

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

山梨大学大学院 正会員 ○神津 和大
 山梨大学大学院 正会員 博(工) 齊藤 成彦
 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) 衣笠 泰広

Abstract : Prestressed concrete beams with steel corrosion exhibit complicated behavior, so that their failure mechanism is not well clarified. This paper presents an experimental study on flexural behavior of corroded post-tensioned prestressed concrete beams that were deteriorated by an accelerated galvanic corrosion test. The condition of steel corrosion was varied to investigate the effects of corrosion distribution on flexural behavior. The flexural capacity and failure processes are greatly affected by the maximum corrosion loss, localization of corrosion of each wire of the prestressing strand, and bond degradation between steel and concrete.

Key words : corroded prestressed concrete beam, flexural failure, local 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。鉄筋腐食の生じた鉄筋コンクリート（以下、RC）部材に関する研究は精力的に行われており、その耐荷性状は明らかになりつつある¹⁾。しかしながら、プレストレストコンクリート（以下、PC）部材については、使用される鋼材が多様で、シーす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るため、劣化の生じた部材の耐荷機構は複雑となるが、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²⁾で、電食により鋼材を一様に腐食させた PC はりの載荷実験を行い、シーすや鋼材の腐食が部材耐力に及ぼす影響について検討を行った結果、鋼材の腐食量の偏りや素線ごとの腐食量のばらつきが、部材の耐荷挙動に影響を及ぼすことが確認された。そこで本研究では、電食により鋼材を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。

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 の位置に鋼製シーすを配置し、その中に PC 鋼より線（SWPR7BL, $\phi 15.2\text{mm}$ ）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

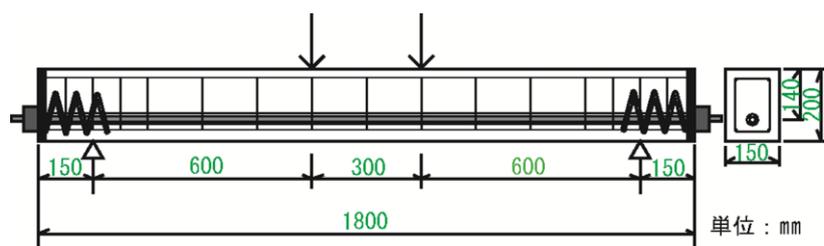


図-1 試験体概要

表-1 材料諸元および腐食促進試験結果

試験体名	腐食方法	電食期間 (day)	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)	PC鋼より線	PC鋼より線降伏強度 (N/mm ²)	導入プレストレス (kN)
			平均	最大					
S	健全	0	0	0	49.9	41.6	SWPR7BL φ 15.2mm	1600以上	150
C	一様	17	10.5	17.4	51.6	48.4			
D1	局所		3.0	18.9	52.3	45.9			
D2			3.0	20.2	53.3	43.4			

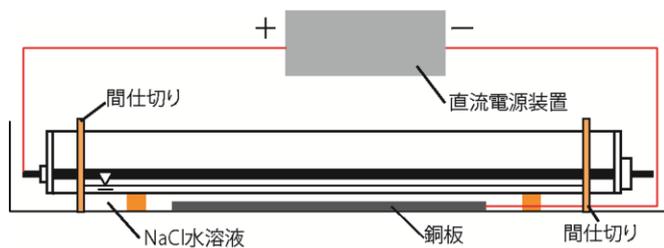


図-2 腐食促進試験概要(一様腐食)

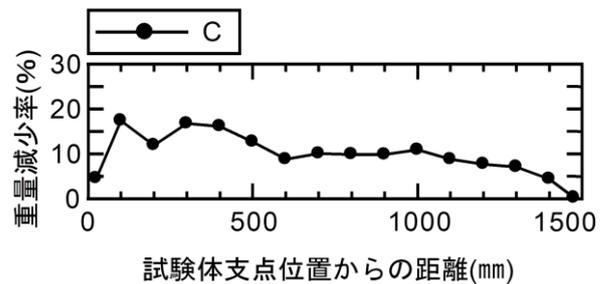


図-4 PC鋼材重量減少率分布(一様腐食)

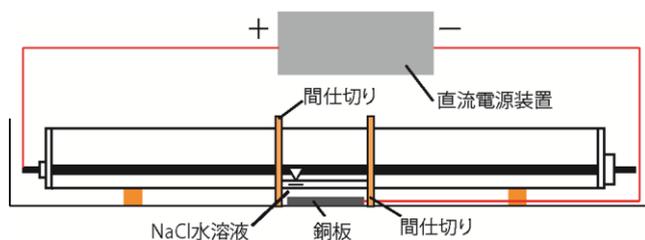


図-3 腐食促進試験概要(局所腐食)

