

論文 腐食促進試験によるプレストレストコンクリート部材の劣化に関する研究

今野 洋一^{*1}・睦好 宏史^{*2}・Ha Minh^{*3}・谷口 博胤^{*4}

要旨：近年，ポストテンション方式プレストレストコンクリート（以下 PC）橋に関して，塩害，グラウトの未充填に起因した PC 鋼材の腐食問題が顕著化してきた。そこで本研究では通電による腐食促進試験を行い，各腐食要因が及ぼす影響を明らかにした。また腐食に伴う一連の挙動をモデル化し，実験結果との比較を行った。この結果，通電日数から腐食ひび割れ幅が，腐食ひび割れ幅からコンクリート内部のシースの腐食量が推定可能となった。

キーワード：腐食促進試験，積算電流量，腐食量，腐食ひび割れ幅

1. はじめに

わが国では，第 2 次世界大戦後の国土復興，高度成長期において，膨大な社会基盤施設が建設されてきた。これら社会基盤施設は建設後，数十年が経過し，老朽化が大きな問題となっている。ポストテンション方式 PC 橋に関しても，塩害，グラウトの未充填に起因した PC 鋼材の腐食が大きな問題となっている。このような PC 鋼材の腐食は未然に発見される場合が多いが，落橋という最悪の結果を招いた後に明らかになった事例もある。そのような中で，既設のポストテンション方式 PC 橋梁の維持管理や，新設のポストテンション方式 PC 橋梁のライフサイクルコストを考える際に，鋼材腐食に影響を及ぼす因子を明らかにし，それらを考慮した耐用年数の予測方法や鋼材腐食の判定方法の確立が早急に求められている。

本研究では通電による腐食促進試験を行い，各腐食要因がシースおよび PC 鋼材の腐食に及ぼす影響を明らかにするとともに，腐食に伴う一連の挙動をモデル化し，解析的にも解明しようとしたものである。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

今回実験に用いた試験供試体の形状寸法を図 - 1 に示す。供試体はポストテンション方式 PC 梁とし，全長 2000mm，断面は 100mm × 200mm の矩形断面とした。PC より線 SWPR7A 9.3mm（引張り強さ 1720N/mm²）を配置し，目標導入プレストレス量は引張り強さの 60%とした。また供試体端部はエポキシ樹脂でコーティングし，端部と定着具間にはゴム板を挟むことにより絶縁した¹⁾。

2.2 腐食促進試験概要

腐食促進試験概略図を図 - 2 に示す。アクリル製プールにチタンメッシュを敷き，その上に供試体を設置した。プール内に供試体高さの約 1/3 程度が浸されるように重量パーセント濃度で 5%の塩水を張った。PC より線を陽極に，チタンメッシュを陰極に設定し，配線する銅線の長さ，銅線の接着位置を全ての供試体で等しくし，回路による抵抗の差を無くした上で，電流を 0.7A 一定として通電を行った。実験は室温 20℃，湿度 60%とした恒温高湿室で行った。また乾燥によって電圧が極端に上昇するのを防ぐ為に，適時スプレーによってプール内と同様の塩水を供試体表面に噴霧した。

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 埼玉大学 工学部 建設工学科 教授 工博 (正会員)

*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 工修 (正会員)

*4 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻

2.3 実験要因と測定項目

各供試体名と実験要因を表-1に示す。Aシリーズは通電時間のみ変化させた供試体である。Cシリーズは注入するグラウト内にも塩化物イオン (Cl⁻) を混入した供試体である。現在の日本におけるセメントの塩分量の規制値を緩めた場合、グラウトの塩分量が鋼材腐食に与える影響を調査することを目的とした。Dシリーズはシースの直径を変化させて、グラウトの厚さとかぶりを変化させた供試体である。グラウトの厚さが鋼材腐食におよぼす影響を明らかにすることを目的とした。

測定項目は、供試体に生じたひび割れ幅とし、ひび割れ性状の観察も行った。本研究でのひび割れ幅は、供試体端部から20cm間隔で設けた9断面において、シース位置に沿って両側面と上面に発生した全ひび割れの幅をノギス等で計測し、合計した値の平均値とする。また腐食促進試験後に梁の載荷実験を行い劣化後のPC梁の耐荷性状を明らかにした。載荷実験終了後にPC鋼材をはつり出し、クエン酸二アンモニウムに2日間浸けて除錆した後、腐食量を計測した。

