

論文 模擬ひび割れを有する試験体の中性化後における含水状態と鉄筋腐食速度の関係

酒井 正樹*1・神代 泰道*2・小林 利充*2

要旨: ひび割れが生じた部位に対する、中性化後の鉄筋腐食を考慮した寿命評価を目的として、ひび割れ幅が0.4mmの模擬ひび割れを有する鉄筋コンクリート試験体の含水状態と鉄筋腐食の関係を検討した。その結果、次のことがわかった。(1) セメント種別に関わらず、中性化後の鉄筋腐食速度には含水状態の影響が大きかった。(2) 模擬ひび割れを有する場合、相対湿度が高い条件や屋外暴露条件では、中性化後の暴露試験にて鉄筋腐食が進行した。(3) 模擬ひび割れを有する試験体でも、含水率が小さい場合には中性化後も鉄筋腐食は生じなかった。乾燥環境下では、ひび割れの有無に関わらず、中性化後も鉄筋腐食は生じにくいものと考えられる。

キーワード: 模擬ひび割れ, 中性化, 含水率, 鉄筋腐食, 黒皮, 腐食電流密度

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート造建築物の維持管理と寿命評価の高度化が求められている。実構造物では、供用期間中に乾燥の影響を受けることで、中性化の進行速度は大きくなるが、鉄筋腐食は生じにくいとの報告がある¹⁾。そのため、コンクリートの含水状態に着目し、中性化後の鉄筋腐食を考慮して寿命評価を行うことは合理的であり、建築物の供用が継続されれば、サステナビリティの観点からも有益である。近年では、学会においても中性化後の鉄筋腐食に基づいた寿命評価の考え方が示されている²⁾。

著者らはこれまでに、鉄筋位置まで中性化を進行させた鉄筋コンクリート試験体を異なる相対湿度に暴露し、コンクリートの含水状態と鉄筋腐食速度の関係を検討してきた³⁾。一方、長期にわたって供用される実構造体では、乾燥収縮や外力に起因するひび割れが生じる場合がある。ひび割れや打継ぎ部では、中性化や鉄筋腐食が進行しやすいとの報告⁴⁾も多いが、実構造物の調査では、含水率が低ければひび割れが生じた部位でも、鉄筋

腐食が生じていない場合も認められている⁵⁾。

本研究は、ひび割れが生じた部位に対する、中性化後の鉄筋腐食を考慮した寿命評価を目的として、ひび割れ幅が0.4mmの模擬ひび割れを有する鉄筋コンクリート試験体の含水状態と鉄筋腐食の関係を実験的に検討したものである。

2. 実験計画

実験計画の概要を表-1に示す。試験体寸法は100×100×400mmとし、促進中性化試験および中性化後の暴露試験では、1面のみを暴露面とした。模擬ひび割れ幅は0.4mmと設定した。コンクリートのセメント種別は高炉セメントB種[記号:BB]と普通ポルトランドセメント[記号:N]の2水準とした。試験体の内部には、黒皮付きの丸鋼φ12mmを設置した。促進中性化試験は、中性化深さが鉄筋の全断面に到達するまで行い、試験期間はBBでは約半年間、Nでは約2年間とした。中性化後の暴露条件は、相対湿度60~100%RHと屋外暴露の5水準とし、暴露期間はBBでは約2年、Nでは約1年となった。

表-1 実験計画の概要

	項目	内容
試験体条件	寸法	100×100×400mm
	境界条件	打込み側面1面のみ暴露面, 周囲3面と小口面はシール
	模擬ひび割れ	なし, あり(0.4mmのスリット鋼板により導入, 位置は図-1参照)
材料条件	セメント種別	高炉セメントB種 [記号:BB], 普通ポルトランドセメント [記号:N]
	鉄筋種別	黒皮付き丸鋼φ12mm (SS400) (位置は図-2参照)
試験方法	前養生方法	20℃封かん5日間+20℃気中9日間
	促進中性化試験条件	環境条件: 温度20℃, 相対湿度60%RH, CO ₂ 濃度5% (JIS A 1153) 試験期間: 中性化深さが鉄筋の全断面に到達するまで (位置は図-2参照)
	中性化後の暴露条件	(1)相対湿度60%RH, (2)相対湿度75%RH, (3)相対湿度90%RH, (4)相対湿度100%RH, (5)屋外暴露

