

論文 ひび割れ損傷が生じたRCはり部材の塩害劣化と曲げ耐力評価

松尾 豊史*1・江藤 修三*2・松村 卓郎*1・藤井 隆*2

要旨：ひび割れ損傷を有する RC はり部材における塩分の浸透状況をレーザ誘起ブレイクダウン分光法等により計測した結果、塩化物イオン濃度は、コンクリート中のひび割れ位置で高くなることを確認した。一方で、損傷レベルが鉄筋降伏直後(残留ひび割れ幅 0.4mm 程度)までであれば、ひび割れの有無が腐食進行に及ぼす影響は小さかった。しかし、かぶり剥落後に鉄筋腐食が進行した場合には局所的な腐食が顕著になる傾向にあり、鉄筋破断により曲げ耐力が約7%に低下することを示した。さらに、鉄筋腐食量と経過時間の関係に関する実験結果に基づいて、ひび割れ損傷を考慮した鉄筋の腐食速度も導出した。

キーワード：鉄筋コンクリート, ひび割れ, 塩分濃度, 鉄筋腐食, 耐荷特性, 維持管理

1. はじめに

既設コンクリート構造物の経年劣化が顕在化する中、鉄筋コンクリート製(RC)電力施設の健全性評価の高度化を図るためには、環境と荷重の複合的影響を解明していくことが重要である。わが国の火力・原子力発電所におけるRC地中構造物は、臨海部に建設される。既設RC構造物では、施工、使用環境、構造・外力などによりひび割れが生じているものもあり、この状態で塩害等の劣化が進むと、鉄筋腐食やそれに伴う耐荷力の低下が懸念される。著者らは、RC地中構造物が経年劣化した場合を想定して、これらの構造物に関する健全性評価の研究を進めてきた¹⁾。しかしながら、既往のRC部材の劣化進行や耐荷特性評価では、ひび割れ損傷の影響が十分に考慮されているとは言い難い。

そこで、本研究では、ひび割れ損傷などがRCはり部材の塩害劣化や耐荷特性に及ぼす経年的な影響を実験的に評価するとともに、その考慮方法について提案を行った。

2. RCはり部材の環境・荷重作用負荷実験

2.1 実験概要

(1) 試験体の仕様

実験に用いた試験体の形状と配筋を図-1に示す。部材の寸法は長さ2800mm×高さ400mm×奥行200mmであり、主筋はD16鉄筋(SD295)を50mm間隔で4本配置した。試験体下面のかぶりは32mm、側面は17mmである。破壊モードは、腐食がない状態で、斜めひび割れ発生後に主筋が降伏して、曲げ破壊するように設計した。実験時のコンクリート圧縮強度は平均で45.1N/mm²であった。

(2) 実験ケース

実験ケースを表-1に示す。実験パラメータは、初期損傷および、環境作用期間、初期欠陥とした。

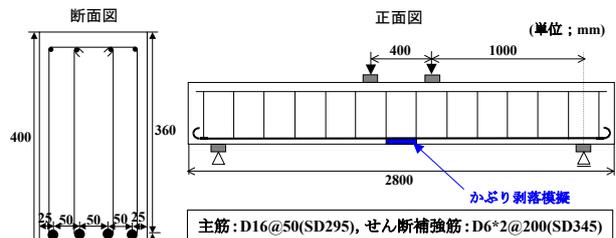


図-1 試験体の寸法と配筋

初期損傷の程度は、部材レベルでのひび割れ状況とひび割れ幅の影響を検討するために、損傷小(鉄筋降伏前)、損傷中(鉄筋降伏直後)、損傷大(局所的なコンクリート圧壊直後)の3段階とした。初期損傷時の最大残留ひび割れ幅としては、損傷小で0.04~0.08mm程度、損傷中で最大残留ひび割れ幅が0.2~0.4mm程度、損傷大で1.0~3.0mm程度であった。環境作用期間は、0ヶ月、12ヶ月、22ヶ月と54ヶ月の4段階として、経年的な影響を考慮した。初期欠陥は、耐荷特性に影響を及ぼすと考えられる箇所の鉄筋腐食を進行させるために、かぶりコンクリートの剥落を設けることにより考慮した(図-1)。

