

論文 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

松村卓郎*1・松尾豊史*2 宮川義範*2・原口和靖*3

要旨: ひび割れを生じさせた鉄筋コンクリート試験体を用いて、干満帯および土中を模擬した環境において、16 か月間の鉄筋腐食実験を行った。その結果、(1)塩化物イオンはひび割れを通じてコンクリート内部に浸透し、特に、鉄筋に沿って多く浸透したが、比較的高濃度の塩化物イオンが存在しても鉄筋腐食が生じていない部分が広く認められた。(2)干満環境ではひび割れ幅が大きいほど腐食した鉄筋の引張強度は大きく低下した。土中環境ではひび割れ幅に依らず低下傾向は同程度であった。(3)実験結果に基づいて、それぞれの環境における鉄筋腐食進行予測式を経過時間の一次関数として導出した。

キーワード: 干満環境, 土中環境, ひび割れ, 鉄筋腐食, 塩化物イオン

1. はじめに

火力発電所や原子力発電所が大きな地震作用を受けた場合、構造物の健全性を評価することは、施設の再稼働、設備の再使用に対する安全性を確認する上で重要である。地震作用を受けた後の構造物の健全性とは、損傷を生じた構造物が、その後の供用期間において所要の性能を保持していることと理解できる。このような経年的な性能の変化を評価するためには、損傷の生じた構造物の経年的な劣化の進行を評価することが必要となる。特に、これらの発電所の取放水路系コンクリート構造物は干満環境や土中環境などの海水と接する環境中にあるため、損傷を考慮したこれら環境中における塩害劣化の進行を評価することが重要である。

筆者らは、干満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に関する研究を実施し、評価方法を提案している^{1),2)}。しかし、この研究で使用した試験体のかぶりは30mmであり、発電所の取放水路系コンクリート構造物の多くは80mm以上のかぶりを有していることから、実態に則したかぶりを対象にした検討が必要である。また、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に関する報告はほとんどない。

本研究では、比較的かぶりの大きい試験体を用いて、干満、土中環境における劣化実験を行い、鉄筋腐食、塩化物イオン濃度などの経年的な劣化に関するデータを取得し、これらのデータに基づいて、ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食の進行予測方法を検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

実験に供する試験体は、図-1に示すように、幅

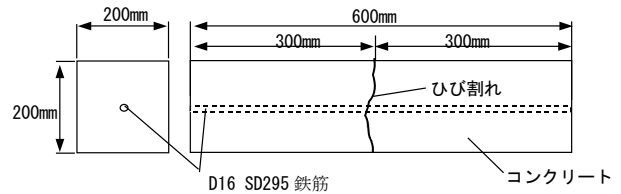


図-1 試験体の形状・寸法とひび割れ導入位置

表-1 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		C	W	S	G	AE 減水剤
60	43.2	262	157	794	1088	2.62

200mm、高さ 200mm、長さ 600mm の形状とし、D16 鉄筋 (SD295、長さ 600mm) を試験体の断面中心位置に 1 本配置した。取放水路系コンクリート構造物の実態を参考に、かぶりを 90mm とした。試験体の軸方向中心位置にひび割れを導入し、その後、側面の 1 面以外の 5 面は、エポキシ樹脂塗料 (タールエポキシ) を塗布し、シールした。また、ひび割れ幅とひび割れ位置の鉄筋ひずみの関係を把握するために、鉄筋の軸方向中心位置にひずみゲージを貼付した試験体を別途用意した。鉄筋腐食がバラツキの大きい現象であることを勘案して、同一の実験要因の試験体数を 10 体とした。

セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、陸砂とび砕砂を 7:3 で混合して使用した。粗骨材は、砕石 (最大寸法 20mm) を使用した。コンクリートの示方配合を表-1に示す。コンクリートの水セメント比は 60%、目標スランプは 8

*1 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 上席研究員 工博 (正会員)

*2 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 主任研究員 工修 (正会員)

