

ニアフィールド構成材料の ガスの移行特性に関する研究（概要）

（核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書）

2002年 2月

東洋エンジニアリング株式会社

本資料の一部または全部を複写・複製・転写する場合は、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

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

ニアフィールド構成材料のガス移行特性に関する研究(概要)
(核燃料サイクル開発機構 業務委託報告書)

山本 幹彦*, 大場 敏行*, 森 竜馬*

要 旨

地層処分環境下においては廃棄物収納容器, 金属製廃棄物等が還元性雰囲気下で腐食し, 処分場内で H₂ ガスが発生する。さらに, 微生物によって有機廃棄物が分解されることにより CH₄, CO₂ 等のガスが発生すると予測されている。処分場内で発生したガスは, その蓄積と移行の過程で人工バリアシステム内の間隙圧力上昇, 核種に汚染された間隙水の早期排出等の現象を誘発し, 処分システムの長期安全性に影響を及ぼす可能性が指摘されている。

本研究では粘土系材料についてガス透過試験に対する問題点を整理し, 近年実施されたガス透過試験手法の調査を行うことにより, 粘土系材料のガス透過試験方法について検討し, 硬岩系岩盤条件では供試体/容器界面の止水材の適用が, 軟岩系岩盤条件下では適切な拘束圧力の負荷がバイパス経路形成対策として有効であること等を示し, 基本的試験条件を示した。

また, セメント系材料に対して毛管圧力の測定試験, 及びガス透過試験を行なった。その結果, ガス透過試験ではガスブレイクスルー時に排水速度が急激に増加し, その後排水速度が低下してガス排出速度が急激に増加する挙動が確認された。ガスのブレイクスルー圧は JIS モルタルについて約 4,000~8,000kPa であり, セメントペーストについては 500~800 kPa であった。乾燥状態でのガスの透過係数は JIS モルタルについて 10^{-18}m^2 , セメントペーストについては 10^{-16}m^2 であり, 飽和試料の水の透過係数は JIS モルタルについて 10^{-20}m^2 , セメントペーストについては 10^{-17}m^2 であった。

さらに, 得られたガス透過試験結果に対して2相流パラメータを設定し, 連続媒体に対する2相流モデルを用いたシミュレーションを実施することにより, 連続媒体に対する2相流モデルのセメント系材料に対する適用性が高いことを確認した。

本報告書は, 東洋エンジニアリング株式会社が核燃料サイクル開発機構との委託研究契約により実施した研究成果に関するものである。

機構担当部課室: 東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部
処分材料研究グループ

* : 東洋エンジニアリング株式会社

Gas Migration Phenomena in Potential Components of Near-Field Barrier System
(Summary Report)

Mikihiko Yamamoto*, Toshiyuki Oba* and Ryoma Mori*

Abstract

Gas production resulting from mechanisms which includes metal corrosion and microbial degradation in a geological repository are able to lead an overpressurisation and enhanced release of radionuclides.

An improved method of gas injection test of clay materials regarding test conditions and methods of gas flow rate measurement were examined and some key issues are recommended.

Gas injection experiments of saturated mortar and cement paste and quantitative evaluation of gas and water flow properties in these materials were carried out. Water permeability of saturated mortar and cement paste are 10^{-20} m² and 10^{-17} m² respectively, although their gas permeability of dried sample were 10^{-18} m² and 10^{-16} m² respectively. Under the condition of constant injection pressure and axial flow, gas breakthrough phenomenon at which sharp increase of gas outflow rate after rapid rise in outflow rate of water was observed. Then the injection pressure rose a peak value range from 0.5 MPa to 8.2 MPa higher than backpressure. Afterward, outflow rate of gas increased to a steady state value in the permeability range 10^{-20} - 10^{-19} m². Outflow of water continued after gas breakthrough phenomenon.

A conventional continuum two-phase flow model was applied for simulation of the gas injection experiments. The simulation results of gas injection test were compared with measured test's data. The results of the simulation were in reasonably agreement with obtained experimental data.

This work was performed by Toyo Engineering Corporation under contract with Japan Nuclear Cycle Development Institute.

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

* Toyo Engineering Corporation

目 次

| | |
|----------------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 粘土系材料のガス移行試験手法の調査・検討及び確立 | 2 |
| 2.1 粘土系材料のガス移行試験手法に関する調査 | 2 |
| 2.1.1 調査対象 | 2 |
| 2.1.2 まとめ | 2 |
| 2.2 土質試験法に関する調査 | 4 |
| 2.3 粘土系材料のガス移行試験手法の検討・確立 | 4 |
| 3. 粘土系以外のニアフィールド構成材料のガス移行特性データ取得 | 5 |
| 3.1 試験条件の検討 | 5 |
| 3.1.1 試料調整パラメータ | 6 |
| 3.1.2 試験条件パラメータ | 6 |
| 3.2 試験操作 | 6 |
| 3.3 試験結果 | 7 |
| 3.3.1 モルタル | 7 |
| 3.3.2 セメントペースト | 12 |
| 3.4 毛管圧力の測定評価 | 18 |
| 3.4.1 試験方法 | 18 |
| 3.4.2 試験結果 | 18 |
| 4. 気液 2 相流モデルでの評価の適用性検討 | 21 |
| 4.1 移行モデル | 21 |
| 4.2 ガス透過試験のシミュレーション | 22 |
| 4.2.1 モルタルのガス透過試験 | 22 |
| 4.2.2 シミュレーション結果 | 24 |
| 4.2.3 セメントペーストのガス透過試験 | 26 |
| 4.2.4 シミュレーション結果 | 28 |
| 4.3 結論 | 30 |
| 4.3.1 2 相流モデルの適用性 | 30 |

| | |
|----------------------------|----------|
| 4.3.2 ガス移行特性データベースの整理..... | 30 |
| 4.3.3 今後の課題..... | 30 |
| 5. おわりに..... | 31 |
| 付 録..... | 付-1 (33) |

目 次

| | | |
|--------|--|----|
| 図 3-1 | 試験手順 | 7 |
| 図 3-2 | 飽和過程後期における注入圧力の経時変化(モルタル試料 3) | 8 |
| 図 3-3 | 飽和試料の透過係数の評価(モルタル試料 3) | 8 |
| 図 3-4 | ガス押し過程における注入圧力の経時変化(モルタル試料 3) | 9 |
| 図 3-5 | ガス押し過程におけるガス排出速度の経時変化(モルタル試料 3) | 10 |
| 図 3-6 | ガス押し過程における累積排出水量の経時変化(モルタル試料 3) | 10 |
| 図 3-7 | Klinkenberg 透過係数の評価 (モルタル試料 3) | 11 |
| 図 3-8 | 飽和過程後期における注入圧力の経時変化(セメント ^o -ス試験料 1) | 13 |
| 図 3-9 | 飽和試料の透過係数の評価(セメント ^o -ス試験料 1) | 13 |
| 図 3-10 | ガス押し過程における注入圧力の経時変化(セメント ^o -ス試験料 1) | 14 |
| 図 3-11 | ガス押し過程におけるガス排出速度の経時変化(セメント ^o -ス試験料 1) | 15 |
| 図 3-12 | ガス押し過程における累積排出水量の経時変化(セメント ^o -ス試験料 1) | 15 |
| 図 3-13 | Klinkenberg 透過係数の評価 (セメント ^o -ス試験料 1) | 16 |
| 図 3-14 | JIS モルタルの毛管圧力と飽和度との関係 (遠心法) | 19 |
| 図 3-15 | セメントペーストの毛管圧力と飽和度との関係 (遠心法) | 20 |
| 図 4-1 | 毛管圧と間隙水飽和度の関係 (モルタル試料) | 22 |
| 図 4-2 | 相対透過係数の変化 (モルタル試料 3) | 23 |
| 図 4-3 | 解析に用いた幾何モデル (モルタル試料 5) | 24 |
| 図 4-4 | ガス排出速度シミュレーション結果 (モルタル試料 3) | 25 |
| 図 4-5 | 累積間隙水排出量シミュレーション結果(モルタル試料 3) | 25 |
| 図 4-6 | 毛管圧と間隙水飽和度の関係 (セメントペースト試料) | 26 |
| 図 4-7 | 相対透過係数の変化 (セメント ^o -ス試験料 1) | 27 |
| 図 4-8 | 解析に用いた幾何モデル (セメント ^o -ス試験料 1) | 28 |
| 図 4-9 | ガス排出速度シミュレーション結果 (セメント ^o -ス試験料 1) | 29 |
| 図 4-10 | 累積間隙水排出量シミュレーション結果(セメント ^o -ス試験料 1) | 29 |

表 目 次

| | | |
|-------|----------------------------|----|
| 表 2-1 | 粘土系材料のガス移行試験手法及び試験条件 | 3 |
| 表 2-2 | 粘土系材料に対するガス透過試験条件 | 5 |
| 表 3-1 | セメント系供試体材料の物理的強度 | 6 |
| 表 3-2 | 基本的試験条件 | 6 |
| 表 3-3 | モルタル試料 3 の試験結果 | 12 |
| 表 3-4 | セメントペースト試料 1 の試験結果 | 17 |
| 表 3-5 | 各供試体の基本物性及び透過特性 | 17 |
| 表 3-6 | 測定方法による特性値の比較 | 18 |
| 表 4-1 | 毛管圧力のパラメータ (モルタル試料) | 22 |
| 表 4-2 | 相対透過係数パラメータ (モルタル試料 3) | 23 |
| 表 4-3 | 毛管圧力のパラメータ (セメントペースト試料) | 26 |
| 表 4-4 | 相対透過係数パラメータ (セメントペースト試料 1) | 27 |

1. はじめに

我が国の地層処分対策は、高レベル放射性廃棄物に対して昭和 55 年に原子力委員会放射性廃棄物対策専門部会において基本的な考え方が示され、平成 5 年 5 月に高レベル事業推進準備会が設立された後、平成 12 年 6 月に「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」が公布されたのを受けて、同年 10 月には通商産業大臣（当時）の認可を得て「原子力発電環境整備機構」が設立されている。また、処分技術については平成 11 年に「地層処分研究開発第 2 次取りまとめ」が報告され、我が国における地層処分の技術的信頼性が示されている。TRU 核種を含む放射性廃棄物に対しては、原子力委員会において昭和 63 年 10 月より放射性廃棄物対策専門部会の下に TRU 廃棄物分科会が設置され、平成 3 年 7 月にとりまとめられた「TRU 核種を含む放射性廃棄物の処分について」において TRU 廃棄物の区分目安値（全核種濃度：約 1GBq/t）を示すとともに、処分方法の見通しを 1990 年代末までに得ることを勧告した。これに従い平成 12 年 3 月に核燃料サイクル開発機構、電力業界の協力協定の下「TRU 廃棄物処分概念検討書」がとりまとめられ、原子力委員会原子力バックエンド専門部会における審議の基礎資料として供されている。

処分場内で金属腐食等によって発生するガスの影響は、EU 諸国による国際研究プロジェクト、及び米国における WIPP、Yucca Mt. に対する性能評価研究を中心に研究開発が実施されてきているが、研究開始が 1980 年代後半と歴史が浅いことから、OECD/NEA の見解でも、各バリア構成材料とも評価モデルの確立、十分なデータの取得には至っていないのが現状である。

本研究は地層処分研究開発第 2 次取りまとめ、及び TRU 廃棄物処分概念検討書の成果を踏まえ、処分を具体化する上で不可欠となる長期安全評価手法の確立に資するため、粘土系材料に対するガス透過試験方法の確立とともに、飽和状態のセメント系材料に対するガス透過特性の取得、評価を目的として実施した。粘土系材料に対するガス透過試験方法については、土質試験技術に対する調査を基に各国の既往の研究例等を参考として、望ましい供試体処理方法、試験条件について検討した。また、JIS モルタル及びセメントペーストについて 3 軸拘束条件下でガス透過試験を実施し、得られたガス及び水の排出フラックスに対して気液 2 相流モデルを用いてシミュレーションを行うことにより、2 相流モデルのセメント系材料に対する適用性の確認を行った。

2. 粘土系材料のガス移行試験手法の調査・検討及び確立

緩衝材の候補材料である粘土系材料は、処分場内のガスの移行に決定的な影響を及ぼすが、可塑性あるいは膨潤性を有するため、試験装置内の圧力、応力状態、寸法等供試体状態の制御、把握が困難であり、信頼性の高いデータは希少である。本章では近年実施された粘土系材料のガス透過試験について調査を行ない、今後適用すべき試験手法、試験条件について検討し、粘土系材料に対するガス移行試験手法・条件を提案、確立した。

2.1 粘土系材料のガス移行試験手法に関する調査

2.1.1 調査対象

粘土系材料中のガス透過試験に関する試験研究動向については、最近の5年間における主要な粘土系材料中のガス透過試験の実施状況より、英国を初めとする諸外国に対する最近数年間の試験手法・条件について調査を行なった。調査対象とする材料は、ベントナイト、ベントナイト/珪砂混合材、天然粘土、あるいは泥岩、頁岩等の可塑性、膨潤性を有する材料とした。

調査項目として考慮した材料緒言、透過特性、パラメータを含め、調査対象範囲を以下に示す。

- ・対象試料 : 名称, 鉱物組成, 密度, 間隙率
- ・試料調整条件 : 圧縮(密度調整)方法, 表面処理方法, 試料飽和手順
- ・試験装置 : 機器構成, 試験容器構造, 流量/流速測定手法
- ・応力条件 : 拘束圧力/背圧負荷の有無等
- ・ガス移行方向 : 試料軸方向, 試料径方向
- ・制御条件 : 流体注入圧力昇圧速度, 応力, 温度等
- ・測定項目 : ガス注入/排出流量, 排出水量, 応力等
- ・その他 : 不具合, 問題点等

