

論文 シース腐食が PC はりの曲げ耐荷性能に与える影響

近藤 拓也*1・奥野 喜久*2・山本 貴士*3・宮川 豊章*4

要旨: 塩害に起因した鋼製シースの腐食によって腐食ひび割れが発生した PC はりを想定し、鋼製シースの電食を行った後、最大荷重に達する以前の曲げ挙動を把握することを目的に、PC はりの曲げ試験を実施した。その結果、シースを電食した PC はりの曲げひび割れ発生荷重は、健全なものよりも低下する傾向が確認された。また、腐食ひび割れが発生した PC はりでは、曲げひび割れが分散する傾向がみられた。このことから、鋼製シースの腐食により内部の応力状態が変化する可能性が示唆された。ただし、最大荷重には変化が見られなかった。

キーワード: シース腐食, PC はり, 腐食ひび割れ, 曲げ耐荷性状, 電食

1. はじめに

塩害環境で供用されている PC はりは、腐食ひび割れがコンクリート表面に発生されているものも存在する。このような PC はりでは、PC 鋼材の腐食とは無関係に、その周辺に配置されている鋼製シースの腐食が原因で腐食ひび割れが発生する可能性があることを筆者らは報告している¹⁾。鋼製シースについては、設計計算上、耐荷力の負担は考慮しないことから、過去にシース腐食が原因でひび割れが生じた PC はりの曲げ耐荷性能に関する検討はほぼ皆無であった。

著者らは、約 10 年間暴露し、PC 鋼材の腐食はほとんど見られなかったものの、シース腐食により腐食ひび割れが生じた PC はりの曲げ耐荷性状に関する報告を行った²⁾。この報告では、劣化方法は暴露であり、各供試体で腐食量を管理することができなかったため、劣化状態と曲げ挙動の関係について言及することは困難であった。シース腐食量が異なると、腐食ひび割れ幅が変化することは文献¹⁾で示しており、このことは PC はりの曲げ耐荷性能に大きく影響を与えられと考えられるコンクリートの物性や、コンクリートとシースあるいは PC 鋼材間の

付着性能に変化をもたらすと考えられる。よって、シースの腐食程度と曲げ耐荷性能の関係を把握することは重要であると考えられる。

本論文では、ポストテンション方式 PC はりの鋼製シース腐食量が曲げ耐荷性能に与える影響を検討するため、シースに対する電食の積算電流量を変化させた PC はりの曲げ耐荷性能、特に最大荷重に到達するまでの曲げ性状について検討を行った。

2. 試験概要

2.1 試験要因

本論文における試験要因を表-1 に示す。腐食程度については、鋼製シースの腐食が軽微な状態、進行した状

表-1 試験要因一覧

供試体名	せん断補強筋間隔	シース目標質量減少率	供試体数
S70-N	70mm	0%	1
S70-30	70mm	30%	2
S70-100	70mm	100%	2
S245-N	245mm	0%	1
S245-30	245mm	30%	2
S245-100	245mm	100%	2

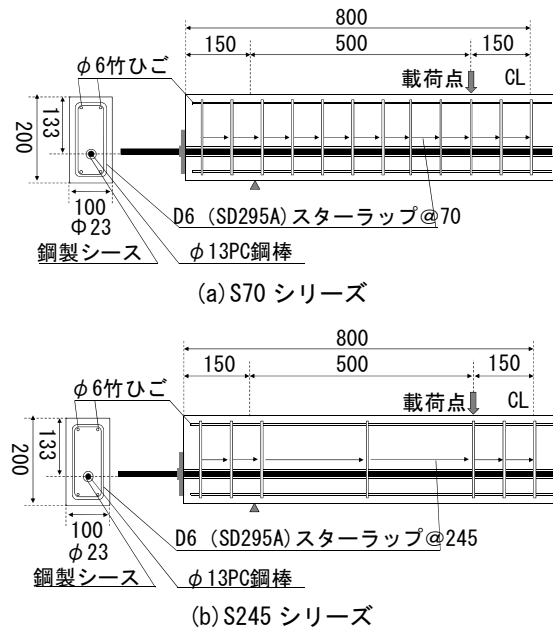


図-1 供試体概要 (単位: mm)

