

学位論文

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手法に関する研究

2024 年 3 月

酒井 正樹

# 要 旨

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート造（以下、RC 造という）建築物の多くが建築後 50 年を経過し、使用を継続するか、解体するか判断が迫られている。既存の建築ストックを継続使用する選択がされると、経済性だけではなく、国連の持続可能な開発サミットで採択された「持続可能な開発目標：Sustainable Development Goals (SDGs)」の観点からも有益と言える。

RC 造建築物の寿命を決める耐久性は、塩害や凍害など特殊な環境条件に置かれる場合を除き、設計から維持管理に至るまで、鉄筋腐食を引き起こす要因とされるコンクリートの中性化深さの進行に基づいて評価されてきた。一方、近年では、長期供用後に解体される既存 RC 造建築物を中心に耐久性調査が行われ、鉄筋位置までコンクリートの中性化が進行しても、鉄筋の腐食因子となる水分供給がない部位では、鉄筋腐食の進行は無視できる程度に小さいことが明らかとなった。この事実は、中性化の進行だけで RC 造建築物の耐久性評価を行うと、まだ十分に継続使用が可能な建築物であっても、解体の判断が下されることを意味する。

こうした状況を背景として、RC 造建築物の耐久性をコンクリートの中性化深さだけで評価するのではなく、中性化後の鉄筋腐食速度の進行を考慮して評価する考え方が議論されている。このような、中性化の進行を許容した上で、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮して耐久性を評価する考え方を採ることにより、従来の耐久性評価では解体の判断が下されていた既存の RC 造建築物に対して、より長期間の供用を計画することが可能となる。

本研究は、RC 造建築物の耐久性を対象として、従来のコンクリートの中性化を指標とした耐久性評価手法に対して、コンクリートの中性化後における鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法の構築を目的とした実験的研究である。

中性化後における鉄筋腐食の進行を予測するためには、鉄筋腐食の挙動を速度として捉える必要がある。金属腐食化学の理論では、大気中における鉄の腐食速度は、鉄の溶解速度と酸素の拡散速度で整理される。一方、RC 造建築物では、鉄筋周囲は多孔体のコンクリートに覆われており、同様の理論をそのまま適用することは難しい。また、既存 RC 造建築物の耐久性調査結果から理論を構築しようとしても、コンクリートの使用材料や強度、供用期間中の環境条件が一定ではないため、鉄筋腐食速度を定量的に示すことは困難であった。

そこで本研究では、使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定した。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。この実験結果を基に、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法を提案した。

また、実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。加えて、乾湿繰返しを受ける部材に対しても、水分移動解析によりコンクリート中の水分状態を予測し、中性化後の鉄筋腐食速度を算定することで、提案し

た耐久性評価手法が適用できることを確認した。

本研究の結論を以下に示す。

- (1) 使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定する実験的検討を行った。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。
- (2) 外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、セメント種別、水セメント比、混和材を高含有したコンクリートのいずれに対しても、同様の傾向となることを確認した。
- (3) 外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、中性化残りが 0mm 以下ではほぼ同等とみなせる範囲であり、中性化深さがかぶり厚さに到達した以降の鉄筋腐食速度は、ほぼ一定とみなせることを確認した。
- (4) 外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、ひび割れ部においても同様の傾向が認められた。
- (5) かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係に基づいて、中性化後の鉄筋腐食を考慮した新しい耐久設計手法を提案した。
- (6) 実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。
- (7) 乾湿繰返しを受ける部材に対して、水分移動解析によりコンクリート中の水分状態を予測し、中性化後の鉄筋腐食速度を算定することで、提案した耐久性評価手法が適用できることを確認した。

本研究の構成を以下に示す。

1 章では、本研究の背景、目的、構成を示した。

2 章では、中性化を指標とした耐久性評価手法、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法、コンクリート中の鉄筋腐食速度の測定方法について、調査の研究を取りまとめた。

3 章では、使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定した。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。

4 章では、3 章で定式化した外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度に基づいて、中性化後の鉄筋腐食を考慮した新たな耐久性評価手法を提案した。さらには、実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。

5 章では、乾湿繰返しを受ける部材に対して、水分移動解析を介することにより、提案した新たな耐久性評価手法が適用できることを確認した。

6 章では、本研究の結論として、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手法に関する研究全体を取りまとめた。

# 目 次

1. はじめに .....	1
1.1 本研究の背景 .....	1
1.2 本研究の目的 .....	3
1.3 本研究の構成 .....	4
2. 既往の研究 .....	9
2.1 中性化を指標とした耐久性評価手法に関する既往の研究 .....	9
2.1.1 中性化を指標とした耐久性評価手法の現状	
2.1.2 中性化の進行速度におよぼす各種要因	
2.1.3 ひび割れなどの局所的な劣化部が中性化の進行速度におよぼす影響	
2.1.4 実構造物における中性化の実態調査	
2.2 鉄筋腐食の進行に基づいた耐久性評価手法に関する既往の研究 .....	23
2.2.1 鉄筋腐食の進行に基づいた耐久性評価手法の現状	
2.2.2 鉄筋腐食の進行速度におよぼす各種要因	
2.2.3 ひび割れなどの局所的な劣化部が鉄筋腐食の進行速度におよぼす影響	
2.2.4 実構造物における鉄筋腐食の実態調査	
2.3 コンクリート中における鉄筋腐食速度の測定方法 .....	46
2.3.1 電気化学的測定方法	
(1) 自然電位	
(2) 分極抵抗	
(3) コンクリート抵抗	
2.3.2 鉄筋腐食特性（腐食グレード、腐食面積率、腐食減量）の測定方法	
3. 外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度の実験的検討 .....	56
3.1 3章の位置付け .....	56
3.2 コンクリート材料・調合が異なる場合の鉄筋腐食速度 .....	57
3.2.1 3.2 節の概要	
3.2.2 実験計画	
3.2.3 実験方法および測定方法	
3.2.4 試験体の作製およびフレッシュ性状	
3.2.5 試験結果および考察	
(1) 圧縮強度、塩化物量、促進中性化試験および暴露試験の日数	
(2) 含水率	
(3) 自然電位による鉄筋の腐食状態	
(4) 腐食面積率、腐食減量による鉄筋の腐食状況	

(5) 腐食電流密度による鉄筋の腐食速度	
3.2.6 3.2 節の結論	
3.3 中性化残りが異なる場合の鉄筋腐食速度 .....	84
3.3.1 3.3 節の概要	
3.3.2 実験計画	
3.3.3 実験方法および測定方法	
3.3.4 試験体の作製およびフレッシュ性状	
3.3.5 試験結果および考察	
(1) 圧縮強度，促進中性化試験および暴露試験の日数	
(2) 含水率	
(3) 自然電位による鉄筋の腐食状態	
(4) 腐食電流密度による鉄筋の腐食速度	
3.3.6 3.3 節の結論	
3.4 ひび割れ部における鉄筋腐食速度 .....	102
3.4.1 3.4 節の概要	
3.4.2 実験計画	
3.4.3 実験方法および測定方法	
3.4.4 試験体の作製およびフレッシュ性状	
3.4.5 実験結果および考察	
(1) 促進中性化深さ	
(2) 含水率	
(3) 鉄筋腐食速度	
(4) 鉄筋取出しによる表面観察および腐食面積率	
3.4.6 3.4 節の結論	
3.5 混和材を高含有したコンクリートの鉄筋腐食速度 .....	119
3.5.1 3.5 節の概要	
3.5.2 実験計画	
3.5.3 実験方法および測定方法	
3.5.4 試験体の作製およびフレッシュ性状	
3.5.5 実験結果および考察	
(1) 圧縮強度，促進中性化試験および暴露試験の日数	
(2) 含水率	
(3) 自然電位による鉄筋の腐食状態	
(4) 腐食電流密度による鉄筋の腐食速度	
3.5.6 3.5 節の結論	
3.6 3 章の結論 .....	130
4. 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の提案と実設計例 .....	134
4.1 4 章の位置付け .....	134
4.2 外部環境が一定条件の場合の腐食環境の整理 .....	135

4.3 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の提案 .....	138
4.3.1 4.3 節の概要	
4.3.2 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の提案	
4.3.3 中性化を指標とした耐用年数の算定	
4.3.4 鉄筋腐食を指標とした耐用年数の算定	
4.3.5 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定	
4.3.6 提案手法（鉄筋腐食を指標）と従来の JASS 5（中性化を指標）の評価の比較	
4.3.7 4.3 節の結論	
4.4 実設計で再利用を計画した既存建築物への耐久性評価手法の適用例 .....	166
4.4.1 4.4 節の概要	
4.4.2 既存地下躯体の再利用における確認項目	
4.4.3 中性化を指標とした耐用年数評価	
(1) 概要	
(2) かぶり厚さおよび中性化深さの調査	
(3) 中性化を指標とした耐用年数の算定	
4.4.4 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数評価	
(1) 概要	
(2) 鉄筋腐食状況および含水率の調査	
(3) 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定	
4.4.5 実設計および維持管理計画の立案	
4.4.6 4.4 節の結論	
4.5 4 章の結論 .....	181
5 乾湿繰返しを受ける部材に対する提案した耐久性評価手法の適用性検討 .....	183
5.1 5 章の位置付け .....	183
5.2 外部環境が乾湿繰返し条件の場合の腐食環境の整理 .....	184
5.3 既存建築物の調査による鉄筋位置の水分状態と鉄筋腐食速度の検討 .....	185
5.3.1 5.3 節の概要	
5.3.2 既存建築物の調査概要	
5.3.3 既存建築物の調査結果および中性化後の鉄筋腐食速度に関する考察	
(1) 各種要因が中性化後の鉄筋の自然電位におよぼす影響	
(2) 各種要因が中性化後の鉄筋の腐食電流密度におよぼす影響	
(3) 各種要因が中性化後の鉄筋の腐食グレードにおよぼす影響	
5.3.4 5.3 節の結論	
5.4 乾湿繰返しを受ける部材の鉄筋位置の水分状態の実測 .....	201
5.4.1 5.4 節の概要	
5.4.2 RC 造の打放し外壁内部の相対湿度の測定計画	
5.4.3 RC 造の打放し外壁内部の相対湿度の測定結果	
5.4.4 5.4 節の結論	
5.5 乾湿繰返しを受ける部材に対する提案した耐久性評価手法の適用性検討 .....	209

5.5.1	5.5 節の概要	
5.5.2	乾湿繰返しを受ける部材の鉄筋位置の水分状態の解析的検討	
5.5.3	乾湿繰返しを受ける部材に対する提案した耐久性評価手法の適用性検討	
5.5.4	5.5 節の結論	
5.6	5 章の結論	222
6.	本研究の結論	224

## 1. はじめに

### 1.1 本研究の背景

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート造（以下、RC 造という）建築物の多くが建築後 50 年を経過し、使用を継続するか、解体するか判断が迫られている<sup>[1-1]</sup>。既存の建築ストックを継続使用する選択がされると、経済性だけではなく、国連の持続可能な開発サミットで採択された「持続可能な開発目標：Sustainable Development Goals (SDGs)」の観点からも有益と言える<sup>[1-2]</sup>。

RC 造建築物の長期供用は、構造安全性のほか意匠性、使用性、耐久性など、多くの側面から判断されることが多い。例えば、構造安全性については建築基準法をはじめとして耐震改修促進法など、意匠性についてはバリアフリー新法など、維持管理における健全性評価と対策方法が法制化されているものもある。本報で対象とした材料の耐久性は、塩害や凍害など特殊な環境条件に置かれる場合を除き、設計から維持管理に至るまで、鉄筋腐食を引き起こす要因とされるコンクリートの中酸化深さの進行に基づいて評価されてきた。

一方、近年では、日本建築学会の RC 造建築物の耐久設計小委員会<sup>[1-3]</sup>をはじめとして、長期にわたって供用された後、解体される既存 RC 造建築物を中心に耐久性調査が行われ、鉄筋位置までコンクリートの中酸化が進行しても、鉄筋の腐食因子となる水分供給がない部位では、鉄筋腐食の進行は無視できる程度に小さいことが明らかとなった<sup>[1-4]・[1-5]</sup>。この事実は、中酸化の進行だけで RC 造建築物の耐久性評価を行うと、まだ十分に継続使用が可能な建築物であっても、解体の判断が下されることを意味する。

こうした状況を背景として、RC 造建築物の耐久性をコンクリートの中酸化深さだけで評価するのではなく、中酸化後の鉄筋腐食速度の進行を考慮して評価する考え方が議論されている。2017 年度の日本建築学会大会のパネルディスカッションでは、劣化要因を中酸化とした場合の、耐久設計における限界状態の見直しに関する議論が行われた<sup>[1-6]</sup>。また、土木学会でも同様の議論がなされ、2017 年改定のコンクリート標準示方書（設計編）において、コンクリート構造物の耐久設計のうち劣化要因が中酸化の場合には、鉄筋腐食の要件となるコンクリートの含水状態で耐久性評価を行う考え方が取り入れられた<sup>[1-7]</sup>。

このような、中酸化の進行を許容した上で、中酸化後の鉄筋腐食の進行を考慮して耐久性を評価する考え方を採ることにより、従来の耐久性評価では解体の判断が下されていた既存の RC 造建築物に対して、より長期間の供用を計画することが可能となる。

加えて、この考え方は、新築される RC 造建築物の耐久設計の場面でも同様に適用できると考えられる。日本建築学会の建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 コンクリート工事<sup>[1-8]</sup>（以降、JASS 5 という）は、2022 年 11 月に大改定が行われ、一般劣化環境においては、鉄筋腐食に対する劣化作用の強さに応じた劣化環境の区分（腐食環境・非腐食環境）が新たに設定された。この大改定では、設計者が外部からの水分供給がない部位を非腐食環境として定めることができることになり、そのような部位では耐久設計基準強度を適用しなくてよくなった。一方、設計者が非腐食環境と定められない部位は、原則として腐食環境とみなされ、従来どおり中酸化の進行に基づいた耐久設計が踏襲されることとなった。

ここで、実際の耐久設計の場面を考えると、設計者は最初に対象とする部位ごとに、劣化環境の区分（腐食環境・非腐食環境）を定める必要がある。平易な言葉で言い換えると、『水が無ければ錆びない』と言える部位はどこなのかを定めることになる。しかしながら、現状の JASS 5 に



においては、腐食環境および非腐食環境となる部位の例が示されるに留まっており、本質的な鉄筋腐食速度の観点から、腐食環境・非腐食環境を定める技術的な方法論を示すには至っていない。このような状況下では、設計者の責任において、腐食環境・非腐食環境を定めることは困難であると考えられる。このように、鉄筋腐食による耐久設計の考え方は示されたものの、実設計においてはその設計手法は未確立の状態であり、さらなる技術の向上が求められている。

腐食環境と評価された部位については、現行では中性化の指標による耐久設計が踏襲されることになっている。しかしながら、将来的には、耐久性評価の指標を鉄筋腐食とした次世代の耐久設計手法の構築が期待されている。その背景の一つとして、近年における混和材を高含有した環境配慮型コンクリートの推進がある。これらのコンクリートは、セメントの大部分を高炉スラグ微粉末などの副産物に置換しているため、一般的なコンクリートと比較して中性化速度が大きくなる<sup>[1-9]</sup>。そのため、現行の中性化の指標による耐久設計の枠組みでは、耐用年数が極端に短くなる場合があり、利用が進みにくいという懸念があった。耐久性評価の指標を鉄筋腐食とし、中性化の進行を許容できるようになれば、より合理的な評価ができるようになると考えられる。2023年度の日本建築学会大会の研究協議会では、中性化後の鉄筋腐食を考慮した耐久設計の具体化についての議論が行われた<sup>[1-10]</sup>。

以上より、長期にわたって供用された既存 RC 造建築物の延命化、混和材を高含有した環境配慮型コンクリートを用いた新築 RC 造建築物の合理的な耐久性評価など、既存建築物と新築建築物の両面から、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法の構築が強く望まれている。

## 1.2 本研究の目的

本研究は、RC 造建築物の耐久性を対象として、従来のコンクリートの中性化を指標とした耐久性評価手法に対して、コンクリートの中性化後における鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法の構築を目的とした実験的研究である。

中性化後における鉄筋腐食の進行を予測するためには、鉄筋腐食の挙動を速度として捉える必要がある。金属腐食化学の理論では、大気中における鉄の腐食速度は、鉄の溶解速度と酸素の拡散速度で整理される。一方、RC 造建築物では、鉄筋周囲は多孔体のコンクリートに覆われており、同様の理論をそのまま適用することは難しい。また、既存 RC 造建築物の耐久性調査結果から理論を構築しようとしても、コンクリートの使用材料や強度、供用期間中の環境条件が一定ではないため、鉄筋腐食速度を定量的に示すことは困難であった。

そこで本研究では、使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定した。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。この実験結果を基に、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法を提案した。

また、実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。加えて、乾湿繰返しを受ける部材に対しても、水分移動解析によりコンクリート中の水分状態を予測し、中性化後の鉄筋腐食速度を算定することで、提案した耐久性評価手法が適用できることを確認した。

### 1.3 本研究の構成

本研究の構成を図 1.3-1 に示す。

1 章では、本研究の背景、目的、構成を示した。

2 章では、中性化を指標とした耐久性評価手法、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法、コンクリート中の鉄筋腐食速度の測定方法について、調査の研究を取りまとめた。

3 章では、使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定した。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。

4 章では、3 章で定式化した外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度に基づいて、中性化後の鉄筋腐食を考慮した新たな耐久性評価手法を提案した。さらには、実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。

5 章では、乾湿繰返しを受ける部材に対して、水分移動解析を介することにより、提案した新たな耐久性評価手法が適用できることを確認した。

6 章では、本研究の結論として、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手法に関する研究全体を取りまとめた。

本研究で提案した耐久性評価手法の全体構成と各章の位置付けを図 1.3-2 に示す。

最初に、JASS 5 に準じて、鉄筋の腐食状態を中性化の指標を用いて評価する耐久性評価を行う。具体的には、中性化速度、中性化の進行予測式および中性化の限界値を定めることで耐用年数を算定することができる。中性化速度、中性化の進行予測式については、JASS5 の考え方に従った。中性化の限界値を定めるにあたって、鉄筋腐食の限界状態を設定する必要がある。JASS5 では、目視による腐食グレードが 2 から 3 になる状態が限界状態と定義されており、本研究もその考え方に従った。また、この時の中性化の限界値は、屋内では、中性化深さがかぶり厚さより 20mm 奥に達した時点、屋外では、中性化深さがかぶり厚さに達した時点とされている。なお、中性化後の鉄筋腐食の評価を考える場合に必要となる、腐食の起点となる中性化深さは、日本建築学会の建築保全標準もしくは土木学会のコンクリート標準示方書に示される、かぶり厚さより 10mm 手前とした。

次に、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価を行う。中性化を指標とした場合と同様に、中性化後の鉄筋腐食速度、鉄筋腐食の進行予測式および鉄筋腐食の限界値を定めることで耐用年数を算定することができる。中性化後の鉄筋腐食速度は、本研究の 3 章で取得した実験結果を基に、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化したものを用いることとした。なお、3 章の実験的検討は外部環境が一定の条件下における結果である。5 章では、乾湿繰返しを受ける部材を評価の対象として、水分移動解析を介して、3 章で構築した実験式を適用する方法について検討した。

鉄筋腐食の進行予測式は、鉄筋腐食速度を材齢で積算する  $t$  則を採用した。掛川ら<sup>[1-11]・[1-12]</sup>は、黒皮付きの鉄筋を埋設したコンクリート試験体の 20 年間にわたる暴露試験結果から、初期段階の鉄筋腐食速度は大きく、暴露試験材齢の経過に伴って鉄筋腐食速度が低下することを確認している。また、筆者らも、みがき鋼材を埋設したコンクリート試験体を用いて、中性化後の鉄筋腐

食速度を測定した実験において、鉄筋の全周が腐食生成物で覆われた後では、鉄筋腐食速度が大きく低下する現象を確認している<sup>[1-13]</sup>。しかしながら、本研究では、鉄筋周囲が腐食生成物で覆われることによる腐食抑制効果を定量的に把握できないため、鉄筋腐食が進行しても鉄筋腐食速度は一定値とする安全側の仮定をとった。

鉄筋腐食の限界状態は、原則として JASS 5 の定義をそのまま引用し、目視による腐食グレードが 2 から 3 になる状態とした。この時の限界腐食量は、既往の研究で提示された値を引用した。

ここで、従来の鉄筋腐食の状態を中性化の指標により評価する方法ではなく、鉄筋の腐食量を直接評価する方法をとれば、例えば、鉄筋腐食の限界状態を腐食ひび割れが発生する時点まで延ばして設定することも可能となる。本研究では、本間らの既往の研究<sup>[1-14]</sup>で示された、腐食ひび割れが発生する限界腐食量の値を引用して、鉄筋腐食の限界状態を腐食ひび割れが発生する時点とした場合についても検討した。

腐食ひび割れが発生する時点の限界腐食量は、かぶり厚さにより異なる値となることが分かっている。一方、従来の目視による腐食グレードに基づいた限界状態の考え方は、鉄筋の周囲が腐食生成物で覆われる状態のみに着目しているため、かぶり厚さの違いは考慮されていなかった。このように、鉄筋の腐食量を評価指標とし、新たな鉄筋腐食の限界状態を設定する場合には、かぶり厚さが直接的な影響因子となるなど、評価に影響をおよぼす部材条件や環境条件がこれまでとは異なってくる可能性がある。それぞれに対する理論モデルもまだ確立されておらず、今後も引き続き検討すべき課題と考える。

また、本研究では、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法について、一連の評価の流れを提示したが、評価プロセスの一つ一つに着目すると、複数の理論モデルの引用により成り立っている。技術の現状を鑑みて、最も確度が高いと考える理論モデルを選定したが、引用したモデルによっては未だ理論が確立されていないものもあり、精度検証など今後も引き続き検討すべき課題と考える。

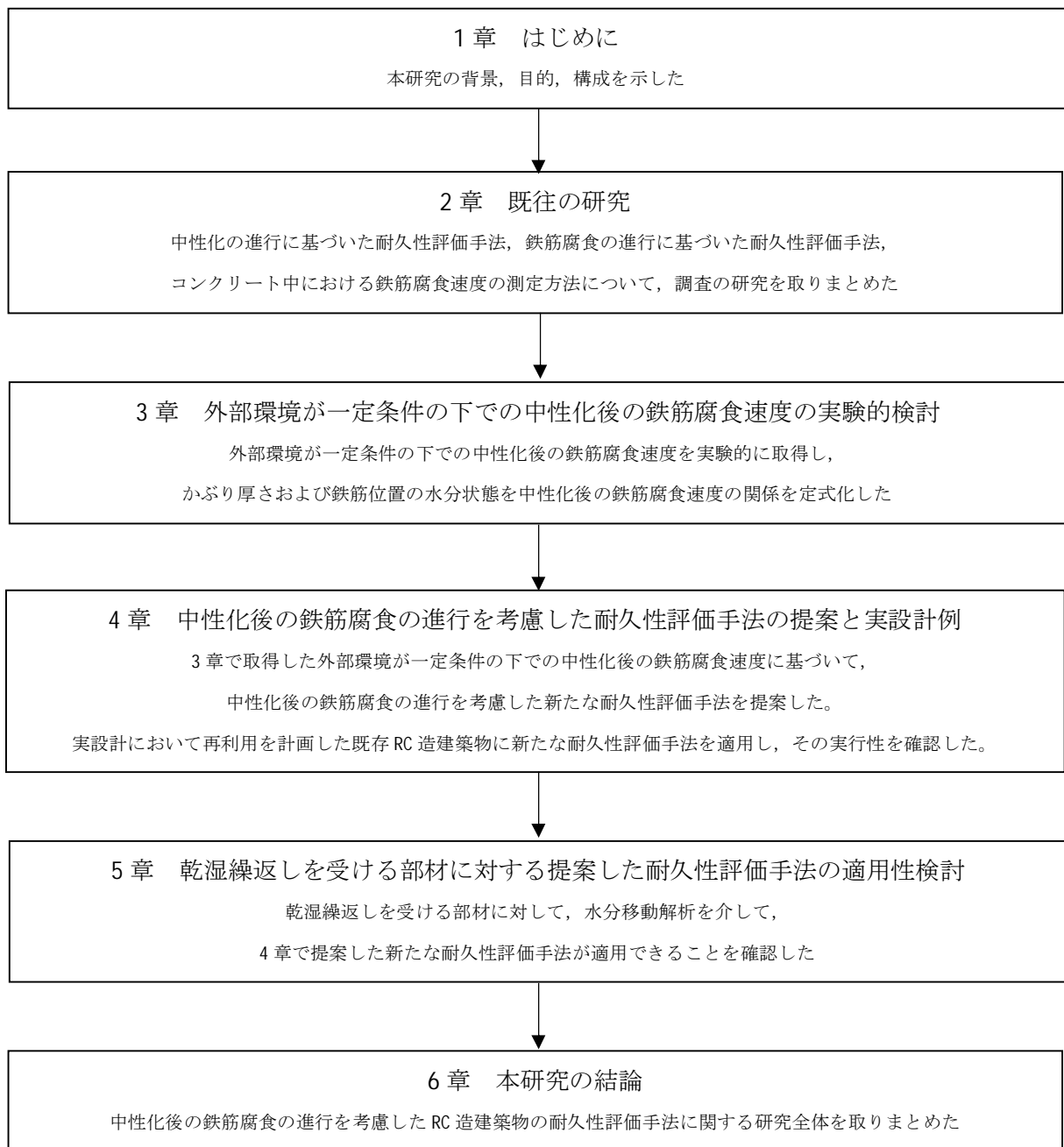


図 1.3-1 本研究の構成

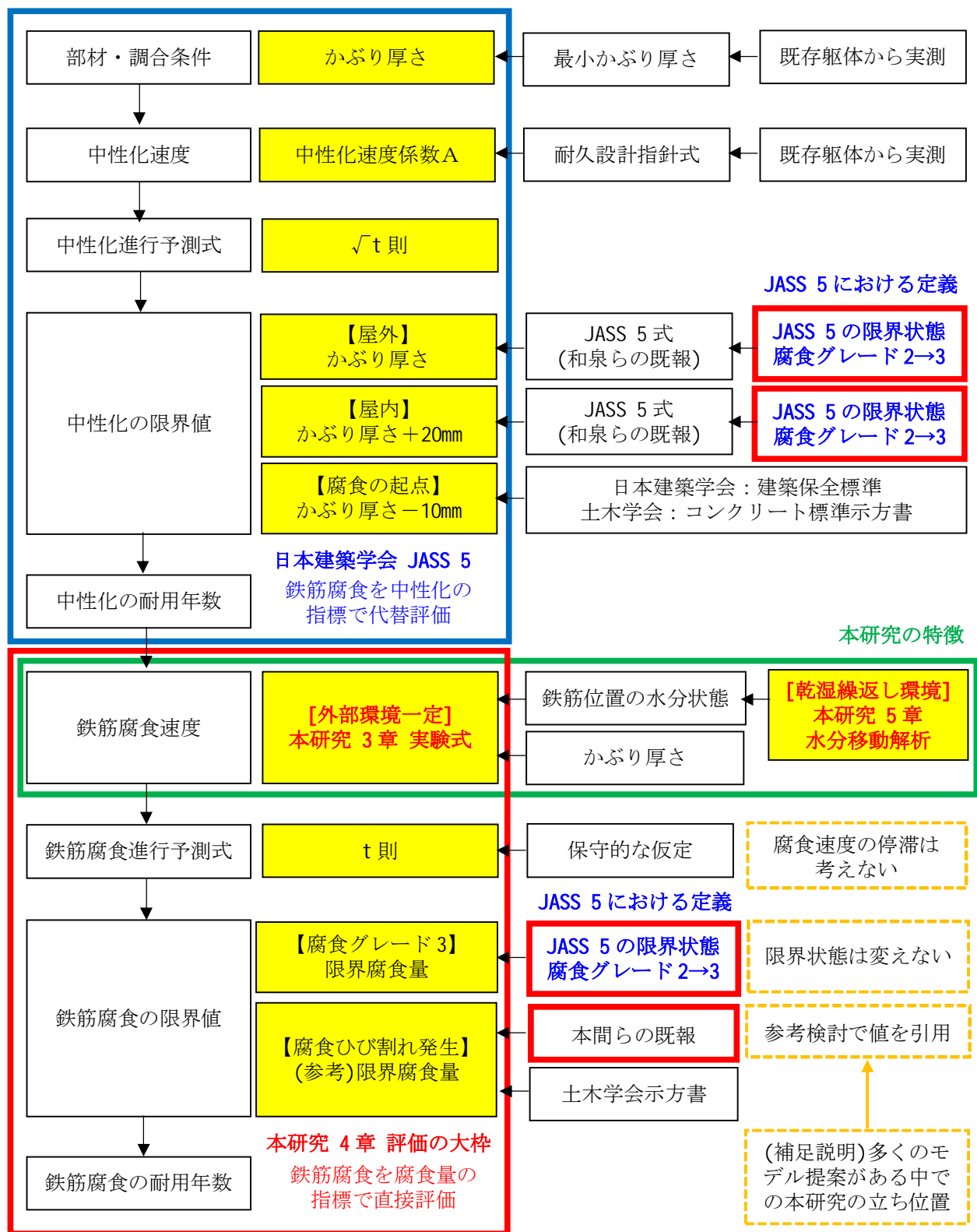


図 1.3-2 本研究で提案した耐久性評価手法の全体構成と各章の位置付け

## 1 章の参考文献

- [1-1] 国土交通省：建築物ストック統計, 2018.9, <https://www.mlit.go.jp/common/001254408.xlsx> (accessed 2020.1.23)
- [1-2] 国連持続可能な開発サミット：持続可能な開発のための 2030 アジェンダ, 2015.9, [https://www.unic.or.jp/activities/economic\\_social\\_development/sustainable\\_development/2030agenda/](https://www.unic.or.jp/activities/economic_social_development/sustainable_development/2030agenda/) (accessed 2020.1.23)
- [1-3] 庭野究ほか：同潤会上野下アパートに関する調査研究(その4) ひび割れと鉄筋の腐食状況, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.1133-1134, 2014
- [1-4] 田沼毅彦, 杉山央：築後 53 年を経過した鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋腐食状況の実態調査, 日本建築学会技術報告集, 第 23 巻, 第 53 号, pp.37-42, 2017.2
- [1-5] 野口貴文ほか 24 名：旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査(その 1~12), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.417-430, 2015.7
- [1-6] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考ー中性化は寿命か?ー, 2017 年度日本建築学会大会(中国) 材料施工部門パネルディスカッション資料, pp.1-4, pp.5-11, 2017.8
- [1-7] 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編], 2017
- [1-8] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2022
- [1-9] 小林利充ほか：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状(その 1~15), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011~2018
- [1-10] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考ー次世代の耐久設計, 2023 年度日本建築学会大会(近畿) 材料施工部門研究協議会資料, 2023.9
- [1-11] 掛川勝, 梶田佳寛, 松林裕二, 鹿毛忠継：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
- [1-12] 掛川勝, 梶田佳寛, 松林裕二, 鹿毛忠継：コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する長期暴露実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.672, pp.143-151, 2012.2
- [1-13] 酒井正樹ほか：鉄筋の黒皮が中性化したコンクリート内部の鉄筋腐食におよぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.943-944, 2020
- [1-14] 本間大輔, 米澤敏男, 押田文雄, 山口善弘, 岡本博史, 中尾正純：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, 第 79 巻, 第 701 号, pp.867-876, 2014.7

## 2. 既往の研究

### 2.1 中性化を指標とした耐久性評価手法に関する既往の研究

#### 2.1.1 中性化を指標とした耐久性評価手法の現状

中性化を指標とした耐久設計手法については、2017 年の日本建築学会大会パネルディスカッション「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?」<sup>[2-1]</sup>および 2023 年の日本建築学会大会研究協議会「鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考 ―次世代の耐久設計」<sup>[2-2]</sup>および野口<sup>[2-3]</sup>の報告などに詳しくまとめられている。以降は、それらの既報の中から、本研究に関わる部分について概要のみを記載する。

中性化を寿命とする考え方は、内田祥三、濱田稔<sup>[2-4]</sup>らによる一連の耐久性試験に端を発し、中性化によるアルカリ性の喪失をひとつの限界状態として捉える考え方が提案された。この考え方は、後に岸谷ら<sup>[2-5]</sup>、白山ら<sup>[2-6]</sup>に引き継がれ、式(2.1-1)に示される $\sqrt{t}$ 則に基づく中性化予測式の構築に繋がっている。また、この時点では、中性化の進行に対する限界状態は明示的には示されていないものの、中性化深さが鉄筋位置に到達した時点をも寿命（＝限界状態）とする考え方が取られた。

なお、式(2.1-1)の比例定数である  $A$ （中性化速度係数）については、日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説<sup>[2-7]</sup>に、岸谷ら、白山らの研究を基に構築された式(2.1-2)が示されている。

$$C=A\sqrt{t} \quad (2.1-1)$$

ここに、 $C$ ：中性化深さ（mm）

$A$ ：中性化速度係数（mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ）

$t$ ：材齢（年）

$$A=k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \quad (2.1-2)$$

ここに、 $A$ ：中性化速度係数（mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ）

$K$ ：中性化速度に関する係数（岸谷式では 17.2）

$\alpha_1$ ：骨材種類， $\alpha_2$ ：セメント種類， $\alpha_3$ ：水セメント比

$\beta_1$ ：気温， $\beta_2$ ：湿度， $\beta_3$ ： $\text{CO}_2$ 濃度

RC 造建築物の耐久性評価については、和泉ら<sup>[2-8]</sup>は 100 棟以上におよぶ既存建築物の調査結果を基に、目視による鉄筋の腐食グレードと平均さび評点の関係を表 2.1-1 のとおり示した。また、既存建築物の調査結果を整理し、中性化残り（かぶり厚さから中性化深さを引いた値）と平均さび評点の関係を図 2.1-1 のとおり示した。

鉄筋腐食の限界状態を、平均さび評点が 2 から 3 に変化する時点と定義して、図 2.1-1 より鉄筋腐食の限界状態となる中性化深さを、式(2.1-3)のとおり求めた。

$$C_{lim}=D \quad (\text{屋外環境}) \quad (2.1-3)$$

$$C_{lim}=D+20\text{mm} \quad (\text{屋内環境})$$

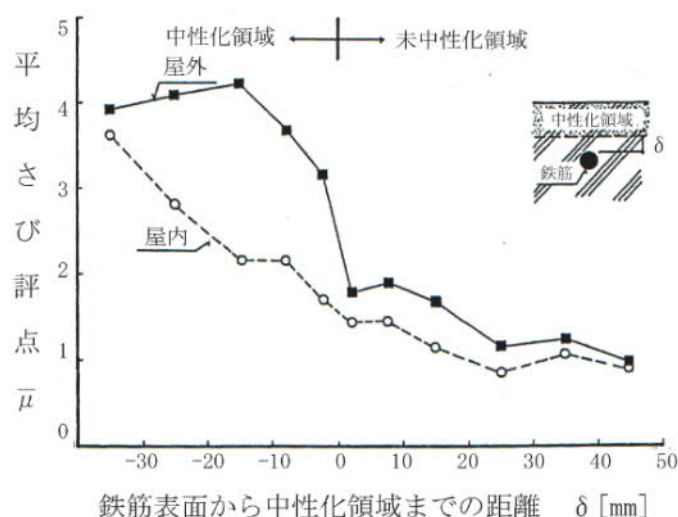
ここに、 $C_{lim}$ ：中性化深さの限界値(mm)

$D$ ：かぶり厚さ(mm)



表 2.1-1 腐食グレードと平均さび評点の関係とその評価基準<sup>[2-8]</sup>

腐食グレード	平均さび評点	評価基準
1	0	腐食がない状態，または表面にわずかな点さびが生じている状態
2	1	表面に点さびが広がって生じている状態
3	2	点さびつながって面さびとなり，部分的に浮きさびが生じている状態
4	4	浮きさびが広がって生じ，コンクリートにさびが付着し，断面積で 20%以下の欠損を生じている箇所がある状態
5	6	厚い層状のさびが広がって生じ，断面積で 20%を超える著しい欠損を生じている箇所がある状態

図 2.1-1 鉄筋表面から中性化領域までの距離と平均さび評点の関係<sup>[2-8]</sup>

旧建設省の総合技術開発プロジェクト「建築物の耐久性向上技術の開発」（1980~1985 年）では，和泉ら<sup>[2-8]</sup>による信頼性設計に基づく耐久設計法が提案された。和泉らの手法では，信頼性設計を取り入れたことにより，設計指標が中性化からかぶり厚さと中性化深さのばらつきを考慮した腐食確率（中性化が限界状態に達した割合）に変更された。鉄筋の腐食確率の考え方を図 2.1-2 に示す。

なお，日本建築学会の JASS 5 でも，この信頼性設計の考え方が取り入れられており，コンクリートの中性化と鉄筋腐食の関係<sup>[2-9]</sup>として，図 2.1-3 が示されている。ただし，図に示された関係を見ると，かぶり厚さや水セメント比が異なる場合であっても，同一の中性化残りを限界状態と設定しており，設計手法として一定の割り切りがなされたものと言える。

日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説<sup>[2-7]</sup>では，耐久設計を行う上での限界状態として設計限界状態と維持管理限界状態の二つが定められている。設計限界状態は，鉄筋腐食およびコンクリートの劣化によって，かぶりコンクリートまたは仕上げ材に浮き・剥落が生じるとき，または仕上げ材に浮き・剥落が生じるときとされ，そのときの鉄筋腐食確率

は 20%と設定されている。維持保全限界状態は、コンクリートまたは仕上げ材に浮き・剥落につながるおそれのあるひび割れが生じるときとされ、そのときの鉄筋腐食確率は 3%と設定されている。

なお、信頼性設計に基づく耐久設計法の詳細な手順は、日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説<sup>[2-7]</sup>の「付録 1 耐久設計例」や、日本建築学会の建築物の耐久設計支援ガイドブック<sup>[2-10]</sup>の「3 章 建築物等に対する設計の耐用年数の設定方法および推定方法」に具体的に示されている。

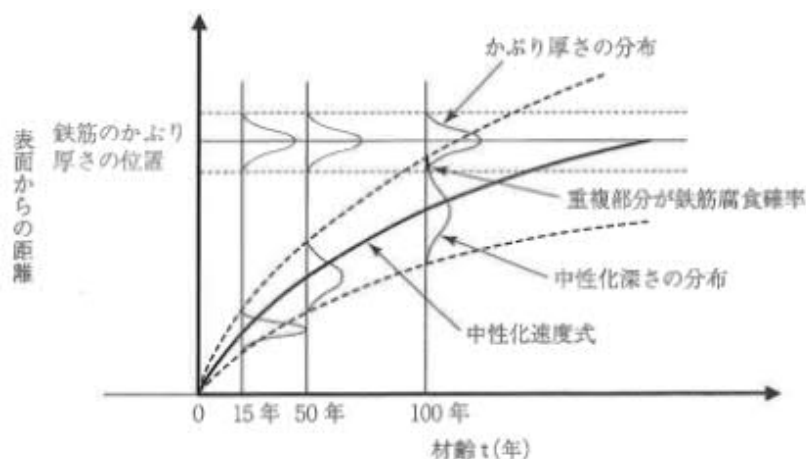


図 2.1-2 鉄筋の腐食確率の考え方<sup>[2-8]</sup>

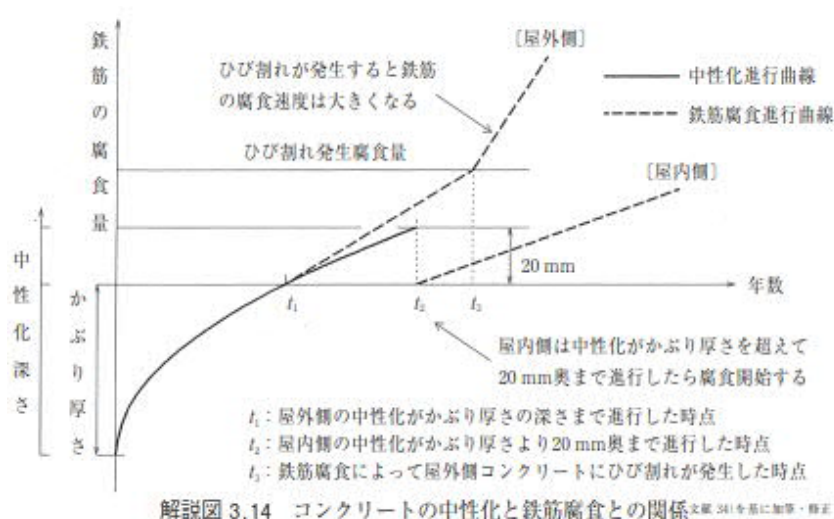


図 2.1-3 コンクリートの中性化と鉄筋腐食の関係<sup>[2-9]</sup>

### 2.1.2 中性化の進行速度におよぼす各種要因

中性化の進行速度におよぼす各種要因として、コンクリートに用いられるセメント種別や調合条件が良く知られている。加えて、外部環境として相対湿度が影響することが分かっており、促進中性化試験と実際の暴露環境の違いについても既往の研究がある。

コンクリートの水分状態が中性化におよぼす影響については、これまでに多くの研究が行われている。古くは1972年のドイツ鉄筋コンクリート委員会による報告<sup>[2-11]</sup>があり、温度、湿度などの環境条件のうち、コンクリートの吸水状態を中性化の影響要因として取り上げている。水で飽和されたコンクリート（相対湿度 100%または水中養生）は、物理的に CO<sub>2</sub> を吸収できないため中性化は進行しない。一方、中性化反応を進行させるためには、ある程度の水膜が必要であるため、完全に乾燥したコンクリート（相対湿度 30%以下）もまた、中性化は進行しない。これらの結果をまとめて、中性化の進行は相対湿度 50~70%で最大になると総括している。また、同報告では、CO<sub>2</sub> 濃度を高めて行う促進中性化試験についても言及している。促進中性化試験では、コンクリート中の細孔溶液の pH 値を大きく低下させるため、実際の暴露環境と比較して厳しい条件となる。そのため、実際の暴露環境における評価を行う際には注意が必要であると指摘した。

国内では、佐伯ら<sup>[2-12]</sup>による実験報告がある。佐伯らは、モルタルの促進中性化試験をはじめとする要素試験を行い、中性化の進行速度を水で閉塞されない空隙量と結び付けて考察した。外部相対湿度とモルタルの中性化深さの関係を図 2.1-4 に示す。暴露環境下では、相対湿度が 50%程度で、中性化深さが最も大きくなることを示した。一方、CO<sub>2</sub> 濃度が高い促進中性化試験では、相対湿度が低い領域でも中性化の進行速度は大きくなることを示した。この理由として、水が蒸発し尽くす前に急速に中性化が進行するためと考察しており、暴露環境と促進中性化試験の違いを指摘した。

鄭ら<sup>[2-13]</sup>もコンクリートを用いて、相対湿度をパラメータとして促進中性化試験を行っている。外部相対湿度とコンクリートの中性化速度係数の関係を図 2.1-5 に示す。佐伯らの実験報告と同様に、外部相対湿度が 50%の時に中性化速度係数が最大となり、それ以上でも、それ以下でも、中性化の進行速度は低下することが確認された。

小宮ら<sup>[2-14]</sup>は、飽和度の違いが炭酸化に与える影響を模式図として、図 2.1-6 を示している。飽和度が低い場合には、コンクリート内部に CO<sub>2</sub> は拡散しやすいが、炭酸化反応が生じる水の場合が形成されないこと、逆に飽和度が高い場合には、炭酸化反応が生じるための水は豊富に存在するものの、空隙が水で埋まることでコンクリート内部に CO<sub>2</sub> が拡散しないことを理由として、中性化の進行速度が小さくなることを示した。その結果、飽和度が中程度となる場合に、最も中性化速度が大きくなることを説明した。

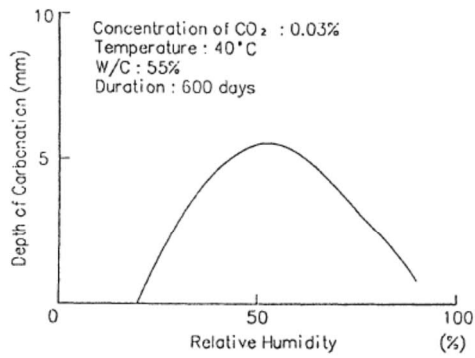


Fig. 22 Relationship between relative humidity and depth of carbonation exposed outdoors.

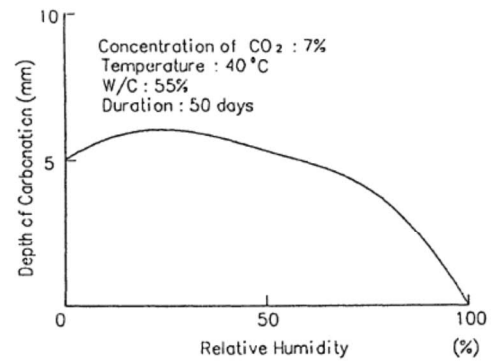


Fig. 21 Relationship between relative humidity and depth of carbonation under the condition of high concentration of carbon dioxide.

(暴露環境 :  $\text{CO}_2$  濃度 0.03%)

(促進中性化試験 :  $\text{CO}_2$  濃度 7%)

図 2.1-4 外部相対湿度とモルタルの中性化深さの関係<sup>[2-12]</sup>

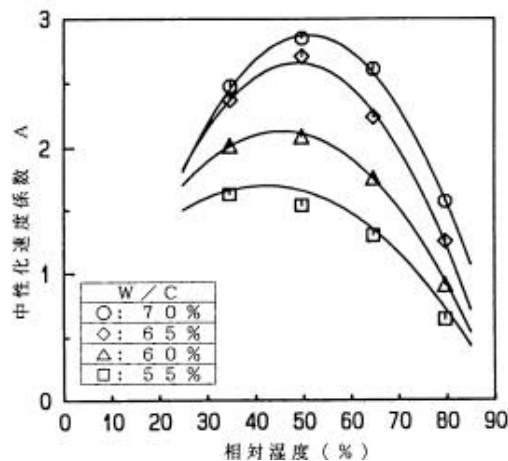


図 2.1-5 外部相対湿度とコンクリートの中性化速度係数の関係<sup>[2-13]</sup>

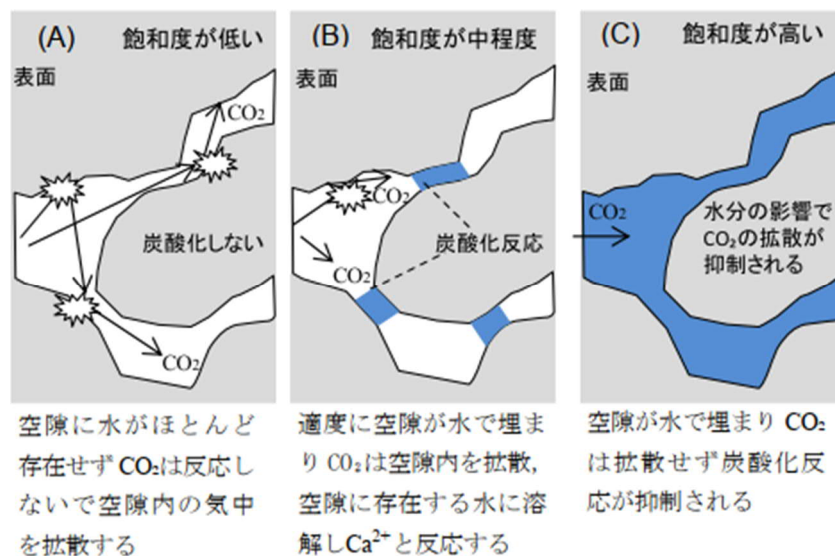
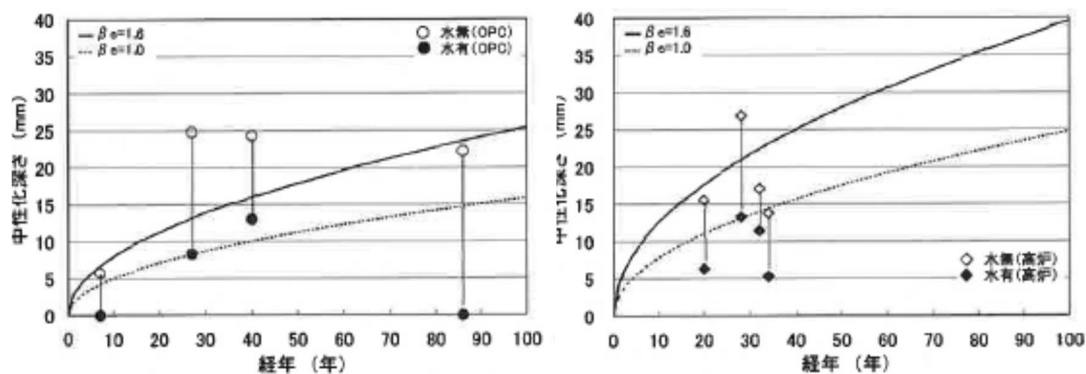


図 2.1-6 飽和度の違いが炭酸化に与える影響に関する模式図<sup>[2-14]</sup>

松田<sup>[2-15]</sup>らは、鉄道関連の建物、構築物を中心として、高経年化した構造体コンクリートの調査結果を分析し、水掛かりの有無と中性化の進行速度の関係をとりまとめている。両者の関係を図 2.1-7 に示す。構造体コンクリートの調査の結果、経過年数やセメント種別に関わらず、水掛かりのある部位では中性化の進行速度は小さくなり、水掛かりのない乾燥した部位では中性化の進行速度は大きくなることを示した。



(普通ポルトランドセメント)

(高炉 B 種セメント)

図 2.1-7 水掛かりの有無と中性化深さの関係<sup>[2-15]</sup>

横塚ら<sup>[2-16]</sup>は、供試体の前養生（乾燥養生）条件を変えて促進中性化試験を行い、乾燥により中性化の進行速度が大きくなるメカニズムを検討した。JIS A 1153 に基づく促進中性化試験では、水中養生後より 28 日間の乾燥養生（20℃、60%RH）を行うのに対し、横塚らは事前乾燥期間を 7 日、14 日、28 日と変えてコンクリートの乾燥程度を調整した上で、中性化の進行速度との関係を検討した。乾燥期間と飽水度、酸素拡散係数の関係を図 2.1-8 に示す。この実験では、保安の観点から CO<sub>2</sub> の代わりに酸素を使用しており、酸素の拡散係数を CO<sub>2</sub> の拡散係数の代替指標としている。乾燥期間が長いほどコンクリートの飽水度は小さくなり、酸素の拡散係数は大きくなることを実験的に示し、乾燥により中性化の進行速度が大きくなることを理論付けた。

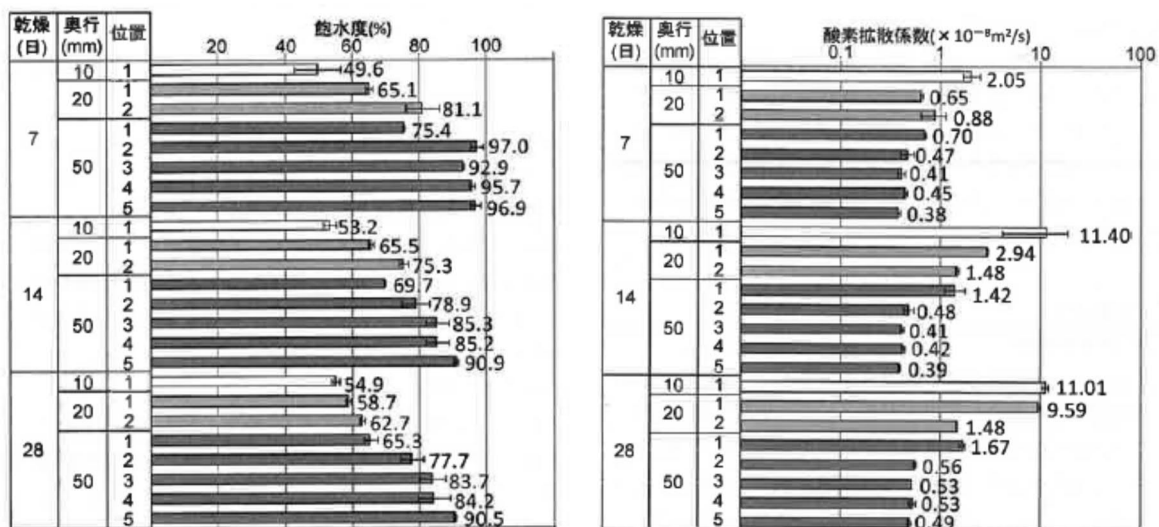


図 2.1-8 乾燥期間と飽水度、酸素拡散係数の関係<sup>[2-16]</sup>

### 2.1.3 ひび割れなどの局所的な劣化部が中性化の進行速度におよぼす影響

辻埜ら<sup>[2-17]</sup>は、ひび割れ等の各種欠陥を有する鉄筋コンクリート試験体に対して、11年間の屋外暴露を行い、中性化深さを測定した。コンクリートの水セメントは45%と57.5%の2水準、欠陥の種類は水平打継ぎ、鉛直打継ぎおよびひび割れの3水準とした。健全部と欠陥部の中性化深さの測定結果を図2.1-9に示す。健全部と比較して、水平打継ぎ部および鉛直打継ぎ部では屋外暴露後の中性化深さが大きくなることを示した。なお、ひび割れ部では、屋外暴露5年の時点で、全ての試験体において鉄筋位置まで中性化が進行したことを報告した。

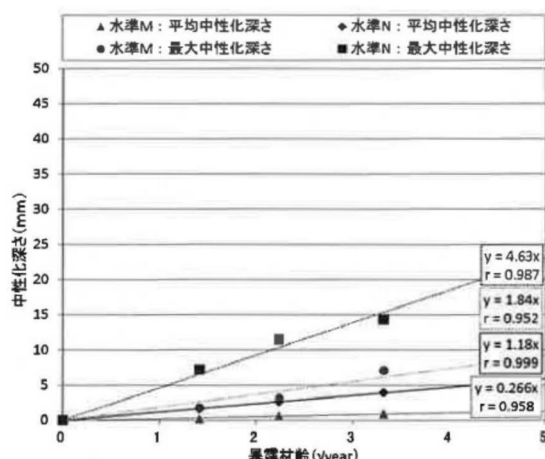


図-4 中性化深さの試験結果（健全部）

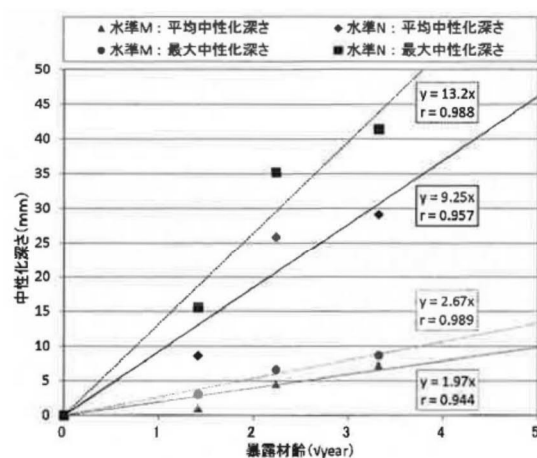


図-6 中性化深さの試験結果（水平打継ぎ部）

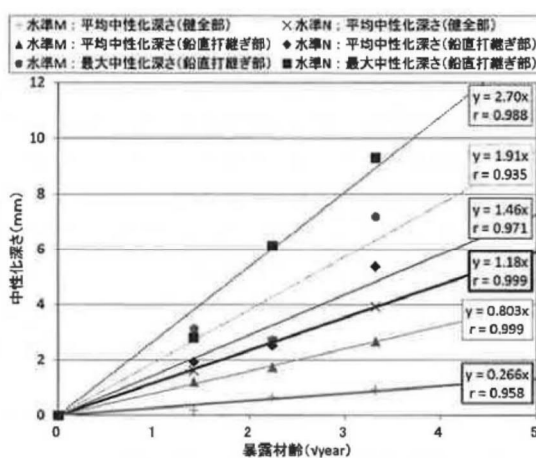


図-9 中性化深さの試験結果（鉛直打継ぎ部）

図 2.1-9 健全部と欠陥部の中性化深さの測定結果<sup>[2-17]</sup>

岸本ら<sup>[2-18]</sup>は、ひび割れを有するコンクリートに対して、ひび割れ部への酸性雨の供給により中性化の進行速度が大きくなることを懸念し、コンクリート中の水分と中性化深さの解析的検討を行った。解析には、コンクリート材料内の熱・水分同時移動が考慮可能な、独自の中性化進行予測モデルを用いた。また、解析モデルには、幅0.4mm、深さ20mmのひび割れを導入し、10日間に付き6時間の降雨を受ける条件での中性化の進行速度を計算した。

ひび割れ部における含水率分布の解析結果を図2.1-10に示す。ひび割れ部において、降雨により含水率の上昇が見られる範囲は、ひび割れ中心から10mm以内の範囲となることを示した。ひび割れ部における中性化深さの解析結果を図2.1-11に示す。降雨を受ける条件では、ひび割れ中

心のごく近傍のみで、含水率の上昇と同様に中性化の進行速度も小さくなることを示した。

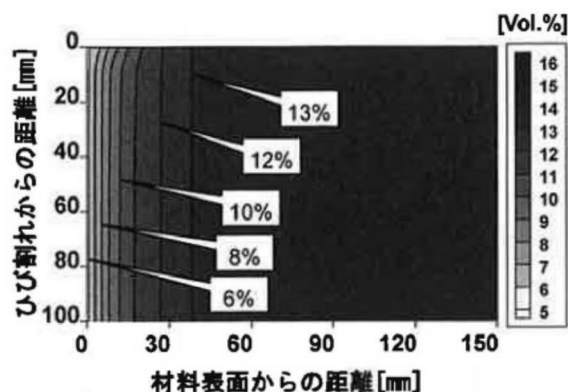


図 2.1-10 ひび割れ部における含水率分布の解析結果<sup>[2-18]</sup>

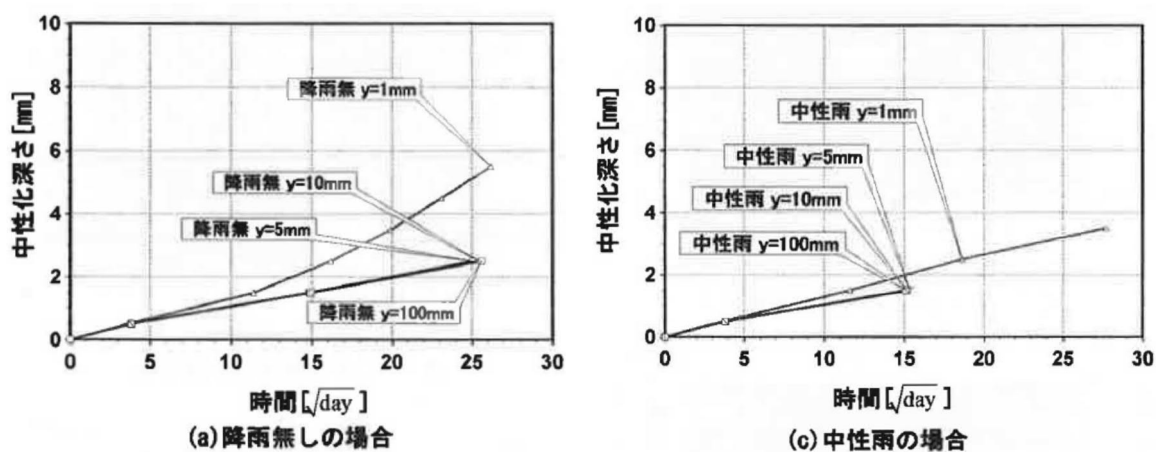


図 2.1-11 ひび割れ部における中性化深さの解析結果<sup>[2-18]</sup>

大竹ら<sup>[2-19]</sup>は、ステンレス板のスリットにより模擬ひび割れを導入したコンクリート試験体の促進中性化試験を行い、ひび割れ部における中性化の進行速度を検討した。ひび割れ幅はスリットの厚みにより調節し、0.05mm～0.6mm までの範囲で設定している。

ひび割れ幅と中性化深さの関係を図 2.1-12 に示す。模擬ひび割れを導入した試験体では、ひび割れ幅の違いに関わらず促進中性化の直後からひび割れ沿いに中性化が進行し、いずれも早期にひび割れ先端まで中性化が進行することを示した。また、この実験では、促進中性化試験に加えて散水暴露条件を設定しており、散水により中性化の進行速度が小さくなることを示した。

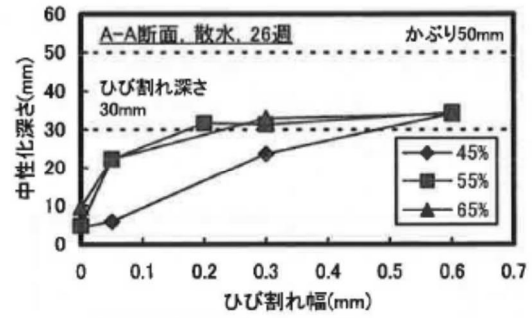
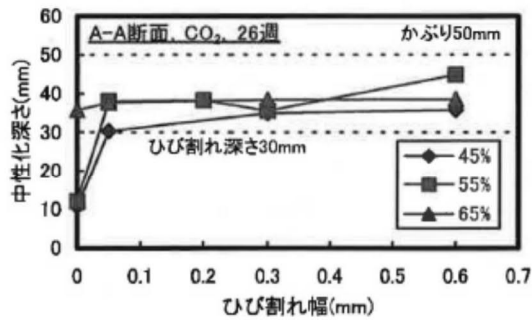
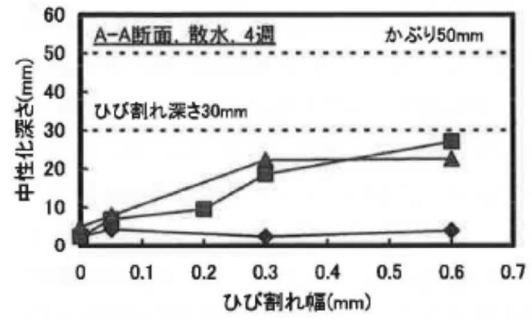
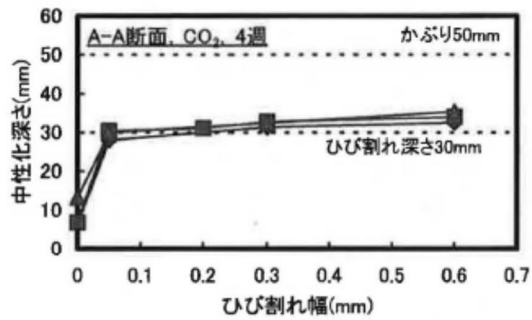


図-3 CO<sub>2</sub> 曝露によるひび割れ幅と中性化深さの関係（上：材齢4週，下：材齢26週）

図-4 散水曝露によるひび割れ幅と中性化深さの関係（上：材齢4週，下：材齢26週）

図 2.1-12 ひび割れ幅と中性化深さの関係[2-19]



## 2.1.4 実構造物における中性化の実態調査

近年、日本建築学会の RC 造建築物の耐久設計小委員会の活動をはじめとして、多くの既存建築物の調査が行われている。野口ら<sup>[2-20]</sup>は、築 87 年を経過した集合住宅（同潤会上野下アパートメント）の解体時に躯体コンクリートの調査を実施し、圧縮強度、含水率と中性化深さの関係を測定した。

圧縮強度、含水率と中性化深さの関係を図 2.1-13 に示す。圧縮強度と中性化の進行速度には明確な相関関係は認められないとした。一方、含水率については、屋外の雨掛かり部においてコンクリートの含水率が高くなり、その部位では中性化がほとんど進行していないことから、コンクリートの含水率が高いと中性化の進行速度が小さくなることを示した。

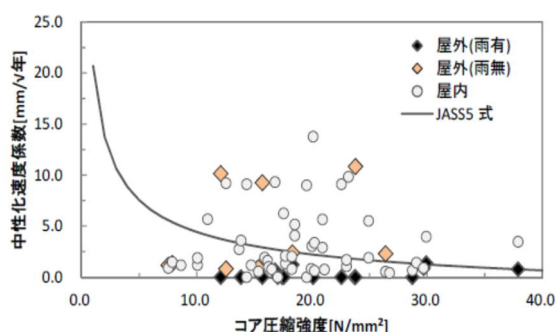


図 2 コア圧縮強度と中性化速度係数の関係

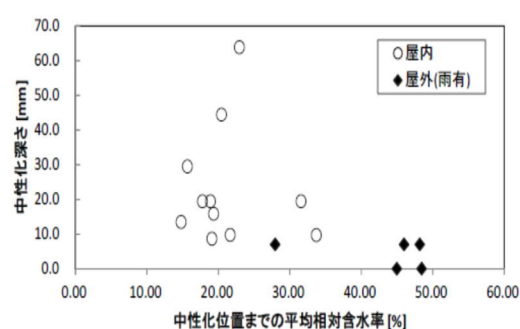
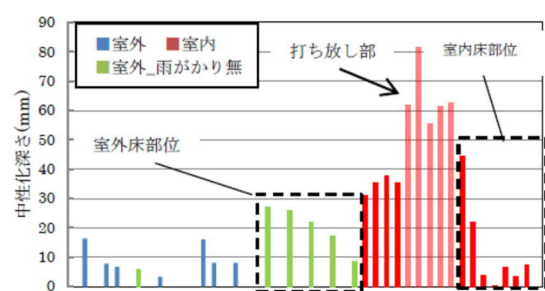


図 4 中性化深さと中性化位置までの平均質量含水率の関係

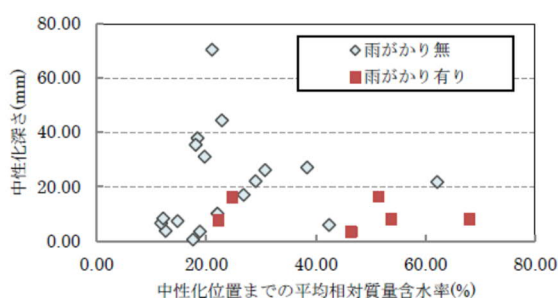
図 2.1-13 圧縮強度、含水率と中性化深さの関係<sup>[2-20]</sup>

中井ら<sup>[2-21]</sup>は、築 49 年を経過した集合住宅の解体時に躯体コンクリートの調査を実施し、コンクリートの含水率と中性化深さの関係を測定した。

測定部位、含水率と中性化深さの関係を図 2.1-14 に示す。中性化深さは屋内側では大きく、屋外側では小さくなり、雨掛かりのある部位では特に小さくなるとした。



図一2 中性化深さ測定結果



図一3 相対質量含水率と中性化深さの関係

図 2.1-14 測定部位、含水率と中性化深さの関係<sup>[2-21]</sup>

木野瀬ら<sup>[2-22]</sup>は、築 43～49 年を経過した集合住宅 3 棟 (A, B, C) について躯体コンクリートの調査を実施し、コンクリートの含水率と中性化の進行速度の関係をとり纏めた。

質量含水率と中性化速度係数の関係を図 2.1-15 に示す。打放しおよび仕上げ材付きのいずれも、質量含水率が小さいほど中性化速度係数が大きくなり、質量含水率と中性化速度係数には一定の相関関係が認められることを示した。

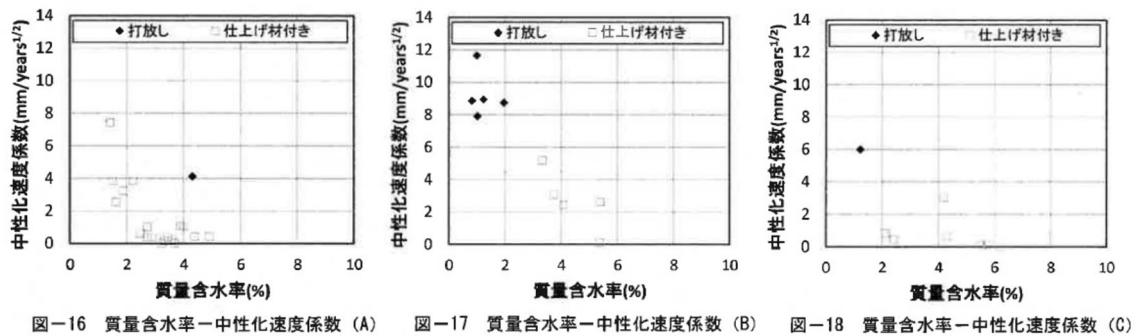


図 2.1-15 質量含水率と中性化速度係数の関係<sup>[2-22]</sup>

野口ら<sup>[2-23]</sup>は、旧国立霞ヶ丘競技場の解体時に躯体コンクリートの調査を実施し、仕上げ種別、コンクリートの含水率、圧縮強度と中性化の進行速度の関係を測定した。

仕上げ種別、コンクリートの含水率と中性化の進行速度の関係を図 2.1-16 に示す。屋内、屋外ともに、含水率が大きいほど中性化深さが小さくなっている。一方、含水率が小さい部位では中性化深さに明確な傾向が認められないが、この理由として、仕上げ材に 10mm を超えるモルタルが使われていること、圧縮強度が平均値以上であったことなどを挙げた。また、仕上げ種別と中性化率の関係もばらつきが大きく、この理由として、仕上げ材の劣化程度の違いを指摘した。このように、実構造物における中性化深さを評価する際には、仕上げ材の劣化に関する評価と予測について考える必要がある。

圧縮強度と中性化速度係数の関係を図 2.1-17 に示す。屋内、屋外、雨掛かりなどの環境条件や仕上げ種別に関わらず、コンクリートの強度が高いほど中性化の進行速度は小さくなることを示した。図中には、JASS 5 による標準水中養生供試体の圧縮強度と実暴露による中性化速度係数の関係が併記されている。環境条件や仕上げ種別に関わらず、同一の圧縮強度に対する中性化速度係数は概ね大きくなることを示した。

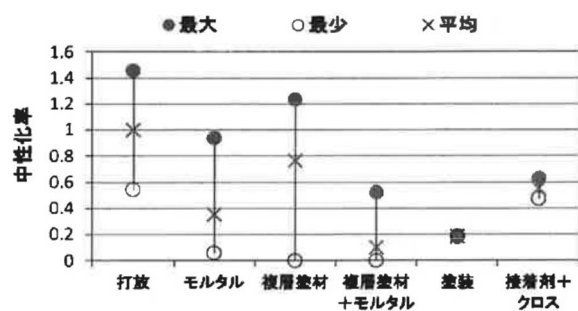
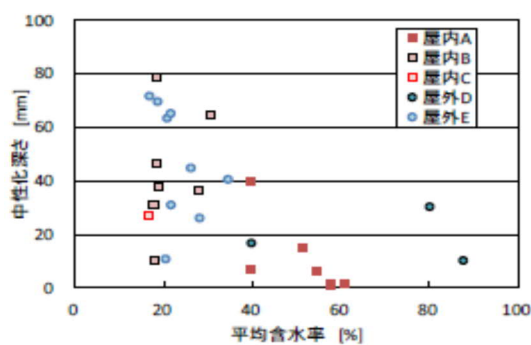


図 2.1-16 仕上げ種別、コンクリートの含水率と中性化の進行速度の関係<sup>[2-23]</sup>

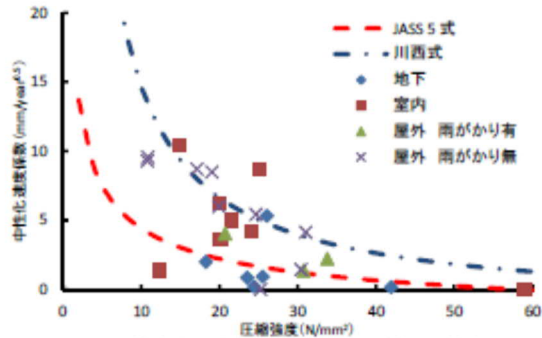


図3 圧縮強度と中性化速度係数の関係（環境別）

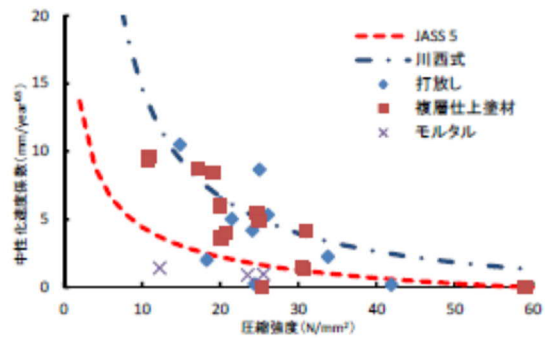


図4 圧縮強度と中性化速度係数の関係（仕上げ別）

図 2.1-17 圧縮強度と中性化速度係数の関係<sup>[2-23]</sup>

春畑ら<sup>[2-24]</sup>は、1965～1984年に建設された建築物の調査時に採取した4261本のコア供試体の試験結果から、圧縮強度と中性化速度係数の関係をまとめた。

打放しコンクリート面での両者の関係を図 2.1-18 に示す。図中には、JASS 5 による両者の関係式が併記されており、打放し面では屋外、屋内ともに、同一の圧縮強度に対する中性化速度係数が2～3倍程度大きくなることを示した。この理由に関する説明はないものの、コンクリートの乾燥に伴い中性化の進行速度が大きくなっていることが推察される。このことから、実構造物においては、部材厚が薄い場合や打放しなどの乾燥を受ける部位では、JASS 5 による既存式での評価が危険側となることがわかる。高経年化した建築物に対する中性化深さの評価においては、JASS 5 による既存式の取り扱いに留意する必要がある。

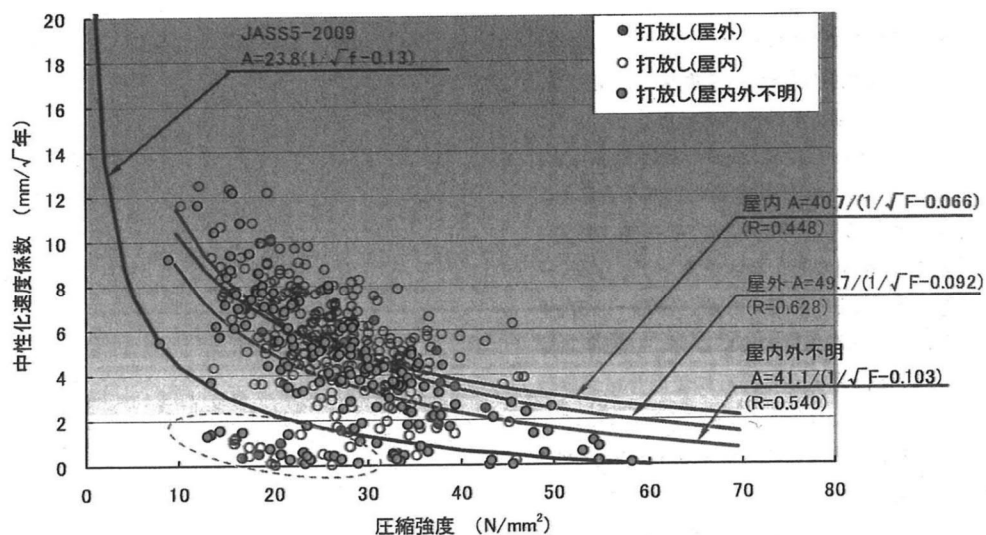
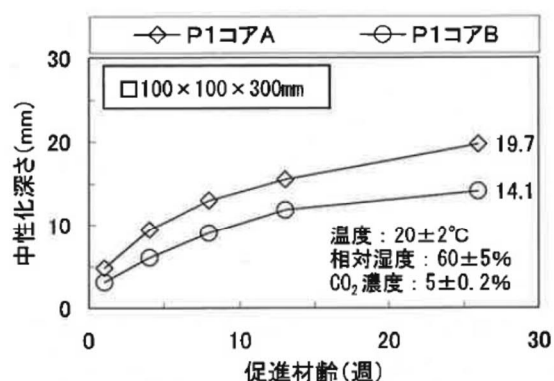


図-10 中性化速度係数と圧縮強度との関係

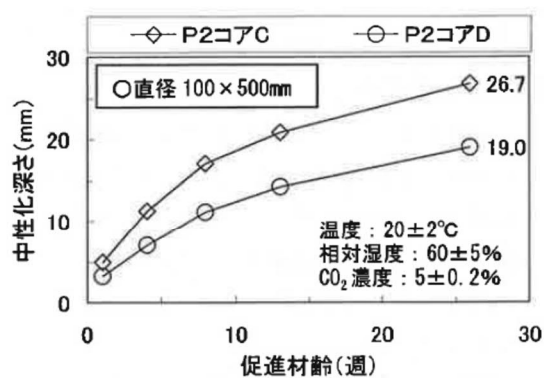
図 2.1-18 中性化速度係数と圧縮強度の関係<sup>[2-24]</sup>

桐山ら<sup>[2-25]</sup>は、昭和30年に竣工し、築48年を経過した河川のRC橋脚について、健全部よりコア供試体を採取して促進中性化試験を行い、実暴露での中性化深さの測定結果と比較した。実暴露での中性化深さの測定結果は、気中では22mm～28mmと大きくなり、干満の影響を受ける部位では1～2mmと小さくなることを示した。

促進中性化試験結果を図 2.1-19，促進中性化試験と実暴露の中性化速度係数の比較を図 2.1-20 に示す。2 種類の供試体形状で促進中性化試験を行っており，角柱供試体では実暴露の約 35 倍の中性化速度（促進期間 1.5 週＝実暴露 1 年），円柱供試体では実暴露の約 104 倍の中性化速度（促進期間 0.5 週＝屋外自然暴露 1 年）となることを示した。これにより，促進中性化試験と実暴露の違いを指摘した。



図－4 促進材齢と中性化深さの関係  
(橋脚 P1 コア A と B)



図－5 促進材齢と中性化深さの関係  
(橋脚 P2 コア C と D)

図 2.1-19 促進中性化試験結果（角柱：100mm×100mm，円柱：φ100mm） [2-25]

橋脚	中性化速度係数		促進倍率 (倍)
	(1) 促進試験	(2) 現地調査	
P1	コア A	断面 X 4.04	25～48 平均 35
	コア B		
	平均		
P2	コア C	断面 X 3.18	72～142 平均 104
	コア D		
	平均		

※単位：(1)mm/week<sup>1/2</sup>，(2)mm/year<sup>1/2</sup>

図 2.1-20 促進中性化試験と実暴露の中性化速度の比較[2-25]

植松ら[2-26]は，築 31 年を経過した躯体コンクリートの品質調査を行い，圧縮強度および容積含水率と中性化速度係数の関係をまとめた。

圧縮強度および容積含水率と中性化速度係数の関係を図 2.1-21 に示す。部位の違いでは，地下外壁では中性化はほとんど進行していないが，地上部では屋内側，屋外側ともに中性化深さが大きくなることを示した。JASS 5 による両者の関係式と比較すると，同一の圧縮強度に対する中性化速度係数は大きくなるとしている。また，含水率との関係では，含水率が小さいほど中性化速度係数が大きくなることを示した。

