報告 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

中村 英佑*1·渡辺 博志*2·古賀 裕八*3·木村 嘉富*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、沖縄で実施している。試験開始から約28ヶ月後に2回目の解体調査を行い、コンクリートひび割れ部の塩分浸透と鉄筋腐食について検討した。約12ヶ月後の結果と比較して鉄筋位置の塩化物イオン濃度や鉄筋の腐食面積に大幅な増加はなかったが、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供 試体の鉄筋には軽微な断面欠損を伴う腐食が生じたものがあった。また、かぶりが大きい供試体では、相対 的に鉄筋位置のひび割れ幅が小さくなり、暴露地点の環境にかかわらず腐食面積が小さ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

ー般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すると考えら れており、設計と施工の両面でひび割れ幅を耐久性上有 害とならない範囲に制御することが求められている。

ところが、ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に 及ぼす影響については必ずしも統一的な見解が得られ ていない^{1), 2)}。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る。ま た、各国のコンクリート構造物の設計規準に示されてい る許容ひび割れ幅の値やその制御方法は様々である。

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 ヶ所で行っている³⁾。本報告は,暴露開始から約28ヶ月 後に2回目の解体調査を実施し,前回調査(暴露開始から 約12ヶ月後に実施済み)の結果³⁾との比較も交えて,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 結果をまとめたものである。

2. 試験の概要

2.1 供試体の形状

図-1 に,暴露した供試体の形状を示す。供試体は, 長さ 1m の鉄筋(SD295A,D13)を1本有する200×200× 1,000mmの角柱である。鉄筋の両端部は,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

表-1に、暴露試験の実験パラメータを示す。

暴露地点は、つくば、新潟、沖縄の3ヶ所とした。つ くば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比較的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、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 種類とした。

暴露期間は,試験結果の経時的な変化を把握できるよう1,2.5,5,10年の4期間を予定した。本報告では2.5年(暴露開始から約28ヶ月後)の解体調査結果を報告する。 コンクリートの水セメント比は55%を基本とし,比較

のため一部で 35%の供試体も製作した。表-2 に, コン クリート配合を示す。

*1 (独) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ 研究員 工修 (正会員)
*2 (独) 土木研究所 つくば中央研究所 材料地盤研究グループ 基礎材料チーム 上席研究員 工博 (正会員)
*3 (独) 土木研究所 つくば中央研究所 材料地盤研究グループ 基礎材料チーム 主任研究員 工修 (正会員)
*4 (独) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ 上席研究員 工修 (非会員)

2.3 供試体の暴露状況

写真-1に,試験開始から約28ヶ月以降の供試体の暴 露状況を示す。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4)。 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。ただし, ひび割れ面の向きが試験 結果に与える影響を把握するため、新潟ではひび割れ面 を上向きにして設置した供試体も暴露した。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

測定と調査の方法は、前回調査と全て同一とした。

(1) ひび割れ幅の変動

供試体の回収前にコンタクトゲージによる測定を再 度実施し、移設作業および約28ヶ月の暴露試験を通じ てひび割れ幅の変動がほとんど無いことを確認した。

(2) 自然電位

回収前に,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わなかった。

(3) 鉄筋の腐食状態

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。



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^{*2}	1	
北本※1	0.2mm以下	30	2.5	35 ^{**3}
小座	0.3mm前後	50	5	55
沖縄	0.5mm以上	70	10	

※1: ひび割れ面を上向きにして設置した供試体も暴露

(W/C55%, かぶり30, 70mmのひび割れを導入した供試体のみ) ※2: 暴露期間1, 2.5年のみ

※3: つくばはかぶり30mm, 北陸は50mm, 沖縄は70mmのみ

表-2	コンクリ	J —	ト	配合
-1X -		/		

W/C (%)	s/a (%)	単位重量(kg/m ³)				
		W	С	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%, 混和剤はポリカルボン酸系化合物を主成分とする高性能AE減水剤