*1 西日本旅客鉄道 (株) 鉄道本部施設部土木技術課主査 修士(工学) (正会員)

*2 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*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)

態を模擬したもの、および健全の3種類とした。なおシース目標質量減少率は、印加した積算電流密度から計算されるクーロン量に基づき設定した。また、せん断補強筋の配置間隔については70mm および245mm 間隔の2種類とした。

2.2 供試体概要

本論文における供試体の概要を図-1、使用材料を表-2、コンクリートおよびグラウトの配合を表-3および表-4に示す。供試体は図-1に示すように、100×200×1600mmの矩形断面供試体とした。曲げせん断耐力比 $V_u \cdot a/M_u$ はS70 シリーズで1.45、S245 シリーズで0.88とした。またせん断補強筋については、鋼製シース電食による影響から腐食保護を行うため、はり高さ1/2以下については絶縁ゴムを巻き付けた。

供試体へのプレストレスの導入は、目標圧縮強度 40N/mm^2 に達していることを確認して行った。プレストレスは、PC鋼棒に引張強度の50%の緊張力を作用させることにより導入した。また、鋼製シースの電食によりPC鋼材が腐食を生じないように、PC鋼材と鋼製シースが接触していないことをテスターで確認しながらPC鋼材の緊張を行った。鋼製シース内へのグラウト注入は、プレストレス導入後、速やかに実施した。

グラウトが所定の強度に達した後、鋼製シースの電食を行った。電食は図-2に示すように、鋼製シースを陽極、供試体底面に設置した銅板を陰極として行った。なお、5%NaCl溶液については、供試体底面から100mmの高さで水面を保つよう、適宜補充を行った。電流密度は、鋼製シースと同一直径を持つ円筒管と仮定し、円筒管に

対して 0.865mA/cm^2 で一定とした。通電期間については、既往の研究を参考¹⁾に設定した。

表-2 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント
グラウト	普通ポルトランドセメント +メラミンスルホン酸系化合物と水溶性高分子エーテル系化合物を主成分とした混和剤
PC鋼棒	φ13mm, B種1号 SBPR930/1080
シース	φ23mm 鋼製シース

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE減水剤(cc/m ³)
		W	C	S	G	
40	45	170	425	728	911	1063

