

塩分の供給方法がひび割れを有するコンクリート中の鉄筋の腐食に与える影響

維持管理工学研究室 桐山翔伍

1. 研究背景と目的

一般に鉄筋コンクリート構造物は、鉄筋がかぶりコンクリートによって保護されることで、高い耐久性を有するとされている。しかし、ひび割れの発生により、水分、酸素、塩化物イオンなどの劣化因子がコンクリート内部に侵入しやすくなり、鉄筋腐食が進行する可能性が高まる。このため、構造物の耐久性を確保するには、ひび割れを有害とならない範囲で制御することが重要である。

これまでに、ひび割れと鉄筋腐食の関係に関する研究は多数行われてきたが、ひび割れ幅と腐食の進行に相関があるとする報告と、長期的には明確な関係が見られないとする報告があり、統一的な見解には至っていない。また、塩分供給方法の違いが腐食挙動に及ぼす影響についても、十分な知見は得られていない。特に、海岸構造物が曝される飛沫帯や干満帯といった環境では、塩分の供給メカニズムが異なるため、腐食進行に差が生じる可能性がある。

そこで本研究では、劣化促進手法として貯水試験および噴霧試験の2条件を採用し、曲げひび割れ幅および劣化促進期間をパラメータとして、ひび割れが腐食に与える影響、並びに塩分供給方法の違いが鉄筋腐食に与える影響を実験的に評価することを目的とする。

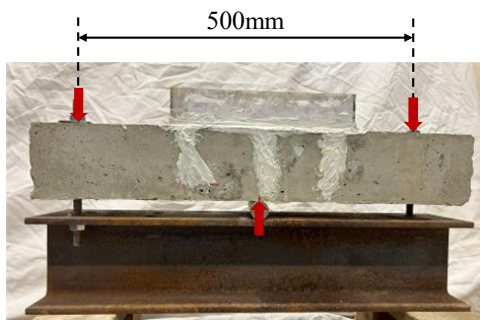


図-1 供試体の様子

表-1 実験パラメータ

実験変数	水準	
促進環境	貯水試験	噴霧試験
曲げひび割れ幅(mm)	0, 0.05, 0.10, 0.20, 0.40	0, 0.2, 0.4
劣化期間(month)	1, 3, 7, (12)*	1, 3, 7

*12monthについては、0, 0.2, 0.4mmのみ

2. 実験概要

2.1 供試体の形状

供試体は、長さ 580mm の鉄筋 (SD295, D13) を 1 本有する 100mm×100mm×600mm の角柱である。コンクリートの水セメント比を 55%、鉄筋のかぶりを 30mm とした。供試体は作製後、20°C の養生室内で約 8 週間、湿布養生を行った後に、所定の幅の曲げひび割れを導入した上で、供試体中央部に塩ビ板製の貯水槽を設置した(図-1)。実験パラメータについては、表-1 に示す。

2.2 劣化促進

劣化促進室にて NaCl 3% 溶液を用いて所定の期間、下記の乾湿繰返しを実施した。

(1) 貯水試験 (干満帯環境を模擬)

促進室を開放した状態で NaCl 溶液を 2 日間室温で貯留させ、NaCl 溶液を抜いたのちに促進室を閉鎖した状態で 5 日間高温 (45~55°C) で乾燥させる。以上の工程を 1 サイクルとし、1 週間に 1 サイクルの頻度で劣化促進を行った。

(2) 噴霧試験 (飛沫帯環境を模擬)

促進室を開放した状態で NaCl 溶液を噴霧器 (約 260ml/min) を用いて、4 秒間噴霧し、8h 静置後、促進室を閉鎖した状態で 40h 高温 (40~55°C) で乾燥させる。以上の工程を 1 サイクルとし、1 週間に 2 サイクルの頻度で劣化促進を行った。

