

微粒子セメント懸濁液グラウトによる中空円筒 コンクリート構造物の止水欠陥補修

坂口雄彦¹・伊藤 洋²・西岡吉弘³・藤原 愛⁴・辻 幸和⁵

¹正会員 (株)熊谷組技術研究所 土木構造グループ 副長 (〒300-22茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

²正会員 工博 (株)熊谷組技術研究所 土木構造グループ 課長 (同上)

³正会員 (株)熊谷組名古屋支店 大幸作業所 (〒464愛知県名古屋千種区萱場2-5-10)

⁴工修 (財)原子力環境整備センター 研究第2部 次長 (〒105東京都港区虎ノ門2-8-10)

⁵正会員 工博 群馬大学工学部建設工学科 教授 (〒376群馬県桐生市天神町1-5-1)

地下施設や下水処理水槽等の水密コンクリート構造物の止水欠陥を補修する方法として、極低濃度の微粒子セメント懸濁液を止水欠陥部に自然浸透させることにより閉塞させて止水させる方法を提示し、基礎実験結果の概要を示した上で、止水欠陥を有する実規模の中空円筒鉄筋コンクリート構造物に本工法を適用させた。補修効果の透水性評価に当たっては、構造物規模に対応した容量と精度を確保する必要性から特別に設計した加圧装置による注水量測定法とベンチレーション法による水蒸気浸出量測定法を適用した。透水試験は、補修前後及び補修1年後より約1年間にわたって実施し、本工法の止水効果を確認した。さらに、ひび割れ部のコア採取を行い、ひび割れ内部の閉塞状況を調査した。

Key Words : concrete structures, cracks, repairing, watertightness method, permeability test

1. はじめに

下水処理水槽、廃棄物処分施設やエネルギー貯蔵施設等の鉄筋コンクリート製の地下構造物においては、高耐久性、高水密性が特に要求される。この種の構造物では、地下水圧が作用するため、材料・施工上避け得ないひび割れ、打継目、セパレータ部等の止水欠陥の存在は、構造物の耐久性を低下させる要因となるばかりでなく、漏水の主要原因となるため、それに対応した止水処理・補修技術の確立が望まれている¹⁾。

しかしながら、構造物においてこれらの止水欠陥をもれなく発見し、これを所定の機能(止水性)を満足するレベルまで補修することは容易ではない。また、構造物の水密性の評価に当たっても、現状では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の評価を行ったものは少なく、ほとんどがコンクリート母材単体を対象としたもの、あるいは室内試験レベルのものである²⁾。

こういった背景にあつて、著者らは、極低濃度の微粒子セメント懸濁液をコンクリートピット内に灌水し、止水欠陥部へ漏水現象を利用して自然浸透させることにより、徐々にセメント粒子を流路空隙に

付着・拘留させて流路を閉塞・止水させる方法に関する研究を行っている。すでに、室内実験レベルにおいては、本工法の効果をj確認している³⁾。

本論文では、構造物レベルでの本補修工法の効果の確認を目的として、止水欠陥を有する実規模の中空円筒鉄筋コンクリート構造物を構築し、止水欠陥補修工法を実施した。その効果を確認するために、補修前後に透水試験を実施するとともに、補修後の長期的な安定性を検証するため補修後約1年間放置した後、1年間にわたる長期透水試験を実施した。また、透水試験終了後には、止水欠陥部のセメント粒子充填状況の調査を目的として各種分析を実施した。

ここで、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(水蒸気浸出)までの評価が必要となったことから、特別に設計した加圧装置により注入量を測定し、構造物全体の透水性を評価した。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、各止水欠陥ごとの浸出量を測定し評価した。

本論文では、以上の結果を報告する。

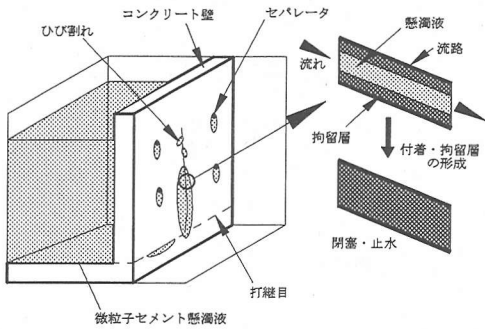


図-1 止水欠陥補修工法の概念

2. 止水欠陥補修工法の概念

止水欠陥補修工法の概念を図-1に示す。同図に示すように、コンクリート構造物の内部あるいは外部に極低濃度の微粒子セメント懸濁液を湛水（供給）すると、セメント粒子はひび割れ等の漏水経路に沿って流れ、その一部が流路内壁面に附着・拘留されることになる。このセメント粒子の附着・拘留は徐々に成長して最終的に流路を閉塞する^{4)~6)}。さらに、拘留されたセメント粒子は水和反応により硬化し、漏水個所の水密性・止水性は長期的にも安定することになる³⁾。懸濁液の濃度は、3000ppm~5000ppmと非常に薄く（通常のセメント系グラウト材の1/100程度）、水と同程度の粘性であるため、漏水経路にはもれなく浸透することとなる。既設地下構造物において地下水圧が作用している場合には、外部に供給源を設けて作用水圧を利用して、地下水圧と同等以上の注入圧で浸透させることにより対応できる。

本工法の特徴を列記すると、①ひび割れ、打継目、セパレータ等の止水欠陥部を特定する必要がないこと、②数時間~数日の注入期間で、全体を一度に補修することができること、③補修箇所の水密性・止水性が長期的にも安定であること、④補修期間中に人的作業がほとんど必要ないこと、⑤非常に薄い濃度の懸濁液を使用するため、小さなひび割れにも対応できることなどが挙げられる。

