

論文 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

中村 英佑^{*1}・渡辺 博志^{*2}・古賀 裕久^{*3}・青山 尚^{*4}

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、曲げひび割れを導入した RC 供試体の暴露試験をつくば、新潟、沖縄で開始した。試験開始から約 12 ヶ月後に解体調査を行い、ひび割れ部からの塩分浸透と鉄筋腐食について検討した。塩化物イオンは、ひび割れの存在によりコンクリート内部へ容易に浸透する傾向にあったが、ひび割れ幅の大小とコンクリート内部の塩化物イオン濃度には明確な関係はみられなかった。また、鉄筋の腐食面積率は、ひび割れ部から浸透した塩化物イオンの濃度の大小に関わらず、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体で大きくなる傾向にあった。

キーワード: ひび割れ, 塩化物イオン, 鉄筋腐食, 塩害, 暴露試験

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入を容易にするため、耐久性上有害とならない範囲に制御する必要がある。ところが、既往研究には、ひび割れ幅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、ひび割れと鉄筋腐食の関係は必ずしも明らかにされていない^{1), 2)}。

既往研究において異なる見解が得られた原因は、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影響を与える可能性の高い試験条件がそれぞれ異なっていたためと考えられる。従って、ひび割れと鉄筋腐食の関係を明確にするためには、ひび割れ幅やかぶりなど鉄筋腐食と関連性の強い実験パラメータを網羅した供試体を用い、比較的長期的な暴露試験を多様な環境条件下で一斉に実施することが不可欠と考えられる。

そこで、筆者らは、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、曲げひび割れを導入した RC 供試体の暴露試験をつくば、新潟、沖縄の 3 ヶ所で開始した。本論文は、暴露開始から約 12 ヶ月後に供試体の回収、解体調査を実施し、ひび割れ部からの塩分浸透と鉄筋腐食の関係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

暴露試験に用いた供試体の形状を図-1 に示す。供試体は、長さ 1m の SD295A(D13)を 1 本有する 200×200×1,000mm の角柱とした。鉄筋端部の腐食を防ぐため、鉄筋の両端部を塩ビパイプで覆い、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載荷で供試体中央付近に導入した。また、ひび割れの両側にコンタクトゲージ測定用チップを設置し、移設作業前後および暴露試験中のひび割れ幅の変動の有無を確認できるようにした。

2.2 実験パラメータ

今回の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。つくばの暴露場は塩害環境下にはないが、新潟と沖縄の暴露場は比較的厳しい塩害環境下にあると考えられる。

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。一定の範囲内でひび割れ幅を管理した理由は、二点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技術的に困難であったためである。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。ただし、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。ひび割れ幅の測定値は、「0.2mm 以下」で 0.04~0.2mm(3 点平均で 0.05~0.2mm)、「0.3mm 前後」で 0.2~0.5mm(同 0.25~0.45mm)、「0.5mm 以上」で 0.5~0.8mm(同 0.5~0.77mm)の範囲にあった。「0.3mm 前後」と「0.5mm 以上」の供試体には、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、エポキシ樹脂で覆って固定した。

かぶりは 20, 30, 50, 70mm とし、暴露期間は、試験結果の経時的な変化を把握できるように、1, 2.5, 5, 10 年を予定した。コンクリートの水セメント比は 55%とした。コンクリート配合を表-2 に示す。

*1 (独) 土木研究所 つくば中央研究所 技術推進本部 研究員 工修 (正会員)
 *2 (独) 土木研究所 つくば中央研究所 技術推進本部 主席研究員 工博 (正会員)
 *3 (独) 土木研究所 つくば中央研究所 技術推進本部 主任研究員 工修 (正会員)
 *4 (独) 土木研究所 つくば中央研究所 技術推進本部 交流研究員 (正会員)

