

岩盤内の不飽和領域のメカニズムに関する研究
(先行基礎工学研究に関する共同研究報告書)

2002 年 2 月

岡 山 大 学
核燃料サイクル開発機構

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ください。

〒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:029-282-7980
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

© 岡山大学 (Okayama University)
核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2002

岩盤内の不飽和領域のメカニズムに関する研究
(先行基礎工学研究に関する共同研究報告書)

西垣 誠*, 小松 満*, 赤木洋介*, 杉田 裕**, 菊池広人***

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分において処分坑道の掘削に伴い生じる掘削影響領域を考慮した処分坑道周辺での不飽和領域の発生および埋め戻し後の再冠水メカニズムに関する基礎的研究として、平成10年度から平成12年度の3カ年で岡山大学環境理工学部と共同研究を実施した。

研究では、核燃料サイクル開発機構が所有する多孔質媒体不飽和水理試験設備および岡山大学が所有する瞬時水分計測装置、FDR誘電率水分計を用い、不飽和領域の再現、計測を行った。

具体的には、坑道周辺に発生する不飽和のメカニズムに関する室内モデル試験の実施、モデル材料の飽和-不飽和水理特性の把握、不飽和水理特性の計測手法の適用性の確認、不飽和水理解析の実施により、基礎データを取得することができた。

* 岡山大学

** 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

*** 検査開発株式会社

Study on the mechanism of the unsaturated zone in rock mass
(Document Prepared by Other Organization, Based on the Contract)

Makoto NISHIGAKI*, Mitsuru KOMATSU*, Yosuke AKAGI*,
Yutaka SUGITA** and Hirohito KIKUCHI***

Abstract

In geological disposal of high-level radioactive waste (HLW), unsaturated zone will be expected to appear around the disposal tunnel due to the construction of the tunnel. Cooperative research between JNC and Okayama University has done to understand the mechanism of the unsaturation process and the re-saturation process around the tunnel from FY1998 to FY2000.

Characterizing Laboratory test on Unsaturated zone E (CLUE) of JNC was used to simulate the unsaturation process, and the piezometer and frequency domain reflectometry (FDR) of Okayama University were used to measure the unsaturation behavior of the CLUE.

During this study, the laboratory experiments were performed and the saturation-unsaturation hydraulic characteristics of the material were obtained. The applicability of the FDR to measure the unsaturation condition was examined. Unsaturation hydraulic analysis technique was also applied.

These studies supplied the fundamental data on unsaturation processes around the tunnel.

* Okayama University

** Barrier performance group, Waste isolation research division,
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works

*** Inspection Development Corporation

目 次

1.	はじめに	1
1.1	本研究の目的	1
1.2	研究の進め方	2
1.3	共同研究の概要	3
2.	FDR 水分量計測装置(Frequency Domain Reflectometry)の適用性の検討	5
2.1	概要	5
2.2	誘電率計測法の測定原理および FDR 装置	5
2.2.1	地盤の誘電特性	5
2.2.2	誘電率の測定原理(電磁波の伝送と反射)	8
2.2.3	FDR 法測定原理	10
2.2.4	FDR 測定装置	13
2.2.5	計測装置の誤差要因の検討	14
2.3	FDR 測定方法	17
2.3.1	プローブ(電極)の校正	17
2.3.2	各試料に対する校正曲線の作成	18
2.3.3	各依存性に対する適用性の検討	21
2.4	粘土試料に対する適用性の検討	26
2.5	岩盤の水分量の測定法	29
3.	媒体の基礎物性の把握	35
3.1	ガラスビーズの基本物性	35
3.1.1	試料の種類	35
3.1.2	水分特性曲線	35
3.1.3	飽和透水係数	39
3.1.4	不飽和透水係数	40
3.2	岩石の基本物性	47
3.2.1	試料の種類	47
3.2.2	水分特性曲線	47
3.2.3	飽和透水係数	50
3.2.4	不飽和透水係数	51

4. 岩石内への間隙水圧計の設置方法に関する検討	56
4.1 概要	56
4.2 間隙水圧計設置方法	56
4.3 間隙水圧計設置手順	57
4.4 試験手順	60
4.5 試験結果	60
5. 鉛直 2 次元水槽における不飽和領域の形成試験（水槽 A）	63
5.1 概説	63
5.2 試験装置	63
5.3 試験ケース	64
5.4 試験結果	65
5.4.1 予備試験 (EX1)	65
5.4.2 水位固定条件 (EX2)	69
5.4.3 不透水条件 (EX3) ①内側ビーズ 1.0mm	75
5.4.4 不透水条件 (EX3) ②内側ビーズ 0.8mm	82
6. 岩石モデルによる円形坑道周辺での不飽和領域の形成試験（水槽 B）	89
6.1 概要	89
6.2 供試料	89
6.3 試験装置	90
6.4 試験結果	92
7. 大型水槽を用いた不飽和水理試験の解析評価	100
8. おわりに	128
参考文献	129

表 目 次

表-1.1	役割分担	4
表-1.2	研究工程	4
表-2.1	各材質の誘電率測定結果 (20°C)	18
表-3.1	VG パラメータの同定結果	39
表-3.2	VG パラメータの同定結果	48
表-3.3	透水試験結果	50
表-3.4	白浜砂岩	52
表-3.5	試料の飽和体積含水率 θ_s と計測された蒸発量	52
表-3.6	測定および同定された各岩石の物性値	55
表-5.1	試験ケース	64
表-6.1	間隙水圧計設置位置一覧	94
表-6.2	体積含水率の検証	99
表-7.1	解析条件	101
表-7.2	出力ポイントの座標	104
表-7.3	飽和透水係数	104
表-7.4	不飽和水分特性	104

目 次

図-1.1	不飽和領域の発生模式図	1
図-2.1	電送線の境界模式図	8
図-2.2	FDR 測定システム構成概略図	10
図-2.3	FDR スペクトル図(測定物質:水)	12
図-2.4	FDR 測定装置	13
図-2.5	FDR プローブ(電極図)	13
図-2.6	ケーブル長による測定誤差	15
図-2.7	ケーブル長の違いによる合成干渉波ピーク値の比較	15
図-2.8	ケーブル周辺環境の影響	16
図-2.9	システム拡張(20ch オートスイッチングユニット)の影響	17
図-2.10	各材質の測定スペクトル	19
図-2.11	各種土質材料に対する FDR による誘電率測定結果	20
図-2.12	FDR による各種試験に対する校正曲線	20
図-2.13	FDR によるガラスビーズに対する誘電率の測定結果	22
図-2.14	FDR によるガラスビーズに対する校正曲線	22
図-2.15	温度(水温)と誘電率の関係	23
図-2.16	不飽和土における温度と誘電率の関係	23
図-2.17	水溶液の塩分濃度と各ピークの電圧の関係	25
図-2.18	水溶液の塩分濃度と誘電率の関係	25
図-2.19	土粒子密度と誘電率の関係	25
図-2.20	通常電極によるベントナイト混合土のスペクトル	26
図-2.21	電極コーティングによるベントナイト混合土の測定スペクトル	26
図-2.22	電極コーティングによるベントナイト混合土測定結果	28
図-2.23	電極コーティングによるベントナイト混合土 キャリブレーション結果	28
図-2.24	水分量調節装置(加圧板装置)	30
図-2.25	水分量調節装置(遠心装置)	30
図-2.26	計測センサーの設置概要図:(1) 大谷凝灰岩	30
図-2.27	計測センサーの設置概要図:(2) 白浜砂岩・船生凝灰岩	31
図-2.28	岩石供試体の水分特性曲線:(1) 大谷凝灰岩	32

図-2.29	誘電率測定結果：(1) 大谷凝灰岩	32
図-2.30	砂岩に対する誘電率の測定結果	33
図-2.31	各岩石に対する誘電率の測定結果	34
図-2.32	FDR による校正結果	34
図-3.1	土柱法水分特性装置概略図	37
図-3.2	加圧板法水分特性測定装置概略図	37
図-3.3	吸引法(砂柱法)水分特性測定装置概略図	37
図-3.4	各試料に対する水分特性曲線	38
図-3.5	粒径とVGパラメータの関係	39
図-3.6	飽和透水試験結果	39
図-3.7	鉛直排水実験の概略図	40
図-3.8	各計測点における体積含水率の経時変化	40
図-3.9	体積含水率の分布	40
図-3.10	各計測点における圧力水頭の分布	40
図-3.11	圧力水頭の分布	40
図-3.12	FDR を用いた瞬時水分計測法(排水実験)装置概略図	43
図-3.13	計測座標	43
図-3.14	体積含水率の経時変化	45
図-3.15	圧力水頭の経時変化	45
図-3.16	体積含水率の分布	45
図-3.17	圧力水頭の分布	45
図-3.18	不飽和透水係数算定結果	46
図-3.19	瞬時水分計測法と土柱法の水分特性曲線の比較	46
図-3.20	VGモデルによるフィッティング結果	46
図-3.21	VGモデルによる不飽和透水係数の算定結果	47
図-3.22	瞬時水分計測法の結果を考慮して設定した不飽和透水係	47
図-3.23	試験に供した試料	48
図-3.24	WESCOR 社製サンプルチャンバーC-52-SF	49
図-3.25	ナノボルトメータ	49
図-3.26	各試料に対する水分特性曲線およびVG-modelによる同定結果	50
図-3.27	排水量の経時変化	51
図-3.28	不飽和透水係数を得るための試験概略図	52

図-3.29	1次元解析モデル	52
図-3.30	試料No.1の圧力水頭・水分蒸発量累計の経時変化	53
図-3.31	試料No.2の圧力水頭・水分蒸発量累計の経時変化	53
図-3.32	パラメータスタディー結果	54
図-3.33	カーブマッチの結果	54
図-3.34	船生石の不飽和透水係数	55
図-4.1	間隙水圧計設置方法	56
図-4.2	フィルターの設置概要	57
図-4.3	岩石の水槽への設置	59
図-4.4	岩石の飽和	59
図-4.5	岩石内に設置したセンサーによる計測結果	61
図-5.1	鉛直2次元多孔質媒体不飽和水理試験装置(水槽A)概観図	64
図-5.2	試験条件(CLUE水槽A:予備試験EX1-1)	66
図-5.3	センサー配置図(CLUE水槽A:予備試験EX1-1)	67
図-5.4	圧力水頭の経時変化(EX1-1)	68
図-5.5	体積含水率の経時変化(EX1-1)	68
図-5.6	水分特性試験結果との比較(EX1-1)	69
図-5.7	試験条件(CLUE水槽A:EX2)	70
図-5.8	センサー配置図(CLUE水槽A:EX2)	71
図-5.9	圧力水頭の経時変化:外側0.1mm ^径 部分(EX2-3)	73
図-5.10	圧力水頭の経時変化:内側2.0mm ^径 部分(EX2-3)	73
図-5.11	体積含水率の経時変化(EX2-3)	74
図-5.12	試験中の圧力水頭と体積含水率測定値の検討	74
図-5.13	試験条件(CLUE水槽A:EX3)	76
図-5.14	センサー配置図(CLUE水槽A:EX3-1)	77
図-5.15	センサー配置図(CLUE水槽A:EX3-3)	78
図-5.16	間隙水圧の経時変化(EX3-3)	79
図-5.17	間隙水圧の経時変化(EX3-3)	80
図-5.18	体積含水率の経時変化(EX3-1)	80
図-5.19	間隙水圧の経時変化(EX3-1)	81
図-5.20	排水量の経時変化(EX3-1, EX3-3)	81

図-5.21	センサー配置図 (CLUE 水槽 A:EX3-2)	83
図-5.22	センサー配置図 (CLUE 水槽 A:EX3-4)	84
図-5.23	間隙水圧の経時変化 (EX3-4)	85
図-5.24	間隙水圧の経時変化 (EX3-4)	86
図-5.25	体積含水率の経時変化 (EX3-2)	86
図-5.26	間隙水圧の経時変化 (EX3-2)	87
図-5.27	水分特性曲線の比較	87
図-5.28	排水量の経時変化 (EX3-2, EX3-4)	88
図-6.1	試験装置図	90
図-6.2	計測用センサー配置図	91
図-6.3	間隙水圧計の経時変化	92
図-6.4	ベンチレーションによる排水速度の経時変化	93
図-6.5	間隙水圧の経時変化	94
図-6.6	体積含水率の経時変化	96
図-6.7	van Genuchten の検証	97
図-6.8	体積含水率の変化	99
図-6.9	試料採取手順	99
図-7.1	解析モデルおよび出力ポイント	102
図-7.2	解析メッシュ図	103
図-7.3	水分特性曲線	105
図-7.4	不飽和透水係数	105
図-7.5	case1-1 の圧力水頭経時変化	107
図-7.6	case1-1 の体積含水率経時変化	108
図-7.7	case1-2 の圧力水頭経時変化	109
図-7.8	case1-2 の体積含水率経時変化	110
図-7.9	case1-3 の圧力水頭経時変化	111
図-7.10	case1-3 の体積含水率経時変化	112
図-7.11	case1-4 の圧力水頭経時変化	113
図-7.12	case1-4 の体積含水率経時変化	114
図-7.13	case2 の圧力水頭経時変化	115
図-7.14	case2 の体積含水率経時変化	116

図-7.15	case3 の圧力水頭経時変化	117
図-7.16	case3 の体積含水率経時変化	118
図-7.17	case4 の圧力水頭経時変化	119
図-7.18	case4 の体積含水率経時変化	120
図-7.19	case1-1, case1-2, case1-3, case1-4, case2 の湧水量の 経時変化	121
図-7.20	case3, case4 の湧水量の体経時変化	121
図-7.21	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-1	122
図-7.22	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-2	122
図-7.23	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-3	123
図-7.24	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-4	123
図-7.25	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-5	124
図-7.26	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-6	124
図-7.27	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-7	125
図-7.28	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-8	125
図-7.29	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-9	126
図-7.30	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-10	126
図-7.31	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-11	127
図-7.32	case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-12	127

写 真 目 次

写真-4.1	フィルター設置の様子	58
写真-4.2	エポキシ系接着剤の塗布	58
写真-4.3	岩石を水槽内へ設置した様子	60
写真-5.1	不飽和領域発生状況 (EX2)	72
写真-5.2	不飽和領域発生状況 (EX3-1)	75
写真-5.3	不飽和領域発生状況 (EX3-2)	85
写真-6.1	試験装置	90
写真-6.2	岩石供試体のセンサー取付け孔の加工	91

1. はじめに

本研究は、高レベル放射性廃棄物の地層処分において処分坑道の掘削に伴い生じる掘削影響領域を考慮した処分坑道周辺での不飽和領域の発生メカニズムに関する基礎的研究として、平成10年度から平成12年度の3カ年で岡山大学環境理工学部との共同研究として核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）が実施した先行基礎研究である。

1.1 本研究の目的

処分坑道の周辺には坑道自身の掘削や処分作業時の排水・ベンチレーションの影響で不飽和領域が発生すると考えられる（図-1.1参照）。不飽和領域の形成により、坑道周辺の岩盤内に空気が侵入するほか、液相中に侵入した空気（酸素）は地下水中へ溶解し、酸化還元電位に影響を与える。また、周辺岩盤中の鉱物が酸化され、収着性も変化すると考えられる。

これらの現象の中でも特に本研究においては、オーバーパックの腐食深さの評価に大きな影響を与えると考えられる岩盤および地下水に蓄積された酸素量および埋め戻し材の再冠水時間を評価するために、気相／液相中の流れおよび2相の界面の動きをモデル化することを目的とする。具体的には、このような処分坑道周辺に生じる不飽和領域の進展メカニズムを多孔質媒体不飽和水理試験装置を用いて実験的に明らかにし、モデルの構築／検証を行う。

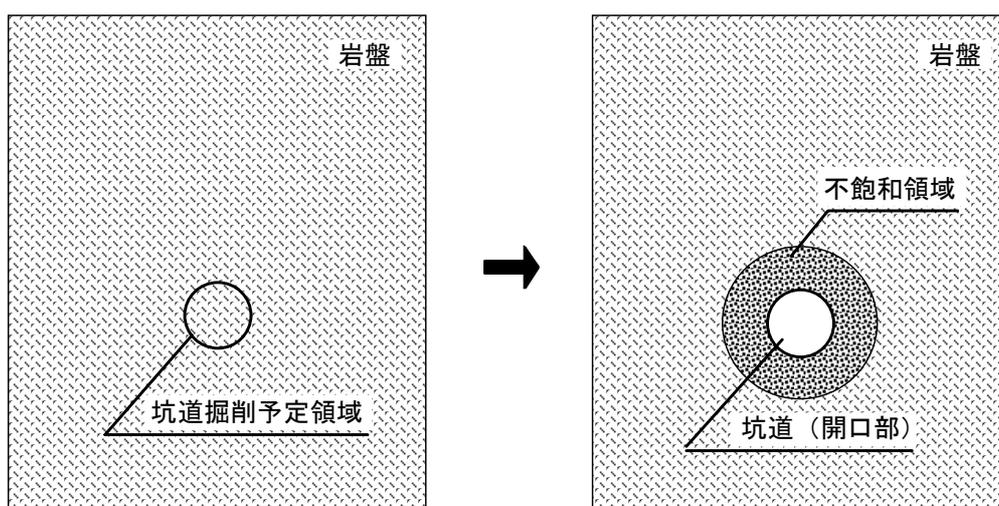


図-1.1 不飽和領域の発生模式図

1.2 研究の進め方

不飽和領域の広がりを支配する主な要因としては、以下の事が挙げられる。

1. 境界条件：坑道からの排水量，坑道周囲の水位・流量条件
2. 透水係数：坑道へのフラックスに影響する部分の透水係数，ゆるみ域に代表される坑道周辺の透水係数，亀裂などによる透水係数の不均質性

これらの要因を把握しながら研究を進めるため，本研究では以下に示すステップで段階的に進めることとした。

ステップ1：上記支配要因の不飽和領域の広がりに与える影響について現象の再現を試み，不飽和領域の広がりに特に影響の大きい支配要因を抽出する。

ステップ2：それらの現象を適切に表現する既存モデルの適用性の確認やモデルの開発，室内試験レベルでのモデルの検証を行う。

不飽和現象の模擬試験は，鉛直2次元水槽（水槽A）および岩石を用いた加圧条件下の試験（水槽B）を用いて行う。

(1) 鉛直2次元水槽による不飽和現象の模擬試験（水槽A）

坑道周辺の不飽和領域の形成・広がりは主に次の2つに支配される。

- ① 坑道周辺から供給される水量と坑道への排水量（境界条件）
- ② 坑道周辺の透水係数

このため，不飽和領域を2次元水槽において種々の条件を制御して，不飽和領域の形成条件を把握し，広がる状況を観察する。現象の模擬試験は主にガラスビーズを用いた試験を主体に実施する。試験内容は大きく以下の4項目に区分される。

1) FDR法 (Frequency Domain Refractometry)の適用性の検討

含水比測定方法としてFDR法の適用性を種々の材質（ガラスビーズ，土質，岩石）に対して検討する。

2) ガラスビーズ等媒体の基礎物性の計測

- ① 水分特性曲線（土柱法，加圧板法），間隙率（定容積に対する充填質量より算定）
- ② 飽和透水係数（定水位透水係数）
- ③ 不飽和透水係数（瞬時水分計測法，マルチステップ法）

3) 鉛直2次元水槽における円形坑道周辺での不飽和領域の形成試験

粒径0.1mmの最も粒径の細かいガラスビーズを用いて均質場を設定し、不飽和領域の形成試験を実施する。均質場にて不飽和領域が生じない場合は、モデル坑道の周辺に粒径の大きいガラスビーズを設置し、不均質場における不飽和領域の形成試験を実施する。

4) 不飽和領域形成状況の計測・観察，形成条件の把握

不飽和領域の形成条件下で，FDR，間隙水圧計等により計測を実施する。さらにCCDビデオで不飽和領域の発達状況を記録する。

(2) 岩石を用いた加圧条件下の試験（水槽B）

1) 均質多孔質岩石の基礎物性の計測

- ① 水分特性曲線，間隙率
- ② 飽和透水係数

2) 加圧条件での坑道部大気解放に伴う不飽和領域の形成（均質多孔質岩石）

3) 坑道部ベンチレーションに伴う不飽和領域の形成（均質多孔質岩石）

2)の後，モデル坑道部に比較的乾燥した空気を送り，不飽和領域の形成状況を把握する。また，ベンチレーションに伴うモデル坑道部からの排水量，モデル坑道部周辺の含水比の経時変化を計測する。

実験的に再現された飽和-不飽和現象は不飽和水理解析モデルを用いて解析評価を行う。解析結果を実験値と比較し，適切な境界条件の設定に関して検討を行う。

1.3 共同研究の概要

(1) 実施項目

上記研究の進め方をまとめると，本共同研究の実施項目は以下の4項目となる。

- 1) FDR等を用いての多孔質媒体，岩石内の水分量測定に関する基礎的研究
- 2) 多孔質媒体および岩石を用いた不飽和水理試験
- 3) FDR等による不飽和領域測定に関する検討
- 4) 不飽和発生現象の解析評価

(2) 役割分担

前項の実施項目に対し，表-1.1に示す分担で研究に着手した。

表-1.1 役割分担

項目	サイクル機構	岡山大学
1) FDR 等を用いた測定に関する基礎的研究		○
2) 多孔質媒体および岩石を用いた不飽和水理試験	○	
3) FDR 等による不飽和領域測定に関する検討	○	○
4) 不飽和発生現象の解析評価	○	
5) 報告書作成	○	○

(3) 研究工程

表-1.2 に示す研究工程に従い，研究を実施した。

表-1.2 研究工程

		平成 10 年度		平成 11 年度		平成 12 年度	
		上半期	下半期	上半期	下半期	上半期	下半期
1	FDR 等に関する基礎的研究						
2	多孔質岩体および岩石を用いた不飽和水理試験						
3	FDR 等による不飽和領域測定に関する検討						
4	解析評価						

2. FDR水分量計測装置 (Frequency Domain Reflectometry) の適用性の検討

2.1 概要

従来の土中水分計測法としては中性子やガンマ線を利用したRI (ラジオ・アイソトープ) 法や電気抵抗法等が用いられてきたが、装置が大がかりで、線源の強度の規制や定期的な校正が必要である等の問題がある。一方、近年注目されている誘電率計測法は、高周波(1MHz~1GHz)を用いて地盤の比誘電率を測定して直接体積含水率に変換する技術であり、校正が簡易であることや測定装置がコンパクトである等の利点がある。

この誘電率計測法には、TDR法 (Time Domain Reflectometry)¹⁾、FDR法 (Frequency Domain Reflectometry)²⁾、ADR法 (Amplitude Domain Reflectometry)³⁾ 等があるが、センサーであるプローブの構造に様々な改良を要することや、高水分領域での測定精度の低下、あるいは、測定範囲が極端に狭いため地盤の局所的な水分量しか得られない等の問題があり、これらの改善のため、現在様々な研究がなされている。しかし、地盤内の水分量の変化をモニタリングする方法としては非常に簡便な方法である。

本研究では、これら誘電率計測法のうち周波数領域で比誘電率を解析するFDR法を採用し、その適用性の検討を行った。FDR法は、マイクロ波のアンテナ調整用の測定機器類を利用するものであり、1本の電極で高精度の測定が可能であり、正確な測定座標が得られることが特徴である。

2.2 誘電率計測法の測定原理およびFDR装置

2.2.1 地盤の誘電特性⁴⁾

誘電体(dielectrics)とは、物理的には電導電子を持たない絶縁体的電子構造を持ち、電界を加えると誘電分極を発生する固体、液体、気体物質の総称である。誘電体は電気・電子工学分野での材料として導体、半導体、磁性体などと並んで重要な地位を占め、主として誘電率が大きいことを利用したコンデンサ材料と絶縁抵抗の高いことを利用した電気絶縁材料(insulating materials)として用いられる。

原子を電界中に置くと、正電荷(原子核)の中心と負電荷(電子)の中心とが相対的にずれて電子分極による双極子能率ができる。誘電体の誘電率の大き

さはその分極の大きさによって定まる。分極の形成に時間的遅れがある場合には、交番電界のもとでは分極の位相遅れとなり、誘電損といわれる電力損失を生じる。つまり、このような損失が生じることから、誘電率は複素数、すなわち複素誘電率として取り扱われる。分極は、誘電体内の原子や分子を構成する正および負電荷が、電界によって相対位置のずれを生じる結果形成されるものであるから、分極機構は物質の分子構造や分子運動などと深い関係がある。すなわち、誘電率は誘電体の巨視的性質、複素誘電率は微視的な原子や電子のふるまいを反映している。したがって、誘電率や複素誘電率などの誘電的性質が電界の強さ、周波数、温度などによってどのように変化するかを知ることは、工学上きわめて大切であるばかりでなく、物性の研究にも役立つところが大きい。

誘電率とは、単位電界のもとで単位体積中に蓄えられる静電エネルギーの大きさを示す量である。通常、誘電率計測法で測定される誘電率は、比誘電率 (ϵ_r) のことであり、次式のように誘電体の誘電率 (ϵ) と真空の誘電率 ($\epsilon_0=8.855 \times 10^{-12}$ F/m) との比で表される。

$$\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0 \quad (2.1)$$

誘電体の比誘電率は常に1よりも大きい。

物質の比誘電率は空間に関連するある電場の影響における分極の潜在能力である。また、物質の複素誘電率 ϵ^* は次式で表される。

$$\epsilon^* = \epsilon' + j(\epsilon'' + \sigma_{dc} / \omega \epsilon_0) \quad (2.2)$$

ここで、 ϵ' 、 ϵ'' : ϵ^* の実数部、虚数部

σ_{dc} : 直流導電率

ω : 角周波数 (rad/sec)

ϵ_0 : 真空中の誘電率

式 (2.2) 中の第1項、第2項はそれぞれ物質中に伝播する電磁波の誘電と導電損失である。この損失角 δ をタンジェントすると、

$$\tan \delta = \frac{\epsilon'' + \sigma_{dc} / \omega \epsilon_0}{\epsilon'} \quad (2.3)$$

となる。

土は三相 (固相 : 土粒子、液相 : 水、気相 : 空気) より構成されており、塩類が少ないものは導電率 σ の値がほとんど0となり、誘電体であると考えられ

この3相の構成要素の中で、土粒子、空気の誘電率（それぞれ4, 1）と比較して、双極子分子である水は80.4（20℃）⁵⁾というきわめて大きな誘電率を持つ。したがって、土壌全体としての誘電率は水分量に大きく左右されることになる。言い換えれば、誘電率を測定することで水分量を求めることができると考えられる。ここで、水の誘電率が特に大きな理由は、以下の要因に基づいている。

① 常温で液体状態となる物質の分子としては例外的に小さい。

② 水分子構造は非対称をとり、電気的には全体として中性であるが、プラスとマイナスの重心がずれ、双極子モーメントを持っている（電気双極子モーメントが1.84D、永久性）。

この二重性を有する有極性水分子は一定の方向の電場が与えられると、突然、電場方向に配向されることになる。電場によるその作用に対して、本来は回転運動と熱運動によって無秩序的な向きを示すが、この場合、一定の配向になるため、これが分極として表れるのである（水分子の分極率は平均分極率として $1.444 \times 10^{-24} \text{ cm}^3$ ）。そして水分子の場合は永久双極子モーメントの大きさと単位体積中の分子数の多さだけでなく互いに近傍した位置にある分子も互いに双極子モーメントを誘起し合う。このような幾つかの特性によって巨視的な電気分極として表面化し、それが水の誘電率 ϵ を大きくするのである。

水の誘電率 ϵ については、温度の3次式として次式で表されている。

$$\epsilon = 88.15 - 0.414t + 0.131 \times 10^{-2}t^2 - 0.046 \times 10^{-4}t^3 \quad (2.4)$$

ここで、 t ：測定時の水の温度(°C)である。

地盤の誘電率は通常、砂よりも粘土、また含水率と塩分濃度の増加とともに損失が大きくなる。そして、水の ϵ^* と $\tan \delta$ も同波数の反射強度によって変化する。しかしながら、1MHz-1GHzの範囲内の同波数では、 ϵ' がほぼ一定で、 $\tan \delta$ も非常に小さい（ $\delta \rightarrow 0$ ）と言われている。すなわち、この間の電磁波を用いて地盤の誘電率を測定すると、その誘電率の変化値は地盤の体積含水率だけと関係があり、電磁波の発射強度による誘電率の変化がほぼ無視できるようになる。つまり、誘電損失の小さい場合には、複素誘電率は誘電率実数部として処理できるから、物質の比誘電率 ϵ_r を誘電率実数部 ϵ' として差し支えない。

$$\epsilon_r = \epsilon' \quad (2.5)$$

電磁波による土壌水分測定の実用化はToppら(1980)¹⁾によって確立された。Toppらは1MHzから1GHzの範囲内の周波数における土壌の誘電率が土壌の性質、

構造と多少の塩分含量にあまり影響されなく、主に土壌の体積含水率 θ に依存されると指摘した。そして、TDRによる何種類かの土壌測定結果の精度は $\pm 2.5\%$ にも達している。

2.2.2 誘電率の測定原理（電磁波の伝播と反射）

電磁気学的に、ある複素誘電率 ε^* を持つ媒体中に置かれた導体を伝わる電気現象の速度は次のようになる。

$$v = c / \left\{ \varepsilon' (1 + \tan^2 \delta) \right\}^{1/2} \quad (2.6)$$

ここで、 $\tan \delta$ は式 (2.3) で与えられる。また、 c は真空中の光の速さ ($3.0 \times 10^8 \text{m/s}$)、 ε' は複素誘電率実数部である。ここで、1MHz-1GHzの範囲内の同波数では、 ε' がほぼ一定で、 $\tan \delta$ も非常に小さい ($\delta \rightarrow 0$) ことを考慮すると、式(2.6)は次式のように表される。

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (2.7)$$

したがって、媒体中に置かれた導体を伝わる電気現象の速度はその媒体の持つ誘電率によって決定されることが分かる。また、電送線の特徴インピーダンスは誘電率から求まる値である。

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \quad (2.8)$$

次に2つの異なる特徴インピーダンスを持つ電送線が接続されている場合の境界における電気現象について考える。

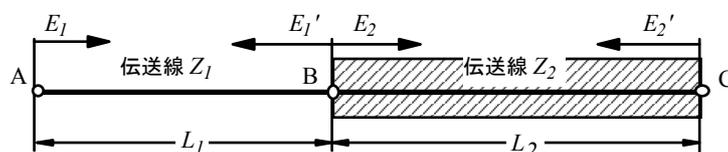


図- 2.1 電送線の境界模式図

2つの電送線をつないだ時、その接続条件として、この境界の前後で電流及び電圧が等しくならなければならない。この条件を満たすには、反射波が発生すると考えればよい。この時、2つの電送線の特徴インピーダンスをそれぞれ Z_1 ,

Z_2 とすると電圧の反射係数 α は次のように表される。

$$\alpha = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (2.9)$$

この時、透過係数は $(1 - \alpha)$ となる。

実際に、図-2.1中のAB間とBC間は信号供給ケーブルと地盤中に挿入する電極の部分に相当する。ここで、AB間は同軸ケーブルであるから、その中の電磁波の伝播速度は真空中と同じであると考えられる。BC間の電極における電磁波の伝播速度は上述のように周辺の土壌の含水率によって変わる。つまり、電磁波の入、反射波は集中的に土壌の境界面のB点と電極末端のC点で発生する。

FDRの測定は、信号供給ケーブルと測定電極のインピーダンスの差により電極の入り口での反射波と電極への侵入波のエネルギーの振り分けが決まる（FDRによる土壌誘電率の測定は、入射波と反射波の干渉波によって行う）。反射係数と透過係数のいずれかにも極端に大きくあるいは小さくなることも測定結果に悪い影響を及ぼす。

このような場合としては、以下の3つのケースが考えられる。

$$\textcircled{1} \quad Z_1 = Z_2 \quad , \quad \textcircled{2} \quad Z_1 \gg Z_2 \quad , \quad \textcircled{3} \quad Z_1 \ll Z_2$$

$$\textcircled{1} \quad Z_1 = Z_2$$

この場合、電圧の反射率（ α ）は0になるので、電極接続部分での反射波は発生せず、すべてのエネルギーは土壌挿入電極上で消費されることになり、合成干渉波は発生しない。

$$\textcircled{2} \quad Z_1 \gg Z_2$$

ほぼすべてのエネルギーが測定電極に侵入し、一次反射波が生じない。

$$\textcircled{3} \quad Z_1 \ll Z_2$$

電圧の反射率（ α ）は1となり、すべてのエネルギーが電極接続部分で反射してしまい、測定電極に信号が侵入しないことになる。この場合も反射波が生じない。

つまり、干渉波が生じるための条件は、信号供給ケーブルのインピーダンスと電極部分のインピーダンスが適度に異なっていることが必要である。FDRシステムでは、信号供給系とスペクトル測定系のインピーダンスは 50Ω に固定されている。したがって、電極部分のインピーダンスが 50Ω あるいはその他から著しく外れる場合には、FDRによる測定は困難である。

2.2.3 FDR法測定原理

物質内の電磁波の伝播速度はその物質の比誘電率と次のような関係がある。

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2.10)$$

ここで、 ϵ : 物質の比誘電率

c : 比誘電率 ϵ_r の物質内の電磁波の伝播速度 (m/s)

c_0 : 真空中の光の速度 (3×10^8 m/s)⁵⁾

土粒子を構成する鉱物粒子の比誘電率は5から9程度で乾燥した土壌の比誘電率は固相率を考慮すると3から5程度の値をとる。液状水の誘電率は水分子の構造による相極子モーメントのため、他の物質に比べて著しく大きく、約80.4 (20℃) である。したがって、地盤の見かけの誘電率は含水率に大きく左右されると言える。FDR測定システムの概略図を図-2.2に示す。

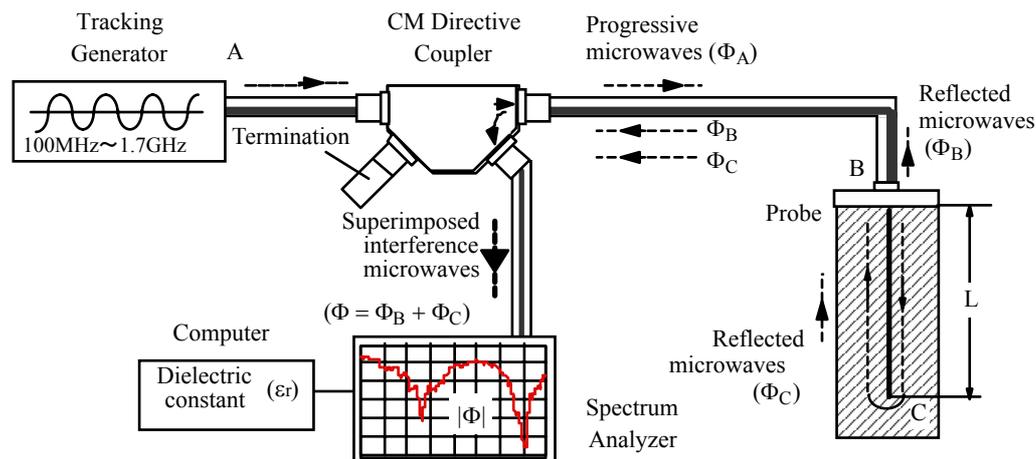


図-2.2 FDR測定システム構成概略図

A点の発信器 (Tracking Generator) から出力された電磁波は電送線に沿ってB点に達する。BC間が異なるインピーダンスを持つ場合、電磁波の一部はB点で反射する (反射波B)。B点を通過した電磁波はC点に達し、ここで放射による損失がなければ) 同じ位相で完全反射して戻ってくる (反射波C)。反射波Cは反射波Bと合成され方向性結合器を経てD点の受信器 (Spectrum Analyzer) で観測される。

この時、入力波は広帯域の電磁波であるから、反射波の電圧も広帯域の周波数に対して測定される。この反射波の電圧はB点における反射と屈折の割合と、反射波Bと反射波Cの位相のズレによって干渉が起こっているため、それぞれの周波数に対して異なる電圧を示すことになる。この波形は周期的にピークが現れ、その周期はBC間の電磁波の速さ（BC間の誘電率）によって異なる。したがって、このピーク間隔を測定することで誘電率が測定できるという方法である。

入力端での反射波Bと試料中ロッド先端での反射波Cの時間遅れ t は、試料内の電磁波の伝播速度 c を用いて次式のように表される。

$$t = \frac{2L}{c} \quad (2.11)$$

ここで、 L ：ロッドの長さ (cm)

今、信号の角周波数を ω とし、同軸ケーブルとロッドの結合部分の反射波を Φ_A 、ロッド端部からの反射波が同軸ケーブルに返ってきた成分を Φ_B とすると、 Φ_B は Φ_A より、ロッドを信号が往復するのに必要な時間 t だけ位相が遅れるから、それぞれ次式のように表される。

$$\Phi_A = A \cdot \exp(j\omega\tau) \quad (2.12)$$

$$\Phi_B = B \cdot \exp(j\omega\tau - t) \quad (2.13)$$

したがって、両者の合成波は以下のように表される。

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_B = A \cdot \exp(j\omega\tau) + B \cdot \exp(j\omega\tau - t) \quad (2.14)$$

測定される電圧は Φ の絶対値に比例するから、 $|\Phi|$ を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} |\Phi| &= A \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{B}{A}\right)^2 + 2\left(\frac{B}{A}\right) \cdot \operatorname{Re}[\exp(-j\omega t)] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= A \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{B}{A}\right)^2 + 2\left(\frac{B}{A}\right) \cdot \cos(-j\omega t) \right\} \end{aligned} \quad (2.15)$$

信号の角周波数を普通の周波数で表すと、両者は次のような関数で結ばれる。

$$\omega = 2\pi f \quad (2.16)$$

同軸ケーブル内の反射波の測定値は $|\Phi|$ で表されるから、式(2.15)で示すように、2つの反射波の干渉の結果、反射波のスペクトルは一定の周期間隔で山と谷が現れることになる。山と山、あるいは谷と谷の周期を Δf とおくと、

$$2\pi\Delta f \cdot t = 2\pi \quad \therefore t = \frac{1}{\Delta f} \quad (2.17)$$

これと式(2.11)より,

$$\Delta f = \frac{C}{2L} \quad (2.18)$$

さらに式(2.10)より,

$$\varepsilon = \left(\frac{C_0}{2L \cdot \Delta f} \right)^2 \quad (2.19)$$

ここで, ε : 物質の比誘電率

c_0 : 真空中の光の速さ ($c_0 = 3.0 \times 10^{10}$) (cm/sec)

L : 電極ロッドの長さ (cm)

Δf : 反射波のスペクトルにおけるピーク間隔の周期 (GHz)

したがって, 既知長の電極ロッドを用いて, 反射波のスペクトルにおけるピーク間隔を測定することで, 式(2.19)式より試料の見かけの比誘電率 ε が求まる。

図-2.3にスペクトラムアナライザの出力結果の例を示す。ここで, 測定の対象となるピークは f_1 から f_6 までの6点であり, 周波数間隔は Δf_1 から Δf_5 の5個である。したがって, この場合, 式(1.17)の Δf はこの Δf_1 から Δf_6 の平均値となる。

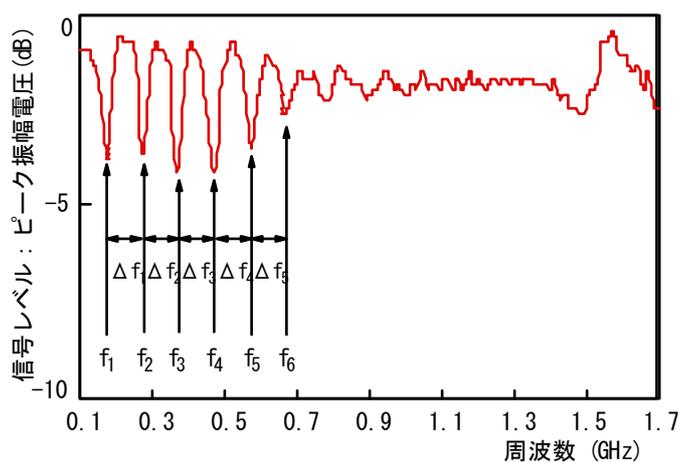


図-2.3 FDRスペクトル図 (測定物質: 水)

2.2.4 FDR測定装置

FDR計測装置は基本的にトラッキングジェネレータ（以下TG）、スペクトラムアナライザ（以下SA）、方向性結合器、電極（アンテナ）と接続装置のプローブから構成されている。これらの機器は同軸型ケーブルで接続されている。図-2.4に本研究で使用したFDR装置の概略図を示す。本システムではSAにTGが内蔵されており、非常にコンパクトである。また、SAをパソコンとGP-IB接続することで、自動的にSAの各パラメータを設定してデータを収集し、誘電率を解析することが可能である。

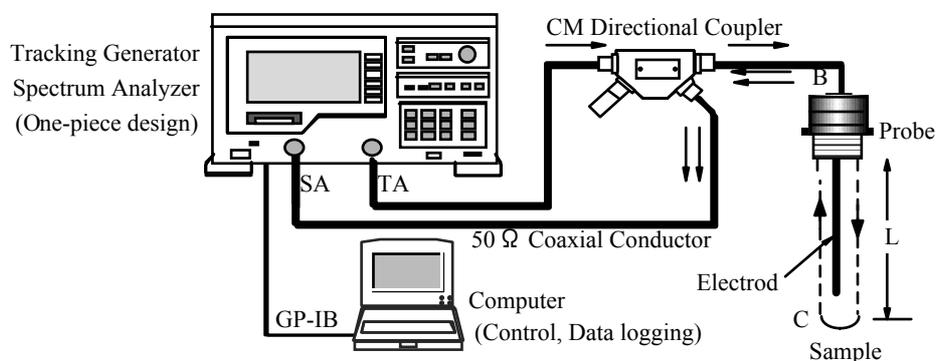


図-2.4 FDR測定装置

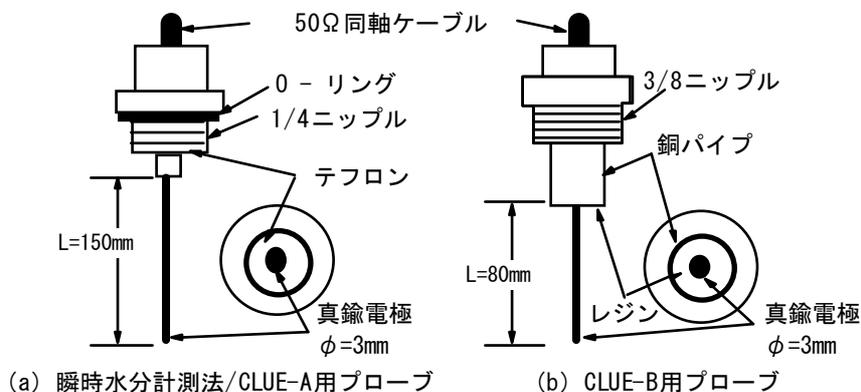


図-2.5 FDRプローブ（電極部）

方向性結合器は、主同軸線路と副同軸線路からなり、主同軸線路に流れる電磁波の振幅レベル(電圧)を前進波と反射波に分けて副同軸線路から取り出すことができる。使用できる周波数範囲は100kHzから1.7GHzであり、終端抵抗器の特性インピーダンスは50Ωである。本器の主同軸線路の一端を空中線または疑

似負荷（試料）に接続し、次に副同軸線路の一端に終端抵抗器（50Ω）を他端に電圧測定器を接続する。FDR計測の場合、反射波を測定するために終端抵抗器を送信器側に、出力測定器を空中線側に接続する。

ロッド（センサープローブ）には、図-2.5の概略図に示すような同軸ケーブルコネクタに電極として真鍮のアンテナをはんだで接続したものをを用いた。コネクタの先端は1/4のニップルで、モールドに取り付けやすく、またO-リングにより水漏れを防止している。また、CLUE装置で使用したプローブはシールド部分を銅パイプで延長して供試体との密着性を良くしたほか、PVC製のニップルを用いることで、磁場の発散を防止した。

2.2.5 計測装置の誤差要因の検討

FDR装置は電極の形状等に特徴を持っており、様々な状況での測定に適用が可能である。しかし、この特徴を活かして室内試験や原位置での計測に適用するためには、次のような幾つかの誤差要因が考えられる。

- (1) ケーブル長の影響
- (2) ケーブル周辺環境の影響
- (3) システム拡張（20chオートスイッチングユニット）の影響
- (4) 測定影響範囲

これらは特に原位置での計測の際に大きく影響する要因である。伝送線の長さ、伝送線の配置環境は、測定点の配置や埋め戻し材料に取り囲まれた状況下に置かれる場合が考えられる。また、複数の測定を同時に行うことは常に要求される点でもある。ここでは、これらの課題に対してそれぞれ検討を行った。

(1) ケーブル長の影響

1mと40mの2種類のケーブルを用いて、水に対する測定を実施した。測定は、TGのノーマライズを施した場合と、しない場合の2通りについて検討した。図-2.6、2.7に測定結果を示す。TGのノーマライズを一切行わない場合、ピーク周波数はほぼ同じ値を示しているが、信号レベルに関しては、ケーブルが長くなるほど、そのレベルの低下が生じている。これは、ケーブルでの信号レベルの損失が現れた結果であると思われる。しかし、TGのノーマライズを行った場合、ケーブルでの損失はほとんどキャンセルされ、ほぼ同じ様なピーク特性を示して

いる。しかし、図-2.7を見ると、ノーマライズを行った場合でも、1mケーブルに比べて40mケーブルでは、得られる波形に細かなノイズが生じているのが良く分かる。更に第一ピークに注目すると、40mケーブルのピークがノイズに埋もれてしまい、1mケーブルの波形から、やや大きめの誤差を生じているのが分かる。しかし、誘電率の大きな物質については、この程度の誤差であれば影響は無いものと思われる。結論として、TGのノーマライズ機能は、発信源から測定プローブまでで生じる損失をキャンセルし、被測定物質の相対的な特性を把握することを可能にするため、この機能を適用すれば、ケーブル長さの影響を取り除くことができる。

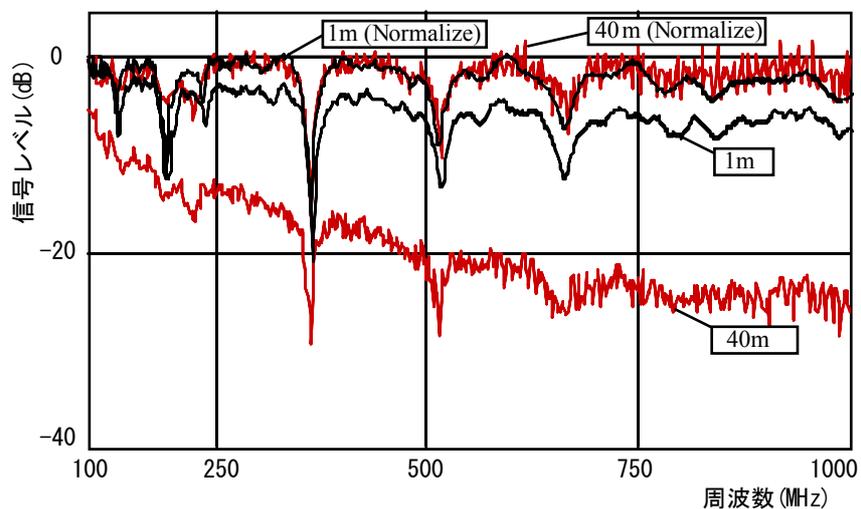


図-2.6 ケーブル長による測定誤差

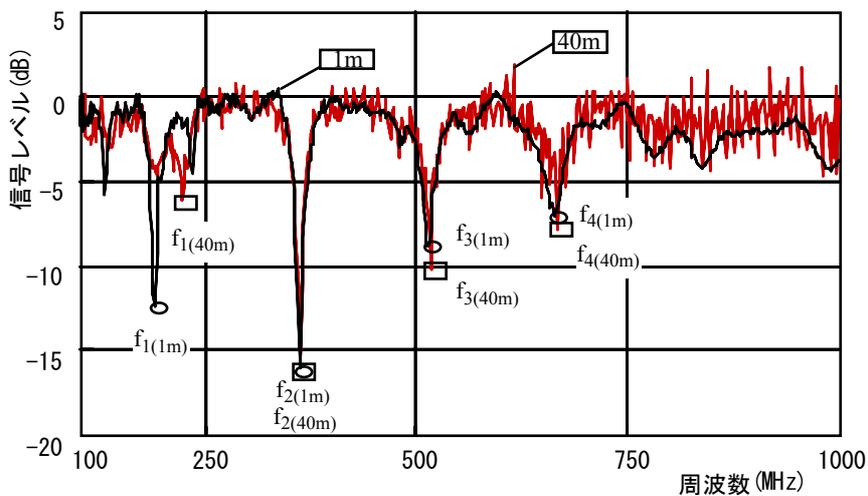


図-2.7 ケーブル長の違いによる合成干渉波ピーク値の比較（ノーマライズ後）

(2) ケーブル周辺環境の影響

FDR計測法を原位置での水分量測定に適用する際に、プローブと連結しているケーブルは、必然的に地盤内への埋め戻しを余儀なくされる。したがって、測定時のケーブル周辺環境の影響の検討が非常に重要になってくる。ここでは、40mのケーブルを用いて、ケーブル全体が水に浸かった状態と、そうでない状態で水の測定を行った。この際、TGのノーマライズはどちらの場合にも施した状態で測定を行った。図-2.8に結果を示す。第一ピークの部分での極微細な相違以外は、水によるケーブル周辺環境の影響はほとんどないことが言える。水は土粒子や空気に比べ、非常に誘電率の大きな物質であるため、結果として、ケーブルを地盤内に埋め戻すことの影響はほとんど無いことが分かる。

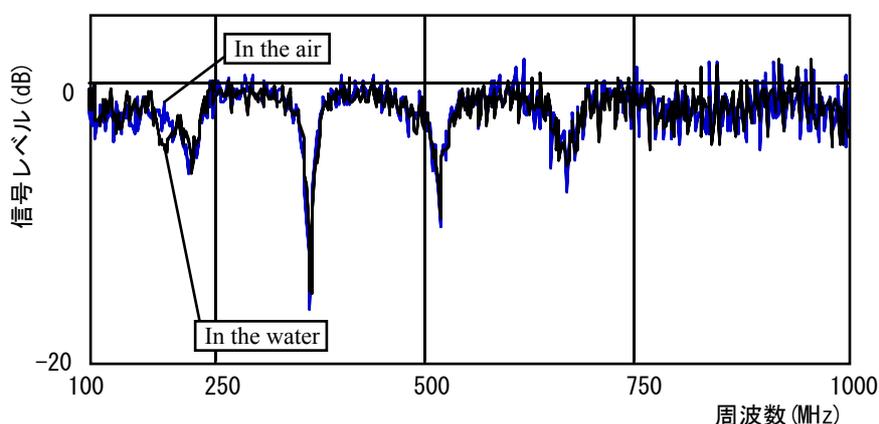


図-2.8 ケーブル周辺環境の影響

(3) システム拡張 (20chオートスイッチングユニット) の影響

原位置での多地点での計測や長期に渡る計測などを行う際に、計測をより簡便かつ短時間に行うためにはマルチプローブシステムが必要となってくる。しかし、測定精度において、マルチプローブシステムの適用の際に用いられるスイッチボックスで生じる反射波の影響が懸念される。ここでは、実際に1mのケーブルを用いて、スイッチボックスを通したマルチプローブシステムを適用した場合と、スイッチボックスを通さずに直接的に測定する場合とで、水に対する測定を行った。結果を図-2.9に示す。測定スペクトルの第一ピークを除いては、スイッチボックスでの反射の影響はほとんど見られない。したがって、第一ピーク以外の値から水分量を求めるか、または取り込んだ波形を比較検討し、

