

[1119] 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

伊藤 洋^{*1}・西岡吉弘^{*2}・坂口雄彦^{*3}・藤原 愛^{*4}

1. はじめに

廃棄物貯蔵・処分サイロや液体燃料貯蔵ピットなどコンクリート構造物においても高水密性が要求されるようになってきている。しかし、コンクリートの透水性に関してほとんどがコンクリート母材単体のものであって、構造物全体や大型構造物で発生すると考えられる止水欠陥（ひびわれ、打継目、セパレータ等）の評価を行なったものは少ない。一方、大型構造物であるといった止水欠陥を補修することも容易でなく、特に有効な方法は見いだされていない[1]。

本研究では、こういった背景にあって、止水欠陥を有するサイロ構造物の透水性を評価すること、及び著者らが開発している懸濁液グラウトによる止水処理工法[2]の有用性を確認することを目的として、実大サイロ構造物を構築し、止水処理前後で透水試験を行い、構造物全体及び止水欠陥部の透水性評価を行なった。透水試験では、構造物規模に対応した容量と精度を確保することと極めて小さい漏水量までの評価が必要であることから特殊に設計された加圧装置により注入量を測定し、また、水蒸気浸出量まで測定可能なベンチレーション法を適用して浸出量を測定した。その結果、工学的に有用な知見が得られたのでここに報告する。

2. サイロ構造物の概要

サイロ構造物は、図-1に示したように外径7.25m、高さ5.25m、天版・底版の厚さ1.50m、側壁の厚さ1.25mの鉄筋コンクリート製円筒形サイロである（主鉄筋 D29～35@200mm、純かぶり12cm）。止水欠陥は、結果的に貫通性のひびわれ10本（ひびわれ幅w=0.05～0.25mm、長さl=1.0～2.25m）、タイロッドを設置したセパレータ51本、及び天版と側壁の打継目1か所（長さl=3.77 m）を設けた（後述図-3参照）。ここで、ひびわれは打設後の温度ひびわれが予想されたが（打設温度34°C、最高温度92.2°C；材令28.9日、ひびわれ指数0.6）、より確実なものとするため、ひびわれ誘発目地を2か所設け、さらに温度降下時に液体窒素により内空間の強制冷却を行なった。また、セパレータは実際の施工規模を考慮してR25丸鋼を用い、打継目は標準施工を行なった。一方、天版のマンホール周辺に漏水が認められたが評価対象からは除外した。

表-1は用いたコンクリートの配合である。また、構造物は材令約1.2年(412～467日)を経過しており、品質管理試験の結果、圧縮強度495～531 kgf/cm² (28日; 464～473 kgf/cm²)、引張強度36.6～43.6kgf/cm² (28日; 35.5～38.0kgf/cm²)、静弾性係数 35.7×10^4 kgf/cm² (28日; 33.8×10^4 kgf/cm²)で、インプット法による母材単体の透水係数はk = 1.7×10^{-13} m/s、見かけ比重試験による母材の空隙率はn = 14.4%である。

*1 (株)熊谷組 技術研究所 力学系研究開発部 係長、工博（正会員）

*2 (株)熊谷組 技術研究所 力学系研究開発部 (正会員)

*3 (株)熊谷組 技術研究所 力学系研究開発部 (正会員)

*4 (財)原子力環境整備センター 研究第2部 課長、理修

3. 止水処理施工の方法

上述のような止水欠陥を持つ構造物において透水試験を行なった後、本研究の一つの目的である止水処理施工を実施した。止水処理の主な対象はひびわれである。また、打継目及び天版の漏水部は本工法が重力浸透を利用しているため効果検討の対象外とした。

図-2は、止水処理施工の概要を示したものである。止水処理材料は微粒子セメントとシリカフュームを用い、懸濁液の初期濃度を約5000ppmとした。表-2は止水処理材料の配合を示したものである。

懸濁液の投入は、攪拌装置付きの水槽に約10倍濃度の懸濁液を調合して加圧ポンプによりサイロ内に投入した。つぎに、2~3時間エアブロー攪拌した後、マンホール蓋をセットして、さらにエア加圧により継続して24時間攪拌した。その後、エア攪拌を停止し、加圧装置による水の注入加圧(3kgf/cm²)を5日間実施した。このサイクルを1回として3回繰り返し実施した。

