

循環注入法による PC グラウトの施工性に関する実験的検討

大阪支店	土木工事部 (九州支店駐在)	岡部成行
大阪支店	土木工務部	前田文男
大阪支店	土木工務部	橋野哲郎

概要： PC グラウトの施工では、ダクトの下り勾配部においてグラウトの先流れによる有害な空隙の発生を防止するため、PC グラウトの流動性および注入流量等を考慮した注入口、排気口、排出口の設置や使用する施工機械器具の選定を行っている。PC グラウト循環注入法は、下り勾配部の空隙を減少させる注入方法として考案した施工法であり、今回実施した実物大供試体を用いた注入実験により、PC グラウトの密度向上や残留空隙の減少に効果があることがわかった。

Key Words： PC グラウト、循環注入方式、充填性

1. はじめに

PC 構造物に用いられる PC グラウトは、ダクト内の PC 鋼材を腐食から守る役割を備えており、その充填性が、構造物の耐荷性能・耐久性に大きな影響を与える。

近年、構造物の老朽化による不具合が顕在化し、社会的にクローズアップされており、PC 構造物の長寿命化は、我々 PC に携わる技術者に課せられた重要な責務であると考えられる。

PC 構造物を延命化するにあたり、ダクト内の PC グラウトの充填性は、一つの生命線とも考えられる重要なポイントである。そこで、今回 PC ダクト内の未充填部分を減少させるために考案した、グラウトを循環して注入する方法の有効性を検証するために行った実験結果を報告する。

2. PC グラウトの注入法

2.1 現状の注入方法

橋梁等のポストテンション方式の PC 構造物では、PC 鋼材は部材内で上下にその位置を変化させながら配置されている。そのため PC 鋼材のダクト内に片側からグラウトを充填する場合は、下り勾配や上り勾配を経て充填されることとなる。グラウトの粘性が低く注入速度が遅い場合は、下り勾配部においてグラウトがダクト内全体を充填せず、グラウトの一部のみが先流れし水平部分まで到達する。その後、水平部分でグラウトがダクトの全断面を充填すると下り勾配部分の空隙が閉塞されてダクト内に残る。図-1 に空隙発生メカニズムを示す。

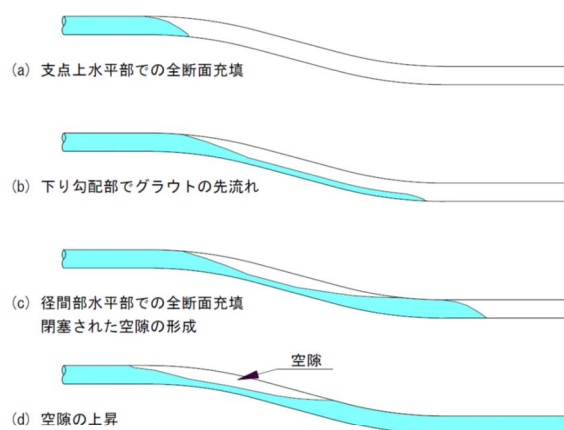


図-1 先流れによる空隙発生メカニズム



岡部成行



前田文男



橋野哲郎

PC グラウト施工マニュアル^リでは、この空隙部分の空気を排出するためにダクトの下り勾配の開始点付近に中間排気口を設置することになっているが、空隙が発生する位置は、グラウトの粘性、ダクトの勾配や直径、注入速度ならびにダクト内の PC 鋼材の位置などにより変化するため、効果的な中間排気口の位置を設定するのは難しい。これに対し、先流れを防ぐためにグラウトの粘性を高くした高粘性グラウトが広く用いられるようになってきている。また一方では、極端にグラウトの粘性を低くして最も高い位置に中間排気口を取り付け、空気を上方に排出することでグラウトの充填性を高める手法も用いられている。さらに、注入方法の工夫としては、真空ポンプを排出側に繋ぎ、ダクト内を減圧しつつグラウトを注入する手法が多くの工事で用いられている。この場合は先流れによる空隙が発生しても減圧の効果で空隙を小さくすることができる。

2.2 循環式グラウト注入法

前述のように今日では、グラウト材料、注入資機材、施工法ともかなり改善されているが、これまでの透明のダクトによる注入実験において、高粘性タイプのグラウトでも注入条件によっては、先流れすることが知られており、さらなる施工方法の改善が求められている。

