

多孔質媒体不飽和水理試験設備
(CLUE) 試験結果および解析評価
(研究報告)

2002年2月

核燃料サイクル開発機構
東海事業所

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大字村松4-49

核燃料サイクル開発機構

技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to :

Technical Cooperation Section,

Technology Management Division,

Japan Nuclear Cycle Development Institute

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

Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)

2002

多孔質媒体不飽和水理試験設備 (CLUE) 試験結果および解析評価
(研究報告)

菊池広人*, 杉田裕**, 千々松正和***, 鈴木英明*
小松 満****, 西垣 誠****

要 旨

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、処分場の建設にともない坑道周辺に不飽和領域が発生すると予想される。この不飽和領域の発生は、坑道周辺の岩盤への空気の侵入、その空気による地下水中の酸化還元電位の変化、さらには鉱物の酸化による収着性の変化へと影響する。これらの影響は、安全評価で考慮している地下環境条件とは異なるものを作りだすことになり、条件によっては人工バリアの健全性に直接関連するオーバーパックの腐食挙動に影響すると考えられる。

そこで、不飽和領域の発生メカニズムを解明するため、坑道周辺の不飽和領域の発生を再現する多孔質媒体不飽和水理試験設備 (CLUE) を設計製作した。CLUE は、岩盤を模擬した媒体としてガラスビーズを用いた試験水槽 A と実岩盤を用いた試験水槽 B を備えている。

不飽和水理試験に供するガラスビーズに関する飽和・不飽和の水理物性試験を実施し、不飽和浸透流解析に必要な物性値を取得した。また、間隙水圧計および誘電率計測法 (FDR 水分量計測装置) を試験水槽 A の試験に用いた。

試験水槽 A での不飽和水理試験の結果、ガラスビーズを用いて不飽和領域の発生状況を再現することができ、また、間隙水圧計および誘電率計測法によってこれらの分布および経時変化を測定することが可能であることが確認された。さらに、定常状態における不飽和領域の分布に関しては、試験結果と不飽和浸透流解析結果は良い一致を示した。

* 検査開発株式会社
** 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
*** 株式会社間組
**** 岡山大学

Experimental studies on unsaturated zone surrounding rock using
Characterizing Laboratory test on Unsaturated zone (CLUE)

Hirohito KIKUCHI*, Yutaka SUGITA**, Masakazu CHIJIMATSU***,
Hideaki SUZUKI*, Mituru KOMATSU**** and Makoto NISHIGAKI****

Abstract

In geological disposal of high-level radioactive waste (HLW), unsaturated zone will be developed around the disposal tunnel due to the construction of the tunnel. The development of the unsaturated zone would lead to the intrusion of the air into the surrounding rock and then oxygen would dissolve into ground water. Dissolved air affects the redox potential of the ground water and also oxidizes minerals existed in surrounding rock and changes their sorption capacity. These influences would change the geochemical conditions of the repository and affect the corrosion behavior of the overpack.

Therefore, Characterizing Laboratory test on Unsaturated zone (CLUE) was designed and assembled to understand the development process of the unsaturated zone. The CLUE is designed from the viewpoint of the hydraulic characteristics. CLUE has two test tanks. The test tank A uses glass beads to simulate rock mass, the test tank B uses rock block sample.

Fundamental hydraulic data of the glass beads on saturation/unsaturation conditions for numerical analysis was obtained. Tests using the test tank A used the piezometer and frequency domain reflectometry (FDR) to measure the unsaturation behavior.

From the results of the test tank A, the unsaturated zone was developed around the tunnel. The piezometer and FDR measured the distribution and the time history of the unsaturated zone well. In stable condition, measurement data was in good agreement with the analytical results.

* Inspection Development Corporation
** Barrier performance group, Waste isolation research division,
Waste management and fuel cycle research center, Tokai works
*** Hazama Corporation
**** Okayama University

目 次

1. はじめに	1
2. FDR 水分量計測装置 (Frequency Domain Reflectometry) の適用性の検討	3
2.1 誘電率計測法の測定原理および FDR 装置	3
2.1.1 FDR 法測定原理	3
2.1.2 FDR 測定装置	6
2.1.3 計測装置の誤差要因の検討	7
2.2 FDR 測定方法	11
2.2.1 プローブ (電極) の校正	11
2.2.2 各試料に対する校正曲線の作成	12
3. ガラスビーズの基礎物性測定	17
3.1 試料の種類	17
3.2 供試体の状態量	17
3.3 水分特性曲線	18
3.4 飽和透水係数	23
3.5 不飽和透水係数	25
4. 鉛直 2 次元矩形水槽 A を用いた不飽和領域の形成試験	34
4.1 概要	34
4.2 試験装置	34
4.3 試験ケース	37
4.4 試験結果	37
4.4.1 予備試験	37
4.4.2 水位固定条件試験	47
4.4.3 不透水条件試験	53
5. 不飽和浸透流解析	70
5.1 形状とモデル	70
5.2 飽和/不飽和浸透流解析の支配方程式	71
5.3 材料の物性	71
5.4 解析条件	72
5.5 解析結果	74
6. おわりに	87
【参考文献】	88

目 次

図 1-1	不飽和領域の発生模式図	1
図 2-1	FDR 測定システム構成概略図	4
図 2-2	FDR スペクトル図 (測定物質: 水)	5
図 2-3	FDR 測定装置	6
図 2-4	FDR プローブ電極部	7
図 2-5	ケーブル長さによる測定誤差	8
図 2-6	ケーブル長さ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)	8
図 2-7	ケーブル周辺環境の影響	9
図 2-8	システム拡張 (20ch オートスイッチングユニット) の影響	9
図 2-9	各材質の測定スペクトル	12
図 2-10	各種土質試料に対する FDR による誘電率測定結果	14
図 2-11	FDR による各種試料に対する校正曲線	14
図 2-12	FDR によるガラスビーズに対する誘電率の測定結果	15
図 2-13	FDR によるガラスビーズに対する校正曲線	15
図 3-1	ガラスビーズ供試体を構成する要素	18
図 3-2	土柱法水分特性測定装置概略図	21
図 3-3	吸引法 (砂柱法) 水分特性測定装置概略図	21
図 3-4	加圧板法水分特性測定装置概略図	21
図 3-5	各試料に対する水分特性曲線の VG-model による同定結果	22
図 3-6	粒経と VG パラメータの関係	23
図 3-7	定水位透水試験測定装置概略図	24
図 3-8	飽和透水試験結果	25
図 3-9	鉛直排水実験の概略図	26
図 3-10	各計測点における体積含水率の経時変化	27
図 3-11	体積含水率分布	27
図 3-12	各計測点における圧力水頭の経時変化	28
図 3-13	圧力水頭分布	28
図 3-14	FDR 土壤水分計を用いた瞬時水分計測法 (排水実験) 装置概略図	29
図 3-15	計測座標	29
図 3-16	体積含水率の経時変化	31
図 3-17	圧力水頭の経時変化	31
図 3-18	体積含水率分布	31
図 3-19	圧力水頭分布	31

図 3-20	不飽和透水係数算定結果	32
図 3-21	瞬時水分計測法と土柱法の水分特性曲線の比較	32
図 3-22	球の接点メニスカス	32
図 3-23	VG モデルによるフィッティング結果	33
図 3-24	VG モデルによる不飽和透水係数の算定結果	33
図 3-25	瞬時水分計測法の結果を考慮した不飽和透水係数	33
図 4-1	試験水槽 A の外形概略	35
図 4-2	間隙水圧計の設置状況	36
図 4-3	間隙水圧計の性能試験装置	38
図 4-4	間隙水圧計の経時変化 (EX1-1)	38
図 4-5	センサー配置図 (CLUE 試験水槽 A : EX1-2)	40
図 4-6	間隙水圧計の経時変化 (CLUE 試験水槽 A : EX1-2)	41
図 4-7	試験条件 (CLUE 試験水槽 A : EX1-3)	43
図 4-8	センサー配置図 (CLUE 試験水槽 A : EX1-3)	44
図 4-9	間隙水圧の経時変化 (EX1-3)	45
図 4-10	体積含水率の経時変化 (EX1-3)	45
図 4-11	水分特性試験結果との比較 (EX1-3)	46
図 4-12	試験条件 (CLUE 試験水槽 A : EX2)	49
図 4-13	センサー配置図 (CLUE 試験水槽 A : EX2)	50
図 4-14	間隙水圧の経時変化 : 外側 0.1mm ビーズ部分 (EX2-3)	51
図 4-15	間隙水圧の経時変化 : 内側 2.0mm ビーズ部分 (EX2-3)	51
図 4-16	体積含水率の経時変化 (EX2-3)	52
図 4-17	試験中の圧力水頭と体積含水率測定値の検討 (ビーズ 0.1mm, pF 試験結果との比較)	52
図 4-18	試験条件 (CLUE 試験水槽 A : EX3)	56
図 4-19	センサー配置図 (CLUE 試験水槽 A : EX3-1)	57
図 4-20	センサー配置図 (CLUE 試験水槽 A : EX3-3)	58
図 4-21	間隙水圧計の経時変化 : 外側 0.1mm ビーズ部分 (EX3-3)	59
図 4-22	間隙水圧計の経時変化 : 内側 1.0mm ビーズ部分 (EX3-3)	59
図 4-23	体積含水率の経時変化 (EX3-1)	60
図 4-24	間隙水圧の経時変化 (EX3-1)	60
図 4-25	水分特性曲線との比較 (1.0mm ・ 同一測定点での値)	61
図 4-26	排水量の経時変化	61
図 4-27	センサー配置図 (CLUE 試験水槽 A : EX3-2)	65
図 4-28	センサー配置図 (CLUE 試験水槽 A : EX3-4)	66
図 4-29	間隙水圧の経時変化 : 外側 0.1mm ビーズ部分 (EX3-4)	67
図 4-30	間隙水圧の経時変化 : 内側 0.8mm ビーズ部分 (EX3-4)	67
図 4-31	体積含水率の経時変化 (EX3-2)	68
図 4-32	間隙水圧の経時変化 (EX3-2)	68
図 4-33	水分特性曲線との比較 (0.8mm ・ 同一測定点での値)	69

図 4-34	排水量の経時変化	69
図 5-1	解析ジオメトリ	70
図 5-2	解析メッシュ図	70
図 5-3	水分特性曲線	72
図 5-4	不飽和透水係数	72
図 5-5	多孔質媒体の不飽和水分特性曲線	73
図 5-6	解析モデルおよび出力ポイント	76
図 5-7	間隙水圧の経時変化 (Case 1-1:岩盤モデル部)	77
図 5-8	間隙水圧の経時変化 (Case 1-1:ゆるみ領域部)	77
図 5-9	体積含水率の経時変化 (Case 1-1:岩盤モデル部)	78
図 5-10	体積含水率の経時変化 (Case 1-1:ゆるみ領域部)	78
図 5-11	圧力水頭の実験値と解析値 (Case1-1, Case1-2) の比較	79
図 5-12	体積含水率の実験値と解析値 (Case1-1, Case1-2) の比較	79
図 5-13	排水量の実験値と解析値 (Case1-1, Case1-2) の比較	80
図 5-14	圧力水頭の解析コンター (1)	81
図 5-14	圧力水頭の解析コンター (2)	82
図 5-14	圧力水頭の解析コンター (3)	83
図 5-15	飽和度の解析コンター (1)	84
図 5-15	飽和度の解析コンター (2)	85
図 5-15	飽和度の解析コンター (3)	86

表 目 次

表 2-1	各材質の誘電率測定結果 (20°C)	11
表 3-1	ガラスビーズの粒径および粒径範囲	17
表 3-2	PF 値測定範囲	18
表 3-3	VG パラメータの同定結果	23
表 3-4	透水試験結果	25
表 4-1	試験ケース	37
表 4-2	岩盤モデル部のガラスビーズ充填状況 (EX3-1)	55
表 4-3	岩盤モデル部のガラスビーズ充填状況 (EX3-2)	64
表 5-1	ガラスビーズの飽和透水係数	72
表 5-2	VG-model のパラメータ	72
表 5-3	解析条件	73
表 5-4	出力ポイントの座標	76

写真目次

写真 4-1	不飽和領域発生状況 (EX2)	47
写真 4-2	不飽和領域発生状況 (EX3-1)	54
写真 4-3	不飽和領域発生状況 (EX3-2)	63

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分においては、従来の地下構造物と異なり、地下を利用するためにその空間を維持するのではなく、人工バリアの定置後は地下施設（坑道）を埋め戻すこととなる。地下施設が埋め戻された後は、地下環境は還元環境が保たれることが望まれているが、処分場の操業期間を考慮すると何十年という期間、坑道は解放された状態が続き、その間に地上から供給される空気の影響は地下環境の設定において無視できないと考えられる。つまり、建設・操業時における排水・ベンチレーションの影響により、処分場の坑道周辺には図 1-1 に示すような不飽和領域が発生すると予想される。このような不飽和領域の発生により、坑道周辺の岩盤には空気が侵入し、その空気により地下水中の酸化還元電位が変化する。また、鉱物の酸化により岩盤の収着性も変化すると考えられる。

このような不飽和領域の発生は、安全評価で考慮している地下環境条件とは異なる条件を作り出すものであり、その広がりや量、さらには埋め戻し後の環境条件の回復に要する期間によっては、人工バリアの健全性に直接関連するオーバーパックの腐食挙動に影響すると考えられる。空気の侵入は本来飽和と考えられている地下深部の岩盤から地下水が排水され、空気と置き変わることによって起こる。このため、空洞周辺の地下水の挙動を把握することで、空気の侵入を予測することが可能であると考えられる。そこで、不飽和領域の発生メカニズムを解明するため、坑道周辺の水理場の観点から不飽和領域の発生を再現する試験設備（多孔質媒体不飽和水理試験設備（以下、CLUE とする。)) を設計製作した。

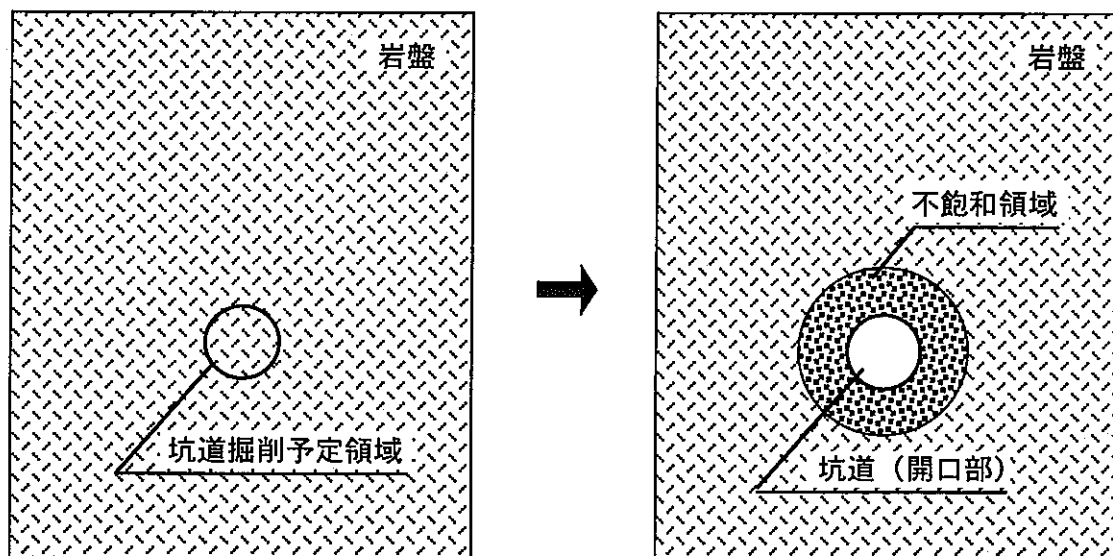


図 1-1 不飽和領域の発生模式図

CLUE を用いた研究開発では、掘削により生じる不飽和領域の気相/液相の流れ、および 2 相の界面の移動のメカニズムを理解し、モデルを検証することを目指す。最終的には、処分環境の条件に本解析手法を適用し、埋め戻し後の再冠水時間やオーバーパックの腐食等の人工バリアの耐久性の評価に資していく。CLUE には 2 つの大型水槽があり、鉛直 2 次元矩形水槽 A (以下、試験水槽 A とする。) はガラスビーズ等の材料を用いての試験、鉛直 2 次元円形水槽 B (以下、試験水槽 B とする。) は実岩石を用いての試験を実施することができる。

不飽和領域の広がり支配する要因としては、境界条件 (坑道からの排水、坑道周囲の水位、流量条件)、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一性)、水分フラックスの運動形態 (液相、気相 (水蒸気)) 等が挙げられる。試験水槽 A はガラスビーズを用いることにより上記の透水係数を任意に設定することができ、試験水槽 B では岩石供試体を任意に選択することにより、ある固有の透水係数の場での試験を行うことが出来る。また、いずれの水槽においても、付属するバルブの開閉により境界条件の一つである排水条件を任意に設定することができる。

CLUE では、不飽和水理特性を計測するため、体積含水率および間隙水圧を計測し、圧力および体積含水率が低下したところに不飽和領域が発生したとする。体積含水率は誘電率計測法 (FDR 水分量計測装置 (Frequency Domain Reflectometry (以下、FDR 法とする。))) を用い、間隙水圧は間隙水圧計によりそれぞれ計測する。不飽和水理特性は対象となる材料固有のものであり、その材料の不飽和水分特性を把握するとともに、計測機器による計測では、事前に試験試料を用いて各計測機器の適用性を確認しておく。

CLUE の試験として、これまでに試験水槽 A に用いたガラスビーズの不飽和水分特性を把握するとともに、試験水槽 A を用いた試験を実施した。また、汎用解析コード (ABAQUS) および不飽和水理特性解析用に開発した計算コードを用い、試験水槽 A における不飽和水理試験の解析評価を行なった。

本論では、これら試験水槽 A に関する一連の試験および解析により得られた成果を示す。

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

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), FDR法 (Frequency Domain Reflectometry), ADR法 (Amplitude Domain Reflectometry) 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。

このうち、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。そこで、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。

2.1 誘電率計測法の測定原理およびFDR装置

2.1.1 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。

$$c = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon}} \quad (2.1)$$

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)

土粒子を構成する鉱物粒子の比誘電率は5~9程度で、乾燥した土壌の比誘電率は固相率を考慮すると3~5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[°C])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2-1に示す。

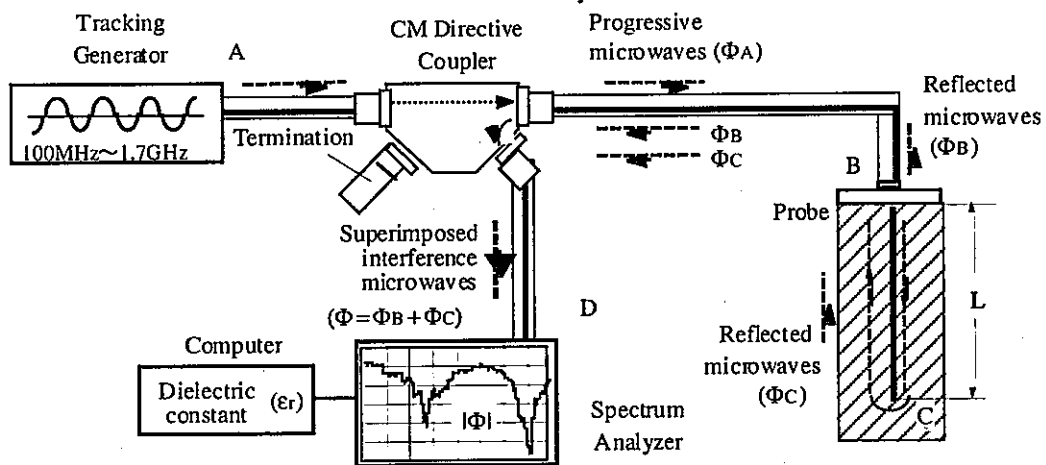


図2-1 FDR測定システム構成概略図

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点を通じた電磁波は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(2.2)のように表される。

$$t = \frac{2L}{c} \tag{2.2}$$

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戻ってきた成分を 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。

$$\Phi_A = A \cdot \exp(j\omega t) \tag{2.3}$$

$$\Phi_B = B \cdot \exp(j\omega t - t) \tag{2.4}$$

したがって、両者の合成波は以下のように表される。

$$\Phi = \Phi_A + \Phi_B = A \cdot \exp(j\omega t) + B \cdot \exp(j\omega t - t) \tag{2.5}$$

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。

$$|\Phi| = A \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{B}{A} \right)^2 + 2 \left(\frac{B}{A} \right) \cdot \text{Re}[\exp(-j\omega t)] \right\}^{\frac{1}{2}} = A \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{B}{A} \right)^2 + 2 \left(\frac{B}{A} \right) \cdot \cos(-j\omega t) \right\} \quad (2.6)$$

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。

$$\omega = 2\pi f \quad (2.7)$$

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(2.6)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、

$$\begin{aligned} 2\pi\Delta f \cdot t &= 2\pi \\ \therefore t &= \frac{1}{\Delta f} \end{aligned} \quad (2.8)$$

これと式(2.2)より、

$$\Delta f = \frac{C}{2L} \quad (2.9)$$

さらに式(2.1)より、

$$\varepsilon = \left(\frac{C_0}{2L \cdot \Delta f} \right)^2 \quad (2.10)$$

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(2.10)式より試料の見かけの比誘電率 ε が求まる。

図2-2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 $f_1 \sim f_6$ までの6点であり、周波数間隔は $\Delta f_1 \sim \Delta f_5$ の5個である。したがって、この場合、式(2.8)の Δf はこの $\Delta f_1 \sim \Delta f_5$ の平均値となる。

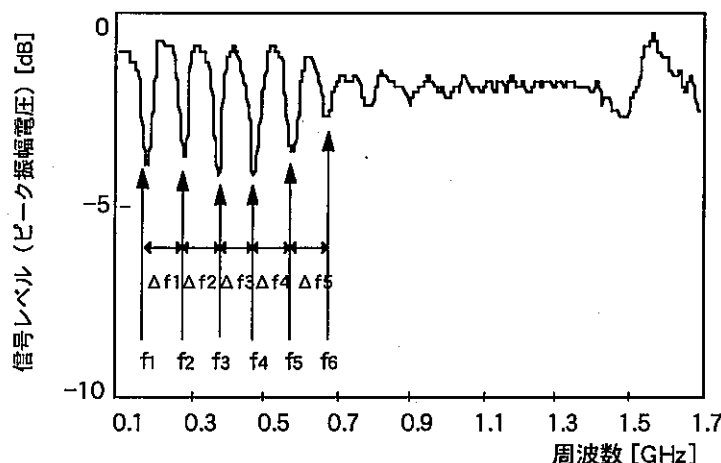


図2-2 FDRスペクトル図 (測定物質: 水)

2.1.2 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2-3にFDR装置の概略図を示す。本システムは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。

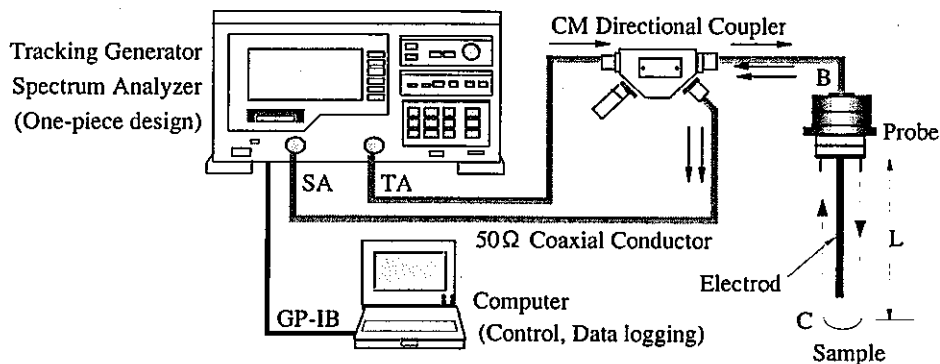


図 2-3 FDR 測定装置

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～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2-4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。

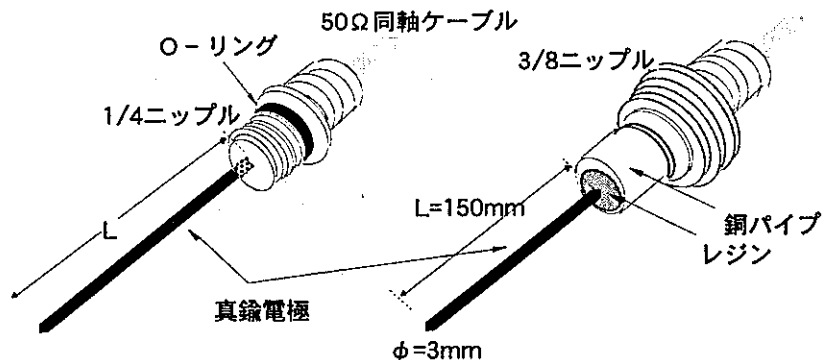


図 2-4 FDR プロブ電極部

2.1.3 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。

(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2-5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はほとんど問題ではないと言える。

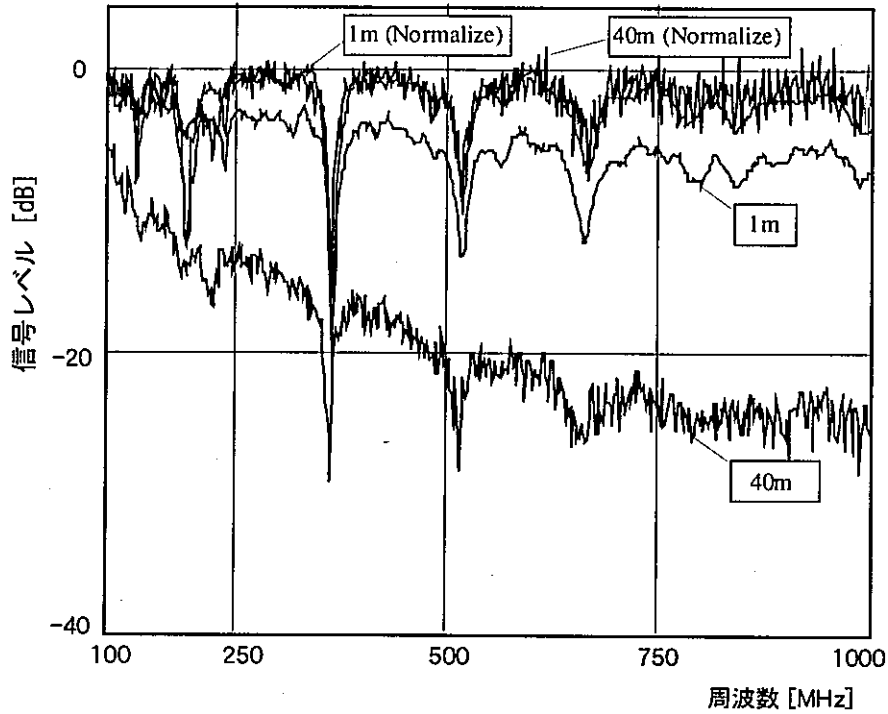


図2-5 ケーブル長さによる測定誤差

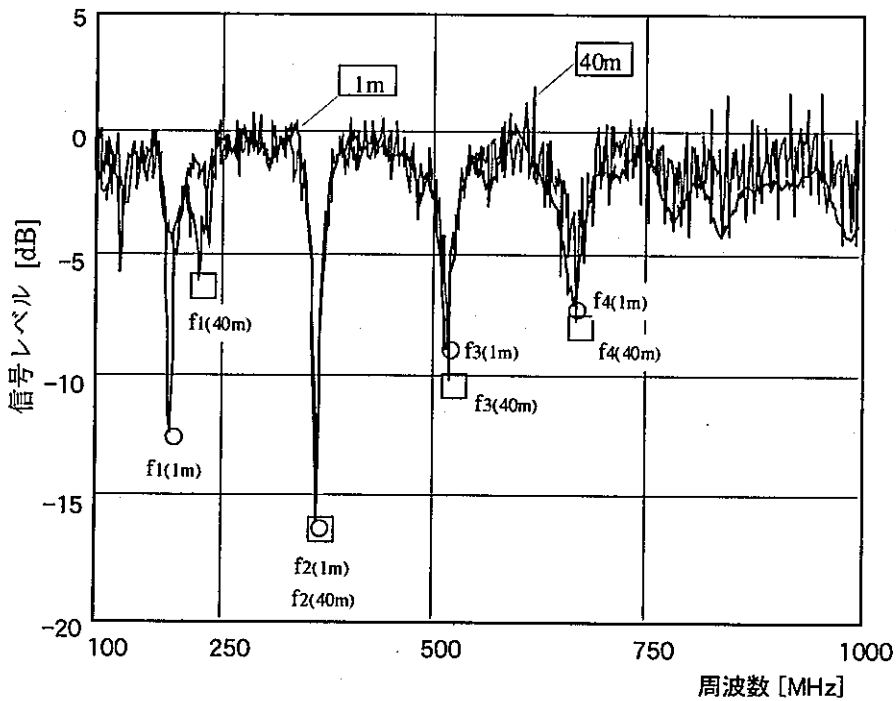


図2-6 ケーブル長さの違いによる合成干渉波ピーク値の比較 (ノーマライズ後)

(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2-7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 비해、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。

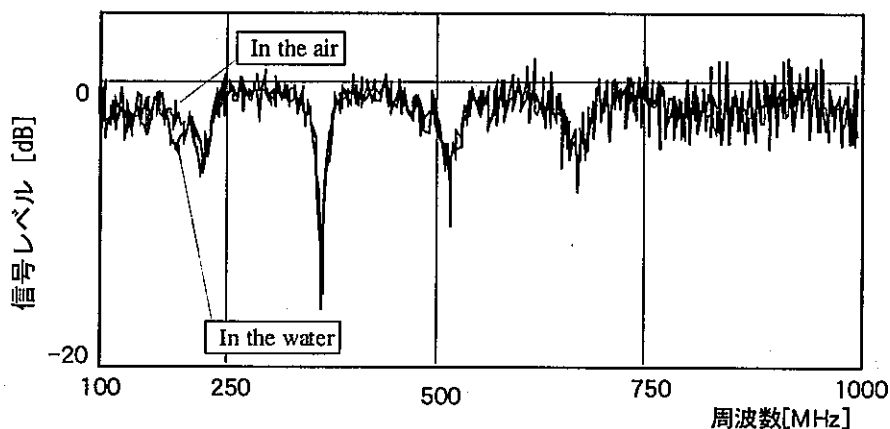


図2-7 ケーブル周辺環境の影響

(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2-8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。

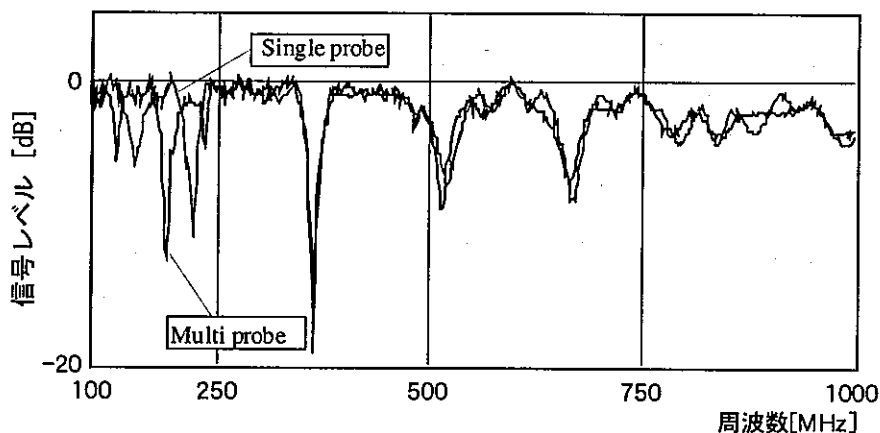


図2-8 システム拡張 (20chオートスイッチングユニット) の影響

(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ようにも注意が必要である。

2.2 FDR測定方法

2.2.1 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[°C])、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(2.11)に示す。

$$\epsilon = k \cdot \epsilon_c = k \left(\frac{c}{2L \cdot \Delta f_c} \right) \tag{2.11}$$

ここで、 ϵ_c : 校正用試料の誘電率（純水80.4(20°C)、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 : 真空中の光の速度(=3×10⁸[m/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2-9(a)～(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)

ε = k(C/2LΔf), C=3.010 ⁸ m/sec, L=0.15m, k=0.778 (水による校正)										
物質	ピーク周波数						平均ピーク周波数差 Δf [MHz]	標準差 ±σ	誘電率	
	ピーク周波数間隔								ε	√ε
	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
		102	93	102	103	92				
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	202.0	15.1	19.1	4.37
		230	205	192	195	202				
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								

