

# 論文 ひび割れを有する鉄筋コンクリート部材の腐食に関する実験的研究

秋元 秀孝\*1・岸本 一蔵\*2

**要旨:** 海浜に建つ鉄筋コンクリート構造物では、飛来塩分による鉄筋腐食が問題となる。そこで本論文では、ひび割れを有する鉄筋コンクリート部材に対し飛来塩分環境の模擬を意図した塩水噴霧試験を行い、ひび割れ内部の塩化物イオン濃度、鉄筋の腐食程度について、同時に行った塩水浸漬試験、暴露試験との比較を行った。その結果、塩水噴霧試験でのひび割れ内部の塩化物イオン濃度、鉄筋の腐食程度に及ぼすひび割れ幅やかぶり厚さの違いは、塩水浸漬試験結果と異なる傾向が、鉄筋の腐食程度については暴露試験結果と同様の傾向が見られた。

**キーワード:** 鉄筋腐食, ひび割れ幅, 塩化物イオン濃度, 塩水噴霧試験, 暴露試験

## 1. はじめに

鉄筋腐食は鉄筋コンクリート構造物の耐久性低下の主要因である。コンクリートにひび割れが発生していない状態での内部鉄筋の腐食については研究が進んでいる一方<sup>1)</sup>、コンクリートにひび割れが発生している状態での内部鉄筋の腐食については研究例が少ない。また、ひび割れが発生していない場合の内部鉄筋の腐食に関する研究では、主として塩水への浸漬試験（以降、塩水浸漬試験と称する）や電食による手法が腐食促進方法として用いられているが、飛来塩分が腐食要因となる建築物の場合、これらの実験では環境条件がかなり異なるため、これらの手法の適用に疑問が残る。そこで本研究は、ひび割れを有する鉄筋コンクリート試験体に対し、腐食促進方法として、飛来塩分環境の模擬を意図した塩水噴霧試験を行い、塩水浸漬試験結果と比較を行うことにより、コンクリート中への塩化物イオンの侵入程度とそれに伴う鉄筋腐食程度の違いを検討する。また暴露試験を行い、塩水噴霧試験結果との比較検討も行う。

## 2. 腐食促進試験

### 2.1 実験概要

#### (1) 試験体概要

本研究で用いた試験体を図-1に示す。それぞれ試験体は断面中央にD22異形鉄筋(SD345,長さ700mm)を埋設し、試験体Aはかぶり厚さ30mm、試験体Bはかぶり厚さ100mmとして作製したものである。試験体長軸方向の中央位置にひび割れ誘発用のステンレス鋼板を設置している。試験体のひび割れ導入については、型枠脱型後、鉄筋に引張力を作用させ、鉄筋-コンクリート間の付着力によってひび割れを発生させる。ひび割れ発生と同時に目標のひび割れ幅と同等の厚さを有するステンレス鋼板を既設のステンレス鋼板間にハンマー等を用いて挿入し、ひび割れ幅を確保している。ひび割れ導入後、デジタルマイクロスコープ(撮影倍率200倍)を用いて実際のひび割れ幅の計測を行った。本実験で使用したコンクリートの材料特性を表-1に示す。