*1 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 修士(工学) (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所生産技術研究部 博士(工学) (正会員)

3. 実験方法

3.1 試験体の作製およびコンクリートの基礎性状

鉄筋コンクリート試験体(模擬ひび割れあり)の詳細を図-1に示す。試験体の暴露面は、コンクリートの打込み側面となるように計画し、型枠側面の片側から所定のかぶり厚さを確保した位置に鉄筋を固定した上で、コンクリートの打込みを行った。鉄筋は、SS400の黒皮付き丸鋼φ12mmを使用した。既往の研究では、みがき鋼材を用いた実験が多いが、実際の建築物では黒皮付きの鉄筋が用いられているため、黒皮の影響を含めた評価ができるようにした。試験体への模擬ひび割れは、コンクリート打込み直後に0.4mmのスリット鋼板を所定の位置に差し込み、凝結が終了した約6時間後に引き抜いて導入した。模擬ひび割れの深さは30mm(鉄筋表面まで)とした。なお、硬化後の表面ひび割れ幅は0.4~0.45mm程度であった。コンクリートの打込みおよび初期養生は20℃で行い、材齢5日目までは封かん養生とした。その後、材齢14日目までは気中養生とし、その間に側面1面を除いた周囲3面と小口2面をエポキシによりシールした。

コンクリートの使用材料を表-2、調合を表-3に示す。いずれの調合とも、水セメント比は60%、単位水量はBBでは182kg/m³、Nでは180kg/m³とし、化学混和剤はAE減水剤を使用した。なお、目標スランブは18.0±2.5cm、目標空気量は4.5±1.5%とした。

コンクリートの基礎性状として、練上り直後のスランブ、空気量、コンクリート温度、単位容積質量、硬化性状として圧縮強度を測定した。コンクリートのフレッシュ性状の試験結果を表-4に示す。いずれの調合とも、スランブ、空気量ともに目標値を満足した。コンクリートの圧縮強度の試験結果を表-5に示す。材齢28日における標準養生の圧縮強度はBBでは30.5N/mm²、Nでは37.7N/mm²となった。また、材齢5日で脱型し、脱型以降は20℃、60%RHで気中養生した供試体の圧縮強度を併せて測定した。気中養生した供試体では、材齢91日以降、促進中性化期間が終了した時点の材齢(BBでは292日、Nでは770日)においても、圧縮強度の増進は3N/mm²以下と小さく、促進中性化期間が異なるものでも、圧縮強度は概ね同等であると考えられる。

3.2 促進中性化試験

促進中性化試験は、JIS A 1153に準じて行った。促進中性化試験環境は、温度20℃、相対湿度60%RH、CO₂濃度5%とした。鉄筋のかぶり厚さとコンクリートの中性化深さの目標値を図-2に示す。鉄筋のかぶり厚さは、模擬ひび割れなしでは20mm、模擬ひび割れありでは30mmとした。目標とする中性化深さは、模擬ひび割れなしでは全断面で鉄筋下端の32mm、模擬ひび割れありでは、ひび割れ部における鉄筋下端で42mmと設定した。

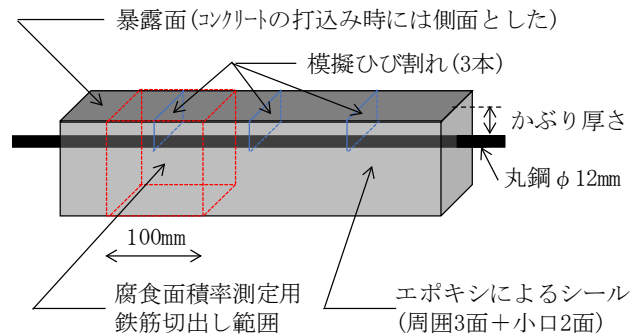


図-1 鉄筋コンクリート試験体(ひび割れあり)の詳細

表-2 コンクリートの使用材料

種類	記号	概要
セメント	BB	高炉セメントB種(密度3.04g/cm ³)
	N	普通ポルトランドセメント(密度3.14g/cm ³)
細骨材	S	木更津産陸砂(表乾密度2.61g/cm ³ , 吸水率1.90%, F.M.2.45, 実積率66.7%)
粗骨材	G	青梅産碎石(表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.92%, F.M.6.61, 実積率58.9%)
水	W	上水道水
混和剤	Ad	AE減水剤