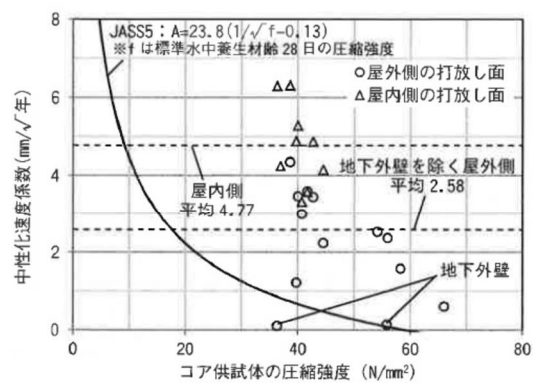


図-1 1 圧縮強度と中性化速度係数の関係

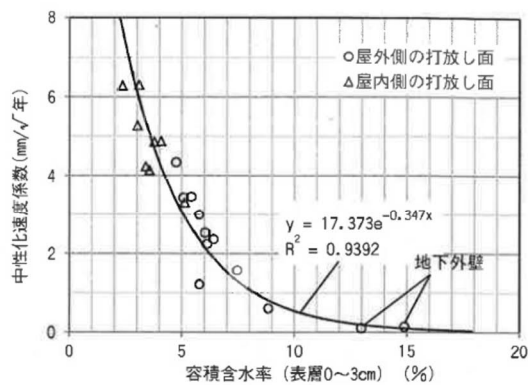


図-1 2 表層含水率と中性化速度係数の関係

図 2.1-21 圧縮強度および容積含水率と中性化速度係数の関係[2-26]



## 2.2 鉄筋腐食の進行に基づいた耐久性評価手法に関する既往の研究

### 2.2.1 鉄筋腐食の進行に基づいた耐久性評価手法の現状

高アルカリ環境下に置かれる鉄筋の表面には不働態皮膜が形成されており、鉄筋腐食の要件となる水と酸素の存在下においても、鉄筋腐食は進行しないことが分かっている。鉄筋腐食の進行に基づいた耐久性評価を考えるにあたっては、高アルカリ環境下において鉄筋腐食が進行しないことを考慮して、鉄筋腐食の起点となる中性化深さを定める必要がある。

ここで、JASS 5 においては鉄筋腐食の限界状態は目視による腐食グレード 2 から 3 となる点と定義されている。また、和泉らの既存建築物の調査結果では、屋外ではその限界状態となる点は中性化深さがかぶり厚さに達した時点とされている。両者を比較すれば、屋外においては中性化深さがかぶり厚さに達した時点で既に相応の鉄筋腐食が生じている状態と判断することができ、鉄筋腐食の起点となる中性化深さは、かぶり厚さより手前にあるといえる。

土木学会<sup>[2-27]</sup>では、中性化残り（かぶり厚さから中性化深さを差し引いた値）10mm を、鉄筋腐食の起点と判断してきた。近年では、前原ら<sup>[2-28]</sup>は、雨掛かりを受ける土木構造物の耐久性調査を行い、かぶり厚さ、中性化深さおよび鉄筋の腐食度を測定し、図 2.2-1 のとおりかぶり厚さに対する中性化深さと腐食度の関係を取りまとめた。図中の点線より下部は、中性化残りが 10mm 以上（中性化深さが、かぶり厚さ－10mm よりも手前）となる領域であり、鉄筋腐食が生じていないことが確認されている。轟ら<sup>[2-29]</sup>は、雨掛かりを受ける土木構造物の耐久性調査を行い、かぶり厚さ、中性化深さおよび鉄筋の腐食度を測定し、図 2.2-2 のとおりかぶりおよび中性化残りと鉄筋腐食に起因するはく離はく落発生率の関係を取りまとめた。中性化残りが 10mm 以上となる領域であり、鉄筋腐食に起因するはく離はく落が生じていないことが確認されている。

日本建築学会の建築保全標準 JAMS 3-RC<sup>[2-30]</sup>における、中性化が鉄筋腐食に及ぼす影響程度の分類を表 2.2-1 に示す。かぶり厚さと中性化深さの関係のうち水が作用する環境では、中性化深さがかぶり厚さ－10mm よりも大きくなると、鉄筋腐食におよぼす影響程度が中となり、鉄筋腐食の進行が生じることが示唆されている。

以上より、鉄筋腐食の起点は、中性化深さがかぶり厚さ－10mm に到達した時点（中性化残り 10mm となった時点）と判断できると考えられる。

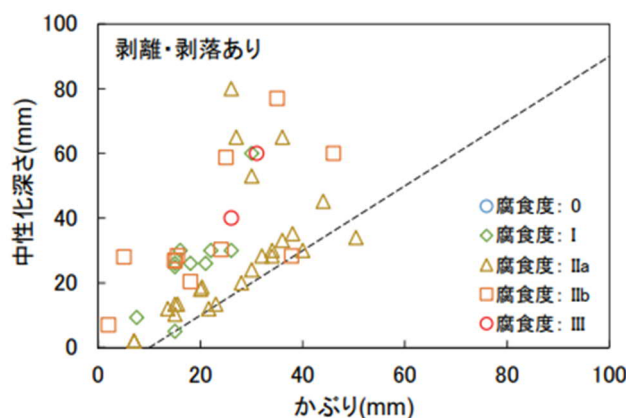


図 2.2-1 かぶり厚さに対する中性化深さと腐食度の関係<sup>[2-28]</sup>

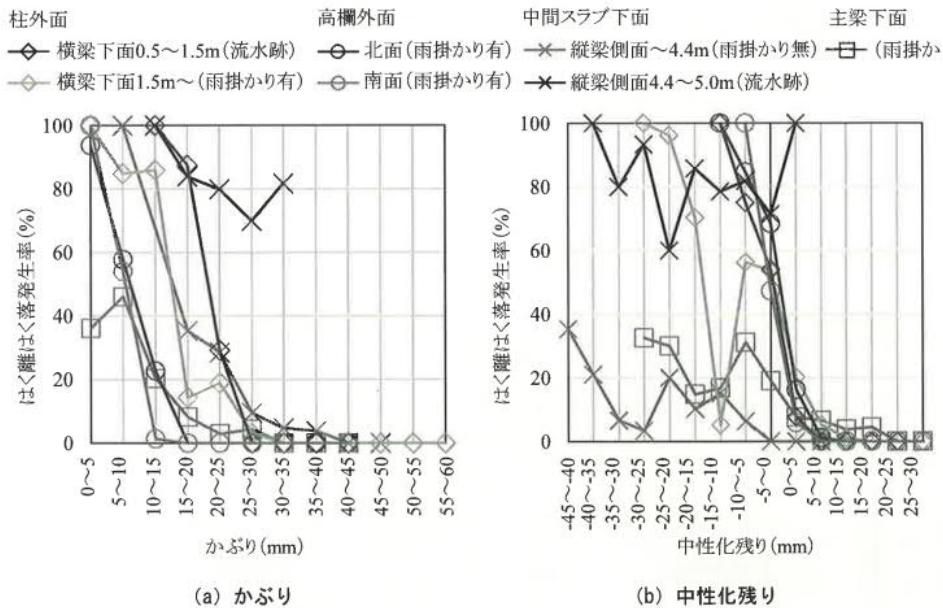


図 2.2-2 かぶりおよび中性化残りとはく離はく落発生率の関係<sup>[2-29]</sup>

表 2.2-1 中性化が鉄筋腐食に及ぼす影響程度の分類<sup>[2-30]</sup>

鉄筋腐食に及ぼす 影響程度	かぶり厚さと中性化深さの関係 [mm]	
	水が作用する環境	水が作用しない環境
小	$D - 10 \geq C_d$	$D \geq C_d$
中	$D - 10 < C_d \leq D$	$D < C_d \leq D + 20$
大	$D < C_d$	$D + 20 < C_d$

ここで、 $D$ : 調査した鉄筋のかぶり厚さの平均値  
 $C_d$ : 調査箇所ごとの中性化深さ

鉄筋腐食速度は、金属化学の分野においては、鉄筋の腐食要件となる水と酸素の供給条件によって整理されている。今本ら<sup>[2-31]</sup>、清原ら<sup>[2-32]</sup>、スカイティンら<sup>[2-33]</sup>は、金属表面における湿度条件と水膜厚さの関係 (図 2.2-3) および金属表面の水膜厚さと腐食速度の関係 (図 2.2-4) から、湿度条件が 80%RH の時に腐食速度が最も大きくなること、それよりも湿度が高い場合には水膜厚さが大きくなり、酸素の供給が減少することで、腐食速度が小さくなることを説明している。

清原らは、実構造物調査におけるコンクリート内部の相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係を整理し、金属表面で確認された理論が、コンクリート中の鉄筋腐食に対しても当てはまることを示した (図 2.2-5)。図 2.2-5 からは、湿度条件が 80%RH よりも低い場合で、腐食速度が小さくなることが読み取れる。コンクリート中の湿度の低下は、かぶりコンクリートへの酸素の供給を増加させる効果があるが、湿度が低くなり過ぎると腐食反応場が形成されなくなることが分かる。今本<sup>[2-34]</sup>は、これらの現象説明として、コンクリート内部の鉄筋の相対湿度 80%付近における水と酸素の供給の模式図である図 2.2-6 を示した。

コンクリートの中性化後における鉄筋腐食速度については、多くの実験的検討が行われており、それらの多くは水分状態との関係で整理されている。それぞれの実験結果については、2.2.2 節に

て取りまとめる。

湿度条件	水膜厚(nm)
60%RH	0.5
90%RH	1
80%RH	10
100%RH	$10^3$
結露	$10^4$
雨	$10^5$

図 2.2-3 金属表面における湿度条件と水膜厚さの関係[2-31]

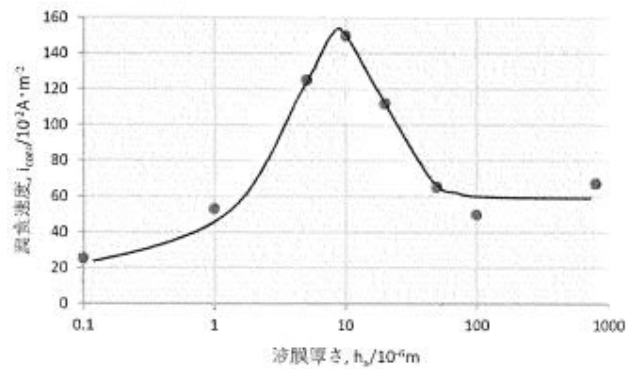


図 2.2-4 金属表面の水膜厚さと腐食速度の関係[2-31]

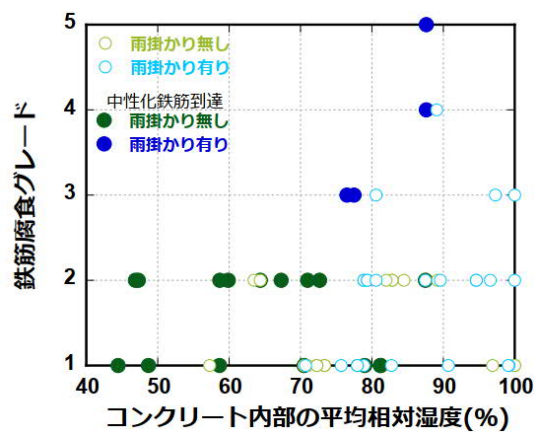


図 2.2-5 実構造物調査におけるコンクリート内部の相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係[2-32]

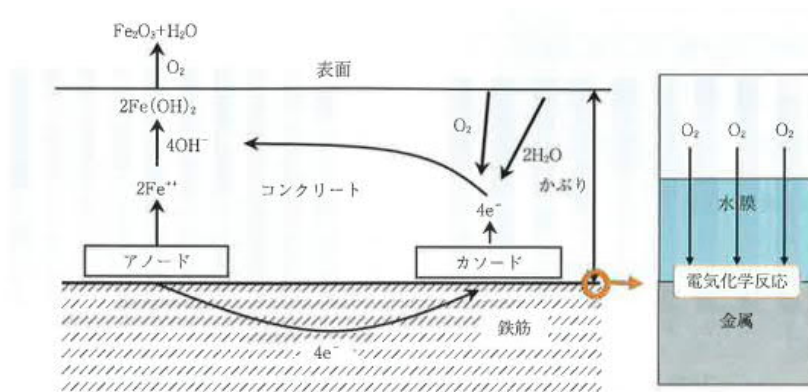


図 2.2-6 コンクリート内部の鉄筋の相対湿度 80%付近における水と酸素の供給の模式図[2-34]



コンクリート中における鉄筋腐食の進行予測式，言い換えると材齢経過に伴う鉄筋腐食速度の変化については，定量的な理論は確立されていない。定性的には，掛川ら<sup>[2-35]・[2-36]</sup>は，黒皮付きの鉄筋を埋設したコンクリート試験体の 20 年間にわたる暴露試験結果から，初期段階の鉄筋腐食速度は大きく，暴露試験材齢の経過に伴って鉄筋腐食速度が低下することを確認している。また，筆者らも，みがき鋼材を埋設したコンクリート試験体により，中性化後の鉄筋腐食速度を測定した実験において，鉄筋の全周が腐食生成物で覆われた後では，鉄筋腐食速度が大きく低下する現象を確認している<sup>[2-37]</sup>。しかしながら，鉄筋の周囲が腐食生成物で覆われる効果は定量的に把握されていない。土木学会の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）委員会報告書<sup>[2-38]・[2-39]</sup>の検討では，鉄筋腐食が進行した後も，安全側の仮定として鉄筋腐食速度は低下せずに一定値として試算されている事例などが紹介されており，今後の課題と考えられる。

鉄筋腐食の限界状態については，日本建築学会の JASS 5 および耐久設計施工指針では，目視による腐食グレードが 2 から 3 に変化する時点と定義されている。この時の質量減少率は，梶田ら<sup>[2-40]</sup>の調査結果（図 2.2-7）によれば 1.12%，日本建築学会耐久性調査 WG<sup>[2-41]</sup>の調査結果（表 2.2-2）によれば 1.18%となる。なお，鉄道総合技術研究所<sup>[2-42]</sup>における塩化物イオンを劣化要因とした場合の質量減少率（表 2.2-3）は，5 段階の腐食度のうち 3 段階目の質量減少率が 4%となっており，中性化を劣化要因とした場合と比較して大きくなる傾向が認められる。

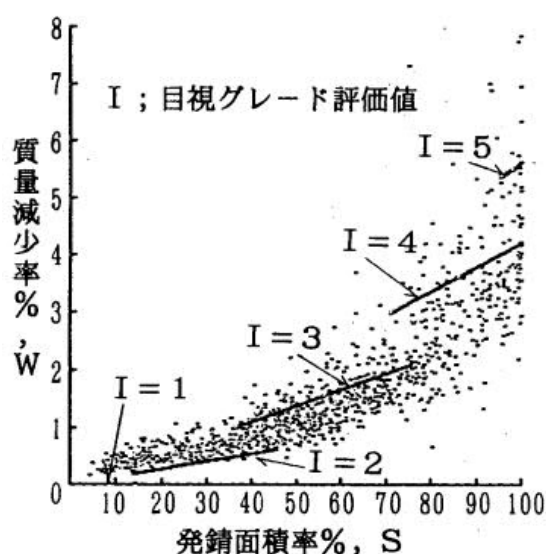


図 2.2-7 発錆面積率および質量減少率と目視による腐食グレードの関係<sup>[2-40]</sup>

表 2.2-2 鉄筋の腐食グレードと腐食面積率および質量減少率の関係<sup>[2-41]</sup>

鉄筋腐食 グレード	腐食面積率 (%)	質量減少率 (%)	腐食状況
-	0	0.00	
1	10	0.15	施工時の状態
2	30	0.44	部分的な腐食
-	51	0.75	暴露試験体データ
3	80	1.18	大部分の腐食
-	100	1.47	全面的な腐食
4	100	5.0	全面的な断面欠損
5	100	15.0	断面の 15%が欠損

表 2.2-3 鉄筋の腐食度と評価基準および質量減少率の関係<sup>[2-42]</sup>

腐食度	評価基準
0	施工時の状態を保ち、以降の腐食が認められない。質量減少率：0%
I	部分的に軽微な腐食が認められる。質量減少率：2%
IIa	表面の大部分に腐食が認められる。質量減少率：4%
IIb	部分的に断面欠損が認められる。質量減少率：6%
III	鉄筋の全周にわたり断面欠損が認められる。質量減少率：10%

鉄筋腐食による限界状態として、腐食ひび割れの発生時点を限界状態とする考え方もある。これは、腐食ひび割れの発生により、ひび割れを介して腐食因子である水と酸素の供給が過大となり、劣化が加速的に進行することによる。腐食ひび割れが発生する限界腐食量については、実験的もしくは解析的に検討されている。

本間ら<sup>[2-43]</sup>は実験と RBSM による弾塑性解析により、水結合材比、かぶり厚さ、鉄筋径をパラメータとした予測式を提案している。一般的な RC 造建築物を想定して、水結合材比を 40～60%、鉄筋径を 10～38mm とした場合、この予測式を用いて限界腐食量を算定した結果を表 2.2-4 に示す。腐食ひび割れが発生する腐食減量は、かぶり厚さ 10mm では 76～98mg/cm<sup>2</sup>、かぶり厚さ 20mm では 51～66mg/cm<sup>2</sup>、かぶり厚さ 30mm では 36～46mg/cm<sup>2</sup> となる。なお、黒皮付きの鉄筋では、鉄筋の全断面が腐食生成物で覆われるほど鉄筋腐食が進行している状況は多くないため、ほぼ一様に全断面を腐食させた実験結果から得られた限界腐食量を判断基準として採用できるかどうかは明確ではなかった。田沼ら<sup>[2-44]</sup>は既存の RC 造建築物の耐久性調査を行い、かぶり厚さが小さく屋外側で水分供給がある部位では、中性化後には鉄筋の全周にわたって腐食が進行している事例を報告している。このことから、黒皮付きの鉄筋では中性化後も鉄筋腐食速度は急激に増加しにくいものの、長期にわたって鉄筋腐食が進行した後には、全断面に一様な腐食状況となるものと考えられる。

表 2.2-4 腐食ひび割れが発生する限界腐食量（本間ら）<sup>[2-43]</sup>

かぶり厚さ	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
ひび割れ発生限界腐食量 (mg/cm <sup>2</sup> )	76～98	51～66	36～46	30～39	34～44

土木学会<sup>[2-27]</sup>では、ひび割れ発生限界腐食量に関する既往の研究結果が  $10\sim 100\text{mg}/\text{cm}^2$  と大きく幅があることを考慮して、安全側となるように  $10\text{mg}/\text{cm}^2$  (腐食深さとしては、 $1.27\times 10^{-2}\text{mm}$  に相当) と設定している。設計上は、この  $10\text{mg}/\text{cm}^2$  に安全率を掛けた上で、かぶり厚さの関数としている。

以上より、腐食ひび割れが発生する限界腐食量については、研究により幅が見られるため、値の設定については、複数の既存の RC 造建築物の耐久性調査結果とも比較しながら、その妥当性を検証していく必要があり、今後の課題の一つと考えられる。

表 2.2-5 腐食ひび割れが発生する限界腐食量 (土木学会) <sup>[2-27]</sup>

かぶり厚さ	10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
ひび割れ発生限界腐食量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	10	20	30	40	50

土木学会の 2017 年改定のコンクリート標準仕様書 (設計編) <sup>[2-27]</sup>では、鋼材腐食に対する照査方法について、従来の中性化深さをを用いた方法から、鋼材腐食深さを直接計算する方法へと改められた。コンクリート標準仕様書による降雨作用 (時間) と鋼材腐食の進行に関する考え方を図 2.2-8 に示す。鋼材腐食の進行には、水と酸素が大きく影響するため、外部環境である降雨による乾湿繰返しの影響を、鋼材位置に水が繰返し到達する回数に換算することで考慮している。また、コンクリート中への水分移動は、水分移動速度係数の測定により、設計時点で考慮できるようになっている。なお、水の年間到達回数と、水の到達 1 回あたりの鋼材腐食深さの積により、1 年あたりの鋼材腐食深さが算定される。

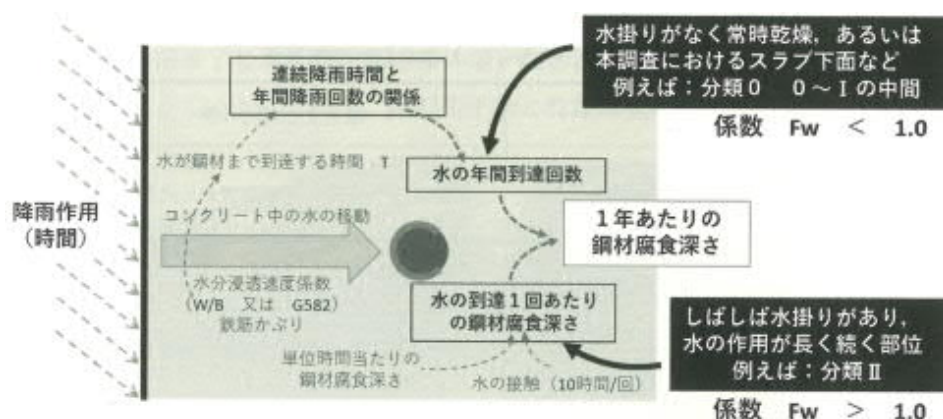


図 2.2-8 コンクリート標準仕様書による降雨作用(時間)と鋼材腐食の進行に関する考え方<sup>[2-45]</sup>

鋼材腐食深さの照査方法の基本的な考え方を式(2.2-1)、式(2.2-2)に示す。

$$S_d = \gamma_w \cdot S_{dy} \cdot t \quad (2.2-1)$$

ここに、 $S_d$  : 鋼材腐食深さの設計値(mm)

$S_{dy}$  : 1 年あたりの鋼材腐食深さの応答値(mm/年)

$t$  : 設計耐用年数(年)

$\gamma_w$  : 安全係数

$$S_{dy} = 1.9 \times 10^{-4} \times \exp(-0.068 \times (c - \Delta c_e)^2 / q_d^2) \quad (2.2-2)$$

ここに、 $\Delta c_e$ ：かぶりの施工誤差（mm）

$q_d$ ：コンクリートの水分浸透速度係数の設計値（mm/√hour）

$q_d = \gamma_c \times q_k$

$\gamma_c$ ：コンクリートの材料係数

$q_k$ ：コンクリートの水分浸透速度係数の特性値（mm/√hour）

鋼材腐食深さの設計値である  $S_d$  に対して、腐食速度に相当する  $S_{dy}$  と設計耐用年数  $t$  の積を比較することにより照査が行われる。なお、 $S_{dy}$  は、「水の到達 1 回あたりの鋼材腐食深さ」と「水の年間到達回数」の積で表される指標である。

このように、照査の指標は鋼材浸食深さであるが、鉄筋腐食速度で評価すべき腐食環境を水作用環境に置き変えて評価を行う体系が構築されている。

なお、2023 年の日本建築学会大会研究協議会「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」においては、腐食環境の定め方のみならず、鉄筋腐食の進行に基づいた耐久設計手法に関して積極的な議論がなされた。この研究協議会で、兼松は<sup>[2-2]</sup>各設計法などにおける設計指標と中性化と腐食に対する限界状態について、表 2.2-6 のとおり整理している。

表 2.2-6 各設計法などにおける設計指標と中性化と腐食に対する限界状態<sup>[2-2]</sup> <sup>[2-3]</sup>

設計法など	設計指標	中性化に対する限界状態	腐食に対する限界状態
内田・濱田の研究など	中性化深さ	中性化深さ＝かぶり厚さ	—
高耐久指針	中性化深さ	屋外：中性化深さ＝かぶり厚さ 屋内：中性化深さ＝かぶり厚さ＋20mm	鉄筋が発錆しないこと
1997 年版 JASS 5	中性化深さ(腐食確率)	同上	腐食確率 3%
2007 年版 耐久設計指針	中性化深さ(腐食確率)	同上	設計限界：腐食確率 20% 維持保全限界：腐食確率 3%
2017 年版 耐久設計指針	中性化深さ(腐食確率)	常時水に接する環境、屋外の雨がかり環境、屋内の 高温多湿環境 ：中性化深さ＝かぶり厚さ 屋外の雨がかりでない環境、一般屋内環境 ：中性化深さ＝かぶり厚さ＋20mm	同上
2022 年版 JASS 5	一般劣化環境(腐食環境) ：中性化深さ(腐食確率)	中性化深さ＝かぶり厚さ	腐食確率 3%
	一般劣化環境(非腐食環境) ：設定しない	—	—

日本建築学会の建築工事標準仕様書 JASS 5 コンクリート工事<sup>[2-9]</sup>は、2022 年 11 月に大改定が行われ、一般劣化環境においては、鉄筋腐食に対する劣化作用の強さに応じた、劣化環境の区分（腐食環境・非腐食環境）が新たに設定された。この大改定では、設計者が外部からの水分供給がない部位を非腐食環境として定めることができることになり、そのような部位では、耐久設計基準強度を適用しなくてよかった。一方、設計者が非腐食環境と定められない部位は、原則として腐食環境とみなされ、従来どおり中性化の進行に基づいた耐久設計が踏襲されることとなった。JASS 5 による一般劣化環境（非腐食環境）および一般劣化環境（腐食環境）の例を表 2.2-7 に示す。

表 2.2-7 JASS 5 による一般劣化環境（非腐食環境）および一般劣化環境（腐食環境）の例<sup>[2-9]</sup>

劣化環境	定義	部位の例	
一般劣化環境 (非腐食環境)	鉄筋に作用する腐食因子が存在しないとみなせる部位	外気に接することの無い屋内空間にある部位で、直接の水濡れおよび結露などによる水分供給の可能性の無い部位	
一般劣化環境 (腐食環境)	鉄筋に作用する腐食因子が存在する部位  一般劣化環境 (非腐食環境)でない部位.	常時外気に接する屋外空間にある部位、および土または水に直接する部位.	外壁や外部にあるスラブなど直接雨がかりが想定される部位、および囲われていないピロティや、常時解放された開口を介して外気に触れる期間が長い駐車場など.
		屋内空間にあっても、外皮に接する部位	屋根・屋上スラブ・外壁など外皮の屋内側、地下の擁壁や基礎まわりの屋内側にあって、腐食の条件となる水分供給の可能性が否定できない部位
		屋内空間にあっても、直接の水濡れや結露が想定される部位	台所や風呂、トイレ、屋内プールや地下ピットなどを有する室の壁や天井、床など、直接の水濡れや結露などによる水分供給が著しいと想定される部位



## 2.2.2 鉄筋腐食の進行速度におよぼす各種要因

鉄筋コンクリート中における鉄筋の腐食反応は、金属分野における鋼材の腐食理論と同様に、鉄筋とコンクリート内に侵入した水（電解質）が接する界面における、電気化学反応により説明できる。しかしながら、高アルカリ環境のもとでは、鉄筋表面に不働態皮膜が形成されることや、鉄筋コンクリートのかぶり厚さが水や酸素の侵入抵抗となり、鉄筋位置における水や酸素の供給評価が難しいことなどから、外部環境と鉄筋コンクリート中における鉄筋腐食速度を、直接結びつけることは困難である。既往の研究の多くは、外部環境と部材内部（鉄筋位置）の含水状態が平衡となった状態において、鉄筋の腐食減量や鉄筋腐食速度を測定している。本節では、主に平衡となった水分状態における鉄筋腐食速度について取りまとめた。

コンクリート中の鉄筋腐食の主な律速条件は、鉄筋の溶解律速（アノード律速）と酸素の拡散速度（カソード律速）で整理できる。近年、これらの金属腐食化学の理論と、実構造物における鉄筋腐食の評価を結びつけるため、ISOをはじめとして構造物の置かれる環境分類に基づいた整理が進められている。また、その整理の中で鉄筋腐食におよぼす水の関与が注目されている。

鉄筋腐食におよぼす水の関与は、カソード反応式の消費項に  $H_2O$  が入っていることから、鉄筋腐食の反応媒体としての役割を有している。また、多孔体であるコンクリート中では、水の存在がかぶりコンクリートにおける酸素の拡散速度に影響をおよぼすことが知られている。このような背景から、実構造物における鉄筋腐食の評価に水の因子を取り込もうとする考え方は、古くから提案されてきた。

森永<sup>[2-46]</sup>は、湿度、酸素濃度および腐食速度の関係を提示した（図 2.2-9）。実構造物を対象とした鉄筋腐食の評価に湿度をパラメータとした先駆的な研究と考えられる。対象とした湿度領域は 40～100%と広範であり、腐食速度は湿度と酸素濃度の両方の影響を受けることを論じている。

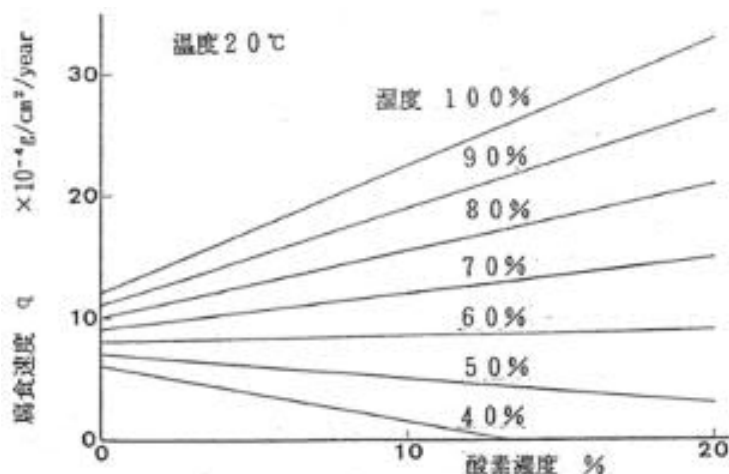


図 2.2-9 湿度、酸素濃度および腐食速度の関係<sup>[2-46]</sup>

J. A. Gonzalez, C. Andrade ら<sup>[2-47]</sup>は、鉄筋コンクリート供試体に対して電気化学的な測定手法を適用し、コンクリートの中性化後における、鉄筋の自然電位や腐食電流密度（鉄筋腐食速度）を測定した。暴露環境の相対湿度と自然電位、腐食電流密度の関係を図 2.2-10 に示す。暴露環境の相対湿度が大きいほど、また、供試体を水浸させた場合、鉄筋腐食速度が特に大きくなる傾向を示した。

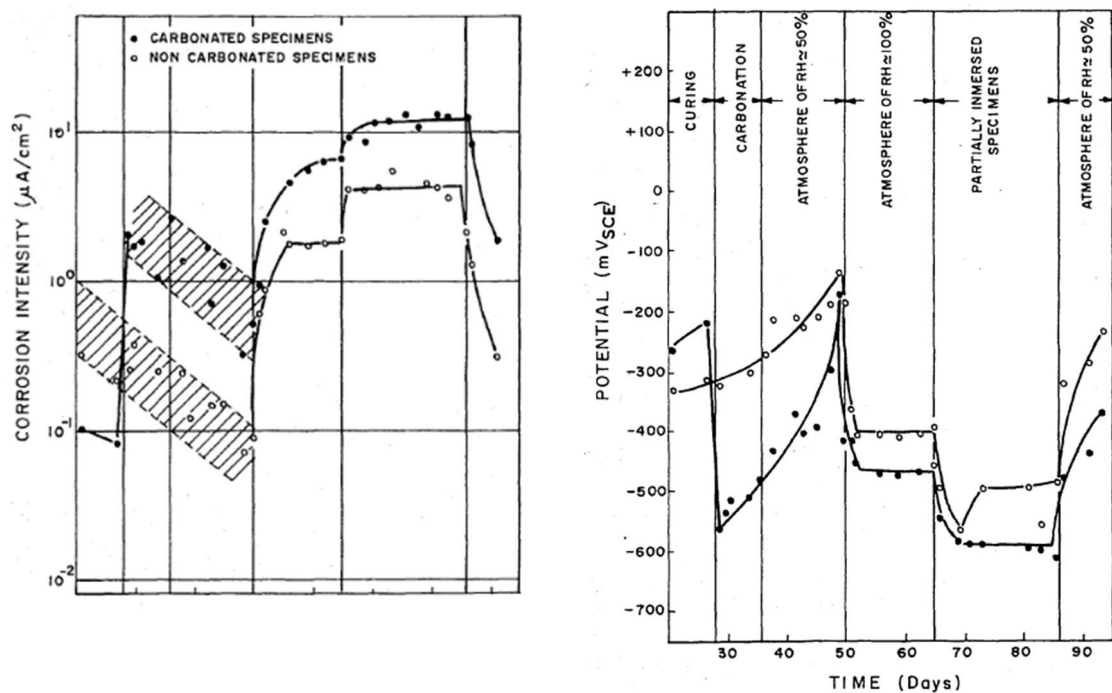


図 2.2-10 暴露環境の相対湿度と自然電位，腐食電流密度の関係<sup>[2-47]</sup>

和泉ら<sup>[2-8]</sup>は，経年 RC 構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食に関する実測データを基に，鉄筋のかぶり厚さに対するコンクリートの中性化深さの違いが，平均さび評点（現在の鉄筋腐食グレードの元になった指標）におよぼす影響を統計的に分析した（図 2.2-11）。

その結果，屋外では中性化深さが鉄筋に到達した時点，屋内では中性化深さがかぶり厚さを 20～30mm 通り越した時点で，腐食グレード 3 に相当する状況になることを示した。この実験結果は，JASS5 をはじめとする中性化の進行に基づいた耐久設計において，中性化深さの限界状態を定める根拠とされてきた。

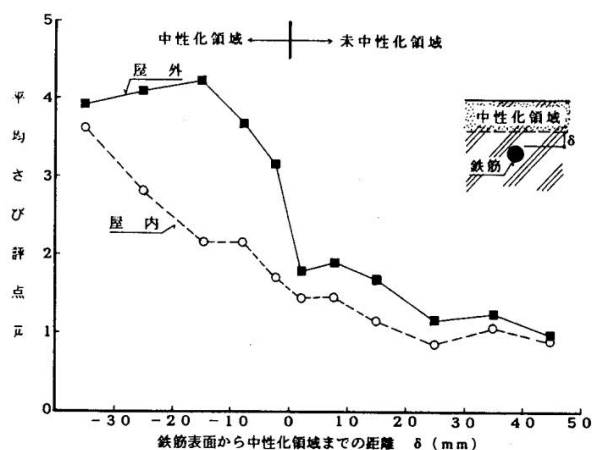


図 2.2-11 中性化の進行と平均さび評点の関係<sup>[2-8]</sup>

一般環境下において，コンクリート中の水が完全になくなることはない。そのため，コンクリート中の水が腐食反応場として機能する，言い換えると鉄筋腐食反応を無視できるコンクリート

中の水量の最小値があると考えられるが、現時点においては明らかではない。

古賀ら<sup>[2-48]</sup>は、築 38 年が経過した高濃度の塩化物を含有する壁式 RC 造建築物を調査した結果、鉄筋の腐食限界と言われる  $1.2\text{kg/m}^3$  を超える塩化物イオンを含有したものでも、鉄筋位置におけるコンクリートの質量含水率として 3.5% 以下であれば鉄筋腐食は生じていなかったことを報告している。

山本ら<sup>[2-49]</sup>は、磨き丸鋼を使用して、鉄筋位置まで中性化させた鉄筋コンクリート試験体に対して、一定の含水条件を与えた上で、鉄筋腐食に及ぼすコンクリートの含水率の影響について検討した。その結果、コンクリートの相対含水率として、Cl-を混入しない場合には 35% 以下、Cl-を混入する場合には 20% 以下であれば、鉄筋腐食は生じないことを報告している。

鉄筋位置におけるコンクリートの含水状態は、外部の環境条件の他、使用するコンクリートの緻密性、部材のかぶり厚さなどに影響を受けるため、既往の報告で得られた数値を一般化できるものではないが、鉄筋腐食の観点から部材の乾燥条件を考える上で一つの目安となる数値であろう。

掛川ら<sup>[2-36]</sup>は、塩化物イオンを含んだコンクリートの鉄筋腐食速度に及ぼす中性化の影響を検討した。この実験では、塩化物イオンが含有されており、中性化が複合劣化要因の一つとして与えられているに過ぎないが、温度条件を  $20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$  に変えた場合の、鉄筋腐食速度の違いが考察できる。実験結果より、鉄筋腐食速度は  $20^{\circ}\text{C}$ 、 $40^{\circ}\text{C}$ 、 $60^{\circ}\text{C}$  の順に大きくなるが、 $80^{\circ}\text{C}$  では溶存酸素量が減少するため、 $60^{\circ}\text{C}$  よりも鉄筋腐食速度が小さくなることを示した。

鳥取、宮川<sup>[2-50]</sup>は、中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測について、格子状に配筋した鉄筋コンクリート試験体 ( $500\text{mm} \times 500\text{mm} \times$  厚さ  $85\text{mm}$ ) を促進的に中性化させた後、約 5 年間の屋外暴露試験を行い、鉄筋腐食に関する劣化予測法について検討した。一般に鉄筋が腐食し始める中性化残り（鋼材の純かぶりから中性化深さを引いた残りの厚さ）は  $0 \sim 10\text{mm}$  程度であり、鉄筋腐食開始後の腐食速度は温度、湿度、あるいはコンクリートの比抵抗と相関があると言われている。暴露時の鉄筋腐食量の経時変化を図 2.2-12 に示す。かぶり厚さを  $15\text{mm}$  として下端筋の中央付近まで促進中性化を行った場合は、下端筋の平均腐食速度は  $2 \times 10^{-3}\text{mm}/\text{年}$  程度となることを示した。また、同一の試験体で中性化残りが  $10\text{mm}$  程度となる上端筋では、平均腐食速度は下端筋の  $1/10$  程度となることを示した。また、暴露開始直後には、マクロセル腐食と想定される影響で腐食速度がやや大きくなるが、腐食速度は徐々に低下していき経年によりその影響は小さくなると推定した。RC 建築物の劣化予測の例を図 2.2-13 に示す。かぶり厚さが小さい場合 ( $c$  (かぶり厚さ) /  $\phi$  (鉄筋径) = 1) においても、曲げ耐力上の限界腐食量に達するのは 100 年経過後であり、耐久性として問題にないとした。ただし、中性化進行が早く、かぶり厚が小さい場合には、コンクリートの剥離・剥落の発生が想定されるため、適切な時期に補修等の対策が必要になることを補足した。



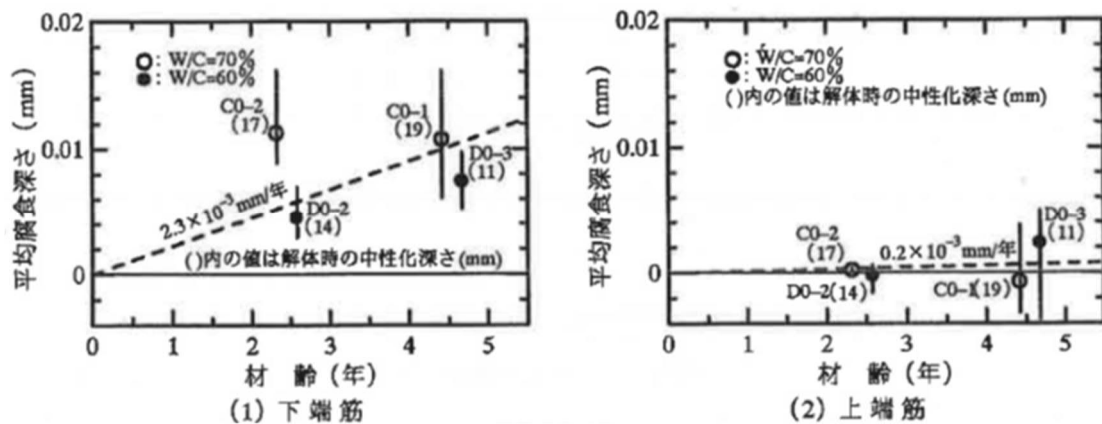


図 2.2-12 暴露時の鉄筋腐食量の経時変化<sup>[2-50]</sup>

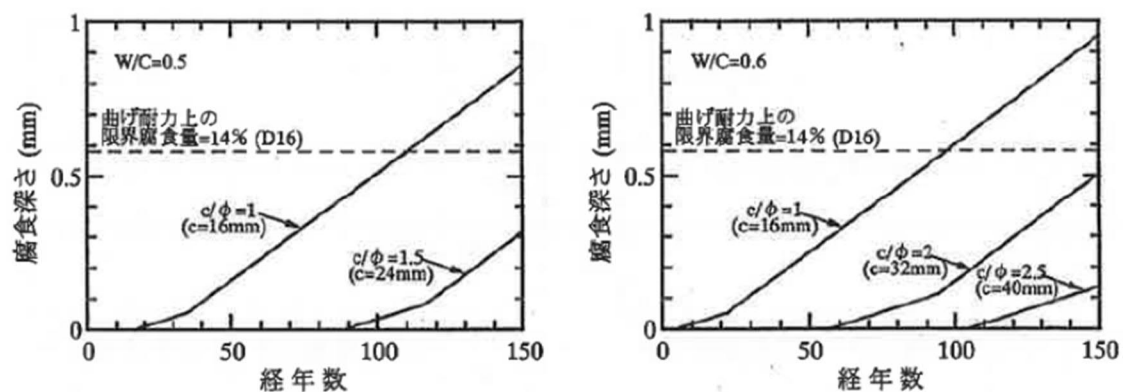


図 2.2-13 RC 建築物の劣化予測の例<sup>[2-50]</sup>

また、最近では、鉄筋腐食におよぼす水の役割自体は言及していないが、電気化学的にそれらの影響を内包した鉄筋腐食速度として測定し、コンクリートの含水状態との関係を論じたものがある。

仁平ら<sup>[2-51]</sup>は、水セメント比 70%のコンクリート試験体を作製し、中性化促進試験と促進腐食試験を同時に行い、中性化深さと鉄筋腐食性状を測定した。なお、促進腐食試験では、乾湿繰返し条件 ( $\text{CO}_2$  濃度 10%,  $40^\circ\text{C}$ , 95%RH で 7 日間  $\times$   $40^\circ\text{C}$ , 60%RH で 7 日間) を設定し、コンクリートの含水率の違いを考察している。

促進腐食試験による鉄筋腐食程度を図 2.2-14 に示す。自然電位は、鉄筋の腐食開始時点で急激に低下したが、腐食過程では変化が停滞している。腐食電流密度は、鉄筋腐食が進行した時点から急激に低下し、鉄筋腐食量の変化と相関が認められるとしている。また、乾湿繰返し条件では、中性化速度係数は小さくなるが、コンクリート中の含水率が大きくなるため、鉄筋腐食量が大きくなることを示した。

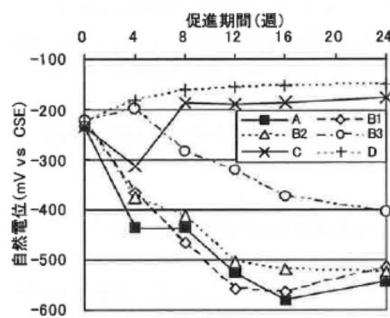


図-6 自然電位の経時変化

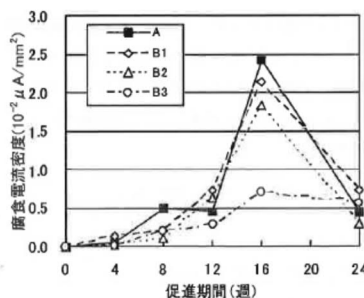


図-7 腐食電流密度の経時変化

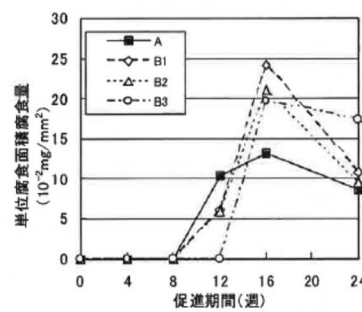


図-10 単位腐食面積腐食量の経時変化

図 2.2-14 促進腐食試験による鉄筋腐食程度[2-51]

米澤ら[2-52]は、コンクリートが中性化した後の鉄筋の腐食速度を研究するため、中庸熱ポルトランドセメントにフライアッシュを加えた調査を中心として、みがき鉄筋のかぶり厚さを 20～50mm としたコンクリート試験体の全断面を中性化させた後、相対湿度 40～95%RH で約 1 年半の暴露試験を行い、鉄筋腐食速度を測定した。湿度の影響については、鉄筋位置に高分子湿度センサーを埋め込み、鉄筋位置の湿度と環境湿度の関係を考察している。

コンクリートが中性化した後の鉄筋腐食速度の推定値を図 2.2-15 に示す。コンクリート中の湿度が暴露環境の湿度と平衡した時点の分極抵抗から、湿度が 80%を超えると腐食速度が大きくなることを実験的に示し、湿度を考慮した中性化後の腐食速度を提案した。

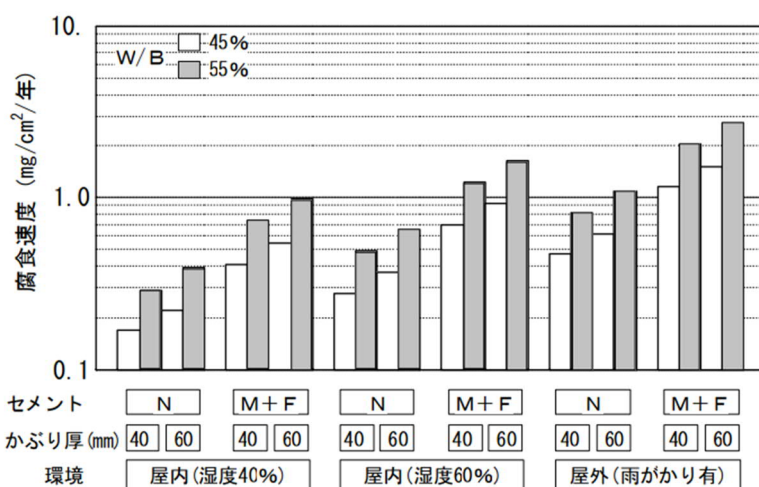


図 2.2-15 コンクリートが中性化した後の鉄筋腐食速度の推定値[2-52]

本間ら[2-43]は、鉄筋の腐食による腐食ひび割れ発生時の限界腐食量を検討するため、鉄筋を埋設したコンクリート試験体の人工海水中への 7 日間浸漬、7 日間乾燥の乾湿繰返し暴露実験を行った。実験では、結果にばらつきが生じることや検討できる水準に制約があることから、一般化を目的として剛性ばねモデル (RBSM) による解析的検討を行っている。

実験および解析結果として、限界腐食量と水結合材比、かぶり厚さ、鉄筋径の関係を図 2.2-16 に示す。水結合材比が大きいほど、かぶり厚さが小さいほど、限界腐食量は大きくなることを示した。鉄筋径の違いでは、鉄筋径が 19mm の場合に限界腐食量は最小値をとり、それより鉄筋径が小さくても大きくても限界腐食量は大きくなることを示した。また、この傾向は FEM の弾塑

性解析では再現できず、RBSM による解析手法が有用であることを示した。

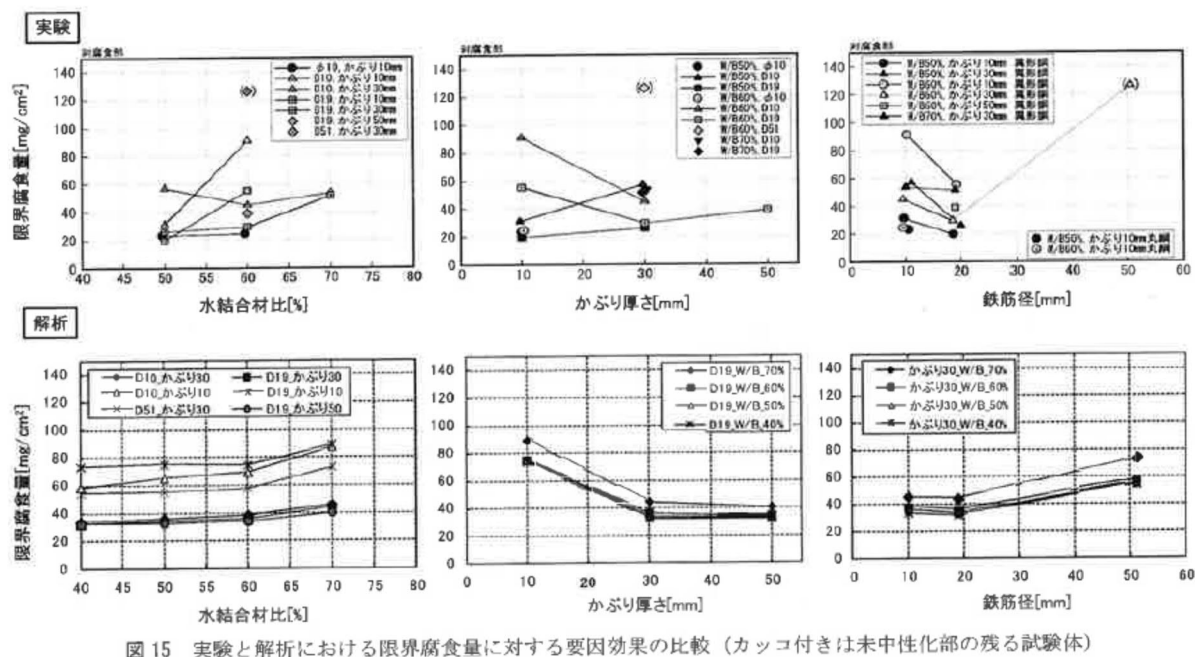


図 2.2-16 限界腐食量と水結合材比，かぶり厚さ，鉄筋径の関係（実験，解析）[2-43]

光木ら[2-53]は，フライアッシュ B 種セメントを用いた調合で，黒皮付きの鉄筋を埋設したコンクリート試験体により，60℃の高温環境下で促進中性化試験と相対湿度 30～100%RH での暴露試験を行い，腐食減量を測定した。その結果，60℃の高温環境下でも，相対湿度が 90%RH 以下では中性化後の鉄筋腐食速度は小さいことを示した。

L. Cheng ら[2-54]は，直径 10mm のみがき鉄筋を，かぶり厚さが 5mm となるように埋設したのモルタル試験体 (20×20×40mm) に対して，鉄筋位置まで中性化させた後，異なる相対湿度環境に暴露し，平衡状態となったところで電気化学的に鉄筋腐食速度を測定した（図 2.2-17，図 2.2-18）。その結果，モルタルの相対湿度もしくは含水量と鉄筋腐食速度には高い相関関係が見られることを示した。また，相対湿度 80%RH を上回ると，腐食電流密度は大きく増加する傾向を示し，この時のモルタルの含水率は約 2%であることを示した。

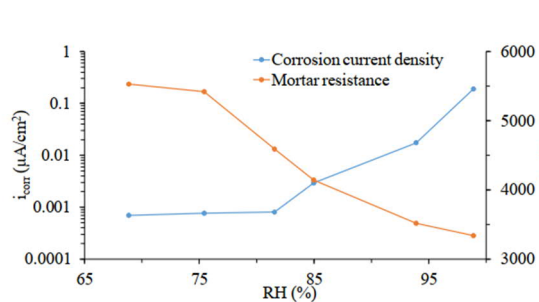


図 2.2-17 相対湿度と腐食電流密度の関係[2-53]

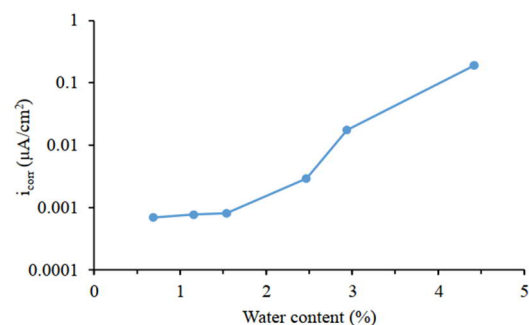


図 2.2-18 含水率と腐食電流密度の関係[2-53]

近年における海外研究の動向として，いくつかのレビュー論文の発表がある。

M. Stefanoni ら<sup>[2-51]</sup>は、中性化後のコンクリート中の鉄筋腐食速度についてレビュー論文を取りまとめ、その中で相対湿度と腐食速度の関係について整理している（図 2.2-19）。図 2.2-19 は、コンクリートの調合や暴露条件が異なる、複数の試験結果をまとめたものであるが、相対湿度と鉄筋腐食速度の対数値には、概ね比例関係が認められるとしている。なお、この図での鉄筋腐食速度は対数軸で取られているため、相対湿度の増大に伴って指数関数的に増加することに注意が必要である。なお、黒皮などの存在については、鉄筋腐食速度に影響を与える可能性があるとしても、レビューした文献からは鉄筋の状態に関して詳細な情報は得られていない。

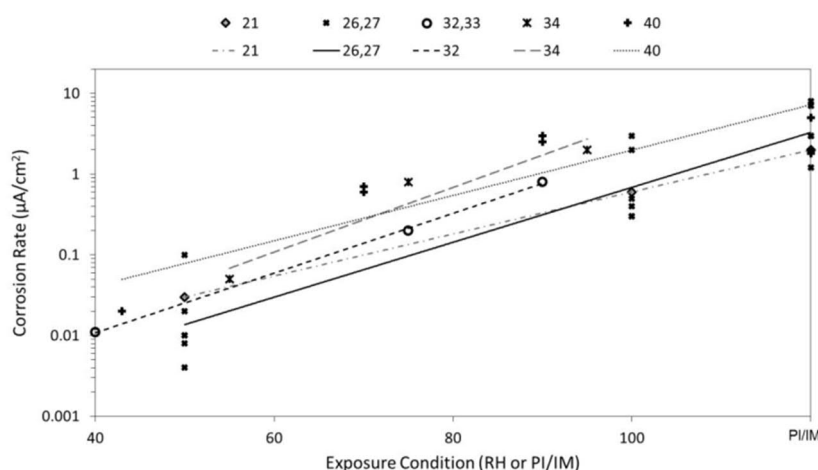


図 2.2-19 相対湿度と腐食速度の関係<sup>[2-55]</sup>

U. Angst ら<sup>[2-56]</sup>も、中性化後のコンクリート中の鉄筋腐食速度についてレビュー論文を取りまとめ、その中で相対湿度と腐食速度の関係について整理している（図 2.2-20）。先述した M. Stefanoni ら<sup>[2-55]</sup>のレビュー論文を参考として、同じ視点で取りまとめられている。

図 2.2-20 の a) では、相対湿度と鉄筋腐食速度の対数値の関係を示し、両者には概ね比例関係が認められるとしている。また、値のばらつきを示す図中に塗り潰された広範な着色域を見ると、実験条件によって中性化後の鉄筋腐食速度が大きく異なっていることが分かる。

図 2.2-20 の b) は、縦軸を飽水状態における鉄筋腐食速度を 1 とした場合の値を示したものである。相対湿度が 90%RH を上回ると、急激に鉄筋腐食速度が大きくなることが分かる。

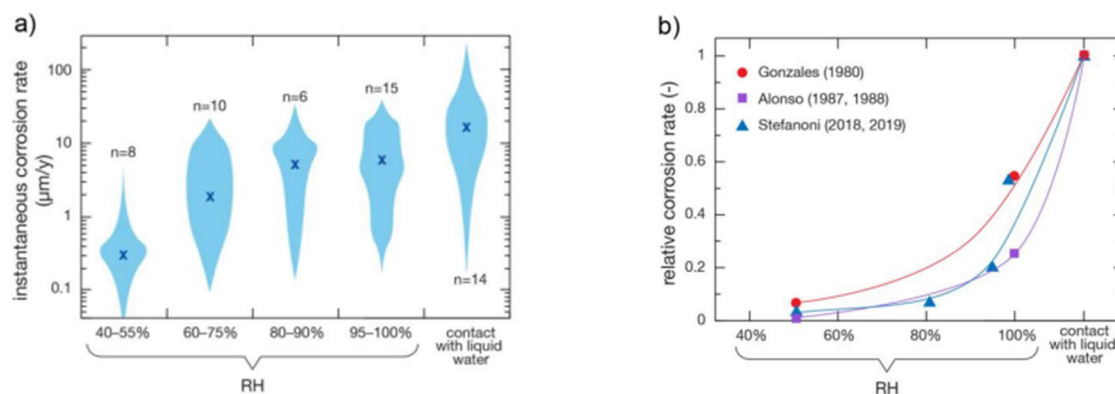


図 2.2-20 相対湿度と腐食速度の関係<sup>[2-56]</sup>

### 2.2.3 ひび割れなどの局所的な劣化部が鉄筋腐食速度におよぼす影響

一般的な RC 造建築物では、ひび割れ部およびかぶり厚さが小さい部位での鉄筋腐食が多く認められており、ひび割れと鉄筋腐食の関係についても既往の研究も多い。古くは、P.Schiessl<sup>[2-57]</sup>や A.W.Beeby<sup>[2-58]</sup>により、鉄筋に直交するひび割れについて初期材齢では鉄筋腐食に影響するが、長期材齢では影響が見られなくなるとの結論が示されている。一方、ひび割れが長期的に鉄筋腐食を促進させるとする報告も多く、ひび割れ部や打継ぎ部での中性化と鉄筋腐食に関する検討が行われている。

鈴木ら<sup>[2-59]</sup>は、D13 の異形鉄筋を設置したコンクリート試験体を作製し、曲げひび割れを導入した上で、65℃、NaCl (3.1%) 溶液槽に 24 時間浸漬と室内乾燥 24 時間の乾湿繰返しを行い、鉄筋の促進腐食試験を実施した。ひび割れ幅と鉄筋腐食面積率の関係を図 2.2-21 に示す。ひび割れ幅が大きいほど、鉄筋腐食面積率が大きくなることを示した。

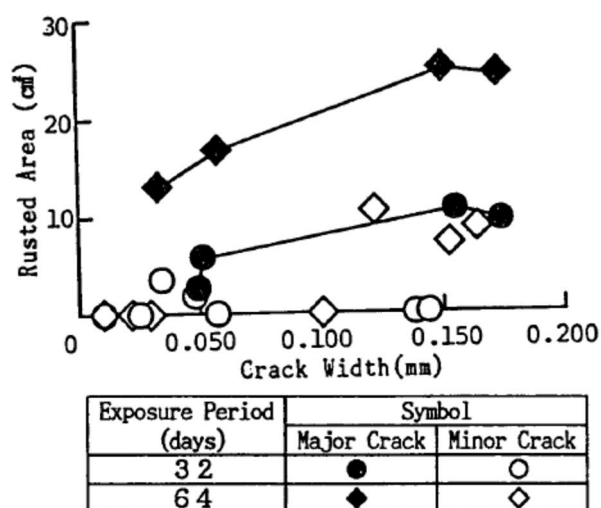


図 2.2-21 ひび割れ幅と腐食面積率<sup>[2-59]</sup>

辻埜ら<sup>[2-60]</sup>は、ひび割れ等の各種欠陥を有する鉄筋コンクリート試験体を作製し、11 年間にわたって屋外暴露を行い、鉄筋の腐食面積率を測定した。コンクリートの水セメントは 45%と 57.5%の 2 水準、欠陥の種類は水平打継ぎ、鉛直打継ぎおよびひび割れの 3 水準である。

ひび割れ部での鉄筋の腐食面積率を図 2.2-22 に示す。ひび割れ幅が大きいほど、鉄筋の腐食面積率が大きくなることを示した。また、同程度のひび割れ幅では、水セメント比が大きいほど、かぶり厚さが小さいほど、鉄筋の腐食面積率が大きくなることを示した。

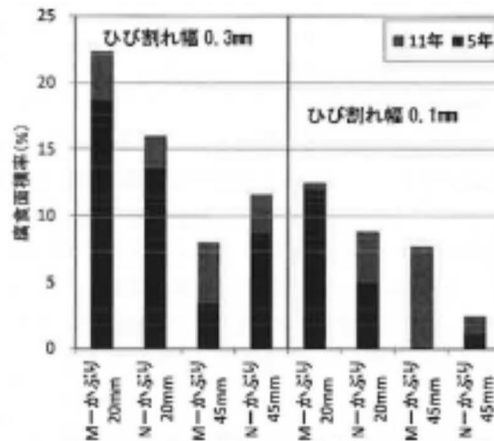


図 2.2-22 ひび割れ部における鉄筋の腐食面積率<sup>[2-60]</sup>

大竹ら<sup>[2-61]</sup>は、ステンレス板のスリットにより模擬ひび割れを導入したコンクリート試験体に対して、促進中性化試験と1日2時間の散水養生を行い、鉄筋腐食程度を測定した。

ひび割れ部での鉄筋の腐食面積率の経時変化を図 2.2-23 に示す。ひび割れが鉄筋位置まで到達したものでは、ひび割れ幅が 0.3mm 以上の場合において、材齢経過に伴い鉄筋の腐食面積率が增大することを示した。

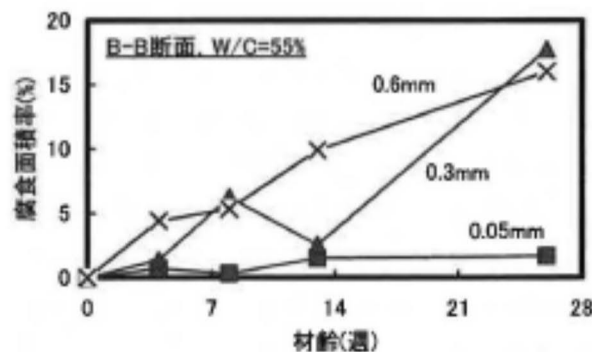
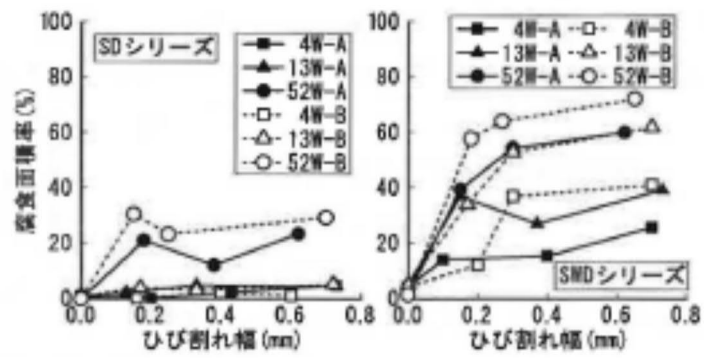


図 2.2-23 ひび割れ部での鉄筋腐食の経時変化<sup>[2-61]</sup>

唐沢ら<sup>[2-62]</sup>は、ひび割れ部での劣化進行予測を目的として、鉄筋を埋込んだ供試体を作製し、促進中性化試験および促進腐食試験を行った。

促進腐食試験でのひび割れ幅と鉄筋の腐食面積率の関係を図 2.2-24 に示す。事前に促進中性化試験を行い、鉄筋位置まで中性化が進行した後では、水分を与えない場合 (SD) はひび割れ幅に関わらず鉄筋の腐食速度は小さいことを示した。一方、水分を与えた場合 (SWD) は鉄筋の腐食速度が大きくなり、早期に鉄筋全面が腐食することを示した。とりわけ、ひび割れ幅が 0.2mm 以上でその傾向が顕著に見られるとした。また、この実験では、ひび割れ部から鉄筋沿いに腐食が広がり、ひび割れ近傍のみでの局所的な腐食は見られないとしている。



(促進中性化試験) (促進中性化 8 日間×湿潤 6 日間)

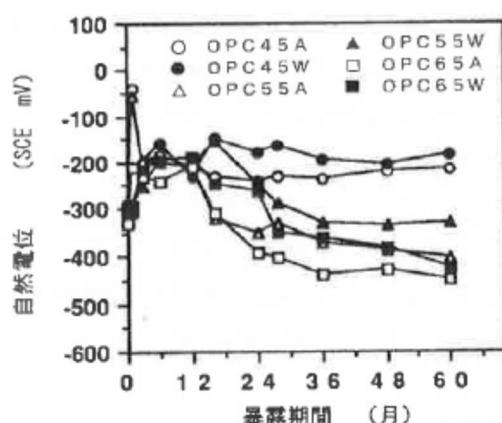
図 2.2-24 ひび割れ幅と鉄筋の腐食面積率<sup>[2-62]</sup>



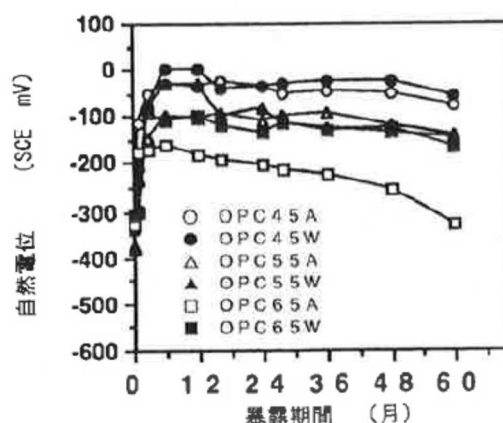
## 2.2.4 実構造物における鉄筋腐食の実態調査

笹谷ら<sup>[2-63]</sup>は、鉄筋を埋設したコンクリート試験体を作製し、海洋環境および建物屋上に 5 年間の暴露試験を行い、自然電位と鉄筋腐食状況を確認した。

暴露試験後の自然電位の変化を図 2.2-25 に示す。普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートでは、海洋暴露では経年による自然電位の低下が見られ鉄筋腐食の進行が確認された。屋外暴露では経年での自然電位の変化は小さく鉄筋腐食も認められないとした。一方、フライアッシュ、高炉スラグおよびシリカフュームを用いたコンクリートでは、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートと異なり、自然電位と鉄筋腐食性状には明確な相関が見られず、電気化学特性により鉄筋腐食状況を推定するためには、異なる評価軸が必要であることを示した。



図一 普通セメントコンクリートの自然電位（海洋環境暴露）



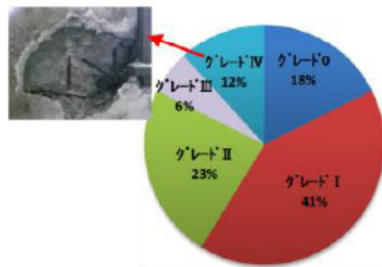
図三 普通セメントコンクリートの自然電位（建物屋上暴露）

図 2.2-25 暴露試験後の自然電位の変化<sup>[2-63]</sup>

野口ら<sup>[2-20]</sup>は、築 87 年を経過した集合住宅（同潤会上野下アパートメント）の解体時に躯体コンクリートの調査を実施し、含水率、中性化深さとともに鉄筋腐食程度を測定した。

含水率と鉄筋の腐食グレードの関係を図 2.2-26 に示す。鉄筋位置まで中性化が進行した部位と比較すると、屋内でコンクリートの含水率が低くなる部位では鉄筋の腐食グレードが小さくなり、屋外の雨掛かり部など含水率が高くなる部位では鉄筋の腐食グレードが大きくなることを示した。





調査部位				中性化深さ	かぶり厚	含水率	腐食グレード	備考
棟	階	方位	部位	[mm]	[mm]	[%]		
1	1.5F	S	内壁	32.8	35	3.02	1	
2	4F	E	内壁	33.3	40	1.62	1	
2	4F	N	内壁	8.3	38	1.68	2	
1	1.5F	N	内壁	16.2	-	2.04	1	
1	2.5F	N	内壁	15.3	-	3.83	1	
1	2.5F	S	内壁	6.5	-	3.00	2	
1	3.5F	N	内壁	6	-	3.29	0	
1	3.5F	S	内壁	7.2	-	2.34	2	
1	3F	N	雑壁	15.5	55	1.35	1	
2	4F	E	雑壁	6.8	30	1.41	1	
1	2F	N	雑壁	全面	85	3.04	2	
1	4F	N	雑壁	18.5	-	1.29	3	
2	RF	W	外壁	11.3	40	3.19	1	
2	1F	E	外壁	8.6	40	1.29	0	雨掛り有
2	RF	S	外壁	全面	58	3.38	0	
2	3F	N	内壁	-	-	1.45	4	ひび割れ有
2	4F	S	梁	-	-	2.16	4	ひび割れ有

図 2.2-26 含水率と鉄筋の腐食グレードの関係<sup>[2-20]</sup>

野口ら<sup>[2-23]</sup>は、旧国立霞ヶ丘競技場の解体時に調査を実施し、含水率と鉄筋腐食の関係を測定した。質量含水率と鉄筋腐食グレードの関係を図 2.2-27 に示す。コンクリートの含水率が高いと中性化の進行が遅くなるため、高含水率かつ鉄筋位置まで中性化した部位はなかった。鉄筋位置まで中性化した部位については、質量含水率が 3%以下、鉄筋腐食グレードは 2 以下となり、含水率の低い部位では鉄筋腐食が進行しにくいことを示した。なお、ひび割れ部で外部からの水分供給がある部位では、鉄筋腐食グレード 4 または 5 となり、局所的に鉄筋腐食の生じやすい条件となることを示した。

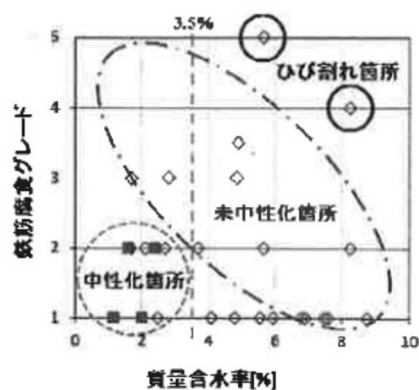


図 2.2-27 質量含水率と鉄筋腐食グレード<sup>[2-23]</sup>

前原ら<sup>[2-28]</sup>は、築 11 年～87 年を経過した鉄道関係の建物構築物を対象として、中性化深さ、かぶり厚さ、鉄筋腐食度、かぶりコンクリートの剥離・剥落の状況を調査し、雨掛かりの影響について検討している。なお、鉄筋腐食度は、表 2.2-8 に示す鉄道総合技術研究所の評価基準<sup>[2-42]</sup>に準じて評価している。

剥離・剥落に及ぼす鉄筋腐食度および雨掛かりの影響を図 2.2-28 に示す。図中の破線は、土木学会のコンクリート標準示方書（設計編）<sup>[2-27]</sup>で鉄筋腐食の起点とされている中性化残り 10mm を示している。鉄筋腐食度の影響については、鉄筋腐食度が IIa 以上の点は、概ね破線の左側にプロットされており、中性化残りが 10mm 以下となっていることがわかる。また、雨掛かりの影響

については、雨掛かりが無ければ、鉄筋腐食度がⅡa以上でも剥離・剥落は生じていない場合が多い、一方、雨掛かりがある部位では、中性化残りが10mm以下で剥離・剥落が生じる場合が多い。

また、鉄筋腐食度の調査結果から、図 2.2-29 に示す鉄筋腐食の進展機構を提案し、かぶり厚さと鉄筋の腐食速度の関係を図 2.2-30 のとおり取りまとめた。これと併せて、図 2.2-31 に示す、雨掛かりの部位におけるコンクリート表面からの含水率分布の測定結果と比較を行うと、コンクリート表面から 30mm 以下の領域において、特に乾湿繰返しの影響を受けやすく鉄筋腐食速度が大きくなる可能性について考察した。

表 2.2-8 鉄筋腐食度の評価基準<sup>[2-42]</sup>

腐食度	評価基準
0	施工時の状況を保ち、以降の腐食が認められない。質量減少率：0%
I	部分的に軽微な腐食が認められる。質量減少率：2%
Ⅱa	表面の大部分に腐食が認められる。質量減少率：4%
Ⅱb	部分的に断面欠損が認められる。質量減少率：6%
Ⅲ	鉄筋の全周にわたり断面欠損が認められる。質量減少率：10%

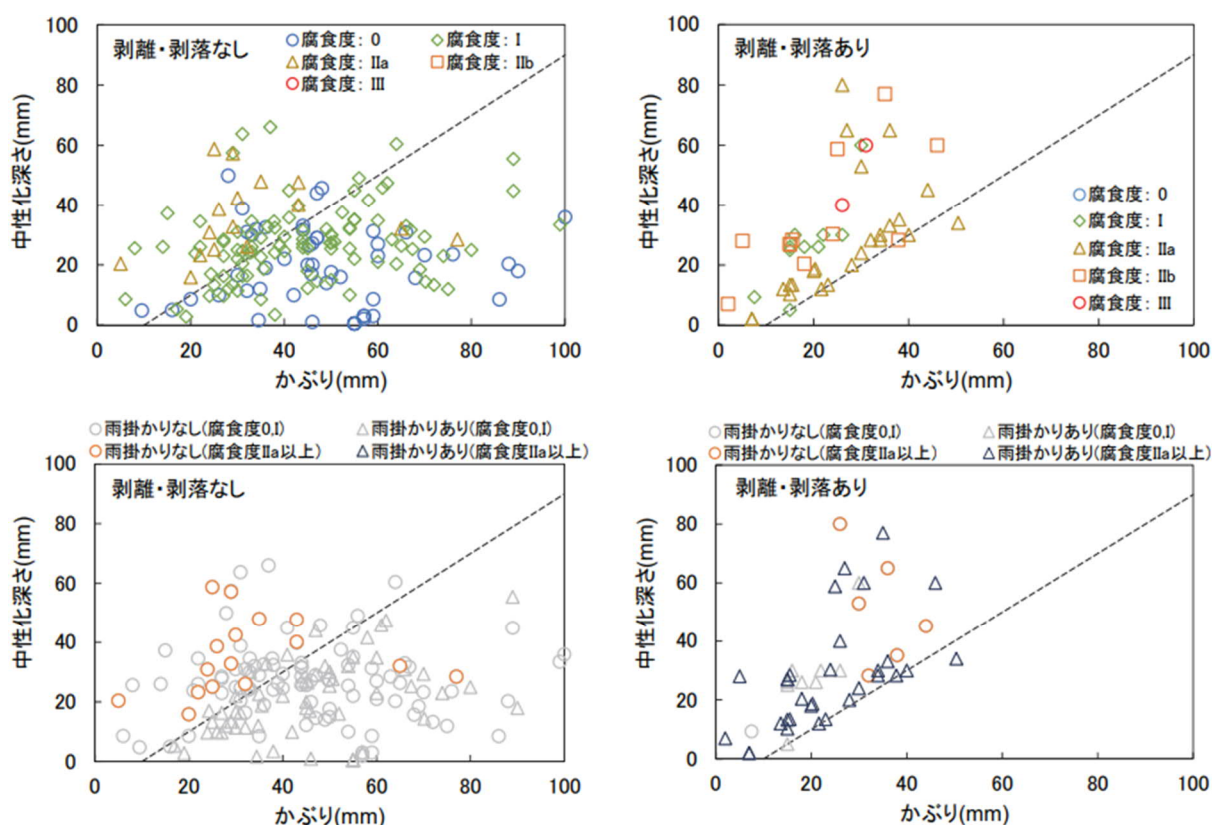


図 2.2-28 剥離・剥落に及ぼす鉄筋腐食度および雨掛かりの影響<sup>[2-28]</sup>

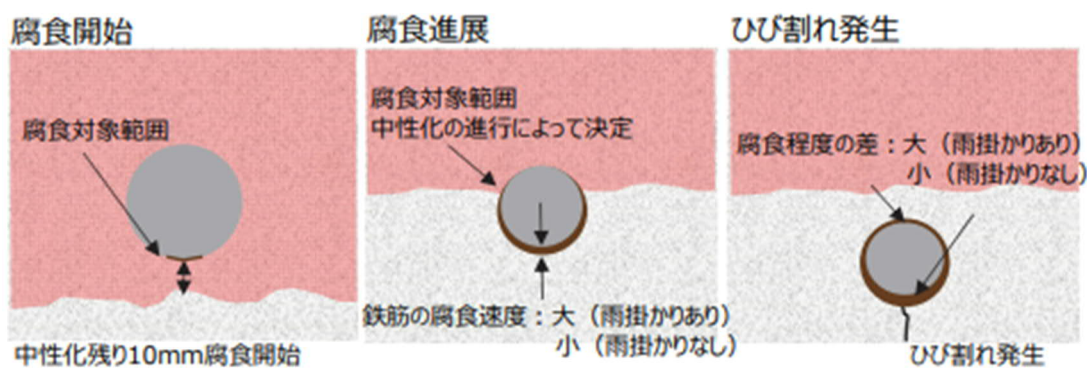


図 2.2-29 中性化による鉄筋腐食の進展機構<sup>[2-28]</sup>

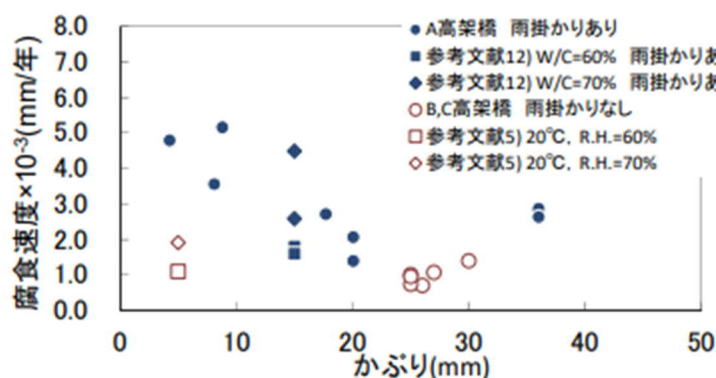


図 2.2-30 かぶり厚さと鉄筋の腐食速度の関係<sup>[2-28]</sup>

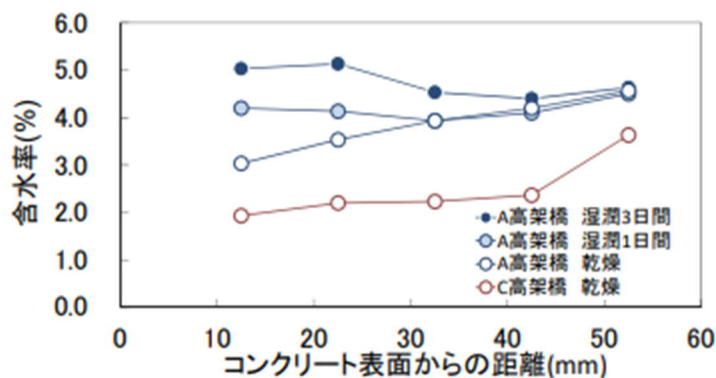


図 2.2-31 雨掛かりの部位におけるコンクリート表面からの含水率分布の測定結果<sup>[2-28]</sup>

山田ら<sup>[2-41]</sup>は、日本建築学会の既存鉄筋コンクリート構造物の構造・材料調査 WG の活動の一環として、22 棟の既存 RC 造建築物の耐久性調査結果を取りまとめ、外部環境と鉄筋腐食状況について検討を行っている。雨掛かりありの箇所における相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係を図 2.2-32、仕上げ表面から深さ方向の相対湿度の変化を図 2.2-33 に示す。

実施した調査の範囲内によると、かぶり厚さが 30mm 以下かつ相対湿度が 80～90%において鉄筋腐食速度が高まる危険性があると指摘している。また、実構造体の内部湿度を測定した結果でも、かぶり厚さが 30mm 以下で屋外環境の影響を受けて湿度が変動することを確認している。このように、かぶり厚さが小さくかつ乾湿繰返しの影響を受ける部位において、鉄筋腐食が進行する条件が揃いやすいことを考察しており、定量的な評価手法の構築は今後の課題とされている。

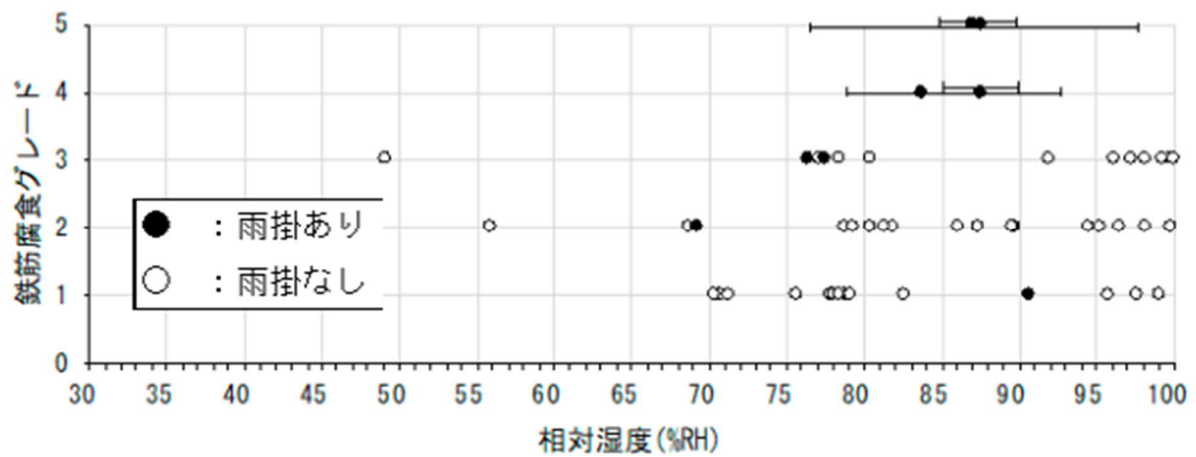


図 2.2-32 雨掛かりありの箇所における相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係<sup>[2-41]</sup>

