

論文 ポストテンション方式 PC 構造物への電気防食法の適用に関する実験的研究

山口 明伸^{*1}・前田 聰^{*2}・好本 健一^{*3}・武若 耕司^{*4}

要旨: 電気防食を PC 構造物へ適用する場合、過防食状態における PC 鋼材の水素脆化の危険性があるため、その防食状態には特に留意する必要がある。しかしながら、ポストテンション方式の PC 構造物を対象とする場合、シースの存在やシースの初期欠陥、あるいはグラウトの充填不足等によるシース内部の残存空隙等が、内部鋼材の通電環境および特性に多大な影響を及ぼすことが考えられるが、未だ十分な把握に至っていない。そこで本研究では、実験的検討より、各種要因がポストテンション PC 構造物の電気防食効果に及ぼす影響を明確にするとともに、適用時の留意点についての考察を加えた。

キーワード: 電気防食法, PC 構造物, ポストテンション, シース, PC 鋼棒

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の塩害による被害が多数報告されており、その耐久性能評価手法の構築が強く求められている。特にプレストレスコンクリート(PC)構造物の場合、塩害等による鋼材の劣化が構造物全体の耐力の直接的な低下を意味するため、その要求性能を確保するために、施工から供用終了までの期間時々刻々と変化する構造物の耐久性能を常時正しく評価しながら維持管理を行っていくとともに、状況に応じて適切な補修・補強を行うことが必要となると考えられる。

著者らは、塩害を受ける鉄筋コンクリート(RC)構造物の補修工法として、鋼材の腐食反応に直接関与してこれを停止させることのできる電気防食法に注目し、その効果について検討してきた¹⁾。その結果、その防食性や防食システムの維持管理等の観点から高い有用性があることを確認している。従って、この工法を PC 構造物の維持管理対策に盛り込むことができれば、塩害環境下の PC 構造物に対してより幅広い維持管理計画の策定が可能になるものと考えられる。ただし、電気防食法を PC 構造物へ適

用する場合に問題となるのは、構造物の劣化状況あるいは環境条件を考慮したより綿密な防食管理を行わないと、水素脆化等の問題が生じる危険性が高くなることである。にも拘わらず、ポストテンション方式におけるシースの存在を始め、各種要因が PC 構造物の通電特性や防食効果に及ぼす影響については未だ不明な点が多いのが現状である²⁾。

そこで本研究では、主にポストテンション方式 PC 構造物の通電特性を解明することを目的として、部材の各種環境および内部条件が電気防食効果に及ぼす影響についての実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験用 PC 供試体の概要

供試体用コンクリートには、早強ポルトランドセメント、富士川産川砂、始良産碎石を使用した。またシース内の充填用グラウトには、上記セメントに加え、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤とエトリンガイド系膨張材を使用している。それぞれの配合を表-1に示す。

供試体は、図-1に示す 600×100×100mm の

*1 鹿児島大学工学部 助手 工学部海洋土木工学科 工博（正会員）

*2,*3 鹿児島大学大学院 理工学系研究科（正会員）

*4 アジア工科大学院 土木講座 助教授 工博（正会員）

角柱であり、上面に陽極用チタンメッシュが埋め込んでいる。また、PC鋼棒とシースは試験体両側の支圧鋼板を通じて電気的に導通している。また、シースは $\phi 42\text{mm}$ スパイラルタイプを使用して供試体下面からかぶり厚 20mm の位置に設置し、PC鋼棒は $\phi 9\text{mm}$ (降伏応力 1438N/mm^2)を使用してシース中央に設置している。さらに、PC鋼棒の電位測定用架橋として、測定個所にグラウトを充填した $\phi 13 \times 35\text{mm}$ の円柱塩化ビニール管(シースを貫通)を供試体下面側からシースを貫通して埋設してある。また、支持鋼板の腐食の影響を除くために、供試体の両端から厚さ 5cm の範囲をエポキシ樹脂によるコーティングを施した。

2.2 検討要因と測定項目

種々の内部および環境条件が、PC供試体の通電特性と電気防食効果に及ぼす影響を明らかにするために、表-2に示す要因と水準について検討した。電気防食試験における通電回路は図-2に示す通りであり、チタンメッシュを陽極、PC鋼棒およびシースを陰極として、検討シリーズごとの供試体を、同一電源に並列回路で接続している。通電に際しては、同一回路に接続した供試体の中で、シース分極量が最大値を示す供試体を基準とし、そのシース分極量が 100mV 程度となるよう電圧を設定した。