*3 関西電力 (株) 土木建築室 原子力土木建築グループ マネジャー

±1cm, 目標空気量は $5 \pm 1\%$ とした。打設時のスランプは 7.5cm, 空気量は 4.3% であった。木製型わくを用いてコンクリートを打設し, 28 日間の湿布養生を行った。

2.2 実験要因および水準

実験要因は, 環境条件, ひび割れ幅, 実験期間の 3 種類とした。それぞれの水準を表-2 に示す。環境条件は, 干満環境と土中環境の 2 種類とした。各々の環境条件については劣化実験の方法において述べる。ひび割れ幅は, 鉄筋の降伏する範囲となるよう, 干満環境では 0.4mm, 0.8mm の 2 水準, 土中環境では 0.4mm, 0.8mm, 1.2mm の 3 水準を目標値とし, 目標値に対して $\pm 0.1\text{mm}$ の範囲で導入した。実験期間は, 劣化進行の時間変化の傾向を把握するため, 0.5 年, 1.0 年, 1.5 年の 3 水準とした。

2.3 ひび割れの導入方法

2 つの鋼製のエッジを試験体の上下にそれぞれ設置し, 耐圧試験機で載荷することにより試験体にひび割れを導入した。荷重を漸増しながら, 両側面の鉄筋位置のひび割れ幅をクラックスケールにより随時計測し, 所定のひび割れ幅が残留するよう若干大きめ (0.1mm 程度) のひび割れ幅となった時点で除荷した。

実験に先立ち, 鉄筋にひずみゲージを貼付した試験体を用いて, 鉄筋ひずみとひび割れ幅を測定し, これらの関係を把握した。パイ型ゲージはひび割れの長さ方向の中央位置に, 表面と裏面にそれぞれ設置し, 平均値を採用した。ひび割れ幅と鉄筋ひずみの関係の例を図-2 に示す。ひび割れ幅が 0.4mm 程度残留するひび割れの場合, 鉄筋ひずみは 4000×10^{-6} 程度であり, 鉄筋は降伏していると考えられる。残留ひび割れ幅が 0.8mm 程度の場合, 鉄筋ひずみは 15000×10^{-6} 程度, 残留ひび割れ幅が 1.2mm 程度の場合, 鉄筋ひずみは 20000×10^{-6} 程度であり, ひずみ硬化域にあると考えられる。

2.4 劣化実験の方法

(1) 干満環境

干満環境における劣化実験は, 干満槽を用いて行った。干満槽を用いた劣化実験の状況を図-3 に示す。実験の条件は, 腐食に対して厳しい条件を模擬することとし, 気中の時間が長く, 酸素がコンクリートに侵入しやすい環境を考え, 海水を模擬した 3% 濃度の NaCl 水溶液に 1 日 2 回 30 分間 (12 時間間隔) 浸漬することとした。腐食速度は温度が高い方が大きいことから, 気温および水温は, 夏季の気温を参考に, 40°C とした。NaCl 水溶液にはエアレーションを行い, 溶存酸素を飽和濃度となるようにした。湿度は制御しなかったが, 湿度計により定期的に計測を行ったところ, 気温は概ね 40°C , 湿度は干満の影響により変化し, R.H.30%~100% の範囲であった。

所定の期間毎に試験体を干満槽から取出し, 鉄筋の腐食状態の観察ならびにコンクリート中の塩化物イオン

表-2 劣化実験の要因と水準

要因	水準
目標ひび割れ幅 (mm)	0.4, 0.8, 1.2 (土中のみ) 目標値に対して $\pm 0.1\text{mm}$ の範囲
環境条件	干満, 土中
実験期間 (年)	0.5, 1.0, 1.5 (干満環境: 21, 43, 67 週間, 土中環境: 19, 45, 68 週間)