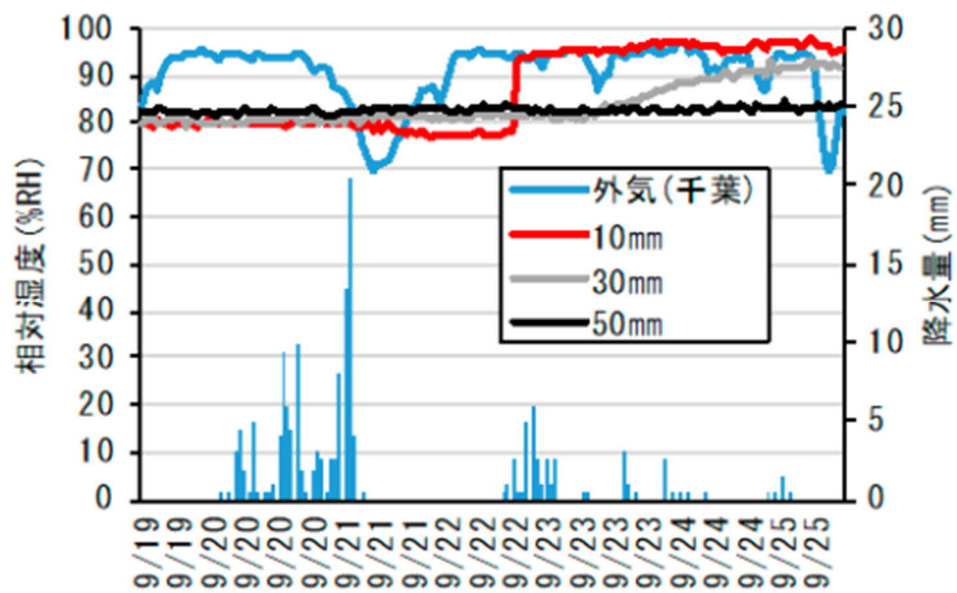


図 2.2-33 仕上げ表面から深さ方向の相対湿度の変化<sup>[2-41]</sup>



## 2.3 コンクリート中における鉄筋腐食速度の測定方法

### 2.3.1 電気化学的測定方法

コンクリート中の鉄筋腐食性状の非破壊で測定できる方法として、電気化学的な測定方法がある。ここでは、本研究で使用した交流インピーダンス法による分極抵抗の測定原理を中心として、電気化学的測定により得られる自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗の各指標の意味と、腐食判定基準について概説する。

ポータブル型の分極抵抗測定装置の一例を写真 2.3-1、この装置の概要を表 2.3-1、概念図を図 2.3-1 に示す。この装置は、矩形波電流分極法を用いており、高低 2 周波数（200Hz, 0.1Hz）の矩形波電流の重畳パルスを印加することで分極抵抗を得ることができる。対極の形状は 2 重センサ方式であり、センター対極の周囲に円形のガード対極を有している。また、分極の範囲（鉄筋に電流が流れている範囲）については、鉄筋径、かぶり厚さ、コンクリート抵抗、使用交流周波数などをもとに、FEM 解析で求めた電流分布から、条件ごとに求めることとされている。本装置では、自然電位、分極抵抗およびコンクリートの電気抵抗が一度に測定することができる。なお、電気化学特性の測定前には、コンクリートの表面が表乾状態（高周波含水率計で表面含水率が 4～5%）となるまで濡れウエスで覆い、あらかじめ含水調整を行うこととされている。

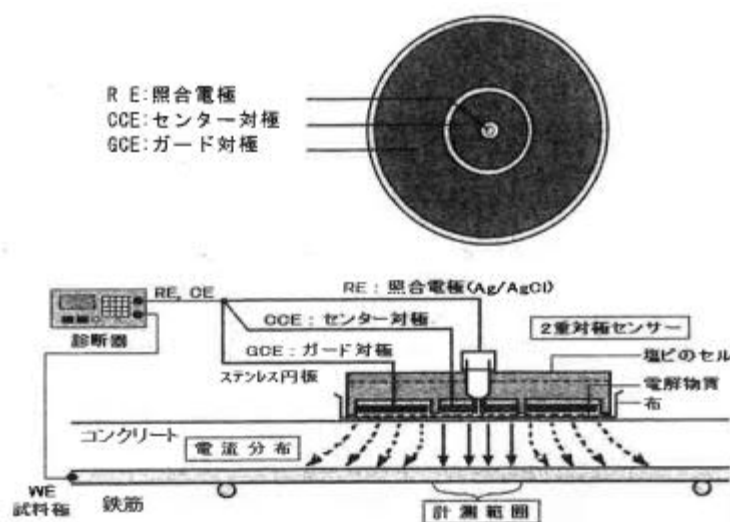
配筋状態とかぶり厚さを考慮した FEM モデルによる電流分布シミュレーションから得られる推定値と鉄筋の真の分極抵抗の係数を用いて、見掛けの測定値から真の分極抵抗が算出できる。分極抵抗から腐食電流密度に換算するための K 値を 0.026V の一定値と仮定すれば、腐食電流密度は、分極抵抗の逆数に比例定数である K 値を掛け合わせた値となり、これは電気化学的に鉄筋が溶け出す速度を示すため、一般に鉄筋腐食速度と読み替えることができる。



写真 2.3-1 鉄筋腐食診断装置の一例<sup>[2-64]</sup>

表 2.3-1 鉄筋腐食診断装置の概要

項目	内容
区分	矩形波電流分極法
採用周波数	高低 2 周波数 (200Hz, 0.1Hz) の矩形波電流の重畳パルスを印加
対極の形状・寸法	2 重対極センサ方式 センター対極 (外径 3.6cm, 内径 0.7cm) ガード対極 (外径 6.0cm, 内径 4.2cm)
分極範囲 (鉄筋の被測定範囲)	鉄筋径, かぶり厚さ, コンクリート抵抗, 使用交流周波数などをもとに, FEM 解析で求めた電流分布からその都度求める
分極抵抗 ( $R_p$ )	両周波数のインピーダンス値 (絶対値) の差を $R_p$ , 高周波数側のインピーダンス値を $R_s$ とする
K 値	0.026V と仮定

図 2.3-1 装置の概念図<sup>[2-65]</sup>

### (1) 自然電位

自然電位は、コンクリート中の鋼材が腐食しやすい環境におかれているかどうかを診断することのできる非破壊検査方法である。一般に、健全なコンクリート中で不動態被膜によって保護されている鋼材は貴な電位を示すが、塩化物イオンの浸透やコンクリートの中性化などによって腐食の生じやすい環境に置かれている鋼材は卑な電位を示すことが知られている。自然電位法は、このように鋼材が周囲の環境によって異なる電位を示すことを利用して、コンクリート中の鋼材が置かれた腐食環境を推定する検査方法である。

自然電位の測定は、土木学会基準「JSCE-E601-2000 コンクリート構造物における自然電位測定方法（案）」がある。この基準には、独自の腐食判定基準の提案は行われていないが、代表例として表 2.3-2 に示す ASTM C 876 の腐食判定基準<sup>[2-66]</sup>が引用されている。なお、鉄筋腐食診断装置によっては、設置されている電極が銀塩化銀電極のものもあるため、ASTM の基準を適用するためには、銅飽和硫酸銅電極の数値に換算する必要がある。両者の電位差は 120mV であり、銀

塩化銀電極で求められた自然電位の数値から 120mV を差し引いた値となる。

表 2.3-2 ASTM C 876 の腐食判定基準<sup>[2-66]</sup>

自然電位 E (V vs C.S.E.)	鉄筋腐食の可能性
$-0.20 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-0.35 < E \leq -0.20$	不確定
$E \leq -0.35$	90%以上の確率で腐食あり

## (2) 分極抵抗

分極抵抗法は、コンクリート構造物中の鉄筋に微弱な電流を流したときに生じる電位変化量などの測定から分極抵抗を求め、それにより鉄筋の腐食速度を評価する非破壊検査方法である。分極抵抗は、鋼材の電位を自然電位（自然状態にあるときの電位）からわずかに分極（電位の強制変化）させたときに発生する電流量を計測して、それらの日である分極曲線の傾きとして式 (2.3-1) により算定される。

$$R_p = \Delta E / \Delta I \quad (2.3-1)$$

ここに、 $R_p$  : 分極抵抗

$\Delta E$  : 分極量（変動させる電位）

$\Delta I$  : 発生する電流

分極抵抗法とは、この分極曲線の傾きである分極抵抗と腐食速度との間に反比例の関係があることを利用して腐食速度を推定する方法である。一般に、腐食速度は鉄筋の単位面積当たりの腐食電流密度で表現され、測定された分極抵抗を式 (2.3-2) に代入して求められる。なお、分極抵抗から腐食速度への換算係数  $K$  は、式 (2.3-3) に示すようにアノードおよびカソード反応のターフェル勾配によって決定される値であるが、コンクリート中での鋼材腐食に対しては 0.026V が用いられることが多い。

$$I_{corr} = K \cdot (1/R_p) \quad (2.3-2)$$

ここに、 $I_{corr}$  : 腐食電流密度 ( $A/cm^2$ )

$R_p$  : 分極抵抗 ( $\Omega cm^2$ )

$K$  : 定数 (V)

$$K = (\beta_a \cdot \beta_c) / 2.303 \times (\beta_a + \beta_c) \quad (2.3-3)$$

ここに、 $\beta_a$  : アノードターフェル勾配

$\beta_c$  : カソードターフェル勾配

腐食電流密度を用いて、式 (2.3-4) により腐食速度を求めることができる。なお、腐食量は式 (2.4-4) を積分することにより求めることができ、腐食速度が一定の場合には腐食速度に測定期間を乗ずることで腐食量を算出することができる。

$$V = (m \cdot I_{\text{corr}}) / (z \cdot F) \quad (2.3-4)$$

ここに、V：鉄の腐食速度 (mg/cm<sup>2</sup>/year)

m：鉄の原子量 (=55.8g)

z：鉄のイオン価数 (=2:Fe→Fe<sup>2+</sup> + 2e<sup>-</sup>)

F：ファラデー定数 (=96500A・s クーロン)

分極抵抗の測定方法は、土木学会の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）委員会報告書<sup>[2-38]</sup>、<sup>[2-39]</sup>にて取りまとめられた、「コンクリート構造物における分極抵抗測定方法（試案）」がある。

腐食速度の評価基準については、国内における共通基準が制定されていないため、表 2.3-3 に示す RIREM で提案された腐食速度の評価基準<sup>[2-67]</sup>が参考となる。

表 2.3-3 RIREM による腐食速度の判定基準<sup>[2-67]</sup>

I <sub>corr</sub> ：腐食電流密度	判定基準
0.1～0.2 未満	不動態状態（腐食なし）
0.2～0.5	低～中程度の腐食速度
0.5～1.0	中～高程度の腐食速度
1.0 以上	激しい、高い腐食速度

### (3) コンクリート抵抗

一般に、電気抵抗の大きい乾燥したコンクリート中では鉄筋の腐食は生じないが、抵抗の小さい湿潤なコンクリート中では鉄筋の腐食が生じやすいことが定性的に分かっている。かぶりコンクリートの電気抵抗はコンクリート中の鋼材の腐食状況を直接表すものではないが、鋼材が腐食を起こしているときの腐食電池内を流れる腐食電流の大きさ（腐食速度）を支配するので、コンクリート抵抗を求めることは、コンクリート中にある鉄筋の腐食進行のしやすさ、すなわち腐食のリスクについて調べる有効かつ簡便な手法と考えられる。言い換えると、電気抵抗の小さい箇所ほど、腐食のリスクは高いと判定できる。測定結果に対する評価基準については、国内外ともに共通基準が整備されていないため、相対的な腐食リスクの評価に留まる。



### 2.3.2 鉄筋腐食特性（腐食グレード、腐食面積率、腐食減量）の測定方法

鉄筋の腐食程度は目視による腐食グレードで判定されることが多い。5段階の腐食グレードの目視判定基準を写真 2.3-2 に示す。

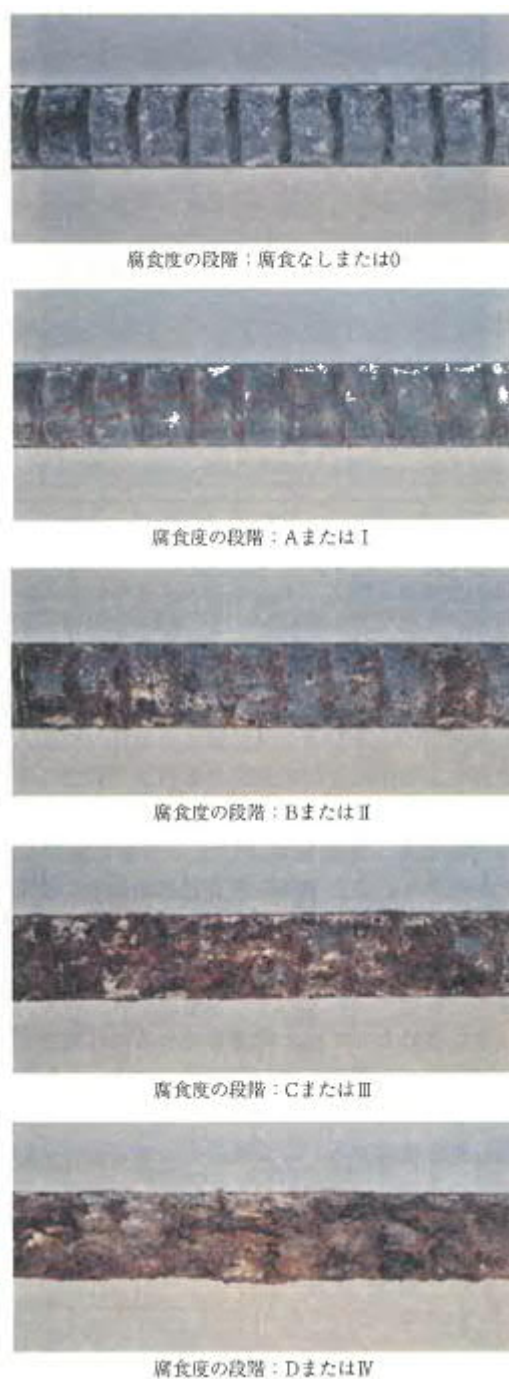


写真 2.3-2 5段階の腐食グレードの目視判定基準<sup>[2-68]</sup>

腐食面積率および腐食減量の測定方法として、JCI-SC1（コンクリート中の鋼材の腐食評価方法）<sup>[2-69]</sup>が定められている。

腐食面積率は、鋼材の腐食面積を表面積で除した値として、式(2.3-5)で算定される。

$$S = S_{\text{corr}} / S_{\text{surface}} \times 100 \quad (2.3-5)$$

ここに、S：腐食面積率（%）

$S_{\text{corr}}$ ：鋼材の腐食面積(mm<sup>2</sup>)

$S_{\text{surface}}$ ：鋼材表面積(mm<sup>2</sup>)

腐食減量の測定は、溶解材として 10%クエン酸二アンモニウム水溶液（20℃）が用いられる。なお、黒皮付きの鉄筋を使用した場合、健全な鉄筋の黒皮も併せて除去されるため、掛川らは<sup>[2-35]</sup>式(2.3-6)のとおり黒皮の減量分を補正して、腐食減量の変化速度を算定する方法を提案している。

なお、黒皮の減量分は、同一ロットの健全な黒皮付きの鉄筋を溶解材に同時間だけ浸漬して求めたが、鉄筋ごとに黒皮の厚みにばらつきがあるため、黒皮の減量分の補正により式(2.3-6)の腐食減量の変化速度が負の値となる場合がある。

$$W = (W_i - W_o) / (S \times T) - (W_h - W_o) / (S \times T) \quad (2.3-6)$$

ここに、W：腐食減量の変化速度(mg/mm<sup>2</sup>/year)

$W_i$ ：促進腐食実験後の鉄筋の質量(mg)

$W_h$ ：健全な鉄筋の質量(mg)

$W_o$ ：黒皮および腐食生成物を除去した後の鉄筋質量(mg)

S：鉄筋の表面積(mm<sup>2</sup>)

T：試験日数(year)

## 2 章の参考文献

- [2-1] 兼松学：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（近畿）材料施工部門パネルディスカッション資料，2017.9
- [2-2] 兼松学：鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考－次世代の耐久設計，2023 年度日本建築学会大会（近畿）材料施工部門研究協議会資料，2023.9
- [2-3] 野口貴文：建築分野における中性化／炭酸化の新たな視点，コンクリート工学 2023 年 9 月号，2023.9
- [2-4] 内田祥三，浜田稔：鋼及コンクリートの耐久試験，建築雑誌，第五一六號，1928 年（昭和 3 年）
- [2-5] 岸谷孝一：鉄筋コンクリートの耐久性，鹿島出版社，1963
- [2-6] 日本建築学会：コンクリートの調査設計・調合管理・品質検査指針案・同解説，1976
- [2-7] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，2016.7
- [2-8] 和泉意登志，押田文雄：経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食，日本建築学会構造系論文集，第 406 号，pp.1-12，1989
- [2-9] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2022.11
- [2-10] 日本建築学会：建築物の耐久設計支援ガイドブック，pp.31-38，2022.10
- [2-11] 近藤連一訳：コンクリートの炭酸化－鉄筋の防食に対する影響と作用－，セメントコンクリート，No. 314，pp.33-37，Apr. 1973
- [2-12] 佐伯竜彦，大賀宏行，長瀧重義：コンクリートの中性化の機構解明と進行予測，土木学会論文集，No.414，V-12，pp.99-108，1990
- [2-13] 鄭載東，平井和喜，三橋博三：モルタルの中性化速度に及ぼす温度・湿度の駅用に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，第 1 巻，第 1 号，1990
- [2-14] 小宮克仁，文野光，西尾悠平，兼松学：セメント硬化体炭酸化の湿度依存性に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41，No. 1，pp. 599-605，2019
- [2-15] 松田芳範，上田洋，石田哲也，岸利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.629-634，2010
- [2-16] 横塚清規，半井建一郎，李春鶴：供試体の寸法および乾燥期間がセメント系硬化体の中性化進行に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.725-730，2011
- [2-17] 辻埜真人，橋田浩，湯浅竜貴：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
- [2-18] 岸本嘉彦，佐藤靖彦，鈴木修一：酸性雨とひび割れを考慮したコンクリートの中性化進行に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.669-674，2008
- [2-19] 大竹淳一郎，橋本真幸，早野博幸，棚木隆：コンクリートのひび割れ部における中性化と鉄筋腐食に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.649-654，2005
- [2-20] 野口貴文ほか 7 名：同潤会上野下アパートに関する調査研究（その 1～8），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1127-1142，2014.9
- [2-21] 中井明日香ほか 6 名：築 49 年を経過した既存鉄筋コンクリート造建築物の材料調査（その 1～3），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1121-1126，2014.9
- [2-22] 木野瀬徹，今本啓一，田沼毅彦，清原千鶴：コンクリート中の水分を考慮した中性化後に

- おける鉄筋腐食予測に向けた基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, vol.37, No.1, 2015.7
- [2-23] 野口貴文ほか7名:旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査(その1~12), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.417-440, 2015.9
- [2-24] 春畑仁一, 中村隆治, 大橋正治, 永山勝:既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート材料調査における圧縮強度と中性化深さの統計, GBRC, Vol.36, No.1, 2011.1
- [2-25] 桐山和也, 渡邊義規, 星野実, 梅原秀哲:48年経過したコンクリートの中性化と同コンクリートを用いた促進中性化, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.631-634, 2005
- [2-26] 植松俊幸, 神代泰道, 一瀬賢一:31年間供用した躯体コンクリートの品質に関する調査, 日本建築学会技術報告集, 第21巻, 第48号, pp.409-414, 2015.6
- [2-27] 土木学会:2017年制定コンクリート標準示方書(設計編), 2017.3
- [2-28] 前原聡, 伊代田岳史:雨掛かりの有無が中性化によるかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集E2, 第74巻2号, pp.80-87, 2018
- [2-29] 轟俊太郎ほか:水掛かりと鉄筋腐食のpHが腐食による変状の発生に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.467-472, 2021
- [2-30] 日本建築学会:建築保全標準 JAMS 3-RC, 2021
- [2-31] 今本啓一:鉄筋コンクリート造建築物の限界状態再考ー中性化は寿命か?ー, 2017年度日本建築学会大会(中国)材料施工部門パネルディスカッション資料, 2017.8
- [2-32] 清原千鶴ほか:実構造物調査を通した中性化到達鉄筋の腐食性状, 日本建築学会学術講演梗概集, 2017.8
- [2-33] スカイティンほか:既存RC造構造物のコンクリート内部相対湿度および腐食環境に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.497-502, 2020.7
- [2-34] 今本啓一:かぶりコンクリートの役割と検査方法①かぶりコンクリートの役割と構造物の耐久性, コンクリート工学 Vol.57, No.6, pp.447-451, 2019.6
- [2-35] 掛川勝, 梶田佳寛, 松林裕二, 鹿毛忠継: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
- [2-36] 掛川勝, 梶田佳寛, 松林裕二, 鹿毛忠継:コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する長期暴露実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.672, pp.143-151, 2012.2
- [2-37] 酒井正樹ほか:鉄筋の黒皮が中性化したコンクリート内部の鉄筋腐食におよぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.943-944, 2020
- [2-38] 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, 258-259, 2009.10
- [2-39] 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(その2), 2012
- [2-40] 梶田佳寛ほか:腐食速度評価式の検討, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, 1992
- [2-41] 山田宗範ほか:既存RC構造物における雨掛かりのある箇所の鉄筋腐食条件の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.599-600, 2018.9

- [2-42] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，2007
- [2-43] 本間大輔，米澤敏男，押田文雄，山口善弘，岡本博史，中尾正純：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，第 79 巻，第 701 号，pp.867-876，2014.7
- [2-44] 田沼毅彦，杉山央：築後 53 年を経過した鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋腐食状況の実態調査，日本建築学会技術報告集，第 23 巻，第 53 号，pp.37-42，2017.2
- [2-45] 土木学会：コンクリート中への水分浸透評価とその拡張に関する研究小委員会（362 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ No.131，pp.138，2022.11
- [2-46] 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評価に関する研究，東京大学学位論文，1976
- [2-47] J. A. Gonzalez, J. S. Algaba and C. Andrade: Corrosion of Reinforcing bars in Carbonated Concrete, British Corrosion Journal, 15:3, pp.135-139, 1980
- [2-48] 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
- [2-49] 山本佳城ほか：中性化したコンクリートの含水状態が鉄筋腐食に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，第 576 号，pp.15-21，2004.2
- [2-50] 鳥取誠一，宮川豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.767，V-64，pp.35-46，2004.8
- [2-51] 仁平達也，井原啓知，関博：中性化および乾湿繰返しを受けるコンクリート中の鉄筋腐食について，コンクリート工学年次論文集，vol.25，No.1，pp.815-820，2003
- [2-52] 米澤敏男，押田文雄，本間大輔，山口善弘，岡本博史，中尾正純：コンクリートの中性化後における鉄筋の腐食速度に関する研究：日本建築学会構造系論文集，第 79 巻，第 704 号，pp.1405-1414，2014.10
- [2-53] 光木史朗ほか：原子力施設の降温環境におけるコンクリートの中性化の進行と鉄筋の腐食について，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.1215-1216，2019.7
- [2-54] L. Cheng et al.: Novel Accelerated Test Method for RH Dependency of Steel Corrosion in Carbonated Mortar, Journal of Advanced Technology, Vol.19, pp.207-215, 2021.3
- [2-55] M. Stefanoni et al.: Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – a critical review, Cement and Concrete Research, Vol.103, pp.35-48, 2018.1  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.007>
- [2-56] U. Angst et al.: Corrosion of steel in carbonated concrete: mechanisms, practical experience, and research priorities - a critical review by RILEM TC 281-CCC, RILEM Technical Letters 5, pp.85-100, 2020  
<https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2020.127>
- [2-57] P. Schiessl: Zusammenhang zwischen Rissbreite und Korrosionsabtragung, BETONWERK + FERTIGTEIL – TECHNIK, pp.594-598, 1975
- [2-58] A. W. Beeby: Corrosion of reinforcing steel in concrete and its relation to cracking, The Structural Engineer, pp.77-81, Vol.56A, No.3, March, 1978

- [2-59] 鈴木計夫, 大野義照, ソムヌクパパンタナトーン, 二宮一, 田村博: コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼすひび割れ幅の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 397 号, pp.1-11, 1989.3
- [2-60] 辻埜真人, 橋田浩, 湯浅竜貴: 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講演論文集, Vol.35, No.1, pp.781-786, 2013
- [2-61] 大竹淳一郎, 橋本真幸, 早野博幸, 檜木隆: コンクリートのひび割れ部における中性化と鉄筋腐食に関する研究, コンクリート工学年次講演論文集, Vol.27, No.1, pp.649-654, 2005
- [2-62] 唐沢智之, 梶田佳寛, 河野政典, 竹内博幸: ひび割れが鉄筋腐食に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.873-878, 2004
- [2-63] 笹谷輝彦, 鳥居和之, 川村満紀: 自然環境下に暴露したコンクリート中の鉄筋の腐食性状, Vol.16, No.1, pp.787-792, 1994
- [2-64] 日鉄住金テクノロジー: 鉄筋腐食診断機 CM-SE1 取扱説明書, 2015
- [2-65] 横田優: 2.最新の非破壊検査技術, 2-3 電気化学的手法, 日本材料学会, コンクリート構造物の診断技術, pp.26-36, 2001
- [2-66] ASTM C876-09: Standard Test Method for half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2009
- [2-67] 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
- [2-68] 日本コンクリート工学会: コンクリート診断技術 '23, 2023.3
- [2-69] 日本コンクリート工学協会: JCI-SC1 (コンクリート中の鋼材の腐食評価方法), コンクリート構造物の腐食防食に関する試験方法ならびに基準 (案), pp. 91-94, 2004

### 3. 外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度の実験的検討

#### 3.1 3章の位置付け

研究の背景でも述べたとおり、既存 RC 造建築物の耐久性調査結果から、中性化後の鉄筋腐食速度が考察できれば合理的である。しかしながら、既存 RC 造建築物では、コンクリートの使用材料、設計基準強度、実強度が明確ではないこと、多くは表層に仕上げ材が施工されているが、仕上材の種類および維持管理状況が明確ではないこと、供用期間中における外部の環境条件は必ずしも一定ではなく、鉄筋位置における水分状態の履歴も明確ではないことなどから、鉄筋位置の水分状態と中性化後における鉄筋腐食速度の関係を定量的に示すことは困難と考えられた。

そこで本章では、コンクリートの使用材料や強度の条件を揃えて、かぶり厚さをパラメータとして鉄筋コンクリート試験体を作製し、鉄筋位置まで中性化させた後に異なる相対湿度で暴露試験を行い、電気化学的に鉄筋腐食速度を測定した。これにより、外部環境が一定条件の下でのコンクリートのかぶり厚さ、鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。

ここで、本実験では黒皮付きの鉄筋を用いており、黒皮の影響を含めた中性化後の鉄筋腐食速度を取得したことを特徴としている。中性化後の鉄筋腐食速度を実験的に検討した既往の研究の多くは、黒皮を落としたみがき鉄筋を用いているため、実構造物に用いられている黒皮付きの鉄筋に対しては保守的な評価となっている。近年の長期供用された既存 RC 造建築物の耐久性調査結果においても、みがき鉄筋を用いた実験で認められている、鉄筋の全断面が腐食生成物で覆われるような、鉄筋腐食の進行状況はほとんど認められておらず<sup>[3-1]・[3-2]</sup>、実構造物においては黒皮による保護機能が働いていることは明らかである。そのため、みがき鉄筋を用いた実験結果に基づいて中性化後の鉄筋腐食の進行速度を評価すると、実構造物の劣化状況に対して過度に保守的になると考えられる。既存の建築ストックをできる限り継続使用するという考え方に拠れば、実構造物における劣化の進行程度を適切に評価できる鉄筋腐食速度の予測手法が必要であると考えたことによる。

また、長期にわたって供用される実構造物では、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<sup>例えば[3-3]</sup>も多いが、既存 RC 造建築物の耐久性調査結果によれば、含水率が低い部位では、ひび割れや打継ぎ部であっても鉄筋腐食は生じないことが確認されている<sup>[3-4]</sup>。そこで本章では、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耐久性評価を目的として、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鉄筋位置の水分状態と鉄筋腐食の関係を実験的に検討した。

### 3.2 コンクリート材料・調合が異なる場合の鉄筋腐食速度

#### 3.2.1 3.2 節の概要

本節では、コンクリートの使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を作製し、あらかじめ鉄筋位置まで促進中性化させた後、異なる相対湿度で 2～3.5 年間の暴露試験を行い、電気化学的に鉄筋腐食速度を測定したものである。

試験体の条件は、黒皮付きの丸鋼φ12mm をかぶり厚さが 10, 20, 30mm となるように埋設し、埋設した丸鋼φ12mm の下端となる 22, 32, 42mm まであらかじめ中性化を進行させた。

コンクリートの調合条件は、セメント種別が高炉セメント B 種で水セメント比が 60%、セメント種別が普通ポルトランドセメントで水セメント比が 60%と 50%の合計 3 水準とした。

中性化後の暴露環境条件は、温度は 20℃、相対湿度は 100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH の一定の湿度条件と屋外暴露の 5 水準とした。

実験結果に基づいて、コンクリートのかぶり厚さ、鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。



### 3.2.2 実験計画

実験の流れを図 3.2-1 に示す。

黒皮付きの丸鋼  $\phi 12\text{mm}$  をかぶり厚さが 10, 20, 30mm となるように埋設した試験体を作製し、初期養生として JASS 5 における壁の型枠存置期間に相当する封かん養生 5 日間を行った。なお、JASS 5 では、高炉セメント B 種の湿潤養生期間を 7 日以上と定めているが、本実験では 5 日間で統一した。

初期養生後は材齢 14 日から促進中性化試験を開始した。促進中性化試験は、中性化深さが鉄筋の下端に到達するまで行った。そのため、セメント種別、水セメント比およびかぶり厚さによって、促進中性化試験の期間が異なる。中性化深さが鉄筋の下端に到達した試験体から、異なる相対湿度で暴露試験を行った。暴露試験の期間中は、数ヶ月ごとにコンクリート中の含水率と鉄筋の自然電位および分極抵抗を測定した。また、2～3 年ごとに試験体から鉄筋の一部を切り出し、鉄筋の腐食面積率と腐食減量を測定した。

なお、土木学会では、鉄筋腐食は中性化が鉄筋のかぶり厚さより 10mm 手前の時点で開始されるとしている<sup>[3-5]</sup>。また、JASS 5 の腐食環境における限界状態は、中性化が鉄筋のかぶり厚さまで到達した時点とされ、わずかながら鉄筋腐食が開始された状態と定められている。本試験では、促進試験により中性化の期間が短いため、暴露試験を開始した時点の鉄筋腐食は無視できるものとし、中性化深さが鉄筋の下端に到達した時点を起点として、中性化後の鉄筋腐食速度を測定した。

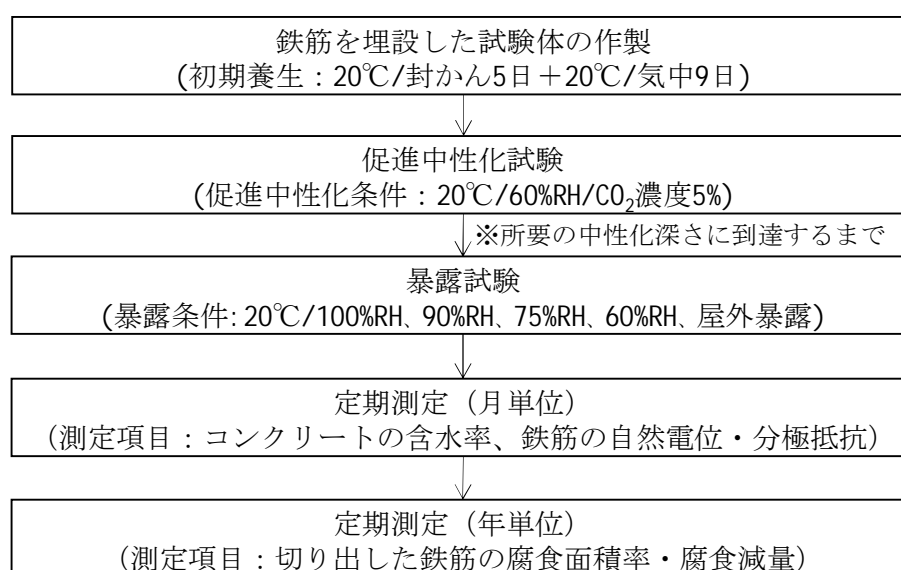


図 3.2-1 実験の流れ

実験条件を表 3.2-1 に示す。試験体の概要を図 3.2-2 に示す。

コンクリートの調合条件は、セメント種別を高炉セメント B 種とし、水セメント比が 60%（記号：60BB）、セメント種別を普通ポルトランドセメントとし、水セメント比が 60%（記号：60N）と 50%（記号：50N）の合計 3 水準とした。試験体の形状は 100×100×400mm の角柱とした。

促進中性化試験とその後の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 面はエポキシ樹脂によりシールした。

試験体の種類は、非破壊試験により鉄筋腐食速度を測定する鉄筋試験体と、破壊試験により中性化深さと含水率の測定を行う無筋試験体の 2 種類とした。なお、鉄筋試験体には、暴露面からのかぶり厚さが 10, 20, 30mm の位置に SS400 の黒皮付き丸鋼  $\phi 12\text{mm}$  を埋設した。

コンクリートの打込みおよび初期養生は  $20^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 60%RH の恒温恒湿室で行った。

促進中性化試験は、JIS A 1153 に準じて行い、温度  $20^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 60%RH、 $\text{CO}_2$  濃度 5%とした。鉄筋試験体のかぶり厚さと中性化深さの設定値を図 3.2-3 に示す。鉄筋のかぶり厚さは 10, 20, 30mm とし、埋設した丸鋼  $\phi 12\text{mm}$  の下端となる 22, 32, 42mm まで中性化を進行させた。試験体記号はそれぞれ No.1~3 とした。鉄筋のかぶり厚さが 30mm のものでは、鉄筋の位置まで中性化が未到達となる No.4 を比較用として設定した。なお、50N では、試験期間に中性化深さが 42mm まで到達しなかったため、かぶり厚さが 30mm の No.3 の暴露試験のデータは得られなかった。屋外暴露の条件は、かぶり厚さが 20mm (No.2) とかぶり厚さが 30mm (No.3) の 2 水準のみとした。

設定した中性化深さに到達した試験体から、暴露試験を開始した。暴露試験の環境は、 $20^{\circ}\text{C}$  で相対湿度 100, 90, 75, 60%RH と屋外暴露の 5 水準とした。

暴露試験の設備を写真 3.2-1 に示す。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、相対湿度は $\pm 3\%$ RH、温度は  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  で管理した。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。屋外暴露の条件は、東京都内の屋根のないアスファルト上に、暴露面を側面として試験体を静置した。暴露地点の外気温の通年の測定値を図 3.2-4 に示す。夏季の 8 月に  $35^{\circ}\text{C}$ 、冬季の 1 月に  $0^{\circ}\text{C}$  となるような環境である。

全ての暴露条件において、酸素濃度は大気中と同等の 21%程度であることを酸素濃度計により確認した。

表 3.2-1 実験計画

項目		内容
試験体 条件	コンクリート 調合	(1)高炉セメント B 種－水セメント比 60% [記号：60BB] (2)普通ポルトランドセメント－水セメント比 60% [記号：60N] (3)普通ポルトランドセメント－水セメント比 50% [記号：50N]
	形状	100×100×400mm（角柱）
	境界条件	側面 1 面：暴露面 外周 3 面および小口 2 面：シーリング
	種類	(1) 鉄筋試験体：黒皮付き丸鋼φ12mm をかぶり厚さ 10, 20, 30mm で埋設 (2) 無筋試験体
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	JIS A 1153：20℃/60%RH/CO <sub>2</sub> 濃度 5% 中性化深さの目標値：鉄筋の下端まで※1
	暴露試験	20℃/100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH, 屋外暴露※2

※1：詳細は図 3.2-3 を参照。鉄筋位置まで中性化が未到達の条件を比較用として設定。50N は試験期間に中性化深さ 42mm まで未到達のため、かぶり厚さ 30mm（図 3.2.3 の No.3）の水準なし

※2：屋外暴露は、かぶり厚さ 20mm, 30mm の 2 水準のみ設定

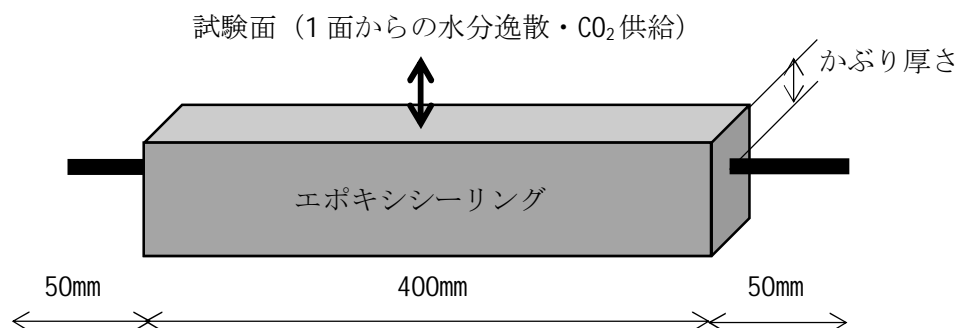


図 3.2-2 試験体の概要

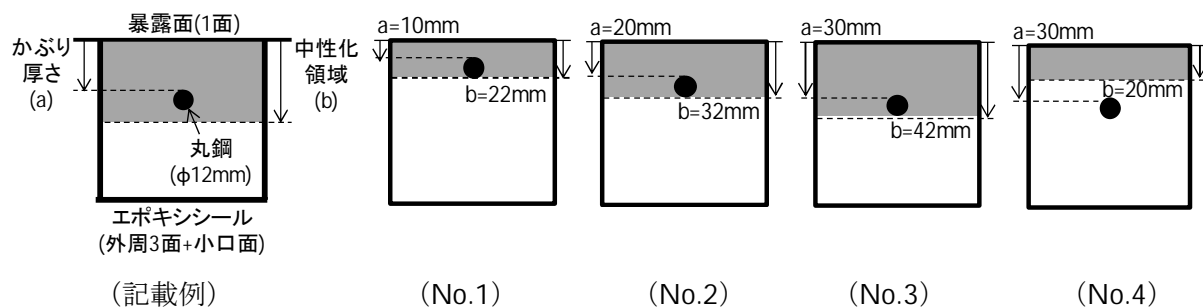


図 3.2-3 鉄筋試験体のかぶり厚さと促進中性化深さの目標値



(100%RH)



(90%RH, 75%RH 管理用プレハブ)



(90%RH, 75%RH エアコン+加湿器)



(60%RH)

写真 3.2-1 暴露試験の設備

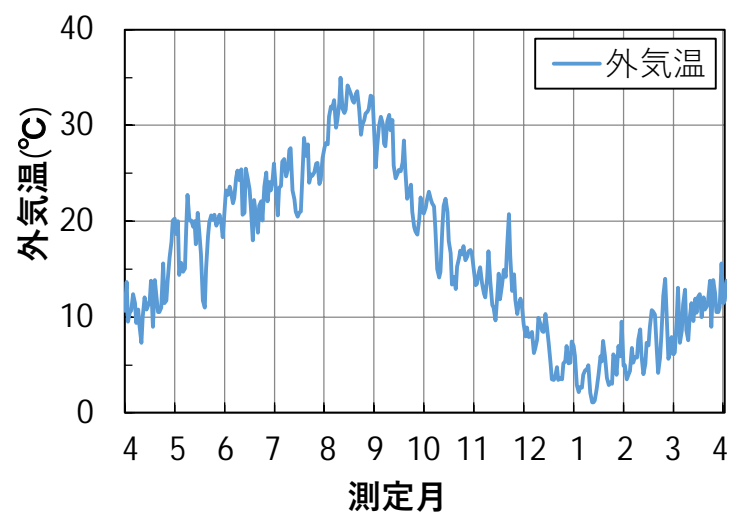


図 3.2-4 暴露地点の外気温の測定値 (2019 年 4 月～2020 年 3 月)

### 3.2.3 実験方法および測定方法

測定計画を表 3.2-2 に示す。

鉄筋試験体では、数ヶ月ごとに自然電位と分極抵抗を測定した。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<sup>[3-6]</sup>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<sup>[3-7]</sup>を参考として、試験体の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<sup>[3-8]</sup>、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。

2～3 年ごとに試験体端部から長さ 100mm の鉄筋を切り出し、鉄筋の腐食面積率と腐食減量を測定した。なお、腐食減量については、鉄筋の切り出し長さには施工誤差が生じることから、切り出した鉄筋の長さとして直径を測定し、単位面積当たりの腐食減量として算出した。また、中性化後の暴露試験の日数が異なるため、暴露試験の材齢で除した腐食減量の変化速度として示した。

腐食面積率および腐食減量の測定は、いずれも JCI-SC1（コンクリート中の鋼材の腐食評価方法）<sup>[3-9]</sup>を参考として測定した。腐食減量の測定に用いた溶解材は 10%クエン酸二アンモニウム水溶液（20℃）とした。なお、本実験では、黒皮付きの鉄筋を使用しており、健全な鉄筋の黒皮も併せて除去されるため、掛川らの報告<sup>[3-10]</sup>を参考として、式(3.2-1)により黒皮の減量分を補正して、腐食減量の変化速度を算定した。

$$W=(W_i-W_o)/(S \times T)-(W_h-W_o)/(S \times T) \quad (3.2-1)$$

ここに、W：腐食減量の変化速度(mg/mm<sup>2</sup>/year)

W<sub>i</sub>：促進腐食実験後の鉄筋の質量(mg)

W<sub>h</sub>：健全な鉄筋の質量(mg)

W<sub>o</sub>：黒皮および腐食生成物を除去した後の鉄筋質量(mg)

S：鉄筋の表面積(mm<sup>2</sup>)

T：試験日数(year)

なお、黒皮の減量分は、同一ロットの健全な黒皮付きの鉄筋を溶解材に同時間だけ浸漬して求めたが、鉄筋ごとに黒皮の厚みにばらつきがあるため、黒皮の減量分の補正により式(3.2-1)の腐食減量の変化速度が負の値となる場合がある。

無筋試験体では、中性化深さおよび含水率を測定した。中性化深さの測定は、JIS A 1153 に準じて行った。含水率の測定は、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、切断片を暴露面より 12.5mm 間隔で 8 等分し、JIS A 1476（建築材料の含水率測定方法）に準じて行った。また、飽水状態の質量含水率に対する割合として、飽和度を式(3.2-2)のとおり定義した。

$$Wd = (S - Sd) / (Sw - Sd) \times 100 \quad (3.2-2)$$

ここに、Wd：飽和度(%)

S：測定質量(g)

Sd：絶乾質量(g)

Sw：飽和質量(g)

表 3.2-2 測定計画

試験体	測定項目	測定方法
有筋試験体	自然電位	JSCE-E 601
	分極抵抗	土木学会 338 委員会試案
	腐食面積率	JCI-SC1
	腐食減量	JCI-SC1
無筋試験体	中性化深さ	JIS A 1153
	含水率※	JIS A 1476(暴露面から 12.5mm 間隔で 8 等分)

※最大となる暴露試験材齢で測定（経時変化の測定なし）

### 3.2.4 試験体の作製およびフレッシュ性状

コンクリートの使用材料を表 3.2-3、コンクリートの調合を表 3.2-4 に示す。

60BB と 60N では、単位水量を  $180\text{kg/m}^3$  以上とし、化学混和剤は AE 減水剤を使用した。50N では、単位水量を  $170\text{kg/m}^3$  とし、化学混和剤は高性能 AE 減水剤を使用した。

コンクリートのフレッシュ性状を表 3.2-5 に示す。

コンクリートのスランプの目標値は  $18\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量の目標値は  $4.5\pm 1.5\%$  と設定し、いずれも目標値を満足することを確認した。

なお、試験体の作製方法として、型枠側面の 1 面が暴露面となるようにコンクリートの打込みを行った。

表 3.2-3 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 $3.04\text{g/cm}^3$ )
	N	普通ポルトランドセメント (密度 $3.16\text{g/cm}^3$ )
細骨材	S	木更津産陸砂 (乾密度 $2.61\text{g/cm}^3$ , 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 $2.65\text{g/cm}^3$ , 吸水率 0.92%, F.M.6.61, 実積率 58.9%)
水	W	上水道水
化学 混和剤	AE	AE 減水剤
	SP	高性能 AE 減水剤

表 3.2-4 コンクリートの調合

調合 記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )					化学混和剤 (セメント $\times$ %)	
			W	BB	N	S	G	AE	SP
60BB	60	49.5	182	303	—	871	906	0.6	—
60N	60	49.5	180	—	300	875	907	0.85	—
50N	50	50.1	170	—	340	882	892	—	1.1

表 3.2-5 コンクリートのフレッシュ性状

調合 記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	単位容積質量 ( $\text{kg/m}^3$ )
60BB	19.0	4.2	21	2291
60N	18.5	5.1	22	2277
50N	19.0	4.8	19	2305

### 3.2.5 試験結果および考察

#### (1) 圧縮強度、塩化物量、促進中性化試験および暴露試験の日数

コンクリートの圧縮強度を表 3.2-6 に示す。

鉄筋試験体、無筋試験体と併せて作製した  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  の管理供試体の試験結果を示した。標準養生 28 日における圧縮強度は、60BB では  $30.5 \text{ N/mm}^2$ 、60N では  $37.7 \text{ N/mm}^2$ 、50N では  $47.3 \text{ N/mm}^2$  となった。また、鉄筋を埋設した試験体の養生条件に合わせて、材齢 5 日で脱型し、脱型以降は  $20^\circ\text{C}$ 、60%RH で気中養生した供試体の圧縮強度を測定した。この気中養生した供試体は、材齢 91 日に加えて、促進中性化試験が終了した材齢における圧縮強度も測定した。気中養生 91 日における圧縮強度は、60BB では  $28.2 \text{ N/mm}^2$ 、60N では  $30.3 \text{ N/mm}^2$ 、50N では  $35.0 \text{ N/mm}^2$  となった。60BB の圧縮強度が、60N よりも小さくなった理由として、JASS 5 では高炉セメント B 種の湿潤養生期間を 7 日以上と定めているのに対して、本実験では普通ポルトランドセメントに合わせて、湿潤養生を 5 日で打ち切ったためと考えられ、表層を中心として相対的には品質低下が生じている可能性がある。

硬化したコンクリート中の塩化物イオン量を、JIS A 1154（硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法）に準じて測定した。その結果、塩化物イオン量は 60BB、60N では  $0.02 \text{ kg/m}^3$ 、50N では  $0.04 \text{ kg/m}^3$  となり、JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）に規定される  $0.30 \text{ kg/m}^3$  以下であることを確認した。

促進中性化試験および暴露試験の日数を表 3.2-7 に示す。

所要の中性化深さに達するまでの促進中性化試験の日数は、かぶり厚さが大きいほど長くなり、60BB では 155～746 日、60N では 466～1285 日、50N では 1981～2406 日となった。促進中性化試験後の暴露試験の日数は 60BB では 1549～2492 日、60N では 644～2200 日、50N では 220～645 日となった。なお、本試験は同日に打ち込んだ試験体を用いているため、促進中性化試験の日数が長くなった水準ほど、本報告時点までの暴露試験の日数が短くなっている。

調合条件ごとの、促進中性化試験結果を図 3.2-5 に示す。中性化速度係数は、60BB では  $33.1 \text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$ 、60N では  $19.6 \text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$ 、50N では  $11.6 \text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$  となった。

表 3.2-6 コンクリートの圧縮強度

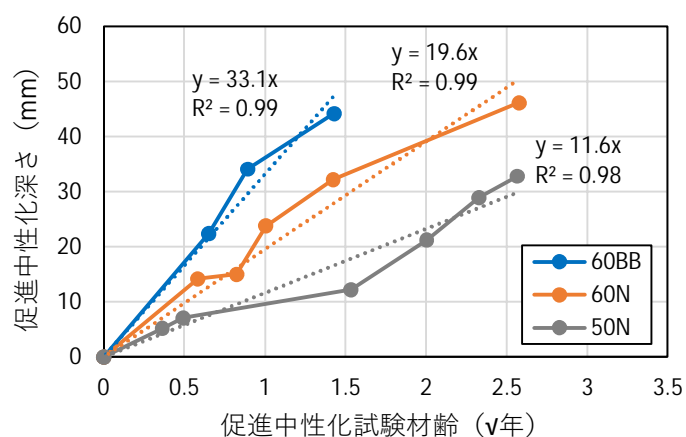
調合 記号	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )					
	標準 養生 28日	封かん 養生 91日	5日脱型後気中養生(目標中性化深さ到達材齢)			
			材齢 91日	中性化深さ 22mm到達	中性化深さ 32mm到達	中性化深さ 42mm到達
60BB	30.5	41.4	28.2	29.0 (材齢155日)	28.6 (材齢291日)	28.5 (材齢746日)
60N	37.7	42.9	30.3	33.1 (材齢466日)	35.0 (材齢770日)	37.8 (材齢1285日)
50N	47.3	49.5	35.0	42.0 (材齢1981日)	41.6 (材齢2406日)	未到達



表 3.2-7 促進中性化試験および暴露試験の日数

調合 記号	試験体 記号	かぶり 厚さ (mm)	促進中性化試験			暴露試験
			目標中性化 深さ(mm)	実測中性化 深さ(mm)	中性化 期間(日)	暴露試験 期間(日)
60BB	No.1	10	22	22.4	155	2492
	No.2	20	32	34.1	291	2356
	No.3	30	42	44.2	746	1901
	No.4	30	20	22.4	155	2492
60N	No.1	10	22	23.8	466	2200
	No.2	20	32	32.2	770	1894
	No.3	30	42	46.1	1285	644
	No.4	30	20	23.8	466	2200
50N※	No.1	10	22	28.9	1981	645
	No.2	20	32	32.8	2406	220
	No.4	30	20	28.9	1981	645

※50N の No.3 は、目標中性化深さ 42mm に未到達のため結果なし

図 3.2-5 促進中性化試験結果 (CO<sub>2</sub> 濃度 5%, 60%RH)

## (2) 含水率

暴露試験終了時における暴露面から内部にかけての質量含水率および飽和度の分布を図 3.2-6 に示す。いずれも鉄筋の中心位置での値をプロットした。

なお、本報では、50N の暴露試験の材齢が 0.6～1.8 年であり、60BB、60N と比較して短くなっている。筆者らは、事前検討により暴露試験の開始後から半年程度で、暴露環境の相対湿度とコンクリート中の含水状態は平衡となり、それ以降の自然電位、腐食電流密度の値は概ね一定となることを確認している<sup>[3-11]</sup>。そのため、材齢の異なる試験水準であっても、最大となる暴露試験材齢におけるコンクリート中の含水状態は平衡となっており、自然電位および腐食電流密度の相対比較は可能であると判断した。

質量含水率は、調合条件によって飽水状態での値が異なるため、暴露環境の相対湿度と平衡時

の値も異なる。一方、飽和度はそれぞれの飽水状態に対する割合であるため、調合条件の違いに関わらず、暴露環境の相対湿度に対して同程度とみなせる値となった。このため、含水率についての以降の考察は、飽和度で行うこととした。

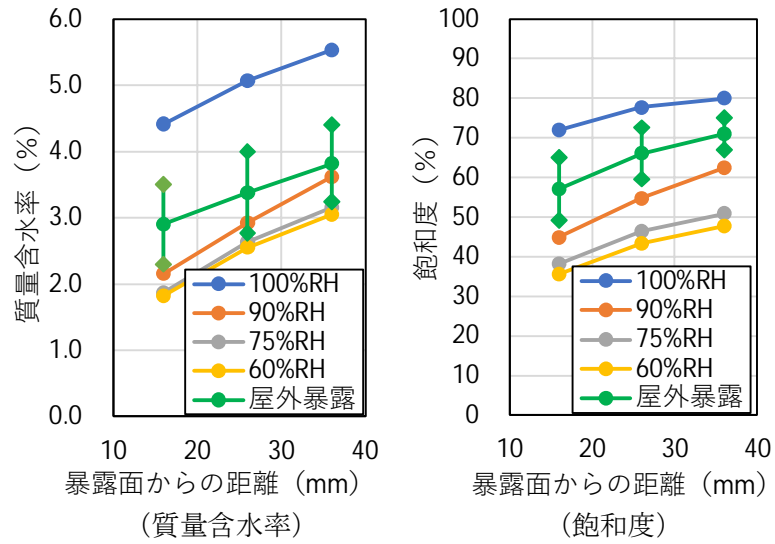
相対湿度が 100～60%RH に暴露した条件では、60BB では表層の飽和度は、内部と比較して 10%程度大きくなった。一方、60N と 50N では、表層と内部の飽和度の差は 5%程度と小さかった。

屋外暴露の条件では、断面内の含水率分布は、天候の変化に影響を受け、長期間の暴露試験後においても平衡にならなかった。そのため、1 ヶ月以上にわたって降雨がなかった乾燥期と、3 日間連続で降雨があった湿潤期の 2 つの時期で測定した。60BB では、暴露面で最も小さくなり、内部にかけて大きくなる飽和度の分布となった。表層の飽和度は、内部と比較して 10～15%程度大きくなった。一方、60N と 50N では、表層と内部の飽和度の差は 5～10%程度と小さかった。

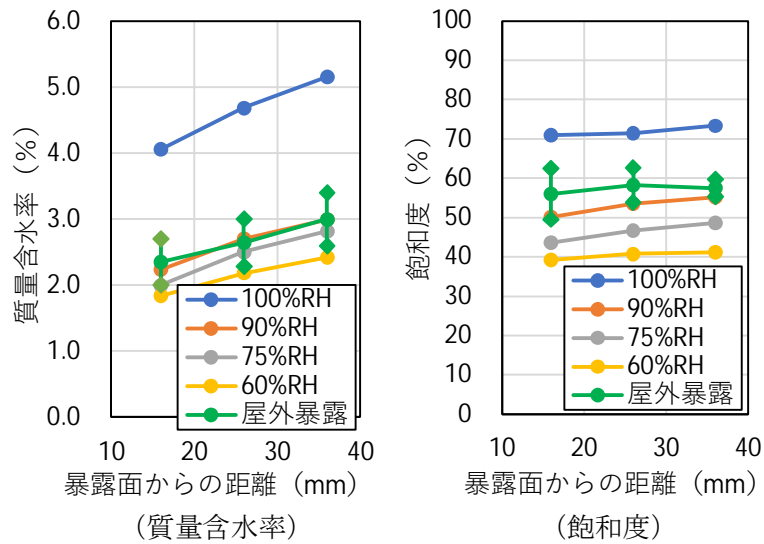
なお、50N では、暴露環境の相対湿度 100%RH および屋外暴露の条件では、内部よりも表層の飽和度が 5%程度大きくなった。これらの試験体は、20℃、60%RH で促進中性化試験を 1981 日間行い、その後、20℃、100%RH もしくは屋外暴露での暴露試験を 645 日行ったものである。長期乾燥後に湿潤状態としているが、水セメント比が 50%と小さいためコンクリート中の組織が緻密化しており、表層から内部にかけての水分移動が生じにくい状況にあるものと推察される。

暴露環境の相対湿度とコンクリート中の飽和度の関係を図 3.2-7 に示す。いずれも鉄筋の中心位置における値をプロットした。60BB では、かぶり厚さが小さいほど、最大となる暴露材齢での飽和度が小さくなった。この理由の一つとして、本実験では実構造体における壁の養生条件を模擬して、材齢 5 日で脱型し、その後気中養生としたため、初期の強度発現が比較的遅い高炉セメント B 種を用いた 60BB では、60N、50N と比較して表層品質が低下しやすく、外部環境からの水分の出入りが大きくなったことが考えられる。なお、かぶり厚さの違いに関わらず、暴露環境の相対湿度を大きくした時に、飽和度が増加する傾きは概ね等しかった。60N および 50N では、かぶり厚さの違いによらず、暴露環境の相対湿度と飽和度の関係は概ね等しかった。

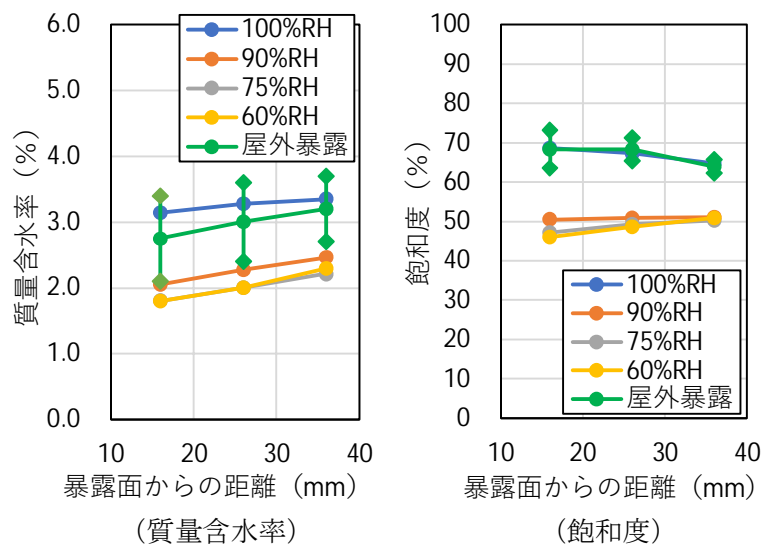
なお、全ての調合条件において、暴露環境の相対湿度を 100%RH とした水準でも、暴露環境の相対湿度と平衡になった時の飽和度は 70～80%であるため、コンクリート細孔中の残りの 20～30%の部分は水分で飽和していない空隙の状態で存在しているものと考えられる。



(a)60BB



(b)60N



(c)50N

図 3.2-6 最大となる暴露試験材齢における暴露面から内部にかけての質量含水率・飽和度の分布

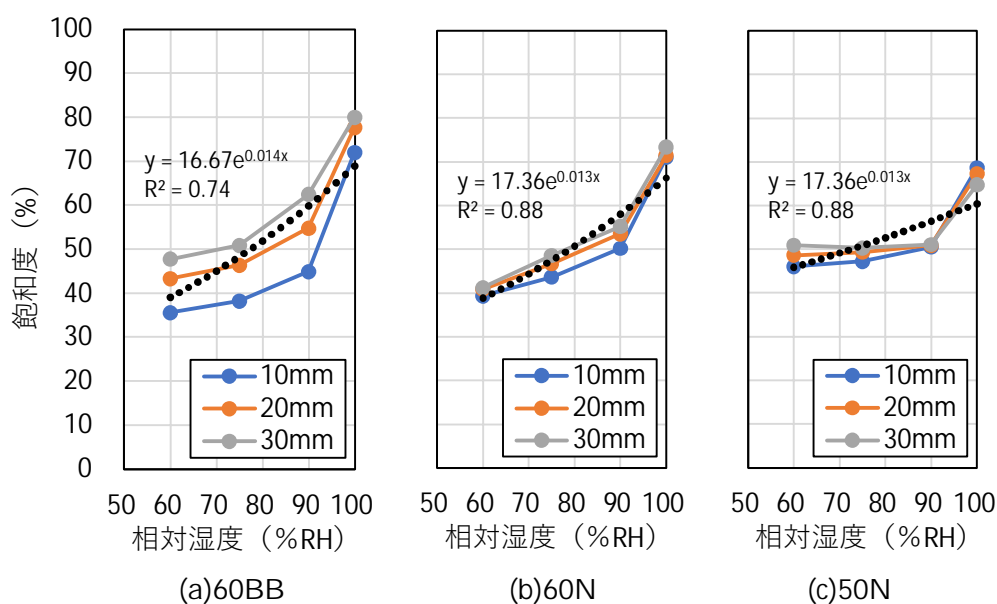


図 3.2-7 暴露環境の相対湿度とコンクリート中の飽和度の関係

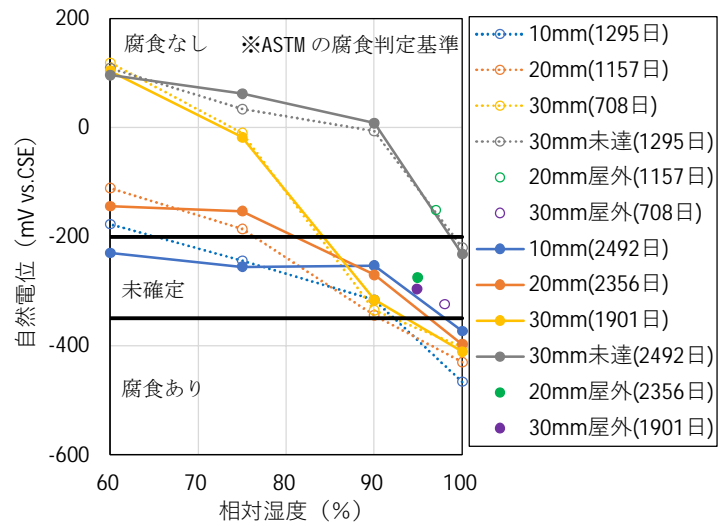
### (3) 自然電位による鉄筋の腐食状態

暴露環境の相対湿度と鉄筋の自然電位の関係を図 3.2-8 に示す。

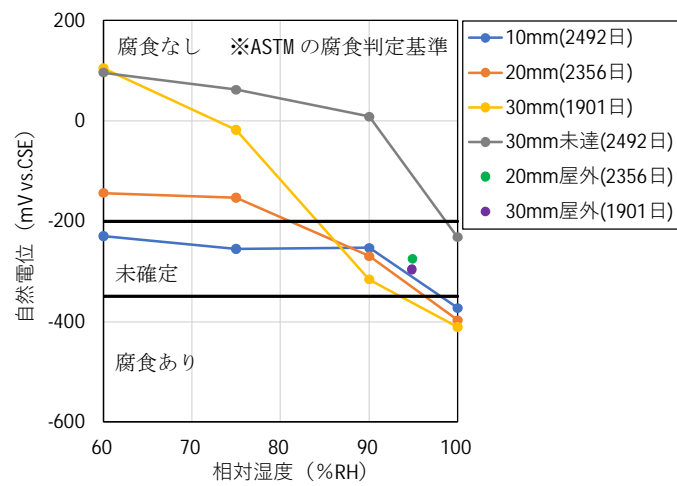
図中には、ASTM の腐食判定基準を併記した<sup>[3-12]</sup>。調合条件やかぶり厚さによって、中性化後の暴露試験の日数が異なるため、それぞれ最大となる暴露試験の材齢（凡例の末尾に示す）における値を示した。屋外暴露の相対湿度は、3 日間連続で降雨があった湿潤期の値を用いた。また、60BB については、2～3.5 年の暴露試験結果を白抜きのプロット、暴露試験の材齢を 5～6.5 年まで延長した暴露試験結果を塗り潰したプロットで示した。なお、これらの図の表記方法については、以降の図でも同様とした。

中性化が鉄筋位置まで未到達の水準（凡例の 30mm 未達）では、セメント種別、水セメント比の違いに関わらず、全ての相対湿度において概ね腐食なしと判定された。

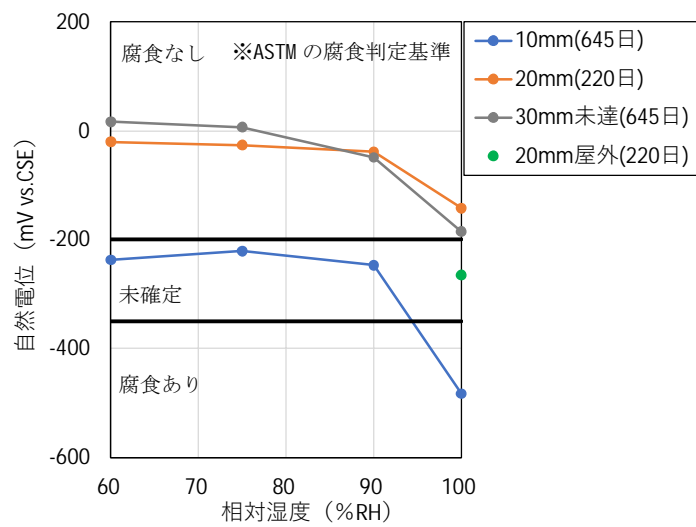
鉄筋位置まで中性化させた水準では、60BB、60N では、かぶり厚さの違いに関わらず、暴露環境の相対湿度が 100%RH では腐食ありと判定された。一方、90%RH 以下および屋外暴露の条件では、鉄筋腐食の可能性は不確定もしくは腐食なしと判定された。なお、60BB については、暴露試験の材齢が約 3 年延長されたが、材齢の経過による自然電位の卑化はほぼ認められなかった。50N では、かぶり厚さが 10mm、暴露環境の相対湿度が 100%RH のみで、腐食ありと判定された。それ以外の水準では、鉄筋腐食の可能性は不確定もしくは腐食なしと判定された。



(a)60BB



(b)60N



(c)50N

図 3.2-8 暴露環境の相対湿度と鉄筋の自然電位の関係

セメント種別、水セメント比と最大となる暴露試験の材齢における自然電位の関係を図 3.2-9 に示す。最初に、セメント種別の違いについて、水セメント比が 60%と等しく、セメント種別が異なる 60BB と 60N の比較を行う。かぶり厚さの違いに関わらず、60BB と 60N の自然電位から評価される ASTM による腐食判定基準はほぼ同等であった。60BB、60N とともに、鉄筋の下端まで中性化させており、鉄筋位置における pH は概ね等しいため、水セメント比が同等であれば、理論上はセメント種別の違いが自然電位に影響をおよぼさないと考えられるが、本実験ではそのとおりの結果を確認することができた。

次に、水セメント比の違いについて、セメント種別が普通ポルトランドセメントと等しく、水セメント比が異なる 60N と 50N の比較を行う。かぶり厚さが 10mm では、60N と 50N の自然電位から評価される ASTM による腐食判定結果はほぼ同等であった。このことから、セメント種別の違いがコンクリートの含水状態と自然電位の関係におよぼす影響は小さいものと考えられる。一方、かぶり厚さ 20mm では、暴露環境の相対湿度が 100、90%RH において、60N では腐食ありもしくは鉄筋腐食の可能性は不確定と判定されたのに対して、50N では腐食なしとなった。このことから、かぶり厚さが 20mm 以上であれば、水セメント比が小さい場合には、中性化後に高い含水状態になっても、鉄筋腐食は進行しにくいと考えられる。

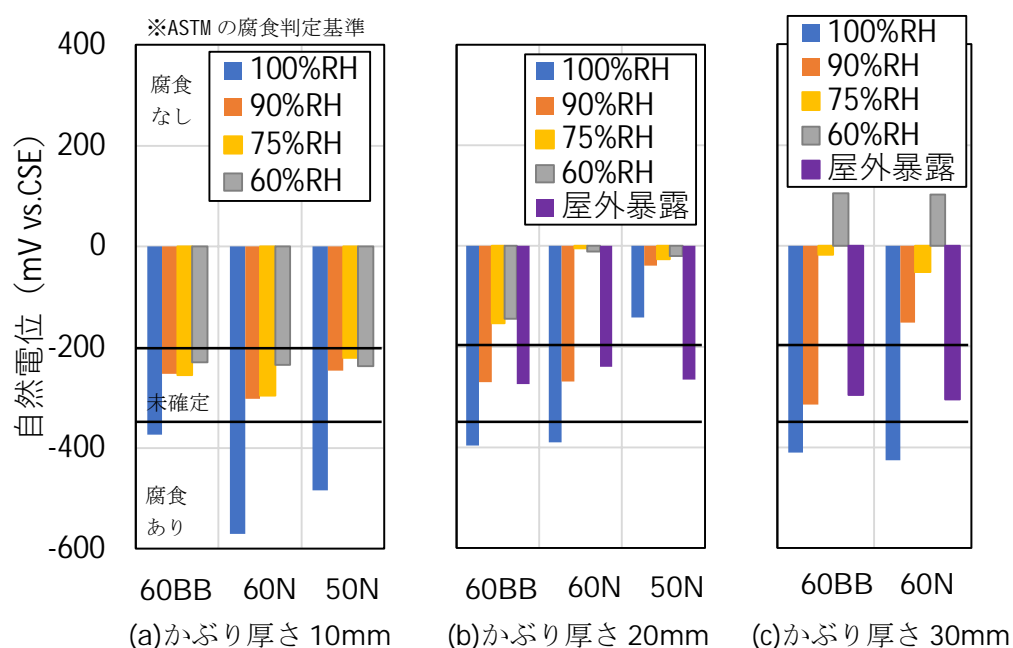


図 3.2-9 セメント種別、水セメント比の違いと自然電位の関係

#### (4) 腐食面積率、腐食減量による鉄筋の腐食状況

暴露環境の相対湿度と切り出した鉄筋の腐食面積率の関係を図 3.2-10、腐食減量の変化速度の関係を図 3.2-11 に示す。調合条件やかぶり厚さにより、中性化後の暴露試験の日数が異なるため、腐食面積率についてはそれぞれ最大となる暴露試験の材齢における値、腐食減量については暴露試験の材齢で除した腐食減量の変化速度として示した。

なお、本実験では黒皮付きの鉄筋を用いているため、鉄筋の腐食減量の測定では、黒皮の減量分として一定値を差し引く補正を行った。しかしながら、鉄筋ごとに黒皮の厚みにばらつきがあるため、腐食減量の変化速度の一部は負の値となった。このような場合には、腐食面積率が 0 で

あれば、鉄筋腐食は生じていないものと判断した。

中性化が鉄筋位置まで未到達の水準（凡例の 30mm 未達）では、セメント種別、水セメント比の違いに関わらず、いずれの暴露環境の相対湿度でも、腐食面積率は 2%以下、腐食減量の変化速度は  $0.5\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$  以下となり、鉄筋腐食は生じていないと判断された。

鉄筋位置まで中性化させた水準では、60BB では、かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 90%RH では腐食面積率が 40%、100%RH では 20%、75%RH では 10%、かぶり厚さが 20mm では、暴露環境の相対湿度が 90%RH では腐食面積率が 15%、100%RH では 10%、75%RH では 5%となり、90%RH の水準を最大とした山なりの分布となった。また、腐食減量についても、腐食面積率と概ね同様の傾向となった。本試験における外部環境の相対湿度の設定値は 75、90、100%RH と離散的であるが、暴露環境の相対湿度が 90%RH の近傍で、鉄筋腐食が最も進行する結果となった。

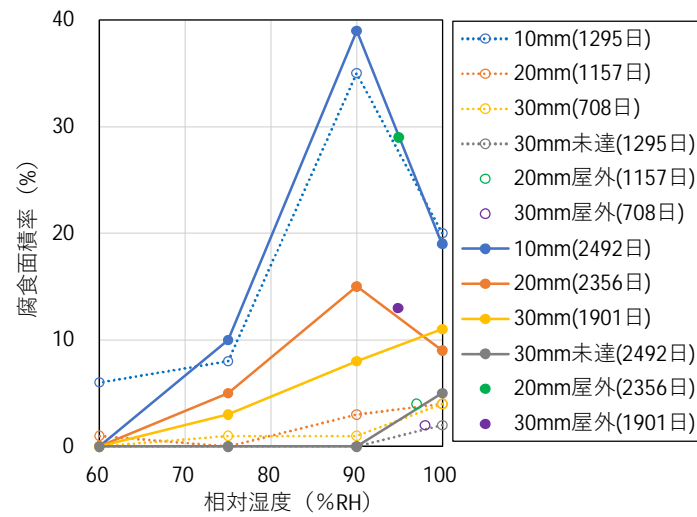
一方、かぶり厚さが 30mm では、暴露環境の相対湿度が大きいほど、鉄筋の腐食面積率、腐食減量は大きくなり、暴露環境の相対湿度 100%RH で、腐食面積率は 10%と最大値をとった。また、腐食減量についても、腐食面積率と概ね同様の傾向となった。屋外暴露の条件では、暴露環境の相対湿度が 100%RH と 90%RH の概ね中間に相当する位置にプロットされた。

60BB については、暴露試験の材齢が約 3 年延長された。かぶり厚さが 10mm では、材齢の経過により腐食面積率はほとんど増加しなかったが、腐食減量の変化速度は逆に減少した。この理由について次のとおり考察する。中性化による鉄筋腐食は、面的に腐食が広がっていく初期段階と、深部方向に腐食が進展していく進展段階に分けられる。掛川ら<sup>[3-10]・[3-13]</sup>は、黒皮付きの鉄筋を埋設したコンクリート試験体の 20 年間にわたる暴露試験結果から、初期段階の鉄筋腐食速度は大きく、暴露試験材齢の経過に伴って鉄筋腐食速度が低下することを確認している。また、筆者らも、みがき鋼材を埋設したコンクリート試験体により、中性化後の鉄筋腐食速度を測定した実験において、鉄筋の全周が腐食生成物で覆われた後では、鉄筋腐食速度が大きく低下する現象を確認している<sup>[3-14]</sup>。このことから、暴露試験の材齢が約 3 年延長されたが、鉄筋の深部方向への腐食の進展は停滞しているため、暴露試験の材齢で除している腐食減量の変化速度の値は、逆に減少したものと考えられる。

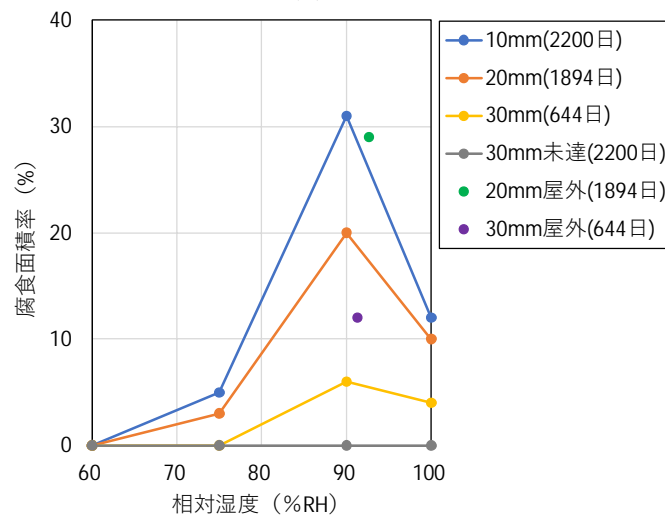
一方、かぶり厚さが 20、30mm では、材齢の経過により腐食面積率は 0 から 5～15%まで増加、腐食減量の変化速度は  $0.5\sim 1.0$  から  $1.2\sim 1.4\text{ mg}/\text{cm}^2/\text{year}$  まで増加した。これらの試験水準は、鉄筋腐食速度が大きくなる、鉄筋腐食の初期段階にあるものと考えられる。

60N では、かぶり厚さの違いに関わらず、暴露環境の相対湿度と腐食面積率および腐食減量の関係は 60BB と概ね同様の傾向となり、暴露環境の相対湿度が 90%RH を最大とした山なりの分布となった。なお、60BB との値の大きさの比較は、次節で考察する。屋外暴露の条件では、かぶり厚さの違いに関わらず、暴露環境の相対湿度が 90%RH と同等もしくは若干大きい値となった。

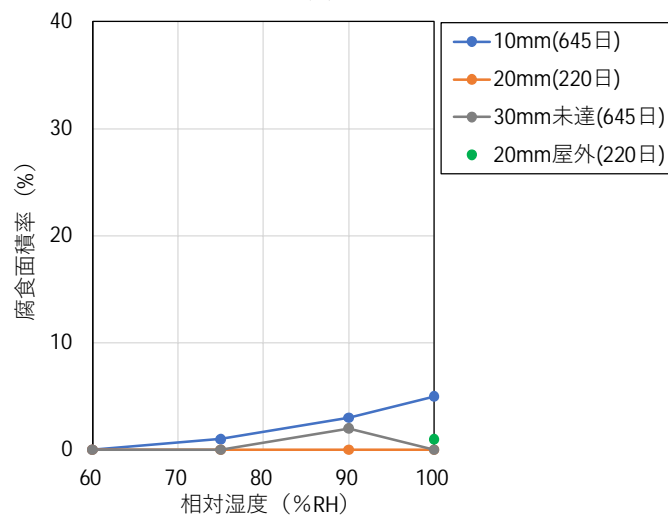
50N では、かぶり厚さが 10mm、暴露環境の相対湿度が 100%RH のみ、軽微な鉄筋腐食が確認された。それ以外では、いずれの指標もほぼ 0 となり、鉄筋腐食は認められなかった。



(a)60BB



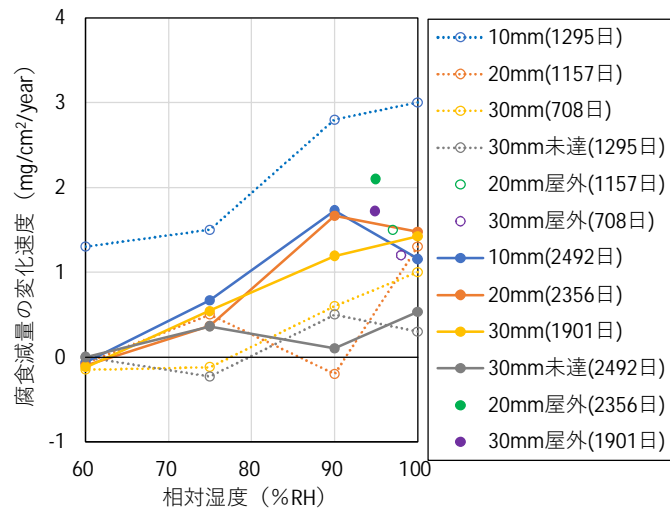
(b)60N



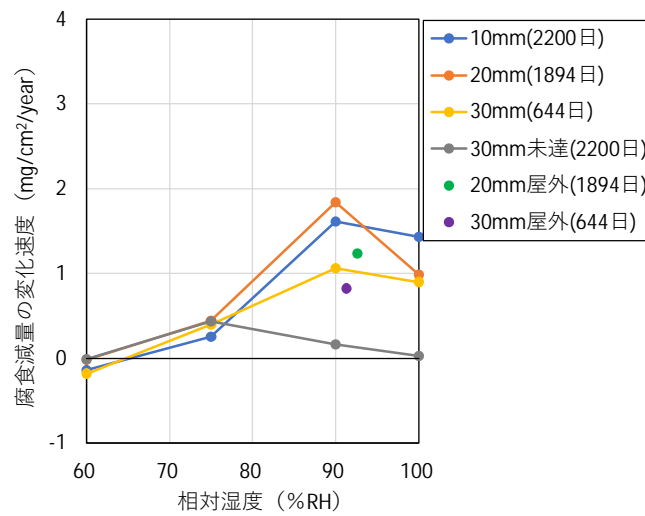
(c)50N

図 3.2-10 暴露環境の相対湿度と切り出した鉄筋の腐食面積率の関係

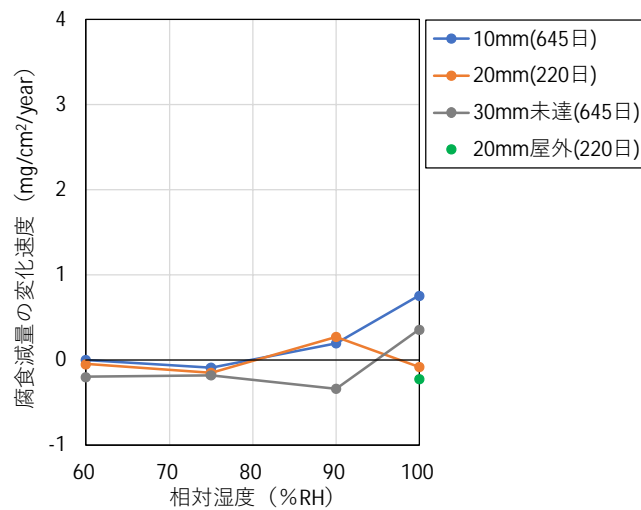




(a)60BB



(b)60N



(c)50N

図 3.2-11 暴露環境の相対湿度と切り出した鉄筋の腐食減量の変化速度の関係

セメント種別、水セメント比と腐食面積率の関係を図 3.2-12 に示す。中性化による鉄筋腐食は、塩害で見られるような孔食の形態にならず、表面に一様に進行する傾向があり、本実験においても、鉄筋の腐食面積率と腐食減量には概ね相関関係が認められたため、ここでは腐食面積率で考察を行った。最初に、セメント種別の違いについて、水セメント比が 60%と等しく、セメント種別が異なる 60BB と 60N の比較を行う。かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 75%RH では、60BB の腐食面積率が若干大きくなった。一方、相対湿度が 60%RH では、60BB と 60N の腐食面積率はほぼ同等であった。かぶり厚さが 20mm では、暴露環境の相対湿度が 90%RH では、60N の腐食面積率が若干大きくなった。一方、かぶり厚さが 20mm のその他の相対湿度、および、かぶり厚さが 30mm では、暴露環境の相対湿度の違いに関わらず、60BB と 60N の腐食面積率はほぼ同等であった。なお、かぶり厚さが 20mm 以上であれば、腐食面積率の差異は 0~5% と小さく、鉄筋の黒皮の厚みなどによるばらつきの影響を考えると、セメント種別の違いがコンクリートの含水状態と腐食減量の関係におよぼす影響は小さいものと考えられる。