表-3 コンクリートの調合

セメント種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad (セメント×%)
			W	BB	N	S	G	
BB	60	49.5	182	303	—	871	906	0.6
N	60	49.5	180	—	300	875	907	0.85

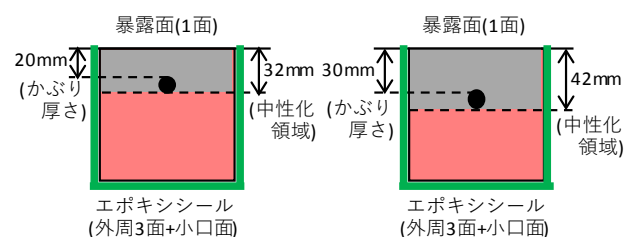
表-4 コンクリートのフレッシュ性状の試験結果

セメント種別	スランブ(cm)	空気量(%)	コンクリート温度(℃)	単位容積質量(kg/m ³)
BB	19.0	4.2	21	2291
N	18.5	5.2	22	2277

表-5 コンクリートの圧縮強度の試験結果

セメント種別	圧縮強度(N/mm ²)				
	標準28日	封かん91日	気中		
			91日	234日*	770日*
BB	30.5	41.4	28.2	29.0	—
N	37.7	41.2	30.6	—	33.7

※促進中性化期間が終了した時点の材齢



(a)BB, N 模擬ひび割れなし (b)BB, N 模擬ひび割れあり

図-2 鉄筋のかぶり厚さと中性化深さの目標値

なお、中性化深さの測定は、鉄筋を埋設した鉄筋腐食測定用の試験体と同時に、中性化深さ・含水率モニタリング用の試験体を作製して行った。この試験体は無筋とし、暴露面他の境界条件、前養生条件、促進中性化試験方法、中性化後の暴露試験方法は、鉄筋腐食測定用の試験体と同様とした。

3.3 促進中性化試験後の暴露試験

促進中性化試験後の暴露試験方法を表-6に示す。目標とする中性化深さに到達した試験体は、相対湿度60%RH、75%RH、90%RH、100%RH、屋外暴露の5水準の環境に置き、鉄筋腐食速度の経時変化を測定した。相対湿度75%RH、90%RHの環境条件は、エアコンと加湿器により制御し、相対湿度は±3%RH、温度は20℃±2℃で管理した。また、いずれの暴露条件においても、酸素濃度は大気中と同等の21%程度であることを確認した。

3.4 含水率の測定

含水率の測定は、中性化深さ・含水率モニタリング用の試験体を乾式カッターで小口面と平行に30mmの厚さに切断し、さらにその切断片を暴露面より12.5mm間隔で8等分したものを試料として用いた。それぞれの試料に対し、JASS 5N T-602に準じた105℃乾燥質量に基づく質量法により質量含水率を算定した。また、鉄筋を埋設した鉄筋腐食測定用の試験体に対しては、非破壊の静電容量式の含水率測定器を用いて、表層含水率を測定した。

3.5 鉄筋腐食速度の測定

促進中性化試験後の暴露試験では、1~2ヶ月の測定間隔で、電気化学特性として分極抵抗を測定した。分極抵抗の測定には、市販のポータブル型分極抵抗測定装置(交流インピーダンス法)を用い、10mVの交流電圧を印加して、10Hz~0.01Hzの7点の周波数で測定を行った。なお、配筋状態とかぶり厚さを考慮したBEMモデルによる電流分布シミュレーションから得られる推定値と鉄筋の真の分極抵抗の関係を用いて、見掛けの測定値から真の分極抵抗を算出した⁹⁾。分極抵抗から腐食電流密度に換算するためのK値は0.026Vの一定値と仮定した。

3.6 鉄筋腐食面積率の測定

本試験では黒皮付きの鉄筋を用いたため、腐食量を測定するには、黒皮分に相当する腐食減量の補正が必要とされた。そのため、本報では鉄筋腐食の評価は腐食面積率の指標により行った。腐食面積率は、図-1に示した鉄筋の切り出し範囲(長さ100mm)に対して測定した。鉄筋を取り出した後は、表面のセメントペーストを除去した上で、鉄筋の円周方向に腐食生成物に覆われた部分を黒く塗り潰してトレースした。その後、スキャニングを行い、円周方向の鉄筋の全表面積(ピクセル数)に対する、腐食生成物に覆われた部分の表面積(ピクセル数)の割合を算定し、これを腐食面積率と定義した。