2.2 実験方法

(1) 環境作用負荷

環境作用負荷の条件としては、わが国の海岸における最も厳しい塩害環境を想定して、温度40°C±2°C、湿度90%±5%、塩水噴霧量60mg/dm²/day(24時間毎に3分間の3%NaCl水溶液の噴霧)に設定した²⁾。

(2) 荷重作用負荷

荷重作用負荷実験では、RCはり部材のスパン中央から200mmの位置2点を油圧アクチュエーターによる変位制御で上側から載荷した。載荷におけるせん断スパン長は1000mm、せん断スパン比は2.78である。底部支持条件は、片側ローラー、片側固定の単純支持である。

*1 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 博(工) (正会員)

*2 電力中央研究所 電力技術研究所 高エネルギー領域

表-1 実験ケース

名称	初期損傷	環境作用	かぶり剥落
N-0-N	なし	0ヶ月	なし
N-0-N2	なし	0ヶ月	なし
S-1-N	小	12ヶ月	なし
M-1-N	中	12ヶ月	なし
L-1-N	大	12ヶ月	なし
S-2-N	小	22ヶ月	なし
M-2-N	中	22ヶ月	なし
M-2-C	中	22ヶ月	かぶり剥落
M-2-N1	中	22ヶ月	なし
M-2-N2	中	22ヶ月	なし
L-2-N	大	22ヶ月	なし
N-3-N	なし	54ヶ月	なし
M-3-N	中	54ヶ月	なし
L-3-N	大	54ヶ月	なし
L-3-C	大	54ヶ月	かぶり剥落

(3) 実験手順

まずは、環境・荷重作用を負荷する前に、地震などの外力によって生じた損傷を模擬した初期時点での損傷(以降、初期損傷)を導入するため、1回目の荷重作用負荷実験を行う。次に、初期損傷がある試験体に対して、塩害環境下において経年劣化させるために環境作用負荷実験を行う。なお、RC部材の下面が海水の飛沫等の影響を受けやすいことを勘案して、載荷後に試験体を反転させ、初期損傷のある面を上面として、噴霧された塩水に触れやすい条件とした。さらに、この試験体を用いた2回目の荷重作用負荷実験を実施することにより、損傷後に鉄筋腐食が進行した場合の耐荷特性を評価する。

2.3 計測方法

(1) 塩化物イオン濃度

Cl⁻濃度の測定は、JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの測定方法」に準拠して行った。採取したコアを表面から奥行き方向に10mm厚でスライスし、それらのCl⁻濃度を測定した。Cl⁻濃度測定用試料の採取位置を図-2に示す。まず、L-2-N試験体では、環境作用22ヶ月目における塩分の浸透状況を把握するために、試験体側面からコア①を、塩水噴霧面から②の試料をそれぞれ採取した。次に、M-3-N試験体では、環境作用54ヶ月目におけるひび割れの影響を把握するために、試験体側面のひび割れがない箇所からコア③を、曲げひび割れが生じた箇所からコア④の試料をそれぞれ採取した。

(2) レーザ誘起ブレイクダウン分光法

パルスレーザーを対象物に照射してプラズマを生成し、プラズマの発光を分光することにより対象物に含まれる元素の種類や濃度を計測する手法をレーザー誘起ブレイクダウン分光法(LIBS: Laser-Induced Breakdown Spectroscopy)を用いて、Clなどの元素分析を行った。

EPMAと異なり、LIBSは真空環境下で測定を行わないため、測定前に鉄筋を除去したり試験体表面を研磨したりする必要が無く、測定時間も比較的短いという特長がある。図-3に実験配置図を示す。計測では、Nd:YAGレーザー(パルス幅10ns, 繰り返し10Hz)の第二高調波を凸レンズ(焦点距離250mm)でコンクリート試験片表面に集光することでプラズマを生成させ、分光装置(刻線数1200g/mm)およびICCDカメラを用いてその発光を計測した³⁾。1mm/sの送り速度で試験片を移動させながら0.1mm毎にレーザー照射し、25回の照射分で得られた発光スペクトルを積算平均してCl発光強度を算出するため、空間分解能は2.5mm(0.1mm×25)となる。図-2に示したコア④を対象としてLIBSを行った。