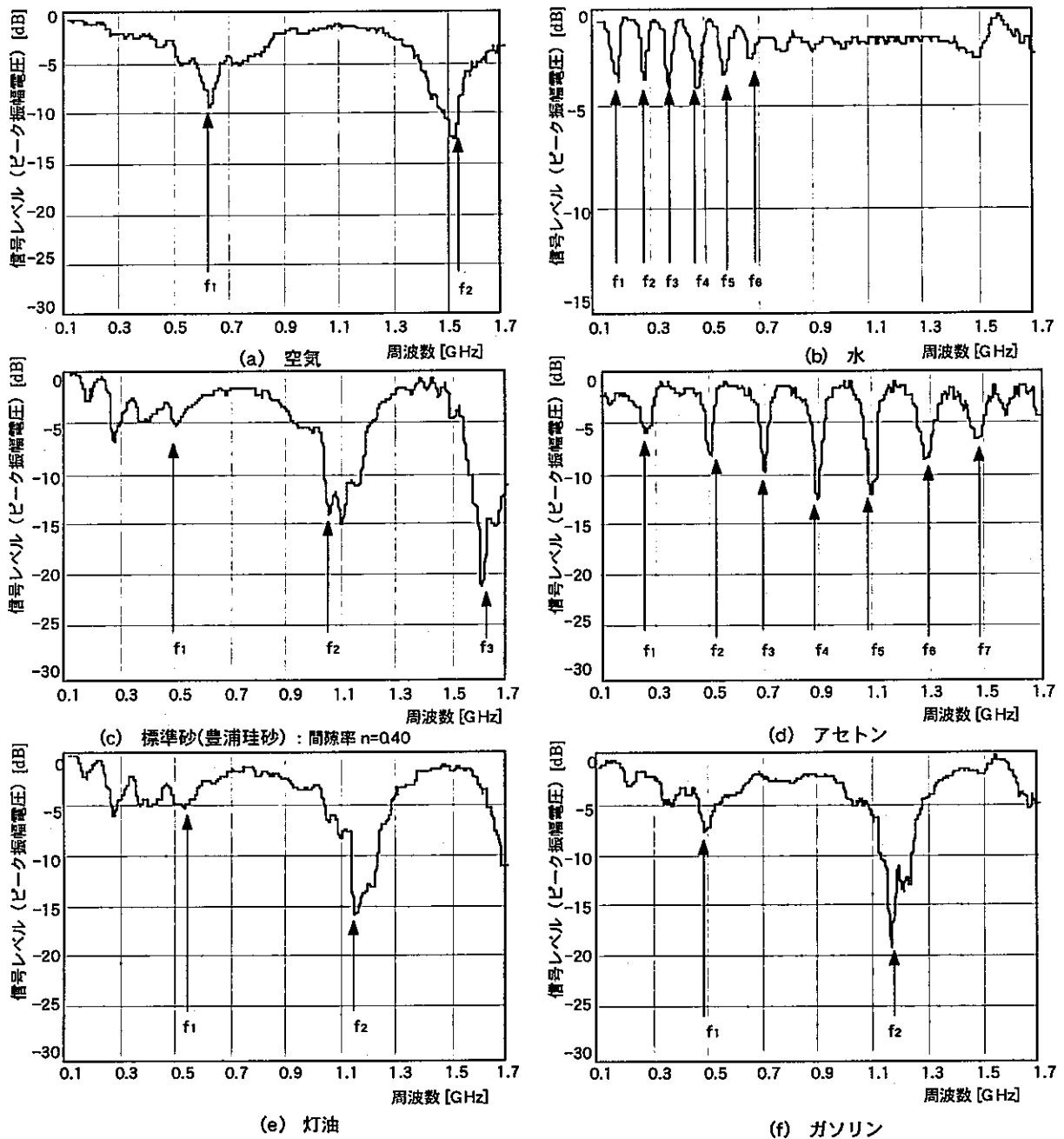


図 2-9 各材質の測定スペクトル

2.2.2 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、 $\epsilon - \theta$ 関係は試料の種類や密度の影響を受けないとして次式(2.10)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。

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon^2 + 4.3 \times 10^{-6} \epsilon^3 \quad (2.10)$$

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。

(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2-10に示す。さらに、図2-11に誘電率の平方根で整理した関係を示す。

図2-11では測定値は、Toppが提案した式(2.10)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。

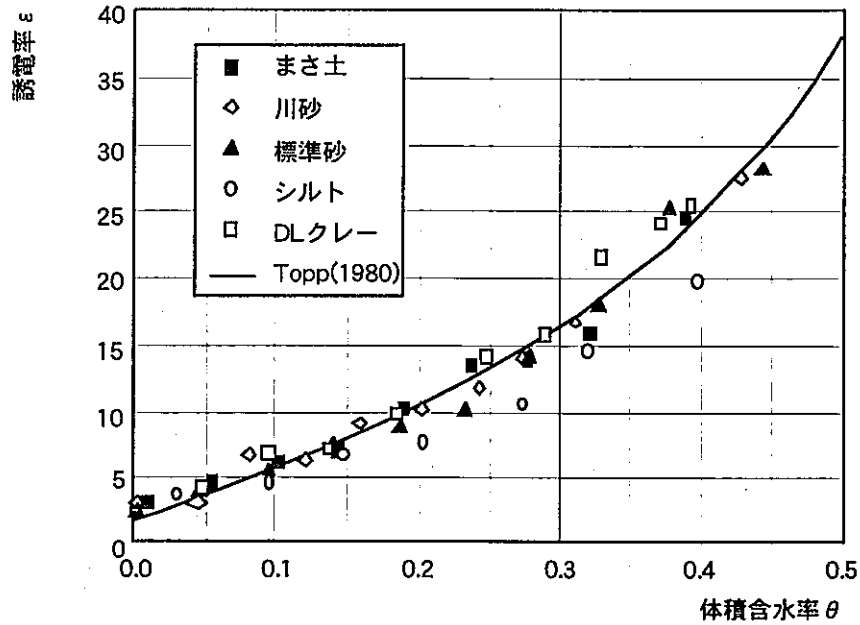


図 2-10 各種土質試料に対する FDR による誘電率測定結

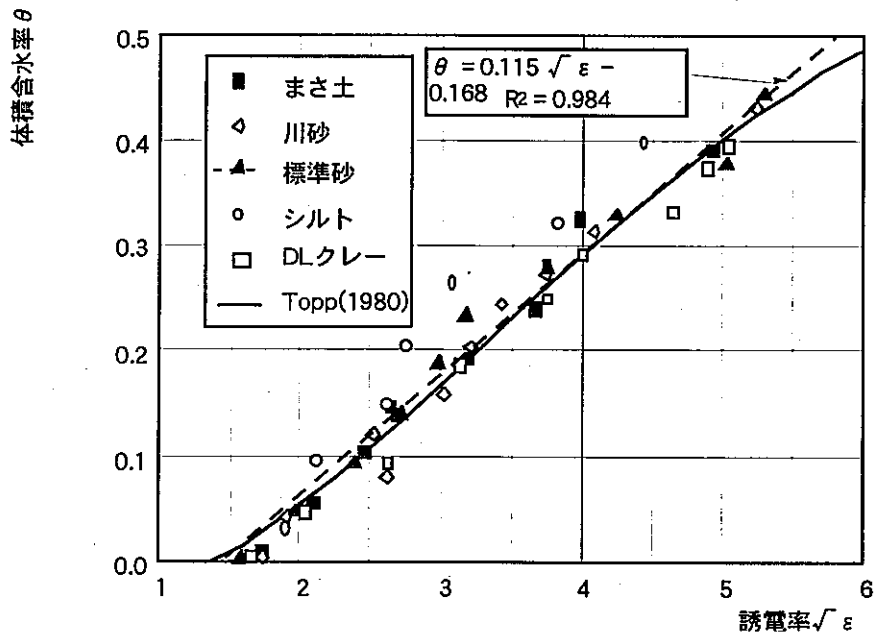


図 2-11 FDR による各種試料に対する校正曲線

(2) ガラスビーズ

次にCLUE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2-12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2-13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。

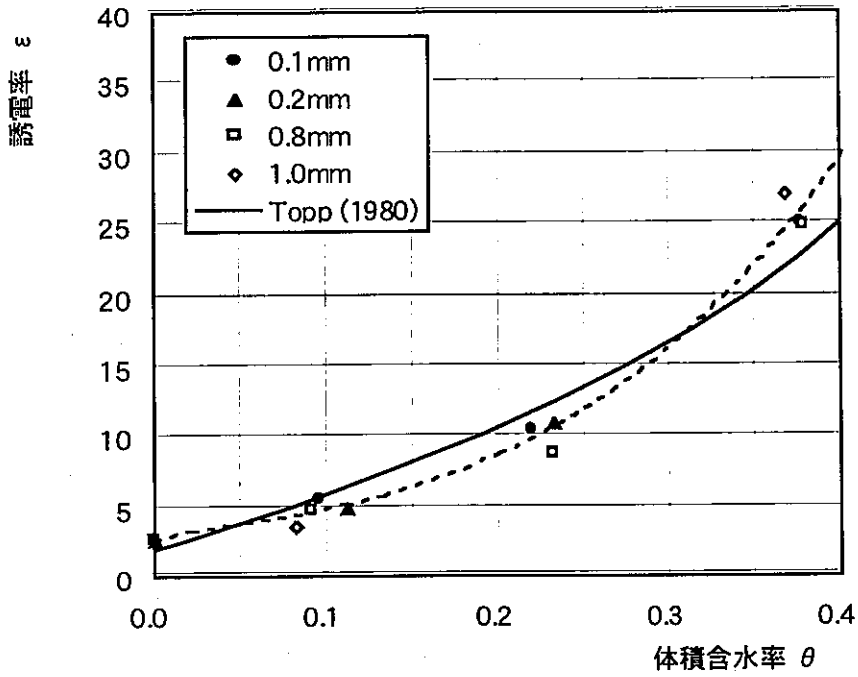


図 2-12 FDR によるガラスビーズに対する誘電率の測定結果

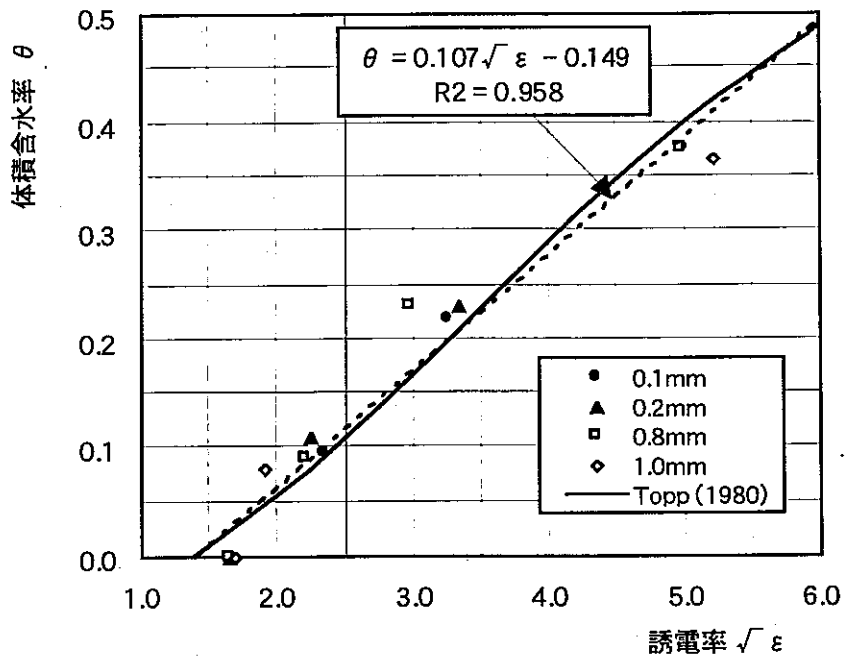


図 2-13 FDR によるガラスビーズに対する校正曲線

以上の結果から、不飽和領域の水分量の測定法としての、FDR法の適応性に関しては、以下のようにまとめられる。

- (1) FDRシステムの特徴として、ロッドの長さを自由に選択できることから、様々な測定に適用できると考えられる。
- (2) このシステムの測定範囲は2.0cmである。しかし、測定値の90%以上を数mmの範囲で測定していることから、測定範囲は非常に狭い。したがって、中性子水分計や γ 線密度計よりきわめて正確な座標点での体積含水率の計測が可能となる。
- (3) 校正曲線について、特に砂試料に対してはキャリブレーションが不必要である。しかしながら、微粒子の試料に対しては必要であるといえる。

結論として、FDR計測法は瞬時に供試体内の体積含水率の測定が可能で、計測している領域は狭く、ほぼ飽和度全般にわたる測定が可能であることから、不飽和領域でのモニタリング手法として十分適用できると言える。

3. ガラスビーズの基礎物性測定

3.1 試料の種類

試験水槽A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、不飽和浸透流解析に必要な入力データを得るため、飽和・不飽和浸透を支配する基礎物性の測定を行なった。測定の対象は、水分特性曲線、飽和透水係数および、不飽和透水係数である。試験に供したガラスビーズはいずれも単一粒径で、表 3-1 に示す 6 種類である。

表 3-1 ガラスビーズの粒径および粒径範囲

粒径 [mm]	φ 0.1	φ 0.2	φ 0.8	φ 1.0	φ 2.0	φ 3.0
粒径範囲	φ 0.105	φ 0.177	φ 0.710	φ 0.991	φ 1.976	φ 2.794
[mm]	~ φ 0.125	~ φ 0.250	~ φ 0.990	~ φ 1.397	~ φ 2.794	~ φ 3.962

比重は $G_s=2.49$ [g/cm³] (JIS-A-1202 土粒子の比重試験方法)。

3.2 供試体の状態量

試験水槽内でのガラスビーズの状態量は、一般の土中と同様、図 3-1 に示すように、気相、液相、固相の 3 つの供試体構成要素に分けて考えることができる。ガラスビーズの含水比 w [%]、乾燥密度 ρ_d [g/cm³]、体積含水率 θ [-]、間隙率 n [%]、飽和度 S_r [%] はそれぞれ次式の様に表される。

$$\cdot \text{含水比} \quad w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\cdot \text{乾燥密度} \quad \rho_d = \frac{W_s}{V} \quad (3.2)$$

$$\cdot \text{体積含水率} \quad \theta = \frac{V_w}{V} = \frac{W_w / \rho_w}{W_s / \rho_d} \quad (3.3)$$

$$\cdot \text{間隙率} \quad n = \frac{V_v}{V} \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) \times 100 \quad (3.4)$$

$$\cdot \text{飽和度} \quad S_r = \frac{V_w}{V_v} \times 100 = \frac{w}{\left(\frac{n}{100-n} \right)} \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (3.5)$$

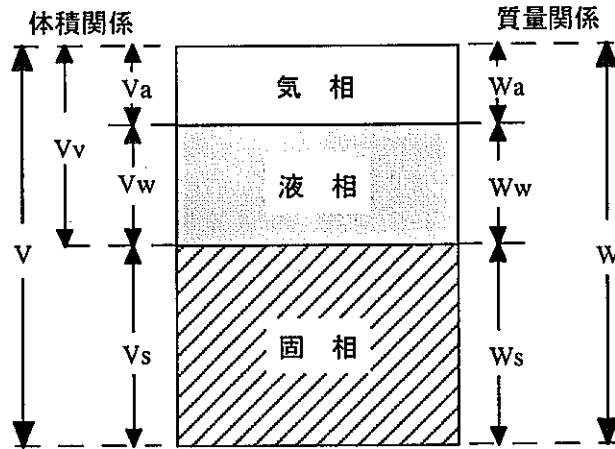


図 3-1 ガラスビーズ供試体を構成する要素

3.3 水分特性曲線

水分特性測定法には、土柱法、吸引法（砂柱法）、加圧板法、蒸気圧法、サイクロメータ法等があるが、ひとつの方法で水分特性曲線の全範囲を測定することは困難である。このため測定するサクシジョンの範囲や目的（低サクシジョンの測定に適している方法を高サクシジョンの測定に適用すると、水分を平衡にするために長時間を必要とし、誤差も大きくなる。）等を考慮し、これらを使い分ける必要がある。サクシジョンの実用尺度として pF があり、これは毛管上昇高さ h_c [cm] の常用対数 $pF = \log h_c$ で表される。各測定方法と対応する pF 値の測定範囲の関係は表 3-2 のようになる。本研究においては、飽和から不飽和に至る過程のサクシジョンの変化（図 3-1 の気相、液相の比率の変化）が対象となる。そこで、この測定範囲をカバーできる土柱法、吸引法（砂柱法）、加圧板法の 3 方法によって、ガラスビーズ供試体のサクシジョンを測定した。

表 3-2 PF 値測定範囲

pF値	乾燥	6.5	6.0	5.0	4.5	3.5	2.5	2.0	1.5	0.0	飽和
測定方法	<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;"> <p>蒸気圧法</p> <p>←—————→</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>遠心法・加圧板法</p> <p>←—————→</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>土柱法</p> <p>←—————→</p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;"> <p>サイクロメータ法</p> <p>←—————→</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>吸引法</p> <p>←—————→</p> </div> </div>										

(1) 試験方法

(a) 土柱法

図 3-2 に土柱法測定装置の概略図を示す。試験カラム（内径 50.0[mm]、高さ 30.0[mm]）の亚克力製）を 1.0m まで組み上げ、脱気水を試験カラムに充填し、試験カラム内にガラスビーズを水中落下により充填する。1回の試験では同じ粒径のガラスビーズのみを用い、測定するガラスビーズの粒径ごとに試験カラムを作製した。

試験開始とともにカラム下部のバルブを開放し、下部より脱気水を排水させる。このとき、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を測定する。間隙水圧計の測定値が一定になったところでサクシオン h [cm] が定常状態になったとみなし、試験カラムを分解する。土の含水比測定法に従って 24 時間 110[°C] で炉乾燥し、(3.1) ~ (3.5) 式に従ってそれぞれの試験カラムの含水比、乾燥密度、体積含水率を求める。

(b) 吸引法（砂柱法）

図 3-3 に吸引法（砂柱法）測定装置の概略図を示す。内径 114.0[mm]、高さ 105.0[mm] のステンレス製試験カラムにガラスビーズを水中落下により充填し、供試体を作製した。1回の試験では同じ粒径のガラスビーズのみを用い、測定するガラスビーズの粒径ごとに試験カラムを作製した。

試験装置に供試体をセットし、供試体中心における負圧がゼロになるように排水位を調整し、そのまま放置し余剰水を排水する。任意のサクシオン h [cm] になるよう供試体中心と排水口の高低差を変え、水分平衡に達し、排水が止るまで排水を続け、その高さで排水量を測定する。試験終了まで、 h を数点設定し、測定を繰り返す。試験終了後、試験カラムを取り出し、土の含水比測定法に従って 24 時間 110[°C] で炉乾燥し、(3.1) ~ (3.5) 式に従って含水比、乾燥密度、体積含水率を求める。

(c) 加圧板法

図 3-4 に加圧板法測定装置の概略図を示す。素焼板を脱気水に浸して 12 時間以上放置し、完全飽和させる。図 3-4 のように、圧力チャンパー内に素焼板をセットし、試験カラム内に充填したガラスビーズを素焼板の上に置き、試験カラム下部より脱気水を毛管飽和させ、供試体を作製した。1回の試験では同じ粒径のガラスビーズのみを用い、測定するガラスビーズの粒径ごとに試験カラム

ムを作製した。

試料が飽和した後、圧力チャンバーの蓋を閉じ、任意のサクション h [cm H_2O] まで加圧し、圧力を一定に保つ。水分平衡に達し、メスシリンダーへの排水が止った後圧力を開放する。試験終了後、試験カラムを取り出し、土の含水比測定法に従って 24 時間 110[°C] で炉乾燥し、(3.1) ~ (3.5) 式に従って含水比、乾燥密度、体積含水率を求める。

(2) 試験結果

上記試験によって得られた、ガラスビーズのそれぞれの粒径に対する測定結果、次式(3.6)で表される van-Genuchten モデル (以下 VG-model) でフィッティングを行なった結果をあわせて図 3-5(1) ~ (6) に示す。

$$S_e = (1 + |\alpha\psi|^n)^{-m} \quad (3.6)$$

ここで、 ψ は負の圧力水頭 [cm]、 S_e は有効飽和度、 α 、 n 、 m は形状パラメータ ($m=1-1/n$) である。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(3.7)で表される。また、van-Genuchten は水分特性曲線 (式(3.6)) から、不飽和透水係数 k を式(3.8)で推定している。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3.7)$$

$$k_r = \frac{k}{k_s} = S_e^{1/2} \left\{ 1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right\}^2 \quad (3.8)$$

ここで、 θ は体積含水率、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は最小容水量、 k_s は飽和透水係数 [cm/sec] である。

表 3-3 には各粒径のガラスビーズにおいて同定された VG-model のパラメータを示す。また、図 3-6 に粒径と VG パラメータの関係を示す。

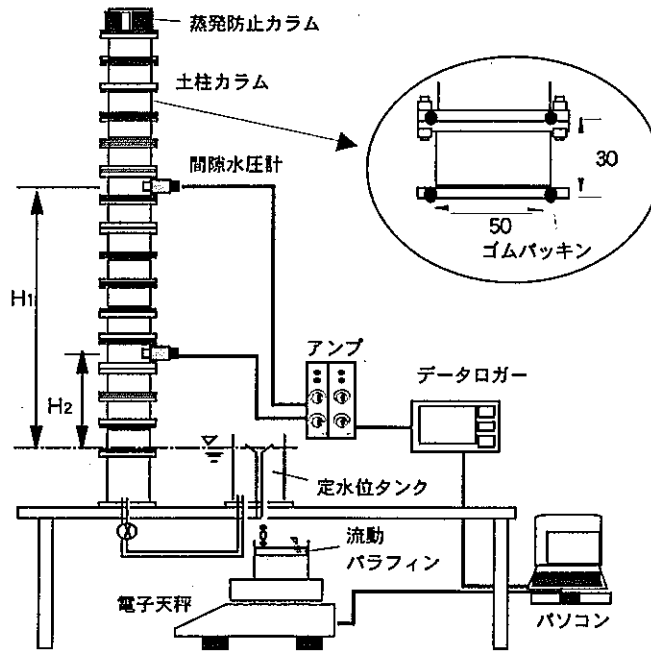


図 3-2 土柱法水分特性測定装置概略図

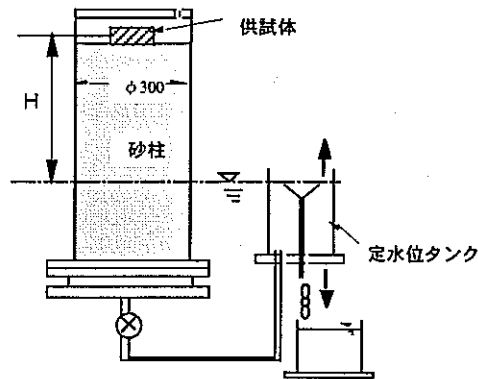


図 3-3 吸引法（砂柱法）水分特性測定装置概略図

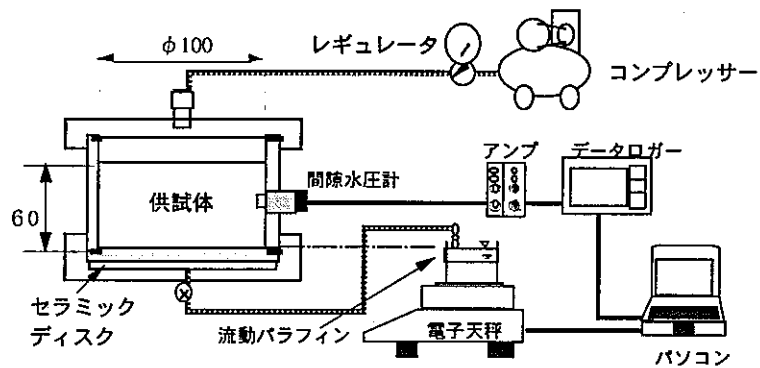
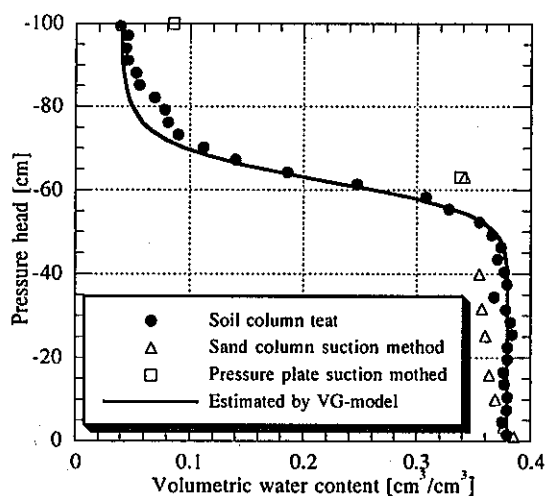
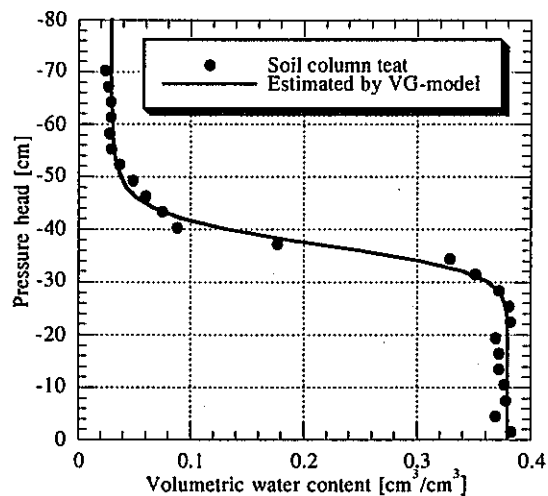


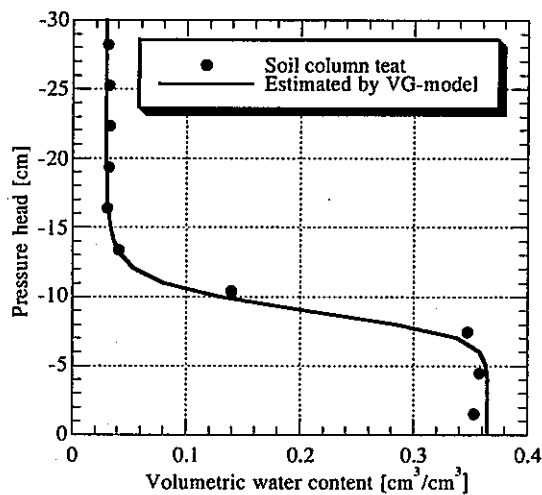
図 3-4 加圧板法水分特性測定装置概略図



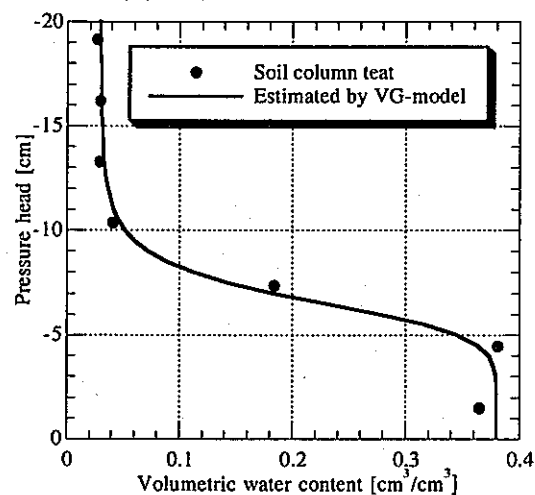
(1) ガラスビーズ 0.1mm



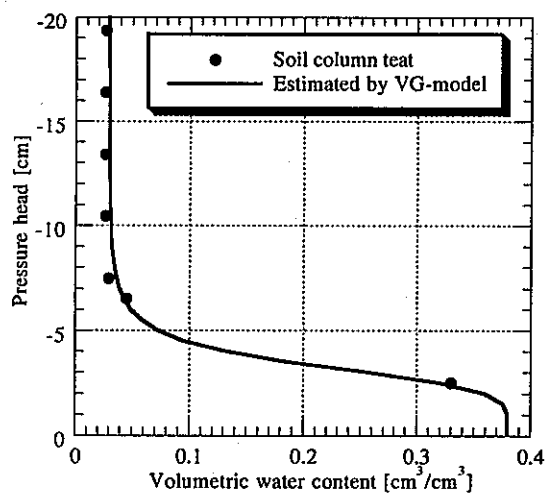
(2) ガラスビーズ 0.2mm



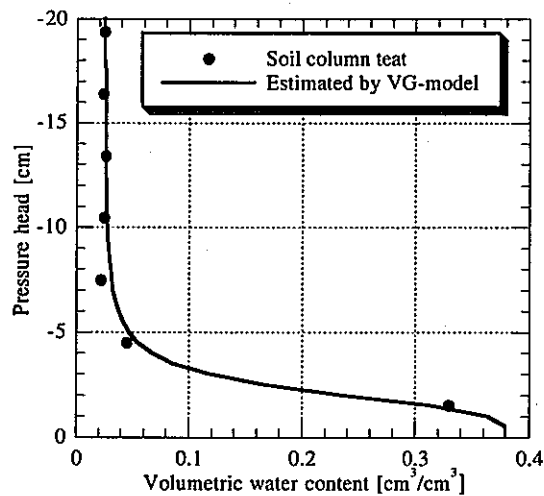
(3) ガラスビーズ 0.8mm



(4) ガラスビーズ 1.0mm



(5) ガラスビーズ 2.0mm

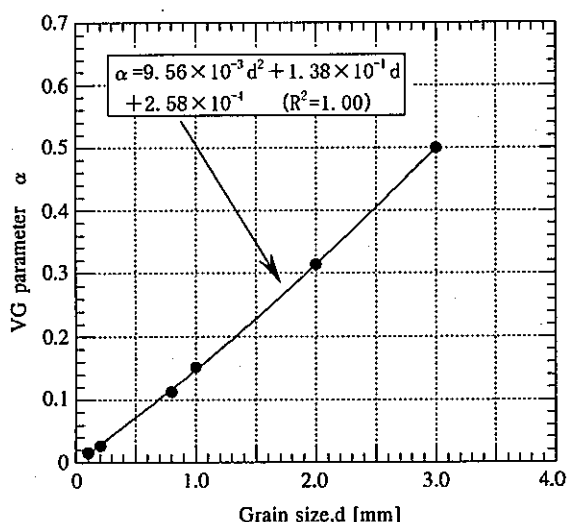


(6) ガラスビーズ 3.0mm

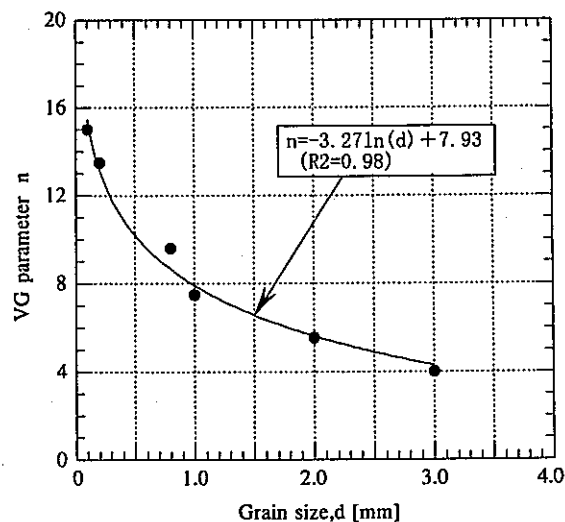
図 3-5 各試料に対する水分特性曲線の VG-model による同定結果

表 3-3 VG パラメータの同定結果

粒経 [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 3-6 粒経と VG パラメータの関係

3.4 飽和透水係数

(1) 試験装置概要

一般に土を対象とした透水試験では、水頭圧を利用した定水位あるいは、変水位透水試験装置が用いられる。本試験では図 3-7 に示すように圧力水頭差を利用した定水位型の透水試験装置を用いた。

試験装置は定水位型透水試験装置(サンケイ理化製)で、試験カラム(材質:SUS304, 質量: $\phi 114.0$ [mm], h105.0 [mm]), 電子天秤(測定精度: ± 0.01 [g]), 測定用パソコンで構成されている。

(2) 試験方法

サクシヨンの測定と同様に、内径 114.0[mm]、高さ 105.0[mm]のステンレス製試験カラムにガラスビーズを水中落下により充填し、図 3-7 のように供試体を作製した。1 回の試験では同じ粒径のガラスビーズのみを用い、測定するガラスビーズの粒径ごとに試験カラムを作製した。

作製した試験カラムに通水を行いビーズ層の沈降がなくなったのを確認後、試験を開始する。定水位透水試験装置に試験カラムを設置し、任意の一定水頭差でマリオットタンクより、透過液（脱気水）を試験カラムに通水させる。試験カラムを透過した液は水位調整タンクを通り、オーバーフローした透過液が秤量タンク内の電子天秤上に貯められる。このとき、時間当たりの透過量を計測する。事前に計測用パソコンに、試料断面積：A [cm²]，充填カラムの長さ，L [cm]，水位差：h [cm] を入力し、ガラスビーズの飽和透水係数は、ダルシーの法則に基づいた次式 (3.9) により算出する。

$$k_s = \frac{\Delta Q}{Ah/L} \quad (3.9)$$

ここで、 k_s は飽和透水係数、 L は充填カラムの長さ、 A はカラム断面積、 ΔQ は単位時間当たりの通過流量、 h は水位差である。

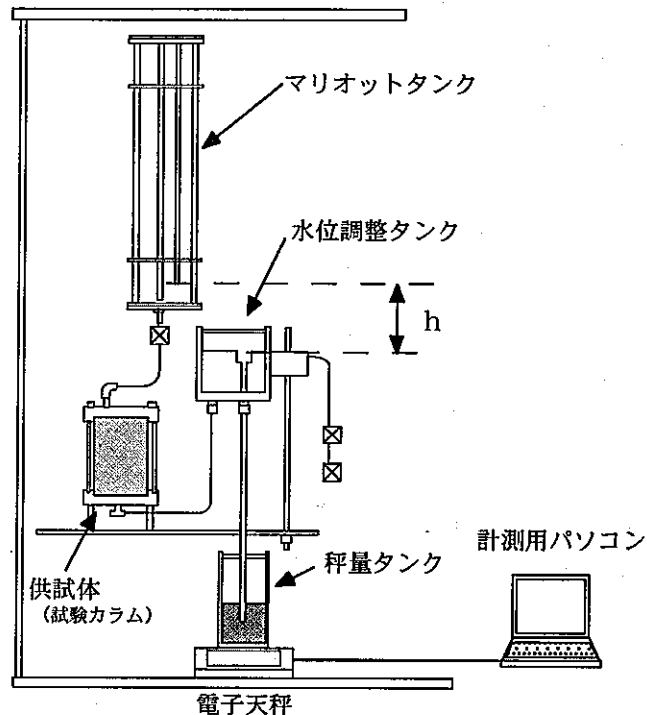


図 3-7 定水位透水試験測定装置概略図

(3) 試験結果

試験は各ガラスビーズ粒径ごとに対して3回ずつ実施した。表 3-4 に各ガラスビーズにおける透水試験結果の平均値を示す。また、図 3-8 には測定された飽和透水試験と粒径の関係を示す。

表 3-4 透水試験結果

粒径	透水係数[m/s]
0.1	1.213E-04
0.2	3.681E-04
0.8	5.136E-03
1.0	9.626E-03
2.0	2.077E-02
3.0	2.676E-02

