

## PC鋼より線の腐食特性に関する基礎的研究

金沢工業大学大学院

○中島 朋子

金沢工業大学大学院

正会員 博士(工学) 宮里 心一

Abstract : Recently, steel corrosion and break age of PC steel strand has been reported in Japan. The main causes are insufficient filling of grout, and the work of chloride ion. PC steel strand has always tensile stress. Therefore, if a wire of PC steel strand was broken with the corrosion, a bunch of PC steel strand is easily broken. Thus, it is important to understand that corrosion property of PC steel strand. Based on the above background, the purpose of this study is to examine the basic corrosion property of PC steel strand. In the experiment, the polarization curve is measured. As a result, the PC steel strand with tensile corrodes more than that without tensile.

Key words : PC steel strand, tensile stress, corrosion, polarization curve

## 1. はじめに

1980年代頃から、プレストレストコンクリート構造物(以下、PC構造物)には、コンクリートとの付着強度などを考慮して、PC鋼より線(以下、より線)が使用されるようになった。PC構造物は、鉄筋コンクリート構造物と比較して、ひび割れが生じにくく、さらに水セメント比も低いことから、耐久性に優れている。しかしながら、近年、PC構造物に埋設された、PC鋼材の腐食や破断が報告されている。その主な原因は、施工時のグラウトの充填不足や供用中の塩化物イオンの作用である。一方で、より線をコンクリートに埋設した場合、束の内部までモルタルペーストが浸透せず、局部腐食が生じる懸念もある。より線は、常時引張力が作用しているため、1本のより線が破断すると、1束の破断に至る場合もある。また、より線の破断は、PC構造物のぜい性的な耐力低下につながる<sup>1)</sup>。そのため、より線の腐食特性を解明することが重要である。

以上の背景を踏まえて本研究では、より線の腐食特性を解明することを目的とし、要素実験を行った。すなわち、実験1では、塩害および中性化の環境を模擬した、pHの異なる2種類の水酸化カルシウム水溶液中において、より線の腐食特性を検討した。また、実験2では、塩害の影響を受けたPC構造物を模擬し、NaClを添加したモルタル硬化体中において、より線および素線の腐食特性を検討した。

## 2. 試験に供したより線および素線

使用する鋼材は、JIS G 3536 SWPR7AL,  $\phi 9.3\text{mm}$ のPC鋼より線(7本より)とした。また、このより線をバラバラにしたものを素線とした。より線および素線の機械的性質を表-1に示す。次に、引張試験の概要を図-1に示す。より線の引張は、油圧ジャッキにより

与えた。なお、緊張力は室内での引張負荷であること等を考慮し、降伏点荷重(75.5kN)の80%を目標値とした。また、緊張の際コンクリート供試体に埋設されていない、図-1の(1)点および(2)点のより線表面の凹みをエポキシ樹脂で埋めたのちひずみゲージを貼りつけ、データロガーにてひずみを測定した。その結果、緊張前後でのひずみは、 $3520\mu$ であった。また、除荷したのちも、より線はバラバラにならずに束のままであり、引張を与えたより線および素線では、同等のひずみが生じたと仮定した。

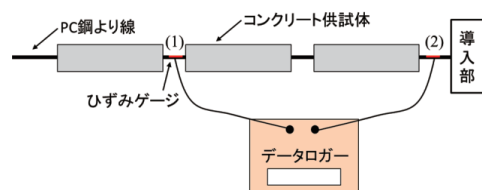


図-1 引張試験の概要

なお、3章の実験1では、引張を受けたより線を使用した。また、4章の実験2では、引張を受けたより線、引張を受けていないより線、引張を受けた素線、引張を受けていない素線の4種類を使用した。

表-1 より線および素線の機械的性質

鋼材	径 (mm)	最大荷重 (kN)	0.2%永久伸びに対する試験力 (kN)	伸び (%)	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
より線	9.23	96.9	87.9	7.8	193
素線	2.98	—	—	—	—

3. 実験1 (溶液中における腐食)

3.1 実験手順

実験ケースを表-2に示す。溶液のpHは、既往の文献<sup>2)</sup>を参考に、pH=8.5およびpH=12.4とした。ここで、前者は顕著に中性化したコンクリートを、後者は中性化していないコンクリートを模擬したものである。なお、pHは、Ca(OH)<sub>2</sub>により調整した。次に、塩化物イオン濃度(以下、Cl<sup>-</sup>濃度)は、0%および16%の2水準とし、NaClの添加により調整した。

この溶液に引張を受けたより線を浸漬し、1週間後に取り出し、分極曲線を測定した。なお、参照電極にはAg/AgClを用い、走査速度は1mV/sとした。

3.2 実験結果

Cl<sup>-</sup>濃度=0%の溶液中に浸漬後の様子を写真-1に示す。pH=12.4では、より線表面および溶液に錆は確認されなかった。一方、pH=8.5では、より線の表面に錆が確認され、溶液が茶色に変色したことが分かる。

