

持続荷重下における RC 構造物の腐食促進劣化試験

河村 圭亮^{*1}・鈴木 三馨^{*1}・福浦 尚之^{*1}・丸屋 剛^{*1}

Keywords : chloride attack, rebar corrosion, sustained load, cyclic wetting and drying, corrosion crack

塩害, 鉄筋腐食, 持続荷重, 乾湿繰返し, 腐食ひび割れ

1. はじめに

塩害を受ける鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の劣化進行過程は、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の4つに区分されている。2007年制定コンクリート標準示方書[設計編]¹⁾では潜伏期末の腐食開始までが照査対象であり、鉄筋位置において腐食発生限界塩化物イオン濃度以下にすることが基本とされている。

照査段階を進展期末に移行し、ひび割れ発生限界腐食量により照査することができれば、RC構造物の合理的な設計（新規設計および維持管理）を可能にし、コスト削減に寄与することができる。そのためには、腐食劣化したRC構造物のひび割れ、たわみおよび耐力を高精度に予測可能なツールの開発が必要である。

そこで、著者らはRC構造物中の塩害による劣化の機構をシミュレートするため、鉄筋腐食に関する構造解析と耐久性解析との連成解析システムを構築してきた²⁾。その中で、これまでに外力の作用がなく、初期ひび割れが生じていない条件での実験³⁾を行ってきた。今後、本システムの高機能化を図るためには、さらに様々な条件下での、鉄筋腐食に伴うRC構造物の劣化機構とそれに伴う性能低下のメカニズムについて明らかにする必要性がある。しかし、持続荷重が作用し、初期ひび割れが生じた条件での鉄筋腐食に伴うRC構造物の劣化機構については明確になっていない点が多くある。

本研究では、持続荷重が作用し、初期ひび割れが生じた条件下において、鉄筋腐食が構造性能に及ぼす影響について把握することを目的として、RC梁試験体を用いた持続荷重下における乾湿繰返し腐食促進劣化試験を行った。

2. 持続荷重下における腐食促進劣化試験

2.1 実験概要

実験に用いた試験体は図-1および図-2に示す断面300×200mm、長さ4,200mmのRC梁試験体である。試験体は、持続荷重を作用させ、初期ひび割れを導入した条件下で塩水噴霧により促進劣化させるケース（塩水噴霧あり）と、比較対象として持続荷重を作用させるのみのケース（塩水噴霧なし）の計2体作製した。断面図に示すように主鉄筋として引張側、圧縮側ともにかぶり20mmでSD295の異形鉄筋D16が3本ずつ配置されており、引張鉄筋比は1.14%である。また、せん断補強鉄筋にはD6が100mmピッチで配筋されている。等曲げ区間、せん断スパンはそれぞれ600mm、1,500mmである。

試験体に使用したコンクリートの配合を表-1に示

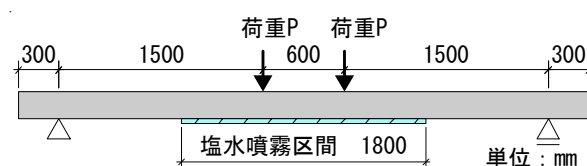


図-1 梁試験体の概要
Fig.1 Beam specimen outline

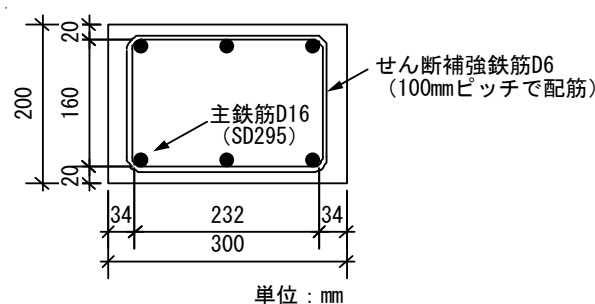


図-2 梁試験体の断面図
Fig.2 Cross-section view of beam specimen

*1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

表ー1 コンクリートの配合
Table 1 Concrete mixture proportion

スランプ cm	空気量 %	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
14.0	5.0	55	44	165	300	808	1027	0.75

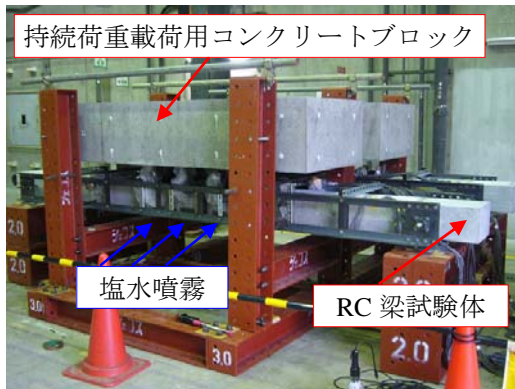


写真-1 持続荷重載荷状況
Photo. 1 Sustained loading state

す。材齢 28 日でのコンクリートの圧縮強度は 36.3N/mm^2 であった。なお、養生は現場封緘とした。また、主鉄筋 D16 の降伏強度は 359N/mm^2 であった。

