報告　5年間暴露したコンクリートのひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食

中村　英佑[*1]・古賀　裕久[*2]・鈴木　聡[*3]・渡辺　博志[*4]

要旨：ひび割れが塩化物イオン浸透と鉄筋腐食に与える影響を明らかにするため，ひび割れ幅とかぶりの異なる鉄筋コンクリート供試体をつくば，新潟，沖縄に暴露し，約1，2.5，5年後に解体調査を行った。鉄筋表面の腐食箇所の面積は，ひび割れ幅の大きい供試体とかぶりの小さい供試体で大きくなり，暴露期間にかかわらず同程度であった。しかし，暴露期間を長くすると，新潟と沖縄に暴露した供試体では断面欠損を伴う腐食の生じた鉄筋の数が増加した。また，ひび割れにより塩化物イオンは供試体内部に浸透しやすくなったが，ひび割れ幅の大小と供試体内部の塩化物イオン濃度や見掛けの拡散係数の関係は明確ではなかった。

キーワード：ひび割れ，暴露試験，鉄筋腐食，塩化物イオン濃度，見掛けの拡散係数

1. はじめに

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討することを目的とした暴露試験はこれまでにも数多く行われてきたが，ひび割れと鉄筋腐食が密接な関係にあると指摘するものがある一方で，長期的には両者に明確な関係はないと指摘するものもあり，試験によって異なる結果が得られている[1)]。この原因のひとつとして，コンクリート配合や供試体形状，暴露期間など試験結果に多大な影響を与える実験パラメータが試験ごとに異なっていたことが挙げられる。ひび割れの影響を正確に把握するためには，ひび割れ幅やかぶりなど主要な実験パラメータを網羅した同一形状の供試体を多数製作し，多様な環境条件下で一斉に試験を開始することが望ましいが，そのような事例はこれまで報告されていない。そこで，筆者らは，ひび割れがコンクリート内部の塩化物イオン浸透と鉄筋腐食に与える影響を明らかにするために，ひび割れ幅やかぶりなどを実験パラメータとした268体の鉄筋コンクリート供試体を製作し，つくば，新潟，沖縄に暴露して解体調査を定期的に行っている。

本報告は，暴露5年後の解体調査の結果を報告するとともに，文献2)，3)で報告した暴露1，2.5年後の結果との比較も交えて，ひび割れがコンクリート内部の塩化物イオン浸透と鉄筋腐食に与える影響について検討した結果をまとめたものである。

2. 暴露試験の概要

2.1 供試体の形状

供試体の形状を**図－1**に示す。供試体は，鉄筋(SD295A，D13)を1本配置した200×200×1,000mmの角柱とした。鉄筋の端部の腐食を防ぐため，両端部を塩ビ管で保護し，供試体の両端面をエポキシ樹脂で塗装した。ひび割れは，材齢28日以降に二点曲げ載荷で供試体中央付近に導入した。その後，供試体の移設作業中や暴露試験中のひび割れ幅の変動の有無を確認するため，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

本試験の実験パラメータの一覧を**表－1**，コンクリート配合を**表－2**に示す。本試験では各実験パラメータにつき1体ずつの供試体を製作して暴露した。

暴露環境は，つくば，新潟，沖縄の3種類である。つくばの暴露場は内陸部に位置するが，新潟と沖縄の暴露場は海岸線沿い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水準である。二点曲げ載荷で厳密に所定の幅の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を管理した。このため，ひび割れ導入後に供試体下面の中央部，中央部の両側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となり，複数のひび割れが発生した場合は幅の大きいひび割れで供試体を分類した。なお，「0.3mm前後」と「0.5mm以上」の供試体では約10mm×約10mmの厚さ0.1mmあるいは0.3mmのステンレス片をひび割れ端部に挿入し，試験期間中のひび割れ幅の変動を抑制した。