より線に分極曲線の測定結果を図-2に示す。なお、電流密度の算定に用いる表面積は、図-3に示す2通りが考えられる。ただし、図-2中の(a)と(b)で著しい差がないことから、本研究では緊張が解放されていることを考慮し、(a)の表面積により算定された電流密度を分極曲線の作図に用いた。

ここで、図-2によれば、同一のpHであれば、Cl<sup>-</sup>濃度が16%では0%と比較して、アノード腐食電流は流れやすいことが確認された。また、同一のCl<sup>-</sup>濃度であれば、pHが8.5では12.4と比較して、アノード腐食電流はわずかに流れやすいことが確認された。

表-2 実験1ケース

pH \ Cl <sup>-</sup> 濃度(%)	0	16
	8.5 (8.5~7.6)	●
12.4 (12.4~11.7)	●	●

注：( )内は浸漬中の変化を測定した値。



写真-1 模擬浸漬溶液試験の様子 (左: pH=12.4, 右: pH=8.5)

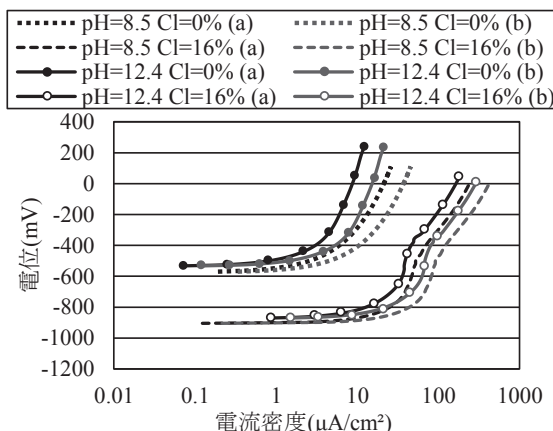


図-2 実験1のアノード分極曲線

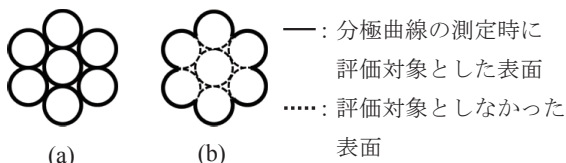


図-3 より線の表面積

4. 実験2 (モルタル硬化体中における腐食)

4.1 実験手順

試験体を図-4に示す。試験体は、長さが15mmの素線あるいはより線とし、おのおのの一端面にリード線をはんだ付けしたのち、接続部をエポキシ樹脂にて被覆した。この試験体を表-3に示す配合のモルタル中に埋設した。セメントには普通ポルトランドセメントを用いた。また、塩害の影響を受けたコンクリートを模擬するために、Cl<sup>-</sup>が15kg/m<sup>3</sup>となるようにNaClを予め練混ぜ水に添加した。供試体の概要を図-5に示す。供試体は、打設翌日に脱型を行い、27日間の中水養生後、分極曲線を測定した。なお、測定方法は実験1と同様とした。

表-3 モルタル配合

W/C (%)	S/C	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )		
		W	C	S
50	3.0	253	507	1523

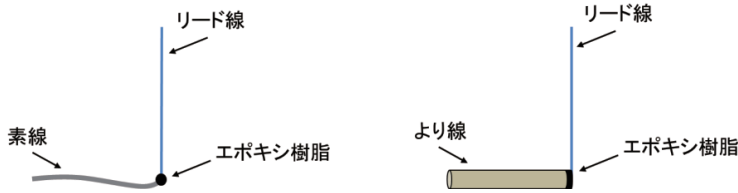


図-4 試験体概要 (左:素線, 右:より線)

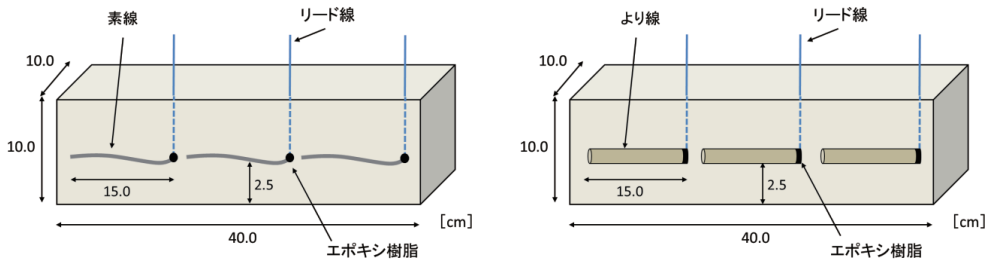


図-5 供試体概要 (左:素線, 右:より線)