2.1.2 まとめ

上記項目に対する調査結果をまとめて表 2-1に示した。

表 2-1 粘土系材料のガス移行試験手法及び試験条件

| 国 | 実施機関 | 試料 | | 試料調整 | | | 試験装置 | 試験条件 | | | | 備考 | |
|-------------------------|----------------|-----------------|--|----------------------------------|---------------------------|---------------|--|--------------------------------------|-----------------|---|---|---|--|
| | | 材料 | 密度 kg/m ³ | 密度調整 | 表面処理 | 飽和 | | 応力条件 MPa | | 流れの 方向 | 昇圧条件 | | 温度 |
| | | | | | | | | 拘束圧 | 背圧 | | | | |
| 4, 7, 8) イギリス | 地質調査所 (BGS) | MX80 100% | 1,617 | モルト + 一軸圧縮機 | | 両面注水(1.01MPa) | 水 + ガス: 背圧ポンプ動作量 | 等方圧 | 1.01 | 軸方向 | 定流量 0.012 ~ 0.104 μ dm ³ /s | 室温 | 20kPa/hr at 0.104 μ dm ³ /s 振動が スラックス |
| | | | 8 ~ 22 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | 1,592 | | 両面注水 (2 10MPa:ステップ) | 同上? | 無し (体積拘束) | 1.0 | 半径 方向 | 定流量 0.104 μ dm ³ /s | 同上 | kPa/hr at 0.104 μ dm ³ /s 振動が スラックス | |
| | 1,596 | | 両面注水(1.0MPa) + 上流面注水 (1.78E-5 6.11E-4 μ dm ³ /s:step) + 両面注水(1.0MPa) | 同上? | 軸方向: 10 周方向: 歪拘束 | 1.0 | 軸方向 | 定流量 0.104 μ dm ³ /s | 同上 | 10 ~ 20kPa/hr at 0.104 μ dm ³ /s 振動が スラックス | | | |
| | Boom Clay | | 採取時特性 | リングフォーム型抜 上下端 0.5cm を除去平滑化 | 採取時特性 | 同上? | 等方圧 4.4 | 2.2 | 軸方向 | 定流量 0.012 ~ 0.104 μ dm ³ /s | 同上 | 20kPa/hr at 0.104 μ dm ³ /s 間欠的が スラックス | |
| 9) ベルギー | SCK/CEN | Boom Clay | 1,598 ~ 1,717 | 試験容器内 で圧密処理 | | 下流面注水 | 水銀バッチ + ディスプレイメントラ ンステューブ or 背圧ポンプ動作量 | 等方圧 3.0 - 5.7 | 1.5 ~ 3.0 | 軸方向 | 定圧 200kPa/ 数日-20日 | 同上 | 間欠的が スラックス |
| 8, 10) カナダ | マニトバ大学 | Avonlea Clay | 600 ~ 1,450 | Oedometer 切内で圧縮 | | 両流面注水 | 不明 | 軸方向: 不明 周方向: 歪拘束 | 不明 | 軸方向 | 0.2MPa/ 5min 1.0MPa/ 5min | 同上 | 定圧試験 0.3MPa ~ 19.8MPa |
| 10, 11) フランス (日本) | ANDRA JNC | Fo-Ca Clay | 1,600 ~ 1,900 | 切内で 一軸圧縮機 | | 下流面注水 | 水: 収集チャンセル ガス: 収集チャンセル + 石鹸膜流量計 | 体積拘束 | 無し | 軸方向 | 50kPa/ 24hr ~ 100kPa/ 12hr | 同上 | ダニミックロー |

2.2 土質試験法に関する調査

我が国及び米国における標準的土質試験方法を対象として、透気及び透水試験方法実施方法に記述された、供試体 / 試験容器界面での卓越流路の形成に対する防止策について調査を行った。ここに記述された卓越流路形成防止策は以下の通りであった。

- ・ JIS (地盤工学会) では試験容器内で締め固めを行わない供試体については、漏水防止剤の充填塗布を勧告している。
- ・ 漏水防止剤については、粘土等の比較的透過性が低く応力により変形する供試体に対しては、シリコン系シール剤の適用性が高い。
- ・ 地盤工学会では透水係数が 10^{-16}m^2 以下の極低透水性の土に対しては、三軸圧縮試験装置を使用し静水圧による拘束圧を負荷して測定する方法を推奨している。
- ・ 米国の土壌科学会、作物栽培学会の規定する土壌の透気試験手法においては、周方向の拘束圧を負荷することにより防止する方法を採っている。
- ・ 米国の標準的透水試験方法 (ASME) においては、粘土等の低透水性材料の透水試験における防止策は、拘束圧を負荷することが第一である。
- ・ 供試体の圧密による卓越流路の形成については、過剰な動水勾配 (注入圧力) の載荷を避けることが必要であるとされている。

2.3 粘土系材料のガス移行試験手法の検討・確立

前節において得られた調査結果を基に、今後ベントナイト / 珪砂混合材に対して適用すべきガス透過試験方法、及び透過試験条件について検討した。

これまでの粘土系材料に対するガス透過試験では、ガスブレイクスルー後一定時間経過した後、急激に排出ガスフラックスが増加する現象 (以後ダイナミックフローと称する)、間欠的ガスフラックスの出現や、応力条件、流体の移行方向 (試験装置のジオメトリ) により、膨潤応力とブレイクスルー圧力との直線的な関係が成立しないケース等が報告されていることから、ここでは処分場環境をより实际的に模擬する試験条件を整理し、さらにこれらの現象の機構と試験装置、試験条件との関係を整理することにより、今後粘土系材料のガス透過試験に対して適用すべき試験条件、装置条件について検討した。表 2-2 に得られた対応策を示す。

表 2-2 粘土系材料に対するガス透過試験条件

| 検討項目 / 問題点 | 硬岩系岩盤 | 軟岩系岩盤 |
|---------------|---|--|
| 応力条件 | | |
| ・ 背圧 | 処分深度相当静水圧 | 同左 |
| ・ 拘束圧 | 負荷しない | 岩盤圧力相当 平均有効応力一定で昇圧 or 圧密量に従って一定差圧で制御 |
| ジオメトリ | | |
| ・ 軸方向移行 | 基本的移行特性データ取得試験 | 同左 |
| ・ 円周方向移行 | 異方性卓越流路の確認 | 周方向拘束が困難 異方性卓越流路の確認 (軸方向拘束) |
| ダイナミックフロー | | |
| ・ 界面卓越流路 | シリコン系シーラント注入 高真空用グリス塗布 | 拘束圧の負荷 (シリコン系シーラント注入) (高真空用グリス塗布) |
| ・ 乾燥収縮 | 確実な飽和：減圧脱気 + 高圧注入 + 透水時水バランス確認 湿潤ガスの注入 | |
| ・ 間隙圧力上昇による変形 | 現象の詳細把握とモデル化 | |
| 間欠的ガスフラックス | | |
| ・ 累積ガス排出量 | データ取得間隔の短縮による積分データの利用 置換法による測定 | |
| ・ 背圧レギュレータ | × 背圧ポンプによる測定 背圧ポンプ + 気液分離収集槽での液位測定 | |

3. 粘土系以外のニアフィールド構成材料のガス移行特性データ取得

今年度はニアフィールド構成材料のうち、特に TRU 廃棄物処分場においては処分場内の間隙圧力、間隙水排出量に重要な影響を及ぼすと考えられている、セメント系材料を試験対象とした。セメント系材料に対しては、EU において実施された放射性廃棄物処分場のガス影響に係る国際共同研究において指摘されているように、処分場環境条件に最も近い初期飽和からの非定常ガス透過試験はほとんど実施されていない。したがって、本研究では間隙が水で飽和したセメント系材料に対するガス透過試験を実施し、処分場環境下でのガス移行特性評価の基礎データを取得した。

3.1 試験条件の検討

本年度はセメント系材料のうち充填材の候補材料であり、セメントとしての透過特性がより顕著に現われると考えられるモルタル、さらに CSH ゲルの特性を明確に示すと考えられる、骨材を添加しないセメントペーストに対してガス透過試験を行なった。以

下に連続媒体に対する 2 相流モデルを用いた解析に必要なパラメータ等の評価に必要な測定条件を示す。

3.1.1 試料調整パラメータ

本研究で用いられた供試体の諸元を以下に示す。

表 3-1 セメント系供試体材料の物理的強度

| 材料名 | 配合率等 | 強 度 | |
|----------|---|--------|---------|
| JIS モルタル | OPC | 一軸圧縮強度 | 42.0MPa |
| | セメント / 標準砂 : 1/3 (重量比) 水 / セメント : 0.50 (重量比) | 曲げ強度 | 8.6MPa |
| セメントペースト | OPC 水 / セメント : 0.85 (重量比) | 一軸圧縮強度 | 6.6MPa |

珪砂細骨材 : 標準砂 (JIS R 5201 10.2 及び同付属書 2 に規定された天然珪砂)
養生 : 50 で 28 日間とし、飽和試料を得るため水中養生
試料寸法 : 76.2mm (3 inch) × 50mmH を標準

3.1.2 試験条件パラメータ

本年度実施したガス移行試験条件を、表 3-2 に示す。

表 3-2 基本的試験条件

| | 評価項目 [解析時入力データ] | 試験方法 | 測定項目 | 圧力/応力 | 寸法 | 材料 |
|---------|--------------------|--------------|---------------|--------------|-------------------|---------------|
| 軟岩系岩盤条件 | 絶対透過係数(水) | 間隙水飽和試料の水押し | 累積排出水量の経時変化 | 深度500m相当の拘束圧 | 厚さ50mm 直径120mm | JIS珪砂セメントペースト |
| | 排水時相対透過係数(水) | 間隙水飽和試料のガス押し | 累積排出水量の経時変化 | | | |
| | 排水時相対透過係数(ガス) | | ガス排出速度の経時変化 | | | |
| | Threshold圧力 | | ブレイクスルーガス入り圧力 | | | |
| | ガス注入圧力と実効透過係数の関係 | | | | | |
| 飽和度 | 試料中水分量 | 重量変化 | | | | |

3.2 試験操作

供試体の調整は所定の寸法に成型加工され、乾燥を避けるため養生水を含ませたペーパータオルで包み、さらにポリ袋内に密封される。この供試体を取り出し重量を測定した後、試験容器中のゴムスリーブ内に挿入、設置する。

図 3-1 に試験手順フローを示す。

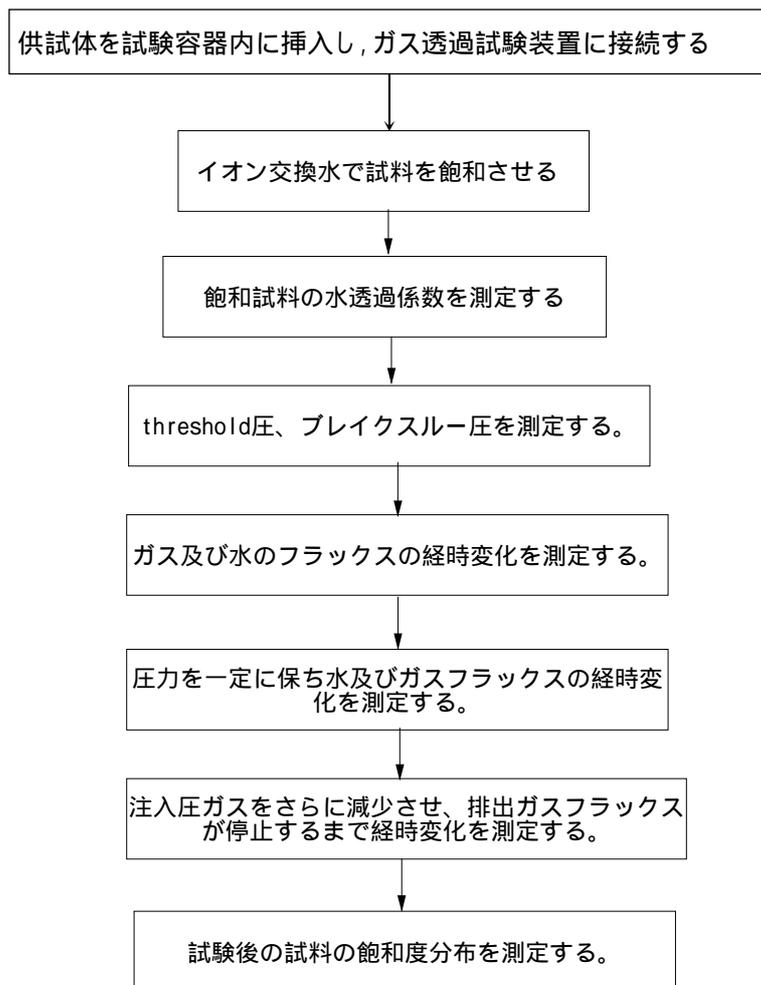


図 3-1 試験手順

3.3 試験結果

3.3.1 モルタル

代表としてモルタル試料 3 に対する試験結果を以下に示す。

(1) 飽和過程後期

試料上下流側両端の注入水圧を 5,000kPa で一定とした飽和過程前期の終了後、図 3-2に示すように背圧を 5,000 kPa として、注入圧力を 5,000 kPa から 100kPa/1 時間でステップ状に昇圧させ、約 9,900kPa で保持した。また、排水速度が一定となった期間に対して、飽和試料に対する水の透過係数を算定した。結果を図 3-3に示す。

