

報 告

[1159] 微粒子セメント懸濁液グラウトによるひびわれ補修に関する基礎実験

正会員○西岡吉弘 (熊谷組原子力・エネルギー部)  
 正会員 坂口雄彦 ( 同 上 )  
 正会員 伊藤 洋 ( 同 上 )  
 清水昭男 ( 同 上 )

1. はじめに

コンクリート構造物では、ひびわれや打継目及びセパレータ部等、材料特性上あるいは施工上避け得ない止水欠陥が存在する。しかし、下水処理水槽、海洋構造物、廃棄物処分ピットなど水密性の要求される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なことではない。著者らは、新しいひびわれ等の補修・止水工法として、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湛水し、ひびわれ等の止水欠陥部に漏水現象を利用して自然浸透させることにより、徐々にセメント微粒子をひびわれ面へ付着・拘留させて流路空隙を閉塞する工法を提案し、基礎実験を若干試みた<sup>1)</sup>。

本研究では、人工的にひびわれを発生させた円柱供試体29体を用いて、微粒子セメント懸濁液の浸透・注入基礎実験を行った。その結果、本工法のひびわれ補修・止水効果が基本的に確認されたのでここに報告する。

2. ひびわれ補修工法の概要

本工法の概念を図-1に示す。同図に示すように、コンクリート構造物内に微粒子セメント懸濁液を湛水すると、セメント粒子はひびわれ等の漏水流路に沿って流れ、その一部がひびわれ面等の凹凸部に付着・拘留されることになる。このセメント粒子の付着・拘留層は徐々に成長して最終的に流路を閉塞する<sup>2)~4)</sup>。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、漏水箇所の水密・止水性は長期的にも安定することになる。

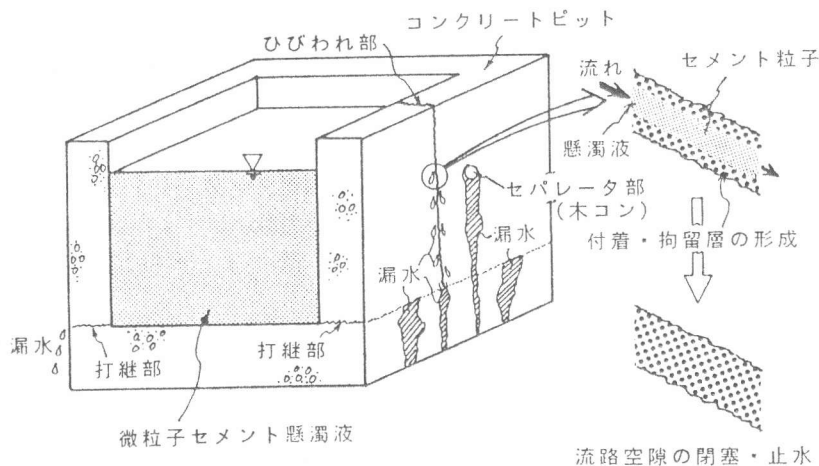


図-1 懸濁液グラウト工法の概念

### 3. 実験方法

#### (a) 実験供試体

実験に使用した供試体を図-2に示す。コンクリートの配合は表-1に示した通りである。供試体は、 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 円柱供試体に割裂法によりひびわれを発生させ、この周囲にエポキシ樹脂コーティングを行い、コンクリート・カッターで供試体の両端面を15mm程度切断することにより作製した。また、あらかじめクラックルーペで表面ひびわれ幅を測定して、実験用供試体を選別した。

#### (b) 実験装置

実験装置の概要を図-3に示す。実験装置は、同図に示したように、①ボルト固定式フランジの供試体取付治具、②、③攪拌機付き懸濁液供給タンク、④加圧注入ポンプ、⑤、⑥低圧注入用ポンプ・オーバーフロー、⑧、⑨懸濁液回収ポンプ・タンクより構成される。同装置により、供試体ひびわれ部に一定圧力で懸濁液を2体同時に連続的に通水することができる。また、漏水量は供試体取付治具下部で⑩メスシリンダを用いて直接測定した。