表-6 促進中性化試験後の暴露試験方法

暴露条件	試験方法
相対湿度 60%RH	20℃・60%RHの恒温恒湿室内に静置
相対湿度 75%RH	20℃・75%RHのプレハブ内に静置
相対湿度 90%RH	20℃・90%RHのプレハブ内に静置
相対湿度 100%RH	底部に水を張ったコンテナ内に静置
屋外暴露	屋根のないアスファルト上に暴露面が側面となるように静置(東京都清瀬市)

表-7 促進中性化試験結果および暴露試験期間

セメント	模擬ひび割れ	かぶり厚さ(mm)	中性化領域 ^{*1} (mm)	促進中性化期間(日)	暴露試験期間(日)
BB	なし	20	34.1	234	732(250 ^{**2})
	あり	30	46.2	152	817
N	なし	20	33.5	770	406
	あり	30	43.2	755	378

*1: ひび割れありのものは、ひび割れ直下の値とした

*2: 屋外暴露のみ、暴露試験期間が250日と短い

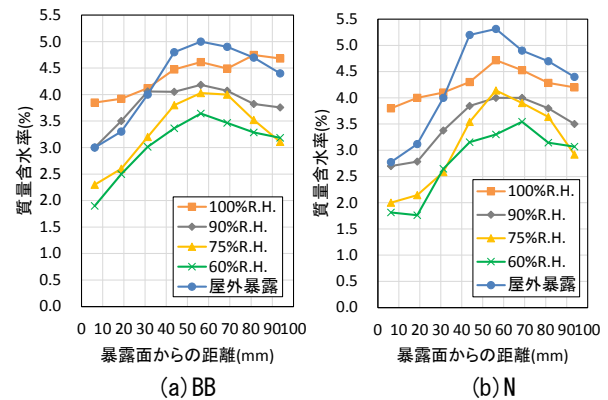


図-3 暴露試験期間後の含水率分布(質量法)

4. 実験結果

4.1 促進中性化試験結果

促進中性化試験結果および暴露試験期間を表-7に示す。セメント種別および模擬ひび割れの有無により、促進中性化試験期間は異なり、BBでは152~234日、Nでは755~770日となった。なお、本試験は同一期間で実施しているため、促進中性化試験期間が長くなった水準では、暴露試験期間が短くなっている。

4.2 含水率の測定結果

表-7に示す暴露試験期間後に、中性化深さ・含水率モニタリング用の無筋試験体から測定した質量法による含水率分布を図-3に示す。図中のプロットは、12.5mm間隔に切断した試験片の中心位置を、暴露面からの距離とした。深さ相対湿度60~100%RHでは、試験体の表層(暴露面)から内部に至るまで、相対湿度が高いほど含水率が大きくなる傾向となった。また、屋外暴露では、表層と内部の含水率勾配が大きくなった。なお、いずれの養生条件でも、乾燥面からの距離が50mmより大きく

なると含水率が小さくなる傾向が認められた。この理由として、促進中性化期間に受けた乾燥影響が残った可能性などが推察される。以降のコンクリートの含水状態と鉄筋腐食速度の関係の考察においては、図-3 に示した含水率分布のうち、鉄筋の埋設位置（鉄筋圆心の位置）の含水率を用いることとした。

鉄筋を埋設した鉄筋腐食測定用の試験体で測定した静電容量法による表層含水率を表-8 に示す。静電容量法では、表層近傍の平均的な含水率が測定されると考えられるが、図-3 で得られた、暴露条件の違いによる含水率の違いを傾向として把握できることを確認した。

