

# 論文 非ニュートン流体力学に基づいたコンクリート中の微速透水機構に関する研究

岡崎 慎一郎<sup>\*1</sup>・岸 利治<sup>\*2</sup>

要旨：コンクリート中の液状水の挙動の把握は，構造物の耐久性評価にとって重要な指標である。透水試験装置を用いた既往の研究においてもこの液状水の挙動における非ダルシー性の存在を指摘している。本研究ではこの現象に対して，液状水にビンガム流体モデルを適用した解析を行ったところ，非ダルシー性が再現でき，定式化することが可能となった。

キーワード：液状水，耐久性，非ダルシー性，ビンガム流体，透水

## 1. はじめに

近年，地下に建設される放射性廃棄物処理施設の止水材料として，ベントナイト系の人工バリア材料の他に，コンクリートの使用が検討されている。一方でコンクリート構造物はひび割れ，打継目などが弱点となり，コンクリートそれ自身の信頼性が確立されていないのが現状である。しかしながら，大型のマッシブな鉄筋コンクリート構造物における透水実験<sup>1)</sup>によると，液状水の浸透深さは供試体厚 1m に対して数センチのオーダーであり，コンクリート自身は難透水性であるのも事実である。そこで本研究では，コンクリートの高圧環境下における液状水の挙動を実験的に把握し，さらにコンクリートの透水現象のモデル化と定式化を行った。

## 2. 透水試験装置を用いた実験結果

### 2.1 既往の研究

高岡らによると<sup>2)</sup>，アウトプット法による透水試験装置を用いた実験結果に基づいて，コンクリート中の微速透水現象について，コンクリートの透水パスは均一ではなく，透水性の高いもの，低いものが存在すること，そしてそれぞれのパスには始動動水勾配が存在し，流速を持つ間は動摩擦的に，一度透水が停止した後の昇圧過程において停止した水が動き出す場合は静

摩擦に作用するとある。そこで同装置を用いてこの現象の確認を行った。

### 2.2 アウトプット法の概要と試験方法

アウトプット法とはコンクリート供試体に水を圧入し，供試体対面に透過した水量を計測する方法である。図-1 に透水試験装置，図-2 に透水セルの断面図を示す。



図-1 透水試験装置の外観

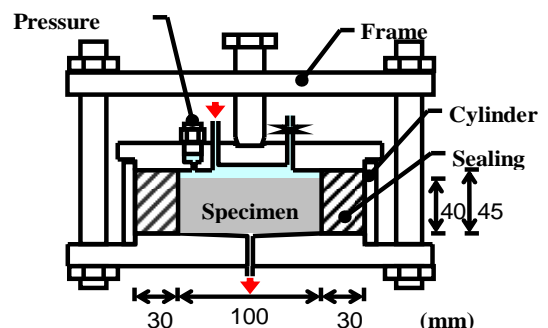


図-2 透水セルの断面図

\*1 東京大学大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 修(工) (正会員)

\*2 東京大学助教授 東京大学生産技術研究所 博(工) (正会員)

表-1 配合表

Type of Mix	W	C	S	G	curing
65% - 750	142	219	945	1053	封緘, 気中
65% - 600	228	351	755	841	封緘, 気中

表-1 に本実験に使用した供試体の配合を示す。W/C と細骨材量と粗骨材量の割合は一定とし、いずれも W/C=65%, s/a=48%とした。配合種類の数字は細・粗骨材の合計体積 ( $1/m^3$ ) を表している。以下に試験手順を示す。各供試体について初めに水圧を 3MPa まで上げ 0.1MPa になるまで降圧を行い、その間に動水勾配と流量の関係をプロットする。その後、再び 3MPa になるまで昇圧を行い、さらに降圧、昇圧、降圧と繰り返す。ここで動水勾配  $i$  は、透水圧力水頭を供試体厚で割ったもの、流量は単位時間、単位面積当たりの流量を示している。