#### (c) 懸濁液材料

セメント懸濁液は、水道水に微粒子セメントのみを溶かしたもので、3種の濃度(1000, 3000, 5000ppm : 1000ppm は、水1ℓに対し微粒子セメント1g)を設定した。微粒子セメントは、最大粒径 $10\mu\text{m}$ 、平均粒径 $4\mu\text{m}$ 程度(メーカー提供値)のものを使用した。また、最も濃度の高5000ppmの懸濁液の粘性をJロートによる流動性試験で測定した結果、流下時間は18.99秒(20℃, 6回平均)であり、水道水のみ流下時間18.66秒(同)と同程度であった。

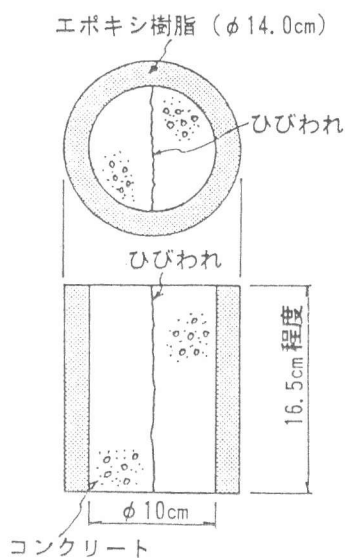
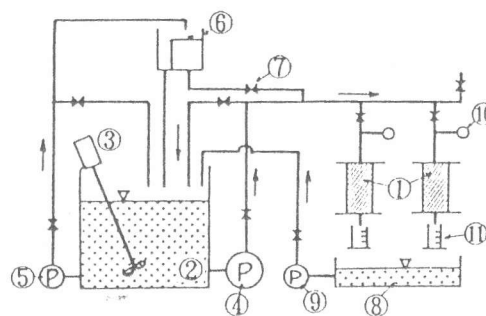


図-2 供試体概要



- ①供試体取付治具
- ②懸濁液タンク
- ③攪拌機
- ④加圧注入ポンプ
- ⑤オーバーフロー供給ポンプ
- ⑥オーバーフロー
- ⑦バルブ
- ⑧回収タンク
- ⑨回収ポンプ
- ⑩圧力計
- ⑪メスシリンダ

図-3 実験装置概要

表-1 供試体コンクリートの配合

セメントの種類	スランブ (cm)	空気量 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
普通ポルトランド	8.0	4.0	20	55.0	45.6	165	300	829	1106	0.60

(d) 実験手順

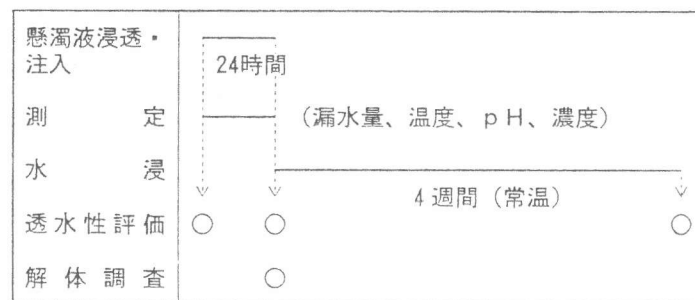
実験は、表-2に示す手順に従って行った。供試体は、実験開始直前まで長期間水浸し、十分飽和させたものを使用した。懸濁液の注入期間は24時間とし、この間の供給タンク内の懸濁液の漏水量、温度、pH、濃度を経時的に測定した。その後供試体を取り外して4週間水浸した後、再度水のみを流してひびわれの透水性評価を行った。また、この間代表的な供試体をいくつか解体して、内部状況の観察を行った。

ここで、透水性評価は、経時的に流路幅が変化することから、単位幅Bを一定とした式(1)より、便宜的に換算透水係数を求めて検討を行った。

$$k_t = \frac{q_t \times h}{h_p \times B \times \ell} \quad (1)$$

ここに、 $k_t$  : 懸濁液注入開始後の材令  $t$  における換算透水係数 (cm/s)、 $q_t$  : 同じく材令  $t$  における漏水量 (cm<sup>3</sup>/s)、 $h$  : 供試体高さ (cm)、 $h_p$  : 注入圧力水頭 (cm)、 $B$  : 単位幅 (1 cm)、 $\ell$  : 供試体端面のひびわれ長さ (10cm) である。