2.3 供試体の暴露状況

供試体の暴露状況を写真-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³⁾。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、主に海水の飛沫により飛来塩分が供給される環境であったが、沖縄の暴露場は、天候によっては海水が供試体に直接降りかかる環境であった。架台の高さは、つくばと新潟で約1m、沖縄で約0.5mとした。

2.4 測定および調査の概要

(1) 暴露試験開始時の測定

ひび割れ導入後、速やかに供試体を暴露場に移設した。移設前後のコンタクトゲージの測定により、移設作業によるひび割れ幅の変動はほとんど無く、ひび割れが所定のひび割れ幅の範囲内にあることを確認した。

移設直後、各暴露場で自然電位を測定した。測定は、供試体表面に約30分間散水した後、銅/硫酸銅電極を用いて行った。測定点は、図-2の鉄筋直上のひび割れ部もしくは供試体中央と、この両側50, 100, 200, 300mmの計9点とした。測定値の温度補正は行っていない。

(2) 回収時の測定

暴露開始から約12ヶ月後に、暴露期間1年を予定していた供試体を回収した。回収時にも各暴露場でコンタクトゲージの測定を行い、ひび割れ幅の変動がほとんど無いことを再確認した。また、暴露試験開始時と同様の方法で、各暴露場において自然電位を測定した。

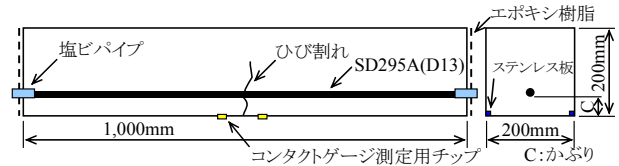


図-1 供試体の形状

表-1 実験パラメータ

暴露地点	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	55
新潟	0.2mm以下	30	2.5	
沖縄	0.3mm前後 0.5mm以上	50 70	5 10	

※: 暴露期間1, 2.5年のみ

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
55	44.8	160	294	820	1044	3.12

普通ポルトランドセメント
最大骨材寸法20mm, スランプ8cm, 空気量4.5%

(3) 解体調査

回収後、供試体を解体し、鉄筋を取り出して腐食状態を目視観察・記録し、この結果から腐食面積率を求めた。また、ひび割れ部の塩化物イオン濃度とその分布状況を把握するため、塩化物イオン濃度の測定とEPMA法による面分析を行った。このため、図-2に示すように、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φ50mmとφ75mmのコアを鉄筋の直近で採取した。



(a)つくば (15.3℃, 76.9%, 96.6mm)

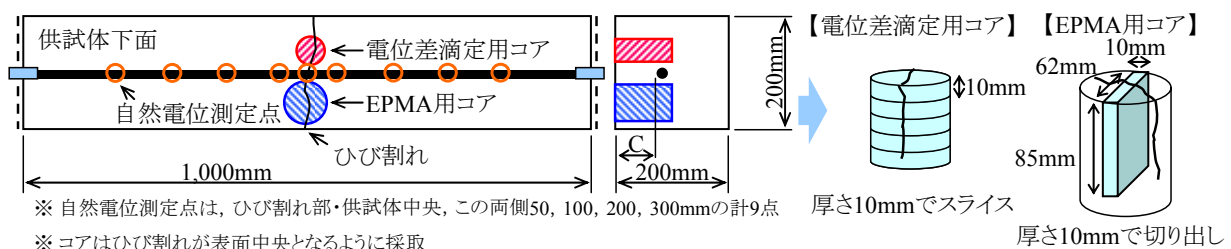


(b)新潟 (14.8℃, 74.9%, 227.4mm)



(c)沖縄 (23.2℃, 74.7%, 220.7mm)