一部の試験体は、「既に鉄筋近傍位置でのコンクリートが中性化している」という条件で腐食促進試験を行うた

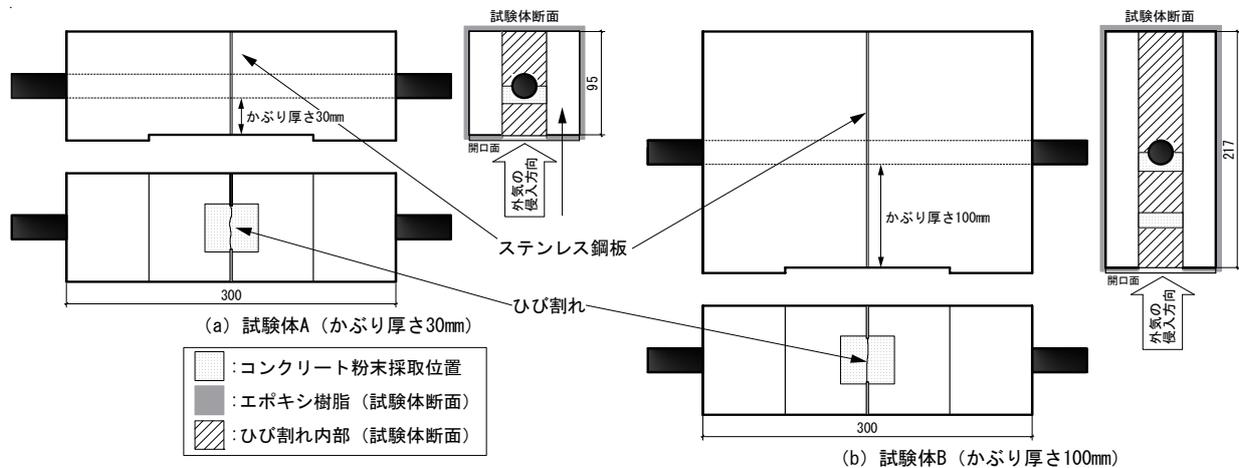


図-1 試験体概略図

\*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 大学院生 (正会員)

\*2 近畿大学 建築学部建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

め、ひび割れ作製後、中性化促進試験機を用いてひび割れ内部に二酸化炭素を送り込むことにより鉄筋近傍のコンクリートを中性化させている。その後、本実験の対象となるひび割れが存在する面（以降、開口面と称する）以外の面と試験体両端の鉄筋にエポキシ樹脂を塗布することで、内部鉄筋が対象となるひび割れを介してのみ外気に曝される状態としている。

### (2) 実験変数

表-2 に実験変数の詳細を示す。塩水噴霧試験では実験変数より 33 通りの試験体をそれぞれ 1~3 体ずつ計 78 体を、塩水浸漬試験では実験変数より 24 通りの試験体をそれぞれ 1~3 体ずつ計 47 体を作製し実験を行った。

### (3) 腐食促進方法

塩水噴霧試験は複合サイクル試験機を用いて行い、塩水噴霧、乾燥、湿潤のサイクルで行った。条件及びサイクルは JIS-H-8502 「中性塩水噴霧サイクル試験方法」による（表-3）。

塩水浸漬試験は塩水浸漬（NaCl濃度 3.2%、水温 60±3℃）、自然乾燥の繰り返し（各 24 時間、1 サイクル 48 時間）で行った<sup>1)</sup>。

### (4) 測定方法

腐食促進試験後、試験体長軸方向に試験体を割裂し、鉄筋を抽出している。その後フェノールフタレイン溶液を用いてひび割れ進行方向におけるコンクリートの中性化判定を行った。中性化促進試験を行っていない試験体については、中性化深さとして、試験体表面のひび割れ位置からフェノールフタレインによる呈色箇所までの

距離を、定規を用いて測定している（写真-1）。詳述すると、試験体表面のひび割れ位置を基準（0）として、ひび割れ内で、鉄筋に向かってどの程度の長さ中性化しているかを「中性化深さ」と称している。中性化促進試験を行った試験体については、鉄筋位置でのコンクリートが中性化していることを確認している。

塩化物イオン量測定は、開口面とひび割れ内部の鉄筋近傍位置（鉄筋位置から周囲約 10mm の箇所）においてコンクリート粉末を採取し（写真-2）、蛍光 X 線分析装置を用いて行っている。以降、ひび割れが現れている面の表面の塩化物イオン量を外部塩化物イオン量、鉄筋近傍位置の塩化物イオン量を内部塩化物イオン量と称する。

鉄筋腐食程度については鉄筋腐食面積率で評価している。鉄筋腐食面積率は JCI 規準集「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に記載されている均一腐食の評価方法<sup>2)</sup>を参考に、鉄筋を 60 度ずつ回転させて撮影した写真によって作成した鉄筋展開写真を用い、ひび割れ位置に相当する箇所を中心に鉄筋材軸方向 10mm ずつの鉄筋腐食面積率を算出している。後述する鉄筋腐食程度の評価においては、鉄筋材軸方向 10mm ずつ算出した鉄筋腐食面積率のうち最大のものを用いており、以降、最大腐食面積率と称する。

## 2.2 腐食促進試験実験結果

### (1) 塩化物イオン量

ひび割れがある場合、ひび割れを通して内部に塩化物イオンが侵入すると考えられるが、その程度について検討する。

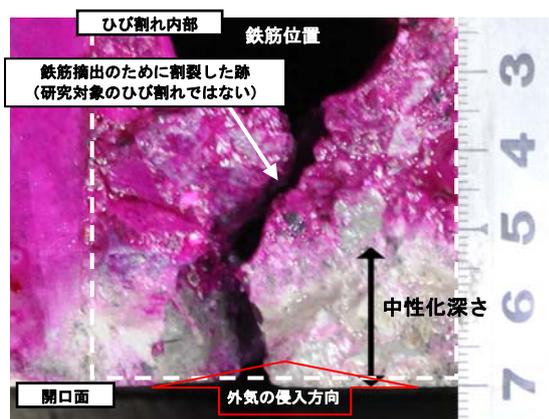


写真-1 中性化深さ測定



写真-2 コンクリート粉末採取箇所

表-1 コンクリート配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	W	C	S	G
55	180	327	873	925
45	180	400	792	941