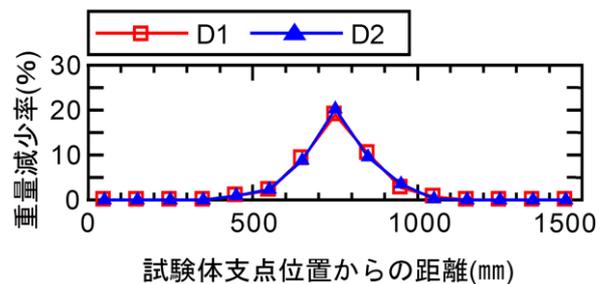


図-5 PC鋼材重量減少率分布(局所腐食)

面 150mm×200mm である。また、スターラップを配置するために試験体軸方向の上部(圧縮側)に鉄筋(D6)、下部(引張側)に木材(φ 10)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、150mm 間隔で配置し、同様にエポキシ樹脂塗料を施した。コンクリートおよびグラウト内には、電食が進むように 3kg/m³ の塩を混入させた。使用した材料の諸元は、表-1 の通りである。

2.2 腐食状況

腐食促進試験の概要を図-2 および図-3 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。なお、局所的な腐食は端部の間仕切りの幅を変え、スパン中央 200mm のみを NaCl 水溶液に浸して通電を行うことで再現した。通電電流量は一様腐食において 3A、局所腐食において 0.5A とし、腐食ひび割れからの腐食生成物の流出を極力抑えるため、水位はシース位置より下になるように調整した。また、通電中、試験体に湿らせた麻袋をかぶせておくことにより、試験体の乾燥防止を図った。

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-4 および図-5 に示す。PC 鋼

表-2 曲げ載荷試験結果

試験体名	腐食方法	PC鋼材重量減少率(%)		最大荷重(kN)	耐力比	最終破壊状況
		平均	最大			
S	健全	0	0	101.0	1.00	圧壊
C	一様	10.5	17.4	45.7	0.45	破断
D1	局所	3.0	18.9	83.7	0.83	圧壊+破断
D2		3.0	20.2	50.6	0.50	破断

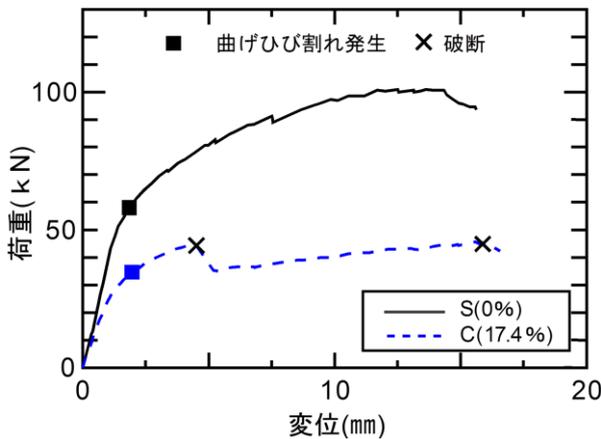


図-6 荷重－変位関係(一様腐食)

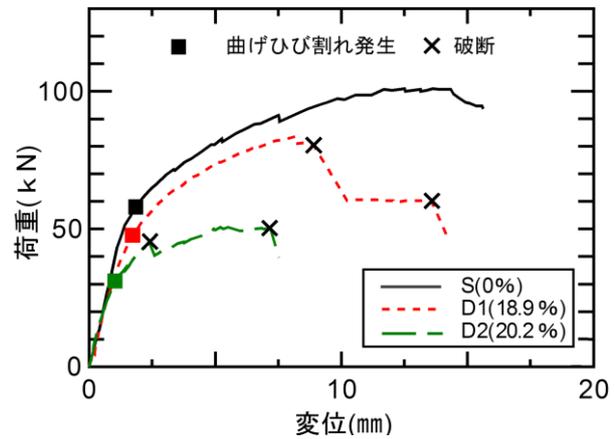


図-7 荷重－変位関係(局所腐食)

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100mmごとの重量を測定することで求めた。各試験体のPC鋼材全体の平均重量減少率と、PC鋼材の最大重量減少率を表-1に示す。一様腐食させた試験体Cでは鋼材が平均的に腐食しており、局所腐食させた試験体D1および試験体D2ではスパン中央に鋼材の腐食が偏っていることが確認できる。