3. 基礎実験結果の概要⁷⁾

ここでは、本実験に先だって本工法の基本的機能を確認することを目的に実施した、基礎実験の概要について述べる。図-2は、実験装置と供試体の概要を示すものである。

実験に用いた供試体は、中央部に人工的に割裂ひび割れ（ひび割れ幅： $w=0.21\sim 2.5\text{mm}$ ）を発生させた直

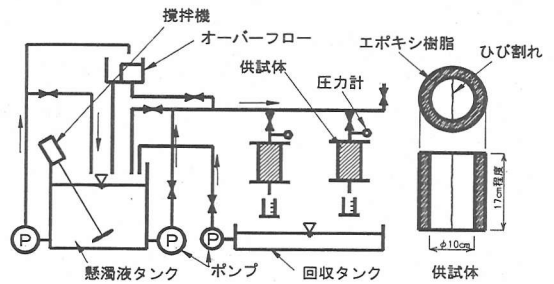


図-2 基礎実験装置の概要

表-1 微粒子セメントの化学成分

比重	粉末度		化学成分(%)						
	比表面積 (m^2/g)	ふるい残分(%)		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
		15 μm	10 μm						
3.00	9200	0.0	1.2	27.2	10.6	1.5	52.5	4.3	2.1

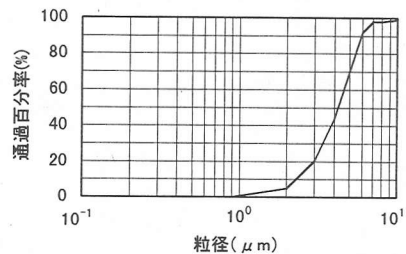


図-3 微粒子セメントの粒径分布

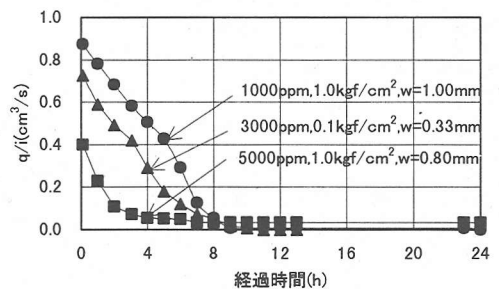


図-4 基礎実験結果の一例

径10cm、長さ約17cmのコンクリート円柱である。これに、所定の濃度（1000,3000,5000ppmの3種）に調整した微粒子セメント懸濁液を、所定の圧力（0.1,1.0,3.0 kgf/cm^2 の3種）で約24時間注入し、その間の漏水量の経時変化を測定した。注入終了後は、補修後の安定性を検討するために、供試体を4週間水中に浸した後、再度透水試験を実施した。

使用した微粒子セメントの化学成分及び粒径分布を表-1及び図-3に示す。また、最も濃度の高い5000ppmの懸濁液の粘性をJ漏斗による流動試験で測定したと

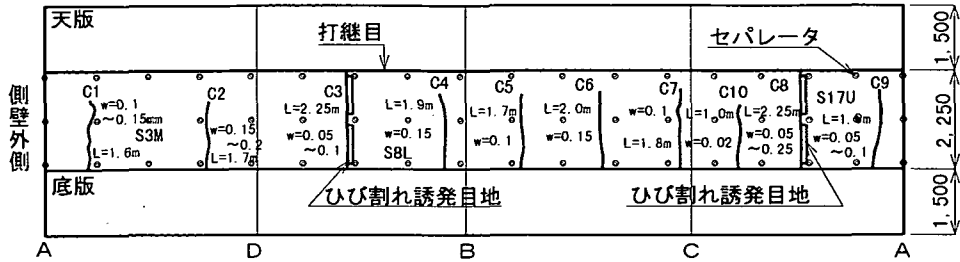


図-6 止水欠陥の分布

表-2 実験の全体工程

材齢(年)	1	2	3	備考
補修工		■		懸濁液注入3回
透水試験	■	■	■	$p = 1.5 \sim 3.0 \text{ kgf/cm}^2$
コアリング				125cm貫通(乾式)
構造物内部	灌水 (途中数度の排水期間あり)			
構造物表面	浸透養生		大気環境	

表-3 コンクリートの配合

C_{max} (mm)	スラング (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					W	C	S	G	Ad ₁	Ad ₂
20	8±1.5	4±1	40	44	165	420	757	1004	1.050	0.0252

※セメントの種類：普通ポルトランドセメント，Ad₁：AE減水剤，Ad₂：AE助剤

配が異なるケースの流量低減傾向を比較するために流量 q を動水勾配 i で除した q/i の経時変化を示す。実験の結果、ひび割れ幅が0.8mm程度以下であれば、24時間の注入で漏水量は初期の1/100~1/1000程度以下に低減できること、同一濃度では圧力が高いほど、同一圧力では濃度が大きいほど、それぞれ低減効果は大きいことが明らかとなった⁷⁾。また、水中に浸した後の漏水量は水中に浸す前と同等かそれ以下となり、注入後の安定性にも問題ないことがわかった⁷⁾。

4. 実験装置と実験方法

構造物レベルでの本補修工法の効果の確認を目的として、実規模の中空円筒鉄筋コンクリート構造物を構築し、止水欠陥補修工法を実施した。補修前後には透水試験を実施し、その後約1年間自然状態で放置した後、1年間にわたる長期透水試験を実施した。また、長期透水試験終了後には、ひび割れ部のコアボーリングを行い付着物質の分析を実施した。表-2に、実験の全体工程を示す。

