

第Ⅲ編

既存住宅の長寿命化に係る耐久性向上技術

目次

1. 研究の目的と内容	Ⅲ-4
2. 本編の構成	Ⅲ-4

第Ⅲ-1編

既存鉄筋コンクリート造集合住宅の健全度の評価手法および長寿命化のための適正管理手法(案)

1. 適用範囲	Ⅲ-7
1.1 適用対象とする建物	Ⅲ-7
1.2 適用対象とする性能	Ⅲ-7
1.3 概要および特徴	Ⅲ-8
2. 用語の定義	Ⅲ-11
3. 既存鉄筋コンクリート造集合住宅の健全度の評価手法	Ⅲ-14
3.1 健全度の評価方法の概要	Ⅲ-14
3.2 部位の劣化グレードの評価方法	Ⅲ-15
3.3 部位の健全度の評価方法	Ⅲ-20
3.4 建物の健全度の評価方法	Ⅲ-21
3.5 部位の劣化グレード、部位の健全度および建物の健全度の評価事例	Ⅲ-21
3.5.1 対象とした建物の概要	Ⅲ-21
3.5.2 部位の劣化グレード D_j の評価結果	Ⅲ-21
3.5.3 部位の健全度 H_j の評価結果	Ⅲ-24
3.5.4 建物の健全度の評価結果	Ⅲ-25
4. 長寿命化のための適正管理手法	Ⅲ-29
4.1 適正管理手法の概要	Ⅲ-29
4.2 モニタリング	Ⅲ-29
4.3 適正管理限界状態の設定方法	Ⅲ-31
4.4 長寿命化のための対策および適正管理限界状態の目安	Ⅲ-35

第Ⅲ-2編 付録1

既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価手法の検討

1. はじめに	Ⅲ-39
2. 既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価手法(素案)	Ⅲ-40
2.1 評価手法の全体概要	Ⅲ-40
2.2 現在の健全度の評価	Ⅲ-41
2.3 健全度の低下速度の評価	Ⅲ-42
2.4 残存耐用年数の評価	Ⅲ-44
3. 健全度の低下速度の評価の検討	Ⅲ-46
3.1 健全度の定期的なモニタリングを用いた例	Ⅲ-46
3.1.1 対象とした建物の概要	Ⅲ-46
3.1.2 結果	Ⅲ-46
3.2 中性化および鉄筋腐食の進行速度を用いた例	Ⅲ-48
3.2.1 測定概要	Ⅲ-48
3.2.2 結果	Ⅲ-48
4. 残存耐用年数の評価の検討	Ⅲ-50
4.1 健全度の定期的なモニタリングを用いた例	Ⅲ-50
4.1.1 ケーススタディについての設定	Ⅲ-50
4.1.2 結果	Ⅲ-50
4.2 中性化および鉄筋腐食の進行速度を用いた例	Ⅲ-51
4.2.1 ケーススタディについての設定	Ⅲ-51
4.2.2 結果	Ⅲ-51

Ⅲ. 耐久性向上

4.2.3 まとめ	Ⅲ-52
5. おわりに	Ⅲ-54

第Ⅲ-3編 付録2

健全度の低下および鉄筋腐食の進行の要因の分析

1. 目的	Ⅲ-56
2. 鉄筋腐食の進行のメカニズム	Ⅲ-56
3. 実建物調査結果を用いた鉄筋腐食の進行の要因に関する分析	Ⅲ-58
3.1 分析方法	Ⅲ-58
3.2 建物の調査方法	Ⅲ-58
3.2.1 建物の概要	Ⅲ-58
3.2.2 調査箇所	Ⅲ-58
3.2.3 調査項目	Ⅲ-59
3.3 結果・考察	Ⅲ-60
3.3.1 かぶり厚さ分類の結果	Ⅲ-60
3.3.2 含水率別の結果	Ⅲ-61
3.3.3 かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した場合の結果	Ⅲ-62
4. 実建物調査結果を用いた鉄筋腐食の進行のばらつきに関する分析	Ⅲ-66
4.1 目的	Ⅲ-66
4.2 検討手法	Ⅲ-66
4.3 結果	Ⅲ-66
4.4 まとめ	Ⅲ-72
5. 鉄筋腐食へのコンクリートのひび割れ等局所劣化の影響	Ⅲ-73
5.1 コンクリートのひび割れと中性化	Ⅲ-73
5.2 コンクリートのひび割れと水の浸透	Ⅲ-74
5.2.1 事例調査による考察	Ⅲ-74
5.2.2 部材を用いた漏水実験	Ⅲ-75
5.2.3 吸水実験	Ⅲ-76
5.3 まとめ	Ⅲ-76
6. 鉄筋腐食の進行の要因の整理	Ⅲ-78
7. 各物性と目視評価の関係の検討	Ⅲ-79
7.1 目的	Ⅲ-79
7.2 調査方法	Ⅲ-79
7.3 結果	Ⅲ-79
7.3.1 目視インデックスと鉄筋腐食減量の関係	Ⅲ-79
7.3.2 劣化グレードと鉄筋腐食減量の関係	Ⅲ-80
7.3.3 かぶり厚さの影響	Ⅲ-82
7.4 まとめ	Ⅲ-83
8. 鉄筋腐食グレードごとの劣化グレードの発生割合	Ⅲ-84
8.1 目的	Ⅲ-84
8.2 調査方法	Ⅲ-84
8.3 結果	Ⅲ-84
8.4 まとめ	Ⅲ-85
9. まとめ	Ⅲ-87