表-4 グラウトの配合

C(kg/m ³)	W(kg/m ³)	混和剤(g/m ³)
10	4	100

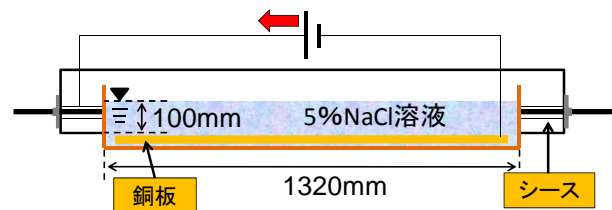


図-2 電食方法

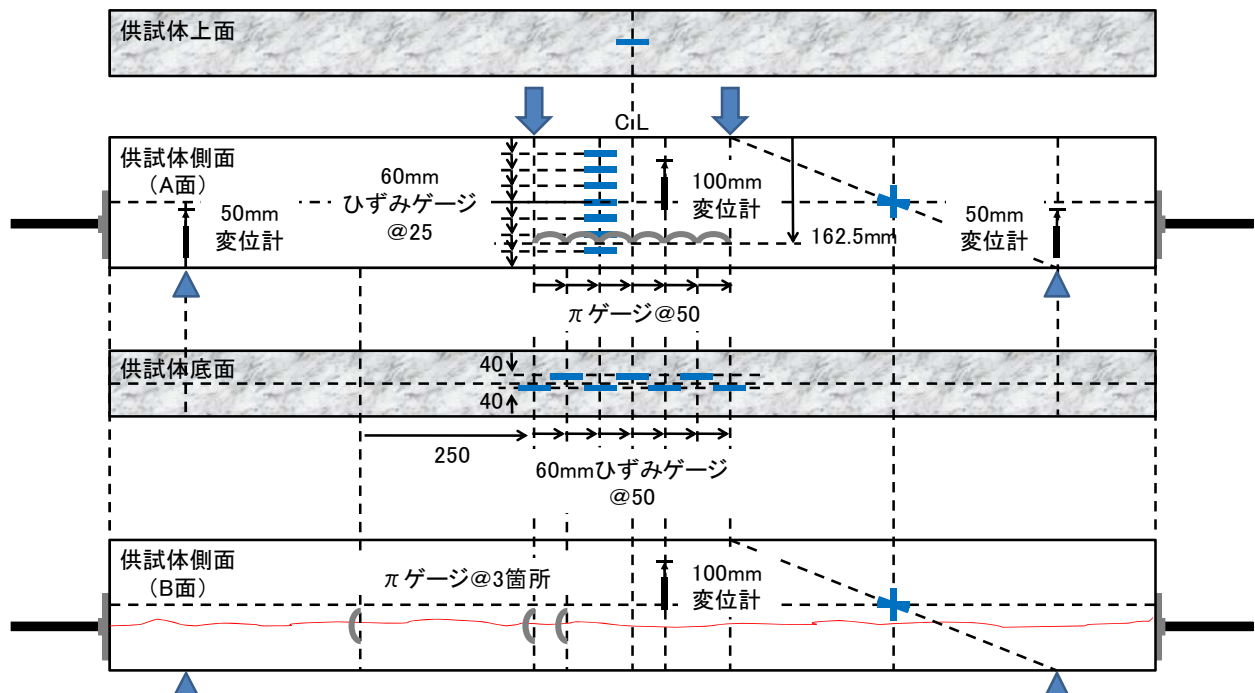


図-3 測定装置取り付け概要

2.3 測定概要

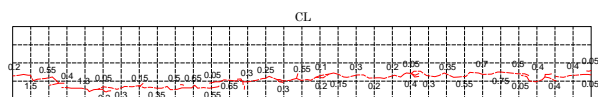
(1) 電食終了時

電食終了後、はり供試体側面および底面に 50mm 間隔で線を引き、線と交わる箇所の腐食ひび割れ幅をクラックゲージおよびノギスを用いて測定した。

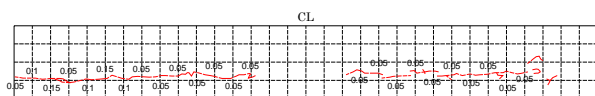
(2) 曲げ載荷試験時

載荷は、スパン 1300mm に対して等曲げ区間 300mm、せん断スパン 500mm の対称 2 点一方向載荷とした。最大荷重 P_m 到達までは 5kN ずつの荷重を漸増させた。

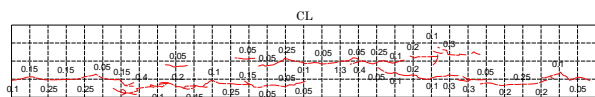
測定器具取り付け状況を図-3 に示す。支間中央から 50mm 離れた位置、および各支点には変位計（感量 0.01mm）を取り付けた。等曲げ区間のはり供試体下面には、曲げひび割れ発生を特定するため、千鳥状にひずみゲージ（検長 60mm）を 50mm 間隔で貼り付けた。等曲げ区間内におけるはり高さ方向のひずみ分布を測定するため、支間中央から水平方向に 50mm 離れた位置に、高