そこで、グラウトの空隙を減少させるためにグラウトを循環して注入する方法が考案され²⁾、今回はその有効性を実験により検証することとした。

グラウトの練混ぜは、通常 1,000rpm 以上の高速回転のミキサで行われ、この練混ぜの際に少なからぬ量の空気がグラウト内に連行される。その内の大部分は即時ないしホッパ内に受けとめられている間に排出されるが、幾らかの量はグラウトの内部に連行されたままとなる。また、一方では、グラウトもコンクリートと同様にポンプ圧送により空気量が減少するとされている。循環式注入法は、このことを利用し空気量が減少したグラウトを再度注入することにより、グラウト内に連行された空気の総量を減少させるとともに、先流れによる空隙を排出して、充填性の向上を図るものである。基本的な注入システムを図-2 に示す。

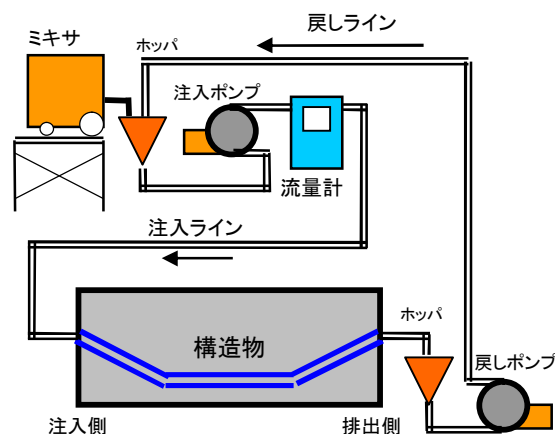


図-2 循環グラウトシステム概念図

3. 実物大注入実験

3.1 実験概要

実験は、連続桁を想定し中間に曲上げ部および曲下げ部を有する延長約 27m の大型試験体で行った。試験体の諸元を表-1 に、試験体の写真と側面図を写真-1、図-3 に示す。

表-1 供試体の諸元

試験体数	9体 (表-2参照)
試験体延長	27m
最大高低差	1.187m
ダクト	透明 (商品名 Fits) 外径89mm, 内径81mm
PC鋼材	12S15.2 (SWPR7) 非緊張
ケーブル角度	最大 15度
グラウト量	95 ㍓/本, (3.5 ㍓/m)
グラウト配合	高粘性グラウト W/C=40.5% 超低粘性グラウト W/C=34.0%
注入速度	高粘性グラウト 10 ㍓/min 超低粘性グラウト 15 ㍓/min



写真-1 供試体の写真

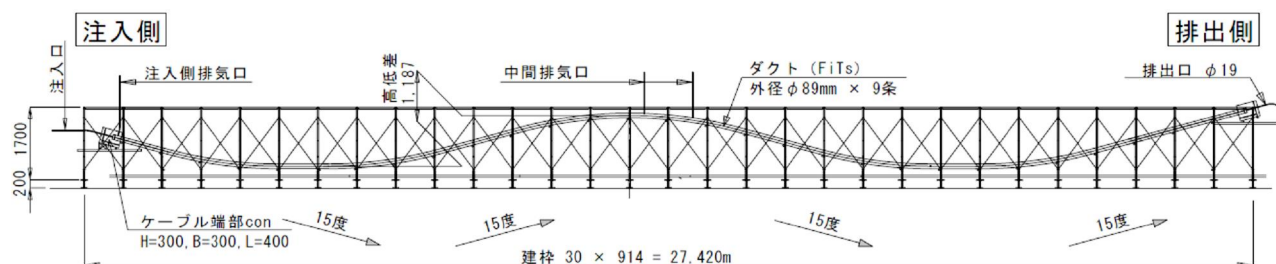


図-3 供試体の側面図 (高粘性グラウト)

ダクトには、内径 81mm の透明の保護管を用いてグラウトの流れが直接観察できるようにした。ケーブル角度に関しては、片持ち張出し架設工法で施工される橋梁のウェブに配置されたケーブルにも適用可能なようにやや大きめの 15° とした。ダクト内には直径 15.2mm の PC 鋼より線を 12 本配置(12S15.2)し、両端では注入・排出ホースをダクトにつなぎその周りをコンクリートで囲んだ。

