

論文 PCT 橋のグラウト充填不良部における鋼線腐食メカニズムに関する実験的検討

白川 祐太*1・森川 英典*2・鴨谷 知繁*3

要旨: 現在, グラウト充填不良部を有し, 鋼材腐食の可能性のある PC 橋に対する対応が求められている。そこで, ケーブルの曲げ上げ部付近のグラウト充填不良部を模擬した供試体を作製し, 促進腐食試験を実施し, 腐食メカニズムについて検討した。鋼線と鋼線の隙間, シースと鋼線の隙間には, グラウトが充填されず, その隙間に腐食促進物質が侵入し, 腐食が発生した。また, 鋼線と鋼線が接している近傍, シースと鋼線が接している近傍において, 最も腐食が進展し, 孔食や局部腐食が発生していた。また, 凍結防止剤の環境を考慮し, 塩水で腐食促進を行うと, 鋼線の軸方向にはグラウトから離れるほど腐食が大きいことがわかった。

キーワード: PCT 橋, グラウト充填不良, 腐食, 凍結防止剤

1. はじめに

床版上面に定着される主ケーブル (以下, 上縁定着ケーブル) を有する既設 PC 橋の主ケーブル曲げ上げ部 (図-1 の位置) から定着具の間で, ブリーディングが原因と推定されるグラウト充填不良が発生している¹⁾。これらの PC 橋の多くは床版防水を実施していないため, 定着部からシース内に水分が侵入しやすい環境にあり, 特に凍結防止剤が使用される環境では, 塩化物イオンによる著しい鋼材腐食が懸念される²⁾。

曲げ上げ部のケーブル断面の例を図-1 の写真に示す。既設 PC 道路橋の主ケーブルの多くは現行の PC 鋼より線とは異なり, 鋼線 (以下, 素線) の束である。よって, ケーブル曲げ上げ部の各素線は, 有効緊張力による腹圧によりシース上部にシースと平行に配置される。さらに, グラウト充填が比較的良好な場合でも, 図-1 の写真に見られるように局所的な充填不良が生じやすく, このような箇所がグラウト不良の境界となると, 鋼材表面のグラウト被覆状態はさらに不均一となりマクロセル腐食の発生も懸念される。

写真-1 では, 凍結防止剤使用環境に位置する **表-1** の M 橋の上縁定着ケーブル曲げ上げ部においてコア削孔した際に発生していた鋼材腐食状況を示す。素線はシースと平行にシース上部に偏在しており, グラウトはシースと素線の隙間や, シース下部で一部充填が確認されたものの, 鋼材表面の多くは被覆されておらず, 赤褐色の錆が生じていた(a)。ブラシで手前側を除錆したところ素線同士の隙間は錆で埋もれており, グラウトが充填されていなかった(b)。またケーブルの腐食状況は一様ではなく, 局所的な腐食が生じていた。このような場合には, 早急な腐食抑制対策や腐食量評価に基づく PC 橋の健全

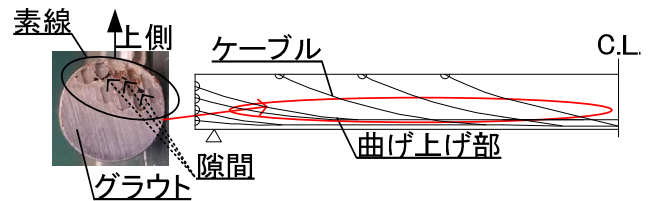


図-1 主桁の主ケーブル配置図および曲げ上げ部の主ケーブル(シース)断面図

表-1 M 橋の構造諸元

橋梁形式	PC単純ポストテンションT桁橋
位置	兵庫県佐用郡
竣工年月	昭和37年4月
主桁本数	6主桁
支間長	23.25m
設計荷重	T-20

度評価が求められる。ただし, 今回の調査のように PC 鋼材の腐食状況が把握できる範囲は限定されるため, 劣化調査箇所以外で顕著な腐食が生じるかどうかについて推察するには, 劣化メカニズムを解明が必要である。

