

論文 PC グラウト充填不足部における PC 鋼材の腐食抑制に関する研究

北野 勇一^{*1}・川口 千大^{*2}・直江 幸司^{*3}・山崎 哲男^{*4}

要旨：既設ポストテンション方式 PC 橋を対象に、PC グラウト充填不足部に気化性防錆剤を圧入することにより、PC 鋼材の腐食を抑制する効果について実験的に検討した。実物大試験より、PC グラウト充填不足部に NaCl0.6%水溶液が存在する状況において、当該部 1m 当り気化性防錆剤を 1g 以上圧入し PC グラウトを注入することで PC 鋼材の腐食が抑制される状態になることを確認した。また、マクロセル腐食試験より、既存グラウト中に含まれる塩化物イオン量が 30kg/m^3 となる状況において、PC グラウトを再注入する前に気化性防錆剤を圧入することにより既存グラウトとのマクロセル腐食が抑制される状態になることを確認した。

キーワード：ポストテンション方式 PC 橋、PC グラウト充填不足、PC 鋼材、気化性防錆剤

1. はじめに

1990 年代以前に建設されたポストテンション方式プレストレストコンクリート (PC) 橋では PC グラウトの充填が一部で不充分となっており、その対策として PC グラウト再注入による補修が有効であるとされる¹⁾。しかしながら、PC グラウト充填不足部に塩化物イオンが残留する状況では PC グラウト再注入による防食効果が低下することや、既存グラウト部に多量の塩化物イオンが含まれる状況では再注入された PC グラウトと既存グラウトとの境界部でマクロセル腐食を生じるおそれがあると指摘されている²⁾。この対応としては、PC グラウト充填不足部に亜硝酸リチウム水溶液を注入して PC 鋼材を不動態化させ当該水溶液を排出した後に亜硝酸リチウムを PC グラウトに添加して再注入する方法³⁾、イオン交換樹脂または塩化物イオン固定化材を PC グラウトに混和させ再注入することで塩化物イオンを吸着または固定化させ鋼材の腐食環境を軽減させる方法⁴⁾⁵⁾が提案されている。

ところで、新設の PC グラウトは完全充填が得られる施工技術が確立されているのに対し、既設ポストテンション方式 PC 橋の PC グラウト充填不足部に対して行われる PC グラウト再注入は定着端部にグラウトホースが設置できないことや緊張容量の小さい PC 鋼材が用いられてシースの空隙量が元々小さいことに起因し、再注入される PC グラウトが完全に充填されないことも想定される。さらに、PC グラウト再注入が完全に充填されたとしても、既存グラウトとの境界部付近はブリーディングによりグラウトが疎になっていることも想定される。

そこで筆者らは水中と気中の両環境で鋼材の腐食抑制が可能な気化性防錆剤に着目し、この気化性防錆剤を PC グラウト充填不足部に投入して PC 鋼材の腐食を抑制し

た状態でさらに必要に応じて気化性防錆剤を PC グラウトに添加して再注入する方法を提案した。前報⁶⁾では小型試験体を用いて促進実験を行った結果、アミン類亜硝酸塩を主成分とする気化性防錆剤については同じ質量の亜硝酸リチウム 40%水溶液を用いた場合と同等の腐食抑制効果が得られ、かつ、水中と気中の両環境において腐食抑制効果が発揮されることを確認した。

引き続き筆者らは、PC グラウト充填不足部における気化性防錆剤の適正な使用法を検討するため、実物大試験体を用いて実環境下で試験を行うとともに、再注入した PC グラウトと既存グラウトとの境界部で生じるマクロセル腐食について実験的に検討した。本文では、2 章にて気化性防錆剤の概要を簡潔に述べ、3 章にて PC グラウト充填不足部の実物大試験、4 章にてマクロセル腐食試験を実施した結果について詳述する。

なお、本研究では既設ポストテンション方式 PC 橋の主ケーブルとして 1990 年頃まで多用されていた PC 鋼線 $12\phi 5 \sim 7\text{mm}$ 、シース内径 $35 \sim 45\text{mm}$ について予防保全として再注入された PC グラウトが十分に充填されない