Ⅲ. 耐久性向上

1. 研究の目的と内容

郊外住宅市街地を構成する鉄筋コンクリート造の集合住宅（区分所有のマンションを主対象とする。）について、住宅の長寿命化を図っていくうえの基本要件として耐久性の確保が重要となる。

鉄筋コンクリート造の既存住宅の躯体の耐久性については現在、コンクリートの中性化を主要な指標として用いて評価されており、中性化を指標とした現行の評価手法では、構造体の表面から一様に中性化が進行していくと仮定し、その進行深さで劣化の程度が評価される。しかし、実際の劣化は面的に一様に進行するのではなく、ひび割れ、欠損等が部分的に発生することが少なくないため、現行の評価手法では、こうした局所劣化が構造体の耐久性に及ぼす影響については適切に評価できていない。

また、長寿命化を図っていくうえでは、躯体の不具合原因の発生箇所を特定し、適切な補修・保全計画が必要となるが、水の侵入等を原因とする不具合現象の原因箇所の診断は難しく、また、補修技術の長期性能も不明であるなどの課題がある。

そこで本編では、中性化に加え、局所的な劣化リスクの発生箇所、程度、組合せ等の影響を考慮した耐久性評価手法、水の侵入による不具合現象の原因等の適切な診断手法と診断結果を踏まえた躯体の長寿化のための適正管理手法について検討した。

2. 本編の構成

本編は、**第Ⅲ-1編**～**第Ⅲ-3編**によって構成される。

第Ⅲ-1編は、建物の所有者が、耐久性の維持向上を目的として、建物の保全を行う上で全面改修や補修の実施をするか否かの判断などの意思決定をする際に、参考書として活用されることを目的とし、研究の背景と目的を踏まえ検討した成果を、「既存鉄筋コンクリート造集合住宅の健全度の評価手法および長寿命化のための適正管理手法（案）」としてとりまとめたものである。

第Ⅲ-2編は、既存建築物の長寿命化に向けては、計画供用期間および建物の残存耐用年数の両方を踏まえて、補修・改修等の実施計画を立てることが望ましいことから既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価手法の素案について検討した内容を付録としてまとめたものである。未検証なる部分もあることから素案の位置づけとしており、引き続き検討が必要な課題である。

第Ⅲ-3編は、健全度が低下する原因を明らかにするため、鉄筋腐食の進行に及ぼす要素について検討した内容を付録としてまとめたものである。また、**第Ⅲ-1編**や**第Ⅲ-2編**を検討するにあたり根拠とした技術資料でもある。

また、本検討および関連する研究の結果は、論文として公表しているものも多く、本編をまとめるにあたり、参考文献として引用してまとめている。より詳細の実験手法や条件を把握したい場合には、各編各章で引用されている参考文献を参照されたい。

Ⅲ. 耐久性向上

なお、これらの検討においては、現場における技術の現状や学識からの助言を頂くための小委員会を適時設置し、検討を進めた。委員については、下記のとおりである。

(敬称略・順不同)

【平成 30～令和元年度】

主 査：	野口 貴文	東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授
委 員：	兼松 学	東京理科大学理工学部建築学科 教授
	福山 智子	立命館大学理工学部建築都市デザイン学科 准教授
	松沢 晃一	国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ 主任研究員
	小寺 努	日本建築仕上材工業会 (エスケー化研株式会社東京支店営業技術チーム 課長)
	佐藤 大輔	(株) コンステック 研究開発本部 技術診断部

【令和 3～4 年度】

主 査：	野口 貴文	東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授
委 員：	濱崎 仁	芝浦工業大学建築学部建築学科 教授
	古賀 純子	芝浦工業大学建築学部建築学科 教授
	兼松 学	東京理科大学理工学部建築学科 教授
	松沢 晃一	国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ 主任研究員
	小寺 努	日本建築仕上材工業会 (エスケー化研株式会社東京支店営業技術チーム 課長)

第Ⅲ-1 編

既存鉄筋コンクリート造集合住宅の健全度の評価手法 および長寿命化のための適正管理手法（案）

Ⅲ-1. 耐久性向上

1. 適用範囲

1.1 適用対象とする建物

本資料は、既存鉄筋コンクリート造集合住宅に適用する。

【解説】

本資料の適用対象は、既存鉄筋コンクリート造集合住宅とする。

建築後一定の年数が経過しているが、構造耐力は確保されているストックの有効活用・長寿命化を図るうえでは、耐久性の維持向上が特に必要とされる。

そこで、本資料は、建物の所有者が、耐久性の維持向上を目的として、建物の保全を行う上で全面改修や補修の実施をするか否かの判断などの意思決定をする際に、参考書として活用されることを目的としている。

1.2 適用対象とする性能

評価の対象は、材料の劣化に関することとする。特に、鉄筋コンクリート中の鉄筋の腐食に係る使用安全性に対する評価に適用する。

【解説】

本資料では、地震・常時荷重等への耐力および火災への防耐火性の評価を行うものではなく、材料の劣化を判断する評価指標として、特に、鉄筋腐食によるコンクリートの劣化に対する使用安全性が確保されているか、に着目している。

解説表 1.2.1 に、既往の規準や指針等に示されている劣化の扱いを整理して示す。

非構造部材の剥落などを対象とした使用安全性においては、建物全体としての劣化の評価基準や指針等は示されておらず、また、供用期間中に実施する将来予測手法などは未整備の状態である。そのため、本資料での対象は主に、使用安全性に着目した建物全体としての健全度の評価指標の提案および、これを活用した建物の管理手法の提案とする。

