

第V部門

グラウト内の可溶性硫酸イオンの存在と PC 鋼材の腐食に及ぼす影響に関する実験的検討

神戸大学大学院工学研究科 学生員 ○宮代 凌成
神戸大学大学院工学研究科 正会員 福田 圭祐

神戸大学大学院工学研究科 正会員 森川 英典

1. 研究背景・目的: 近年海外の PC 橋において、硫酸イオンが PC 鋼材の腐食を進行させ、破断に至った可能性があると報告されている¹⁾。米国ヴァージニア州の斜張橋 Varina-Enon 橋²⁾では、グラウトの充填不足部において図-1 に示すような PC 鋼材の破断が確認された。破断箇所付近のグラウトはブリーディング等によって脆弱化しており、高濃度の硫酸イオンが発生していたと報告されている。同米国フロリダ州の PC 箱桁橋 Ringling Causeway 橋や韓国の PC 箱桁橋 See-Ho 橋においても同様の報告がされており、日本国内の PC 橋においても硫酸イオンの影響で PC 鋼材の腐食が進行している可能性がある。本稿では、日本国内で 1990 年代以前に建設された PC 橋のグラウト配合を使用し、グラウト成分分析を行いグラウト内のアルカリイオンと硫酸イオンの関係について検討を行った。また、既設ポステン PC 桁のグラウト充填不足部を模擬した供試体を作製、水道水浸漬による乾湿繰り返しで促進腐食試験を行い、硫酸イオンによる PC 鋼より線束の腐食性状の検討を行った。



図-1 PC 鋼材の破断 (Varina-Enon 橋)¹⁾

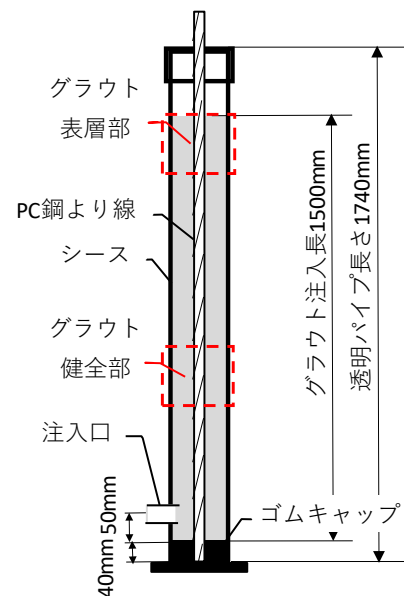


図-2 グラウト鉛直管試験供試体

2. グラウト成分分析: 成分分析を行うためのグラウトおよびブリーディング水を採取するため、JSCE-F 535-2018 に準拠しグラウトの鉛直管試験を行った。供試体概要を図-2 に示す。シースには、内径 60mm のものを使用し、PC 鋼材には PC 鋼より線 7 本より 15.2mm を使用した。供試体の概要とグラウト配合を表-1 に示す。添加 K^+ 量は、FHWA の報告³⁾に記載されている、PCA のブリーディング水の化学分析結果を参考に設定した。また、添加 Cl^- 量は、文献²⁾で示される腐食限界濃度 C (単位セメント量) $\times 0.3\%$ を基準に設定した。鉛直管試験で発生したブリーディング水は、グラウトに再吸収される前に採取し、グラウトは 28 日間養生後、図-2 に示す表層部、健全部を採取した。化学成分分析はイオンクロマトグラフィーにより行った。

グラウトおよびブリーディング水の化学成分分析結果をそれぞれ表-2 に示す。基準と比較して、 K^+ 、 $K^+ + Cl^-$ ではグラウト、ブリーディング水ともに SO_4^{2-} 、 K^+ 、 Na^+ の量が多い傾向が確認できる。また、図-3 に示すように、 SO_4^{2-} 量は Na^+ 量より K^+ 量と正の相関が大きいことから、可溶性硫酸イオンはカリウムイオンとバランスを保ってグラウト内に存在していると推察される。I. Jawed ら³⁾は、セメント内の SO_3 はアルカリ硫酸塩を形成し、特にカリウム硫酸塩を優先的に形成しやすいと報告している。ブリーディングによってエトリングライトが形成できずに生じたカリウム硫酸塩による硫酸イオンが、不動態皮膜を破壊すること⁴⁾により、PC 鋼材の腐食が発生している可能性がある。

3. グラウト充填不足部における PC 鋼より線束の腐食性: 硫酸イオンによる PC 鋼より線束の腐食性状を検討するため、グラウト充填不足部を模擬した供試体を作製、水道水浸漬による乾湿繰り返しで促進腐食試験を行った。供試体の概要を図-4 に示す。既設ポステン PC 桁の主ケーブル曲げ上げ部を模擬し、7 本より PC 鋼より線を 12 本 (12S12.4 mm)

表-1 鉛直管試験供試体一覧

供試体	W/C(%)	水(kg/m ³)	セメント(kg/m ³)	混和剤(kg/m ³)	アルミ粉(kg/m ³)	K ⁺ (kg/m ³)	Na ⁺ (kg/m ³)	Cl ⁻ (kg/m ³)
基準	42	570	1356	3.39	0.07	0	0	0
K ⁺	42	570	1356	3.39	0.07	8.54	0	0
K ⁺ + Cl ⁻	42	570	1356	3.39	0.07	8.54	2.63	4.07