以下に、実験に用いた構造物の概要と実験装置、実験方法を示す。

(1) 構造物の概要

構造物は、図-5に示すように、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中空円筒サイロであり（主鉄筋D29~D35@200mm、純かぶり12cm）、床スラブとは合成樹脂シートにより縁切りされている。止水欠陥は、図-6に示すように、結果的に貫通性のひび割れ10本（ひび割れ幅 $w=0.05 \sim 0.25 \text{ mm}$ 、長さ $l=1.0 \sim 2.25 \text{ m}$ ）、

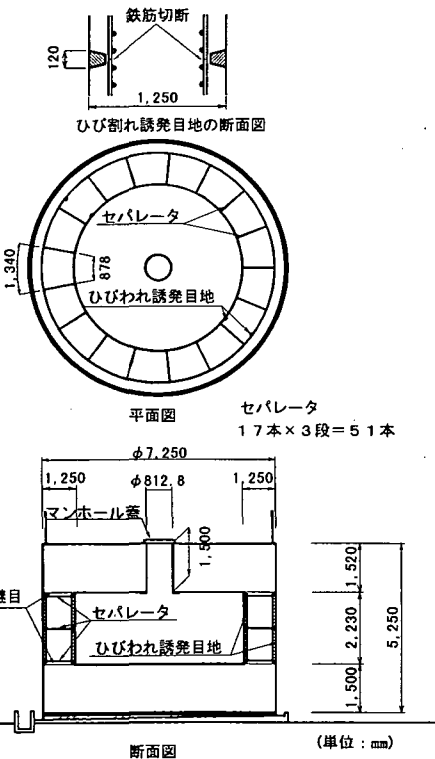


図-5 構造物の概要

ころ、流下時間は19.0秒（20℃、6回平均）で、水道水のそれ18.7秒と同程度であった。

基礎実験は、全部で29ケース実施した⁷⁾。図-4にそれらの結果のうち代表的な3ケースについて、動水勾

表-4 懸濁液材料の配合

水(W)	(C+M)W	微粒子セメント(C)	シカフォーム(M)	混和剤
約40m ³	5,125ppm	180kgf	25kgf	2,000cm ³
上水道	初期	d ₅₀ ≒40μm	d ₅₀ ≒0.15μm	遅延形AE減水剤

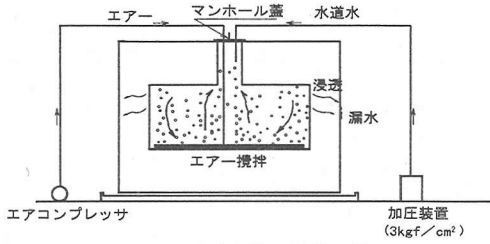


図-7 止水欠陥の補修工法

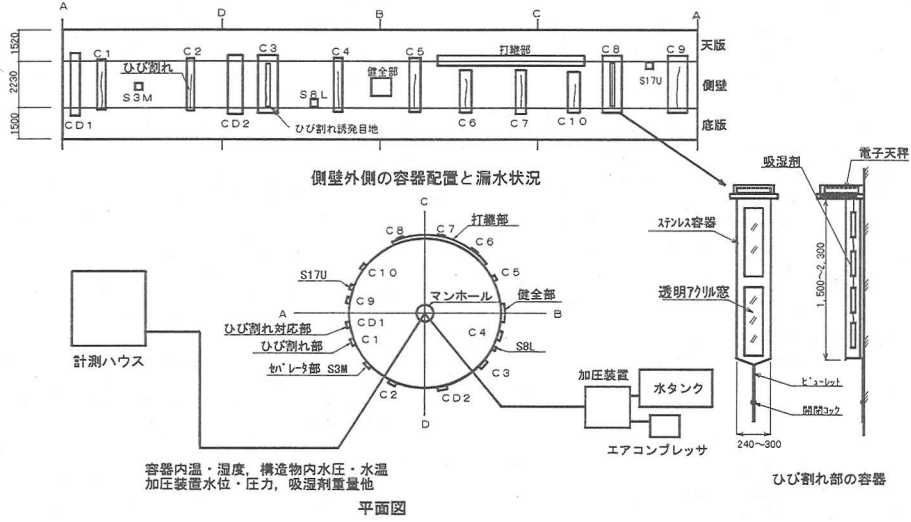


図-8 透水試験装置の全体概要

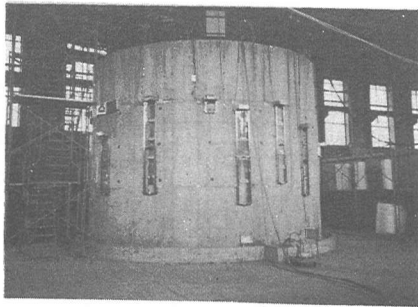


写真-1 実験状況の全景写真

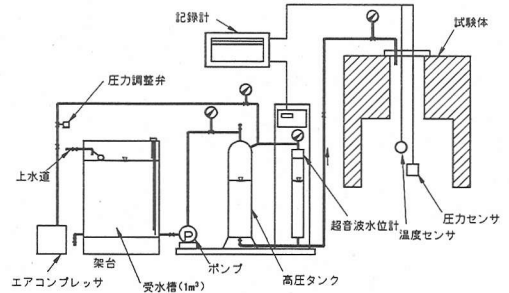


図-9 加圧透水試験装置

タイロッドを設置したセパレータ51本のうち代表的な3ヶ所、及び天版と側壁の打継目1ヶ所（長さ $l=3.77\text{m}$ ）であった。

ここで、ひび割れは打込み後の温度ひび割れが予想されたが（打込み温度 34°C 、最高温度 92.2°C ；材齢28.9日、ひび割れ指数0.6）、より確実なものとするため、ひび割れ誘発目地を2ヶ所設け、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、打継目は標準施工とした。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-3は、用いたコンクリートの配合である。止水欠陥部の補修時の構造物は、材齢約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 $50.5\sim 54.2\text{N/mm}^2$ （28日； $47.3\sim 48.3\text{N/mm}^2$ ）、引張強度 $3.73\sim 4.45\text{N/mm}^2$ （28日； $3.62\sim 3.88\text{N/mm}^2$ ）、静弾性係数 $3.64\times 10^4\text{N/mm}^2$ （28日； $3.45\times 10^4\text{N/mm}^2$ ）であった。また、インプット法によるコンクリート母材単体の透水係数は、 $k=1.7\times 10^{-13}\text{m/s}$ 、見かけ比重試

