

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)

2004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)

2004

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）

井上 博之※ 吉野尚人※ 宮野前俊一※ 水谷和彦※ 野田兼司※

要 旨

本委託業務では、大久保モデルによる岩盤の長期力学的変形挙動評価手法の信頼性向上に資することを目的として、北海道幌延地域で採取された堆積軟岩を対象とした室内試験を行った。また、2002年度までの幌延試錘調査より判明している情報を用いて、幌延原位置試験実施予定領域の環境を想定し、処分坑構築時の空洞安定性評価に関する検討を行った。

その結果、熱や乾燥などの試験条件が異なる場合の大久保モデルの各パラメータを多数取得することに成功し、その結果をもとに算出したクリープ寿命と実測のクリープ寿命の比較検討を行うことができた。また、ピットの掘削時、および長期経過後の力学的安定性について解析的な検討を行い、変位や緩み域の進展は、初期の段階で顕著であり、徐々に収束傾向を示す結果を得た。

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委託研究契約により実施した研究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 Long-term Deformation of Soft Rock (II)
(Document Prepared by Other Organization, Based on The Trust Contract)

Hiroyuki Inoue*, Naoto Yoshino*, Shunichi Miyanomae*,
Kazuhiko Mizutani*, Kenji Noda*

Abstract

In this study, the laboratory mechanical tests of sedimentary soft rock sampled at HORONOBE area in HOKKAIDO prefecture were conducted in order to build the confidence of OKUBO model for long term deformation of sedimentary rock. And the stability of rock around tunnel in building under the condition assumed the underground of HORONOBE area was examined by numerical simulation using information of boring data obtained before 2002 year.

As a result, authors could obtain many values of parameter in OKUBO model under various conditions. These conditions have the difference of temperature and water saturation. In addition, the life time in creep predicted by OKUBO model could be compared with the real one. And numerical simulations, assuming various conditions such as stiffness of buffer material and yielding of support, had been carried out to evaluate the long-term stability of rock surrounding buffer material. Results show the decreasing tendency of time dependency 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 ボーリングコアを用いた試験	6
2. 2. 1 ボーリングコア採取	6
2. 2. 2 試験体の作成と選別	7
2. 2. 3 歪み速度を変化させた一軸圧縮試験	14
2. 2. 4 マルチクリープ試験	48
2. 3 今後の課題と提案	74
3. 幌延を条件とした岩盤の長期力学挙動評価	75
3. 1 検討概要	75
3. 2 検討条件の設定	77
3. 2. 1 対象深度の設定	77
3. 2. 2 研究坑道軸の配置方向の検討	80
3. 2. 3 研究坑道の支保の検討	82
3. 3 掘削時の挙動解析	84
3. 3. 1 研究坑道の掘削解析	84
3. 3. 2 ピットの掘削解析	88
3. 4 長期挙動解析	100
3. 4. 1 解析条件の設定	100
3. 4. 2 予備解析	104
3. 4. 3 本解析	109
4. おわりに	118
・参考文献	119
・付録-1 (水平方向コア抜き試験)	付-1(1)
・付録-2 (試験状況写真)	付-2(1)

表 目 次

表 2.1-1	α と m/n の関係	4
表 2.2-1	乾燥時間と再冠水後の試験体の状態に関する試験結果	9
表 2.2-2	試験体概要その 1 (計測値)	12
表 2.2-3	試験体概要その 2 (算出値)	13
表 2.2-4	一軸圧縮試験の試験条件等	15
表 2.2-5	一軸圧縮試験体の概要	16
表 2.2-6	一軸圧縮試験から算出した大久保モデルの定数等	17
表 2.2-7	クリープ試験基準試験体のまとめ	18
表 2.2-8	クリープ試験の試験条件等	49
表 2.2-9	クリープ試験体の概要	50
表 2.2-10	クリープ試験結果のまとめ	51
表 3.2-1	岩盤物性値	77
表 3.2-2	応力比	80
表 3.2-3	支保の条件	81
表 3.3-1	考慮したケース	89
表 3.3-2	長期挙動解析におけるピットの基本条件	98
表 3.4-1	解析手順	105
表 3.4-2	含水比 15%における緩衝材の物性値 (乾燥密度 1.6Mg/m^3)	106
表 3.4-3	解析に用いた物性値	109
表 3.4-4	解析手順	110
表 3.4-5	支保の降伏条件	111
表 A.1-1	横抜きコア試験体の寸法等	付-1(1)
表 A.1-2	横抜きコアの大久保モデル定数等	付-1(2)

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	乾燥時間と含水比低下率の関係	10	
図 2.2-2	試験体寸法の計測位置	11	
図 2.2-3	一軸圧縮試験装置の概念図	14	
図 2.2-4	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.04A)	水中常温	19
図 2.2-5	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.04A)	水中常温	19
図 2.2-6	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.04B)	水中常温	20
図 2.2-7	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.04B)	水中常温	20
図 2.2-8	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.12B)	水中常温	21
図 2.2-9	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.12B)	水中常温	21
図 2.2-10	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.12D)	水中常温	22
図 2.2-11	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.12D)	水中常温	22
図 2.2-12	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(463.04C)	水中常温	23
図 2.2-13	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(463.04C)	水中常温	23
図 2.2-14	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(463.04D)	水中常温	24
図 2.2-15	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(463.04D)	水中常温	24
図 2.2-16	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.35B)	水中 80 度	25
図 2.2-17	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.35B)	水中 80 度	25
図 2.2-18	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.35C)	水中 80 度	26
図 2.2-19	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.35C)	水中 80 度	26
図 2.2-20	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.96B)	水中 80 度	27
図 2.2-21	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.96B)	水中 80 度	27
図 2.2-22	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.96C)	水中 80 度	28
図 2.2-23	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.96C)	水中 80 度	28
図 2.2-24	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.43B)	乾燥	29
図 2.2-25	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.43B)	乾燥	29
図 2.2-26	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.43D)	乾燥	30
図 2.2-27	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.43D)	乾燥	30
図 2.2-28	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.51A)	乾燥	31
図 2.2-29	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.51A)	乾燥	31
図 2.2-30	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.51B)	乾燥	32
図 2.2-31	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.51B)	乾燥	32
図 2.2-32	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.59B)	乾湿水中常温	33

図 2.2-33	一軸圧縮試験	応力-歪み曲線(462.59B)	乾湿水中常温	33
図 2.2-34	一軸圧縮試験	時間-歪み曲線(462.59C)	乾湿水中常温	34
図 2.2-35	一軸圧縮試験	応力-歪み曲線(462.59C)	乾湿水中常温	34
図 2.2-36	一軸圧縮試験	時間-歪み曲線(462.88A)	乾湿水中常温	35
図 2.2-37	一軸圧縮試験	応力-歪み曲線(462.88A)	乾湿水中常温	35
図 2.2-38	一軸圧縮試験	時間-歪み曲線(462.88C)	乾湿水中常温	36
図 2.2-39	一軸圧縮試験	応力-歪み曲線(462.88C)	乾湿水中常温	36
図 2.2-40	一軸圧縮試験	応力-歪み曲線 (水中常温のまとめ)		37
図 2.2-41	一軸圧縮試験	応力-歪み曲線 (水中 80 度のまとめ)		37
図 2.2-42	一軸圧縮試験	応力-歪み曲線 (乾燥のまとめ)		38
図 2.2-43	一軸圧縮試験	応力-歪み曲線 (乾湿水中常温のまとめ)		38
図 2.2-44	載荷応力一定(5MPa)での寿命の比較	(HDB1 孔: 2002 年度報告)		41
図 2.2-45	載荷応力一定(5MPa)での寿命の比較	(HDB3 孔: 2003 年度報告)		41
図 2.2-46	応力レベル一定(80%)で寿命の比較	(HDB1 孔: 2002 年度報告)		42
図 2.2-47	応力レベル一定(80%)で寿命の比較	(HDB3 孔: 2003 年度報告)		42
図 2.2-48	n の比較	(HDB1 孔: 2002 年度報告)		43
図 2.2-49	n の比較	(HDB3 孔: 2003 年度報告)		43
図 2.2-50	$\lambda 1$ の比較	(HDB1 孔: 2002 年度報告)		44
図 2.2-51	$\lambda 1$ の比較	(HDB3 孔: 2003 年度報告)		44
図 2.2-52	一軸圧縮強度の比較	(HDB1 孔: 2002 年度報告)		45
図 2.2-53	一軸圧縮強度の比較	(HDB3 孔: 2003 年度報告)		45
図 2.2-54	弾性波速度と一軸圧縮強度の関係			47
図 2.2-55	クリープ試験装置の概念図			48
図 2.2-56	クリープ試験	経過時間-変位(462.04C)	水中常温	52
図 2.2-57	クリープ試験	経過時間-応力(462.04C)	水中常温	52
図 2.2-58	クリープ試験	経過時間-歪み速度(462.04C)	水中常温	53
図 2.2-59	クリープ試験	経過時間-歪み(462.04C)	水中常温	53
図 2.2-60	クリープ試験	経過時間-変位(462.12C)	水中常温	54
図 2.2-61	クリープ試験	経過時間-荷重(462.12C)	水中常温	54
図 2.2-62	クリープ試験	経過時間-歪み速度(462.12C)	水中常温	55
図 2.2-63	クリープ試験	経過時間-歪み(462.12C)	水中常温	55
図 2.2-64	クリープ試験	経過時間-変位(462.35D)	水中 80 度	56
図 2.2-65	クリープ試験	経過時間-応力(462.35D)	水中 80 度	56
図 2.2-66	クリープ試験	経過時間-歪み速度(462.35D)	水中 80 度	57
図 2.2-67	クリープ試験	経過時間-歪み(462.35D)	水中 80 度	57
図 2.2-68	クリープ試験	経過時間-変位(462.96D)	水中 80 度	58

図 2.2-69	クリープ試験	経過時間-応力(462.96D)	水中 80 度	58
図 2.2-70	クリープ試験	経過時間-歪み速度(462.96D)	水中 80 度	59
図 2.2-71	クリープ試験	経過時間-歪み(462.96D)	水中 80 度	59
図 2.2-72	クリープ試験	経過時間-変位(462.43C)	乾燥	60
図 2.2-73	クリープ試験	経過時間-応力(462.43C)	乾燥	60
図 2.2-74	クリープ試験	経過時間-歪み速度(462.43C)	乾燥	61
図 2.2-75	クリープ試験	経過時間-歪み(462.43C)	乾燥	61
図 2.2-76	クリープ試験	経過時間-変位(462.51D)	乾燥	62
図 2.2-77	クリープ試験	経過時間-応力(462.51D)	乾燥	62
図 2.2-78	クリープ試験	経過時間-歪み速度(462.51D)	乾燥	63
図 2.2-79	クリープ試験	経過時間-歪み(462.51D)	乾燥	63
図 2.2-80	クリープ試験	経過時間-変位(462.59A)	乾湿水中常温	64
図 2.2-81	クリープ試験	経過時間-応力(462.59A)	乾湿水中常温	64
図 2.2-82	クリープ試験	経過時間-歪み速度(462.59A)	乾湿水中常温	65
図 2.2-83	クリープ試験	経過時間-歪み(462.59A)	乾湿水中常温	65
図 2.2-84	クリープ試験	経過時間-変位(462.88D)	乾湿水中常温	66
図 2.2-85	クリープ試験	経過時間-応力(462.88D)	乾湿水中常温	66
図 2.2-86	クリープ試験	経過時間-歪み速度(462.88D)	乾湿水中常温	67
図 2.2-87	クリープ試験	経過時間-歪み(462.88D)	乾湿水中常温	67
図 2.2-88	破壊時の応力レベルにおける想定寿命と実測寿命			68
図 2.2-89	クリープ曲線の実測値と理論値 (462.04C)			
			水中常温 応力レベル 83%	69
図 2.2-90	クリープ曲線の実測値と理論値 (462.12C)			
			水中常温 応力レベル 200%	69
図 2.2-91	クリープ曲線の実測値と理論値 (462.35D)			
			水中 80 度 応力レベル 51%	70
図 2.2-92	クリープ曲線の実測値と理論値 (462.96D)			
			水中 80 度 応力レベル 27%	70
図 2.2-93	クリープ曲線の実測値と理論値 (462.43C)			
			乾燥 応力レベル 55%	71
図 2.2-94	クリープ曲線の実測値と理論値 (462.51D)			
			乾燥 応力レベル 49%	71
図 2.2-95	クリープ曲線の実測値と理論値 (462.59A)			
			乾湿水中常温 応力レベル 62%	72
図 2.2-96	クリープ曲線の実測値と理論値 (462.88D)			
			乾湿水中常温 応力レベル 63%	72

図 2.2-97	破壊時の応力レベル	73
図 3.1-1	岩盤の長期力学挙動検討フロー	76
図 3.2-1	地山強度比	79
図 3.2-2	理論解による結果	79
図 3.2-3	2次元解析モデル	81
図 3.2-4	塑性領域の分布	81
図 3.2-5	最大せん断ひずみの分布	81
図 3.2-6	支保発生応力 (吹付け厚さ 20cm)	83
図 3.2-7	支保発生応力 (吹付け厚さ 40cm)	83
図 3.3-1	3次元解析モデル	85
図 3.3-2	塑性領域の分布	85
図 3.3-3	最大せん断ひずみの分布	86
図 3.3-4	支保発生応力	87
図 3.3-5	天端部の変位	88
図 3.3-6	解析手順	89
図 3.3-7	塑性領域の分布 (ケース I)	90
図 3.3-8	塑性領域の分布 (ケース II)	90
図 3.3-9	塑性領域の分布 (ケース III)	90
図 3.3-10	最大せん断ひずみの分布 (ケース I)	91
図 3.3-11	最大せん断ひずみの分布 (ケース II)	91
図 3.3-12	最大せん断ひずみの分布 (ケース III)	91
図 3.3-13	支保発生応力	92
図 3.3-14	ピット壁面変位の測線	93
図 3.3-15	ピット壁面変位 (ケース I)	94
図 3.3-16	ピット壁面変位 (ケース II)	94
図 3.3-17	ピット壁面変位 (ケース III)	95
図 3.3-18	塑性領域の分布 (ケース III, 隣接考慮)	99
図 3.3-19	最大せん断ひずみの分布 (ケース III, 隣接考慮)	99
図 3.4-1	拘束圧作用に伴う破壊強度の変化	102
図 3.4-2	拘束圧作用に伴う m/n の変化	102
図 3.4-3	一軸圧縮強度と弾性係数の関係	103
図 3.4-4	一軸圧縮強度と n_0 の関係	103
図 3.4-5	応力状態の比較 (A 軸)	105
図 3.4-6	応力状態の比較 (B 軸)	105
図 3.4-7	緩衝材の一軸圧縮強度	106
図 3.4-8	緩衝材の弾性係数	106

図 3.4-9	ピット壁面変位の経時変化	107
図 3.4-10	低下領域の幅と変位の関係	108
図 3.4-11	10年後の弾性係数の分布	108
図 3.4-12	応力状態の比較 (A 軸)	111
図 3.4-13	応力状態の比較 (B 軸)	111
図 3.4-14	ピット壁面変位の経時変化	112
図 3.4-15	支保発生応力の強度への接近度の経時変化	112
図 3.4-16	ピット壁面変位の経時変化	113
図 3.4-17	緩み領域の経時変化	114
図 3.4-18	支保発生応力 (平均値) の強度への接近度の経時変化	114
図 3.4-19	変位速度と時間の関係 (両対数)	115
図 A.1-1	一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(463.00A)	
	水中常温 水平コア抜き	付-1(1)
図 A.1-2	一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.00A)	
	水中常温 水平コア抜き	付-1(2)
図 A.1-3	载荷応力一定(5MPa)での寿命の比較 (鉛直と水平コア抜き)	付-1(3)
図 A.1-4	応力レベル一定(80%)での寿命の比較 (鉛直と水平コア抜き)	付-1(3)
図 A.1-5	n の比較 (鉛直と水平コア抜き)	付-1(4)
図 A.1-6	m の比較 (鉛直と水平コア抜き)	付-1(4)
図 A.1-7	一軸圧縮強度の比較 (鉛直と水平コア抜き)	付-1(5)

写 真 目 次

写真 A.2-1	弾性波速度測定器	付-2(1)
写真 A.2-2	弾性波速度測定状況	付-2(1)
写真 A.2-3	岩石三軸圧縮試験機	付-2(2)
写真 A.2-4	一軸圧縮試験 載荷状況	付-2(2)
写真 A.2-5	一軸圧縮試験後 (水中常温 : 462.04A)	付-2(3)
写真 A.2-6	一軸圧縮試験後 (水中常温 : 462.04B)	付-2(3)
写真 A.2-7	一軸圧縮試験後 (水中常温 : 462.12B)	付-2(4)
写真 A.2-8	一軸圧縮試験後 (水中常温 : 462.12D)	付-2(4)
写真 A.2-9	一軸圧縮試験後 (水中常温 : 463.04C)	付-2(5)
写真 A.2-10	一軸圧縮試験後 (水中常温 : 463.04D)	付-2(5)
写真 A.2-11	一軸圧縮試験後 (水中 80 度 : 462.35B)	付-2(6)
写真 A.2-12	一軸圧縮試験後 (水中 80 度 : 462.35C)	付-2(6)
写真 A.2-13	一軸圧縮試験後 (水中 80 度 : 462.96B)	付-2(7)
写真 A.2-14	一軸圧縮試験後 (水中 80 度 : 462.96C)	付-2(7)
写真 A.2-15	一軸圧縮試験後 (乾燥 : 462.43B)	付-2(8)
写真 A.2-16	一軸圧縮試験後 (乾燥 : 462.43D)	付-2(8)
写真 A.2-17	一軸圧縮試験後 (乾燥 : 462.51A)	付-2(9)
写真 A.2-18	一軸圧縮試験後 (乾燥 : 462.51B)	付-2(9)
写真 A.2-19	一軸圧縮試験後 (乾湿水中常温 : 462.59B)	付-2(10)
写真 A.2-20	一軸圧縮試験後 (乾湿水中常温 : 462.59C)	付-2(10)
写真 A.2-21	一軸圧縮試験後 (乾湿水中常温 : 462.88A)	付-2(11)
写真 A.2-22	一軸圧縮試験後 (乾湿水中常温 : 462.88C)	付-2(11)
写真 A.2-23	クリープ試験機	付-2(12)
写真 A.2-24	クリープ試験機 (拡大) (水中 80℃条件)	付-2(12)
写真 A.2-25	クリープ試験後 A (水中常温 : 462.04C)	付-2(13)
写真 A.2-26	クリープ試験後 B (水中常温 : 462.04C)	付-2(13)
写真 A.2-27	クリープ試験後 A (水中常温 : 462.12C)	付-2(14)
写真 A.2-28	クリープ試験後 B (水中常温 : 462.12C)	付-2(14)
写真 A.2-29	クリープ試験後 A (水中常温 : 463.04A)	付-2(15)
写真 A.2-30	クリープ試験後 B (水中常温 : 463.04A)	付-2(15)
写真 A.2-31	クリープ試験後 A (水中 80 度 : 462.35D)	付-2(16)
写真 A.2-32	クリープ試験後 B (水中 80 度 : 462.35D)	付-2(16)
写真 A.2-33	クリープ試験後 A (水中 80 度 : 462.96D)	付-2(17)
写真 A.2-34	クリープ試験後 B (水中 80 度 : 462.96D)	付-2(17)

写真 A.2-35	クリープ試験後 A (乾湿水中常温 : 462.59A)	付-2(18)
写真 A.2-36	クリープ試験後 B (乾湿水中常温 : 462.59A)	付-2(18)
写真 A.2-37	クリープ試験後 A (乾湿水中常温 : 462.88D)	付-2(19)
写真 A.2-38	クリープ試験後 B (乾湿水中常温 : 462.88D)	付-2(19)

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分における人工バリア近傍（ニアフィールド）の岩盤は、人工バリアの長期的安全評価に大きな影響を与えることが想定される。そのため、ニアフィールド岩盤の長期的な諸特性を把握することは地層処分の安全評価上重要な検討項目となっている。一方、核燃料サイクル開発機構は「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。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、深地層研究に資するデータを蓄積することが望まれている。

「第2次とりまとめ（核燃料サイクル開発機構，1999）」では、非線形粘弾性モデルの一つであるコンプライアンス可変型クリープ構成則「大久保モデル」（大久保他，1987；大久保・金，1993；大久保・福井，1997）を使用して例示的に坑道の長期力学的安定性の評価を行っている。その後、堆積軟岩を対象として、大久保モデルを用いた岩盤の長期力学的変形挙動評価手法の信頼性向上を目的とした研究を行ってきた（井上・野田，2002；井上・南，2003）。その結果、試験体の温度や飽和度が岩盤の長期力学的変形挙動に影響を及ぼすことを定性的に把握することができた。しかし、大久保モデルにより長期力学的変形挙動を定量的に予測するためには、さらに多くのデータを蓄積するとともに、大久保モデルを用いた空洞解析手法の確立が必要になると考えられる。

本委託業務では、幌延地域に分布する堆積軟岩に対する大久保モデルの適用性を確認することと大久保モデルを使用した空洞安定解析手法について検討するために以下の検討を行った。

- ① ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす影響検討
- ② 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力学挙動に及ぼす影響検討では、幌延地域で採取された堆積軟岩を対象とした室内試験を実施した。また、試錘調査、および室内試験で得られた情報をもとに、幌延における処分技術の信頼性向上のための原位置試験が処分孔縦置き方式を模擬して行われる場合を想定し、ピット（模擬処分孔）の掘削時、および長期経過後の力学的安定性について、解析的に検討した。

空白

P. 2

2. ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす影響検討

処分後の高レベル放射性廃棄物からの熱や、処分場における掘削、操業、埋め戻しに伴うニアフィールド岩盤の飽和度の変化が、ニアフィールド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)が適用可能かどうかを把握するため、一軸圧縮試験およびクリープ試験を実施し、大久保モデルによる検討を行った。

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、 $\lambda (= \varepsilon / \sigma)$ 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 [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。

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

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。

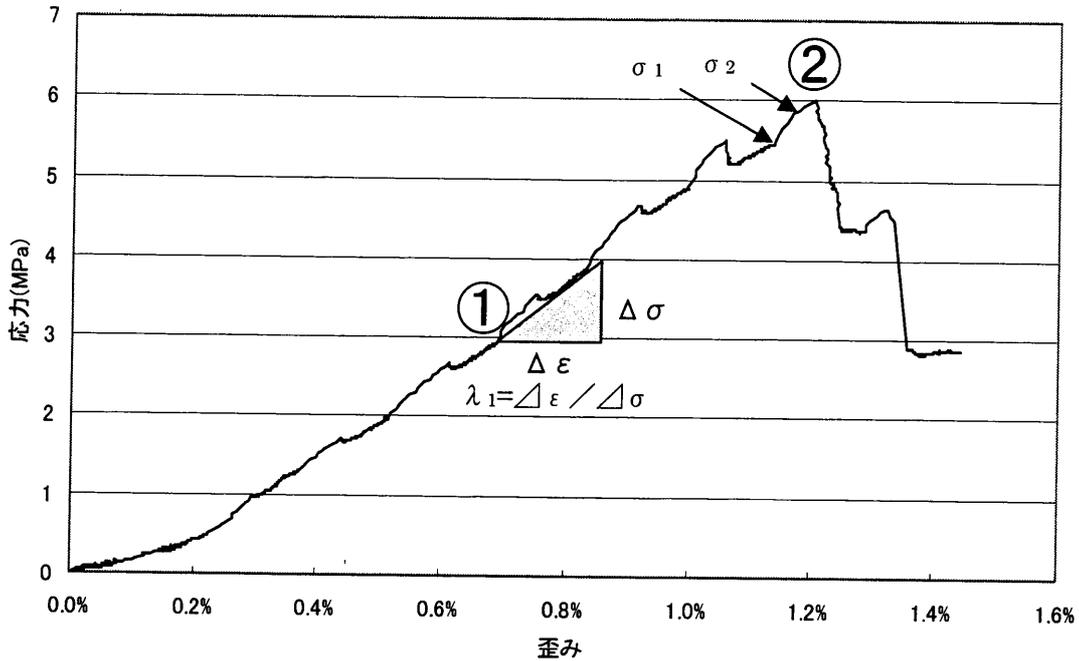


図 2.1-1 一軸圧縮試験での応力-ひずみ曲線の一例

(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 [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。

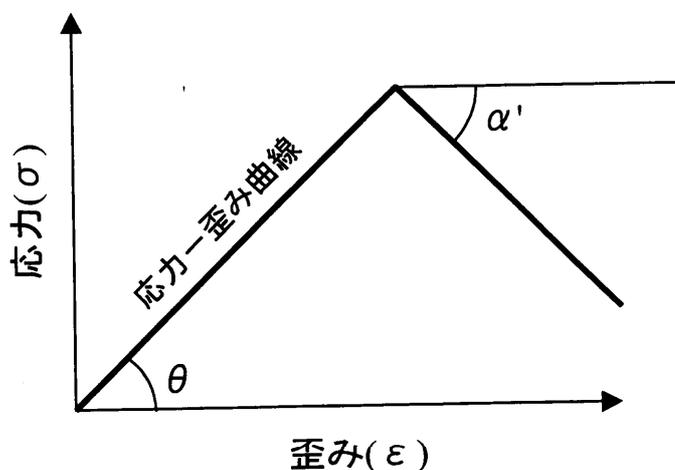


図 2.1-2 応力-歪み曲線から m を求めるときの考え方

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

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、载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。载荷応力を 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 マルチクリープ試験

以下の頁では上記各段階の詳細な説明および試験結果等について示す。

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、2002 年度には、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 HDB3～5 孔の 3 孔による試錐調査を実施している（サイクル機構、2003a）。さらに、2003 年度は深さ 500m 程度の試錐孔を 3 孔（HDB6～8 孔）掘削中である（サイクル機構、2003b）。

本研究では、このうち HDB3 孔のコア（直径 8.3cm、深度約 400m～450m、稚内層）を試験体として使用し、幌延地域に分布する堆積軟岩に対する大久保モデルの適用性確認を目的とした室内試験を実施した。なお、HDB3 孔の 300m 以深は、硬岩用ビット（外径 158.80 mm、内径 83.06 mm）を使用して掘削を行っている。そのため、採取されたコアの直径は約 83mm となっている。

また、HDB6 孔の深度約 300m 地点より、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 試験体の作成と選別

(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 であることから、1 本のコアから最高 4 本の試験体が採取可能となる。
- 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う。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 421.11A は試験体の中心位置が採取深度 421.11m 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) 弾性波速度試験

一般に、クリープ試験結果は、応力レベル（載荷応力／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。そのため、弾性波速度が等しいコアは力学的な特性も同様である可能性がある。本研究では、同一の深度から試験体コアが最大4個採取されることから、以下の手順で一軸圧縮試験用コアとクリープ試験用コアを選別した。

- ① 同一の深度で採取されたコアの V_P および V_S を測定し、平均値を算出する。
- ② 平均値に最も近い弾性波速度を示すコアを一軸圧縮試験用コア（一軸コア1）とする。この一軸コア1で得られる大久保モデルの各定数や一軸圧縮強度を使用してクリープ試験の応力レベルや寿命の予測などを行う。
- ③ 一軸圧縮試験用コアと最も近い弾性波速度を示すコアをクリープ試験用コア（クリープコア）とする。
- ④ 残り2つの試験体のうち、一軸圧縮試験用コアの弾性波速度と近い値を示すコアを参考用の一軸圧縮試験用コア（一軸コア2）とする。

ただし、クラックが入っているなど明らかに外見上他の試験体と異なる性状を呈している試験体については、試験に使用しないこととした。また、一軸コア1での一軸圧縮試験結果が異常であると認められる場合には、一軸コア2をクリープ試験の基準となる試験体とした。

（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度、③乾燥、④乾湿水中常温の4種類である。なお、試験体作成の際に使用した水は、HDB6孔の深度約300m地点より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 水中常温
水中、常温、一軸状態での試験である。
- ② 水中80度
上記①の試験条件に加えて、水温を80度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（ベントナイトの外縁）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度にした。
- ③ 乾燥
恒温恒湿室（温度約 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度約 $60 \pm 5\%$ ）で約1週間気中乾燥させた後での水中、常温、一軸状態での試験である。処分坑などの掘削に伴い壁面が気中乾燥する状態を想定している。なお、試験体の含水比を予め把握するために直径25mm高さ50mmの試験体を使用して1週間の気中乾燥による予備試験を行った。その

結果、試験体の含水比は約5%になっており、今回の乾燥条件は含水比約5%での試験となっていると考えられる。

④乾湿水中常温

恒温室で一定時間乾燥させ、水中に再度浸した状態での水中、常温、一軸状態での試験である。これは、トンネル掘削で一度乾燥した岩盤が処分後に再冠水する状態を想定している。

幌延地域のコア(HDB1 孔)を使用した過去の試験（井上・南, 2002）では、乾湿水中常温は全ての試験体が最冠水直後に破壊しており、ここでの試験も乾燥の程度によっては試験ができない可能性があると考えられた。そのため、事前に乾燥時間と再冠水後の試験体の状態について予備的な試験を行った。試験体はコアの破片を使用した。

その結果、表 2.2-1、図 2.2-1 に示すように、乾燥時間が3時間以内であれば試験体は破壊しておらず、一軸圧縮試験およびクリープ試験が実施可能であることが確認された。そのため、乾湿水中常温の試験における乾燥時間は全て3時間として試験体を作成した。

表 2.2-1 乾燥時間と再冠水後の試験体の状態に関する試験結果

乾燥時間 [hour]	試験体の大きさ	採取深度 [m]	状態	経過時間 [hour]	重量 [g]	含水比 [%]	含水比低下率*	再冠水後コア状態
2	小	462.43	飽和	0	15.040	27.79	9.96%	健全
			乾燥	2	14.714	25.02		
			絶乾		11.769	-		
3	中	462.43	飽和	0	48.179	27.72	13.43%	健全
			乾燥	3	46.775	24.00		
			絶乾		37.723	-		
4	小	462.12	飽和	0	15.539	28.10	23.56%	破壊
			乾燥	4	14.736	21.48		
			絶乾		12.130	-		
5	中	462.88	飽和	0	45.381	27.94	15.44%	健全
			乾燥	5	43.851	23.63		
			絶乾		35.470	-		
6	中	462.12	飽和	0	40.351	27.29	26.97%	破壊
			乾燥	6	38.018	19.93		
			絶乾		31.700	-		
24	大	462.35	飽和	0	349.278	27.38	30.72%	破壊
			乾燥	24	326.215	18.97		
			絶乾		274.200	-		
24	中	462.12	飽和	0	31.027	27.55	53.75%	破壊
			乾燥	24	27.425	12.74		
			絶乾		24.325	-		
24	小	462.12	飽和	0	9.921	26.82	58.06%	破壊
			乾燥	24	8.703	11.25		
			絶乾		7.823	-		

*含水比低下率 = (1 - (乾燥時の含水比 / 飽和時の含水比)) × 100

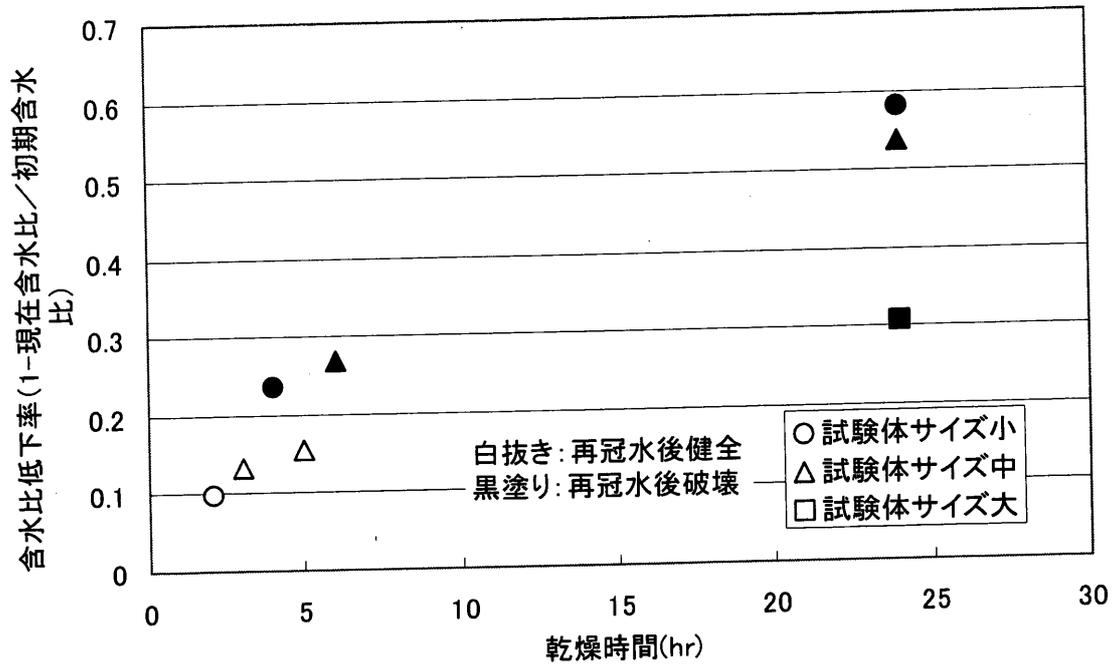


図 2.2-1 乾燥時間と含水比低下率の関係

(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 2.2-2 には試験体の寸法および重量などの計測値を、表 2.2-3 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。なお、用意した試験体の数量は予備の試験体も含んでいる。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 2.2-2 に示す位置での計測結果
- ③ 高さ (H1~H4) [cm] : 図 2.2-2 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×平均高さ
- ⑩ 湿潤密度 [g/cm^3] : 重量/体積
- ⑪ V_p [m/sec] : 縦波弾性波速度=平均高さ/ T_p
- ⑫ V_s [m/sec] : 横波弾性波速度=平均高さ/ T_s
- ⑬ 動ポアソン比 [-] : V_p と V_s 算出される動ポアソン比(ν_d) (式(2.2-1)参照)

$$\nu_d = \frac{(V_p/V_s)^2 - 2}{2\{(V_p/V_s)^2 - 1\}} \quad (2.2-1)$$

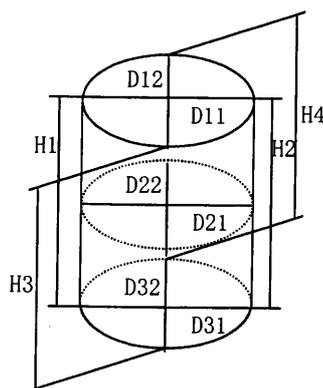


図 2.2-2 試験体寸法の計測位置

表 2.2-2 試験体概要その1 (計測値)

試験体番号	採取深度 [m]	重量 [g]	直径						高さ				Tp [μ sec]	Ts [μ sec]
			D11	D12	D21	D22	D31	D32	H1	H2	H3	H4		
			[cm]											
462.04A	464.04	44.7	2.459	2.468	2.464	2.474	2.464	2.473	5.018	5.020	5.020	5.018	22.3	47.9
462.04B	464.04	45.1	2.484	2.484	2.479	2.479	2.478	2.478	5.018	5.016	5.015	5.016	22.4	46.9
462.04C	464.04	43.6	2.444	2.466	2.443	2.463	2.430	2.446	5.000	4.997	4.997	4.999	22.4	47
462.04D	464.04	43.9	2.439	2.463	2.445	2.462	2.448	2.468	4.982	4.983	4.984	4.983	22.8	48.9
462.12B	462.12	44.1	2.454	2.458	2.447	2.457	2.442	2.453	4.993	4.988	4.984	4.985	24.5	47.7
462.12C	462.12	43.1	2.434	2.437	2.430	2.429	2.430	2.431	5.010	5.012	5.011	5.011	22.8	49.2
462.12D	462.12	44.3	2.459	2.436	2.463	2.454	2.454	2.453	5.008	5.007	5.005	5.006	23.4	49.6
462.20A	462.2	43.5	2.424	2.425	2.420	2.432	2.421	2.440	4.999	4.998	4.998	4.997	23.7	52.4
462.20B	462.2	43.9	2.452	2.430	2.456	2.437	2.455	2.439	5.012	5.014	5.015	5.012	23.7	44
462.20C	462.2	44.1	2.458	2.456	2.447	2.442	2.452	2.446	5.010	5.009	5.008	5.010	24.1	48.9
462.20D	462.2	43.2	2.421	2.437	2.430	2.434	2.417	2.427	4.984	4.983	4.984	4.984	24.8	48.5
462.35A	462.35	43.5	2.414	2.443	2.423	2.453	2.423	2.452	5.006	5.007	5.007	5.006	26.2	59.4
462.35B	462.35	43.7	2.442	2.451	2.442	2.453	2.457	2.467	4.937	4.937	4.938	4.939	24.8	56
462.35C	462.35	43.8	2.446	2.446	2.443	2.441	2.444	2.445	5.001	5.001	5.000	5.001	24.4	56.8
462.35D	462.35	43.6	2.448	2.418	2.445	2.418	2.448	2.420	4.995	4.995	4.994	4.994	25.4	59.4
462.43B	462.43	44	2.460	2.442	2.461	2.460	2.459	2.455	5.006	5.005	5.002	5.000	22.3	49
462.43C	462.43	43.3	2.448	2.422	2.449	2.418	2.451	2.428	5.005	5.005	5.002	5.000	22.3	50.8
462.43D	462.43	43.5	2.450	2.440	2.457	2.444	2.454	2.443	5.000	4.999	5.000	5.000	22.6	49.2
462.51A	462.51	43.8	2.437	2.456	2.439	2.455	2.438	2.454	5.006	5.006	5.008	5.007	22.6	49.6
462.51B	462.51	43.6	2.449	2.423	2.427	2.450	2.426	2.449	5.011	5.010	5.009	5.011	23.3	52.4
462.51C	462.51	43.3	2.426	2.433	2.433	2.437	2.433	2.434	4.998	4.999	5.004	5.002	24.1	51
462.51D	462.51	43.8	2.426	2.455	2.444	2.464	2.434	2.459	5.000	4.999	5.000	5.002	23.1	49.8
462.59A	462.59	44.3	2.462	2.456	2.462	2.459	2.465	2.465	5.003	5.003	5.003	5.003	23.2	54.2
462.59B	462.59	42.5	2.450	2.455	2.459	2.461	2.456	2.466	4.812	4.814	4.811	4.811	22.6	52.2
462.59C	462.59	44.4	2.463	2.453	2.461	2.462	2.478	2.477	5.012	5.013	5.013	5.013	23.1	53.4
462.59D	462.59	43.1	2.416	2.440	2.416	2.444	2.415	2.440	5.001	5.003	5.004	5.001	22	51.2
462.88A	462.88	42.9	2.410	2.407	2.410	2.403	2.410	2.407	5.007	5.009	5.009	5.008	24.5	55
462.88C	462.88	42.5	2.418	2.419	2.416	2.415	2.417	2.416	5.004	5.006	5.006	5.004	23.9	53
462.88D	462.88	43.2	2.432	2.432	2.436	2.433	2.435	2.431	5.002	5.002	5.005	5.005	23.7	53.6
462.96A	462.96	42.7	2.433	2.434	2.432	2.434	2.432	2.433	4.934	4.934	4.934	4.935	22.7	53.4
462.96B	462.96	43.7	2.438	2.440	2.441	2.439	2.439	2.440	5.016	5.017	5.015	5.015	22.8	54.4
462.96C	462.96	43.5	2.439	2.437	2.437	2.435	2.438	2.434	5.017	5.015	5.016	5.017	23.3	54.4
462.96D	462.96	43.6	2.450	2.443	2.440	2.437	2.442	2.440	4.990	4.989	4.988	4.989	24	54.6
463.04A	463.04	44.2	2.449	2.450	2.446	2.446	2.447	2.445	5.016	5.015	5.016	5.016	22.9	53.4
463.04C	463.04	43.5	2.444	2.445	2.441	2.444	2.439	2.439	4.968	4.969	4.968	4.968	23	52.4
463.04D	463.04	43.5	2.439	2.440	2.435	2.437	2.437	2.437	4.994	4.991	4.990	4.991	22.8	54.6

表 2.2-3 試験体概要その2 (算出値)

試験体番号	採取深度	重量	平均直径	断面積	平均高さ	体積	湿潤密度	Vp	Vs	動ポアソン比
	[m]	[g]	[cm]	[cm ²]	[cm]	[cm ³]	[g/cm ³]	[m/sec]	[m/sec]	[-]
462.04A	464.04	44.7	2.467	4.780	5.019	23.992	1.863	2251	1048	0.362
462.04B	464.04	45.1	2.480	4.832	5.016	24.238	1.861	2239	1070	0.352
462.04C	464.04	43.6	2.449	4.709	4.998	23.538	1.852	2231	1063	0.353
462.04D	464.04	43.9	2.454	4.730	4.983	23.572	1.862	2186	1019	0.361
462.12B	462.12	44.1	2.452	4.721	4.988	23.548	1.873	2036	1046	0.321
462.12C	462.12	43.1	2.432	4.645	5.011	23.275	1.852	2198	1018	0.363
462.12D	462.12	44.3	2.453	4.727	5.007	23.663	1.872	2140	1009	0.357
462.20A	462.2	43.5	2.427	4.626	4.998	23.122	1.881	2109	954	0.371
462.20B	462.2	43.9	2.445	4.694	5.013	23.535	1.865	2115	1139	0.296
462.20C	462.2	44.1	2.450	4.715	5.009	23.619	1.867	2079	1024	0.340
462.20D	462.2	43.2	2.428	4.629	4.984	23.069	1.873	2010	1028	0.323
462.35A	462.35	43.5	2.435	4.656	5.007	23.308	1.866	1911	843	0.379
462.35B	462.35	43.7	2.452	4.722	4.938	23.316	1.874	1991	882	0.378
462.35C	462.35	43.8	2.444	4.692	5.001	23.463	1.867	2049	880	0.387
462.35D	462.35	43.6	2.433	4.649	4.995	23.217	1.878	1966	841	0.388
462.43B	462.43	44	2.456	4.738	5.003	23.705	1.856	2243	1021	0.369
462.43C	462.43	43.3	2.436	4.661	5.003	23.317	1.857	2243	985	0.381
462.43D	462.43	43.5	2.448	4.707	5.000	23.532	1.849	2212	1016	0.366
462.51A	462.51	43.8	2.447	4.701	5.007	23.536	1.861	2215	1009	0.369
462.51B	462.51	43.6	2.437	4.666	5.010	23.376	1.865	2150	956	0.377
462.51C	462.51	43.3	2.433	4.648	5.001	23.243	1.863	2075	981	0.356
462.51D	462.51	43.8	2.447	4.703	5.000	23.515	1.863	2165	1004	0.363
462.59A	462.59	44.3	2.462	4.759	5.003	23.808	1.861	2156	923	0.388
462.59B	462.59	42.5	2.458	4.745	4.812	22.831	1.862	2129	922	0.385
462.59C	462.59	44.4	2.466	4.775	5.013	23.935	1.855	2170	939	0.385
462.59D	462.59	43.1	2.429	4.632	5.002	23.170	1.860	2274	977	0.387
462.88A	462.88	42.9	2.408	4.553	5.008	22.805	1.881	2044	911	0.376
462.88C	462.88	42.5	2.417	4.588	5.005	22.961	1.851	2094	944	0.372
462.88D	462.88	43.2	2.433	4.650	5.004	23.265	1.857	2111	933	0.378
462.96A	462.96	42.7	2.433	4.649	4.934	22.940	1.861	2174	924	0.390
462.96B	462.96	43.7	2.440	4.674	5.016	23.444	1.864	2200	922	0.393
462.96C	462.96	43.5	2.437	4.663	5.016	23.392	1.860	2153	922	0.388
462.96D	462.96	43.6	2.442	4.684	4.989	23.367	1.866	2079	914	0.380
463.04A	463.04	44.2	2.447	4.703	5.016	23.591	1.874	2190	939	0.387
463.04C	463.04	43.5	2.442	4.684	4.968	23.269	1.869	2160	948	0.381
463.04D	463.04	43.5	2.438	4.666	4.992	23.292	1.868	2189	914	0.394

2. 2. 3 歪み速度を変化させた一軸圧縮試験

2. 1で示したように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。なお、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

一軸圧縮試験には図 2.2-3 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実験を行った。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。

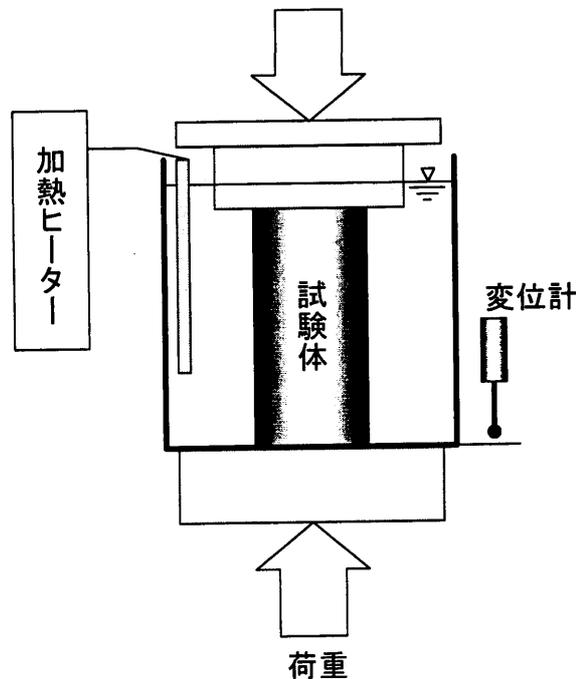


図 2.2-3 一軸圧縮試験装置の概念図

(3) 一軸圧縮試験条件

一軸圧縮試験の試験条件を表 2.2-4 にまとめて示す。

表 2.2-4 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 (HDB3 孔)
載荷方法	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"> ・水中常温・・・真空飽和→試験 ・水中 80 度・・・真空飽和→24 時間の 80 度保温→試験 ・乾燥・・・真空飽和→1 週間の真空乾燥→試験 ・乾湿水中常温・・・真空飽和→3 時間気中乾燥→浸水して 24 時間の真空脱気→試験 <p>※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。</p> <p>※真空飽和および試験には幌延 HDB6 孔の深度 300m 付近で採取した水を真空脱気したものを使用した。</p>
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)

(4) 一軸圧縮試験体の概要

一軸圧縮試験に使用した試験体の概要を表 2.2-5 にまとめて示す。今回の一軸圧縮試験とクリープ試験は同一深度で採取した試験体を使用し、クリープ寿命の予測精度を向上させるようにしている。そのため、クリープ試験でクリープ曲線が得られない（クリープ試験失敗）場合、採取深度が同じ一軸圧縮試験結果はクリープ試験に反映されない。深度 463.04m の試験体はクリープ試験で荷重を増加している最中に試験体が破壊し、クリープ曲線が得られなかった。そのため、試験条件「水中常温」は試験数を増加させた。

表 2.2-5 一軸圧縮試験体の概要

試験体番号	採取深度	重量	平均直径	断面積	平均高さ	体積	湿潤密度	Vp	Vs	動ポアソン比	試験条件	備考
	[m]	[g]	[cm]	[cm ²]	[cm]	[cm ³]	[g/cm ³]	[m/sec]	[m/sec]	[-]		
462.04A	464.04	44.7	2.467	4.780	5.019	23.992	1.863	2251	1048	0.362	水中常温	
462.04B	464.04	45.1	2.480	4.832	5.016	24.238	1.861	2239	1070	0.352	水中常温	
462.12B	462.12	44.1	2.452	4.721	4.988	23.548	1.873	2036	1046	0.321	水中常温	
462.12D	462.12	44.3	2.453	4.727	5.007	23.663	1.872	2140	1009	0.357	水中常温	
463.04C	463.04	43.5	2.442	4.684	4.968	23.269	1.869	2160	948	0.381	水中常温	クリープ試験失敗
463.04D	463.04	43.5	2.438	4.666	4.992	23.292	1.868	2189	914	0.394	水中常温	
462.35B	462.35	43.7	2.452	4.722	4.938	23.316	1.874	1991	882	0.378	水中80度	
462.35C	462.35	43.8	2.444	4.692	5.001	23.463	1.867	2049	880	0.387	水中80度	
462.96B	462.96	43.7	2.440	4.674	5.016	23.444	1.864	2200	922	0.393	水中80度	
462.96C	462.96	43.5	2.437	4.663	5.016	23.392	1.860	2153	922	0.388	水中80度	
462.43B	462.43	44	2.456	4.738	5.003	23.705	1.856	2243	1021	0.369	乾燥	
462.43D	462.43	43.5	2.448	4.707	5.000	23.532	1.849	2212	1016	0.366	乾燥	
462.51A	462.51	43.8	2.447	4.701	5.007	23.536	1.861	2215	1009	0.369	乾燥	
462.51B	462.51	43.6	2.437	4.666	5.010	23.376	1.865	2150	956	0.377	乾燥	
462.59B	462.59	42.5	2.458	4.745	4.812	22.831	1.862	2129	922	0.385	乾湿水中常温	
462.59C	462.59	44.4	2.466	4.775	5.013	23.935	1.855	2170	939	0.385	乾湿水中常温	
462.88A	462.88	42.9	2.408	4.553	5.008	22.805	1.881	2044	911	0.376	乾湿水中常温	
462.88C	462.88	42.5	2.417	4.588	5.005	22.961	1.851	2094	944	0.372	乾湿水中常温	

(5) 一軸圧縮試験結果

時間—歪み曲線、応力—歪み曲線を図 2.2-4～図 2.2-43 に示す。なお、図 2.2-4～図 2.2-15 は水中常温、図 2.2-16～図 2.2-23 は水中 80 度、図 2.2-24～図 2.2-31 は乾燥、図 2.2-32～図 2.2-39 は乾湿水中常温を示す。図 2.2-40～図 2.2-43 は各試験別にまとめたものである。応力—歪み曲線の中には大久保モデルによる理論曲線も併記している。また、応力—歪み曲線から算出される大久保モデルの各定数を表 2.2-6 にまとめて示す。なお、 m については、ほとんどの応力—歪み曲線より、 α (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 (3) m について参照) は明瞭な角度が限定できず、ほぼ 90 度となっていたことから、今回の検討では $\alpha \approx 90$ 度として $m=n$ とした。全体的な傾向として λ_1 は約 0.0005～約 0.0015 [MPa]の間、 n は 20～50 の間に分布していることがわかる。また、 σ_v は乾燥では約 20～40[MPa]に分布しているが、その他の試験条件では乾燥よりも小さい傾向にあることがわかる。

試験条件別の大久保モデル各定数の詳細な傾向および HDB1 の結果との比較については、(6) 一軸圧縮試験の考察で示す。

表 2.2-6 一軸圧縮試験から算出した大久保モデルの定数等

試験体番号	試験条件	λ_1	n	m	a	σ_v	備考
		[MPa]	[-]	[-]	[MPa·sec]	[MPa]	
462.04A	水中常温	0.0005058	49	49	8.53E+90	20.30	
462.04B	水中常温	0.0006492	20	20	2.69E+32	17.55	
462.12B	水中常温	0.0005836	43	43	1.50E+88	10.92	
462.12D	水中常温	0.0007853	18	18	1.16E+35	6.65	
463.04C	水中常温	0.0013400	50	50	2.48E+85	10.97	クリープ試験失敗
463.04D	水中常温	0.0008500	42	42	3.33E+74	13.97	
462.35B	水中80度	0.0009749	48	48	4.36E+89	10.33	
462.35C	水中80度	0.0014000	21	21	7.45E+32	9.86	
462.96B	水中80度	0.0011935	23	23	1.47E+35	13.17	
462.96C	水中80度	0.0009351	24	24	7.07E+39	12.77	
462.43B	乾燥	0.0006411	22	22	3.19E+30	31.78	
462.43D	乾燥	0.0005585	43	43	1.18E+65	38.19	
462.51A	乾燥	0.0006621	41	41	7.15E+56	42.26	
462.51B	乾燥	0.0008193	50	50	1.61E+86	17.13	
462.59B	乾湿水中常温	0.0009672	21	21	1.29E+34	12.33	
462.59C	乾湿水中常温	0.0007137	22	22	5.03E+34	18.84	
462.88A	乾湿水中常温	0.0014119	20	20	1.09E+32	8.74	
462.88C	乾湿水中常温	0.0005508	41	41	4.48E+68	26.49	

λ_1 : 初期コンプライアンス

n, m, a : 大久保モデルの定数 (ただし、 a は λ_1, n, m から算出している)

σ_v : 一軸圧縮強度

表 2.2-7 に予定クリープ試験体別の想定される一軸圧縮強度（想定圧縮強度）などをまとめたものを示す。予定クリープ試験体とその基準用の一軸圧縮試験体（基準試験体）は、当初、同一深度で弾性波速度（ V_p ）が近い値になるように選定した。しかし、一軸圧縮試験の応力-歪み曲線より一軸圧縮強度発現前に破壊が発生したのではないかと疑われるものについては、原則として基準から外すこととした。そのため、表中の予定クリープ試験体 462.04C, 462.43C, 462.51D, 462.59A の基準試験体は、当初の基準試験体とは異なっている。

表 2.2-7 クリープ試験基準試験体のまとめ

試験体番号	試験条件	V_p [m/sec]	当初の基準試験体 ※1	実際の基準試験体 ※2	一軸圧縮強度 [MPa]	予定クリープ試験体		想定圧縮強度 [MPa]	備考
						試験体番号	弾性波速度 [m/sec]		
462.04A	水中常温	2251		○	20.3	462.04C	2231	20.3	※3
462.04B	水中常温	2239	○		17.55				
462.12B	水中常温	2036			10.92	462.12C	2198	6.65	
462.12D	水中常温	2140	○	○	6.65				
463.04C	水中常温	2160			10.97	463.04A	2190	13.97	クリープ試験失敗
463.04D	水中常温	2189	○	○	13.97				
462.35B	水中80度	1991	○	○	10.33	462.35D	1966	10.33	
462.35C	水中80度	2049			9.86				
462.96B	水中80度	2200			13.17	462.96D	2079	12.77	
462.96C	水中80度	2153	○	○	12.77				
462.43B	乾燥	2243	○		31.78	462.43C	2243	38.19	※3
462.43D	乾燥	2212		○	38.19				
462.51A	乾燥	2215		○	42.26	462.51D	2165	42.26	※3
462.51B	乾燥	2150	○		17.13				
462.59B	乾湿水中常温	2129		○	12.33	462.59A	2156	12.33	※3
462.59C	乾湿水中常温	2170	○		18.84				
462.88A	乾湿水中常温	2044			8.74	462.88D	2111	26.49	
462.88C	乾湿水中常温	2094	○	○	26.49				

※1 当初の基準試験体は一軸圧縮試験前に弾性波速度をもとに、クリープ試験時の想定圧縮強度を求める予定にしていた試験体である。

※2 実際の基準試験体はクリープ試験に際して実際に想定圧縮強度を求めた試験体である。

※3 当初の基準試験体と実際の基準試験体異なるのは、一軸圧縮試験結果の応力-歪み曲線からの判断である。具体的には、一軸圧縮応力発現前に部分的に破壊が進行したのではないかと疑われる試験体については基準試験体とはしなかった。

