

断面内の腐食性状がPCはり部材の耐荷挙動に及ぼす影響

黒沢建設(株) 正会員 修(工) ○神津 和大
山梨大学大学院 正会員 博(工) 斉藤 成彦

Abstract : A study on the load carrying capacity of prestressed concrete beams with steel corrosion is presented based on flexural tests. Post-tensioned prestressed concrete beams with three tendons in the cross section were damaged by an accelerated galvanic corrosion test, where the number of tendons corroded was the test parameter. The flexural capacity and failure processes are greatly influenced by the maximum corrosion loss in the longitudinal distribution of tendon corrosion and also the average cross-sectional area loss of corroded tendons at the beam section with the maximum corrosion loss. The local corrosion condition of each wire of the prestressing strand especially affects the flexural behavior with tendon ruptures.

Key words : corroded prestressed concrete beams, flexural behavior, distribution of steel corrosion

1. はじめに

近年、塩害により鋼材腐食の生じたコンクリート構造物に対し、その現有性能を定量的に把握するための健全性評価手法の確立が急務となっている。プレストレストコンクリート(以下、PC)部材は、使用される鋼材が多様で、シースや定着具といった装置を有することから、その劣化過程が多岐にわたり、劣化の生じた部材の耐荷機構は複雑となる。そのため、腐食したPC部材に関する研究はまだ少なく、腐食量と部材耐力の関係などの定量的評価には更なる研究が必要である。

既往の研究¹⁾で、電食により鋼材を一様および局所的に腐食させたPCはりの載荷実験を行い、鋼材の局所的な腐食や素線ごとの腐食量のばらつきが曲げ耐荷性状に及ぼす影響について検討を行った。その結果、PC鋼材の軸方向の最大腐食量が耐荷挙動に大きな影響を及ぼすことが確認されている。一方で、断面内に複数のPC鋼材が配置された場合には、各鋼材の腐食性状が部材の耐荷挙動に影響を及ぼすことが確認されている²⁾が、まだ十分な知見は蓄積されていない。そこで本研究では、断面内に3本のPC鋼材を有する模型PCはり試験体を対象に、電食によりPC鋼材の腐食性状を変化させた上で載荷実験を行い、曲げ耐荷挙動に及ぼす影響について検討を行った。

2. 腐食促進試験

2.1 試験体概要

本研究に用いた試験体の概要を図-1に示す。試験体は、上部から140mmの位置にシースを3本配置し、それぞれにPC鋼より線(SWPR7BL, 呼び径12.7mm)1本を配置したポストテンション方式PCはりで、部材全長1800mm、断面250mm×200mmである。また、使用するシースは中央のPC鋼材の腐食を抑制するため、3本配置される中央のみをPEシース(内径φ35)とし、他の2本には鋼製シース(内径φ

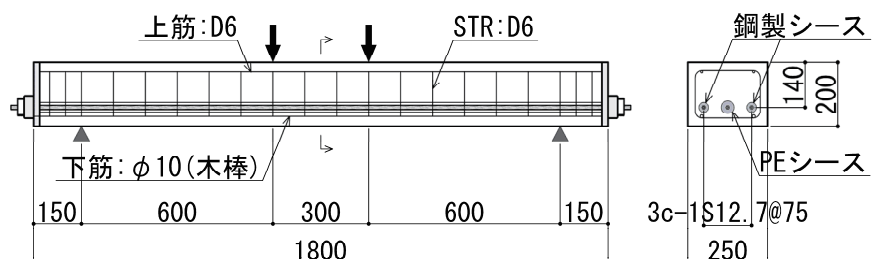


図-1 試験体 概要図

表-1 腐食促進試験および材料諸元

試験体名	腐食本数 (本)	積算電流量 (A*h)	平均通電電流量 (A)	PC鋼材重量減少率		コンクリート圧縮強度 (N/mm ²)	グラウト圧縮強度 (N/mm ²)	骨材の最大寸法 (mm)	使用鋼材 -	導入プレストレス (kN/本)
				平均 (%)	最大 (%)					
S	0	0	0	0	0	47.2	35.7	20	SWPR7BL 3c-1S 12.7mm	92
A1	1	314	1.276	33.8	82.7	58.2	39.4			
A2		511	0.901	54.2	100.0	55.5	42.6			
B	①	2	312	0.409	16.7	37.2	59.0			
	②				16.8	31.8				