次に、水セメント比の違いについて、セメント種別が普通ポルトランドセメントと等しく、水セメント比が異なる 60N と 50N の比較を行う。50N では、60N と比較して腐食面積率の値が極めて小さくなった。かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 90%RH 以上では腐食面積率が 5%程度となったが、かぶり厚さ 10mm の 75%RH 以下、および、かぶり厚さが 20mm 以上では、暴露環境の相対湿度の違いに関わらず、腐食面積率がほぼ 0 となった。このことから、水セメント比が小さい場合には、中性化後に高い含水状態になっても、鉄筋腐食は進行しにくいと考えられる。

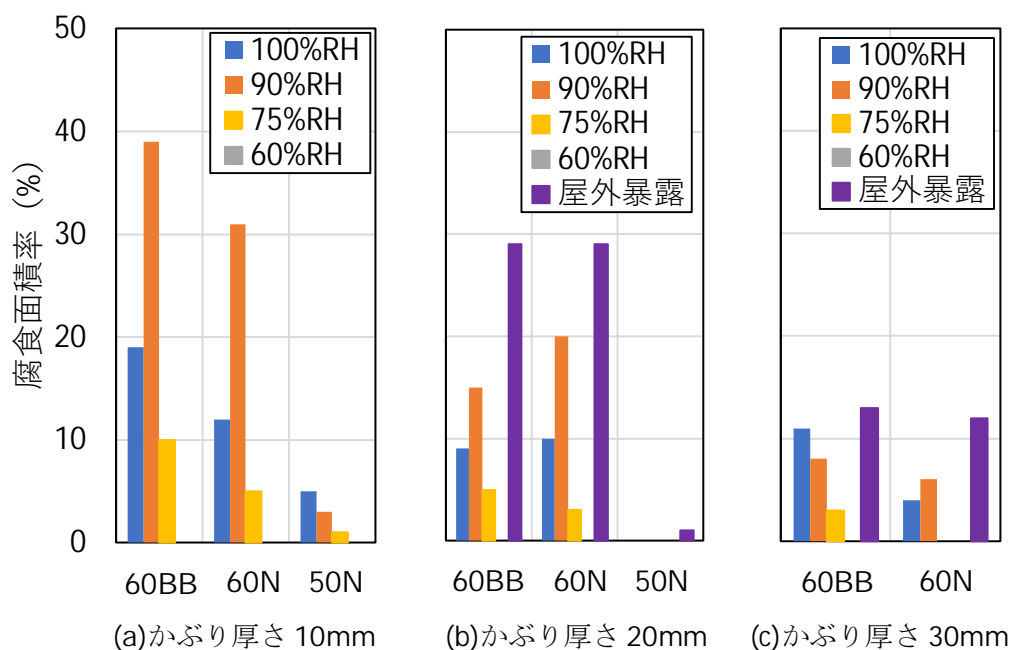


図 3.2-12 セメント種別、水セメント比と腐食面積率の関係

##### (5) 腐食電流密度による鉄筋の腐食速度

本検討では、中性化後の鉄筋の腐食速度を、腐食電流密度で評価することとした。暴露環境の相対湿度と最大となる暴露試験材齢における鉄筋の腐食電流密度の関係を図 3.2-13 に示す。図中には、RILEM の鉄筋腐食速度の判定基準を併せて示した<sup>[3-15]</sup>。

中性化が鉄筋位置まで未到達の水準（凡例の 30mm 未達）では、セメント種別、水セメント比の違いに関わらず、いずれの暴露環境の相対湿度でも、不働態状態と判定された。

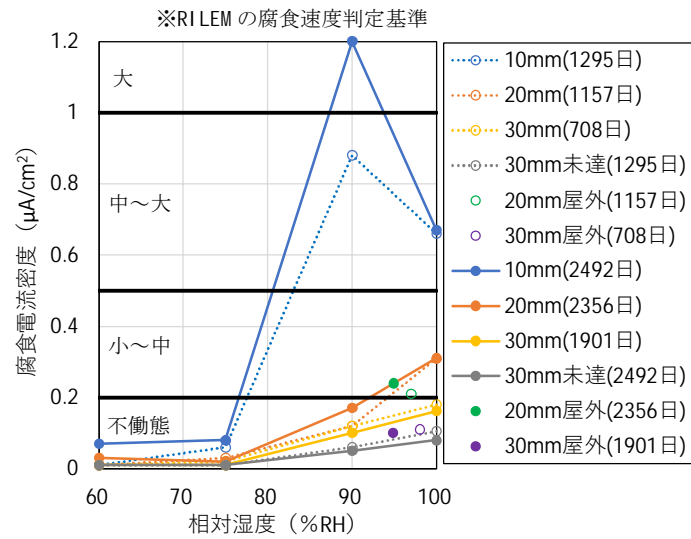
鉄筋位置まで中性化させた水準では、60BB では、かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 90%RH で大きい腐食速度、100%RH で中～高程度の腐食速度、75%RH 以下で不働態状態と判定され、90%RH を最大とした山なりの分布となった。

かぶり厚さが 20mm では、暴露環境の相対湿度が大きいほど、腐食電流密度は大きくなり、暴露環境の相対湿度が 100%RH で低～中程度の腐食速度、90%RH 以下で不働態状態と判定された。かぶり厚さ 30mm では、暴露環境の相対湿度に関わらず、不働態状態と判定された。屋外暴露の条件では、暴露環境の相対湿度が 100%RH と 90%RH の概ね中間に相当する位置にプロットされた。

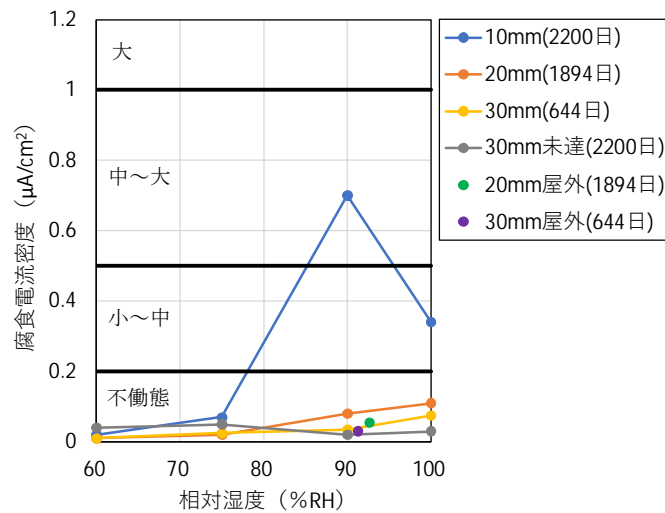
60BB については、暴露試験の材齢が約 3 年延長された。かぶり厚さが 10mm、暴露環境の相対湿度が 90%RH のみで、材齢の経過により腐食電流密度は 0.9 から 1.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ に増加したが、それ以外では、腐食電流密度はほとんど増加しなかった。

60N では、かぶり厚さが 10mm では、かぶり厚さの違いに関わらず、暴露環境の相対湿度と鉄筋腐食速度の関係は 60BB と概ね同様となった。かぶり厚さが 20mm、30mm では、暴露環境の相対湿度の違いに関わらず不働態状態と判定された。60BB との値の大きさの比較は、次節で考察する。

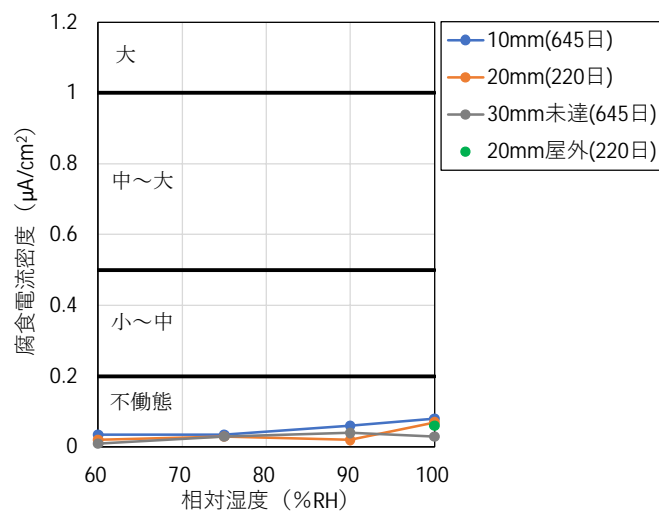
50N では、暴露環境の相対湿度の違いに関わらず、腐食電流密度は 0.2 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 以下となり不働態状態と判定された。



(a)60BB



(b)60N



(c)50N

図 3.2-13 暴露環境の相対湿度と鉄筋の腐食電流密度の関係

ここで、かぶり厚さが 10mm の場合に、飽和度が 50%の時に腐食面積率と腐食電流密度が最大となった理由を考察する。

鉄筋の腐食反応には水と酸素が必要である。しかしながら、金属化学の分野では、相対湿度が 100%RH の下では、金属表面に厚い水膜が形成され、酸素の供給が遮断されることで腐食速度が小さくなることが報告されている<sup>[3-16]</sup>。高谷らは、実構造物に用いられる鉄筋を、相対湿度を変えた大気中に暴露し、酸素の供給状態の違いから鉄筋の腐食速度および腐食生成物が異なることを示した<sup>[3-17]</sup>。一方、実構造物においては、鉄筋はコンクリート中に埋め込まれており、鉄筋への水と酸素の供給もコンクリート中の細孔を通じて行われる。そのため、コンクリート中の鉄筋腐食速度の違いを説明するためには、コンクリートの細孔中の水と酸素の移動と腐食反応によるそれらの消費を考慮した検討が必要であるが、水と酸素の移動解析を含む数理モデルの構築は極めて難解である。

清原ら<sup>[3-18]</sup>は、実構造物調査におけるコンクリート内部の相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係を整理し、金属表面で確認された理論が、コンクリート中の鉄筋腐食に対しても当てはまることを示した（図 3.2-14）。図 3.2-14 からは、湿度条件が 80%RH よりも低い場合で、腐食速度が小さくなることが読み取れる。コンクリート中の湿度の低下は、かぶりコンクリートへの酸素の供給を増加させる効果があるが、湿度が低くなり過ぎると腐食反応場が形成されなくなることが分かる。今本<sup>[3-19]</sup>は、これらの現象説明として、コンクリート内部の鉄筋の相対湿度 80%付近における水と酸素の供給の模式図を示した（図 3.2-15）。この模式図によると、コンクリート中の鉄筋であっても、コンクリートは多孔体であるため、コンクリート中の細孔を通じて鉄筋位置に酸素供給が行わるとしても、鉄筋表面の水膜の影響により、腐食反応は抑制されるものと考えられる。このことが、暴露環境 90%RH の条件に相当する飽和度が 50%の時に、腐食電流密度が最大となった理由と推察される。

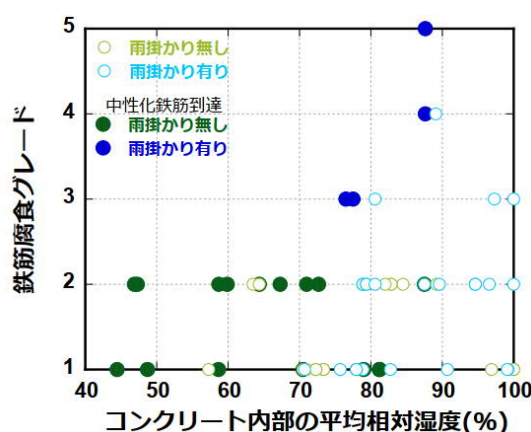


図 3.2-14 実構造物調査におけるコンクリート内部の相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係<sup>[3-18]</sup>

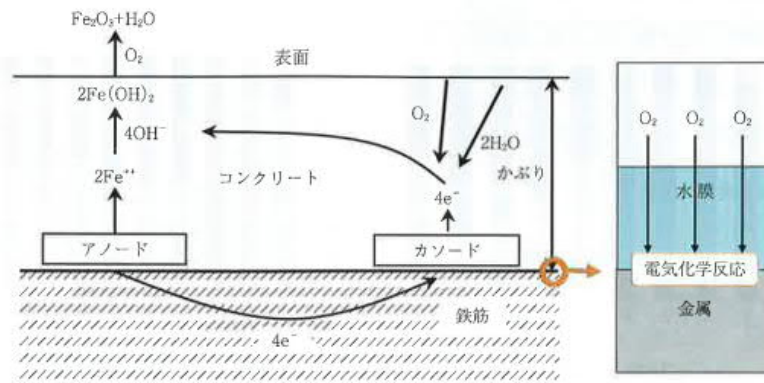


図-9 相対湿度 80%付近における水と酸素の供給

図 3.2-15 コンクリート内部の鉄筋の相対湿度 80%付近における水と酸素の供給の模式図<sup>[3-19]</sup>

また、本報における 60N の実験結果と、セメント種別（普通ポルトランドセメント）、水セメント比（60%）、環境温度（20℃）が等しい Cheng ら<sup>[3-20], [3-21]</sup>の実験結果を比較する。Cheng らの実験結果では、かぶり厚さが 20mm では、暴露環境の相対湿度が 95%RH で腐食電流密度が  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、97%RH では  $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$  となった。かぶり厚さが 30mm では、暴露環境の相対湿度に関わらず、腐食電流密度は  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となった。一方、本報では、かぶり厚さが 20, 30mm とともに、暴露環境の相対湿度が 100, 90%RH のいずれにおいても、腐食電流密度は  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  程度と小さくなった。この暴露環境の相対湿度を 100%RH としても、腐食電流密度が増加する傾向が認められなかった理由として、Cheng らがみがき鋼材を使用しているのに対し、本報では黒皮付きの鉄筋を使用しているため、黒皮による鉄筋腐食の進行を抑制する機能が働いていることが考えられる。ただし、かぶり厚さが 20mm 以上あれば、いずれの実験結果でも、腐食電流密度の値は極めて小さく、不働態状態もしくは低～中程度の腐食速度と判定される程度であるため、耐久性の評価が大きく異なるものではない。

以上のことから、暴露環境の相対湿度が大きい場合には、中性化後の鉄筋腐食速度も大きくなる傾向が認められ、かぶり厚さが 10mm では、中性化後の鉄筋腐食速度が大きくなる場合がある。一方、かぶり厚さが 20mm 以上では、本実験の調合条件である水セメント比が 60%以下で、コンクリートの含水状態を一定条件とした場合には、暴露環境の相対湿度の違いに関わらず、腐食電流密度の値は極めて小さく、高い耐久性を有しているものと考えられる。

セメント種別、水セメント比と最大となる暴露試験材齢における腐食電流密度の関係を図 3.2-16 に示す。最初に、水セメント比が 60%と等しく、セメント種別が異なる 60BB と 60N の比較を行う。かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 90%以上では、60BB の腐食電流密度が大きくなった。この理由として、かぶり厚さが小さい条件においては、60BB では、60N、50N と比較して、暴露試験終了時における飽和度が大きく、外部環境からの水分の出入りが大きいことが影響したものと考えられる。一方、75%RH 以下では、いずれも腐食電流密度が  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり不動態状態と判定された。かぶり厚さが 20mm では、かぶり厚さが 10mm と同様の傾向が認められるが、腐食電流密度の値は  $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下と小さくなり、セメント種別が鉄筋腐食速度におよぼす影響は小さいと考えられる。かぶり厚さが 30mm では、60N、50N とともに腐食電流密度は  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり不動態状態と判定された。以上より、かぶり厚さが 10mm で、暴露環境の相対湿度が 90%RH 以上の場合において、60BB では、表層部分で外部環境からの水分の出入りが大きくなるため、暴露環境の相対湿度が同じでも暴露試験終了時の飽和度が大きくなり、鉄筋腐食速度が大きくなる。一方、かぶり厚さが 10mm で、暴露環境の相対湿度が 75%RH 以下の場合、もしくは、かぶり厚さが 20mm 以上では、暴露環境の相対湿度の違いによらず、鉄筋腐食速度は極めて小さくなっており、コンクリートの含水状態と鉄筋腐食速度の関係におよぼす影響は小さいと考えられる。

次に、水セメント比の違いについて、セメント種別が普通ポルトランドセメントと等しく、水セメント比が異なる 60N と 50N の比較を行う。50N では、暴露環境の相対湿度に関わらず、全てのかぶり厚さで腐食電流密度が  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり不動態状態と判定された。一方、60N では、かぶり厚さが 10mm では、腐食電流密度の値が  $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、かぶり厚さが 20mm 以上では、腐食電流密度が  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり不動態状態と判定された。以上より、水セメント比が小さい場合には、かぶり厚さが 10mm と小さい場合でも、中性化後に高い含水状態になっても、鉄筋腐食は進行しにくいと考えられる。

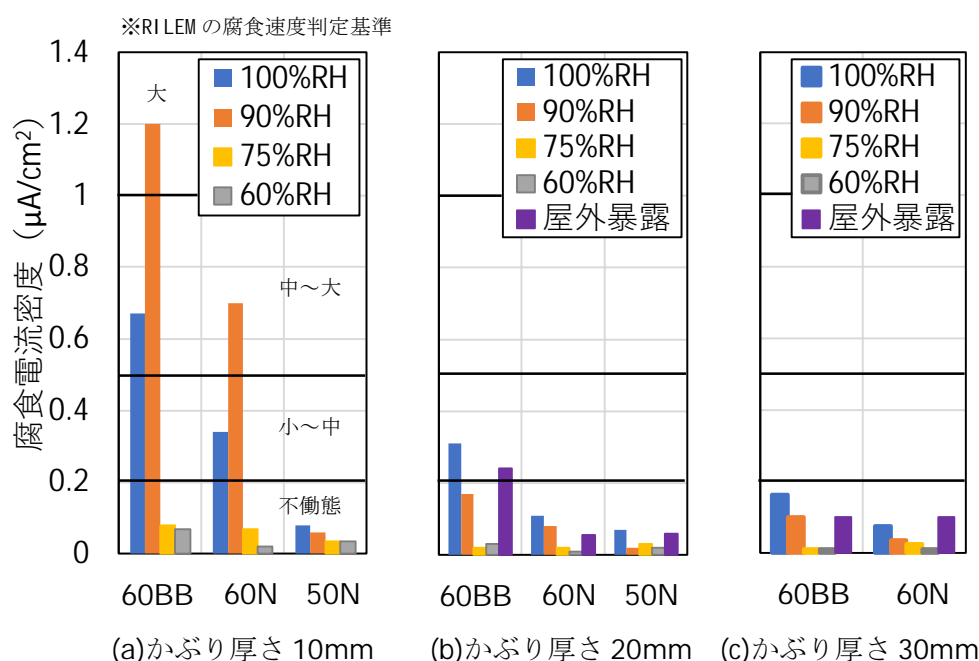


図 3.2-16 セメント種別、水セメント比と腐食電流密度の関係

かぶり厚さおよび相対湿度と鉄筋腐食速度の関係を図 3.2-17 に示す。実験により取得した中性化後の鉄筋腐食速度を、相対湿度ごとにかぶり厚さとの関係として示したものである。

それぞれの調合に対して、相対湿度ごとに中性化後の鉄筋腐食速度をかぶり厚さの関数として定式化した結果について、60BB を式(3.2-1)、60N を式(3.2-2)、50N を式(3.2-3)として示す。

(a)60BB

$$\left. \begin{array}{l} 60\%RH : V_{corr}=37.4 \cdot D^{-1.73} (R^2=0.98) \\ 75\%RH : V_{corr}=56.5 \cdot D^{-1.86} (R^2=0.99) \\ 90\%RH : V_{corr}=2110 \cdot D^{-2.33} (R^2=1.00) \\ 100\%RH : V_{corr}=118 \cdot D^{-1.27} (R^2=1.00) \end{array} \right\} (3.2-1)$$

ここに、 $V_{corr}$ ：中性化後の鉄筋腐食速度 (mg/cm<sup>2</sup>/year)

$D$ ：かぶり厚さ(mm)

(b)60N

$$\left. \begin{array}{l} 60\%RH : V_{corr}=0.793 \cdot D^{-0.671} (R^2=0.92) \\ 75\%RH : V_{corr}=5.88 \cdot D^{-1.03} (R^2=0.89) \\ 90\%RH : V_{corr}=3510 \cdot D^{-2.77} (R^2=1.00) \\ 100\%RH : V_{corr}=76.1 \cdot D^{-1.41} (R^2=0.99) \end{array} \right\} (3.2-2)$$

ここに、 $V_{corr}$ ：中性化後の鉄筋腐食速度 (mg/cm<sup>2</sup>/year)

$D$ ：かぶり厚さ(mm)

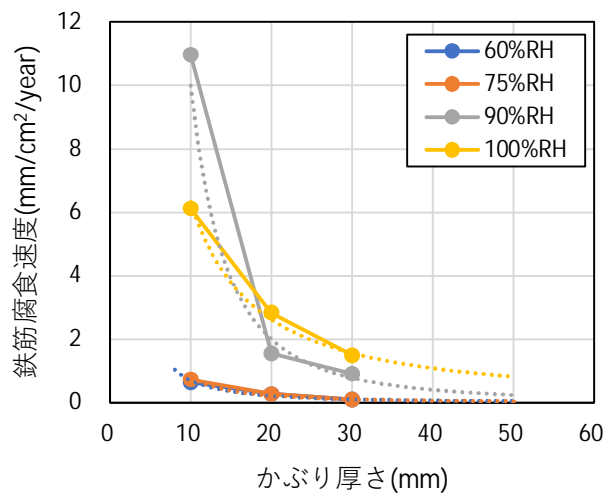
(c)50N

$$\left. \begin{array}{l} 60\%RH : V_{corr}=2.16 \cdot D^{-0.830} (R^2=1.00) \\ 75\%RH : V_{corr}=0.563 \cdot D^{-0.245} (R^2=1.00) \\ 90\%RH : V_{corr}=1.88 \cdot D^{-0.533} (R^2=1.00) \\ 100\%RH : V_{corr}=1.13 \cdot D^{-0.190} (R^2=1.00) \end{array} \right\} (3.2-3)$$

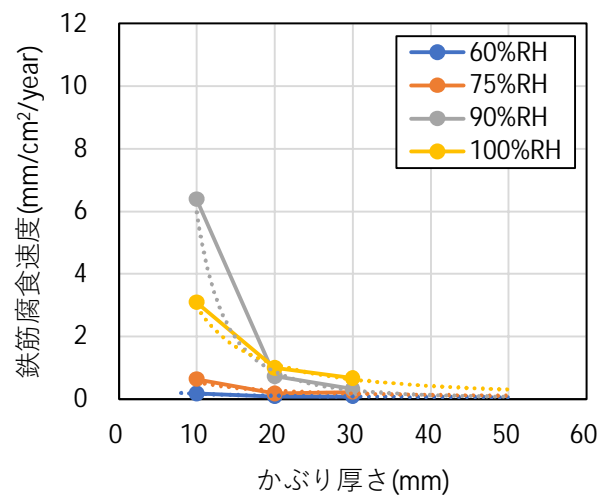
ここに、 $V_{corr}$ ：中性化後の鉄筋腐食速度 (mg/cm<sup>2</sup>/year)

$D$ ：かぶり厚さ(mm)

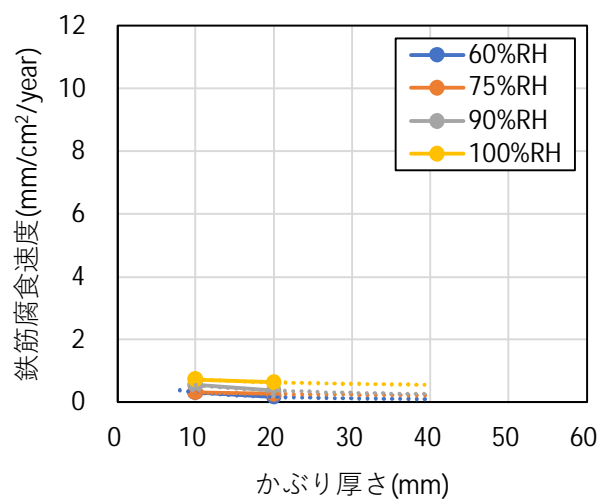




(a)60BB



(b)60N



(c)50N

図 3.2-17 かぶり厚さおよび相対湿度と鉄筋腐食速度の関係

### 3.2.6 3.2 節の結論

本節では、コンクリートの使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を作製し、あらかじめ鉄筋位置まで促進中性化させた後、異なる相対湿度で 2～3.5 年間の暴露試験を行い、電気化学的に鉄筋腐食速度を測定した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) コンクリートの含水率を飽和度で示し、中性化後の鉄筋腐食状況および鉄筋腐食速度との関係について考察した。
- (2) 電気化学的に中性化後の鉄筋腐食速度を測定し、かぶり厚さ、含水状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を得た。
- (3) かぶり厚さが 10mm の場合は、飽和度が 50%を下回ると極めて遅い腐食速度、飽和度が 50%を上回ると高い腐食速度となった。また、飽和度が 50%において中性化後の鉄筋腐食速度が最大となった。
- (4) かぶり厚さが 20, 30mm の場合は、飽和度が高いと中性化後の鉄筋腐食速度は増加するが、いずれも極めて遅い腐食速度となった。
- (5) それぞれの調合に対して、相対湿度ごとに、鉄筋腐食速度をかぶり厚さの関数として定式化した。

### 3.3 中性化残りが異なる場合の鉄筋腐食速度

#### 3.3.1 3.3 節の概要

本節では、3.2 節と同様に、コンクリートの使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を作製し、あらかじめ所定の中性化深さまで促進中性化させた後、異なる相対湿度で暴露試験を行い、電気化学的に鉄筋腐食速度を測定したものである。

コンクリートの中性化残り（鋼材のかぶり厚さから中性化深さを差し引いた値）をパラメータとして、中性化残りが、+10mm, ±0mm, -12mm（埋設した鉄筋の下端）、-20mm となるまで促進中性化させた後、暴露試験を開始した。

試験体の条件は、黒皮付きの丸鋼φ12mm をかぶり厚さが 20, 30mm となるように埋設した。

コンクリートの調合条件は、セメント種別が高炉セメント B 種で水セメント比が 60%、セメント種別が普通ポルトランドセメントで水セメント比が 60%の 2 水準とした。

中性化後の暴露環境条件は、温度は 20℃、相対湿度は 100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH の一定の湿度条件と屋外暴露の 5 水準とした。

実験結果に基づいて、中性化残りの違いが、コンクリートのかぶり厚さ、鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係におよぼす影響について取りまとめた。

### 3.3.2 実験計画

実験の流れを図 3.3-1 に示す。

黒皮付きの丸鋼  $\phi 12\text{mm}$  をかぶり厚さが 20, 30mm で埋設した試験体を作製し、初期養生として JASS 5 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。なお、JASS 5 では、高炉セメント B 種の湿潤養生期間を 7 日以上と定めているが、本実験では 5 日間で統一した。

初期養生後は、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、所要の中性化深さに到達するまで行った。そのため、セメント種別、かぶり厚さおよび中性化深さの目標値により、促進中性化試験の期間が異なる。

所要の中性化深さまで到達した試験体から、異なる相対湿度で暴露試験を行った。暴露試験の期間中は、数ヶ月ごとにコンクリート中の含水率と鉄筋の自然電位および分極抵抗を測定した。

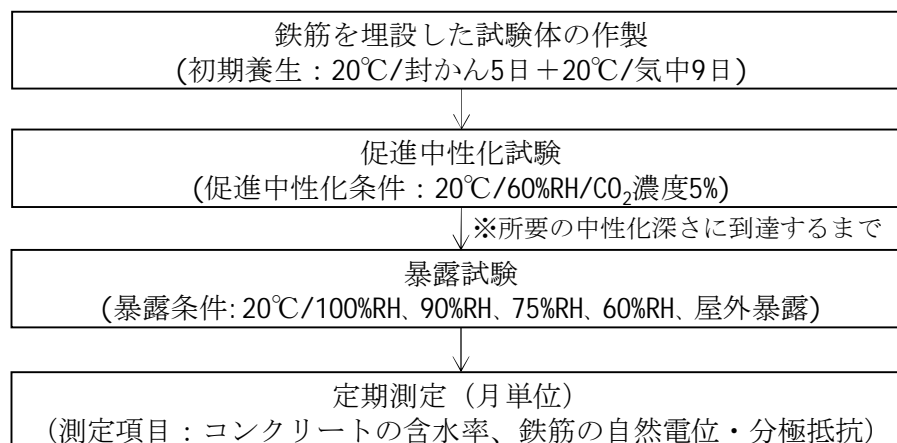


図 3.3-1 実験の流れ

実験条件を表 3.3-1 に示す。

コンクリートの調合条件は、水セメント比は 60%のみ、セメント種別は高炉セメント B 種と普通ポルトランドセメントの 2 水準とした。試験体の形状は 100×100×400mm の角柱とした。促進中性化試験とその後の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 面はエポキシ樹脂によりシールした。

試験体の種類は、非破壊試験により鉄筋腐食速度を測定する鉄筋試験体と、破壊試験により中性化深さと含水率の測定を行う無筋試験体の 2 種類とした。鉄筋試験体には、暴露面からのかぶり厚さが 20, 30mm となる位置に SS400 の黒皮付き丸鋼  $\phi 12\text{mm}$  を埋設した。

コンクリートの打込みおよび初期養生は 20℃、相対湿度 60%RH の恒温恒湿室で行った。

促進中性化試験は、JIS A 1153 に準じて行い、温度 20℃、相対湿度 60%RH、CO<sub>2</sub> 濃度 5%とした。中性化深さの目標値は、試験体のかぶり厚さに対して、中性化残りが +10mm, ±0mm, -12mm (埋設した鉄筋の下端), -20mm の 4 水準となるように定めた。ただし、中性化残りが +10mm, ±0mm の水準は、かぶり厚さが 30mm の試験体のみ設定した。鉄筋試験体のかぶり厚さと中性化深さの目標値を図 2 に示す。かぶり厚さが 20mm の試験体では、中性化深さの目標値は 32, 40mm の 2 水準、かぶり厚さが 30mm の試験体では、中性化深さの目標値は 20, 30, 42, 50mm の 4 水準とし、セメント種別が異なる合計 6 水準の組合せを設定した。なお、試験体記号

は、『セメント種別－かぶり厚さ－中性化深さ』の順とし、それぞれ該当する記号もしくは数値を並べて示した。

設定した中性化深さに到達した試験体から、暴露試験を開始した。暴露試験の環境は、20℃で相対湿度 100, 90, 75, 60%RH と屋外暴露の 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、相対湿度は±3%RH、温度は 20℃±2℃で管理した。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。屋外暴露の条件は、東京都内の屋根のないアスファルト上に、暴露面を側面として試験体を静置した。全ての暴露条件において、酸素濃度は大気中と同等の 21%程度であることを酸素濃度計により確認した。

表 3.3-1 実験条件

項目			内容
試験体 条件	コンクリート調合	水セメント比	60%
		セメント種別	(1)高炉セメント B 種 [記号：BB] (2)普通ポルトランドセメント [記号：N]
	試験体詳細	寸法	100×100×400mm（角柱）
		境界条件	側面 1 面：暴露面 外周 3 面および小口 2 面：シール
	試験体種類	鉄筋試験体	鉄筋：黒皮付き丸鋼φ12mm かぶり厚さ：(1)20mm (2)30mm
		無筋試験体	鉄筋：なし
環境 条件	初期養生	環境条件	20℃／封かん 5 日＋20℃／気中 9 日
	促進中性化試験	促進条件	JIS A 1153 (20℃／60%RH／CO <sub>2</sub> 濃度 5%)
		中性化深さの 目標値※1	(1)かぶり厚さ－10mm※2 (2)かぶり厚さ±0mm※2 (3)かぶり厚さ＋12mm※3 (4)かぶり厚さ＋20mm
	暴露試験	環境条件	20℃／100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH, 屋外暴露

※1：詳細は図 3.3-2 を参照

※2：かぶり厚さが 30mm の試験体のみで設定

※3：埋設した丸鋼φ12mm の下端まで中性化させた水準

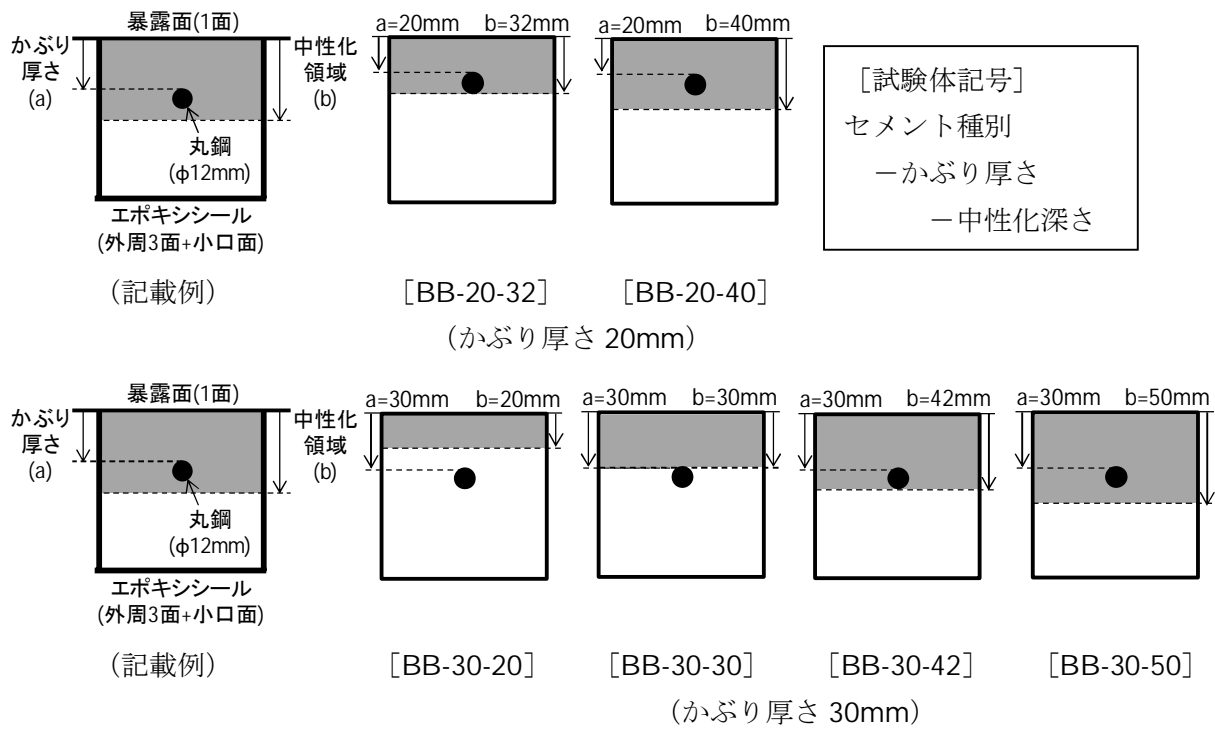


図 3.3-2 鉄筋試験体のかぶり厚さと促進中性化深さの目標値

### 3.3.3 実験方法および測定方法

測定計画を表 3.3-2 に示す。

鉄筋試験体では、数ヶ月ごとに自然電位と分極抵抗を測定した。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<sup>[3-6]</sup>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<sup>[3-7]</sup>を参考として、試験体の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<sup>[3-8]</sup>、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。

無筋試験体では、中性化深さおよび含水率を測定した。中性化深さの測定は、JIS A 1153 に準じて行った。含水率の測定は、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、切断片を暴露面より 12.5mm 間隔で 8 等分し、JIS A 1476（建築材料の含水率測定方法）に準じて行った。

また、飽水状態の質量含水率に対する割合として、飽和度を式(3.3-1)のとおり定義した。

$$Wd = (S - Sd) / (Sw - Sd) \times 100 \quad (3.3-1)$$

ここに、Wd：飽和度(%)

S：測定質量(g)

Sd：絶乾質量(g)

Sw：飽和質量(g)

表 3.3-2 測定計画

試験体	測定項目	測定方法
有筋試験体	自然電位	JSCE-E 601
	分極抵抗	土木学会 338 委員会試案
無筋試験体	中性化深さ	JIS A 1153
	含水率※	JIS A 1476(暴露面から 12.5mm 間隔で 8 等分)

※最大となる暴露試験材齢で測定（経時変化の測定なし）

### 3.3.4 試験体の作製およびフレッシュ性状

コンクリートの使用材料を表 3.3-3, コンクリートの調合を表 3.3-4 に示す。セメント種別が BB では単位水量を 182kg/m<sup>3</sup>, セメント種別が N では単位水量を 180kg/m<sup>3</sup> とし, 化学混和剤は AE 減水剤を使用した。

コンクリートのフレッシュ性状を表 3.3-5 に示す。コンクリートのスランプの目標値は 18±2.5cm, 空気量の目標値は 4.5±1.5%と設定し, いずれも目標値を満足することを確認した。

表 3.3-3 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 <sup>3</sup> )
	N	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S	木更津産陸砂 (乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> , 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 <sup>3</sup> , 吸水率 0.92%, F.M.6.61, 実積率 58.9%)
水	W	上水道水
化学混和剤	AE	AE 減水剤

表 3.3-4 コンクリートの調合

セメント 種別	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					化学混和剤 (セメント×%)
			W	BB	N	S	G	AE
BB	60	49.5	182	303	—	871	906	0.6
N	60	49.5	180	—	300	875	907	0.85

表 3.3-5 コンクリートのフレッシュ性状

セメント種別	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )
BB	19.0	4.2	21	2291
N	18.5	5.1	22	2277



### 3.3.5 試験結果および考察

#### (1) 圧縮強度、促進中性化試験および暴露試験の日数

コンクリートの圧縮強度を表 3.3-6 に示す。

鉄筋試験体、無筋試験体と併せて作製した  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  の管理供試体の試験結果を示した。標準養生 28 日における圧縮強度は、セメント種別が BB では  $30.5 \text{ N/mm}^2$ 、N では  $37.7 \text{ N/mm}^2$  となった。また、鉄筋を埋設した試験体の養生条件に合わせて、材齢 5 日で脱型し、脱型以降は  $20^\circ\text{C}$ 、 $60\%\text{RH}$  で気中養生した供試体の圧縮強度を測定した。この気中養生した供試体は、材齢 91 日に加えて、促進中性化試験が終了した材齢における圧縮強度も測定した。気中養生 91 日における圧縮強度は、BB では  $28.2 \text{ N/mm}^2$ 、N では  $30.3 \text{ N/mm}^2$  となった。BB の圧縮強度が N よりも小さくなった理由として、JASS 5 では高炉セメント B 種の湿潤養生期間を 7 日以上と定めているのに対して、本実験では普通ポルトランドセメントに合わせて、湿潤養生を 5 日で打ち切ったため、表層の品質が相対的に低下している可能性がある。

促進中性化試験および暴露試験の日数を表 3.3-7 に示す。

所要の中性化深さに達するまでの促進中性化試験の日数は、かぶり厚さが大きいほど長くなり、セメント種別 BB では 155～1100 日、セメント種別 N では 466～1709 日となった。促進中性化試験後の暴露試験の日数はセメント種別 BB では 1547～2356 日、セメント種別 N では 220～2200 日となった。なお、本試験は同日に打ち込んだ試験体を用いているため、促進中性化試験の日数が長くなった水準ほど、本報告時点までの暴露試験の日数が短くなっている。

調合条件ごとの、促進中性化試験結果を図 3.3-3 に示す。

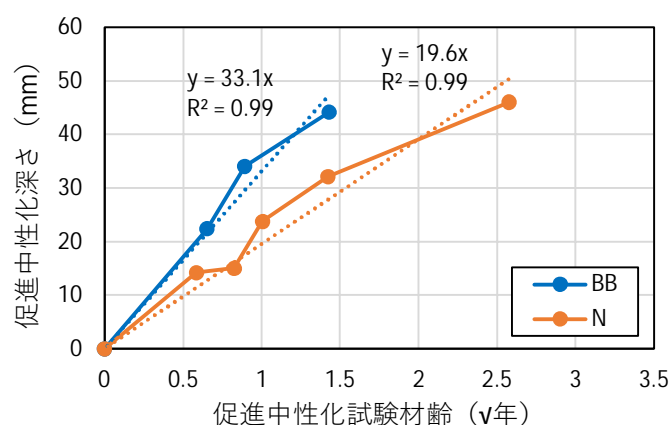
試験材齢の平方根と中性化深さには比例関係が認められ、比例定数である中性化速度係数は、BB では  $33.1 \text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$ 、N では  $19.6 \text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$  となった。なお、促進中性化期間が長いものでも、両者の比例関係から大きく逸脱しておらず、促進中性化期間における表層品質の変化はほとんどないと考えられる。

表 3.3-6 コンクリートの圧縮強度

セメント 種別	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )						
	標準養生	封かん養生	5日脱型後気中養生（目標中性化深さに到達した材齢）				
	材齢 28日	材齢 91日	材齢 91日	中性化深さ 20mm到達	中性化深さ 32mm到達	中性化深さ 42mm到達	中性化深さ 50mm到達
BB	30.5	41.4	28.2	29.0 (材齢155日)	28.6 (材齢291日)	28.5 (材齢746日)	29.2 (材齢1100日)
N	37.7	42.9	30.3	33.1 (材齢466日)	35.0 (材齢770日)	37.8 (材齢1285日)	38.2 (材齢1709日)

表 3.3-7 促進中性化試験および暴露試験の日数

セメント 種別	かぶり 厚さ (mm)	目標 中性化深さ (mm)	促進中性化試験		暴露試験
			実測中性化深さ (mm)	中性化試験期間 (日)	暴露試験期間 (日)
BB	20	32	34.1	291	2356
	20	40	44.2	746	1901
	30	20	22.4	155	2492
	30	30	34.1	291	2356
	30	42	44.2	746	1901
	30	50	51.2	1100	1547
N	20	32	32.2	770	1894
	20	40	46.1	1285	644
	30	20	23.8	466	2200
	30	30	32.2	770	1894
	30	42	46.1	1285	644
	30	50	50.3	1709	220

図 3.3-3 促進中性化試験結果 (CO<sub>2</sub> 濃度 5%, 60%RH)

## (2) 含水率

最大となる暴露試験材齢における暴露面から内部にかけての質量含水率および飽和度の分布を図 3.3-4 (セメント種別 BB)、図 3.3-5 (セメント種別 N) に示す。いずれも鉄筋の中心位置での値をプロットした。

本報では、N-30-50 の暴露試験の材齢 (220 日) が、他の水準と比較して短くなっている。筆者らは、事前検討により暴露試験の開始後から半年程度で、暴露環境の相対湿度とコンクリート中の含水状態は平衡となり、それ以降の自然電位、腐食電流密度の値は概ね一定となることを確認している。そのため、材齢の異なる試験水準であっても、最大となる暴露試験材齢におけるコンクリート中の含水状態は平衡となっており、自然電位および腐食電流密度の相対比較は可能であると判断した。

なお、質量含水率は、調合条件によって飽水状態での値が異なるため、暴露環境の相対湿度と

平衡時の値も異なる。一方、飽和度はそれぞれの飽水状態に対する割合であるため、調合条件の違いによる影響を受けにくい値と考えられる。

含水率分布は、セメント種別や暴露環境の相対湿度の違いによらず、暴露面で最も小さくなり、内部にかけて大きくなった。本研究での実験水準とした、鉄筋位置（かぶり厚さ 20mm, 30mm）における質量含水率は、セメント種別 BB では、暴露環境の相対湿度が 100%RH では 5.0～5.5% 程度、90%RH では 3.0～3.5% 程度、75%RH、60%RH では 2.5～3.0% 程度となった。セメント種別 N では、暴露環境の相対湿度が 100%RH では 4.5～5.0% 程度、90%RH、75%RH では 2.5～3.0% 程度、60%RH では 2.0～2.5% 程度となった。いずれも、かぶり厚さ 20mm の鉄筋位置における質量含水率は、かぶり厚さ 30mm と比較して 0.5% 程度小さくなった。

屋外暴露の条件では、断面内の含水率分布は、天候の変化に影響を受け、長期間の暴露試験後においても平衡にならなかった。そのため、1 ヶ月以上にわたって降雨がなかった乾燥期と、3 日間連続で降雨があった湿潤期の 2 つの時期で測定した。本研究での実験水準とした、鉄筋位置（かぶり厚さ 20mm, 30mm）における質量含水率は、セメント種別 BB では乾燥期で 2.5～3.0% 程度、湿潤期で 4.0～4.5% 程度、平均すると 3.5～4.0% 程度となった。セメント種別 N では、乾燥期で 2.0～2.5% 程度、湿潤期で 3.0～3.5% 程度、平均すると 2.5～3.5% 程度となった。

なお、セメント種別によらず、暴露環境の相対湿度を 100%RH とした水準でも、暴露環境の相対湿度と平衡になった時の飽和度は 70～80% であるため、コンクリート細孔中の残りの 20～30% の部分は水分で飽和していない空隙の状態で存在しているものと考えられる。

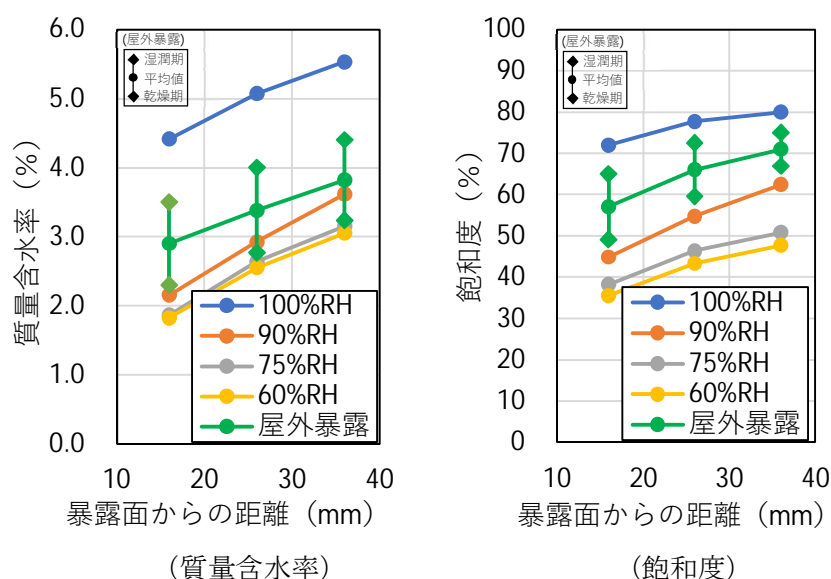


図 3.3-4 最大となる暴露試験材齢における暴露面から内部にかけての質量含水率・飽和度の分布（セメント種別 BB）

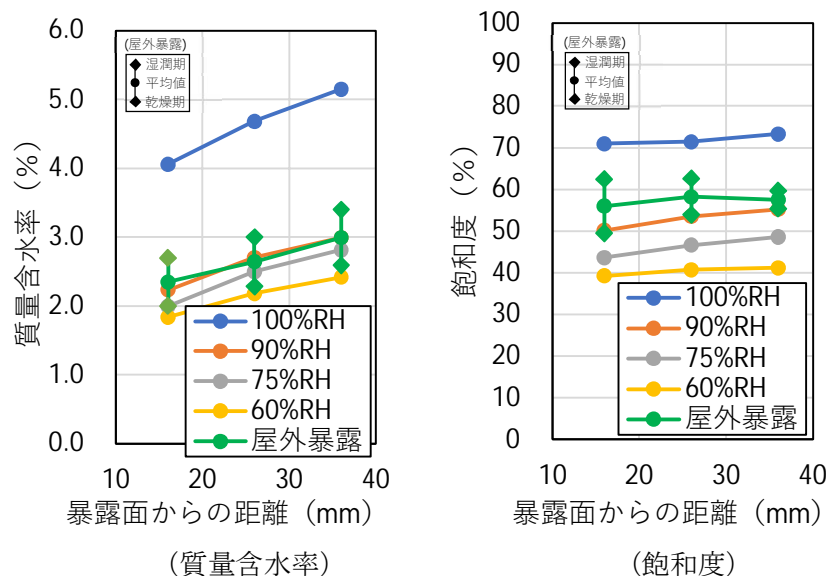


図 3.3-5 最大となる暴露試験材齢における暴露面から内部にかけての質量含水率・飽和度の分布（セメント種別 N）

### (3) 自然電位による鉄筋の腐食状態

セメント種別 BB における，暴露環境の相対湿度と鉄筋の自然電位の関係を図 3.3-6 に示す。図中には，ASTM の腐食判定基準<sup>[3-12]</sup>を併記した。なお，調合条件やかぶり厚さによって，中性化後の暴露試験の日数が異なるため，それぞれ最大となる暴露試験の材齢（凡例の末尾に示す）における値を示した。また，屋外暴露の条件では，乾燥期と湿潤期の 2 つの時期でコンクリートの含水状態を測定している。ここでは，鉄筋腐食の要因となる水分供給が多くなる湿潤期において測定した，暴露地点の相対湿度の平均値を用いた。なお，これらの図の表記方法は，以降の図でも同様とした。

自然電位による評価では，測定時点において鉄筋が腐食する状態にあるかを判断することができるが，必ずしも鉄筋腐食が生じているとは言えない。また，測定値は鉄筋位置におけるコンクリートの含水状態などにも影響を受ける。しかしながら，本実験でははつり出しによる鉄筋腐食状況の確認を行っていないため，自然電位から評価される ASTM の腐食判定基準に基づいて考察を行うこととした。

かぶり厚さ 20mm では，中性化深さの違いによらず，暴露環境の相対湿度が 100%RH では，自然電位は $-350\text{mV}$  以下となり，ASTM による腐食判定基準では腐食あり，90%RH では鉄筋腐食の可能性は不確定，75%以下では，自然電位は $-200\text{mV}$  以上となり腐食なしと判定された。屋外暴露の条件では，中性化深さの違いによらず，鉄筋腐食の可能性は不確定と判定された。

かぶり厚さ 30mm では，中性化が鉄筋位置まで未到達の水準（凡例の BB-30-20）では，暴露環境の相対湿度が大きいほど自然電位は小さくなる傾向が認められたが，全ての相対湿度において概ね腐食なしと判定された。中性化が鉄筋位置まで到達している水準では，中性化深さの違いによらず，暴露環境の相対湿度が 100%RH では，自然電位は $-350\text{mV}$  以下となり，ASTM による腐食判定基準では腐食あり，90%RH では鉄筋腐食の可能性は不確定，75%以下では，自然電位は $-200\text{mV}$  以上となり腐食なしと判定された。屋外暴露の条件では，中性化深さの違いによらず，鉄筋腐食の可能性は不確定と判定された。

セメント種別 BB における、鉄筋位置の質量含水率と鉄筋の自然電位の関係を図 3.3-7 に示す。  
 なお、屋外暴露の条件では、湿潤期において測定した、鉄筋位置の質量含水率を用いた。

かぶり厚さ 20mm では、中性化深さが 32mm の場合は質量含水率が 4~4.5%以上で、ASTM による腐食判定基準では腐食あり、中性化深さが 40mm の場合は質量含水率が 3.5%以上で腐食ありと判定された。それ以下では、鉄筋腐食の可能性は不確定もしくは腐食なしと判定された。その境界となる質量含水率は、2.5~3%程度であったが、自然電位の変化の傾きが大きく、閾値は明確に示せなかった。

かぶり厚さ 30mm では、中性化深さ 42mm の場合は質量含水率が 4~4.5%以上で、ASTM による腐食判定基準では腐食あり、中性化深さ 50mm の場合は質量含水率が 4.5~5%以上で腐食ありと判定された。それ以下では、鉄筋腐食の可能性は不確定もしくは腐食なしと判定されたが、その境界となる閾値は明確に示せなかった。

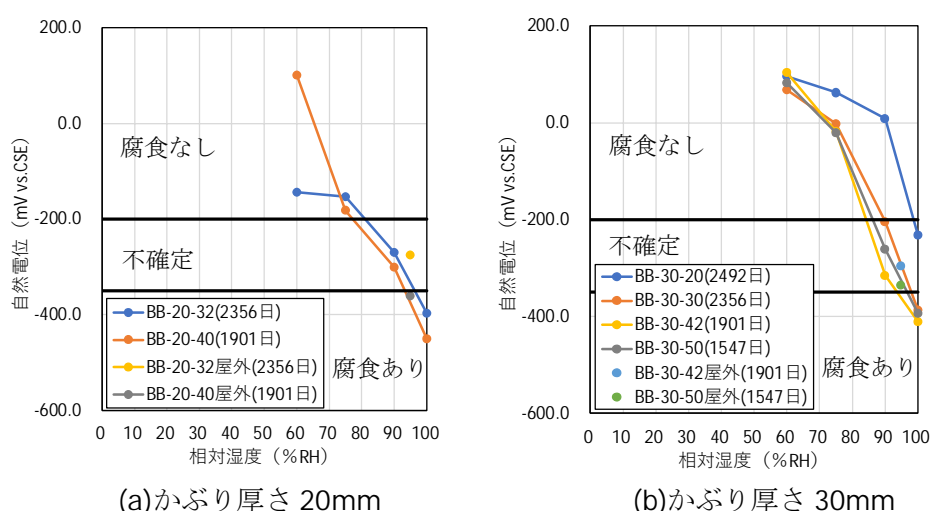


図 3.3-6 暴露環境の相対湿度と自然電位の関係 (セメント種別 BB)

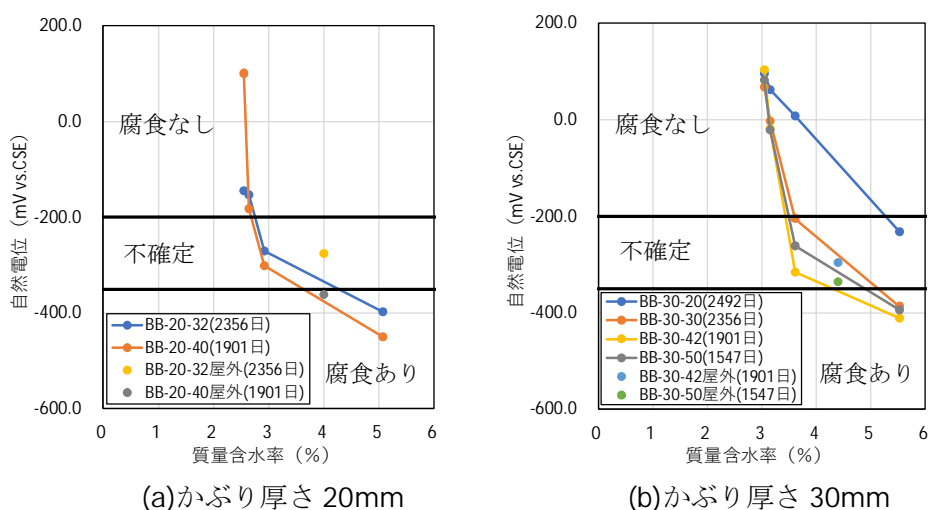


図 3.3-7 暴露環境の質量含水率と自然電位の関係 (セメント種別 BB)

セメント種別 N における、暴露環境の相対湿度と鉄筋の自然電位の関係を図 3.3-8 に示す。  
 かぶり厚さ 20mm では、中性化深さの違いによらず、暴露環境の相対湿度が 100%RH では、

自然電位は $-350\text{mV}$ 以下となり、ASTMによる腐食判定基準では腐食あり、90%RHでは鉄筋腐食の可能性は不確定、75%以下では、自然電位は $-200\text{mV}$ 以上となり腐食なしと判定された。屋外暴露の条件では、中性化深さの違いによらず、鉄筋腐食の可能性は不確定と判定された。

かぶり厚さ30mmでは、中性化が鉄筋位置まで未到達の水準（凡例のN-30-20）および中性化深さが30mmに到達した状態では、暴露環境の相対湿度が大きいほど自然電位は小さくなる傾向が認められたが、全ての相対湿度において、ASTMによる腐食判定基準では概ね腐食なしと判定された。中性化深さが42mm、50mmとかぶり厚さよりも奥まで進行した状態では、中性化深さの違いによらず、暴露環境の相対湿度が100%RHでは、自然電位は $-350\text{mV}$ 以下となり腐食あり、90%RH以下では、自然電位は $-200\text{mV}$ 以上となり腐食なしと判定された。屋外暴露の条件では、中性化深さの違いによらず、鉄筋腐食の可能性は不確定と判定された。

セメント種別Nにおける、鉄筋位置の質量含水率と鉄筋の自然電位の関係を図3.3-9に示す。かぶり厚さ20mmでは、中性化深さの違いによらず、質量含水率が3.5%以上で、ASTMによる腐食判定基準では腐食ありと判定された。それ以下では、鉄筋腐食の可能性は不確定もしくは腐食なしと判定された。その境界となる質量含水率は、2.5~3%程度であったが、自然電位の変化の傾きが大きく、閾値としては明確に示すことはできなかった。

かぶり厚さ30mmでは、中性化深さの違いによらず、質量含水率が4.5%以上で、ASTMによる腐食判定基準では腐食ありと判定された。それ以下では、鉄筋腐食の可能性は不確定もしくは腐食なしと判定されたが、その境界となる質量含水率の閾値は、明確に示すことはできなかった。

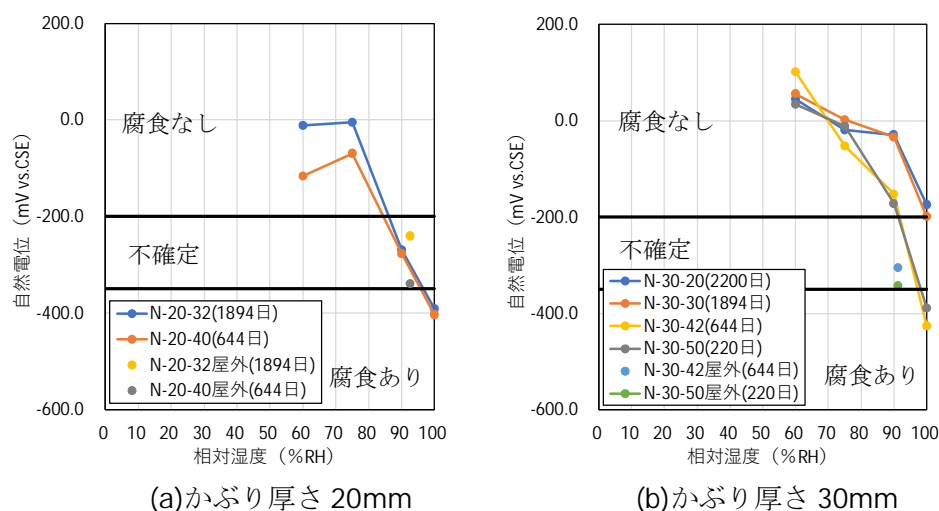


図 3.3-8 暴露環境の相対湿度と自然電位の関係（セメント種別 N）



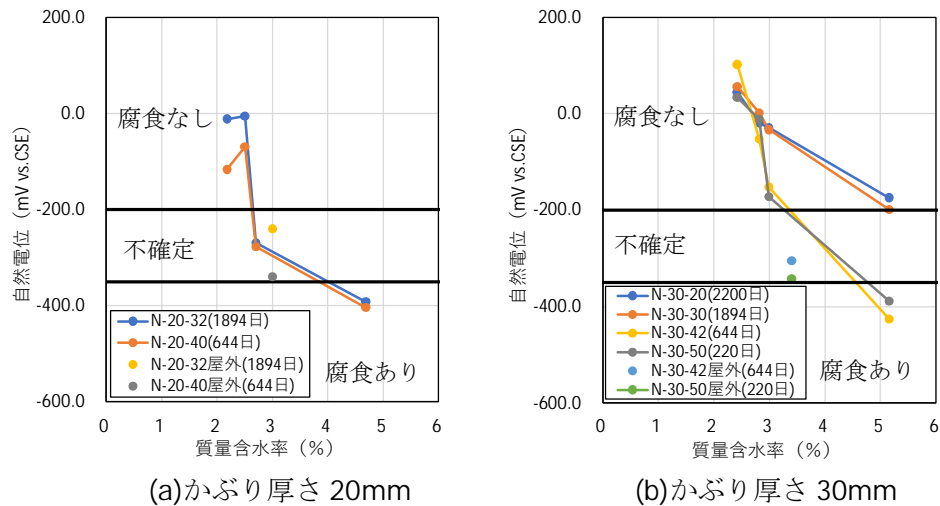


図 3.3-9 暴露環境の質量含水率と自然電位の関係 (セメント種別 N)

かぶり厚さに対する中性化深さと最大となる暴露試験の材齢における自然電位の関係を図 3.3-10 (セメント種別 BB), 図 3.3-11 (セメント種別 N) に示す。

セメント種別 BB では、中性化が鉄筋位置まで未到達の水準(凡例の BB-30-20)を除けば、かぶり厚さ 20mm, 30mm とともに、かぶり厚さに対する中性化深さの違いによらず、自然電位から評価される ASTM による腐食判定結果はほぼ同等であった。このことから、中性化深さの違いがコンクリートの含水状態と自然電位の関係におよぼす影響は小さく、中性化後の鉄筋腐食速度には暴露環境の相対湿度が大きく寄与するものと考えられる。

セメント種別 N では、かぶり厚さが 20mm では、かぶり厚さに対する中性化深さの違いによらず、自然電位から評価される ASTM による腐食判定結果はほぼ同等であった。一方、かぶり厚さが 30mm では、暴露環境の相対湿度が 100%RH では、中性化が鉄筋位置まで未到達の水準(凡例の N-30-20) および中性化深さが 30mm に到達した状態では腐食なし、中性化深さが 42mm, 50mm とかぶり厚さよりも奥まで進行した状態では腐食ありと判定された。暴露環境の相対湿度が 90%RH 以下では、かぶり厚さに対する中性化深さの違いによらず、腐食なしと判定された。このことから、かぶり厚さが 30mm 以上であれば、中性化深さが鉄筋位置に到達した状態では、高い含水状態になっても、鉄筋腐食は進行しにくいと考えられる。一方、中性化がかぶり厚さよりも奥まで進行した状態では、中性化後の鉄筋腐食速度は、かぶり厚さに対する中性化深さの違いよりも、暴露環境の相対湿度が大きく寄与するものと考えられる。

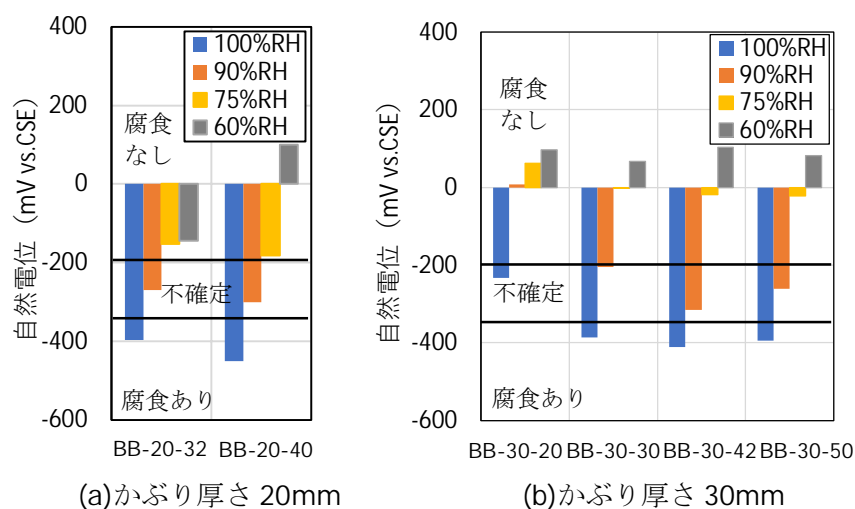


図 3.3-10 中性化深さと自然電位の関係 (セメント種別 BB)

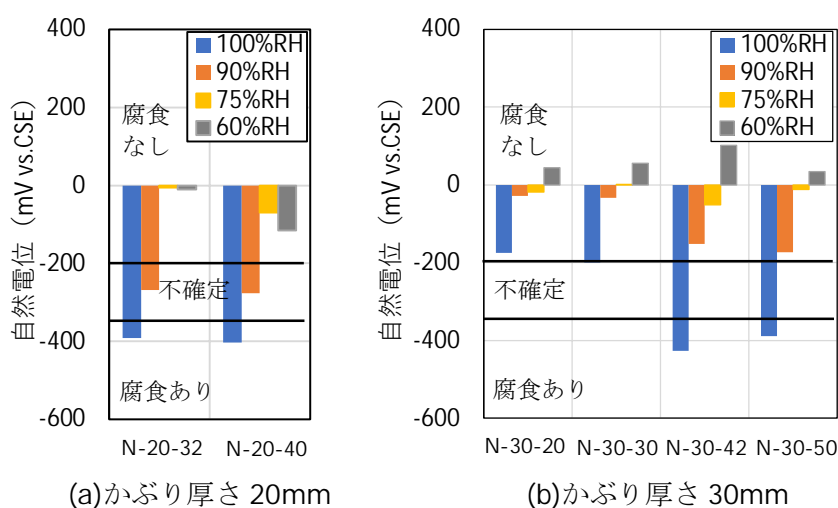


図 3.3-11 中性化深さと自然電位の関係 (セメント種別 N)

#### (4) 腐食電流密度による鉄筋の腐食速度

セメント種別 BB における，暴露環境の相対湿度と鉄筋の腐食電流密度の関係を図 3.3-12 に示す。図中には，RILEM の鉄筋腐食速度の判定基準を併記した<sup>[3-15]</sup>。なお，調査条件やかぶり厚さによって，中性化後の暴露試験の日数が異なるため，それぞれ最大となる暴露試験の材齢（凡例の末尾に示す）における値を示した。

かぶり厚さ 20mm では，中性化深さの違いによらず，暴露環境の相対湿度が 100%RH では，腐食電流密度が  $0.3\mu\text{A}/\text{cm}^2$  程度となり小～中程度の腐食速度と判定された。一方，75%以下では，腐食電流密度が  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり不働状態と判定された。屋外暴露の条件では，中性化深さの違いによらず，暴露環境の相対湿度が 100% RH と 90%RH の概ね中間に相当する位置にプロットされた。

かぶり厚さが 30mm では，中性化が鉄筋位置まで未到達の水準（凡例の BB-30-20）を含めて，中性化深さの違いによらず，腐食電流密度は  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり不働状態と判定された。セメント種別 BB における，鉄筋位置の質量含水率と鉄筋の腐食電流密度の関係を図 3.3-13 に示す。



かぶり厚さ 20mm では、中性化深さの違いによらず、質量含水率が 3.5%以上で小～中程度の腐食速度と判定された。質量含水率が 3.5%以下およびかぶり厚さ 30mm では、中性化深さの違いによらず、全て不働態状態と判定された。

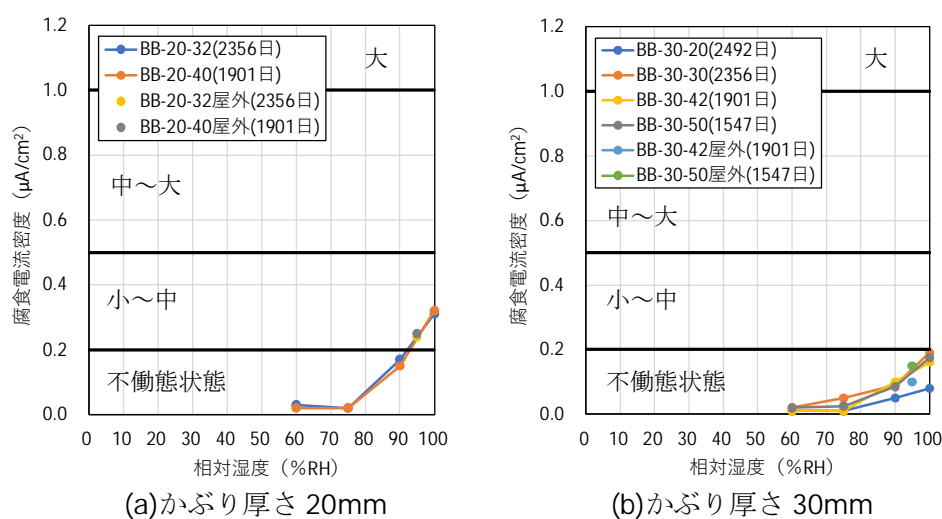


図 3.3-12 暴露環境の相対湿度と腐食電流密度の関係（セメント種別 BB）

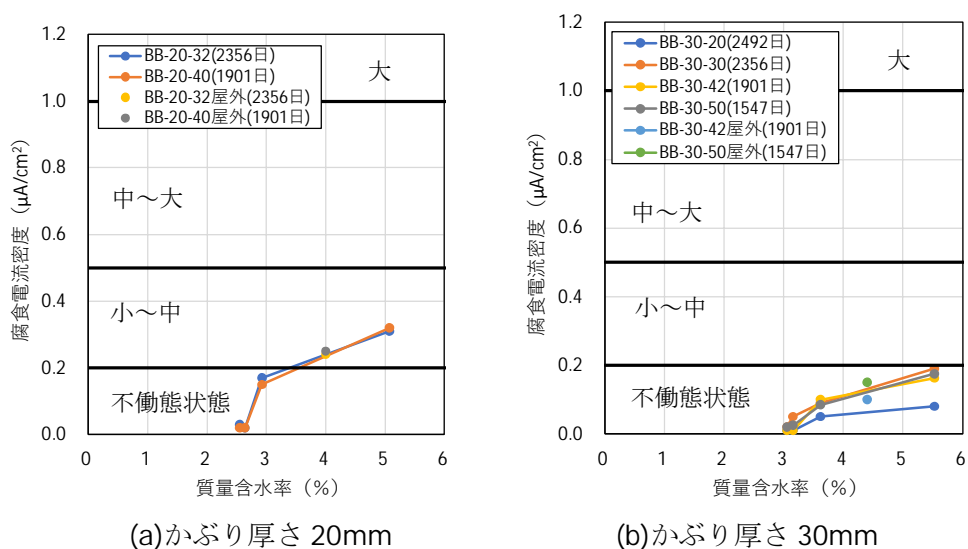


図 3.3-13 暴露環境の質量含水率と腐食電流密度の関係（セメント種別 BB）

セメント種別 N における、暴露環境の相対湿度と鉄筋の腐食電流密度の関係を図 3.3-14 に示す。セメント種別 N では、かぶり厚さ 20mm, 30mm とともに、中性化が鉄筋位置まで未到達の水準（凡例の N-30-20）を含めて、中性化深さの違いによらず、腐食電流密度は  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり不働態状態と判定された。

セメント種別 N における、鉄筋位置の質量含水率と鉄筋の腐食電流密度の関係を図 3.3-15 に示す。セメント種別 N では、かぶり厚さ 20mm, 30mm とともに、中性化深さの違いによらず、全ての質量含水率において不働態状態と判定された。

暴露環境の相対湿度と鉄筋腐食速度の関係について、既往の研究との比較を行う。清原ら<sup>[3-22]</sup>は、実構造物の調査結果を分析し、コンクリート内部の相対湿度と鉄筋腐食グレードの関係を整

理した。その結果、鉄筋腐食の反応場となる水の量と外部からの酸素供給の両方の影響を受け、湿度条件が 80%RH で鉄筋腐食速度が最も大きくなることを示した。また、3.2 節においても、かぶり厚さが 10mm の鉄筋コンクリート試験体を用いて、中性化後の鉄筋腐食速度を測定した結果、暴露環境の相対湿度が 90%RH で腐食電流密度が最大となることを示した。

Cheng ら<sup>[3-20]</sup>は、かぶり厚さが 20, 30, 40mm のみがき鋼材を埋設したモルタル試験体を用いて、中性化後の鉄筋腐食速度を測定した。その結果、かぶり厚さが 20mm で暴露環境の相対湿度が 97%RH では、腐食電流密度が  $0.4\mu\text{A}/\text{cm}^2$  と若干大きくなったが、それ以外では全て  $0.1\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となることを示した。Cheng らの結果は、本報における実験結果と概ね同様であり、かぶり厚さが 20mm 以上であれば、中性化後においても鉄筋腐食速度は大きくならないものと考えられる。

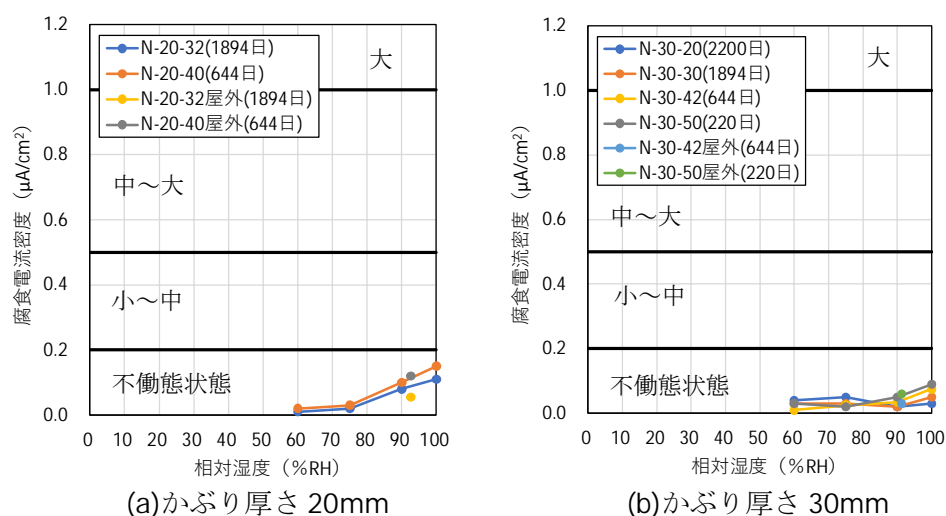


図 3.3-14 暴露環境の相対湿度と腐食電流密度の関係（セメント種別 BB）

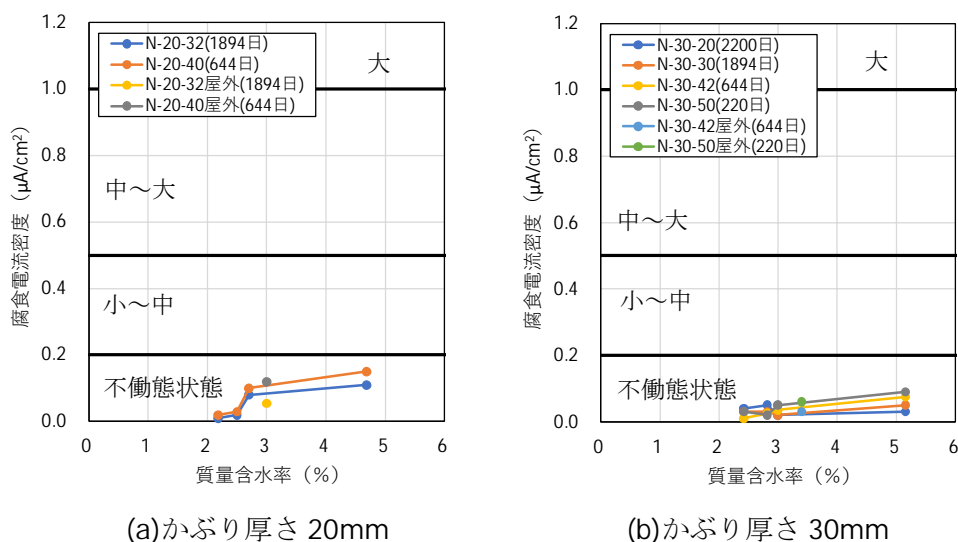


図 3.3-15 暴露環境の質量含水率と腐食電流密度の関係（セメント種別 N）

かぶり厚さに対する中性化深さと最大となる暴露試験の材齢における腐食電流密度の関係を図 3.3-16（セメント種別 BB）、図 3.3-17（セメント種別 N）に示す。

セメント種別 BB では、かぶり厚さが 20mm では、暴露環境の相対湿度が 100%RH で、腐食電流密度から評価される RILEM による鉄筋腐食速度の判定結果は小～中となったが、かぶり厚さに対する中性化深さの違いによる影響は認められなかった。暴露環境の相対湿度が 90%RH 以下、およびかぶり厚さ 30mm では、RILEM による鉄筋腐食速度の判定結果は全て不働態状態となった。

セメント種別 N では、かぶり厚さ 20mm, 30mm とともに、中性化深さの違いによらず、RILEM による鉄筋腐食速度の判定結果は全て不働態状態となった。

以上より、中性化深さの違いがコンクリートの含水状態と鉄筋腐食速度の関係におよぼす影響は小さく、中性化後の鉄筋腐食速度には暴露環境の相対湿度が大きく寄与するものと考えられる。このことから、中性化深さが鉄筋のかぶり厚さに到達して以降は、コンクリートの含水状態が変わらなければ、かぶり厚さを超えて中性化が進行しても鉄筋腐食速度は大きく変化せず、中性化後の鉄筋腐食速度はコンクリートの含水状態により一律に評価できると考えられる。

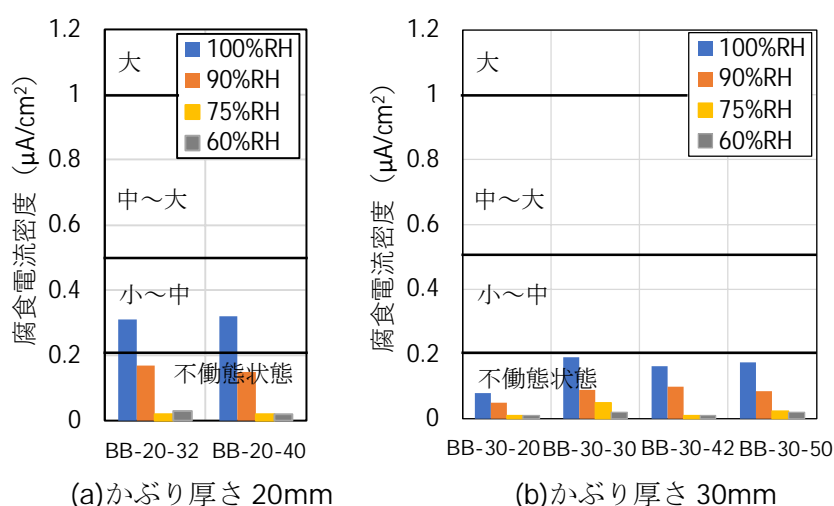


図 3.3-16 中性化深さと腐食電流密度の関係 (セメント種別 BB)