材齢 75 日で各試験体に降伏荷重 (41kN) の約 50% の持続荷重として 21kN の荷重を載荷し、初期ひび割れ (曲げひび割れ) を導入した。持続荷重載荷時の状況を写真-1 に示す。

塩水噴霧ありのケースでは材齢 81 日 (持続荷重載荷から 6 日後) で図-1 に示す試験体下面中央の塩水噴霧区間に 3% 塩化ナトリウム水溶液を噴霧し、以降、塩水噴霧 1 日、乾燥 13 日を 1 サイクルとして、261 日間乾湿繰返しを行った。

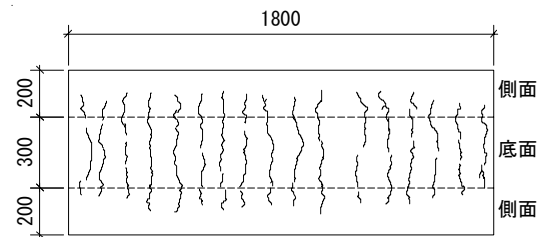
促進劣化中のひび割れ観察は、14 日に 1 度の頻度で、塩水噴霧を行う前の時点で行った。試験体中央における主鉄筋のひずみおよび鉛直変位の経時変化について 1 時間毎に計測を行った。

2.2 ひび割れ進展状況

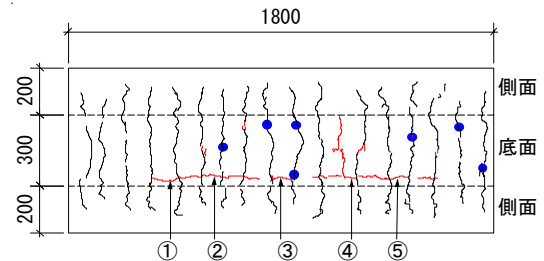
塩水噴霧ありのケースの持続荷重載荷から 1 日後、129 日後、261 日後における試験体底面のひび割れ図を図-3 に示す。図中の黒線は曲げひび割れ、赤線は腐食ひび割れ、青丸印は表面で錆汁が確認できた箇所をそれぞれ示している。また、3 本の引張側主鉄筋について、図-3(c)に示すように鉄筋番号を定める。

曲げひび割れは、約 100mm ピッチで、せん断補強鉄筋のほぼ直下に生じている。持続荷重載荷時の曲げひび割れ幅は、 $0.04\sim 0.08\text{mm}$ であった。

持続荷重載荷から約 100 日後に、せん断補強鉄筋直下の曲げひび割れ位置で表面に錆汁が初めて確認でき

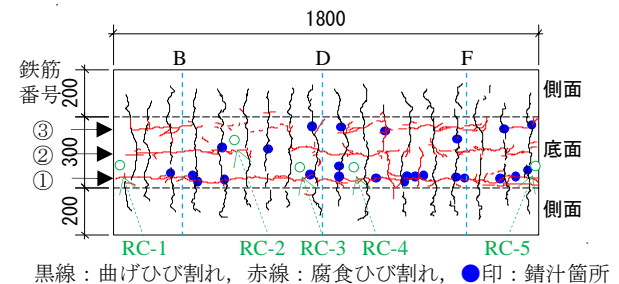


(a) 持続荷重載荷から 1 日後



番号：ひび割れ幅計測位置

(b) 持続荷重載荷から 129 日後 (腐食ひび割れ発生直後)



(c) 持続荷重載荷から 261 日後

図-3 底面のひび割れ状況

Fig.3 Crack on bottom surface

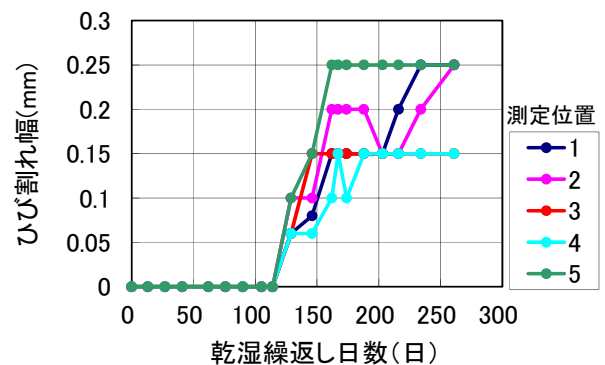


図-4 腐食ひび割れ幅の経時変化

Fig.4 Time histories of corrosion crack width

た。これは、ひび割れ発生位置においては、塩化物イオン、水、酸素等の腐食因子となる物質が浸透し易く、せん断補強鉄筋が腐食したことや、主鉄筋が比較的早く腐食したため、ひび割れ間から錆汁が流出したものと考えられる。

