

論文 中空円筒コンクリート構造物の長期透水性評価実験

坂口雄彦*1・小西一寛*2・藤原 愛*3・辻 幸和*4

要旨: 止水欠陥を有する鉄筋コンクリート構造物の透水性を、時間軸の影響を含めて評価することを目的とし、実大の中空円筒鉄筋コンクリート構造物を構築して透水試験を実施した。透水試験は、構造物全体及び止水欠陥部を対象とし、約 1.2 年の長期にわたって実施した。透水性の測定は、加圧注入法（注入側の流量）と、ペンフレージョン法の併用が可能な閉塞容器による集水法（流出側の流量）を適用し、蒸発成分を含めて評価した。

キーワード: 中空円筒構造物, 透水係数, 加圧注入法, ペンフレージョン法, 集水法

1. はじめに

廃棄物処分サイロや液体燃料貯蔵ピットなどの高水密性が特に要求される構造物や地下水圧が作用する地下施設が、多く建設されるようになってきている。従来、コンクリートの水密性の評価は、母材の透水試験や供試体でのひび割れ透水試験などが行われているが、構造物としての評価は極めて少ない[1]。構造物の透水性評価例としては、伊藤らがひび割れ等のグラウト止水効果を判定することを主目的としてサイロ構造物で実施している[2]。しかし、実際の構造物では長期的な浸透現象と考えられることから、透水性の評価に当たっては、時間依存性を含めた透水性を見極める必要がある。

本研究では、こういった背景にあって、止水欠陥を有する中空円筒鉄筋コンクリート構造物の透水性を時間軸の影響を含めて評価することを目的とし、実大の中空円筒構造物を構築し、構造物全体及び止水欠陥部（ひび割れ、打継目）を対象とした透水性評価試験を、約 1.2 年の長期にわたって実施した。透水性の測定では、構造物規模に対応した容量と蒸発量程度の極微量流量に対応した精度を確保する必要性から、特別に設計した加圧装置と蒸発成分（ペンフレージョン法）から流水（転倒樹、電子天秤）までの測定が可能な閉塞容器での集水法とを適用した。

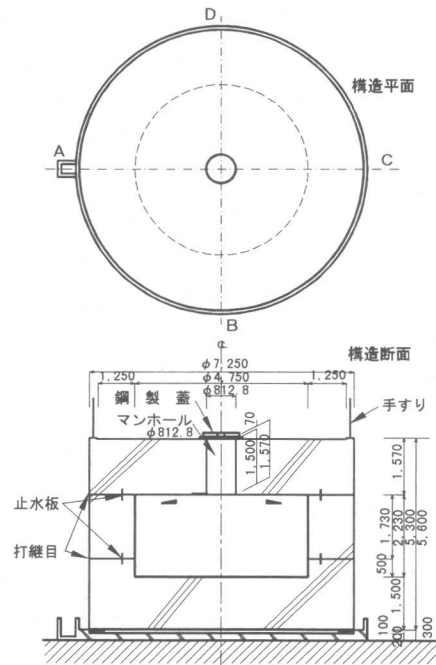


図-1 構造物の概要

2. 中空円筒構造物の概要[3]

- | | | | |
|----|------------------------|----|-------|
| *1 | (株) 熊谷組 技術研究所 土木構造グループ | 副長 | (正会員) |
| *2 | (株) 大林組 土木技術本部 設計第二部 | 課長 | (正会員) |
| *3 | (財) 原子力環境整備センター 研究第2部 | 次長 | 工修 |
| *4 | 群馬大学教授 工学部 建設工学科 | 工博 | (正会員) |

