# 論文 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

松村 卓郎\*1·松尾 豊史\*2 宮川義範\*2·玉田 潤一郎\*3

要旨:干満帯を模擬した環境において、コンクリートの水セメント比、セメント種類、ひび割れ幅を実験要因とした鉄筋コンクリート試験体の鉄筋腐食実験を行った。その結果、(1)普通セメントを使用したコンクリートの場合、鉄筋腐食発生時の塩化物イオン濃度は、3.0kg/m<sup>3</sup>程度であった。(2)ひび割れが存在する場合、ひび割れ幅が大きいほど鉄筋の腐食速度は大きく、普通セメントよりもフライアッシュセメントの方が腐食速度は大きかった。

キーワード:干満環境,鉄筋腐食,塩化物イオン濃度,ひび割れ,フライアッシュ

# 1. はじめに

臨海地域に位置する発電所のコンクリート構造物で は、干満帯や海水中など、海水に接する部位が多い。こ のような環境下における構造物の調査や実験では、コン クリートの含水率が高く、鉄筋腐食に必要な酸素の供給 量が少ないため、鉄筋腐食が生じにくいとする報告が多 い<sup>1),2),3),4),5)</sup>が、鉄筋腐食のばらつきを考えるとデータ数 は少なく、十分に検討されているとは言い難い。また、 荷重や収縮によりひび割れが生じると、鉄筋腐食が生じ やすくなることが容易に想像できる。ひび割れ幅が大き いほど、水セメント比が大きいほど、腐食速度が大きく なるとの報告もされている<sup>0,7)</sup>。しかし、干満環境など、 環境条件を特定し、腐食速度を定量的に評価した例は少 なく、ひび割れを有するコンクリート構造物の塩害の予 測方法は確立されていない。

本研究では、1)干満環境下におけるコンクリート中の 鉄筋の腐食発生限界塩化物イオン濃度を評価する実験 (以降,限界塩分濃度実験と称する),ならびに、2)干満 環境下におけるひび割れを有するコンクリート中の鉄 筋腐食速度を評価する実験(以降,ひび割れ試験体の腐 食実験と称する)の2種類の実験を行った。

## 2. 限界塩分濃度実験

#### 2.1 実験の概要

## (1) 試験体

試験体は、図-1 に示すように、幅 76mm,高さ 100mm, 長さ 400mm の形状とし、D16 鉄筋 (SD345,長さ 85mm) を断面中心 (かぶり 42mm) に長さ方向に等間隔(80mm) で5本設置した。開放面 (上面) 以外の5面は、タール エポキシ (JIS I 種適合品) を塗装し、シールした。

### (2) 実験要因

実験の要因は、塩化物イオン濃度、W/C、セメント種

\*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

類,実験期間とした。各要因の水準等は表-1に示すとお りである。塩化物イオン濃度は、気中における 1.2kg/m<sup>3</sup> を参考に 0.0~3.6kg/m<sup>3</sup>の範囲とした。なお、セメントに 固定される可能性のある塩化物イオン濃度は最大で単 位セメント量の 0.4%程度と考えられていることを考慮 し、フライアッシュを使用した場合の単位セメント量が 200kg/m<sup>3</sup>程度の場合もあることから、最小の塩化物イオ ン濃度をこれの 0.4%よりも小さい 0.6kg/m<sup>3</sup>と設定した。 セメント種類は、普通ポルトランド、ならびにフライア ッシュをセメント置換で 20%のセメント(以降、フライ アッシュセメントと称する)とした。同一要因の試験体 数は、2体(鉄筋数 10本)とした。

#### (3) 使用材料および配合

セメントは研究用セメントを使用した。セメントの密



図-1 限界塩分濃度実験の試験体

衣⁻l	限界塩分漏度美敏の要因と水準	

要因	水準			
塩化物イオン濃度	0, 0.6, 1.2, 2.4, 3.6			
$(kg/m^3)$				
W/C	0.4, 0.5, 0.6			
セメント種類	普通ポルトランド、フライア			
	ッシュ(セメント置換 20%)			
実験期間(週)	31, 73			