そこで, 本論文ではケーブル曲げ上げ部においてグラウト不良境界が発生した場合を想定した供試体を作製し, 促進腐食試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

主ケーブル曲げ上げ部を模擬した供試体の概要図を図-2 に示す。主ケーブルは, 既設 PCT 道路橋に対応して素線φ7mm を 12 本平行に束ねたもの (12φ7mm) を用い, 曲げ上げ部の偏在を考慮して, シース上側に束ねた。実橋では, 亜鉛メッキの螺旋状シースが使用される

*1 神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 (正会員)

*2 神戸大学大学院工学研究科 市民工学専攻 教授 博(工) (正会員)

*3 (株)ピーエス三菱大阪支店 設計センター設計グループ 修(工) (正会員)

が、本研究ではグラウトの充填や腐食状況を確認するため、透明の塩ビ管を使用した。シースの相違が腐食に与える影響が懸念された。亜鉛メッキシー스에素線を沿わせ、3%塩水で促進腐食させた。亜鉛が犠牲陽極として先行溶出するが、数日で、素線腐食が進行し、素線表面の錆発生により、シースと素線の導通がなくなり、30日程度で素線全体で一様に腐食したため、亜鉛メッキの効果が一時的であり、塩ビ管を代用してもその影響は小さいと判断される。

グラウト配合を表-2に示す。写真-1で示したM橋の建設当時、使用された配合とした。グラウトには、定着端部からの凍結防止剤が侵入し、塩分が供給された場合を考慮して、文献³⁾で示される腐食限界濃度C(単位セメント量) $\times 0.3\%$ を参考に塩分を追加した場合も設定した。グラウトの注入は、図-2のように下方向より手押しポンプで行った。

グラウト充填状況を写真-2に示す。当初グラウト境界線の延長線上にグラウトが充填されることを予想したが、シースと素線の隙間からは、グラウトが充填されず、また、腐食終了後に供試体の解体をして確認したところ、素線間が接している箇所からも、グラウトが充填されていない。実橋では、螺旋状のシースであるため、シースと素線の間に螺旋状の隙間が生じることから螺旋に沿ってグラウトが充填されると考えられ、本実験の方が厳しい条件といえる。一方、素線間の隙間については、素線同士が平行になった状態で腹圧を受けており、ケーブル断面方向からは、グラウトを充填することができるが、ケーブル直角方向からは充填できないと考えられる。

ただし、現在は、鋼材にPC鋼より線が使用される。さらに当時よりグラウトの品質が向上しているため、信頼性の高いグラウト充填が行われていると考えられる。

また、促進腐食は、水、もしくは3%濃度の塩水の腐食液を用い、1日1時間腐食液に浸漬させる乾湿サイクルとして、腐食速度が大きい夏季期間に実施した。供試体一覧を表-3に示す。供試体名は、促進腐食環境の違い、グラウト内追加塩分の違い、腐食期間の違いを示している。また、腐食期間は、N-0-85が85日とし、それ以外の供試体が130日とした。

2.2 測定概要

促進腐食した後、常温において10%濃度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、ブラッシングにより素線に付着した錆を取り除いた。

図-3に示すように素線の腐食量Rの測定を行った。腐食量の測定位置は、目視により、孔食が発生している箇所、もしくは局部腐食が発生している箇所とし、孔食・局部腐食が発生している位置を把握するため、図-4に示

