

論文 PC 部材のシースの腐食ひび割れに与えるシース径とかぶりの影響

西 弘*1・近藤 拓也*2・中谷 明登*3・大西 弘志*4

要旨: PC 構造物のシース腐食と PC ケーブルに沿ったひび割れの関係を探るために、シース径とシースのかぶり、およびグラウト充填状況を試験要因とし、シース腐食を模擬した電食試験を実施した。シース径とシースかぶりの比による影響を整理した結果、鉄筋腐食時と同様、その比が小さい場合は通電時間を増加させてもひび割れが電食面のみ 1 本発生する状況を示した。しかしその比を大きくすると、通電時間の増加とともにシース周辺に複数のひび割れが発生する傾向を示し、実橋の劣化事例でも見られるようなシース周辺に複数のひび割れが発生する傾向を再現できた。

キーワード: 鋼製シース、ひび割れ、シース径、シースかぶり、電食

1. はじめに

近年、国土交通省令により、道路橋などの構造物は 5 年に 1 回の定期点検が実施されている。しかし、PC 構造物の生命線であるグラウトの充填状況や PC 鋼材の腐食状況を評価する方法は、現行の定期点検要領には具体的に記されてなく、外観上で評価することは極めて難しい。

PC 橋特有の変状の一つである PC ケーブルに沿ったひび割れ性状は、実橋では図-1(a)のように定着付近のコンクリートが水の供給によりシースや PC 鋼材腐食により剥離し、支間中央に向かって PC ケーブルに沿ったひび割れが生じることが多く、このひび割れ幅の傾向は近似結果であるが、定着部側が大きく、支間中央に向かって徐々に小さくなっている (図-1(b))。このように実橋に生じているひび割れは一定の規則性を有していると考えられる。一方、近藤ら¹⁾、鈴木ら²⁾の一連の研究では、ポストテンション方式 PC 構造物において鋼製シースが腐食した場合、コンクリート表面に腐食ひび割れが発生する可能性が高いことが示されているが、これらの研究は同一断面諸元で実施されていることより、既設構造物の診断に用いることは不十分である。RC 構造物における腐食ひび割れは Brown³⁾の研究に代表されるように各種検討が実施され、鉄筋径とかぶり厚さによりひび割れ発生性状が異なることが明らかとなっている。既設構造物ではシース径やシースかぶりが部材や部位により異なることから、これら諸元を変更させた場合のひび割れ挙動を明らかにする必要がある。本研究はシースかぶりとシース径がシースの腐食によってひび割れ性状に与える影響を確認するために、小型供試体を用いてそれらを要因とした鋼製シースの電食試験を行った。その結果について論じる。

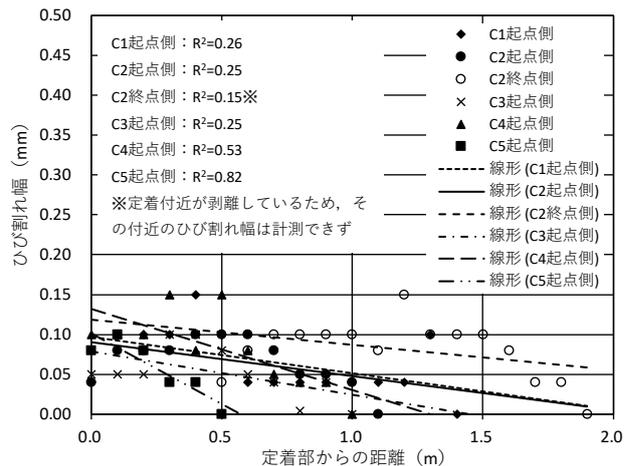
2. 試験概要

2.1 目的

PC ケーブルに沿ったひび割れの要因の一つは、定着部から劣化因子が侵入し、その付近のシースや PC 鋼材が



(a) PC 桁のひび割れ状況 (C2 ケーブル終点側)



