

## 環境の違いや緊張力の有無がPC鋼材の腐食に与える影響

京都大学 工博 ○高谷 哲  
 住友大阪セメント(株) 工博 中村 士郎  
 京都大学 正会員 工博 山本 貴士  
 京都大学 正会員 工博 宮川 豊章

Abstract : Recently, steel corrosion in PC structures have been focused on. Though many studies on corrosion property in RC structures have been carried out, studies on corrosion property in PC structures are lacking. Therefore, the difference of corrosion property between PC bar and PC strand, or influence of tensile stress on corrosion of tendon are still unclear. Then, in this study, wet-dry cycle test, salt spray test, and electric corrosion test for PC tendon and electric corrosion test for PC tendon in concrete are carried out, and with the results influence of corrosion environment and tension on corrosion property of PC tendon are investigated.

Key words : PC tendon , tension, corrosion environment, corrosion products

### 1. はじめに

適切に設計・施工されたPC構造物であれば、PC鋼材はグラウトに保護されているため腐食しにくい状態となっている。しかし、近年、グラウト充填不良によるPC鋼材の腐食が注目されるようになってきている。PC鋼材の腐食が進行すると破断に至り、構造耐荷力を大きく低下させる危険性もある。そのため、PC構造物に生じるひび割れとPC鋼材腐食の関係<sup>例えば1)2)</sup>や、PC鋼材の腐食が構造耐荷力に与える影響<sup>例えば3)4)</sup>など、様々な研究が行われるようになってきている。しかし、PC鋼材の腐食特性に関する研究は少なく、PC鋼棒とPC鋼より線の腐食挙動の違いや、緊張力が腐食に与える影響、腐食環境がPC鋼材の腐食に与える影響などについては検討事例が少なく、不明確な点が多いのが現状である。

鉄系の腐食生成物には酸化鉄、水酸化鉄、オキシ水酸化鉄などがあり、これまでに約20種類確認されている。各腐食生成物の生成条件が異なるため、鋼材の種類や腐食環境により、生じる腐食生成物が異なると考えられる。既往の研究を元に、コンクリート中で生成する可能性のある主な腐食生成物の反応経路を整理した結果を図-1に示す。本研究では、様々な環境下でPC鋼材を腐食させ、生じる腐食生成物を分析することにより、鋼棒とより線の腐食特性の違いや、緊張力の影響、腐食環境の影響について検討を行った。

### 2. 実験概要

#### 2. 1 実験要因

実験要因は、鋼材の種類 (D19異形棒鋼,  $\phi 9.2$ PC鋼棒,  $\phi 12.7$ PC鋼より線の3種類), 腐食方法 (鋼材単体電食, 鋼材単体乾湿繰り返し, 鋼材単体塩水散布, コンクリート埋設鋼材電食の4種類), 緊張力の有無とし、表-1に示す計20要因 (各1体) について検討を行った。ポストテンション方式PC構造物の場合には、PC鋼材はグラウトに保護されているが、本実験では異形棒鋼との比較を行うために、コンクリート中で検討を行っている。

腐食区間は、異形棒鋼については300mm, PC鋼材については400mmとし、腐食させない部位はブチルゴムテープとペトラタム系防食テープを用いて防食処理を施した。