写真-1 供試体の暴露状況 ※()内は気温, 湿度, 月間降水量の平均値



※ 自然電位測定点は、ひび割れ部・供試体中央、この両側50, 100, 200, 300mmの計9点
※ コアはひび割れが表面中央となるように採取

図-2 自然電位測定点とコア採取位置, 試料製作方法

塩化物イオン濃度の測定は、新潟と沖縄に暴露した全ての供試体からφ50mmのコアを採取して厚さ10mmでスライスし(図-2)、JIS A 1154に準拠して電位差滴定法により行った。また、面分析には、新潟と沖縄のかぶり70mmの供試体から採取したφ75mmのコアを用いた。φ75mmのコアは約100mmの深さまで採取し、ひび割れ部が中央となるように厚さ10mmの版状で供試体を切り出した(図-2)。なお、面分析は、62mm×85mmの範囲を対象として、JSCE G574-2005に準拠して行った。

3. 暴露試験の結果および考察

3.1 自然電位

暴露試験前後の自然電位の分布を比較するため、沖縄のかぶり50mmの「ひび割れなし」と「0.5mm以上」の供試体の暴露開始時と回収時の自然電位を図-3に示す。暴露開始時の自然電位は、ひび割れの有無に関わらず-200mV:CSE程度であったが、回収時の自然電位は、「0.5mm以上」の供試体で-320mV:CSE程度の卑な値になった。これは、約12ヶ月間の暴露試験により、この供試体の鉄筋が腐食しやすい環境に置かれたことを反映したためと考えられる。また、自然電位の分布に着目すると、「0.5mm以上」の供試体では、ひび割れ周辺のみではなく部材全体で自然電位が卑になっていた。後に示す鉄筋の腐食状態の目視観察結果では、腐食はひび割れ部周辺のごく一部のみで生じていた。腐食の生じていない部材端部の鉄筋でも自然電位が卑になった原因は、ひび割れ周辺の狭い範囲の鉄筋が腐食しやすい環境に置かれたことによりマクロセル腐食が形成され、分極の影響を受けて腐食しやすい環境にはない部材端部でも卑な自然電位が測定されたためと考えられる。

次に、基本シリーズ供試体の暴露開始時の自然電位を図-4に、回収時の自然電位を図-5に暴露地点ごとに示す。ここでは、ひび割れ部もしくは供試体中央と、この両側50mmの計3点の自然電位を平均した。これによると、暴露開始時の自然電位は、かぶり20mmの「0.5mm以上」の供試体で若干卑となったが、これ以外の供試体では概ね同程度であった。しかし、回収時の自然電位は、供試体ごとに異なり、若干のばらつきはあるものの、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体で卑になる傾向にあった。これは、約12ヶ月間の暴露の後に、ひび割れ幅やかぶりの違いにより、鉄筋の置かれた腐食環境の変化に差が生じたことを反映したためと考えられる。

3.2 鉄筋の腐食面積率

回収後の供試体を解体し、取り出した鉄筋の腐食状態を目視観察した。鉄筋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は一致し、ひび割れを導入していない供試体で腐食は生じていなかった。いずれも孔食に