(b) 定着部からの距離とひび割れ幅の関係

図-1 実橋での PC ケーブルに沿ったひび割れ状況

*1 (株) CORE 技術研究所 専務取締役東京支店長 (正会員)

*2 高知工業高等専門学校ソーシャルデザイン工学科 准教授 (正会員)

*3 高知工業高等専門学校専攻科 建設工学専攻

*4 岩手大学理工学部システム創成工学科 准教授 (正会員)

腐食することにより、次第に PC 部材に PC ケーブルに沿ったひび割れが発生すると考えられる。本研究ではこのひび割れ要因の初動となっているシースが腐食した場合のひび割れ性状について、シース径とシースかぶりの違いによる影響を明らかにし、橋梁点検などの実務における PC 橋の健全性評価の目安にすることを目的とする。

2.2 試験要因

本研究における試験要因を表-1 に示す。シースかぶり（以下「C」と表記）とシース径（以下「D」と表記）、Browne が実施した鉄筋腐食ひび割れの発生パターンに基づき³⁾、C/D が、0.67, 1.0, 1.5 となるように設定した。なお、図-1 の実橋での C/D は 1.27（設計値）である。グラウト充填率は、シース内にグラウトが充填されている場合と充填されていない場合の 2 種類設定した。積算電流量は、鋼製シースの腐食量がコンクリートひび割れに与える影響を確認するため 3 種類設定した。なお、供試体は 1 要因につき 2 体とした。

2.3 供試体諸元

本研究で使用する供試体断面を図-2 に示す。供試体は 100mm×100mm×400mm の角柱供試体とし、各試験要因に応じた位置にシースを配置した。鋼製シースは普通鋼板のものを用い、いずれの径のものも鋼板厚 0.25mm を使用した。使用したコンクリートの水セメント比は、文献 1) を参考として 40%、グラウトを充填する供試体については、水セメント比を 55% とした。

2.4 電食方法

コンクリート材齢は 7 日で、グラウト充填を実施する供試体にはグラウトを充填した。コンクリート材齢 14 日で電食を開始した。

電食回路図を図-3 に示す。質量濃度 3% の NaCl 溶液の入ったプラスチック容器内に設置し、シースを陽極、供試体の底面に設置した亜鉛めっき金網を陰極として電食を行った。供試体端部は、電食時にシース内への水の侵入を防ぐため、電食開始前に厚さ 5mm のゴム板を貼り付けして止水処理を行った。電流密度はシース表面積に対して 0.26A/m² 一定とした。そのため、D=20mm での電流量は 0.13A、D=30mm での電流量は 0.2A とした。また電圧については、ひび割れ発生以前についてはいずれの供試体についても 20V 程度として通電を行った。

2.5 調査項目

(1) ひび割れ確認

図-4 に示すように、供試体表面に 50mm 間隔で線を引き、その線とひび割れが交差する箇所でひび割れ幅を測定した。測定には目視によるクラックスケール（精度：0.1mm）を用いた。鈴木らは、同種の実験を行った結果、ひび割れ幅の合計は、腐食量と比例することが述べられているため²⁾、今回も同様に 7 箇所のひび割れ幅の平均

を平均ひび割れ幅と定義し、複数面にひび割れが発生した場合には、供試体端部から同一距離の電食面で発生したひび割れ幅の合計値を、ひび割れ幅とした。また、各測点におけるひび割れ幅が 0mm であっても、ひび割れ

表-1 試験要因一覧

試験要因	水準
かぶり	20mm, 30mm
シース径	20mm, 30mm
グラウト充填率	100%, 0%
積算電流量	20hr・A, 40hr・A, 60hr・A