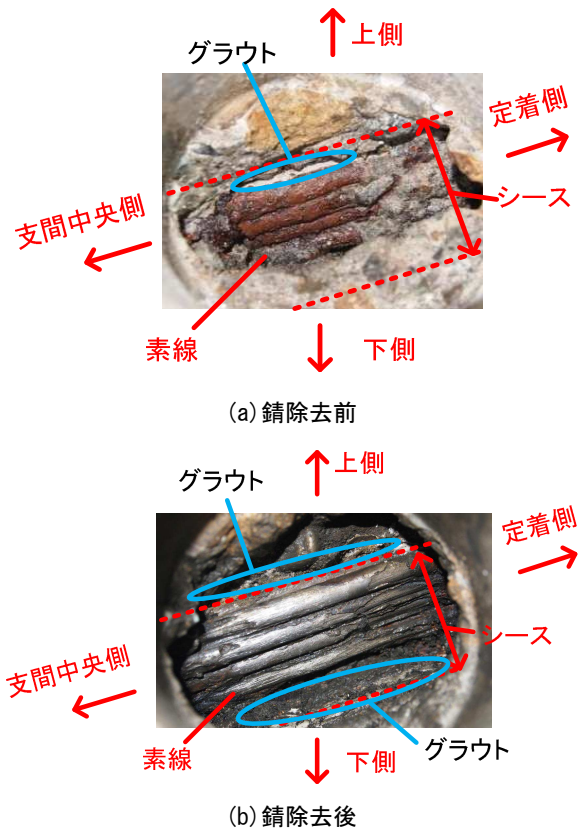


写真-1 削孔調査の結果

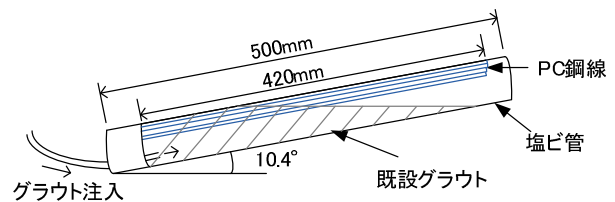


図-2 供試体概要図

表-2 グラウト配合

水セメント比	水	セメント	混和材	アルミ粉
42%	10.5kg	25kg	62.5g	1.25g

表-3 供試体一覧

供試体名	腐食液	グラウト内追加塩化物イオン濃度(C \times mass%)	試験日数(日)
H-0.3-130	H ₂ O	0.3	130
H-1.2-130	H ₂ O	1.2	130
N-0-130	NaCl(3%濃度)	0	130
N-0-85	NaCl(3%濃度)	0	85
N-0.3-130	NaCl(3%濃度)	0.3	130

※C:単位セメント量

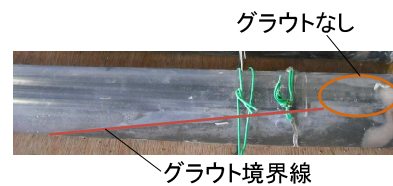


写真-2 グラウト施工後の写真

すように素線の断面を30°ごとに孔食・局部腐食の発生位置の読み取りを行った。次に、その箇所において、図

-3に示すノギスを用い、**図-3**の測定値 D_1 の測定を行い、腐食量 R の測定を行った。また、**図-3**の下側に示すノギスの デプスバーを用いて孔食深さ H の測定も実施した。さらに、グラウト側より孔食・局部腐食が発生している箇所までの距離 L の測定を実施した。孔食深さ H は、**図-3**の下側のように測定を行うため、孔食の形状によって深さの誤差が生じる。そのため、孔食深さ H は目安とする。また、素線において、グラウトが付着していた箇所では、供試体・腐食条件に関わらず、**写真-3**のように、ほぼ腐食がなく、グラウト付着の境界が明確である。よって、グラウトが付着していた長さ L_g (**図-4**)についても測定を行った。また、ここで記述した孔食および局部腐食の進行過程を表-4に示す。換算断面減量率は、式(1)のように、測定値 D_1 を直径とした減量率である。

$$\angle W = (A_0 - A_1) / A_0 \times 100 \quad (1)$$

ここに、 $\angle W$:換算断面減量率(%), A_0 :健全素線断面積(mm^2), A_1 :腐食量における素線断面積(mm^2)

3. 実験結果および考察

3.1 孔食・局部腐食発生位置

各素線の孔食・局部腐食発生位置の傾向を把握するために、最大腐食量を示した位置を**図-5**の断面図に示す。ここでは、素線長手方向の位置は考慮していない。腐食量については、測定値 D_1 のみを考慮した R 、および測定値 D_1 と孔食深さ H を考慮した R' を併記した。また、各位置における腐食量 R の最大値および第5位の値を表-5に示す。

