-2(g) は、破壊時の応力レベルでの歪み-補正時間図である。同図より、補正時間が約 100[sec]のときに歪みが大きくなっている箇所があることがわかる。このときに、試験体の一部分が変形もしくは破壊したのではないかと考えられる。実測の寿命は 1759[sec]であるのに対し、理論値は約 2 オーダー以上大きくなっていた。また、歪みの初期値も約 0.6[%]異なっており、試験体番号 438.78C と同様の傾向を示していた。図 2.3-2(h) は、破壊時の応力レベルでの歪み速度-補正時間図である。同図より、歪み速度の最小値は、約 4×10^{-7} [sec]であることがわかる。

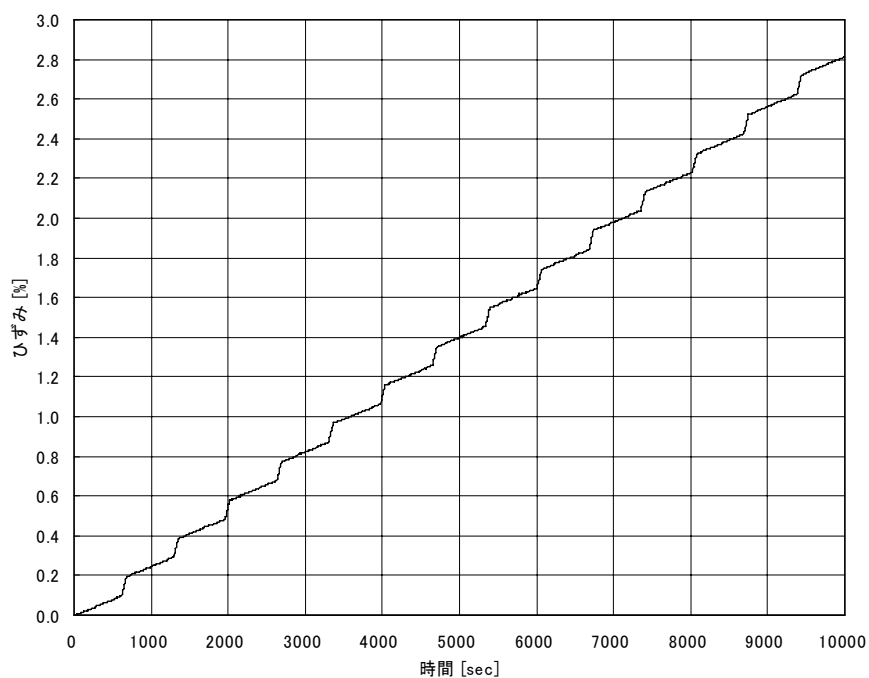


図 2.3-2(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.78D 20°C

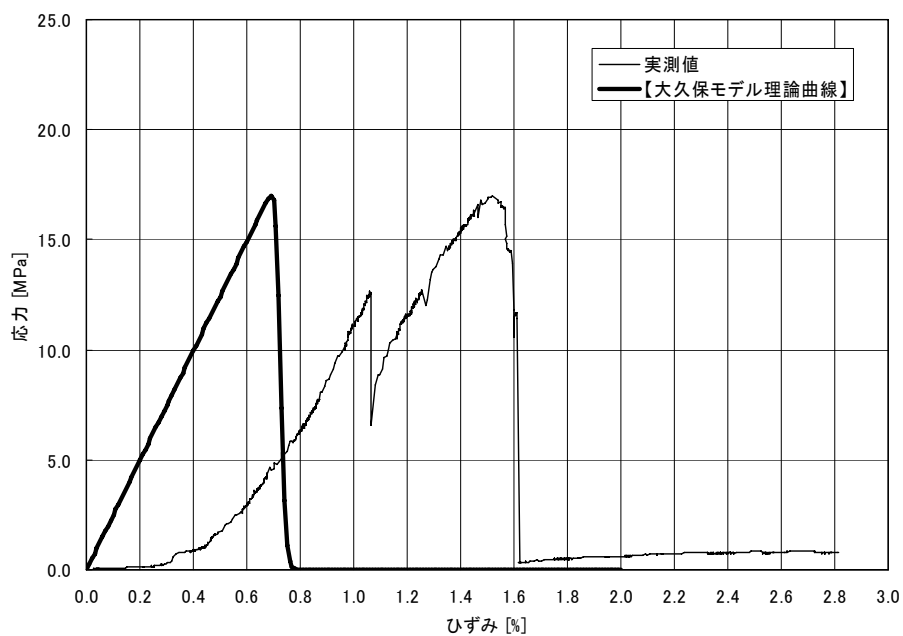


図 2.3-2(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.78D 20°C

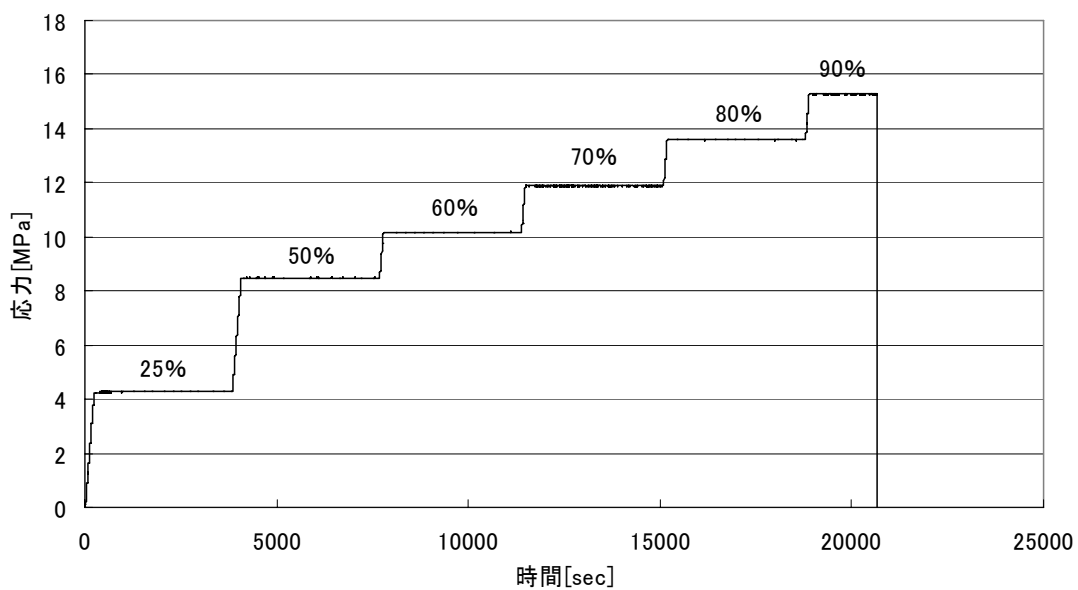


図 2.3-2(c) クリープ試験結果 応力-時間 438.78A 20°C

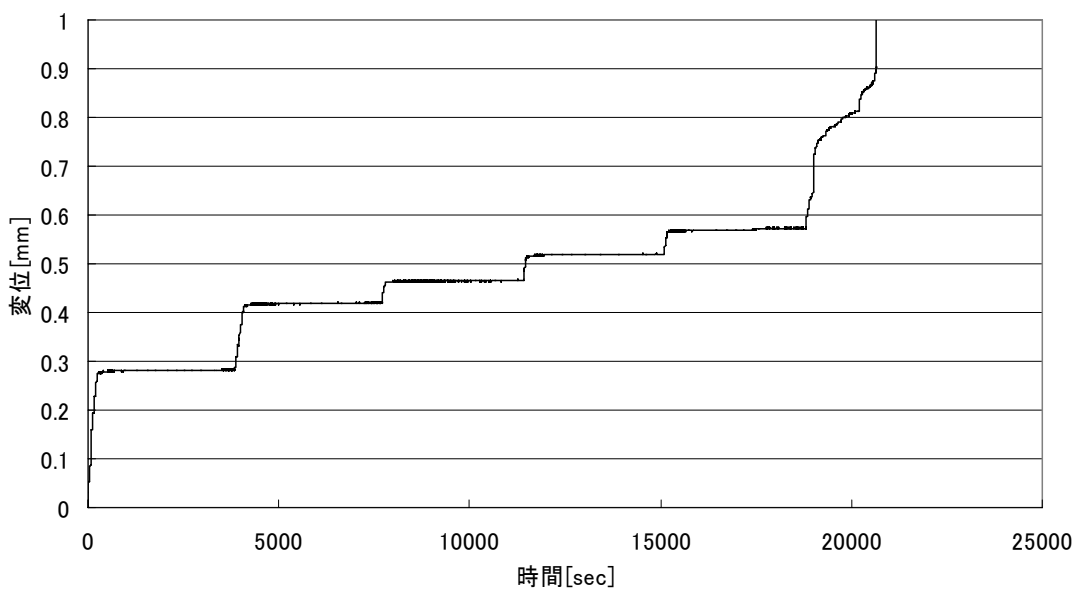


図 2.3-2(d) クリープ試験結果 変位-時間 438.78A 20°C

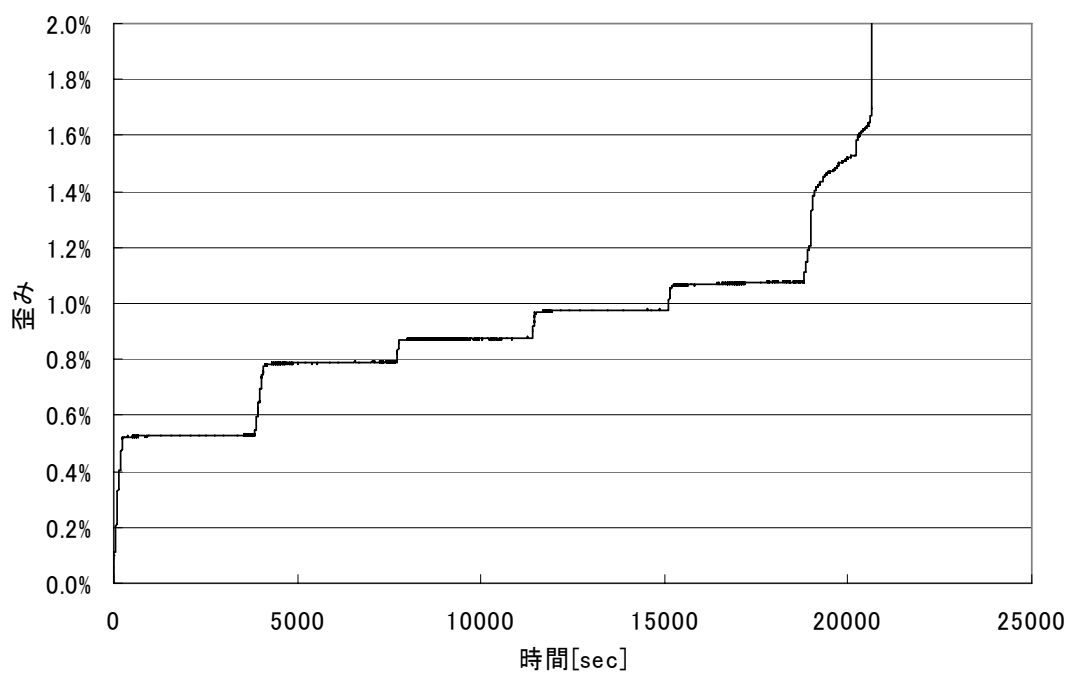


図 2.3-2(e) クリープ試験結果 歪み図-時間 438.78A 20°C

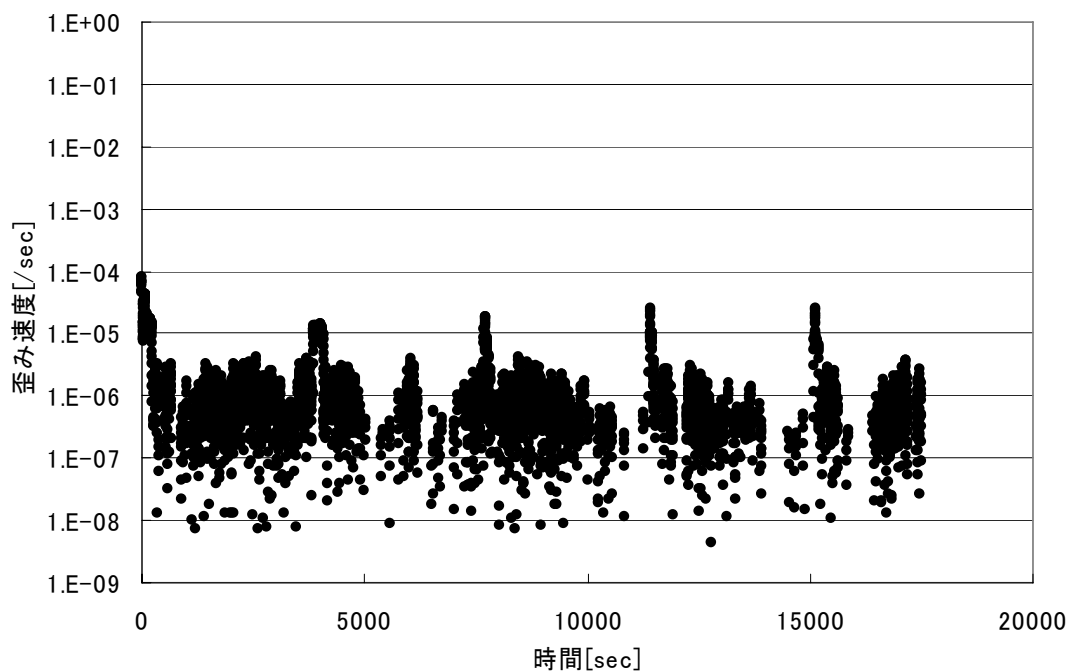


図 2.3-2(f) クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.78A 20°C

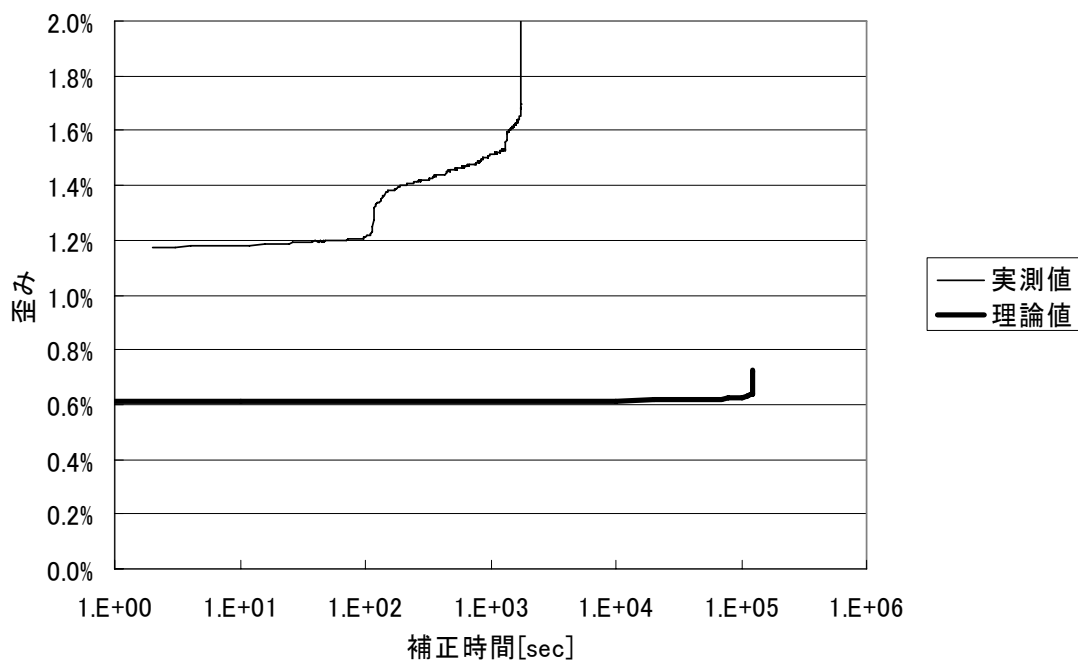


図 2.3-2(g) クリープ試験結果 歪み-補正時間 438.78A 20°C

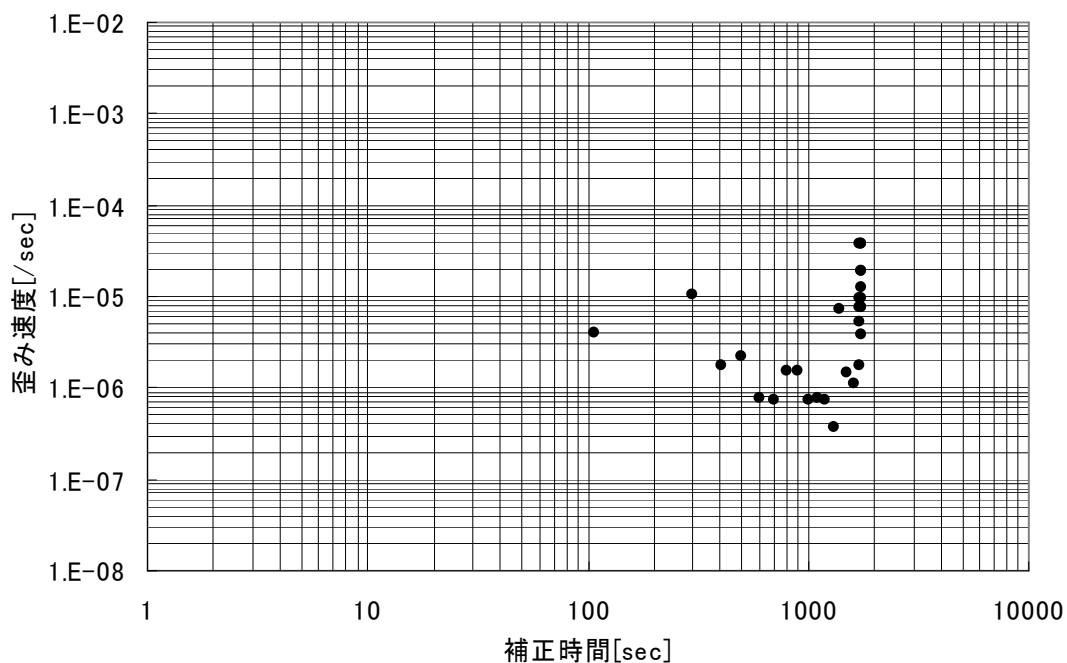


図 2.3-2(h) クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 438.78A 20°C

図 2.3-3(a)と図 2.3-3(b)は、試験体番号 438.70B (試験条件：80℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-3(a)は歪み-時間図であり、歪み時間の設定が設定どおりであることが確認できる。図 2.3-3(b)は応力-歪み図であり、特異な点がない結果となった。一軸圧縮強度は 25.06[MPa]で一軸圧縮強度後は応力が急激に低下して 0[MPa]となっていた。

図 2.3-3(c)～図 2.3-3(h)は、試験体番号 438.70D (試験条件：80℃) のクリープ試験結果である。試験体番号 438.70D は 438.70B の一軸圧縮試験結果をもとに各応力レベルの荷重値を設定している。図 2.3-3(c)は応力-時間図である。応力レベルが第 2 段階の 50[%]で破壊が起こっており、クリープ試験で使用した試験体は想定していた一軸圧縮強度よりも小さい強度しかなかった可能性が高いと考えられる。図 2.3-3(d) , 図 2.3-3(e) はそれぞれ変位-時間図, 歪み-時間図であり、第 1 段階 (応力レベル=25[%]) で変位や歪みが徐々に低下している箇所があった。実際にこのような現象が起こっているとは考えにくく、試験機器の測定誤差であると考えられる。図 2.3-3(f) は、歪み速度-時間図であり、各応力レベルでの歪み速度がわかる。図 2.3-3(g) は破壊時の応力レベルでの歪み-補正時間図である。実測の寿命は 2576[sec]であったが、理論値は 4 オーダー以上大きくなっていた。これは、想定していた一軸圧縮強度と実際の強度が大きく異なっていたことが原因と考えられる。図 2.3-3(h) は、破壊時の応力レベルでの歪み速度-補正時間図である。歪み速度の最小値は約 2×10^{-7} [/sec]であることが確認できる。

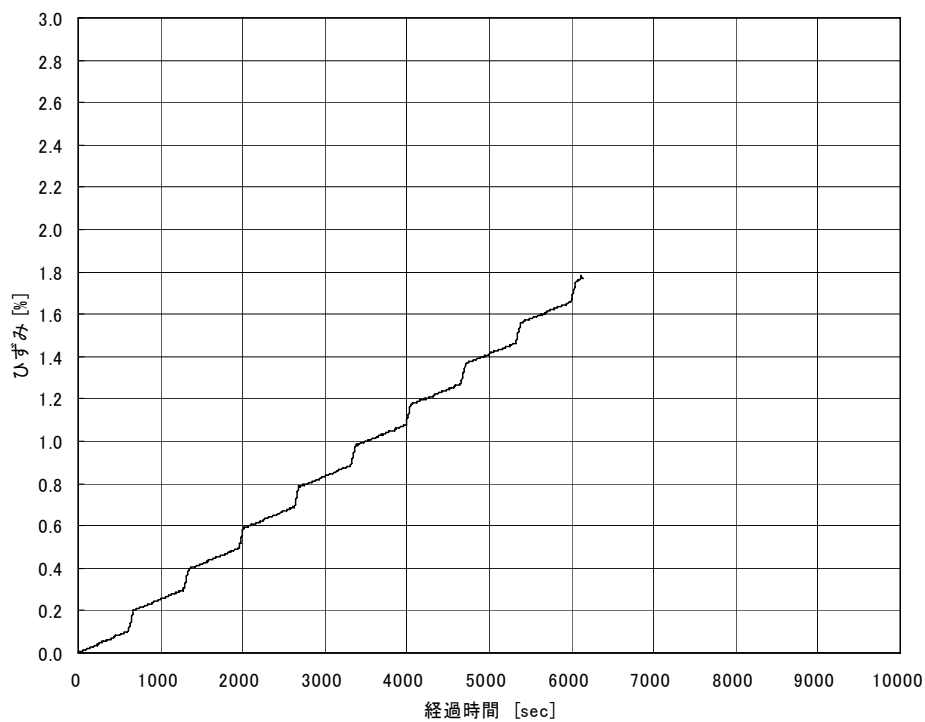


図 2. 3-3(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438. 70B 80°C

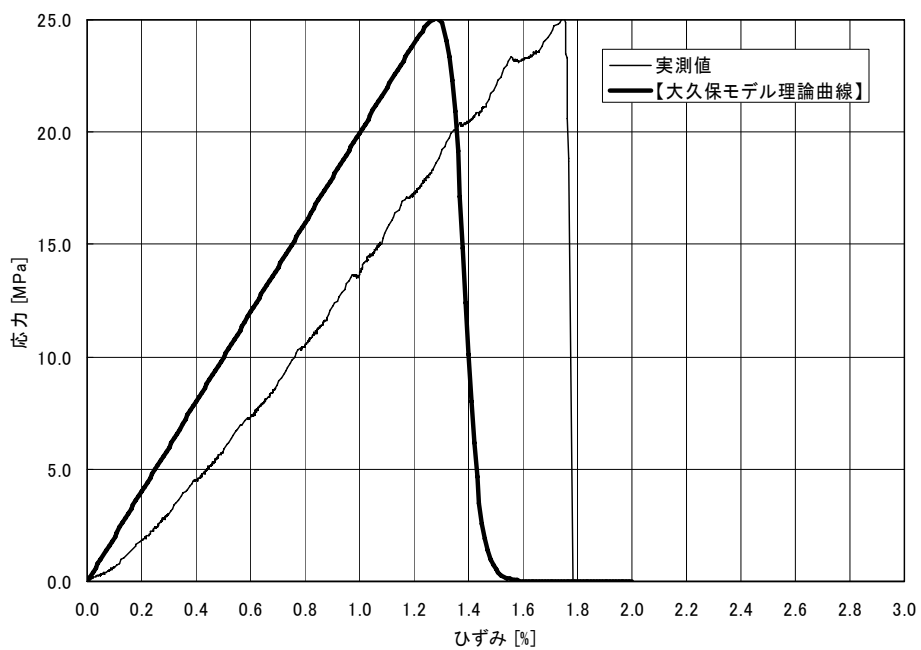


図 2. 3-3(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438. 70B 80°C

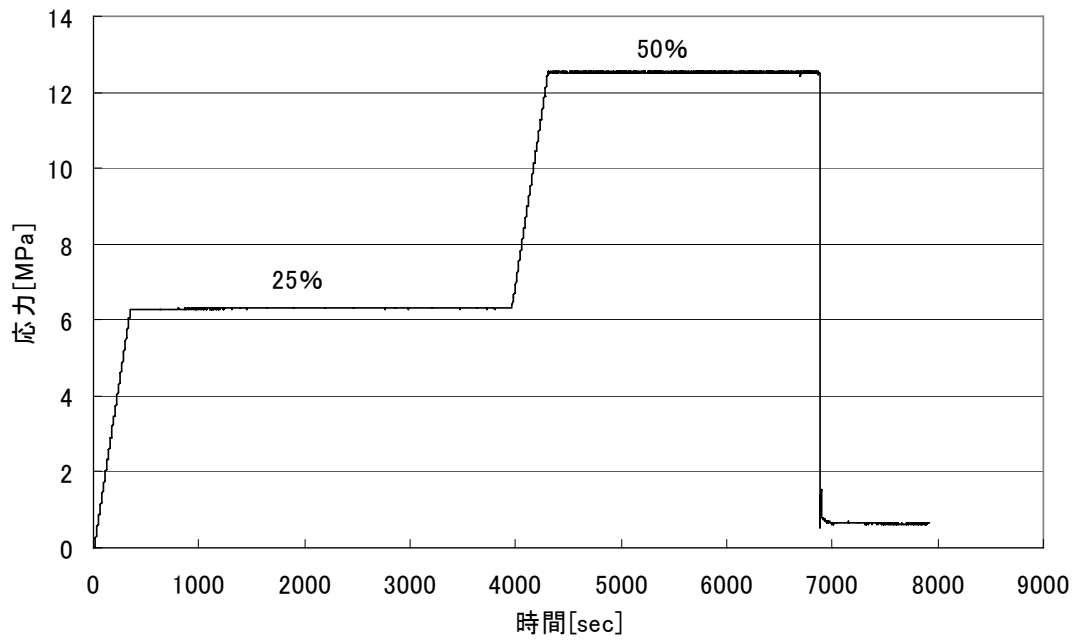


図 2.3-3(c) クリープ試験結果 応力-時間 438.70D 80°C

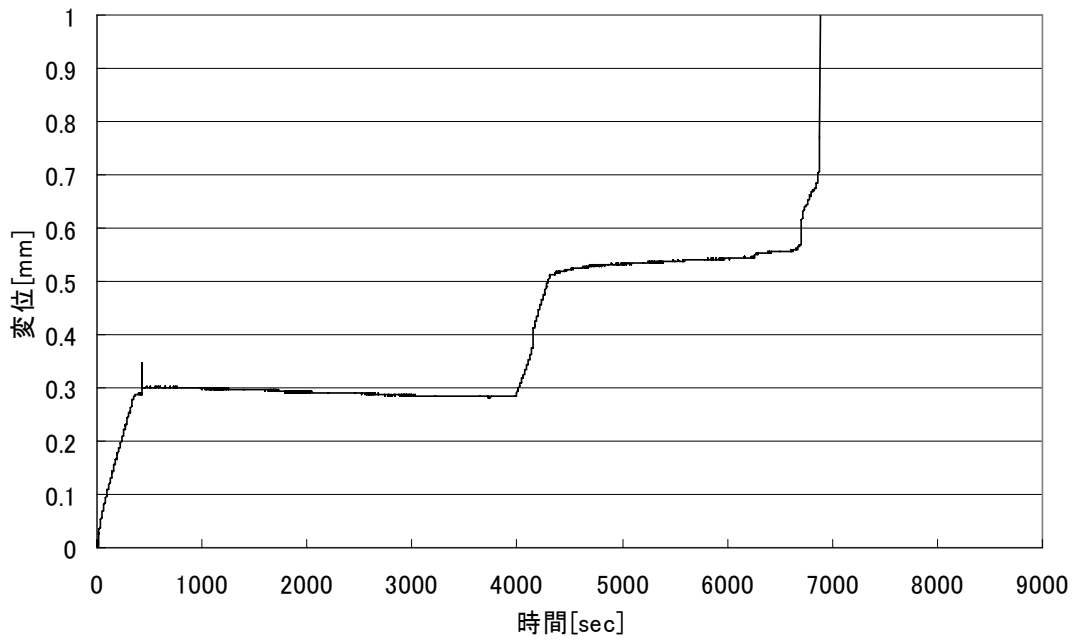


図 2.3-3(d) クリープ試験結果 変位-時間 438.70D 80°C

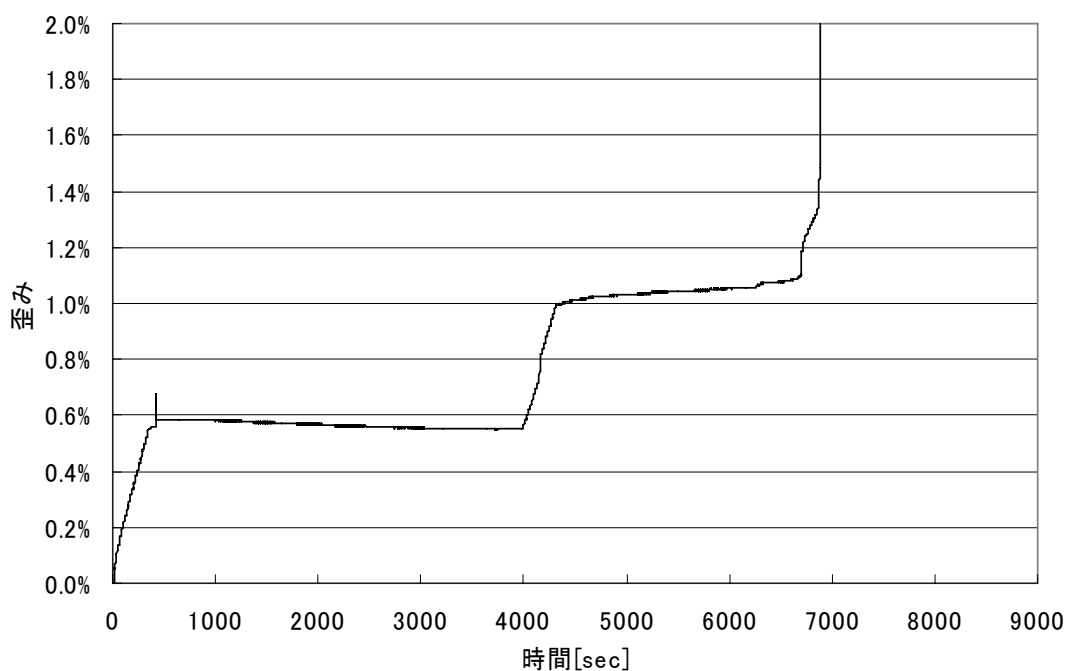


図 2.3-3(e) クリープ試験結果 歪み-時間 438.70D 80°C

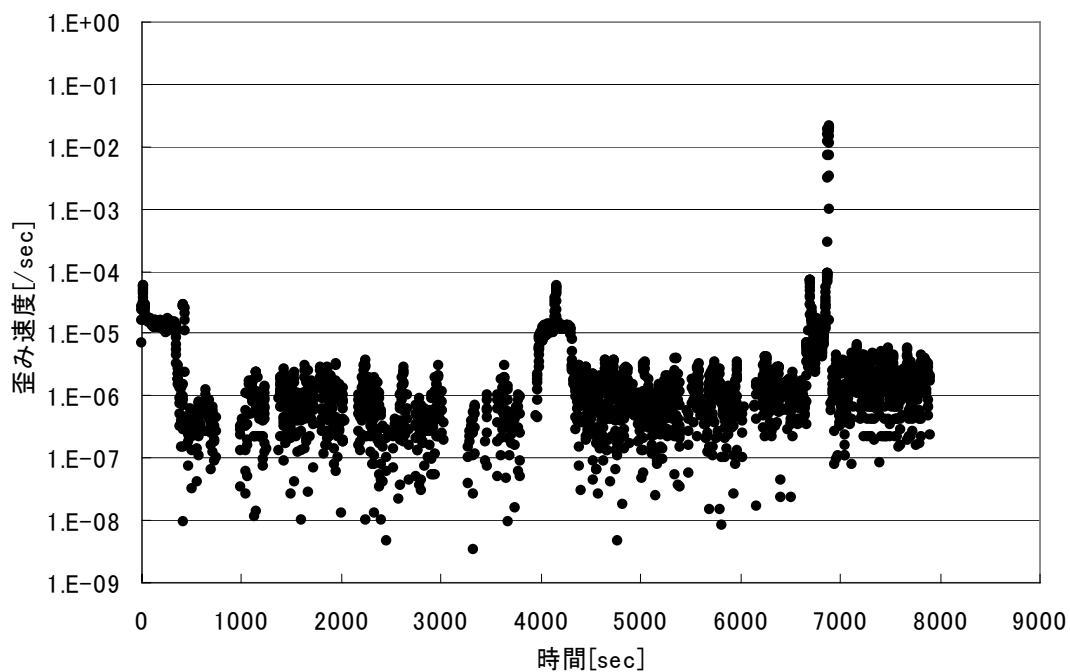


図 2.3-3(f) クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.70D 80°C

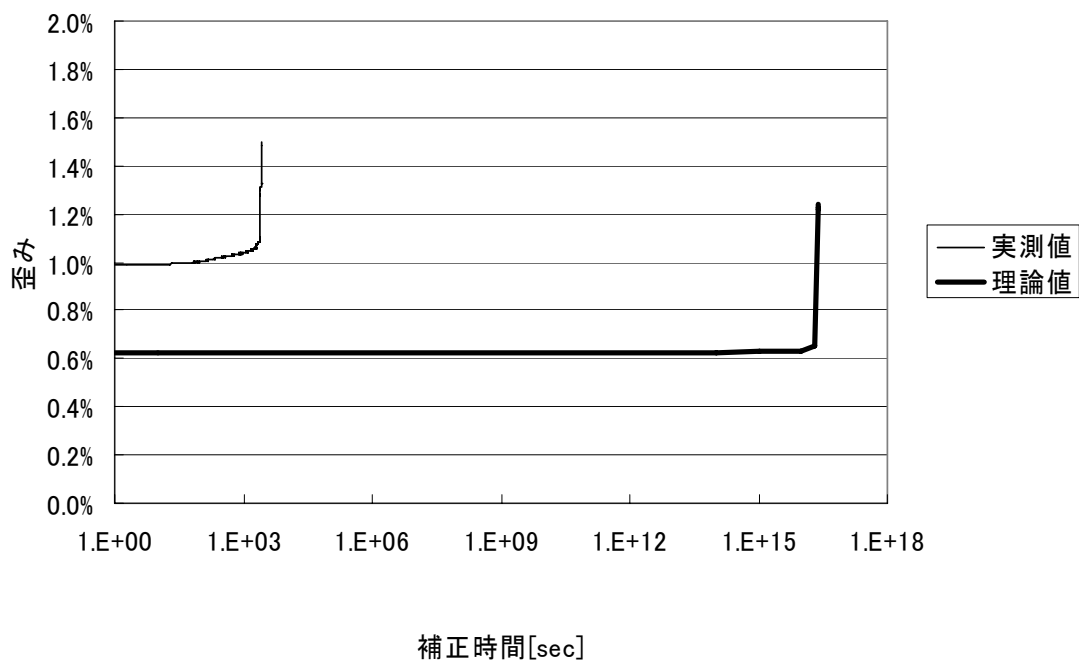


図 2.3-3(g) クリープ試験結果 歪み-補正時間 438.70D 80°C

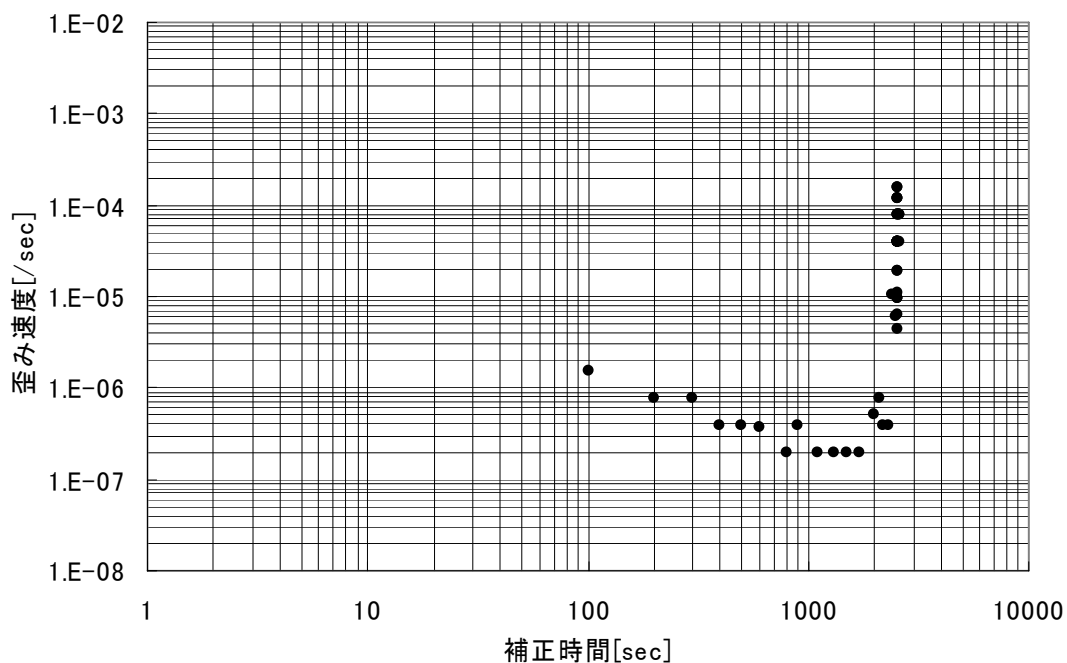


図 2.3-3(h) クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 438.70D 80°C

図 2.3-4(a)と図 2.3-4(b)は、試験体番号 438.70A (試験条件：80℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-4(a)は、歪み-時間図であり、歪み速度を変化させた一軸圧縮試験が行われていることが確認できる。図 2.3-4(b)は応力-歪み図であり、特異な点はなかった。一軸圧縮強度は 24.28[MPa]で同一深度の試験体番号 438.70B の一軸圧縮強度 (25.06[MPa]) とほぼ等しくなった。一軸圧縮強度後は応力が急激に低下して 0[MPa]となっていた。

図 2.3-4(c)～図 2.3-4(h)は試験体番号 438.70C (試験条件：80℃) のクリープ試験結果である。図 2.3-4(c)は応力-時間図であり、応力レベル 90[%]で破壊していることが確認できる。図 2.3-4(d) , 図 2.3-4(e) はそれぞれ変位-時間図, 歪み-時間図である。また、図 2.3-4(f) は、歪み速度-時間図である。図 2.3-4(g) は、破壊時の応力レベルでの歪み-補正時間図である。理論値と実測値の初期歪みの誤差は約 0.1[%]であり、試験体番号 438.78D, 438.78B, 438.70D の結果と比較すると誤差が小さくなっていた。しかし、理論値が実測値よりも小さい傾向は同様であり、前段階までのクリープ歪みの蓄積がこの誤差の原因と考えられる。一方、実測の寿命は 82[sec]で理論値の寿命は約 1 オーダー大きい値であった。図 2.3-4(h) は、破壊時の応力レベルでの歪み速度-補正時間図である。実測の寿命が 82[sec]であることから歪み速度の値は測定誤差が大きくなる傾向にある。同図より、誤差は大きいと考えられるものの、最小歪み速度は約 4×10^{-6} [/sec]であることが読み取れる。

