

論文 ポストテンション桁における鋼材腐食メカニズムの検討

阿部 健*1・山本 悟*2・皆川 浩*3

要旨：PC 桁のプレストレス導入方式であるポストテンション方式では、PC 鋼材定着部からシース管内に水が浸入し、シース管の継手部より浸透水がコンクリート内に浸出することが考えられる。この浸透水が塩化物イオンを含む場合、鋼材腐食がシース管外面から発生することが予想される。そこで、本研究では、上記の腐食メカニズムをコンクリート供試体試験により検討すると共に、鋼材を保護するための補修工法としての電気防食の効果も調べた。その結果、シース管から浸出した塩化物イオンを含む水溶液により、コンクリート内のシース管外面から腐食が生じ、同条件の供試体に電気防食を適用した場合は、鋼材は保護された。

キーワード：塩害、ポストテンション方式、シース管、鋼材腐食、電気防食

1. はじめに

我が国の社会資本の多くは、高度成長期に建造され、現在は維持管理を必要とする時期に入っている。PC 構造物は土木構造物として幅広く利用されてきたが、道路橋の PC 桁では、海岸近くや凍結防止剤を散布する地域に位置する場合、塩害により早期劣化が生じる場合がある。

PC 桁では、躯体コンクリート硬化後にシース管内に PC 鋼材を通し、これに引張応力を加えて躯体コンクリートにプレストレスを導入するポストテンション方式が普及している。本方式の桁では塩害環境において、塩化物イオンを含む水がかぶりコンクリートに浸透し、鋼材を腐食させることがある。さらに PC 鋼材定着部の防水処理が不十分な箇所からもシース管内に水が浸入することが考えられる。特に旧建設省の基本設計では平成 2 年度まで PC 鋼材の定着部を桁の上縁に設けていたことから、床版からの浸透水がシース管内に浸入しやすい環境にある。この浸透水が塩化物イオンを含む場合、PC 鋼材が著しい鋼材腐食を生じた事例がある¹⁾。また、一般にシース管の定尺は 4m であることから、桁長がそれより長い場合は、図-1 に示すようにシース管に継手を用いて

延長する必要がある。継手にはシース管と同様の管を使用し、粘着テープで固定するが、シース管内の水は、図-2 示すように、粘着テープ重ね巻部の隙間を通して浸出することが実験室試験により確認された。このため、図-3 に示すように、実構造物では塩化物イオンを含んだ浸透水により、塩害がコンクリート内部のシース管外面から発生することが予想された。

