

論文 持続荷重と塩害を受ける RC 梁の鉄筋の腐食状況と変形挙動

鈴木 三馨*1・福浦 尚之*2・丸屋 剛*2

要旨: 本研究の目的は、持続荷重と塩害を受ける RC 梁の鉄筋腐食が腐食ひび割れの進展と RC 梁の変形挙動に与える影響の把握である。RC 梁試験体を用いて、持続荷重により曲げ区間に複数の曲げひび割れを発生させたのち、約 260 日間の乾湿繰返し腐食促進実験を行った後、RC 梁の繰返し載荷実験を行った。その結果、曲げひび割れ近傍のマクロセル腐食の発生と鉄筋腐食に伴う腐食ひび割れによる腐食範囲の拡大状況を確認した。また、鉄筋の平均腐食量が $30\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度の場合、持続荷重下における試験体の変形挙動に及ぼす影響はほとんどないが、鉄筋とコンクリートとの付着の変化により除荷後の残留変位が大きくなった。

キーワード: 塩害, マクロセル腐食, 腐食ひび割れ, 曲げひび割れ, 変形, 付着

1. はじめに

鋼材に生じる腐食の内、局所的に腐食が進行するマクロセル腐食は、全体に渡って一様に腐食が進行するミクロセル腐食よりも腐食速度が速いことから維持管理上危険性の高い腐食とされている¹⁾。また、荷重作用によるひび割れが発生すると、ひび割れ位置で局所的に腐食が進行するマクロセル腐食となることが考えられる。しかし、持続荷重が作用し、曲げひび割れが複数生じた条件での塩害による鉄筋腐食に伴う鉄筋コンクリート(以下、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、降伏荷重の 50% 程度の持続荷重により曲げ区間に複数の曲げひび割れを発生させた RC 梁を対象に、鉄筋腐食が腐食ひび割れの進展と RC 梁の変形挙動に与える影響を把握することを目的とし、腐食促進実験を行ったのち、繰返し載荷実験を行った。腐食促進実験は、持続荷重により曲げ区間に複数の曲げひび割れを発生させたのち、塩水噴霧による乾湿繰返しを行う実験で、鉄筋腐食が腐食ひび割れの進展と RC 梁の変形挙動に与える影響を明らかにした。さらに、繰返し載荷実験は、RC 梁に降伏荷重の 50% 程度の荷重の載荷・除荷を繰返し、さらに降伏荷重の 50% から 70% 間の荷重の載荷・除荷を繰返す実験で、鉄筋腐食が載荷・除荷の過程の RC 梁の変形挙動に与える影響を明らかにした。

2. 持続荷重下における腐食促進実験

2.1 腐食促進実験概要

実験に用いた試験体は図-1 に示す断面 $300 \times 200\text{mm}$ 、長さ $4,200\text{mm}$ の RC 梁試験体である。主鉄筋は引張側、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異形鉄筋 D6 が 100mm ピッチで配筋されている。試験体は、持続荷重を作用させ、曲げひび割れを導入した条件下で塩水噴霧により鉄筋腐食を促進させるケース(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。

試験体に使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。材齢 28 日でのコンクリートの圧縮強度は $36.3\text{N}/\text{mm}^2$ であった。各試験体は気中養生とし、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 P を載荷し、複数の曲げひび割れを導入した。

塩水噴霧ありのケースでは材齢 81 日に図-1 (a) に示す試験体下面中央の塩水噴霧区間に 3%NaCl 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、約 260 日間に渡って乾湿繰返しを行った。腐食促進試験は 2010 年 6 月から 2011 年 3 月に温湿度制御のない室内で行い、最高気温 33°C 、最低気温は 3°C 、湿度は 2010 年 7 月から 10 月まで測定し、その平均湿度は 70% であ

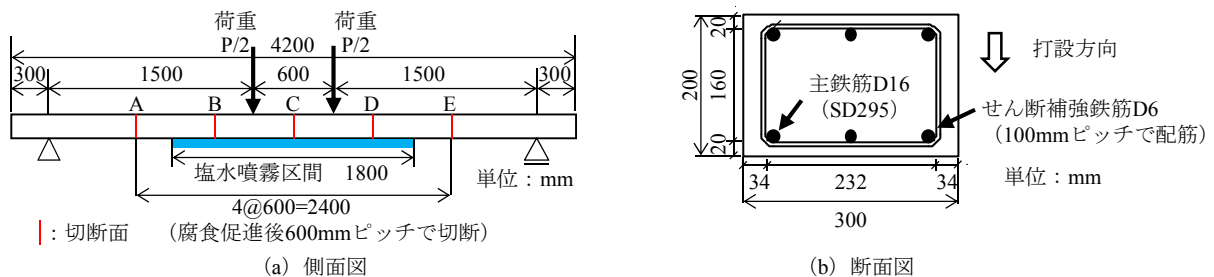


図-1 試験体概要

*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室, 工修 (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室, 工博 (正会員)