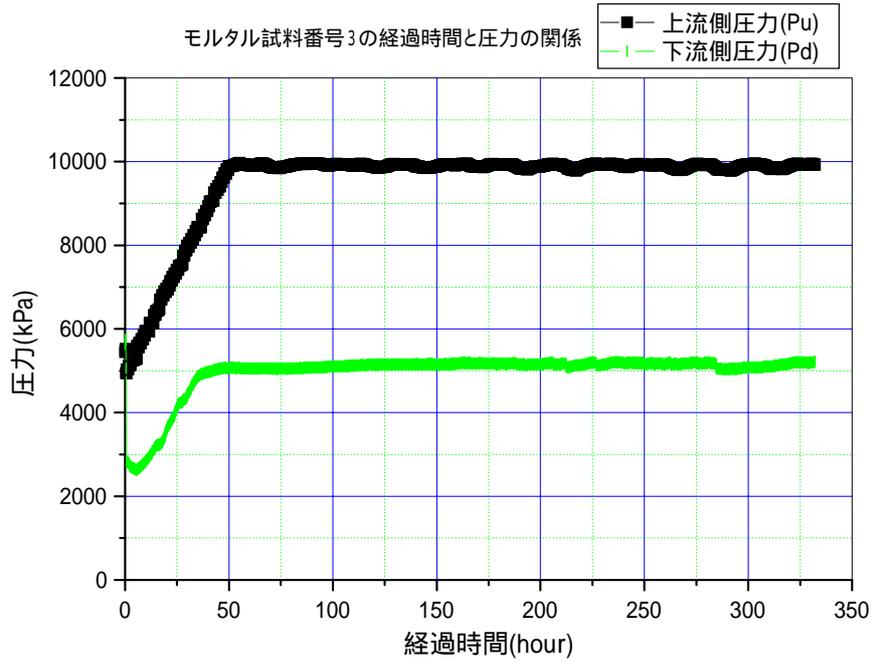


図 3-2 飽和過程後期における注入圧力の経時変化(モルタル試料 3)

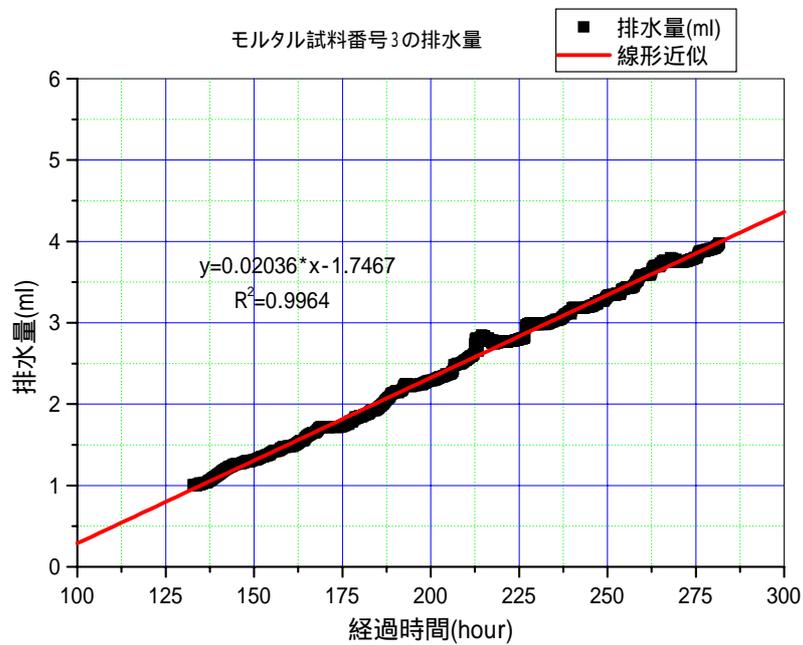


図 3-3 飽和試料の透過係数の評価(モルタル試料 3)

(2)ガス押し過程

注入流体をガスに切替え注入ガス圧力を 5,000kPa から 50kPa/1 時間でステップ状に昇圧し、注入ガス圧力が約 10,000kPa に達した時点で一定に保持した後、再度 50kPa/1 時間でステップ状に昇圧し、ブレイクスルー検出後一定圧とした。試験開始後約 215 時間後に排水速度が急上昇を開始し、233 時間でガスの排出を検出し、234 時間後にブレイクスルーを検出して 13.2MPa で注入圧の昇圧を停止した。ガスの平均排出速度は、その後も間隙水の排出による飽和度の低下に従って上昇する傾向を示している。水の排出はブレイクスルー後も減衰しつつ 75 時間後も継続して検出されている。試験終了時の試験装置からの累積排水量は 12.4ml であった。

図 3-4～図 3-6にガス押し過程における注入ガス圧力、ガス排出速度、及び累積排水量の経時変化を示す。

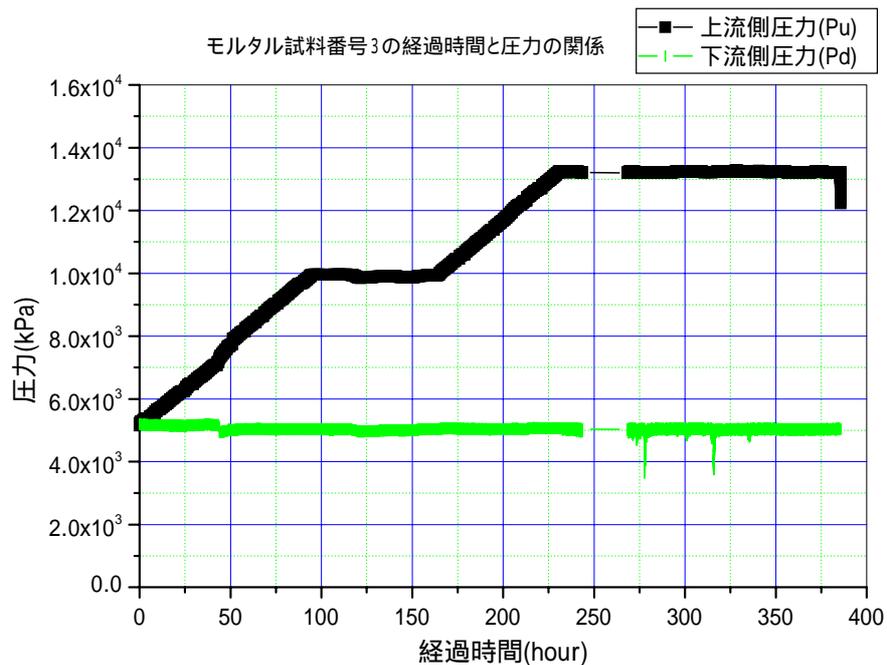


図 3-4 ガス押し過程における注入圧力の経時変化(モルタル試料 3)

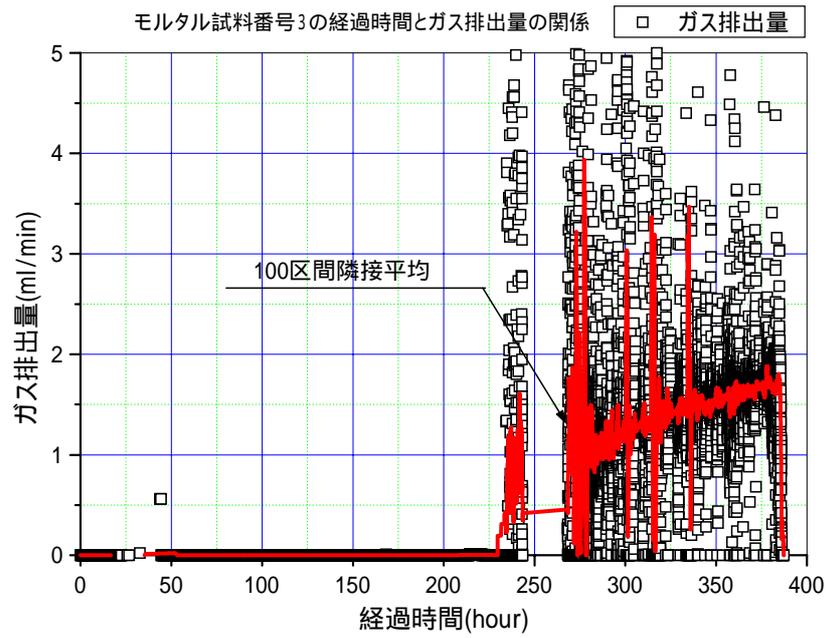


図 3-5 ガス押し過程におけるガス排出速度の経時変化(モルタル試料 3)

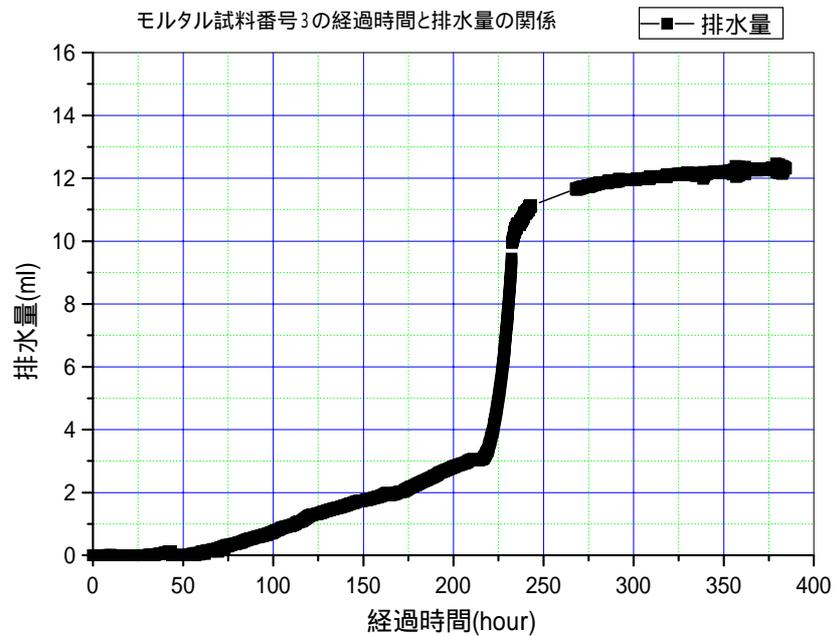


図 3-6 ガス押し過程における累積排水量の経時変化(モルタル試料 3)

(3)乾燥試料に対するガスの透過係数

ガス押し過程終了後 110 で 20 時間以上乾燥した試料に N₂ ガスを透過させ、乾燥試料に対するガスの透過係数を測定した。本試料に対する測定条件は、背圧を大気圧とし、拘束圧は静水圧条件でガス注入圧力 + 3,500kPa とした。ガス注入圧力を約 300kPa、600kPa、900kPa 程度の 3 段階で変化させることにより、ガス排出速度の変化を測定した。異なる圧力勾配で測定した透過係数について、平均間隙圧力（上流側圧力(注入圧力)Pu と下流側圧力(背圧)Pd の平均値）による透過係数への影響を図 3-7 に示した。平均間隙圧力の逆数と見かけの透過係数が直線関係にあり、注入圧力、即ち圧力勾配の増加により見かけの透過係数が減少する傾向が明確に現われている。この slippage 現象の影響を排除し、固相との相互作用のない液体の透過係数に相当するとされる Klinkenberg 透過係数は X 軸切片で評価され、本試料では $5.01 \times 10^{-8} \text{m}^2$ であった。

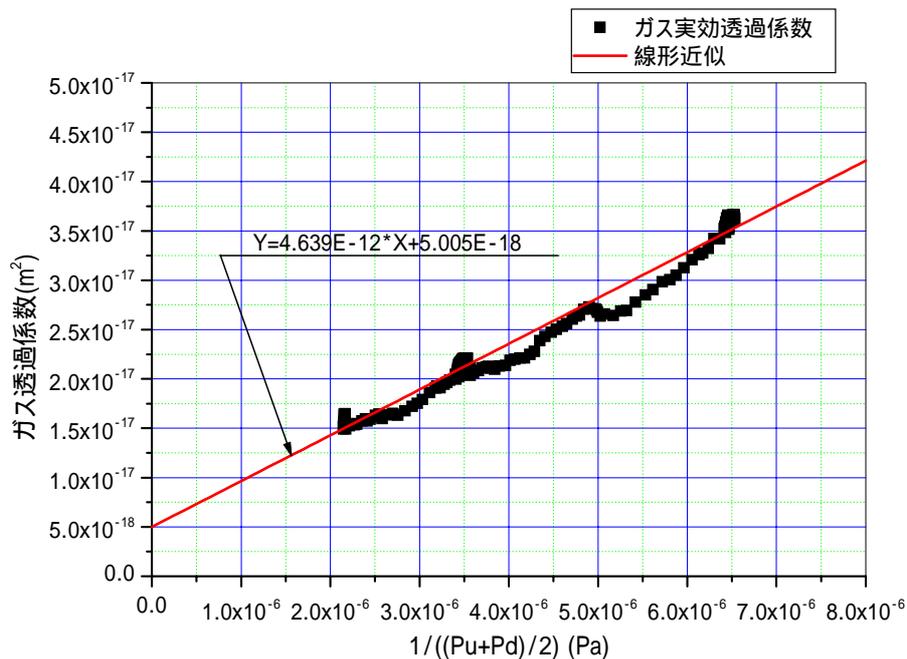


図 3-7 Klinkenberg 透過係数の評価（モルタル試料 3）

モルタル試料 3 に対する基本特性及び試験結果を表 3-3 に示す。

表 3-3 モルタル試料 3 の試験結果

| | | | | |
|-----------------------|--------------------------|---|---------------------|--------|
| No. | モルタル試料 3 | | | |
| 試験温度 | 20 ~ 24 | | | |
| 仕様 / 特性 | モルタル | 配合率 : JIS モルタル | | |
| | 寸法 | 直径 7.722cm , 厚さ 4.778 cm | | |
| | 乾燥条件 | 炉乾燥 | 105 ~ 110 で 24 時間以上 | |
| | | | 開始時 | 終了時 |
| | 乾燥後 | | | |
| | 試料重量(g) | 510.85 | 517.08 | 480.76 |
| | 乾燥密度(g/cm ³) | | | 2.15 |
| | 湿潤密度(g/cm ³) | 2.28 | 2.31 | |
| | 間隙率(%) | 16.2 | | |
| 間隙体積(ml) | 36.3 | | | |
| 液体 | 蒸留水の粘性係数 | 1.002 × 10 ⁻³ Pa·s (101,325Pa , 20) | | |
| 液体 | 飽和試料の水の係数 | 1.22 × 10 ⁻²⁰ m ² | | |
| 気体 | 窒素の粘性係数 | 1.760 × 10 ⁻⁵ Pa·s (101,325Pa , 20) | | |
| 気体 | Klinkenberg 透過係数 | 5.01 × 10 ⁻¹⁸ m ² | | |
| 計測上の threshold 圧(kPa) | 1,576 | 試料上流側圧力(kPa) | 6,590 | |
| | | 注入ポンプ圧(kPa) | 6,700 | |
| | | 試料下流側背圧(kPa) | 5,014 | |
| | | 背圧ポンプ圧(kPa) | 5,000 | |
| 計測上のブレイクスルー圧(kPa) | 8,210 | 試料上流側圧力(kPa) | 13,231 | |
| | | 注入ポンプ圧(kPa) | 13,400 | |
| | | 試料下流側背圧(kPa) | 5,021 | |
| | | 背圧ポンプ圧(kPa) | 5,000 | |