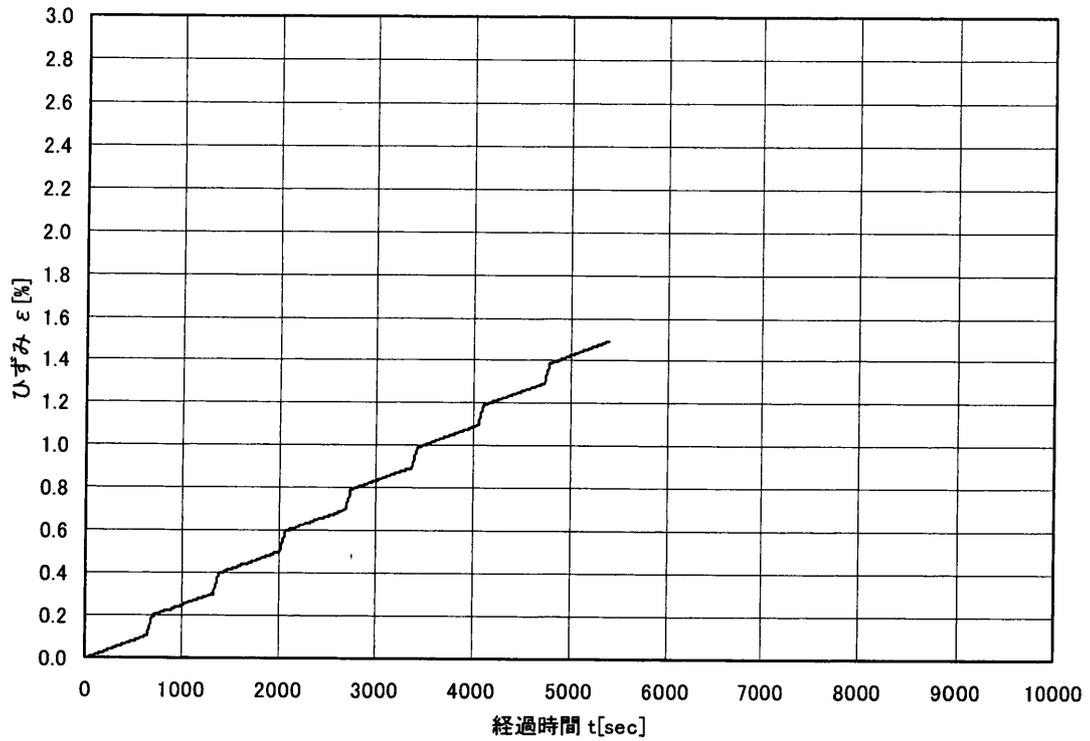


図 2.2-4 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.04A) 水中常温

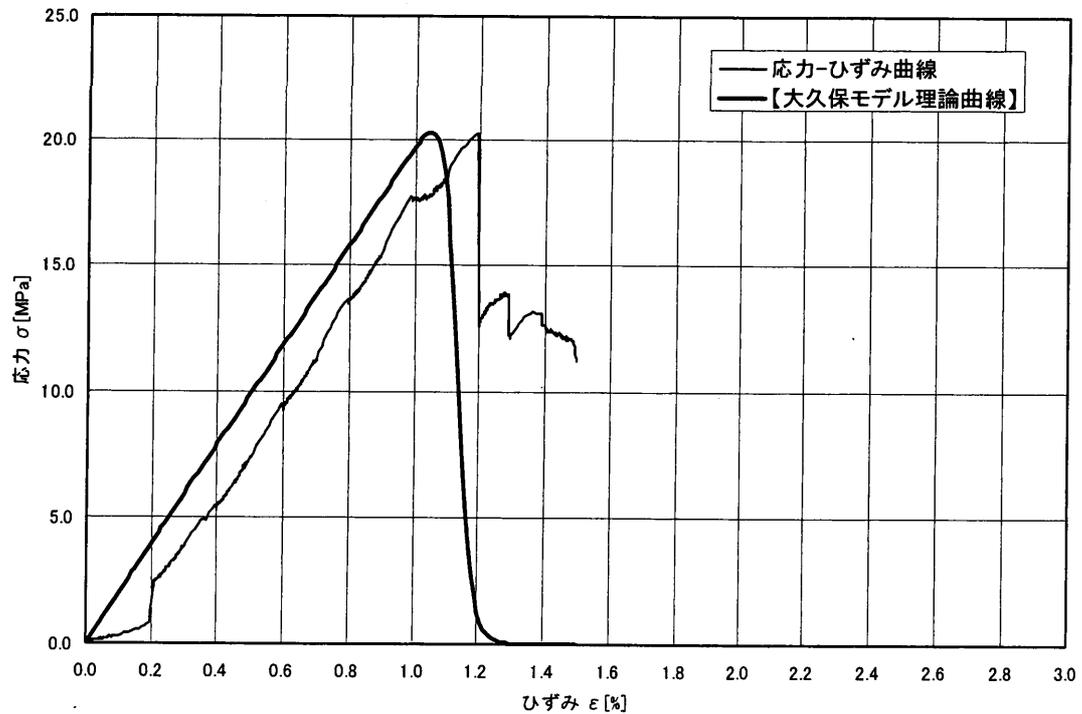


図 2.2-5 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.04A) 水中常温

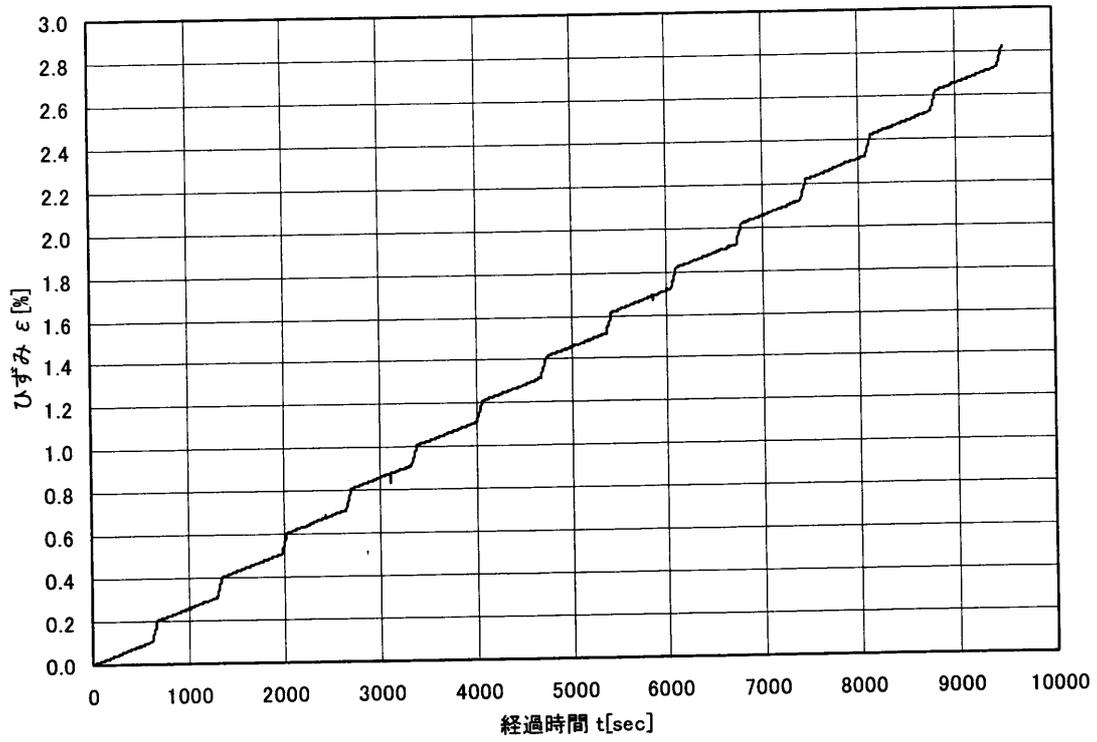


図 2.2-6 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線 (462.04B) 水中常温

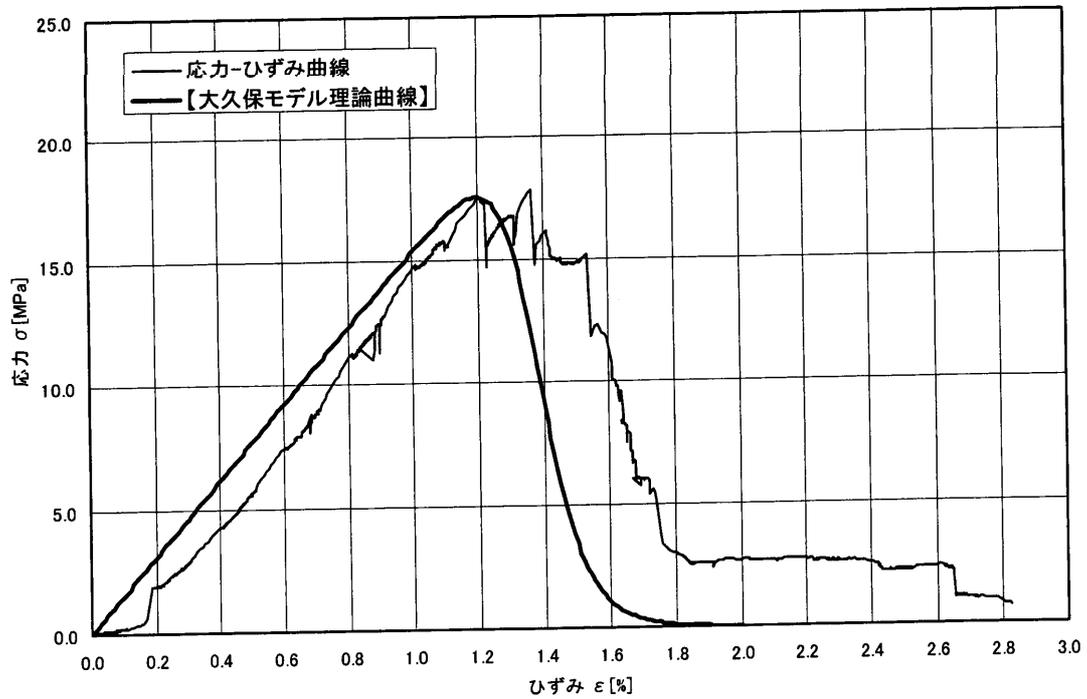


図 2.2-7 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線 (462.04B) 水中常温

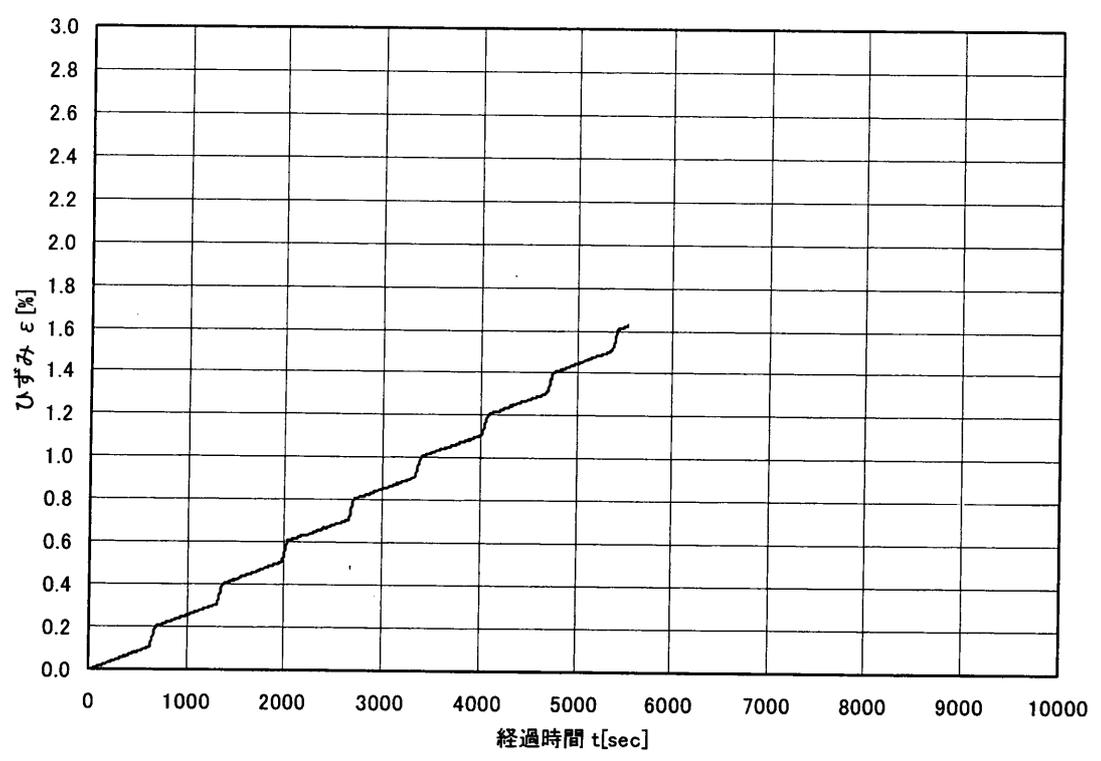


図 2.2-8 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.12B) 水中常温

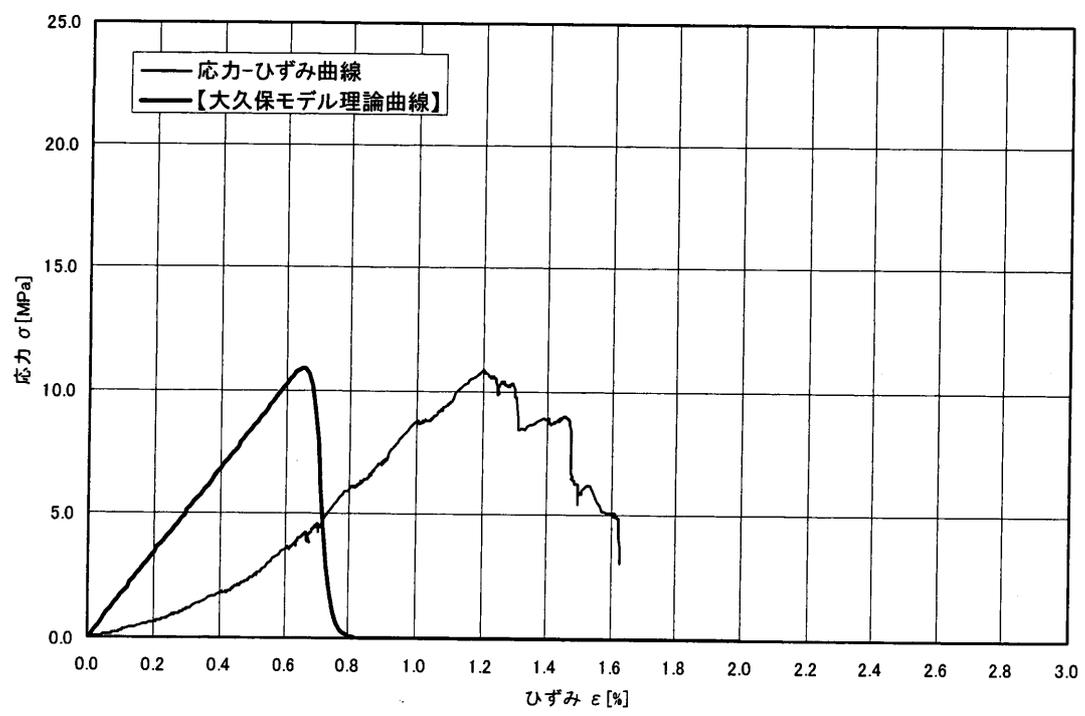


図 2.2-9 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.12B) 水中常温

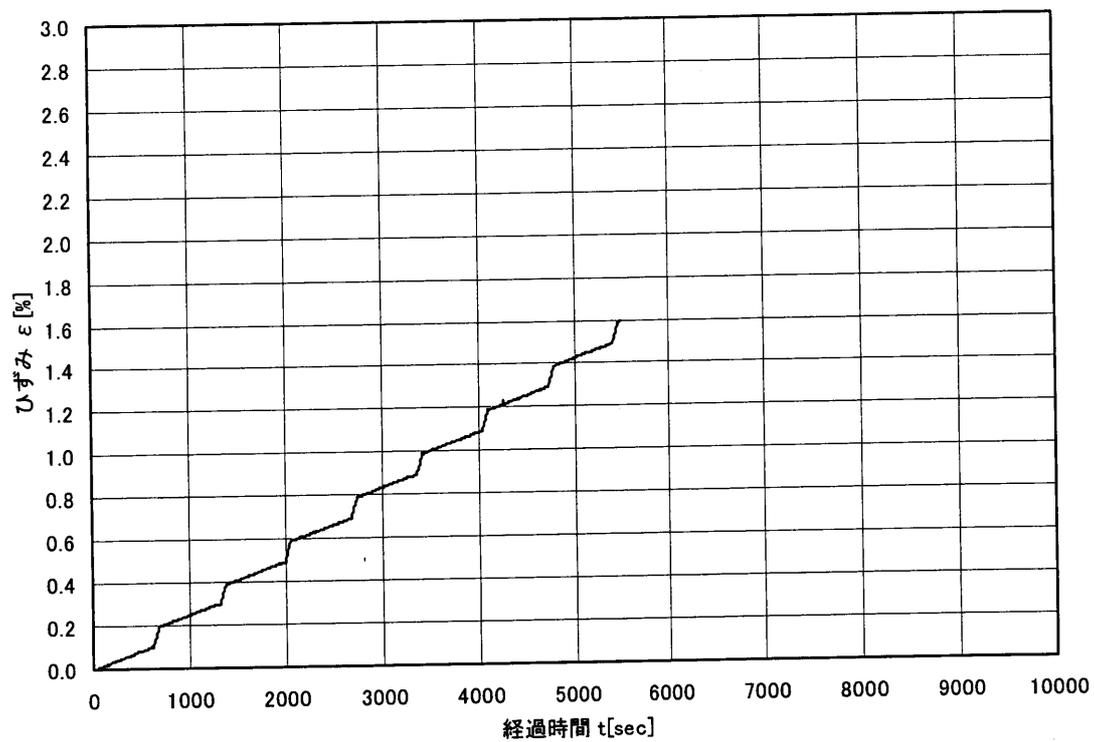


図 2.2-10 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.12D) 水中常温

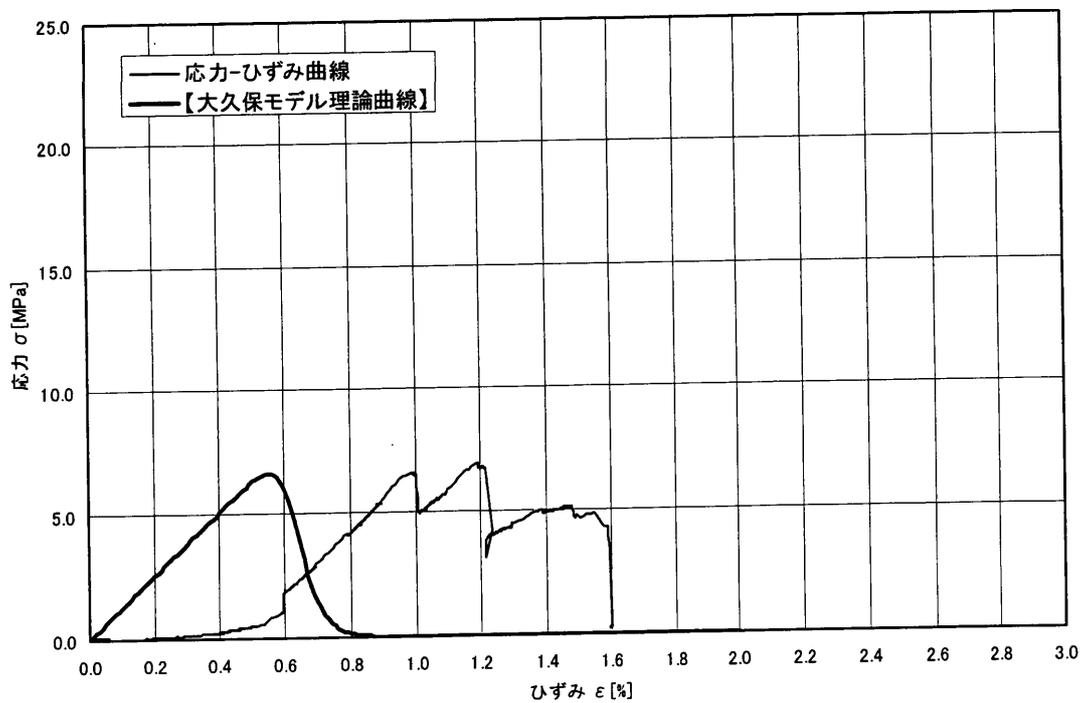


図 2.2-11 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.12D) 水中常温

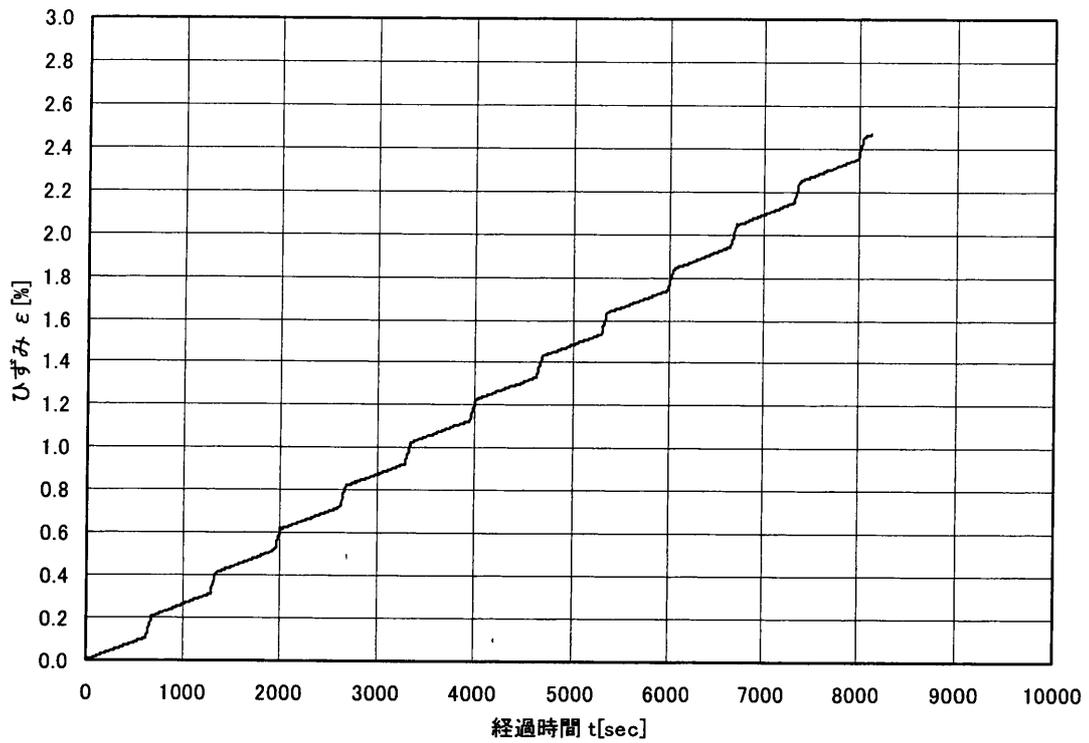


図 2.2-12 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(463.04C) 水中常温

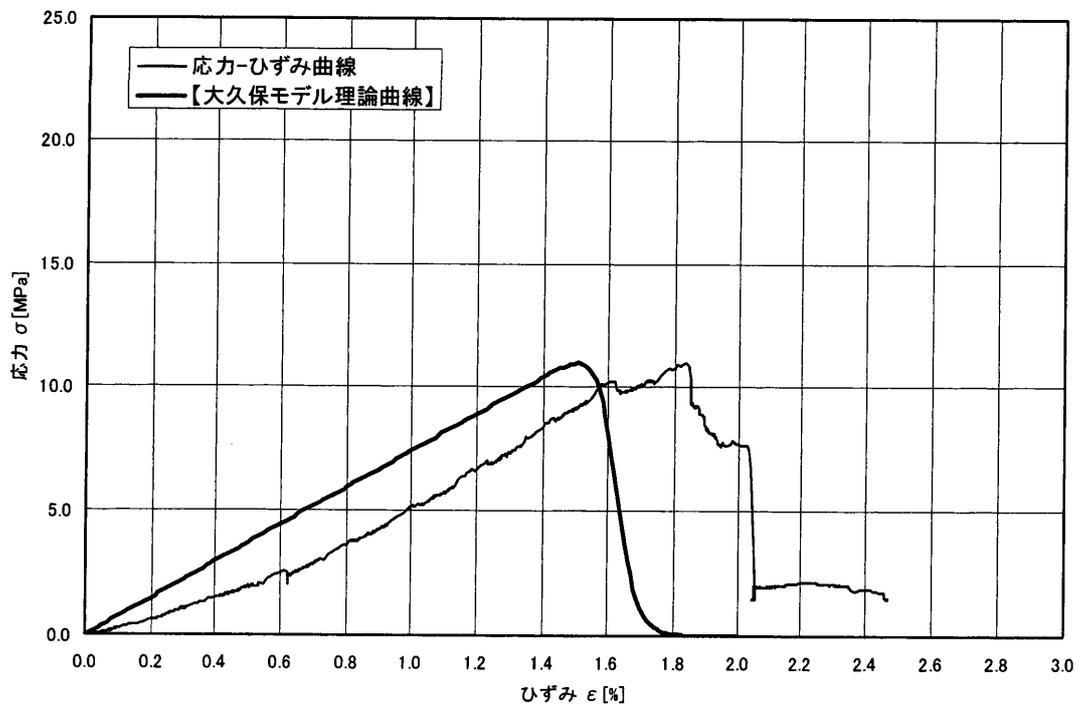


図 2.2-13 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(463.04C) 水中常温

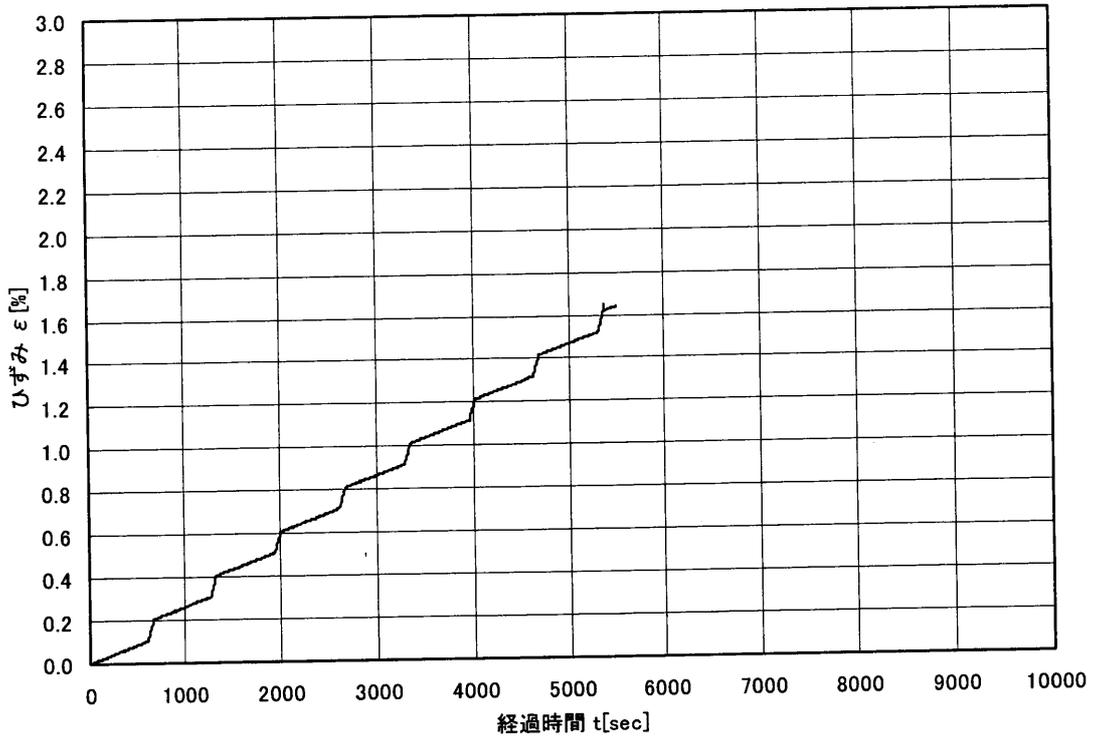


図 2.2-14 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線 (463.04D) 水中常温

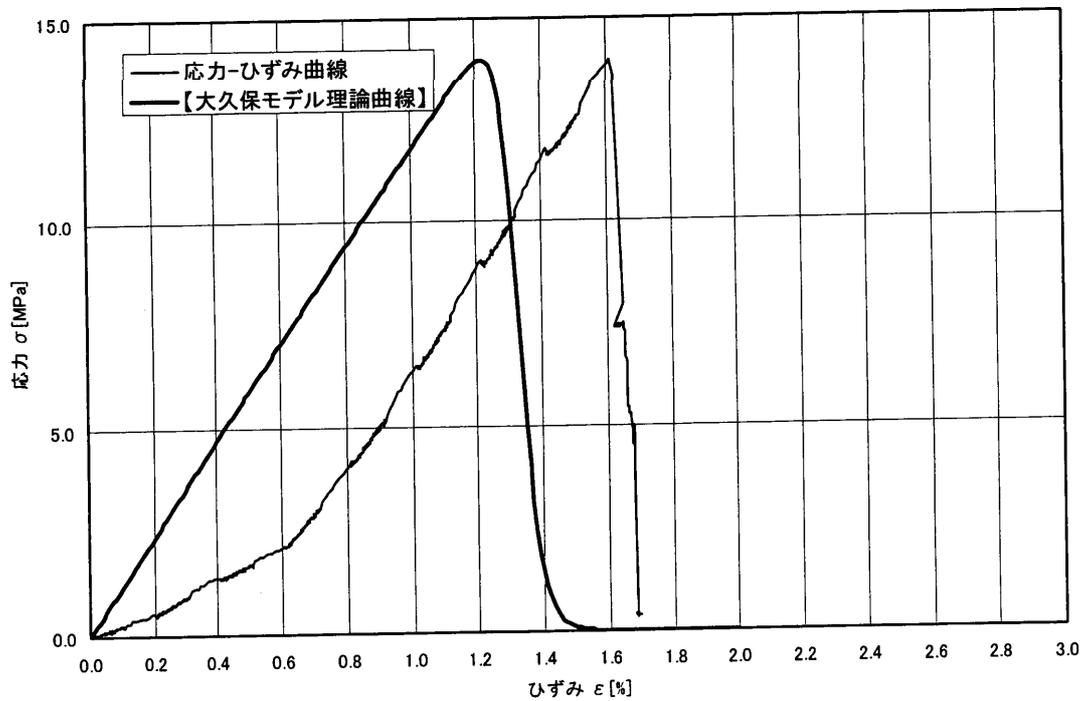


図 2.2-15 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線 (463.04D) 水中常温

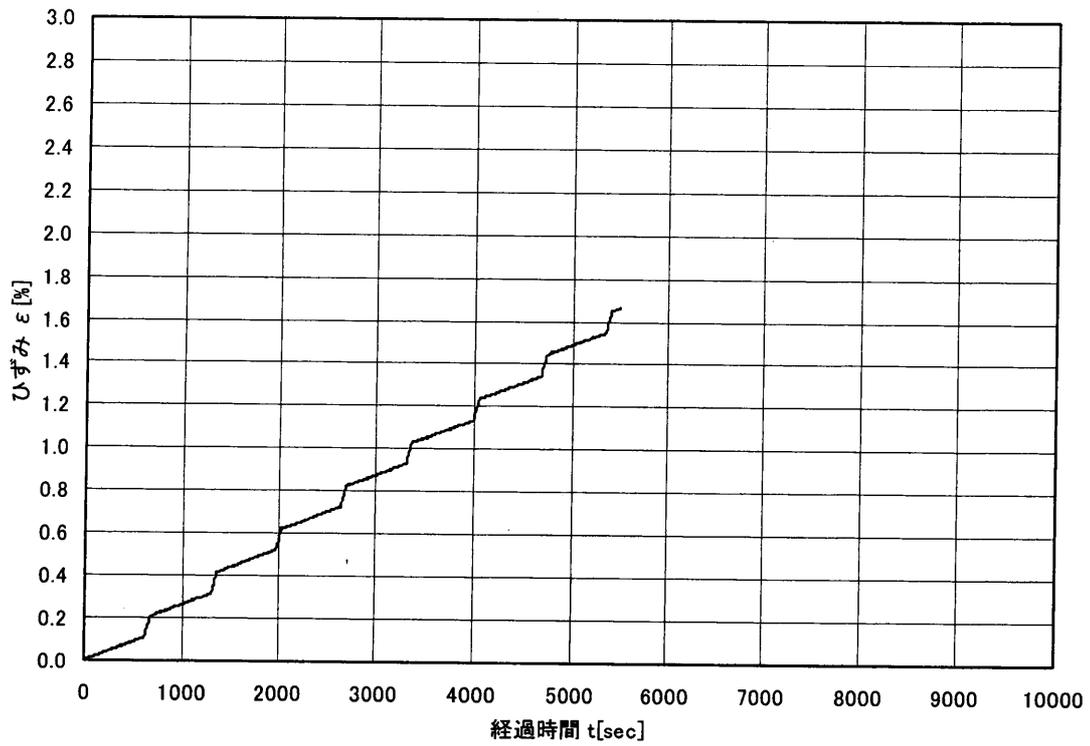


図 2.2-16 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線 (462.35B) 水中 80 度

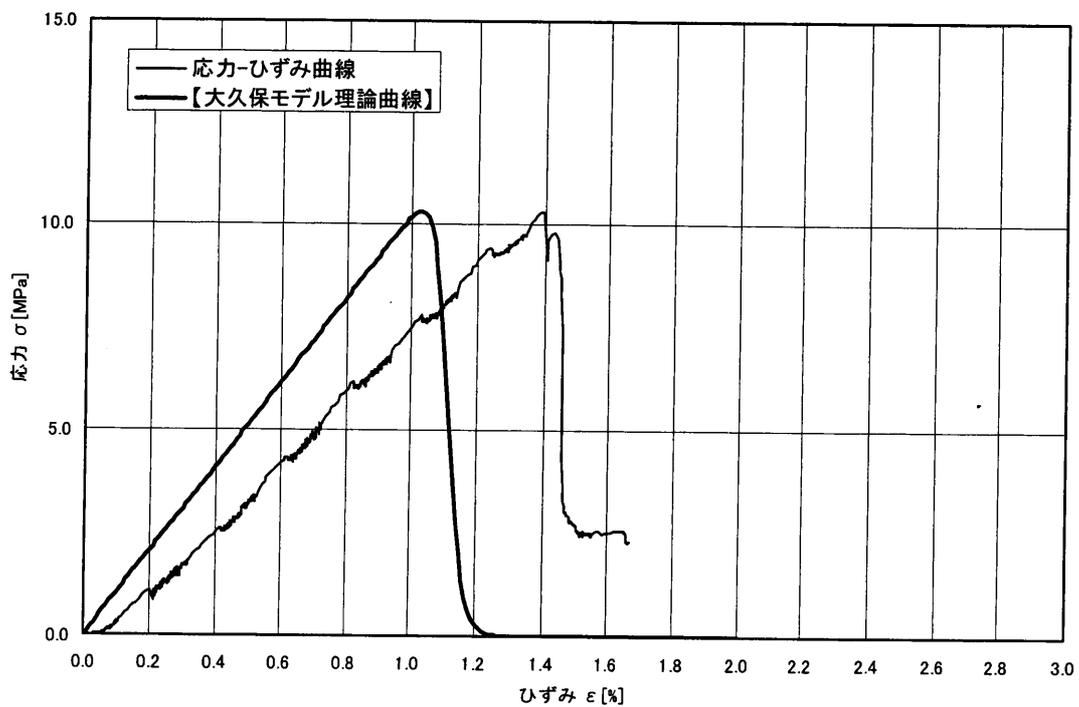


図 2.2-17 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線 (462.35B) 水中 80 度