表-2 グラウトおよびブリーディング水成分分析結果

グラウト		pH	SO ₄ ²⁻ ppm	Cl ⁻ ppm	Na ⁺ ppm	K ⁺ ppm
基準	表層部	12.6	130	24	1600	2500
	健全部	12.6	100	11	1600	2500
K ⁺	表層部	12.7	220	16	1600	7300
	健全部	12.7	240	11	1600	6800
K ⁺ + Cl ⁻	表層部	12.7	230	530	3200	7200
	健全部	12.7	270	460	3000	6700
ブリーディング水		pH	SO ₄ ²⁻ ppm	Cl ⁻ ppm	Na ⁺ ppm	K ⁺ ppm
基準		12.9	6100	360	2000	5400
K ⁺		13.2	17000	400	2100	16000
K ⁺ + Cl ⁻		13.1	17000	6900	5900	16000

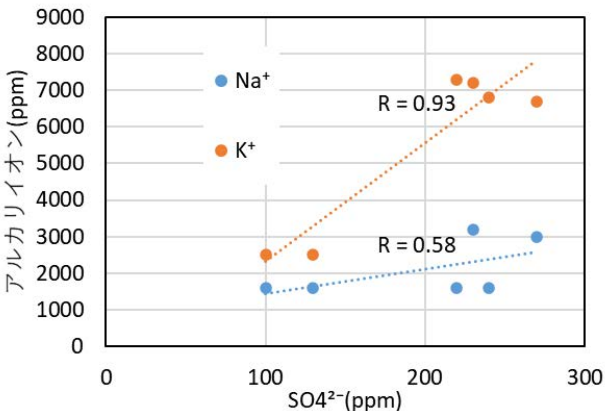


図-3 硫酸イオンとアルカリイオンの関係

上側に偏在させて配置した。グラウト配合は表-1 に示す基準の配合を使用した。作製した供試体は 10 か月間、1 日 1 時間水道水に浸漬させ、それ以外の時間は養生箱(気温 50℃、湿度 80%)に静置した。促進腐食終了後、供試体を解体し、各 PC 鋼より線を常温の 10wt%のクエン酸二アンモニウム溶液に 2 日間浸漬させた後、水洗いとブラッシングにより除錆した。

深さ 0.3 mm以上の局部腐食発生状況を図-5 に示す。塩化物イオンが入っていないにもかかわらず、深さ 0.3mm以上の局部腐食が発生していることが確認された。このことから、接触部やグラウト境界部に滞留した水に、可溶性硫酸イオンが溶出することで不導態皮膜を破壊し、局部腐食が発生している可能性が考えられる。

4. まとめ：可溶性硫酸イオンはカリウムイオンとバランスを保ってグラウト内に存在していると推察される。滞留した水にグラウトから可溶性硫酸イオンが溶出することで、局部腐食が発生している可能性が考えられる。

5. 参考文献：1)FHWA (Federal Highway Administration) : Corrosion-Induced Durability Issues and Maintenance Strategies for Post-Tensioned Concrete Bridges, pp.145-154, 2022.9, 2) 二井谷教治, 徳光卓, 山田一夫, 野島昭二, 宮川豊章 : PC グラウトの塩分濃度が鋼材腐食に及ぼす影響, プレストレスト・コンクリート 52(1), pp.76-84, 2010, 3) Inam Jawed, Jan Skanly, ALKALIES IN CEMENT : A REVIEW, I. Forms of Alkalies and Their Effect on Clinker Formation : CEMENT and CONCRETE RESEARCH, Vol.7, pp.719-730, 1977

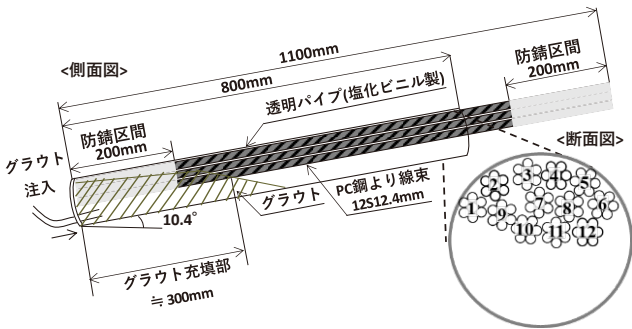


図-4 PC 鋼より線束供試体概要図

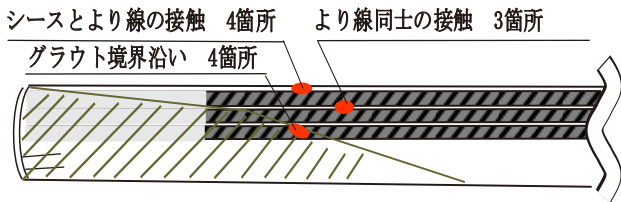


図-5 深さ 0.3 mm以上の局部腐食発生状況