表-2 実験変数

実験変数	水準	
	腐食促進試験 (噴霧・浸漬)	暴露試験
ひび割れ幅 (mm)	0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 2.0	0.1, 0.2
水セメント (%)	45, 55	55
かぶり厚さ (mm)	30, 100	30
試験期間	3, 6, 9, 12 (週)	213, 476, 623, 729 (日)
中性化促進	有, 無	有, 無

表-3 塩水噴霧試験サイクル

項目	条件		時間 (h)
	温度 (°C)	NaCl 濃度 (g/l)	
塩水噴霧	35±5	50±5	2
	60±1	20 - 30	
乾燥	50±1	95 以上	2
	60±1	95 以上	

## 1) 外部塩化物イオン量

図-2に試験期間と外部塩化物イオン量（開口面での塩化物イオン量）の関係を示す。同図からわかるように、塩水噴霧試験では試験体ごとのばらつきが大きく、試験期間と塩化物イオン量の間には明確な傾向はみられなかった。これは、試験機内の塩水噴霧の状態が均一でなかったためと考えられる。本実験ではひび割れを発生させる必要性から比較的大きい試験体を用いており、これが試験機内の気流に影響し、塩水噴霧の状態が均一となることを妨げたと思われる。一方、塩水浸漬試験では塩化物イオン量は塩水噴霧試験に比べてばらつきは小さい。また、試験期間が長くなるに従い塩化物イオン量はやや増加する傾向が見られ、水セメント比45%の試験体では55%の試験体に比べてやや小さい値となっている。

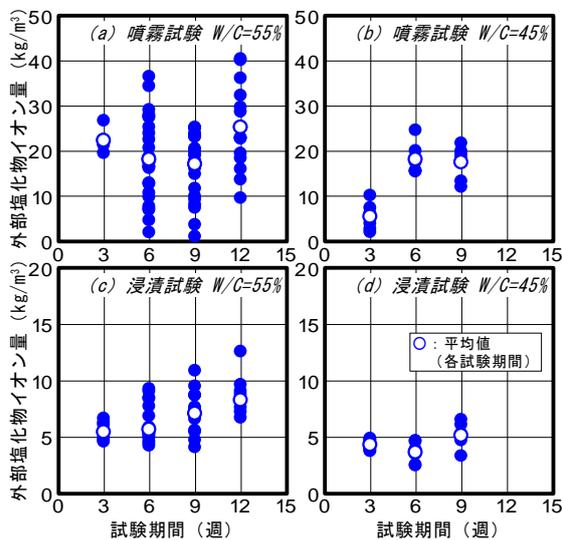


図-2 試験期間-外部塩化物イオン量

## 2) 内部塩化物イオン量

図-3に目標ひび割れ幅0.3mmの試験体における、試験期間と内部塩化物イオン量（ひび割れ幅0.3mm）の関係を示す。前述の外部塩化物イオン量の場合と同様、塩水噴霧試験では試験体ごとのばらつきが大きいことがわかる。また塩水浸漬試験では外部塩化物イオン量で示した傾向と同様の傾向が見られる。そこで、内部塩化物イオン量と外部塩化物イオン量との比（以下、塩化物イオン内外比）として検討したものが図-4である。なお、同図は塩化物イオン内外比をひび割れ幅との関係で示している。塩水噴霧、塩水浸漬の両試験を比較すると、塩水浸漬試験ではひび割れ幅によらず塩化物イオン内外比の値はほとんどの試験体で100%以上となっている。これは、同試験では塩水がひび割れ内に直接流入し、さらに乾燥時において、ひび割れ内部に残留した塩水の蒸発により析出した塩分がひ