各検討シリーズについての補足説明を以下に示す。シースの有無については、プレテンション方式とポストテンション方式の供試体による比較検討を行った。シースの欠損は、供試体左端部から 150mm の位置のシース上部を幅 50mm で所定の長さだけ切り取ることにより表現した。シース内に空隙の供試体は、グラウトの充填不足を想定したものであり、シース内部に円弧断面(全断面に対して上部 $1/4$ 程度)で長さ 50mm の空隙を設けている。曝露環境は、乾燥(RH約 60%)、塩水湿潤(NaCl5%塩水湿布)、塩水噴霧(NaCl5%塩水噴霧6時間・RH80%18時間)の3種類を設定した。緊張力は、PC鋼棒の降伏応力に対して 0 、 40 、 80% の3種類を設

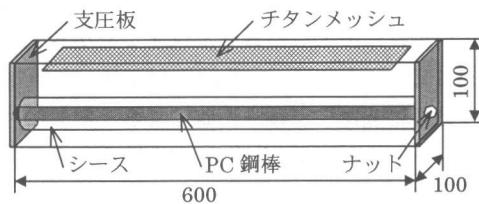
表-1 コンクリートおよびグラウトの配合

【コンクリート】

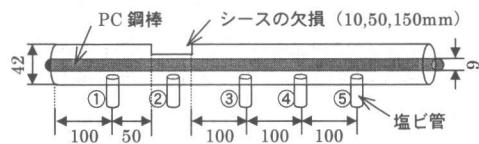
W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
		W	C	S	G
55	45	204	370	798	976

【グラウト】

W/C (%)	単位量 (kg/m^3)			
	W	C	SP	膨張材
40	544	1324	14	70



(a) 試験体全体



(b) シース部分 (①～⑤は測定位置)

図-1 試験体概要

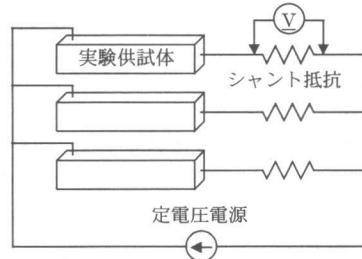


図-2 通電回路の概要

表-2 要因と水準

要因	水準
通電の有無	無、有
曝露環境	乾燥、塩水湿潤、塩水噴霧
シースの有無	無(プレテン)，有
シースの欠損	無, 10, 50, 150 (mm)
シース内の空隙	無, 50 (mm)
シースの錆び	無, 一部 (50mm), 全面
PC鋼棒の緊張力	無, 40%, 80%
塩分の混入	無, 有 (4.5kg/m^3)

定した。塩分混入有りの場合は、コンクリート打設時に $4.5\text{kg}/\text{m}^3$ の NaCl を混入している。シースの錆びについては、シースを予め約 1 ヶ月間屋外に放置し、表面に赤錆がほぼ均一に発生させた状態で使用した。

全シリーズとも測定項目は、陽極電流密度、PC 鋼材とシースの分極量、PC 鋼棒とシースの E-logI 試験等を取り上げ、曝露および通電期間中について経時的に測定した。照合電極には、Ag/AgCl 電極を使用し、図-1 中に示す 100mm 間隔の各測定ポイントで測定を行った。ただし、シースに欠損等のある場合は、測定ポイント 2 は欠損部中央、測定ポイント 3 以降は欠損の終了位置から 100mm 間隔としている。なお、試験は全て $30 \pm 2^\circ\text{C}$ の温度環境下で行っている。

3. 結果と考察

3.1 シースの存在の影響

まず、ポストテンション方式の最も特徴的な点であるシースに関して、その存在が通電特性と電気防食効果に及ぼす影響の検討を行った。図-3 は、シース有りのポストテンション方式とシース無しのプレテンション方式の供試体の E-logI 試験結果を示したものである。この結果から、ポストテンション方式の場合、シースと PC 鋼棒の両方に防食効果が得られていることが分かる。ただし、プレテンション方式と比較すると、同一の陽極電流密度における分極量は減少しており、防食効果が低下していることが分かる。これは、シースの存在により陰極側の電流密度が実質的に低下したためと考えられる。これは、ポストテンション PC 部材への電気防食適用に際しては、プレテンション PC 部材や RC 部材の場合よりも陽極電流密度を増やす必要があることを示しており、例えば 100mV シフト基準³⁾で電気防食法を施す場合、陽極電流密度を 2.5~3 倍程度に増加させる必要があることになる。