3. 腐食促進試験結果

3.1 ひび割れ幅と通電日数の関係

図-3はC、Dシリーズのひび割れ幅と通電日数および積算電流量との関係を示したものである。グラウト内にもCl⁻が混入してあるCシリーズがA-2よりもひび割れ幅が大きくなった。しかしCl⁻量とひび割れ幅には明確な関係は見られない。これは錆汁の影響である。すなわちシースが錆びることによって体積が膨張し、コンクリートにひび割れが発生するが、C-2、C-3供試体では、錆がひび割れから流出したため、錆による膨張圧が減少し、その結果ひび割れ幅はC-1より小さくなったものと推測される。

シースの径が腐食ひび割れ幅に及ぼす影響を見てみるとD-2はD-1よりもひび割れ幅が小さいことがわかる。これは腐食促進試験の通電を定電流 (0.7A) で行っている。従って、式(1)

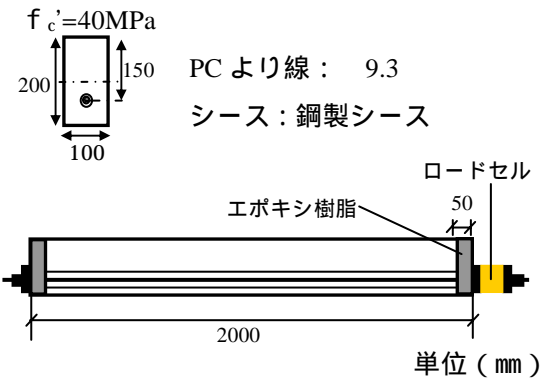


図-1 供試体形状寸法

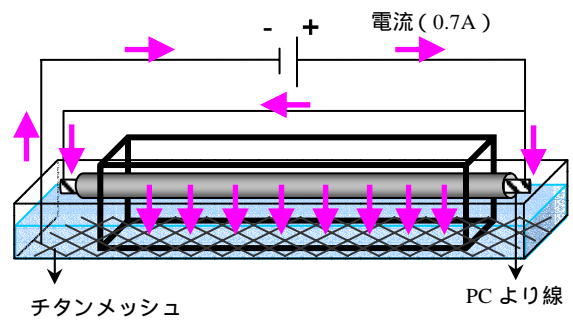


図-2 腐食促進試験概略図

表-1 供試体名と実験要因

No.	通電時間 (週)	シースの径 (mm)	コンクリート内 Cl ⁻ (kg/m ³)	グラウト内 Cl ⁻ (%)
A-1	0	20	0	0
A-2	2			
A-3	3			
A-4	4			
A-5	5			
C-1	2	20	3	0.02
C-2				0.1
C-3				0.2
D-1	2	30	0	0
D-2		35		
D-3		40		

に示すようにシース径が大きいほど単位表面積あたりに流れる電流量 (腐食電流 (A/cm²)) が小さくなることから錆の発生量も少なくなったと考えられる。

$$G = \frac{M}{2Fa} \int I_{corr} dt \quad (I_{corr} = I/S) \quad (1)$$

ここに G : 腐食量(g/cm^2), M : 鉄の原子量(55.8)

F_a : ファラデー数, S : シースの表面積

I : 電流(A), I_{corr} : 腐食電流 (A/cm^2)

3.2 腐食量について

表 - 2 に各供試体の PC より線の長さ 2m あたりの腐食量を質量で示す。A シリーズは通電時間が長くなるにつれて鋼材腐食が激しくなり腐食量が大きくなっていくことが確認された。特に通電 3 週間以降の質量減少は激しく、腐食は全面にわたり、数箇所では激しい孔食によって PC 鋼線が破断しているものが確認された。特に通電 5 週間の A-5 の鋼材腐食は激しく、PC より線の 7 本中 4 本が破断しており、残りの 3 本も断面減少が激しく、いつ破断してもおかしくない状態であった。C シリーズは C-1 のみが鋼材腐食を起こした。C-1 は錆汁が発生しなかったため最もひび割れ幅が大きくなり、ひび割れから酸素と噴霧した塩水が多量に供給されることにより鋼材の腐食が進んだものと考えられる。錆び汁が発生しひび割れ幅がそれ程大きくならなかった C-2, C-3 はほとんど鋼材腐食を起こさなかった。すなわち本実験結果から、鋼材の腐食程度はグラウトの塩分濃度よりも、発生したひび割れ幅の大きさが大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。D シリーズは D-1 のみが鋼材腐食を起こし、D-2, D-3 には表面に浮き錆は見られたが、断面減少を引き起こすほどのものではなかった。しかしシースの径の小さい A-2 よりも結果的に大きな腐食量となった。これは、通電開始 10 日目以降から D-1 のひび割れ表面が剥離し、最終的には A-2 よりもひび割れ幅が極端に大きくなったことから、酸素と塩水が大量に供給されたためと考えられる。この結果から、腐食促進試験において、ひび割れの拡大に伴う酸素と塩水の供給の増加が鋼材の腐食に与える影響は大きく、今後は定量的に検討する必要がある。