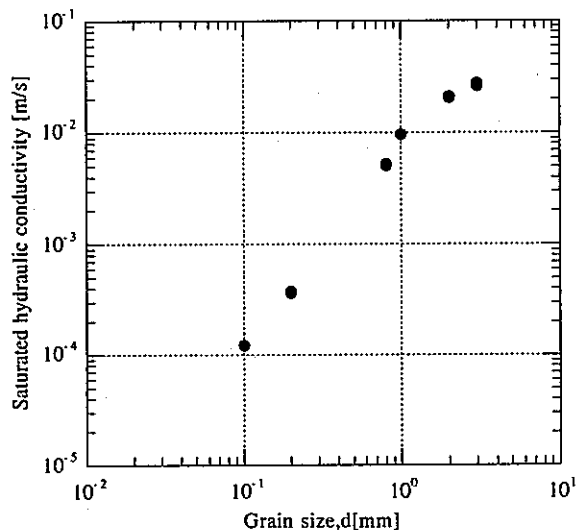


図 3-8 飽和透水試験結果

3.5 不飽和透水係数

(1) 瞬時水分計測法を用いた不飽和透水係数の測定

不飽和透水試験のうち、瞬時水分計測法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。

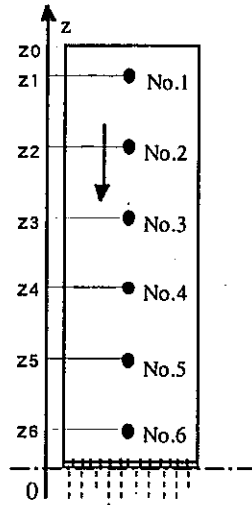


図 3-9 鉛直排水実験の概略図

図 3-9 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(3.10)となる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} k(\theta) \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right] \quad (3.10)$$

両辺を z で積分すると，次式(3.11)になる。

$$\int \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = k(\theta) \left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right]_z + C_1 \quad (3.11)$$

$z=z_0$ では水の補給がないため $v=0$ である。この境界条件を式(3.12)に用いると，

$$C_1 = \left[\int \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right]_{z=z_0} \quad (3.12)$$

となり，任意の点の任意時間での不飽和透水係数は次式(3.13)により求められる。

$$k(\theta) = \frac{\int_{z_0}^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz}{\left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right]_z} \quad (3.13)$$

式(3.13)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 3-9 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 3-10)。
- ② 各時間に対する体積含水率と z 座標の関係を図 3-9 より図 3-11 に示すように整理する。
- ③ 図 3-11 より任意の点(例えば No.3)を t_1 から t_3 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(3.13)の分子は次式(3.14)で計算できる。

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

$$\left[\int_{z_0}^z \frac{\partial \theta}{\partial t} dz \right]_{z_3, t_2 = \frac{t_1+t_3}{2}} = \frac{\int_{z_0}^{z_3} \theta dz}{t_3 - t_1} = \frac{A}{t_3 - t_1} \quad (3.14)$$

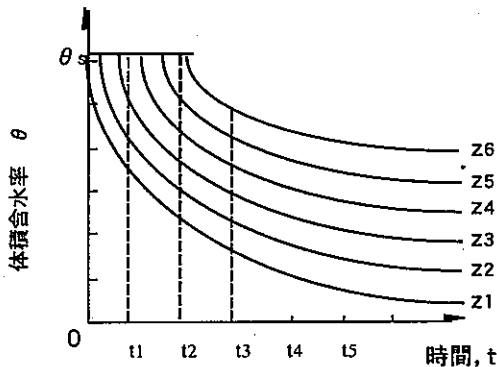


図 3-10 各計測点における
体積含水率の経時変化

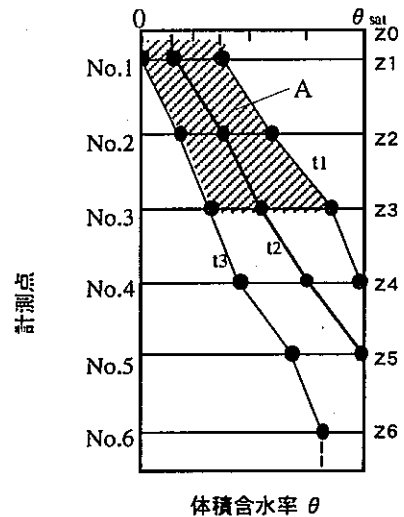


図 3-11 体積含水率分布

b) 分母の値の求め方

- ① 図 3-12 中の各点での圧力水頭の経時的変化を同時に計測する (図 3-13)。
- 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(3.15)で求められる。

$$\left[\frac{\partial \psi}{\partial z} + 1 \right]_{z_3, t_2 = \frac{t_1+t_3}{2}} = \frac{\psi_4 - \psi_2}{z_4 - z_2} + 1 \quad (3.15)$$

したがって、このようにして求めた式(3.14)、式(3.15)の値を式(3.13)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 3-9 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、体積含水率の経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の最低2カ所での計測が必要である。

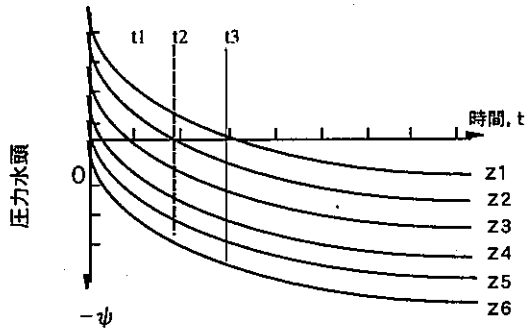


図 3-12 各計測点における
圧力水頭の経時変化

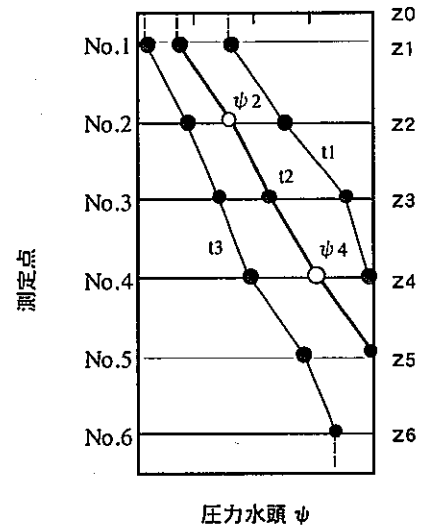


図 3-13 圧力水頭分布

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 3-14 に示す。縦 10cm、横 20cm、高さ 60cm のアクリル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。

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 3-15 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。

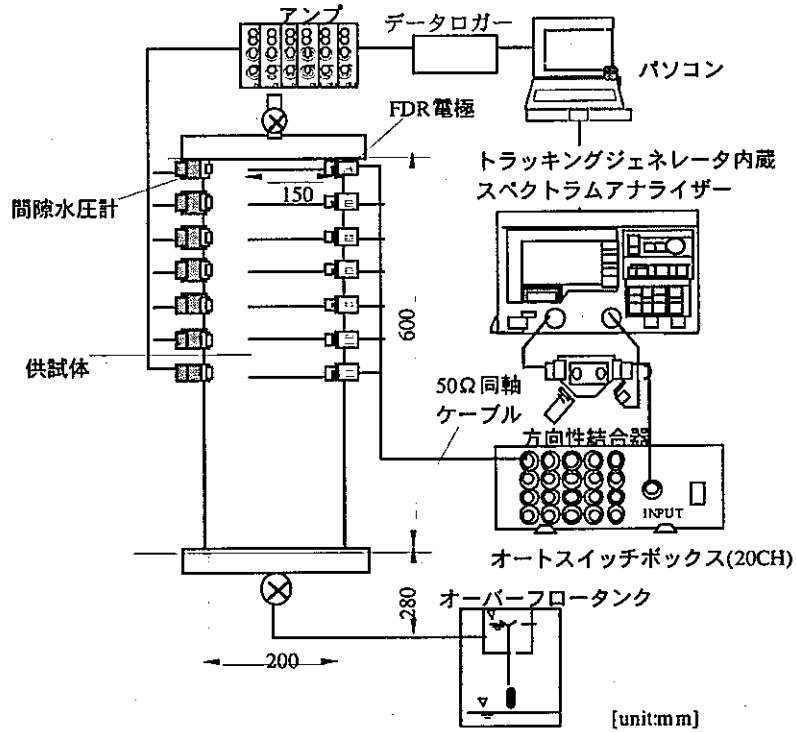


図 3-14 FDR 土壤水分計を用いた瞬時水分計測法 (排水実験) 装置概略図

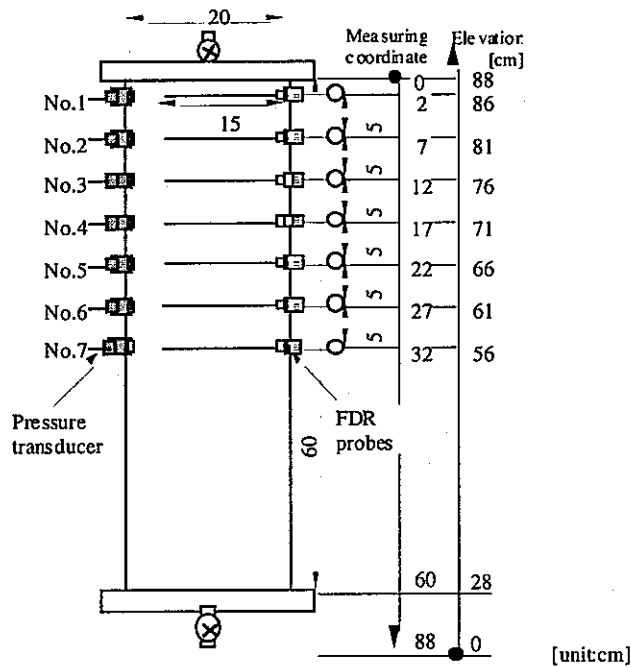


図 3-15 計測座標

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、モールド下部のバルブを開き、試験を開始した。

3) 試験結果及び考察

FDR 法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 3-16, 図 3-17 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 3-18, 図 3-19 に示す。図 3-16 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を元に更に補正した図である。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 3-20 に示す。試験データから, 飽和度 50%以下 (体積含水率 0.18 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, 定常状態の水分特性曲線との比較を行った。図 3-21 に示す。同体積含水率に対する圧力水頭 (ヘッド) の値は, 最大でも 15cm 程度であり, 間隙水圧計の精度 ($\pm 1.5\text{cm}$: セラミックカップ無し, $\pm 10\text{cm}$: 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。また, 非定常状態と定常状態の水分特性曲線はそもそも異なっていることも, 接触角 θ (図 3-22) の違いから考えられる。さらに, 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 ($\alpha = 0.01685$, $n = 12.52$) を重ねたものを図 3-23 に示す。

瞬時水分計測法により得られた値は, 不飽和状態になった時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。一方で, 不飽和領域では体積含水率 0.35 ぐらいから VG モデルにより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 オーダ以内であり妥当な結果が得られていると言える。したがって, 解析上では, 飽和透水係数を単独のパラメータとし, 不飽和領域では VG モデルによる推定値を使用するような不連続パラメータとして用いるか, あるいは計測値をそのまま入力データとする必要がある。

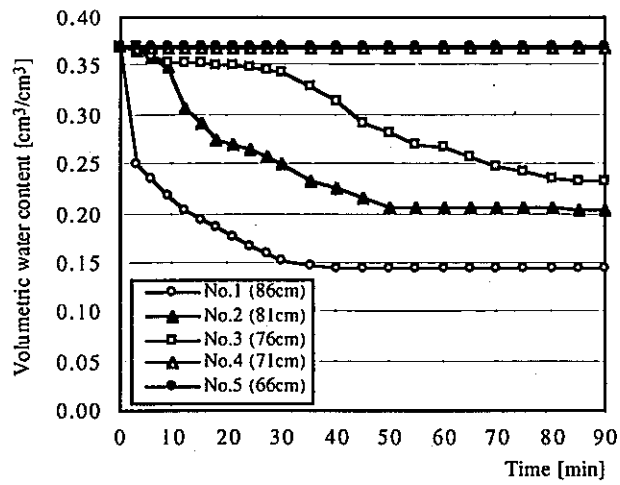


図 3-16 体積含水率の経時変化

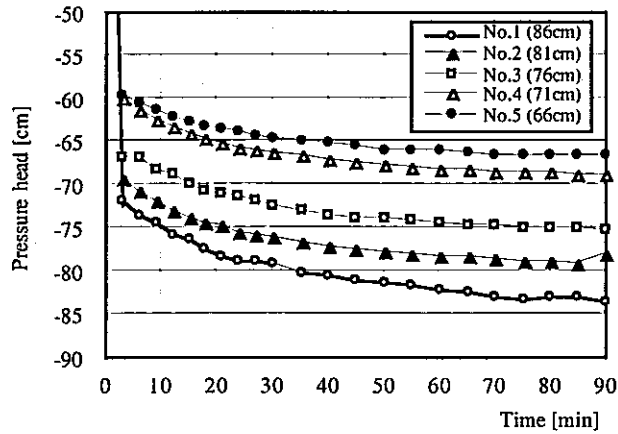


図 3-17 圧力水頭の経時変化

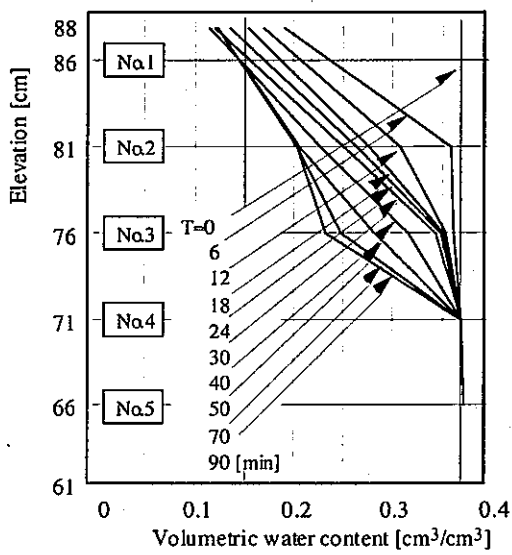


図 3-18 体積含水率分布

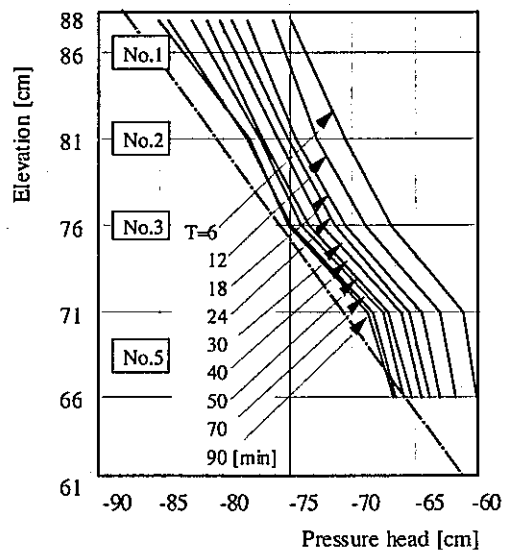


図 3-19 圧力水頭分布

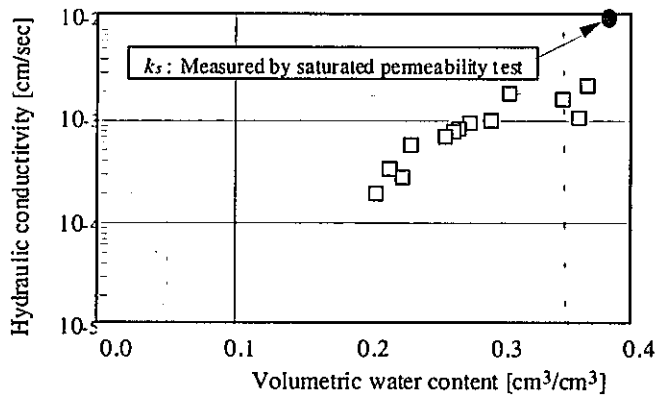


図 3-20 不飽和透水係数算定結果

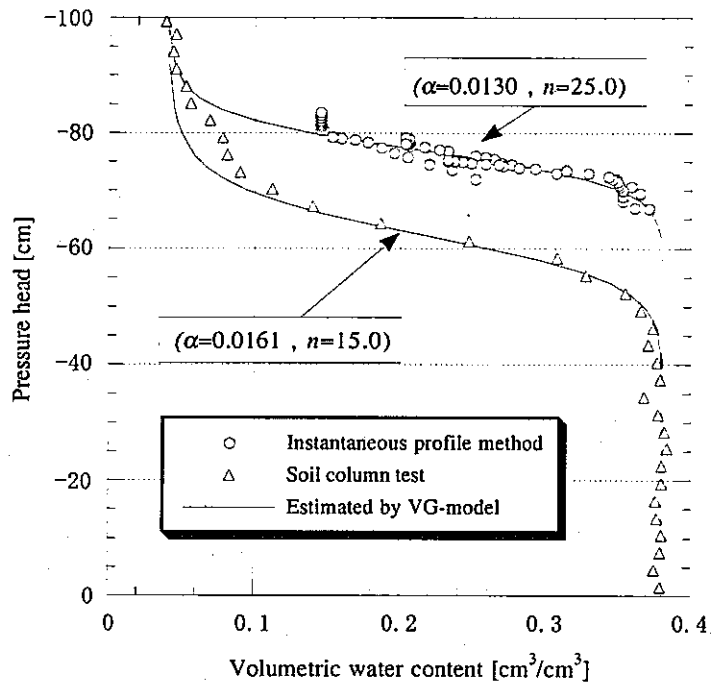


図 3-21 瞬時水分計測法と土柱法の水分特性曲線の比較

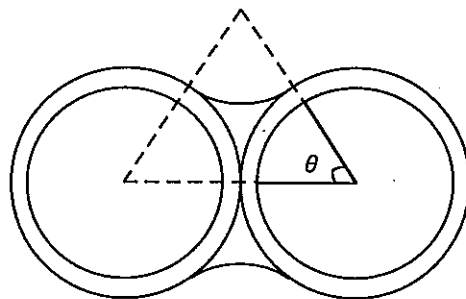


図 3-22 球の接点メニスカス

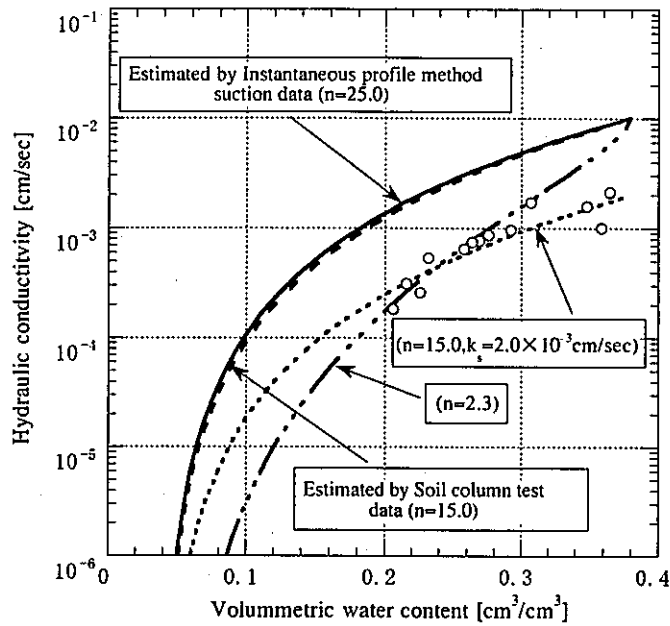


図 3-23 VG モデルによるフィッティング結果

(2) VG モデルにより計算される各ガラスビーズの不飽和透水係数

式(3.8)および表 3-2 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における体積含水率と不飽和透水係数の関係を図 3-24 に示す。また、図 3-25 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考慮して、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による各粒径のガラスビーズ毎の体積含水率と不飽和透水係数の関係を示す。

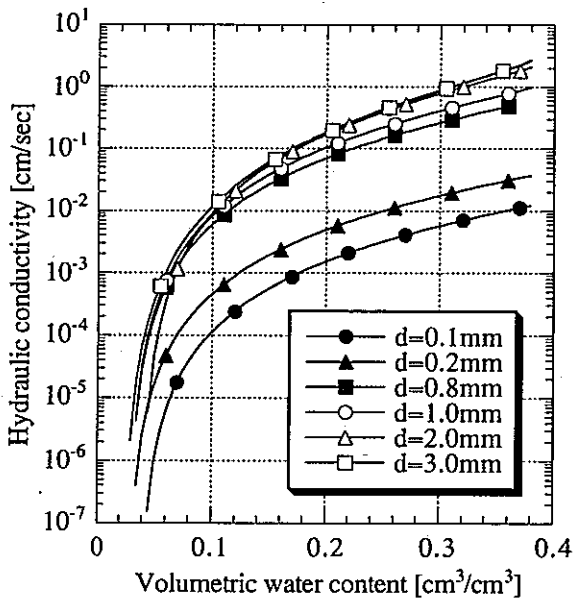


図 3-24 VG モデルによる不飽和透水係数の算定結果

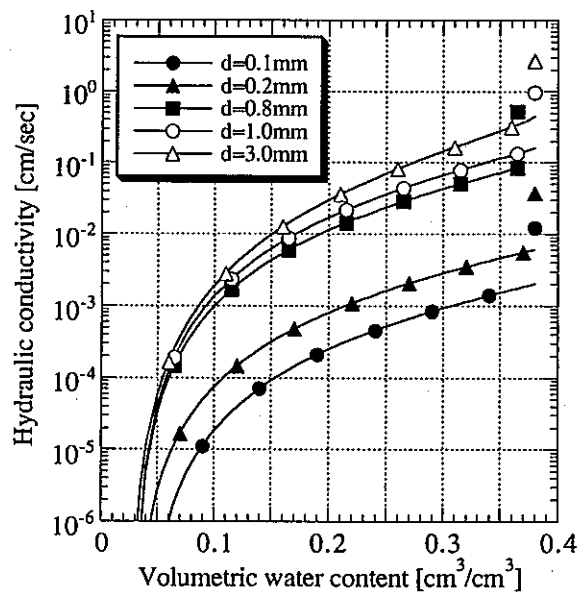


図 3-25 瞬時水分計測法の結果を考慮した不飽和透水係数

4. 鉛直 2 次元矩形水槽Aを用いた不飽和領域の形成試験

4.1 概要

処分坑道周辺に生じると考えられ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、CLUEにおける試験水槽Aを用いて模擬試験を実施した。

坑道周辺の不飽和領域の形成・広がりには主に次の2つの要因に支配されると考えられる。

①外側岩盤から坑道周囲へ向かって供給される水量と坑道部への排水量（境界条件）

②坑道周辺の透水性（透水係数）

そこで、模擬試験により不飽和領域の広がりに特に影響の大きい要因を抽出することを目的とした。試験では以下に示す2項目に着目した。

1) 試験水槽A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、不飽和領域の形成を試みる。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を再現する。

2) 不飽和領域形成状況の計測・観察、形成条件の把握

不飽和領域の形成過程において、間隙水圧計およびFDRにより水理挙動の変化を計測する。

4.2 試験装置

試験水槽Aの試験装置概略図を図4-1に示す。試験水槽は、内寸で高さ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200mm厚の亚克力製板となっている。

試験水槽Aの基本機能およびガラスビーズ充填方法を以下に述べる。

(1) 試験水槽Aの基本機能

- 1) 水槽の中心部には模擬坑道が設けられている。模擬坑道の背面部には坑道掘削による坑道開放を模擬するための排水用バルブが設けられ、バルブを開放することにより水を排水する。排水速度は、バルブ開放率で制御することができる。
- 2) 模擬坑道周辺部におけるゆるみ領域の大きさはパールコンフィルターあるいは、

ステンレスメッシュにより任意に設定できる。また、これらを複数設置することにより、坑道の半径方向に透水性の異なるゆるみ領域を複数設定することができる。

- 3) モデル作成時のガラスビーズ充填は、水槽を90度回転させ、水平状態で行い、ゆるみ領域部、健全部とも均質に作成することができる。
- 4) 前面の亚克力製板取り回し用のチェーンブロック、および左右側面水位固定用のオーバーフロータンク、さらに復水盆を備えている。

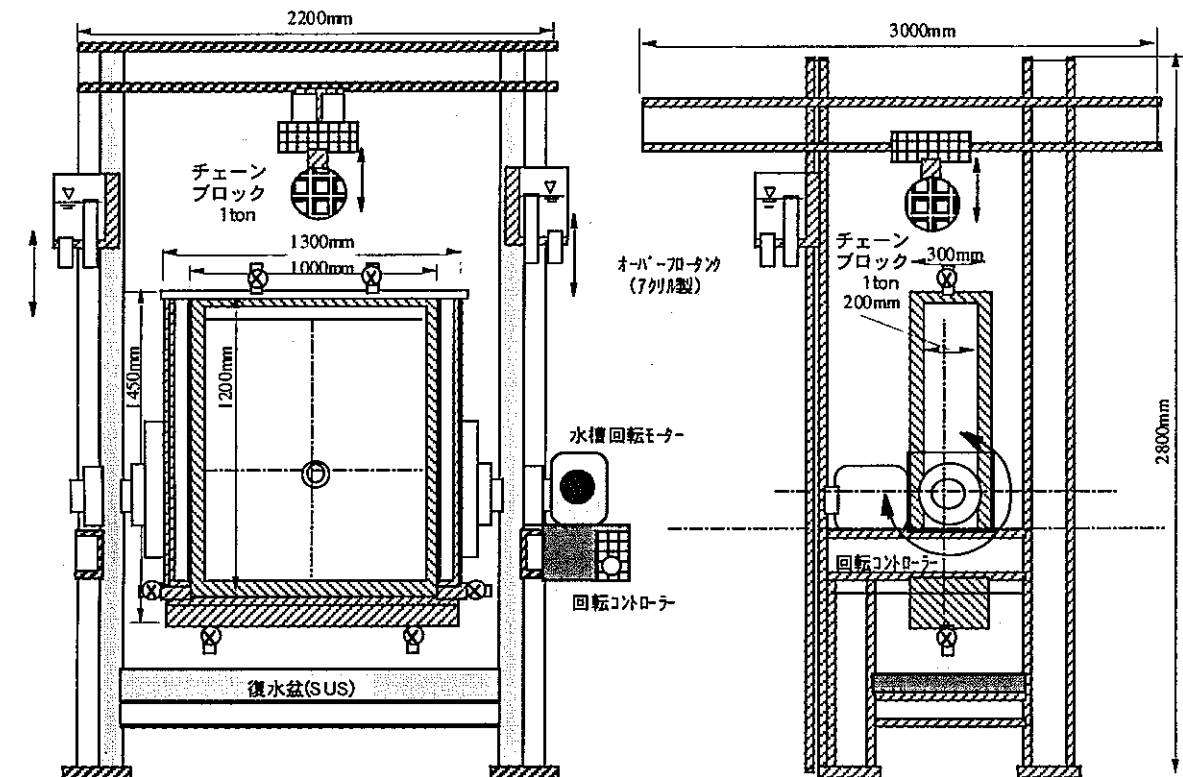


図4-1 試験水槽Aの外形概略

(2) 計測機器

試験水槽内における水理挙動の計測には、第2章に示すFDRと間隙水圧計を用いた。間隙水圧計としては、ハネエルデータ・インスツルメン社製MODEL-ABを用いた。間隙水圧計の測定範囲は $\pm 0.1\text{MPa}$ である。間隙水圧計本体は水槽背面外側に配置しており、水槽内の間隙水圧を測定するために図4-2に示すようにステンレス製の管の先端にセラミックキャップを取り付けたセラミック付フィルターを取り付けてある。負圧の測定には、セラミックキャップを十分に脱気させることと、および、フィルター内を脱気水で満たしておく必要がある。

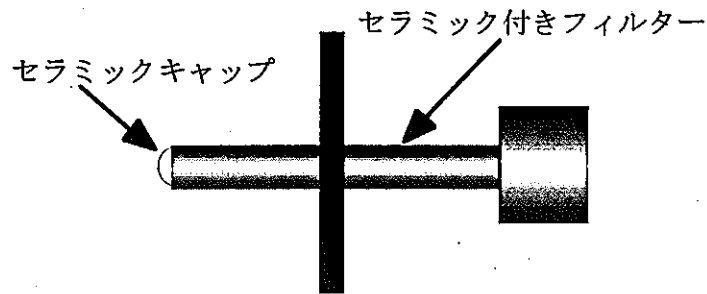


図 4-2 間隙水圧計の設置状況

(3) ガラスビーズ充填方法

水平にした水槽に対して以下の手順でガラスビーズの充填を行う。

- 1) バケツを用いて、一定量のガラスビーズを水と混ぜる。その後、ガラスビーズに付着した空気を除去する。
- 2) 水槽内にガラスビーズを充填する際、あらかじめ水槽内に水を満たしておき、気泡の混入が生じないようにスコップにて、静かにガラスビーズを充填する。
- 3) 充填後、水槽背面よりパイプレータを用いて振動を加え、ガラスビーズの締固めおよび混入した空気の強制除去を行う。
- 4) 所定の位置までガラスビーズを充填した後、アクリル製板を試験水槽の前面部に設置する。
- 5) 水槽を垂直状態にし、上部の蓋をいったん取り外す。
- 6) 水槽を垂直に戻した際、上部に生じた隙間にさらにガラスビーズを充填し、水槽背面よりパイプレータを用いて振動を加え、ガラスビーズの締固めを行い、上部の蓋を再度取り付ける。

4.3 試験ケース

試験ケースを表4-1に示す。試験は全部でケース区分は3通り（EX1：予備試験，EX2：水位固定条件，EX：左右端不透水条件）で行なった。

表4-1 試験ケース

No.	ケース名	外側ビーズ 粒径[mm]	内側ビーズ 粒径[mm]	装置側面 条件	FDR	間隙水圧計	試験水	排水量測定
1	EX1-1	—	—	予備試験	—	○	無色水	×
2	EX1-2							×
3	EX1-3							○
4	EX2-1	0.1	3.0	水位固定	△	△		×
5	EX2-2		3.0		△	△		×
6	EX2-3		2.0		△	△		×
7	EX2-4		2.0		×	○		×
8	EX2-5		1.0	×	○	○		
9	EX3-1		不透水	1.0	○	△		○
10	EX3-2			0.8	○	△		○
11	EX3-3			1.0	×	○		○
12	EX3-4	0.8		×	○	○		

○：測定 △：一部測定 ×：非測定

なお、水槽内均質部を外側ビーズ部分とし、坑道周辺のゆるみ領域部を内側ビーズ部分とする。

4.4 試験結果

4.4.1 予備試験

ここでは、第2章で示したFDRセンサーの適応性同様に間隙水圧計の測定精度の確認を目的に予備試験を行なった。

(1) 予備試験-1 (EX1-1)

アクリル容器を用いた場合での間隙水圧計の測定精度を確認する目的で試験を行った。間隙水圧計の性能確認試験装置の概略図を図4-3に示す。計測開始前に、アクリル容器下部に間隙水圧計を設置し、アクリル容器に水を注入する。100cmの高さまで水を充填し、その後容器下部より排水を行い、排水時の水位変化の目測値と、間隙水圧計の測定値の比較を行なった。試験は、排水バルブの開放率を変え、異なる排水速度の元で3回実施した。試験結果を図4-4に示す。図から、試験1と試験2はほとんど同じ排水速度であったが、この両者と排水速度の速い試験3の全ての試験ケースにおいて、排水開始後から目測値およびセンサーの測定値ともに同一の経時変化を示していることがわかる。これより、間隙水圧計は、水圧の変化を精度良く測定できることを確認できた。

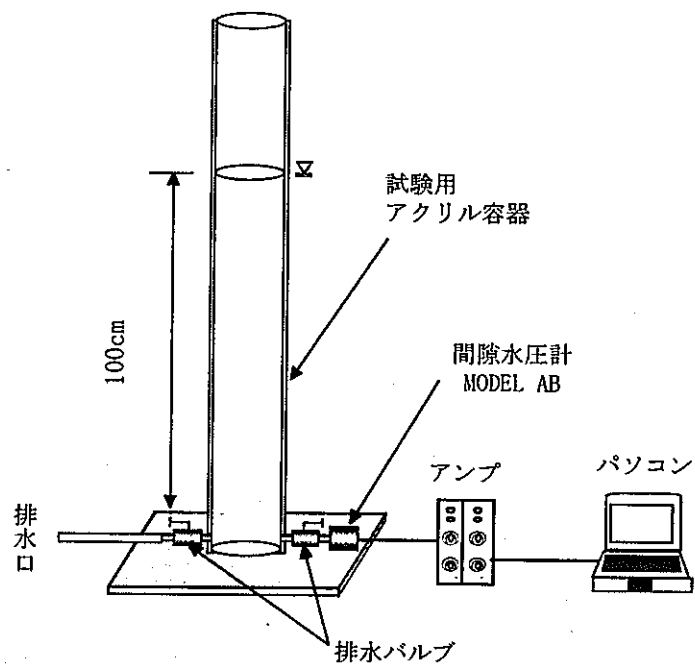


図4-3 間隙水圧計の性能試験装置

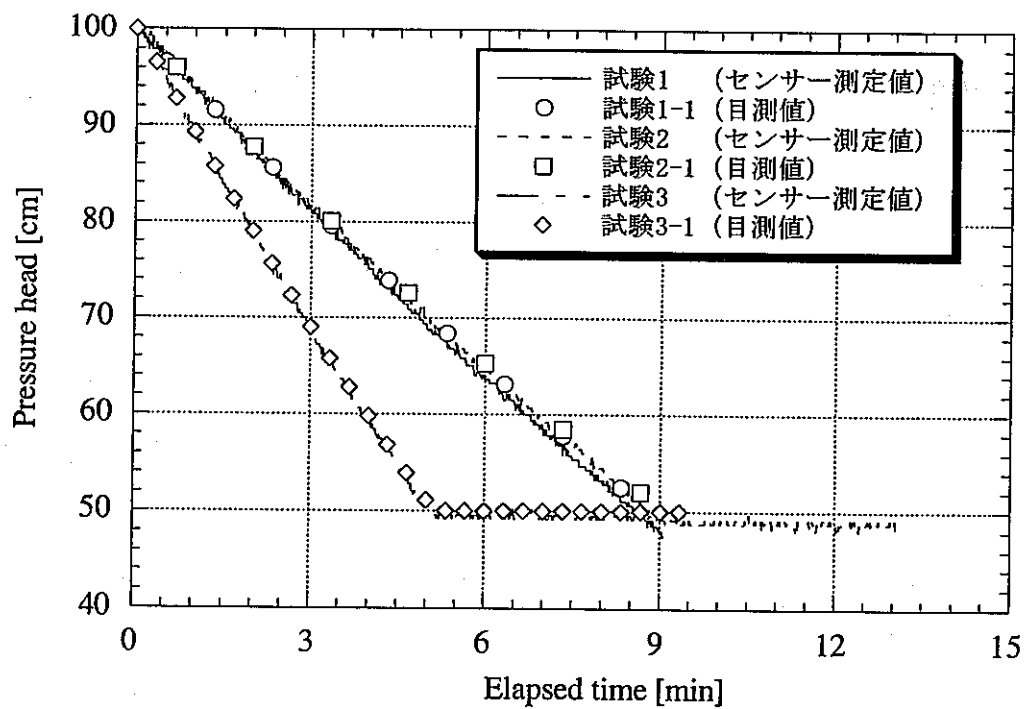


図4-4 間隙水圧計の経時変化 (EX1-1)

