

# PC構造物のグラウト不良とその補修のための 後注入材料に関する実験

小林 和夫\*1・宮川 豊章\*2・杉江 功\*3・森 拓也\*4

## 1. はじめに

1992年秋、英国運輸省がPC橋におけるグラウトの禁止措置を発表した。これは1985年のYnys-y-Gwas橋の落橋とその後の調査などから、PCポステン桁におけるグラウト不良と凍結防止材の使用によるPC鋼材の腐食が問題となってきたためである。施工管理体制などの違いにより一概に比較はできないが、日本でもグラウトの施工不良部の存在が確認され、後注入による補修事例も報告されている。しかし、これらはシースの径が比較的大きく、グラウトも全く注入されていないものが多かった。本稿はブロック工法で架設された比較的古いPC橋のように、ブロック目地部など非常に注入材の通過しにくい箇所が断続的に存在する場合を想定し、そのグラウト状況の調査と、後注入に適した材料を選定するために実施した実験の結果について報告する。

## 2. グラウト充填状況調査

これまで国内において、グラウト不良が直接的原因となって落橋した例はないが、海外においては、1985年の英国Ynys-y-Gwas橋（ポステンI形単純桁橋）の落橋<sup>1)</sup>や、米国のフロリダにおける駐車場（ポステンスラブ）の落下事故<sup>2)</sup>などが報告されている。

今回、阪神高速道路で問題とされたのは、昭和40年代にプレキャストブロック工法で架設されたポステンションT桁橋であり、ブロック目地は幅10cmの無筋コンクリートで間詰めされている。現在のようにマッチキャスト方式でブロック（セグメント）を製作し、架設現場でも樹脂接着剤を用いて目地部を接着するものと異なり、当時はこの10cm程度の間隙で、両ブロックの対応するシースの接続作業を行う必要があった。このため接続不良が生じ易く、グラウト漏れの原因となった可

