

## PCグラウト充填までの期間に関する検討 —屋外暴露実験—

オリエンタル白石(株) 正会員 工修 ○東 洋輔  
 (株)高速道路総合技術研究所 正会員 工修 青木 圭一  
 西日本旅客鉄道(株) 正会員 博(工) 近藤 拓也

### 1. はじめに

2012年12月に、公益社団法人プレストレストコンクリート工学会から「PCグラウトの設計施工指針[改訂版]」(以下、指針改訂版とする)が発刊された。7年前に発刊された最初の指針では、「PC鋼材の挿入後および緊張後、速やかにPCグラウトを注入し、有害な錆が生じないようにしなければならない。」と記されているが、「速やか」とはどの程度の期間なのかが明確ではなかった。そこで、指針改訂版の発刊にあたり、「速やか」が環境条件に応じてどの程度の期間なのかを明らかにするため、コンクリート供試体のシース中にPC鋼材を配置し、穏やかなし中程度の環境での屋外暴露実験を行った。所定期間暴露した後、PC鋼材をシースから取り出し、その腐食程度、機械的特性および電気化学的特性を調査および評価し、PCグラウト充填までの許容期間を検討する。また、冬季施工など、速やかにPCグラウトが注入できない場合に必要となる一時防錆対策の効果についても併せて評価する。

### 2. 実験方法

#### 2.1 概要

コンクリート供試体のシース中にPC鋼材を静置し、所定期間屋外環境に暴露した。所定期間暴露したPC鋼材はシースから取り出し、健全性の検討を行った。供試体概要を図-1に示す。コンクリート供試体にφ70mmのポリエチレン(以下、PEとする)シースを埋設し、シース内にPC鋼材(SWPR7B, 1S12.7, L=900mm)を1シース内につき12本静置した。図-1および表-1に暴露時の配置状況および実験要因を示す。実験要因は、一時防錆対策の有無、シースの密閉・開放である。一時防錆対策については、防錆油の塗布および乾燥空気の送風とした。防錆油については、①水置換性溶剤型防錆油(商品名:RPC-1,住友電工スチールワイヤー製)および②水溶性防錆剤(商品名:NOX-RUST 311LF,日本パーカラライジング,神鋼鋼線工業製)の2種類使用した。乾燥空気については、写真-1に示す除湿型のスポットクーラーおよび湿度管理型の電源制御装置により、シース内の湿度がRH60%以下になるように制御した。また、基準試料として、処理および暴露をまったく施さない試料(以下、ブランクとする)を12本用意した。

PC鋼材は予め初期損傷および初期濡れの履歴を与えたのちに、コンクリート供試体のシース中に挿入し暴露を行った。初期損傷については、実施工を再現するため、図-2に示す要領でPC鋼材をシース

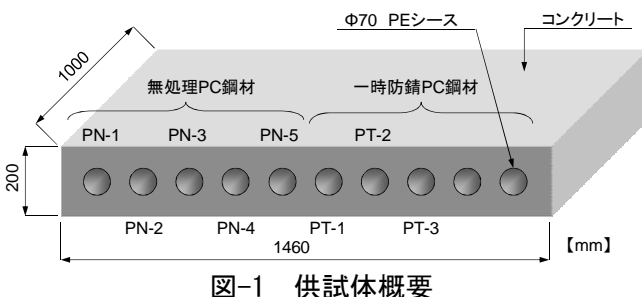


図-1 供試体概要

表-1 実験要因

試料No.	シース	一時防錆対策		暴露期間	初期損傷	初期濡れ	シース端部
		有無	種類				
PN-1	PE	なし	-	2週	あり	表乾程度 (濡らして布で拭き取る)	密閉
PN-2				4週			
PN-3				8週			
PN-4				16週			
PN-5				30週			
PT-1	あり	-	防錆油1	25週	なし	なし	-
PT-2			防錆油2				
PT-3			乾燥空気(≤RH60%)				
ブランク	-	なし	-	-	なし	なし	-

内で 100m 相当移動させ、鋼材表面に摩擦による傷を与えた。初期濡れについては、一旦 PC 鋼材に散水を行った後に乾布で表面水を拭き取るものであり、PC 鋼材の表面は乾いているが、素線間が濡れた状態で暴露を開始するものである。なお、防錆油塗布鋼材については防錆油保護のため、散水後水分を拭き取らずに初期損傷を与えたのち、シース中へ静置した。シース端部の処置として、シース内を密閉するケースについては、アクリル板にてシース端部に蓋をした。また、開放するケースについては、アクリル板にφ26mm ホースを接続することで外部環境と同化したが、雨水の侵入は防止した。供試体の暴露状況を写真-2 に示す。暴露期間中は、栃木県真岡市のオリエンタル白石(株)技術研究所内の屋外に供試体を設置した。