表-2 実験手順



3. 実験結果及び考察

実験は、表-3に示すように懸濁液の濃度3水準(1000, 3000, 5000ppm)、注入圧力3水準(0.1, 1.0, 3.0 kgf/cm<sup>2</sup>)の条件をひびわれ幅0.17~2.5 mmの供試体に適宜組み合わせで行った。同表には、各材令における漏水量の測定結果を併せて示してある。

(a) 漏水量の経時変化

代表的な供試体の懸濁液通水中の漏水量  $q_t / i$  ( $i$  : 動水勾配) の経時変化を図-4に示す。漏水量の経時的な低減傾向は、注入圧力・濃度及びひびわれ幅によって変わることが示唆されるが、最終的には、ひびわれ幅が0.33~1.0 mm程度であると、概ね10時間程度で大きく低減し、恒常流量に近づくことが認められる。

(b) ひびわれ内部のセメント付着状況

懸濁液通水終了後、いくつかの代表的な供試体を解体し、ひびわれ表面部の観察を行った。この時点では、ひびわれ面に付着したセメント粒子は、スラリー状で不安定な状況ではあったが、ひびわれ面全域に様に付着していることが確認された。一方、4週間水浸後のひびわれ内のセメント粒子は、硬化して供試体ひびわれ面と固結していることが確認された。

(c) ひびわれ幅と漏水量低減比

24時間懸濁液を連続注入した後の漏水量低減比 ( $q_1 / q_0$ ) と4週間水浸した後の漏水量低減率 ( $q_{28} / q_0$ ) を各ケース別にひびわれ幅との関係で整理したものが図-5である。図中、△が注入後、■が水浸後である。一部解体などしたケースもあるため、水浸後のデータがないものもあるが、概ねつぎのような傾向が読みとれる。

