

ひび割れが腐食速度に与える影響に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23

担当チーム：基礎材料チーム

研究担当者：渡辺博志，古賀裕久，中村英佑

【要旨】

ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に与える影響を検証するため、ひび割れ幅とかぶりが異なる鉄筋コンクリート供試体の長期暴露試験をつくば、新潟、沖縄で行っており、平成 23 年度に暴露 5 年後の解体調査を実施した。この結果、鋼材表面の腐食の範囲は、暴露環境や暴露期間、塩化物イオン供給量の違いにかかわらず、ひび割れ幅が大きくかぶりが小さい供試体で広くなり、これらの鋼材には断面欠損を伴う腐食が生じたものも含まれていた。ただし、暴露 5 年後までに生じた断面欠損は、鋼材の力学性能を低下させるほどのものではなかった。また、過去 5 年間で得られた結果を精査した上で、環境条件とかぶりに応じたひび割れ幅の制限値を提案した。キーワード：ひび割れ，鋼材腐食，塩分浸透，暴露試験，コンクリート構造物

1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れは、塩化物イオンや水、酸素など腐食因子の浸透を容易にしてコンクリート内部の鋼材の腐食を助長すると考えられている。このため、コンクリート構造物に生じるひび割れに対しては、設計と施工の両面において、耐久性上有害とならない範囲にひび割れ幅を制御することが求められている。

ところが、ひび割れ幅をどの程度に制御するのが適切かという点については、必ずしも統一的な見解が得られていない。国内外の設計規準を比較すると、ひび割れ幅の許容値やその制御方法は様々であり、設計規準ごとに異なる内容が記載されている。また、既往研究では、短期的にはひび割れがコンクリート中の鋼材の腐食を助長すると指摘するものがある一方で、長期的には両者の間には必ずしも明確な関係は見られないと指摘するものもある。

これらのことを踏まえ、ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に与える影響を検証することを目的として、平成 18 年 4 月から、ひび割れを導入した鉄筋コンクリート供試体の長期暴露試験をつくば、新潟、沖縄で開始した。本暴露試験では、ひび割れ幅、かぶり、暴露期間、暴露環境など試験結果に影響を与える可能性が高い実験パラメータを網羅した供試体を製作・暴露し、解体調査を定期的に行い、コンクリートひび割れ部における鋼材の腐食性状と塩分浸透性を明らかにすることを目的とした。

本研究課題では、暴露 5 年後の供試体を回収して

解体調査を行い、ひび割れがコンクリート中の鋼材の腐食速度と塩化物イオンの浸透量に与える影響を検討した。また、別途実施した暴露 1, 2.5 年後の調査結果^{1)~3)}も精査した上で、耐久性の観点から環境条件とかぶりに応じたコンクリート表面のひび割れ幅の制限値を提案した⁴⁾。

2. 暴露試験の内容

2.1 供試体の形状

供試体の形状を図-1 に示す。供試体は、長さ 1m の鋼材(SD295A, D13)を 1 本有する 200×200×1,000mm の角柱である。鋼材の両端部は、腐食を防ぐため塩ビパイプで覆い、供試体側面をエポキシ樹脂で被覆した。ひび割れは、材齢 28 日以降に所定のひび割れ幅となるよう二点曲げ載荷で供試体中央付近に導入し、ひび割れ幅の長期的な変動の有無を確認するためのコンタクトゲージ測定用チップをひび割れの左右に設置した。

2.2 実験パラメータ

本暴露試験の実験パラメータを表-1 に示す。

暴露地点は、つくば、新潟、沖縄の 3 ヶ所とした。つくばの暴露場は内陸部のため塩害環境下にはないが、新潟と沖縄の暴露場は沿岸部の厳しい塩害環境下にある。ひび割れ幅は、「なし」、「0.2mm 以下」、「0.3mm 前後」、「0.5mm 以上」の 4 水準とした。二点曲げ載荷で厳密に所定の幅を有するひび割れを導入することが困難であったため、一定の範囲内でひび割れ幅を管理した。ひび割れ導入後、供試体下面

の中央，中央から両側 50mm の 3 点のひび割れ幅をクラックスケールで測定し，目標とするひび割れ幅の条件を満たしていることを確認した．3 点の平均値は「0.2mm 以下」で 0.05～0.2mm，「0.3mm 前後」で 0.25～0.45mm，「0.5mm 以上」で 0.5～0.77mm の範囲にあり，複数のひび割れが発生した場合には最も幅の大きいひび割れで供試体を分類した．「0.3mm 前後」と「0.5mm 以上」の供試体ではひび割れ導入後に約 10mm×約 10mm の厚さ 0.1mm もしくは 0.3mm のステンレス片を端部に挿入してひび割れを固定した．なお，供試体の移設・回収作業の前後でのコンタクトゲージ測定により，暴露試験中にひび割れ幅が大幅に変動していないことを確認した．

かぶりは 20, 30, 50, 70mm の 4 種類とした．

暴露期間は，経時的な変化を把握できるように 1, 2.5, 5, 10 年の 4 期間を予定した．平成 23 年度は暴露 5 年後の供試体の回収・解体調査を行った．

コンクリートの水セメント比(以下，W/C)は 55% を基本とし，比較のため一部で 35%の供試体も製作した．コンクリート配合を表-2 に示す．

2.3 供試体の暴露状況

暴露 5 年後の供試体の状況を写真-1 に示す．ここでは各暴露場の最寄りの気象観測所における試験中の気温，湿度，月間降水量の平均値も併記する⁵⁾．供試体は架台の上に 120mm 間隔で，ひび割れ面を下向きにして設置した．橋梁上部工など実際のコン

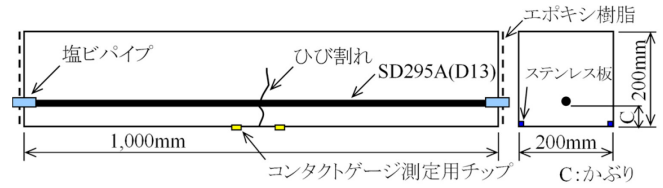


図-1 供試体の形状

表-1 実験パラメータ

暴露環境	ひび割れ幅	かぶり (mm)	暴露期間 (year)	W/C (%)
つくば ^{※1}	なし	20 ^{※2}	1	
新潟	0.2mm 以下	30	2.5	35 ^{※3}
	0.3mm 前後	50	5	55
沖縄	0.5mm 以上	70	10	

※1: Cl濃度 0.3kg/m³換算の NaCl を練り混ぜた供試体も暴露

※2: 暴露期間 1, 2.5 年のみ

※3: つくばはかぶり 30mm, 新潟は 50mm, 沖縄は 70mm のみ

表-2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位重量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	混和剤
35	40.0	155	443	684	1065	4.43
55	44.8	160	294	820	1044	3.12

※: 普通ポルトランドセメント，最大粗骨材寸法 20mm，

スランブ 8cm，空気量 4.5%

クリート構造物で生じることの多い部材下面の曲げひび割れを模擬したためである．

新潟の暴露場は，海水が供試体に直接降りかかる



(a)つくば (15.1℃, 75.1%, 112.2mm) (b)新潟 (14.6℃, 75.3%, 219.8mm) (c)沖縄 (23.1℃, 73.9%, 176.7mm)