4. 透水試験の方法

透水試験は、加圧注入法(注入側)とベンチレーション法(浸出側)を併用して行なった。図-3は透水試験装置の全体概要である。試験期間は、止水処理前後で約1.5ヶ月とした。

4. 1 加圧透水試験(注入側)

本試験は、構造物内に所定の一定圧力で水を注入し、その注入量を測定するものである。試験では、長期にわたる連続測定を可能にするため加圧水の自動供給が可能であり、併せて注入圧力

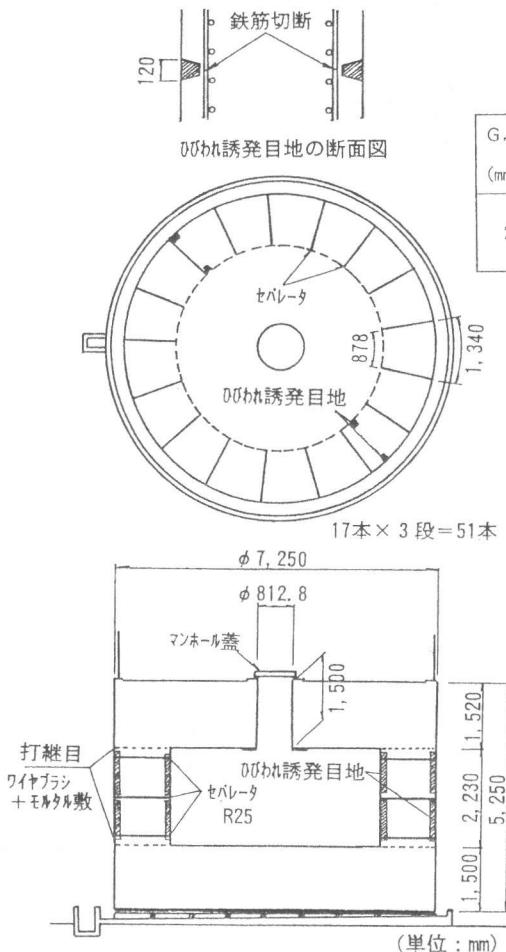


図-1 サイロ構造物の概要

表-1 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	S1 (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kgf/cm ³)					
					W	C	S	G	Ad ₁	Ad ₂
20	8 ± 1.5	4 ± 1	40	44	165	420	757	1004	1.05	0.0252

表-2 止水処理材料の配合

水(W)	(C+M)/W	微粒子セメント(C)	シリカフューム(M)	混和剤
約40m ³	5,125ppm	180 kg	25 kg	2,000cm ³
上水道	初期	d ₅₀ ≈ 4.0 μm	d ₅₀ ≈ 0.15 μm	遅延型AE減水剤