2.2 測定項目

表-2 に測定項目を示す。基本として、暴露期間 16 週のケースは腐食目視観察を暴露開始後 2, 4, 8 および 16 週にて行い、暴露開始後 16 週に錆の拭き取りの実施、腐食面積、腐食減量および引張強度の試験を行った。なお、以下では暴露開始後の材齢を指す場合、単に暴露〇〇週と記す。また、暴露期間 2, 4 および 8 週のケースに関しては、終了週に上記試験をすべて行った。上記試験に加えて、防錆油ケースは暴露 25 および 30 週、乾燥空気ケースは暴露 20 および 25 週において腐食目視観察および引張強度の試験を行った。また、暴露した PC 鋼材の再動態化を評価するため、PC 鋼材を PC グラウトに埋設し、PC グラウト充填後の自然電位を経時的に測定した。図-3 に電気化学的測定の概要を示す。

2.3 判定基準

所定期間暴露した PC 鋼材に発生した錆が、許容できる腐食であるか否かを判定した。その指標は、①錆の発生時期（錆が発生したときの暴露材齢）、②錆の程度（PC 鋼材に発生した錆が柔らかい乾布で拭き取れるなど許容できる腐食であること）、③機械的特性（PC 鋼材の引張強度がブランクと比較して 95%以上であること。なお、PC 鋼材の引張強度を 95%以上としたのは、試験誤差も加味して設定した値であり、5%の強度低下を容認するものではない。）および④電気化学的特性（PC 鋼材の自然電位が 1~3 ヶ月以内に-200mV(vsCSE)より貴な電位で落ちつくかブランク供試体の電位と同等であること）とし、これらを総合的に判断した。



写真-1 乾燥空気制御装置

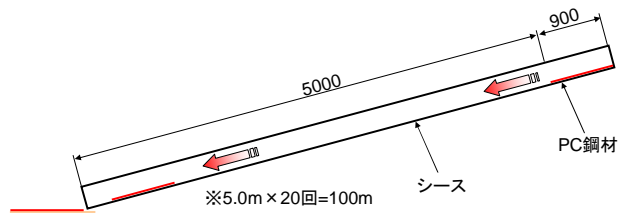


図-2 初期損傷処置概要図



写真-2 供試体暴露状況

表-2 測定項目

測定項目	備考
温度・湿度	シース内温度、シース内湿度、PC鋼材温度、外気温
腐食目視観察	PC鋼材の腐食の有無(暴露2, 4, 8, 16週を基本とするが、追加して乾燥空気ケースは20, 25週, 防錆油ケースは25, 30週で実施)や柔らかい乾布で錆が拭き取れるか(暴露終了時を基本)
腐食面積	PC鋼材12本中、腐食している3本の錆をスケッチし腐食面積を測定
腐食減量	腐食面積を測定した3本について、クエン酸2アンモニウム水溶液で処理した後に腐食減量を測定
引張強度	他の腐食している3本について、引張強度を測定
再動態化	他の腐食している3本について、PCグラウトに埋設した供試体を成形し、PCグラウト充填後の自然電位を測定(充填後2, 4, 8, 12, 24週を基本)代表的なケースについて実施

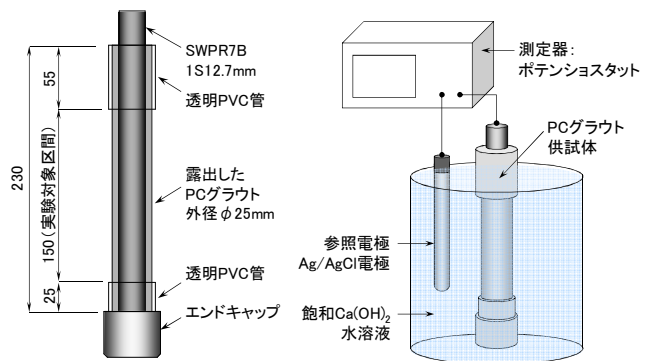


図-3 電気化学的測定の概要

### 3. 実験結果

#### 3.1 目視および機械的試験の結果

各ケースの各実験結果を表-3 に示す。また、観察状況の一例（本実験で腐食程度の大きいケース）を写真-3 に示す。無処理 PC 鋼材について、密閉で暴露 9 週、開放で暴露 8 週にて点錆の発生を確認した。暴露 16 週における各実験結果は、錆は拭き取れ、腐食面積および腐食減量から錆は軽微で、引張強度はブランクと同程度であった。錆の拭き取り状況の一例（暴露 16 週実験終了時に PN-4 に対して実施した結果）を写真-4 に示す。また、暴露 2, 4 および 8 週に暴露を終了したケース（腐食なし）の引張強度はブランクと同程度であった。