4.3 腐食電流密度

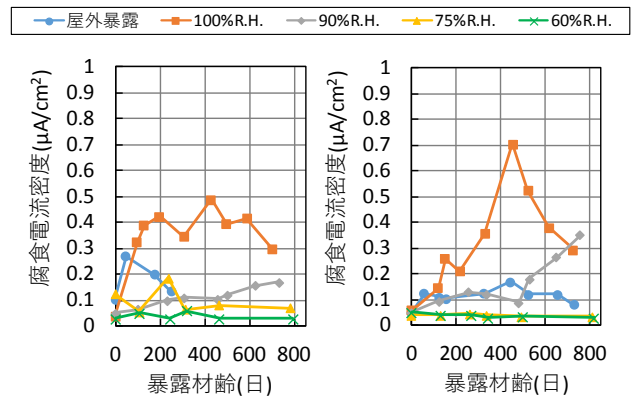
促進中性化試験後の暴露試験における腐食電流密度の経時変化を図-4 (BB)、図-5 (N) に示す。BB では、相対湿度 100%RH, 90%RH では、模擬ひび割れの有無に関わらず、腐食電流密度は相対的に大きくなり、RIREM に示される腐食判定基準⁷⁾では、低い腐食速度 ($0.2 \sim 0.5 \mu A/cm^2$) から中程度の腐食速度 ($0.5 \sim 1.0 \mu A/cm^2$) となった。一方、相対湿度 75%RH, 60%RH では、模擬ひび割れの有無に関わらず、腐食電流密度は小さく、不動態状態と同等 ($0.2 \mu A/cm^2$ 以下) となった。屋外暴露では、模擬ひび割れありでは、一時的に低い腐食速度となったが、その他は不動態状態と同等となった。N では、相対湿度 100%RH では、腐食電流密度が相対的に大きくなる傾向が見られたが、模擬ひび割れの有無に関わらず、全ての暴露条件において腐食電流密度は小さく、不動態状態と同等と評価された。

以上より、本研究の範囲では、セメント種別の違いにより中性化後の鉄筋腐食速度に差異が認められたが、中性化後の鉄筋腐食速度には含水状態が大きく影響し、ひび割れの有無の影響は小さいことが分かった。

鉄筋位置の質量含水率と腐食電流密度の関係を図-6 (BB)、図-7 (N) に示す。なお、ここでの腐食電流密度は、本報告における暴露試験期間の終了とした最終測定時における数値をプロットした。BB では、鉄筋位置の質量含水率が 4%を上回ると、低い腐食速度となり、それを下回る含水率では、不動態状態と同等と評価された。古賀ら⁸⁾は、既存の RC 造建築物の調査結果から、質量含水率が 3.5%以下であれば、鉄筋腐食は生じないことを報告しており、本実験結果も概ね同様の傾向と言える。

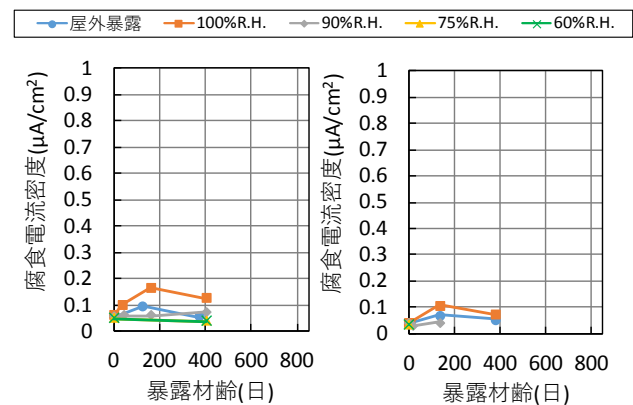
表-8 暴露試験期間後の表層含水率（静電容量法）

セメント	模擬ひび割れ	暴露条件				
		60%RH	75%RH	90%RH	100%RH	屋外暴露
BB	なし	3.6	3.9	4.0	4.7	3.8
	あり	3.5	3.8	3.9	4.7	3.9
N	なし	3.4	3.5	4.0	4.5	4.0
	あり	3.3	3.5	3.8	4.5	3.9



(a)BB 模擬ひび割れなし (b)BB 模擬ひび割れあり

図-4 暴露期間の腐食電流密度の経時変化 (BB)



(a)N 模擬ひび割れなし (b)N 模擬ひび割れあり

図-5 暴露期間の腐食電流密度の経時変化 (N)

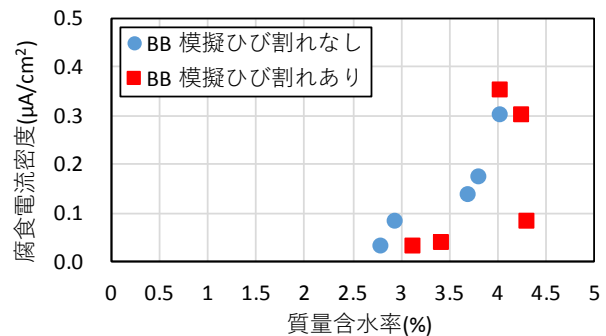


図-6 鉄筋位置の質量含水率と腐食電流密度の関係 (BB)