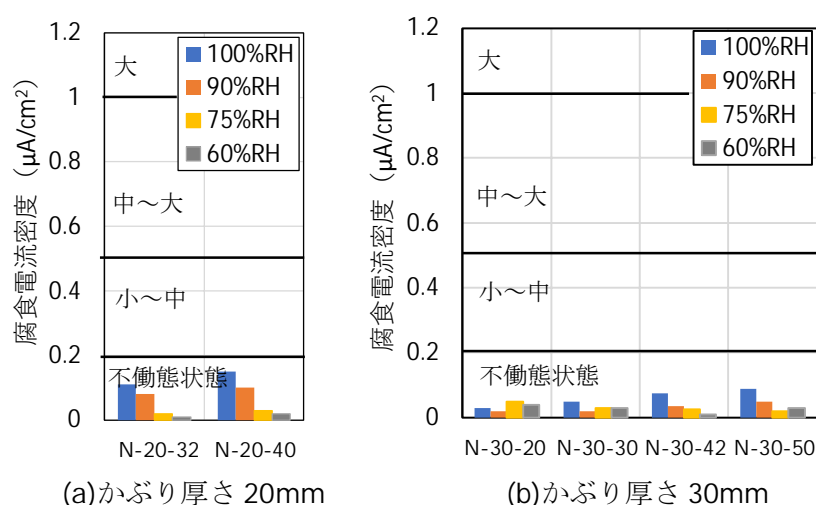


図 3.3-17 中性化深さと腐食電流密度の関係 (セメント種別 N)

### 3.3.6 3.3 節の結論

本節では、中性化残りをパラメータとして、中性化残りが、+10mm, ±0mm, -12mm (埋設した鉄筋の下端), -20mm まで中性化させた後に、異なる相対湿度で暴露試験を行い、鉄筋腐食状況および鉄筋腐食速度を測定した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 中性化残りが、コンクリートの含水状態と自然電位および腐食電流密度の関係におよぼす影響は小さく、中性化後の自然電位および腐食電流密度には、暴露環境の相対湿度が大きく影響するものと考えられる。
- (2) 中性化深さが鉄筋のかぶり厚さに到達して以降は、コンクリートの含水状態が変わらなければ、かぶり厚さを超えて中性化が進行しても腐食電流密度は大きく変化しなかった。このことから、中性化後の腐食電流密度は、コンクリートの含水状態により一律に評価できると考えられる。

### 3.4 ひび割れ部における鉄筋腐食速度

#### 3.4.1 3.4 節の概要

前節では、鉄筋位置まであらかじめ促進中性化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。

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<sup>例えば[3-3]</sup>も多いが、既存 RC 造建築物の耐久性調査結果によれば、含水率が低い部位では、ひび割れや打継ぎ部であっても鉄筋腐食は生じないことが確認されている[3-4]。

そこで本節では、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耐久性評価を目的として、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鉄筋位置の水分状態と鉄筋腐食の関係を実験的に検討した。

### 3.4.2 実験計画

実験計画の概要を表 3.4-1 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  $\phi 12$  mm 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 3.4-1 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 3.4-1 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 $\phi 12$ mm (SS 400) (位置は図 3.4-2 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 <sub>2</sub> 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 3.4-2 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

### 3.4.3 実験方法および測定方法

鉄筋コンクリート試験体（模擬ひび割れあり）の詳細を図 3.4-1、試験体の作製状況を写真 3.4-1 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  $\phi 12\text{mm}$  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  $0.4\text{mm}$  のスリット鋼板を所定の位置に差し込み、凝結が終結した約 6 時間後に引き抜いて導入した。なお、硬化後の表面ひび割れ幅は  $0.4\sim 0.45\text{mm}$  程度であった。

コンクリートの打込みおよび初期養生は  $20^{\circ}\text{C}$  で行い、材齢 5 日までは封かん養生とした。その後、材齢 14 日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。

なお、鉄筋を埋設した鉄筋コンクリート試験体と同時に、中性化深さと含水率をモニタリングするための試験体を併せて作製した。中性化・含水率モニタリング用の試験体を写真 3.4-2 に示す。

中性化・含水率モニタリング用の試験体は、測定材齢ごとに試験体端部から等間隔に試験体を切断する必要があるため、無筋とした。また、ひび割れの直下における中性化深さが測定できるように、試験体の長手（ $400\text{mm}$ ）方向に、表面からのひび割れ深さ（鉄筋のかぶり厚さに相当）を合わせて、連続した模擬ひび割れを構成している。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。

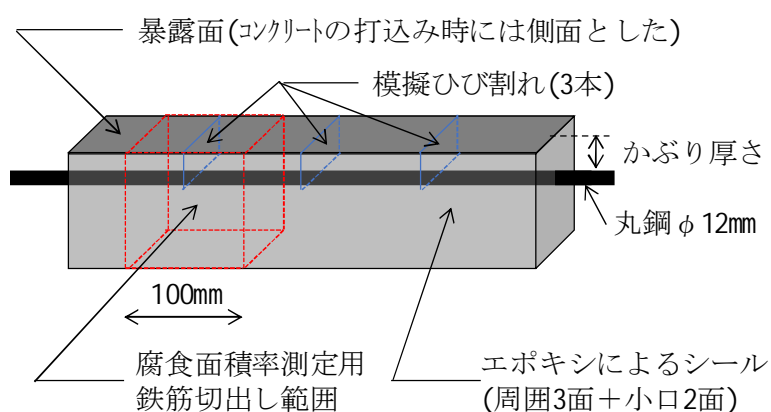


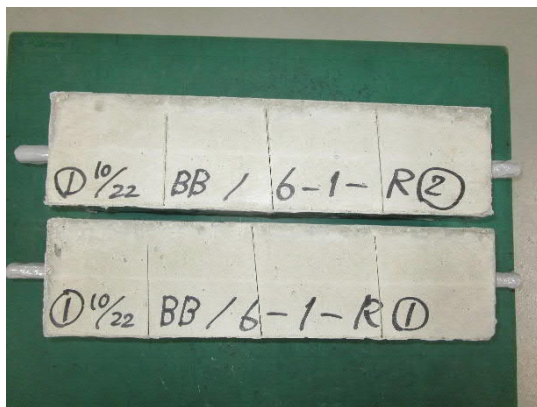
図 3.4-1 鉄筋コンクリート試験体（ひび割れあり）の詳細



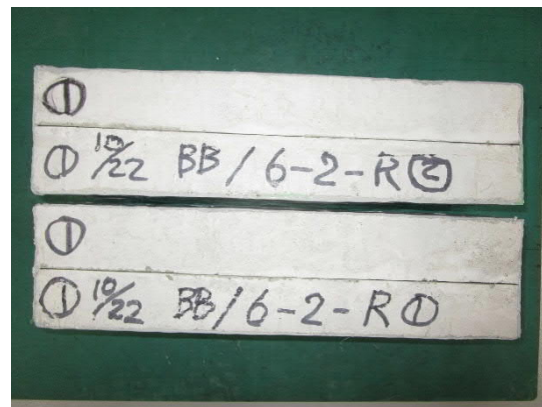


(模擬ひび割れ導入：含水率・中性化測定) (模擬ひび割れ導入：鉄筋腐食測定)

写真 3.4-1 試験体の作製状況



(鉄筋腐食測定試験体)



(中性化・含水率用試験体)

写真 3.4-2 試験体種類

促進中性化試験は、JISA 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠した。JISA 1153では、試験体の前養生として、脱型後より 4 週間の 20℃水中または相対湿度 95%以上の養生、その後 4 週間の 20℃、60%R.H.の乾燥養生を行った上で、促進中性化を開始するとしている。しかしながら、本実験においては、鉄筋位置まで中性化した後での、コンクリートの含水率と鉄筋腐食性状の関係の検討を目的としており、十分な養生期間をとることでコンクリートが緻密化して中性化の進行が遅くなることに懸念があった。そのため、JISA 1153 の前養生方法に従わず、実構造物のかぶり部分のコンクリートを模擬した養生条件とし、コンクリートの打込み後より、5 日間の封かん養生（せき板存置）、その後、供試体側面のエポキシシーリングを行い（9 日間）、速やかに促進中性化を開始とした。なお、促進中性化条件は JISA 1153 に準拠しており、温度は  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度は  $60 \pm 5\%$ 、炭酸ガス濃度は  $5 \pm 0.2\%$  とした。

鉄筋のかぶり厚さおよび目標とするコンクリートの中性化深さの設定値を図 3.4-2 に示す。

鉄筋のかぶり厚さは、模擬ひび割れなしのものでは 20mm、模擬ひび割れありのものでは 30mm とした。目標とする中性化深さは、模擬ひび割れなしのものでは、全断面にわたって鉄筋下端の 32mm、模擬ひび割れありのものでは、ひび割れ部における鉄筋下端の 42mm と設定した。



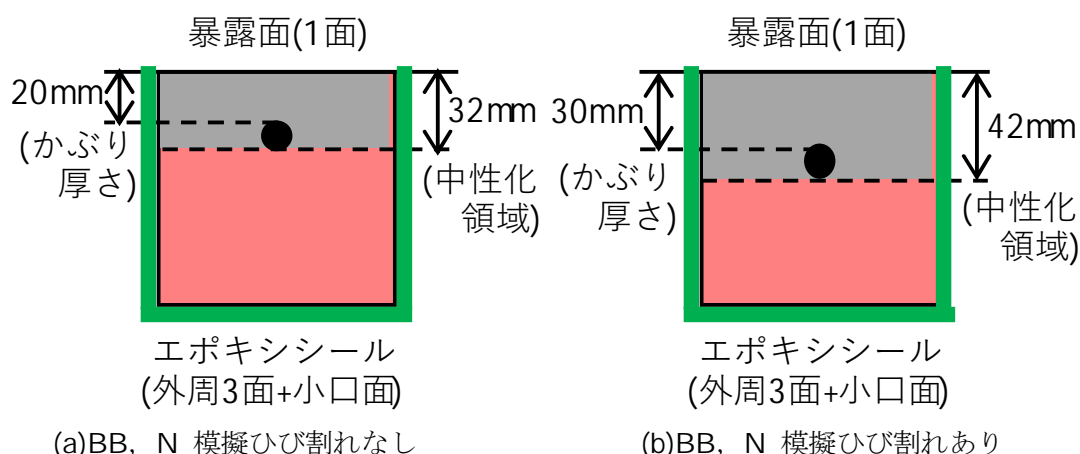


図 3.4-2 鉄筋のかぶり厚さおよび目標とするコンクリートの中性化深さの設定値

目標とする中性化深さに到達した試験体は、相対湿度 100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH および屋外暴露の 5 水準の暴露環境に置き、鉄筋腐食速度の経時変化を測定した。

相対湿度 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、相対湿度は $\pm 3\%$ RH, 温度は  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  で管理した。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。屋外暴露の条件は、東京都内の屋根のないアスファルト上に、暴露面を側面として試験体を静置した。全ての暴露条件において、酸素濃度は大気中と同等の 21%程度であることを酸素濃度計により確認した。

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  $105^{\circ}\text{C}$  乾燥質量に基づく質量法により質量含水率を算定した。

促進中性化試験後の暴露試験では、鉄筋腐食速度の測定を目的として、1～2 ヶ月の測定間隔で分極抵抗を測定した。分極抵抗の測定には、交流インピーダンス法によるポータブル型分極抵抗測定装置を用いた。測定方法は、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。また、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。ここに、腐食電流密度は、分極抵抗の逆数に比例定数である K 値を掛け合わせた値であり、電気化学的に鉄筋が溶け出す速度を示すもので、一般に鉄筋腐食速度と読み替えることができる。

一般に、鉄筋腐食度を評価する指標として、鉄筋腐食量および鉄筋腐食面積率が用いられる。

腐食面積率は、図 3.4-1 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、表面のセメントペーストを除去した上で、鉄筋の円周方向に透明フィルムを巻き付け、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、式 (3.4-1) により腐食面積率を定義した。なお、模擬ひび割れあり

の水準では、模擬ひび割れを中心に水平距離が±30mm の範囲に対する割合について、模擬ひび割れ近傍の腐食面積率として併せて算定した。

$$S = S_{\text{corr}} / S_{\text{surface}} \times 100 \quad (3.4-1)$$

ここに、S：腐食面積率（%）

$S_{\text{corr}}$ ：鋼材の腐食面積(mm<sup>2</sup>)

$S_{\text{surface}}$ ：鋼材表面積(mm<sup>2</sup>)

腐食率は、腐食面積率の測定後、取り出した鉄筋をクエン酸二アンモニウムに浸漬し、腐食生成物であるさびを除去して、式（3.4-2）により腐食率を算定した。

$$\text{腐食率 (\%)} = (Ca - Cc) / Cb \times 100 \quad (3.4-2)$$

ここに、Cb：腐食前の鉄筋質量

Cc：さび除去後の鉄筋質量

Ca：腐食後の鉄筋質量

### 3.4.4 試験体の作製およびフレッシュ性状

コンクリートの使用材料を表 3.4-2 に示す。

セメント種別は、高炉セメント B 種 (BB) および普通ポルトランドセメント (N) の 2 種類とした。本報告の範囲では、水セメント比は 60%とした。単位水量は BB では 182kg/m<sup>3</sup>, N では 180kg/m<sup>3</sup>とし、化学混和剤は AE 減水剤を使用した。

表3.4-2 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 <sup>3</sup> )
	N	普通ポルトランドセメント (密度3.14g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	S	木更津産陸砂 (表乾密度2.61g/cm <sup>3</sup> , 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 <sup>3</sup> , 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

コンクリートの調合およびフレッシュ時の基礎性状を表 3.4-3 に示す。

コンクリートのフレッシュ性状は、スランプ (18±2.5cm), 空気量 (4.5±1.5%) と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 3.4-4 に示す。

材齢 28 日における標準養生の圧縮強度は BB では 30.5 N/mm<sup>2</sup>, N では 37.7 N/mm<sup>2</sup> となった。本実験では、目標とする中性化深さの設定値に到達するまでの、促進中性化試験の期間が 152 ~ 770 日と異なっている。そこで、試験体のかぶりコンクリートの品質を確認するため、気中養生した供試体の圧縮強度を確認した。気中養生の方法は、材齢 5 日で脱型し、脱型以降は 20℃, 60%RH の環境下に暴露した。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 234 日, N では 770 日) においても、圧縮強度の増進は 3N/mm<sup>2</sup> 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。

表3.4-3 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

セメント 種別	W/C (%)	s/a (%)	調合					フレッシュ性状			
			単位量(kg/m <sup>3</sup> )					スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (℃)	単位容積 質量 (kg/m <sup>3</sup> )
			W	BB	N	S	G				
BB	60	49.5	182	303	—	871	906	19.0	4.2	21	2291
N	60	49.5	180	—	300	875	907	18.5	5.2	22	2277

表 3.4-4 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 <sup>2</sup> )				
	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

### 3.4.5 実験結果および考察

#### (1) 促進中性化深さ

促進中性化試験結果および暴露試験期間を表 3.4-5 に示す。

セメント種別および模擬ひび割れの有無により、目標とする中性化深さに到達するまでの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。

表3.4-5 促進中性化試験結果および暴露試験期間

セメント 種別	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

#### (2) 含水率

表 3.4-5 に示した暴露試験期間後に、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 3.4-3 に示す。

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。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 3.4-3 に示した含水率分布のうち、鉄筋の埋設位置（中心位置）の含水率を用いることとする。

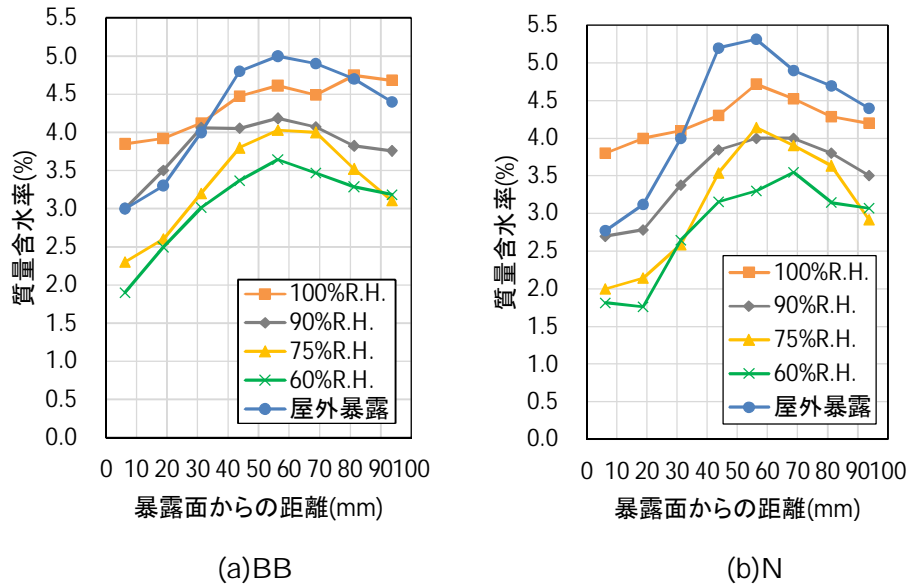


図 3.4-3 暴露試験期間後の含水率分布（質量法）

### (3) 鉄筋腐食速度

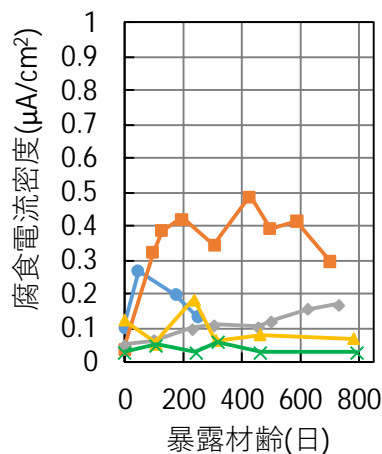
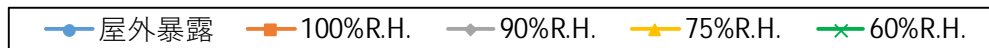
促進中性化試験後の暴露試験における腐食電流密度の経時変化を図 3.4-4 (BB), 図 3.4-5 (N) に示す。

RIREM では腐食判定基準として、腐食電流密度が  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下では不動態状態と同等、 $0.2 \sim 0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$  では低い腐食速度、 $0.5 \sim 1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$  では中程度の腐食速度、 $1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以上では高い腐食速度と分類している。

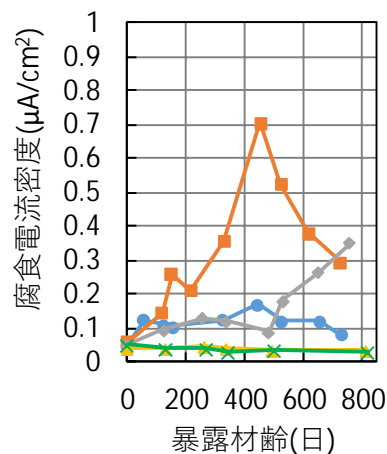
BB では、相対湿度 100%RH, 90%RH では、ひび割れの有無に関わらず、腐食電流密度は相対的に大きくなり、低い腐食速度 ( $0.2 \sim 0.5\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) から中程度の腐食速度 ( $0.5 \sim 1.0\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) となった。一方、相対湿度 75%RH, 60%RH および屋外暴露では、模擬ひび割れの有無に関わらず、腐食電流密度は小さく、不動態状態と同等 ( $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下) と評価された。

N では、相対湿度 100%RH において、他の暴露条件と比較して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 ( $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下) 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。

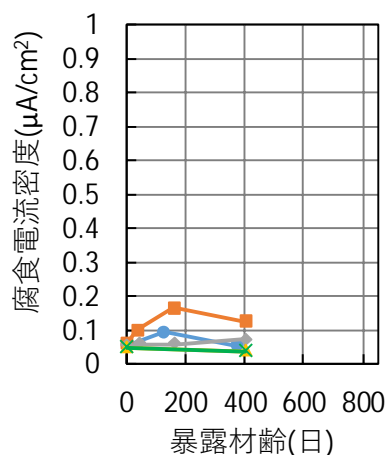
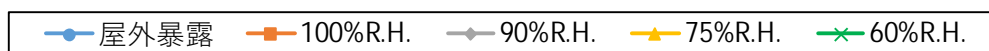


(a)BB 模擬ひび割れなし

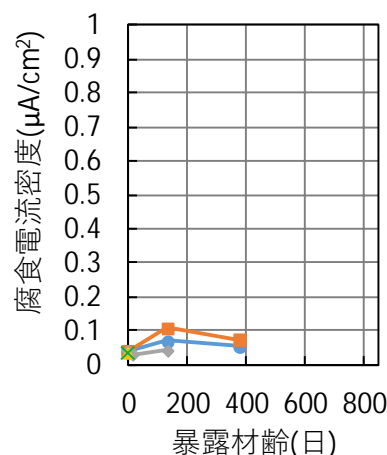


(b)BB 模擬ひび割れあり

図 3.4-4 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 3.4-5 暴露期間の腐食電流密度の経時変化(N)

鉄筋位置の質量含水率と腐食電流密度の関係を図 3.4-6 (BB), 図 3.4-7 (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 ( $0.2 \sim 0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以上) 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<sup>[3-22]</sup>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。

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 ( $0.2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下) と評価された。

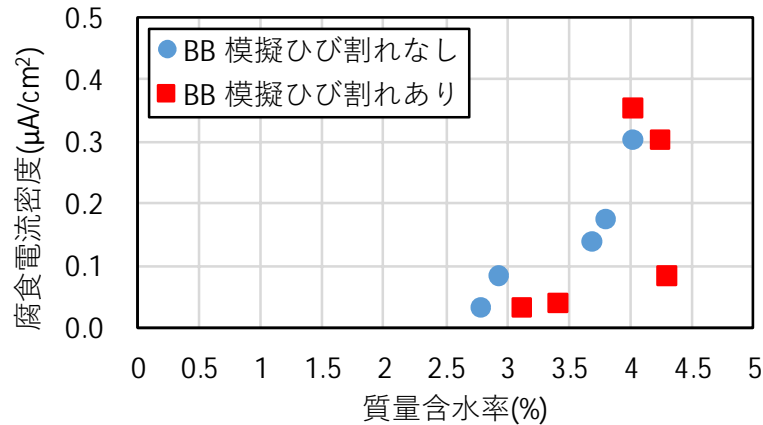


図 3.4-6 鉄筋位置の質量含水率と腐食電流密度の関係 (BB)

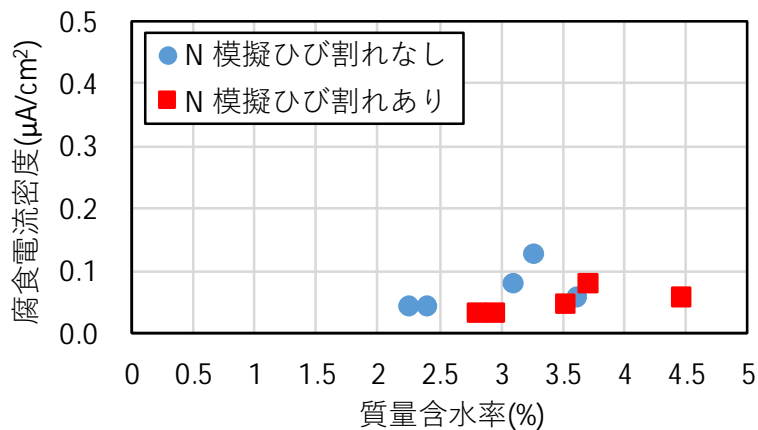


図 3.4-7 鉄筋位置の質量含水率と腐食電流密度の関係 (N)

#### (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 3.4-3 (BB), 写真 3.4-4 (N) 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たものである。

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 3.4-8, 図 3.4-9 (BB), 図 3.4-10, 図 3.4-11 (N) に示す。なお、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の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)の測定範囲についても図中に併せて示した。

相対湿度と腐食面積率の関係を図 3.4-12 (BB), 図 3.4-13 (N) に示す。

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、腐食電流密度は測定時点の瞬間的な鉄筋腐食速度を評価するものであるが、屋外暴露のように乾湿繰返しを受ける環境下では、測定時の含水状態に敏感に反応しやすく、特定時の測定値での評価が難しいものと考えられた。特に、模擬ひび割れありの場合は、降雨時に鉄筋位置まで直接水分供給が



なされ、腐食速度が大きくなるため、腐食電流密度の評価の際には、測定時の含水状態などを十分に考慮して判断する必要がある。

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%と大きく鉄筋の打込み下面側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。また、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。JASS5 では、屋内側では、中性化がかぶり厚さを超えて 20mm 奥まで進行した時点で腐食が開始されるとしており、本試験結果も同様の傾向であることが確認された。また、鉄筋腐食を考慮した寿命評価の観点からは、乾燥環境下ではひび割れの有無の影響は小さいものと考えられた。

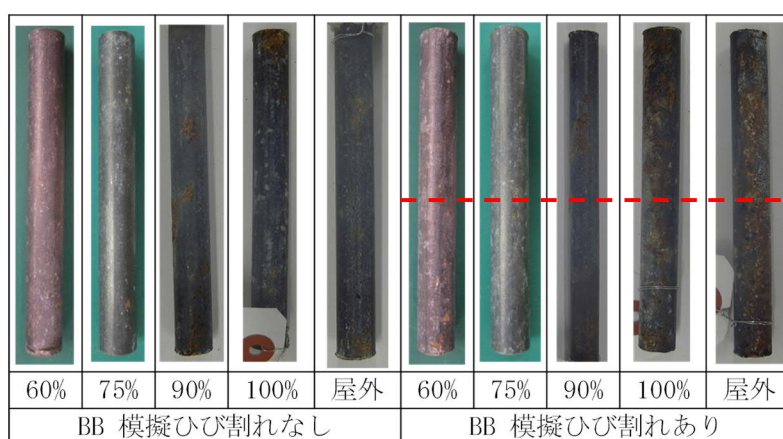


写真 3.4-3 暴露試験期間終了時の鉄筋腐食状況（BB／模擬ひび割れなし，あり）

※点線は模擬ひび割れを導入した位置

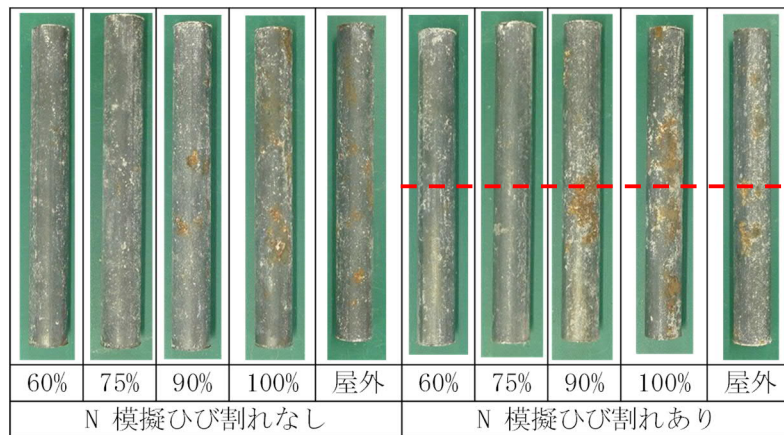


写真 3.4-4 暴露試験期間終了時の鉄筋腐食状況（N／模擬ひび割れなし，あり）  
※点線は模擬ひび割れを導入した位置

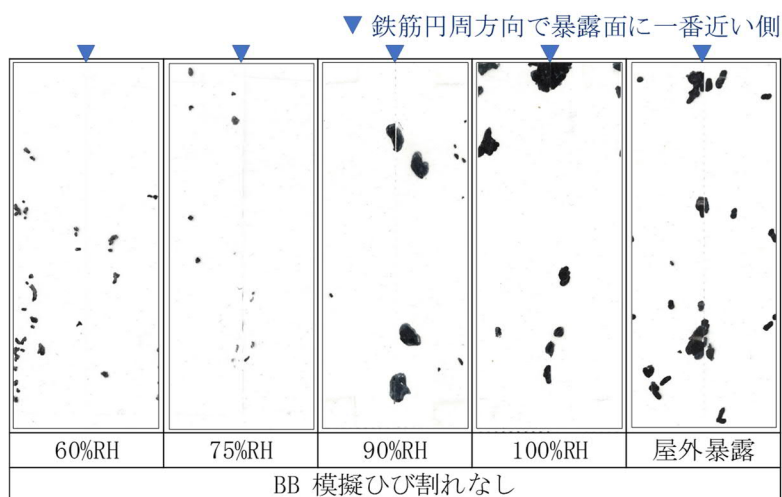


図 3.4-8 暴露試験終了時の鉄筋表面の鉄筋腐食箇所のトレース結果（BB／模擬ひび割れなし）

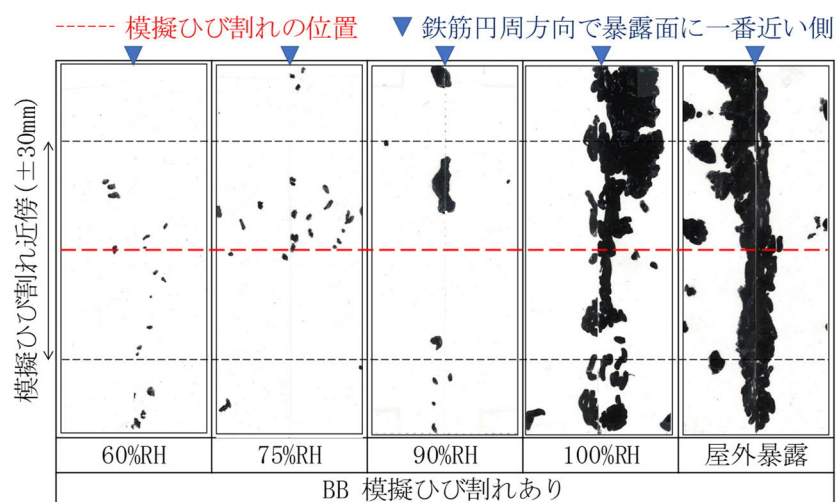


図 3.4-9 暴露試験終了時の鉄筋表面の鉄筋腐食箇所のトレース結果（BB／模擬ひび割れあり）

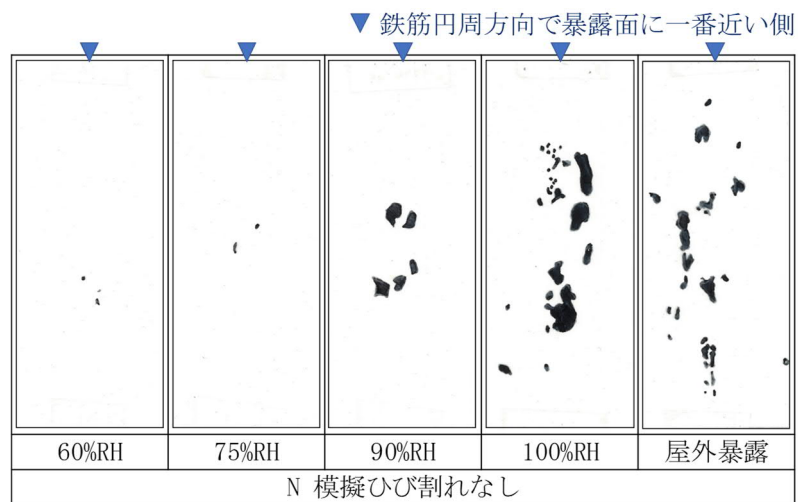


図 3.4-10 暴露試験終了時の鉄筋表面の鉄筋腐食箇所のトレース結果 (N／模擬ひび割れなし)

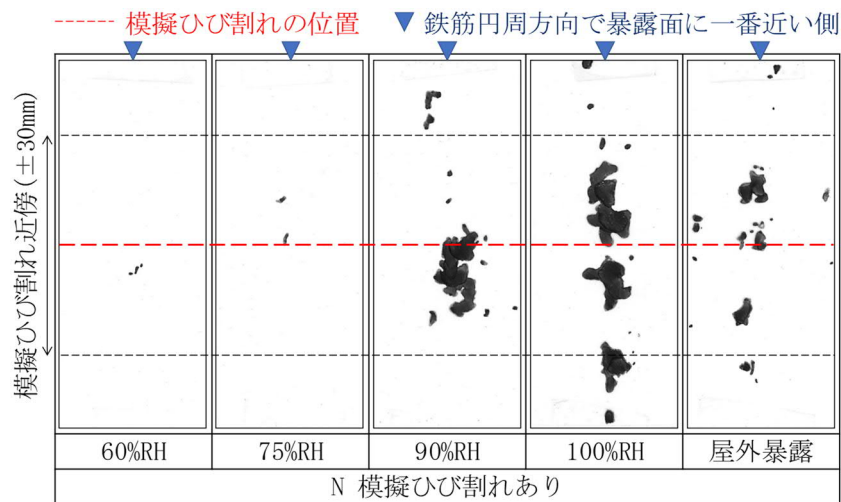


図 3.4-11 暴露試験終了時の鉄筋表面の鉄筋腐食箇所のトレース結果 (N／模擬ひび割れあり)

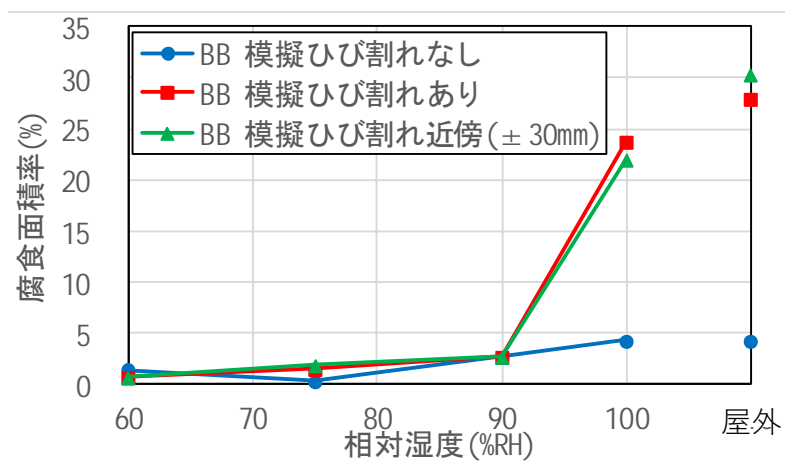


図 3.4-12 相対湿度と腐食面積率の関係(BB)

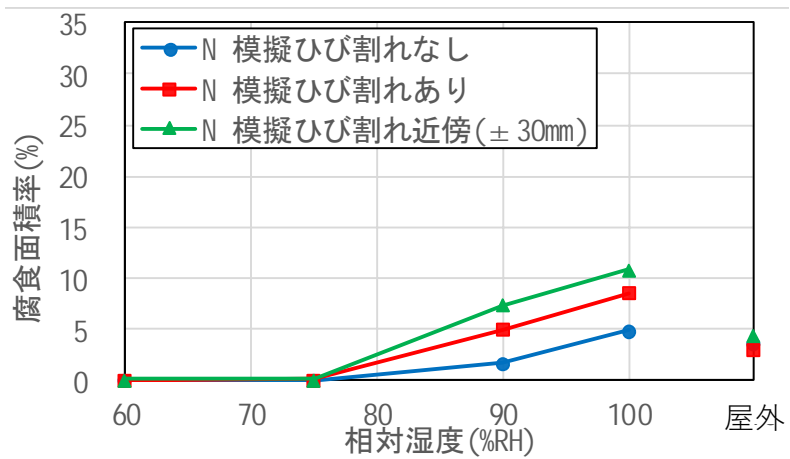


図 3.4-13 相対湿度と腐食面積率の関係(N)

#### 3.4.6 3.4 節の結論

本節では、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耐久性評価を目的として、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鉄筋位置の水分状態と鉄筋腐食の関係を実験的に検討した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 模擬ひび割れの有無に関わらず、中性化後の鉄筋腐食速度には、鉄筋位置におけるコンクリートの含水率の影響が大きい。
- (2) 中性化後の暴露条件が、相対湿度 90%RH 以上もしくは屋外暴露の場合、模擬ひび割れ部における鉄筋腐食速度が大きくなる可能性がある。この理由として、ひび割れを通じて鉄筋位置まで直接水分が供給され、鉄筋位置におけるコンクリートの含水率が高くなることが考えられる。
- (3) 中性化後の暴露条件が、相対湿度 75%以下の場合、模擬ひび割れの有無に関わらず、鉄筋腐食は認められなかった。屋内などの乾燥環境においては、鉄筋腐食を考慮した寿命評価の適用に際して、ひび割れの有無はほとんど影響しないと考えられる。

### 3.5 混和材を高含有したコンクリートの鉄筋腐食速度

#### 3.5.1 3.5 節の概要

本研究は、既存の RC 造建築物を対象とした、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の構築を目的としたものである。

一方、近年、利活用が推進されている混和材を高含有した環境配慮型コンクリートを使用した新設設計の場面においても、同様の評価手法が有用となる可能性がある。これらのコンクリートは、セメントの大部分を高炉スラグ微粉末などの副産物に置換しているため、一般的なコンクリートと比較して中性化速度が大きくなる<sup>[3-23]</sup>。そのため、現行の中性化の進行に基づいた耐久設計の枠組みでは、利用が進みにくいという懸念があった。中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法を取り入れ、中性化の進行を許容できるようになれば、より合理的な評価ができるようになる。

本節では、セメント重量の 75%を高炉スラグ微粉末に置換した混和材を高含有したコンクリートについて、鉄筋のかぶり厚さを 30mm として、かぶり厚さに対して $\pm 0\text{mm}$ 、 $+12\text{mm}$ （埋設した鉄筋の下端）、 $+20\text{mm}$  まで促進中性化させた後、異なる相対湿度で長期間の暴露試験を行い、中性化後の自然電位と腐食電流密度を測定した。

### 3.5.2 実験計画

実験条件を表 3.5-1 に示す。

コンクリートの調合条件は、混和材を高含有したコンクリート（記号：CC）としたが、比較として普通ポルトランドセメント（記号：N）と高炉セメント B 種（記号：BB）を用いた調合も示した。なお、後者の 2 水準の実験結果については、3.2 節で既に報告している。なお、混和材を高含有したコンクリートは、高炉セメント B 種と同一強度となるよう調合し、水結合材比は 50%とした。

中性化深さの目標値は、30mm、42mm（埋設した鉄筋の下端）、50mm の 3 水準とした。鉄筋試験体のかぶり厚さと中性化深さの設定値を図 3.5-1 に示す。なお、試験体記号は、『コンクリート調合－かぶり厚さ－中性化深さ』の順とし、それぞれ該当する記号もしくは数値を並べて示した。

表 3.5-1 実験条件

項目		内容
試験体 条件	コンクリート 調合	(1) 混和材を高含有したコンクリート－水結合材比 50% [記号：CC] (2) 普通ポルトランドセメント－水セメント比 60% [記号：N] ※1 (3) 高炉セメント B 種－水セメント比 60% [記号：BB] ※1
	寸法	100×100×400mm（角柱）
	境界条件	側面 1 面：暴露面 外周 3 面および小口 2 面：シール
	試験体種類	(1)鉄筋試験体：黒皮付き丸鋼φ12mm をかぶり厚さ 30mm で埋設 (2)無筋試験体
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	JIS A 1153 (20℃／60%RH／CO <sub>2</sub> 濃度 5%)
	中性化深さの 目標値※2	(1) 30mm（かぶり厚さ±0mm） (2) 42mm（かぶり厚さ＋12mm※3） (3) 50mm（かぶり厚さ＋20mm）
	暴露試験	20℃／100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH, 屋外暴露

※1：3.2 節で報告済、※2：詳細は図 3.5-1 を参照

※3：埋設した丸鋼φ12mm の下端まで中性化させた水準

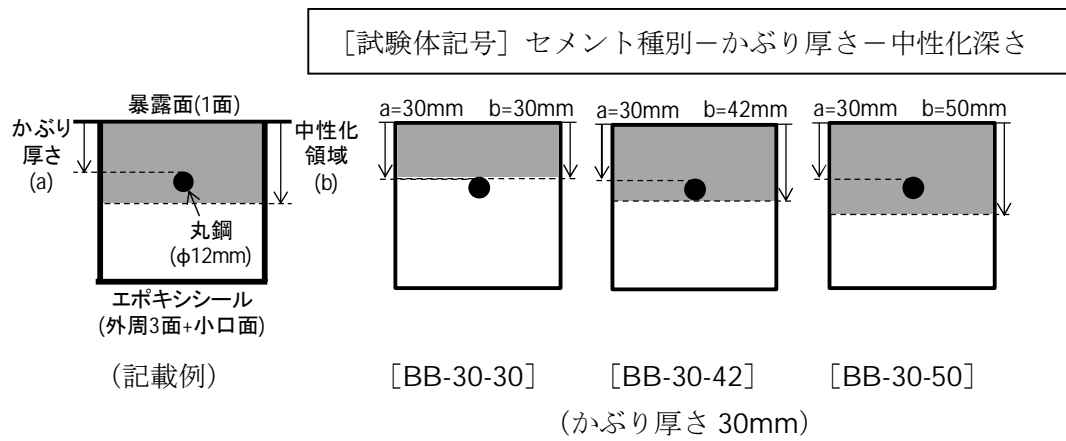


図 3.5-1 鉄筋試験体のかぶり厚さと促進中性化深さの目標値



### 3.5.3 実験方法および測定方法

測定計画を表 3.5-2 に示す。

鉄筋試験体では、数ヶ月ごとに電気化学的測定方法により自然電位と分極抵抗を測定した。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、金田らの報告を参考として、試験体の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、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。

無筋試験体では、中性化深さおよび含水率を測定した。中性化深さの測定は、JIS A 1153 に準じて行った。含水率の測定は、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、切断片を暴露面より 12.5mm 間隔で 8 等分し、JIS A 1476（建築材料の含水率測定方法）に準じて行った。また、飽水状態の質量含水率に対する割合として、飽和度を式(3.5-1)のとおり定義した。

$$Wd = (S - Sd) / (Sw - Sd) \times 100 \quad (3.5-1)$$

ここに、Wd：飽和度(%)

S：測定質量(g)

Sd：絶乾質量(g),

Sw：飽和質量(g)

表 3.5-2 測定計画

試験体	測定項目	測定方法
有筋試験体	自然電位	JSCE-E 601
	分極抵抗	土木学会 338 委員会試案
	腐食面積率	JCI-SC1
	腐食減量	JCI-SC1
無筋試験体	中性化深さ	JIS A 1153
	含水率※	JIS A 1476(暴露面から 12.5mm 間隔で 8 等分)

※暴露試験で平衡状態となった後に測定（経時変化の測定なし）

### 3.5.4 試験体の作製およびフレッシュ性状

コンクリートの使用材料を表 3.5-3、コンクリートの調合を表 3.5-4 に示す。

N では単位水量を 180kg/m<sup>3</sup>、BB では単位水量を 182kg/m<sup>3</sup>、CC では単位水量を 180kg/m<sup>3</sup> とし、化学混和剤は AE 減水剤を使用した。

コンクリートのフレッシュ性状を表 3.5-5 に示す。コンクリートのスランプの目標値は 18±2.5cm、空気量の目標値は 4.5±1.5%と設定し、いずれも目標値を満足することを確認した。

表 3.5-3 コンクリートの使用材料

種類	記号	概要
セメント	N	普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm <sup>3</sup> ）
	BB	高炉セメント B 種（密度 3.04g/cm <sup>3</sup> ）
結合材	BS	高炉スラグ微粉末（密度 2.90g/cm <sup>3</sup> ）
細骨材	S	木更津産陸砂（乾密度 2.61g/cm <sup>3</sup> ，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 <sup>3</sup> ，吸水率 0.92%，F.M.6.61，実積率 58.9%）
水	W	上水道水
化学混和剤	AE	AE 減水剤

表 3.5-4 コンクリートの調合

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						化学混和剤 (セメント×%)
			W	N	BB	BS	S	G	AE
N	60	49.5	180	300	—	—	875	907	0.85
BB	60	49.5	182	—	303	—	871	906	0.6
CC	50	45.8	180	90	—	270	778	933	1.0

表 3.5-5 コンクリートのフレッシュ性状

記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )
N	18.5	5.1	22	2277
BB	19.0	4.2	21	2291
CC	19.5	4.8	20	2258

### 3.5.5 実験結果および考察

#### (1) 圧縮強度、促進中性化試験および暴露試験の日数

コンクリートの圧縮強度を表 3.5-6 に示す。

鉄筋試験体、無筋試験体と併せて作製した  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  の管理供試体の試験結果を示した。標準養生 28 日における圧縮強度は、N では  $37.7 \text{N/mm}^2$ 、BB では  $30.5 \text{N/mm}^2$ 、CC では  $30.6 \text{N/mm}^2$  となった。また、鉄筋を埋設した試験体の養生条件に合わせて、材齢 5 日で脱型し、脱型以降は  $20^\circ\text{C}$ 、60%RH で気中養生した供試体の圧縮強度を測定した。この気中養生した供試体は、材齢 91 日に加えて、促進中性化試験が終了した材齢における圧縮強度も測定した。気中養生のものは、いずれの調合条件においても、材齢 91 日以降の圧縮強度は大きく変化しておらず、促進中性化試験の期間が異なるものでも、コンクリートの圧縮強度は概ね同等であると考えられる。

促進中性化試験および暴露試験の日数を表 3.5-7 に示す。

所要の中性化深さに達するまでの促進中性化試験の日数は、かぶり厚さが大きいほど長くなり、N では 466～1709 日、BB では 155～1100 日、CC では 193～657 日となった。促進中性化試験後の暴露試験の日数は N では 220～2200 日、BB では 1547～2356 日、CC では 1189～1658 日となった。なお、本試験は同一の試験期間で実施しているため、促進中性化試験の日数が長くなった水準ほど、暴露試験の日数が短くなっている。

表 3.5-6 コンクリートの圧縮強度

記号	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )					
	標準 養生 28日	封かん 養生 91日	5日脱型後気中養生(目標中性化深さに到達材齢)			
			材齢 91日	中性化深さ 30mm到達	中性化深さ 42mm到達	中性化深さ 50mm到達
N	37.7	42.9	30.3	35.0 (材齢770日)	37.8 (材齢1285日)	38.2 (材齢1709日)
BB	30.5	41.4	28.2	28.6 (材齢291日)	28.5 (材齢746日)	29.2 (材齢1100日)
CC	30.6	40.6	28.2	29.3 (材齢193日)	27.5 (材齢368日)	27.3 (材齢657日)

表 3.5-7 促進中性化試験および暴露試験の日数

記号	かぶり厚さ (mm)	目標中性化深さ (mm)	促進中性化試験		暴露試験
			実測中性化深さ (mm)	中性化試験期間 (日)	暴露試験期間 (日)
N	30	30	32.2	770	1894
	30	42	46.1	1285	644
	30	50	50.3	1709	220
BB	30	30	34.1	291	2356
	30	42	44.2	746	1901
	30	50	51.2	1100	1547
CC	30	30	32.2	193	1658
	30	42	42.1	368	1483
	30	50	55.1	657	1189

## (2) 含水率

暴露試験の平衡状態における暴露面から内部にかけての質量含水率および飽和度の分布を図 3.5-2 (CC) に示す。ここでは、鉄筋の中心位置での値をプロットした。なお、屋外暴露の条件では、断面内の含水率分布は、天候の変化に影響を受け、長期間の暴露試験後においても平衡にならなかった。そのため、1 ヶ月以上にわたって降雨がなかった乾燥期と、3 日間連続で降雨があった湿潤期で測定した。

かぶり厚さ 30mm の鉄筋中心位置の質量含水率は、暴露環境の相対湿度が 100%RH では 5.3%、相対湿度が 90%RH では 3.9%、相対湿度が 75%RH では 3.1%、60%RH では 2.6%となった。屋外暴露の条件では、乾燥期で 4.0%、湿潤期で 5.5%、平均で 4.8%となった。

かぶり厚さ 30mm の鉄筋中心位置の飽和度は、暴露環境の相対湿度が 100%RH では 80%、相対湿度が 90%RH では 70%、相対湿度が 75%RH では 50%、60%RH では 45%となった。屋外暴露の条件では、乾燥期で 68%、湿潤期で 72%、平均で 70%となった。

なお、暴露環境の相対湿度を 100%RH とした水準でも、暴露環境の相対湿度と平衡になった時の飽和度は 80%であるため、コンクリート細孔中の残りの 20%の部分は水分で飽和していない空隙の状態で存在しているものと考えられる。

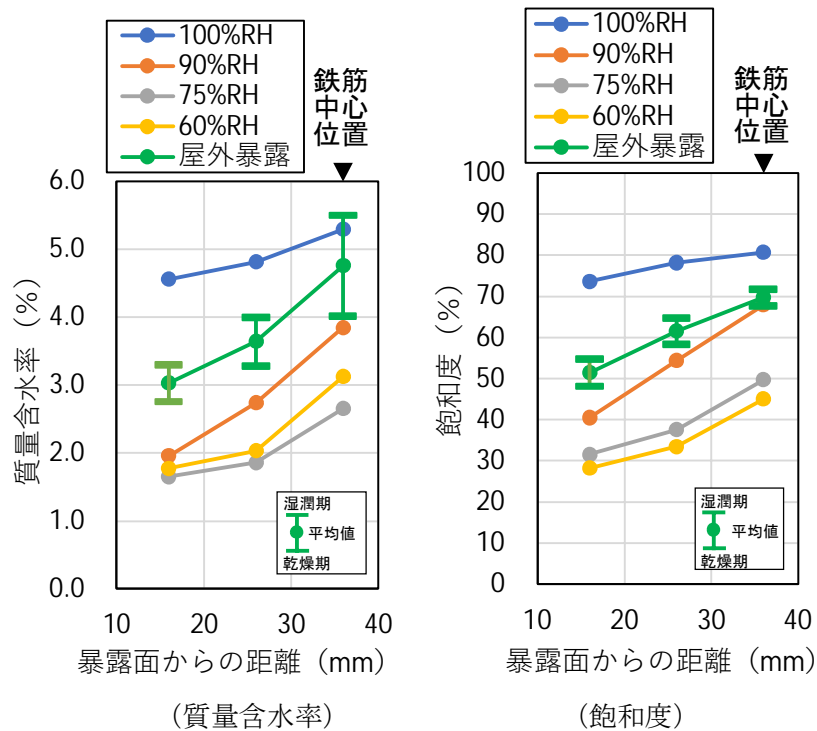


図 3.5-2 暴露試験の平衡状態における含水状態 (CC)

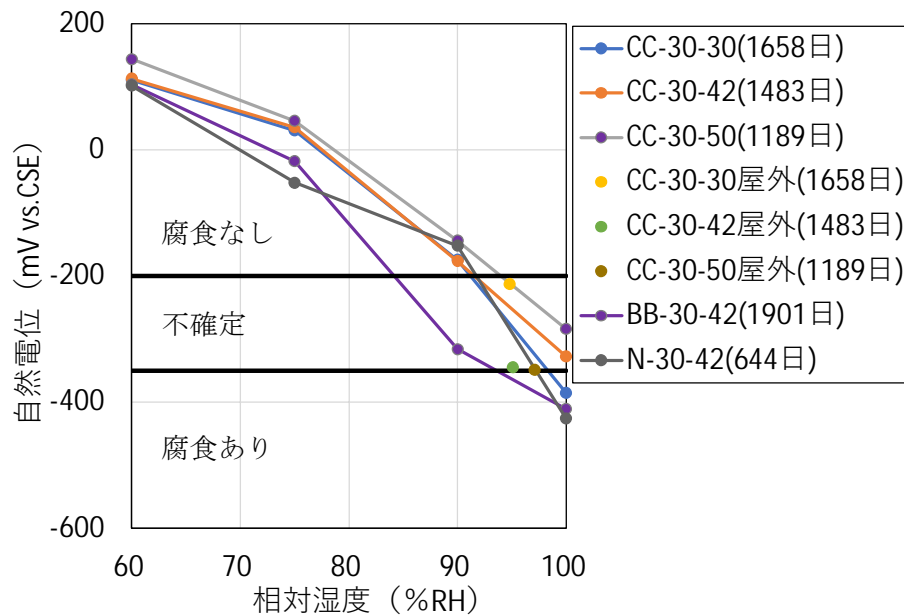
### (3) 自然電位による鉄筋の腐食状態

暴露環境の相対湿度と中性化後の鉄筋の自然電位の関係を図 3.5-3 に示す。

図中には、ASTM の腐食判定基準を併記した。なお、調合条件やかぶり厚さによって、中性化後の暴露試験の日数が異なるため、それぞれ最大となる暴露試験の材齢（凡例の末尾に示す）における値を示した。

CC では、暴露環境の相対湿度が大きいほど自然電位は低下する傾向が認められた。中性化が鉄筋位置まで到達している水準は、中性化深さの違いに関わらず、暴露環境の相対湿度が 100%RH では、自然電位は $-350\text{mV}$  以下となり、ASTM の判定基準では腐食ありとなった。一方、90%RH 以下では、自然電位は $-200\text{mV}$  以上となり、ASTM の判定基準では腐食なしとなった。屋外暴露の条件では、中性化深さの違いに関わらず、暴露環境の相対湿度が 100% RH と 90%RH の概ね中間に相当する位置にプロットされた。

図中には、BB と N のかぶり厚さが 30mm で鉄筋下端まで中性化させた水準における、暴露環境の相対湿度と鉄筋の自然電位の関係を併記した。いずれのセメント種別においても、暴露環境の相対湿度と鉄筋の自然電位の関係はほとんど同様であることが確認された。



※図中には ASTM（自然電位）の腐食判定基準を併記した

図 3.5-3 暴露環境の相対湿度と中性化後の自然電位の関係

#### (4) 腐食電流密度による鉄筋の腐食速度

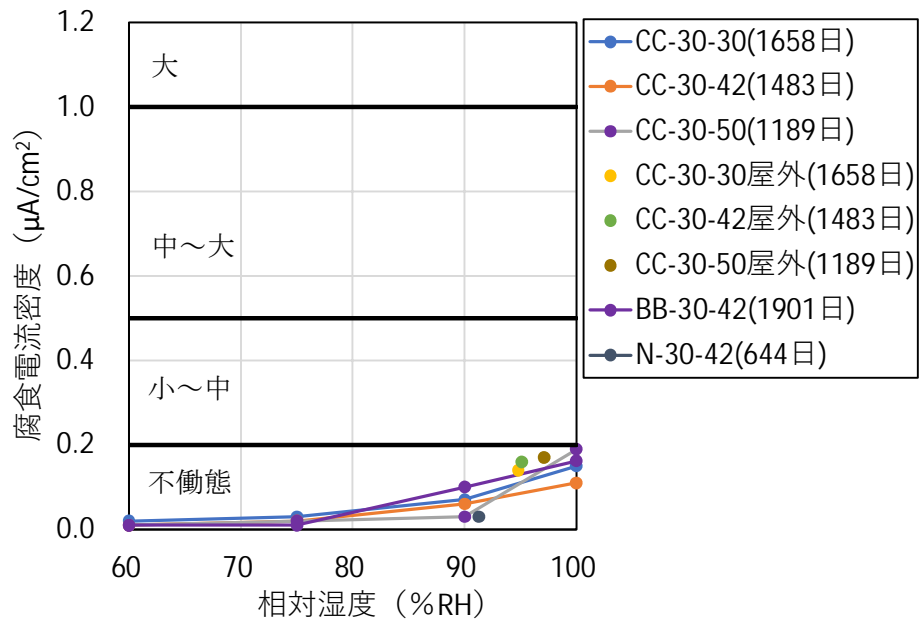
暴露環境の相対湿度と中性化後の鉄筋の腐食電流密度の関係を図 3.5-4 に示す。図中には、RILEM の鉄筋腐食速度の判定基準を併記した。なお、調合条件やかぶり厚さによって、中性化後の暴露試験の日数が異なるため、それぞれ最大となる暴露試験の材齢（凡例の末尾に示す）における値を示した。

CC では、中性化深さの違いに関わらず、腐食電流密度が  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり、RILEM の判定基準では不動態状態となった。屋外暴露の条件では、中性化深さの違いに関わらず、暴露環境の相対湿度が 100% RH と 90%RH の概ね中間に相当する位置にプロットされた。

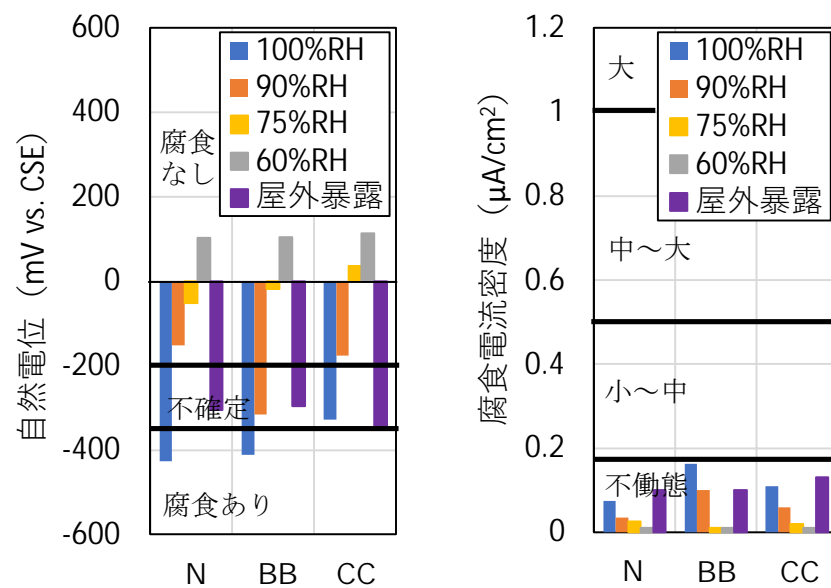
図中には、BB と N のかぶり厚さが 30mm で鉄筋下端まで中性化させた水準における、暴露環境の相対湿度と鉄筋の腐食電流密度の関係を併記した。いずれのセメント種別においても、かぶり厚さを 30mm とした本試験条件の下では、暴露環境の相対湿度に関わらず中性化後の RILEM の判定基準では不動態状態となり、ほとんど同様の関係であることが確認された。

セメント種別と中性化後の自然電位、腐食電流密度の関係を図 3.5-5 に示す。

同一の外部湿度に対する自然電位および腐食電流密度の値は、セメント種別の違いによらず概ね等しくなった。このことから、中性化速度が大きくなる混和材を高含有したコンクリートであっても、中性化後の鉄筋腐食速度は一般的なセメント種別と同程度と評価できるものと判断された。



※図中には RILEM（腐食電流密度）の腐食判定基準を併記した  
 図 3.5-4 暴露環境の相対湿度と中性化後の腐食電流密度の関係



※図中には ASTM（自然電位）と RILEM（腐食電流密度）の腐食判定基準を併記した  
 図 3.5-5 セメント種別と中性化後の自然電位，腐食電流密度の関係

#### 3.5.6 3.5 節のまとめ

セメント重量の 75%を高炉スラグ微粉末に置換した混和材を高含有したコンクリートについて、鉄筋のかぶり厚さを 30mm として、かぶり厚さに対して $\pm 0\text{mm}$ ,  $+12\text{mm}$ (埋設した鉄筋の下端),  $+20\text{mm}$  まで促進中性化させた後、異なる相対湿度で長期間の暴露試験を行い、中性化後の自然電位と腐食電流密度を測定した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 同一の外部湿度に対する自然電位および腐食電流密度の値は、セメント種別の違いによらず概ね等しくなった。
- (2) 中性化速度が大きくなる混和材を高含有したコンクリートであっても、中性化後の鉄筋腐食速度は一般的なセメント種別と同程度と評価できるものと判断された。



### 3.6 3章の結論

コンクリートの使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を作製し、あらかじめ鉄筋位置まで促進中性化させた後、異なる相対湿度で2~3.5年間の暴露試験を行い、電気化学的に鉄筋腐食速度を測定した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) コンクリートの含水率を飽和度で示し、中性化後の鉄筋腐食状況および鉄筋腐食速度との関係について考察した。
- (2) 電気化学的に中性化後の鉄筋腐食速度を測定し、かぶり厚さ、含水状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を得た。
- (3) かぶり厚さが10mmの場合は、飽和度が50%を下回ると極めて遅い腐食速度、飽和度が50%を上回ると高い腐食速度となった。また、飽和度が50%において中性化後の鉄筋腐食速度が最大となった。
- (4) かぶり厚さが20, 30mmの場合は、飽和度が高いと中性化後の鉄筋腐食速度は増加するが、いずれも極めて遅い腐食速度となった。
- (5) それぞれの調合に対して、相対湿度ごとに、鉄筋腐食速度をかぶり厚さの関数として定式化した。

中性化残りをパラメータとして、中性化残りが、+10mm, ±0mm, -12mm（埋設した鉄筋の下端）、-20mmまで中性化させた後に、異なる相対湿度で暴露試験を行い、鉄筋腐食状況および鉄筋腐食速度を測定した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 中性化残りが、コンクリートの含水状態と自然電位および腐食電流密度の関係におよぼす影響は小さく、中性化後の自然電位および腐食電流密度には、暴露環境の相対湿度が大きく影響するものと考えられる。
- (2) 中性化深さが鉄筋のかぶり厚さに到達して以降は、コンクリートの含水状態が変わらなければ、かぶり厚さを超えて中性化が進行しても腐食電流密度は大きく変化しなかった。このことから、中性化後の腐食電流密度は、コンクリートの含水状態により一律に評価できると考えられる。

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耐久性評価を目的として、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鉄筋位置の水分状態と鉄筋腐食の関係を実験的に検討した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 模擬ひび割れの有無に関わらず、中性化後の鉄筋腐食速度には、鉄筋位置におけるコンクリートの含水率の影響が大きい。
- (2) 中性化後の暴露条件が、相対湿度90%RH以上もしくは屋外暴露の場合、模擬ひび割れ部における鉄筋腐食速度が大きくなる可能性がある。この理由として、ひび割れを通じて鉄筋位置まで直接水分が供給され、鉄筋位置におけるコンクリートの含水率が高くなることが考えられる。
- (3) 中性化後の暴露条件が、相対湿度75%以下の場合、模擬ひび割れの有無に関わらず、鉄筋腐食は認められなかった。屋内などの乾燥環境においては、鉄筋腐食を考慮した寿命評価の適用に際して、ひび割れの有無はほとんど影響しないと考えられる。

セメント重量の 75%を高炉スラグ微粉末に置換した混和材を高含有したコンクリートについて、鉄筋のかぶり厚さを 30mm として、かぶり厚さに対して $\pm 0\text{mm}$ ,  $+12\text{mm}$ (埋設した鉄筋の下端),  $+20\text{mm}$  まで促進中性化させた後、異なる相対湿度で長期間の暴露試験を行い、中性化後の自然電位と腐食電流密度を測定した。得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 同一の外部湿度に対する自然電位および腐食電流密度の値は、セメント種別の違いによらず概ね等しくなった。
- (2) 中性化速度が大きくなる混和材を高含有したコンクリートであっても、中性化後の鉄筋腐食速度は一般的なセメント種別と同程度と評価できるものと判断された。

### 3 章の参考文献

- [3-1] 田沼毅彦, 杉山央: 築後 53 年を経過した鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋腐食状況の実態調査, 日本建築学会技術報告集, 第 23 巻, 第 53 号, pp.37-42, 2017.2
- [3-2] 野口貴文ほか 7 名: 旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査 (その 1~12), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), pp.417-440, 2015.9
- [3-3] 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
- [3-4] 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
- [3-5] 土木学会: コンクリート標準示方書 [設計編], 2017
- [3-6] 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, 258-259, 2009.10
- [3-7] 金田尚志, 松岡和巳: 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
- [3-8] 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
- [3-9] 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
- [3-10] 掛川勝, 梶田佳寛, 松林裕二, 鹿毛忠継: 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
- [3-11] 酒井正樹, 神代泰道, 小林利充: 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, 大林組技術研究所報, No.82, pp.1-8, 2018.12
- [3-12] ASTM C876-09: Standard Test Method for half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 2009
- [3-13] 掛川勝, 梶田佳寛, 松林裕二, 鹿毛忠継: コンクリート中の鉄筋腐食速度に及ぼす各種要因の影響に関する長期暴露実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.77, No.672, pp.143-151, 2012.2
- [3-14] 酒井正樹ほか: 鉄筋の黒皮が中性化したコンクリート内部の鉄筋腐食におよぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 材料施工, pp.943-944, 2020
- [3-15] 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
- [3-16] Nagano, H., Doi, T. and Yamashita, M.: Study on Water Adsorption-Desorption on Metal Surfaces and the Early Stage of Atmospheric Corrosion in Steels, Materials Science Forum, vols.289-292, pp.127-134, 1998
- [3-17] 高谷哲, 奥野翔矢, 本田正和, 川上圭司, 左藤眞市, 羽村陽平, 山本貴士, 宮川豊章: ア

- ルカリ環境下における鉄系腐食生成物の生成プロセスおよびコンクリート中における鉄筋の腐食環境, 材料, Vol. 66, No. 8, pp.545-552, 2017.8
- [3-18] 清原千鶴ほか：実構造物調査を通した中性化到達鉄筋の腐食性状, 日本建築学会学術講演梗概集, 2017.8
- [3-19] 今本啓一：かぶりコンクリートの役割と検査方法①かぶりコンクリートの役割と構造物の耐久性, コンクリート工学 Vol.57, No.6, pp.447-451, 2019.6
- [3-20] Cheng, L., Maruyama, I. and Ren, Y.: Novel Accelerated Test Method for RH Dependency of Steel Corrosion in Carbonated Mortar, Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 19, pp.207-215, 2021 (DOI: 10.3151/jact.19.207)
- [3-21] Cheng, L. and Maruyama, I.: Effect of Cover Thickness on Steel Corrosion in Carbonated Mortar under Variable Environmental Conditions, Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Materials and Construction, pp.211-212, 2022
- [3-22] 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
- [3-23] 小林利充ほか：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状(その 1～15), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011～2018

## 4. 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の提案と実設計例

### 4.1 4章の位置付け

3章では、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を実験的に検討し、中性化がかぶり厚さにまで到達した以降では、鉄筋位置の水分状態により鉄筋腐食速度が評価できることを示した。

一方、実構造物の耐久性評価の場面を考えると、鉄筋位置の水分状態が常に得られるとは限らず、多くは外部環境の相対湿度のみが与条件となる。ここで、長期耐久性を考える上では、外部の環境条件が一定であれば、鉄筋位置の水分状態は外部湿度と平衡状態になっていると仮定することができる。そのため、3章で得られた中性化後の鉄筋腐食速度の実験結果を用いて、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定ができると考えた。なお、乾湿繰返しを受ける部位については、外部の環境条件の変化から鉄筋位置の水分状態の変化を予測する必要があるため、5章で別途検討することとした。

4章では、最初に外部環境を軸とした鉄筋腐食速度の整理を行った上で、3章で実験により得られた中性化後の鉄筋腐食速度を用いて、外部の環境条件が一定の場合における中性化の進行と鉄筋腐食の進行の両方を考慮した新たな耐久性評価手法を提案した。加えて、実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に新たな耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。

## 4.2 外部環境が一定条件の場合の腐食環境の整理

腐食環境を含む劣化環境をクラス分けする考え方は既に多方面で取り入れられており、ISO 22965-1 Concrete – Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier の付属書<sup>[4-1]</sup>では、コンクリート構造物が置かれる環境に応じて、劣化現象ごとに劣化外力の強さをクラス分けしている。

ISO 22965-1 による劣化外力の強さのクラス分類のうち、中性化による腐食に関する部分を表 4.2-1 に示す。鉄筋腐食に対する劣化作用の強さは、乾湿繰返しが生じる環境（XC3）で最も大きくなることが分かる。なお、この基準を参考とした場合、X0 または XC1 を非腐食環境、XC2 または XC3 を腐食環境と考えることができる。

表 4.2-1 ISO 22965-1 による劣化外力の強さのクラス分類<sup>[4-1]</sup>  
(中性化による腐食に関する部分を抜粋)

クラス	環境	暴露環境の例
1 腐食および有害作用のリスクが少ない		
X0	極めて乾燥	湿度が極めて低い建築物内部のコンクリート
2 中性化による腐食		
XC1	乾燥または常時湿潤	湿度の低い建築物内部のコンクリート、常に水に浸漬されているコンクリート
XC2	湿潤、まれに乾燥	長期間水に接するコンクリート表面、基礎
XC3	中程度の湿潤、乾湿繰返し	中程度または高い湿度の建築物内部のコンクリート、水に接することのあるコンクリート表面（暴露クラス XC2 に該当するものを除く）、雨よけのある屋外コンクリート

JASS5 では、建築工事の標準仕様書としての位置付けから、非腐食環境および腐食環境となる部位を例示している。JASS5 による一般劣化環境（非腐食環境）および一般劣化環境（腐食環境）の例<sup>[4-2]</sup>を表 4.2-2 に示す。ここで、一般劣化環境とは、構造体コンクリートの温度および含水状態に影響をおよぼす環境条件、ならびに空気中の二酸化炭素であって、基本的には立地によらず作用する環境として想定されており、塩害劣化環境や凍害劣化環境などの特殊な劣化環境は除かれている。

非腐食環境は、従前より「屋内」とされてきた環境が想定されている。ただし、屋内であつても、屋根・屋上・外壁などの建物外皮に接する部材の屋内側、最下階の床や地下外壁など地下水に接する部材の屋内側、室内プールに面する壁や床など常時水に接するような部材については、仕様を提示するにあたって、保守側の想定がなされ全て腐食環境とみなされている。今後の研究の蓄積によって、腐食環境の評価基準を定量的に示すことができれば、より精緻な性能設計が可能になると考えられる。

表 4.2-2 JASS 5 による一般劣化環境（非腐食環境）および  
一般劣化環境（腐食環境）の例<sup>[4-2]</sup>

劣化環境	定義	部位の例	
一般劣化環境 (非腐食環境)	鉄筋に作用する腐食因子が存在しないとみなせる部位	外気に接することの無い屋内空間にある部位で、直接の水濡れおよび結露などによる水分供給の可能性の無い部位	
一般劣化環境 (腐食環境)	鉄筋に作用する腐食因子が存在する部位  一般劣化環境（非腐食環境）でない部位.	常時外気に接する屋外空間にある部位、および土または水に直接する部位.	外壁や外部にあるスラブなど直接雨がかりが想定される部位、および囲われていないピロティや、常時解放された開口を介して外気に触れる期間が長い駐車場など.
		屋内空間にあっても、外皮に接する部位	屋根・屋上スラブ・外壁など外皮の屋内側、地下の擁壁や基礎まわりの屋内側にあつて、腐食の条件となる水分供給の可能性が否定できない部位
		屋内空間にあつても、直接の水濡れや結露が想定される部位	台所や風呂、トイレ、屋内プールや地下ピットなどを有する室の壁や天井、床など、直接の水濡れや結露などによる水分供給が著しいと想定される部位

外部環境と劣化速度に基づいた腐食環境評価のうち、乾湿繰返しがなく、湿度が一定条件の場合を表 4.2-3 に示す。

はじめに、外部環境については外部相対湿度を一つの尺度として、相対湿度が低い方から、当該部位に水が作用する環境を（1）極めて乾燥、（2）乾燥、（3）中程度の湿潤、（4）湿潤の 4 つに分類した。この分類は、ISO 22965-1 による劣化外力の強さのクラス分類を参考にしたものである。

次に、それぞれの水作用環境に対して、耐久性評価の指標とする中性化速度と鉄筋腐食速度を評価した。ここで、それぞれの劣化速度を評価するためには、外部環境である水作用環境を、部材内部（鉄筋位置）の水分状態に変換する必要がある。しかしながら、外部環境を一定条件とした場合では、長期耐久性を考えると外部環境と部材内部（鉄筋位置）の含水状態は平衡状態になっていると仮定できるため、3 章で示した外部環境が一定条件の下で測定された、相対湿度と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を根拠に評価した。

これらの劣化速度の評価結果を基に、それぞれの水作用環境の分類に対して腐食環境の評価を行った。腐食環境の評価は、JASS 5 に準じた腐食環境・非腐食環境の分類を主として行い、比較として ISO の劣化外力強さの分類も併記した。加えて、それぞれに該当する部位の位置付けと、JASS 5 に示されている部位の例を併せて示した。

外部相対湿度が 60%RH 以下であり、水作用環境が（1）極めて乾燥となる環境について、腐食環境評価を行う。この環境は湿度が極めて低く、水の存在に起因した液相反応による腐食反応は生じない環境と言える。そのため、鉄筋腐食速度はほぼ 0 となり、「非腐食環境」と評価した。外部相対湿度が 80～90%RH 程度を下回り、水作用環境が（2）乾燥となる環境について、腐食環境評価を行う。

この環境は、中性化後の鉄筋腐食速度は 0 ではないが、その速度が極めて小さくなる環境と言える。これらの部位は水分供給がないため、将来的に躯体は乾燥に向かうことから、「非腐食環境」とみなす評価ができると考える。

これらの部位の例として、屋内では外気の導入はあるが直接的な水濡れや結露の発生がない部位、屋外では雨除けなどがあり雨掛かりではない部位が相当する。

外部環境湿度が 80～90%RH 程度を上回り、水作用環境が (3) 中程度の湿潤となる環境について、腐食環境評価を行う。この環境は、ひとたびかぶり厚さまで中性化が進行すれば、鉄筋腐食が進行する環境であるため、「腐食環境」と評価した。

これらの部位の例として、屋内では外皮に接する部材の屋内側や水濡れや結露の発生がある部位、屋外では雨掛かりがある部位が相当する。

表 5.2-1 は、乾湿繰返しがなく、湿度が一定条件の場合となるが、建築基準法の最低かぶり厚さである 20mm 以上が確保されていれば、中性化後の鉄筋腐食速度は小さくなる環境と言える。従って、今後の研究の蓄積によって、腐食環境の評価基準を定量的に示すことができれば、実用上は鉄筋腐食の進行は無視でき、「非腐食環境」とみなす評価ができる可能性がある。

なお、水作用環境 (2) 乾燥と (3) 中程度の湿潤の境界となる外部環境湿度は 80～90%RH となると考えられる。ただし、鉄筋腐食速度は部材のかぶり厚さなども影響するため、現状において、外部環境湿度のみによって、腐食環境と非腐食環境を一律に線引きすることは困難である。

最後に、外部環境湿度が 100%以上となる常時水中もしくは土中となり、水作用環境が (4) 湿潤となる環境について、腐食環境評価を行う。この環境は、鉄筋の腐食反応に必要な酸素が、水中の溶存酸素分しか供給されないため、酸素欠乏の状態となり、中性化後の鉄筋腐食速度はほぼ 0 となる。そのため、「非腐食環境」とみなす評価ができると考える。

これらの部位の例として、屋内では常時水に接する部位、屋外では常時水中か土中にある部位が相当する。

表 4.2-3 外部環境と劣化速度に基づいた腐食環境評価（湿度が一定条件の場合）

外部環境	外部相対湿度	0%RH	60%RH	80～90%RH	100%RH (水中)
	水作用環境	(1)極めて乾燥	(2)乾燥	(3)中程度の湿潤	(4)湿潤
劣化速度	中性化速度	小～大	大	小	≒0(CO <sub>2</sub> 僅少)
	鉄筋腐食速度	0	微小	小	≒0(O <sub>2</sub> 僅少)
環境評価	腐食環境 (腐食リスク)	非腐食環境	腐食環境(微小) 【≒非腐食環境】	腐食環境(小)	腐食環境(≒0) 【≒非腐食環境】
	劣化外力強さ (ISO分類)	Very Dry (X0)	Dry (XC1)	Wet (XC2)	Permanently Wet (XC1)
	部位の位置付け	極めて低湿度	水分供給がない	水分供給がある	常時湿潤
	部位の例 (参考: JASS5他)	(屋内) ・外気や水に接しない ・極めて低湿度	(屋内) ・外皮に接しない ・水濡れ・結露がない (屋外) ・雨掛かりなく低湿度	(屋内) ・外皮に接する ・地下室など高湿度 (屋外) ・雨掛かりなく高湿度	(屋内) ・常時水に接する  (屋外) ・水中・土中にある



## 4.3 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の提案

### 4.3.1 4.3 節の概要

本節では、従来の中性化を指標とした耐久性評価手法に対して、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久設計手法の提案を行った。

また、3章の実験水準のうち、高炉セメントB種を用いて水セメント比を60%とした場合、普通ポルトランドセメントを用いて水セメント比を60%、50%とした場合の3水準について、提案した新たな耐久設計手法を適用した。

#### 4.3.2 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の提案

本節では、提案した耐久性評価手法を適用するための3つの手順を示す。

- (1) 中性化を指標とした耐久性評価 [中性化深さがかぶり厚さに達するまで、もしくは、中性化深さがかぶり厚さ-10mmに達するまで]
- (2) 鉄筋腐食を指標とした耐久性評価 [腐食の起点から限界腐食量に達するまで]
- (3) 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価 [中性化深さがかぶり厚さ-10mmに達するまで、かつ、腐食の起点から限界腐食量に達するまで]

次節以降では、コンクリートの調合、セメント種別、かぶり厚さおよび相対湿度が異なる場合について、本節で提案した新たな耐久性評価手法を適用し、算定結果の比較検討を行う。

中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の概念図を図4.3-1に示す。この概念図は、(1)～(3)の評価の全てに共通するものである。この概念図については、以降に詳説する。

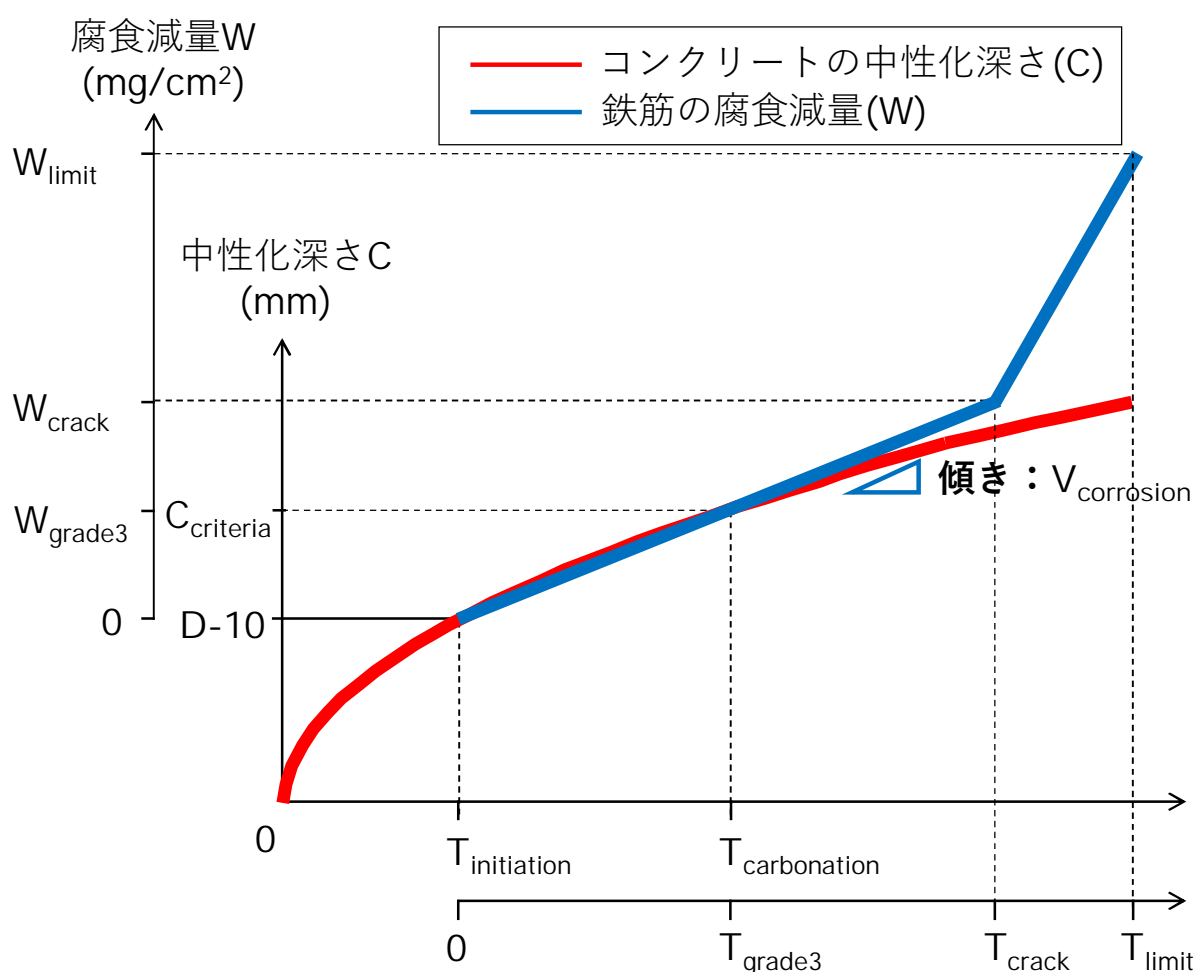


図 4.3-1 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の概念図

(1) 中性化を指標とした耐久性評価 [中性化深さがかぶり厚さに達するまで、もしくは、中性化深さがかぶり厚さ－10mm に達するまで]