(a) S70-100-1（平均腐食ひび割れ幅：3.0mm）



(b) S245-30-1（平均腐食ひび割れ幅：0.15mm）



(c) S245-100-1（平均腐食ひび割れ幅：4.0mm）

図-4 電食終了後の側面外観状況の一例

（图中数字はひび割れ幅を示す，単位：mm）

表-5 シースおよび PC 鋼棒の質量減少率

供試体名	試験要因		質量減少率(%)	
	せん断補強筋間隔	シース目標質量減少率	シース	PC 鋼棒
S70-N	70mm	0%	0	0
S70-30-1		30%	9.0	1.1
S70-30-2		30%	9.4	2.1
S70-100-1		100%	58.0	3.1
S70-100-2		100%	63.1	2.2
S245-N	245mm	0%	0	0
S245-30-1		30%	11.6	1.5
S245-30-2		30%	12.6	1.4
S245-100-1		100%	68.6	2.0
S245-100-2		100%	69.1	1.6

さ 25mm 間隔でひずみゲージ（検長 60mm）を軸方向に貼り付けた。

等曲げ区間内における曲げひび割れ幅の測定は、 π ゲージ（感量 0.01mm）を用いた。また、目視によって曲げひび割れの進展状況を 5kN 毎に観察した。

(3) 曲げ試験終了後

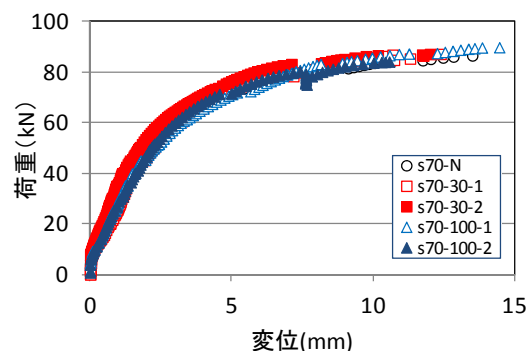
曲げ試験終了後、はり供試体の解体を行い、鋼製シースおよび PC 鋼材を取り出した。その後、JCI-SC1 法に基づき錆を取り除いた後、質量を測定した。はり供試体作製前に予め計量した質量を用いて、電食前後の質量差を電食前質量で除することにより、質量減少率とした。

3. 試験結果

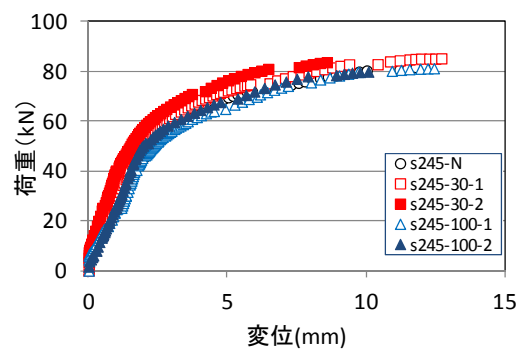
3.1 電食終了後のはり供試体状況

電食終了後の側面の腐食ひび割れ状況を図-4 に示す。目標質量減少率 30% の供試体については、外観でひび割れが確認できるものできないものがあった。目標質量減少率が 100% のものについては、全てのはり供試体で側面に腐食ひび割れが生じており、一部のはり供試体では、底面にも腐食ひび割れの発生が目視で確認できた。

試験終了後、はり供試体を解体し取り出した鋼製シースおよび PC 鋼棒の質量減少率を表-5 に示す。鋼製シースについては、表面積が大きいことから電食が局所的になり、鋼製シースが全面にわたり電食されなかったこと



(a) S70 シリーズ



(b) S245 シリーズ

図-5 荷重-変位関係

で目標質量減少率と比較して小さな値を示したと考えられる。しかし、目標質量減少率 100% 供試体については、特に鋼製シースの下半分でシースが原形をとどめておらず、上半分についてもほとんどの箇所が電食の影響を受けていた。