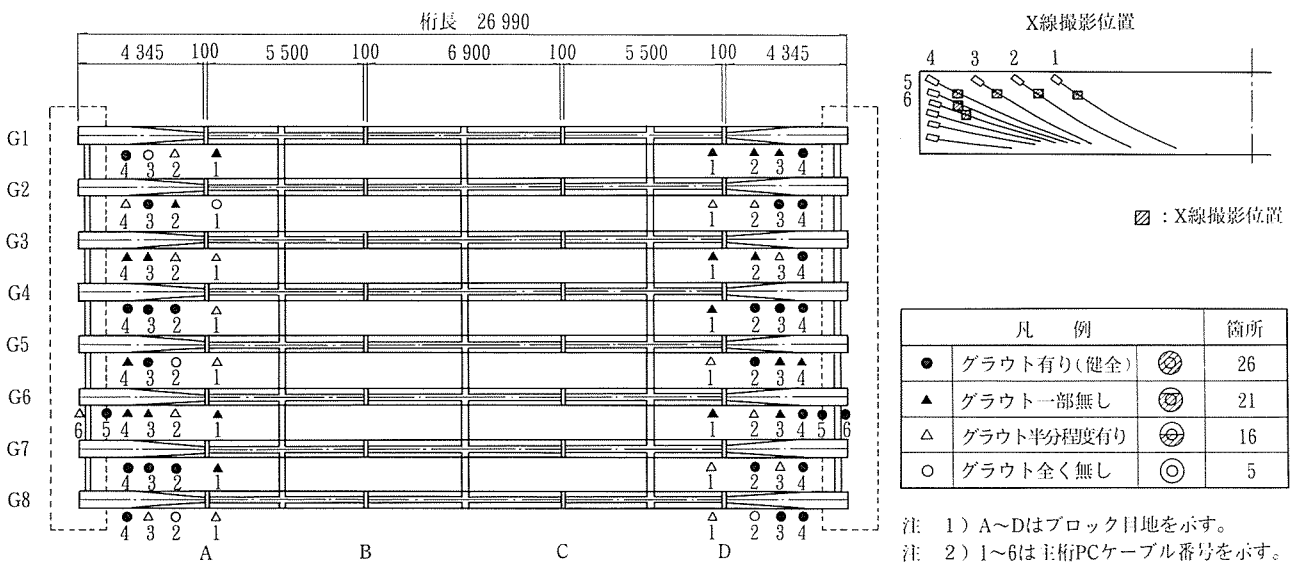


図-1 グラウト不良部調査結果の一例

\*1 Kazuo KOBAYASHI : 大阪工業大学 土木工学科 教授  
 \*2 Toyoaki MIYAGAWA : 京都大学 土木工学科 助教授  
 \*3 Isao SUGIE : 阪神高速道路公団 保全施設部  
 \*4 Takuya MORI : (株) ピー・エス 大阪支店技術部

◇研究報告◇

能性も考えられる。このような形式の構造は合計 27 径間あるが、昭和 63 年からの調査でかなりの目地部において、ひびわれ、開閉挙動、漏水および遊離石灰などの損傷が発見された。さらに、X 線透過とシーすのはつり出しによりグラウト充填状況を調査したところ、図-1 に示すようなグラウト不良部が確認された。平成元年には、損傷の最も大きい径間についてトラッククレーン (40 ton) を用いた静的載荷試験を実施し、プレストレスが最高で設計値の 70 % 程度に低下していることが明らかになった。この原因は明確に特定できないものの、シーす内のグラウト不良が、腐食による鋼材断面の減少や、定着部のすべりの原因となっていることも考えられる。また、損傷の発見された橋梁は外ケーブルを用いて順次補強されているが、グラウト不良については、現在のところ、特別な対処はなされていない。

シーす内のグラウト充填状況を調査するには、現在大きく分けて 2 つの方法が考えられる。1 つは X 線などを照射してその透過量から推察する方法。もう 1 つはかぶりコンクリートをはつり、シーすを開いて目視あるいは

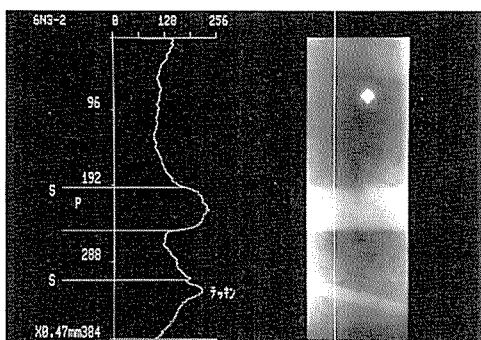
は CCD カメラなどで直接観察する方法である。ただし、これらの方法では橋軸方向に長いシーすのほとんど一断面しか確認できず、連続した充填状況は 1 本のシーすについて 2 箇所以上で調査を行い、その結果から推定しなければならない。また X 線を用いる場合、調査位置は部材厚が小さく、鋼材が重複しないウェブに限られるといった制限を受ける。写真-1, 2 は X 線透過、およびはつり出しによる調査結果の例を示すものである。

阪神道路公団で行った調査の結果から、該当橋梁について以下のことが明らかになった。

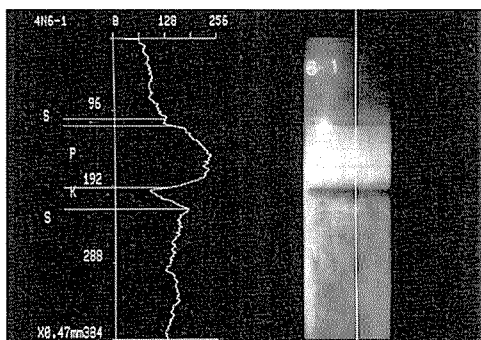
- ① 2 径間について X 線による調査をした結果、1 径間目では 68 箇所内の 42 箇所、2 径間目では 57 箇所内の 36 箇所、平均して 62 % のグラウト不良部が確認された (調査位置は図-1 に示すように、主として桁端付近に限られる)。
- ② X 線透過による方法は、直接観察した結果とほぼ一致していた。
- ③ グラウト不良の程度は、健全、一部無し、半分程度有り、全く無しの 4 段階に分類したが、同一ケーブルの両端部での充填状況はほぼ同じであった。