図-3 と図-4 に封緘養生供試体において、3度の降圧過程、2度の昇圧過程の結果を示したグラフを示す。実験結果のはじめに骨材量の影響を示す。二図を比較すると、骨材量が多い程流量は小さい傾向にある。これは高 W/C であるために、骨材周りの遷移帯の影響よりもペースト部の透水が支配的であるためと考えられる。これらの現象は気中養生の供試体においても確認された。またこれらの図の降圧過程のみを見ると、試験を進めるにつれ、流量の減少が確認できる。これは透水試験中における水和の進行が考えられる。さらに Hans W. Reinhardt は、水に比べ  $Ca(OH)_2$  溶液の方が浸透性が高い事を指摘している。これは、硬化体中の透水は通水溶液と硬化体壁面の吸着の影響が大きく、流量の減少は  $Ca(OH)_2$  の溶脱によるものであると考えられる。

さらに、昇圧過程の流速はその直前の降圧過程の流速より小さい値を示している。また、昇圧-1 のグラフと降圧-2 のグラフ、昇圧-2 のグラフと降圧-3 のグラフを比較すると、昇圧過程の流量が小さいことが分かる。これは  $Ca(OH)_2$

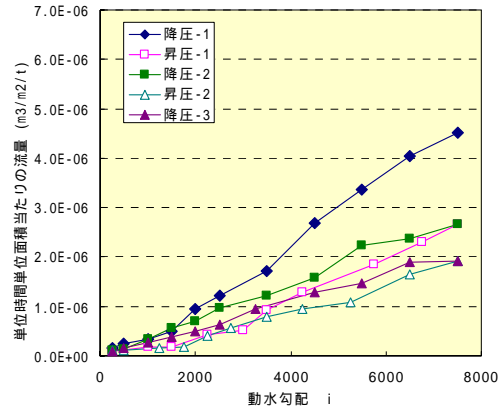


図-3 65%-750 封緘養生供試体の降圧・昇圧

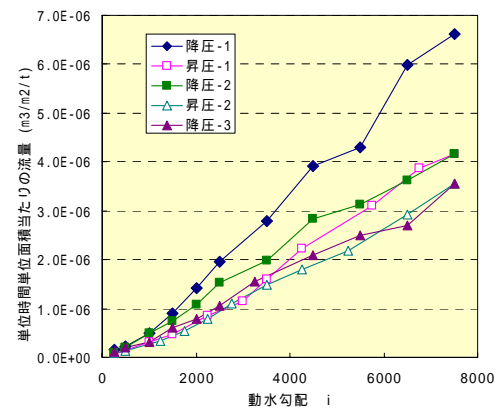


図-4 65%-600 封緘養生供試体の降圧・昇圧

の溶脱の影響を考慮しても、降圧過程と昇圧過程に独特な透水機構が存在することを示唆しているものと考えられる。同様の現象は気中養生においても見られる。さらに図-5 に封緘養生時の、図-6 に気中養生時の供試体において、透水試験で、もはや流量の変化が見られなかったものについての降圧・昇圧過程を示す。封緘養生の供試体について動水勾配が 5000 以下において骨材量による流量の差はほとんど見られないが、降圧・昇圧過程において流量の差が見られ、いずれも非ダルシー性が確認できる。図-6 の気中養生のものについては封緘養生と同様な傾向が見られるが、65%-750 については動水勾配が約 2000、65%-600 については動水勾配が 800 程度で流量の停止が確認でき、降圧過程と昇圧過程により流量の停止する動水勾配が異なることが分かる。これらの現象にはコンクリートの透水現象における独特の支配機構が存在すると考えられる。