PC 鋼棒については、クエン酸水素二アンモニウムによる除錆の過程で、質量が少し減少したものと考えられ、目視では腐食をほとんど確認できなかった。したがって鋼製シースの電食による影響は小さかったものと考えられる。

3.2 曲げ荷重時の荷重－変位関係

最大荷重に到達するまでの荷重－スパン中央部付近変位関係を図-5 に示す。なお、荷重－変位関係については包絡線で示した。

せん断補強筋が密に配置されている S70 シリーズについては、いずれの電食期間においても、ほぼ同じ荷重－変位曲線を示している状況が確認できる。せん断補強筋本数が少ない S245 シリーズでは、電食期間が長いシリーズにおいて、荷重初期から変位が大きくなる状況が確認できる。これは、せん断補強筋が S245 では少なく、腐食ひび割れの拘束が小さいため、荷重－変位関係にコンクリートにひび割れが生じたことによる見かけの曲げ剛性低下の影響が表れたものと考えられる。

なお、いずれの供試体においても、破壊は等曲げ区間上縁圧縮部のコンクリートで圧壊を生じた。

3.3 曲げひび割れ発生以前の挙動

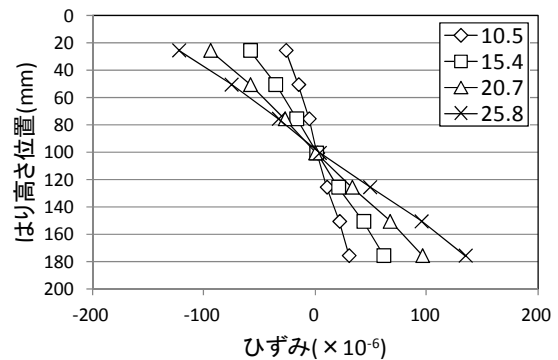
等曲げ区間内におけるはり供試体高さ方向のひずみ分布の一例を図-6 に示す。この図から、曲げひび割れ発生以前では、シース腐食による腐食ひび割れの有無に関わらず、ひずみ分布は直線を示した。曲げひび割れ発生以前の PC はりでは、鋼製シース腐食による腐食ひび割れの有無に関わらず、外力に対して断面が一体となり抵抗していると考えられる。

曲げひび割れ発生荷重時の荷重および変位から算定した曲げ剛性を図-7 に示す。なお曲げ剛性は、弾性はり理論式から、荷重および変位の実測値を代入することにより求めた。目標質量減少率 30% では、健全はりと比較して曲げ剛性が若干上昇するものも見られた。目標質量減少率 30% は腐食ひび割れが発生した、もしくは発生する直前の状態であるため、コンクリートの強度増加によるコンクリートの弾性係数増加が寄与したものと考えられる。しかし、電食が過度に進行した目標質量減少率 100% 供試体では、腐食ひび割れの影響によりコンクリートの弾性係数が低下したため、電食を実施しない供試体とほぼ同様の値を示したものと考えられる。

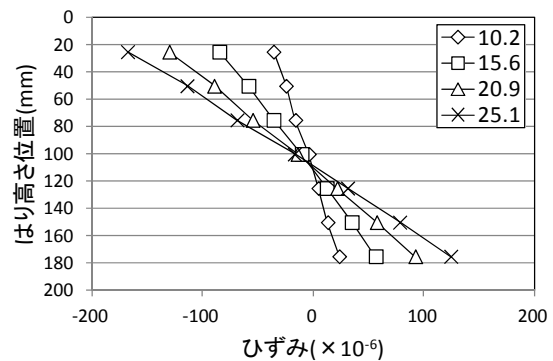
はり供試体に導入したプレストレスの残存割合を図-8 に示す。なおプレストレスの残存割合については、

はり供試体の荷重材齢と同材齢のコンクリート曲げ供試体における曲げ強度と、曲げひび割れ発生荷重から算定した緊張力を、プレストレス導入時の緊張力で除することにより算出した。