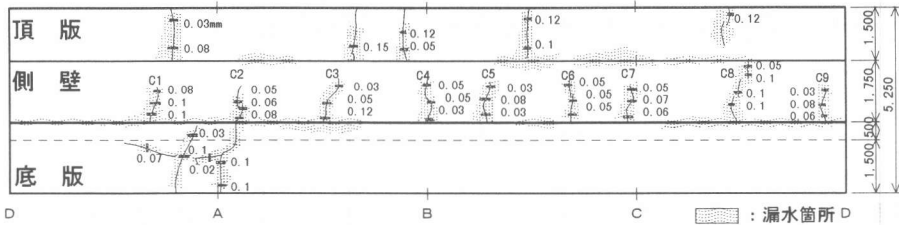


図-2 透水試験開始時のひび割れ発生状況及び漏水状況（展開図）

表-1 コンクリートの配合

セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C	細骨材 S	骨材 G	石灰石粉	高性能AE減水剤	空気量調整剤
2成分系発熱セメント	20	12±2.5	4±1	40	40.0	154	385	741	1023	30	5.585 (1.5%)	0.84 (6.5A)

構造物は、図-1に示すように外径7.25m、高さ5.25m、頂版・底版の厚さ1.5m、側壁の厚さ1.25mの鉄筋コンクリート製である（主鉄筋：D29～35@200mm、かぶり12cm）。施工に当たっては、下部の打継目を拘束緩和を目的に底版上面より50cm上部に上げ、打継目の処理は、凝結遅延剤散布後、翌日に高压水洗浄した。加えて、30cm幅の止水板（ステンレス製）を設置した。止水欠陥は、結果的に貫通性のひび割れ9本（ひび割れ幅 $w=0.03\sim 0.12\text{mm}$ 、長さ $l=0.93\sim 1.47\text{m}$ ）、及び上下の打継部2ヶ所（長さ $l=22.8\text{m}$ ）が発生した。図-2にひび割れ発生状況を示す。また、頂版部上面及び底版の数カ所にも漏水箇所が発生したが、これらはエポキシ樹脂で止水処理を行い、流出量の評価からは除外することとした。

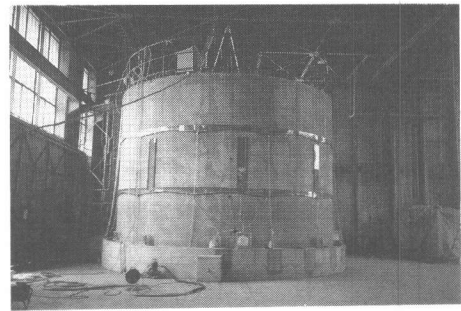


写真-1 構造物の外観

コンクリートの配合を表-1に示す。使用セメントは、2成分系低発熱セメント（中庸熟ホトランドセメント45%、高炉スラグ微粉末55%）である。

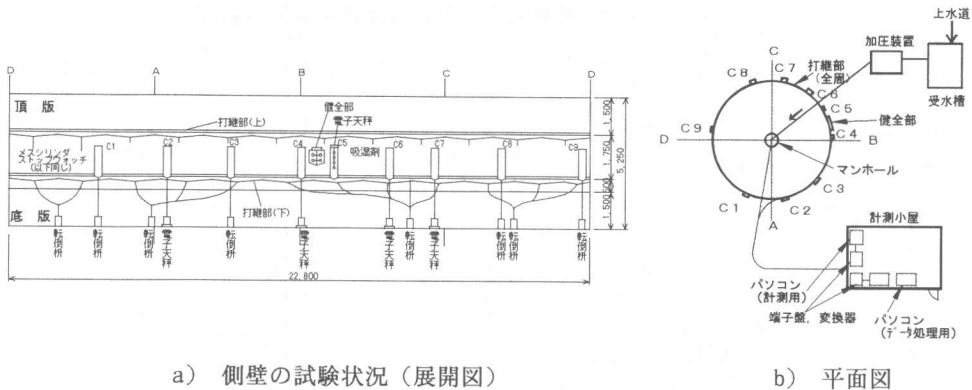
構造物の材齢は約2.0年を経過している。打込み後の温度履歴は、側壁で打込み温度8.0℃（液体窒素によるプレクーリングを実施）で、最高温度上昇時は43.5℃となり、このときのひび割れ指数は2.1とひび割れ発生確率は小さい状況にあった[4]。材齢1ヶ月までには幅が0.05mm以下で若干の漏水のある3本の温度ひび割れの発生が認められた程度であったが、材齢が1.5年経過した時点から上述のような貫通ひび割れが発生・顕在化した。この原因としては、打込み時の残留応力に加え、季節的な温度変化、自己収縮、加圧による負荷応力などが考えられる。