その規則性を把握した上で、ピーク値の補正を行えば、スイッチボックスでの反射の影響は無視できると考えられる。

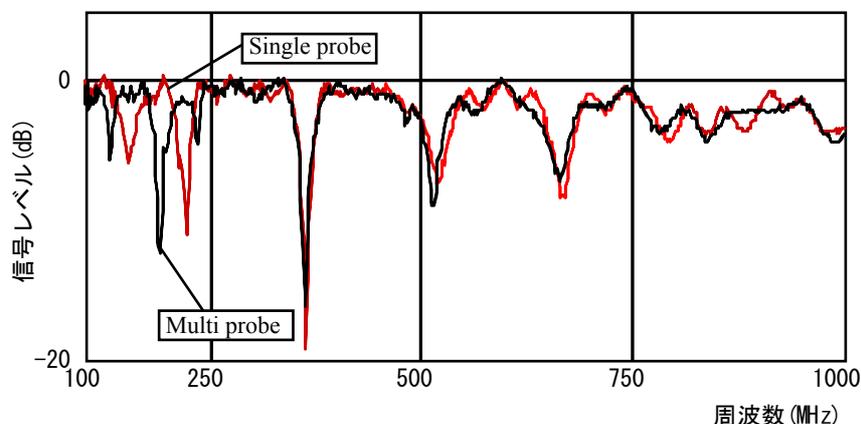


図-2.9 システム拡張（20chオートスイッチングユニット）の影響

(4) 測定影響範囲

センサープローブの測定範囲は周囲、先端方向とも20mm程度であり、その中に誘電率が急変するような境界が存在する場合は測定値が不安定になるため注意が必要である。また、その9割以上を数mm以内のごく近傍で計測している。そのため、電極周囲の土を乱さないことにも注意が必要である。

2.3 FDR測定方法

2.3.1 プローブ（電極）の校正

プローブに用いる電極の幾何学的特性や、電極長さ(L)、および計測機器等の誤差により、測定値にその誤差が混入することが考えられる。そこで純水（誘電率80.4（20℃））、あるいはアセトン（誘電率20.4）から誤差補正係数(k)を用いて誤差を補正する。その換算式を式(2.20)に示す。

$$\varepsilon = k \cdot \varepsilon_c = k \left(\frac{c}{2L \cdot \Delta f_c} \right) \quad (2.20)$$

ここで、 ε_c : 校正用試料の誘電率（純水80.4（20℃）、アセトン20.4）

Δf_c : 校正用試料に対する測定周波数差(Hz)

c : 真空中の光の速さ(=3×10⁸m/sec)

L : 電極長さ(m)

この方法で校正した後、得られた各材質に対する測定スペクトルを図-2.10(a)から(f)、結果を表-2.1にまとめる。なお、校正材料には純水を用いた。ここで、アセトンの測定値は19.1と多少小さく見積もられている。これは純水で校正した場合、高誘電率値での補正となるため、低誘電率値の測定には、誤差の割合が大きくなるためであると考えられる。そこで、測定の対象とする誘電率値が低い場合には、アセトンによる校正が望ましい。

表-2.1 各材質の誘電率測定結果 (20°C)

$\varepsilon = k(C/2L\Delta f)$, $C=3.0 \times 10^{-8}$ m/sec, $L=0.15$ m, $k=0.778$ (水による校正)											
物質	ピーク周波数 (MHz)							平均ピーク 周波数差 Δf (MHz)	標準誤差 $\pm \sigma$	誘電率	
	ピーク周波数間隔 (MHz)									ε	$\sqrt{\varepsilon}$
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7				
水	174	276	369	471	574	666		98.4	5.4	80.4	8.96
空気	622	1508						886.0	0.0	1.0	1.00
		886									
標準砂	500	1050	1610					555.0	7.1	2.5	1.59
		550	560								
アセトン	270	500	705	897	1092	1294	1482	202.0	15.1	19.1	4.37
		230	205	192	195	202	188				
灯油	529	1153						624.0	0.0	2.0	1.41
		624									
ガソリン	494	1169						675.0	0.0	1.7	1.31
		675									

2.3.2 各試料に対する校正曲線の作成

校正曲線についてToppら¹⁾は、同軸型ホルダーによるTDR装置を用いて、砂質ローム、2つの粘土質ローム、粘土を試料とした実験を行っている。その結果、 $\varepsilon - \theta$ 関係は試料の種類や密度の影響を受けないとして次式のような回帰式を求めている。なお、この校正曲線から標準誤差1.3%の精度で θ が推定できるとしている。さらに溶解塩がパルスの伝播速度に影響を与えないことも実験的に確認している。

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \varepsilon - 5.5 \times 10^{-4} \varepsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \varepsilon^3 \quad (2.21)$$

従来、一般にTDR法やFDR法は単一の校正曲線で表され、測定毎のキャリブレーションが必要ないものとされてきたが、ここでは実際に、各種試料に対して誘電率と含水量の関係を測定し、キャリブレーションの必要性について検討する。

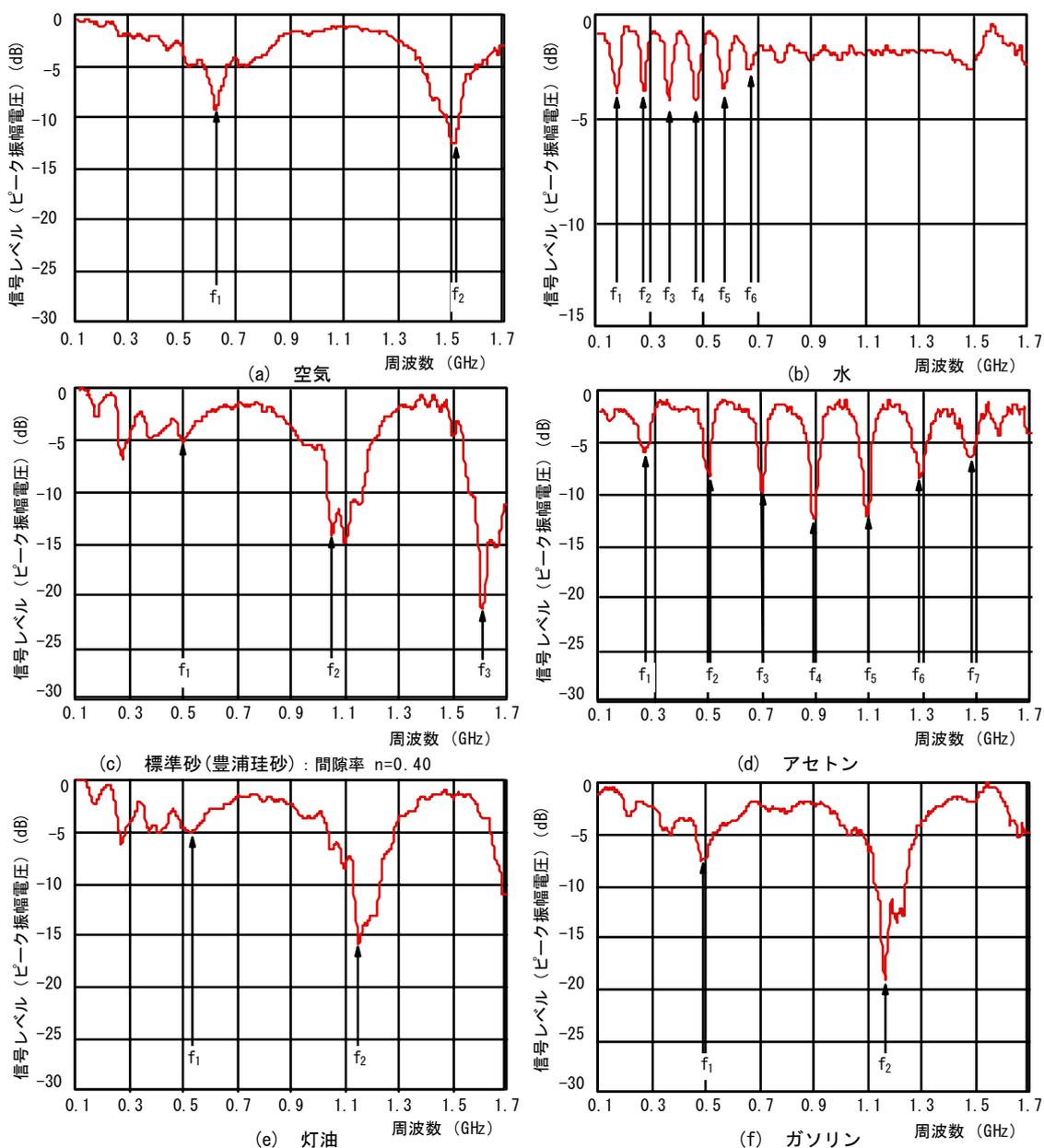


図-2.10 各材質の測定スペクトル

(1) 土質試料

測定方法は乾燥密度を一定にして加える水の量を変化させ、それぞれの試料について気乾状態から飽和状態までの10点の測定を行った。ここで用いた電極は長さ10cmのもの、また測定容器は、内径10cm、高さ12cmの亚克力製モールドである。得られた誘電率と体積含水率の関係を図-2.11に示す。さらに、図-2.12に誘電率の平方根で整理した関係を示す。

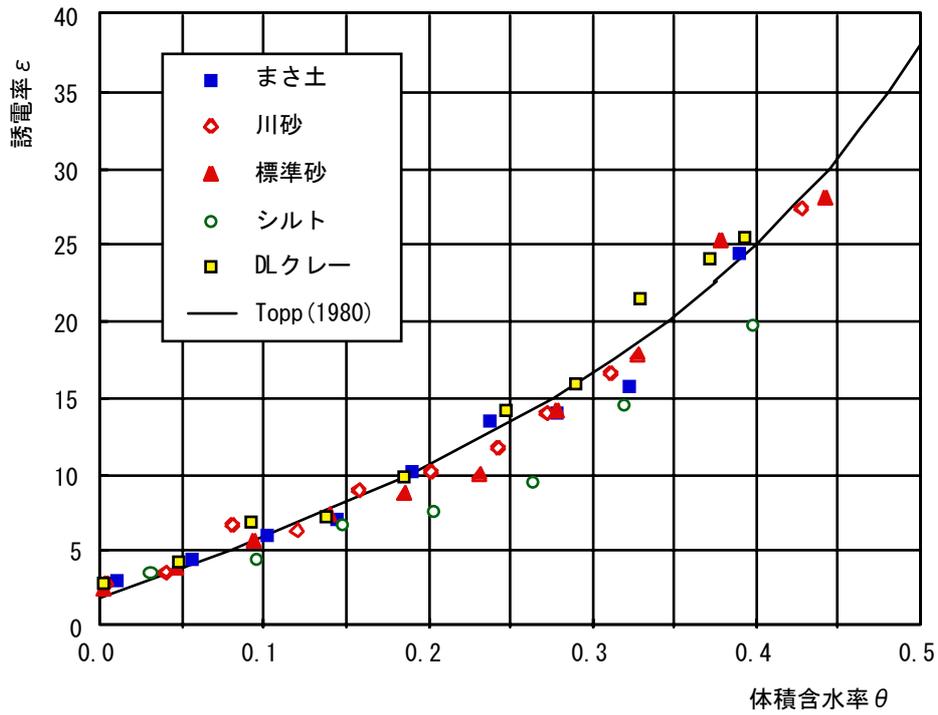


図-2.11 各種土質試料に対するFDRによる誘電率測定結果

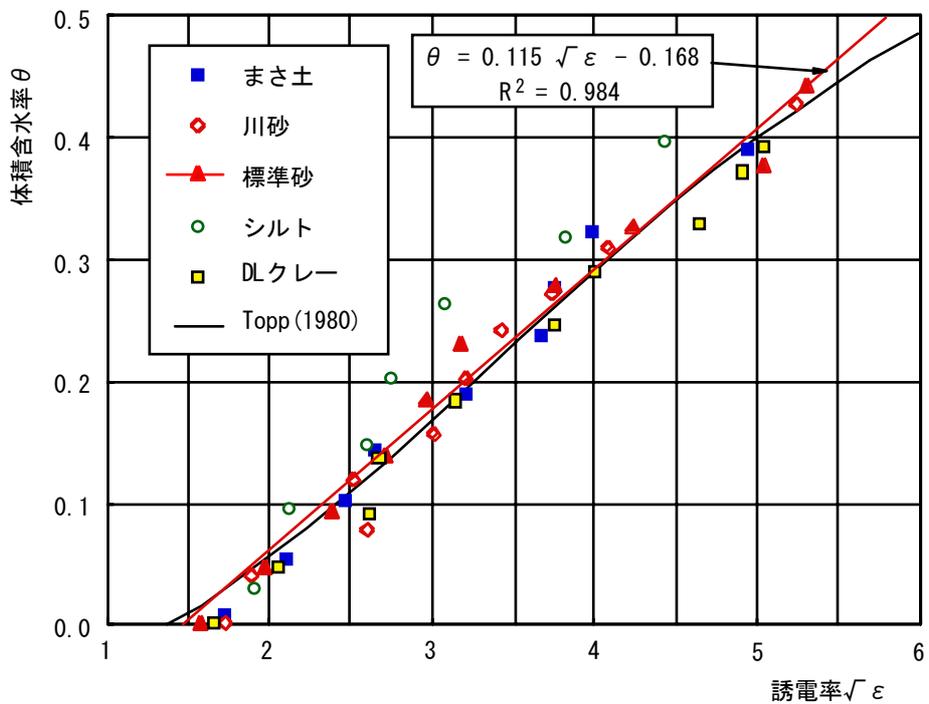


図-2.12 FDRによる各種試料に対する校正曲線

図-2.12ではToppが提案した式(2.21)と良く一致している。特に砂試料に対しては適用性が良いといえる。若干、シルトが低い値を示していることから、インピーダンスの類似性による測定値の精度低下が考えられる。つまり、微粒子の試料に対してはキャリブレーションが必要である。

(2) ガラスビーズ

次にCLUE試験で用いるガラスビーズについて校正曲線の作成を行った。図-2.13に誘電率の測定結果を示す。先の土質試料とは異なり、低、高含水領域でToppの校正曲線より高い値を示しているが、中含水領域(0.2 [θ])で低い値を示している。また、図-2.14に校正曲線を示す。結論として誤差5%の精度で測定が可能であることがわかる。

2.3.3 各依存性に対する適用性の検討

実際に測定を行う際には、用いる測定機器及び方法、プローブの特性等の影響により、その校正曲線には少なからず誤差が存在すると思われる。したがって、FDR法を用いて実際に土中の水分量を測定する場合、温度や土中に含まれる塩分濃度に影響を受けることが考えられる。そこで、本節では、実際に(1)温度、(2)塩分濃度、(3)土粒子密度の3項目について、これらが変化した場合の測定値の違いについて調査した。

(1) 温度

原位置での測定においては、測定時期によって地盤の温度も大きく変化しているものと予想される。特に、水の誘電率は0℃以下で急激に変化するためこの付近の温度で測定する場合には測定結果を過小評価する危険性がある。そのため、温度変化による影響についての把握が必要である。そこで、水溶液と不飽和土の供試体のそれぞれに対して温度を変化させて誘電率を測定した。水溶液の場合の測定結果を図-2.15に表す。また、不飽和土に対する測定結果を図-2.16に示す。温度の上昇に伴いわずかに誘電率が低下するという結果が得られた。水溶液の場合と比較してこの値は決して大きいものではないので、温度による変化はないものとして差し支えないと思われるが、より高い測定精度を求めるには温度補正が必要である。

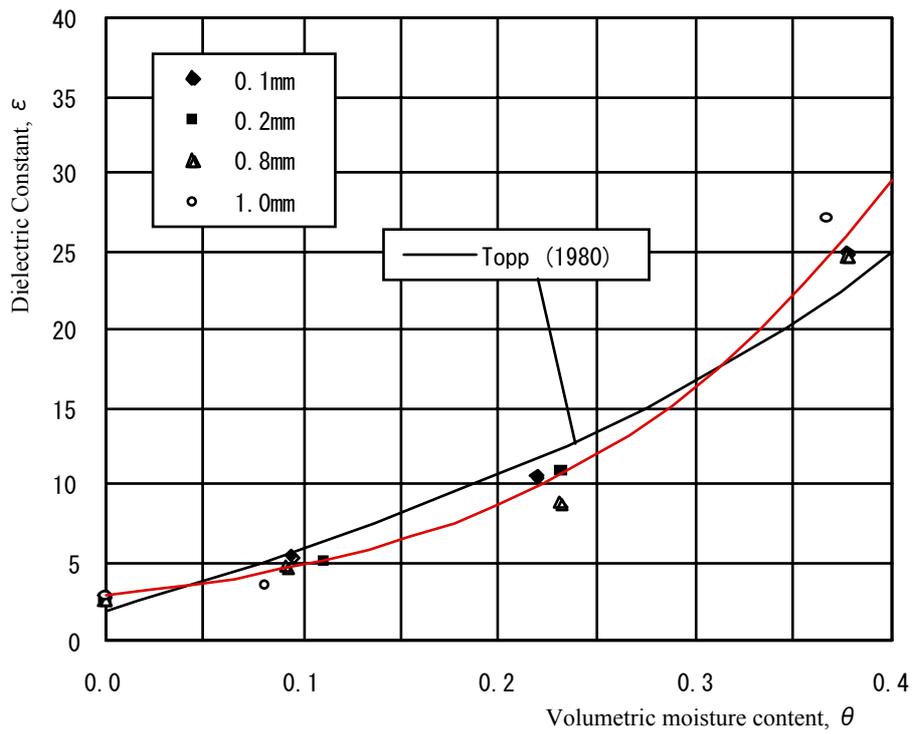


図-2.13 FDRによるガラスビーズに対する誘電率の測定結果

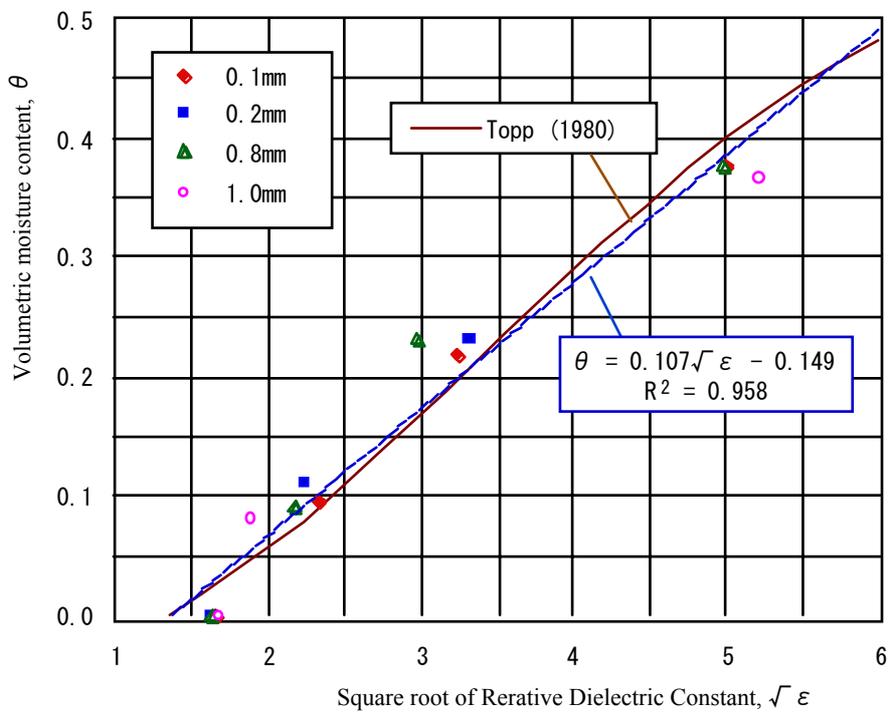


図-2.14 FDRによるガラスビーズに対する校正曲線

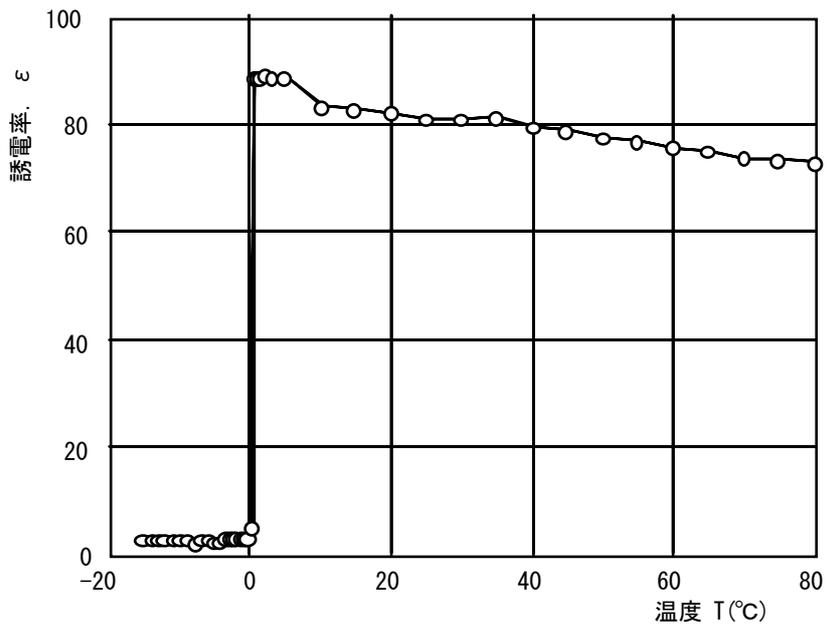


図-2.15 温度（水温）と誘電率の関係

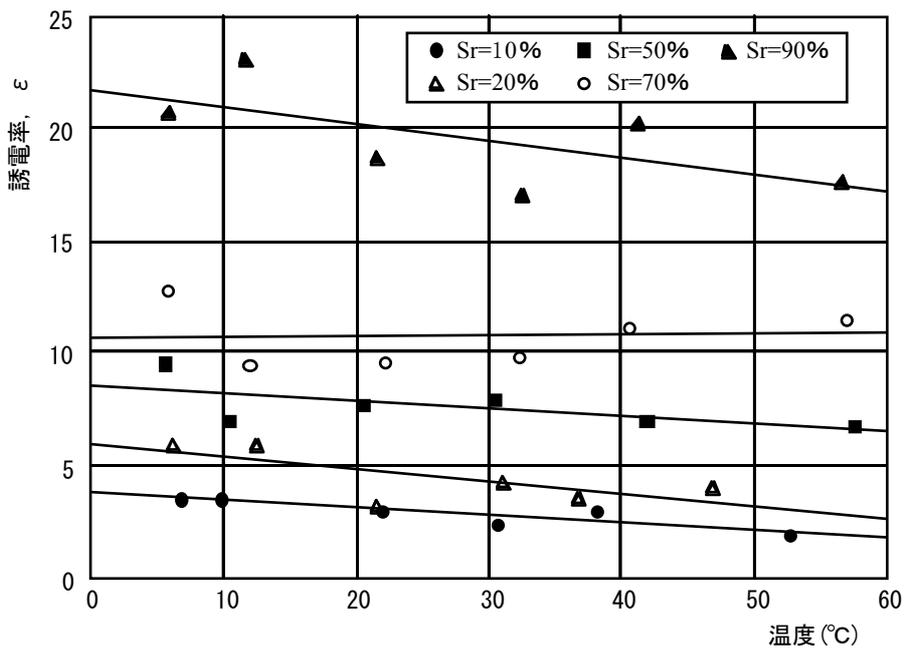


図- 2.16 不飽和土における温度と誘電率の関係

(2) 塩分濃度

実際の地盤で測定する場合において、地盤中にイオン性の物質を含んでいる場合は、少なからず誘電率に影響を与えることが懸念される。そこでイオン性物質として塩化ナトリウムを用いて塩分濃度を変化させ、誘電率に与える影響を調べた。測定結果を図-2.17に、各ピーク振幅レベル(電圧)の変化を図-2.18に示す。その結果、約2000ppmまでの濃度であればピーク間隔に影響なく測定可能であるが、その一方で次第にピークの谷が小さくなり、2000ppm (0.2%) を越えたあたりから検出不可能となった。

(3) 土粒子密度

一般に、土粒子、空気の誘電率(土粒子4, 空気1)は水の誘電率($\epsilon=81$)に比べて非常に小さいので誘電率に影響を与えるのは体積含水率だけであるとされている。その確認として体積含水率 θ を一定とし、乾燥密度 ρ_d を変化させた供試体(まさ土, 標準砂)の誘電率を測定した。また、高含水量の場合と低含水量の場合での変化も調べるため水分量を変えて行った。得られた結果を図-2.19に示す。乾燥密度 ρ_d が増加しても誘電率はほぼ一定となっている。この試験結果により誘電率は土粒子密度の影響を受けることなく、体積含水率により決定されることが確認できた。ただし、水分量が低い場合は、誘電率が低くなるため、この場合土粒子の誘電率への依存性が高くなると考えられる。今回の測定結果からは標準砂ではわずかにその傾向が見られたが、まさ土では見られずその影響は考慮する必要はないと考えられる。

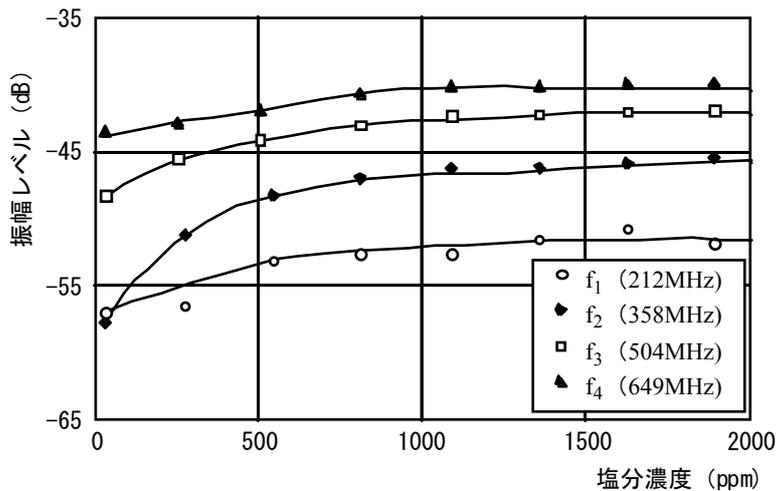


図-2.17 水溶液の塩分濃度と各ピークの電圧の関係

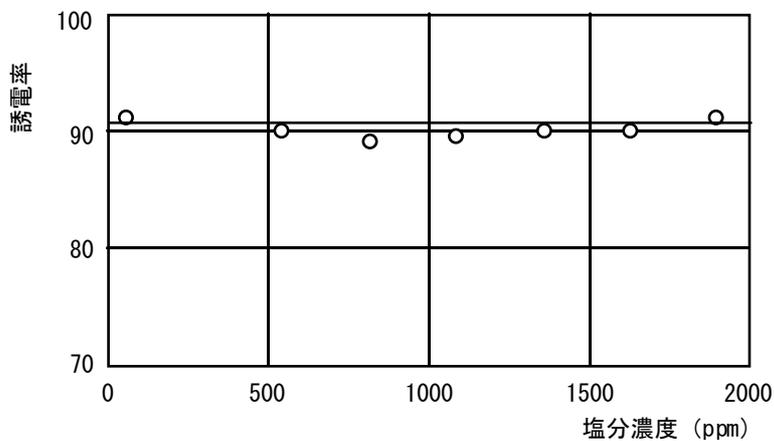


図-2.18 水溶液の塩分濃度と誘電率の関係

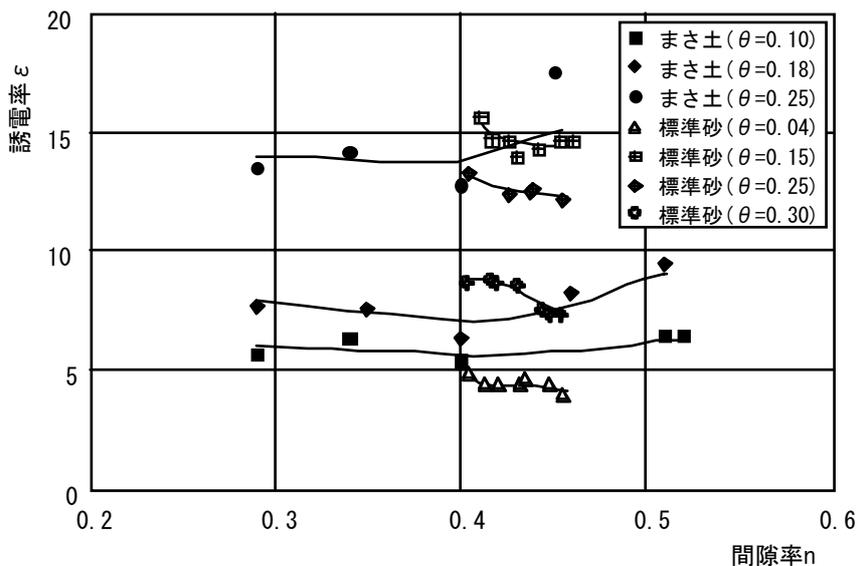


図-2.19 土粒子密度と誘電率の関係

2.4 粘土試料に対する適用性の検討

これまでに行った、FDR装置の適用性の検討から、電解質を含んだ物質についても測定が可能であることを示した（塩水で2000ppmまで）。しかし、粘土系試料においては砂質試料による校正曲線から外れる傾向があり、またベントナイトのような電解質を多く含む物質については図-2.20のように干渉波が発生せず、測定が不可能であった。

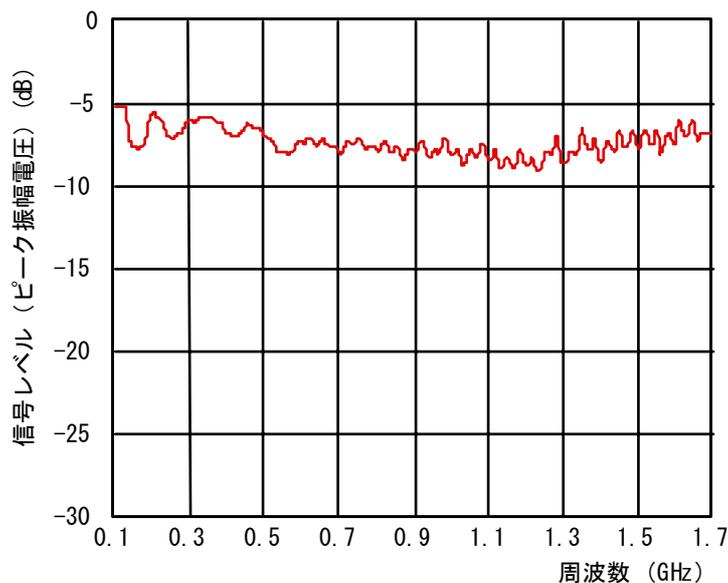


図-2.20 通常電極によるベントナイト混合土 (S:B=85:15, $\theta=0.28$) の測定スペクトル

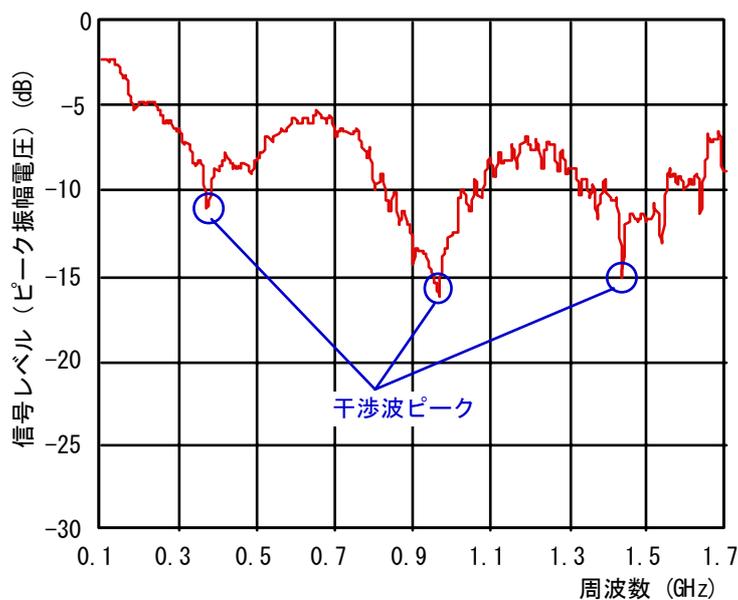


図-2.21 電極コーティングによるベントナイト混合土 (S:B=85:15, $\theta=0.25$) の測定スペクトル

干渉波が生じるための条件は、①信号供給ケーブルのインピーダンスと電極のインピーダンスが適度に異なっていること、②誘電体であること、の2つの条件が必要である。電解質を多く含む物質の場合、電場を発生させても電子分極が起こらず、逆に起電流を発生させていると考えられる。FDRシステムでは、信号供給系とスペクトル測定系のインピーダンスは50Ωに固定されている。したがって、先の条件を満たさない試料の測定には、電極のインピーダンスを変更させること、また絶縁物質でコーティングして起電流の発生を抑止することが必要である。そこで、ここでは、実際にレジンをを用いて電極をコーティングし、ベントナイト混合土を対象に適用性の検討を行った。

レジンによるコーティングは直径φ5mm、長さ10cmの電極に厚さ1mmで行った。供試体の作成は、ベントナイト混合土（標準砂：ベントナイト=85:15, 75:25）を用いて、直径φ50mm、高さ160mmのモールドに一定の乾燥密度($\rho_d=1.5\text{g/cm}^3$)で2cmずつ7層に分けて締固めた。そして、供試体上部中央にコーティングを施した改良プローブを絶縁部分が試料表面に接触するまで挿入し、測定を行った。

図-2.22, 2.23に、測定結果をToppの校正曲線と比較したものとして示す。その結果、図-2.21に示すように干渉波のピークが現れ、測定が可能となった。これらより、ベントナイト混合土に対して、水分量の増加に伴う、誘電率値の上昇が非常に良く現れているのが分かる。しかし、Toppの校正曲線と比較すると、含水量の増加に伴い、測定値が低いものになっている。したがって、改良プローブを用いたベントナイトの測定は可能であるが、測定を行う際には、あらかじめキャリブレーションが必要である。

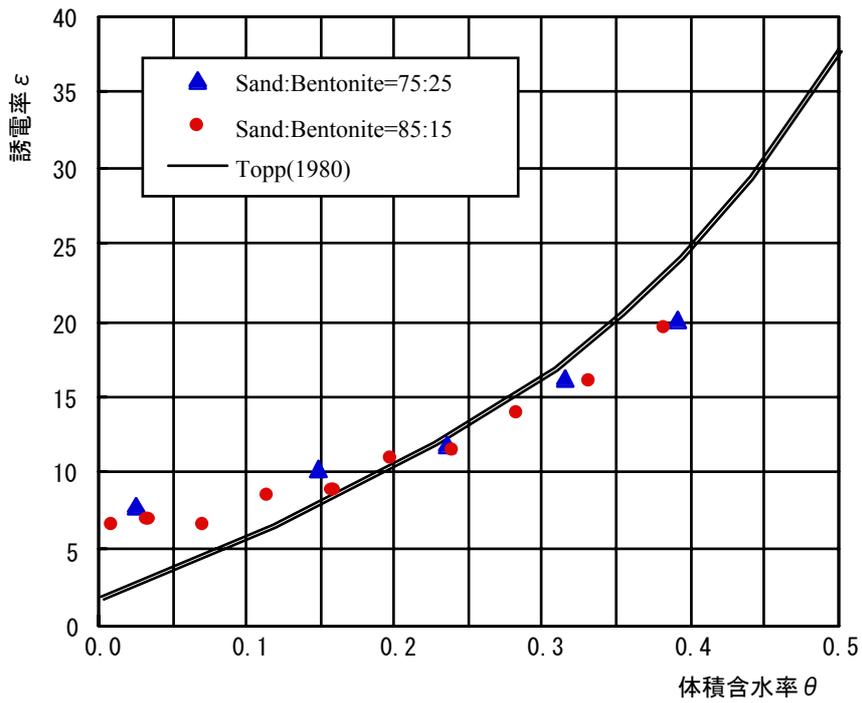


図-2.22 電極コーティングによるベントナイト混合土測定結果

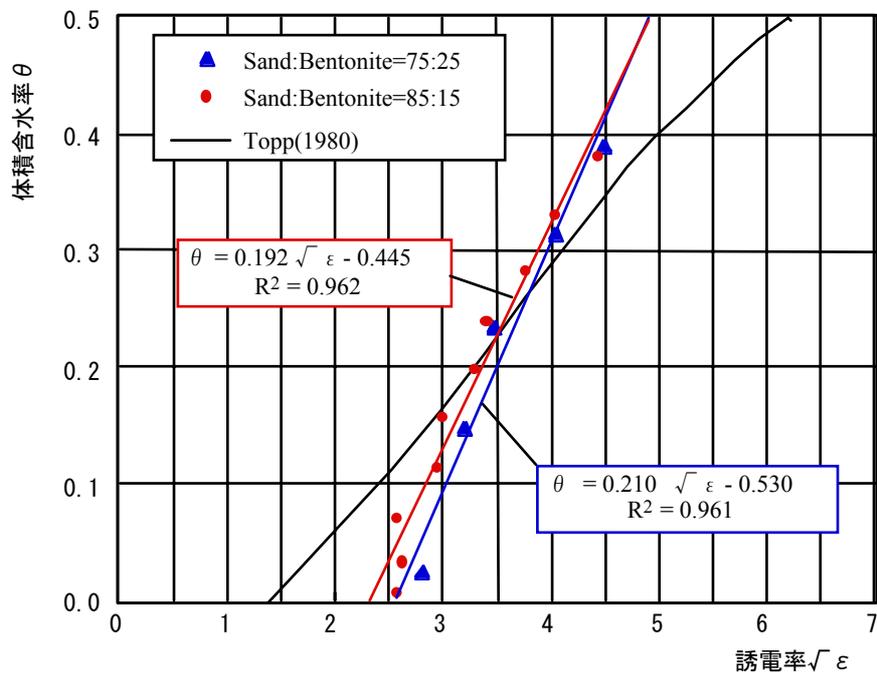


図-2.23 電極コーティングによるベントナイト混合土
キャリブレーション結果

2.5 岩盤の水分量の測定法

現在、岩盤中の水分量を非破壊で測定する方法としては、RI法⁶⁾、比抵抗法⁷⁾等が用いられている。しかし、これらの方法は測定装置が大がかりであり、またキャリブレーションが必要である等、非常に扱いにくいものである。Sakakiら(1998)はTDRを用いて砂岩他5岩種に対してキャリブレーションを行い、適用性を吟味している⁸⁾。さらに櫛原ら(1999)は、TDRに加えて、孔間レーダー法を用いて原位置で岩盤の水分量を計測する方法について研究を行っている⁹⁾。一方、本研究で用いたFDR法は、電極が1本でも高精度の測定が可能である利点を持っている。つまり、施工性を考えるとプローブ設置のための掘削本数が少ないほど有利である。そこで、ここではFDR法を用いて岩盤中の水分量測定を行うことを目的として、岩石試料に対するキャリブレーションについて検討した。なお、試料には凝灰岩（大谷石：間隙率 $n=0.39$ ，船生石： $n=0.27$ ），砂岩（白浜石：間隙率 $n=0.13$ ， $n=0.17$ ）を用いた。

(1) 岩石試料の水分量調整方法

FDR装置によるキャリブレーションの際には供試体内の水分量を均一にすることが必要であるが土質試料とは異なり岩石試料は困難である。Sakakiら(1998)は飽和状態の供試体を大気中に一定時間放置後、ラップで密封し、さらに24時間放置後に内部の水分状態が平衡状態に達したものとみなしている⁸⁾。本研究においては図-2.24, 25示す加圧板装置と遠心装置を用いて水分量を調節を行い、キャリブレーションと同時に岩石の水分特性も測定することを試みた。

(2) 試料の成形とプローブ（電極）の設置

a) 加圧板装置：大谷凝灰岩

図-2.26のように、高速カッターを用いて130×60×60(mm)の角柱に成形した。測定プローブは、長さ100mm、φ5mmの棒電極測定タイプと、同軸ケーブルの線心部分とアース部分を銅板に直接取り付け、それを試料の側面に張り付ける板電極タイプを用いた。棒電極タイプでは、まず、あらかじめプローブの電極と同じ径、同じ長さの孔をドリルで開け、そこにプローブを挿入する。また、接地部分にも深さ10mm、径3mm程度の孔を開けておき、そこに溶かしたハンダを流し込み、完全な密着を行う。また、板電極タイプでは、試料の側面に銅板を粘着テープで張り付け、それを覆うようにエポキシ系接着剤でコーティングする方法で設置を行った。

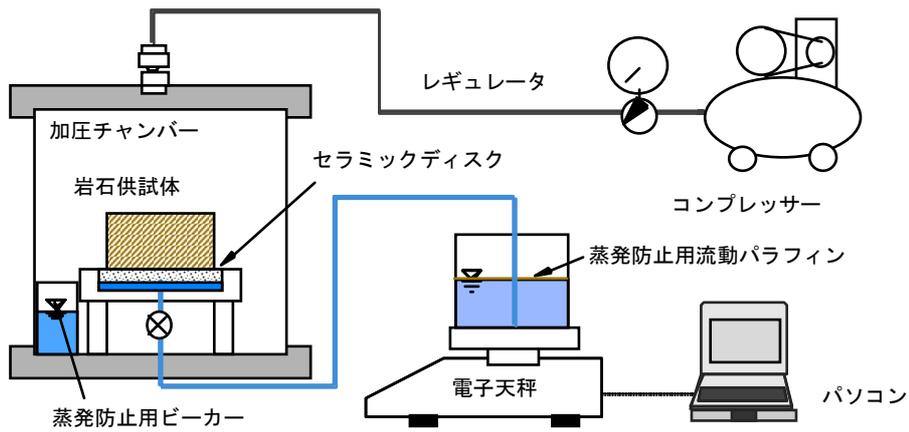


図-2.24 水分量調節装置（加圧板装置）

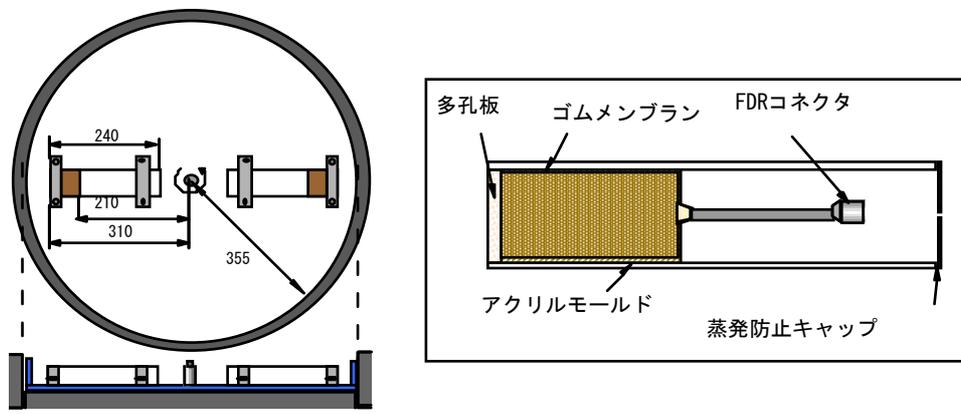


図-2.25 水分量調節装置（遠心装置）

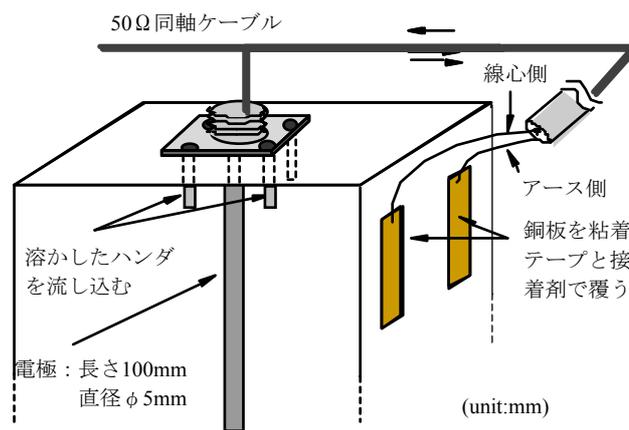


図-2.26 計測センサーの設置概要図：(1) 大谷凝灰岩

b) 遠心装置：白浜砂岩・船生凝灰岩

図-2.27のように、コアカッターを用いて $\phi 60 \times 100$ (mm)の円柱に成形し、長さ100mm、 $\phi 5$ mmの棒電極を導電グリスを介して挿入し、同軸ケーブルの線心部分を接続した。また、アース部分には長さ10mmの棒電極を同様に設置した。なお、このアース部分は、TDR法の片方の電極に相当している。

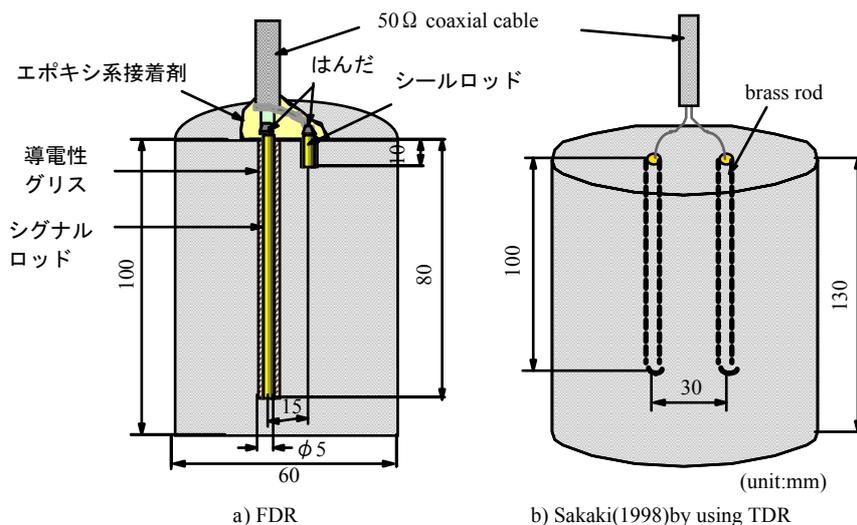


図-2.27 計測センサーの設置概要図：(2) 白浜砂岩・船生凝灰岩

(3) 誘電率の測定および校正曲線の作成

成形後に測定用プローブを設置した供試体を水中脱気し、重量変化がなくなった状態をもって飽和とした。

図-2.28に加圧板法により求めた負の圧力水頭と体積含水率の関係を示す。実測値のプロットを見ると、試験開始（飽和状態）から終了時までの水分量の変動はかなり狭いものではあるが、確実に排水は生じている。その確認は、試験終了後に試料を砕き、試料の表面部分と中心部分とについて、炉乾により含水量を確認したところ、試料表面と内部とで水分量の違いがないことで判断した。また、図-2.29に加圧板装置により測定された体積含水率と誘電率値との関係を示す。プローブ挿入タイプではある程度良好な結果が得られているが、銅板貼り付けタイプでは水分量の増加による誘電率値の変化がほとんど現れなかった。この原因としては銅板と試料表面との接地が不完全であったものと考えられる。

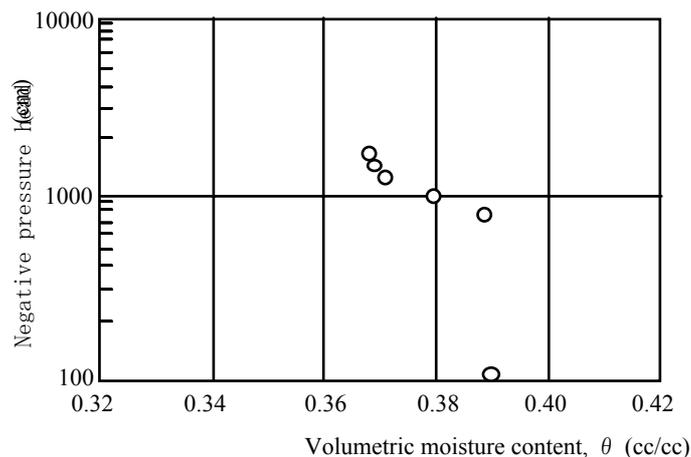


図-2.28 岩石供試体の水分特性曲線：(1)大谷凝灰岩

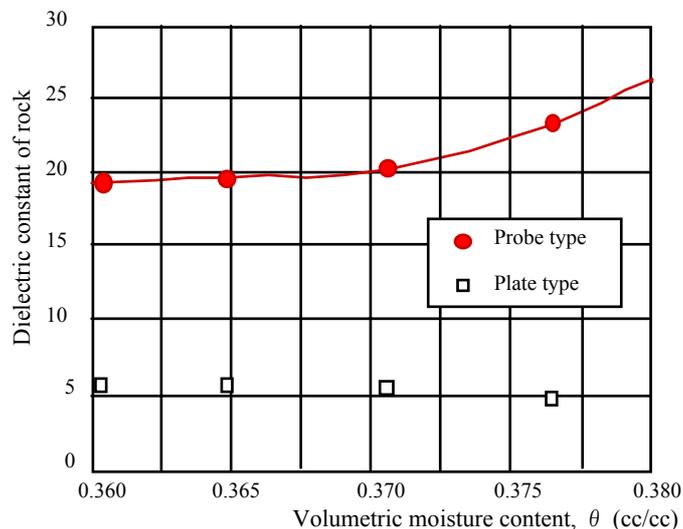


図-2.29 誘電率測定結果：(1)大谷凝灰岩

一方、図-2.30に遠心装置により得られた砂岩に対する誘電率の測定結果を示す。飽和付近で比較的高い値をとっている。これはSakaki (1998)が示した結果と同様の傾向を示している⁸⁾。電極部分の設置自体はFDR法、TDR法とも同様であることから、完全飽和の場合に電極と試料のわずかな隙間に水がたまる現象 (Water filled cup) のためか、双極子モーメントが大きく作用するためであると考えられ、完全飽和付近での評価には注意が必要である。

また、図-2.31には加圧板装置での大谷凝灰岩と遠心装置での白浜砂岩の結果を示す。ほぼTopp(1980)が示した曲線と一致しており、岩盤に対しても土質地

盤と同様に測定が可能であるといえる。

図-2.32に誘電率の平方根と体積含水率の関係に直したものを示す。この関係にはWhalley(1993)によって直線関係があることが示されている¹⁰⁾。図に示すように飽和度の高い部分でToppの式から外れる結果が得られたため、飽和度の高い領域と低い領域とに分類し、2種類の校正式（一次式）を用いることとした。