-1069-

度は 3.16 (g/cm<sup>3</sup>), 比表面積は 3350 (cm<sup>2</sup>/g) である。フ ライアッシュは II 種適合品を使用した。試験成績を表-2 に示す。細骨材は, 千葉県富津市横山産(陸砂)を使用 した。粗粒率(FM)は 2.58, 表乾密度は 2.57 (g/cm<sup>3</sup>), 吸水率は 1.98 (%)である。粗骨材は, 埼玉県秩父郡皆 野町産(砕石)を使用した。実績率 60.8 (%), 表乾密度 は 2.66 (g/cm<sup>3</sup>)である。最大寸法は 20mm である。混和 剤は AE 減水剤および AE 助剤を使用した。コンクリー トの示方配合を表-3 に示す。

## (4) 実験方法

干満作用を模擬した実験槽(以降,干満実験槽と称す る)にて腐食実験を行った。干満作用は1日2回30分 間の水没とし,温度は40℃とした。干満槽の温度は水位 の上下に伴い変化するが,概ね40℃であった。湿度も水 位の上下に伴い変化するが,概ね30~80%の範囲であっ た。所定の期間毎に試験体を解体し,鉄筋の腐食状態を 測定した。測定方法は、日本コンクリート工学協会規準 「コンクリート構造物の腐食・防食に関する実験方法な らびに規準(案)」<sup>8)</sup>に準拠した。また、コンクリート中 の塩化物イオン濃度を測定した。測定方法は、JISA1154 「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの実験

「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの実 方法」に準拠した。

# 2.2 実験結果および考察

実験期間 31 週では,鉄筋の腐食はわずかであり,鉄筋腐食と塩化物イオン濃度の関係を検討するのは困難であった。ここでは,実験期間 73 週の結果を示す。

# (1) 外観状況および塩化物イオン濃度

試験体には,鉄筋腐食によると考えられるひび割れ等 は発生していなかった。

普通セメント(W/C=0.6) とフライアッシュセメント (W/C=0.6)の塩化物イオン濃度の深さ方向分布を図-2 に示す。混入塩化物イオン濃度にかかわらず、表面付近 の塩化物イオン濃度は非常に高い値を示しており、外部 から塩化物イオンが供給されていることがわかる。普通 セメントでは、鉄筋位置(表面からの距離 40mm)の塩 化物イオン濃度が、混入塩化物イオン濃度よりも大きい 値となっている。一方、フライアッシュセメントでは、 鉄筋位置の塩化物イオン濃度は混入塩化物イオン濃度 と同程度である。これは、フライアッシュセメントの塩 化物イオンの浸透性が普通セメントと比べて小さいた めと考えられる。以降の検討では、鉄筋位置の塩化物イ オン濃度の測定値を用いる。

## (2) 塩化物イオン濃度と腐食面積の関係

図-3に、普通セメントの鉄筋位置の塩化物イオン濃度 と腐食面積率の関係を示す。腐食面積率は、腐食面積を 鉄筋の表面積で除した値である。塩化物イオン濃度が 3.0kg/m<sup>3</sup>より高くなると、腐食面積率が著しく大きくな

#### 表-2 フライアッシュの試験成績表

項	試験値		
二酸化けい素(%	73.3		
湿分(%)	0.09		
強熱減量(%)	1.5		
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.13		
粉末度	45 µ m ふるい	18	
	残分(%)		
	比表面積	3940	
	$(cm^2/g)$		
フロー値比(%)	104		
活性度指数(%)	材令 28 日	81	
	材会 91 日	92	

表-3 コンクリートの示方配合

W/	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
C (%)	W	С	FA	S	G	AE 減水 剤	AE 助 剤
40	172	430	-	571	1088	4.31	0.0388
50	163	325	-	752	1015	3.26	0.0228
60	153	255	-	806	1044	2.55	0.0153
60	149	199	50	778	1069	2.48	0.2110