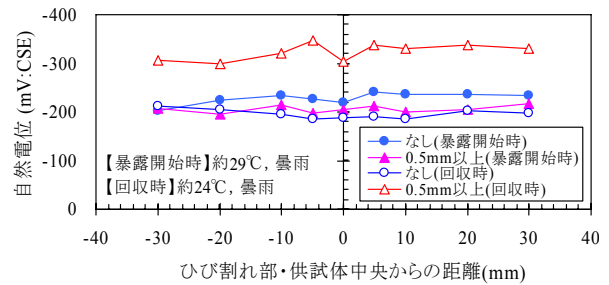


図-3 暴露開始時・回収時の自然電位分布の例

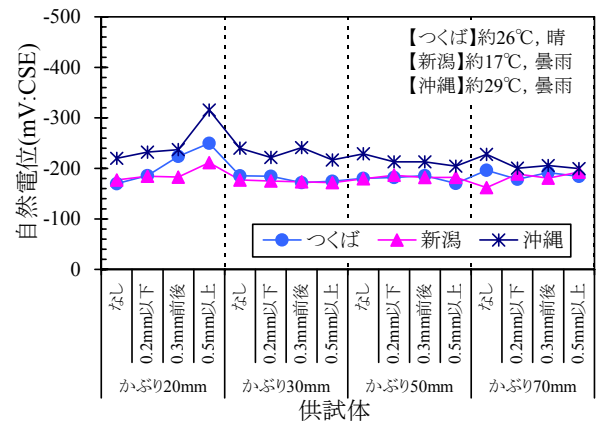


図-4 暴露開始時の自然電位

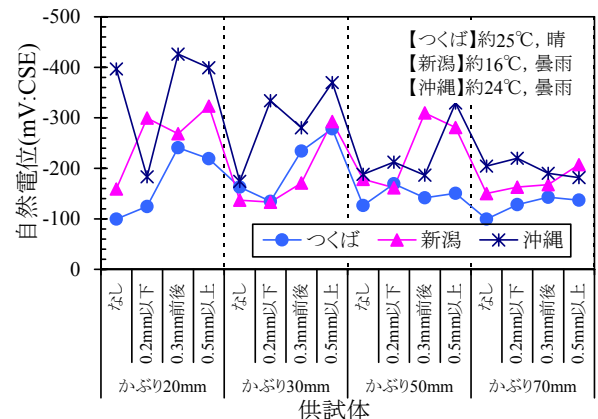
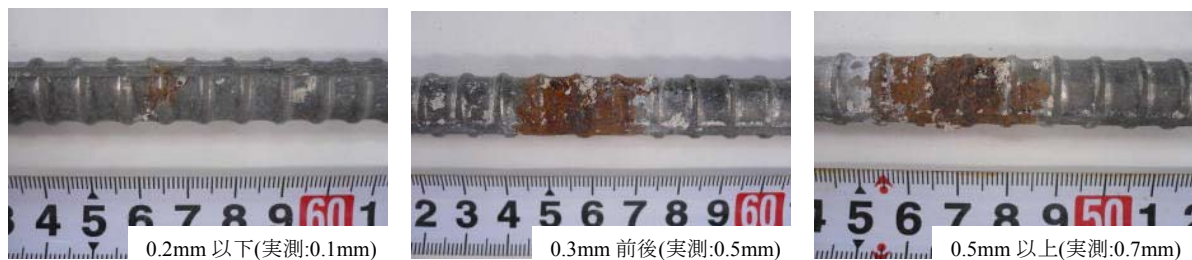


図-5 回収時の自然電位

よる断面欠損のような激しい腐食は生じておらず鉄筋表面の軽微な腐食であったが、写真-2に示すように腐食の程度はそれぞれ異なっていた。これらにつくばのかぶり20mmの供試体の鉄筋の腐食状態であるが、ひび割れ幅が大きいほど腐食区間長も大きい。ここでは簡易に各供試体の腐食の程度を相対比較するため、ひび割れ部から200mmの鉄筋の表面積に占める腐食部分の割合を腐食面積率として算定した。ただし、この対象区間以外で腐食は生じておらず、複数のひび割れが生じている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た。なお、腐食部分の面積は、目視観察時に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。

図-6に、各供試体の腐食面積率を示す。腐食面積率



(a)腐食区間長 10mm 以下 (b)腐食区間長 10～30mm (c)腐食区間長 30mm 以上
 写真-2 鉄筋の腐食状態 ※つくばのかぶり 20mm の供試体

は、かぶりが小さくひび割れ幅が大きい供試体で大きくなる傾向にあった。これは、図-5 の回収時の自然電位が示した傾向と概ね同様のものである。沖縄の腐食面積率は最も大きく、つくばは塩害環境下にはないため腐食面積率は比較的小さいが、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体では新潟と同程度の腐食が生じていた。暴露地点やひび割れ幅に加えて、かぶりの大きさによっても、腐食の程度は大きく異なることが窺える。