排気口は、注入側端部のコンクリートブロックに 1 箇所、中間の曲下げ開始点付近に 2 箇所設置した。中間排気口の位置は、PC グラウト施工マニュアル¹⁾を参考にして注入するグラウトの粘性によりその位置を変えた。すなわち、高粘性グラウトでは、曲下げ開始点から 500mm およびその先 1,000mm の 2 箇所、超低粘性グラウトでは、曲下げ開始位置とその先の 500mm の 2 箇所とした。後述する部分循環の試験では、さらに部分循環用の注入口と排出口を図-4 に示すように追加した。

3.2 実験ケース

実験ケースは、表-2 のようにグラウトの粘性、真空ポンプ併用の有無および循環方式をパラメーターとした 9 ケースとした。グラウトの粘性に関しては、混和剤に GF-1720(BASF ジャパン社製)を用いた高粘性グラウトと、プレミックスのハイジェクター(太平洋マテリアル社製)を用いた超低粘性グラウトの 2 種類とした。

注入方法としては、真空ポンプを併用する場合としない場合とした。循環方式に関しては、全体循環、部分循環および循環なしの 3 種類とした。

全体循環は注入口から排出口までの全体を循環させて注入するものである。部分循環は、連続桁のように長いケーブルの場合に、作業性を改善するために比較的気泡が生じやすい下り勾配部分のみを循環させて注入するものである。

3.3 循環注入方式

3.3.1 全体循環法

注入口よりグラウトを注入し、ダクト内がグラウトで満たされた初回注入後、排出口より排出されたグラウトを戻しポンプにより注入側のホップに戻し、再び注入口よりグラウトを注入した。図-2 に循環グラウトシステムの概念図を示す。全体循環において循環させるグラウト量は、試験体内のグラウトの体積(950)に相当する量とし、試験体内のグラウトを 1 回循環させた。

循環式注入法においても初回の注入同様に中間排気口からグラウトを各々約 150 排出させ中間排気口を閉じた。注入側の流量計を用いて循環させた注入量が 950 となった時点で排出口を閉栓し、0.3MPa まで加圧した後に注入を終了した。

表-2 試験ケース

Case No.	グラウトの粘性	真空ポンプ	循環方式	備考
A	高粘性 (GF-1720)	-	-	従来方式
B		併用	-	真空のみ
C		-	全体循環	循環のみ
D		-	部分循環	
E		併用	全体循環	真空 + 循環
F		併用	部分循環	
G	超低粘性 (ハイジェクター)	-	-	従来方式
H		併用	-	真空のみ
I		-	全体循環	循環のみ

3.3.2 部分循環法

初回の注入作業が終了した後、中間排気口と部分循環用の排出口を開き、下り勾配終了部付近に取り付けた部分循環用の注入口より注入した。部分循環の注入量はこの区間のグラウトの体積(約 40ℓ)とした。また、部分循環は下り勾配部分の空隙の排除が目的であるためこの部分に関しては初回の注入方向とは逆方向の下方からの注入とした。図-4 に部分循環方式の注入方法を示す。

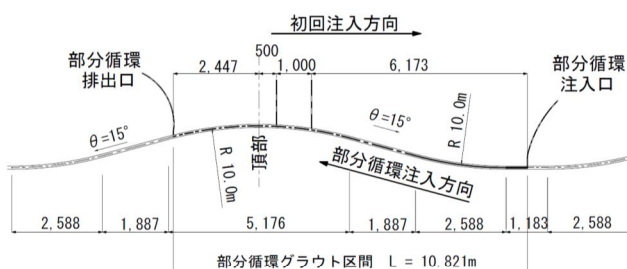


図-4 部分循環注入の注入方法（高粘性グラウト）

3.4 検討項目

循環式注入法の効果を確認するために、練混ぜ直後（注入側と表示）と初回注入の際に端部の排出口より排出された（排出側と表示）グラウトの空気量と単位容積質量を測定し、併せて水結合材比(W/C)を推定した。通常 PC グラウトでは空気量は配合の際に考慮されないのので、空気量を無視し次式で水結合材比を求めた。

$$W/C = \frac{1 - M/\rho}{M/\gamma_w - 1}$$

ここに、 M ：グラウトの単位容積質量 (g/cm^3)
 γ_w ：水の単位容積質量($=1.0 \text{ g}/\text{cm}^3$ とする)
 ρ ：セメントまたはプレミックス材の密度

セメントおよびプレミックス材の密度は、試験成績書に示された値であり、高粘性グラウトでは 3.16 g/cm³、超低粘性グラウトでは 3.06 g/cm³として水結合材比を算出した。