4. 載荷試験結果

図 - 4 に A シリーズの載荷実験から得られた

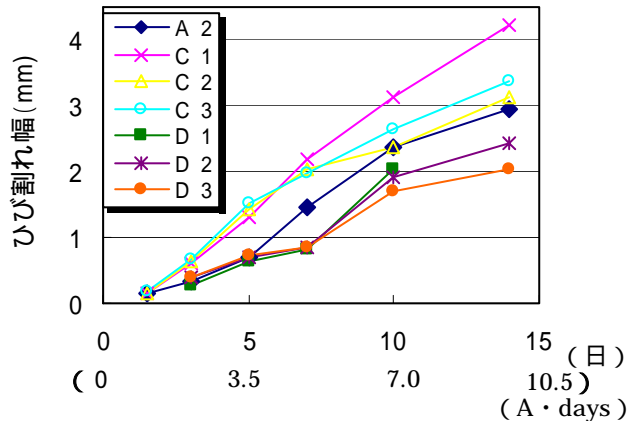


図 - 3 ひび割れ幅 - 通電日数 (積算電流量) 関係 (C・D シリーズ)

表 - 2 PC より線の腐食量

	腐食量 ($\text{g}/2\text{m}$)	質量減少率 (%)
A 1	0	0.00
A 2	8.2	1.03
A 3	27.6	3.47
A 4	105.9	13.32
A 5	245.2	30.84
C 1	13.4	1.68
C 2	0	0.00
C 3	0	0.00
D 1	22.2	2.79
D 2	0	0.00
D 3	0	0.00

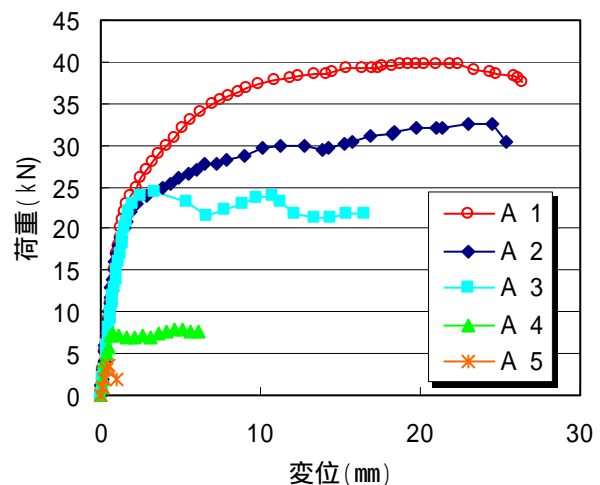


図 - 4 通電日数の違いによる耐荷性状の変化について

表 - 3 最大値と曲げ耐力比

通電日数 (週)	最大荷重 (kN)	終局変位 (mm)	曲げ耐力 比(%)
0	39.82	26.42	100
2	32.50	25.36	81.62
3	24.50	16.46	61.53
4	8.00	6.10	20.09
5	3.67	0.94	9.21

