論文 PC 部材中のシース腐食とコンクリート表面のひび割れに関する実験 的検討

鈴木 佑典^{*1}·近藤 拓也^{*2}·山本 貴士^{*3}·宮川 豊章^{*4}

要旨:ポストテンション方式 PC 桁を想定した供試体を作製し,鋼製シースの腐食を電食により模擬した。電 食はコンクリートの外的塩害を模擬した回路で行い,グラウト充填率と積算電流量を要因とした。また,グ ラウト充填率によるコンクリートの内部応力状態を推定するため,ひずみゲージを取り付けたアクリル製リ ングを供試体内部に埋め込み,そのひずみの経時変化を計測した。その結果,コンクリート表面のひび割れ 幅は、シース質量減少率とグラウト充填率に大きく関係があることがわかった。また、シース内部に空隙が 存在する場合には、シースの腐食膨張圧がコンクリートに伝達されにくいことを実験的に示した。 キーワード:ポストテンション方式 PC,電食、グラウト充填率,ひび割れ、腐食減少量

1. はじめに

現在、長大橋を中心に使用されているポストテンショ ン方式のプレストレストコンクリート(以下 PC と表記 する) 桁は, PC の特性上, 高強度コンクリートを使用す ることが多く、耐久性に富む構造形式であるとされてい る。しかし近年、海岸付近に建設されたポストテンショ ン方式 PC 桁の塩害による早期劣化事例¹⁾を代表とした, PC 桁の耐久性に関する様々な問題が提起されるように なってきた。しかし, ポストテンション方式 PC 桁では, コンクリートとPC鋼材との間にシースが存在するため, コンクリート表面から確認できるひび割れと PC 鋼材の 腐食との関連性については、力学的なメカニズムを含め て不明な点が多い。また、ボンドタイプのポストテンシ ョン方式 PC 桁において、シース内にグラウトが十分に 充填されていない場合がある²⁾。原因はグラウト注入時 のブリーディング, グラウトの流動性不足, PC 鋼材の過 密配置や曲線配置等多岐にわたる。これらによって生じ た空隙は、コンクリート表面に発生するひび割れの挙動 をより複雑なものにすると考えられる。

近藤ら³は、コンクリート表面にひび割れが発生する のは鋼製シースの外側が腐食した場合であり、PC 鋼材が 腐食した場合はグラウトに発生したひび割れが鋼製シ ースにより遮られると報告している。また筆者ら⁴⁾は、 プレストレス導入の有無によってコンクリート表面に 発生するひび割れの性状に明確な差異は表れない可能 性を示している。これら一連の研究に基づき、シース腐 食によるひび割れ発生機構を明らかにするため、PC 鋼材 を挿入せずにコンクリートの外的塩害を模擬した電食 試験を実施し、シース内のグラウト充填率がコンクリー ト表面に発生するひび割れに与える影響について検討 を行った。また、電食試験実施時にコンクリート内部に 発生するひずみを測定し、コンクリート内部応力の相違 について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験要因

本試験の実験要因を表-1 に示す。実験要因はグラウト充填率,積算電流量とした。グラウト充填率75%とは, 図-1 に示すように充填高さがシース径の3/4の状態を示している。甲シリーズでは各要因につき2体ずつ,乙シリーズでは各要因につき1体の供試体を作製した。

2.2 供試体諸元

甲シリーズに用いた供試体の断面図および側面図を 図-2に示す。文献³⁾と同配合の供試体としたため、コ ンクリートの水セメント比は40%、グラウトの水セメン ト比は55%とした。使用材料を表-2に示す。供試体は

	試験要因	内容
ひび割れ幅 測定試験 (甲シリーズ)	グラウト 充填率(%)	100, 75, 50, 25, 0
	積算電流量 (hr・A)	40, 60, 80, 100
内部応力状態 推定試験 (乙シリーズ)	グラウト 充填率(%)	100, 75, 25, 0
	積算電流量 (hr・A)	40

表-1 試験要因一覧

*1京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 修士課程 (正会員)
*2西日本旅客鉄道(株) 鉄道本部施設部土木技術課 課員 修士(工学) (正会員)
*3京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 准教授 博士(工学) (正会員)
*4京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 教授 工学博士 (正会員)







表--2 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
混和剤	AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物と
	ポリオールの複合体)
シース	鋼製スパイラルシース(φ 40mm)



100×100×400mm の角柱供試体とし、内部に φ40mm の 鋼製シースを配置した。7 日間の湿布養生の後、片方の 供試体端部に厚さ 5mm のゴム板を貼り付けて止水処理 を施し、もう片方の端部からグラウトを所定の量だけ注 入した。その後ただちにゴム板を貼り付けて止水処理を 施した。

乙シリーズ供試体の断面図および側面図を図-3 に示 す。乙シリーズの供試体は、形状寸法は甲シリーズの供 試体と同一であるが、内部にアクリル製のリングを埋め 込んだものとした。リングの形状寸法を図-4 に示す。1 個のリングにつき、上方に1枚、側方に2枚のひずみゲ



図-4 アクリル製リング(単位:mm)