写真-1 試験体腐食状況(供試体C)

試験体Cに対し、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。試験体Cでは、シースはほぼ消失しており、PC鋼材もある程度の腐食が確認できた。一方、試験体D1および試験体D2では、スパン中央付近のみでシースが消失するほどの激しい腐食が生じ、PC鋼材の腐食も確認された。

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-2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-6および図-7に示す。健全な試験体Sでは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、一様に腐食させた試験体Cにおいては、鋼材の破断音とともに耐力の低下に至り、鋼材破断は、PC鋼材の重量減少率が最大となる付近に集中していた。一方、局所的に腐食させた試験

表-3 素線ごとの重量減少率(試験体 C)

試験体名	線名	PC鋼材重量減少率(%)		破断
		平均	最大	
C	全体	10.5	17.4	
	心線	3.6	4.9	
	側線1	12.0	24.7	○
	側線2	11.9	19.7	
	側線3	10.7	24.4	
	側線4	10.4	29.5	○
	側線5	10.3	22.1	
	側線6	10.3	31.8	○

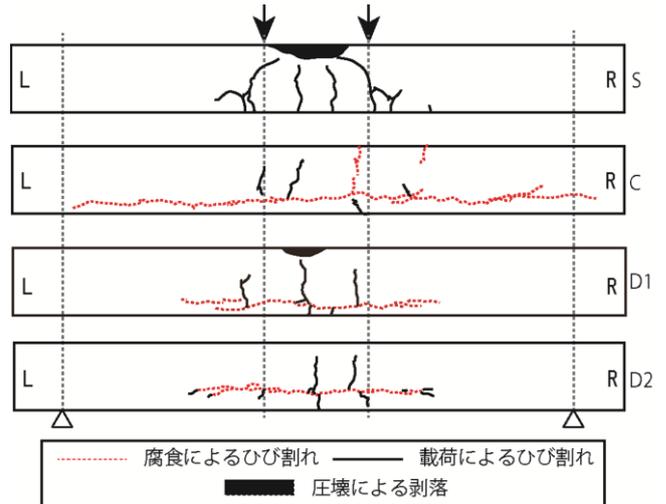


図-8 ひび割れ性状

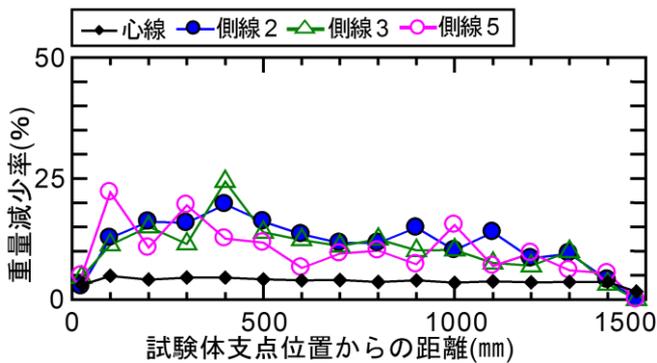


図-9 試験体 C 重量減少率分布(非破断線)

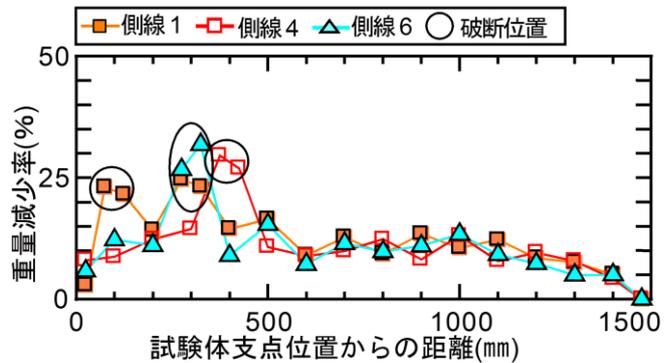


図-10 試験体 C 重量減少率分布(破断線)

体 D1 および試験体 D2 においては、それぞれ破壊形式が異なり、試験体 D1 ではコンクリート上部の圧壊と同時に鋼材の破断が生じて、大きな耐力低下に至ったが、試験体 D2 においては、コンクリートの圧壊前に鋼材の破断とともに耐力低下に至った。