この支配機構の概念を図-7 に示す。降圧過程において動水勾配-流速関係が非ダルシー則に従うように曲線を描きながら0より大きな値に収束する。これは供試体に無数存在する透水パスにおいて、透水圧が小さくなるとパス群の透水が順次ストップすると考えられる。これはマクロ視点から見ると透水が動摩擦的に止まると考えられる。また昇圧過程では降圧過程よりも流速が小さいことから、透水パスは動摩擦的に静止する圧力よりも大きな水圧を与えなければ透水しない、つまり各透水パスにおいて静止摩擦的に作用する始動動水勾配存在がするものと考えられる。次の節ではこれらの現象を踏まえて、本実験のモデル化と定式化を行う。

### 3. 透水モデリングおよび定式化

#### 3.1 ビンガム流体を用いた透水モデリング

Daniel Hillel によると<sup>3)</sup>、多孔質物質中における液状水の移動に関して、水粒子が物質壁面の吸着力場の影響を大きく受けることにより、ダルシー則に従わない多孔質物質の透水現象が起こるとされている。つまり、液状水が通常のニュートン流体よりも降伏値をもつビンガム流体（非ニュートン流体の一種）の性質を示すとある。ニュートン流体と非ニュートン流体であるビンガム流体について図-8 に示す。この流体モデルはせん断応力がある値（降伏値） $\tau_0$  以上にならないと流動しないという性質を持つ。これを定式化すると以下の式のようになる<sup>4)</sup>。

$$\begin{cases} \tau - \tau_0 = \eta_y \dot{\gamma} & (\tau \geq \tau_0) \\ \dot{\gamma} = 0 & (|\tau| < \tau_0) \end{cases} \quad (1)$$

( $\tau$ :せん断応力,  $\dot{\gamma}$ :せん断速度,  $\tau_0$ :せん断降伏値,  $\eta_y$ :塑性粘度)

単管における液状水の水速度分布とせん断応力分布を図-9 に示す。せん断応力分布はニュートン流体と同様であるが、流速分布が異なる。ここで壁面におけるせん断応力を  $\tau_w$ (せん断応力の最大値)とすると以下のケースが考えられる。