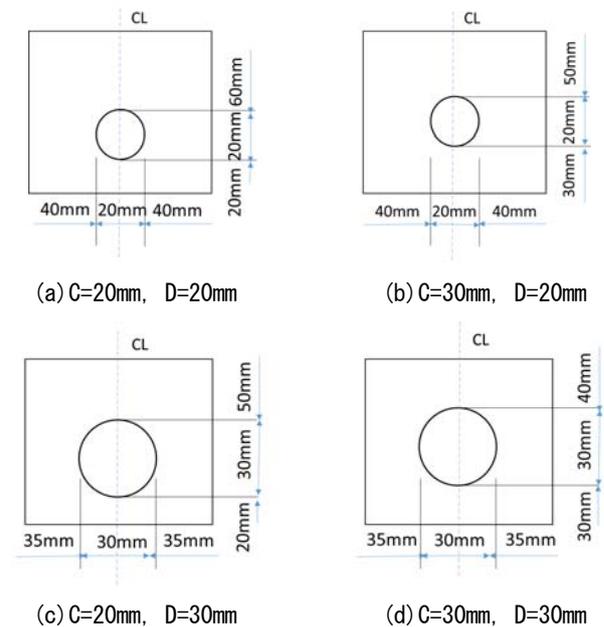


図-2 供試体断面図（シース径は内径で表示）

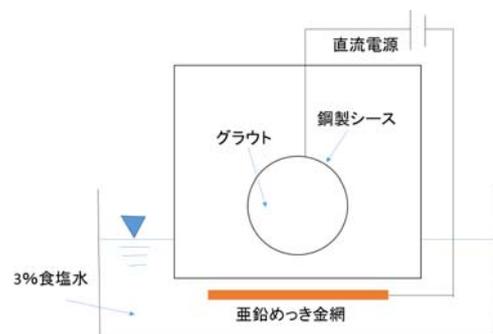


図-3 電食回路模式図

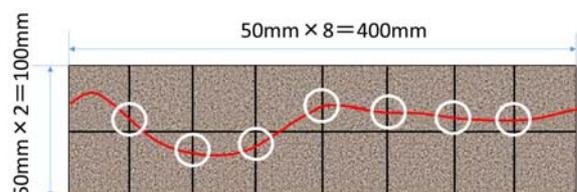


図-4 ひび割れ幅測定箇所（○が測定箇所）

幅測定箇所の母数には加算した。ひび割れ幅測定後、コンクリートカッターを用いて、供試体軸方向中央位置を切断し、そして、切断面に発生したひび割れの観察を行った。

(2) 鋼製シースの質量減少率

供試体切断後、コンクリートからシースを取り出し、シースの長さを測定した。その後、除錆し、質量減少率を計算した。除錆の方法については、JCI-SC1 法に準拠し、60℃の10%クエン酸二アンモニウム溶液に、取り出した鋼製シースを6時間浸漬して、素地を傷めないように腐食生成物を除去した。その後、質量の測定を行った。質量の測定精度は0.01gとした。同延長の健全鋼製シースの質量差を腐食減少量とし、腐食減少量と健全鋼製シース質量の比の百分率を質量減少率とした。

3. 試験結果

3.1 コンクリート表面のひび割れ性状

所定の期間電食を行った供試体の外観状況について、電食面の状況例を図-5に示す。グラウト充填率100%の供試体では、全ての試験パターンでひび割れが確認できた。一方で、グラウト充填率0%の供試体では、全ての試験パターンでシースの質量減少率は充填率100%と同程度であったが、コンクリート表面のひび割れは確認できなかった。グラウトが充填されていない場合に鋼製シースが腐食した場合、シースはグラウトが充填されていないシース内側に変形するため、コンクリートに腐食膨張圧が伝わらないことを筆者らは述べている⁴⁾が、シースカぶりやシース径が変化しても、シース腐食圧がコンクリートに伝わりにくいため、このような結果を示したものと考えられる。

コンクリート表面にひび割れが発生したグラウト充填率100%の供試体を対象とした、積算電流量と平均ひび割れ幅の関係を図-6に示す。1シリーズにつき2体の試験を行っているため、その結果について示している。評価については、電食試験であること、近藤ら¹⁾の研究に