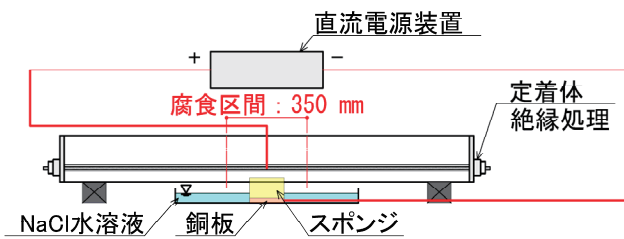


図-2 腐食促進試験 概要図

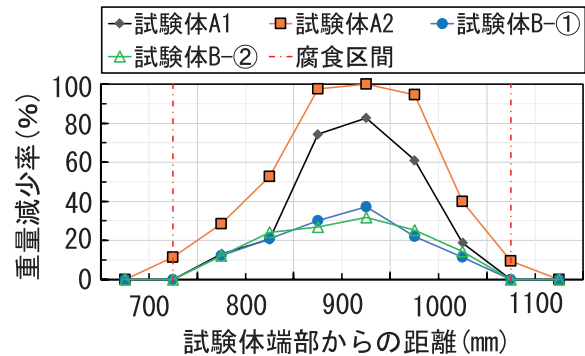


図-3 PC鋼材重量減少率分布

表-2 素線ごとのPC鋼材重量減少率(A1)

試験体名	線名	PC鋼材重量減少率	
		区間平均 (%)	区間最大 (%)
A1	7本平均	33.8	82.7
	芯線	12.1	46.6
	側線1	42.7	100.0
	側線2	36.0	100.0
	側線3	40.5	69.6
	側線4	38.6	100.0
	側線5	30.6	70.7
	側線6	36.2	100.0

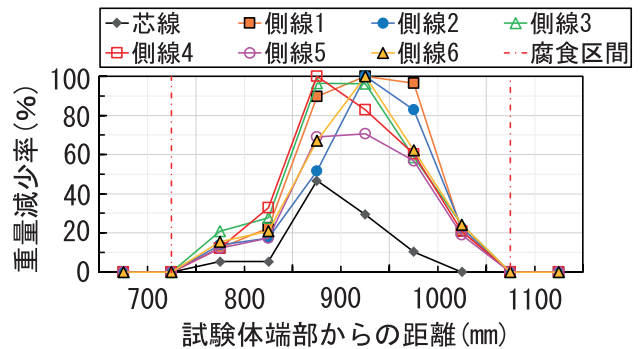


図-4 素線ごとのPC鋼材重量減少率分布(A1)

28) を用いた。部材軸方向には、スターラップを

配置するため、上部（圧縮側）に鉄筋（D6），下部（引張側）に木材（φ10）を計4本配置し、鉄筋（D6）においては試験体端部の定着具とともにエポキシ樹脂により絶縁した。スターラップ（D6）は、100mm間隔で配置し、同様にエポキシ樹脂塗料を施した。

試験体の種類は、断面に3本配置されるPC鋼材の内、端部1本のみを腐食させ、目標とする腐食量を変えたAシリーズと、両端部2本を腐食させたBシリーズとした。試験体に用いた材料の諸元を表-1に示す。

2.2 腐食状況

腐食促進試験の概要を図-2に示す。電食は直流電源装置の陽極とPC鋼材、陰極と銅板を接続し、試験体と銅板を10%NaCl水溶液の入った水槽に浸して、通電する方法を用いた。本研究では、試験体中央のみを腐食させるため、スパン中央において試験体と銅板の間にスポンジ（長さ100mm）を介して設置することにより、スパン中央のみをNaCl水溶液に浸すことで再現した。載荷試験後にはつり出したPC鋼材より得られた重量減少率分布を図-3に示す。また、素線ごとのPC鋼材重量減少率分布を図-4～図-7に示す。PC鋼材の重量減少率は、はつり出した鋼材を濃度10%のクエン酸水素二アンモ

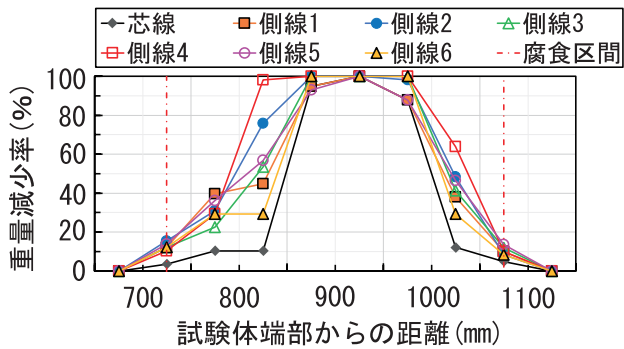


図-5 素線ごとの PC 鋼材重量減少率分布 (A2)