供試体の材齢1年時の品質管理試験の結果は、圧縮強度 60.0N/mm^2 （28日； 48.0N/mm^2 ）、引張強度 4.86N/mm^2 （28日； 3.50N/mm^2 ）、ヤング係数 $3.66 \times 10^4\text{N/mm}^2$ （28日； $2.98 \times 10^4\text{N/mm}^2$ ）であった。インプット法による母材コンクリート単体の透水係数は $k=3.9 \times 10^{-15}\text{m/s}$ であった。

写真-1は、構造物の外観と試験状況を示したものである。

3. 透水試験の方法

透水試験は、加圧注入法（注入側の流量）とベンチレーション法の併用が可能な閉塞容器による集水法



a) 側壁の試験状況（展開図）

b) 平面図

図-3 透水試験状況の概要

（流出側の流量）により実施した。図-3は、透水試験装置の全体概要を示したものである。試験期間は、冬場の12月から開始し、翌々年の2月までの約1.2年間である。

3.1 加圧透水試験（注入側）

頂版のマンホール部から注水し、その注入量を計測することにより、構造物の透水性を評価するものである。一般的に、岩盤の透水試験などに用いられる方法であるが、ここでは対象構造物がかなり大きいこと、1年間にわたる長期連続試験であることから、加圧水の自動供給が可能であり、かつ注入圧力の自動制御、注入量の自動記録が可能な試験装置を新たに製作して使用した[2]。注入圧力は、 $p=300 \pm 5 \text{ kPa}$ （マンホール位置）とした。

3.2 閉塞容器による集水法（流出側）

試験の対象は、ひび割れ9本、上下の打継部2ヶ所、健全部1ヶ所の合計12ヶ所である。各測定個所に合成樹脂の閉塞容器を取り付け、流量の大小によって測定方法を変えた。最も流量が多い場合は転倒樹（転倒回数による測定；測定精度： $\pm 1 \text{ ml}$ ）を用い、それより小さく液状水である場合は電子天秤（集水容器の質量測定；測定精度： $\pm 0.1 \text{ g}$ ）を用い、水蒸気による流出が無視できない状態、あるいは水蒸気流出のみの場合はベンゾレーション法[2],[5]（吸湿剤に水蒸気を吸収し、その質量を測定；測定精度： $\pm 0.1 \text{ g}$ ）を用いて測定し記録した。各測定個所における測定方法を、初期と最終段階で示したものが表-2である。

3.3 測定項目

測定項目は、注入量（水位変化）と流出量（転倒回数、重量変化）及びベンゾレーション測定容器内における温度・湿度、構造物内の水温・水圧である。測定頻度は、初期の2ヶ月間は1回/1日、それ以降は1回/1~2週とした。

3.4 透水係数の算定[2]

コンクリート中の水分移動は、水分の状態によって異なり、液状水ではダルシーの法則によると考えられるが、水蒸気では単純ではない[6]。しかし、ここでは評価の基準を統一して考えること、初期状態では液状水による流出量が支配的であることから、構造物内の水分移動はすべてダルシーの法則によって浸透すると仮定した。

まず、構造物全体の透水係数 $k(\text{m/s})$ は、構造物形状が単純でないため、FEMによる軸対称回転体モデルによる浸透流解析を行い、以下の式を算定した。

