

論文 鉄筋の黒皮の有無が中性化後の鉄筋腐食速度におよぼす影響

酒井 正樹^{*1}・神代 泰道^{*2}・植松 俊幸^{*3}・兼松 学^{*4}

要旨：黒皮付き鉄筋とみがき鉄筋を用いて中性化後の鉄筋腐食速度を測定し、両者の比較により鉄筋の黒皮の有無が中性化後の鉄筋腐食速度におよぼす影響を検討した。みがき鉄筋では、黒皮付き鉄筋と比較して中性化後の鉄筋腐食速度が大きくなった。また、みがき鉄筋では、暴露試験の開始直後に鉄筋腐食速度が急増し、材齢経過に伴い鉄筋腐食速度が低下した。みがき鉄筋の鉄筋腐食速度を用いると、暴露環境の相対湿度によっては、黒皮付き鉄筋より中性化後の耐用年数が短くなる場合がある。中性化後の鉄筋腐食を考慮した耐久性評価を考える上では、鉄筋の黒皮の影響を適切に考慮する必要があると考えられる。

キーワード：中性化, 鉄筋腐食, 黒皮, みがき鋼, 腐食電流密度, 腐食面積率

1. はじめに

近年、中性化が進行しても水分供給がなければ鉄筋腐食は進行しないことから、中性化を許容し、鉄筋腐食の進行により耐久性評価を行う考え方が提案されている。この考え方に拠れば、中性化速度が比較的大きいとされる、セメントの大部分を高炉スラグ微粉末などの産業副産物に置換した環境配慮型のコンクリート²⁾の耐久性を、合理的に評価することができる。

中性化後の鉄筋腐食の進行を実験的に把握しようとした研究³⁾は古くからある。その多くは、限られた研究期間内に鉄筋腐食を進行させるため、鉄筋表面の保護皮膜である黒皮を除去したみがき鉄筋が用いられている。しかしながら、みがき鉄筋では、ひとたびコンクリートが中性化すると鉄筋腐食速度が急増し、数年で腐食ひび割れが発生する限界腐食量まで達してしまう。長期にわたって供用された実建物の躯体調査結果⁴⁾では、鉄筋の黒皮が健全に存在しており、中性化後も急激な鉄筋腐食が生じていない場合が多い。そのため、みがき鉄筋における算定結果は、過度に保守的な評価と言わざるを得ない。実建物に対して、中性化を許容し、鉄筋腐食の進行により耐久性評価を行うためには、鉄筋表面の黒皮の影響を適切に考慮する必要がある。

本研究は、黒皮付き鉄筋とみがき鉄筋をコンクリート中に埋設した試験体を作製し、事前に促進中性化させた。その後、相対湿度が異なる環境で暴露試験を行い、鉄筋腐食速度を測定し、両者の比較により、鉄筋の黒皮の有無が中性化後の鉄筋腐食速度におよぼす影響を検討した。

2. 研究概要

2.1 実験シリーズ

本研究は、表-1に示す2つの実験シリーズからなる。

シリーズ1では、相対湿度が異なる環境に鉄筋をそのままの状態暴露して、鉄筋腐食状況を確認した。シリーズ2では、鉄筋をコンクリート中に埋設した試験体を事前に促進中性化させた後、相対湿度が異なる環境で暴露試験を行い、中性化後の鉄筋腐食速度を測定した。

2.2 シリーズ1の概要

シリーズ1では、相対湿度が異なる環境に黒皮付き鉄筋とみがき鉄筋をそのままの状態暴露して、目視により5段階の腐食グレード⁴⁾で鉄筋腐食状況を確認した。

黒皮付き鉄筋は、SS400の丸鋼(φ12mm)とした。みがき鉄筋は、同一ロットの黒皮付きの丸鋼を、クエン酸二アンモニウム塩水溶液に浸漬して黒皮を取り除いたものとした。暴露試験の環境は、20℃で相対湿度60, 75, 90, 100%RHおよび屋外暴露の5水準とした。相対湿度100%RHの条件は、底部に水を張ったコンテナ内に試験体を静置した。相対湿度90, 75%RHの条件は、エアコンと加湿器による制御とした。相対湿度60%RHの条件は、JIS A 1129に準拠した恒温恒湿室を用いた。いずれも、温度は20℃±2℃、相対湿度は±3%RHで管理した。屋外暴露の条件は、東京都内の屋根のない(雨掛かり)アスファルト上に試験体を静置した。なお、暴露地点の外気温の測定値は、夏季の8月に最高気温が35℃、冬季の1月に最低気温が0℃となるような環境である。

