

# 論文 腐食促進実験による RC および PRC 梁の鉄筋腐食に関する研究

川名 桂子\*1・西岡 友樹\*2・睦好 宏史\*3・浅本 晋吾\*4

**要旨:** 本研究は、ひび割れを人為的に導入した RC 部材および PRC 部材を対象に、腐食促進実験を行って各部材の劣化メカニズムについて実験的検討を行い、鋼材腐食による劣化後の供試体の状態を実環境下における供用年数と関連付けるために、Fick の拡散則やファラデーの法則を用いて解析的検討を行った。その結果、腐食環境下においては、ひび割れの発生を許容する RC 部材に比べ、ひび割れ幅を制御することができる PRC 部材の方が鋼材腐食の進行を抑制できることが明らかとなった。飛沫帯環境下で供用されたと仮定した場合、PRC 供試体は通電を開始してから、2 週間で実構造物の約 32 年間に相当することが確認された。

**キーワード:** 塩害、腐食促進実験、曲げひび割れ幅、供用年数

## 1. はじめに

コンクリート構造物の高齢化が深刻となる時代を迎えつつあり、耐久性評価方法や劣化予測手法の確立は急務であるといえる。既往の研究として、著者らは PC 部材を対象に通電による腐食促進実験を行い、供試体の劣化状況を実環境下における供用年数と関連付けるための解析的検討を行った<sup>1)</sup>。既往の研究で実験対象とした PC 部材はひび割れを許容しないため、耐腐食性を考えると、ひび割れを許容する RC 部材および PRC 部材よりも優れていると考えられる。

淵上らの研究<sup>2)</sup>では、鉄筋量を減じた PRC 部材は、腐食環境下においてひび割れの発生を許容する場合にひび割れ幅の増大を助長するという構造的弱点が指摘されている。しかしながら、RC、PRC、PC 部材において、ひび割れの有無あるいはひび割れ幅の制御方法の違いが塩化物イオンによる鋼材腐食に及ぼす影響について、現状明らかにされているとは言い難い。

本研究はひび割れを人為的に導入した RC 梁および PRC 梁に対して腐食促進実験を行い、各梁の鋼材腐食による劣化メカニズムについて実験および解析的に明らか

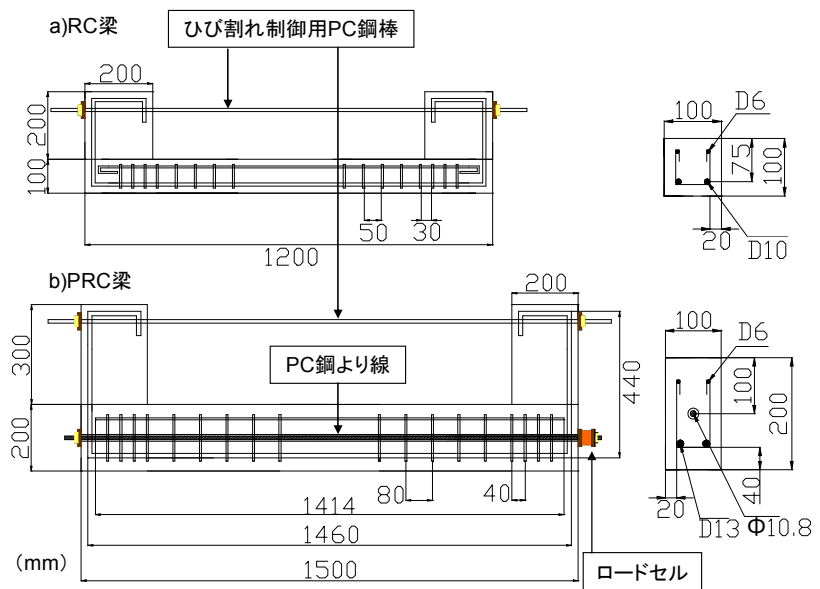


図-1 供試体の形状寸法

かにすることを目的としたものである。

## 2. 実験的検討

### 2.1 配合および供試体

RC および PRC 梁部材に用いたコンクリートの示方配合を表-1 に、実験に用いた供試体の形状寸法を図-1 に示す。実験に用いた梁供試体は図-1 に示すように、RC 供試体は、断面 100mm×100mm、全長 1200mm で、PRC 供試体は、断面 100mm×200mm、全長 1500mm で、