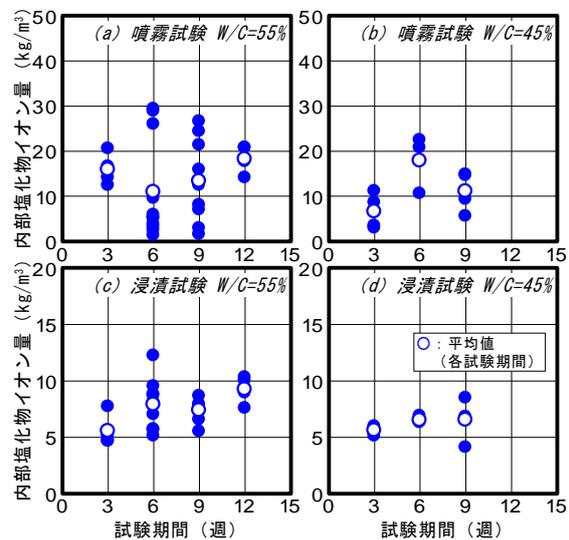


図-3 試験期間-内部塩化物イオン量（ひび割れ幅0.3mm）

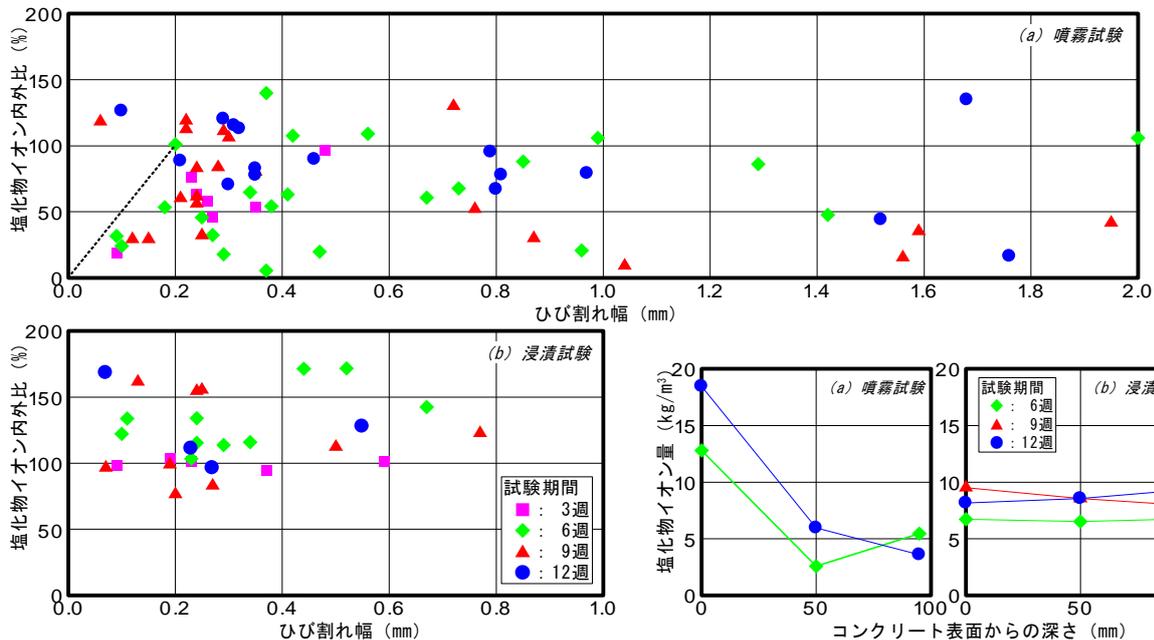


図-4 塩化物イオン内外比-ひび割れ幅

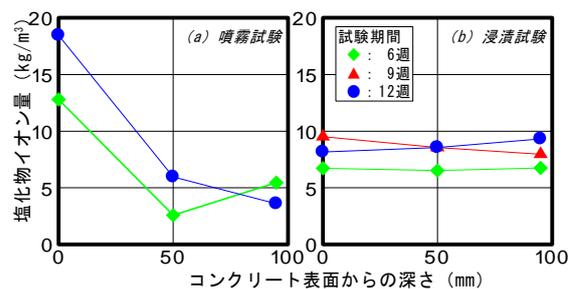


図-5 塩化物イオン量の深さ方向分布

び割れ内部の塩分濃度を増加させたことで、ひび割れ内部の塩化物イオン濃度が、試験体表面の塩化物イオン濃度に比べ同等以上になったものと推察される。

塩水噴霧試験ではひび割れ幅が 0.2mm を越える場合、ひび割れの大きさによらず塩化物イオン内外比の値は大きくばらつき、特定の傾向はみられない。一方、図中の点線が示すように、およそ 0.2mm より小さい範囲ではその値は小さくなっていることが分かる。このことから、ひび割れ幅が 0.2mm 以上であれば、内部鉄筋位置での塩化物イオン濃度はひび割れ面近傍の濃度と同程度になる可能性があること、また 0.2mm より小さい場合には塩化物のひび割れ内部への侵入が抑えられることがわかる。

