

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

酒井正樹 神代泰道

Study on the Durability Evaluation Method for RC Buildings Considering Progress of Rebar Corrosion After Carbonation

Masaki Sakai Yasumichi Koushiro

Abstract

In recent years, a rational approach has been discussed in which the durability of RC buildings is evaluated both by the carbonation of concrete and the corrosion rate of the rebar after carbonation. In this study, based on previously reported experimental results, we formulated a relationship between the cover thickness, moisture content at the rebar position, and corrosion rate of the rebar after carbonation under certain external environmental conditions. Based on this relationship, we proposed a new durability evaluation method that considers rebar corrosion after carbonation. Furthermore, when rebuilding an RC building, we applied the proposed durability evaluation method to a new construction design that plans to reuse the existing underground structures and confirmed its feasibility.

概要

SDGs の推進や 2050 年カーボンニュートラルの実現に向けて、コンクリートの中性化（以下、中性化という）後の鉄筋腐食を考慮して RC 造建築物の耐久性を評価する考え方が注目されている。これは、中性化の進行を許容した上で、中性化後の鉄筋腐食を指標として耐久性評価を行うもので、従来の評価手法では解体の判断が下されていた既存の建築ストックの継続使用が可能となる。本研究では、既報の実験結果に基づいて、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を定式化し、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。さらには、RC 造建築物の建て替えにあたって、既存建築物の地下部分の再利用を計画した新設の設計案件に対して、提案した耐久性評価手法の適用性を確認した。

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート造（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¹⁾。既存の建築ストックの継続使用は、経済性だけでなく、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)」の観点からも極めて有益と言える²⁾。

既存の RC 造建築物の継続使用は、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。本報で対象とする RC 造建築物の耐久性は、塩害や凍害など特殊な環境条件に置かれる場合を除いて、鉄筋腐食により評価される。しかしながら、鉄筋腐食の測定手法や予測手法が確立されていないため、安全側の評価となるように、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を指標として、設計や維持管理がなされている。

一方、近年では、長期供用後に解体される既存 RC 造建築物を中心として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、鉄筋腐食の進行が無視できる程度に小さいことが明らかとなってきた^{3), 4)}。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った場合には、鉄筋腐食が生じることなく、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。

日本建築学会では、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の進行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について議論がなされ、2022 年 11 月には建築工事標準仕様書 JASS 5 コンクリート工事⁵⁾（以降、JASS 5 という）の大改定に反映された。この大改定では、一般劣化環境において、非腐食環境と腐食環境の区分が新設され、外部からの水分供給がない非腐食

環境では、耐久設計基準強度の適用がなくなった。これは、設計における制御の対象を、従来の中性化ではなく、中性化の結果生じる鉄筋腐食とした上で、中性化後の鉄筋腐食の進行に対する水分の作用による影響の大きさを考慮したものである。このように、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評価を行う考え方を採用できれば、従来の耐久性評価では解体の判断が下されていた RC 造建築物に対し、より長期間の供用を計画することが可能となる。

筆者らはこれまでに、既報^{6)~9)}において、コンクリートの中性化後における鉄筋腐食速度の実験的検討を行ってきた。具体的には、セメント種別、水セメント比およびかぶり厚さを変えた鉄筋コンクリート試験体を作製して、事前に所定の中性化深さになるまで促進中性化試験を行った後、異なる相対湿度(60~100%RH)で0.6~6.8年間にわたって長期暴露試験を行い、鉄筋位置の水分状態と鉄筋腐食速度を電気化学的に測定した。

本報では、最初に既報^{6)~9)}の実験結果をもとに、外部の環境条件が一定の場合における、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定式化する。次に、この関係を用いて、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を提案する。最後に、RC 造建築物の建て替えにあたって、既存建築物の地下部分の再利用を計画した新設の設計案件¹⁰⁾に対して、提案した鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の適用性を検証する。

2. 中性化後の鉄筋腐食速度の定式化

既報^{6)~9)}の実験結果に基づいた、外部の環境条件が一定の場合における、かぶり厚さおよび外部環境の相対湿度と中性化後の鉄筋腐食速度の関係を Fig.1 に示す。

既報では、コンクリートの中性化の進行速度が速く、中性化後の鉄筋腐食速度の進行を考慮する機会が多くなると想定された高炉セメント B 種を中心として、4 水準

のコンクリート調合を設定している。コンクリートの調合条件は、水セメント比が 60%でセメント種別が高炉 B 種セメント [60BB]と普通ポルトランドセメント [60N]、水セメント比が 50%でセメント種別が普通ポルトランドセメント [50N] と混和材を高含有したコンクリート [50CC] である。ただし 50CC は、かぶり厚さが 30mm の実験水準のみであり、かぶり厚さと中性化後の鉄筋腐食速度の関係は得られていない。

なお、本報では、コンクリートの調合表 (Table 1) のみを示したが、フレッシュ性状や硬化性状などその他の測定結果については、既報^{6)~9)}を参照されたい。

また、既報では中性化後の腐食電流密度が示されているが、本報では腐食電流密度を鉄筋腐食速度に換算して、相対湿度ごとにかぶり厚さと鉄筋腐食速度の関係を示した。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き、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る式(1)¹¹⁾を用いて行った。

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

ここに、 V_{corr} : 鉄筋腐食速度 (mg/cm²/year)

I_{corr} : 腐食電流密度 (μ A/cm²)

Fig. 1 の近似式である式(2)は、4 水準のコンクリートの調合に対して、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ものである。60BB, 60N, 50N は、かぶり厚さが 10~30mm の範囲で