写真-1 供試体の暴露状況(暴露 5 年後) ※()内は気温，湿度，月間降水量の平均値

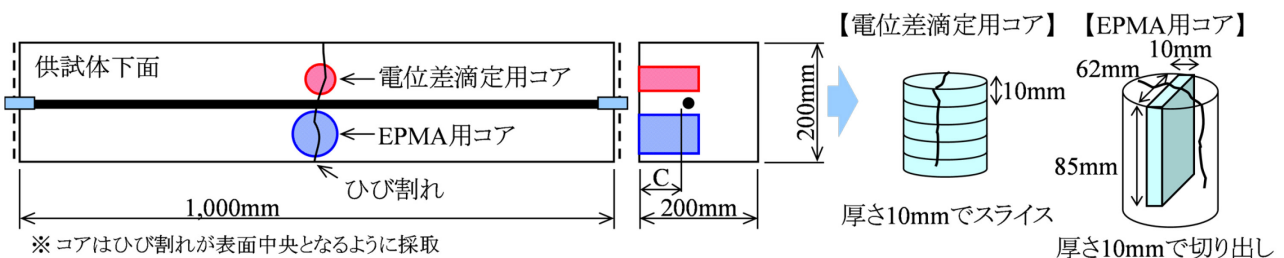


図-2 コア採取位置と試料製作方法

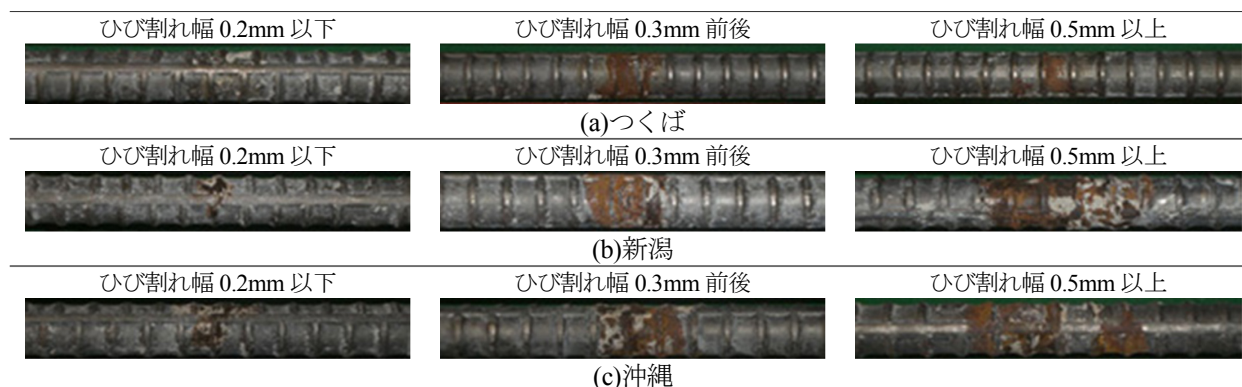


写真-2 各暴露環境における鋼材の腐食状態 ※W/C55%のかぶり 50mm の供試体



(a)孔食による断面欠損を伴う腐食

(b)比較的軽微な断面欠損を伴う腐食

写真-3 腐食鋼材の断面欠損の典型例 ※除錆後の状態

ことはないものの、海中の消波ブロックや波打ち際で生成された海水の飛沫によって飛来塩分が供給される環境である。一方、沖縄の暴露場は、このような飛来塩分に加えて、天候によっては海水が供試体に直接降りかかることもある環境である。

2.4 解体調査の方法

(1) 鋼材の腐食面積率と質量減少率

供試体を回収・解体して鋼材を取り出した後、鋼材表面の腐食発生範囲を目視観察・記録し、腐食面積率を求めた。また、JCI-SC1 に準拠して濃度 10% のクエン酸二アンモニウム溶液に鋼材を浸せきして除錆した後に質量を測定し、腐食による鋼材の質量減少率を求めた。

(2) 腐食鋼材の力学特性

上記(1)の各測定を行った後の鋼材を用いて、JIS Z 2241: 1998 に準拠して引張試験を行い、最大荷重と降伏荷重、破断後の伸びを測定した。

(3) 塩化物イオンの浸透状況

ひび割れ部周辺のコンクリート中の塩化物イオンの濃度とその浸透状況を把握するため、コンクリート表面のひび割れがコア表面の中央となるように $\phi 50\text{mm}$ と $\phi 75\text{mm}$ のコアを鋼材の直近で採取し(図-2)、塩化物イオン濃度の測定と EPMA 法による面分析を行った。塩化物イオン濃度の測定は、新潟と沖

縄の W/C35% と W/C55% の供試体から採取した $\phi 50\text{mm}$ のコアを厚さ 10mm にスライスし、JIS A 1154: 2003 に準拠して電位差滴定法で行った。EPMA 法による面分析には沖縄の W/C55% のかぶり 70mm の供試体から採取した $\phi 75\text{mm}$ のコアを用い、ひび割れ部が中央となるように厚さ 10mm の試料を切り出し、 $62\text{mm} \times 85\text{mm}$ の範囲を対象として JSCE-G 574-2005 に準拠して行った。

3. 解体調査の結果

3.1 鋼材の腐食状態

暴露 5 年後に回収した供試体から取り出した鋼材の腐食状態を写真-2 に示す。いずれの暴露環境においても、鋼材腐食の生じていた供試体ではひび割れと腐食の発生位置が一致し、ひび割れを導入していない供試体では目視による腐食を確認することはできなかった。また、腐食の範囲はひび割れ幅が大きいほど広がる傾向にあった。これは、ひび割れ幅の大きい供試体ほどコンクリートと鋼材の付着が切れた区間が長くなったこと、ひび割れ幅の大きい供試体ほど塩化物イオンや水、酸素など腐食因子の浸透が容易であったことなどが原因と考えられる。

次に、鋼材の腐食状態の経年的な変化を明らかにするため、目視観察の結果から鋼材の腐食状態を、

表-3 鋼材の腐食状態の経年変化 ※W/C55%の供試体

かぶり ひび割れ幅	かぶり 30mm				かぶり 50mm				かぶり 70mm			
	なし	0.2mm 以下	0.3mm 前後	0.5mm 以上	なし	0.2mm 以下	0.3mm 前後	0.5mm 以上	なし	0.2mm 以下	0.3mm 前後	0.5mm 以上
つくば												
暴露 1 年後	×	△	△	△	×	×	×	△	×	×	×	×
暴露 2.5 年後	×	△	△	△	×	×	△	×	×	×	×	×
暴露 5 年後	×	△	△	△	×	×	△	△	×	×	×	△
新潟												
暴露 1 年後	×	△	△	△	×	×	△	△	×	×	×	△
暴露 2.5 年後	×	◎	△	◎	×	×	◎	○	×	×	◎	◎
暴露 5 年後	×	△	○	◎	×	◎	◎	◎	×	×	◎	◎
沖縄												
暴露 1 年後	×	△	△	△	×	×	×	△	×	×	×	×
暴露 2.5 年後	×	△	◎	◎	×	△	△	△	×	×	×	◎
暴露 5 年後	×	◎	○	◎	×	○	◎	◎	×	△	○	○

※◎:孔食による断面欠損を伴う腐食, ○:比較的軽微な断面欠損を伴う腐食,

△:鋼材表面のみの腐食(断面欠損なし), ×:腐食なし

①孔食による断面欠損を伴う腐食, ②比較的軽微な断面欠損を伴う腐食, ③鋼材表面のみの腐食(断面欠損なし), ④腐食なしの 4 種類に分類し(写真-3), 腐食の程度を定性的に評価した. 上記に基づいて分類した W/C55%の供試体における鋼材の腐食状態の経年的な推移を表-3 示す. この結果によると, 断面欠損を伴う腐食が生じた鋼材は, かぶりが小さく, ひび割れ幅が大きく, 暴露期間が長い供試体で多く確認されたこと, つくばでは暴露 5 年後においても断面欠損を伴う腐食が生じていなかったこと, 塩害環境下である新潟と沖縄では孔食あるいは比較的軽微な断面欠損を伴う腐食が生じており, この割合が経年的に増加したことなどが分かる.