3.3 塩化物イオン濃度

図-7 に新潟、図-8 に沖縄のかぶり 70mm の供試体の塩化物イオン濃度の測定結果を示す。新潟では、供試体表層の塩化物イオン濃度が内部よりもわずかに大きくなった。一方、沖縄では供試体表面から 20mm の深さまで 2~2.5kg/m³ 程度の塩化物イオンが浸透しており、新潟より厳しい塩害環境にあったことがわかる。

沖縄の測定結果で、表面から 30mm よりも深い部分に着目すると、ひび割れのない供試体よりもひび割れのある供試体で塩化物イオン濃度が大きくなった。しかし、ひび割れ幅の違いに着目すると、表面から 30mm よりも深い部分では、「0.5mm 以上」の供試体の塩化物イオン濃度は必ずしも「0.2mm 以下」や「0.3mm 前後」の供試体よりも大きくない。すなわち、ひび割れの存在により、塩化物イオンはコンクリート内部へ比較的容易に浸透するようになると考えられるが、内部の塩化物イオン濃度の大小は必ずしもひび割れ幅の大小とは一致していない。同様の傾向は、かぶり 20, 30, 50mm の供試体でも確認された。

次に、各供試体の鉄筋位置の塩化物イオン濃度を図-9 に示す。今回の塩化物イオン濃度の測定では、コアを 10mm ごとにスライスして測定を行ったため、鉄筋位置から 10mm 深い位置までの塩化物イオン濃度を「鉄筋位置の塩化物イオン濃度」と定義した(例えば、かぶり 70mm の供試体では、表面から 70~80mm におけるφ50mm のコアの塩化物イオン濃度)。鉄筋位置の塩化物イオン濃度は、沖縄ではかぶりの小さい供試体で大きくなっているが、新潟ではかぶりの大きさによる違いはほとんどみられない。これは、図-7 に示したように、新潟で

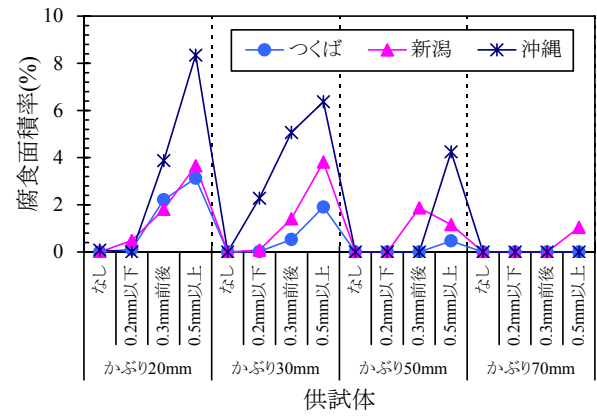


図-6 鉄筋の腐食面積率

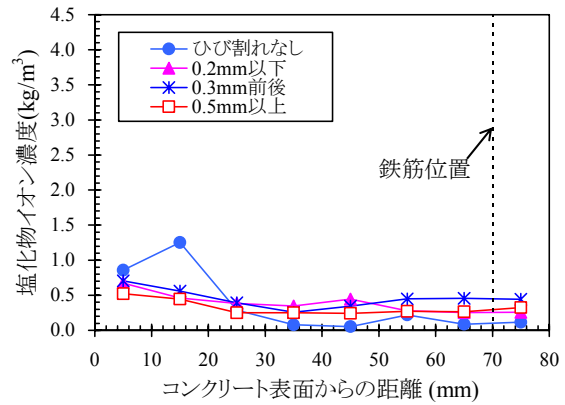


図-7 塩化物イオン濃度の分布(新潟かぶり 70mm)