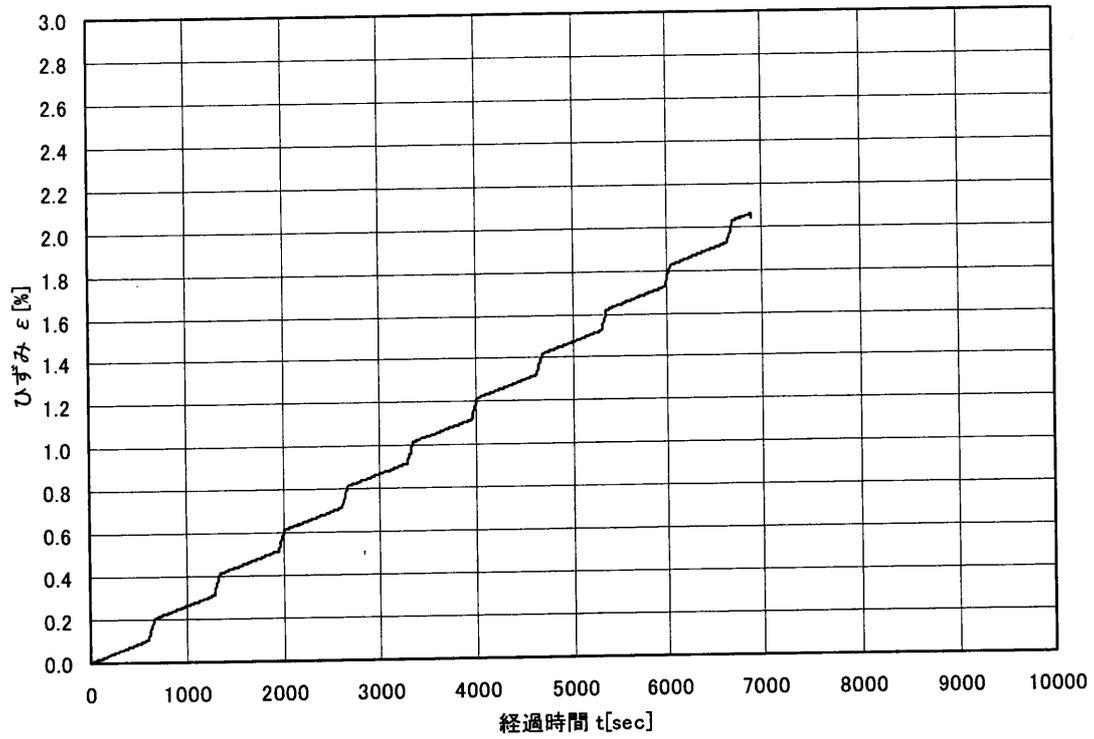


図 2.2-18 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.35C) 水中 80 度

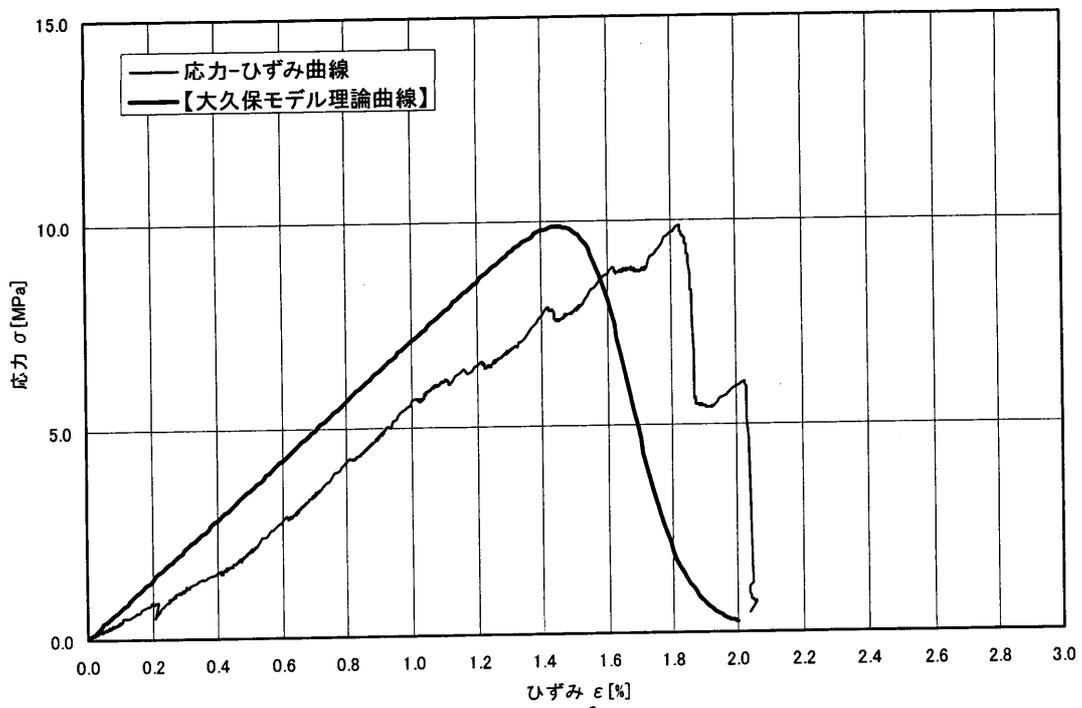


図 2.2-19 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.35C) 水中 80 度

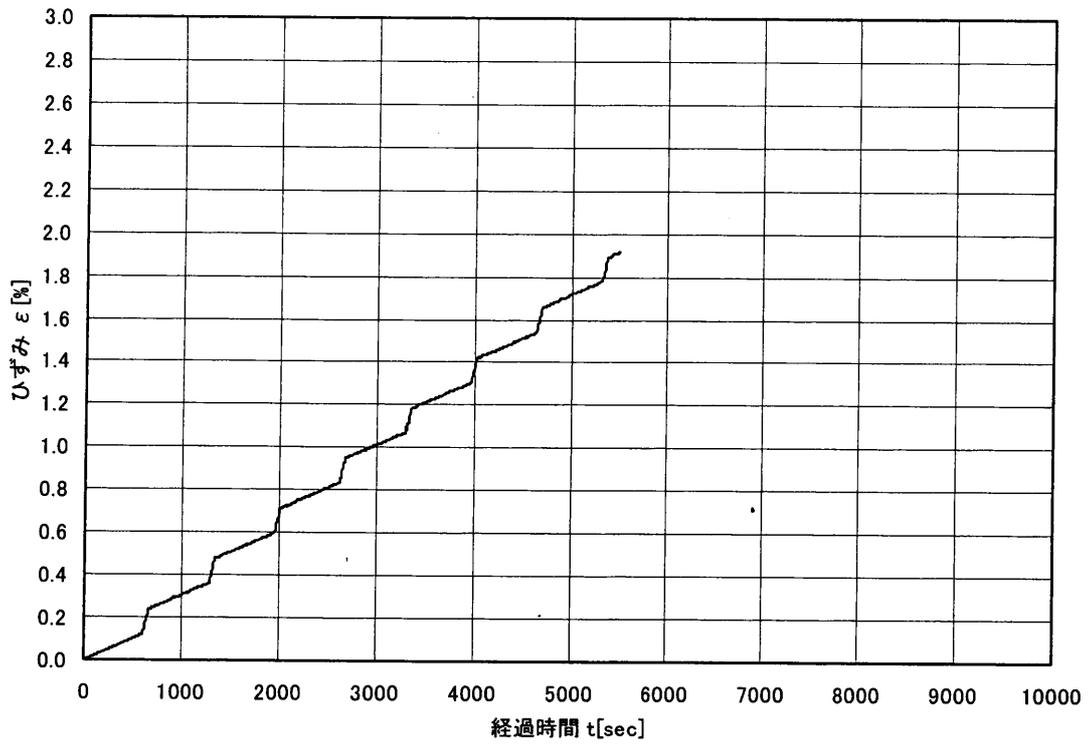


図 2.2-20 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.96B) 水中 80 度

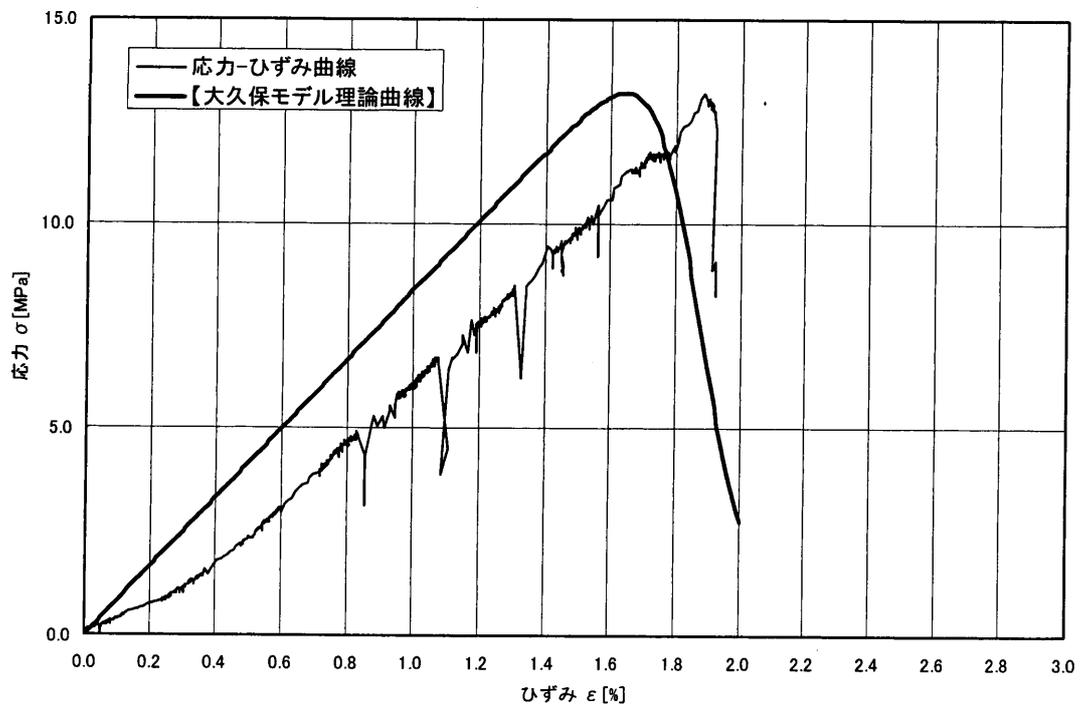


図 2.2-21 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.96B) 水中 80 度

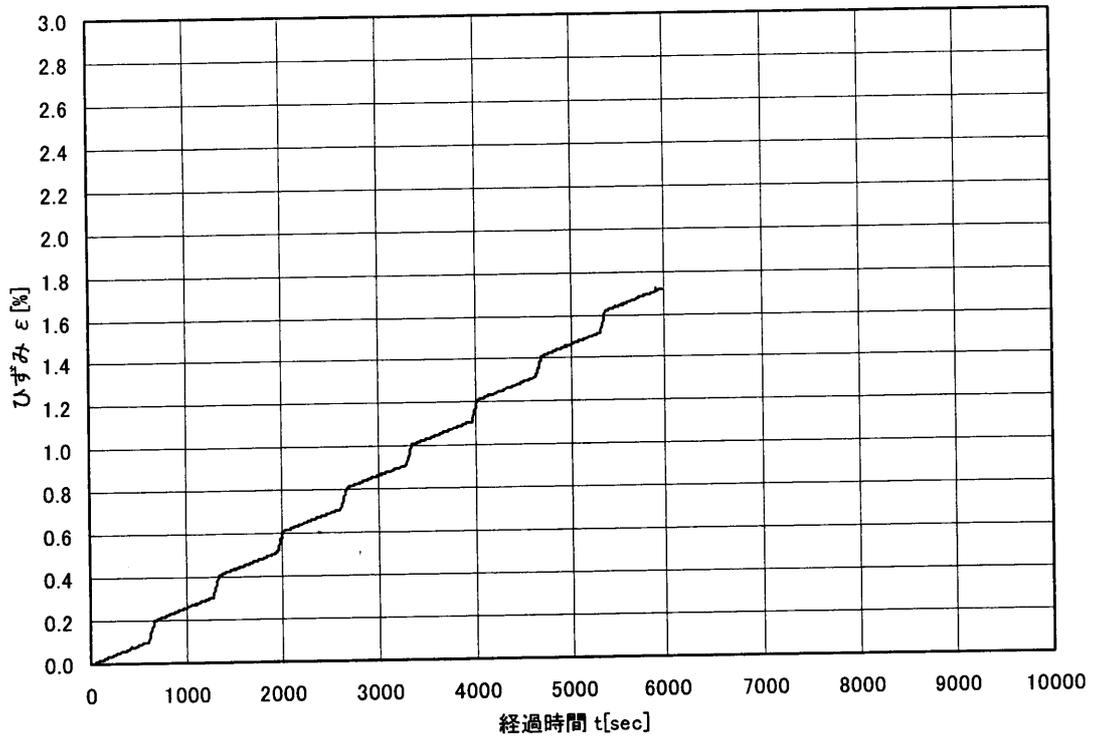


図 2.2-22 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.96C) 水中 80 度

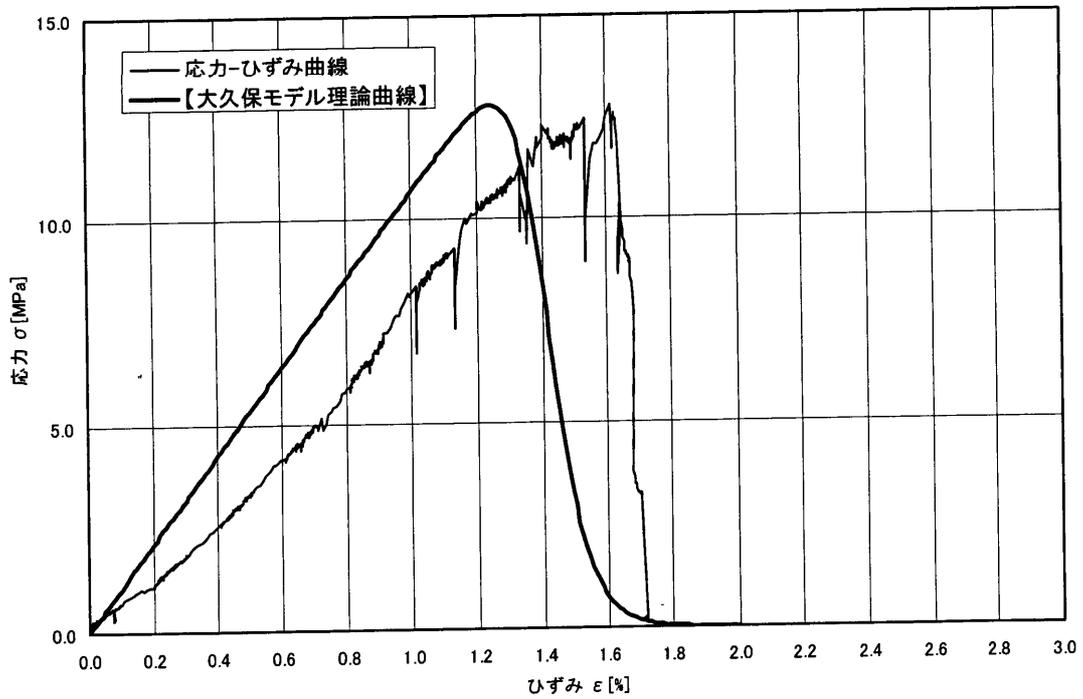


図 2.2-23 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.96C) 水中 80 度

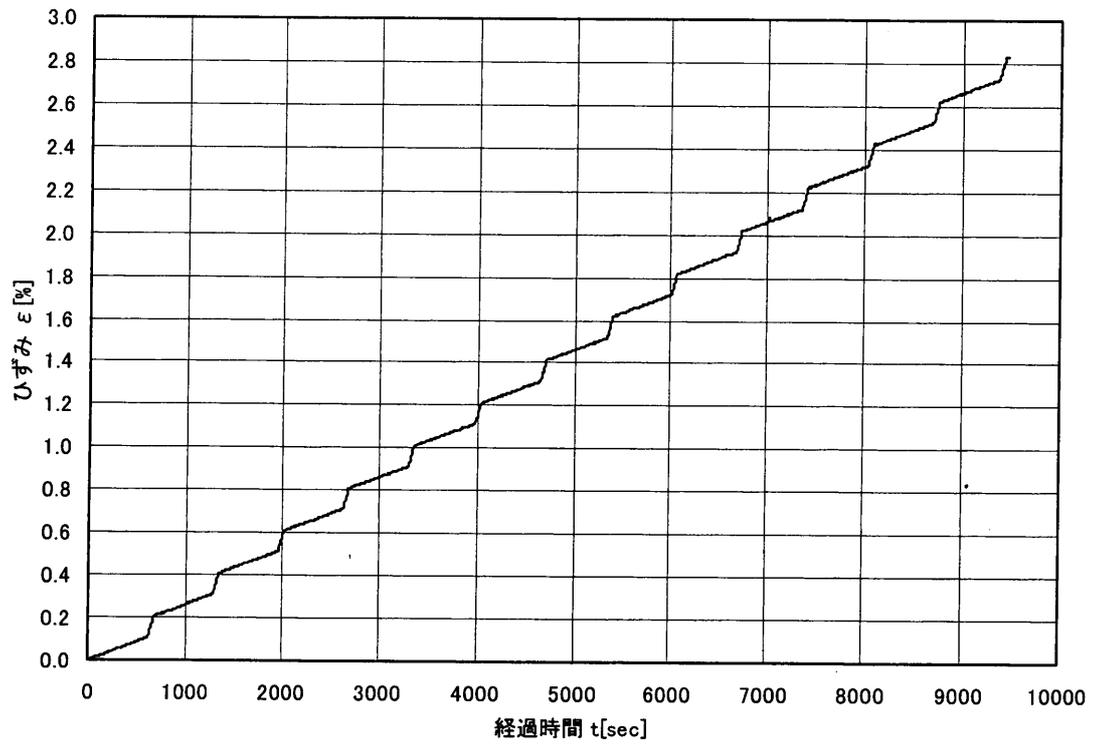


図 2.2-24 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.43B) 乾燥

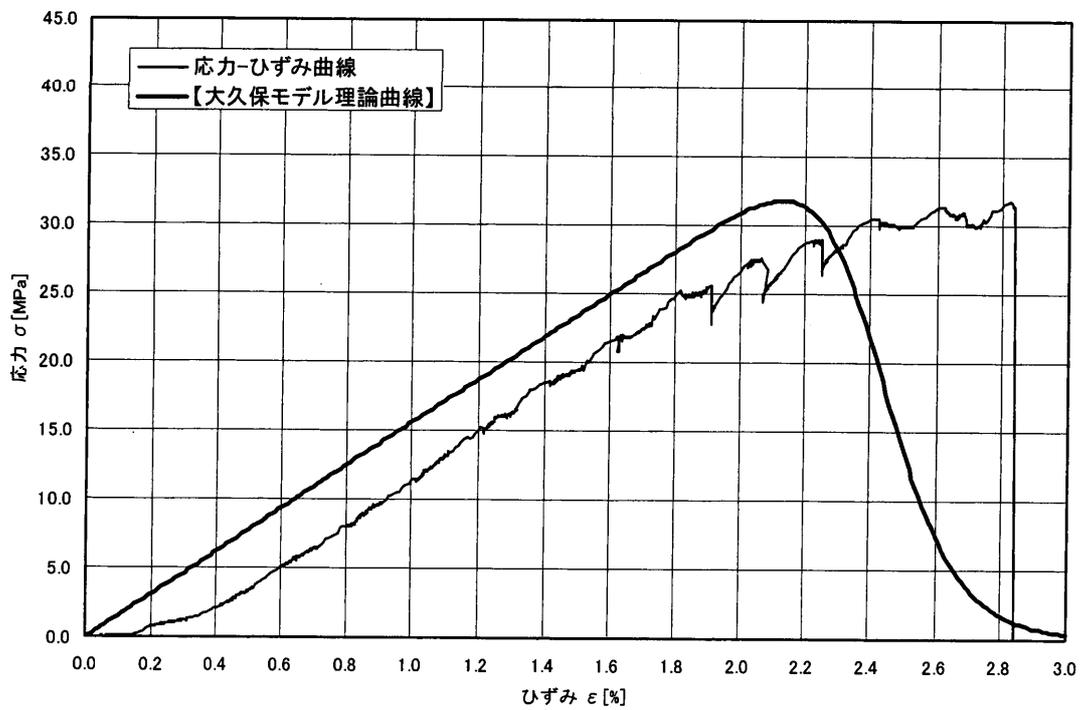


図 2.2-25 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.43B) 乾燥

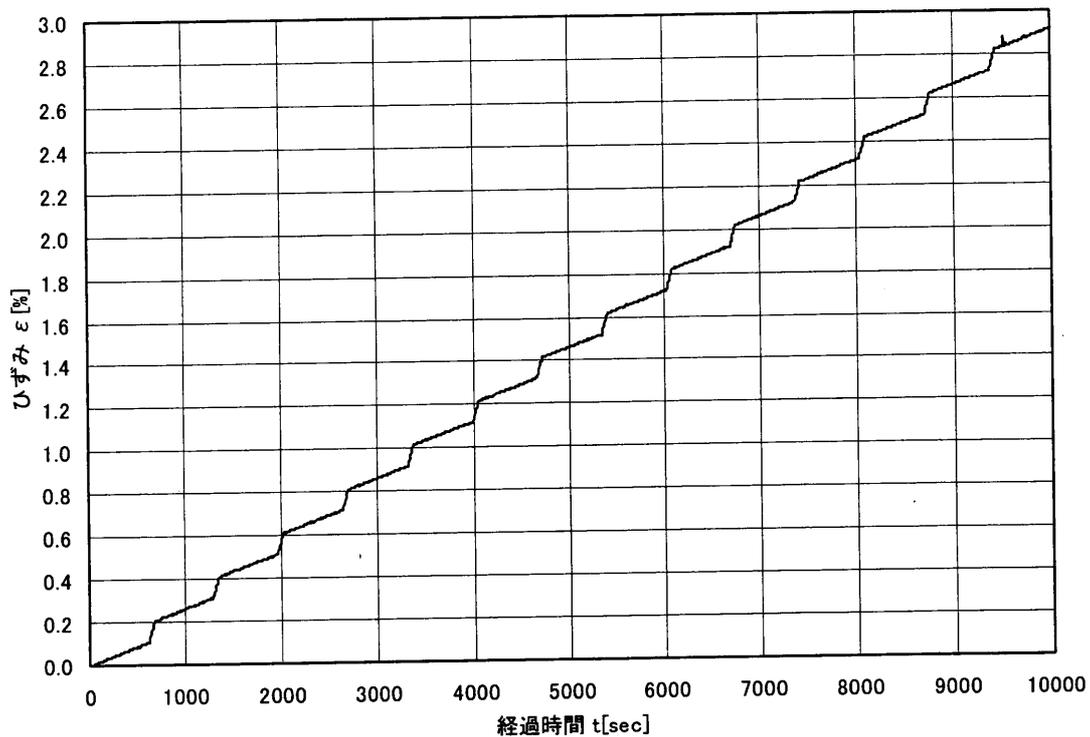


図 2.2-26 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.43D) 乾燥

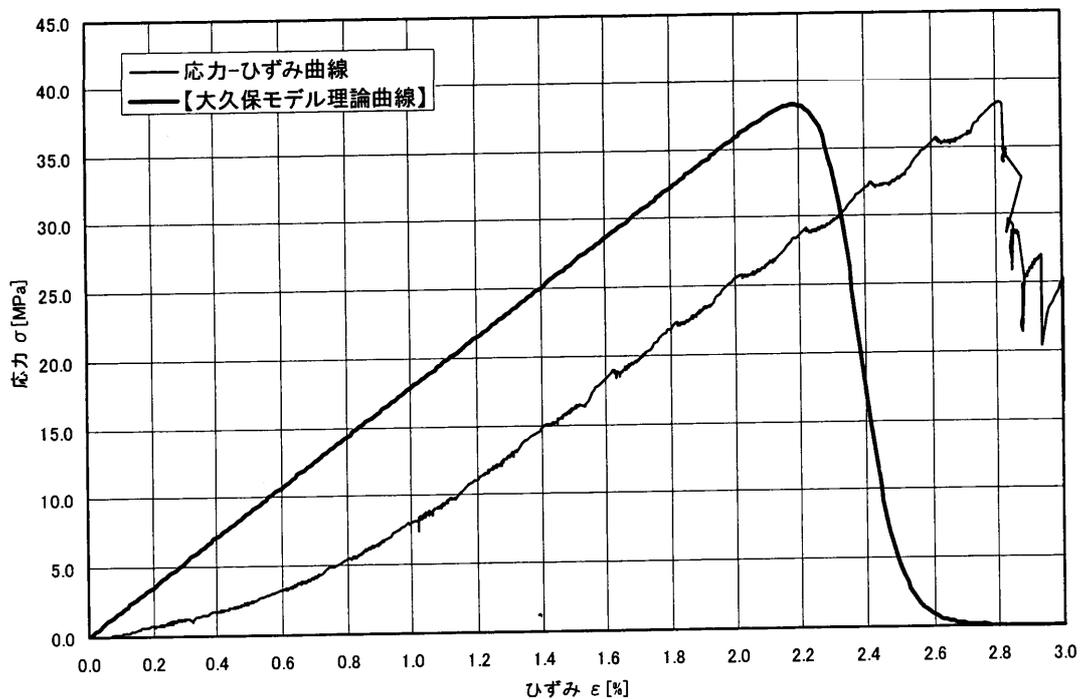


図 2.2-27 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.43D) 乾燥

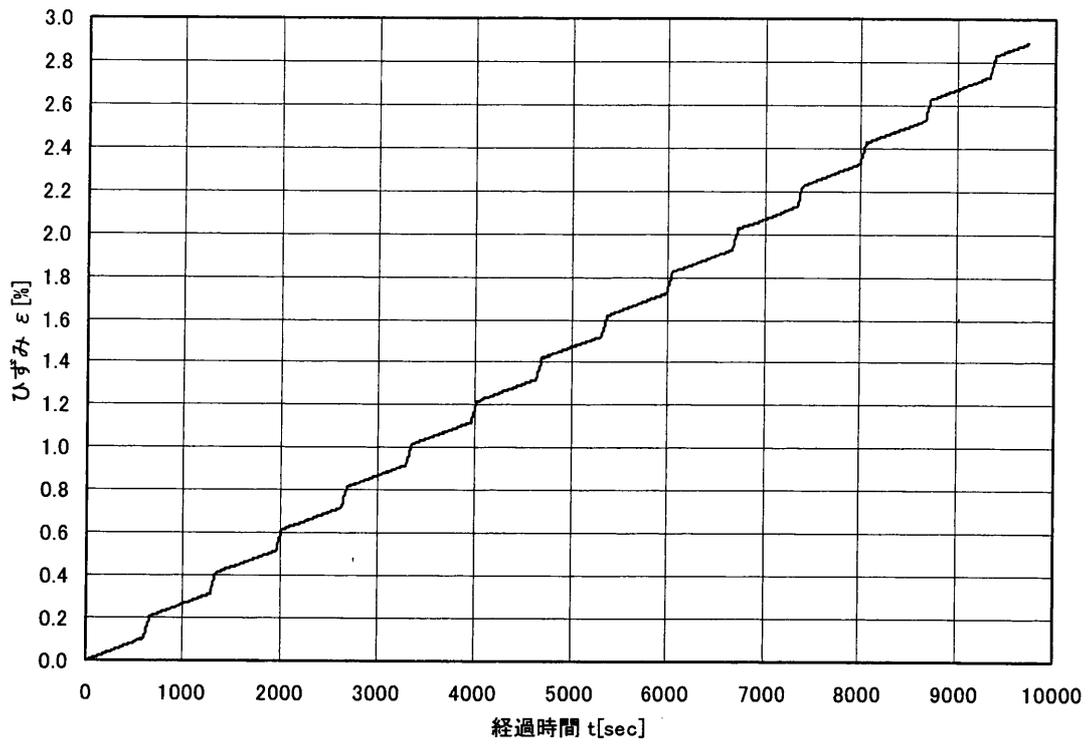


図 2.2-28 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線 (462.51A) 乾燥

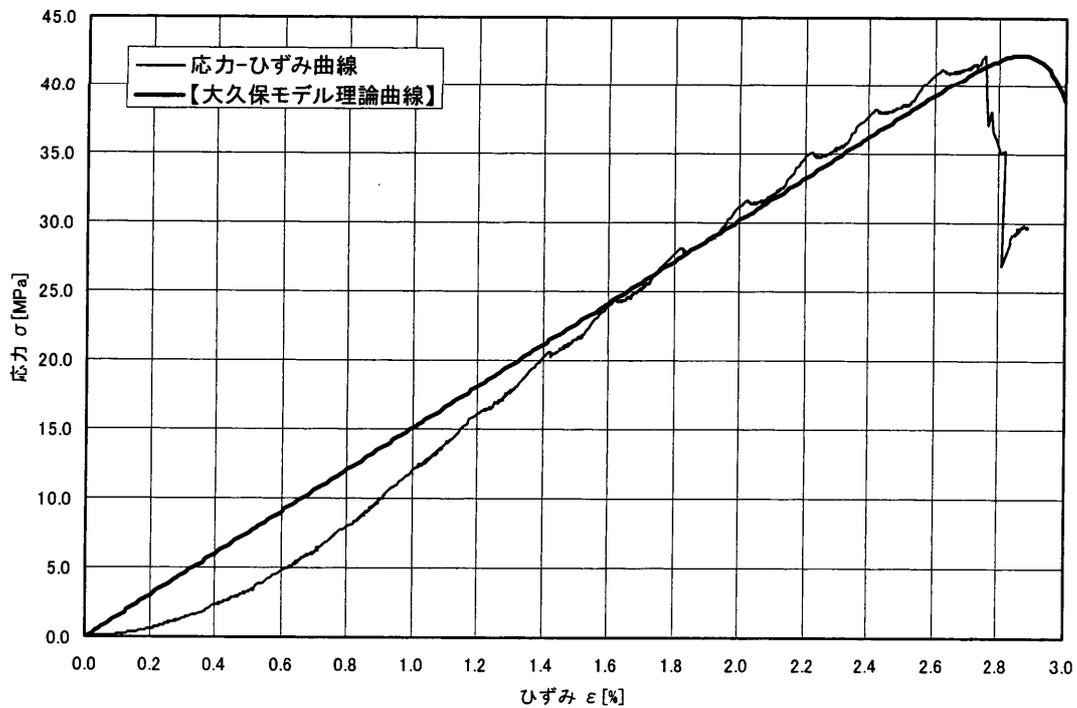


図 2.2-29 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線 (462.51A) 乾燥

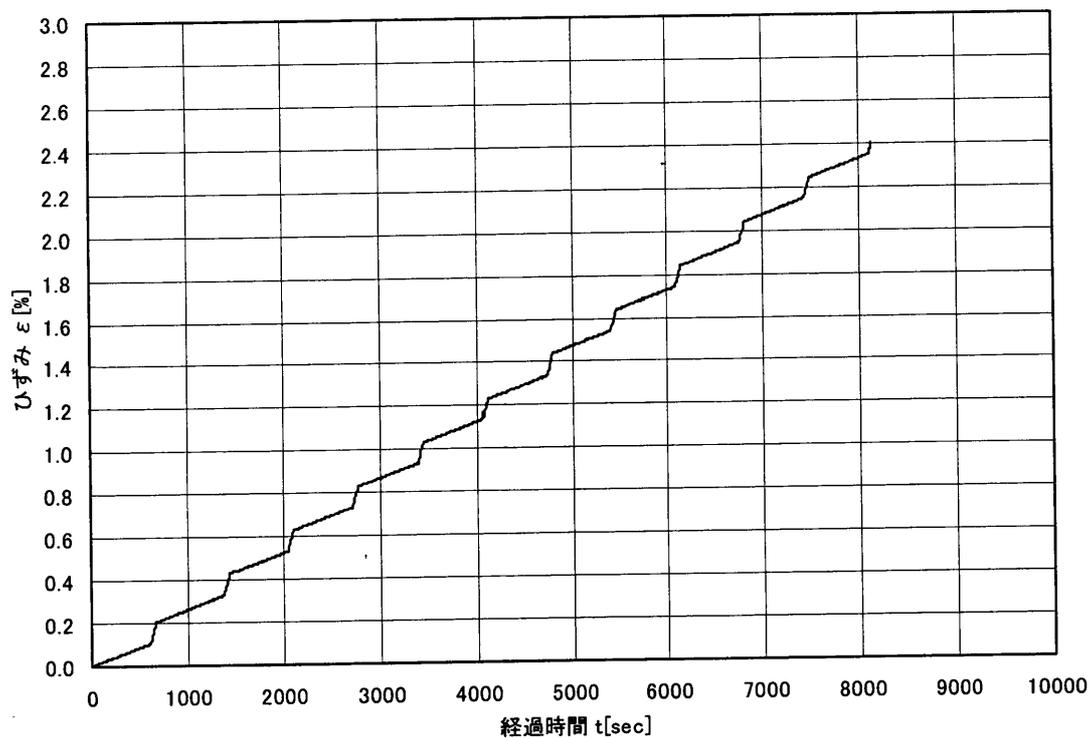


図 2.2-30 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.51B) 乾燥

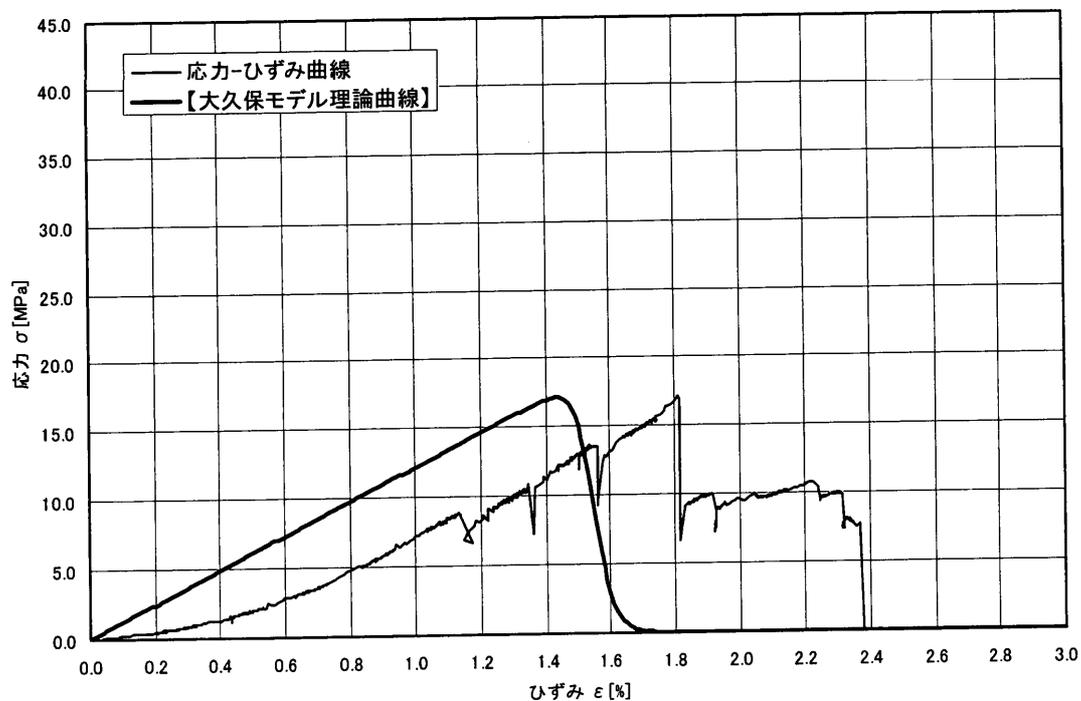


図 2.2-31 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.51B) 乾燥

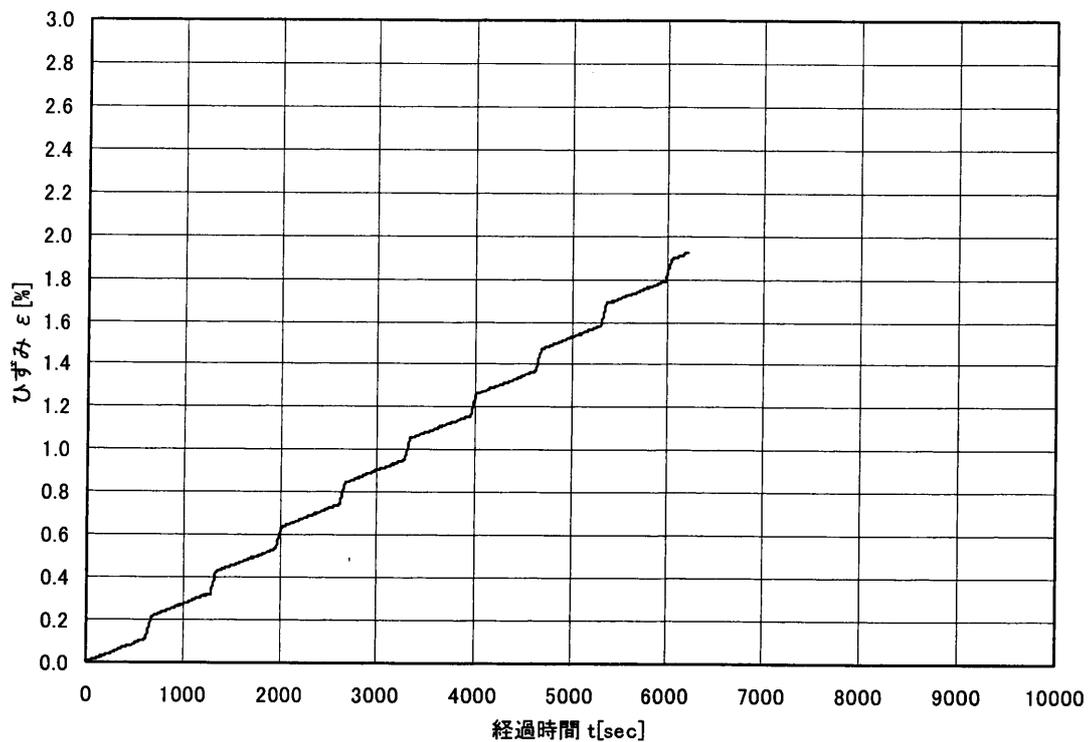


図 2.2-32 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.59B) 乾湿水中常温

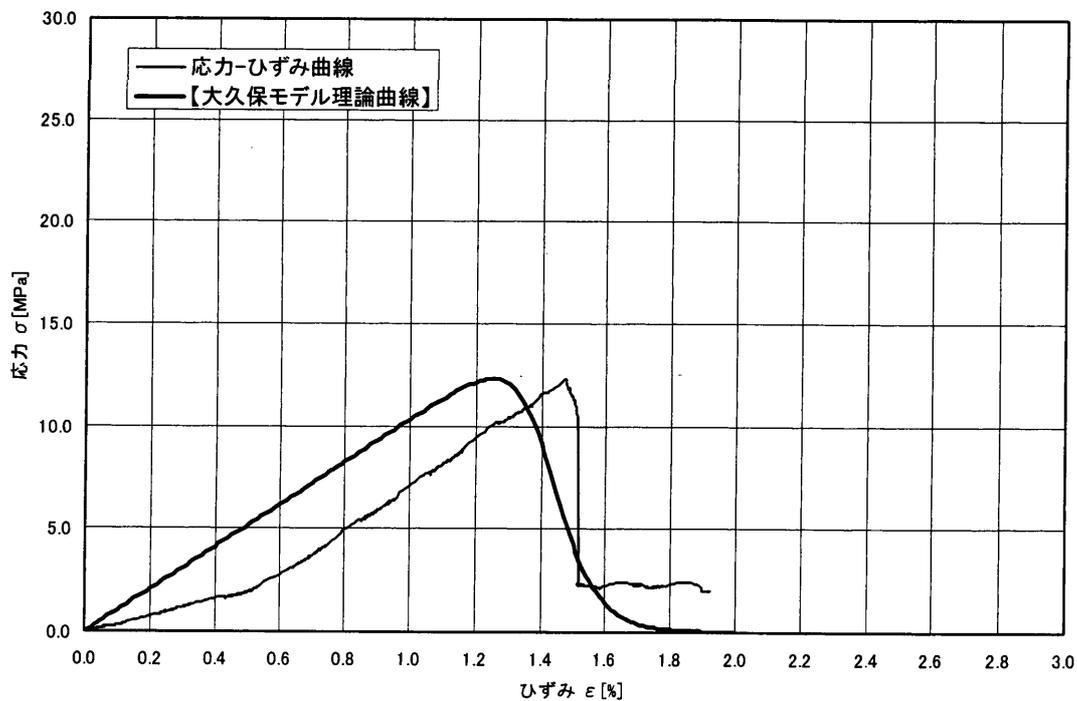


図 2.2-33 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.59B) 乾湿水中常温

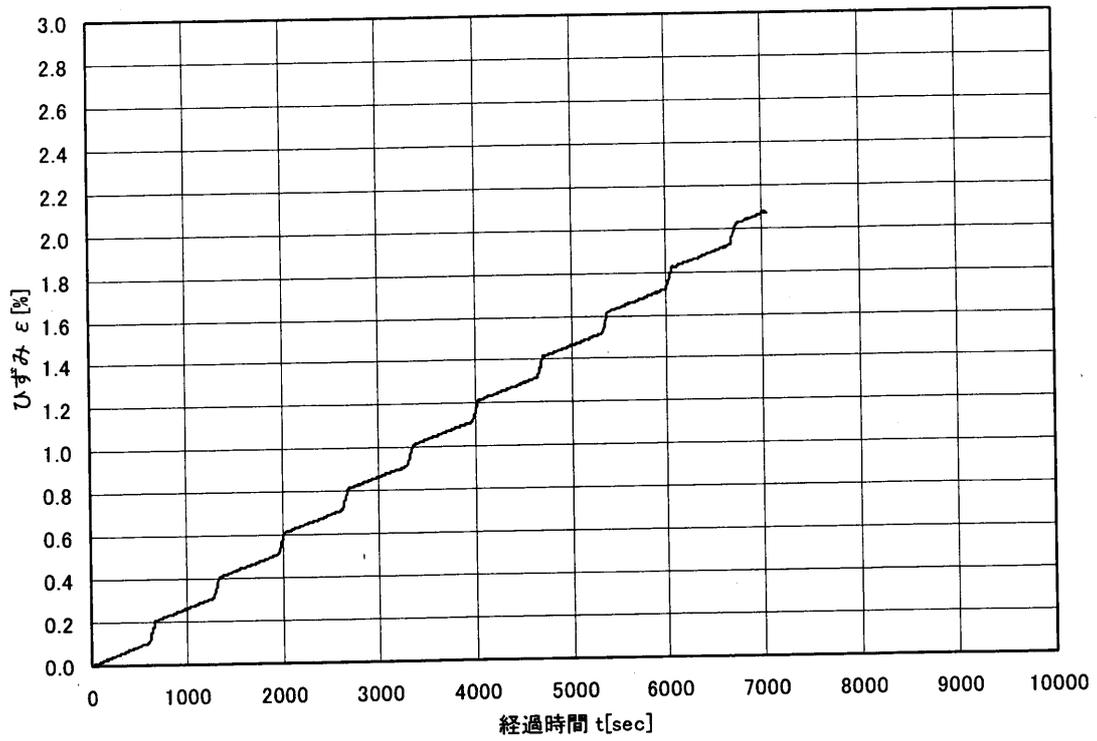


図 2.2-34 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.59C) 乾湿水中常温

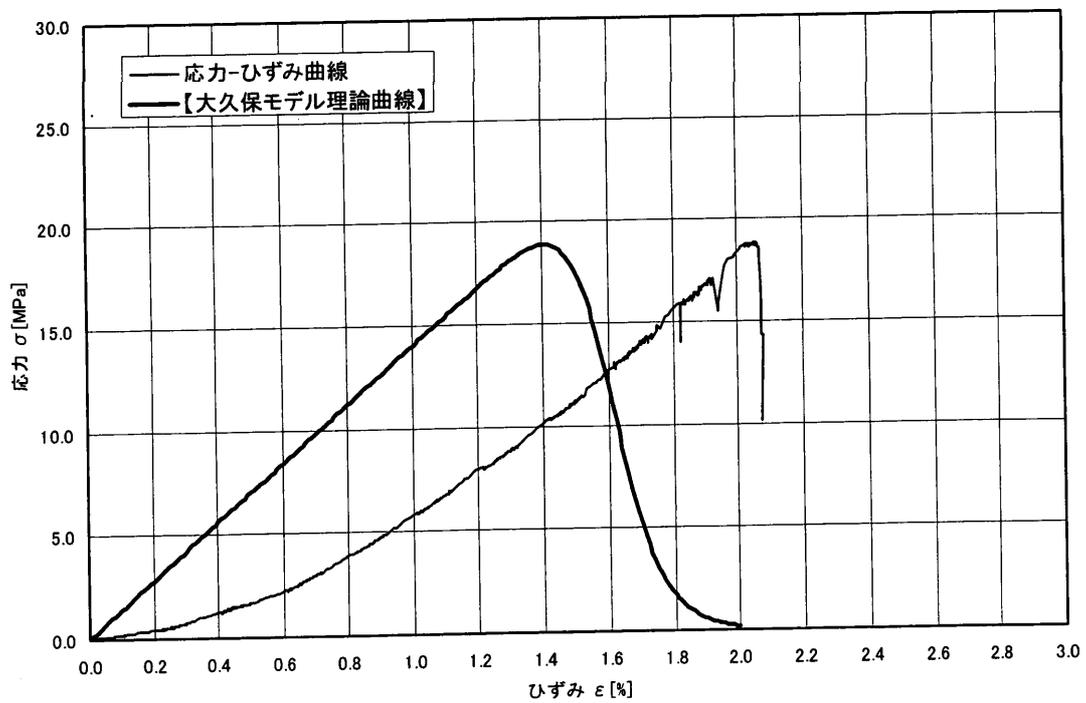


図 2.2-35 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.59C) 乾湿水中常温

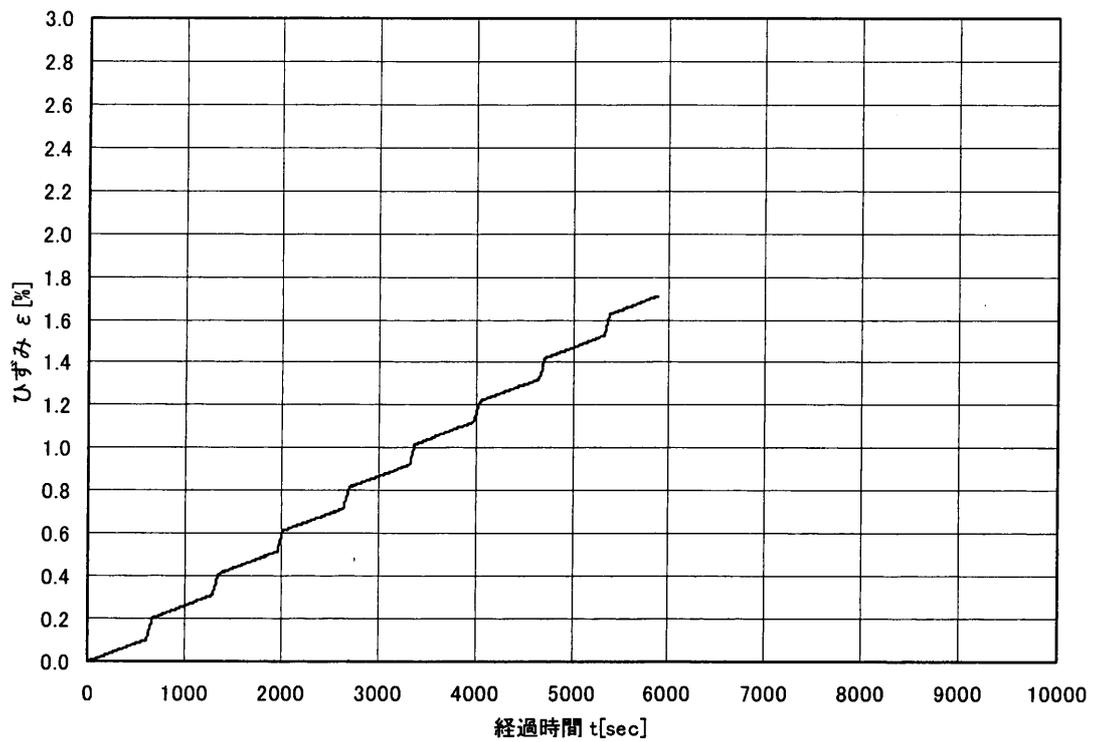


図 2.2-36 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.88A) 乾湿水中常温

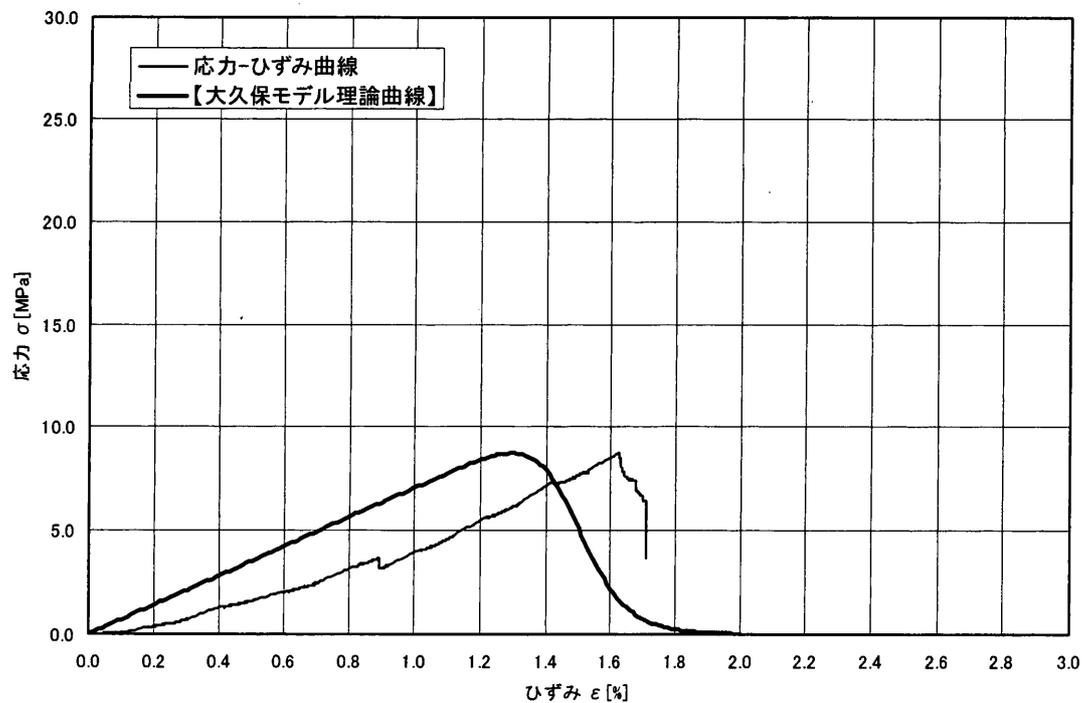


図 2.2-37 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.88A) 乾湿水中常温

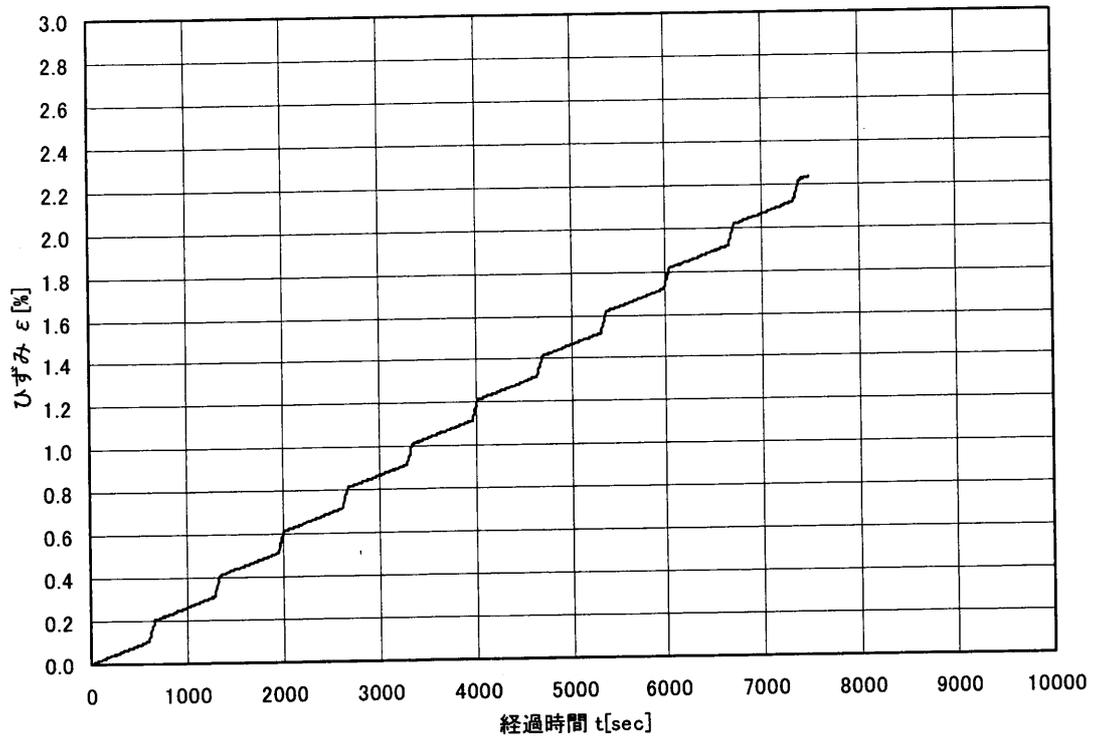


図 2.2-38 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(462.88C) 乾湿水中常温

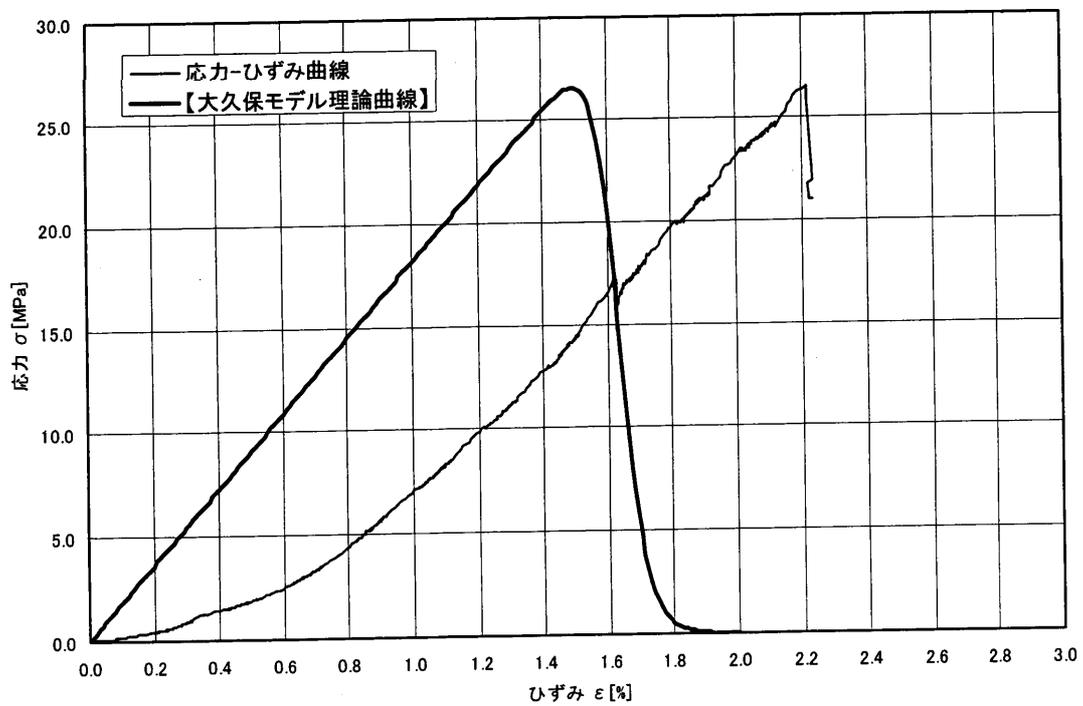


図 2.2-39 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.88C) 乾湿水中常温

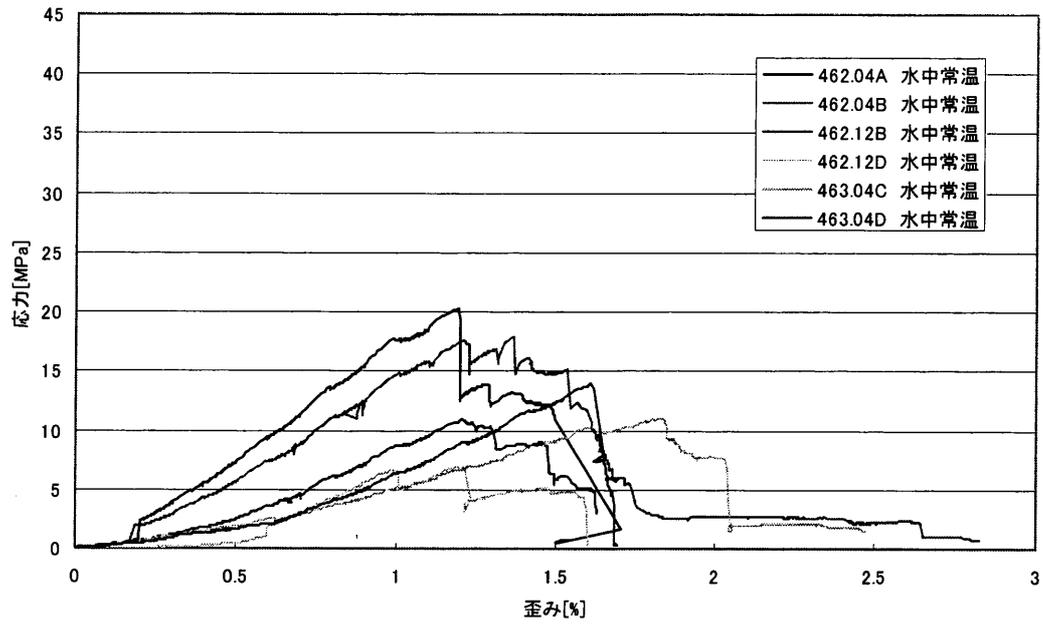


図 2.2-40 一軸圧縮試験 応力—歪み曲線 (水中常温のまとめ)

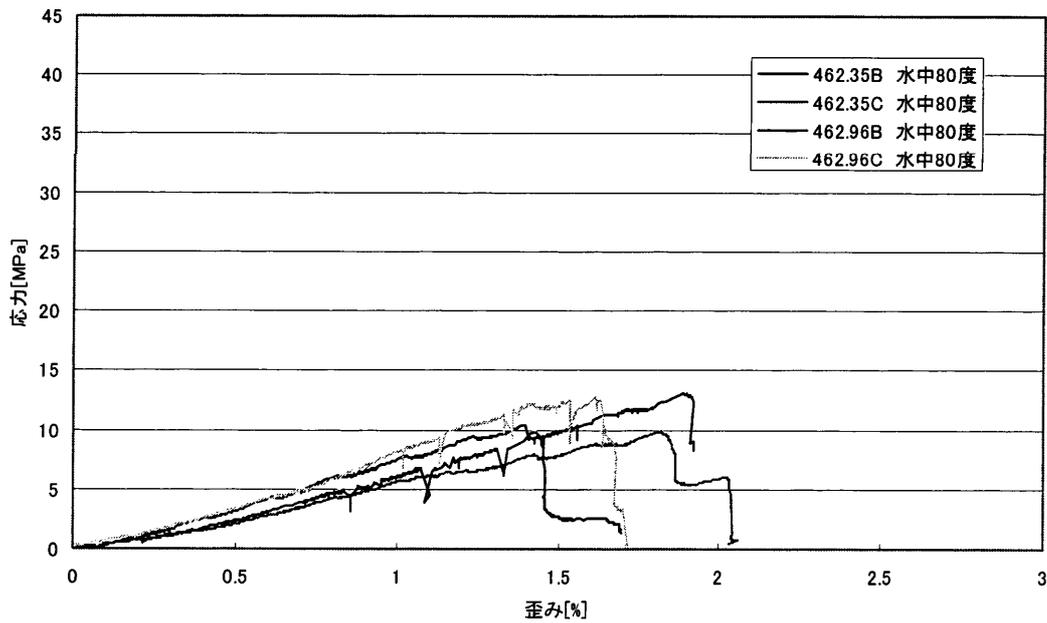


図 2.2-41 一軸圧縮試験 応力—歪み曲線 (水中 80 度のまとめ)

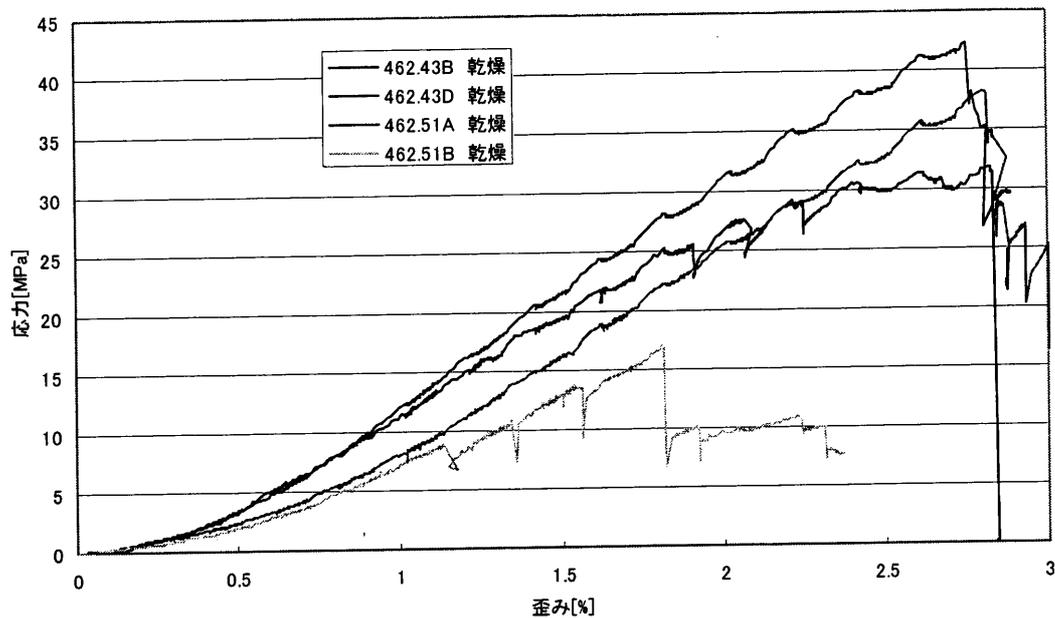


図 2.2-42 一軸圧縮試験 応力—歪み曲線 (乾燥のまとめ)

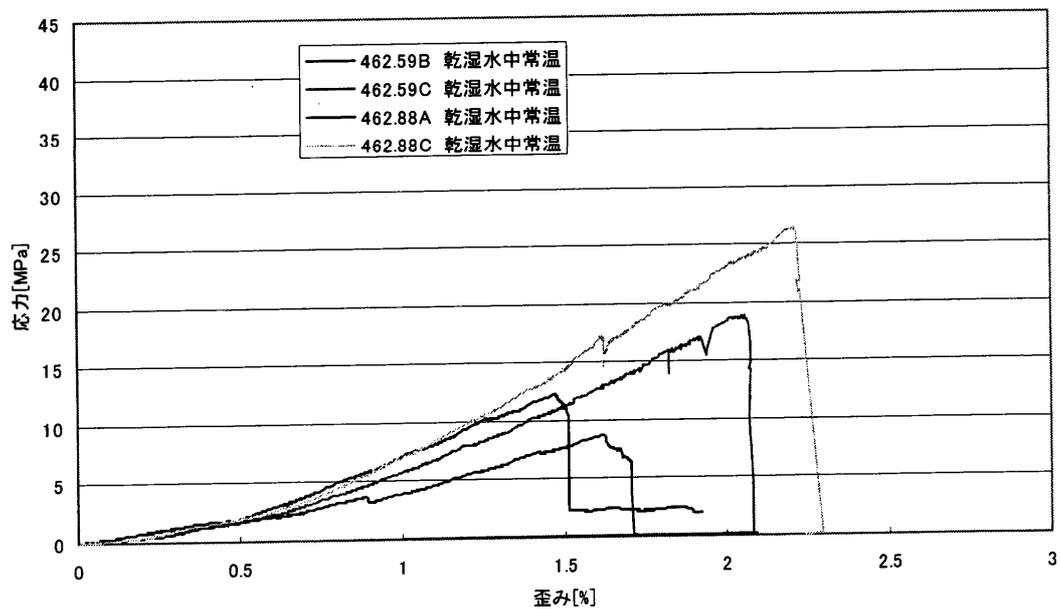


図 2.2-43 一軸圧縮試験 応力—歪み曲線 (乾湿水中常温のまとめ)

(6) 一軸圧縮試験の考察

今回の一軸圧縮試験で得られた大久保モデルの各定数について、幌延 HDB1 孔での一軸圧縮試験結果（井上・南，2002）との比較を行った。また、飽和状態や熱などの試験条件が大久保モデルの各定数などにどのように影響するかを定性的に捉えることを試みた。

図 2.2-44～図 2.2-53 では、大久保モデルの各定数を試験ケースごとに棒グラフで表示している。なお、想定寿命は荷重応力一定（荷重応力 5MPa：全ケースで一軸圧縮強度の最小値以下の値）の場合と応力レベル一定の場合の 2 種類について検討している。各定数の傾向について以下に列挙する。

① 荷重応力一定での寿命について

大久保モデルの寿命の式（式(2.1-10)参照）には、 σ_v 、 λ_1 、 n 、 m などの各パラメータが入っているため、荷重応力一定での寿命を検討することにより、熱や乾燥などの環境条件がクリープ寿命に与える影響が把握できると考えた。図 2.2-44 より HDB1 の試験では、水中常温より水中 80 度の方が寿命は大きくなっていった。しかし、図 2.2-45 より、HDB3 の試験では水中常温と水中 80 度はほぼ等しい寿命を示していた。一般的に、土質試験等で温度による物性変化が生じるのは 110 度以上であるといわれており、80 度では物性変化が発生していない可能性が高いと考えられる。乾燥については HDB1 および HDB3 の試験結果ともに他の条件よりも寿命が大きくなっていった。乾湿水中常温については、HDB1 の試験結果はなく、HDB3 の試験結果だけでは、定性的にも環境による寿命の大小の把握はできないと考えられる。以上より、以下の 2 点が明らかとなった。

- 1) 熱が加わっても寿命に明瞭な差異は認められない。
- 2) 乾燥により寿命は大きくなる。

② 応力レベル一定での寿命について

応力レベル一定での寿命を考察することにより、一軸圧縮強度特性が等しいと仮定した場合の寿命を知ることができる。すなわち、熱や乾燥などの環境条件について、一軸圧縮強度が等しい試験体で考察することができると考えられる。しかし、HDB1、HDB3 とともに、環境条件の違いによる明瞭な寿命の違いは見られなかった。

③ n について

大久保モデルのパラメータ n は一軸圧縮強度の時間依存性を表しており、その値が小さくなるほど、時間依存性が大きくなる。しかし、HDB1、HDB3 とともに、環境条件の違いによる明瞭な n の差異は見られなかった。

④ λ_1 について

λ_1 は初期コンプライアンスであり、一定応力に対する弾性歪量の増分で与えられる。すなわち、その値が大きいほど一定応力に対する弾性歪みが大きいことを表

している。HDB1では、水中常温>水中80度>乾燥の順にコンプライアンスは大きくなっているように見えるが、HDB3の試験結果では、水中80度が最も大きくなっており、環境条件の違いによる明瞭な差異は見られない。

⑤ 一軸圧縮強度について

一軸圧縮強度はHDB1では水中常温<水中80度<乾燥の順に大きくなっているように見える。一方、HDB3では、乾燥が最も大きいが、その他の環境条件には明瞭な差異は見られない。

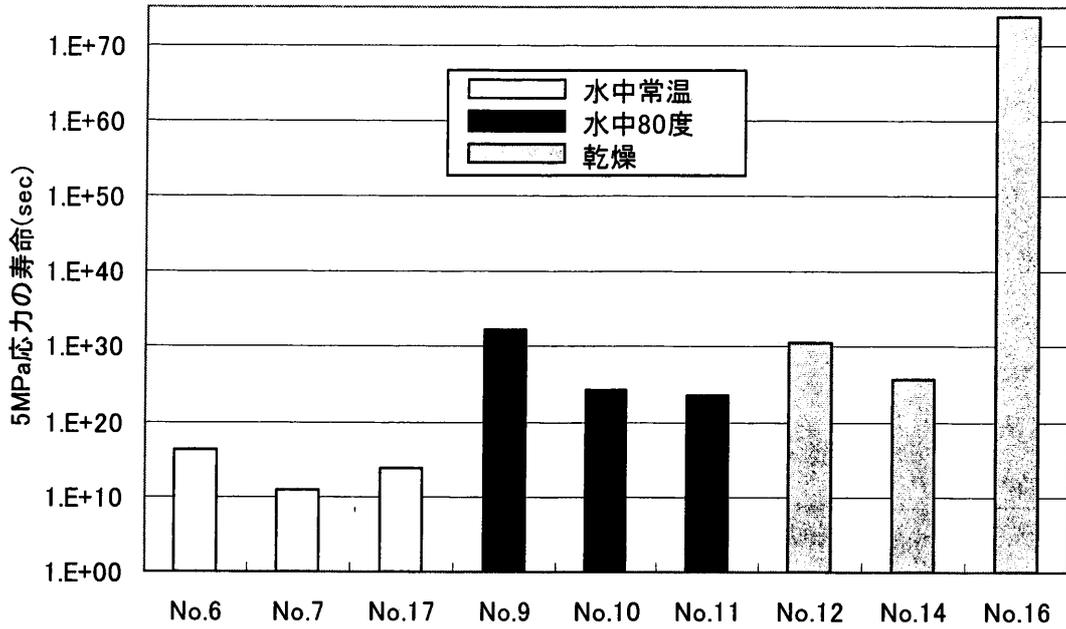


図 2.2-44 载荷応力一定 (5MPa) での寿命の比較 (HDB1 孔 : 2002 年度報告)

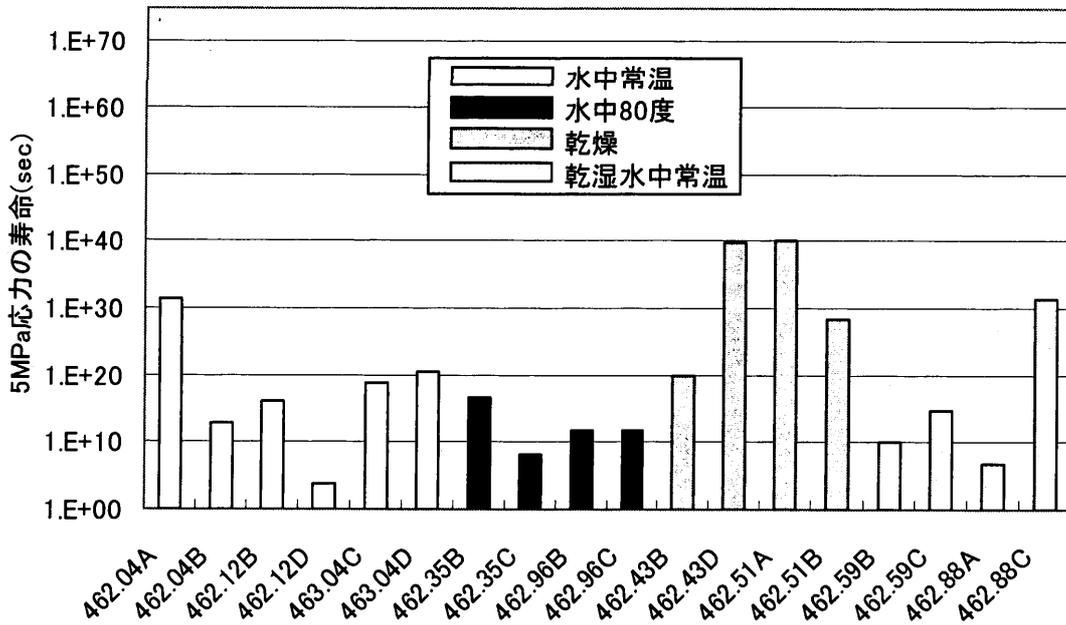


図 2.2-45 载荷応力一定 (5MPa) での寿命の比較 (HDB3 孔 : 2003 年度報告)

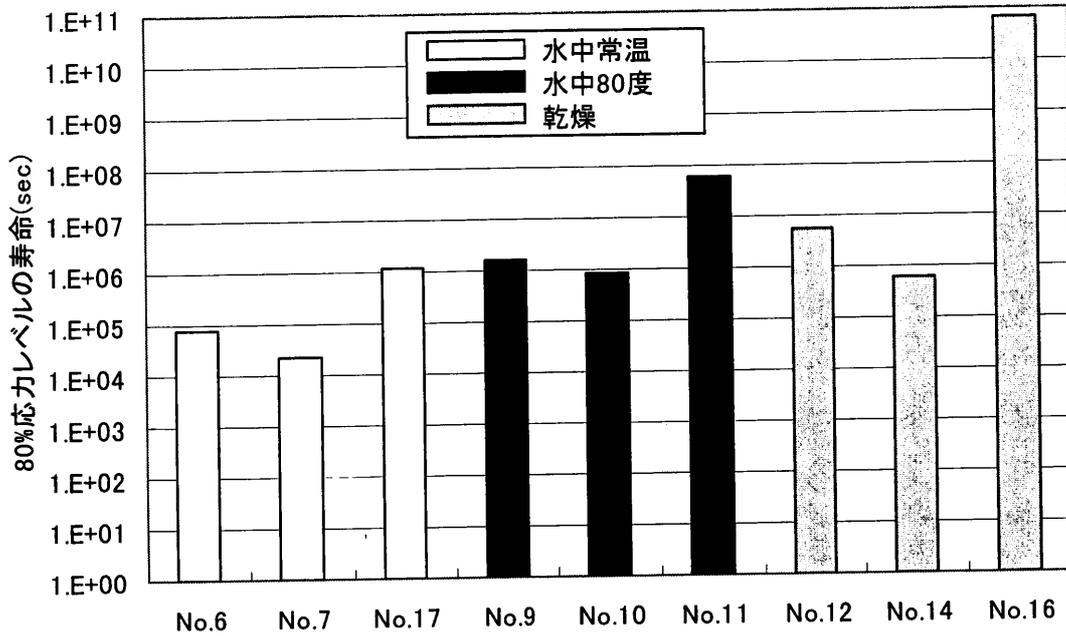


図 2.2-46 応力レベル一定(80%)での寿命の比較 (HDB1 孔 : 2002 年度報告)

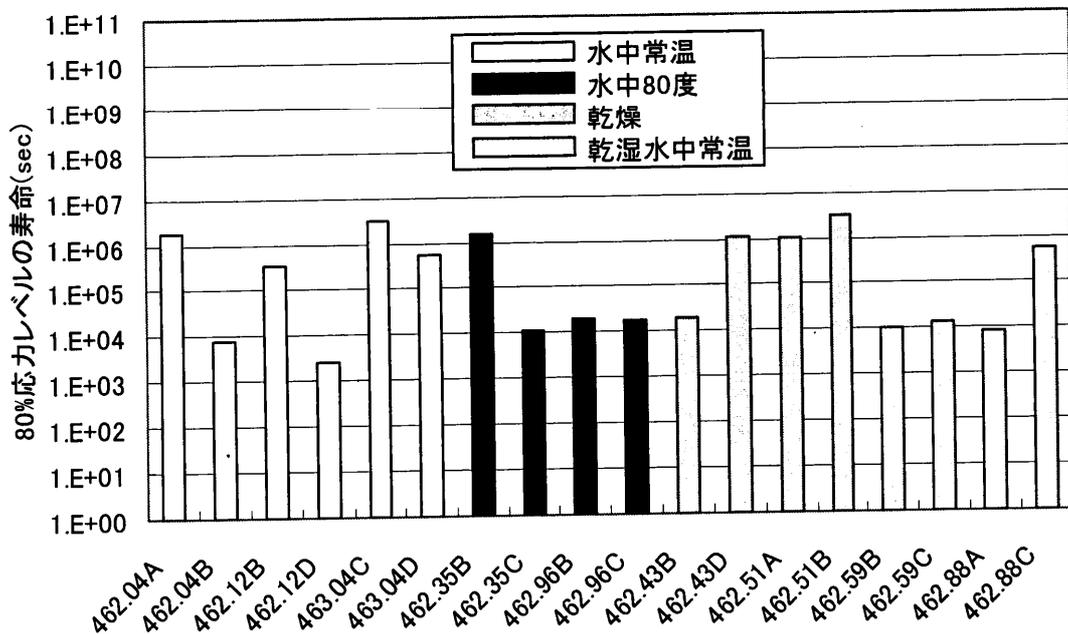


図 2.2-47 応力レベル一定(80%)での寿命の比較 (HDB3 孔 : 2003 年度報告)

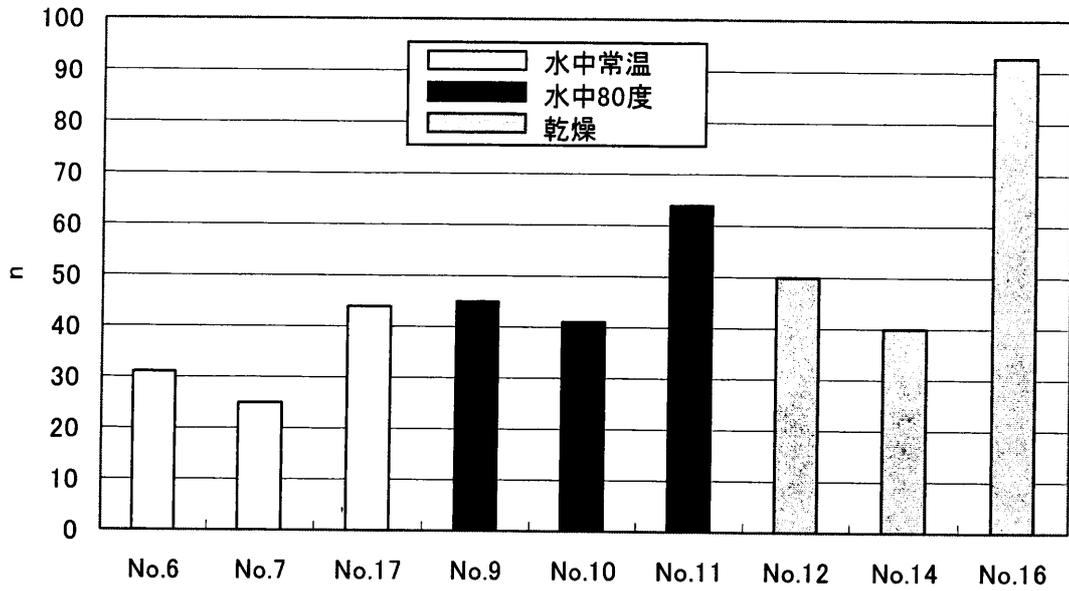


図 2.2-48 nの比較 (HDB1 孔 : 2002 年度報告)

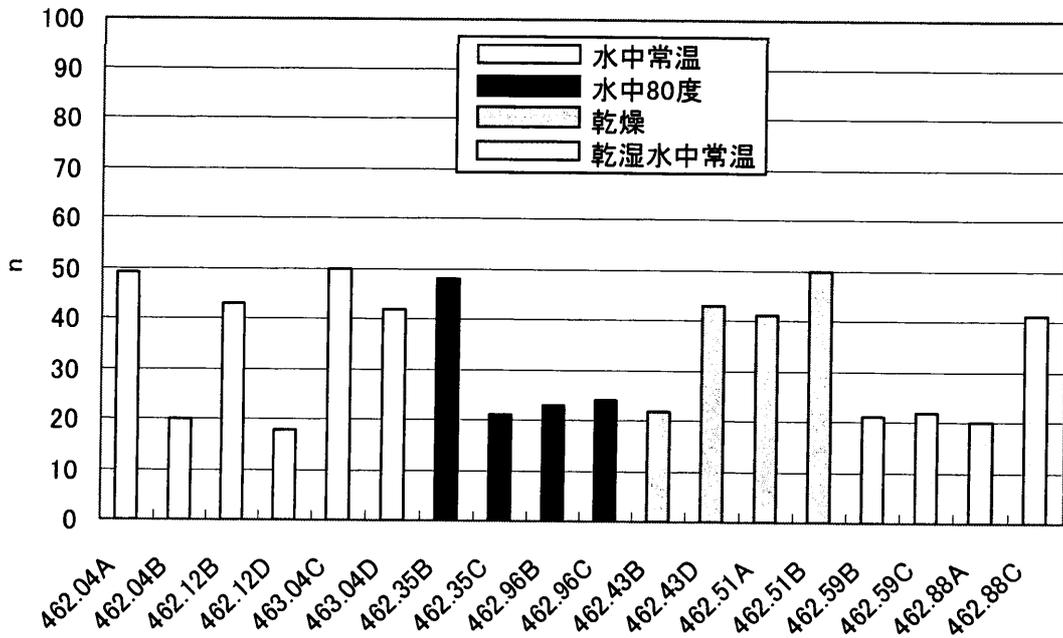


図 2.2-49 nの比較 (HDB3 孔 : 2003 年度報告)