Ⅲ-1. 耐久性向上

表1.2.1 既往の規準・指針等における劣化の扱いに関する整理

時間	設計時(t=0)	供用期間のある時期 t1			将来予測 (t1+Δt)	
		②対象部位全体	③不具合部	④不具合補修・改修部の扱い	②の将来予測	③④の将来予測
評価対象の範囲・性能	①対象部位全体	②対象部位全体	③不具合部	④不具合補修・改修部の扱い	②の将来予測	③④の将来予測
主要構造部の構造安全性	耐久設計（鉄筋腐食確率） ^{1) 2)}	I _s の経年指標 T（中性化深さ） ³⁾	I _s の経年指標 T（ひび割れやその他不具合） ³⁾	完全な補修がされていけば問題がないと判断 ³⁾ 。	耐久設計（鉄筋腐食確率 ⁵⁾	未整備
非構造部材の使用安全性（剥落）	部位によっては耐久設計の考えあり ⁴⁾	未整備	定期点検項目・現況検査項目 ^{5) 6)}	I _N の実態指数 t：履歴・補修と経年数の組み合わせ ³⁾ 。	未整備	未整備
使用性（漏水）	リファレンス サービスライフ RSL（仕上げ） ⁷⁾	未整備	定期点検項目・現況検査項目 ^{5) 6)}	補修されていけば問題がないと考えられる。	RSL（仕上げ）（研究段階） ^{7) 8)}	未整備

1) 国土交通省住宅局住宅生産課ほか、日本住宅性能表示基準・評価方法基準技術解説（新築住宅）、2018
 2) 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
 3) 日本建築防災協会、既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準、2017
 4) 日本建築学会、非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領、2014
 5) 国土交通省住宅局住宅生産課ほか、住宅性能表示制度 建設住宅性能評価解説（既存住宅・現況検査）、2018
 6) 国土交通省住宅局、公営住宅等日常点検マニュアル（耐火・準耐火構造編）、2016
 7) 建築研究所、建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究、建築研究資料 No.145、2013
 8) 国土技術政策総合技術研究所、地域安心居住機能の戦略的ストックマネジメント技術の開発（平成27年度～29年度）、国土技術政策総合技術研究所プロジェクト研究報告 第62号、2019.1

1.3 概要および特徴

本資料は、区切られた部位の評価により、数値指標をもって建物を評価し、これにより建物の劣化状態を把握することを目的とする。また、目視を中心とした簡易な評価であることを特徴とし、定期的に評価を適用することで適切な保全を行うことに活用できる。

【解説】

本資料は、単一の数値指標をもって建物の評価を実施することを特徴とする。各劣化現象を個々にではなく総合してとらえ、劣化の程度を数値化し、建物の健全度として評価する考え方である。

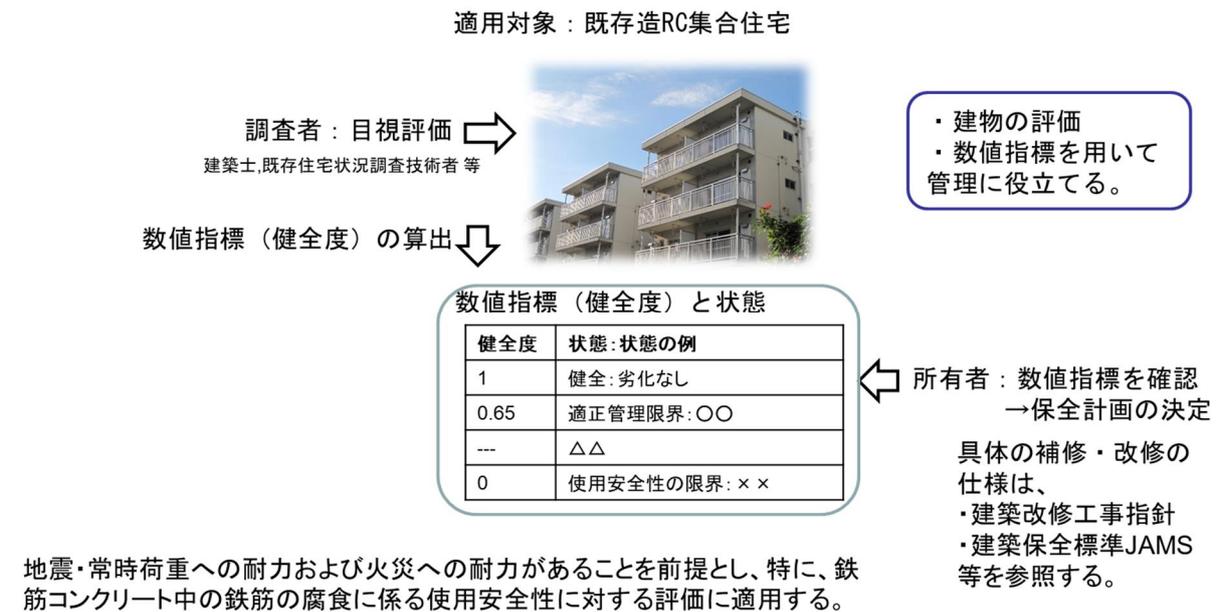
建物の調査および評価を実施する者は、建築士などの専門的な知識を有する者を基本とし、さ

III-1. 耐久性向上

らに、既存住宅状況調査技術者（国土交通大臣が登録する一定の要件を満たす既存住宅状況調査技術者講習を修了した建築士）など、既存建築物の劣化に関する知識を有する者がなお望ましい。なお、局所的な劣化箇所ごとへの劣化診断・評価および対策は、例えば、「建築改修工事監理指針（建築保全センター）」⁹⁾ や「建築保全標準（日本建築学会）」^{10)~12)}などを参照するとよい。