図-5より、H-0.3-130の断面図における R については、1位は、シースと素線の隙間に、2位から5位は、素線

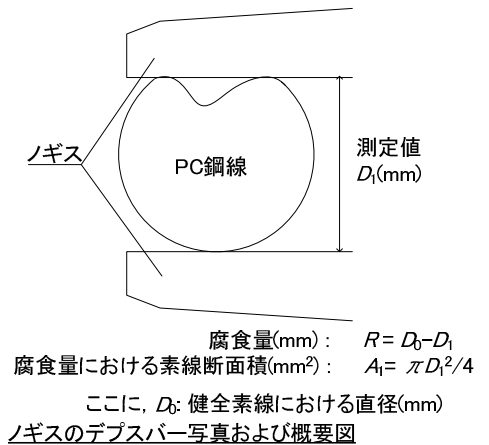


図-3 腐食量測定方法

同士の隙間に発生している。また、 R' が大きい5位までの腐食をみると、1位、素線 c の2位はシースと素線が接している付近、それ以外は、素線同士が接している付近となっている。このように、シースと素線または素線同士の隙間で腐食量が多い傾向は、他の供試体においても、同様であった。このような位置は、表面張力等により腐食促進溶液の液膜が生じるため、腐食が進展しやすい状況であると考えられる。また、素線同士が接している付近の素線の腐食状況の一例を**写真-4**に示す。矢印のラインが素線同士に接していた箇所であり、一直線上に腐食が進行しており、このような傾向は他の素線においても同様であった。土木研究所資料⁴⁾でも腐食が同一一直線上に発生する溝型腐食が多く報告されていることから素線を用いた主ケーブルでは、このような形状が発生しやすいと推察される。

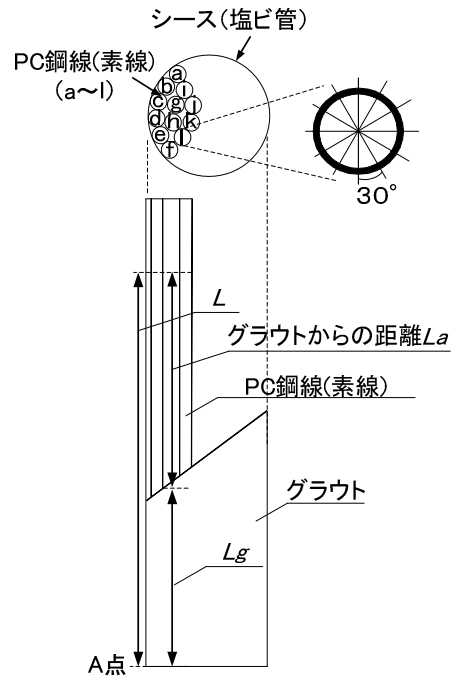


図-4 測定概要図

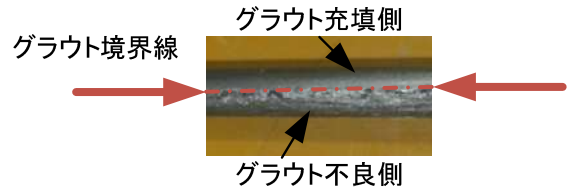


写真-3 グラウト境界

表-4 孔食・局部腐食の進行過程の例

	写真	内容	測定値 D_1 のみを考慮した腐食量 $R(\text{mm})$	換算断面減量率 (%)	孔食深さ $H(\text{mm})$
I		健全	0	0.0	0
II		小さい孔食	0.12	3.4	0.0~0.18
III		大きい孔食	0.56	15.5	0.0~0.44
IV		大きい凹凸	0.9	24.3	0.0~0.15