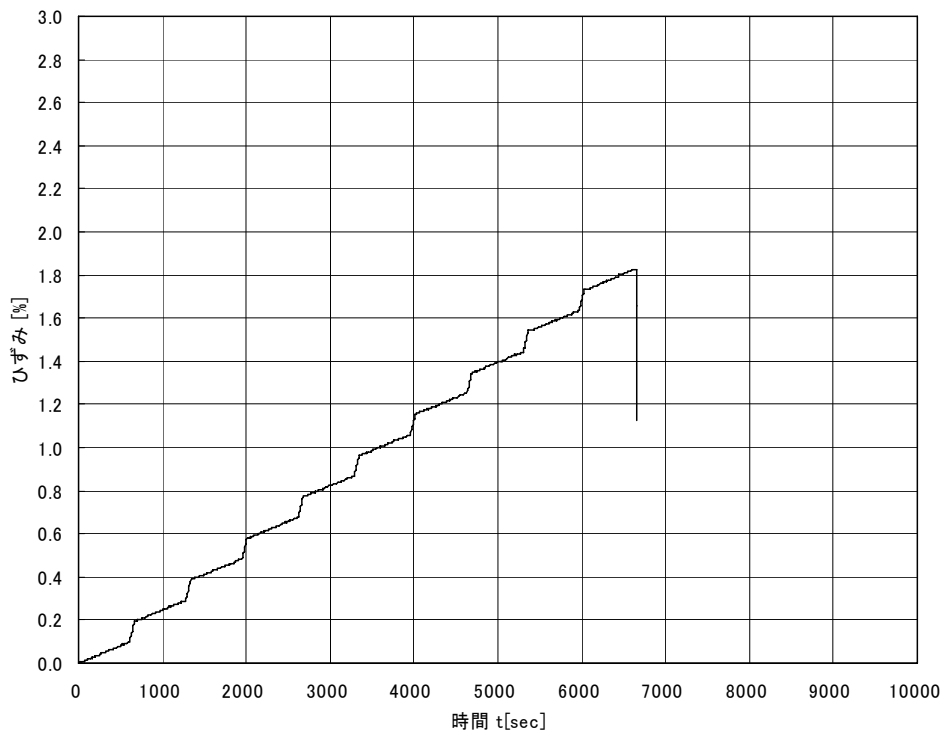


図 2.3-4(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.70A 80°C

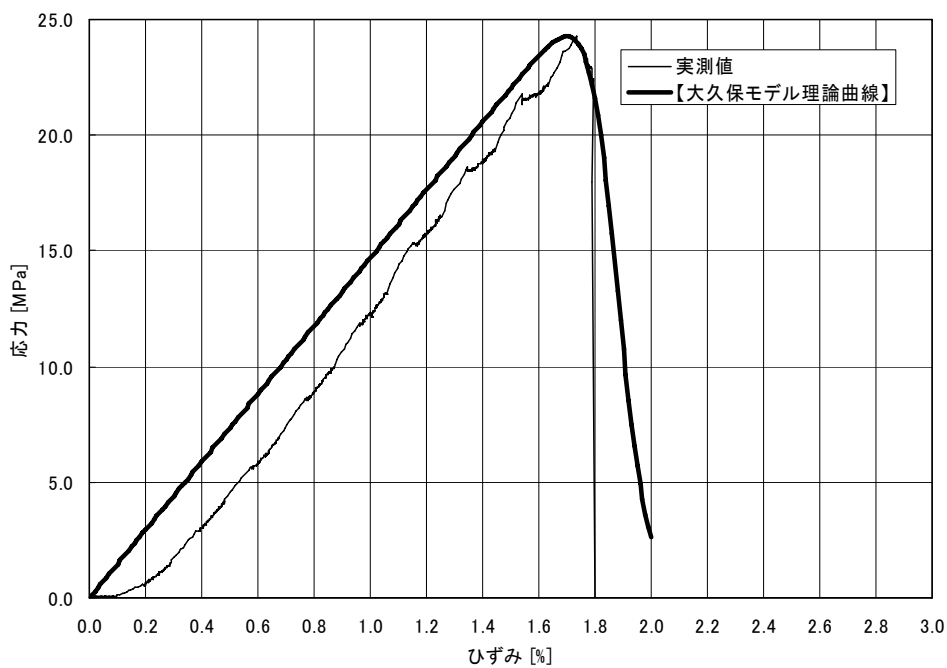


図 2.3-4(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.70A 80°C

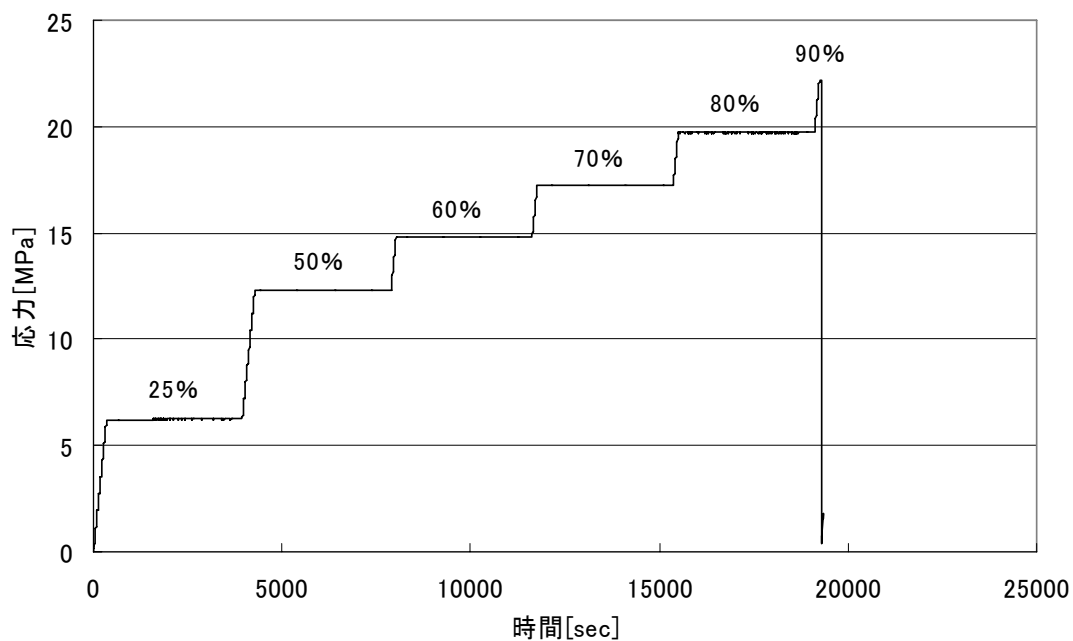


図 2.3-4(c) クリープ試験結果 応力-時間 438.70C 80°C

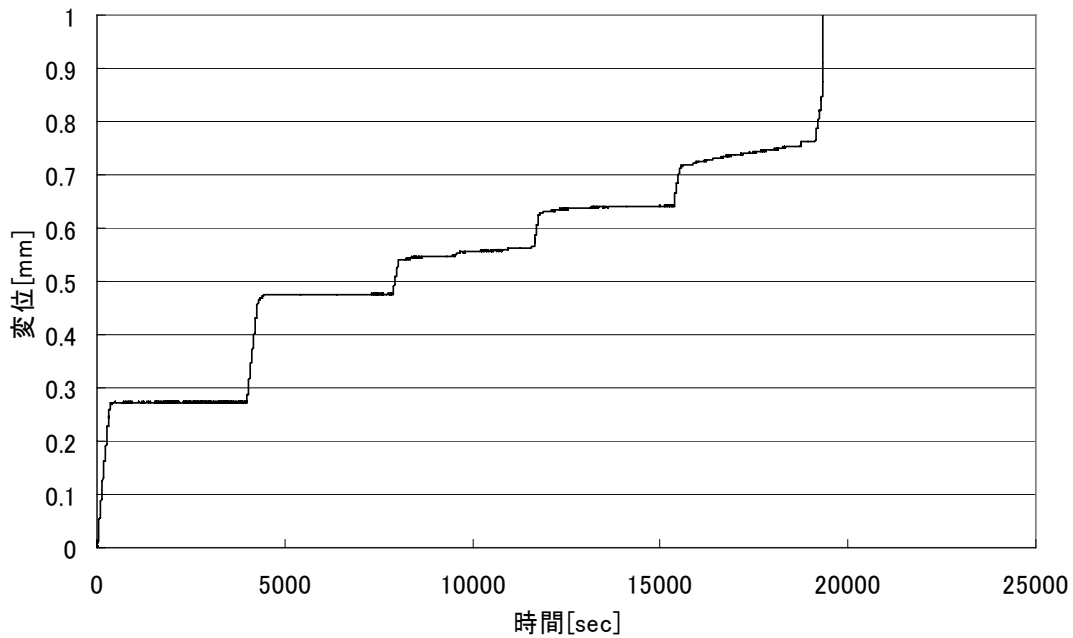


図 2.3-4(d) クリープ試験結果 変位-時間 438.70C 80°C

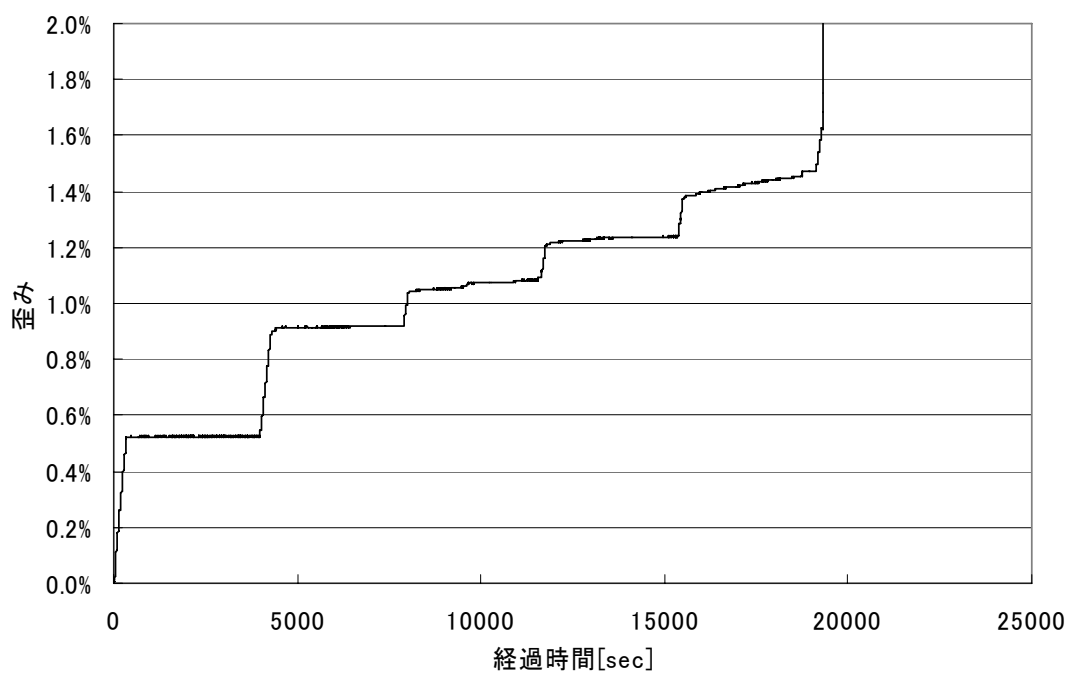


図 2.3-4(e) クリープ試験結果 歪み-時間 438.70C 80°C

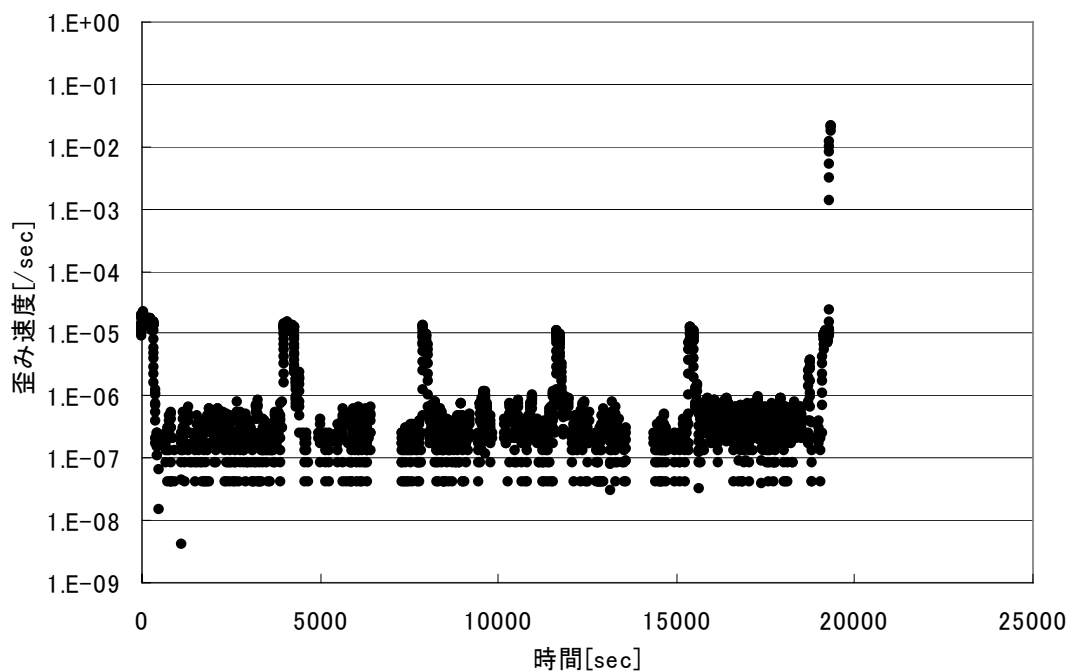


図 2.3-4(f) クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.70C 80°C

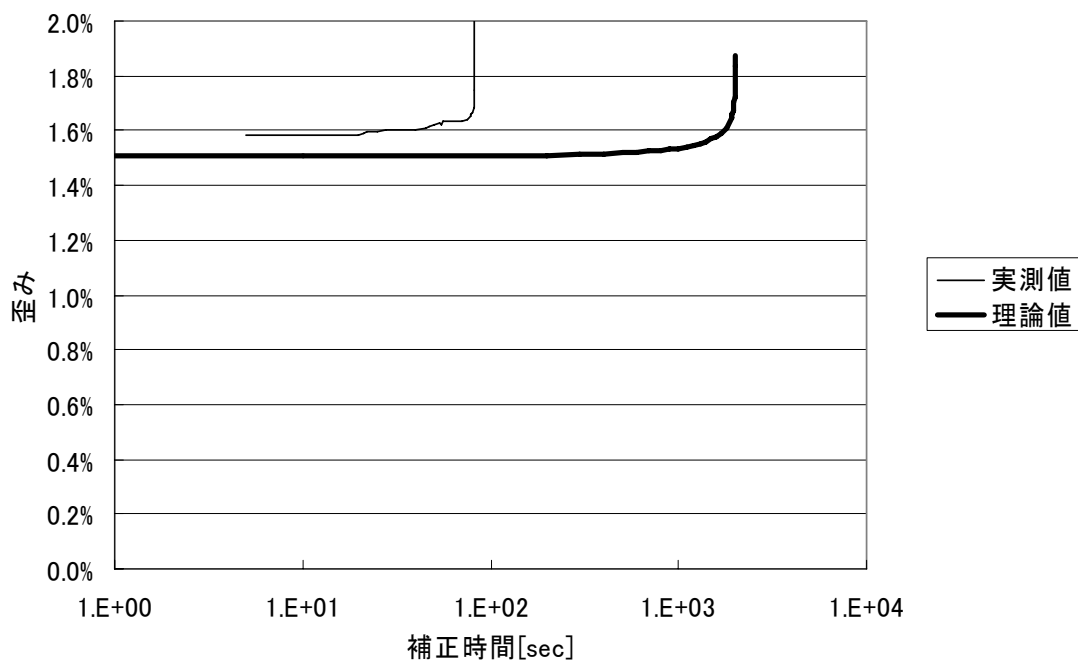


図 2.3-4(g) クリープ試験結果 歪み-補正時間 438.70C 80°C

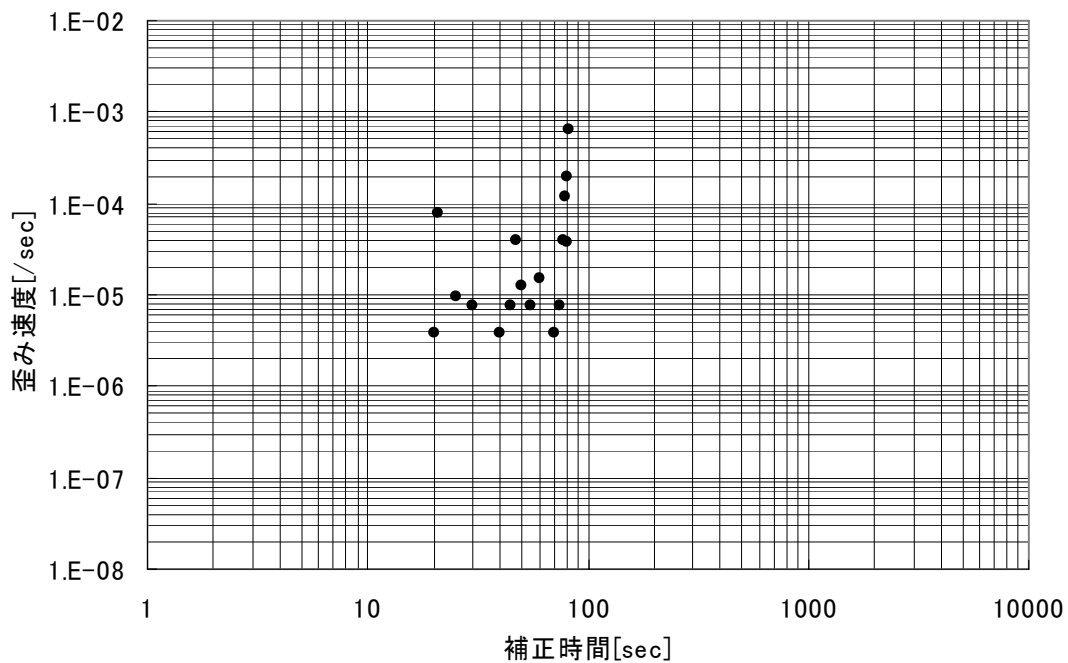


図 2.3-4(h) クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 438.70C 80°C

図 2.3-5(a)と図 2.3-5(b)は、試験体番号 438.62C (試験条件：20℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-5(a)は、歪み-時間図であり、歪み速度を変化させた試験が行われていることが確認できる。図 2.3-5(b)は応力-歪み図であり、一軸圧縮強度は 18.68[MPa]であった。

図 2.3-5(c)～図 2.3-5(h)は試験体番号 438.62A (試験条件：20℃) のクリープ試験結果である。図 2.3-5(c)は応力-時間図であり、応力レベル 80[%]で破壊していることがわかる。図 2.3-5(d) , 図 2.3-5(e) はそれぞれ変位-時間図, 歪み-時間図である。また、図 2.3-5(f) は、歪み速度-時間図である。図 2.3-5(g) は、破壊時の応力レベルでの歪み-補正時間図である。理論値と実測値の初期歪みの誤差は、約 0.2[%]であった。また、実測の寿命は 1432[sec]であり、理論値は約 2 オーダー大きくなった。

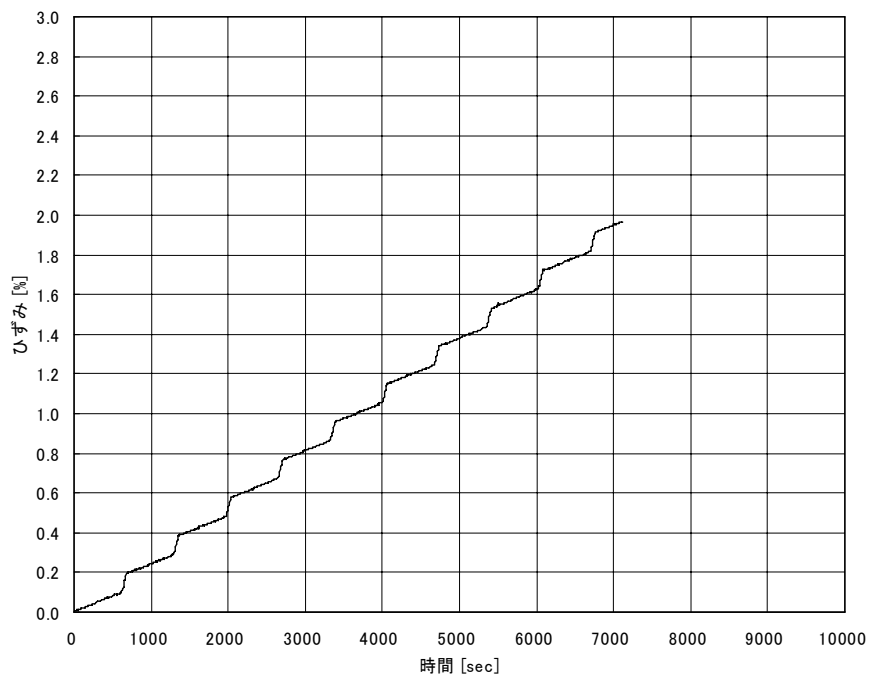


図 2.3-5(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.62C 20°C

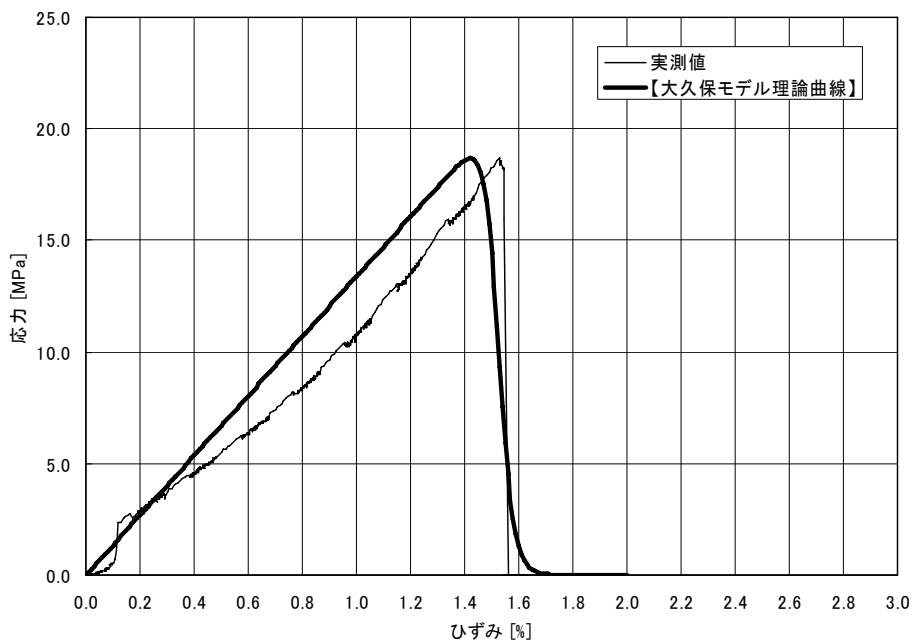


図 2.3-5(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.62C 20°C

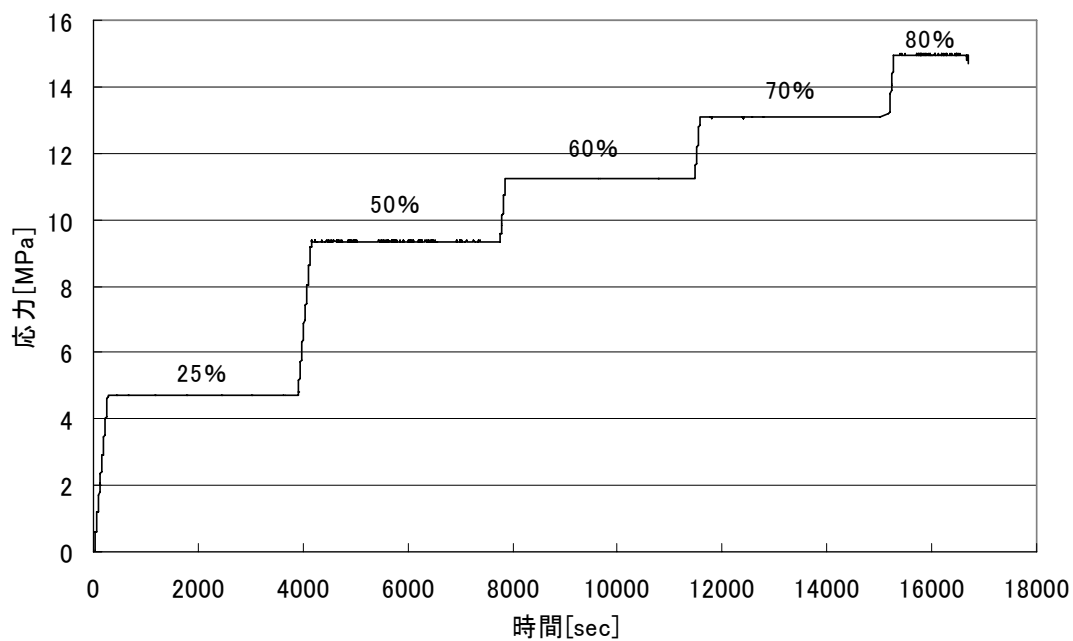


図 2.3-5(c) クリープ試験結果 応力-時間 438.62A 20°C

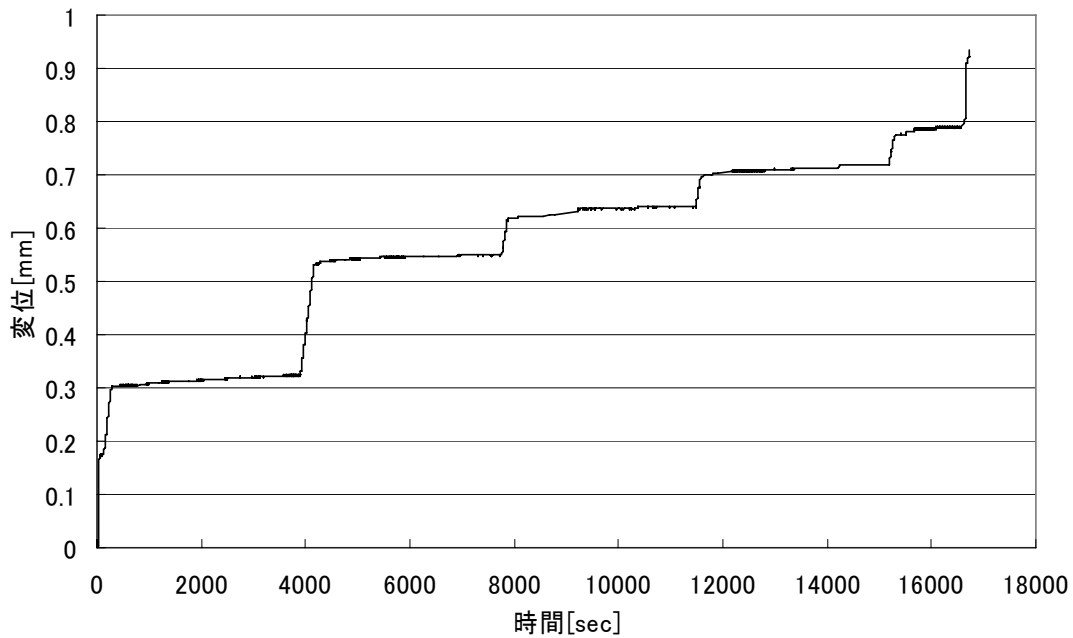


図 2.3-5(d) クリープ試験結果 変位-時間 438.62A 20°C

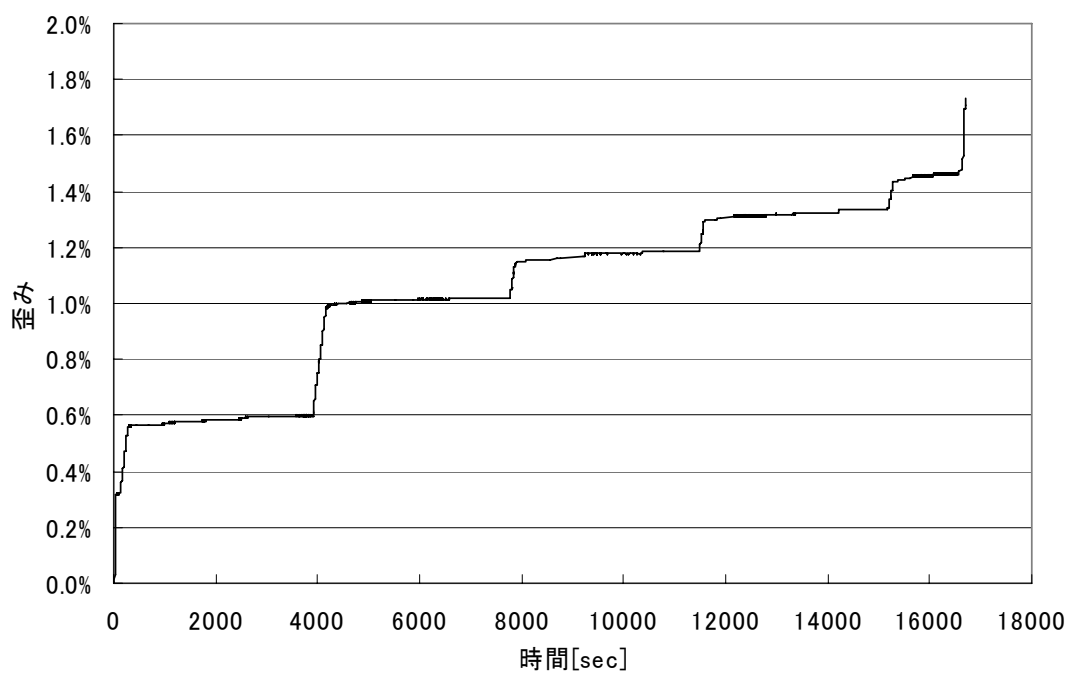


図 2.3-5(e) クリープ試験結果 歪み-時間 438.62A 20°C

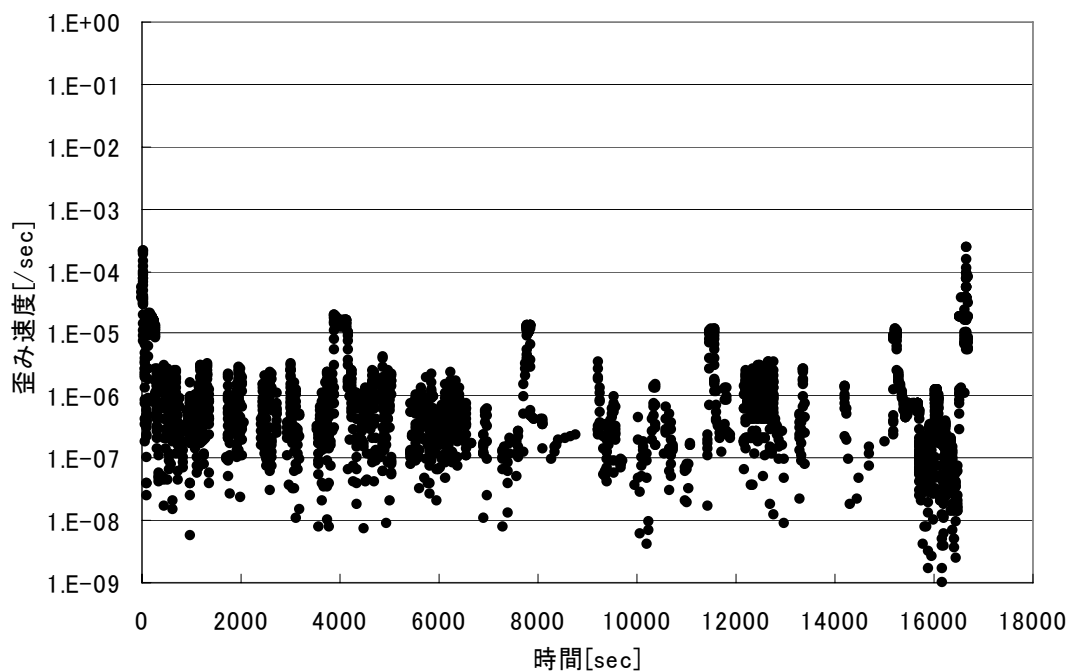


図 2.3-5(f) クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.62A 20°C

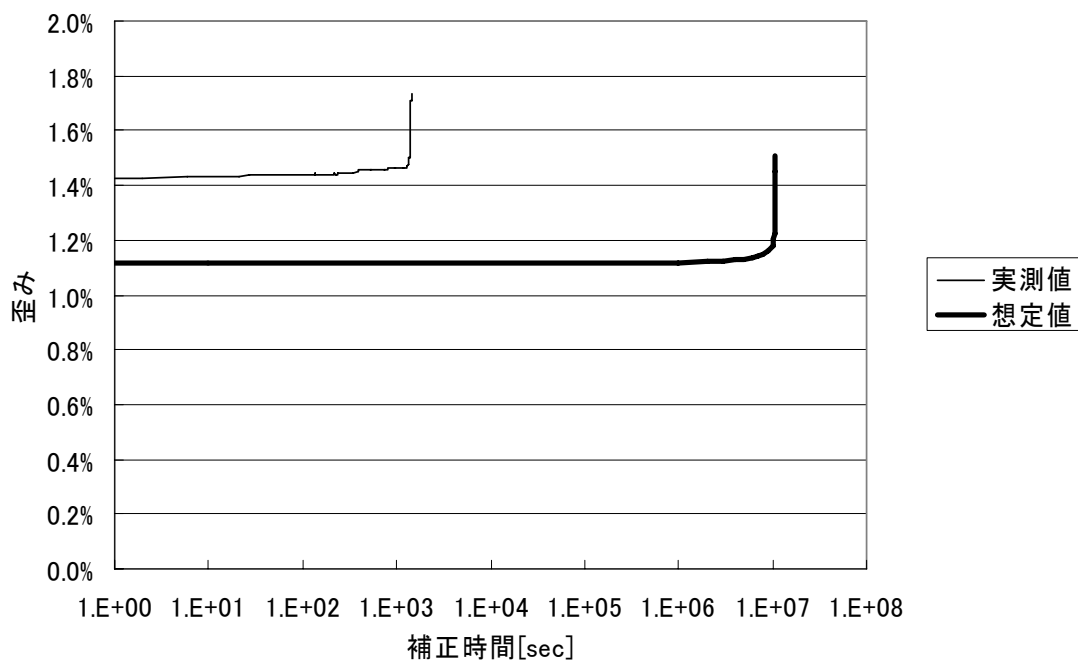


図 2.3-5(g) クリープ試験結果 歪み-補正時間 438.62A 20°C

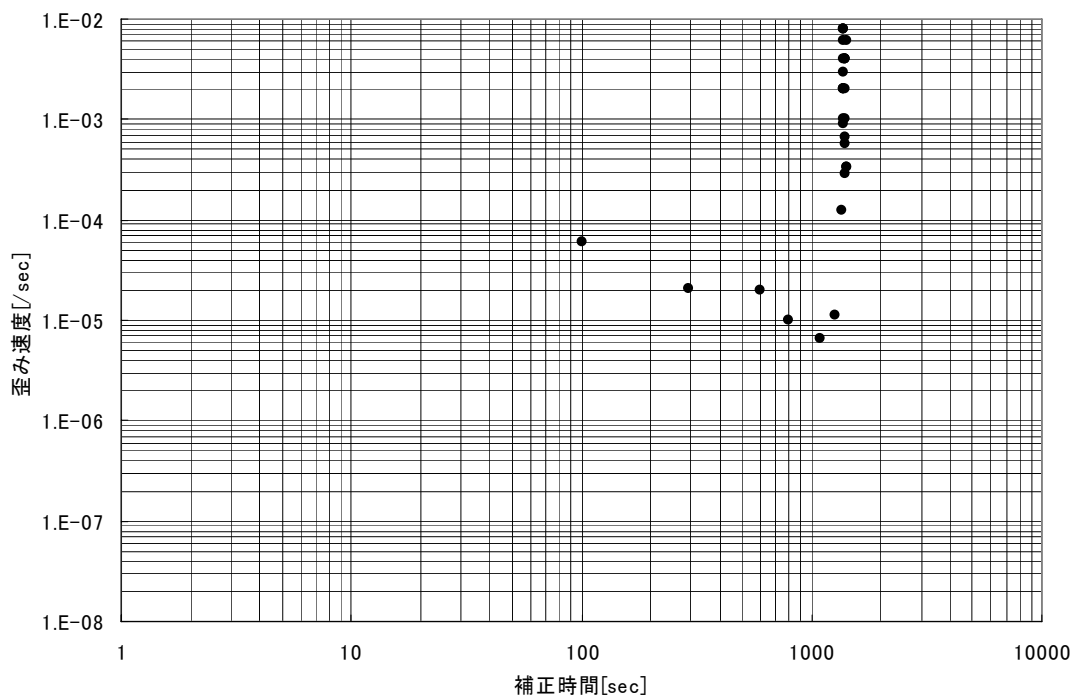


図 2.3-5(h) クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 438.62A 20°C

図 2.3-6(a)と図 2.3-6(b)は、試験体番号 438.62D (試験条件：80℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-5(a)は、歪み-時間図であり、歪み速度を変化させた一軸圧縮試験が行われていることが確認できる。図 2.3-6(b)は応力-歪み図であり、一軸圧縮強度は 13.73[MPa]であった。歪みが 1.5~2.1[%]の領域では一軸圧縮強度後の挙動がわかり α' を 51 度とした。 θ は 41 度であり $\alpha=60$ 度付近となった。このとき $m/n=0.75$ として m を算出した (2.1.1 一軸圧縮試験時の大久保モデルの理論曲線導出方法参照)。この試験以外の一軸圧縮試験では、一軸圧縮強度後の挙動は把握できなかったことから、この試験は貴重なデータといえる。

図 2.3-6(c)~図 2.3-6(h)は試験体番号 438.62B (試験条件：80℃) のクリープ試験結果である。図 2.3-6(c)は応力-時間図であり、応力レベル 120[%]で破壊していることがわかる。本試験では試験体番号 438.62C の一軸圧縮試験結果をもとに荷重を設定しているが、クリープ試験に使用した試験体の一軸圧縮強度が想定値よりも大幅に大きかったのではないかと考えられる。図 2.3-6(d) , 図 2.3-6(e) はそれぞれ変位-時間図, 歪み-時間図である。また、図 2.3-6(f) は、歪み速度-時間図であり、各応力レベルで歪み速度が徐々に低下していることがわかる。図 2.3-6(g) は、破壊時の応力レベルでの歪み-補正時間図である。破壊時の応力レベルが 120[%]であったことから、理論曲線は併記していない。実測の寿命は 5578[sec]であった。図 2.3-6(h) は、破壊時の応力レベルでの歪み速度-補正時間図である。歪み速度の最小値は約 5×10^{-8} [/sec]であった。

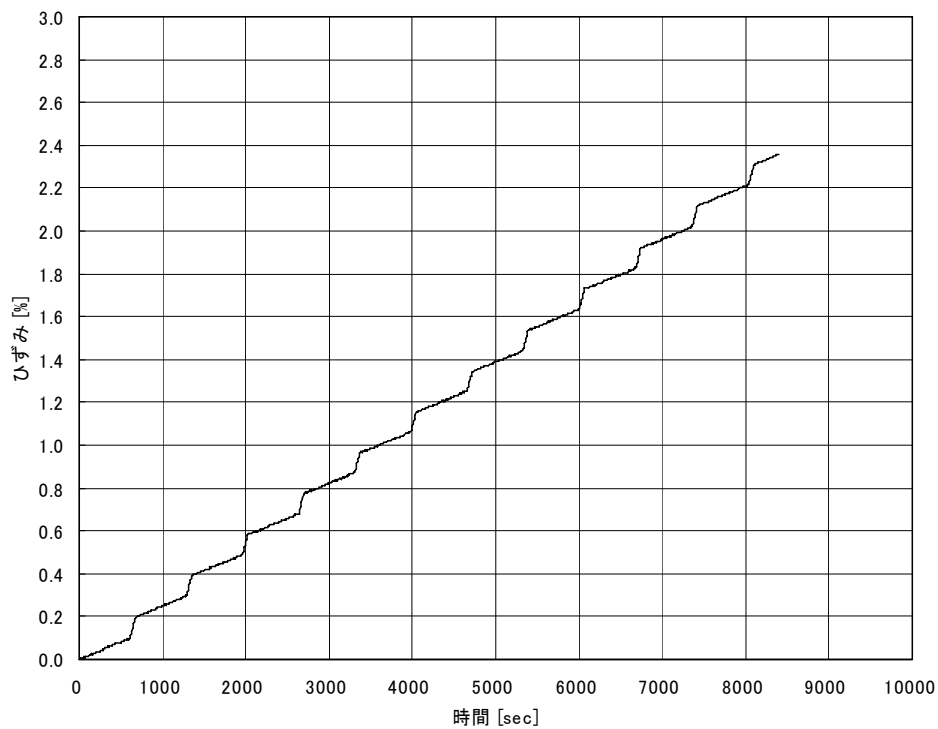


図 2.3-6(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.62D 80°C

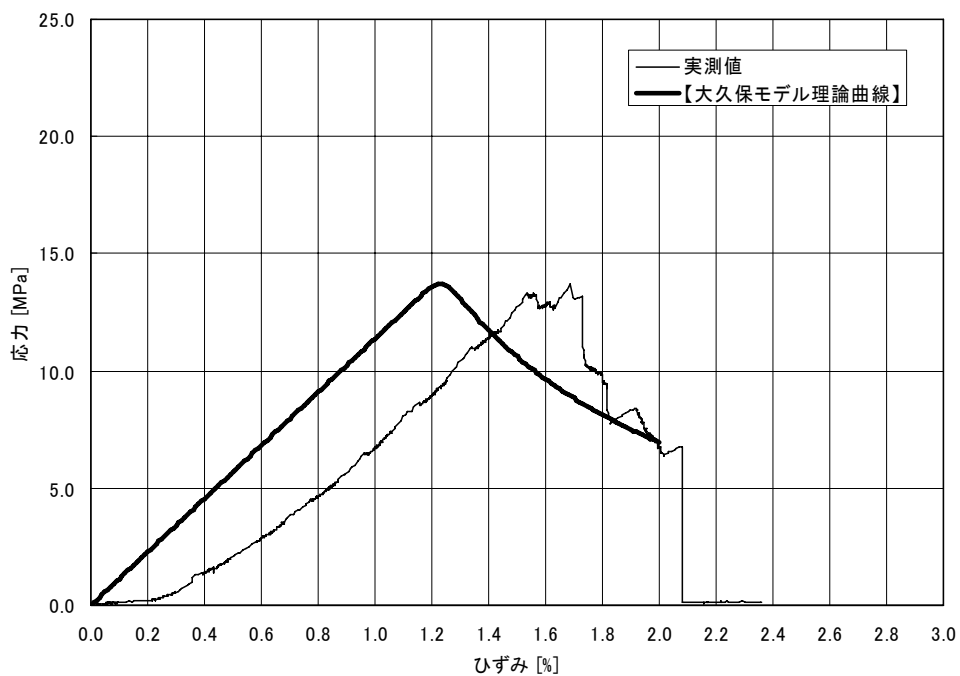


図 2.3-6(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み図 438.62D 80°C

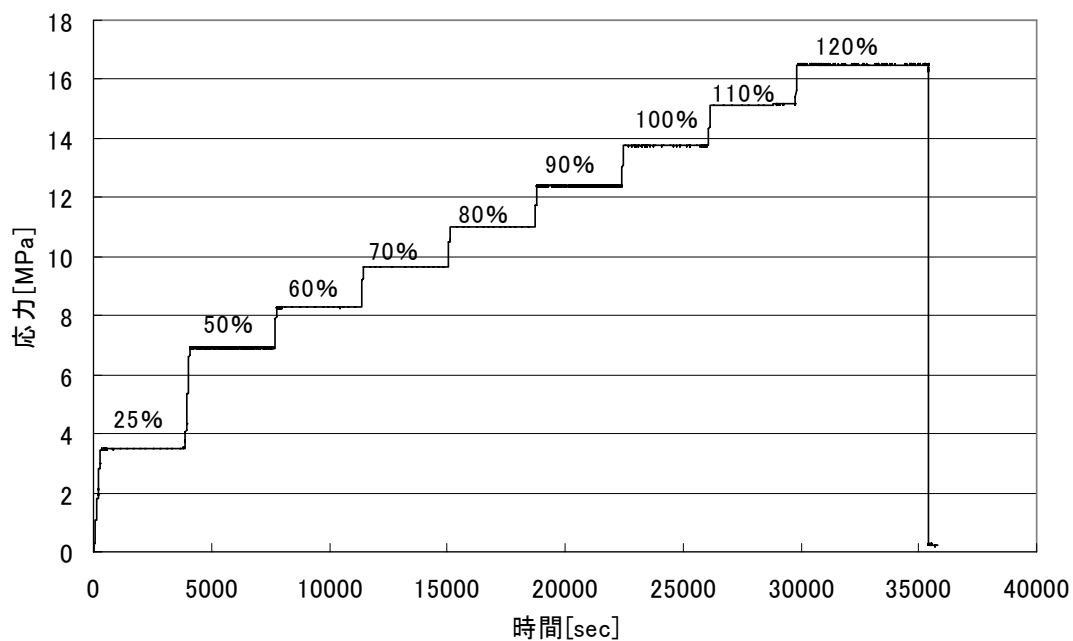


図 2.3-6(c) クリープ試験結果 応力-時間 438.62B 80°C

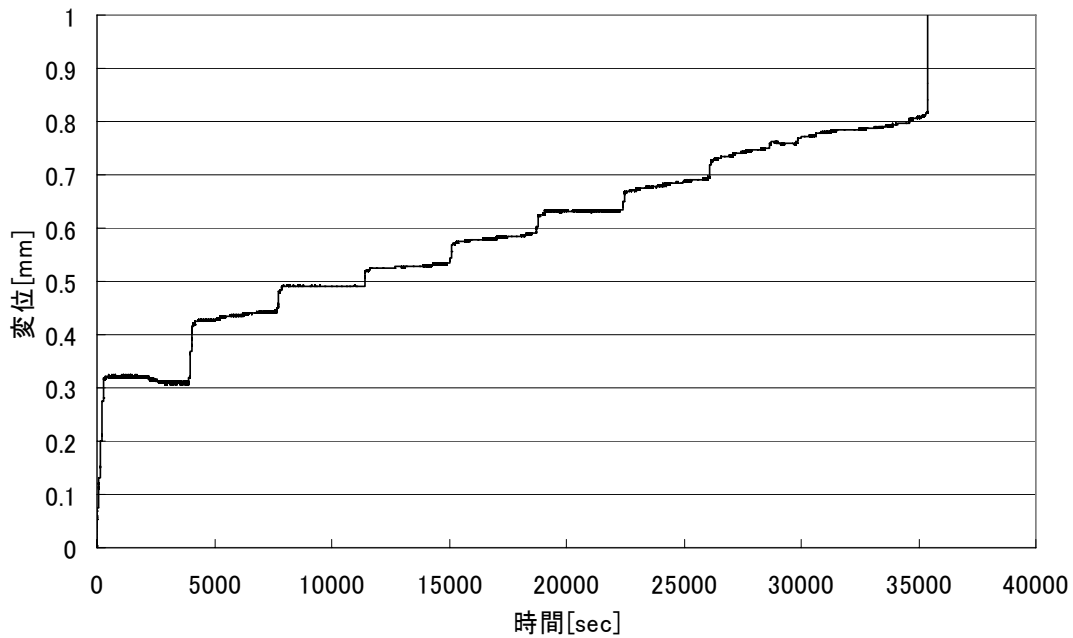


図 2.3-6(d) クリープ試験結果 変位-時間 438.62B 80°C

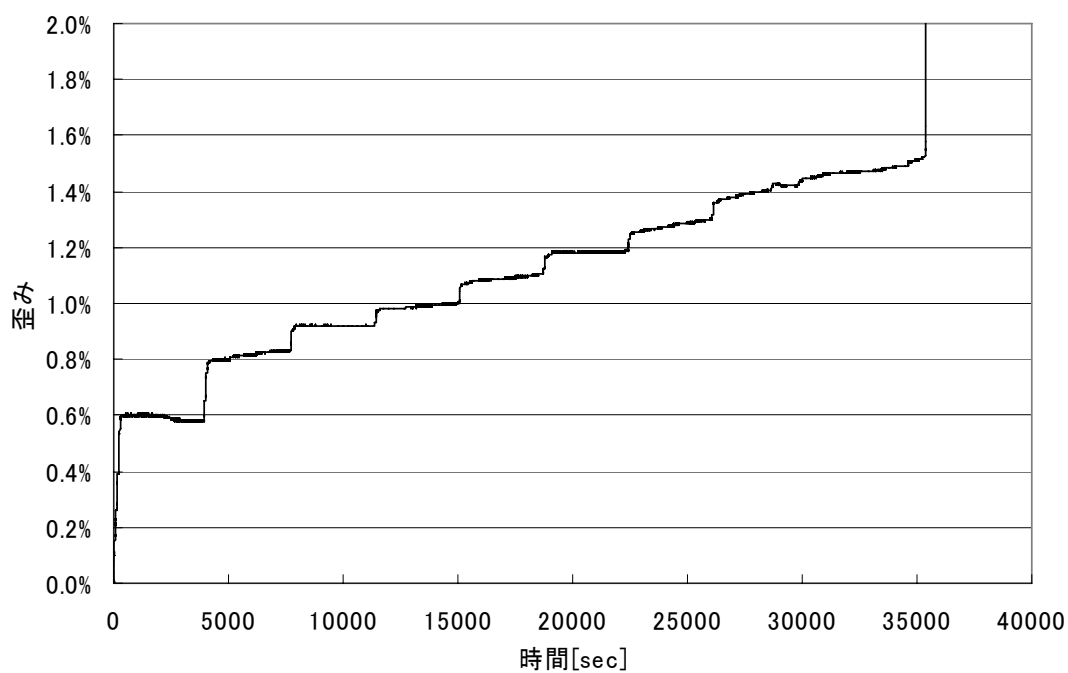


図 2.3-6(e) クリープ試験結果 歪み-時間 438.62B 80°C

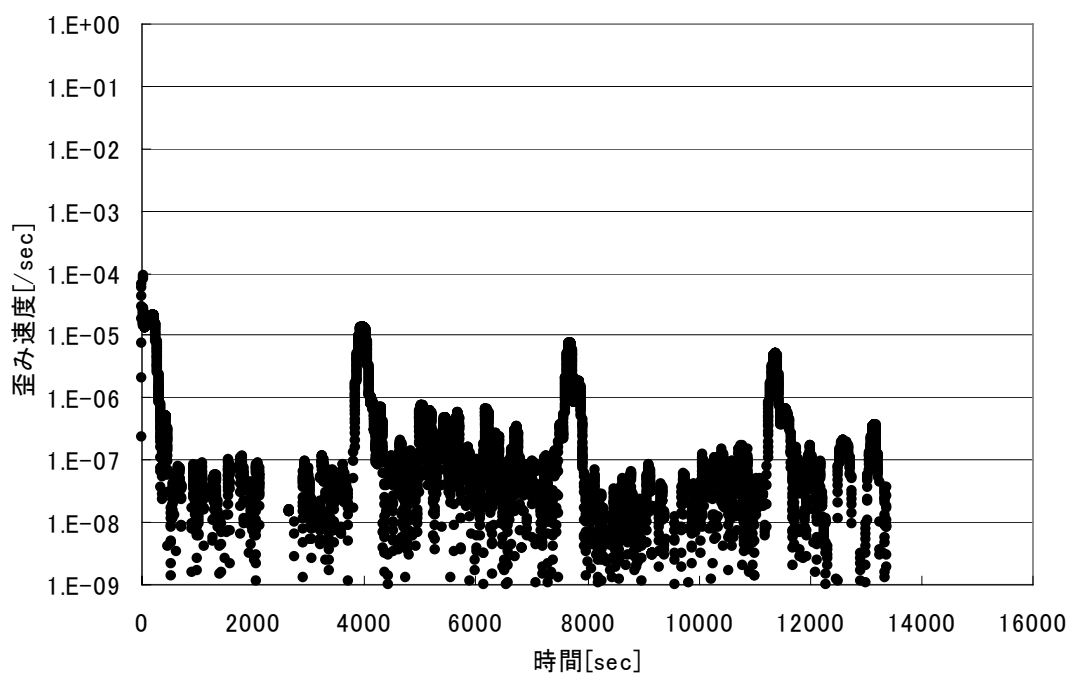


図 2.3-6(f) クリープ試験結果 歪み速度-時間 438.62B 80°C

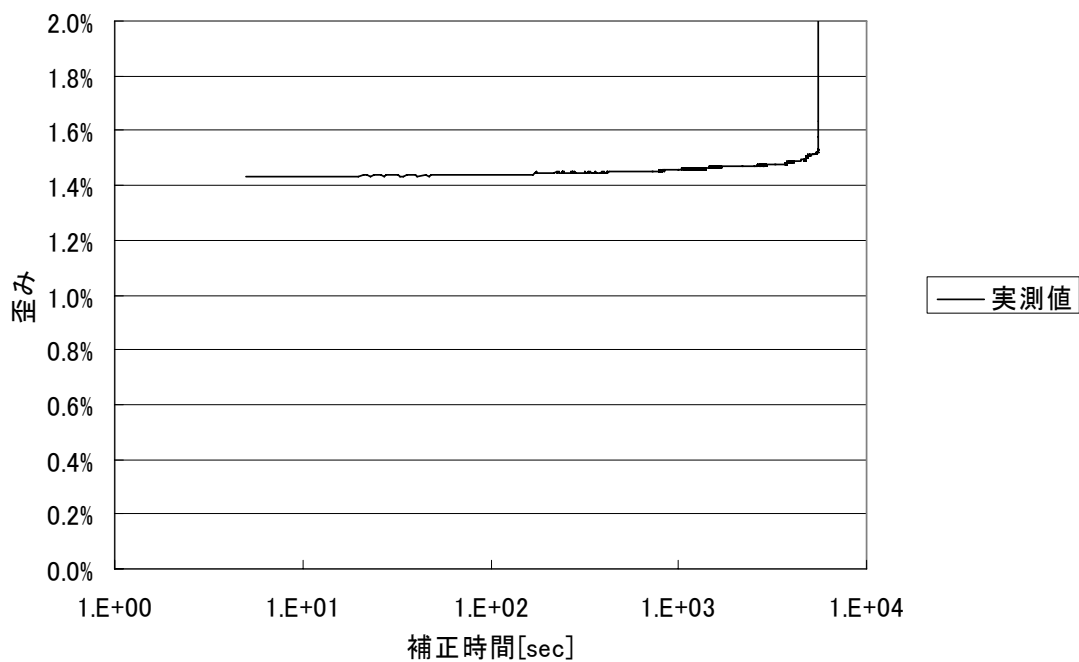


図 2.3-6(g) クリープ試験結果 歪み-補正時間 438.62B 80°C

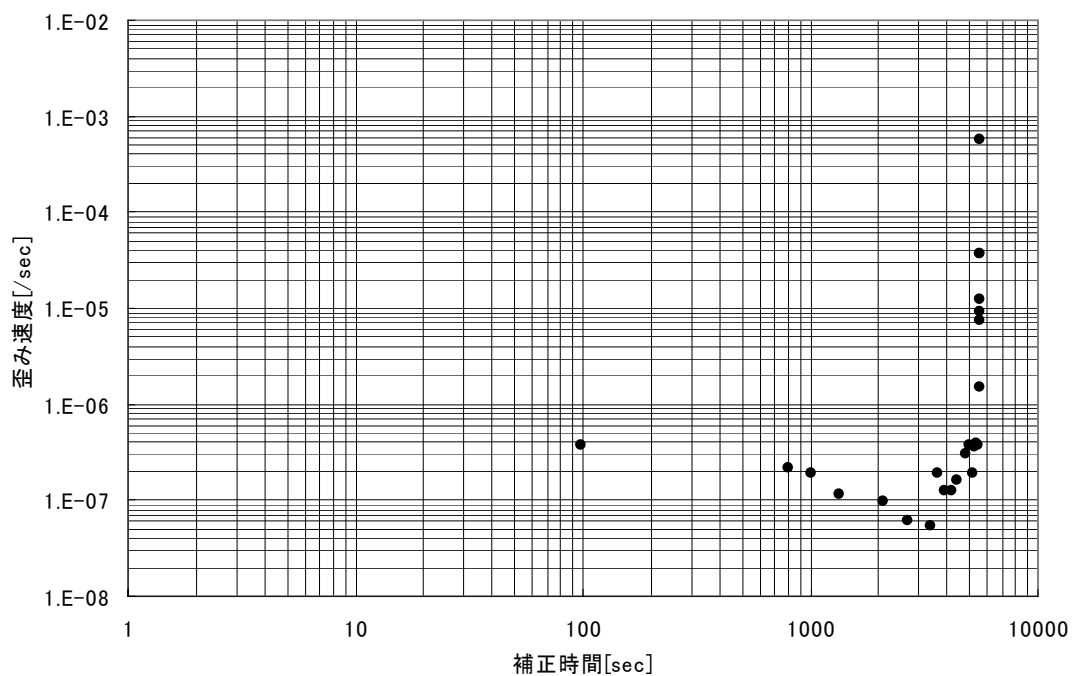


図 2.3-6(h) クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 438.62B 80°C

図 2.3-7(a)と図 2.3-7(b)は、試験体番号 334.28B (試験条件：20℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-7(a)は、歪み-時間図であり、歪み速度を変化させた一軸圧縮試験が行われていることが確認できる。図 2.3-7(b)は応力-歪み図であり、一軸圧縮強度は 19.96[MPa]であった。