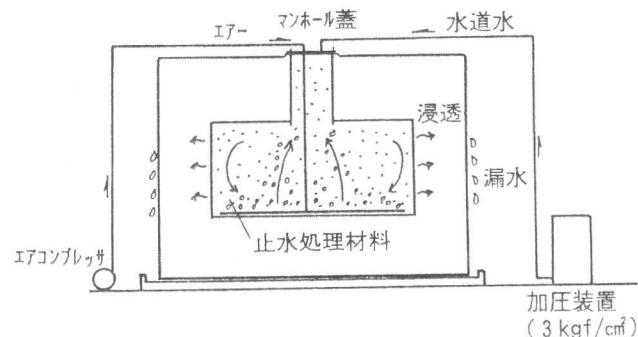


図-2 止水処理施工の概要

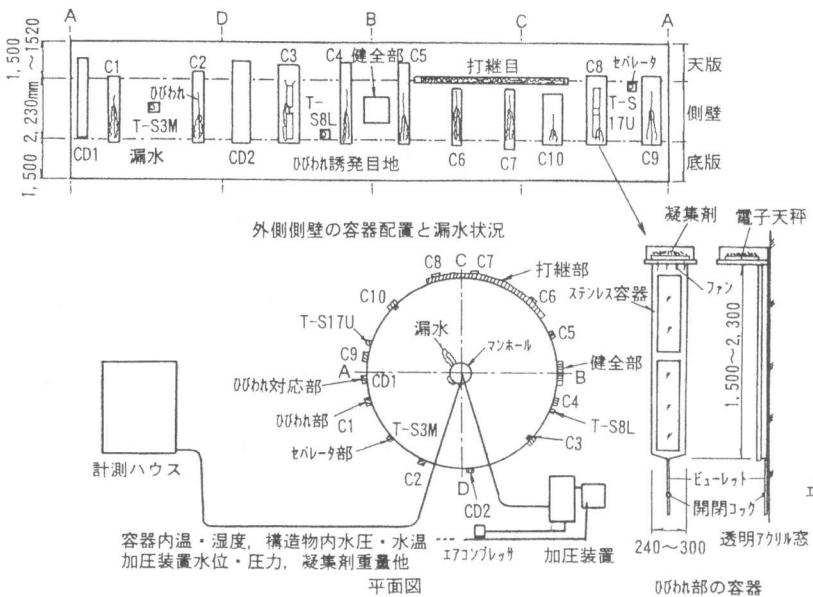


図-3 透水試験装置の全体概要

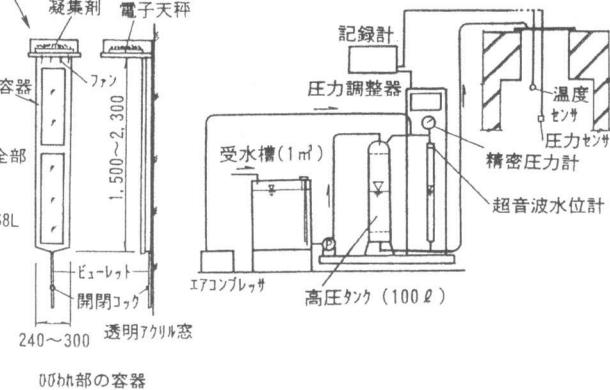


図-4 加圧装置の概要

及び注入量などが自動制御・測定・記録できる試験装置を新たに製作して使用した。図-4に加圧装置の概要を示す。注入圧力は、 $p = 3.00 \pm 0.05 \text{ kgf/cm}^2$ (マンホール位置)とした。

4. 2 ベンチレーション法試験（浸出側）

ベンチレーション法試験の対象は、ひびわれ部10ヶ所、セパレータ部3ヶ所、ひびわれ対応部（健全部でひびわれ測定用容器と同じものを用いた）2ヶ所、健全部1ヶ所、打継部1ヶ所の合計17ヶ所である。測定対象は水蒸気浸出する漏水量であるため、各測定部をステンレス容器で密閉し、容器内空気をファンにより循環しつつ浸出した水蒸気を容器上部に設けた凝集剤（シリカゲル）に吸収させ、その重量変化を電子天秤により自動計測した。また、浸出水が多くなって液状になった場合は、容器下のビューレットの開閉コックを開けて、メスシリングにより直接測定した。

4. 3 測定項目

主な測定項目は、注入量、漏水量（液状水）、ベンチレーション法試験容器内の温・湿度及び凝集剤重量、試験体内の水温・水圧である。測定頻度は、漏水量は手動計測のため1回／1～2週、それ以外は自動計測であるので1回／2～8時間とした。

4. 4 透水係数の算定式

構造物における水分移動は、ひびわれ部に代表されるように空隙が液状水で飽和されて浸出する場合はダルシー則により移動すると考えられるが、健全部のようなところでは表面からの水蒸気拡散による蒸発フラックスが卓越したものとなる。厳密には水分状態によって透水性評価を分離して考えることもできるが、ここでは評価の基準を統一して考えるため構造物内の水分移動は全て見かけ上ダルシー則によると仮定した。

まず、構造物全体の透水係数 k (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で浸透流解析を行ない、形状係数を決めて以下の式により算定した。

$$k = 1.32 \times 10^{-9} \cdot Q_i / \Delta p \quad (1)$$

ここに、 Q_i ：注入量 (cm^3/s)、 Δp ：注入圧力増分 (3 kgf/cm^2) である。

つぎに、各止水欠陥部については、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の水蒸気拡散量を考慮して次式により求めた。

$$k = \frac{[Q_i - q_u (A - A_u)] \cdot \ell n (R/r_u) L}{2 \pi A_u \Delta H_p} \quad (2)$$