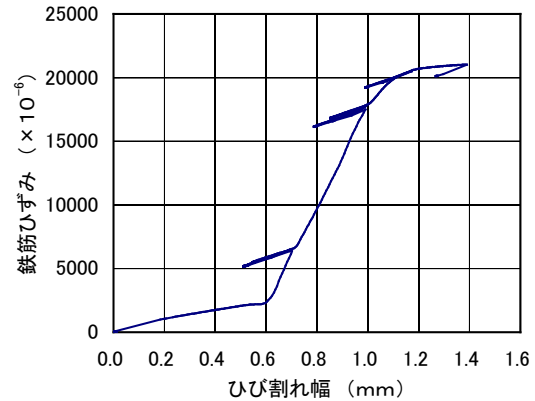


図-2 載荷時の鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係

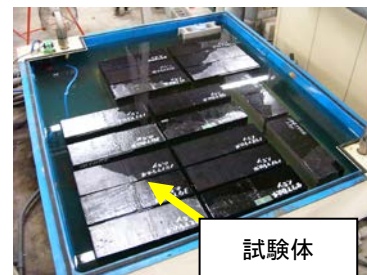


図-3 干満槽を用いた劣化実験の状況

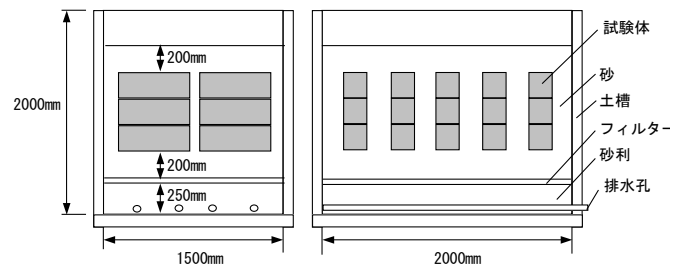


図-4 土槽を用いた劣化実験の概要

濃度を測定 (JIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠) した。さらに, 鉄筋の引張試験を行い, 鉄筋の強度物性値を測定した。

(2) 土中環境

土中環境における劣化実験は, 土槽を用いて行った。実験の概要を図-4 に示す。砂は平均粒径 1mm の珪砂を用いた。使用した珪砂の粒径分布を図-5 に示す。粒

径の範囲が比較的小さいため、保水性が小さく、空気が入りやすい砂であり、腐食に対して安全側の条件であると考えられる。設置した砂の質量と土槽の容積から算出した砂の密度（乾燥状態）は $\rho_d=1.63\text{g/cm}^3$ であり、間隙比は $e=0.63$ 、相対密度は $D_r=100\%$ であった。砂の密度 ρ_d の精度は高いとは言えないものの、概ね密に締固まった砂であると考えられる。

土槽底部の排給水孔から水を供給・排出することにより、土槽内の水位を1日2回、砂地盤上面（満水と称する）と砂地盤底面（干水と称する）の間で上下させた。満水の時間は、腐食し易いよう短時間の0.5時間とした。水の供給と排出は、別途用意した高低差のある2つの水槽と土槽の間で自由落下させたため、供給と排出の時間の設定はできなかったが、満水から干水までの時間は約3.0時間、干水から満水までの時間は約1.5時間であり、干水の時間は約7.0時間である。水は海水を模擬した3%濃度のNaCl水溶液を用いた。これらの条件は、土中の鋼材腐食に関する既往の研究^{3),4),5)}を参考にした。

劣化実験中には、土槽から排出されたNaCl水溶液の溶存酸素飽和率を1週間に1回を基本に計測した。溶存酸素はほぼ飽和状態であった。所定の期間毎に試験体を土槽から取出し、干満環境と同様の測定を行った。

3. 実験結果

3.1 鉄筋の腐食状況

図-6に、干満環境67週試験体の鉄筋の腐食部分のスケッチを、図-7に、土中環境68週試験体の腐食部分のスケッチを示す。これらのスケッチは、開放面に最も近い位置から展開した鉄筋の中央200mm部分の展開図である。ひび割れはこれらの展開図のほぼ中央に生じていた。いずれの試験体の鉄筋もひび割れ位置付近の部分が腐食している。干満環境では、目標ひび割れ幅0.4mmの方が目標ひび割れ幅0.8mmに比較して腐食部分がやや分散しているように見受けられる。土中環境では、ひび割れ幅の違いによる影響が明確に認められ、ひび割れ幅の大きい方が腐食部分の広い傾向にある。