通常のグラウト注入作業が一方からの片押しで行われることを考えると、両端部が完全に充填されている場合には、その間もほぼ充填されている可能性が高いと考

グラウトが十分に充填されている場合



グラウト中に部分的に空隙が見られる場合



グラウト中の大部分に空隙が見られる場合

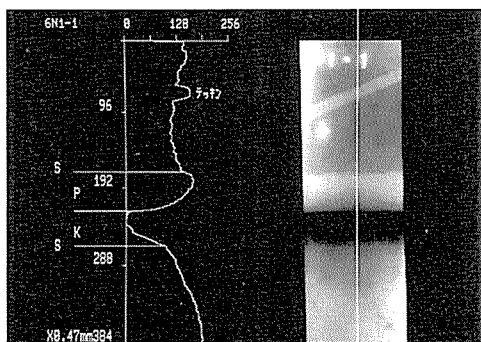


写真-1 X 線写真例



写真-2 はつり出しによるグラウト調査例

えられる。また逆に、両端部がともに全く充填されていないものは、その間も同様の状況であると予測されるが、この場合には空隙が大きく、比較的容易に後注入できるものと思われる。最も問題となるのは、シーす断面の一部しか充填されていないもの、あるいは両端部で充填状況が異なるものである。つまり、これらはスパン中央部で充填状況がどのように変化しているか予想が困難であり、注入孔や排出孔の位置、あるいは注入材料を選定するのに別途調査が必要となる可能性がある。

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験対象材料の選定

PCグラウトの後注入材に要求される性能としては

- ① 充填性がよいこと
- ② 防錆効果が高いこと
- ③ 所要の強度を有すること
- ④ 作業性がよいこと

などが挙げられる。特に実際のシーす内はグラウト不良が断続的に存在していると考えられ、微少なすき間さえも通過し得る細部充填性が特に重視されるべき性能と考えられる。これらの点を考慮し、今回の実験では、主としてひびわれ注入用材料、およびこれまでにグラウトの後注入材として使用された実績のある材料を中心に、有機系7種類、無機系5種類を選定した。

#### 3.2 注入実験

実験供試体は図-2に示すように、実際のPC桁主ケーブルを模擬した形状で行った。途中2箇所人工的に製作したグラウト不良箇所を設け、下端から注入し、上端排出孔への注入をするものである。充填状況が直接見られるように透明塩化ビニルパイプ（内径41mm）を用い、充填状況の観察とともに、注入時間、注入圧などを測定した（写真-3）。

実際の橋梁におけるグラウト不良の程度は千差万別であり、空隙度の大きいものから小さいものまで、さまざまなものが混在していると考えられる。今回の実験では、図-3に示すようにこれらを、ランク1, 2, 3, 3'の4段階の空隙度に分類し、各ランクごとでの後注入を