った。

腐食促進中の目視によるひび割れ観察は、おおよそ 14 日に 1 度の頻度で行った。試験体中央における鉛直変位は 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乾湿繰返し開始から約 130 日後（腐食ひび割れ発生直後）、約 260 日後（乾湿繰返し終了時）における試験体底面および側面のひび割れ図を 図-2 に示す。図中の灰色線は曲げひび割れ、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す。また、3 本の引張側主鉄筋は、 図-2 (b) に示す位置にあり、それぞれを鉄筋 A～C とした。

持続荷重による曲げひび割れは、約 100mm ピッチで、せん断補強鉄筋のほぼ直下に生じた。曲げひび割れ幅は、乾湿繰返し開始時では 0.04～0.08mm、乾湿繰返し開始から 261 日後で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。

乾湿繰返し開始から約 90 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た。これは、ひび割れ部では、腐食因子となる物質が浸透し易く、せん断補強鉄筋と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、乾湿繰返し開始から約 130 日後に、鉄筋 A の直下のコンクリート表面に軸方向に発生し、その時点のひび割れ幅は 0.06～0.1mm であった。その後 30 日以内に鉄筋 B、C の直下からも発生した。

図-2 (a) 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-3 に示す。乾湿繰返し開始から約 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 まで拡大した。その後、ひび割れ幅は 0.15～0.25mm 程度で収束し、それ以上拡大しなかった。

既往の文献 2) 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腐食促進実験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-4 に示す。試験体中央における鉛直変位の経時変化は塩水噴霧の有無によらず、乾湿繰返し開始から実験を終了した

表-1 コンクリートの配合

W/C	s/a	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	AE減水剤
55	44	165	300	808	1027	0.75

普通ポルトランドセメント使用、空気量 4.5%

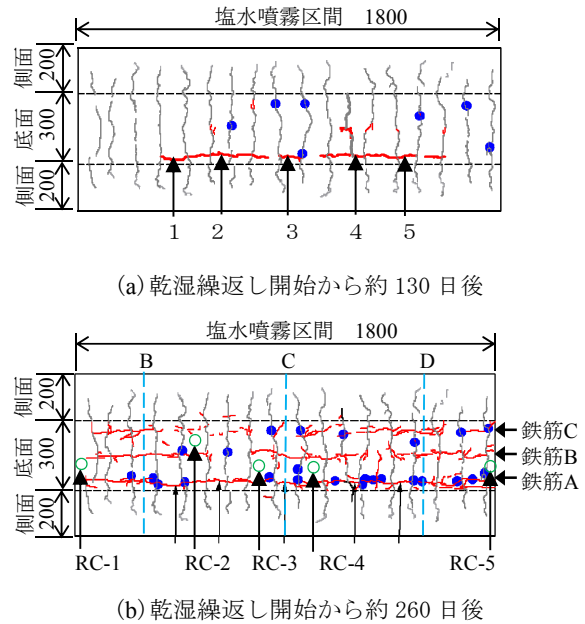


図-2 底面のひび割れ状況
 灰色線：曲げひび割れ、赤線：腐食ひび割れ
 ●印：錆汁位置、番号 1～5：ひび割れ幅計測位置
 RC-1～RC-5：塩化物イオン濃度測定用コア抜き位置
 線：切断面 単位：mm

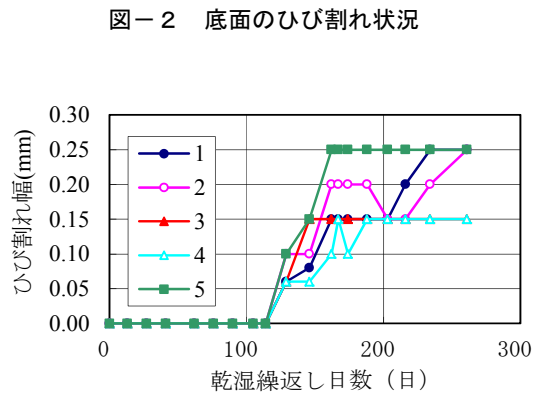


図-3 腐食ひび割れ幅の経時変化

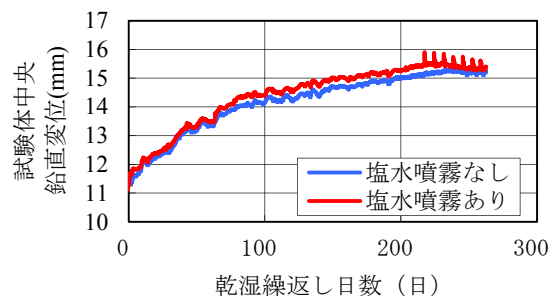


図-4 試験体中央における鉛直変位の経時変化

261 日後まで増加し続け、約 12mm から約 15mm に増加した。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。