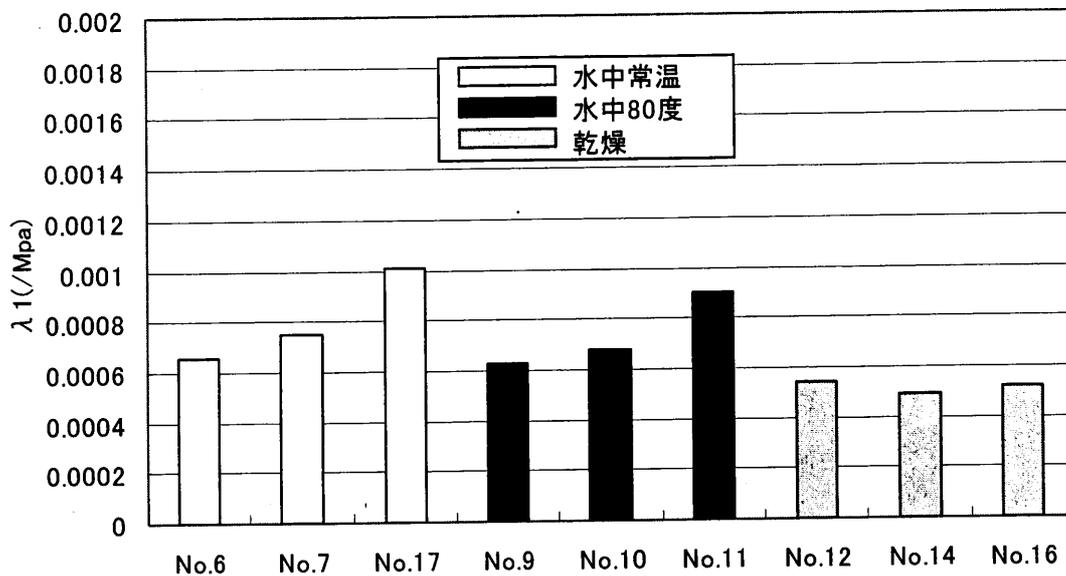


図 2.2-50 λ1 の比較 (HDB1 孔 : 2002 年度報告)

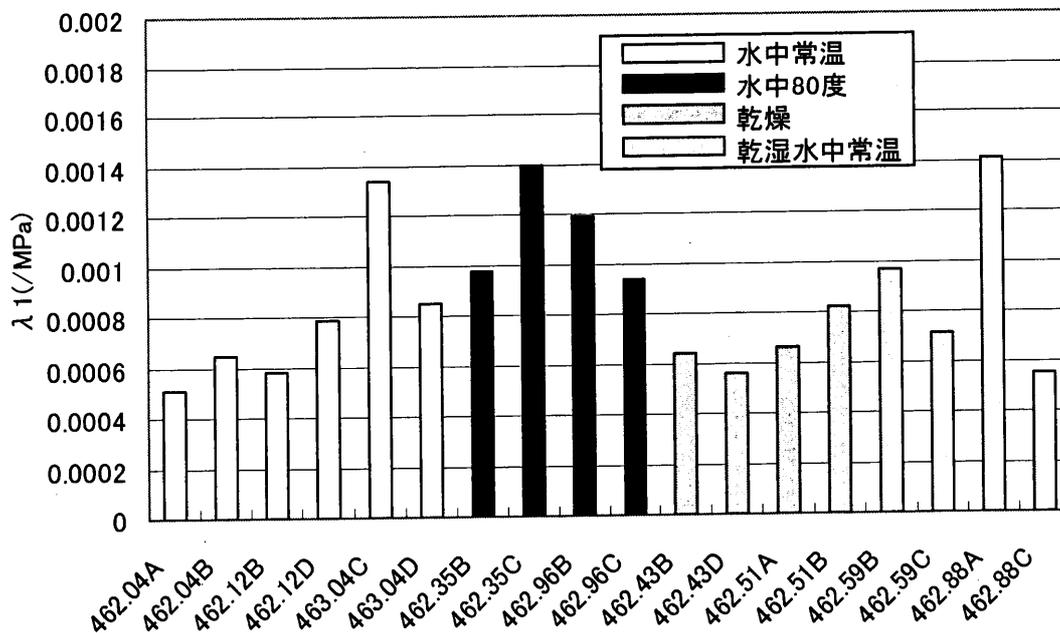


図 2.2-51 λ1 の比較 (HDB3 孔 : 2003 年度報告)

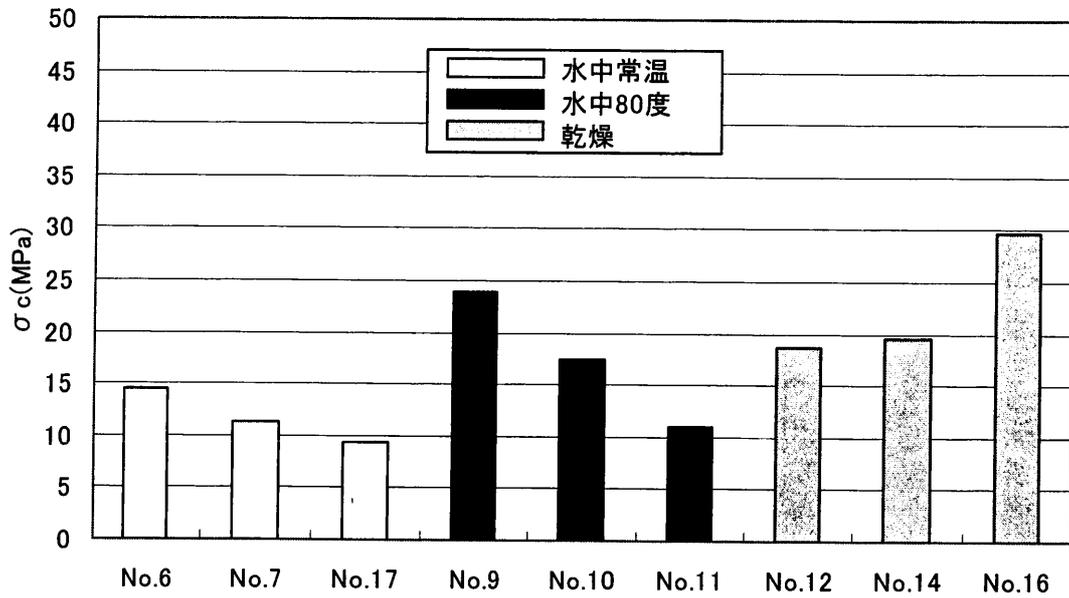


図 2.2-52 一軸圧縮強度の比較 (HDB1 孔 : 2002 年度報告)

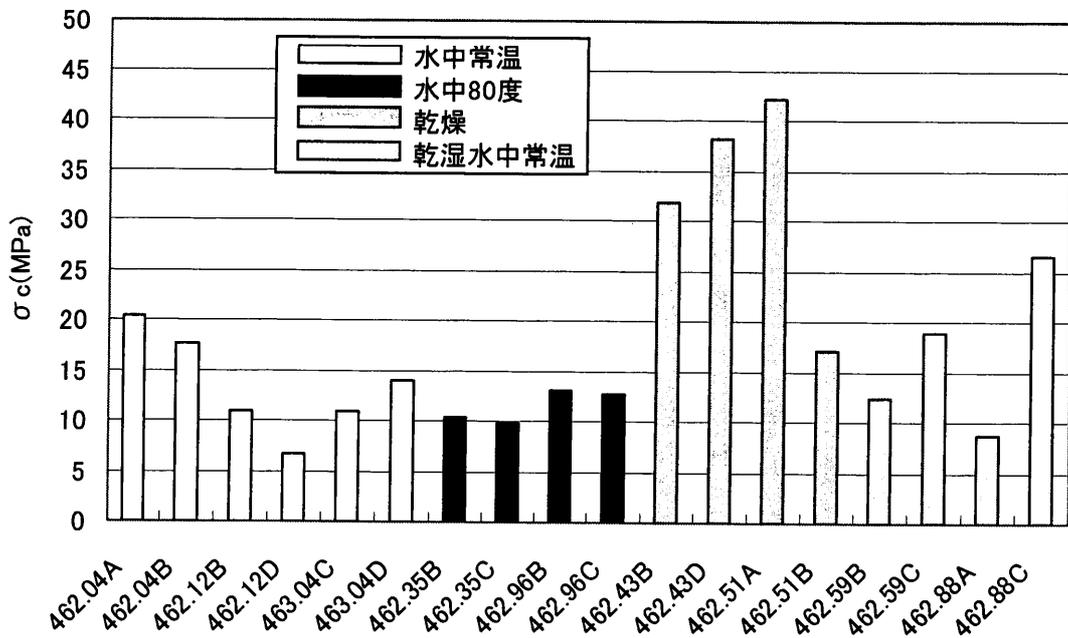


図 2.2-53 一軸圧縮強度の比較 (HDB3 孔 : 2003 年度報告)

図 2.2-54 に弾性波速度 (V_p) と一軸圧縮強度 (σ_v) の関係を試験条件別に示す。全ての試験体の V_p は、コア抜きして水中で湿潤状態にした後に計測した値であるため、試験条件に依存しない値である。一方、 σ_v は試験条件別に計測した。そのため、図 2.2-54 は試験条件別にプロットしている。また、試験体の採取深度を把握するため、プロット点の近傍に各試験体番号を併記した。以下に試験条件別の考察を示す。

① 水中常温

V_p は 2030~2250[m/sec]、 σ_v は 6~20[MPa] に分布する。462.04A と 462.04B、463.14C と 463.14D は、それぞれ V_p が 20~30[m/sec]、 σ_v が 2~3[MPa] しか異ならず、同一深度で採取した試験体の V_p と σ_v がほとんど変わらない結果となった。しかし、462.12B と 462.12D は σ_v が 5[MPa] 異なるのに対して V_p は約 100[m/sec] 異なっていた。すなわち、試験体を同一深度で採取した場合で σ_v はほとんど同じだが、 V_p は異なる場合があるという結果となった。

② 水中 80 度

462.35B と 462.35C、462.96B と 462.96C とともに σ_v はほぼ等しいが V_p は約 50[m/sec] 異なった。

③ 乾燥

V_p は他の試験条件と同様な範囲にあるが、 σ_v は 17~43[MPa] となり、他の試験条件よりも大きくなった。462.43B と 462.43D は V_p と σ_v の関係は負の相関となったが、 V_p と σ_v の値の違いは小さかった。しかし、462.51A と 462.51B は V_p 、 σ_v とともに大きく異なり、462.51B は 462.51A と比較して微細はクラックなどが多数入っていた可能性があると考えられた。なお、462.51B の応力-歪み曲線では、強度発現前に破壊が生じたのではないかと疑われるような急激な歪みの減少が見られた。乾燥による強度の増加する度合いは試験体ごとに異なっていたと考えられ、試験条件の設定が与える影響は大きいと考えられる。

④ 乾湿水中常温

水中常温や水中 80 度と比較すると同一深度の試験体でも V_p 、 σ_v とともに大きく異なる結果となった。これは、乾湿水中常温は、最冠水時のクラックの進展が試験体によって異なっていたことが原因ではないかと考えられる。

以上より、乾燥や乾湿水中常温よりも試験条件の設定が一軸圧縮強度に及ぼす影響が小さいと考えられる水中常温や水中 80 度では、同一深度から試験体を採取して弾性波速度を考慮することで、一軸圧縮強度がほぼ等しい試験体を作成できると考えられる。しかし、同一の深度で採取した試験体でも、試験体内に他の部分と異なる傾向をもつクラック等がある場合には弾性波速度や一軸圧縮強度に大きく影響を及ぼすと考えられ、一軸圧縮強度などの力学的特性の揃った試験体を

用意するためには、その他の要因（例えば亀裂の進展方向など）についても検討する必要があると考えられる。また、乾燥や乾湿水中常温では、試験条件の設定が一軸圧縮強度などの力学的特性に及ぼす影響も大きいと考えられるため、厳密な試験条件設定が必要となると考えられる。

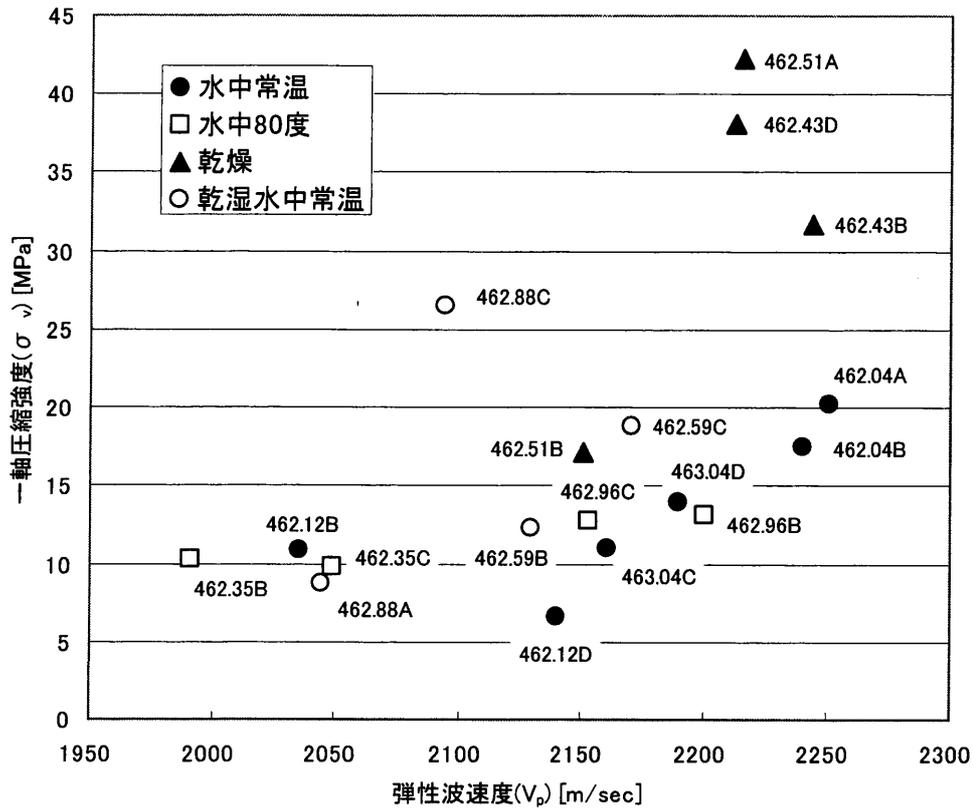


図 2.2-54 弾性波速度と一軸圧縮強度の関係

2. 2. 4 マルチクリープ試験

本研究では、マルチクリープ試験を実施した。これは、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、クリープ試験結果が得られないことを避けるためである。マルチクリープ試験では、原則として想定圧縮強度を基準とした応力レベルを 10% から約 10% 刻みで段階的に増加させ、各段階の载荷時間は 24 時間以上とした。以降、特に断らない場合には「クリープ試験」は「マルチクリープ試験」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クリープ試験機に据える。
- ② 所定の応力レベルを负荷させてクリープ試験を開始する。
- ③ 24 時間以上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

試験装置として、図 2.2-55 に示すように、重錘式载荷方式クリープ試験機（株式会社協同精機）を使用した。計測器として、変位計（型式 CDP-10：東京測器研究所：容量 10mm）、荷重計（型式 CLA20KNA：東京測器研究所：容量 20kN）、温度制御装置（型式 BX-303：東邦電子株式会社：温度制御 0～399 度）を使用した。水中 80 度での加温のため、加熱ヒーター（100V×300W×1P：坂口電熱株式会社）を使用した。

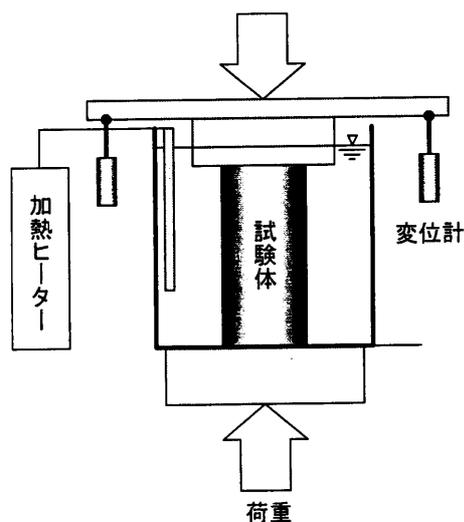


図 2.2-55 クリープ試験装置の概念図

(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 2.2-8 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(HDB3 孔)
載荷方法	※応力レベルを原則として 10%から 10%刻みで増加させた。載荷継続時間は各応力レベルで約 24 時間とした。載荷に際しては設定応力レベルに達するまで衝撃を与えることなく載荷した。
試験体の状態	<ul style="list-style-type: none"> ・水中常温・・・真空飽和→試験 ・水中 80 度・・・真空飽和→24 時間以上の 80 度保温→試験 ・乾燥・・・真空飽和→1 週間の真空乾燥→試験 ・乾湿水中常温・・・真空飽和→3 時間の気中乾燥→浸水して 24 時間の真空脱気→試験 <p>※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。</p> <p>※飽和、試験には幌延 HDB6 孔深度 300m 付近で採取した水を脱気したものを使用した。</p>
供試体寸法	<p>直径約 25mm×高さ約 50mm</p> <p>※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。</p>
試験機の仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・重錐式載荷方式クリープ試験機 (株式会社協同精機) ・変位計：型式 CDP-10 (東京測器株式会社：容量 10mm) ・荷重計：型式 CLA20KNA (東京測器株式会社：容量 20kN) ・加熱ヒーター：100V×300W×1P (坂口電熱株式会社) ・温度制御装置：型式 BX-303 (東邦電子株式会社製造：温度 0～399℃)
試験室の状態	空調設備が整った恒温恒湿室 (温度 20±2℃, 湿度 60±5%) で試験を実施した。

(4) クリープ試験体の概要

試験体の寸法および重量等を表 2.2-9 に示す。

表 2.2-9 クリープ試験体の概要

試験体番号	採取深度	重量	平均直径	断面積	平均高さ	体積	湿潤密度	Vp	Vs	動ポアソン比	試験条件	備考
	[m]	[g]	[cm]	[cm ²]	[cm]	[cm ³]	[g/cm ³]	[m/sec]	[m/sec]	[-]		
462.04C	464.04	43.6	2.449	4.709	4.998	23.538	1.852	2231	1063	0.353	水中常温	
462.12C	462.12	43.1	2.432	4.645	5.011	23.275	1.852	2198	1018	0.363	水中常温	
463.04A	463.04	44.2	2.447	4.703	5.016	23.591	1.874	2190	939	0.387	水中常温	設定載荷前破壊
462.35D	462.35	43.6	2.433	4.649	4.995	23.217	1.878	1966	841	0.388	水中80度	
462.96D	462.96	43.6	2.442	4.684	4.989	23.367	1.866	2079	914	0.380	水中80度	
462.43C	462.43	43.3	2.436	4.661	5.003	23.317	1.857	2243	985	0.381	乾燥	載荷中
462.51D	462.51	43.8	2.447	4.703	5.000	23.515	1.863	2165	1004	0.363	乾燥	載荷中
462.59A	462.59	44.3	2.462	4.759	5.003	23.808	1.861	2156	923	0.388	乾湿水中常温	
462.88D	462.88	43.2	2.433	4.650	5.004	23.265	1.857	2111	933	0.378	乾湿水中常温	

(5) クリープ試験結果

図 2.2-56～図 2.2-63 は水中常温，図 2.2-64～図 2.2-71 は水中 80 度，図 2.2-72～図 2.2-79 は乾燥，図 2.2-80～図 2.2-87 は乾湿水中常温のクリープ試験結果を示す。試験結果として，経過時間—変位，経過時間—応力，経過時間—歪み速度，経過時間—軸歪みを示している。なお，経過時間—変位図の中の変位 1 および変位 2 はそれぞれクリープ試験機の左端および右端の変位計の値（圧縮方向の変位を－，逆方向を；＋と表記）を表している（図 2.2-55 参照）。表 2.2-10 には，クリープ試験結果のまとめを示す。なお，実測寿命とは，破壊時の載荷応力が載荷され始めた時点から破壊するまでの時間であり，想定寿命とは，破壊時の想定載荷応力レベルで想定される寿命である。なお，クリープ試験機の構造上の問題により，乾燥では応力レベル約 50% までしか載荷できず，破壊に至っていない。そのため，表 2.2-10 および図 2.2-72～図 2.2-79 のクリープ試験結果には現在（2004 年 1 月 26 日：クリープ試験開始から 30 日経過時点）までの結果を示している。破壊時の載荷応力は水中 80 度が 3～5[MPa]と小さく，水中常温と乾湿水中常温は 7～17[MPa]と水中常温と比較して大きくなった。なお，実測寿命と想定寿命の関係については（6）クリープ試験の考察で示す。

表 2.2-10 クリープ試験結果のまとめ

試験体番号	試験条件	想定した大久保モデル各定数等				クリープ試験結果			想定寿命 ※3	備考
		n	m	$\lambda 1$	σv	破壊時の 載荷応力	破壊時の想 定載荷応力 レベル ※1	実測の寿命 ※2		
		[-]	[-]	[/Mpa]	[MPa]	[MPa]	[%]	[sec]		
462.04C	水中常温	49	49	0.0005058	20.30	16.85	83	6.67E+04	3.13E+05	
462.12C	水中常温	18	18	0.0007853	6.65	13.30	200	7.37E+04	0.00E+00	
462.35D	水中80度	48	48	0.0009745	10.33	5.27	51	3.74E+03	3.69E+15	
462.96D	水中80度	24	24	0.0009351	12.77	3.45	27	1.73E+03	3.61E+15	
462.43C	乾燥	43	43	0.0005585	38.19	21.07	55	-	1.17E+13	載荷中※4
462.51D	乾燥	41	41	0.0006621	42.26	20.89	49	-	5.56E+14	載荷中※4
462.59A	乾湿水中常温	21	21	0.0009670	12.33	7.64	62	1.97E+04	2.13E+06	
462.88D	乾湿水中常温	41	41	0.0005508	26.49	16.69	63	7.41E+02	9.72E+09	

※1: 破壊時の載荷応力／想定圧縮強度

※2: 破壊時の載荷応力が載荷され始めた時点から破壊するまでの時間

※3: 破壊時の想定載荷応力レベルで大久保モデルの寿命の式で想定される寿命

※4: 乾燥(462.43C,462.51D)は現在載荷中である。そのため、クリープ試験結果欄は以下のように変更している。
破壊時の載荷応力→現在の応力値、破壊時の想定載荷応力レベル→現在の応力レベル、
想定寿命→現在の応力レベルでの想定寿命

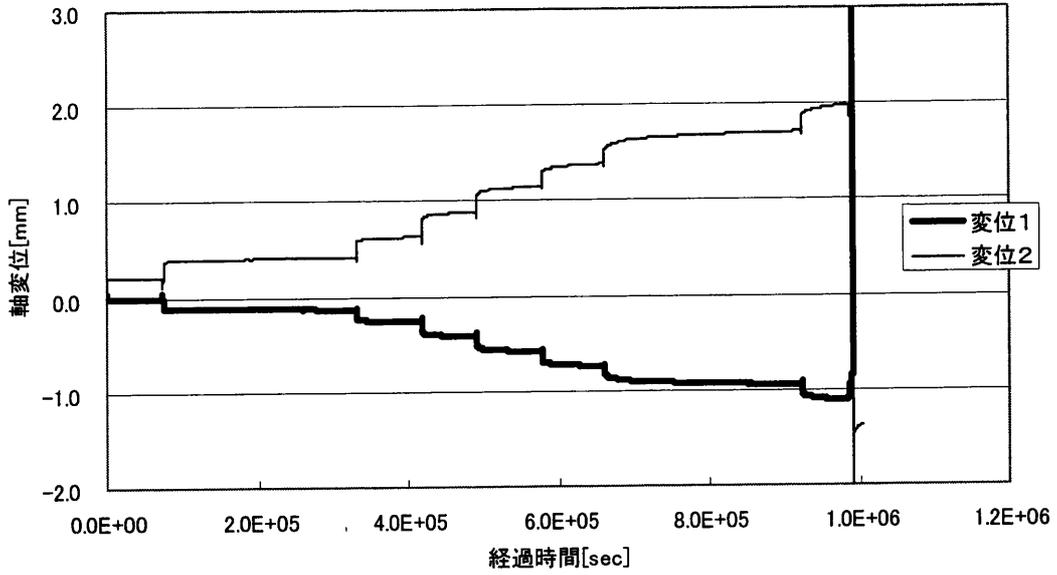


図 2.2-56 クリープ試験 経過時間-変位(462.04C) 水中常温

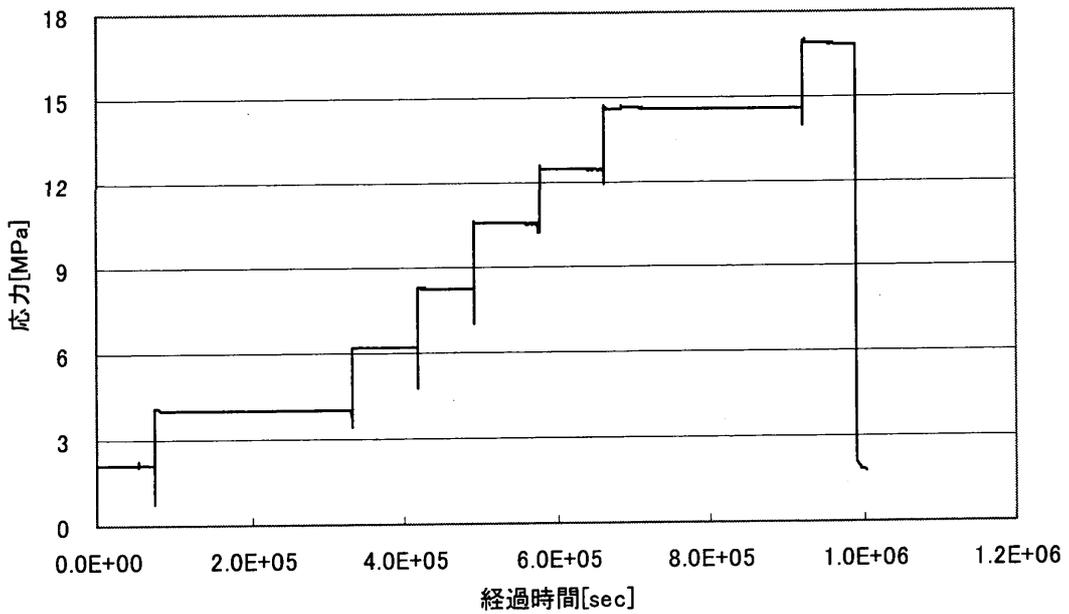


図 2.2-57 クリープ試験 経過時間-応力(462.04C) 水中常温

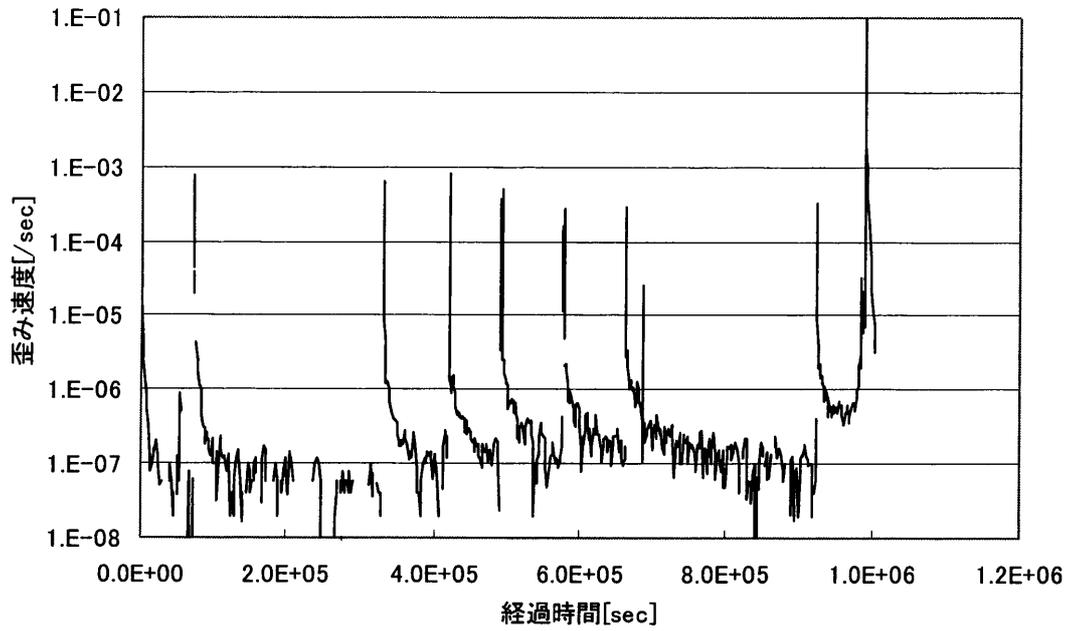


図 2.2-58 クリープ試験 経過時間-歪み速度(462.04C) 水中常温

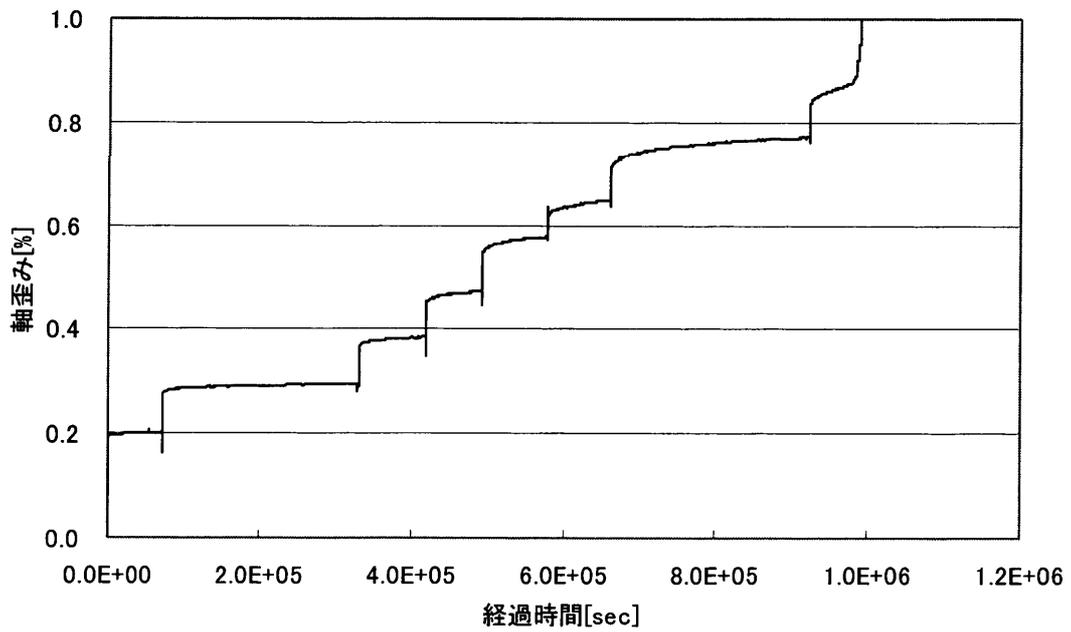


図 2.2-59 クリープ試験 経過時間-歪み(462.04C) 水中常温

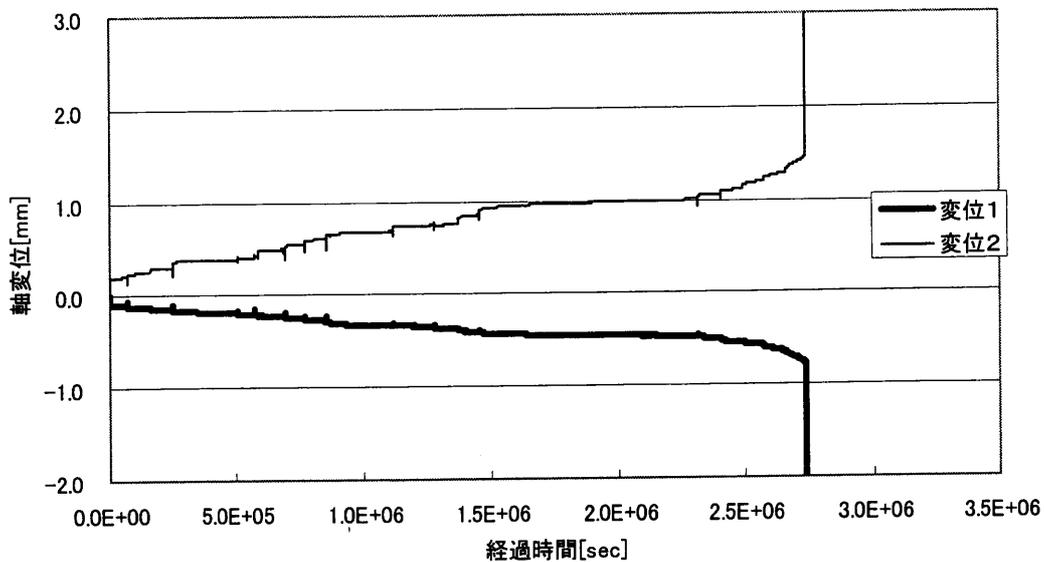


図 2.2-60 クリープ試験 経過時間-変位(462.12C) 水中常温

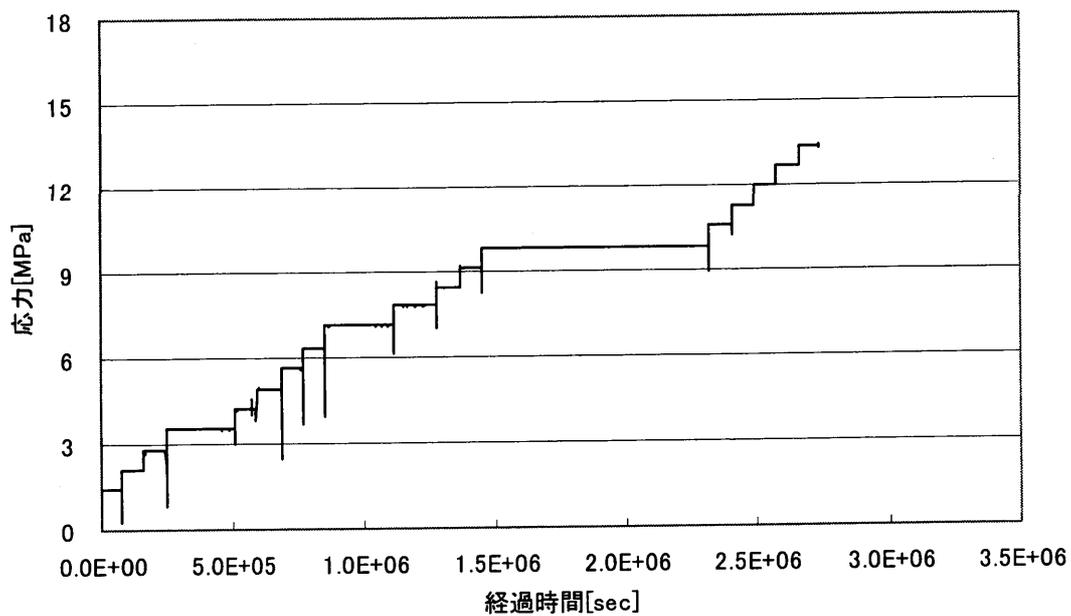


図 2.2-61 クリープ試験 経過時間-荷重(462.12C) 水中常温

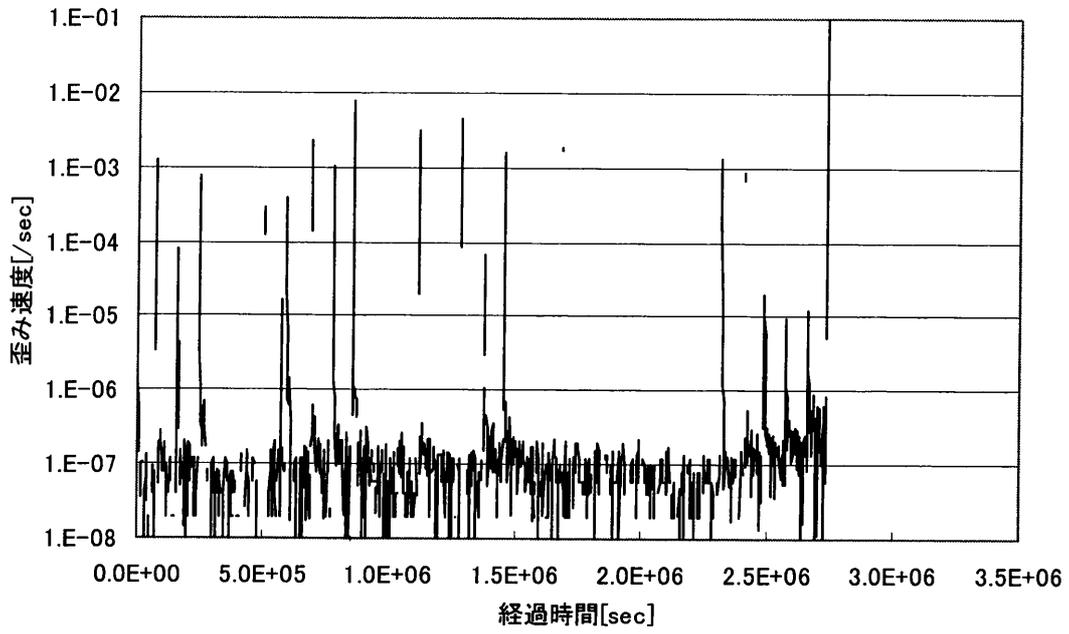


図 2.2-62 クリープ試験 経過時間-歪み速度(462.12C) 水中常温

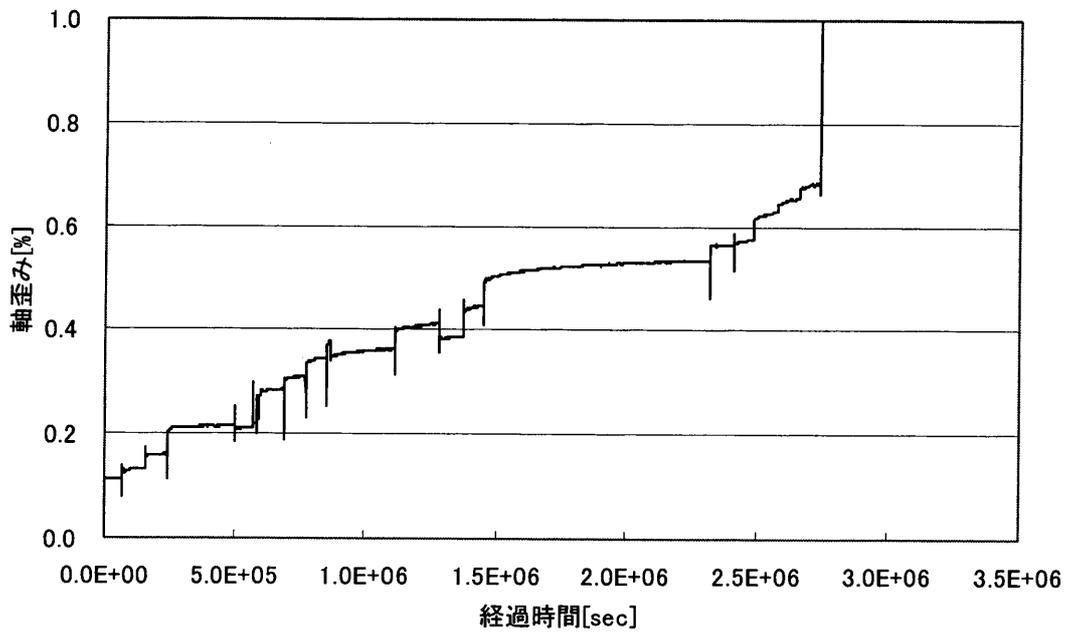


図 2.2-63 クリープ試験 経過時間-歪み(462.12C) 水中常温

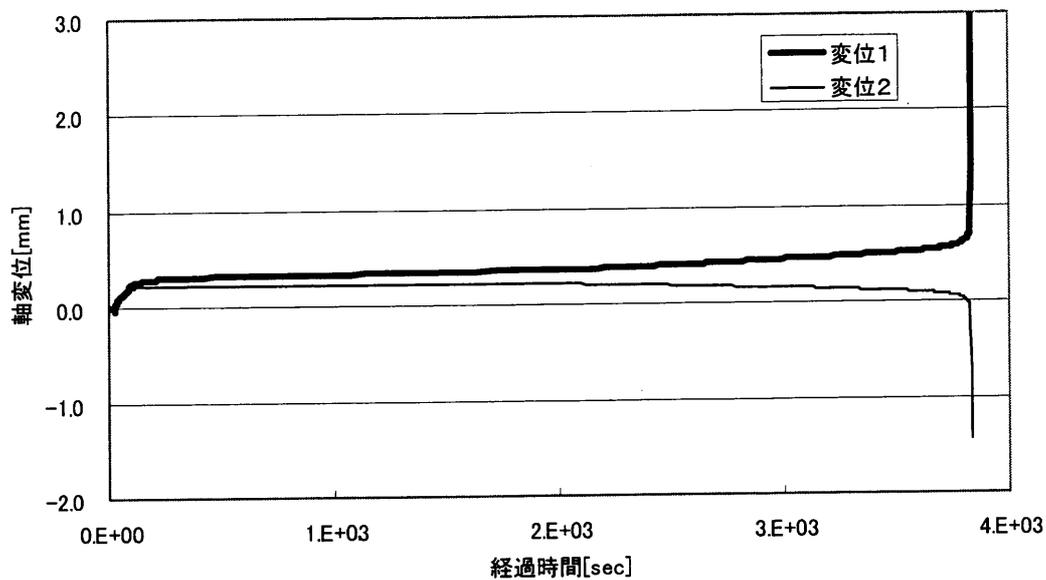


図 2.2-64 クリープ試験 経過時間-変位(462.35D) 水中 80 度

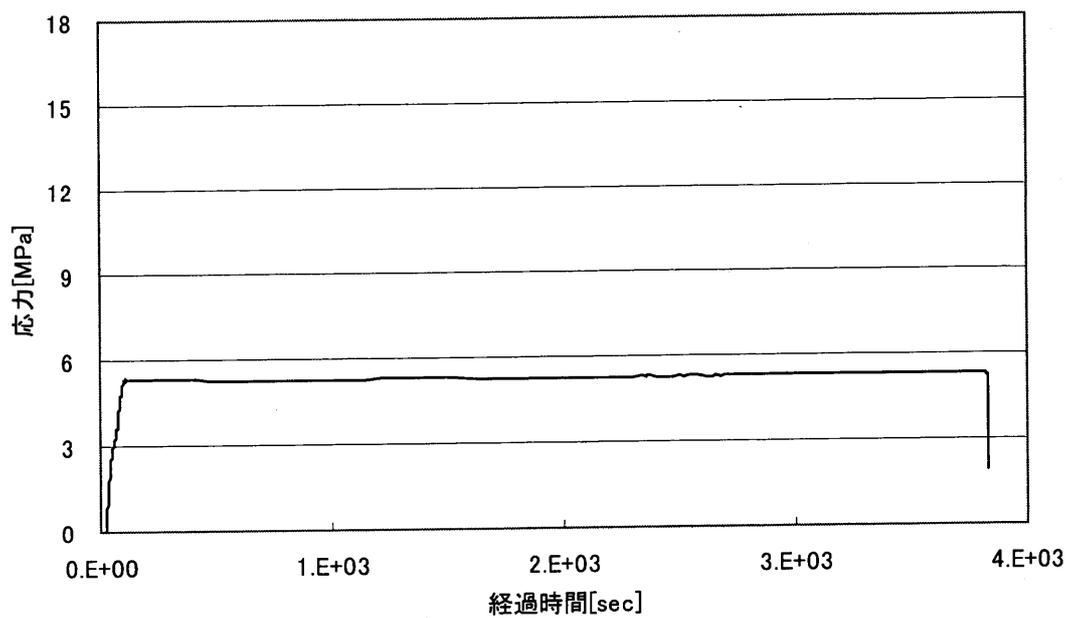


図 2.2-65 クリープ試験 経過時間-応力(462.35D) 水中 80 度

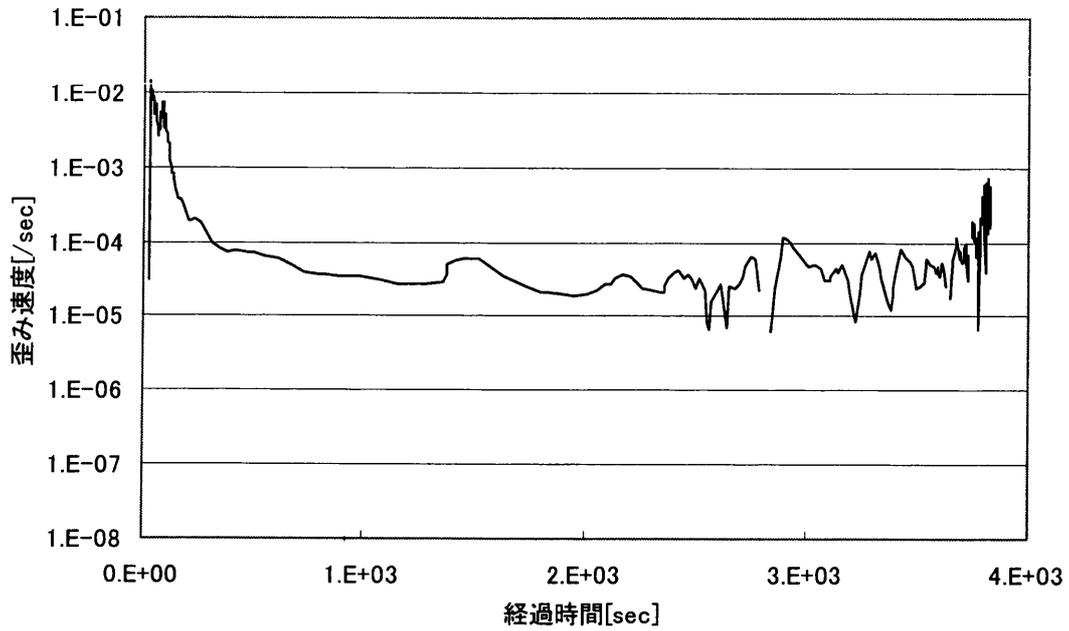


図 2.2-66 クリープ試験 経過時間-歪み速度(462.35D) 水中 80 度

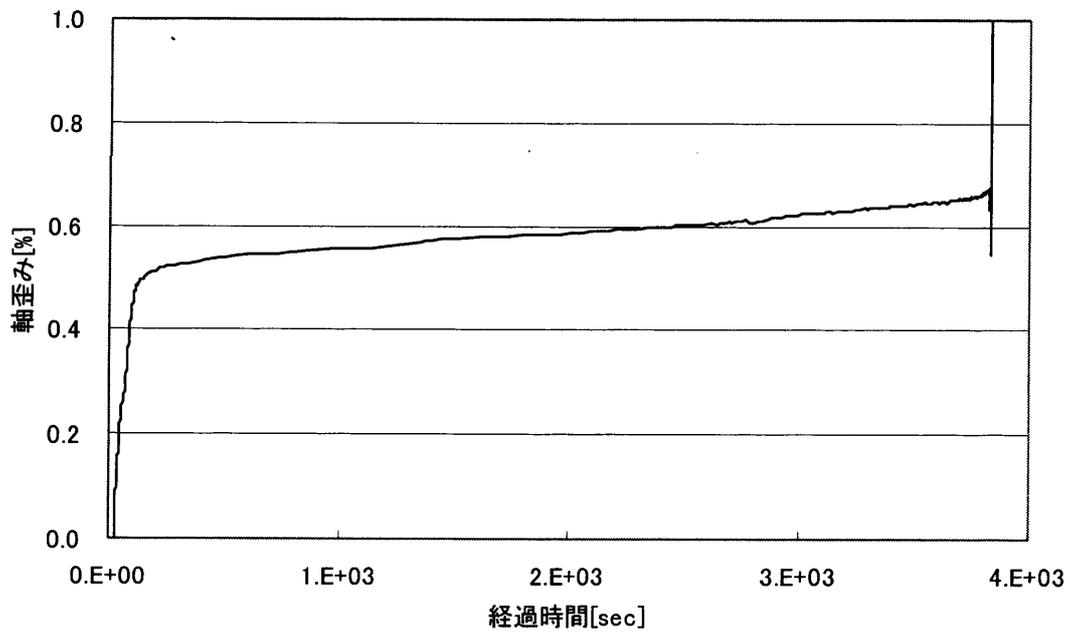


図 2.2-67 クリープ試験 経過時間-歪み(462.35D) 水中 80 度

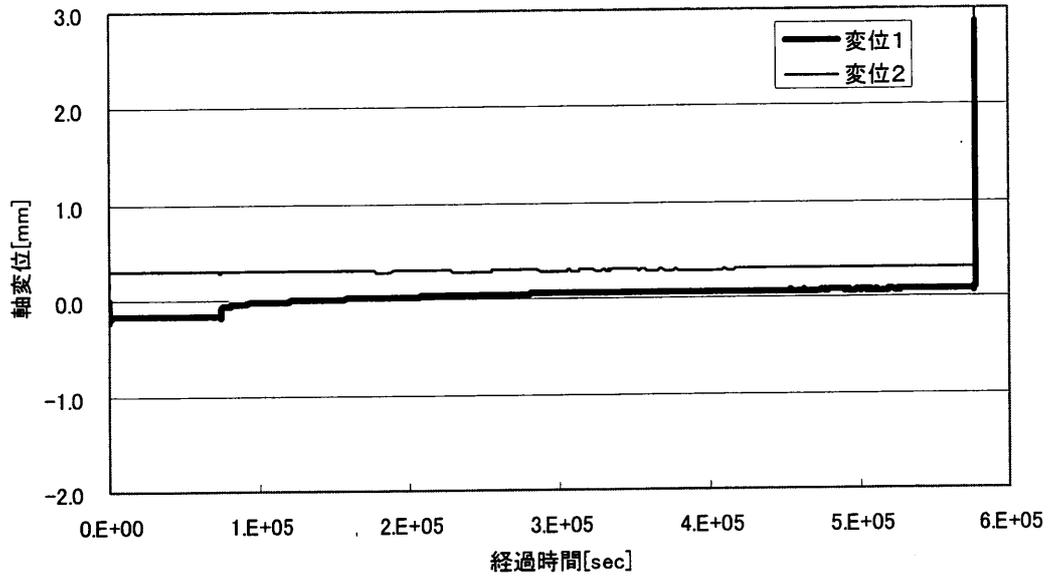


図 2.2-68 クリープ試験 経過時間-変位(462.96D) 水中 80 度

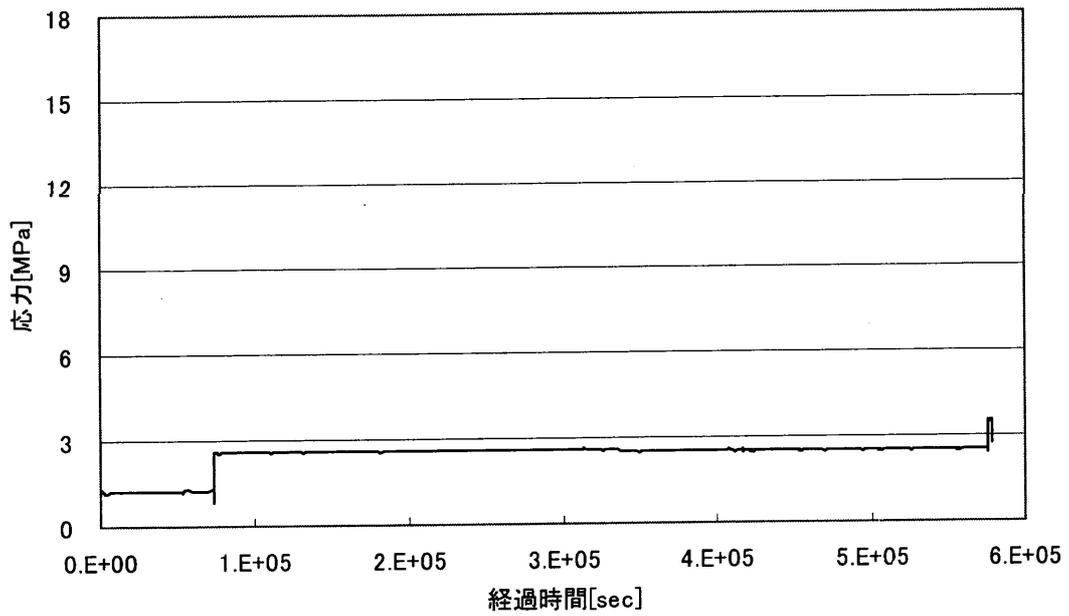


図 2.2-69 クリープ試験 経過時間-応力(462.96D) 水中 80 度

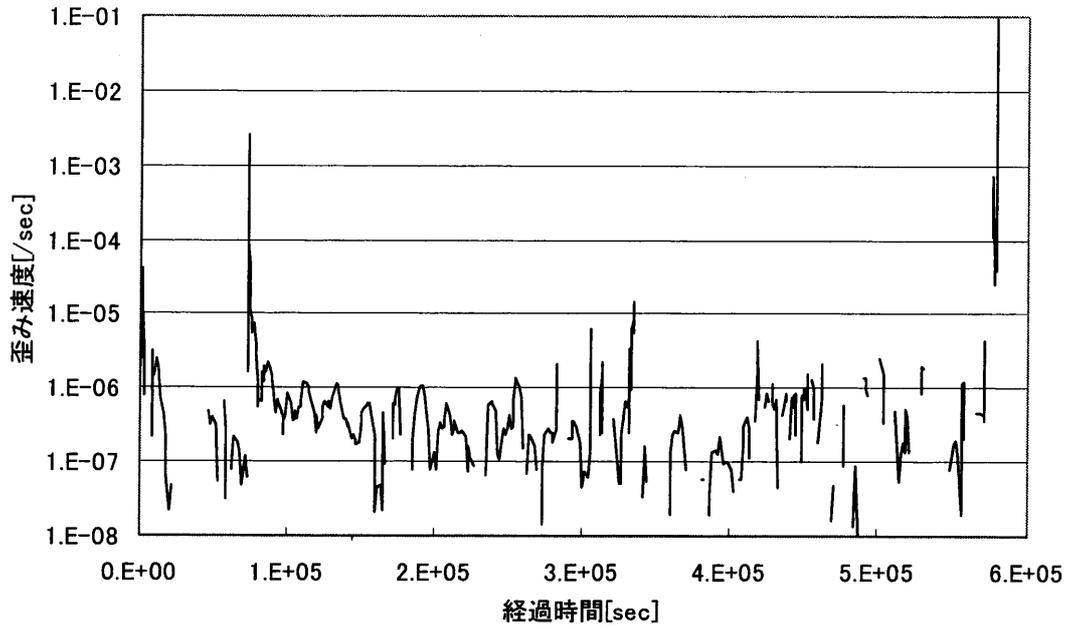


図 2.2-70 クリープ試験 経過時間-歪み速度(462.96D) 水中 80 度

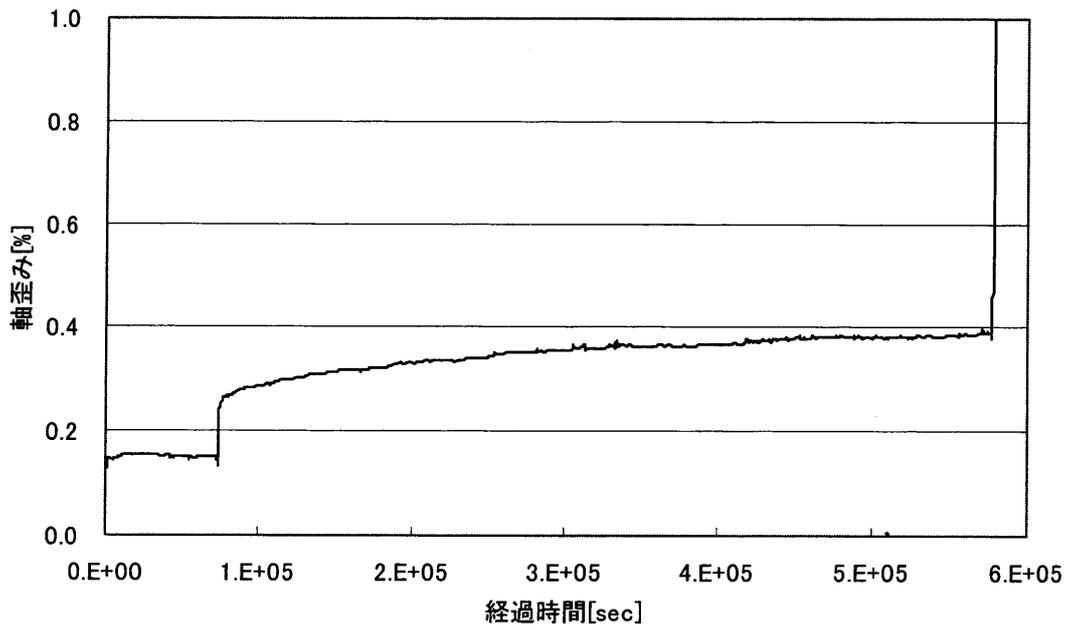


図 2.2-71 クリープ試験 経過時間-歪み(462.96D) 水中 80 度

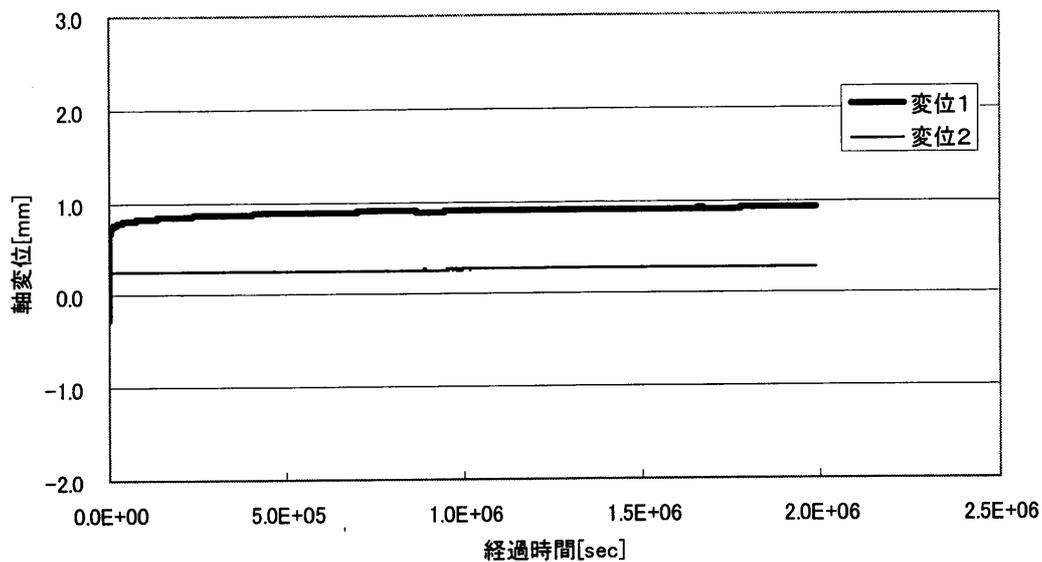


図 2.2-72 クリープ試験 経過時間-変位(462.43C) 乾燥
(載荷中)