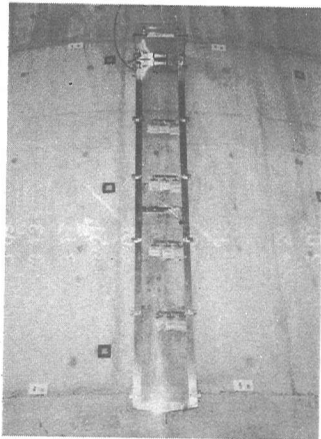


写真-2 測定状況（ひび割れ部）

験による母材単体の空隙率は $n=14.4\%$ であった。

(2) 止水欠陥の補修方法

上述のような止水欠陥を有する構造物に対して、後述する透水試験を実施した後、微粒子セメント懸濁液グラウトによる補修工法を実施した。補修工法の概要を図-7に示す。懸濁液材料は、基礎実験の結果を基に、表-4に示す配合のものを用いた。

懸濁液の投入は、攪拌装置付きの水槽（容量 0.4m^3 ）に約10倍濃度の懸濁液を調合して加圧ポンプにより水を湛水した構造物内に投入した。つぎに、構造物内底部に設置した有孔塩ビ管にエアコンプレッサで空気を送り込み、2~3時間のエアブロー攪拌を行なった。その後、マンホール蓋をセットして、さらにエア加圧（ 3kgf/cm^2 ）により継続して24時間攪拌した後、エア攪拌を停止し、加圧装置による水の注入加圧（ 3.0kgf/cm^2 ）を、5日間実施した。加圧終了後、懸濁液を排水し、内壁の止水欠陥部及び底部に堆積した懸濁液材料（軟らかいペースト状）を撤去・洗浄した。この、懸濁液の投入から排水・洗浄までのサイクルを1回として、3回繰り返した。

(3) 透水試験

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）を併用して行った。図-8及び写真-1は、透水試験装置の全体概要である。試験は、前出の表-2に示したように、まず構築直後に実施した（ただし、この時は注水量測定のみ）。つぎに、止水欠陥補修工の前後に各々約1.5ヶ月間実施し、両者を比較して補修効果の確認を行った。つづいて、試験終

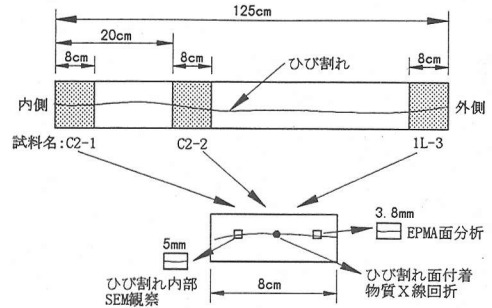


図-10 分析試料の概要

了約1年後、1年間にわたる長期透水試験を実施した。

a) 加圧透水試験（注入側）⁸⁾

加圧透水試験装置の概要を図-9に示す。本装置は、構造物規模が大きいため、長期にわたる連続測定となることから、新たに製作したもので、加圧水の自動供給、注入圧力の自動制御及び注入量の自動測定・記録が可能な装置である。

図中のエアコンプレッサ及び高圧タンクより、構造物の天版に設置したマンホール部を通じて一定圧力で注水し、その注入量を計測することにより透水性を評価するものである。高圧タンクは容量 1m^3 の受水槽に、受水槽は上水道に連結しており、各々所定の水位以下になった時点で自動供給される。注水量の測定は、高圧タンク内の水位変化を超音波水位計で測定することにより行う。注入圧力は、構造物内に設置した圧力センサにより自動制御される（ $p=3.0 \pm 0.05\text{kgf/cm}^2$ ；マンホール位置）。高圧タンク水位、構造物内水温及び水圧等の測定値は、記録計に自動記録される。

b) ベンチレーション法試験（浸出側）⁹⁾

試験の対象は、ひび割れ部10ヶ所（C1~C10）、セパレータ部3ヶ所（S3M,S8L,S17U）、ひび割れ対応部（健全部でひび割れ測定容器と同じものを用いた）2ヶ所（CD1,CD2）、健全部1ヶ所、打継目1ヶ所の計17ヶ所である。測定対象は、水蒸気浸出する漏水量が主であるため、各測定部をステンレス容器で密閉し、容器内に浸出した水蒸気を吸湿剤（シリカゲル）に吸収させ、容器上部に設けた電子天秤にてその質量変化を自動測定した。また、液状水の浸出が認められた場合には、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ダにより直接測定した。写真-2に、ひび割れ部の測定状況の写真を示す。

c) 測定項目

主な測定項目は、注入量（加圧装置内高圧タンク水位；超音波水位計、図-9参照）、漏水量（液状水；メスシリンダ）、ベンチレーション法試験容器内の温

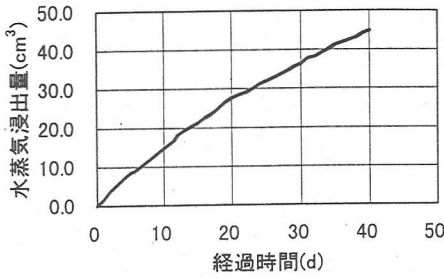


図-11 水蒸気浸出量の経時変化
(健全部：補修前)