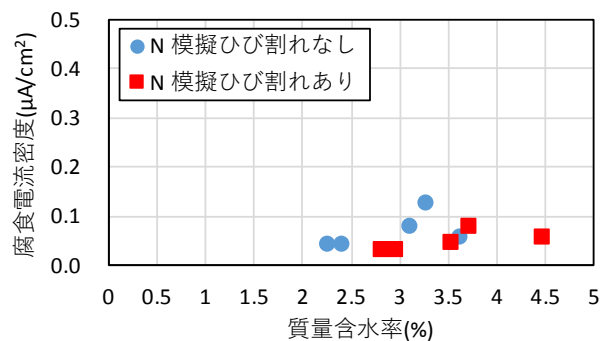


図-7 鉄筋位置の質量含水率と腐食電流密度の関係 (N)

N では、現時点では含水状態に関わらず腐食電流密度は小さく、いずれも不動態状態と同等と評価された。

4.4 鉄筋取出しによる表面観察および腐食面積率

暴露試験期間終了時の鉄筋腐食状況を写真-1 に示す。写真は鉄筋の円周方向のうち、暴露面に一番近い側から撮影している。暴露試験終了時の鉄筋表面の鉄筋腐食箇所のトレース結果を図-8 (BB), 図-9 (N) に示す。また、相対湿度と腐食面積率の関係を図-10 (BB), 図-11 (N) に示す。なお、図中には模擬ひび割れ位置を起点とした鉄筋腐食の広がりを確認するため、模擬ひび割れ近傍の腐食面積率(模擬ひび割れを中心に水平距離が±30mmの範囲、詳細は図-8, 9を参照)も示した。

BB では、模擬ひび割れなしの場合、いずれの暴露条件でも腐食面積率は5%未満となり、中性化後の暴露期間では、ほとんど鉄筋腐食は認められなかった。

一方、模擬ひび割れありの場合、腐食面積率は相対湿

度 100%RH で 23%、屋外暴露で 28%となり、暴露期間における鉄筋腐食の進行が認められた。電気化学的測定では、屋外暴露の腐食電流密度は大きくなかったが、実際には鉄筋腐食の進行が認められた。この理由として、屋外暴露のように乾湿繰返しを受ける環境下では、コンクリート表層部の含水率が日々変動するため、測定時における瞬間的な鉄筋腐食速度を示す腐食電流密度の値と累積的な鉄筋腐食の程度には差が生じることが考えられた。特に、模擬ひび割れありの場合、降雨時には、鉄筋位置まで直接水分が供給されて鉄筋腐食速度が大きくなるが、乾燥すると鉄筋腐食速度は小さくなる。このように、乾湿繰返しを受ける部位では、測定時における含水率の影響を考慮して、鉄筋腐食の進行を評価する必要がある。

また、鉄筋腐食の進行は模擬ひび割れの近傍に留まらず、測定した全長にわたって認められた。この理由として、試験体作製の際に暴露面が側面となるようにコンク

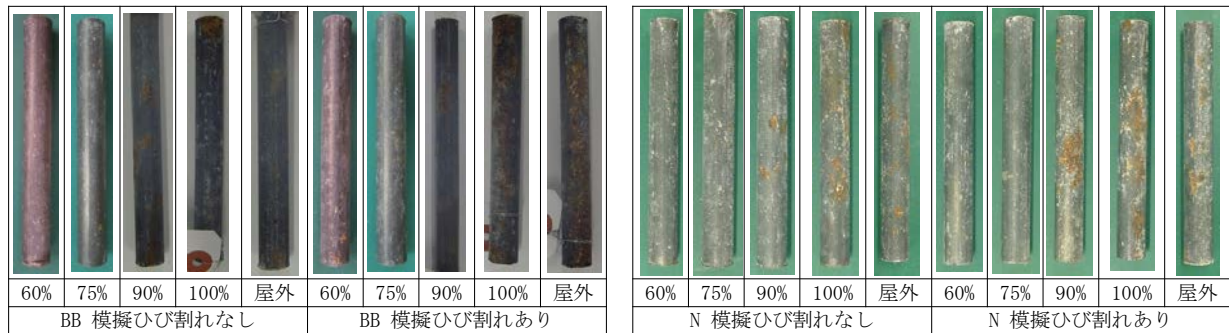


写真-1 暴露試験期間終了時の鉄筋腐食状況 (BB, N/模擬ひび割れなし, あり)