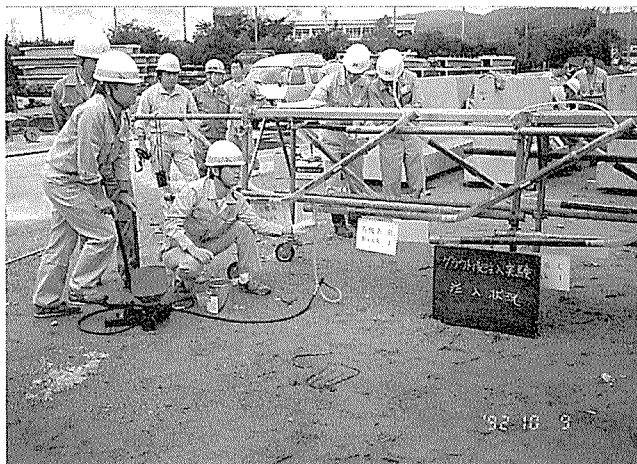


写真-3 注入実験状況

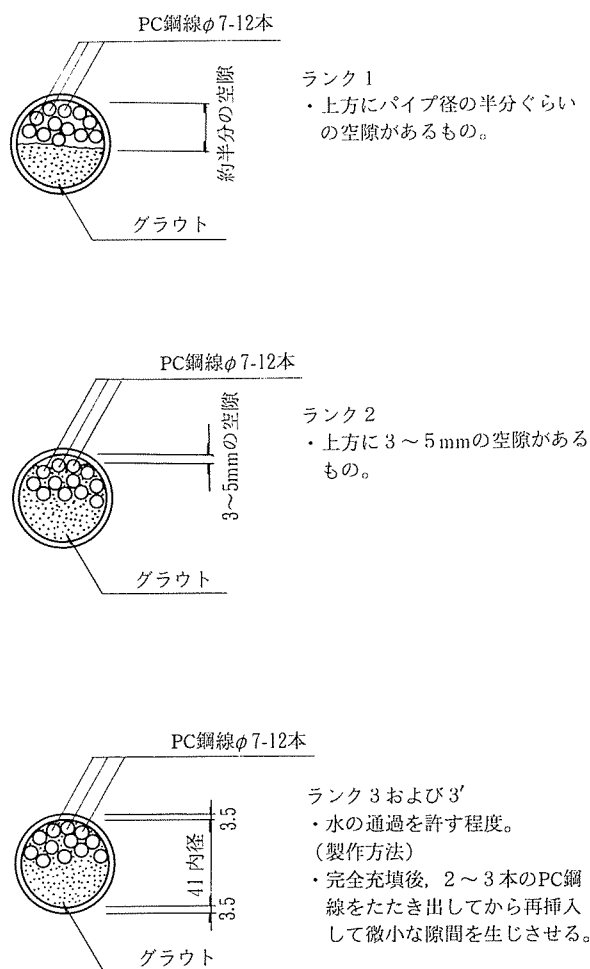


図-3 グラウト箇所断面図

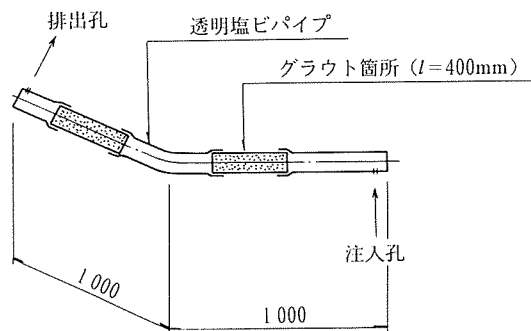


図-2 注入実験供試体

行った。

しかしながらグラウト不良箇所を人工的に製作するのは非常にむずかしく、同様の製作方法によっても必ずしも同一の空隙度が得られない。したがって、グラウト不良箇所製作後に水通しによって空隙度を測定し、各ランクごとで同程度のものになるよう選別した。水通しによる空隙度測定は図-4に示す要領で行い、マーク点1か

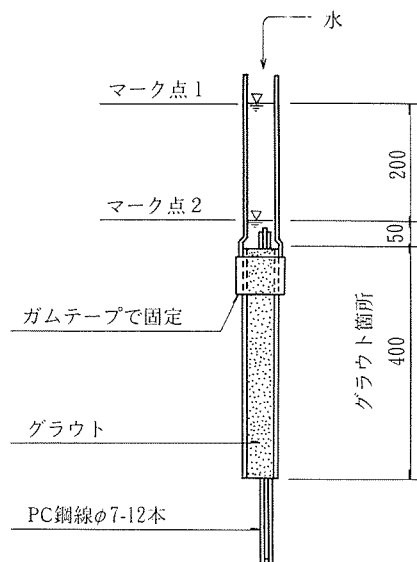


図-4 水通しによる空隙度測定

らマーク点2までの水の通過時間をもってその空隙度とした。その結果ランク2は水の通過時間5~15秒程度、ランク3は15~80秒程度、また、それ以上の時間を要したきわめて空隙度の小さいものをランク3'として分類した。

実験はまず、全注入材に対してランク1での注入実験を実施し、その結果により注入材料の一次選別を行った後、ランク2,3の注入を行った。さらに充填性のきわめて良い材料についてはランク3'での後注入を実施した。また、無機系Eについては、パイプ内に水通しを行った後での注入実験を、追加的に行った。これはシース内での湿潤状態が、注入に与える影響を調査する目的で行ったものである。