3.2 鋼材の腐食面積率と質量減少率

暴露 1, 2.5, 5 年後に回収した供試体の鋼材の腐食面積率を図-3 に示す. ここでは, ひび割れ部から両側 200mm の鋼材の表面積(16,000mm²)に占める腐食部分の割合を腐食面積率として算定した.

新潟と沖縄に暴露した供試体から取り出した鋼材の腐食面積率は, つくばに暴露した供試体から取り出した鋼材よりも大きくなった. この傾向は, 暴露 1, 2.5, 5 年後のいずれの結果でも見られ, ひび割れ幅の大きい供試体で明確に確認することができた. 塩害環境下である新潟と沖縄の暴露試験場に暴露した供試体は, 塩害環境下ではないつくばよりも腐食が生じやすい環境に置かれたためと考えられる.

また, 経年的に鋼材の腐食面積率が大幅に増加するような傾向は見られなかった. 経年的な腐食面積率の変化に比べると, ひび割れ幅の違いによる腐食

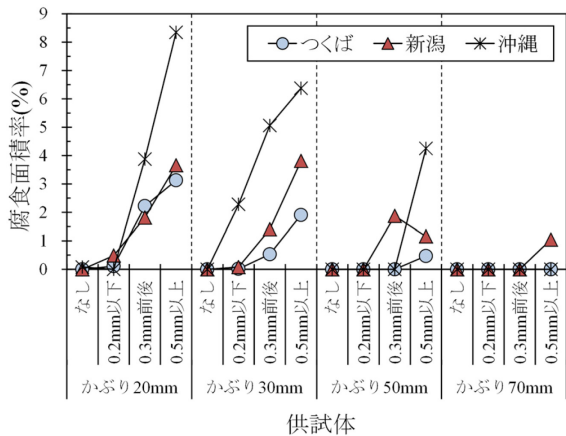
面積率の大小の方に明確な差が現れている. すなわち, 鋼材表面の腐食は試験開始後初期の時点で生じ, その後の面的な進展はほとんどなかったと考えられる. こうした面的な腐食の範囲は, ひび割れ幅が大きいほど, かぶりが小さいほど, 広がった. ひび割れ幅が大きくかぶりが小さい供試体では, コンクリートと鋼材の付着切れの範囲が広く, 塩化物イオンや水, 酸素など腐食因子の侵入も容易となり, 腐食の生じた範囲が広がったと考えられる.

上記に加えて, W/C35%の供試体と塩化物イオン濃度 0.3kg/m³相当の塩化ナトリウムを練混ぜ時に混入した供試体の腐食面積率も得たが, これらが鋼材の腐食面積率に与えた影響はひび割れ幅やかぶり, 暴露環境よりも小さい結果となった.

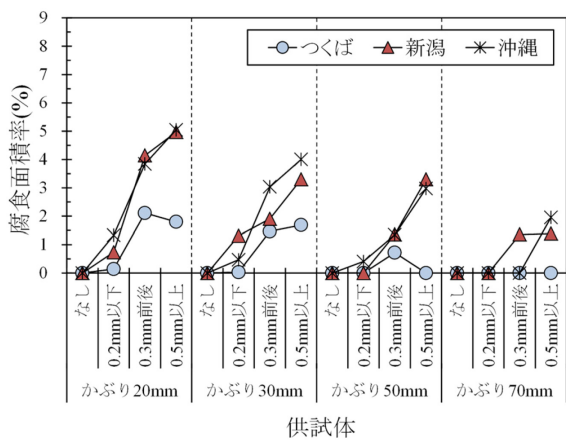
なお, 別途実施した質量減少率の測定では, 腐食面積率のようにひび割れ幅やかぶりの違いによる影響を確認するには至らなかった. この原因としては, ここで生じていた腐食がひび割れ部周辺のみで局所的なものであり, 質量減少率が 2.0%以下と比較的小さく, 質量減少率で評価できる程度まで腐食が進展していなかったことが考えられる.

3.3 腐食鋼材の力学特性

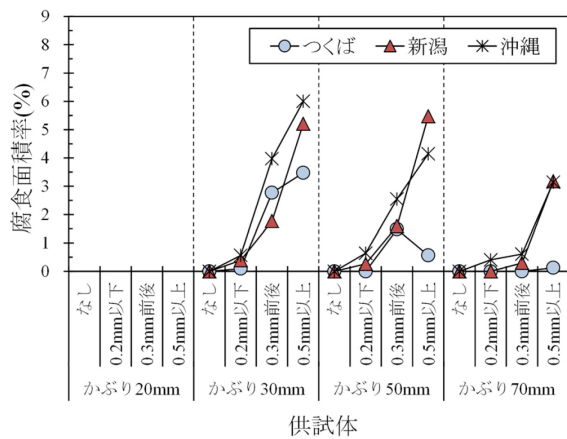
W/C55%の供試体から取り出した鋼材の引張試験の結果を図-4 に示す. これらの結果を比較すると, 最大荷重, 降伏荷重, 破断時の伸びのいずれの力学特性においても, ひび割れ幅やかぶりの違いによる差を明確に確認することはできなかった. すなわち, 暴露 5 年後の解体調査では, 孔食による断面欠損を伴う腐食が生じていた鋼材を確認することができた



(a) 暴露 1 年後

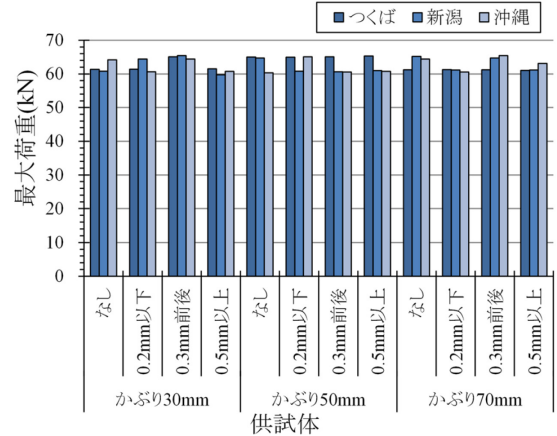


(b) 暴露 2.5 年後

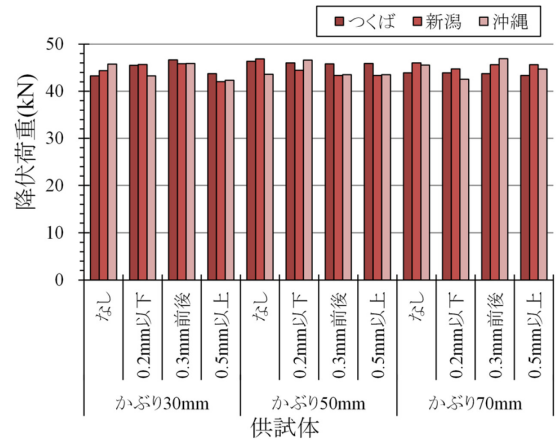


(c) 暴露 5 年後

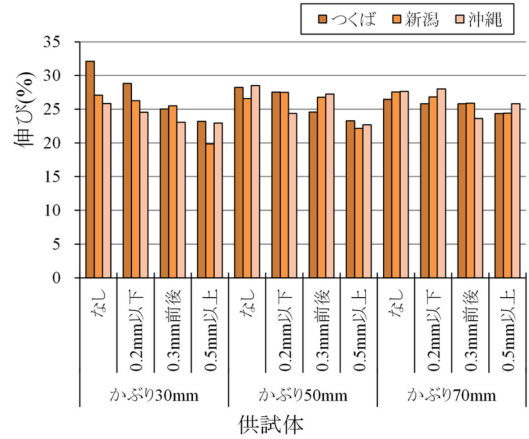
図-3 鋼材の腐食面積率



(a) 最大荷重



(b) 降伏荷重



(c) 破断時の伸び

図-4 鋼材の引張試験結果

が、鋼材の力学特性が低下する程度の断面欠損ではなかったと考えられる。

3.4 塩化物イオンの浸透状況

暴露 5 年後に回収した供試体の塩化物イオン濃度の測定結果を図-5 に示す。W/C による塩化物イオンの浸透状況の違いも比較するため、W/C55%と 35%の供試体の測定結果を示す。ひび割れの有無に