腐食ひび割れは、持続荷重載荷から約 130 日後に、①の鉄筋直下で軸方向に発生し、その後 30 日以内に②、③の鉄筋直下からも発生した。目視で腐食ひび割

れが確認できた時点のひび割れ幅は、0.06～0.1mm であった。

図-3(b)中に示すひび割れ幅計測位置における腐食ひび割れ幅の経時変化を図-4に示す。持続荷重載荷から約130日後に腐食ひび割れが発生してから、比較的短期間(約50日)でひび割れ幅は0.15～0.25mmまで拡大する。その後、持続荷重載荷から261日まではひび割れ幅が0.15～0.25mm程度で収束し、それ以上拡大しないことが分かる。また、持続荷重載荷から261日後の曲げひび割れ幅は、塩水噴霧の有無によらず、わずかに拡大しており、0.04～0.15mmであった。

鉄筋の腐食量と表面ひび割れ幅の関係で整理された既往の文献⁴⁾では、表面で軸方向に生じる腐食ひび割れ幅は、軸方向ひび割れが生じた後、内部ひび割れが進展する段階においてはあまり変化が無く、内部である程度ひび割れが進展すると、再び表面のひび割れ幅が拡大することが報告されている。本実験を終了した時点は、内部でひび割れが進展している段階であったため、表面でのひび割れ幅が収束した可能性がある。そのため、さらに塩水噴霧による促進劣化を続けると再び表面のひび割れ幅が拡大した可能性も考えられる。また、本実験ケースでは、せん断補強鉄筋が軸方向に

生じる腐食ひび割れに対して直交する方向に配置されているため、せん断補強鉄筋による拘束効果によってひび割れ幅の拡大が抑制された可能性も考えられる。

2.3 鉛直変位の経時変化

試験体中央における鉛直変位の経時変化を図-5に示す。鉛直変位は塩水噴霧の有無によらず、持続荷重載荷開始から実験を終了した261日後まで増加し続け、約3mm増加している。塩水噴霧ありのケースでは腐食ひび割れの発生に伴う鉛直変位の変化はなく、変形挙動に差はみられなかった。よって、本実験での腐食レベルでは、主鉄筋の腐食が持続荷重載荷時における試験体の変形挙動に及ぼす影響はないと言える。また、後述する主鉄筋の断面欠損についても、試験体の変形挙動に及ぼす程の欠損はなかったと言える。

2.4 主鉄筋ひずみの経時変化

試験体中央における引張側主鉄筋ひずみの経時変化を図-6に示す。持続荷重載荷開始から約50日後から塩水噴霧ありのケースのひずみは低下し始めており、鉄筋に変化が生じている。鉄筋腐食により腐食電流が生じたために、ひずみゲージで計測された値に変化が表れたことが推察され、この時点で主鉄筋の腐食が始まったことが考えられる。ただし、計測された値は必ずしも正確なデータであるとは言えない。