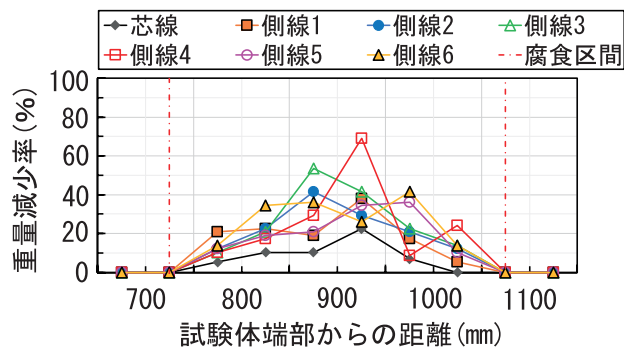


図-6 素線ごとの PC 鋼材重量減少率分布 (B-①)

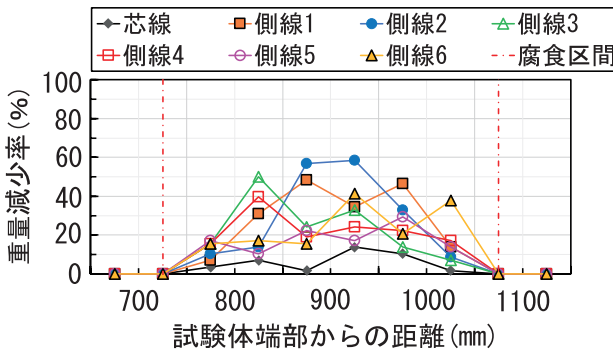


図-7 素線ごとの PC 鋼材重量減少率分布 (B-②)

表-3 素線ごとの PC 鋼材重量減少率 (A2)

試験体名	線名	PC鋼材重量減少率	
		区間平均 (%)	区間最大 (%)
A2	7本平均	54.2	100.0
	芯線	40.5	100.0
	側線1	53.4	100.0
	側線2	59.7	100.0
	側線3	55.1	100.0
	側線4	64.0	100.0
	側線5	56.0	100.0
側線6	51.0	100.0	

表-4 素線ごとの PC 鋼材重量減少率 (B)

試験体名	線名	PC鋼材重量減少率		
		区間平均 (%)	区間最大 (%)	
B	鋼材①	7本平均	16.7	37.2
		芯線	6.9	22.4
		側線1	15.3	37.9
		側線2	17.3	41.4
		側線3	20.3	53.4
		側線4	19.8	69.0
		側線5	16.6	36.2
	側線6	20.7	41.4	
	鋼材②	7本平均	16.8	31.8
		芯線	4.7	13.8
		側線1	22.6	48.3
		側線2	22.6	58.6
		側線3	17.9	50.0
側線6		18.5	41.4	

ニウム水溶液に1日以上浸したのち、金属ブラシを用いて除錆を行い、長さ50mmごとの重量を測定することで求めた。なお、図-3の分布は素線7本の平均値であり、2本を腐食させた試験体Bは鋼材ごとに示した。腐食促進試験の結果、スパン中央350mmにおいてPC鋼材の腐食が確認され、この区間を腐食区間とした。重量減少率を腐食区間で平均した値（区間平均）と、区間での最大値（区間最大）を表-2～表-4に示す。

いずれの試験体においてもスパン中央付近で鋼材の腐食が最大となっており、素線ごとに腐食量のばらつきが確認できる。また、試験体A2においては、スパン中央のPC鋼材が消失するほどの激しい腐食が確認された。ここに、試験体A1および試験体Bに対してかぶりコンクリートをはつり、鋼材を露出させた状況を写真-1に示す。いずれの試験体においても断面中央に配置されたPEシースおよびPC鋼材に腐食は確認されなかった。また、試験体A1およびA2においては腐食側のシースはほぼ消失して