3.2 塩化物イオン濃度と鉄筋腐食状況

図-8に示す位置から試料を採取し、鉄筋に沿ったコンクリート中の塩化物イオン濃度とシール面沿いのコンクリート中の塩化物イオン濃度をそれぞれひび割れから20mmの間隔で測定した。図-9に、干満環境の43週試験体および67週試験体の塩化物イオン濃度とひび割れからの距離の関係の例（目標ひび割れ幅0.8mmの試験体）を示す。シール面沿いに比べて、鉄筋沿いの方が同位置における塩化物イオン濃度が高く、ひび割れから離れた位置まで塩化物イオンが浸透していることが認められる。43週よりも67週の方が同位置における塩化

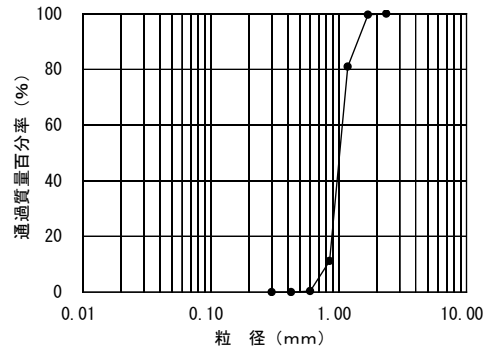
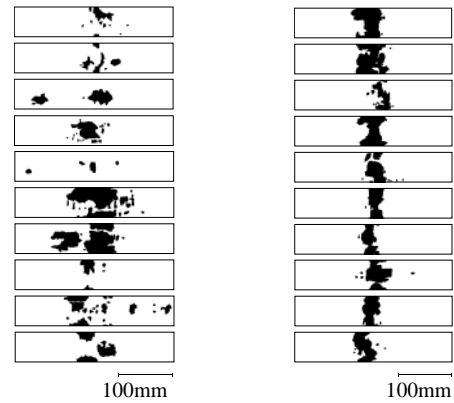
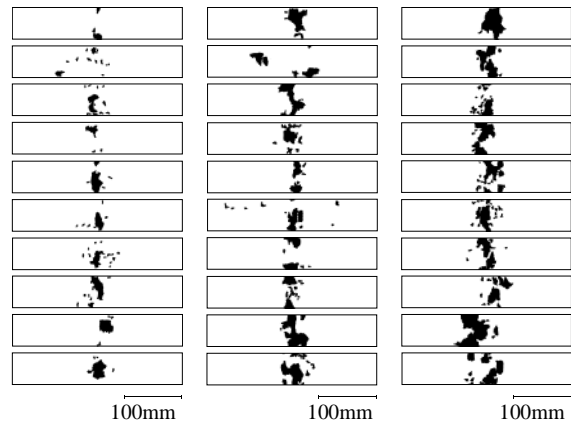