図-5 は内部塩化物イオン量に及ぼすかぶり厚さの影響を見たものである(試験体 B: ひび割れ幅 0.3mm)。同図によれば、塩水噴霧試験では外部塩化物イオン濃度(0mm の位置の値)にくらべ、50mm, 100mm の位置での値は 1/4 程度で、両位置の値はほぼ同じとなっている。前述したように、0.2mm 程度のひび割れでは外部と内部の塩化物イオン濃度は同程度になる傾向があるのに対し、かぶりの大きい本試験体(50mm, 100mm)の結果では内部の塩化物イオン濃度はかなり小さい(標準試験体のかぶりは 30mm)。本試験体は 2 体と少なく十分検証できていないとは言えないが、かぶり厚さが大きい場合、内部の塩化物イオン濃度は大きく低減する可能性があるといえる。一方、塩水浸漬試験では、50mm, 100mm の位置においても外部との差はなく、標準試験体の場合と同じ結果となった。

## (2) 鉄筋腐食程度

### 1) 鉄筋腐食状態

写真-3 に腐食促進試験後の鉄筋展開写真の例を示す。試験方法で腐食状況を比較する((a)と(c)の比較)と、塩水噴霧試験ではひび割れ位置(外気に直接曝される部分)を中心に、鉄筋の材軸方向に比較的狭い範囲で腐食が見られるのに対して、塩水浸漬試験ではより広範囲に腐食が進行している。また中性化の影響については、両試験ともに中性化促進していない試験体では腐食程度が抑制

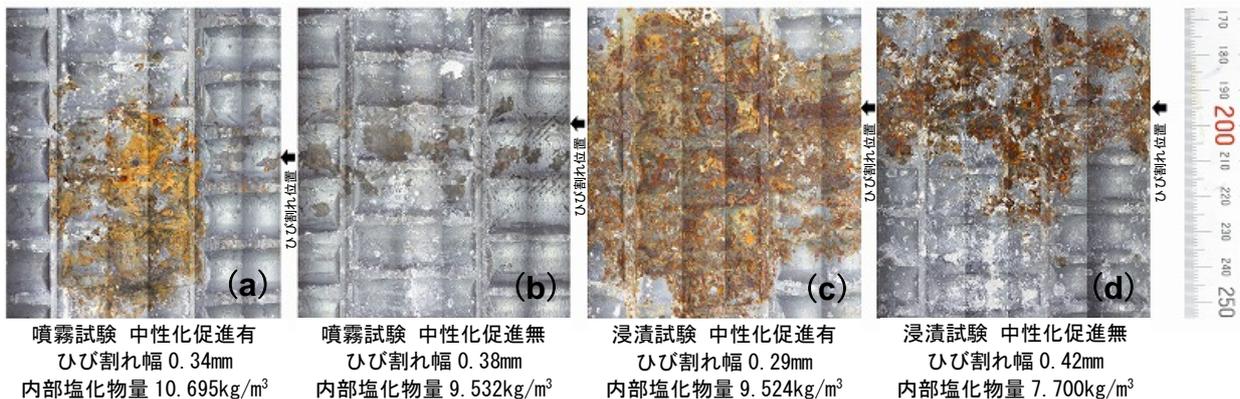


写真-3 腐食促進試験による鉄筋腐食状態(鉄筋展開写真)

されており、抑制程度は塩水噴霧試験のほうが強い傾向がみられた((a)と(b), (c)と(d)の比較)。

### 2) 最大腐食面積率

図-6 は最大腐食面積率について、横軸に内部塩化物イオン量を取り示したものである。同図より、塩水噴霧試験では、中性化促進の有無によらず、内部塩化物イオン量の増加に伴い最大腐食面積率は増加する傾向が見られる。中性化促進の有無の違いについて比較すると、中性化促進を行っていない試験体では、中性化促進を行っ