(3) 鉄筋の腐食量

鉄筋の腐食量は、質量差に基づく方法と荷重差に基づく方法の2通りの方法で求めた。荷重差に基づく方法では、腐食した鉄筋の引張試験を実施し、腐食していない鉄筋の最大引張荷重との差から鉄筋の断面積の減少率を換算し、これを腐食量とした。質量差に基づく腐食量が腐食区間の平均値に対応するのに対して、荷重差に基づく腐食量は腐食区間の最大値に対応する。

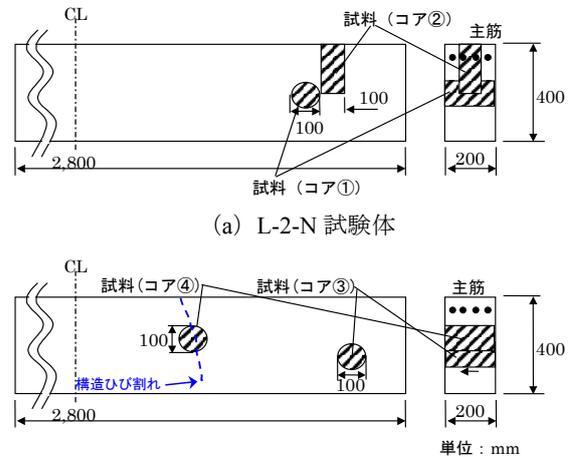


図-2 Cl⁻濃度測定用試料の採取位置

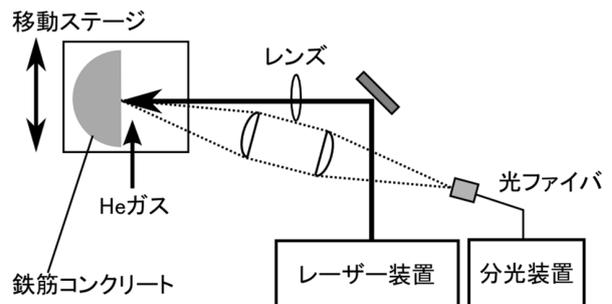


図-3 LIBSにおける実験装置概念図

3. 環境作用による材料劣化

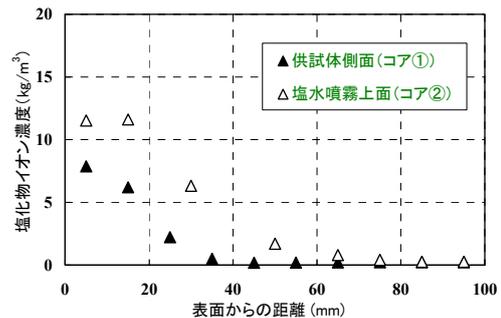
3.1 塩化物イオン濃度の深さ方向分布

試験体から採取した各コアの Cl 濃度と表面からの距離の関係を図-4 に示す。まず、環境作用 22 ヶ月で塩水噴霧面の影響を比較した結果、試験体側面よりも塩水噴霧を直接受ける面の方が表面近傍の Cl 濃度が高くなった(図-4(a))。次に、環境作用 54 ヶ月でひび割れの影響を比較結果、ひび割れがある場合の方が Cl 濃度は高くなったものの、その差は大きくなかった(図-4(b))。これは、ひび割れの影響は長期的には小さくなる可能性を示していると考えられる。さらに、経年の影響を比較すると、環境作用 22 ヶ月では、表面部の Cl 濃度が最も高かったものの、環境作用 54 ヶ月では、表面から 15mm 程度の位置で Cl 濃度が最も高くなった。これは、表面部 10mm 程度では、コンクリートの中性化に伴って Cl⁻の移動が生じたためと考えられる。なお、別途作成した材料試験用のコンクリート試験片の割裂ひび割れ面に 1%フェノールフタレイン溶液を噴霧した結果では、表面から 10~20mm が中性化した。