表-1 実験シリーズ

シリーズ	概要
1	相対湿度が異なる環境に鉄筋をそのままの状態暴露して、鉄筋腐食状況を確認した
2	鉄筋を埋設した鉄筋コンクリート試験体を促進中性化させた後、相対湿度が異なる環境に暴露して、鉄筋腐食速度を測定した

*1 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*2 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 上級首席技師 博士(工学) (正会員)

*3 株式会社大林組 技術研究所 生産技術研究部 副主任研究員 (正会員)

*4 東京理科大学 創域理工学部 建築学科 教授 博士(工学) (正会員)

2.3 シリーズ2の概要

(1) 実験計画

実験の流れを図-1に示す。実験計画を表-2、鉄筋コンクリート試験体の概要を図-2に示す。シリーズ2では、100×100×400mmの角柱に、黒皮付き鉄筋とみがき鉄筋をかぶり厚さが20mmとなるよう埋設した試験体を作製した。促進中性化試験および暴露試験における試験体の境界条件は、コンクリートの打込み側面1面を暴露面とし、その他の外周3面と小口2面はエポキシ樹脂でシールした。コンクリートの調合条件は、水セメント比を60%、セメント種別を高炉セメントB種とした。試験体数は暴露試験環境ごとに2体とした。また、促進中性化試験の測定用として、無筋試験体を別途2体作製した。

試験体の作製後は、初期養生としてJASS5の普通ポルトランドセメントの湿潤養生期間に相当する封かん養生5日間を行った。初期養生後は、湿度が管理されていない屋内で9日間の気中養生を行い、材齢14日から促進中性化試験を開始した。促進中性化試験は、JISA1153に準じて行い、温度20℃、相対湿度60%RH、CO₂濃度5%とした。中性化深さの目標値は、埋設した丸鋼φ12mmの全域が中性化域となる32mmとした。促進中性化後は、シリーズ1と同様に5水準の相対湿度が異なる環境で暴露試験を行った。暴露試験中には、定期的に鉄筋の自然電位、分極抵抗、腐食面積率、腐食減量を測定した。

(2) 鉄筋腐食の測定

自然電位および分極抵抗の測定は、ポータブル型分極抵抗測定装置（交流インピーダンス法）により行った。自然電位の測定は、JSCE-E 601（コンクリート構造物における自然電位測定方法）に準じて行った。分極抵抗の測定は、土木学会の338委員会試案⁵⁾を参考として、10mVの交流電圧を印加して10Hz～0.01Hzの7点の周波数で、見掛けの分極抵抗を測定した。その後、金田らの報告⁶⁾を参考として、BEMモデルによる電流分布シミュレーションを行い、測定した見掛けの分極抵抗から鉄筋の真の分極抵抗へと変換した。なお、分極抵抗の逆数と腐食電流密度には比例関係が認められるが⁷⁾、本研究ではその比例定数（K値）を0.026Vの一定値として、腐食電流密度を算定した。測定は暴露試験材齢ごとに試験体2体で行い、測定結果は2体の平均値により整理した。

腐食面積率と腐食減量の測定は、JCI-SC1⁸⁾に準じて行った。ともに破壊試験となるため、試験体の端部から長さ100mm部分の鉄筋を切り出して測定した。また、試験体数に限りがあったため、試験体の破壊を伴うこれらの測定は、暴露試験材齢ごとに試験体2体のうち1体のみで行った。なお、黒皮付き鉄筋では、健全な鉄筋の黒皮も腐食減量として測定されるため、掛川らの報告⁹⁾を参考として、黒皮の減量分を補正した腐食減量を算定した。