かぶりは，20，30，50，70mmの4種類である。

暴露期間は，試験結果の経年的な変化を確認できるように1，2.5，5，10年を予定した。本報告では暴露5年後までの解体調査結果を用いて検討を行う。

コンクリートの水セメント比(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。

*1 (独)土木研究所　つくば中央研究所　材料資源研究グループ　基礎材料チーム　研究員　工修　(正会員)
*2 (独)土木研究所　つくば中央研究所　材料資源研究グループ　基礎材料チーム　主任研究員　工修　(正会員)
*3 (独)土木研究所　つくば中央研究所　材料資源研究グループ　基礎材料チーム　交流研究員　工修　(正会員)
*4 (独)土木研究所　つくば中央研究所　材料資源研究グループ　基礎材料チーム　上席研究員　工博　(正会員)

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。各暴露場の最寄りの気象観測所での試験期間中の気温，湿度，月間降水量の平均値も併記する [4]。供試体は架台の上に 120mm 間隔で配置した。また，橋梁上部構造など実際のコン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するため，ひび割れ面が下向きとなるように供試体を固定した。新潟の暴露場は，海水が供試体に直接降りかかることはないが，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，上記の飛来塩分に加えて，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) ひび割れ幅の変動

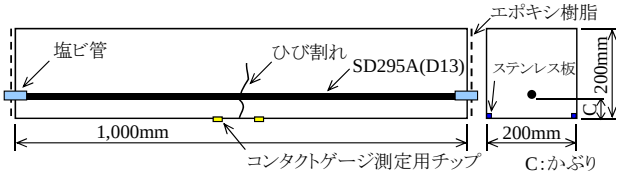
各暴露場でコンタクトゲージによる測定を行い，供試体の移設作業と暴露試験の前後においてひび割れ幅の変動がほとんど生じていなかったことを確認した。

(2) 鉄筋の腐食状態

供試体を回収・解体して鉄筋を取り出した後，鉄筋表面の腐食箇所を目視観察・記録し，この結果から鉄筋の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鉄筋を浸せきして除錆し，鉄筋の断面欠損状態を目視観察した。

(3) 塩化物イオン濃度

ひび割れ部周辺のコンクリート中の塩化物イオン濃度を測定するため，供試体表面のひび割れがコア表面の中央となるように，φ50mm のコアを鉄筋の直近で採取した（**図－2** 参照）。この際，コアの最外縁部が供試体側面から約 40mm の位置となっていたことから，このコアには供試体側面から浸透した塩化物イオンは含まれていなかったと考えられる。測定は，新潟と沖縄の供試体から採取したコアを表面から厚さ 10mm ごとにスライスし，JIS A 1154:2003 に準拠して電位差滴定法で行った。



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)	水セメント比 (%)
つくば	なし	20※1	1	35※2
新潟	0.2mm以下	30	2.5	55
沖縄	0.3mm前後	50	5	
	0.5mm以上	70	10(予定)	

※1: 暴露期間1, 2.5年のみ
※2: つくばはかぶり30mm, 北陸は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使用
最大粗骨材寸法20mm, スランプ8cm, 空気量4.5%