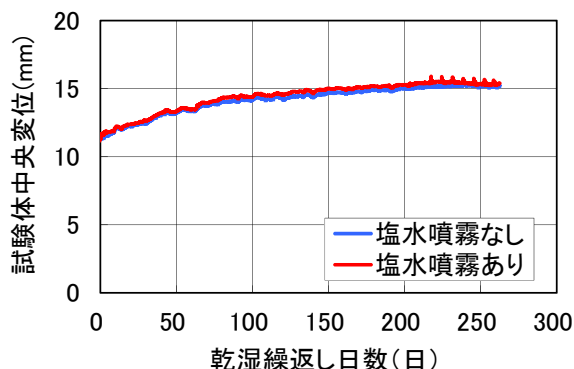


図-5 試験体中央における鉛直変位の経時変化

Fig.5 Time histories of vertical displacement at center of specimen

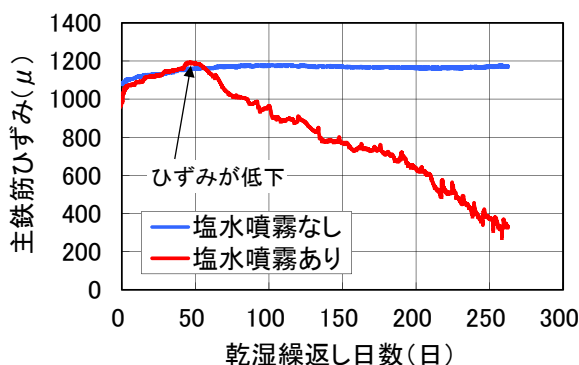


図-6 試験体中央における主鉄筋ひずみの経時変化

Fig.6 Time histories of main rebar strain at center of specimen

3. 促進劣化させた RC 梁試験体の繰返し載荷試験

3.1 実験概要

繰返し荷重が作用した時の、鉄筋腐食の有無による変形挙動の違いを確認するため、促進劣化試験を行った後、塩水噴霧ありの試験体、塩水噴霧なしの試験体ともに繰返し載荷試験を行った。繰返し載荷は、図-7に示すように、荷重21kNを20サイクル繰返し載荷して、試験体中央における鉛直変位を測定した。

3.2 実験結果

繰返し載荷を行った時の荷重と試験体中央における鉛直変位の関係を図-8に示す。

持続載荷終了時点では、図-5に示すように、塩水噴霧の有無に関わらず鉛直変位はほぼ同じであった。しかし、除荷時の残留変位は塩水噴霧ありのケースの方が約4mm大きく、両者の挙動に差がみられた。これは腐食ひび割れの発生により、鉄筋とコンクリートの間の付着劣化が生じたことに起因して、除荷時にすべり挙動が生じたためであると考えられる。

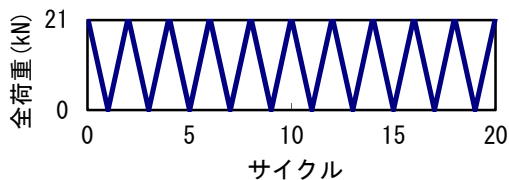


図-7 繰返し載荷時の荷重サイクル
Fig.7 Loading cycle at cyclic loading test

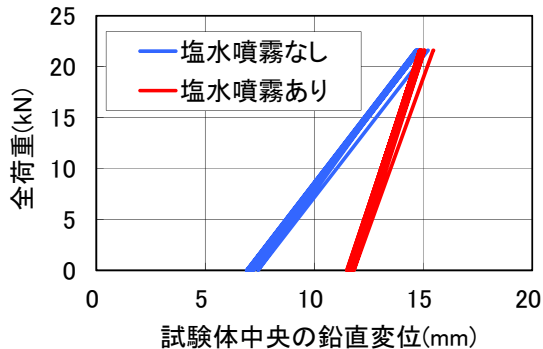


図-8 荷重-変位関係
Fig.8 Load displacement curve

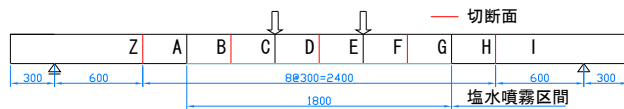
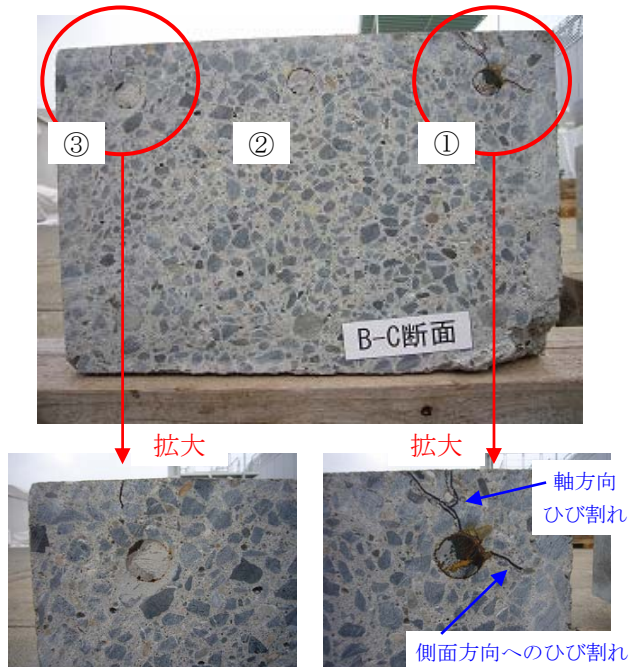


図-9 試験体切断位置
Fig.9 Specimen cut position



*写真中の黒線は目視で確認できたひび割れを示す。

*写真中の番号は図-3(c)中に示す鉄筋番号を示す。

写真-2 断面内のひび割れ進展挙動

Photo. 2 Crack propagation behavior in cross-section

り変化が見られなかったものと考えられる。

写真中、中央の鉄筋（鉄筋番号②）に対しては図－3(c)に示すように表面に目視で軸方向ひび割れが確認できていたが、断面内においてはひび割れが確認できなかった。軸方向に生じる腐食ひび割れは、表面から進展するものと考えられている⁴⁾ことから、断面内においては、まだ進展していない段階であったことや、目視では観察できない程度のひび割れ幅であったことが考えられる。