また、本資料は、目視を中心とした手法のため、1次インスペクション（1次調査・簡易調査）の手法としても活用できる。

なお、具体の手法については3章に記載しているが、関連する規定および技術検討結果を参照して定めた。



解説図 1.3.1 本資料の特徴

第1章 参考文献

- 1) 国土交通省住宅局住宅生産課ほか、日本住宅性能表示基準・評価方法基準技術解説（新築住宅）、2018
- 2) 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
- 3) 日本建築防災協会、既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準、2001
- 4) 日本建築学会、非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領、2014
- 5) 国土交通省住宅局住宅生産課ほか、住宅性能表示制度 建設住宅性能評価解説（既存住宅・現況検査）、2018
- 6) 国土交通省住宅局、公営住宅等日常点検マニュアル（耐火・準耐火構造編）、2016
- 7) 建築研究所、建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究、建築研究資料 No.145、2013

Ⅲ-1. 耐久性向上

- 8) 国土技術政策総合技術研究所、地域安心居住機能の戦略的ストックマネジメント技術の開発
(平成 27 年度～29 年度)、国土技術政策総合技術研究所プロジェクト研究報告 第 62 号、
2019.1
- 9) (一財) 建築保全センター、建築改修工事監理指針令和元年版、2019
- 10) (一社) 日本建築学会、建築保全標準・同解説 JAMS 1-RC 一般共通事項—鉄筋コンクリ
ート造建築物 JAMS 2-RC 点検標準仕様書—鉄筋コンクリート造建築物、2021
- 11) (一社) 日本建築学会、建築保全標準・同解説 建築保全標準・同解説 JAMS 3-RC 調
査・診断標準仕様書—鉄筋コンクリート造建築物、2021
- 12) (一社) 日本建築学会、建築保全標準・同解説 建築保全標準・同解説 JAMS 4-RC 補
修・改修設計規準—鉄筋コンクリート造建築物 JAMS 5-RC 補修・改修工事標準仕様書—
鉄筋コンクリート造建築物、2021

2. 用語の定義

① 残存耐用年数

建築物またはその部分が使用安全性の限界状態に至るまでの今後の年数。

② 使用安全性

建築物の利用者および建築物周囲の歩行者・器物等に危害を与えないことを目的とした性能

③ 使用安全性の限界状態

使用安全性が確保されなくなった状態。

④ 劣化グレード

鉄筋コンクリートの使用安全性に関係する劣化の程度。鉄筋腐食により発生する各段階の鉄筋コンクリートの劣化事象、および、鉄筋腐食により発生する劣化事象ではないものの複合的に鉄筋腐食の進行に影響を及ぼすと考えられる劣化事象を対象とする。

⑤ 健全度

鉄筋コンクリートの使用安全性を評価する指標。劣化グレードを用いて、使用安全性に係る劣化事象の発生の量と発生の分布を加味して評価される。

⑥ 適正管理限界状態

供用期間中に鉄筋腐食による使用安全性への危険が大きくなるようにするために、対策を取ることを推奨する状態の限界状態であり、補修・改修等の措置が困難となる状態に至る前の状態。

⑦ 部位

単一または複数の部材の部分。

【解説】

① 残存耐用年数

旧建設省の総合技術開発プロジェクトの成果がまとめられた指針¹⁾や「建築物・部材・材料の耐久設計手法に関する指針（日本建築学会）²⁾」において、「耐用年数」とは、「建築物またはその部分が使用に耐えなくなるまでの年数¹⁾」または、「建築物またはその部分が使用に耐えなくなるまでの年数、建築物またはその部分が、建設された後、劣化あるいは陳腐化により、要求性能に適合せず使用に耐えなくなるまでの年数²⁾」と定義されている。さらに、「残存耐用年数」とは、「建築物またはその部分が使用に耐えなくなるまでの今後の年数」と定義されている¹⁾。

本資料で示す健全度の評価の応用・展開においては、新築から時間が経過している既存鉄筋コンクリート建築物を対象として、使用安全性が限界状態に至るまでの年数（使用安全性が確保さ

Ⅲ-1. 耐久性向上

れている年数)の推定を行うことが想定される。

② 使用安全性

「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説（日本建築学会）³⁾」では、「使用安全性とは、建築物の利用者および建築物周囲の歩行者・器物等に危害を与えないことを目的とした性能」とされ、「コンクリートの一体性またはコンクリートと仕上げとの一体性によって評価する」と解説されている。そこで、本資料においては、特に鉄筋腐食によって引き起こされる鉄筋とコンクリートの一体性に問題がないことを中心にしている。

③ 使用安全性の限界状態

鉄筋腐食によって引き起こされる鉄筋とコンクリートの一体性に問題がある状態とは、劣化事象として表現すれば、鉄筋とコンクリートの剥離・浮きおよび鉄筋露出が該当する。従って、3章で示す劣化グレードにおいて、使用安全性の限界状態に位置づけられる劣化事象は、「かぶりコンクリートの剥離・浮きが見られる状態、鉄筋露出している状態」とした。

なお、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説（日本建築学会）³⁾」では、性能ごとに設計限界状態および維持保全限界を設けている。つまり、「使用安全性」という点からは、かぶりコンクリートの剥落が多発することを許容せず、局所的なコンクリート片や仕上げ材の浮き・剥落（劣化度 4）を設計限界とし、一方、構造安全性では屋外部の過半で鉄筋腐食によるひび割れ、かぶりコンクリートの剥落が生じる状態（劣化度 5）程度を設計限界状態としている。