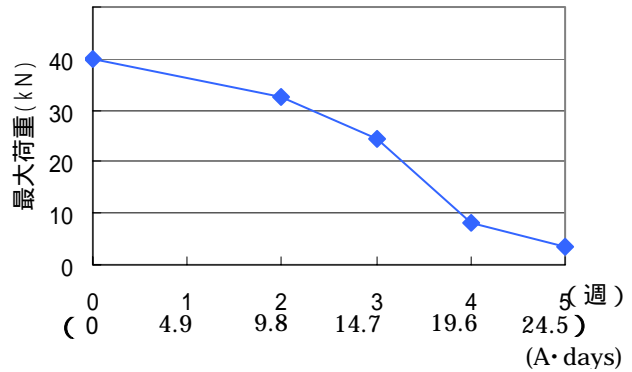


図 - 5 最大荷重 - 通电日数 (積算電流量) 関係

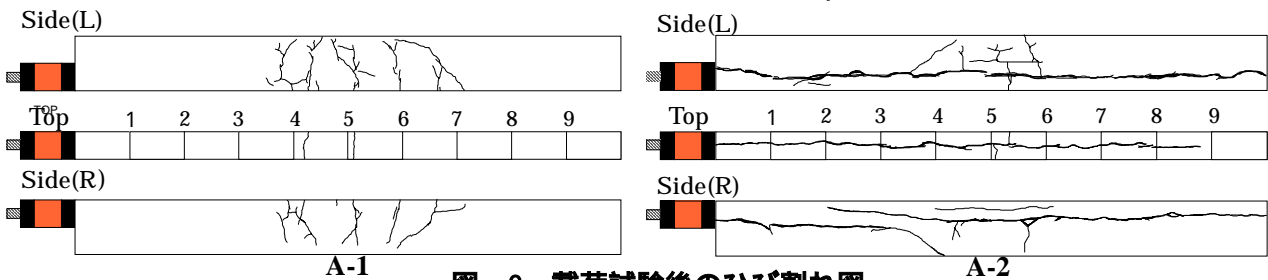


図 - 6 荷重試験後のひび割れ図

荷重 変位関係を、表 - 3 にその最大値と曲げ耐力比を示す。図 - 5 に通电日数と最大荷重の関係を示す。これらから、通电日数が増加するにつれて最大荷重が減少していることが分かる。これは第一段階としてシースの外部の腐食が進行しコンクリートとの付着が錆びによって劣化しやすくなる。第 2 段階として、腐食ひび割れ幅の拡大により、PC 鋼材の断面減少に伴うプレストレス量の急激な減少が原因と考えられる。また、通电 2 週間を超えると終局変位も急激に小さくなり梁は脆化する。曲げ耐力比を見ると A-5 では健全な供試体(A-1)と比較して約 91% の耐力低下を生じている。これは先にも述べた腐食による PC より線の破断が大きく影響していると考えられる。

図 - 6 に荷重実験後の A-1 ,A-2 供試体のひび割れ図を示す。通电を行っていない A-1 は荷重点間で圧縮縁コンクリートの圧壊によって終局状態に至った。しかしその他全ての供試体は A-2 とほぼ同様に、荷重に伴い腐食ひび割れが閉じることによって腐食ひび割れが発生した側面と逆の側面に水平方向にひび割れが発生し (右側面), その瞬間に荷重が低下する。または

そのひび割れから荷重点または支点方向に発生したひび割れによって耐力が減少した。

現段階では錆汁の発生の有無やグラウトへの Cl⁻ の浸透速度等の不確定要素が多いが、図 - 5 には概略的に最大荷重と通电日数の関係が認められることから、腐食促進試験における積算電流量と実構造物での腐食劣化期間との関係が明らかとなれば、実験的に既設 PC 構造物の残存耐力は推定可能であると考えられる。

5. ひび割れ発生モデルを用いた解析

5.1 ひび割れ発生モデルについて

以上で述べたように、PC 部材の腐食、劣化仮定は、シースの腐食、ひび割れの発生、鋼材の腐食へと進んでいく。このような過程は、実際の PC 橋梁においても同様であるといえる。ここではまず、シースの腐食が PC 梁部材に腐食ひび割れを生じさずメカニズムをモデル化し、解析的検討を行った。すなわち、グラウトとシー、かぶりコンクリートからなるモデルを用いて、かぶりコンクリート中の Cl⁻ の濃度が鋼材の腐食限界発生量に達した瞬間から、錆の発生によって腐食ひび割れが発生し、シースの全