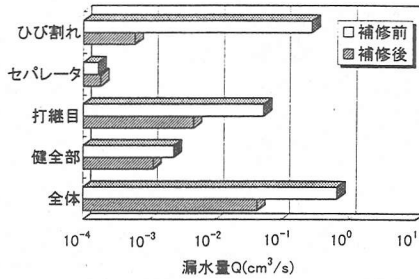


図-12 補修前後の漏水量

度・湿度(温・湿度センサ)及び吸湿剤質量(電子天秤), 水温(温度センサ), 水圧(圧力センサ)である。測定頻度は, 1回/2~8時間であり, 漏水量以外は, 全て自動計測した。また, 1回/2~4週間の頻度で, 吸湿剤の交換を行った。

d) 透水係数の算定式

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則によると考えられるが, 水蒸気では単純でない¹⁰⁾。しかし, ここでは評価の基準を統一して考えるために, 構造物内の水分移動は全て, 見掛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_t (m/s) は, 構造物形状が単純でなく壁厚が厚いために, コーナー部の影響を含めたモデル化ができないため, 構築直後に実施した加圧透水試験(水圧: 1kgf/cm²~4kgf/cm²の段階加圧)で得られた流量データを用いて, FEMによる軸対称回転体モデルで境界圧力を変えた浸透流解析を行い, 形状係数 α を決めて, 式(1)により算定した。

$$k_t = \alpha \cdot Q_1 / \Delta p, \alpha = 1.32 \times 10^{-9} \quad (1)$$

ここに, Q_1 : 注入量 (cm³/s), Δp : 注入圧力増分 (3kgf/cm²) である。

つぎに, 各止水欠陥部については, 全て側壁にある

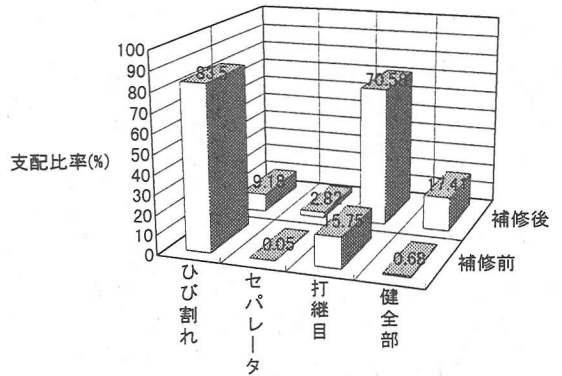


図-13 補修前後の漏水量の支配比率

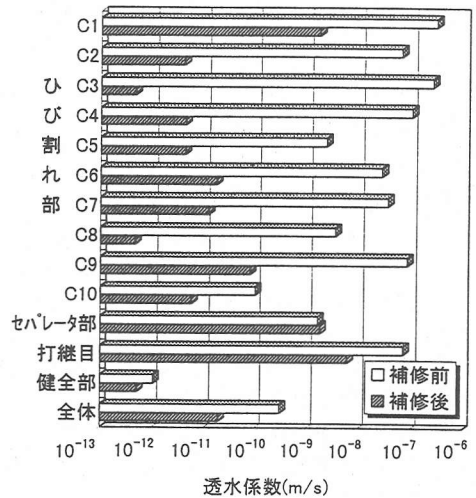


図-14 補修前後の透水係数

ため, 放射流を仮定した透水係数の算定式¹¹⁾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。

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

ここに, Q_0 : 浸出量(m³/s), q_u : 健全部の単位面積当たりの水蒸気浸出量(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) [ひび割れ及び打継目; 幅1cm×長さ, セパレータ; 1cm²とした], 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(22.777m), ΔH_p : 平均注入圧力水頭(32.65m)である。

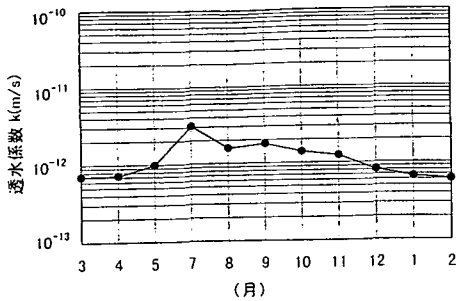


図-15 透水係数の経時変化（全体）

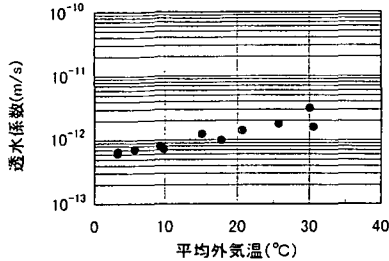


図-16 透水係数と平均外気温の関係

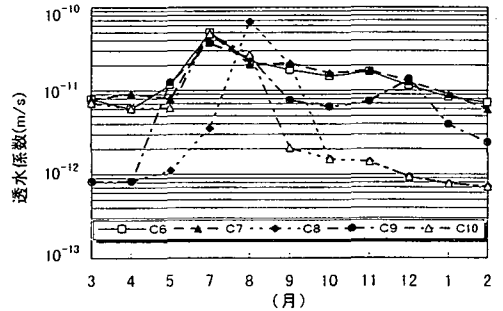
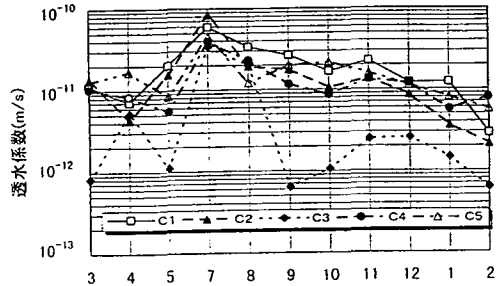