Table 1 コンクリートの調合

Mix Proportion of Concrete

調合記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
			W	BB	N	BS	S	G
60BB	60	49.5	182	303	—	—	871	906
60N	60	49.5	180	—	300	—	875	907
50N	50	50.1	170	—	340	—	882	892
50CC	50	45.8	180	—	90	270	778	933

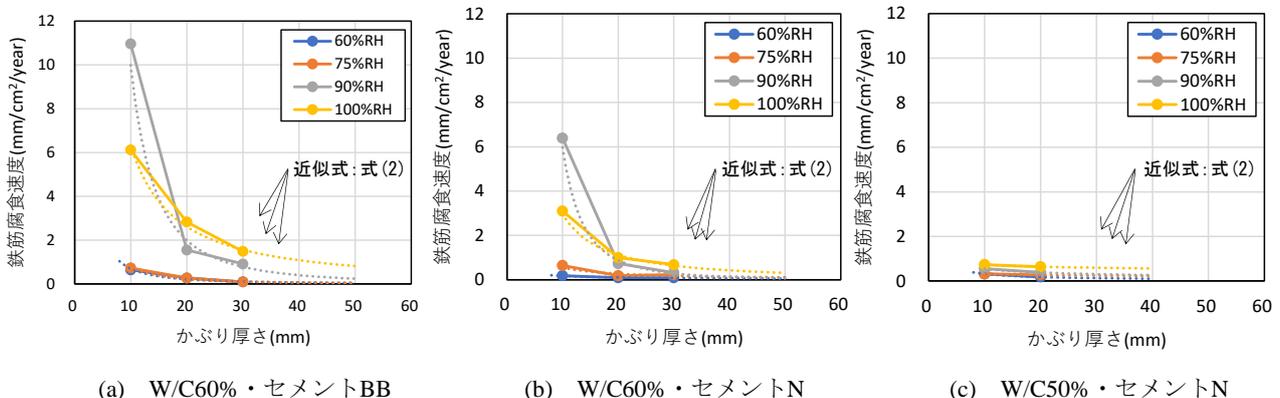


Fig. 1 外部の環境条件が一定の場合におけるかぶり厚さおよび外部環境の相対湿度と中性化後の鉄筋腐食速度の関係
Relationship between Cover Thickness and Relative Humidity and Rebar Corrosion Rate after Carbonation

実験データを取得しているため、かぶり厚さ 30mm 以上の範囲については外挿補完となる。また、50CC はかぶり厚さ 30mm の場合のみ適用される。式(2)の係数 α 、 β を Table 2 に示す。これらの係数は、相対湿度ごとに設定した。

$$V_{\text{corr}} = \alpha \cdot D^\beta \quad (2)$$

ここに、 V_{corr} : 鉄筋腐食速度 (mg/cm²/year)

D : かぶり厚さ (mm)

α 、 β : 係数 (Table 2)

3. 鉄筋腐食を考慮した耐久性評価手法の提案

3.1 従来の中性化を指標とした耐久性評価手法

従来の中性化を指標とした耐久性評価は、日本建築学会の JASS 5⁴⁾および鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説¹²⁾(以降、耐久設計指針という)に準じて、式(3)に示す \sqrt{t} 則によるコンクリートの中性化深さ (C) に基づいて行われる。

$$C = A\sqrt{t} \quad (3)$$

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)

同指針では、鉄筋が腐食し始める時の中性化深さの限界値 (C_{criteria}) を次のように定めている。

【中性化深さの限界値 (C_{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、土に接する地下躯体および屋内の水まわり部分等湿度の高い環境 (屋外環境) :

式(4)に示すとおり、中性化深さ (C) が鉄筋のかぶり厚さ (D) まで達した時を中性化深さの限界値 (C_{criteria}) として設定する。

$$C_{\text{criteria}} = D \quad (4)$$

ここに、 C_{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 (屋内環境) :

式(5)に示すとおり、中性化深さ (C) が鉄筋のかぶり厚さよりも 20mm 奥 ($D+20$) まで達した時を中性化深さの限界値 (C_{criteria}) として設定する。

$$C_{\text{criteria}} = D+20 \quad (5)$$

ここに、 C_{criteria} : 中性化深さの限界値 (mm)

D : かぶり厚さ (mm)

JASS 5 および耐久設計指針では、中性化深さ (C) が限界値 (C_{criteria}) に達した時点とは、鉄筋腐食が開始され

Table 2 式(2)の係数 α 、 β

Coefficient α 、 β of Formula 2

W/C	セメント種別	外部湿度	α	β	R ²
60%	BB	60%RH	37.4	-1.73	0.98
		75%RH	56.5	-1.86	0.99
		90%RH	2110	-2.33	1.00
		100%RH	118	-1.27	1.00
60%	N	60%RH	0.793	-0.671	0.92
		75%RH	5.88	-1.03	0.89
		90%RH	3510	-2.77	1.00
		100%RH	76.1	-1.41	0.99
50%	N	60%RH	2.16	-0.830	1.00
		75%RH	0.563	-0.245	1.00
		90%RH	1.88	-0.533	1.00
		100%RH	1.13	-0.190	1.00
50%	CC	60%RH	0.09	0	—
		75%RH	0.18	0	—
		90%RH	0.55	0	—
		100%RH	1.00	0	—