3.2 シース欠損部の影響

図-4 は、シース欠損がある供試体の陽極電

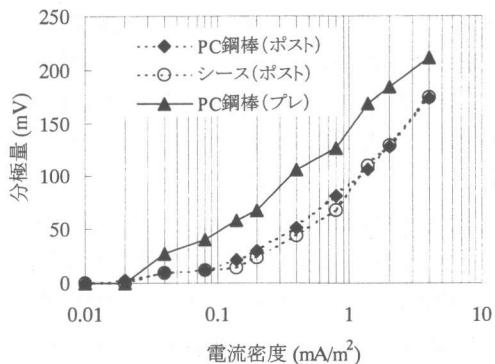


図-3 E-logI 試験結果

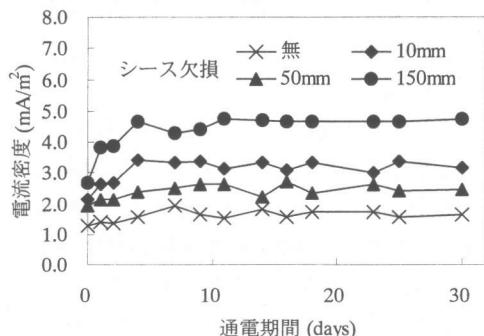
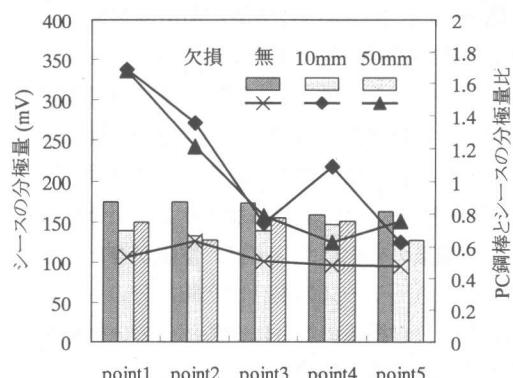


図-4 陽極電流密度の経時変化（シース欠損）



注) 棒 : シースの分極量 (左軸)
折れ線 : PC 鋼棒の分極量/シースの分極量 (右軸)
欠陥の位置 : point2
(分極量は通電 7~30 日目までの平均)

図-5 シースと PC 鋼棒の分極量（シース欠損）

流密度の経時変化を示したものである。また、図-5は、シース分極量（棒グラフ）とPC鋼棒分極量のシース分極量に対する比（折れ線グラフ）を示したものである。なお、各分極量は通電7~30日目までの平均値である。

図-4から、シースの欠損が大きくなるに伴い、電流密度が増加する傾向となることが分かる。一方、図-5に示すように、欠損を有するシース自体の分極量は大きく変化していないにも拘わらず、欠損付近のPC鋼棒の分極量は局部的に増加し、同一電流密度におけるシースとPC鋼棒の分極比が場所によって変動する結果となった。これは、欠損部分を通じてPC鋼棒に流れ込む電流量等の影響により、PC鋼棒の防食電流量が局部的に増加したためと考えられる。

通常、何らかの原因により部材内のシースが一部欠損している場合、シース内部に腐食因子が侵入しやすくなるため、その付近のPC鋼棒は腐食する危険性が高まると考えられる。図-5の結果は、このような腐食の危険性の高い部分に対しては、防食効果が局部的に高まるることを示しており、ポストテンション方式PC部材に電気防食法を適用する上で非常に有利な現象であると考えられる。

3.3 シース内部の空隙の影響

図-6に、シース内に空隙がある供試体の陽極電流密度の経時変化を示す。また図-7には、各測定位置のシースとPC鋼棒に対する空隙の影響を、空隙がある場合と無い場合の分極量変化率として表した。まず、陽極電流密度は、空隙が存在することにより増加することが分かる。また分極量の変化については、空隙が存在することにより、シースの場合は空隙部分の分極量が低下し、PC鋼棒の場合は空隙部分の分極量が増加する傾向があることが分かる。

これは、内部空隙によって酸素に触れているシースの腐食環境性が局部的に高まり、その部分の防食効果が低下したことが主な原因であると考えられる。従って、シース内部に空隙がある場合、シースの局部的な腐食や、その後のPC

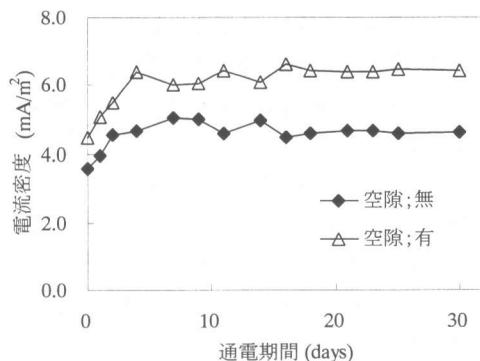
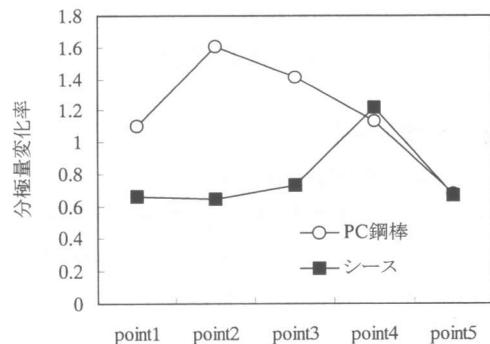