(3) コンクリートの使用材料、調合、基礎性状

コンクリートの使用材料を表-3、コンクリートの調合を表-4に示す。水セメント比は60%、単位水量は182kg/m³とし、化学混和剤はAE減水剤を使用した。

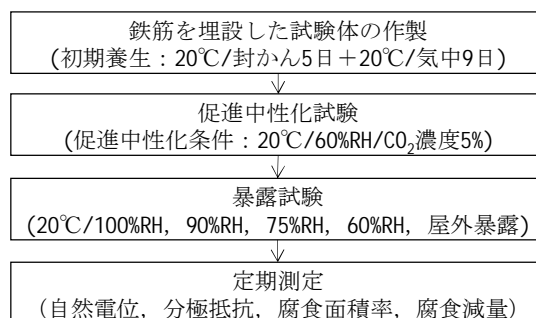


図-1 実験の流れ

表-2 実験計画

項目	内容	
試験体条件	形状	100×100×400mm
	境界条件	打込み側面1面: 暴露面 その他5面: シール
	水セメント比	60%
	セメント種別	高炉セメントB種 (BB)
	鉄筋種別	黒皮付き鉄筋 (SS400 丸鋼φ12mm) みがき鉄筋 (SS400 丸鋼φ12mm)
かぶり厚さ	20mm	
環境条件	初期養生	20℃封かん5日+20℃気中9日
	促進中性化試験	JISA1153: 20℃, 60%RH, CO ₂ 濃度5% 中性化深さの目標値: 32mm
	中性化後の暴露試験	20℃/60%RH, 75%RH, 90%RH, 100%RH, 屋外暴露

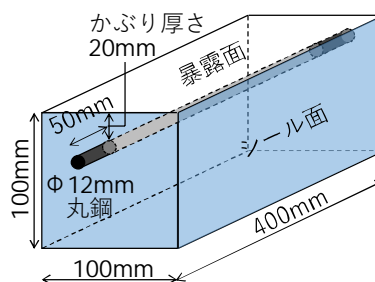


図-2 鉄筋コンクリート試験体の概要

表-3 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)
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	青梅産砕石 (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	AE	AE減水剤

表-4 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE (C×%)
		W	BB	S	G	
60	49.5	182	303	871	906	0.4

コンクリートの基礎性状を表-5に示す。スランブの目標値は 18 ± 2.5 cm、空気量の目標値は 4.5 ± 1.5 とし、いずれも目標値を満足した。圧縮強度は、標準養生28日で 26.8N/mm^2 、封かん養生91日で 34.4N/mm^2 となった。

3. 実験結果および考察

3.1 大気中における鉄筋の腐食状況（シリーズ1）

相対湿度が異なる環境に鉄筋をそのままの状態ですら1371日間暴露した後の鉄筋腐食状況を写真-1に示す。

黒皮付き鉄筋は、60%RH、75%RHおよび100%RHでは鉄筋腐食は認められなかった。60%RH、75%RHは比較的乾燥した環境であり、腐食反応に必要な水分供給がなかったため、100%RHは湿潤環境であり、腐食反応に必要な酸素供給がなかったためと考えられる。90%RHでは、水分と酸素がともに一定量存在している状態であり、腐食グレードⅡ～Ⅲに相当する鉄筋腐食が認められた。屋外暴露では、乾湿繰返しを受ける状態であり、腐食グレードⅣに相当する激しい鉄筋腐食が認められた。

みがき鉄筋は、60%RHでは鉄筋腐食は認められなかった。100%RHでは腐食グレードⅡ、75%RHでは腐食グレードⅡ～Ⅲに相当する軽微な鉄筋腐食が認められた。90%RHでは腐食グレードⅢ、屋外暴露では腐食グレードⅣに相当する激しい鉄筋腐食が認められた。

大気中に暴露した鉄筋は、コンクリート中とは異なり大気中から酸素が供給されやすく、わずかでも水分供給があれば、鉄筋腐食が進行する条件になると考えられる。

3.2 コンクリートの中性化の進行（シリーズ2）

促進中性化試験の結果、材齢193日において中性化深さが32.7mmとなり、中性化深さの目標値である32mmに到達したため、暴露試験へ移行した。

3.3 自然電位による鉄筋の腐食状態（シリーズ2）

中性化後の暴露試験におけるコンクリート中の鉄筋の自然電位の変化を図-3に示す。各プロットのエラーバーは試験体2体の最大値と最小値を示す。図中には、ASTMの腐食判定基準¹⁰⁾を併記した。

黒皮付き鉄筋は、60%RH、75%RH、90%RHではASTMの判定基準によれば腐食なし～不確定、相対湿度100%RH、屋外暴露では不確定～腐食ありと判定された。