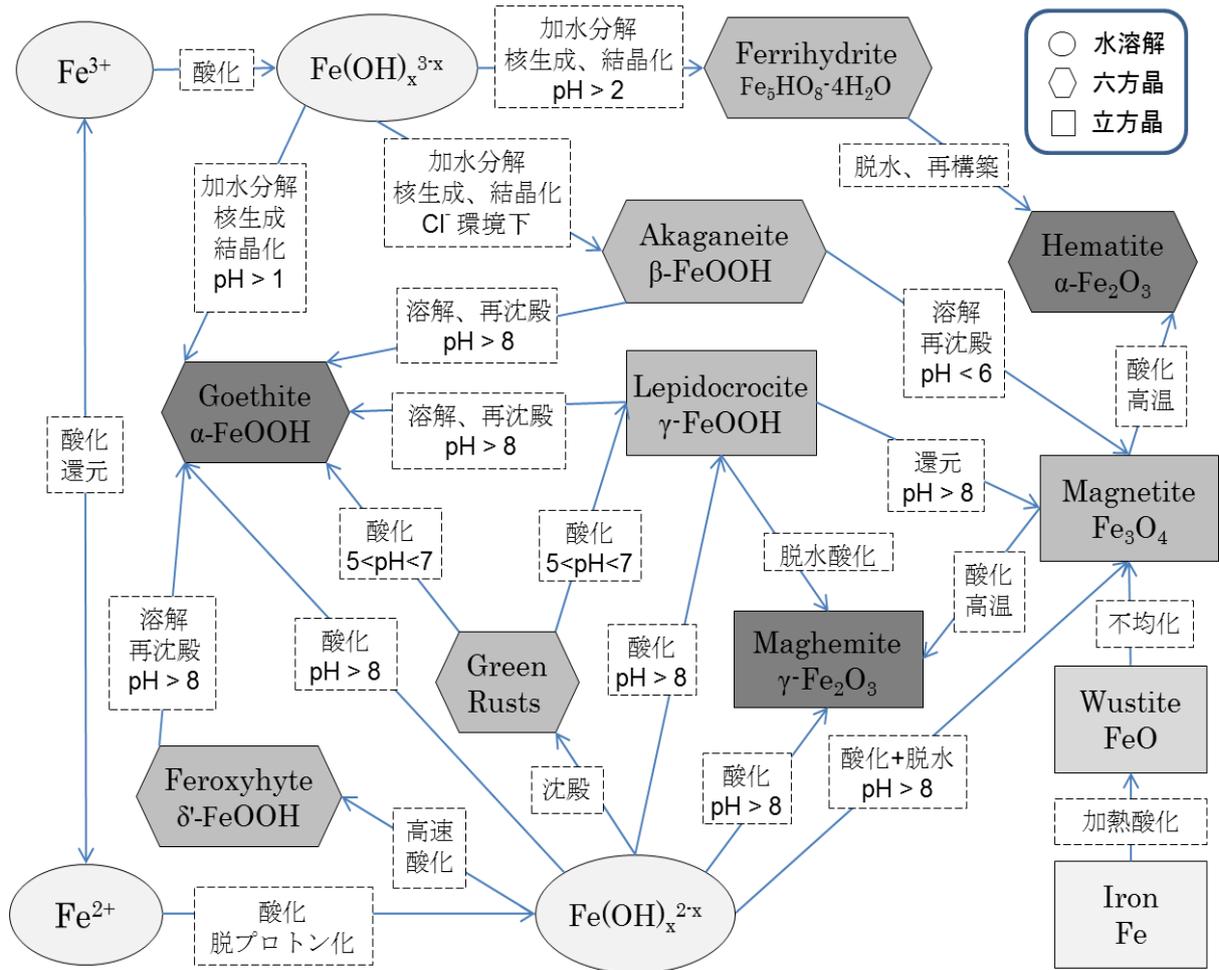


図-1 腐食生成物の反応経路<sup>5) 6) 7)</sup>

緊張力は、最大引張荷重Puの70%とし、PC鋼棒については50.3kN、PC鋼より線については128kNの緊張力を導入した。鋼材単体の腐食試験については図-2に示すコンクリート製の緊張力保持器（100×100×400mmの角柱供試体に幅16mm、深さ50mmのスリットを設けたもの）を用いて、緊張力を導入した状態で腐食試験を行った。

## 2. 2 腐食方法

### (1) 鋼材単体電食

鋼材単体の電食試験は、3%NaCl水溶液中に浸せきした鋼材を陽極、銅板を陰極として1.22mA/cm<sup>2</sup>の電流密度を24時間供給して行った。

### (2) 鋼材単体乾湿繰り返し

鋼材単体の乾湿繰り返し試験は、5日間の湿潤環境（40℃、95%RH）、2日間の乾燥環境

表-1 供試体一覧

鋼材の種類	緊張力	腐食環境
異形棒鋼	—	電食
		乾湿繰り返し
		塩水散布 コンクリート中電食
PC鋼棒	無	電食
		乾湿繰り返し
		塩水散布 コンクリート中電食
	有	電食
		乾湿繰り返し
		塩水散布 コンクリート中電食
PC鋼より線	無	電食
		乾湿繰り返し
		塩水散布 コンクリート中電食
	有	電食
		乾湿繰り返し
		塩水散布 コンクリート中電食