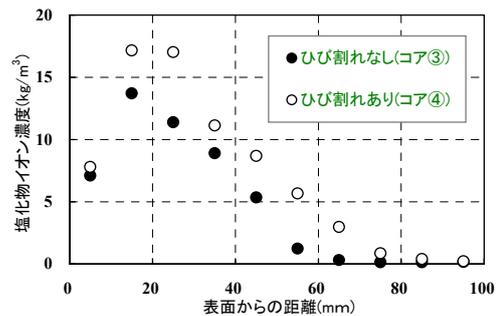
3.2 Cl の二次元分布

ひび割れの影響を考察するために、試験体 M-3-N から採取したコア④におけるひび割れを含むコア断面の写真と LIBS を用いて Cl 発光強度の二次元分布を測定した結果を図-5 に示す。Cl 発光強度の測定値は、青色から緑、黄、赤、白の順に濃度が高いことを示している。また、図中の点線と丸枠はひび割れ位置と鉄筋の位置をそれぞれ示している。ひび割れ箇所では、試験体表面に凹凸が発光強度に影響を及ぼすと考えられるが、Cl と他の元素との発光強度を比較した結果、今回観測されたひび割れ幅程度では顕著な発光強度の変化はないと判断した³⁾。

図-5 より、コア④では同じ試験体深さにおいても浸透・拡散状況に違いが見られる。深さ 25mm 以降は全面的に塩分浸透しているため、ひび割れの影響は小さいものと考えられる。破線の丸で囲んだ箇所 A のように骨材のある箇所では、Cl 発光強度が低下する傾向にあることが分かる。これは、Cl が骨材よりもモルタル中を拡散していくことを示している。さらに、鉄筋周辺には顕著に Cl 発光強度が高くなっていることが分かる。深さ 0~20mm で観測されるひび割れ B においては、ひび割れが骨材周囲に沿って深さ方向に進展しているのが確認されるが、そのひび割れに近傍にて Cl 発光強度が高くなった。これは、この RC 断面において、ひび割れを通して塩分が鉄筋まで浸入してきたものと考えられる。一方、深さ 20mm にて横方向に進展しているひび割れ箇所 C では、顕著に Cl 発光強度が高くなかったことから、このひび割れは初期損傷で生じたものではなく、鉄筋腐食に伴う鉄筋の膨張により生じたものと考えられる。



(a) 塩水噴霧面の違い(環境作用 22 ヶ月)



(b) ひび割れの影響(環境作用 54 ヶ月)

図-4 Cl 濃度と表面からの距離の関係

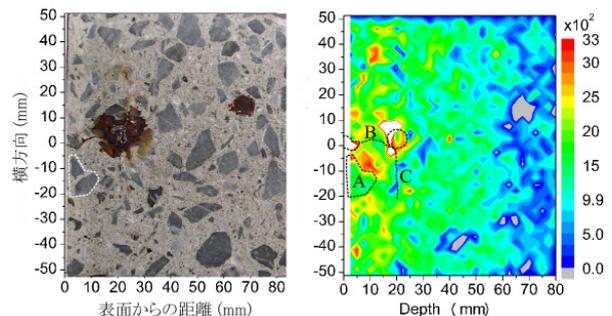
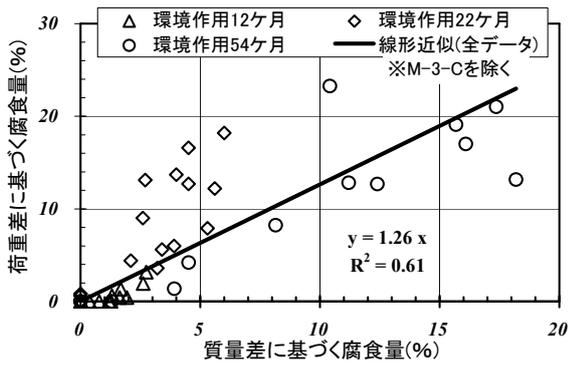