みがき鉄筋では、暴露環境の違いによらず、暴露試験の開始直後から急激に卑化し、腐食ありと判定された。その後、暴露試験の材齢経過に伴い、100%RHを除いて貴化に転じ、暴露試験日数が2386日で自然電位は -200mV vs. CSE を上回り、長期材齢の経過後は、腐食電池が形成される状態ではなくなったと判断できる。このように、経時変化を確認せずに長期材齢のみで自然電位の測定を行った場合、実際に鉄筋腐食が生じている場合でも、腐食なしと誤判定される可能性がある。

3.4 はつり出しによる鉄筋の腐食状況（シリーズ2）

中性化後のコンクリート中の鉄筋腐食状況を写真-2に示す。

黒皮付き鉄筋は、60%RH、75%RHでは鉄筋腐食は認められなかった。90%RH、100%RHでは腐食グレードⅢに相当する鉄筋腐食が認められた。屋外暴露では腐食グレードⅢ～Ⅳに相当する激しい鉄筋腐食が認められた。

みがき鉄筋は、60%RH、75%RHであっても腐食グレードⅢに相当する鉄筋腐食が認められた。100%RHでは

表-5 コンクリートの基礎性状

スランブ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)	UW (kg/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)	
				標準 28日	封かん 91日
18.0	5.5	20	2266	26.8	34.4

CT：コンクリート温度，UW：単位容積質量

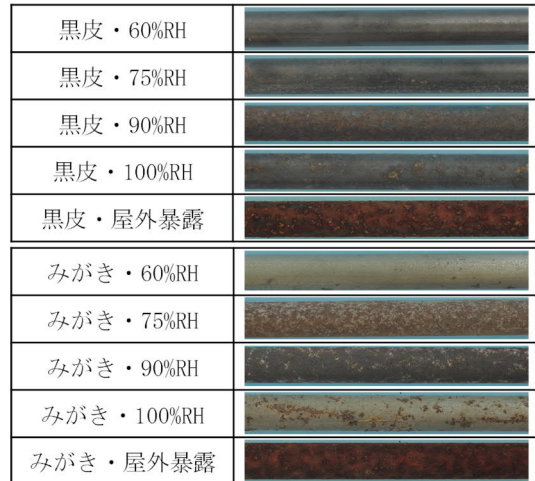


写真-1 大気中での鉄筋腐食状況（暴露期間 1371日）

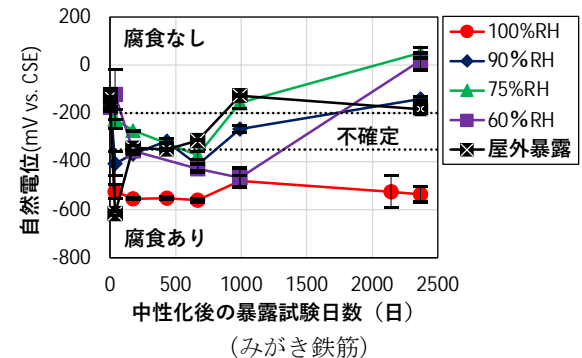
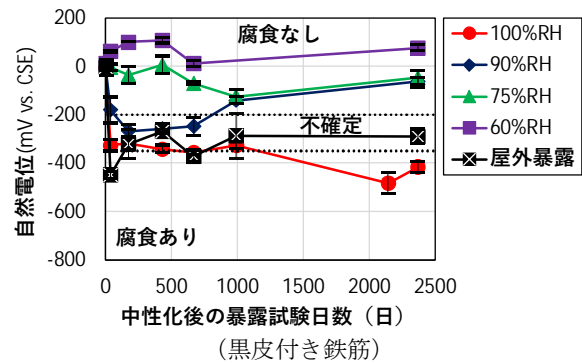


図-3 中性化後のコンクリート中の鉄筋の自然電位

腐食グレードⅢ～Ⅳ, 90%RH, 屋外暴露では腐食グレードⅣに相当する激しい鉄筋腐食が認められた。

3.5 腐食電流密度による鉄筋の腐食速度 (シリーズ2)

中性化後の暴露試験におけるコンクリート中の鉄筋の腐食電流密度の変化を図-4 に示す。各プロットのエラーバーは試験体2体の最大値と最小値を示す。図中には、RILEMの鉄筋腐食速度の判定基準を併記した¹¹⁾。