図-6 より一様腐食させた試験体 C 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のもの比べて小さいことが分かる。試験体 C では、PC 鋼材の平均重量減少率が 10%程度で、最大でも 17%程度であるのにも関わらず、約 5 割もの耐力低下が確認できた。一方、図-7 より局所腐食させた試験体 D1 および試験体 D2 においては、鋼材の腐食が進むと耐力および剛性、曲げひび割れ発生荷重の低下が確認でき、鋼材の重量減少率が平均、最大ともに同程度の値を示したのにも関わらず、試験体 D1 においては、剛性および曲げひび割れ荷重の低下が比較的小さく、耐力の低下も約 2 割に止まったのに対し、試験体 D2 においては、試験体 D1 に比べ剛性および曲げひび割れ発生荷重の低下が著しく、約 5 割もの耐力低下を示した。また、耐力低下率が近い試験体 C と試験体 D2 を比較すると、PC 鋼材の最大重量減少率は同程度であるが、試験体全域にわたって腐食している試験体 C の方が、剛性低下が若干大きいことが確認できる。



写真-2 より線の腐食状況(供試体 D2)

表-4 素線ごとの重量減少率(試験体 D1)

試験体名	線名	PC鋼材重量減少率(%)		破断
		平均	最大	
D2	全体	3.0	20.2	
	心線	0.9	3.3	
	側線1	3.0	15.0	
	側線2	3.3	18.4	
	側線3	3.3	21.2	
	側線4	3.9	32.1	○
	側線5	3.9	34.5	○
側線6	3.2	45.6	○	

表-5 素線ごとの重量減少率(試験体 D2)

試験体名	線名	PC鋼材重量減少率(%)		破断
		平均	最大	
D1	全体	3.0	18.9	
	心線	0.9	3.2	
	側線1	3.7	29.8	○
	側線2	3.7	31.8	○
	側線3	3.1	17.3	
	側線4	3.0	17.3	
	側線5	3.2	19.7	
側線6	3.3	31.8	○	

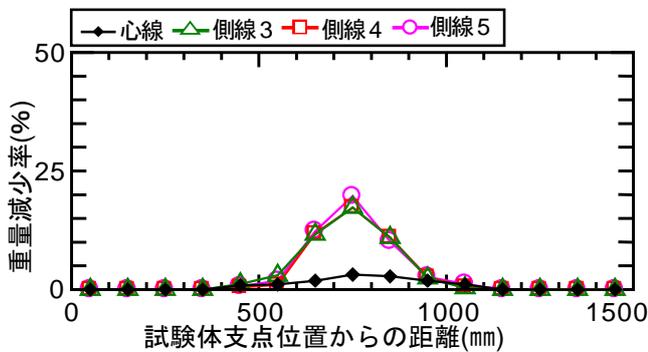


図-11 試験体 D1 重量減少率分布(非破断線)

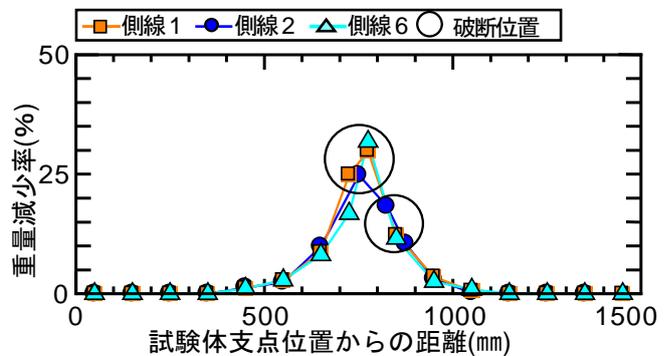


図-12 試験体 D1 重量減少率分布(破断線)

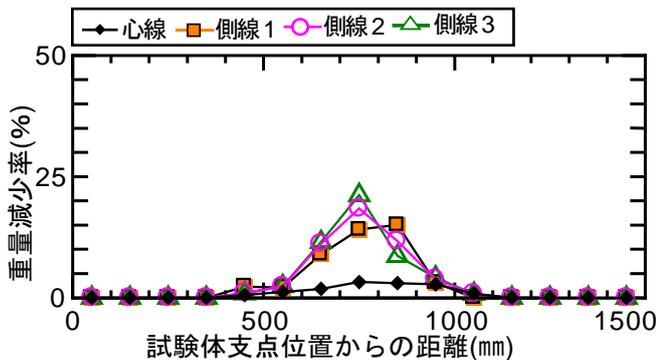


図-13 試験体 D2 重量減少率分布(非破断線)