着目すると、沖縄の W/C55%の供試体の一部で例外が認められるが、ひび割れを有する供試体ではひび割れの無い供試体よりもコンクリート内部の塩化物イオン濃度が高くなったことがわかる。ただし、ひび割れ幅の大きい供試体ほどコンクリート内部で塩化物イオン濃度が高くなるような傾向は認められず、ひび割れ幅の大小と塩化物イオン濃度との関係は明

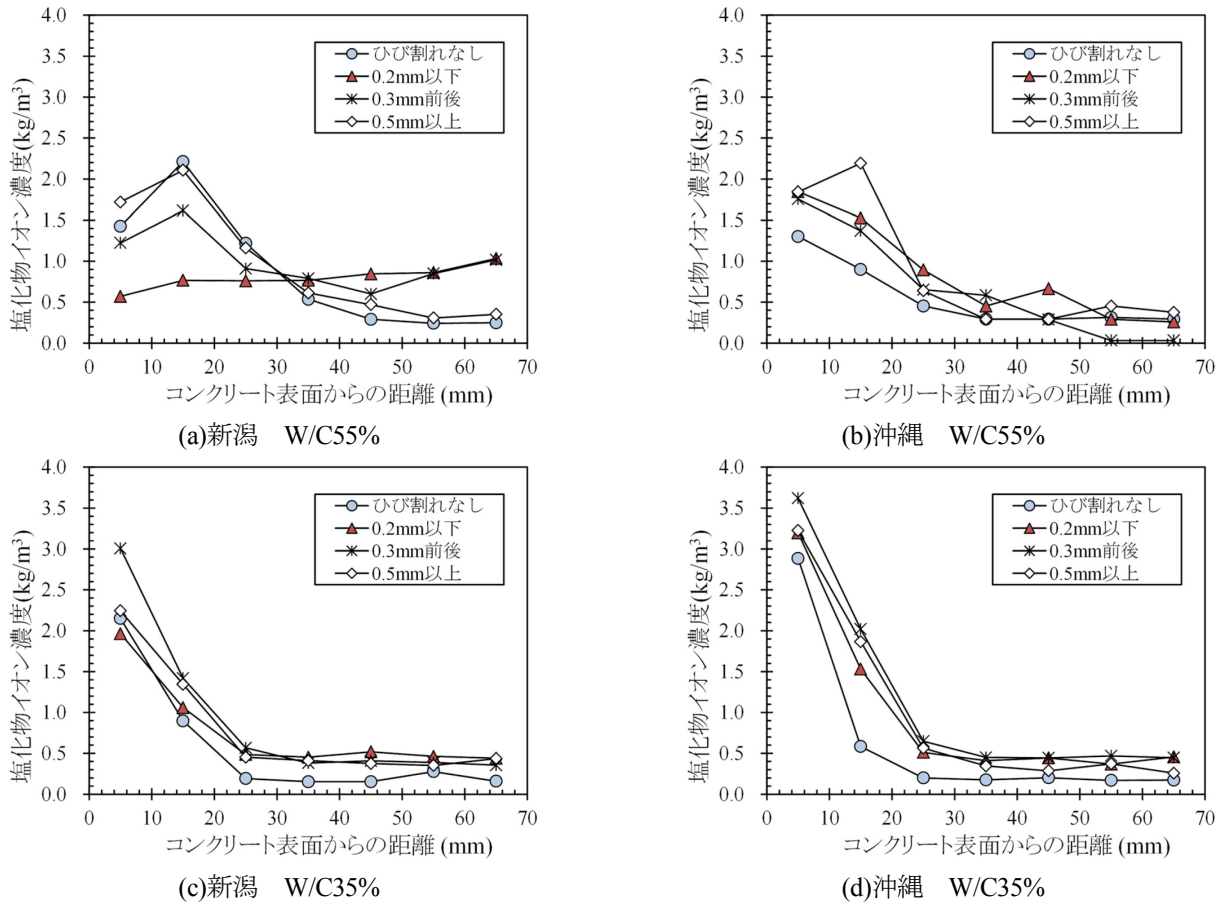


図-5 コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布

確ではなかった。なお、W/C55%の供試体の一部では表面よりも内部で塩化物イオン濃度が高くなったものもあるが、これはコンクリート表面付近の中性化により塩化物イオンが内部へ移動・濃縮したためと考えられる。

W/Cの違いに着目すると、W/C35%の供試体よりもW/C55%の供試体で塩化物イオンが内部まで浸透していたことがわかる。W/Cの小さいコンクリートで塩化物イオン浸透抵抗性が向上する傾向が現れており、ひび割れが存在する場合においてもW/Cが小さいほど塩化物イオンの浸透量が小さくなることが窺える。一方、コンクリート表面の塩化物イオン濃度は、W/C35%の供試体で大きくなった。

また、暴露1, 2.5, 5年後に沖縄から回収したW/C55%の供試体から採取したコアを用いて実施したEPMA法による塩素の面分析の結果を図-6に示す。いずれの供試体においてもコンクリート表面近傍において塩素の濃度の低い領域が存在した。この原因は、同時に実施したカルシウムと硫黄の面分析の結果において供試体表面周辺のコンクリートが中性化していたことが確認されたことから、中性化の

進行とともに塩素が供試体内部へ移動・濃縮したためと考えられる。一方、粗骨材の偏りや配置による供試体の個体差の影響もあるが、ここでもひび割れ幅の大きい供試体ほどひび割れに沿った塩化物イオンの浸透量が大きくなるような傾向は確認できない。むしろ、ひび割れ幅が最も大きい「0.5mm以上」の供試体よりもひび割れ幅の小さい「0.2mm以下」と「0.3mm前後」の供試体において、暴露1, 2.5年後の結果でひび割れに沿った塩化物イオンの浸透を明確に確認することができる。また、暴露期間を長くするほどひび割れ部周辺の塩化物イオンの浸透量が大きくなるような傾向も現れていない。従って、ひび割れが発生しているコンクリート構造物においては、ひび割れ幅の大小にかかわらず比較的容易かつ短期的にひび割れに沿って塩化物イオンが浸透する可能性があるが、その浸透程度は必ずしもひび割れ幅の大小と一致しないと考えられる。

3.5 塩化物イオンの拡散係数

一般に、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透量の将来予測を行う際には、式(1)のフィックの拡散方程式の解に基づいて、塩化物イオンの見掛けの