(2) 予備試験-2 (EX1-2)

試験水槽Aを用いた場合での間隙水圧計の測定精度を確認する目的で試験を行なった。試験の模式図を図4-5に示す。試験開始前に、試験水槽Aの所定位置に間隙水圧計を設置し、試験水槽内に水を注入した。水槽内を満水にし、その後水槽内に設置してある坑道部より、排水を開始し、ある一定量を排水後、坑道部からの排水を終了した。排水中の水槽内における水位変化の目測値と間隙水圧計による測定値の比較結果を図4-6に示す。同図より坑道部開放後、目測による水位変化の値と坑道部中心に位置する間隙水圧計により計測された値（水位に相当する）は良い一致を示している。また、その他の位置のセンサーにより測定された水圧変化の傾向も実測の水位変化に良く一致している。これより、試験水槽Aでの水圧変化を間隙水圧計は、精度良く測定できることを確認できた。

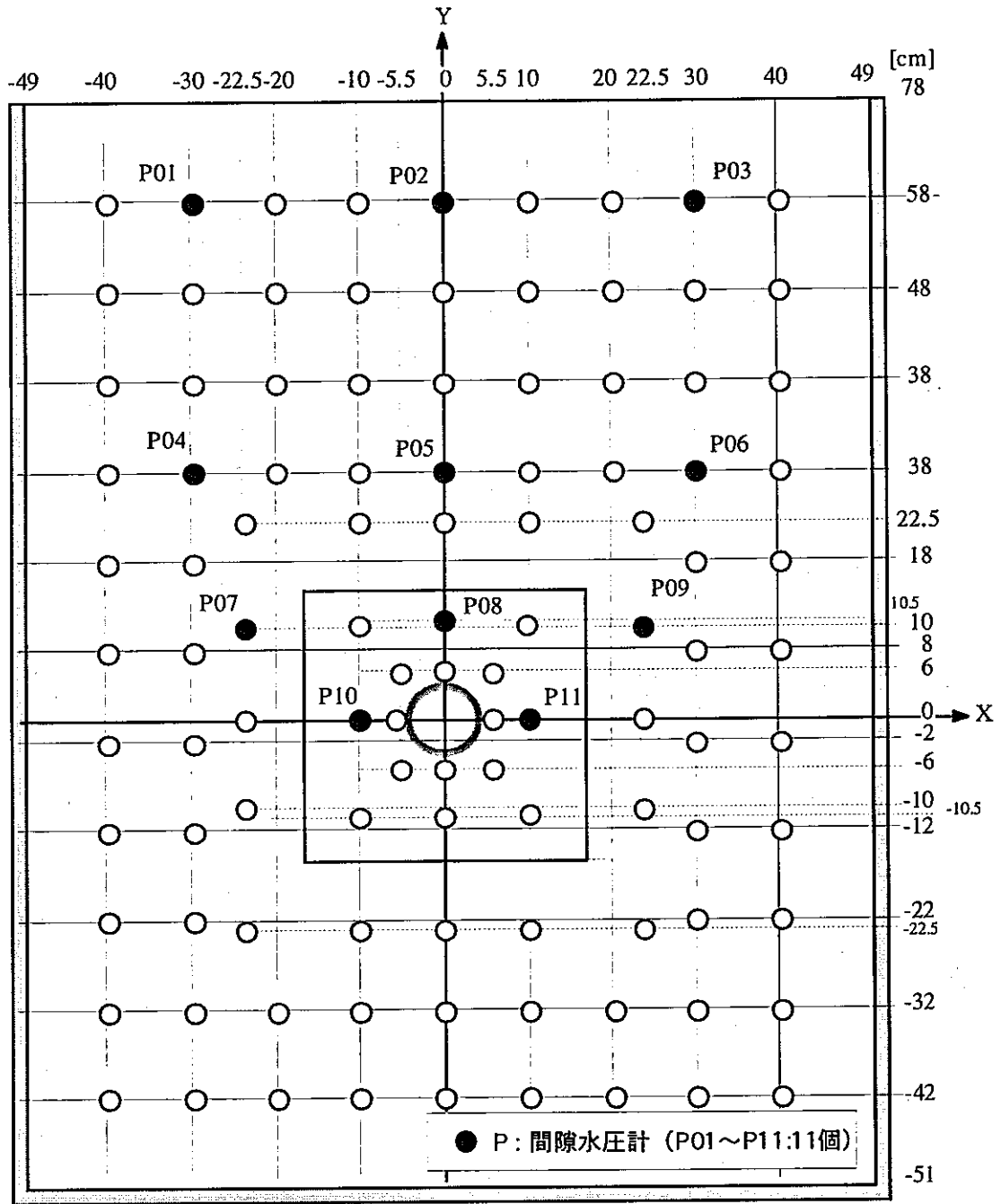


図4-5 センサー配置図 (CLUE試験水槽A : EX1-2)

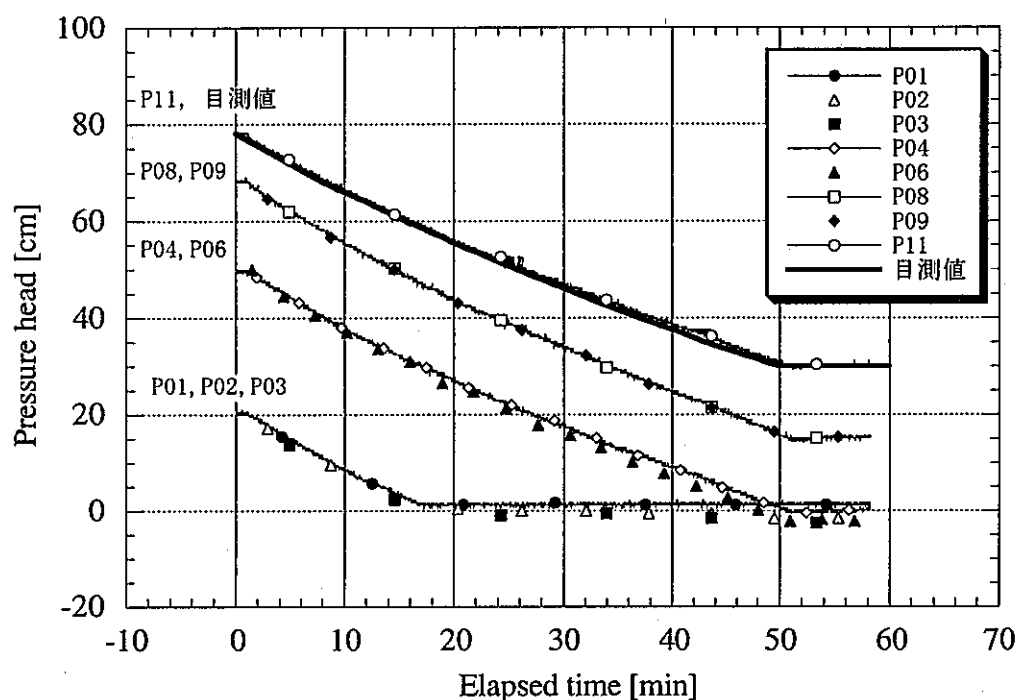


図4-6 間隙水圧計の経時変化 (CLUE試験水槽A:EX1-2)

(3) 予備試験-3 (EX1-3)

CLUE装置 (試験水槽A) の作動状況および内部にガラスビーズを充填した際の間隙水圧計及びFDRの測定精度を確認する目的で予備試験を行なった。

1) モデル条件

試験の模式図を図4-7に示す。モデルはガラスビーズ0.1mmのみの均質場とした。モデル中心部には坑道を模擬した直径50mmのパールコンフィルターを設置した。図中水槽内の○印は水槽Aにおけるセンサー設置可能位置を示している。図4-8には、本予備試験におけるセンサーの配置図を示す。FDRをF01～F10の10個、間隙水圧計をP01～P11の11個設置した。なお、FDRは長さ150mmの電極を用いた。

2) 試験内容

試験は図4-7に示すように、まず、①パールコンフィルター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。

3) 観察結果及び計測結果

①の坑道部からの排水過程では、模擬坑道部の水のみ排水され、坑道部周辺の水は排水されなかった。したがって、間隙水圧計およびFDRの不飽和領域における計測精度を確認することを目的に強制的に排水して不飽和領域を発生されるために、②装置下端からの排水を行なった。その結果、水槽上部に不飽和領域が発生した。以下、②における水理挙動変化について示す。

図4-9および図4-10に、②のステップ開始後から測定した圧力水頭と体積含水率の経時変化をそれぞれ示す。図4-9から全ての計測点において時間の経過とともに圧力が減少していることがわかる。ただし、間隙水圧計のうち、P09は測定開始後の水位低下に圧力が追従していない。これはセラミック付フィルター内への空気の混入やセラミックキャップの脱気不足が原因と考えられる。図4-10より、排水開始後、水槽上部に位置するF01～F05の体積含水率が低下していることが分かる。高位置のものほど水分の低下量が大きいことから水槽上部から順番に水が抜けていることが分かる。一方、坑道部より下となるF06～F10においては変化は見られなかった。また、図4-9、図4-10ともに計測開始から約240分後からさらに圧力水頭や体積含水率が低下していることが分かる。これは水槽内で水の移動（落下）が再度起こったものと考えられる。

以上のことから、排水に伴う水槽内部における間隙水の挙動が間隙水圧計とFDRによって計測できていることがわかる。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（図3-5（1）参照）との比較を行なった結果を図4-11に示す。図のプロットは、図4-10の体積含水率毎データと図4-9の圧力のデータをプロットしたものである（以下、各試験での水分特性曲線のグラフは、同様の方法で作成した。）。飽和体積含水率部分の誤差はガラスビーズの締固め不足によるものと考えられる。その他は間隙水圧計の測定誤差によるものと考えられるが、これらを除いてはほぼ一致していることから、間隙水圧計およびFDRが本試験における不飽和形成過程を測定するセンサーとして妥当なものであると言える。これ以降の試験では、この間隙水圧計およびFDRを組み合わせる使用することとした。

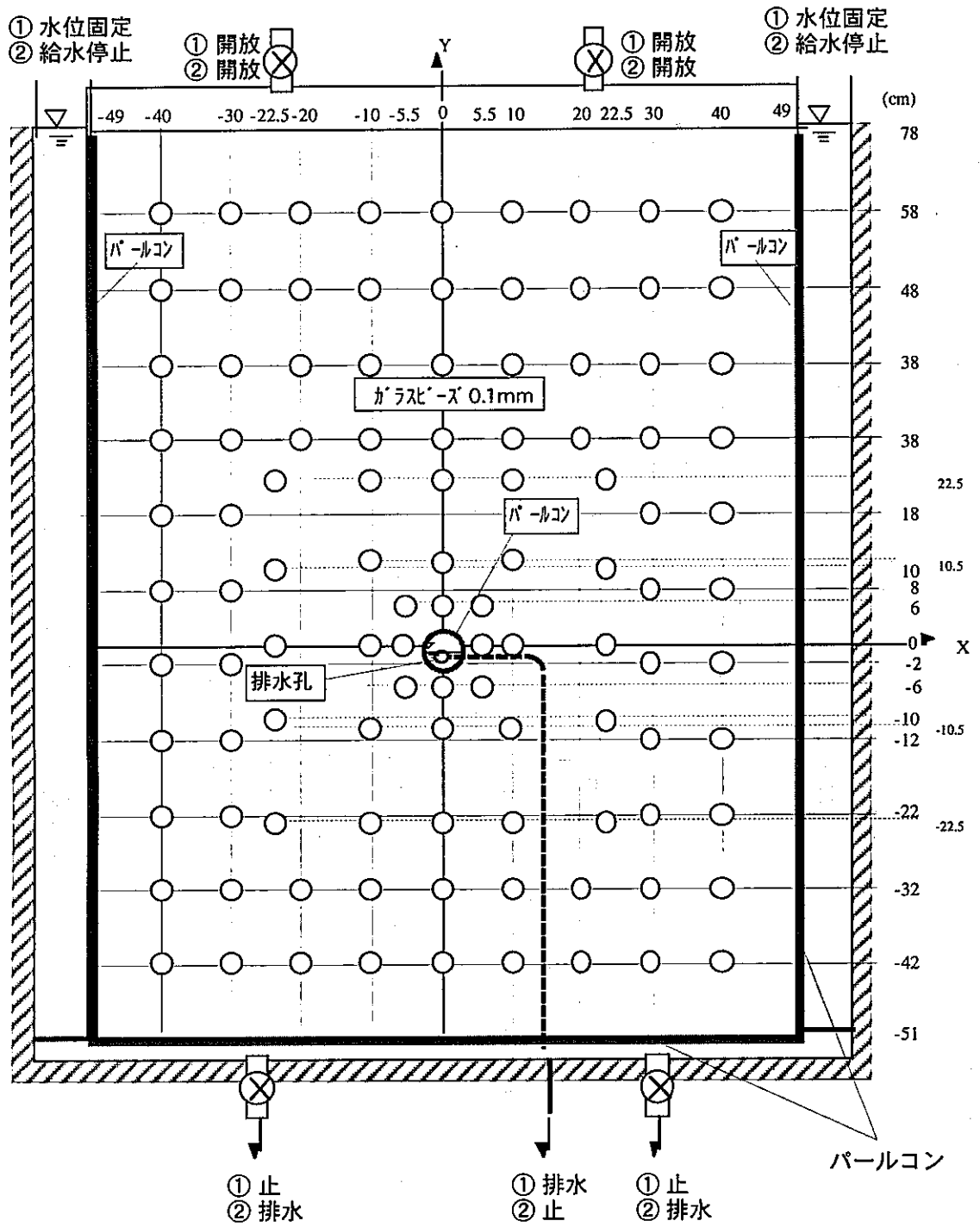


図4-7 試験条件 (CLUE試験水槽A : EX1-3)

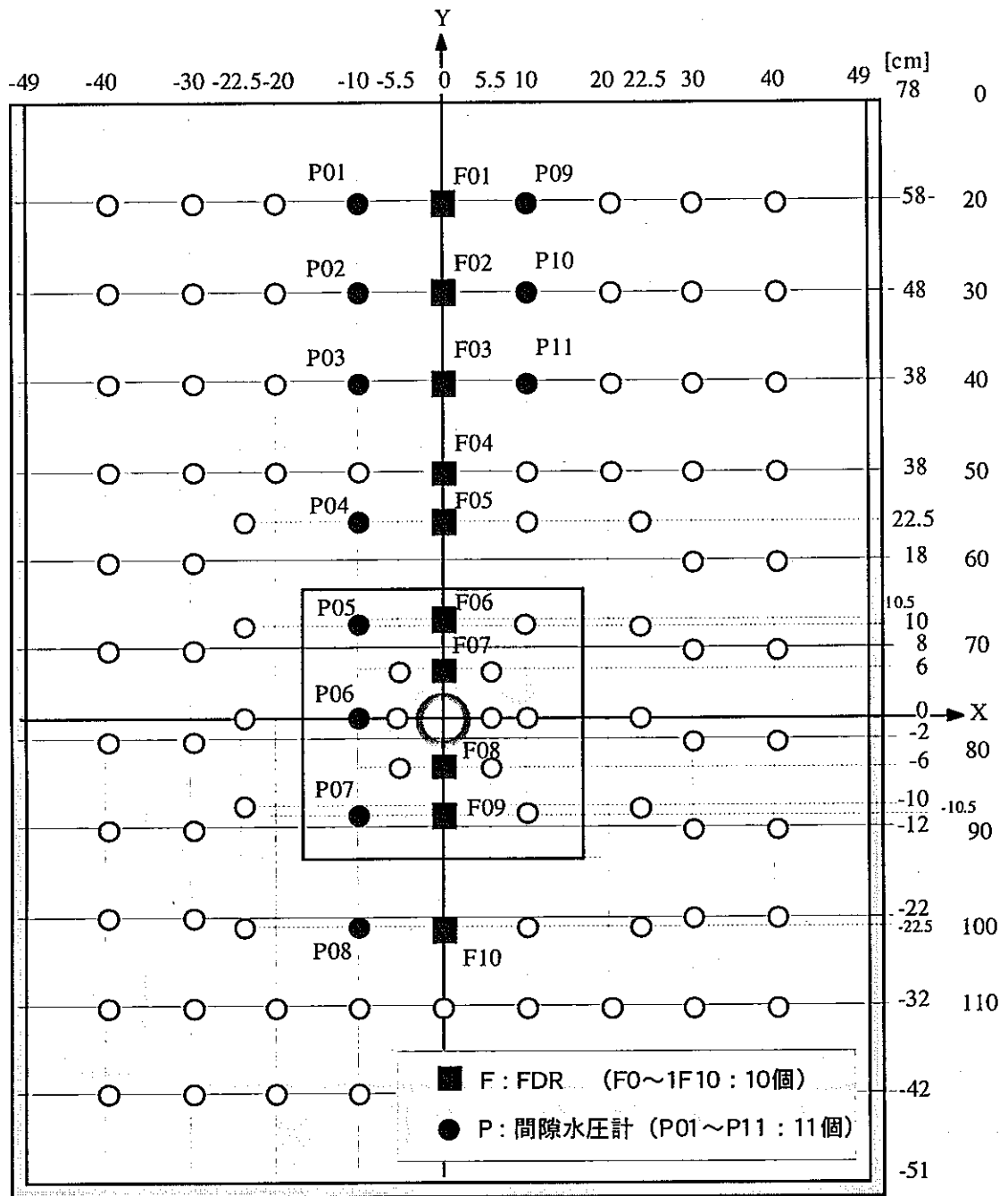


図4-8 センサー配置図 (CLUE試験水槽A: EX1-3)

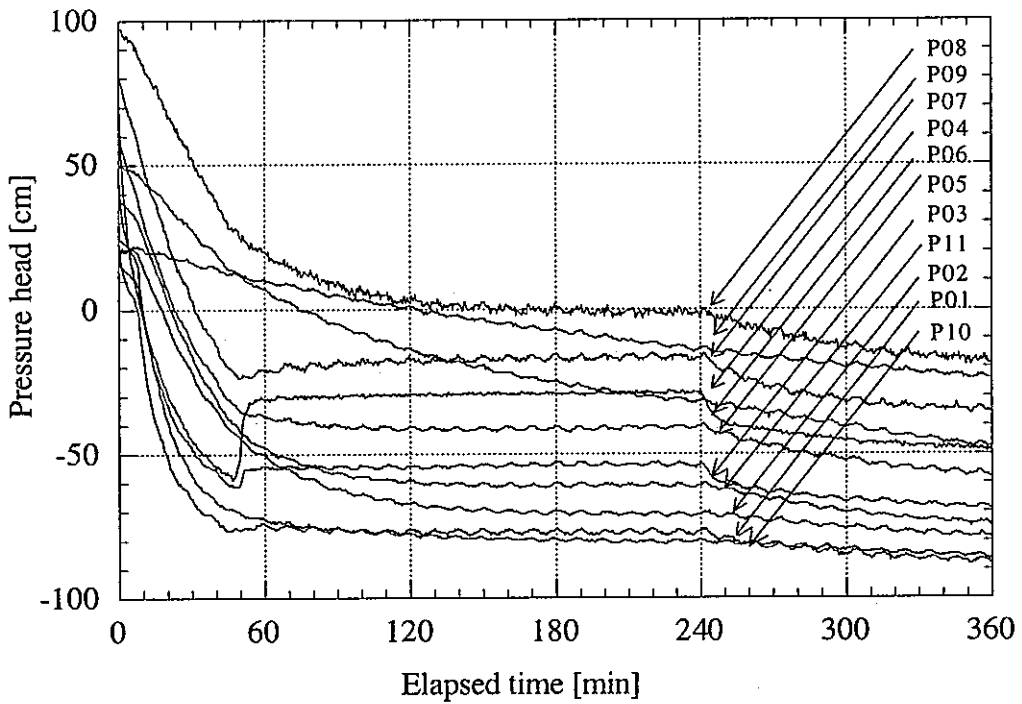


図4-9 間隙水圧の経時変化 (EX1-3)

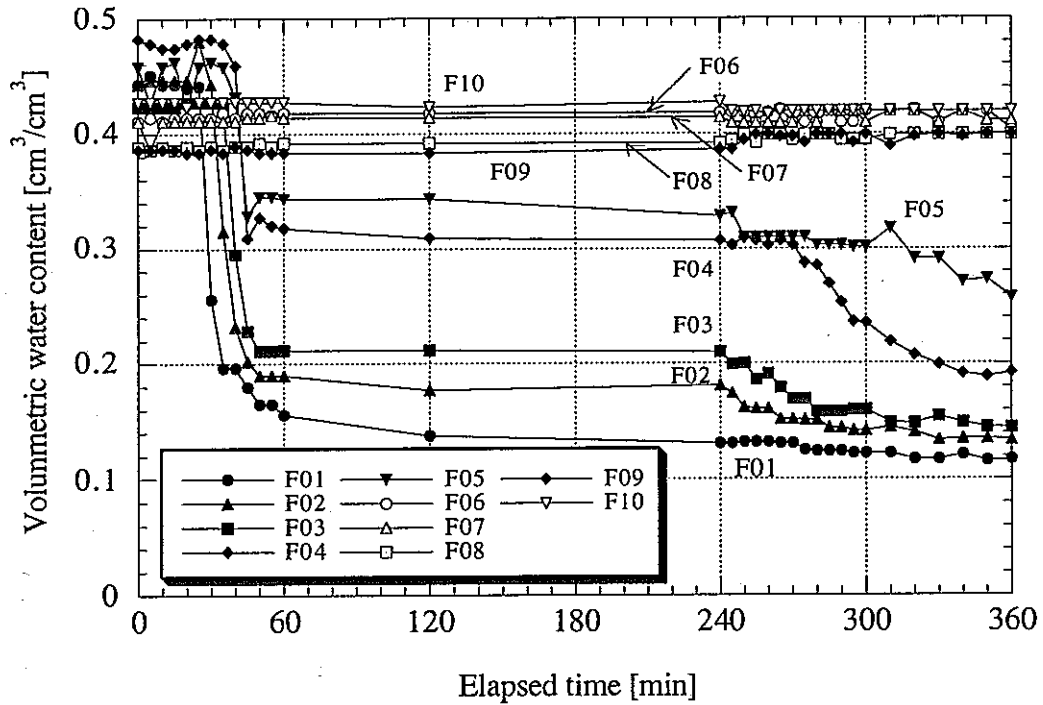


図 4-10 体積含水率の経時変化 (EX1-3)

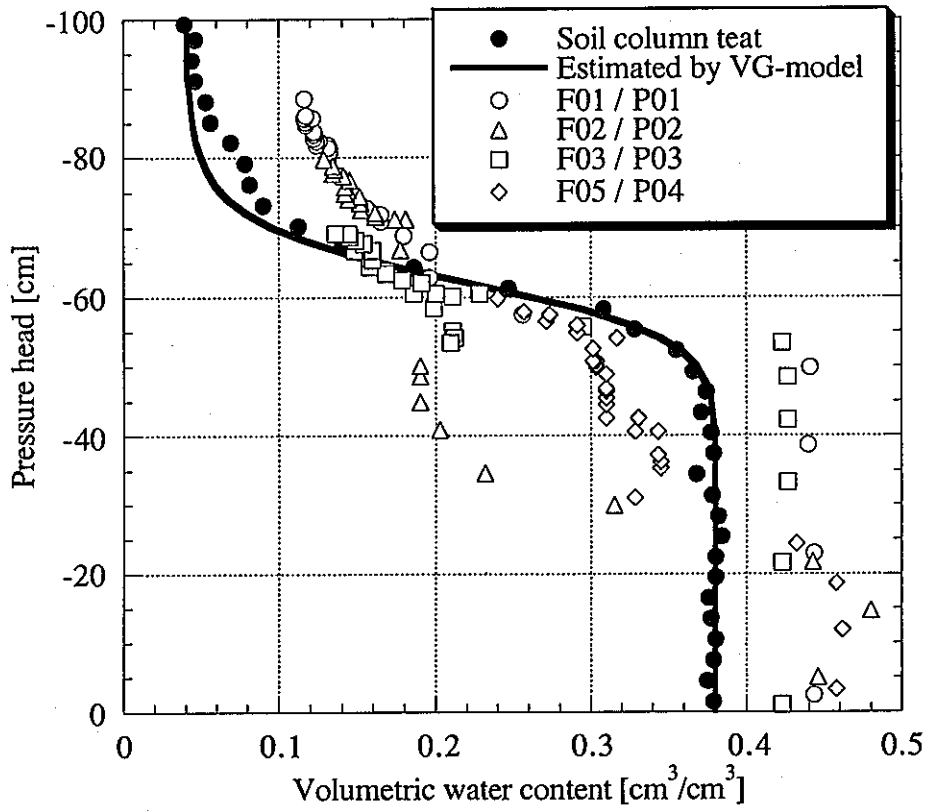


図 4-11 水分特性試験結果との比較 (EX1-3)

4.4.2 水位固定条件試験 (EX2)

(1) モデル条件

実験模式図を図4-12に示す。先の予備試験 (EX1-3) で不飽和領域が形成されなかったため、今度は2種類のビーズ (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なった。図4-13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~P17の17個, FDRはF01~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は長さ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 (2.0mmビーズ) 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4-1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なった。

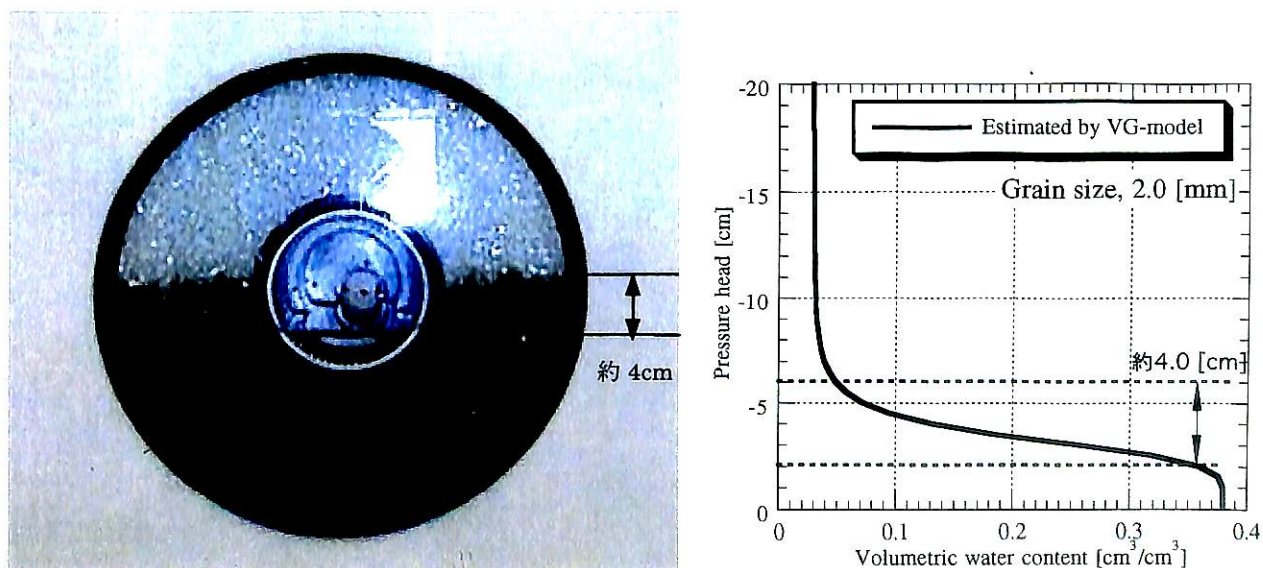


写真4-1 不飽和領域発生状況 (EX2)

(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 4-14、図 4-15 に、FDR による体積含水率の経時変化を図 4-16 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とが分かる。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 $\theta = 0.05$ (飽和度 $S_r = 10\%$)、P11 が $\theta = 0.20$ (飽和度 $S_r = 45\%$) 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、水位の低下に伴い、間隙水圧計が水面以上になったものは、空気がステンレスメッシュフィルター内に侵入し、圧力が開放され計測値はゼロとなった (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 によりその経時的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 4-17 に示す。水分特性試験の結果 (図 3-5 (1) 参照) と比べると、体積含水率の値はおよそ 0.10 程度大きくなっている。これはガラスビーズの締固め具合が緩く、間隙が大きいいため水分量が多いことを示していると考えられる。

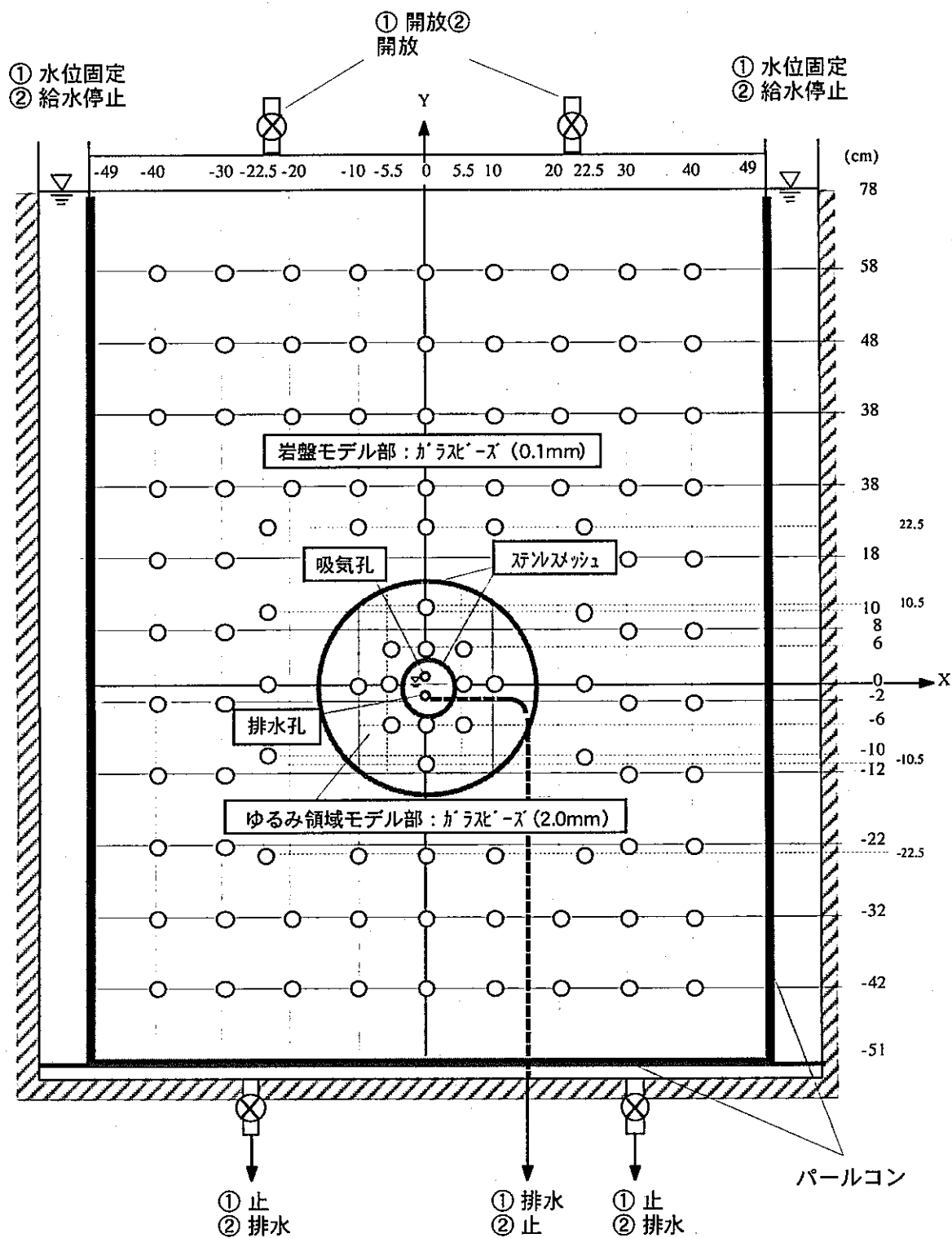


図 4-12 試験条件 (CLUE 試験水槽 A : EX2)