黒皮付き鉄筋では、暴露環境条件の違いによらず、本実験の暴露試験の期間にわたって、RILEMの判定基準によれば不動態状態～低い腐食速度と判定された。

みがき鉄筋では、暴露試験の開始直後から腐食電流密度が急増し、90%RH, 100%RH, 屋外暴露では高い腐食速度、60%RH, 75%RH であっても中程度の腐食速度の判定領域に達した。その後、暴露試験の材齢経過に伴い腐食電流密度は低下し、暴露試験日数が 2386 日で腐食電流密度は $0.5 \mu A/cm^2$ を下回り、低い腐食速度もしくは不動態状態と等しい状態になった。この理由については、次節の腐食面積率のところを考察する。

3.6 はつり出しによる鉄筋の腐食面積率 (シリーズ2)

中性化後におけるコンクリート中の鉄筋の腐食面積率を図-5 に示す。

黒皮付き鉄筋では、60%RH～100%RH では、本実験の暴露試験の期間にわたって、腐食面積率は20%以下と小さく、鉄筋腐食は軽微であった。一方、屋外暴露では、暴露試験日数が 2368 日で腐食面積率が 60%程度まで増加し、黒皮付き鉄筋でも鉄筋腐食の進行が認められた。

みがき鉄筋では、暴露環境条件の違いによらず、暴露

試験の開始直後から腐食面積率が急増し、暴露試験日数が 173 日で腐食面積率は概ね 80%を上回った。

なお、シリーズ1では、100%RH で鉄筋腐食がほぼ生じなかったのに対し、シリーズ2では鉄筋腐食が確認された。この理由として、暴露試験前の促進中性化試験を60%RHで行ったため、中性化後に100%RHとした水準も、鉄筋近傍のコンクリートが飽水状態まで戻らず、酸素が供給される状態であったためと考えられる。

ここで、先述したみがき鉄筋において暴露試験の開始直後に腐食電流密度が急増し、暴露試験の材齢経過に伴い腐食電流密度が低下した理由を、図-4 と図-5 を比較して考察する。掛川ら⁹⁾は、鉄筋コンクリート試験体の長期暴露試験により、鉄筋腐食が進行して、鉄筋周囲

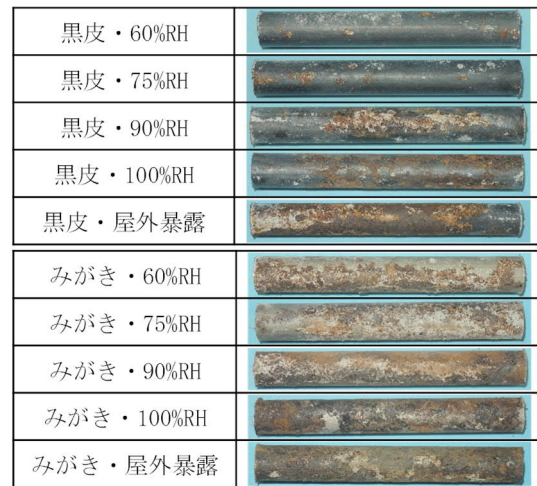


写真-2 中性化後のコンクリート中の鉄筋腐食状況 (暴露期間 2368 日)

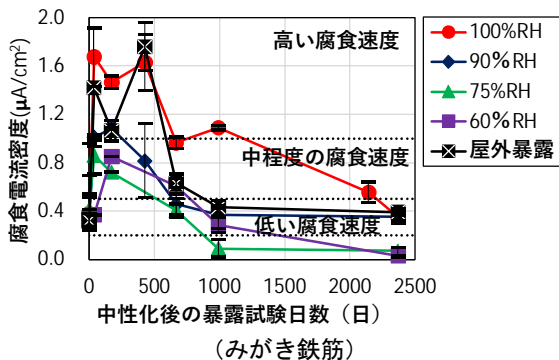
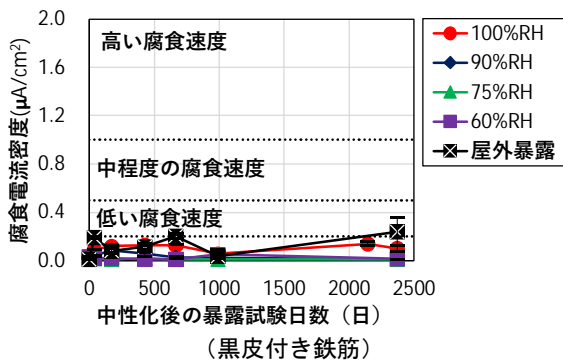