3. 断面内のひび割れ進展挙動

3.1 断面観察方法

塩水噴霧ありのケース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-1 に示す A~E 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, C, D は図-2 (b) に示す位置とそれぞれ対応している。

3.2 内部ひび割れの進展状況

切断面 B において、切断面 C の方向を見た断面における鉄筋 A と鉄筋 C の周りの内部ひび割れを写真-1 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 であった隅角部の鉄筋 A の位置においては、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。

隅角部の鉄筋 C 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。

本実験では隅角部の鉄筋 A 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。腐食促進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まり変化が見られなかったものと考えられる。

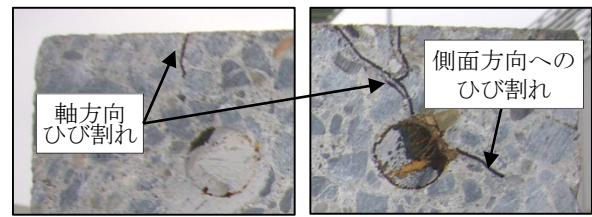
中央の鉄筋 B に対しては図-2 (b) に示すように表面に目視で軸方向ひび割れが確認できていたが、断面内においてはひび割れが確認できなかった。軸方向に生じる腐食ひび割れは、表面から進展するものと考えられている²⁾ことから、断面内においては、まだ進展していない段階であったことや、目視では観察できない程度のひび割れ幅であったことが考えられる。

4. 鉄筋の腐食量および腐食分布

4.1 腐食量測定方法

鉄筋の腐食分布を把握するために、塩水噴霧ありの試験体の図-1 に示す切断した各区分において引張側の主鉄筋 3 本 (600mm×計 12 本) をはつり出し、腐食量および腐食分布の測定を行った。

はつり出した鉄筋は、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に準拠し、60℃の 10%クエン酸二アン



* 写真中の黒線は目視で確認できたひび割れを示す。

写真-1 断面内のひび割れ (左: 鉄筋 C, 右: 鉄筋 A)

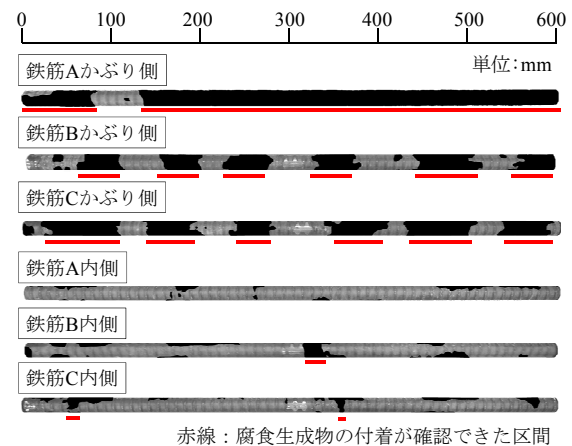


写真-2 主鉄筋の腐食状況 (区間 C-D)

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。その後、鉄筋の質量と長さを測定し、同一鉄筋の腐食が生じていない部分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、レーザー変位計により断面形状の測定を行った³⁾。各測定断面を 36 分割し、レーザー変位計を用いて鉄筋を 10 度ごとに回転させながら半径方向の距離を測定した。測定断面はふしのない箇所鉄筋の軸方向に約 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、腐食が生じていない断面で測定した断面積との差、鉄の密度および単位長さから単位表面積当たりの腐食量に換算した。

4.2 鉄筋の腐食状況

図-1 中に示す区間 C-D からはつり出した主鉄筋のかぶり側および内側 (かぶり側の反対) の腐食状況の様子を写真-2 に示す。写真中のスケールは位置 C からの距離に対応している。また、目視にて鉄筋表面で腐食生成物の付着が確認できた箇所を黒で塗り、その区間を赤線で示した。