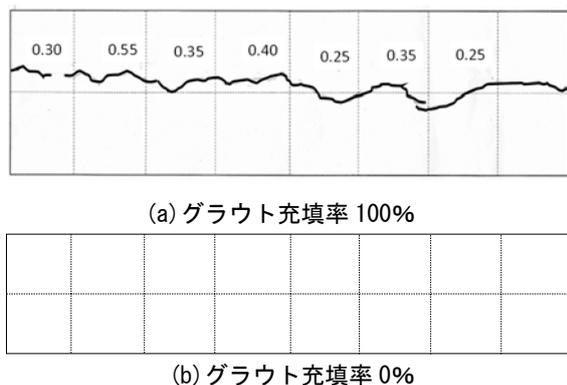
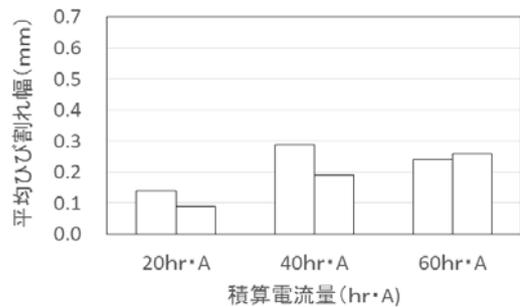


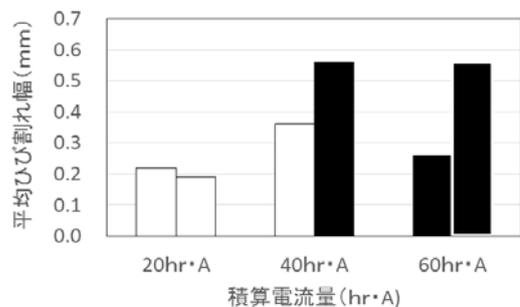
図-5 電食終了後の電食面の状況

(C=30mm, D=30mm, 積算電流量=20hr・A)

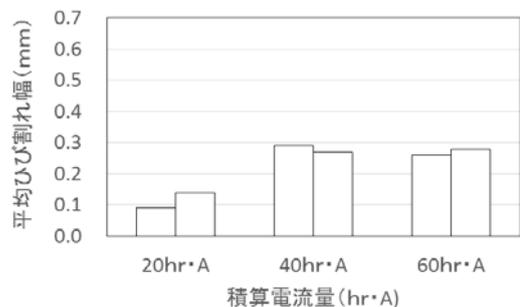
においても平均値と最大値で大きな差は確認されていないことから、今回は平均値で評価した。各積算電流量で異なる供試体を用いたため、積算電流量の増加とともにひび割れ幅が増加していないケースもあるが、積算電流量の増加とともに、平均ひび割れ幅が概ね増加する状況が



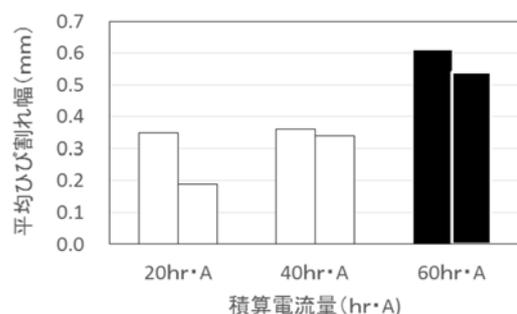
(a) C=20mm, D=20mm



(b) C=30mm, D=20mm



(c) C=20mm, D=30mm



(d) C=30mm, D=30mm

図-6 平均ひび割れ幅の推移

(図中□：ひび割れが1本、■：ひび割れが複数)