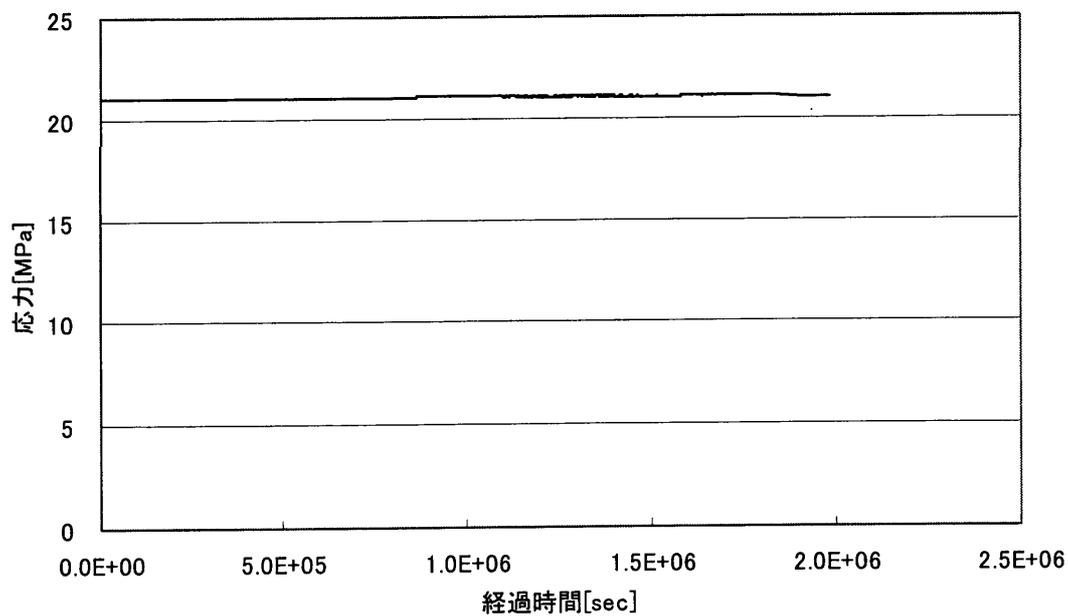


図 2.2-73 クリープ試験 経過時間-応力(462.43C) 乾燥
(載荷中)

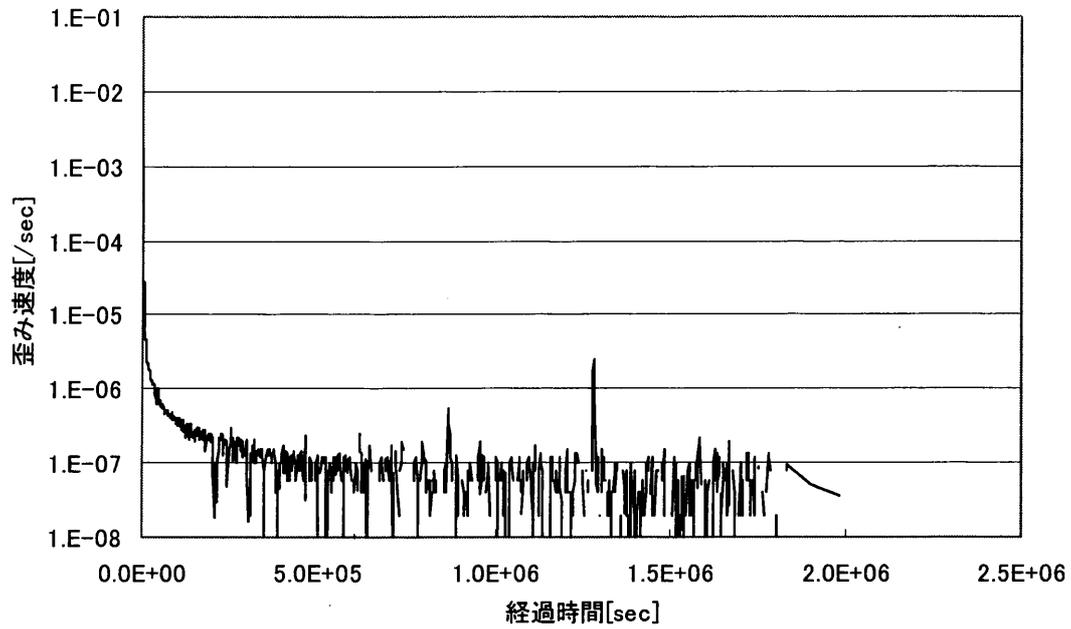


図 2.2-74 クリープ試験 経過時間-歪み速度(462.43C) 乾燥
(載荷中)

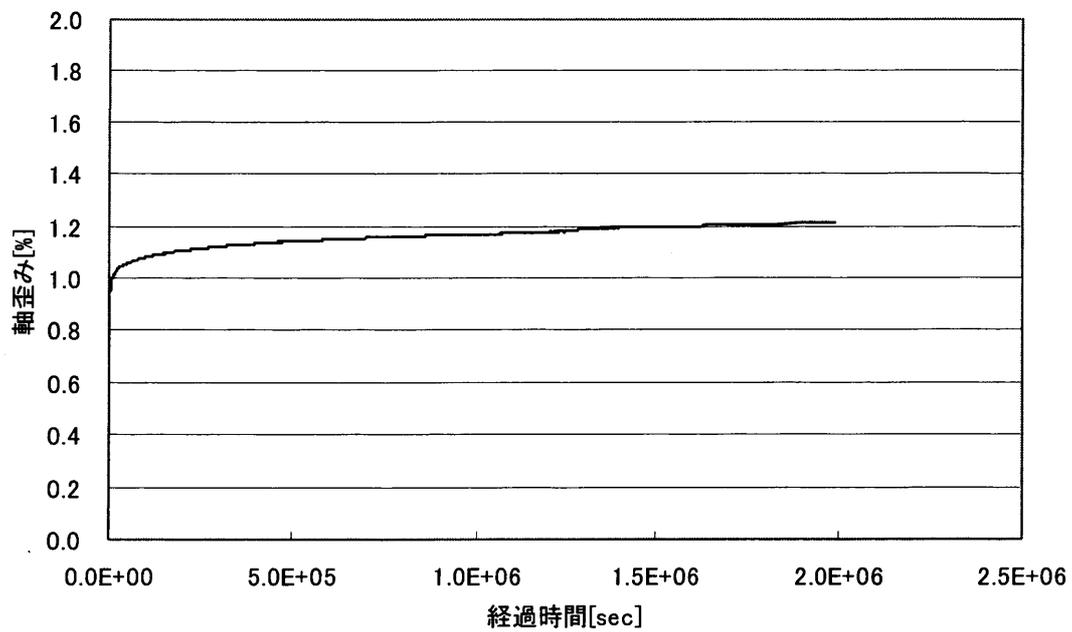


図 2.2-75 クリープ試験 経過時間-歪み(462.43C) 乾燥
(載荷中)

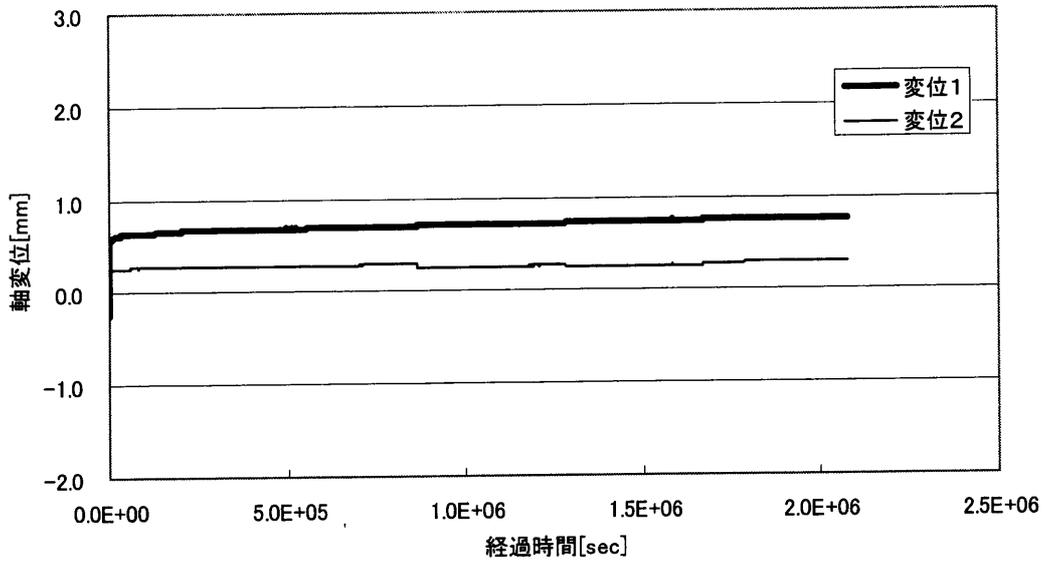


図 2.2-76 クリープ試験 経過時間-変位(462.51D) 乾燥
(載荷中)

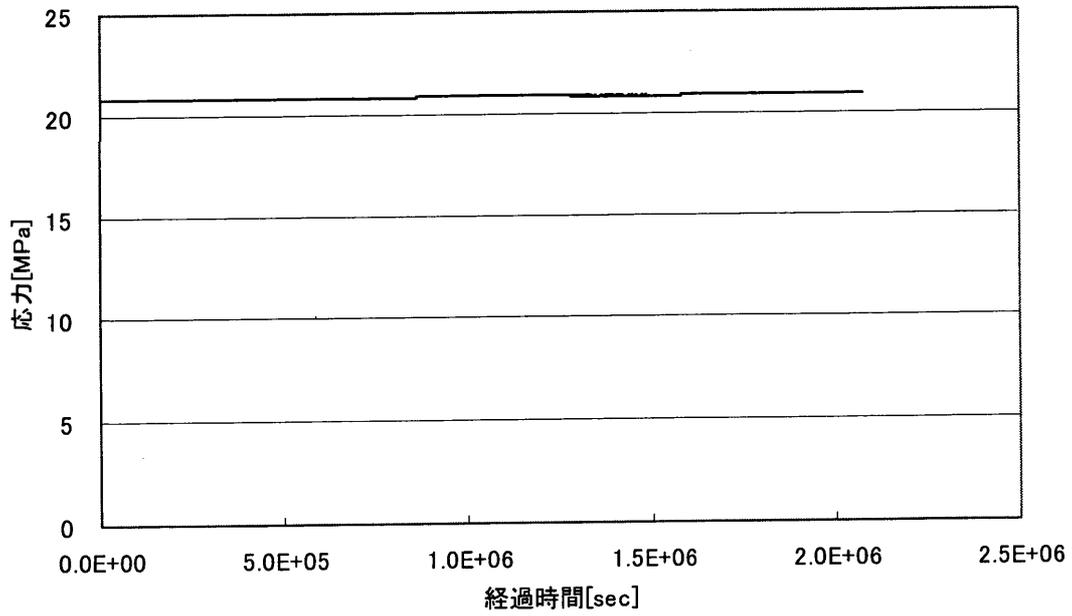


図 2.2-77 クリープ試験 経過時間-応力(462.51D) 乾燥
(載荷中)

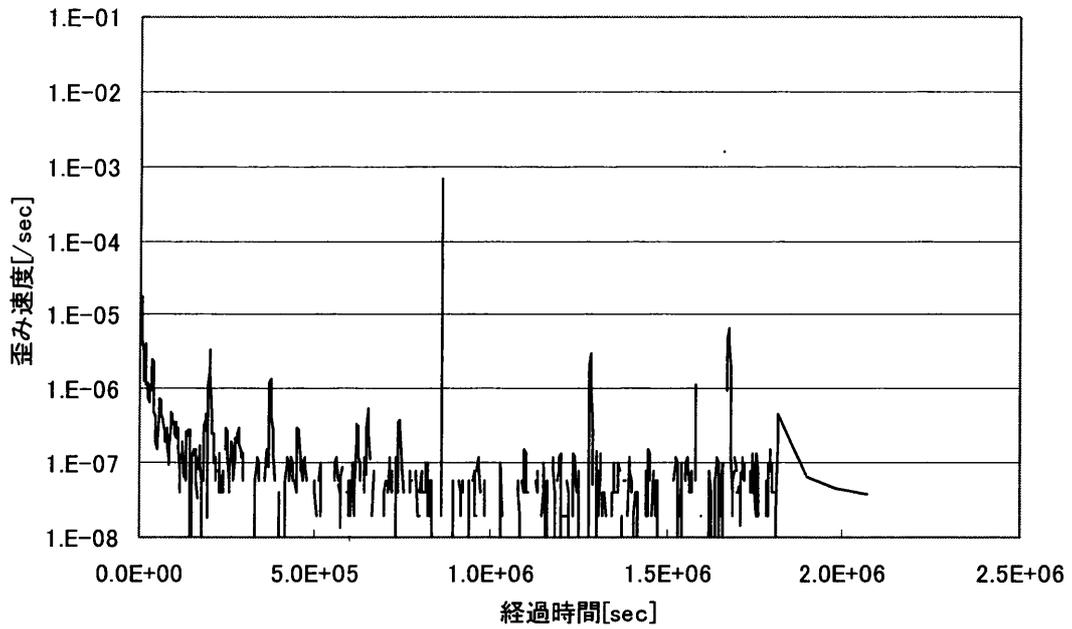


図 2.2-78 クリープ試験 経過時間-歪み速度(462.51D) 乾燥
(载荷中)

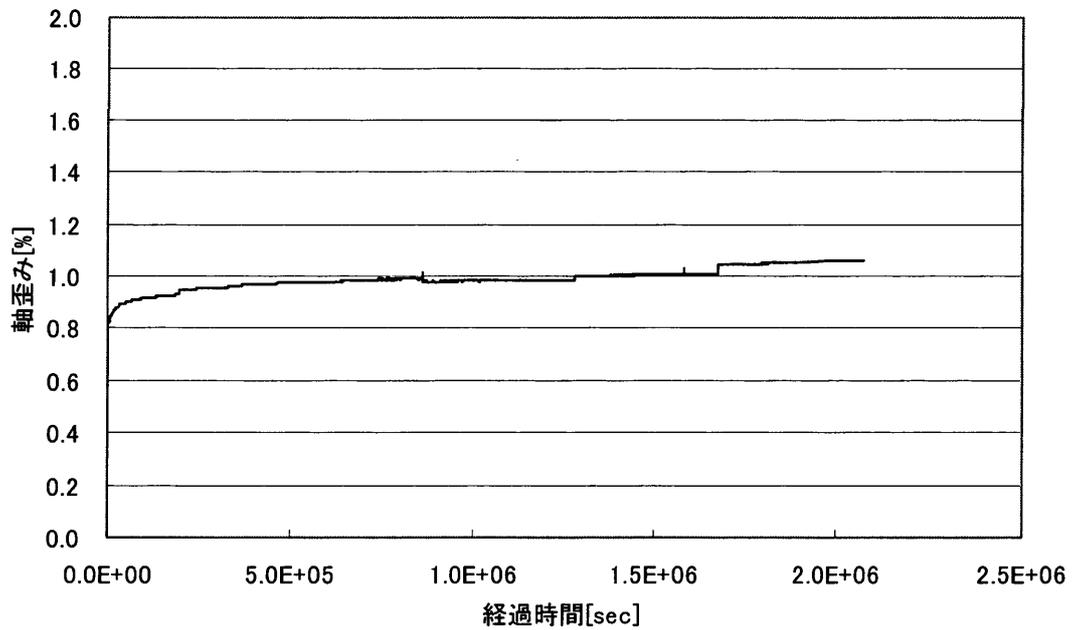


図 2.2-79 クリープ試験 経過時間-歪み(462.51D) 乾燥
(载荷中)

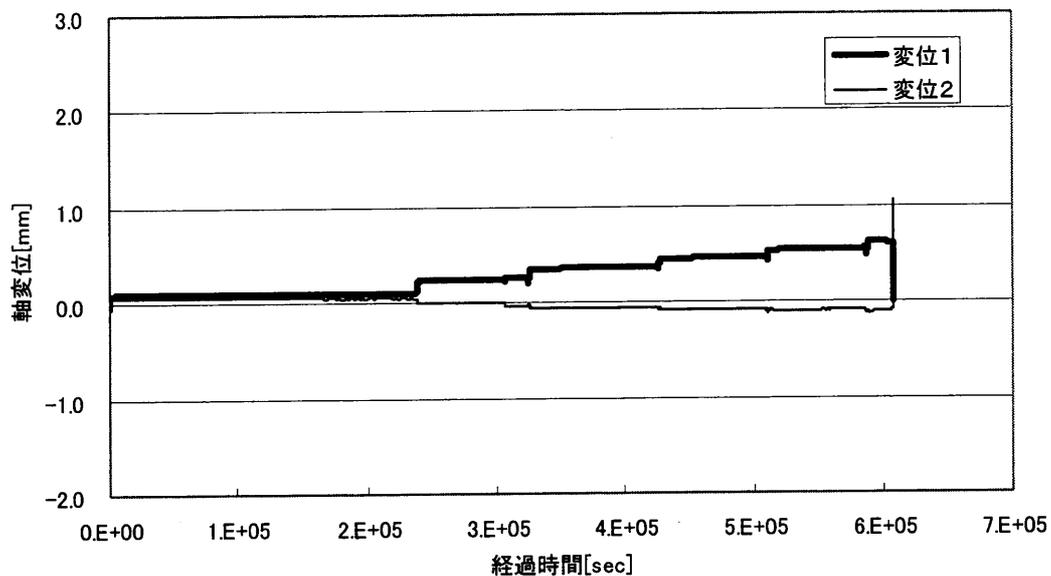


図 2.2-80 クリープ試験 経過時間-変位(462.59A) 乾湿水中常温

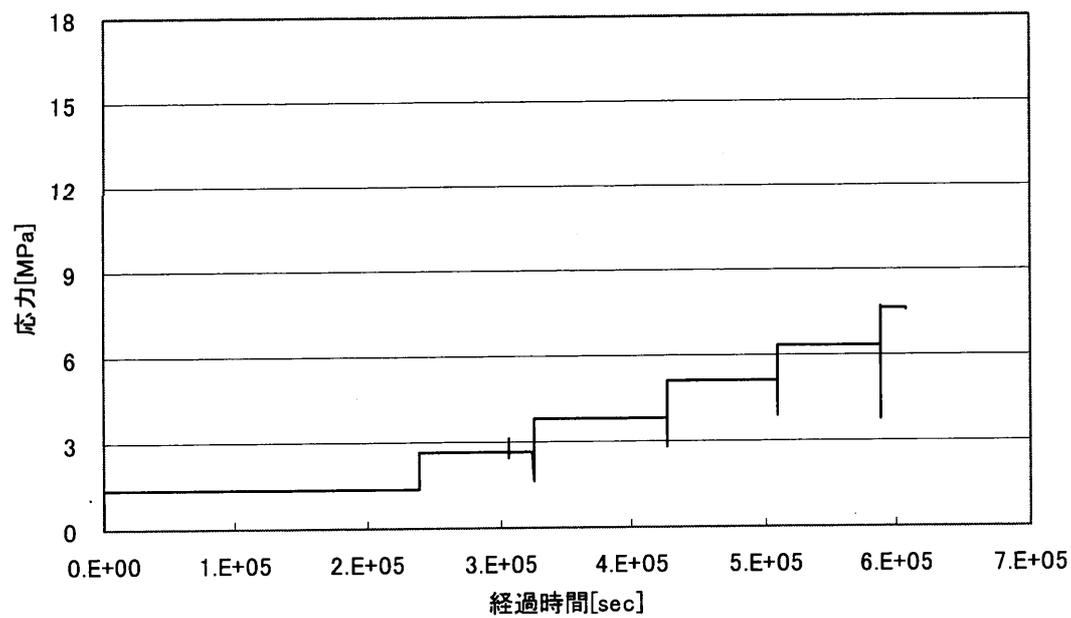


図 2.2-81 クリープ試験 経過時間-応力(462.59A) 乾湿水中常温

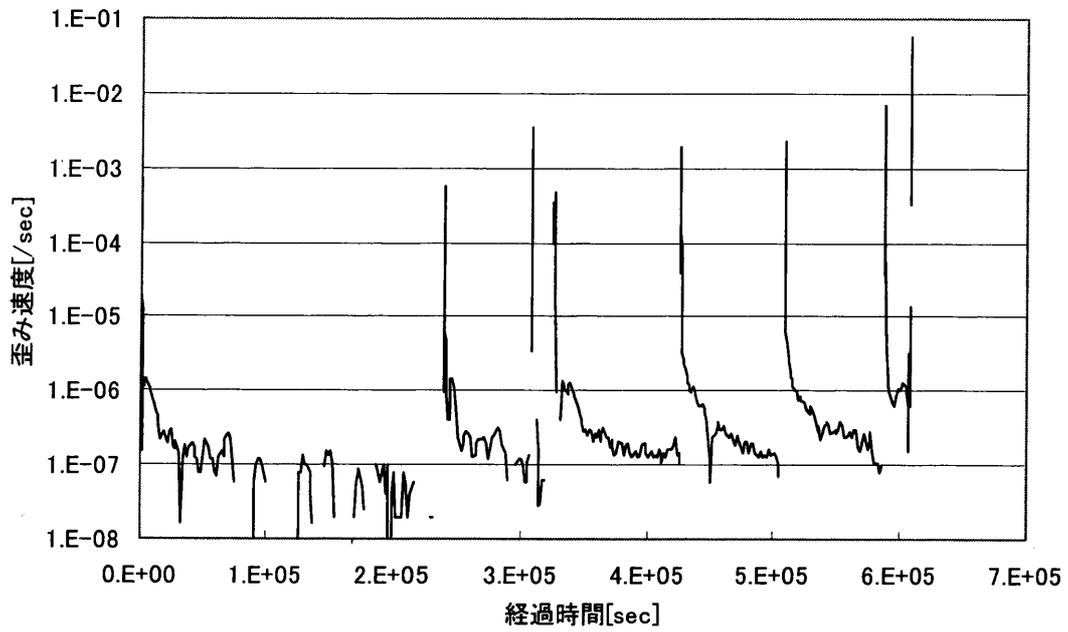


図 2.2-82 クリープ試験 経過時間-歪み速度(462.59A) 乾湿水中常温

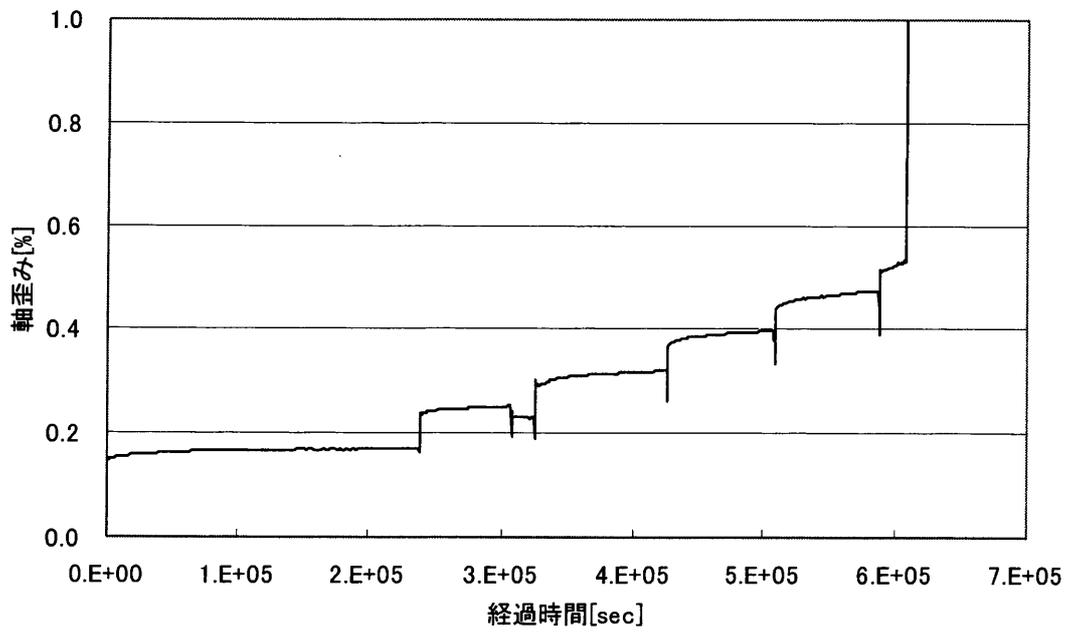


図 2.2-83 クリープ試験 経過時間-歪み(462.59A) 乾湿水中常温

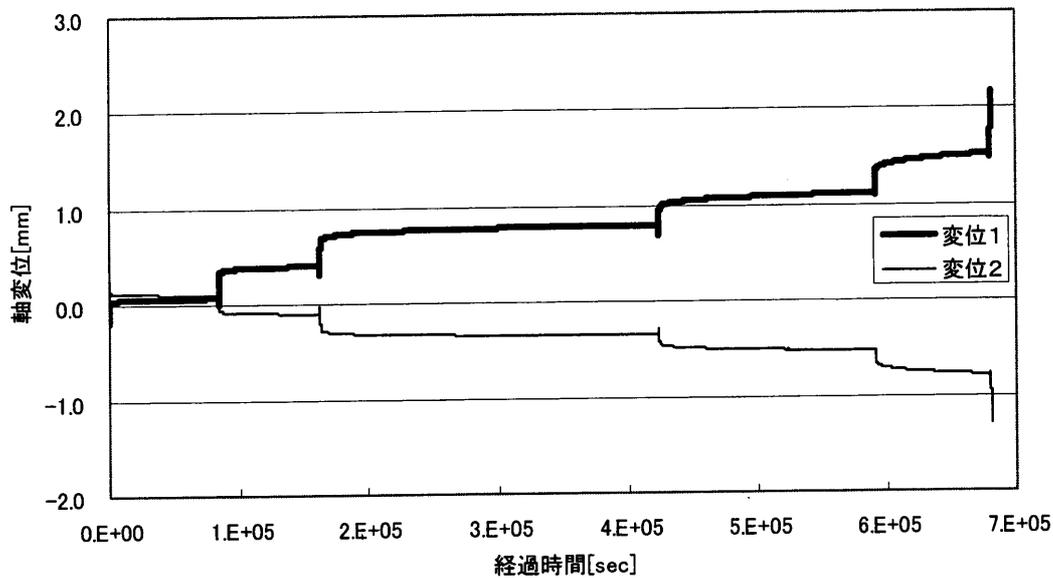


図 2.2-84 クリープ試験 経過時間-変位(462.88D) 乾湿水中常温

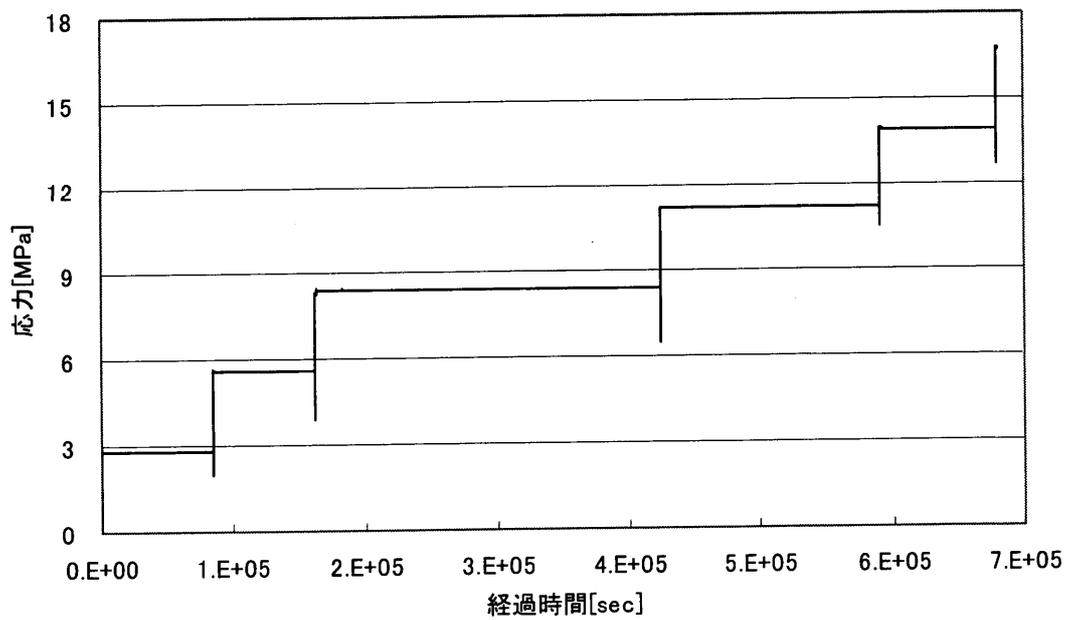


図 2.2-85 クリープ試験 経過時間-応力(462.88D) 乾湿水中常温

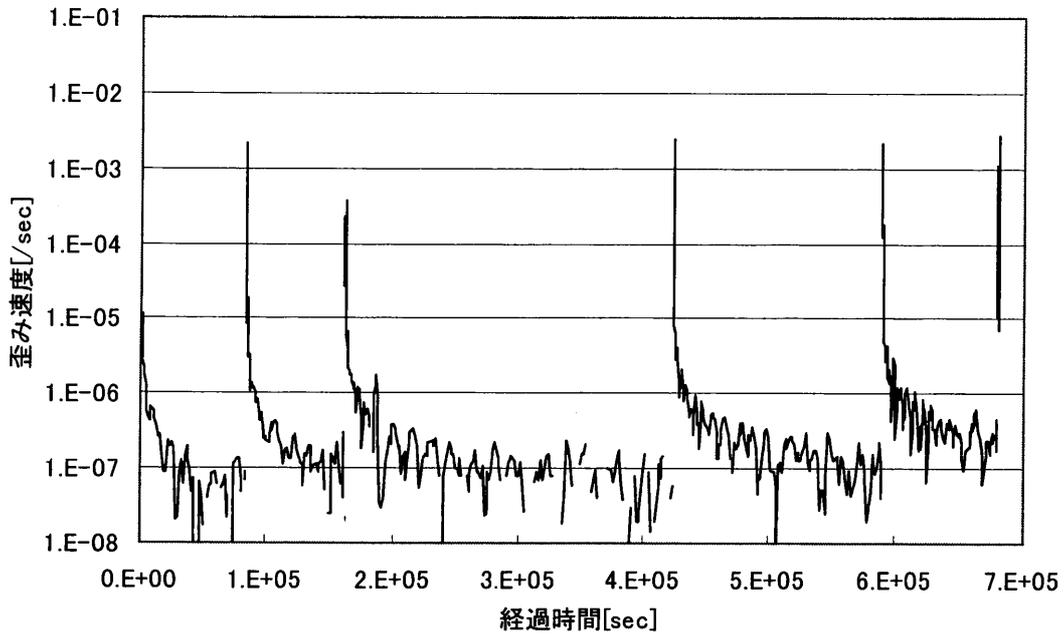


図 2.2-86 クリープ試験 経過時間-歪み速度(462.88D) 乾湿水中常温

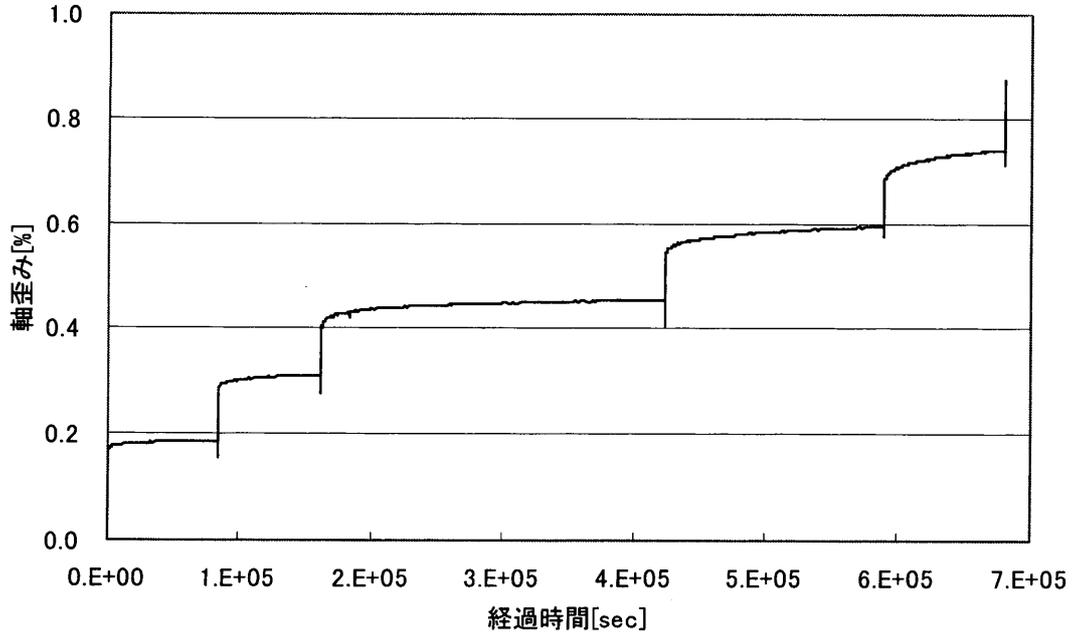


図 2.2-87 クリープ試験 経過時間-歪み(462.88D) 乾湿水中常温

(6) クリープ試験の考察

実測寿命（破壊時の設定荷重が载荷された時点から破壊までの時間）と想定寿命（破壊時の想定载荷応力レベルでの寿命）との比較を行った。図 2.2-88 に想定寿命と実測寿命を試験ケースごとに棒グラフで示す。また、図 2.2-89～2.2-96 に実測のクリープ曲線と大久保モデルによる理論曲線を示す。なお、クリープ試験機の構造上の問題により、乾燥では応力レベル約 50%までしか载荷できなかったため、記載している試験結果は破壊に達していないものである（図 2.2-93, 図 2.2-94 参照）。水中常温の一部のケース（試験体番号：462.04C）では想定寿命とほぼ等しい結果が得られたが、水中 80 度や乾湿水中常温では、想定した寿命と大きく異なる結果となった。本研究では、一軸圧縮試験とクリープ試験に使用する試験体を同一の深度から採取し、両者の試験体の一軸圧縮強度などの値がほぼ同一となることを目標にして試験を行った。しかし、実際には一軸圧縮試験体とクリープ試験体とでは一軸圧縮強度などの値が異なっていた可能性が大きい。また、水中常温と比較して、水中 80 度や乾湿水中常温では、試験の環境条件を整えることが困難だったと考えられる。さらに、試験体の寸法が直径 25 mm, 高さ 50 mm と小さく、整形は ISRM 指針（岩の力学連合会 1982）に則ったものの、試験体の整形度が試験結果に及ぼす影響も大きかったのではないかと考えられる。

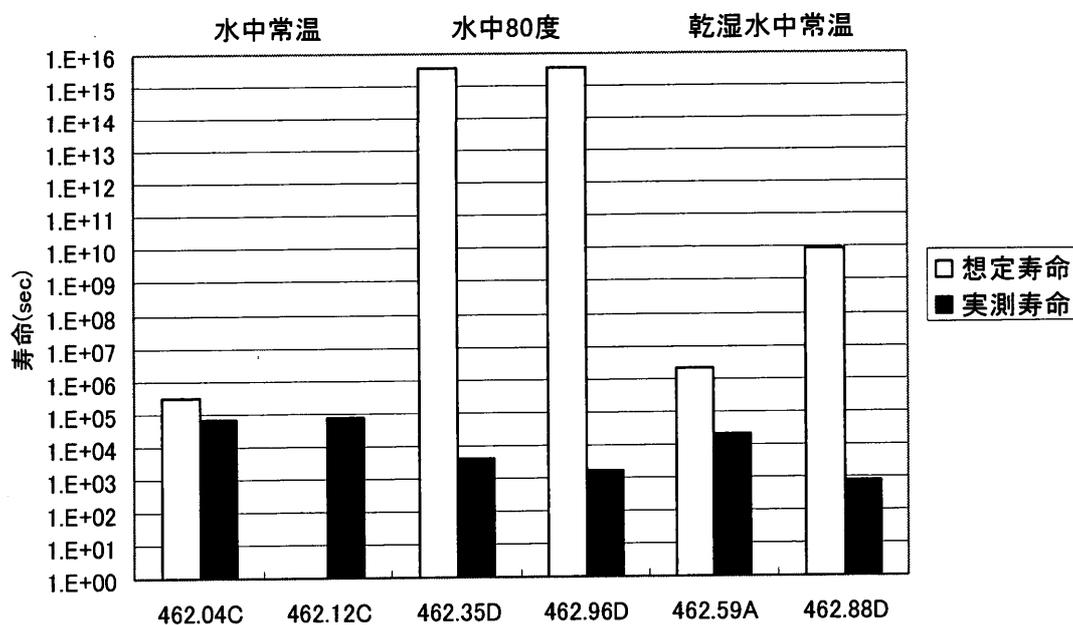


図 2.2-88 破壊時の応力レベルにおける想定寿命と実測寿命

※ 462.12D は破壊時の応力が想定した一軸圧縮強度を超えたため、想定寿命は記載していない。

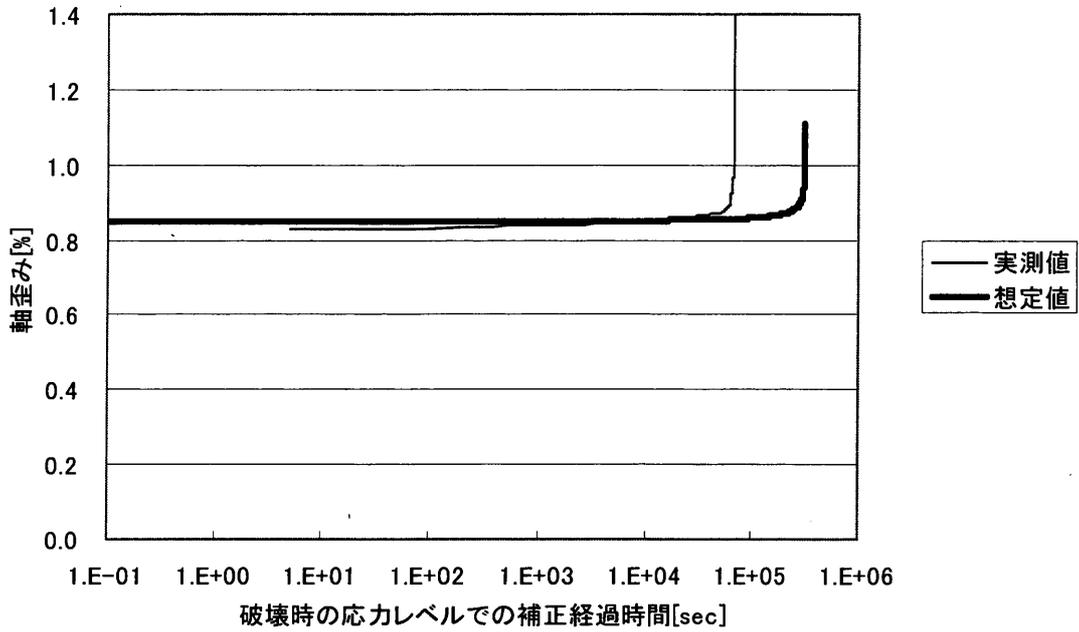


図 2.2-89 クリープ曲線の実測値と理論値 (462.04C) 水中常温 応力レベル 83%

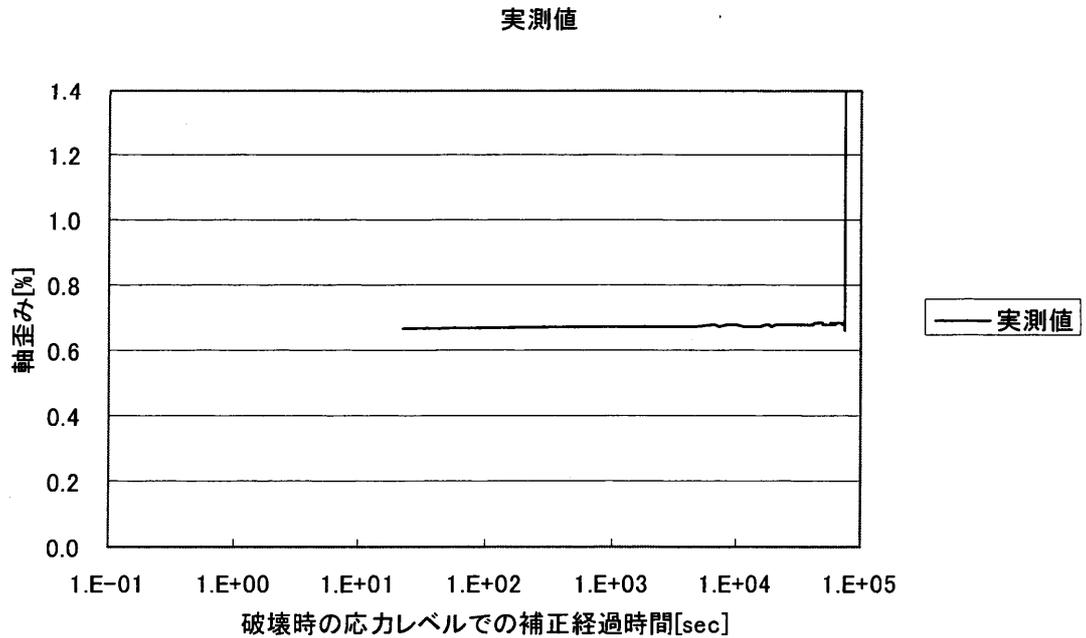


図 2.2-90 クリープ曲線の実測値と理論値 (462.12C) 水中常温 応力レベル 200%
 ※ 破壊時の応力が想定した一軸圧縮強度を超えたため、想定のカリープ曲線は描いていない。

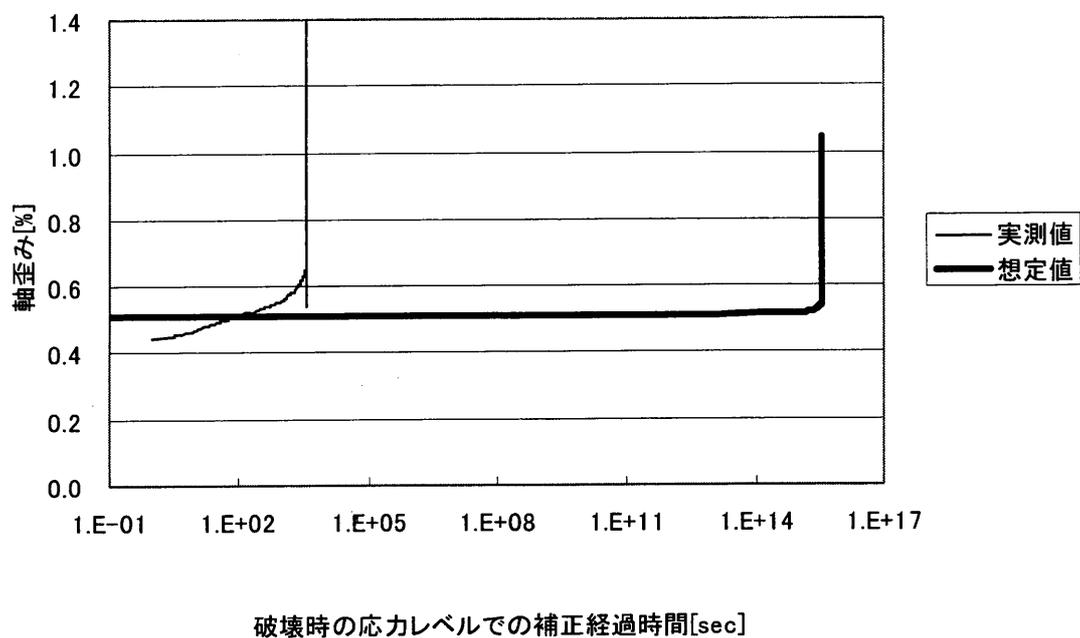


図 2.2-91 クリープ曲線の実測値と理論値 (462.35D) 水中 80 度 応力レベル 51%

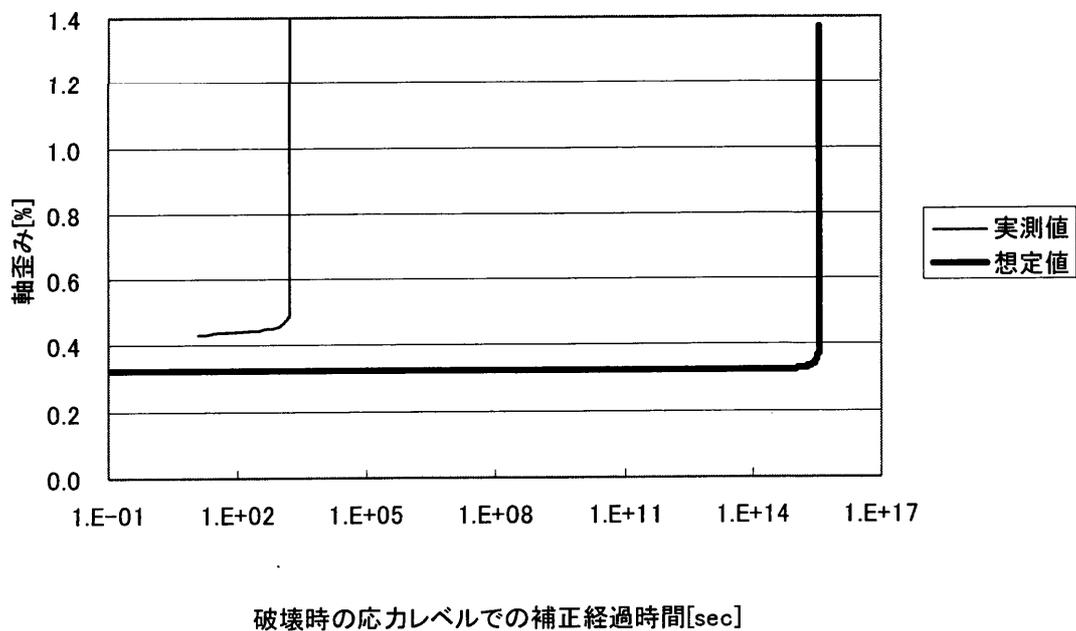


図 2.2-92 クリープ曲線の実測値と理論値 (462.96D) 水中 80 度 応力レベル 27%

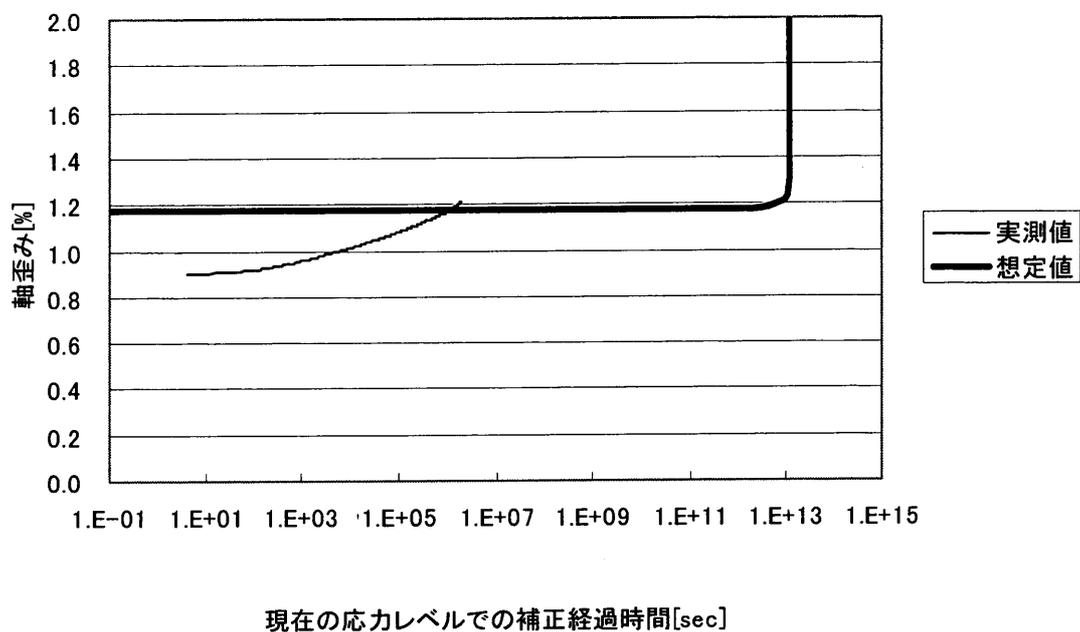


図 2.2-93 クリープ曲線の実測値と理論値 (462.43C) 乾燥 応力レベル 55% (载荷中)

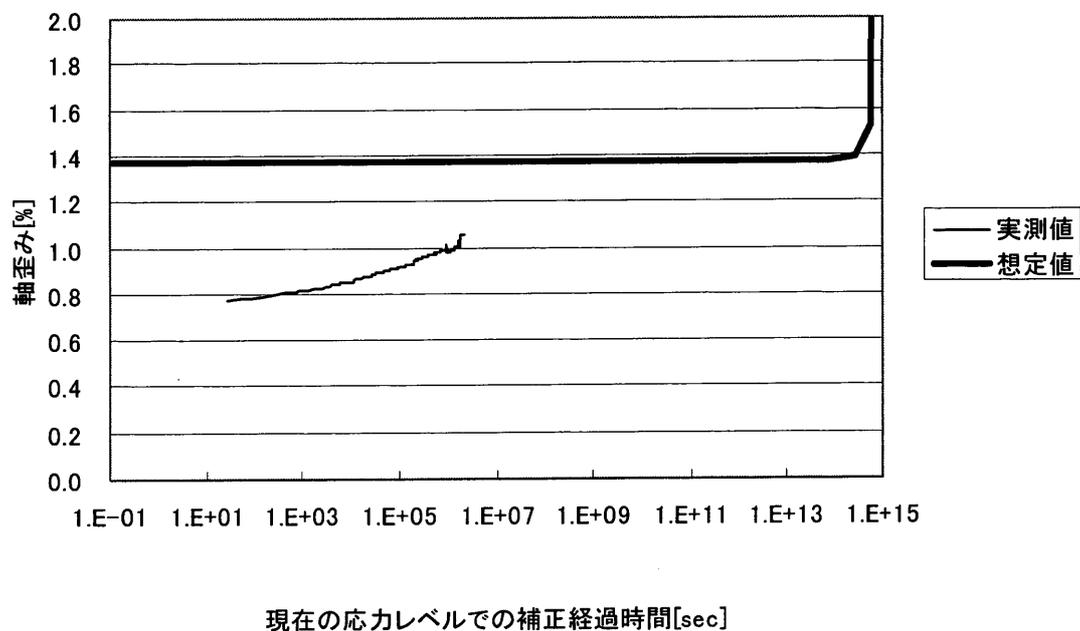


図 2.2-94 クリープ曲線の実測値と理論値 (462.51D) 乾燥 応力レベル 49% (载荷中)

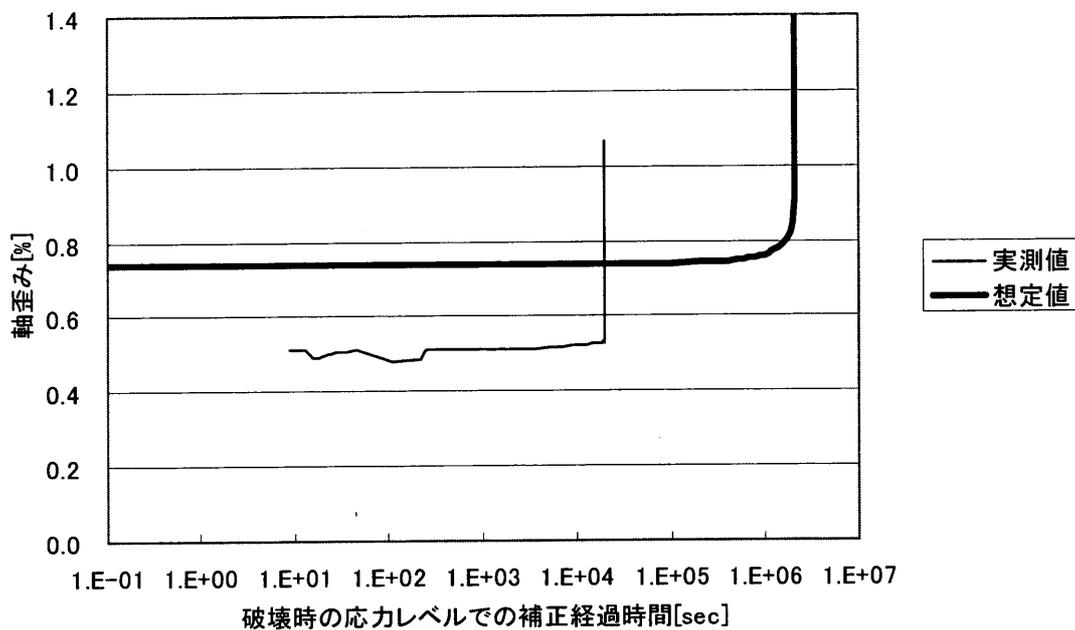


図 2.2-95 クリープ曲線の実測値と理論値 (462.59A) 乾湿水中常温
 応力レベル 62%

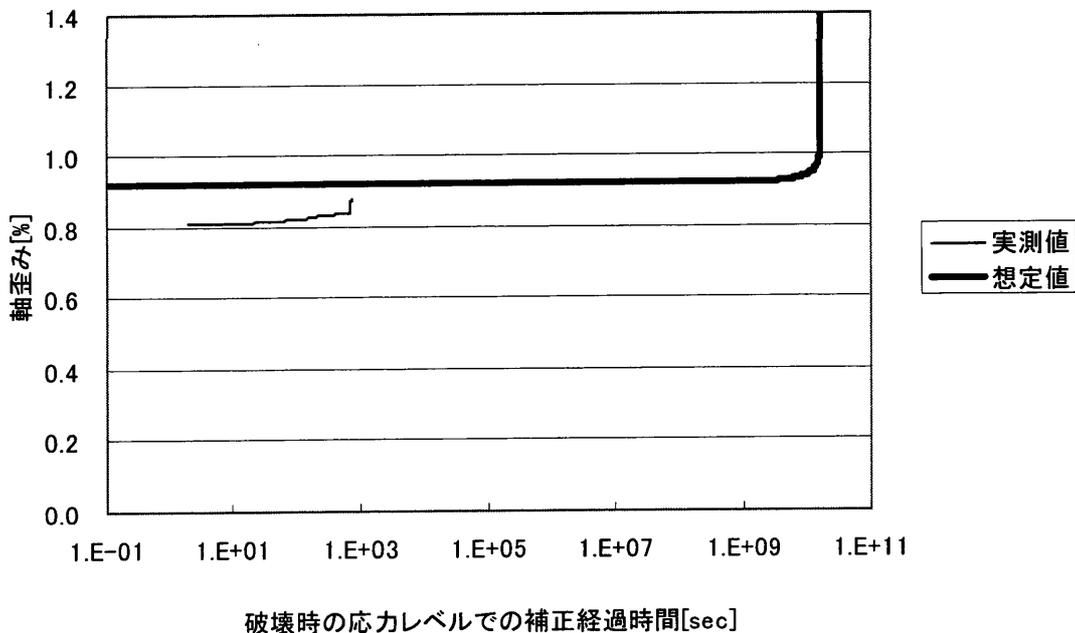


図 2.2-96 クリープ曲線の実測値と理論値 (462.88D) 乾湿水中常温
 応力レベル 63%

次に、熱や乾湿などの試験条件の違いがクリープ試験結果に与える影響について考察するため、破壊時の応力レベルに着目した検討を行った。図 2.2-97 に各試験での破壊時の応力レベルを棒グラフにしたものを示す。試験数が少ないため、断定はできないが概略的な傾向として以下の考察ができると考えられる。

- ・ 水中 80 度は水中常温と比較して破壊時の応力レベルが小さいことから、熱によってクリープ強度が小さくなった可能性がある。
- ・ 乾湿水中常温は水中常温と比較して破壊時の応力レベルが小さいことから、乾湿によってクリープ強度が小さくなった可能性がある。