図-6 陽極電流密度の経時変化（空隙）



分極量変化率：分極量（空隙有） / 分極量（空隙無）

空隙の位置：point2

（分極量は通電7~30日目までの平均）

図-7 分極量の変化率（空隙）

鋼棒の腐食への発展等の恐れがあるため、電気防食による管理を強化する必要がある。

なお、シースの分極量が空隙部分で局部的に低下する現象を逆に利用すれば、通電によってシース内の空隙個所を非破壊的に推定できる可能性がある。

3.4 曝露環境の影響

図-8に、曝露環境ごとの陽極電流密度の経時変化を示す。また、図-9にPC鋼棒の分極量を通電7~30日の平均値で示した。陽極電流密度は、塩水噴霧および塩水湿潤では同程度であるが、乾燥状態では低下する傾向にあった。この

時のPC鋼材の分極量は、電流密度の傾向とは逆に、塩水湿润では小さな分極量を示し、乾燥状態では大きな分極量を示している。これは、乾燥状態の場合は、他に比較して含水量が少ないので分極抵抗が大きくなつたためと考えられ、ポストテンション方式PC供試体でもRC供試体における既往の研究結果³⁾と同様の結果であることが分かった。また、塩水噴霧環境の場合には、欠損付近のPC鋼棒分極量が増加するのに対して、乾燥や湿润の場合はその傾向が表れておらず、曝露環境の影響の大きさが示されている。

3.5 その他の要因の影響

図-10に、PC鋼棒の緊張力を変えた場合の通電30日目におけるシースおよびPC鋼棒の分極量を示す。また、その時の陽極電流密度も併せて示した。プレストレスト方式PC供試体における既往の研究⁴⁾では、PC鋼棒の緊張力が増加すると、それに伴って分極抵抗性が低下する傾向があることが報告されているが、今回の実験結果ではそのような傾向は認められなかった。

図-11に、シースの腐食状況とコンクリートの塩分含有状況が異なる場合の通電30日目におけるシースおよびPC鋼棒の分極量を示す。また、その時の陽極電流密度も併せて示した。

まず、シースの初期腐食がない供試体（「健全・無」および「健全・有」）で、含有塩分の有無の影響をみてみると、塩分が含有された場合、陽極電流量が増加し、シース・PC鋼棒とともに分極量が低下していることがわかる。これは、塩分によりシースとPC鋼棒がともに腐食し易い環境にあるためであると考えられる。従って、塩分が混入されている部分は、そうでない部分に比べて防食効果が低下する可能性がある。

また、シースが初期腐食している供試体（「健全・有り」「一部・有」「全面・有」）では、分極量に大きな変化が認められないものの、腐食面積が大きくなるに従って陽極電流密度が大きくなっていく結果となった。これは、シース腐食部の分極抵抗性が低下し、その影響がPC鋼棒

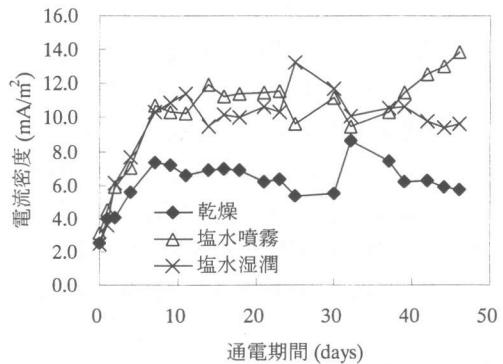
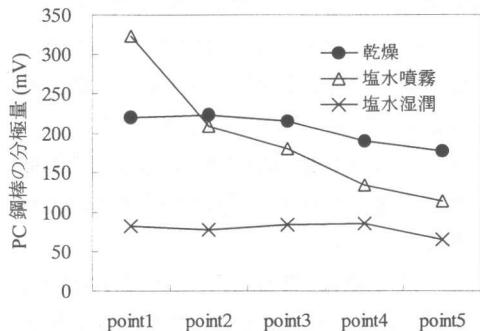
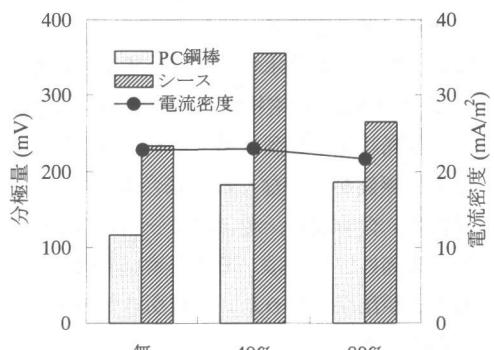