図-5 電食回路模式図(断面図)



図-6 外観調査および供試体切断概要図(単位:mm)

ージを取り付けた。リングの固定には \$ 3mm の竹籤を 4 本用いた。

2.3 電食方法

甲シリーズ、乙シリーズの電食回路の模式図を図-5 に示す。各供試体を質量パーセント濃度 5%の NaCl 溶液 の入ったアクリル製水槽内に設置し、シースを陽極、供 試体の底面に設置した銅板を陰極として通電した。なお、 NaCl 溶液は供試体底面に接する程度の量を水槽に入れ、 適宜補充した。甲、乙両シリーズともに、電流密度はシ ース表面積に対して 4.0A/m²とした。また、通電は電食 が終了するまで一定の電流密度で実施した。

2.4 調査項目

(1) 外観調査

甲シリーズの電食終了後,図-6に示すように供試体 表面に50mm間隔でメッシュを切り、メッシュ線とひび 割れとが交差する7箇所,すなわち供試体端部からの距 離50mm,100mm,150mm,200mm,250mm,300mm, 350mmにおけるひび割れ幅を測定した。測定には、クラ ックスケール(精度:0.1mm)を用いた。また、供試体 の両端50mmを切り落とし、残った300mm区間を100mm ずつにコンクリートカッターで切断して、切断面に発生 したひび割れの観察を行った。

なお、本論文においては、測定した7箇所のひび割れ 幅の平均値を平均ひび割れ幅、その中の最大値を最大ひ び割れ幅と定義し、同一要因2体となる甲シリーズでは、 さらに、平均ひび割れ幅および最大ひび割れ幅それぞれ についての2体の平均値を算出した。また、複数の面に ひび割れが発生した供試体の場合には、供試体端部から の距離毎にひび割れ幅を合計した。例えば、図-6の供 試体の場合には、端部からの距離50mm でのひび割れ幅 は B1 と S1 の和とした。ひび割れが発生していない箇所 については、ひび割れ幅 0mm として扱った。

(2) シースの質量減少率

甲シリーズの供試体を切断後、シースを取り出し、 JCI-SC1 法に基づいて除錆した後、質量を測定した。ま た、シースの長さを測定し、その値にシースの健全時単 位長さ質量(0.33g/mm)を乗じて健全時の質量とし、除 錆後の質量との差を質量減少量とした。質量減少量を健 全時の質量で除した値を質量減少率とした。シースの腐 食が激しく取り出しが不可能であった部分は、質量減少 率は100%とした。1体の供試体から採取される3分割さ れたシースの質量減少率の平均値を、その供試体におけ るシース質量減少率とした。また、同一要因2体の平均 値を算出した。

(3) アクリル製リングのひずみ

乙シリーズでは、アクリル製リングに取り付けたひず みゲージで、積算電流量が100hr・Aに達するまで1時 間毎にひずみを計測した。コンクリートとアクリル製リ ングとの一体性は、事前にアクリル棒を埋め込んだ供試 体で曲げ試験を行い、そのひずみ分布を測定することで 十分確保できていることを確認した。3 断面の上方ひず みゲージで計測したひずみの平均値をその供試体の上 方ひずみ、1 断面につき2枚、計6枚の側方ひずみゲー ジで計測したひずみの平均値をその供試体の側方ひず みとした。



3.1 グラウト充填率とひび割れ性状の関係

3. 実験結果および考察



甲シリーズにおいて, 電食終了後にコンクリートの表 面に発生したひび割れのスケッチ図の一例を図-7に, 供試体切断後の断面のスケッチ図の一例を図-8 に示す。 また、電食によるひび割れ幅の分布の様子を図-9に示 す。グラウト充填率 100%および 75%の供試体では、積 算電流量にかかわらずすべての供試体において中央 300mm 区間でひび割れが発生していることが確認でき る。しかし、グラウト充填率 50% および 25%の供試体に ついては、ひび割れは確認できたものの必ずしも中央 300mm 区間全長にわたってひび割れが発生したわけで はなかった。これは、グラウト充填率 50%および 25%の 供試体において、端部からの距離 350mm でのシース内 のグラウト高さがほぼ0となっており、グラウト充填界 面に軸方向の勾配が発生していたためと考えられる。ま た、グラウト充填率 0%の供試体については、ひび割れ は確認できなかった。

供試体切断後に断面を観察したところ,積算電流量が 40hr・A および 60hr・A の供試体については、シース内 のグラウトにひび割れは確認できなかったが,積算電流 量が 80hr・A および 100hr・A の供試体については、グ ラウトにもひび割れが確認できた。また、コンクリート に入ったひび割れとグラウトに入ったひび割れの起点 は、シースの同一箇所であった。グラウト充填率毎の積 算電流量と平均ひび割れ幅および最大ひび割れ幅との 関係を図-10に、シース質量減少率と平均ひび割れ幅お よび最大ひび割れ幅との関係を図-11に示す。なお、今 回の実験では、印加した積算電流量から計算される電食 効率は 20~40%であった。積算電流量の増加に伴って平 均ひび割れ幅および最大ひび割れ幅が増加する傾向を