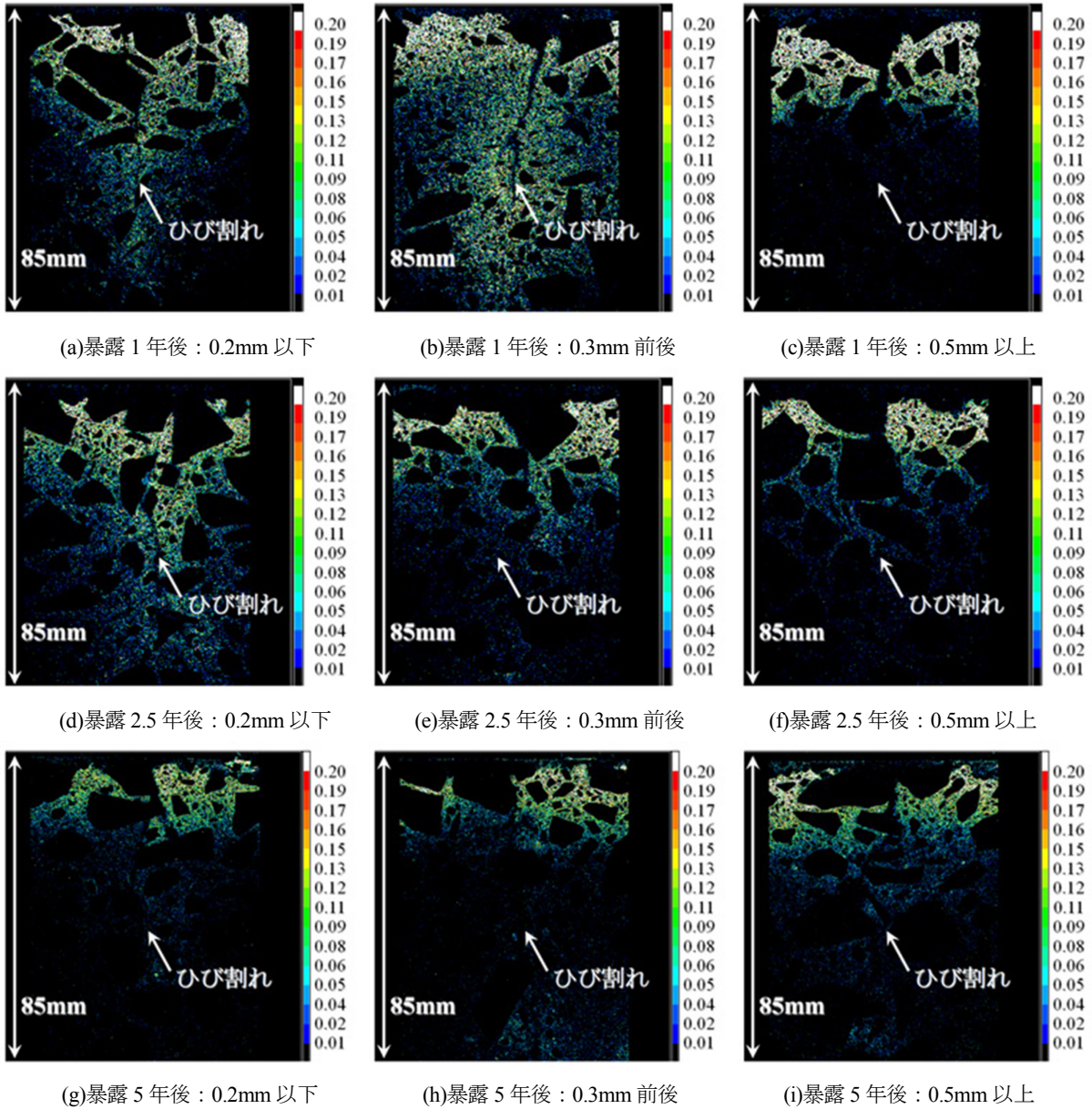


図-6 コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布

拡散係数を計算して用いることが多い。ここでは、ひび割れ幅と環境条件が異なる場合の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を比較するため、暴露5年後の供試体の塩化物イオン濃度の測定結果を用いて塩化物イオンの見掛けの拡散係数を計算した。W/C55%の供試体では表面周辺のコンクリートの中酸化により塩化物イオンが内部へと移動・濃縮しており、見掛けの拡散係数を適切に計算できないことが懸念されたため、ここではW/C35%の供試体での計算結果のみを示す。

$$C(x, t) - C_i = (C_0 - C_i) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right\} \quad (1)$$

ここで、 x : コンクリート表面から全塩化物イオンを

測定した箇所までの距離(cm), t : 暴露期間(year), $C(x, t)$: 距離 x (cm)と暴露期間 t (year)において測定された塩化物イオン濃度(kg/m^3), C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度(kg/m^3), C_i : 初期に含有される塩化物イオン濃度(kg/m^3), D_{ap} : 見掛けの拡散係数(cm^2/year), erf : 式(2)の誤差関数とする。

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \quad (2)$$

式(1)では、 C_i としてコンクリート中に当初から含まれる塩化物イオンの濃度が用いられる。ここでは図-5のひび割れのない供試体のコンクリート表面から深さ30~70mmの塩化物イオン濃度の測定値の平均値を参考に、 C_i を $0.15\text{kg}/\text{m}^3$ として見掛けの拡散

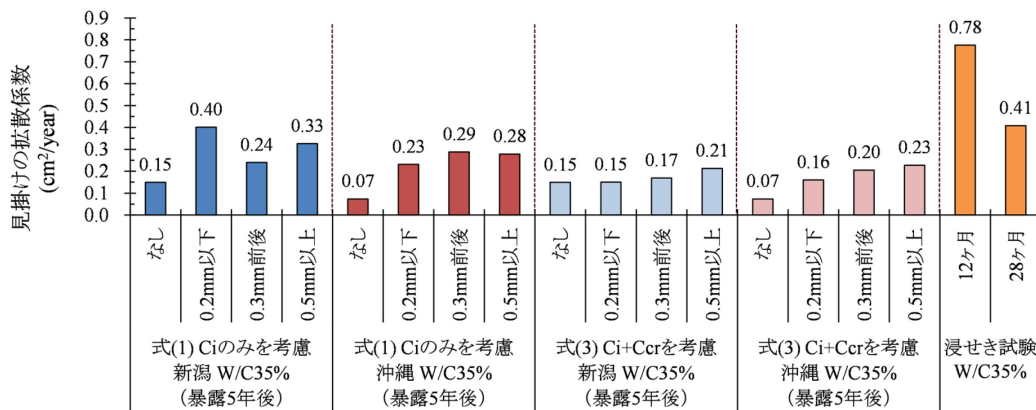


図-7 見掛けの拡散係数の計算値

係数を計算した。しかしながら、図-5、6を参照すると、ひび割れを有する供試体では比較的初期の段階で内部まで塩化物イオンが浸透したと考えられ、W/C35%の供試体ではコンクリート表面から30mmよりも深い位置で塩化物イオン濃度が概ね一定値となった。このため、ここでは式(3)に示すように、 C_i だけでなく、ひび割れの存在によってコンクリート深部に浸透した塩化物イオン濃度 C_{cr} を加味して見掛けの拡散係数を計算することを試みた。

$$C(x, t) - C_i - C_{cr} =$$

$$(C_0 - C_i - C_{cr}) \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap}t}} \right) \right\} \quad (3)$$

ここで、 C_{cr} ：コンクリート深部のひび割れ周辺における塩化物イオン濃度(kg/m³)とする。式(3)の C_{cr} については、図-5を参照し、供試体深部のひび割れ周辺の塩化物イオン濃度が概ね一定値であるコンクリート表面から30~70mmの塩化物イオン濃度の平均値を供試体ごとに計算して用いた。