表-3 実験条件及び結果

ケース名	濃度 (ppm)	注入圧力 P (kgf/cm <sup>2</sup> )	ひびわれ幅 w (mm)	供試体高さ h (cm)	漏水量 (cm <sup>3</sup> /s)		
					初期 q <sub>0</sub>	注入後 q <sub>1</sub>	水浸後 q <sub>2g</sub>
A-1	1000	1.0	0.38	16.47	3.66×10 <sup>0</sup>	3.73×10 <sup>-1</sup>	解体
A-2	1000	1.0	1.00	16.65	2.40×10 <sup>1</sup>	1.08×10 <sup>0</sup>	—
B-1	1000	3.0	0.21	16.40	9.32×10 <sup>0</sup>	9.80×10 <sup>-1</sup>	1.36×10 <sup>-2</sup>
B-2	1000	3.0	0.38	16.25	1.70×10 <sup>1</sup>	2.20×10 <sup>0</sup>	1.11×10 <sup>-1</sup>
C-1	3000	0.1	0.21	16.32	8.67×10 <sup>-2</sup>	3.33×10 <sup>-3</sup>	—
C-2	3000	0.1	0.24	16.37	2.41×10 <sup>0</sup>	4.17×10 <sup>-2</sup>	8.00×10 <sup>-3</sup>
C-3	3000	0.1	0.33	16.23	4.57×10 <sup>0</sup>	1.94×10 <sup>-2</sup>	—
C-4	3000	0.1	0.53	16.37	1.03×10 <sup>1</sup>	1.06×10 <sup>-1</sup>	1.60×10 <sup>-2</sup>
C-5	3000	0.1	1.14	16.60	6.04×10 <sup>0</sup>	1.00×10 <sup>-1</sup>	1.40×10 <sup>-2</sup>
C-6	3000	0.1	2.50	16.70	3.82×10 <sup>1</sup>	1.16×10 <sup>1</sup>	6.00×10 <sup>-3</sup>
D-1	3000	1.0	0.21	16.65	7.40×10 <sup>0</sup>	7.90×10 <sup>-2</sup>	解体
D-2	3000	1.0	0.31	16.32	1.22×10 <sup>1</sup>	4.00×10 <sup>-2</sup>	2.90×10 <sup>-2</sup>
D-3	3000	1.0	0.39	16.38	2.68×10 <sup>1</sup>	2.35×10 <sup>0</sup>	3.70×10 <sup>-1</sup>
D-4	3000	1.0	0.79	16.72	2.25×10 <sup>1</sup>	4.75×10 <sup>-2</sup>	2.04×10 <sup>-3</sup>
D-5	3000	1.0	1.47	16.75	6.11×10 <sup>1</sup>	8.43×10 <sup>-1</sup>	1.57×10 <sup>-1</sup>
D-6	3000	1.0	2.07	16.80	3.02×10 <sup>1</sup>	4.02×10 <sup>0</sup>	2.12×10 <sup>0</sup>
E-1	3000	3.0	0.21	17.09	4.22×10 <sup>0</sup>	8.00×10 <sup>-2</sup>	9.17×10 <sup>-4</sup>
E-2	3000	3.0	0.39	16.32	2.43×10 <sup>1</sup>	7.17×10 <sup>-2</sup>	8.38×10 <sup>-2</sup>
E-3	3000	3.0	0.53	16.23	2.91×10 <sup>1</sup>	5.17×10 <sup>-2</sup>	5.83×10 <sup>-4</sup>
F-1	5000	1.0	0.24	16.33	5.80×10 <sup>0</sup>	2.20×10 <sup>-2</sup>	解体
F-2	5000	1.0	0.31	16.47	1.30×10 <sup>1</sup>	1.80×10 <sup>-2</sup>	解体
F-3	5000	1.0	0.80	16.78	5.23×10 <sup>1</sup>	3.00×10 <sup>-2</sup>	—
F-4	5000	1.0	0.98	16.62	1.54×10 <sup>2</sup>	1.70×10 <sup>-2</sup>	—
F-5	5000	1.0	1.23	16.70	5.99×10 <sup>1</sup>	4.42×10 <sup>-2</sup>	解体
F-6	5000	1.0	1.39	16.72	8.16×10 <sup>1</sup>	2.12×10 <sup>1</sup>	1.92×10 <sup>1</sup>
G-1	5000	3.0	0.17	16.68	5.13×10 <sup>-1</sup>	1.46×10 <sup>-2</sup>	9.17×10 <sup>-4</sup>
G-2	5000	3.0	0.38	17.73	1.34×10 <sup>1</sup>	1.83×10 <sup>-2</sup>	—
G-3	5000	3.0	0.56	17.13	5.97×10 <sup>1</sup>	2.70×10 <sup>-2</sup>	3.33×10 <sup>-3</sup>
G-4	5000	3.0	0.90	17.23	1.25×10 <sup>2</sup>	8.13×10 <sup>-1</sup>	7.47×10 <sup>-3</sup>