※孔食深さ H は、測定値 D_1 のみを考慮した腐食量 $R(\text{mm})$ に対する値の範囲を示している

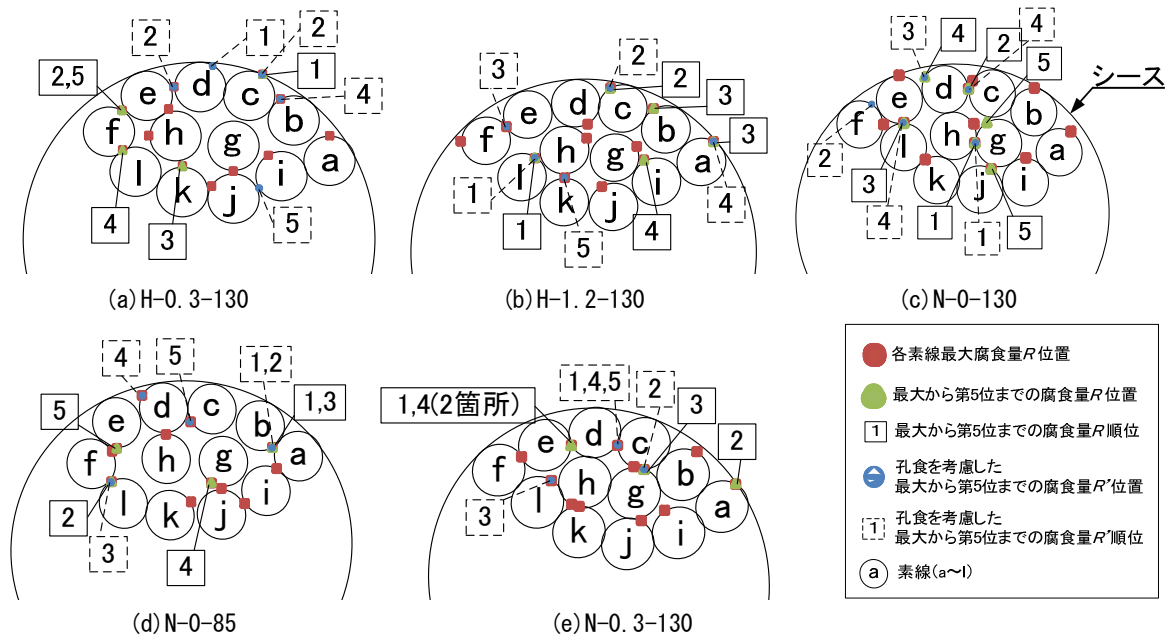


図-5 孔食・局部腐食発生位置

表-5 孔食発生位置の最大と第5位の腐食量 R

	測定値 D_1 のみから算出した腐食量 R (mm)		測定値 D_1 と孔食深さ H から算出した腐食量	
	最大	第5位	最大	第5位
H-0.-130	0.42	0.33	0.66	0.41
H-1.2-130	0.42	0.35	0.47	0.38
N-0-130	1.20	0.97	1.43	1.14
N-0-85	0.84	0.68	1.04	0.78
N-0.3-130	1.78	1.12	1.78	1.27

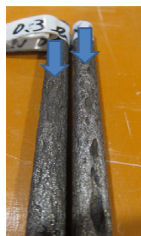


写真-4 腐食の特徴

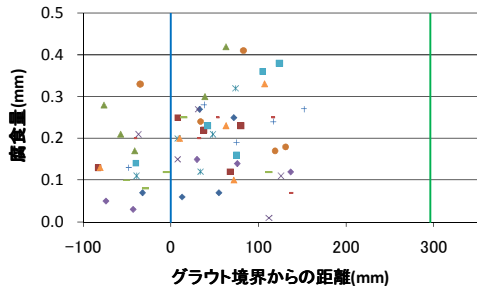
3.2 グラウト境界からの距離と腐食量 R との関係

各供試体のグラウト境界からの距離 L_a (図-4 参照) と腐食量 R との関係を図-6 に示す。グラウト境界からの距離は、図-4 に示すように A 点からの距離 L からグラウト平均付着長さ L_g を引いたものとした。ノギスを使用した測定では、図-3 の下図のように小さい孔食・局部腐食の深さを測定することができないため、以下の考察では測定値 D_1 のみを考慮する腐食量 R の結果を整理した。N-0-85 は、促進腐食期間中に端部 50mm 程度切り落とし、促進腐食期間を決定するためのデータとしたため、素線の長さが他の供試体よりも 50mm 程度短い。また、図-6 に示す緑線の素線相対長さは、実際の素線長さからグラウト平均付着長さを引いた値を示しており、各々供試体で素線相対長さが異なるのは、グラウトの充填長さにお