中性化を指標とした耐久性評価は、式(4.3-1)に示される、 $\sqrt{t}$  則に基づくコンクリートの中性化深さ (C) に基づいて行われる。

$$C=A\sqrt{t} \quad (4.3-1)$$

ここに、C：中性化深さ (mm)

A：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ )

t：材齢 (年)

日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説<sup>[4-3]</sup>では、鉄筋が腐食し始める時の中性化深さの限界値 ( $C_{\text{criteria}}$ ) を次のように定めている。

中性化深さの限界値 ( $C_{\text{criteria}}$ ) の設定基準

- ① 常時水が接するような湿潤環境、雨掛かり環境、および屋内の水まわり部分等湿度の高い環境では、中性化深さが鉄筋のかぶり厚さ D まで達した時 (主に屋外環境)

$$C_{\text{criteria}} = D \quad (4.3-2)$$

ここに、 $C_{\text{criteria}}$ ：中性化深さの限界値 (mm)

D：かぶり厚さ (mm)

- ② 屋外の雨掛かりでない部分および一般の屋内では中性化深さが鉄筋のかぶり厚さ D から 20mm 奥まで達した時 (主に屋内環境)

$$C_{\text{criteria}} = D + 20 \quad (4.3-3)$$

ここに、 $C_{\text{criteria}}$ ：中性化深さの限界値 (mm)

D：かぶり厚さ (mm)

同指針では、中性化深さが限界値に達しても、直ちに鉄筋が躯体の耐久性に影響をおよぼすような腐食状態になるものではないが、中性化領域にある鉄筋の腐食速度を明確に把握できないことから、安全側に評価するために、中性化深さ (C) が中性化深さの限界値 ( $C_{\text{criteria}}$ ) に達した時点で腐食状態にあると判断することとし、その材齢を中性化の進行による耐用年数 ( $T_{\text{carbonation}}$ ) として算定している。

なお、耐久性に影響がある腐食状態とは、日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針 (案)・同解説<sup>[4-4]</sup>に規定されている、「鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 以上をいい、点さびがつながって面さびとなり、部分的に浮きさびが生じている状態」以上に腐食が進行した状態のことであると補足している。このことは、中性化深さ (C) が中性化深さの限界値 ( $C_{\text{criteria}}$ ) に達した時点、言い換えると中性化の進行による耐用年数 ( $T_{\text{carbonation}}$ ) に達した時点における鉄筋の腐食減量 (W) は、鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) に等しいといえる。

一方、中性化後の鉄筋腐食の起点を評価する場合には、中性化深さの限界値をかぶり厚さ－10mm と設定し、同様の計算を行うことになる。これについては、(3)で再度詳述する。

(2) 鉄筋腐食を指標とした耐久性評価 [腐食の起点から限界腐食量に達するまで]

中性化後の鉄筋腐食速度および限界腐食量を設定することにより、鉄筋腐食を指標とした耐久性評価を行うことができる。

日本建築学会では、中性化深さの限界値 ( $C_{\text{criteria}}$ ) に達した時点で、既に鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食状態にあると判断している。このことは、中性化深さが鉄筋のかぶり厚さまで達した時点（主に屋外環境）、もしくは中性化深さが鉄筋のかぶり厚さから 20mm 奥まで達した時点（主に屋内環境）では、既に鉄筋腐食は進行した状況であり、鉄筋腐食の起点はもっと前にとられていると解釈する必要がある。

鉄筋腐食の起点については古くから研究がなされているが、土木学会<sup>[4-5]</sup>をはじめとして、鉄筋位置における pH の変化から、中性化深さがかぶり厚さの 10mm 手前に達した時点とされることが多い。そこで、図 5.3-1 に示すとおり、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ ( $C_{w0}$ ) を、式(4.3-4) に示すとおり、かぶり厚さ -10mm と設定した。

$$C_{w0} = D - 10 \quad (4.3-4)$$

ここに、 $C_{w0}$ ：鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (mm)

$D$ ：かぶり厚さ (mm)

鉄筋腐食の起点となる中性化深さ ( $C_{w0} = D - 10$ ) に到達した以降は、中性化後の鉄筋腐食速度に基づいて、鉄筋の腐食減量  $W$  の算定を行う。中性化後の鉄筋腐食速度 ( $V_{\text{corrosion}}$ ) は、コンクリートの調合、セメント種別、かぶり厚さおよび相対湿度によって異なる。本検討では、3 章で RC 供試体を用いて中性化後の鉄筋腐食速度を測定した実験結果を引用することとした。

なお、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ ( $C_{w0} = D - 10$ ) に到達した以降も、中性化は継続して進行しており、鉄筋位置の pH は変化していく。そのため、中性化後の鉄筋腐食速度も変化していくと考えられる。ただし、3 章で中性化残りを変えた RC 供試体を用いて中性化後の鉄筋腐食速度を測定した実験結果によれば、同一の含水状態であれば、中性化深さがかぶり厚さに達した以降の鉄筋腐食速度は概ね一定と評価できることから、中性化の進行に伴う鉄筋腐食速度の変化は考慮せず、含水状態ごとに一定値とした。

中性化後の鉄筋腐食速度  $V_{\text{corr}}$  は、3 章の実験的検討において、かぶり厚さが 10mm, 20mm, 30mm のそれぞれに対して、相対湿度 (100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH) ごとに測定した値を用いた。なお、本実験で測定した腐食電流密度から鉄筋腐食速度への換算は、両者が比例関係にあるとされるファラデーの第二法則に基づいて、鉄の原子量を 55.865g, 鉄のイオン価数を 2, ファラデー定数を 96,500 クーロンとした場合に得られた式(4.3-5)<sup>[4-6]</sup>を用いて行った。

$$V_{\text{corr}} = 9.13 \times I_{\text{corr}} \quad (4.3-5)$$

ここに、 $V_{\text{corr}}$ ：鉄筋腐食速度 (mg/cm<sup>2</sup>/year)

$I_{\text{corr}}$ ：腐食電流密度 (μA/cm<sup>2</sup>)

中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価を行うためには、限界腐食量を設定する必要がある。本検討では、限界腐食量として次に示す2つの腐食減量を設定した。

- (1) 鉄筋腐食度評価基準のグレード3に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ )
- (2) 腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ )

日本建築学会では、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性に係る限界状態を腐食ひび割れの発生およびかぶりコンクリートの脱落で定められる使用性で規定している。従来の中性化の進行による耐久性評価では、この使用性で定められる限界状態を腐食確率として定義し、先述したとおり中性化深さ(C)が中性化深さの限界値( $C_{\text{criteria}}$ )に達した時点で腐食状態にあると判断している。また、この時の限界腐食量は、(1)鉄筋腐食度評価基準のグレード3に相当する腐食減量( $W_{\text{grade3}}$ )としており、腐食ひび割れが発生するかなり手前の設定となっている。なお、鉄筋腐食の起点となる中性化深さに達した時点を0として、 $W_{\text{grade3}}$ になるまでの年数( $T_{\text{grade3}}$ )は、中性化の進行による耐用年数( $T_{\text{carbonation}}$ )と概ね一致するものと考えられる。

鉄筋腐食度評価基準のグレード3に相当する腐食減量( $W_{\text{grade3}}$ )に関する既往の研究は少ない。山田ら<sup>[4-7]</sup>は、日本建築学会の既存鉄筋コンクリート構造物の構造・材料調査WGの活動の一環として、9棟の既存RC造建築物の耐久性調査結果を取りまとめ、雨掛かりがある部位に対して鉄筋の腐食グレードと質量減少率の関係を表4.3-1のとおり整理している。また、鉄道総合技術研究所<sup>[4-8]</sup>では、表4.3-2に示す鉄筋腐食度の評価基準を設定しており、鉄筋腐食度と質量減少率の対応を示している。ただし、土木構造物は建築物と比較した場合にかぶり厚さが大きく、中性化のみではなく塩化物イオンも劣化要因として考慮されている。そのため本研究では、山田らにより表4.3-1に示された関係を用いて、鉄筋腐食度評価基準のグレード3に相当する腐食減量( $W_{\text{grade3}}$ )を質量減少率1.18%に相当する値としてと設定することとした。

表 4.3-1 鉄筋腐食グレードと質量減少率の関係<sup>[4-7]</sup>

鉄筋腐食 グレード	腐食面積率 (%)	質量減少率 (%)	腐食状況
-	0	0.00	
1	10	0.15	施工時の状態
2	30	0.44	部分的な腐食
-	51	0.75	暴露試験体データ
3	80	1.18	大部分の腐食
-	100	1.47	全面的な腐食
4	100	5.0	全面的な断面欠損
5	100	15.0	断面の15%が欠損

表 4.3-2 鉄筋腐食度の評価基準<sup>[4-8]</sup>

腐食度	評価基準
0	施工時の状況を保ち、以降の腐食が認められない。質量減少率：0%
I	部分的に軽微な腐食が認められる。質量減少率：2%
IIa	表面の大部分に腐食が認められる。質量減少率：4%
IIb	部分的に断面欠損が認められる。質量減少率：6%
III	鉄筋の全周にわたり断面欠損が認められる。質量減少率：10%

一般的な RC 造建築物を想定して、鉄筋径を 10～38mm とした場合の、鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) の算定結果を表 4.3-3 に示す。本研究では、限界腐食量を安全側に下限値として設定し、21.0 mg/cm<sup>2</sup>とした。

ただし、 $W_{\text{grade3}}$  の設定値については、複数の既存の RC 造建築物の耐久性調査結果とも比較しながらその妥当性を検証していく必要があり、今後の課題の一つとされる。

表 4.3-3 既往の研究による鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ )

鉄筋径		D10	D19	D25	D32	D38
グレード 3 相当腐食量 (mg/cm <sup>2</sup> )	算定値	21.0	44.5	59.8	73.2	88.5
	本研究の設定値 (最小値を採用)	21.0				

本研究では、限界腐食量を(1)鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) とした場合のほか、(2)腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ ) とした場合についても検討を行った。これは、評価指標を腐食量とすれば、腐食ひび割れの発生およびかぶりコンクリートの脱落で定められる限界状態と直接結び付けることができると考えられることによる。

腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ ) については、複数の既往の研究があり、土木学会の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 (その 1) <sup>[4-6]</sup>、(その 2) <sup>[4-9]</sup>に、詳しくまとめられている。本研究では、近年発表された本間ら<sup>[4-10]</sup>による限界腐食量の予測式を用いて設定することとした。本間らは、実験と RBSM による弾塑性解析により、水結合材比、かぶり厚さ、鉄筋径をパラメータとした予測式を提案している。一般的な RC 造建築物を想定して、水結合材比を 40～60%、鉄筋径を 10～38mm とした場合、この予測式を用いて限界腐食量を算定した結果を表 4.3-4 に示す。腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ ) は、かぶり厚さ 10mm では 76～98mg/cm<sup>2</sup>、かぶり厚さ 20mm では 51～66mg/cm<sup>2</sup>、かぶり厚さ 30mm では 36～46mg/cm<sup>2</sup> となる。そのため本研究では、かぶり厚さごとの限界腐食量を安全側に下限値として設定し、かぶり厚さ 10mm では 76mg/cm<sup>2</sup>、かぶり厚さ 20mm では 51mg/cm<sup>2</sup>、かぶり厚さ 30mm では 36mg/cm<sup>2</sup>とした。

なお、黒皮付きの鉄筋では、鉄筋の全断面が腐食生成物で覆われるほど鉄筋腐食が進行している状況は多くないため、ほぼ一様に全断面を腐食させた実験結果から得られた限界腐食量を判断基準として採用できるか明確でなかった。一方、田沼ら<sup>[4-11]</sup>は既存の RC 造建築物の耐久性調査を

行い、かぶり厚さが小さく屋外側で水分供給がある部位では、中性化後には鉄筋の全周にわたって腐食が進行している事例を報告している。このことから、黒皮付きの鉄筋では中性化後における鉄筋腐食速度の増加は小さいが、長期にわたって鉄筋腐食が進行した後には、全断面に一樣な腐食状況となるものと考えられたため、本研究では先述した本間らの予測式を用いて算定した限界腐食量を採用することとした。

このように、 $W_{\text{crack}}$  の設定値については、複数の既存の RC 造建築物の耐久性調査結果とも比較しながらその妥当性を検証していく必要があり、今後の課題の一つと考えられる。

表 4.3-4 既往の研究による腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ ) [4-10]

かぶり厚さ		10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
ひび割れ発生 限界腐食量 (mg/cm <sup>2</sup> )	算定値の範囲	76～98	51～66	36～46	30～39	34～44
	本研究の設定値 (最小値を採用)	76	51	36	30	34

(3) 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価 [中性化深さがかぶり厚さ－10mm に達するまで、かつ、腐食の起点から限界腐食量に達するまで]

(1)中性化の指標による耐久性評価では、コンクリートの含水率が高い場合には、中性化自体の進行速度が遅くなり、耐用年数が長く算定される。一方、(2)鉄筋腐食の指標による耐久性評価では、コンクリートの含水率が高い場合には、中性化後の鉄筋腐食速度が大きくなり、ひとたび中性化すれば耐用年数が短く算定される。

そこで、(1)中性化の指標による耐久性評価と(2)鉄筋腐食の指標による耐久性評価の両方を考慮して、(3) 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価を提案した。ただし、(1)中性化の指標による耐久性評価については、中性化の限界状態を、JASS5 で定義される中性化深さがかぶり厚さに達した時点とする場合と、中性化後の鉄筋腐食の起点とされる中性化深さがかぶり厚さ－10mm に達した時点とする場合の 2 種類があり、異なる耐用年数が算定される。本研究で提案した、(3)中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価には、後者の耐用年数を用いる必要があるため、注意が必要である。

中性化後の鉄筋腐食速度  $V_{\text{corr}}$  を定め、限界腐食量を設定することができれば、中性化深さが鉄筋腐食の起点となる中性化深さ ( $C_{w0}=D-10$ ) に到達した以降の、鉄筋腐食の進行による耐用年数を算定することができる。

本節では、調合条件を代表して 60BB の場合について、3 章の実験的検討において中性化後の鉄筋腐食速度を測定した、かぶり厚さが 10mm, 20mm, 30mm, 相対湿度が 100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH の条件において、中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐久性評価手法の適用方法について具体的な試算を通じて概説する。なお、異なる調合条件の比較については、次節以降で詳しく考察する。

最初に、本会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説[4-12]を参考として、JIS A1153 の促進中性化試験により得られた中性化速度係数から、温度 20℃, 相対湿度 60～100%RH, CO<sub>2</sub>濃度 0.1%の一般環境における中性化速度係数へと換算した。一般環境での中性化速度係数の

算定結果を表 4.3-5 に示す。

表 4.3-5 促進中性化試験結果から換算した一般環境での中性化速度係数の算定 (60BB)

		促進中性化	一般環境			
CO <sub>2</sub> 濃度		5%	0.01%			
相対湿度		60%RH	60%RH	75%RH	90%RH	100%RH
CO <sub>2</sub> 濃度の係数		1.0	0.14	0.14	0.14	0.14
相対湿度の係数		1.0	1.0	0.63	0.23	0.00
中性化速度係数 (mm/√年)	60BB	33.1	4.6	2.9	1.1	0

調合条件が 60BB でかぶり厚さを 10mm とした場合における、材齢と中性化深さおよび腐食減量の経時変化を図 4.3-2 に示す。中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定例を表 4.3-6 に示す。

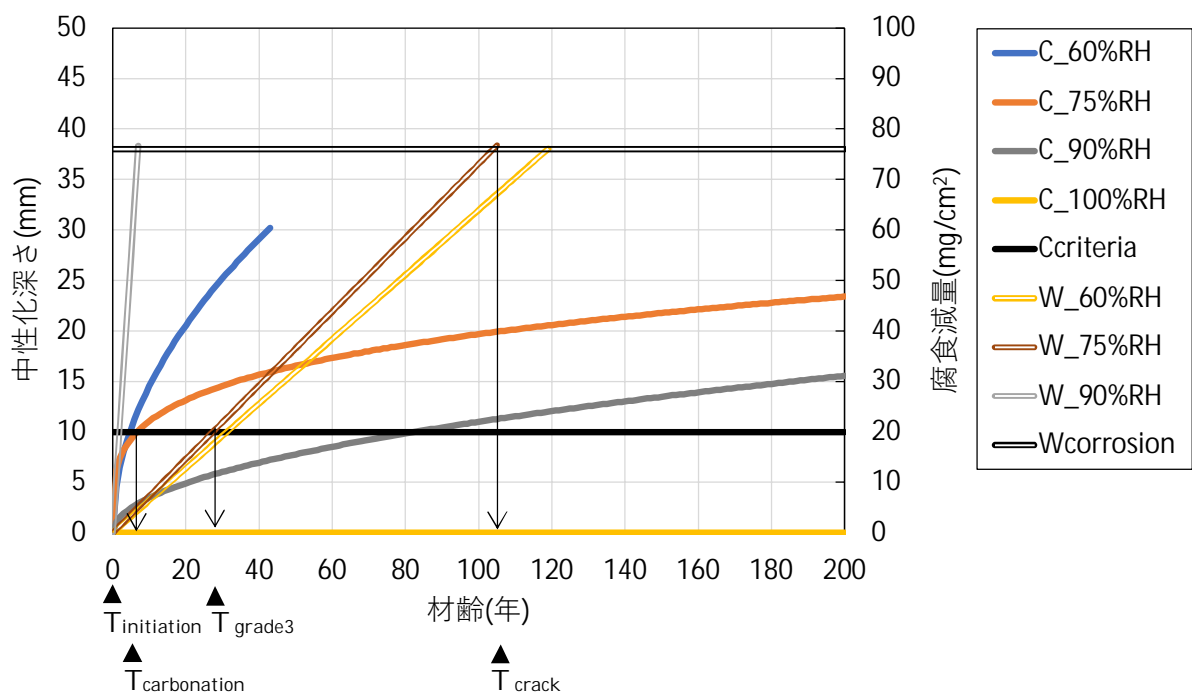
JASS5 による中性化を指標とした耐久性評価〔中性化深さがかぶり厚さに達するまで〕を行った場合の耐用年数は、相対湿度が 60%RH では 5 年、75%RH では 7 年、90%RH では 83 年、100%RH では 200 年以上となった。

鉄筋腐食を指標とした耐久性評価〔腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕を行った場合の耐用年数は、限界腐食量を腐食グレード 3 に相当する  $W_{grade3}$  とした場合、相対湿度が 60%RH では 33 年、75%RH では 29 年、90%RH では 2 年、100%RH では 4 年となった。限界腐食量を腐食ひび割れ発生限界の  $W_{crack}$  とした場合、相対湿度が 60%RH では 119 年、75%RH では 105 年、90%RH では 7 年、100%RH では 13 年となった。

中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価〔中性化深さがかぶり厚さ－10mm に達するまで、かつ、腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕を行った場合の耐用年数は、かぶり厚さ 10mm では、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ ( $C_{w0}=D-10$ ) が 0 となるため、鉄筋腐食の指標による耐用年数と同値となる。

以上より、暴露環境の相対湿度が高い場合には、中性化自体の進行速度が遅くなり、中性化を指標とした耐用年数が長く算定される。その一方で、中性化後の鉄筋腐食速度は大きくなるため、ひとたび中性化すれば鉄筋腐食の指標による耐用年数は短く算定される。両者を考慮することにより、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定が可能となる。





(※図中の矢印は相対湿度 75%RH で各耐用年数の算定位置を例示したもの)

図 4.3-2 材齢と中性化深さおよび腐食減量の経時変化 (かぶり厚さ 10mm, 60BB)

表 4.3-6 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定例  
(かぶり厚さ 10mm, 60BB)

かぶり 厚さ D	腐食起点 $C_{w0}$	耐久性 評価指標	限界値	耐用年数	耐用年数			
					60%RH	75%RH	90%RH	100%RH
10mm	D-10	(1) 中性化	D	$T_{\text{carbonation}}$	5	7	83	200 超
			D-10 (腐食起点)	$T_{\text{initiation}}$	0	0	0	0
		(2) 鉄筋腐食	$W_{\text{grade3}}$	$T_{\text{grade3}}$	33	29	2	4
			$W_{\text{crack}}$	$T_{\text{crack}}$	119	105	7	13
		(3) 中性化+ 鉄筋腐食	D-10 + $W_{\text{grade3}}$	$T_{\text{initiation}}$ + $T_{\text{grade3}}$	33	29	2	4
			D-10 + $W_{\text{crack}}$	$T_{\text{initiation}}$ + $T_{\text{crack}}$	119	105	7	13

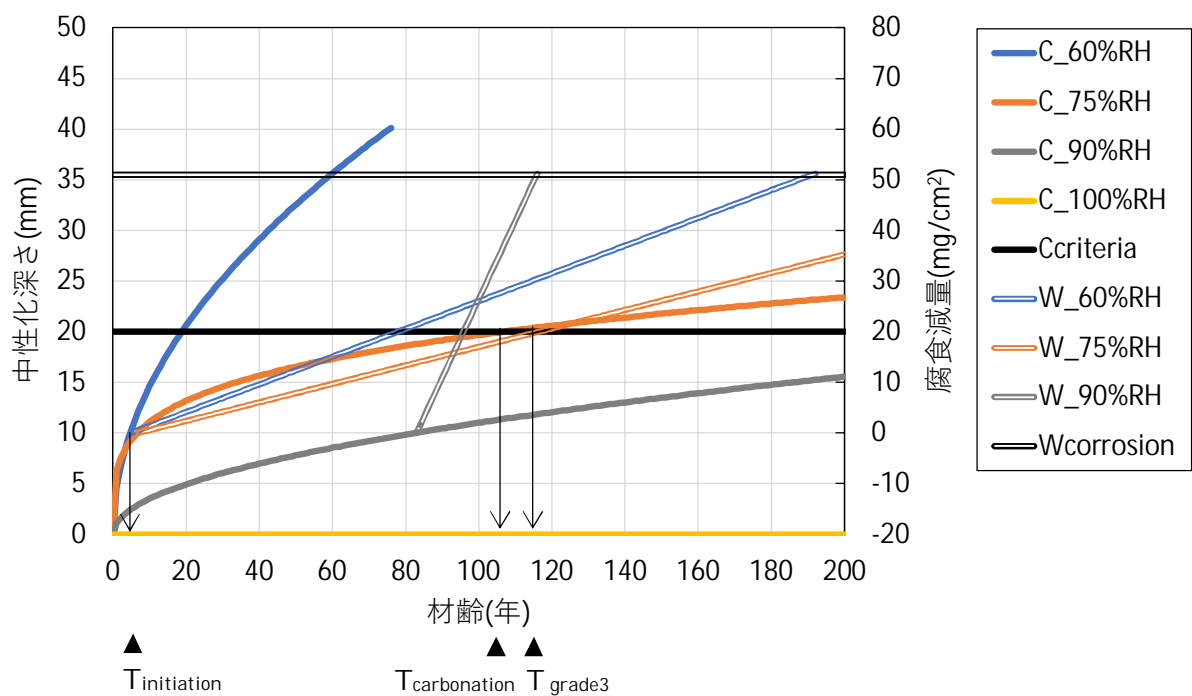
調合条件が 60BB でかぶり厚さを 20mm とした場合における、材齢と中性化深さおよび腐食減量の経時変化を図 4.3-3 に示す。中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定例を表 4.3-7 に示す。

JASS5 による中性化を指標とした耐久性評価〔中性化深さがかぶり厚さに達するまで〕を行った場合の耐用年数は、相対湿度が 60%RH では 19 年、75%RH では 107 年、90%RH では 200 超、100%RH では 200 年以上となった。

鉄筋腐食を指標とした耐久性評価〔腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕を行った場合の耐用年数は、限界腐食量を腐食グレード 3 に相当する  $W_{\text{grade3}}$  とした場合、相対湿度が 60%RH では 77 年、75%RH では 116 年、90%RH では 14 年、100%RH では 8 年となった。限界腐食量を腐食ひび割れ発生限界の  $W_{\text{crack}}$  とした場合、相対湿度が 60%RH では 187 年、75%RH では 200 年以上、90%RH では 33 年、100%RH では 18 年となった。

中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数は、限界腐食量を腐食グレード 3 に相当する  $W_{\text{grade3}}$  とした場合、相対湿度が 60%RH では 82 年、75%RH では 123 年、90%RH では 97 年、100%RH では 200 年以上となった。限界腐食量を腐食ひび割れ発生限界の  $W_{\text{crack}}$  とした場合、相対湿度が 60%RH では 192 年、75%RH では 200 年以上、90%RH では 116 年、100%RH では 200 年以上となった。

なお、参考として、暴露環境の相対湿度が 60%RH のもので、中性化深さがかぶり厚さよりも 20mm 奥まで進行した時点を寿命と判断した場合、中性化の進行による耐用年数は 76 年となる。その時の腐食減量を図 4.3-3 より逆算すると  $19.7\text{mg/cm}^2$  となり、鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) として設定した  $21\text{mg/cm}^2$  と概ね同等の値であることが確認できた。



(※図中の矢印は相対湿度 75%RH で各耐用年数の算定位置を例示したもの)

図 4.3-3 材齢と中性化深さおよび腐食減量の経時変化 (かぶり厚さ 20mm, 60BB)

表 4.3-7 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定例  
(かぶり厚さ 20mm, 60BB)

かぶり 厚さ D	腐食起点 $C_{w0}$	耐久性 評価指標	限界値	耐用年数	耐用年数			
					60%RH	75%RH	90%RH	100%RH
20mm	D-10	(1) 中性化	D	$T_{\text{carbonation}}$	19	107	200 超	200 超
			D-10 (起点)	$T_{\text{initiation}}$	5	7	83	200 超
		(2) 鉄筋腐食	$W_{\text{grade3}}$	$T_{\text{grade3}}$	77	116	14	8
			$W_{\text{crack}}$	$T_{\text{crack}}$	187	200 超	33	18
		(3) 中性化+ 鉄筋腐食	D-10 + $W_{\text{grade3}}$	$T_{\text{initiation}}$ + $T_{\text{grade3}}$	82	123	97	200 超
			D-10 + $W_{\text{crack}}$	$T_{\text{initiation}}$ + $T_{\text{crack}}$	192	200 超	116	200 超

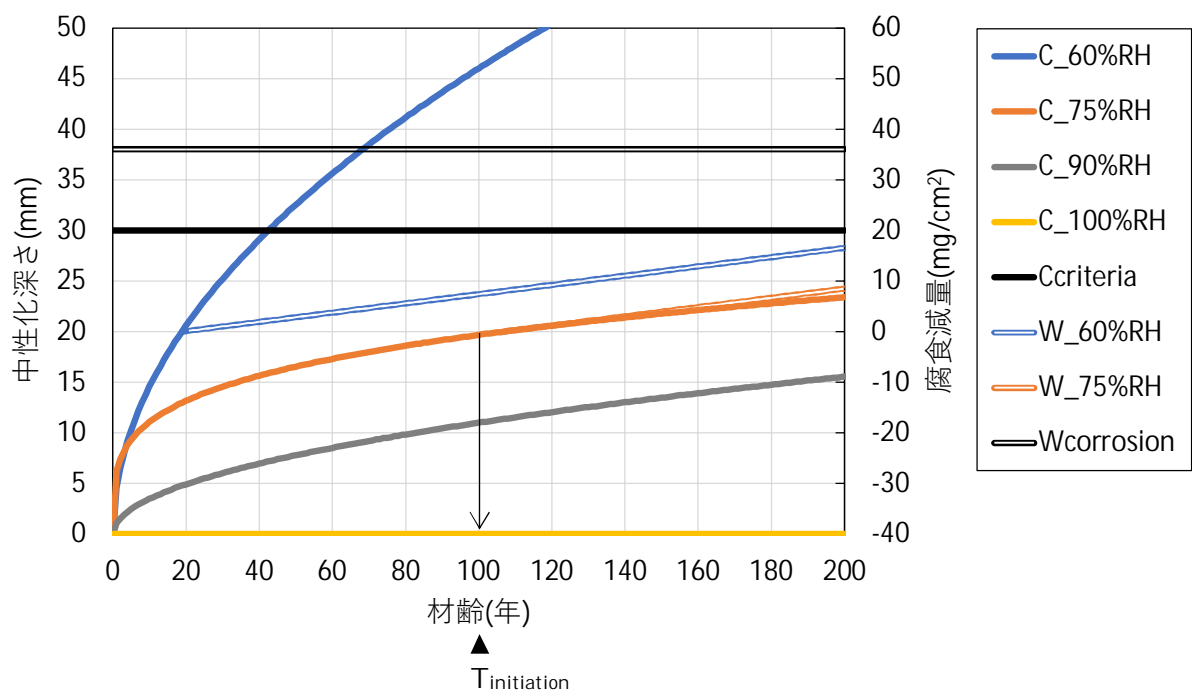
調査条件が 60BB でかぶり厚さを 30mm とした場合における、材齢と中性化深さおよび腐食減量の経時変化を図 4.3-4 に示す。中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数の算定例を表 4.3-8 に示す。

JASS5 による中性化を指標とした耐久性評価〔中性化深さがかぶり厚さに達するまで〕を行った場合の耐用年数は、相対湿度が 60%RH では 43 年、75%RH～100%RH では 200 年以上となった。

鉄筋腐食を指標とした耐久性評価〔腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕を行った場合の耐用年数は、限界腐食量を腐食グレード 3 に相当する  $W_{\text{grade3}}$  とした場合、相対湿度が 60%RH では 200 年以上、75%RH では 200 年以上、90%RH では 23 年、100%RH では 14 年となった。限界腐食量を腐食ひび割れ発生限界の  $W_{\text{crack}}$  とした場合、相対湿度が 60%RH では 200 年以上、75%RH では 200 年以上、90%RH では 40 年、100%RH では 25 年となった。

中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価〔中性化深さがかぶり厚さ－10mm に達するまで、かつ、腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕を行った場合の耐用年数は、限界腐食量を腐食グレード 3 に相当する  $W_{\text{grade3}}$  とした場合、限界腐食量を腐食ひび割れ発生限界の  $W_{\text{crack}}$  とした場合ともに、全ての相対湿度で 200 年以上となった。

なお、参考として、暴露環境の相対湿度が 60%RH のもので、中性化深さがかぶり厚さよりも 20mm 奥まで進行した時点を寿命と判断した場合、中性化の進行による耐用年数は 119 年となる。その時の腐食減量を図 4.3-4 より逆算すると  $10.5\text{mg/cm}^2$  となった。かぶり厚さが大きくなると、鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) として設定した  $21\text{mg/cm}^2$  よりも小さい値となるため、中性化を指標とする耐久性評価は保守的な判断となっている可能性がある。



(※図中の矢印は相対湿度 75%RH で各耐用年数の算定位置を例示したもの)

図 4.3-4 材齢と中性化深さおよび腐食減量の経時変化 (かぶり厚さ 30mm, 60BB)

表 4.3-8 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定例  
(かぶり厚さ 30mm, 60BB)

かぶり 厚さ D	腐食起点 $C_{w0}$	耐久性 評価指標	限界値	耐用年数	耐用年数			
					60%RH	75%RH	90%RH	100%RH
20mm	D-10	(1) 中性化	D	$T_{\text{carbonation}}$	43	200 超	200 超	200 超
			D-10 (起点)	$T_{\text{initiation}}$	19	107	200 超	200 超
		(2) 鉄筋腐食	$W_{\text{grade3}}$	$T_{\text{grade3}}$	200 超	200 超	23	14
			$W_{\text{crack}}$	$T_{\text{crack}}$	200 超	200 超	40	25
		(3) 中性化+ 鉄筋腐食	D-10 + $W_{\text{grade3}}$	$T_{\text{initiation}}$ + $T_{\text{grade3}}$	200 超	200 超	200 超	200 超
			D-10 + $W_{\text{crack}}$	$T_{\text{initiation}}$ + $T_{\text{crack}}$	200 超	200 超	200 超	200 超

#### 4.3.3 中性化を指標とした耐用年数の算定

本節では、かぶり厚さ、セメント種別および水セメント比が異なる条件に対して、JASS 5 による中性化を指標とした耐用年数〔中性化深さがかぶり厚さに達するまで〕を算定し、結果の比較考察を行った。

異なる調合条件における中性化速度係数は、前節と同様に、促進中性化試験結果から一般環境での中性化速度係数を換算した。異なる調合条件における一般環境での中性化速度係数を表 4.3-9 に示す。一般に、中性化の進行速度は、セメント種別や水セメント比により異なることが分かっており、本実験の調合条件では、50CC、60BB、60N、50N の順に中性化速度係数は大きくなった。なお、高炉セメントを用いたコンクリートでは、高濃度の CO<sub>2</sub> 環境下で行う促進中性化試験から得られる中性化速度係数は、実環境における暴露試験から得られる中性化速度係数よりも大きくなることが報告されている<sup>[4-11]</sup>。本検討では、促進中性化試験の結果から一般環境下における中性化速度係数を算定したため、安全側の評価となっており、実環境における耐用年数は更に長くなる可能性がある。

表 4.3-9 促進中性化試験結果から換算した一般環境での中性化速度係数の算定

		促進中性化	一般環境			
CO <sub>2</sub> 濃度		5%	0.01%			
相対湿度		60%RH	60%RH	75%RH	90%RH	100%RH
CO <sub>2</sub> 濃度の係数		1.0	0.14	0.14	0.14	0.14
相対湿度の係数		1.0	1.0	0.63	0.23	0.00
中性化速度係数 (mm/√年) ※実験値	60BB	33.1	4.6	2.9	1.1	0
	60N	19.6	2.7	1.7	0.6	0
	50N	11.6	1.6	1.0	0.4	0
	50CC	41.8	5.9	3.7	1.4	0

JASS 5 による中性化を指標とした耐用年数〔中性化深さがかぶり厚さに達するまで〕の試算結果を図 4.3-5 に示す。

60BB では、かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 94%RH では 200 年以上となった。相対湿度が小さくなるほど中性化を指標とした耐用年数は短く算定され、相対湿度 60%RH では 5 年となった。同様に、かぶり厚さが 20mm では、暴露環境の相対湿度が 88%RH 以上では 200 年以上となり、相対湿度 60%RH では 19 年となった。かぶり厚さが 30mm では、暴露環境の相対湿度が 82%RH 以上では 200 年以上となり、相対湿度 60%RH では 43 年となった。

60N では、かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 89%RH では 200 年以上となった。相対湿度が小さくなるほど中性化を指標とした耐用年数は短く算定され、相対湿度 60%RH では 14 年となった。同様に、かぶり厚さが 20mm では、暴露環境の相対湿度が 80%RH 以上では 200 年以上となり、相対湿度 60%RH では 55 年となった。かぶり厚さが 30mm では、暴露環境の相対湿度が 70%RH 以上では 200 年以上となり、相対湿度 60%RH では 123 年となった。

50N では、かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 83%RH では 200 年以上となった。相対湿度が小さくなるほど中性化を指標とした耐用年数は短く算定され、相対湿度 60%RH

では 39 年となった。同様に、かぶり厚さが 20mm では、暴露環境の相対湿度が 66%RH 以上では 200 年以上となり、相対湿度 60%RH では 156 年となった。かぶり厚さが 30mm では、全ての相対湿度で 200 年以上となった。

50CC では、かぶり厚さが 30mm のみの水準となり他の調合条件と比較できないが、暴露環境の相対湿度が 86%RH では 200 年以上となった。相対湿度が小さくなるほど中性化を指標とした耐用年数は短く算定され、相対湿度 60%RH では 26 年となった。

以上より、セメント種別の違いについては 60BB の方が 60N よりも、水セメント比の違いについては 60N の方が 50N よりも、中性化を指標とした耐用年数が短く算定される結果となった。また、暴露環境の相対湿度、鉄筋のかぶり厚さともに小さい方が中性化の進行による耐用年数は短くなる結果となった。本試験結果からは、暴露環境の相対湿度を小さくするよりも、かぶり厚さを大きくする方が、中性化を指標とした耐用年数を増加させる効果が大きいと考えられる。

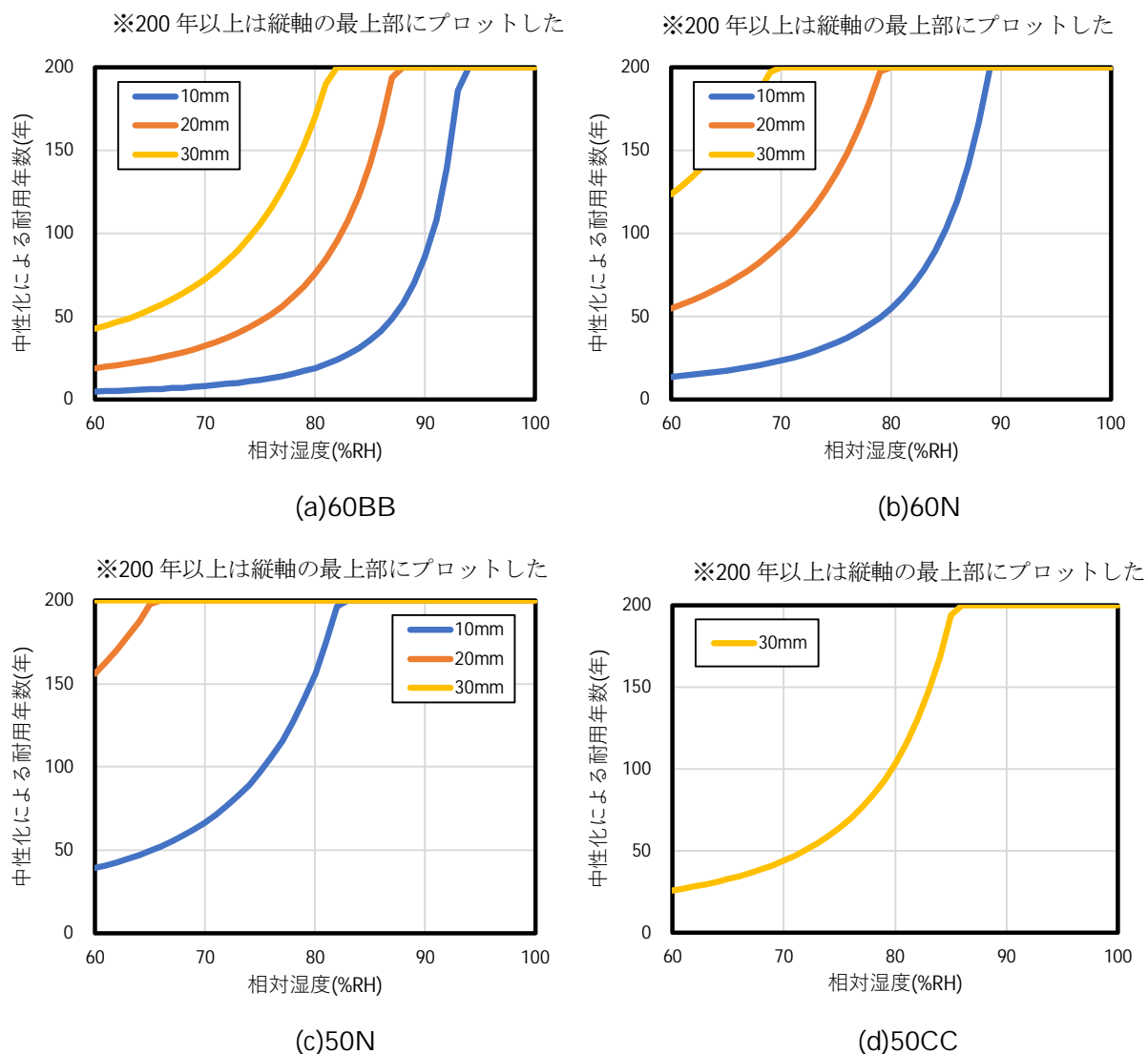


図 4.3-5 JASS 5 による中性化を指標とした耐用年数の算定結果  
[中性化深さがかぶり厚さに達するまで]

#### 4.3.4 鉄筋腐食を指標とした耐用年数の算定

本節では、かぶり厚さ、セメント種別および水セメント比が異なる条件に対して、鉄筋腐食を指標とした耐用年数〔腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕を算定し、結果の比較考察を行った。

前節と同様に、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ ( $C_{wo}$ ) はかぶり厚さ  $D-10\text{mm}$  とする。

鉄筋腐食速度は、3章の実験的検討において、かぶり厚さが 10mm, 20mm, 30mm のそれぞれに対して、相対湿度 (100%RH, 90%RH, 75%RH, 60%RH) ごとに測定した値を用いた。実験により測定した鉄筋腐食速度を表 4.3-10 (かぶり厚さ 10mm), 表 4.3-11 (かぶり厚さ 20mm), 表 4.3-12 (かぶり厚さ 30mm) に示す。なお、3章の実験的検討では、鉄筋の下端まで中性化させた試験体を用いて鉄筋腐食速度を測定している。そのため、中性化深さが鉄筋のかぶり厚さに到達した時点から中性化深さが鉄筋下端まで進行するまでの間の鉄筋腐食速度は、本実験の測定値よりも小さくなるものと考えられる。ただし、本検討は鉄筋腐食速度を一定とした場合の算定としているため、算定結果が安全側となるように実験での測定値をそのまま採用することとした。

また、限界腐食量は、鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) と腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ ) の 2 種類に対して算定を行うこととした。 $W_{\text{grade3}}$  は、表 4.3-3 (再掲) に示すとおり  $21.0\text{ mg/cm}^2$  とし、 $W_{\text{crack}}$  は表 4.3-4 (再掲) に示すとおり、かぶり厚さごとに異なる値とした。

表 4.3-10 実験により測定した鉄筋腐食速度 (かぶり厚さ 10mm)

相対湿度		60%RH	75%RH	90%RH	100%RH
鉄筋腐食速度 $V_{\text{corr}}$ ( $\text{mg/cm}^2/\text{year}$ )	60BB	0.64	0.73	10.96	6.12
	60N	0.18	0.64	6.39	3.10
	50N	0.32	0.32	0.55	0.73

表 4.3-11 実験により測定した鉄筋腐食速度 (かぶり厚さ 20mm)

相対湿度		60%RH	75%RH	90%RH	100%RH
鉄筋腐食速度 $V_{\text{corr}}$ ( $\text{mg/cm}^2/\text{year}$ )	60BB	0.27	0.18	1.55	2.83
	60N	0.09	0.18	0.73	1.00
	50N	0.18	0.27	0.18	0.64

表 4.3-12 実験により測定した鉄筋腐食速度 (かぶり厚さ 30mm)

相対湿度		60%RH	75%RH	90%RH	100%RH
鉄筋腐食速度 $V_{\text{corr}}$ ( $\text{mg/cm}^2/\text{year}$ )	60BB	0.09	0.09	0.91	1.48
	60N	0.09	0.23	0.32	0.68
	50N※	0.13	0.24	0.31	0.59
	50CC	0.09	0.18	0.55	1.00

※50N の鉄筋腐食速度は、かぶり厚さ 10mm, 20mm からの外挿により算定した。



表 4.3-3 (再掲) 既往の研究による鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量  
( $W_{\text{grade3}}$ )

鉄筋径		D10	D19	D25	D32	D38
グレード 3 相当腐食量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	算定値	21.0	44.5	59.8	73.2	88.5
	本研究の設定値 (最小値を採用)	21.0				

表 4.3-4 (再掲) 既往の研究による腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ )

かぶり厚さ		10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
ひび割れ発生 限界腐食量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	算定値の範囲	76~98	51~66	36~46	30~39	34~44
	本研究の設定値 (最小値を採用)	76	51	36	30	34

限界腐食量を鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) とした場合の鉄筋腐食を指標とした耐用年数 [腐食の起点から限界腐食量に達するまで] の算定結果を図 4.3-6 に示す。

60BB の耐用年数では、かぶり厚さ 10mm では、暴露環境の相対湿度に関わらず非常に短くなり、最長でも 33 年 (60%RH) となった。かぶり厚さ 20, 30mm では、かぶり厚さ 10mm と比較すれば耐用年数は増大するが、相対湿度が 80%RH を超えると 50 年を下回った。60BB の中性化後の鉄筋腐食速度は、湿潤養生期間を 5 日で打ち切った試験体により測定された結果である。湿潤養生期間を JASS 5 で定められている 7 日以上とすれば、実際の耐用年数はもう少し長くなると考えられる。

60N の耐用年数は、かぶり厚さが 10mm では、相対湿度が 60%RH のときに 117 年と長くなったが、75%RH 以上では 33 年以下と短かった。かぶり厚さが 20mm では、かぶり厚さ 10mm と比較して耐用年数は増大し、相対湿度が 75%RH 以下では 117 年以上となった。一方、相対湿度が 80%RH を超えると 50 年を下回った。かぶり厚さが 30mm では、更に耐用年数は増大していくが、相対湿度が 90%RH を超えると 50 年を下回った。

50N の耐用年数は、かぶり厚さが 10mm では、相対湿度が 75%RH 以下では 66 年以上となった。一方、相対湿度が 80%RH を超えると 50 年を下回った。かぶり厚さ 20, 30mm では、かぶり厚さ 10mm と比較して耐用年数は増大していくが、相対湿度が 90%RH を超えると 50 年を下回った。

50CC の耐用年数は、かぶり厚さ 30mm と比較的大きいことから、相対湿度が 80%RH 以下では 70 年以上となった。一方、相対湿度が 85%RH を超えると 50 年を下回った。

限界腐食量を腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ ) とした場合の鉄筋腐食を指標とした耐用年数 [腐食の起点から限界腐食量に達するまで] の算定結果を図 4.3-7 に示す。

鉄筋腐食速度は同じ値を使用しており、限界状態とする腐食減量を  $21\text{mg}/\text{cm}^2$  から  $71\text{mg}/\text{cm}^2$  (かぶり厚さ 10mm),  $51\text{mg}/\text{cm}^2$  (かぶり厚さ 20mm),  $36\text{mg}/\text{cm}^2$  (かぶり厚さ 30mm) まで

大きくした。そのため、全ての調合条件において、限界状態とする腐食減量を増加させた分だけ、耐用年数が増大している。特に、かぶり厚さが 10mm の場合には、限界状態とする腐食減量の増加量が大きくなることもあり、耐用年数が増大する傾向が見られ、50N ではかぶり厚さ 10mm の耐用年数が最大となった。

かぶり厚さが小さい水準で耐用年数が大きくなる算定結果は、実現現象を正確に表現しているとは言い難いが、50N では鉄筋腐食速度の算定に用いた腐食電流密度が、かぶり厚さ 10mm では  $0.12\mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、かぶり厚さ 20mm では  $0.14\mu\text{A}/\text{cm}^2$  と、ともに  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下であり、不働態状態と判定される範囲であったことから、ともに電気化学的測定の誤差の範囲内の結果となった。

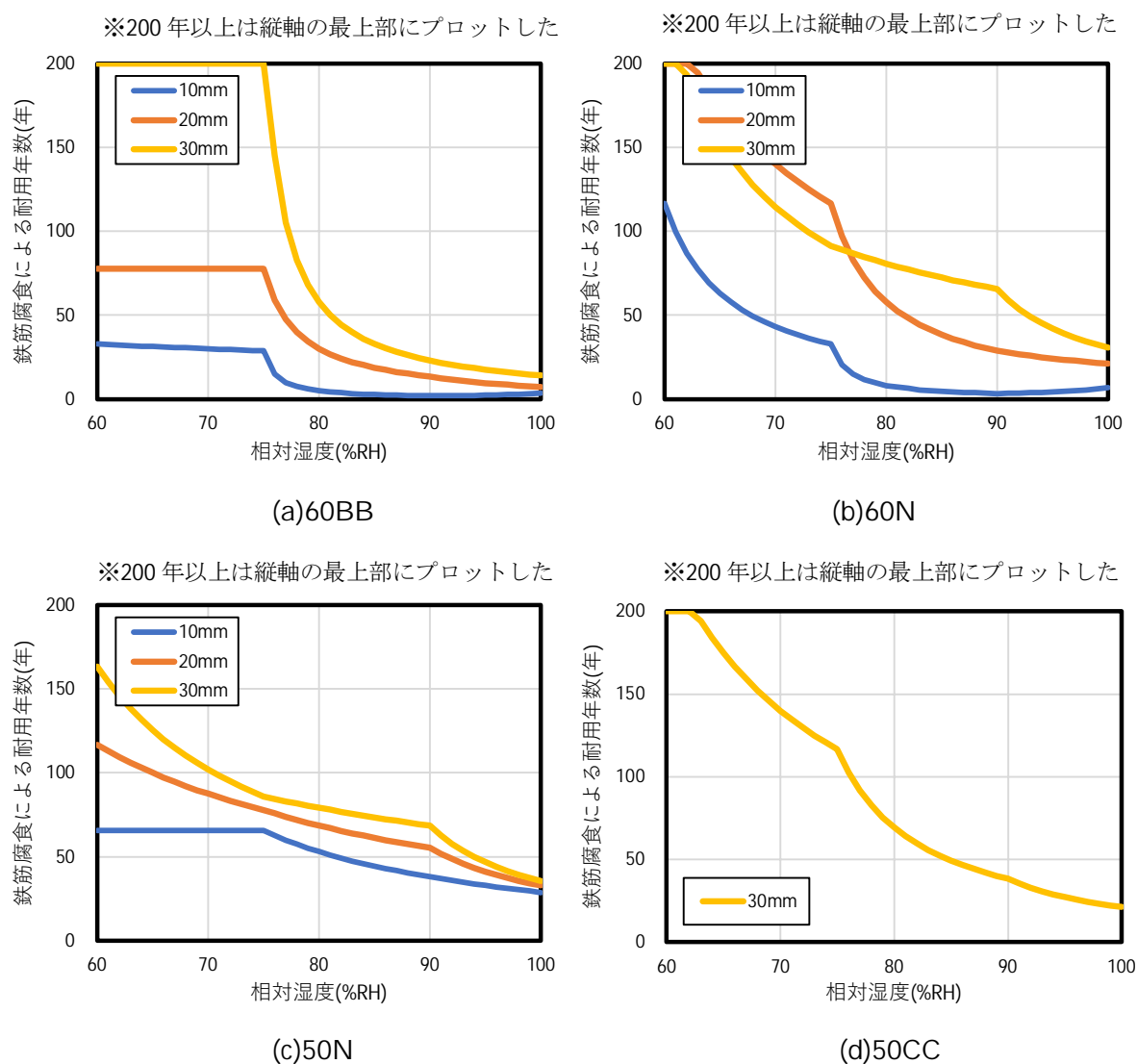
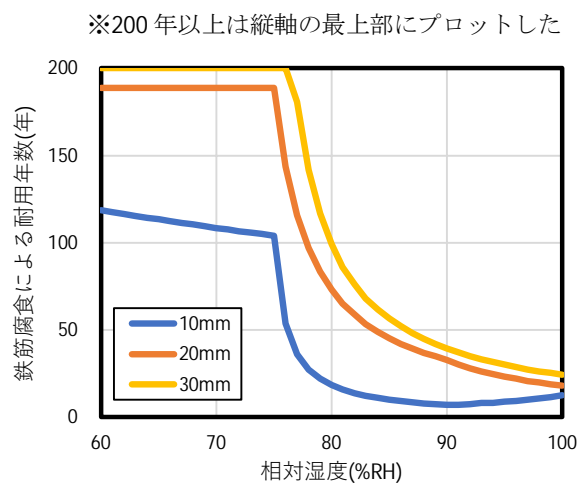


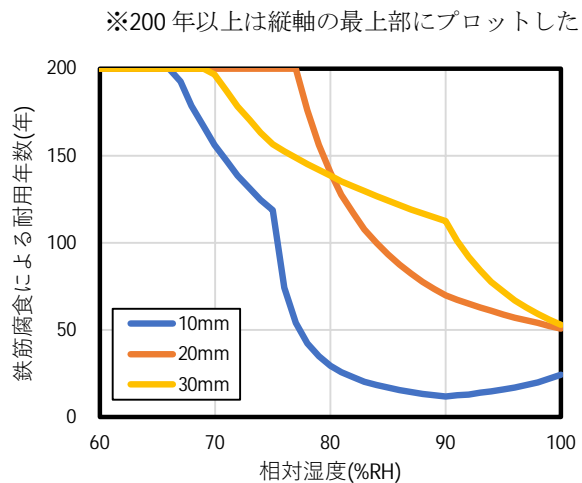
図 4.3-6 鉄筋腐食を指標とした耐用年数の試算結果

[腐食の起点から限界腐食量に達するまで]

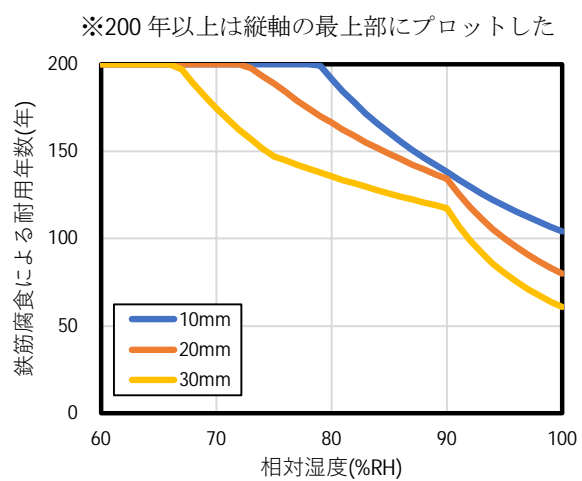
(限界腐食量を鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) とした場合)



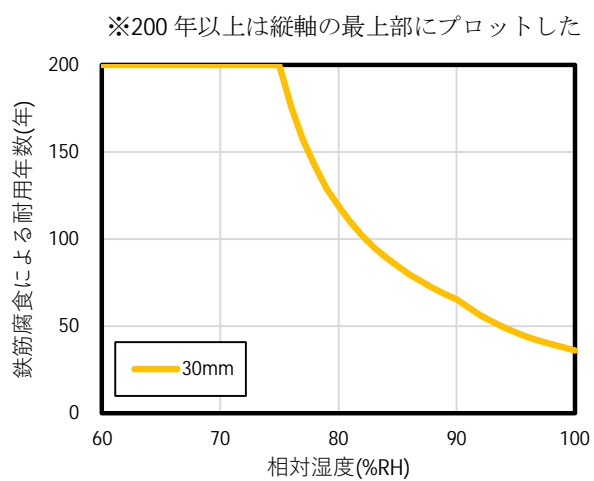
(a)60BB



(b)60N



(c)50N



(d)50CC

図 4.3-7 鉄筋腐食を指標とした耐用年数の試算結果

[腐食の起点から限界腐食量に達するまで]

(限界腐食量を腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ ) とした場合)

#### 4.3.5 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定

本節では、かぶり厚さ、セメント種別および水セメント比が異なる条件に対して、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数〔中性化深さがかぶり厚さ－10mm に達するまで、かつ、腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕を算定し、結果の比較考察を行った。

中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定方法の説明として、調合条件を 60BB、限界腐食量を鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) とした場合の例を図 4.3-8 に示す。

かぶり厚さ 10mm では、鉄筋腐食の起点となる中性化深さがかぶり厚さ－10mm であるため、中性化を指標とした耐用年数（図の凡例：中性化（D－10mm））は算定されない。そのため、材齢 0 日より鉄筋腐食の進行が開始されるものとして、鉄筋腐食を指標とした耐用年数（図の凡例：鉄筋腐食 ( $W_{\text{grade3}}$ )）が算定され、両方を考慮した耐用年数（図の凡例：中性化＋鉄筋腐食）と等しくなる。

かぶり厚さ 20mm, 30mm では、外部環境の相対湿度が高い場合には、中性化自体の進行速度が遅くなるため、中性化を指標とした耐用年数は長く算定される。一方、中性化後の鉄筋腐食速度は大きくなるため、鉄筋腐食を指標とした耐用年数は短く算定される。また、外部環境の相対湿度が低い場合はその逆の傾向を示す。鉄筋腐食の起点となる中性化深さに達するまでの中性化を指標とした耐用年数（図の凡例：中性化（D－10mm））と、鉄筋腐食の起点となる中性化深さに達した以降の鉄筋腐食を指標とした耐用年数（図の凡例：鉄筋腐食 ( $W_{\text{grade3}}$ )）の両方を考慮することで、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数（図の凡例：中性化＋鉄筋腐食）が算定される。その結果は、相対湿度が 75～85%RH を底とする下に凸の曲線関係となっている。

限界腐食量を鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) とした場合の中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数〔中性化深さがかぶり厚さ－10mm に達するまで、かつ、腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕の算定結果を図 4.3-9 に示す。

60BB の耐用年数は、かぶり厚さが 10mm では、先述したとおり鉄筋腐食を指標とした耐用年数と等しくなる。かぶり厚さ 20mm では、相対湿度が 80%RH で耐用年数が 48 年、かぶり厚さが 30mm では、相対湿度が 80%RH で耐用年数が 133 年と最小値をとった。

60N の耐用年数は、かぶり厚さが 10mm では、鉄筋腐食を指標とした耐用年数と等しくなる。かぶり厚さ 20mm では、相対湿度が 80%RH で耐用年数が 113 と最小値をとった。かぶり厚さ 30mm では、全ての相対湿度において耐用年数は 200 年以上となった。

50N の耐用年数は、かぶり厚さが 10mm では、鉄筋腐食を指標とした耐用年数と等しくなる。かぶり厚さ 20, 30mm では、全ての相対湿度において耐用年数は 150 年以上となった。

50CC の耐用年数は、かぶり厚さ 30mm と比較的大きいことから、相対湿度が 80%RH で耐用年数が 115 年と最小値をとった。

以上の結果から、劣化要因を中性化とした場合には、本実験条件である 60BB, 60N, 50N, 50BB の調合の下では、建築基準法で規定されている最小かぶり厚さが確保されていれば、一般環境においては非常に高い耐久性を有していると言える。ただし、相対湿度が 80%RH 付近では、ひとたび中性化してしまうと、鉄筋腐食を指標とした耐用年数は短くなるため、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮して耐久性評価を行う際には、十分に注意したい。

限界腐食量を腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ ) とした場合の中性化後の鉄筋腐食の進

行を考慮した耐用年数〔中性化深さがかぶり厚さ－10mm に達するまで、かつ、腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕の算定結果を図 4.3-10 に示す。

全ての調査条件において、かぶり厚さが 20mm 以上であれば、相対湿度によらず耐用年数は 80 年を上回っており、非常に高い耐久性を有していると言える。

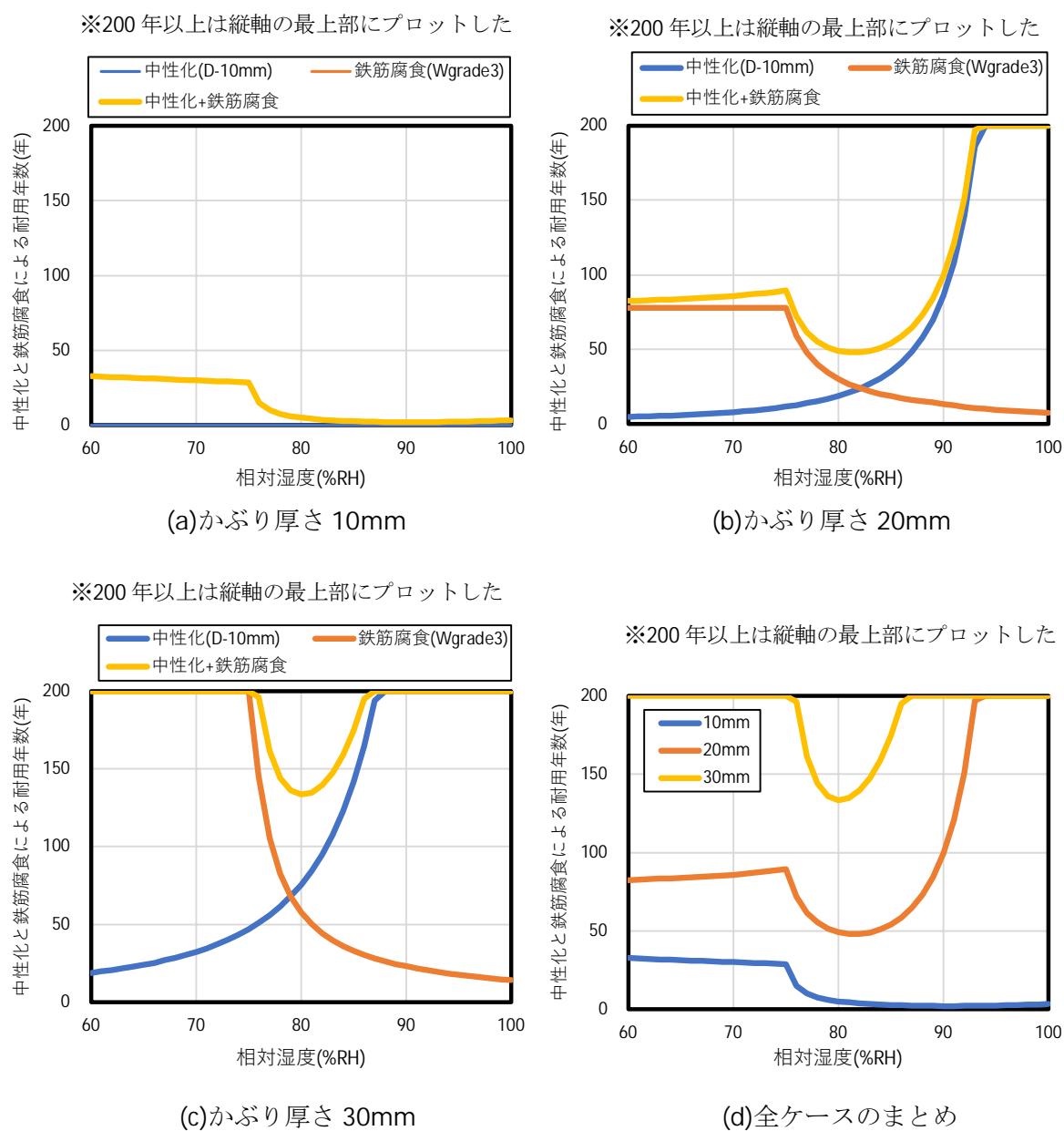
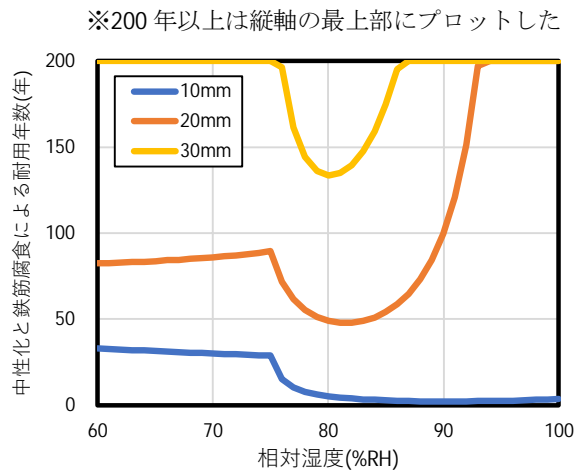


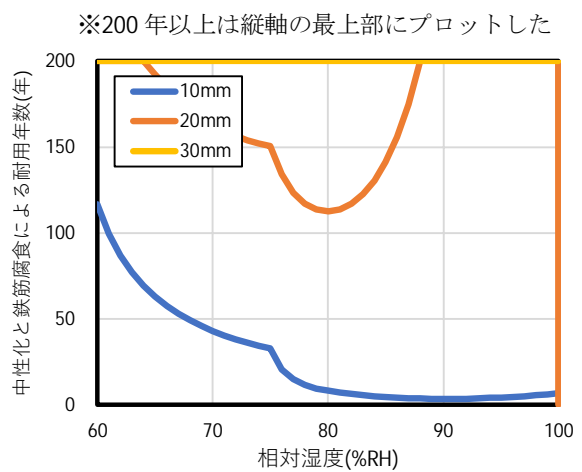
図 4.3-8 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定方法

〔中性化深さがかぶり厚さ－10mm に達するまで、腐食の起点から限界腐食量に達するまで〕

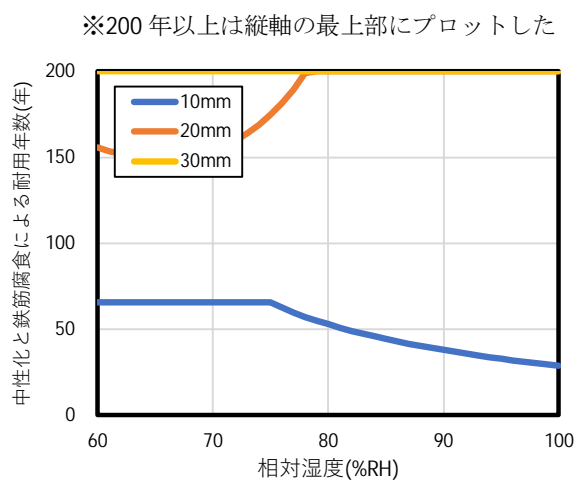
(60BB の限界腐食量を  $W_{\text{grade3}}$  とした場合の一例)



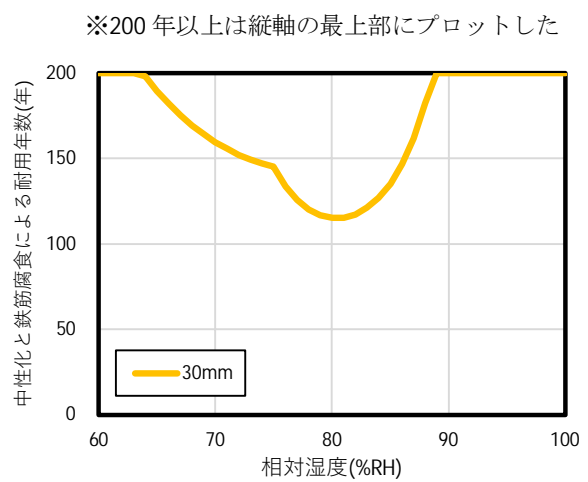
(a)60BB



(b)60N



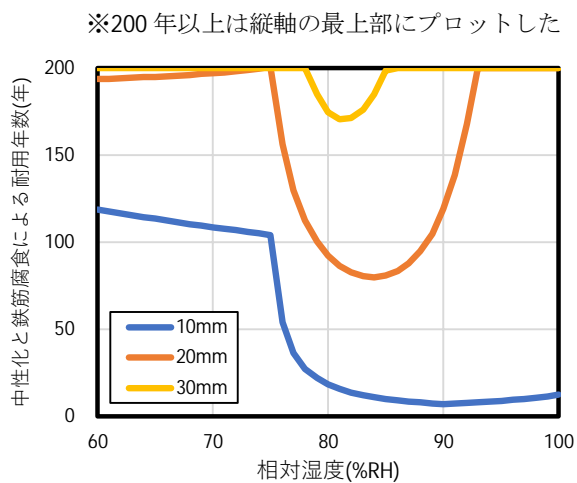
(c)50N



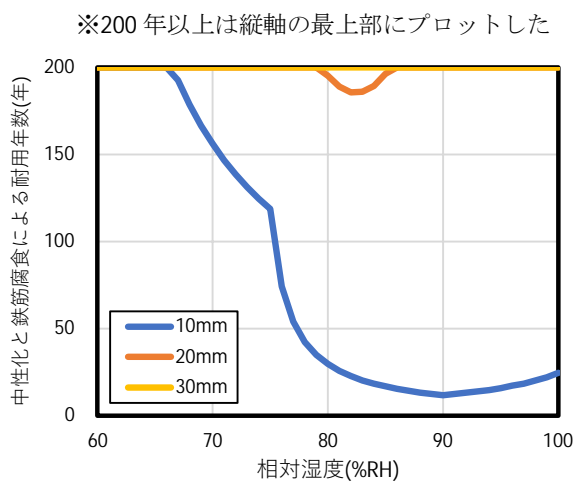
(d)50CC

図 4.3-9 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定結果

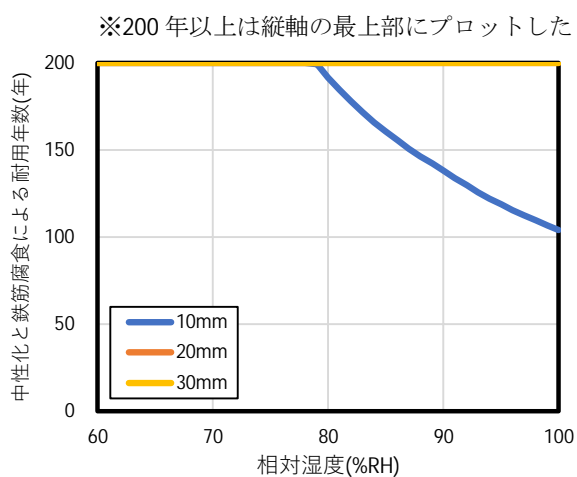
[中性化深さがかぶり厚さ-10mm に達するまで、腐食の起点から限界腐食量に達するまで]  
(限界腐食量を鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) とした場合)



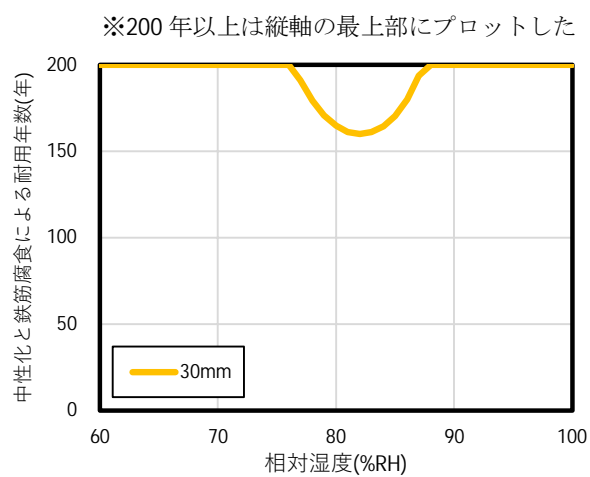
(a)60BB



(b)60N



(c)50N



(d)50CC

図 4.3-10 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定結果  
 [中性化深さがかぶり厚さ-10mm に達するまで、腐食の起点から限界腐食量に達するまで]  
 (限界腐食量を腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{\text{crack}}$ ) とした場合)

#### 4.3.6 提案手法（鉄筋腐食を指標）と従来の JASS 5（中性化を指標）の評価の比較

提案した鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法による耐用年数に対して、従来の JASS 5 に示される中性化を指標とした耐久性評価手法による耐用年数を比較する。

調合条件が 60BB、かぶり厚さ 10mm の耐用年数の試算結果を図 4.3-11(a)に示す。

相対湿度 76%RH 以下の乾燥領域では、JASS 5 に示される中性化の指標で評価するよりも、鉄筋腐食の指標で評価した方が、耐用年数が増加する傾向があり、鉄筋腐食による評価を行うことで合理的な評価ができる。このことは、JASS 5 における非腐食環境の定義である中性化しても鉄筋腐食は生じないという現象説明を、中性化後の鉄筋腐食速度というエビデンスを持って説明できたと考えられる。中性化した既存躯体の評価や、中性化速度が極めて大きくなる環境配慮コンを評価する際に有用と考えられる。

相対湿度 76%RH 以上の湿潤領域では、鉄筋腐食の指標で評価を行った方が耐用年数は短くなる結果となった。このことは、かぶり不足の箇所では、中性化の指標による評価よりも鉄筋腐食が進むリスクが高くなる可能性を示していると考えられる。実際の既存躯体調査においても、かぶり不足の箇所では、20～30 年の供用期間で鉄筋腐食が生じているケースがある。ただし、極端な湿潤状態にあり、外部環境が一定条件の場合であれば、中性化指標による耐用年数は 50 年以上となっている。中性化した既存躯体の評価や、中性化速度が極めて大きくなる環境配慮コンを評価する際には、中性化しても鉄筋腐食で評価できる新たなルートを示しており、有益と考えられます。

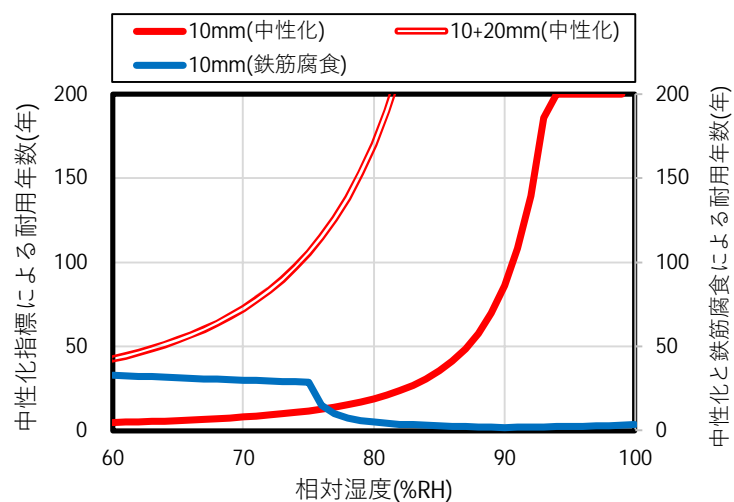
調合条件が 60BB、かぶり厚さ 20mm の耐用年数の試算結果を図 4.3-11(b)に示す。

乾燥領域および湿潤領域における評価は、先述したかぶり厚さ 10mm の場合と概ね等しい傾向が認められた。加えて、かぶり厚さ 20mm では、相対湿度 75～85%の間に耐用年数が極小となる結果となった。

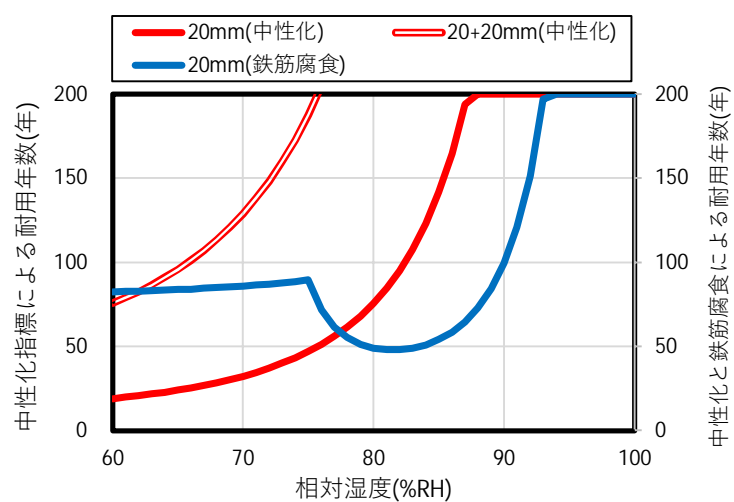
調合条件が 60BB、かぶり厚さ 30mm の耐用年数の試算結果を図 4.3-11(c)に示す。

乾燥領域および湿潤領域における評価は、先述したかぶり厚さ 10mm、20mm の場合と概ね等しい傾向が認められた。ただし、かぶり厚さ 30mm では、湿潤領域においても、耐用年数は 130 年を超え、長寿命であるため、影響は小さいものと考えられる。

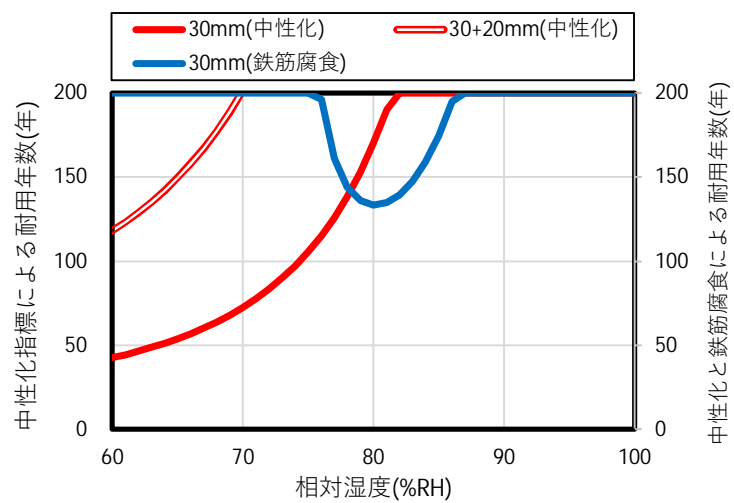




(a)60BB, かぶり厚さ 10mm の試算結果



(b)60BB, かぶり厚さ 20mm の試算結果



(c)60BB, かぶり厚さ 30mm の試算結果

図 4.3-11 提案手法と従来の JASS 5 の評価の比較 (60BB)

全ての調査条件に対して、提案した中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法による耐用年数に対して、従来の JASS 5 に示される中性化を指標とした耐久性評価手法による耐用年数を比較した。

限界腐食量を腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{crack}$ ) とした場合の耐用年数の比較を図 4.3-12, 限界腐食量を腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{crack}$ ) とした場合の耐用年数の比較を図 4.3-13 に示す。

いずれの調査条件においても、相対湿度 80%RH 程度を境界として、それより相対湿度が小さい領域では、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の方が長く算定された。乾燥環境では、鉄筋腐食の進行を考慮することで、合理的な耐久性評価が可能となるものと考えられる。一方、相対湿度が大きい領域では、中性化を指標とした耐用年数の方が長く算定された。特に、かぶり厚さが 10mm など、法かぶりを下回るような場合には、中性化による耐用年数に先んじて鉄筋腐食が進行している可能性がある。実際の建築物においても、こうしたかぶり不足の箇所では、比較的初期から鉄筋腐食の進行が確認される場合もあるため、十分に注意が必要な箇所である考えられる。