※1 : R² は多変量解析における決定係数

※2 : 50CC は、かぶり厚さ 30mm の実験データのみを根拠としておりかぶり厚さ 30mm のみ適用可能であるため、 $\beta = 0$ とする

る点であって、その時点で躯体の耐久性に影響をおよぼすような鉄筋腐食状態に至っている訳ではないとしている。ただし、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、中性化深さが中性化深さの限界値に達した時点で、耐久性に影響がある鉄筋の腐食状態になっていると安全側に仮定して、その時の材齢を対象部材の中性化の進行による耐用年数 ($T_{\text{carbonation}}$) と算定することとした。

3.2 新たな鉄筋腐食を考慮した耐久性評価手法

本研究では、従来の中性化を指標とした耐久性評価手法に対して、新たな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の概念図を Fig. 2 に示す。提案した耐久性評価手法は、次に示す 3 つのステップからなる。次節以降は、Fig. 2 の概念図に沿って、ステップ 1~3 のそれぞれについて詳説する。

【中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法適用のための3つのステップ】

ステップ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、中性化深さが腐食の起点に達するまでの年数]

ステップ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の年数]

ステップ3:

中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価 [鉄筋腐食の起点となる中性化深さに達するまでの年数 (ステップ1) と鉄筋腐食の起点となる中性化深さに達した材齢を0として、限界腐食量になるまでの年数 (ステップ2) を足し合わせた年数]

なお、限界腐食量については、本研究では鉄筋腐食グレード3に相当する鉄筋腐食量 (W_{grade3}) と定義したが、設計条件によっては、腐食ひび割れが発生する腐食量 (W_{crack}) とするなど、任意に設定することも可能である。

3.3 ステップ1: 中性化を指標とした耐久性評価

高アルカリ環境下のコンクリート中に埋設された鉄筋の表面には不動態被膜が形成されており、鉄筋腐食は生じない。耐久性評価を鉄筋腐食の進行で行う場合、コンクリートの中性化が進行して、鉄筋腐食が開始される時点を把握する必要がある。

JASS 5 および耐久設計指針では、中性化深さの限界値 ($C_{criteria}$) 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、屋外環境では中性化深さが鉄筋のかぶり厚さまで達した時点、屋内環境では中性化深さが鉄筋のかぶり厚さから 20mm 奥まで達した時点において、既に鉄筋腐食が進行した状況といえるため、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、古くから数多くの研究がなされているが、土木学会¹⁴⁾をはじめ、鉄筋位置における pH の変化を根拠として、中性化深さがかぶり厚さの 10mm 手前に到達した時点とされることが多い。本研究では、式(6)に示すとおり、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (C_{w0}) をかぶり厚さの 10mm 手前 (D-10) と設定した。

$$C_{w0} = D - 10 \quad (6)$$

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)

3.4 ステップ2: 鉄筋腐食を指標とした耐久性評価

鉄筋腐食の起点となる中性化深さに到達した以降、中性化後の鉄筋腐食速度を定め、限界腐食量を設定することができれば、鉄筋腐食の進行に基づいて耐用年数を算定することができる。

Fig.2 に示すとおり、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (C_{w0}) 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 ($V_{corrosion}$) 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ため、本研究では、2 章で定式化した値を用いることとした。

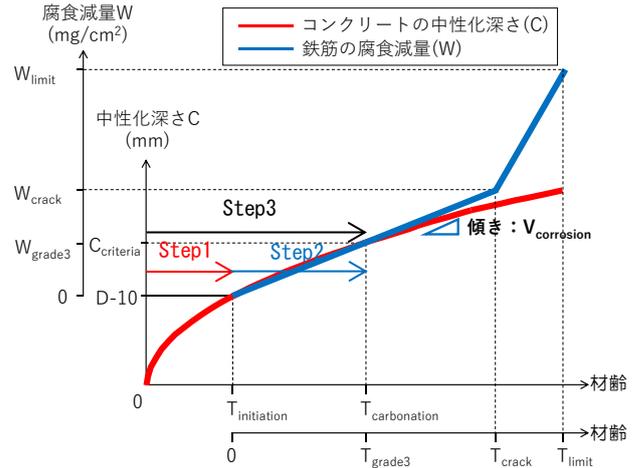


Fig. 2 中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価手法の概念図
Conceptual Diagram of Durability Evaluation Method considering Rebar Corrosion after Carbonation

なお、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (C_{w0}) に到達した以降も、中性化は継続して進行していくため、中性化後の鉄筋腐食速度が変化する可能性がある。ただし、既報⁸⁾に拠れば、鉄筋のかぶり厚さに対するコンクリートの中性化深さを変えて、中性化後の鉄筋腐食速度を測定した結果、同一の含水状態であれば、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概ね一定であることが分かっている。このことから、本研究においては、中性化後の鉄筋腐食速度 ($V_{corrosion}$) は、中性化の進行に伴う変化は考慮せず、かぶり厚さと鉄筋位置の水分状態のみで定まるものとした。

次に、鉄筋腐食を指標とした耐久性評価における限界腐食量を設定する。JASS 5 および耐久設計指針では、RC造建築物の耐久性に基づいた限界状態を、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により規定している。従来の中性化を指標とした耐久性評価では、中性化深さ (C) が中性化深さの限界値 ($C_{criteria}$) に達した時点で、耐久性に影響がある鉄筋の腐食状態になっていると安全側に仮定して、耐用年数 ($T_{carbonation}$) を算定することとした。なお、耐久性に影響がある鉄筋の腐食状態とは、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¹³⁾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としており、腐食ひび割れが発生するよりもかなり手前の設定となっている。以上のことから、本研究では、鉄筋腐食を指標とした耐久性評価における限界腐食量を、鉄筋腐食グレード3に相当する腐食減量 (W_{grade3}) と定めることとした。