図-8 陽極電流密度の経時変化（曝露環境）



欠損の位置：point2
(分極量は通電7~30日までの平均)

図-9 PC鋼棒の分極量（曝露環境）



注) 棒：分極量（左軸）
折れ線：陽極電流密度（右軸）
測定位置：point4（通電30日目）

図-10 分極量と陽極電流密度（緊張力）

の分極量にも影響していると考えられる。

以上のように、緊張力、含有塩分、およびシース腐食等の要因がシースとPC鋼棒の分極特性に与える影響については、定性的な傾向は得られたものの、今回の実験範囲では十分な解明には至らなかった。これらの要因は、ポストテンション方式特有の問題を引き起こす可能性もあるため、今後より詳細な検討が必要である。

4.まとめ

本研究では、部材の各種環境および内部条件がポストテンション方式PC構造物の電気防食効果に及ぼす影響についての実験的検討を行った。その結果、以下のような結論が得られた。

- 1) ポストテンションPC部材への電気防食適用に際しては、シースの存在により、プレテンションやRC構造物の場合よりも陽極電流密度を2.5~3倍程度増加させる必要がある。
- 2) シースに欠損がある場合、シース自体の分極量には大きな変化が生じないが、欠損付近のPC鋼棒分極量は局部的に増加することが明らかとなった。
- 3) シース内に空隙がある場合、空隙付近のシース分極量が局部的に低下すること分かった。この現象は、空隙部検出法として利用できる可能性がある。
- 4) コンクリートの含水状態によってシースおよびPC鋼棒の通電特性は大きく異なるため、乾燥状態や湿潤状態ではシース欠損等の影響評価ができなくなる場合がある。
- 5) 緊張力、含有塩分、およびシースの腐食部等の要因については、その影響を明確にすることが出来なかった。今後引き続き検討する必要がある。
- 6) ポストテンション方式PC部材の通電管理をシースの分極量で行う場合、上記の要因によってシースとPC鋼棒の通電特性がそれぞれ単独で変化する場合があるので十分な注意が必要である。

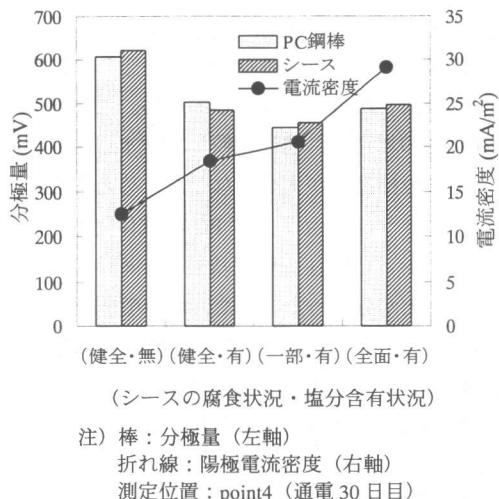


図-11 分極量と陽極電流密度（腐食状態）

謝辞:本研究を遂行するに当たり、松本進教授（鹿児島大学）に有益なご助言を頂きました。ここに深謝いたします。また、実験に際して、上原尚也助手、前村政博技術官、柴田泰和君（鹿児島大学）、川俣孝治氏（住友大阪セメント株）、馬庭秀士氏（日研高压コンクリート株）のご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

なお、本研究は、平成11年度科学研究費補助金（基盤研究B）（研究代表者：山口明伸）によるものであることを付記します。

参考文献

- 1) 例えば、山本誠、武若耕司、川俣孝治：電気防食による防食電流分布に関する実験的検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.2, pp.1039-1044, 1999
- 2) 峰松敏和、堺孝司、池田勝日輝、石川光男：水素発生領域におけるプレストレストコンクリートの電気防食、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16, No.1, pp.841-846, 1994
- 3) 土木学会コンクリート委員会腐食防食小委員会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向、コンクリート技術シリーズNo.26, 土木学会, 1997
- 4) 武若耕司：塩害を受けたPC構造物の補修工法における電気防食の利用に関する研究、平成4年度科学研究費補助金（一般研究C）研究成果報告書、1993