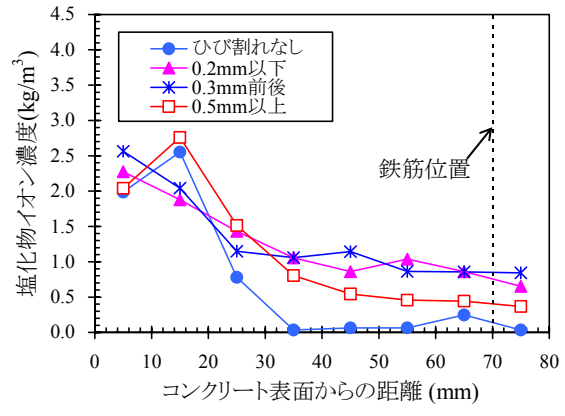


図-8 塩化物イオン濃度の分布(沖縄かぶり 70mm)

はコンクリート内部へ浸透した塩化物イオン自体がそれほど多くなかったためと考えられる。また、沖縄の結果に着目すると、図-8と同様に、必ずしもひび割れ幅の大きい供試体で鉄筋位置の塩化物イオン濃度が大きくなるといった傾向は確認できない。「0.2mm 以下」や「0.3mm 前後」の方が、「0.5mm 以上」よりも鉄筋位置の塩化物イオン濃度が大きくなる場合が多かった。

3.4 面分析による塩化物イオン濃度の分布

図-10に、EPMA法による面分析から得られた沖縄のかぶり70mmの供試体の塩化物イオン濃度の分布を示す。「ひび割れなし」と「0.5mm 以上」ではひび割れに沿った塩化物イオンの浸透を確認することはできないが、「0.2mm 以下」と「0.3mm 前後」ではひび割れに沿った塩化物イオンの浸透がみられる。新潟でも、コンクリート内部へ浸透した塩化物イオンの濃度自体が小さいため沖縄ほど明確ではないが、「0.2mm 以下」と「0.3mm 前後」でひび割れに沿った塩化物イオンの浸透がみられた。今回の試験では塩化物イオン濃度の測定と面分析に異なるコアを用いたため、両者の結果が完全に一致しないことも起こり得る。しかし、「0.2mm 以下」と「0.3mm 前後」でひび割れに沿った塩化物イオンの浸透が大きくなる傾向は両者で共通する傾向であり、ひび割れ幅の大小とコンクリート内部の塩化物イオン濃度には必ずしも明確な関係がないことを示唆するものと考えられる。

3.5 ひび割れ幅と塩分浸透性、鉄筋腐食の関係

一般に、ひび割れ部からの塩化物イオンの浸透を防止するために、ひび割れ幅は一定の許容値以下に制御することが求められている。しかし、今回の試験結果では、ひび割れ幅が大きいほど浸透する塩化物イオンの濃度も大きくなるといった現象はみられなかった。この原因は、今回の暴露試験ではひび割れ面が下面となるように供試体を設置したため、ひび割れ幅の比較的小さい供試体(「0.2mm 以下」と「0.3mm 前後」)では毛細管現象により水とともに塩化物イオンがコンクリート内部へ浸透したが、ひび割れ幅が比較的大きい供試体(「0.5mm 以上」)ではこのような現象がひび割れ幅の小さい供試体よりも起こりにくかったためではないかと推察される。