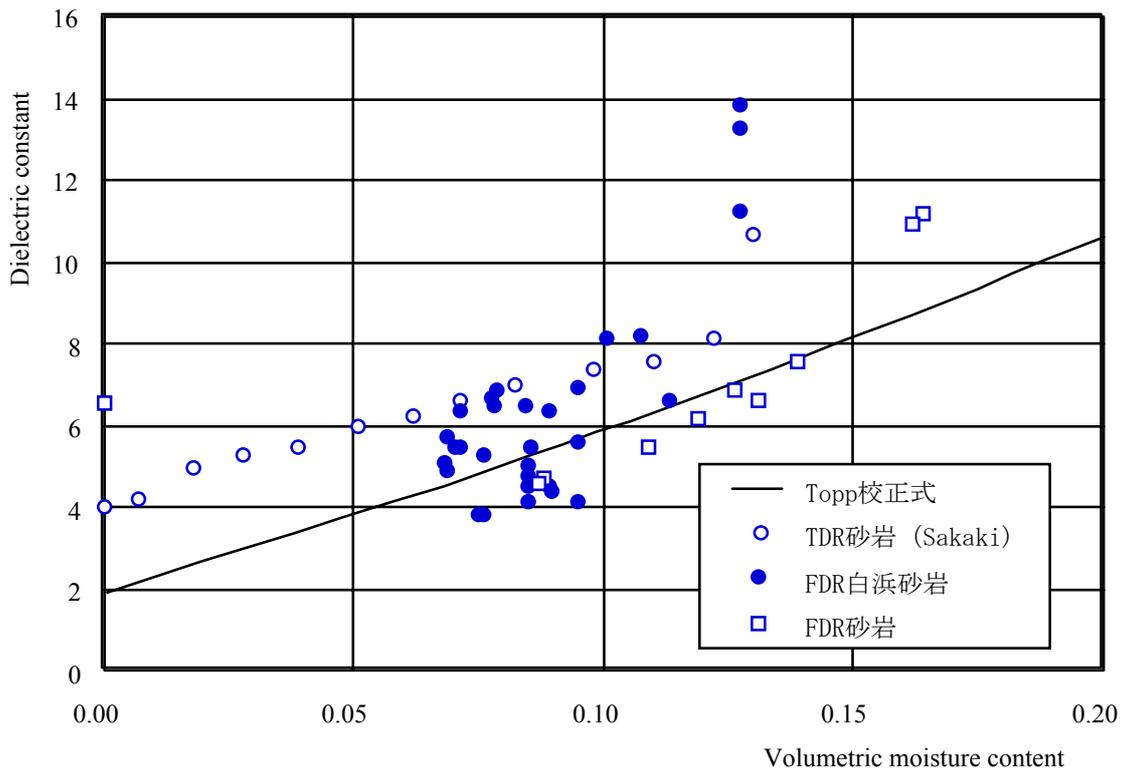


図-2.30 砂岩に対する誘電率の測定結果

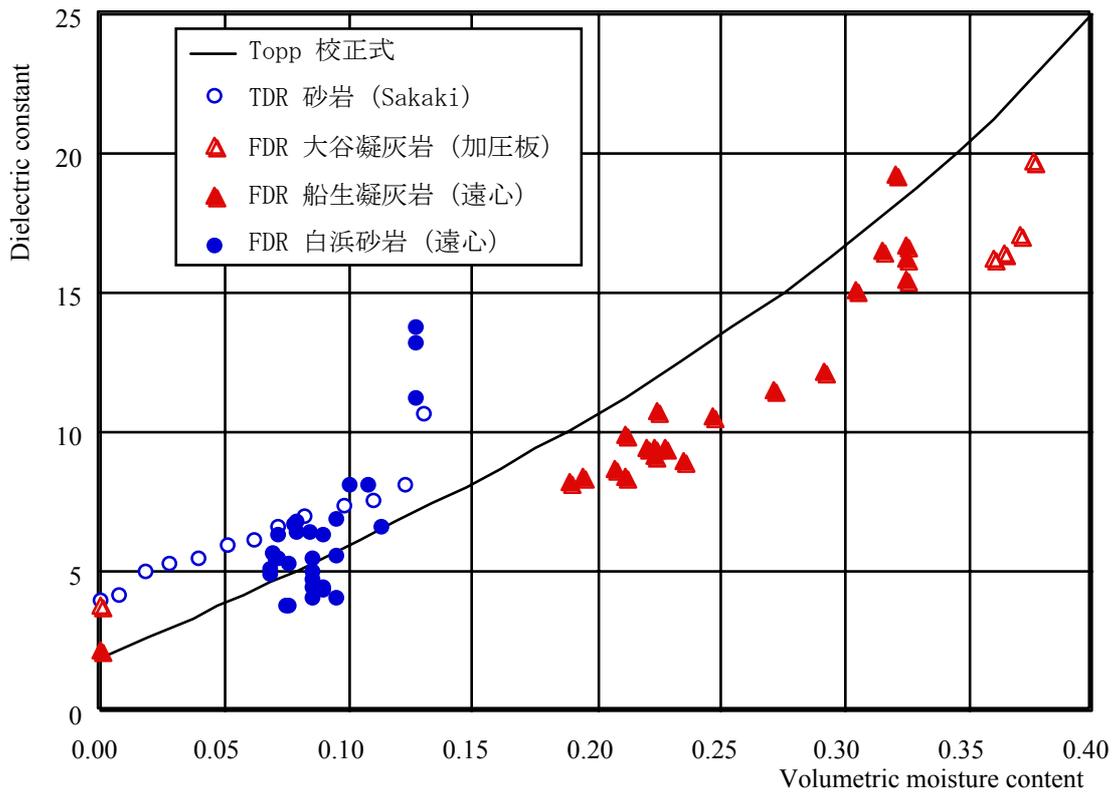


図-2.31 各岩石に対する誘電率の測定結果

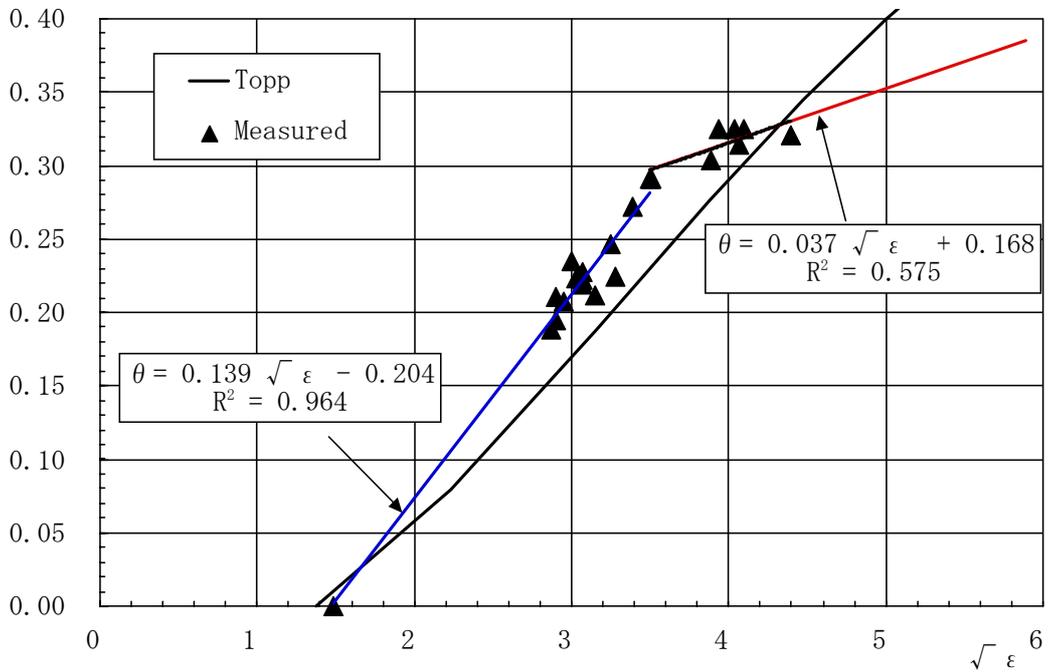


図-2.32 FDRによる校正結果

3. 媒体の基礎物性の把握

3.1 ガラスビーズの基本物性

3.1.1 試料の種類

ここでは、鉛直2次元水槽における円形坑道周辺での不飽和領域形成試験で使用するガラスビーズについて、飽和・不飽和浸透を支配する基礎物性の測定を行った。基礎物性の把握のために用いたガラスビーズはいずれも単一粒径で、次の5種である。

①0.1mm, ②0.2mm, ③0.8mm, ④1.0mm, ⑤2.0mm, ⑥3.0mm

なお、比重は $G_s=2.49(\text{g}/\text{cm}^3)$ である (JIS-A-1202 土粒子の比重試験方法)。

3.1.2 水分特性曲線

水分特性測定法としては、土柱法排水試験 (Soil column test), 加圧板法 (Pressure plate method), 吸引法(砂柱法) (Sand column suction method) の3方法を採用した^{11), 12)}。

土柱法排水試験は、図-3.1のように内径50mm, 高さ30mmの亚克力製カラムを約1mの高さまで積み上げ、水中落下により供試体を作成した。試験は下部より排水させ、排水流量の経時変化及びカラムの任意の2点に取り付けた間隙水圧計の測定値より定常状態を確認した後、各カラムごとに分解し、炉乾法によって体積含水率の分布を求めた。

加圧板法は、図-3.2のように内径100mm, 高さ60mmに同じく水中落下により供試体を作成した。

吸引法は図-3.3のように砂柱を高さ1mまで積み上げ、その上に供試体を置き、定水位タンクを上下することで、任意のサクション状態を作成した。

ガラスビーズのそれぞれの粒径に対する測定結果及び次式(3.1)で表される van-Genuchtenモデル (以下VG)¹³⁾でフィッティング¹⁴⁾を行った結果を図-3.4(1)から(6)に、VGパラメータの同定結果を表-3.1に示す。また、図-3.5に粒径とVGパラメータの関係を示す。

$$S_e = \left(1 + |\alpha\psi|^n\right)^{-m} \quad (3.1)$$

ここで、 ψ : 負の圧力水頭 (cm)

S_e : 有効飽和度

α, n, m : 形状パラメータ ($m=1-1/n$)

有効飽和度 S_e は不飽和浸透に関与する水分量と空隙量の比として式(3.2)で表される。また、van Genuchtenは水分特性曲線（式(3.1)）から、不飽和透水係数を式(3.3)で推定している¹³⁾。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.2)$$

$$k_r = \frac{k}{k_s} = S_e^{1/2} \left\{ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right\}^2 \quad (3.3)$$

ここで、 θ : 体積含水率
 θ_s : 飽和体積含水率
 θ_r : 最小容水量
 k_s : 飽和透水係数 (cm/sec)

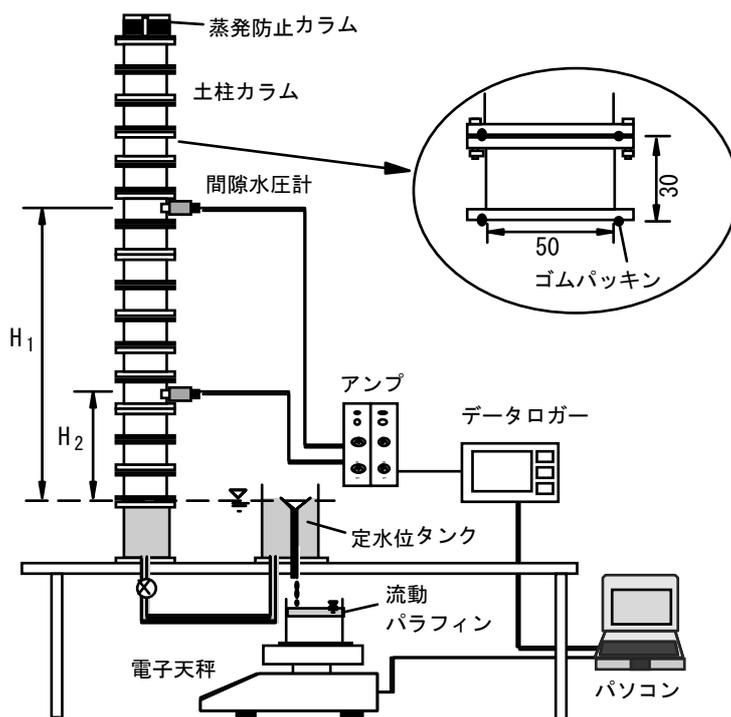


図-3.1 土柱法水分特性測定装置概略図

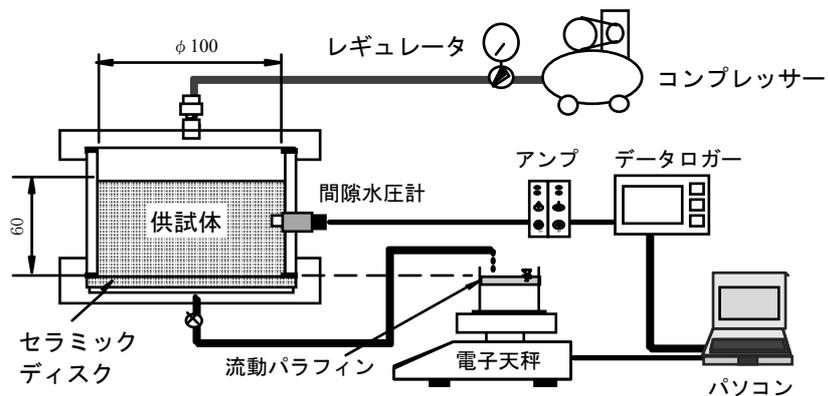


図-3.2 加圧板法水分特性測定装置概略図

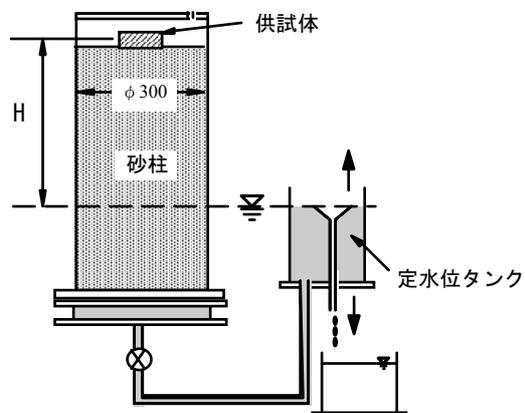
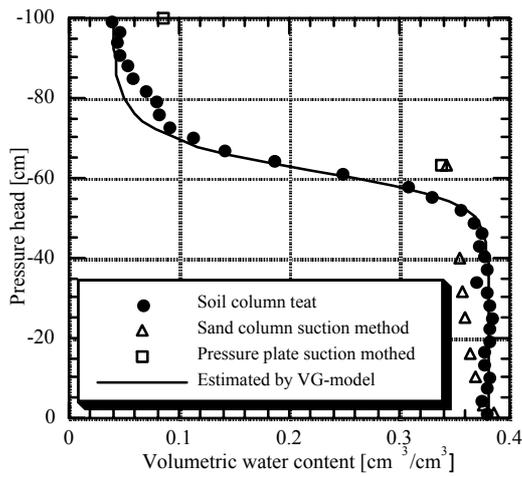
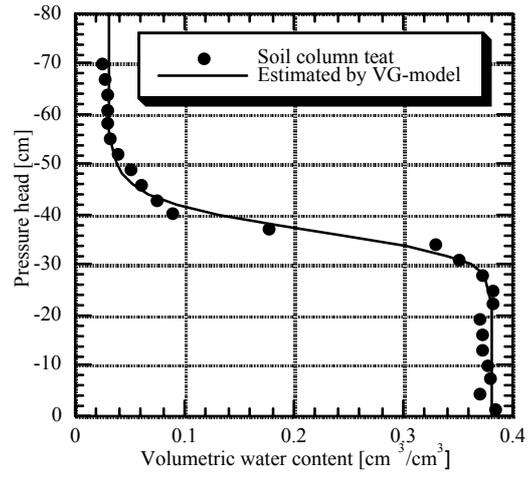


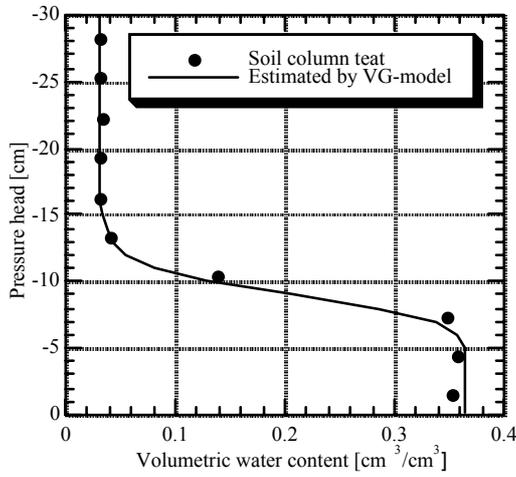
図-3.3 吸引法(砂柱法)水分特性測定装置概略図



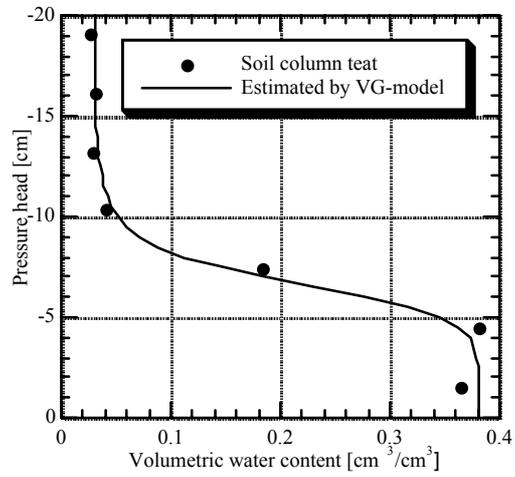
(1) ガラスビーズ 0.1mm



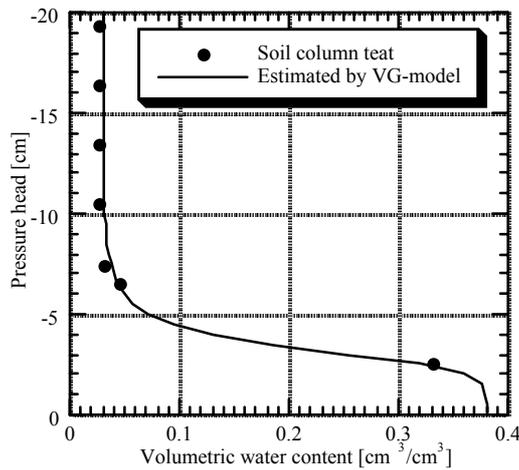
(2) ガラスビーズ 0.2mm



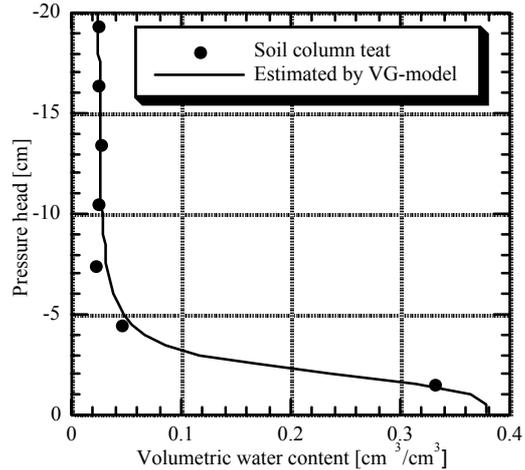
(3) ガラスビーズ 0.8mm



(4) ガラスビーズ 1.0mm



(5) ガラスビーズ 2.0mm

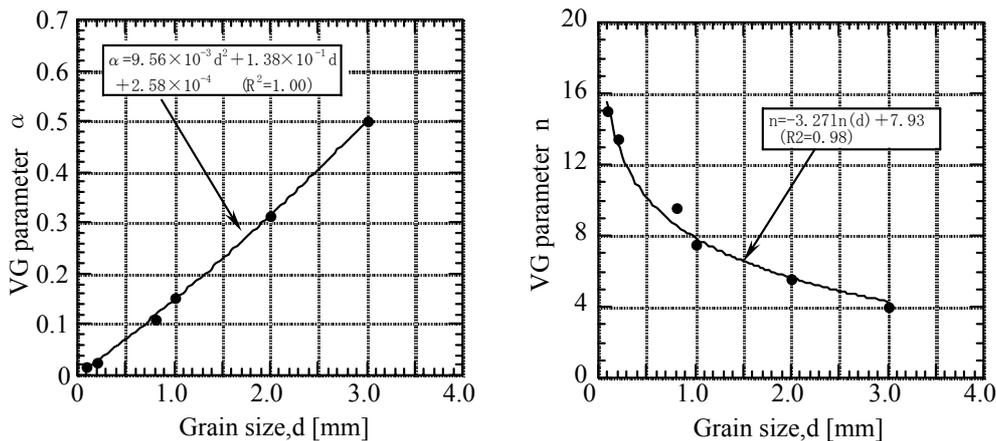


(6) ガラスビーズ 3.0mm

図-3.4 各試料に対する水分特性曲線

表-3.1 VG パラメータの同定結果

粒径 [mm]	VG パラメータ		θ_s	θ_r
	α	n		
0.1	0.016	15.00	0.380	0.040
0.2	0.027	13.49	0.380	0.030
0.8	0.112	9.58	0.365	0.030
1.0	0.152	7.50	0.380	0.030
2.0	0.314	5.56	0.380	0.030
3.0	0.500	4.00	0.380	0.025



(1) VGパラメータ α

(2) VGパラメータ n

図-3.5 粒径とVGパラメータの関係

3.1.3 飽和透水係数

飽和透水試験は、JIS A 1218（定水位透水試験）により行った。供試体は内径 ϕ 100mm、高さ120mmで水中落下で作成した。図-3.6に飽和透水試験結果を示す。

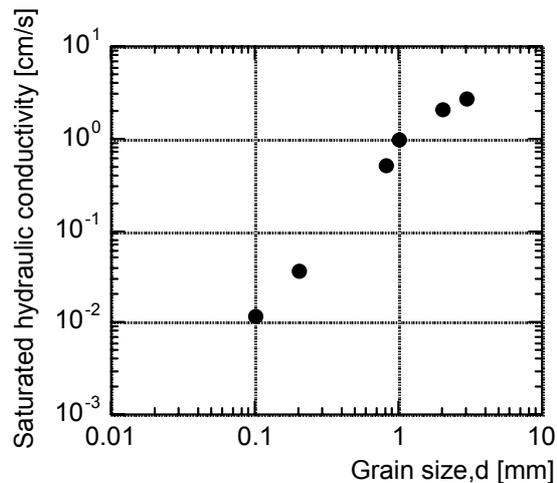


図-3.6 飽和透水試験結果

3.1.4 不飽和透水係数

不飽和透水試験のうち、瞬時水分計測法¹⁵⁾を用いて不飽和透水係数を求めた。

(1) 瞬時水分計測法の基礎理論

瞬時水分計測法は、鉛直一次元の土柱内で給水湿潤あるいは排水の開始後、時々刻々と変化する体積含水率の分布と圧力水頭を計算することにより不飽和透水係数を求める試験法であり、同時に水分特性曲線も得ることができる。この手法はきわめて短時間の実験で不飽和土の浸透特性を求めることが可能である。またポーラスストーンや試料の不均質性の影響が少ないため、より正確な土の浸透特性を求めることができるとされている。

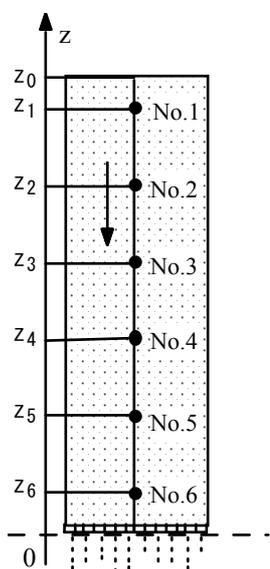


図-3.7 鉛直排水実験の概略図

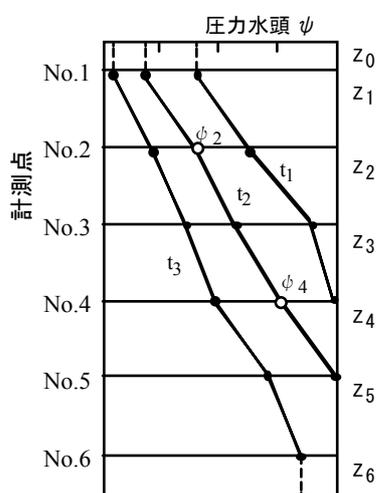


図-3.11 圧力水頭の分布

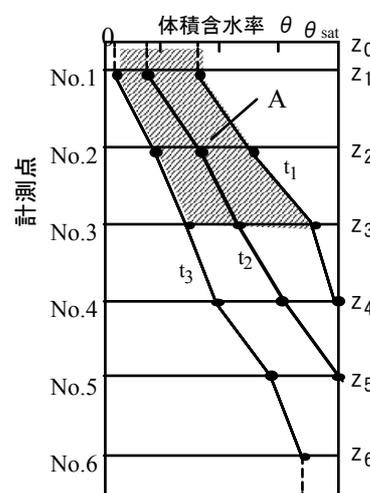


図-3.9 体積含水率の分布

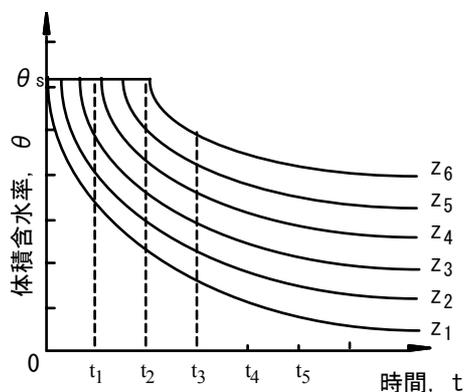


図-3.8 各計測点における体積含水率の経時変化

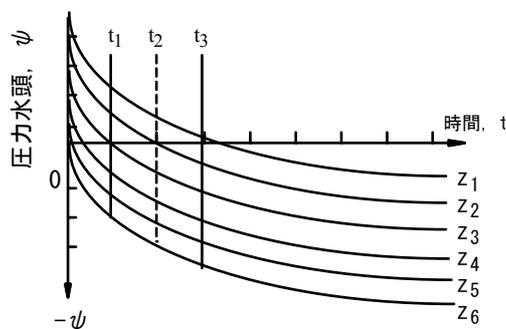


図-3.10 各計測点における圧力水頭の変化

図-3.7のような鉛直1次元の排水実験において、排水面を $z=0$ 基準面にし、鉛直上方に座標をとる。この場合、不飽和浸透の支配方程式は次式となる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k(\theta) \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right] \quad (3.4)$$

両辺を z で積分すると、次式になる。

$$\int \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = k(\theta) \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right]_z + C_1 \quad (3.5)$$

$z=z_0$ では水の補給がないため $v=0$ である。この境界条件を式(3.5)に用いると、

$$C_1 = \left[\int \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right]_{z=z_0} \quad (3.6)$$

となり、任意の点の任意時間での不飽和透水係数は次式により求められる。

$$k(\theta) = \frac{\int_{z_0}^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right]_z} \quad (3.7)$$

式(3.7)の右辺の分子、分母は以下の手法で求められる。

a) 分子の値の求め方

- ① 図-3.7に示す土柱の各計測点での体積含水率の時間的变化を計測する (図-3.8)。
- ② 各時間に対する体積含水率と z 座標の関係を図-3.8より図-3.9に示すように整理する。
- ③ 図-3.9より任意の点 (例えばNo.3) を t_1 から t_2 の間に通過する流量は斜線部の面積となる。この面積を A とすると、位置 z_3 および時間 t_1 と t_3 の中間時間 t_2 における式(4)の分子は次式で計算できる。

$$A = \int_{z_0}^{z_3} \theta dz$$

$$\left[\int_{z_0}^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right]_{z_3, t_2 = \frac{t_1+t_3}{2}} = \frac{\int_{z_0}^{z_3} \theta dz}{t_3 - t_1} = \frac{A}{t_3 - t_1} \quad (3.8)$$

b) 分母の値の求め方

- ① 図-3.10中の各点での圧力水頭の経時的变化を同時に計測する (図-3.11)。
- ② 任意時間 $t_2 = (t_1+t_3)/2$ におけるNo.3における動水勾配はNo.2, No.4の時間 t_2 における圧力水頭(ψ_2, ψ_4)を用いて近似的に次式で求められる。

$$\left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right]_{z_3, t_2 = \frac{t_1 + t_3}{2}} = \frac{\psi_4 - \psi_2}{z_4 - z_2} + 1 \quad (3.9)$$

したがって、このようにして求めた式(3.8), 式(3.9)の値を式(3.7)に代入すると不飽和透水係数の値が求められる。なお、不飽和透水係数と体積含水率の関係は、不飽和透水係数を計算した時間及び計測点に対応する体積含水率の値を図-3.8により求めることによって得られる。

以上の方法によると、体積含水率の継時的変化の計測は土柱の全領域にわたって行う必要があり、圧力水頭の変化は、不飽和土の透水係数を求めようとする点の上下で最低2カ所での計測が必要である。

(2) FDR法を用いた瞬時水分計測法

FDR法を用いた瞬時水分計測法（給水実験）の装置概略図を図-3.12に示す。体積含水率をFDR法により、また間隙水圧をセラミックカップを設置したサクシオン計測用の圧力変換器によって計測する。

計測座標を図-3.13に示す。試験は排水過程で、モールドの上端と排水面との水位差は約88cmとし、測定位置はモールド上端より2cmの位置から5cm間隔で5点設けた。測定項目は誘電率と圧力水頭である。FDRの電極センサーの長さは校正時と同様の15cmのものを用いた。測定時間は90分で、間隔は排水開始から30分までは3分毎に、30分から90分までは5分毎に測定した。

(3) 試験方法

縦10cm, 横20cm, 高さ60cmの亚克力製モールドに水中落下で試料（0.1mmガラスビーズ）を詰め、供試体を作成した。

供試体作成後、まず飽和透水試験を変水位透水試験により求めた。その後、先に示した手順により瞬時水分計測法を用いて不飽和透水係数を算定した。

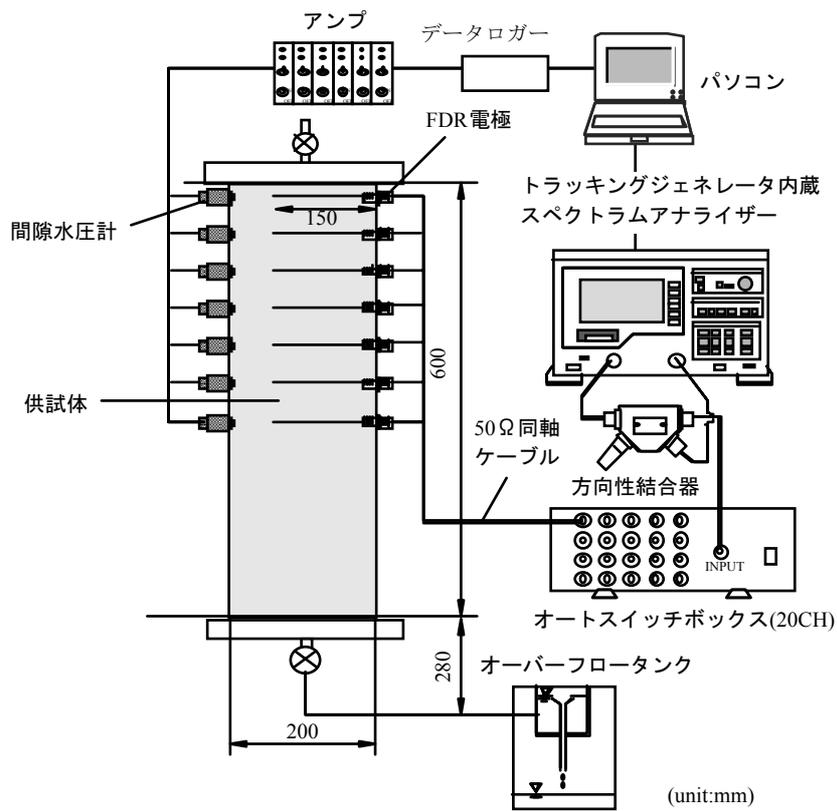


図-3.12 FDRを用いた瞬時水分計測法(排水実験)装置概略図

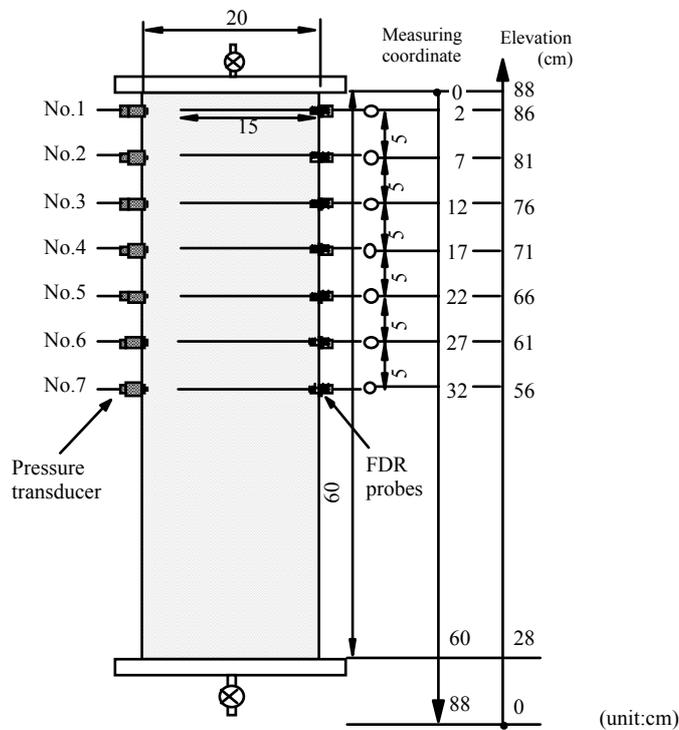


図-3.13 計測座標

(4) 試験結果及び考察

本試験により得られた体積含水率及び圧力水頭の経時変化をそれぞれ図-3. 14, 図-3. 15に, 各高さにおける体積含水率と圧力水頭の分布をそれぞれ図-3. 16, 図-3. 17に示す。図-3. 14は測定により得られたスペクトル解析図に全周波数レンジの3%のスムージングをかけたスペクトル図から得られた周波数間隔を誘電率に変換し, 先に求めたガラスビーズの校正式を用いて得られた体積含水率の結果である。FDRにより上部からの経時変化を正確な座標でとらえていることがわかる。

次に, 先に得られた計測値を用い算定した不飽和透水係数を図-3. 18に示す。試験データから, 飽和度50%以下の不飽和透水係数の値を得ることが出来なかった。

さらに, 瞬時水分計測試験中の体積含水率と圧力水頭の測定データの妥当性を調べるために, 図-3. 19に定常状態の水分特性曲線との比較を行った。同体積含水率に対する圧力水頭(サクション)の値は, 最大でも15cm程度であり, 間隙水圧計の精度(±1.5cm:セラミックカップ無し, ±10cm:セラミックカップ有り)及びFDR水分計の精度(約5%)を考慮するとほぼ妥当な測定値であると言える。

そして, 図-3. 20に土柱法により得られたデータを元にVGモデルを用いて算定した不飽和透水係数を重ねて示す($\alpha=0.01685$, $n=12.52$)。瞬時水分計測法により得られた値は, 不飽和状態に移行した瞬間に急激な透水係数の低下が見られる。この急激な変化をVGモデルで表現する事は困難であるが, その一方で, 不飽和領域では体積含水率0.35ぐらいから同定された値と平行している。体積含水率0.20までではあるが, 2つの値はその差が1オーダー以内であり妥当な結果が得られていると言える。

式(3.3)および図-3.4の付表に示すVGパラメータを用いて算定した各粒径のガラスビーズの不飽和透水係数を図3-21に示す。また, 図3-22には瞬時水分計測法により算定された不飽和透水係数の値を参考に, 飽和時の透水係数と不飽和時の透水係数を不連続にしたモデルを示す。

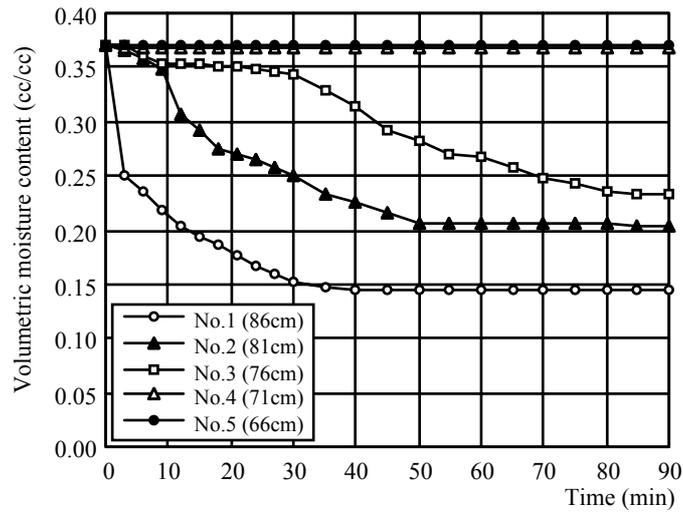


図-3.14 体積含水率の経時変化

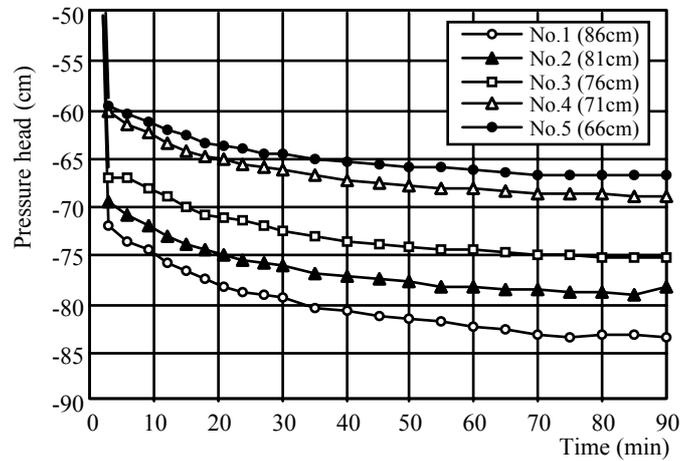


図-3.15 圧力水頭の経時変化

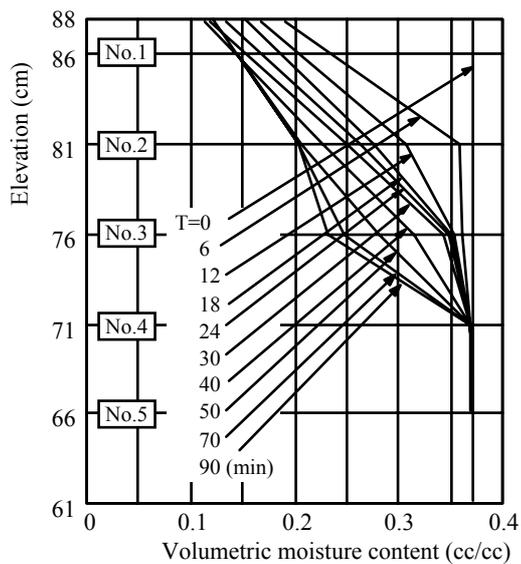


図-3.16 体積含水率の分布

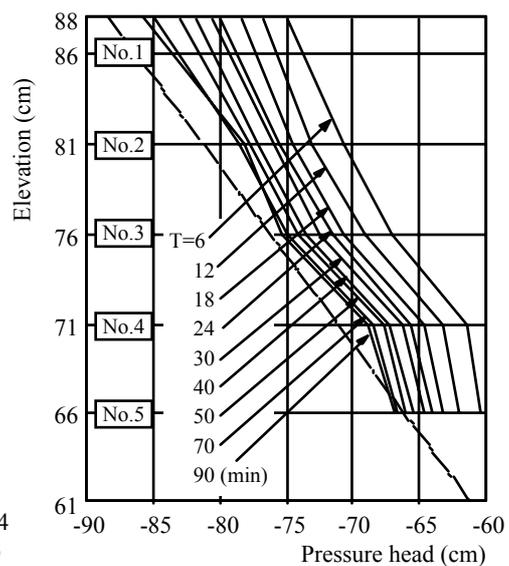


図-3.17 圧力水頭の分布

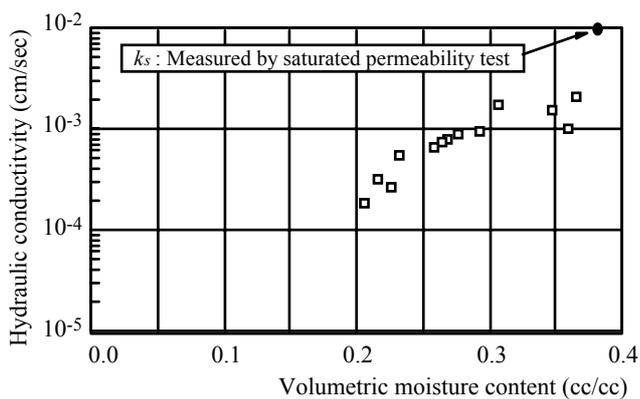


図-3.18 不飽和透水係数算定結果

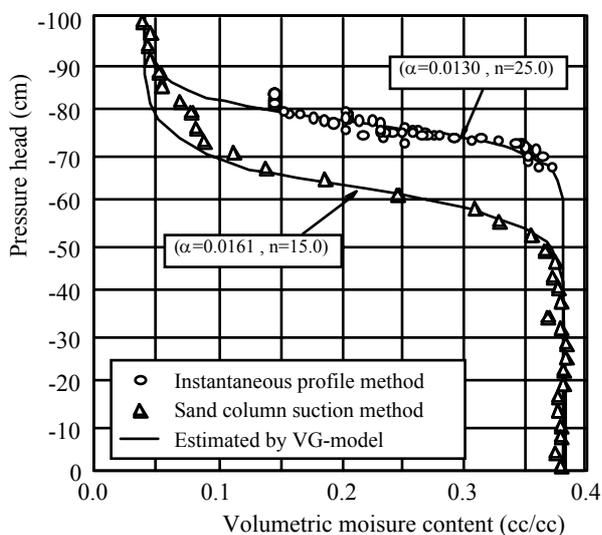


図-3.19 瞬時水分計測法と土柱法の水分特性曲線の比較

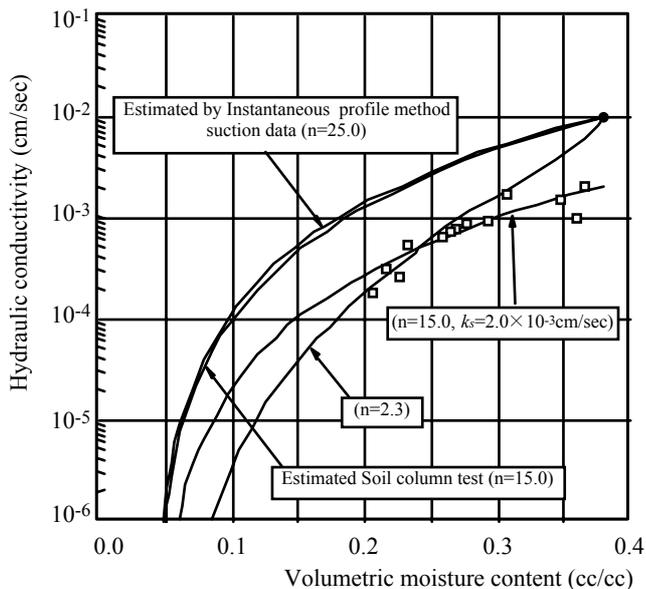


図-3.20 VGモデルによるフィッティング結果

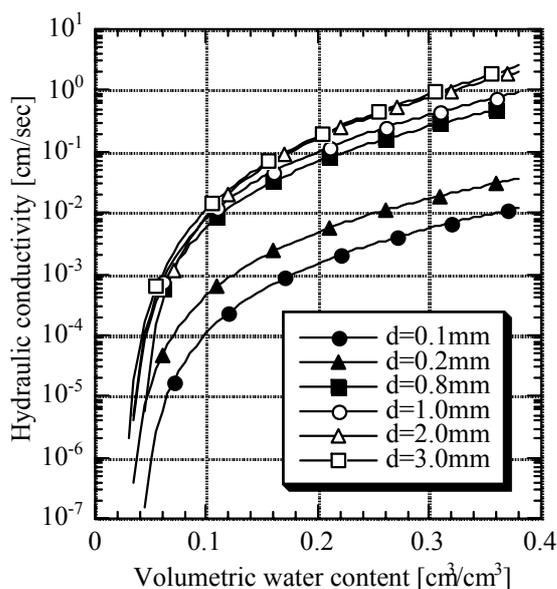


図-3.21 VGモデルによる不飽和透水係数の算定結果

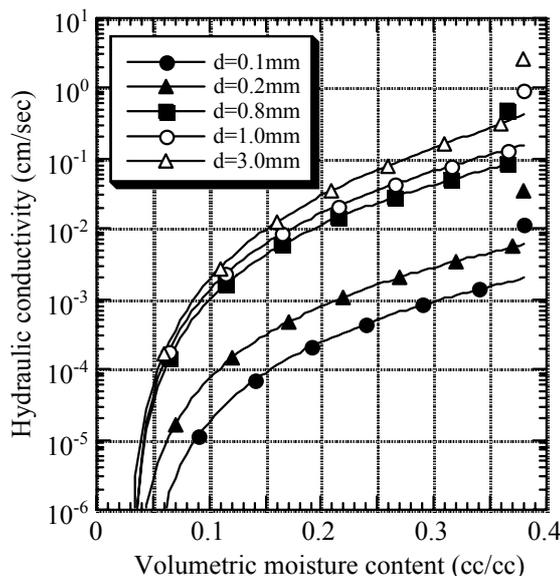


図-3.22 瞬時水分計測法の結果を考慮して設定した不飽和透水係数

3.2 岩石の基本物性

3.2.1 試料の種類

鉛直 2 次元水槽 B における円形坑道周辺での不飽和領域形成試験で使用する岩石試料について、飽和・不飽和浸透を支配する基礎物性の測定を行なった。試験に供した岩石は船生石（栃木県産凝灰岩）および白浜砂岩（和歌山県産砂岩）の 2 種類である。

3.2.2 水分特性曲線

水分特性曲線は、サイクロメータ法により求めた。試験に供した岩石の大きさは直径 8mm，高さ 3mm である。サイクロメータ法での測定は WESCOR 社製サンプルチャンバー C-52-SF を用いて行なった。図-3.23 には試験に供した試料，図-3.24 には WESCOR 社製サンプルチャンバー C-52-SF，図-3.25 にはナノボルトメータを示す。

図-3.26 には測定された水分特性曲線および式(3-1)の VG-model でフィッティングした結果を示す。また、表-3.2 には同定された VG-model のパラメータを示す。



図-3.23 試験に供した試料

表-3.2 VG パラメータの同定結果

試料	VG パラメータ		s	r
		n		
船生石	0.000156	2.28	0.325	0.030
白浜砂岩	0.000438	1.965	0.148	0.060

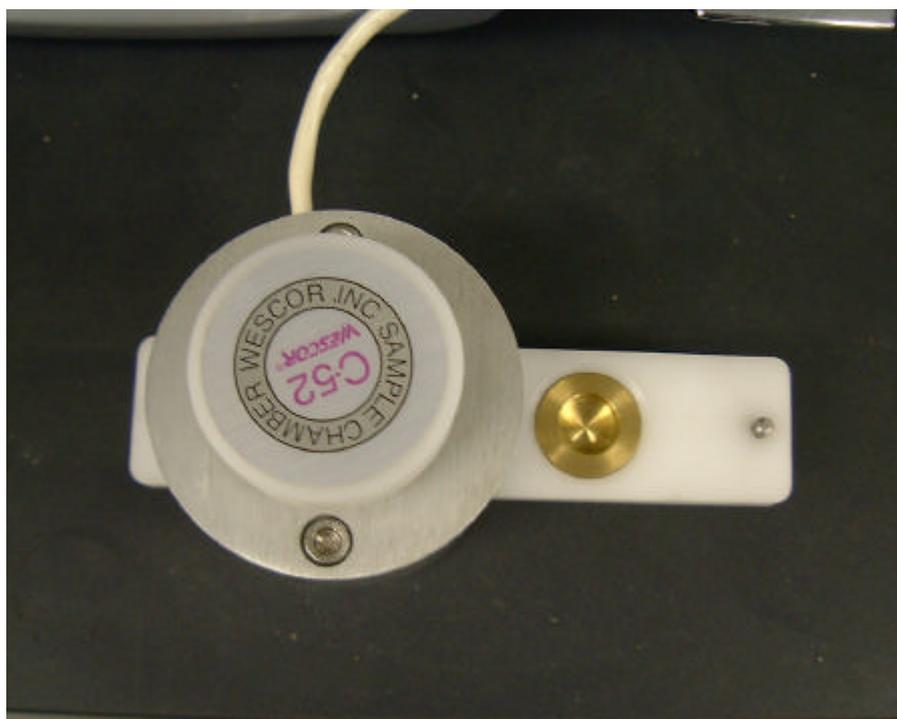
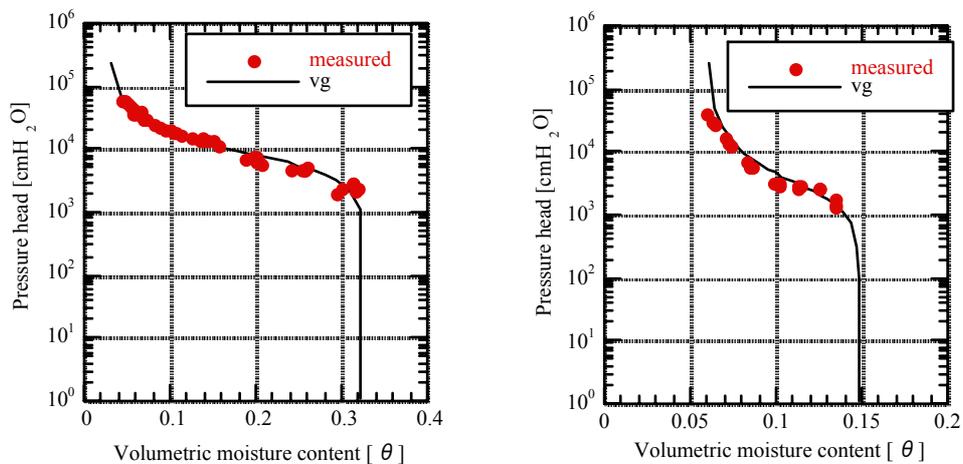


図-3.24 WESCOR 社製サンプルチャンバーC-52-SF



図-3.25 ナノボルトメータ



(1) 船生石

(2) 白浜砂岩

図-3.26 各試料に対する水分特性曲線およびVG-modelによる同定結果

3.2.3 飽和透水係数

船生石の飽和透水試験は、JIS A 1218（定水位透水試験）により行った。供試体の直径は50mmである。試験は、厚さ5mmの供試体を2個、厚さ10mmの供試体を3個実施した。図-3.27には排水量の径時変化を示す。供試体Cを除き、全て排水量の勾配は等しくなった。供試体Cに関しては、試験用セルと岩石との隙間が十分にシール出来ていなかったものと考えられる。したがって、供試体Cを除いた4ケースの排水量勾配の平均値から透水係数を算定した。