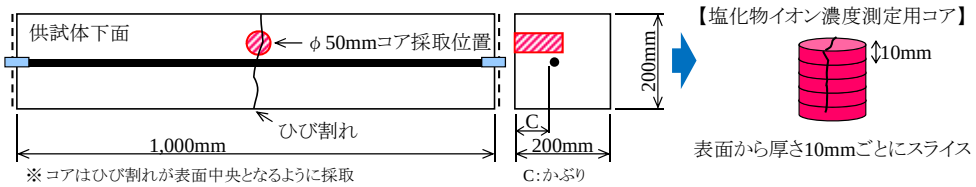
3. 結果および考察

3.1 鉄筋の腐食状態

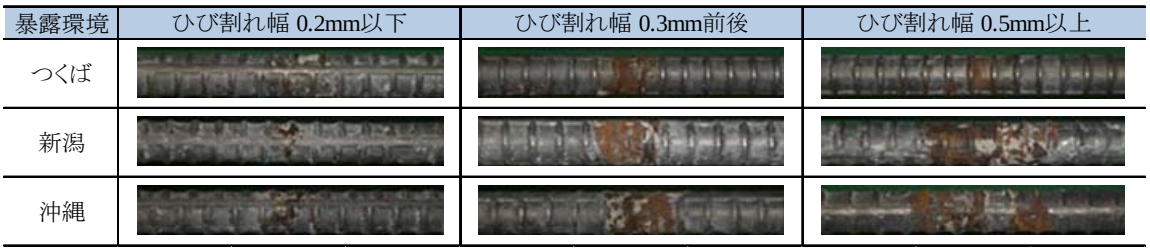
暴露 5 年後に解体した供試体から取り出した鉄筋の腐食状態の例を**写真－2** に示す。いずれの暴露環境においても，鉄筋腐食の生じていた供試体ではひび割れと腐食の位置が一致し，ひび割れ幅の大きい供試体で腐食の生

(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　暴露 5 年後の供試体の状況　※( )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　暴露 5 年後の鉄筋の腐食状態の例　※W/C55%のかぶり 50mm の供試体

じた範囲が広くなる傾向にあった。一方，ひび割れを導入していない供試体では，鉄筋表面に目視で確認できる腐食は生じていなかった。

3.2 鉄筋の腐食面積率

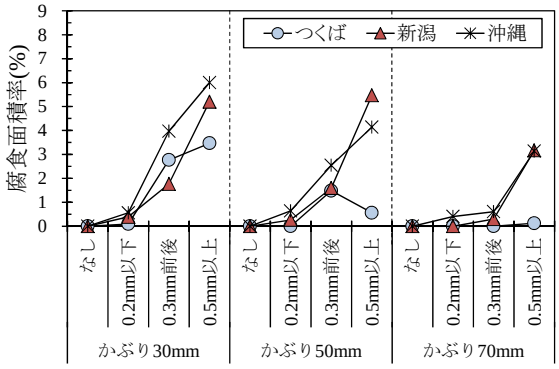
鉄筋表面に生じた腐食の範囲を比較するため，ひび割れ両側 200mm の鉄筋の表面積に占める腐食箇所の割合を腐食面積率として算出した。ここでは，複数のひび割れが発生した供試体では最も幅の大きいひび割れ近傍の腐食のみを考慮し，腐食箇所の面積は目視観察で作成した鉄筋の腐食状態のスケッチ図から積算して求めた。

暴露 5 年後に解体した供試体から取り出した鉄筋の腐食面積率を**図－3** に示す。腐食面積率は，ひび割れ幅の大きい供試体とかぶりの小さい供試体で大きくなる傾向にあった。また，腐食面積率は，ひび割れ幅 0.2mm 以下の供試体では暴露環境にかかわらず小さくなったが，ひび割れ幅 0.5mm 以上の供試体では新潟と沖縄で大きくなった。暴露環境の違いによる影響は，ひび割れ幅の大きい供試体で明確に現れると考えられる。

次に，腐食面積の経年変化を把握するため，暴露 1，2.5，5 年後の鉄筋の腐食面積率を**図－4** に示す。ここでも，腐食面積率は，ひび割れ幅の大きい供試体とかぶりの小さい供試体で大きく，つくばよりも新潟と沖縄に暴露した供試体で大きくなったことを確認できる。しかし，腐食面積率は，暴露期間を長くしても大幅には増加しておらず，これまでの解体調査では概ね同程度に留まった。また，W/C35%の供試体の腐食面積率も W/C55%の供試体と概ね同程度であった。すなわち，鉄筋表面の腐食は，暴露開始から 1 年以内の短期間で発生したものであり，その後は鉄筋の表面方向にはほとんど進展しなかったと考えられる。今回暴露した供試体では，曲げひび割れ導入時にひび割れ近傍でコンクリートと鉄筋の付着が失われる区間が生じ，特にひび割れ幅の大きい供試体やかぶりの小さい供試体ではこの付着喪失区間が長くなったと考えられる。暴露 5 年後まで腐食面積率が大幅に増加しなかった原因は，塩化物イオンや水，酸素などの侵入が付着喪失区間内に留まり，鉄筋表面の腐食もこの区間内のみで生じたためではないかと推察される。