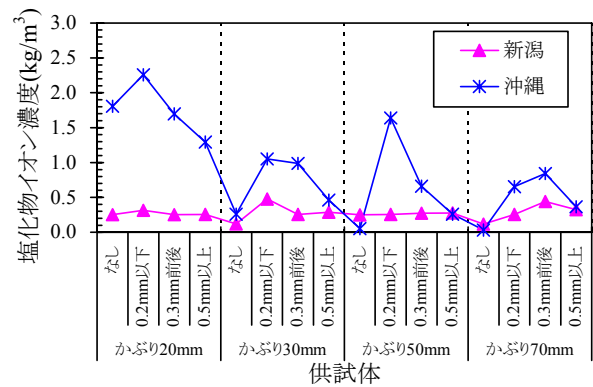


図-9 鉄筋位置の塩化物イオン濃度

図-6に示したように、つくばは塩害環境下にはないが、かぶりの小さい供試体では新潟と同程度の腐食が生じていた。また、図-7, 9によれば、新潟の供試体のひび割れ部から浸透した塩化物イオンは必ずしも多くない。すなわち、つくばと新潟の供試体で生じた腐食は、必ずしもひび割れ部から浸透した塩化物イオンの濃度と明確な関係はなく、ひび割れ部の中性化や、水や酸素との接触によって生じたものである可能性が高いと推察される。このため、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体では、塩化物イオンの浸透の有無に関わらず、鉄筋腐食が生じる可能性が高いと考えられる。

3.6 鉄筋位置のひび割れ幅と腐食面積率

上記では、コンクリート表面のひび割れ幅と各調査結果の関係を考察してきた。今回のようにかぶりが異なる供試体を用いた場合には、コンクリート表面のひび割れ幅が同程度であっても、鉄筋位置のひび割れ幅や曲げ荷による付着切れの範囲は異なる可能性が高い。ひび割れと鉄筋腐食の関係を厳密に検討するためには、これらと腐食の関係も考慮する必要がある。しかしながら、今回用いた供試体でコンクリート内部の鉄筋位置のひび割れ幅や付着切れの範囲を正確に測定することは事実上困難である。そこで、下記のような簡便な方法を用い、おおよその鉄筋位置のひび割れ幅を推定し、これと鉄筋腐食の関係を検討する。

図-11に、鉄筋位置のひび割れ幅 w_{re} と、コンクリート

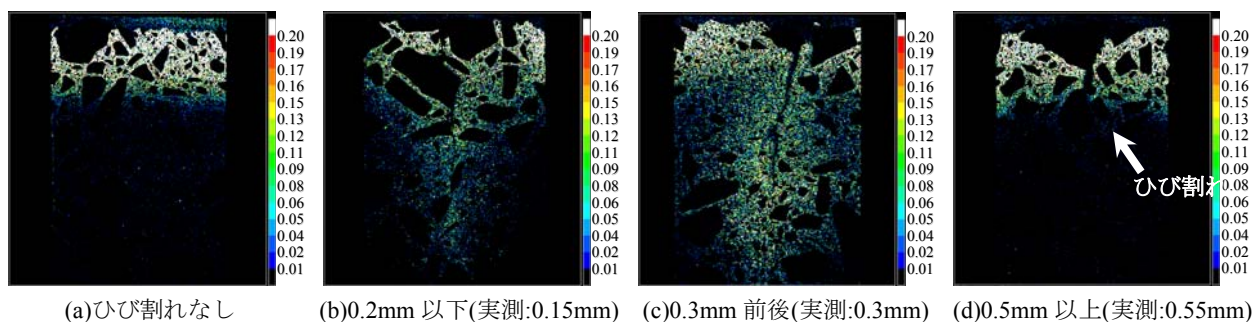


図-10 面分析による塩化物イオン濃度の分布(沖縄かぶり70mm)

ト表面のひび割れ幅 w_{cr} , かぶり C , 側面のひび割れ進展高さ L の関係を示す。コンクリート内部のひび割れ幅が供試体表面からの距離に比例すると仮定すると, 鉄筋位置のひび割れ幅は式(1)で推定される。