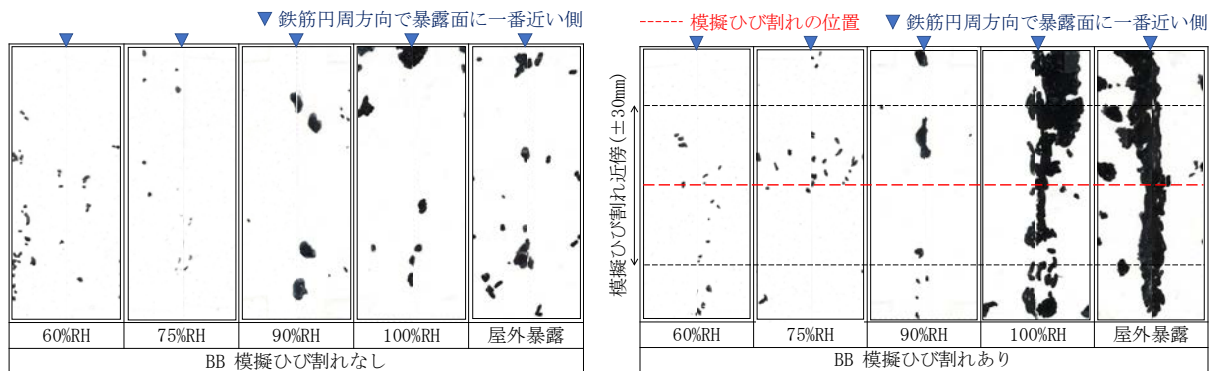


図-8 暴露試験終了時の鉄筋表面の鉄筋腐食箇所のトレース結果 (BB/模擬ひび割れなし, あり)

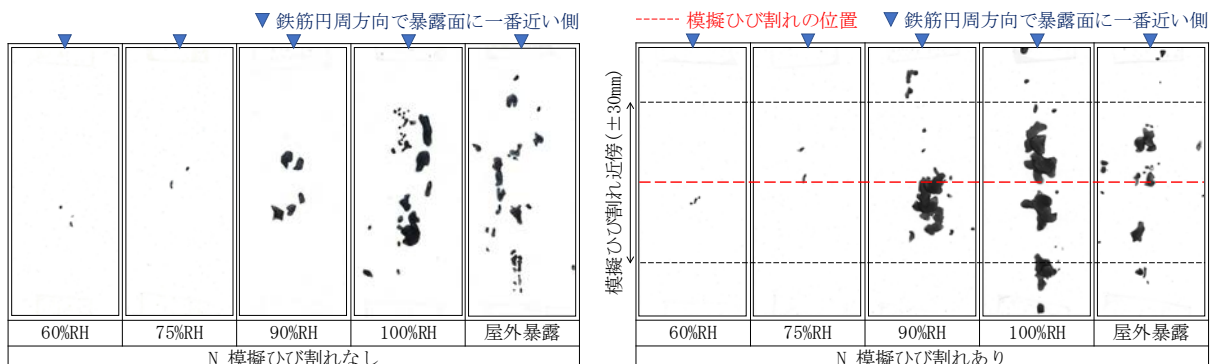


図-9 暴露試験終了時の鉄筋表面の鉄筋腐食箇所のトレース結果 (N/模擬ひび割れなし, あり)

リートを打ち込んだが、水セメント比が60%と大きく鉄筋の側面にブリーディングによる空隙が生じ、相対湿度が高い条件や屋外暴露条件では、鉄筋に沿った水分移動が生じた可能性が推察される。一方、相対湿度が90%RH以下では、腐食面積率は5%未満となり、中性化後の暴露期間では、ほとんど鉄筋腐食は認められなかった。

Nでは、模擬ひび割れなしの場合、いずれの暴露条件でも腐食面積率は5%未満となった。模擬ひび割れありの場合でも、相対湿度100%RHでは腐食面積率が9%とわずかに大きくなったが、屋外暴露を含むその他の暴露条件では、腐食面積率は5%未満となり、中性化後の暴露期間において、ほとんど鉄筋腐食は認められなかった。

Nの鉄筋腐食の進行が小さかった理由として、中性化後の暴露期間が短かったこと、BBよりも圧縮強度が大きく、鉄筋の腐食反応に必要な酸素の浸透が少なかったことなどが推察される。セメント種別の違いについては、以後も継続測定を予定しており、今後の課題としたい。