3.3 鉄筋の断面欠損状態

除錆した鉄筋の断面欠損状態の例を**写真－3** に示す。



図－3　暴露 5 年後の鉄筋の腐食面積率

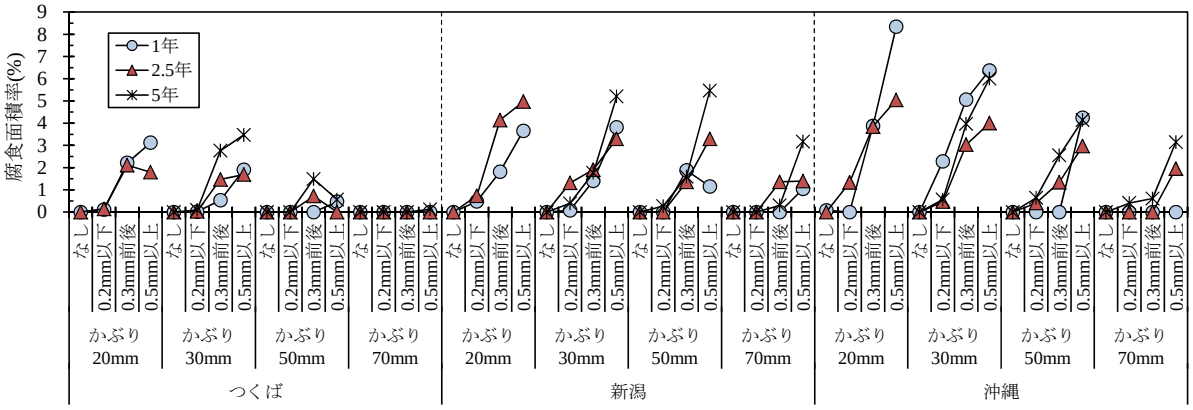
暴露 5 年後に解体した供試体から取り出した鉄筋には，断面欠損の生じたものが含まれていた。

鉄筋の断面欠損状態の経年変化を把握するため，暴露 1，2.5，5 年後の除錆した鉄筋の断面欠損状態の目視観察結果を**表－3** に示す。ここでは，定性的な評価となるが，目視観察により，除錆した鉄筋を，(1)断面欠損を伴う腐食(**写真－3**)，(2)表面のみの軽微な腐食(断面欠損なし)，(3)腐食なし，の 3 種類に分類した。暴露 1 年後の供試体では断面欠損を伴う腐食の生じた鉄筋は存在せず，暴露 2.5，5 年後の新潟と沖縄の供試体では断面欠損を伴う腐食の生じた鉄筋が多数確認された。このため，暴露 1 年後から暴露 5 年後までの間，鉄筋の表面方向には腐食はほとんど進展しなかったものの，新潟と沖縄の塩害環境下に暴露した供試体では鉄筋の内部方向に腐食が進展して断面欠損が生じたと考えられる。

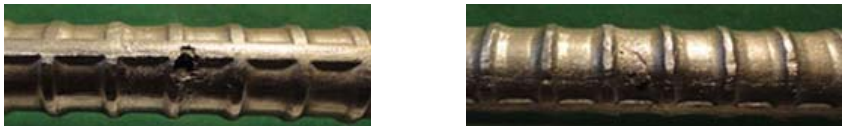
なお，上記に加えて，鉄筋の質量減少率や引張強度の測定も行ったが，暴露 5 年後までの結果では腐食量による差は明確ではなかった。