表-1 コンクリートの示方配合

組骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	11	40	2	39.2	192	479	635	1009

\*1 埼玉大学 理工学研究科 環境システム工学系専攻(正会員)

\*2 埼玉大学 理工学研究科 環境システム工学系専攻

\*3 埼玉大学 大学院 教授 工博 (正会員)

\*4 埼玉大学 大学院 助教 博士 (工学) (正会員)

表-2 実験要因および荷重実験結果

供試体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	通電日数 (日)	材齢 (日)	導入曲げひび割れ幅 (mm)	終局耐力 (kN)	終局耐力減少率 (%)	引張鉄筋質量減少率 (%)
RC-ref	51.5	0	20	0	39.83	0	0
RC-14-0	51.5	14	34	0	22.8	42.8	41.4
RC-14-007	51.5	14	34	0.07	19.8	50.3	43.6
RC-7-02	51.5	7	27	0.2	8.7	78.2	43.6
PRC-ref	58.0	0	20	0	115.0	0	0
PRC-3-007	65.8	3	23	0.07	106.5	7.4	12.9
PRC-7-007	65.8	7	27	0.07	87.0	24.4	29.2
PRC-14-007	63.2	14	34	0.07	52.0	54.8	51.2

両供試体ともコの字型の供試体とした。コの字型とした理由は、実験中に常にひび割れ幅を制御するために、PC鋼棒にプレストレスを導入して、梁に曲げモーメントを与えるためである。PRC 供試体には PC 鋼より線 SWPR7A φ10.8mm を配置した。

### 2.2 腐食促進実験

表-2 に実験要因および荷重実験結果を、図-2 に腐食促進実験概要を示す。各供試体は、材齢 17 日に静的 2 点荷重により所定の曲げひび割れ幅を導入し、供試体上部に設置した PC 鋼棒のひずみを一定にすることにより、一定の曲げモーメントを供試体に与えた。RC 供試体は、通電終了まで一定の曲げモーメントを与え続け、曲げひび割れを開いた状態で通電を行った。PRC 供試体は、12 時間を曲げひび割れが開いた状態で、さらに 12 時間を曲げひび割れが閉じた状態で通電を行った。これは、通常の PRC 橋の供用状態を模擬したものである。腐食促進実験は、供試体を質量パーセント濃度 5% の NaCl 溶液の入ったアクリル製プール内に設置し、直流安定化電源を用いて、対象とする鉄筋 (RC: 圧縮鉄筋および引張鉄筋, PRC: PC 鋼より線および引張鉄筋) を陽極、供試体の底面に設置したチタンメッシュを陰極として通電を行った。電流密度は、各鋼材の表面積に対して 557 μA/cm<sup>2</sup> に設定し通電を行った。軸方向引張鉄筋および PC 鋼材の腐食劣化を検討するために、腐食範囲を供試体中央 30cm に限定し、その範囲以外の鉄筋はエポキシ樹脂でコーティングした。また、鋼材の腐食を促すため、全供試体の練り混ぜ水に 1.8kg/m<sup>3</sup> の塩化物イオンを混入し打設を行った。通電中は適宜、腐食ひび割れ幅の計測およびひび割れ性状を観測した。腐食ひび割れ幅は、0.001mm 精度のデジタルマイクロスコープを用いて計測した。