### 3.3 材料実験

注入材料の特性を把握するため、粘性の経時的な変化、および硬化後の物理性状の測定を以下に示すように行った。

#### (1) 粘性の経時変化

粘性は注入材の充填性に最も密接に関連する性質であり、実橋規模での後注入を考えた場合、粘性が時間の経過とともに大きく変化しないことが望ましい。したがって各注入材に対して、注入前、30分後、60分後の時点で粘性の測定を行い、その経時的な変化を測定した。

測定は回転粘度計で行ったが、無機系材料については一般的によく行われるJロートによるコンシステンシー試験も合わせて行った。

#### (2) 硬化後の物理性状

PCグラウトはシース内PC鋼材の防錆のほか、付着により主桁のひびわれ分散性状や、曲げ破壊耐力を高めることを目的としている。したがって所定の強度を有し

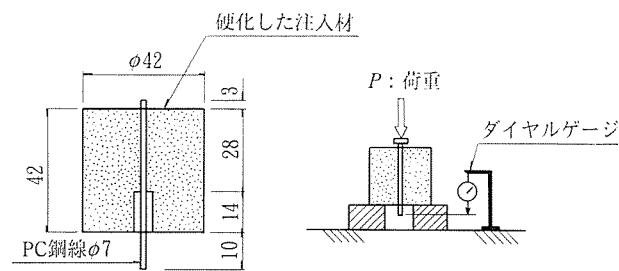


図-5 付着強度の測定方法

ていることは、後注入材に要求される基本性能の1つといえる。今回の実験においては、硬化後の圧縮強度、弾性係数、付着強度の測定を行った。付着強度の測定は図-5に示す要領で行い、鋼線の抜け出しが確認されたときの荷重を、付着面積で除して付着強度とした。

## 4. 実験結果

### 4.1 注入実験

各注入材の実験結果を表-1に示す。これらをまとめると以下のとおりである。

- ① ランク1,2ではすべての注入材が比較的容易に注入できたが、ランク3になると、後注入実績のある無機系B,Cは注入不可能であった。また有機系Bは注入に1時間近くを要する結果となった。
- ② ランク3'を排出孔まで注入できた材料はなかった。
- ③ 基本的に、注入時間や注入圧は粘性に左右され、この点からは粘性の小さい無機系材料が有利といえる。また無機系材料の粘性は粒径の影響を強く受ける傾向にある。
- ④ 有機系と無機系とでは、閉塞の状況に若干の違いが観察された。無機系では、一度詰まると以後の注入は全くできなくなるが、有機系では、完全に閉塞することはなく、注入速度が著しく落ちた状態になる。
- ⑤ 無機系Eについて行った水通し後の注入実験は、水通ししないものとはほぼ同様の結果となり、シース内が乾燥状態であっても、湿潤状態であっても、充填性に大きな影響を与えないことが判明した。
- ⑥ 注入した箇所を硬化後に切断し、断面の充填状況を観察すると、有機系F,Gでは硬化収縮が激しく、塩ビパイプとの間に2~3mmの空隙が生じていた。他の材料では若干の気泡があったものの、概ね良好な充填状況であった(写真-4,5)。すべての注入材に対して、ランク1での注入後、充填箇所の透水係数を測定したが、その値はごく小さく、密実な充填ができたものと判断できる。