3.4 ひび割れ幅と暴露環境，かぶりが腐食に与える影響

供試体表面のひび割れ幅と鉄筋の腐食状態の関係を**図－5～7** 示す。ここでは，暴露 1，2.5，5 年後の W/C35%，55%の供試体の解体調査で得られた結果を暴露環境ごとに示し，断面欠損の生じていた鉄筋(**表－3** で「断面欠損を伴う腐食(**写真－3**)」に分類された鉄筋)に○印を追記した。なお，供試体表面のひび割れ幅はひび割れ導入後に供試体表面の 3 点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であり，コンタクトゲージの測定により移設作業と暴露試験の前後でひび割れ幅の変動がほとんど生じていなかったことを確認した。



図－4　暴露 1，2.5，5 年後の鉄筋の腐食面積率　※W/C55%の供試体，かぶり 20mm は暴露 1，2.5 年後のみ



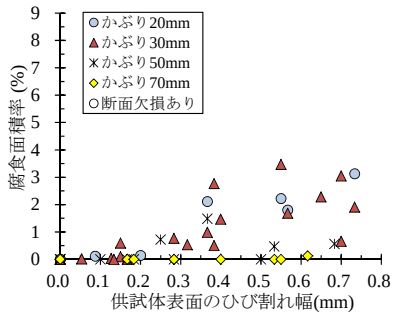
(a)孔食による断面欠損を伴う腐食　　(b)比較的軽微な断面欠損を伴う腐食

写真－3　除錆した鉄筋の断面欠損状態の例

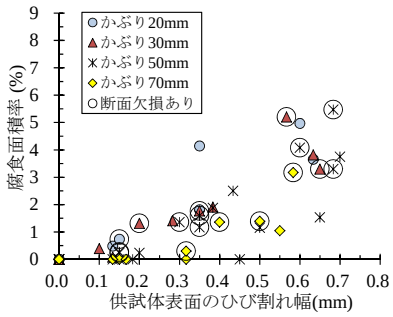
表－3　除錆した鉄筋の断面欠損状態の目視観察結果　※W/C55%の供試体

かぶり		かぶり30mm				かぶり50mm				かぶり70mm			
ひび割れ幅		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	1年	×	▲	▲	▲	×	×	×	▲	×	×	×	×
	2.5年	×	▲	▲	▲	×	×	▲	×	×	×	×	×
	5年	×	▲	▲	▲	×	×	▲	▲	×	×	×	▲
新潟	1年	×	▲	▲	▲	×	×	▲	▲	×	×	×	▲
	2.5年	×	●	▲	●	×	×	●	●	×	×	●	●
	5年	×	▲	●	●	×	●	●	●	×	×	●	●
沖縄	1年	×	▲	▲	▲	×	×	×	▲	×	×	×	×
	2.5年	×	▲	●	●	×	▲	▲	▲	×	×	×	●
	5年	×	●	●	●	×	●	●	●	×	▲	●	●