### 2.3 荷重実験

通電終了後の供試体に対して荷重実験を行った。荷重実験は、図-3 に示すように、RC 供試体および PRC 供試体とも油圧ジャッキによる静的 2 点荷重とし、荷重

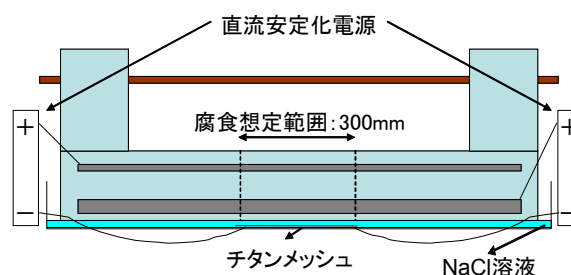


図-2 腐食促進実験概要

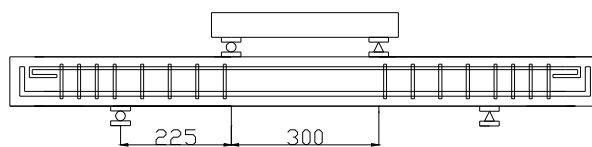


図-3 荷重実験概要 (RC 梁の例)

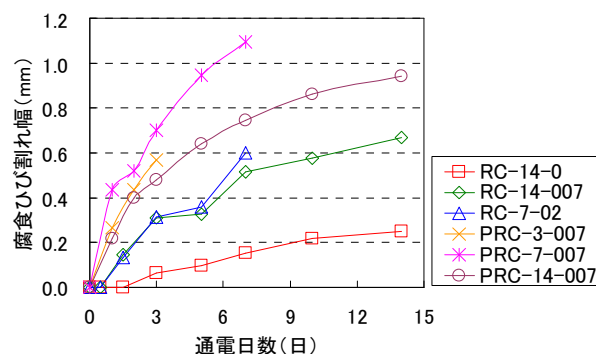


図-4 腐食ひび割れ幅-通電日数関係

スパンは 300mm とした。支点間隔は、RC 供試体は 750mm, PRC 供試体は 1100mm とし、せん断スパンは、RC 供試体は 225mm, PRC 供試体は 400mm とした。

荷重実験終了後に鋼材をはつり出し、質量パーセント濃度 10% のクエン酸水素二アンモニウムに 2 日間漬けて除錆した後に質量を計測した。質量減少率は、計測された質量減少量を、健全な鋼材質量で除したものである。

### 3. 実験結果

#### 3.1 腐食ひび割れ幅の推移

図-4 に引張鉄筋に沿って発生した腐食ひび割れ幅と通電日数の関係を、図-5 に RC-7-02 の導入曲げひび割れ幅と通電日数の関係を、図-6 に PRC-14-007 の導入曲げひび割れ幅と通電日数の関係を示す。腐食ひび割れ幅は、供試体中央部と、中央部から両端方向に 150mm 離れた位置の断面について計測を行い、その 3 箇所計測されたひび割れ幅の平均値をある日数における腐食ひび割れ幅と定義している。この結果から、通電日数に増加に伴い、腐食ひび割れ幅が増大していることが確認できる。また、RC 供試体よりも PRC 供試体の腐食ひび割れ幅が増大する傾向にあることが明らかとなった。かぶりが 20mm である RC 供試体の方が、かぶりが 40mm である PRC 供試体よりも曲げひび割れから錆汁が流れ出やすいため、腐食膨張圧が軽減されたと考えられる。

RC 供試体は通電日数の増加につれ、供試体上部の PC 鋼棒により与えられた曲げモーメントに対する抵抗力が減少し、図-5 に示されるように曲げひび割れ幅が拡大した。図中の番号は、曲げひび割れ導入時に発生した各曲げひび割れを表しており、RC-7-02 では曲げひび割れが 5 本発生したことを意味している。ひび割れ幅が急激に拡大した No.3 は、供試体中央部に発生した曲げひび割れである。ひび割れの開口とともに、RC-14-007 でも、供試体中央部に発生した曲げひび割れが拡大していく現象が確認された。一方、PRC 供試体は、図-6 に示されるように徐々に曲げひび割れ幅は拡大しているものの、RC 供試体のような急激な拡大は生じていない。これは、プレストレスによりひび割れが抑制され、通電終了時まで曲げひび割れ幅が拡大しなかったと考えられる。