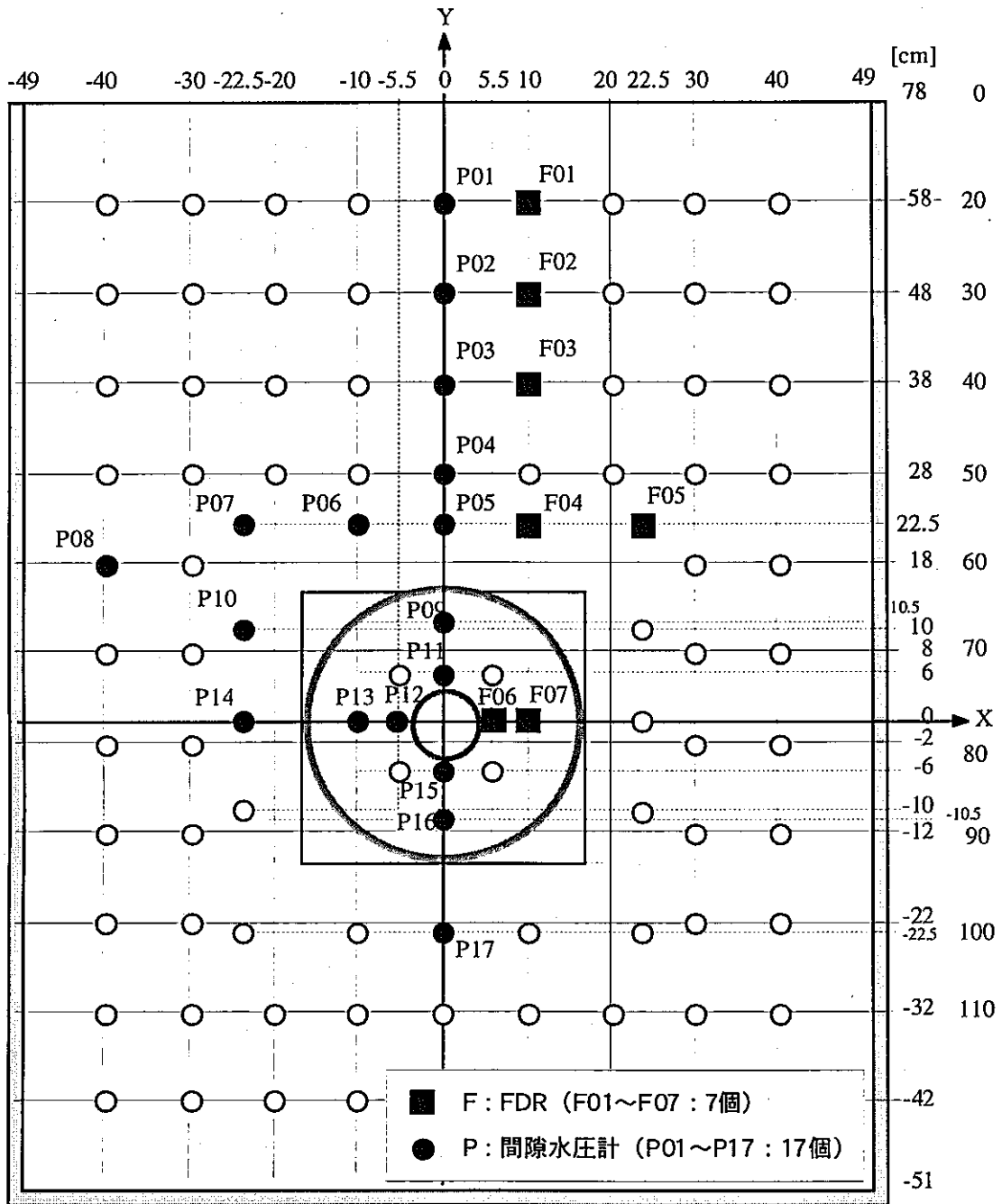


図 4-13 センサー配置図 (CLUE 試験水槽 A : EX2)

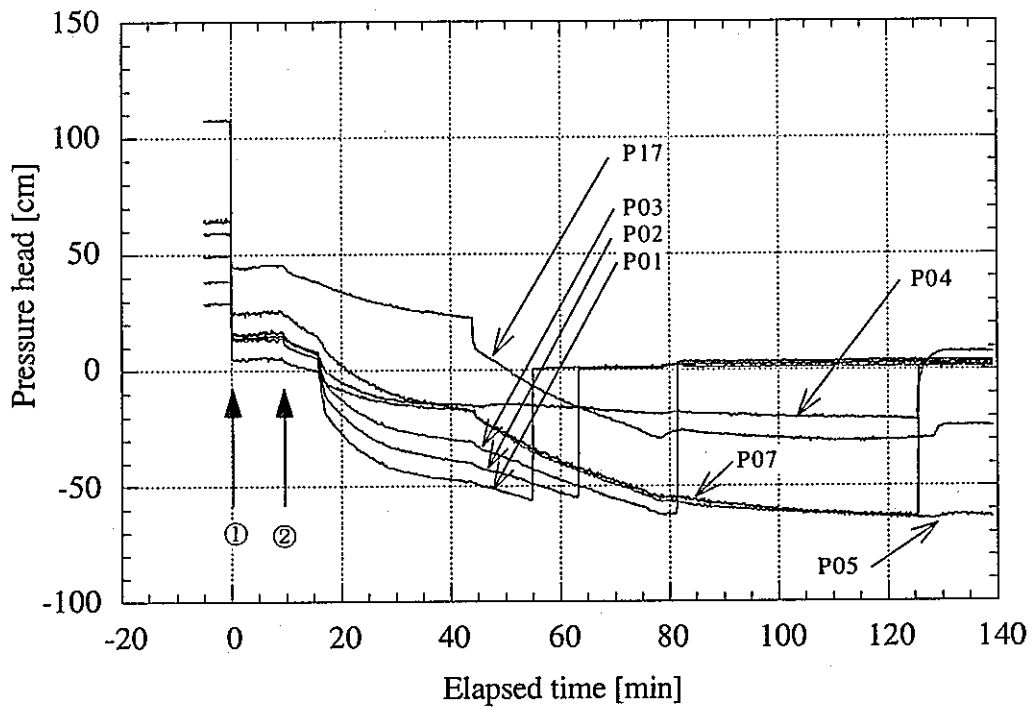


図 4-14 間隙水圧の経時変化：外側 0.1mm ビーズ部分 (EX2-3)

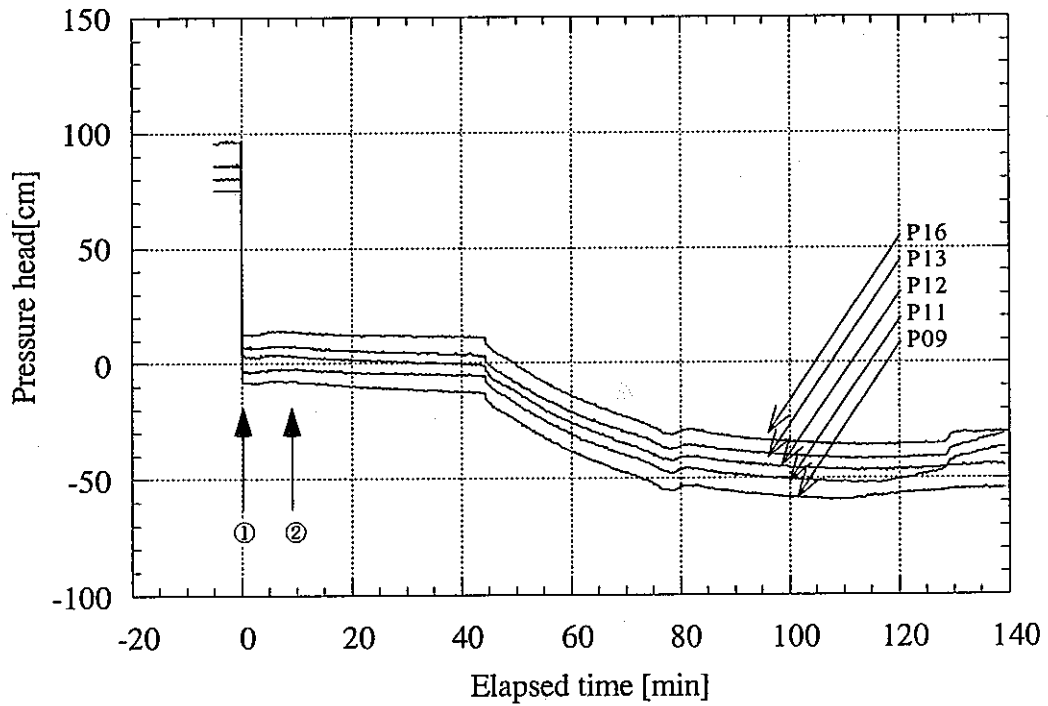


図 4-15 間隙水圧の経時変化：内側 2.0mm ビーズ部分 (EX2-3)

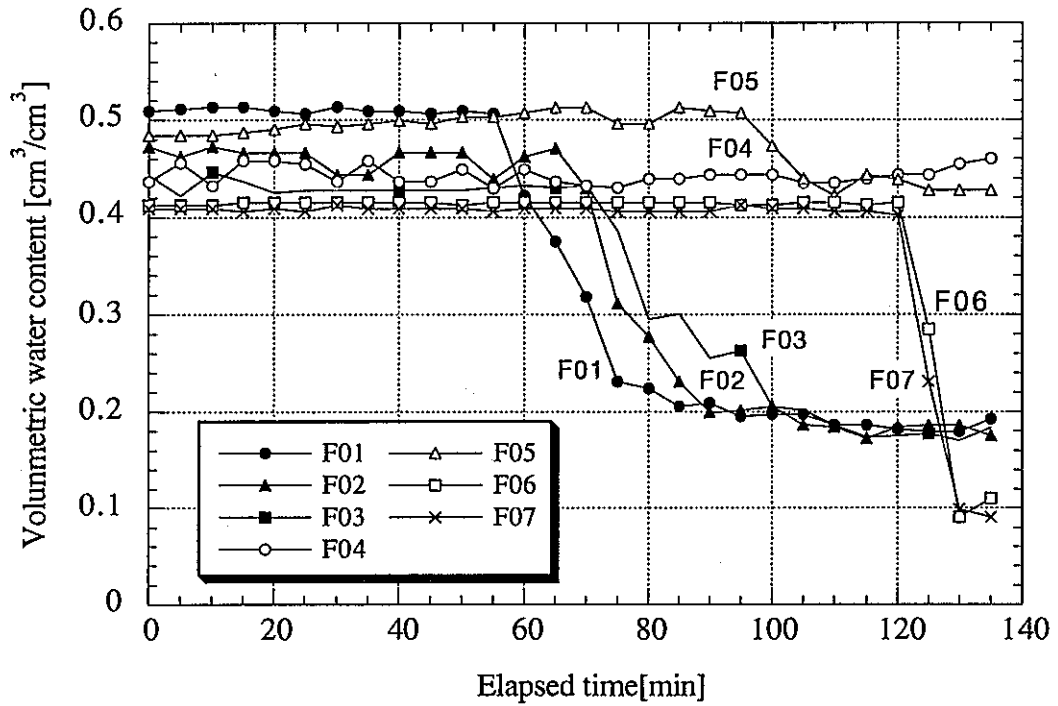


図 4-16 体積含水率の経時変化 (EX2-3)

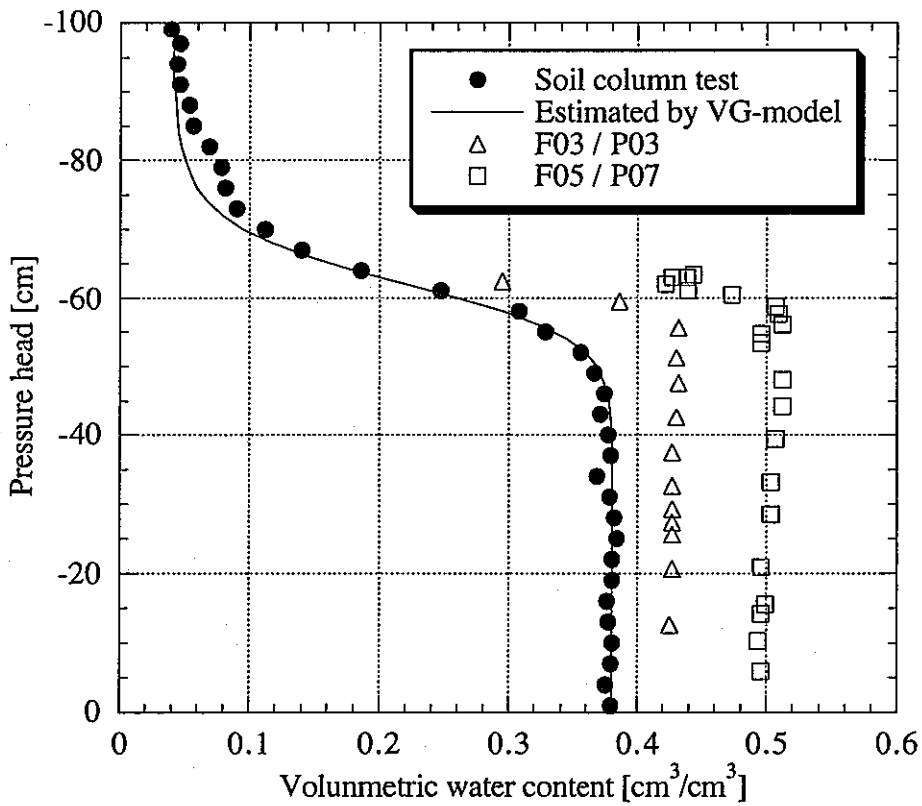


図 4-17 試験中の圧力水頭と体積含水率測定値の検討

(ビーズ 0.1mm, pF 試験結果との比較)

4.4.3 不透水条件試験

(1) ケース 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

試験模式図を図4-18に示す。ここでは、2種類のガラスビーズ (0.1mm, 1.0mm) および2種類のステンレスメッシュ (直径90mmおよび直径280mm) を用いて、内側から坑道部, ゆるみ領域部 (ガラスビーズ1.0mm), 岩盤モデル部 (ガラスビーズ0.1mm) として、不均質モデルを作製した。また、水槽上端を除く周囲はステンレス板を設置し不透水境界とした。

図4-19にEX3-1のときのセンサーの設置状況を示す。FDRはF01~F18の18個、間隙水圧計はP01~P09の9個を設置した。また、図4-20にEX3-3のときの間隙水圧計の設置状況を示す。EX3-1においてFDRを配置したのと同じ点にP01~P19の14個を設置した。なお、FDRは長さ150mmの電極を用いた。モデルEX3-1および、EX3-3は同じ条件になるようにガラスビーズを充填したものである。

2) 試験内容

試験は図4-18に示すように、坑道部を開放し、排水を開始する。開放後、坑道部より排水された水を計測した。なお、試験は、EX3-3とEX3-1の2回行なった。このとき、EX3-1および、EX3-3は同じ手順で試験を行なった。

3) 観察結果および計測結果

EX3-1 の試験の結果、坑道部開放による排水過程では、坑道部周辺のゆるみ領域部 (ガラスビーズ 1.0mm) に気泡が混入し、この気泡は、岩盤モデル部 (ガラスビーズ 0.1mm) 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 4-2 にゆるみ領域部の状況を示す。坑道部分の水位から飽和領域が約 8cm の高さまで立ち上がっており、右図の水分特性曲線から判断すると、排水後にこの部分より上部に不飽和領域が発生していることがわかる。

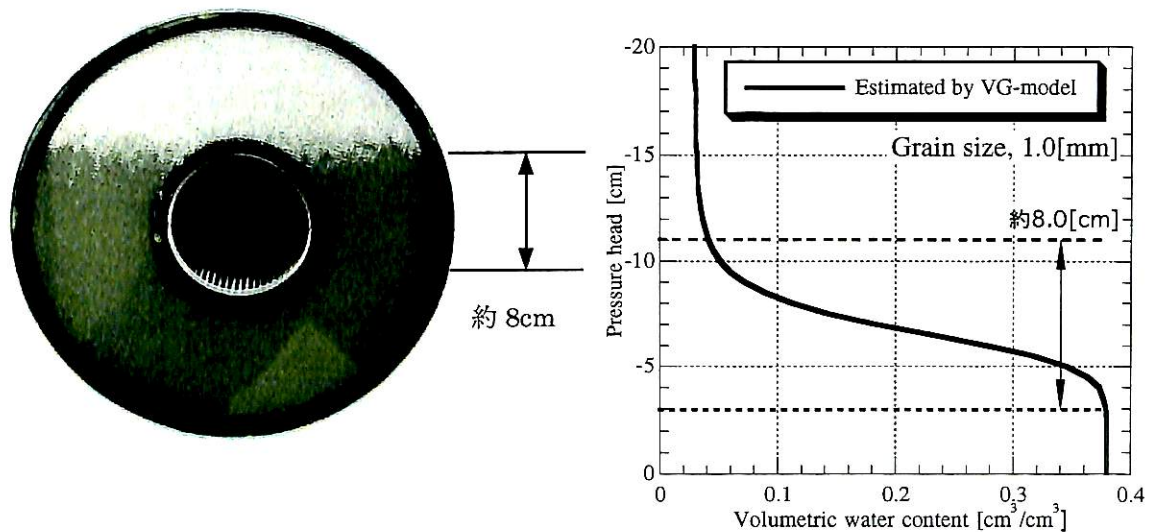


写真 4-2 不飽和領域発生状況 (EX3-1)

不透水状態における水理挙動について以下に示す。

図 4-21 に EX3-3 のときの岩盤モデル部の圧力水頭の経時変化を示す。図から全ての計測点において排水開始後、岩盤モデル部は時間の経過とともに圧力が減少していることが分かる。このときバルブ開放直後の状態では間隙水圧計の位置と圧力水頭の関係の逆転現象もみられるが圧力が定常となる 60 分経過後あたりでは間隙水圧計の位置と相対する圧力水頭分布となっている。

次に、図 4-22 に EX3-1 のときのゆるみ領域部の圧力水頭の経時変化を示す。図から図 4-21 同様に全ての計測点において排水直後、ゆるみ領域部も時間の経過とともに圧力が減少していることが分かる。このときも同様に、バルブ開放直後の状態では間隙水圧計の位置と圧力水頭の関係の逆転現象もみられるが圧力が定常となる 60 分経過後あたりでは間隙水圧計の位置と相対する圧力分布となっている。上記の結果により、圧力が開放されると充填されたガラスビーズのもつ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った。

次に、図 4-23 に FDR による体積含水率の計測結果を示す。図から排水開始直後後、ゆるみ領域部に位置する F10～F12 では急激に体積含水率が低下し、その後約 20 分経過後には定常となっていることが分かる。これは排水開始とともにゆるみ領域部に気泡が混入し、不飽和状態になったためと考えられる。また、図 4-24 に示した EX3-1 において計測された間隙水圧計による圧力水頭の挙動も EX3-3 の結果と同等の傾向を示した。

次に、EX3-1, EX3-3 における FDR による体積含水率の測定結果と間隙水圧計による測定結果の同測定点（同座標点）での値と、基礎物性試験で測定した水分特性曲線（図 3-5（4）参照）との比較図を図 4-25 に示す。わずかにばらつきはあるが、装置測定精度、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。

水位固定条件の試験でも問題となったガラスビーズの充填性についてここで確認した。試験終了後、岩盤モデル部のガラスビーズのサンプリングを行い、実充填密度から間隙率を求めた。EX3-1 の結果は、表 4-2 に示すようにガラスビーズの基礎物性を取得した水分特性測定法での充填より間隙率が大きいことがわかった。これは、図 4-26 に示す排水量の結果から明らかである。測定された排水量が、坑道部とゆるみ領域部から計算される排水量より多く排水されたているのは、岩盤モデル部（ガラスビーズ 0.1mm 部分）の間隙が大きくサクションもそれに伴い、小さくなることから、この部分からも排水されているものと考えられる。

表4-2 岩盤モデル部のガラスビーズ充填状況 (EX3-1)

NO.	測定ポイント	乾燥密度[g/cm ³]	間隙率 [-]	基礎物性値0.1[mm] 間隙率 [-]
1	P01	1.473	0.410	0.383
2	P03	1.453	0.419	
3	P05	1.523	0.391	
4	P08	1.463	0.415	
5	P09	1.475	0.410	

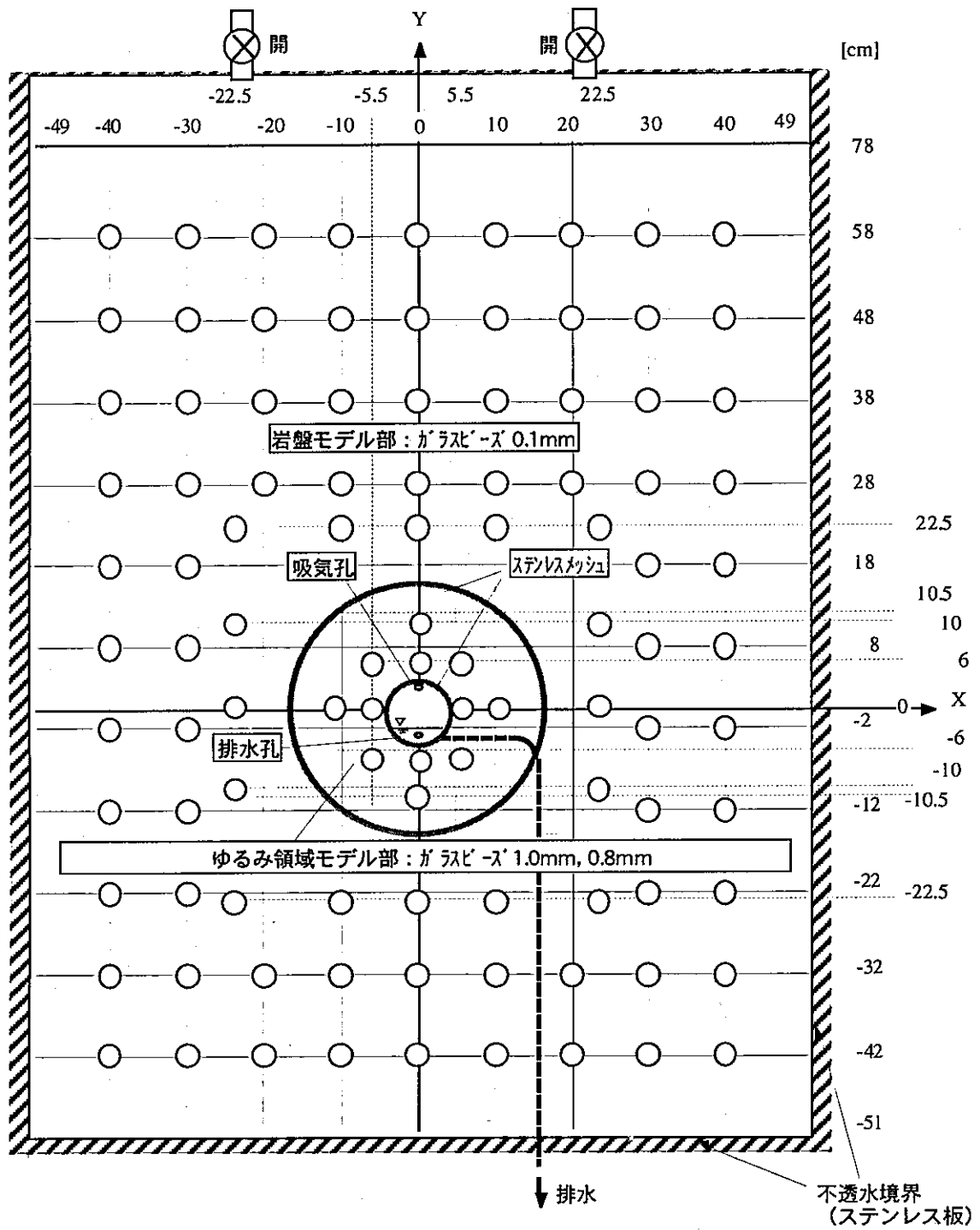


図4-18 試験条件 (CLUE試験水槽A : EX3)

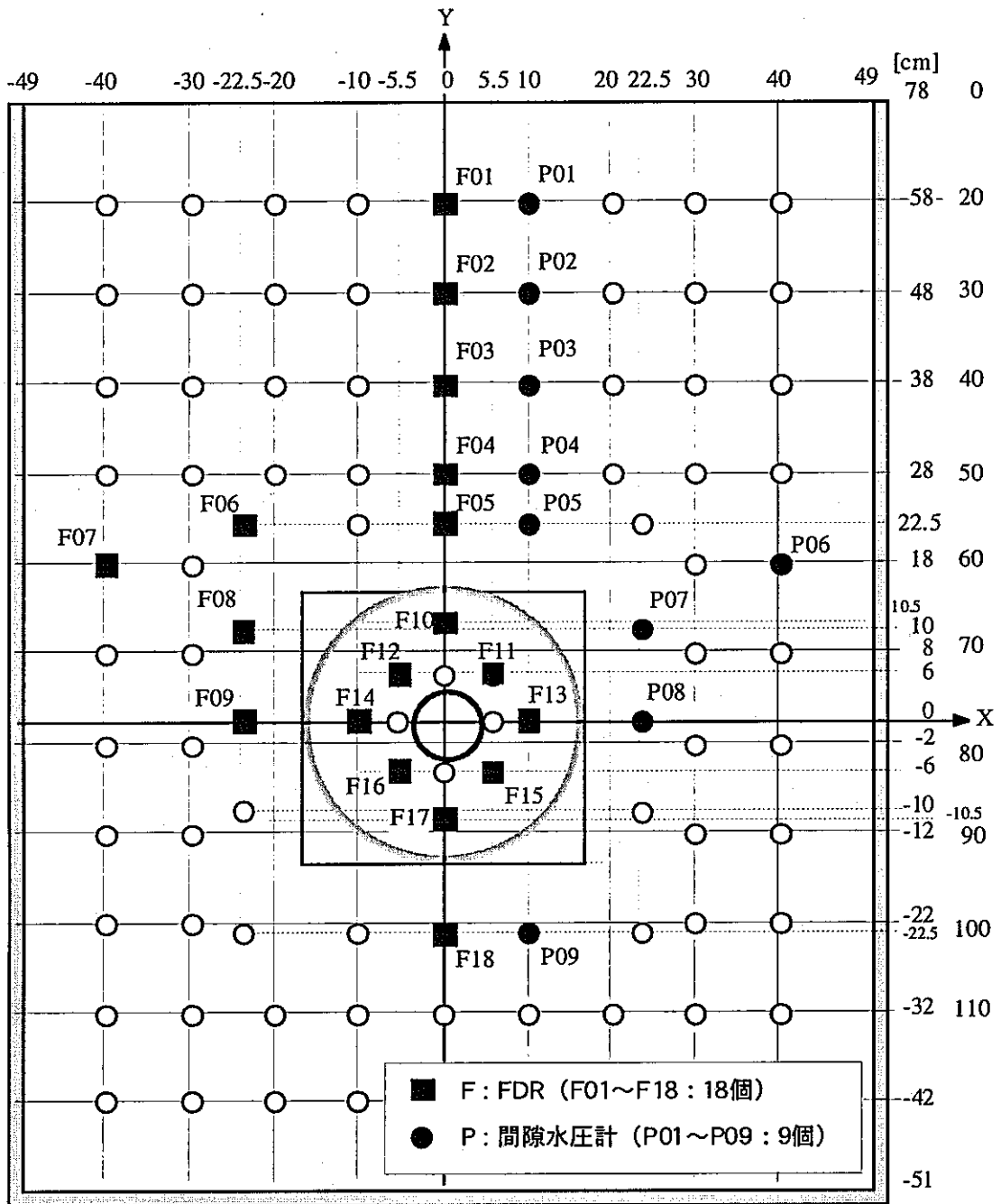


図 4-19 センサー配置図 (CLUE 試験水槽 A : EX3-1)

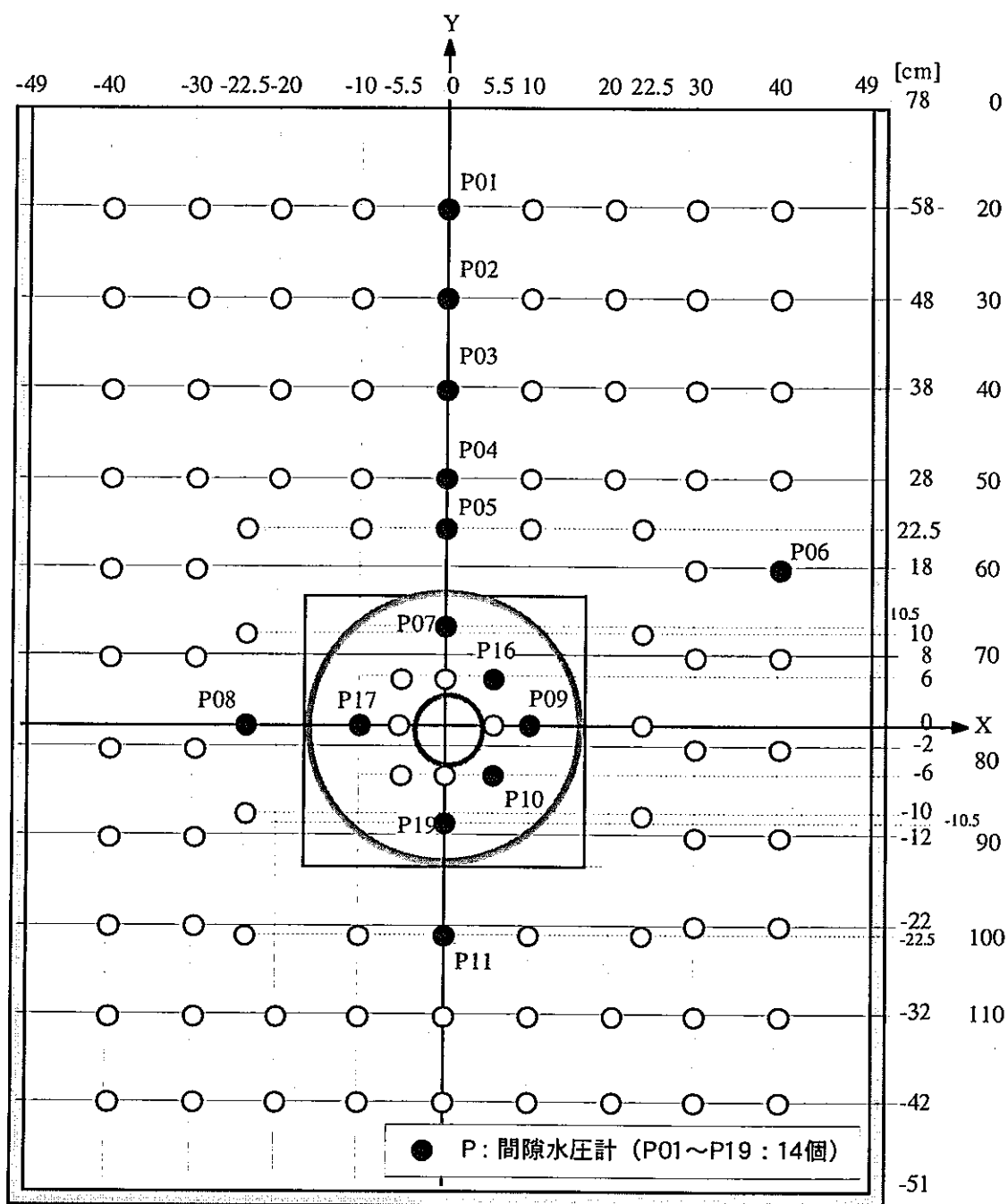


図4-20 センサー配置図 (CLUE試験水槽A : EX3-3)

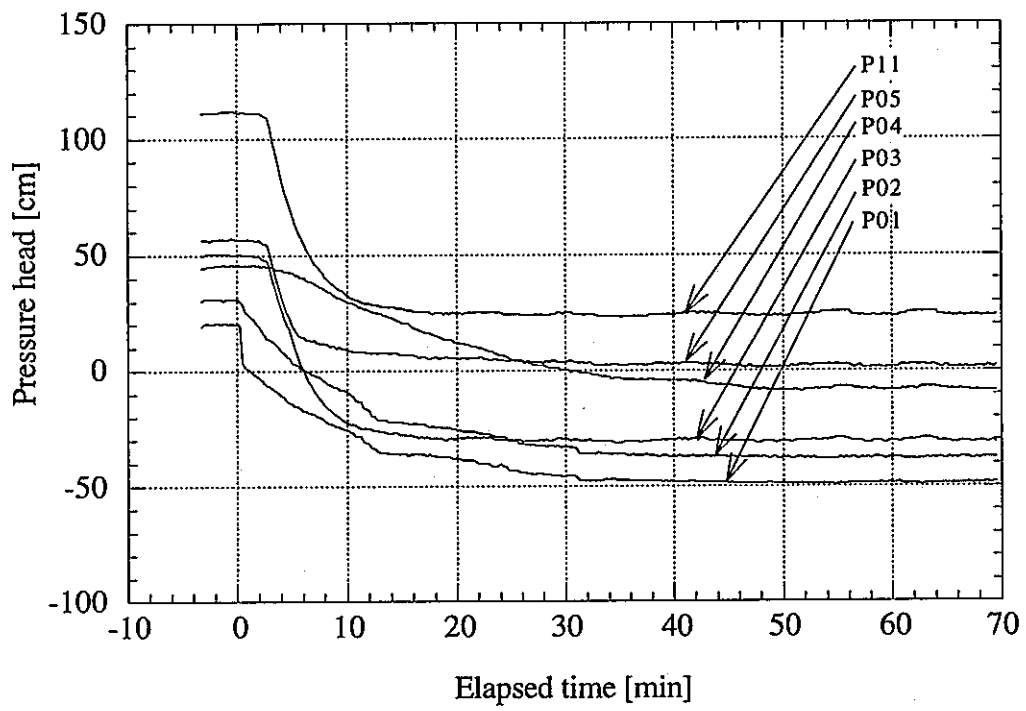


図4-21 間隙水圧計の経時変化：外側0.1mmビーズ部分 (EX3-3)

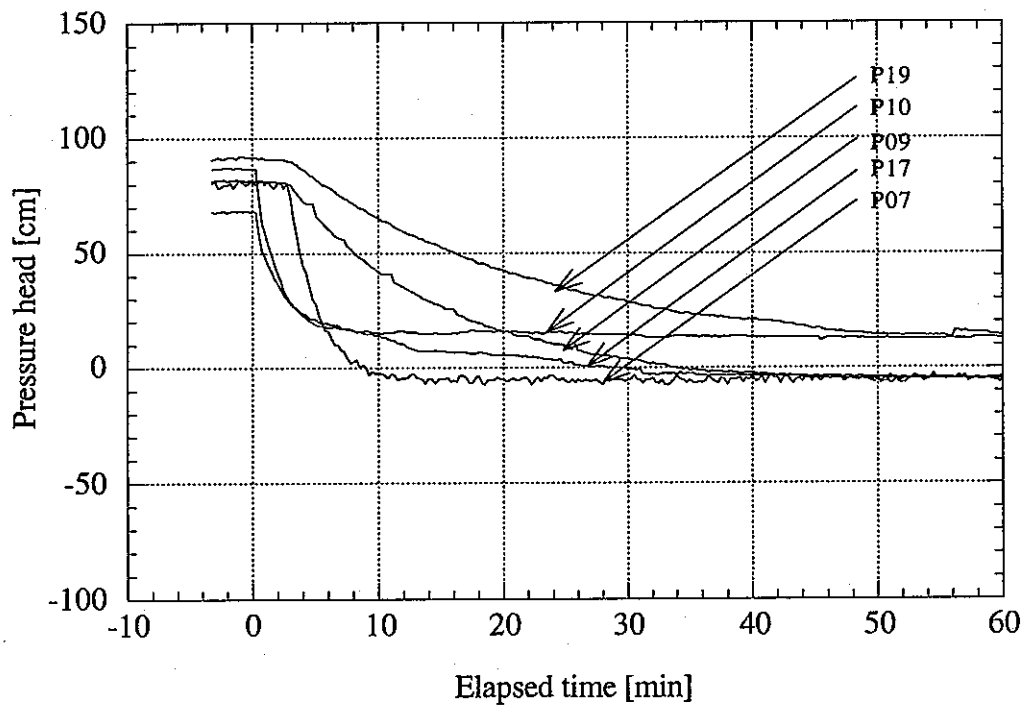


図4-22 間隙水圧計の経時変化：内側1.0mmビーズ部分 (EX3-3)