図-5 使用した珪砂の粒度分布



(a) 目標ひび割れ幅 0.4mm (b) 目標ひび割れ幅 0.8mm

図-6 鉄筋の腐食部分のスケッチ（開放面に最も近い位置からの展開図、干満、67週）



(a) 目標ひび割れ幅 0.4mm (b) 目標ひび割れ幅 0.8mm (c) 目標ひび割れ幅 1.2mm

図-7 鉄筋の腐食部分のスケッチ（開放面に最も近い位置からの展開図、土中、68週）

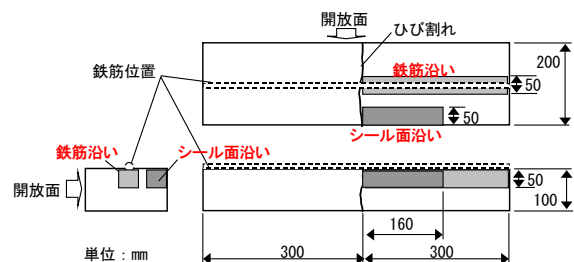
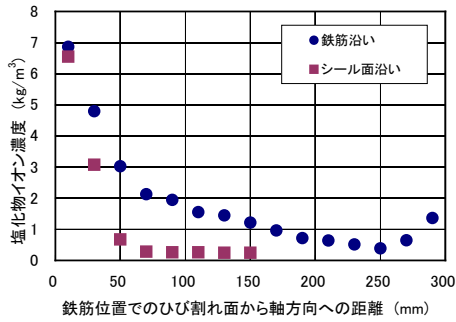
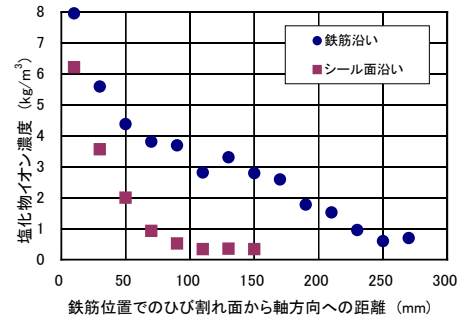


図-8 塩化物イオン濃度測定試料採取位置

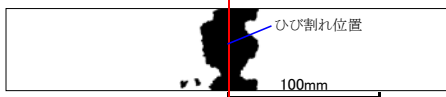


(a) 43 週経過時

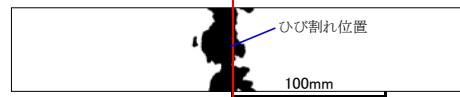


(b) 67 週経過時

図-9 塩化物イオン濃度とひび割れからの距離の関係例 (干満, ひび割れ幅 0.8mm)

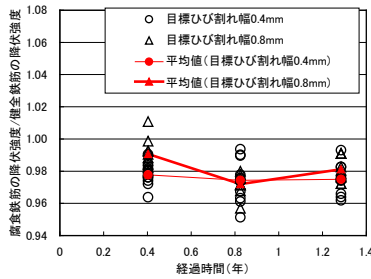


(a) 43 週経過時

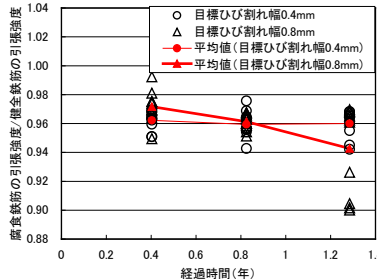


(b) 67 週経過時

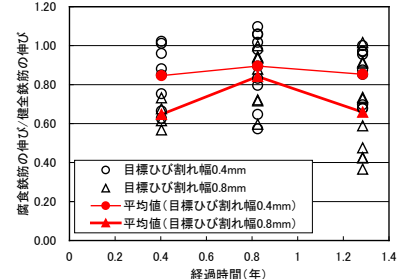
図-10 鉄筋の腐食状況例 (干満, ひび割れ幅 0.8mm)



(a) 降伏強度

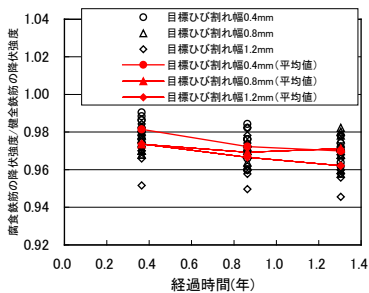


(b) 引張強度

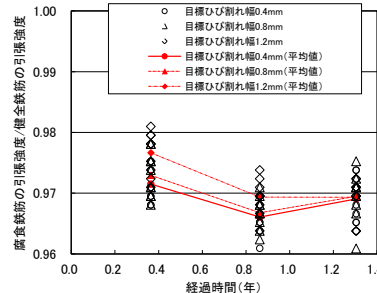


(c) 伸び

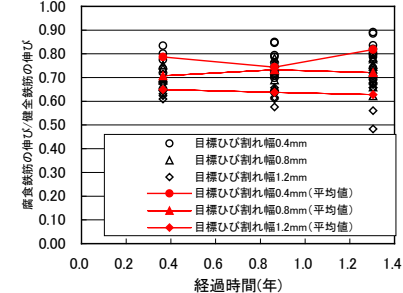
図-11 鉄筋の各強度特性値の対健全鉄筋比と経過時間の関係 (干満)