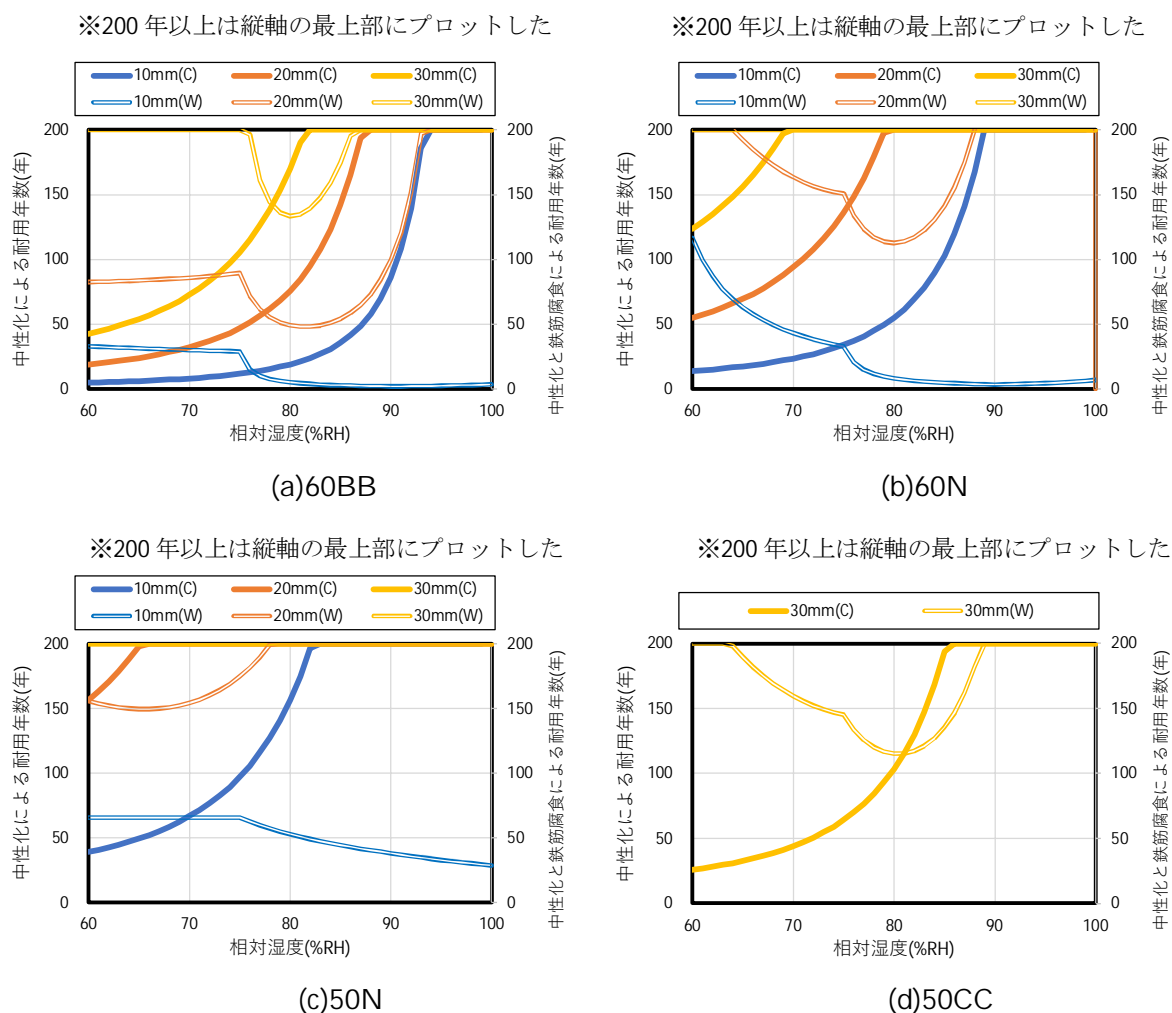


図 4.3-12 提案手法と従来の JASS 5 の評価の比較 (全調査)  
(限界腐食量を腐食ひび割れが発生する腐食減量 ( $W_{crack}$ ) とした場合)

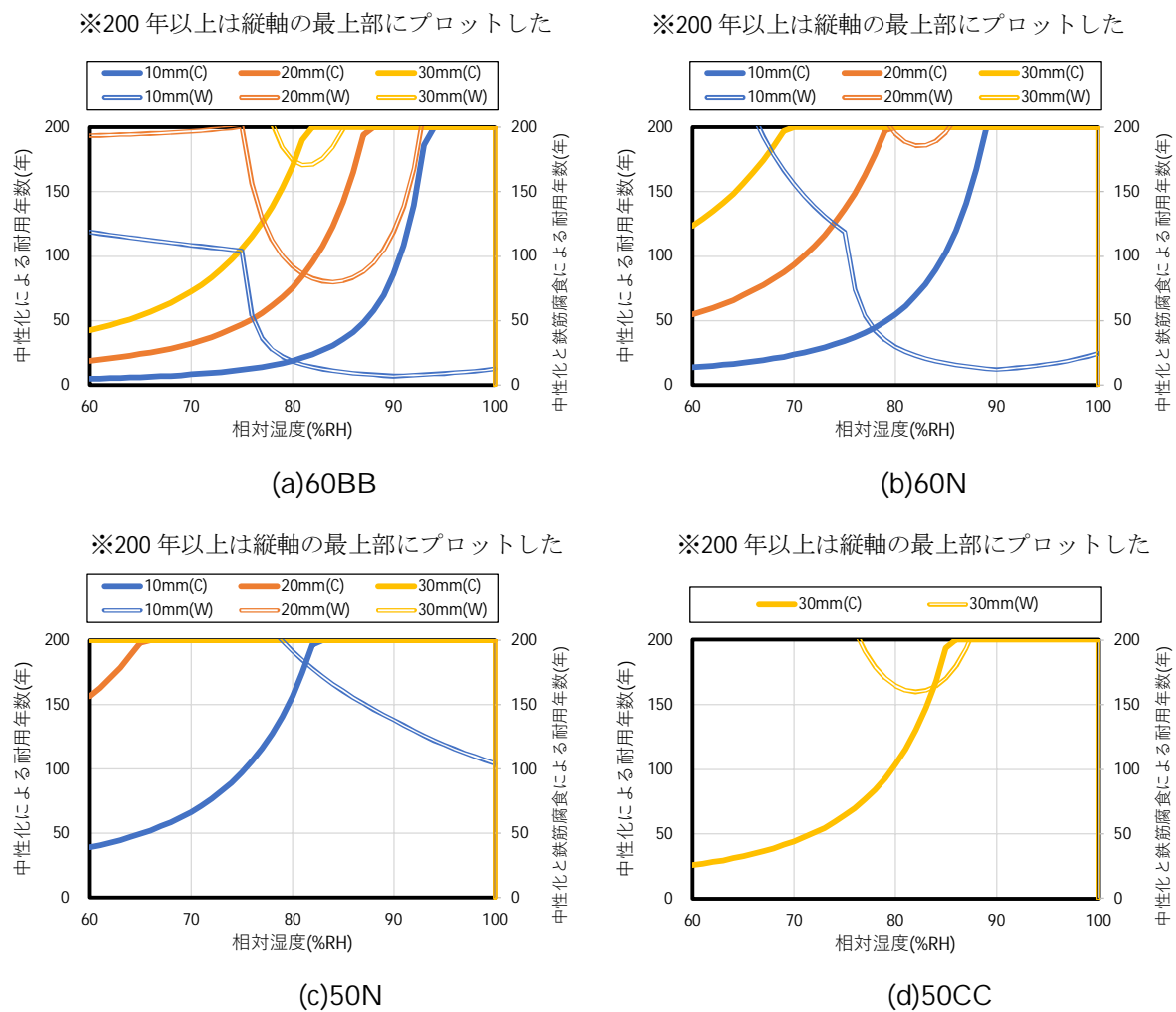


図 4.3-13 提案手法と従来の JASS 5 の評価の比較（全調合）  
（限界腐食量を腐食ひび割れが発生する腐食減量（ $W_{\text{crack}}$ ）とした場合）

#### 4.3.7 4.3 節の結論

コンクリートの含水状態および中性化後の鉄筋腐食速度を一定条件とした場合における，中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定方法を示し，かぶり厚さ，セメント種別および水セメント比の違いについて考察した。

かぶり厚さが 10mm の場合，高炉セメント B 種で水セメント比が 60%の調合条件では，暴露環境の相対湿度が 90～60%RH の範囲で，中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数は 100 年程度となり，他の水準と比較して耐久性が低いと考えられる。その他の調合条件では，暴露環境の相対湿度が 100～60%RH の設定した全範囲で，耐用年数は 150 年を超え，高い耐久性を有すると考えられる。ただし，高炉セメント B 種の中性化後の鉄筋腐食速度は，湿潤養生期間を 5 日で打ち切った試験体により測定された結果である。湿潤養生期間を JASS 5 で定められている 7 日以上とすれば，実際の耐用年数は更に長くなるものと考えられる。

かぶり厚さが 20mm 以上の場合，調合条件によらず，暴露環境の相対湿度が 100～60%RH の設定した全範囲で，中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数は 200 年を超え，高い耐久性を有すると考えられる。

このように，中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数に拠れば，一般的なコンクリートに対しても，中性化速度が大きくなる混和材を高含有したコンクリートに対しても，合理的な評価が可能となると考えられる。

## 4.4 実設計で再利用を計画した既存建築物での耐久性評価手法の適用例

### 4.4.1 4.4 節の概要

本節では、実設計において再利用を計画した既存建築物の耐久性評価の検討として、中性化後の鉄筋腐食速度に基づいた耐用年数評価を行い、4.3 節で提案した耐久性評価手法の実行性を確認したものである。加えて、維持管理を含めた耐久設計の実施例についても検討した<sup>[4-13]</sup>。

建築物の計画概要を表 4.4-1 に示す。対象とした建築物は、地上 20 階、地下 3 階であり、基準階が約 1000 坪のオフィスを中心としたホテル・商業・シェアオフィス・ホールからなる、大規模複合施設である。開発の特徴は、建替えを計画した旧建築物との地下 1 階床以深の既存地下躯体を、空間および構造体として最大限活用する計画としたことである<sup>[4-14]</sup>。

再利用を計画した既存地下躯体の詳細を表 4.4-2、既存図の伏図を図 4.4-1、断面図を図 4.4-2、内観を写真 4.4-1 に示す。

既存建物は地下 3 階、地上はエキスパンションジョイントで分離した 2 棟からなり、地下で一体構造となっている。竣工年は 1982 年であり、調査時において竣工後 38 年が経過していた。地下の主な用途はトレーニングジム、事務室、機械室、駐車場、電気室等であった。既存建物の建設時の図面、計算書が残っており当初の設計意図をある程度把握することが可能であった。

表 4.4-1 建築物の計画概要

所在地	東京都
敷地面積	約 6,700m <sup>2</sup>
延床面積	約 69,000m <sup>2</sup>
構造形式	地上 鉄骨造 地下 鉄骨鉄筋コンクリート造
規模	地上 20 階、地下 3 階、塔屋 2 階
高さ	約 97m
用途	事務所、ホテル、ホール、商業施設、駐車場等

表 4.4-2 再利用を計画した既存地下躯体の詳細

項目	摘要
竣工年月	1982 年 1 月
調査時築年数	38 年
階数	地下 3 階
構造形式	鉄骨鉄筋コンクリート造
用途	トレーニングジム、事務室、機械室、駐車場、電気室等
コンクリート仕様	設計基準強度 240kg/cm <sup>2</sup>



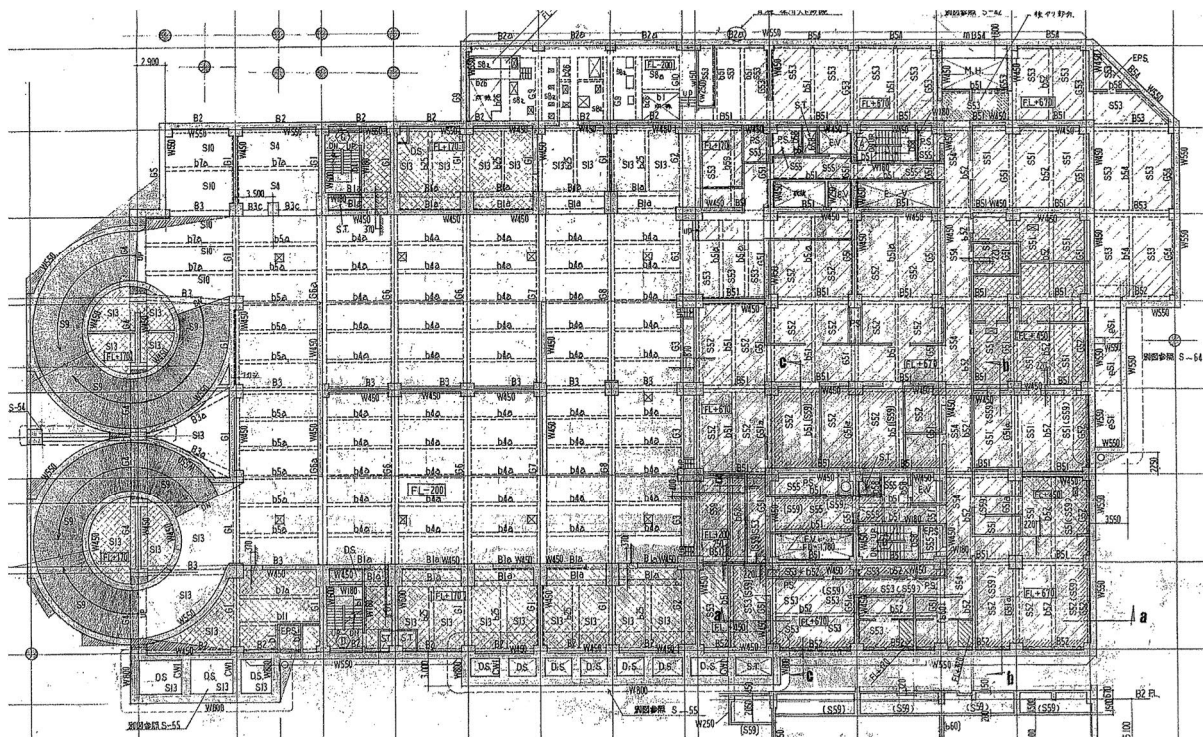


図 4.4-1 再利用を計画した既存地下躯体の伏図

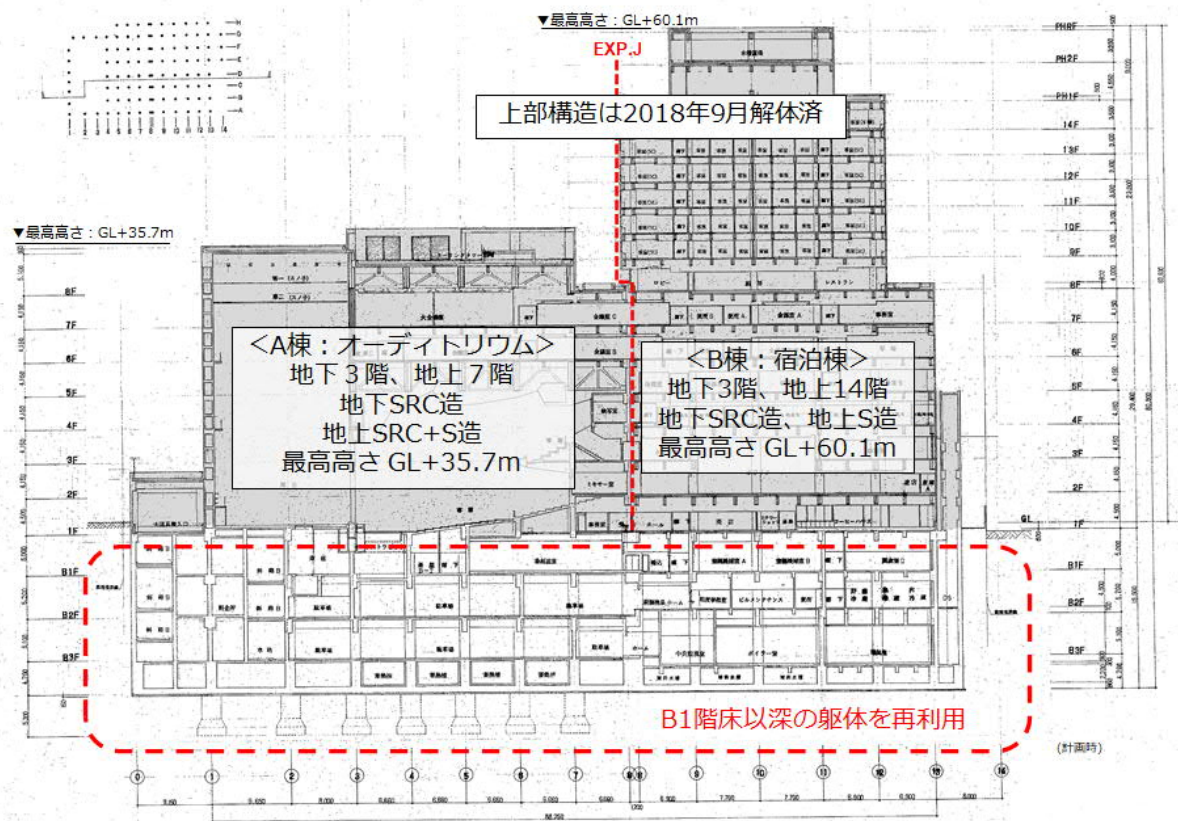


図 4.4-2 再利用を計画した既存地下躯体の断面図



(a)地下外周壁



(b)地下内壁・地下床(見上げ)

写真 4.4-1 再利用を計画した既存地下躯体の内観

#### 4.4.2 既存地下躯体の再利用における確認項目

既存地下躯体の再利用における主な確認項目を表 4.4-3 に示す。

設計図書との整合については、日本建築防災協会の既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説<sup>[4-15]</sup>に準拠して、部材の位置・寸法、配筋状況、かぶり厚さを調査し、概ね既存図面と整合していることを確認した。ただし、一部でかぶり厚さが不足している箇所が認められたため、適切な補修を行うこととした。コンクリートの構造安全性については、同指針に準拠して圧縮強度を調査し、全ての調査箇所（34 箇所）において、設計基準強度以上であることを確認した。

本節で主題としたコンクリートの耐久性（耐用年数）については、日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説<sup>[4-12]</sup>に準拠して、中性化深さ、鉄筋腐食状況および含水率を調査した。これらの調査結果より、中性化の進行に基づいて、中性化深さが許容限界に達するまでの期間を耐用年数とする従来の耐用年数評価と、腐食環境・非腐食環境（中性化後の鉄筋腐食速度）を考慮した耐用年数評価を実施した。

表 4.4-3 既存地下躯体の再利用における主な確認項目

確認項目	調査項目	調査方法
設計図書との整合 <sup>[4-15]</sup> に準拠	部材位置・寸法	非破壊試験
	配筋状況	非破壊試験
	かぶり厚さ	非破壊試験
コンクリートの構造安全性 <sup>[4-15]</sup> に準拠	圧縮強度	湿式コア供試体（JIS A 1108）
コンクリートの耐久性 （耐用年数） <sup>[4-12]</sup> に準拠	中性化深さ	湿式コア供試体（JIS A 1152）
	鉄筋腐食状況	はつり出し
	含水率	乾式コア供試体（JIS A 1476）



#### 4.4.3 中性化を指標とした耐用年数評価

##### (1) 概要

既存地下躯体のかぶり厚さおよび中性化深さの調査結果から、JASS 5 による中性化指標とした耐用年数評価を行った。

検討対象は、地下外周壁、地下内壁および地下床の 3 部材とした。詳細な算定方法は、耐久設計施工指針<sup>[4-15]</sup>を参考として、コンクリートの中性化の進行は、経過材齢の平方根に比例するものとし、中性化深さの許容限界は、屋外では中性化深さがかぶり厚さに到達した時点、屋内では中性化深さがかぶり厚さより 20mm 奥まで到達した時点とした。

既存地下躯体の一部については、図 4.4-3 に示すように躯体表面に仕上げ材が施されているものがあつた。仕上げ材がセメント系の場合には、仕上げ材の中性化抑制効果を考慮して、仕上げ層が全て中性化した後にコンクリートの中性化が開始するものとした。一方、仕上げ材が塗料などの非セメント系の場合には、施工直後は中性化抑制効果が期待できるが、仕上げ材の経年劣化によりその効果は徐々に失われていくものと考えられる。本検討においては、仕上げ材を施工した後の維持管理状況も明確でないことから、非セメント系の仕上げ材の中性化抑制効果は考慮しないこととした。

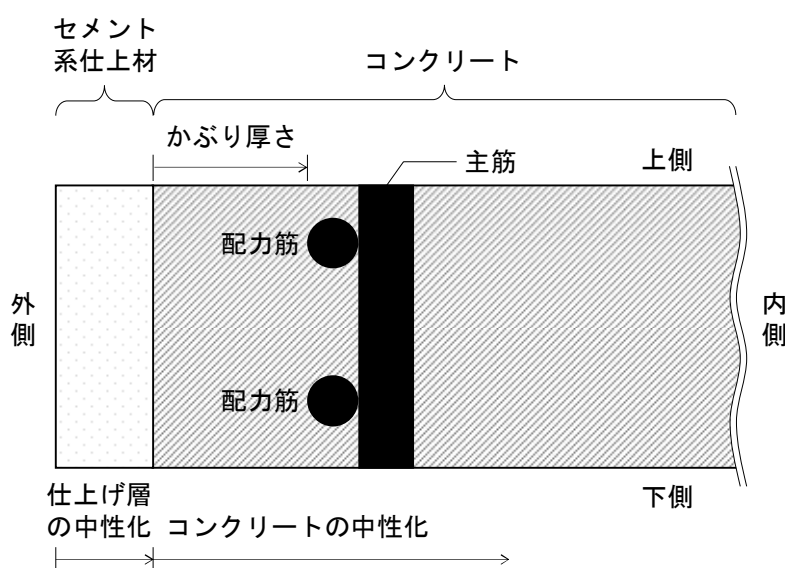


図 4.4-3 地下内壁の断面図の一例

##### (2) かぶり厚さおよび中性化深さの調査

地下外周壁、地下内壁、地下床のそれぞれの部材に対して、各階（B1 階、B2 階、B3 階）ごとに鉄筋のかぶり厚さおよびコンクリートの中性化深さの調査を行った。

かぶり厚さは、地下外周壁では 34 箇所、地下内壁では 34 箇所、地下床では 31 箇所について、非破壊試験により測定した。地下外周壁のかぶり厚さは、平均値は 79.6mm（標準偏差 29.8mm）であつた。耐用年数の算定に用いるかぶり厚さは、ばらつきを考慮して 49.8mm と設定した。地下内壁および地下床については、耐用年数の算定に用いるかぶり厚さは、建築基準法上の最小かぶり厚さとし、それぞれ 30mm、20mm と設定した。

コンクリートの中性化深さは、地下外周壁では 10 箇所、地下内壁では 22 箇所、地下床では 9

箇所について、湿式コア供試体により測定した。コア供試体による中性化深さの測定例を写真 4.4-2、調査時点（築年数 38 年）における中性化深さの測定値を図 4.4-4 に示す。

地下外周壁（図 4.4-4 (a)）は、躯体表面にほとんど仕上げ材が施されていなかった。調査時点におけるコンクリートの中性化深さは 9.8～23.0mm であり、平均値は 17.9mm（標準偏差 5.4mm）であった。

地下内壁（図 4.4-4 (b)）は、躯体表面に仕上げ材として貧調合モルタルが施されていた。仕上げ層の厚さは 0～43mm であり、平均値は 20.6mm であった。調査時点におけるコンクリートの中性化深さは 0.6～23.8mm であり、平均値は 9.8mm（標準偏差 9.8mm）であった。

地下床（図 4.4-4 (c)）は、躯体表面に仕上げ材として貧調合モルタルが施されていた。仕上げ層の厚さは 0～40mm であり、平均値は 17.1mm であった。調査時点におけるコンクリートの中性化深さは 1.4～31.9mm であり、平均値は 18.4mm（標準偏差 9.2mm）であった。

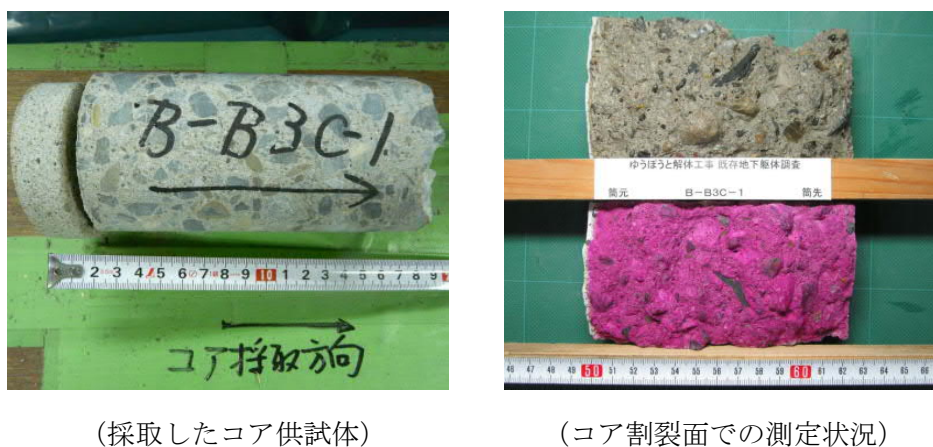


写真 4.4-2 中性化深さの測定例

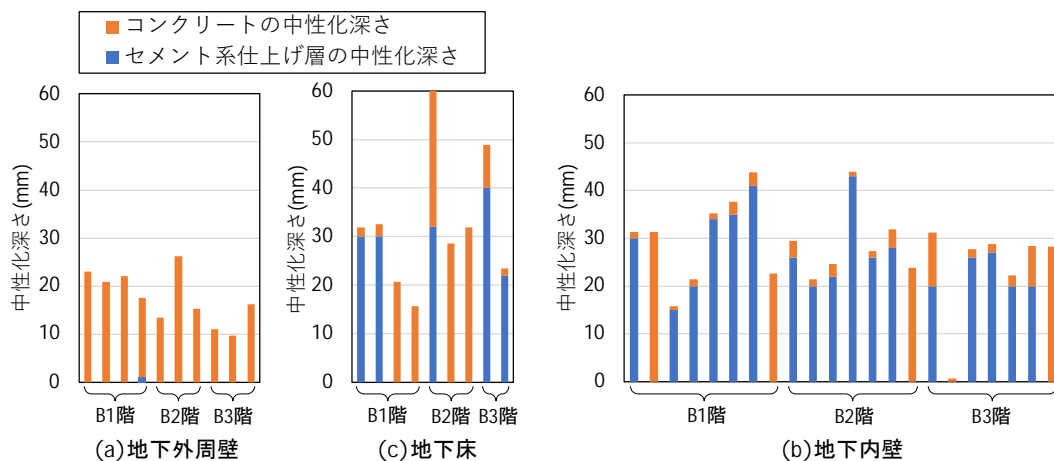


図 4.4-4 調査時点（築年数 38 年）における中性化深さの測定結果

### (3) 中性化を指標とした耐用年数の算定

再利用する既存地下躯体について、竣工からの中性化の進行予測を行い、中性化深さが許容限界に到達するまでの期間を耐用年数として算定した。

仕上げ材の条件と中性化速度係数の算定結果を表 4.4-4 に示す。

中性化の進行速度は、調査時点（築年数 38 年）における中性化深さの実測値に基づいて、中性化の進行が経過材齢の平方根に比例するものとして算定した。なお、中性化速度係数は、中性化深さの実測値のばらつきを考慮して、安全側となるように設定している。また、セメント系の仕上げ材がある場合には、表 4.4-4 に示す仕上げ層の厚さが全て中性化した後にコンクリートの中性化が開始するものとした。

竣工からの中性化の進行予測を図 4.4-5 に示す。図の横軸は、既存地下躯体の再利用の起点である築 38 年後を 0 にとり、再利用後の経過年数を示した。図の縦軸は、コンクリートの表層を 0 にとり、耐久設計施工指針<sup>[4-12]</sup>に準拠して、コンクリートの表層より手前にある仕上げ層（負の領域として示す）の中性化の進行とコンクリートの中性化の進行の 2 段階の進行予測を行った。

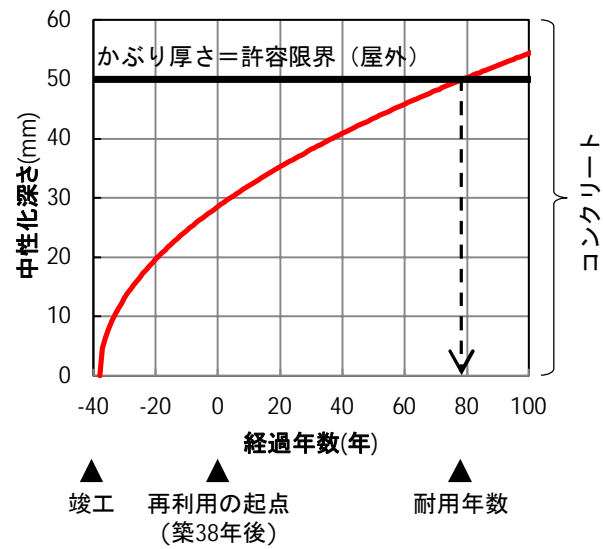
地下外周壁（図 4.4-5 (a)）は、屋外環境にある部材のため、中性化深さがかぶり厚さに到達した時点が中性化深さの許容限界とした。再利用後の耐用年数（中性化深さが許容限界に到達するまでの期間）は 78 年と算定された。

地下内壁（図 4.4-5 (b)）および地下床（図 4.4-5 (c)）は、屋内環境にある部材のため、中性化深さがかぶり厚さより 20mm 奥まで到達した時点が中性化深さの許容限界とした。再利用後の耐用年数は、地下内壁では 89 年、地下床では 42 年と算定された。

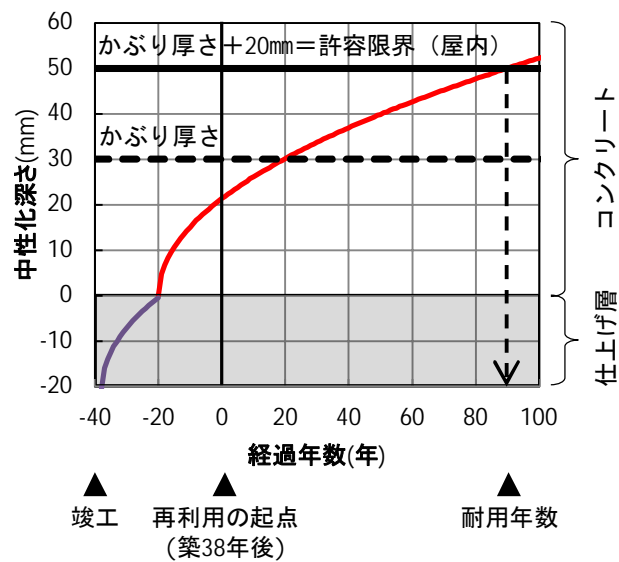
以上より、中性化の進行に基づいた、再利用後の既存地下躯体全体の耐用年数は、最も短期間となった地下床で定められる 42 年と評価され、発注者の要求する耐用年数を満足しなかった。

表 4.4-4 仕上げ材の条件と中性化速度係数の算定結果

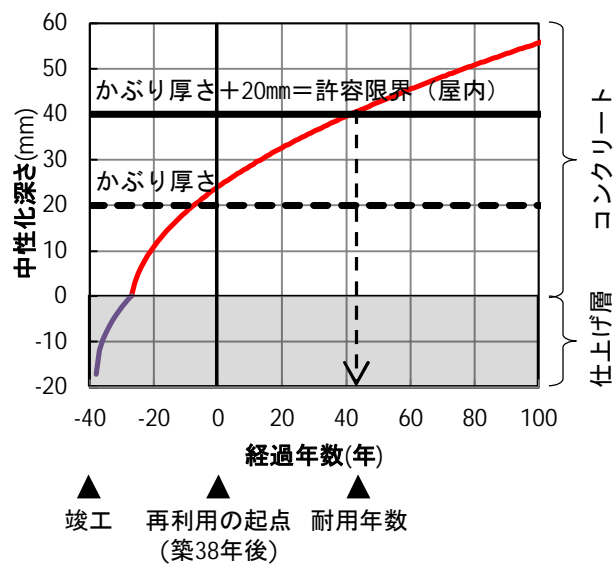
部材	仕上げ材		コンクリートの中性化速度係数
	種類	厚さ	
地下外周壁	貧調合モルタル	0.2mm	4.63mm/√年
地下内壁	貧調合モルタル	20.6mm	4.77 mm/√年
地下床	貧調合モルタル	17.1mm	5.22 mm/√年



(a) 地下外周壁



(b) 地下内壁



(c) 地下床

図 4.4-5 竣工からの中性化の進行予測

#### 4.4.4 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数評価

##### (1) 概要

本プロジェクトのように既存躯体を再利用する場合には、長期供用後における鉄筋位置の水分状態を直接測定することができる。そこで、鉄筋のかぶり厚さの位置における含水率の測定結果から、中性化後の鉄筋腐食速度を判断し、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数を算定した。

##### (2) 鉄筋腐食状況および含水率の調査

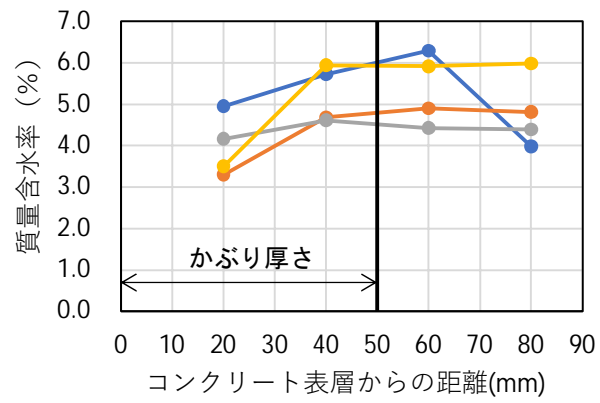
地下外周壁，地下内壁，地下床のそれぞれの部材に対して，各階（B1 階，B2 階，B3 階）ごとに鉄筋腐食状況および含水率の調査を行った。

鉄筋腐食状況は，地下外周壁では 1 箇所，地下内壁では 1 箇所，地下床では 1 箇所について，かぶりコンクリートをはつり取り，目視により確認した。その結果，調査時点（築年数 38 年）において，屋内環境にあり鉄筋位置まで中性化が進行していた箇所でも，鉄筋腐食は認められなかった。

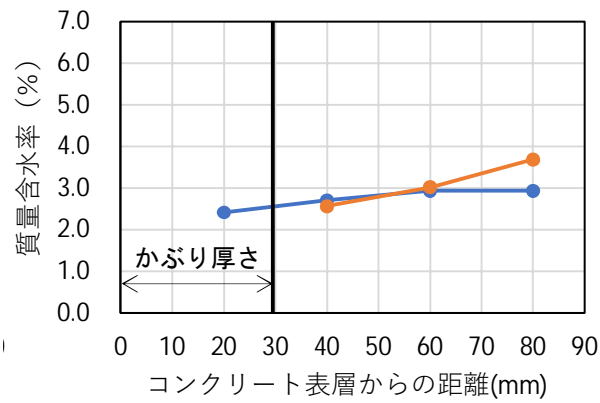
含水率は，地下外周壁では 4 箇所，地下内壁では 2 箇所，地下床では 2 箇所測定した。測定方法は，乾式コア供試体を採取して，コンクリートの表層から 10mm 以深を 20mm 間隔に乾式切断したものを測定試料とし，断面内の含水率分布を算定した。コンクリート断面内の含水率の測定結果を図 4.4-6 に示す。

地下外周壁（図 4.4-6 (a)）は，38 年間にわたって屋外環境にあった部材であるが，表層ほど含水率が小さく，内部にかけて含水率が大きくなる含水率分布となった。表層側鉄筋のかぶり厚さの位置（49.8mm）における含水率は 4.5～6.0%であった。

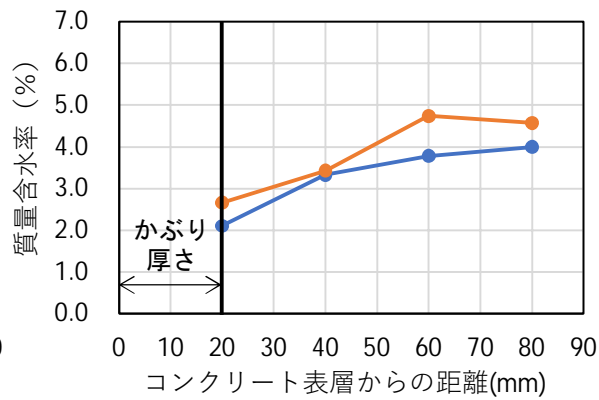
地下内壁（図 4.4-6 (b)）および地下床（図 4.4-6 (c)）は，38 年間にわたって屋内環境にあった部材であるが，表層ほど含水率が小さく，内部にかけて含水率が大きくなる含水率分布となった。地下内壁の表層側鉄筋のかぶり厚さの位置（30mm）における含水率は 2.6%，地下床の表層側鉄筋のかぶり厚さの位置（20mm）における含水率は 2.1～2.7%であった。



(a) 地下外周壁(4 測点)



(b) 地下内壁(2 測点)



(c) 地下床(2 測点)

図 4.4-6 コンクリート断面内の含水率の測定結果

### (3) 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定

鉄筋のかぶり厚さの位置における含水率から、中性化後の鉄筋腐食速度を判断し、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数を算定した。

かぶり厚さ位置の含水率および鉄筋腐食速度表 4.4-5 に示す。なお、ひび割れ発生限界腐食量は、鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量 ( $W_{\text{grade3}}$ ) を  $21\text{mg/cm}^2$  と設定した。

地下外周壁のかぶり厚さの位置における含水率は  $4.5\sim 6.0\%$  と高い状態であった。3 章の実験結果からも、鉄筋位置におけるコンクリートの質量含水率が  $3.5\%$  を上回ると、中性化後の鉄筋腐食速度が増大する結果が得られており、ひとたび中性化してしまうと中性化後の鉄筋腐食速度は大きくなるものと判断された。かぶり厚さとかぶり厚さ位置の含水率より、3 章の実験結果から算定した中性化後の鉄筋腐食速度は  $0.82(\text{mg/cm}^2/\text{year})$  となった。

中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数の算定結果を図 4.4-7 に示す。中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数 ( $T_{\text{grade3}}$ ) は 63 年となった。中性化後から鉄筋腐食の進行による耐用年数は 26 年と非常に短かった。中性化による耐用年数 ( $T_{\text{carbonation}}$ ) は 78 年であり、中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数 ( $T_{\text{grade3}}$ ) を下回った。なお、実設計においては、従来どおり中性化の進行に基づいた耐用年数で評価された。

地下内壁のかぶり厚さの位置における含水率は  $2.6\%$  と低い状態であった。3 章の実験結果によれば、中性化後の腐食電流密度は  $0.2\mu\text{A/cm}^2$  以下となり、RILEM の腐食判定基準では不動態状態と判定される領域にあった。かぶり厚さとかぶり厚さ位置の含水率より、3 章の実験結果から算定した中性化後の鉄筋腐食速度は  $0.10(\text{mg/cm}^2/\text{year})$  となった。

中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数の算定結果を図 4.4-8 に示す。中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数 ( $T_{\text{grade3}}$ ) は 200 年超となった。中性化による耐用年数 ( $T_{\text{carbonation}}$ ) は 89 年であり、中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数 ( $T_{\text{grade3}}$ ) はそれを大幅に上回った。このことから、外部の環境条件が今後も一定に保たれる場合であれば、供用期間中に鉄筋が腐食する環境にはならないと判断された。

地下床のかぶり厚さの位置における含水率は  $2.1\sim 2.7\%$  と低い状態であった。3 章の実験結果によれば、中性化後の腐食電流密度は  $0.2\mu\text{A/cm}^2$  以下となり、RILEM の腐食判定基準では不動態状態と判定される領域にあった。かぶり厚さとかぶり厚さ位置の含水率より、3 章の実験結果から算定した中性化後の鉄筋腐食速度は  $0.18(\text{mg/cm}^2/\text{year})$  となった。

中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数の算定結果を図 4.4-9 に示す。中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数 ( $T_{\text{grade3}}$ ) は 80 年となった。中性化による耐用年数 ( $T_{\text{carbonation}}$ ) は 42 年であり、中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数 ( $T_{\text{grade3}}$ ) はそれを大幅に上回った。このことから、外部の環境条件が今後も一定に保たれる場合であれば、供用期間中に鉄筋が腐食する環境にはならないと判断された。

以上より、中性化後の鉄筋腐食速度を考慮した、再利用後の既存地下躯体全体の耐用年数は、中性化後に鉄筋が腐食する環境にあり、耐用年数が算定された地下外周壁で定められる 78 年と評価された。

表 4.4-5 かぶり厚さ位置の含水率，鉄筋腐食速度，ひび割れ発生限界腐食量

部材	かぶり厚さ	10mm 以深の含水率(%)	かぶり厚さ位置の含水率(%)	鉄筋位置の相対含水率(%)	鉄筋位置の相対湿度(%)	鉄筋腐食速度(mg/cm <sup>2</sup> /year)
地下外周壁	50	3.30～4.90 4.16～4.61 3.98～6.29 3.50～5.98	4.8 4.5 6.0 6.0	98	100	0.82
地下内壁	30	2.41～2.93 2.56～4.74	2.6 -	55	42	0.10
地下床	20	2.11～4.00 2.66～4.74	2.1 2.7	55	42	0.18

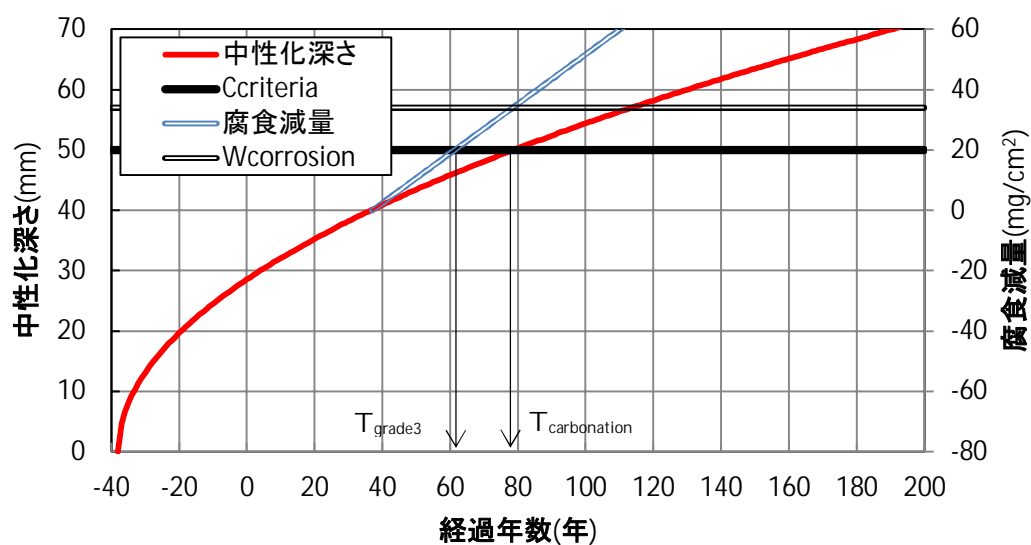


図 4.4-7 中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数の算定結果（地下外周壁）



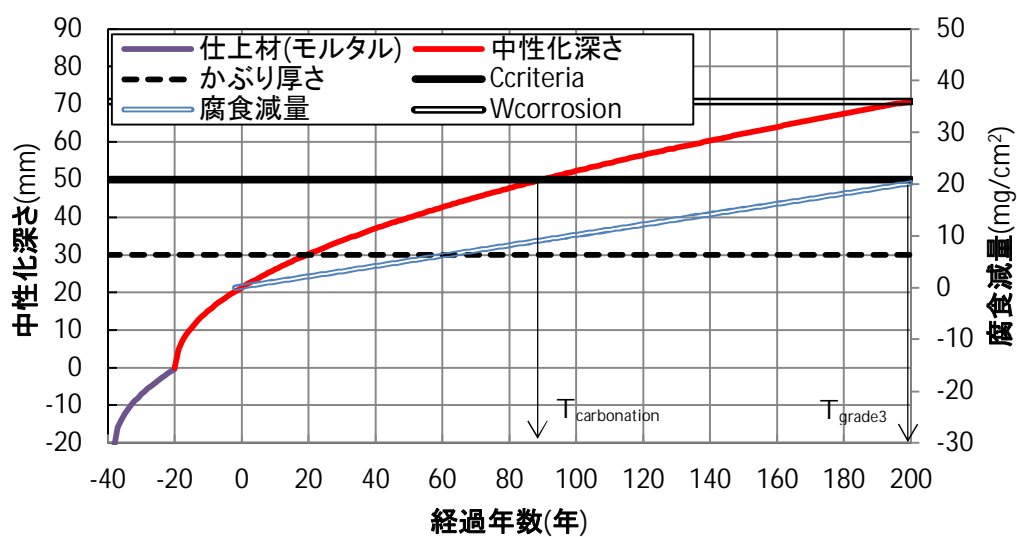


図 4.4-8 中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数の算定結果（地下内壁）

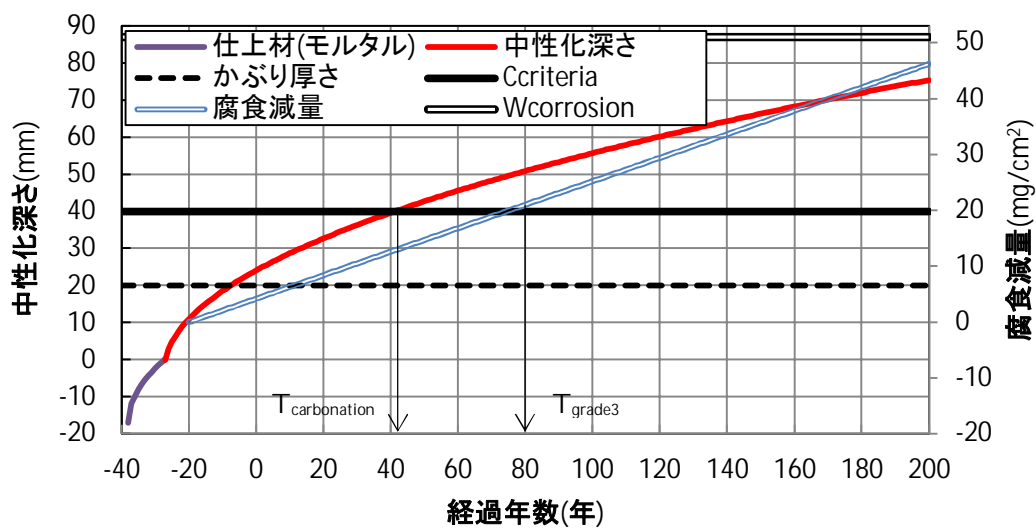


図 4.4-9 中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数の算定結果（地下床）

#### 4.4.5 実設計および維持管理計画の立案

部分的に中性化した既存地下躯体の再利用に関する検討として、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定を行った。その結果、再利用後の既存地下躯体の耐用年数は、地下外周壁で定められる 78 年と評価された。この評価結果は、発注者の要求する耐用年数を満たしたため、耐久性に対する既存地下躯体の補修・補強は不要と判断した。

なお、中性化後の鉄筋腐食速度は、技術的資料に基づき高い確度をもって設計者の責任において特定すべきものであり、将来にわたって鉄筋が腐食する環境にならないこと維持できる保全計画などを十分想定した上で定める必要がある。特に、実設計として算定した耐用年数は、地下内壁および地下床は、鉄筋位置の含水率が小さく、鉄筋が腐食する環境にないため、耐久設計は不要と判断したことに基づいており、これらの部材については、将来的に外部からの水分供給がない状況が継続されることが前提となる。本プロジェクトでは、再利用する既存地下躯体は、外気に接する機会や水分供給が少ないとみなされる屋内駐車場を主な用途として利用する計画であり、大規模な用途変更がない限り、今後も鉄筋が腐食する環境にならないことが維持できるものと判断された。その上で、将来的な維持管理計画として、建物所有者による定期点検を竣工後 5 年後、10 年後、以降 10 年ごとに実施し、地下内壁および地下床について乾燥状態が保持されていることの確認を管理項目として定めた。

#### 4.4.6 4.4 節の結論

本節では、実設計で再利用を計画した既存建築物の耐久性評価手法の検討として、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数評価を行い、提案した耐久性評価手法の実行性を確認したものである。

JASS 5 による中性化の指標により算定した再利用後の既存地下躯体全体の耐用年数は、地下床で定められる 42 年と評価され、発注者の要求する耐用年数を満足しなかった。

一方、地下内壁のかぶり厚さの位置における含水率は 2.6%，地下床では 2.1～2.7%と低い状態であり、3 章の実験結果によれば、中性化後の腐食電流密度は  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり、RILEM の腐食判定基準では不働状態と判定される領域にあった。中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数を算定したところ、それぞれ 200 年超、80 年となり、JASS 5 による中性化を指標とした耐用年数を大幅に上回った。

以上より、地下床では、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数が 80 年となるため、再利用後の既存地下躯体全体の耐用年数は、地下外周壁で定められる 78 年と評価された。

本プロジェクトは、部分的に中性化した既存地下躯体に対して、従来の中性化を指標とした耐用年数評価によれば発注者の要求する耐用年数を満足しなかったものを、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数評価を行うことにより、要求耐用年数を満足した事例となった。

#### 4.5 4 章の結論

本章では、コンクリートの含水状態および中性化後の鉄筋腐食速度を一定条件とした場合における、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定方法を示し、かぶり厚さ、セメント種別および水セメント比の違いについて考察した。

かぶり厚さが 10mm の場合、高炉セメント B 種で水セメント比が 60% の調合条件では、暴露環境の相対湿度が 90～60%RH の範囲で、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数は 100 年程度となり、他の水準と比較して耐久性が低いと考えられる。その他の調合条件では、暴露環境の相対湿度が 100～60%RH の設定した全範囲で、耐用年数は 150 年を超え、高い耐久性を有すると考えられる。ただし、高炉セメント B 種の中性化後の鉄筋腐食速度は、湿潤養生期間を 5 日で打ち切った試験体により測定された結果である。湿潤養生期間を JASS 5 で定められている 7 日以上とすれば、実際の耐用年数は更に長くなるものと考えられる。

かぶり厚さが 20mm 以上の場合、調合条件によらず、暴露環境の相対湿度が 100～60%RH の設定した全範囲で、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数は 200 年を超え、高い耐久性を有すると考えられる。

また、実設計で再利用を計画した既存建築物の耐久性評価の検討として、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数評価を行い、提案した耐久性評価手法の実行性を確認した。

JASS 5 による中性化の指標により算定した再利用後の既存地下躯体全体の耐用年数は、地下床で定められる 42 年と評価された。ただし、地下内壁のかぶり厚さの位置における含水率は 2.6%、地下床では 2.1～2.7% と低い状態であり、3 章の実験結果によれば、中性化後の腐食電流密度は  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以下となり、RILEM の腐食判定基準では不働態状態と判定される領域にあった。中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数はそれぞれ 200 年超、80 年となり、中性化による耐用年数を大幅に上回った。

以上より、地下床では、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数が 80 年となるため、再利用後の既存地下躯体全体の耐用年数は、地下外周壁で定められる 78 年と評価された。

本プロジェクトは、部分的に中性化した既存地下躯体に対して、従来の中性化の指標による耐用年数評価によれば発注者の要求する耐用年数を満足しなかったものを、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数評価により、要求耐用年数を満足した事例となった。

#### 4 章の参考文献

- [4-1] ISO 22965-1 Concrete - Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier, 2007, 文献 15)による和訳
- [4-2] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2022.11
- [4-3] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 2016.7
- [4-4] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説, 1997
- [4-5] 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編], 2017
- [4-6] 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, 258-259, 2009.10
- [4-7] 山田宗範, 今本啓一, 野口貴文, 濱崎仁, 兼松学, 清原千鶴：既存 RC 構造物における雨掛かりのある箇所の鉄筋腐食条件の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）, pp.599-600, 2018.9
- [4-8] 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物, 2007
- [4-9] 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（その 2）, 2012
- [4-10] 本間大輔, 米澤敏男, 押田文雄, 山口善弘, 岡本博史, 中尾正純：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, 第 79 巻, 第 701 号, pp.867-876, 2014.7
- [4-11] 田沼毅彦, 杉山央：築後 53 年を経過した鉄筋コンクリート造建築物における鉄筋腐食状況の実態調査, 日本建築学会技術報告集, 第 23 巻, 第 53 号, pp.37-42, 2017.2
- [4-12] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説, 2016.7
- [4-13] 三好夏恵, 酒井正樹ほか：五反田計画（仮称）における部分的に中性化した既存地下躯体の再利用, コンクリート工学, Vol.61, No.8, 2023.9
- [4-14] 城戸隆宏ほか：五反田計画（仮称）-既存地下躯体を再利用するための各種のトランスファー要素-, 鉄構技術, pp.16-17, 2022.10
- [4-15] 日本建築防災協会：2001 年改定版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・改修設計指針・同解説, 2001

## 5. 乾湿繰返しを受ける部材に対する提案した耐久性評価手法の適用性検討

### 5.1 5章の位置付け

3章, 4章では, 外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を実験的に取得し, かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係から, 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法について検討した。しかしながら, 実構造物の置かれる外部環境条件を考慮すると, 乾湿繰返しを受ける部材の中性化後の鉄筋腐食速度を把握する必要がある。

本章では, 既存 RC 造建築物の耐久性調査結果の分析により, 乾湿繰返しを受ける部位における, かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を検討した。その結果, 鉄筋腐食速度に影響をおよぼすのは, 降雨や乾燥などの外部環境の変動ではなく, 鉄筋位置の水分状態であることが明らかとなった。しかしながら, 設計時もしくは供用期間中に得られるのは, 外部環境のデータに限られる。そこで, 乾湿繰返しを受ける部材に対して, 水分移動解析によりコンクリート中の水分状態を予測し, 中性化後の鉄筋腐食速度を算定することで, 提案した耐久性評価手法が適用できることを確認した。

## 5.2 外部環境が乾湿繰返し条件の場合の腐食環境の整理

外部環境と劣化速度に基づいた腐食環境評価のうち、外部環境が乾湿繰返し条件の場合を表5.2-1に示す。ここでは、当該部位に水が作用する環境のうち、乾湿繰返しとなる場合を検討した。

外部環境として、水作用環境が乾湿繰返しとなる部位は、既存躯体の耐久性調査の結果などからも、中性化後の鉄筋腐食速度が極めて大きくなることが分かっており、「腐食環境（大）」と評価される。ただし、現状において、乾湿繰返しの条件から、かぶり厚などを考慮した上で、部材内部（鉄筋位置）の水分状態へと結び付け、中性化後の鉄筋腐食速度を評価する方法論は確立できていない。

なお、JASS5では、乾湿繰返しを受ける部位の例として、屋内では、直接の水濡れや結露が繰返し発生する部位、屋外では、雨掛かりがあり乾湿が繰り返される部位とされている。

表 5.2-1 外部環境と劣化速度に基づく腐食環境評価（外部環境が乾湿繰返し条件の場合）

外部環境	外部相対湿度	0%RH	60%RH	80～90%RH	100%RH	(水中)
	水作用環境	(5)乾湿繰返し				
劣化速度	中性化速度	小～大				
	鉄筋腐食速度	大				
環境評価	腐食環境 (腐食リスク)	腐食環境(大)				
	劣化外力強さ (ISO分類)	Cyclic Wet and Dry (XC3)				
	部位の位置付け	乾湿繰返しがある				
	部位の例 (参考: JASS5他)	(屋内) ・直接の水濡れや結露が繰返し発生する (屋外) ・雨掛かりがあり乾湿が繰り返される				

## 5.3 既存建築物の調査による鉄筋位置の水分状態と鉄筋腐食速度の検討

### 5.3.1 5.3 節の概要

3 章では、鉄筋を埋設したコンクリート供試体を用いた実験により、中性化後の腐食電流密度は、中性化残りの違いよりも、暴露環境の相対湿度の影響が大きいことが分かった。

そこで本節では、長期間供用された RC 造建築物の躯体調査結果を分析することにより、中性化後の腐食電流密度とかぶり厚さ、中性化残り、鉄筋位置の含水率との関係を検討し、3 章の実験結果と既存躯体調査結果の比較を行った。

また、既存躯体調査に関する既往の報告のうち、中性化残りが 10mm 以下であり、鉄筋位置の含水率および鉄筋の腐食グレードが示されているもののみを抽出して、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係について検討を行った。



### 5.3.2 既存建築物の調査概要

本研究で調査を行った建物の概要を表 5.3-1 に示す。調査を行った建物は、調査時点における築年数が 33～88 年の鉄筋コンクリート造もしくは鉄骨鉄筋コンクリート造の建築物である。

主な調査項目および調査方法を表 5.3-2 に示す。かぶり厚さは、実躯体の最外鉄筋をはつり出し、スケールを用いて測定した。中性化深さは、湿式コア供試体を採取し、割裂面にて JIS A 1152 に準じて測定した。含水率は、乾式コア供試体を採取し、表面から 25mm 程度ごとに切断して 105℃乾燥を行い、表層から内部にかけての含水率分布を測定した。鉄筋の腐食グレードは、実躯体の最外鉄筋をはつり出し、目視により 5 段階で評価した。自然電位は JSCE-E 601（コンクリート構造物における自然電位測定方法）、分極抵抗は土木学会 338 委員会試案を参考として測定した。

表 5.3-1 本研究で調査を行った建物の概要

記号	所在地	用途	竣工年	調査時年数
建物 A	東京都	事務所	1983	33
建物 B	埼玉県	事務所	1969	46
建物 C	東京都	事務所	1964	52
建物 D	東京都	事務所	1965	52
建物 E	東京都	役場	1972	49
建物 F	京都府	劇場	1929	88
建物 G	東京都	事務所	1987	33

表 5.3-2 主な調査項目および調査方法

対象	調査項目	調査方法
コンクリート	かぶり厚さ	最外鉄筋のはつり出し（スケールを用いて測定）
	中性化深さ	JIS A 1152（湿式コア供試体）
	含水率	JIS A 1476（乾式コア供試体を表面から 25mm 程度ごとに切断）
鉄筋	腐食グレード	最外鉄筋のはつり出し（グレード 1～5 の 5 段階の目視による評価）
	自然電位	JSCE-E 601
	分極抵抗	土木学会 338 委員会試案

### 5.3.3 既存建築物の調査結果および中性化後の鉄筋腐食速度に関する考察

#### (1) 各種要因が中性化後の鉄筋の自然電位におよぼす影響

屋内部材における既存躯体の鉄筋の自然電位を図 5.3-1 に示す。かぶり厚さ、中性化残り、鉄筋位置の含水率と自然電位の関係についてそれぞれ示した。鉄筋位置の含水率と自然電位の関係については、供試体実験から得られた両者の関係を併せて示した。また、図中には、ASTM の腐食判定基準を併記した。

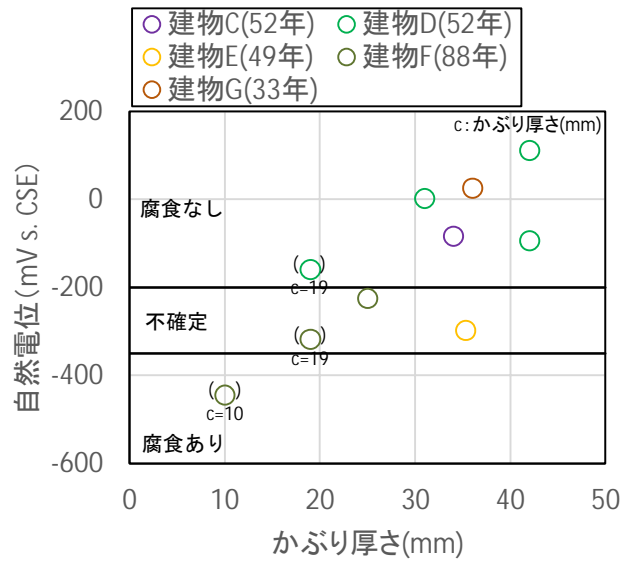
図中の凡例のうち、白抜きは屋内の部材、黒塗りは屋外の部材を意味する。既存躯体の調査結果には、建築基準法で規定されている最小かぶり厚さ 20mm を下回るものがあった。これらのかぶり不足となる測定箇所は、図中のプロットに括弧を付けて示し、実測されたかぶり厚さを併記したうえで、個別に考察を行った。なお、これらの図の表記方法は、以降の図でも同様とした。

屋内部材では、かぶり不足（かぶり厚さ 10mm）となる測定箇所では腐食ありと判定されたが、それ以外では鉄筋腐食の可能性は不確定もしくは腐食なしと判定された。

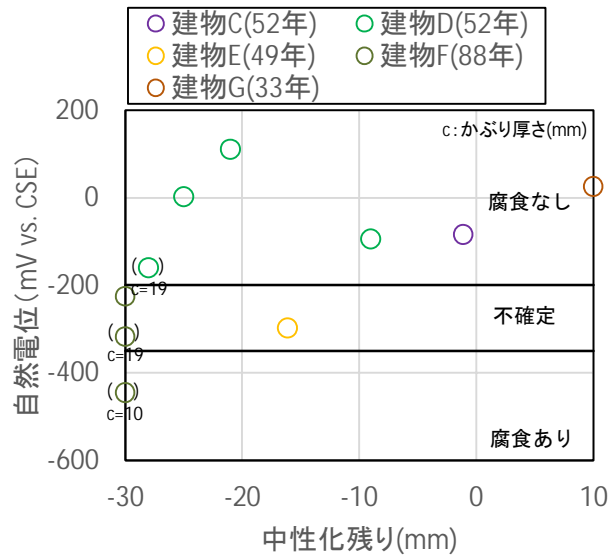
かぶり厚さと自然電位の関係については、かぶり不足（かぶり厚さ 10mm）となる測定箇所では自然電位の卑化が大きくなったが、それ以外では両者に明確な相関は認められなかった。中性化残りとの関係についても同様に、両者に明確な相関は認められなかった。

鉄筋位置の含水率と自然電位の関係については、既存躯体調査で測定された質量含水率は 2.2% 以下となり、鉄筋腐食の可能性は不確定もしくは腐食なしと判定された。供試体実験から得られた両者の関係と比較すると、安全側の評価として、高炉セメント B 種を用いた調合で、建築基準法で規定されている最小かぶり厚さ 20mm の水準を見ると、質量含水率が 3.5% 以上で腐食ありの判定となっている。また、既往の研究では、古賀ら<sup>[5-11]</sup>は、既存躯体調査を行い、鉄筋の腐食限界と言われる  $1.2\text{kg/m}^2$  を超える塩化物イオンを含有したものでも、鉄筋位置の質量含水率が 3.5% 以下であれば、鉄筋腐食は生じないことを報告した。ス カイティンら<sup>[5-2]</sup>は、鉄筋位置の含水状態を考慮しながら、外部環境の相対湿度を評価指標として鉄筋腐食が発生する条件を検討しており、鉄筋腐食が発生する閾値は、相対湿度 80%RH 以上であることを報告している。

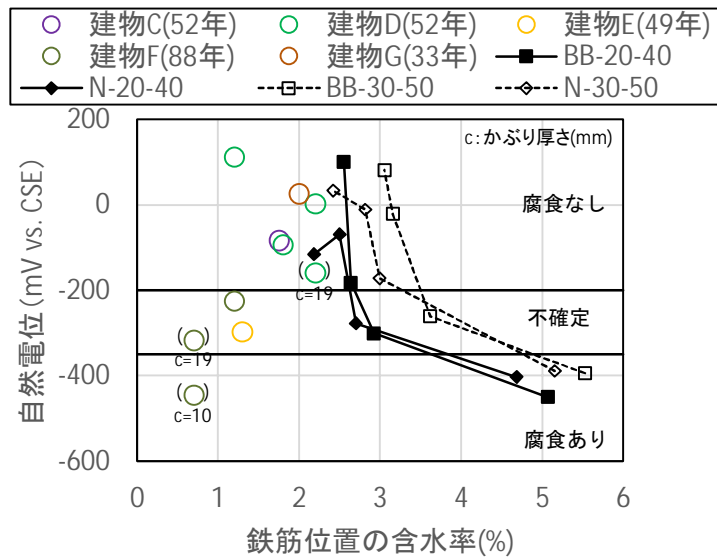
以上より、屋内部材では鉄筋位置の含水率が小さく、中性化後も鉄筋腐食が生じる環境にはなっていないと判断できる。



(a) かぶり厚さとの関係



(b) 中性化残りとの関係



(c) 鉄筋位置の含水率との関係

図 5.3-1 既存躯体の鉄筋の自然電位（屋内部材）

屋外部材における既存躯体の鉄筋の自然電位を図 5.3-2 に示す。

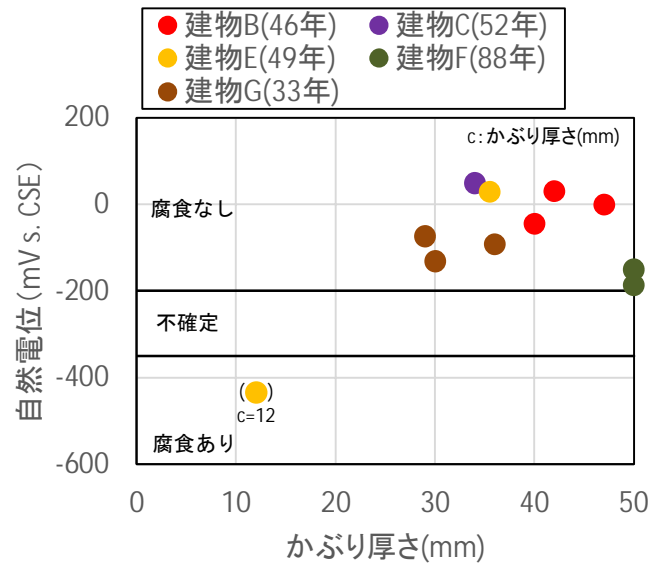
屋外部材では、かぶり不足（かぶり厚さ 12mm）となる箇所では腐食ありと判定されたが、それ以外では腐食なしと判定された。

かぶり厚さと自然電位の関係については、かぶり不足（かぶり厚さ 12mm）となる箇所では自然電位の卑化が大きくなったが、それ以外で

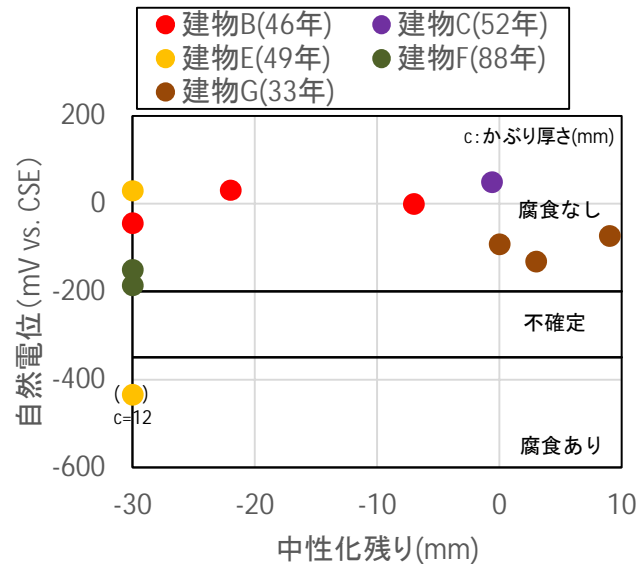
は両者に明確な相関は認められなかった。中性化残りとの自然電位の関係についても同様に、両者に明確な相関は認められなかった。

鉄筋位置の含水率と自然電位の関係については、既存躯体調査で測定された質量含水率は 3.2% 以下となり、腐食なしと判定された。供試体実験から得られた両者の関係では、質量含水率が 3.5% 以上で腐食ありの判定となっており、屋外部材であっても、鉄筋位置の質量含水率が 3.5% を下回っていても、中性化後も鉄筋腐食が生じる環境にはなっていないと判断できる。

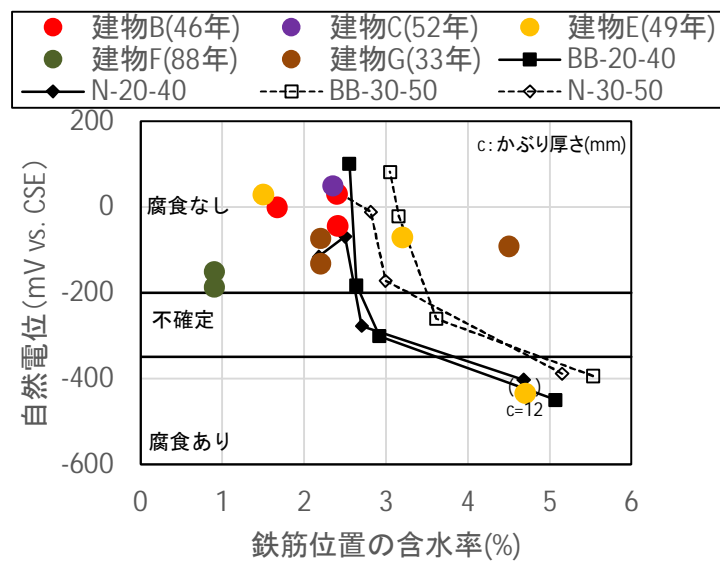
なお、質量含水率が 4.5% と大きい点も、自然電位からは腐食なしと判定された点があった（図中に「腐食あり」と示した点）。この測定箇所における、最外鉄筋のはつり出しによる腐食グレードは 3（鉄筋表面に薄い浮き錆が広がって生じている）であり、実際に鉄筋腐食が生じていたため、自然電位が正確に測定できていないものと判断した。



(a) かぶり厚さとの関係



(b) 中性化残りとの関係



(c) 鉄筋位置の含水率との関係

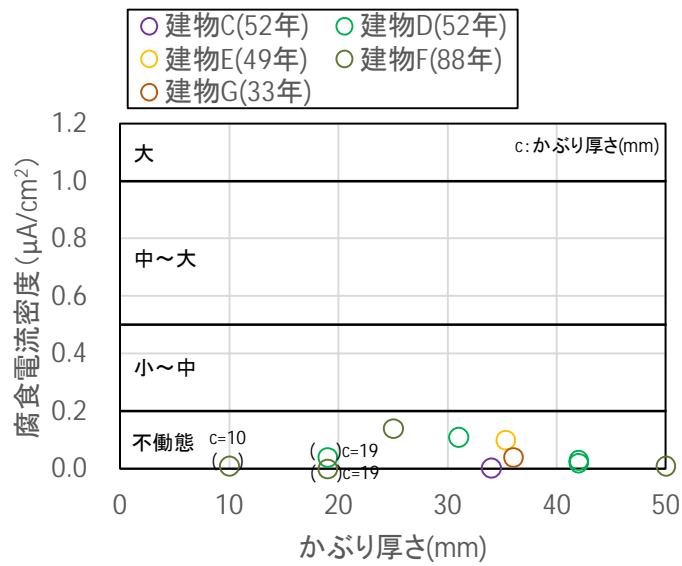
図 5.3-2 既存躯体の鉄筋の自然電位（屋外部材）

## (2) 各種要因が中性化後の鉄筋の腐食電流密度におよぼす影響

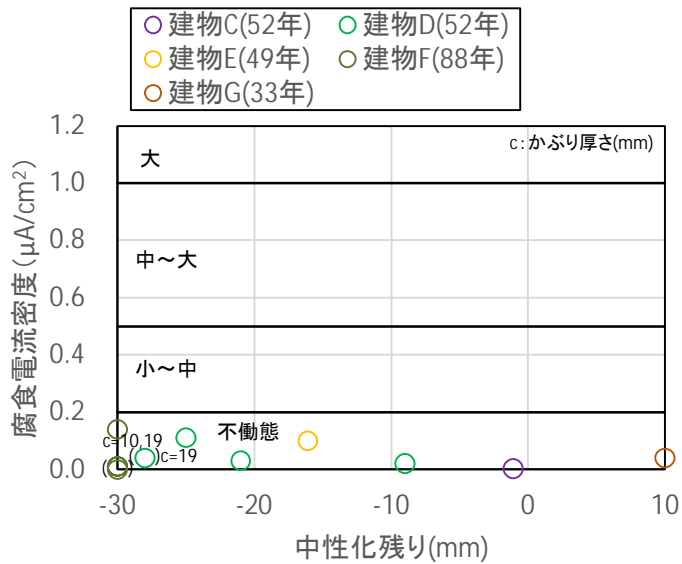
屋内部材における既存躯体の鉄筋の腐食電流密度を図 5.3-3 に示す。鉄筋位置の含水率と腐食電流密度の関係については、供試体実験から得られた両者の関係を併せて示した。また、図中には、RILEM の鉄筋腐食速度の判定基準を併記した。

屋内部材では、全ての測定箇所において、腐食電流密度による判定結果は不働態状態となった。かぶり厚さと腐食電流密度、中性化残りと腐食電流密度の関係については、明確な相関は認められなかった。

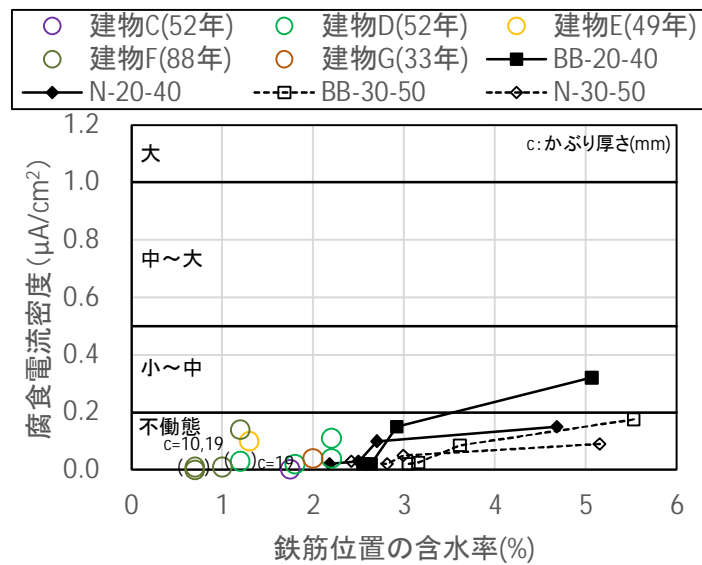
鉄筋位置の含水率と腐食電流密度の関係については、既存躯体調査で測定された質量含水率は 2.2%以下となり、不働態状態と判定された。供試体実験から得られた両者の関係と比較すると、安全側の評価として、高炉セメント B 種を用いた調合で、建築基準法で規定されている最小かぶり厚さ 20mm の水準を見ると、質量含水率が 3.5%以上で鉄筋腐食速度が小～中となっている。自然電位による腐食判定においても、質量含水率が 3.5%以上で腐食ありとなっており、同様の傾向となった。以上より、屋内部材においては、鉄筋位置の含水率が小さく、中性化後の鉄筋腐食速度は極めて小さいと判断できる。



(a) かぶり厚さとの関係



(b) 中性化残りとの関係



(c) 鉄筋位置の含水率との関係

図 5.3-3 既存躯体の鉄筋の腐食電流密度（屋内部材）

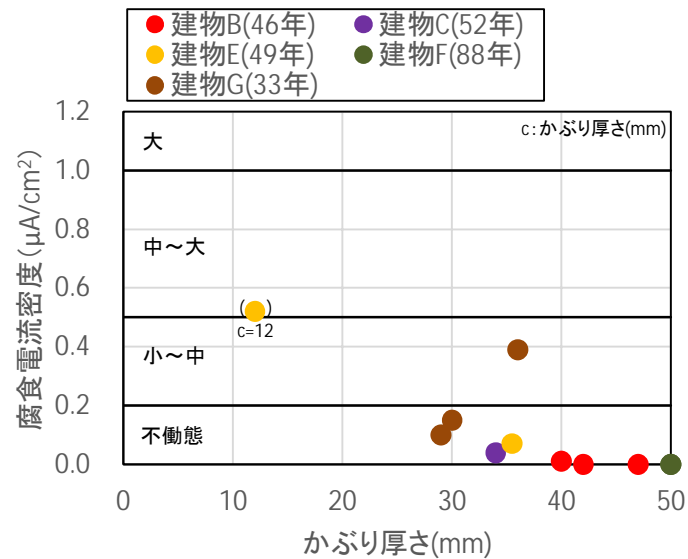
屋外部材における既存躯体の鉄筋の腐食電流密度を図 5.3-4 に示す。

屋外部材では、かぶり不足（かぶり厚さ 12mm）となる測定箇所では、鉄筋腐食速度が中～大、かぶり厚さ 36mm で質量含水率が 4.5%の点では、鉄筋腐食速度が小～中と判定された。それ以外では、腐食電流密度による判定結果は不働態状態となった。かぶり厚さと腐食電流密度、中性化残りと腐食電流密度の関係については、明確な相関は認められなかった。

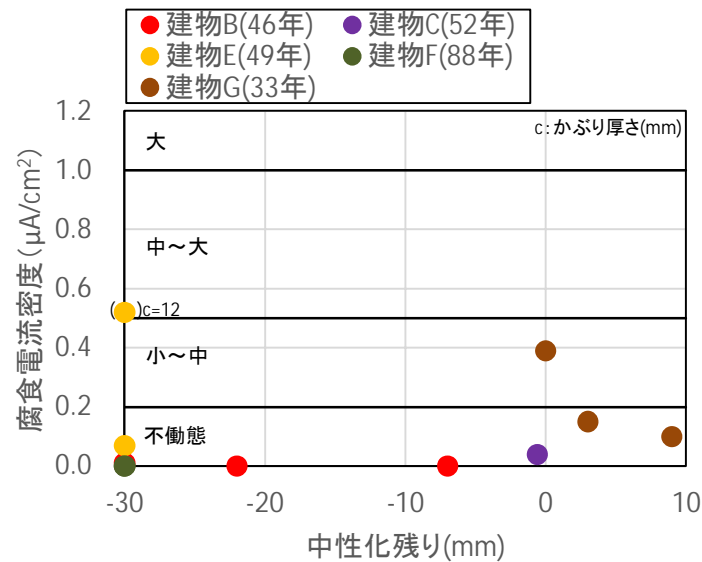
鉄筋位置の含水率と腐食電流密度の関係については、既存躯体調査で測定された質量含水率が 4.5%の点では、鉄筋腐食速度が小～中と判定された。供試体実験から得られた両者の関係では、質量含水率が 3.5%以上で鉄筋腐食速度が小～中となっており、同様の傾向となった。

なお、かぶり不足（かぶり厚さ 12mm）となる測定箇所では、中性化後の鉄筋腐食速度が中～大と大きくなったが、3.2 節において、かぶり厚さを 10mm とした供試体を用いて中性化後の鉄筋腐食速度を測定した実験でも、同様の結果が得られている。また、木野瀬ら<sup>[5-3]</sup>による既存躯体の調査結果においても、鉄筋の腐食グレード 3 を上回った部位のほとんどは、かぶり不足となる測定箇所となっており、得られた調査結果は妥当であると考えられる。

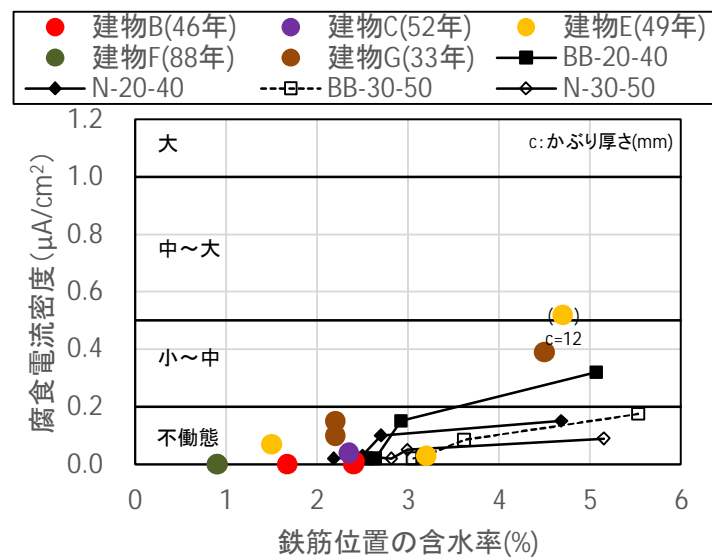




(a) かぶり厚さとの関係



(b) 中性化残りとの関係



(c) 鉄筋位置の含水率との関係

図 5.3-4 既存躯体の鉄筋の腐食電流密度（屋外部材）

### (3) 各種要因が中性化後の鉄筋の腐食グレードにおよぼす影響

屋内部材における既存躯体の鉄筋の腐食グレードを図 5.3-5 に示す。既存躯体調査のうち腐食グレードに関する報告は多く、本研究で調査を行った結果に加えて、庭野ら<sup>[5-4]</sup>、木野瀬ら<sup>[5-3]</sup>、野田ら<sup>[5-5]</sup>の既存躯体の調査結果も併せて示した。また、日本建築学会の耐久設計施工指針・同解説<sup>[5-6]</sup>および建築工事標準仕様書 JASS 5 コンクリート工事<sup>[5-7]</sup>において、腐食環境における中性化深さの限界状態を定める根拠となっている、和泉ら<sup>[5-8]</sup>による既存躯体の調査結果も示した。なお、和泉らの調査結果は、平均さび評点の指標により整理されている。日本建築学会の鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説<sup>[5-9]</sup>では、鉄筋腐食度の評価基準として、腐食グレードと平均さび評点を表 5.3-3 のとおり示している。本検討では、表 5.3-3 に従って両者の値を対応させてグラフを作成して、考察を行った。