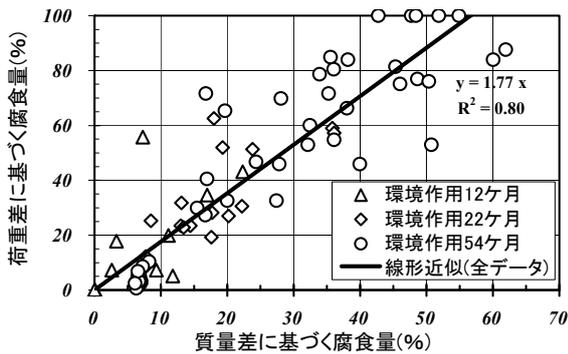
図-5 コア断面の Cl 分布比較

3.3 鉄筋腐食量

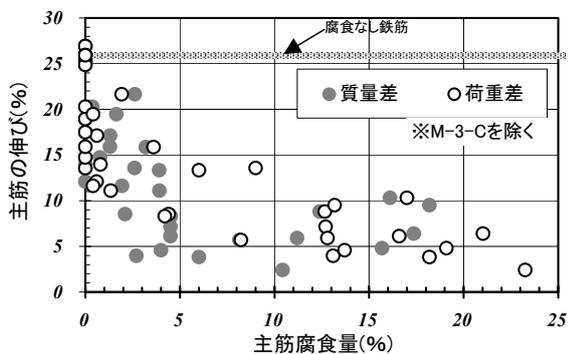
環境作用負荷実験における鉄筋腐食量の測定結果を図-6 に示す。なお、M-3-C は載荷後に鉄筋破断していたため、図面から省いた。まず、腐食区間の最大値に対応する荷重差に基づく腐食量は、腐食区間の平均値に対応する質量差に基づく腐食量よりも大きくなっている。これは、損傷や初期欠陥があると、鉄筋が直接塩水に接するため、局所的な腐食進行が著しくなるためと考えられる。また、鉄筋腐食量は環境作用を与えた期間が長い方が大きくなっていることが分かる。一方で、初期損傷の影響は明確ではなかった。これは、塩分はひび割れ部から浸透しやすい傾向にあったものの、腐食ひび割れが発生していくにしたがって、初期損傷の影響が小さくなるためと考えられる。次に、主筋の腐食量よりもせん断補強筋の腐食量の方が大きくなっていることが分かる。これは、せん断補強筋の方が主筋と比べて径が小さく、表面からの距離も短いため環境作用の影響が大きいためと考えられる。さらに、同一の伸びに対する腐食量



(a)主筋腐食量



(b)せん断補強筋腐食量



(c)伸び

図-6 質量差と荷重差の腐食量との関係

を比較すると、特に伸びが10%以下にまで低下する領域において、腐食量(質量差)よりも腐食量(荷重差)の方が大きくなる傾向が認められた。これは、最も腐食した区間で鉄筋が破断しやすいためであると考えられる。

4. 耐荷特性に及ぼす材料劣化の影響

4.1 ひび割れ損傷状況

環境作用を受けていない試験体は、斜めひび割れが発生した後に鉄筋が降伏し、コンクリートの圧縮破壊により終局に至った。環境作用を受けた試験体も、破壊モードは全て同様であった。

荷重作用負荷実験後のひび割れ状況を図-7に示す。こ

れによると、鉄筋降伏前の初期損傷を与えた後に環境作用を受けた試験体では、試験体側面に主筋軸方向に沿った腐食ひび割れが発生し、載荷では、環境作用を受けていない場合に比べて、試験体両端側で斜めひび割れが発生しにくかった。また、曲げモーメントが大きい区間の曲げひび割れのみが進展する傾向にあった。これは、主に鉄筋とコンクリートの付着劣化によるものだと考えられる。このように、損傷や初期欠陥を伴って鉄筋腐食した場合には、ひび割れの分散性の低下が認められた。

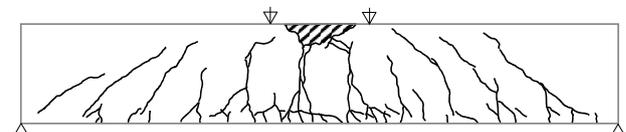
4.2 損傷および鉄筋腐食がある場合

環境作用12、22ヶ月の場合、M-2-Cを除いて各試験体ともに、鉄筋腐食量(荷重差)は5~20%であるものの、鉄筋腐食量(質量差)は5%程度であり、初期損傷を与える影響としては小さかった。また、環境作用54ヶ月の場合、L-3-C以外の鉄筋腐食がある供試体では、鉄筋腐食がない場合と比べて主筋降伏時の荷重が13~20%低下したものの、最大荷重は大きくは低下しなかった(図-8)。これは、主筋とコンクリートとの付着劣化に伴って、引張側主筋より上部でアーチ状の圧縮領域が形成され、試験体上縁のコンクリートの圧縮破壊によって終局に至ったためであると考えられる⁴⁾