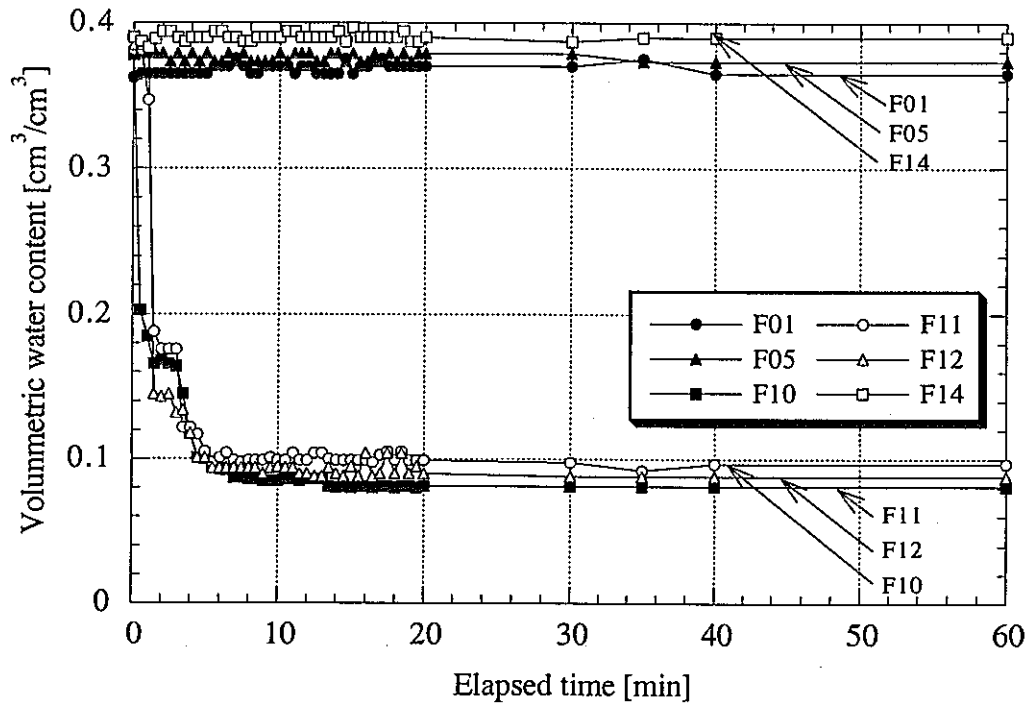


図4-23 体積含水率の経時変化 (EX3-1)

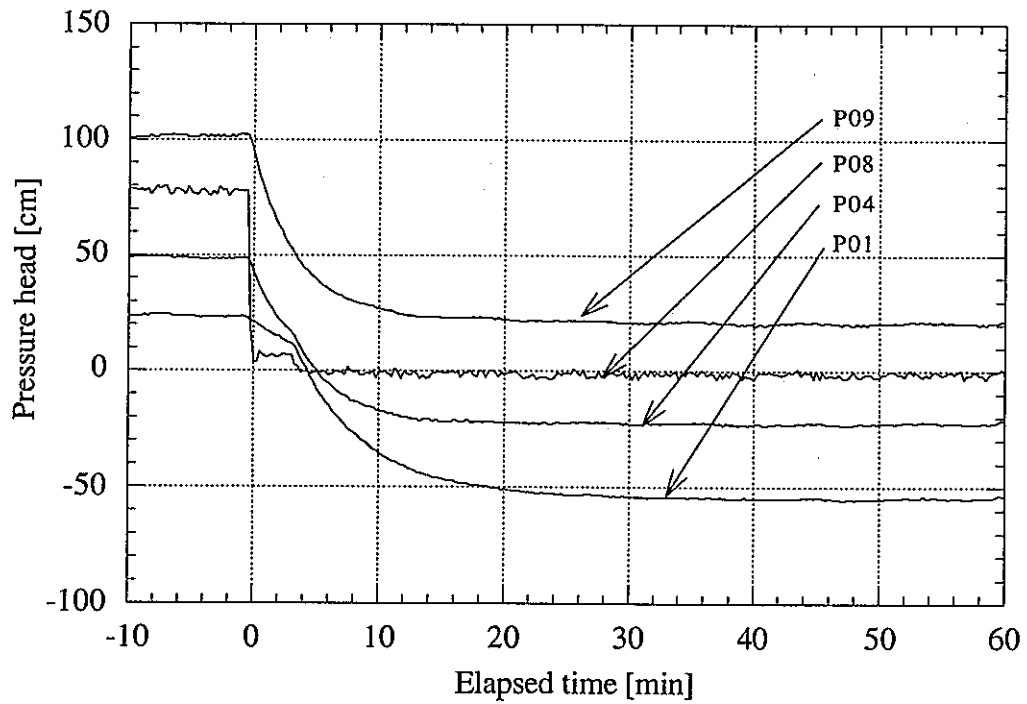


図4-24 間隙水圧の経時変化 (EX3-1)

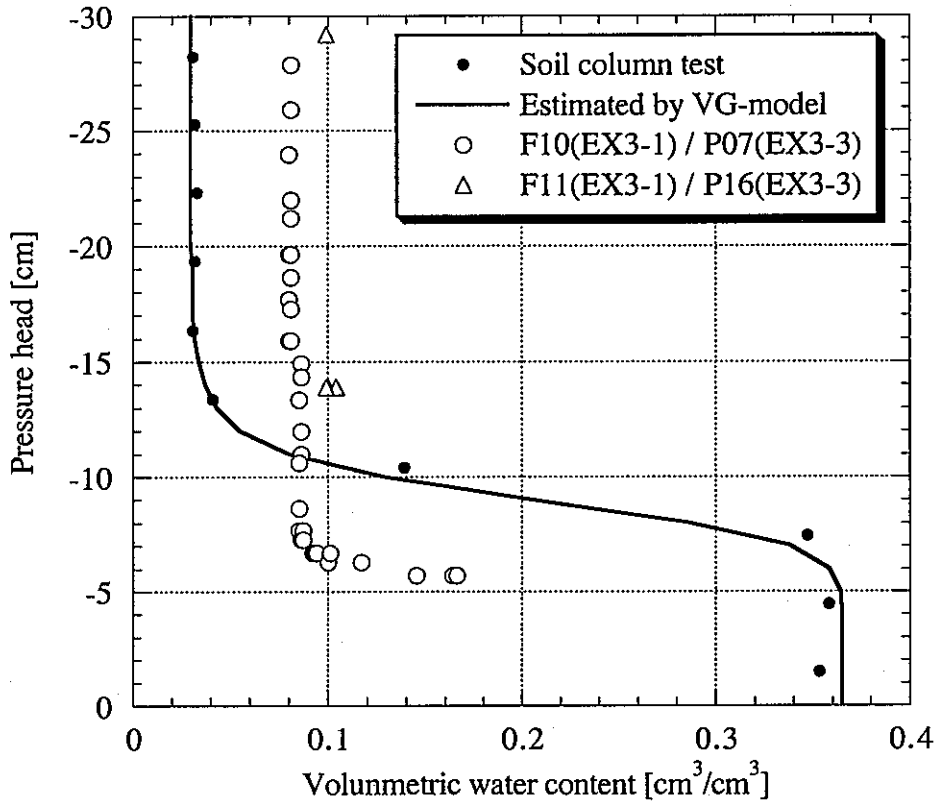


図4-25 水分特性曲線との比較
(1.0mm・同一測定点での値)

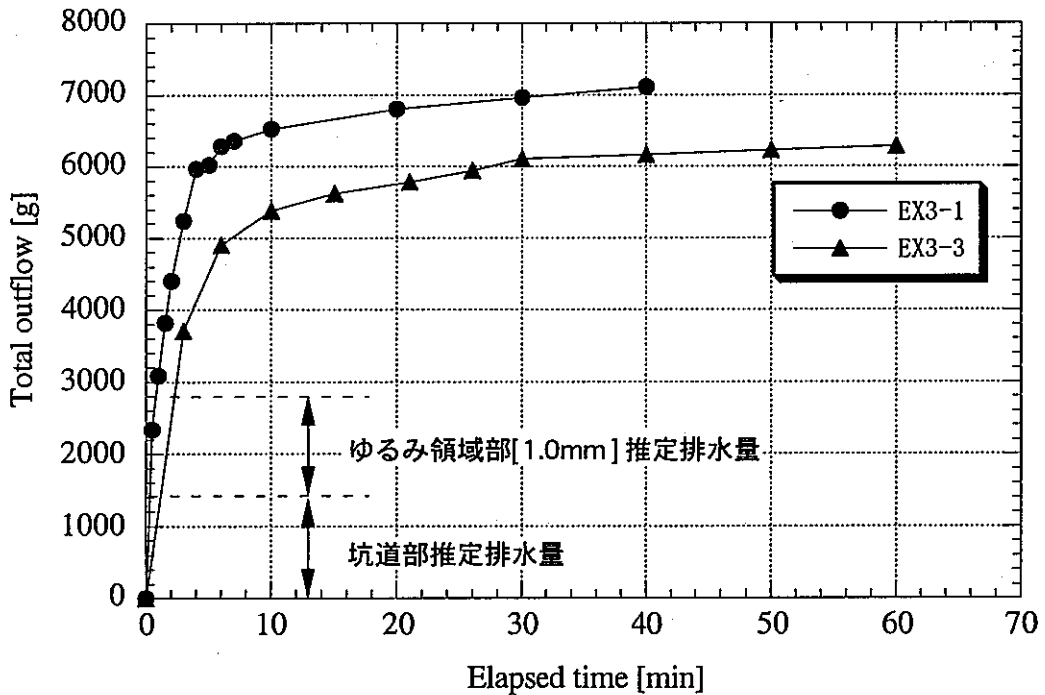


図 4-26 排水量の経時変化

(2) 試験ケース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) モデル条件

試験の方法は試験ケース1と同じである。試験ケース1同様，2種類のガラスビーズ（0.1mm，0.8mm）および2種類のステンレスメッシュ（直径90mmおよび直径280mm）を用いて，内側から坑道部，ゆるみ領域部（ガラスビーズ0.8mm），岩盤モデル部（ガラスビーズ0.1mm）として，不均質モデルを作成した。また，水槽上端を除く周囲はステンレス板を設置し不透水境界とした。

図4-27にEX3-2のときのセンサーの設置状況を示す。FDRはF01～F18の18個，間隙水圧計はP01～P09の9個設置した。また，図4-28にEX3-4のときの間隙水圧計の設置状況を示す。EX3-4における間隙水圧計の設置位置は，EX3-2において，FDRで測定した同じ点にP01～P20の15個を設置した。なお，FDRは長さ150mmの電極を用いた。モデルEX3-2およびEX3-4は同じ条件になるようにガラスビーズを充填したものである。

2) 試験内容

図4-18に示すように，坑道部を開放し，排水を開始する。開放後，坑道部より排水された水を計測した。なお，試験は，EX3-2とEX3-4の2回行なった。このとき，EX3-2 および，EX3-4は同じ手順で試験を行なった。

3) 観察結果および計測結果

EX3-2の観察結果から，坑道部開放による排水過程では，坑道部周辺のゆるみ領域（ガラスビーズ0.8mm）に気泡が混入し，この気泡は，岩盤モデル部（ガラスビーズ0.1mm）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4-3にゆるみ領域部の状況を示す。坑道部分の水位から飽和領域が約10cmの高さまで立ち上がっており，右図の水分特性曲線から判断すると，排水後にこの部分より上部に不飽和領域が発生していることがわかる。

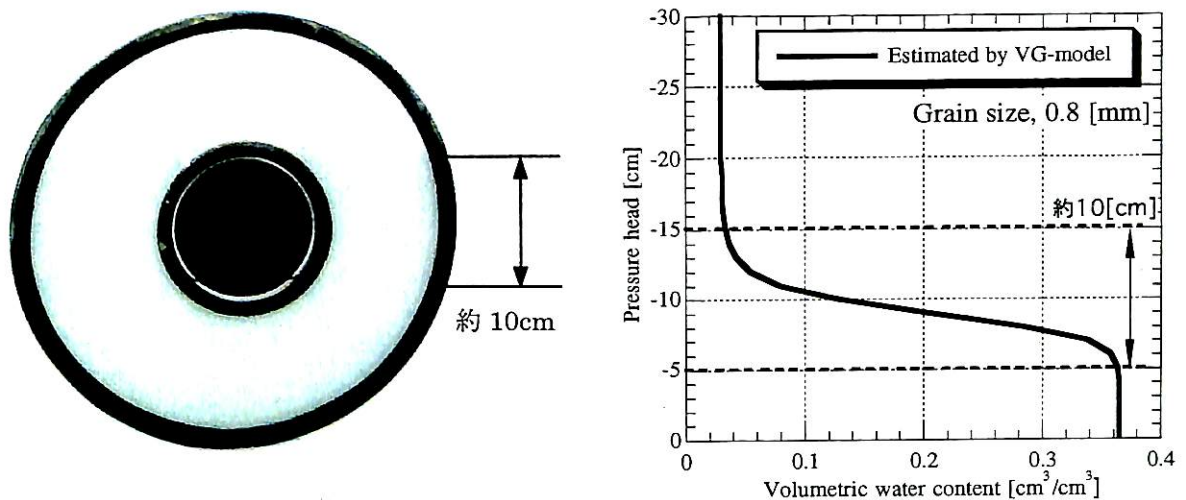


写真4-3 不飽和領域発生状況 (EX3-2)

不透水状態における水理挙動について以下に示す。

図4-29にEX3-4のときの岩盤モデル部の圧力水頭の経時変化を示す。図から全ての計測点において排水開始後、岩盤モデル部は時間の経過とともに圧力が減少していることがわかる。このときバルブ開放直後の状態では間隙水圧計の位置と圧力水頭の関係で水槽上部に位置するP10の逆転現象もみられるが圧力が定常となる60分経過後あたりでは間隙水圧計の位置と相対する圧力分布となっている。

次に、図4-30にEX3-4のときのゆるみ領域部の圧力水頭の経時変化を示す。図から図4-29同様に全ての計測点において排水直後、ゆるみ領域部においても時間の経過とともに圧力が減少していることが分かる。その後、約60分経過後あたりで間隙水圧計の位置と相対する圧力分布となっている。上記の結果より、圧力が開放されるとガラスビーズの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った。

次に、図4-31にFDRによる体積含水率の計測結果を示す。図から排水開始直後後、ゆるみ領域部に位置するF10～F12は時間の経過とともに体積含水率が低下し、その後約40分経過後には定常となっていることが分かる。これは排水開始とともにゆるみ領域部に気泡が混入し、不飽和状態になったためと考えられる。また、圧力水頭の経時変化に関して、図4-32に示すEX3-2の結果は図4-29のEX3-4の結果と同等の傾向を示した。

次に、EX3-2におけるFDRによる体積含水率の測定結果と間隙水圧計による測定結果の同測定点（同座標点）、同時間における値と、基礎物性試験で測定した

水分特性曲線（図 3-5 (3) 参照）との比較図を図 4-33 に示す。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。

ここでも同様に岩盤モデル部のガラスビーズ充填性について試験終了後に確認を行った。表4-3に示すように、水分特性測定法で行われた試験の間隙率よりも大きい値となっており、ガラスビーズ充填の難しさが明らかとなった。この結果、図4-34に示す排水量について、EX3-2の結果は計算された坑道部とゆるみ領域から排水された量より多く排水されており、岩盤モデル部（ガラスビーズ0.1mm部分）上端部から排水されているものと考えられる。なお、EX3-4では、排水量が計算値とほぼ一致する。これは、ガラスビーズの充填密度がかなり改善されたためと考えられる。

表4-3 岩盤モデル部のガラスビーズ充填状況 (EX3-2)

NO.	測定ポイント	乾燥密度 [g/cm ³]	間隙率 [-]	基礎物性値0.1[mm] 間隙率 [-]
1	P01	1.476	0.409	0.373
2	P03	1.525	0.390	
3	P05	1.453	0.419	
4	P08	1.458	0.417	
5	P09	1.456	0.418	

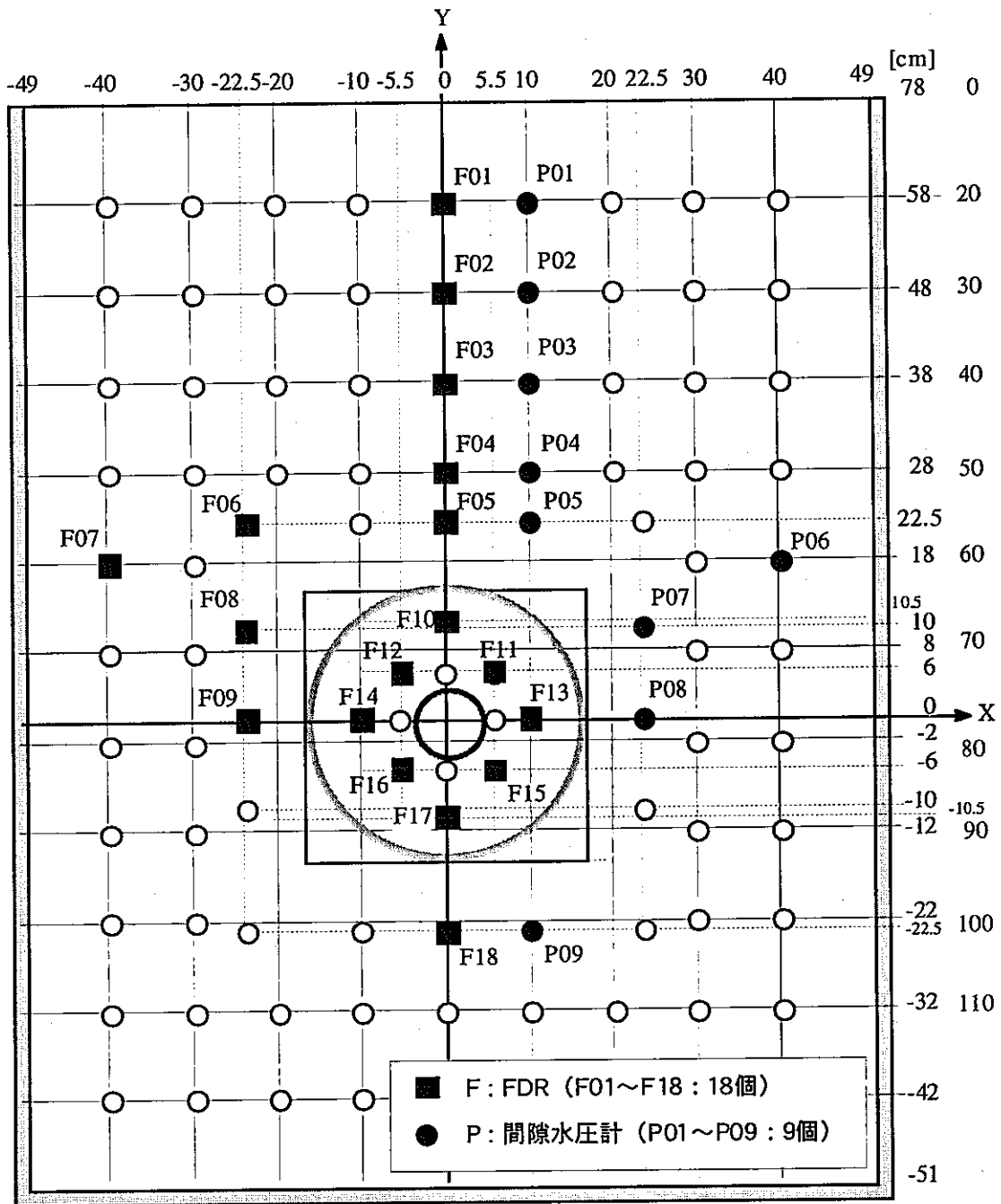


図4-27 センサー配置図 (CLUE試験水槽A : EX3-2)

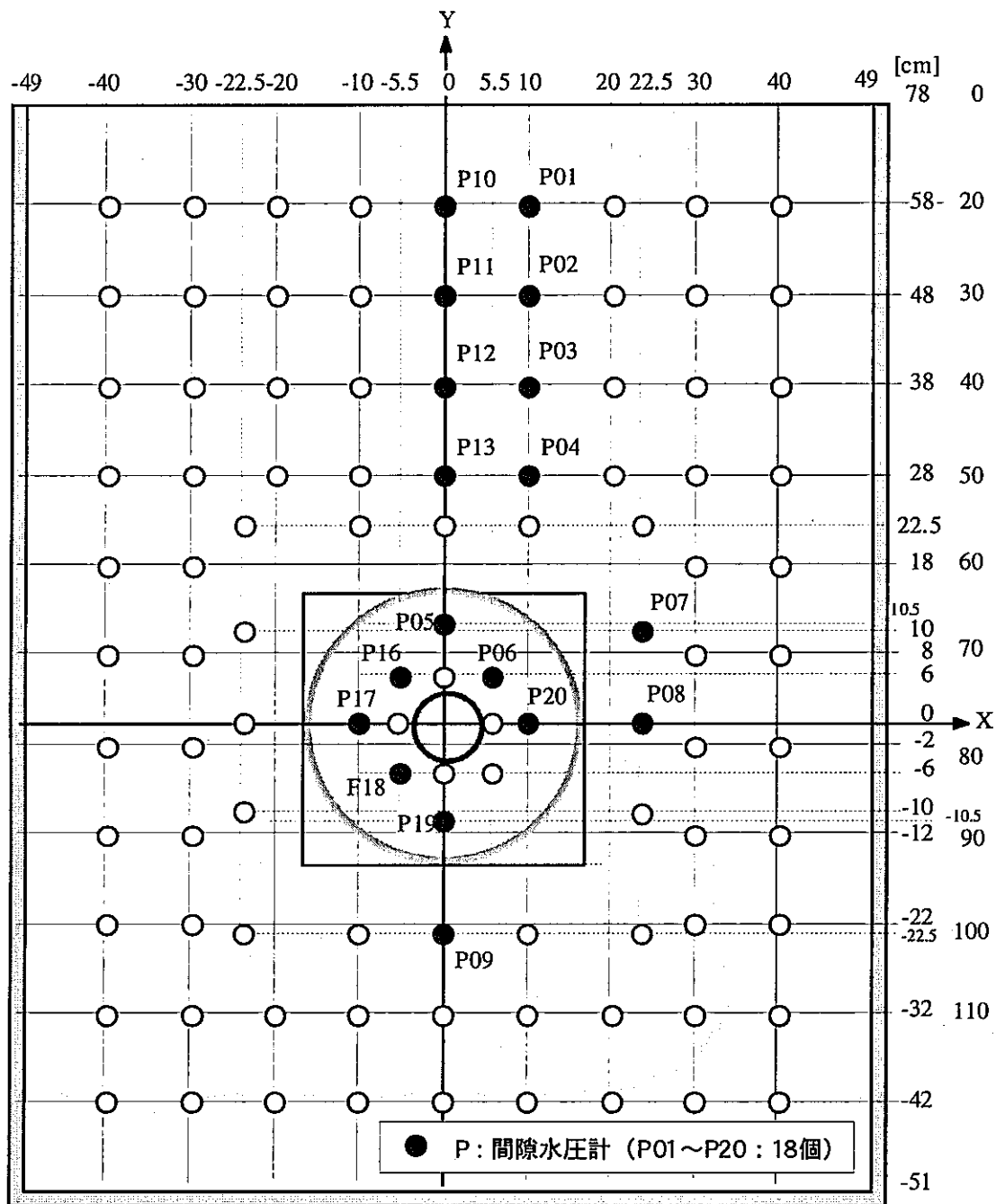


図4-28 センサー配置図 (CLUE試験水槽A: EX3-4)

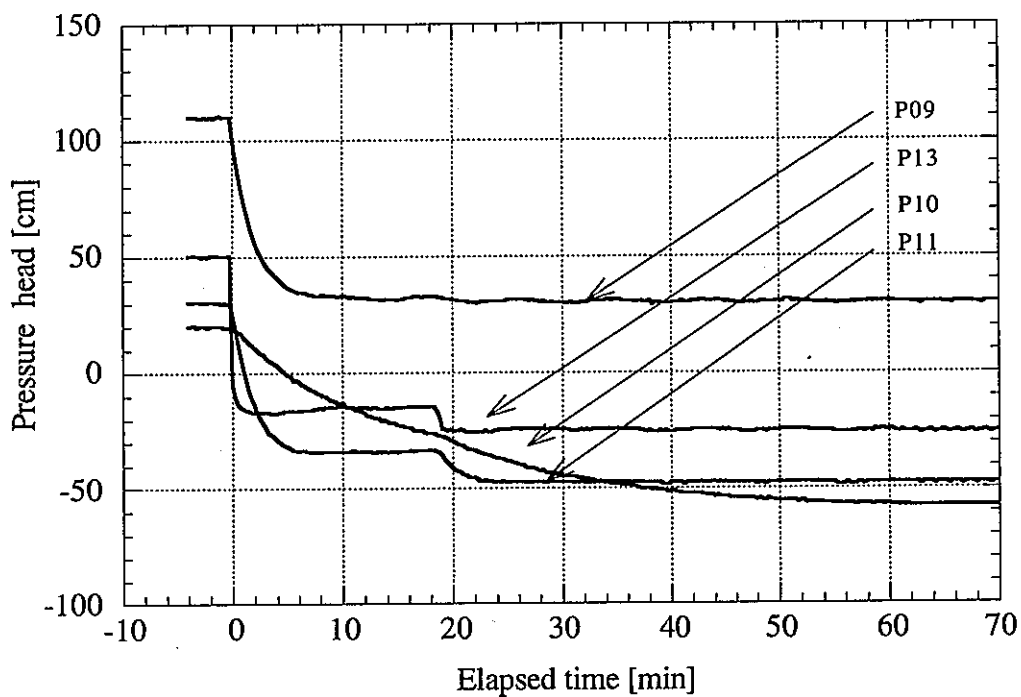


図4-29 間隙水圧の経時変化：外側0.1mmビーズ部分 (EX3-4)

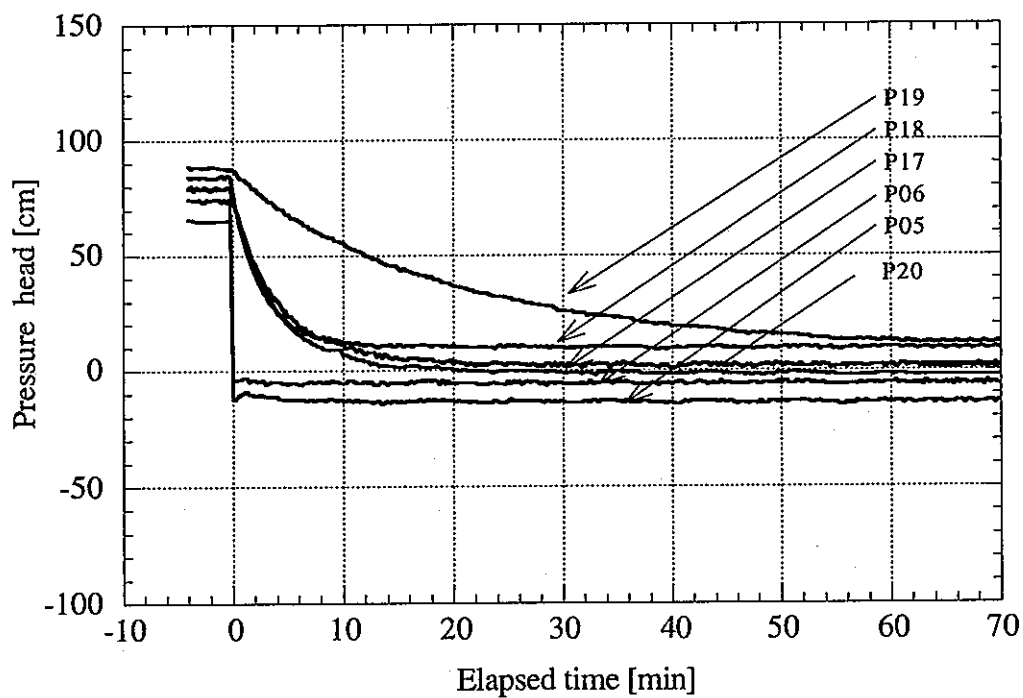


図4-30 間隙水圧の経時変化：内側0.8mmビーズ部分 (EX3-4)

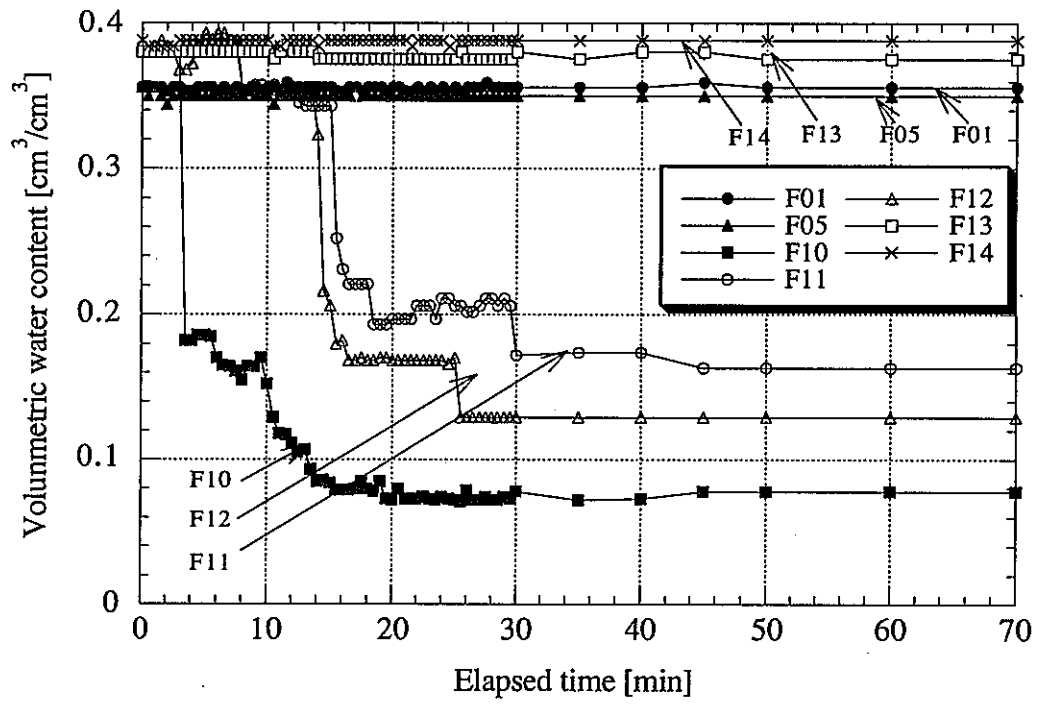


図4-31 体積含水率の経時変化 (EX3-2)

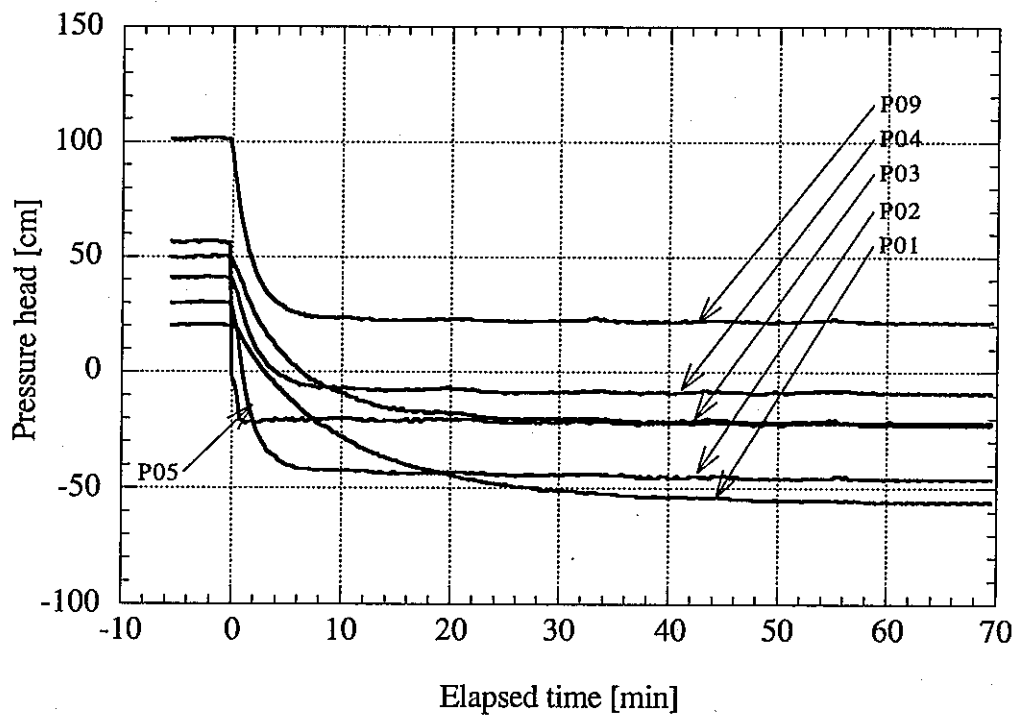


図4-32 間隙水圧の経時変化 (EX3-2)