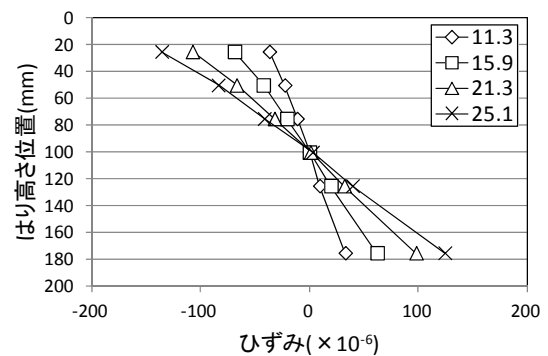
電食を実施していないはり供試体では、プレストレスの残存割合は 90% 以上の高い数値を示した。一方で、電食を実施したはり供試体では、プレストレス残存割合が 60%～80% と軒並み低い結果を示した。電食期間中のプレストレスの低下は大きくないと考えられることから、電食はり供試体では、導入プレストレスに対してコンクリートの曲げひび割れ発生荷重が理論値より相対的に小さくなっていると考えられる。



(a) S70-N



(b) S70-30-1

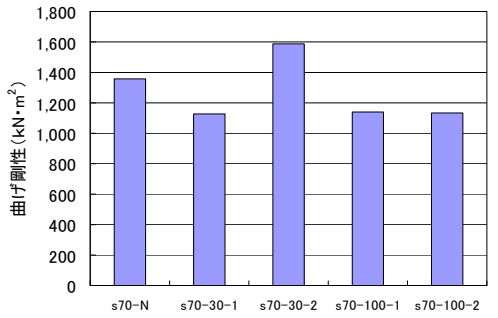


(c) S70-100-1

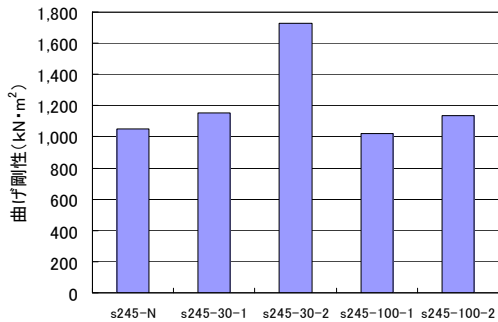
図-6 はり高さ方向のひずみ分布
(凡例数字は載荷荷重を示す, 単位: kN)

曲げ載荷試験終了後におけるはり供試体側面のひび割れ状況の一例を図-9に示す。電食を実施していないはり供試体では、はり供試体底面から曲げひび割れが発生している状況が確認できる。一方で、電食を実施したはり供試体では、必ずしも曲げひび割れの発生が底面からではなく、腐食ひび割れ発生箇所から曲げひび割れが

進展しているものも確認できる。このことから、曲げひび割れ発生荷重が相対的に低下した理由は、腐食ひび割れの発生により、はり供試体の高さが低下したようになる、いわゆる重ねはりのような挙動を局所的に示すことが一因であると考えられる。しかし曲げひび割れ発生以前では、図-6によるはり高さ方向のひずみ分布からは、