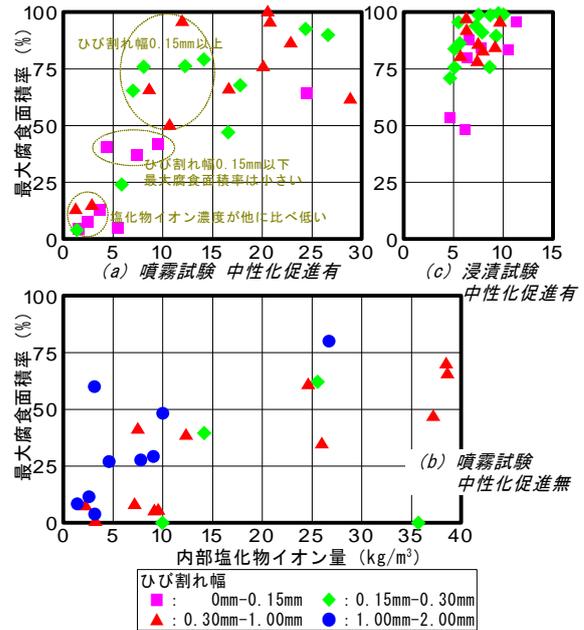


図-6 最大腐食面積率-内部塩化物イオン量

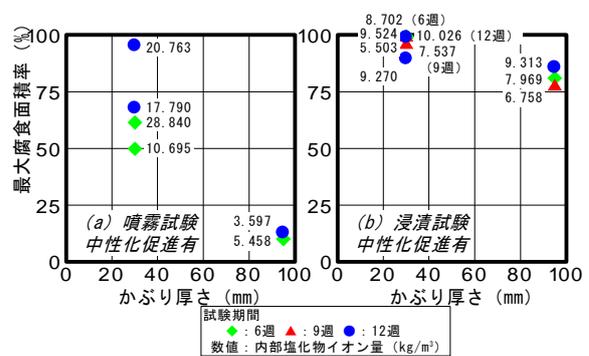


図-7 最大腐食面積率-かぶり厚さ

た場合に比べ最大腐食面積率は小さく、特にひび割れが非常に大きい場合でも（例えば 1.0mm-2.0mm：図-6(b) ●印）腐食が抑制されていることがわかる。なお、中性化促進を行っていない試験体では塩水噴霧試験終了時においても中性化が鉄筋位置まで達していなかったことを確認している。

中性化促進を行った試験体について、ひび割れ幅と最大腐食面積率の関係を見ると、同じ塩化物イオン濃度の条件で比較すれば、ひび割れ幅が 0.15mm 以下の試験体（図-6(a) ■印）では（塩化物イオン濃度が非常に低いものを除けば）最大腐食面積率はひび割れ幅が 0.15mm を超えるものよりも小さいことがわかる。一方、ひび割れ幅 0.15mm-0.30mm 試験体（図-6(a) ◆印）とひび割れ幅 0.30mm-1.00mm の試験体（図-6(a) ▲印）では最大腐食面積率に明確な差はない。以上より、ひび割れがある程度小さくなると（本実験では 0.15mm 以下の範囲）腐食が抑制されると考えられる。この理由については水や酸素等の腐食促進に必要な物質の供給が抑制されるためであると推察される。

塩水浸漬試験では本実験で得られた内部塩化物イオン量が約 5-10kg/m<sup>3</sup>と塩水噴霧試験に比べて狭く、最大腐食面積率もほぼ 75%以上の値となっており、内部塩化物イオン量と最大腐食面積率の間には明確な傾向はみられなかった。

図-7 に最大腐食面積率とかぶり厚さの関係を示す。同図より塩水噴霧試験ではかぶり厚さが大きい場合、最大腐食面積率は著しく小さいことがわかる。これは図中に示すとおりかぶり厚さが大きい場合には塩化物イオン量が低い事に加えて、前述のように水や酸素の供給が抑

制されているためと考えられる。一方塩水浸漬試験ではかぶり厚さによる最大腐食面積率の差は平均で 10%程度であり、塩水噴霧試験に比べて小さく、かぶり厚さが大きくなることで腐食が抑制されることはないといえる。

### 3. 暴露試験

#### 3.1 実験概要

暴露試験は日本海沿岸部の高台（福井県大飯郡おおい町大島 1 字吉見 1-1；海岸線より約 30m）に、試験体（腐食促進試験と同様の方法で作製）合計 20 体（実験変数：表-1）を、2008 年 12 月 12 日から 2010 年 12 月 10 日までの 729 日間設置した。試験体設置状況（写真-4）に示すように、試験体を風雨から防ぐものは設置していない。また、開口面は海側に向けている。測定方法（中性化判定、塩化物イオン量測定、鉄筋腐食面積率の算出）は、腐食促進試験と同様の方法で行っている。