また、異なる試験方法によって得られる塩化物イオンの見掛けの拡散係数を比較するため、ひび割れを導入した供試体に用いたものと同じコンクリートを使用して製作した円柱供試体(φ100×200mm)の浸せき試験も行った。浸せき試験では、土木研究所の室温約20℃に管理された実験室内において塩分濃度10%の塩化ナトリウム水溶液に円柱供試体を浸せきし、浸せき開始から12ヶ月後と28ヶ月後に厚さ10mmで供試体を切断してコンクリート中の塩化物イオン濃度の深さ方向の分布を電位差滴定法により測定した。

新潟と沖縄の暴露5後のW/C35%の供試体、円柱供試体の12ヶ月と28ヶ月の浸せき試験から得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数の計算結果を図-7示す。式(1)と式(3)のいずれの方法を用いても、

見掛けの拡散係数はひび割れのない供試体よりもひび割れを有する供試体で大きくなる傾向にあった。しかし、ひび割れ幅の影響については、両者で異なる結果が得られた。式(1)の計算値では、新潟で「0.2mm以下」、沖縄で「0.3mm前後」の供試体で見掛けの拡散係数が最も大きくなっており、ひび割れ幅の大小と見掛けの拡散係数の大小には必ずしも明確な関係は見受けられない。一方、式(3)を用いて計算した見掛けの拡散係数では、ひび割れを有する供試体とひび割れのない供試体で見掛けの拡散係数の差が小さくなったが、ひび割れ幅の大きい供試体ほど見掛けの拡散係数が大きくなった。これまでに示した塩化物イオン濃度の測定結果やEPMA法による塩素の分布画像などではひび割れ幅の大小による塩化物イオンの浸透量の違いを明確に確認するには至らなかったが、供試体内部のひび割れ周辺の塩化物イオン濃度を差し引いて得られた塩化物イオン濃度の見掛けの拡散係数はひび割れ幅に応じて大きくなる結果となった。また、新潟と沖縄の供試体から得られた見掛けの拡散係数の計算値はおおむね同程度であったため、暴露環境の違いが見掛けの拡散係数に与える影響は小さいと考えられる。

式(1)と式(3)の計算値の精度を比較するため、両式から得られた塩化物イオン濃度の計算値と実測値を図-8に示す。式(1)から得られた塩化物イオン濃度の計算値よりも式(3)から得られた塩化物イオン濃度の計算値の方が、実測値により適合する結果となった。従って、コンクリート深部のひび割れ部周辺の塩化物イオン濃度 C_{cr} を差し引くことで、ひび割れが生じた場合の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を適切に算定することができる可能性があると考えられる。ただし、実際のコンクリート構造物を対象とする場合には、現時点では C_{cr} の設定方法が明確

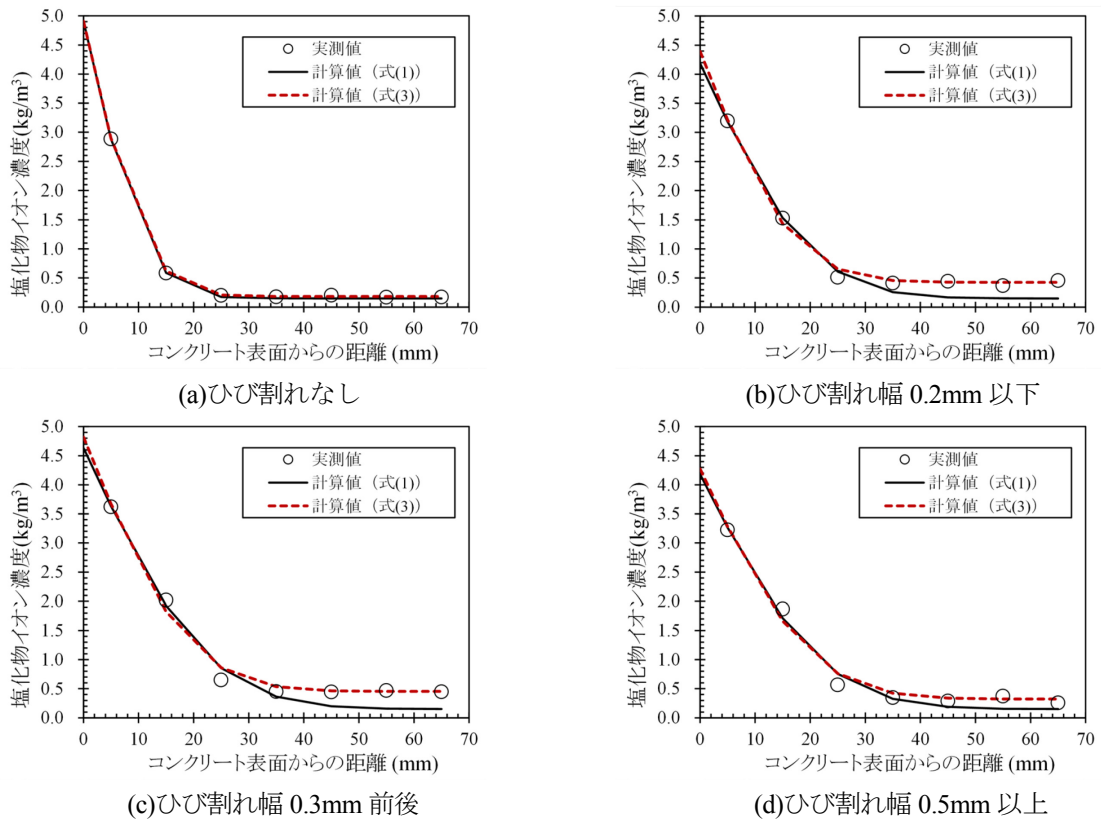


図-8 塩化物イオン濃度の計算値と実測値（暴露5年後のW/C35%の沖縄の供試体）

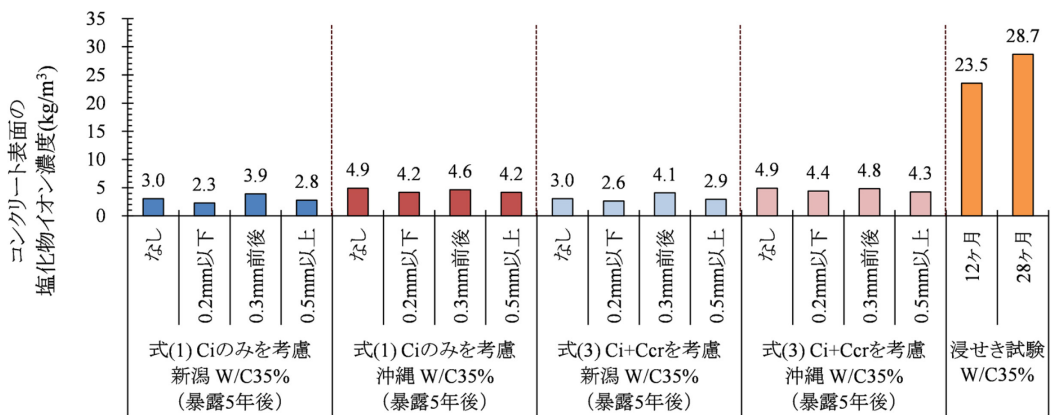


図-9 コンクリート表面の塩化物イオン濃度の計算結果

ではないため、この点については引き続き検討を行っていく必要がある。

また、図-7によると、室内内促進試験である浸せき試験から得られた見掛けの拡散係数はひび割れのない供試体で得られた計算値よりも大幅に大きく、浸せき期間を12ヶ月から28ヶ月へと長くすることで小さくなる傾向にあった。今回の浸せき試験では塩水の塩分濃度を10%としたため、比較的早期にコンクリート内部へ塩化物イオンが浸透して拡散係数が大きくなったのではないかと考えられる。浸せき試験の実施方法の妥当性については、改めて検討を