以上のことから、腐食環境下においては、ひび割れの発生を許容する RC 梁に比べ、ひび割れの発生を一定幅に制限することができる PRC 梁は高い耐久性を持つと判断される。

#### 3.2 耐力の低下および質量減少率

図-7 に RC 供試体の荷重と変位の関係、図-8 に PRC 供試体の荷重と変位の関係、表-2 に載荷実験結果と引張鉄筋質量計測結果を示す。ref 供試体は、通電を施さなかった健全な供試体である。

RC 供試体に着目すると、導入ひび割れ幅の大きい供試体ほど耐力が低下していることが確認できる。しかし、RC 供試体の質量減少率に着目すると、RC-14-007 と RC-7-02 の質量減少率が同値であり、RC-14-0 とともに約 2%

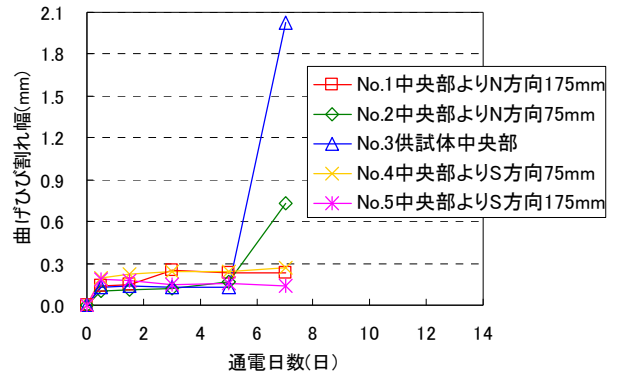


図-5 導入曲げひび割れ幅-通電日数関係 (RC-7-02)

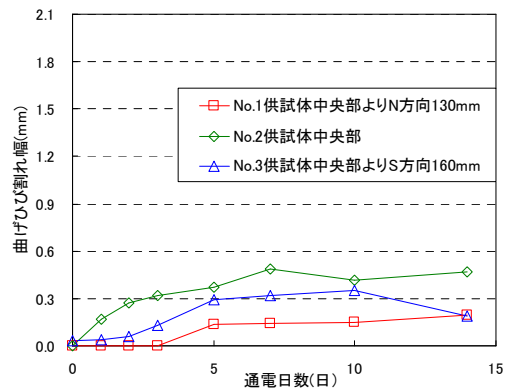


図-6 導入曲げひび割れ幅-通電日数関係 (PRC-14-007)

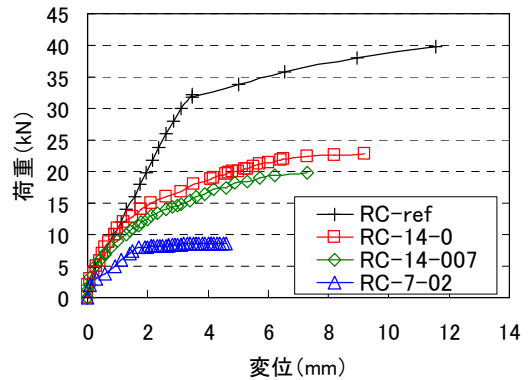


図-7 荷重-変位関係 (RC 供試体)

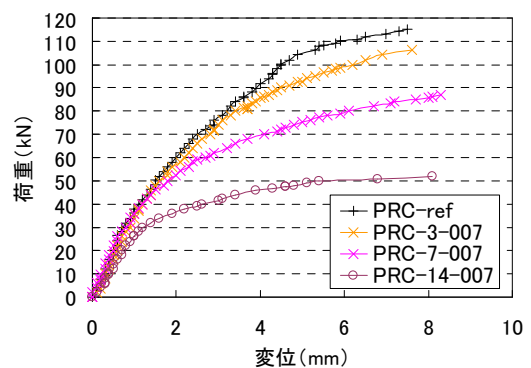


図-8 荷重-変位関係 (PRC 供試体)