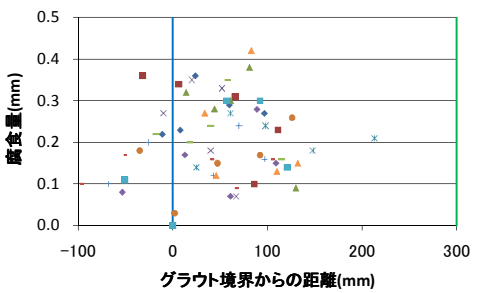
ける施工誤差によるものである。

図-6 より、H-0.3-130 および H-1.2-130 は、グラウト境界からの距離 150mm 程度以上で局部腐食・孔食が確認できず、グラウト位置 0mm から離れるにつれ、腐食量が小さくなる傾向が得られた。グラウト境界付近の隙間における腐食液である水の液膜にグラウト内塩分が溶けだしたため、グラウトが付着している付近で腐食が大きく進行したと考えることができる。そこで、供試体で使用したグラウトの塩分溶出量を確認するために、H-0.3-130 および H-1.2-130 からグラウトを採取し、写真-5 のように水道水に 6 日間浸漬させ、塩分溶出量を写真-6 のように塩分濃度計ソルコンにより測定した。表-6 に測定結果を示すように、グラウトから塩分溶出が確認できた。文献⁹⁾には、最大の腐食速度を示す液膜の厚さ 0.1mm において、液膜内の塩分濃度が少しでも増加すると、腐食速度が大きくなること示されている。そのため、グラウト境界付近における素線と素線、シーと素線間の塩分濃度が増加し腐食速度が大きくなった。また、グラウト塩分濃度の違いである H-0.3-130 および H-1.2-130 を比較すると、ばらつきは大きいもののグラウト塩分量が多い H-1.2-130 の方の腐食量がやや大きい結果となり、塩分溶出量が多い方の腐食量が大きくなる傾向にある。

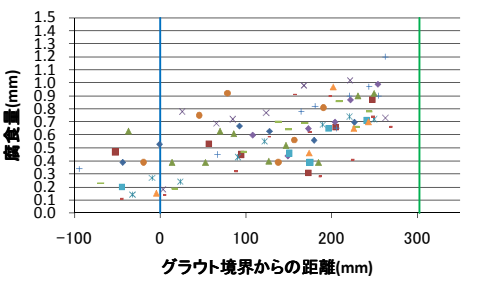
次に、腐食液の違いである H-0.3-130 および N-0.3-130 を比較すると、H-0.3-130 では、グラウト付近で腐食が大きく、局部腐食・孔食が確認できているのに対し、N-0.3-130 では、不良部の端部側方向に腐食量が大きくなる傾向であった。腐食液が塩水である場合は、線形で不良部側方向にグラウト境界位置から離れるとともに、腐食量の増加が見られることから、腐食液が塩水である 3 体の共通の特徴として、グラウトの不良部側の端部では、グ