そこで、本研究では、上記の腐食メカニズムをコンクリート供試体試験により検討した。また、シース管を保護するための補修工法としての電気防食の効果も調べた。

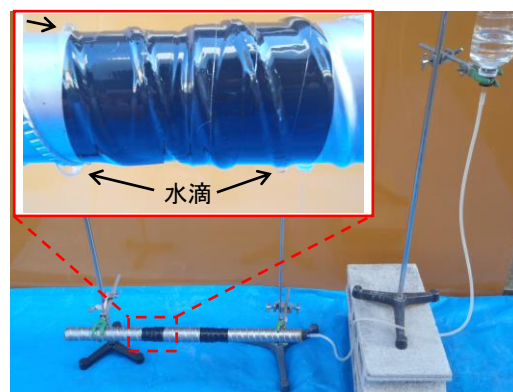


図-2 シース管内部からの水の浸出状況

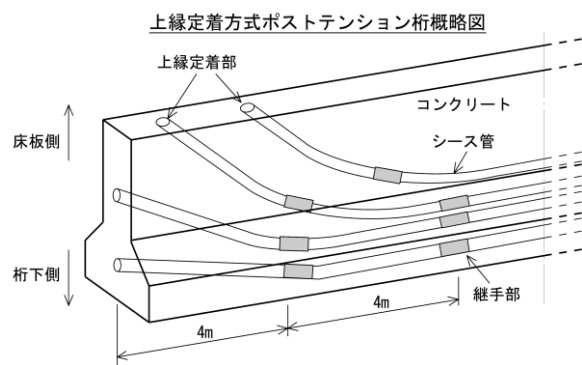


図-1 ポストテンション桁概略図

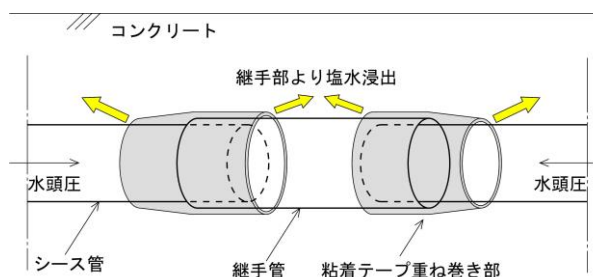


図-3 シース管継手部の概略図

*1 日本防蝕工業 (株) 技術研究所 (正会員)

*2 日本防蝕工業 (株) エンジニアリング部 博(工) (正会員)

*3 東北大学 工学研究科土木工学専攻 准教授 博(工) (正会員)

2. 試験方法

2.1 供試体概要

供試体に用いたコンクリート配合を表-1 に、形状および試験条件を図-4 に、鋼材の配置状況を図-5 に示す。供試体の形状は高さ180×幅150×長さ400mmとし、配合は一般的なPC橋に用いるコンクリート相当とした。供試体打設後には、気温20℃相対湿度60%で7日間、その後は室温で57日間気中養生を行った。

供試体の配筋は図-4 に示すように、軸方向鉄筋を2本および帯筋を供試体断面に対して縦横に1本ずつ配置した。シース管は取水口を設けたシース管をJ1、中央部に設置し継手管としたものをJ2、取水口と反対側のシース管をJ3とし、これらをまとめてシース管Jと呼ぶ。また、シース管Sをシース管Jと平行に設置して実際のポストテンション桁の一部分を模擬した。なお、シース管S、J1およびJ3は外径35mm、シース管J2は38mmのものを使用した。また、シース管の継手部は実施工と同様に粘着テープで固定し、両端はゴム栓およびシリコン樹脂で止水した。

供試体は3体作製し、表-2に示す条件で供試した。電気防食用供試体No.3には耐久性陽極材(貴金属酸化物被覆陽極材 以下、陽極材と呼ぶ)を供試体側面中央のかぶり20mmの位置に設置した。

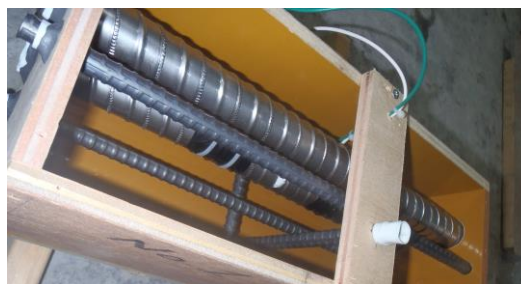


図-5 鋼材の配置状況

表-2 試験条件表

供試体番号	試験液の種類	補修工法
No.1	飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液+飽和 NaCl	なし
No.2	飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液	なし
No.3	飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液+飽和 NaCl	電気防食

2.2 試験条件

本試験では、シース管内に浸入する水を模擬した表-2に示す試験液で、シース管J内を満たした。その後、シリコンチューブおよび樹脂製容器で1mの水頭圧を与えた状態で室内に静置した。試験液は供試体No.1(以下、No.1と呼ぶ)では融雪剤として使用したNaClが飽和状態でシース管内に浸入したことを想定

表-1 コンクリート配合および物性一覧

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						フレッシュ性状			圧縮強度 (N/mm ²)
		W	C	S	G	高性能 AE 減水剤	AE 剤	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)	
37	42	165	446	704	996	C×0.6%	C×0.002%	14.5	5.0	21	57.3