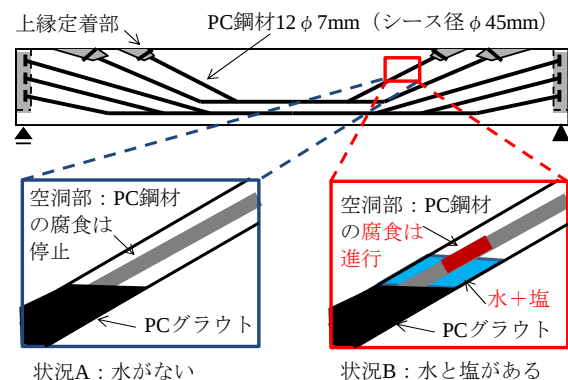


図-1 PC グラウト充填不足部の模式

*1 川田建設 (株) 技術部技術開発課 (正会員)

*2 川田建設 (株) 技術部技術課

*3 中部キレスト (株) 研究部商品開発課

*4 キレスト (株) 本社営業部

箇所水や塩が侵入する状況（図－1 の状況 B）を対象に研究を進めている。一方、PC グラウトが充填不足であっても水が浸入しない状況（図－1 の状況 A）では PC 鋼材の腐食が認められないこと⁷⁾、PC 鋼材が著しく腐食した状況では PC 鋼材の機械的性質が著しく損なわれるため事後保全の観点から対策を講じる必要があること¹⁾については本研究の対象外としている。



写真－1 気化性防錆剤（1.0g）

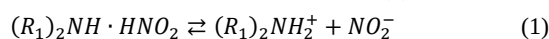
2. 気化性防錆剤について

2.1 使用材料

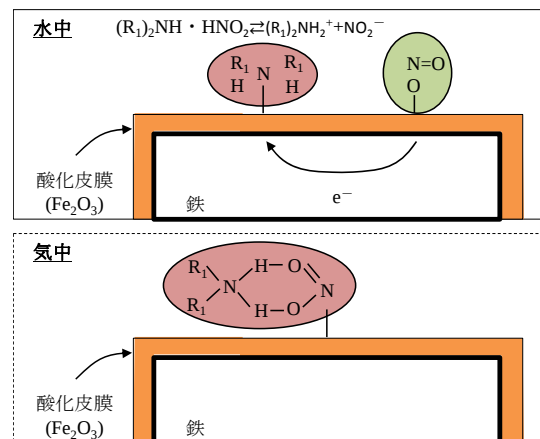
前報⁶⁾の結果を受け、PC グラウト充填不足部の PC 鋼材の腐食を抑制する防錆剤として、アミン類亜硝酸塩を主成分とする気化性防錆剤を選定した。この気化性防錆剤は写真－1 に示すように白色または微黄色の粉末で、pH が 6.0 から 7.0、水には約 3%溶解するものである。また、防錆性能としては JIS Z 1519 気化性さび止め剤の 1 種 L 形の規格に合格し、一般環境における使用量は密封空間 1m³ 当り 30g（1L 当り 0.03g）を標準とするものである。なお、本材料は毒物および劇物取締法の対象物ではない。

2.2 腐食抑制機構

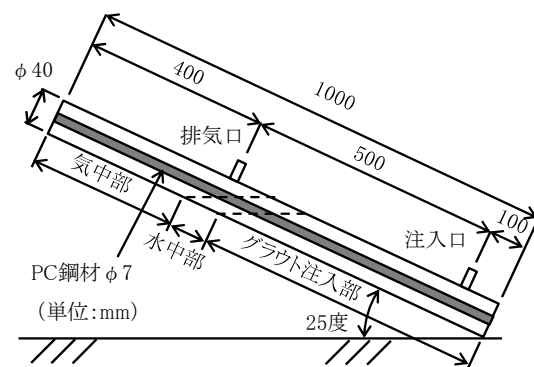
今回用いた気化性防錆剤の反応を式(1)に示す。



今回用いたアミン類亜硝酸塩系の気化性防錆剤は、水中で式(1)右辺のようにアミンと亜硝酸イオンに解離し、図－2 上に示すように、酸素や水よりも先に金属表面に吸着し分子膜を形成することで腐食を抑制すると想定される。また、金属表面に吸着した亜硝酸イオンは、酸化皮膜を生成する役割も果たすと想定される。一方、防錆成分が気化した後は、式(1)左辺および図－2 下に示すように、気中で分子が結合した状態で金属表面に吸着すると想定される。