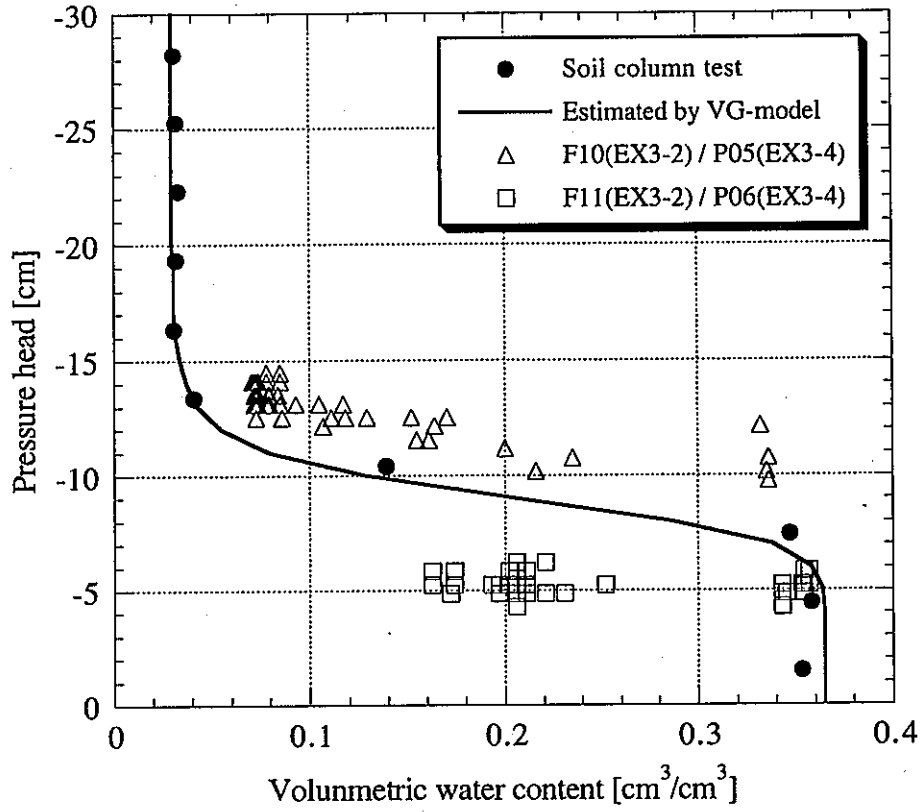


図4-33 水分特性曲線との比較
(0.8mm・同一測定点での値)

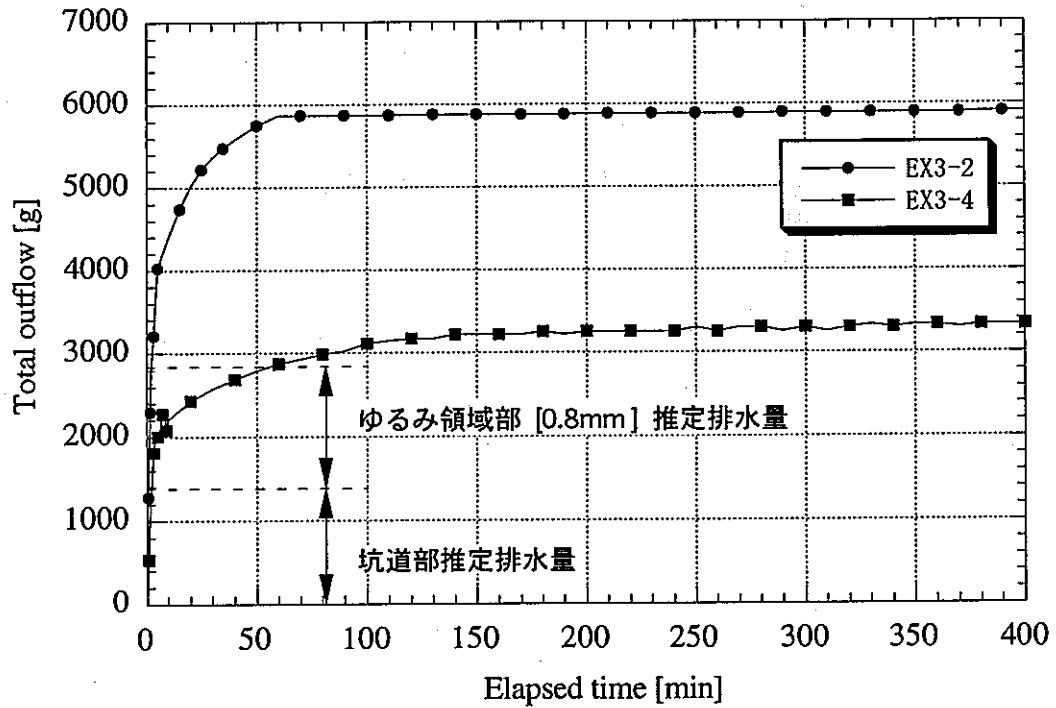


図4-34 排水量の経時変化

5. 不飽和浸透流解析

ここでは、第 4 章で記述した試験水槽 A を用いて行った不飽和水理試験結果と比較するために、多孔質媒体内の不飽和浸透流解析を実施した結果を示す。解析には汎用有限要素解析コード ABAQUS を使用した。本解析では、排水に伴う多孔質媒体の変形は考慮せずに非連成の浸透問題として解析を行った。また、比較対象として不透水条件試験の試験ケース 3 (EX3-2, EX3-4) の試験結果を用いた。

5.1 形状とモデル

解析モデルは、試験水槽 A の軸対称性を考慮し、試験体の半分を平面ひずみ要素でモデル化した。解析ジオメトリを図 5-1 に、解析用のメッシュを図 5-2 に示す。

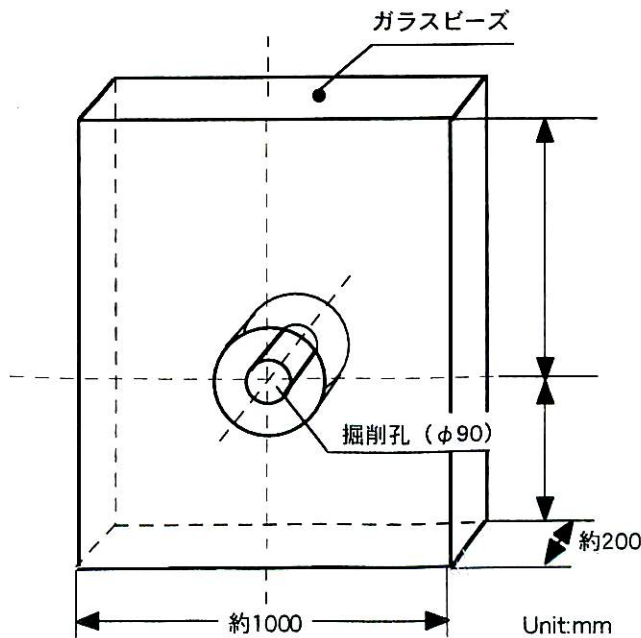


図 5-1 解析ジオメトリ

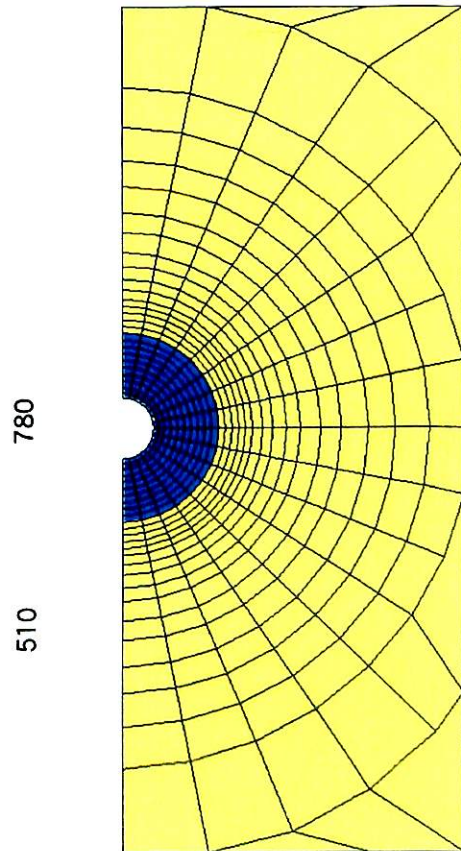


図 5-2 解析メッシュ図

5.2 飽和/不飽和浸透流解析の支配方程式

以下に不飽和浸透流解析に用いた地下水の連続式である支配方程式 (5.1) を示す。

$$\cdot \text{支配方程式 (質量保存則)} \quad \nabla \cdot (\rho_w q_w) + \frac{\partial (\rho_w \theta_w)}{\partial t} = 0 \quad (5.1)$$

ここで、 q_w : 地下水のダルシー流速ベクトル、 ρ_w : 地下水の密度、 θ_w : 体積含水率である。なお、地下水のダルシー流速ベクトルは、次式 (5.2, 5.3) で与えられる。

$$\cdot \text{構成方程式 (ダルシー則)} \quad q_w = -k_s k_r \nabla h \quad (5.2)$$

$$q_w = -k_s k_r \nabla (\psi + Z) \quad (5.3)$$

ここで、 h : 全水頭 ($h = \psi + Z$ (ψ : 圧力水頭、 Z : 高さ)、 k_s : 飽和透水係数、 k_r : 比透水係数である。

5.3 材料の物性

使用する材料の物性は第 3 章で示したものをを用いた。岩盤モデル部を模擬した部分に関しては、0.1mm 粒径のガラスビーズを対象とし、坑道部周辺のゆるみ領域部を模擬した部分に関しては、0.8mm 粒径のガラスビーズを対象として実施した。飽和透水係数に関しては、表 5-1 に示す。また、不飽和透水係数に関しては、実測の水分特性曲線を VG モデルにおける式 (3.6) により同定した結果から得られたパラメータ n を式 (3.8) より算定した不飽和透水係数を用いたケース (Case 1-1) と、瞬時水分計測法によって実測された不飽和透水係数の値を鑑み Case 1-1 における不飽和透水係数の値を一定率で低減させたケース (Case 1-2) の 2 通りについて解析を実施した。VG モデルのパラメータとして表 5-2 に示す。

解析上、各粒径に対する水分特性曲線を図 5-3 に示す。また、VG-model および瞬時水分計測法によって求められた不飽和透水係数合わせて図 5-4 に示す。

なお、間隙率はガラスビーズの粒径によらず一律に 0.380 とした。

表 5-1 ガラスビーズの飽和透水係数

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

表 5-2 VG-model のパラメータ

ガラスビーズ 粒径 : D [mm]	VG-Parameter		θ_s	θ_r
	α [1/cm]	n		
0.1	0.0161	15.00	0.380	0.040
0.8	0.1120	9.58	0.380	0.030

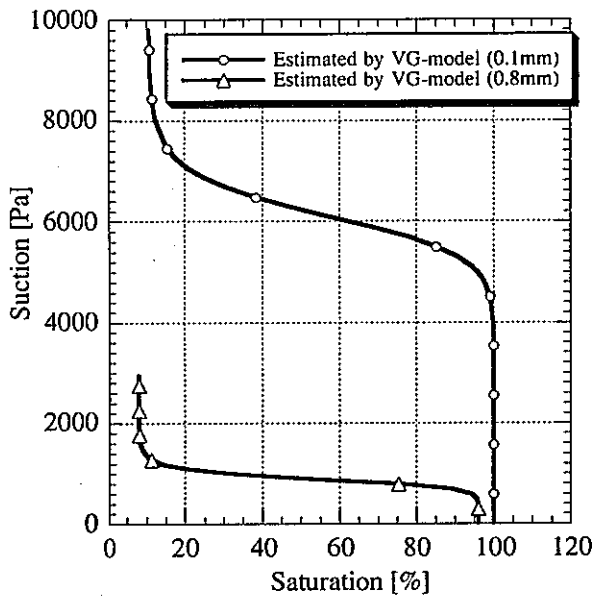


図 5-3 水分特性曲線

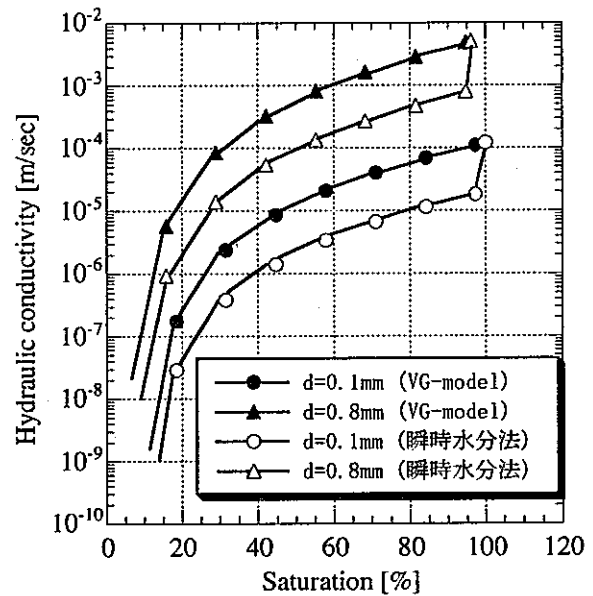


図 5-4 不飽和透水係数

5.4 解析条件

表 5-3 に解析条件を示す。初期条件は、完全飽和状態とした。境界条件は、側方境界を不透水境界条件とし、坑道部の内側境界条件は、全節点を自由排水条件とした。側方境界条件を次式 (5.4) に示す。

・側方境界条件
$$\frac{\partial \psi}{\partial Z} = 0 \tag{5.4}$$

なお、ABAQUS では、フォルヒハイマー則に基づき水の流れ解析が行われる。

フォルヒハイマー則は、流体の速度が大きくなるに従って透水率の低下（間隙流体の閉じこめ）が表せるものがあるが、流体の速度が小さく、速度依存性が無視できる場合にはダルシー則となる。本解析では、フォルヒハイマー則における速度係数を0としダルシー則として解析を行った。

また、多孔質媒体は、間隙流体内のサクシオン（ヘッド）が図 5-5 に示すように限界毛管上昇高さ以上となった時に不飽和となる。このことは、媒体内に毛管現象が存在することを示すものであり、不飽和浸透流解析に用いるサクシオンと体積含水率の関係は、水分特性曲線で定義することができる。不飽和浸透流解析に用いるサクシオンと体積含水率の関係、すなわち水分特性曲線は各粒径のガラスビーズにおいて第3章に示した通りである。

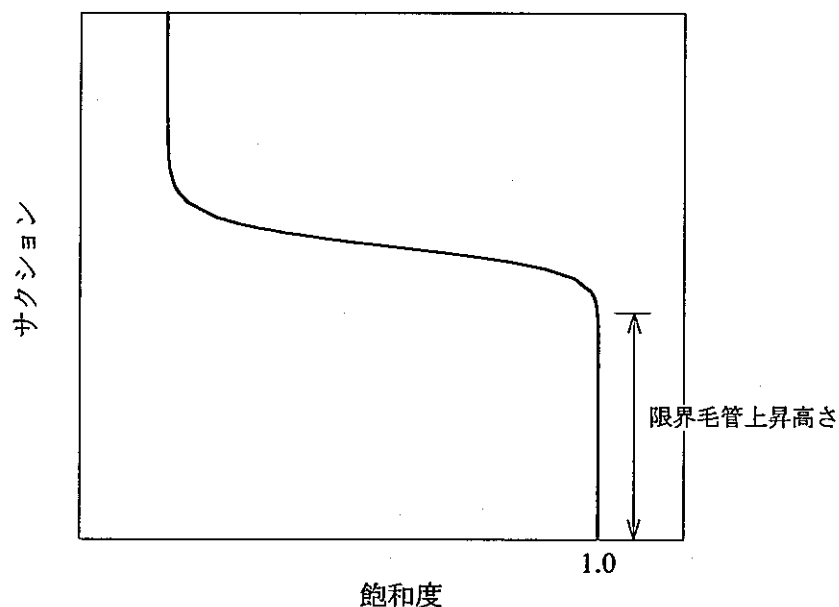


図 5-5 多孔質媒体の不飽和水分特性曲線

表 5-3 解析条件

解析ケース	初期条件	境界条件	対応試験ケース
Case 1-1	完全飽和	不透水境界	EX3-2
Case 1-2			EX3-4

5.5 解析結果

圧力水頭および体積含水率の出力ポイントを図 5-6 に示す。表 5-4 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, EX3-4) における計測点を示す。

Case 1-1 における圧力水頭の解析結果を図 5-7, 図 5-8 に体積含水率の解析結果を図 5-9, 図 5-10 にそれぞれ実験結果とあわせて示す。

図 5-7 には, 岩盤モデル部における圧力水頭の解析値と実験値の比較を示す。図から解析値は, 全ての出力ポイントにおいて坑道部開放直後から急激に圧力が低下し, 約 30 分後には定常状態に達していることがわかる。実験値と解析値を比べると, 実験値の方がやや圧力の低下がゆっくりではあるが, 定常となった後は, 両者はほぼ同じ値になっている。

次に, 図 5-8 にゆるみ領域部の圧力水頭の解析値と実験値の比較を示す。図から解析値は岩盤モデル部同様, 全ての出力ポイントにおいて坑道部開放直後から急激に圧力が低下し, 約 5 分後には定常状態に達していることがわかる。実験値と解析値を比べると, 坑道部横のゆるみ域内に位置する S16 においては実験値の方がやや圧力の低下がゆっくりではあるが, 約 20 分経過後の定常となった後では, 両者はほぼ同じ値になっている。上記の結果より, 解析値に比べ実験値の方が若干の圧力低下の遅れはあるものの, 解析により実験結果をほぼ再現することができた。

次に, 図 5-9 に岩盤モデル部における体積含水率の解析値と実験値との比較を示す。図から解析においては坑道部開放後, 解析モデル上部に位置する S01 では時間の経過とともに体積含水率が低下し, 約 40 分経過後には定常状態に達していることがわかる。図 5-5 より, この地点の圧力水頭の解析値は-70cm 程度となっており, その結果, 図 3-5 (1) に示す粒径 0.1mm のガラスビーズの不飽和水分特性曲線により, この地点は不飽和となっている。しかしながら, 実験では, 体積含水率の低下は計測されなかった。同位置における間隙水圧の実験値は約-65cm となっており, この地点の不飽和水分特性曲線が図 3-5 (1) に示すものであるならば, この地点では不飽和状態になっているはずである。これは, 試験で確認された間隙の差によるものと考えられる。その他の出力ポイントにおいては, 解析値は, 実験値とほぼ同じ値を示している。

次に, 図 5-10 にゆるみ領域部における体積含水率の解析値と実験値の比較を示す。図から解析値は坑道部開放直後から, 各出力ポイントともに急激に体積含

水率が低下し、約 10 分後には定常状態に達していることが分かる。実験値と解析値を比べると、坑道部上部に位置する S12, S13 においては実験値の方がやや体積含水率の低下がゆっくりではあるが、約 40 分経過後では、両者ともほぼ同じ値を示している。

次に、圧力水頭および体積含水率の比較図を Case1-1, Case1-2 の解析結果および実験結果とあわせて図 5-11, 図 5-12 に示す。さらに、図 5-13 に排水量の解析結果を実験結果とともに示す。また、図 5-14 に圧力水頭で表した Case1-1, Case1-2 の解析コンターを、図 5-15 に飽和度で表した Case1-1, Case1-2 の解析コンターをに示す。

図 5-11 に圧力水頭と実験値と解析値の比較図を示す。図から Case1-1, Case1-2 両者ともに坑道部開放後、ほぼ同じ値を示している。さらに、図 5-14 に示した解析コンターを見ても分かるように同様のことが言える。また、圧力水頭の解析結果の比較においては透水係数と飽和度の相関は低いことが分かった。

次に、図 5-12 体積含水率の実験値と解析値の比較図を示す。図から Case1-1 は坑道部開放後急激に圧力が低下し、定常状態に達してしまうが、Case1-1 に比べ、Case1-2 はややゆっくりと圧力が低下し、約 30 分後には定常状態に達していることが分かる。これは、第 3 章で示した両者の透水係数と飽和度の関係によるものであり、実験結果と両者を比較すると Case1-2 の方が Case1-1 に比べ、実験結果の経時変化に、より近いことが分かる。さらに、図 5-15 に示した解析コンターを見ても分かるように同様のことが言える。

次に、図 5-13 に排水量の解析結果を実験値とともに示す。Case 1-1 と Case 1-2 を比較すると、Case1-2 の方が透水係数と飽和度の関係から排水速度は小さくなっている。実験値と比較すると、排水速度には若干の差異があるものの、最終的な排水量のほぼ同じとなっている。

上記結果から、ガラスビーズの充填による間隙の影響を考慮すると不飽和浸透流解析による CLUE 試験（不透水条件試験）のモデル解析はほぼ再現できたと考えられる。

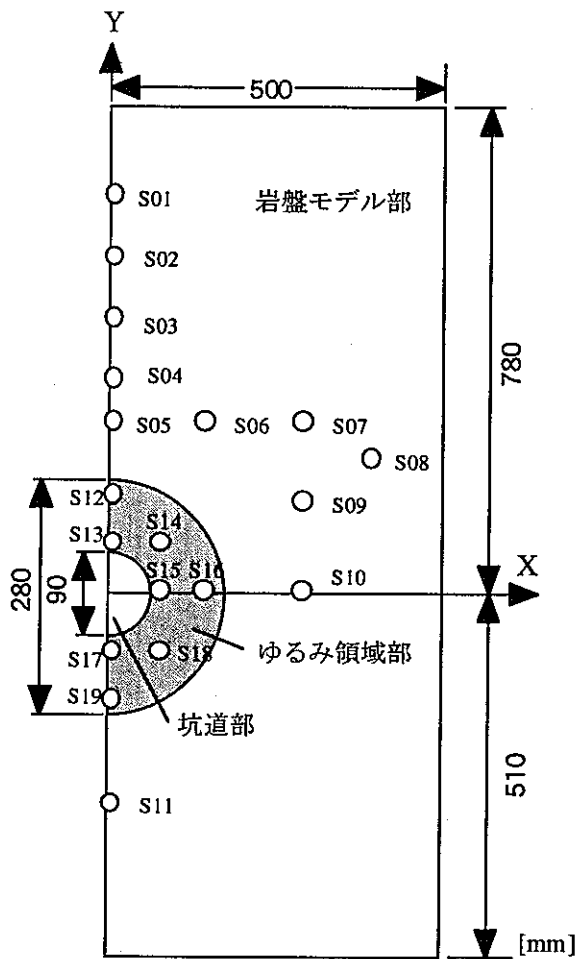


図 5-6 解析モデルおよび出力ポイント

表 5-4 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	P01, 10
S02	0.0	48.0	F02	P02, 11
S03	0.0	38.0	F03	P03, 12
S04	0.0	28.0	F04	P04, 13
S05	0.0	22.5	F05	—
S06	10.0	22.5	—	—
S07	22.5	22.5	F06	—
S08	40.0	18.0	F07	—
S09	22.5	10.0	F08	P07
S10	22.5	0.0	F09	P08
S11	0.0	-22.5	F18	P09
S12	0.0	10.5	F10	P05
S13	0.0	6.0	—	—
S14	5.5	6.0	F11, 12	P06, 16
S15	5.5	0.0	—	—
S16	10.0	0.0	F13, 14	P17, 20
S17	0.0	-6.0	—	—
S18	5.5	-6.0	F15, 16	P18
S19	0.0	-10.5	F17	P19

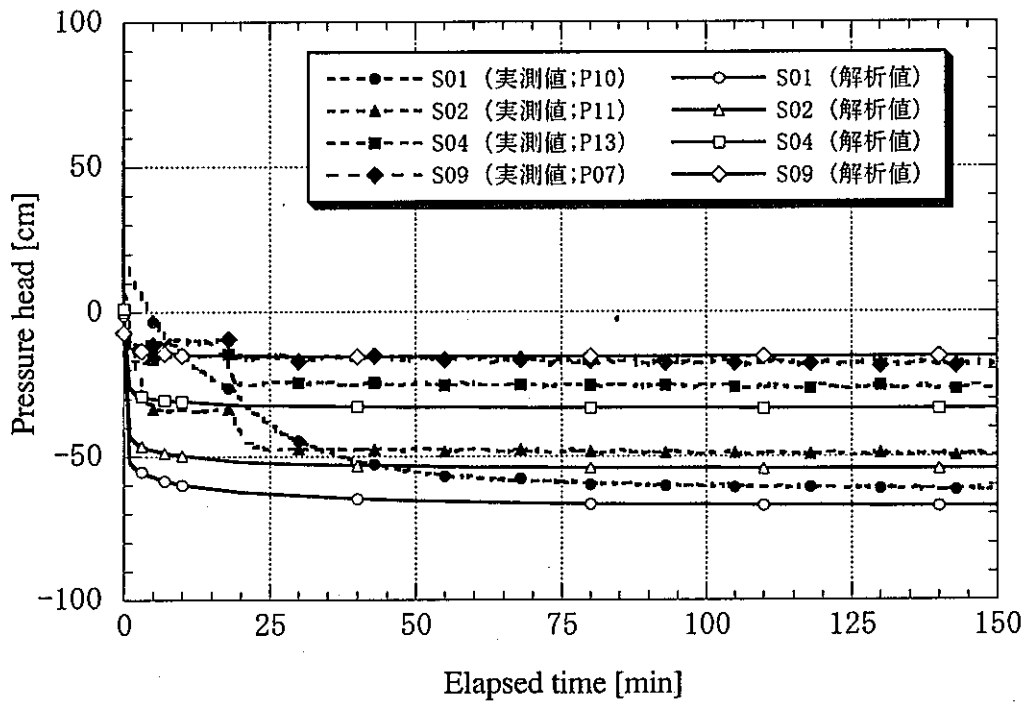


図 5-7 間隙水圧の経時変化 (Case 1-1:岩盤モデル部)

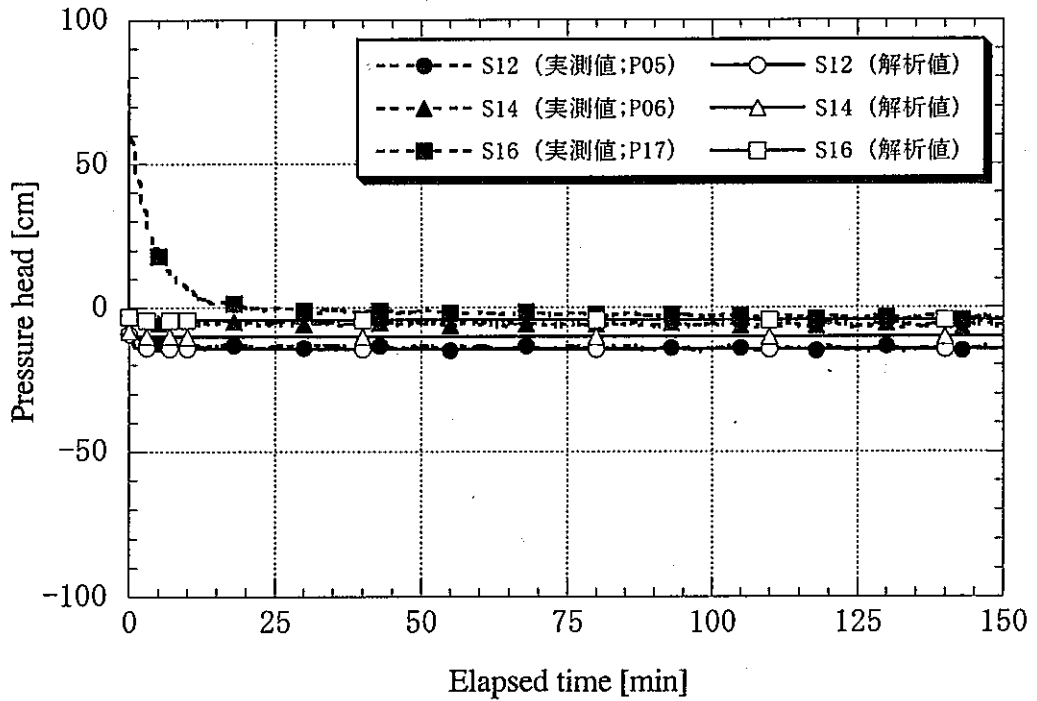


図 5-8 間隙水圧の経時変化 (Case 1-1:ゆるみ領域部)

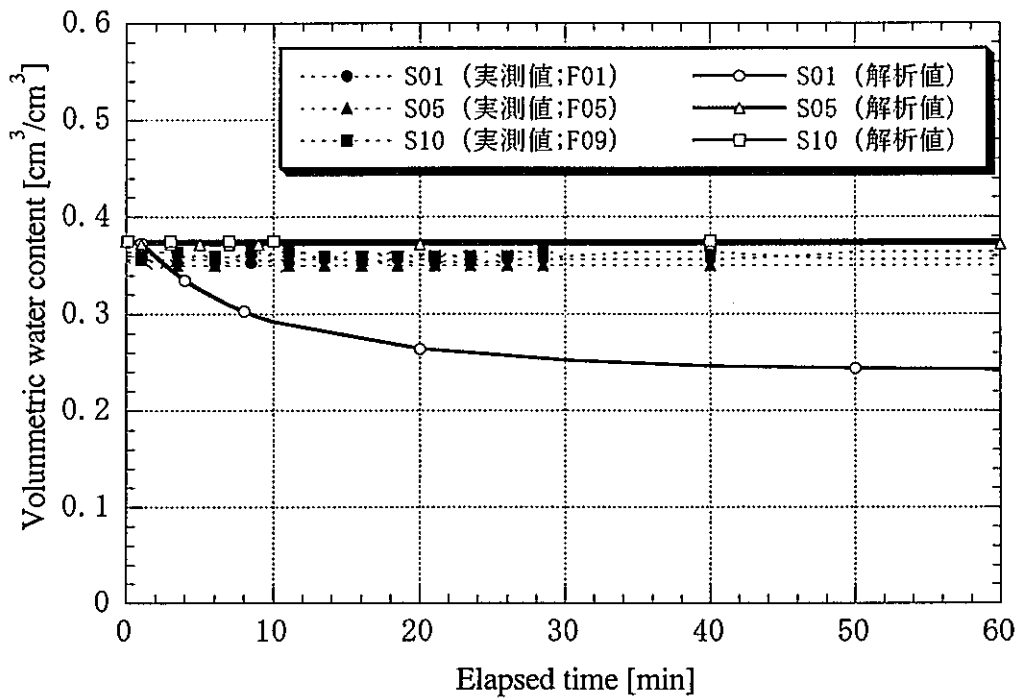


図 5-9 体積含水率の経時変化 (Case 1-1:岩盤モデル部)

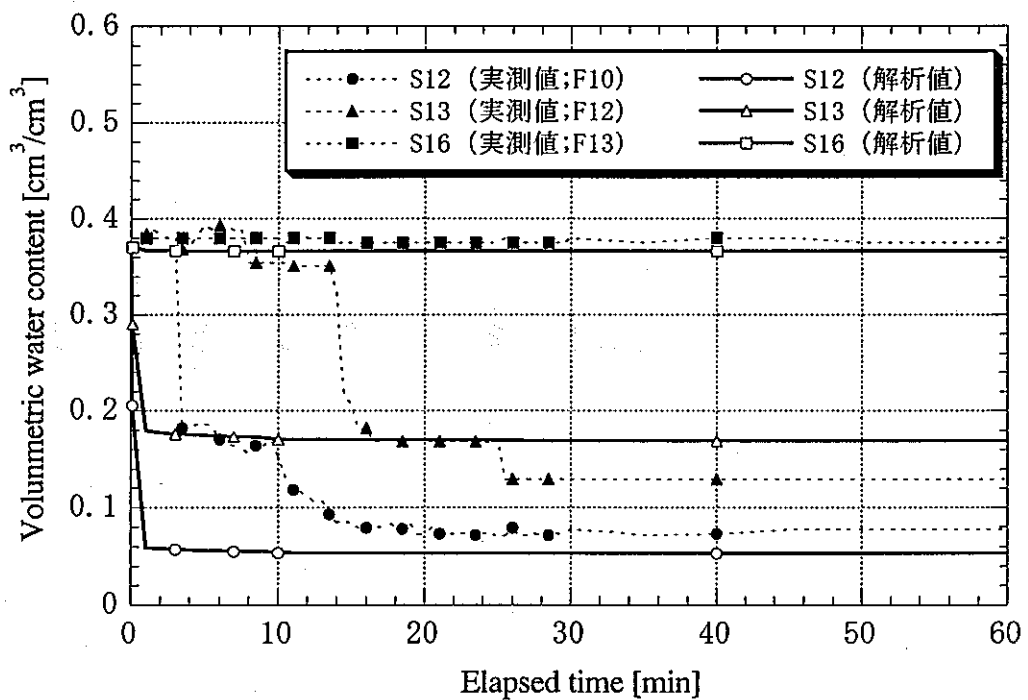


図 5-10 体積含水率の経時変化 (Case 1-1:ゆるみ領域部)