また、グラウトが硬化した後にダクトを除去しグラウトの表面を観察するとともに、表面に発生した気泡の面積を測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 グラウトの空気量と単位容積質量

各試験ケースにおける注入側と排出側の空気量、単位容積質量および推定された水結合材比(推定 W/C)を表-3 に示す。

いずれのケースにおいても排出側の空気量は注入側に比べおよそ半減している。これに伴い排出側の単位容積質量も **Case-G**(超低粘性, 通常注入)を除いて増大している。これは、エントラップドエアが時間の経過とともに減少したためか、あるいはポンプ圧送によりグラウト内の空気量が減少したためと考えられる。このように、一旦注入され排出されたグラウトは空気量が減少しており、これを再度注入することでエントラップドエアが減少し、グラウトの充填性が向上すると考えられる。

ちなみに注入方法以外のパラメーターに着目すると、材料の違いでは注入側の超低粘性グラウト(G~I)の空気量は、高粘性グラウト(A~F)のおよそ半分である。排出側の空気量の変化は、割合では高粘性グラウトと同様におよそ半減しているが減少量としては高粘性グラウトに比べて小さい。

注入時のポンプの圧力は高粘性グラウトで 0.3MPa～0.6MPa, 超低粘性グラウトで 0.1MPa～0.3MPa であった。この注入圧力の差も空気量の減少に関与していると考えられるが今回の実験では明確な影響は捉えることができていない。

推定 W/C については、高粘性グラウトが設計値 40.5%よりも大きい値を示し、一方の超低粘性グラウトが設計値 34.0%より小さい値となった。粘性の違いによりエントラップトエアの排出の速さやグラウト内部に

表-3 注入側と排出側でのグラウト性状

Case No.	空氣量 (%)		單位容積質量 (g/cm ³)		推定 W/C (%)	
	注入側	排出側	注入側	排出側	注入側	排出側
A	4.2	2.0	1.938	1.961	41.2	39.5
B	3.3	0.7	1.933	1.970	41.6	38.8
C	4.4	1.9	1.924	1.944	42.3	40.8
D	3.4	1.6	1.934	1.953	41.5	40.1
E	4.7	1.8	1.935	1.951	41.5	40.2
F	4.4	2.0	1.916	1.942	43.0	40.9
G	2.2	1.6	2.037	2.026	32.2	32.9
H	2.2	1.3	2.034	2.045	32.4	31.7
I	2.3	1.1	2.037	2.044	32.2	31.8

留まる量が違うことなどから設計 W/C と推定 W/C の差の現れ方が違うものと考えられる。

4.2 硬化後の充填状況

グラウトが硬化した後、ダクトの上半分を除去し、充填状況を確認した。頂部より下り勾配部分の充填状況を写真-2 に示す。左側は高粘性グラウト、右側は超低粘性グラウトの充填状況であり、空隙部分を分かり易くするため 2mm 程度以上の空隙を黒色に着色した。