表-2 初期と最終測定における測定方法及び結果

対象部位	容器面積, ひび割れ幅, 長さ等	初 期		最 終		減少率 k _f /k _i	
		初年度12 k _i (m/s)	測定方法	年度2月 k _f (m/s)	測定方法		
全体注入量		5.88 × 10 ⁻⁹	加圧タンク水位 (超音波水位計)	1.03 × 10 ⁻¹¹	加圧タンク水位 (超音波水位計)	1.75 × 10 ⁻³	
流 出 部	C1	A=3,500cm ² w=0.08-0.1mm l=98.5cm	2.98 × 10 ⁻⁶	液状水 (転倒 枡)	4.10 × 10 ⁻¹¹	液状水 (転倒枡)	1.36 × 10 ⁻⁵
	C2	A=3,500cm ² w=0.05-0.08mm l=93.0cm	3.39 × 10 ⁻⁸	液状水 (電子天秤)	3.64 × 10 ⁻¹⁰	液状水+水蒸気 (電子天秤,ヘンツレージョン)	1.07 × 10 ⁻²
	C3	A=3,500cm ² w=0.03-0.12mm l=106.0cm	4.79 × 10 ⁻⁷	液状水 (転倒 枡)	2.74 × 10 ⁻¹¹	液状水+水蒸気 (電子天秤,ヘンツレージョン)	5.72 × 10 ⁻⁵
	C4	A=3,500cm ² w=0.03-0.05mm l=94.0cm	1.48 × 10 ⁻⁸	液状水 (電子天秤)	7.37 × 10 ⁻¹³	液状水+水蒸気 (電子天秤,ヘンツレージョン)	4.98 × 10 ⁻⁵
	C5	A=4,200cm ² w=0.03-0.08mm l=93.0cm	1.28 × 10 ⁻¹⁰	水蒸気 (ヘンツレージョン)	5.22 × 10 ⁻¹²	水蒸気 (ヘンツレージョン)	4.08 × 10 ⁻³
	C6	A=3,500cm ² w=0.05mm l=110.0cm	3.29 × 10 ⁻⁹	液状水 (電子天秤)	2.76 × 10 ⁻¹¹	液状水+水蒸気 (電子天秤,ヘンツレージョン)	8.39 × 10 ⁻³
	C7	A=3,500cm ² w=0.05-0.07mm l=96.0cm	2.46 × 10 ⁻⁷	液状水 (電子天秤)	4.99 × 10 ⁻¹²	水蒸気 (ヘンツレージョン)	2.03 × 10 ⁻⁵
	C8	A=4,200cm ² w=0.05-0.11mm l=147.0cm	2.23 × 10 ⁻⁶	液状水 (転倒 枡)	2.11 × 10 ⁻¹⁰	液状水 (転倒枡)	9.46 × 10 ⁻⁵
	C9	A=3,500cm ² w=0.03-0.08mm l=110.0cm	2.71 × 10 ⁻⁶	液状水 (転倒 枡)	3.67 × 10 ⁻¹¹	液状水 (転倒枡)	1.35 × 10 ⁻⁵
	健全部	A=2,500cm ² 止水欠陥なし	3.11 × 10 ⁻¹²	水蒸気 (ヘンツレージョン)	1.03 × 10 ⁻¹²	水蒸気 (ヘンツレージョン)	3.31 × 10 ⁻¹
打継部	(上)	l=22.8m (全周)	6.68 × 10 ⁻⁹	液状水 (メスリッ ク)	4.72 × 10 ⁻¹⁰	液状水 (メスリック)	7.07 × 10 ⁻²
	(下)	l=22.8m (全周)	2.32 × 10 ⁻⁷	液状水 (転倒 枡)	6.18 × 10 ⁻¹⁰	液状水 (転倒枡)	2.66 × 10 ⁻³
全体流出量計		7.92 × 10 ⁻¹⁰		2.65 × 10 ⁻¹²		3.35 × 10 ⁻³	

$$k = 1.32 \times 10^{-9} \cdot Q_i / \Delta p$$

ここに、 Q_i : 注入量 (cm³/s), Δp : 注入圧力増分 (3kgf/cm²)である。

つぎに、各集水用密閉容器を取り付けた止水欠陥部及び健全部については、すべて側壁にあるため放射流を仮定した透水係数算定式から、容器内の健全部流量を考慮して、次式を用いた。

$$k = [Q_0 - q_u (A - A_u)] \cdot \ln (R/r_0) L / [2 \pi A_u \Delta H_p]$$

ここに、 Q_0 : 流出量 (m³/s), q_u : 健全部の単位面積当たりの水蒸気流出量 (m³/s/m²), A : 容器内の測定面積 (m²), A_u : 止水欠陥部の対象面積 (m²), R : 構造物の外半径 (3.625m), r_0 : 構造物の内半径 (2.375m), L : 構造物の周長 (22.78m), ΔH_p : 注入平均圧力水頭 (32.65m)である。