図 2.3-7(c)～図 2.3-7(h)は試験体番号 334.28A (試験条件：20℃) のクリープ試験結果である。図 2.3-7(c)は応力-時間図であり、応力レベル 70[%]に達した直後に破壊していることがわかる。図 2.3-7(d) , 図 2.3-7(e) はそれぞれ変位-時間図, 歪み-時間図である。また、図 2.3-7(f) は、歪み速度-時間図であり、測定精度に問題はあるものの各応力レベルで歪み速度が徐々に低下していることがわかる。図 2.3-7(g) は、破壊時の応力レベルでの歪み-補正時間図である。寿命の実測値は 18[sec]であるが、理論値は約 2.3×10^{12} [sec]であり、大きく異なっていることがわかる。クリープ試験で使用した試験体の想定一軸圧縮強度が大きく異なっていたためではないかと考えられる。図 2.3-7(h) は、破壊時の応力レベルでの歪み速度-補正時間図である。寿命の実測値は 18[sec]であることから歪み速度の評価は極めて困難であると考えられるが、同図より歪み速度の最小値は約 2×10^{-5} [/sec]とした。

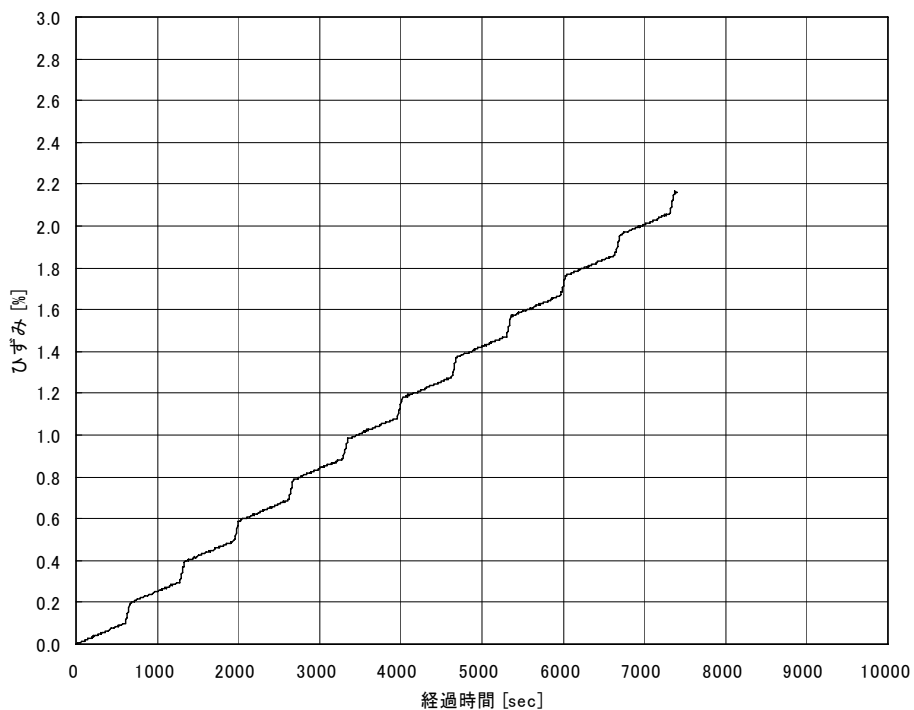


図 2.3-7(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 334.28B 20°C

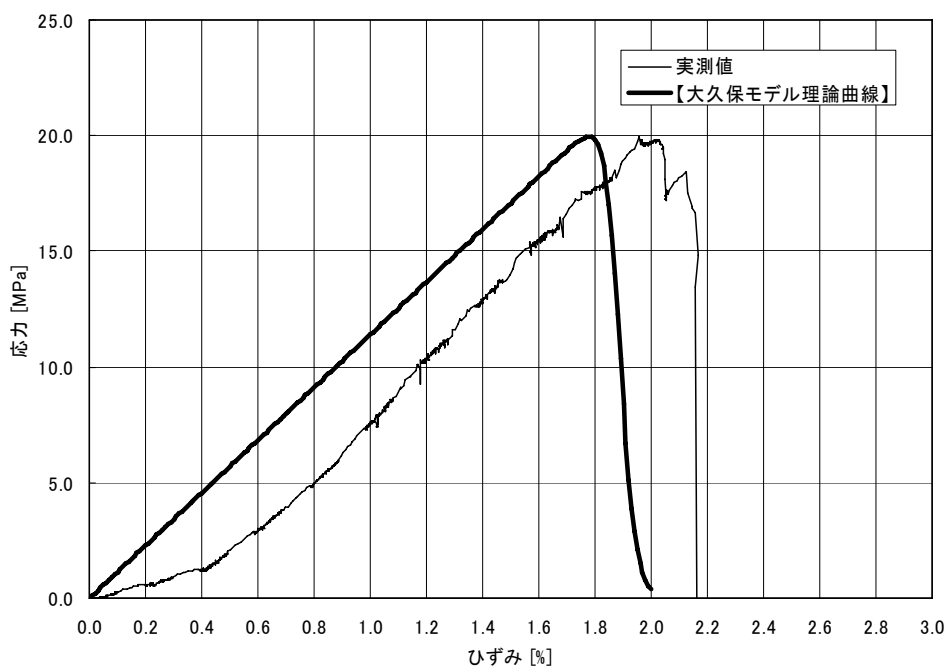


図 2.3-7(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 334.28B 20°C

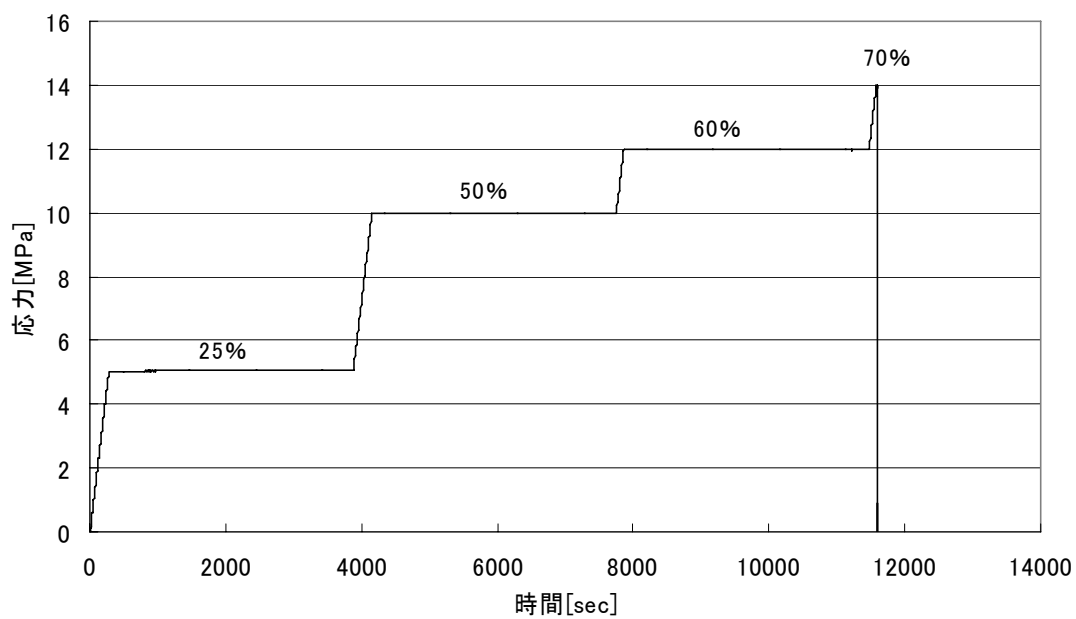


図 2.3-7(c) クリープ試験結果 応力-時間 334.28A 20°C

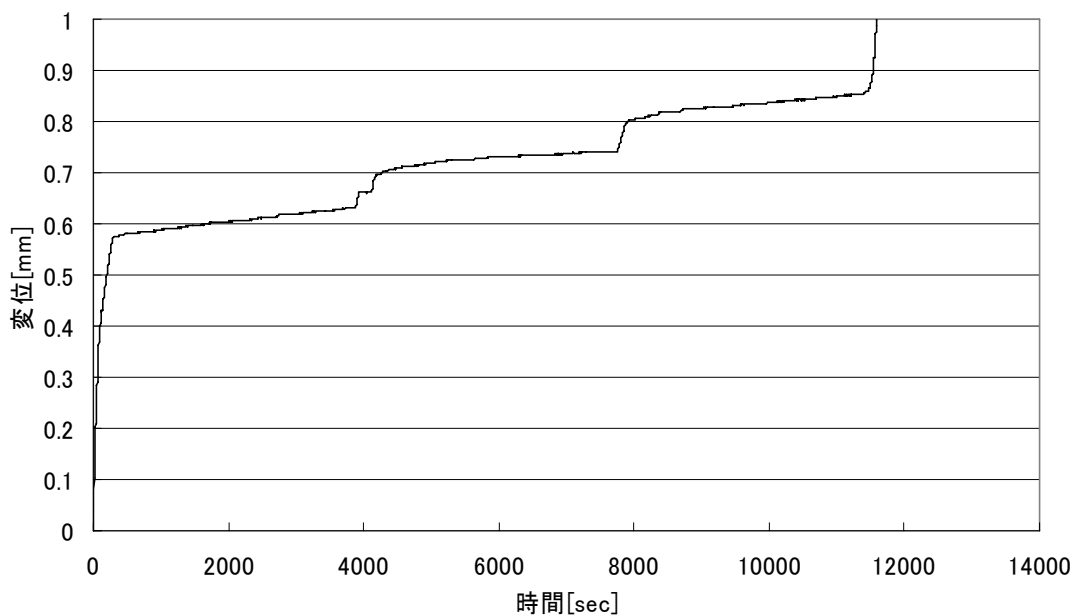


図 2.3-7(d) クリープ試験結果 変位-時間 334.28A 20°C

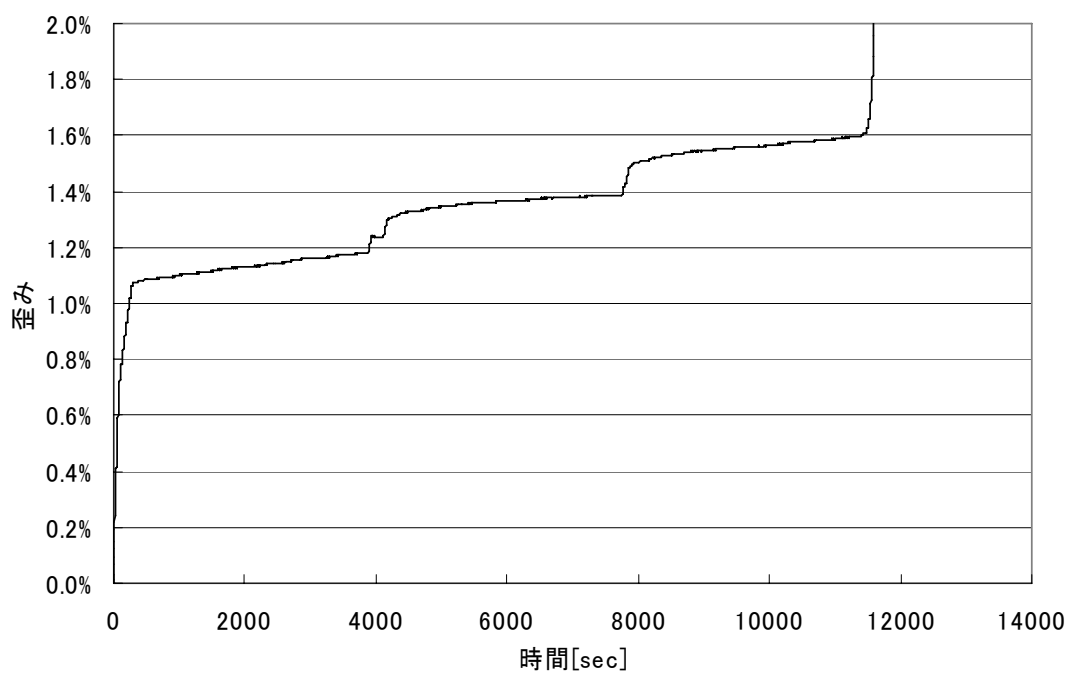


図 2.3-7(e) クリープ試験結果 歪み-時間 334.28A 20°C

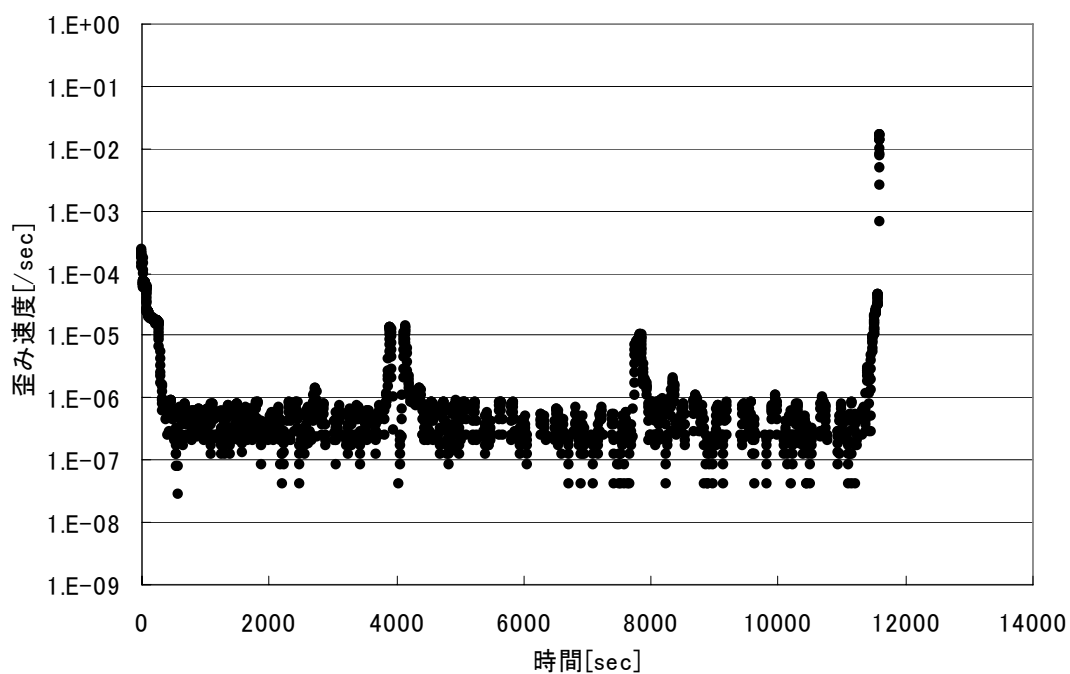


図 2.3-7(f) クリープ試験結果 歪み速度-時間 334.28A 20°C

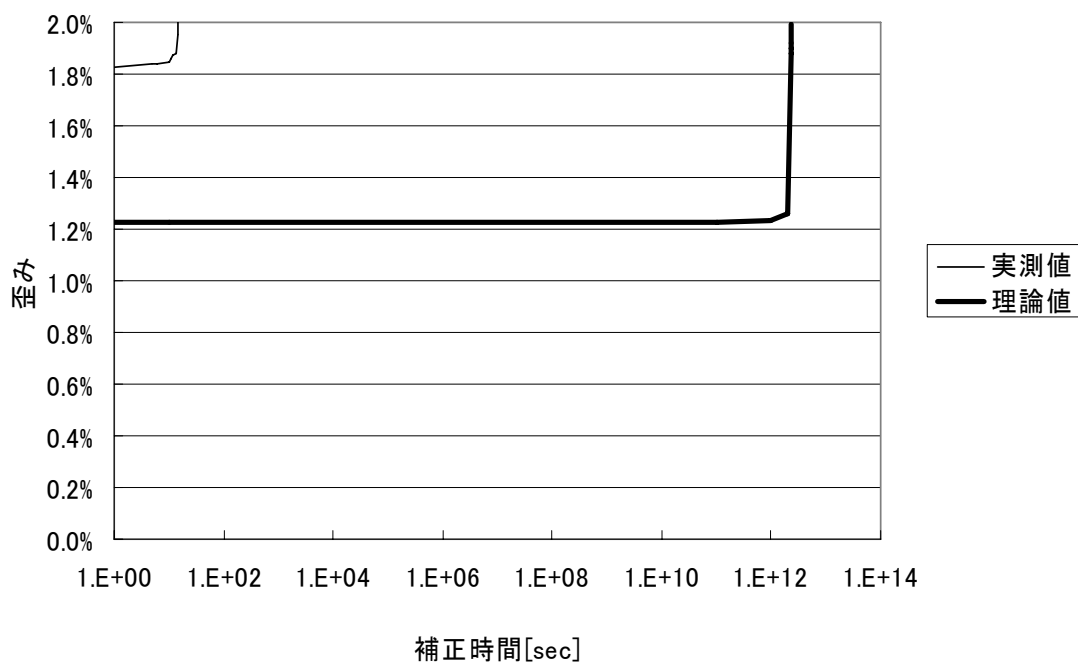


図 2.3-7(g) クリープ試験結果 歪み-補正時間 334.28A 20°C

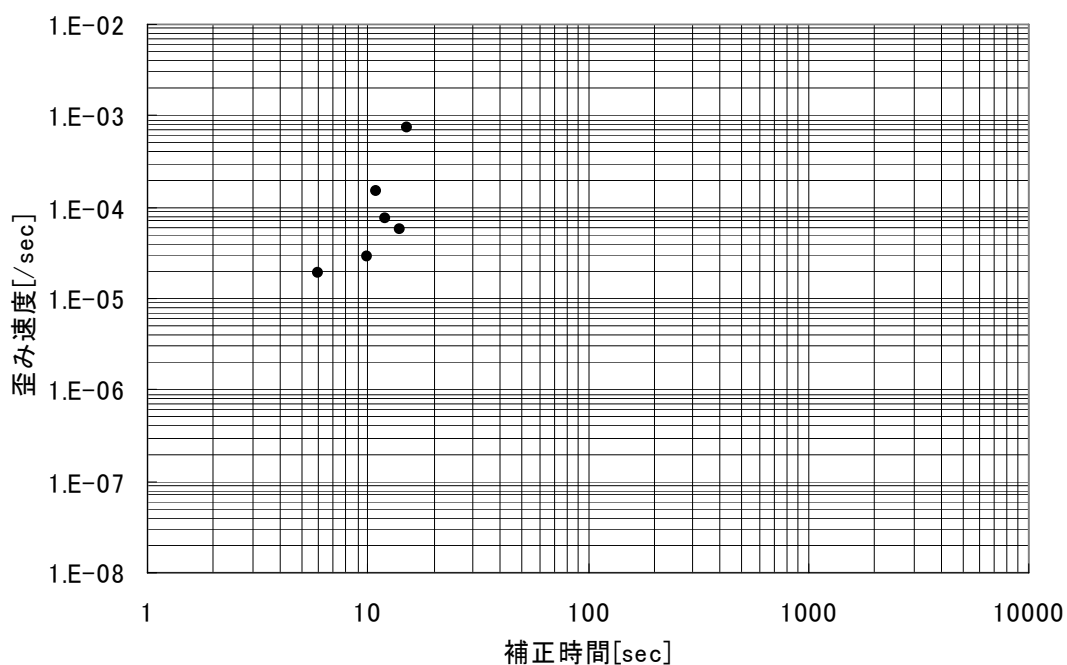


図 2.3-7(h) クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 334.28A 20°C

図 2.3-8(a)と図 2.3-8(b)は、試験体番号 334.28D (試験条件：80℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-8(a)は、歪み-時間図であり、歪み速度を変化させた一軸圧縮試験が行われていることが確認できる。図 2.3-7(b)は応力-歪み図であり、一軸圧縮強度は 14.54[MPa]であった。

図 2.3-8(c)～図 2.3-8(h)は試験体番号 334.28C (試験条件：80℃) のクリープ試験結果である。図 2.3-8(c)は応力-時間図であり、応力レベル 90[%]で破壊していることがわかる。図 2.3-8(d) , 図 2.3-8(e) はそれぞれ変位-時間図, 歪み-時間図である。また、図 2.3-7(f) は、歪み速度-時間図であり、測定精度に問題はあるものの各応力レベルで歪み速度が徐々に低下していることがわかる。図 2.3-8(g) は、破壊時の応力レベルでの歪み-補正時間図である。寿命の実測値と想定値はそれぞれ 1052[sec]と 2074[sec]であり、ほぼ予測できていることがわかる。図 2.3-7(h) は、破壊時の応力レベルでの歪み速度-補正時間図である。同図より歪み速度の最小値は約 4×10^{-7} [/sec]とした。

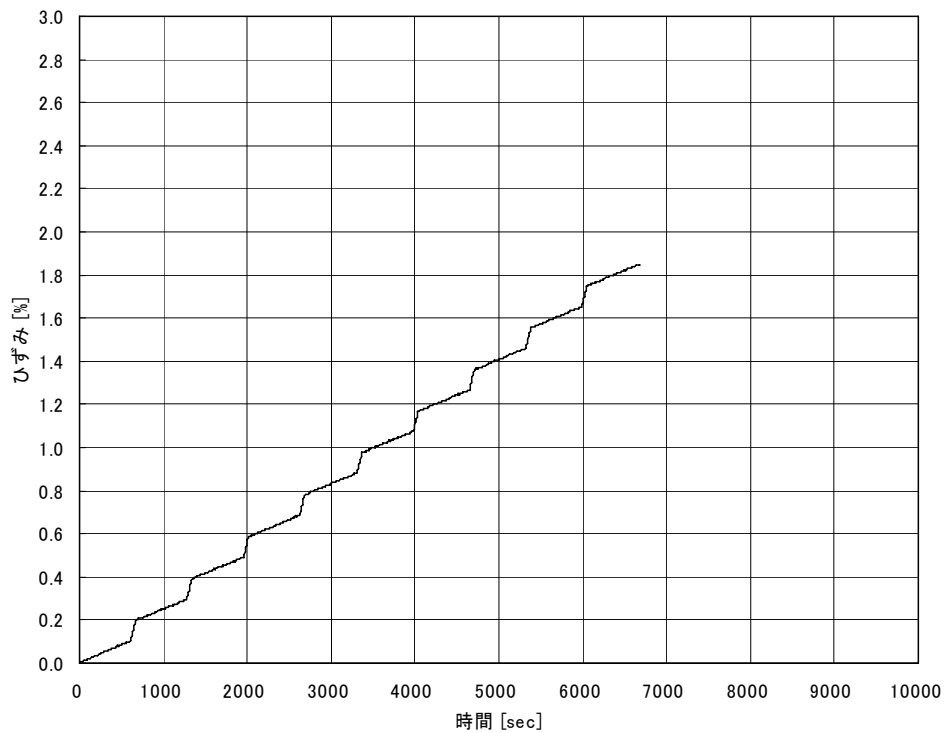


図 2.3-8(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 334.28D 80°C

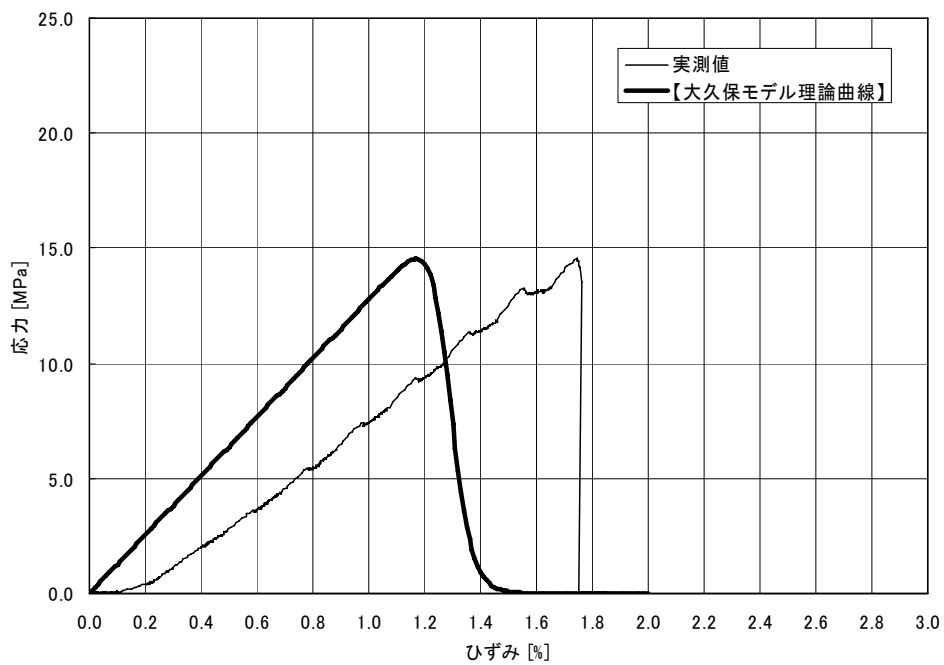


図 2.3-8(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 334.28D 80°C

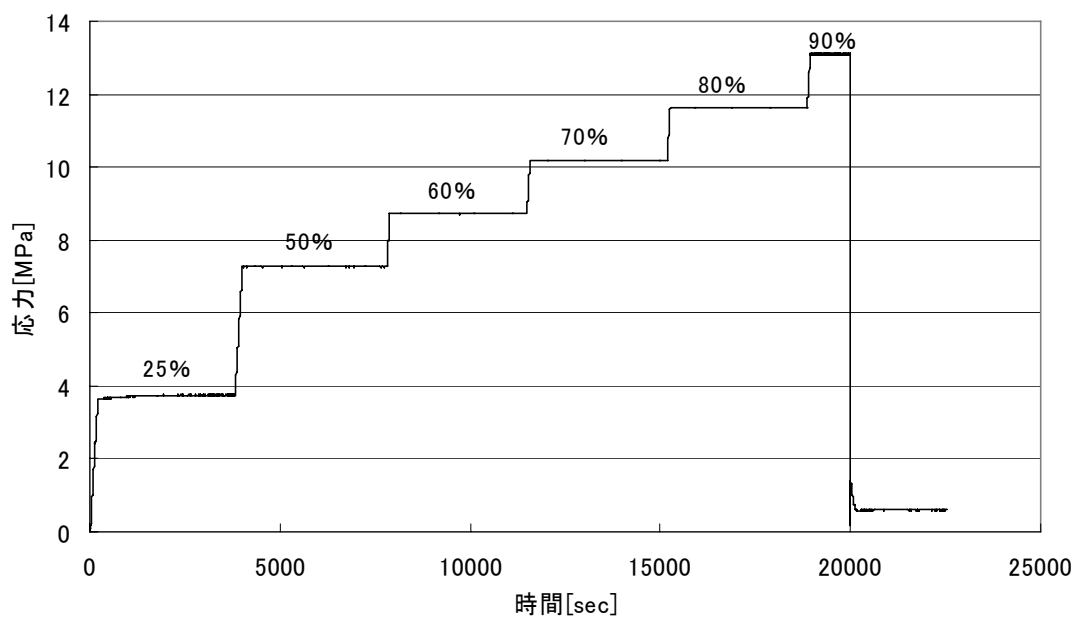


図 2.3-8(c) クリープ試験結果 応力-時間 334.28C 80°C

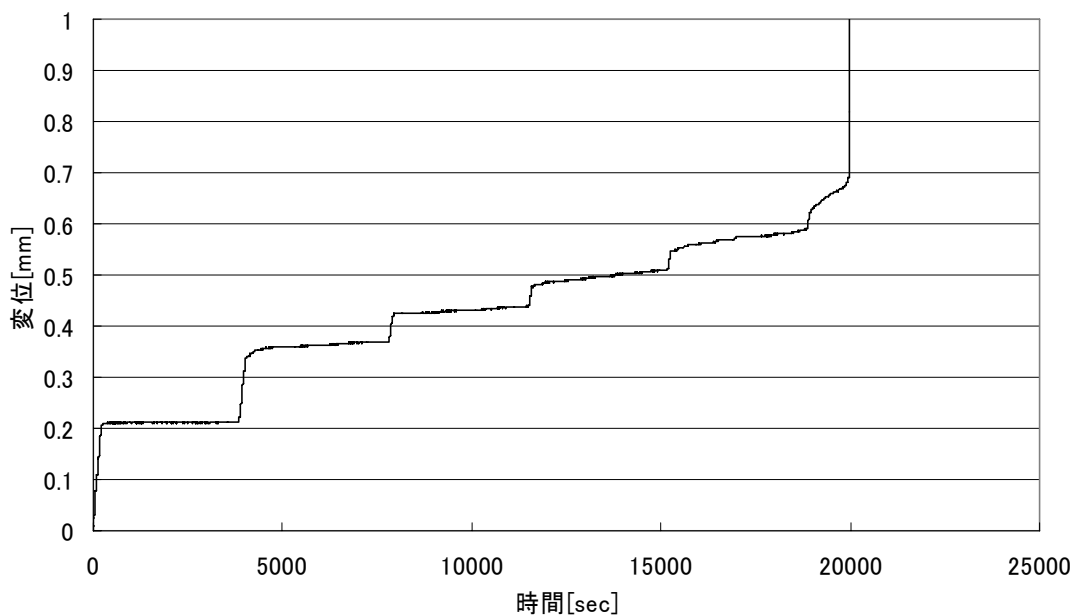


図 2.3-8(d) クリープ試験結果 変位-時間 334.28C 80°C

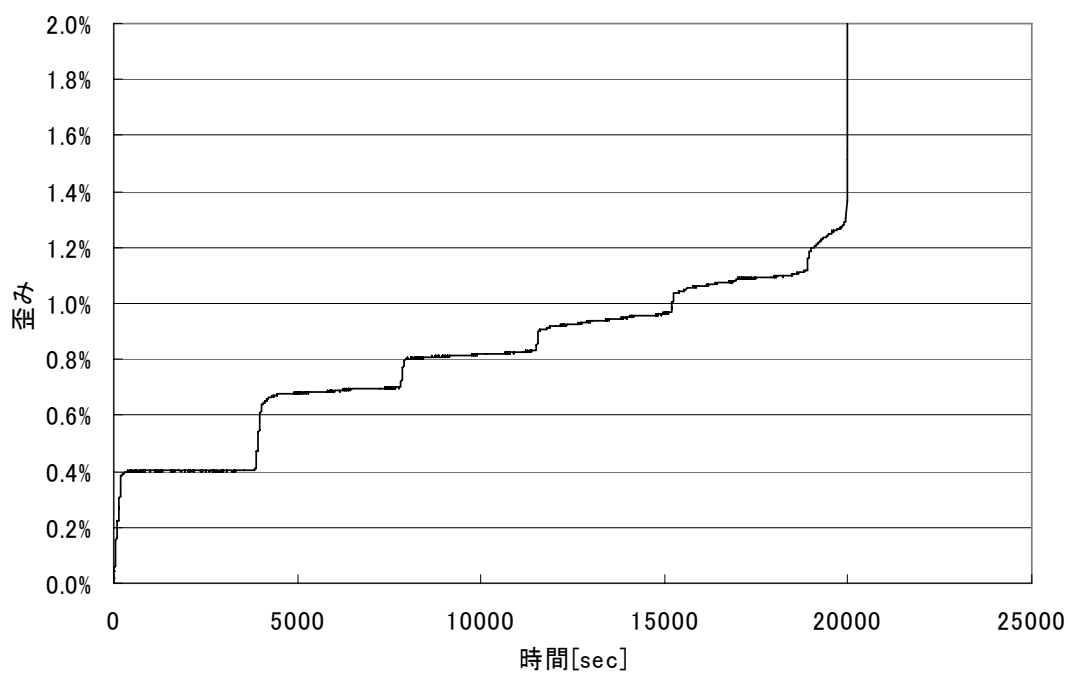


図 2.3-8(e) クリープ試験結果 歪み-時間 334.28C 80°C

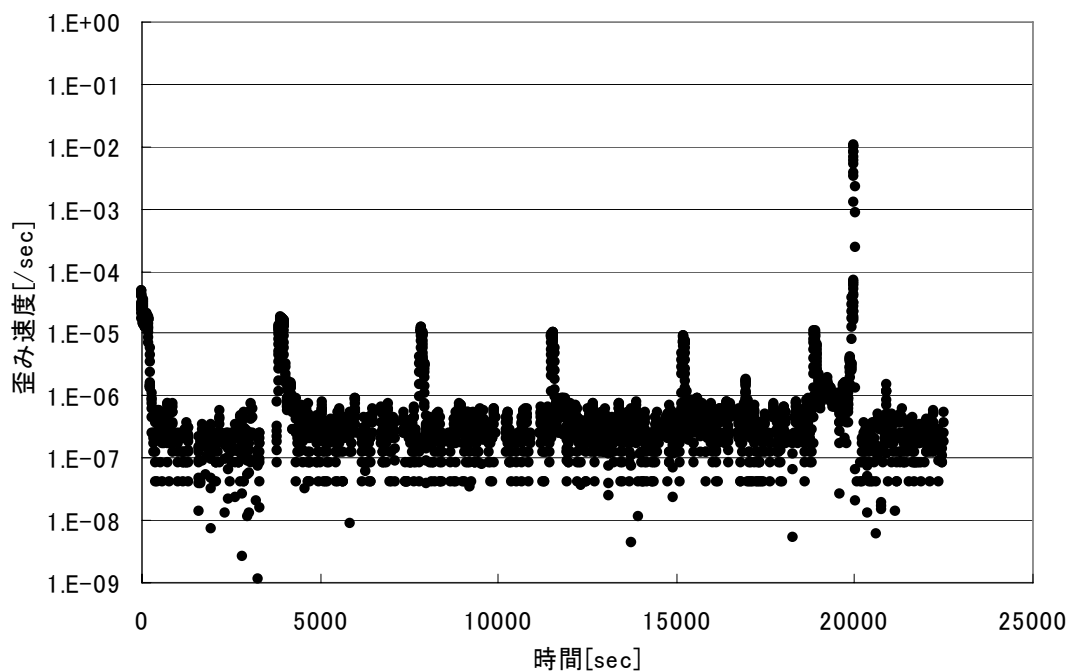


図 2.3-8(f) クリープ試験結果 歪み速度-時間 334.28C 80°C

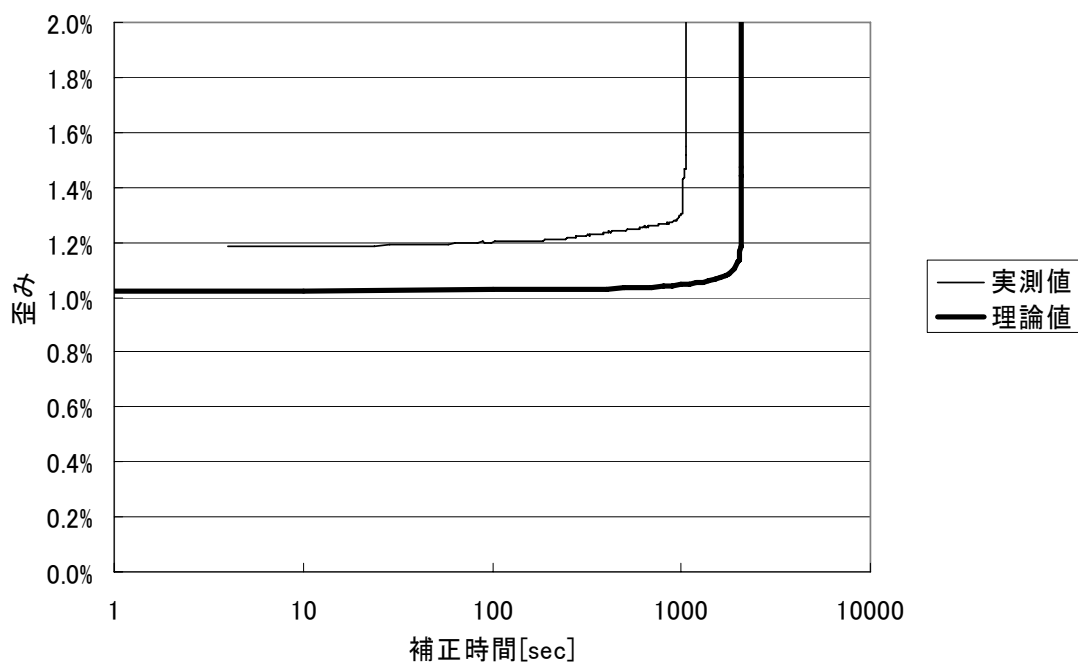


図 2.3-8(g) クリープ試験結果 歪み-補正時間 334.28C 80°C

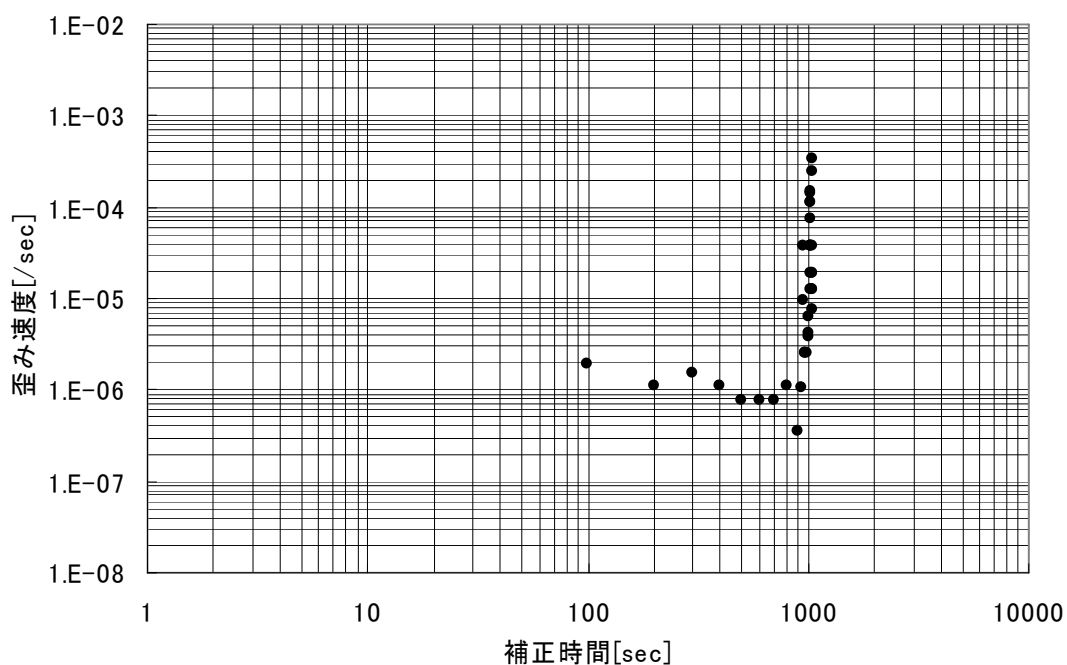


図 2.3-8(h) クリープ試験結果 歪み速度-補正時間 334.28C 80°C

以上より、一軸圧縮試験とクリープ試験の結果をまとめたものを表 2.3-2 に示す。また、実測寿命と理論寿命の比較結果を図 2.3-9 に示す。寿命の実測値と想定値は 1 オーダーから大きいものでは 8 オーダー異なる結果となった。実測の寿命と理論寿命の誤差は、試験体の一軸圧縮強度の想定値と実際の強度の誤差に大きく依存すると考えられる。今回の試験では、なるべく力学的特性が揃った試験体を用意するため同一深度で試験体を採取している。そのため、表 2.3-2 に示すように、438.78B と 438.78D の一軸圧縮強度はそれぞれ 19.71[MPa]と 16.98[MPa]、438.70A と 438.70B の一軸圧縮強度はそれぞれ 24.28[MPa]と 25.06[MPa]となり、ほぼ同程度の一軸圧縮強度の試験体を得ることができた。しかし、438.62C と 438.62D や 334.28B と 334.28C では約 5[MPa]異なっており、同一深度で採取した試験体であっても一軸圧縮強度が異なる場合があることがわかる。そのため、寿命の誤差で大久保モデルの検証を行うことは困難であると考えられる。また、歪み速度を変化させた一軸圧縮試験から n を算出する際には、破壊直前での低歪み速度の応力 (σ_1) と歪み速度をあげた後の応力 (σ_2) を設定する必要がある。 σ_2 は、 σ_1 でのヤング率とほぼ等しくなる点で読み取るが、実際にはその読み取り精度の確度は厳密ではない。そのため、 n の値は大きなバラツキをもつと考えられ、実測寿命と予測寿命の誤差にも大きく影響していると考えられる。また、一軸圧縮後の傾きがほとんど得られないため、 m を算出できず便宜的に $m=n$ としていることも寿命誤差の原因と考えられる。