2.3 評価項目

劣化促進期間終了時に、供試体表面のひび割れ状況を記録した。その後、コンクリートカッターを用いて供試体中央部から 200mm を切り出して割裂し、割裂面に硝酸銀水溶液を噴霧することで、塩化物イオンの侵入範囲を確認した。また、供試体表面および鉄筋位置などの各測定点からコンクリート粉を採取し、塩化物イオン量の測定を行った。さらに、一部の供試体については EPMA 分析を実施し、塩化物イオンの濃度分布を詳細に評価した。一方、鉄筋をはつり出し、目視観察により腐食状況を確認するとともに、腐食面積率および質量減少率を算出した。加えて、3D スキャナを用いて鉄筋の断面減少を三次元的に計測し、腐食の空間分布特性を評価した。

2.4 水分浸透試験

水分の浸透挙動は、塩化物イオンの移動および鉄筋腐食環境の形成に大きく影響すると考えられる。そこで、水分の浸透特性を把握することを

目的として、2.1 節に示した供試体と同一の配合および寸法を有する供試体を別途作製し、水分浸透試験を実施した。供試体の養生期間は、実験上の制約から約4週間とした。所定の幅の曲げひび割れを導入した後、貯水試験および噴霧試験と同様の条件で塩水を供給し、乾湿繰り返しを1か月間行い、最終サイクルにおける所定の測定時期で供試体を割裂した。水分に反応して発色する水濡れ発色検査剤を割裂面に噴霧し、水分の浸透範囲および分布状況を目視により確認した。水分浸透試験における実験パラメータを表-2に示す。

表-2 水分浸透試験における実験パラメータ

要因	種類	
	貯水試験	噴霧試験
乾湿繰り返し方法		
測定時期	湿潤サイクル終了時、乾燥サイクル終了時	噴霧後1h経過時、噴霧後8h経過時
曲げひび割れ幅(mm)	0,0.20	

3. ひび割れ性状および塩分・水分分布状況

3.1 ひび割れ状況

劣化促進前後のひび割れ状況の目視観測より、貯水試験および噴霧試験のいずれにおいても、曲げひび割れを導入した供試体では、ひび割れ近傍を起点として腐食ひび割れが発生、進展することが確認された。次に、表-3に各条件において確認された最大腐食ひび割れ幅を示す。まず貯水試験に着目すると、劣化促進期間1か月時点から曲げひび割れ幅0.20mm以上の供試体で腐食ひび割れが発生した。そして、劣化促進期間3か月以降は曲げひび割れの有無によらず腐食ひび割れの発生がみられた。しかし劣化促進期間7か月時点で発生した腐食ひび割れ幅には、曲げひび割れ幅0.20mm未満と0.20mm以上の供試体の間で顕著な差が認められた。

次に噴霧試験では、曲げひび割れを導入していない供試体は、劣化促進の期間が7か月になって

も、腐食ひび割れの発生は確認されなかった。これに対し、曲げひび割れを導入した供試体では、劣化促進期間1か月時点から一部供試体で腐食ひび割れが発生し、劣化促進期間7か月ですべての供試体で腐食ひび割れの発生がみられた。また、曲げひび割れ幅0.20mm以上では貯水試験同様に、曲げひび割れ幅の影響は確認されなかった。そして、劣化促進期間7か月時点において、生じた腐食ひび割れ幅はいずれも貯水試験と比較し、明らかに小さな値を示し、腐食の進行がかんまんであることが示唆された。

3.2 塩分の浸透状況

硝酸銀噴霧による呈色領域の観察結果より、貯水試験および噴霧試験のいずれにおいても、曲げひび割れを導入していない供試体では、供試体表面から比較的均一に塩化物イオンが浸透している様子が確認された。一方、曲げひび割れを導入した供試体では、ひび割れに沿ってより深部まで塩化物イオンが浸透しており、曲げひび割れが塩分浸透の主要な経路として機能していることが確認できる。

塩化物イオンの最大浸透深さおよび鉄筋位置における供試体軸方向の浸透距離を図-2および図-3に示す。貯水試験では、劣化促進期間1か月において、最大浸透深さおよび軸方向浸透距離はいずれも曲げひび割れ幅が大きい供試体ほど大きな値を示した。しかし、劣化促進期間3か月以降では、曲げひび割れを導入していない供試体においても呈色領域が供試体全体へと広がり、曲げひび割れ幅の違いによる差は不明瞭となった。