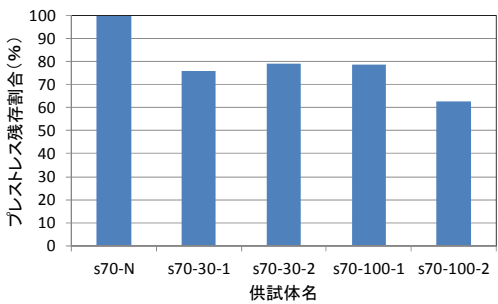


(a) S70 シリーズ

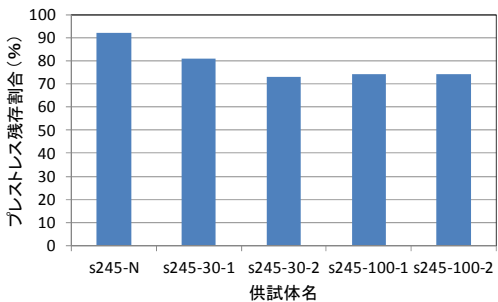


(b) S245 シリーズ

図-7 曲げひび割れ発生時の曲げ剛性



(a) S70 シリーズ



(b) S245 シリーズ

図-8 プレストレス残存割合

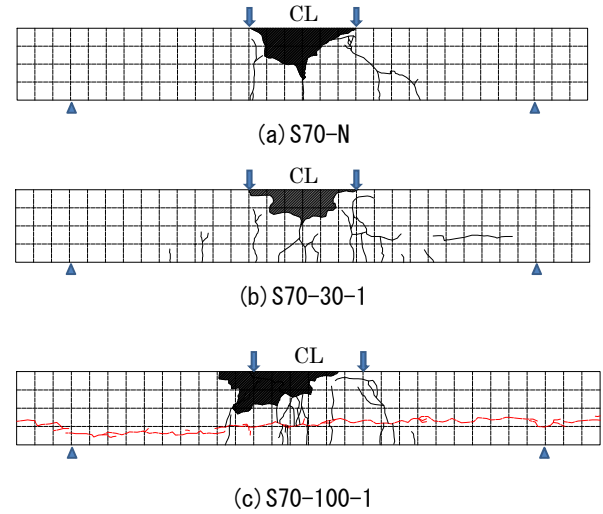
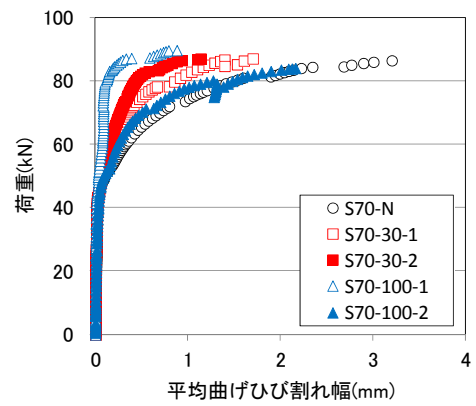
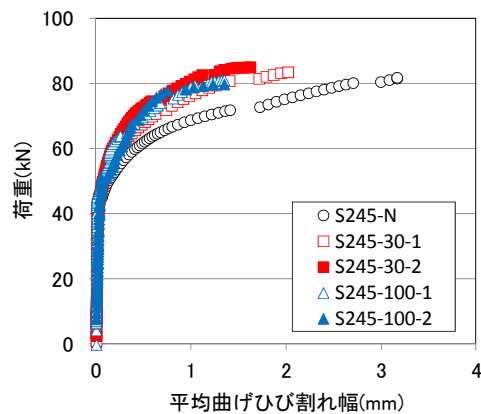


図-9 曲げ試験終了後の側面外観状況

(図中赤線は載荷前に発生した腐食ひび割れを示す)



(a) S70 シリーズ



(b) S245 シリーズ

図-10 荷重-平均ひび割れ幅の関係

断面が一体となり外力に抵抗する傾向が確認できるため、更なる考察が必要である。

3.4 曲げひび割れ発生以降の挙動

等曲げ区間内における平均曲げひび割れ幅と載荷荷重の関係を図-10、最大荷重時における等曲げ区間内の平均ひび割れ間隔を図-11に示す。本論文における1本のひび割れの定義は、各側面の底面から発生しているひび割れとし、底面から枝分かれしたものについては、それぞれεゲージが示した値の合計値をひび割れ1本のひび割れ幅とした。平均曲げひび割れ間隔については、各側面の等曲げ区間で底面から発生した各ひび割れ間距離の平均としている。