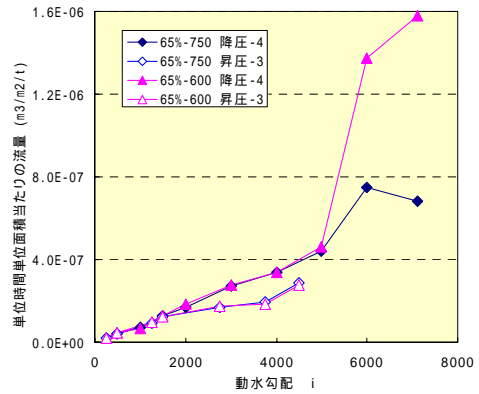


図-5 封緘養生供試体の昇圧・降圧

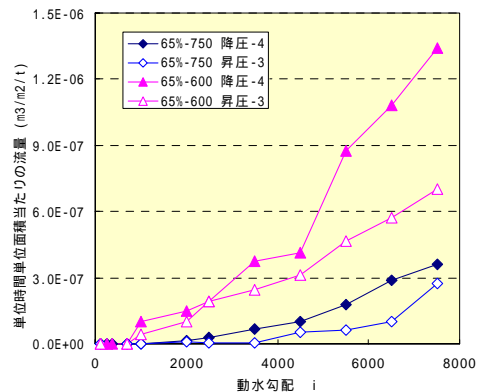


図-6 気中養生供試体の昇圧・降圧

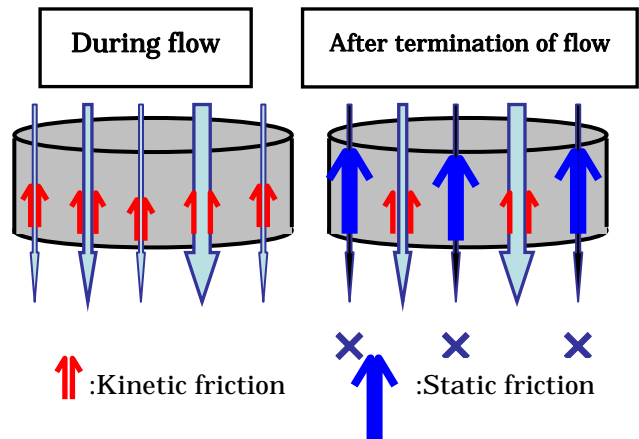


図-7 水の動摩擦的、静摩擦的挙動の概念図

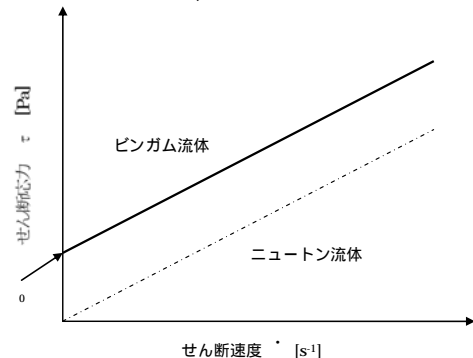


図-8 各流体モデルにおけるせん断速度とせん断応力の関係

$\tau_0 < \tau_w$  の場合 (流速)

)  $\tau_0 < \tau < \tau_w$  の場合

せん断応力が降伏値より大きくなるので流動が発生し, その流速は以下の式で表される。

$$u = \frac{i}{4\eta_y} \{R^2 - r^2 - 2r_0(R - r)\} \quad (2)$$

(u:流速, i:動水勾配, R:管の半径, r:管の中心からの距離,  $r_0$ :流体が降伏するときの管の中心からの距離)

)  $\tau < \tau_0 < \tau_w$  の場合 (流速)

降伏値よりも小さい領域であるので流動は起こらないが, )の流動する領域に引きずられることにより流速をもち, 以下の一定の値となる。

$$u = \frac{i}{4\eta_y} (R - r_0)^2 \quad (3)$$

$\tau_0 > \tau_w$  の場合

せん断応力分布の最大値  $\tau_w$  が降伏値を下回るため, 以下の速度となる。

$$u = 0 \quad (4)$$

これらの流速分布から各管の流量を算出する。流量  $Q$  は以下の式で算出される。

$$Q = \int_0^R 2\pi r u dr \quad (5)$$

)  $\tau_0 < \tau_w$  の場合 (流量)

本解析において, 液状水は重力を受けるので, これを加味した流量  $Q$  は以下の式となる。

$$Q = \frac{\pi}{128\eta_y} \left( \frac{1}{4}(i + \rho g) - \frac{4}{3}\tau_0 + \frac{64}{3} \frac{\tau_0^4}{(i + \rho g)^3} \right) \quad (6)$$

( :細孔径で  $=2r$ )

$\tau_0 > \tau_w$  の場合 (流量)

流速  $u=0$  であるので, 以下の式となる。

$$Q = 0 \quad (7)$$

次に, モデル供試体における総流量を算出する。モデル供試体は実験と同様に  $100 \times 40\text{mm}$  の円柱供試体とする。解析を進めるにあたり, 本モデルにおける流動を支配する2つのパラメータ  $\eta_y$  と  $\tau_0$  についての性質を確認するため, 以下のケースについて総流量を算出した(図-10)。