一方、噴霧試験においても、曲げひび割れ幅が大きい供試体ほど最大浸透深さおよび軸方向浸透距離は大きな値を示したが、劣化促進期間7か月に達しても、曲げひび割れの有無による差は明確に認められた。これは、噴霧試験では塩水供給が間欠的であるため、塩化物イオンの内部浸透が主として曲げひび割れ部を介して進行したことによるものと考えられる。

表-3 各劣化条件における最大腐食ひび割れ幅

	劣化環境	劣化期間	曲げひび割れ幅									
			0mm		0.05mm		0.10mm		0.20mm		0.40mm	
最大腐食ひび割れ幅[mm]	貯水試験	1か月	—	—	—	—	—	—	0.05	0.05	0.05	0.05
		3か月	0.05	0.05	0.05	0.05	—	0.05	0.10	0.05	0.20	0.25
		7か月	0.20	0.25	0.35	0.30	0.35	0.35	0.65	0.65	0.60	0.50
	噴霧試験	1か月	—	—					—	—	0.05	—
		3か月	—	—					0.15	—	0.05	0.10
		7か月	—	—					0.20	0.25	0.10	0.30

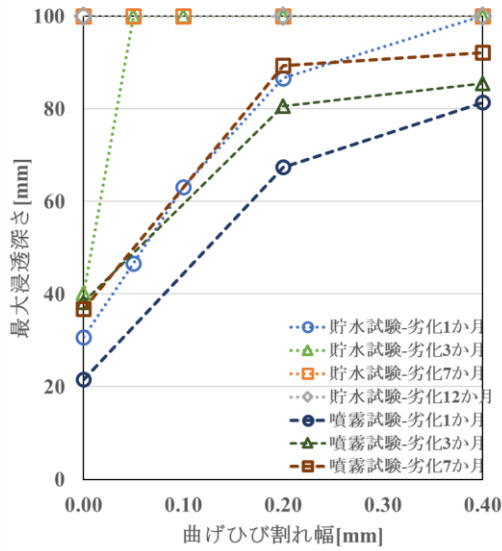


図-2 最大浸透深さ

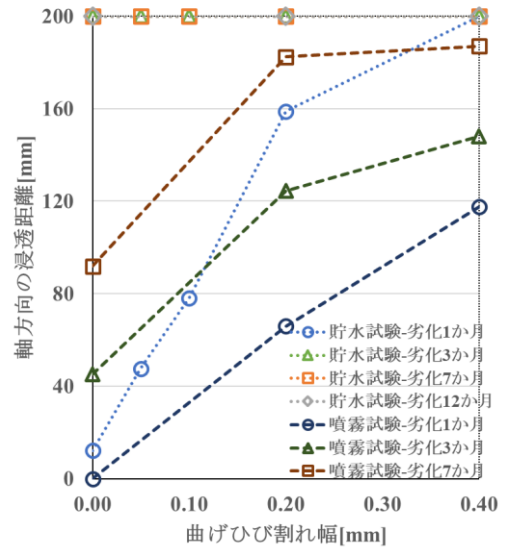


図-3 鉄筋位置での軸方向の浸透距離

3.3 水分の浸透状況

貯水試験における湿潤工程終了時および噴霧試験における噴霧後1時間経過時の水分浸透試験の結果を図-4に示す。貯水試験および噴霧試験のいずれにおいても、曲げひび割れの存在により内部まで水分が浸透していることが確認できる。水分についても塩化物イオンと同様に、曲げひび割れが内部への浸透を著しく促進することが明らかとなった。貯水試験では、供試体表面全体から常時水分が供給される条件であるため、曲げひび割れの有無にかかわらず、比較的広範囲に水分が浸透する傾向を示した。一方、噴霧試験では水分供給が間欠的であり、供試体が水に接触する時間や供給される水量が限定されることに加え、表面に付着した水分が比較的短時間で乾燥する条件である。このため、水分の浸透は主として曲げひび割れ近傍に集中する傾向が確認された。