#### 3.2 暴露試験実験結果

##### (1) 塩化物イオン

図-8 に試験期間と外部塩化物量・内部塩化物量の関係を示す。暴露試験では、試験期間によらず外部塩化物イオン量は概ね一定となった。また内部塩化物イオン量は試験期間 213 日、476 日、623 日ではほぼ一定で外部塩化物イオン量を約 50% 上回る値、試験期間 729 日ではやや低い値（外部濃度比約 100%）となっている。図-9 にひび割れ幅と塩化物イオン内外比の関係を示す。塩水噴霧試験ではひび割れ幅 0.2mm 程度より小さい場合、ひび割れ内部の塩化物イオン濃度は外部の塩化物イオン濃度よりも小さくなること（図中に示す点線より下側にデータがあること）を示した。これに対し、暴露試験ではひび割れ面に直接風が当たる等、ひび割れ内部へ外気が入



写真-4 暴露試験 試験体設置状況

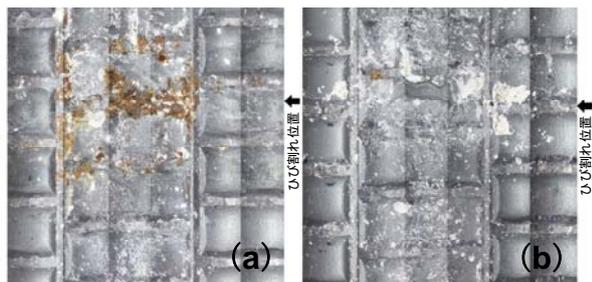


写真-5 暴露試験による鉄筋腐食状態（鉄筋展開写真）  
 暴露試験 中性化促進有 ひび割れ幅 0.16mm 内部塩化物量 2.491kg/m<sup>3</sup>  
 暴露試験 中性化促進無 ひび割れ幅 0.16mm 内部塩化物量 2.787kg/m<sup>3</sup>

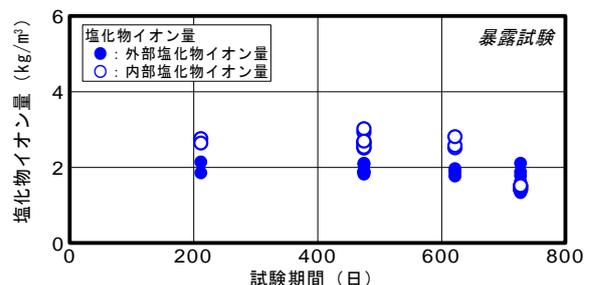


図-8 試験期間-塩化物イオン量

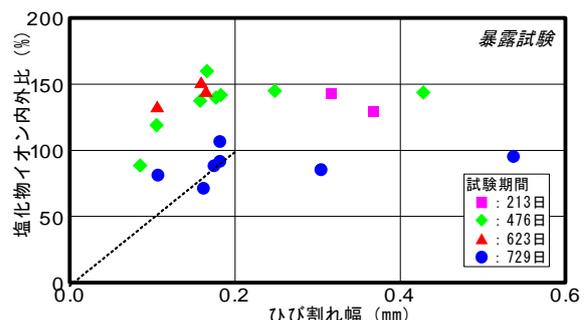


図-9 塩化物イオン内外比-ひび割れ幅

りやすい状況となるため、より小さいひび割れ幅においてもひび割れ内部の塩化物イオン濃度が外部の濃度とより近い値になると考えられる。

## (2) 鉄筋腐食程度

### 1) 鉄筋腐食状態

写真-5に暴露試験後の鉄筋展開写真の例を示す。中性化促進を行った試験体(写真-5(a))では、ひび割れ位置(外気に直接曝される部分)を中心に、鉄筋の材軸方向に比較的狭い範囲で腐食が見られ、塩水噴霧試験の場合と同様の腐食傾向を示した(写真-3(a))。また、鉄筋近傍位置におけるコンクリートが中性化していない場合、腐食促進試験と同様、腐食が抑制されることが確認された(写真-5(a)と(b)の比較)。

### 2) 最大腐食面積率

図-10に最大腐食面積率とひび割れ幅の関係を示す。中性化促進を行っていない試験体は、暴露試験終了後の鉄筋近傍位置のコンクリートの中性化状態に応じて3種類に分類して示している。図中○印で示す「鉄筋近傍のコンクリートまで中性化していた試験体」は、ひび割れ幅が0.3mm以上であり、全ての試験体で腐食が発生していた。図中△印で示す「部分的に鉄筋周りまで中性化していた試験体」は、ひび割れ幅は0.1mm~0.3mmの範囲にあり、ひび割れ幅が0.2mm以下では腐食は発生していなかった。図中×印で示す「鉄筋位置まで中性化していない試験体」は、ひび割れ幅0.1mm以下の範囲にあり腐食は発生していなかった。一方、中性化促進を暴露試験前に行った試験体(図中◎印、ひび割れ幅0.17mm程度)では、全ての試験体で腐食が確認された。