図－2 気化性防錆剤の防錆機構の想定



図－3 PC グラウト充填不足部の実物大試験体

3. PC グラウト充填不足部の実物大試験

3.1 実験概要

ここでは、既設ポストテンション方式 PC 橋の PC グラウト充填不足が想定される上縁定着ケーブル曲上げ部を対象に、図－3 に示す試験体を用いて実物大試験を実施した。試験体は、内径 40mm 長さ 1000mm の円筒状アクリル管に PC 鋼材 φ7mm を 4 本配置し（12φ5 および 12φ7 の空隙量の範囲内）、25 度の角度で傾斜させ、表－1 に示すように気化性防錆剤の圧入量と圧入時期、PC グラウト部の割合、水中部に用いる溶液を変化させた。

気化性防錆剤の圧入量は、前報⁶⁾において水中部 50cc の溶液中に 3%（1.5g）の気化性防錆剤を投入し腐食抑制効果が得られたことを参考に、0、0.3、1、3、10g と変化させた。アクリル管の容積は PC 鋼材を除き約 1L であり、

表－1 実物大試験ケース

No.	気化性防錆剤の圧入量(g)と圧入時期	グラウト注入部の割合(%)	水中部に用いる溶液
1	10（先）	100	—
2	10（先）	50	NaCl0.6% 水溶液 50cc
3	0		水道水 50cc
4	3（先）		NaCl0.6% 水溶液 50cc
5	3（後）		水道水 50cc
6	1（先）		水道水 50cc
7	1（先）	0	水道水 200cc
8	0.3（先）		
9	1（先）		

注）気化性防錆剤の圧入時期はカッコ内に示し、（先）は PC グラウト注入前に、（後）は注入中に圧入を実施した。



写真-2 気化性防錆剤圧入の様子（先入れ）



写真-3 気化性防錆剤付着の様子（圧入 3g）

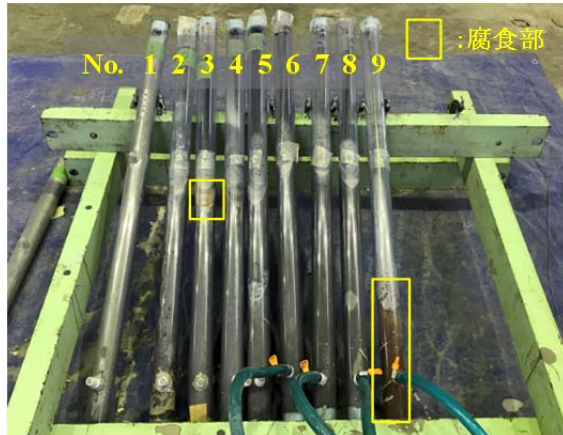


写真-4 実物大試験の様子（暴露 3 か月）

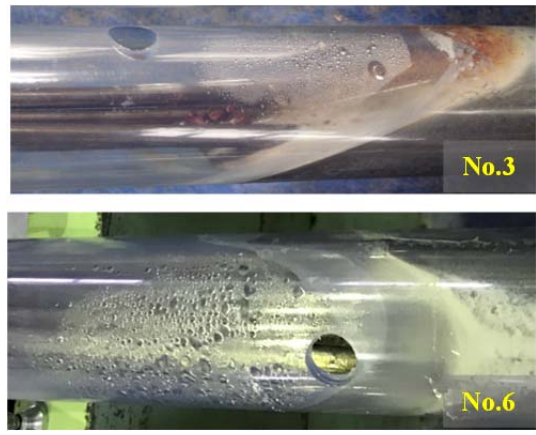


写真-5 水中部付近の様子（暴露 3 か月）

表-2 実物大試験結果一覧

気化性防錆剤 の圧入量(g)と 圧入時期	水中部の溶液種類		グラウト 充填状況
	水道水	NaCl0.6% 水溶液	
0		×(No.3)	良好
0.3（先）	◎(No.8)		
1（先）	◎(No.7)	◎(No.6)	
3（先）	◎(No.4)		
3（後）	◎(No.5)		充填不足
10（先）		◎(No.2)	