また、白浜砂岩は、船生石よりも透水係数が小さいことから、測定手法は短時間で計測可能なトランジェントパルス法とした。直径50mm、高さ100mmの供試体を6個用意し、透水係数を算定した。算定された透水係数の平均値を表-3.3に示す。

表-3.3 透水試験結果

岩石	透水係数[m/s]
船生石	4.782E-06
白浜砂岩	8.633E-07

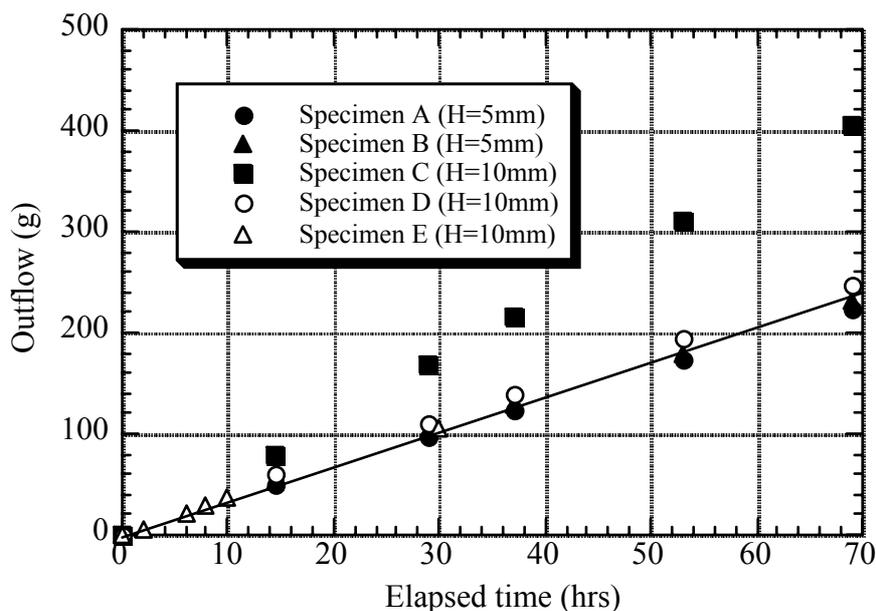


図-3.27 排水量の径時変化 (船生石)

3.2.4 不飽和透水係数

不飽和透水係数は、コア状の岩石を用い、一端を解放、他の面は防水シールし、解放面と反対側の非定常な圧力変化を計測しカーブマッチングより算定した。

白浜砂岩については既に報告¹⁶⁾されているデータを用いることとし、ここでは船生石に関して不飽和透水係数を得ることとした。表-3.4にVG式を利用した白浜砂岩の不飽和透水係数の同定結果を示す。ここでのnは水分特性曲線とは独立に与えられる値である。

図-3.28に不飽和透水係数を得るための試験概要図を示す。図-3.29に1次元解析モデル図を示す。図-3.30~3.31には2試料で得られた蒸発量、圧力水頭の経時変化を示す。表-3.5に計測された蒸発量および体積含水率を示す。このときの体積含水率は、表-3.2と異なるが、不飽和透水係数の同定の際には表-3.5に示す飽和体積含水率の値、0.29を用いた。ただし、水分特性曲線に用いるパラメータ α , nは表-3.2の値を用いた。図-3.30に示す試料No.1の圧力水頭の経時変化は途中エアの侵入と見られる圧力の戻りがみられる。ここでは試料No.2の圧力水頭の経時変化を対象に相対透水係数を算定することとした。

表-3.4 白浜砂岩

	白浜砂岩
VG 式の n	3.0

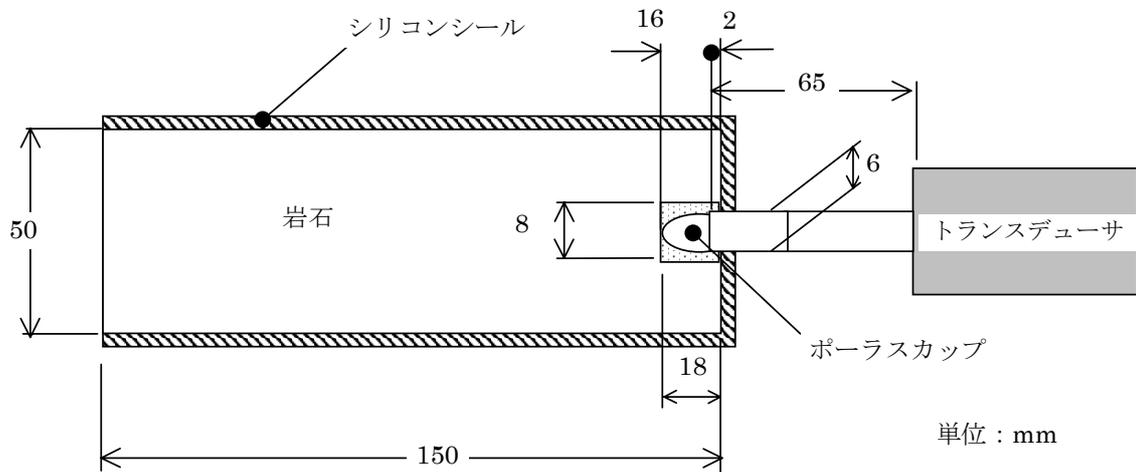


図-3.28 不飽和透水係数を得るための試験概要図

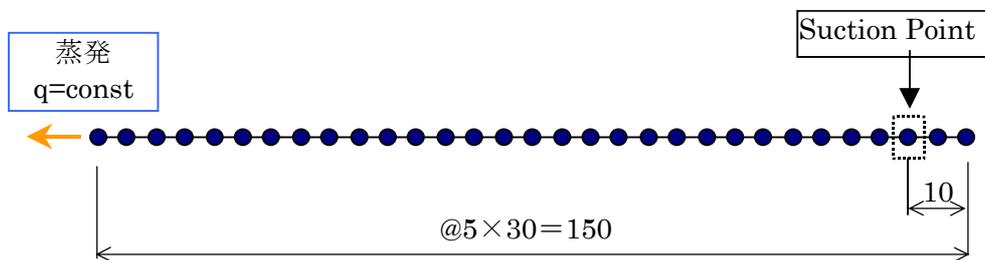


図-3.29 1次元解析モデル

表-3.5 試料の飽和体積含水率 θ_s と計測された蒸発量

試料	断面積 (cm ²)	θ_s	cc/hrs	cc/m ² /s
1	19.63	0.29	0.3080	0.0436
2		0.29	0.2095	0.0296

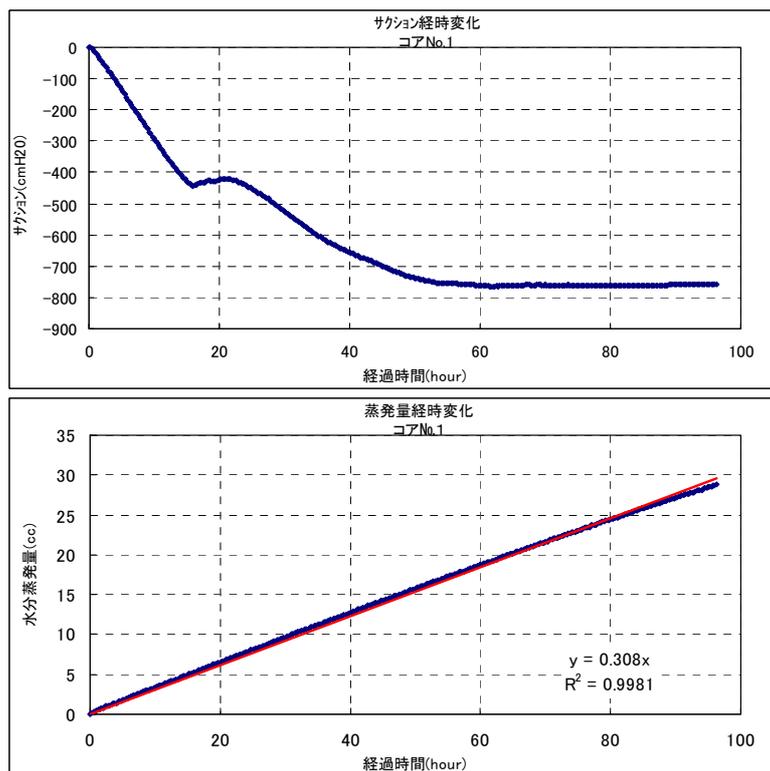


図-3.30 試料 No. 1 の圧力水頭・水分蒸発量累計の経時変化

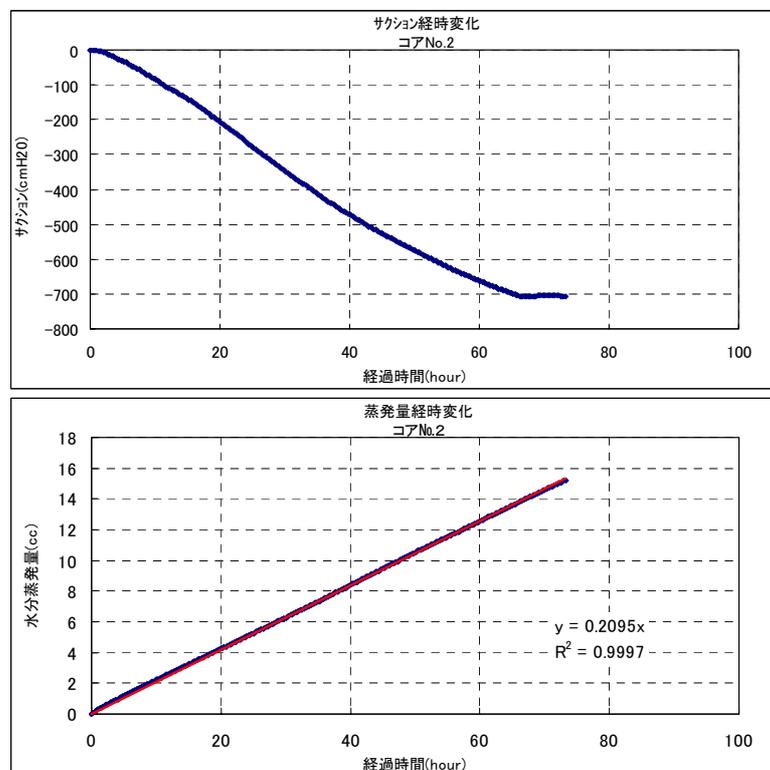


図-3.31 試料 No. 2 の圧力水頭・水分蒸発量累計の経時変化

始めにどの程度の値を示すのかを把握する目的で透水係数に関するパラメータスタディを実施した。図-3.32 にパラメータスタディ結果を示す。

透水試験により得られた船生石の飽和透水係数は $4.8 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ である。この結果を見ると、計測された圧力水頭と一致させるためにはかなり透水係数が小さくないとカーブマッチしないと考えられる。このため不飽和時は飽和透水係数に対しある比率 d ($d < 1.0$) で小さな飽和透水係数を仮定し、水分特性曲線とは独立にVGモデルでの相対透水係数のパラメータ n を算定することとした。図-3.33 にカーブマッチの結果を示す。ここで d は 0.00008 であった。図-3.33 からパラメータ n は 18 以上といえる。

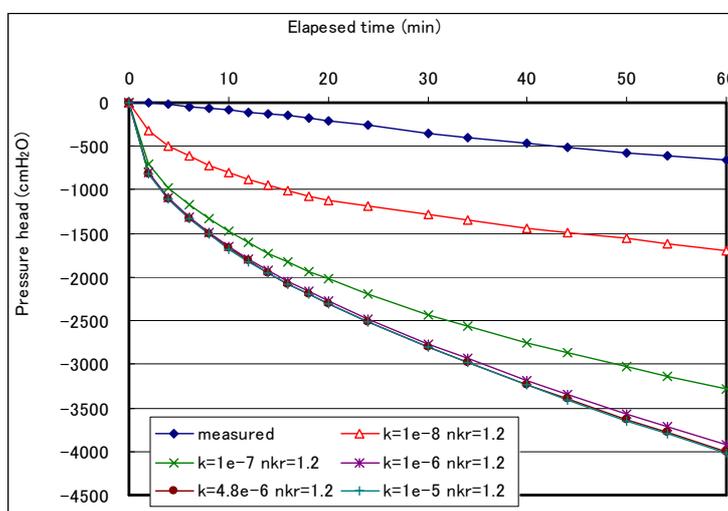


図-3.32 パラメータスタディ結果
(k は飽和透水係数、 nkr はVG 式のパラメータ n)

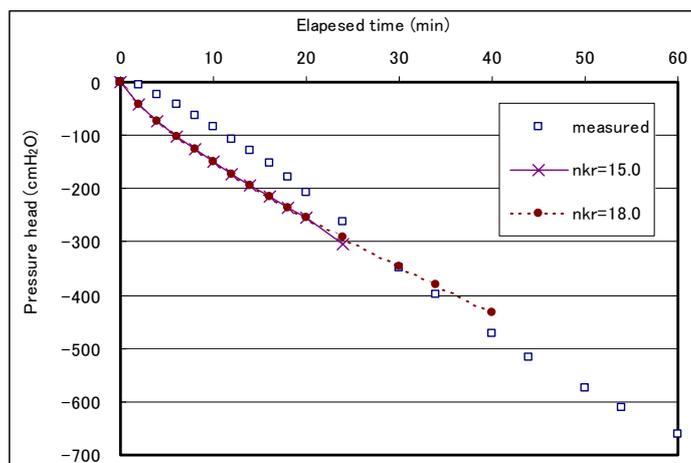


図-3.33 カーブマッチの結果
(nkr はVG 式のパラメータ n)

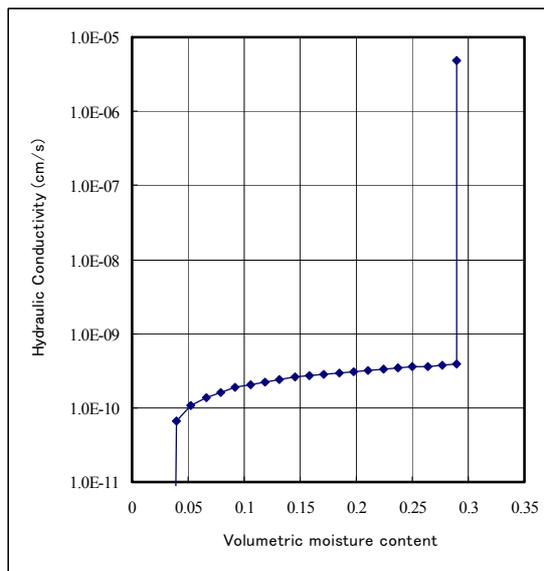


図-3.34 船生石の不飽和透水係数

解析に用いるパラメータをまとめると以下の通りである。

表-3.6 測定および同定された各岩石の物性値

	θ_s	θ_r	α (1/cm)	n	K_s (cm/s)	不飽和透水係数
白浜砂岩	0.15	0.06	0.000438	1.965	8.6E-7	VG式 (n=3)
船生石	0.29	0.03	0.000156	2.28	4.8E-6	VG式 (n=18) $\times 0.00008$

4. 岩石内への間隙水圧計の設置方法に関する検討

4.1 概要

不飽和の状態を精度よく計測するためには、計測機器の選択に加え、その計測機器の設置方法の選定が重要となる。FDRの計測に関しては、3章において詳細に検討した結果を報告した。ここでは、岩石試料の間隙水圧を精度よく計測する方法として、岩石と計測機器の隙間の処置および計測機器先端部の取扱いについて検討した。間隙水圧計では、岩石内のサクションを測定する。

4.2 間隙水圧計設置方法

岩石コアに間隙水圧計設置用の孔を試験試料と同じ大きさ（直径、深さ）で掘削し、そこに間隙水圧計を設置した。間隙水圧計の設置方法は、図4-1に示す3ケースである。(a)はセラミックキャップを取り付けたフィルター（セラミックフィルター）と岩石との隙間を石膏で充填する方法、(b)はセラミックキャップを付けないフィルター（メッシュフィルター）と岩石との隙間を石膏で充填する方法、(c)はセラミックフィルターと岩石との隙間を細粒ケイ砂で充填する方法である。(c)では間隙水圧計設置孔内に飽和した細粒ケイ砂を充填後、セラミックフィルターを設置し、上部を石膏で固める。また、岩石コア上部はエポキシ系接着剤で全体をシールする。これにより、間隙水圧計設置側からの水および空気の経路を遮断し、石膏部からの蒸発を防ぐとともに、隙間処置材および岩石を介しての水圧変化を計測できるようにした。間隙水圧計設置終了後、約0.1MPaで加圧し、その後、供試体を乾燥させサクションの測定を実施する。

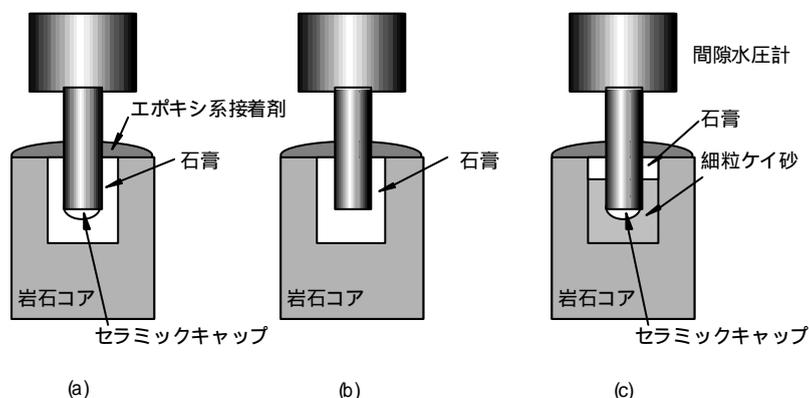


図-4.1 間隙水圧計設置方法

4.3 間隙水圧計設置手順

多孔質媒体不飽和水理試験設備の「水槽 B」は岩石試料の試験に対応した試験装置であり，本検討も水槽 B を用いて実施した。間隙水圧計の設置手順を以下に詳細に述べる。

(1) 岩石へのセラミックフィルターおよびメッシュフィルターの設置

はじめに，図-4.2 に示すように岩石コアへのセラミックフィルターあるいはメッシュフィルターの設置について示す。(a)では，セラミックフィルターを石膏内に設置した。設置孔内に石膏を充填し，石膏が固化する前に，脱気飽和させたセラミックフィルターを設置した。(b)はメッシュフィルターを石膏内に設置した。(a)と同様に設置孔内に石膏を充填し，石膏が固化する前に，メッシュフィルターを設置した。(a)(b)ともに，石膏固化後はコア上部まで石膏を充填した。(c)は飽和した細粒ケイ砂を設置孔内に充填し，ケイ砂内に脱気飽和させたセラミックフィルターを設置し，その後，上部に石膏を充填した。

各供試体とも，設置孔の石膏固化後に上部にエポキシ系接着材を塗布した。エポキシ系接着剤を塗布する目的は，石膏部からの蒸発を防ぐとともに，隙間処置材および岩石を介しての影響を除去するためである。写真-4.1 にはセンサー設置の様子を，写真-4.2 にはエポキシ系接着剤を塗布した様子を示す。

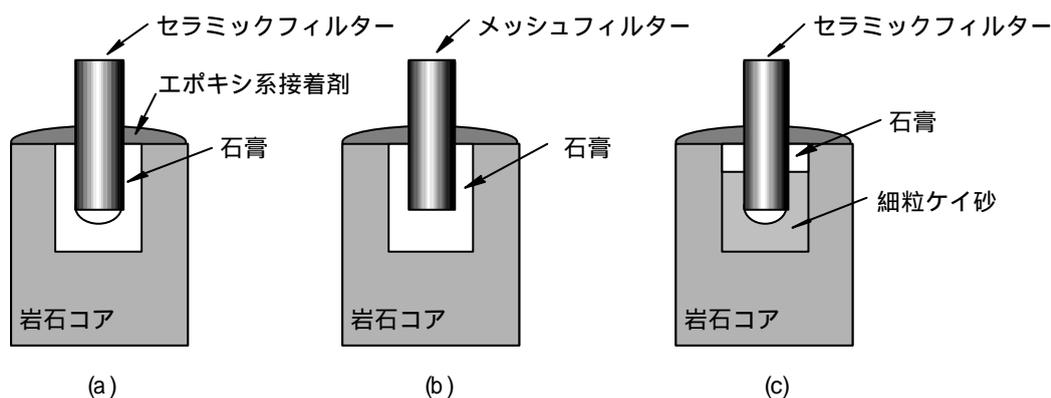


図-4.2 フィルターの設置概要

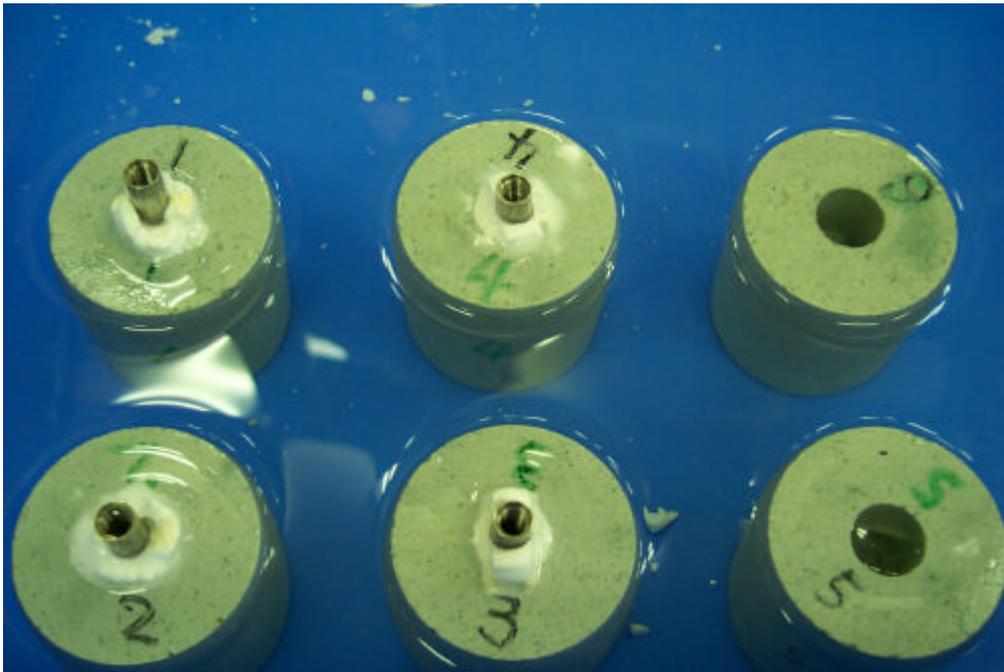


写真-4.1 フィルター設置の様子



写真-4.2 エポキシ系接着剤の塗布

(2) 岩石の水槽への設置

(1)のようにフィルターを設置した岩石コアを、水槽Bに設置した。また、

比較検討のためにセラミックフィルター、メッシュフィルターのみも設置した
(図-4.3 参照)。

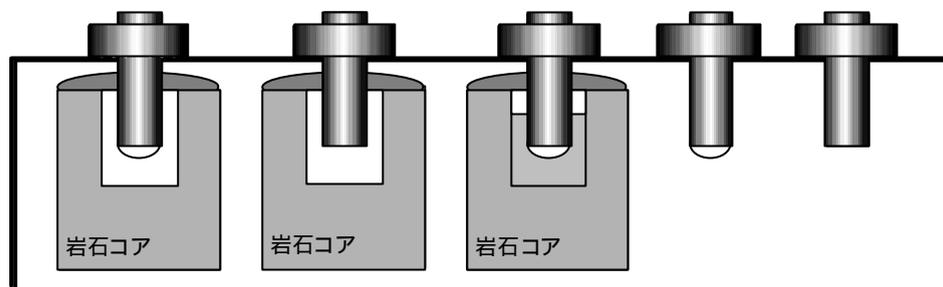


図-4.3 岩石の水槽への設置

(3) 間隙水圧計の設置および岩石の飽和

(2)までに水槽に設置したフィルターに間隙水圧計を設置した。その際に、フィルター内に空気が残らないように注意した。間隙水圧計設置後、水槽に蓋をした、水を充填した。これらの設置が終了した後、真空ポンプにより岩石を脱気飽和した(図-4.4 参照)。写真-4.3 には、水槽内に設置した様子を示す。アクリル窓から見える円柱状のものが岩石コアである。

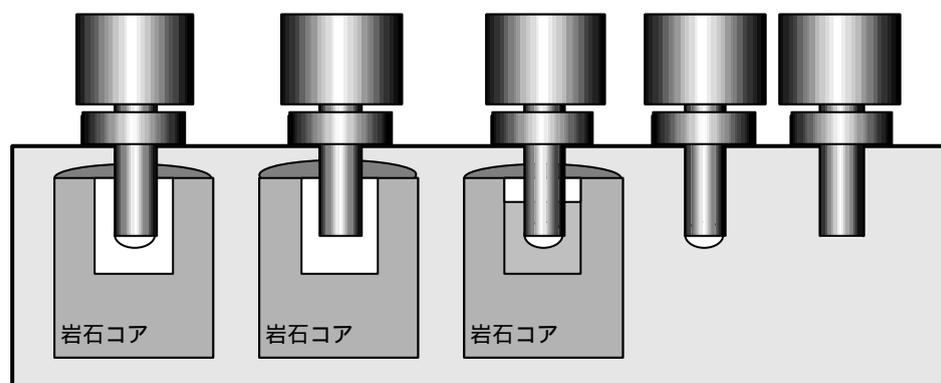


図-4.4 岩石の飽和

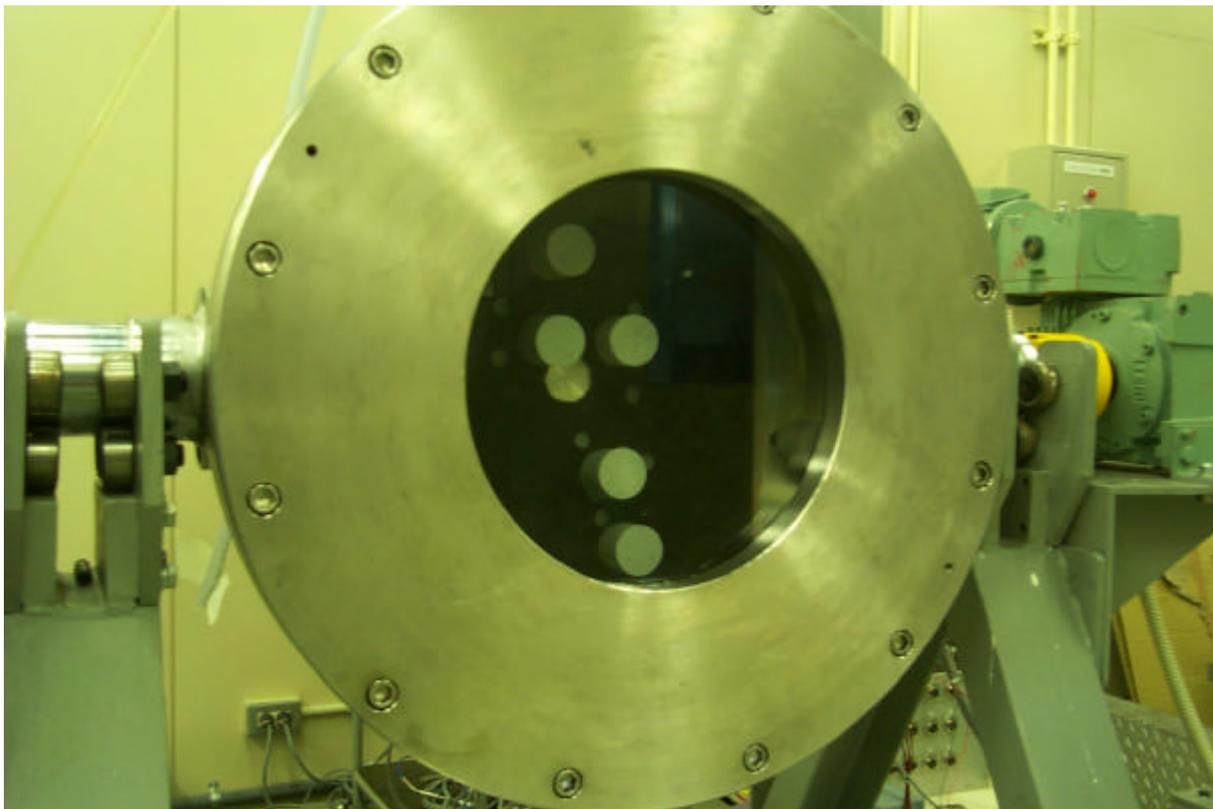


写真-4.3 岩石を水槽内へ設置した様子

4.4 試験手順

試験は下記の手順で実施した。

- (1)加圧装置を用いて水槽内を 0.1MPa で加圧（正圧）する。
- (2)水槽内の圧力が安定した後，圧力を開放し，水槽前面の蓋を外し，水槽内の水を排水する。そのまま，岩石を乾燥させ，圧力（負圧）の経時変化を測定する。
- (3)下記の各センサーにより取得されたデータを比較検討する。

岩石内 + 石膏 + セラミックフィルター

岩石内 + 石膏 + メッシュフィルター

岩石内 + ケイ砂 + セラミックフィルター

セラミックフィルター

メッシュフィルター

4.5 試験結果

図-4.5 に岩石内に設置したセンサーによる試験結果を示す。図より，セラミックフィルターを用い，孔内を飽和した細粒ケイ砂で充填したものは，加圧除

荷時の反応がもっとも早い結果となった。しかしながら、乾燥時に負圧が計測出来ないことから、この設置方法は不飽和の測定に適していないことがわかった。

一方、孔内を石膏で充填した場合の比較では、セラミックフィルターとメッシュフィルターはほぼ同じ挙動を示しており、除荷に続く不飽和状態に関しても計測できている。圧力変化に対する追随性では、両者の比較ではメッシュフィルターを用いた方が、若干反応が早いことがわかる。これより、石膏が充分に孔内に充填されている場合は両者の差はそれほど大きくなく、不飽和状態も計測できることがわかった。セラミックフィルターの反応が鈍いのは、セラミック部の水の移動の抵抗が影響していると考えられる。しかし、両者の圧力変化に対する反応の差は有意であるとは考えにくい。両方式とも負圧の測定最大値はほぼ同じ値の6 [m]である。それ以上の負圧は計測できず、計測値は-6 [m]の一定値を示した。

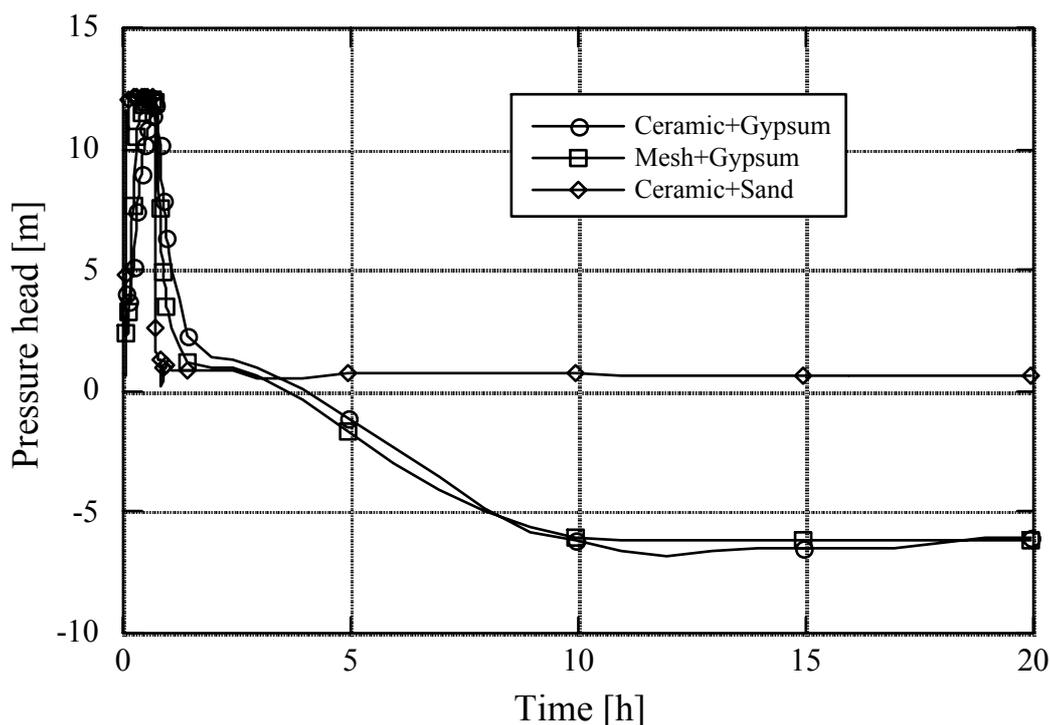


図-4.5 岩石内に設置したセンサーによる計測結果

次に、センサーの設置の観点から検討した。岩石試料を用いた水槽Bでの試験の際には、センサー設置孔が深いため、本検討での設置方法より困難になると考えられる。このため、センサーの感知部近傍で石膏の充填が不十分となる

ことも考えられる。センサー周囲の石膏の充填が不完全であると、センサー感知部近傍に空隙ができたり、その空隙に空気が残存し、計測できないことも考えられる。セラミックフィルターの先端部は丸く、あらかじめ充填された前もって設置孔に充填された石膏部に密着しながら規定の深さにセンサーを設置することができる。一方、メッシュフィルターは先端部に平らで中心部に凹みがある。このため、前もって石膏を充填した設置孔にメッシュフィルターを挿入する際、先端部に空気が取り残されることが考えられる。フィルターの設置の良否は、フィルターの固着後、センサー本体を設置して初めてわかることから、設置時のリスクを考慮して設置の不備の可能性の低いセラミックフィルターを採用した。

5. 鉛直2次元水槽における不飽和領域の形成試験（CLUE：水槽A）

5.1 概要

ここでは、処分坑道周辺に生じる不飽和領域の進展メカニズムを実験的に明らかにするため、多孔質媒体不飽和水理試験装置（CLUE）における鉛直2次元水槽（水槽A）を用いて行った模擬試験について述べる。

坑道周辺の不飽和領域の形成・広がりには主に次の2つに支配される。

- ①坑道周辺から供給される水量と坑道への排水量（境界条件）
- ②坑道周辺の透水係数

そこで、模擬試験により不飽和領域の広がり特に影響の大きい支配要因を抽出した。

試験内容は主として以下の2項目である。

1) 鉛直2次元水槽における円形坑道周辺での不飽和領域の形成試験

粒径0.1mmの最も粒径の細かいガラスビーズを用いて均質場を設定し、不飽和領域の形成試験を実施する。均質場にて不飽和領域が生じない場合は、モデル坑道の周辺に粒径の大きいガラスビーズを設置し、不均質場における不飽和領域の形成試験を実施する。

2) 不飽和領域形成状況の計測・観察，形成条件の把握

不飽和領域の形成条件下で、FDR，間隙水圧計等により計測を実施する。さらにCCDビデオで不飽和領域の発達状況を記録する。

5.2 試験装置

図-5.1にCLUE水槽Aの試験装置概略図を示す。水槽モデル部分は高さ1200mm×幅1000mm×奥行200mmのステンレス製で、不飽和領域の形成が観察できるように前面のみが20mm厚の亚克力製になっている。装置全体の構成は、モデル作成のために水槽を横にして試料を充填して立ち上げるための回転装置，前面の亚克力蓋取り外し用のチェーンブロック，および左右水位固定用のオーバーフロータンク，さらに排水盆となっている。

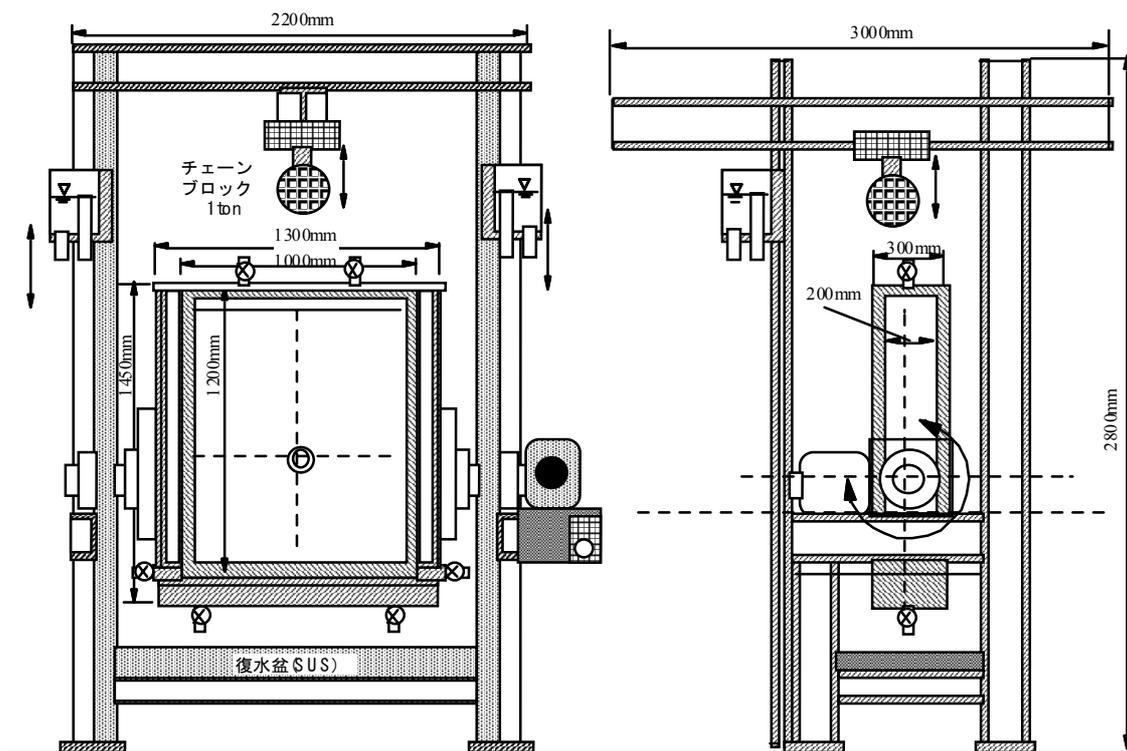


図-5.1 鉛直2次元多孔質媒体不飽和水理試験装置（水槽A）概観図

5.3 試験ケース

試験ケースを表-5.1に示す。試験はケース区分3通り（EX1：予備試験，EX2：水位固定条件，EX3：左右端不透水条件）で行った。

表-5.1 試験ケース

No.	実施日	試験ケース	外側ビーズ径	内側ビーズ径	側面条件	FDR	間隙水圧計	試験水	排水量測定
1	10-7-30	EX1-1	0.1	0.1		○	○	無色水	×
2	11-3-12	EX2-3	0.1	0.2	水位固定	△	△		×
3	11-7	EX2-4	0.1	0.2	水位固定	×	○		×
4	11-8-5	EX3-1	0.1	1.0	不透水	○	△		○
5	11-8-10	EX3-2	0.1	0.8	不透水	○	△		○
6	11-9-2	EX3-3	0.1	1.0	不透水	×	○		○
7	11-9-14	EX3-4	0.1	0.8	不透水	×	○		○

○：測定，△：一部測定，×：非測定

5.4 試験結果

5.4.1 予備試験 (EX1-1)

1) モデル条件

まず、CLUE装置の稼働状況、間隙水圧計及びFDRの測定精度を確認する目的で予備試験を行った。図-5.2に試験条件図を示す。モデルはガラスビーズ0.1mmの均質場とした。図-5.3にセンサーの配置図を示す。FDRをF01からF10の10個、間隙水圧計をP01からP11の11個設置した。

2) 試験内容及び観察結果

試験は、まず、①パールコンで作成した坑道部からの排水を行い、その後、②坑道部からの排水を止め、装置下端から排水させてセンサーの反応をチェックした。

観察の結果、①の坑道部からの排水過程では、不飽和状態は発生しなかった。

3) 計測結果

試験結果を図-5.4および図-5.5に圧力水頭と体積含水率の経時変化としてそれぞれ示す。図-5.4および図-5.5の測定結果はいずれも②のステップ開始後に測定したデータである。排水に伴う不飽和領域の拡大の様子が間隙水圧計とFDRセンサーによってとらえられていることがわかる。ただし、間隙水圧計のうち、P09はセンサー内の空気の混入とセラミックカップの脱気不足が原因と考えられる測定ミスが認められた。FDRについてはほぼ妥当な値が得られている。これらの測定値の妥当性を検討するために、水分特性試験で得られた水分特性曲線との比較を行った結果を図-5.6に示す。図のプロットは、図-5.5の体積含水率ごとの図-5.4の水圧のデータをプロットとしたものである。飽和体積含水率部分の誤差はCLUE試験での供試体の締固め不足によるものであり、その他は間隙水圧計の測定ミスによるものと考えられるが、これらを除いてはほぼ一致が見られることから、CLUEに使用するセンサーが供試体の不飽和形成過程を測定する装置として妥当なものであると言える。

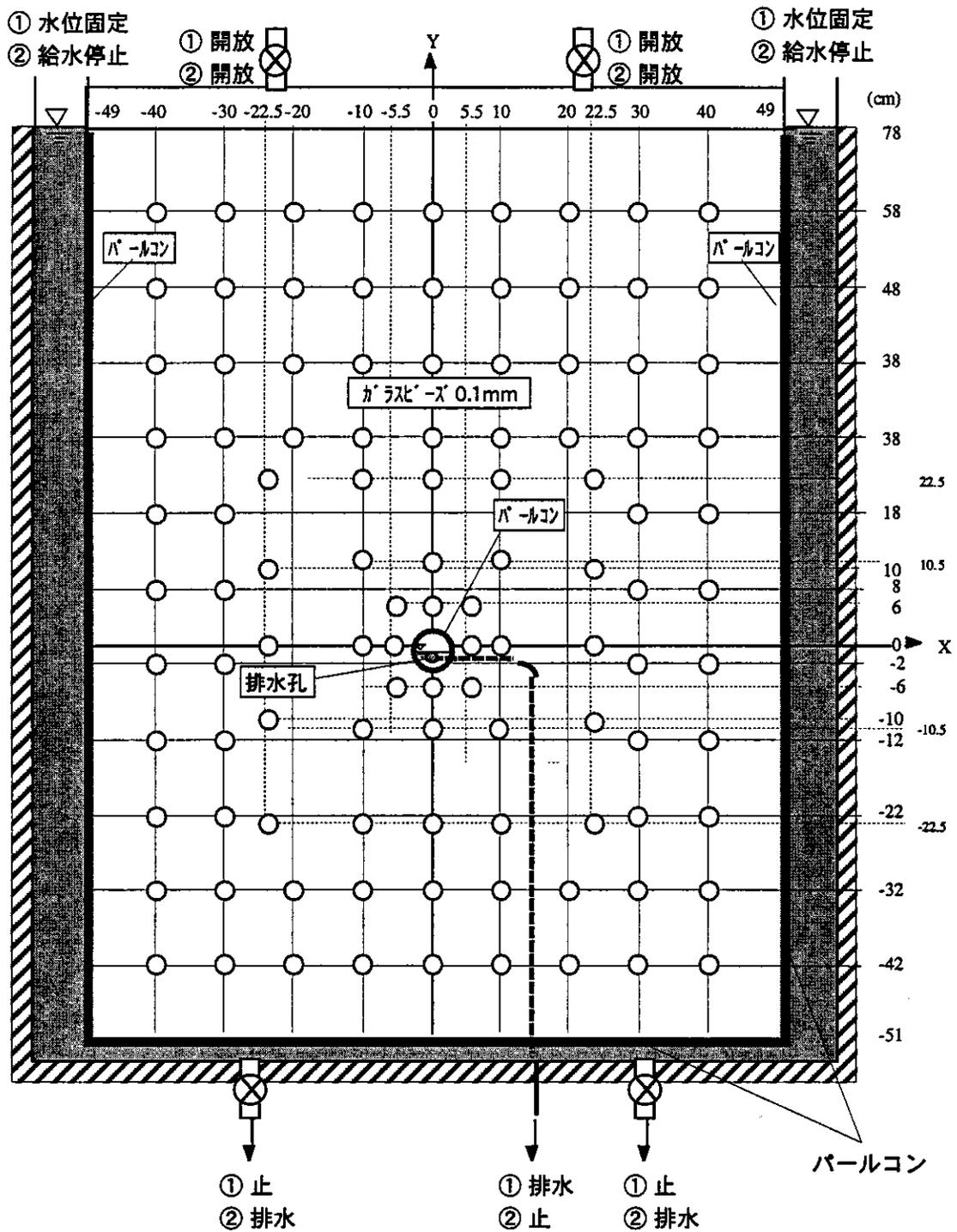


図-5.2 試験条件 (CLUE水槽A：予備試験EX1-1)

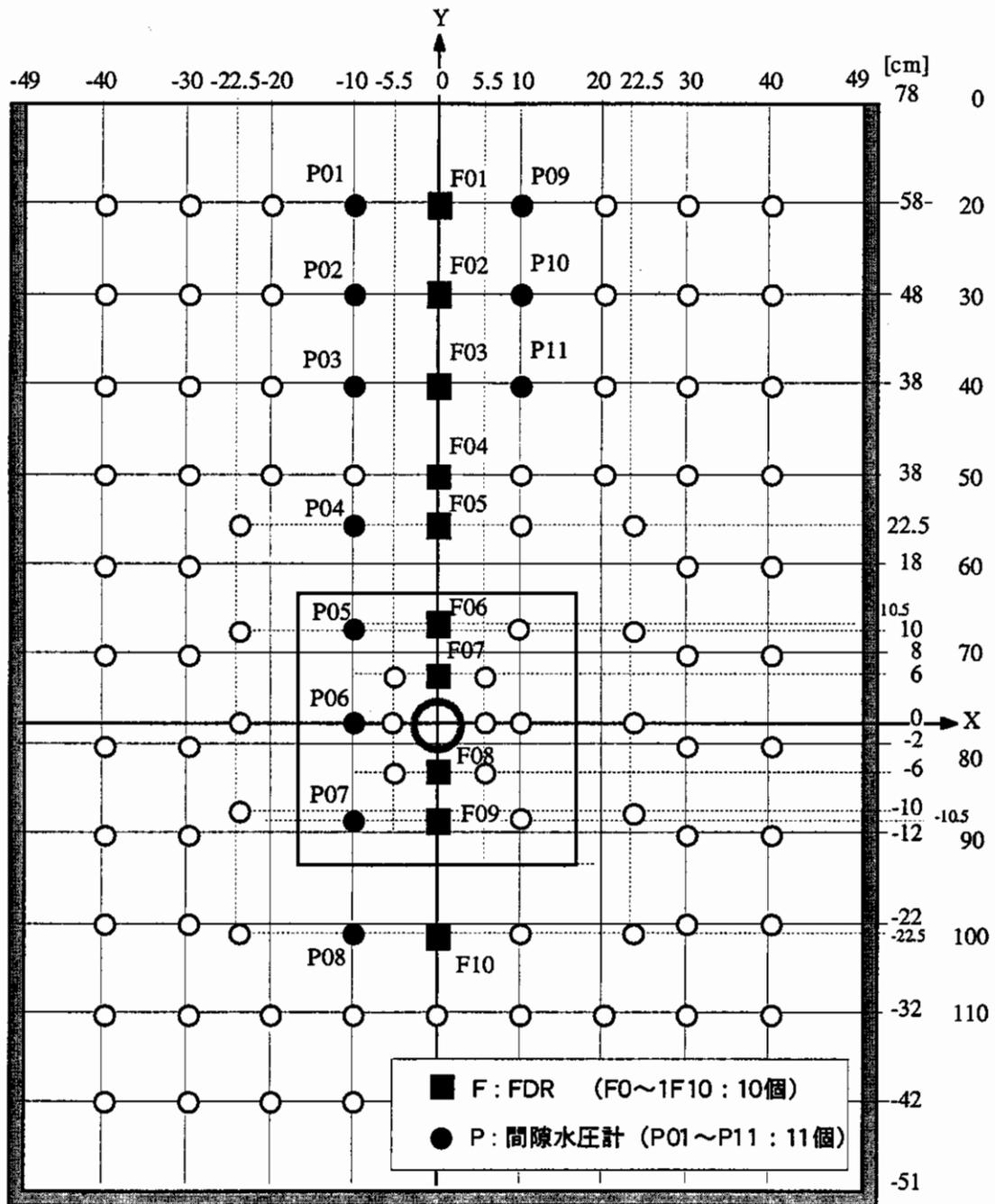


図-5.3 センサー配置図 (CLUE水槽A : 予備試験EX1-1)

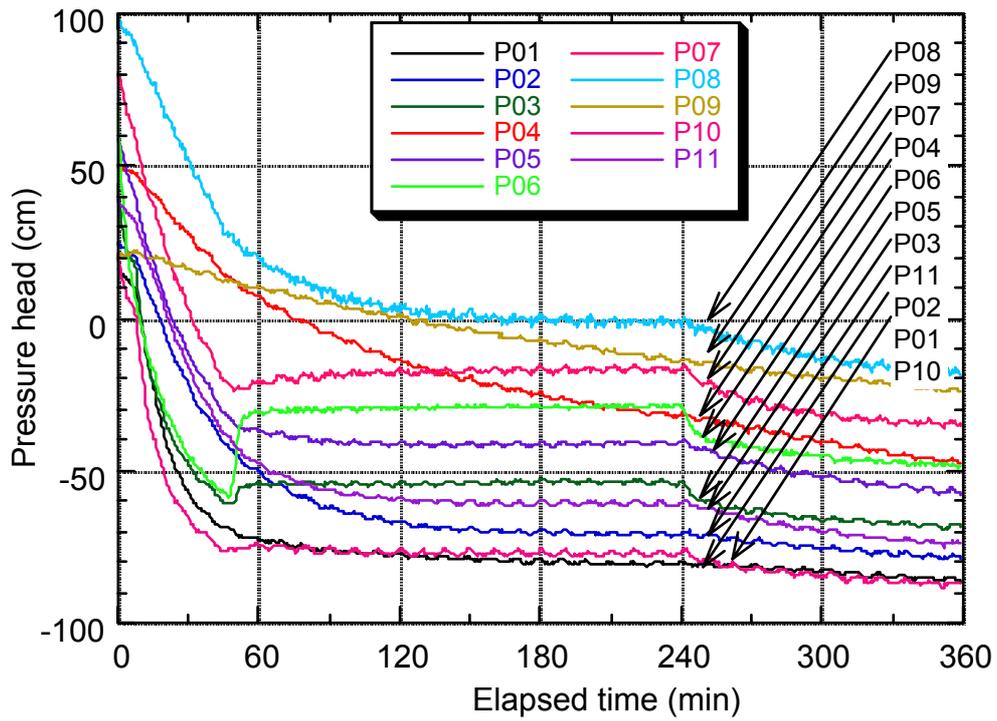


図-5.4 圧力水頭の経時変化 (EX1-1)