図-11に最大腐食面積率と内部塩化物イオン量の関係を示す(中性化促進を行った試験体のひび割れ幅が

0.2mm未満であったため、中性化促進を行っていない試験体についても同様の範囲で検討を行っている)。前述したように、ひび割れ幅が0.2mm未満では中性化促進を行っていない試験体で腐食は発生しておらず、0.2mm以上ではひび割れ幅の増加に伴い最大腐食面積率は概ね増加する傾向が見られた。一方、中性化促進を行った試験体では0.2mm以下でも腐食が発生しており、内部塩化物イオン量の増加に伴い最大腐食面積率が増加する傾向が見られ、塩水噴霧試験における相関(図-6(a))と同様の相関関係が見られた。

## 4. まとめ

ひび割れを有する鉄筋コンクリート部材に対して、塩分飛来環境を模擬した塩水噴霧試験を行い、塩水浸漬試験と比較して、塩化物イオンの侵入程度、内部鉄筋の腐食程度の違いを検討し、また暴露試験を行い塩水噴霧試験と比較検討を行うことで以下の知見を得た。

- (1) ひび割れ内部の塩化物イオン濃度は、塩水噴霧試験ではひび割れ幅が小さくなると(本実験では0.2mm以下)試験体表面の塩化物イオン濃度より小さくなる。一方、塩水浸漬試験ではひび割れ幅との相関はなく、試験体表面の塩化物イオン濃度と比べ同等以上となる。
- (2) ひび割れ内部の塩化物イオン濃度は、塩水噴霧試験ではかぶり厚さが大きくなると小さくなるが、塩水浸漬試験ではかぶり厚さの影響はない。
- (3) 内部鉄筋の腐食程度は、塩水噴霧試験ではひび割れ幅が小さい(本実験では0.15mm以下)場合、またかぶり厚さが大きい場合小さくなる。これは水や酸素の供給(かぶり厚さが大きい場合、加えて内部塩化物イオン量)が抑制されることが要因と考えられる。
- (4) 塩水噴霧試験と暴露試験の比較では、内部鉄筋の腐食状況、内部塩化物イオン量と最大腐食面積率の関係について両試験で同様の傾向が見られた。一方、塩化物イオンのひび割れ内部への侵入状況は、暴露試験ではより小さいひび割れ幅で内部の塩化物イオン濃度は外部の濃度に近い値となることから、風などによる外気のひび割れ内部への流入が大きく影響しているものと考えられる。

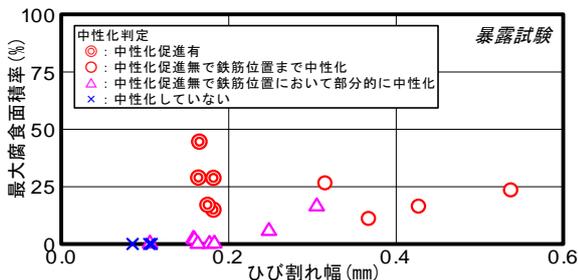


図-10 最大腐食面積率-ひび割れ幅

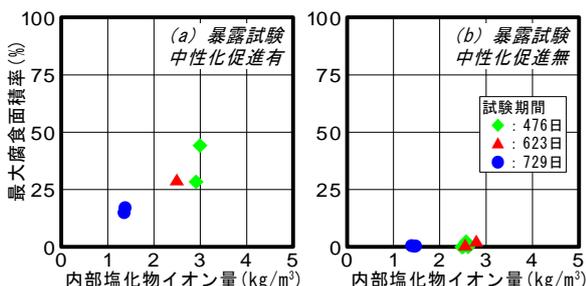


図-11 最大腐食面積率-内部塩化物イオン量

## 参考文献

- 1) 例えば、鈴木計夫、大野義照：コンクリート中の鉄筋のマクロセル腐食に及ぼす各種要因の影響、日本建築学会近畿支部研究報告集 平成7年度、pp.25-28, 1995
- 2) 社団法人 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集 (1977~2002年度)、pp.91-92, 2004