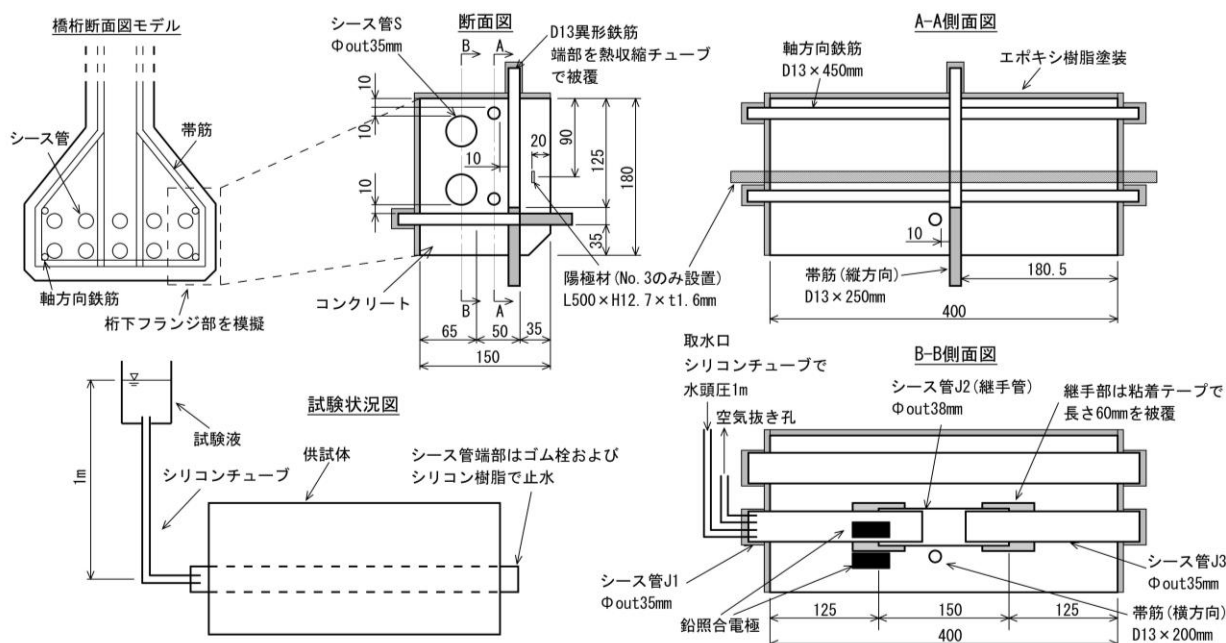


図-4 供試体形状および試験条件

して、飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と NaCl の混合飽和水溶液を、No.2 では塩化物イオンを含まない水が浸入した場合を模擬し、飽和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液のみとした。No.3 では、No.1 と同様な供試体に電気防食を適用した。電気防食の電源は定電流電源装置を用いた。また、試験期間は 188 日間とし、この期間中の室温は 17.9～30.3℃であった。

2.3 測定項目

(1)鋼材間電流

供試体中の各鋼材からのリード線を端子台で電氣的に接続した。このとき、鋼材間交流抵抗が 140～670Ωであったため、最低値の 10%未満の固定抵抗 10Ωを挿入し、固定抵抗 R に発生する電圧 V をデータロガーで自動測定した。この値から、鋼材間電流 I を式(1)によって計算した。

$$I = V / R \quad (1)$$

(2)鋼材電位の測定

シース管継手部外面および内面に設置した鉛照合電極を用いて鋼材の自然電位をデータロガーで自動測定した。電気防食を適用した No.3 では通電オン時の電位である E_{on} を測定した。また、 E_{on} は IR ドロップによる誤差電位を含むため、定期的に通電遮断直後の電位であるインスタントオフ電位 E_{ins} も測定した。

(3)復極試験および分極試験

電気防食を適用した No.3 では、一般に実施されている復極試験によって防食電流を調整した。本試験での復極試験とは、通電遮断直後の電位 E_{ins} と遮断して 24 時間後の電位 E_{off} を測定し、その差(以下、復極量と呼ぶ)を求めるもので、復極量が 100mV 以上であれば防食効果が得られているとした²⁾。