一時防錆対策 PC 鋼材について、防錆油で暴露 25 週、乾燥空気暴露 20 週にて点錆の発生を確認した。両ケースとも暴露 25 週における引張強度はブランクと同程度であった。

#### 3.2 自然電位測定結果

暴露期間 4 週（腐食なし）、16 週（腐食あり）のケースおよびブランクの PC 鋼材において、PC グラウトを充填した供試体の自然電位測定結果を図-4 に示す。なお、結果は供試体 3 本の平均値とした。

ASTM C876 の腐食判定によれば、各ケースとも不確定領域に位置するが、ブランクと同程度の電位であることから、暴露期間中に腐食した PC 鋼材も再不動態化し、腐食は進行していないと考えられる。

#### 3.3 暴露環境

図-5 に実験期間中の日平均気温経時変化を示す。本実験の暴露環境として PN-1~PN-5 は概ね暴露 13 週程度までが 20℃以下、以降が 25℃以下で、PT-1~PT-3 は概ね前半が 25℃以下、以降が 30℃以下となり、全体を通した平均値は 19℃であった。図-6 に PN-4 および図-7 に PT-3 のシース内温度、湿度、PC 鋼材温度、宇都宮市日平均湿度および飽和水蒸気圧 Tetens(1930)の式 (1) よりシース内の結露状況を判定した結果について示す。密閉したシース内の湿度は常に RH60%以上と高く、結露判定によると大半の期間において結露している状態であると判断でき、乾燥空気を送風したシース内の湿度は

表-3 目視および機械的試験の結果

試料 No.	一時防錆対策		暴露期間	ダクト端部	腐食を確認した暴露週	試験を行った暴露週	腐食した鋼材数 (本)	腐食面積率 (%)※1, 2	腐食減量率 (%)※1, 3	引張強度率 (%)※1, 4	錆の拭き取り除去
	有無	種類									
PN-1	なし	-	2週	密閉	2週 なし	2週	0/12	0	0.37	101.6	錆なし
PN-2			4週		4週 なし	4週	0/12	0	-0.15	102.6	錆なし
PN-3			8週		8週 なし	8週	0/12	0	-0.25	101.0	錆なし
PN-4			16週	開放	9週	10/12	0.15	-0.68	101.9	可能	
PN-5					8週	8/12	0.03	-0.68	101.7	可能	
PT-1	あり	防錆油1	30週	密閉	16週 なし	16週	0/12	0	-	100.9	錆なし
					25週	25週	1/6	-	-	102.2	可能
PT-2		防錆油2	30週		16週	16週	0/12	0	-	99.5	錆なし
					30週	30週	2/6	-	-	100.1	可能
PT-3	乾燥空気 (≦RH60%)	25週		16週	16週	0/12	0	-0.16	100.7	錆なし	
				25週	25週	6/6	-	-	102.5	可能	

※1 試料3本の平均値

※2 計測した腐食面積÷12.7mmを円の直径とした場合の表面積

※3 ブランク値(1.32%)を控除した値

※4 ブランク値(192.3kN)を100%として表示 (JIS規格: 183kN)



○部：錆形成箇所

写真-3 観察状況の一例 (PN-4: 無処理 PC 鋼材 密閉ケース 暴露 16 週)

拭き取り前



拭き取り後



○部：錆形成箇所

写真-4 錆の拭き取り状況の一例 (PN-4: 無処理 PC 鋼材 密閉ケース 暴露 16 週)