図-17 透水係数の経時変化
（ひび割れ部 10ヶ所）

(4)補修状況の調査・分析

後述のように、長期透水試験の開始時には、全ての止水欠陥部において液状水の浸出は停止しており、健全部と同等の水密性が得られた。そこで、試験終了後、ひび割れ10本について各々上中下3ヶ所、コアボーリングによる試料採取を行った。コアボーリングはひび割れ面の付着物質の流出を防ぐために研磨剤を用いた乾式で行い、ひび割れに沿って側壁部を貫通させた（長さ125cm）。採取したコア試料のうち代表的なもののひび割れ面を開放し、内部のセメント微粒子の充填状況を目視と写真撮影により観察した。

さらに、図-10に示すように、内側端部、内側より20cm内部付近及び外側端部を各々8cm切断し、目詰まり物質の分析を行った。分析項目は、EPMA面分析（X線マイクロアナライザ）、ひび割れ面付着物質のX線回折（X線回折装置）、及びひび割れ内部のSEM観察（走査電子顕微鏡）である。

5. 実験結果と考察

補修前後に実施した透水試験結果を示し、両者の比較により本工法の効果を確認した。さらに、試験後1年を経て、1年間にわたって実施した長期透水試験結果及び解体調査・分析結果を示し、本工法の長期的な安定性の検討を行った。

(1)補修効果の確認

補修効果の確認は、補修前後の漏水量と透水係数を比較することにより評価した。

a)漏水量

液状水による漏水は、全てのひび割れ及び上部打継目の一部で確認された。また、健全部、ひび割れ対応部及びセパレータ部では少なくとも液状の漏水はなく、水蒸気浸出のみであった。また、天版のマンホール周辺部からも、漏水が認められた。

つぎに、水蒸気浸出部の吸湿剤質量の経時変化の代表例として、補修前の健全部について示したものが図-11である。吸湿剤質量増分（吸湿剤に吸収された水の質量）1gを浸出量1cm³として換算した。吸湿剤質量は、初期と限界吸湿量に近づく測定末期を除いてほぼ線形増加となっている。

図-12は、補修前後の各部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、マンホール周辺部からの漏水も含んだ値である。これより、補修前ではひび割れからの漏水が最も多く、つぎに、打継目、セパレータの順になっていることがわかる。しかし、補修後はひび割れの漏水量は大きく低減し、打継目が主体となっている。また、健全部の漏水量に着目すると、補修後ではひび割れ部や打継目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

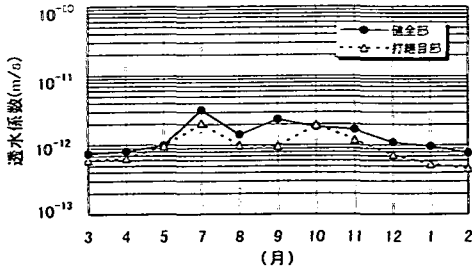


図-18 透水係数の経時変化
(健全部, 打継目部)

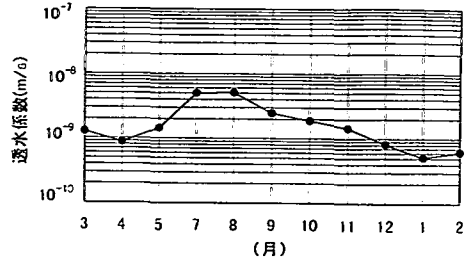


図-19 透水係数の経時変化(セパレータ部)

とが認められる。また、健全部では補修によって漏水量が約1/2に減少しているが、これは、微粒子セメントがそれより十分小さい健全部の微小空隙まで浸透して閉塞効果が表れたとは考えにくく、補修前後の環境変化によるものと推察される。補修前の試験環境は平均気温20℃、補修後は10℃であり、湿度60%RHとして、水蒸気拡散量を試算してみると、ほぼ漏水量の比と一致する¹²⁾。

つぎに、漏水量の支配比率を補修前後で示したものが図-13である。これより、補修前の比率はひび割れ部が最も大きく83.5%となっており、つぎに、打継目、健全部、セパレータ部の順になっており、健全部及びセパレータ部は1%未満と小さい。しかし、補修後のそれは、打継目が最も大きく、つぎに健全部となりひび割れ部は健全部の1/2程度となっている。つまり、本補修により、2ヶ所のひび割れからの漏水量が健全部からの蒸発浸出水総量より小さくなるまで改善されたことになる。

b) 透水係数

図-14は、補修前後の各部の透水係数を示したものである。まず、ひび割れ部に注目すると、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、補修後は $k=10^{-13} \sim 10^{-9} \text{ m/s}$ と $1/10^2 \sim 1/10^6$ に低減している。特にひび割れ誘発目を設けた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、補修効果が顕著に表れたものと考えられる。

つぎに、セパレータ部の透水係数は補修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)は浸透しにくいことを示唆しているものと推定できる。