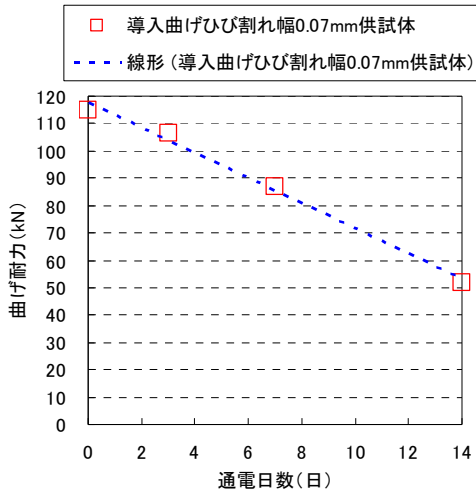


図-9 曲げ耐力-通電日数関係  
(PRC 供試体)

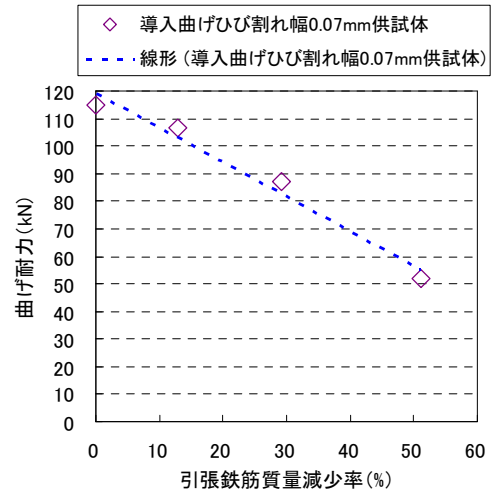


図-10 曲げ耐力-引張鉄筋質量減少率関係  
(PRC 供試体)

しか差がないという結果となり、各供試体で耐力の差に現れているほどの大きな違いはないことが確認できる。導入曲げひび割れ幅の大きい供試体ほど、鋼材の質量減少率が低下することが考えられるが、本実験結果では、こうした現象は確認できなかった。これは、腐食性状の違いに原因があると考えられる。すなわち、質量減少率が同程度の場合においても、腐食の範囲が異なれば、耐力は異なり得るのである。写真-1 は、はつり出し後の鉄筋を示したものである。RC-14-0 は圧縮鉄筋にはさほど腐食が進行しておらず、RC-14-007 は腐食が鉄筋全体に広がっており、RC-7-02 は供試体中央で腐食が局所化していることが確認できる。各供試体で腐食性状が異なるため、質量減少率が同程度であっても供試体において耐力に差が現れたと考えられる。したがって、曲げひび割れ幅は腐食性状に影響を及ぼし、曲げひび割れ幅の大きい供試体ほど鋼材腐食は局所化し、腐食が局所化した方が全面腐食の場合よりも大きな耐力低下を生じることが本実験結果から想定できる。

PRC 供試体に着目すると、通電日数の増加につれ、耐力低下が生じていることが確認できる。図-9 に PRC 供試体の曲げ耐力と通電日数の関係を、図-10 に曲げ耐力と質量減少率の関係を示す。本実験においては、最大荷重と通電日数、質量減少率はほぼ線形関係にあることが確認できる。写真-2 から確認できるように、PRC 供試体では、シーースに腐食が進行しているものの、PC 鋼より線にまで腐食が進行していないため、耐力低下は主に引張鉄筋の腐食により生じたと考えられる。したがって、本実験における PRC 梁の場合、PC 鋼より線まで腐食が進行していない場合、引張鉄筋の質量減少率から概ね耐力予測することが可能であるといえる。