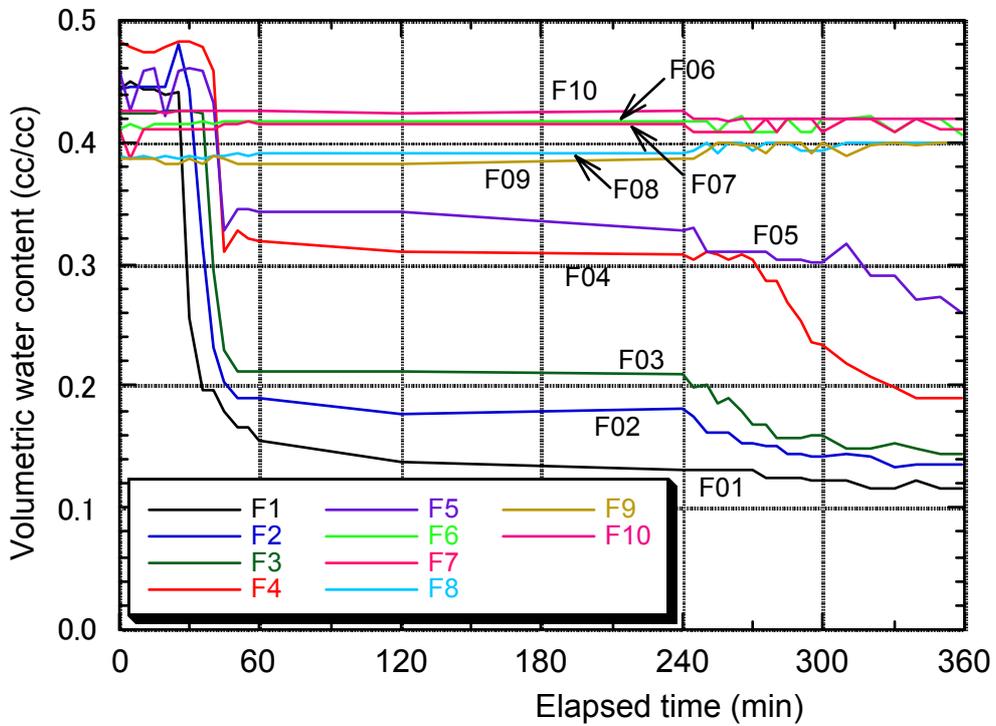


図-5.5 体積含水率の経時変化 (EX1-1)

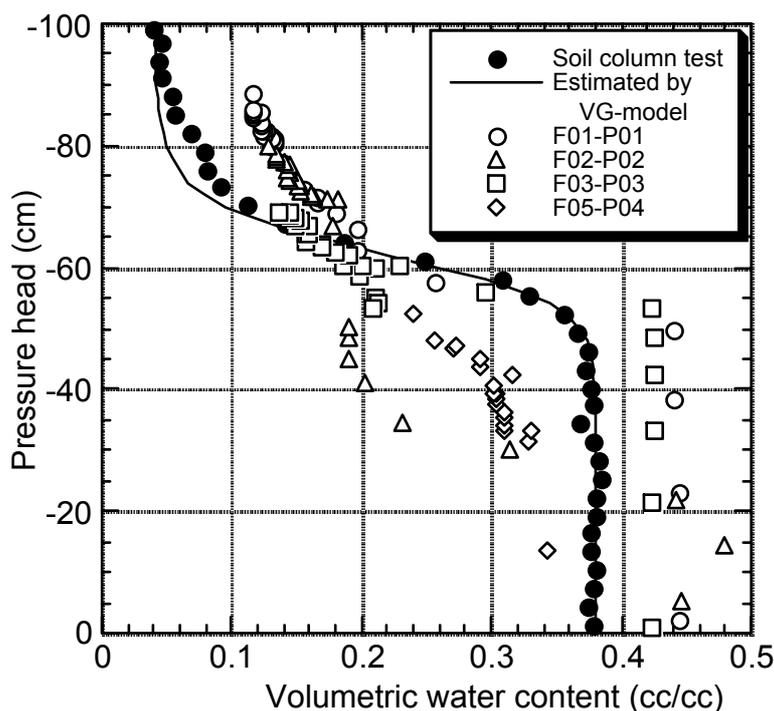


図-5.6 水分特性試験結果との比較 (EX1-1)

5.4.2 水位固定条件 (EX2)

1) モデル条件

実験模式図を図-5.7に示す。先の予備試験では、坑道モデル部からの排水では坑道モデル部周辺に不飽和領域が形成されなかったため、今度は2種類のビー (0.1mm, 2.0mm) を用いて不均質場を作成し、坑道モデル部分からの排水を行った。図-5.8に各センサーの設置状況を示す。間隙水圧計は対象とするP01からP17の17個、FDRはF01からF07の7個設置した。間隙水圧計は測定負圧範囲が小さいことから、セラミックカップを用いずにステンレスメッシュを用いた。なお、FDRは150mmの電極を用いた。

2) 試験内容及び観察結果

このモデルで、①坑道部からの排水を行うと、ゆるみ領域に気泡が浸入し、不飽和領域の発生が見られた。この気泡は、外側の部分 (0.1mmビーズ) には広がらず、内部の円形部分の上部に溜まっていった。写真-5.1にゆるみ領域部分の状況を示す。坑道部分の水位から飽和領域が約4cmの高さまで立ち上がっており、右図の水分特性曲線の結果と一致している。これらの現象は約9分で定常状態に達した。その後、②坑道部からの排水を停止し、水槽下部から排水を行った。

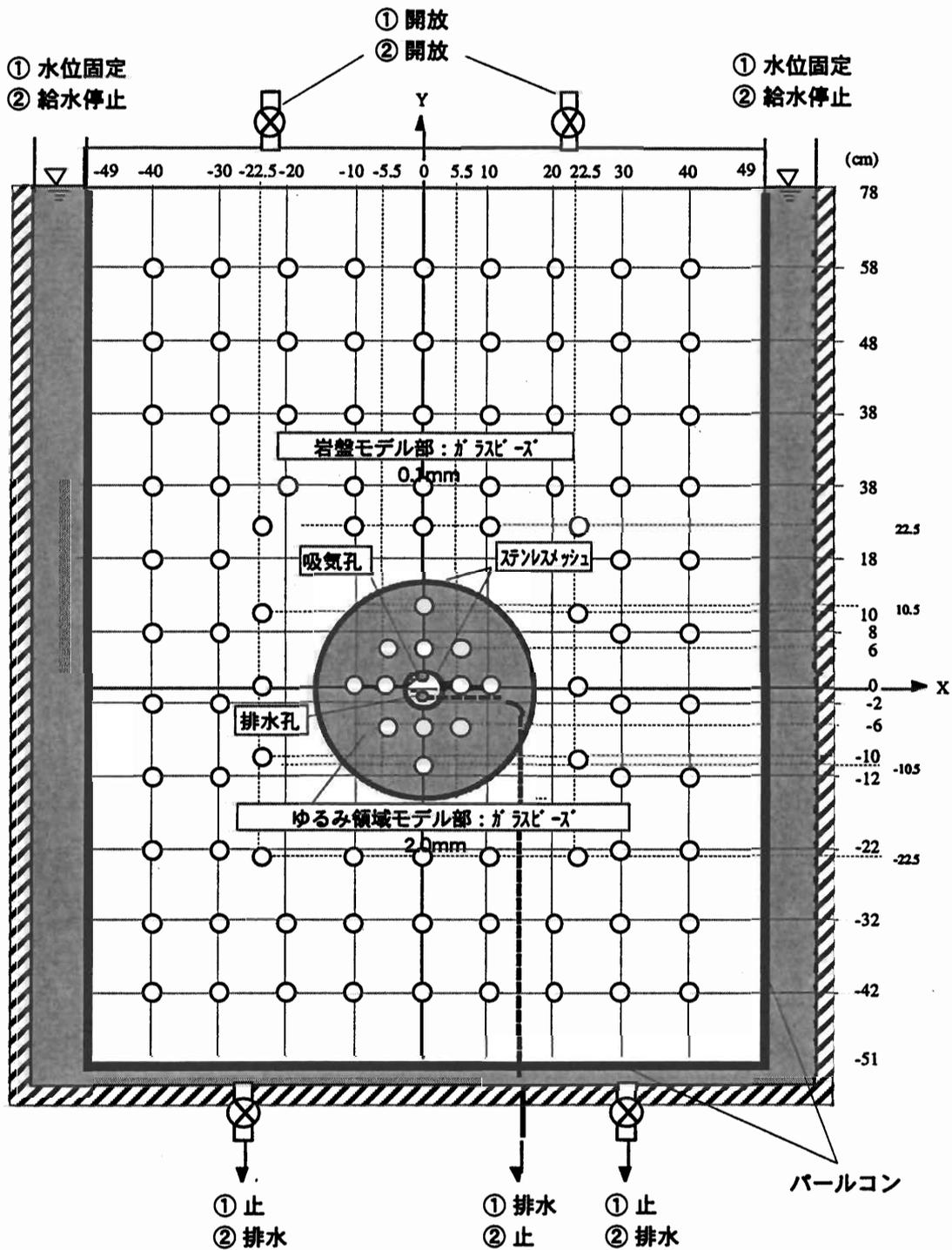


図-5.7 試験条件 (CLUE 水槽 A : EX2)

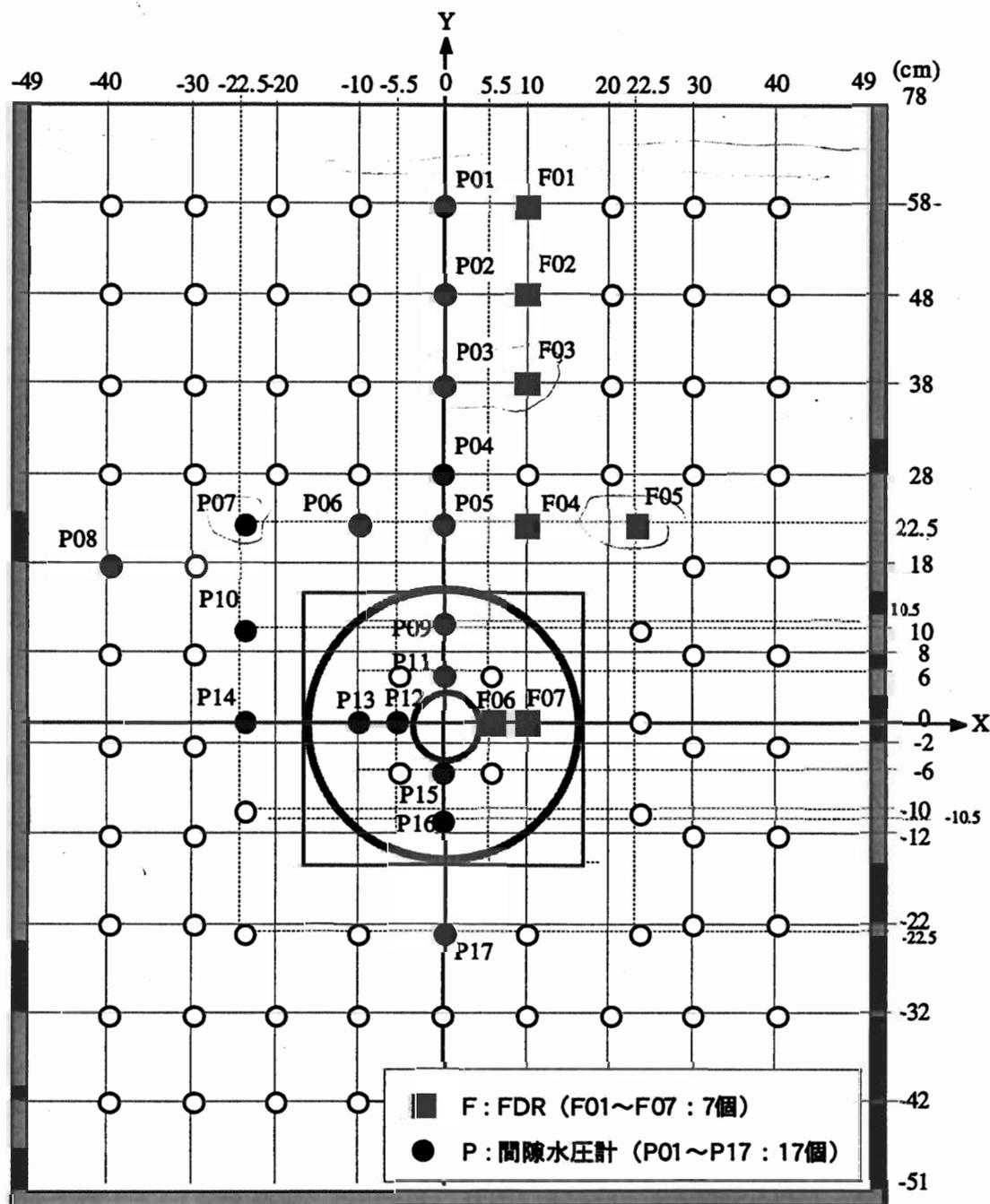


図-5.8 センサー配置図 (CLUE水槽A : EX2)

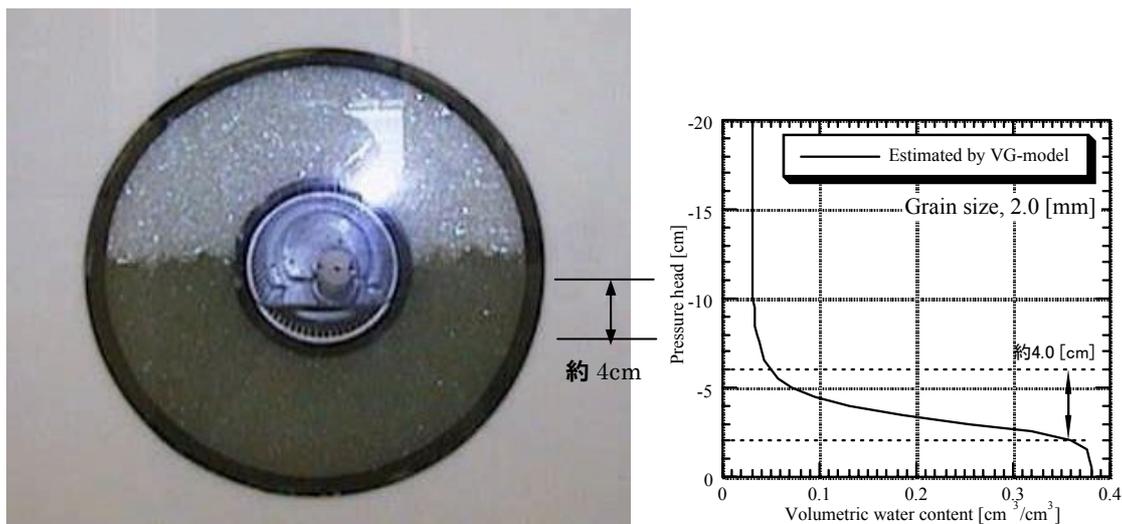


写真-5.1 不飽和領域発生状況 (EX2)

3) 計測結果

ビーズ 0.1mm 及び 2.0mm の圧力水頭の経時変化をそれぞれ、図-5.9、図-5.10 に、FDR による体積含水率の経時変化を図-5.11 に示す。これらより、①坑道部より排水を開始した直後に全体の圧力は急激に低下し、ゆるみ領域の P09、P11 が負圧に転じている。この値をガラスビーズ 2.0mm の水分特性曲線から判断すると、排水直後にこの部分に不飽和領域が発生していることがわかる。また、これらの点の体積含水率の値は、P09 が $\theta = 0.05$ ($S_r = 10\%$)、P11 が $\theta = 0.20$ ($S_r = 45\%$) となる。

その後、②坑道部からの排水を停止し、水槽下部から排水を行うと、全体的に緩やかに低下し、その後、水槽上部から順に不飽和状態に至っている。なお、水位の低下にともない間隙水圧計が水面以上になったものは空気がセラミックフィルタに侵入し圧力解放され、計測値はゼロとなる (P01, P02, P03, P04)。体積含水率も F01～F03 が低下しており、多少ばらつきはあるものの、FDR によりその経時変化を追うことができている。

次に、測定データの妥当性確認のため、本試験で測定されたほぼ同位置にある間隙水圧計と FDR のデータを水分特性曲線上にプロットしたものを図-5.12 に示す。水分特性試験の結果と比べると、体積含水率の値はおよそ 0.1 程度大きくなっている。これは CLUE 試験でのガラスビーズの締固め具合が緩く、間隙が大きかったためと考えられる。

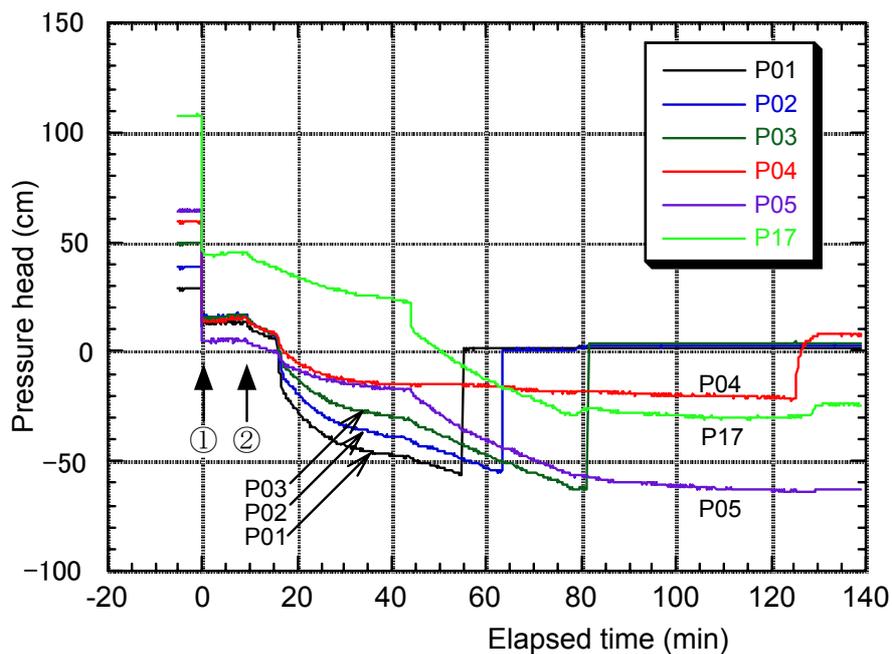


図-5.9 圧力水頭の経時変化：外側 0.1mm ビーズ部分 (EX2-3)

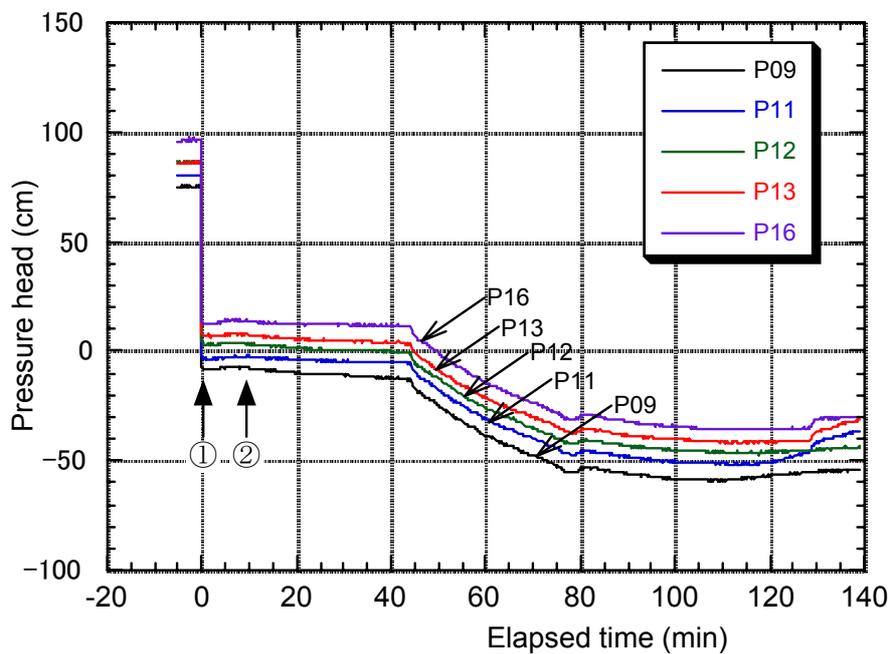


図-5.10 圧力水頭の経時変化：内側 2.0mm ビーズ部分 (EX2-3)

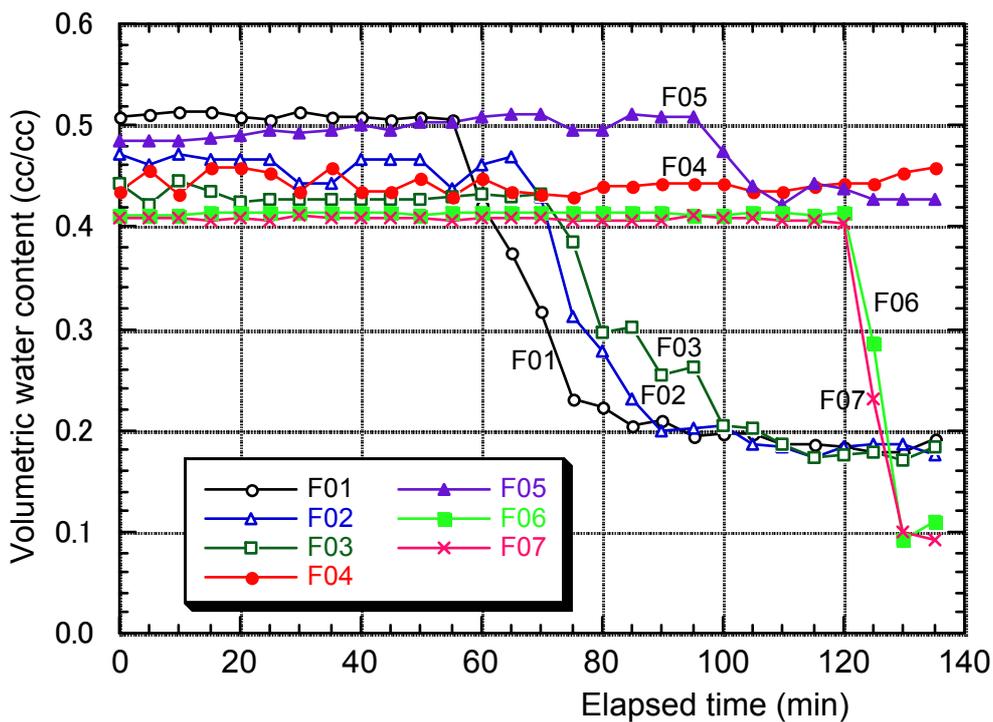


図-5.11 体積含水率の経時変化 (EX2-3)

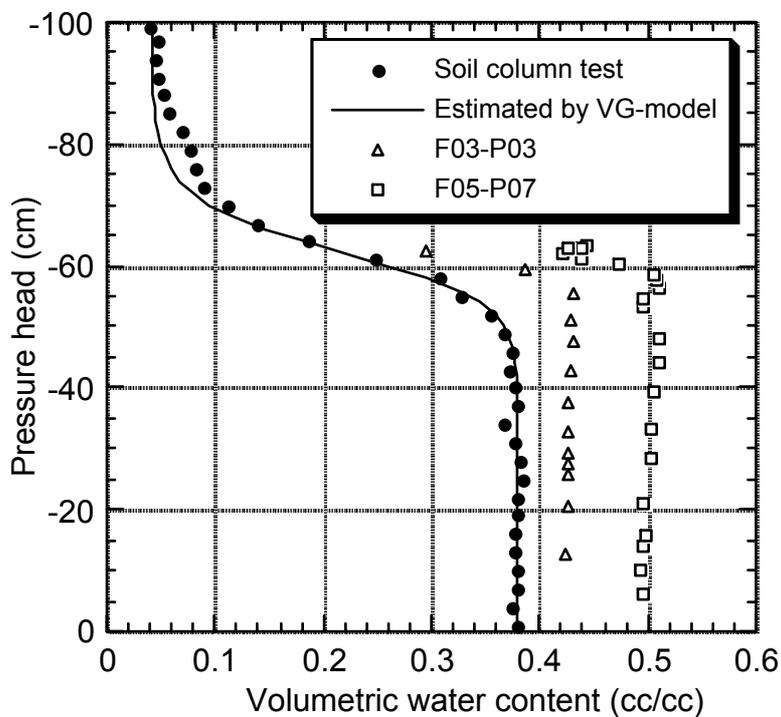


図-5.12 試験中の圧力水頭と体積含水率測定値の検討
(ピース 0.1mm, pF 試験結果との比較)

5.4.3 不透水条件①内側ビーズ 1.0mm (EX3-1 : 体積含水率測定, EX3-3 : 圧力水頭測定)

1) モデル条件

実験模式図を図-5.13に示す。今度は坑道部を拡大させて排水しやすく、かつ気泡が浸入しやすいようにした。上端を除く周囲はステンレス板によって、不透水境界とした。モデルは不均質場を対象とし、外側は0.1mmビーズ、内側には1.0mmビーズを用いて模擬試験を行った。図-5.14にEX3-1に計測センサーの配置図を示す。EX3-1では、体積含水率と間隙水圧を測定した。FDRはF01からF18の18個、間隙水圧計はP01からP09の9個設置した。また、図-5.15にEX3-3の計測センサーの配置を示す。EX3-3では、圧力水頭測定のセンサーを先のFDRと同じ測定点にP01からP19の14個設置した。

2) 試験内容及び観察結果

このモデルで、坑道部からの排水を行うと、ゆるみ領域に気泡が浸入し、不飽和領域の発生が見られた。不飽和領域形成の様子を写真-5.2に示す。今度は坑道部分の水位より飽和領域が約8cmの高さまで立ち上がっており、右図の水分特性曲線の値と比較しても妥当なものと考えられる。この気泡は、外側の部分(0.1mmビーズ)には広がらず、内部の円形部分の上部に溜まっていった。

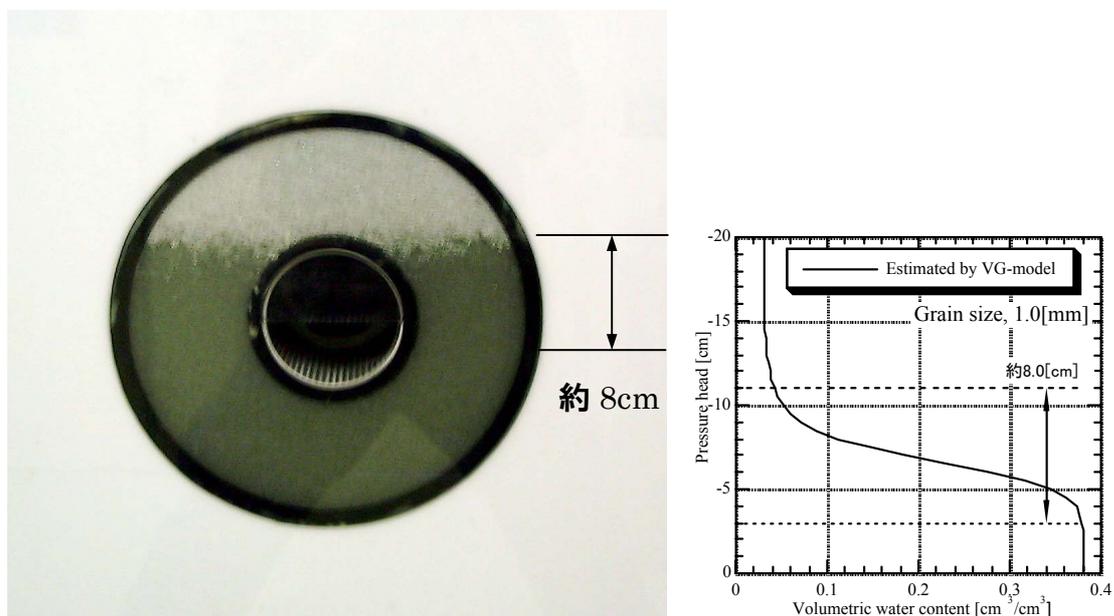


写真-5.2 不飽和領域発生状況 (EX3-1)

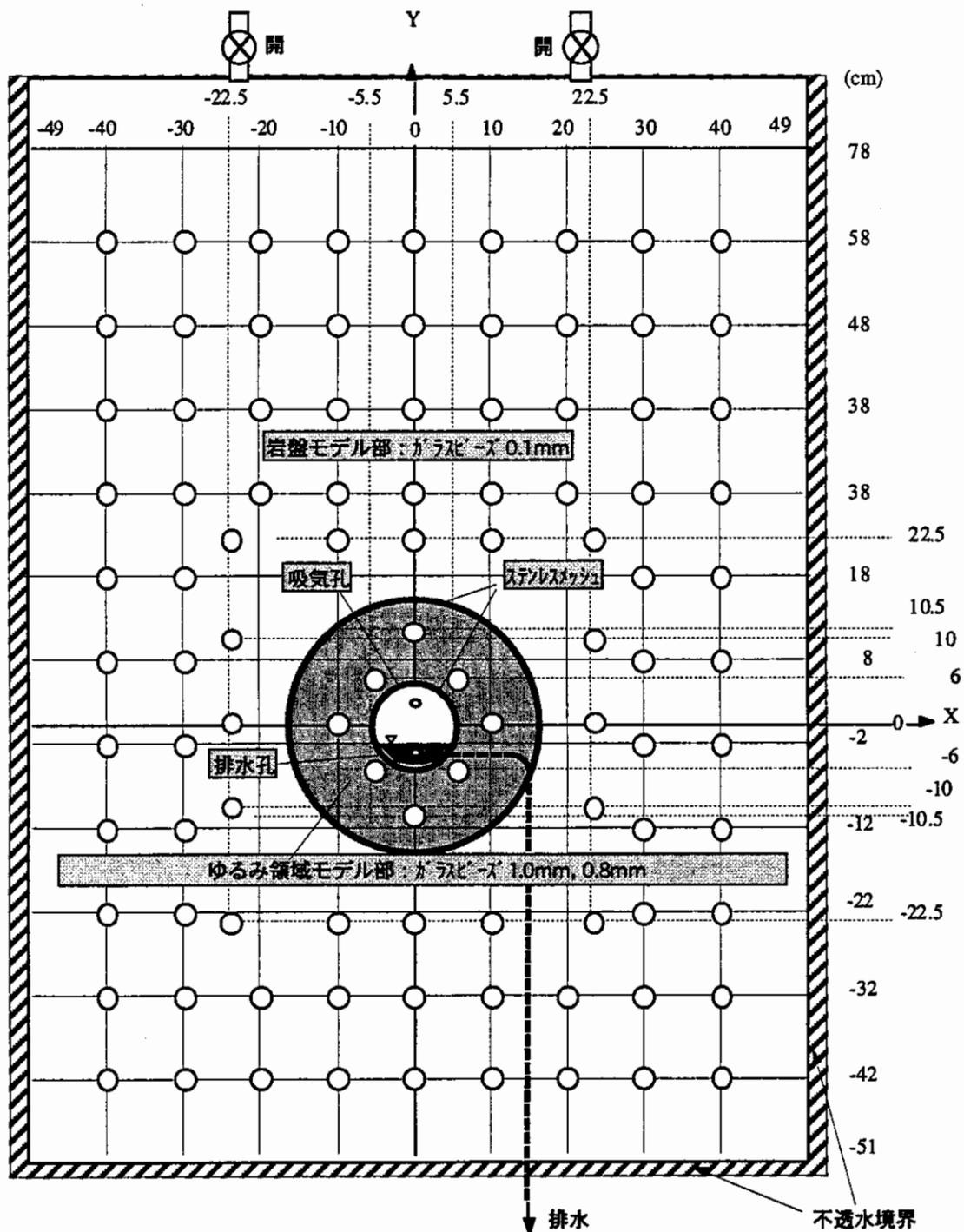


図-5.13 試験条件 (CLUE水槽A : EX3)

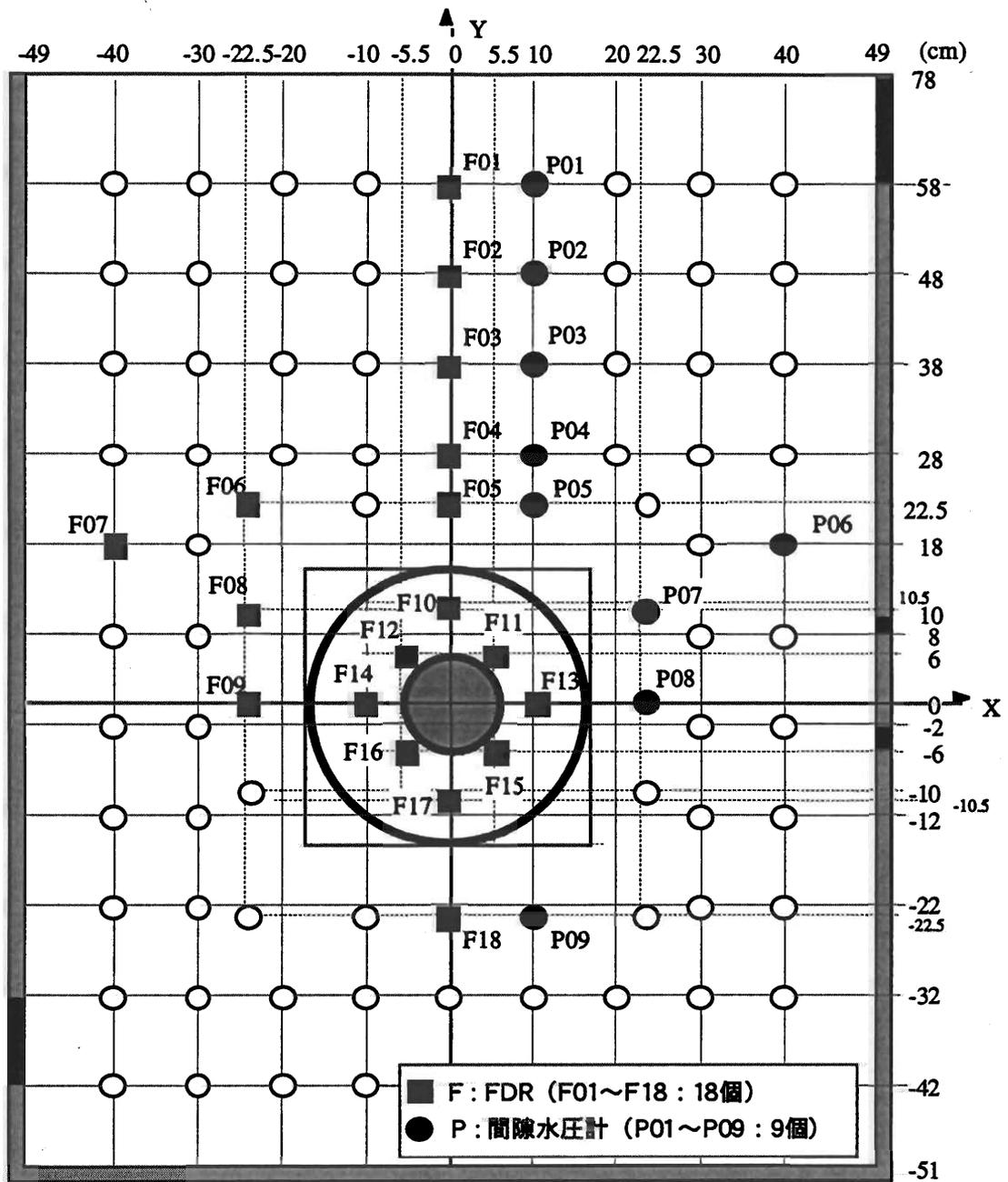


図-5.14 センサー配置図 (CLUE 水槽 A : EX3-1)

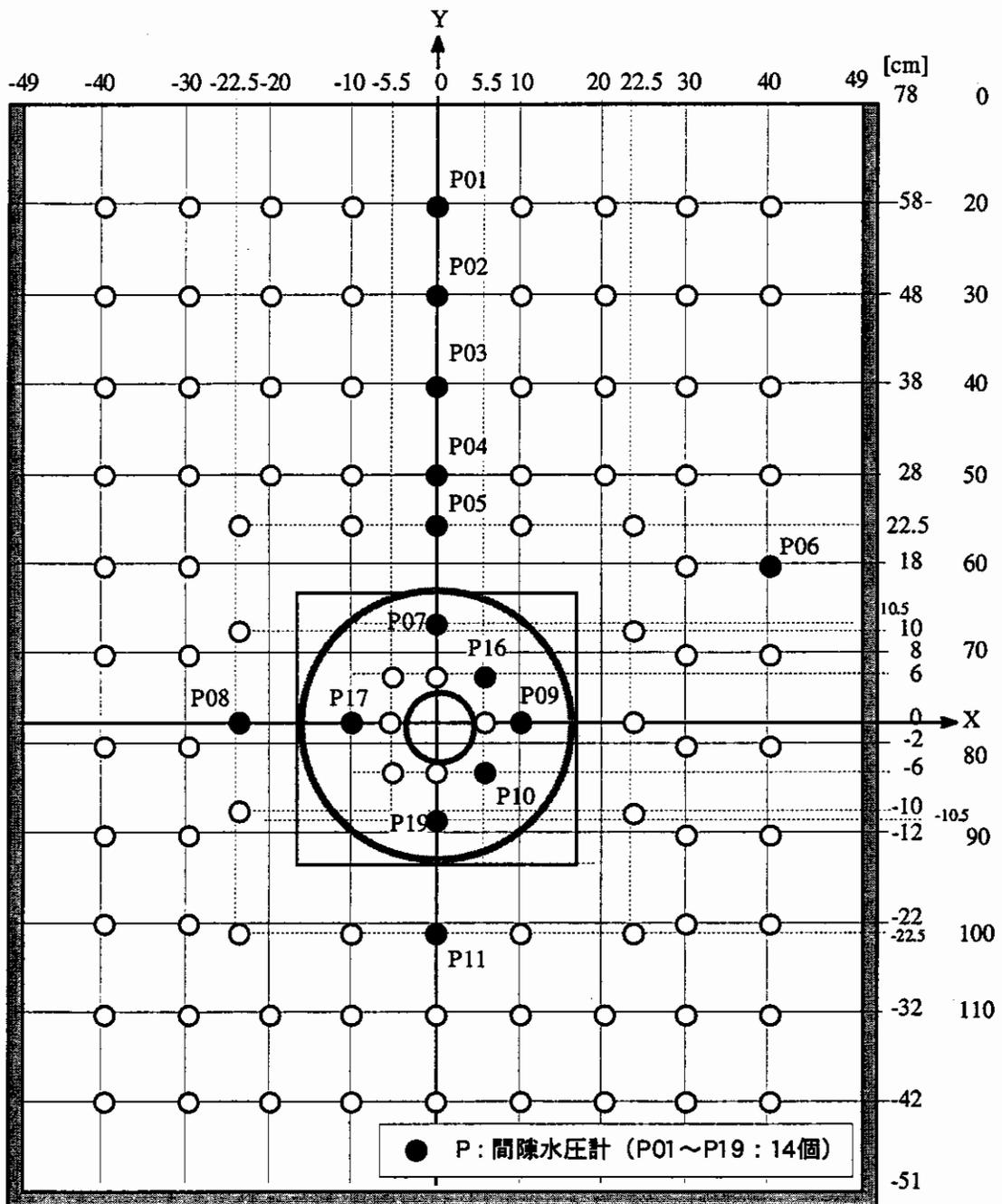


図-5.15 センサー配置図 (CLUE水槽A : EX3-3)

3) 計測結果

ビーズ 0.1mm 及び 1.0mm の圧力水頭の経時変化 (EX3-3) を図-5.16, 図-5.17 に, FDR による体積含水率の経時変化 (EX3-1) を図-5.18 に示す。この時の圧力水頭の測定結果は図-5.19 である。

結果を見ると坑道部より排水直後にゆるみ領域に設置した間隙水圧計の測定値が急激に低下している。その他の圧力水頭は緩やかに低下していることから、坑道部の圧力が開放されると供試体は高さ分に相当するサクション状態になるまで徐々に排水することがわかる。また、FDR の測定結果をみると、ゆるみ領域に設置したセンサーのみに変化が現れており、この部分に不飽和領域が発生している。また、図-5.20 に排水量の経時変化を示す。2 ケースでわずかに差が生じているが、これは供試体作成時の締固め度の差に起因するものと考えられる。また、測定された排水量は、坑道部とゆるみ領域部の空隙から計算される排水量より多く排水されており、0.1mm ビーズ部分からもわずかに排水されているものと考えられる。

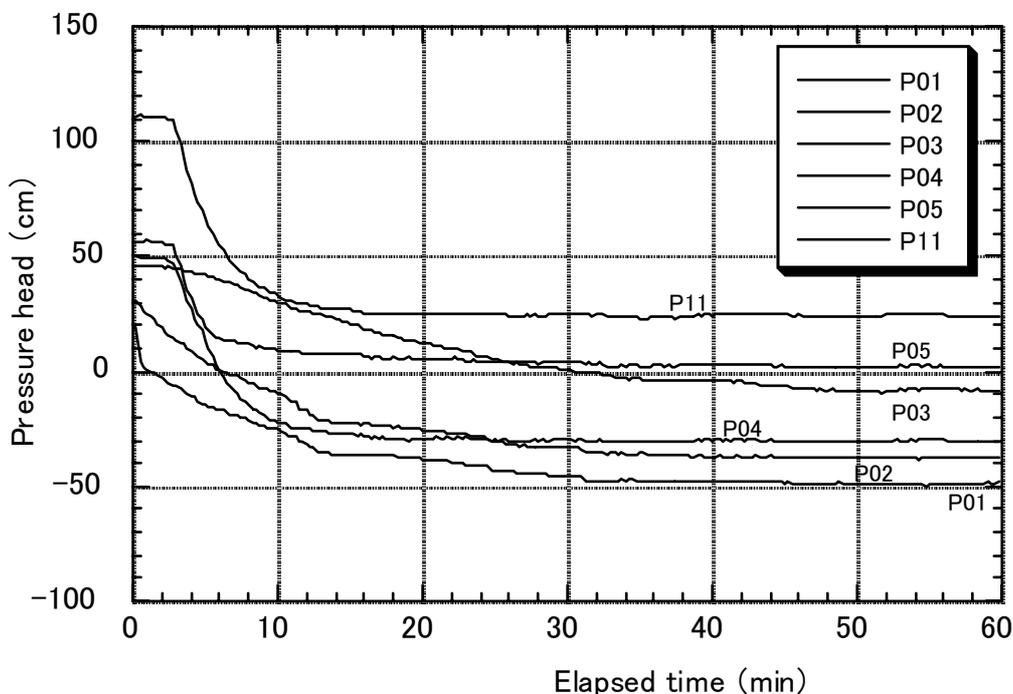


図-5.16 間隙水圧の経時変化 (EX3-3 ; 外側0.1mm)

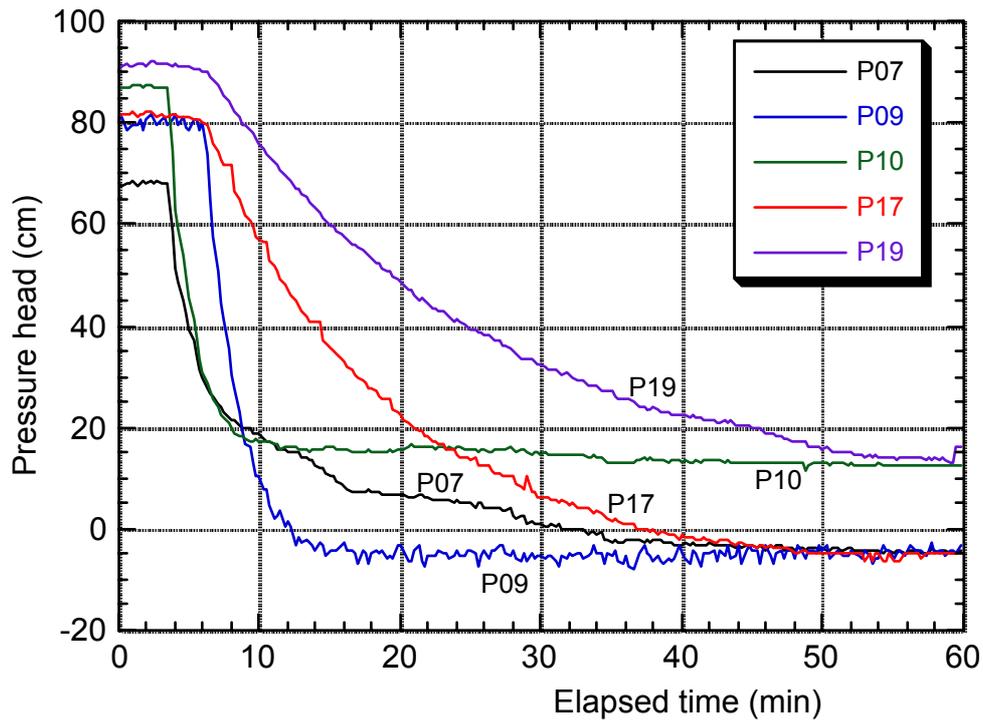


図-5.17 間隙水圧の経時変化 (EX3-3 ; 内側1.0mm)

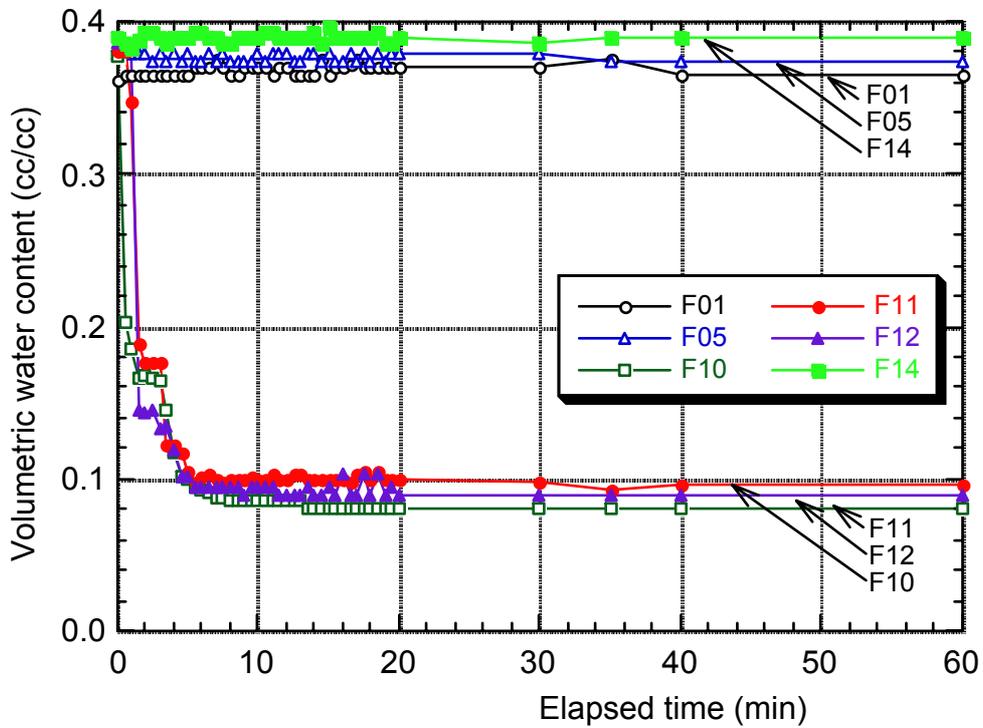


図-5.18 体積含水率の経時変化 (EX3-1)

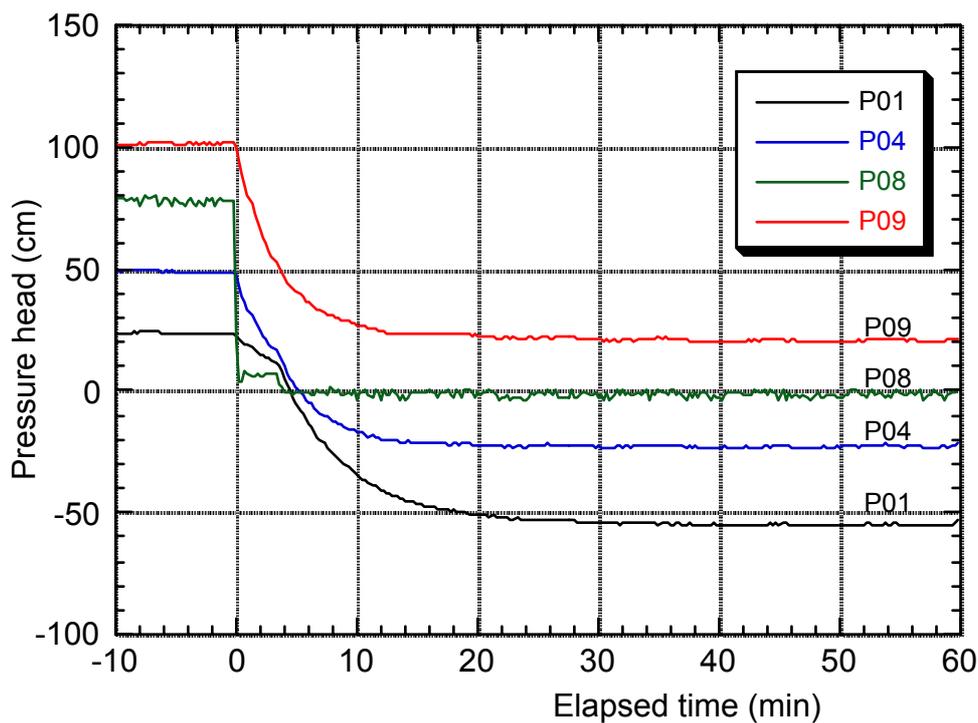


図-5.19 間隙水圧の経時変化 (EX3-1)