(a)普通セメント



(b)フライアッシュセメント



る傾向が認められる。この傾向は,W/Cが大きくなるほど顕著である。W/C=0.4の場合は,腐食面積率の著しい増大は認められない。これは,塩化物イオンの浸透程度

が小さく,鉄筋位置の塩化物イオン濃度が 3.0kg/m<sup>3</sup>程度 と他の W/C よりも小さい濃度であるためと考えられる。

図-4 にフライアッシュセメントの鉄筋位置の塩化物 イオン濃度と腐食面積率の関係を示す。図中には、比較 のため,フライアッシュセメントの試験体と同じ W/C=0.6の普通セメントの塩化物イオン濃度と腐食面積 率の関係を示す。フライアッシュセメントの場合は, 普 通セメントと同様に、塩化物イオン濃度が高くなると腐 食面積率が大きくなる傾向がある。ただし、塩化物イオ ン濃度が同じでも、普通セメントと比較して腐食面積率 は大きい傾向がある。この理由として、次のことが考え られる。鉄筋の腐食発生の限界塩化物イオン濃度はコン クリートの pH と関係があり, pH が低いほど, 限界塩化 物イオン濃度が小さいことが知られている<sup>9)</sup>。フライア ッシュセメントを用いたコンクリートは, 普通セメント を用いたコンクリートと比較して、アルカリ性が若干低 いため、普通セメントよりも腐食面積率が大きくなった と考えられる。

### (3) 腐食発生限界塩分濃度の評価

鉄筋位置の塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係か ら、図-3に示したように、干満作用下の普通セメントを 用いた試験体では腐食面積率が急増するのは、塩化物イ オン濃度が 3.0kg/m<sup>3</sup>程度以上の場合であった。山路ら<sup>4)</sup> の行った干満帯における 15 年間の暴露実験によると、 明確な腐食の傾向が認められるのは、塩化物イオン濃度 2.0kg/m<sup>3</sup>以上の場合であり、かぶりが増大すると腐食発 生限界塩化物イオン濃度は大きくなり、かぶり 40mmの 場合は、3.0kg/m<sup>3</sup>程度と報告している。ただし、試験体 数は各要因につき1体であり、鉄筋腐食がばらつきの多 い現象であることを考えると、試験体数は十分とは言え ない面もある。本実験の実験期間は73週であり、実構 造物の供用期間を考えると十分とは言えないものの,同 一要因について 10 体の試験体を用いており, 腐食現象 のばらつきを考慮できていると考えられる。本実験の実 験条件は、W/C=0.4、0.5、0.6 の普通セメント、かぶり 42mm であり、この条件において得られた値が、3.0kg/m<sup>3</sup> 程度であった。この値は山路ら<sup>4)</sup>の結果とも整合してい る。これらのことを総合的に勘案すると、干満帯に位置 する普通セメントを用いた鉄筋コンクリートの腐食発 生限界塩化物イオン濃度は、かぶり 40mm 以上で、 W/C=0.6以下の場合 3.0kg/m<sup>3</sup>と評価できる。

また,フライアッシュセメントでは,W/C=0.6の場合, 塩化物イオン濃度1.2kg/m<sup>3</sup>程度以上で腐食面積率が急増 したが,本研究の実験ではフライアッシュ混入率が20% のW/C=0.6の1ケースの限られた範囲の結果であり,限 界塩化物イオン濃度を明確にすることは困難である。今 後,かぶり,W/Cをパラメータとした実験などによりデ



図-3 塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係 (普通セメント)



図-4 塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係 (普通セメントとフライアッシュセメント)

ータを取得・蓄積することができれば、フライアッシュ セメントを使用したコンクリートの腐食発生限界塩化 物イオン濃度を評価するこがが可能と考えられる。

# 3. ひび割れ試験体の腐食実験

## 3.1 実験の概要

# (1) 試験体

試験体は、図-5 に示すように、幅 100mm、高さ 100mm、 長さ 376mm の形状とし、D10 鉄筋 (SD295A、長さ 385mm) を断面中心のかぶり 30mm の位置に 1 本設置した。3 点 曲げ載荷 (支点間距離 300mm) によりひび割れを導入し、 開放面 (上面) 以外の 5 面は、タールエポキシ (JIS I 種適合品)を塗装し、シールした。使用材料および配合 は、腐食発生限界塩分実験と同様である。ただし、W/C は 0.6 のみである。