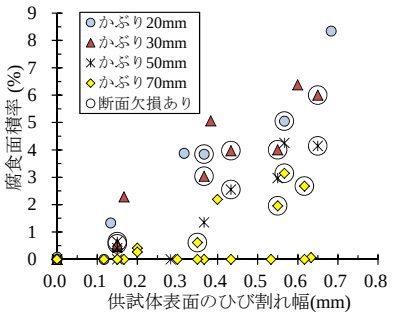
※○断面欠損を伴う腐食，▲：表面のみの軽微な腐食（断面欠損なし），×：腐食なし



図－5　ひび割れ幅と鉄筋腐食：つくば



図－6　ひび割れ幅と鉄筋腐食：新潟

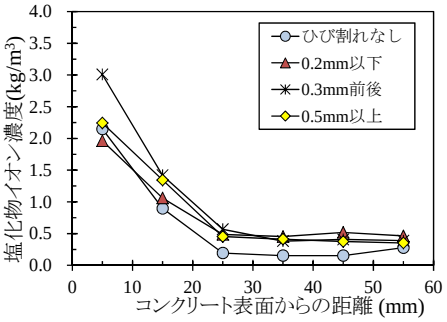


図－7　ひび割れ幅と鉄筋腐食：沖縄

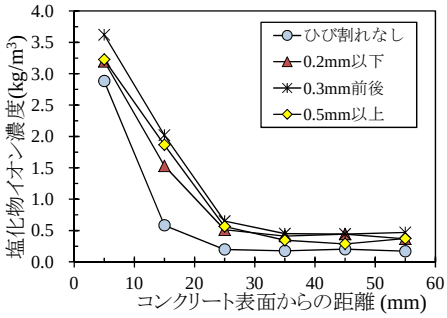
図－5～7 によると，鉄筋の腐食状態には，供試体表面のひび割れ幅だけでなく，暴露環境とかぶりも影響を与えていたことが読み取れる。暴露環境の影響に着目すると，新潟と沖縄の供試体では，つくばの供試体よりも腐食面積率が大きくなり，断面欠損を伴う腐食が生じた鉄筋が多数確認された。特に塩害環境下では，ひび割れの存在により，鉄筋腐食が進展しやすくなることが窺える。一方，かぶりの影響に着目すると，暴露環境の違いにかかわらず，かぶりの大きい供試体ほど腐食面積率が小さくなったことがわかる。つくばのかぶり 70mm の供試体ではひび割れ幅 0.6mm 程度でもほとんど腐食は生じておらず，新潟と沖縄のかぶり 70mm の供試体ではひび割れ幅 0.2mm 程度で鉄筋表面に腐食が僅かに生じ，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。ところが，沖縄と新潟のかぶり 50mm 以下の供試体では，ひび割れ幅 0.15mm 程度でも断面欠損を伴う腐食の生じた鉄筋があり，腐食箇所の範囲が比較的狭い場合にも断面欠損が生じていた。このため，コンクリート表面のひび割れ幅の許容値を検討する際には環境条件とかぶりの影響を考慮することが重要であると考えられる。