4. 鉄筋の腐食状況

4.1 腐食面積率

腐食面積率の結果を図-5に示す。腐食面積率はいずれの塩分供給方法においても、劣化促進期間

が長くなるにつれ増加する傾向を示しており、時間の経過とともに鉄筋腐食が進行していることが確認できる。貯水試験では劣化促進期間1か月および3か月において、曲げひび割れを導入した供試体が、ひび割れを有しない供試体よりも高い値を示した。一方、これらの期間では曲げひび割れ幅の大小による明確な差は認められず、腐食初期段階ではひび割れ幅よりも、ひび割れの有無が腐食進行に対して支配的であったと考えられる。しかし、劣化促進期間7か月以降では、ひび割れの有無によらず腐食面積率が高い値を示し、12か月ではすべての供試体において鉄筋表面全体に腐食が広がる状態となった。このことから、貯水試験では劣化の進行に伴い表面全体からの塩化物イオン供給が支配的となり、ひび割れ条件による差が次第に不明瞭となったものと考えられる。

一方、噴霧試験では、劣化促進期間1か月および3か月において、貯水試験と同様に曲げひび割れを有する供試体で腐食面積率が大きく、ひび割れの有無による影響が明瞭に確認された。この傾向は劣化促進期間7か月においても維持され、貯水試験とは異なり、ひび割れの影響が長期間にわ

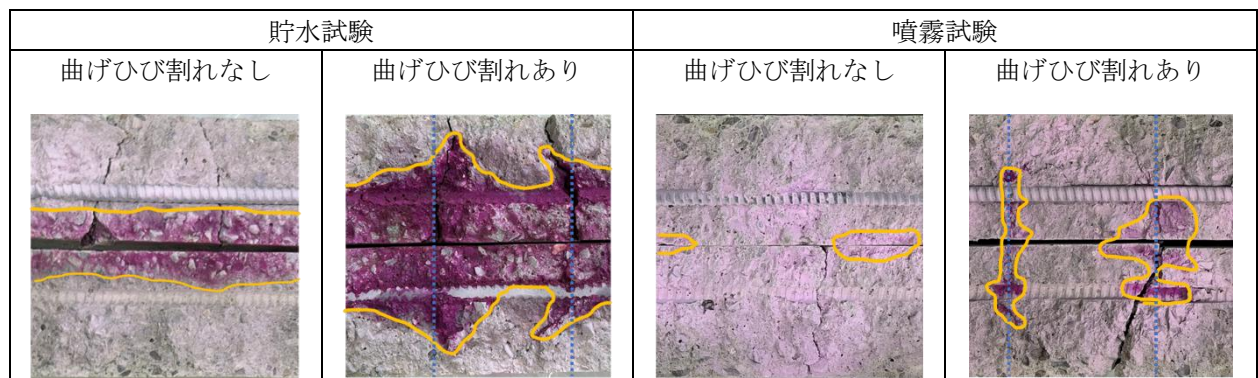


図-4 水分の浸透状況

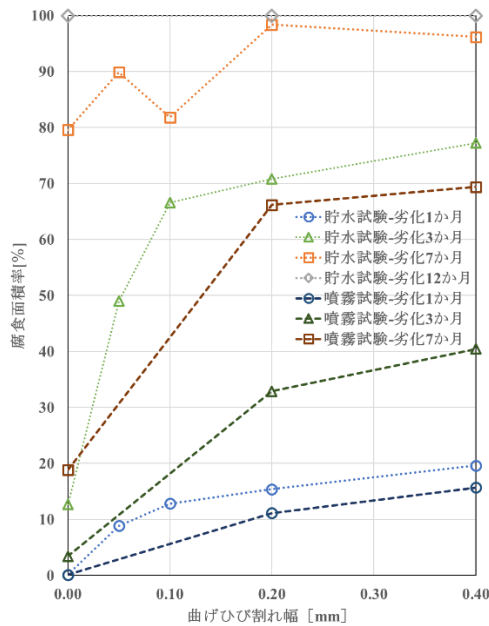


図-5 腐食面積率

たって残存した。これは、噴霧試験では塩水供給が間欠的であり、塩化物イオンの内部浸透が主として曲げひび割れ部を介して進行したため、ひび割れの影響が相対的に大きく現れたことによるものと考えられる。