注 1) 試験前試料下流側残留水は 7.30ml

注 2) 試験前上流側残留水は 0.32ml

3.3.2 セメントペースト

代表としてセメントペースト試料 1 に対する試験結果を以下に示す。

(1) 飽和過程後期

上下流側両端の注入水圧を 5,000kPa で一定とした飽和過程前期終了後、試験容器を含む系内の圧力を 0kPa まで減圧し、背圧を載荷せずに注入圧力のみを 100kPa で保持することとした。また排水速度が一定となった期間に対して、飽和試料に対する水の透過係数を算定した。結果を図 3-8、図 3-9に示す。

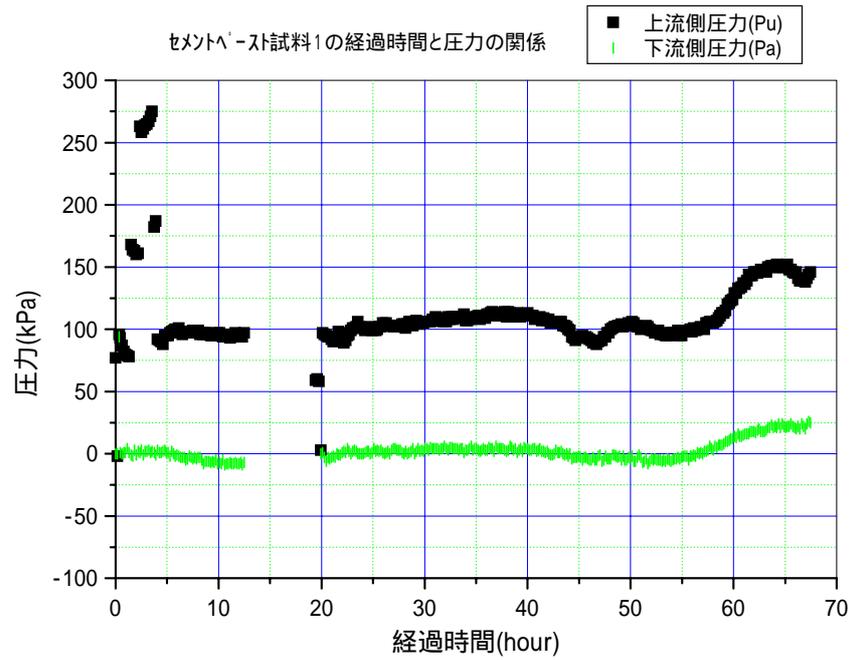


図 3-8 飽和過程後期における注入圧力の経時変化(セメントペースト試料 1)

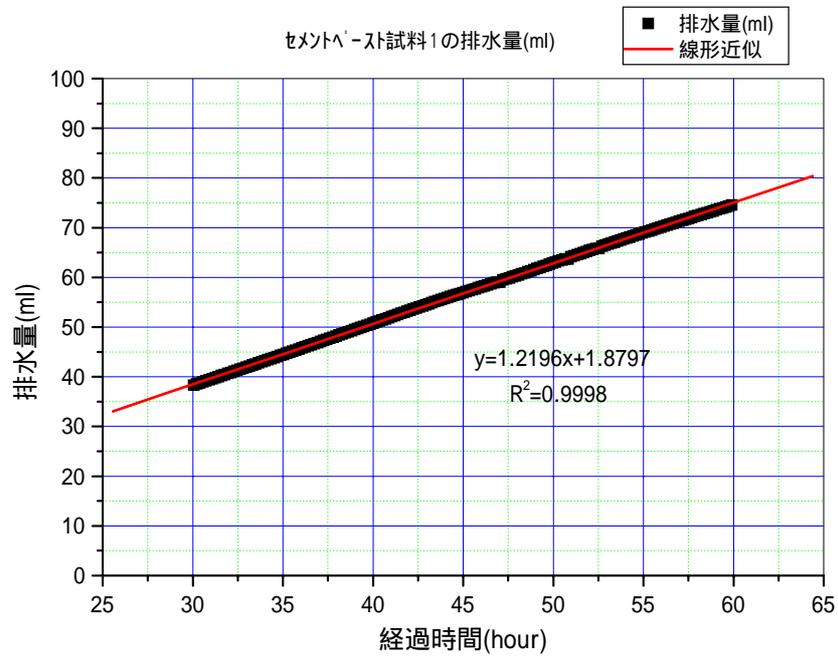


図 3-9 飽和試料の透過係数の評価(セメントペースト試料 1)

(2)ガス押し過程

図 3-10～図 3-12にガス押し過程における注入ガス圧力，ガス排出速度，及び累積排出水量の経時変化を示す。注入流体をガスに切り替えて注入ガス圧力を 70kPa から 5kPa/2 時間～25kPa/1 時間でステップ状に昇圧した。試験開始後約 150 時間後に排水速度が急上昇を開始し，ほぼ 160 時間でガスの排出を検出し始めたが，ガスの排出速度が微小で検出下限値に近いため，さらに注入圧を 855kPa から昇圧しガス排出速度がほぼ 5ml/min 以上に増加した 1,150kPa で一定とした。ガス排出速度はその後も上昇を続け，ほぼ 12ml/min で定常値に近づいている。水の排出はモルタル試料に比較して，ブレイクスルー直前までほとんど排出されず，140 時間前後の注入圧 600kPa が threshold 圧であり，ガスの侵入後急速にブレイクスルーに至っていると考えられる。このことはセメントペーストの間隙径分布が $0.3\mu\text{m}$ 付近で急激に頻度が増すことと一致している。

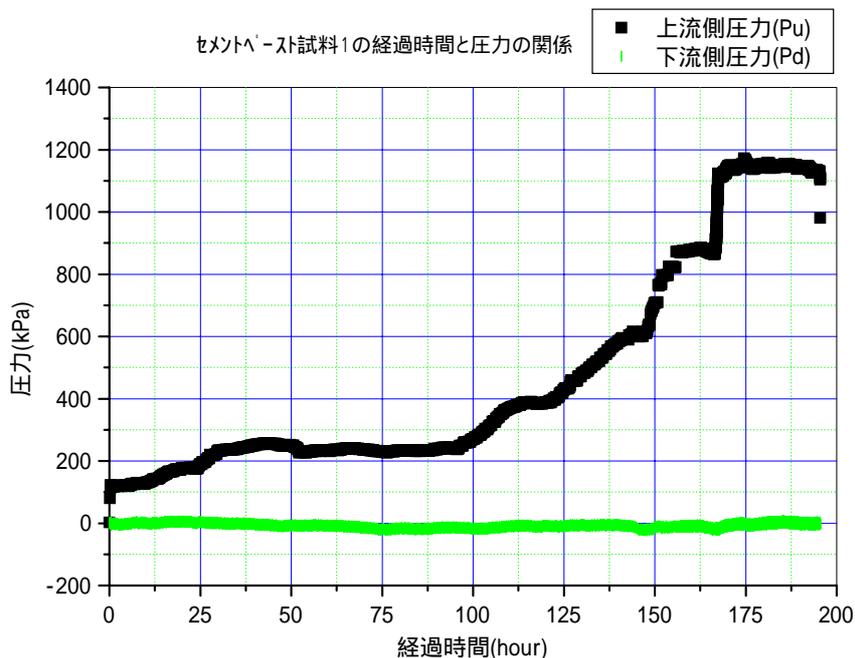


図 3-10 ガス押し過程における注入圧力の経時変化(セメントペースト試料 1)

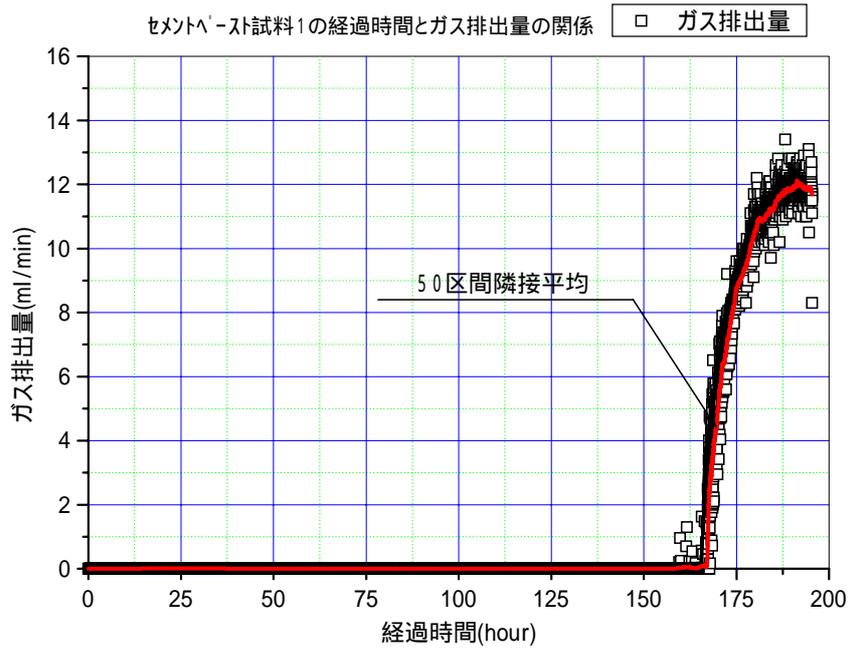


図 3-11 ガス押し過程におけるガス排出速度の経時変化(セメントペースト試料 1)

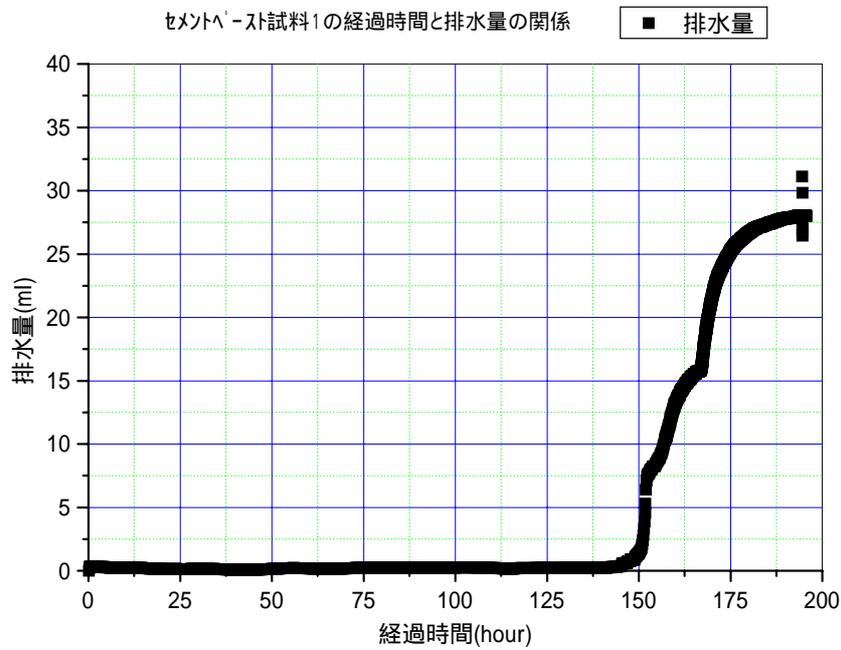


図 3-12 ガス押し過程における累積排出水量の経時変化(セメントペースト試料 1)

(3)乾燥試料に対するガスの透過係数

ガス押し過程終了後 110 で 20 時間以上乾燥した試料に N₂ ガスを透過させ、乾燥試料に対するガスの透過係数を測定した。本試料に対しては約 2,000kPa の背圧を負荷し、拘束圧は静水圧条件でガス注入圧力 + 3,500kPa とした。ガス注入圧力を約 2,020kPa から 1,980kPa まで変化させてガス排出速度の変化を測定したが、ガス注入圧力を低下させた際、背圧も低下したことから差圧があまり減少せず、ガス排出速度の変化も限定された範囲となった。平均間隙圧力による透過係数への影響を図 3-13 に示した。ここで設定可能であった注入圧力の変動幅は、平均間隙圧力の逆数と見かけの透過係数との関係を得るには充分でなく、この関係は明確にならなかった。Klinkenberg 効果は透過係数が小さいほど顕著となることが知られており、したがって圧力の影響はモルタルより小さいと考えられ、また平均間隙注入圧力も高いことから、ここでは Klinkenberg 透過係数として各測定点の平均値である $2.37 \times 10^{-16} \text{m}^2$ を採用することとした。