◎：腐食なし，△：僅かに腐食，×腐食あり

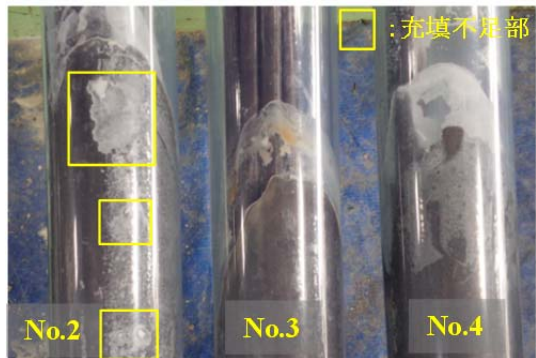


写真-6 PC グラウトの様子（アクリル管下面）

気化性防錆剤 0.3g の圧入ケースにおいても標準使用量の 10 倍となっている。また、気化性防錆剤の圧入は、PC グラウト充填不足部の端部に近い開口部からの施工（実工事では注入口が PC グラウト充填不足部の端部となる場合とそうでない場合があるため開口部は注入口と兼用しない施工）を想定し、写真-2 に示すようにコンプレッサーを用いアクリル管の端部より 0.4MPa の空気圧にて圧送した。この圧入により、気化性防錆剤はアクリル管中を微粉状になって一気に飛散し、アクリル管の内面および PC 鋼材表面に概ね均等に付着した（写真-3）。ただし、圧入量 10g に関しては、気化性防錆剤の一部がアクリル管の底面に断続的に堆積する様子が確認された。なお、気化性防錆剤の後入れは、グラウトを半分まで注した時点で排気口より気化性防錆剤の圧入を行った。

PC グラウト充填不足部に気化性防錆剤を圧入した後、超低粘性タイプの PC グラウト（W/P=36%）を手動ポンプにより注入口より所定の割合まで充填させた。PC グラウト注入の 7 日後に、所定の溶液を排気口から水中部に流入させた。その後、実物大試験体は密封状態として、室内にて暴露した。

3.2 実験結果

暴露 3 か月後の実物大試験の様子を写真-4 に示す。PC 鋼材の腐食が確認されたのは気化性防錆剤を用いなかった No.3 と PC グラウトが注入されていない No.9 の 2 ケースであった。一方、気化性防錆剤を圧入しかつ PC グラウトを注入したすべてのケースで、PC 鋼材は防食されることが確認された。

No.3 および No.6 の水中部付近の様子を写真-5 に示す。

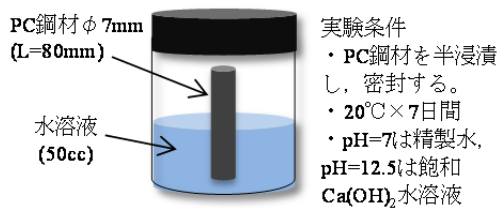


図-4 水溶液試験装置の概要

表-3 水溶液試験ケース

ケース名	pH	NaCl濃度 (%)	PC 鋼材 本数	気化性防錆剤 圧入量(g/m)*
N1	7	0	1	0,0.3,1,3
N2		0.6	1	
N3			3	
A1	12.5	0	1	
A2		0.6	1	
A3			3	

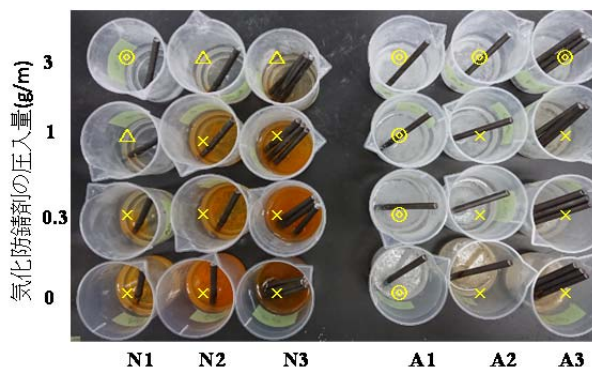
*長さ1mあたりの質量に換算し、表示した。

両試験体とも水中部に NaCl0.6%水溶液が存在するが、気化性防錆剤を圧入しなかった No.3 は PC 鋼材の腐食が認められ、気化性防錆剤を 1g 圧入した No.6 は PC 鋼材が防錆されていることがわかる。

実物大試験の結果一覧を表-2、PC グラウトの様子を写真-6 に示す。これより、水中部に水道水あるいは NaCl 0.6%水溶液を用いても、気化性防錆剤の圧入量を 1g 以上とすることで PC 鋼材の腐食を防ぐことが確認された。しかしながら、気化性防錆剤 3g を PC グラウト注入時に後入れした No.5 と 10g を先に圧入した No.2 に関しては注入した PC グラウトに充填不足が生じた。