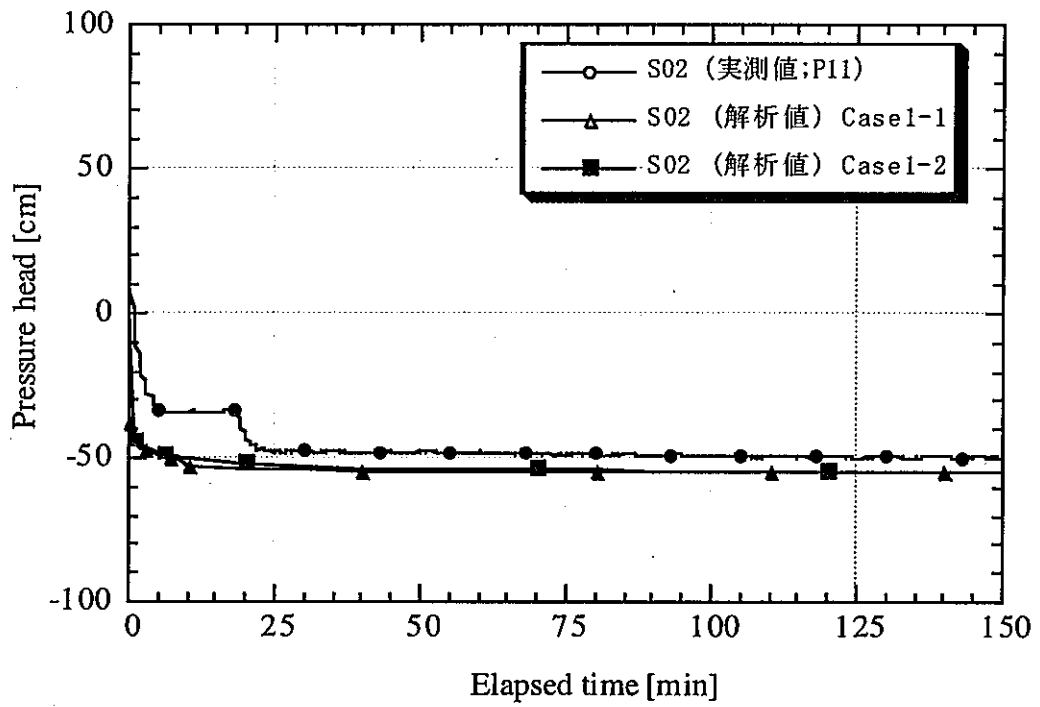


図 5-11 圧力水頭の実験値と解析値 (Case1-1, Case1-2) の比較

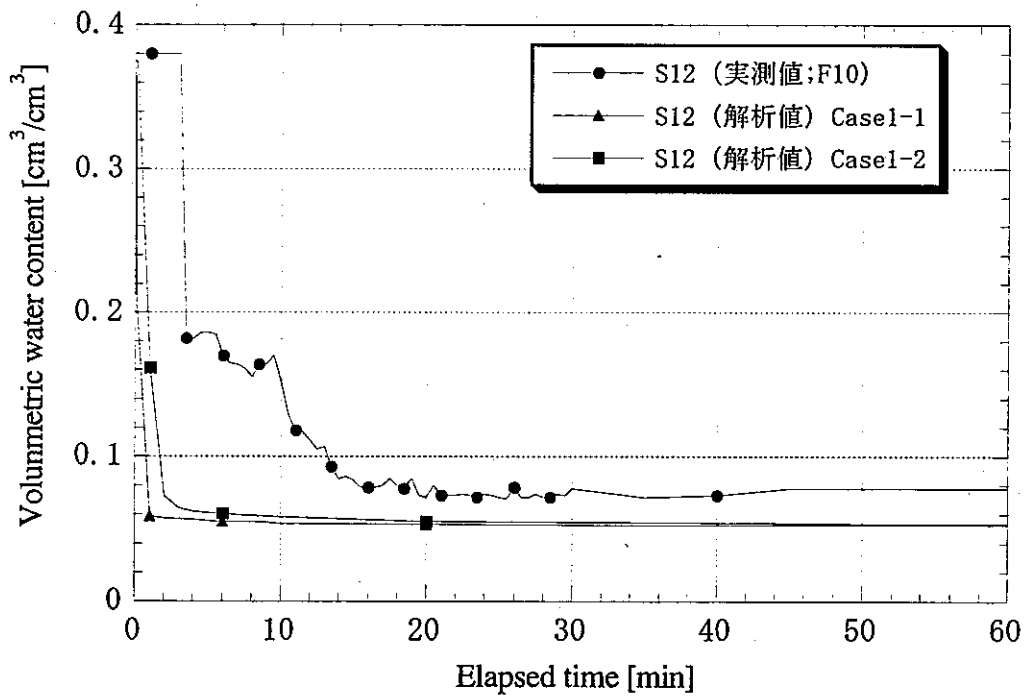


図 5-12 体積含水率の実験値と解析値 (Case1-1, Case1-2) の比較

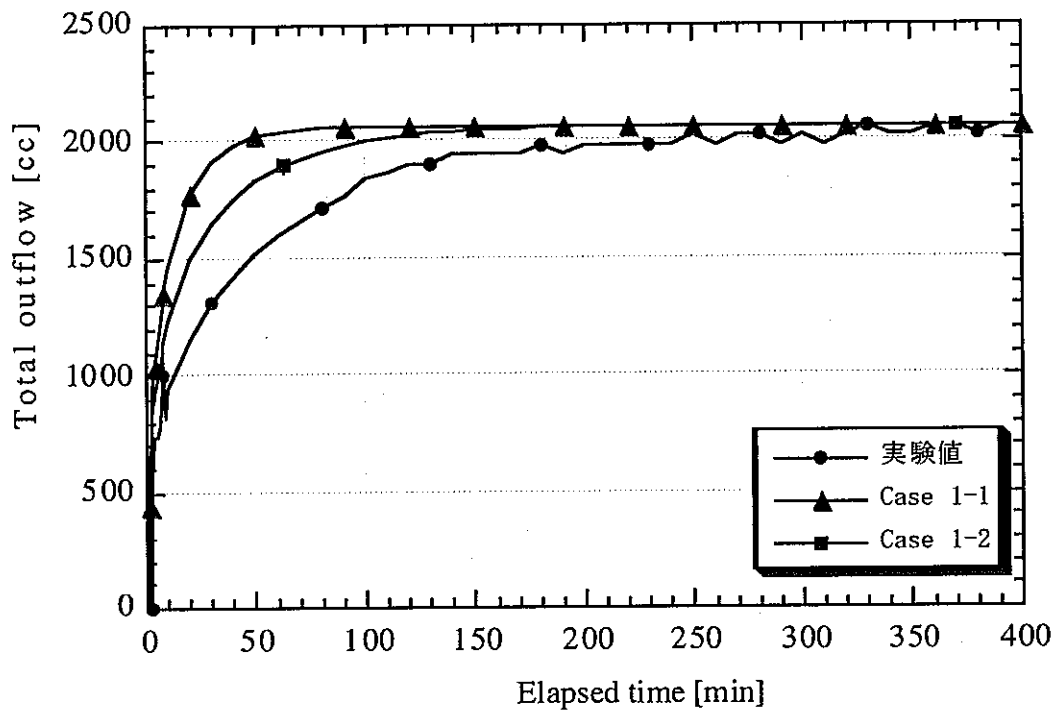


図 5-13 排水量の実験値と解析値 (Case1-1, Case1-2) の比較

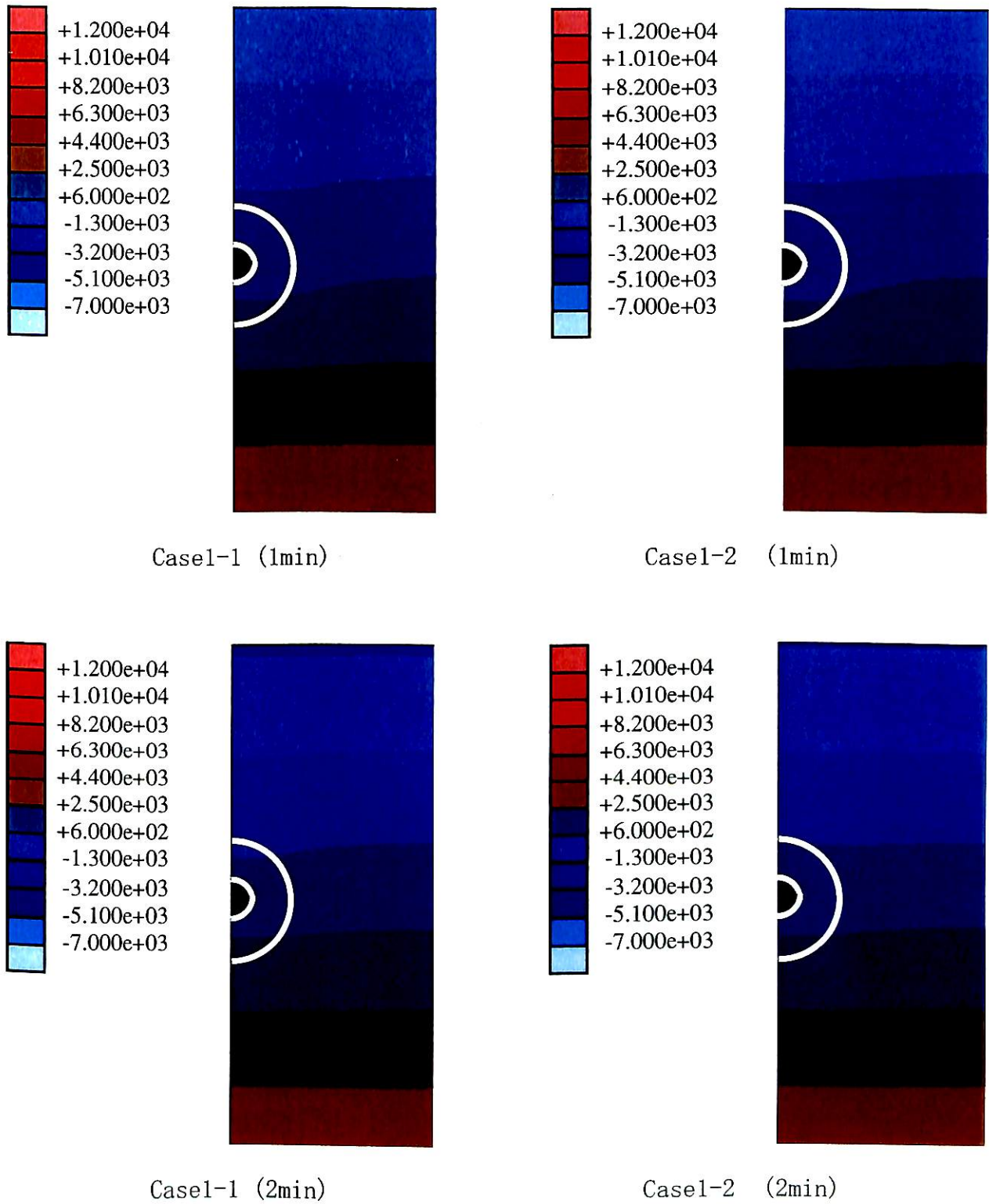
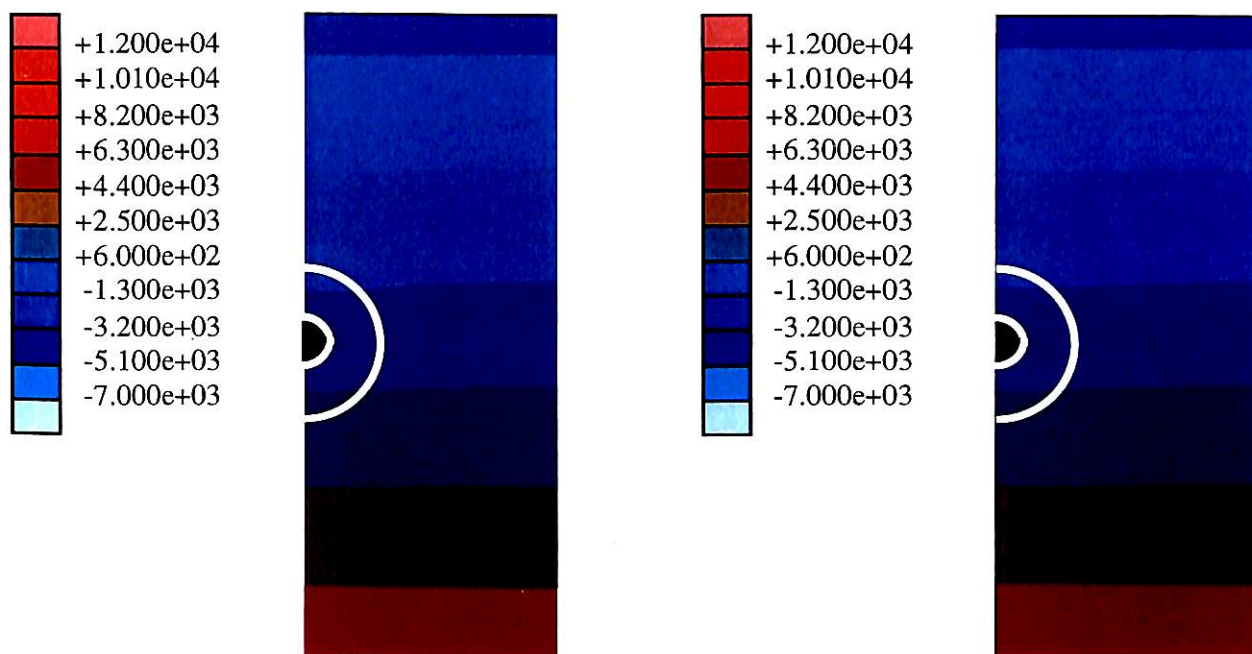
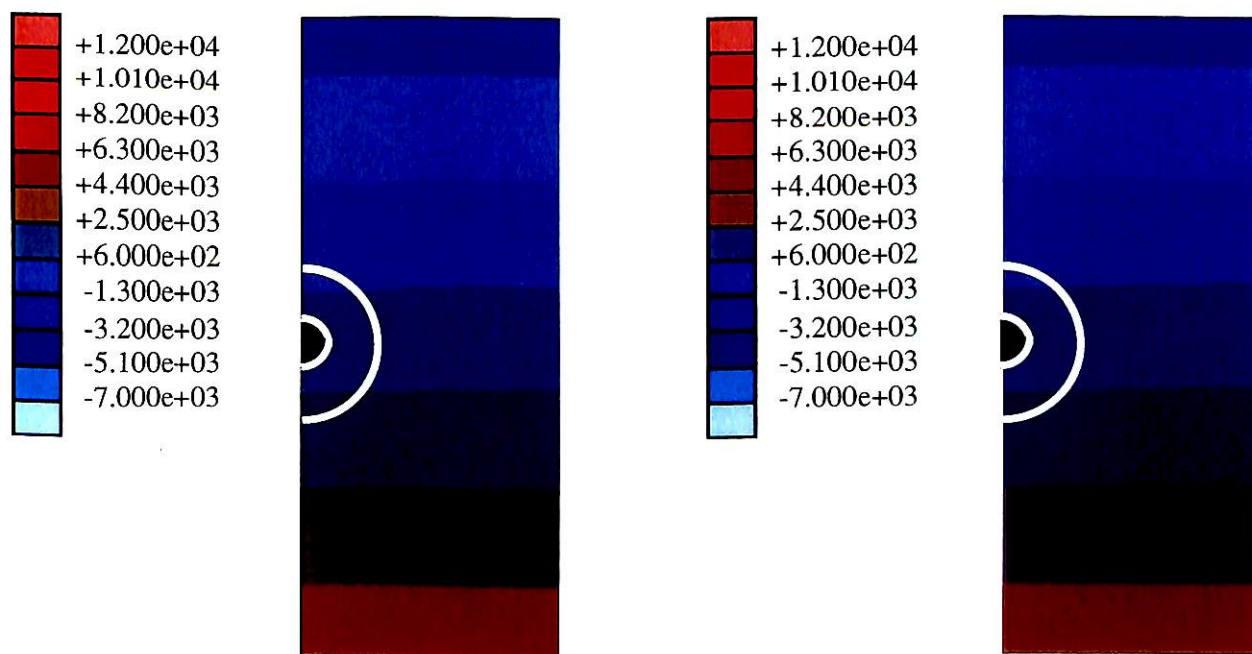


図 5-14 圧力水頭の解析コンター (1)



Case1-1 (5min)

Case1-2 (5min)



Case1-1 (10min)

Case1-2 (10min)

図 5-14 圧力水頭の解析コンター (2)

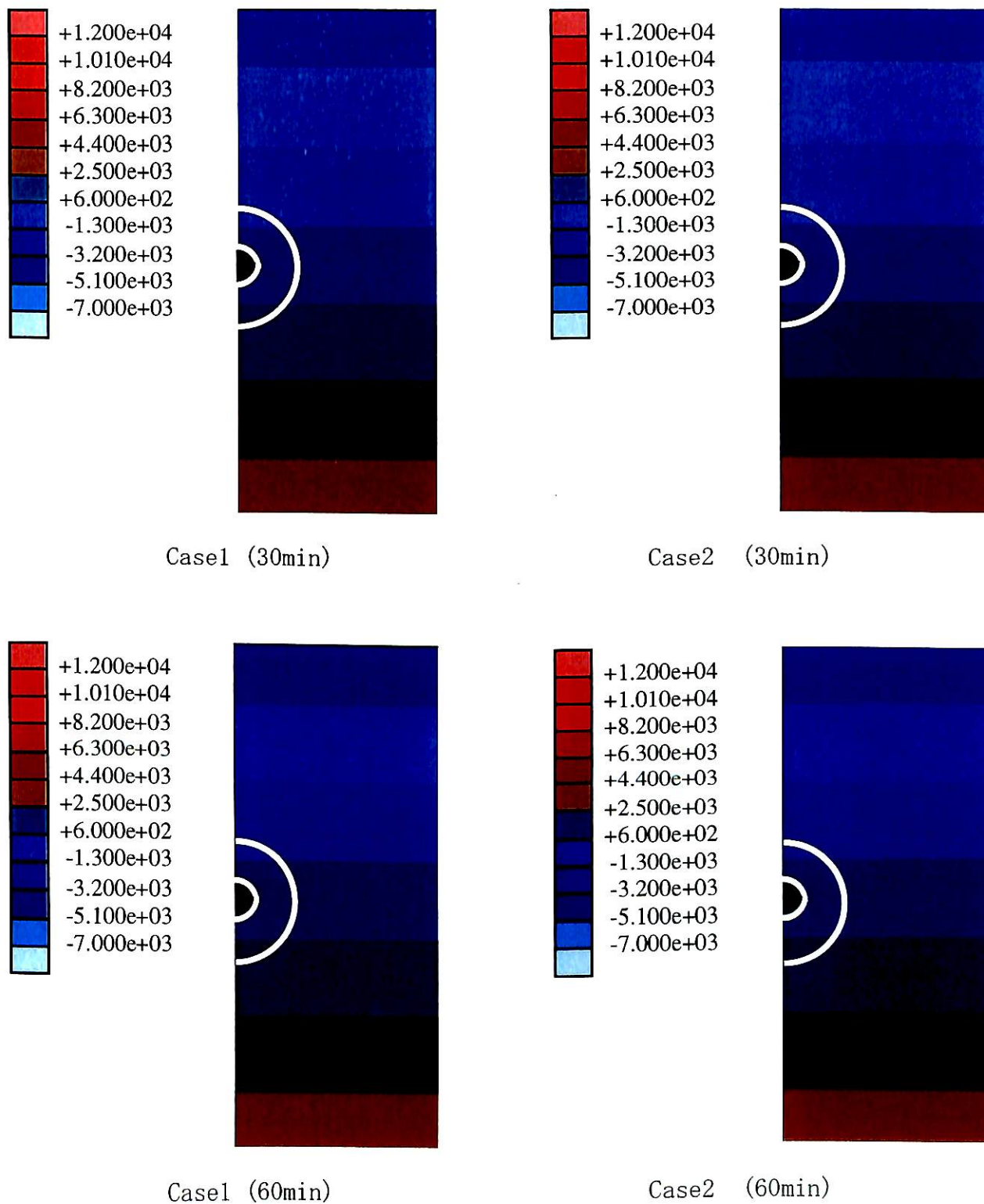
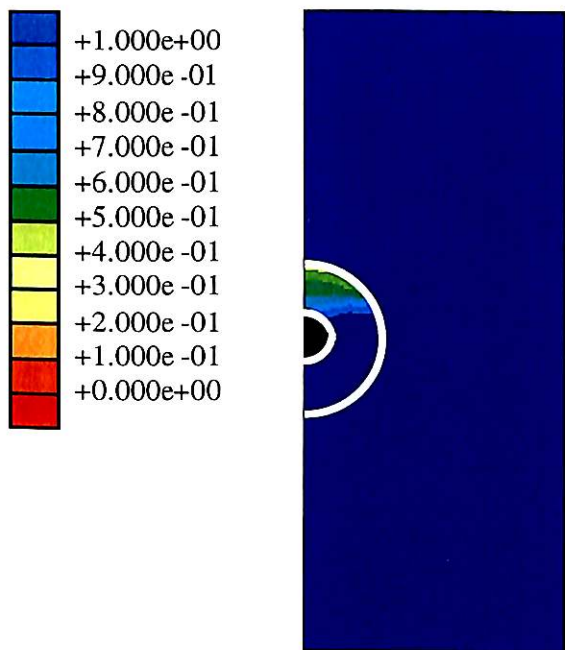
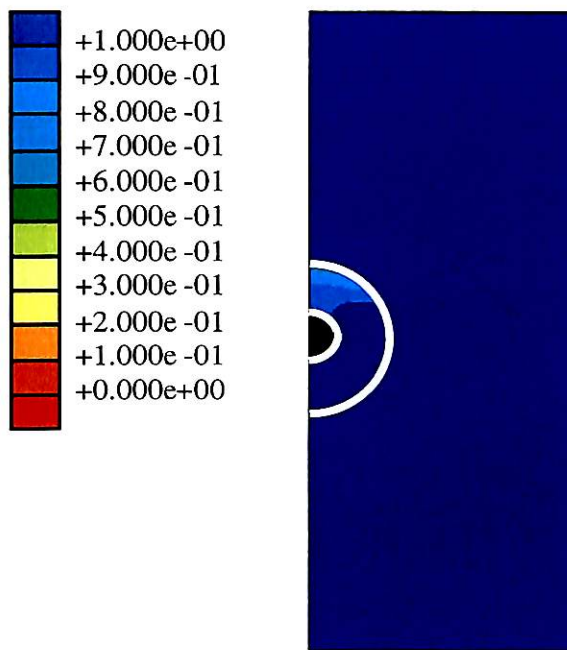


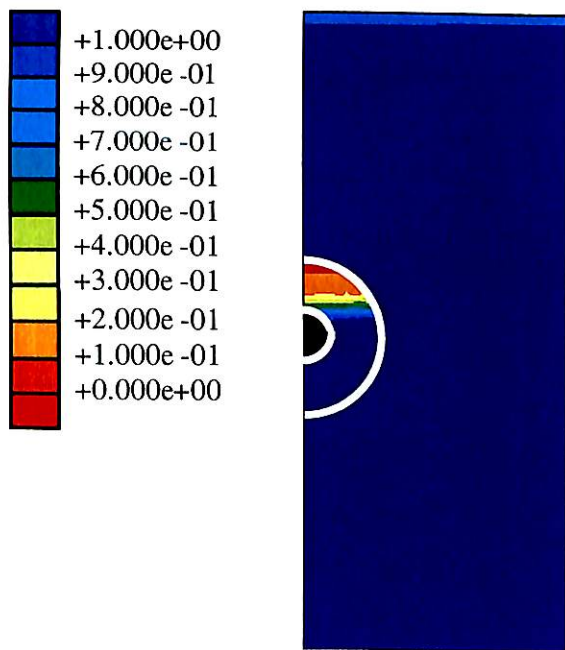
図 5-14 圧力水頭の解析コンター (3)



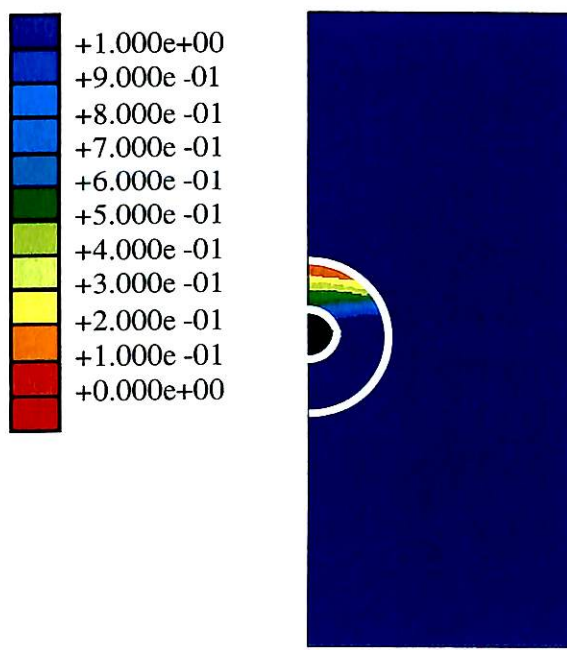
Case1-1 (1min)



Case1-2 (1min)



Case1-1 (2min)



Case1-2 (2min)

図 5-15 飽和度の解析コンター (1)

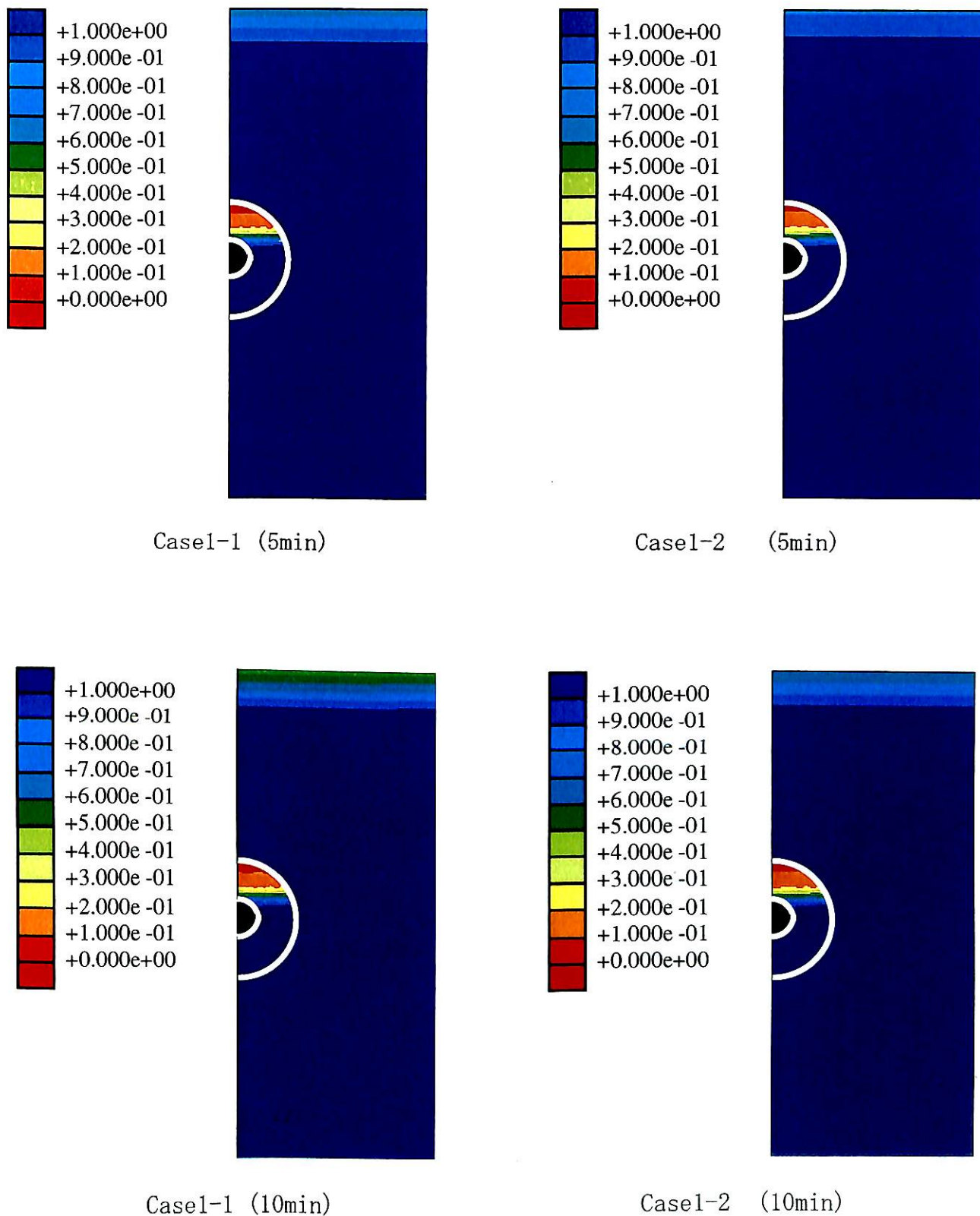


図 5-15 飽和度の解析コンター (2)

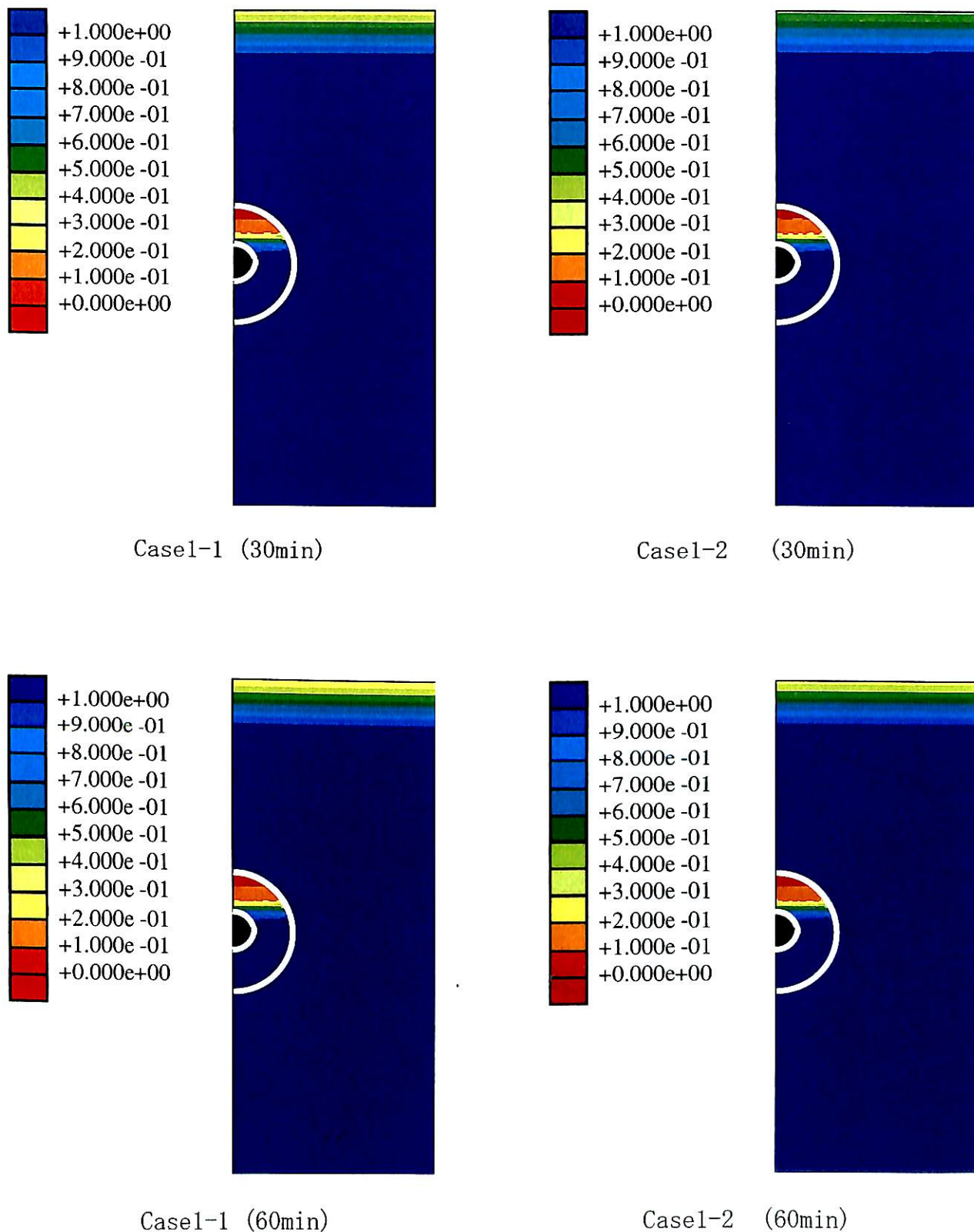


図 5-15 飽和度の解析コンター (3)

6. おわりに

本研究では、媒体（ガラスビーズ）の飽和・不飽和浸透特性の取得、FDR 水分量計測装置の適応性の検討、さらに、坑道掘削による不飽和領域形成に関する模擬試験を CLUE の試験水槽 A を用いて実施した。また、汎用性有限要素解析コード ABAQUS を用いて不飽和領域形成過程の解析評価を行った。

これらにより得られた知見を以下に列挙する。

- (1) FDR 水分量測定装置は、ガラスビーズの水分量測定装置として適用可能であることがわかった。ガラスビーズに対する校正曲線は、Topp が示した校正曲線と一致し、異なる粒径のガラスビーズに対しても単一の校正曲線を用いることが可能であることがわかった。
- (2) 試験試料の物性を取得するため、試験に供したガラスビーズに関する飽和・不飽和の水理物性試験を実施し、解析に必要な物性値のデータ取得を行なった。
- (3) 試験水槽 A を用いて不透水条件試験を行ない、水圧・飽和度の経時変化を間隙水圧計および FDR 水分量測定装置を用いて計測できることがわかった。
- (4) 不均質場における不飽和領域の発生状況を観察することができた。
- (5) 汎用有限要素解析コード ABAQUS を用いて不飽和浸透流解析を行った結果、試験水槽 A を用いた不飽和水理試験の水圧および体積含水率の分布および経時変化をほぼ再現できた。

【参考文献】

G. C. Topp, J. L. Davis, A. P. Annan : "Electromagnetic Determination of Soil Water Content", Measurements in Coaxial Transmission Lines, Water Reso. Res., Vol. 16, No. 3, pp. 574-582 (1980)

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)

Gaskin, G. J. and J. D. Miiker : "Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique", J. Agric. Eng. Res., No. 63, pp. 153-160 (1996)

中野政詩, 宮崎毅, 塩沢昌, 西村拓 : 土壌物理環境測定法, 東京大学出版会 (1995)

土質工学会 : 土質試験の方法と解説JSF T 121-1990 (1990)

M. Th. van : "A Closed-form Equation for Predicting the hydraulic Conductivity of Unasturated Soils, Soil Science", Vol. 44, pp. 892-898 (1980)

西垣誠, 小松満, 横田英嗣 : "不飽和土の透水・排水に関する試験方法", 地質と調査, 第2号, pp. 3-8 (1997)

冀北平, 三野徹, 赤江剛夫, 長堀金造 : "FDR による現地土壌水分の測定", 農業土木学会論文集, No. 182, pp. 31-38 (1996)

西垣誠, 小松満, 熊本創, 二宮功 : "誘電率測定法を用いた地盤塩水汚染度のモニタリング手法", 土と基礎, N047-10, pp. 17-20 (1999)

西垣誠, 小松満 : "複素誘電率計測法による接触式土壌水分計・濃度計の開発に関する研究", 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, III-A221 (1999)

西垣誠, 小松満, 熊本創 : "FDR による岩盤の不飽和浸透特性の計測法に関する研究", 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集, III-A257, pp. 514-515 (1999)

西垣誠, 小松満, 二宮功 : "複素誘電率測定法を用いた塩水汚染地盤の調査法に関する研究", 第34回地盤工学研究発表会平成11年度発表講演集2分冊の1, pp. 221-222 (1999)

P. S. ファコーン, G. F. ピンダー : 地下水解析の基礎と応用 (上) 基礎編 (1987)

理科年表 : 国立天分台編, 丸全株式会社出版 (1995)