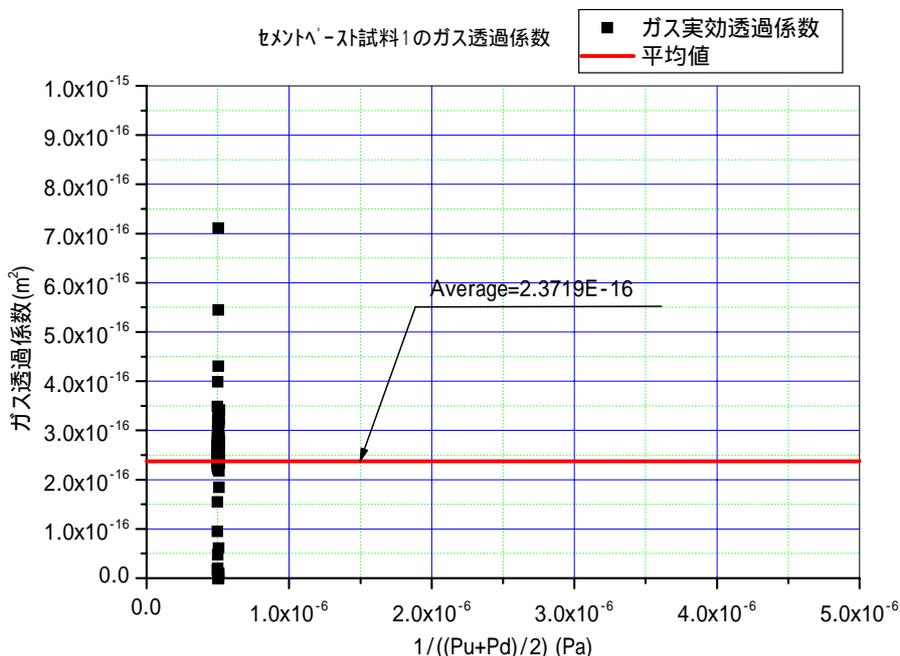


図 3-13 Klinkenberg 透過係数の評価 (セメントペースト試料 1)

セメントペースト試料 1 に対する基本特性及び試験結果を表 3-4 に示す。

表 3-4 セメントペースト試料 1 の試験結果

| | | | | |
|-----------------------|--------------------------|--|---------------------|--------|
| No. | セメントペースト試料 1 | | | |
| 試験温度 | 20 ~ 21 | | | |
| 仕様 / 特性 | モルタル | 配合率：水 / セメント：0.85 (重量比) | | |
| | 寸法 | 直径 7.77cm, 厚さ 4.999 cm | | |
| | 乾燥条件 | 炉乾燥 | 105 ~ 110 で 24 時間以上 | |
| | | | 開始時 | 終了時 |
| | 試料重量(g) | 391.19 | 360.14 | 253.76 |
| | 乾燥密度(g/cm ³) | | | 1.07 |
| | 湿潤密度(g/cm ³) | 1.65 | 1.52 | |
| | 間隙率(%) | 49.9 | | |
| | 間隙体積(ml) | 118.5 | | |
| 液体 | 蒸留水の粘性係数 | 1.002 × 10 ⁻³ Pa·s (101,325Pa, 20) | | |
| 液体 | 飽和試料の水の係数 | 3.44 × 10 ⁻¹⁷ m ² | | |
| 気体 | 窒素の粘性係数 | 1.760 × 10 ⁻⁵ Pa·s (101,325Pa, 20) | | |
| 気体 | Klinkenberg 透過係数 | 2.37 × 10 ⁻¹⁶ m ² | | |
| 計測上の threshold 圧(kPa) | 605 | 試料上流側圧力(kPa) | 605 | |
| | | 注入ポンプ圧(kPa) | 595 | |
| | | 試料下流側背圧(kPa) | 0 | |
| | | 背圧ポンプ圧(kPa) | 0 | |
| 計測上のブレイクスルー圧(kPa) | 880 | 試料上流側圧力(kPa) | 880 | |
| | | 注入ポンプ圧(kPa) | 855 | |
| | | 試料下流側背圧(kPa) | 0 | |
| | | 背圧ポンプ圧(kPa) | 0 | |

注 1) 試験前試料下流側残留水は 4.98ml

注 2) 試験前上流側残留水は 0.32ml

以上のガス透過試験に用いられた供試体の諸元, 及び得られた特性値を,

表 3-5にまとめて示した。

表 3-5 各供試体の基本物性及び透過特性

| 材 料 | JISモルタル | | セメントペースト | | 備 考 |
|---------------------------------------|---------|---------|----------|---------|-----------------|
| | 試料 5 | 試料 3 | 試料 1 | 試料 6 | |
| 高さ (cm) | 4.56 | 4.78 | 5.00 | 4.98 | |
| 直径 (cm) | 7.75 | 7.72 | 7.77 | 7.76 | |
| 乾燥密度 (g/cm ³) | 2.11 | 2.12 | 1.07 | 1.05 | |
| 間隙率 (-) | 0.16 | 0.16 | 0.50 | 0.50 | |
| 絶対透過係数 (m ²) 飽和試料 / 水 | 1.8E-20 | 1.2E-20 | 3.4E-17 | 6.4E-17 | 透水係数 |
| 絶対透過係数 (m ²) 乾燥試料 / ガス | 8.1E-18 | 5.0E-18 | 2.4E-16 | 3.1E-16 | 透気係数 |
| 終了時飽和度 (-) | 0.89 | 0.87 | 0.83 | 0.82 | 排出水量より |
| | 0.99 | 1.00 | 0.90 | 1.02 | 重量測定より |
| 計測上の threshold値 (kPa) | 840 | 1,576 | 605 | 525 | 一定排出水量 検出時 |
| 計測上の ブレイクスルー値 (kPa) | 4,265 | 8,210 | 880 | 525 | 一定ガス排出 速度検出時 |

3.4 毛管圧力の測定評価

3.4.1 試験方法

湿潤相の排水側の挙動における飽和度と毛管圧力との関係を、忠実に再現可能と考えられる遠心法により測定を行なった。

(1) 試験装置

7kPa から 7,600kPa までの排水圧力の負荷が可能な Beckman 社製 High Speed Ultracentrifuge を使用した。排出された液体はコアホルダ先端に装着されたメスシリンダ内に蓄積し、回転速度に同期するストロボにより排出量を読み取る。

(2) 試験条件

1.5inch (約 53mm) の供試体を 104 で乾燥後、ステンレス製飽和セル内に収納し 12 時間以上真空ポンプで減圧後、蒸留水を 13.8MPa で注入し約 6 時間保持して飽和試料を得る。秤量後測定用コアホルダに収納しロータヘッドに装着して、室温、拘束圧力無負荷、置換ガスを空気として測定した。所定の加速度を 8 時間以上維持して排水量を測定し、排水速度が一定以下となった時点で平衡と見なし、段階的に回転数を上昇させた。測定終了後供試体を秤量し残留水量を評価した。

3.4.2 試験結果

遠心法により得られた間隙径分布及び基礎物性を、JIS モルタル試料について図 3-14 に、セメントペーストについて図 3-15 に示した。また、水銀圧入法と遠心法で測定された特性値の比較を表 3-6 にまとめて示した。試験結果のシミュレーションに用いる毛管圧力と間隙水飽和度との関係は、遠心法で得られたデータを適用した。

表 3-6 測定方法による特性値の比較

| 試料 | 基本物性 | | 測定方法 |
|----------|-----------|------------------------|------------------------|
| | 間隙率(-) | 透過係数(m ²) | |
| JIS 珪砂 | 0.163 | 3.75×10^{-17} | Swanson 透過係数 (水銀圧入法) |
| | 0.162 | 1.88×10^{-17} | Klinkenberg 透過係数 (遠心法) |
| セメントペースト | 0.503 | 8.95×10^{-16} | Swanson 透過係数 (水銀圧入法) |
| | 0.499 | 7.09×10^{-16} | Klinkenberg 透過係数 (遠心法) |
| 試料 | 毛管圧力(kPa) | | 測定方法 |
| | Threshold | 飽和度 0.5 | |
| JIS 珪砂 | 55 | 3,000 | 水銀圧入法 |
| | 120 | 7,000 | 遠心法 |
| セメントペースト | 220 | 1,200 | 水銀圧入法 |
| | 500 | 2,400 | 遠心法 |

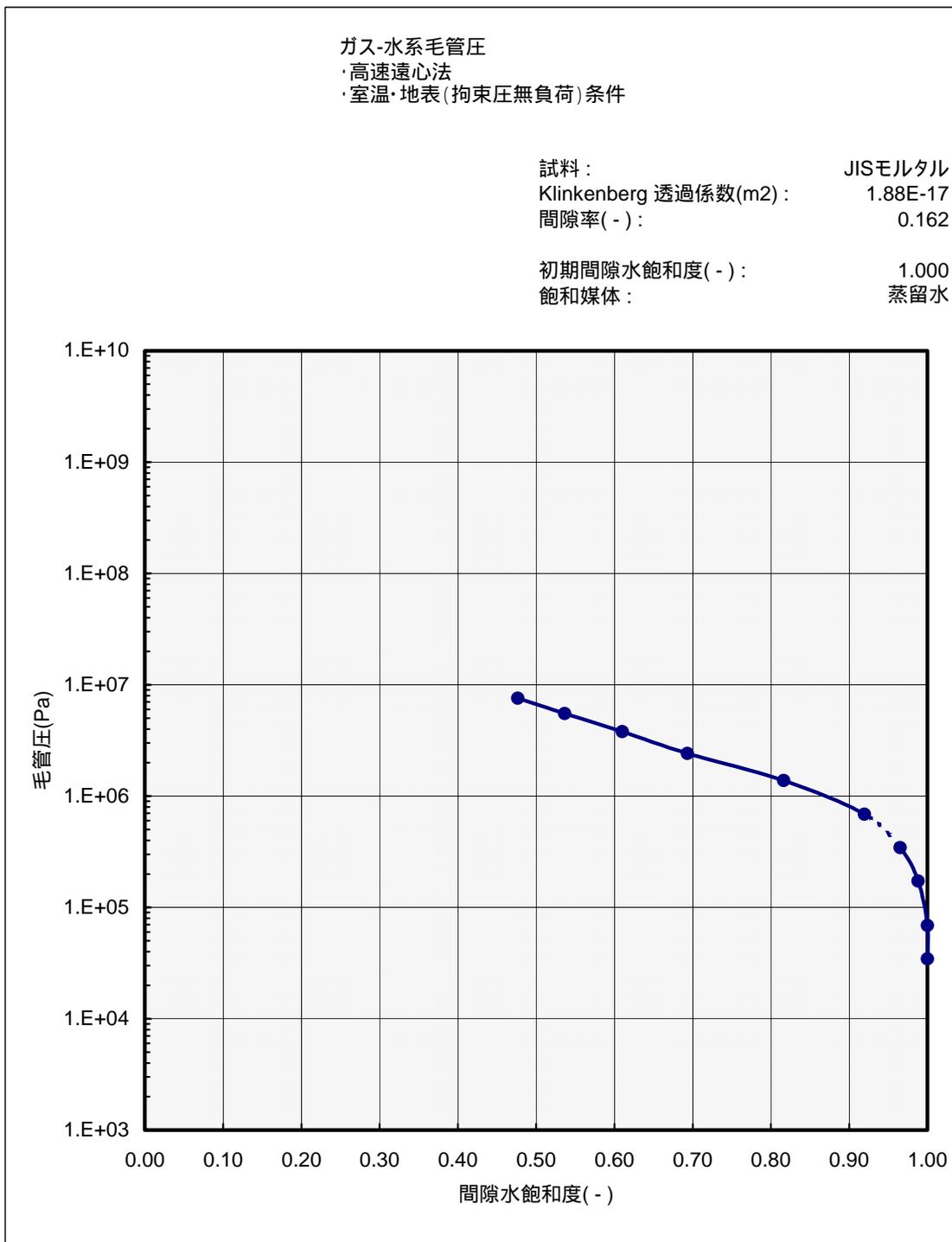


図 3-14 JIS モルタルの毛管圧力と飽和度との関係 (遠心法)

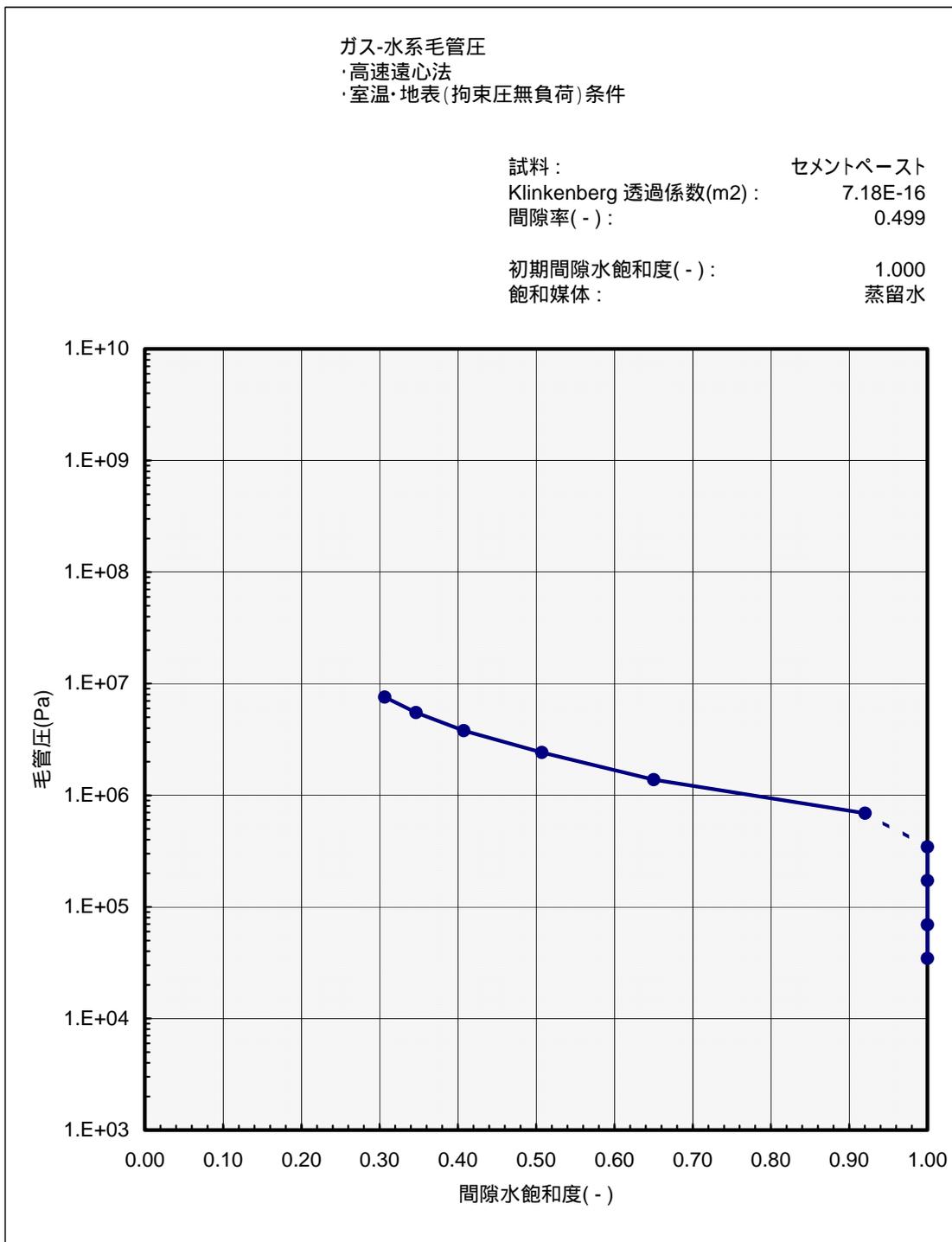


図 3-15 セメントペーストの毛管圧力と飽和度との関係 (遠心法)