4. 実験結果と考察

実験結果を整理し、主に透水係数の観点からの評価と検討を行う。

4.1 漏水状況

初期の全体の漏水量は、注入量で 1.16m³/day、流出量で 0.156 m³/day であり、ひび割れの1ヶ所 (C5) と健全部以外は、すべて液状水での漏水である。したがって、表-2 に示したようにほと

んどの流出量計測は、転倒樹と電子天秤で測定されている。注入量と流出量に差が大きいのは、①注入量では、頂版部のマホール周辺部や底版側面部からの漏水が比較的大きいこと、②構造物の母材コンクリートに吸収される量が注入量に含まれることなどが考えられる。したがって、注入量は構造物全体の透水性を表しているが、このような不確定な要因も含まれることになる。

最終的な全体の漏水量は、注入量で $2.03 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{day}$ 、流出量で $0.52 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{day}$ となり、概ね初期の数百分の1に大きく減少している。漏水状況は、いずれの止水欠陥部とも減少し、ひび割れの5本はベンチレーション法の併用あるいはベンチレーション法による測定に切り替えて測定しなければならなかった。つまり、ひび割れ部では、流出量が水蒸気の流出レベル程度まで減少したことを示している。打継部でも流出量は減少しているが、ひび割れ部ほど顕著ではなく、最終的にも液状水での測定が可能であった。

4.2 透水係数の変化

透水係数については、上述の漏水状況の検討から、注入量に含まれる不確定な要因を排除することができないため、流出量から算定された結果をもとに検討を加えることとする。

まず、全体の透水係数の変化を示したのが図-4である。初期の透水係数は $k=7.92 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ であったものが、経時的に減少し、最終的には $k=2.65 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ と約 1/300 になっている。健全部の透水係数が、 $k=1.03 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ であるので、同じオーダまで低下していることになる。

つぎに、代表的なひび割れ部、打継部(下)及び健全部の透水係数の変化を図-5～図-7に示す。ひび割れ部では、継続的に液状水の漏水があったC1をみると、 $k=2.98 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ から $k=4.10 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ に経時的に大きく減少しているのに対し、初期から水蒸気流出であったC5においては、 $k=1.28 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ から $k=5.22 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ に低減しているが、変動幅は比較的小さいことがわかる。打継部(下)では、 $k=2.32 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ から $k=6.18 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ に経時的に低減しているが、打継部(上)では、 $k=6.68 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ から $k=4.72 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ と低減率は小さい。いずれにしても、打継部は低減率・最終的な透水係数共にひび割れ部のそれほど顕著な減少傾向は認められない。健全部では、経時的な減少はなく、夏場で $k=1.59 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ と大きく、冬場で $k=1.03 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ と小さくなっている。これは、気温の高い夏場に蒸発量が多くなることを示しており、十分納得できる。

つぎに、初期と最終での低減率に注目して整理したものが、図-8と図-9である。表-2と併せてみると、ひび割れ部で低減率が大きく、最終的な透水係数は $10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ m/s}$ オーダ前後となっている。打継部では低減率がひび割れのそれより小さく、最終的な透水係数も 10^{-10} m/s オーダとなっている。健全部は、上述と同様季節変動の影響が大きく経時的な減少傾向は認められない。

5. まとめ

本研究より得られた主な結果を整理すると、以下のようになる。

- (1) 構造物全体及び各止水欠陥部や健全部の透水試験に、加圧注入法と閉塞容器による集水法、ベンチレーション法を併用して適用することにより、精度よく透水性を評価することができた。
- (2) ひび割れ幅が 0.1mm 程度以下の貫通ひび割れでは、通水が継続すると目詰まり現象により透水係数は大きく低減することが、実構造物においても確認された。
- (3) 打継部の透水係数は、通水が継続すると経時的に減少するが、ひび割れ部の透水係数ほど大きく減少せず、液状水の漏水が残る可能性が示唆された。一方、健全部の透水係数は、蒸発が主体であり、季節変動を生じ、夏は大きく、冬は小さくなる傾向がみられたが、経時的な減少傾向は認められなかった。