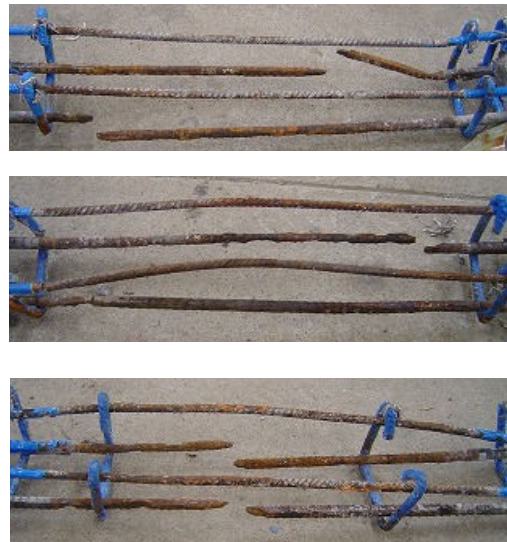


写真-1 はつり出し後の鉄筋の様子  
(上から、RC-14-0, RC-14-007, RC-7-02)

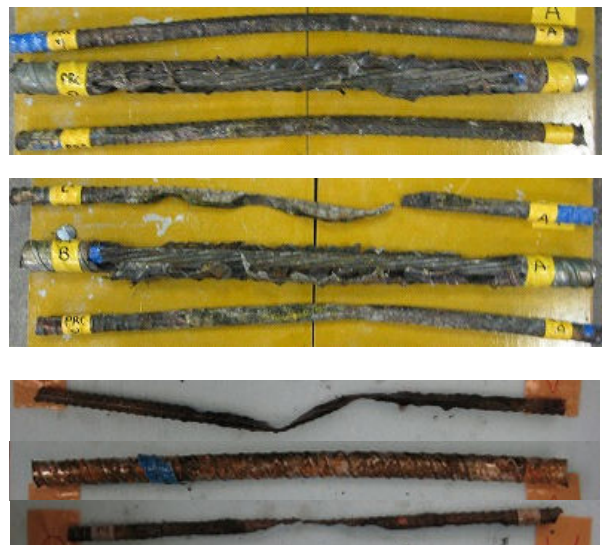


写真-2 はつり出し後の鉄筋の様子  
(上から、PRC-3-007, PRC-7-007, PRC-14-007)



以上より、本実験供試体において人為的に導入した曲げひび割れ幅が異なる場合、鋼材全面腐食や局部腐食など腐食性状が変化し耐力予測は難しいが、曲げひび割れ幅が同じ程度である場合、腐食性状も同様になる傾向があり一定の速度で耐力低下を引き起こすことが明らかとなった。

実環境においては、温度や湿度など腐食因子が変化するため、本実験のように一定速度で耐力低下するとは考え難いが、本実験結果から実環境における構造物の劣化状態をある程度再現できると考えられる。以上のことより、腐食促進実験による通電日数を実橋供用年数に換算することができれば、実環境における構造物劣化状態は本実験供試体を用いて再現できる可能性があると考えられる。

#### 4. 劣化予測について

##### 4.1 塩害による劣化過程

塩害による劣化過程は図-11 に示すモデルが一般的に用いられている<sup>5)</sup>。このモデルは塩害による劣化過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4つのステージに分けて説明するものである。潜伏期は、鋼材のかぶり位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度に達するまでの期間、進展期は、鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間、加速期は、腐食ひび割れ発生により鋼材の腐食速度が増大する期間、劣化期は、鋼材の腐食量の増加により耐力の低下が顕著な期間をそれぞれ指している。こうした塩害による劣化過程について、腐食促進日数を変化させたPRC供試体を用いて、それぞれのステージに相当する実環境下における供用年数を解析的に検討して劣化予測を行った。本研究の目的は、短期間で実構造物の劣化を実験的にシミュレートすることである。そのためには、実構造物と実験では、条件的に必ずしも合致しない場合がある。合致しない場合には、解析などにより、実験の初期条件が実構造物の何年に相当するかを推定して置き換えている。