(4) 塩化物イオン濃度

ひび割れ部の塩化物イオン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 \$ 50mm と \$ 75mm のコアを鉄筋の直 近で採取し(図-2 参照),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、新潟と沖縄の水セメント比 55%の供試体から採取 した φ 50mm のコアを厚さ 10mm でスライスし, JIS A



(a)つくば (15.7℃, 76.3%, 109.2mm)



(c)沖縄 (23.7°C, 74.1%, 183.6mm)



図-2 自然電位測定点とコア採取位置, 試料製作方法



1154 に準拠して電位差滴定法で行った。面分析には、新 潟と沖縄の水セメント比 55%のかぶり 70mmの供試体か ら採取した φ 75mm 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、62mm×85mm の範囲を対象として、JSCE G574-2005 に準拠して行った。

3. 試験結果および考察

3.1 自然電位

図-3に試験開始時,図-4に試験開始から約28ヶ月 後の自然電位を示す。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 した値を示す。試験開始時の自然電位は各暴露場におい て測定したものであるが、いずれも-200mV前後の同程 度の値となり、この時点で供試体中の鉄筋が腐食環境に あるとは考えにくい。一方、試験開始から約28ヶ月後 の自然電位は、各供試体が置かれた暴露地点によって大 きく異なり、若干のばらつきはあるが、つくばと比較し て新潟と沖縄の供試体で卑な値が得られた。同一暴露地 点で比較すると、かぶりが小さくひび割れを有する供試 体で卑な値となった。暴露試験により鉄筋の置かれた腐 食環境が変化したことを反映したためと考えられる。

3.2 鉄筋の腐食状態と腐食面積率

回収した供試体を解体し,鉄筋の腐食状態を目視観察 した。前回調査の結果と同様に,腐食の生じた供試体で はひび割れ位置と腐食位置が一致し,ひび割れを導入し ていない供試体では腐食は生じていなかった。写真-2 に,沖縄のかぶり 20mmの供試体の鉄筋の徐錆前の写真



沖縄のかぶり 20mm の供試体.除錆後のかぶり側の状態 写真-3 除錆後の鉄筋の腐食状態

を示す。ひび割れ幅が大きいほど腐食の範囲が広く,腐 食の程度も悪化した。これは,ひび割れ幅の大きい供試 体ほどコンクリートと鉄筋の付着が切れた区間が長く なったことや塩化物イオンや水,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。除錆後 の鉄筋表面を目視観察すると、「0.5mm 以上」では写真 -3 のような孔食によると思われる軽微な断面欠損がみ られた。前回調査で確認した腐食は、いずれも鉄筋表面 のみの軽微なものであった。ところが、今回調査では、 新潟と沖縄のかぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試 体においては、軽微ではあるが、孔食による断面欠損を 伴う腐食が生じているものも確認した。

また,腐食の範囲を相対比較するため,ひび割れ位置 の両側 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求めた。複数のひび割れを有する供 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,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。ただし,鉄筋 表面の凹凸は考慮せずに腐食部分の鉄筋の長さを目視







図-7 鉄筋位置の塩化物イオン濃度(約12ヶ月後)³⁾

で記録した。図-5 に前回調査,図-6 に今回調査の鉄 筋の腐食面積率を示す。どちらもかぶりが小さくひび割 れ幅の大きい供試体で腐食面積率が大きく,これは自然 電位の傾向とも一致した。また,前回から今回にかけて 腐食範囲の大幅な増加はみられなかった。しかし,今回 調査では断面欠損を伴う腐食が生じており,暴露期間が 長くなることで鉄筋の深さ方向に腐食が進行していた。 すなわち,腐食面積の増加はみられなかったが,腐食の 程度は前回よりも進展していたと考えられる。