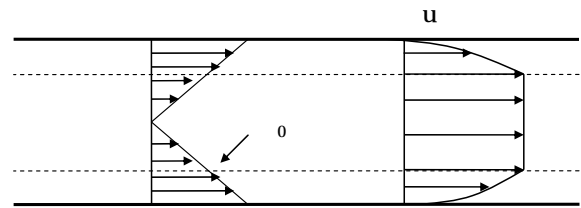


図-9 単管内の流体におけるせん断応力および流速分布

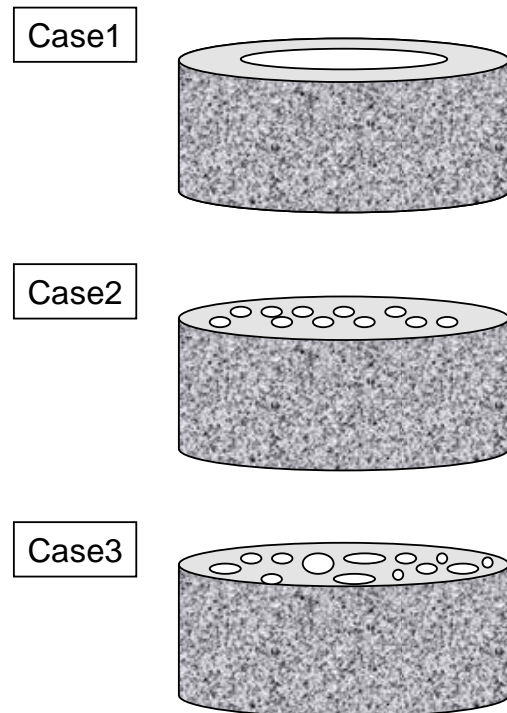


図-10 ケース毎解析モデル図

Case1

供試体の断面における細孔量断面積が, 総細孔断面量  $S/2$  ( $S$ :モデル供試体断面)である単管1本で構成される場合

Case2

供試体の断面における細孔量断面積が, 総細孔断面量  $S/200$  の単管100本で構成される場合

Case3

供試体の断面における細孔量断面積分布がコンクリートの細孔量分布曲線に従う単管で構成される場合

### 3.2 Case1, 2 の解析結果

図-11, 図-12 に Case1,2 において,  $\eta_y$  を  $10\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$  と一定とし  $\tau_0$  を 200, 600, 800 $\text{N}/\text{m}$  と変化させた場合について示す。両ケースで流量, 始動動水勾配のオーダーが違うものの,  $\tau_0$  が大きくなるにつれて始動動水勾配, つまり流動が開始する動水勾配の値が大きくなり, 液状水の始動後は同一の直線上に乗るといった傾向があることが分かる。つまり  $\tau_0$  は始動動水勾配のみを支配することが示された。

次に各ケース  $\tau_0$  を  $600\text{N}/\text{m}$  と一定とし,  $\eta_y$  を 10, 20, 30  $\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$  とした場合を図-13, 図-14 に示す。Case1 の場合動水勾配が 40 付近, Case2 では 400 付近の同じ値において始動動水勾配が見られ,  $\eta_y$  が増加するにつれて流量が減少する傾向が見られる。つまり,  $\eta_y$  は始動動水勾配には影響せず, 流量の変化率のみ支配することが示された。

### 3.2 Case3 の解析結果

次に Case3 である, コンクリートの細孔径分布を透水パスに用いて流量を算出する。ただし, 骨材部分と骨材周りの遷移帯では透水が起らないものとする。具体的には, 65%-75% の場合, 骨材割合は断面において 75% を占めるので, 残り 25% 部分を透水部分としてモデル化する。さらにコンクリートの透水パスは, 異なる径を有する単管の集合とみなし, 細孔面積分布密度関数については水銀圧入式ポロシメータによる試験結果を参考に Raleigh-Ritz 分布を適用し, 式(8)によって表現した。ただし, 全配合において, ほぼ同程度の結果がポロシメータ試験によって得られたので, すべての供試体ケースにおいて以下の値を決定した。

$$dS(\phi) = S(\infty)B \exp(-Br) d \ln r \quad (8)$$

( $B=15000, S(\infty)$ : 総細孔面積で  $S(\infty)=0.166$ )

図-15 に封緘養生供試体に対して初めて透水した場合の供試体と  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  が溶脱して流量が減少した供試体の実験結果, さらにこれら結果