④ 劣化グレード

鉄筋コンクリート部位の使用安全性に係る残存耐用年数に関する劣化の程度を 0～4（D0～D4）の段階で示したものを、鉄筋腐食により発生する各段階の鉄筋コンクリートの劣化事象、および、鉄筋腐食により発生する劣化事象ではないものの複合的に鉄筋腐食の進行に影響を及ぼすと考えられる劣化事象を対象とする。

⑤ 健全度

現時点で保有している健全度を示す指標である。また、本資料においては、適切な管理を行う上で参考とする指標としている。劣化グレードを用いて計算する。特に、部位の健全度の評価において、竣工時の健全度は 1、対象部位の全域において使用安全性が確保されていない状態は 0 としている。なお、ここでいう全域とは、対象とする部位を複数に分割したときに、その分割した一要素の範囲内で、少しでも使用安全性が確保されていない状態となっており、かつそのような一要素の状態が、対象とする部位の全域に当てはまる状態をいう。すなわち、部位要素（3章にて定義）で判定される劣化グレードの結果がすべて、使用安全性の限界である劣化グレード 3 である状態を健全度が 0 の状態とする。

⑥ 適正管理限界状態

使用安全性の限界状態に至らないように健全度を一定水準以上に持続するために、推奨される管理の限界の状態であり、補修・改修等の措置が困難となる状態に至る前の状態とする。適正管理限界状態を下回った状態とは、鉄筋腐食によって生じる使用安全性の低下が著しいことを示す。

ただし、保全技術（モニタリング手法や、劣化箇所の対策技術）の進歩により、適正管理限界状態となる限界状態は変わると考えるため、ここでいう適正管理限界とは、現在の一般的な保全技術を前提とするものである。

Ⅲ-1. 耐久性向上

なお、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（日本建築学会）³⁾」によれば、「建築物の構造体および部材の性能の低下を生じさせる劣化状態のうち、耐久設計の段階でそれ以上低下すると維持保全が極めて困難になると予想される限界の劣化状態³⁾。」を「維持保全限界状態」と定義している。本資料で定義する適正管理限界状態は、設計段階で予想されるものではない点は、維持保全限界状態の定義と異なるが、性能がそれ以上低下すると維持保全が極めて困難になると予想される限界の劣化状態の考え方、という点では同様の考え方である。

⑦ 部位

「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2022（日本建築学会）」と同義である。部材とは、柱、梁、壁などを指し、一方で部位は、同じ形状の部材でも配置される場所によって区別したい場合や、複数部材をまとめて表したい場合に使用している。なお、本資料では、部位要素とは、3章に示すように、区分された部位を一定間隔でさらに細かい部分に区分した部分を指し、劣化箇所とは、大きさを問わずに劣化した部分を指しており、部位要素より小さい部分を指す場合もあれば、部位要素全体で生じている劣化の部分の部分を指す場合もある。

第2章 参考文献

- 1) 建設大臣官房技術調査室監修、鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術、技報堂出版、1986
- 2) 日本建築学会、建築物・部材・材料の耐久設計手法・同解説、2003
- 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

3. 既存鉄筋コンクリート造集合住宅の健全度の評価手法

3.1 健全度の評価方法の概要

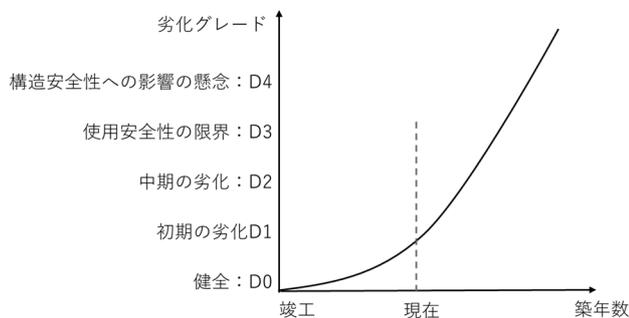
建物の健全度は、下記 1) ～3) の手順により評価する。

- 1) 対象部位の劣化グレードの評価
- 2) 対象部位の健全度の評価
- 3) 建物の健全度の評価

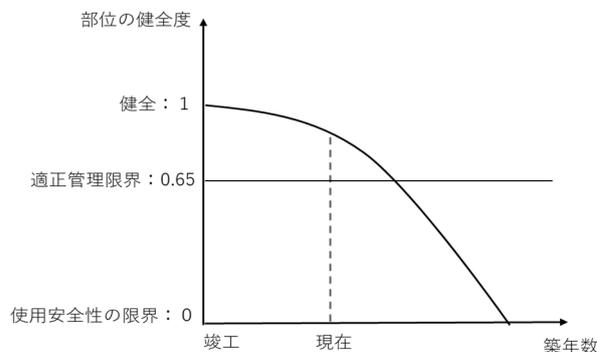
【解説】

一般的に、解説図 3.1.1 に示すように、鉄筋コンクリート部位は、竣工時を起点として、年数の経過に伴い劣化が進行すると考えられるため、築年数とともに劣化グレードは大きくなり、そのため解説図 3.1.2 に示すように、部位の健全度は低下するものと考えられる。そこで、竣工から年数が経過している現在における劣化状況を劣化グレードにより評価し、その劣化グレードを用いて対象とする部位の健全度を評価することとした。なお、鉄筋コンクリート部位の劣化の進行は、部位が置かれる環境によって異なることも知られている^{1) 2)}ため、健全度は置かれる環境や部材形状による分類をして区切った部位ごとに評価することとした。

一方で、既存鉄筋コンクリート造集合住宅の適正管理に向けては、部位ではなく建物としての評価を実施することが望ましいことから、対象部位の健全度の評価結果を用いて、建物としての健全度を評価する。