また、No.3 のみ試験開始および終了時に全鋼材面積に対してカソード分極試験を実施した。本試験は各電流密度で 10 分間通電し、1 分間の休止時間を設けた。電流密度は 0.1, 0.5, 1.0, 5.0, 10, 30, 50mA/m² まで段階的に増加させた。

(4)供試体の解体調査

上記測定後に供試体を割裂して鋼材などを観察した後に、供試体内のシース管を取り出し、試験開始前の質量 W_1 と除錆処理後の質量 W_2 の差から、腐食減量を調べた。除錆処理方法は、JIS Z 2371 塩水噴霧試験法の化学的腐食生成物除去方法に準じたもので、塩酸－ヘキサメチレンテトラミン溶液で酸洗した。このとき、酸洗によって質量減が生じるため、供試したシース管と同形状のシース管3本を酸洗処理し、それらの質量減の平均値を補正值 $W_a(g)$ とし、式(2)に示すように試料の質量減から減じた値を実腐食量 $W_r(g)$ とした。また、データロガーで測定した鋼材間電流 I (A) と測定間隔の時間 Δh の積から電気量 q (Ah) を求め、これらの積

算値に鉄の電気化学当量(1.042 g/Ah)を乗じることで、試験期間中の理論腐食量 W_t (g) を式(3)に示すように計算した。

$$W_r = W_1 - W_2 - W_a \quad (2)$$

$$W_t = \Sigma (I \times \Delta h) \times 1.042 \quad (3)$$

3. 結果と考察

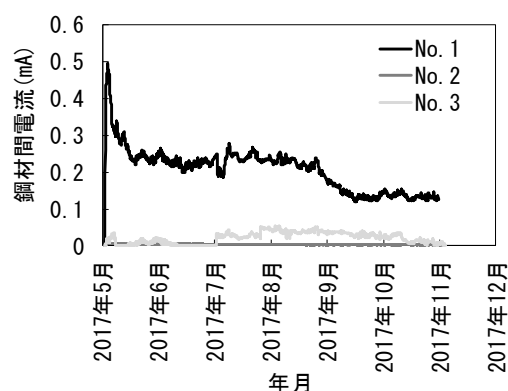
3.1 供試体中の電流の経時変化

(1)鋼材間電流の経時変化

シース管 J の鋼材間電流の経時変化を図－6 に示す。電流の符号は、対象鋼材から流出した場合を正(+)とした。一般に、流出電流は腐食電流である。

鋼材間電流は No.1 では初期に最大 0.5mA 程度が流出したが、これは、シース管内の試験液がコンクリート側に浸出したためで、No.1 の試験液は塩化物イオンを含んでいたためにシース管表面の不動態皮膜が破壊され、腐食欠陥部(アノード部)が形成されたと考えられる。このとき、浸出液と接しない他の健全な鋼材がマクロセルのカソードとなったと考えられる。また、No.1 の鋼材間電流は経時的に減少した。これは、アノード部の電位がカソード側の電位に近付き、マクロセルの電位差が減少したためと推定された。一方で、No.2 の鋼材間電流は 0.001～0.007mA の範囲であり、No.1 と比較して小さい値(約 1%)を示した。これは、試験液に塩化物イオンを含まないために、上記のようなアノード部が形成されなかったと考えられる。

電気防食を適用した No.3 では、シース管から流出する電流は最大 0.055mA で No.1 に比較して、小さい値を示した。これは、電気防食によって、カソード部の電位が卑化したためにマクロセルの電位差が減少したことによると考えられる。