表-1 注 入 実 験 結 果

注入材	主 成 分	主 な 用 途	材 料 特 性 (メーカー公称値) (注1)					注 入 結 果 (注2)				
			粘 性 ( $c_p$ )	粒 径 ( $\mu m$ )	圧縮強度 ( $kgf/cm^2$ )	可使時間 (min)	硬化後の収縮率 (%)	ランク 1	ランク 2	ランク 3	ランク 3'	
有機系	A	エポキシ樹脂 (無溶剤型)	ひびわれ注入	32~250	-	600~ (977)	34~110	2.0~3.0	○ <sup>2</sup>	○ <sup>7</sup>	○ <sup>9</sup> 3.0	
	B	エポキシ樹脂 (無溶剤型)	ひびわれ注入	500~1 500	-	500~ (758)	30 以上	0.03	○ <sup>4</sup>	○ <sup>4</sup> 5.0	○ <sup>52</sup> 5.0 以上	
	C	ポリウレタン樹脂 (無溶剤型)	支 承 の 防 錆 吊り材の防錆	3 000±1 000	-	- (軟質)	30~90	-	○ <sup>4</sup>			
	D	エポキシ樹脂 (無溶剤型)	ひびわれ注入	300~800	-	800~ (968)	40~60	0.0	○ <sup>5</sup> 6.0			
	E	エポキシ樹脂 (無溶剤型)	ひびわれ注入 目地充填材	500~1 000	-	- (軟質)	約 30	0.0	○ <sup>8</sup> 6.0	○ <sup>2</sup> 5.0	○ <sup>8</sup> 8.0	● <sup>42</sup> 8.0 以上
	F	エポキシ樹脂 (溶剤型)	防 錆 材	約 1 400	-	- (軟質)	塗料扱い	-	○ <sup>2</sup>			
	G	ポリウレタン樹脂 (溶剤型)	防 錆 材	約 50	-	- (軟質)	塗料扱い	-	○ <sup>4</sup>			
無機系	A	超微粒子セメント	ひびわれ注入	約 100	3.0~3.5	300~400 (275)	30~60	0.0~0.8	○ <sup>2</sup>	○ <sup>3</sup>	○ <sup>8</sup> 2.5	
	B	セメント+カルシウム サルフォアルミネート	グラウト注入	(Jロート) 7±1 sec	88 以下	746 (720)	30~60	-	○ <sup>2</sup>	○ <sup>7</sup>	● <sup>11</sup>	
	C	セメント+A 1+スル ホン 酸 化 合 物	グラウト注入 モルタル注入	(Jロート) 7±1 sec	80~100	350~390 (393)	約 60	0.2	○ <sup>2</sup>	○ <sup>6</sup>	● <sup>13</sup>	
	D	超微粒子セメント	ひびわれ注入	20	16 以下	374 (109)	約 45	-	○ <sup>3</sup>			
	E	超 微 粒 子 セメント+ポリマー	ひびわれ注入	105±45	4.0~5.0	300~500 (304)	-	-	○ <sup>4</sup>	○ <sup>4</sup> 0.5	○ <sup>5</sup> 2.0	● <sup>12</sup> 5.0 以上
										(注3) ○ <sup>4</sup> 5.0	● <sup>4</sup> 20.0	

(注 1) 圧縮強度の欄の下段 ( ) 内は今回実験の測定値

(注 2) ○: 注入可能

●: 注入不可能

また、数値は上段が注入時間(分), 下段が最大注入圧( $kgf/cm^2$ )を示す。

(注 3) 無機系 E の下段は、水通し後に行った注入実験結果を示す。

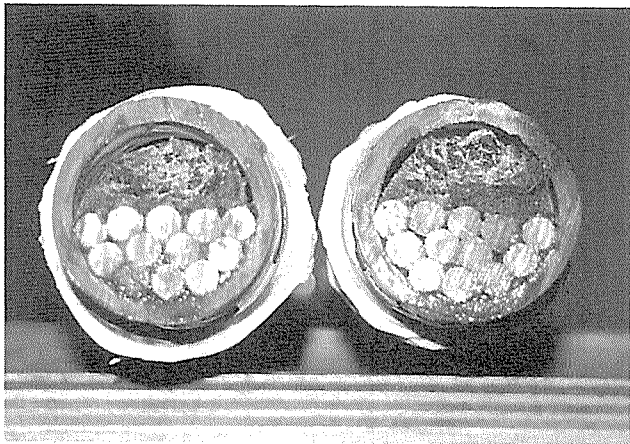


写真-4 注入箇所切断面 (有機系 F)