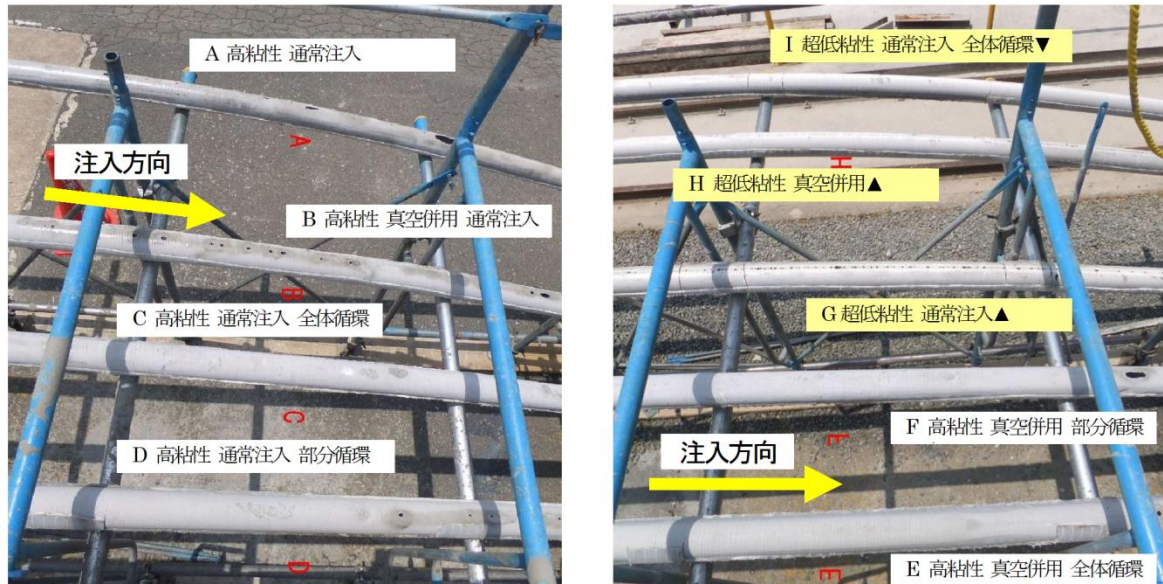


写真-2 硬化後の下り勾配部分の充填状況(左；高粘性、右；超低粘性)

各ケースの下り勾配部分の空隙発生状況を写真-3に示す。高粘性グラウトを通常の手法での注入したAおよびBのケースでは、比較的大きな気泡がダクト上面に発生している。循環して注入したCおよびDでは細かな気泡が認められるものの良好な充填状況となった。