行う必要がある。

見掛けの拡散係数の算出時に同時に求めたコンクリート表面の塩化物イオン濃度の算出結果を図-9に示す。新潟と沖縄に暴露した供試体の結果に着目すると、コンクリート表面の塩化物イオン濃度は新潟よりも沖縄で大きくなる傾向にあった。一方、浸せき試験から得られたコンクリート表面の塩化物イオン濃度は、暴露した供試体よりも大幅に大きな値となった。浸せき試験では供試体が塩水中に常時浸せきされた状態にあったこと、今回用いた塩水の塩分濃度が10%と一般的な海水の塩分濃度よりも大幅

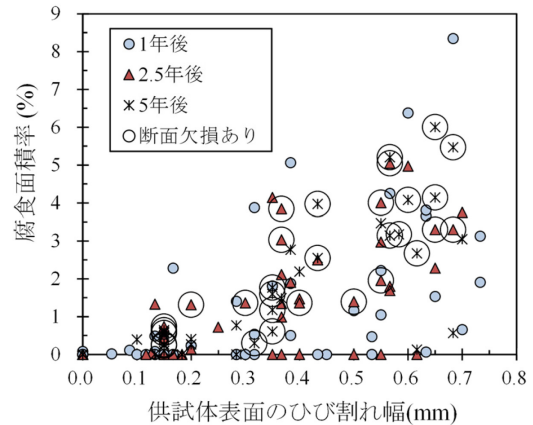
に大きかったことなどが原因と考えられる。

4. ひび割れ幅の制限値の提案

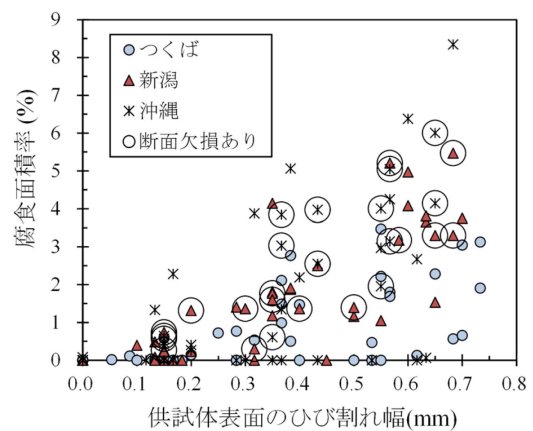
本暴露試験の結果を用いて、耐久性の観点からコンクリート表面のひび割れ幅の制限値について検討を行う。供試体表面のひび割れ幅の実測値と鋼材の腐食面積率の関係を図-10に示す。ここでは、暴露1, 2.5, 5年後のW/C55%とW/C35%の供試体で得られた結果を暴露期間、暴露環境、かぶりの違いごとに表示し、断面欠損の生じていた鋼材に○印を追記した(表-3で「孔食による断面欠損を伴う腐食(写真-3(a))」, 「比較的軽微な断面欠損を伴う腐食(写真-3(b))」に分類された鋼材)。なお、供試体表面のひび割れ幅は、曲げひび割れ導入後にコンクリート表面の3ヶ所でクラックゲージを用いて測定したひび割れ幅の平均値を用いた。

既に述べたように、鋼材の腐食面積率は、暴露期間を長くしても大幅な増加は見られなかったが、つくばに暴露した供試体よりも新潟と沖縄に暴露した供試体で大きく、いずれの暴露環境においてもかぶりの小さい供試体とひび割れ幅の大きい供試体で大きくなる傾向にあった。一方、図-10によると、鋼材の断面欠損はひび割れ幅が0.15mm以上の供試体で生じ、ひび割れ幅が大きくなるほど断面欠損の生じた供試体の数が多くなった。また、かぶりの大きい供試体では腐食面積率が小さくなる傾向にあるが、新潟と沖縄では腐食面積率の比較的小さい供試体においても断面欠損が生じていた鋼材が存在する。すなわち、かぶりの大きい供試体では腐食面積率が小さく面的な腐食の進展度合いが小さいとみなされるものが多くあったが、塩害環境下ではこのような腐食面積率の小さい鋼材においても断面欠損が生じたものがあり、ひび割れ幅によってはかぶりを大きくすることだけでは断面欠損を伴う腐食を抑制できない可能性がある。ひび割れ幅が0.35mm以上の供試体でも、腐食面積率が比較的小さく断面欠損の生じていないものがあるが、これらの大部分は、暴露期間が1年の供試体、つくばに暴露した供試体、かぶり70mmの供試体のいずれかであった。

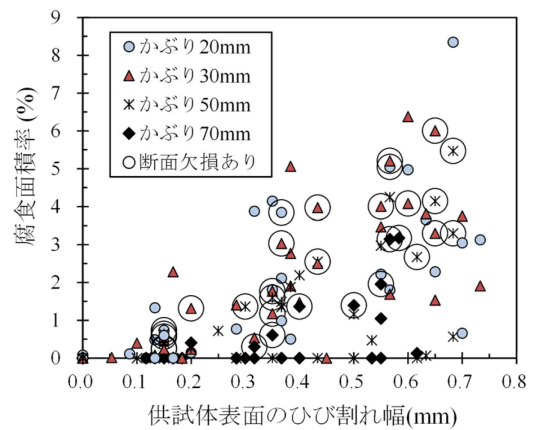
ひび割れ幅と腐食面積率、断面欠損の有無の関係を検討するにあたっては、ひび割れ部分の鋼材の付着喪失区間に留意することが重要である。本暴露試験に用いた供試体では、曲げひび割れ導入時にひび割れ近傍においてコンクリートと鋼材の付着が失われた区間が生じたと考えられるが、曲げひび割れ導



(a)暴露期間



(b)暴露環境



(c)かぶり

図-10 供試体表面のひび割れ幅と腐食面積率 (暴露期間, 暴露環境, かぶりによる比較)

入時に平面保持の法則が成立したと仮定すると、かぶりが小さいほど、また、ひび割れ幅が大きいほど、曲げひび割れ導入時に鋼材に大きな引張りずみが生じ、付着喪失区間も大きくなったと推察される。本暴露試験では、暴露5年後まで鋼材の腐食面積率の経時的な増加は見られず、かぶりが小さいほど、ひ

ひび割れ幅が大きいほど腐食面積率が大きくなった。この原因は、鋼材の腐食範囲が付着喪失区間に留まっていたためと考えられる。また、新潟と沖縄の供試体では腐食面積率の小さい鋼材でも断面欠損を伴う腐食が生じており、これらの鋼材では腐食の面的な進展は付着喪失区間に限定されたものの、鋼材の内部に向かって腐食が進展して断面欠損が生じたと考えられる。

図-10 をかぶりの大小のみに着目して、つくば、新潟、沖縄の3暴露環境ごとに整理した結果を図-11 に示す。つくばでは、ひび割れ幅 0.35mm 以上の供試体で腐食面積率が大きくなったことが分かる。また、かぶり 70mm の供試体では、ひび割れ幅が 0.6mm 程度となってもほとんど腐食は生じていない。つくばの供試体の鋼材には断面欠損が生じていなかったことから、耐久性上は、かぶり 50mm 以下の場合には 0.35mm 程度、かぶり 70mm の場合には 0.6mm 程度にコンクリート表面のひび割れを制御する必要があると考えられる。ただし、ひび割れ幅の許容値を設定する際には、本報告書で示した耐久性面からの検討以外にも、美観や水密性なども考慮した検討を行うことが不可欠である。