このことは、中性化深さ (C) が中性化深さの限界値 ($C_{criteria}$) 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、鉄筋腐食グレード3に相当する腐食減量 (W_{grade3}) に等しいと読み替えることができる。また、Fig.2によれば、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (C_{w0}) に達するまでの年数 ($T_{\text{initiation}}$) と、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (C_{w0}) に達した材齢を0として、鉄筋腐食グレード3に相当する腐食減量 (W_{grade3}) になるまでの年数 (T_{grade3}) を加えたものは、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。

鉄筋腐食グレード3に相当する腐食減量 (W_{grade3}) に関する既往の研究は少ない。山田ら¹⁵⁾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を行い、雨掛かりがある部位に対する、鉄筋腐食グレードと質量減少率の関係を整理した。その結果、鉄筋腐食の限界値とされる、鉄筋腐食グレード3に相当する鉄筋の質量減少率は1.18%であることを報告している。ここで、一般的なRC造建築物の最外側鉄筋をD10~D38とすれば、鉄筋の質量減少率1.18%を鉄筋腐食量に換算すると21.0~88.5 (mg/cm²)となる。鉄筋の質量減少率が同一であれば、鉄筋径が小さいほど鉄筋腐食量は小さくなること、最外側鉄筋であるフープ筋やスターラップ筋の多くが比較的小径であることなどから、本研究では安全側として鉄筋径が10mmの場合の鉄筋腐食量である21.0 (mg/cm²)を限界腐食量 (W_{grade3}) と設定することとした。

なお、本研究では、鉄筋の質量減少率1.18%を基に限界腐食量を設定したが、JIS G 3112 (鉄筋コンクリート用棒鋼) で規定される異形棒鋼1本の質量の差異の許容差は±4~±6% (D38~D10)であることを考えると、非常に小さな値となる。また限界腐食量は、既往の研究により異なる値も提案されている。そのため、設定した数値の妥当性については、既存のRC造建築物の耐久性調査結果とも比較検証していく必要があり、今後の課題の一つとする。

3.5 ステップ3：中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価

中性化を指標とした耐久性評価 (ステップ1) と鉄筋腐食を指標とした耐久性評価 (ステップ2) の両方を考慮した、新たな耐久性評価手法 (ステップ3) を提案する。具体的には、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (C_{w0}) に達するまでの年数 ($T_{\text{initiation}}$) と、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (C_{w0}) に達した材齢を0として、限界腐食量 (W_{grade3}) になるまでの年数 (T_{grade3}) の足し合わせとなる。

なお、中性化を指標とした耐久性評価 (ステップ1) 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るため、耐用年数は長く算定される。一方、鉄筋腐食の指標による耐久性評価 (ステップ2) では、コンクリートの含水率が高い場合には、逆に中

性化後の鉄筋腐食速度が大きくなるため、ひとたび中性化すれば耐用年数が短く算定される。中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価 (ステップ3) では、それぞれの影響が考慮された結果となる。具体的な算定方法については、次章で詳説する。

4. 鉄筋腐食を考慮した耐久性評価手法の適用

4.1 提案した耐久性評価手法の適用方法の例示 (高炉セメントB種 [60BB] を用いた場合)

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の適用方法について、コンクリートの調合条件が水セメント比60%で高炉B種セメント [60BB]、かぶり厚さが20mm、相対湿度が75%RHの条件について、具体的な試算を通じて概説する。なお、検証に用いた諸元は全て2章に準じて設定した。

4.1.1 ステップ1：中性化を指標とした耐久性評価

耐久設計指針¹²⁾を参考として、JIS A 1153の促進中性化試験により得られた中性化速度係数を、温度20°C、相対湿度60~100%RH、CO₂濃度0.1%の一般環境における中性化速度係数へ換算した。促進中性化試験 (60%RH) と一般環境の相対湿度の違いは、同指針の式(7)により評価した。

$$R = H \times (100 - H) \times (140 - H) / 192000 \quad (7)$$

ここに、R：相対湿度が60%RHのときの中性化速度係数に対する倍率

H：相対湿度 (%RH)

促進中性化試験結果から換算した、一般環境下における中性化速度係数をTable 3に示す。

コンクリートの調合条件が60BB、かぶり厚さが20mmの場合における、中性化深さおよび鉄筋腐食量の経時変化をFig. 3に示す。

中性化を指標とした耐久性評価では、中性化の限界状態をJASS 5で定義される中性化深さ (C) がかぶり厚さ (D) に達した時点としている。よって、Fig. 3における耐久性評価 (図中の赤線) として、中性化深さがかぶり厚さに達するまでの年数 ($T_{\text{carbonation}}$) は107年となる。

Table 3 促進中性化試験結果から換算した一般環境下における中性化速度係数

		Carbonation Coefficient under General Environment Converted from the results of Accelerated Carbonation Tests				
		促進中性化	一般環境			
CO ₂ 濃度		5%	0.01%			
相対湿度		60%RH	60%RH	75%RH	90%RH	100%RH
CO ₂ 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
	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

一方、本研究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では、中性化後の鉄筋腐食の起点とされる中性化深さ (C) がかぶり厚さの 10mm 手前 (D-10) に達した時点が中性化の限界状態と設定するので、その年数 ($T_{initiation}$) は 7 年となる。