図－6 シース管 J の鋼材間電流の経時変化

(2)鋼材間電流と防食電流密度との関係

電気防食を適用した No.3 のシース管 J の鋼材間電流と防食電流密度の関係を図－7 に、コンクリート深部

に位置する鋼材の腐食および電気防食モデルを図-8に示す。

防食電流密度は試験開始時に、供試体中の全ての鋼材面積当たり最大の 15mA/m^2 としたが、その後は防食電流密度を 10, 5, 4mA/m^2 と低下させた。このとき、シース管から流出する電流は防食電流密度を減少させた直後は増加したが、それ以降は経時的に減少した。これは、無防食状態のときは、図-8 の上の図に示すようにアノード部では腐食反応により pH が低下し、腐食が維持される³⁾。しかし、電気防食を適用した場合、健全部の鋼材の電位がアノード部の電位まで卑になるため、鋼材間の電位差が減少し、腐食反応も減少したと考えられる。これによって、アノード部の H^+ 発生速度がコンクリートからの OH^- 供給速度よりも低下した結果、図-8 の下図に示すように pH が上昇し、腐食部が不活性になったと考えられる。

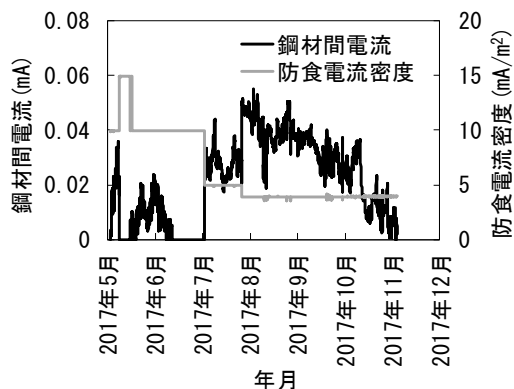


図-7 No.3の鋼材間電流と防食電流密度の関係

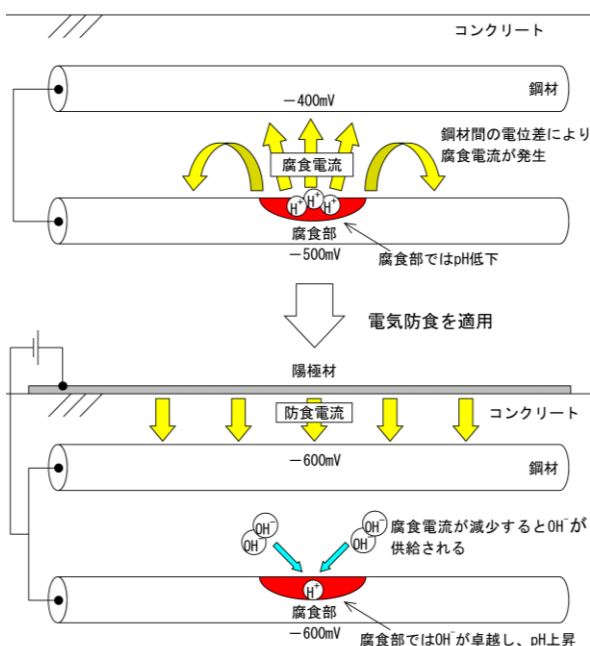


図-8 コンクリート深部の鋼材腐食および防食モデル

3.2 シース管の電位経時変化

シース管 J の外面の電位経時変化を図-9 に、内面の電位経時変化を図-10 に示す。図中には ASTM C876 の腐食確率を示した。シース管外面の自然電位は、No.1 では $-543 \sim -345\text{mV vs. CSE}$ (以下、mV と略す) で ASTM C876 によると、「腐食域」にあった。一方、No.2 は $-254 \sim -203\text{mV}$ で「不確定域」にあった。

シース管内面の自然電位は、No.1 の試験開始時では -558mV だったが、その後、急激に -700mV 程度まで卑化した。これは、シース管内の試験液が塩化物イオンを含む場合に鋼材表面が活性であったためと考えられる。しかし、試験液が飽和 NaCl 水溶液であったため溶存酸素濃度が低く⁴⁾、シース管内への酸素供給性が悪いため、アノード部本来の平衡電位に近い値となったと考えられる。なお、このように腐食反応に必要な酸素が欠乏すると、一般に腐食は進行しないとされている。なお、シース管内に空気が入るような条件では、シース管内面が腐食すると考えられる。一方、No.2 内面の自然電位は $-492 \sim -324\text{mV}$ の範囲で No.1 よりも貴な値を示した。No.2 では、時間と共に貴化する傾向が認められた。このことから、酸素の供給性が悪い環境であっても、塩化物イオンを含まないと鋼材表面はより不活性であったと考えられる。