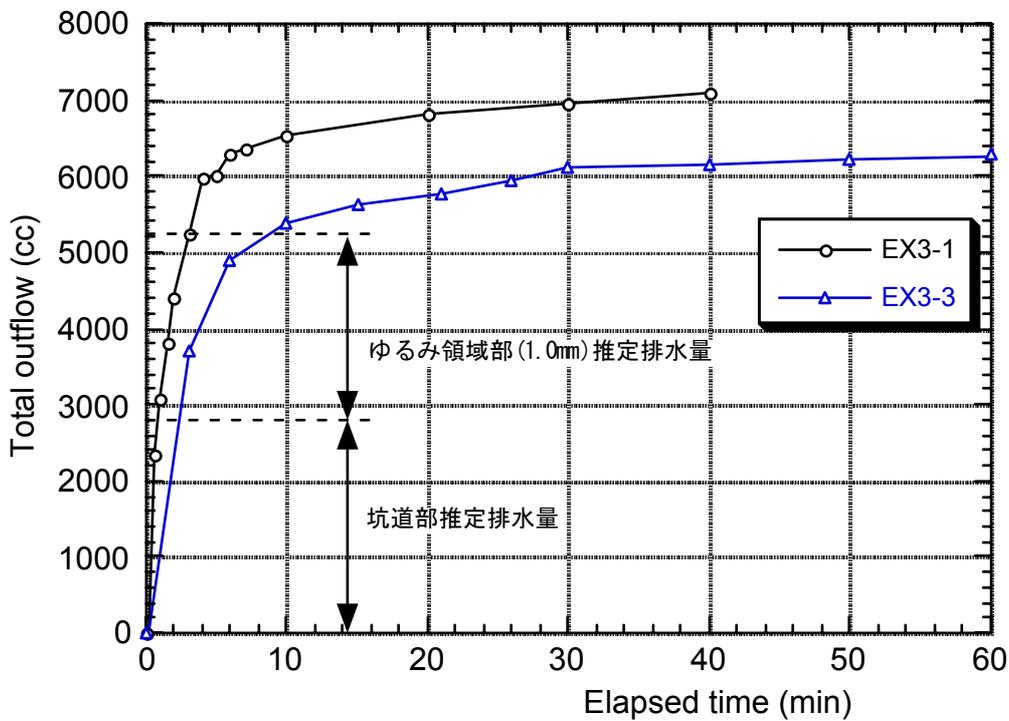


図-5.20 排水量の経時変化 (EX3-1, EX3-3)

5.4.4 不透水条件②内側ビーズ0.8mm (EX3-2：体積含水率測定, EX3-4：圧力水頭測定)

1) センサー配置図

図-5.21にEX3-2：体積含水率測定のセンサーの設置状況を示す。FDRはF01からF18の18個, 間隙水圧計はP01からP09の9個設置した。また, 図-5.22にEX3-4：圧力水頭測定のセンサーの設置状況を示す。先のFDRで測定した同じ点にP01からP20の15個設置した。

2) 試験内容及び観察結果

このモデルで, 坑道部からの排水を行うと, ゆるみ領域に気泡が浸入し, 不飽和領域の発生が見られた。この気泡は, 外側の部分 (0.1mmビーズ) には広がらず, 内部の円形部分の上部に溜まっていった。写真-5.3に, この時の様子を示す。飽和領域は約10cm立ち上がっており, 右図の水分特性曲線の値と比較しても妥当なものと考えられる。

3) 計測結果

ビーズ0.1mm及び0.8mmの圧力水頭の経時変化をそれぞれ, 図-5.23, 図-5.24, 5.26に, FDRによる体積含水率の経時変化を図-5.25に示す。現象をみると, 先の1.0mmの場合とほぼ同様であると言える。図-5.27にFDRと間隙水圧計の同測定点 (同座標点), 同時間での測定値と先に測定した水分特性曲線との比較図を示す。わずかにばらつきはあるが, 装置の測定精度, ガラスビーズの間隙等から考えるとほぼ妥当な値であると言える。

図-5.28に排水量の経時変化を示す。2つのケースでほぼ同一の曲線が示されており, その量も先の1.0mmの場合と同様の結果である。

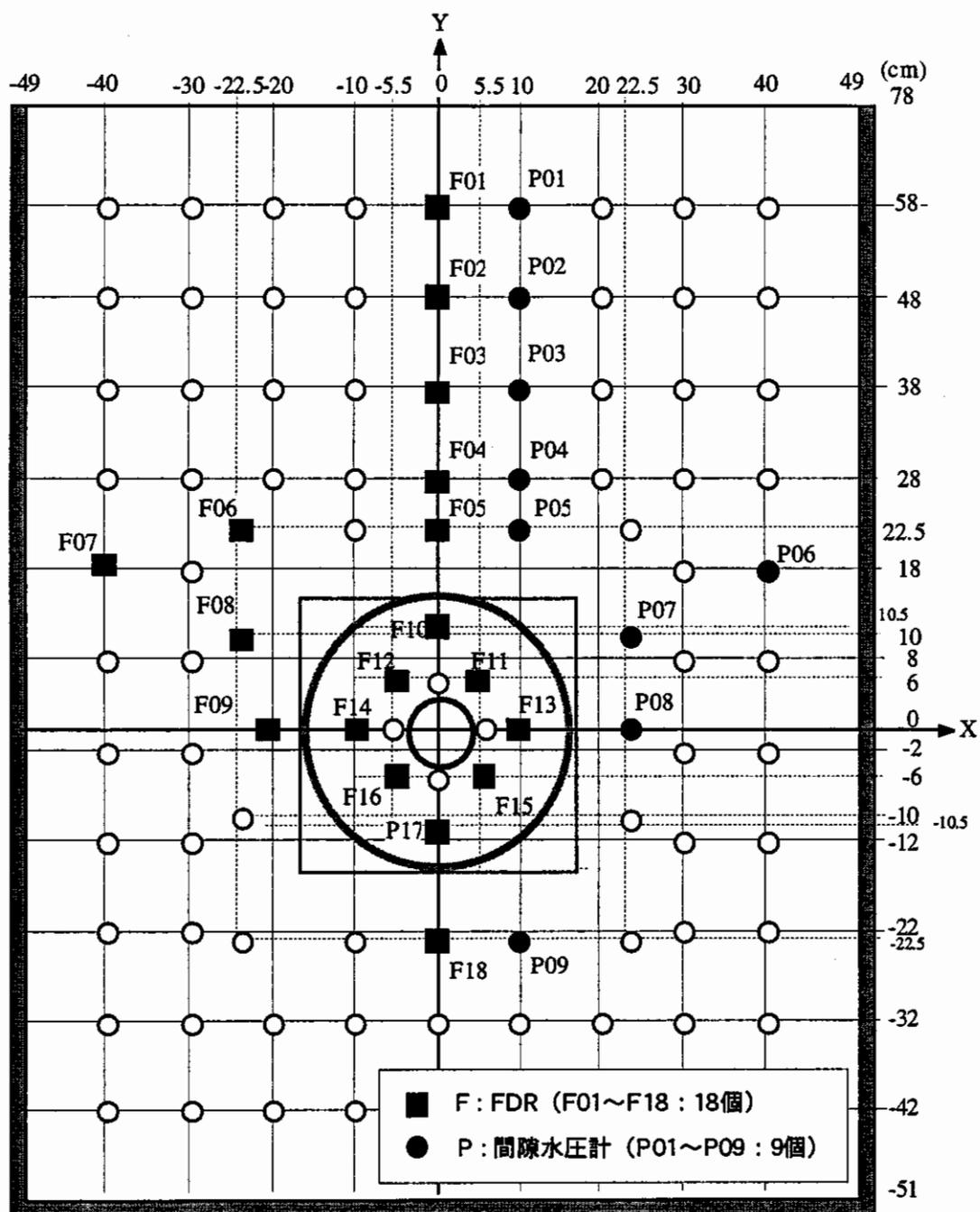


図-5.21 センサー配置図 (CLUE水槽A : EX3-2)

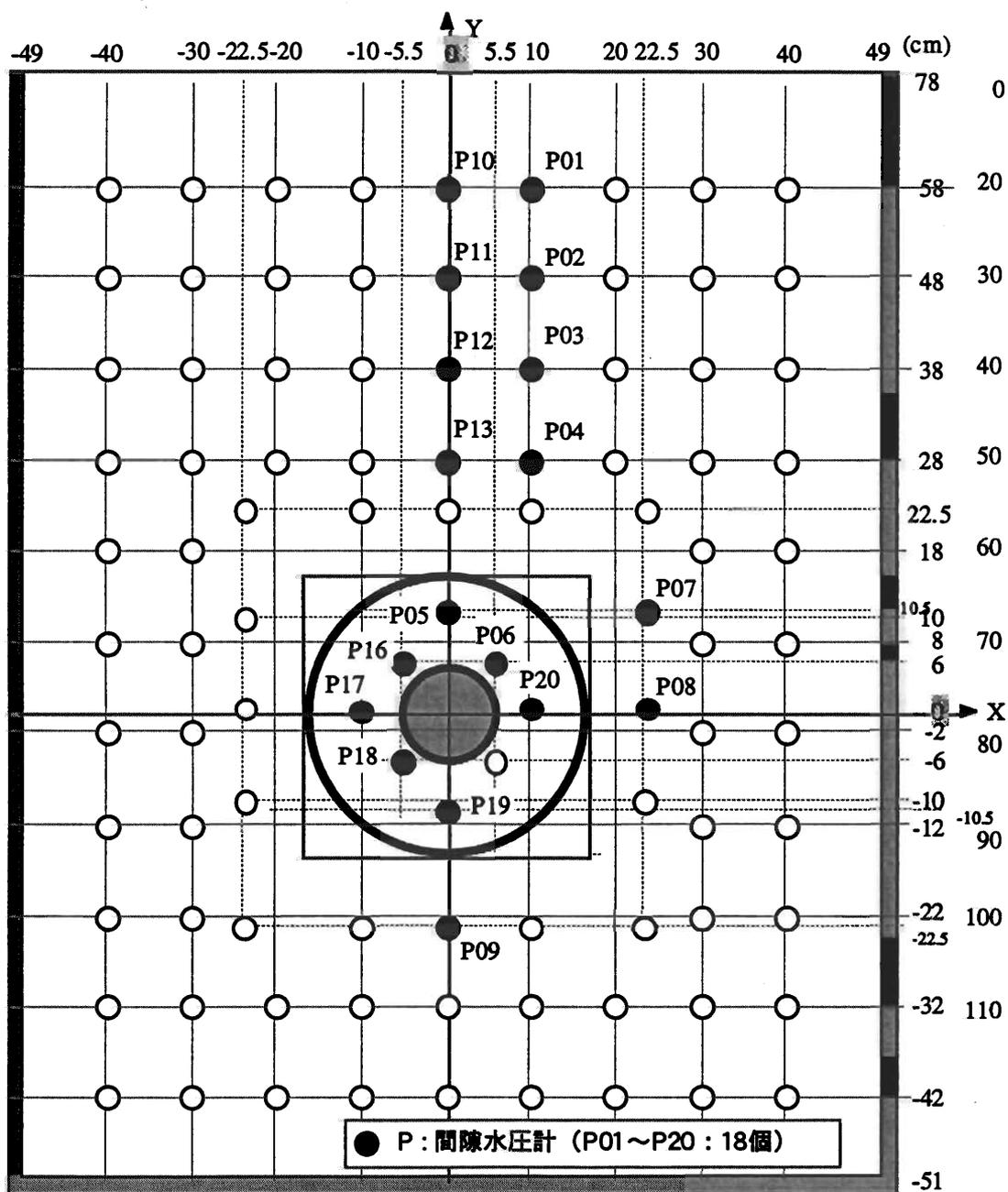


図-5.22 センサー配置図 (CLUE水槽A : EX3-4)

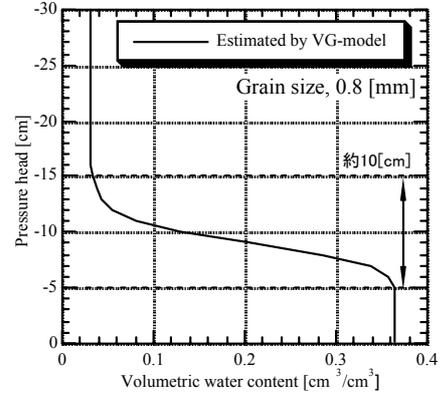
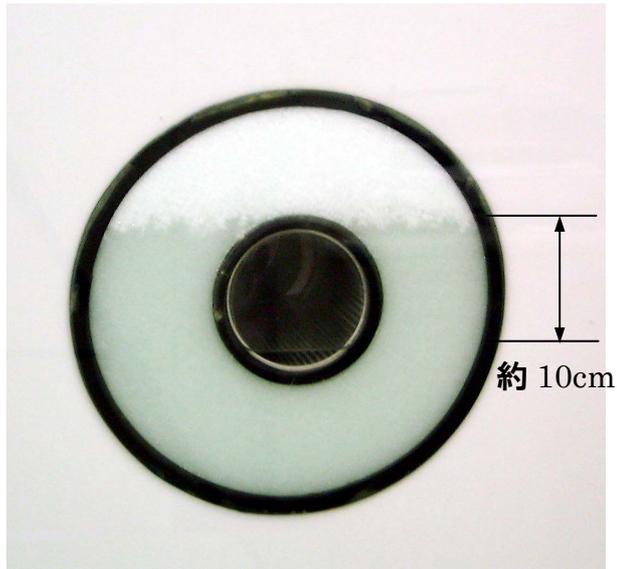


写真-5.3 不飽和領域発生状況 (EX3-2)

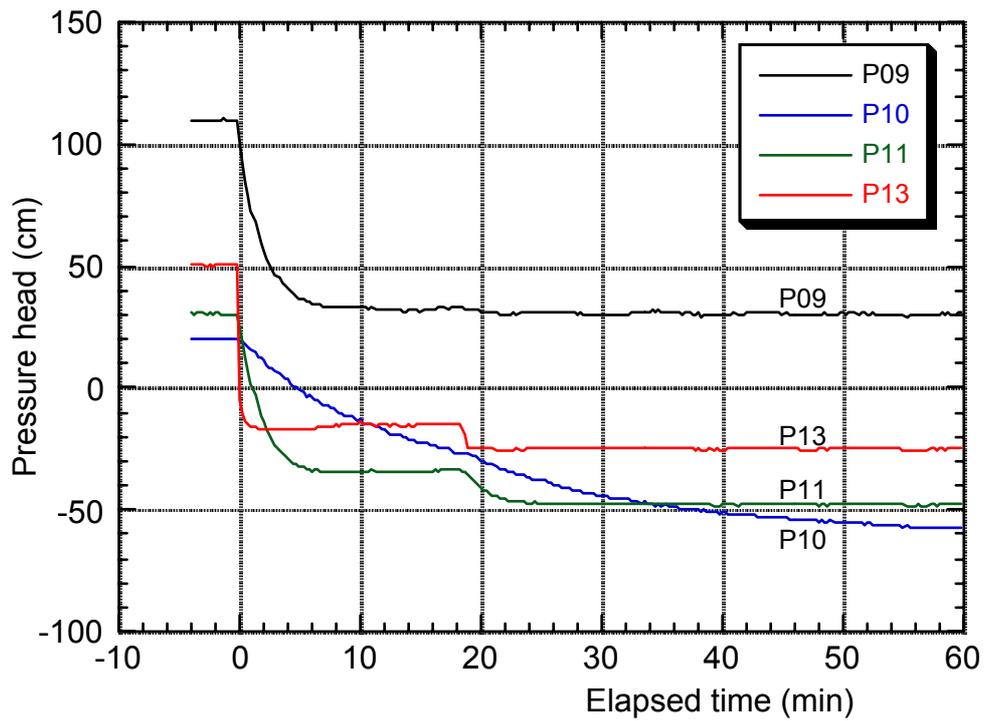


図-5.23 間隙水圧の経時変化 (EX3-4 ; 外側0.1mm)

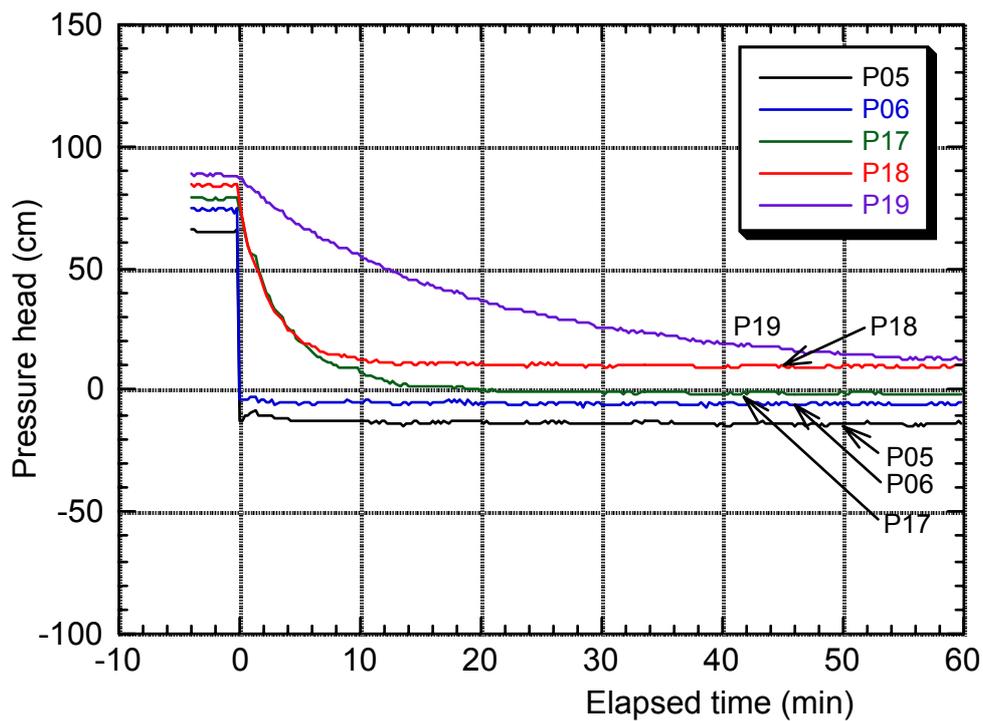


図-5.24 間隙水圧の経時変化 (EX3-4 ; 内側0.8mm)

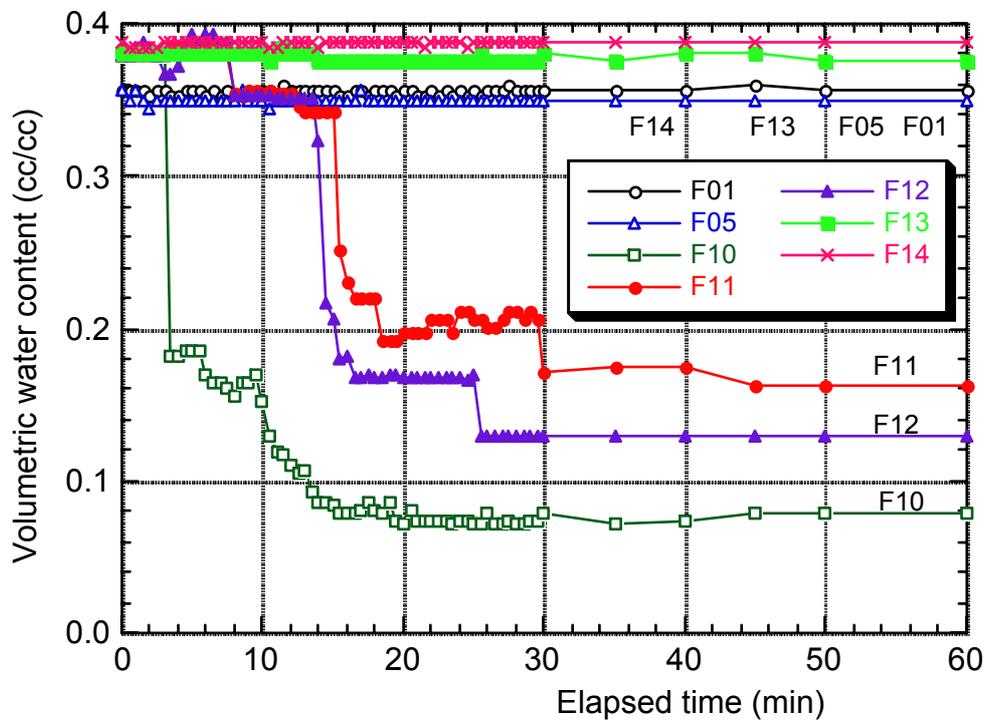


図-5.25 体積含水率の経時変化 (EX3-2)

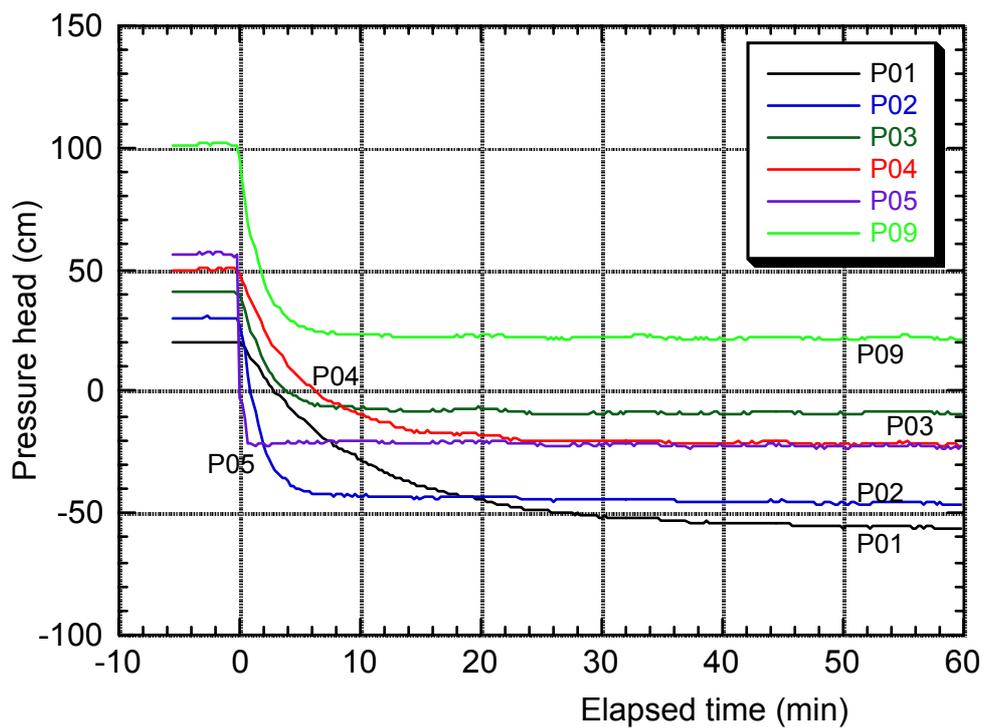


図-5.26 間隙水圧の経時変化 (EX3-2)

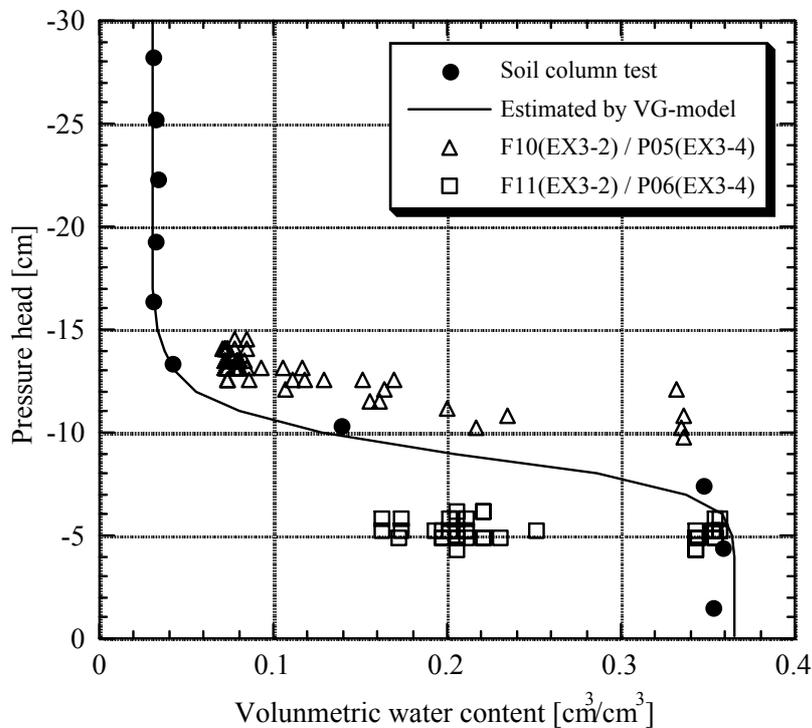


図-5.27 水分特性曲線の比較

(0.8mm ; EX3-2-EX3-4, 同一測定点での値)

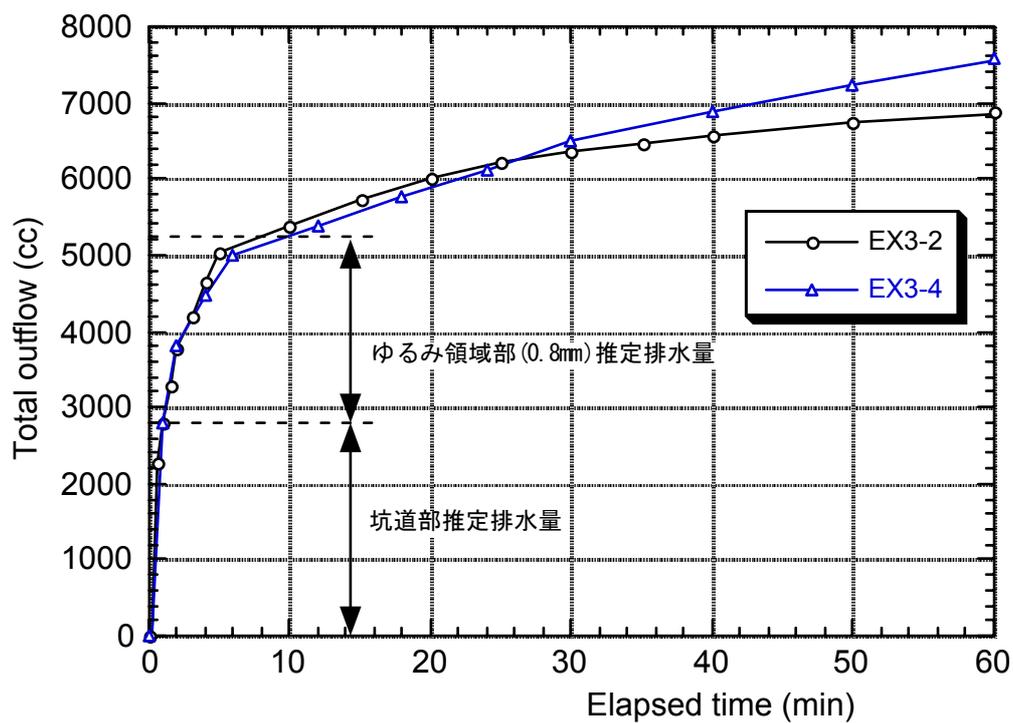


図-5.28 排水量の経時変化 (EX3-2, EX3-4)

6. 岩石モデルによる円形坑道周辺での不飽和領域の形成試験（水槽 B）

6.1 概要

5章において、均質媒体ガラスビーズを用い、坑道周辺に掘削影響領域を模擬した室内試験によって模擬坑道周辺に不飽和領域が発生することが観察・計測された。これらの現象は、間隙水圧計および FDR センサーにより計測できた。次に、より実際の岩盤条件に近い状態での現象を理解するため、岩石ブロックを用いた室内試験を実施した。

処分場において予想される坑道内の環境は、坑道掘削以後、操業期間中は坑道環境維持のため、常に換気された状態になると考えられる。坑道に送風される空気は、地上から供給することから坑道内のもともとの環境よりも乾燥していると考えられる。これより、処分場における不飽和領域形成の理解のためには、坑道掘削による坑道の解放に加え、換気の影響も再現する必要がある。

そこで、乾燥空気の供給の影響も考慮した不飽和領域形成のメカニズム解明を目的に模擬試験を行った。岩石の透水性はガラスビーズに比較して小さいことから、不飽和の形成領域も試験の範囲内では水槽 A の場合より小さくなると予想される。さらに、供試体の飽和、計測の重点配置等を考慮し、供試体の大きさは水槽 A より小さくなっている。ここでは岩石試料にモデル坑道部を設け、乾燥した空気を送り不飽和領域の形成状況を計測する。計測するパラメータは試料内の間隙水圧および体積含水率で、それぞれの経時変化を計測した。

実施した試験は、間隙水圧計の反応を確認する間隙水圧反応試験および坑道の換気を模擬したベンチレーション試験である。

6.2 供試体

3章において凝灰岩および砂岩の水理基本特性を把握した。水槽 B の試験で用いる供試体は、FDR 計測法の精度の観点から間隙が大きく、含水率の変化が出やすいものが適していると考えられることから、凝灰岩(船生石)を選択した。供試体は、石材として流通しているものを購入し、表面観察の結果ほぼ一様と考えられる部分を切り出して、一片 400mm、厚さ 200mm の角柱に加工した。供試体中心部には直径 50mm の模擬坑道をあらかじめ開けた。

6.3 試験装置

水槽 B は図-6.1, 写真-6.1 に示すように円柱形の水槽であり, 内部に岩石供試体を固定する。水槽は水槽 A と同様, 鋼製枠に固定されており, 電動モーターにより回転する仕組みになっている。水槽の前面は取り外し可能となっており, 前面の中心部は水槽の内部が直接観察できるようにアクリル製の窓となっている。計測機器は水槽の背面に前もって開けられている計測機器取り出し口を使用して任意の位置に取り付けることができる。計測機器取り出し口の位置を考慮し, 供試体中央の模擬坑道部周辺には図-6.2, 写真-6.2 に示すように間隙水圧計, FDR センサー, 熱電対を設置する孔を加工した。

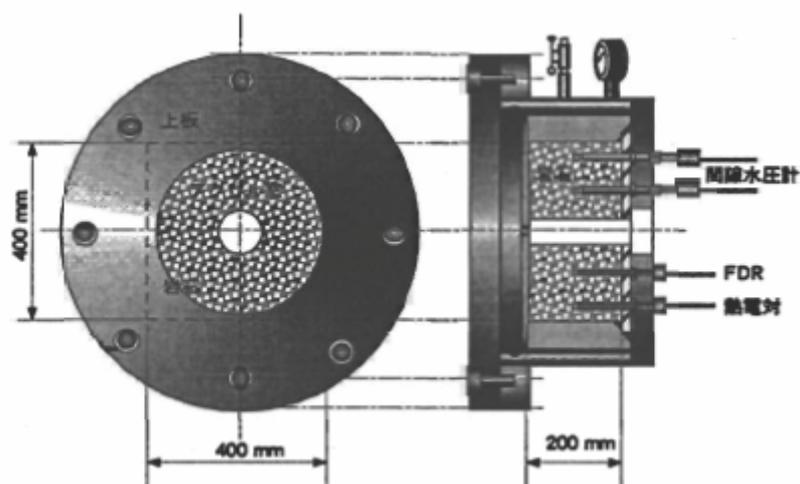


図-6.1 試験装置図



写真-6.1 試験装置

(左: 水槽 B 全景, 右: 水槽正面)

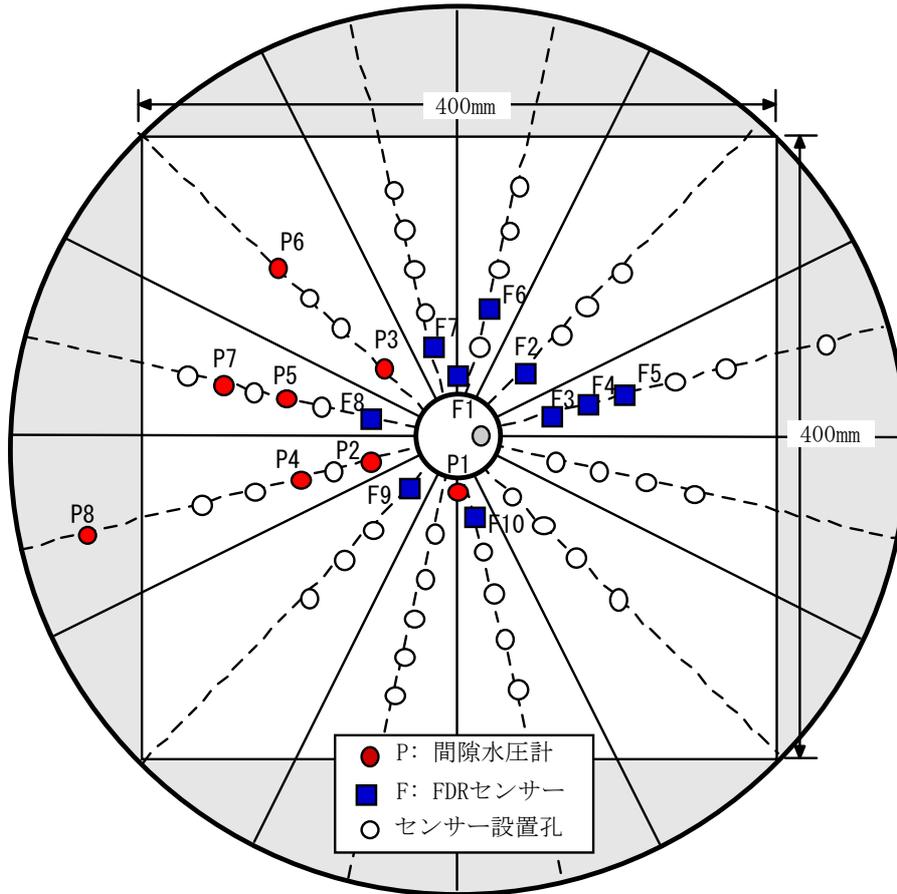


図-6.2 計測用センサー配置図

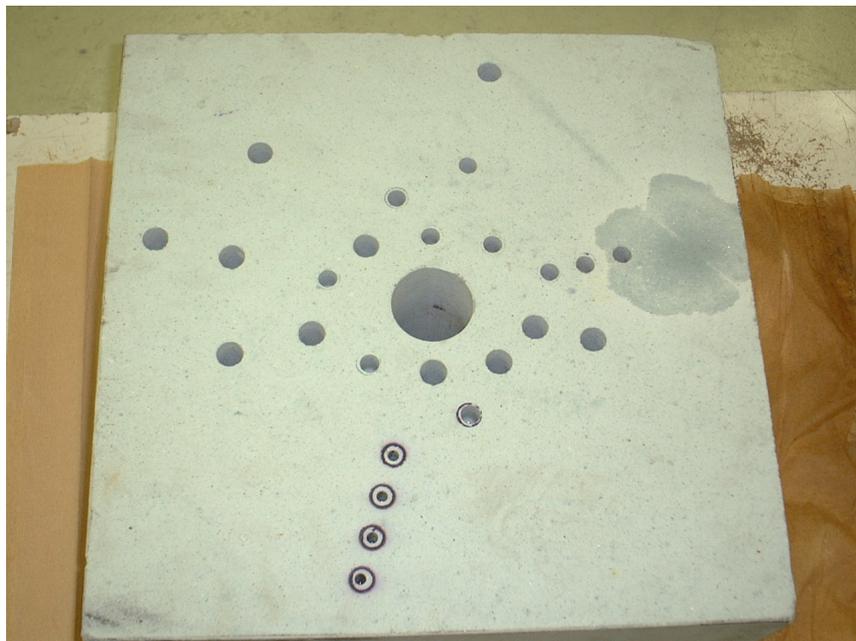


写真-6.2 岩石供試体のセンサー取付け孔の加工

6.4 試験結果

(1) 間隙水圧反応試験

はじめに、岩石供試体および計測機器を設置した状態で、間隙水圧計の反応を確認するため、水槽内の加圧・除荷を行った。これは、4章の試験において間隙水圧計の設置方法を検討したが、採択した方式で岩石供試体内の圧力変化を精度よく計測出来るか確認することを目的とした。

図-6.3 に結果を示す。間隙水圧計の設置位置は図-6.2 の配置位置である。圧力の増加量は 0.1MPa (10 mH₂O) で一定とした。計測点 P8 は水槽内の圧力を示している。図から、圧力の増加とともに、供試体に設置した間隙水圧計は増加した。全ての計測値がほぼ 0.1MPa となり、圧力の計測も一定で安定していることから、間隙水圧計は良好なデータを計測できると判断した。加圧状態での計測状況を確認した後、除荷した。圧力の除荷に伴い間隙水圧計の値もほぼゼロまで低下した。出力値から計測点 P3 では供試体内部に残留圧力が認められるものの、圧力変化に対する間隙水圧計の追従は妥当であると判断し、岩石供試体によるベンチレーション試験を実施した。

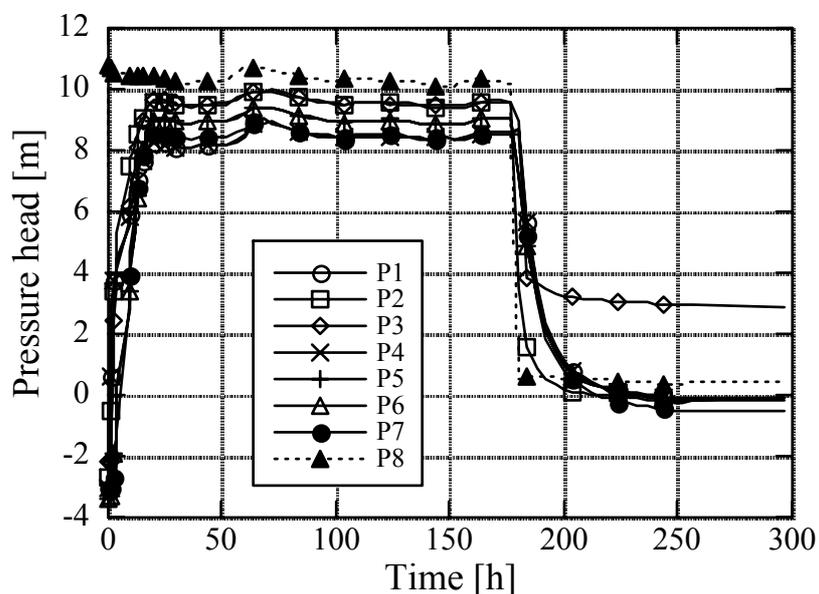


図-6.3 間隙水圧計の経時変化

(2) ベンチレーション試験

はじめに、坑道の掘削のみを模擬するため、水槽背面のバルブの開放のみを実施した。観察の結果、模擬坑道に繋がる水槽の背面バルブを解放するだけでは、模擬坑道に充填されていた水が排水されただけで、間隙水圧計および FDR で捉えられるような変化は起こらなかった。これは、岩石の持つサクションによって岩石内部の水がとどまっており、移動しないためと考えられる。

次に、ベンチレーションを行うことにより処分場の坑道環境での換気の影響による不飽和の発生を再現した。処分場環境では高温多湿の地下環境にその環境よりも乾燥した空気が送り込まれることにより岩盤が乾かされると考えられる。試験水槽 B では岩石供試体の温度制御機能がないことから供試体その物を高温環境に維持することはできない。

そこで、ベンチレーション試験では、岩石供試体は室温条件下とし、高温で乾燥した空気を模擬坑道に供給することとした。供給した空気は温度 70 度、送風量は 50 [L/min] である。図-6.4 にベンチレーションによる排水速度の経時変化を示す。

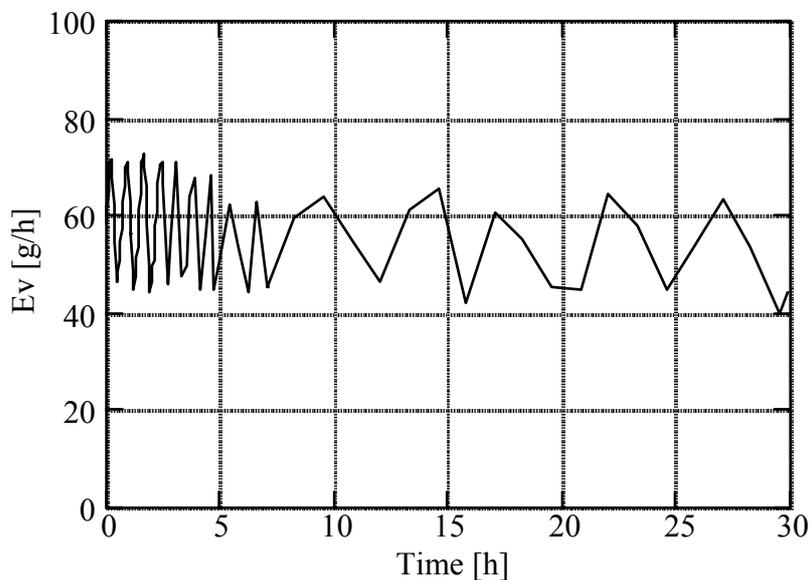


図-6.4 ベンチレーションによる排水速度の経時変化

排水量はベンチレーションした空気の湿度を測定し、排水量に換算した。図から、排水速度はベンチレーション開始直後から振動はあるもののほぼ 60 [g/h]

で安定していることから、一定の速度で坑道を乾燥させることができた。

1) 間隙水圧計測結果

図-6.5 に間隙水圧の経時変化を示す。間隙水圧計の設置位置は図-6.2 の配置位置である。間隙水圧計測は8点で実施した。

表-6.1 間隙水圧計設置位置一覧

計測点	坑道壁面（カッコ内は中心）からの距離 [mm]
P1	25 (50)
P3	35 (60)
P2	55 (80)
P4	105 (130)
P5	105 (130)
P6	125 (150)
P7	155 (180)
P8	水槽内

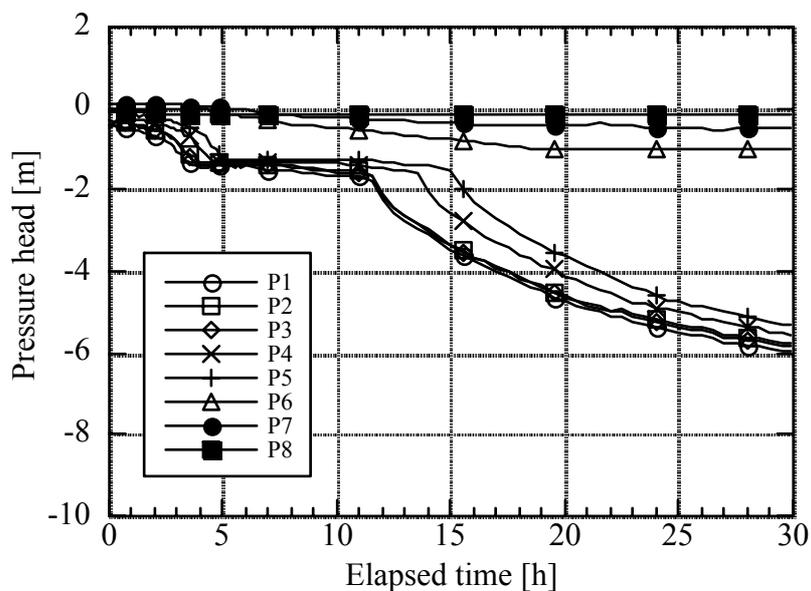


図-6.5 間隙水圧の経時変化

坑道から最も離れた P7 は岩石供試体外側の水槽の値 P8 と同様、試験期間を通じて間隙水圧 0 を維持している。これは、本試験の実施期間において岩石供試体の外側境界が飽和状態を維持していることを示していると考えられる。

坑道直下の P1 および坑道近傍の P2, P3 は、坑道壁面から 55mm までの範囲にあり、この 3 点はほぼ同じ挙動を示している。圧力も 30 時間経過後に、測定下限値の -0.06MPa ($-6\text{ mH}_2\text{O}$) まで下がっている。その外側に位置する P4 と P5 は坑道壁面からの距離が同じ 105mm で、P1, P2, P3 と比較すると、反応時間の遅れは見られるものの、ほぼ同じ圧力の経時変化を示している。さらに坑道壁面からの距離が大きくなる P6 (坑道壁面から 125mm) では圧力の低下はごくわずかとなっている。

ベンチレーションを行うことにより坑道周辺に同心円上に負圧の領域が形成され、その距離にしたがって圧力の反応が伝わりにくくなり、坑道壁面から 155mm の距離ではほとんどベンチレーションによる影響がない結果となった。

2) FDR 計測結果

図-2.32 の校正曲線を用いて FDR 水分量計測装置の測定結果を体積含水率に換算した経時変化を図-6.6 に示す。体積含水率は、試験開始後はいずれの計測点でも変化がなく、ほぼ 0.35 の初期値のままである。5 時間経過後から 15 時間経過後にかけてわずかに低下し、その後はいずれの点でも変化はなく、ほぼ 0.30 の一定値となった。この初期値は、供試体である船生石の間隙率 (0.325) と比較すると若干大きめの値となっている。

間隙率以上の体積含水率が測定された要因としては、岩石供試体とプローブ(電極)との間の導電性シリコン充填の不十分さが考えられる。このような充填性の不備はプローブと供試体との間に微小な空隙を生じ、その空隙に水が満たされていたため試験開始時の初期値が岩石供試体の間隙率よりも大きなものであったと考えられる。つまり、試験開始時の体積含水率は見かけ上、過飽和の状態を計測していたと考えられる。

試験開始後の計測値の低下は、5~15 時間経過の間にベンチレーションに伴う坑道からの排水により、空隙周囲の高い負の圧力水頭によってプローブ周囲の空隙から水分が移動し、供試体のもつ間隙率まで体積含水率の計測値が低下したものと考えられる。したがって、この段階でも供試体中の水分は初期状態

のまま飽和状態を維持していると考えられる。

このようにベンチレーションにより坑道からの排水があるにも関わらず、坑道周辺が不飽和にならなかったのは、坑道からの排水と水槽内にある供試体周辺からの水の供給がバランスしていたため、常に飽和を維持したものと考えられる。

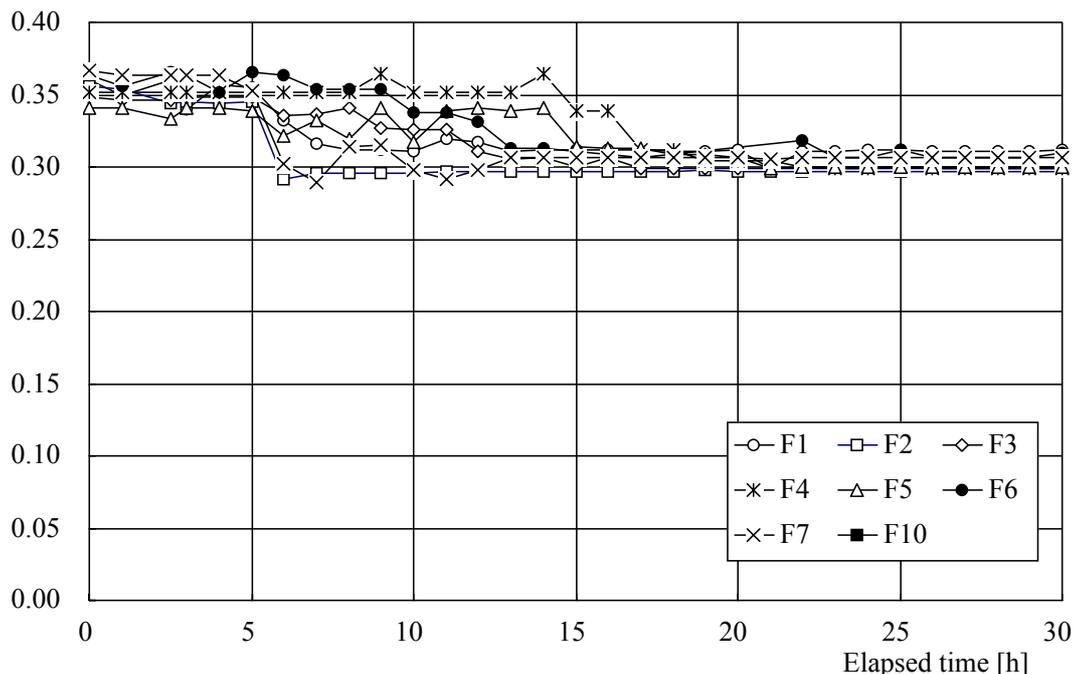


図-6.6 体積含水率の経時変化

3) 不飽和透水特性の検証

岩石供試体の試験ではベンチレーションを行い、不飽和領域の発生を試みたが、間隙水圧の低下は計測されたものの坑道周辺に有意な不飽和領域を発生させることができなかった。体積含水率の低下が計測されなかったことから、要素試験で求めた水分特性曲線の検証範囲は限定されてしまうが、その範囲において検証した。

FDR および間隙水圧計の計測は対称性を考慮して配置していることから、坑道壁面からの距離が同じであれば岩盤内の含水比状態は同じであると仮定し、同じ計測点と見なすことができる4点について図-3.26で示した不飽和水分特性曲線の検証を行った。検証に用いた計測点は、(FDRの計測点, 間隙水圧の計

測点), (F1, P1), (F5, P3), (F3, P2), (F2, P4) である。図-6.7 に図-3.26のグラフに計測値をプロットしたものを示す。

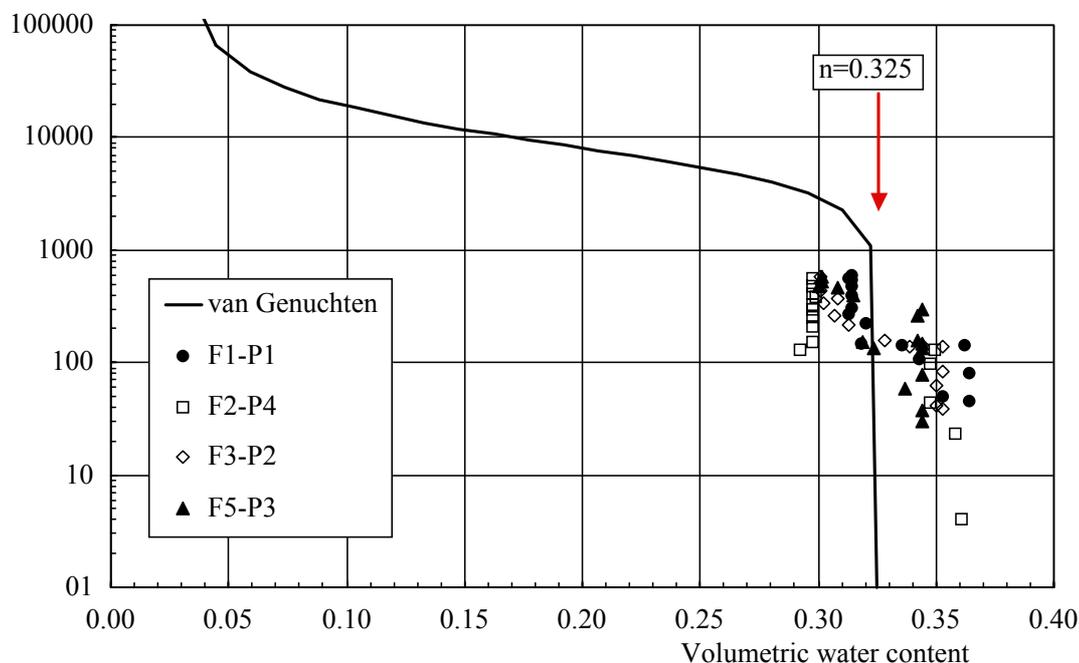


図-6.7 van Genuchten の検証 (体積含水率と間隙水圧の関係)

間隙水圧の測定限界の関係からプロットされる範囲が限定されている。要素試験で同定された結果から、体積含水率の低下が始まるのは圧力水頭が-1000～2000cm である。しかし、今回の計測結果では間隙水圧の測定限界を大きく越えているため十分に計測することができなかった。このことから高い圧力水頭で水分を保持する岩石試料を用いる場合、不飽和領域の発生を誘発する初期の圧力勾配は間隙水圧の計測より測定し、その後の実際の水分移動は FDR などの水分計で追跡する等の処置が必要と考えられる。