なお, JCI-SC1 に準拠して鉄筋の質量減少率も測定し たが,鉄筋の長さが 1m と長く断面欠損も微量であった ため,明確な差を見出すことはできなかった。

3.3 鉄筋位置の塩化物イオン濃度

図-7 に前回調査,図-8 に今回調査の鉄筋位置の塩 化物イオン濃度を示す。コアを10mmごとにスライスし て塩化物イオン濃度を測定したため,ここでは鉄筋表面 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。両図において鉄筋 位置の塩化物イオン濃度は同程度であり,試験開始約12 ヶ月後から約28ヶ月後の期間における塩化物イオン濃 度の増加を明確に確認するには至らなかった。

沖縄のひび割れを導入した供試体に着目すると,かぶ りが小さいほど鉄筋位置の塩化物イオン濃度が大きく なる傾向は等しいが,ひび割れ幅と塩化物イオン濃度の



鉄筋の腐食面積率(約28ヶ月後)

- 新潟 <mark>★</mark> 沖縄 0.3mm前後 0.3mm前後 0.5mm以上 0.3mm前後 0.5mm以上 0.2mm以下 0.3mm前後 0.5mm以上 0.2mm以下 0.5mm以上 0.2mm以下 なし なし なし 0.2mm以下 ない かぶり20mm かぶり30mm かぶり50mm かぶり70mm 供試体

図-6

図-8 鉄筋位置の塩化物イオン濃度(約28ヶ月後)

大小の関係では傾向が異なった。前回調査では、かぶり の小さい供試体(50mm以下)において、ひび割れ幅の小さ いほど鉄筋位置の塩化物イオン濃度が大きくなる傾向 にあったが、今回調査ではひび割れ幅の大小にかかわら ず鉄筋位置の塩化物イオン濃度は概ね同程度であった。 この原因は、供試体間の個体差の影響もあるが、ひび割 れ面を下向きにして供試体を暴露しており、塩化物イオ ンは、短期的にはひび割れ幅が小さい供試体で毛細管現 象により水とともにひび割れ内部へ浸透したが、長期的 にはひび割れ幅の大きい供試体でひび割れ開口部から 直接浸透し、かぶりが小さい供試体ほどこの傾向が顕著 に現れたためではないかと推察される。

3.4 面分析による炭素と塩素の分布

図-9に、沖縄のかぶり70mmの供試体の炭素と塩素 の分布を示す。各画像の右横のカラースケールは、これ に隣接する数字が大きい色ほど各元素の濃度が高いこ とを示す。炭素は供試体表層5mm程度までで高濃度と なり、この部分で塩素と硫黄が低濃度となっていたこと から、表層付近で中性化が生じていたと考えられる。一 方、ひび割れに沿った中性化が認められたのは「0.5mm 以上」で表面から10mm程度までの部位に限られ、これ よりも深い位置や他の供試体では確認できなかった。な お、試料を樹脂で固定して分析を行ったため、炭素の分 布ではひび割れ内部の樹脂が白く表示されている。



(a)ひび割れなし (b)0.2mm 以下(実測:0.1mm) (c)0.3mm 前後(実測:0.35mm) (d)0.5mm 以上(実測:0.55mm) 図-9 面分析による炭素と塩素の分布(沖縄,かぶり70mm, W/C55%) ※上段:炭素,下段:塩素,上辺がコンクリート表面





これに対し塩素は、「ひび割れなし」では供試体表層 のみに浸透していたが、ひび割れを有する供試体ではひ び割れに沿って比較的深い位置まで浸透しており、図-8 と同傾向の結果が得られた。ただし、この浸透深さは 必ずしもひび割れ幅の大小とは一致しておらず、ひび割 れ幅の比較的小さい供試体(「0.2mm 以下」、「0.3mm 前 後」) でコンクリート内部深くまでの浸透量が多くなっ た。新潟の供試体でも同様の傾向が確認された。

なお,今回調査では,中性化とこれに伴う塩素と硫黄 の移動や濃縮は供試体表層のみに限定され,ひび割れ部 では確認されなかった。

3.5 ひび割れ面の向き、水セメント比の影響

図-10に、新潟に暴露したひび割れ面の向きの異なる 供試体の鉄筋の腐食面積率を比較して示す。ひび割れ面 の向きにかかわらず、腐食面積率は同程度であるため、 新潟に暴露した供試体においては、ひび割れ面の向きが 腐食面積に与えた影響は小さいと考えられる。