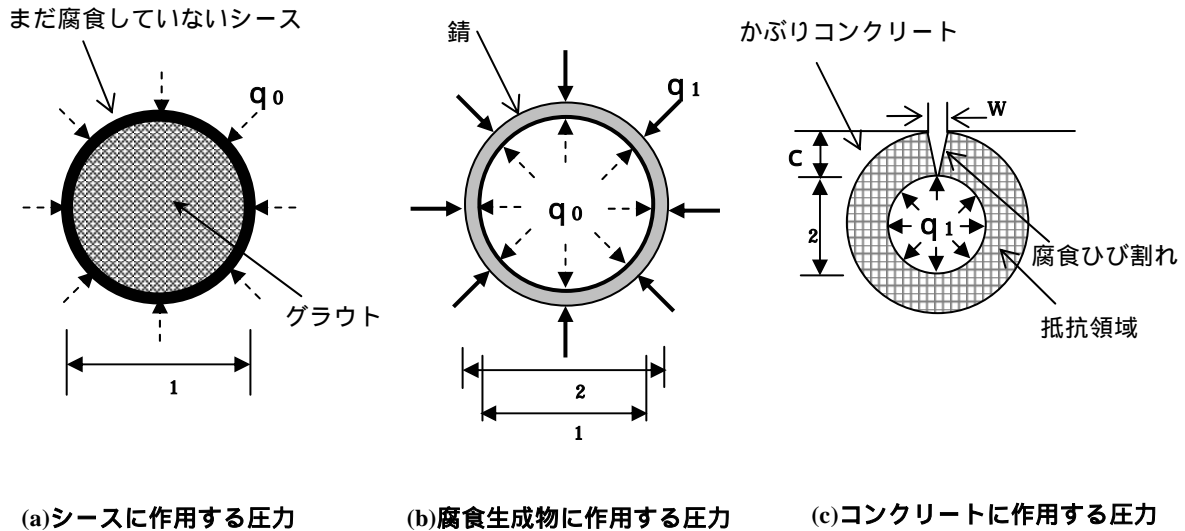


図 - 7 腐食膨張によるひび割れ発生の力学的モデル

体積が錆化するまでひび割れが拡大していく一連の挙動をモデル化した。

図 - 7 に腐食膨張によるひび割れ発生の力学モデルの考え方を示す^{2),3)}。まず発生する錆はシースの表面に均一に発生すると仮定をした。シース外部の腐食が進行すると、錆の膨張により、シースに圧力 q_0 とかぶりコンクリートに圧力 q_1 が発生する。この圧力 q_1 によりコンクリート表面にひび割れが生じると仮定した。腐食膨張圧によるひび割れ発生モデルとして図 - 7(c) に示す円筒モデルを用いた。ここでコンクリート表面ひび割れ発生条件として、錆の膨張によりコンクリートに発生する引張り応力がコンクリートの引張強度を超えると腐食ひび割れが発生すると仮定した。膨張圧 q_1 とひび割れ幅の関係は式 (2) で表せる。

$$\delta_w = \frac{3 \pi \cdot q_1 (\phi + c)^3 \cdot (\phi + 2c)}{16 E_c \cdot I_c} \quad (2)$$

ここに、 E_c : クリープを考慮したヤング係数
 I_c : 単位厚さの円筒の断面 2 次モーメント
 また、式 (1) を用いることによって、腐食量と腐食電流 (定電流 : 0.7A) から通電日数を算出して、腐食量とひび割れ幅の関係に時間軸を与え、通電開始からの時間と腐食量、ひび割れ幅を算出した。

5.2 解析精度の検討

図 - 8 に A シリーズのひび割れ幅 - 通電日数の関係について、実験値 (A-3, A-5) と解析値を示す。A-2 ~ A-5 は通電日数を変えた以外は全て等しいのでひび割れ幅の推移もほぼ等しくなった。解析値を比較してみると両者は通電 3 週まではほぼ一致しているが、3 週以降は実験結果との差が急激に大きくなった。これは PC 鋼線の腐食による影響であると考えられる。本モデルでは PC 鋼線の影響は考慮されていない。また、実験値よりも解析値のひび割れ発生が遅くなっているのは、本モデルでは腐食は均一に発生すると仮定しているのに対し、腐食促進試験ではひび割れが発生するまではチタンメッシュ方向へ局所的に錆が発生しているためで、