以上より、模擬ひび割れを有する場合、中性化が進行した後に、相対湿度が高く恒常的に高い含水状態となる場合、屋外暴露のように乾湿繰返しを受ける場合には、鉄筋腐食が進行する可能性があることが分かった。一方、模擬ひび割れを有する場合でも、恒常的に低い含水状態となる場合は、鉄筋腐食は生じなかった。近年では、学会において、乾燥環境下では中性化後も鉄筋腐食は生じにくいとする考え方が議論されているが²⁾、本試験結果からは、ひび割れが生じた部位に対しても、同様の傾向となるものと考えられる。

5. まとめ

ひび割れが生じた部位に対する、中性化後の鉄筋腐食を考慮した寿命評価を目的として、ひび割れ幅が0.4mmの模擬ひび割れを有する鉄筋コンクリート試験体の含水状態と鉄筋腐食の関係を検討した。その結果、次のことが分かった。

- (1) セメント種別の違いにより中性化後の鉄筋腐食速度に差異が認められたが、いずれも中性化後の鉄筋腐食速度には含水状態の影響が大きかった。
- (2) 模擬ひび割れを有する試験体では、相対湿度が高い条件や屋外暴露条件において、中性化後の暴露試験において、鉄筋腐食の進行が認められた。
- (3) 模擬ひび割れを有する試験体でも、恒常的に低い含水状態となる場合は、鉄筋腐食は生じなかった。近年、学会において、乾燥環境下では中性化後も鉄筋腐食は生じにくいとする考え方が議論されているが、ひび割れが生じた部位に対しても、同様の傾向となるものと考えられる。

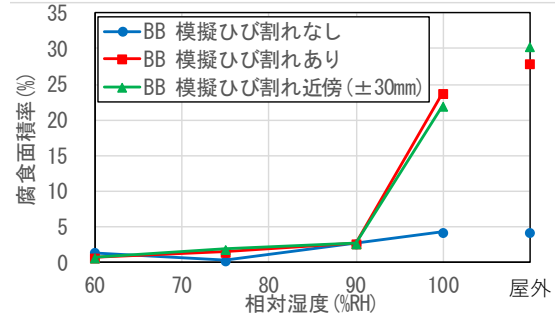


図-10 相対湿度と腐食面積率の関係 (BB)

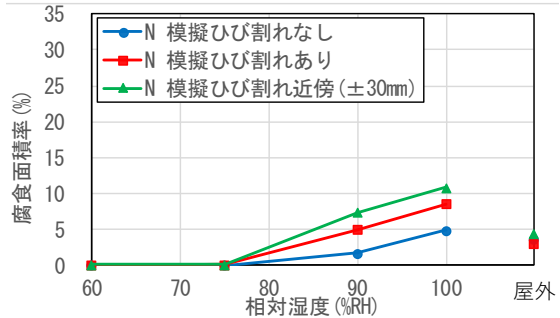


図-11 相対湿度と腐食面積率の関係 (N)

参考文献

- 1) 日本建築学会編：鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考－中性化は寿命か？－，2017年度日本建築学会大会（中国）材料施工部門 PD 資料，2017.8
- 2) 土木学会編：コンクリート標準示方書 [設計編]，2018.3
- 3) 酒井正樹ほか：中性化後における鉄筋コンクリート試験体の含水状態と鉄筋腐食速度の関係，コンクリート工学年次論文集，vol. 40，pp. 603-608，2018.7
- 4) 辻埜真人ほか：屋外暴露した欠陥を有する鉄筋コンクリートにおける中性化および鉄筋腐食の状況，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.781-786，2013.7
- 5) 酒井正樹ほか：RC造建築物の躯体調査に基づく含水率と中性化・鉄筋腐食の進行に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，vol. 39，pp. 577-582，2017.7
- 6) 金田尚志ほか：BEMによる電流分布シミュレーションと鉄筋の分極抵抗値の推定，コンクリート工学年次論文集，vol. 33，No. 1，pp. 1715-1720，2011.7
- 7) RIREM TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion, Test Methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, Material and Structures, Vol.37, pp.623-643, Nov. 2004
- 8) 古賀一八ほか：高濃度塩化物イオン含有 RC 建築物の含水率および鉄筋腐食調査，コンクリート工学年次論文集，vol. 30，No. 1，pp. 783-788，2008.7