また,図-11に、水セメント比の異なる供試体の鉄筋



図-11 鉄筋の腐食面積率(水セメント比の影響)

の腐食面積率を示す。ここでは、暴露地点ごとに異なる かぶりの供試体で水セメント比35%の供試体を暴露した が、腐食面積率は暴露地点やかぶりが等しければ水セメ ント比にかかわらず同程度であった。本暴露試験では、 塩化物イオンなど腐食因子の浸透がひび割れ部からに 限定されており、この結果、水セメント比の違いによる 影響が明確には認められなかったものと考えられる。

3.6 鉄筋位置のひび割れ幅と腐食面積率

本暴露試験で用いたようなかぶりの異なる供試体で は、コンクリート表面のひび割れ幅が同程度でも鉄筋位 置のひび割れ幅や付着切れの範囲が異なる可能性が高 い。しかし、供試体製作時に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把握するこ とは困難であった。そこで、コンクリート内部のひび割 れ幅が表面からの距離に比例すると仮定して式(1)によ り鉄筋位置のひび割れ幅のおおよその値を推定する。

$$w_{re} = \frac{L-C}{L} w_{cr} \tag{1}$$

ここで、 w_{re} :鉄筋位置のひび割れ幅、 w_{cr} : コンクリート 表面のひび割れ幅 C:かぶり、L:供試体側面のひび割 れ進展長さとする。

図-12に、鉄筋位置のひび割れ幅の推定値と腐食面積 率の関係を暴露期間,暴露地点,かぶりの違いに着目し て示す。暴露期間の違いに着目すると、先に述べたよう に,暴露期間を長くしても腐食面積の大幅な増加は確認 できない。従って、ひび割れ部以外から塩化物イオンな どの腐食因子の浸透がなければ、鉄筋の腐食範囲はひび 割れ近傍に限定され、短期的には腐食面積が大幅に増加 することはないと考えられる。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が大きくなる 傾向にあったが、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も大きくなった。ま た,かぶりの違いに着目すると,かぶりが大きい供試体 では、鉄筋位置のひび割れ幅も相対的に小さく、腐食面 積も小さくなる傾向にあった。すなわち、かぶりが十分 に確保されていれば,暴露地点の環境やひび割れ部の塩 化物イオン濃度の大小にかかわらず、腐食の進行を抑制 することができると考えられる。

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検証するため、暴露開始から約28ヶ月後に、曲げ ひび割れを導入したRC供試体の2回目の解体調査を行った。本報告の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

- 前回調査と比較して、鉄筋位置の塩化物イオン濃度 や鉄筋の腐食面積の大幅な増加はなかった。しかし、 かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体には軽 微な断面欠損を伴う腐食が生じていたものもあり、 鉄筋の腐食は進行していた。
- 2) 腐食の発生位置はひび割れ位置と一致し、その面積 はかぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体で大 きくなった。また、かぶりの大きい供試体では、相 対的に鉄筋位置のひび割れ幅が小さくなり、暴露地 点の環境やひび割れ部の塩化物イオン濃度にかか わらず、腐食面積が小さくなる傾向にあった。
- ひび割れ面の向きや水セメント比の違いが試験結 果に与えた影響は必ずしも大きくなかった。

今後は、特に鉄筋断面の腐食損傷と鉄筋位置の塩化物 イオン濃度の推移に着目し、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証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。また,現地測定においては,(独)土



図-12 鉄筋位置のひび割れ幅と腐食面積率

木研究所の青山尚交流研究員,竹内祐樹交流研究員のご 協力を賜りました。記して謝意を表します。

参考文献

- 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
- 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
- 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
- 4) 気象庁 HP:http://www.jma.go.jp/jma/index.html