図-4 中性化後のコンクリート中の鉄筋の腐食電流密度

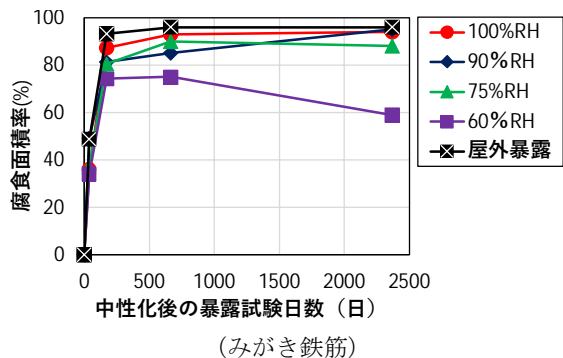
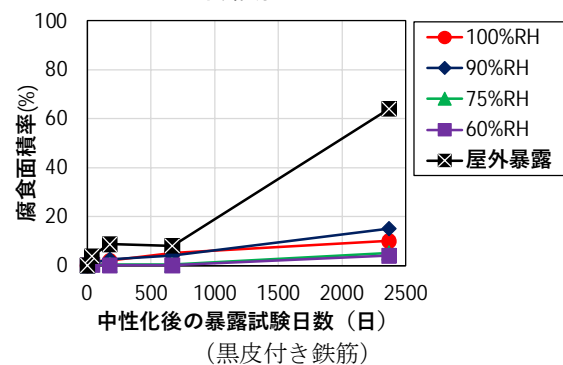


図-5 中性化後のコンクリート中の鉄筋の腐食面積率

が腐食生成物に覆われると、鉄筋の腐食反応に必要なとされる酸素の供給が遮断されるため、鉄筋腐食速度が低下することを報告している。本実験においても、図-5より暴露試験日数が173日で、腐食面積率は概ね80%を超えており、鉄筋のほぼ全面が腐食生成物で覆われた状態になっている。ここで、図-4を見ると、暴露試験日数が173~429日を起点として腐食電流密度が低下している。みがき鉄筋では、中性化後に鉄筋腐食が進行して鉄筋周囲が腐食生成物で覆われたため、長期暴露後の鉄筋腐食速度が低下したと考えられる。なお、黒皮付き鉄筋でも、暴露期間が長期におよぶと鉄筋腐食速度が同様に变化する可能性があるが、みがき鉄筋と比較して中性化後の鉄筋腐食速度は非常に小さいため、筆者らの既報¹²⁾では、中性化後の鉄筋腐食速度は一定値と仮定している。

3.7 はつり出しによる鉄筋の腐食減量（シリーズ2）

中性化後のコンクリート中の鉄筋の腐食減量を図-6に示す。

黒皮付き鉄筋では、60%RH、75%RHでは、本実験の暴露試験の期間にわたって、腐食減量は2mg/cm²以下となり、鉄筋腐食は認められなかった。100%RH、90%RH、屋外暴露では、暴露試験日数が2368日の腐食減量は、それぞれ4、8、13mg/cm²となった。

みがき鉄筋では、暴露試験の開始直後から急激に鉄筋腐食が進行し、暴露試験日数が37日の腐食減量は4~8mg/cm²と大きくなった、その後、暴露試験の材齢経過に伴い鉄筋腐食速度は停滞する傾向が認められ、暴露試験日数が2368日の腐食減量は60%RH、75%RHでは7~8mg/cm²、90%RH、100%RH、屋外暴露では16mg/cm²と極めて大きくなった。このことは、みがき鉄筋を用いた実験から取得した初期の鉄筋腐食速度を一定値として、鉄筋腐食による中性化後の耐用年数を算定した場合、実際の劣化状態と比較して、耐用年数が極端に短くなる可能性があることを示唆している。