劣化予測解析は、著者らの研究<sup>1)</sup>において提案した手法を用いた。表-3は、本研究で仮定した劣化過程を示したものである。まず、潜伏期については飛沫帯であると仮定し、Fickの拡散則により実構造物換算を試みた。この際に使用する鋼材腐食発生限界濃度及び拡散係数については、示方書や文献<sup>3)</sup>を参考にそれぞれ $1.8\text{kg/m}^3$ 、 $0.685\text{cm}^2/\text{year}$ とした。これより、潜伏期は実構造物換算年数5.3年に相当するという結果が得られた。供試体のコンクリート内には鋼材腐食発生限界濃度と同値である $1.8\text{kg/m}^3$ の塩化物イオンが混入されていることから、これは実験供試体が通電の開始以前に既に5.3年間供用された状態にあり、通電の開始直後に鋼材の腐食が開始

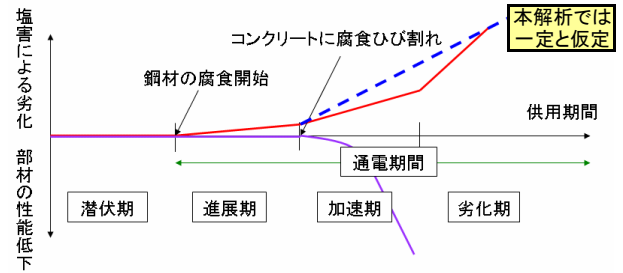


図-11 塩害による劣化過程

表-3 本研究における劣化過程の定義

名称	相当する期間
引張鉄筋腐食潜伏期	供用開始～引張鉄筋の腐食開始
進展期	引張鉄筋の腐食開始～腐食ひび割れの発生
加速期・劣化期	腐食ひび割れの発生以降

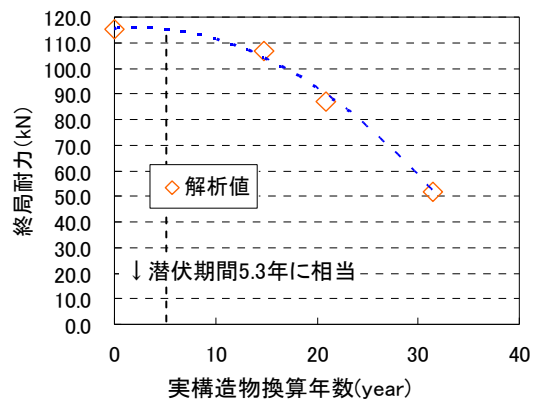


図-12 実構造物換算年数－終局耐力関係

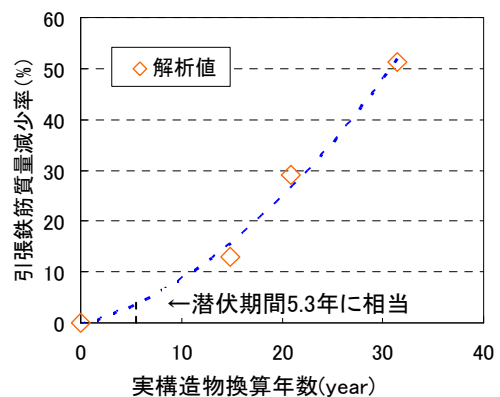


図-13 実構造物換算年数－引張鉄筋質量減少率関係

することを意味している。

進展期については市販の有限要素構造解析プログラム WCOMD を用いて、腐食膨張圧を強制変位で模擬し、変位制御型の増分解析により腐食ひび割れが発生するまでの挙動を解析した。飯泉らの研究<sup>4)</sup>を参考に、そこで得られた総変位量を腐食量に換算し、ひび割れ発生前の腐食速度 $3.4(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year})$ で除することで実構造物換算年数を求めた。これより、進展期は実構造物換算年数

6.5年に相当するという結果が得られた。

加速期・劣化期についてはファラデーの法則から積算電流量を用いて総腐食量を求め、ひび割れ発生後の腐食速度  $10.2(\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year})$  で除することで実構造物換算年数を求めた。ここで、ひび割れ発生前後の腐食速度の定義には、横田ら<sup>6)</sup>や濱田ら<sup>7)</sup>、伊代田ら<sup>8)</sup>の研究における報告を参考にした。これより、3日間通電した PRC-3-007 は実構造物換算年数 3.0年、1週間通電した PRC-7-007 は 9.1年、2週間通電した PRC-14-007 は 19.7年に相当するという結果が得られた。