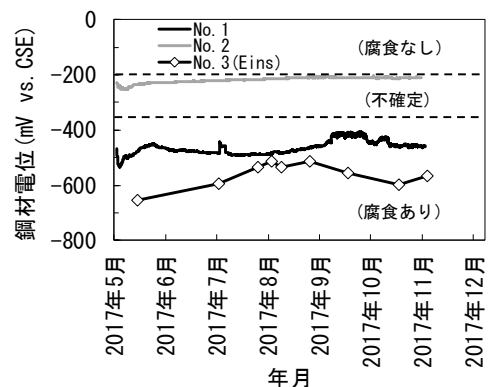


図-9 シース管外面の電位の経時変化

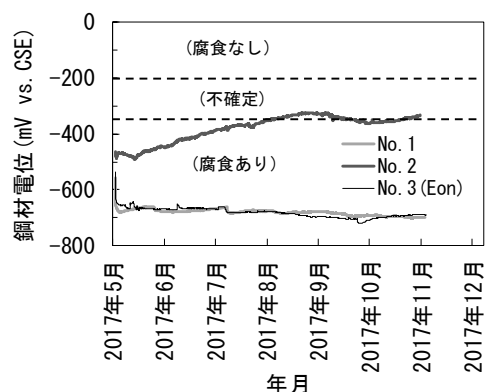


図-10 シース管内面の電位の経時変化

3.3 復極量および防食電流密度の経時変化

No.3 の復極量および防食電流密度の経時変化を図-11 に、分極試験結果を図-12 に示す。

復極量は、試験初期には 230mV と、防食基準の 100mV を大きく上回ったため、防食電流密度を段階的に低下させたが、試験期間中は防食基準を満足した。また、図-12 に示すように通電初期の 2017 年 5 月に比べて、試験終了時の 2017 年 11 月では自然電位が貴側に変化し、かつ、より低い電流密度で大きく分極する傾向が認められたことから、復極量が経時的に増加したものと考えられる。これらのことから、3.1 項で述べたように、継続的に電気防食を適用することでシース管外面の環境が改善されたと考えられる。

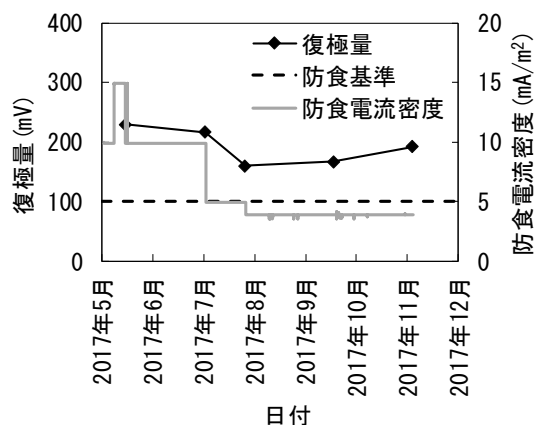


図-11 No.3 復極量の経時変化

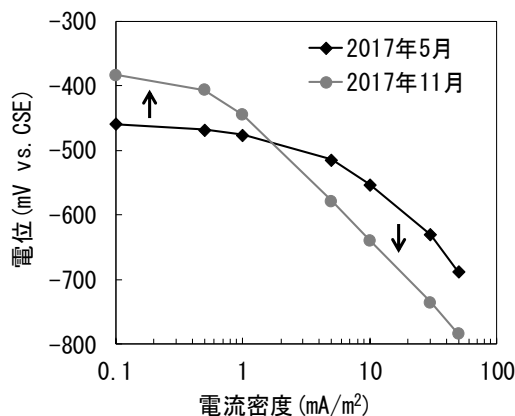


図-12 No.3 分極試験結果

3.4 解体調査結果

(1) 解体供試体の外観観察

供試体の割裂面を図-13 に示す。いずれもシース管の継手部近傍のコンクリートは湿っていたことから、シース管内の試験液が継手部からコンクリート中に浸出したことが確認できた。