ここに、 Q_i ：浸出量 (m^3/s)、 q_u ：健全部の単位面積当たりの水蒸気浸出量 ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$)、 A ：容器内の測定面積 (m^2)、 A_u ：止水欠陥部の対象面積 (m^2) [ひびわれ及び打継目；幅 $1 \text{ cm} \times$ 長さ、セパレータ； 1 cm^2 とした]、 R ：構造物の外半径 (3.625m)、 r_u ：構造物の内半径 (2.375m)、 L ：構造物の周長 (22.7765m)、 ΔH_p ：注入平均圧力水頭 (32.65m) である。

5. 実験結果と考察

試験結果は、上述したようにダルシー則を仮定して見かけ上の透水係数を求めて評価を行うこととした。

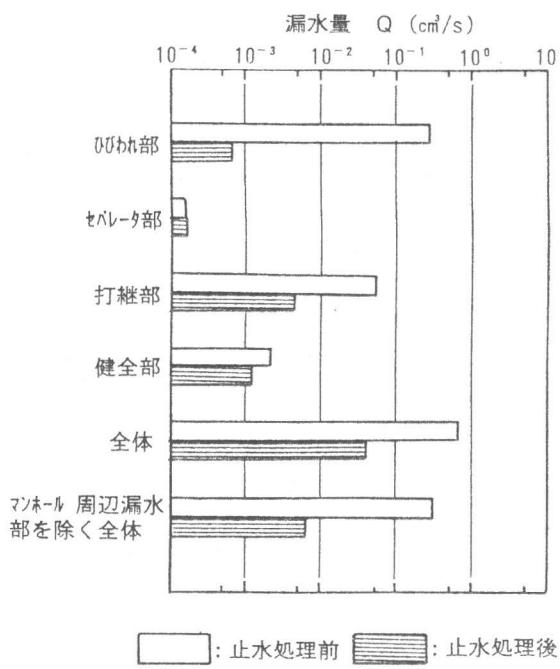
5. 1 漏水量

外壁の止水処理施工前の漏水状況を図-3に併せて示した。液状水による漏水は、すべてのひびわれ及び側壁と天板の打継部の一部で確認された。また、健全部、ひびわれ対応部及びセパレータ部では少なくとも液状での漏水ではなく水蒸気浸出となっていた。一方、天板のマンホール周辺部からも漏水が認められた。

つぎに、水蒸気浸出部の凝集剤重量の経時変化の代表例として止水処理前の健全部について示したもののが図-5である。凝集剤重量 1 g に対し浸出量 1 mL (cm^3) として換算した。凝集剤吸収量は、初期と限界吸湿量に近づく測定末期を除いてほぼ線型増加となっている。

図-6は止水処理前後の各部での漏水量を示したものである。ここで、漏水量は対象とした全面積に換算したものを示している。また、全体漏水量は注入量より求めたものであり、一方、マンホール周辺漏水部を除く全体漏水量は浸出量を積算したものを示している。したがって、両者の差が精度には問題があるが一応マンホール周辺部からの漏水量ということになる。これより、止水処理前ではひびわれの漏水量が最も多く、つぎに打継部、セパレータ部の順になっていることが分かる。しかし、止水処理後はひびわれの漏水量は大きく低減し、打継部が支配的となっている。また、健全部の漏水量に着目すると、止水処理後ではひびわれ部や打継部の漏水量と大差なく、乾燥による水蒸気拡散量が比較的大きいことが認められる。また、健全部では止水処理後で約2分の1に減少している。しかし、これは止水処理材料として用いた微粒子セメントなどがそれより十分小さい健全部の微小空隙まで浸透し閉塞効果が現れたとは考えにくく、止水処理前後の環境変化によるものと推定される。止水処理前の試験環境は平均気温 20°C 、処理後が 10°C で湿度 $60\% \text{RH}$ として水蒸気拡散量を試算してみると[3]、ほぼ漏水量の比と一致する。