打継目は、透水係数は1オーダー低下しており、ある

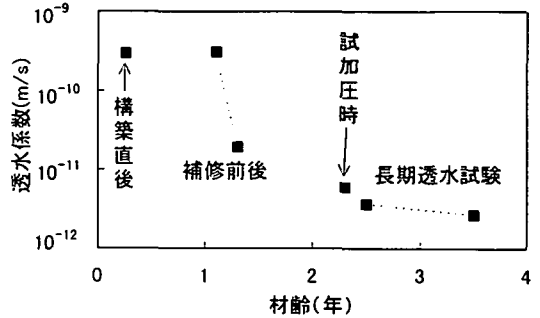


図-20 透水係数の推移(構造物全体)

表-5 ひび割れ部の観察・分析結果のまとめ

項目	観察・分析結果
ひび割れ面 目視観察	ひび割れ面全体が白っぽくなっており、場所による顕著な差はない。
EPMA面分析	<ul style="list-style-type: none"> ・内側表面付近: CaOが主成分 ・内側より3.8mm~: CaOが主成分、一部空隙あり。 ・内側より20cm付近: CaO, Al₂O₃, SO₃が主成分 ・外側表面付近: CaOが主成分、空隙多い
X線回折	<ul style="list-style-type: none"> ・水酸化カルシウム: 内部に比べ、内側及び外側表面付近でピークが弱くなっており、炭酸化の進行が伺える。 ・エトリンガイト: 内側及び外側表面付近でピークが弱く、内部で強い。 ・カルサイト: 全体的にピークが強い。石灰骨材の影響と思われる。
SEM観察	<ul style="list-style-type: none"> ・内側及び外側表面付近: カルサイト ・ひび割れ内部: エトリンガイトで全面覆い尽くされている。
総合評価	注入グラウト材成分の特定はできない。 内側及び外側表面付近はカルサイト(エフロレンセス)で埋められているが、一部空隙となっている。 ひび割れ内部は全体がエトリンガイトで埋められている。

程度補修効果が期待できることが示唆された。しかし、ひび割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、補修効果が顕著には現れなかった。

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、補修後は $5.18 \times 10^{13} \text{m/s}$ とほぼ1/2に低減している。

一方、マンホール周辺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 $k_0=4.57 \times 10^{11} \text{m/s}$ であったが、補修後は $k_1=2.99 \times 10^{12} \text{m/s}$ とおよそ1/15程度に低減している。全体の透水係数の低減率がひび割れのそれと比較してあまり大きくならなかったのは、①補修後の漏水を支配している打継目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、絶対値でみれば補修後の透水係数は、健全部のそれより1オーダー程度大きい値にまで改良されていることになる。

(2)長期安定性

上述の補修効果の確認試験終了後、約1年間試験体を湛水状態のまま放置したが、その期間の最終に実施した水圧 $p=1.5 \sim 3.0 \text{kgf/cm}^2$ の試験加圧時には、既に天版のマンホール周辺を含めいづれの止水欠陥部からも液状水の流出は全く認められなかった。したがって、その後1年間（3月～翌年2月）にわたって実施した長期透水試験については、水蒸気浸出のみを対象とし、ベンチレーション法により得られた各止水欠陥の透水係数により、水密性を評価する。

まず、図-15は、各部の水蒸気浸出量の合計より換算した構造物全体の透水係数の経時変化を示したものである。各々の値は、3月から翌年2月までの各月の平均値を示している。透水係数は、3月から7月にかけて $7.10 \times 10^{13} \text{m/s}$ から $3.10 \times 10^{12} \text{m/s}$ に上昇した後、徐々に減少している様子が伺える。そこで、各月の平均外気温と透水係数の関係を示した図-16に着目すると、透水係数は外気温の上昇に対応して増大していることがわかる。つまり、本構造物の全体の透水係数の変動は、気温変化に追従したのものであると考えられ、構造物の水密性はほぼ安定しているといえる。

つぎに、ひび割れ部、セパレータ部（3ヶ所の平均値）及び健全部と打継目部の透水係数の経時変化を、図-17～図-19に示した。これらより、ひび割れ部においては、C10を例にとると、 $k=7.14 \times 10^{13} \text{m/s} \sim 4.77 \times 10^{11} \text{m/s}$ 、セパレータ部では、 $k=5.14 \times 10^{10} \text{m/s} \sim 2.45 \times 10^9 \text{m/s}$ 、健全部では、 $k=7.51 \times 10^{13} \text{m/s} \sim 2.35 \times 10^{12} \text{m/s}$ 、打継目部では、 $k=4.63 \times 10^{13} \text{m/s} \sim 2.08 \times 10^{12} \text{m/s}$ の範囲で推移していることが認められる。ここで、いずれ

も全体の透水係数と同様な季節変動を示していることが認められるが、その変動幅はひび割れ部において最も顕著である。これは、環境温度の差による水蒸気拡散量の変動に加えて、補修により流路は閉塞されているものの、構造物が床と縁切りされているために、夏季の外気温上昇に伴い構造物全体が膨張し、ひび割れ幅が拡大して、透水性に影響を与えたものと推察される。

つぎに、図-20は、構築直後から材齢3年時に実施した長期透水試験の最終までの、注入量から換算した構造物全体の透水係数の推移を示したものである。これより、構造物の当初の透水係数は 10^{10}m/s オーダーであったが、材齢1年を経た時期に実施した補修工により1オーダー程度低下し、その後の湛水放置、加圧時には経年的に漸減している様子が伺える。このことから、本補修工法の効果が少なくとも2年間は保持されることが確認され、さらにその後の減少傾向から長期的な安定性が期待できる。

(3)補修状況の調査

表-5に、ひび割れ部の観察結果と分析結果をまとめて示した。これらの結果と試験体の構築からコア採取までの経緯、環境条件を総合し、ひび割れ部の閉塞・止水メカニズムを検討する。