解説図 3.1.1 既存鉄筋コンクリート部位の劣化進行のイメージ



解説図 3.1.2 既存鉄筋コンクリート部位の健全度の低下

3.2 部位の劣化グレードの評価方法

- ・対象とする部位 J を複数に分割した一要素を部位要素 J_{ei} とし、部位要素の劣化グレード D_{je} の評点 α を加重平均したものを、部位 J の劣化グレード D_j とする。
- ・部位 J は、評価対象とする部位のうち、特定の対象の部位を指す。評価対象とする部位は外壁（東面、南面、西面および北面の各方位）、階段室、バルコニー、供用廊下、屋根等、とする。
- ・部位要素 J_{ei} は、鉛直方向は各階で区切り、水平方向は 1 住戸ごとに区切ったものを 1 要素とすることを基本とする。
- ・部位要素 J_{ei} の劣化グレードは、1 つの要素範囲内で出現している劣化グレードのうち最も大きな劣化グレードを採用する。
- ・劣化グレードは表 3.2.1 に示すとおりとする。
- ・劣化グレードの評価を目視等において判定する場合は、表 3.2.2 による。

表 3.2.1 劣化グレード

劣化グレード (記号)	状態	劣化現象	評点
0 (D0)	健全	下記の劣化がみられない	0
1 (D1)	初期の劣化	仕上げ・表層部コンクリートの劣化	1
2 (D2)	中期の劣化 (今後急激に劣化進行)	鉄筋腐食に関する劣化	2
3 (D3)	使用安全性の限界	コンクリートの剥離・鉄筋露出	3
4 (D4)	構造安全性への影響が懸念される状態	鉄筋コンクリート部材のたわみ・傾斜	4

表 3.2.2 目視インデックス

目視インデックス No.	症状	劣化グレード
1	なし	0
2	外装の浮き、仕上げの劣化 (塗材の劣化は含まず)	1
3	コンクリート表層のひび割れ	1
4	エフロレッセンス・白華	1
5	錆汁	2
6	鉄筋腐食によるひび割れ (鉄筋に沿ったひび割れ・錆汁を伴うひび割れ)	2
7	鉄筋腐食による浮き・剥離 (鉄筋に沿って 20cm 以内の範囲)	3
8	鉄筋腐食による浮き・剥離 (鉄筋に沿って 20cm を超える範囲)	3
9	鉄筋露出	3
10	たわみ	4
11	傾斜	4
12	その他	協議による
備考	補修痕、豆板、構造ひび割れなどがあれば備考欄記入	—

Ⅲ-1. 耐久性向上

【解説】

劣化グレードは、用語の定義にも示したとおり、鉄筋腐食により発生する各段階の鉄筋コンクリート部位の劣化事象、および、鉄筋腐食により発生する劣化事象ではないものの複合的に鉄筋腐食の進行に影響を及ぼすと考えられる劣化事象を対象としている。鉄筋コンクリートの残存耐用年数と関係する指標でもある。既往の文献^{3)～12)}を調査し、これらの整理¹³⁾を通して設定した。

劣化グレード0が健全な状態であり、劣化グレードの数字が大きいほど、使用安全性が危惧される劣化が激しいことを示す。使用安全性に係る劣化グレードは劣化グレード0～3の4段階であり、それぞれ、健全、初期の劣化、中期の劣化、使用安全性の限界とし、使用安全性の限界状態が劣化グレード3である。劣化グレード1である初期の劣化とは、鉄筋腐食は発生していないと想定されるものの、鉄筋腐食の発生につながる劣化現象であるコンクリートの中酸化や雨水等の浸入に対する抵抗性が低くなっている状態として、仕上げの劣化や表層部のコンクリートの微細なひび割れ等の劣化とした。また、劣化グレード2である中期の劣化とは、鉄筋腐食が開始し、さらに鉄筋腐食の進行の要因となる水や酸素の供給がされているため、引続き鉄筋腐食が進行し、かぶりコンクリートの剥落が懸念される状態である。劣化グレード3である使用安全性の限界とは、定義に示したとおり、建築物の利用者および建築物周囲の歩行者・器物等に危害を与えないことを目的とした性能の確保が危惧される状態であり、すなわちコンクリートの一体性が欠落している状態である。さらに、劣化グレード3以降では、鉄筋コンクリート部材のたわみや傾斜なども想定され、これは構造安全性に影響が懸念される劣化であるため、劣化グレード4とした。

また、一定の範囲に区切った部位要素 J_{ei} ごとに劣化の段階を評価し、さらにこれらを部位 J にわたって累積することにより、その部位全体の平均を評価する¹⁴⁾。各劣化現象を個々にではなく総合してとらえ、劣化の程度を数値化する考え方である。

従って、下記の手順により建物の健全度を評価する。

1) 部位 J の劣化グレード D_J を解説式(3.1)により評価する。

$$D_J(t) = \frac{\sum \alpha_{je}(t)}{N} \quad \text{解説式 (3.1)}$$

ここに、

$D_J(t)$ ：築年数 t における部位 J の劣化グレード

$\alpha_{je}(t)$ ：築年数 t における部位要素 J_{ei} において判定された劣化グレードの評点

J ：評価対象とする特定の部位

J_{ei} ：部位要素（部位 J を複数に分割した一要素）（ $i: 1, 2, 3 \cdots n$ ）

N ：部位要素 J_{ei} の総数

t ：築年数

なお、本資料の多くの記述では、築年数 t は省略して表記しており、その場合、現時点の値を示している。

評価対象となる部位 J は外壁（東面、南面、西面、北面の各方位の外壁面、又はこれと同等の面）、階段室、バルコニー、供用廊下、屋根、その他これらと同等の単位と考えられる部