(20°C, 40%RH) を1サイクルとし, これを3サイクル行った。

(3) 鋼材単体塩水散布

鋼材単体の塩水散布試験は, 20°C, 40%RHの恒温室に存置した鋼材に, 3%NaCl水溶液を一日に2度全体的に散布することを3週間繰り返して行った。

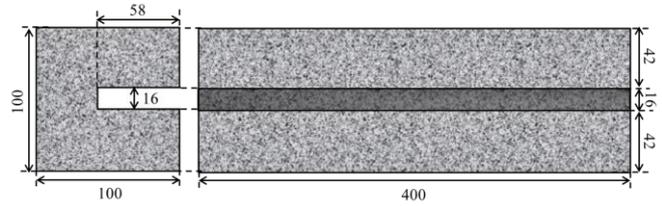


図-2 コンクリート製緊張力保持器

(4) コンクリート埋設鋼材電食

コンクリート埋設鋼材の電食については, 100×100×400mmの角柱供試体とし, かぶり20mmの位置に鋼材を1本配置した。セメントは早強セメントを使用し, W/Cは60%とした。供試体を3%NaCl水溶液中に浸せきし, 鋼材を陽極, 銅板を陰極として1.22mA/cm<sup>2</sup>の電流密度を24時間供給して行った。緊張力有の試験体に関しては, 緊張力を導入した後にコンクリートを打設している。

2. 3 腐食生成物の分析

腐食試験終了後に鋼材を取り出し, 粉末X線回折により腐食生成物の分析を行った。腐食生成物は, ステンレス製のノミを用いて鋼材から削り取ることにより採取した。腐食生成物の同定は, 各腐食生成物のピークリスト中の3強線を主に用いて行った。分析対象とした化合物は, 鉄, Goethite, Akaganeite, Lepidocrocite, Ferrihydrite, Wustite, Hematite, Maghemite, Magnetite, 塩化酸化鉄(III)カルシウム, 水酸化鉄(II), 水酸化鉄(III), 塩化水酸化鉄, 水酸化カルシウム, 炭酸カルシウム, 酸化カルシウム, 塩化ナトリウム, α-石英, Green rust (I)の20種類である。