屋内部材では、本研究で調査を行った建物では、かぶり不足（かぶり厚さ 10mm）となる測定箇所では、腐食グレード 3 となったが、それ以外では腐食グレード 2 以下となった。既報の調査結果を加えると、かぶり厚さ 23mm で腐食グレード 4 となった点があったが、それ以外では腐食グレード 3 以下であった。

かぶり厚さと腐食グレードの関係については、かぶり不足となる測定箇所を含めて、両者に明確な相関は認められなかった。ただし、屋内部材においては、ほとんどが腐食グレード 2 以下となった。

ここで、腐食グレードの評価基準について、日本建築学会の耐久設計施工指針・同解説では、耐久性に影響がある腐食状態を腐食グレード 3 以上として、わずかながら鉄筋腐食が開始された状態を限界状態と定めている。この評価基準に拠れば、腐食グレード 2 以下であれば、耐久性を大きく損なうものではないと判断できる。しかしながら、中性化が鉄筋位置に到達してから長い時間が経過していない時期に、腐食グレードが 2 になるような場合、鉄筋腐食速度が小さいと評価することは正しくない。腐食グレードは、測定時点における評価となるが、その評価基準を考える際には、鉄筋腐食の進行速度を考慮して判断する必要があると考えられる。これについては、今後の課題とする。

和泉らが示した両者の関係と比較すると、既報の調査結果の一部を除いて、かぶり厚さに対する鉄筋腐食度は小さくなる傾向が見られた。この理由として、和泉らの実施した調査対象には戦前の建物も入っており、コア強度の大部分は 150～300kgf/cm<sup>2</sup> の範囲とされ、一部コンクリート品質（緻密性や表層品質）が低いものが含まれていると考えられる。一方、近年実施されている調査対象は、高度経済成長期以降に建設された建物が多く、コア強度も相対的に高くなっているため、同一のかぶり厚さや中性化残りで和泉らの調査結果と比較した場合には、腐食グレードが小さくなったものと考えられる。

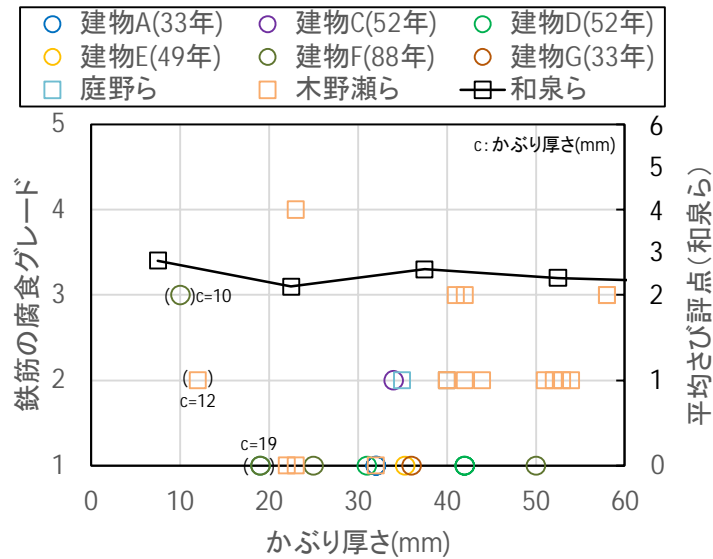
中性化残りと腐食グレードの関係についても、かぶり不足となる測定箇所を含めて、両者に明確な相関は認められなかった。和泉らが示した両者の関係と比較すると、本研究で調査を行った建物では、同一の中性化残りに対して鉄筋腐食グレードが小さくなる傾向が見られた。この傾向は、かぶり厚さと腐食グレードの関係と同様である。

鉄筋位置の含水率と腐食グレードの関係については、質量含水率が 1%程度と、実験結果から得られた質量含水率 3.5%以下のものでも、腐食グレード 3 もしくは 4 となったものがあり、両者に明確な相関は認められなかった。この理由として、過去に含水状態が高い履歴を受けていた可能性が考えられる。鉄筋の腐食反応には水と酸素が必要であるため、金属の表面における水膜厚さ

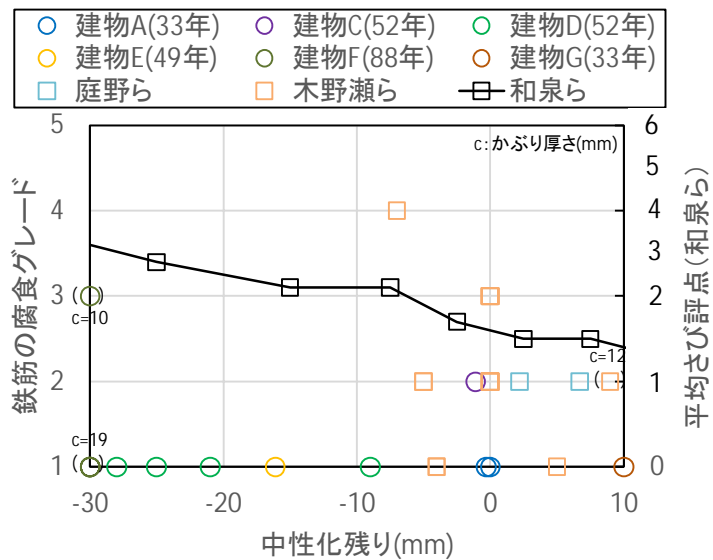
が小さければ、腐食の反応場が形成されにくくなり、腐食速度は限りなく小さくなることが報告されている[5-10]。そのため、屋内部材であって、測定箇所の質量含水率が1%程度で乾燥状態にある条件の下では、鉄筋腐食はほぼ進行しないと言える。そのため、過去の水分状態の履歴による可能性と推察した。このように、過去の用途履歴などが定かでない場合では、はつり出しによる鉄筋の腐食グレードの確認などを併せて行う必要がある。

表 5.3-3 鉄筋腐食度の評価基準

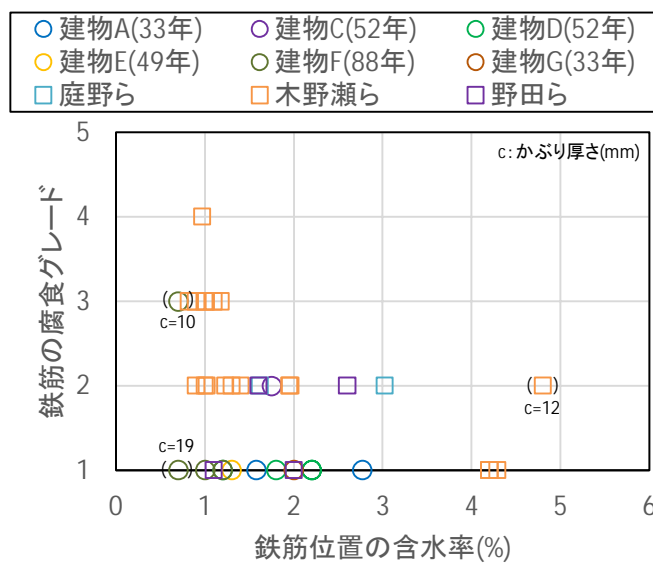
腐食グレード	平均さび評点	評価基準
1	0	腐食がない状態、または表面にわずかな点さびが生じている状態
2	1	表面に点さびが広がって生じている状態
3	2	点さびつながって面さびとなり、部分的に浮きさびが生じている状態
4	4	浮きさびが広がって生じ、コンクリートにさびが付着し、断面積で20%以下の欠損を生じている箇所がある状態
5	6	厚い層状のさびが広がって生じ、断面積で20%を超える著しい欠損を生じている箇所がある状態



(a) かぶり厚さとの関係



(b) 中性化残りとの関係



(c) 鉄筋位置の含水率との関係

図 5.3-5 既存躯体の鉄筋の腐食グレード（屋内部材）

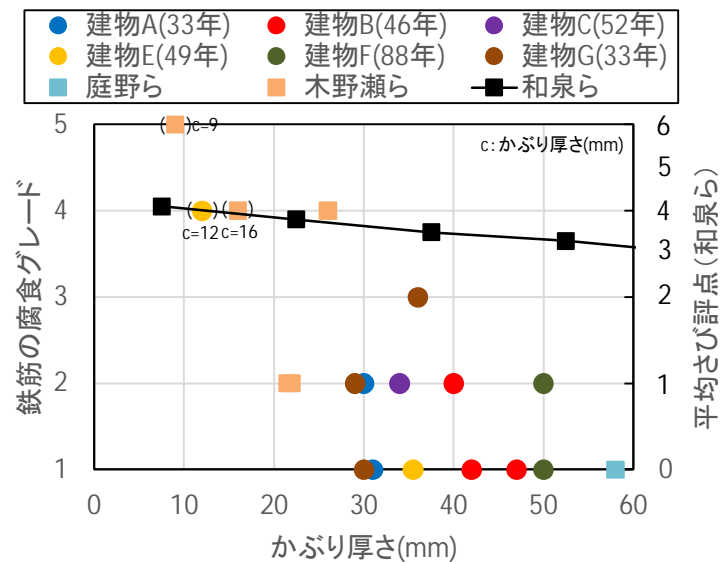
屋外部材における既存躯体の鉄筋腐食グレードを図 5.3-6 に示す。

屋外部材では、本研究で調査を行った建物では、かぶり不足（かぶり厚さ 12mm）となる測定箇所では、腐食グレード 4 となったが、それ以外では腐食グレード 3 以下となった。既報の調査結果を加えると、かぶり厚さ 9mm で腐食グレード 5、かぶり厚さ 16mm、26mm で腐食グレード 4 となった点があったが、それ以外では腐食グレード 3 以下であった。

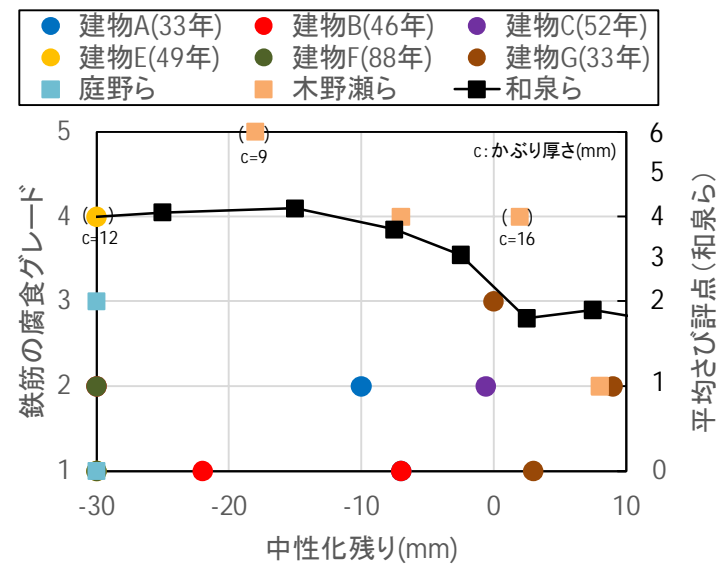
かぶり厚さと鉄筋の腐食グレードの関係については、かぶり厚さ 10mm 以下では腐食グレード 5、10～20mm では腐食グレード 4、20～30mm では腐食グレード 4 以下、30～40mm では腐食グレード 3 以下、40～50mm では腐食グレード 2 以下、50mm 以上では腐食グレード 1 となり、かぶり厚さが大きくなるほど、腐食グレードが小さくなる傾向が見られた。和泉らが示した両者の関係と比較すると、屋内部材と同様に、かぶり厚さに対する鉄筋腐食度は小さくなる傾向が見られた。

中性化残りと腐食グレードの関係については、腐食グレード 3 以上では、和泉らが示した両者の関係と概ね一致する傾向が見られた。腐食グレード 2 以下では、明確な相関は認められなかった。

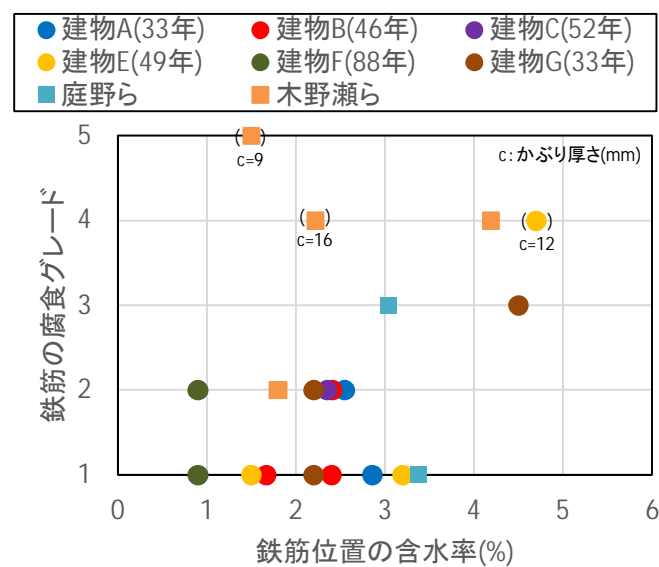
鉄筋位置の含水率と腐食グレードの関係については、かぶり不足となる測定箇所を含めて、明確な相関は認められなかった。質量含水率が小さいにも関わらず腐食グレードが大きくなったものがあるが、屋内部材における考察と同様に、過去に含水状態が高い履歴を受けたことなどが理由として考えられる。



(a) かぶり厚さとの関係



(b) 中性化残りとの関係



(c) 鉄筋位置の含水率との関係

図 5.3-6 既存躯体の鉄筋の腐食グレード (屋内部材)

#### 5.3.4 5.3 節の結論

本節では、長期間供用された RC 造建築物の躯体調査結果を分析することにより、中性化後の腐食電流密度とかぶり厚さ、中性化残り、鉄筋位置の含水率との関係を検討し、3 章の実験結果と既存躯体調査結果の比較を行った。

また、既存躯体調査に関する既往の報告のうち、中性化残りが 10mm 以下であり、鉄筋位置の含水率および鉄筋の腐食グレードが示されているもののみを抽出して、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係について検討を行った。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 長期間供用された RC 造建築物の躯体調査結果を分析した結果、鉄筋位置の含水率と鉄筋の自然電位および腐食電流密度には相関が認められた。一方、かぶり不足となる測定箇所では、鉄筋の自然電位、腐食電流密度が大きくなったが、それを除けば、かぶり厚さや中性化残りとは鉄筋の自然電位および腐食電流密度との相関はほとんど認められなかった。
- (2) 躯体調査結果と実験結果を比較した結果、中性化後の腐食電流密度は、中性化残りの違いよりも、暴露環境の相対湿度の影響が大きくなるという傾向が、等しく認められた。

ただし、実験はコンクリートの含水状態を一定条件として実施したものである。それに対して、実構造物では降雨の影響などによりコンクリートの含水状態が変化するため、耐久性評価ではその含水状態の履歴を適切に考慮する必要がある。実構造物の部材条件や環境条件は様々であり、本研究で実施した既存躯体調査においても、調査時点における含水状態しか得られていない。本章では、躯体調査結果と実験結果を直接比較したが、降雨の影響などにより含水状態が変化する部材の評価については、水分移動解析を介した検討などが必要であることが分かった。

## 5.4 乾湿繰返しを受ける部材の鉄筋位置の水分状態の実測

### 5.4.1 5.4 節の概要

3 章では、鉄筋を埋設したコンクリート供試体を用いた実験により、中性化後の鉄筋腐食速度は鉄筋位置の水分状態により評価できる見通しを得た。

この実験結果を、実環境に置かれる建築物へと適用するためには、実際に建築物の置かれる環境条件とコンクリート内部の鉄筋位置の水分状態の関係を明らかにする必要がある。

本節では、屋外で雨掛かりのある RC 造の打放し外壁におけるコンクリート内部の相対湿度を通年で測定し、外気の温湿度変化や降雨といった外部環境と鉄筋位置の水分状態の関係を考察した。



#### 5.4.2 RC 造の打放し外壁内部の相対湿度の測定計画

測定対象とした RC 造の打放し外壁を写真 5.4-1 に示す。

対象は、屋外の屋根付きの資材倉庫（東京都清瀬市，W14,400mm×D3,600mm×H4,000mm）とした。壁厚は180mm，コンクリートの調合管理強度は 30N/mm<sup>2</sup>であり，測定時点で竣工より 6 年が経過している。

コンクリート内部の相対湿度の測定位置を表 5.4-1，図 5.4-1，センサ設置位置の詳細を図 5.4-2 に示す。

測点 a，b は，北面で上部に庇のある雨掛かりの部位で，測定高さは地上から 1.5m と 0.1m である。測点 c は，西面で上部に庇のない雨掛かりの部位で，測定高さは地上から 1.5m である。測点 d は，資材倉庫の屋根内の雨がくれの部位で，測定高さは地上から 1.5m である。

測定項目は，外気の温湿度，コンクリート内部の温湿度とした。コンクリート内部の温湿度は，白石らの方法<sup>[5-11]</sup>を参考として，表 5.3-1 に示す表層からの深さまで電動ドリルを用いて削孔し，温湿度データロガーを埋設して測定した。

測定期間は，7 月上旬から翌年の 7 月下旬の 12 ヶ月間とした。



（北面）



（西面）



（南面）



（東面）

写真 5.4-1 測定対象とした RC 造の打放し外壁

表5.4-1 コンクリート内部の相対湿度の測定位置

測点	方位	降雨条件	高さ	表層からの深さ
a	北	雨掛かり(底有)	1.5m	10, 20, 30, 50, 90mm
b	北	雨掛かり(底有)	0.1m	10,30,50mm
c	西	雨掛かり(底無)	1.5m	10, 20, 30, 50mm
d	南	雨がくれ	1.5m	10, 20, 30, 50, 90mm

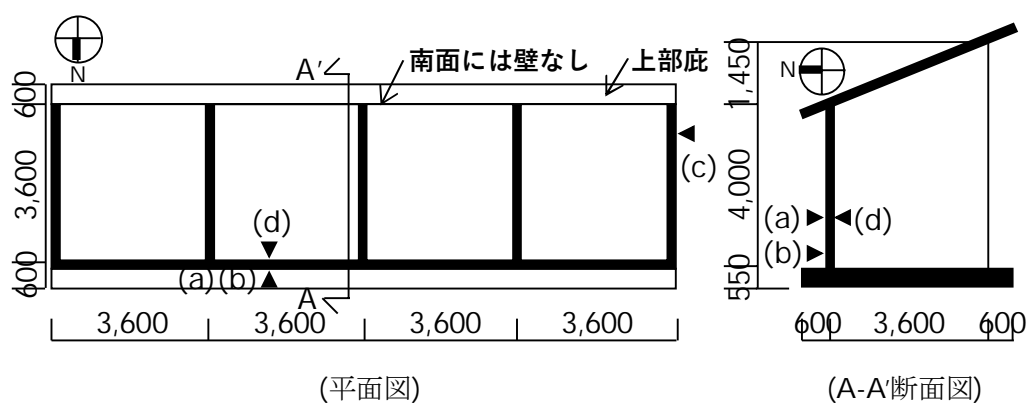


図 5.4-1 コンクリート内部の相対湿度の測定位置

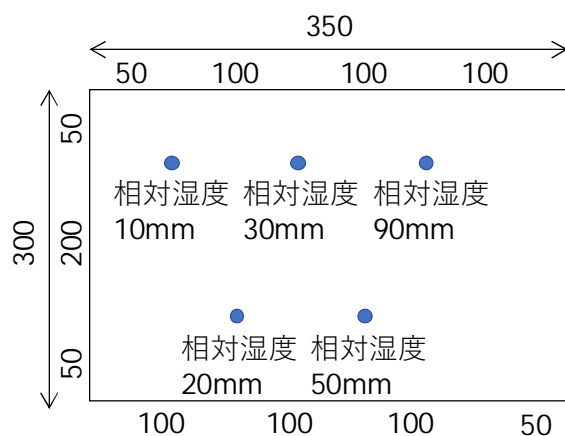


図 5.4-2 温湿度センサ設置位置の詳細

### 5.4.3 RC 造の打放し外壁内部の相対湿度の測定結果

#### (1) 外気の温湿度

測定箇所における外気温の経時変化を図 5.4-3、外気の相対湿度の経時変化を図 5.4-4 に示す。

ここでは、測定箇所近傍の気象庁データ（所沢）を示した。また、外気の相対湿度は降雨の影響を受けやすいため、気象庁データのうち降水量の日合計についても併せて示した。

外気温は、通年で 0～35℃の範囲で推移している。外気の相対湿度は、梅雨期（6 月中旬～7 月下旬）に 90%RH 程度と最も高くなり、梅雨明け直後の夏期は 60%RH 程度まで低下した。また、冬期は乾燥傾向となり 40%RH 程度まで低下した。

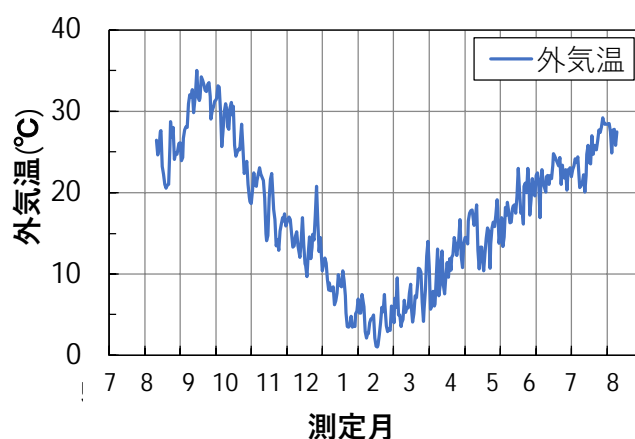


図 5.4-3 外気温の経時変化

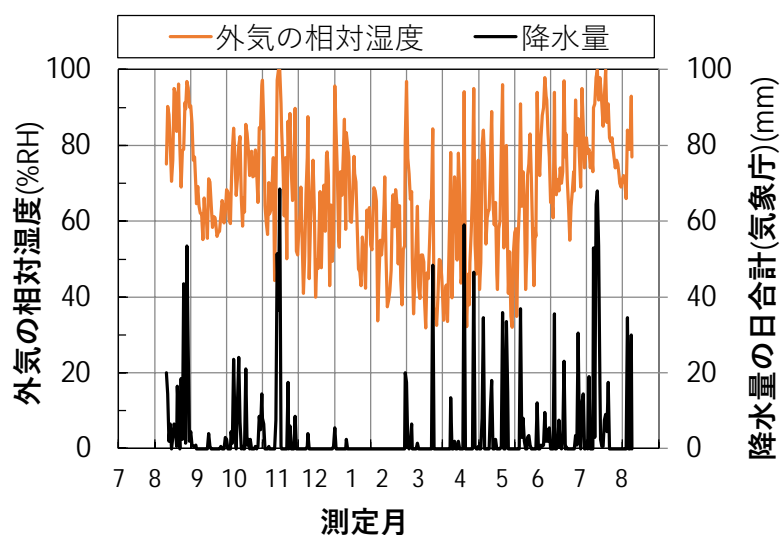


図 5.4-4 外気の相対湿度の経時変化

## (2) コンクリート内部の相対湿度

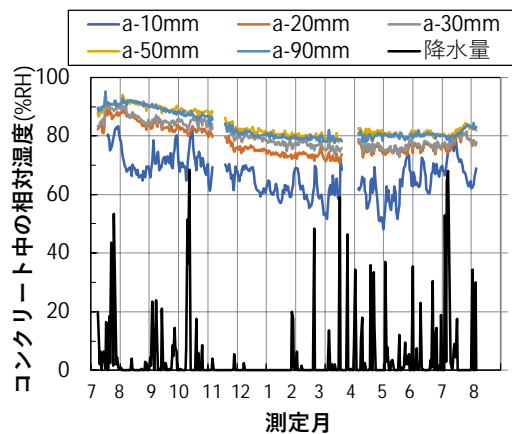
コンクリート内部の相対湿度の経時変化を図 5.4-5 に示す。

測点 a では、表層から 10mm の相対湿度は、降雨により 50～80%RH の範囲で変動が見られた。一方、20mm 以深では、降雨による相対湿度の変動は小さかった。

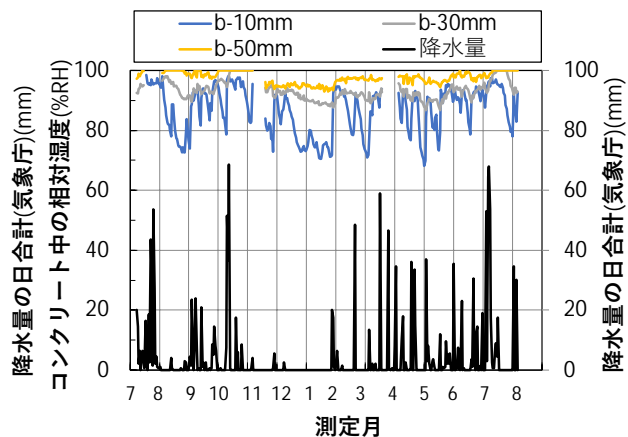
測点 b では、測点 a と同様に表層から 10mm の相対湿度は、降雨による変動が見られた。また、断面全体の相対湿度は 70～100%RH であり、測点 a と比較して高かった。この理由として、測点 b では、降雨時に地面からの水はねを受けて水分供給が多くなったことが考えられる。

測点 c では、測点 a, b と同様に表層から 10mm の相対湿度は、降雨による変動が見られた。加えて、20mm 以深でも、同様に相対湿度の変動が見られた。この理由として、測点 c では、上部に庇がなく降雨時に雨垂れを受けて水分供給が多くなったことと、乾燥時に日射（西日）の影響を受けて乾燥が促進されたことが考えられる。

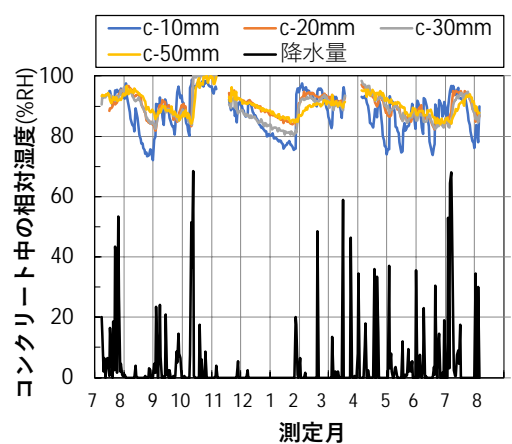
測点 d では、断面全体で降雨による相対湿度の変動は小さかった。なお、測点 a, d では、測定期間においては乾燥の進行が見られたが、図 4.3-5 からは、3 月中旬から 7 月上旬にかけて外気の相対湿度が増加しているため、コンクリート中の相対湿度も同様に増加していくと考えられる。



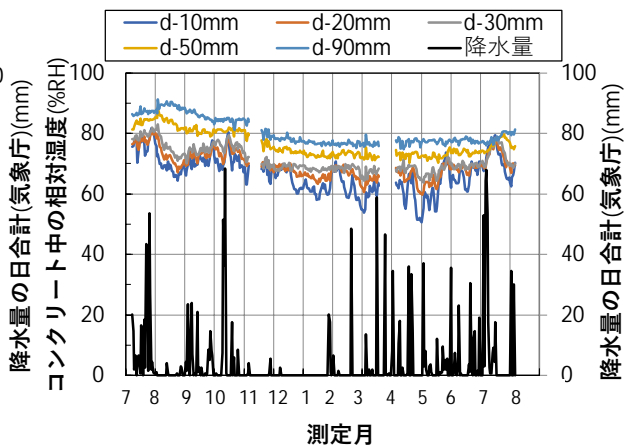
(測点 a : 雨掛かり・底有・1.5m)



(測点 b : 雨掛かり・底有・0.1m)



(測点 c : 雨掛かり・底無・1.5m)



(測点 d : 雨がくれ・屋根内・1.5m)

図 5.4-5 コンクリート内部の相対湿度の経時変化

季節ごとの断面内の相対湿度分布を図 5.4-6 に示す。図には、表層から 90mm（壁厚の中心位置）までの分布を示した。

梅雨期・標準期では、測点 b, c では、全断面で相対湿度が 80%RH 以上と高くなった。一方、上部に底のある測点 a と雨がくれの測点 d では、表層から 30mm まで相対湿度の低下が見られたが、50mm 以深ではほぼ一定であった。

夏期は、いずれの測点でも、表層から 10mm の相対湿度は梅雨期から大きく低下して 65～75%RH 程度となった。一方、雨掛かりの部位では、表層から 20, 30mm の相対湿度は 80%RH 以上となり、梅雨期からの変動は小さかった。

冬期では、いずれの測点でも、表層ほど相対湿度の低下が見られ、表層から 50mm 以深ではほぼ一定であった。

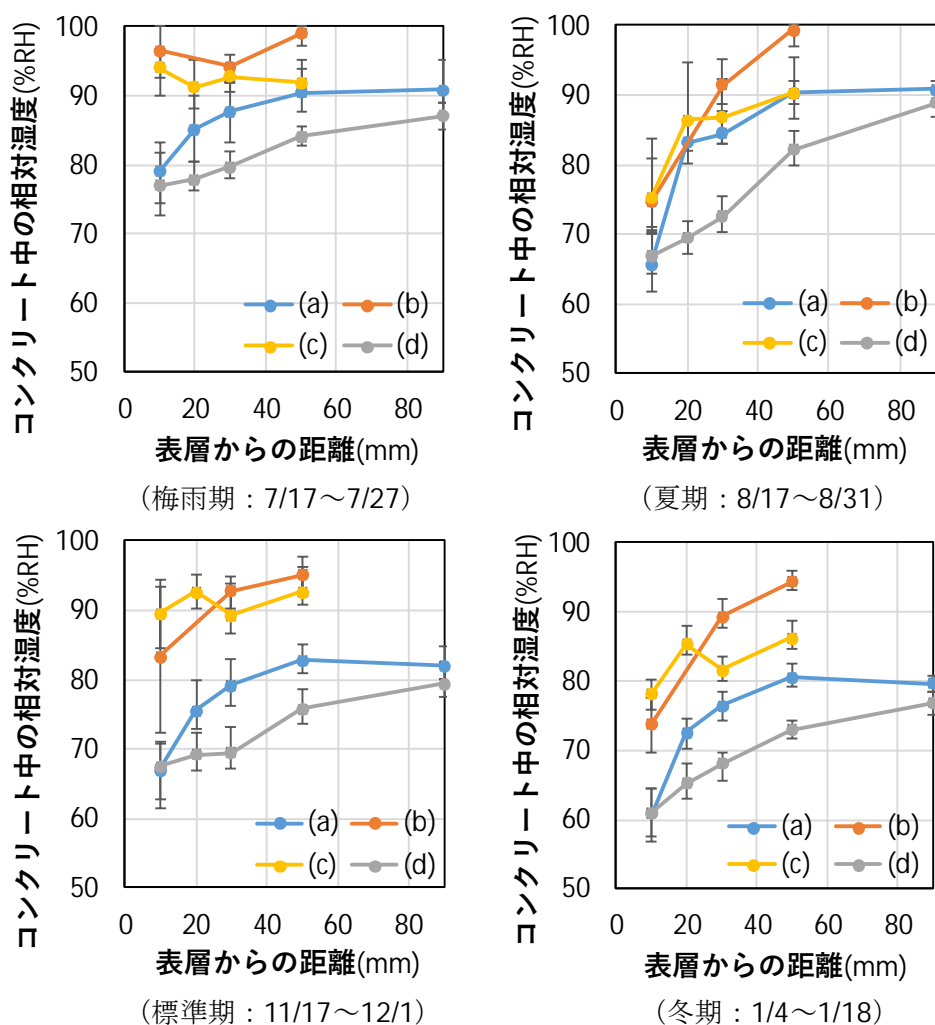


図 5.4-6 季節ごとの断面内の相対湿度分布  
(壁厚の中心位置である表層から 90mm までの分布)

#### 5.4.4 5.4 節の結論

屋外で雨掛かりのある RC 造の打放し外壁におけるコンクリート内部の相対湿度を通年で測定し、外気の温湿度変化や降雨といった外部環境と鉄筋位置の水分状態の関係を考察した。

得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 表層から 10mm の相対湿度は、降雨による変動が見られ、梅雨期には 80%RH 以上となる。
- (2) 表層から 20, 30mm の相対湿度は、降雨による変動が小さくなり、50mm 以深ではほぼ一定となる。
- (3) 庇、水はね、雨垂れなど、降雨時の水分供給条件は、表層から 30mm までの相対湿度の変動に大きく影響する。

このことから、屋外で雨掛かり（乾湿繰返し）のある鉛直部材については、数日間の連続的な降雨があった場合も、コンクリート中の含水率の上昇は、表層から 10mm 程度のみであり、表層から 20mm 以上の位置では、ほとんど含水率の変動は見られないことが分かった。また、屋外で雨掛かり（乾湿繰返し）のある鉛直部材のコンクリート内部の含水状態は、長期的には乾燥の方向に向かっていくことが分かった。建築基準法上の最小かぶり厚さである 20mm 以上を満足している場合には、屋外で雨掛かり（乾湿繰返し）のある場合の、鉄筋位置における含水状態の変動は非常に小さいものと判断された。

## 5.5 乾湿繰返しを受ける部材に対する提案した耐久性評価手法の適用性検討

### 5.5.1 5.5 節の概要

5.4 節では、屋外で雨掛かりのある鉛直部材では、数日間の連続的な降雨があった場合も、コンクリート中の含水率の上昇は、表層から 10mm 程度のみであり、表層から 20mm 以上の位置では、ほとんど含水率の変動は見られないことが分かった。

本節では、既往の研究を参考として、乾湿繰返しを受ける部材内部のコンクリート中の相対湿度を水分移動解析により取得し、4 章で提案した耐久性評価手法を乾湿繰返しを受ける部材に対して適用できることを確認した。



### 5.5.2 乾湿繰返しを受ける部材の鉄筋位置の水分状態の解析的検討

コンクリート中の水分移動は、秋田らの既報<sup>[5-12],[5-13]</sup>を参考として、1次元の拡散方程式により計算することとした。コンクリート中の水分移動は、コンクリート中の相対含水率として解いた。また、境界面では、雰囲気相の相対湿度とのやり取りになるため、コンクリートの表面要素の相対湿度を相対含水率に変換して解いた。

基礎方程式を、式(5.5-1)に示す。

$$\frac{\partial R}{\partial t} = D \frac{\partial^2 R}{\partial x^2} \quad (5.5-1)$$

ここに、R：コンクリート中の相対含水率（%）

D：拡散係数（mm<sup>2</sup>/min）

t：時間（日）

x：距離（mm）

境界条件を、式(5.5-2)に示す。

$$\frac{\partial R}{\partial n} + \alpha_m (R_s - R_o) = 0 \quad (5.5-2)$$

ここに、R：コンクリート中の相対含水率（%）

$\alpha_m$ ：水分伝導率拡散係数（mm/min）

$R_s$ ：乾燥表面の相対含水率：表面要素の相対湿度から変換（%）

$R_o$ ：雰囲気相の相対含水率：表面要素の相対湿度から変換（%）

コンクリート中の水分移動を拡散方程式により解くためには、相対含水率と相対湿度の関係を知る必要がある。ここで、コンクリート中の水分は、通常の条件ではその位置での水蒸気圧に平衡しているため、相対湿度に対応した含水率を示すことが知られている。この関係は並行含水率曲線と呼ばれる。本検討では、秋田らの既報<sup>[5-12]</sup>を参考として、式(5.5-2)に示す関係を用いた。両者の関係を図 5.5-1 に図示する。

$$R = 33.4 + 1.46H - 0.287\gamma - 1.58 \times 10^{-2}H^2 - 1.58 \times 10^{-2}H\gamma + 4.22 \times 10^{-4}\gamma^2 + 7.73 \times H^3 + 1.74 \times 10^{-4}H^2\gamma - 4.22 \times 10^{-6}H\gamma^2 \quad (5.5-3)$$

ここに、R：コンクリート中の相対含水率（%）

H：コンクリート中の相対湿度（%）

$\gamma$ ：コンクリートの水セメント比

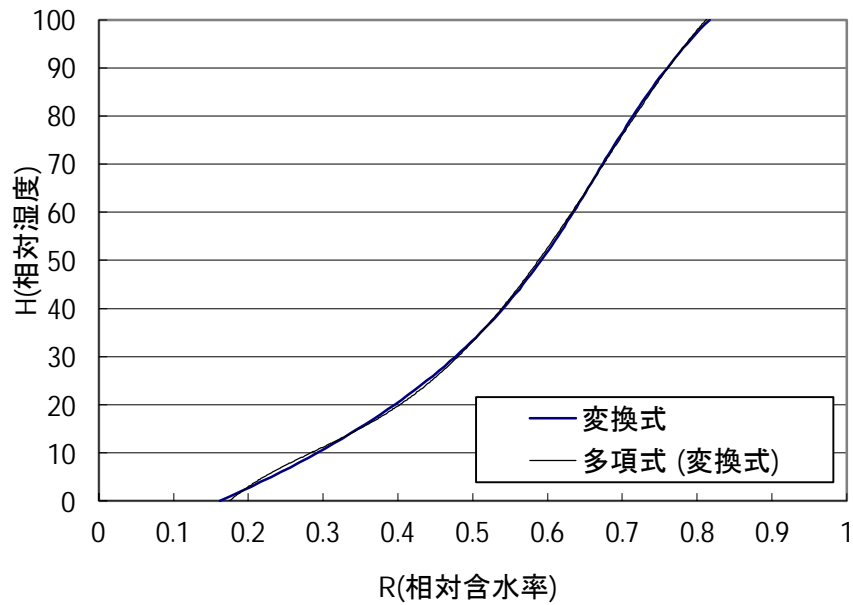


図 5.5-1 コンクリート中の相対含水率と相対湿度の関係式

コンクリートの乾燥過程における拡散係数は，コンクリート中の相対含水率に依存するものとし，秋田らの既報<sup>[5-12]</sup>を参考として，式(5.5-4)により定義した。

$$D = \frac{0.029}{(29(1-R/100)+1)^{1.4}} \quad (5.5-4)$$

ここに，D：拡散係数（mm<sup>2</sup>/min）

R：コンクリート中の相対含水率（%）

コンクリートの吸水過程における拡散係数は，コンクリート中の相対含水率に依存するものとし，兼松らの既報<sup>[5-14]</sup>を参考として，式(5.5-5)により定義した。

$$\text{Log}[D(\theta)] = a \cdot \theta (\theta^2 - \theta_{\text{sat}}^2) + b \cdot \theta (\theta^2 - \theta_{\text{sat}}) + 3\theta / \theta_{\text{sat}} - 2.5 \quad (5.5-5)$$

以上の構成方程式で 1 次元モデルの水分移動を解く差分法のプログラムを作成し，計算を行った。

壁厚 180mm の打放し外壁を対象として、コンクリート中の相対湿度が 60%を初期条件とし、降雨が 7 日間連続する過程におけるコンクリート中の相対湿度の経時変化を解析した。

降雨時におけるコンクリート中の相対含水率の経時変化を図 5.5-2、コンクリート中の相対湿度の経時変化を図 5.5-3 に示す。

表層より 10mm の位置では連続降雨時間が 0.5 日、20mm の位置では連続降雨時間が 1.0 日、30mm の位置では連続降雨時間が 2.0 日後には、中性化後の鉄筋腐食速度が大きくなるとされる相対湿度 90%RH を上回る結果となった。なお、土木学会<sup>[5-15]</sup>・<sup>[5-16]</sup>によれば、連続降雨時間の中央値は 10 時間とされているため、連続的な降雨の影響で鉄筋位置の相対湿度が 90%RH を上回るのは、表層から 10mm 以下の範囲のみとなる。

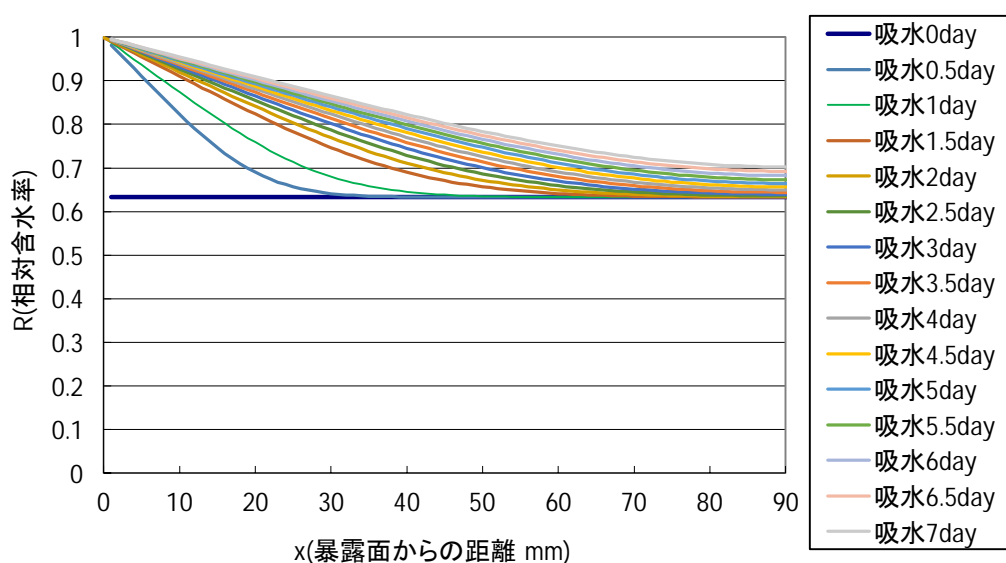


図 5.5-2 降雨時におけるコンクリート中の相対含水率の経時変化

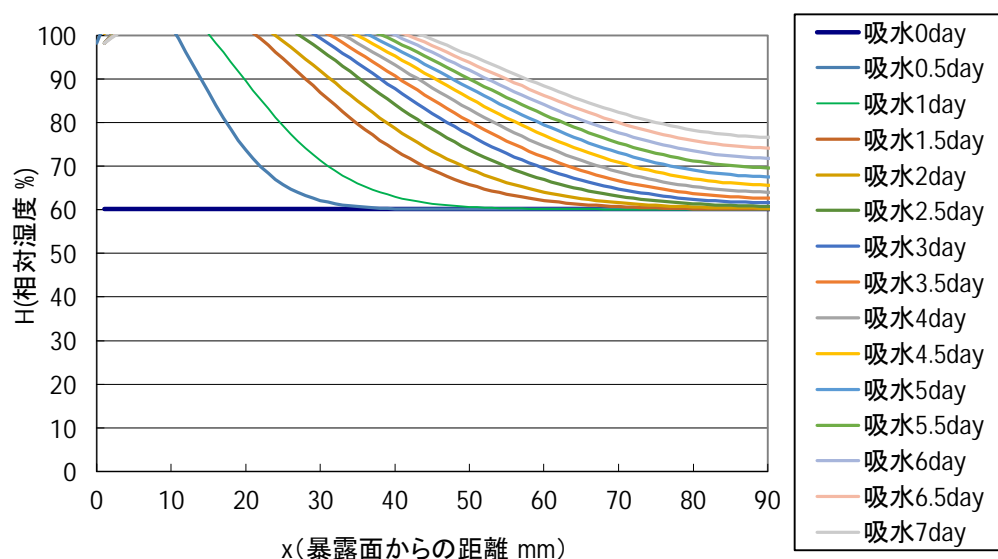


図 5.5-3 降雨時におけるコンクリート中の相対湿度の経時変化（壁厚中心までの分布）

次に、壁厚 180mm の打放し外壁を対象として、コンクリート中の相対湿度が 100%を初期条件とし、相対湿度 60%RH 環境下において 28 日間連続で乾燥を受ける過程におけるコンクリート中の相対湿度の経時変化を解析した。

乾燥時におけるコンクリート中の相対含水率の経時変化を図 5.5-4、コンクリート中の相対湿度の経時変化を図 5.5-5 に示す。

表層より 10mm の位置では、乾燥 1 日後に相対湿度が 90%RH、7 日後に 80%RH、28 日後に 70%RH となるような乾燥速度であった。表層より 20mm の位置では、乾燥 7 日後に相対湿度が 90%RH、21 日後に 80%RH となるような乾燥速度であった。表層より 30mm の位置では、乾燥 14 日後に相対湿度が 90%RH、28 日後でも 85%RH 程度までしか乾燥は進行しなかった。表層より 40mm の位置では、乾燥 28 日後においても相対湿度は 90%RH と高い値を保っていた。

このことから、28 日間連続で乾燥を受ける場合であっても、コンクリート中の水分移動が生じるのは、表層から 30mm 以下の範囲のみとなった。

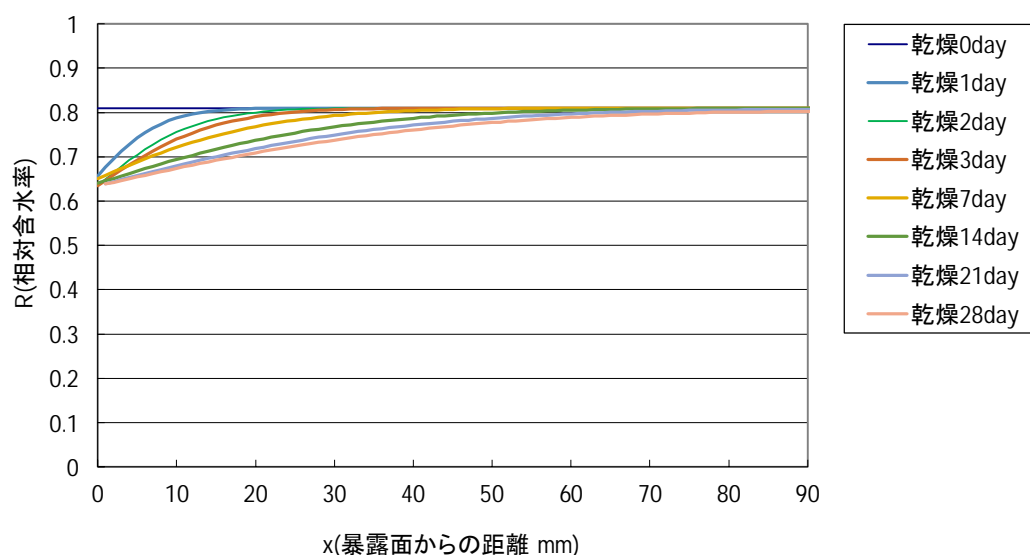


図 5.5-4 乾燥時におけるコンクリート中の相対含水率の経時変化

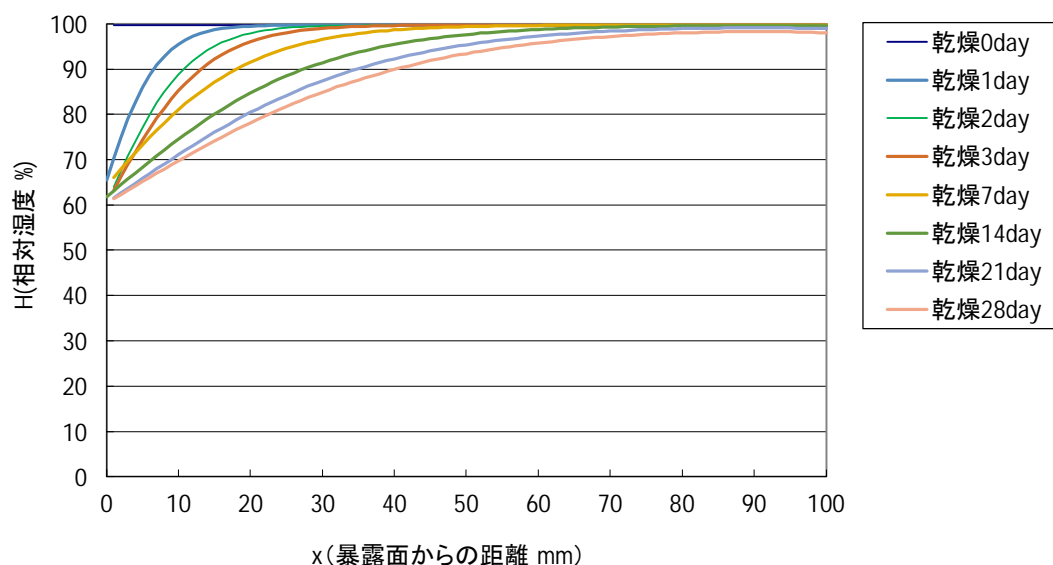


図 5.5-5 乾燥時におけるコンクリート中の相対湿度の経時変化（壁厚中心までの分布）

前節で実測した，壁厚 180mm の打放し外壁を対象として，連続的な降雨過程や乾燥過程における，コンクリート中の相対湿度の変化を解析的に検討した。

外気の相対湿度は，気象庁の平年値（東京）を用いて 1 日ごとに变化させた。乾燥過程においては，境界条件として外気の相対湿度を設定することで対応した。湿潤過程においては，気象庁の平年値（東京）の降水量が 5ml/日を上回る日に対して，12 時間連続で吸水させる条件を与えた。連続降雨時間 12 時間の設定は，土木学会<sup>[5-15]</sup>・<sup>[5-16]</sup>において，連続降雨時間の中央値が 10 時間であり，設計の際には安全率として 1.2 倍した，連続 12 時間の降雨を想定するとされていることを参考とした。

東京における壁厚 180mm の壁のコンクリートの相対含水率の解析結果を図 5.5-6，相対湿度の解析結果を図 5.5-7 に示す。

乾燥の影響と降雨による吸水の影響を受けて，コンクリートの表層から 5mm，10mm，20mm の範囲では，コンクリート中の含水状態の変動が大きくなっている。一方，コンクリートの表層から 30mm 以深になると，外部環境の変化によるコンクリートの含水状態の変動は非常に小さくなっている。

1 年間を通じたコンクリート中の含水状態の変化を見ると，6～7 月の梅雨時期でコンクリート内部まではほぼ飽水状態まで含水率が上昇し，冬期にはコンクリート内部まで乾燥が進行するものの，翌年の 6～7 月の梅雨時期になると，再度コンクリート内部まではほぼ飽水状態まで含水率が上昇する挙動が見られた。

ここで，実測結果を図 5.4-5（再掲）に再掲し，解析結果である図 5.5-7 との比較検討を行った。

測定を開始した 7 月中旬には，コンクリートの表層から 10mm～50mm の相対湿度は概ね 95% 程度となっている。実測結果も解析結果も概ね同様の値となっている。

降雨の少ない 1 月末には，実測結果ではコンクリートの表層から 10mm の点では相対湿度が 70～80%程度，解析結果は 60～70%程度と，わずかながら解析の方が乾燥の進行が大きくなった。解析結果の方が，コンクリート中への水分の出入りが大きくなるため，鉄筋腐食の進行の観点からみれば，解析では安全側の結果が得られるものと判断できる。

以上より，水分移動解析によって，鉄筋位置の含水状態を安全側に評価できることを確認した。これにより，乾湿繰返しを受ける部材に対して，年間を通じた鉄筋位置の水分状態の変化を得ることができ，中性化後の鉄筋腐食速度の変化を推定することができる。

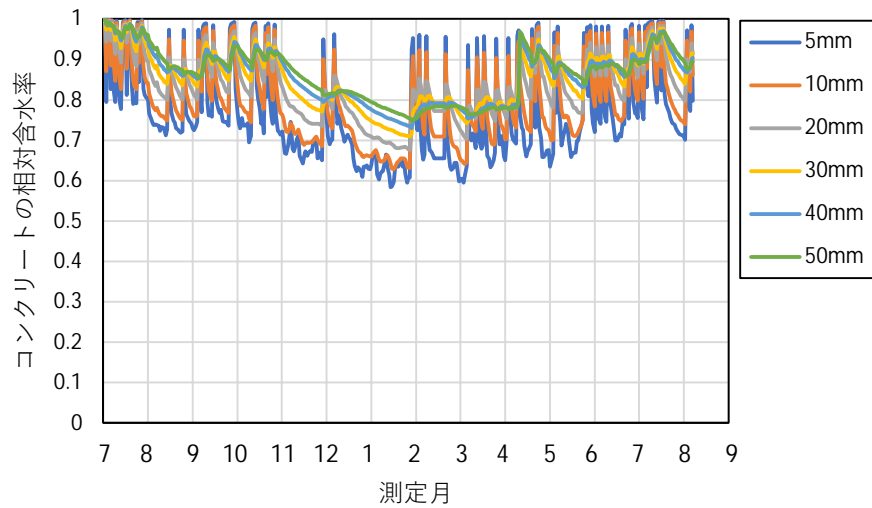


図 5.5-6 東京における壁厚 180mm の壁のコンクリートの相対含水率の解析結果

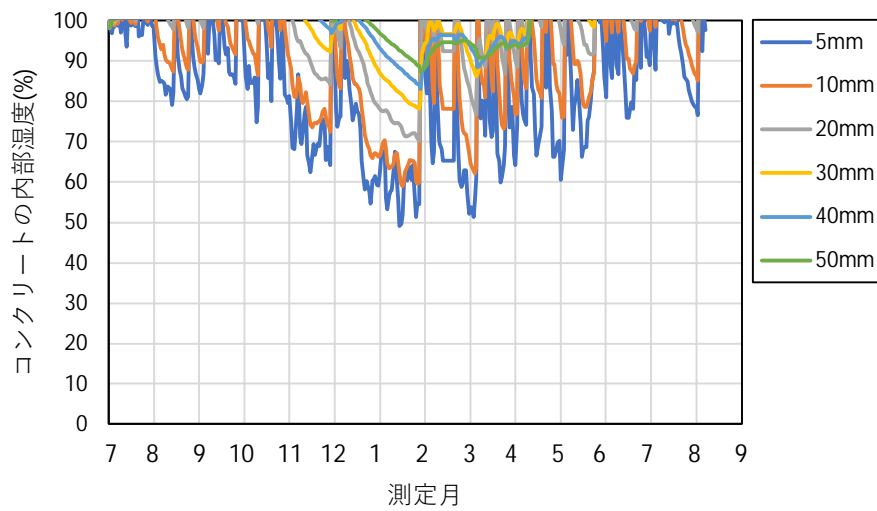
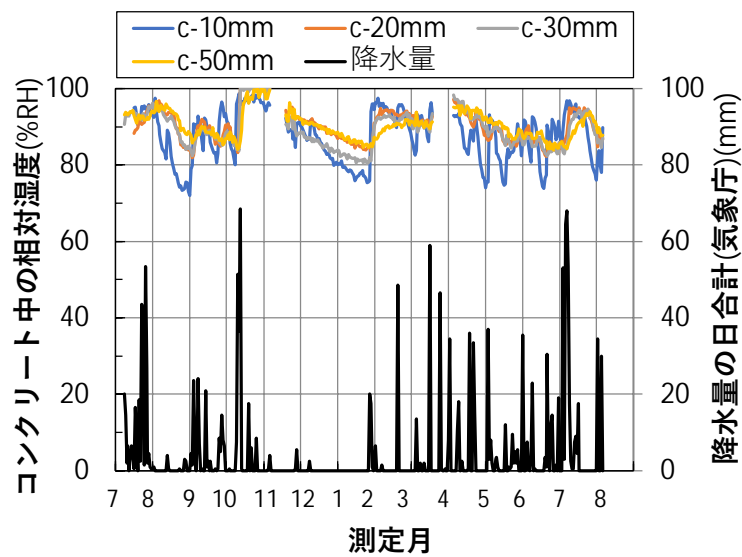


図 5.5-7 東京における壁厚 180mm の壁のコンクリートの内部湿度の解析結果



(測点 c: 雨掛かり・庇無・1.5m)

図 5.4-5 (再掲) コンクリート内部の相対湿度の経時変化

### 5.5.3 乾湿繰返しを受ける部材に対する提案した耐久性評価手法の適用性検討

前節では、壁厚 180mm の打放し外壁を対象として、連続的な降雨過程や乾燥過程における、コンクリート中の水分状態の変化を解析的に得られることを確認した。この解析により得られた鉄筋位置の相対湿度から、3 章で得られた鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を用いて鉄筋腐食速度を算定することで、乾湿繰返しを受ける部材に対しても、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法が適用できることを確認する。

#### (1) 中性化の指標による耐用年数の算定のための条件整理

本検証で対象とする部材条件を以下に示す。

- ① 計画場所：東京都
- ② 部材条件：外壁（壁厚 180mm）
- ③ 設計基準強度：24N/mm<sup>2</sup>
- ④ 調合管理強度：27N/mm<sup>2</sup>
- ⑤ コンクリートの水セメント比：0.55
- ⑥ セメント種別：普通ポルトランドセメント

屋外面の雨掛かりにおける中性化速度は、日本建築学会の耐久設計施工指針・同解説に基づいて式 (5.5-6) により算定した。

$$\begin{aligned} A &= k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \\ &= 17.2 \times 1.00 \times 1.00 \times (0.55 - 0.38) \times 1.00 \times 1.00 \times 1.00 \\ &= 2.92 \text{ (mm/}\sqrt{\text{年)}} \end{aligned} \tag{5.5-6}$$

ここに、A：中性化速度係数 (mm/√年)

$\alpha_1 \sim \alpha_3$ ：係数

$\beta_1 \sim \beta_3$ ：係数

式 (5.5-6) より、本検討における中性化速度係数は、2.92 (mm/√年) となった。

## (2) 鉄筋腐食の進行による耐用年数算定のための条件整理

3章の実験的検討では、コンクリート中の相対湿度と中性化後の鉄筋腐食速度の関係性を示した。本節では、水分移動解析により得られたコンクリート中の相対湿度から、解析刻み幅（本検討では1日）ごとに鉄筋腐食速度を算定し、それらを平均化することにより、乾湿繰返しを受ける部材の中性化後の鉄筋腐食速度を求めた。

かぶり厚さおよび相対湿度と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を図 5.5-8 に示す。この関係を用いて、1日（水分移動解析の刻み幅）ごとに、中性化後の鉄筋腐食速度を算定した。なお、かぶり厚さの違いについては、図 5.5-8 に示した累乗近似曲線（3章で、式(3.2-1)、式(3.2-2)、式(3.2-3)として定式化している）により算定した。相対湿度の違いについては、実験でパラメータとした60%RH、75%RH、90%RH、100%RHの4点の線形補完により算定した。

乾湿繰返しを受ける部位の鉄筋腐食速度の考え方を式(5.5-7)に示す。

$$V_{\text{corr,ave.}} = \Sigma V_{\text{corr,day}} / D \quad (5.5-7)$$

ここに、 $V_{\text{corr,ave.}}$ ：乾湿繰返しを受ける部位の中性化後の鉄筋腐食速度（ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ）

$V_{\text{corr,day}}$ ：1日（解析刻み）ごとの中性化後の鉄筋腐食速度（ $\text{mg}/\text{cm}^2$ ）

D：解析日数

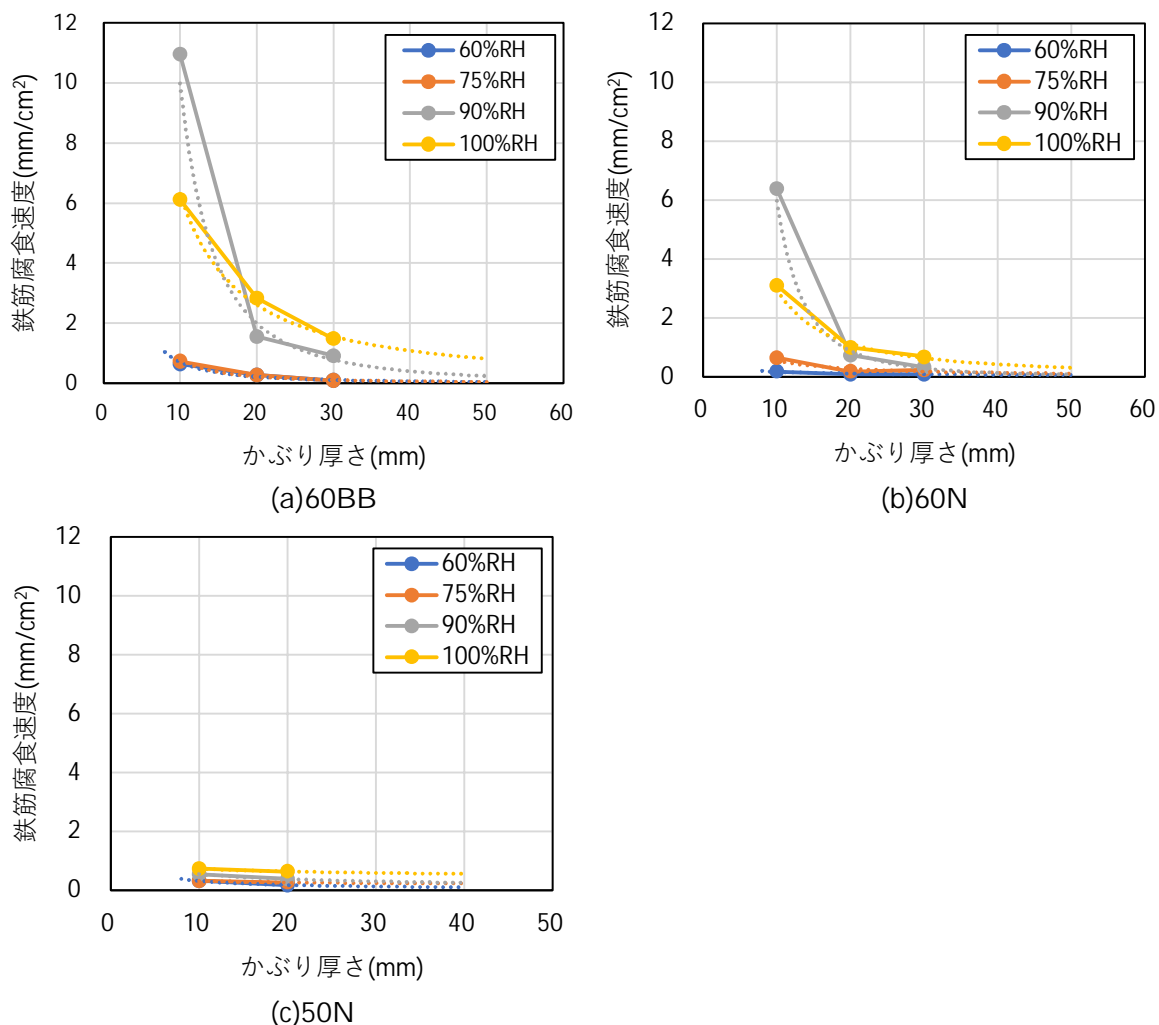


図 5.5-8 かぶり厚さおよび相対湿度と中性化後の鉄筋腐食速度の関係



前節で算定した1年間の水分移動解析結果(図 5.5-7)を用いて、式(5.5-7)により算定した中性化後の鉄筋腐食速度を表 5.5-1 に示す。

なお、鉄筋腐食の限界状態として、鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量( $W_{\text{grade3}}$ )と腐食ひび割れが発生する腐食減量( $W_{\text{crack}}$ )の2種類を設定した。それぞれの値を、表 5.5-2 と表 5.5-3 に示す。

表 5.5-1 1年間の水分移動解析結果の平均化により算定した鉄筋腐食速度

かぶり厚さ		10mm	20mm	30mm	50mm
鉄筋腐食速度 $V_{\text{corr.ave.}}$ ( $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{year}$ )	60N	4.3	0.73	0.37	0.35

表 5.5-2 既往の研究による鉄筋腐食度評価基準のグレード 3 に相当する腐食減量( $W_{\text{grade3}}$ )

鉄筋径		D10	D19	D25	D32	D38
グレード 3 相当腐食量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	算定値	21.0	44.5	59.8	73.2	88.5
	本研究の設定値 (最小値を採用)	21.0				

表 5.5-3 既往の研究による腐食ひび割れが発生する腐食減量( $W_{\text{crack}}$ )

かぶり厚さ		10mm	20mm	30mm	40mm	50mm
ひび割れ発生 限界腐食量 ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ )	算定値の範囲	76~98	51~66	36~46	30~39	34~44
	本研究の設定値 (最小値を採用)	76	51	36	30	34

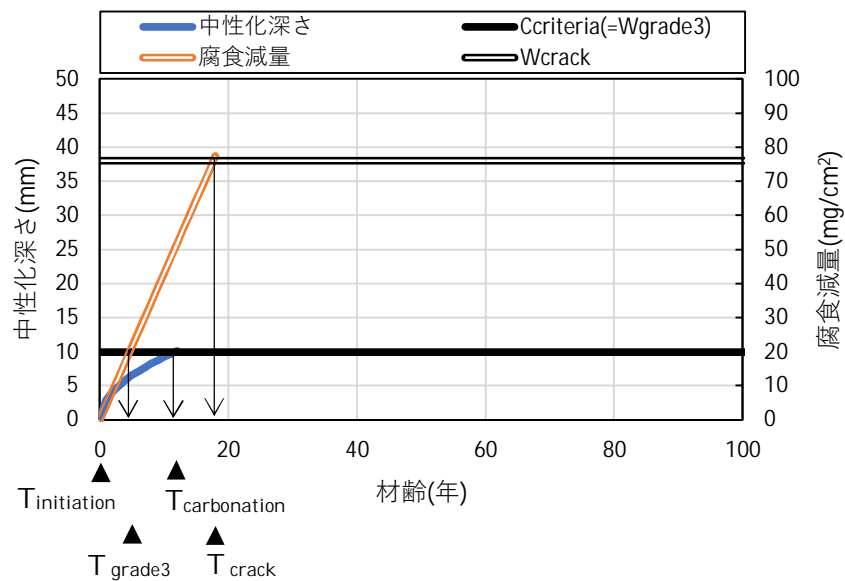
乾湿繰返しを受ける部材に対する中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定結果を図 5.5-9 および表 5.5-4 に示す。

中性化を指標とした耐用年数は、かぶり厚さ 10mm では 12 年、かぶり厚さ 20mm では 47 年、かぶり厚さ 30mm では 106 年、かぶり厚さ 50mm では 200 年以上となった。

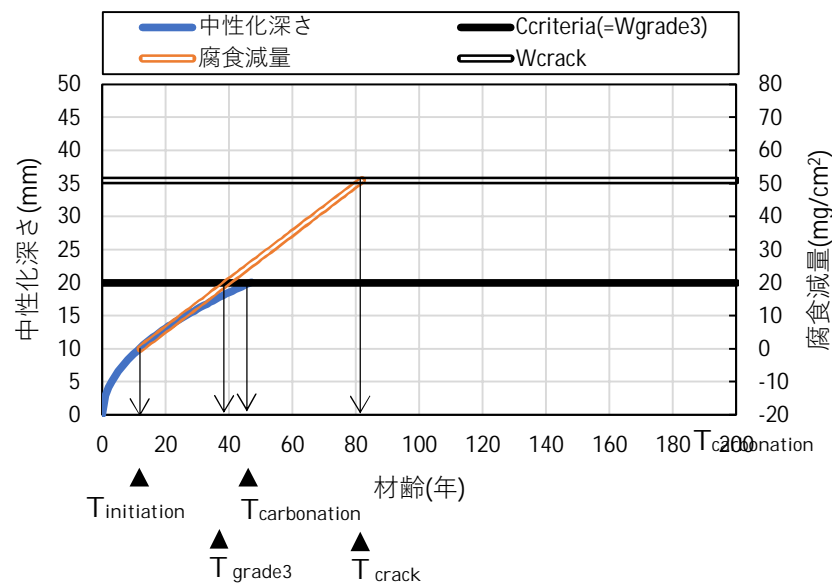
鉄筋腐食を指標とした耐用年数は、限界腐食量を腐食グレード 3 に相当する  $W_{\text{grade3}}$  とした場合、かぶり厚さ 10mm では 5 年、かぶり厚さ 20mm では 30 年、かぶり厚さ 30mm では 57 年、かぶり厚さ 50mm では 60 年となった。限界腐食量を腐食ひび割れ発生限界の  $W_{\text{crack}}$  とした場合、かぶり厚さ 10mm では 18 年、かぶり厚さ 20mm では 70 年、かぶり厚さ 30mm では 98 年、かぶり厚さ 50mm では 97 年となった。

中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数は、限界腐食量を腐食グレード 3 に相当する  $W_{\text{grade3}}$  とした場合、かぶり厚さ 10mm では 5 年、かぶり厚さ 20mm では 42 年、かぶり厚さ 30mm では 104 年、かぶり厚さ 50mm では 200 年以上となった。限界腐食量を腐食ひび割れ発生限界の  $W_{\text{crack}}$  とした場合、かぶり厚さ 10mm では 18 年、かぶり厚さ 20mm では 82 年、かぶり厚さ 30mm では 145 年、かぶり厚さ 50mm では 200 年以上となった。

このように、乾湿繰返しを受ける部材に対しても、3章で提案した中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法が適用できることを確認した。



(a)かぶり厚さ 10mm



(b)かぶり厚さ 20mm

図 5.5-9 (1/2) 乾湿繰返しを受ける部材に対する中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定結果

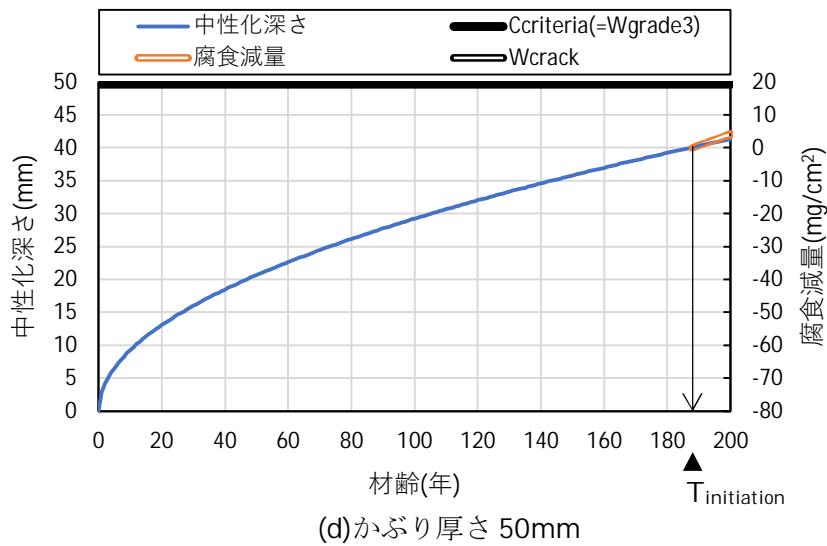
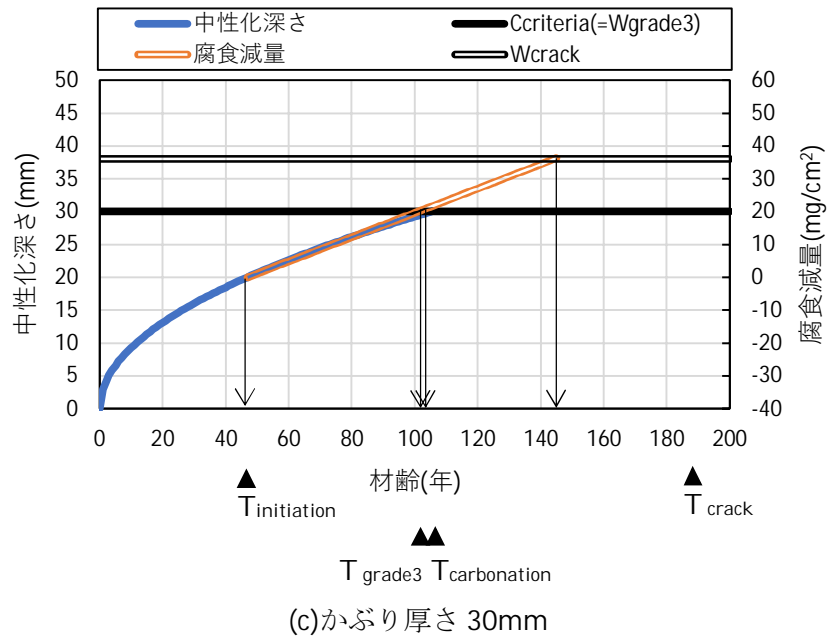


図 5.5-9 (2/2) 乾湿繰返しを受ける部材に対する中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の算定結果

表 5.5-4 乾湿繰返しを受ける部材に対する中性化後の鉄筋腐食の  
進行を考慮した耐用年数の算定結果

耐久性 評価指標	限界値	耐用年数	耐用年数			
			かぶり厚さ 10mm	かぶり厚さ 20mm	かぶり厚さ 30mm	かぶり厚さ 50mm
(1) 中性化	D	$T_{\text{carbonation}}$	12	47	106	200 超
	D-10 (起点)	$T_{\text{initiation}}$	0	12	47	188
(2) 鉄筋腐食	$W_{\text{grade3}}$	$T_{\text{grade3}}$	5	30	57	60
	$W_{\text{crack}}$	$T_{\text{crack}}$	18	70	98	97
(3) 中性化+ 鉄筋腐食	D-10 + $W_{\text{grade3}}$	$T_{\text{initiation}}$ + $T_{\text{grade3}}$	5	42	104	200 超
	D-10 + $W_{\text{crack}}$	$T_{\text{initiation}}$ + $T_{\text{crack}}$	18	82	145	200 超

## 5.6 5 章の結論

5 章では、既存 RC 造建築物の耐久性調査結果の分析により、乾湿繰返しを受ける部位における、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を検討した。ここで、鉄筋腐食速度に影響をおよぼすのは、降雨や乾燥などの外部環境の変動ではなく、鉄筋位置の水分状態であることを明らかとした。しかしながら、設計時もしくは供用期間中に得られるのは、外部環境のデータに限られる。そこで、乾湿繰返しを受ける部材に対して、水分移動解析によりコンクリート中の水分状態を予測し、中性化後の鉄筋腐食速度を算定することで、提案した耐久性評価手法が適用できることを確認した。

長期間供用された RC 造建築物の躯体調査結果を分析した結果、鉄筋位置の含水率と鉄筋の自然電位および腐食電流密度には相関が認められた。一方、かぶり不足となる測定箇所では、鉄筋の自然電位、腐食電流密度が大きくなったが、それを除けば、かぶり厚さや中性化残りと鉄筋の自然電位および腐食電流密度との相関はほとんど認められなかった。躯体調査結果と実験結果を比較した結果、中性化後の腐食電流密度は、中性化残りの違いよりも、暴露環境の相対湿度の影響が大きくなるという傾向が、等しく認められた。

屋外で雨掛かり（乾湿繰返し）のある鉛直部材については、数日間の連続的な降雨があった場合も、コンクリート中の含水率の上昇は、表層から 10mm 程度のみであり、表層から 20mm 以上の位置では、ほとんど含水率の変動は見られないことが分かった。また、屋外で雨掛かり（乾湿繰返し）のある鉛直部材のコンクリート内部の含水状態は、長期的には乾燥の方向に向かっていくことが分かった。建築基準法上の最小かぶり厚さである 20mm 以上を満足している場合には、屋外で雨掛かり（乾湿繰返し）のある場合の、鉄筋位置における含水状態の変動は非常に小さいものと判断された。

壁厚 180mm の打放し外壁を対象として、連続的な降雨過程や乾燥過程における、コンクリート中の相対湿度の変化を水分移動解析により算定した。解析により得られた鉄筋位置の相対湿度から、中性化後の鉄筋腐食速度を算定し、提案した中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法を、乾湿繰返しを受ける部材に対しても適用できることを確認した。

## 5 章の参考文献

- [5-1] 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
- [5-2] スカイティンほか：既存 RC 造構造物のコンクリート内部相対湿度および腐食環境に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.42，No.1，pp.497-502，2020.7
- [4-3] 木野瀬徹，今本啓一，田沼毅彦，清原千鶴：コンクリート中の水分を考慮した中性化後における鉄筋腐食予測に向けた基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.37，No.1，2015.7
- [5-4] 庭野究ほか：同潤会上野下アパートに関する調査研究（その 4）ひび割れと鉄筋の腐食状況，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.1133-1134，2014
- [5-5] 野田貴之ほか：旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査（その 12）鉄筋腐食状況，日本建築学会大会学術講演梗概集，材料施工，pp.439-440，2015
- [5-6] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説，2016.7
- [5-7] 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事，2022
- [5-8] 和泉意登志，押田文雄：経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食，日本建築学会構造系論文集，第 406 号，pp.1-12，1989
- [5-9] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説，p.6，1997
- [5-10] Nagano, H., Doi, T. and Yamashita, M.: Study on Water Adsorption-Desorption on Metal Surfaces and the Early Stage of Atmospheric Corrosion in Steels, Materials Science Forum, vols.289-292, pp.127-134, 1998
- [5-11] 白石聖ほか：旧国立霞ヶ丘競技場の建築材料調査 その 7：含水率，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，pp.429-430，2015.10
- [5-12] 秋田宏ほか：モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動，土木学会論文集，第 420 号，V-13，1990.8
- [5-13] 秋田宏ほか：乾燥を受けるコンクリート中の水分移動を解析する方法，土木学会論文集，第 490 号，V-23，pp.101-110，1994.5
- [5-14] 兼松学ほか：熱中性ラジオグラフィによるコンクリートの吸水過程の解明，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 690 号，pp.1339-1347，2013.8
- [5-15] 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書（設計編），2017.3
- [5-16] 土木学会：コンクリート中への水分浸透評価とその拡張に関する研究小委員会（362 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ No.131，pp.138，2022.11

## 6. 本研究の結論

本研究は、RC 造建築物の耐久性を対象として、従来のコンクリートの中性化の進行に基づいた耐久性評価手法に対して、コンクリートの中性化後における鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法の構築を目的とした実験的研究である。

実験では、使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定した。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。この実験結果を基に、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した新たな耐久性評価手法を提案した。

また、実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。加えて、乾湿繰返しを受ける部材に対して、水分移動解析によりコンクリート中の水分状態を予測し、中性化後の鉄筋腐食速度を算定することで、提案した耐久性評価手法が適用できることを確認した。

本研究の結論を以下に示す。

- (1) 使用材料や強度などの条件を揃えて、かぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を用いて、鉄筋位置の水分状態を変えて、中性化後における鉄筋腐食速度を測定する実験的検討を行った。これにより、外部環境が一定条件の下での中性化後の鉄筋腐食速度を取得し、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を定式化した。
- (2) 外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、セメント種別、水セメント比、混和材を高含有したコンクリートのいずれに対しても、同様の傾向となることを確認した。
- (3) 外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、中性化残りが 0mm 以下ではほぼ同等とみなせる範囲であり、中性化深さがかぶり厚さに到達した以降の鉄筋腐食速度は、ほぼ一定とみなせることを確認した。
- (4) 外部環境が一定条件の下での、かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係は、ひび割れ部においても同様の傾向が認められた。
- (5) かぶり厚さおよび鉄筋位置の水分状態と中性化後の鉄筋腐食速度の関係に基づいて、中性化後の鉄筋腐食を考慮した新しい耐久設計手法を提案した。
- (6) 実設計において再利用を計画した既存 RC 造建築物に対して、提案した耐久性評価手法を適用し、その実行性を確認した。
- (7) 乾湿繰返しを受ける部材に対して、水分移動解析によりコンクリート中の水分状態を予測し、中性化後の鉄筋腐食速度を算定することで、提案した耐久性評価手法が適用できることを確認した。

以 上