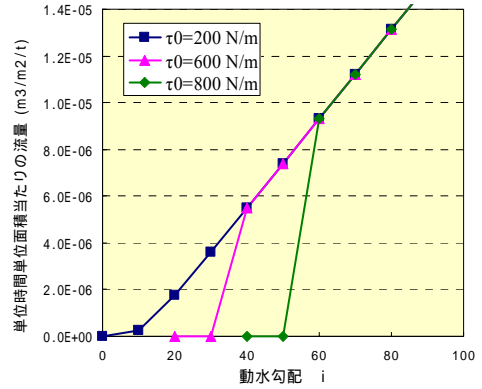


図-11 Case1,  $\eta_y$  一定時における  $\tau_0$  の影響

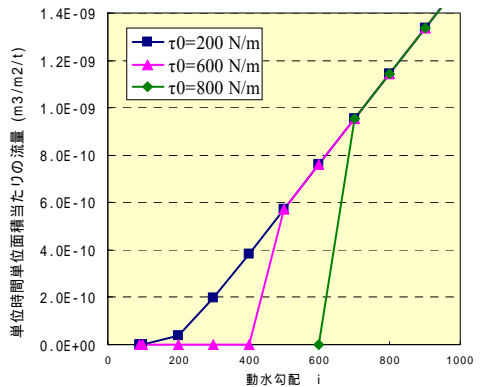


図-12 Case2,  $\eta_y$  一定時における  $\tau_0$  の影響

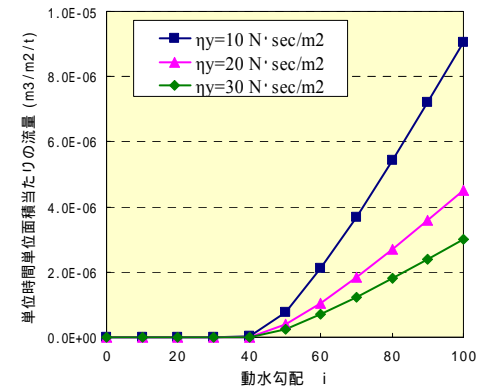


図-13 Case1,  $\tau_0$  一定時における  $\eta_y$  の影響

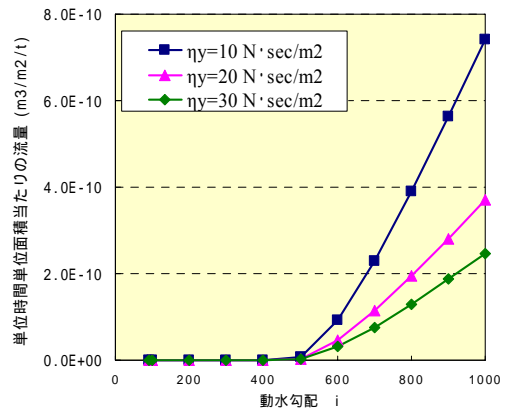


図-14 Case2,  $\tau_0$  一定時における  $\eta_y$  の影響

について前節で示したモデルにおける  $\eta_y$  と  $\tau_0$  を最適化した解析結果を示す。解析値は、一般的に用いられるような原点を通る直線ではなく、原点ではない部分に始動動水勾配を持ちながら曲線を描くグラフとなっている。この曲線によって浸透流の非ダルシー性が表現可能となったと言える。パラメータについては両者とも  $\tau_0=0.05\text{N/m}$  であり、原点近くのところに始動動水勾配を持つ。 $\eta_y$  は、未透水時では  $\eta_y=3.5\times 10^{-7}\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$  であり  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶脱後は  $\eta_y=1.8\times 10^{-6}\text{N}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$  となり、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶脱等による流量の減少の影響は  $\eta_y$  を変化させることで表現が可能となった。