4. 断面内のひび割れ進展挙動

4.1 実験概要

繰返し载荷試験実施後、塩水噴霧ありの試験体について断面内における腐食ひび割れの進展挙動を把握するために、試験体を図－9 に示す Z,B,D,F,H 断面で切断し、断面内のひび割れ観察を行った。なお、切断面 B,D,F は図－3(c)に示す位置とそれぞれ対応している。

4.2 実験結果

切断面 **B** において、**C** の方向を見た断面におけるひび割れ進展挙動を写真-2 に示す。写真は上側が底面であり、写真中の黒線は目視で確認できたひび割れを示している。

表面のひび割れ幅が 0.15～0.25mm であった写真中右側の鉄筋（鉄筋番号①）位置においては、軸方向ひび割れと側面方向に斜め裏側に進展したひび割れが確認できた。

左側の鉄筋（鉄筋番号③）に対して表面に生じた軸方向ひび割れは、鉄筋位置にまで達しておらず、表面側から発生し、進展したものと考えられる。

本実験では底面のかぶり 20mm、側面のかぶり 34mm の位置に配置された隅角部の鉄筋（鉄筋番号①）の腐食が比較的大きく進行しており、腐食ひび割れは斜めに進展している。促進劣化試験の最終段階では、2.2 節で述べたように、側面方向へのひび割れが進展している段階であったため、表面におけるひび割れ幅にあら

5. 鉄筋の腐食量および腐食分布

5.1 実験概要

塩水噴霧ありの試験体の、鉄筋の腐食分布を把握するために、鉄筋をはつり出し、腐食量および腐食分布の測定を行った。鉄筋は図－9に示す Z-B 区間、B-D 区間、D-F 区間、F-H 区間において底面側の主鉄筋 3 本（600mm×計 12 本）をはつり出した。

はつり出した鉄筋は、JCI-SC1「コンクリート中の鋼

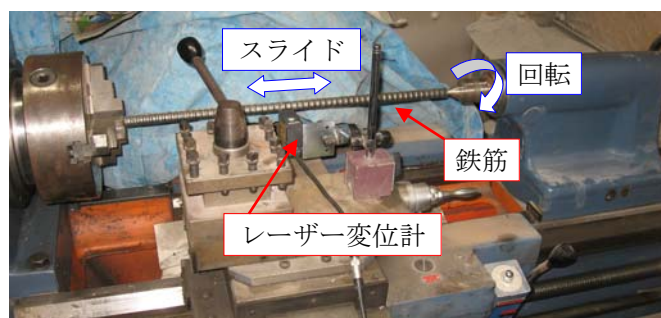


写真-3 断面形状の測定装置

Photo. 3 Measuring device of cross-section shape

材の腐食評価方法」にほぼ準拠するように、60℃の10%クエン酸二アンモニウム溶液に7.5時間浸漬して腐食生成物を除去した。腐食生成物を除去した鉄筋の質量と長さを測定し、同一鉄筋の健全部で測定した単位長さ当たりの質量を基準として、はつり出した各鉄筋の質量減少量を測定し、単位表面積当たりの腐食量を算定した。また、写真-3に示す装置を用いて断面形状の測定を行った。レーザー変位計を用いて鉄筋を回転させながら半径方向の距離を測定して記録した。1ヶ所の測定断面を36分割し、鉄筋を10度ごとに回転させて測定した。測定断面は鉄筋の軸方向に約20mm間隔とした。この測定から得られた断面積を残存断面積とし、鉄の密度と単位長さから単位面積当たりの腐食量に換算した。

5.2 鉄筋の腐食状況

図-9中に示す区間D-Fからはつり出した主鉄筋のかぶり面側および内側の腐食状況の様子を写真-4に示す。写真中のスケールは位置Dからの距離に対応している。また、赤線は鉄筋表面で腐食生成物の付着が確認できた区間を示している。

最初に腐食ひび割れが発生し、促進劣化終了時点で鉄筋に沿って全体に軸方向の腐食ひび割れが生じていた①の鉄筋は、かぶり側表面を見ると全体に腐食生成物が付着していることが分かる。腐食ひび割れが発生することで、その位置からも腐食因子となる物質が浸透し易くなり、全体的に腐食の進行が加速していることが考えられる。

一方、促進劣化終了時点で軸方向の腐食ひび割れが発生したものの、全体には生じていなかった②、③の鉄筋は、かぶり側表面を見ると約100mmピッチの等間隔に腐食生成物が付着していることが分かる。この位置は2.2節で述べた曲げひび割れ発生位置と対応しており、せん断補強筋が配置されている位置とも対応する。従って、初期ひび割れが生じている条件下では、