4. 気液 2 相流モデルでの評価の適用性検討

前節で得られた JIS モルタル及びセメントペーストのガス透過試験結果に対し、連続媒体中の気液 2 相の移行を評価する数学モデルを適用してシミュレーションを行なうことにより、連続媒体 2 相流モデルのセメント系材料に対する適用性を評価した。

4.1 移行モデル

解析は TOUGH2 コードを使用した。また、本評価にて使用した相対透過係数と間隙水飽和度との関係を以下に示す。粘土物質の透過性に対するフィッティングに使用され、柔軟性の高い Corey モデルの特殊形を適用することとした。式 3 - 1、式 3 - 2 に Corey 変形モデルによる相対透過係数と間隙水飽和度との関係を示す。

$$k_{rg} = (1 - S_e)^n (1 - S_e^n) \quad \text{式 4-1}$$

$$k_{rl} = S_e^m$$

$$S_e = \frac{(S_l - S_{lr})}{(1 - S_{lr} - S_{sr})} \quad \text{式 4-2}$$

- k_{rg} : 気相の相対透過係数 (-)
- k_{rl} : 液相の相対透過係数 (-)
- S_e : 実効飽和度 (Corey モデル) (-)
- S_{lr} : 残留間隙水飽和度 (-)
- S_{sr} : 残留ガス飽和度 (-)
- m, n : 間隙径分布係数 (-)

毛管圧力と間隙水飽和度との関係については、式 3 - 3 に本評価で適用した Narasimhan のモデルを示す。同モデルは Mayer らによって、水銀圧入法によって得られた間隙径分布に基づいたデータに対して適用され、良好な再現性が確認されている。

$$p_c = -p_e - p_0 \left(\frac{(1 - S_l)}{(S_l - S_{lr})} \right)^{\frac{1}{n}} \quad \text{式 4-3}$$

- n : 間隙径分布係数 (-)
- P_e : 毛管排除圧 (ガス侵入圧) (Pa)

4.2 ガス透過試験のシミュレーション

連続媒体中の2相流モデルを用いて、セメント系材料に対するガス透過試験結果のシミュレーションを実施し、ガス排出速度及び累積排出水量の経時変化に対してフィッティングを行うことにより、当該モデルの適用性評価を行った。

4.2.1 モルタルのガス透過試験

ここではモルタル試料3で得られた排出ガス速度、及び累積間隙水排出量の経時変化をフィッティング対象としてシミュレーションを実施した。

(1) 2相流パラメータ

a. 毛管圧と間隙水飽和度との関係

モルタル試料に対して設定された、Narasimhan モデルを適用した遠心法による測定データとのフィッティング結果、及びパラメータを図 4-3、表 4-1に示す。

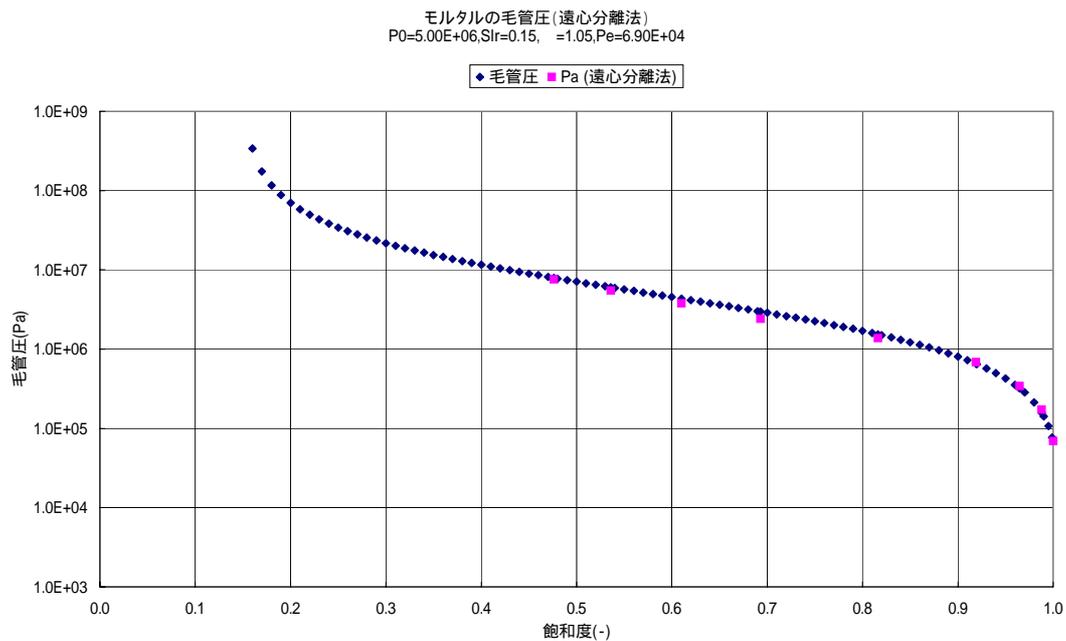


図 4-1 毛管圧と間隙水飽和度の関係 (モルタル試料)

表 4-1 毛管圧力のパラメータ (モルタル試料)

| 計算式 | 毛管圧 | | | 間隙率 |
|------------|----------|-------|-------|-------|
| | P_0 | Slr | P_e | |
| Narasimhan | 5.00E+06 | 0.15 | 1.05 | 0.162 |

b. 相対透過係数と間隙水飽和度との関係

本ケースで設定されたパラメータ値は，水の絶対透過係数を試料の飽和過程最終段階で得られた水の透過係数の 0.8 倍とし，ガスの絶対透過係数は乾燥試料の透気試験で得られたガスの透過係数（Klinkenberg 透過係数）の 1.46 倍として，Corey 変形モデルの残留飽和度（ S_{sr} ）と間隙径分布パラメータ（ m 及び n ）を変化させることにより試験結果にフィットさせた。

モルタル試料 3 に対して設定された相対透過係数に対するパラメータを表 4-2 に，相対透過係数と間隙水飽和度との関係を図 4-2 に示す。

表 4-2 相対透過係数パラメータ（モルタル試料 3）

| 流体 | 絶対透過係数 | 相対透過係数 | | | | |
|----|-----------|--------|----------|----------|------|------|
| | | 計算式 | S_{lr} | S_{sr} | m | n |
| 水 | 9.776E-21 | Corey | 0.15 | 0.075 | 25.0 | 2.30 |
| ガス | 7.311E-18 | | | | | |

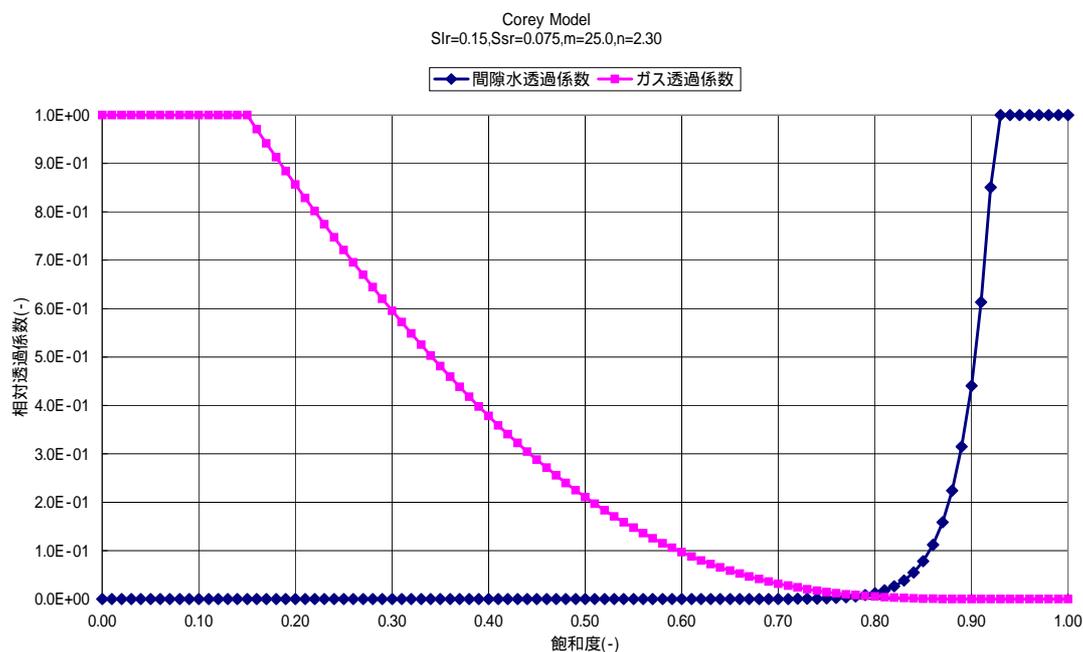


図 4-2 相対透過係数の変化（モルタル試料 3）

(2)幾何モデル

解析上の幾何体系を図 4-3 に示す。

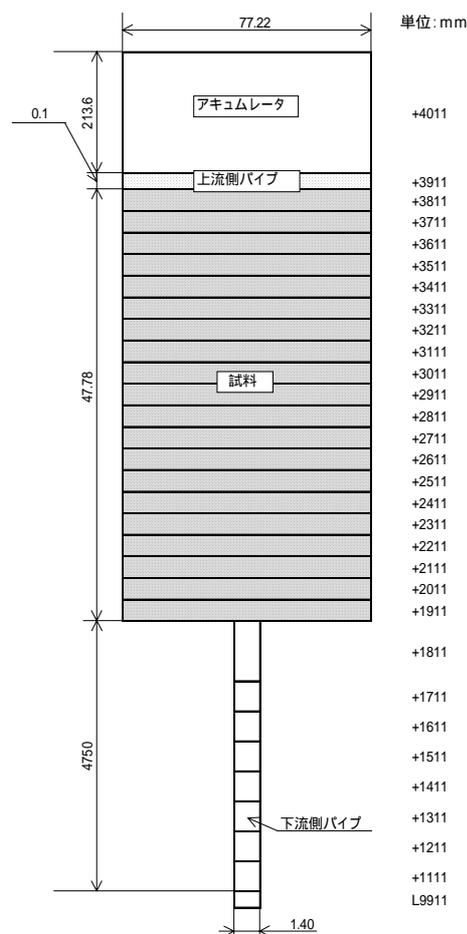


図 4-3 解析に用いた幾何モデル（モルタル試料 5）

4.2.2 シミュレーション結果

ガス排出速度，及び間隙水累積排出量に対するシミュレーション結果をそれぞれ図 4-4，図 4-5 に示す。ガスの排出について，ブレイクスルー時期は解析結果ではほぼ 236 時間時点であり，試験結果の 233 時間に対して極めて近い時期に発生している。ブレイクスルー後のガス排出速度については，解析で得られたフラックスの値は試験結果（隣接 100 区間平均値）に比較してブレイクスルー直後の急速なフラックスの上昇幅がやや小さく，特にガス排出初期においては試験結果より 10% から 20% 程度小さい値となっている。

累積排出水量については最終的な累積排出水量，及びブレイクスルー時の急激な上昇傾向のみでなく，ブレイクスルー前のガスによる間隙水の置換過程における排水過程もシミュレーションによる排出速度は試験結果と極めてよく一致し，ブレイクスルーに伴う排出水の急激な立ち上がり時期も高い再現性を示している。

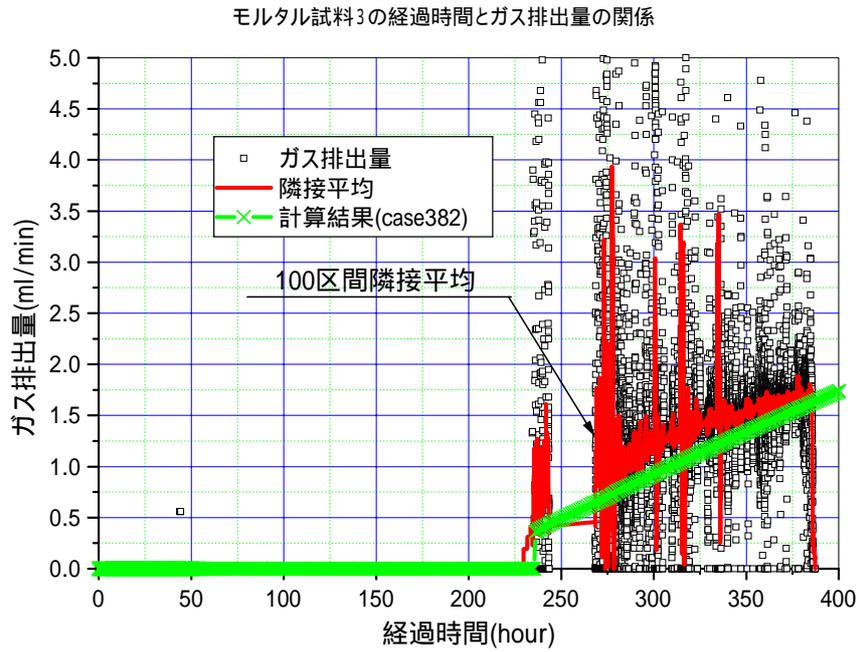


図 4-4 ガス排出速度シミュレーション結果 (モルタル試料 3)