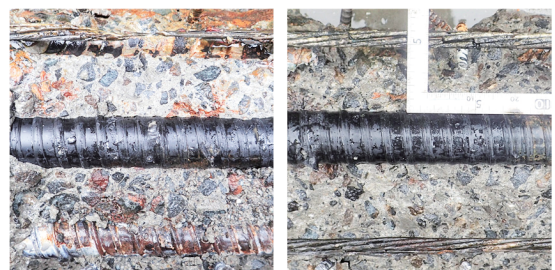


写真-1 鋼材腐食状況 (左 : A1, 右 : B)

表-5 曲げ載荷試験結果

試験体名	腐食本数 (本)	PC鋼材重量減少率		最大荷重 (kN)	耐力比※	終局状況	
		区間平均 (%)	区間最大 (%)				
S	0	0	0	199.0	1.00	圧壊	
A1	1	33.8	82.7	149.8	0.75	圧壊	
A2		54.2	100.0	135.8	0.68	圧壊	
B	①	2	16.7	37.2	117.2	0.59	鋼材破断
	②		16.8	31.8			

※ 耐力比は健全な試験体の最大荷重に対する各試験体の最大荷重比

おり、PC鋼材にも激しい腐食が確認できるが、逆端はシースに若干の腐食が確認できる程度であった。一方、試験体Bにおいては両端のシースはほぼ消失しており、PC鋼材にも腐食が確認された。

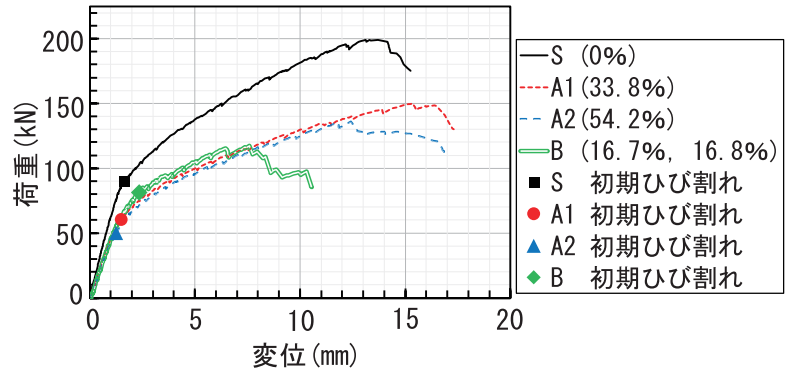


図-8 荷重-変位関係

3. 曲げ載荷試験

3.1 荷重-変位関係

各試験体の静的載荷試験の結果を

表-5に示す。また、静的載荷試験より得られた荷重-(スパン中央)変位関係を図-8に示す。載荷試験は、曲げスパン1500mm、等曲げ区間300mmとした曲げ載荷試験であり、スパン中央および支点上部に変位計を設置し、変位および支点での沈下量を計測した(図-9)。健全な試験体SおよびPC鋼材1本を腐食させた試験体A1およびA2では、鋼材の破断は生じずコンクリート上部の圧壊による曲げ破壊を示したのに対し、鋼材2本を腐食させた試験体Bにおいては、腐食の生じた鋼材の破断音とともに荷重低下に至り、その後、鋼材破断の連鎖が生じた。鋼材破断はPC鋼材の重量減少率が最大となるスパン中央に集中していた。なお、健全なPC鋼材に破断は生じなかった。

既往の研究³⁾では、コンクリートとシース間、またはPC鋼材とグラウト間に付着劣化が生じると、剛性および曲げひび割れ荷重が低下することが確認されている。本試験の試験体の曲げ載荷試験においても、図-8に示すように、PC鋼材を1本腐食させた試験体A1およびA2においては、鋼材の腐食が進むと耐力および剛性の低下が確認でき、曲げひび割れの発生荷重も健全な試験体Sと比べて小さいことが確認できる。また、試験体A1においては、腐食させたPC鋼材の重量減少率が区間平均 33.8% (区間最大 82.7%) で健全な試験体Sと比べて約25%の耐力低下を示し、試験体A2においては、腐食させたPC鋼材の重量減少率が区間平均 54.2% (区間最大 100%) で約32%の耐力低下を示した。これより、腐食区間での平均的な腐食量は異なるが、同程度の耐力を示したことが分かる。