(a) 降伏強度



(b) 引張強度



(c) 伸び

図-12 鉄筋の各強度特性値の対健全鉄筋比と経過時間の関係 (土中)

物イオン濃度は高く、塩化物イオンが時間経過に伴い浸透したことが推測される。この原因の一つとして、林ら⁹⁾が報告しているように、ひび割れ導入時に鉄筋とコンクリートのはく離が生じ、鉄筋とコンクリートの界面が塩化物イオンを浸透し易い状態になったことが考えられる。ここで、一般に考えられている腐食発生の限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m^3 に着目すると、鉄筋沿いの 43 週経過時ではひび割れから 150mm 程度まで、67 週経過時ではひび割れから 220mm 程度までが腐食発生の範囲と言える。

一方、図-10に、塩化物イオン濃度を測定した試験体の鉄筋の腐食状況を示す。鉄筋の腐食部分は、ひび割れから数 10mm の範囲であり、塩化物イオンが限界塩化物イオン濃度以上存在していても腐食していない部分が広く認められる。土中環境の 45 週試験体および 68 週試験体においても塩化物イオン濃度の測定と腐食部分の比較を行ったが、干満環境の場合とほぼ同様の結果であった。これらのことは、ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食発生の条件は、ひび割れの無い鉄筋コンクリートの場合とは異なることを示唆している。

3.3 各強度特性と経過時間の関係

図-1.1と図-1.2に、干満環境と土中環境それぞれにおける鉄筋の降伏強度、引張強度、伸びの各強度特性値の対健全鉄筋比（それぞれ以降、降伏強度比、引張強度比、伸び比と称する）と経過時間の関係を示す。ここで、鉄筋にはひび割れ導入時にひび割れ幅に応じた損傷が生じていた可能性があり、このような状態の鉄筋がそれぞれの環境において腐食し、強度特性値が変化していることを付記する。

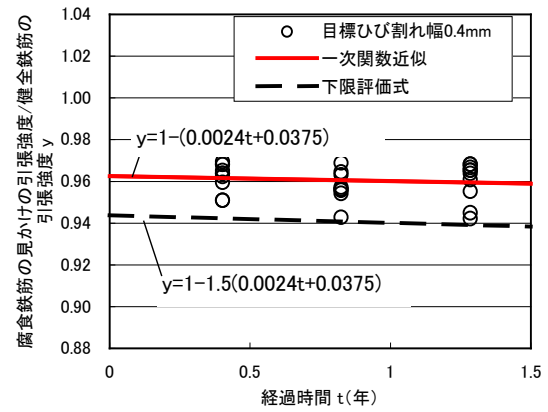
干満環境の降伏強度比は、ひび割れ幅に係わらず、ほぼ一定の低下傾向にあり、引張強度比は、目標ひび割れ幅 0.8mm の低下傾向が目標ひび割れ幅 0.4mm の低下傾向よりも明らかに大きい傾向がある。干満環境の伸び比は、目標ひび割れ幅 0.8mm の低下傾向が大きい。一方、土中環境の降伏強度比は、ひび割れ幅の大きいほど小さいが、低下傾向は同程度である。引張強度比は、ひび割れ幅に係わらず、低下傾向は同程度である。伸び比は、ひび割れ幅の大きいほど小さく、低下傾向は同程度である。

干満環境における強度特性値の時間経過に伴う低下傾向は、総じてひび割れ幅の影響を受け、ひび割れ幅が大きいと低下傾向が大きい。一方、土中環境における強度特性値の時間経過に伴う低下傾向は、ひび割れ幅の影響を受けにくい。この原因は明確ではないが、ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食の進行は、ひび割れ中の水分状態に影響を受ける可能性が考えられる。干満環境においては、定期的にひび割れが気中に曝されるため、ひび割れ中の水分が減少する時間が存在する。水分が減少すると空気がひび割れ中に侵入するため、空気中の酸素が鉄筋に到達し易くなる。このひび割れ中の水分の減少程度が、表面張力や蒸発経路などの影響により、ひび割れ幅の大きい方が大きくなることで、鉄筋の腐食進行が大きくなることが考えられる。