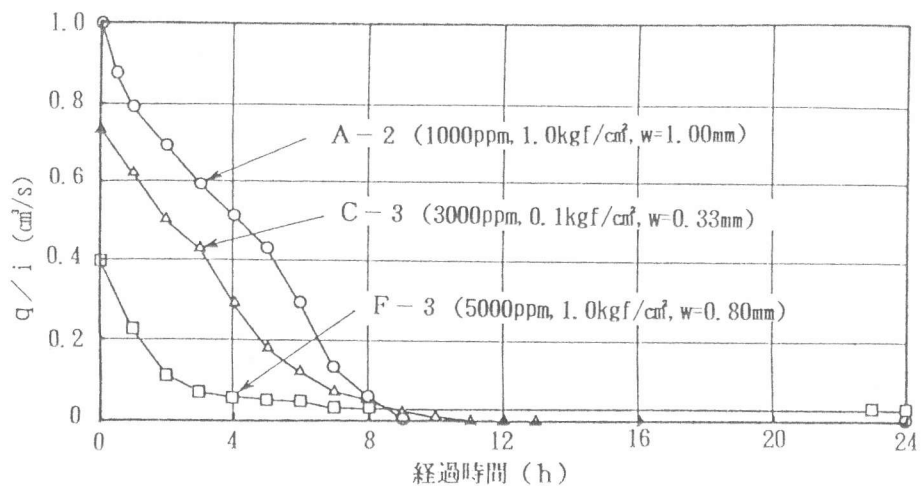


図-4 懸濁液通水中の漏水量の経時変化

まず、注入後の低減比に着目すると、全体的には低減比が $10^{-1} \sim 10^{-4}$ の範囲にあることがわかる。ひびわれ幅との関係でみると、ひびわれ幅が0.6 ~ 0.8 mm前後で最も小さくなり、それよりひびわれ幅が小さく、あるいは大きくなると低減比は大きくなる傾向にあることが認められる。これは、ひびわれ幅が小さい範囲では、もともと漏水量が小さいために低減比に限界があること、逆にひびわれ幅が大きい範囲では漏水量が多く、表面のせん断応力による剝離現象<sup>5)</sup>が生じてセメント粒子が付着・拘留されにくいことによるものと考えられる。また、濃度・注入圧力条件との関係では、注入圧力による低減比の差はそれほど顕著ではないが、濃度による差は、1000ppmで $10^{-1}$ 程度であるのに対し、3000及び5000ppmでは、 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ 程度となっており、明確ではないが、濃度が大きい方が低減比が小さくなる傾向が読みとれる。

つぎに、注入後と水浸後の低減比は、水浸後の方がさらに $10^{-1} \sim 10^{-2}$ 程度小さくなっており、セメントの水和反応による硬化が、漏水量の低減に付加的に寄与していることがわかる。

#### (d) ひびわれ幅と換算透水係数

漏水量から、式(1)を用いて換算透水係数 $k_t$ を求め、各ケース別にひびわれ幅との関係で整理したものが図-6である。図中、○が初期状態、△が注入後、■が水浸後である。換算透水係数は、漏水量低減比が相対的な評価であるのに対し、懸濁液注入により改善される絶対値のレベルを表している。まず、初期透水係数は、 $10^{-4} \sim 10^0$  cm/sと範囲は広いがひびわれ幅が大きいほど増大する傾向にはある。注入後及び水浸後の透水係数は、ひびわれ幅が0.6 ~ 0.8 mm程度よ