(a) かぶり側



(b) 内側

(A) 鉄筋番号①, 区間 D-F



(a) かぶり側



(b) 内側

(B) 鉄筋番号②, 区間 D-F



(a) かぶり側



(b) 内側

(C) 鉄筋番号③, 区間 D-F

*写真中の赤線は鉄筋表面で腐食生成物の付着が確認できた区間を示す。

写真-4 主鉄筋の腐食状況

Photo. 4 Corrosion condition on main rebar



写真-5 せん断補強鉄筋の腐食状況

Photo. 5 Corrosion condition on shear rebar

初期ひび割れ発生位置から腐食が進行していくことが分かる。鉄筋の内側表面については、いずれの鉄筋もほとんど腐食生成物の付着は見られなかった。よって、本実験の腐食レベルでは、かぶり側のみに腐食が集中しており、かぶりと反対側では比較的健全な状態を維持できていると言える。

図-9中に示す区間F-Hからはつり出したせん断補強鉄筋の腐食状況の様子を写真-5に示す。写真中のスケールは①の主鉄筋側からの距離に対応しており、上側がかぶり側である。

せん断補強筋表面の腐食状況を見ると、かぶり側で

全体的に腐食生成物が付着しており、曲げひび割れの影響により腐食が進行していたことが分かる。

5.3 鉄筋の腐食量

各鉄筋の質量減少率から算出した 600mm 区間での平均の腐食量を図-10(a)に示す。最も腐食が進行していた鉄筋①の中央部での腐食量は約 20~30mg/cm²であった。一方、実験終了時に腐食ひび割れがかぶり表面で観察された区間と観察されなかった区間が混在する鉄筋②や③の腐食量は約 10~15mg/cm²であり、本実験条件下におけるひび割れ発生限界腐食量は約 10~15mg/cm²以下であると考えられる。

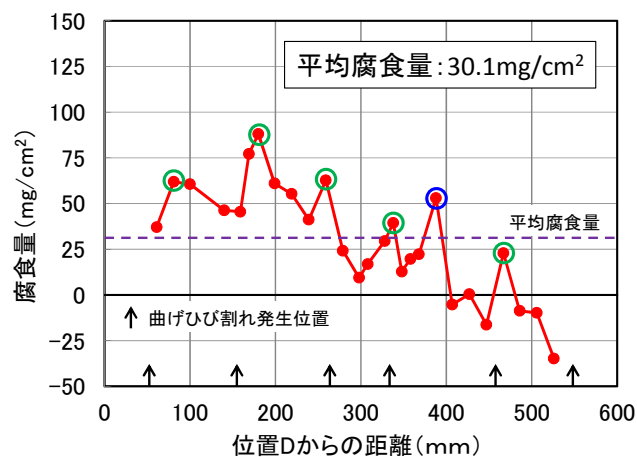
5.4 鉄筋の腐食分布

各鉄筋の残存断面積から算出した 600mm 区間での平均の腐食量を図-10(b)に示す。残存断面積から算出した腐食量は、約 5~60mg/cm²であり、測定方法による誤差が生じることや、約 20mm ピッチで測定した値の平均値として算出していることから、質量減少率より算出した腐食量と必ずしも同等の結果を得ることはできなかった。

質量減少率より算定した腐食量と比較的近い値が得られたケースとして、区間 D-F からはずり出した主鉄筋の内、鉄筋番号①の腐食分布を図-11に示す。こ

れは、写真-4(A)に示したようにかぶり側が全体的に腐食している部分である。質量減少率より算定した腐食量が 29.5mg/cm²であったのに対して、鉄筋の残存断面積から算出した平均の腐食量は 30.1mg/cm²であった。

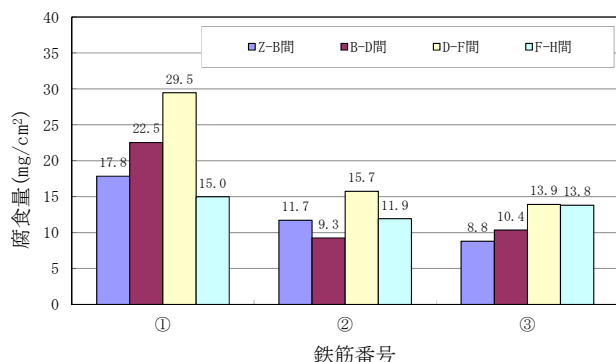
腐食分布を見ると全体的に腐食しているが、図中に丸印で示すように、局部的に腐食量が大きく、平均腐食量の 2 倍程度以上の腐食量になっている箇所が複数見られる。これは約 100mm ピッチでほぼ等間隔になっ