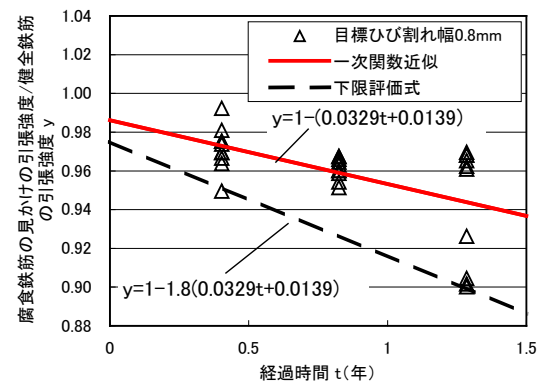
一方、土中環境においては、水位の変化により土中の含水状態は変化するものの、ひび割れが気中に曝されることはなく、ひび割れ中の水分の減少程度は小さく、ひび割れ幅による違いも少なくなる。鉄筋への酸素の供給は、主にひび割れ中の水分中の溶存酸素の移動の形で鉄筋に到達する。この場合、ひび割れ幅による溶存酸素の到達程度の差は大きくなかったことが考えられる。

4. 鉄筋腐食の進行予測方法

図-1.3と図-1.4に、干満環境と土中環境のそれぞれにおける鉄筋の引張強度比と経過時間の関係を一次関数で近似した結果を示す。土中環境については、ひび割れ幅の影響は認められないので、ひび割れ幅 0.4, 0.8, 1.2mm の全てのデータを示している。ここに、 t : 経過年



(a) 目標ひび割れ幅 0.4mm



(b) 目標ひび割れ幅 0.8mm

図-1.3 鉄筋の引張強度の対健全鉄筋比と経過時間の関係の近似結果（干満）

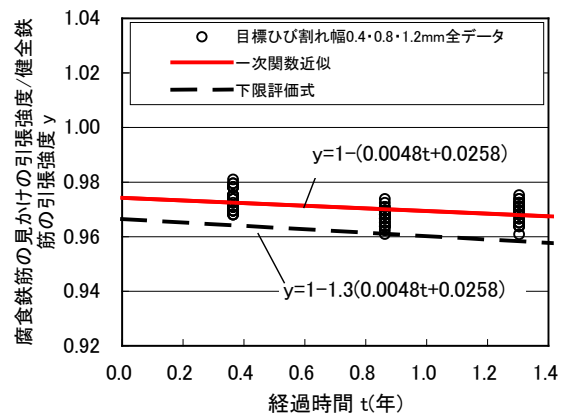


図-1.4 鉄筋の引張強度の対健全鉄筋比と経過時間の関係の近似結果（土中）

数（年）、 y : 鉄筋の引張強度比である。

それぞれの環境条件におけるデータの下限を包含するように導出した評価式は次式のように表される。図-1.3と図-1.4にも併せて示す。

干満環境（ひび割れ幅 0.4mm）:

$$y = 1 - 1.5(0.0024t + 0.0375) \quad (1)$$

干満環境（ひび割れ幅 0.8mm）：

$$y=1-1.8(0.0329t+0.0139) \quad (2)$$

土中環境（ひび割れ幅 0.4～1.2mm）：

$$y=1-1.3(0.0048t+0.0258) \quad (3)$$

式(1)、式(2)、式(3)のそれぞれの第2項の絶対値は引張強度比の1との差を表している。ここでは、これらの差が腐食による鉄筋の断面減少により生じたと仮定する。次に示す式⁷⁾により、鉄筋の断面減少率から鉄筋の減肉深さを算出することができる。

$$x=d/2 \cdot (1-(1-a/100)^{1/2}) \quad (4)$$

ここに、d：鉄筋径(mm)，x：鉄筋の減肉深さ(mm)，a：鉄筋の断面減少率(%)。

式(4)にd=16mmを代入し、a/100として式(1)、式(2)、式(3)のそれぞれの第2項の絶対値を代入すると、対応する式は、それぞれ次のようになる。

干満環境（ひび割れ幅 0.4mm）：

$$x=0.014t+0.228 \quad (5)$$

干満環境（ひび割れ幅 0.8mm）：

$$x=0.240t+0.101 \quad (6)$$

土中環境（ひび割れ幅 0.4mm～1.2mm）：

$$x=0.025t+0.135 \quad (7)$$

ここに、x：鉄筋の減肉深さ(mm)。

これらの式で表される鉄筋の減肉深さは、引張強度の減少に対応する最大腐食量に相当すると考えることができるので、平均腐食量を最大腐食量の1/2と考える⁷⁾と、次式により腐食進行を予測することができる。