一方、PC鋼材を2本腐食させた試験体Bにおいても、鋼材の腐食によって耐力および剛性、曲げひび割れ発生荷重の低下が確認でき、腐食させたPC鋼材の重量減少率が区間平均 16.7%、16.8% (区間最大 37.2%、31.8%) で約41%の耐力低下を示した。試験体Bの各PC鋼材の腐食量は小さく、区間平均の重量減少率に基づいた断面内のPC鋼材3本の総断面積の減少量は試験体Aシリーズに比べて小さいが、最大荷重は試験体Bの方が小さくなった。これは、PC鋼より線の局所的な腐食量が影響しているものと考えられ、3.3節でさらに検討を行う。

腐食させたいずれの試験体においても同程度の初期剛性の低下がみられるが、曲げひび割れ発生荷重は、1本腐食させた試験体A1およびA2と比較して、2本腐食させた試験体Bの方が大きいことが確認

できる。試験体A1およびA2においては、スパン中央のPC鋼材が消失するほどの激しい腐食によるプレストレスの損失およびプレストレスの損失に伴う試験体断面横方向の応力に大きな偏りが生じていたのに対し、2本腐食させた試験体Bにおいては、試験体A1およびA2に比べてPC鋼材の腐食量が少ないことから、プレストレスの損失や試験体断面の応力に偏りが少なく、1本腐食の試験体に比べて大きな荷重で曲げひび割れが発生したものと考えられる。

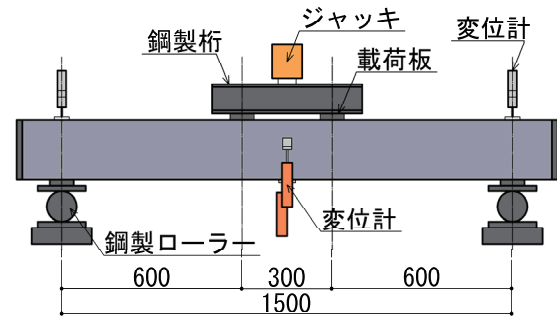


図-9 曲げ载荷試験

3.2 ひび割れ性状

図-10に、健全な試験体Sと試験体A1における载荷終了時のひび割れ性状を示す。ここで、試験体A1のひび割れ性状のうち、上図がPC鋼材を腐食させた面(以下、腐食側と記す)を、下図がPC鋼材を腐食させていない面(以下、非腐食側と記す)を示す。健全な試験体Sにおいては、等曲げ区間を中心に曲げひび割れがほぼ均等に分散しているのに対して、腐食させた試験体A1では、シースの位置に腐食ひび割れが生じており、腐食側で曲げひび割れが少なくなっていることが確認できる。どちらの試験体においても試験体上部の圧壊にて終局を迎えているが、試験体A1においては、圧壊領域が非腐食側に偏って発生していることが確認された。試験体断面において、腐食側は低鉄筋比となるため、コンクリートの圧壊が生じにくくなり、非腐食側に圧壊破壊が集中したものと考えられる。また、試験体A2およびBを含む腐食させたいずれの試験体においても腐食側で曲げひび割れの間隔が大きくなっており、腐食側のシースとコンクリート間には付着劣化が生じていることが確認できた。

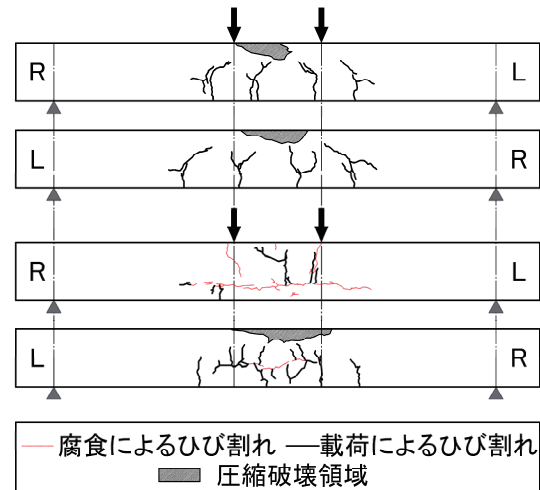


図-10 ひび割れ性状 (上 : S, 下 : A1)

3.3 PC鋼材腐食量と曲げ耐力の関係

既往の研究^{1,3)}によれば、断面にPC鋼材が1本のみ配置された試験体では、PC鋼材の軸方向における最大腐食量が耐荷性状に大きな影響を及ぼし、PC鋼材のわずかな腐食の差やPC鋼材とグラウト間およびシースとコンクリート間の付着劣化の影響により、耐荷メカニズムが大きく異なることが確認されている。ここでは、腐食区間における重量減少率の最大値に着目して検討を行うこととした。