4.1.2 ステップ 2：鉄筋腐食を指標とした耐久性評価

Fig. 3 より、腐食グレード 3 に相当する鉄筋腐食量 (W_{grade3}) を限界腐食量と設定した場合の鉄筋腐食を指標とした耐久性評価として、腐食の起点となる中性化深さ ($T_{initiation}$) に達した材齢を 0 として、鉄筋腐食量が限界腐食量 (W_{grade3}) に達するまでの年数 (T_{grade3}) は 116 年となる。

4.1.3 ステップ 3：中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価

Fig. 3 より、中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した耐用年数 ($T_{all(grade3)}$) は、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (C_{w0}) に達するまでの年数 ($T_{initiation}$) が 7 年、鉄筋腐食の起点となる中性化深さ (C_{w0}) に達した材齢を 0 として限界腐食量 (W_{grade3}) になるまでの年数 (T_{grade3}) が 116 年となるため、これらを足し合わせた 123 年となる。

4.2 かぶり厚さおよび外部環境の相対湿度と耐久性評価結果の関係 [60BB]

コンクリートの調査条件が 60BB、かぶり厚さが 10mm, 20mm, 30mm、外部環境の相対湿度が 60%RH~100%RH とした場合の、中性化を指標とした耐用年数と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 Fig.4 に示す。

従来の JASS 5 による中性化を指標とした耐用年数の試算結果を Fig. 4(a)に示す。かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 94%RH 以上では 200 年以上となった。相対湿度が小さくなるにつれて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 年となる。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 200 年以上となり、相対湿度 60%RH では 19 年となる。かぶり厚さが 30mm では、暴露環境の相対湿度が 82%RH 以上で 200 年以上となり、相対湿度 60%RH では 43 年となる。

中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の試算結果を Fig. 4(b)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であるかぶり厚さ-10mm が 0 となるため、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は算定されない。そのため、材齢 0 日より鉄筋腐食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のみが算定され、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数と等しくなる。

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小さくなるため、中性化を指標とした耐用年数は長くなる。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なる。外部環境の相対湿度が低い場

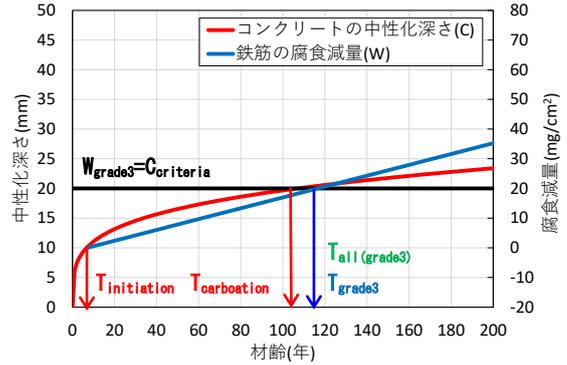
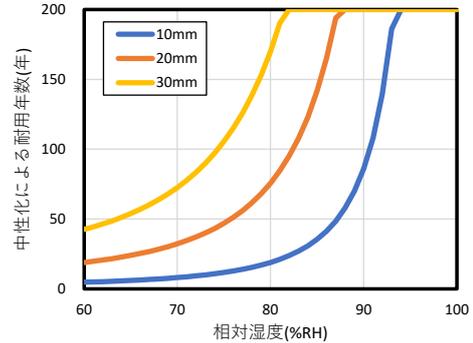
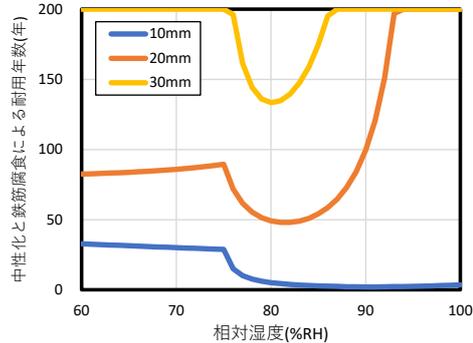


Fig. 3 中性化深さおよび鉄筋腐食量の経時変化 (60BB, かぶり厚さ20mm, 75%RH)

Carbonation Depth and Rebar Corrosion Rate Over Time



(a) 従来手法：中性化を指標とした耐用年数 ($T_{carbonation}$)



(b) 提案手法：中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数 ($T_{all(grade3)}$)

Fig. 4 中性化を指標とした耐久性評価と中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価結果の比較 (60BB)
Example of Calculation of Service Life of RC buildings due to Carbonation or Rebar Corrosion after Carbonation (60BB)

合には、その逆の傾向を示す。提案手法では、外部環境の相対湿度によって耐用年数の変動が大きくなる。この理由は、中性化の進行速度に対して、鉄筋腐食の進行速度 ($V_{corrosion}$: Fig. 2 の腐食減量の増加傾き) の方が相対湿度の影響を受けやすいことによる。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が算

定され、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る。

4.3 異なる調合条件に対する提案した耐久性評価結果の比較

2章の実験水準として設定された、4水準のコンクリートの調合 [60BB, 60N, 50N, 50CC] に対して、かぶり厚さを 10mm, 20mm, 30mm (50CC は、かぶり厚さ 30mm のみ)、外部環境の相対湿度を 60%RH~100%RH とした場合、中性化を指標とした耐用年数と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て、比較検討を行った。調合ごとの耐用年数の算定結果を Fig. 5 に示す。なお、60BB は Fig. 4 の再掲となるため、本節の考察は 60N, 50N, 50CC を中心に行った。