4.2 実験結果

分極曲線の測定結果を図-6~図-8に示す。

4.2.1 アノード分極曲線

図-6によれば、より線と素線では共に、引張ありのケースが、引張なしのケースと比較して、アノード腐食電流が流れやすい傾向にあることが確認された。既往の文献<sup>3),4)</sup>によると、鋼材に作用する応力の増加に伴い、不動態皮膜が破壊されやすくなるとされている。したがって、本研究でも引張ありのケースが引張なしのケースと比較して、アノード腐食電流が流れやすい傾向を示したと考えられる。次に、炭素鋼とより線の比較を図-7に示す。ここで用いる炭素鋼のアノード分極曲線は、最大ひずみ履歴0μまたは14000μを与え、「水酸化カルシウム水溶液(pH=12.4, NaCl=3.0%, 温度20℃):1日+乾燥(20℃, RH60%):2.5日」を1サイクルとした環境にて乾湿繰返しを行い、暴露28日目に測定したものである<sup>5)</sup>。これによると、14000μのひずみを与えた炭素鋼および3520μのひずみを与えたより線は、引張なしのケースと比較してアノード腐食電流は流れやすいことが確認された。

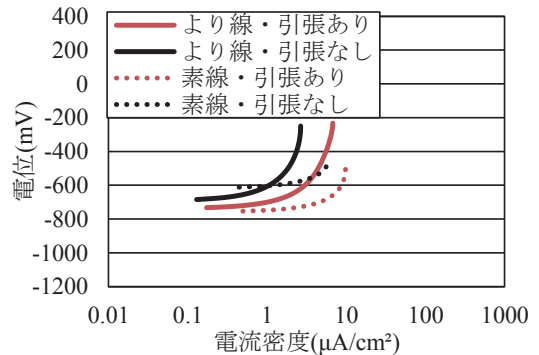


図-6 実験2のアノード分極曲線

### 4.2.2 カソード分極曲線

図-8によれば、より線および素線の両ケースにおいて、引張の有無による差は確認されなかった。これは、一般に、コンクリート中の鉄筋は、酸素供給量により律速される<sup>6)</sup>。したがって、かぶりコンクリート(かぶりモルタル)の品質が同じであれば、鉄筋への酸素供給量は変化せず、その結果として今回の実験ではひずみ履歴により鋼材の表面が多少変化しても、その影響はカソード分極曲線へ顕著に現れなかったものと考えられる。

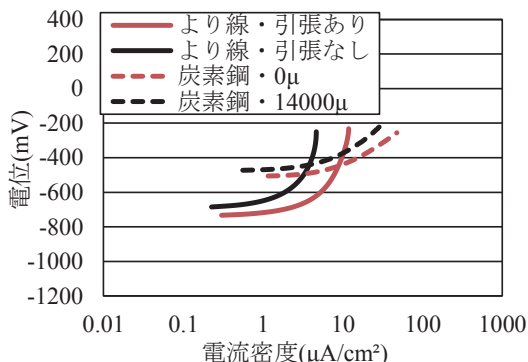


図-7 炭素鋼とより線の比較

### 5. まとめ

- 1) 引張を受けたより線の水酸化カルシウム水溶液中の腐食特性は、pHが12.4に比較して8.5において、またCl濃度が0%に比較して16%において、アノード腐食電流が流れやすい。
- 2) 3520μの引張ひずみを受けたPC鋼より線は、引張を受けていないPC鋼より線と比較して、セメント硬化体中で、アノード腐食電流は流れやすい。一方、カソード分極曲線に、引張履歴は影響を及ぼさない。

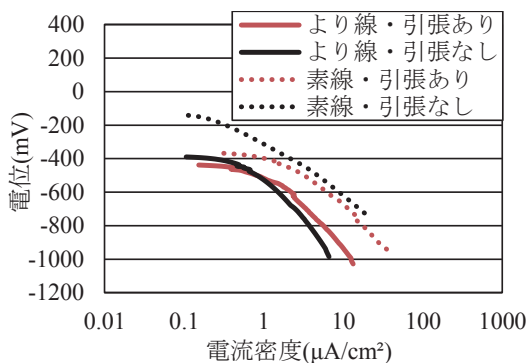


図-8 実験2のカソード分極曲線

### 謝辞

本研究は、SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)および科研費(No.26289137)の一環として実施したものである。ここに記して感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 村上祐貴, 内山拓也, 井林康, 田中泰司: 塩害により損傷を受けた実橋プレテンションPC桁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.839-844, 2011
- 2) 山路徹, 濱田秀則, 水間誠治, 山本俊彦: 海洋環境下におけるステンレス鉄筋の耐食性に関する研究, 土木学会論文集E, Vol.66, No.2, pp.207-220, 2010
- 3) 松塚忠政, 渡辺博志, 古賀裕久, 中村英佑: 塩分を含むコンクリート中のPC鋼より線の腐食評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.919-924, 2005
- 4) 菅原博勝, 五藤寛丈, 小茂鳥潤: Ni-Ti 形状記憶合金の腐食挙動に及ぼす応力負荷およびひずみの影響, 材料と環境 2005 講演集, No.C-117, pp.285-288, 2005
- 5) 東洋輔, 宮里心一: 応力負荷を受けた鉄筋のモルタル中における腐食特性の解明, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, Vol.61, No.5, pp.503-504, 2006
- 6) 宮川豊章, 松村卓郎, 小林和夫, 藤井学: 鋼材腐食からみたコンクリート中での酸素透過性の検討, 土木学会論文集, 第408号, V-11, pp.111-120, 1989