#### 4.2 解析結果

各ステージの実構造物換算年数を足し合わせた年数と終局耐力および引張鉄筋質量減少率の関係を図-12、図-13に示す。

解析より得られた実構造物換算年数は、PRC-3-007 で約 15年、PRC-7-007 で約 21年、PRC-14-007 で約 32年となった。これは、塩害環境の最も厳しい飛沫帯を想定した上で得られた推定値であるため、劣化状態の安全側を評価していると考えられる。

以上より、本実験の PRC 供試体を飛沫帯で供用した場合の、耐力低下の推移および引張鉄筋質量減少率の推移が推測された。

#### 5. まとめ

本研究では、RC 梁および PRC 梁に対して、一定の曲げモーメントを与えながら腐食促進実験を行い、劣化状態の実験的検討を行った。さらに、鋼材腐食により劣化した実験供試体が、実環境において何年分に相当するかの解析的検討を行った。この結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) RC 供試体は通電日数の増加につれ、コンクリートの剛性が低下し、供試体上部の PC 鋼棒により与えられた曲げモーメントに対する抵抗力が減少するため曲げひび割れ幅が急激に拡大するが、PRC 供試体はプレストレスにより、通電終了時までコンクリートの剛性が保たれるため急激な曲げひび割れ幅拡大は生じにくい。
- (2) ひび割れを導入した RC と PRC 梁について腐食促進試験を行った結果、本実験ではひび割れの発生を許容する RC 梁に比べ、ひび割れの発生を一定幅に制限することができる PRC 梁の方が高い耐久性を持つことが確認できた。今後はひび割れ幅とかぶりの影響について検討を行うことが必要である。
- (3) 曲げひび割れ幅は腐食性状に影響を及ぼし、曲げひ

び割れ幅の大きい供試体ほど鋼材腐食が局所化し、鋼材腐食が局所化した方が全面腐食を生じた場合よりも大きな耐力低下を生じる。

- (4) 本実験供試体において載荷により導入した曲げひび割れ幅が異なる場合、全面腐食や局部腐食など腐食性状が変化し耐力予測は難しいが、曲げひび割れ幅が同値である場合、腐食性状も同様になる傾向があり一定の速度で耐力低下を引き起こす。
- (5) 飛沫帯で供用されたと仮定し、電流密度  $557 \mu \text{A}/\text{cm}^2$  で通電を行った場合の PRC 梁の実験供試体の劣化程度は、3日間で約 15年間、7日間で約 21年間、14日間で約 32年間に相当することが推測された。

#### 参考文献

- 1) 中村典昭，睦好宏史，Ha Minh，西岡友樹：塩害によるポステン式 PC 梁の劣化予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1025-1030，2006
- 2) 淵上優子，西川和廣，神田昌幸，内田賢一：腐食環境下における PRC 部材の耐久性に関する実験的検討，土木学会第 51 回年次学術講演会，V-179，pp.358-359，1996.9
- 3) 飯泉興平，関博，薛昕：塩化物と中性化の複合作用を受ける RC 部材の鉄筋腐食とかぶりコンクリートに発生するひび割れに関する研究，コンクリート工学年次論文集，vol.27，No.1，2005，pp.925-930
- 4) 堤知明，白井伸一，安田登，松島学：塩害劣化に関する影響要因の実データに基づく定量的評価，土木学会論文集，No.544/V-32，pp.33-41，1996.8
- 5) コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.24-28，2002年制定
- 6) 横田優，佐々木孝彦，飯島享，松島学：塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，2004，pp.1041-1046
- 7) 濱田宏，丸山久一，下村匠，青山敏幸：腐食性環境下における鉄筋コンクリート構造物の劣化予測モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.811-816，1997
- 8) 伊代田岳史，矢島哲司，魚本健人：コンクリート構造物の劣化診断システムの構築，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，1999，pp.1123-1128