4.3.1 中性化を指標とした耐久性評価 60N の耐用年数は、かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 89%RH 以上では 200 年以上となる。相対湿度が小さくなるにつれて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 年となる。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 200 年以上となり、相対湿度 60%RH で 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 200 年以上となり、相対湿度 60%RH で 123 年となる。

50N の耐用年数は、かぶり厚さが 10mm では、暴露環境の相対湿度が 83%RH 以上では 200 年以上となる。相対湿度が小さくなるにつれて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 39 年となる。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 200 年以上となり、相対湿度 60%RH で 156 年となった。かぶり厚さが 30mm では、全ての相対湿度で 200 年以上となる。

50CC の耐用年数は、かぶり厚さが 30mm のみの水準となるため他の調合条件との比較は限られるが、暴露環境の相対湿度が 86%RH 以上で 200 年以上となる。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 26 年となる。

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る。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る。実験結果を基にした検討からは、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いと考えられる。

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

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のみで算定される。かぶり厚さ 20mm では、相対湿度が 80%RH で耐用年数が 113 年と最も短くなった。かぶり厚さ 30mm では、全ての相

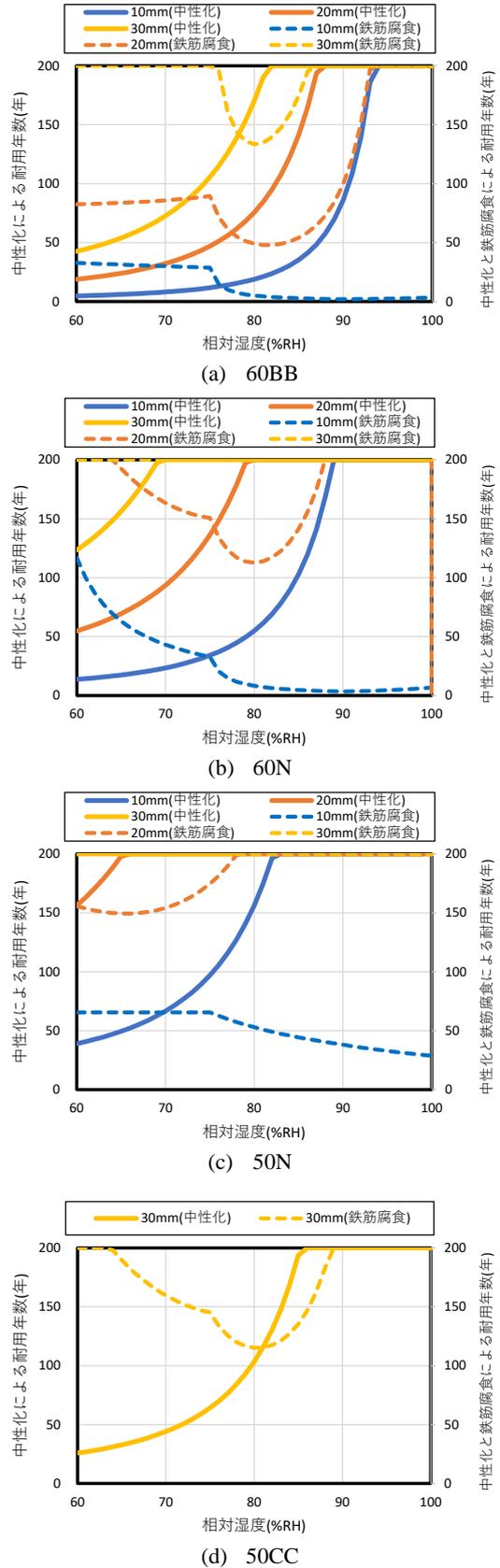


Fig. 5 中性化を指標とした耐用年数と中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数 (全調合)
Calculation of Service Life due to Carbonation or Rebar Corrosion after Carbonation (All Cases)

対湿度において耐用年数は200年以上となる。

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のみで算定される。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年以上となる。

50CCの耐用年数は、かぶり厚さ30mmと比較的大きいこともあり、相対湿度が80%RHで耐用年数が115年と最も短くなる。

以上の結果から、劣化要因を中性化した場合、60BB, 60N, 50N, 50CCの調査条件では、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が極めて短くなるため、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、十分に注意すべきと考えられる。

4.3.3 中性化を指標とした耐用年数と中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数の比較 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と、従来のJASS 5によ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。

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、相対湿度が低い乾燥領域では、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価の方が耐用年数は増加する傾向があり、鉄筋腐食を指標とした評価を行うことで合理的な耐久性評価が可能となる。

一方、相対湿度が高い湿潤領域では、従来のJASS 5による中性化を指標とした耐久性評価と比較して、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐久性評価の方が耐用年数は減少する傾向となる。これは中性化を指標とした耐用年数に達する前に、鉄筋腐食が開始される可能性があることを意味する。特に、かぶり厚さが10mmのかぶり不足となる箇所では、実際の建築物においても、竣工から数年後に鉄筋腐食が確認される場合がある。一方、かぶり厚さが20mm以上であれば、60BBの調査を除くと、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数は100年以上となり、高い耐久性を有していると言えるため、実務の上では問題になりにくいと考えられる。

5. 既存躯体の再利用時における新たな耐久性評価手法の適用性検討

5.1 検討の概要

RC造建築物の建て替えにあたって、既存建築物の地下部分の再利用を計画した新設の設計案件¹⁰⁾を対象として、提案した耐久性評価手法の適用性を検討する。検討対象とした既存のRC造建築物は、竣工後38年が経過しており、地上部分は解体、再構築され、地下1階から3階の部分を再利用する計画とされている。