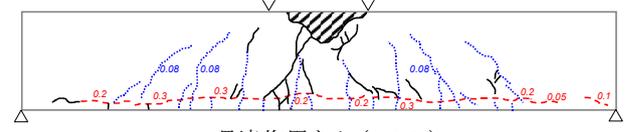
一方で、L-3-Nの最大荷重の低下程度は数%であったのに対して、かぶりコンクリートの剥落を模擬したL-3-Cでは、最大荷重が約7%に大幅に低下した。これは、かぶり剥落を模擬した部位では、主筋の局所的な腐食進行が顕著であり、載荷後早期に鉄筋破断に至ったためである(図-9)。これは、腐食した鉄筋の引張特性には、初期損傷の程度よりも初期欠陥としてかぶりコンクリート剥落を模擬した影響が大きかったことを示している。



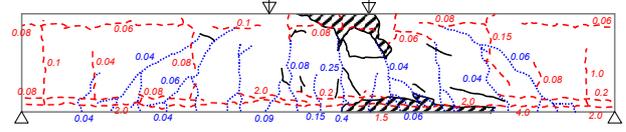
図中の数値は載荷前のひび割れ幅 [単位:mm]



(a)環境作用なし(N-0-N2)



(b)環境作用あり(S-1-N)



(c)環境作用あり(M-3-N)

図-7 実験後のひび割れ状況

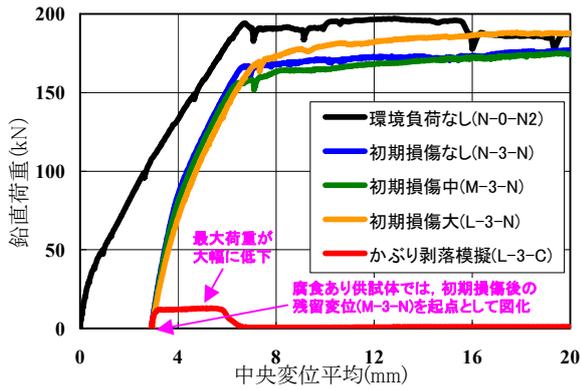


図-8 荷重変位関係比較(環境作用 54 ヶ月)



図-9 主筋の腐食状況(かぶり剥落部)

5. ひび割れ損傷を考慮した塩害劣化進行評価

5.1 経年的な腐食量の評価方法

既往文献^{1),5)}に基づいて、ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋の経年的な腐食量を評価する方法を示す。この方法は、定期点検などにおいて、ひび割れの原因が特定されていない場合でも評価できる方法である。

点検時あるいは将来の腐食量は、次式により推定する。

$$\Delta r_b(t) = \Delta r_b(t_{cr}) + \int_{t_{cr}}^t v_{corr} dt \quad (1)$$

ここで、 $\Delta r_b(t)$: 時点 t における腐食深さ(mm), t_{cr} : ひび割れの深さがかぶりを超えていない最後の点検時点, v_{corr} : 腐食速度(mm/年)

ひび割れの深さに関する情報が得られない場合、および塩害や中性化などにより腐食が先行して生じるひび割れの可能性がある場合は、ひび割れが観察されていない最後の点検時点を t_{cr} とする。時点 t_{cr} における腐食深さは、腐食ひび割れの可能性が否定されている場合、ゼロとする。鉄筋の腐食は、孔食を伴うなど必ずしも同心円状に進行するわけではないが、それでも表面積の減少によって断面積の減少速度は低下すると考え、上記のように mm/年が v_{corr} の単位とされている。

5.2 ひび割れ損傷後の腐食速度

図-6(a)の主筋腐食量について、主筋配置とかぶり剥落模擬で区分した鉄筋腐食量の結果を図-10 に、初期損傷の程度(鉄筋降伏直後とその前後) かぶり剥落模擬で区分して経過時間(月)と主筋腐食量の関係で整理した結