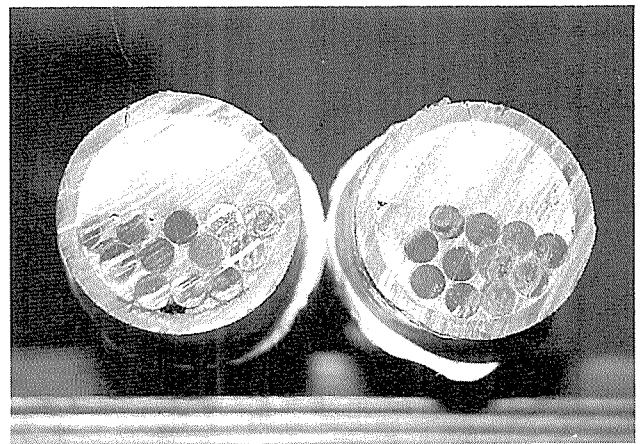


写真-5 注入箇所切断面 (無機系 E)

## 4.2 材料実験

### (1) 粘性

回転粘度計による粘性の経時変化測定結果を図-6に示す。無機系 B は、30 分後にはすでに測定不能となった。また有機系 B、無機系 A なども、かなり大きな変化を示すことがわかった。

一方、無機系 B、C、E について行った J ロートによるコンシステンシー試験では、回転粘度計による結果とほぼ同様の傾向を示すことが確認された (図-7)。

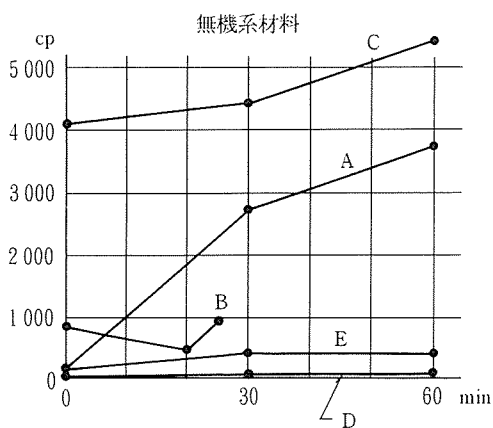
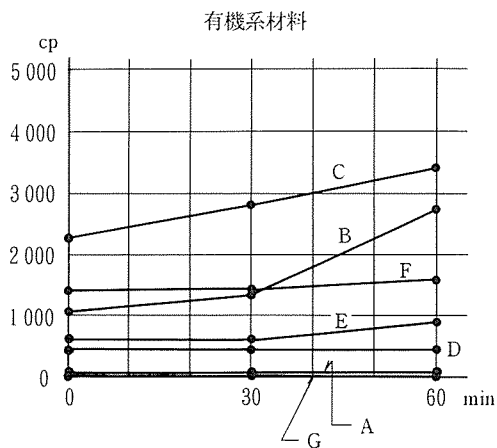


図-6 粘性の経時変化

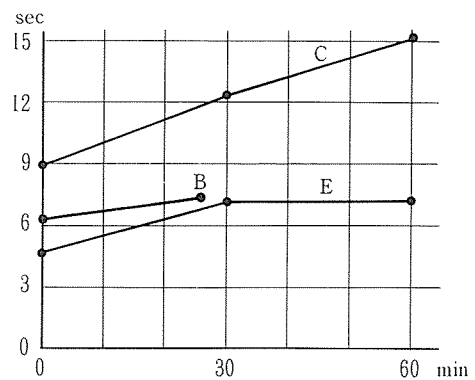


図-7 コンシステンシーの経時変化 (無機系材料, J ロート)

### (2) 硬化後の材料強度

各注入材の圧縮強度、弾性係数および付着強度の試験結果を一括して表-2に示す。有機系材料のいくつかは硬化後も非常に軟質で、強度測定ができなかったものもあるが、他の材料は概ね十分な圧縮強度を有していることが確認された。また付着強度も 10~20 kgf/cm<sup>2</sup> であり、PC グラウト材料として使用上問題のない値であった。