つぎに、漏水量の支配比率を止水処理前後で示したのが図-7である。この図よりマンホール周辺部の漏水が多いことがわかるが、この部分は止水処理の対象外なのでこれを除外して考える。まず、止水処理前の比率はひびわれ部が最も大きく 41.5% となっており、つぎに、打継部、健全部、セパレータ部の順となり、健全部及びセパレータ部は 0.5% 以下と小さい。しかし、止水処理後のそれは打継部が最も大きく、つぎに健全部となりひびわれ部は健全部の2分の1程度となっている。つまり、ひびわれ部からの漏水量は健全部からの蒸発浸出水総量より小さくなるまで止水処理により改善されることになる。



□: 止水処理前 ■: 止水処理後

図-6 漏水量

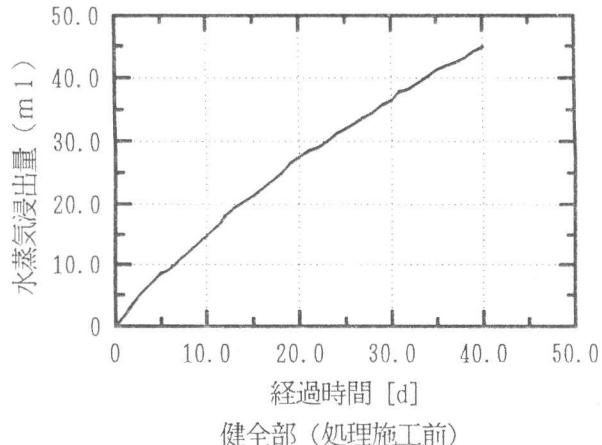
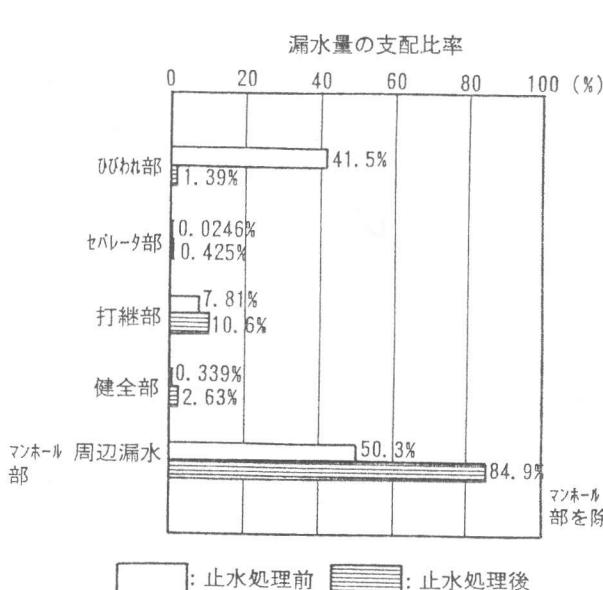
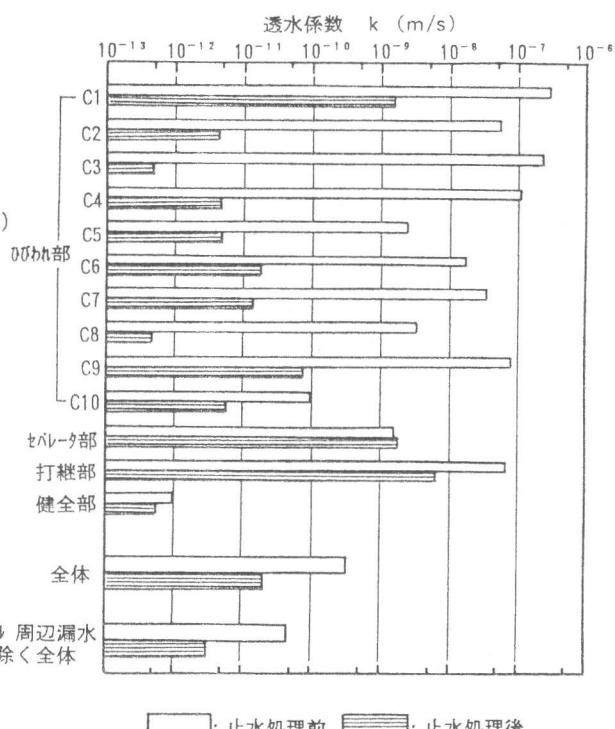