3. 実験結果および考察

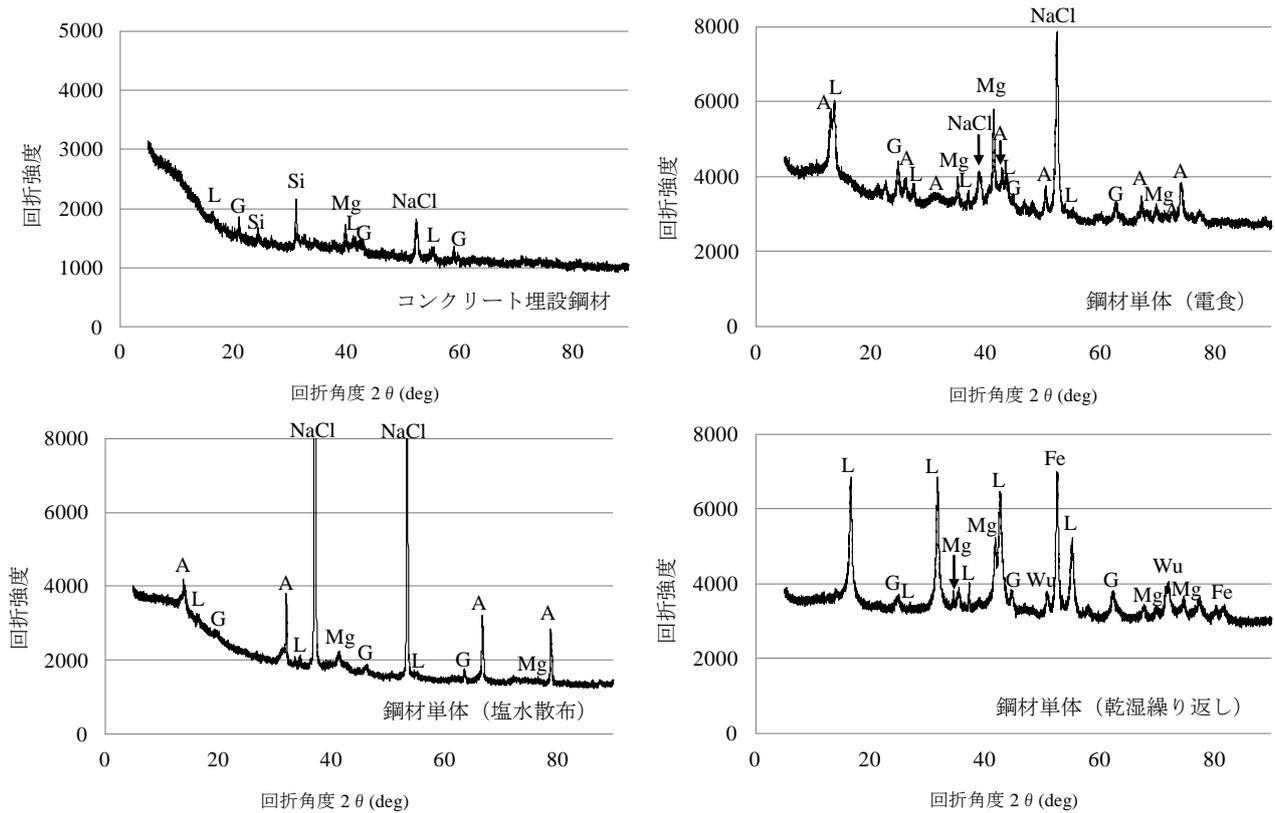
3. 1 腐食生成物分析結果

各試験条件下で得られた腐食生成物を表-2に示し, X線回折チャートの一例としてPC鋼より線(緊張無)の結果を図-3に示す。表中の○はX線回折により得られた腐食生成物を表しており, △はピークが小さく生成が明確に確認できなかったものを表している。なお, 表中には分析により得られた化合物の中から鉄系の化合物のみを抜粋して掲載している。

本研究において行ったX線回折では定量分析を行うことができなかったが, 概ね同量の試料(0.1g)を用いて分析を行ったため, ピーク高さの違いから生成量の多寡もある程度議論できると考

表-2 X線回折による腐食生成物分析結果

鋼材の種類	緊張力	腐食環境	腐食生成物								
			鉄	Goethite	Akaganeite	Lepidocrocite	Magnetite	Ferrihydrite	Wustite	塩化酸化鉄(III)カルシウム	塩化水酸化鉄
異形棒鋼	—	電食		○	○	△	○				
		乾湿繰り返し		○		○	○				
		塩水散布		○	○	○	○				
		コンクリート中電食		○		○	○			○	○
PC鋼棒	無	電食		○	○	△	○				
		乾湿繰り返し		○		○	○				
		塩水散布		○	○	○	○				
		コンクリート中電食		○		○	○			○	○
	有	電食		○	○	△	○				
		乾湿繰り返し		○		○	○				
		塩水散布		○	○	○	○				
		コンクリート中電食		○		○	○			○	○
PC鋼より線	無	電食		○	○	○	○				
		乾湿繰り返し	○	○		○	○		○		
		塩水散布		○	○	○	○				
		コンクリート中電食		○		○	○			△	
	有	電食		○	○	○	○				
		乾湿繰り返し		○		○	○	○			
		塩水散布		○	○	○	○				
		コンクリート中電食		○	○	○	○			○	



G: Goethite, A: Akaganeite, L: Lepidocrocite, Mg: Magnetite, Wu: Wustite, Ca-Fe-Cl: 塩化酸化鉄(III)カルシウム, Si: Quartz

図-3 X線回折チャートの一例 (PC 鋼より線, 緊張力無)

え, 以下の考察では量的な検討も行っている。ただし, コンクリート中で行った電食試験では得られた腐食生成物が0.1gに満たなかったため, 量的な検討からは除外している。

### 3. 2 腐食生成物の特性から考える各要因の影響

#### (1) Goethite

Goethiteは全ての要因で生成が確認された。このことから, Goethiteはどのような腐食環境でも生成しやすい腐食生成物であると考えられる。ただし, 明確なピークは確認されているが, Goethiteの生成量が他の腐食生成物に比べて多いかどうかは議論できない。

#### (2) Akaganeite

Akaganeiteは塩化物イオン存在下で生成することが知られている腐食生成物である。コンクリート中で腐食させた場合の結果を見てみると, 異形棒鋼やPC鋼棒は緊張力の有無に関わらずAkaganeiteの生成は確認されなかった。X線回折チャートではいずれの場合もNaClは確認されており, 図-1に示すようにコンクリート中が高アルカリ環境であるために, AkaganeiteがGoethiteやMagnetiteに変化したと考えられる。PC鋼より線の場合には, 緊張力有の場合でAkaganeiteの生成が確認された (図-