# (2) 実験要因および実験方法



(目標ひび割れ幅 0.2mm)

) (目標ひび割れ幅 0.4mm)

(目標ひび割れ幅 0.2mm)



図-6 構造ひび割れ試験体の鉄筋の腐食状況(展開図, 73 週後)

実験要因は、ひび割れ幅、セメント種類、実験期間と した。ひび割れ幅は、0.2±0.1mm、0.4±0.1mmの2種類 とした。セメント種類は、普通ポルトランド、ならびに フライアッシュをセメント置換で20%のセメントとした。 W/Cは0.6とした。限界塩分濃度実験と同様に、干満作 用下の腐食実験を行った。同一要因の試験体数は10体 とした。所定の期間毎に試験体を解体し、鉄筋の腐食状 態、ならびに鉄筋周囲のコンクリート中の塩化物イオン 濃度を測定した。それぞれの測定方法は、限界塩分濃度 実験と同様である。

# 3.2 実験結果および考察

# (1) 試験体の外観および鉄筋の腐食状況

いずれの試験体も鉄筋に沿ったひび割れは生じてい なかった。図-6に、劣化実験 73 週後の鉄筋の腐食部分 の展開図を示す。普通セメントでは、ひび割れ幅による 腐食部分の違いは明確ではない。フライアッシュセメン トでは、普通セメントに比べて、腐食部分がひび割れ付 近に集中している傾向がある。また、フライアッシュセ メントでは、目標ひび割れ幅 0.4mm の方が、目標ひび割 れ幅 0.2mm に比べて、腐食部分が狭い傾向がある。

# (2) 鉄筋の腐食面積とひび割れ幅の関係

図-7 に、劣化実験 73 週後の鉄筋の腐食面積とひび割 れ幅の関係を示す。普通セメントでは、ひび割れ幅と腐 食面積の間には、明確な関係は認められない。また、フ ライアッシュセメントの方が、普通セメントよりも、腐 食面積の小さい傾向が認められ、フライアッシュセメン トでは、ひび割れ幅の小さい方が、腐食面積が大きい傾 向がある。この原因については今回の実験範囲からは不 明であり、今後の課題と考える。

#### (3) 鉄筋の腐食面積と経過時間の関係

図−8 に,鉄筋の腐食面積と経過時間の関係を示す。腐 食面積の時間経過にともなう増大に,目標ひび割れ幅の 違いによる影響はほとんど無い。また,普通セメントの











(b)フライアッシュセメント



方が,フライアッシュセメントよりも,腐食面積の時間 経過にともなう増大は大きい傾向がある。

(4) 鉄筋の強度特性値





図-9 に、鉄筋の強度特性値と経過時間の関係を示す。 ここで、腐食した鉄筋の降伏強度および引張強度は腐食 による断面積の減少を考慮していないため、見かけの強 度であることに注意が必要である。健全な鉄筋の降伏強 度, 引張強度, 伸びは, それぞれ 374N/mm<sup>2</sup>, 531N/mm<sup>2</sup>, 28.7%である。降伏強度の時間経過にともなう低下はほ とんど認められないが、引張強度、伸びは時間経過にと もない低下している。フライアッシュセメントの引張強 度、伸びは、ひび割れ幅の大きい方が、低下の割合は大 きい。これは、ひび割れ近傍の狭い範囲に腐食が生じて いるため、応力が集中したためと考えられる。図-10に、 引張強度比と経過時間の関係を示す。ここで、引張強度 比は健全鉄筋の引張強度に対する比を表す。同図中には, 両者の関係を経過時間 0, 引張強度比 1.0 を通る線形関 係として近似した結果も示す。引張強度比はセメント種 類、ひび割れ幅により若干の違いが認められるが、時間 経過にともなう引張強度比の低下は、最も大きいフライ アッシュセメントの目標ひび割れ幅 0.4mm の場合で, 7.6%/年である。