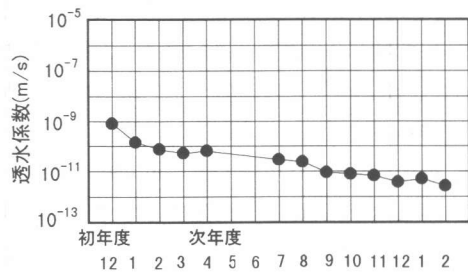


図-4 全体の透水係数の経時変化

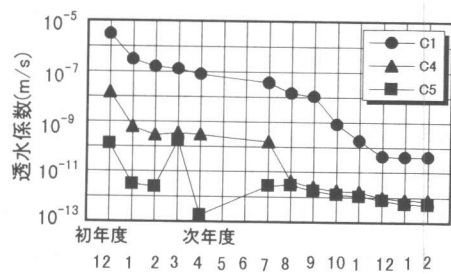


図-5 ひび割れ部における透水係数の経時変化

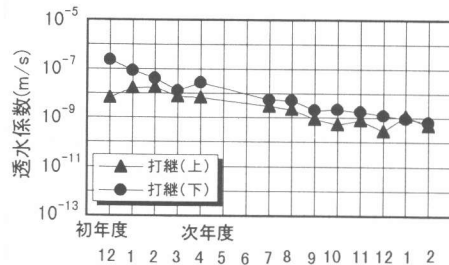


図-6 打継部における透水係数の経時変化

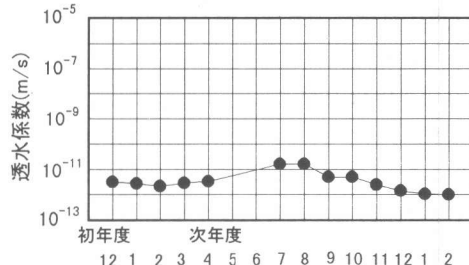


図-7 健全部における透水係数の経時変化

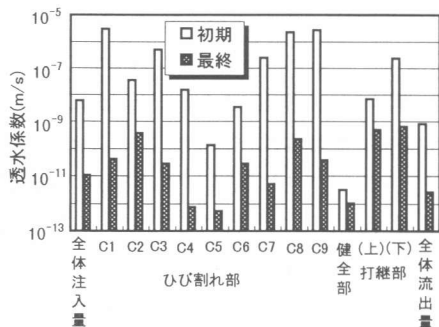


図-8 初期及び最終の透水係数

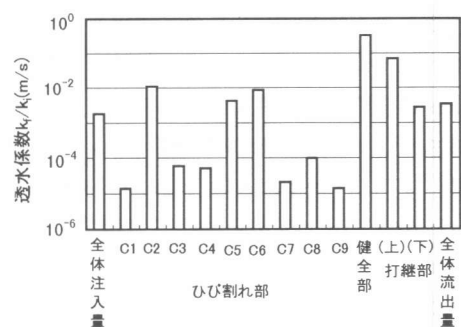


図-9 透水係数の低減率

あとがき

この研究をまとめるにあたり、(財)原子力環境整備センターに設けられたコンクリート構築物検討委員会の委員の方々から、貴重なご助言を頂き深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 伊藤 洋ほか：地下空間内外環境に係わるコンクリートの透水性評価について、「都市地下空間利用における大深度地盤」シンポジウム，土質工学会，pp.221～226，1993.11.
- [2] 伊藤 洋，西岡吉弘，坂口雄彦，藤原 愛：加圧注入法とベンチレーション法の併用による実大サイロ構造物の透水性評価実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.723～728，1994.
- [3] 小西一寛，伊藤 洋，藤原 愛，辻 幸和：中空円筒構造物の温度ひび割れの制御，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，1997.
- [4] コンクリート標準示方書（平成3年版）施工編：土木学会，pp.134～136，1991.9.
- [5] 伊藤 洋，坂口雄彦，前村辰二，藤原 愛：コンクリート表面からの水分蒸発過程による透水性評価実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.507～512，1993.
- [6] 下村 匠・小沢一雅：細孔構造モデルによるコンクリート中の水分移動解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.1，pp.631～636，1992.