確認できる。また、ひび割れの本数については、かぶり30mmの供試体で積算電流量が増加すると、電食面以外でひび割れが発生する傾向を示した。

3.2 コンクリート表面のひび割れ幅

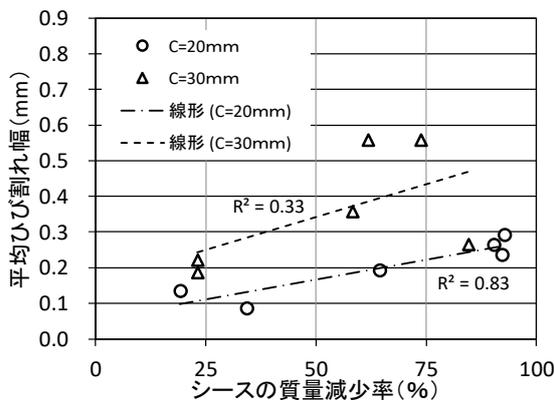
コンクリート表面にひび割れが確認された、シース内にグラウトが充填されている供試体について、要因毎のひび割れ幅増加傾向について検討する。

シース径を同一とした場合における、シースの質量減少率と平均ひび割れ幅の関係について、シースかぶりと比較したものを図-7に示す。いずれのシース径においても、シースの質量減少率の増加とともに平均ひび割れ幅の増加が確認できる。シースかぶりによる比較を行った場合、シースかぶりが大きい供試体のひび割れ幅が大きくなる傾向が示された。田森らは、かぶりを変化させて配置した鉄筋に電食を行った結果、同一腐食量であればかぶりの大きい供試体でひび割れ幅が大きくなる傾向を得ている⁹⁾。今回の試験においても同様の結果が得られているため、鉄筋が腐食した場合の応力状態とほぼ同じ状態が発生しているものと考えられる。

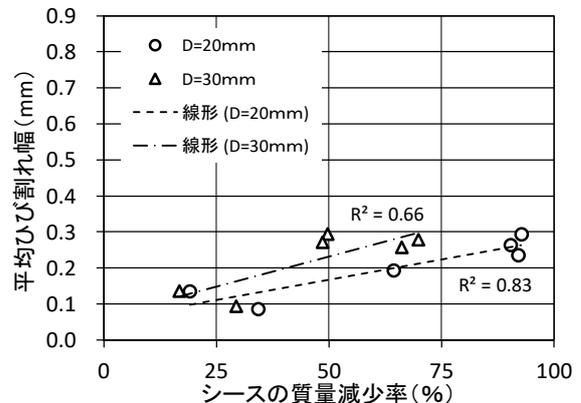
また、今回の試験における鋼製シースの状況は、陰極

に近い面での鋼製シースの損傷状況が著しく、陰極から離れた面では健全な状況であった。そのため少し異なるが、円筒内に等方圧力を発生させた場合、円周方向の伸び量は半径長に比例する⁹⁾ため、かぶり面付近のひび割れ幅が大きくなると説明されているが、本結果についてもシースから離れるほど同一膨張量（腐食量）であってもひび割れ幅が大きくなるものと考えられる。

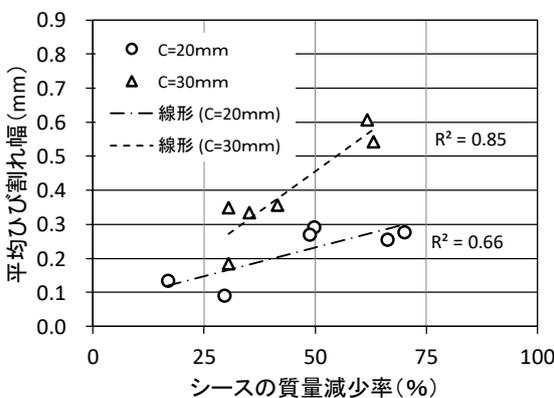
シースかぶりを同一とした場合における、シースの質量減少率と平均ひび割れ幅の関係について、シース径で比較したものを図-8に示す。シース径を同一として整理した図-7と比較し、シース径の変化がひび割れ幅に与える影響は明確ではないが、いずれのシースかぶりにおいても、シース径が大きい方でひび割れ幅が大きい傾向が示された。これは、同一シース質量減少率の場合、シース周長はシース径30mmの方が大きくなるため、シース腐食量も多くなると考えられる。このため、同一質量減少率の場合、ひび割れ幅はシース径が大きい方が大きくなると考えられる。なお、一部相関係数が小さいデータが確認できるが、これは後述するように断面内のみで発生したひび割れの影響で、コンクリート表面で測定した