# (5) ひび割れ存在下の鉄筋の腐食速度

曲げひび割れ存在下の鉄筋の引張強度の低下速度は, 最も大きいフライアッシュセメントの目標ひび割れ幅





図-10 鉄筋の引張強度比と経過時間の関係

0.4mmの場合で、7.6%/年であった。引張強度は腐食部分の鉄筋の断面積を表すと考えると、断面積の減少率が引 張強度の低下率に等しいと考えることができる。すなわ ち、次式の関係が成り立つ。

$$\frac{\pi (d/2)^2 - \pi (d/2 - x)^2}{\pi (d/2)^2} = a/100 \tag{1}$$

ここに, d:鉄筋径(mm), x:腐食による鉄筋径の減少 深さ (mm), a:鉄筋の引張強度の低下率(%)。

変形すると,次式が得られる。

$$x = \frac{d}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - a/100} \right)$$
(2)

a=7.6(%), d=10(mm)を代入すると, x=0.18(mm)が得ら れる。これより,腐食による鉄筋径の減少深さは0.18mm/ 年と表示できる。

# 4. まとめ

本研究の範囲で得られた主な結果をまとめると以下 のとおりである。

- (1) 鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高い方が鉄筋の腐食 面積率は大きく、W/Cの大きいコンクリートの方が この傾向が著しいこと、セメント種類により鉄筋の 腐食程度は異なることが分かった。
- (2) 普通セメントを使用したコンクリートの場合には、 コンクリートのW/Cによらず、腐食面積率が急増す る塩化物イオン濃度はほぼ一定であり、干満環境下 における腐食発生の限界塩化物尾イオン濃度は 3.0kg/m<sup>3</sup>程度であると考えられた。

(3) 曲げひび割れをあらかじめ生じさせた場合の鉄筋腐 食による引張強度の低下の速度は、ひび割れ幅、セ メント種類の影響を受け、フライアッシュセメント を使用したコンクリートの目標ひび割れ幅が 0.4mm 程度(0.2~0.4mmの範囲)の場合に最も大きな低下 速度であった。この場合の腐食速度は 0.18mm/年程 度であった。

# 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

- 田啓, 堀之内義夫, 守分敦郎, 村松道夫: 桟橋の塩害 劣化に関する一考察, 土木学会第54回年次学術講演 会概要集V部門, pp.88-89, 1999.
- 2) 大即信明,長瀧重義,福手勤,中川兼次:港湾での鉄 筋コンクリートの塩害に及ぼす海洋環境の影響に関 する基礎的検討,土木学会論文集,V-20, No.472, pp.59-68, 1993.
- 3) 守分敦郎,伊坂征二,福手勤,羽渕貴士:70 年以上 経過した鉄筋コンクリート構造物の干満および海水 中における耐久性,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.829-834, 1997.
- 山路徹, Mohammed, T. U., 青山敏幸, 濱田秀則: 海洋コンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境および セメントの種類の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.577-582, 2001.
- 5) 松村卓郎,西内達雄,金津努:干満帯のコンクリート 構造物の鉄筋腐食評価,コンクリート構造物の補修, 補強,アップグレード論文報告集,第4巻,pp.17-24, 2004.
- 6) 蜷川友司,見坊東光,森芳徳,伊藤洋:海水が浸透す るひび割れ中の鉄筋腐食に関する基礎的研究,土木学 会論文集,V-19, No.466, pp.31-40, 1993.
- 7) 大野義照,鈴木計夫,田村博:コンクリート中鉄筋の マクロセル腐食に及ぼす各種要因の影響,セメントコ ンクリート, No.601, pp.41-48, 1997.
- 8) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物の腐 食・防食に関する実験方法ならびに規準(案),1987.
- 9) 大即信明, 樫野紀元, 片脇清士, 小林明夫, 宮川豊章: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(I), 技報 堂出版, 1986.