しかし試験体の強度特性のバラツキが大きかったことや試験数が少ないことを考慮すると、試験条件がクリープ試験結果に与える影響は明確には評価は出来ないと考えられる。

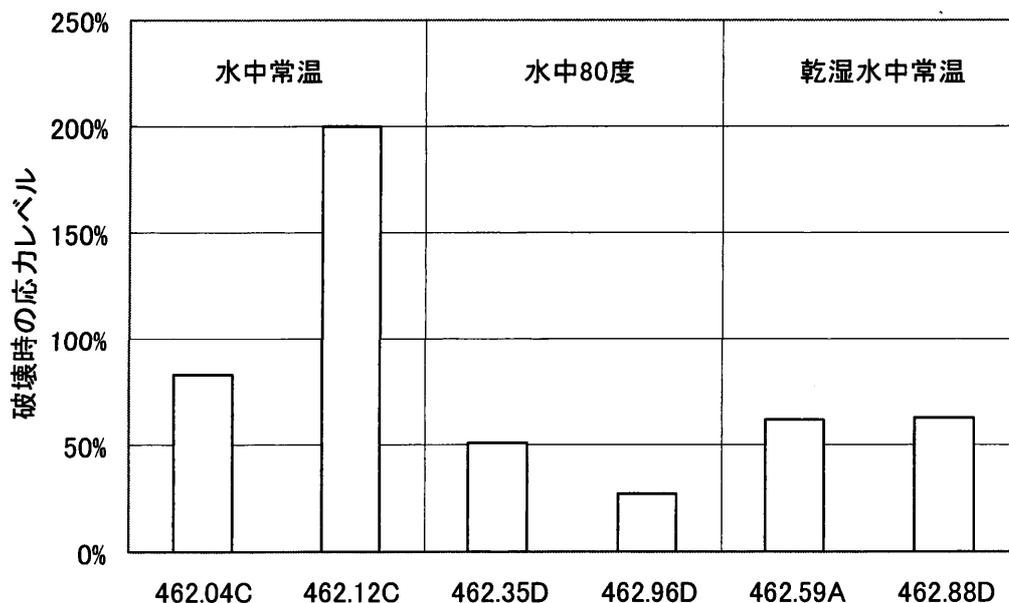


図 2.2-97 破壊時の応力レベル

2. 3 今後の課題と提案

今回の試験では、同一の深度からボーリングコアを採取すれば力学的特性がほぼ同一となると考え、一軸圧縮試験およびクリープ試験を行った。クリープ寿命は一部でほぼ予測できたものもあったが、その他は大きく異なる結果となった。現状では試験体個々の力学的特性の違いが大きいため、幌延堆積岩を対象として一軸圧縮試験の結果から大久保モデルのパラメータを算出し、クリープ寿命を予測することは注意を要すると考えられる。幌延堆積岩は同一方向に潜在的なクラックが多く、自然に割れたコアはほぼ同一の角度をなしていた。そのため、潜在的なクラックの方向を推定するとともに、なるべく潜在的なクラックを含まない箇所を限定して試験体を採取すれば、力学的特性がほぼ等しい試験体が得られると考えられる。

また、最近の研究で大久保らは、大久保モデルの拡張式を提案している（大久保・福井，2002；大久保他，2002）。拡張式は、1次クリープおよび2次クリープでのクリープ曲線も再現できる。本研究では、マルチクリープ試験を実施したため、時間一歪み速度の曲線が多数得られた。この結果は拡張式のパラメータ（1次クリープ時の m や a ）を同定する際に有効であると考えられる。そのため、今回の試験結果をもとに拡張式のパラメータを推定して、拡張式の適用性について検討できると考えられる。

このように、幌延地域に分布する堆積軟岩の長期力学的挙動を把握することを目的とした大久保モデルの信頼性向上のためには、より多くの良質なデータを蓄積するとともに、拡張式の適用性について継続して検討する必要があると考えられる。

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、図 3.1-1 に示すフローに従い、岩盤の長期力学挙動について解析的な検討を行った。フロー中の括弧内に示されている番号は、本報告書において該当する節、項番号である。なお、本研究においては、処分技術の信頼性向上を図る目的で、幌延において「地下施設での調査研究段階（第3段階）」で実施される予定である原位置試験（サイクル機構 2003）が処分孔縦置き方式（サイクル機構 1999）を模擬して実施されるものと仮定し、ピット（模擬処分孔）周辺岩盤の長期力学挙動を主な検討対象とした。また、本研究における検討条件は、「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（平成 15 年度）（サイクル機構 2004）」（以降、「幌延空洞安定」と称する）条件と可能な限り同様とした。

まず、ピット掘削時の周辺岩盤の応力状態について考えてみる。ピット周辺岩盤の応力状態は、ピット掘削前に、既に研究坑道掘削による影響をある程度受けていると推察される。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、ピット周辺岩盤の応力状態は異なると推察される。

そこで、3. 2 節において、幌延における「幌延空洞安定」条件をもとに、検討対象とする深度を便宜的に2つ設定し、配置方向、支保等、研究坑道の条件を想定した。研究坑道の形状は、第2次取りまとめで示された軟岩系岩盤における処分坑道に同様な、内径 5.0 m の三心円断面を想定した。

次に想定した研究坑道の条件をもとに、3. 3 節において、ピット掘削時の周辺岩盤の応力状態について解析的に検討した。ピットのスケールについては、第2次取りまとめで示されたスケール（以降、実規模と称する）、および原位置試験を想定し、便宜的に第2次取りまとめで示されたスケールに比較し、1/4 であるスケール（以降、縮小規模と称する）を考慮した。また、実規模については、ピットに支保を設置するケースについても考慮した。これらの検討にあたっては、簡単のため単一ピットとして取り扱うことを基本としたが、支保を設置する実規模ピットについては、隣接するピットの掘削による影響についても検討した。なお、3. 2 節、および3. 3 節では、第2次取りまとめと同様に、岩盤を Mohr-Coulomb の破壊基準に従う完全弾塑性体、支保を線形弾性体とした掘削解析を行った。また、以下に示す解析結果に主に着目し、研究坑道やピットの安定性について検討した。

- ・ 塑性領域の分布
- ・ 限界せん断ひずみ（後述する最大値）を超過するひずみが発生する領域の分布
- ・ 支保発生応力

これらの結果をふまえて、3. 4 節において、ピット周辺岩盤の長期力学挙動について解

析的に検討した。解析において対象とする時間は、緩衝材設置以降とした。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（大久保ほか，1987）を用いることとし，構成方程式のパラメータは，HDB-1孔のボーリングコアより得られた試験結果（大久保 2003）（井上・南 2003），およびHDB-3孔のボーリングコアより得られた試験結果（2章）より設定した。また，ピット周辺岩盤の長期力学挙動に影響を及ぼすであろう緩衝材の刚性，熱や乾湿繰返しに伴い発生する影響，および支保の挙動等についても適宜検討を加えた。

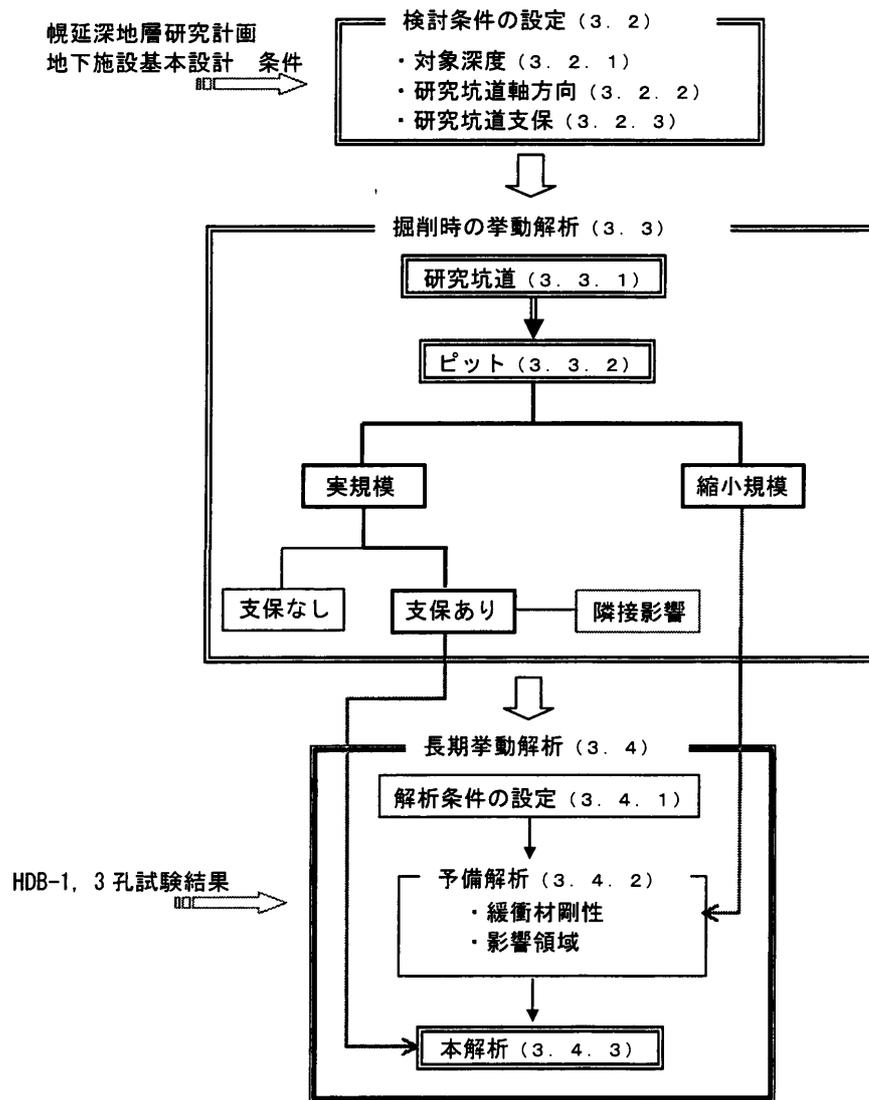


図 3.1-1 岩盤の長期力学挙動検討フロー

3. 2 検討条件の設定

本節では、「3. 3 掘削時の挙動解析」に先立ち、「幌延空洞安定」条件に基づき、検討対象とする深度を便宜的に2つ設定するとともに、研究坑道軸の配置方向、研究坑道の支保等について検討する。研究坑道の形状は、内径 5.0m の三心円断面を想定する。

3. 2. 1 対象深度の設定

(1) 岩盤物性値

「幌延空洞安定」においては、これまで HDB-1 孔、HDB-3 孔で得られたボーリングコアによる室内試験結果より、便宜的に設定された地山区分毎に、岩盤物性値が設定されている。そのうち、深度 300m 付近から深度 600m 付近までの岩盤物性値を表 3.2-1 に示す。表中に記載されている鉛直方向地圧は、岩盤の単位体積重量から推定される値であり、各地山区分における中央深度での値を示した。ここで、地山区分 5~11 は主に HDB-3 孔の、地山区分 12, 13 は主に HDB-1 孔のボーリングコアによる室内試験結果より岩盤物性値が設定されている。

表 3.2-1 岩盤物性値

地山区分	深度 (m)	単位体積重量 (kN/m ³)	粘着力 (MPa)	摩擦角 (°)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	一軸圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	鉛直方向地圧 (MPa)
5	-299 ~ -339	14.9	0.9	16.3	449.5	0.14	2.5	0.25	4.75
6	-339 ~ -360	14.9	1.2	18.2	522.2	0.14	3.2	0.32	5.21
7	-360 ~ -399	16.8	1.1	16.0	845.6	0.10	2.9	0.29	5.69
8	-399 ~ -429	18.6	1.1	16.5	1032.4	0.11	3.0	0.30	6.30
9	-429 ~ -449	18.0	1.9	20.5	1177.0	0.11	5.5	0.55	6.76
10	-449 ~ -479	18.1	2.0	20.8	1153.0	0.12	5.7	0.57	7.21
11	-479 ~ -534	18.0	1.7	19.5	1116.2	0.11	4.8	0.48	7.86
12	-534 ~ -549	18.4	3.8	19.2	2300.0	0.18	10.6	1.06	8.61
13	-549 ~ -634	19.3	3.7	27.5	2520.0	0.24	12.2	1.22	9.57

(2) 深度の設定

表 3.2-1 の岩盤物性値をもとに、各地山区分毎における地山強度比を求めると、図 3.2-1 が得られる。地山強度比は、地山の安定性の目安を得る上で、しばしば用いられる値であり、ここでは式(3.2-1)を用いて求めた。

$$\text{地山強度比} = \frac{\text{一軸圧縮強度}}{\text{単位体積重量により推定される鉛直方向地圧}} \quad (3.2-1)$$

ここで、内径 5.0m の円形坑道が、一掘進長 1.0m で支保を施さず掘削される場合を考える。初期応力は簡単のため、等方等圧に分布しているとする。坑道周辺に発生する塑性領域の分布幅は、岩盤が Mohr-Coulomb の破壊基準に従う完全弾塑性体として挙動する

と仮定した場合の理論解（岡，1977）より，式(3.2-2)で推定される。

$$R = R_0 \left\{ \frac{2}{\zeta + 1} \frac{(\zeta - 1)\sigma_0 + q_u}{(\zeta - 1)\sigma_i + q_u} \right\}^{\frac{1}{\zeta - 1}} - R_0 \quad (3.2-2)$$

ここで， R は坑道周辺に発生する塑性領域の分布幅 [m]， R_0 は掘削半径 [m]， σ_0 は初期応力 [MPa]， σ_i は内圧 [MPa]であり， ζ [-]，および q_u （一軸圧縮強度）[MPa]はそれぞれ式(3.2-3)，式(3.2-4)で求まる。

$$\zeta = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.2-3)$$

$$q_u = \frac{2C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.2-4)$$

ここで， ϕ は内部摩擦角[rad]， C は粘着力[MPa]である。

一方，坑道壁面において坑道周方向に発生するひずみは，式(3.2-5)で推定される。

$$\varepsilon = (\sigma_0 - \sigma_{ra}) \frac{1 + \nu}{E} \frac{(R + R_0)^2}{R_0^2} \quad (3.2-5)$$

ここで， ν はポアソン比[-]， E は弾性係数[MPa]であり，塑性領域から弾性領域に対し，半径方向に作用している応力 σ_{ra} [MPa]は式(3.2-6)で求まる。

$$\sigma_{ra} = \sigma_0 (1 - \sin \phi) - C \cos \phi \quad (3.2-6)$$

また，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ひずみ（桜井・足立，1988）のうち，上限値[-]（窪田ほか，2003）は式(3.2-7)で求まる。

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (3.2-7)$$

ここで，便宜的に限界ひずみへの接近度を式(3.2-8)のように定義する。

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \quad (3.2-8)$$

ここで， ε は式(3.2-5)により求まる坑道壁面において坑道周方向に発生するひずみ， ε_c

は式(3.2-7)により求まる限界ひずみ（上限値）である。

表 3.2-1 の岩盤物性値をもとに、式(3.2-2)より坑道壁面に発生する塑性領域の分布幅を、式(3.2-8)より限界ひずみへの接近度を求めると、図 3.2-2 が得られる。

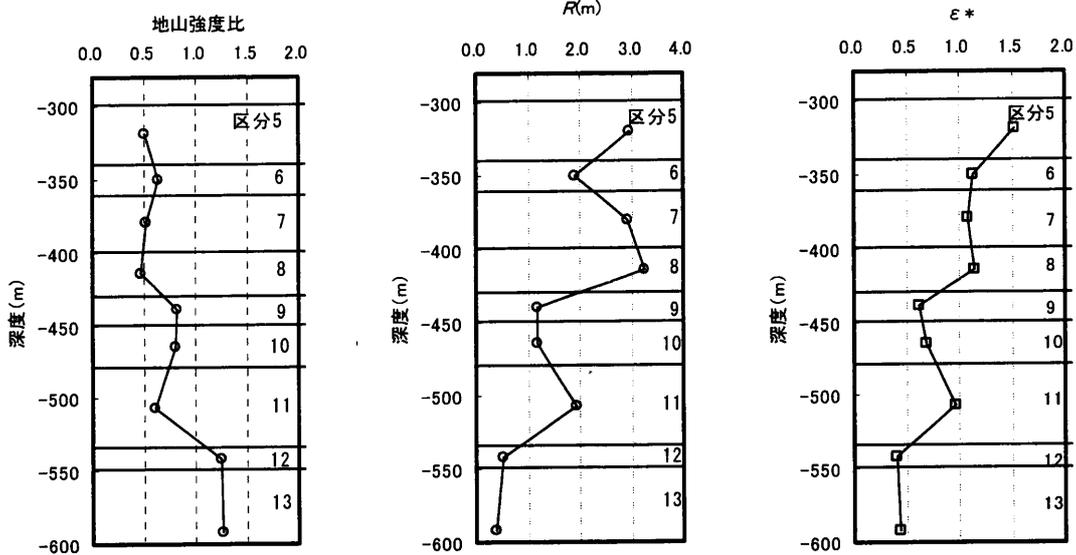


図 3.2-1 地山強度比

(a) 塑性領域の分布幅

(b) 限界ひずみへの接近度

図 3.2-2 理論解による結果

図 3.2-1、および図 3.2-2 より、地山強度比が大きい程、坑道掘削時の安定性が高い（塑性領域の分布幅が小さく、限界ひずみへの接近度が小さい）傾向にあることが分かる。本研究において想定する研究坑道の形状は三心円断面であり、次項で述べるように初期応力は等方等圧に分布していないと想定されるが、各地山区分における研究坑道掘削時の安定性は、相対的に変わらないと推察される。

理論解による検討結果をふまえ、本研究においては、以下2つの地山区分を例にとり、以降の検討を進めることとした。

- ・ 地山区分 11（以降、便宜的に深度①と称する）
 : 「地下施設での調査研究段階（第3段階）」において、最深部の坑道（深度 500m）が展開される予定である箇所。
- ・ 地山区分 13（以降、便宜的に深度②と称する）
 : 最深部の坑道付近で、坑道掘削時の安定性が高い（地山強度比が大きい）と想定される箇所。

3. 2. 2 研究坑道軸の配置方向の検討

(1) 初期応力

「幌延空洞安定」においては、主に HDB-3 孔における水圧破碎法による初期応力測定結果より、応力比を表 3.2-2 のように設定している。ここで、応力比とは、鉛直方向応力に対する水平方向応力の比である。

表 3.2-2 応力比

東西方向	南北方向
1.2	0.8

(2) 研究坑道軸の配置方向の設定

表 3.2-2 に示すように、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、研究坑道掘削時、およびピット掘削時の応力状態は異なると推察される。よってここでは、研究坑道軸を東西方向に配置した場合、および南北方向に配置した場合をそれぞれ想定し、2次元解析により研究坑道掘削時の安定性について検討することとする。

解析に用いたモデルを図 3.2-3 に、設定した支保の条件を表 3.2-3 に示す。解析は平面ひずみ条件で行い、モデル左右端部の水平方向変位、および下端部の鉛直方向変位を拘束し、上端部には深度に相当する初期応力を作用させた。ここでの解析の目的が、研究坑道軸の配置方向による安定性の違いに関する検討であることから、応力解放率は厳密ではなく、仮に 50%と設定した。研究坑道の一掘進長は 1.0m を想定した。また、支保の厚さについても厳密ではなく、「地下施設建設に関する基本計画の検討」(窪田ほか 2003) (以降、「基本計画」と称する)において内径 5.0m の研究坑道(三心円断面、深度 500m)を対象とした解析により設定された厚さ 40cm (鉛直方向応力に対する研究坑道軸と直交する方向の応力比が 2.0 の場合)の吹付けコンクリートを仮に設定した。吹付けコンクリートは、第 2 次取りまとめ、および「基本計画」で用いられた値を参考に、設計基準強度を 36MPa と想定し、弾性係数を 4,000MPa と設定した。解析は、前項で設定した深度①、および深度②を対象とした。深度①については研究坑道スプリングライン位置での鉛直方向応力を深度 500m 相当とし、地山区分 11 の岩盤物性がモデル全体に分布しているものとした。深度②については、研究坑道スプリングライン位置での鉛直方向応力を深度 570m 相当とし、地山区分 13 の岩盤物性がモデル全体に分布しているものとした。岩盤は Mohr-Coulomb の破壊基準に従う、完全弾塑性体とした。支保は線要素でモデル化した。

表 3.2-3 支保の条件

断面積 (m ²)	弾性係数 (MPa)	備考
0.4	4,000	設計基準強度 36MPa の吹付けコンクリートを想定

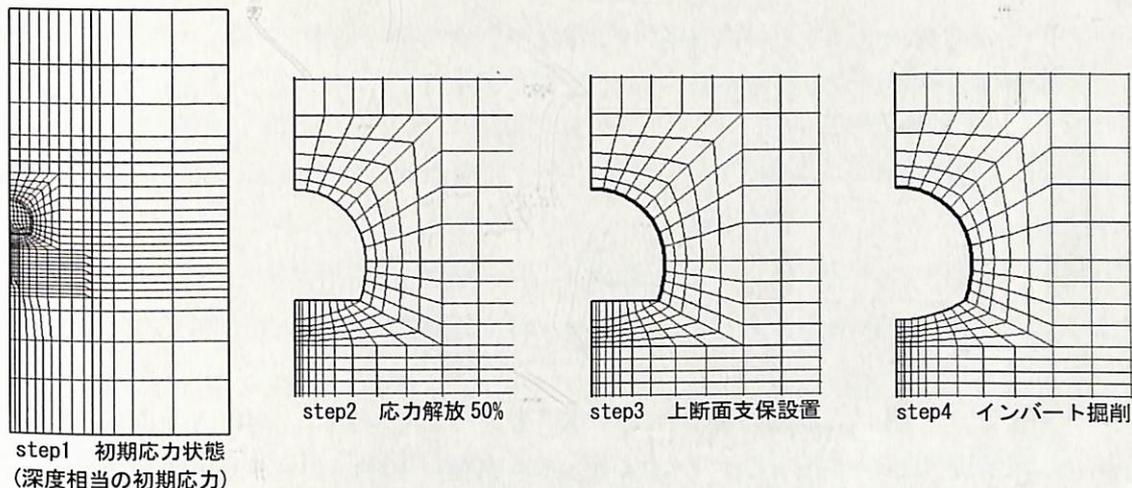


図 3.2-3 2次元解析モデル

ここでは、周辺岩盤に着目し、研究坑道軸の配置方向による掘削時の安定性の違いについて検討する。解析より得られるインバート掘削時 (図 3.2-3 に示す step4 の時点) における塑性領域 (図中赤色に着色した箇所) の分布を図 3.2-4 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.2-5 に示す。

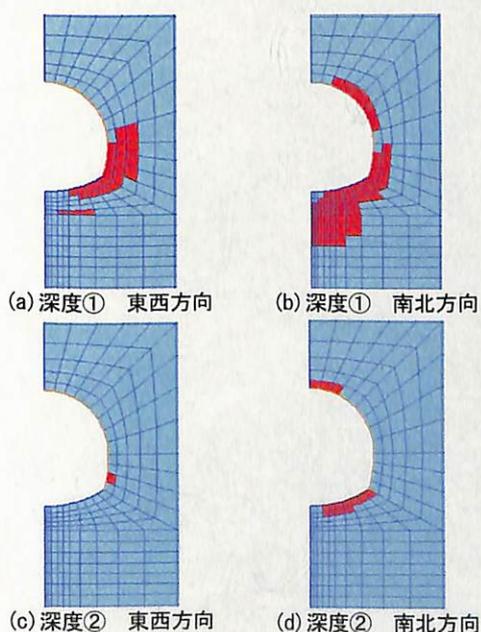


図 3.2-4 塑性領域の分布

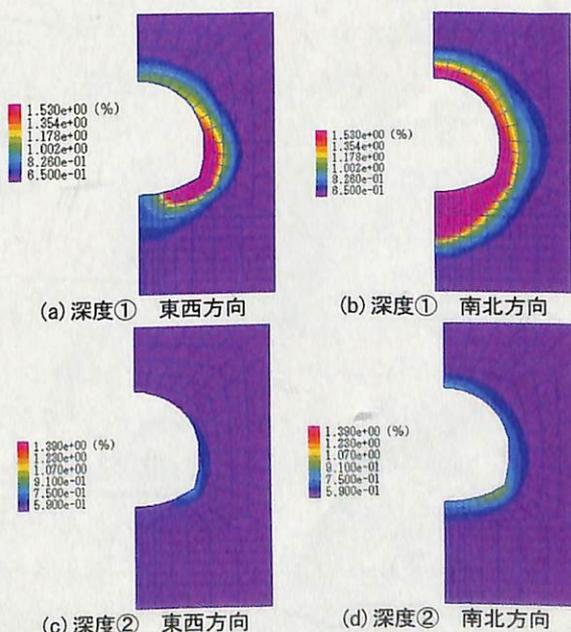


図 3.2-5 最大せん断ひずみの分布

図 3.2-4 より、研究坑道軸の配置方向が東西方向である場合は、南北方向である場合に比較し、塑性領域の分布の程度が小さいことが分かる。深度①において、配置方向が南北方向である場合、ピット周辺岩盤には、ピット掘削前に既に塑性領域が大きく分布している。

一方、三軸応力状態にある周辺岩盤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（桜井ほか，1994）は式(3.2-9)で求まる。

$$\gamma_c = (1 + \nu)\varepsilon_c \quad (3.2-9)$$

ここで、 ν はポアソン比[-]、 ε_c は式(3.2-7)により求まる限界ひずみ（上限値）[-]であり、表 3.2-1 に示す岩盤物性値をもとに、深度①、および深度②においてそれぞれ 1.53%、および 1.39%となる。

図 3.2-5 より、研究坑道軸の配置方向が東西方向である場合は、南北方向である場合に比較し、限界せん断ひずみを超える領域の分布の程度が小さいことが分かる。また、限界せん断ひずみを超える領域の分布の傾向は、塑性領域の分布の傾向と同様である。

これらより、研究坑道軸の配置方向が東西方向である場合は、南北方向である場合に比較し、研究坑道掘削時の安定性がより高いと推察され、本研究においては、研究坑道軸の配置方向を東西方向と想定し、以降の検討を進めることとした。

3. 2. 3 研究坑道の支保の検討

(1) 前提条件

ここでは、以降の検討に用いる研究坑道の支保条件について検討する。ただし、「幌延空洞安定」において、研究坑道の支保の設計が行われていることから、本研究においてはあくまで第2次取りまとめや「基本計画」を参考とした検討にとどめ、詳細な支保の設計までは踏み込まないこととする。

(2) 研究坑道の支保の設定

「基本計画」においては、吹付けのコンクリートの厚さ、および設計基準強度をパラメータとした解析を行い、研究坑道の支保の設定がなされている。

ここでは、「基本計画」における解析で用いられた最小吹付け厚さ（20cm）、最小設計基準強度（18MPa）とした場合、および前項の検討で用いられた吹付け厚さ 40cm、設計基準強度 36MPa とした場合について解析を行い、研究坑道の支保の安定性について検討し、以降の検討に用いる支保を設定する。なお、モデルや岩盤物性値は前項と同様であり、研究坑道軸の配置方向を東西方向と想定した場合についてのみ解析を行うこととする。

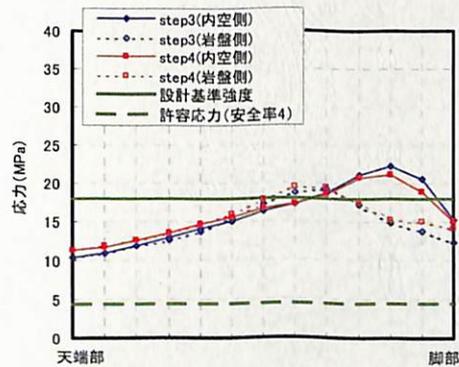
なお、吹付けコンクリートの弾性係数は、第2次取りまとめや「基本計画」を参考に、設計基準強度が 18MPa の場合は 3,400MPa とし、設計基準強度が 36MPa の場合は 4,000MPa とした。鋼製支保工は解析において考慮しなかった。

吹付け厚さが 20cm の場合の支保に発生する応力を図 3.2-6 に、吹付け厚さが 40cm の場合の支保に発生する応力を図 3.2-7 に示す。図 3.2-7 の凡例において、step3, step4 はそれぞれ、図 3.2-3 に示されている上断面掘削時、インバート掘削時を意味する。また、凡例において内空側、および岩盤側はそれぞれ、吹付けコンクリート断面において内空側縁に発生する応力、および岩盤側縁に発生する応力を意味する。また、それぞれの図には、設計基準強度、および参考として仮に安全率を 4 とした場合の許容応力をあわせて示した。

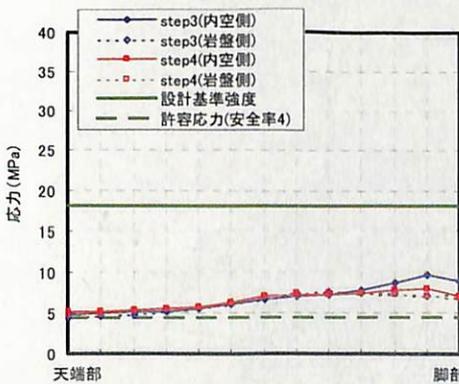
ここで支保に発生する応力は、支保に発生する軸力、および曲げモーメントより、式 (3.2-10) にて求めた。

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{Z} \tag{3.2-10}$$

ここで N は軸力[N], A は断面積[m²], M は曲げモーメント[N・m], Z は断面係数[m³] である。

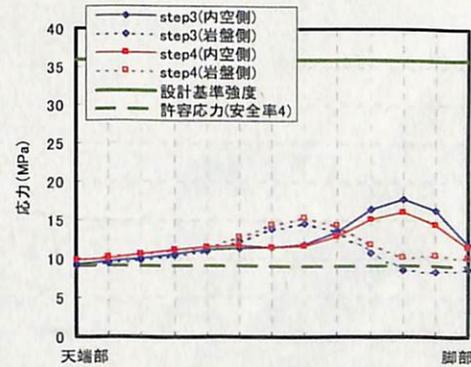


(a) 深度①

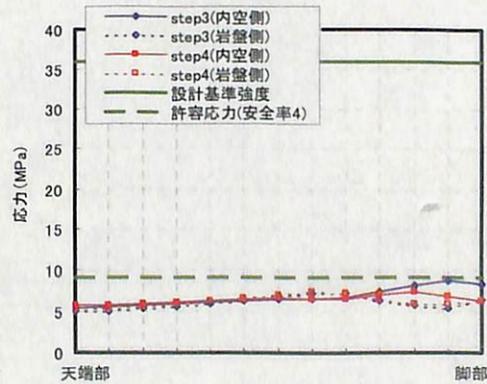


(b) 深度②

図 3.2-6 支保発生応力
(吹付け厚さ 20cm)



(a) 深度①



(b) 深度②

図 3.2-7 支保発生応力
(吹付け厚さ 40cm)

図 3.2-6 より、吹付け厚さ 20cm、設計基準強度 18MPa の条件では、深度①において設計基準強度を超過する応力が発生していることが分かる。一方、図 3.2-7 より、吹付け厚さ 40cm、設計基準強度 36MPa の条件では、両深度において設計基準強度を超過する応力は発生していないことが分かる。

また、一般的に、坑道の支保の設計においては、図中に参考として示したように、ある程度の安全率を考慮した設計が行われると考えられる。

よって、第 2 次取りまとめ、および「基本計画」で設定された吹付け厚さ、設計基準強度を勘案し、本研究においては、研究坑道の吹付け厚さを 40cm、設計基準強度を 36MPa と想定し、以降の検討を進めることとした。

3. 3 掘削時の挙動解析

本節では、「3. 4 長期挙動解析」に先立ち、ピット掘削時の周辺岩盤の応力状態について解析的に検討する。ピット周辺岩盤には、研究坑道掘削による影響、およびピット掘削による影響より、複雑な応力場が形成されると推察されることから、3次元解析による検討を行うこととする。岩盤物性値、および研究坑道の条件は「3. 2 検討条件の設定」で設定された条件と同様とする。

3. 3. 1 研究坑道の掘削解析

(1) 解析モデル

解析に用いたモデルを図 3.3-1 に示す。モデル境界は、「基本計画」を参考に、研究坑道掘削径 ($D=5.8\text{m}$) に対し、4D 程度確保した。ただし、研究坑道軸方向については、5D 程度とした。前節での検討結果をもとに、研究坑道軸の配置方向は東西方向とし、研究坑道上断面に吹付け厚さ 40cm、設計基準強度 36MPa の支保が設置されると想定した。また、インバートは、上断面切羽に 1.0m 遅れで掘削され、上断面と同様の支保が設置されると想定した。上断面、およびインバートの一掘進長は 1.0m を想定し、交互の掘削を繰り返しながら切羽が進行するとした。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た。前節における検討と同様に、深度①については研究坑道スプリングライン位置での鉛直方向応力を深度 500m 相当 (7.86MPa) とし、地山区分 11 の岩盤物性がモデル全体に分布しているものとした。深度②については、研究坑道スプリングライン位置での鉛直方向応力を深度 570m 相当 (9.15MPa) とし、地山区分 13 の岩盤物性がモデル全体に分布しているものとした。岩盤は Mohr-Coulomb の破壊基準に従う完全弾塑性体とした。支保はシェル要素でモデル化した。

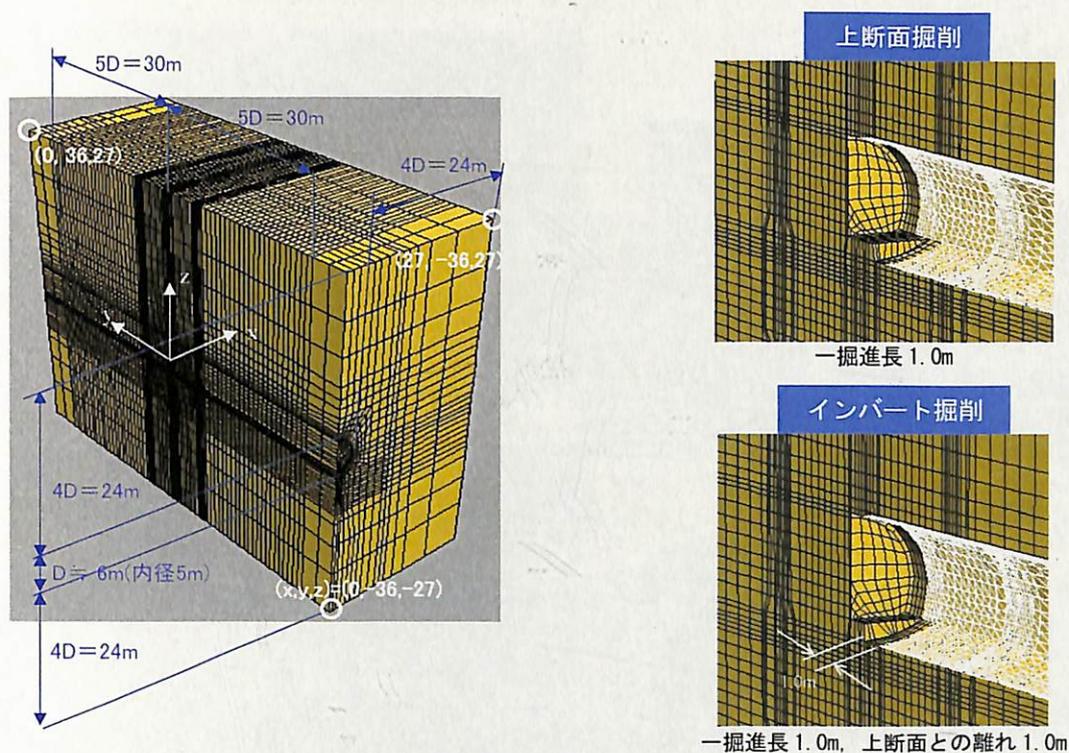


図 3.3-1 3次元解析モデル

(2) 岩盤状態

解析で得られた塑性領域（図中赤色に着色した箇所）の分布を図 3.3-2 に、最大せん断ひずみの分布を図 3.3-3 に示す。なお、本項において以降に示す図は、特にことわらない限り、研究坑道掘削完了時（掘削が図 3.3-1 に示す $y=-36\text{m}$ から開始され、切羽が $y=36\text{m}$ に到着した時点）における、 $y=0\sim 30\text{m}$ の範囲についてのみ表示している。

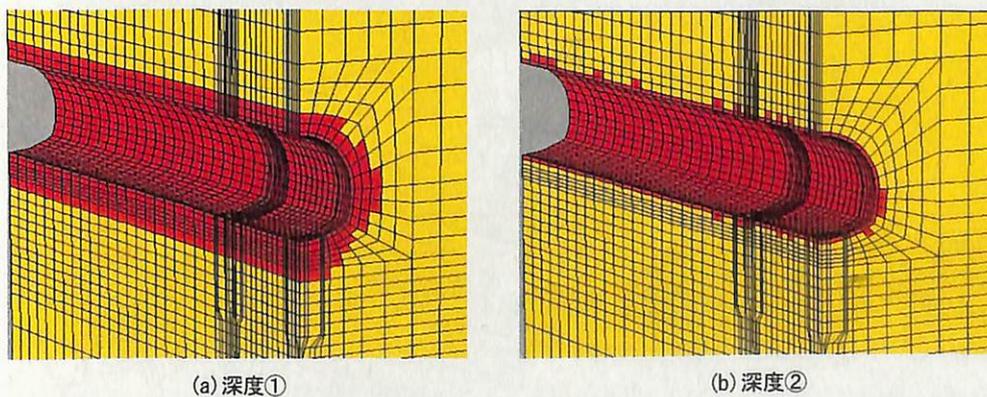


図 3.3-2 塑性領域の分布

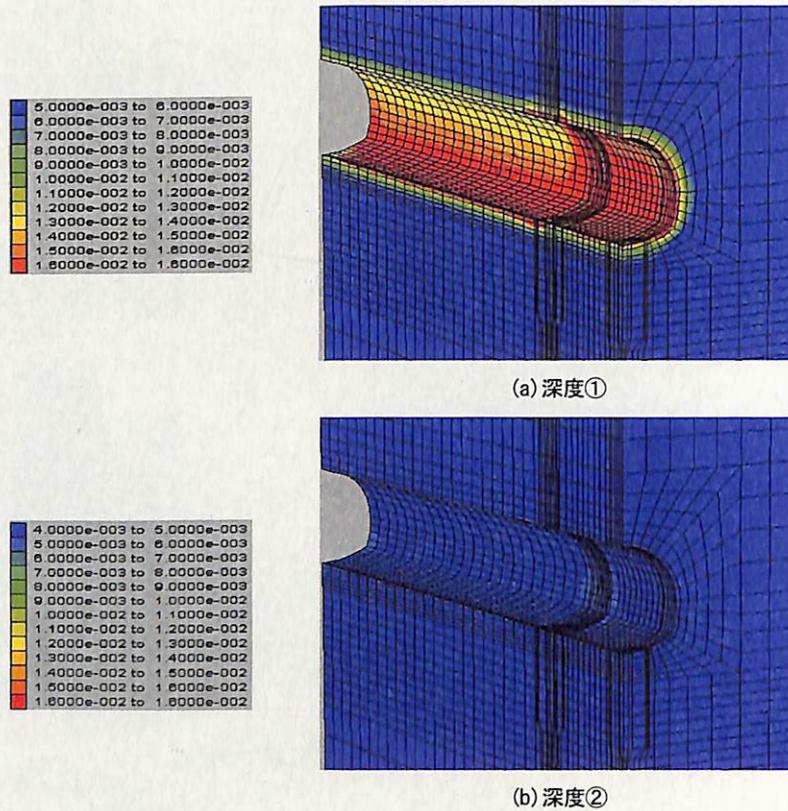


図 3.3-3 最大せん断ひずみの分布

図 3.3-2 より、深度①の条件では、深度②の条件に比較し、塑性領域の分布の程度が大きいことが分かる。深度①の条件では、ピット周辺岩盤には、ピット掘削前に塑性領域が大きく分布している。

一方、前節に示したとおり、深度①、および深度②における限界せん断ひずみは、それぞれ 1.53% ($\approx 1.5 \times 10^{-2}$)、および 1.39% ($\approx 1.4 \times 10^{-2}$) である。図 3.3-3 より、深度①の条件では、研究坑道の壁面付近の最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを超過しているのに対し、深度②では発生する最大せん断ひずみが小さいことが分かる。

(3) 支保の応力状態

図 3.3-4 に支保に発生する応力を示す。ここで支保に発生する応力は、坑道周方向に発生する軸力、および坑道軸回り方向の曲げモーメントより、式(3.2-10)にて求めた値である。なお、凡例の単位は Pa であり、圧縮力がマイナス表示されている。

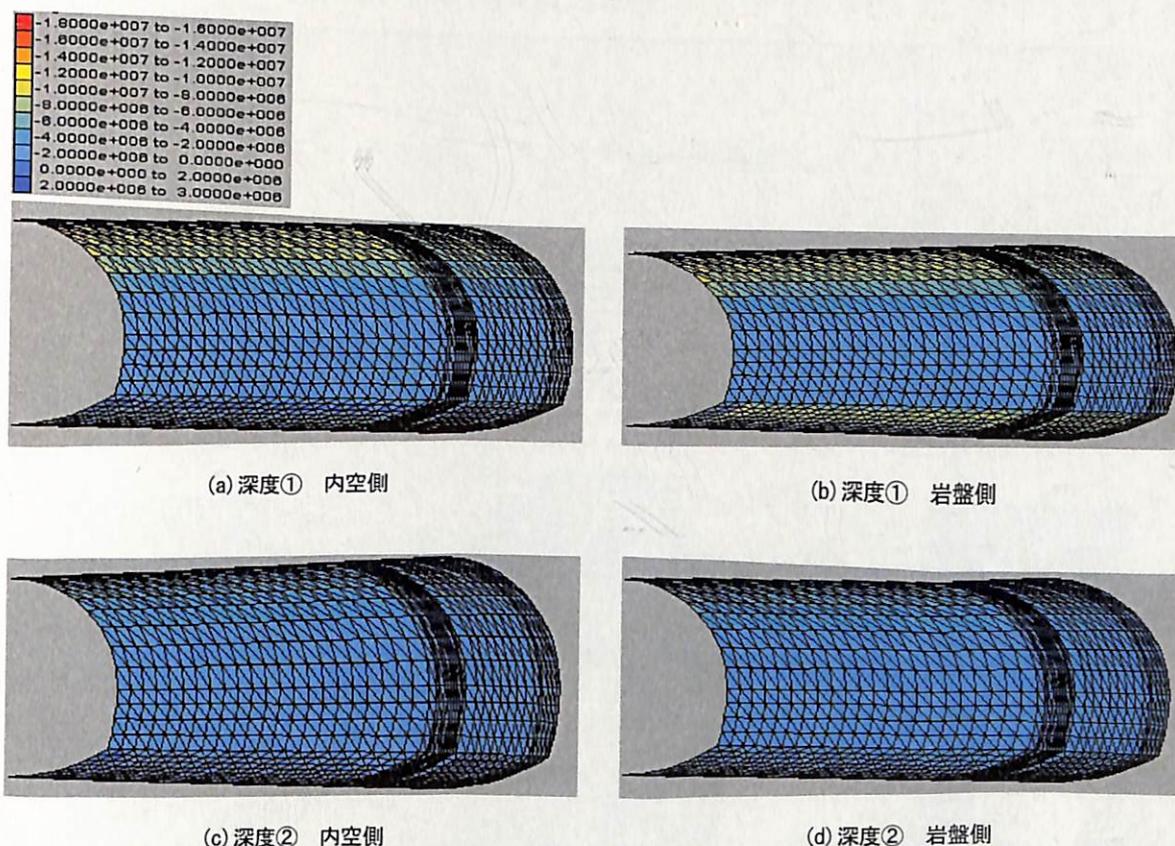


図 3.3-4 支保発生応力

図 3.3-4 より、深度①の条件で支保に発生する応力は、深度②の条件に比較し大きいことが分かる。ここで、仮に安全率を前節と同様に 4 とした場合の許容応力 9MPa と、支保に発生する応力を比較してみる。深度①では、坑道天端部、およびインバート部に許容応力を超過する箇所が発生するのに対し、深度②では許容応力を超過する箇所が発生していないことが分かる。

(4) 変位

切羽の進行に伴い発生する天端部の変位を図 3.3-5 に示す。着目したのは、研究坑道延長の中央部 ($y=0\text{m}$) における天端部であり、上断面切羽が $-5D$ ($y=-29\text{m}$) から $5D$ ($y=29\text{m}$) まで進行するに従って発生する変位を示した。ここで D は坑道掘削径 5.8m である。また、沈下を正の値として結果を示した。

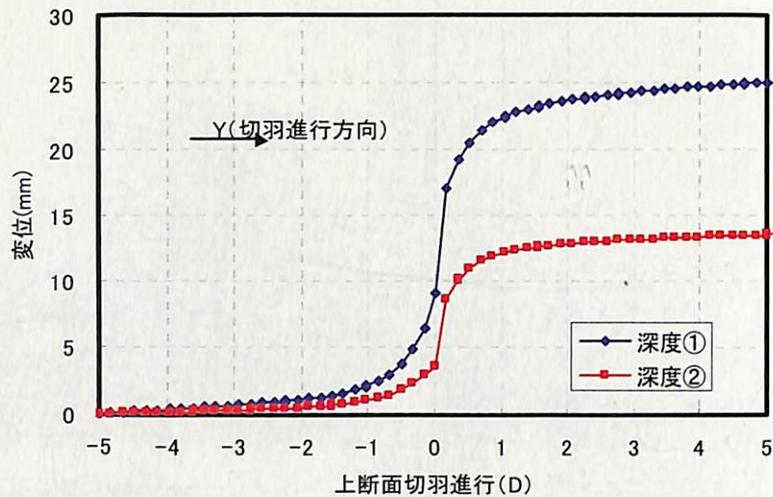


図 3.3-5 天端部の変位

図 3.3-5 より、深度①の条件で天端部に発生する変位は、深度②の条件に比較し大きいことが分かる。

3. 3. 2 ピットの掘削解析

(1) 解析モデル

前項で示した研究坑道の掘削解析に引続き、ピットの掘削解析を行う。解析に用いたモデルは前項と同様であり、研究坑道掘削完了後に、研究坑道延長の中央部（ピット中心軸が $y=0\text{m}$ ）のピットが掘削されることとした。ピットのスケールについては、実規模（内径 $\phi=2.2\text{m}$ 、掘削深さ $h=4.2\text{m}$ ）を考慮するとともに、原位置試験においては、試験期間中における緩衝材の飽和、ピット掘削時の周辺岩盤の安定性、コスト等を考慮し、縮小規模にて試験を実施することもあると考えられることから、仮に実規模に比較し 1/4 スケール（ $\phi=0.55\text{m}$ 、 $h=1.1\text{m}$ ）とした場合についても考慮することとした。ただし解析においてはモデルの都合から掘削深さ h を 1.2m とした。また、縮小規模の掘削深さが浅い場合は、前項の解析結果より、研究坑道掘削による影響領域内での試験となると推察されることから、便宜的に実規模と同様に 4.2m まで掘削されるものとした。また原位置の状況によっては、作業の安全性の観点から、ピットに支保を設置する場合もあると考えられる。よって、ここでは実規模を例にとり、ピットに支保を設置する場合についても考慮した。支保は、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（軟岩系岩盤、内径 $\phi=2.2\text{m}$ ）で設定された支保厚さを参考に、厚さ 10cm のコンクリートを設置する場合を考慮した。コンクリートの物性値は

前節と同様に、設計基準強度 36MPa の吹付けコンクリート相当とした。考慮したケースを表 3.3-1 に、解析手順を図 3.3-6 に示す。ここで、図 3.3-6 は実規模で支保を設置するケースを例にとり示した。それぞれのケースにおいて、一掘削深さは 1.0m 程度とした。また簡単のため、隣接するピットの掘削による影響は考慮せず、単一ピットとして取り扱った。

表 3.3-1 考慮したケース

ケース名	スケール	支保条件
ケースⅠ	実規模	なし
ケースⅡ	縮小規模	なし
ケースⅢ	実規模	10cm のコンクリート

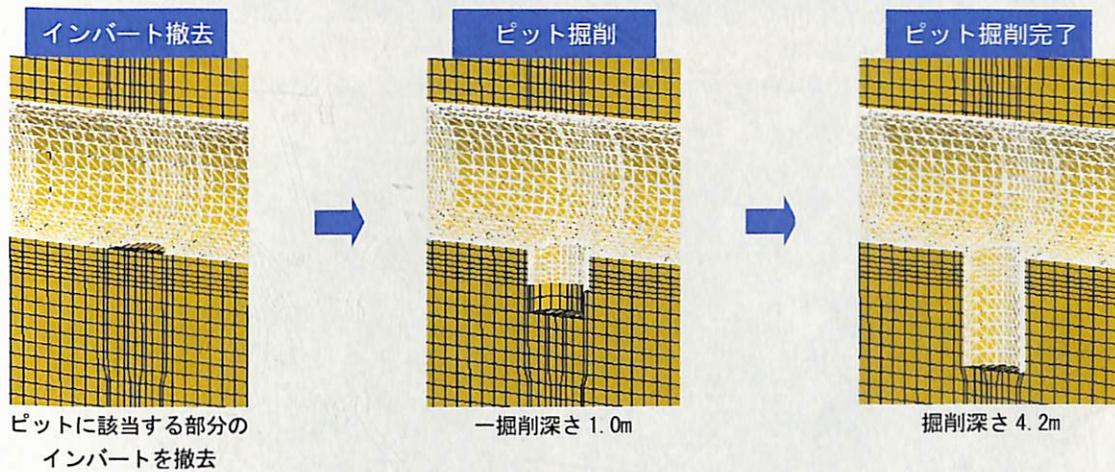
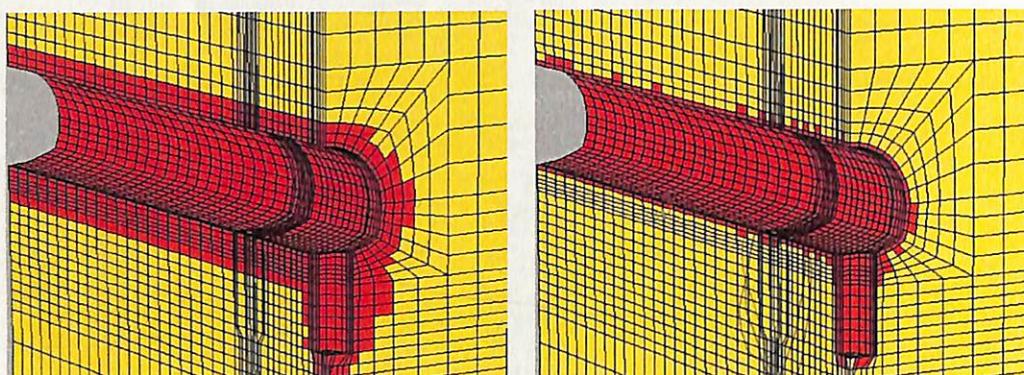


図 3.3-6 解析手順（ケースⅢの場合）

(2) 岩盤状態

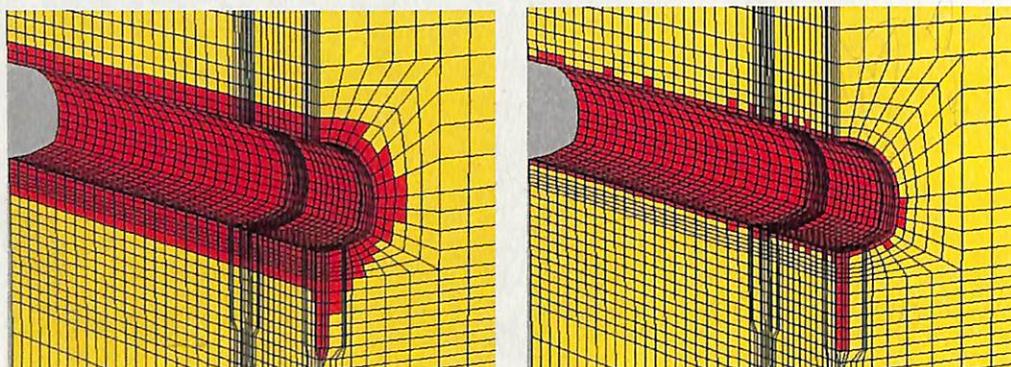
解析で得られる塑性領域（図中赤色に着目した箇所）の分布を図 3.3-7（ケースⅠ）、図 3.3-8（ケースⅡ）、および図 3.3-9（ケースⅢ）に示す。また、最大せん断ひずみの分布を同様に、図 3.3-10 から図 3.3-12 に示す。なお、図 3.3-11（ケースⅡ）、および図 3.3-12（ケースⅢ）における最大せん断ひずみの分布の凡例は、図 3.3-10（ケースⅠ）で示すものと同様である。なお、本項において以降に示す図は、特にことわらない限り、ピット掘削完了時における、 $y=0\sim 30\text{m}$ の範囲についてのみ表示している。

ピット周辺岩盤の塑性領域の分布に着目すると、図 3.3-7 から図 3.3-9 より、前項で示した研究坑道周辺岩盤と同様に、深度①の条件では、深度②の条件に比較し、その分布の程度が大きいことが分かる。また、図 3.3-7（ケースⅠ）と図 3.3-8（ケースⅡ）の比較により、ピットの掘削径に依存し、塑性領域の分布の程度が異なることが分かる。また、図 3.3-7（ケースⅠ）と図 3.3-9（ケースⅢ）の比較により、ピットに支保を設置した場合は、ピットに支保を設置しない場合に比較し、塑性領域の分布の程度は小さくなるが、その差は顕著でないことが分かる。



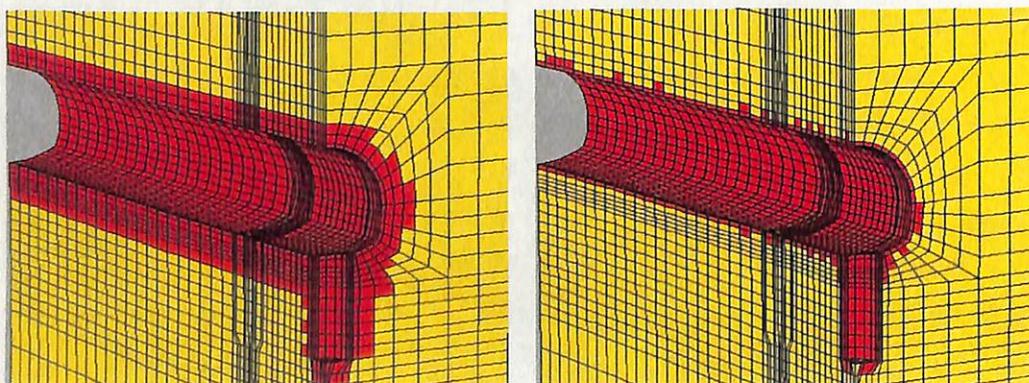
(a)深度① (b)深度②

図 3.3-7 塑性領域の分布 (ケース I)



(a)深度① (b)深度②

図 3.3-8 塑性領域の分布 (ケース II)



(a)深度① (b)深度②

図 3.3-9 塑性領域の分布 (ケース III)

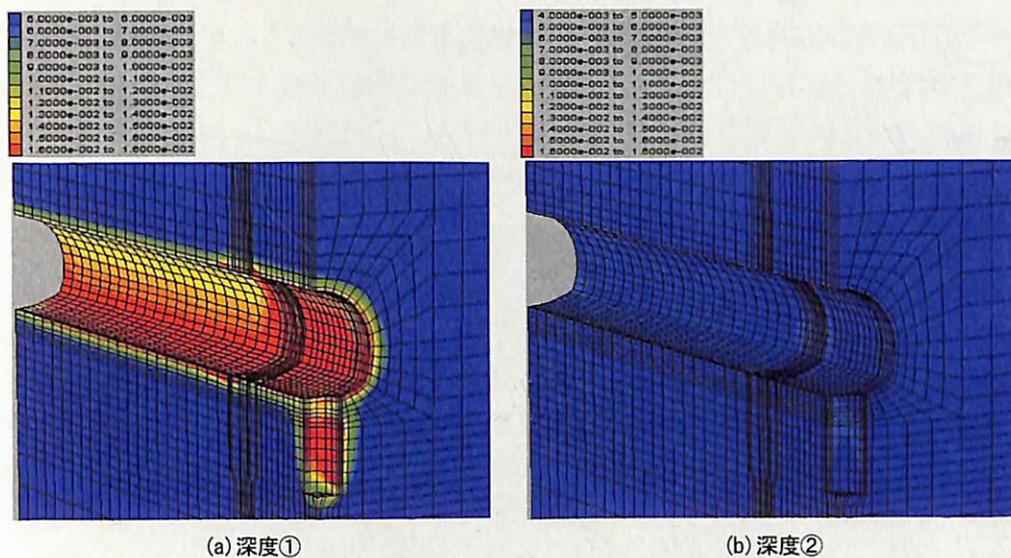


図 3.3-10 最大せん断ひずみの分布 (ケース I)

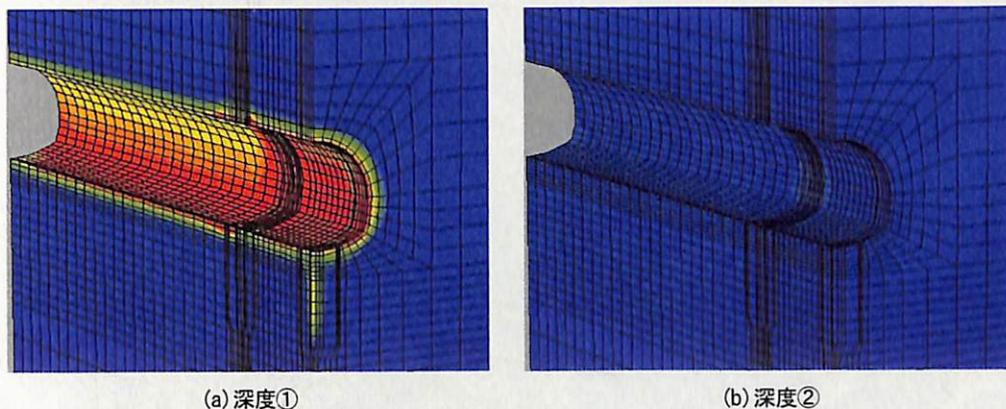


図 3.3-11 最大せん断ひずみの分布 (ケース II)