果を図-11 に示す。これによると、内側主筋(かぶり 40mm)では、初期損傷の程度が鉄筋降伏直後(残留ひび割れ幅 0.4mm)までであれば、外側主筋や初期損傷の程度が鉄筋降伏を超える場合に比べて、腐食の進行速度は小さくなった。また、かぶり剥落を模擬した場合には、腐食区間の最大値に対応する荷重差に基づく腐食量は、平均値に対応する質量差に基づく腐食量よりも特に大きくなる傾向が認められた。

以上より、図-11 中の直線勾配に基づいて、損傷状態ごとにひび割れ発生以降の断面減少速度(%/年)と減肉速度(mm/年)を表-2 のように区分した。また、区間の平均腐食量を最大腐食量に補正するための係数を表-2 に追記した。これは、一般に、区間の最大値に相当する腐食量は区間の平均的な腐食量よりも大きくなるためである。図-10 中の初期損傷中以下(外側鉄筋)とかぶり剥落模擬の直線勾配をそれぞれ 1.17 と 2.94 および既往文献^{1),6)}で 2.0 としていることに基づいて、それぞれ 1.5, 3.0, 2.0 と安全側に設定した。

なお、腐食速度は、温度、湿度、酸素濃度等の環境条件によって異なるのが考えられるが、現段階では、想定した環境条件を踏まえて、飛沫帯、干満帯に対して適用するものとする。また、適用範囲としては、D16 以上の主筋を対象とする。

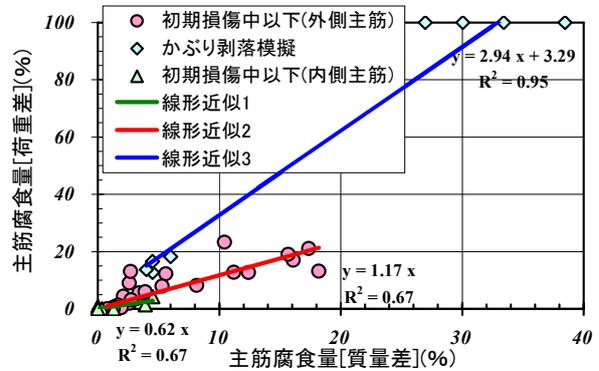


図-10 主筋の腐食量(環境作用 54 ヶ月)

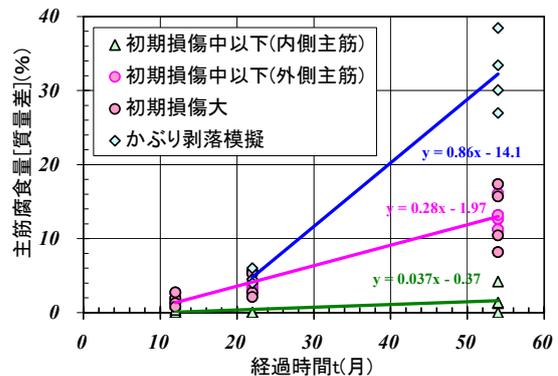


図-11 経過時間と主筋腐食量の関係

表-2 腐食速度(ひび割れ発生以降)

損傷状態	ひび割れ幅の目安	断面減少速度(%/年)	減肉速度(mm/年)	最大腐食量への補正係数
鉄筋降伏以下	0.4mm以下	0.439	0.025	1.5
鉄筋降伏を超える	0.4mmを超える	3.32	0.19	2.0
かぶり剥落	1mm以上	10.3	0.64	3.0

5.3 ひび割れ損傷の考慮方法

本研究で取得した腐食速度を適用し、ひび割れ発生時点の腐食量をゼロとして、D16とD32の鉄筋に対する経年的な平均腐食量を算定した例を図-13に示す。鉄筋腐食の経年変化には、損傷状態および鉄筋径の影響が大きいことが分かる。

一方で、鉄筋降伏や鉄筋破断などの鉄筋の強度特性は最も腐食の著しい断面で決まる。また、RCはり部材の曲げ耐力は、引張主筋の降伏後のコンクリート圧縮破壊により徐々に耐力低下し、一般的に鉄筋腐食に比例して低減することが明らかになっている⁷⁾。ここでは、引張鉄筋は破断しないという仮定を設定して、表-2に示した最大腐食量への補正係数を用いて、既往の断面耐力評価方法⁸⁾を用いて、曲げ耐力の経年変化を算定した例を図-14に示す。これによると、曲げ耐力の経年変化は、平均的な腐食量の変化よりも著しいことが分かる。