4. 実験結果に基づいた鉄筋腐食による中性化後の耐用年数の試算

みがき鉄筋では、黒皮付き鉄筋と比較して中性化後の鉄筋腐食速度が大きくなった。そこで、既報¹²⁾を参考にし、実験により得られた中性化後の鉄筋腐食速度を用いて、黒皮付き鉄筋とみがき鉄筋のそれぞれに対して、鉄筋腐食による中性化後の耐用年数を試算した。

最初に、本実験により得られた腐食電流密度を、鉄筋腐食速度へと換算する。換算には、両者が比例関係にあるとする、ファラデーの第二法則による式(1)⁹⁾を用いた。

$$V_{\text{corr}} = 9.13 \times I_{\text{corr}} \quad (1)$$

ここに、 V_{corr} ：鉄筋腐食速度(mg/cm²/year)

I_{corr} ：腐食電流密度(μ A/cm²)

図-4より、黒皮付き鉄筋では、同一の含水状態であれば、暴露試験期間にわたり鉄筋腐食速度は概ね一定と評価できるため、安全側に腐食電流密度の最大値を採用した。一方、みがき鉄筋では、暴露試験の開始直後と長期暴露後で鉄筋腐食速度が異なるため、それぞれ耐用年数を試算した。なお、前者を初期腐食速度(暴露試験日数が0~429日の最大値を採用)、後者を長期腐食速度(暴露試験日数が2386日の値を採用)と呼ぶこととする。

次に、鉄筋腐食により耐久性評価を行うにあたって、鉄筋腐食の限界状態を設定する。本検討では、腐食ひび割れが発生する時点を限界状態として定義し、腐食ひび割れが発生する限界腐食量を算定することとする。本間ら¹³⁾は、水結合材比、かぶり厚さ、鉄筋径をパラメータとして、実験とRBSMによる弾塑性解析により腐食ひび割れが発生する限界腐食量の予測式を提案している。かぶり厚さ20mmでは51~66mg/cm²となるため、本研究では安全側として下限値である51mg/cm²と設定した。

鉄筋腐食による中性化後の耐用年数を図-7に示す。ここで算定される耐用年数とは、コンクリートが中性化した後、限界腐食量に達するまでの期間を示している。

黒皮付き鉄筋では、60%RH、75%RHでは、鉄筋の腐食反応に必要な水分供給がないため、中性化後の鉄筋腐食速度はほぼ0であり、中性化後の耐用年数は200年を超えた。一方、90%RHでは66年、100%RHでは40年、屋外暴露では23年となった。