超低粘性グラウトを使用したGおよびIにおいても、循環して注入したIは良好な充填を示したが、通常の手法で注入したGでは、細かな気泡が広範囲に発生した。

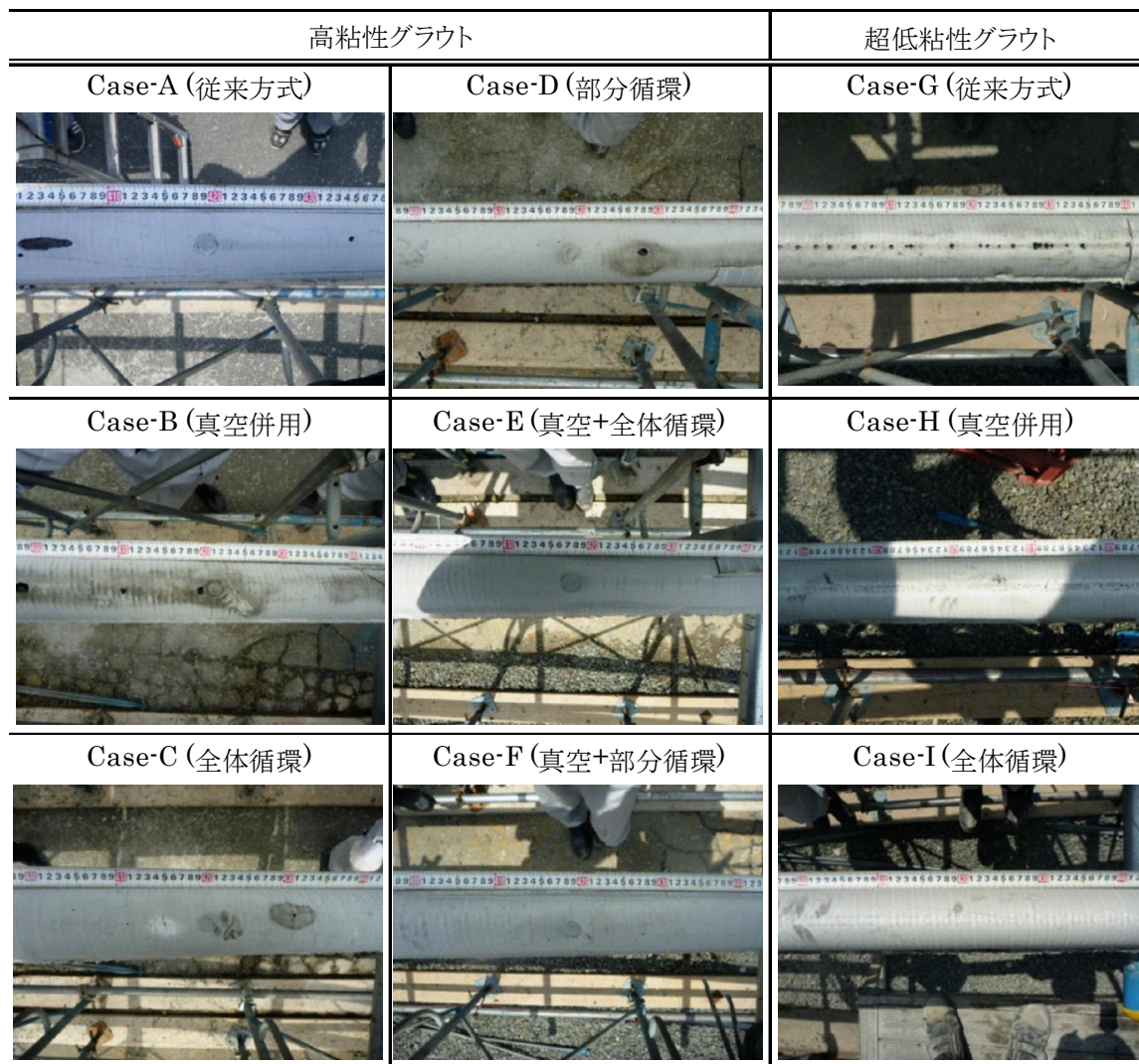


写真-3 硬化後の下り勾配部分の空隙の測定

さらに、この部分でダクトのおよそ上半面に相当する幅100mm、延長方向に1,700mm(面積170,000mm²)を抽出し、この面積における空隙の面積を集計した。計測された空隙部分の面積およびその割合を表-4に示す。

高粘性グラウトにおいて比較基準であるAと循環グラウトC、Dを比べると明らかに空隙が減少している(3.14%→0.04%, 0.28%)。真空ポンプを併用した場合でもBとE、Fを比べると空隙の減少(1.08%→0.06%, 0.63%)が確認できる。

超低粘性グラウトにおいてもGとIを比べると空隙面積の比率は1.66%および0.00%となっており循環させた場合の方が充填性が改善されている。

一方、全体循環と部分循環を比べると真空ポンプなしのCとDではそれぞれ0.04%, 0.28%であり、併用した場合のEとFでも0.06%, 0.63%であり全体循環の方が空隙を減少させる効

表-4 下り勾配部分の空隙

Case No.	粘性	真空ポンプ	循環方式	空隙箇所	
				面積(mm ²)	割合(%)
A	高粘性	—	—	5,340	3.14
B		併用	—	1,841	1.08
C		—	全体	75	0.04
D		—	部分	477	0.28
E		併用	全体	102	0.06
F		併用	部分	1,079	0.63
G	超低粘性	—	—	2,829	1.66
H		併用	—	713	0.42
I		—	全体	3	0.00

果が高い結果となった。

このように、注入されたグラウトの空気量の差が、硬化後のグラウト表面でも確認できた。なお、高粘性と超低粘性を比べると概ね超低粘性の方が空隙が少ない結果となった。これも注入するグラウトの空気量の違いと同様の結果となった。

5. まとめ

本実験より得られた知見を以下に示す。

- (1) 注入側と排出側のグラウトにおいて、空気量は排出側の方が少ない。これに伴い単位容積質量も排出側が大きくなっている。
- (2) 先流れにより空隙が生じやすい下り勾配部分において、硬化後のグラウト表面の状況は次の通りであった。
 - (a) 循環式注入法が通常の注入方法に比べ空隙が少ない。
 - (b) 全体循環と部分循環を比べると、全体循環の方が空隙がより少ない。
 - (c) 超低粘性グラウトと高粘性グラウトを比べると超低粘性グラウトの方が空隙が少なく、空隙自体も小さい。
- (3) 注入するグラウトの空気量（通常の注入方法では注入側の空気量、循環式注入法では排出側の空気量）と硬化後のグラウト表面の空隙の発生状況に関連性があることが確認できた。

このように、グラウトの循環式注入法は、一旦注入して空気量が少なく密実になったグラウトを再度注入することで、充填性の向上が図れる注入法である。またグラウトの硬化後にダクトを除去し充填状況を観察したところ、循環注入した場合は通常の注入方法より空隙が少ないことが確認できた。

6. おわりに

PC グラウトの充填性向上は、PC 構造物の長寿命化における永遠のテーマであり、我々技術者の課題でもある。今回の実験により、循環式注入法による PC グラウトの充填性向上は立証されたが、実施工においては施工労力（コスト）と施工時間が従来工法に比べ多大に掛かるなどの問題点が確認された。

今後は、実施工における注入方法の機械化・マニュアル化に向けた技術開発が期待される。本報告が今後の PC グラウトにおける充填性向上に寄与できれば幸いである。

参考文献

- 1) (一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材 施工マニュアル 2013 改訂版，2013.8
- 2) 特許出願公開番号：特開平 7-189490