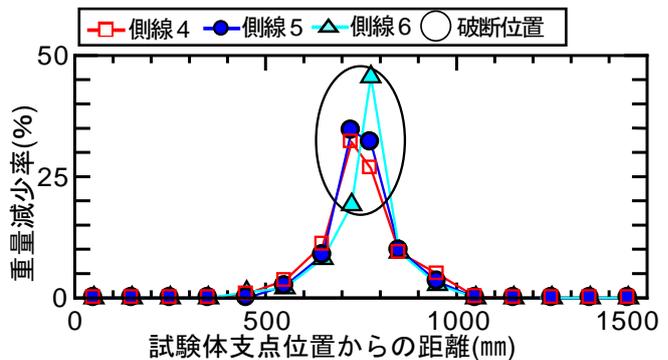


図-14 試験体 D2 重量減少率分布(破断線)

3.2 ひび割れ性状

図-8 に、荷重終了時のひび割れ性状を示す。腐食させた試験体では、シースの位置に腐食ひび割れが生じている。いずれの腐食試験体も、曲げひび割れ間隔が大きくなっており、シースの腐食に伴いシースとコンクリート間の付着が劣化していることが確認できる。

3.3 PC 鋼より線の局所的な腐食の影響

既往の研究²⁾によれば、シースの腐食が著しい場合には、シースとコンクリート間の付着劣化により、耐力が健全なものより 1 割程度低下することが確認されている。一様腐食させた試験体 C では、

PC 鋼材の最大重量減少率は 17%程度であることから、付着劣化と合わせた推定される耐力低下率は 30%にも満たないが、実験の耐力低下率は 55%と非常に大きい。これは PC 鋼材の局所的な腐食によるものと考えられるため、PC 鋼材の腐食分布を詳細に分析した。ここに、試験体 D2 における PC 鋼材の腐食状況を写真-2 に示す。

一様に腐食させた試験体 C における、素線ごとの重量減少率とその分布を表-3 および図 9～図-10 に示す。図より、破断しなかった素線(非破断線)と破断した素線(破断線)を比較すると、素線ごとに腐食量の偏りが見られ、破断線の方が非破断線に比べより腐食していることが分かる。重量減少率が最大となる位置は、等曲げ区間より端部よりであるが、ここに破断が集中していることから、シースの腐食により、シースまたは PC 鋼材とコンクリート間の付着劣化が生じ、PC 鋼材がアンボンドに近い状態であったと推測される。既往の研究¹⁾より、RC 部材の場合では、この程度の腐食で、かつ等曲げ区間外において破断することは考えにくいだが、PC 鋼より線の場合は、応力集中が起きやすく、わずかの腐食でも破断しやすくなるものと考えられる。

次に、局所腐食させた試験体 D1 および試験体 D2 における、素線ごとの重量減少率とその分布を表-4～表-5 および図 11～図-14 に示す。こちらも一様に腐食させた試験体 C と同様に、素線ごとに腐食量の偏りが見られ、破断線の方が非破断線に比べ腐食していることが確認できる。前述のとおり、局所的に腐食させた 2 体では素線 7 本の平均的な腐食量は同程度であるが、破壊メカニズムが異なる結果となった。同試験体の非破断線における素線ごとの重量減少率分布を比較すると大きな差異はないが、破断線における素線ごとの重量減少率分布を比較すると、試験体 D2 の方が試験体 D1 に比べ、より局所的に腐食をしていることが分かる。PC 鋼より線を用いた場合には、PC 鋼材のわずかな腐食の差と 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程度によって、耐荷性状が大きく異なることが確認された。

4. まとめ

本研究では、電食により一様および局所的に鋼材を腐食させた PC はり部材の静的載荷試験により、以下のことが明らかになった。

- (1) 一様に鋼材を腐食させた試験体は、PC 鋼材の最大重量減少率が 17%程度にも関わらず、健全な試験体に比べ 55%もの耐力低下を生じた。
- (2) 局所的に鋼材を腐食させた試験体は、素線 7 本の平均的な腐食量は同程度であるが、破壊メカニズムが異なる結果となった。
- (3) PC 鋼より線を用いた場合には、PC 鋼材のわずかな腐食の差と、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程度によって、耐荷性状が大きく異なることが確認された。

謝辞

本研究に用いた PC はり試験体の製作にあたり、平井圭氏（黒沢建設株式会社）のご協力を得ました。ここに記して、謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 71，2006
- 2) 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