No.1 の固定部近傍には、図-14 に示すような直径 10mm 程度の腐食貫通孔およびその周辺にも腐食による減肉が確認された。これは、3.1 項にも記載したようにシース管継手部から塩化物イオンを含む試験液が浸出し、シース管表面の不動態皮膜が破壊されてアノードになったためと考えられる。また、シース管 J を除く鋼材では腐食が確認されなかったことから、これらの鋼材がカソードとなるマクロセルを形成し、腐食が進行したと考えられる。一方、No.2 および No.3 では継手部近傍の腐食が認められなかった。これらのことより、No.2 のようにシース管内部の試験液が浸出しても塩化物イオンを含まない試験液の場合は腐食せず、また、塩化物イオンを含んでいても電気防食を適用すれば、シース管を保護できることが確認できた。

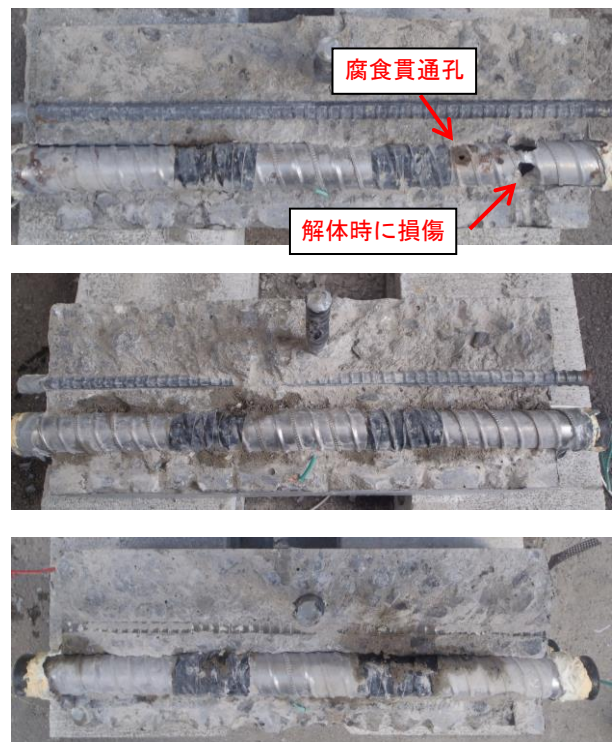


図-13 解体供試体外観(上から No.1, 2, 3)



図-14 No.1 腐食貫通孔拡大(除錆後)

(2)実腐食量の算出

シース管 J の腐食量の一覧を表-3 に、No.1 のシース管内側の表面状態を図-15 に示す。シース管 J の質量減から求めた実腐食量 W_r は No.1 が合計 1.476g で、特に直径 10mm 程度の腐食貫通孔が確認された J3 で高い値を示した。また、No.2 および No.3 の実腐食量 W_r は No.1 を 1.0 としたときに、それぞれの比率は 0.16 および 0.26 程度であった。このことから、試験液が塩化物イオンを含まないか、電気防食条件ではシース管の腐食が進行しないことが明らかになった。

No.1 の実腐食量 W_r に対する理論腐食量 W_t の比率 (W_t/W_r)は表-3 に示すように 0.65 であった。このことから、鋼材の腐食は、鋼材間電流のみでなく、腐食したシース管における鋼材内腐食(自己腐食)も進行したものと考えられる。また、No.3 のシース管 J1 の外面の状態を図-16 に示すが、シース管端部のシリコン樹脂被覆部および継手の固定部で軽微な腐食が認められた。これは、被覆の下に隙間があり、ここに不動態を形成するために必要な OH^- と酸素が供給されにくかったことで、表面が活性な状態にあったと考えられる。これらの除錆後の表面を観察すると、減肉はほとんど確認されなかった。このことは No.2 でも同様に認められた。