以上を考慮した上で、図 2.3-9 をみると、438.78C、334.28C は寿命の実測値と理論値はほぼ 1 オーダー内であることから、おおまかには寿命の予測ができていると考えられる。すなわち、特性の揃った試験体であれば大久保モデルにより 1 オーダー以内で寿命を予測できると考えられる。一方、寿命の実測値と理論値の誤差は、大久保モデルの定数取得時の試験に起因するものであり、力学的特性が揃った試験体を多数用意できれば、寿命の実測値と理論値の誤差はさらに小さくなると考えられる。しかし、幌延のコアを対象とした試験では試験体のバラツキが大きいことから、本研究での誤差が限界ではないかと考えられる。

表 2.3-2 大久保モデル検証結果のまとめ

試験体番号	Vp [m/sec]	試験項目	温度 [°C]	一軸圧縮強度 [MPa]	大久保モデルの定数				想定強度 [MPa]	破壊時の応力 [MPa]	破壊時の応力レベル	破壊時最小歪み速度 [/sec]	想定寿命 [sec]	実測寿命 [sec]
					λ	1	n	m						
438.78B	2166	一軸	20	19.713	5.064E-04	25	25	3.371E+43						
438.78C	2153	クリープ	20						19.713	19.724	100%	9.00E-07	64	222
438.78D	2098	一軸	20	16.979	4.022E-04	87	87	9.485E+181						
438.78A	2136	クリープ	20						16.979	15.276	90%	4.00E-07	124887	1759
438.70B	2150	一軸	80	25.055	5.008E-04	49	49	3.720E+86						
438.70D	2133	クリープ	80						25.055	12.521	50%	2.00E-07	2.39E+16	2576
438.70A	2092	一軸	80	24.281	6.804E-04	35	35	6.097E+55						
438.70C	2126	クリープ	80						24.281	22.120	91%	4.00E-06	1999	82
438.62C	2053	一軸	20	18.681	7.474E-04	56	56	2.578E+97						
438.62A	1967	クリープ	20						18.681	14.952	80%	7.00E-06	1.02E+07	1432
438.62D	2094	一軸	80	13.728	8.794E-04	68	51	1.619E+72						
438.62B	2086	クリープ	80						13.728	16.494	120%	5.00E-08	-	5578
334.28B	2084	一軸	20	19.961	8.775E-04	69	69	5.028E+114						
334.28A	2071	クリープ	20						19.961	13.942	70%	2.00E-05	2.32E+12	15
334.28D	2070	一軸	80	14.54	7.823E-04	35	35	4.784E+61						
334.28C	2062	クリープ	80						14.541	13.093	90%	4.00E-07	2.07E+03	1052

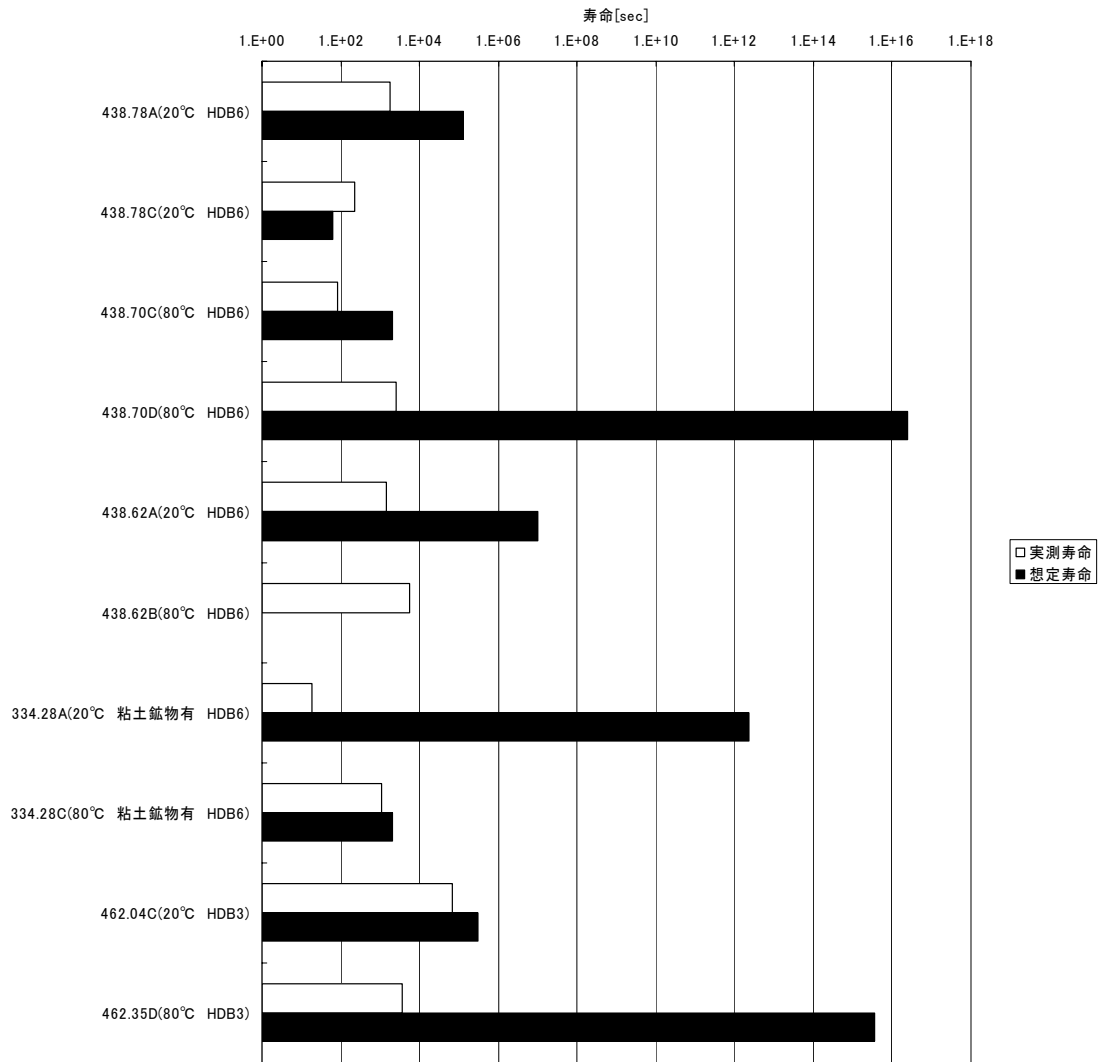


図 2.3-9 クリープ試験での想定寿命と実測寿命

2. 3. 2 熱が大久保モデル定数に及ぼす影響

熱が岩盤の力学的特性に影響すると仮定し、大久保モデルのパラメータがどのように変化するかを把握するためには、力学的特性の揃った試験体を使用して温度を変化させた一軸圧縮試験を行う必要がある。前節の検討より、特性の揃った試験体を用意することは困難であると考えられるが、最も特性の揃った試験体を用意できると考えられる方法として、コア採取位置が同一の試験体を使用し、試験条件の温度を 20℃と 80℃とした一軸圧縮試験を行った。

表 2.3-3 に試験体の概要を示す。HDB8 孔の深度 438.26m で採取した 4 つの試験体を使用して、20℃と 80℃の試験条件で一軸圧縮試験を行った。なお、4 つの試験体の V_p は 2090~2109[m/sec]であり、19[m/sec]内に収まっていた。なお、 V_p の最も大きい試験体と 3 番目に大きい試験体は 20℃の試験に使用した。 V_p が 2 番目と 4 番目の試験体は 80℃の試験体とした。

表 2.3-3 熱が大久保モデル定数に及ぼす影響に関する検討に使用した試験体の概要

試験体 番号	採取深度	重量	平均直径	平均高さ	V_p	V_p の 順位	試験種 類	試験温 度
	[m]	[g]	[cm]	[cm]	[m/sec]			[℃]
438.26A	438.26	43.7	2.436	5.188	2109	1	一軸	20
438.26C	438.26	44.6	2.438	5.275	2101	2	一軸	80
438.26D	438.26	43.7	2.435	5.198	2096	3	一軸	20
438.26B	438.26	44.3	2.430	5.267	2090	4	一軸	80

図 2.3-10(a)と図 2.3-10(b)は、試験体番号 438.26A (試験条件：20℃) の一軸圧縮試験結果である。

図 2.3-10(a)は歪み-時間図であり、図 2.3-10(b)は応力-歪み図である。同図より、歪みが 0.8[%]のときに応力が低下していることがわかる。このときに試験体の一部分が変形もしくは破壊した可能性があると考えられる。一軸圧縮強度は 7.20[MPa]であり、一軸圧縮強度後は急激に応力が低下して、0[MPa]となっていた。

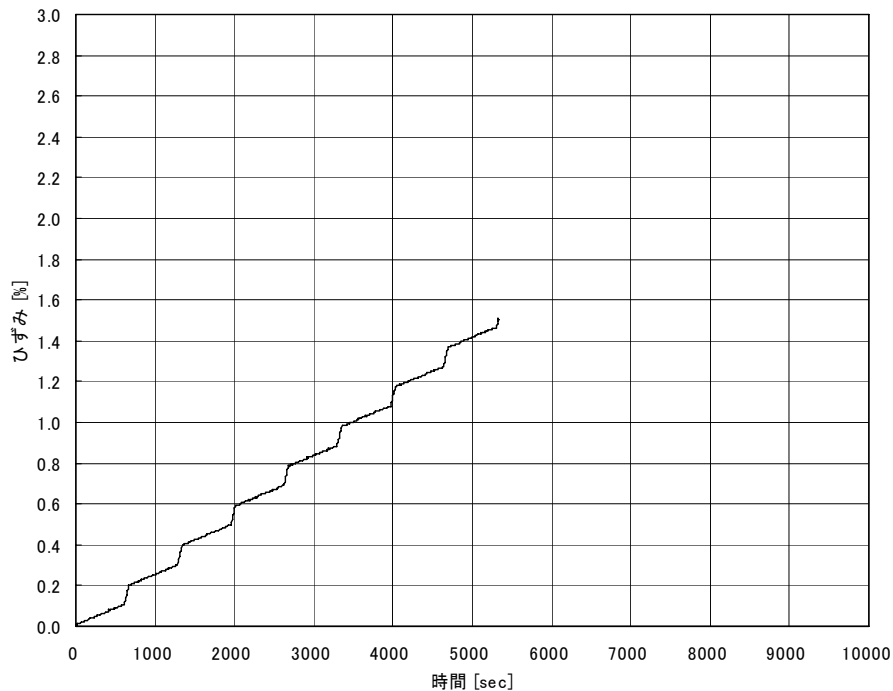


図 2.3-10(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.26A 20°C

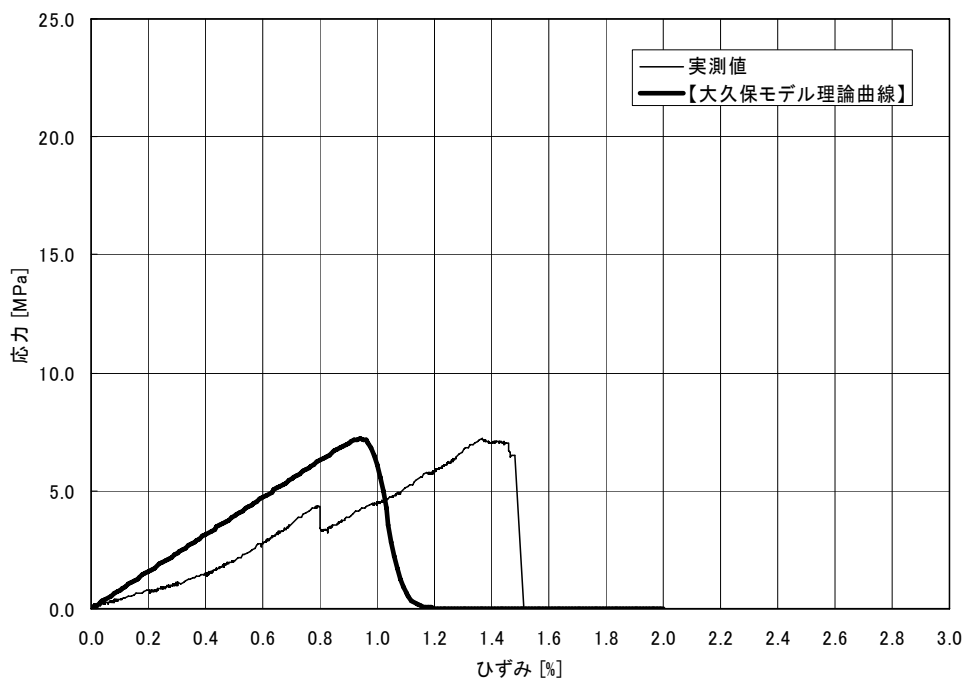


図 2.3-10(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.26A 20°C

図 2.3-11(a)と図 2.3-11(b)は、試験体番号 438.26C (試験条件：80℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-11(a)は歪み-時間図であり、図 2.3-11(b)は応力-歪み図である。同図より、一軸圧縮強度は 14.12[MPa]であることがわかる。歪みが 1.4[%]～1.5[%]のときに一軸圧縮強度後の挙動が若干把握できるような挙動が観察できる。しかし、その傾きを把握するには十分ではないため、 m の算定には考慮しなかった。

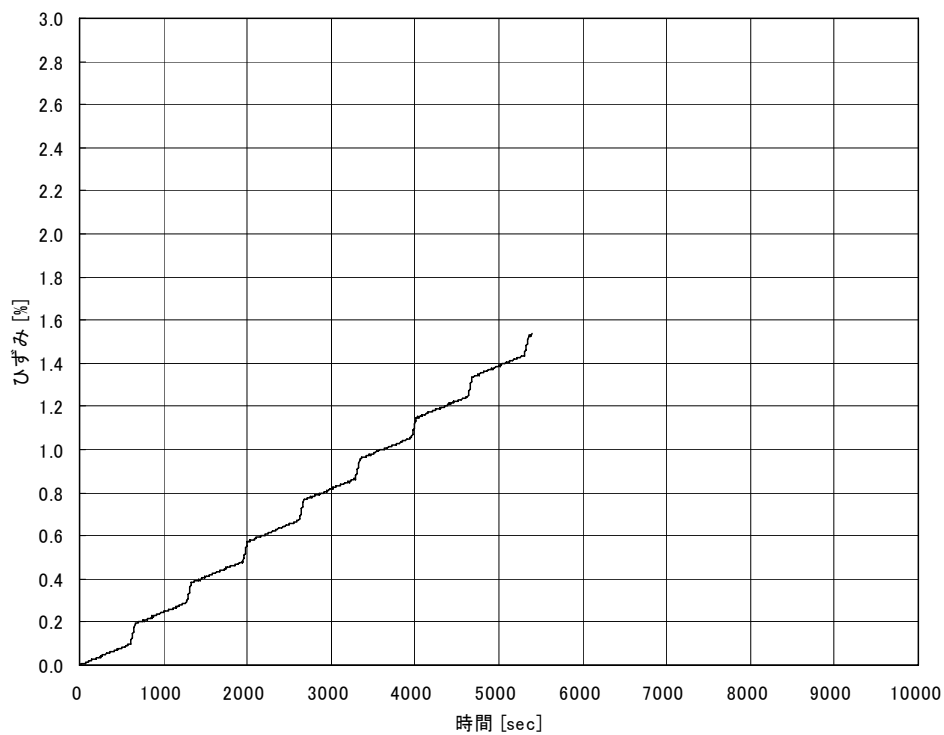


図 2.3-11(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.26C 80°C

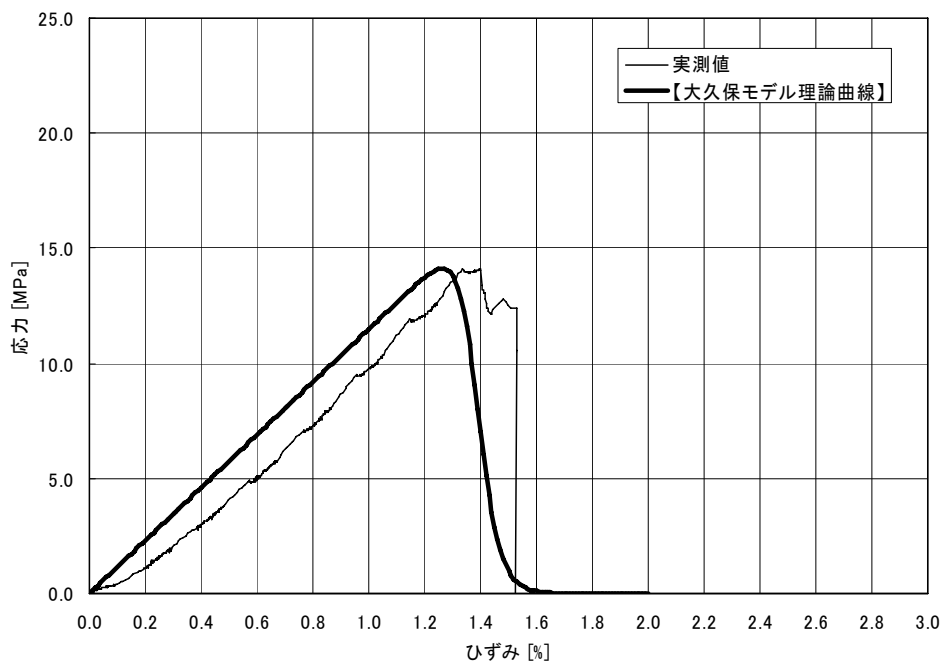


図 2.3-11(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.26C 80°C

図 2.3-12(a)と図 2.3-12(b)は、試験体番号 438.26D (試験条件：20℃) の一軸圧縮試験結果である。図 2.3-12(a)は歪み-時間図であり、図 2.3-12(b)は応力-歪み図である。同図より、一軸圧縮強度は 20.42[MPa]であることがわかる。

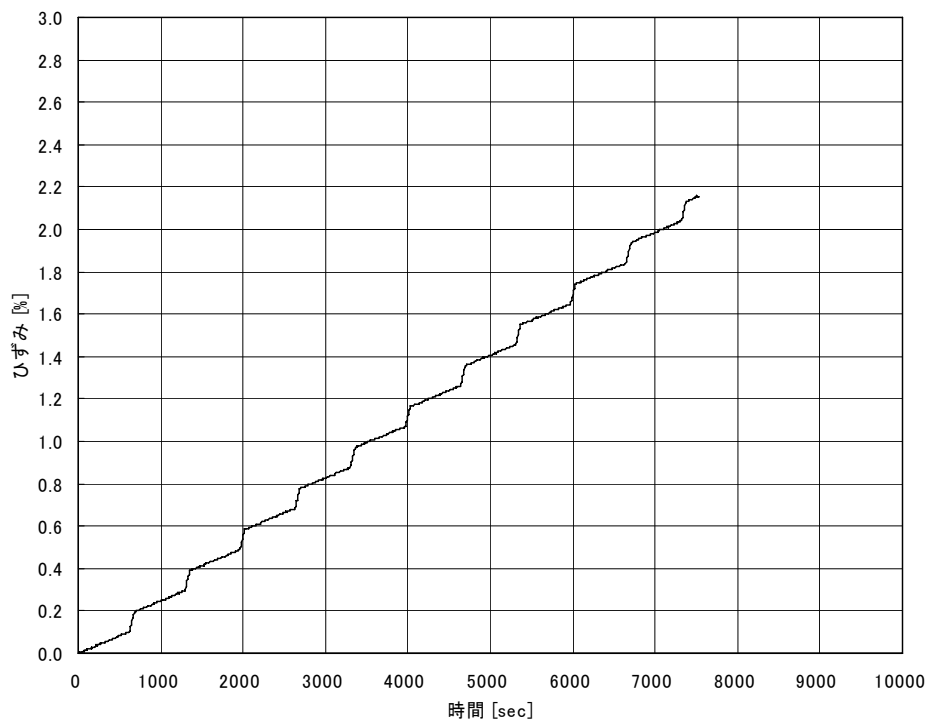


図 2.3-12(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.26D 20°C

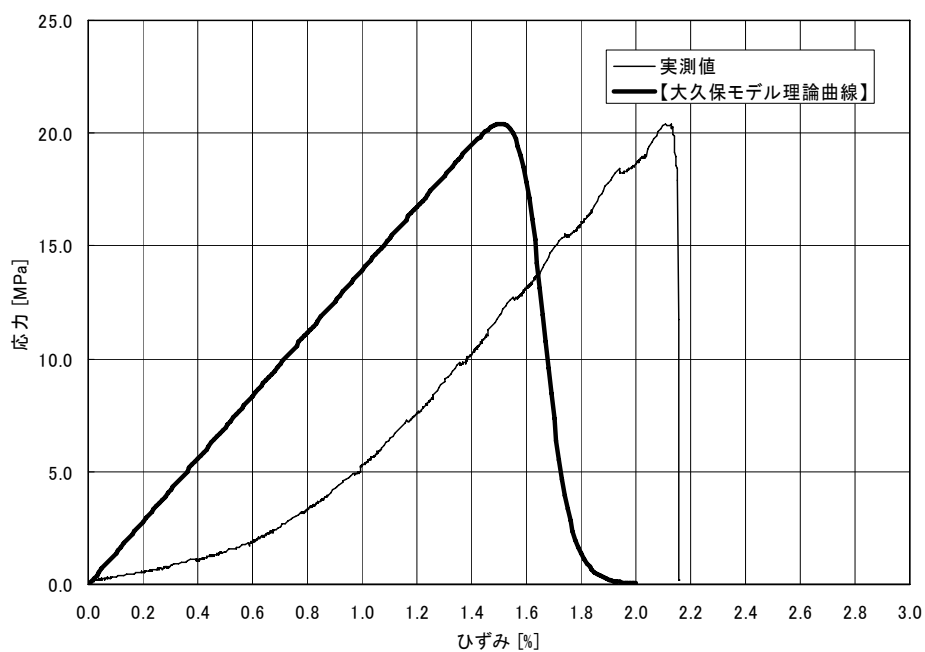


図 2.3-12(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.26D 20°C

図 2.3-13(a)と図 2.3-13(b)は、試験体番号 438.26B (試験条件：80℃) の一軸圧縮試験結果である。

図 2.3-13(a)は歪み-時間図であり、図 2.3-13(b)は応力-歪み図である。同図より、一軸圧縮強度は 15.72[MPa]であり、一軸圧縮強度後は急激に応力が低下して、ほぼ 0[MPa]となっていた。

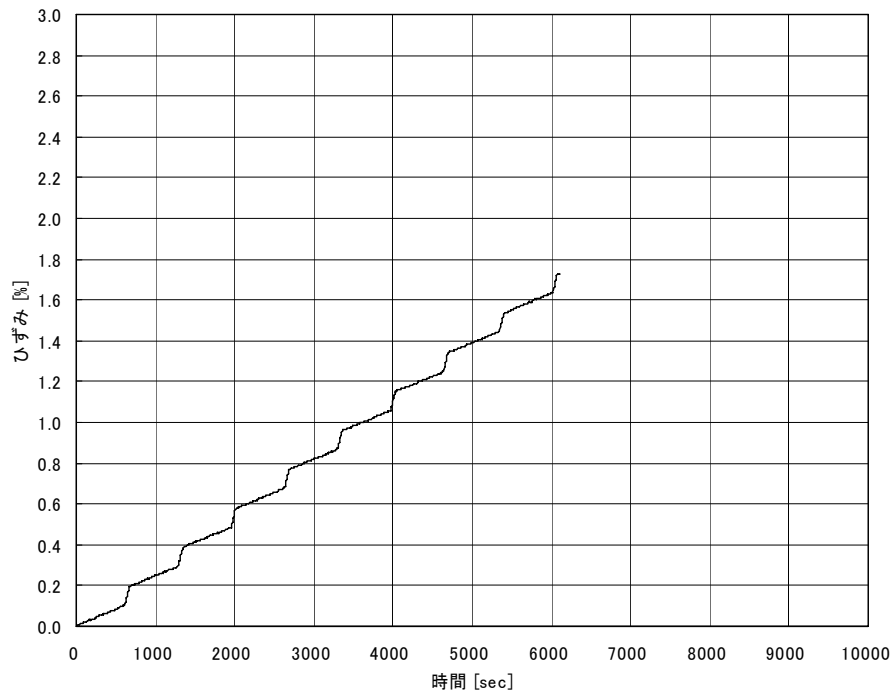


図 2.3-13(a) 一軸圧縮試験結果 歪み-時間 438.26B 80°C

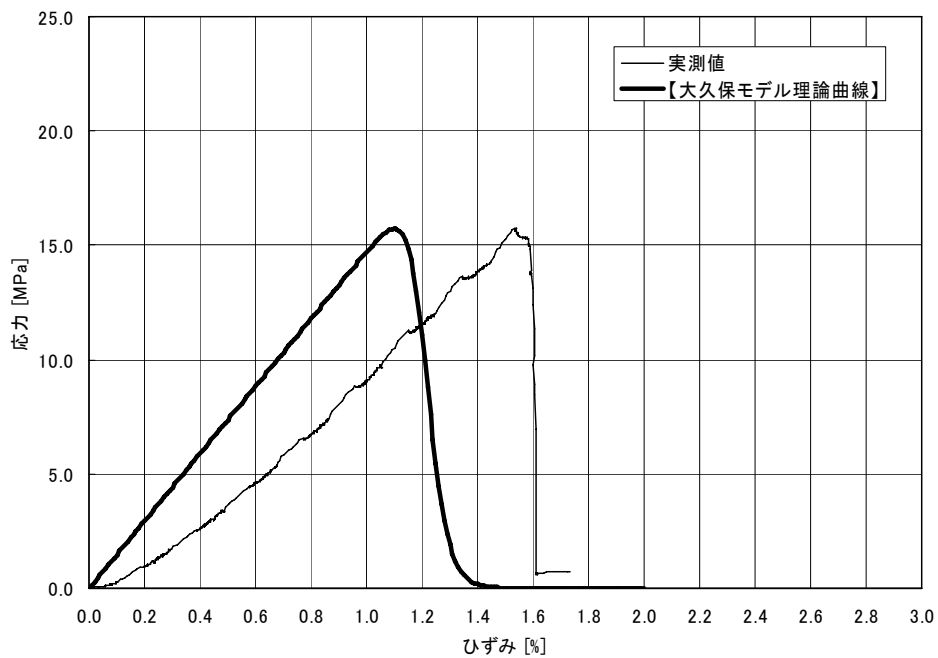


図 2.3-13(b) 一軸圧縮試験結果 応力-歪み 438.26B 80°C

試験体番号 438.26A～D の試験より求めた大久保モデルの定数等を表 2.3-4 にまとめて示す。試験条件 20℃ の 438.26A と 438.26D の一軸圧縮強度は 7.2 [MPa] と 15.72 [MPa] と大きく異なった。一方、80℃ の試験では一軸圧縮強度は 14.12 [MPa] と 15.72 [MPa] となりほぼ等しくなった。20℃ と 80℃ での一軸圧縮強度の変化はこの結果からだけでは判断できない。λ1 も同様に、20℃ の試験では 1.274×10^{-3} [/MPa] と 7.173×10^{-4} [/MPa] でバラツキが大きく、80℃ の試験では、 8.698×10^{-4} [/MPa] と 6.787×10^{-4} [/MPa] でこの試験だけでは比較が困難であると考えられる。大久保モデルの定数 n は温度に関係なく、33～38 の間の値をとった。大久保モデルの定数 m は応力-歪み図で破壊強度後の挙動が把握できないため、ここでは比較できない。以上より、今回の試験では温度により大久保モデルの定数が変化することは確認できなかった。試験時の温度が 20℃ から 80℃ に変化することで大久保モデルの定数が変化することを確認するためには、このような試験を統計的に比較できる程度多数実施する必要があると考えられる。

表 2.3-4 熱が大久保モデル定数に与える影響に関する試験結果

試験体番号	Vp [m/sec]	試験項目	温度 [℃]	一軸圧縮 強度 [MPa]	大久保モデルの定数			
					λ1 [/MPa]	n [-]	m [-]	a [MPa・sec]
438.26A	2109	一軸	20	7.20	1.274E-03	38	38	2.386E+71
438.26C	2101	一軸	80	14.12	8.698E-04	36	36	2.767E+62
438.26D	2096	一軸	20	20.42	7.173E-04	35	35	4.919E+57
438.26B	2090	一軸	80	15.72	6.787E-04	33	33	4.754E+58

2. 3. 3 熱がクリープに及ぼす影響

熱がクリープに及ぼす影響に関する研究によれば、熱の影響でクリープ歪み速度が増大することが知られている（例えば Misra and Murrell, 1965）。ここでは、同様に熱によりクリープ時の歪み速度が増大するかについて検討を行った。

表 2.3-5 に検討に使用した試験体の概要を示す。検討には、前節の大久保モデルの検証と HDB3 孔での試験結果（井上ら, 2003）を用いた。

表 2.3-5 熱がクリープに及ぼす影響に関する検討に使用した試験体の概要

試験体番号	孔番号	深度	直径	高さ	V _p	温度	実測寿命	破壊時最小歪み速度
		[m]	[cm]	[cm]	[m/sec]	[°C]	[sec]	[/sec]
438.78C	HDB6	438.78	2.434	5.145	2153	20	222	9.00E-07
438.78A	HDB6	438.78	2.436	5.319	2136	20	1759	4.00E-07
438.70D	HDB6	438.7	2.423	5.162	2133	80	2576	2.00E-07
438.70C	HDB6	438.7	2.427	5.187	2126	80	82	4.00E-06
438.62A	HDB6	438.62	2.433	5.389	1967	20	1432	7.00E-06
438.62B	HDB6	438.62	2.433	5.339	2086	80	5578	5.00E-08
334.28A	HDB6	334.28	2.434	5.344	2071	20	18	2.00E-05
334.28C	HDB6	334.28	2.434	5.279	2062	80	1052	4.00E-07
462.04C	HDB3	462.04	2.449	4.998	2231	20	66749	3.E-09
462.35D	HDB3	462.35	2.433	4.995	1966	80	3737	1.E-07

図 2.3-14 には寿命（破壊時の段階）と最小歪み速度の関係を示す。同図では、438.62A を除いて、ほぼ-1 の負の相関が認められる。この傾向は、周圧が一定であれば、傾きが-1 になることが知られており、変数分離型の構成方程式が成り立つための必要条件の 1 つである（趙ら 1995）。438.62A だけがこの傾向に合致しないが、その原因については検討中である。

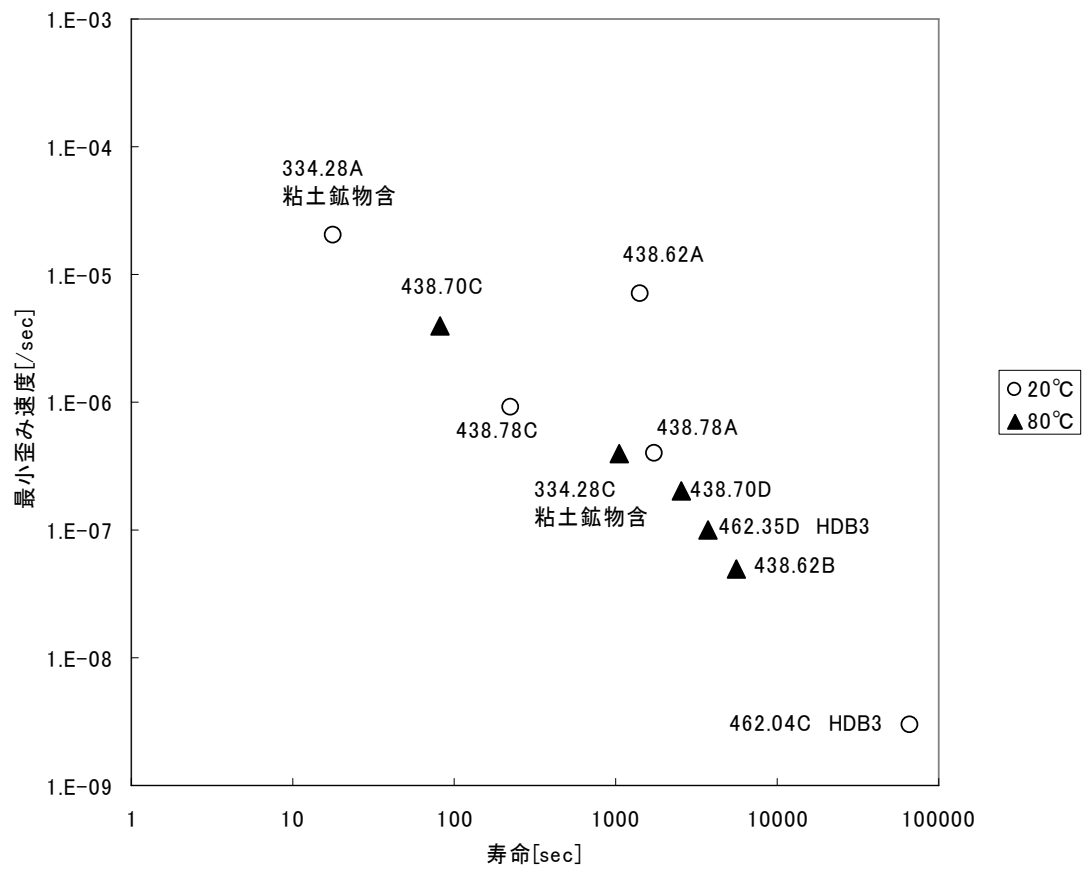


図 2.3-14 寿命と最小歪み速度の関係

クリープ試験のある時刻の歪み速度は、時間（寿命）と応力レベルに依存する。熱がクリープに及ぼす影響を把握するためには、これらの影響を排除する必要がある。時間については、時間を寿命で割って基準化した時間軸を採用した。各試験体の破壊時の応力レベルは厳密に把握することが困難であるため、ここでは便宜的に全ての試験体の破壊時の応力レベルはほぼ等しいと仮定して検討を進める。

図 2.3-15 は寿命で基準化した時間と歪み速度の関係を試験条件別にまとめたものである。図 2.3-15 の基準時間 0~0.8[-]程度の部分の歪み速度を試験条件 20°C（白抜きプロット）と 80°C（塗りつぶしプロット）で比較するとほぼ等しいか 80°Cの方が歪み速度が小さくなっているように見え、20°Cから 80°Cになることによってクリープ歪み速度が大きくなるという傾向は認められなかった。

図 2.3-16 は粘土鉱物を多く含むと考えられる試験体での結果である。334.28A は 20°Cの試験であり 334.28C は 80°Cでの試験である。334.28A は寿命が 18[sec]であり、歪み速度の精度に問題があると考えられるが、ここでも温度を変化させたことでクリープ歪み速度が大きくなることは確認できなかった。

つまり、本研究で対象としたコアでは、20°Cと 80°Cの温度の違いがクリープのひずみ速度に与える影響は少ないのではないかと考えられる。ただし、今回と同様な温度の違いが岩石の長期力学的挙動に影響を及ぼすことは、既往の研究では幾つかの岩石（砂岩や凝灰岩や泥岩）で実証されている（例えば、Kuznetsov・Vashchilin, 1970 ; 山辺ら, 2001 ; 城ら, 2004;）ことから、原位置での岩盤を対象とした試験により確認することが必要であると考えられる。

本研究では多段階載荷式クリープ試験を行い、各応力レベルの載荷時間を約 1 時間とした。そのため、短時間のクリープ寿命を対象とした試験となっていた。つまり、応力レベルが大きい場合のクリープ試験であると考えられる。実際の岩盤内の長期力学挙動を検討する場合、応力レベルが小さい場合すなわちクリープ寿命が長い場合の検討が必要となると考えられる。そのため室内試験でもクリープ寿命が長期（例えば数ヶ月～数年）の試験を行うことが望ましいと考えられる。

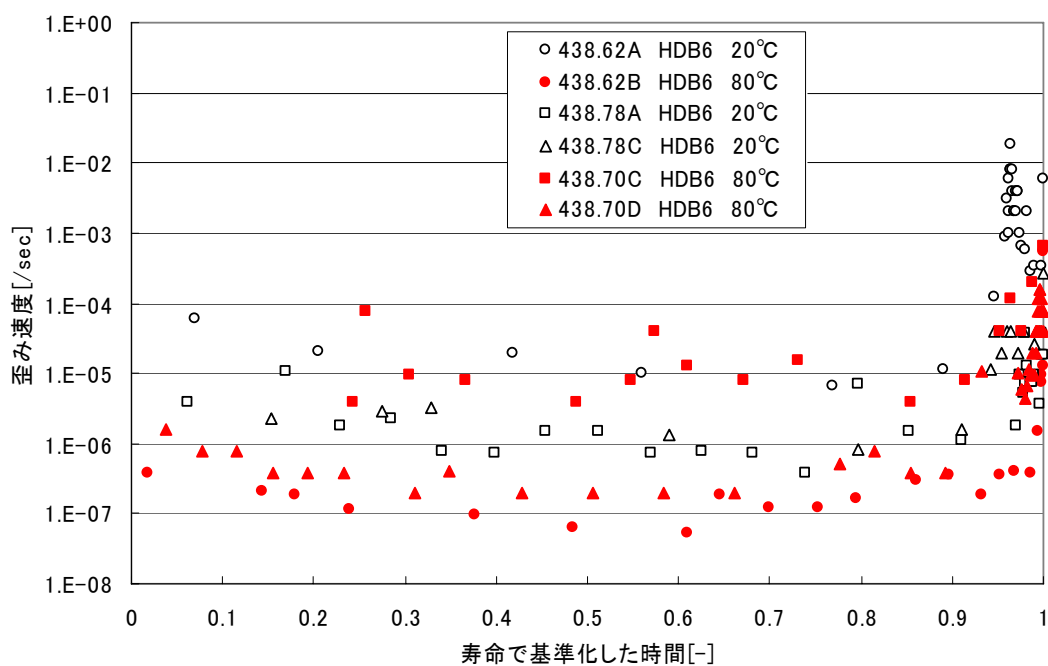


図 2.3-15 寿命で基準化した時間と最小歪み速度で基準化した歪み速度の関係

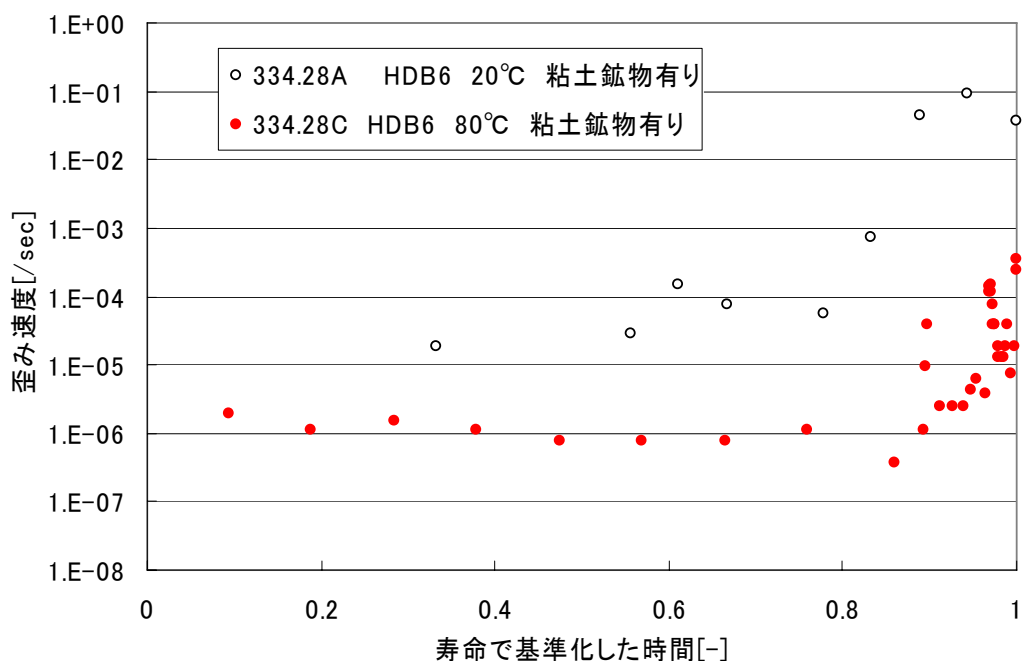


図 2.3-16 寿命で基準化した時間と最小歪み速度で基準化した歪み速度の関係
粘土鉱物を含むと考えられる試験体

2. 4 文献収集・原位置試験方法の検討

2. 4. 1 環境要因が長期安定性に与える影響

クリープに影響する因子としては、①応力の性質、②応力レベル、③拘束圧、④温度、⑤繰り返し载荷、⑥水分と湿度、⑦構造上の因子が上げられる。このうち、環境要因として④温度、⑥水分と湿度がクリープに与える影響について検討した過去の研究とその結果の概略を以下に示す。

(1) 温度

Misra と Murrell (Misra・Murrell, 1965) は、750℃までの温度で、いろいろの種類の数多くの岩石の試験を実施し、 $0.2T_m$ (ここに、 T_m はケルビン温度での岩石の融点) 以下の温度においては、クリープひずみは対数的に時間に依存し、応力および温度に比例することを発見した。さらに高い温度においては、 t^m の関数である付加項が現れる。ここに、 t は時間で $0 < m < 1$ である。 m の値は温度が増加するにしたがって増加し、 $0.5T_m$ においては $1/3$ である。このクリープのタイプは、応力 (おそらく、指数関数的要素から $2\sim 3$ の値を有するべき関数則にしたがって) および温度とともに極めて急速に増加する。後者の場合には、つぎの指数関数則にしたがっている。

$$\varepsilon \propto \exp\left(-\frac{U}{KT}\right) \quad (9.55)$$

ここに、 U =活性化エネルギー[J/mol]、 K =ボルツマンの定数 (8.3 [J/(K・mol)])、 T =絶対温度[K]である。

人造岩塩に関する実験 (LeComte, 1965) では、100MPa の拘束圧および 6.9MPa の軸圧において、温度を 29℃から 104.5℃へ増加したとき、クリープ速度は 4~5 倍大きくなり、29℃から 198.2℃へ増加したとき、クリープ速度は約 22 倍になった。温度差が同じ場合には、これよりも低い拘束圧であっても、クリープ速度はかなり増加した。

Kuznetsov と Vashchilin (Kuznetsov・Vashchilin, 1970) は、温度が 16℃、43℃および 58℃で、短期強度の 70~80%において、曲げによって砂岩供試体の試験を実施し、即時的クリープ変形および二次クリープ変形の両者とも、温度とともに増加することを示した。最初の 3 日間には、クリープ速度が著しく増加した。供試体から加重を除去し、それらの強度を求めると、16℃でクリープ試験をした供試体は 1.2%の強度増加を示し、一方、58℃および 43℃で試験をした供試体は 25~29%の強度増加を示した。クリープ変形にも拘らず強度は増加した。

以上より、温度がクリープに及ぼす影響については、クリープ歪みに関する研究が多いことがわかる。実際に、砂岩や泥岩などの堆積岩でも幾つかの岩石では温度によってクリープ歪みは大きくなる結果が示されている。このことから、幌延地域の堆積岩の長期力学的挙動も温度の影響を受ける可能性はあると考えられる。しかし、温度がクリープ歪みに

及ぼす影響については、実際の岩盤での試験を行って確認しなければその影響の有無は判断できないと考えられる。

(2) 水分と湿度

Phillips (Phillips, 1931) は、岩石が湿潤するとともに、クリープ速度が増加することを示した。

Kanagawa と Nakaarai (Kanagawa・Nakaarai, 1970) によって行われた乾燥状態および湿潤状態の粘板岩およびヒン岩についてのクリープひずみの測定によれば、湿潤試料におけるひずみ速度は、初めは乾燥試料よりも2~5倍ほど大きかったが、およそ20~100日後には、二次クリープ速度はほとんど同じになる傾向があることを示した。安定状態になる時期は、岩石の種類、応力レベル、含水比に依存している。

Wawersik と Brown (Wawersik・Brown, 1973) の研究によれば、花こう岩および砂岩の時間依存変位が含水比の増加によって増大することを示している。一軸圧縮において、自然乾燥状態および含水湿潤状態の供試体の二次クリープ速度は、その大きさがおよそ2オーダー程度異なっている。

Afrouz と Harvey (Afrouz・Harvey, 1974) は、湿潤状態の軟岩に関しては、クリープ速度が、石炭で3倍、頁岩で8倍に増加することを発見した。三軸試験においては、クリープは有効応力（すなわち、与えられた応力から間隙圧を差し引いたもの）の大きさに関係している。したがって、岩石の時間依存変形は、流体の性質には関係なく間隙圧の変化によって影響されることが予想される。

以上より、岩盤の湿潤状態等が力学的挙動に及ぼす影響は大きいと考えられる。つまり、幌延地域の岩盤が乾燥、再冠水することが岩盤の長期力学的挙動に及ぼす影響については十分に検討する必要があると考えられる。

2. 4. 2 原位置試験における検証方法の提案

本研究では、ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす影響を検討するため、室内での岩石試験を行った。一般に、岩盤の力学的挙動は岩盤内の亀裂に大きく影響されるため、岩石試験では岩盤の力学的挙動を正確に評価できないと考えられる。そのため、大久保モデルの検証や熱などの環境条件が岩盤の長期力学的挙動に及ぼす影響を検討するためには、原位置試験を行うことが必要であると考えられる。井上ら（井上・野田 2002）は、深地層研究所における試験法について検討し、原位置試験として、岩盤三軸クリープ試験、模擬トンネル掘削試験、長期坑道挙動把握、試験坑道挙動把握について提案している。ここでは、井上らの提案を基本として、岩盤三軸クリープ試験についてより具体的に記述する。なお、以下の大部分は「岩の調査と試験」（土質工学会、1989）の“岩盤三軸圧縮試験”を参考として記述している。また、ここでは岩盤三軸クリープ試験として記述しているが、その試験方法は岩盤三軸圧縮試験の载荷パターンを変えたものである。

（1）試験の原理

原位置において角柱状の岩盤ブロックを切り出し、ブロックの各面に3方向の軸荷重を作用させ、このときの応力-歪みの関係から岩盤の変形特性を求める。原理的には室内で実施される角柱型供試体を用いる三軸クリープ試験を原位置の岩盤に拡張したものである。しかし岩盤三軸クリープ試験では試験ブロックの底面は地山岩盤と連続しているところに前者との相違がある。