みがき鉄筋(初期腐食速度)では、暴露環境条件の違いによらず、中性化後の鉄筋腐食速度が大きくなり、中性化後の耐用年数は、乾燥した環境である60%RHで

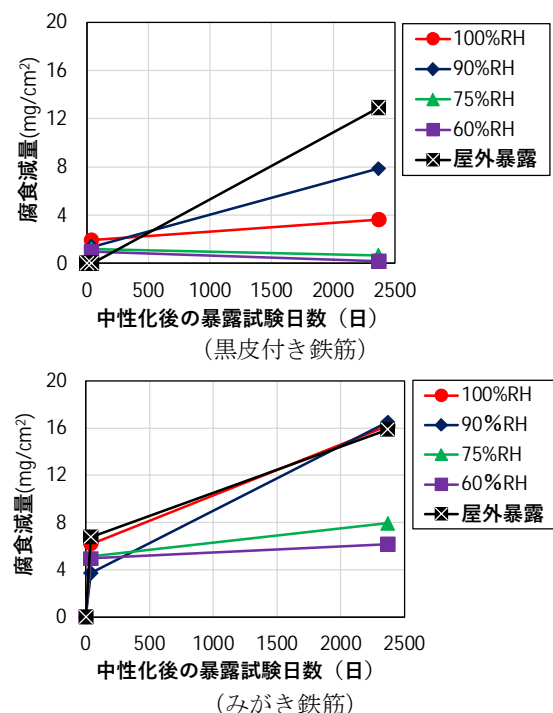


図-6 中性化後のコンクリート中の鉄筋の腐食減量

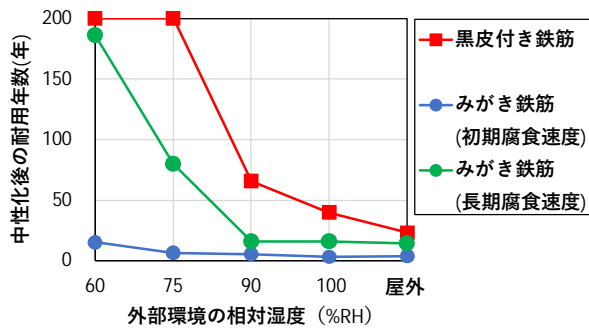


図7 鉄筋腐食による中性化後の耐用年数

15年、75%RH以上では6年以下と短くなった。

みがき鉄筋（長期腐食速度）では、中性化後の耐用年数は60%RHで186年、75%RHで80年となり、長期暴露後に鉄筋腐食速度が停滞する現象が反映される形となり、耐用年数が長くなった。また、90%RH以上では、中性化後の耐用年数は16年となった。

黒皮付き鉄筋とみがき鉄筋での、中性化後の耐用年数を比較する。みがき鉄筋（初期腐食速度）の実験結果を用いた場合には、相対湿度に関わらず、黒皮付き鉄筋よりも中性化後の耐用年数が大幅に短くなった。一方、みがき鉄筋（長期腐食速度）の実験結果を用いた場合には、相対湿度が75%RH、90%RH、100%RHでは、黒皮付き鉄筋よりも中性化後の耐用年数が短くなる傾向が認められたが、相対湿度が60%RHおよび屋外暴露では、黒皮付き鉄筋の場合と概ね同等となった。今後、中性化後の鉄筋腐食を考慮した耐久性評価を考える上では、鉄筋の黒皮の影響を適切に考慮する必要があると考えられる。

5. まとめ

黒皮付き鉄筋とみがき鉄筋を用いて中性化後の鉄筋腐食速度を測定し、両者の比較により鉄筋の黒皮の有無が中性化後の鉄筋腐食速度におよぼす影響を検討した。

得られた結果を以下に示す。

- (1) 相対湿度が異なる環境に、鉄筋をそのままの状態暴露し、鉄筋腐食状況を確認した。大気中に暴露した鉄筋では、大気中から酸素が供給されやすく、水分供給がわずかでも鉄筋腐食が進行する条件となる。
- (2) みがき鉄筋では、黒皮付き鉄筋と比較して中性化後の鉄筋腐食速度が大きくなった。
- (3) みがき鉄筋では、暴露試験の開始直後に鉄筋腐食速度が急増し、材齢経過に伴い鉄筋腐食速度が低下した。この理由として、鉄筋周囲が腐食生成物に覆われて、酸素の供給が遮断されたためと考えられる。
- (4) みがき鉄筋の鉄筋腐食速度を用いると、暴露環境の相対湿度によっては、黒皮付き鉄筋より中性化後の耐用年数が短くなる場合がある。中性化後の鉄筋腐食を考慮した耐久性評価を考える上では、鉄筋の黒

皮の影響を適切に考慮する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 兼松学ほか：鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考—一次世代の耐久設計—, 2023年度日本建築学会大会（近畿）材料施工研究協議会資料, 2023
- 2) 溝渕麻子ほか：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状（その1）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.185-186, 2011
- 3) 森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート構造物の寿命予測に関する研究, 東京大学学位論文, 1976
- 4) 日本建築学会：高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説(1991), pp.74, 1991.7
- 5) 土木学会：コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会（338委員会）報告書, pp.253-255, 2009.10
- 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) M. Stern and A. L. Geary: Electrochemical Polarization, I. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves, Journal of electrochemical Society, Vol.104, No.1 pp.56-63, 1957
- 8) 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集（1977～2002年度）, JCI-SC1 コンクリートの鋼材の腐食評価方法, pp.91-94, 2004.4
- 9) 掛川勝ほか：コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす温度および中性化の影響に関する促進腐食実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.682, pp.1809-1818, 2012.12
- 10) ASTM C876-09: Standard Test Method for half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2009
- 11) 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, 2004.11
- 12) 酒井正樹ほか：中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮したRC造建築物の耐久性評価に関する研究（その1）：セメント種別と水セメント比が異なる試験体における実験結果, 日本建築学会構造系論文集, Vol.85, No.777, pp.1355-1365, 2020
- 13) 本間大輔ほか：鉄筋の腐食ひび割れ発生限界腐食量に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.701, pp.867-876, 2014.7