図-5 水蒸気浸出量の経時変化の例



□: 止水処理前 ■: 止水処理後

図-7 漏水量の支配比率



□: 止水処理前 ■: 止水処理後

図-8 透水係数

5. 2 透水係数

図-8は、止水処理前後の透水係数を示したものである。まず、ひびわれ部に注目すると、透水係数のオーダーは初期状態では $k = 10^{-10} \sim 10^{-6} \text{ m/s}$ であり、処理後は $k = 10^{-13} \sim 10^{-9} \text{ m/s}$ と $1/10^2 \sim 1/10^6$ に低減している。特にひびわれ誘発目地を設けたC3及びC8においては、 $k = 10^{-13} \text{ m/s}$ オーダーとほぼ健全部の透水係数レベルまで低減している。これは、誘発目地が凹型であるため、懸濁物質（浮遊した微粒子セメント）が付着・拘留されやすく長期的にも止水処理効果が継続したものと考えられる。

つぎに、セパレータ部の透水係数は止水処理前後でほとんど変化していない。これは、丸鋼とコンクリートの界面といった微小空隙には懸濁物質（微粒子セメントなど）は浸透しにくいことを示唆しているものと推定できる。

打継部は、止水処理効果の検討対象外としていたが、透水係数は1オーダ低下しており、ある程度止水処理効果が期待できることが示唆された。しかし、ひびわれ部と比較すると低減率は小さく、懸濁液濃度が小さくなる上部であったこともあり、止水効果の明確な評価はできない。

健全部の初期透水係数は、 $k = 1.05 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ であるが、上述した漏水量に対応して止水処理後は $5.18 \times 10^{-13} \text{ m/s}$ とほぼ2分の1に減少している。この透水係数のオーダは母材単体のそれよりやや大きい値となっている。この傾向は、解析的にではあるが透水係数が 10^{-11} m/s より小さくなるとコンクリート中の水分の移動に蒸発フラックスによる影響が現れ、見かけの透水係数は実際の透水係数より大きくなる性質が示唆されており、妥当な結果とも判断できる[4]。

一方、マンホール部の漏水を除く全体の透水係数についてみると、初期状態では $k = 4.57 \times 10^{-11} \text{ m/s}$ であったが、止水処理後は $k = 2.99 \times 10^{-12} \text{ m/s}$ と約1/15程度となっている。全体の透水係数の低減率がひびわれのそれと比較してあまり大きくならなかったのは、①止水処理後の漏水を支配している打継部の漏水量の低減が小さかったこと、②もともと初期透水係数が小さく改良余地が小さかったこと、による。しかし、絶対値でみれば止水処理後の透水係数は、健全部のそれより1オーダ程度大きい値まで改良されていることになる。

6. まとめ

本研究により、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を行い、 10^{-13} m/s といった水蒸気拡散が卓越するオーダから液状水の漏水となる 10^{-6} m/s 程度まで幅広い範囲にわたって精度よく評価できた。
- (2) ベンチレーション法試験は、水蒸気浸出レベルでの漏水量の測定に有用であり、実スケールの構造物にも適用できることが認められた。
- (3) 微粒子セメントとシリカフュームを用いた懸濁液グラウト工法は、ひびわれ幅が $0.1 \text{ mm} \sim 0.2 \text{ mm}$ 程度の実大構造物におけるひびわれの止水処理に有用であることが認められた。
- (4) 本試験で用いたサイロ構造物では、ひびわれ及び打継目が主な漏水対象となったが、止水処理後のひびわれの総漏水量は健全部のそれより小さくなるまで低下した。

本透水試験は、継続して実施しており、今後透水性の長期的な変化特性や止水処理施工の長期的安定性等について検討を行う予定である。

参考文献

- [1] 伊藤 洋：地下防水の止水・改修工法、建築技術、pp. 98 ~ 101, 1992. 9.
- [2] 西岡吉弘ほか：低濃度懸濁液の浸透充填によるひびわれ空隙の止水について、セメント系充填材に関するシンポジウム論文集、pp. 89 ~ 94, 1992. 12.
- [3] 伊藤 洋ほか：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.
- [4] 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、土質工学会「都市地下空間利用における大深度地盤に関するシンポジウム」、pp. 221~226, 1993. 11.