最初に腐食ひび割れが発生し、腐食促進実験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鉄筋 A は、かぶり側の表面全体に腐食生成物が付着していた。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、腐食促進実験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鉄筋 B、C は、かぶり側表面に約 100mm ピッチの等間隔に腐食生成物が付着していた。この位置は 2.2 節で述べた曲げひび割れ発生位置とせん断補強鉄筋が配置されている位置に対応する。従って、曲げひび割れが生じている条件下では、曲げ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、かぶり側の方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。また、鉄筋のかぶり側の方が内側よりも塩化物イオン、溶存酸素、水分などの腐食因子が侵入しやすいと考えられる。

図-1 中に示す区間 D-E 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-3 に示す。写真中の上側がかぶり側であり、左から順に鉄筋 A~C が配置されていた。

せん断補強鉄筋の表面は、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。

4.3 鉄筋の腐食量

各鉄筋の質量減少量および残存断面積から算出した 600mm 区間での平均の腐食量を表-2 に示す。最も腐食が進行していた鉄筋 A の中央部での質量減少率から算出した腐食量は約 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 B や C の腐食量は約 10~15mg/cm² であり、本実験条件下における腐食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。

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、ふしのない箇所にて約 20mm ピッチで測定した値の平均値として算出しているため、ふしのある箇所の孔食の影響を考慮できていないことなどから、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。

4.4 鉄筋の腐食分布

区間 C-D からはつり出した主鉄筋の内、鉄筋 A の腐食分布を図-5 に示す。これは、写真-3 に示したように

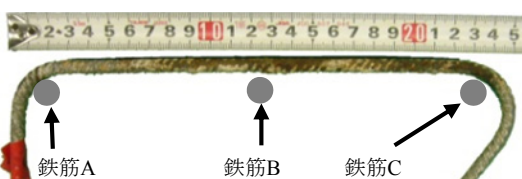


写真-3 せん断補強鉄筋の腐食状況

表-2 鉄筋の腐食量

区間	質量減少量から算出			残存断面積から算出		
	鉄筋A	鉄筋B	鉄筋C	鉄筋A	鉄筋B	鉄筋C
A-B	17.8	11.7	8.8	8.6	5.2	4.8
B-C	22.5	9.3	10.4	53.0	19.6	44.4
C-D	29.5	15.7	13.9	30.1	16.6	50.3
D-E	15.0	11.9	13.8	43.6	61.1	40.2

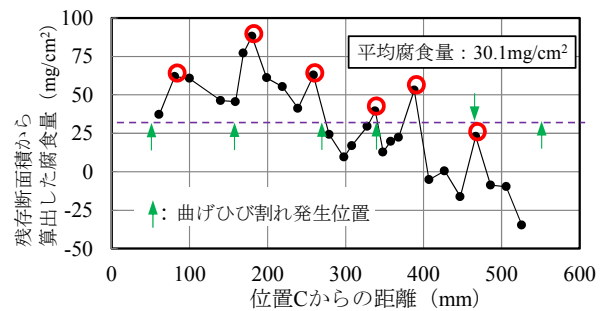


図-5 鉄筋の腐食分布 (鉄筋 A, 区間 C-D)

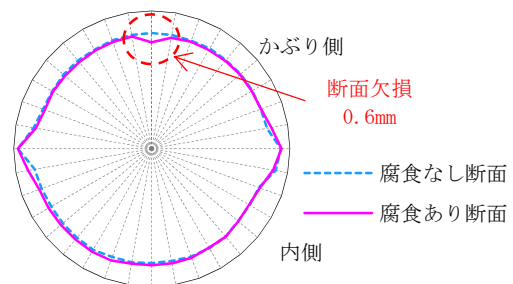


図-6 鉄筋の断面形状

かぶり側が全体的に腐食している部分である。腐食量は表-2 に示すように測定方法によらず約 30mg/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○印で示すように、局所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、曲げひび割れ発生位置において腐食が局所的に進行するマクロセル腐食が生じたものと考えられる。なお、腐食量分布で全体的に傾きが生じ、端部に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の内、図-5 中の○印のうち、位置 C からの距離 400mm 付近の鉄筋の断面形状を図-6 に示す。図中には同じ鉄筋の腐食なし断面の断面形状を併せて示す。両者を比較すると、腐食あり断面では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は断面欠損が確認

できた。測定結果より、この位置での断面欠損深さは0.6mmであった。

5. 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の測定

5.1 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の測定方法

RC 梁試験体作製時に、同一のコンクリートを使用し、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、NaCl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-2(a)中のRC-1～RC-5）から小径コアを採取して、表面から25mmまでの区間を5mmごとに塩化物イオンを測定し、拡散係数の測定を行った。

5.2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の測定結果

塩化物イオン濃度分布から式(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-3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、NaCl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。