PC鋼材の重量減少率の最大値に基づいて計算した曲げ耐力と耐力比を表-6に示す。PC鋼材の重量減少率には、表-2~表-4に示す素線7本の最大値を平均したもの(7本平均)と、素線7本中の最大のもの(素線最大)を用い、それぞれについて断面でのPC鋼材3本の総断面積の減少率(PC鋼材の総断面積の減少率)を求め、曲げ耐力および耐力比の算定を行った。鋼材1本だけの腐食に留めた試験体A1およびA2では、いずれの耐力比の計算値も実験値の耐力比(0.75)と比較的よく対応していることが分かる。試験体A1およびA2の腐食させたPC鋼材はスパン中央でほぼ消失していたため、PC鋼材2本分の耐力を示したと考えられる。

一方、試験体Bでは、7本平均の重量減少率を用いた場合には、実験の耐力比(0.59)をかなり過大評価しているが、素線最大の重量減少率を用いた場合には、計算値は実験値とよく対応していること

表-6 PC鋼材断面積の減少率と曲げ耐力の算定値

試験体名	腐食本数	PC鋼材重量減少率 区間最大 (%)		PC鋼材の 総断面積の 減少率 (%)	曲げ 耐力 (kN)	耐力 比 [※]	PC鋼材の 総断面積の 減少率 (%)	曲げ 耐力 (kN)	耐力 比 [※]	
		7本平均	素線最大	7本平均			素線最大			
S	0	0	0	0	205.9	1.00	0	205.9	1.00	
A1	1	82.7	100.0	27.6	153.7	0.77	33.3	143.0	0.72	
A2		100.0	100.0	33.3	143.0	0.72	33.3	143.0	0.72	
B	①	2	37.2	69.0	23.0	163.1	0.82	42.5	125.9	0.61
	②		31.8	58.6						

※ 耐力比は健全な試験体の計算値に対する各試験体の計算値の比

が分かる。つまり、PC鋼より線の場合には、素線ごとの局所的な腐食により早期の破断が生じ、その後素線の破断が連鎖したため、素線最大の重量減少率に耐荷性状が大きく影響を受けたものと考えられる。したがって、はり軸方向において腐食量が最大となる断面で各PC鋼より線の素線の最大重量減少率を求め、これを平均したもの(素線最大の重量減少率に基づいたPC鋼材の総断面積の減少率)に基づくことにより、腐食の生じたPCはり部材の曲げ耐力は概ね評価できるものと考えられる。ただし、PC鋼より線の場合には、素線の破断が連鎖することによって部材の変形量が著しく低下することに注意が必要である。なお、各PC鋼材の最大腐食量を示す位置がずれている場合でも、3本のうちで最大の腐食量を示す断面に着目することで概ね評価できるものと考えられる。ただし、対象断面に作用する曲げモーメントとの関係で破壊位置が決まることに注意が必要である。

4. まとめ

本研究では、断面内に3本のPC鋼材を有する模型PCはり試験体を対象に、電食によりスパン中央のPC鋼材を局所的に腐食させたPCはり部材の静的載荷試験を行い、以下のことが明らかとなった。

- (1) 2本のPC鋼材を腐食させた試験体は1本腐食の試験体と比較して、断面内のPC鋼材3本の総断面積の減少量は小さかったが、最大荷重が小さくなる結果となった。
- (2) PC鋼より線を用いた場合には、素線ごとの局所的な腐食により早期破断が生じるため、各素線における最大腐食量に耐荷性状が大きく影響を受けることが確認できた。
- (3) PC鋼より線を用いた場合でも、はり軸方向において腐食量が最大となる断面で各PC鋼より線の素線の最大腐食量を求め、これに基づいて曲げ耐力を算定することにより、腐食の生じたPCはり部材の曲げ耐力を概ね評価できることが確認された。

謝辞

本研究を実施するにあたり、山梨大学元学生である内藤佑馬氏にご協力いただいた。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広: PC鋼より線の局所的な腐食がPCはりの耐荷性状に及ぼす影響, 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.297-302, 2012
- 2) 横田敏広, 睦好宏史, I. Wijayawardane: PC鋼材が破断したPC桁の力学的性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.2, pp.487-492, 2016
- 3) 神津和大, 斉藤成彦, 衣笠泰広: 鋼材腐食の生じたPCはりの曲げ耐荷性状に関する研究, 第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.271-276, 2011