曲げひび割れ幅については、電食を実施していないはり供試体で最も大きな値を示し、目標質量減少率の増加とともに曲げひび割れ幅が小さくなる傾向を示した。曲げひび割れ間隔については、特にS245シリーズではばらつきを示したものの、電食を実施したはり供試体で小さくなる傾向を示した。シーす腐食膨張によるグラウト側への反力によりグラウトに圧縮力が作用し、PC鋼材とグラウトおよびその周辺のコンクリート間の付着が健全はり供試体よりも向上した可能性が考えられる。ただし、図-5の荷重-変位関係に示すように、健全はり供試体と電食はり供試体で、曲げひび割れ発生以降の曲線の傾きに大きな挙動変化を与えるものではないようである。一方、S70シリーズでは、目標質量減少率100%供試体で曲げひび割れ幅が再び大きくなっている。過度の腐食と腐食ひび割れの開口による拘束力の解放とそれに伴う付着切れが影響していると推察される。

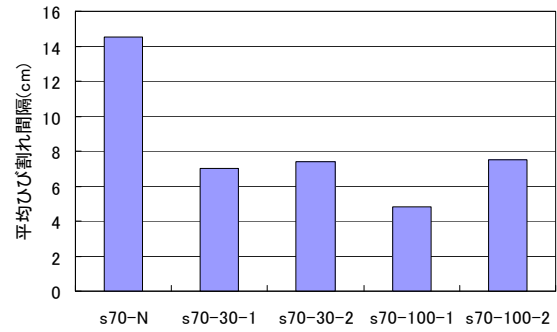
最大荷重については、図-5に示すようにいずれのはり供試体においても大きく変化しなかった。最大荷重は全て圧壊により決定したことから、引張部分の材料物性の変化は影響しないことに加え、PC鋼棒の断面はほとんど減少していなかったことが原因と考えられる。

これら一連の結果は、鋼製シーすが腐食することによりPCはりの力学的性質が変化する可能性を示唆するものと考えられる。

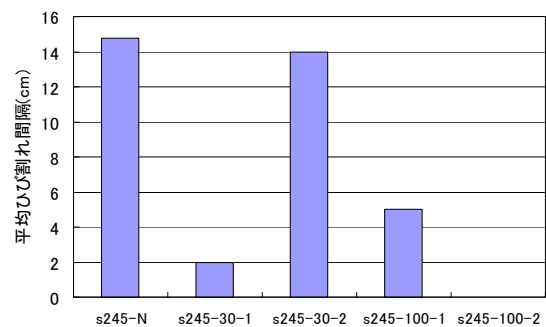
4. おわりに

本論文では、コンクリートの塩害を模擬し、鋼製シーすに対して異なる積算電流量で電食を行ったPCはりの曲げ耐荷性能について検討を行った。以下に、本論文で得た結果を示す。

- (1) 曲げひび割れ発生以前では、はり供試体高さ方向のひずみ分布は腐食ひび割れの有無に関わらず直線関係を示し、外力に対し断面が一体化となり抵抗する傾向を示した。
- (2) シーすを電食したはり供試体は、健全はり供試体と



(a) S70 シリーズ



(b) S245 シリーズ

図-11 最大荷重時の曲げひび割れ間隔
(S245-100-2 は、ひび割れは1本のみ発生)

比較し、曲げひび割れ発生荷重が低下する傾向を示した。

- (3) 曲げひび割れ発生以前の曲げ剛性については、目標質量減少率が30%供試体では、健全はり供試体と比較し、若干上昇する傾向を示した。しかし、目標質量減少率が100%供試体では、健全はり供試体とほぼ同等の値を示した。
- (4) 曲げひび割れ発生性状は、健全はり供試体と比較し電食はり供試体において曲げひび割れ幅、曲げひび割れ間隔ともに小さくなる傾向を示した。
- (5) 最大荷重は電食の有無により変化することはなかった。

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) 近藤拓也, 山本貴士, 高谷哲, 宮川豊章: 腐食ひび割れが生じたポストテンション方式PCはりの曲げ耐荷性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1489-1494, 2011.7