4) 不飽和の強制発生

ベンチレーション試験では、間隙水圧の変化は測定できたものの、体積含水率の変化までは測定できなかった。そこで、今回使用したブロック状の供試体においても体積含水率の変化を FDR センサーで計測出来ることを確認するため、強制的に不飽和を岩石供試体内に発生させることとした。

まず、ベンチレーション試験中に試験水を充填した水槽から試験水を抜き、岩石中に貯留している水の状態とした。次に、この状態で再度ベンチレーションを行った。送風した空気はベンチレーション試験の時と同じ条件である。ここでは、模擬坑道周辺の体積含水率の変化に着目し、測定箇所は FDR センサーの F1 から F10 とした。このときの経時変化を図-6.8 に示す。図は、図-6.6 のベンチレーション試験結果から引き続いて計測した結果を示している。図中に示すように 510 時間後に試験水を抜き、不飽和の強制発生を開始した。試験水除去後は、時間の経過とともに徐々に体積含水率が低下しており、供試体の飽和度が減少していることが確認された。

なお、F3・F6・F7・F10 は、約 300 時間経過後に、測定波形が変化し、明確なピークが現れなくなったことから、測定が困難となった。このため、図-6.8 の経時変化のグラフからは削除している。測定が困難になった原因として、プローブの絶縁付近の設置が不完全であったため、その部分に存在して絶縁機能を果たしていた水が放出され、岩石との接触が悪くなったことが考えられる。確実な電極の設置方法については今後の課題である。

また、試験終了後にセンサー設置部近傍の岩石供試体の含水比を測定し、試験終了時の FDR センサーの測定結果と比較・検証した。試料の採取は、図-6.9 に示すようにセンサー設置孔の反対側からドリルで穴を開ける方法とした。FDR センサーの設置位置とほぼ同じ位置となるように供試体の中心部から削りくずをサンプルとして回収し、含水比を測定した。換算した体積含水率の比較を表-6.2 に示す。

ドリルを用いて回収したサンプルデータと FDR 計測結果の比較から、計測点 F2, F4 はよい一致を示しているが、F1, F5 では、サンプルデータが小さい値となった。しかしながら、岩石供試体のドリリングの際に部分的に堅い部分もあり、このようなところではドリルの摩擦熱により水分が飛ばされていると考えられる。これらサンプリング時の事象と FDR センサーの計測精度を考慮すると、サンプルデータはいずれも FDR 計測結果±20%以内であり、計測値はほぼ妥当であると考えられる。

以上のように、FDR センサーの検証を目的に岩石供試体の不飽和の強制発生を行ったが、ほぼ妥当な値で岩石供試体中の不飽和を FDR センサーで計測できることが確認された。

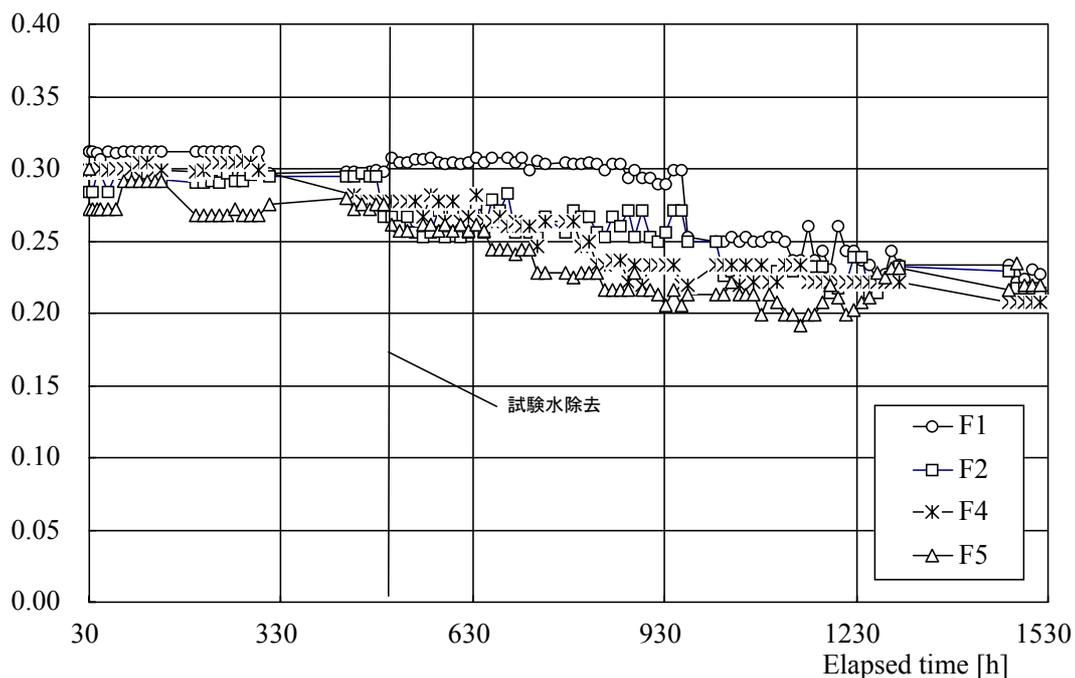


図-6.8 体積含水率の変化

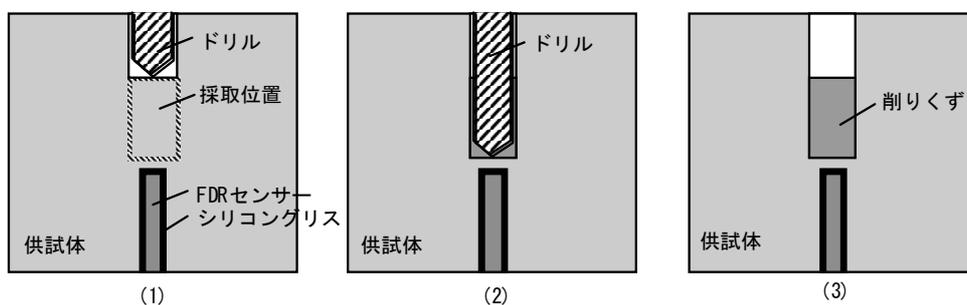


図-6.9 試料採取手順

表-6.2 体積含水率の検証

プローブ	FDR 計測結果	サンプルデータ
F1	0.208	0.167
F2	0.199	0.191
F4	0.195	0.197
F5	0.203	0.175

7. 大型水槽を用いた不飽和水理試験の解析評価

(1) 解析コードの概要

不飽和水理試験の解析には、二次元の飽和-不飽和浸透流解析を用いた。支配方程式は以下の通りとなる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \psi}{\partial z} + k \right) = (C + aS_s) \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (7.1)$$

ここで、 k は透水係数で、不飽和領域においては飽和度 S_r あるいは体積含水率 θ に依存する値となる。 ψ は圧力水頭で、 S_s は比貯留係数である。 C は比水分容量で、水分特性曲線 (θ - ψ の関係)の勾配 ($d\theta/d\psi$)となる。また、 a は次のような変数である。

$$a = \begin{cases} 1 & \text{飽和領域} \\ 0 & \text{不飽和領域} \end{cases} \quad (7.2)$$

水分特性曲線としては van Genuchten の式 (VG モデル) を用いた。これによると有効飽和度 S_e と圧力水頭 ψ の関係は次式で表される。

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^{1-\frac{1}{n}} \quad (7.3)$$

ここで、 α および n は VG モデルのパラメータである。また、有効飽和度 S_e は次式で定義される。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (7.4)$$

ここで、 θ_r は最小含水量、 θ_s は飽和体積含水率である。

不飽和領域における透水係数も次式に示す VG モデルを用いた。

$$k_r = \frac{k}{k_s} = S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (7.5)$$

$$m = 1 - \frac{1}{n} \quad (7.6)$$

ここで、 k_r は比透水係数、 k_s は飽和透水係数である。

(2) 解析条件

ここでは、5章で記述した水槽Aを用いて行なった不飽和水理試験の解析結果を示す。解析モデルを図-7.1に解析用のメッシュを図-7.2に示す。また、解析条件を表-7.1に示す。模擬坑道部周辺のゆるみ領域部に関しては、0.8mmおよび1.0mm粒径のガラスビーズを対象として実施した。また、側方境界に関しては、水位固定および不透水の両者に関して行なった。最初に、ゆるみ領域部のガラスビーズ粒径を0.8mm、側方境界を不透水とした場合の解析を、坑道部の内側境界条件を変えて実施する。内側境界条件としては、全節点を圧力水頭0mで固定するケース、全節点を自由排水境界とするケース、全節点を自由排水境界とし媒体の透水係数を実測された湧水量を参考に21%割り増ししたケース、全節点の圧力水頭を-13.5cmで固定したケースを実施した。

そして、実測値との比較を行ない、適切な内側境界条件の設定に関して検討を行なう。そして、設定された内側境界条件下でゆるみ領域部ガラスビーズ粒径および側方境界条件を変化させ解析を行ない、その影響評価を行なう。図-7.1には解析結果の出力ポイントも示す。表-7.2には各出力ポイントの座標および対応する試験ケースEX3-2およびEX3-4における対応する計測地点を示す。

表-7.1 解析条件

解析ケース	外側ビーズ 粒径 [mm]	内側ビーズ 粒径 [mm]	外側境界条件	内側境界条件	対応する 試験ケース
Case1-1	0.1	0.8	不透水	全節点圧力水頭 0.0cm	EX3-2, EX3-4
Case1-2	0.1	0.8	不透水	自由浸出	
Case1-3	0.1*	0.8*	不透水	自由浸出	
Case1-4	0.1	0.8	不透水	全節点圧力水頭 - 13.5cm	
Case2	0.1	1.0	不透水	自由浸出	EX3-1, EX3-3
Case3	0.1	0.8	水位固定	全節点圧力水頭 0.0cm	なし
Case4	0.1	1.0	水位固定	全節点圧力水頭 0.0cm	なし

* : 実測された湧水量を参考に透水係数を21%割り増し

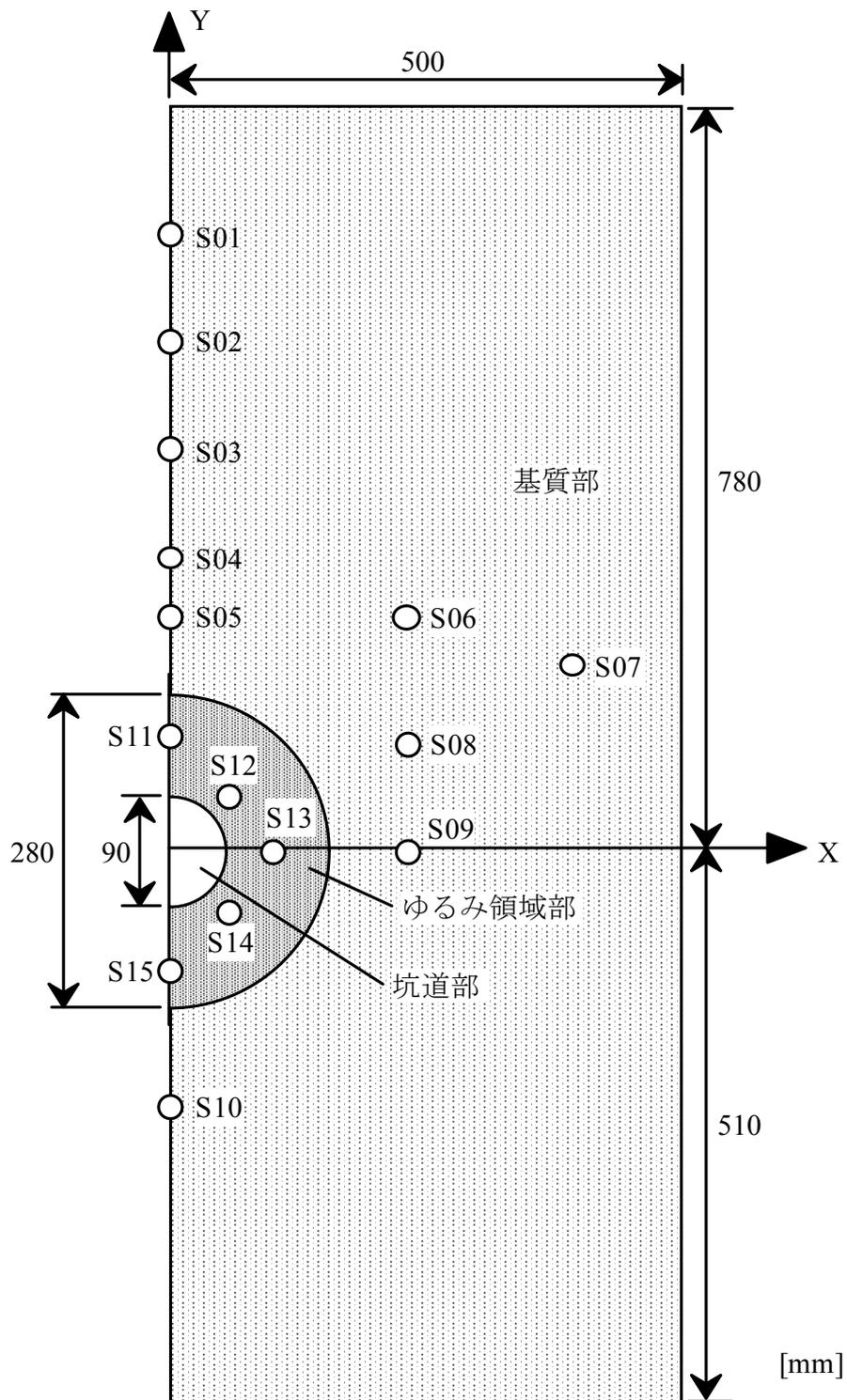


図-7.1 解析モデルおよび出力ポイント

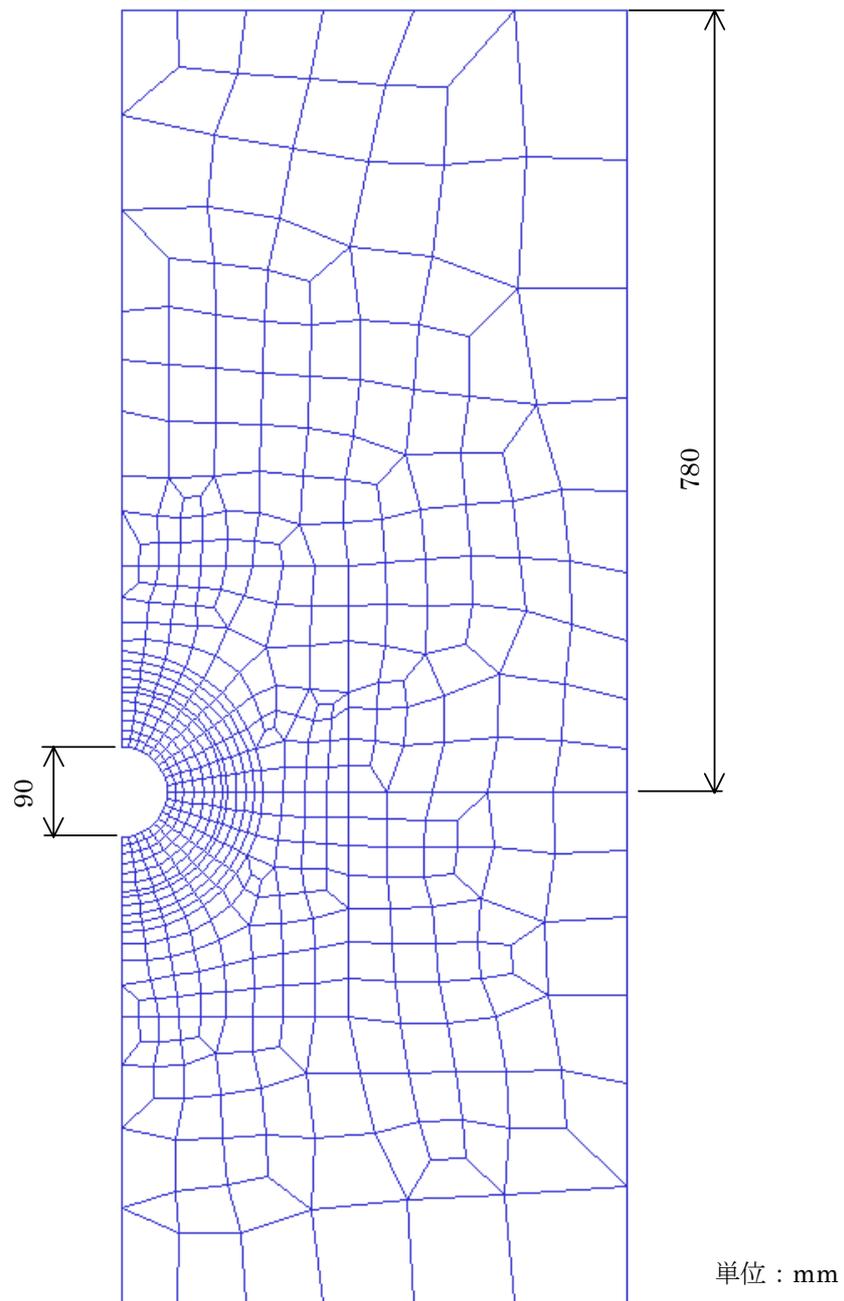


図-7.2 解析メッシュ図 (要素数 535, 節点数 580)

表-7.2 出力ポイントの座標

ポイント	X [cm]	Y [cm]	対応計測地点	
			EX3-2	EX3-4
S01	0.0	58.0	F01	P10
S02	0.0	48.0	F02	P11
S03	0.0	38.0	F03	P12
S04	0.0	28.0	F04	P13
S05	0.0	22.5	F05	
S06	22.5	22.5	F06	
S07	40.0	18.0	F07	
S08	22.5	10.0	F08	P07
S09	22.5	0.0	F09	P08
S10	0.0	-22.5	F18	P09
S11	0.0	10.5	F10	P05
S12	5.5	6.0	F11, 12	P06, 16
S13	10.0	0.0	F13, 14	P17, 20
S14	5.5	-6.0	F15, 16	P18
S15	0.0	-10.5	F17	P19

(3) 材料の物性値

使用する材料（ガラスビーズ粒径 0.1mm, 0.8mm, 1.0mm）の物性値は 3 章で示したものをを用いた。飽和透水係数に関しては、表-7.3 に示すものをを用いる。また、不飽和透水係数に関しては、瞬時水分測定法により得られた値を参考にして設定した図-3.22 に示すものをを用いることとし、VG モデルのパラメータを表-7.4 に示す。

表-7.3 飽和透水係数

ガラスビーズ粒径 : D [mm]	飽和透水係数 [cm/s]
0.1	1.21×10^{-2}
0.8	5.14×10^{-1}
1.0	9.63×10^{-1}

表-7.4 不飽和水分特性

ガラスビーズ粒径 : D [mm]	α [1/cm]	n	θ_s	θ_r	k_s for k_{uns} [cm/s]
0.1	0.0161	15.00	0.380	0.040	2.00×10^{-3}
0.8	0.1120	9.58	0.365	0.030	8.46×10^{-2}
1.0	0.1520	7.50	0.380	0.030	1.59×10^{-1}

解析上、各粒径に対する透水係数は図-7.3, 7.4のような折れ線で近似した。

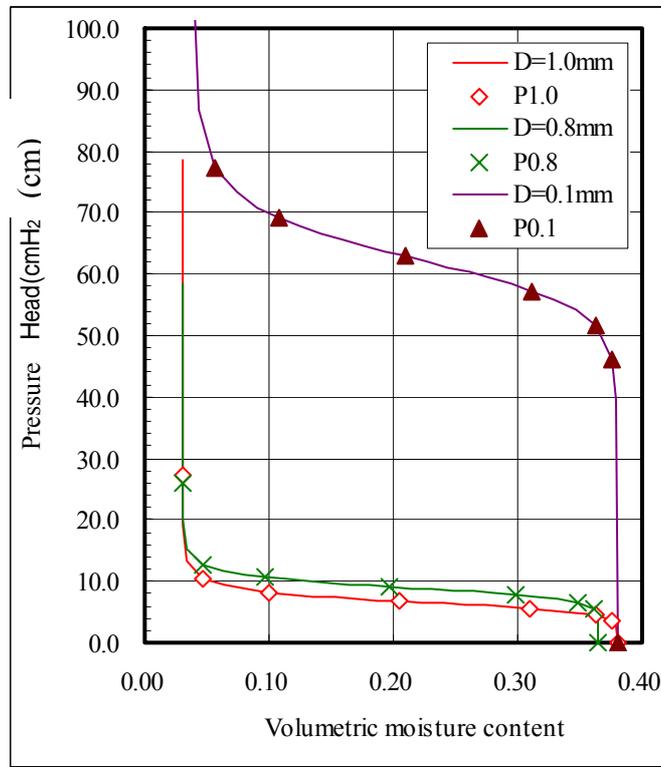


図-7.3 水分特性曲線

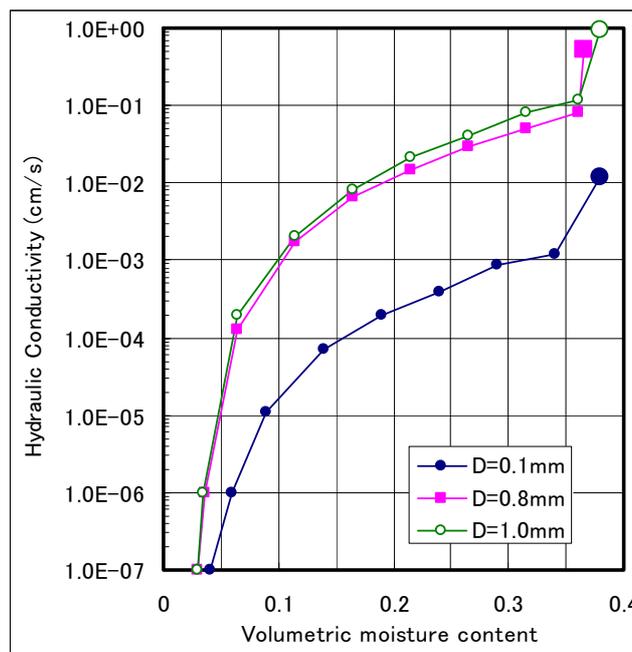


図-7.4 不飽和透水係数

(4) 解析結果

解析結果として case1-1, case1-2, case1-3, case1-4, case2, case3, case4 の 7 ケースについて出力点 S01 から S15 における圧力水頭・体積含水率の経時変化を図-7.5 から 7.18 に示す。

坑道部への流水量を case1-1, case1-2, case1-3, case1-4, case2 の比較として図-7.19 に, case3, case4 の比較として図-7.20 に示す。

case1-2 に関しては圧力水頭コンタ, 流速ベクトル図を各タイムステップごとに図-7.21 から 7.32 に示す。

上記結果から, いずれの解析ケースにおいても圧力水頭の低下は見られるものの, 体積含水率の変化はほとんど見られない。水槽 A の試験結果では, 模擬坑道部のバルブ解放後に間隙水圧の低下とともに, 間隙水圧が負圧になる地点では体積含水率の低下も計測されている。間隙水圧の低下は試験結果と解析結果で同じ傾向を示しているが, 体積含水率の変化に関して両者は一致していない。体積含水率が変化しないという解析解は, 解析で設定した不飽和特性から考えると妥当なものである。実験では体積含水率の顕著な低下が粒径の大きいガラスビーズ充填部で計測されたが, この一因として, ガラスビーズの充填に関して空隙が入力値より大きいことが影響していると考えられる。