（2）試験ブロック作成の手順

試験ブロックの作成にあたっては試験ブロックに損傷を与えないよう配慮する。そのためには図 2.4-1 に示すような段階的な掘削方法とする。同図において予め水平方向の掘削を3段階程度実施し緩衝面を作成しておき、薬量を抑えた制限発破によって掘削する（掘削A、掘削B前半）。さらに試験ブロック近傍ではコールピック等を用いた手掘りとし、試験ブロック上面まで掘削する（掘削B後半）。

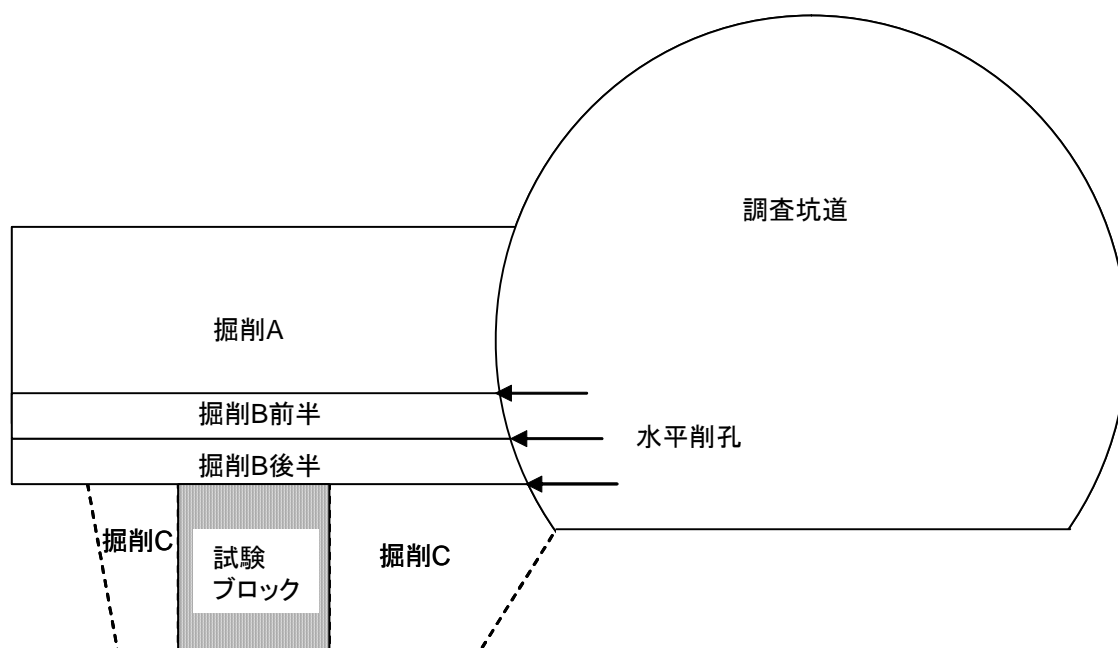


図 2.4-1 試験坑の掘削方法

試験坑の掘削が終了した後、岩盤の状況を調査し最終的な試験位置を決定する。なお、試験ブロックに存在する特定の不連続面の方向や性質によって試験は影響を受け、試験結果のまとめに窮することも考えられることから、試験位置の選定にあたっては、付近の節理等の分布と方向性などを考え合わせて決定することが大切である。

試験ブロックの寸法については特に規定はないが、岩盤三軸圧縮試験の事例によれば角柱の1辺が45～350cmの大きさで実施されている。試験ブロックの寸法決定にあたっては、節理の頻度や規模等の地質的条件を考慮し、原位置岩盤の構造を代表するに足る大きさとすることが大切である。また、切り出す試験ブロックは複数個とし、破壊までの試験を目的とする場合は、試験ブロックの縦横比を2:1程度とする。

決定された試験位置について均したモルタルまたはコンクリートを打設し平坦に仕上げる。そして試験位置の上面からブロックの寸法に沿ってボーリングをオーバーラップさせながら実施し外周部にスリットを形成する。次にスリットで隔てられた周辺岩盤をハイドロブレーカやコールピックを用いて試験ブロックに損傷を与えないように掘削する。

以上の手順によって切り出された試験ブロックの各表面の凹凸部をダイヤモンドグラインダー等で研磨し、所定の寸法に仕上げる。また、試験ブロック表面の節理等の地質学的な観察を記録する。

(3) 試験装置の構成

試験装置はジャッキ等の載荷装置、試験ブロックに取り付ける変位計や歪み計等の計器

類および試験時の荷重, 変位, 歪み等のデータを記録するデータ記録装置から構成される。

荷重装置としては図 2.4-2 に示すように油圧式ピストンジャッキおよびフラットジャッキを使用する。同図では, 側面の荷重にはフラットジャッキを使用しているが, ピストンジャッキを用いるときもある。いずれの場合も荷重板の剛性を高くし, 荷重を分散させることや, 荷重板と試験ブロックの間に不要な摩擦が生じないようにテフロンシートなどで縁切りさせるよう配慮する。

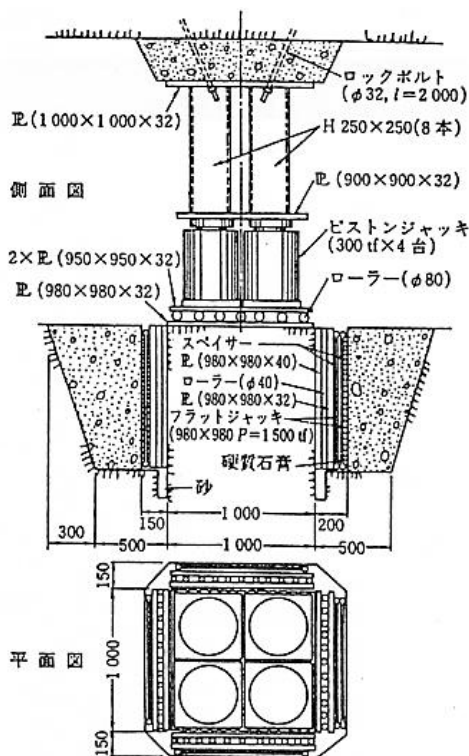


図 2.4-2 岩盤三軸クリープ試験装置の例 (土木学会, 1976)

試験ブロック表面には凹凸が存在することから, 荷重板と試験ブロック表面との隙間はモルタルや硬質石膏によって充填する。また試験ブロック下部の地山との境界部付近では, 荷重時の応力の乱れを避ける目的で同図に示すように, 側面の荷重範囲を境界部からやや上部にとり, 境界部付近に砂や発泡スチロール等を埋め充填する。

荷重を伝達する荷重板や支柱は十分に剛性を有するものとし, 反力部には鉄筋で補強したコンクリートを打設し, 荷重荷重に十分に耐えられる構造としなければならない。同図では側面方向の反力部にはコンクリートを埋め戻す方式を示したが, 鋼製フレーム等を組立て反力体として使用することもある。いずれの場合も荷重装置全体として十分な剛性をもつ構造としなければならない。

使用する計器は歪みゲージ, 一軸歪み計, 変位計などである。歪みゲージは試験ブロック表面に貼付し, 一軸歪み計は試験ブロック内部に埋設し, 変位計は試験ブロックの外側

に取り付ける。荷重の測定にはロードセル、圧力変換器等を使用する。当試験では計測点が比較的多いことから1回あたりのデータ取り込みが短時間で処理できる記録装置が望ましい。また、データを記録するだけでなく、荷重をコントロールするためにも試験中に荷重を監視するモニター装置や荷重と変位の関係などを連続的に記録する装置が必要である。

(4) 試験方法

試験方法は、試験の目的によって異なる。大久保モデルの定数を取得するためには、歪み速度を変化させた圧縮強度試験を行う必要がある。一方、熱などの試験環境条件がクリープ挙動に及ぼす影響を把握するためには、熱などの環境を模擬したクリープ試験を行う。

載荷方式としては等圧載荷とする。載荷パターンは、対象とする構造物について作用する応力状態や応力の変化過程を考慮して決定する。クリープ試験での載荷は、例えば想定強度の50%の応力レベルを第1段階の荷重とし、5~10%ずつ荷重を増加させる多段階載荷方式をとる。各応力レベル間の載荷速度は一義的に決めたいが、本研究での結果をもとにすれば、約 10^{-5} [/sec]の歪み制御で載荷する。載荷手順としては、本載荷を行う前に予備載荷を実施し、載荷装置のなじみや作動状況、および計器の動作チェックを行う。

以下に試験目的別の試験方法を示す。

①歪み速度を変化させた圧縮試験（圧縮試験）

岩盤での大久保モデルの定数を把握するため、歪み速度を変化させた圧縮試験を行う。封圧を所定の値にセットし、軸方向の歪み速度を例えば 10^{-5} [/sec]と 10^{-6} [/sec]で変化させて定歪み速度圧縮を繰り返し、そのときの応力値を計測する。破壊強度後も歪みを継続し、破壊強度後の応力-歪み曲線の勾配を把握する。歪み速度を変化させたときの応力の変化から、大久保モデルの定数 n 、破壊強度後の傾きから大久保モデルの定数 m を算出する。なお、ここで計測した破壊強度は、後に行うクリープ試験の破壊強度の基準値として使用する。すなわち、後に行うクリープ試験の応力レベルごとの荷重値は、歪み速度を変化させた圧縮試験での破壊強度をもとに決定する。

②熱がクリープに与える影響に関するクリープ試験（熱クリープ試験）

廃棄体からの熱によって人工バリアの緩衝材近傍の岩盤が熱を持つことを再現する。この際、測定機器等は設定する予定の温度に対して十分に耐久性があり、温度が測定誤差に及ぼす影響も十分に小さいものを使用する必要がある。熱の再現は、例えば以下の方法が考えられる。

- ・ 試験体周辺の岩盤に孔を穿ち、そこから熱水を注入する。このとき、熱水が試験体に到達するように工夫する必要がある。
- ・ 試験体全体を電熱コイルのようなもので巻き、試験体に熱を供給する。この方法はコイルを巻く方法について検討する必要がある。例えば、試験体周辺に溝を掘る方

法が考えられる。

③ 乾燥状態がクリープに与える影響に関するクリープ試験（乾燥クリープ試験）

乾燥状態は自然乾燥状態を保つことで再現する。試験体周辺の岩盤のサンプリングにより含水比を測定し、試験体の含水比を推定する。含水比がある値まで小さくなり、収束していると考えられる値でクリープ試験を行う。

④ 再冠水がクリープに与える影響に関するクリープ試験（再冠水クリープ試験）

自然乾燥させた試験体を再冠水させる。再冠水の方法は、例えば、熱クリープ試験のときと同様に試験体周辺に孔を穿ち、水を試験体に供給する方法がある。

(5) 試験数

原位置試験の目的は、大久保モデルの検証と環境条件が岩盤の長期力学的挙動に及ぼす影響を把握することである。

・圧縮試験

岩盤の亀裂の頻度や性状にもよるが、一般に岩盤試験の結果は大きくばらつくことが予想される。そのため、少なくとも3ケースの圧縮試験を行う。その結果をもとに破壊強度、コンプライアンス、大久保モデルの定数 n 、 m を取得する。

・熱クリープ試験、乾燥クリープ試験、再冠水クリープ試験

多段階載荷式岩盤三軸クリープ試験を行う。各クリープ試験の試験数は、圧縮試験と同様に3ケース程度は必要と考えられる。

2. 5 ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす影響検討のまとめ

ここでは、本章で得られた知見および提案事項等をまとめて列挙する。

① 大久保モデルの検証

一軸圧縮試験結果をもとに大久保モデルによりクリープ寿命を予測することで大久保モデルの適用性に関して検証した。その結果、特性の揃った試験体であれば、1 オーダー以内で寿命が予測できることを確認した。しかし、幌延地域のコアの物性値のバラツキは大きく、予測値と実測値が大きく異なるケースも多数あった。

② 熱が大久保モデルの定数に及ぼす影響

同一深度の試験体を使用して 20°C と 80°C の試験条件で一軸圧縮試験を行い、熱が大久保モデルの定数に与える影響について検討した。その結果、今回使用した試験体では、大久保モデルの定数は熱によってほとんど変化していないことが明らかとなった。

③ 熱がクリープに及ぼす影響

歪み速度の変化に着目して、熱がクリープに及ぼす影響に関する検討を行った。その結果、今回使用したコアでは熱がクリープに及ぼす影響は確認できなかった。また、粘土鉱物を多く含むと考えられる試験体でも同様の試験を行ったが、熱がクリープに及ぼす影響は確認できなかった。

④ 文献調査

文献調査により、熱や水分がクリープに及ぼす影響に関する知見を得た。

⑤ 原位置試験の提案

原位置試験として、岩盤三軸クリープ試験に関する提案を行った。

3. 幌延を条件とした岩盤の長期力学挙動評価

3. 1 検討概要

本章では幌延における諸条件を例にとり、試験孔（処分孔）の長期力学挙動について解析的な検討を行った。試験孔は処分孔縦置き方式（サイクル機構，1999；以降「第2次取りまとめ」と称す）を想定した。

試験孔周辺岩盤の応力状態は、試験孔掘削前に試験坑道の掘削影響をある程度受けていることが想定される。また水平面内の初期応力に異方性があれば、研究坑道軸の配置方向により、試験孔周辺岩盤の応力状態は異なると想定される。

そこで長期力学挙動の検討に先立ち、試験孔掘削時の周辺岩盤の応力状態および変形状態について解析的に検討した。研究坑道および試験孔の施工条件は「第2次取りまとめ」に同様とした。検討においては隣接する試験孔の掘削影響についても考慮した。深度や研究坑道軸の配置方向の違いによる安定性の高低の検討にあたっては、塑性化領域の発生傾向（応力状態）に主に着目した。「第2次取りまとめ」においては岩盤に発生する最大せん断ひずみを後に示す限界せん断ひずみ（中央値）と比較することにより、変形状態の観点からも安定性検討が行われているが、本研究では変形の大小を把握するための参考としてこれらを示すにとどめた。

試験孔の長期力学挙動の検討では、人工バリア定置後に周辺岩盤が時間依存性挙動を示すものとし、岩盤の構成方程式としてコンプライアンス可変型構成方程式（大久保ら，1987）を採用した。検討においては試験孔の長期力学挙動に影響を及ぼすであろう緩衝材の剛性や人工バリアの設置時期についても考慮した。また岩種の違いによる試験孔の長期力学挙動の違いについて検討する目的で、瑞浪で想定される条件でも解析を行った。

また全体を通して、「第2次取りまとめ」における軟岩系 SR-C 岩盤を想定した場合との比較を適宜行った。

3. 2 掘削解析

3. 2. 1 解析条件

(1) 岩盤物性

表3.2-1に示す岩盤物性を想定した。岩盤物性はそれぞれ幌延の深度450mの地点（サイクル機構，2005）、幌延の深度570mの地点（サイクル機構，2004）、「第2次取りまとめ」（軟岩系岩盤の代表値SR-C）における想定値である。ここで一軸圧縮強度 q_u [MPa] は式(3.2-1)を用いて粘着力 c [MPa] および内部摩擦角 ϕ [rad] から換算される値である。

$$q_u = \frac{2 \cdot C \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.2-1)$$

表 3.2-1 岩盤物性

想定条件	幌延 深度 450m	幌延 深度 570m	SR-C 深度 500m
ヤング率 E [MPa]	2,500	2,520	3,500
ポアソン比 ν [-]	0.186	0.240	0.300
粘着力 C [MPa]	5.2	3.7	3.0
内部摩擦角 ϕ [°]	25.0	27.5	28.0
一軸圧縮強度 q_u [MPa]	16.3	12.2	10.0
引張強度 σ_t [MPa]	1.63	1.22	2.10
単位体積重量 γ [kN/m ³]	18.5	19.3	22.0

(2) 初期応力

表 3.2-2 に示す初期応力を想定した (サイクル機構, 2005 ; サイクル機構, 2004)。ここで応力比 K とは鉛直方向応力に対する水平方向応力の比であり, EW は東西方向を, SN は南北方向を表す。また地山強度比 G_n は, それぞれの想定条件において一軸圧縮強度 (表 3.2-1) を鉛直方向応力で除した値である。

表 3.2-2 初期応力

想定条件	幌延 深度 450m	幌延 深度 570m	SR-C 深度 500m
鉛直方向応力 σ_v [MPa]	7.21	9.15	11.00
EW 方向応力比 K_{EW} [-]	1.30	1.20	1.07
SN 方向応力比 K_{SN} [-]	0.90	0.80	
地山強度比 G_n [-]	2.26	1.33	0.91

(3) 解析ケース

幌延の条件においては表 3.2-2 に示したように水平面内の初期応力に異方性があることが想定されている。研究坑道軸の配置方向により研究坑道および試験孔掘削後の応力状態が異なることが想定されるため、解析ケースを表 3.2-3 のように設定し、その影響について検討することとする。ここで EW と示されるケースは研究坑道の軸方向を東西方向（最大主応力方向）とした場合、SN は南北方向（最小主応力方向）とした場合である。

表 3.2-3 解析ケース

ケース名	HORO450_EW	HORO450_SN	HORO570_EW	HORO570_SN	SR-C
想定条件	幌延 深度 450m		幌延 深度 570m		SR-C 深度 500m
研究坑道 軸方向	EW 方向	SN 方向	EW 方向	SN 方向	—

(4) 解析モデル

図 3.2-1 に示す解析モデルを用いた。研究坑道の形状は「第2次取りまとめ」と同様に内径 5.0m の三心円断面を想定した。試験孔の形状も「第2次取りまとめ」と同様に内径 2.2m の円形断面を想定した。モデル境界は研究坑道掘削径 (D=6.0m) に対し 4D 程度とした。研究坑道軸方向のモデル境界は 5D 程度とした。モデル側面および下面はそれぞれの面に対し垂直方向の変位を拘束した。モデル上面には深度相当の上載荷重を作用させ、図 3.2-2 に示す初期応力状態を表現した。

研究坑道は一掘進長 1.0m で全断面掘削され、掘削に 1.0m 遅れて表 3.2-4 に示す支保工（シェル要素でモデル化した）が設置されることとした。なお“HORO450_EW”および“HORO450_SN”の支保工条件は別途実施した2次元 FEM 解析より設定した。この結果については付録-2 に示す。

試験孔は研究坑道の掘削終了後に該当部分のインバートを撤去した後、一掘進長 1.0m で全断面掘削され、支保工は設置されないこととした。試験孔が1本のみ掘削されるケースおよび3本掘削されるケースを考慮し、隣接する試験孔の掘削影響について検討した。3本掘削されるケースでは試験孔の中心間距離を「第2次取りまとめ」と同様に 6.6m とし、図 3.2-1 (b) に示す①②③の順で掘削されることとした。1本のみ掘削されるケースとの比較においては②の試験孔に着目した。

岩盤は Mohr-Coulomb の破壊規準に従う完全弾塑性体（体積変化なし）とし、表 3.2-1 に示す岩盤物性がモデル全体に分布しているものとした。解析には有限差分コードである FLAC3D (Itasca, 2002) を用いた。

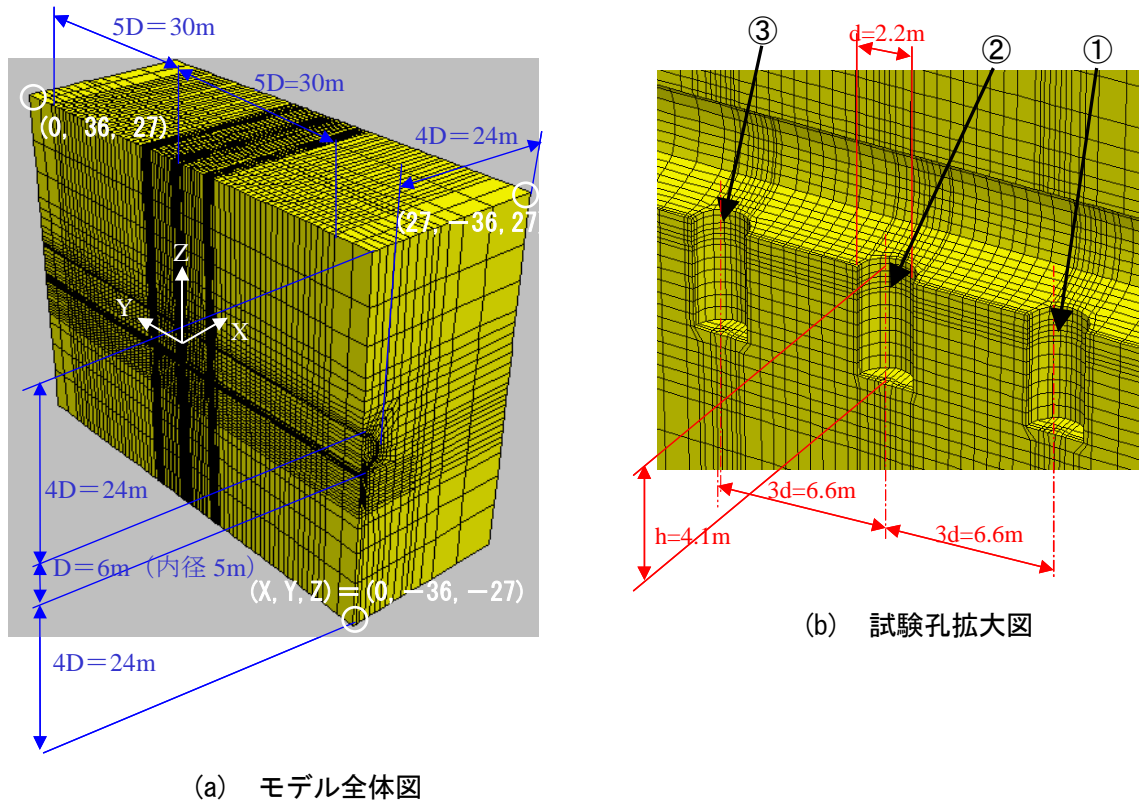


図 3.2-1 解析モデル

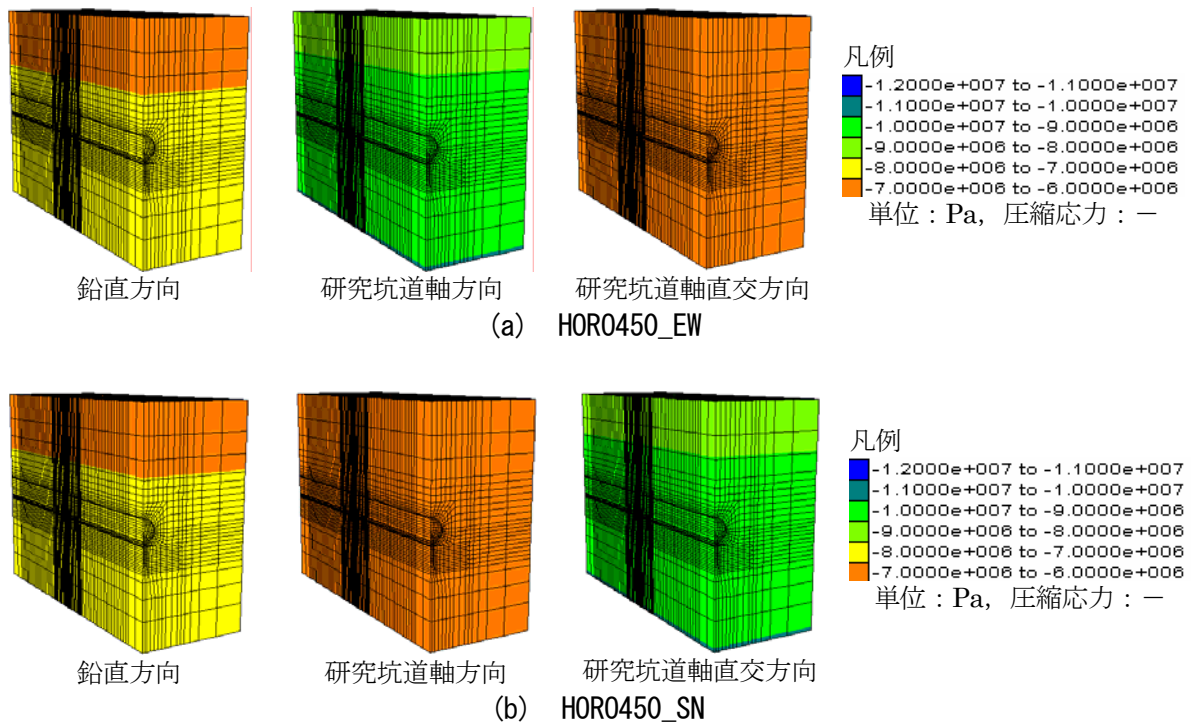


図 3.2-2 初期応力 ; 次頁へ続く

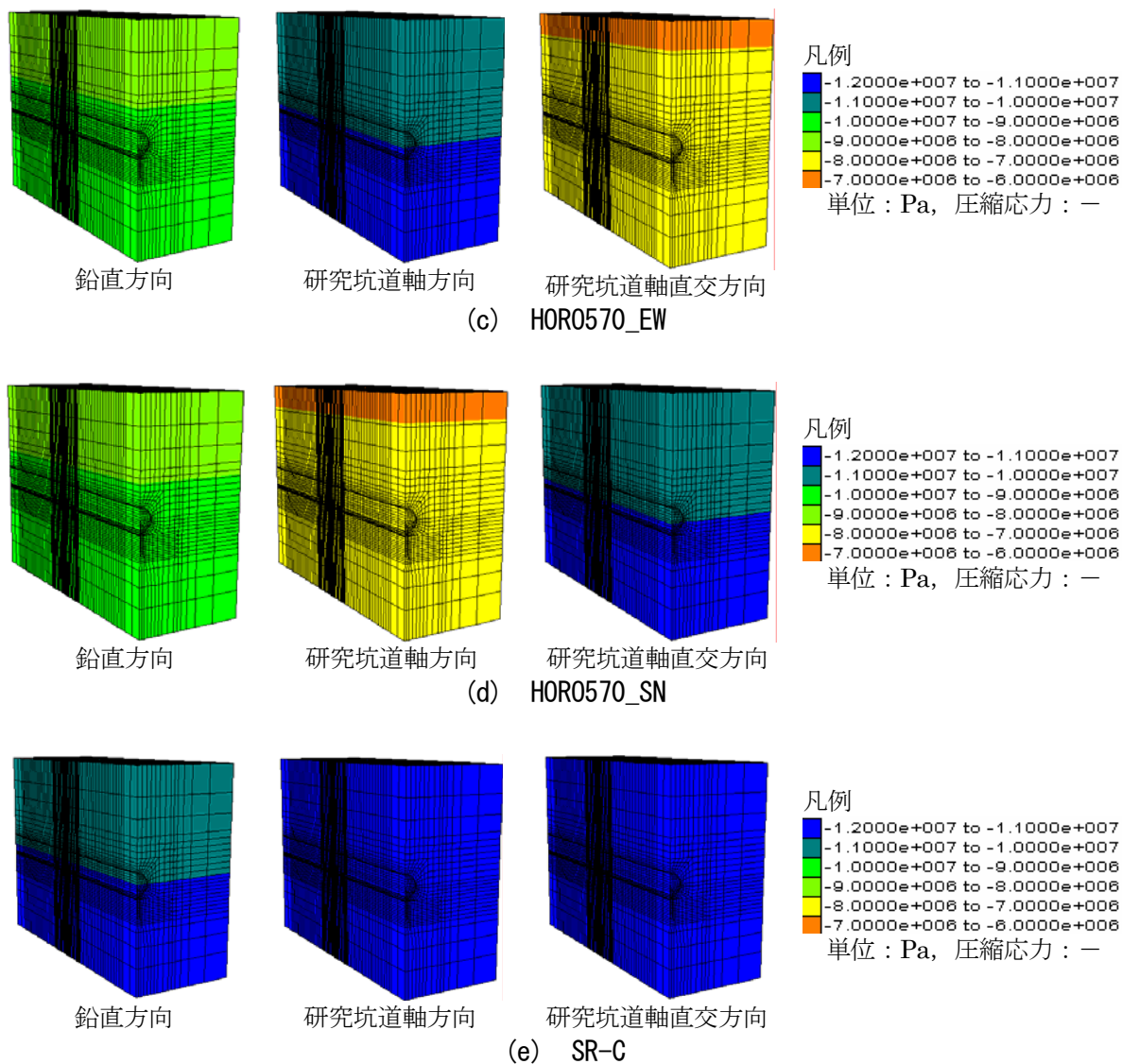


図 3.2-2 初期応力 ; 前頁からの続き

表 3.2-4 研究坑道の支保工

ケース名	HORO450_EW	HORO450_SN	HORO570_EW	HORO570_SN	SR-C
吹付け コンクリート	$t_c=0.2\text{m}$ $E_c=3,400\text{MPa}$		$t_c=0.5\text{m}$ $E_c=4,000\text{MPa}$		
鋼製 支保工	設置しない		設置しない		

t_c : 吹付け厚, E_c : 吹付けコンクリートヤング率

3. 2. 2 解析結果（研究坑道掘削時）

掘削解析で得られた結果を以降に示す。結果は特に断らない限り、**図 3.2-3** に示す $y=0\sim 3.3\text{m}$ の範囲（試験孔②の中心位置（ $y=0\text{m}$ ）から試験孔③との中間位置（ $y=3.3\text{m}$ ）までの範囲）における研究坑道掘削完了時の結果のみ表示している。

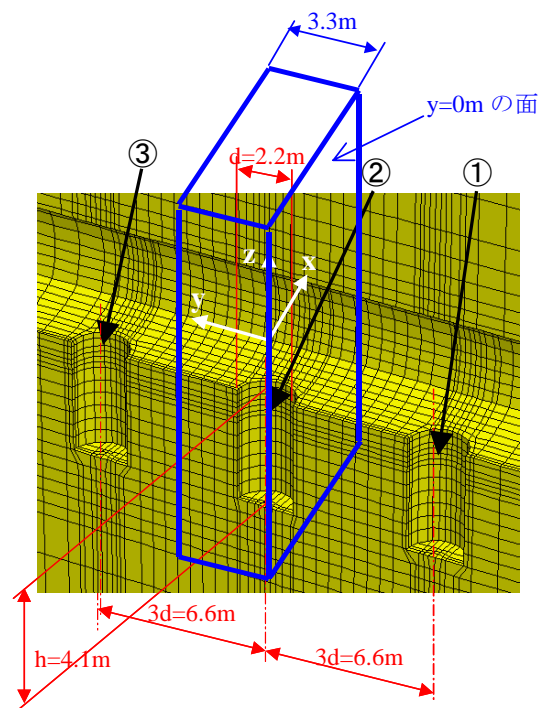


図 3.2-3 結果の表示範囲

（1）塑性化領域の分布

Mohr-Coulomb の破壊規準により塑性化すると判定された領域（赤で着色）の分布を**図 3.2-4** に示す。

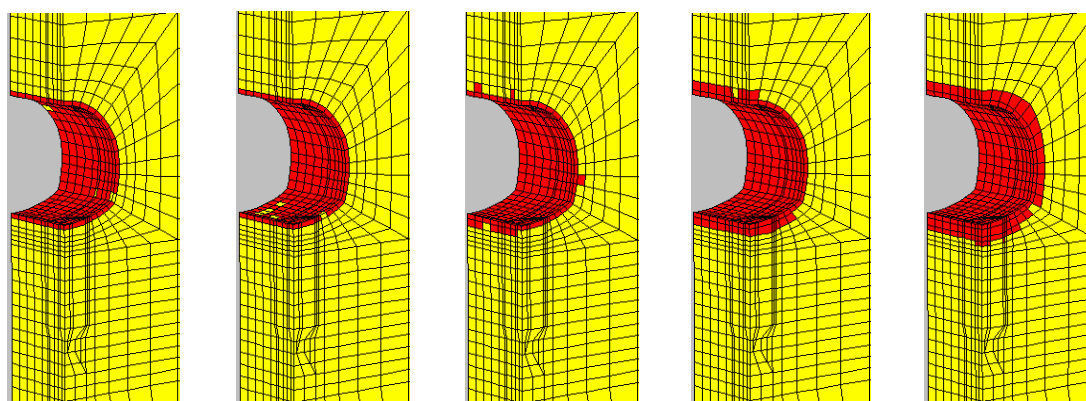
（2）最大せん断ひずみの分布

最大せん断ひずみの分布を**図 3.2-5** に示す。地山の安定性の目安を得る上でしばしば用いられる限界せん断ひずみ（櫻井ら，1994）は式(3.2-2)で求まる。**表 3.2-1** に示した岩盤物性から求まる限界せん断ひずみを**表 3.2-5** に示す。

$$\gamma_c = (1 + \nu)\varepsilon_c \quad (3.2-2)$$

ここに

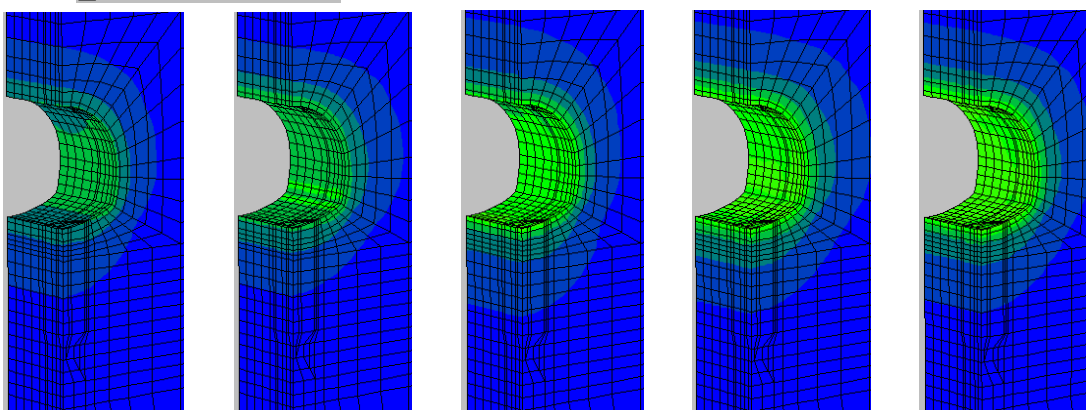
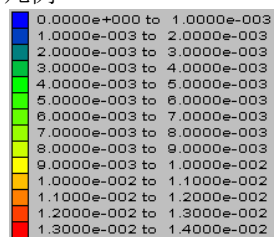
- γ_c : 限界せん断ひずみ [-]
 ν : ポアソン比 [-]
 ε_c : 限界ひずみ [-]



(a) HOR0450_EW (b) HOR0450_SN (c) HOR0570_EW (d) HOR0570_SN (e) SR-C

図 3.2-4 塑性化領域の分布（研究坑道掘削完了時）

凡例



(a) HOR0450_EW (b) HOR0450_SN (c) HOR0570_EW (d) HOR0570_SN (e) SR-C

図 3.2-5 最大せん断ひずみの分布（研究坑道掘削完了時）

表 3.2-5 限界せん断ひずみ

想定条件		幌延 深度 450m	幌延 深度 570m	SR-C 深度 500m
ヤング率 E [MPa]		2,500	2,520	3,500
ポアソン比 ν [-]		0.186	0.240	0.300
限界ひずみ ε_c [-]	中央値 ¹⁾	4.8×10^{-3}	4.8×10^{-3}	4.4×10^{-3}
	上限値 ²⁾	1.1×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.0×10^{-2}
限界せん断ひずみ γ_c [-]	中央値	5.7×10^{-3}	5.9×10^{-3}	5.7×10^{-3}
	上限値	1.3×10^{-2}	1.4×10^{-2}	1.3×10^{-2}

$$1) \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22$$

$$2) \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85$$

3. 2. 3 解析結果（試験孔が1本のみ掘削される場合）

試験孔が1本のみ（図 3.2-1 (b) に示す②の試験孔）掘削されるとした場合に得られた結果を以降に示す。結果は特に断らない限り、図 3.2-3 に示す $y=0 \sim 3.3\text{m}$ の範囲（試験孔②の中心位置（ $y=0\text{m}$ ）から試験孔③との中間位置（ $y=3.3\text{m}$ ）までの範囲）における試験孔②の掘削完了時の結果のみ表示している。

（1）塑性化領域の分布

Mohr-Coulomb の破壊規準により塑性化すると判定された領域（赤で着色）の分布を図 3.2-6 に示す。

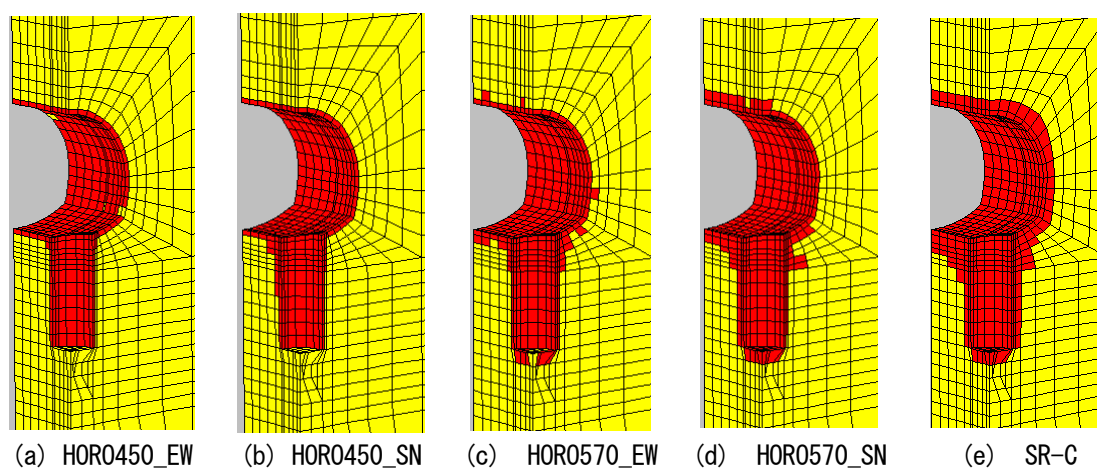


図 3.2-6 塑性化領域の分布（試験孔が1本のみ掘削される場合）

(2) 最大せん断ひずみの分布

最大せん断ひずみの分布を図 3.2-7 に示す。

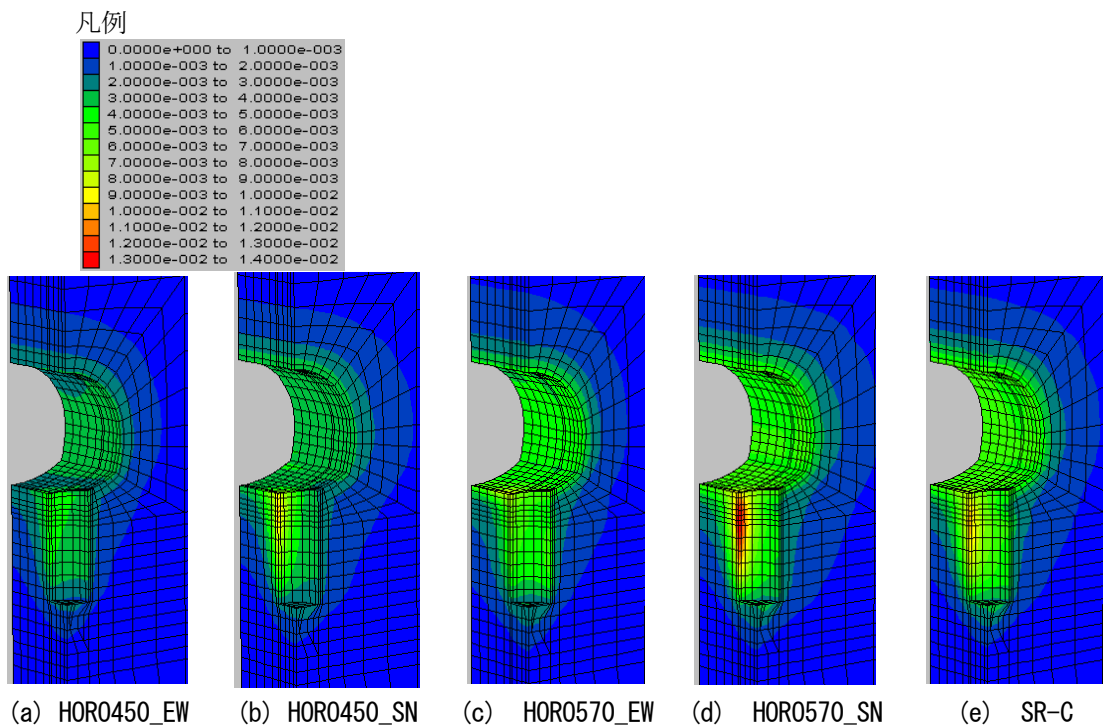


図 3.2-7 最大せん断ひずみの分布 (試験孔が1本のみ掘削される場合)

(3) 試験孔の変位

試験孔② (測線を図 3.2-8 に示す) の掘削に伴う壁面変位を図 3.2-9 に示す。変位は試験孔内空方向への変位を正として示した。また変位の大小の目安を得ることを目的に、便宜的に限界ひずみ (表 3.2-5) より許容変位を式(3.2-3)により求め、図中に青色の破線 (左に位置する破線は限界ひずみの中央値から求まる許容変位, 右に位置する破線は上限値から求まる許容変位) で示した。図は左から右に処分孔の掘削が進行していることになる。

$$u_c = \varepsilon_c r \tag{3.2-3}$$

ここに

- u_c : 許容変位 [m]
- ε_c : 限界ひずみ [-]
- r : 試験孔掘削半径 (=1.1m)

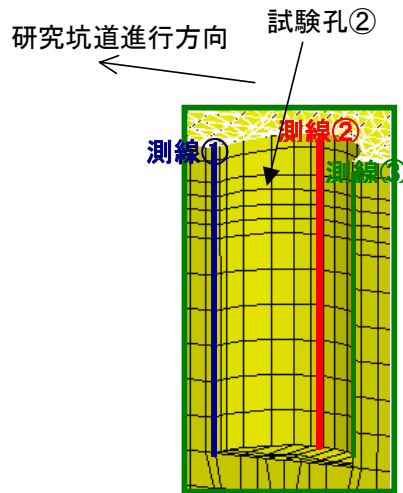


図 3.2-8 試験孔壁面変位の測線

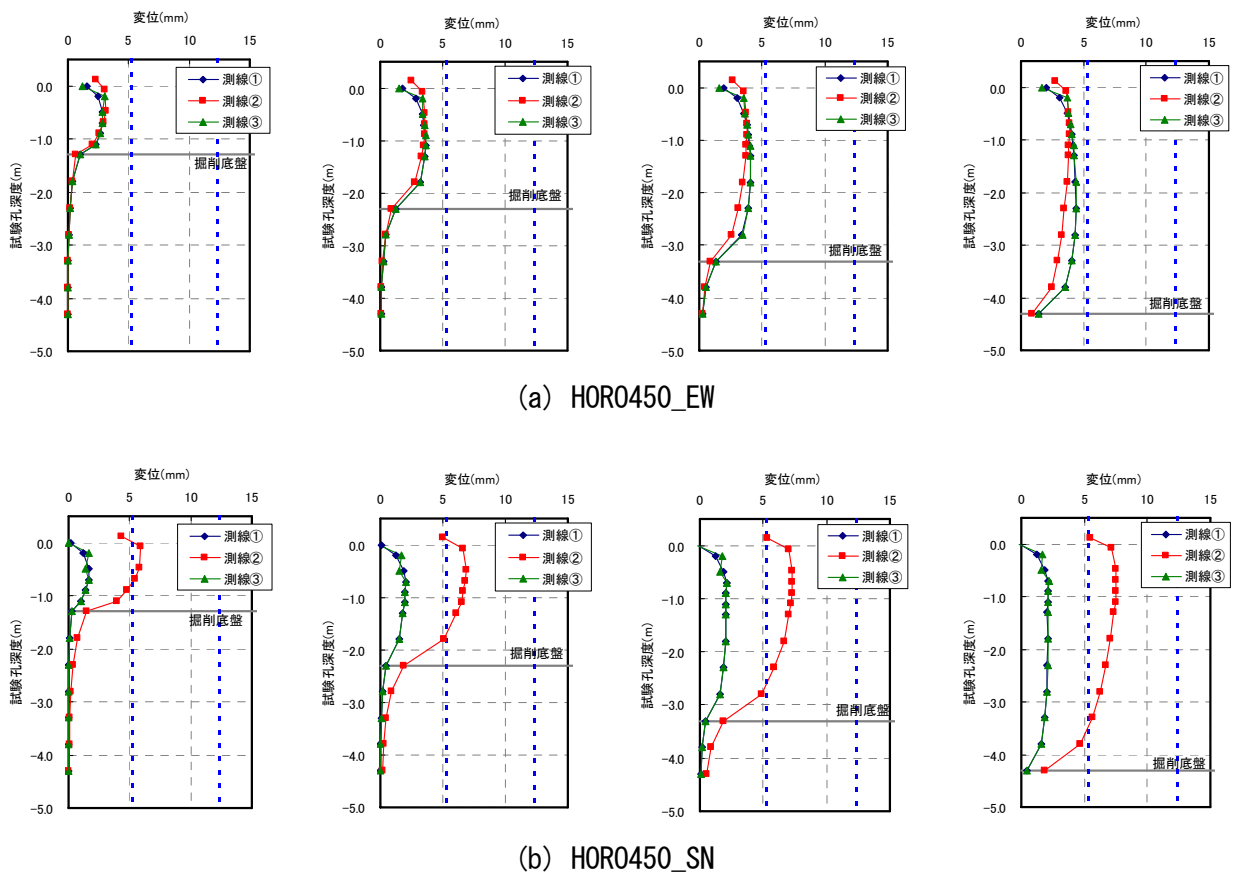
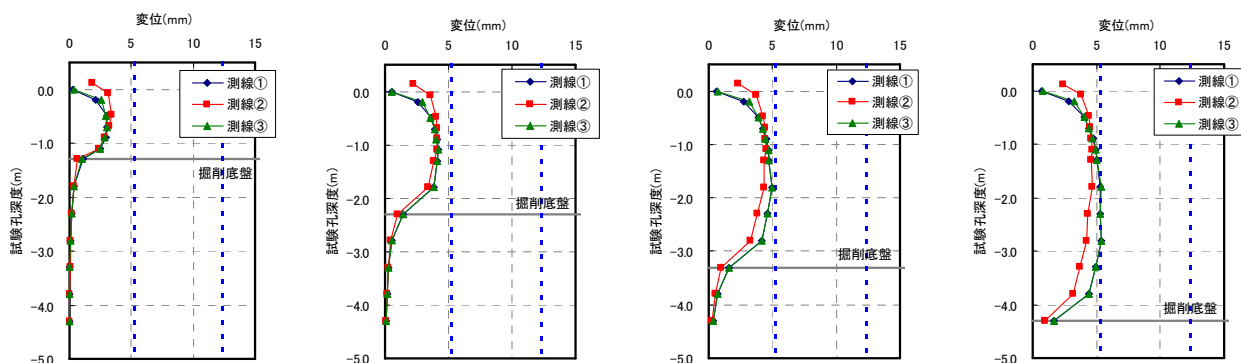
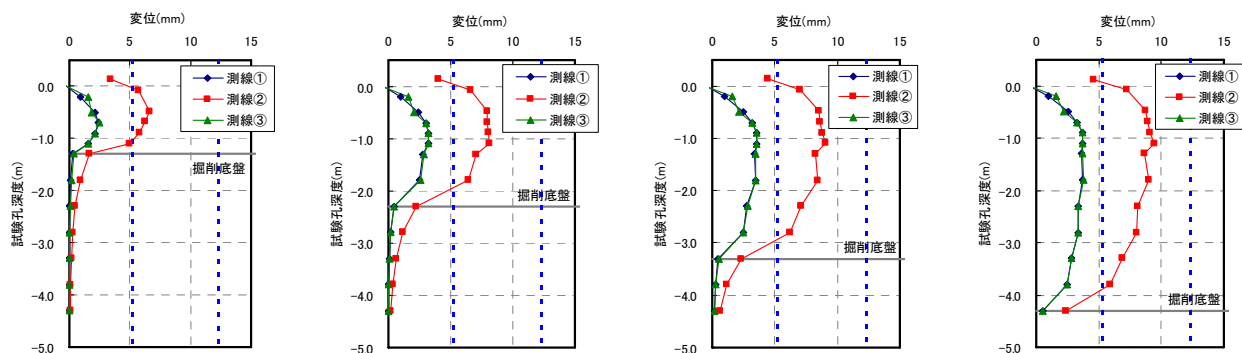