3.5 塩化物イオンの浸透状況

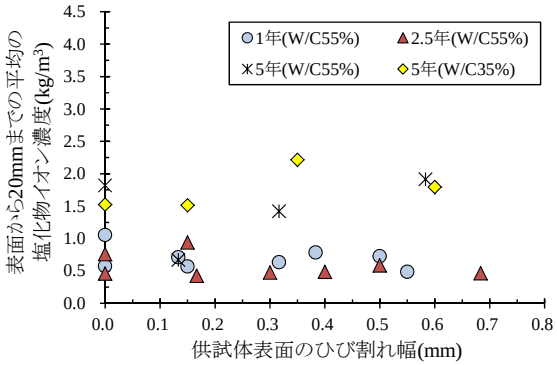
暴露 5 年後に解体した新潟と沖縄の W/C35%の供試体



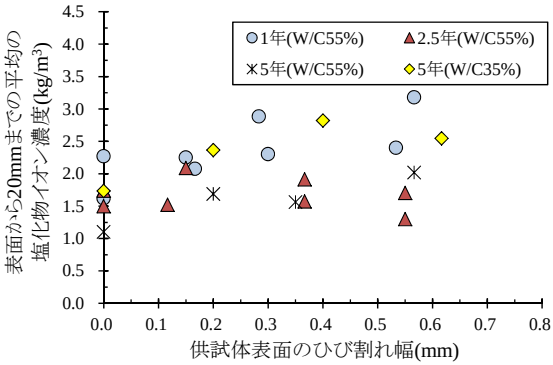
図－8　塩化物イオン濃度：新潟 W/C35%



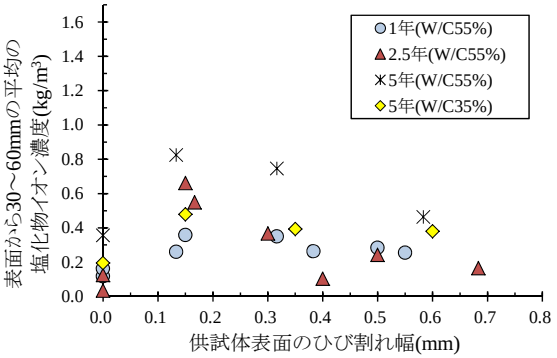
図－9　塩化物イオン濃度：沖縄 W/C35%



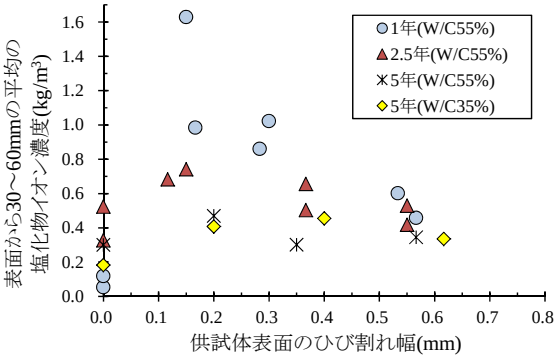
図－10　供試体表面付近の塩化物イオン濃度：新潟



図－11　供試体表面付近の塩化物イオン濃度：沖縄



図－12　供試体深部の塩化物イオン濃度：新潟



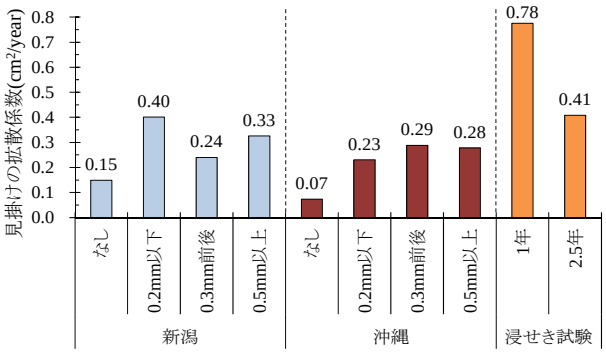
図－13　供試体深部の塩化物イオン濃度：沖縄

での塩化物イオン濃度の測定結果を**図－8，9** に示す。若干のばらつきはあるが，塩化物イオン濃度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高く，ひび割れの存在により塩化物イオンが供試体の内部に浸透しやすくなったと考えられる。ただし，ひび割れ幅の大きい供試体ほど塩化物イオン濃度が高くなるような傾向はなく，ひび割れ幅の大小と塩化物イオン濃度の関係は必ずしも明確ではない。

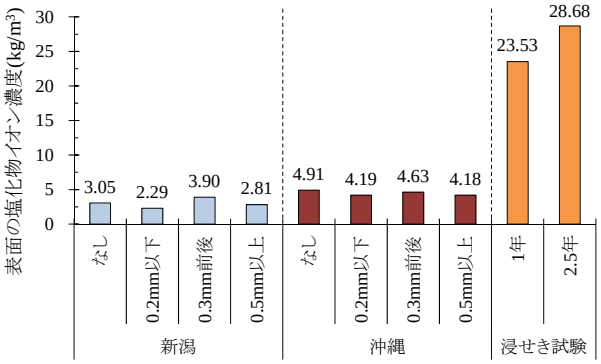
次に，塩化物イオン浸透量とひび割れの関係を詳細に検討するため，供試体の表面付近(表面から 20mm までの平均)と深部(表面から 30～60mm の平均)における塩化物イオン濃度と供試体表面のひび割れ幅の関係を**図－10～13** に示す。新潟と沖縄の結果を比較すると，新潟よりも沖縄で表面付近と深部の両方の塩化物イオン濃度が高くなったことがわかる。新潟よりも沖縄の暴露場で飛来塩分量が多かったためではないかと考えられる。経年的には，若干のばらつきはあるが，新潟では暴露期間を長くすると塩化物イオン濃度が高くなる傾向にあったが，沖縄では暴露期間の影響は必ずしも明確ではなかった。また，特に深部の塩化物イオン濃度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高くなり，この傾向は暴露 1 年後の比較的短期の暴露期間の解体調査の結果でも確認できる。すなわち，塩化物イオンはひび割れの存在により短期間で供試体の深部にまで浸透する可能性があると考えられる。ただし，ひび割れ幅と深部の塩化物イオン濃度は比例関係にはなく，暴露環境や暴露期間にかかわらず，ひび割れ幅 0.2mm 前後の供試体で深部の塩化物イオン濃度が高くなる傾向にあった。この傾向は，暴露 1，2.5 年の解体調査時にひび割れ部から採取したコア（φ75mm）の EPMA 分析でも確認された。