3.3 気化性防錆剤の腐食抑制効果に関する水溶液試験

実物大試験における気化性防錆剤の腐食抑制効果について詳細に検討するため、筆者らの既往実験⁸⁾を参考に図-4 に示す装置を用い、表-3 に示す各種条件で PC 鋼材を半浸漬させる水溶液試験を実施した。気化性防錆剤の圧入量は実物大試験に比べ試験体の長さが短くなることを考慮し、容器を密封した状態で実物大試験と同様の方法で気化性防錆剤の圧入を行った。この試験では密封して 20℃一定の条件で 7 日間経過した後に、容器内の気中部および水中部 PC 鋼材の腐食状況を目視確認するとともに、飽和硫酸銅電極 (CSE) を用いて水溶液中の鋼材の自然電位を測定した。その結果を写真-7 および図-5 に示す。筆者らの研究^{6), 8)}ではグラウト充填不足部における PC 鋼材の腐食に与える影響要因として、PC グラウトの有無、浸水範囲、酸素供給量、pH、塩分濃度および温度を挙げている。本検討では、PC グラウトは無く、浸水範囲、酸素供給量、温度は同じ条件としたため、以



◎：腐食なし，△：僅かに腐食，×腐食あり

写真-7 水溶液試験の様子

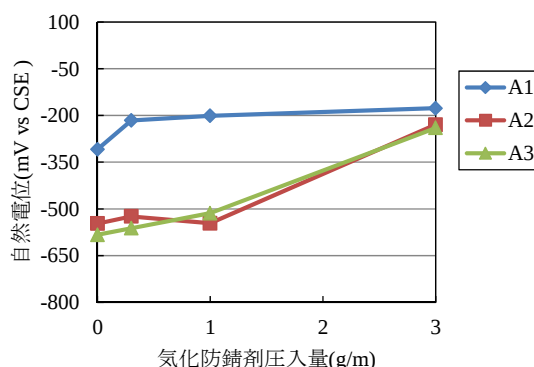
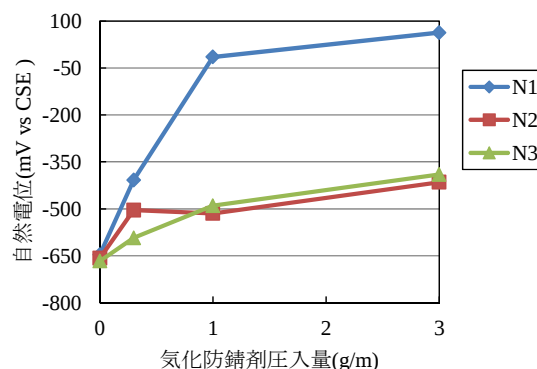


図-5 電位測定結果

下に pH、塩分濃度に加え、PC 鋼材本数および気化性防錆剤の圧入量を変化させた結果について考察する。

(1) pH

水溶液の pH を 7 としたケース (写真-7 の N1～N3) に比べ、pH を 12.5 (写真-7 の A1～A3) とすることで PC 鋼材の腐食が抑制される傾向を示した。この結果は気化性防錆剤を用いていない既報⁸⁾と同じ傾向にあり、今回の気化性防錆剤の使用量であれば、アルカリ性雰囲気により PC 鋼材を不動態化させる方向に働くことが新たに確認された。

(2) 塩分濃度

NaCl0%の水溶液 (写真-7 の N1 および A1) では気化性防錆剤の圧入量を 1g/m 以上とすることで PC グラウト

がない状況においても PC 鋼材の腐食を抑制することが確認された。一方、NaCl 0.6%の水溶液（写真－7 の N2,N3,A2 および A3）では、PC 鋼材の腐食を抑制するのに気化性防錆剤の圧入量を 3g/m 以上にする必要があった。

(3) PC 鋼材本数

PC 鋼材本数を 1 本としたケース（N2 または A2）と 3 本（N3 または A3）としたケースの PC 鋼材腐食状況（写真－7）および自然電位（図－5）の差異は見られなかった。

(4) 気化性防錆剤の圧入量

気化性防錆剤の圧入量が増えると PC 鋼材の腐食が抑制され（写真－7）、電位が貴になる傾向（図－5）が確認された。しかしながら、実物大試験では気化性防錆剤を 1g/m 以上圧入することで PC 鋼材が完全に防食される結果からすると、特に NaCl 0.6%水溶液が存在する状況においては、気化性防錆剤の圧入に加え PC グラウトの注入によって PC 鋼材の腐食抑制効果が増大した可能性がある。