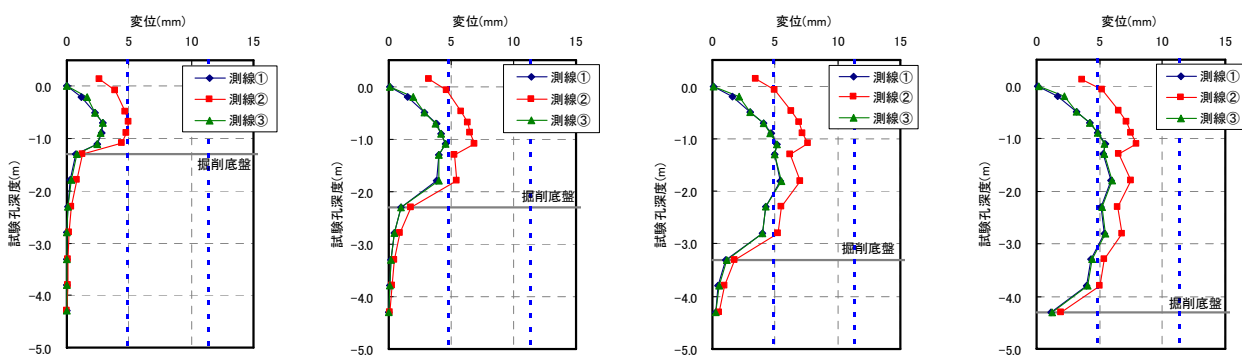
図 3.2-9 試験孔壁面の変位（試験孔が1本のみ掘削される場合）；次頁へ続く



(c) HOR0570_EW



(d) HOR0570_SN



(e) SR-C

図 3.2-9 試験孔壁面の変位 (試験孔が1本のみ掘削される場合) ; 前頁からの続き

3. 2. 4 解析結果（試験孔が3本掘削される場合）

図3.2-1 (b)に示す①②③の順で試験孔が3本掘削されるとした場合に得られた結果を以降に示す。結果は特に断らない限り、図3.2-3に示す $y=0\sim 3.3\text{m}$ の範囲（試験孔②の中心位置（ $y=0\text{m}$ ）から試験孔③との中間位置（ $y=3.3\text{m}$ ）までの範囲）における試験孔③の掘削完了時の結果のみ表示している。

（1）塑性化領域の分布

Mohr-Coulomb の破壊規準により塑性化すると判定された領域（赤で着色）の分布を図3.2-10に示す。

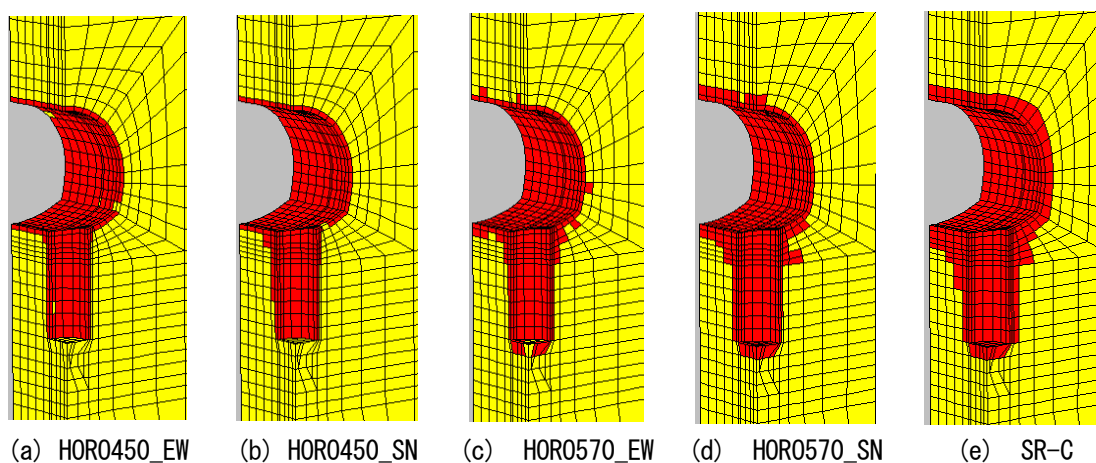


図3.2-10 塑性化領域の分布（試験孔が3本掘削される場合）

（2）最大せん断ひずみの分布

最大せん断ひずみの分布を図3.2-11に示す。

（3）試験孔の変位

試験孔①の掘削完了時の壁面変位を図3.2-12に、試験孔②の掘削に伴う壁面変位を図3.2-9と同様に図3.2-13に、試験孔③の掘削完了時の壁面変位を図3.2-14に示す。なおこれらは全て試験孔②（測線は図3.2-8）の壁面変位である。

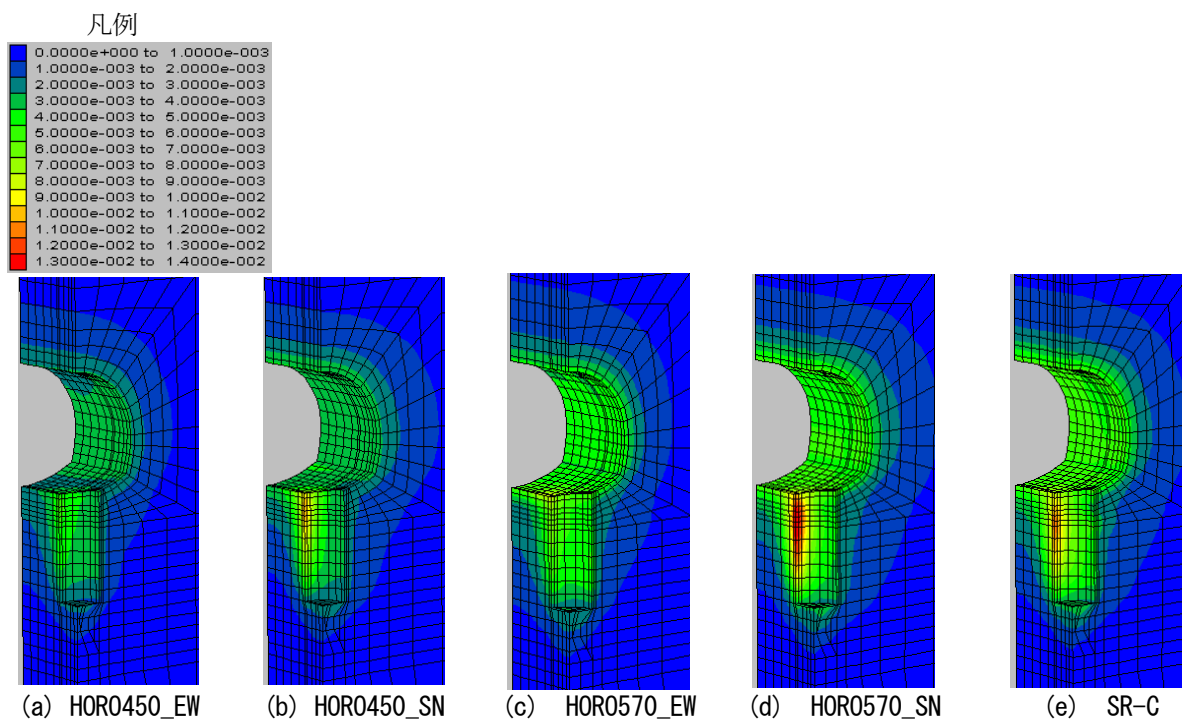


図 3.2-11 最大せん断ひずみの分布 (試験孔が3本掘削される場合)

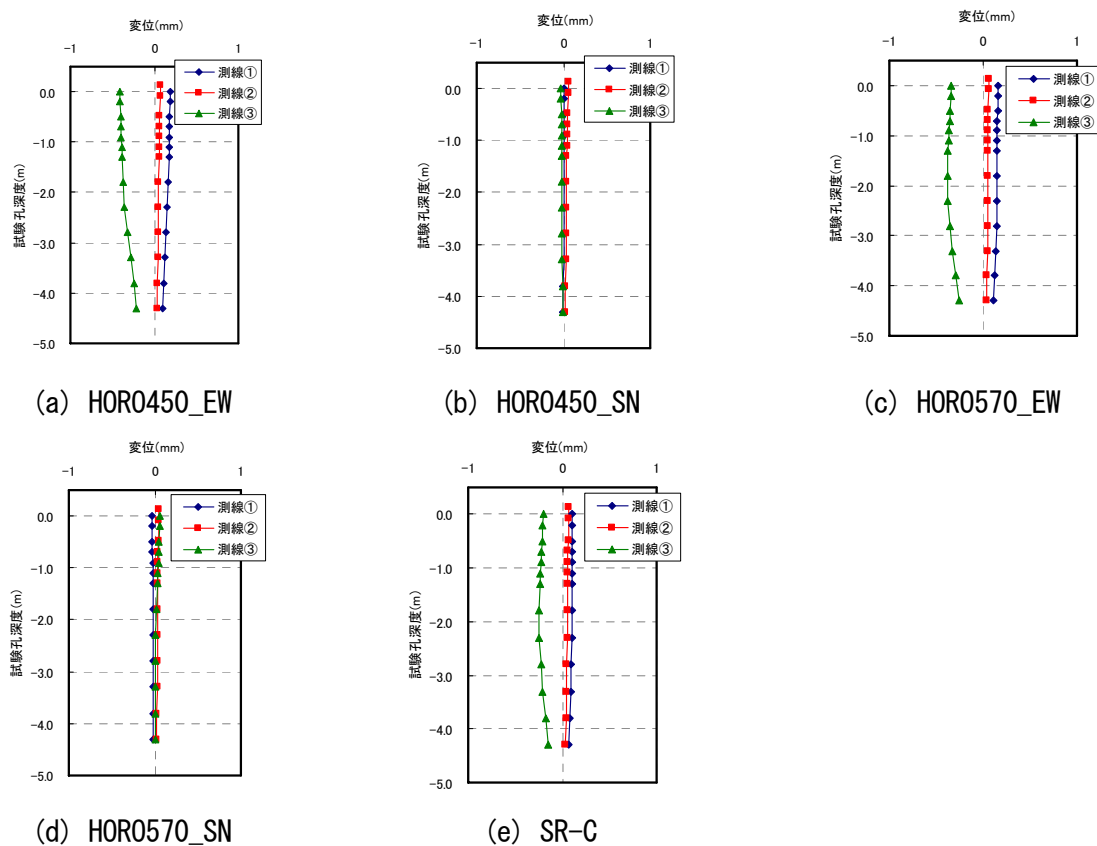
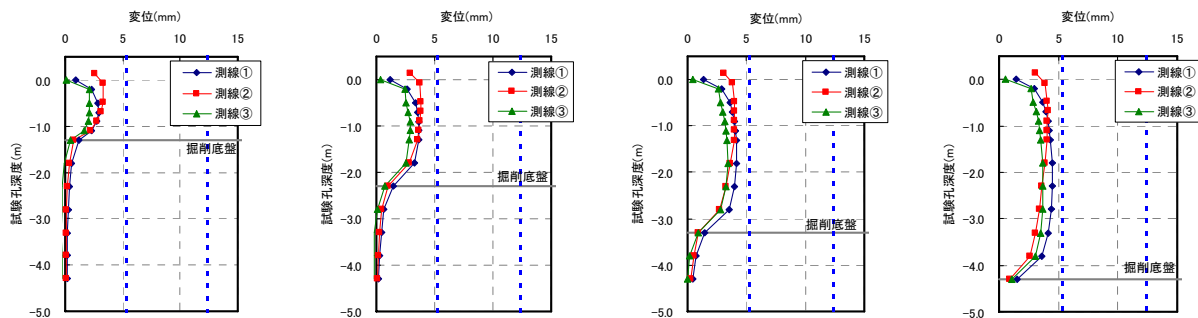
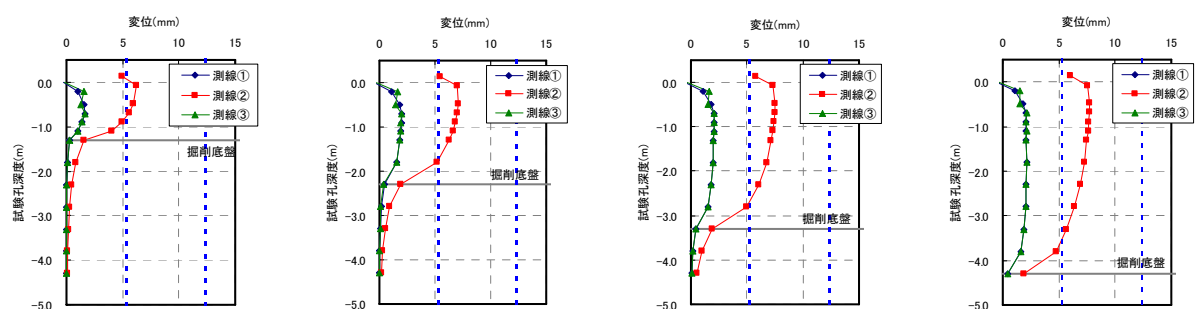


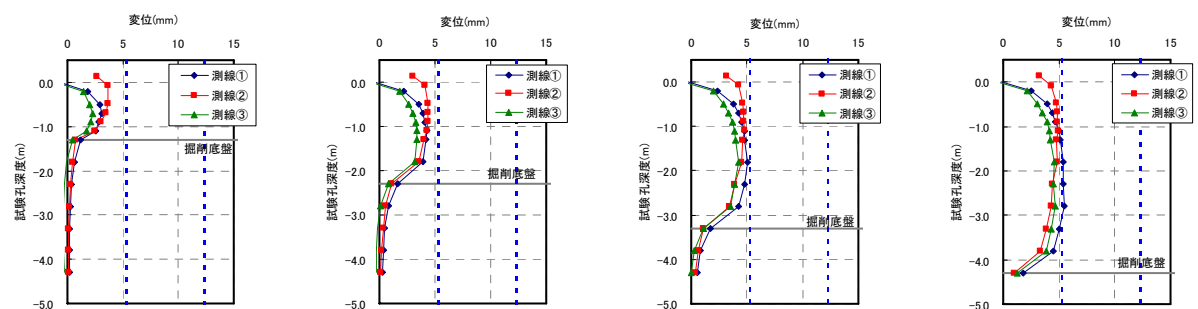
図 3.2-12 試験孔壁面の変位 (試験孔①掘削完了時)



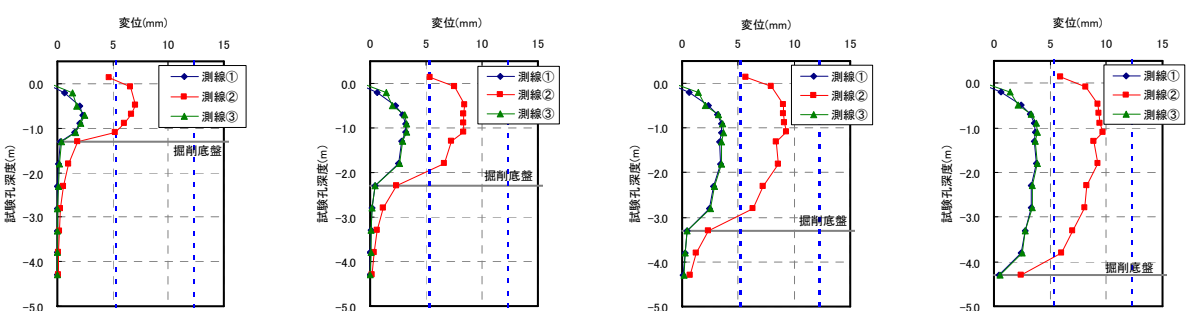
(a) H0R0450_EW



(b) H0R0450_SN

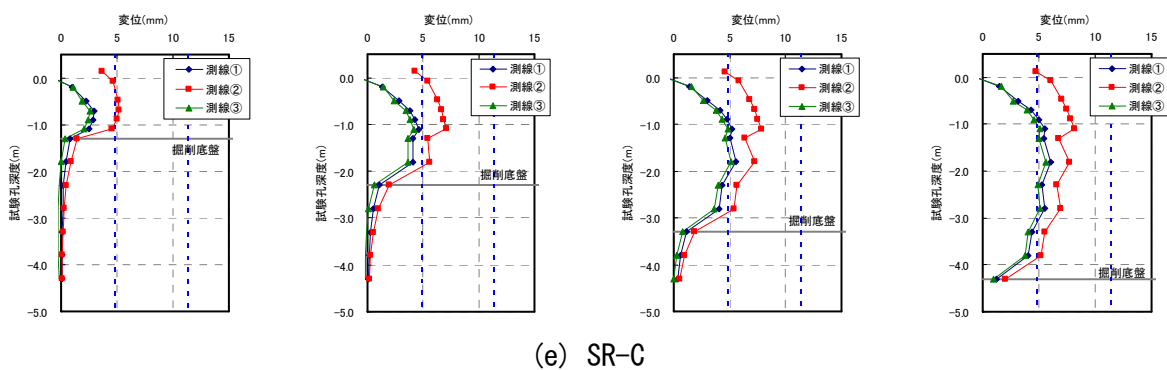


(c) H0R0570_EW

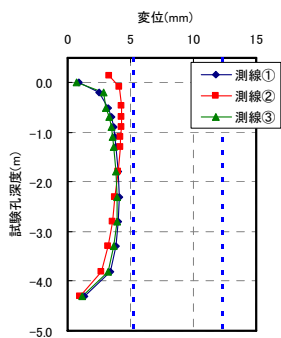


(d) H0R0570_SN

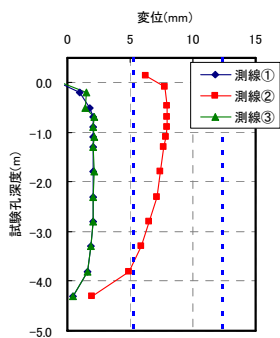
図 3.2-13 試験孔壁面の変位 (試験孔②掘削時) ; 次頁へ続く



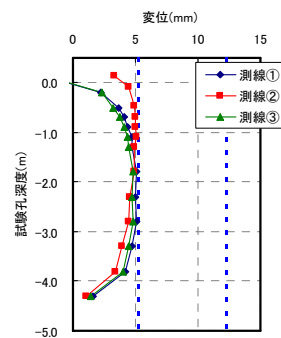
(e) SR-C
 図 3.2-13 試験孔壁面の変位 (試験孔②掘削時) ; 前頁からの続き



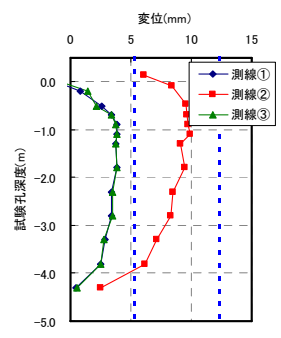
(a) H0R0450_EW



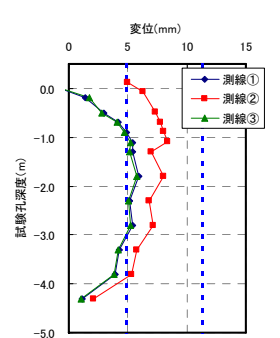
(b) H0R0450_SN



(c) H0R0570_EW



(d) H0R0570_SN



(e) SR-C

図 3.2-14 試験孔壁面の変位 (試験孔③掘削完了時)

3. 2. 5 解析結果のまとめ

これまで述べてきた結果のうち、主に試験孔掘削時の結果について考察する。

地山強度比（表 3.2-2）はトンネルの安定性について目安を得るうえでしばしば用いられる値であり、その値が小さいほど安定性が低下する傾向にある。新第三紀の泥岩・凝灰岩、破碎帯の断層粘土、蛇紋岩などにトンネルを掘削した場合、トンネル断面を大幅に縮小させるような変形が生じ、支保工を破壊する程の土圧を伴って地山が押出してくることがある。このような地山は大変形地山（ないしは押し出し性地山、膨張性地山）と呼ばれているが、大変形が生じた例は地山強度比が 2.0 より小さな場合が多いことが指摘されている（仲野，1975）。また地山強度比が小さいほど変形速度が大きいことが指摘されている（アイダンら，1992）。国外においても同様の傾向が報告されている（ジェオフロンテ研究会，2001）。

これらを鑑み、ここでは地山強度比に着目し結果について考察することとする。それぞれの条件において想定される地山強度比は表 3.2-2 に示したとおりである。これら地山強度比は換算一軸圧縮強度を鉛直方向応力で除した値であることに注意を要する。

図 3.2-6 より地山強度比が小さいほど、塑性化領域が大きくなる傾向にあることが分かる。また図 3.2-7 より地山強度比が小さいほど周辺岩盤の変形が大きな傾向にあることが分かる。試験孔壁面の変位（図 3.2-9）についても同様である。これらから今回の想定条件において掘削時の安定性が最も高いのは幌延の深度 450m の条件であると考えられる。

次に研究坑道軸の配置方向による結果の差であるが、図 3.2-6 より研究坑道軸を最大主応力方向である東西方向（HOR0###_EW と表記されたケース）に配置した場合に比較し、南北方向（HOR0###_SN と表記されたケース）に配置した場合は、試験孔の上部壁面付近に発生する塑性化領域が大きくなる傾向にあることが分かる。また図 3.2-7 より研究坑道軸を東西方向に配置した場合に比較し、南北方向に配置した場合は周辺岩盤の変形が大きな傾向にあることが分かる。HOR0570_SN においては試験孔の上部壁面付近の最大せん断ひずみが限界せん断ひずみの上限値（表 3.2-5）に達する程の変形が生じている。試験孔壁面の変位（図 3.2-9）に着目すると、研究坑道軸を東西方向に配置した場合は測線①～③の変形量がほぼ同様であるのに対し、南北方向に配置した場合は測線②の変形量が卓越していることが分かる。坑道の安定性の観点からは、最大主応力方向に坑道軸方向を一致させた方が変形が小さく有利であるとの報告がある（棚井ら，1999）。今回想定した条件においては、試験孔の安定性の観点からも最大主応力方向（東西方向）に坑道軸方向を一致させた方が安定性が高いと考えられる。

次に隣接する試験孔の掘削影響についてであるが、図 3.2-6 および図 3.2-10 の比較により塑性化領域の分布に顕著な差がないこと、図 3.2-7 および図 3.2-11 の比較によ

り最大せん断ひずみの分布に顕著な差がないこと、図 3.2-9 および図 3.2-14 の比較により試験孔の壁面変位に顕著な差がないことが分かる。また図 3.2-12 から図 3.2-14 より隣接する試験孔の掘削影響はほとんど及んでいないことが分かる。これらから今回想定した条件においては、「第 2 次取りまとめ」と同様に試験孔の中心間距離を 6.6m (3d ; d=2.2m) 程度確保すれば、隣接する試験孔の掘削影響はほとんど及ばないと考えられる。「第 2 次取りまとめ」では隣接する試験孔間に局所安全率 (Mohr-Coulomb の破壊規準に従う) が 1.5 を上回る領域が存在することを中心間距離の設定要件としている。今回想定した条件においても同様の領域が存在し、安定性が確保されていることが図 3.2-15 から分かる。

以上のことから次節においては幌延の条件における研究坑道の軸方向を、力学的により安定と思われる東西方向として試験孔の長期力学挙動について検討する。また隣接する試験孔の掘削影響は顕著でないと思われることから、試験孔を単一のものとして検討することとする。

土井ら (土井ら, 2005) は東濃鉱山北延 NATM 坑道において水平孔を掘削し、肌落ちや山はねに似た孔壁が崩壊する現象が観察されたことを報告している。また人工軟岩を用いた掘削実験 (地山強度比が 1.0 の条件) では、孔壁がうろこ状に破壊したことが報告されている (井上・南, 2002)。掘削時および人工バリア定置までの力学的安定性や形状の確保の観点から、試験孔への支保工の設置についても今後検討する必要があると考えられるが、本研究では「第 2 次取りまとめ」と同様に試験孔には支保工が設置されないこととして検討することとする。

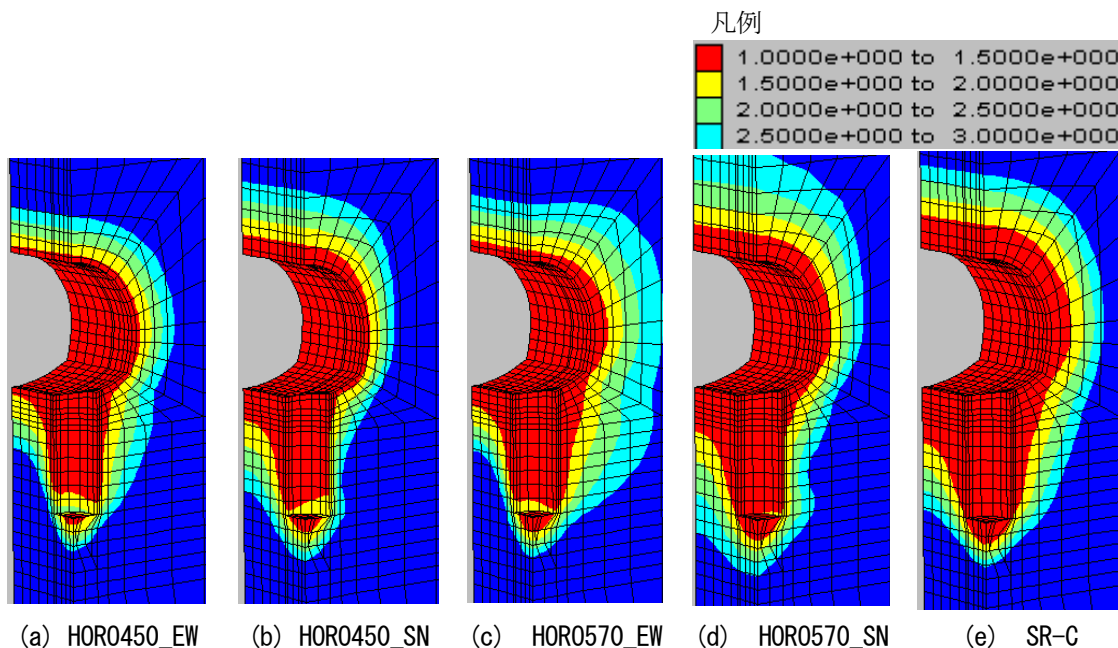


図 3.2-15 局所安全率の分布 (試験孔が 3 本掘削される場合)

3. 3 試験孔の長期解析

前節の結果をふまえ試験孔の長期力学挙動について解析的に検討する。解析において対象とする期間は便宜的に人工バリア定置以降 10,000 年とし、岩盤の構成方程式には 2 章と同様にコンプライアンス可変型構成方程式（大久保ら，1987）を用いることとする。

3. 3. 1 解析条件

(1) 岩盤の構成方程式

大久保らにより提案された粘弾性構成方程式であるコンプライアンス可変型構成方程式を用いる。本構成方程式は岩盤の非線形挙動や破壊挙動の表現に優れ、ヤング率やポアソン比といった岩盤構造物を対象とした解析で一般に用いられるパラメータに時間依存性を表すパラメータ n ，破壊の進行性を表すパラメータ m を加えることにより，一般に時間依存性と称される挙動（载荷速度依存性，クリープ，応力緩和）を表現できる。

三次元応力下における基礎方程式は式(3.3-1)のように表すことができる。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\sigma^*)^n \cdot (\lambda^*)^m \quad (3.3-1)$$

$$a = \frac{\{m/(n+1)\}^{m/(n-m+1)}}{t_0} \quad (3.3-2)$$

$$\sigma^* = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}} \quad (3.3-3)$$

$$n = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}}{\sigma_c} n_0 \quad (3.3-4)$$

ここに

- λ^* : ひずみ ε と応力 σ の比であるコンプライアンス λ ($= \varepsilon / \sigma$) を初期値 λ_0 (初期ヤング率 E_0 の逆数) で基準化した値 ($= E_0 / E$) [-]
- t : 時間 [sec]
- a : 強度を表すパラメータ [/sec] ; 式(3.3-2)

- t_0 : 定ひずみ速度試験を行ったときピーク強度に達するまでの時間 (=120[sec])
 σ^* : 破壊接近度 [-] ; 式(3.3-3)
 σ_1 : 圧縮応力を正とした場合の最大主応力 [MPa]
 σ_3 : 圧縮応力を正とした場合の最小主応力 [MPa]
 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf}$: 破壊強度 [MPa]
 n : 時間依存性の程度を表すパラメータ [-] ; 式(3.3-4)
 m : 破壊の進行性を表すパラメータ [-]
 n_0 : 一軸応力下での n [-]
 σ_c : 一軸圧縮強度 [MPa]

本研究では前節と同様に岩盤が Mohr-Coulomb の破壊規準に従い破壊強度が式(3.3-5)で求まるものとした。

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{cf} = \sigma_c + \frac{2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.3-5)$$

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot C \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

ここに

- ϕ : 内部摩擦角 [rad]
 C : 粘着力 [MPa]

また破壊の進行に伴うポアソン比の変化については現在研究が進められている(大久保, 2004)が, 本研究ではポアソン比が式(3.3-6)に従い破壊の進行につれ0.5に近づくこととして解析を行った。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad (3.3-6)$$

ここに

- ν_0 : 初期ポアソン比 [-]

(2) 岩盤物性

前節と同様に表 3.2-1 に示した岩盤物性を想定した。これらの物性に加え, 時間依存性を表すパラメータ n_0 および破壊の進行性を表すパラメータ m を表 3.3-1 のように想定した。“HOR0450_EW” および “HOR0570_EW” については図 3.3-1 に示す幌延地域におけるボーリングで得られた岩石試験結果(常温, 湿潤状態)(大久保, 2003; 大久保, 2004; 井上・南, 2003; 井上ら, 2004)から時間依存性および破壊の進行性が中間的な場合を想定した。“SR-C” については「第2次取りまとめ」と同じ値を想定した。

これらの物性から得られる三軸圧縮試験（軸ひずみ速度 $d\varepsilon_1/dt=3\times 10^{-5}$ [1/sec] で拘束圧 $\sigma_3=0, 1, 3, 5$ [MPa] の場合）における応力-ひずみ関係を図 3.3-2 に示す。

表 3.3-1 想定した n_0 および m

ケース名	HOR0450_EW	HOR0570_EW	SR-C
n_0 [-]	30	30	20
m [-]	20	20	5

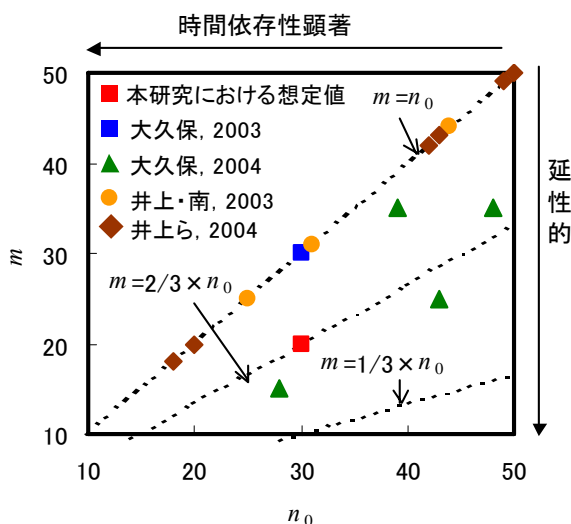
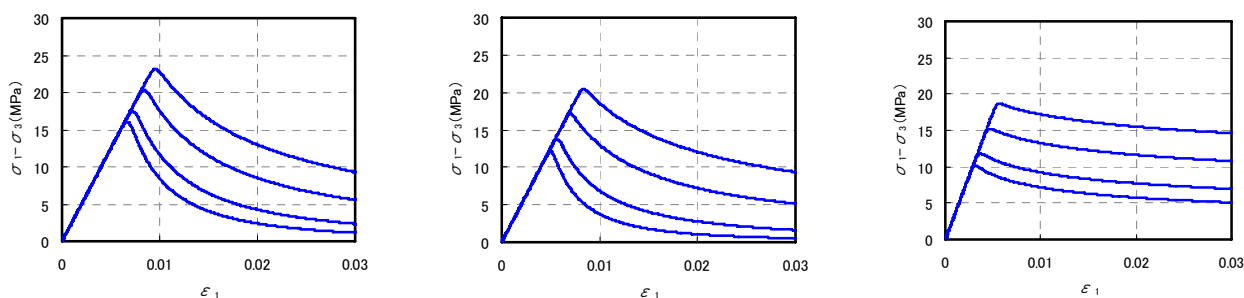


図 3.3-1 岩石試験結果



(a) HOR0450_EW

(b) HOR0570_EW

(c) SR-C

図 3.3-2 想定した物性から得られる応力-ひずみ関係

(3) 解析モデル

図 3.3-3 に示す解析モデル（平面ひずみ条件）を用いた。試験孔の形状は前節と同様に内径 2.2m の円形断面を想定し、試験孔に支保工は設置されないこととした。また本研究では隣接する試験孔は考慮せず、単一のものとして取り扱った。

解析ステップは図 3.3-4 のとおりとした。

step1 では図 3.3-5 (図 3.3-3 に示す A 軸沿い) および図 3.3-6 (B 軸沿い) に示すように前節の掘削解析で得られた試験孔深度 2.5m (「第2次取りまとめ」におけるオーバーパックの中心位置) における研究坑道掘削完了時の応力状態を初期応力として与えた。それぞれの図において σ_r は半径方向応力, σ_θ は周方向応力であり, 試験孔壁面からの距離 (横軸) は掘削直径 d ($=2.2\text{m}$) で無次元化した値である。

step2 で試験孔を掘削 (応力解放) し, step3 で人工バリアを設置した後, step4 でコンプライアンス可変型構成方程式に従う粘弾性解析を行った。step3 で設置される人工バリアの物性は表 3.3-2 に示すとおりとした。うち緩衝材の物性については, 幌延の地下水を用いた圧縮試験結果 (菊池ら, 2005) より設定した。step4 における時間は 10,000 年間とした。

解析には自社開発した有限要素コードにコンプライアンス可変型構成方程式に従う増分型の応力-ひずみ関係を組み込んだもの (野本ら, 2003) を使用した。step4 における時間刻み Δt は初期値を 1 秒とし, 以降 10% ずつ増加させた。

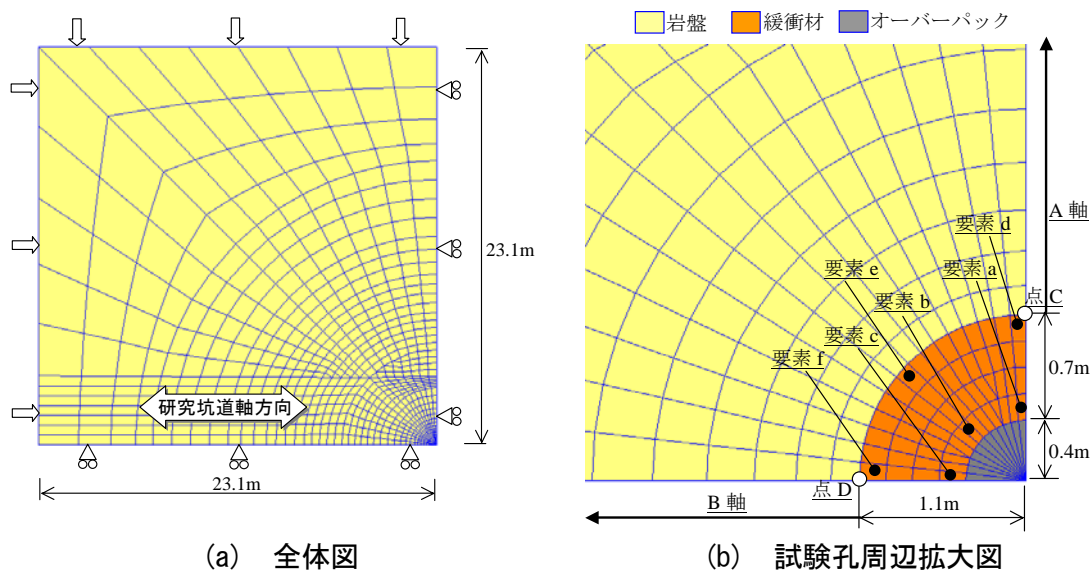


図 3.3-3 解析モデル

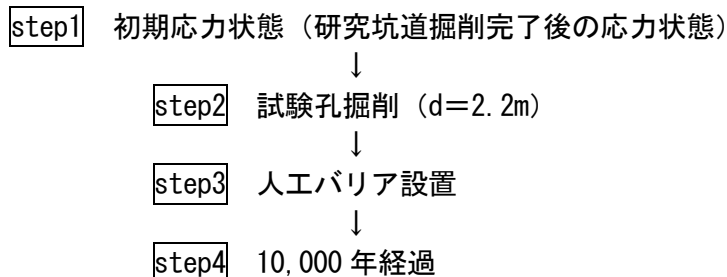


図 3.3-4 解析ステップ

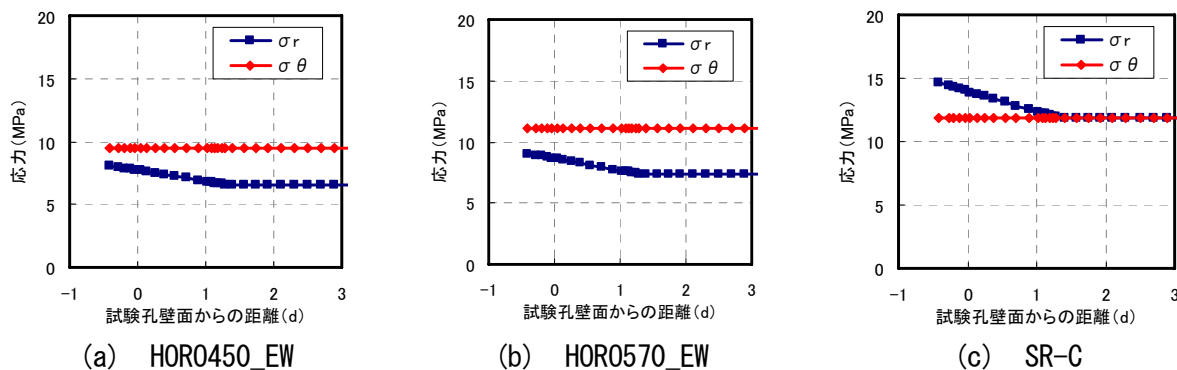


図 3.3-5 初期応力状態 (A 軸沿い)

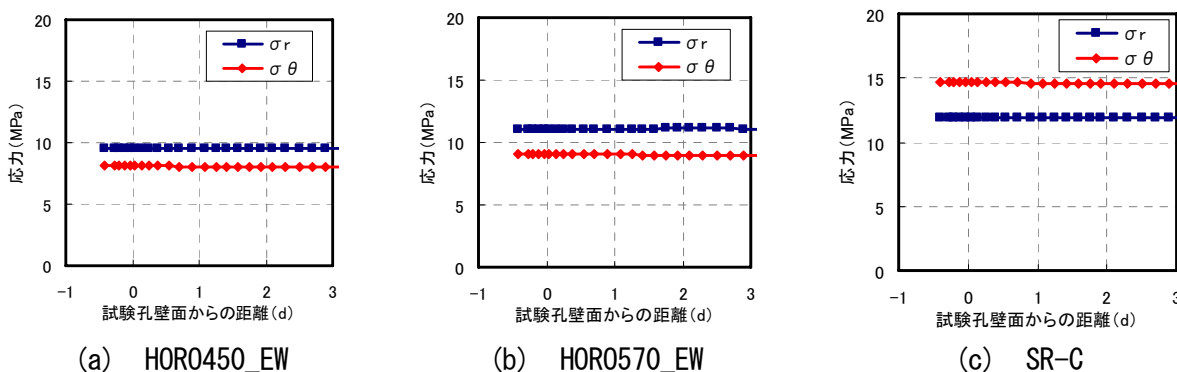


図 3.3-6 初期応力状態 (B 軸沿い)

表 3.3-2 人工バリアの物性

	緩衝材	オーバーパック
ヤング率 [MPa]	18.31	2.1×10^5
ポアソン比 [-]	0.4	0.2

3.3.2 解析結果

(1) 試験孔壁面変位

図 3.3-3 (b) に示す点 C および点 D の変位の経時変化を図 3.3-7 に示す。ここで変位は step2 (図 3.3-4) からの相対変位であり、試験孔内空方向への変位を正として示した。うち当初 10 年間における変位の経時変化を図 3.3-8 に示す。

(2) 緩み領域の分布

$E/E_0 (=1/\lambda^*)$ の分布を図 3.3-9 に示す。ここに E はある時刻におけるヤング率、 E_0 は初期ヤング率であり、本研究では以降ヤング率が初期値より低下した領域のことを緩み領域と称することとする。