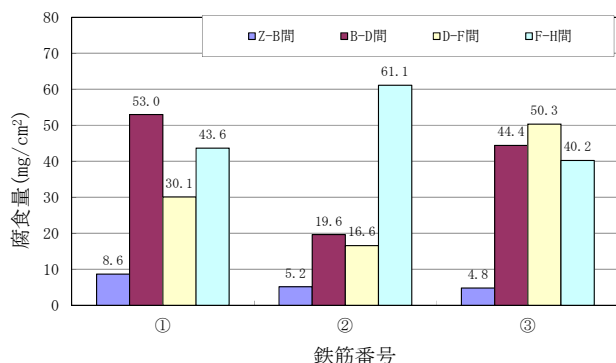
鉄筋番号①，区間 D-F

図-11 鉄筋の腐食分布

Fig.11 Corrosion distribution



(a) 質量減少率より算出



(b) 断面残存率より算出

図-10 鉄筋の腐食量

Fig.10 Amount of corrosion

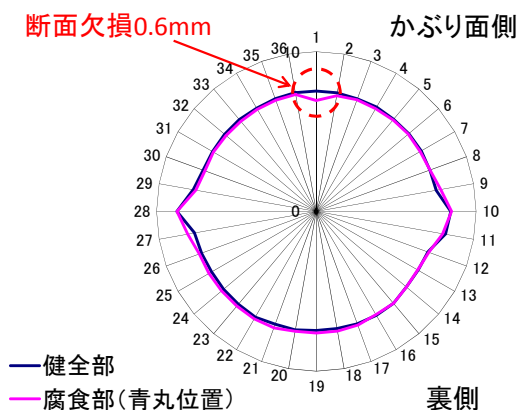


図-12 鉄筋の断面形状

Fig.12 Cross-section shape of rebar

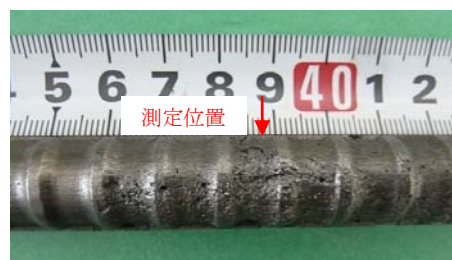


写真-6 断面欠損状況

Photo. 6 Cross-section lost

ており、曲げひび割れが生じていた位置と概ね対応している。よって、初期ひび割れが生じていた位置において腐食が局所的に進行していることが分かる。なお、腐食量分布で全体的に傾きが生じ、端部で腐食量が負の値となっているのは、測定装置に鉄筋を取り付けた際にわずかに傾きが生じていた影響であると思われる。

局所的に腐食が進行していた箇所内、図-11中、青丸で示す位置の鉄筋の断面形状を図-12に示す。図中には同じ鉄筋の健全部で測定した断面形状を併せて示す。健全部の断面形状と比較すると、かぶり面側で局所的に断面欠損が生じていることが分かる。実際の鉄筋の該当部分でも写真-6に示すように断面が欠損していることが確認できる。測定結果より、この位置では0.6mm断面が欠損していた。

6. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の測定

6.1 実験概要

RC梁試験体作製時に、同一のコンクリートを使用して拡散試験用にφ100mm、高さ150mmの円柱供試体を4体作製した。作製した供試体でJSCE-G572-2007に従い、コンクリート中における塩化物イオンの見掛けの拡散係数を測定した。なお、塩化ナトリウム水溶液中への浸漬期間は約9ヶ月間とした。

また、塩水噴霧を行ったRC梁試験体についても、塩水噴霧区間内で、ひび割れが生じなかった部分の内5ヶ所(図-3(c)中のRC-1~RC-5)からコアを採取して拡散係数の測定を行った。

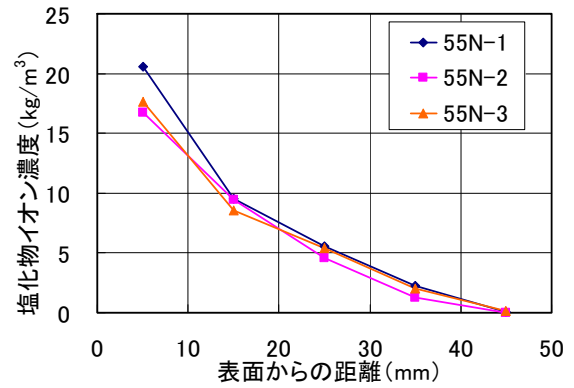
6.2 実験結果

塩化物イオン濃度の測定結果を図-13に示す。分布から式(1)に示すフィックの拡散方程式における、表面塩化物イオン濃度 C_0 および見掛けの拡散係数 D を正規確率紙上の最小二乗法により算出した結果を表-2に示す。