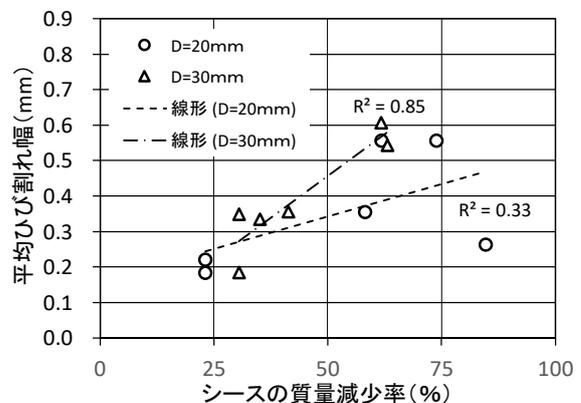
(a) D=20mm



(a) C=20mm



(b) D=30mm



(b) C=30mm

図-7 質量減少率と平均ひび割れ幅の関係
(シース径による比較)

図-8 質量減少率と平均ひび割れ幅の関係
(かぶりによる比較)

ひび割れ幅と一致しなかったものと考えられる。

3.3 コンクリート断面のひび割れ発生性状

RC 構造物では、コンクリート内に 1 本のみ配置されている鉄筋が腐食した場合、 $C/D \leq 0.5$ （この場合、C：鉄筋かぶり、D：鉄筋径）であれば、かぶり面に 1 本のひび割れ、 $0.5 \leq C/D \leq 1.5$ であれば剥離ひび割れ、 $1.5 \leq C/D$ であれば鉄筋周辺に放射状のひび割れが発生する傾向があることが知られている³⁾。ここでは、電食終了時に供試体断面を切断した後、得られたひび割れ発生傾向から、鋼製シース腐食発生時に得られるひび割れ発生傾向について示す。

電食終了時に供試体断面を切断した場合における、同一シース径、シースかぶりにおけるひび割れ性状の推移を図-9 に示す。積算電流量が小さく、シースの質量減少率が小さい段階では、シースかぶり面で 1 本のひび割れが発生している状況を確認できる。その後、積算電流量の増加とともにシース周辺から発生するひび割れの本数が増加する状況を確認できる。

コンクリート断面内に発生するひび割れ性状を全ての要因で整理したものについて表-2 に示す。図-9 のように、積算電流量の増加とともにシース周辺から発生するひび割れ本数が増加するのは、本研究範囲内では $C/D=1.5$ のときのみであった。 $C/D=0.67$ では、積算電流量が増加しても、発生したひび割れはかぶり面に発生する 1 本のみであった。 $C/D=1.0$ では、 $I=40\text{hr} \cdot A$ まででは、かぶり面に 1 本のみひび割れが発生した状況であるが、シース質量減少率が大きくなる段階の $I=60\text{hr} \cdot A$ では、 C/D の大きさにより異なる結果を示した。

C/D が大きくなると、鋼製シースの腐食量の増加とともに鋼製シース周辺に発生するひび割れ本数の増加が確認できる。これは鉄筋腐食を模擬し、断面内に配置した円周内に等方圧力を作用させた場合の応力分布について、荒木が検討を行っている⁷⁾。 C/D が小さい場合、膨張圧がかぶり面に集中するため、引張応力がかぶり面の一部に集中する傾向が得られている。一方で C/D が大きい場合、膨張力によりコンクリートに発生する応力は、円筒周辺に均等に作用するため、放射状のひび割れが発生するものと考えられる。グラウトが完全に充填されている場合には、コンクリート中の鋼製シースが腐食した場