次に始動動水勾配が存在する実験例として  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶脱後の気中養生供試体の結果と解析結果を図-16 に示す。ここに示した2つのケースは出発試料が異なり、 $\tau_0$  が大きく異なるが、それぞれ  $\tau_0=0.8, 2.0$  とすることで  $i=300$  と  $1000$  付近の動水勾配が再現できた。

#### 4. 結論

1) アウトプット法による透水試験結果により、コンクリート中の微速透水現象について、コンクリートの透水パスは均一ではなく、透水性の高いもの、低いものが存在すること、そしてそれぞれのパスには動水勾配のしきい値が存在し、流速を持つ間は動摩擦的に、一度透水が停止した後の昇圧過程において停止した水が動き出す場合は静摩擦的に作用すると考えられる。

2) 非ニュートン流体モデルの1つであるビンガム流体モデルをコンクリート中の液状水に適用空隙系分布を考慮することによって、非ダルシー性の再現、さらには実験値のフィッティングが2つのパラメータ  $\eta_y$  と  $\tau_0$  によって再現できることが示された。

また、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$  の溶脱の影響等による、流量の変化は  $\eta_y$  を変化させることで表現でき、始動動水勾配は  $\tau_0$  を用いることで表現が可能であった。

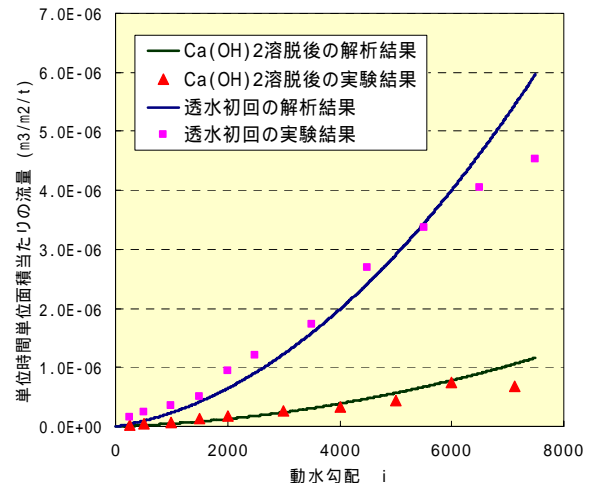


図-15 封緘養生時の実験結果と解析結果

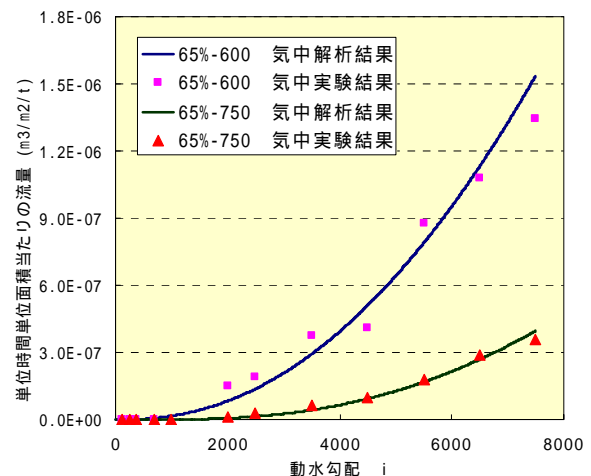


図-16 気中養生して  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶脱後の実験結果と解析結果

謝辞：本研究は、経済産業省から（財）原子力環境整備促進・資金管理センターへ委託された研究の一部として、援助を受けて実施した。ここに記して、謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 辻幸和, 小西一寛, 藤原愛: コンクリート構造物の難透水性評価, 技報堂出版, 2004.9
- 2) 高岡秀明, 岸利治: コンクリート中の微速透水現象の支配メカニズムとダルシー則適用性に関する研究, セメントコンクリート論文集, No59, pp246-252, 2005.2
- 3) ダニエル・ヒレル: 環境土壌物理学 土と水の物理学, 農林統計協会, 2001.1
- 4) 中村喜代次: 非ニュートン流体力学, コロナ社, 1997.9