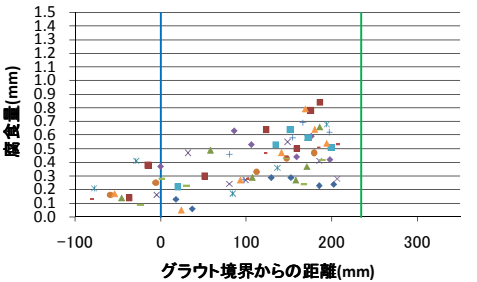
(a) H-0.3-130



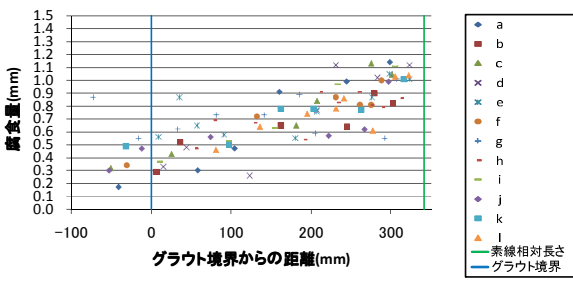
(b) H-1.2-130



(c) N-0-130



(d) N-0-85



(e) N-0.3-130

図-6 腐食量と素線軸方向距離の関係

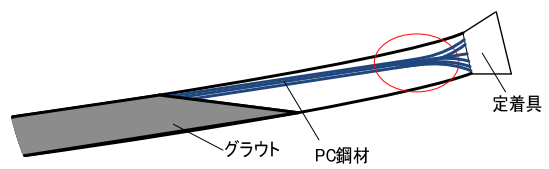


図-7 ケーブル概要図

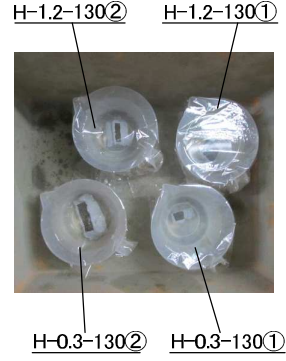


写真-5 供試体および浸漬の様子



写真-6 塩分測定

表-6 塩分溶出量

供試体名	No	溶出面積(mm ²)	NaCl濃度(%)		
			初期値	実測6日目	溶出量
H-0.3-130	1	2.55	0.0015	0.0026	0.0012
	2	14	0.0015	0.0031	0.0016
H-1.2-130	1	7.15	0.0015	0.0051	0.0036
	2	5.76	0.0015	0.0045	0.0030

ラウト側よりも液膜が生じやすく、錆付着後も酸素供給が多かったため、腐食速度が大きく、腐食量が大きくなったと推察される。1章で示したように、凍結防止剤が使用されているような環境の実橋梁では、素線と素線がシースの上部に集まりはじめた箇所(図-7の概要図に示すように、定着部から数10センチの箇所)で腐食が大きいと考えられる。

次に、腐食液が塩水でありグラウト内塩分濃度が異なるN-0-130およびN-0.3-130を比較する。比較を行うために、図-8に2つの供試体の結果である図-6(c)と(e)を重ね合わせた。また、図-8の各々の供試体の近似直線より、傾きが同じ値を示しており、切片も近い値を示していることがわかり、グラウト内塩分濃度の違いが影響しないといえる。仮に、グラウト内塩分が表-6の値程度、素線間の隙間、もしくは素線とシースの隙間に溶出したとしても、最大腐食速度を示す3%濃度塩水に対して塩分濃度増加が微量であり、素線の腐食速度の増加はないと考えられる。そのため、グラウト内塩分濃度に関わらず不良部側方向にグラウト境界から離れていく位置で

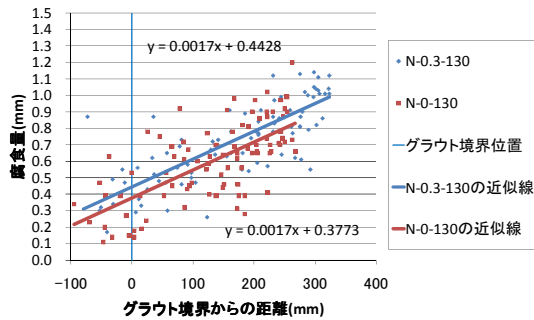


図-8 N-0.3-130 と N-0-130 の比較図

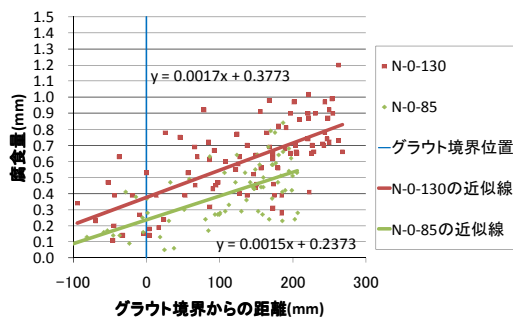


図-9 N-0-130 と N-0-85 の比較図

表-7 腐食速度

	鋼線平均腐食速度 (mm/year)	グラウト不良部側の 平均腐食速度 (mm/year)	腐食期間 (日)
N-0-130	1.639	1.735	130
N-0-85	1.690	1.826	85