6. 鉄筋が腐食したRC梁の荷重実験

6.1 荷重実験概要

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、乾湿繰返し実験を行った後、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荷重実験を行った。繰返し荷重は、図-7に示すとおり、全荷重21kNを10サイクル繰返し荷重した後、全荷重21kNを荷重した状態で、さらに荷重7kN(全荷重28kN)を10サイクル繰返し荷重して、変形を測定した。

6.2 鉄筋腐食の有無によるRC梁の変形挙動の違い

繰返し荷重を行った時の荷重とRC梁試験体のスパン

表-3 表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数

(a)円柱供試体

供試体No.	55N-1	55N-2	55N-3	平均
表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m^3)	32.0	21.8	24.9	26.2
拡散係数 D ($\text{cm}^2/\text{年}$)	1.77	2.39	2.15	2.10

(b)RC梁試験体から採取した小径コア供試体

供試体No.	RC-1	RC-2	RC-3	RC-4	RC-5	平均
表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m^3)	12.4	12.4	10.2	9.6	10.3	11.0
拡散係数 D ($\text{cm}^2/\text{年}$)	0.66	0.64	1.47	1.72	1.95	1.29

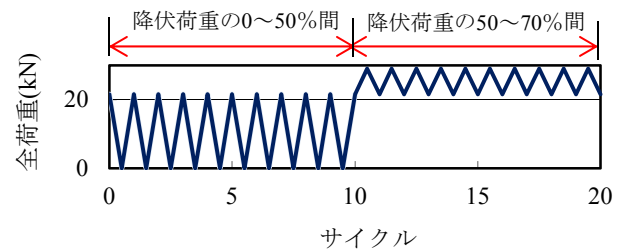


図-7 荷重サイクル

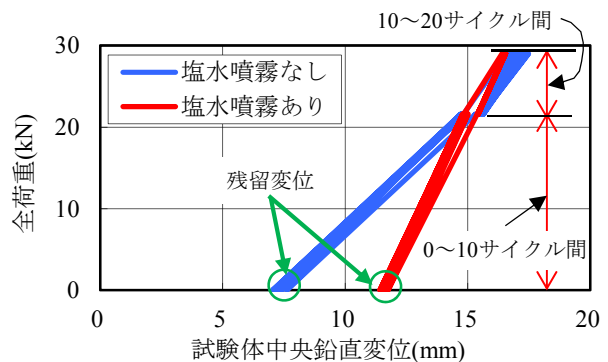


図-8 荷重-鉛直変位関係

中央における鉛直変位の関係を図-8に示す。

持続荷重終了時点では、図-4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大きくなった。これは鉄筋腐食により鉄筋とコンクリートの付着に変化が生じ、ひび割れが閉じにくくなったものと考えられる。全荷重21kNでの繰返し荷重とさらに荷重を加えた全荷重28kNの繰返し荷重の荷重範囲では、塩水噴霧の有無に関わらず繰返しによる変形の進

展はほとんどなかった。よって、本実験での腐食レベルでは、降伏荷重の70%程度までの荷重範囲では繰返し荷重の影響はほとんどないものと考えられる。

7. まとめ

本研究では、降伏荷重の50%程度の持続荷重により曲げ区間に複数の曲げひび割れを発生させたRC梁を対象に、鉄筋腐食が腐食ひび割れの進展とRC梁の変形挙動に与える影響を把握することを目的とし、腐食促進実験を行ったのち、繰返し載荷実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 乾湿繰返し開始から約130日後に、コンクリート表面に鉄筋軸に沿った腐食ひび割れが確認でき、約260日後の腐食促進実験終了時点では、腐食ひび割れ幅は0.15~0.25mmであった。しかし、腐食促進実験中の試験体中央における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) 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。
- (3) 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曲げ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おり、マ

クロセル腐食が生じたものと考えられる。また、かぶり側で局所的に断面欠損が確認できた。

- (4) 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箇所でのRC梁試験体の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。
- (5) 乾湿繰返し実験後、塩水噴霧あり、なしの試験体ともに繰返し載荷実験を行ったところ、塩水噴霧ありの除荷後の残留変位が大きくなった。これは鉄筋腐食により鉄筋とコンクリートとの付着の変化が生じ、ひび割れが閉じにくくなったものと考えられる。また、本実験での腐食レベルでは、繰返し荷重による変形の進展はなかった。

参考文献

- 1) 渡辺博志, 木村嘉富, 古賀裕久, 中村英佑: 塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食形成機構, 土木研究所資料, 第4131号, pp.1-38, 2009.1.
- 2) 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.
- 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.