4. マクロセル腐食試験

4.1 実験概要

ここでは、再注入した PC グラウトと既存グラウトとの境界部を対象に、表－4 に示すケースにてマクロセル腐食に関する試験を実施した。試験体は、内径 40mm、高さ 300mm の円筒状アクリル管に PC 鋼材 $\phi 7\text{mm}1$ 本を鉛直に配置し、既存グラウトを高さ 1/2 まで上部より注入し、7 日後に必要なに応じて気化性防錆剤の圧入および PC グラウト再注入を行った。

グラウト配合と物性値を表－5 に示す。配合 G は既存グラウトであり、既往研究⁹⁾を参考に W/C=48%の普通セメントグラウトとし、マクロセル腐食が顕著に現れるように塩化物イオン (Cl^-) を 30kg/m^3 混入した。配合 L および配合 V は再注入するグラウトであり、前者が超低粘性プレミックスタイプの PC グラウト、後者がこの PC グラウトにアミン類亜硝酸塩系気化性防錆剤を 30kg/m^3 混入したものである。両配合とも PC グラウト充填不足部に残留する塩分、既存グラウトからの塩化物イオンの拡散、および、将来的な塩化物イオンの侵入を想定し、 $\text{Cl}^-=10\text{kg/m}^3$ を混入した。

試験体は各ケース 2 体作製し、水を十分に張った容器に入れ湿空状態として PC グラウト再注入 7 日後から $50^\circ\text{C} \times 6$ 日と $20^\circ\text{C} \times 1$ 日を 1 サイクルとして 20 サイクルの促進試験を行った。実験終了後、PC 鋼材を取り出して腐食状況を確認するとともに、PC 鋼材の引張試験を実施した。別途、未試験の PC 鋼材の引張試験を実施し、引張強さの残存率 (TSL) を式(2)より求めた。

表－4 マクロセル腐食試験ケース

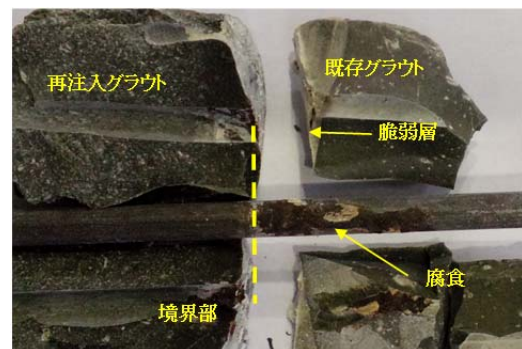
ケース名	既存グラウト材	再注入材料	気化性防錆剤の圧入量(g/m)	φ40 300 再注入グラウト
GL0	G	L	0	
GL3			3	
GV0		V	0	
GV3			3	
R		なし	0	

表－5 グラウト配合と物性値

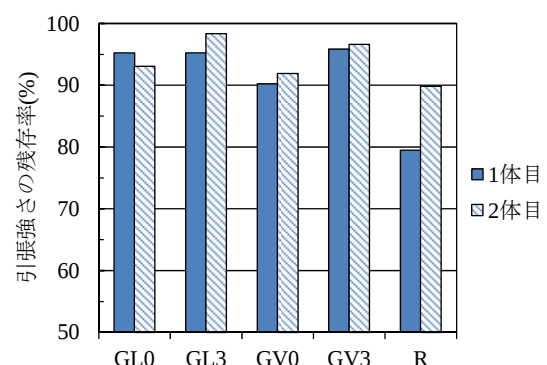
配合名	W/C (W/P) (%)	気化性防錆剤 (g/L)	Cl^- 量 (g/L)	フロー値*1 (mm)	圧縮強度*2 (N/mm^2)
G	48	0	30	260	31.2
L	42	0	10	310	78.4
V	42	30	10	250	57.4

*1 修正 JASS5 のフロー試験による

*2 JSCE G505 の圧縮強度試験による



写真－8 PC 鋼材の様子（GV0 の例）



図－6 PC 鋼材の引張試験結果

$$TSL = \frac{TS_{corr}}{TS_{soud}} \times 100 (\%) \quad (2)$$

ここで、 TS_{soud} ：未試験 PC 鋼材の引張強さ (N/mm^2)

TS_{corr} ：促進試験 PC 鋼材の引張強さ (N/mm^2)