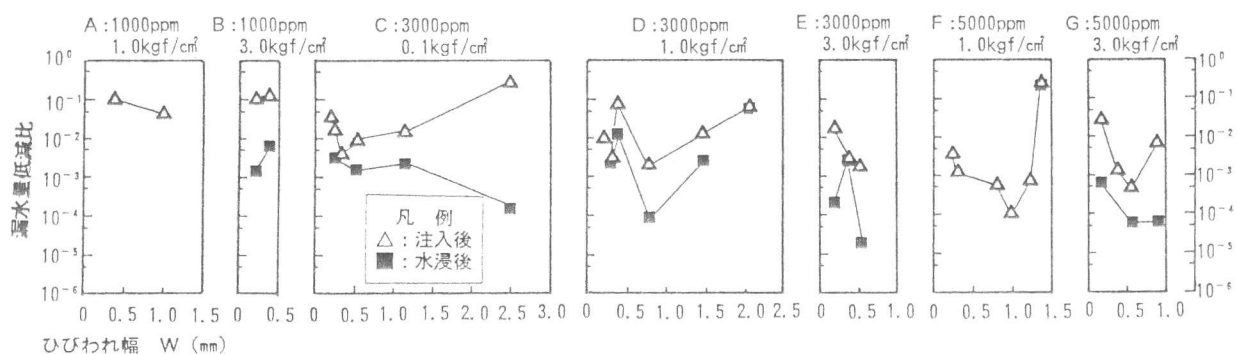


図-5 ひびわれ幅と漏水量低減比の関係

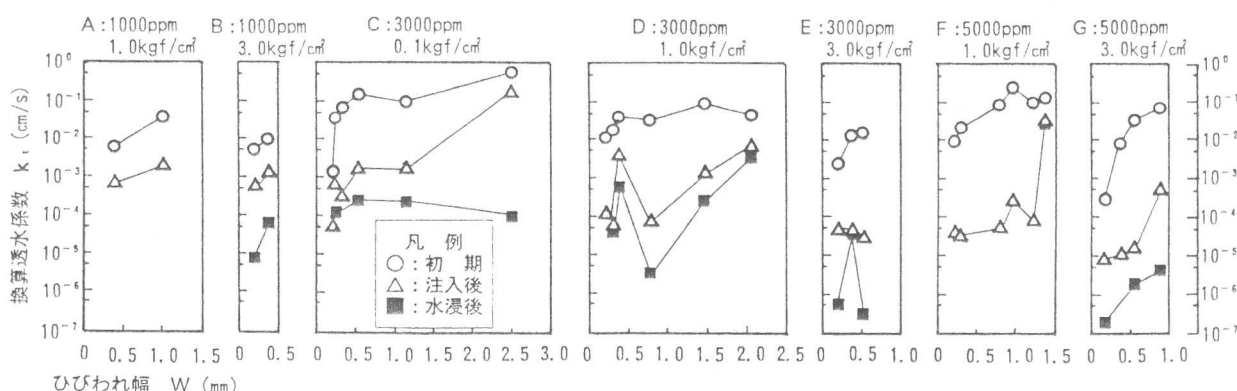


図-6 ひびわれ幅と換算透水係数の関係

り小さい範囲では、概ね注入後で $10^{-3}$ cm/s程度以下、水浸後で $10^{-4}$ cm/s程度以下となっており、同一の濃度・注入圧力の条件下では、ひびわれ幅に関係なくほぼ一定のレベルになっている。ひびわれ幅がそれより大きい範囲では、一応低減効果は認められるものの、ばらつきは大きい。一方、濃度及び注入圧力との関係では、顕著な差ではないが、同一濃度の条件では圧力が高いものほど透水係数は小さくなり、同一圧力の条件では、濃度の大きいものほど透水係数は小さくなる傾向にある。

#### 4. まとめ

得られた成果を整理すると以下ようになる。

- ① セメント粒子は、ひびわれ面内にほぼ均一に付着し、注入終了後常温で4週間水中養生したは、硬化して固結する。
- ② ひびわれ幅が0.3～0.8 mm程度であれば、漏水量を $10^{-2}$ ～ $10^{-3}$ 程度以下に低減することができる。
- ③ 漏水量は、注入後から、水浸後にかけてさらに $10^{-1}$ ～ $10^{-2}$ 程度低減する。
- ④ ひびわれ幅が0.8 mm程度以下であれば、換算透水係数は概ね $10^{-4}$ cm/s以下となる。
- ⑤ 濃度・注入圧力との関係では、顕著な差はないが、同一濃度の条件では圧力が高いものほど透水係数は小さくなり、同一圧力の条件では濃度の大きいものほど、透水係数は小さくなる傾向にある。

結局、本工法により、幅0.3～0.8 mm程度のひびわれ止水欠陥においては、漏水量を1000分の1以下に低減させることが可能であることが示唆された。この範囲のひびわれ幅は、通常のコンクリート構造物に発生するひびわれに十分対応したものと考えられ、実用に供することができるものと考えられる。今後は、他の止水欠陥への適用やセメント微粒子の閉塞状態について、さらに研究を進めていくつもりである。

なお、本実験は科学技術庁より放射性廃棄物処理処分技術開発促進費補助金を受け実施した研究の一部である。

最後に、本実験に御協力いただいた(株)熊谷組豊川技術部 松村哲夫氏、及び同原子力・エネルギー部 西山勝栄氏に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1)坂口雄彦ほか：超微粒子セメント懸濁液によるひびわれ止水工法に関する基礎実験，土木学会第45回年次学術講演会（V），pp. 296-297，1990. 9.
- 2)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.
- 3)伊藤洋ほか：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.
- 4)H. カンプフォール著，齊藤二郎ほか訳：地盤注入《基本理論と施工技術》，鹿島出版会，pp. 27-37，昭和44年7月.
- 5)上田年比古ほか：懸濁物質による砂充填層内の目詰まりと再揚水による透水係数の回復について，日本地下水学会誌，Vol. 25，No. 3，pp. 121-138，1983.