シース管内面は、図-15 に示すようにわずかに変色していたが、顕著な腐食は認められなかった。これは、シース管内面は活性であるにもかかわらず、腐食反応に必要な酸素が欠乏していたためと考えられる。

4. まとめ

ポストテンション桁を模擬した供試体中のシース管内に満たした試験液がシース管等の鋼材腐食に及ぼす影響を検討した結果、以下のことが分かった。

1. $Ca(OH)_2$ と $NaCl$ の混合飽和水溶液がシース管の内部から浸出し、シース管外面の固定部近傍から腐食が生じ、局部的にシース管に貫通孔が生じる現象が確認された。この現象は、シース管内部では酸素供給量が少ないことに加え、シース管外部はその表面と軸方向鉄筋および帯筋とマクロセルを形成したためである。
2. 塩化物イオンを含まない飽和 $Ca(OH)_2$ 水溶液がシース管内部から浸出した場合、鋼材間に流れる電流は小さく、シース管は不動態を維持し、腐食は確認されなかった。
3. 電気防食を適用した供試体では、鋼材間の電位差が減少することによって鋼材間電流が抑制され、シース管は保護された。

表-3 各供試体の腐食量一覧

No.	鋼材	実腐食量(g)		理論腐食量(g)	比率(%)
		鋼材ごと	合計(比率)		
1	J1	0.359	1.476 (1.0)	0.960	0.65
	J2	0.301			
	J3	0.816			
2	J1	0.038	0.231 (0.16)	0.019	0.08
	J2	0.151			
	J3	0.042			
3	J1	0.182	0.387 (0.26)	—	—
	J2	0.097			
	J3	0.108			

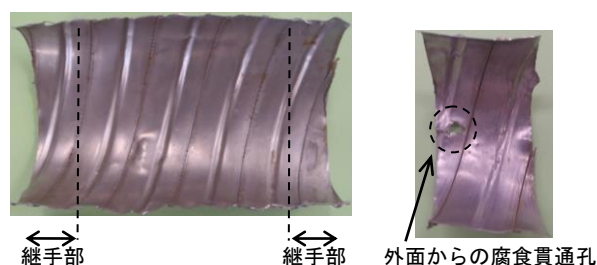


図-15 No.1 シース管内面の表面状態(左:J2、右:J3)

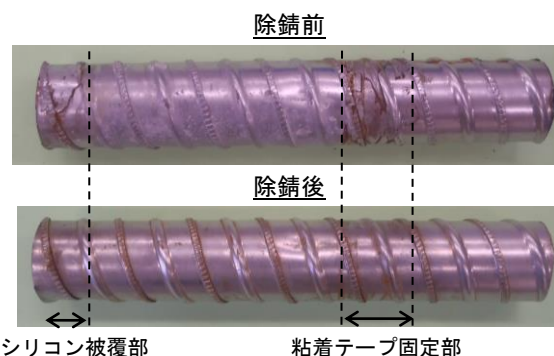


図-16 No.3 シース管 J1 被覆部の表面状態

参考文献

- 1) 白川祐太, 森川英典, 鴨谷知繁: 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, コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.2, pp.493-498, 2011.
- 2) 土木学会: コンクリートライブラリ 107 電気化学的防食工法設計施工指針(案), pp.67, 2001.
- 3) 山本悟, 田代賢吉, 細田喜子, 石井浩司, 関博: さび層を有するコンクリート中鉄筋の電気防食における防食電流密度に関する供試体実験による検討, 材料と環境 2010 講演集, pp.27-30, 2010.
- 4) H.H.ユーリック, R.W.レヴィー: 腐食反応とその制御(第3版), 産業図書, pp.110, 1968