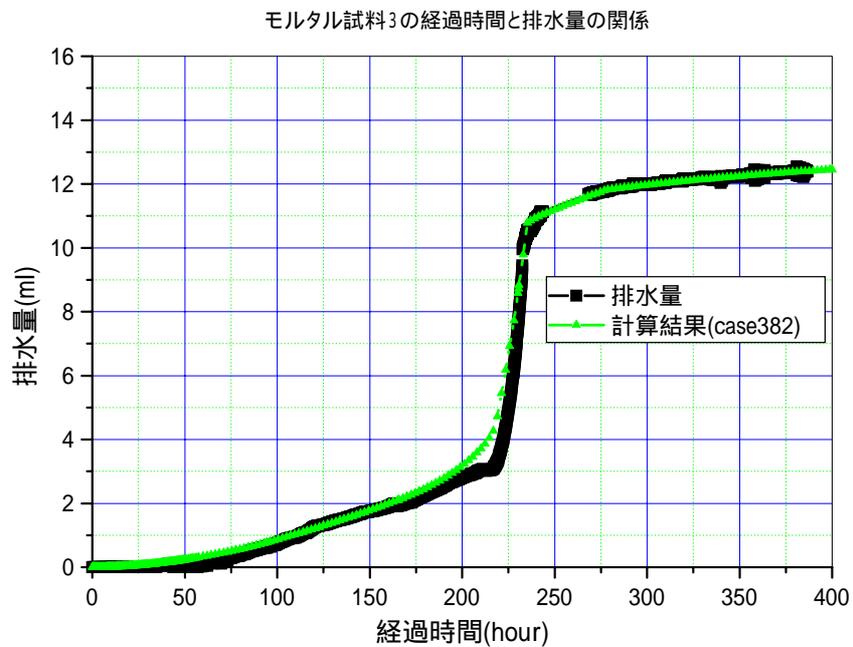


図 4-5 累積間隙水排水量シミュレーション結果(モルタル試料 3)

4.2.3セメントペーストのガス透過試験

ここではセメントペースト試料 1 によって得られた排出ガス速度 , 及び累積間隙水排出量の経時変化をフィッティング対象としてシミュレーションを実施した。

(1) 2 相流パラメータ

a. 毛管圧と間隙水飽和度との関係

セメントペースト試料に対して設定された , Narasimhan モデルを適用した遠心法による測定データとのフィッティング結果 , パラメータを図 4-6 , 表 4-3に示す。

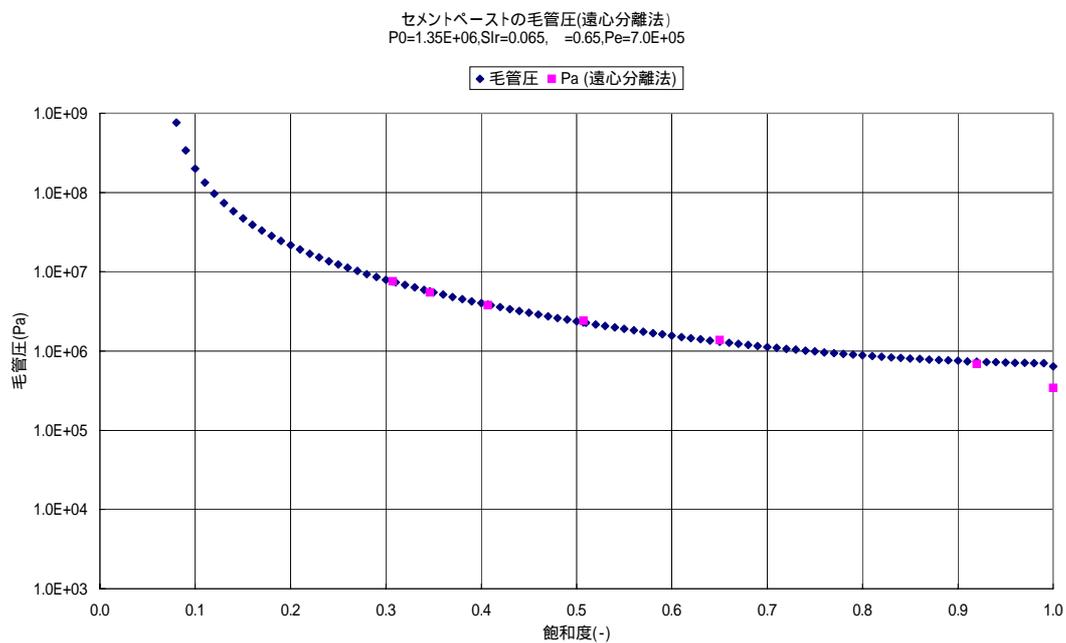


図 4-6 毛管圧と間隙水飽和度の関係 (セメントペースト試料)

表 4-3 毛管圧力のパラメータ (セメントペースト試料)

| 毛管圧 | | | | |
|------------|----------|-------|------|----------|
| 計算式 | P_0 | Slr | | P_e |
| Narasimhan | 1.35E+06 | 0.065 | 0.65 | 7.00E+05 |

b. 相対透過係数と間隙水飽和度との関係

セメントペースト試料 1 に対して設定された相対透過係数に対するパラメータを表 4-4に , 相対透過係数と間隙水飽和度との関係を図 4-7に示す。設定されたパラ

メータ値は、水の絶対透過係数を試料の飽和過程最終段階で得られた水の透過係数とし、ガスの絶対透過係数については乾燥試料の透気試験で得られたガスの透過係数 (Klinkenberg 透過係数) の 0.9 倍として、Corey 変形モデルの残留飽和度 (Ssr) と間隙径分布パラメータ (m 及び n) を変化させることにより、試験結果にフィットさせたものである。

表 4-4 相対透過係数パラメータ (セメントペースト試料 1)

| 流体 | 絶対透過係数 | 相対透過係数 | | | | |
|----|-----------|--------|-------|------|------|------|
| | | 計算式 | Slr | Ssr | m | n |
| 水 | 3.442E-17 | Corey | 0.065 | 0.00 | 12.0 | 0.38 |
| ガス | 2.137E-16 | | | | | |

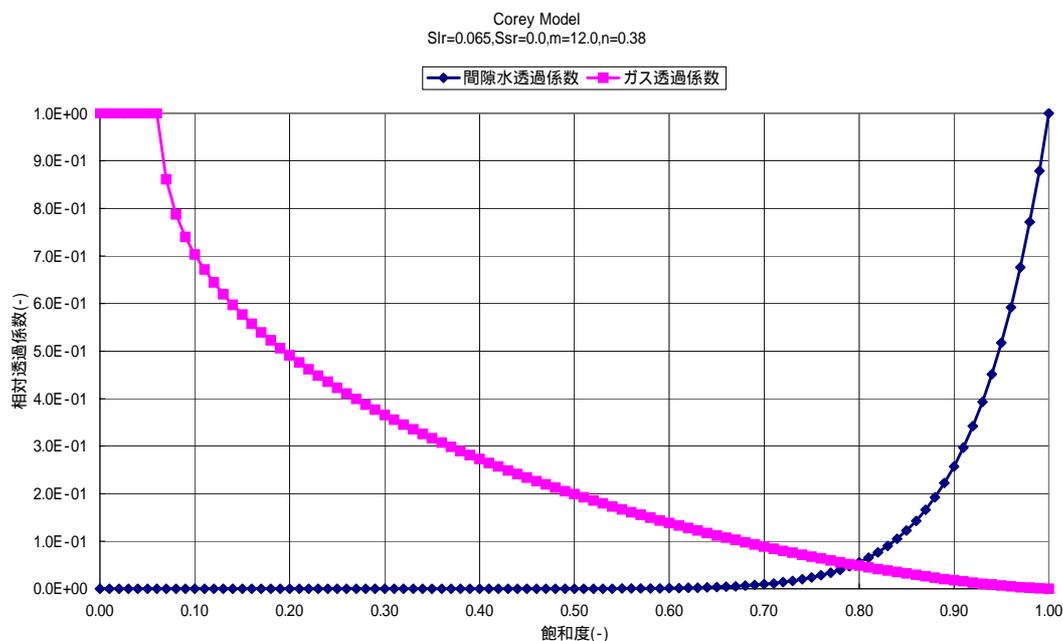


図 4-7 相対透過係数の変化 (セメントペースト試料 1)

(2)幾何モデル

解析上の幾何体系を図 4-8に示す。セメントペースト試料についてもモルタル試料に対するのと同一の幾何モデル構成とした。

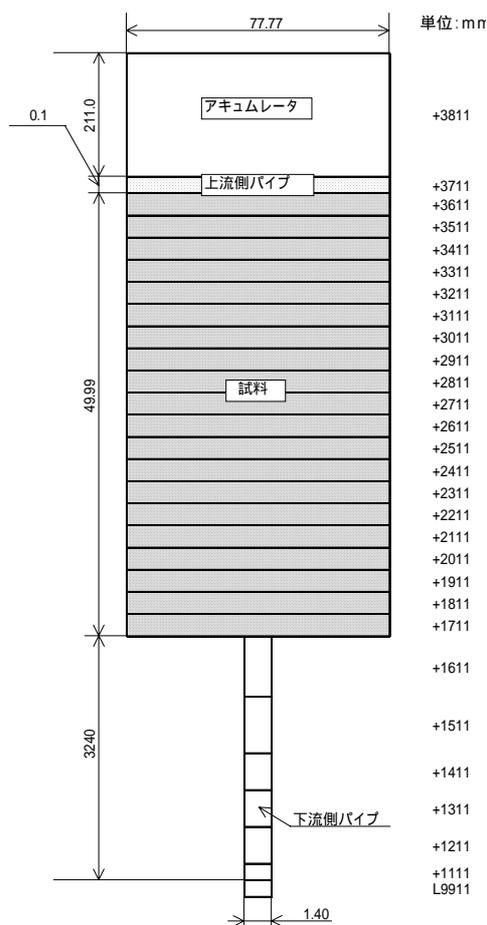


図 4-8 解析に用いた幾何モデル (セメント-スト試料 1)

4.2.4 シミュレーション結果

設定されたパラメータを用いたガス排出速度、及び間隙水累積排出量に対するシミュレーション結果をそれぞれ図 4-9、及び図 3-8に示す。ガスの排出に対しては、ブレイクスルーの時期に関してガス透過試験で観測された 160 時間に対して 154 時間と極めて良く一致した。その後の流速の上昇については、ブレイクスルー時の昇圧過程については実験値より大きい、その後の昇圧過程によるフラックスの上昇については良い一致を見せている。累積排出水量については、140 時間付近での threshold (供試体へのガスの侵入) 現象について非常によく模擬できている。また、ブレイクスルー時の昇圧段階における累積排出水量は、実験値に比較してやや大きい、その後の段階的昇圧による排出水量は実験値より少ない。これらを総合した試験終了時の累積排出水量は試験結果の 28.0ml に対してシミュレーション結果は 28.4ml であり、非常に良い一致を示した。

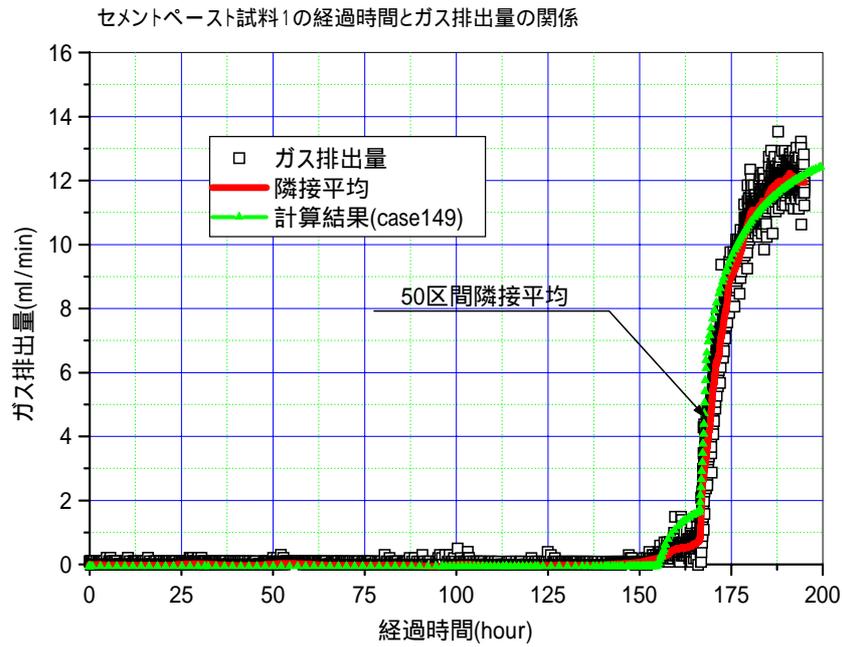


図 4-9 ガス排出速度シミュレーション結果(セメントペースト試料1)