合においてもその変形を拘束するため⁴⁾、コンクリート中の鉄筋が腐食した場合の応力状態と似た状態になると考えられる。そのため、 C/D が大きい場合は、積算電流量の増加とともにコンクリート内部のシース付近に複数のひび割れが放射状に発生し、逆に C/D が小さい場合はかぶり面に 1 本のひび割れが発生する傾向になるものと

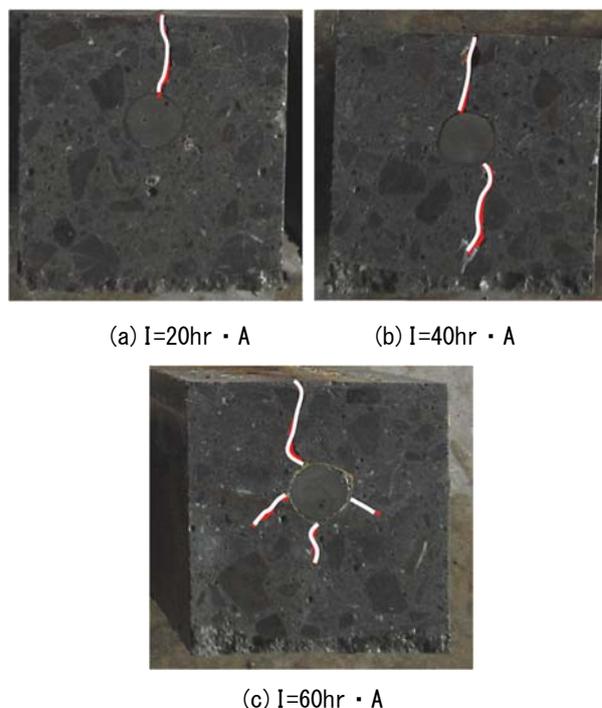


図-9 供試体断面のひび割れ発生状況
($C=30\text{mm}$, $D=20\text{mm}$) (線は加筆)
(上面が陰極設置方向)



図-10 実橋のひび割れ発生状況

表-2 C/D と積算電流量によるひび割れ発生性状の比較 (I:積算電流量)

	$C/D=0.67$	$C/D=1.0$		$C/D=1.5$	$C/D=1.47$ (実測値)
	$C:20\text{mm}/D:30\text{mm}$	$C:20\text{mm}/D:20\text{mm}$	$C:30\text{mm}/D:30\text{mm}$	$C:30\text{mm}/D:20\text{mm}$	$C:66\text{mm}/D:45\text{mm}$
$I=20\text{hr} \cdot A$	1 本	1 本	1 本	1 本	—
$I=40\text{hr} \cdot A$	1 本	1 本	1 本	1 本・2 本	—
$I=60\text{hr} \cdot A$	1 本	1 本	2 本	4 本 (放射状)	—
実橋(参考)	—	—	—	—	複数本(放射状)

考えられる。また、鉄筋腐食の場合において、 $0.5 \leq C/D \leq 1.5$ の条件では剥離ひび割れが発生しやすいが、本試験においては、その条件を想定した $C/D=1.0$ において剥離ひび割れに相当するひび割れ性状は確認できなかった。これは、本研究においては供試体断面が小さく、側面方向の拘束が小さいことにより、1本のみのひび割れが生じたものと考えられる。本試験において $C/D=1.0$ においては2条件で電食を行ったが、ひび割れ発生性状が異なったことから、断面内においては複雑な応力状態になっているものと考えられる。