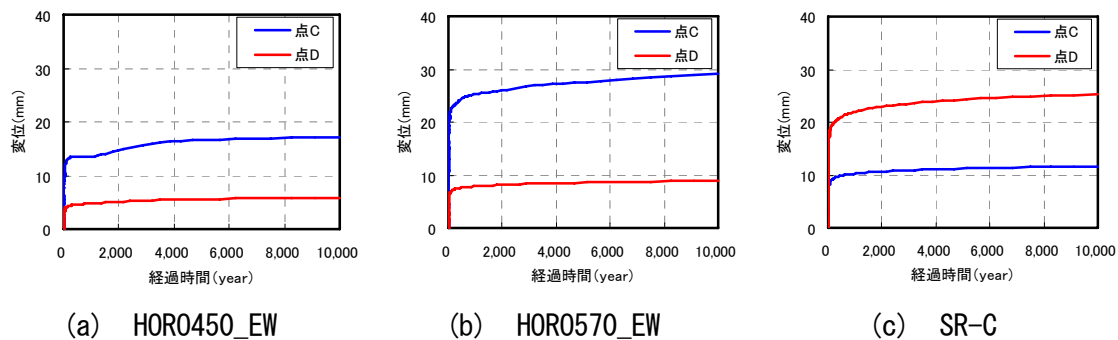


図 3.3-7 試験孔壁面変位の経時変化

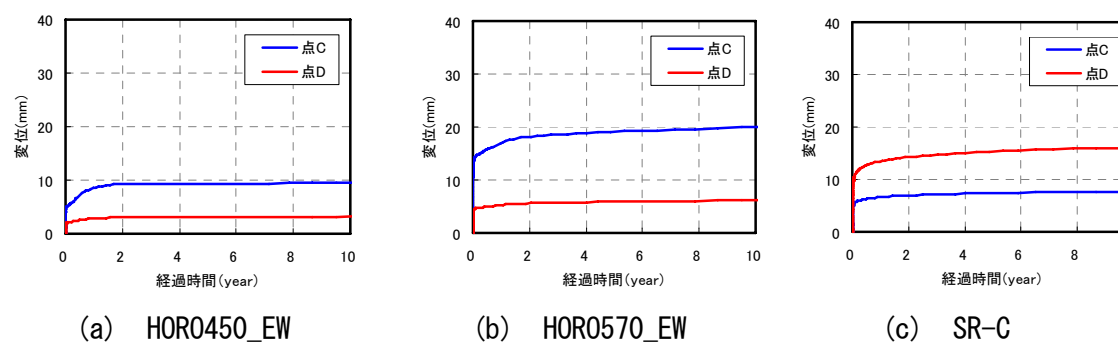


図 3.3-8 試験孔壁面変位の経時変化（当初10年間）

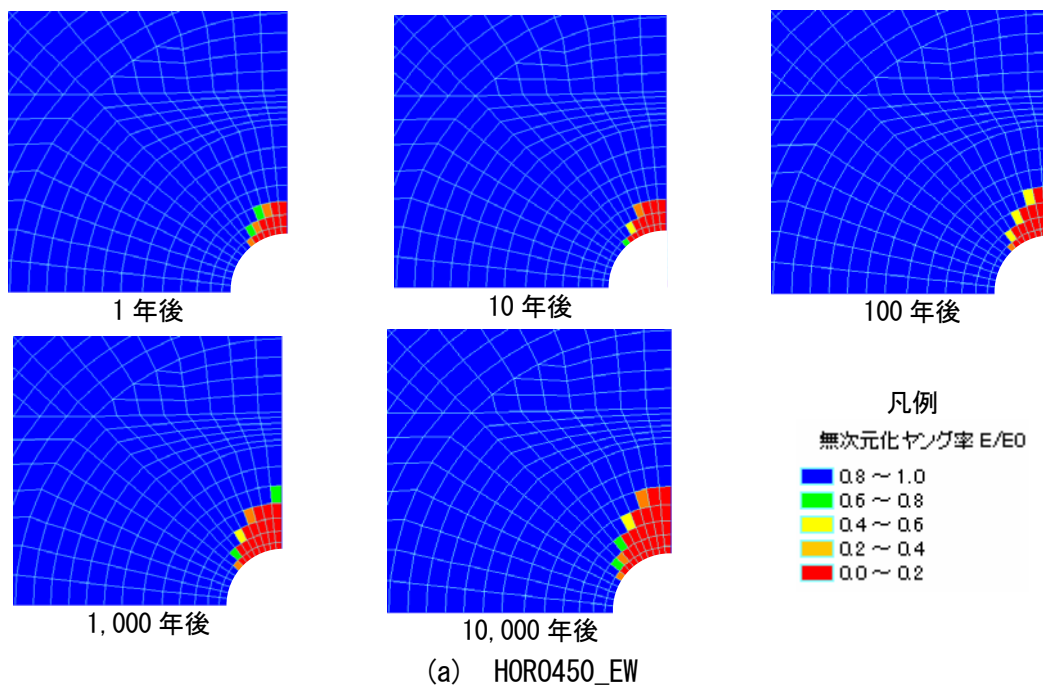


図 3.3-9 緩み領域の分布；次頁へ続く

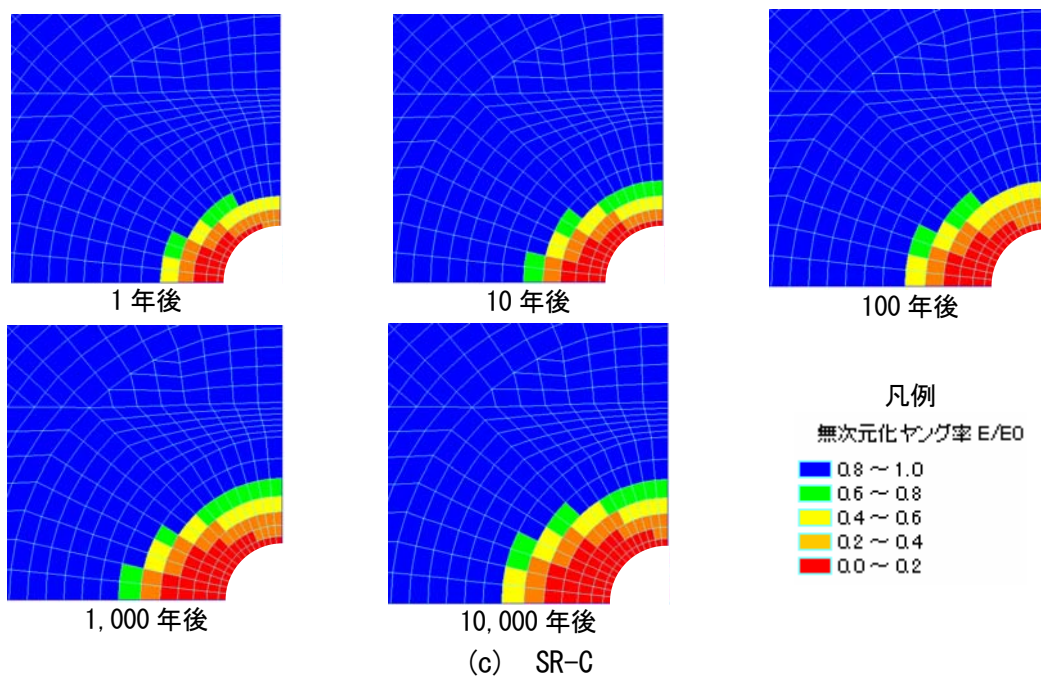
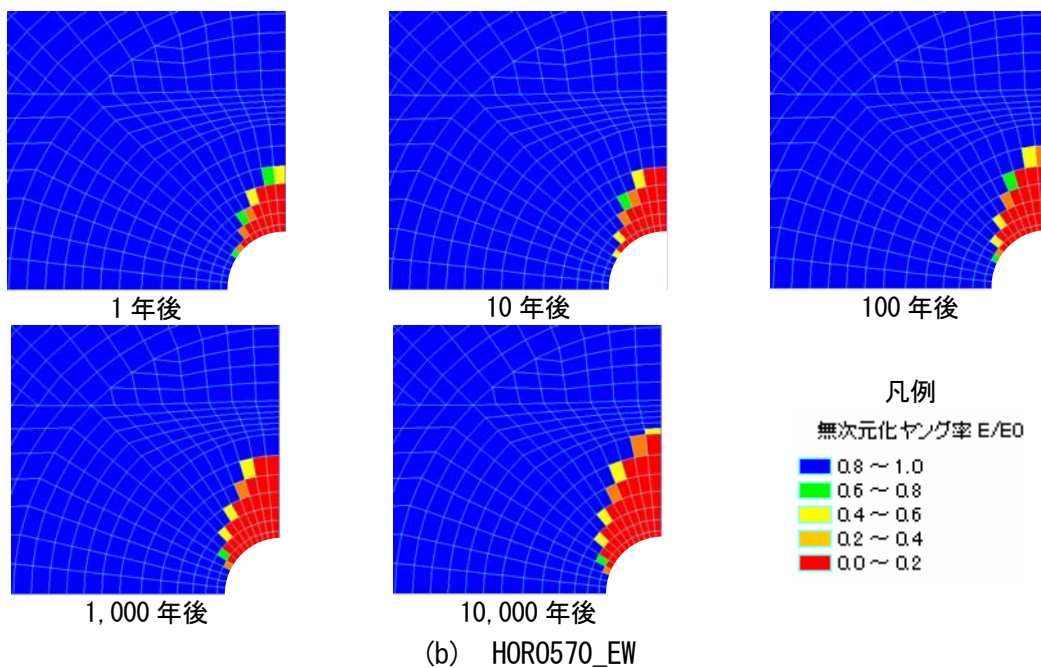
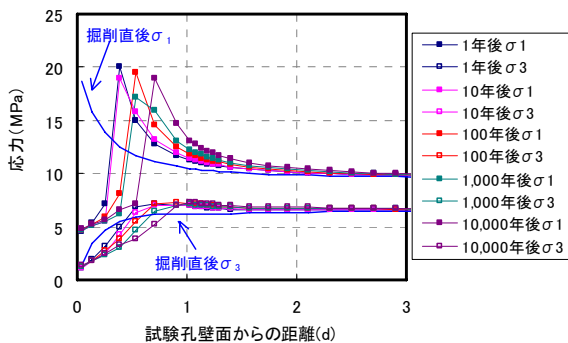


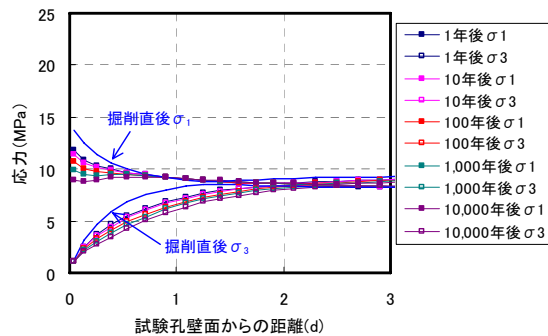
図 3.3-9 緩み領域の分布 ; 前頁からの続き

(3) 岩盤の応力状態

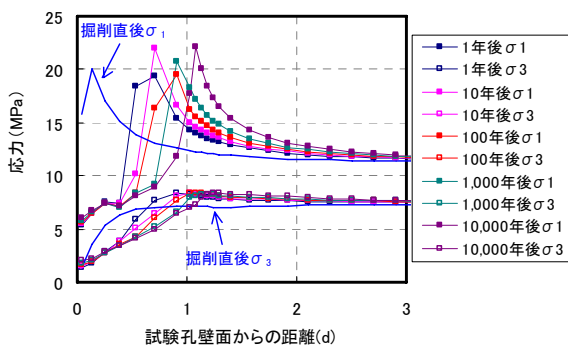
岩盤の最大主応力 σ_1 および最小主応力 σ_3 の分布を図 3.3-10 (図 3.3-3 に示す A 軸沿い) および図 3.3-11 (B 軸沿い) に示す。ここで σ_1 は周方向応力 σ_θ と、 σ_3 は半径方向応力 σ_r とほぼ等しい。図の横軸は試験孔壁面からの距離であり、掘削直径 d (=2.2m) で無次元化した値である。また掘削直後における値を図にあわせて示す。



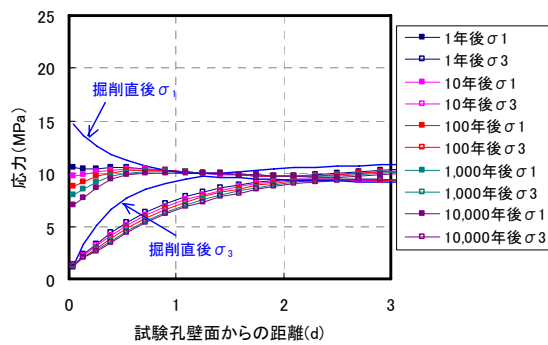
(a) HOR0450_EW



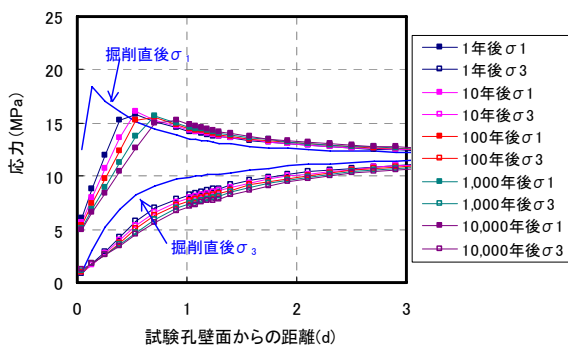
(a) HOR0450_EW



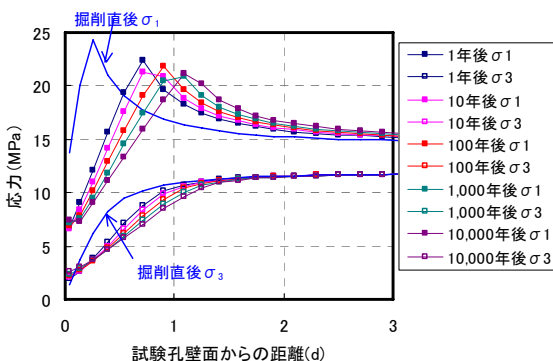
(b) HOR0570_EW



(b) HOR0570_EW



(c) SR-C

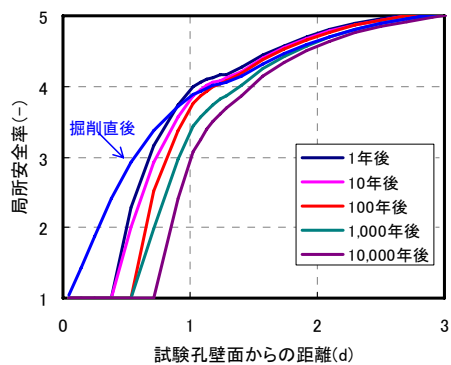


(c) SR-C

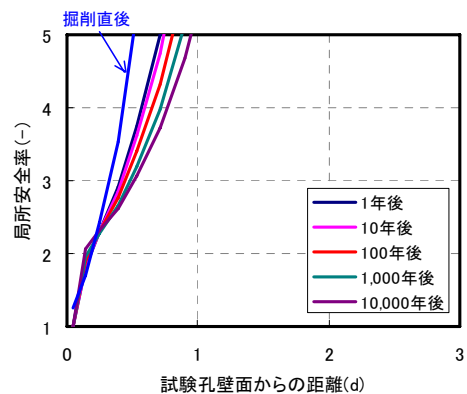
図 3.3-10 岩盤の応力状態 (A 軸沿い)

図 3.3-11 岩盤の応力状態 (B 軸沿い)

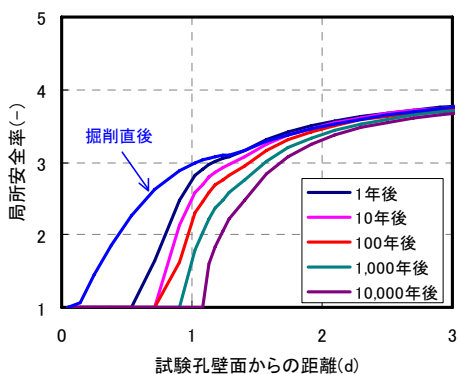
次に σ_1 および σ_3 から計算される局所安全率（「第 2 次取りまとめ」）の分布を図 3.3-12 (A 軸) および図 3.3-13 (B 軸) に示す。なお緩み領域（ヤング率の低下領域）における局所安全率は、破壊が進行している領域という意味で 1.0 として示している。



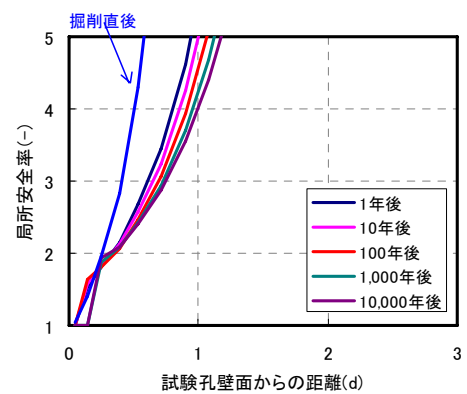
(a) HOR0450_EW



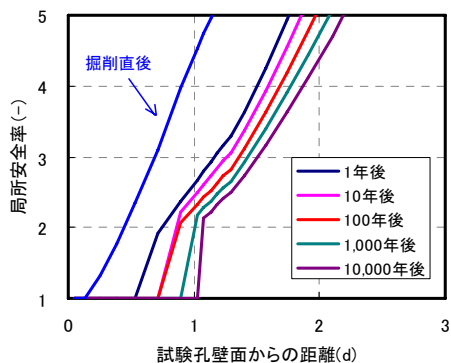
(a) HOR0450_EW



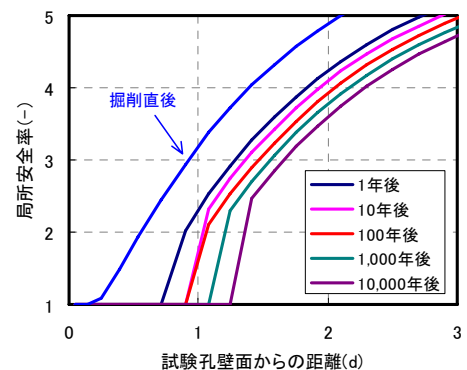
(b) HOR0570_EW



(b) HOR0570_EW



(c) SR-C



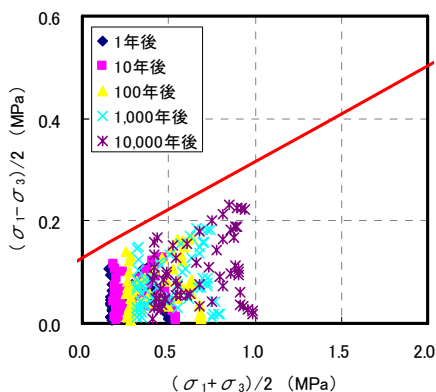
(c) SR-C

図 3.3-12 局所安全率 (A 軸沿い)

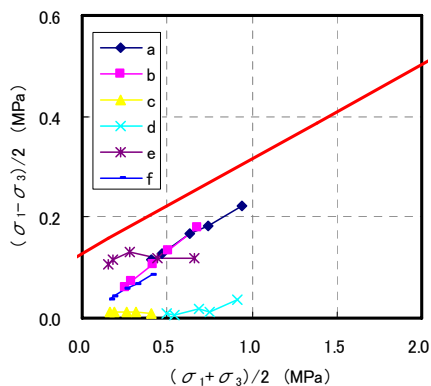
図 3.3-13 局所安全率 (B 軸沿い)

(4) 緩衝材の応力状態

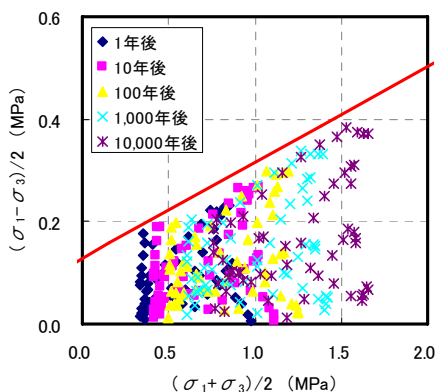
緩衝材の応力状態を図 3.3-14 に示す。図中には既往の圧密非排水三軸試験結果（高治・鈴木，1999）を参考に C を 0.13MPa， ϕ を 10.78° とし破壊接近度 σ^* が 1 となる線を赤で描いた。また図 3.3-15 には図 3.3-3(b) に示す着目要素の応力履歴を示す。



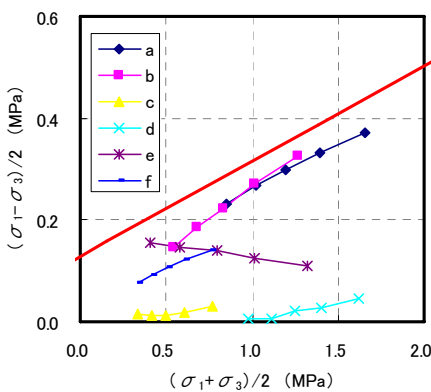
(a) HOR0450_EW



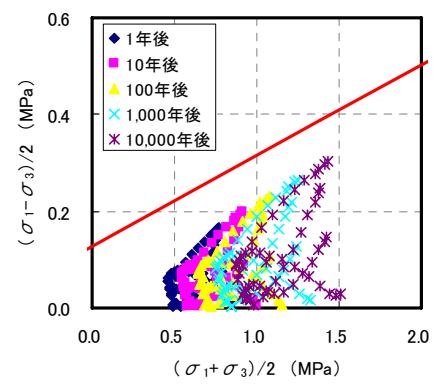
(a) HOR0450_EW



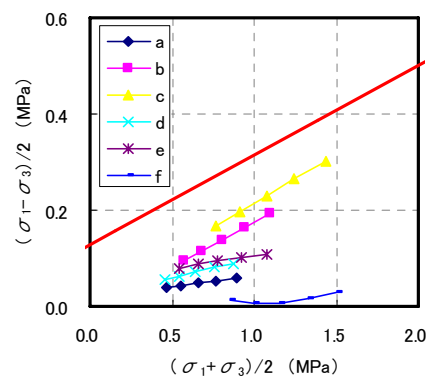
(b) HOR0570_EW



(b) HOR0570_EW



(c) SR-C



(c) SR-C

図 3.3-14 緩衝材の応力状態

図 3.3-15 着目要素の応力履歴

3.3.3 補足検討

ここでは緩衝材の剛性や人工バリアの定置時期，岩種を変化させた場合の解析を行い，これらが結果に与える影響について検討する。主に試験孔壁面変位および緩み領域の分布に着目し結果を報告する。

(1) 緩衝材の剛性

緩衝材のヤング率を 1.831MPa (図中 0.1E と表記)，18.31MPa (E と表記)，183.1MPa (10E と表記) と変化させた場合の試験孔壁面変位の経時変化を図 3.3-16 (10,000 年間) および図 3.3-17 (当初 10 年間) に示す。緩衝材のヤング率のみが異なり，それ以外の物性や手順はこれまで述べてきたものと同様である。また実際の処分においては試験孔 (処分孔) が掘削され，人工バリアが定置されるまでに数年間の期間がある (「第 2 次取りまとめ」) ことが想定されるため，図 3.3-17 には 10 年間人工バリアを定置しない場合 (人工バリアなしと表記) についてもあわせて結果を示した。また緩み領域の分布を 10 年後についてのみ図 3.3-18 に示す。なお緩衝材のヤング率を 18.31MPa とした場合の緩み領域の分布については図 3.3-9 に示したとおりである。

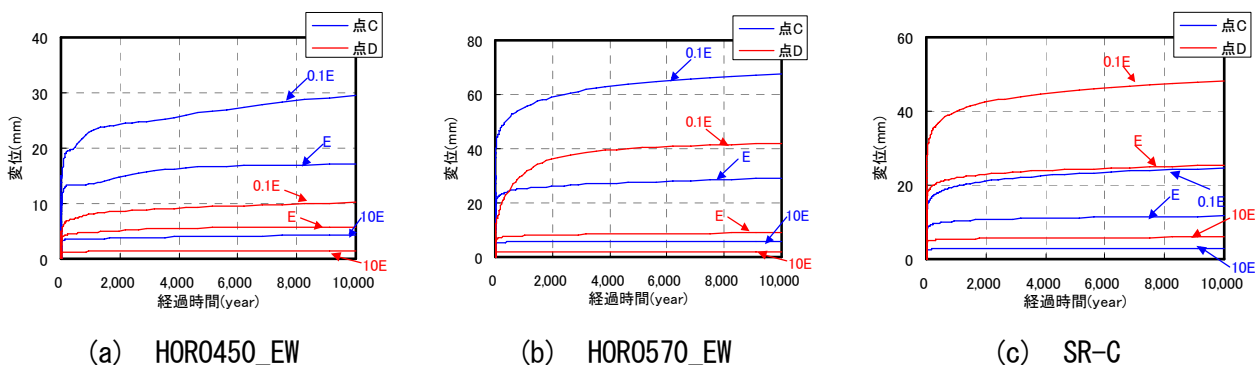


図 3.3-16 緩衝材の剛性の違いによる試験孔壁面変位の比較

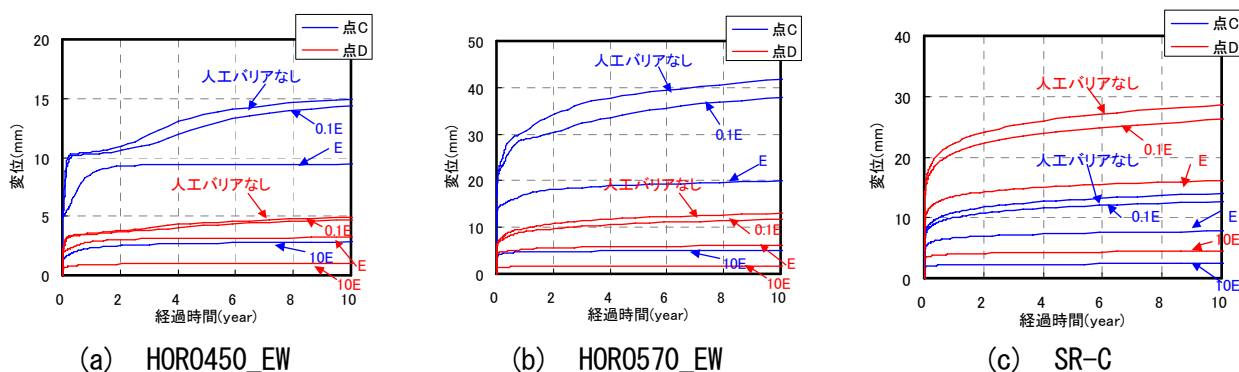


図 3.3-17 緩衝材の剛性の違いによる試験孔壁面変位の比較 (当初 10 年間)

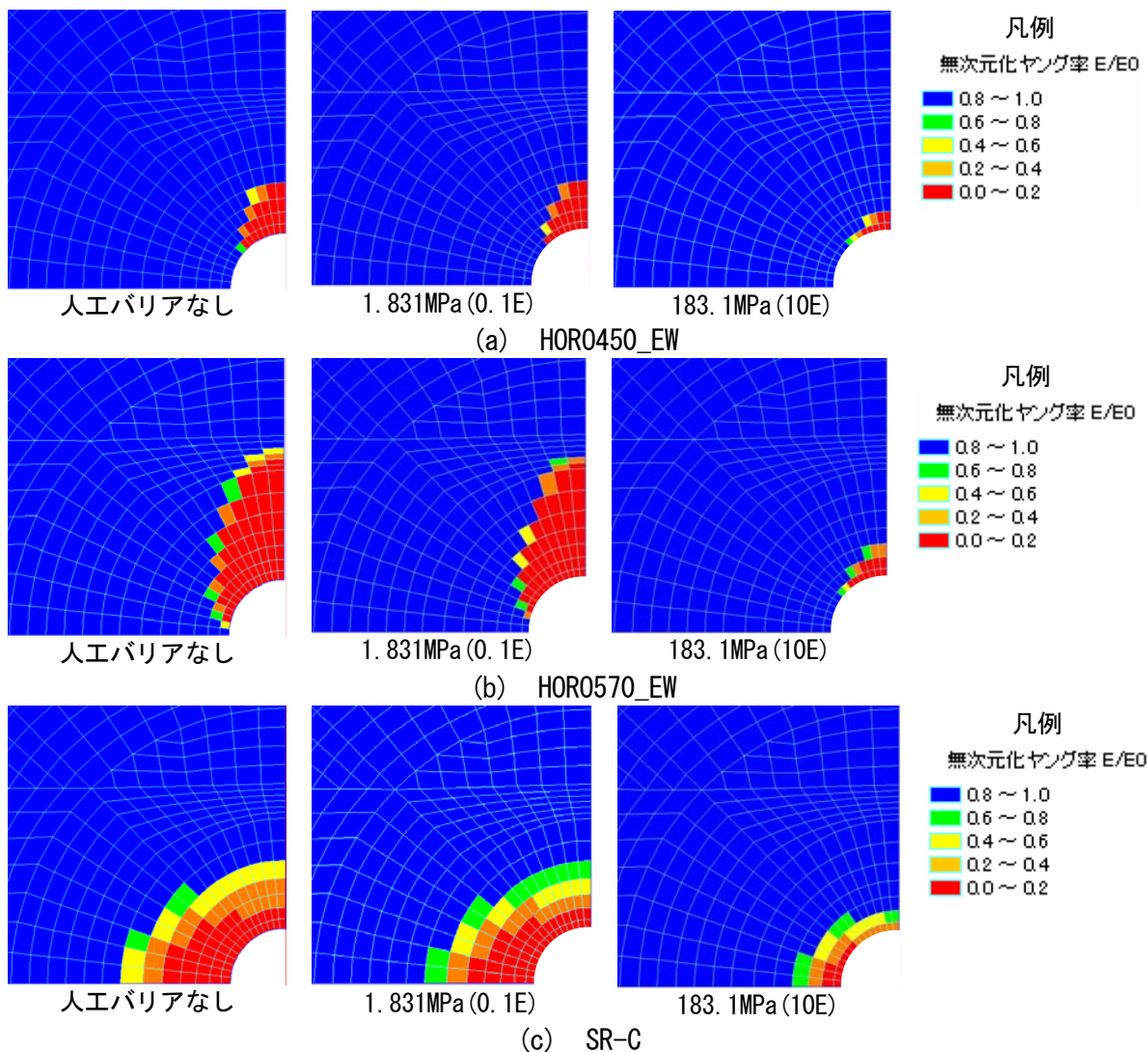


図 3.3-18 緩衝材の剛性の違いによる 10 年後の緩み領域の比較

(2) 支保工の有無

人工バリア定置までの試験孔（処分孔）の安定性確保の観点から，試験孔に支保工を設置した場合の解析を HOR0450_EW の条件で行う。掘削から人工バリアが定置されるまでの期間を 10 年間として，(1) で述べた支保工なしの素掘条件（人工バリアなし）の結果との比較を行う。支保工は吹付けコンクリートを想定し，ヤング率は表 3.2-4 と同様に 3,400MPa とする。吹付け厚は小断面トンネルにおける支保パターン（日本道路公団，1997）および「第 2 次取りまとめ」において坑道横置き方式で設定された支保厚さを参考に 10cm とした。掘削径は 2.2m のままとした。吹付けコンクリートは応

力解放率 65%で設置されることとし、棒要素でモデル化した。試験孔壁面変位を図 3.3-19 に、10 年後の緩み領域の分布を図 3.3-20 に、吹付けコンクリート応力を図 3.3-21 に示す。

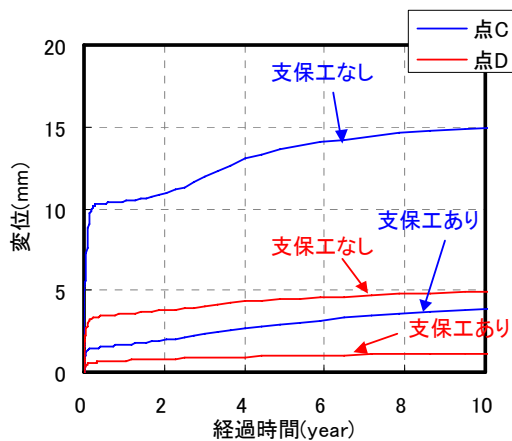


図 3.3-19 支保工の有無による試験孔壁面変位の比較 (HOR0450_EW)

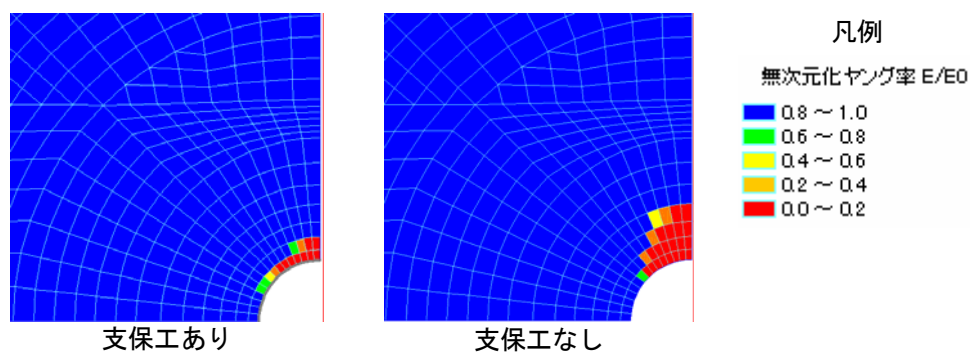


図 3.3-20 支保工の有無による 10 年後の緩み領域の比較 (HOR0450_EW)

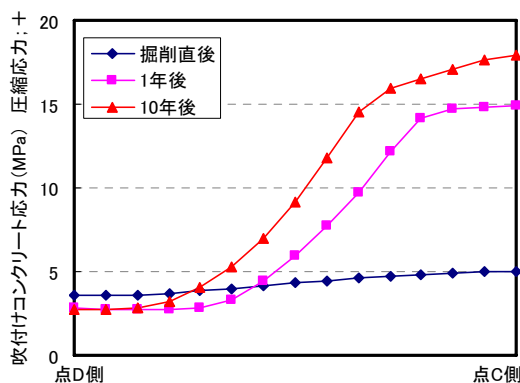


図 3.3-21 吹付けコンクリート応力 (HOR0450_EW)

(3) 岩種

「第2次取りまとめ」においては硬岩 (HR), 軟岩 (SR-C) それぞれについてコンプライアンス可変型構成方程式による坑道の長期力学安定性の検討が行われている。うち硬岩の条件では10,000年後においても変形はごく微小で、緩み領域が確認されなかったことが報告されている。本研究でも同様に硬岩を想定した条件で解析を行う。表 3.3-3 の岩盤物性, 表 3.3-4 の初期応力を用いて得られる試験孔壁面変位を図 3.3-22 に、緩み領域の分布を図 3.3-23 に示す。用いた岩盤物性および初期応力は瑞浪の深度1,000m で想定されるものである (加藤, 1998 ; 佐藤ら, 2004 ; 松井ら, 2001)。また時間依存性を表わすパラメータ n_0 および破壊の進行性を表すパラメータ m は「第2次取りまとめ」と同様にそれぞれ 30, 20 とした。なお step1 (図 3.3-4) における初期応力は研究坑道の掘削による影響が考慮されておらず, 表 3.3-4 に示した値を用いている。研究坑道軸方向 (図 3.3-3(a)) を最大主応力方向として解析を行った。人工バリアの物性は表 3.3-2 に同様とした。

表 3.3-3 岩盤物性 (硬岩)

想定条件	瑞浪深度 1,000m
ヤング率 E [MPa]	30,100
ポアソン比 ν [-]	0.35
粘着力 C [MPa]	14.62
内部摩擦角 ϕ [°]	53.9
一軸圧縮強度 q_u [MPa]	89.74
引張強度 σ_t [MPa]	8.974
時間依存性パラメータ n_0 [-]	30
破壊進行性パラメータ m [-]	20

表 3.3-4 初期応力 (硬岩)

想定条件	瑞浪深度 1,000m
鉛直方向応力 σ_v [MPa]	26.0
水平面内最大主応力 σ_{max} [MPa]	36.6
水平面内最小主応力 σ_{min} [MPa]	18.3
地山強度比 G_m [-]	3.45

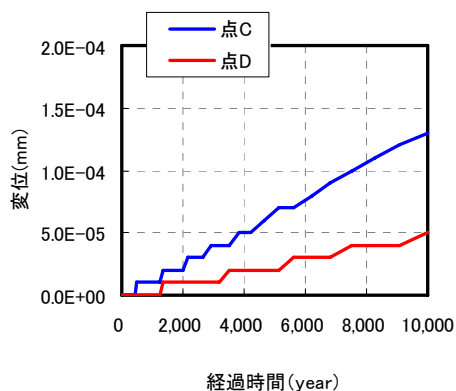


図 3.3-22 試験孔壁面変位 (硬岩)

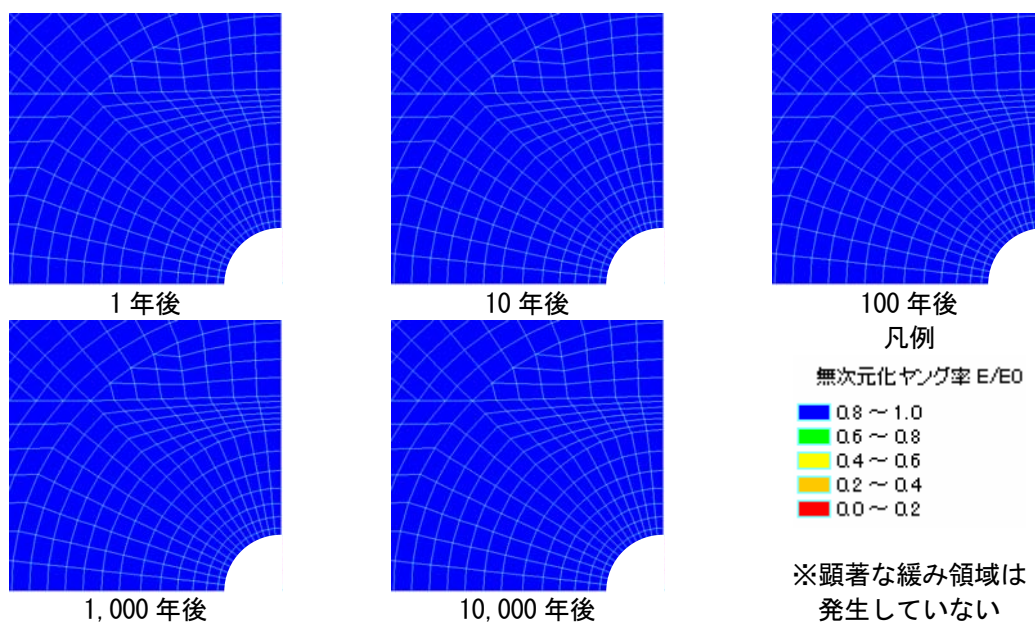


図 3.3-23 緩み領域の分布 (硬岩)

3.3.4 解析結果のまとめ

前節の掘削解析で得られた応力状態をもとに人工バリア定置後の試験孔の長期力学挙動について解析的に検討した。また緩衝材の剛性を変えた場合や支保工を設置した場合についても補足的に検討を行った。

掘削から人工バリア定置までの期間における変化を考慮せず、緩衝材のヤング率を 18.31MPa (線形弾性体) とした場合、考慮したいずれのケース (HOR0450_EW, HOR0570_EW および SR-C) においても試験孔壁面変位は定置後初期の段階で顕著であり、時間の経

過に伴いその速度は小さくなっていく傾向が得られた (図 3.3-7 および図 3.3-8)。また初期応力の異方性や研究坑道の掘削に伴う影響 (図 3.3-6) を考慮した結果, 図 3.3-24 に模式的に示すように応力の卓越方向と直交する側に緩み領域が拡大して行き (図 3.3-9), 応力の卓越方向と直交する側の壁面変位が大きくなる傾向となった。山本ら (山本ら, 2004) はひずみ軟化モデルによる解析を行い, 変形の局所化に起因して軟化領域の拡大する側での変位量が最大となることを示しているが, 本研究でも同様の傾向であった。

定置後 10,000 年後における緩み領域の発生量は, 本研究で想定した条件では 1.0d (d は掘削直径 2.2m) 程度であった (図 3.3-10 および図 3.3-11)。せん断破壊に対する局所安全率 (「第 2 次取りまとめ」) が小さくなる領域の拡大傾向も同様である (図 3.3-12 および図 3.3-13)。これら領域の拡大は試験孔壁面変位と同様に定置後初期の段階で顕著であり, 時間の経過に伴いその速度は小さくなっていく傾向であった。

大久保 (大久保, 2004) は比較的長期間大きな変動がなかったと考えられる地点での地圧測定結果を用いて, 長期経過後も破壊に至らない安定領域の条件を式 (3.3-7) で提案した。

$$\sigma_3 < \sigma_1 < 4\sigma_3 \quad (3.3-7)$$

ここに σ_3 は最小主応力 (>0), σ_1 は最大主応力である。

解析で得られた σ_3 (図 3.3-10 および図 3.3-11) から $4\sigma_3$ を求め, σ_1 (図 3.3-10 および図 3.3-11) と比較したものが図 3.3-25 である。なお図はそれぞれの条件で緩み領域の発生が卓越する方向における掘削直後, 10 年後および 10,000 年後のものである。図より掘削直後においては $\sigma_1 > 4\sigma_3$ である領域が壁面近傍に存在するが, 10 年経過後には周辺岩盤がおおむね $\sigma_1 < 4\sigma_3$ の状態 (安定領域) になることが分かる。よって本研究で得られた解析結果は, 初期の段階においては高い応力状態にある領域が時間の経過に伴い破壊する (緩み領域となる) ことで変形が顕著であるが, やがてそのような応力状態にある領域の発生は少なくなり, 安定化していく (変形が小さくなっていく) 様子を表現している。

緩衝材の応力状態については, 本研究で想定した条件においては塑性化するような応力状態とはならなかった (図 3.3-14)。それぞれのケースで比較すると HOR0570_EW (試験孔壁面変位が最も大きい) の破壊接近度が最も 1.0 に近かった。位置に着目すると周辺岩盤に接する側よりもオーバーパックに接する側の応力状態が高くなる傾向であった (図 3.3-15)。また壁面変位が大きくなる側 (岩盤の初期応力の卓越方向と直交する側) の応力状態が高くなる傾向であった。

原位置における緩衝材の施工においては, 管理項目や管理値が設定され, それらに基づいた施工が行われると考えられる。また原位置施工確認試験においても乾燥密度

や含水比が目標値と大きく異ならなかったことが確認されている（「第2次取りまとめ」）。よって原位置における緩衝材の特性は、室内で締め固められた緩衝材の特性と大きくは異なることが想定されるが、本研究では仮にヤング率を室内試験で得られた値の0.1倍（1.831MPa）とした場合についても解析を行った。また周辺岩盤の変形により緩衝材が圧密され剛性が大きくなるものとして、仮にヤング率を10倍（183.1MPa）とした場合についても解析を行った。その結果、試験孔壁面変位（**図3.3-16** および**図3.3-17**）や緩み領域の発生量（**図3.3-9** および**図3.3-18**）が緩衝材の剛性に顕著に依存することが分かった。ただし緩衝材の剛性を変化させても試験孔壁面変位が定置後初期の段階で顕著であり、時間の経過に伴いその速度が小さくなっていく傾向は変わらなかった。それぞれのケースで比較すると緩衝材のヤング率を18.31MPaとした場合に最も変位が大きく緩衝材の応力状態が高かった HOR0570_EW の結果において緩衝材のヤング率による変位の差が大きかった。いずれのケースにおいても緩衝材のヤング率が183.1MPaの場合に生じる変位は僅かであった。また緩衝材のヤング率を1.831MPaとした場合に生じる変位は人工バリアの設置を考慮しない場合の変位と同程度であった（**図3.3-17**）。

本研究では緩衝材を線形弾性体とし、**図3.3-3**に示すように平面ひずみ状態を仮定して解析を行った。処分孔縦置き方式を想定した場合、緩衝材の膨潤による密度低下対策として、場合により処分坑道の埋め戻しまで一時的に処分孔口にキャップ（ロックボルト方式あるいは坑道天端支持方式）を設置することが想定されている（「第2次取りまとめ」）。また適切な方法や密度で埋め戻しがなされれば、埋め戻し後の緩衝材は模式的に**図3.3-26**のような荷重状態にあると考えられる。本研究で想定した平面ひずみ状態はこのような状態を想定していることになる。このような状態で緩衝材の上面、下面および側面の排水境界が自由であれば大局的にK0圧密状態にあると見なせるので、軸差応力を q 、平均有効応力を p とすれば、緩衝材の応力経路は模式的に**図3.3-27**のようになると考えられる。応力経路が限界状態線とほぼ平行ないしは遠ざかる方向となるため、長期的にはせん断ではなく圧密が進行し、緩衝材の見かけの剛性は大きくなる（硬化する）ものと考えられる。澤田ら（澤田ら，2004）は岩盤を粘弾性体、緩衝材を弾性体ないしは弾粘塑性体（関口・太田モデル）として本研究と同様の解析（平面ひずみ状態）を行っている。その結果、緩衝材を弾性体とした場合と弾粘塑性体とした場合に処分孔壁面に発生する変位はほとんど変わらない（弾粘塑性体とした場合の方が若干小さい）ことを示している。これらのことから長期的に**図3.3-26**のような状態であると見なせれば、緩衝材は岩盤の時間依存性変形に伴う圧密作用により見かけの剛性が高くなると考えられ、緩衝材のヤング率を一定（線形弾性体）とする評価に比較し、処分孔の長期的な変形量は小さくなる可能性がある。しかしこの考えは概念的なものであり、実際にはオーバーパックの腐食による膨張圧の発生や緩衝材の膨潤圧の発生などニアフィールドの力学的相互作用は複雑であると想定されるため、

今後これらを考慮しより詳細な検討が必要であると考えられる。解析的な検討においては岩盤と緩衝材間の境界条件（すべりや剥離挙動、水の出入り）の設定などが特に問題になると想定される。

実際の処分においては人工バリアが定置されるまでに数年間の期間があることが想定される（「第2次取りまとめ」）。よって人工バリア定置までの安定性確保の観点から支保工を設置した場合の解析を HOR0450_EW の条件で行い（期間は10年間とした）、支保工なしの素掘とした場合の結果と比較した。支保工は掘削後直ちに肌落ち防止や支保効果を期待できるものとして本研究では吹付けコンクリートを想定した。コンクリートの強度や剛性は材令により変化することが知られている（久武ら，1989）が簡単のため便宜的にトンネルの設計で用いられている等価なヤング率を設定した。解析を行った結果、支保工により変形（図 3.3-19）や緩み領域の発生（図 3.3-20）が抑制され、人工バリアが定置されるまでの安定性が高くなることが伺えた。しかしながらセメントによる緩衝材への影響が懸念されている（電力中央研究所・電気事業者連合会，1999）ことから支保工材料について今後検討が必要であると考えられる。また HOR0450_EW の条件では吹付けコンクリート（厚さ 10cm）が破壊に至るような応力状態とならない結果（図 3.3-21）であったが、変形がより大きな場合には破壊に至ることもあると考えられる。そのような場合、施工の現実性に配慮した上で対策工の検討（例えば余掘や鋼材料の設置）が必要であると考えられる。

前節では地山強度比に着目し、地山強度比が小さいほど掘削時の塑性化領域の発生量および変形が大きく、力学安定性が低い傾向にあることを述べた。本節でも HOR0450_EW と HOR0570_EW の比較においてはこのような傾向が見られた。また硬岩を想定した場合として瑞浪における条件で解析を行ったが、時間依存性を表わすパラメータ n_0 および破壊の進行性を表すパラメータ m を HOR0450_EW および HOR0570_EW と同様にそれぞれ 30, 20 と設定したにも関わらず、試験孔壁面変位や緩み領域はほとんど生じない結果であった（図 3.3-22 および図 3.3-23）。ただし特に硬岩においては岩盤の連続体的な挙動に加え不連続面の挙動も重要であるが、本研究では考慮していないことに注意を要する。 n_0 および m が同じ値であることを考えると、得られた結果は硬岩、軟岩といった岩種の違いにより挙動に差が生じたのではなく、硬岩で想定した条件における地山強度比や内部摩擦角が軟岩（HOR0450_EW, HOR0570_EW および SR-C）で想定した条件に比較し大きなためであると考えられる（表 3.2-2 および表 3.3-4）。一軸応力状態における破壊接近度 σ^* は作用応力を一軸圧縮強度で除した値となる（式 (3.3-3)）。いわば地山強度比の逆数である。よって地山強度比が大きい（破壊接近度が小さい）場合に比較し地山強度比が小さい（破壊接近度が大きい）場合のヤング率の低下速度（コンプライアンスの増加速度）は大きくなる（式 (3.3-1)）。