$$w_{re} = \frac{L - C}{L} w_{cr} \quad (1)$$

図-12 に, 式(1)から得られた鉄筋位置のひび割れ幅の推定値と腐食面積率の関係を暴露地点およびかぶりの違いに着目して示す。暴露地点の違いに着目すると, 沖縄, 新潟, つくばの順に腐食面積率は大きく, いずれの暴露地点においても鉄筋位置のひび割れ幅が大きいほど腐食面積率も大きくなった。一方, かぶりの違いに着目すると, 暴露地点の違いに関わらず, かぶりの大きい供試体では, 鉄筋位置のひび割れ幅が小さく, 若干のばらつきはあるものの, 腐食面積率も小さくなった。この原因としては, かぶりの大きい供試体では, かぶりコンクリート自体が塩化物イオンや水, 酸素などの腐食因子の浸透防止に強く寄与したことに加え, 相対的に鉄筋位置のひび割れ幅が小さいために腐食面積も小さくなったことが考えられる。この結果, ひび割れ部からの塩化物イオンの浸透量の大小に関わらず, かぶりの大きい供試体では腐食面積率が小さくなったと考えられる。このように, 今回の暴露試験では, かぶりの大小が腐食の程度に大きな影響を与えていた。これは, 許容ひび割れ幅をかぶりの関数で規定している土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾の見解とも一致するものと考えられる。

4. 結論

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明確にするため, 曲げひび割れを導入した RC 供試体の暴露試験を開始した。本論文では, 暴露開始から約 12 ヶ月後の解体調査結果をまとめた。今回の解体調査の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 沖縄, 新潟, つくばの暴露地点の順に, 腐食面積率や鉄筋位置の塩化物イオン濃度は大きくなった。
- 2) 腐食の発生位置は, ひび割れの位置と一致していた。
- 3) 腐食面積率はかぶりが小さくひび割れ幅が大きい供試体で大きくなった。同様に, 自然電位もかぶりが小さくひび割れ幅が大きい供試体で卑になった。
- 4) 塩化物イオンは, ひび割れの存在によりコンクリート内部へ浸透しやすくなる傾向にあったが, ひび割れ幅の大小と浸透した塩化物イオンの濃度には必ずしも明確な関係はみられなかった。
- 5) ひび割れ部から浸透した塩化物イオンの濃度の大小に関わらず, かぶりが大きい供試体ではかぶりコンクリート自体が鉄筋を保護し, 鉄筋位置のひび割れ幅も小さくなるため, 腐食の程度は小さくなった。

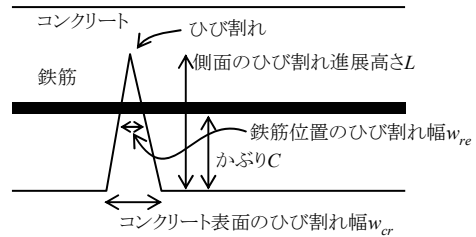
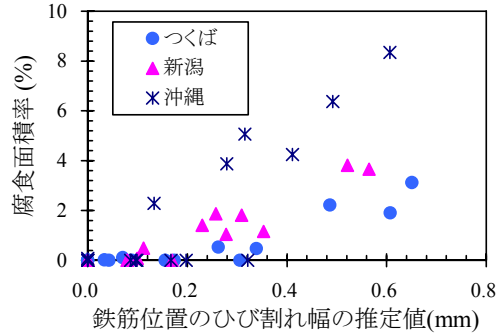
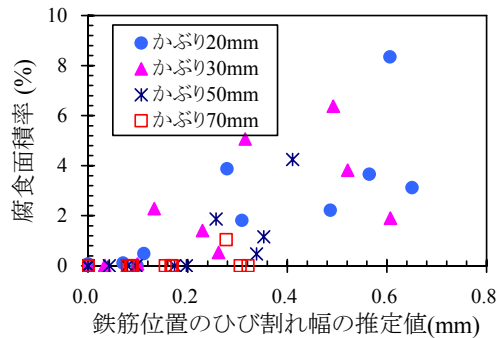


図-11 鉄筋位置とコンクリート表面のひび割れ幅



(a)暴露地点



(b)かぶり

図-12 鉄筋位置のひび割れ幅の推定値と腐食面積率

今後も暴露試験を継続し, 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していく予定である。

謝辞: 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-2003-, 日本コンクリート工学協会, pp.61-65, 2003.6
- 2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 日本建築学会, pp.223-233, 2006.2
- 3) 気象庁 HP: <http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 4) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 土木学会, pp.94-113, 2002.3