再利用が計画された既存地下躯体について、コンクリートの構造安全性に対しては、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・同解説に準拠した調査が行われ、かぶり厚さや設計基準強度をはじめとする既存図面との整合が確認されている。本研究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、一般財団法人日本建築センターによる『鉄筋コンクリート造建築物の耐用年数評価』の審査を受けている。なお、この評価は、かぶり厚さや中性化深さの測定結果に基づいて、最外側鉄筋のほとんどに中性化が達しない期間（年数）を耐用年数として算定するものである。また、評価にあたっては、中性化深さに加えて、鉄筋腐食状況および含水率が調査されており、それらの結果が報告されている。

5.2 中性化の指標による耐久性評価

最初に、中性化の指標による耐久性評価を行った。再利用する既存地下躯体の仕上げ材の条件と中性化速度係数の算定結果をTable 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、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。

中性化の指標による再利用後の耐用年数をTable 5に示す。屋内環境にある内壁と床は、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、再利用後の耐用年数は89年、42年と算定された。屋外環境にある外周壁は、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、再利用

Table 4 既存地下躯体の中性化速度係数¹⁰⁾
Carbonation Speed Coefficient of Existing Underground Framework

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	4.63 mm/√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

Table 5 中性化の指標による再利用後の耐用年数¹⁰⁾
Service Life after Reuse Existing Underground Framework
according to the Indicator of Carbonation

部材	環境	かぶり厚さ	許容限界	耐用年数
地下 外周壁	屋外	49.8mm	49.8mm	78年
地下 内壁	屋内	30mm	50mm	89年
地下 床	屋内	20mm	40mm	42年

※屋内環境は、かぶり厚さ+20mmを許容限界とした

後の耐用年数は 78 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 年と評価された。

5.3 JASS 5 の腐食環境評価による耐久性評価

JASS 5 では、外部からの水分供給がない環境（非腐食環境）では、鉄筋位置まで中性化が進行しても、鉄筋腐食は進みにくいことから、中性化に基づいた耐久設計は不要とされている。そこで、既存地下躯体の含水率を測定し、腐食環境・非腐食環境の判定を行った。

含水率の測定結果と腐食環境の判定結果を Table 6 に示す。屋内環境にある内壁と床では、かぶり厚さ位置の含水率は 2.1~2.7%と低いことから、JASS 5 の非腐食環境に相当するものと判断され、耐用年数の評価対象からは除外した。これにより、再利用後の既存地下躯体全体の耐用年数の最大値は、屋外環境（腐食環境）にある外周壁で算定された 78 年と評価され、発注者の要求する供用期間を満足することが確認された。

5.4 本研究で提案した耐久性評価手法の適用性検討

本検討の事例では、JASS 5 の腐食環境評価を目的として、既存地下躯体に対してかぶり厚さと鉄筋位置の含水率を測定した。その結果により、非腐食環境に相当すると判断された屋内壁と屋内床については、耐用年数の評価対象から除外した。ここで、かぶり厚さおよび鉄筋位置の含水率が得られれば、本研究で提案した耐久性評価手法を適用することができる。そこで、屋内壁と屋内床に対する耐久性評価に対して、提案した耐久性評価手法の適用性を確認した。

含水率の調査結果から算定した鉄筋腐食速度を Table 7 に示す。なお、質量含水率から相対含水率への換算は、秋田らの既報^{16), 17)}、相対含水率から相対湿度への換算は、筆者らの既報^{6)~9)}に示された関係を用いて行い、かぶり厚さとかぶり厚さ位置の相対湿度から、2 章の実験式により鉄筋腐食速度を算定した。なお、既存の RC 造建築物と本研究における実験条件を比較すると、コンクリートの材料、調合、材齢などが異なる。ただし、かぶり厚さが 20mm 以上あれば、中性化後の鉄筋腐食速度は小さく、さらに安全側の検討となるように、実験条件のうち、中性化後の鉄筋腐食速度が最も大きくなる W/C60%・セメント BB の関係を用いることで、安全側の評価となるように配慮した。

地下内壁のかぶり厚さの位置における含水率は 2.6%と低い状態であり、中性化後の鉄筋腐食速度は 0.10(mg/cm²/year)と算定された。地下床のかぶり厚さの位置における含水率は 2.1~2.7%と低い状態であり、中性化後の鉄筋腐食速度は 0.18(mg/cm²/year)と算定された。

本研究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を再利用する既存地下躯体に適用した場合の算定結果を Fig. 6 に示す。

地下内壁に対して、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数 (T_{grade3}) は 200 年超となった。中性化を指標とした耐用年数 (T_{carbonation}) は 89 年であり、中性化後

Table 6 再利用する既存地下躯体の調査結果¹⁰⁾

Survey Results of Reused Existing Underground Framework

部材	環境	かぶり厚さ (mm)	含水率 (%) (10mm以深)	含水率 (%) (かぶり位置)	腐食環境判定
地下外周壁	屋外	49.8	3.30~4.90	4.8	腐食環境
			4.16~4.61	4.5	
			3.98~6.29	6.0	
地下内壁	屋内	30	2.41~2.93	2.6	非腐食環境
			2.56~4.74	-	
地下床	屋内	20	2.11~4.00	2.1	非腐食環境
			2.66~4.74	2.7	

Table 7 含水率の調査結果から算定した鉄筋腐食速度 Rebar Corrosion Rate Calculated from Moisture Content