腐食量 R が増加していくことがわかる。

次に、N-0-130 および N-0-85 の比較を行う。腐食期間の違いの比較であり、図-8 のように比較を行うと、N-0-130 の方が素線の全長に腐食量 R が大きいため、素線全長で腐食が進行していることがわかる。特に、グラウト側よりグラウト不良部側の端部の腐食量増加量が大きいことがわかる。この結果についても、グラウト不良部側の端部より、グラウト境界部付近において素線間、素線とシース間の隙間の方が、錆付着による酸素供給の低下が大きいため、腐食量が小さい結果となった。さらに、表-7 に示す腐食速度の違いをみた。表-7 の腐食速度は、測定した素線の全腐食量 R の平均値、またグラウト不良部から端部側において測定した素線の全腐食量 R の平均値を暴露期間で割ったものである。表-6 より、N-0-130 よりも、N-0-85 の方の腐食速度が大きいことがわかる。また、グラウト不良部のみにおける腐食速度は、素線全長の腐食速度より大きい。また不良部側のみの腐食速度は、N-0-85 の方が大きいため、腐食進展の錆付着による低下が確認できる。これは、既報²⁾において考慮した鋼線に錆が付着することにより腐食速度が低下すること一致する。

4. まとめ

実橋梁で使用されているグラウトを用い、ケーブル曲げ上げ部を考慮し、素線 $12\phi 7\text{mm}$ の供試体を作製した。また、その供試体を促進腐食させ、グラウト充填不良部の腐食メカニズムについて実験的検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1)グラウトは、ブリーディングの影響も含め、素線間、素線とシースの隙間に充填されない傾向にあり、凍結防止剤・腐食促進溶液が侵入することがわかった。
- (2)素線と素線、シースと素線の接している箇所近傍では、腐食液の液膜が生じやすいため、腐食量が大きく、局部腐食・孔食が発生しやすいことがわかった。
- (3)水で乾湿サイクルを行った場合は、グラウト内塩分が溶出することにより、溶出塩分量の微量の違いでも腐食速度が異なり、腐食量の違いが生じることがわかった。
- (4)塩水で乾湿サイクルを行った場合には、グラウト不良部側・グラウト境界から離れる方向にほぼ線形で腐食量が増え、凍結防止剤がグラウト充填不良部に侵入するような場合には、素線がシース上部に集まりはじめた箇所、つまり、定着部から数 10 センチあたりに最も著しい腐食が発生することが考えられる。
- (5)腐食期間が長くなると、錆の付着の影響でグラウト境界付近における素線間、シースと素線の隙間の酸素供給が低下するため、グラウト不良部側の素線端部の素線との腐食量と差が生じることがわかった。

謝辞

橋梁詳細調査に協力いただきました兵庫県県土整備部、および鋼線を提供していただきました神鋼鋼線工業株式会社に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：PC 構造物の現状の問題点とその対策，2003。
- 2) 白川祐太，森川英典，鴨谷知繁：グラウト充填状況を考慮した PC 橋の鋼材腐食の予測と構造安全性，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 10 巻，pp.85-92，2010。
- 3) 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。
- 4) 土木研究所一塩害により損傷を受けた PC 鋼材の機械的性質一塩害を受けた PC 橋の耐力評価に関する研究 (III) 一，No.3810，2001。
- 5) 片山英樹，野田和彦，山本正弘，小玉俊明：人工海水液膜下での鋼の腐食速度と水膜厚さの関係，日本金属学会誌 65(4)，pp.298-302，2001。