III-1. 耐久性向上

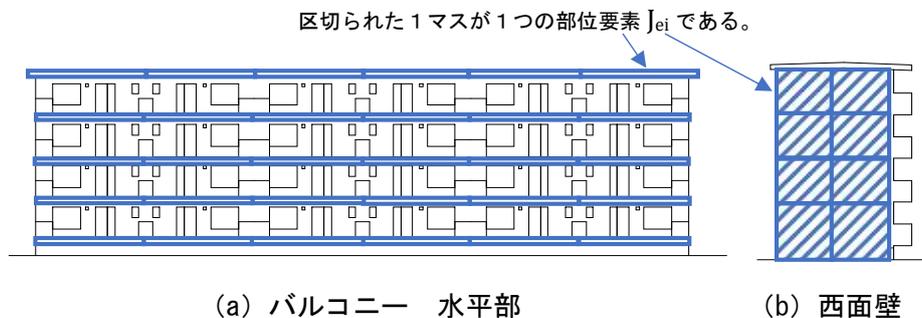
位、によって区分するものとする。なお、耐震診断において実施されている部位ごとに区分すれば、耐震診断への適用への展開も考えられる。

部位要素 J_{ei} は、解説表 3.2.1 および解説図 3.2.1 (a) (b) に示すように、鉛直方向は各階で区分し、水平方向は 1 住戸ごとに区分したものを 1 要素とすることを基本とした。部位要素の区分の仕方を細かくするほど劣化グレードの評価は精緻な評価に近づき、粗くするほど劣化グレードが大きくなることが確認された¹⁴⁾ が、一方で調査にかかる手間や時間を含め、煩雑な評価手法とならないようにするため、このような区分の仕方に設定した。従って、より細かい区分とすることは、より正確な評価ができると考えられることから、これを妨げるものではない。

部位要素 J_{ei} における劣化グレードの評価では、その要素内において出現している劣化グレードのうち最も大きな劣化グレードを採用する。例えば、部位要素 J_{ei} において、仕上げの劣化および鉄筋露出の劣化が確認された場合、劣化グレード 1 および劣化グレード 3 の劣化事象が出現しているわけだが、このとき、部位要素 J_{ei} の劣化グレードは劣化グレード 3 を採用する。

解説表 3.2.1 調査対象の区分の仕方

部位	区分の仕方
鉛直方向	階で区分
水平方向 外壁	桁行方向は住戸で区分した部分とし、梁間方向は住戸を二分した部分とする。
水平方向 階段室	一の階段室の部分とする。
水平方向 バルコニー	住戸で区分した部分とする。



解説図 3.2.1 部位要素 J_{ei} の例

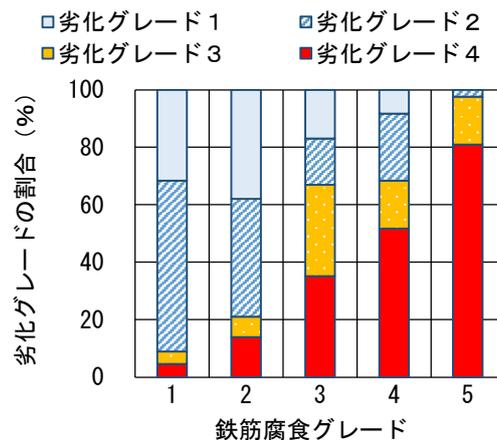
区切られた 1 マスが 1 つの部位要素 J_{ei} である。(a) バルコニーの例の場合、30 の部位要素 J_{ei} を含めたものが部位 J となり、(b) 西面壁の例の場合、8 の部位要素 J_{ei} を含めたものが部位 J となる。

表 3.2.1 の劣化グレードの評価を目視や打診において判定する場合は、表 3.2.2 に示す目視インデックスを用いる。この評価には、専門的な知識を必要とすることから、建物の調査および評価を実施する者は、一級建築士や特定建築物調査員などの専門的な知識を有する者を基本とし、さらに、既存住宅状況調査技術者など、既存建築物の劣化に関する知識を有する者がなお