なお、PC 鋼材の腐食量や最小直径に関する調査は、局所的な腐食が進行する本試験において PC 鋼材の機械的

性質低下を適切に評価できないため⁶⁾、省略した。

4.2 実験結果

実験終了後の PC 鋼材の様子を写真-8 に示す。いずれの試験体も PC グラウト再注入部と既存グラウト部の境界付近が最も腐食していることが確認された。また、既存グラウトの上面から 1~2mm の範囲でブリーディングに起因すると考えられる白く脆い層が確認された。

PC 鋼材の引張試験結果を図-6 に示す。PC グラウトを再注入したいずれのケースも、既存グラウトのみであるケース R に比べ、引張強さの残存率が下回ることとはなかった。また、気化性防錆剤を圧入するケースでは、圧入しないケースに比べ若干ではあるが引張強さの残存率が向上する傾向であった。

以上より、今回の実験条件において、PC グラウトを再注入することにより既存グラウトとのマクロセル腐食が抑制される状態になることが確認された。この点については、既往研究⁹⁾の成果と一致する。さらに今回、PC グラウト充填不足部 1L 当り気化性防錆剤 30g を添加した PC グラウトを再注入することや、PC グラウトを再注入する前に気化性防錆剤を圧入することで既存グラウトとのマクロセル腐食が抑制される状態になることが新たに確認された。

5. まとめ

本研究を通じ、以下のことが明らかになった。

- (1) 実物大試験より、PC グラウト充填不足部に NaCl 0.6 %水溶液が存在する状況において、当該部 1m 当り気化性防錆剤を 1g 以上圧入し PC グラウトを注入することで PC 鋼材の腐食が抑制される状態になる。ただし、気化性防錆剤 3g を PC グラウト注入時に後入れした場合と 10g を先に圧入した場合では注入した PC グラウトに充填不足が生じた。
- (2) 水溶液試験より、NaCl 0%の水溶液では気化性防錆剤の圧入量を 1g/m 以上とすることで PC グラウトがない状況においても PC 鋼材の腐食が抑制されることが確認された。一方、NaCl 0.6%の水溶液では、PC 鋼材の腐食を抑制するのに気化性防錆剤の圧入量を 3g/m 以上にする必要があった。
- (3) マクロセル腐食試験より、既存グラウト中に含まれる塩化物イオン量が 30kg/m³となる状況において、PC グラウトを再注入すること、PC グラウト充填不

足部 1L 当り気化性防錆剤 30g を添加した PC グラウトを再注入すること、PC グラウトを再注入する前に気化性防錆剤を圧入することのいずれかを実施することにより既存グラウトとのマクロセル腐食が抑制される状態になる。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC 構造物の維持保全[2015 年版]—PC 橋の更なる予防保全に向けて—, 2015.3
- 2) プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針, pp.44-47, 2016.9
- 3) 鴨谷知繁, 岡林秀勝, 飯塚崇史, 飯田明弘：グラウト充てん不足を有する PC 橋の長寿命化-亜硝酸リチウム水溶液を用いた新技術の適用-, プレストレストコンクリート Vol.56, No.1, pp.17-22, 2014.1
- 4) 真田修, 睦好宏史, LUAN Yao：イオン交換樹脂を混和した PC グラウトの分離性・流動性・塩化物拡散特性, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.385-390, 2015.10
- 5) 堀越直樹, 井俣俊也, 熊谷紳一郎, 藤田鈺治：再注入用グラウトに混和した塩化物イオン固定化材の基礎的性能, コンクリート工学年次論文集 Vol.39, No.1, pp.1027-1032, 2017.6
- 6) 塩井健太, 北野勇一：気化性防錆剤を用いたグラウト再注入補修に関する基礎実験, 第 26 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.323-326, 2017.10
- 7) 小林崇, 北野勇一, 花井拓, 木村嘉富：既設 PC 橋のグラウト充填状況が PC 鋼材の腐食に与える影響, プレストレストコンクリート工学会第 21 回シンポジウム論文集, pp.443-446, 2012.10
- 8) 塩井健太, 北野勇一：グラウト充填不足部における PC 鋼材の腐食メカニズム, 第 25 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.95-98, 2016.10
- 9) 宮永憲一, 青木圭一, 萩原直樹, 渡邊晋也：PC グラウト再注入が鋼材腐食に及ぼす影響に関する実験的検討, 第 24 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.449-454, 2015.10