Survey Results

部材	質量含水率 (%) (かぶり位置)	相対含水率 (%) (鉄筋位置)	相対湿度 (%) (鉄筋位置)	鉄筋腐食速度 (mg/cm ² /year)
地下内壁	2.6	55	42	0.10
地下床	2.1	55	42	0.18
	2.7			

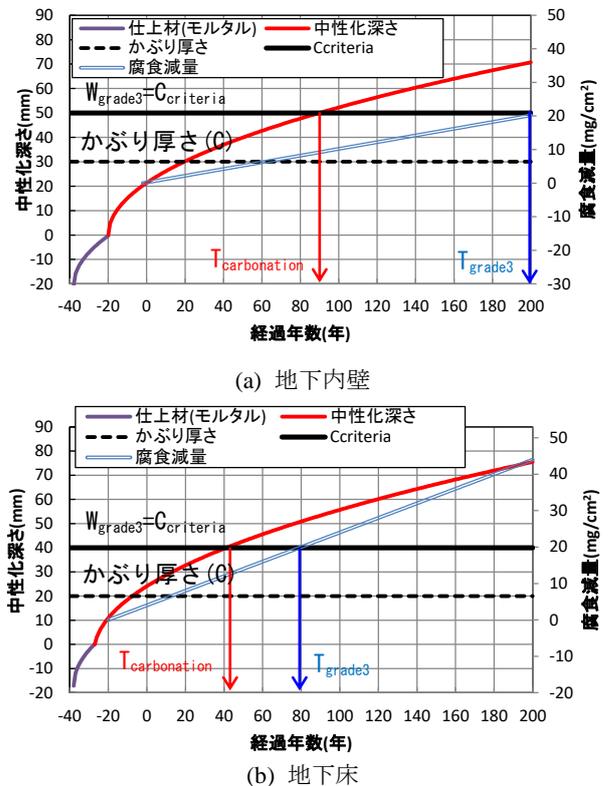


Fig. 6 中性化と鉄筋腐食の両方を考慮した再利用する既存地下躯体の耐用年数の算定結果 Calculation Results of the Service Life of Existing Underground Structures to be reused Considering both Carbonation and Rebar Corrosion

の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数 (T_{grade3}) はそれを大幅に上回った。地下床に対して、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数 (T_{grade3}) は 80 年となった。中性化を指標とした耐用年数 ($T_{\text{carbonation}}$) は 42 年であり、中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した耐用年数 (T_{grade3}) はそれを大幅に上回った。

以上より、地下内壁、地下床について、含水率の測定結果に基づいて非腐食環境と同定して、中性化による耐久設計は不要と判断した考え方を、本研究で提案した中性化後の鉄筋腐食の進行に基づいた耐用年数の算定により、技術的に説明した。

6. まとめ

本研究は、RC造建築物の材料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を提案したものである。

得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 筆者らの既報の実験結果に基づいて、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を定式化した。
- 2) 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基にして、中性化後の鉄筋腐食を考慮した新たな耐久設計手法を提案した。
- 3) RC造建築物の建て替えにあたって、既存建築物の地下部分の再利用を計画した新設の設計案件に対して、本研究で提案した耐久性評価手法の適用性を確認した。
- 4) JASS 5 において非腐食環境と同定された部位では中性化による耐久設計を不要とする考え方を、中性化後の鉄筋腐食速度を根拠とする耐用年数の算定結果により技術的に説明した。

参考文献

- 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>
(参照 2020-01-23)
- 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/
(参照 2020-01-23)
- 3) 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（関東）学術講演梗概集，材料施工，pp.439-440，2015.7
- 4) 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—中性化は寿命か？—，2017 年度日本建築学

- 会大会（中国）材料施工部門パネルディスカッション資料，pp.1-4，pp.5-11，2017.8
- 5) 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
 - 6) 酒井正樹，神代泰道：中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した RC 造建築物の耐久性評価に関する研究（その 1）：高炉セメント B 種を用いてかぶり厚さが異なる試験体における実験結果，日本建築学会構造系論文集，第 85 巻，第 777 号，pp.1355-1365，2020.11
DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.85.1355>
 - 7) 酒井正樹，神代泰道，兼松学：中性化後の鉄筋腐食の進行を考慮した RC 造建築物の耐久性評価に関する研究（その 2）：セメント種別と水セメント比が異なる試験体における実験結果，日本建築学会構造系論文集，第 88 巻，第 814 号，pp.1622-1633，2023.12
DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.88.1622>
 - 8) 酒井正樹，神代泰道，兼松学：中性化残りが異なる鉄筋コンクリート試験体におけるコンクリートの含水状態と中性化後の鉄筋腐食速度に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 88 巻，第 814 号，pp.1634-1645，2023.12
DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.88.1634>
 - 9) 酒井正樹，神代泰道，小林利充，兼松学：混和材を高含有したコンクリートの中性化後における鉄筋腐食に関する研究，日本建築学会技術報告集，第 30 巻，第 75 号，pp.595-598，2024.6
DOI: <https://doi.org/10.3130/aijt.30.595>
 - 10) 三好夏恵，酒井正樹，岸浩行，城戸隆宏：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.9，pp.848-853，2023.9
 - 11) 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
 - 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
 - 13) 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
 - 14) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，2018.4
 - 15) 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（東北）学術講演梗概集，pp.599-600，2018.7
 - 16) 秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：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，pp.61-69，1990.8
 - 17) 秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：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