4.2 質量減少率

質量減少率の結果を図-6に示す。質量減少率は、概ね腐食面積率と同様の傾向を示したが、貯水試験の劣化促進期間7か月以降では異なる挙動が確認された。すなわち、曲げひび割れ幅 0.20mm 以上の供試体において、質量減少率が顕著に増加した。この傾向は、3.1 節で示した供試体表面に発生した最大の腐食ひび割れ幅の結果と整合しており、長期劣化段階では、腐食の進行に伴って発生、拡大した腐食ひび割れが新たな腐食因子の供給経路として機能し、腐食進行を加速させた可能性が考えられる。また、本研究の範囲では、曲げひび割れ幅 0.10~0.20mm 付近を境として、腐食進行挙動が変化する可能性が示唆された。

5. 結論

本研究では、曲げひび割れおよび塩分供給形態の違いが、塩分・水分の浸透状況および鉄筋腐食の進行に及ぼす影響について実験的に検討した。得られた主な知見を以下に示す。

1. 腐食ひび割れの進展形態は、塩分供給形態により大きく異なった。貯水試験では劣化促進期間が長くなるにつれ腐食ひび割れが供試体全体へ拡大し、曲げひび割れ幅が腐食ひび割れの発生範囲に与える影響は次第に不明瞭と

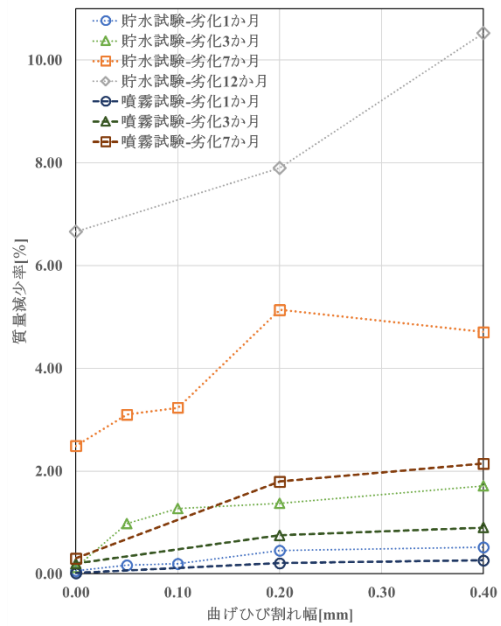


図-6 質量減少率

なった。一方、噴霧試験では劣化促進期間7か月においても腐食ひび割れは曲げひび割れ近傍に集中し、局所的な進展形態を示した。

2. 曲げひび割れは、塩化物イオンおよび水分の主要な浸透経路として機能する。硝酸銀噴霧、塩化物イオン量測定、EPMA 分析および水分浸透試験より、曲げひび割れを有する供試体では、ひび割れ部を起点として塩化物イオンおよび水分が鉄筋近傍へ到達しやすく、腐食環境が早期に形成されることが確認された。
3. 塩分供給方法の違いは、塩分・水分分布および腐食進行様式を規定する。貯水試験では表面全体からの継続的な供給により、塩化物イオンおよび水分が供試体全体へ広がった。一方、噴霧試験では塩水供給が間欠的で、表面への塩分堆積の影響により、内部浸透は主として曲げひび割れ部に集中した。
4. 腐食評価指標の支配因子は劣化段階により変化する。腐食初期~中期では曲げひび割れの有無が腐食進行を支配したが、長期段階では腐食ひび割れの発生、拡大が質量減少率を大きく左右した。また、本研究の範囲では、曲げひび割れ幅 0.10~0.20mm 付近を境に腐食進行挙動が変化する可能性が示唆された。
5. 腐食機構は塩分供給方法に応じて異なる傾向を示した。貯水試験では腐食環境の均一化に伴い、マクロセル腐食からミクロセル腐食へ移行しやすく、断面減少が鉄筋全長へ広がった。一方、噴霧試験では腐食環境の不均一性が維持され、マクロセル腐食が支配的となり、腐食はひび割れ近傍に集中した。