これらのことから条件（深度や岩種）が異なる場合における試験孔の長期安定性について検討する際には前節で述べた掘削時の安定性と同様に、地山強度比で安定性の

高低の目安を得ることができることが分かる。

ただし SR-C は HOR0570_EW に比較し地山強度比が小さいにも関わらず、長期経過後の変形量が小さくなる傾向となった。これは SR-C では HOR0570_EW に比較しヤング率が大きなことに加え、延性的な物性（破壊の進行性を表すパラメータ m で表現される）を仮定しており、破壊後の応力低下が緩慢であるためである（図 3.3-2）。このように岩盤の長期安定性を検討するにあたり破壊後の挙動が重要であると考えられるが、この点については難しく今後の検討課題であるといえる。

先に述べたように緩衝材の剛性の取り扱いが解析結果に与える影響が大きい。また緩衝材の膨潤圧やオーバーパックの腐食膨張圧が適度に岩盤に作用すれば、変形や緩み領域の発生がより緩慢になることも考えられる。これら力学的な相互作用の考慮についても今後の検討課題であるといえる。

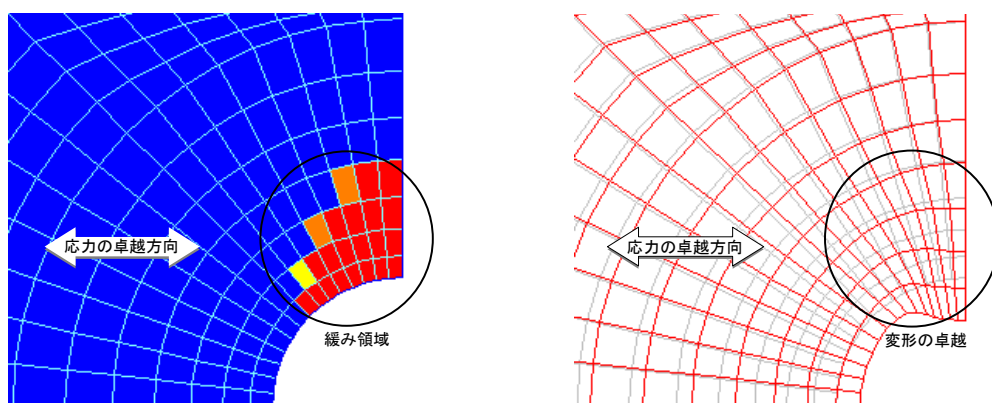
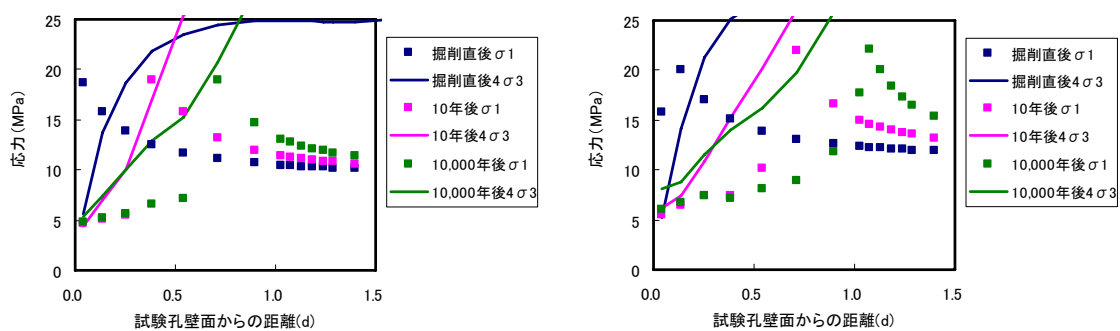
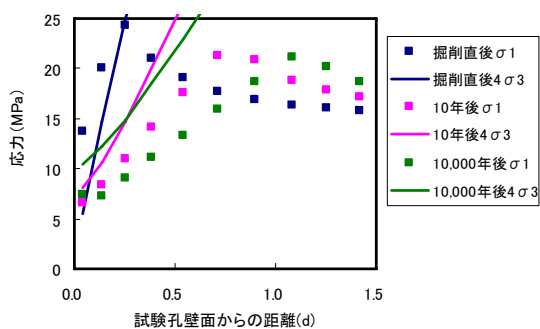


図 3.3-24 応力の卓越方向と緩み領域および変形の関係



(a) HORO450_EW (A 軸沿い)

(b) HORO570_EW (A 軸沿い)



(c) SR-C (B 軸沿い)

図 3.3-25 σ_1 と $4\sigma_3$ の比較

埋め戻しまで：キャップによる拘束
 埋め戻し後：埋め戻し材による拘束

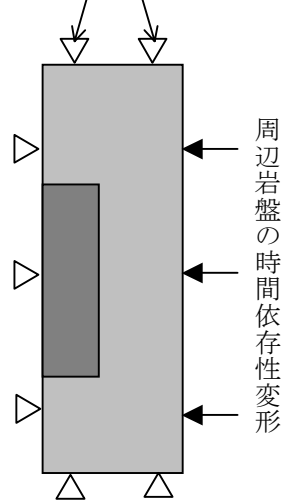


図 3.3-26 緩衝材の荷重状態の想定図

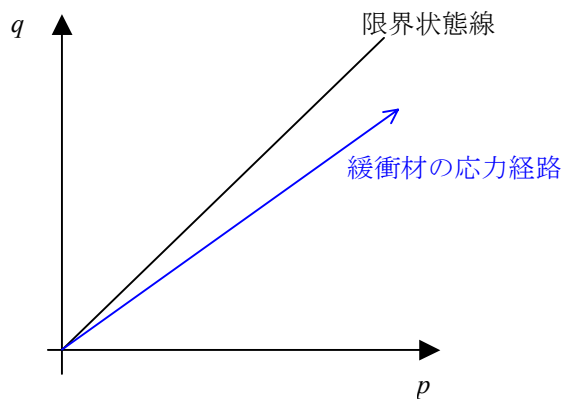


図 3.3-27 緩衝材の応力経路の想定図

4. おわりに

本委託業務では、幌延地域に分布する堆積軟岩を対象として以下の2点に対する検討を行った。

- ① ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす検討
- ② 幌延を条件とした岩盤の長期力学挙動評価

以下にそれぞれの検討で得た知見等をまとめて示す。

① ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす検討

幌延地域の堆積軟岩を対象として、大久保モデルの検証、熱が大久保モデルの定数に及ぼす影響、熱がクリープに及ぼす影響に関する検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ・ 一軸圧縮試験結果をもとに大久保モデルによりクリープ寿命を予測することで大久保モデルの適用性に関する検証を行った。特性の揃った試験体であれば、1オーダー以内で寿命が予測できることを確認した。しかし、幌延地域のコアの物性値のバラツキは大きく、予測値と実測値が大きく異なるケースも多数あった。
- ・ 同一深度の試験体を使用して20℃と80℃の試験条件で一軸圧縮試験を行い、熱が大久保モデルの定数に与える影響について検討した。その結果、今回使用した試験体では、大久保モデルの定数は熱によってほとんど変化していないことが明らかとなった。
- ・ 歪み速度の変化に着目して、熱がクリープに及ぼす影響に関する検討を行った。その結果、今回使用したコアでは熱がクリープに及ぼす影響は確認できなかった。
- ・ 粘土鉱物を多く含むと考えられる試験体でも同様の試験を行ったが、熱がクリープに及ぼす影響は確認できなかった。

また、熱や水分などの環境条件が岩石の長期変形挙動に及ぼす影響に関する文献調査を行うとともに、幌延地域での原位置試験に関する提案も行った。今後の課題としては、長期間（数ヶ月程度）の室内クリープ試験による大久保モデルの検証や原位置での確認試験などを実施することで、大久保モデルの適用性の確認および熱などの試験条件が岩盤や岩石の長期力学挙動に及ぼす影響をよりの確に把握する必要があると考えられる。

② 幌延を条件とした岩盤の長期力学挙動評価

これまでに幌延の試錘調査より得られている情報（岩盤物性、初期応力）を用いて、処分孔縦置き方式を想定した場合の試験孔の掘削時および長期の力学的安定性について解析的に検討した。

掘削時の安定性検討では地山強度比が大きいほど試験孔の安定性が高くなる（塑性化領

域や変形の発生程度が小さい)ことおよび試験坑道軸を最大主応力方向に一致させた方が、安定性が高くなることを示した。また本研究で想定した条件においては試験孔の離間距離を 3d 程度確保すれば、隣接する試験孔の掘削影響はほとんど及ばないことを示した。

人工バリア定置後の長期安定性検討では、緩衝材の剛性や支保工の有無といった条件により変形や緩み領域の発生量に差が生じるものの、それらの発生が時間の経過とともに徐々に収束していく傾向は変わらないことを示した。また掘削時の安定性と同様に、地山強度比で長期安定性の目安を得ることができることを述べた。

今後の課題として、幌延を条件とした岩盤の長期力学挙動評価では緩衝材の剛性の取り扱いが解析結果に与える影響が大きく、より詳細な検討が必要である。また緩衝材の膨潤圧やオーバーパックの腐食膨張圧が適度に岩盤に作用すれば、変形や緩み領域の発生が緩慢になることも考えられる。これらニアフィールドで生じる力学的な相互作用の考慮についても今後の検討課題であると言える。

・参考文献

Afrouz, A. and Harvey, J.M. : “Rheology of rocks within the soft to medium strength range” , Int. J. Rock Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 11, No. 7, July, pp. 281-290, (1974)

電力中央研究所・電気事業者連合会：“高レベル放射性廃棄物地層処分の事業化技術”，(1999)

土木学会：地下構造物の設計と施工，p87，(1976)

土井崇司，大洞光央，アイダンオメール，中間茂雄：“堆積軟岩における空洞周辺の破壊現象に対する実験的および解析的な検討”，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 393-398，(2005)

ジェオフロンテ研究会：海外トンネル事情，2001年版，(2001)

アイダンオメール，赤木知之，伊藤孝，川本眺万：“スクリーニング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測手法について”，土木学会論文集，No. 448, III-19, pp. 73-82, (1992)

井上博之，野田兼司：“軟岩を対象とした長期岩盤挙動研究（核燃料サイクル開発機構業務委託報告書）”，JNC TJ8400 2002-011，(2002)

井上博之，南浩輔：“軟岩の長期力学的変形挙動研究（核燃料サイクル開発機構業務委託報告書）”，JNC TJ8400 2002-061，(2003)

井上博之，吉野尚人，宮野前俊一，水谷和彦，野田兼司：“軟岩の長期力学的変形挙動研究（Ⅱ）（核燃料サイクル開発機構業務委託報告書）”，JNC TJ8400 2004-005，(2004)

Itasca Consulting Group, Inc. : “Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, User’ s Guide”，(2002)

岩の力学連合会：“岩石の一軸圧縮試験法の指針”，ISRM 指針，Vol. 1, pp26-31，(1982)

城まゆみ，青木智幸，山辺正：“昇温下における珪藻質泥岩のクリープ特性変化”，土

木学会第 59 回年次学術講演会, (2004)

核燃料サイクル開発機構: “わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性, 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ, 分冊 2, 地層処分の工学技術”, JNC TN1400 99-022, (1999)

核燃料サイクル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 13 年度調査研究成果報告”, JNC TN1400 2002-004, (2002)

核燃料サイクル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 14 年度調査研究成果報告”, JNC TN5400 2003-001, (2003)

核燃料サイクル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 15 年度調査研究成果報告書”, JNC TN5400 2004-001, (2004)

核燃料サイクル開発機構: “高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究開発, 平成 15 年度報告”, JNC TN1400 2004-007, (2004)

核燃料サイクル開発機構: “幌延深地層研究計画における地下研究施設の空洞安定性評価および支保設計 (平成 15 年度)”, JNC TN5410 2004-001, (2005)

Kanagawa, T. and Nakaarai, K.: “Restraint of swelling creep and effect of absorption of water on triaxial strength and deformability of rocks”, Rock mechanics in Japan, Vol. 1, pp. 74-76, (1970)

加藤春寛: “AN-1 孔における水圧破碎法による初期応力測定 (核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”, JNC TJ7420 99-013, (1998)

Kuznetsov, Y. U. F. and Vashchilin, V. A.: “Rock creep at high temperature”, Sov. Min. Sci., No. 5, Sept.-Oct., pp. 586-588, (1970)

久武勝保, 伊藤富雄, 桜井春輔: “時間依存性を示す膨張性軟岩トンネルの一次覆工挙動”, 土木学会論文集, No. 412, III-12, pp. 153-160, (1989)

LeComte, P.: “Creep in rock salt”, J. Geol., Vol. 73, No. 3, pp. 469-484, (1965)

松井裕哉, 前田信行, 吉川和夫: “MIU-3 号孔における力学特性調査結果および正馬様用地における土岐花崗岩体の岩盤力学的概念モデル”, サイクル機構技術資料, JNC TN7420 2001-001, (2001)

Misra, A. K. and Murrell, S. A. F.: “An experimental study of the effect of temperature and stress on the creep of rocks”, Geophys. J. Roy. Astr. Soc., Vol. 9, No. 5, July, pp. 509-535, (1965)

菊池広人, 棚井憲治: “幌延地下水を用いた緩衝材・埋め戻し材の基本特性試験”, サイクル機構技術資料, JNC TN8430 2004-005, (2005).

仲野良紀: “膨張性地山の実態”, トンネルと地下, Vol. 6, No. 10, pp. 15-25, (1975)

日本道路公団: “設計要領 第三集 トンネル”, (1997)

野本康介, 宮野前俊一, 松井幹雄, 梨本裕, 大久保誠介: “コンプライアンス可変型構成方程式を用いた増分法FEM解析手法の開発”, 土木学会第58回年次学術講演概要集, III-523, (2003)

大久保誠介, 西松裕一, 緒方義弘: “非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション”, 日本鉱業会誌, Vol. 103, pp. 293-296, (1987)

大久保誠介: “軟岩の長期挙動に関する研究”, サイクル機構技術資料 (研究委託報告書; 東京大学), JNC TJ8400 2002-062, (2003)

大久保誠介: “ニアフィールド岩盤の長期安定性評価手法の検討 (核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”, JNC TJ8400 2003-081, (2004).

Phillips, D. W.: “The nature and physical properties of some coal-measure rocks and experimental work on the development of fractures”, Trans. Inst. Min. Eng., Vol. 80, Part 4, Jan., pp. 212-239, (1931)

Renzhiglov, N. F. and Pavlishcheva, T. V.: “On the viscosity of rocks”, Sov. Min. Sci., No. 5, Sept.-Oct., pp. 582-585, (1970)

櫻井春輔, 川嶋幾夫, 大谷達彦, 松村真一郎: “トンネルの安定性評価のための限界せ

ん断ひずみ”，土木学会論文集，No. 493，Ⅲ-27，pp. 185-188，(1994)

佐藤稔紀，今津雅紀，鈴木隆，横井幹仁：“超深地層研究所計画における施設設計・建設工事の現状—研究所坑道掘削に伴う計測のための事前解析—”，土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集，CS1-009，(2004)

澤田昌孝，岡田哲実，大波正行，宮本泰志：“空洞周辺岩盤のクリープと内部充填材との力学的相互作用”，第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 205-210，(2004)

高治一彦，鈴木英明：“緩衝材の静的力学特性”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-041，(1999)

棚井憲治，岩佐健吾，長谷川宏，郷家光男，堀田政國，納多勝：“地層処分場のレイアウトに関する検討”，サイクル機構技術資料，JNC TN8400 99-044，(1999)

趙頭，大久保誠介，福井勝則：“周圧下での三城目安山岩のクリープ”，資源と素材，vol. 111， p. 543-548，(1995)

Wawersik, W. R. and Brown, W. S. : “Creep fracture of rock”, Report No. UTEC-ME-73-197, Mech. Eng. Dept., Univ. Utah, Salt Lake City, Utah, July, (1973)

山辺正，山本綾子，山本寛子，伊藤文雄，小川豊和：“温度場を考慮した軟岩の時間依存性挙動とその変形予測に関する実験的研究”，土木学会第 56 回年次学術講演会，(2001)

山本卓也，青木智幸，城まゆみ，瀧治雄：“堆積軟岩の長期挙動に関する調査試験研究（その 2）(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)”，JNC TJ5400 2003-005，(2004).

・付録-1 試験状況および試験体の写真



写真-1 超音波弾性波速度測定器 その1



写真-2 超音波弾性波速度測定器 その2



写真-3 一軸圧縮試験風景 20℃
※ クリープ試験も同様の風景である



写真-4 一軸圧縮試験風景 80℃
※クリープ試験も同様の風景である



(試験前)



(試験後)

写真-5 一軸圧縮試験の試験体 438.78B 20°C



(試験前)



(試験後)

写真-6 クリープ試験の試験体 438.78C 20°C



(試験前)



(試験後)

写真-7 一軸圧縮試験の試験体 438.78C 20°C



(試験前)



(試験後)

写真-8 クリープ試験の試験体 438.78A 20°C

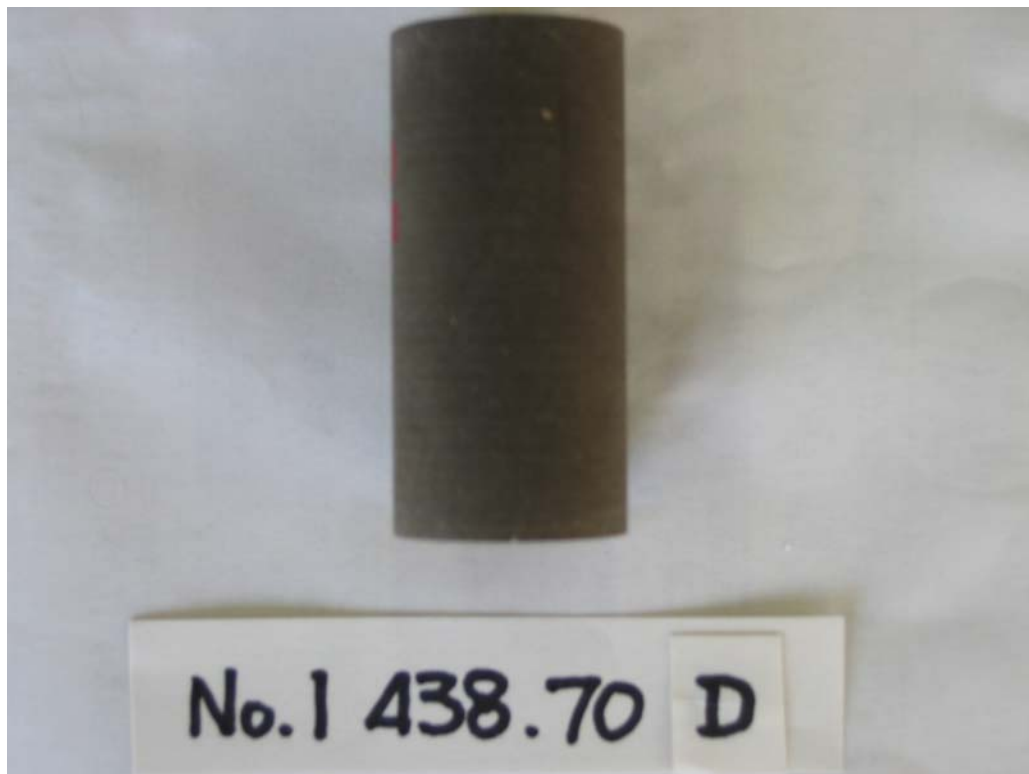


(試験前)



(試験後)

写真-9 一軸圧縮試験の試験体 438.70B 80°C

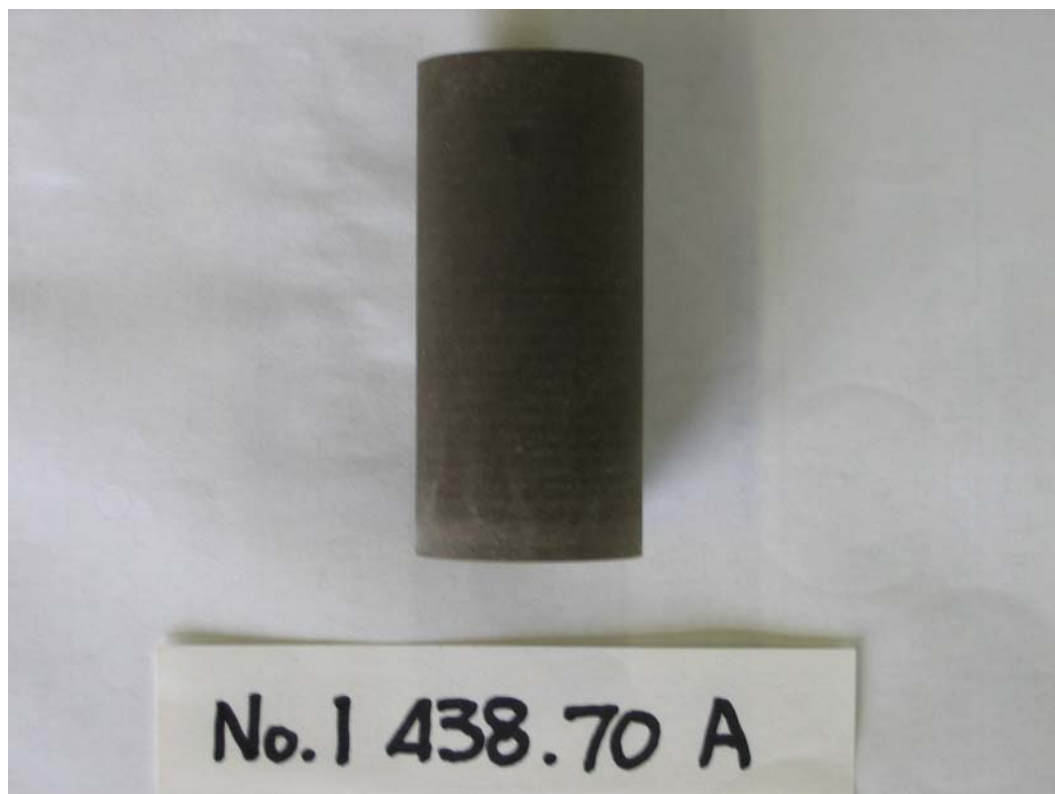


(試験前)



(試験後)

写真-10 クリープ試験の試験体 438.70D 80℃



(試験前)



(試験後)

写真-11 一軸圧縮試験の試験体 438.70A 80℃



(試験前)



(試験後)

写真-12 クリープ試験の試験体 438.70C 80℃

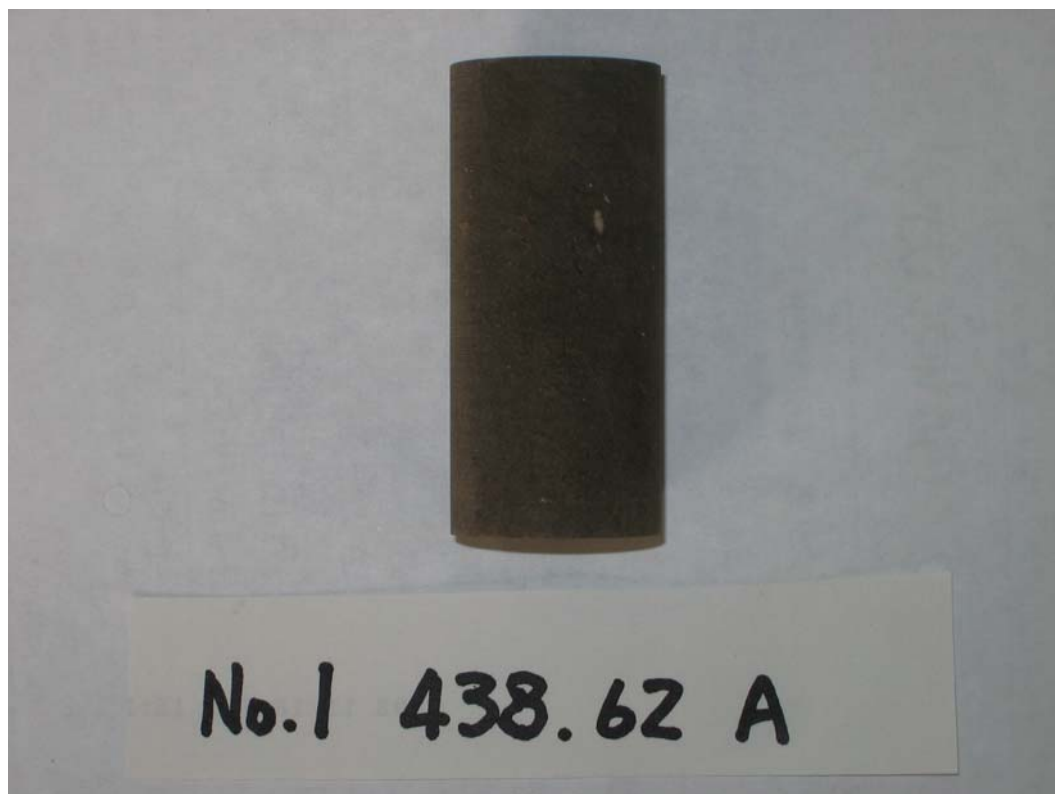


(試験前)



(試験後)

写真-13 一軸圧縮試験の試験体 438.62C 20°C



(試験前)



(試験後)

写真-14 クリープ試験の試験体 438.62A 20°C

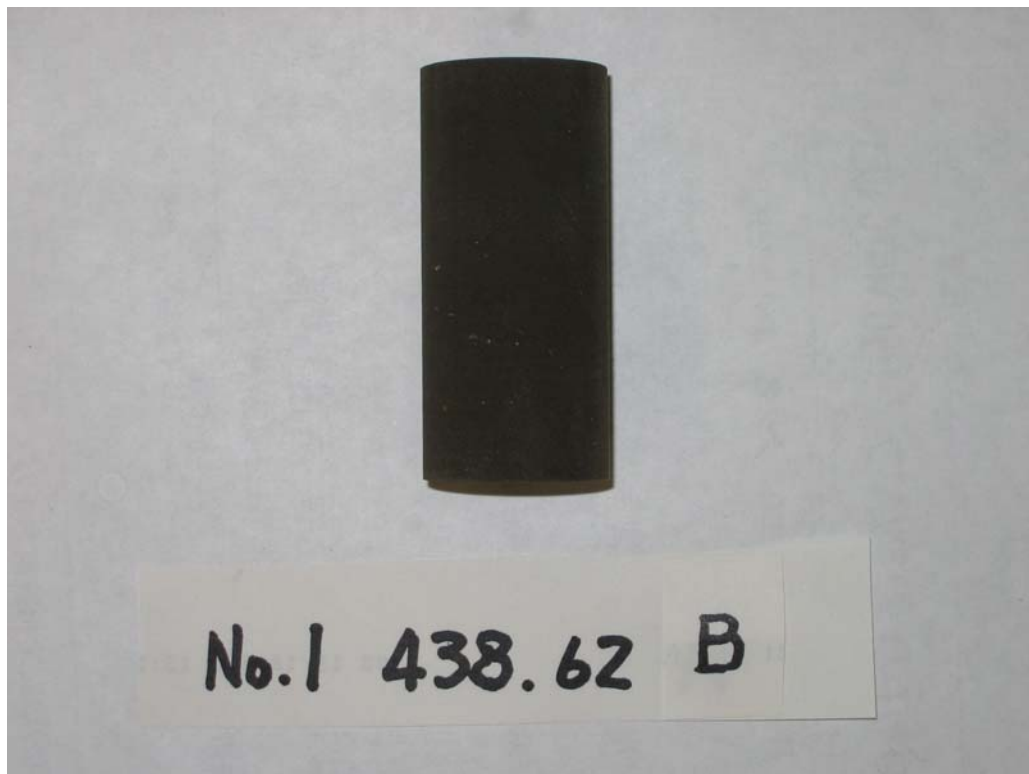


(試験前)



(試験後)

写真-15 一軸圧縮試験の試験体 438.62D 80℃

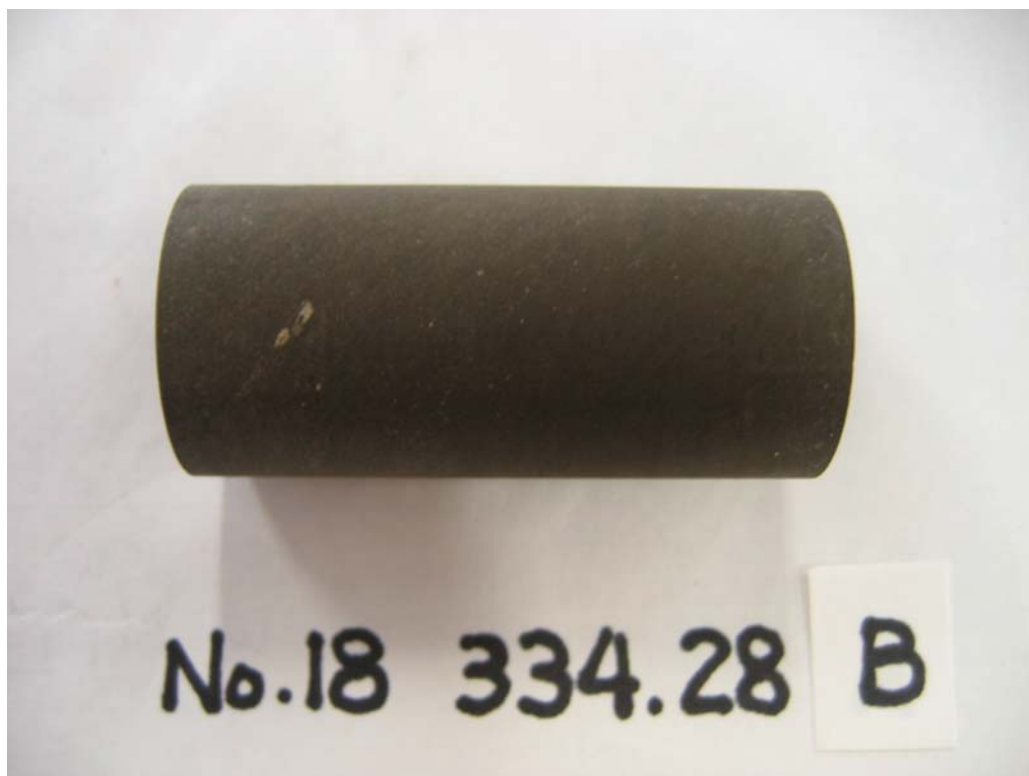


(試験前)



(試験後)

写真-16 クリープ試験の試験体 438.62B 80℃

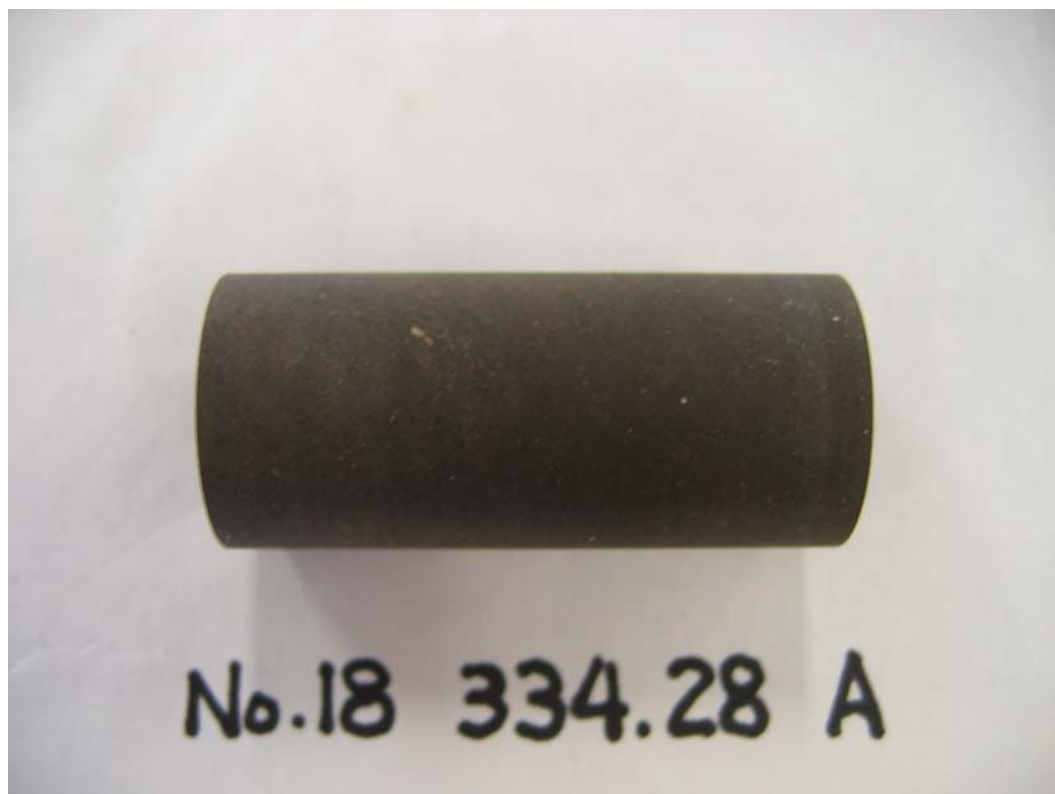


(試験前)



(試験後)

写真-17 一軸圧縮試験の試験体 334.28B 20°C

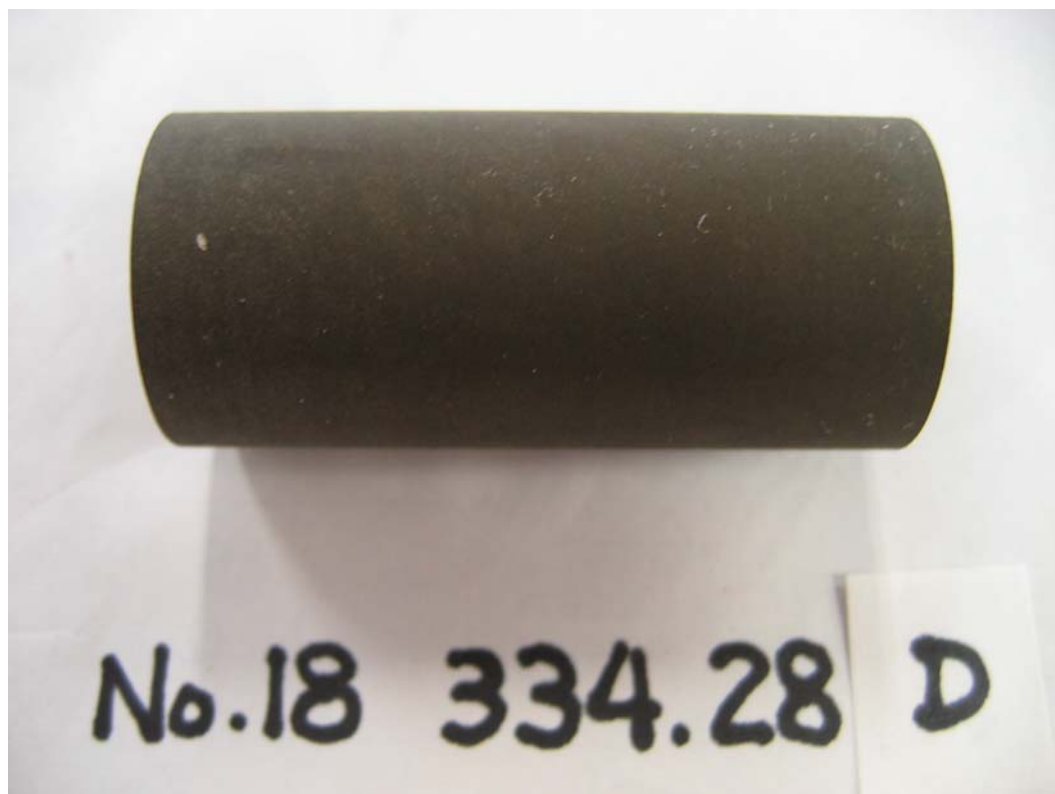


(試験前)



(試験後)

写真-18 クリープ試験の試験体 334.28A 20°C



(試験前)



(試験後)

写真-19 一軸圧縮試験の試験体 334.28D 80℃



(試験前)



(試験後)

写真-20 クリープ試験の試験体 334.28C 80℃



(試験前)



(試験後)

写真-21 一軸圧縮試験の試験体 438.26A 20°C



(試験前)



(試験後)

写真-22 一軸圧縮試験の試験体 438.26C 80℃



(試験前)



(試験後)

写真-23 一軸圧縮試験の試験体 438.26D 20℃



(試験前)



(試験後)

写真-24 一軸圧縮試験後の試験体 438.26B 80℃

付録－2 幌延深度 450m の支保条件の検討

付録－2.1 解析条件

(1) 岩盤物性

付録表-1 に示す岩盤物性を想定した。ここで一軸圧縮強度 q_u [MPa]は、式(3.2-1)を用いて粘着力 C [MPa]および内部摩擦角 ϕ [rad]から換算される値である。

付録表-1 幌延深度 450m における岩盤物性

想定条件	幌延 深度 450m
ヤング率 E [MPa]	2,500
ポアソン比 ν [-]	0.186
粘着力 C [MPa]	5.2
内部摩擦角 ϕ [°]	25.0
一軸圧縮強度 q_u [MPa]	16.3
引張強度 σ_t [MPa]	1.63
単位体積重量 γ [kN/m ³]	18.5

(2) 初期応力

付録表-2 に示す初期応力を想定した。ここで応力比 K とは鉛直方向応力に対する水平方向応力の比であり、EW は東西方向を、SN は南北方向を表す。また地山強度比 G_n は一軸圧縮強度（付録表-1）を鉛直方向応力で除した値である。

(3) 解析モデル

付録図-1 に示す解析モデルを用いた。研究坑道の形状は「第2次取りまとめ」と同様に内径 5.0m の三心円断面を想定した。ここでは研究坑道の軸方向を EW 方向とした場合についてのみ解析を行った。モデル側面および下面はそれぞれの面に対し垂直

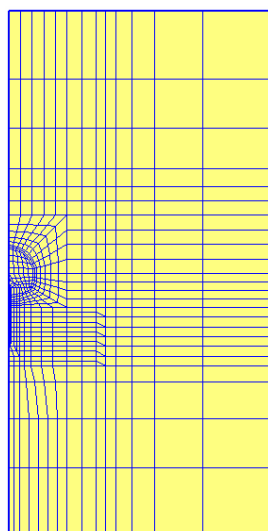
方向の変位を拘束した。モデル上面には深度相当の上載荷重を作用させ、付録図-2に示す初期応力状態を表現した。

研究坑道は一掘進長 1.0m で全断面掘削され、「第 2 次取りまとめ」と同様に応力解放率を 65%とした。支保工（梁要素でモデル化した）は付録表-3 に示すとおりとし、吹付けコンクリート（設計基準強度は 29MPa を想定した）のみをモデル化した。吹付けコンクリートの許容応力度（安全率を 4 とし 7.25MPa とした）を満足しない場合には吹付け厚を増加させることとした。

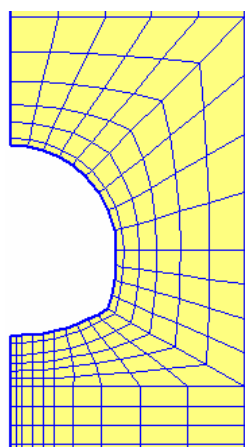
岩盤は Mohr-Coulomb の破壊規準に従う完全弾塑性体（体積変化なし）とし、付録表-1 に示す岩盤物性がモデル全体に分布しているものとした。解析には自社開発した有限要素法解析コードを用いた。

付録表-2 初期応力

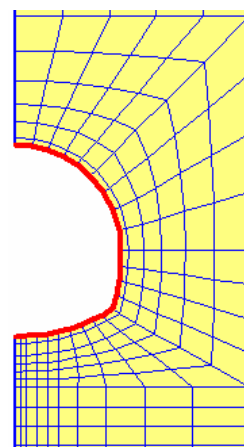
想定条件	幌延 深度 450m
鉛直方向応力 σ_v [MPa]	7.21
EW 方向応力比 K_{EW} [-]	1.30
SN 方向応力比 K_{SN} [-]	0.90
地山強度比 G_n [-]	2.26



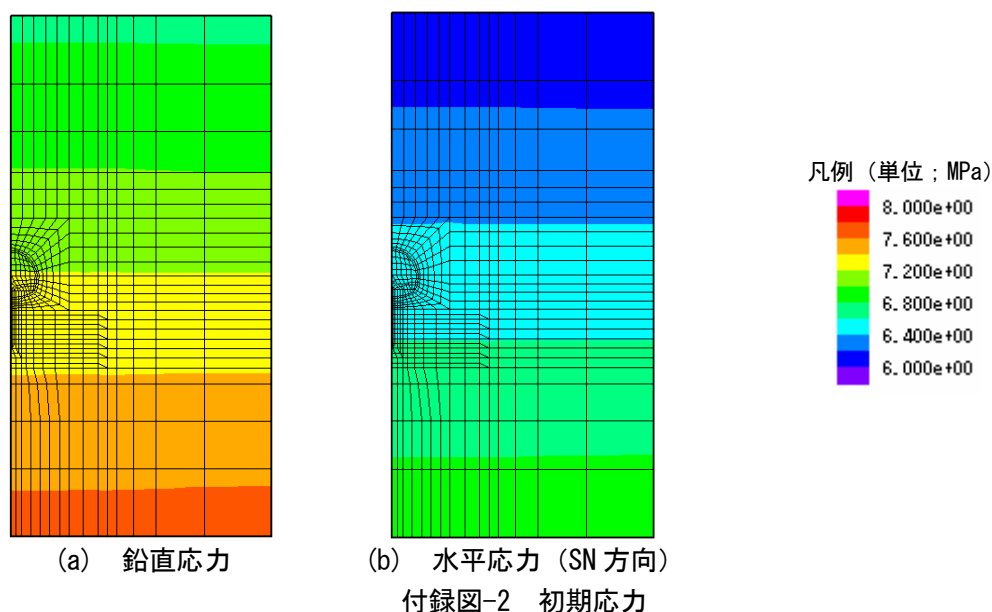
step1 初期応力



step2 応力解放 (65%)
付録図-1 解析モデル



step3 支保工設置



付録表-3 支保工

吹付けコンクリート	$t_c=0.2\text{m}$ $E_c=3,400\text{MPa}$
鋼製支保工	設置しない

t_c : 吹付け厚, E_c : 吹付けコンクリートヤング率

付録-2.2 解析結果

(1) 塑性化領域の分布

Mohr-Coulomb の破壊規準により塑性化すると判定される領域は発生しなかった。

(2) 最大せん断ひずみの分布

最大せん断ひずみの分布を付録図-3 に示す。地山の安定性の目安を得る上でしばしば用いられる限界せん断ひずみを付録表-4 に示す。

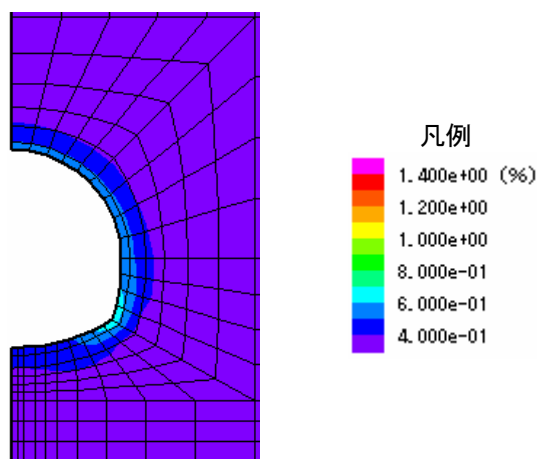
(3) 吹付けコンクリート発生応力

吹付けコンクリートの発生応力を付録図-4 に示す。発生応力は付録式(1)で求めた。

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{Z} \quad \text{付録式(1)}$$

ここに

- σ : 吹付けコンクリート発生応力 [MPa]
- N : 軸力 [MN]
- A : 断面積 (=0.2[m²])
- M : 曲げモーメント [MN・m]
- Z : 断面係数 [m³]



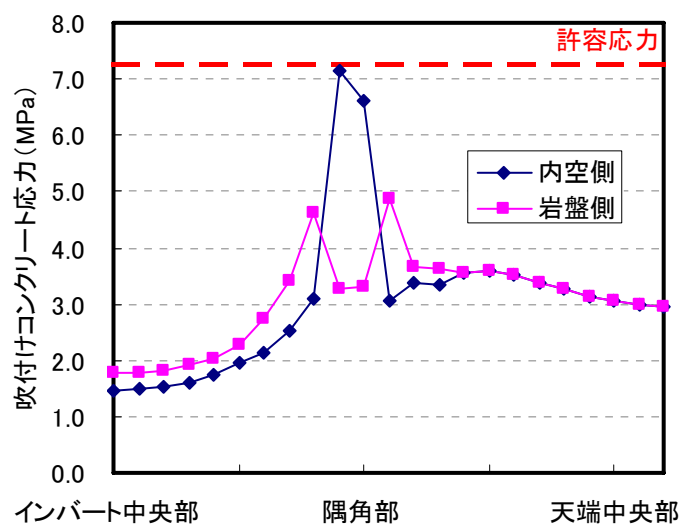
付録図-3 最大せん断ひずみの分布

付録表-4 限界せん断ひずみ

想定条件		幌延 深度 450m
ヤング率 E [MPa]		2,500
ポアソン比 ν [-]		0.186
限界ひずみ ε_c [-]	中央値 ¹⁾	4.8×10^{-3}
	上限値 ²⁾	1.1×10^{-2}
限界せん断ひずみ γ_c [-]	中央値	5.7×10^{-3}
	上限値	1.3×10^{-2}

1) $\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22$

2) $\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85$



付録図-4 吹付けコンクリート発生応力

(4) 結果まとめ

以下に示す結果が得られたことより、幌延深度 450m における検討では研究坑道の支保工として厚さ 0.2m の吹付けコンクリートを想定することとした。

- ・ 塑性化領域が発生しない
- ・ 隅角部に一部最大せん断ひずみが大きな領域が見られるものの、限界せん断ひずみに比較し小さい
- ・ 支保工の許容応力度 (安全率 4) を満足する