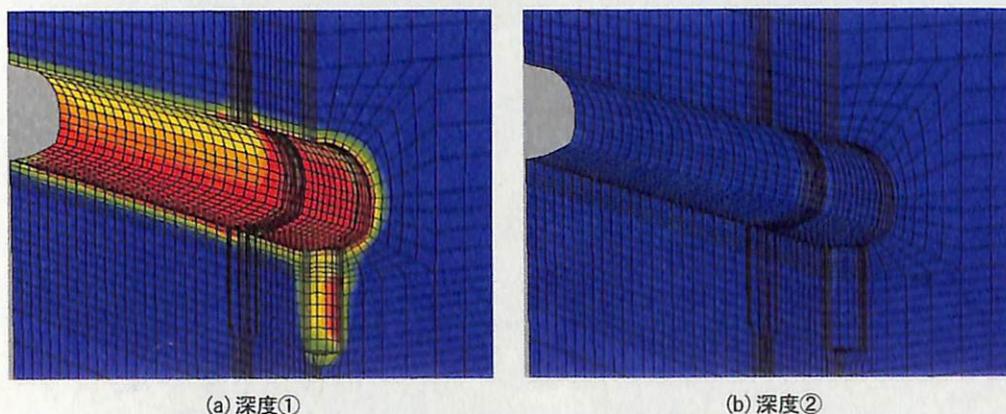
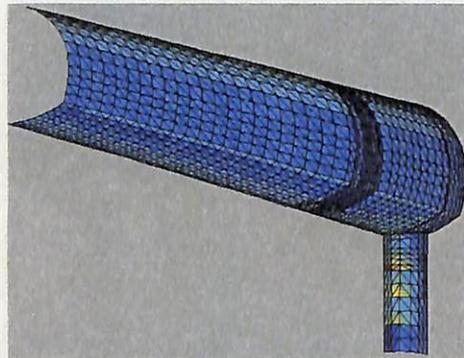
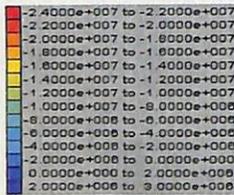


図 3.3-12 最大せん断ひずみの分布 (ケース III)

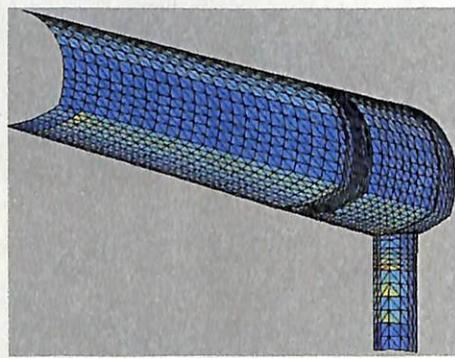
一方、図 3.3-10 から図 3.3-12 より、それぞれのケースに対するピット周辺岩盤の最大せん断ひずみの分布傾向は、塑性領域の分布傾向と同様であることが分かる。ここで、深度①、および深度②の条件においてそれぞれ限界せん断ひずみは、 1.53% ($\approx 1.5 \times 10^{-2}$)、および 1.39% ($\approx 1.4 \times 10^{-2}$) である。いずれのケースにおいても、深度①の条件ではピット壁面付近の最大せん断ひずみが限界せん断ひずみを超過しているのに対し、深度②では発生する最大せん断ひずみが小さいことが分かる。

(3) 支保の応力状態

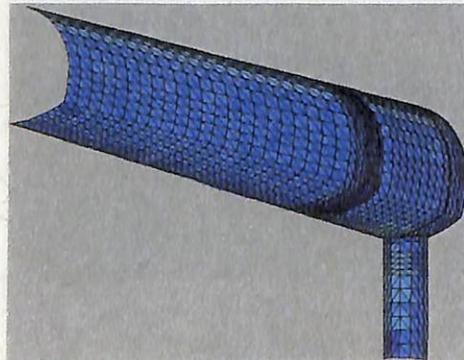
ケースⅢにおいて支保に発生する応力を図 3.3-13 に示す。ここで研究坑道の支保に発生する応力は、坑道周方向に発生する軸力、および坑道軸回り方向の曲げモーメントより式 (3.2-10) にて求めた値である。同様に、ピットの支保に発生する応力は、ピット周方向に発生する軸力、およびピット軸回り方向の曲げモーメントより求めた値である。なお、凡例の単位は Pa であり、圧縮力がマイナス表示されている。



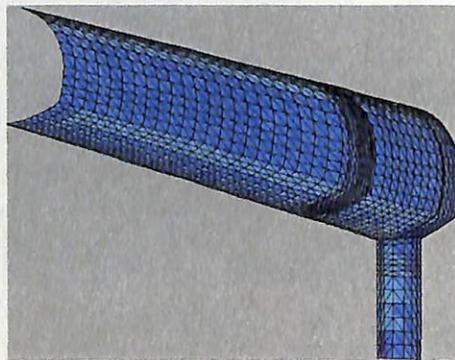
(a) 深度① 内空側



(b) 深度① 岩盤側



(c) 深度② 内空側



(d) 深度② 岩盤側

図 3.3-13 支保発生応力

図 3.3-13 より、深度①の条件でピットの支保に発生する応力は、深度②の条件に比較し大きいことが分かる。ここで、前項と同様に、仮に安全率を 4 とした場合の許容応力 9MPa と、ピットの支保に発生する応力を比較してみる。深度①では許容応力を超過する箇所が発生し、特に浅部において発生する応力が大きい。対し、深度②では許容応力を超過する箇所が発生していないことが分かる。

(4) 変位

掘削進行に伴い発生するピット壁面（測線を図 3.3-14 に示す）の変位を図 3.3-15（ケース I）、図 3.3-16（ケース II）、および図 3.3-17（ケース III）に示す。ここで変位はインバート撤去時（図 3.3-6）からの相対変位であり、ピット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として、便宜的に限界ひずみより許容変位を式(3.3-1)により求め、それぞれの図にあわせて示した。

$$u_c = \varepsilon_c r \quad (3.3-1)$$

ここで u_c は許容変位、 ε_c は限界ひずみ（式(3.2-7)）、 r はピット掘削半径（実規模：1.1m、縮小規模：0.275m）である。

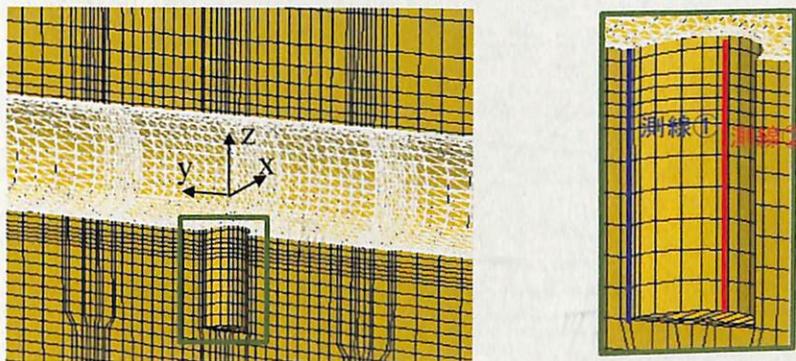
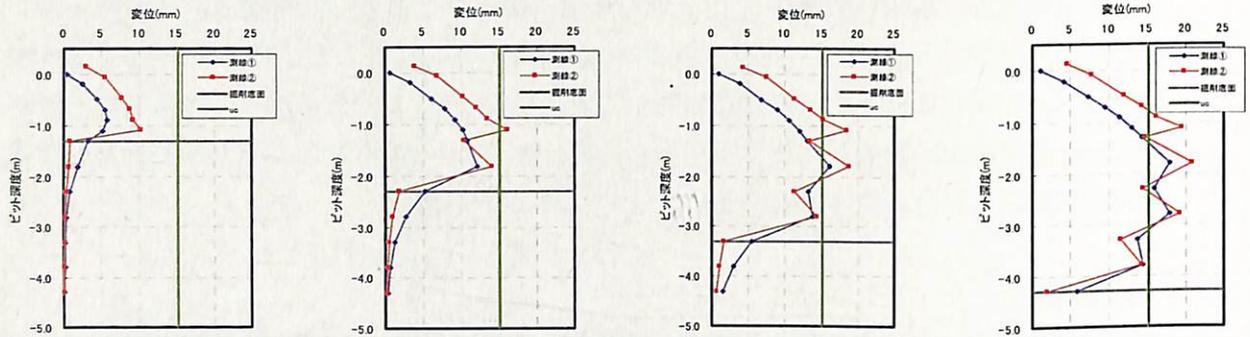
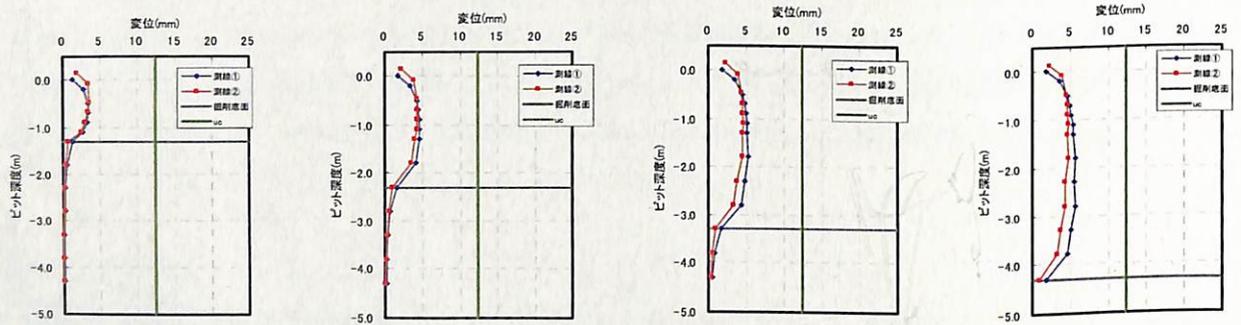


図 3.3-14 ピット壁面変位の測線

まず深度①の条件における結果について述べる。図 3.3-15 より、実規模で支保を設置せずピットが掘削される条件（ケース I）においては、限界ひずみより設定した許容変位を超過する変位が発生していることが分かる。縮小規模で支保を設置せずピットが掘削される条件（ケース II）においては、ケース I に比較し、掘削径が小さいため、変位の絶対量は小さくなるが、実規模と同様に許容変位を超過する変位が発生していることが図 3.3-16 より分かる。実規模で支保が設置される条件（ケース III）においては、僅かに許容変位を超過する変位が発生するものの、ケース I に比較し、変形が抑制されていることが分かる。

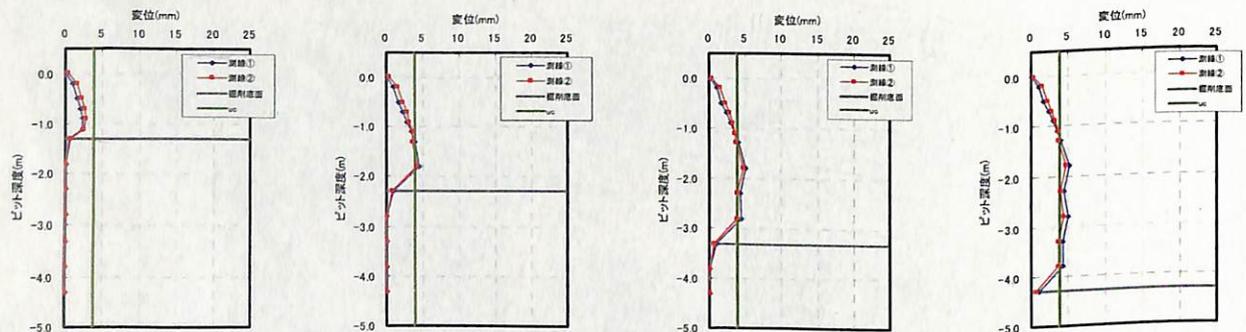


(a) 深度①

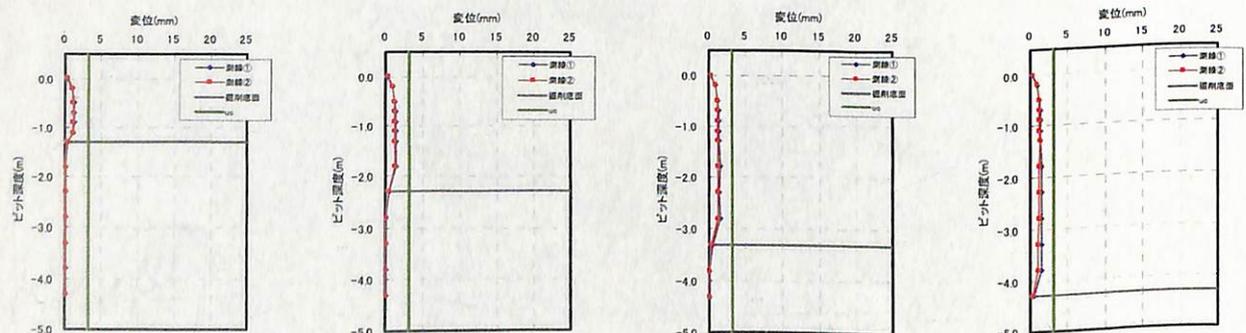


(b) 深度②

図 3.3-15 ピット壁面変位 (ケース I)



(a) 深度①



(b) 深度②

図 3.3-16 ピット壁面変位 (ケース II)

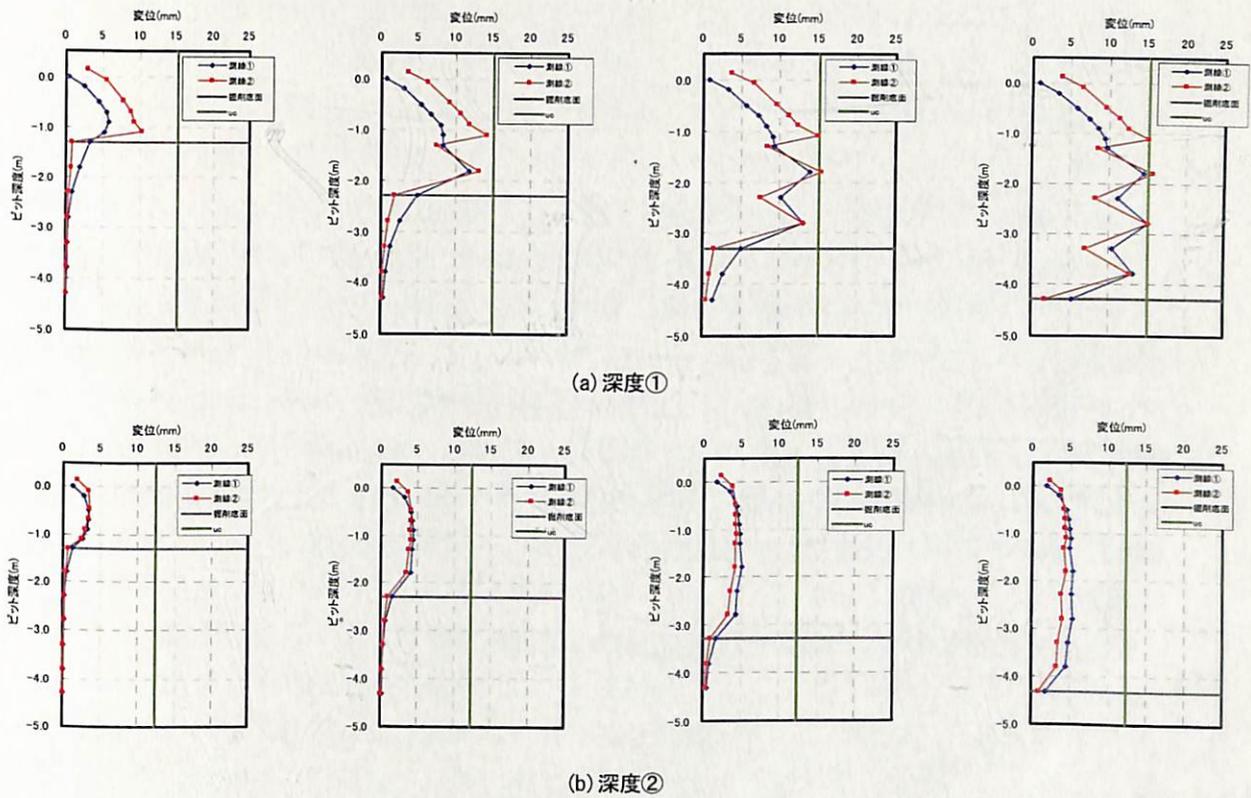


図 3.3-17 ピット壁面変位 (ケースⅢ)

一方、深度②の条件においては、いずれのケースにおいても、限界ひずみより設定した許容変位を超過する変位が発生していないことが分かる。

(5) 結果の考察

本項では、研究坑道の掘削解析 (前項) で得られた結果をもとに、3つの条件 (表 3.3-1) において、ピットの掘削解析を行い、ピット周辺岩盤に発生する塑性領域の分布、および変形状態等について結果を述べてきた。ここで、得られた結果について考察することとする。

まず、規模の違いによる結果 (ケースⅠ, およびケースⅡ) について考察する。本研究においては、研究坑道の掘削による影響を考慮した解析を行っている。また、水平面内の初期応力は等方等圧に分布していないと想定している (表 3.2-2)。よって単純な比較は困難であるが、簡単のため研究坑道の掘削影響はなく、初期応力が等方等圧に分布していると仮定し、「3.2 検討条件の設定」で用いた理論解をもとに検討を行うこととする。

式(3.2-2)の両辺を掘削半径 R_0 で除すと、式(3.3-2)が得られる。

$$\frac{R}{R_0} = \left\{ \frac{2}{\zeta + 1} \frac{(\zeta - 1)\sigma_0 + q_u}{(\zeta - 1)\sigma_i + q_u} \right\}^{\frac{1}{\zeta - 1}} - 1 \quad (3.3-2)$$

式(3.3-2)の右辺を見ると、岩盤物性値 (ζ , q_u)、初期応力 (σ_0)、内圧 (σ_i : 掘削時に支保を設置しないケース I と II の場合 0) が同じ条件であれば一定の値となることが分かる。よって、塑性領域の発生幅 R と掘削半径 R_0 は比例関係にあり、右辺の値が 0 より大きな条件であれば、掘削半径を小さくするに従い小さくはなるものの、塑性領域の発生幅が 0 とはならないことが分かる。図 3.3-7、および図 3.3-8 より、今回の解析においてもほぼ同様の傾向であったと言える。

なお、理論解で得られる掘削時の塑性領域の分布については、人工供試体を用いた模型実験において、計測された結果とほぼ調和的であったとの報告がある (井上・野田, 2002) (井上・南, 2003)。

また、式(3.2-5)を変形すると式(3.3-3)が得られる。

$$\varepsilon = (\sigma_0 - \sigma_{ra}) \frac{1 + \nu}{E} (A + 1)^2 \quad (3.3-3)$$

ここで、 A は式(3.3-2)の右辺である。よって岩盤物性値、初期応力が同じ条件であれば、壁面において発生するひずみは、掘削半径に依存せず一定の値となることが分かる。図 3.3-15、および図 3.3-16 より、掘削径が 1/4 となると変位もほぼ 1/4 となっていることから、今回の解析においてもほぼ同様の傾向であったと言える。よって、今回の解析と同様の手法においては、塑性領域の発生幅と掘削半径の比、および壁面において発生するひずみは、岩盤物性値、初期応力が同じ条件であれば、掘削半径に依存せず一定の値となることが推察される。これに対し、例えば東濃鉱山坑道内において掘削された孔 ($\phi 76 \sim 200\text{mm}$) の壁面観察においては、ほぼ同様の地質学的条件にも関わらず、小さな孔では壁面崩壊がなかったのに対し、大きな孔では壁面が崩壊したことが報告されている (吉川ほか 2000)。掘削半径が大きい方がより不安定となるという意味では、解析結果 (掘削半径が大きい方が塑性領域の発生幅が大きくなる) は、壁面観察と同様の傾向である。対し、壁面崩壊が塑性領域の発生により生じたとした場合、掘削半径が小さい場合に壁面崩壊が発生しないという現象は解析では表現できないことが分かる。これらの評価については、今後の課題といえる。

次に、支保条件の違いによる結果 (ケース I, およびケース III) について考察する。なお今回の解析においては、図 3.3-6 に示すように、ピットが 1.0m 掘削されると同時に、手前 1.0m のピット壁面に支保が設置されるとしている。図 3.3-15 と図 3.3-17 との比較に

より、支保が設置される条件（ケースⅢ）においては、支保が設置されない条件（ケースⅠ）に比較し、変形が抑制されていることが分かる。しかし、図 3.3-7 と図 3.3-9 より、塑性領域の発生はさほど抑制されていないことが分かる。本研究においては、原位置試験が処分孔縦置き方式を模擬して実施されると仮定し、ピット（模擬処分孔）の掘削工法や支保材料を特に限定せず、一掘削深さを 1.0m として例示的に解析を行ったが、支保の設置時期が遅く、支保の設置前の応力解放が大きい条件であったと考えられる。ここで、坑道横置き方式における処分坑道と、処分孔縦置き方式における処分孔の力学状態について考えてみる。第 2 次取りまとめにおいては、両者の内径は同じである。掘削前の初期応力状態が表 3.2-2 に同様と仮定すると、坑道横置き方式においては、坑道面内の最小主応力に対する最大主応力の比は、坑道軸が南北方向であれば 1.2 ($=1.2/1.0$)、東西方向であれば 1.25 ($=1.0/0.8$) である。また、「3. 2 検討条件の設定」で示したように、力学状態がより安定となる方向へ坑道軸を配置することが可能であると考えられる。一方、処分孔縦置き方式においては、坑道の掘削による影響を無視すると、坑道軸の配置方向に関係なく、孔面内の最小主応力に対する最大主応力の比は 1.5 ($=1.2/0.8$) である。さらに前項で示したように坑道の掘削による影響を考慮する必要があると考えられる。これらから考えると、処分孔縦置き方式における処分孔は、坑道横置き方式における処分坑道に比較し、力学的により不利な場合があると考えられる。処分孔縦置き方式を模擬した原位置試験を想定した場合、計測器の設置等、必要に応じピット内での作業が発生することもあると考えられる。そのような場合、作業の安全性の観点から、支保の設置等、何らかの対策を講じる必要があると考えられる。今後、原位置試験の計画にあたり、定置方式（坑道横置きを模擬するか、あるいは処分孔縦置き方式を模擬するか）、掘削工法（第 2 次取りまとめにおいては坑道横置き方式：TBM 工法、処分孔縦置き方式：ロータリー掘削工法）や、支保材料、計測器の設置方法等について、それらの原位置への適用性も勘案して、より詳細な検討が必要である。

また、本研究においては、簡単のため、隣接するピットの掘削による影響は考慮せず、単一ピットとして解析を行った。第 2 次取りまとめにおいては、隣接する処分孔の掘削影響について解析的な検討が行われ、熱的影響も考慮し、処分孔縦置き方式（軟岩系岩盤）における中心間隔を $3.0d$ ($d=2.2\text{m}$) と設定している。本研究で設定した条件において、隣接するピットの掘削影響を考慮した解析結果を図 3.3-18（塑性領域の分布）、および図 3.3-19（最大せん断ひずみの分布）に示す。なお、解析は支保を設置する場合（ケースⅢ m）についてのみ行い、それぞれ図 3.3-6 の手順で、手前、中央、奥のピットを順に掘削した（ただし図においては、中央、奥のピットのみ表示している）。中心間隔は第 2 次取りまとめと同様とした。図 3.3-18、および図 3.3-19 より、本研究で設定した条件においては、隣接するピットの掘削影響はほとんど生じないと推察される。

以上の考察をふまえ、本研究においては深度、および規模の異なるピットについて、原位置試験という観点から表 3.3-2 のように考え、最も適用性が高いと考えられる深度②に

おける実規模ピットの条件を例にとり、次節の検討を進めることとした。なお、前提条件として、以下のように考えた。

- ・計測器の設置等、ピット内での作業が継続的に発生する
- ・支保が必要な場合、その安全率（設計基準強度／想定される発生応力）は4以上とする
- ・重機等の通過による力学的な影響はない

また、表 3.3-2 は現時点で想定された地質条件、および解析結果から判断されるものであり、原位置の状況に応じて、総合的な判断が必要である。

表 3.3-2 ピットの安定性と原位置試験への適用性

深度	規模	安定性	支保の必要性	原位置試験への適用性
深度①	実規模	全体的に不安定領域（塑性領域、限界せん断ひずみ超過領域）が顕著に発生する	コンクリート 10cm 以上に相当する剛な支保	支保設置によるコスト増大、掘削影響による場の攪乱が想定され、他の条件に比較し、コスト対効果に劣る可能性がある
	縮小 (1/4)	上部に不安定領域が顕著に発生する（主に研究坑道の掘削影響による）	特に上部に必要（支保の規模は別途検討が必要）	作業性に劣る（狭隘）主に研究坑道の掘削影響による場の攪乱が想定される
深度②	実規模	塑性領域が発生するものの、広がり小さい	コンクリート 10cm 程度 コンクリート厚を減少、あるいは別材料（仮設支保等）を適用できる可能性	深度①に比較し、掘削影響が顕著でなく、コスト対効果に優れる可能性がある
	縮小 (1/4)	深度②実規模に比較し塑性領域の広がりが更に小さい	支保の規模は別途検討が必要 ただし支保は少なく、また別材料（仮設支保等）を適用できる可能性	作業性に劣る（狭隘） 深度①に比較し、掘削影響が顕著でなく、コスト対効果に優れる可能性がある

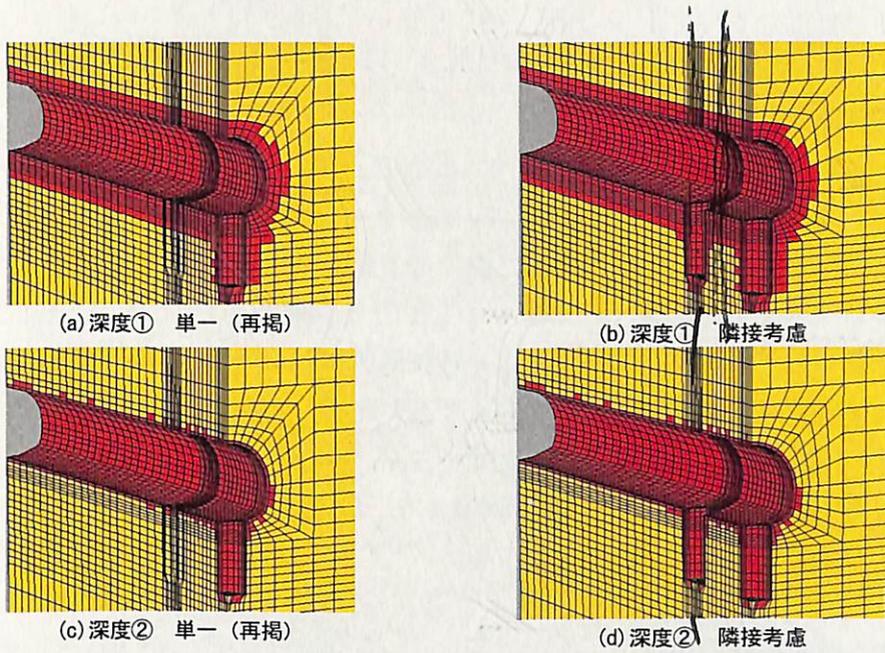


図 3.3-18 塑性領域の分布 (ケースⅢ, 隣接考慮)

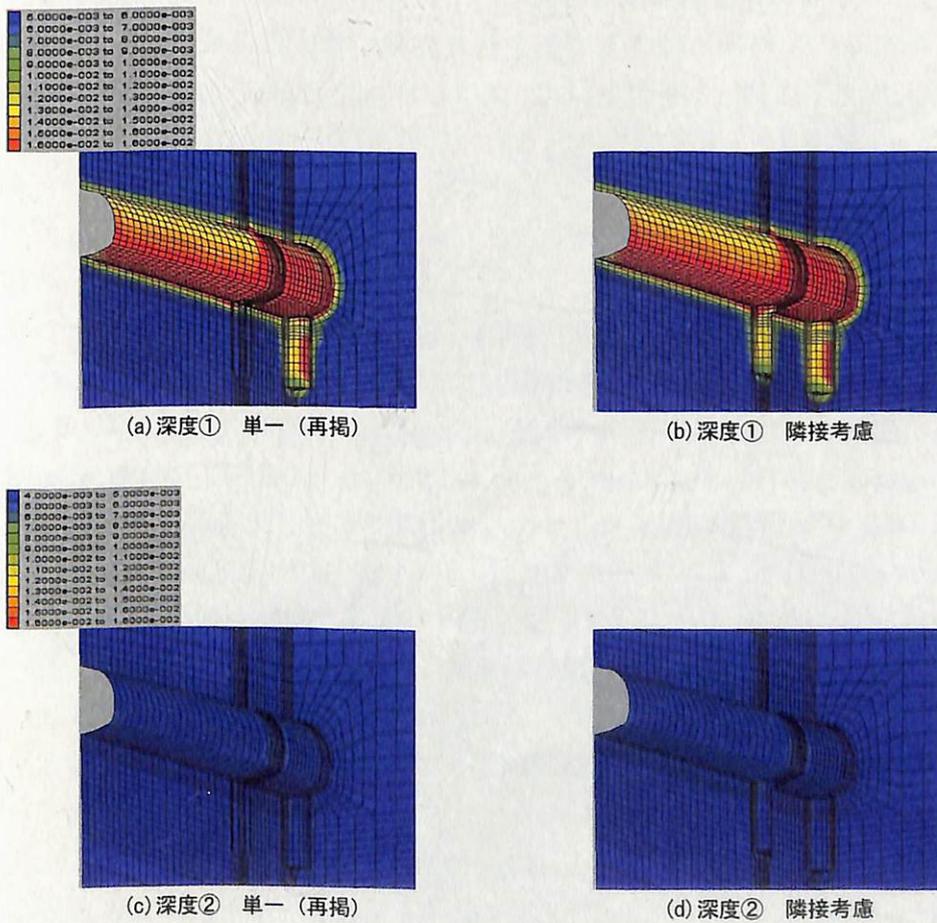


図 3.3-19 最大せん断ひずみの分布 (ケースⅢ, 隣接考慮)

3. 4 長期挙動解析

本節では、「3. 3 掘削時の挙動解析」をふまえ、ピット周辺岩盤の掘削後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時間は、緩衝材設置以降とし、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」における試験期間を10年間と想定し、設置以降10年間までを主な対象とする。ただし原位置試験の有効性や解析における課題について検討する目的で、設置以降1,000年間までを対象とした場合についても解析を行うこととする。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を用いることとし、構成方程式のパラメータはHDB-1孔、およびHDB-3孔のボーリングコアより得られた試験結果より設定することとする。

3. 4. 1 解析条件の設定

(1) コンプライアンス可変型構成方程式

本構成方程式は、大久保らにより提案された粘弾性構成方程式である（大久保ほか1987）。三次元応力下における基礎方程式は式(3.4-1)のようにあらわすことが出来る。

$$\frac{d\lambda^*}{dt} = a \cdot (\sigma^*)^n \cdot (\lambda^*)^m \quad (3.4-1)$$

ここで、 $\lambda^* (= \lambda / \lambda_0)$ [-] はひずみ ϵ [-] と応力 σ [MPa] の比であるコンプライアンス $\lambda (= \epsilon / \sigma)$ [MPa] を初期値 λ_0 (初期ヤング率 E_0 の逆数) [MPa] で基準化した値、 t は時間 [sec]、 σ^* は破壊接近度 [-]、 a は強度を決める定数 [Mpa・sec]、 n は時間依存性をあらわす定数 [-]、 m は破壊の進行性をあらわす定数 [-] である。本研究では、ピット周辺岩盤に拘束圧 σ_3 が作用するに伴い、 σ^* は式(3.4-2)に、 n は式(3.4-3)に従い変化するものとした。

$$\sigma^* = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_0} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\Delta\sigma_0} \quad (3.4-2)$$

$$n = \frac{\Delta\sigma_0}{\sigma_c} n_0 \quad (3.4-3)$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は主応力差 [MPa]、 $\Delta\sigma_0$ 、 σ_c はそれぞれ破壊強度 [MPa]、一軸圧縮強度 [MPa] である。本研究においては、前節までの結果と整合をとるため、Mohr-Coulomb の破壊基準を用いて、破壊強度を式(3.4-4)、一軸圧縮強度を式(3.4-5)に従って求めた（宮野前ほか、2004）。また、 n_0 は [-] は一軸応力下における n である。

$$\Delta\sigma_0 = \sigma_c + \frac{2 \cdot \sigma_3 \cdot \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.4-4)$$

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot C \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3.4-5)$$

ここで、 C は粘着力[MPa]、 ϕ は内部摩擦角[rad]である。また、ポアソン比は λ^* の増加に伴い、式(3.4-6)に従い増加するものとした。

$$\nu = 0.5 - \frac{0.5 - \nu_0}{\lambda^*} \quad (3.4-6)$$

ここで、 ν_0 は初期ポアソン比[-]である。

本研究においては、本構成方程式を用いた増分型の応力-ひずみ関係式を組み込んだコード（野本ほか，2003）により解析を行った。

（２）物性値の設定

本研究で対象としている深度②（地山区分 13）の岩盤物性値（表 3.2-1）は、主に HDB-1 孔で得られたボーリングコアによる室内試験結果より設定されている。よって、物性値の設定にあたっては HDB-1 孔（深度 520m 付近）の室内試験結果（大久保，2003）（井上・南，2003）を基本的に参照することとする。

大久保（2003）により実施された一軸圧縮試験（飽和常温条件）における n の平均値は 30 である。また、井上・南（2003）により実施された一軸圧縮試験（飽和，常温下）における n の平均値は 33 である。これらより、本研究においては n_0 （一軸応力状態における n ）を 30 と設定することとする。

また、大久保（2003）により、排水条件において三軸圧縮試験（拘束圧 5MPa，10MPa）が実施されている。表 3.2-1 の岩盤物性値（内部摩擦角が 27.5° ）をもとに式(3.4-4)より求まる破壊強度と、試験結果の平均値の関係を図 3.4-1 に示す。また、図には、内部摩擦角を 35° とした場合に式(3.4-4)より求まる破壊強度もあわせて示す。

次に、拘束圧作用に伴う m/n の変化について、式(3.4-3)より求まる m/n と、試験結果の平均値の関係を図 3.4-2 に示す。ここで m は試験結果（大久保，2003）より一定値 30 とした。また、図には、内部摩擦角を 35° とした場合に式(3.4-3)より求まる m/n もあわせて示す。ここで、 m/n は、その値が大きくなるほど、脆性的であることをあらわす。

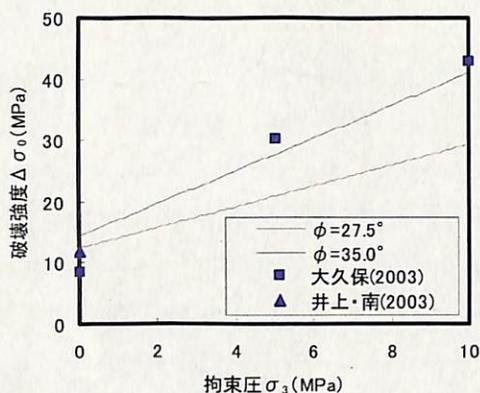


図 3.4-1 拘束圧作用に伴う破壊強度の変化

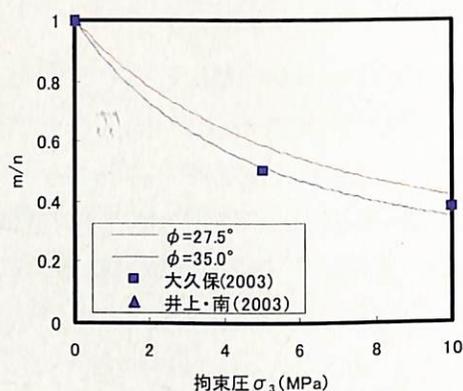


図 3.4-2 拘束圧作用に伴う m/n の変化

図 3.4-1, 図 3.4-2 より, 内部摩擦角を 35° として求めた値は, 試験結果と調和的であることが分かる。

以上より, 長期挙動解析においては, n_0 を 30, m を 30, 内部摩擦角を 35° とすることとする。ただし内部摩擦角に関しては, 後述するように前節の結果 (緩衝材設置以前のピット周辺岩盤の応力状態) との整合をとるため, 便宜的に緩衝材設置以前は 27.5° を, それ以降は 35° とすることとした。これら以外の物性値については, 表 3.2-1 と同様とした。

(3) 環境変化に伴う物性値の変化の設定

ここでは環境変化を考慮した一軸圧縮試験結果をもとに, 環境変化に伴う物性値の変化について検討する。HDB-1 孔については井上・南 (2003) による試験結果を, HDB-3 孔については 2 章の試験結果を参照する。

試験結果より得られる一軸圧縮強度と弾性係数の関係を, それぞれの条件における平均値とともに図 3.4-3 に, 一軸圧縮強度と n_0 の関係を, それぞれの条件における平均値とともに図 3.4-4 に示す。また, 図 3.4-3 には島尻泥岩と神戸泥岩の試験結果より得られた一軸圧縮強度と弾性係数との関係 (赤井ほか, 1973) を破線で, 図 3.4-4 には岩石がとり得るであろう一般的な n_0 の範囲を破線で示す。

図 3.4-3 より, HDB-3 孔の乾燥常温条件以外は, 破線に示した関係の近くに結果がほぼ分布していることが分かる。また, HDB-3 孔では熱 (飽和 80°C 条件) により, 一軸圧縮強度, 弾性係数がともに低下するような傾向にも見えるが, HDB-1 孔ではさほど変わらない傾向に見える。また, HDB-1 孔では乾燥により, 一軸圧縮強度, 弾性係数がともに増加するような傾向にも見えるが, HDB-3 孔では一軸圧縮強度のみ増加する傾向に見える。

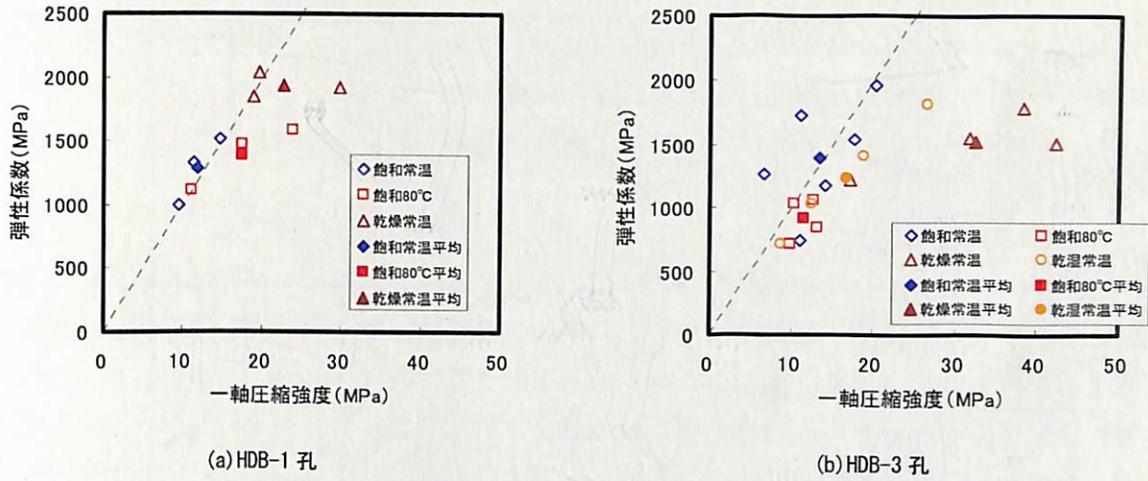


図 3.4-3 一軸圧縮強度と弾性係数の関係

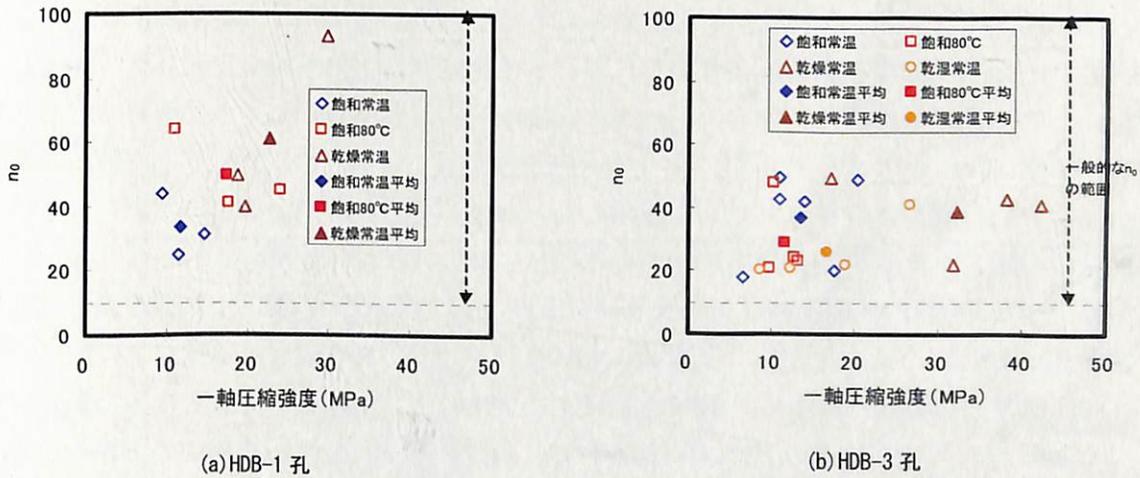


図 3.4-4 一軸圧縮強度と n_0 の関係

また、乾湿繰返（HDB-3 孔）条件は、飽和条件とさほど変わらない傾向に見える。

一方、図 3.3-4 より、試験結果で得られた n_0 はほぼ 20~60 付近（一般的な n_0 の範囲内）に分布していることが分かる。また、環境変化に伴う n_0 の変化についても、一軸圧縮強度、弾性係数と同様に、各条件に対する結果の分布幅が大きく、傾向を捉えるのが困難である。

よって本研究においては、「(2) 物性値の設定」で設定した物性値に対し、 n_0 と m を 20（HDB-3 孔においては試験結果の多くが分布する）($m/n=1$) に低下させ、便宜的に環境変化に伴う物性の低下とすることとした。なおここで n_0 が 20 の条件は n_0 が 30 の条件に対し、より時間依存性が顕著である場合を想定していることになる。

3. 4. 2 予備解析

本項では次項の解析に先立ち、予備的な解析を行うこととする。緩衝材設置以降の岩盤の長期挙動は、緩衝材の剛性、および岩盤の環境変化に依存すると考えられる。よってこれらが解析結果に与える影響について、予備的な解析を通じ、検討することとする。

(1) 解析手順

解析手順を表 3.4-1 に示す。なお、本項で実施する予備解析については、解析条件の簡略化のため便宜的に縮小規模を対象とし、前節で示された縮小規模における解析結果を参照することとした。また、簡単のため、ピットに支保は設置されないものとした。なお、解析対象とするピットの深度は、第2次取りまとめで示されたオーバーパックの中心位置である2.5m 付近とした。

始めに、3次元掘削解析より得られる縮小ピット掘削前（研究坑道掘削完了時）の該当ピット深度における応力状態をもとに、2次元長期挙動解析における初期応力を設定した（step1）。次に、3次元掘削解析より得られるピット掘削時（ピット掘削完了時）の応力状態と、2次元長期挙動解析より得られるピット掘削時の応力状態を比較した（step2）。なお2次元長期挙動解析においても、3次元掘削解析と同様に、ピット掘削時の応力状態を、Mohr-Coulomb の破壊基準に従う完全弾塑性解析で求めた。次にピット内部に緩衝材（簡単のため線形弾性体とした）を設置した（step3）。この時点での応力状態をもとに、前項で設定された長期挙動解析に特有の物性値に従い、長期挙動解析を行った（step4）。対象とする時間は、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」における試験期間を10年間と想定し、10年とした。なお、解析においては、ピット周辺岩盤と緩衝材との間にジョイント要素（Goodman et al. 1968）を配し、剥離（直応力が引張応力となった場合に生じるとした）、すべり（せん断応力が緩衝材の一軸圧縮強度の1/2以上となった場合に生じるとした）挙動を考慮した。

便宜的に、表 3.4-1 に示す方向を、それぞれ A 軸（研究坑道軸に直交する方向）、B 軸（研究坑道軸方向）と称することとする。step1、および step2 の時点における応力状態の比較結果を図 3.4-5（A 軸）、および図 3.4-6（B 軸）に示す。図より、2次元長期挙動解析におけるピット掘削時の応力状態が、良好に設定されていることが分かる。それぞれの図において、横軸はピット壁面からの距離をピット掘削径 d （0.55m）で除した値である。また、 σ_r はピット半径方向応力、 σ_θ はピット周方向応力である。ここで、図 3.4-5 より、A 軸（研究坑道軸に直交する方向）ではピット掘削前（step1）のピット近傍の半径方向応力 σ_r がピット遠方に比較し大きいことが分かる。これは、研究坑道の掘削による影響である。

表 3.4-1 解析手順

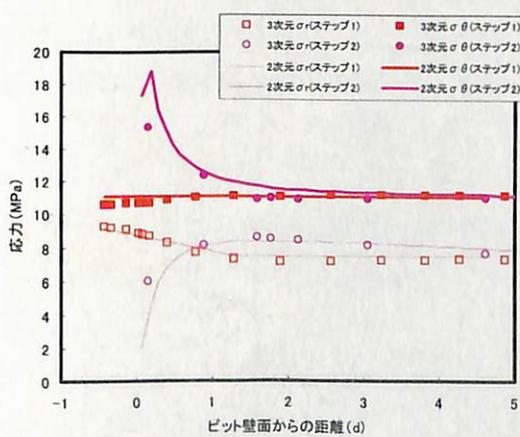
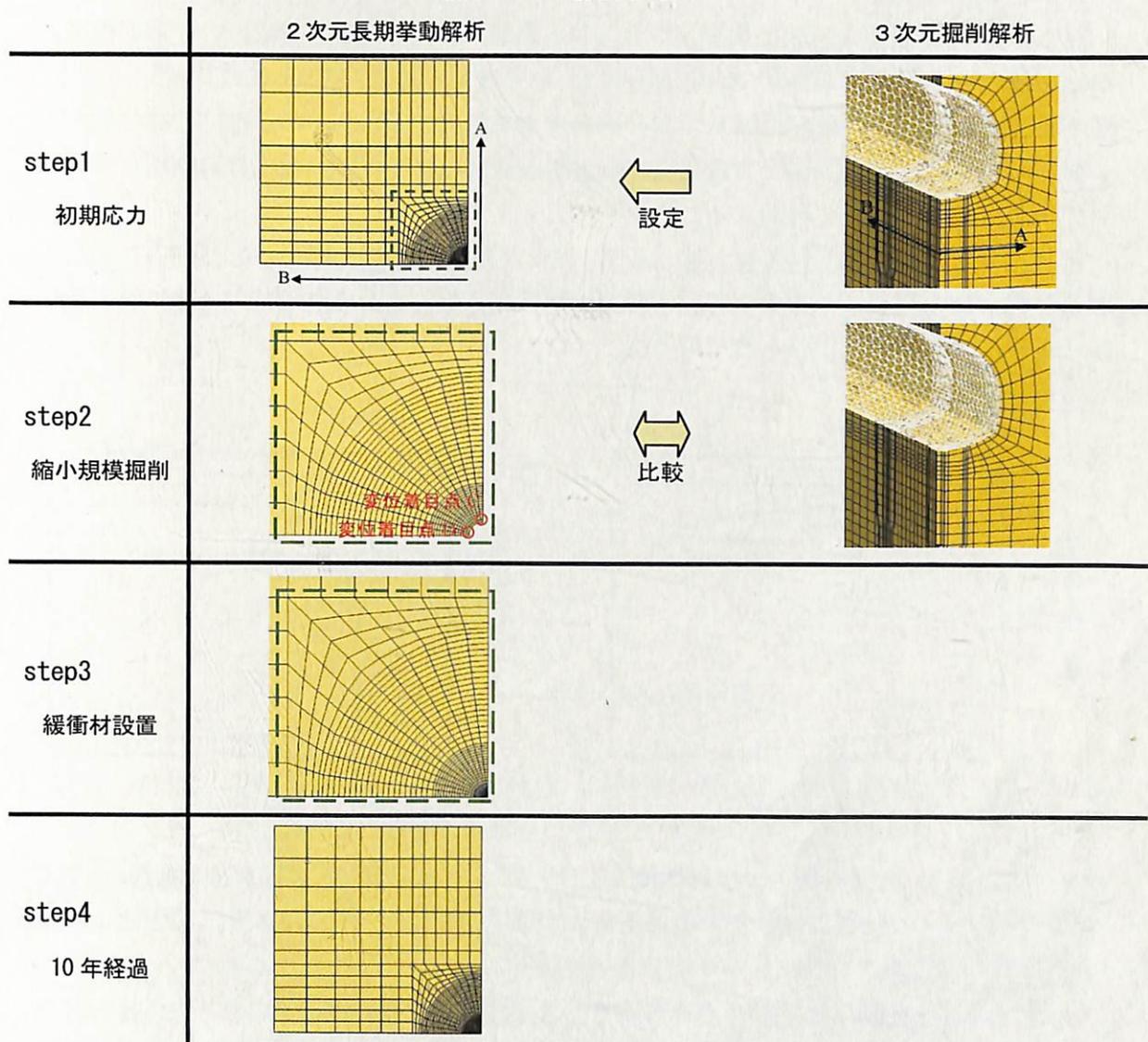


図 3.4-5 応力状態の比較 (A 軸)

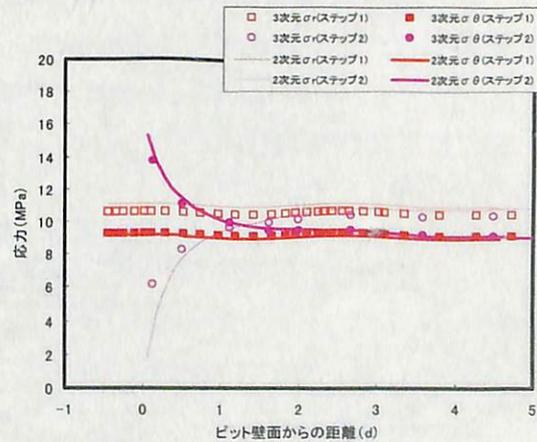


図 3.4-6 応力状態の比較 (B 軸)

(2) 緩衝材の剛性

図 3.4-1, 図 3.4-2 の試験結果が示すように, 岩盤の長期挙動は, 拘束圧の作用の程度に顕著に依存すると考えられる。本項の条件においてピット周辺岩盤について考えてみると, 緩衝材からの反力が拘束圧に該当する。その反力の程度は, 緩衝材の剛性に依存し異なると考えられることから, ここでは長期挙動解析を始めるにあたり, 緩衝材の剛性が解析結果に与える影響について検討することとする。

第2次取りまとめにおいては, 図 3.4-7, および図 3.4-8 に示すように, 緩衝材の配合, および含水比をパラメータとして, 一軸圧縮試験が実施され, それぞれの条件に対する一軸圧縮強度, 弾性係数が得られている。

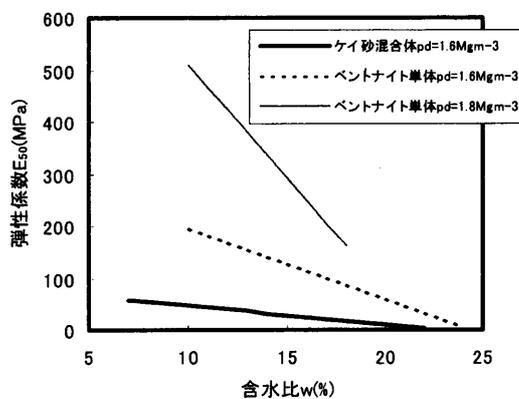


図 3.4-7 緩衝材の一軸圧縮強度
(第2次取りまとめによる)

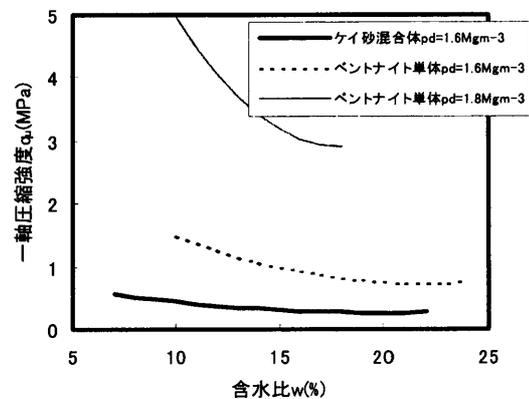


図 3.4-8 緩衝材の弾性係数
(第2次取りまとめによる)

ここで, 第2次取りまとめで述べられている, 釜石原位置試験場における施工確認試験の結果を参考に, 簡単のため配合に依存せず, 緩衝材の初期の含水比 w が 15%であると仮定する。その場合, 乾燥密度 1.6Mg/m^3 の 30wt%ケイ砂混合体, および乾燥密度 1.6Mg/m^3 のベントナイト単体の一軸圧縮強度, 弾性係数を図 3.4-7, 図 3.4-8 よりそれぞれ求めるとおよそ表 3.4-2 の値となる。

表 3.4-2 含水比 15%における緩衝材の物性値 (乾燥密度 1.6Mg/m^3)

	一軸圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)
ケイ砂混合体	0.3	30
ベントナイト単体	1.0	130

ここで、緩衝材の圧密等による物性変化、および緩衝材の膨潤圧が発生しないと仮定して、表 3.4-2 の物性値（ポアソン比は 0.3 とした）を用いて、表 3.4-1 の手順に従い得られたピット壁面位置での変位（表 3.4-1 に示す C 点、D 点）の経時変化を図 3.4-9 に示す。また、参考として緩衝材を設置しない場合（便宜的に $E=0\text{MPa}$ と表示する）の結果についてもあわせて示す。なお図に示した変位は、step2（ピット掘削時）からの相対変位である。

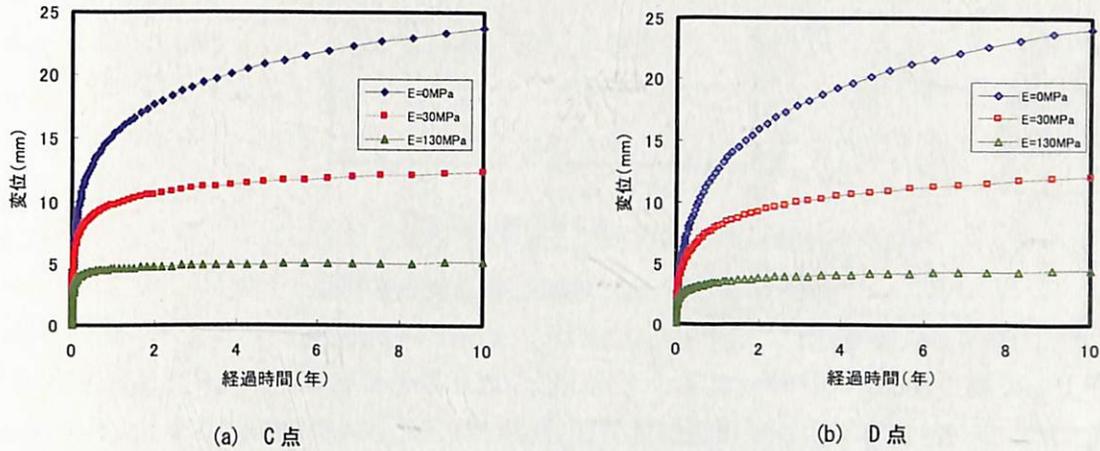


図 3.4-9 ピット壁面変位の経時変化

図より、岩盤の長期挙動が、緩衝材の剛性（緩衝材からの反力）に顕著に依存していることが伺える。また、緩衝材を設置した場合の変位は、時間経過に伴い収束傾向にあるが、緩衝材を設置しない場合の変位速度は、10 年経過後も依然大きな傾向にあることが分かる。

本検討においては、緩衝材を第 2 次取りまとめにおける基本仕様である、乾燥密度 1.6Mg/m^3 の 30wt% ケイ砂混合体 ($E=30\text{MPa}$) と想定し、長期的な物性変化や膨潤圧の発生がないものとして以降の検討を進めることとするが、岩盤の長期挙動を評価するにあたっては、これらを適切に考慮することが重要であると考えられる。

(3) 環境変化による影響

前項で述べたように、本研究においては環境変化による物性の変化を低下についてのみ取り扱うこととし、便宜的に時間依存性を表す定数 n_0 、および破壊の進行性を表す定数 m がある領域において 30 から 20（より時間依存性が顕著となる）へ低下するものとする（以降、低下領域と称する）。低下領域の大きさについては不明な点が多いため、ここではその領域の幅をパラメータとし、解析結果に与える影響について検討することとする。ここで、低下領域は応力状態に関係なく同心円状に発生するものと仮定し、幅をピット壁面から $0.0d$ （低下領域なし）～ $1.0d$ のパラメータとした。ここで d はピット掘削径（ 0.55m ）である。また、便宜的に緩衝材設置（step3）以降直ちに、低下領域が発生することとした。

設定した低下領域の幅と解析で得られる変位の関係を図 3.4-10 に示す。ここで変位は、10 年後における step2 (ピット掘削時) からの相対変位である。

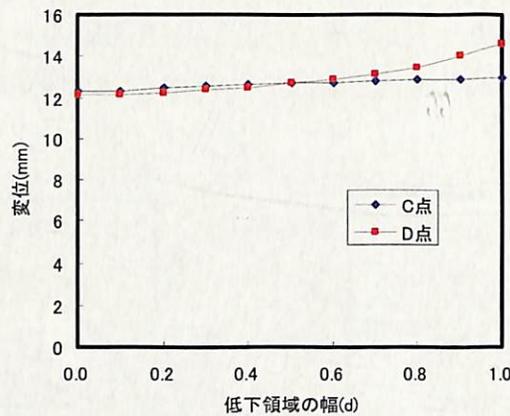


図 3.4-10 低下領域の幅と変位の関係

図 3.4-10 より、表 3.4-1 に示す C 点においては、低下領域の幅に依存せず、変位がほぼ一定であることが分かる。D 点においては、低下領域の幅が 0.7d 付近から、変位が大きくなる傾向にある。ここで、10 年後における弾性係数の分布を、低下領域を設定しない (0.0d) 場合と、低下領域の幅が 1.0d の場合についてのみ図 3.4-11 に示す。図において青色に着色された領域が、弾性係数が初期弾性係数に対し小さくなった領域 (以降便宜的に、緩み領域と称する) である。低下領域を設定しない場合においては、B 軸における緩み領域の幅は約 0.7d、A 軸における緩み領域の幅は 1.0d 以上である。一方、低下領域を 1.0d と設定した場合、B 軸における緩み領域の幅は約 1.0d となっている。