図-10に $C/D=1.47$ の実橋におけるひび割れ発生状況を示す。剥離断面の状況では複数本のひび割れが放射状に発生しており、 $C/D=1.5$ のひび割れ性状と類似していることが確認できた。しかし、実橋ではグラウトが未充填であってもひび割れが生じており、本試験と結果が一致しないことも確認できた。

本試験におけるシース内のグラウト充填状況は、断面で見た場合に完全に充填されている場合と、全く充填されていない場合の2ケースの検討とした。シース断面で見た場合のグラウト充填状況が、鋼製シース腐食時のコンクリートへの応力伝達を変化させる^{2),4)}一方、実橋ではグラウト未充填の場合でもひび割れが認められていることから、今後、プレストレスを与えた試験の実施、凍結膨張圧の影響に着目した実験、シースの断面欠損による乾燥収縮ひずみの影響に関する解析的検討、実橋のひび割れ状況のデータ収集により、実験データの蓄積と実橋との検証および考察が必要であり、更に検討を深めることで、PCケーブルに沿ったひび割れ発生傾向の体系化を図り、実務に展開したいと考えている。

4. おわりに

ポストテンション方式 PC 構造物のシース腐食によりコンクリートに発生するひび割れ発生傾向に関する基礎研究として、シース径およびシースかぶりを試験要因とする、コンクリート断面内に配置した鋼製シースの電食を実施した。電食により得られた試験結果を下記に示す。

- (1) 鋼製シース内にグラウトを充填していない供試体に対して鋼製シースを電食しても、コンクリートに対するひび割れ発生はいずれの場合においても確認できなかった。
- (2) 同一シースかぶりと比較した場合、電食によりコンクリート表面に発生するひび割れ幅は、シース径が大きいほど大きくなる傾向が示された。
- (3) 同一シース径で比較した場合、電食によりコンクリート表面に発生するひび割れ幅は、シースかぶりが大きくなるほど大きくなる傾向が示された。

- (4) 電食終了後に供試体断面を切断して得られたひび割れ性状について、シースかぶり C とシース径 D の比が 1.5 の場合、積算電流量の増加とともに、シース位置から放射状に生じる発生するひび割れ本数が多くなる傾向が示された。この性状は $C/D=1.47$ の実橋と類似している。一方で、 $C/D=0.67$ の場合、積算電流量が増加してもひび割れ本数の増加は確認できなかった。
- (5) (4)より、シース内にグラウトが完全に充填されている場合は、シース腐食のコンクリートに発生する応力状態が鉄筋腐食時と似た条件となるため、シース径とシースかぶりがシース腐食時のひび割れ性状に与える影響は、鉄筋腐食の場合と似た状態になることが考えられる。

謝辞

本研究にあたって、試験装置等の準備はデンカ株式会社 宮口克一氏に、実橋のデータ収集には株式会社富貴沢建設コンサルタントの方々にも多大なご協力をいただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 近藤拓也, 鈴木佑典, 高谷哲, 山本貴士, 宮川豊章: 腐食により生じるポストテンション方式 PC 桁の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
- 2) 鈴木佑典, 近藤拓也, 山本貴士, 宮川豊章: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1091-1096, 2011.7
- 3) Roger. D. Browne : Mechanisms of Corrosion of steel in Concrete in Relation to Design, Inspection, and Repair of Offshore and Coastal Structures, ACI SP65-11, pp.169-204, 1965
- 4) 近藤拓也, 鈴木佑典, 村田一郎, 宮川豊章: シース腐食がかぶりコンクリートのひび割れに与える影響, 鉄道工学シンポジウム論文集第 17 号, 構造工学技術シリーズ No.66, pp.175-182, 2013.7
- 5) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988
- 6) S.チモシェンコ: 材料力学下巻, 1962
- 7) 荒木弘祐: かぶりコンクリート剥落による第三者損傷防止を目的とした維持管理対策に関する研究, 京都大学学位論文, 2006.3