示した。また,シース質量減少率の増加に伴って平均ひ び割れ幅および最大ひび割れ幅が増加する傾向を示し た。さらに,グラウト充填率が高いほど平均ひび割れ幅 および最大ひび割れ幅が大きくなった。積算電流量と平



(甲シリーズ供試体)

均ひび割れ幅との関係のグラフにおいて,積算電流量 40hr・Aから100hr・Aまでの回帰直線の傾きを表-3に

表-3 回帰直線の傾き

グラウト充填率(%)	回帰直線の傾き
100	0.0265
75	0.0129
50	0.0080
25	0.0003
0	0.0000

(a) 上方ひずみ

図-12 アクリル製リングのひずみ測定結果 (乙シリーズ供試体)

示す。積算電流量 40hr・A の段階では平均ひび割れ幅に 大きな差はないものの,それ以降のひび割れ幅開口速度 にグラウト充填率は大きく影響を与えていることがわ かる。

3.2 グラウト充填率と内部圧力発生状況との関係

乙シリーズにおいて、グラウト充填率 0%以外の供試 体において、コンクリート表面でのひび割れを確認する ことができた。グラウト充填率毎の上方ひずみおよび側 方ひずみの測定結果を図-12に示す。グラウト充填率が

高いほど、上方ひずみおよび側方ひずみが大きくなる傾 向を示した。これは、グラウト充填率が高いほど、シー スの腐食膨張圧がコンクリートに有効に伝達している ことを示していると考えられる。一方で、グラウト未充 填によるシース内部の空隙は、コンクリートへの腐食膨 張圧の伝達を阻害する大きな要因になっていると考え られる。

3.3 ひび割れ発生メカニズムの考察

ひび割れ幅測定試験および内部応力状態推定試験の 結果から、コンクリート表面に発生するひび割れに大き く関係する要因が、「シースの腐食量」および「グラウ ト充填率」の2点であることが明らかとなった。コンク リート表面に発生するひび割れメカニズムの概念図を 図-13に示す。鋼製シースの外側が塩化物イオンや中性 化等の劣化因子を原因として腐食することにより、膨張 圧が生じると考えられるが、その際、シース内のグラウ ト充填率が高いほど、シースの腐食膨張圧がコンクリー トに有効に伝達され、コンクリートに引張応力を発生さ せてひび割れを生じさせると考えられる。しかし、シー ス内にグラウトが充填されていない場合には、シースの 腐食膨張圧がシース内部の空隙に吸収され、コンクリー トに引張応力が伝達されにくい、もしくは伝達されない ために、コンクリートにひび割れが発生しないと考えら れる。

実構造物におけるシースに沿ったひび割れに対する 健全度判定手法の例として,鉄道構造物では,鉄道構造 物等維持管理標準・同解説⁵⁾を用いて構造物の健全度判 定を行っている。同書では,鋼製シースに沿ったひび割 れに対する健全度判定例が示されているが,それは,ひ び割れ発生以降,PC 鋼材の腐食抵抗性が低下することに 着目して作成されたものであり,鋼製シース内のグラウ ト充填には着目されていない。本研究では、例えばグラ ウト未充填が比較的多く確認される PC 桁端部の定着部 付近におけるシースに沿ったひび割れへの着目等によ って、同一桁で同一かぶりを有する箇所での目視による グラウト充填度判定を簡易的に行うことができる可能 性を示したと考えられる。

4. まとめ

ポストテンション方式 PC 桁中のシース腐食を模擬し た電食を行い,その結果発生するひび割れの挙動につい て実験的に検討した。得られた結果を以下に記す。

(1) 鋼製シースを電食した場合,グラウト未充填の場合を除いて、コンクリート表面にひび割れが発生することが確認された。ひび割れ幅はシースの質量減少率が大きいほど、またグラウトの充填率が高いほど大きくなる傾向があった。

(2) コンクリート内に発生するひずみを測定した結果, グラウト充填率が大きいほど発生するひずみが大きい ことを確認した。

(3) これらのことから、グラウト未充填によりシース内に発生した空隙が、シースの腐食膨張圧を吸収することが考えられる。

5. 参考文献

- 例えば田中良樹,河野広隆,渡辺博志,木村哲士: ポストテンション PC 桁の塩害劣化と耐荷力,コン クリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.781-786, 2000.7
- 例えば(社)プレストレストコンクリート技術協会:
 PC グラウトの設計施工指針,2005.12
- 3) 近藤拓也,鈴木佑典,高谷哲,山本貴士,宮川豊章: ポストテンション方式 PC 桁の腐食ひび割れに関す る実験的検討,コンクリート構造物の補修,補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, Vol.10, pp.299-304, 2010.10
- 4) 鈴木佑典,近藤拓也,高谷哲,山本貴士,宮川豊章: ポストテンション式 PC のグラウト充填率がコンク リート表面ひび割れに与える影響の実験的検討,土 木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集, Vol.65, pp.V-338, 2010.9
- 5) 国土交通省鉄道局監修,(財)鉄道総合技術研究所 編:鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編 コンクリート構造物),2007.1