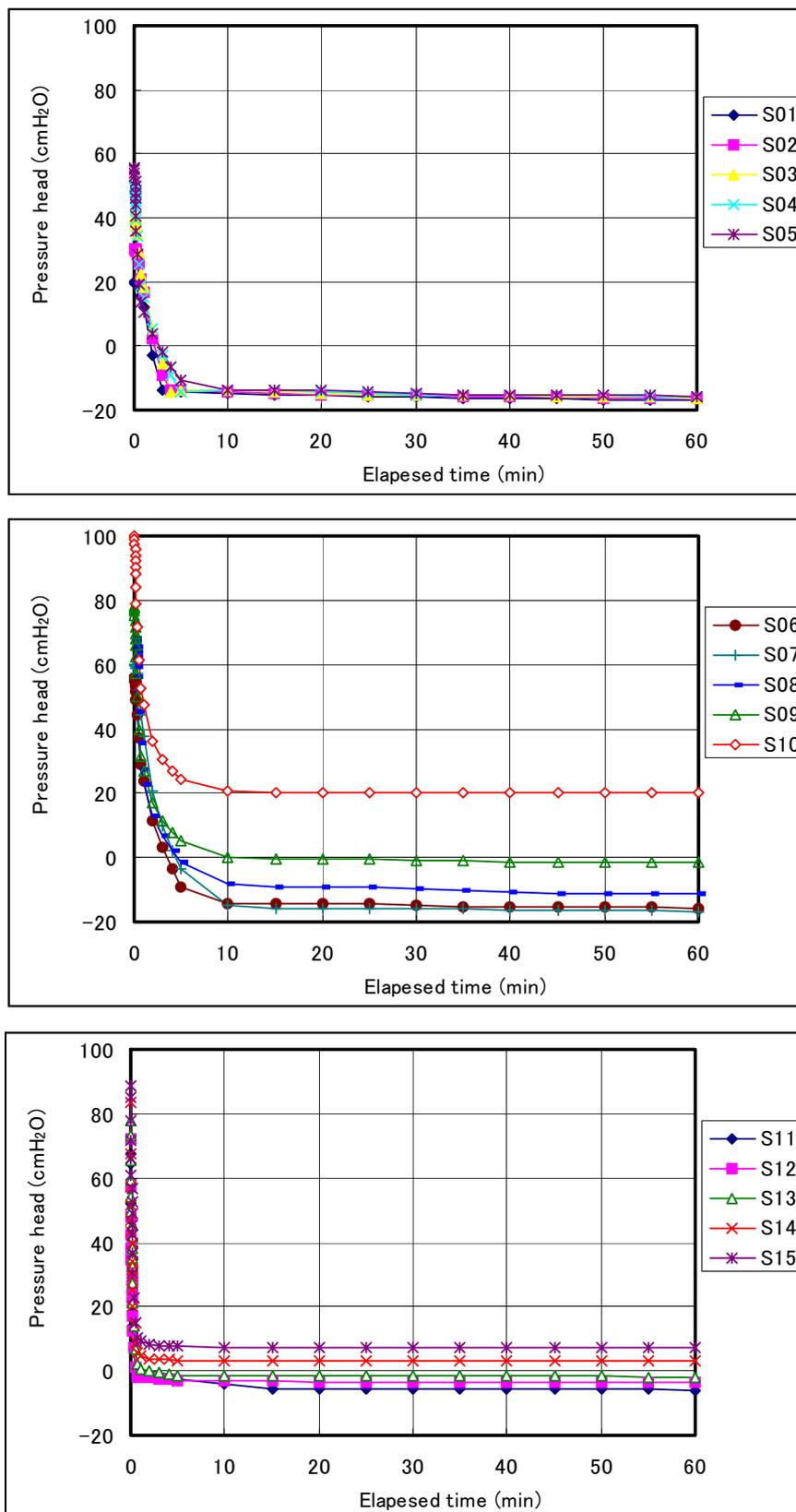


図-7.5 case1-1 の圧力水頭経時変化

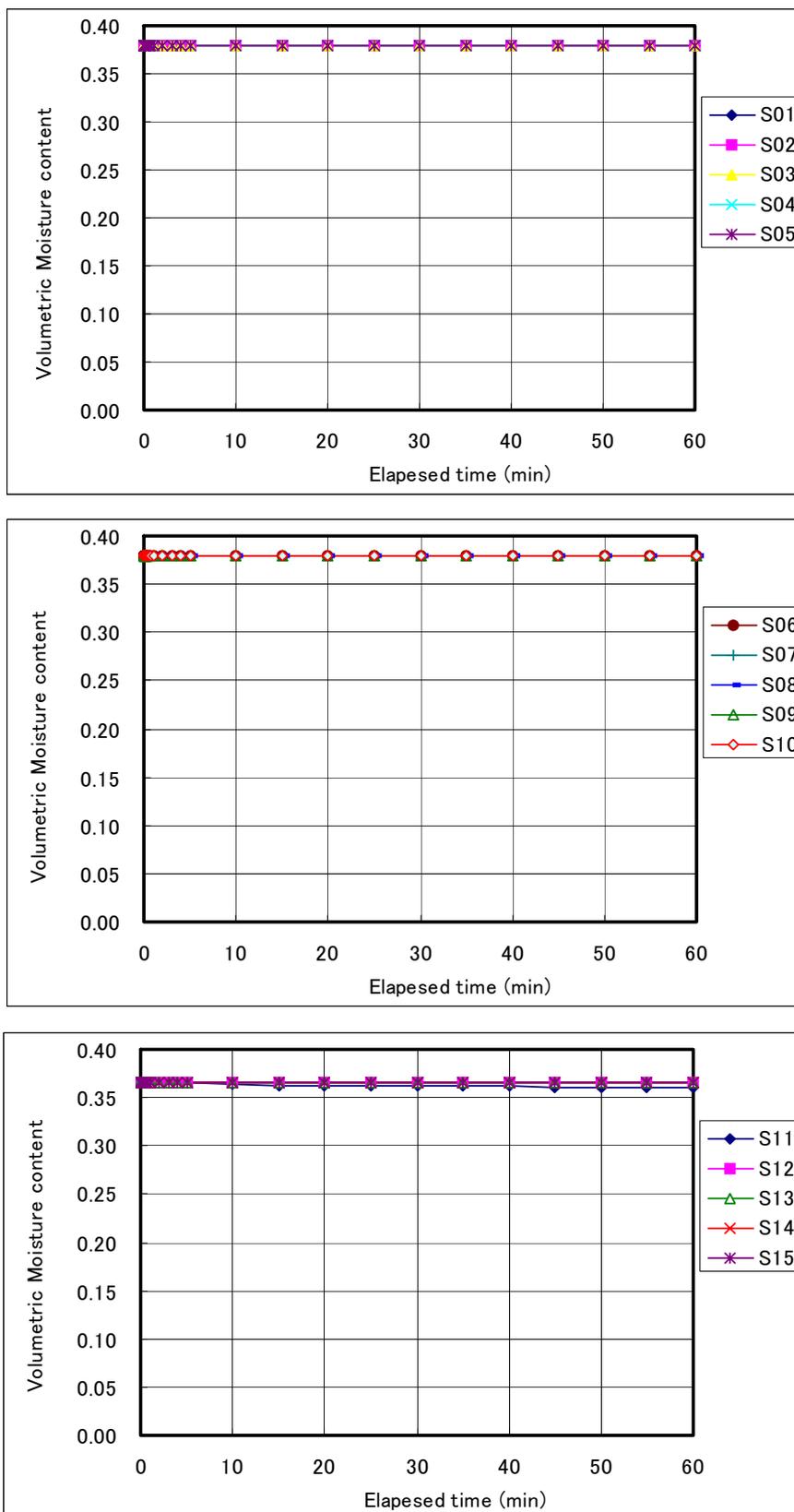


図-7.6 case1-1 の体積含水率経時変化

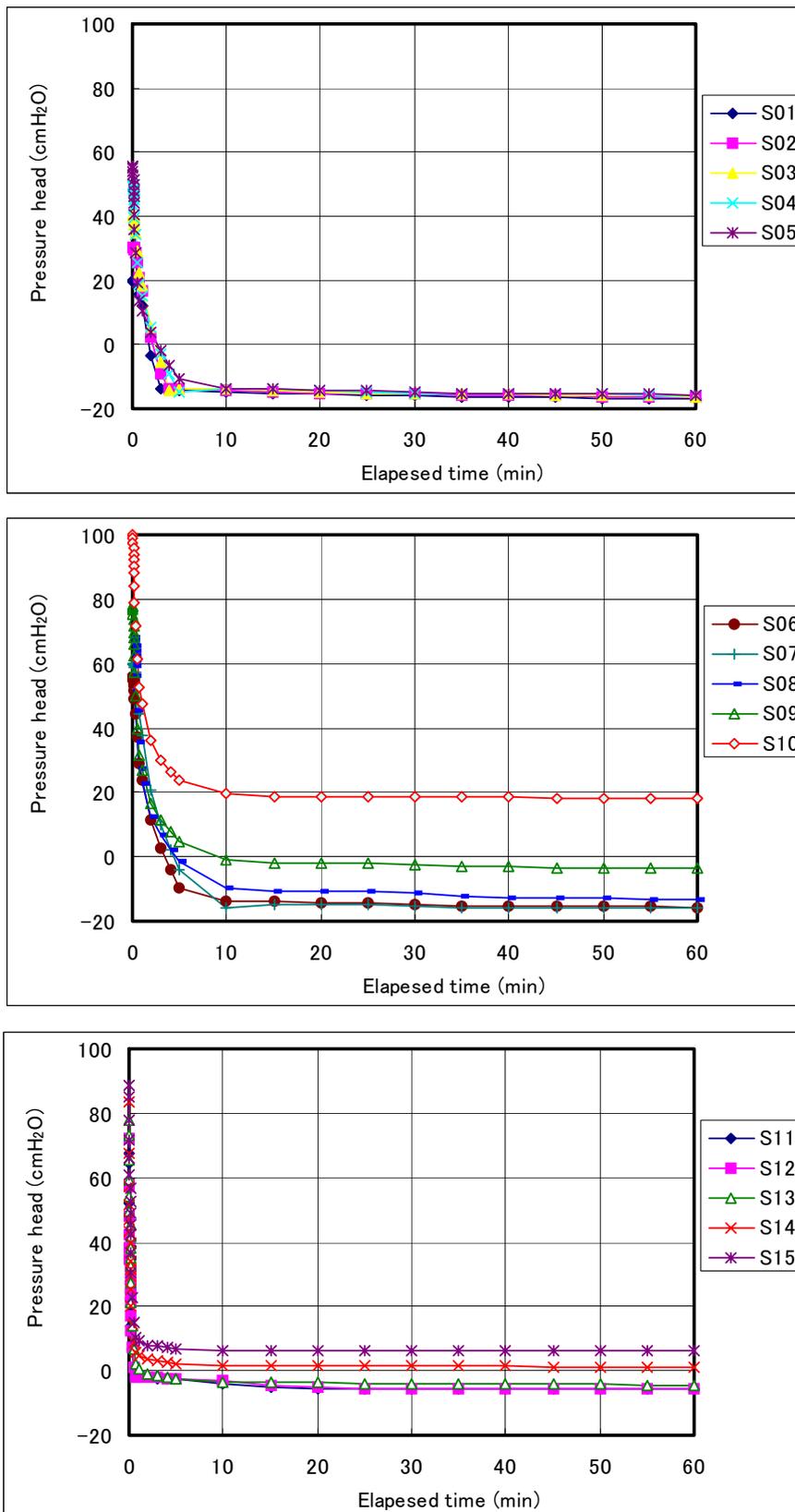


図-7.7 case1-2 の圧力水頭経時変化

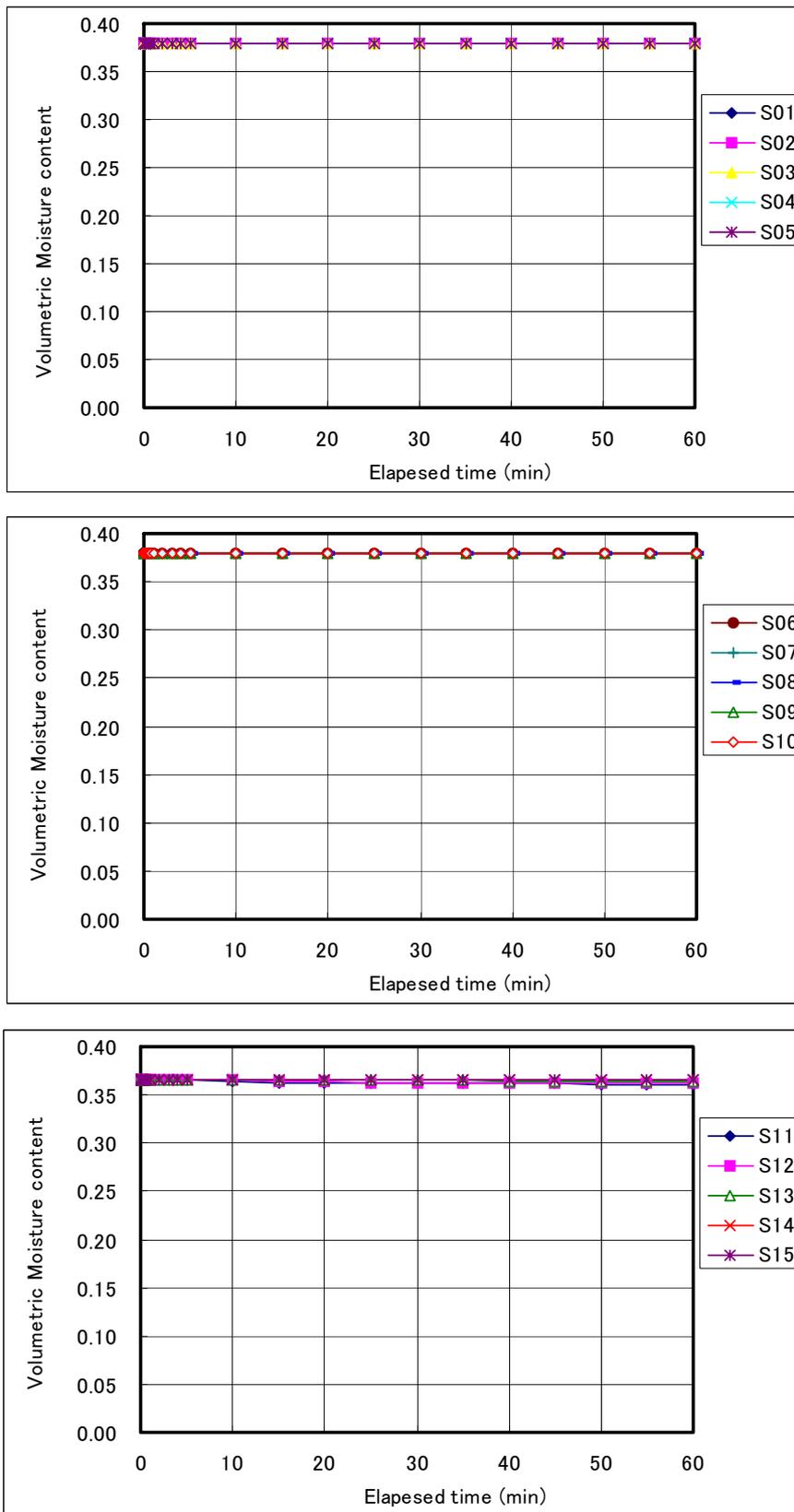


図-7.8 case1-2 の体積含水率経時変化

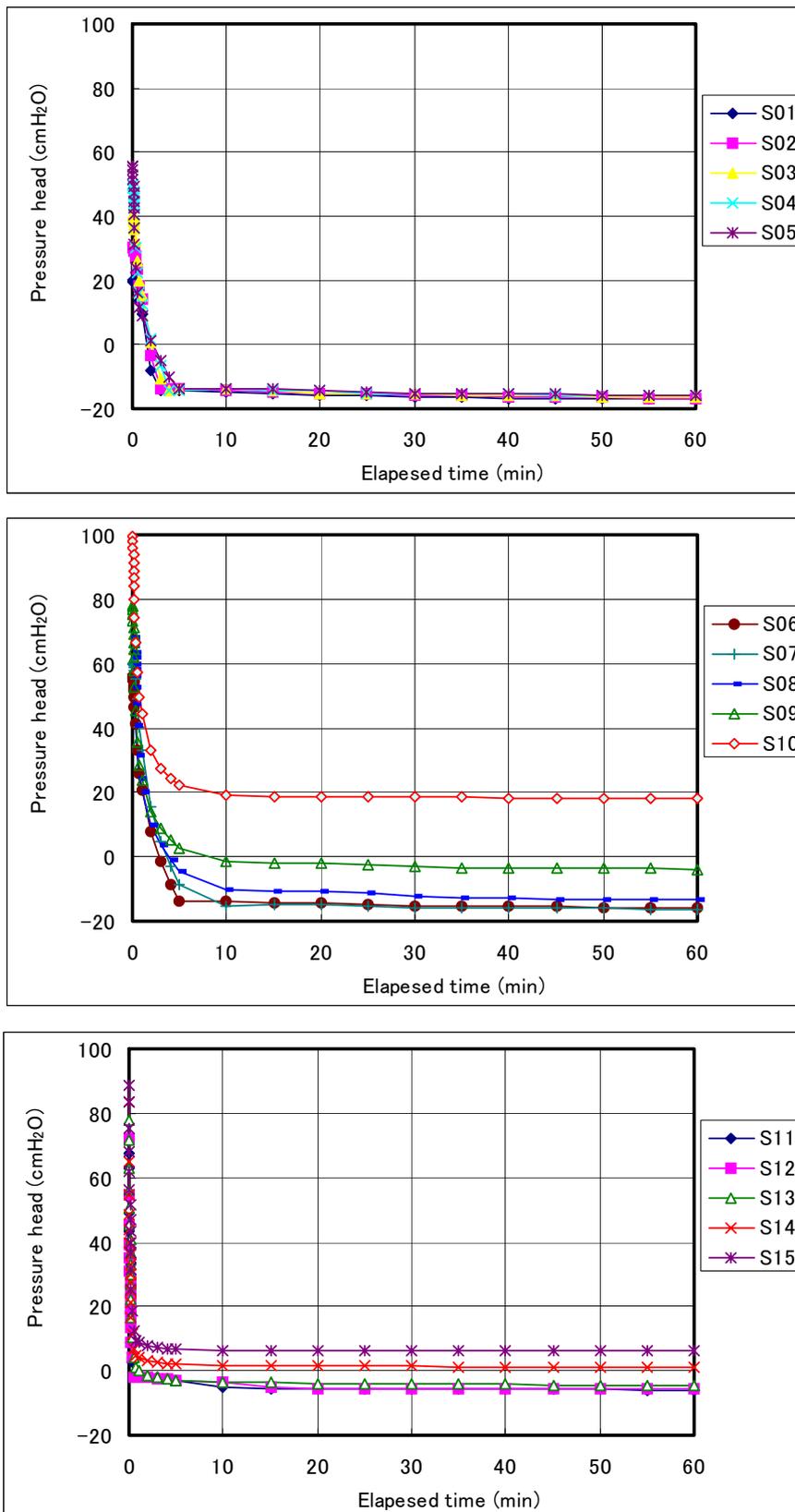


図-7.9 case1-3 の圧力水頭経時変化

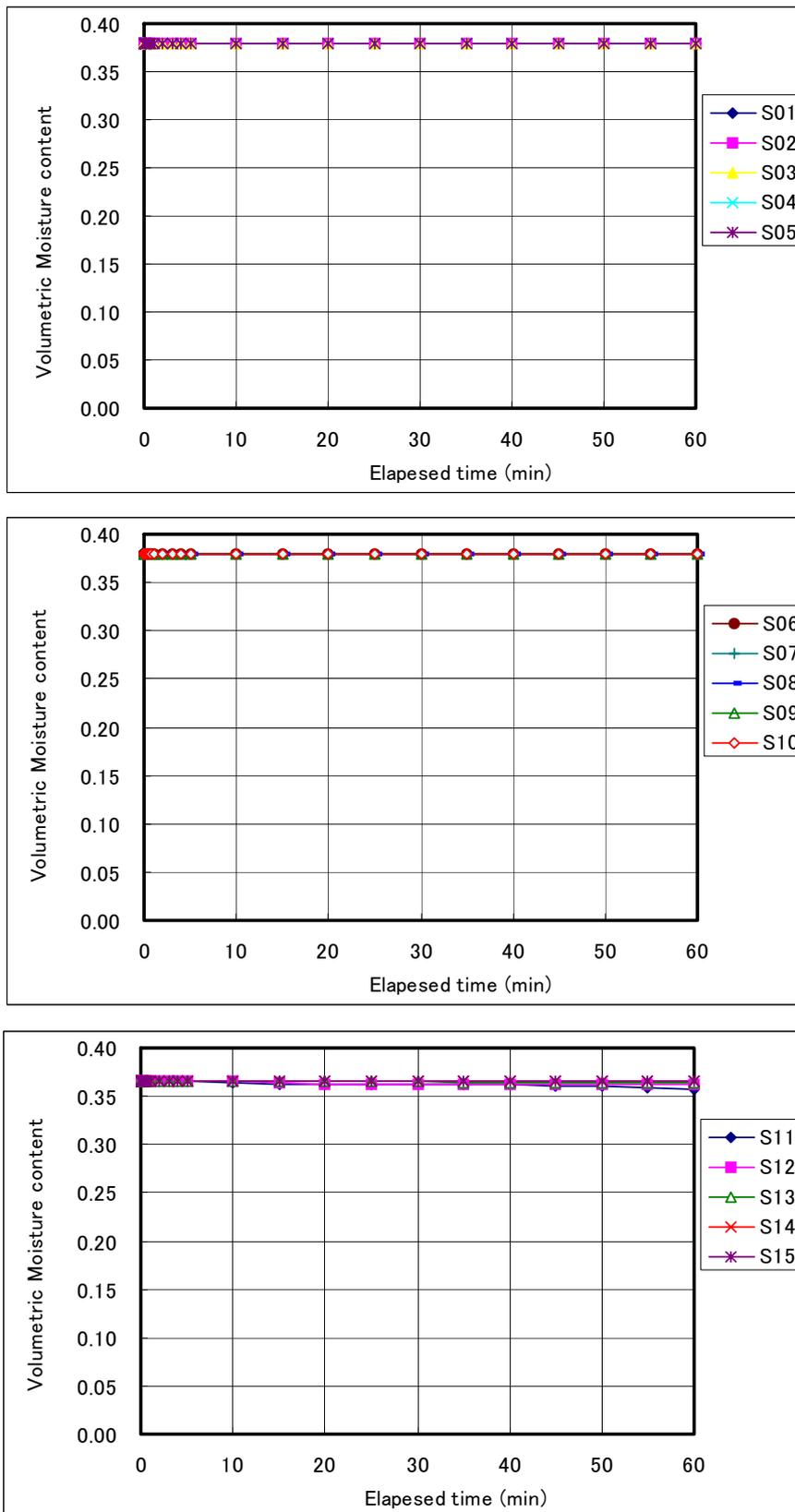


図-7.10 case1-3 の体積含水率経時変化

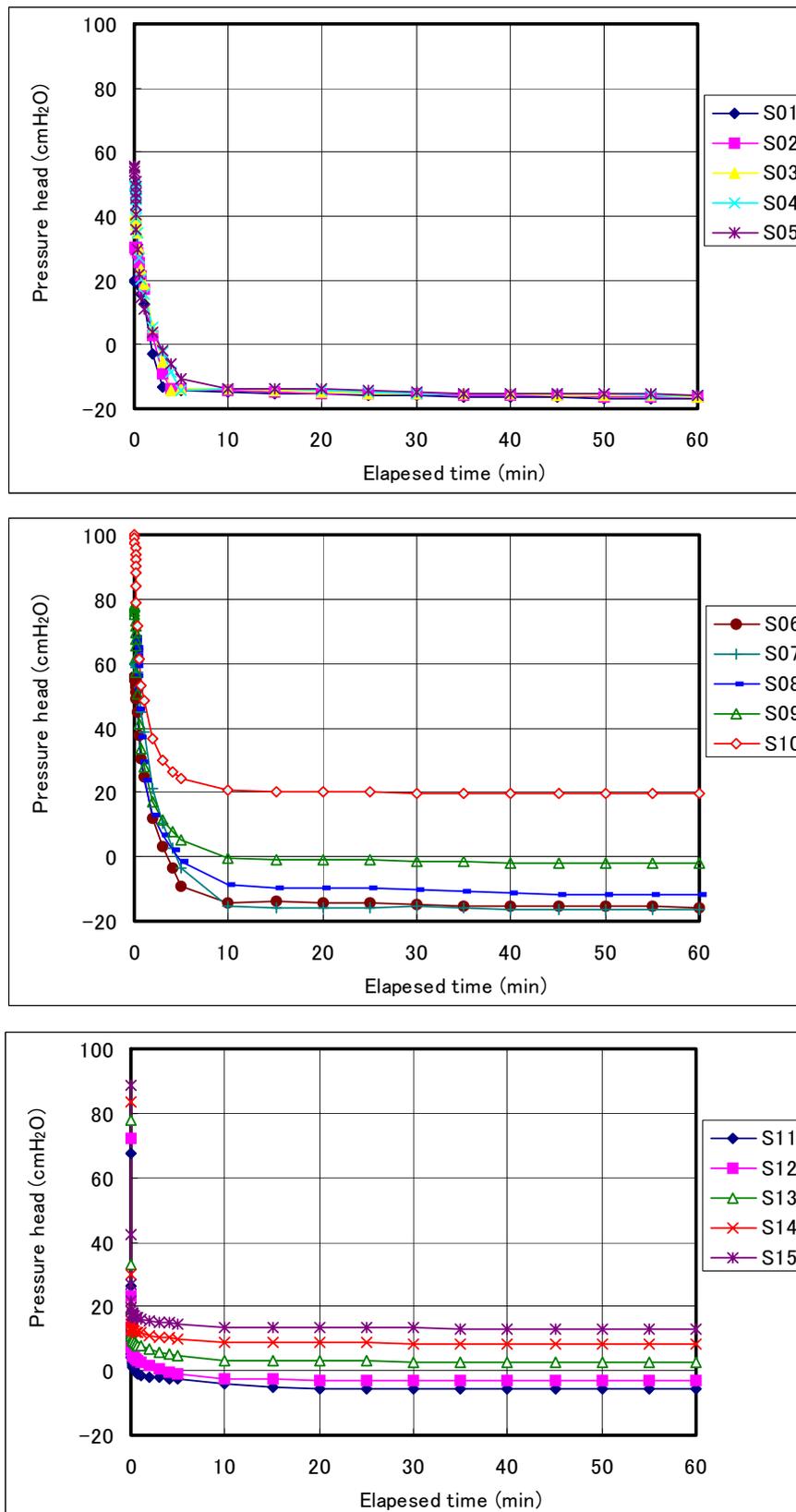


図-7.11 case1-4 の圧力水頭経時変化

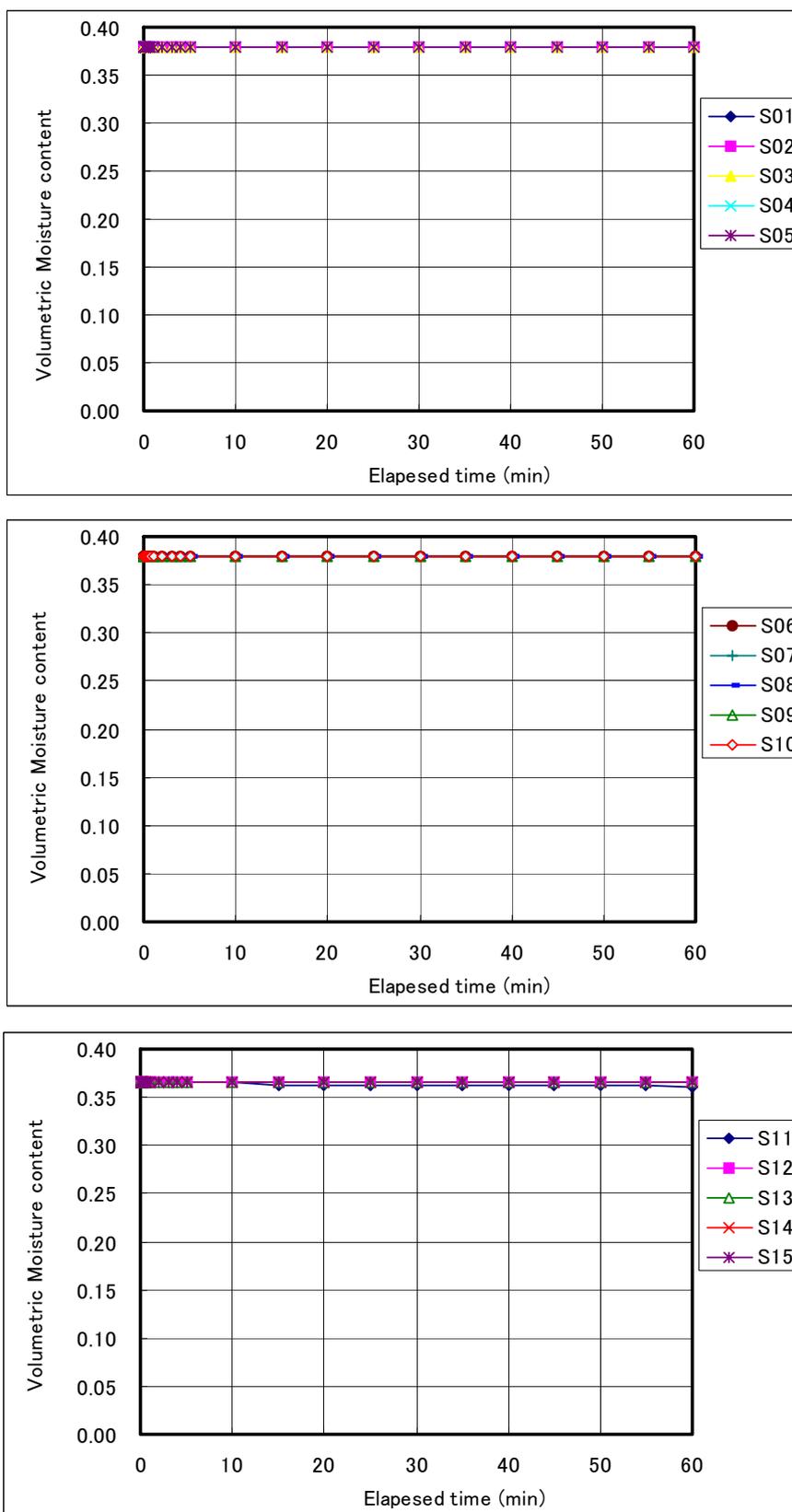


図-7.12 case1-4 の体積含水率経時変化

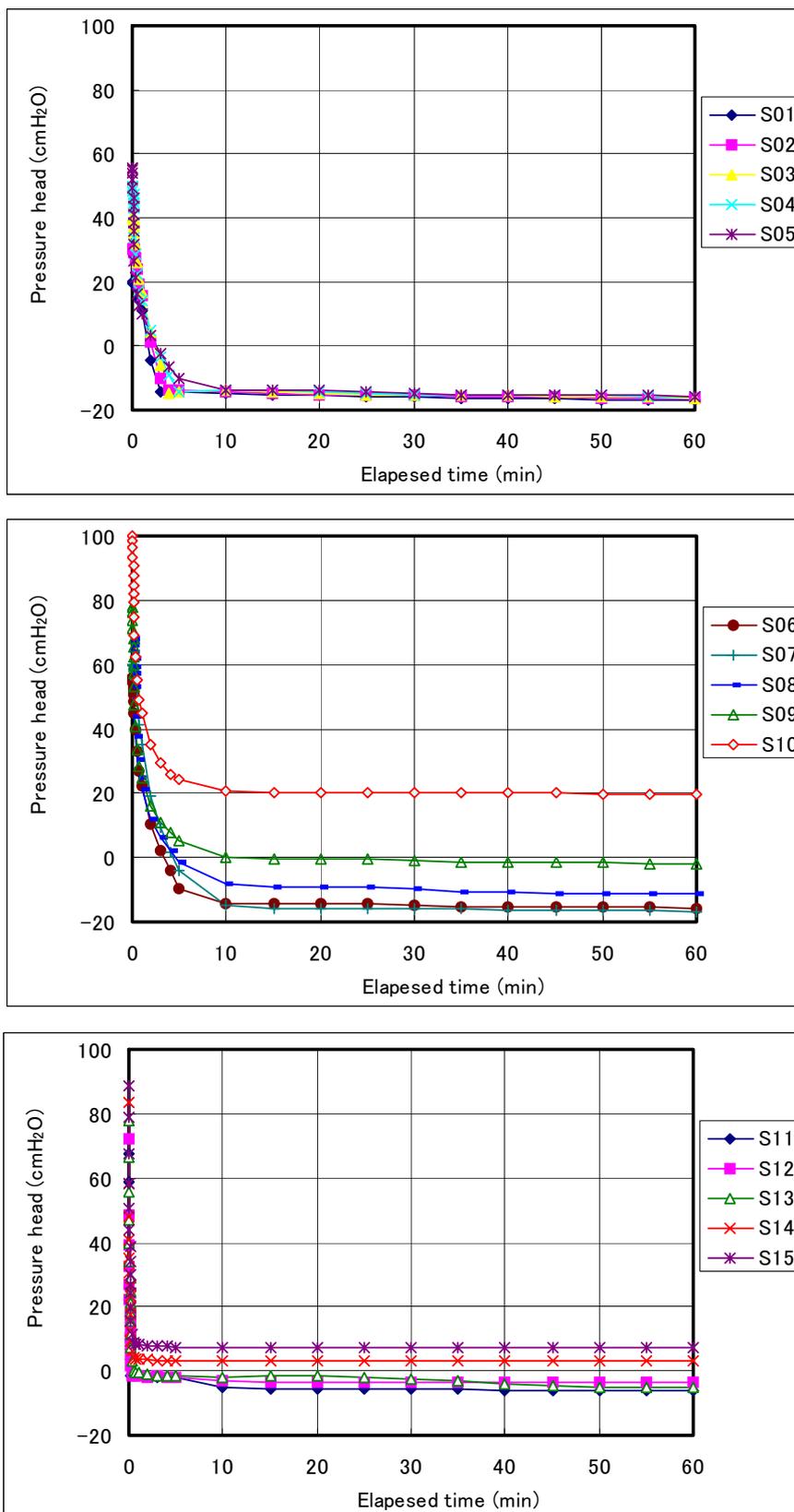


図-7.13 case2 の圧力水頭経時変化

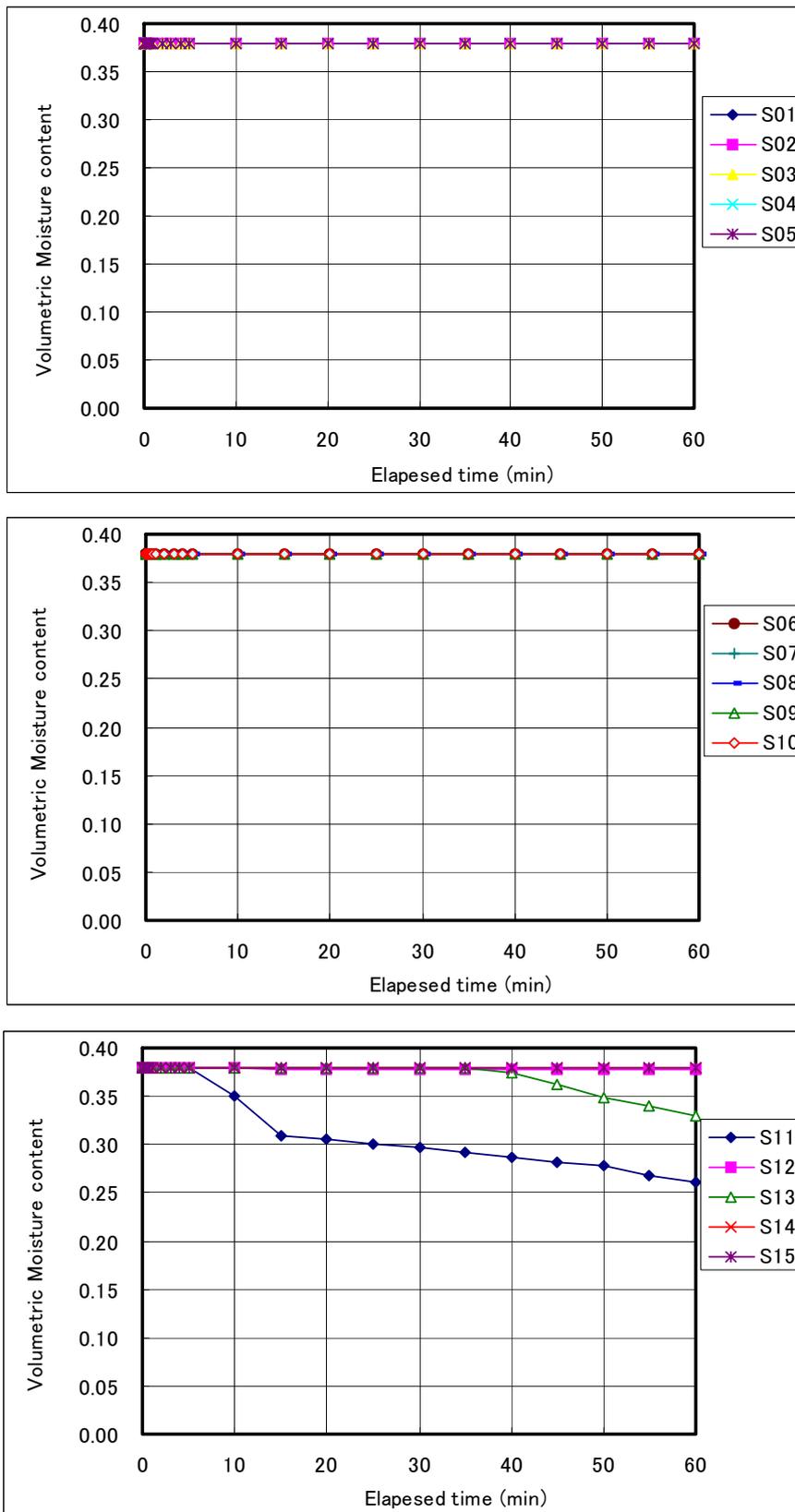


図-7.14 case2 の体積含水率経時変化

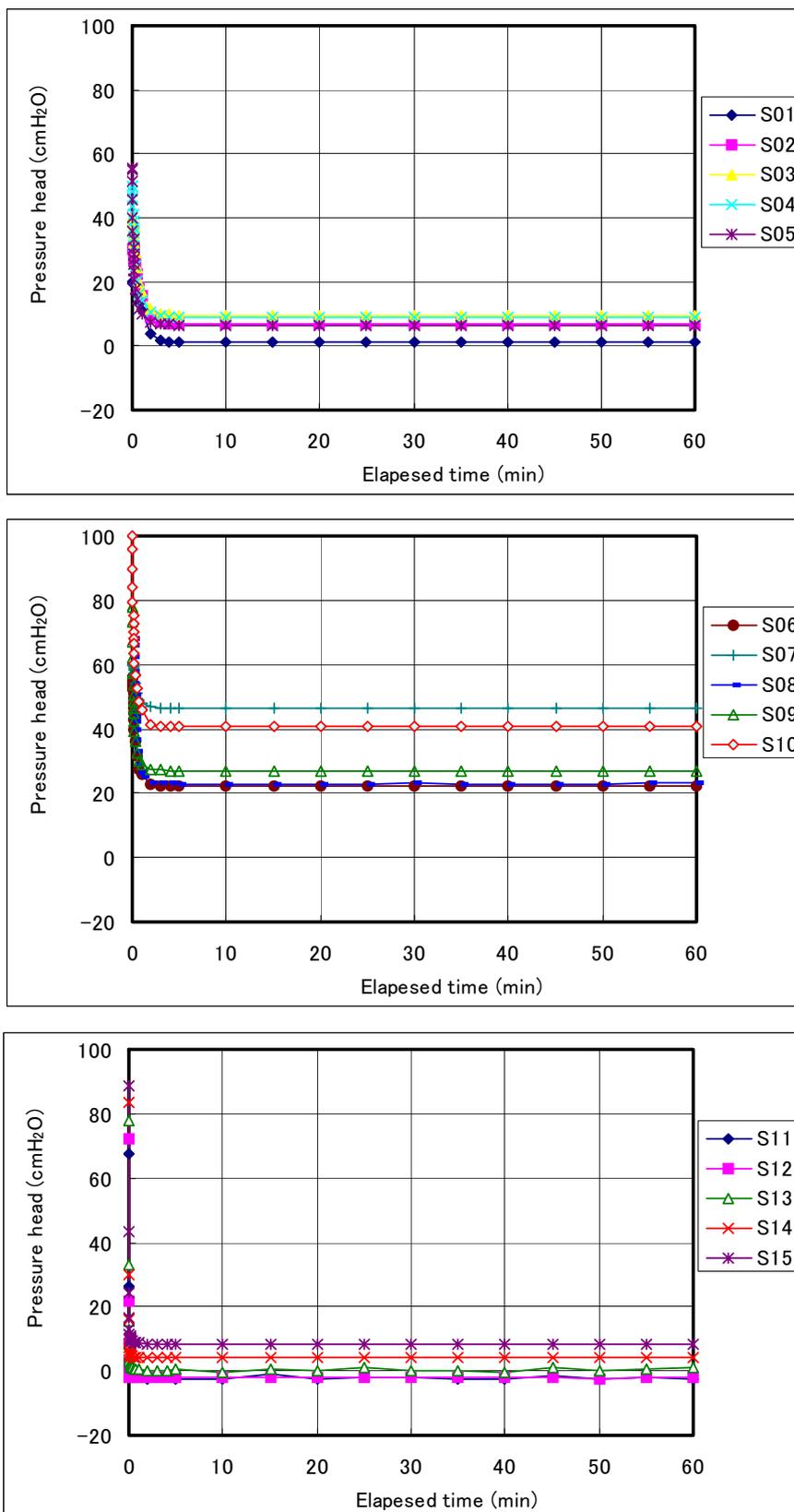


図-7.15 case3 の圧力水頭経時変化

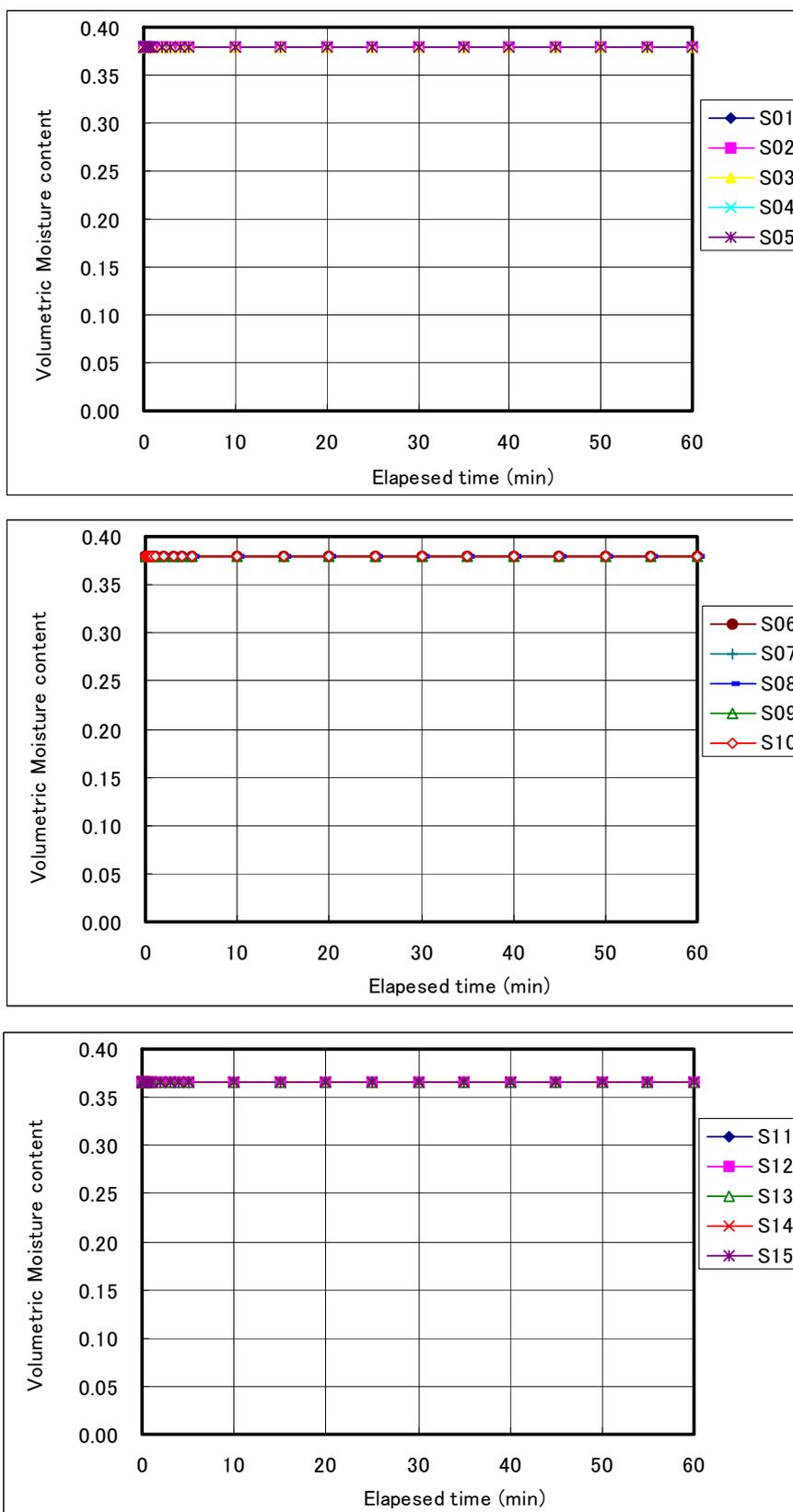


図-7.16 case3 の体積含水率経時変化

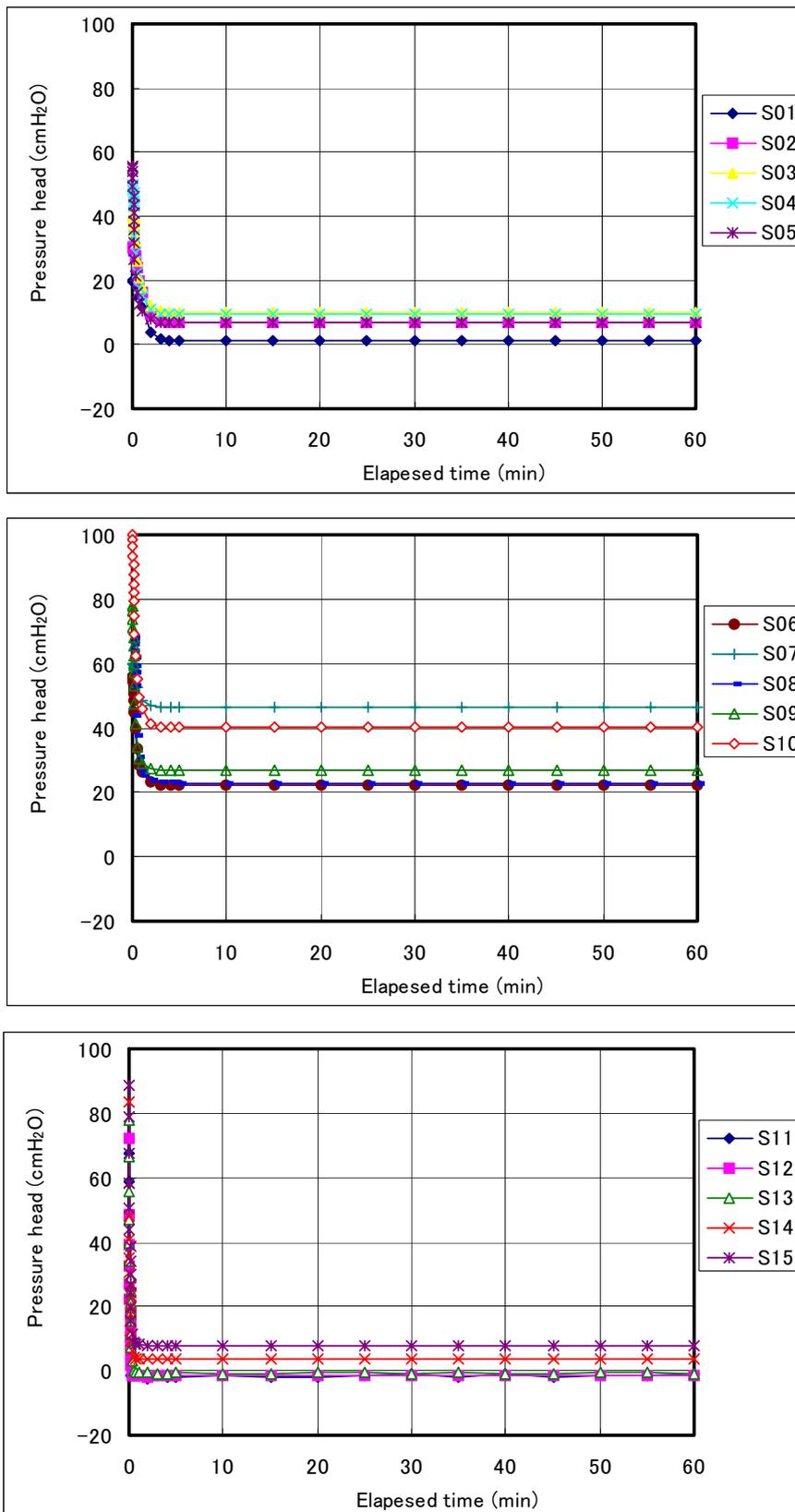


図-7.17 case4 の圧力水頭経時変化

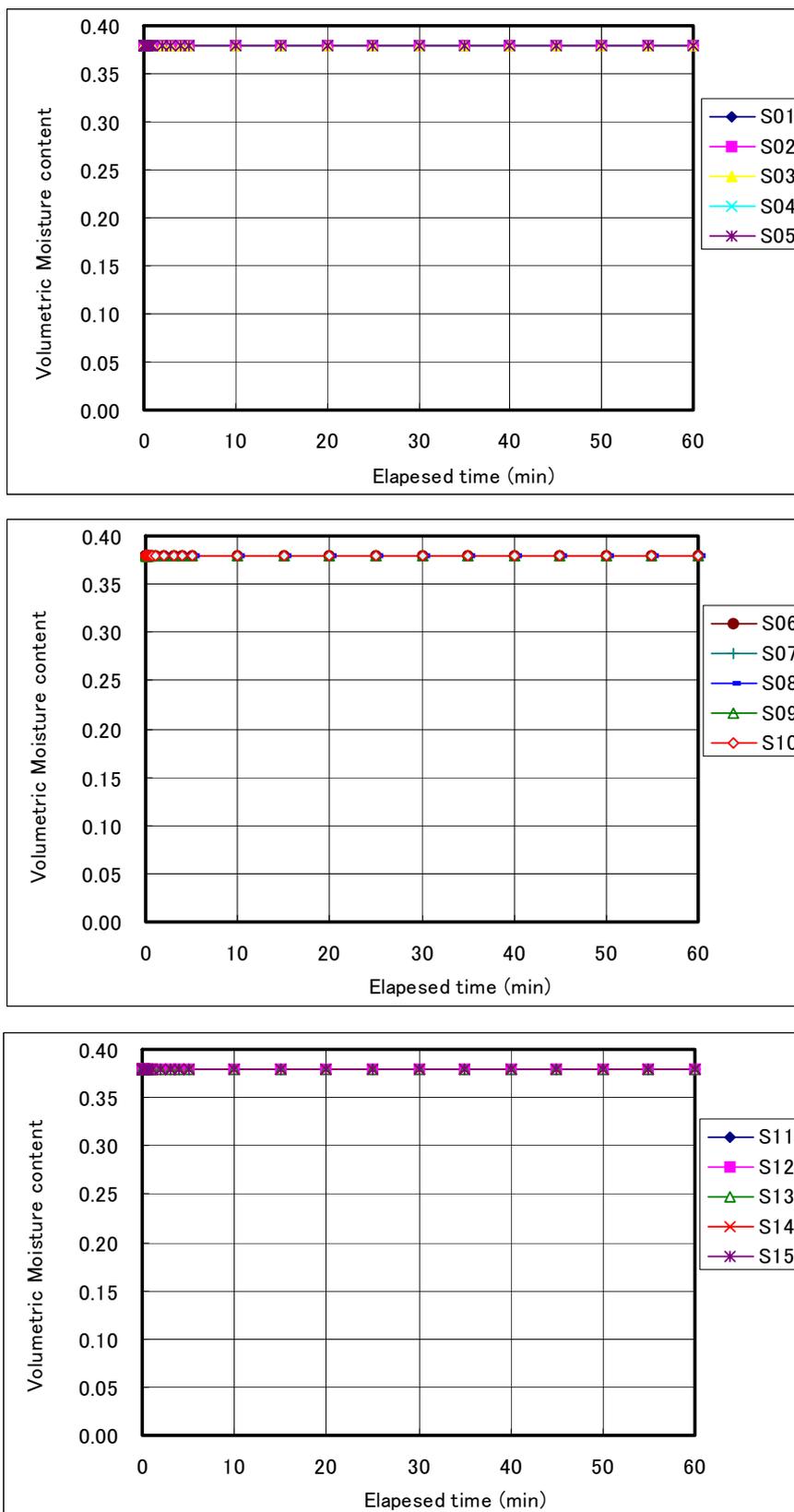


図-7.18 case4 の体積含水率経時変化

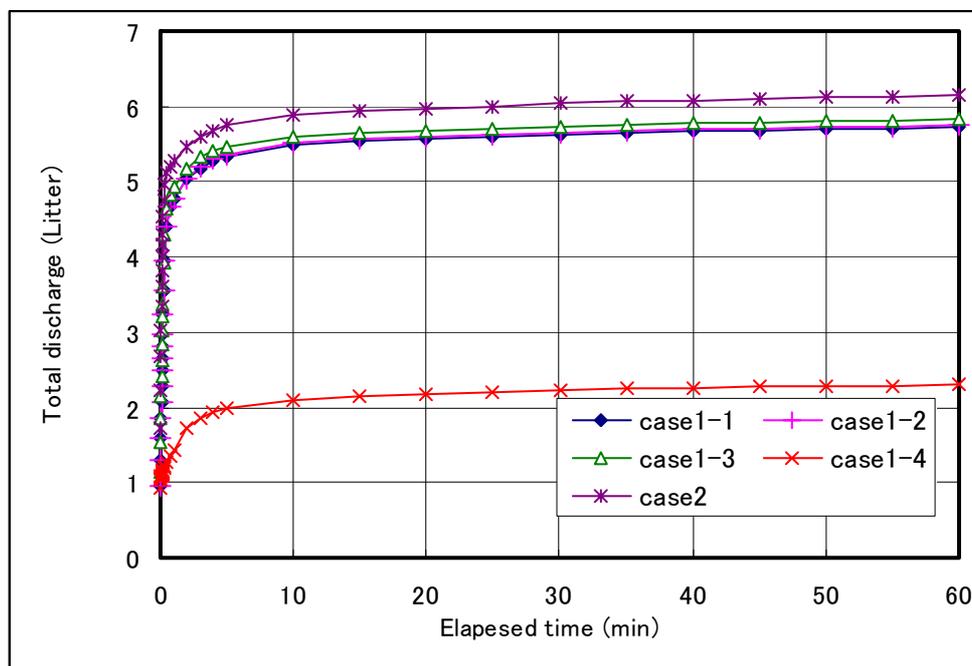


図-7.19 case1-1, case1-2, case1-3, case1-4, case2 の湧水量の経時変化

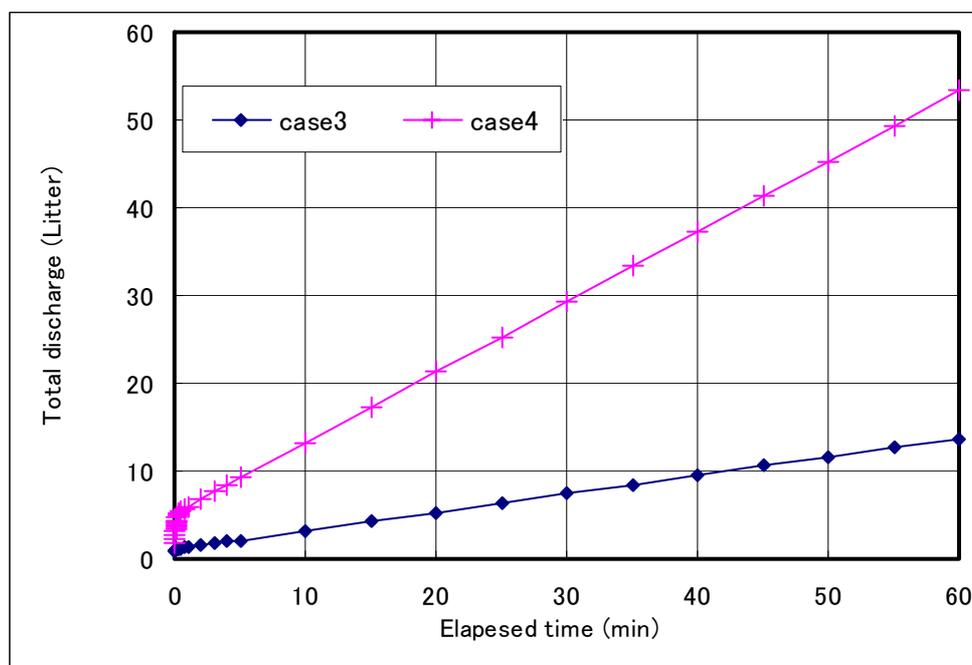


図-7.20 case3, case4 の湧水量の経時変化

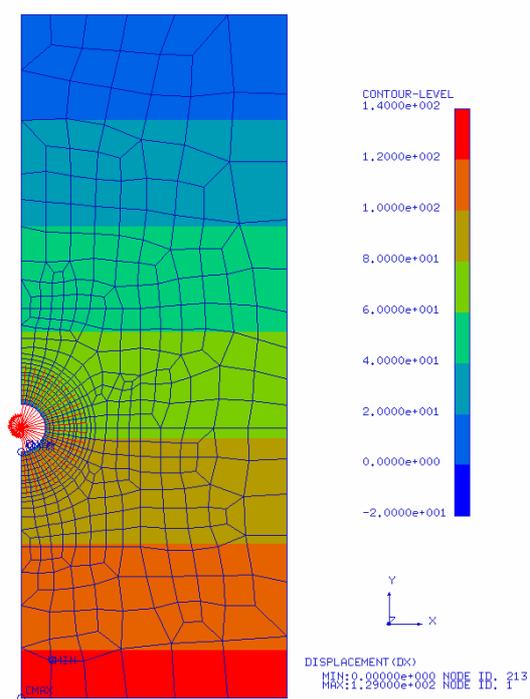


図-7.21 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-1
(0分経過)

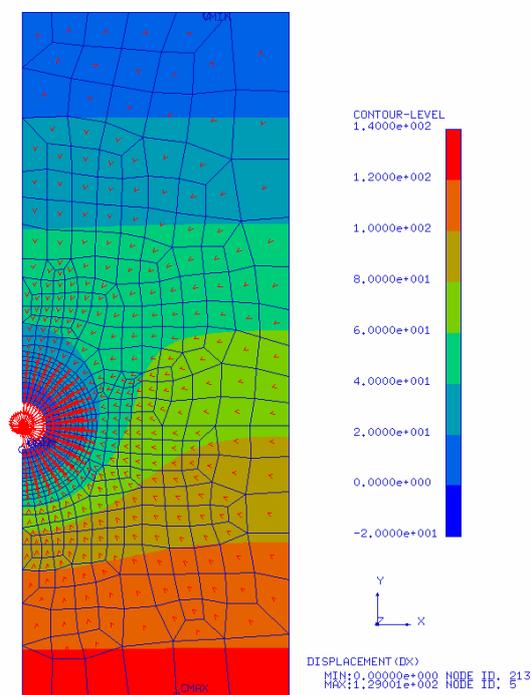


図-7.22 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-2
(0.17分経過)

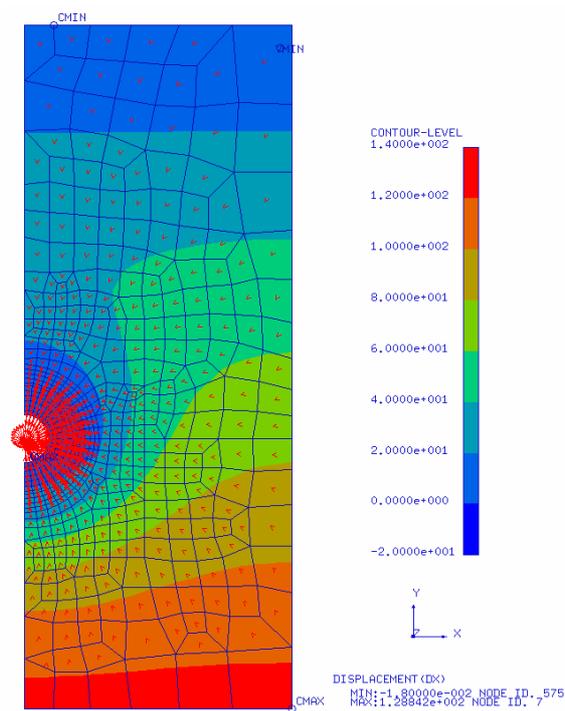


図-7.23 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-3
(0.33分経過)

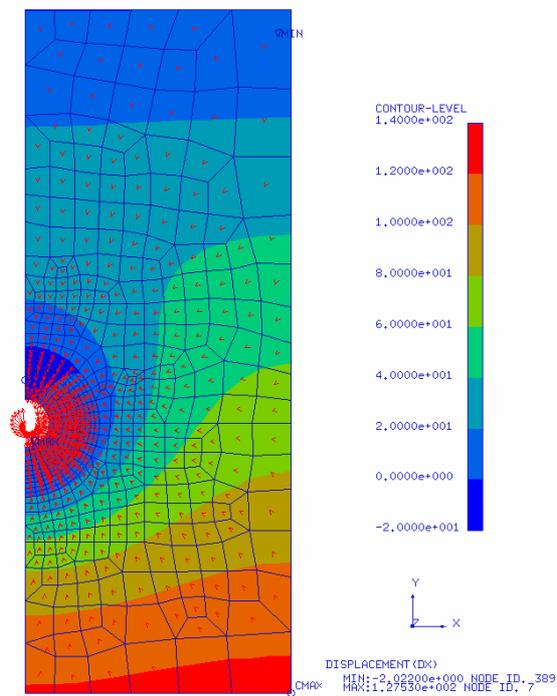


図-7.24 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-4
(0.50分経過)

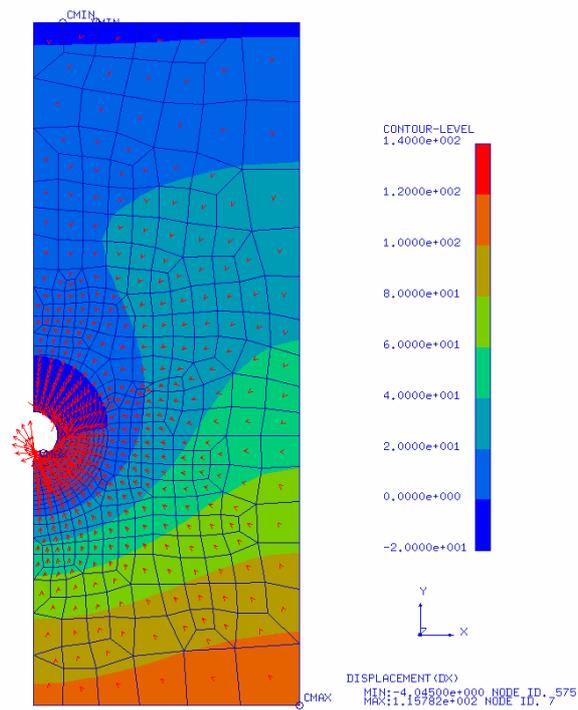


図-7.25 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-5
(1.00 分経過)

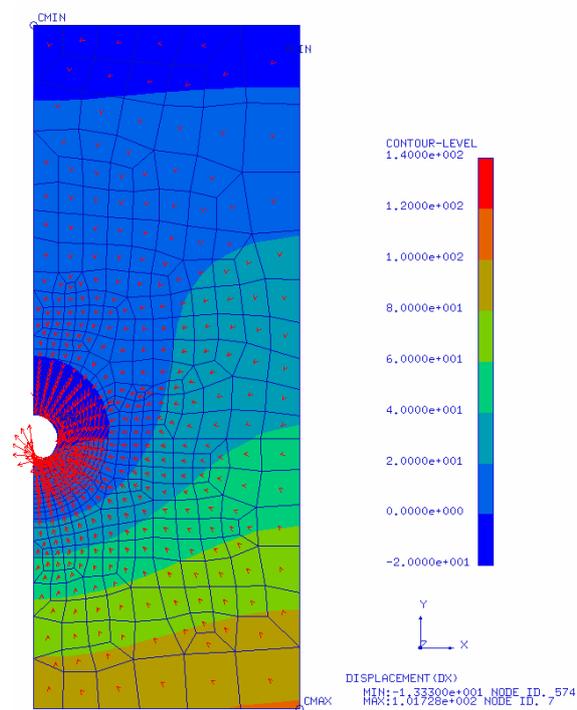


図-7.26 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-6
(1.50 分経過)

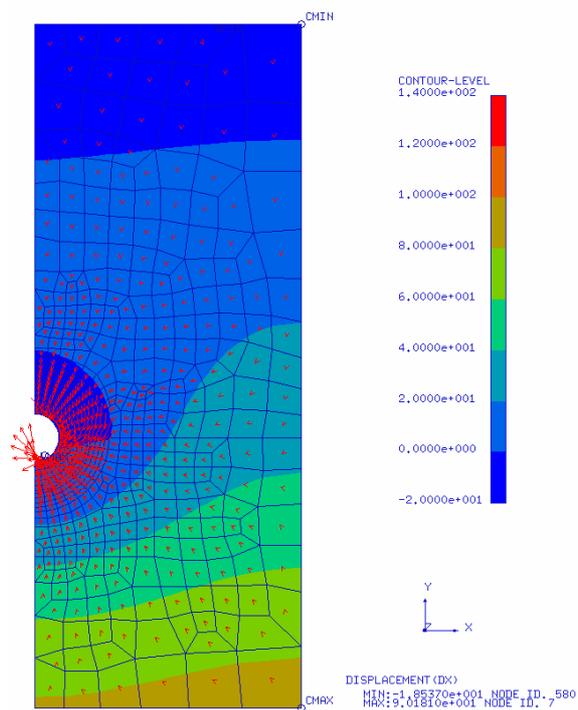


図-7.27 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-7
(2.00 分経過)

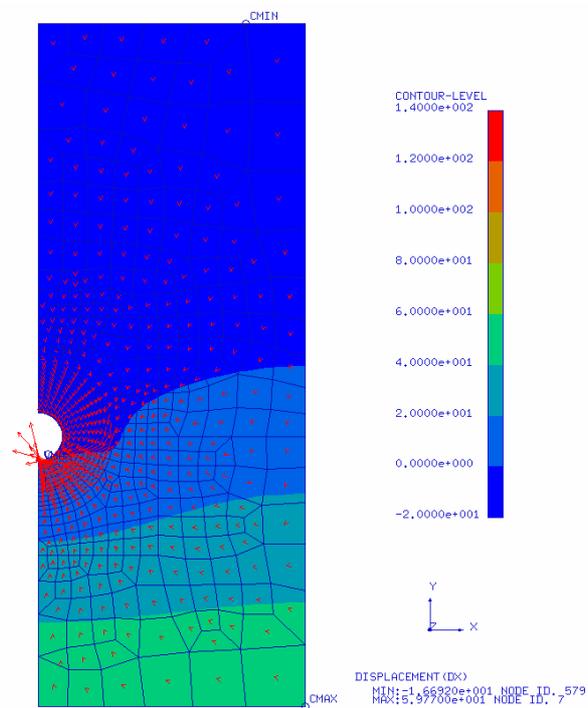


図-7.28 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-8
(5.00 分経過)

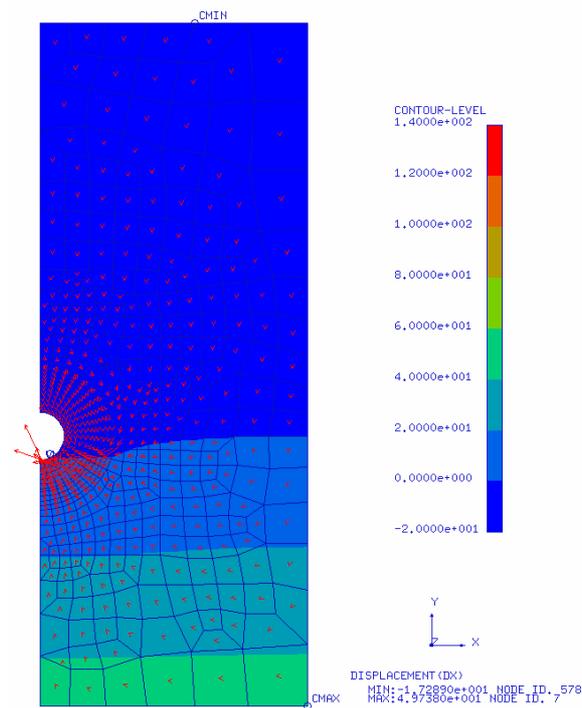


図-7.29 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-9
(10.00 分経過)

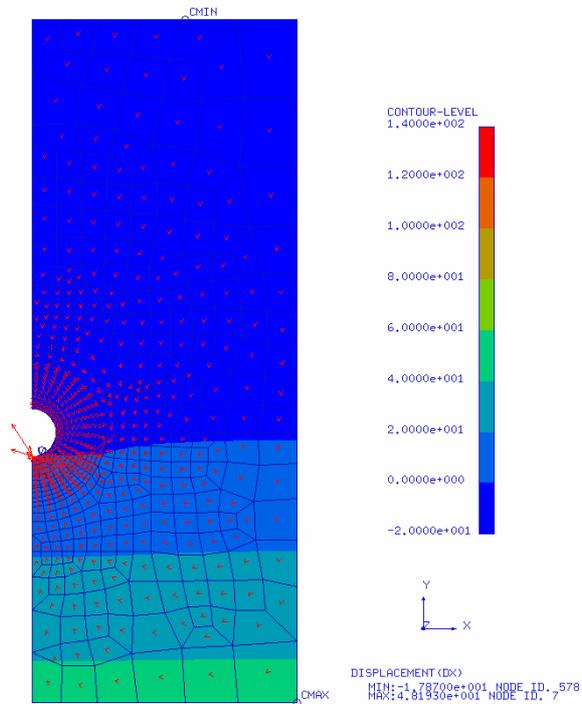


図-7.30 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-10
(20.00 分経過)

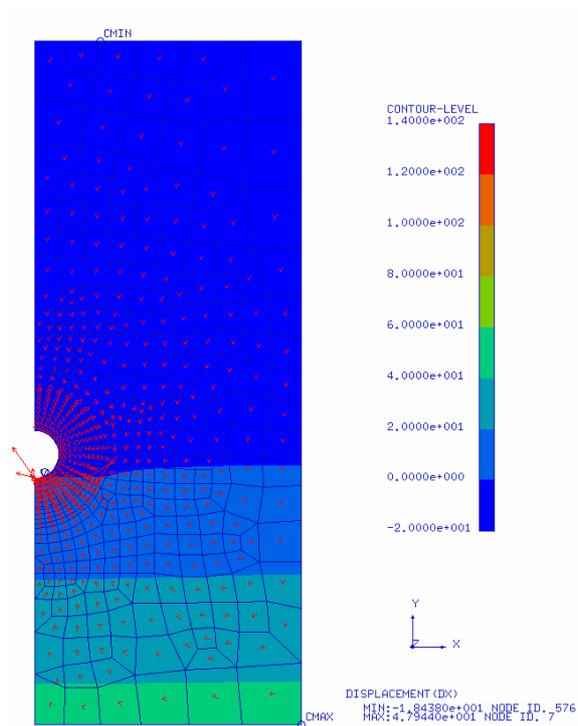


図-7.31 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-11
(30.00 分経過)

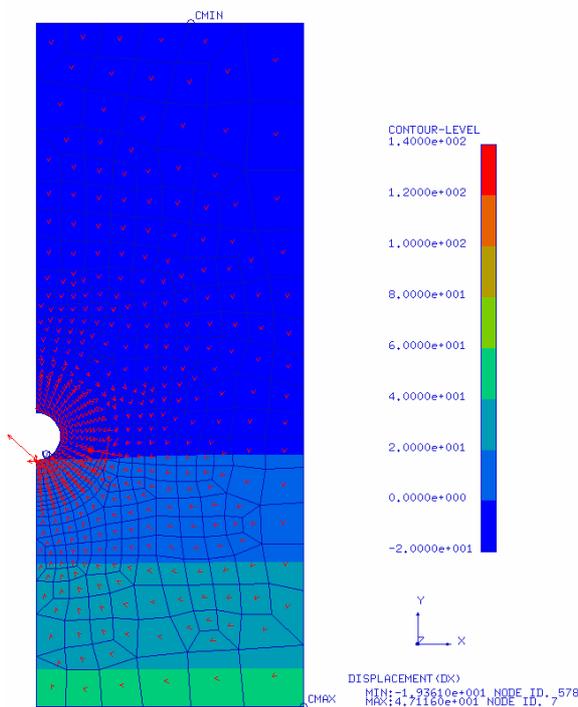


図-7.32 case1-2 の圧力水頭コンタ・流速ベクトル分布・STEP-12
(60.00 分経過)

8. おわりに

高レベル放射性廃棄物の地層処分場において、処分坑道の掘削に伴い生じる掘削影響領域を考慮した処分坑道周辺での不飽和領域の発生メカニズムの基礎的研究に関して、岡山大学およびサイクル機構は共同研究を実施した。研究内容は、不飽和発生メカニズム解明のための室内モデル試験の実施、モデル材料の不飽和-飽和水理特性の取得、不飽和水理特性計測手法の開発、不飽和水理解析の実施である。

共同研究の結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 不飽和水理状況場をガラスビーズを用いた多孔質媒体で再現できる。岩石試料においてベンチレーションを行うことで不飽和領域を坑道周辺に発生させることができる。
- (2) 不飽和水理状況を把握する計測手法として FDR 水分量計測装置、間隙水圧計が適用可能であり、媒体内の間隙水圧の変化および体積含水率の変化を計測できる。FDR 水分量計測装置は、ガラスビーズに関しては Topp (1980) が示した校正曲線と一致し、単一曲線で示すことが可能である。一方、岩石供試体に関しては、低飽和度域では Topp の校正曲線と一致するが、高飽和度域では外れる傾向を示したことから、高飽和度域を精度良く測定するには体積含水率の値に応じて 2 本の校正曲線で示す必要がある。
- (3) 多孔質媒体の 2 次元モデル試験（水槽 A）の結果、水圧・飽和度の経時変化を間隙水圧計と FDR 水分量測定装置を用いて計測することができる。
- (4) 水槽 A の試験結果から、上部を除く 3 面が不透水境界の場合にゆるみ領域部に不飽和領域が形成される。このゆるみ領域の形成については材質の水分特性曲線の限界毛管高さに依存している。
- (5) 水槽 B の試験の結果、坑道掘削を模擬したバルブ開放にベンチレーションを施すことで周辺岩盤の圧力低下を間隙水圧計でとらえることができたが、ベンチレーションを行っても有意な体積含水率の低下は FDR 水分量測定装置を用いても計測することができず、不飽和領域は観察されなかった。
- (6) 不飽和を観察できた水槽 A の鉛直 2 次元モデルの数値シミュレーションでは、圧力の変化は表現できるものの、体積含水率の変化は十分に表現することができなかった。材料特有の慣性等の考慮が必要と考えられる。

参考文献

- 1) G. C. Topp, J. L. Davis and A. P. Annan : “Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines”, Water Resour. Res., Vol. 16, No. 3, pp. 574-582 (1980)
- 2) 冀北平, 三野徹, 赤江剛夫, 長堀金造 : ”FDR計測法による土壌誘電率測定と特定深さの土壌水分測定”, 農業土木学会論文集, No. 182, pp. 25-30 (1996)
- 3) G. J. Gaskin and J. D. Miiiker : “Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique”, J. Agric. Eng. Res., No. 63, pp. 153-160 (1996)
- 4) 電気学会 : 誘電体现象論, 電気学会 (1973)
- 5) 国立天文台編 : 理科年表 (1998)
- 6) 三嶋信雄 : RIによる現場密度・含水比の測定, 土木施工, 現場のための土木計測ハンドブック, pp. 210-221 (1987)
- 7) 島裕雄 : ”比抵抗トモグラフィ”, 地質と調査, 第2号, pp. 19-26 (1991)
- 8) T. Sakaki, K. Sugihara, T. Adach, K. Nishida and W. Lin : “Application of time domain reflectometry to determination of volumetric water content in rock”, Water Resour. Res., Vol. 34, No. 10, pp. 2623-2631 (1998)
- 9) 櫛原昇, 今井久, 雨宮清, 西田薫, 林為人, 榊利博 : ”不飽和領域の解析方法及び原位置計測手法の研究”, サイクル機構技報, No. 4 (1999)
- 10) W. R. Whally : “Consideration on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content”, Soil Science, No. 44, pp. 1-9 (1993)
- 11) 西垣誠, 竹下祐二 : 室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究, 岡山大学土木工学科地下水工学研究室 (1993)
- 12) 土壌物理性測定法委員会編 : 土壌物性測定法, 養賢堂, pp. 206-207 (1976)
- 13) M. Th. van Genuchten, F. J. Leij, S. R. Yates : The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated soil., EPA/600/2-91/065 (1991)
- 14) M. Th. van Genuchten : “A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils”, Soil Science, Vol. 44, pp. 878-892 (1980)
- 15) 河野伊一郎, 西垣誠 : ”不飽和砂質土の浸透特性に関する実験的研究”, 土木学会論文報告集第307号, pp. 59-69 (1981)

- 16) 佐藤稔紀, 菊池正, 雨宮清, 今井久, 安達哲也: ”砂岩の不飽和浸透特性の測定 (その2: 相対透水係数に着目して) ”, 土木学会第53回年次学術講演会予稿集Ⅲ-A, pp. 658-659 (1998)