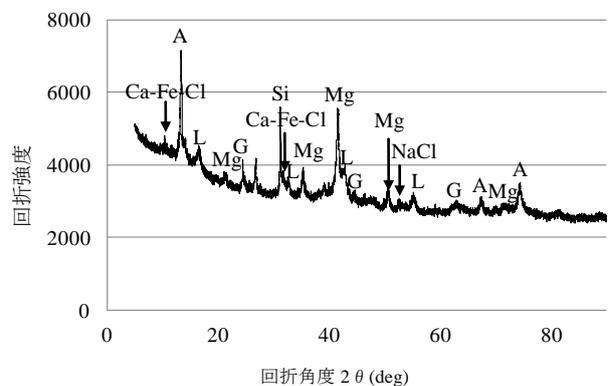


図-4 コンクリート中で電食させたPC 鋼より線 (緊張力有) の X線回折チャート

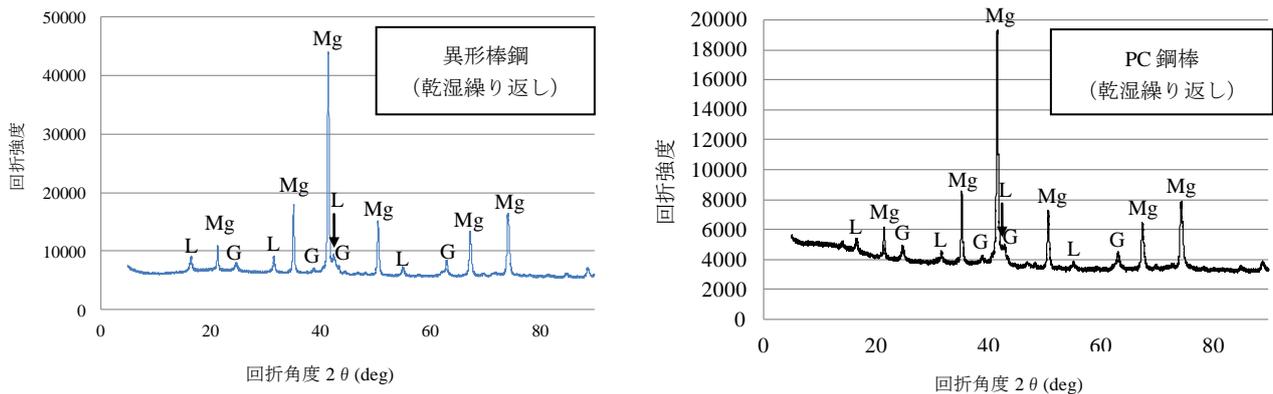


図-5 異形棒鋼およびPC鋼棒（緊張力無）の乾湿繰り返し試験結果

4)。より線は素線にばらして錆を採取しており、本実験で分析を行った試料中にはより線内部の錆とより線外部の錆が混在していると考えられる。アルカリ領域では生成しない腐食生成物が確認されたことから、より線内部では高アルカリ環境でない領域が存在していると考えられる。

### (3) Lepidocrocite

LepidocrociteもAkaganeiteと同様に高アルカリ環境下ではGoethiteやMagnetiteに変化することが知られており、コンクリート中で腐食させた場合には異形棒鋼やPC鋼棒では明確な生成が確認されなかった。しかし、PC鋼より線の場合にはコンクリート中でも緊張力の有無に関わらずLepidocrociteの生成が確認されており、このことからより線内部に高アルカリ環境でない領域が存在していたことが分かる。

### (4) Magnetite

Magnetiteも全ての要因で生成しているが、異形棒鋼およびPC鋼棒の腐食試験の結果を見ると、乾湿繰り返しにより腐食した場合にはMagnetiteのピークが他の腐食試験に比べて明らかに高くなっており、Magnetiteは乾湿繰り返し環境下で特に生成しやすい腐食生成物であると考えられる。異形棒鋼およびPC鋼棒（緊張力無）の乾湿繰り返し試験のX線回折チャートを図-5に示す。しかし、図-3を見ると分かるように、PC鋼より線の場合には、Magnetiteの大きなピークは見られない。このことから、より線内部には常に水が存在しており、Magnetiteが生成しにくかったと考えられる。

### (5) 塩化酸化鉄(Ⅲ)カルシウム

コンクリート中の鋼材に対して電食試験を行った場合でのみ生成した塩化酸化鉄(Ⅲ)カルシウムは、生成過程などが明らかになっていない腐食生成物である。コンクリート中の鋼材の電食試験は、供試体をNaCl水溶液に浸せきして行っているため、細孔がCa(OH)<sub>2</sub>とNaClaqにより満たされていると考えられる。塩化酸化鉄(Ⅲ)カルシウムの鉄の価数がⅢ価であることを考えると、Fe(OH)<sub>3</sub>がGoethiteあるいはAkaganeiteに結晶化する過程でCa<sup>2+</sup>とCl<sup>-</sup>が取り込まれて生成したと考えられる。