これらのことより、本研究における条件では、低下領域を設定せずに発生する緩み領域の幅が、低下領域の幅より大きければ、長期間経過後の解析結果に与える影響は顕著ではないと考えられる。また、図 3.4-10 より、低下領域の幅が 0.1d~0.9d の結果は、低下領域を設定しない (0.0d) 結果と、1.0d の結果との間にあることから、本研究においてはこの 2 つの場合についてのみ考慮し、検討を進めることとする。

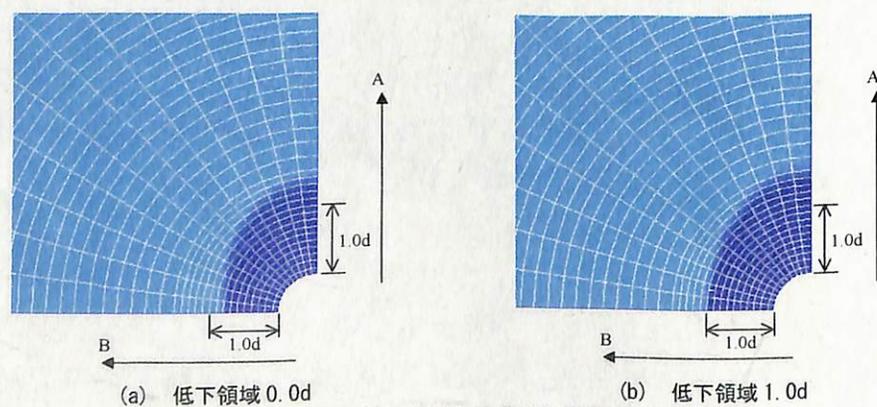


図 3.4-11 10 年後の弾性係数の分布

3. 4. 3 本解析

本項では、前項の結果をふまえ、実規模を対象とした長期挙動解析を行う。本研究においては、前節で述べたように実規模において支保を設置する（表 3.3-2）ことを想定しているため、支保の挙動が解析結果に及ぼす影響についても検討することとする。

(1) 解析手順

解析に用いた物性値を表 3.4-3 に、解析手順を表 3.4-4 に示す。なお、本項で実施する解析については、実規模を対象とし、ピットに支保が設置されるものとした。解析対象とするピットの深度は、前項と同様に、第 2 次取りまとめで示されたオーバーパックの中心位置である 2.5m 付近とした。

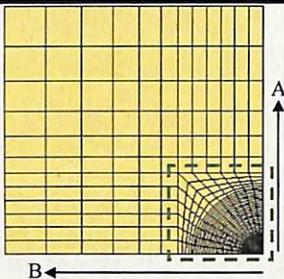
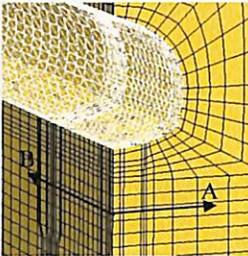
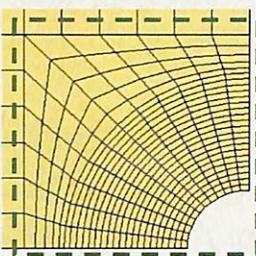
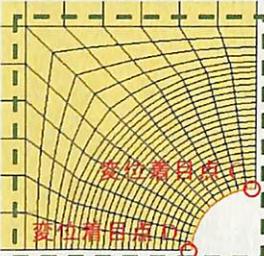
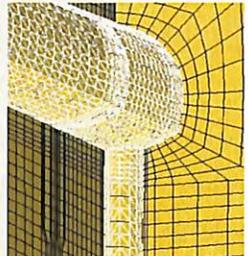
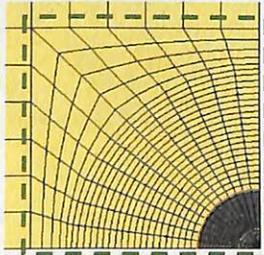
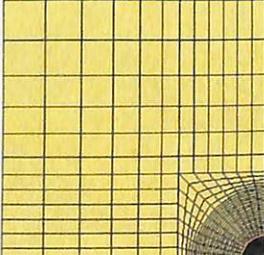
前項で示した縮小規模における解析と同様に、始めに 3 次元掘削解析より得られる実規模ピット掘削前（研究坑道掘削完了時）の該当ピット深度における応力状態をもとに、2 次元長期挙動解析における初期応力を設定した（step1）。次に、便宜的に応力解放率を用い（step2）、3 次元掘削解析（支保設置）より得られるピット掘削時（ピット掘削完了時）の応力状態と、2 次元長期挙動解析より得られるピット掘削時（支保設置時）の応力状態を比較した（step3）。なお本解析においても、3 次元掘削解析と同様に、ピット掘削時の応力状態を、Mohr-Coulomb の破壊基準に従う完全弾塑性解析で求めた。次にピット内部に緩衝材（線形弾性体）、オーバーパック（線形弾性体）を設置した（step4）。この時点での応力状態をもとに、前項と同様に長期挙動解析を行った（step5）。対象とする時間は、「地下施設での調査研究段階（第 3 段階）」における試験期間は 10 年間と想定されるが、原位置試験の有効性や解析における課題について検討する目的で、便宜的に設置以降 1,000 年間までを対象とした。なお、前項と同様に、支保と緩衝材との間、および緩衝材とオーバーパックとの間にジョイント要素を配し、剥離（直応力が引張応力となった場合に生じるとした）、すべり（せん断応力が緩衝材の一軸圧縮強度の 1/2 (0.15MPa) 以上となった場合に生じるとした）挙動を考慮した。

表 3.4-3 解析に用いた物性値

	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	内部摩擦角 (°)	粘着力 (MPa)	n_0	m	設定根拠
岩盤	2,520 ¹⁾	0.24 ²⁾	27.5 35.0 ³⁾	3.7	30	30	3. 2. 1 3. 4. 1
岩盤 (低下領域) ⁴⁾	2,520 ¹⁾	0.24 ²⁾	35.0 ³⁾	3.7	20	20	3. 4. 1
緩衝材 ⁵⁾	30	0.3	—	—	—	—	3. 4. 2
オーバー パック	2.1×10^5	0.2	—	—	—	—	第 2 次 取りまとめ
支保 ⁶⁾	4,000	—	—	—	—	—	3. 3. 2

1) 初期弾性係数, 2) 初期ポアソン比, 3) step5, 4) 1.0d, 5) 膨潤圧の発生なし, 6) 設計基準強度 36MPa

表 3.4-4 解析手順

	2次元長期挙動解析		3次元掘削解析
step1 初期応力		← 設定	
step2 実規模掘削 (応力解放)			
step3 実規模掘削 (支保設置)		⇔ 比較	
step4 緩衝材, オーバ ーパック設置			
step5 1,000年経過			

step2における応力解放率をパラメータとした解析を行った結果、応力解放率を65%とした場合に、step3における応力状態が、3次元掘削解析の結果と調和的であることが分

かった。ピット周辺岩盤の応力状態について比較した結果を図 3.4-12 (A 軸), および図 3.4-13 (B 軸) に示す。図より, 2次元長期挙動解析におけるピット掘削時(支保設置時)の応力状態が, 良好に設定されていることが分かる。それぞれの図において, 横軸はピット壁面からの距離をピット掘削径 d (2.2m) で除した値である。また, σ_r はピット半径方向応力, σ_θ はピット周方向応力である。ここで, ピット掘削前 (step1) の応力状態は, 前項で示した結果に同様である。

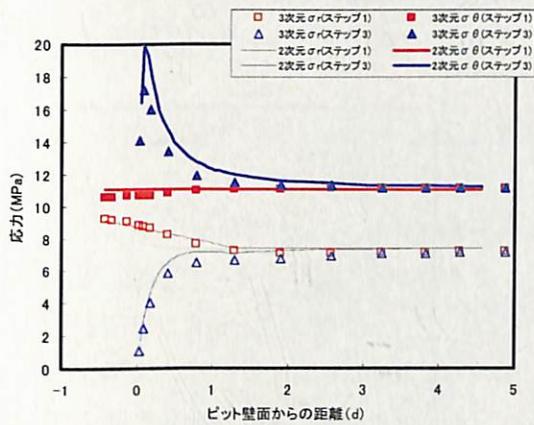


図 3.4-12 応力状態の比較 (A 軸)

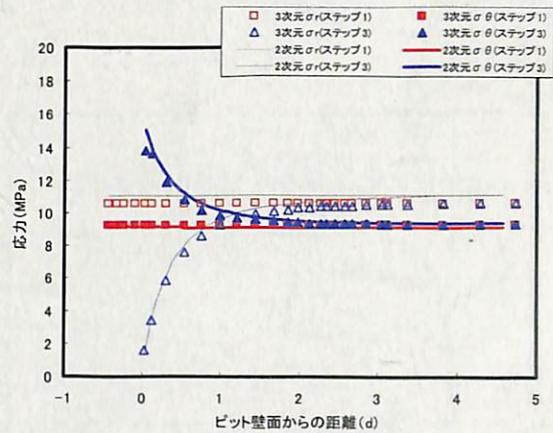


図 3.4-13 応力状態の比較 (B 軸)

(2) 支保の挙動

本解析においては, ピットに支保が設置されることを想定している。前項で緩衝材の剛性に着目し示した結果と同様に, 岩盤の長期挙動は, 反力の程度に依存すると想定されることから, ここでは支保の挙動の取り扱いが, 解析結果に与える影響について検討することとする。

拘束下 (岩盤と緩衝材により拘束される) における支保の挙動については不明な点が多いため, 本研究では, 支保の降伏条件として, 仮に表 3.4-5 に示す 3つの場合を想定し, 解析を行った。

表 3.4-5 支保の降伏条件

降伏条件	解析上の取り扱い
降伏なし	降伏しない (線形弾性)
降伏 (平均値)	支保部材の発生応力の平均値が設計基準強度 36MPa に達すると支保が全体的に降伏
降伏 (最大値)	支保部材の発生応力の最大値が設計基準強度 36MPa に達すると支保が全体的に降伏

環境変化による物性値の低下領域を設定せず，step5 を 10 年間として得られた，ピット壁面変位の経時変化を図 3.4-14 に，支保発生応力の強度への接近度の経時変化を図 3.4-15 に示す。ここで変位は，step3（ピット掘削時）からの相対変位である。また，支保発生応力の強度への接近度は，支保発生応力の平均値，あるいは最大値を設計基準強度（36MPa）で除した値であり，1.0 を超えると発生応力が設計基準強度を上回っていることとなる。なお，本研究の条件においては，発生応力の最大値は，表 3.4-4 に示す C 点付近で発生している。

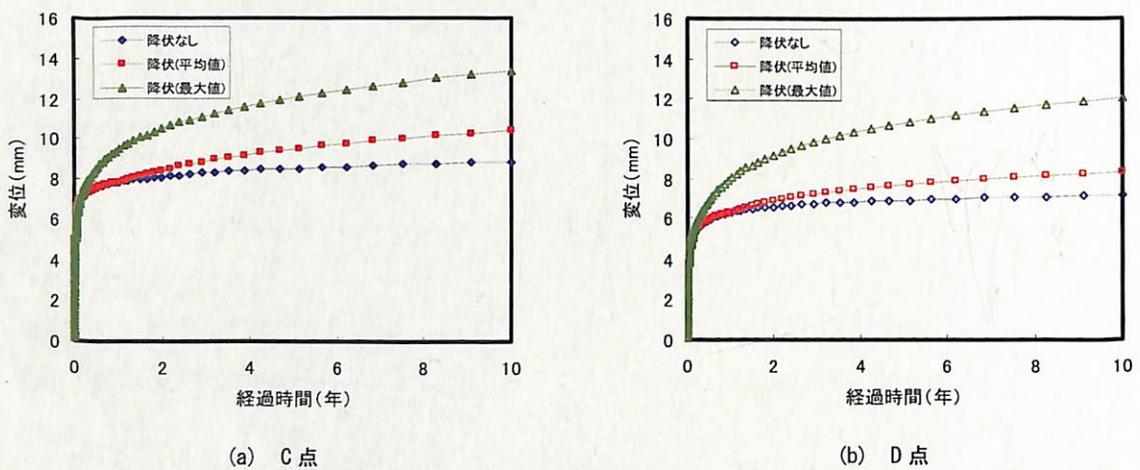


図 3.4-14 ピット壁面変位の経時変化

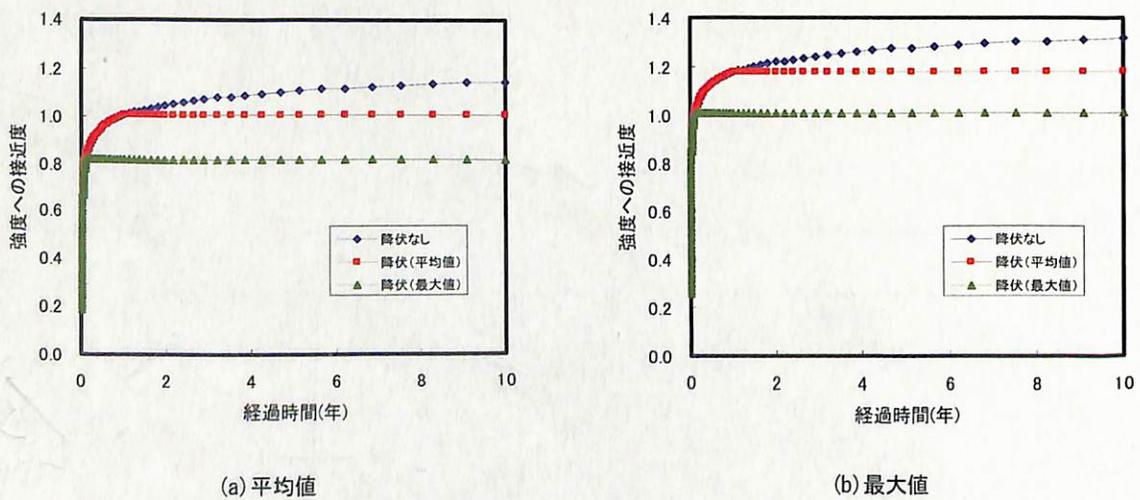


図 3.4-15 支保発生応力の強度への接近度の経時変化

図 3.4-14 より、各条件に対してピット壁面変位の経時変化が異なることが分かるが、その分岐時期は、図 3.4-15 における支保の降伏時期に対応していることが分かる。よって、前項で示した緩衝材の剛性と同様に、支保の挙動が解析結果に与える影響が大きいことが推察される。拘束下における支保の挙動については、支保の強度に岩盤（図 3.4-1）と同様の拘束圧依存性があるとも考えられるが、不明な点が多い。本研究においては、仮に支保発生応力の平均値が設計基準強度以上になると降伏する（支保が全体的に機能しなくなる）との条件で検討を進めることとするが、岩盤の長期挙動を評価するにあたり、本研究での想定と同様に支保が設置される場合においては、その挙動を適切に表現することが重要であると考えられる。

(3) 1,000 年間を対象とした長期挙動解析

これまで本研究で検討した結果をふまえ、表 3.4-3 に示した物性値をもとに、緩衝材設置後 1,000 年間を対象とした解析を行った。解析にあたっては、環境変化を考慮しない場合（低下領域なし）と、環境変化による物性の低下領域の幅をピット壁面から 1.0d（d はピット掘削径 2.2m）とした場合を考慮した。低下領域の幅がピット壁面から 1.0d の場合は、第 2 次取りまとめにおける処分孔の中心間隔（3.0d）で考えれば、ピット間の中央位置までを低下領域と見なしていることになる。ピットに設置される支保については、前述のとおり、支保発生応力の平均値が、想定している設計基準強度（36MPa）に達した時点で、直ちに全体的に降伏することとした。

解析で得られるピット壁面変位（step3（ピット掘削時）からの相対変位）の経時変化を図 3.4-16 に、緩み領域（前項と同様に、弾性係数が初期弾性係数に対し小さくなった領域を緩み領域と称する）の経時変化を図 3.4-17 に、支保発生応力（平均値）の強度への接近度の経時変化を図 3.4-18 に示す。

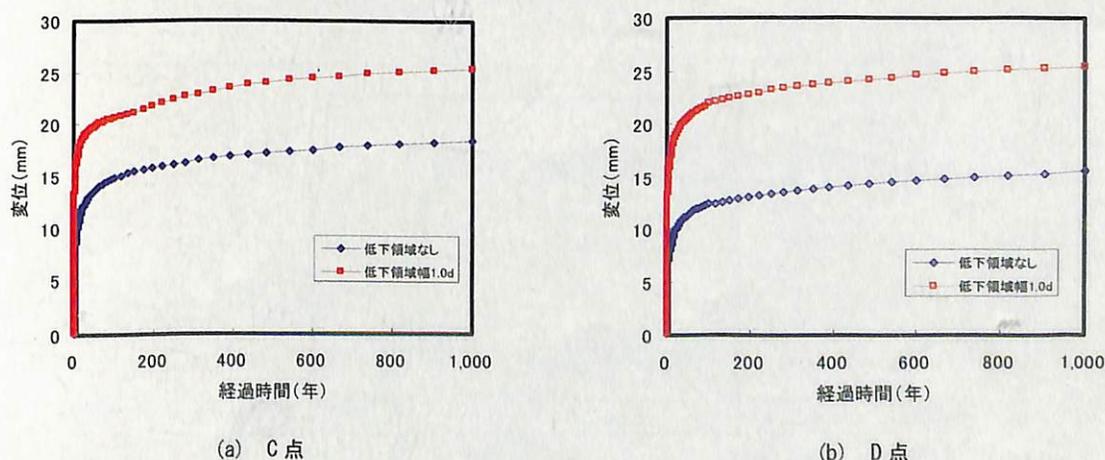


図 3.4-16 ピット壁面変位の経時変化

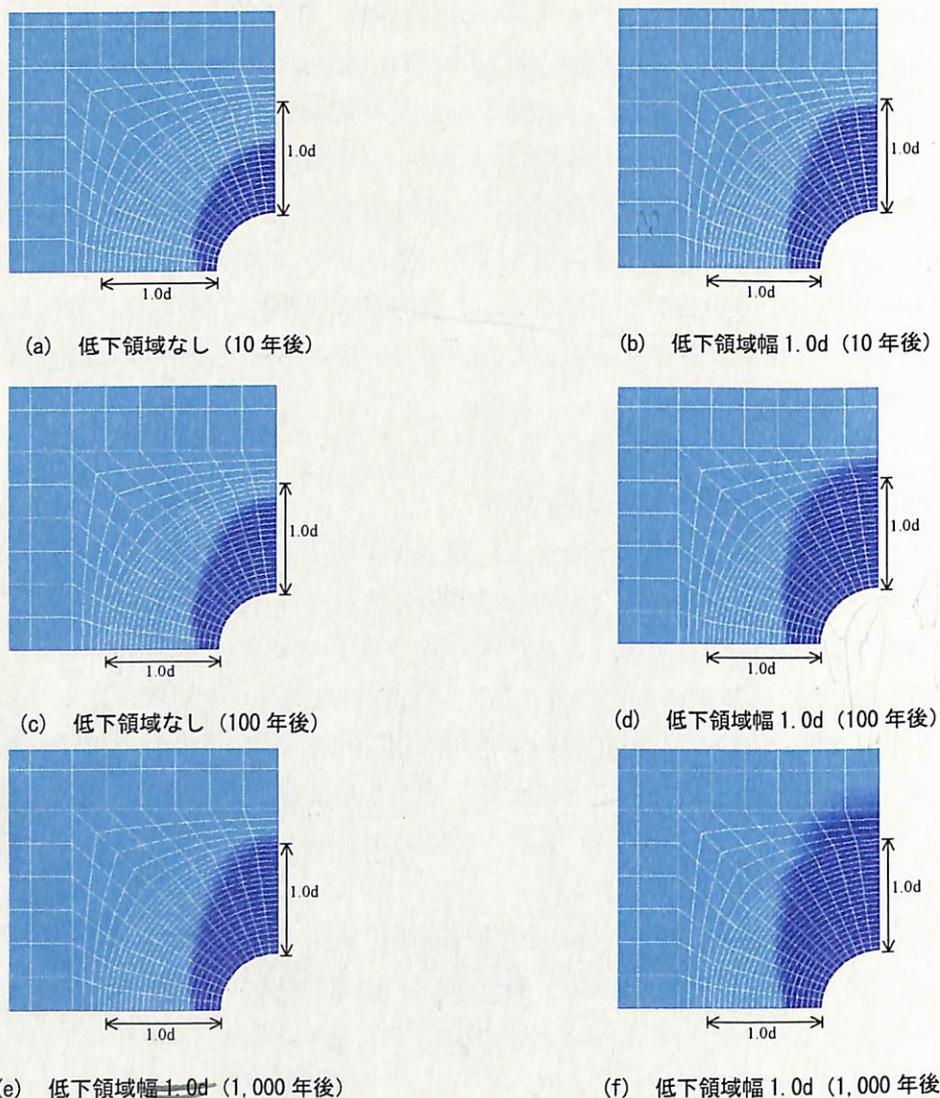


図 3.4-17 緩み領域の経時変化

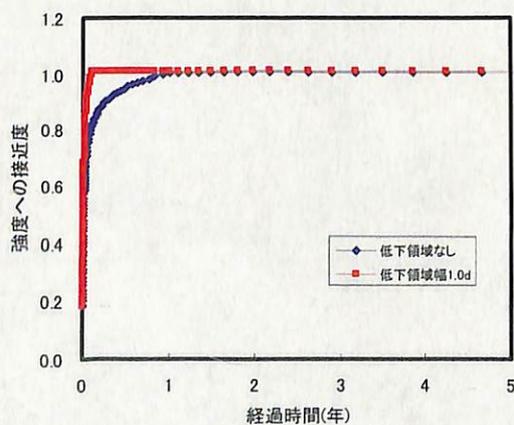


図 3.4-18 支保発生応力 (平均値) の強度への接近度の経時変化

図 3.4-16 より、環境変化による物性の低下領域の幅をピット壁面から 1.0d とした場合の変位は、環境変化を考慮しない場合（低下領域なし）の変位に比較し大きなことが分かる。また、図 3.4-17 に示す、緩み領域についても同様である。図 3.4-18 より、環境変化による物性の低下領域の幅をピット壁面から 1.0d とした場合は、環境変化を考慮しない場合に比較し、支保の降伏時期が早いことが分かる。本研究においては、環境変化による物性の低下を、便宜的に時間依存性を表す定数 n_0 を 20 と低下させることにより取り扱ったが、環境変化を考慮しない場合に比較し、ピット周辺岩盤の時間依存性がより顕著であるため、より早い時期に支保が降伏する（機能しなくなる）結果、変位、および緩み領域が大きくなったものと推察される。また、図 3.4-16、および図 3.4-17 より、変位、および緩み領域の発生は初期の 10 年程度で顕著であり、その後、増加し続けるものの、その進展速度は小さくなる傾向にあることが分かる。変位を例として、図 3.4-16 に示されているピット壁面における変位を、変位速度（対数）と時間（対数）の関係で示すと図 3.4-19 が得られる。図より変位速度は、時間の経過に従い、ほぼ -1 の傾き（図中に点線で示す）で、徐々に収束する結果であることが分かる。また、図 3.4-16 より、初期の段階で生じた変位の差は、時間が経過しても広がらない傾向にあることが分かる。

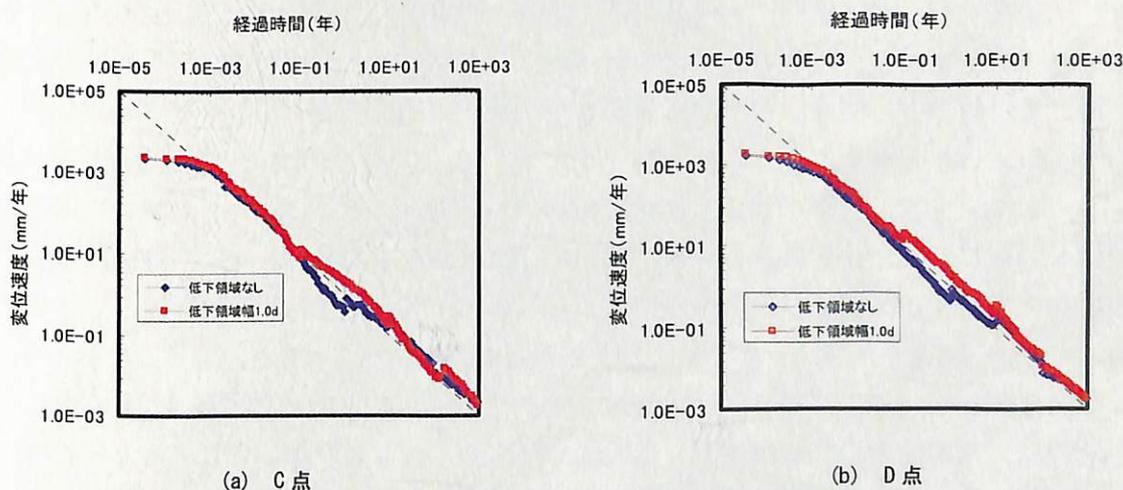


図 3.4-19 変位速度と時間の関係（両対数）

（4）結果の考察

本項では、前項の結果（緩衝材の剛性、および環境変化による物性の低下が解析結果に与える影響検討）をふまえ、実規模ピットの長期挙動について解析的に検討した。ここで、得られた結果について考察することとする。

得られた結果について簡潔にまとめると、以下のような傾向であった。

- ① 変位や緩み領域の進展は、緩衝材設置後、初期の段階（10年程度）で顕著であり、徐々に収束傾向を示す。
- ② 環境変化による物性の低下を考慮した場合、物性の低下を考慮しない場合に比較し、変位や緩み領域が大きくなるが、初期の段階で生じた差は、時間が経過しても広がらない傾向を示す。

まず①の傾向について考察する。実際の岩盤において、長期間にわたって変位を計測した例は極めて少ないが、例えばスイスの **Mont Terri** 調査坑において、約1年間、変位を計測した例 (Boidy et al. 2002) がある。本調査坑の該当地質は主にオパリナスクレイであり、本研究で対象とした条件に比較的近いと考えられる。調査坑周辺に設置されたエクステンソメータによる変位計測の結果、変位の発生は初期の段階で顕著であり、徐々に収束傾向を示している。本研究においては緩衝材を設置したピット周辺岩盤を対象としているため、条件はやや異なるが、①は同様の傾向であったと言える。本研究においてはピット内部に緩衝材を設置しているため、ピット周辺岩盤が内空側へ変形することにより、反作用力として徐々に内圧が付加され、安定へと向かったと推察される。

次に②の傾向について考察する。本研究においては、ピットに支保が設置されることを想定し、解析を行った。また、環境変化による物性の低下を、便宜的にピット周辺岩盤の時間依存性がより顕著となるとして取り扱った。環境変化による物性の低下を考慮した場合における変位や緩み領域の発生が、考慮しない場合に比較しより大きくなる傾向を示したのにはいくつかの理由が考えられるが、「3.4.2.(3) 環境変化による影響」、および「3.4.3.(2) 支保の挙動」における結果から考えると、特に支保の降伏時期による影響が大きかったためと推察される。例えば、Hisatake (2003) は、支保の降伏により、時間依存性を呈するトンネルの変位が増大することを、計測結果との比較を通じ、解析的に示している。図 3.4-14 より、本研究においても同様の傾向であったと言える。図 3.4-18、および図 3.4-19 から考えると、環境変化による物性の低下を考慮した場合は、未だ変化が顕著な時期（変形速度が大きな時期）に支保が降伏し、変化を助長させたと考えられる。これに対し、環境変化を考慮しない場合は、ある程度変化がおさまった時期（変形速度がある程度小さくなった時期）に支保が降伏し、影響が小さかったため、両者に変位や緩み領域の差が生じたものと推察される。その後、両者とも①により、同様の変化（同様の変形速度）となっているため、両者の差が広がらなかったと推察される。

現在、「地下施設での調査研究段階（第3段階）」において、処分技術の信頼性向上を図る目的で原位置試験が計画されているが、その期間は約10年である。本研究においては、緩衝材の剛性低下や支保材料による岩盤への化学的影響等を考慮していないが、その期間において、①、②と同様の傾向（変化は初期の段階で大きく、徐々に収束傾向を示す）が得られれば、評価の信頼性向上にとって大きな成果となり得ると考えられる。これまで、実際の岩盤において、長期にわたり挙動が計測された例はほとんどないことから、原位

置試験が持つ意味は大きいと考えられる。

解析的な検討における今後の課題としては、以下のようなことが挙げられる。

- I 岩盤物性のばらつきの考慮
- II 内圧の考慮

Iについては、試験より得られる岩盤物性は一般にばらついている。また、表 3.2-1 に示すように、深度が僅かに異なれば、岩盤物性は大きく異なる。本研究においては、「基本設計」で用いられている岩盤物性、および試験より得られた岩盤物性より、決定論的な解析を行い、そのばらつきを考慮していないが、これらが解析結果に及ぼす影響について検討する必要があると考えられる。ただし、2章で示したように、岩石の破壊寿命の予測に対する、岩盤物性のばらつきの感度は大きいですが、図 3.4-10 に示したように、物性の低下（ただし n_0 , m のみを変化させている）を考慮してピット周辺岩盤の長期挙動について解析した場合、顕著な差が生じないような場合もあると考えられる。

IIについては、本研究における解析では、例えば緩衝材の飽和による膨潤圧の発生を考慮していない。これまで述べてきたように、内圧の程度が解析結果に与える影響が大きいため、緩衝材の膨潤圧を考慮した場合、より長期的な変化が緩慢になる結果が得られる可能性がある。一方で、支保の設置時期の早遅や、緩衝材の剛性の取り扱いが異なれば、より変化が顕著になる結果が得られる可能性もある。これらについても更なる検討が必要であると考えられる。

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

ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす検討では、幌延地域に分布する堆積軟岩に対する大久保モデルの適用性を確認することと、飽和状態や熱などの試験条件が大久保モデルの各定数にどのように影響するかを把握することを目的として、幌延地域で採取した堆積軟岩を対象とした一軸圧縮試験やクリープ試験を実施した。その結果、試験条件を変化させた場合の大久保モデル各定数を多数取得し、試験条件別の傾向を示すことができた。また、マルチクリープ試験を実施することにより、破壊前の1次クリープや2次クリープ曲線を多数取得することができた。さらに、大久保モデルにより一部のケースにおいてほぼ寿命の予測が可能であることを示すことができた。

幌延を条件とした岩盤の長期力学的挙動評価では、試錘調査および室内試験で得られた情報をもとに、原位置試験が処分孔縦置き方式を模擬して行われる場合を想定し、ピット（模擬処分孔）の掘削時、および長期経過後の力学的安定性について解析的な検討を行った。掘削時の挙動解析においては、研究坑道掘削による力学的影響を考慮するとともに、ピットの掘削規模、支保条件が異なる場合の安定性の違いについても検討した。掘削時の挙動解析により得られた応力状態をもとに、ピット周辺岩盤を対象とした長期挙動解析を行った結果、変位や緩み域の進展は、初期の段階で顕著であり、徐々に収束傾向を示すことが伺えた。また、緩衝材の剛性や支保の挙動が岩盤の長期挙動に及ぼす影響について解析的な検討を行うとともに、得られた解析結果の妥当性や、岩盤の長期挙動に関する原位置試験の有効性についても検討を加えた。

今後の課題として、ニアフィールド環境が力学挙動に及ぼす検討では、幌延地域の堆積軟岩に対する大久保モデルの信頼性向上に資するため、より力学的特性が等しいと考えられる試験体による試験を実施することが挙げられる。また、1次クリープや2次クリープを再現できる拡張式の適用性に関する検討も実施する必要があると考えられる。一方、幌延を条件とした岩盤の長期力学挙動評価では、岩盤物性のばらつきや内圧の取り扱いについて、更なる検討が必要であると考えられる。

・ 参考文献

赤井浩一ほか：島尻泥岩の力学特性，京大防災研究所年報，第 16 号，pp.753-764，(1973)

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，(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)

大久保誠介他：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，金豊年：非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション，資源と素材，Vol.109，pp.209-214，(1993)

大久保誠介，福井勝則：コンプライアンス可変型構成方程式の定数について”，資源と素材，Vol.113，pp.561-564，(1997)

大久保誠介他：コンプライアンス可変型構成方程式の拡張とクリープ試験結果による検討，資源と素材，Vol.118 p.737-744，(2002)

大久保誠介，福井勝則：田下凝灰岩の長期クリープ試験と構成方程式，資源と素材，Vol.118 p.36-42，(2002)

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)

岡行俊：NATMにおける支保理論，施工技術，Vol.10，No.11，pp.6-12，(1977)

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に技術的信頼性—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：高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する研究報告—平成 14 年度報告—, JNC TN1400 2003-004, (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 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, (2003a)

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 年度調査研究計画”, JNC TN1410 2002-002, (2003)

核燃料サイクル開発機構幌延深地層研究センター：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(平成 15 年度), (2004)In preparation.

窪田茂ほか：幌延深地層研究計画 地下施設建設に関する基本計画の検討 (平成 14 年度), サイクル機構技術資料 (核燃料サイクル開発機構 委託研究成果報告書), JNC TJ1400 2002-003, (2003)

桜井春輔, 足立紀尚：都市トンネルにおける NATM, 鹿島出版会 (1988)

桜井春輔ほか：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)

日本道路公団：設計要領 第三集 トンネル, (1997)

野本康介ほか：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-528, pp.1045-1046, (2003)

宮野前俊一ほか：支保がトンネルの長期安定性に与える効果に関する解析的検討, 土木学会第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, (2004)

E.Boidy et al. : Back analysis of time-dependent behaviour of a test gallery in claystone, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.17, pp.415-424, (2002)

Goodman,R.E. et al. : A model for the mechanics of jointed rock, Proc. ASCE, Vol.94, SM3, pp.637-659, (1968)

Masayasu Hisatake : Effects of steel fiber reinforced high-strength shotcrete in a squeezing tunnel, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.18, pp.197-204, (2003)

・ 付録-1 (水平方向コア抜き試験)

本編では、全ての試験体は鉛直方向でコア抜きしている。ここでは、コア抜き方向を水平方向にした場合、大久保モデルの各定数がどのように変化するかについての参考データを得ることを目的として、水平方向にコア抜きした試験体での一軸圧縮試験を行った。コア抜き方向以外は、全て本編の試験方法と同様とし、試験条件は水中常温とした。なお、今回使用したボーリングコアは定方位コアではなかったため、コア抜きの東西南北方向については把握できなかった。

試験体の寸法等を表 A.1-1 に示す。また、一軸圧縮試験結果を図 A.1-1、図 A.1-2 に示す。

表 A.1-1 横抜きコア試験体の寸法等

試験体番号	採取深度	重量	平均直径	断面積	平均高さ	体積	湿潤密度	Vp	Vs	動ポアソン比
	[m]	[g]	[cm]	[cm ²]	[cm]	[cm ³]	[g/cm ³]	[m/sec]	[m/sec]	[-]
464.00A	464.00	43.1	2.434	4.654	4.987	23.208	1.857	2168	1441	0.10

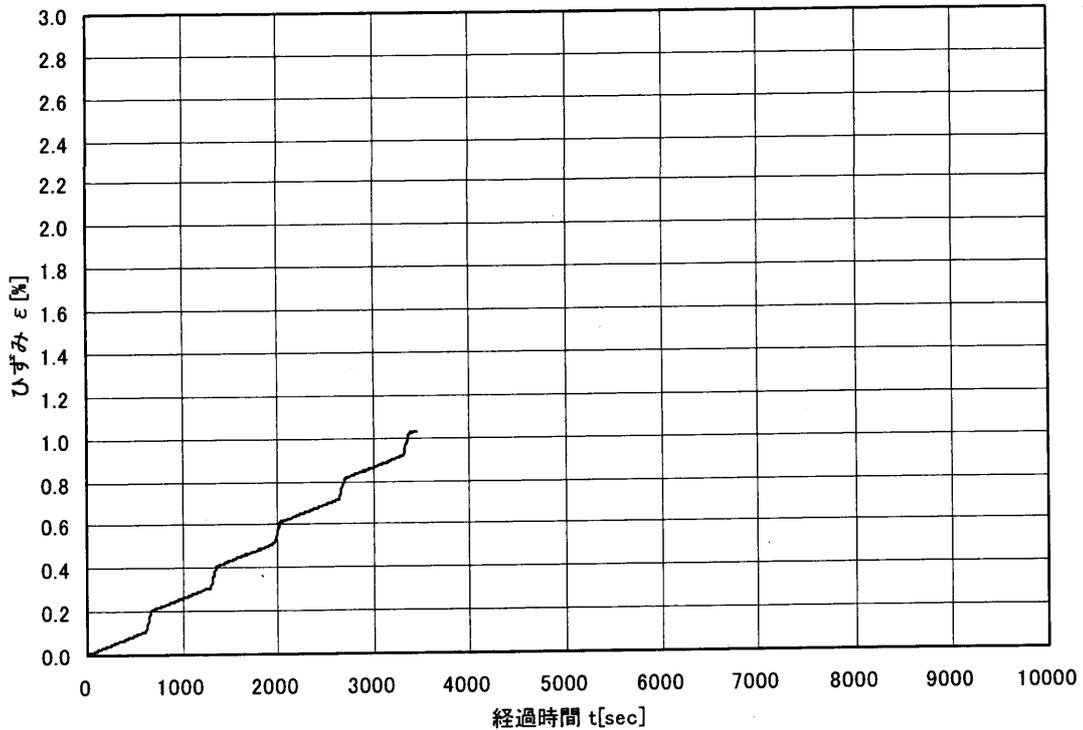


図 A.1-1 一軸圧縮試験 時間-歪み曲線(463.00A) 水中常温 水平コア抜き

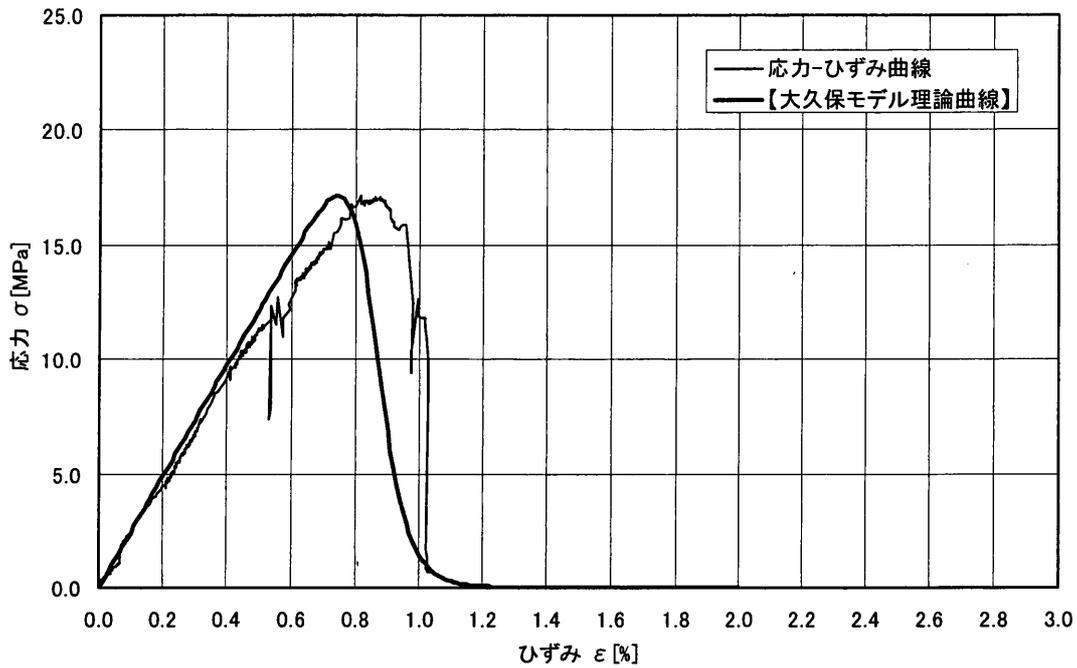


図 A.1-2 一軸圧縮試験 応力-歪み曲線(462.00A) 水中常温 水平コア抜き

一軸圧縮強度や大久保モデルの各定数を表 A.1-2 に示す。

表 A.1-2 横抜きコアの大久保モデル定数等

試験体番号	試験条件	$\lambda 1$	n	m	a	σ_c
		[/MPa]	[-]	[-]	[MPa·sec]	[MPa]
462.04A	水中常温	0.000410	18	18	2.11E+32	17.15

図 A.1-3～図 A.1-7 には、比較を容易にするため、鉛直方向と水平方向のコア抜きによる試験体から得られた大久保モデルの各定数の棒グラフを示す。水平方向によるコア抜きは1試験体のみであるため断定はできないが、水平方向、両者の各定数に明瞭な差異は認められない。コアの力学特性は方向に依存すると考えられるが、より多くの試験体による確認試験が必要であると考えられる。

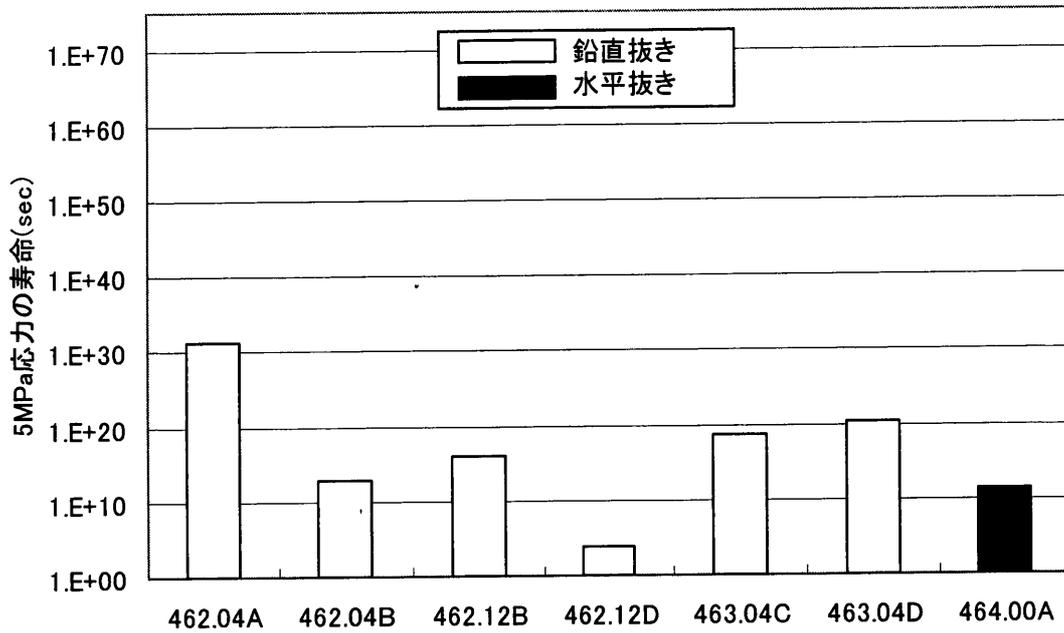


図 A. 1-3 載荷応力一定 (5MPa) での寿命の比較 (鉛直と水平コア抜き)

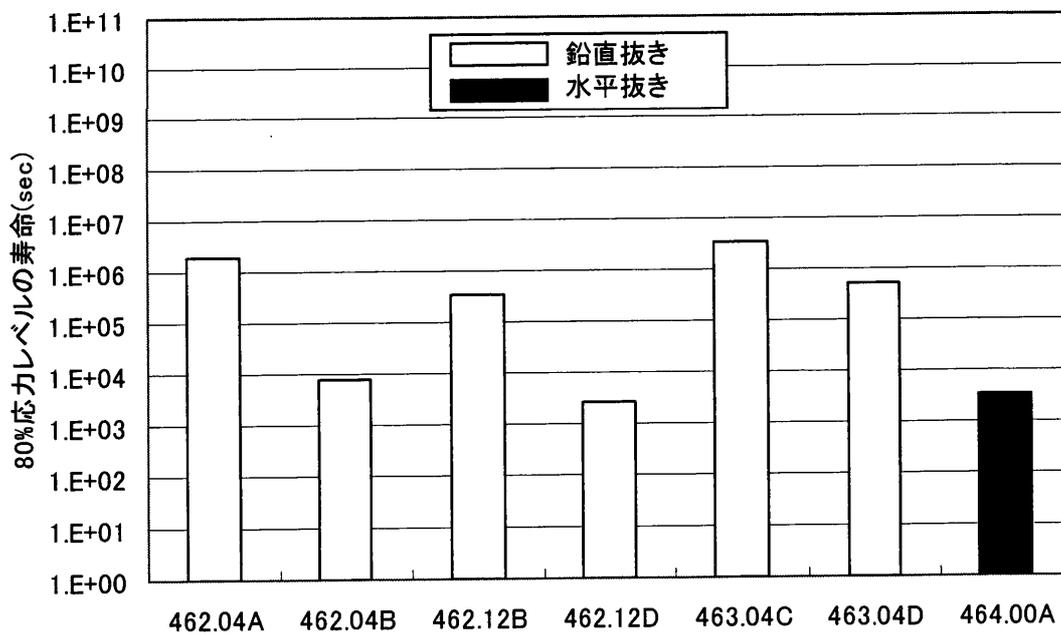


図 A. 1-4 応力レベル一定 (80%) での寿命の比較 (鉛直と水平コア抜き)

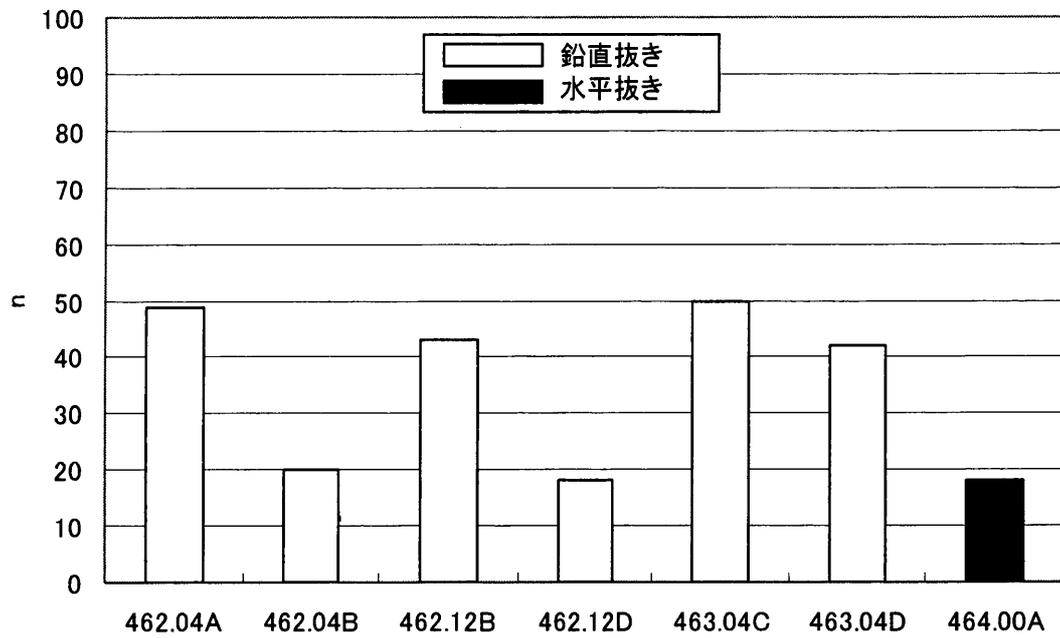


図 A.1-5 nの比較 (鉛直と水平コア抜き)

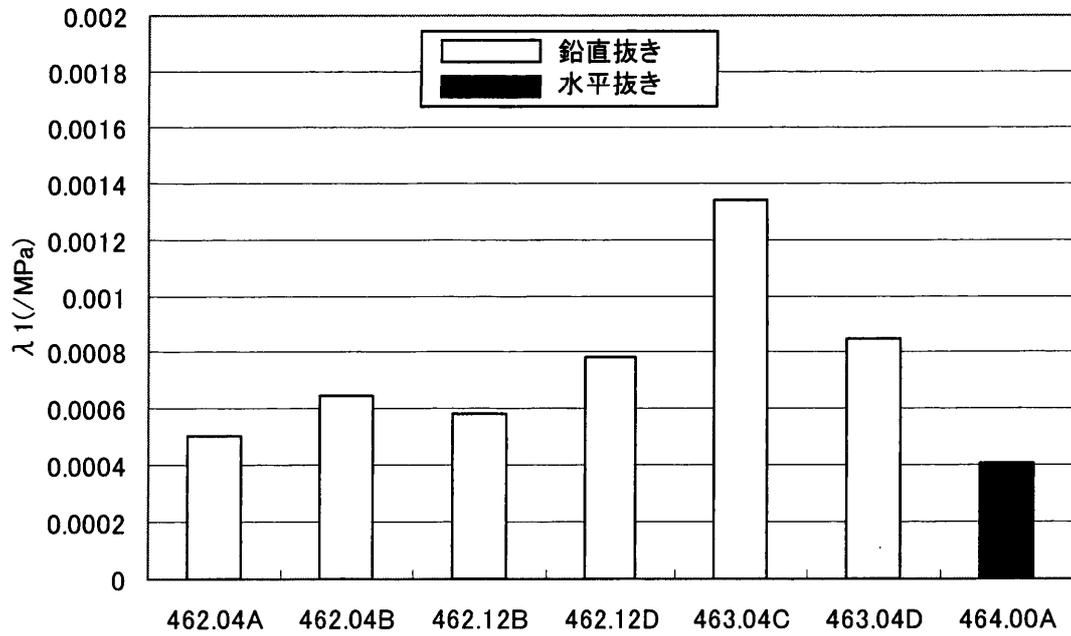


図 A.1-6 mの比較 (鉛直と水平コア抜き)

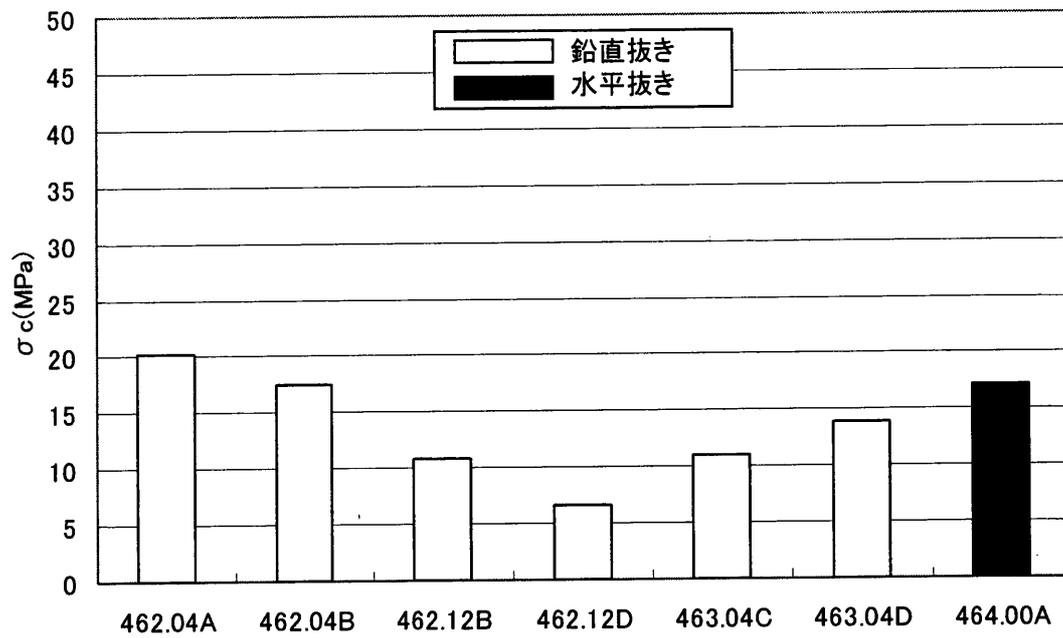


図 A. 1-7 一軸圧縮強度の比較 (鉛直と水平コア抜き)

・ 付録－ 2 （試験状況写真）



写真 A. 2-1 弾性波速度測定器



写真 A. 2-2 弾性波速度測定状況



写真 A. 2-3 岩石三軸壓縮試驗機



写真 A. 2-4 一軸壓縮試驗 載荷狀況



写真 A. 2-5 一軸圧縮試験後 (水中常温 : 462. 04A)

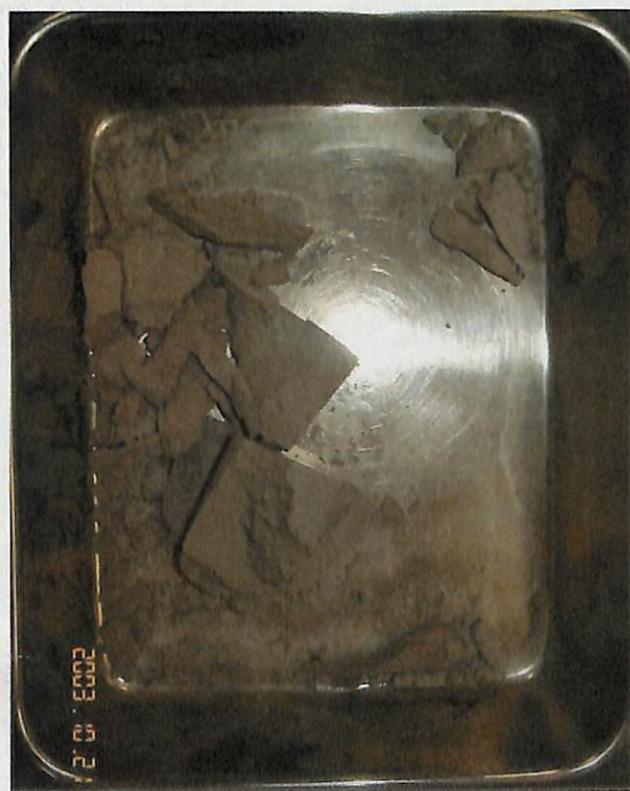


写真 A. 2-6 一軸圧縮試験後 (水中常温 : 462. 04B)



写真 A. 2-7 一軸圧縮試験後（水中常温：462.12B）



写真 A. 2-8 一軸圧縮試験後（水中常温：462.12D）



写真 A. 2-9 一軸圧縮試験後（水中常温：463.04C）



写真 A. 2-10 一軸圧縮試験後（水中常温：463.04D）



写真 A. 2-11 一軸圧縮試験後 (水中 80 度 : 462. 35B)



写真 A. 2-12 一軸圧縮試験後 (水中 80 度 : 462. 35C)



写真 A. 2-13 一軸圧縮試験後 (水中 80 度 : 462.96B)



写真 A. 2-14 一軸圧縮試験後 (水中 80 度 : 462.96C)



写真 A. 2-15 一軸圧縮試験後 (乾燥 : 462. 43B)



写真 A. 2-16 一軸圧縮試験後 (乾燥 : 462. 43D)



写真 A. 2-17 一軸圧縮試験後 (乾燥 : 462. 51A)



写真 A. 2-18 一軸圧縮試験後 (乾燥 : 462. 51B)



写真 A. 2-19 一軸圧縮試験後（乾湿水中常温：462. 59B）



写真 A. 2-20 一軸圧縮試験後（乾湿水中常温：462. 59C）



写真 A. 2-21 一軸圧縮試験後 (乾湿水中常温 : 462. 88A)



写真 A. 2-22 一軸圧縮試験後 (乾湿水中常温 : 462. 88C)



写真 A. 2-23 クリープ試験機

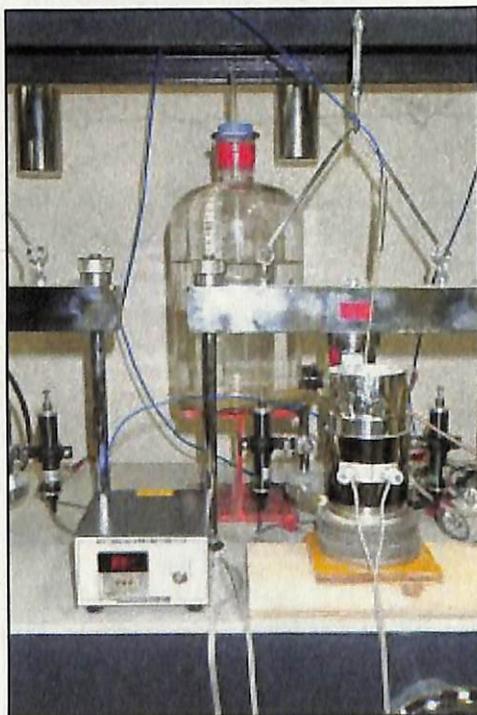


写真 A. 2-24 クリープ試験機 (拡大) (水中 80°C条件)



写真 A. 2-25 クリープ試験後 A (水中常温 : 462.04C)



写真 A. 2-26 クリープ試験後 B (水中常温 : 462.04C)



写真 A. 2-27 クリープ試験後 A (水中常温 : 462. 12C)



写真 A. 2-28 クリープ試験後 B (水中常温 : 462. 12C)



写真 A. 2-29 クリープ試験後 A (水中常温 : 463. 04A)



写真 A. 2-30 クリープ試験後 B (水中常温 : 463. 04A)



写真 A. 2-31 クリープ試験後 A (水中 80 度 : 462. 35D)



写真 A. 2-32 クリープ試験後 B (水中 80 度 : 462. 35D)



写真 A. 2-33 クリープ試験後 A (水中 80 度 : 462. 96D)



写真 A. 2-34 クリープ試験後 B (水中 80 度 : 462. 96D)



写真 A. 2-35 クリープ試験後 A (乾湿水中常温 : 462. 59A)



写真 A. 2-36 クリープ試験後 B (乾湿水中常温 : 462. 59A)



写真 A. 2-37 クリープ試験後 A (乾湿水中常温 : 462. 88D)



写真 A. 2-38 クリープ試験後 B (乾湿水中常温 : 462. 88D)