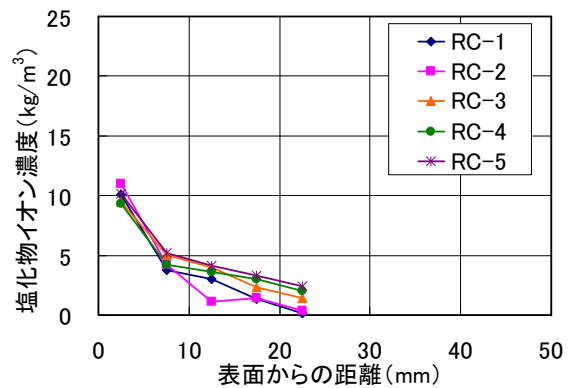
$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $C(x, t)$ は深さ x (cm)、時刻 t (年)における塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_0 は表面における塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 D は塩化物イオン濃度の見掛けの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 erf は誤差関数を表す。

乾湿繰返しを行ったRC梁試験体の表面塩化物イオン濃度は、塩化ナトリウム水溶液中への浸漬を続けた円柱供試体の約4割程度であった。また、RC梁試験体の鉄



(a) 円柱供試体



(b) RC梁試験体

図-13 塩化物イオン濃度の分布

Fig.13 Distribution of chloride

表-2 表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数
Table 2 Amount of surface salt and coefficient of diffusion

(a) 円柱供試体

供試体No.	55N-1	55N-2	55N-3	平均
表面塩分量 C_0 (kg/m^3)	32.0	21.8	24.9	26.2
拡散係数 D_c ($\text{cm}^2/\text{年}$)	1.77	2.39	2.15	2.10

(b) RC梁試験体

供試体No.	RC-1	RC-2	RC-3	RC-4	RC-5	平均
表面塩分量 C_0 (kg/m^3)	12.4	12.4	10.2	9.6	10.3	11.0
拡散係数 D_c ($\text{cm}^2/\text{年}$)	0.66	0.64	1.47	1.72	1.95	1.29

筋位置の深さでの塩化物イオン濃度は $0.2 \sim 2.4 \text{ kg}/\text{m}^3$ であった。ただし、これはひび割れが生じていない箇所での測定結果である。

7. まとめ

本研究では、持続荷重が作用し、初期ひび割れが生じた条件下において、鉄筋腐食が構造性能に及ぼす影響について把握することを目的として、RC梁試験体を

用いた持続荷重下における乾湿繰返し腐食促進劣化試験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1)促進劣化開始から、約 130 日後で表面に鉄筋軸に沿った腐食ひび割れが確認でき、261 日間の促進劣化終了時点では、腐食ひび割れ幅は 0.15～0.25mm であった。しかし、促進劣化中の鉛直変位の変化は塩水噴霧の有無によらず、同様であったことから、腐食量 10～30mg/cm² の段階では、主鉄筋の腐食が持続荷重載荷時における試験体の変形挙動に及ぼす影響はないものと言える。
- (2)促進劣化試験後、塩水噴霧あり、なしの試験体ともに繰返し載荷試験を行ったところ、除荷時の挙動に差が見られ、付着劣化が進行していたと考えられる。
- (3)断面内でのひび割れ進展挙動の観察を行ったところ、隅角部の鉄筋の腐食が比較的大きく進行しており、軸方向ひび割れと側面方向へのひび割れ進展が確認できた。
- (4)はつり出した鉄筋の腐食状況から、持続荷重により導入された初期ひび割れ発生位置において、鉄筋表面への腐食生成物の付着量が多くなっていることが確認できた。また、鉄筋の残存断面積の分布を測定した結果、初期ひび割れ発生位置では、局所的に平

均腐食量の 2 倍程度以上の腐食量になっていることが示された。

- (5)塩水噴霧ありの試験体について、ひび割れが生じていない個所ではあるが、塩化物イオンの見掛けの拡散係数の測定を行ったところ、鉄筋位置の深さでの塩化物イオン濃度は 0.2～2.4kg/m³ であった。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2007
- 2) 鈴木三馨，福浦尚之，丸屋剛：ひび割れ発生限界腐食量と腐食生成物の膨張率の定量化に基づく耐久・構造連成解析システムの高精度化，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.773-778，2010
- 3) 丸屋剛，武田均，堀口賢一，小山哲，許鎧麟：コンクリート中の鋼材のマクロセル腐食に関する解析手法の構築，土木学会論文集 E，Vol.62，No.4，pp.757-776，2006.11
- 4) 河村圭亮，Tran Khoa Kim，中村光，国枝稔：鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面および内部ひび割れ進展挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1007-1012，2010