PC鋼より線の腐食試験において、緊張力無の場合には生成しなかったが、緊張力有の場合には生成が確認されている。このことから、より線に緊張力が加わることで、素線同士の間隙が狭くなり、接触角が小さくなったことで、塩化物イオンが毛細管現象により内部に浸透しやすくなったと推察される。

### (6) 塩化水酸化鉄

コンクリート中で電食させた異形棒鋼やPC鋼棒では塩化水酸化鉄の生成が確認された。塩化水酸化鉄も一般的に知られていない腐食生成物であり、生成環境などは明らかになっていないが、化学式を見ると、Ⅱ価とⅢ価の鉄の複合構造で、水酸化鉄中のOH<sup>-</sup>がCl<sup>-</sup>に置換した構造となっている。水酸化鉄

は非晶質であり、徐々に酸化されてオキシ水酸化鉄や酸化鉄などの結晶に変化することが知られている。つまり、水酸化鉄は腐食生成物の生成過程における中間生成物であると言える。コンクリート中で電食試験を行った場合、水酸化鉄の生成速度は大きいですが、酸素が少ないため、その後の酸化速度は遅いと考えられ、未反応の水酸化鉄中にCl<sup>-</sup>が取り込まれて塩化水酸化鉄が生成したと考えられる。しかし、コンクリート中で電食したPC鋼より線の場合には塩化水酸化鉄の明確な生成が確認されなかった。このことから、より線の間隙から侵入した酸素の影響で水酸化鉄からオキシ水酸化鉄への酸化速度が異形棒鋼やPC鋼棒に比べて大きかったと考えられる。

### 3. 3 PC鋼材の腐食特性

以上より、PC鋼棒およびPC鋼より線の腐食特性を整理すると、PC鋼棒の腐食特性は異形棒鋼の腐食特性と大きく変わらないと考えられる。一方で、PC鋼より線の腐食特性は異形棒鋼やPC鋼棒と異なり、特に緊張力有の場合には、水や塩化物イオンなどが素線の間隙からより線内部に浸透しやすく、より線内部ではより線外部とは異なる環境になっている可能性があることが分かった。また、PC鋼より線の場合には、より線の間隙から酸素が侵入する可能性もあると考えられる。

一般に、グラウトが十分に充填されている場合にはPC鋼材は腐食しにくいと考えられているが、本研究で得られたPC鋼より線の腐食特性を考えると、グラウトに空隙がある場合には、水や酸素、塩化物イオンなどの劣化因子がより線内部に侵入し、より線内部の腐食の危険性も高まると考えられる。

## 4. 結論

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

- (1) 鋼材の腐食生成物に与える環境の影響は大きく、腐食環境や、鋼材の種類、緊張力の有無によって生じる腐食生成物は異なる。
- (2) 異形棒鋼とPC鋼棒の腐食特性は大きくは変わらないが、PC鋼より線の場合には、より線内部に高アルカリ環境下になっていない領域が存在しており、また、より線の間隙から水や酸素、塩化物イオンといった劣化因子が侵入することにより、腐食特性が異なる。
- (3) より線に緊張力が加わると、素線間の間隙が狭くなり、毛細管現象により水や塩化物イオンがより線内部に侵入しやすくなる可能性がある。

## 謝辞

本研究を行うに当たり、京都大学の宇野祐司氏、株式会社中研コンサルタントの中山公彦氏ならびに北之防敏成氏には多大なるご協力をいただいた。ここに謝意を表したい。

## 参考文献

- 1) 中村典昭, 睦好宏史, Ha Minh, 谷口博胤: グラウト充填率がPC梁の腐食劣化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.661-666, 2005.
- 2) 鈴木佑典, 近藤拓也, 山本貴士, 宮川豊章: PC部材中のシーす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, pp1091-1096, 2011.
- 3) 睦好宏史, 谷口博胤, 今野洋一, Ha MINH, 二井谷教治: PC鋼材の腐食によるプレストレストコンクリート橋梁の耐久性, 埼玉大学地域共同研究センター紀要, Vol.3, pp.85-91, 2002.
- 4) 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, pp1489-1494, 2011.
- 5) 三沢俊平: 鉄鋼の湿食形態と腐食生成物, 日本金属学会会報, 第24巻, 第3号, pp.201, 1985.
- 6) 三沢俊平: 鉄さび生成の現状と未解明点, 防食技術, 32, pp.657-667, 1983.
- 7) R. M. Cornell, U. Schwertmann: The Iron Oxides, VHC, 1996.