干満環境（ひび割れ幅 0.4mm）：

$$X=0.007t+0.114 \quad (8)$$

干満環境（ひび割れ幅 0.8mm）：

$$X=0.120t+0.050 \quad (9)$$

土中環境（ひび割れ幅 0.4mm～1.2mm）：

$$X=0.012t+0.068 \quad (10)$$

ここに、X：鉄筋の平均減肉深さ(mm)，t：経過時間(年)。

5. まとめ

ひび割れ幅を変化させた鉄筋コンクリート試験体を用いて、干満環境ならびに土中環境における劣化実験を16か月間行い、鉄筋の腐食状況、コンクリート中の塩化物イオン濃度、ならびに強度特性に関するデータを取得した。得られた実験結果に基づいて、これらの環境におけるひび割れを有するコンクリート中の鉄筋の腐食進行予測方法を検討した。本研究の主な結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 塩化物イオンはひび割れから鉄筋沿いにも浸透することが認められたが、比較的高濃度（コンクリート中の腐食発生の限界塩化物イオン濃度 1.2kg/m³以上）でも鉄筋が腐食しない部分が多く認められた。

ひび割れを有する鉄筋コンクリートの腐食発生の条件は、ひび割れの無い鉄筋コンクリートの場合とは異なる可能性がある。

- (2) 鉄筋の見かけの引張強度の低下傾向は、環境条件によって異なり、干満環境においては、ひび割れ幅が大きいほど低下傾向が大きかったが、土中環境においては、ひび割れ幅に依らず低下傾向は同程度であった。土中環境ではひび割れ中の水分が乾燥しないことが一因と考えられた。
- (3) 鉄筋の見かけの引張強度と経過時間の関係は、一次関数で近似することが可能であった。干満環境においてはひび割れ幅に応じて異なる近似式を、土中環境においてはひび割れ幅に依らない近似式を導出し、これらを鉄筋の平均減肉深さに換算した鉄筋腐食進行予測式を提案した。

謝辞

本研究は電力9社と日本原子力発電(株)、電源開発(株)、日本原燃(株)による電力共通研究として実施した。関係各位に謝意を表す次第である。

参考文献

- 1) 松村卓郎, 宮川義範, 玉田潤一郎, 岩森暁如：干満環境下における鉄筋コンクリートの鉄筋腐食実験：土木学会第63回年次学術講演会講演概要集V部門, pp.447-448, 2008.
- 2) 松村卓郎, 松尾豊史, 宮川義範, 玉田潤一郎：干満環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食性状に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1069-1074, 2009.
- 3) 山本広祐, 工藤康二, 西好一：臨海部における基礎鋼構造物の劣化診断技術(その1) 土壌中腐食の実態調査に基づく鋼管部材の腐食試験, 電力中央研究所報告研究報告 U92008, 1992.
- 4) 山本広祐, 中村秀治, 工藤康二：火力発電施設における土木鋼構造物の腐食実態調査, 電力中央研究所報告調査報告 U89029, 1989.
- 5) 山本広祐, 工藤康二, 西好一：臨海部における基礎鋼構造物の劣化診断技術(その2) 土壌中腐食に関する評価法の提案一, 電力中央研究所報告 研究報告 U93059, 1994.
- 6) 林和彦, 椿龍哉, 細田暁：鉄筋コンクリート部材の鋼材腐食に及ぼす曲げひび割れの内部構造の影響, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.577-588, 2009.
- 7) 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, 技術資料VII, 2008.