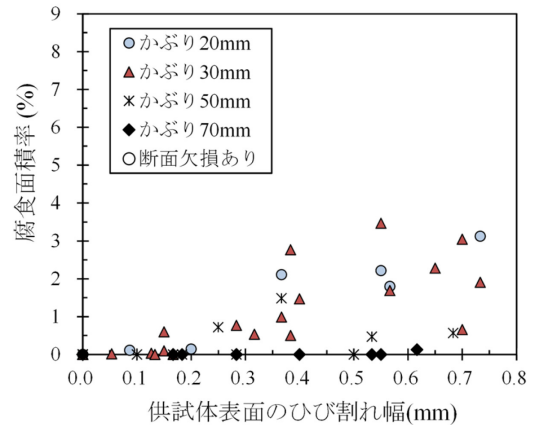
一方、新潟と沖縄では、ひび割れ幅が 0.15mm 程度であっても、かぶり 50mm 以下の供試体で断面欠損を伴う腐食が生じていた。また、かぶり 70mm の供試体ではひび割れ幅 0.2mm 程度で僅かに鋼材表面に腐食が生じ、ひび割れ幅 0.3mm 程度で断面欠損を伴う腐食が生じていた。このため、厳しい塩害環境下では、かぶり 50mm 以下の場合には 0.15mm 程度、かぶり 70mm の場合には 0.2mm 程度にコンクリート表面のひび割れ幅を制御することが必要と考えられる。

なお、上記で提案したコンクリート表面のひび割れ幅の制限値は暴露 5 年後までの結果を用いて検討したものであるため、暴露試験を引き続き継続して検討を加えることが必要である。

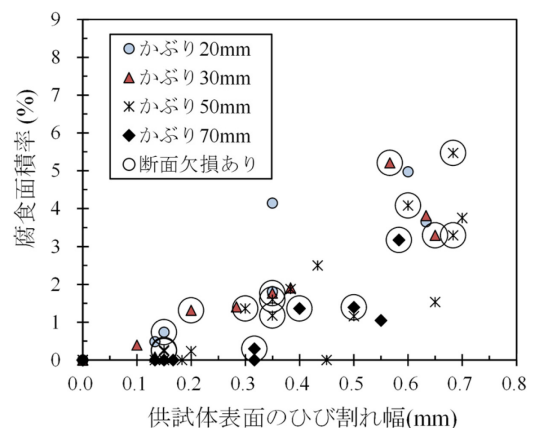
5. まとめ

本研究課題では、つくば、新潟、沖縄に暴露して約 5 年が経過した鉄筋コンクリート供試体の回収と解体調査を行い、ひび割れがコンクリート中の鋼材の腐食速度と塩化物イオンの浸透状況に与える影響について検討した。得られた知見を以下にまとめる。

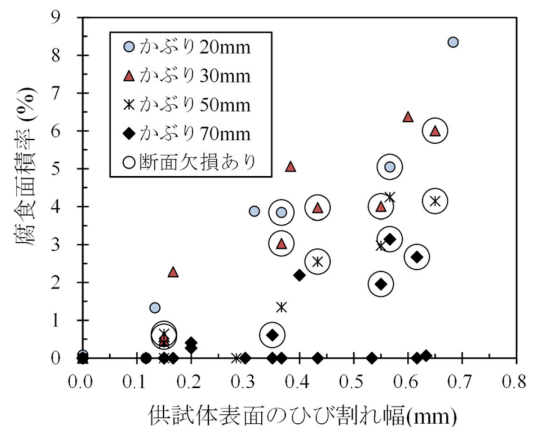
- 1) 鋼材の腐食面積率は、ひび割れ幅が大きく、かぶりが小さい供試体で大きくなる傾向にあった。経年的な腐食面積率の増加は見られなかったが、



(a)つくば



(b)新潟



(c)沖縄

図-11 供試体表面のひび割れ幅と腐食面積率 (各暴露環境でのかぶりごとの比較)

新潟と沖縄の一部の供試体では孔食による断面欠損を伴う腐食が生じており、その割合は暴露期間が長いほど増加した。ただし、暴露 5 年後までに生じた腐食は、鋼材の力学性能を低下させるほどのものではなかった。

- 2) 暴露 1, 2.5, 5 年後の解体調査の結果を踏まえ

て、耐久性の観点から環境条件とかぶりに応じたひび割れ幅の制限値を提案した。塩害環境下でない地域では、鋼材に断面欠損は生じていなかったが、ひび割れ幅を大きくすると鋼材表面の腐食範囲が極端に大きくなる場合があった。このため、かぶり 50mm 以下の場合には 0.35mm 程度、かぶり 70mm の場合には 0.6mm 程度にコンクリート表面のひび割れ幅を制御する必要がある。また、厳しい塩害環境下にある地域では、ひび割れ幅の小さい供試体でも鋼材に断面欠損が生じているものが見られた。このため、かぶり 30~50mm の場合は 0.15mm 程度、かぶり 70mm の場合は 0.2mm 程度にコンクリート表面のひび割れ幅を制御する必要がある。ただし、これらは鋼材の腐食状態のみに着目して提案したものであるため、各種設計規準でひび割れ幅の許容値を設定する際には美観や水密性なども考慮した検討を行うことが不可欠である。

- 3) ひび割れの存在により、塩化物イオンは供試体内部に比較的容易に短期間で浸透する可能性があるが、その浸透量は必ずしもひび割れ幅の大きさに比例しないことが分かった。また、ひび割れを有するコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数を計算する際には、ひび割れに沿ってコンクリート深部に浸透した塩化物イオンの濃度を加味することで、より正確な見掛けの拡散係数の計算結果を得ることができる可能性があることを示した。

なお、本暴露試験は暴露 10 年後までの実施を計画しており、引き続き検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所:コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鋼材腐食に関する暴露試験, 土木研究所資料第 4130 号, 2009
- 2) 中村英佑, 渡辺博志, 古賀裕久, 青山尚:コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食に関する暴露試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.735-740, 2008
- 3) 中村英佑, 渡辺博志, 古賀裕久, 木村嘉富:暴露試験によるコンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1093-1098, 2009
- 4) 独立行政法人土木研究所:コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鋼材腐食に関する暴露試験(暴露 5 年後

の調査結果), 土木研究所資料第 4223 号, 2012

- 5) 気象庁ホームページ:
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>

Study on Effect of Crack in Concrete on Reinforcement Corrosion Ratio

Budget: Grants for Operating Expenses

Research Period: FY2011

Research Team: Concrete and Metallic
Materials Research Team

Author: Hiroshi WATANABE, Hirohisa
KOGA, Eisuke NAKAMRUA

Abstract: A long-term exposure test of reinforced concrete specimens has been conducted in Tsukuba, Niigata, and Okinawa for over five years. The objective of the test is to clarify the effect of crack on durability of concrete structures by using specimens with various crack widths and cover thicknesses. The investigation of the specimens after five-year exposure was conducted in this research project. The test results indicated that the corrosion area of reinforcement increased in specimens with wide crack widths and low cover thicknesses regardless of the test site environment and the test duration. Although corroded reinforcement showed loss in cross section due to pitting corrosion, no sign of the deficit in mechanical properties was found after five-year exposure. Additionally, by reviewing the results obtained in the current exposure test, recommendation values for surface crack width were proposed in terms of the environmental condition and the cover thickness.

Key words: Crack, Reinforcement Corrosion, Chloride Ingress, Exposure Test, Concrete Structure