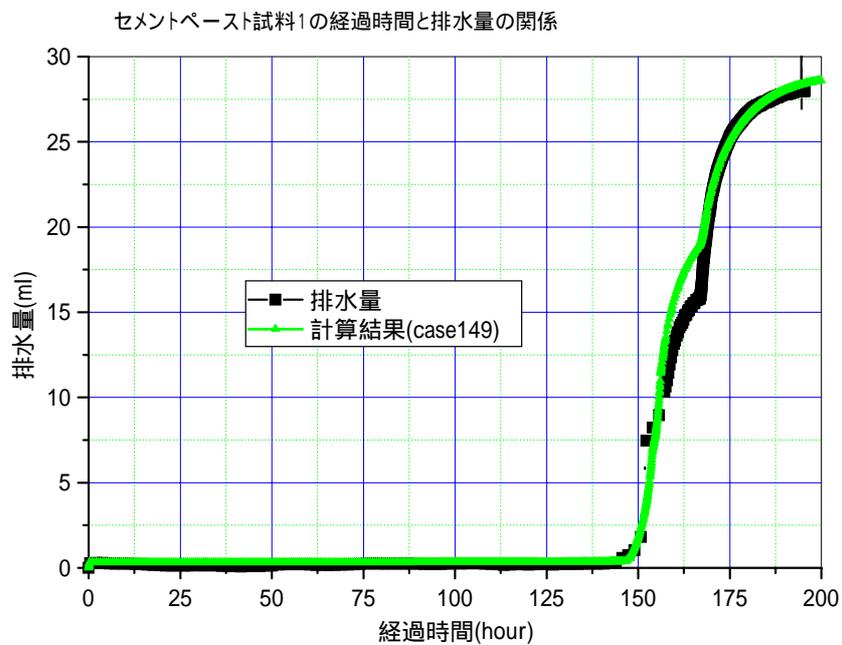


図 4-10 累積間隙水排出量シミュレーション結果(セメントペースト試料1)

4.3 結論

4.3.1 2相流モデルの適用性

水により飽和した状態からのモルタル中のガス透過現象は、連続媒体に対する2相流モデルにより再現可能であることが明らかとなった。また、同様に水により飽和した状態からのセメントペースト中のガス透過現象についても、連続媒体に対する2相流モデルにより再現可能である目途が得られたが、モルタル、セメントペースト双方とも強い間隙径分布特性が不連続/非線形性を示すことから、Corey 変形モデルよりさらに非線形性の強い特性曲線を設定することにより、再現性が向上する可能性があるものと考えられた。

4.3.2 ガス移行特性データベースの整理

本研究で設定された透過特性パラメータをガス移行特性データベースに付加した。付録にガス移行特性データベースを添付する。

4.3.3 今後の課題

今後はセメント系材料に対してさらにパラメータの精度、信頼性を向上させるため、フィッティングの精度と再現性を向上させることが必要である。このため今後以下の手順によるパラメータの検討が必要であると考えられた。

相対透過係数に対する Corey モデルパラメータのより広範な数値の適用

相対透過係数に対するその他の近似モデル、不連続モデルの適用

毛管圧に対するその他の近似モデルの適用

亀裂あるいは複雑な間隙構造に対する二重透過係数モデルの適用

さらに、セメント系材料に対する透過特性データの充実と信頼性向上のため、以下の課題を上げることができる。

より長期のガス透過挙動に多する試験と2相流モデル適用性の確認

水/セメント比による透過特性に対する影響の確認

骨材等の配合条件による透過特性に対する影響の確認

水の透過による化学変化と間隙構造、透過性に対する影響の確認

5. おわりに

地層処分環境下においては廃棄物収納容器，金属の腐食，微生物による有機物の分解によりガスが発生する。処分場内で発生したガスは，その蓄積と移行の過程で人工バリアシステム内の間隙圧力上昇，核種に汚染された間隙水の早期排出等の現象を誘発し，処分システムの長期安全性に影響を及ぼす可能性が指摘されている。

本研究では粘土系材料についてガス透過試験の問題点を整理し，近年実施されたガス透過試験手法の調査を行うことにより，粘土系材料のガス透過試験方法について基本的試験条件を示した。

また，セメント系材料に対して毛管圧力の測定試験，及びガス透過試験を行ない，得られたガス透過試験結果に対して連続媒体に対する2相流モデルの適用性が高いことを確認した。

今後はさらにセメント系材料に対して信頼性向上を図るばかりでなく，配合，劣化による透過特性への影響等に係るデータの充実と整備を行う必要がある。

付 録

以下に本研究において設定した JIS モルタル , 及びセメントペーストの 2 相流パラメータを追加したガス移行特性データベースの「セメント系」部分を添付する。

| | | |
|-------|-------------------------------|----------|
| 付表 -1 | ガス透過特性データベース[セメント系]透過係数 | 付-2 (34) |
| 付表 -2 | ガス透過特性データベース[セメント系]毛管圧 | 付-3 (35) |
| 参考文献 | | 付-4 (36) |

付表-2 ガス透過特性データベース [セメント系] 毛管圧

| No. | 試料名 | 材料 | 組成 | 気圧差 (kPa) | 飽和湿度 (%) | 試験厚 (mm) | 試験方法 | 試験条件 | | | | | 毛管圧 (Pa) | | | | 備考 | 出典 | | | | |
|-----|-----------|---------|-----------------------------------|--------------|-------------|----------|---------------|----------|--------------|------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------------|-----------------|----|
| | | | | | | | | 試料 形状 | 試料寸法 (mm) | 試験気 | 飽和圧 (kPa) | 湿度 (%) | 毛管圧 S1x | S2x | S3x | PH | | | α | β ₁ | β ₂ | |
| 1 | コンクリート | LPC | W/C=41.2% S/a=44.4% | | | 8.158 | 細孔容積分布測定法 | 円柱 | 100φ×20h | | 0.0 | Nitrogen Influx | 0.20 | 0.80 | - | 7.30E+07 | 1.58 | 0.00E+00 | | | 1 | |
| 2 | コンクリート | OPC | W/C=41.2% S/a=44.4% | | | 8.158 | 細孔容積分布測定法 | 円柱 | 100φ×20h | | 0.0 | Nitrogen Influx | 0.20 | 0.80 | - | 1.30E+07 | 1.28 | 0.00E+00 | 行跡部 | | 2 | |
| 3 | モルタル | OPC | W/C=75.0% | | | 8.273 | 細孔容積分布測定法 | 円柱 | 100φ×20h | | 0.0 | Nitrogen Influx | 0.20 | 0.80 | - | 8.00E+07 | 1.58 | 0.00E+00 | | | 3 | |
| 4 | モルタル | OPC | W/C=85.0% | | | 8.243 | 細孔容積分布測定法 | 円柱 | 100φ×20h | | 0.0 | Nitrogen Influx | 0.20 | 0.80 | - | 7.30E+07 | 1.58 | 0.00E+00 | | | 4 | |
| 5 | モルタル | OPC | W/C=85.0% | | | 8.235 | 細孔容積分布測定法 | 円柱 | 100φ×20h | | 0.0 | Nitrogen Influx | 0.20 | 0.80 | - | 8.70E+07 | 1.58 | 0.00E+00 | | | 5 | |
| 6 | コンクリート | OPC | W/C=40~70% | | | 8.120 | 水銀注入法 | | | 水銀 | 0.0 | Nitrogen Influx | 0.20 | 0.10 | - | 1.00E+08 | 1.28 | 1.00E+00 | | | 6 | |
| 7 | ポラスコンクリート | | | 1.800 | 0.580 | 8.258 | 水銀注入法 | | | 水銀 | | Nitrogen Influx | 0.44 | 0.80 | - | 7.10E+07 | 0.88 | 0.00E+00 | | | 7 | |
| 8 | コンクリート | | W/C=40~70% S/a=8~9% | | | 8.107 ~ | | | | | | | | | | | | | | | 8 | |
| 9 | モルタル | | W/C=80.0% | | | 8.150 | | | | | | | | | | | | | | | 9 | |
| 10 | コンクリート | | | | | - | | | | | | | | | | | | | | | 10 | |
| 11 | コンクリート | SRPC | W/C=45.0% w/c=4.8% | | | 2.470 | 8.130 | | | | | | | | | | | | | | 11 | |
| 12 | コンクリート | FFA/OPC | W/C=47.0% w/c=4.1% | | | 2.430 | 8.110 | 水銀注入法 | | 水銀 | | | | | | | | | | | 12 | |
| 13 | グラウト | FFA/OPC | W/C=40% w/c=4.1% | | | 1.380 | 8.280 | 水銀注入法 | | 水銀 | | | | | | | | | | | 13 | |
| 14 | コンクリート | FFA/OPC | W/C=47.0% w/c=4.1% | | | 2.430 | 8.110 | 水銀注入法 | | 水銀 | | | | | | | | | | 試験 | 14 | |
| 15 | コンクリート | FFA/OPC | W/C=47.0% w/c=4.1% | | | 2.430 | 8.110 | 水銀注入法 | | 水銀 | | | | | | | | | | 行跡部 | 15 | |
| 16 | コンクリート | | W/C=65.0% S/a=47.0% | | | 8.805 | | 水銀注入法 | | 水銀 | 0.0 | | | | | | | | | | 16 | |
| 17 | コンクリート | OPC | W/C=41.2% S/a=44.4% | | | 8.158 | 細孔容積分布測定法 | 円柱 | 100φ×20h | | 0.0 | | | | | | | | | | 17 | |
| 18 | ポラスモルタル | M1 | w/c=4% | 2.520 | | 8.270 | 触媒材料、カス押し、変圧法 | 円柱 | φ274×2,700 | 水 | | 0 | Nitrogen Influx | 0.200 | | 5.00E+00 | 0.58 | | | 透過係数E-10 | 18 | |
| 19 | ポラスモルタル | M1 | w/c=4% | 2.520 | | 8.270 | 触媒材料、カス押し、変圧法 | 円柱 | φ274×5,400 | 水 | | 0 | Nitrogen Influx | 0.200 | | 5.00E+00 | 0.58 | | | 透過係数E-10 | 19 | |
| 20 | セメント骨材材料 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 透過係数1.5~4.4E-10 | 20 |
| 21 | セメント骨材材料 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 透過係数1E-10 | 21 |
| 22 | セメント骨材材料 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 透過係数1E-10 | 22 |
| 23 | ポラスコンクリート | | 骨材1~4mm w/c=4% | | | 0.101 | | | | | | | | | | | | | | | | 23 |
| 24 | ポラスコンクリート | | 骨材1~4mm w/c=8% | | | 0.107 | | | | | | | | | | | | | | | | 24 |
| 25 | ポラスコンクリート | | 骨材1~4mm w/c=8% | | | 0.107 | | | | | | | | | | | | | | | | 25 |
| 26 | ポラスコンクリート | | 骨材2~3mm 非圧縮 | | | 0.278 | | | | | | | | | | | | | | | | 26 |
| 27 | ポラスコンクリート | | 骨材2~3mm 1500kg/m ³ に圧縮 | | | 0.340 | | | | | | | | | | | | | | | | 27 |
| 28 | ポラスコンクリート | | 骨材2~3mm 2200kg/m ³ に圧縮 | | | 0.120 | | | | | | | | | | | | | | | | 28 |
| 29 | モルタル | OPC | 水/セメント比:1/31wt w/c=6% | | | 2.10 | 0.180 | 透心法 | 円柱 | φ77.2×47.2 | 蒸留水 | 0.0 | 飽和 | Nitrogen Influx | 0.150 | | 1.00E+08 | 1.00 | 0.00E+00 | | 29 | |
| 30 | セメントペースト | OPC | w/c=8% | | | 1.00 | 0.400 | 透心法 | 円柱 | φ77.7×50.0 | 蒸留水 | 0.0 | 飽和 | Nitrogen Influx | 0.185 | | 1.00E+08 | 0.50 | 7.00E+00 | | 30 | |

参 考 文 献

- 1) 財団法人 原子力環境整備センター：“放射性廃棄物処分高度化システム確証試験 報告書 平成7年度”（1996）
- 2) 財団法人 原子力環境整備センター：“放射性廃棄物処分高度化システム確証試験 報告書」平成8年度”（1997）
- 3) Mayer G., Jacobs F., and Wittmann F. H.: "Experimental Determination and Numerical Simulation of the Permeability of Cementitious Materials", Nuclear Engineering and Design, 138, pp.171-177 (1992)
- 4) 東洋エンジニアリング株式会社：“TRU 廃棄物処分システムの性能評価手法の検討（ ）”，PNC ZJ1277 95-001（1995）
- 5) Iriya, K, et al.: "Cementitious Backfill Materials for a L/ILW Repository - Investigations of Gas Transport Properties", Nuclear Engineering and Design, 129, pp.49-55 (1991)
- 6) Iriya K., et al.: "Gas Transportation in Saturated Cementitious Materials", Distributed Paper at Poster Session of Scientific Basis for Nuclear Waste Management XVIII, pp.8 (1994)
- 7) Pihlajavaara.: "Long-Term Gas Permeability Properties of Concrete in Wet Repository Conditions", Nuclear Engineering and Design, 129, pp.41-48 (1991)
- 8) Harris, A. W., et al.: "Transport of Gases through Concrete Barriers Task 3 Characterization of Radioactive Waste Forms", EUR 14194 EN, pp.83 (1993)
- 9) Rodwell W. R., Harris A. W., Horseman S. T., Lalieux P., Muller W., Ortiz Amaya L. and Pruess K.: "Gas Migration and Two-Phase Flow through Engineered and Geological Barriers for a Deep Repository for Radioactive Waste A Joint EC/NEA Status Report", EUR 19122 EN, pp145-146 (1999)
- 10) Mayer G., Moetsch H. A. and Wittmann F. H.: "Large Scale Experiment for Water and Gas Transport In Cementitious Backfill Materials (Phase 1)", NAGRA Technical Report 98-03 (1992)
- 11) Wittmann F. H.: "CORROSION AND GAS GENERATION IN RADIOACTIVE WASTE REPOSITORIES", pp83-99, AEDIFICATIO Publishers, CH-8103 Unterengstringen, Switzerland, (1994)
- 12) 東洋エンジニアリング株式会社：“ニアフィールド構成材料のガスの移行特性に関する研究”，JNC TJ8400 2002-046（2002）