3.6 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

ひび割れ幅と暴露環境の異なる供試体の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を比較するため，式(1)を用いて暴露 5 年後の W/C35%の供試体での見掛けの拡散係数を計算



図－14　塩化物イオンの見掛けの拡散係数



図－15　コンクリート表面の塩化物イオン濃度

した。ただし，ここではφ50mm のコアで測定した塩化物イオン濃度を使用しており，厳密にはこのコアにはひび割れ近傍以外の試料も含まれるため，計算した見掛けの拡散係数は供試体の寸法の影響を受ける可能性がある。

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

x：表面からの距離(cm)，t：暴露期間(year)，$C(x,\ t)$：距離 x と暴露期間 t での塩化物イオン濃度(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：初期含有塩化物イオン濃度(0.15 kg/m^3)，D_{ap}：塩化物イオンの見掛けの拡散係数(cm^2/year)，erf：誤差関数とする。

見掛けの拡散係数とコンクリート表面の塩化物イオン濃度の計算結果を**図－14**，**15** に示す。ここでは，暴露試験用の角柱供試体と同時に製作した円柱供試体(φ100×200mm)の浸せき試験(塩水濃度：10%，浸せき期間：1，2.5 年)から得られた結果も参考値として示す。なお，W/C55%の供試体では，中性化により塩化物イオンが内部へ移動・濃縮して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，ここには記載しなかった。

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ったが，ひび割れ幅と見掛けの拡散係数の大小は比例関係にはなく，ひび割れ幅の影響は明確ではない。また，新潟と沖縄の結果を比較すると，ひび割れ幅が同程度の供試体では，見掛けの拡散係数は若干のばらつきがあるが概ね同程度であり，暴露環境の違いが見掛けの拡散係数に与える影響は比較的小さいと考えられる。一方，コンクリート表面の塩化物イオン濃度の計算値は沖縄の供試体で大きく，この傾向は**図-8**，**9** の塩化物イオン濃度の測定結果でも確認できる。ただし，先述したように，ひび割れの存在により塩化物イオンは供試体の深部に比較的短期間で容易に浸透する可能性が高く，式(1)をそのままの形で適用するだけではひび割れを有するコンクリートの塩化物イオンの浸透状況を適切に推定できないことが懸念される。また，上記の結果は各実験パラメータにつき 1 体ずつの供試体の解体調査結果であることも踏まえると，ひび割れを有するコンクリートでの見掛けの拡散係数については引き続き試験を継続して検討を行う必要があると考えられる。

4. 結論

ひび割れを導入した鉄筋コンクリート供試体の暴露 5 年後までの調査結果をもとに，ひび割れがコンクリート内部の塩化物イオン浸透と鉄筋腐食に与える影響について検討した。本報告の範囲内で得られた知見をまとめる。

1) 鉄筋表面の腐食箇所の面積は，ひび割れ幅の大きい供試体とかぶりの小さい供試体で大きく，暴露期間にかかわらず同程度であった。しかし，新潟と沖縄に暴露した供試体では，暴露期間を長くすると断面欠損を伴う腐食の生じた鉄筋の数が増加した。
2) ひび割れの存在により塩化物イオンは供試体内部に浸透しやすくなる傾向にあったが，浸透量や拡散係数はひび割れ幅の大小に比例していなかった。

謝辞：本暴露試験を実施するあたり，国土交通省北陸地方整備局，同高田河川国道事務所直江津国道維持出張所，内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所の関係各位にご協力を賜りました。記して謝意を表します。

参考文献

1) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針-2009-，日本コンクリート工学協会，pp.82-84，2009.3
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.735-740，2008.7
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.1093-1098，2009.7
4) 気象庁 HP：http://www.jma.go.jp/jma/index.html