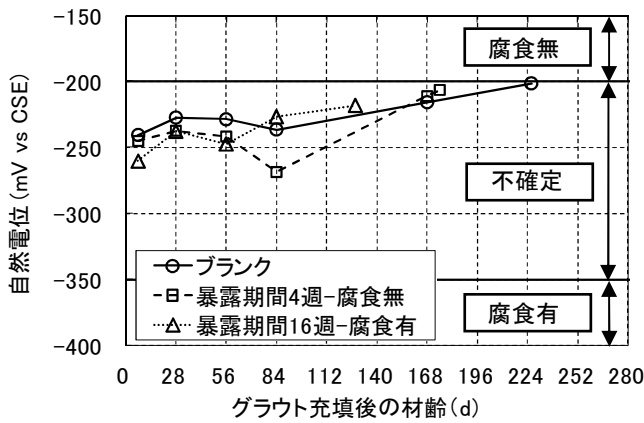


図-4 自然電位測定結果

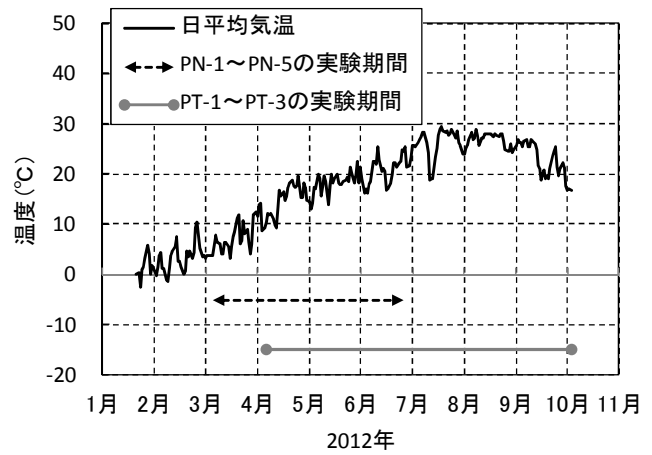


図-5 屋外暴露実験期間の日平均気温

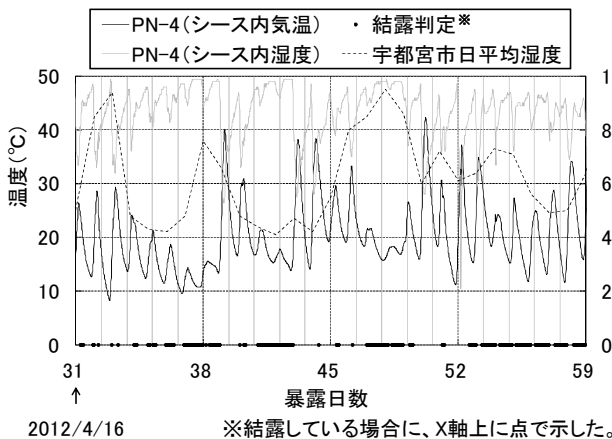


図-6 PN-4 (密閉) の暴露環境

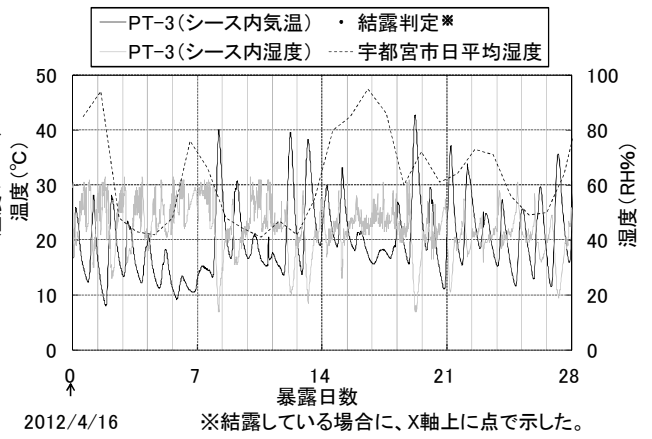


図-7 PT-3 (乾燥空気) の暴露環境

$$E(t) = 6.11 \times 10^{\frac{7.5t}{t+237.3}} \quad \dots \quad \text{式 (1)}$$

ここで、 $t$ : 指定した温度 (°C),  $E(t)$ : 飽和水蒸気圧 (hPa)

概ね RH60%以下を保っており、結露判定によると、すべての期間で結露していないと判断できる。実際に、シース内の PC 鋼材は密閉したケースでは水滴が付着し、乾燥空気を送風したケースでは水滴は発生していないことを確認している。したがって、シース内の PC 鋼材に対して乾燥空気を送風することにより、腐食要因物質となる水の発生を抑制できたため、錆の発生時期が遅延したと考えられる。

#### 4. まとめ

雰囲気温度の平均値が 19°C 程度の穏やかなし中程度の環境において屋外暴露した実験の結果、

- 1) 無処理 PC 鋼材は暴露 8 週程度で錆が確認されたが、錆は暴露 16 週時点で拭き取れる程度で、そのほかの試験結果はblankと比較して同程度であり、許容範囲である。
  - 2) 一次防錆対策である防錆油および乾燥空気ケースについては、PC 鋼材は暴露 25 週程度で錆が確認されたが、錆は拭き取れる程度で、引張強度もblankと比較して同程度であり、許容範囲である。
- 上記 1)および 2)に加え、実施工の工程、安全性および合理性を考慮した上で、指針改訂版では、PC 鋼材をダクトへ挿入後から、PC グラウトを注入するまでの期間の限度を環境条件に応じて記述した。なお、指針改訂版への反映および記載内容の概要については別稿にて報告する。

本実験および検討は、プレストレストコンクリート工学会 PC グラウトの設計施工指針改訂委員会施工 WG において行なったものである。委員の構成は、青木圭一主査、近藤拓也副査、二井谷教治副査、勝田浩一委員、山家芳大委員、今川隆広委員、武部行男委員、船野浩司委員、細野宏巳委員、大和信夫委員、東洋輔委員である。