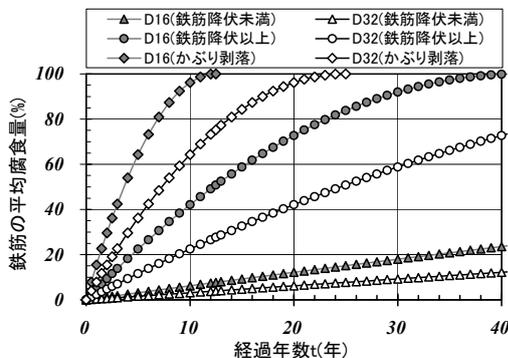


図-12 平均腐食量の経年変化に対する算定例

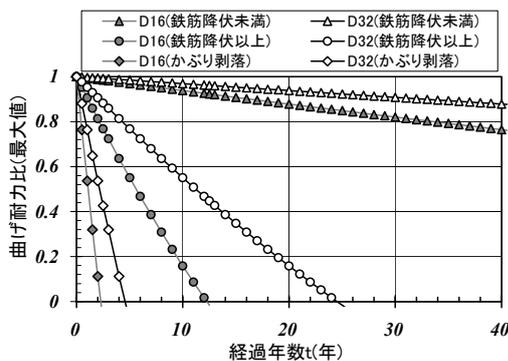


図-13 曲げ耐力の経年変化に対する算定例

6. まとめ

本実験的検討の範囲で得られた主な成果をまとめると以下の通りである。

- 1) コンクリート内部でも、ひび割れ位置ではCl濃度が高くなる傾向にあった。また、LIBSにより、ひび割れ部や鉄筋周辺にClが分布している状況を可視化した。これにより、ひび割れを通じて、塩分が浸透・拡散する状況を把握することができた。
- 2) 初期損傷の程度が鉄筋降伏直後(残留ひび割れ幅0.4mm程度)であれば、かぶり40mmではひび割れの有無が腐食進行に及ぼす影響は小さかった。一方で、初期欠陥としてかぶり剥落を模擬した場合には、局所的な腐食が顕著になる傾向にあった。
- 3) 曲げ耐力は、初期損傷の程度に関わらず、鉄筋腐食量に比例して低減する傾向にあった。かぶり剥落後に鉄筋腐食が進行した場合には、局所的な腐食が顕著になる傾向にあり、鉄筋が破断することにより、耐力は約7%に低下することなども示された。
- 4) 鉄筋腐食量と経過時間の関係に関する実験結果に基づいて、ひび割れ損傷を考慮した鉄筋の腐食速度を算出した。また、算出した腐食速度に基づいて、鉄筋径とひび割れ損傷に関する平均腐食量および曲げ耐力の経年変化に関する算定例を示した。

参考文献

- 1) 土木学会原子力土木委員会:原子力発電所屋外重要土木構造物の構造健全性評価に関するガイドライン, 2012.
- 2) 日本工業規格(JIS G 0594)無機被覆鋼板のサイクル腐食促進試験方法, 2004.
- 3) S. Eto, T. Matsuo, T. Matsumura, T. Fujii and M. Y. Tanaka: Quantitative estimation of carbonation and chloride penetration in reinforced concrete by laser-induced breakdown spectroscopy, Spectrochim. Acta B, Vol.101, pp.245-253, 2014
- 4) 松尾豊史, 酒井理哉, 松村卓郎, 金津努:鉄筋腐食したRCはり部材のせん断耐荷機構に関する研究, コンクリート工學論文集, 第15巻, 第2号, pp.69-77, 2004.
- 5) 松村卓郎, 松尾豊史, 宮川義範, 原口和靖:干満および土中環境におけるひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食進行評価, コンクリート工學年次論文集 Vol.34, 2012.
- 6) 島弘, 堤知明, 入江正明, 鈴木正敏:鉄筋が腐食した一方向RCスラブの曲げ耐力, コンクリート工學年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.563-568, 1990.
- 7) 土木学会:材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ, No.71, 2006.
- 8) 土木学会:【2012年制定】コンクリート標準示方書[設計編], 2013.