表-2 硬化後の材料強度

注入材	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	付着強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )
有機系 A	977	73 400	11.3
B	758	28 500	20.1
C	非常に軟質	非常に軟質	微小
D	968	37 600	13.9
E	非常に軟質	非常に軟質	15.4
F	非常に軟質	非常に軟質	微小
G	非常に軟質	非常に軟質	微小
無機系 A	275	128 000	1.2
B	720	204 000	19.8
C	393	101 000	39.0
D	-	-	-
E	304	66 500	14.2

### 5. 考 察

各材料の特性について評価した結果を表-3に示す。材料選定の上で最も重要な細部への充填性および注入時間に着目すると、超微粒子セメント系材料が最も高い性能を有し、ランク3程度であれば後注入も十分可能であることがわかった。さらに、粘性の経時変化などを考慮し、無機系D、Eが後注入に適した材料であると判定した。ただし、有機系材料や他の無機系材料についても、成分配合の調整によって、今後有力な材料となる可能性があることを付記しておく。また、グラウト不良の状況によっては、後注入実績のある無機系B、Cなどによる注入が効率的、経済的となる場合も考えられる。

表-3 注入材の総合評価

注入材	充填性	注入時間		粘性の経時変化	硬化収縮	防錆雰囲気	経済性	室内実験	総合評価		
		ランク1	ランク2								
有機系	A	○	○	△	○	-	△	○	△防錆効果が確認できれば有望		
	B	△	○	×	×	○	-	△	○	×充填作業性に問題あり	
	C	-	○	-	△	○	-	△	×	×粘性、付着強度に問題あり	
	D	-	○	-	○	○	-	△	○	△ランク3の実績と防錆効果があれば有望	
	E	○	△	△	○	○	-	△	×	×充填作業性と圧縮強度に問題あり	
	F	-	○	-	△	×	○	△	×	×硬化時の収縮や圧縮強度に問題あり	
	G	-	○	-	○	×	○	△	×	×	"
無機系	A	○	○	△	×	○	○	△	(○)	△粘性の経時変化を改善できれば有望	
	B	×	○	×	-	○	○	○	○	×ランク3を充填できない	
	C	×	○	×	△	○	○	○	○	×	"
	D	-	○	-	○	○	○	△	(○)	○ランク3の実績はないが有望	
	E	○	○	○	△	○	○	△	○	○現時点では有望	

実施工への適用を考えた場合、シーす内の空隙状況を把握することが重要である。X線などにより部分的な調査は可能であるが、全体的な把握は、現状ではきわめて困難といわざるを得ない。今回の実験において水通しを行った際、ランク3では注水圧は0 kgf/cm<sup>2</sup>であったが、ランク3'では3~4 kgf/cm<sup>2</sup>が必要であった。このようなことから、実際の施工時には水通し時の注水圧から、シーす内の空隙状況をある程度把握できる可能性を見いだした。これらをもとに、今後は実橋での補修を試験的に実施したいと考えている。

### 6. あとがき

PC構造物の施工に限らず、最近の施工管理体制の充実や、ブロック工法においてはマッチキャスト方式の採用など、現在のわが国ではグラウト不良という損傷は、ほとんど考えられないといっても過言ではないようである。しかし、既設構造物ではこのような状況が少なからず存在すると考えられ、それらの大部分は将来的に鋼材の腐食、さらに深刻な場合は破断および桁の崩壊という事態も考えられる。事実、外国においては先に述べたような事例が報告されているということ念頭におきつつ、今後はこれらを的確に発見する手法ならびに補修方法を確立する必要があると考えている。

最後に、この実験にあたってご指導ご鞭撻を頂いた、阪神高速道路公団「コンクリート構造物の耐久性に関する調査研究委員会」(岡田清委員長)の各委員の方々、ならびに注入材料を提供して頂いた材料メーカーの方々に厚く御礼申し上げます。

### 参 考 文 献

- 1) R. J. Woodward, F. W. Williams : Collapse of Ynys-y-Gwas Bridge, West Glamorgan (Proceedings of The Institution for Civil Engineers Part 1, Aug. 1988)
- 2) Walter Podolny Jr. : Corrosion of Prestressing Steels and Its Mitigation (PCI JOURNAL, 9-10. 1992)

【1993年8月10日受付】