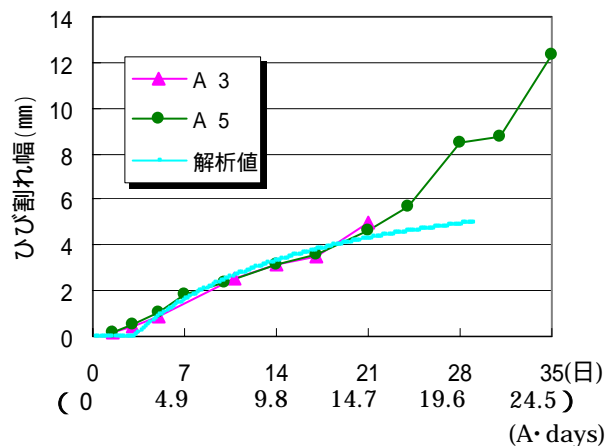


図 - 8 A シリーズと解析値の比較

解析値よりも q_1 の値が局所的に大きくなり、その分ひび割れの発生も早くなる。ひび割れ発生後は酸素と水分により均一腐食へ移行していく。

また、解析値は4週を超えたところで終了している。これはシースの体積が全て錆化したためであるが、はつり出しによる腐食性状の観察の結果、通電4週でシースがほぼ全て錆化していることが同様に確認できた。

5.3 解析結果

図-9は上で述べた解析モデルを用いて、供試体A-3についてシースの腐食量をひび割れ幅の関係を示したものである。同図より、PC梁のシースの腐食量がひび割れ幅に及ぼす影響の程度が概略的に求めることが可能である。これによりPC橋梁におけるひび割れ幅等からシースの腐食量が推定可能である。

6. まとめ

PC梁の鋼材腐食に影響を与える要因を明らかにするために、通電による腐食促進試験を行った。また、腐食に伴う一連の挙動のモデル化を行い、積算電流量、腐食量、ひび割れ幅を解析によって算出した。本研究から以下のことが言える。

- 1) 腐食ひび割れ幅について考えるとき、錆汁発生の有無がひび割れ幅に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。
- 2) 本実験から鋼材の腐食はグラウトの塩分濃度よりも、発生したひび割れ幅の大きさが大きな影響を及ぼすことが明らかになった。これより、今後はひび割れの拡大に伴う酸素と塩水の供給の増加が鋼材腐食に及ぼす影響についても定量的な検討が必要である。
- 3) 断面および電流が一定で、シースの径のみが変化した場合、腐食電流はシースの表面積に反比例することから、シースの径が大きいほうがひび割れは小さくなることが明らかとなった。
- 4) 通電日数の増加とともにPC梁の耐力、終局変位はとも減少し、一定の関係が認めら

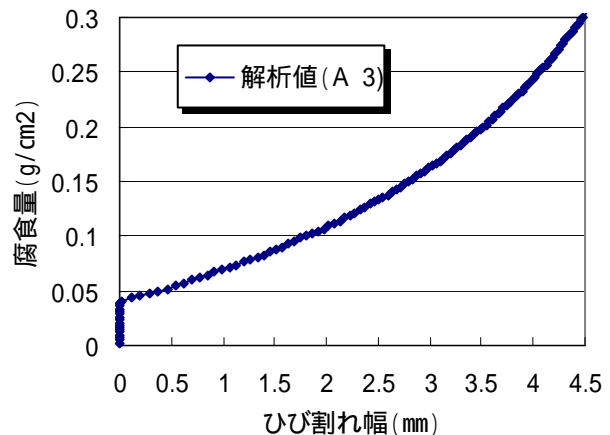


図-9 ひび割れ幅 - 腐食量関係

れた。このため腐食促進試験における積算電流量と実構造物における供用年数と腐食による劣化程度との関係を今後明らかにする必要がある。

- 5) ひび割れ発生モデルを用いた解析を行った結果、腐食促進試験をある程度数値的に求めることが出来た。これにより積算電流量とひび割れ幅からシースの腐食量を推定することが可能である。

謝辞

本研究を行うにあたって、鈴木金属工業(株)の近藤順氏よりPC鋼材を、また(株)ニッカイの峰松敏和氏よりチタンメッシュを御提供頂いた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷口 博胤, 睦好 宏史, 今野 洋一, Ha MINH, 二井谷 教治: グラウトの充填度がPC鋼材腐食に及ぼす影響, PC構造物の現状の問題点とその対策, 第2部シンポジウム論文集, pp309-314, 2003.6
- 2) 堤 知明, 安田 登, 松島 学, 大賀 宏行: 腐食生成物によるひび割れ幅のモデルに関する研究, 土木学会論文集, 585, V-38, pp69-77, 1998.2
- 3) 須田 久美子ほか: 腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, 1, 1992