ひび割れ内部において、注入した懸濁液材料の成分は母材コンクリートの成分と区別できないために特定されなかった。ひび割れ内部のうち、内側及び外側表面付近はカルサイト（エフロレッセンス）で埋められているものの、一部空隙となっている部分もあった。一方、ひび割れ内部（内側表面より20cm付近）は全体にエトリンタイトの生成が認められた。エトリンタイトは、硫酸イオンの存在により生成するものであるが、本構造物では外部環境からの硫酸イオンの侵入は考えにくいことから、ここで生成したエトリンタイトは、注入した懸濁液材料のスラグ成分に起因しているものと考えられる。

本試験におけるひび割れの閉塞・止水機構を説明する。まず、微粒子セメントが流路に拘留・充填されるが、やがてひび割れ面で躯体コンクリートと同化し、成分中の硫酸塩の影響でエトリンタイトが生成・膨張し、ひび割れ内を更に充填したのと考えられる。通常は、エトリンタイトはコンクリート中のマイクログラックや微小な空隙内で生成・膨張して、コンクリートのひび割れの発生を誘発し損傷させ、水密性を低下させる要因となる。しかし、この場合のようにある程度以上の幅を有するひび割れ内部で生成した場合には、ひび割れ内部を充填して、逆に水密性を高める働きをする可能性があることが

示唆される結果となった。

6. 結論

本論文では、止水欠陥を有する実規模の中空円筒鉄筋コンクリート構造物を構築し、低濃度の微粒子セメント懸濁液による止水欠陥補修工法を適用させて、その補修効果を確認する実験を行った。本研究で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- (1)低濃度の微粒子セメント懸濁液による補修工法は、実大構造物において幅が0.1mm～0.2mm程度のひび割れの止水に、特に有効であることが確認された。
- (2)本実験で使用した中空円筒鉄筋コンクリート構造物では、補修後のひび割れの総流量は健全部のそれよりも小さくなるまで低下した。
- (3)打継目については、懸濁液濃度が小さくなる構造物上部であったこともあり、ひび割れに比べると補修による流量低減効果は顕著には認められなかった。
- (4)本補修工法による効果は、補修後1年～2年を経た後でも持続し、長期的には更に効果が増すことが認められた。
- (5)実大構造物において、構造物全体及び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の蒸発成分が卓越するオーダから、液状水の漏水となる 10^6 m/s程度までの幅広い範囲にわたって、透水係数が測定できた。
- (6)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効であり、実規模の構造物にも適用できることが認められた。
- (7)X線回折、SEM観察及びEPMA面分析により、本補修工法によるひび割れの閉塞メカニズムを推測することができた。

以上の実験により、実規模構造物における0.2mm程度のひび割れに対しては、本補修工法の有用性が長期的な効果も含めて確認できたが、それより大きなひび割れに対しても、3.に述べたように、室内実験レベルでは0.8mm程度までのひび割れに対する効果が確認されており、基本的な効果は期待できるものと考えられる。ただ、既設の地下構造物等のように、内外部に懸濁液を灌水できない場合の適用方法、懸濁液の回収方法等の施工方法については、今後さらに検討する必要がある。

謝辞：本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：地下防水の止水・改修工法，建築技術，pp.98～101，1992.9.
- 2) 伊藤 洋，坂口雄彦，西山勝栄，福原輝幸：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.
- 3) 西岡吉弘，坂口雄彦，伊藤 洋，藤原 愛：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.
- 4) 佐藤邦明，伊藤 洋：岩盤内浸透流の時間依存と目詰まり機構，土と基礎，Vol.36, No.4, pp.21～25, 1988.4.
- 5) 伊藤 洋，坂口雄彦，西山勝栄，清水昭男：コンクリートクラック内の透水性に関する実験的研究，セメント技術年報41，pp.217～220，1987.12.
- 6) Hカンブフォール著，斉藤二郎ほか訳：地盤注入《基本理論と施工技術》，鹿島出版会，pp.27～37，1969.7.
- 7) 西岡吉弘，坂口雄彦，伊藤 洋，清水昭男：微粒子セメント懸濁液グラウトによるひび割れ補修に関する基礎実験，コンクリート工学年次論文報告集，13-1，pp.917～922，1991.
- 8) 西岡吉弘，伊藤 洋，坂口雄彦，藤原 愛：実大サイロ構造物における透水試験について，土木学会第48回年次学術講演会講演概要V，pp.994～995，1993.9.
- 9) 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試験，コンクリート工学年次論文報告集，16-1，pp.723～728，1994.
- 10) 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，15-1，pp.507～512，1993.
- 11) 國分正胤編：土木材料実験（改訂4版），技報堂，pp.289～290，1983.3.
- 12) 伊藤 洋，前村辰二，坂口雄彦：水蒸気拡散法によるコンクリートの透水性評価試験について，コンクリート工学年次論文報告集，14-1，pp.733～738，1992.

(1997.1.16 受付)

RESTORING WATERTIGHTNESS IN DEFECTIVE AREAS OF THE MIDAIR CYLINDER CONCRETE STRUCTURE BY GROUTING CEMENT SUSPENSION

Takehiko SAKAGUCHI, Yo ITO, Yoshihiro NISHIOKA, Ai FUJIWARA
and Yukikazu TSUJI

Concrete structures generally suffer in material characteristics or workmanship, and cracks, construction joints, or separator portions often prove unsatisfactory. The authors have devised an easy way to repair or seal areas that are not watertight. Cracks and other defects that affect watertightness can be repaired by grouting with a super-fine cement suspension.

This paper discuss the concept of this method and the result of a basic experiment, and report on the results of the experiment using the midair cylinder concrete structure of an engineering scale.