III-1. 耐久性向上

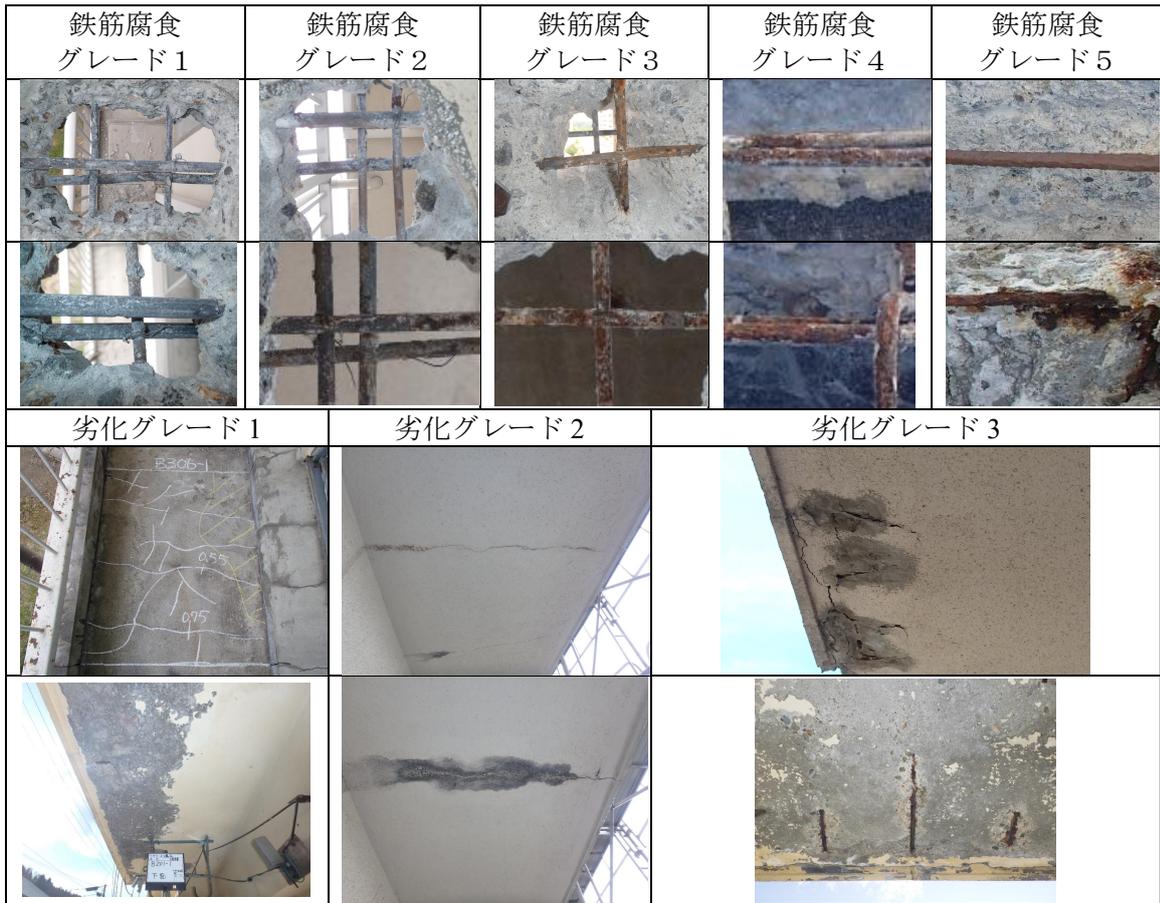
望ましい。この他、補修や改修のための調査を実施するような、建築仕上診断技術者、コンクリート診断士、建築仕上げ改修施工管理技術者による調査結果も活用できる。

なお、鉄筋腐食グレードと劣化グレードの関係性は、建物調査¹⁴⁾¹⁵⁾ および模擬部材実験¹⁶⁾¹⁷⁾を実施し、一定の傾向を捉えることができることを確認している。解説図 3.2.2¹⁴⁾ に、表 3.2.2 により判定した劣化グレードと鉄筋腐食グレードの関係図を示す。また、解説写真 3.2.1¹⁵⁾ に鉄筋腐食グレードおよび劣化グレードの状態の例を示す。使用安全性の限界状態は、「かぶりコンクリートの剥離・浮きが見られる状態、鉄筋露出している状態」と定義しており、これは解説写真 3.2.1 で示される 5 段階の鉄筋腐食グレードにおいてグレード 4 に相当する¹⁸⁾¹⁹⁾。ただし、コンクリート強度、配筋間隔、かぶり厚さや仕上げの厚さによって、鉄筋腐食の程度と劣化事象の出現には違いがあることから¹⁷⁾¹⁹⁾～²³⁾、使用安全性の限界状態に相当する鉄筋腐食グレードが、3 や 5 となる場合もある。解説図 3.2.3 に、かぶり厚さでデータを分類した場合の鉄筋腐食グレードと劣化グレードの平均値の関係を示す。かぶり厚さが大きい場合、劣化グレード 2 および劣化グレード 3 の事象が出現していても鉄筋腐食グレードが 4 や 5 となっている可能性がある。鉄筋腐食グレードが 4 や 5 の場合、コンクリート内部で鉄筋とコンクリートの剥離が生じている可能性があり、また、これらは打診検査で見つけることが困難であるため、かぶり厚さが大きい部材では注意が必要である。

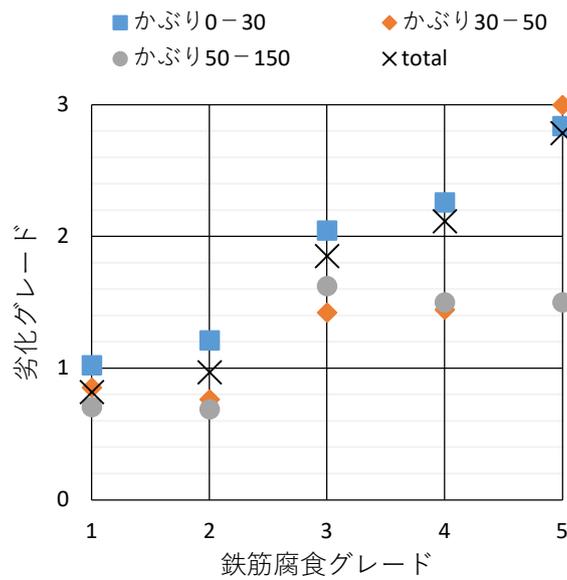


解説図 3.2.2 部位要素における鉄筋腐食グレードと劣化グレードの関係¹⁵⁾

Ⅲ-1. 耐久性向上



解説写真 3. 2. 1 鉄筋腐食グレードおよび劣化グレードの状態の例¹⁵⁾



解説図 3. 2. 3 鉄筋腐食グレードと劣化グレードの平均値の関係 (かぶり厚さで分類)¹⁹⁾

3.3 部位の健全度の評価方法

部位 J の劣化グレード D_j と劣化グレード 3 の評点の比を 1 から差し引いた値を対象部位の健全度 H_j とする。

【解説】

解説図 3.3.1 に示すように、健全度は劣化と相反する指標であるため、健全である場合の数値が高く、より劣化している場合は数値が小さくなるものである。そこで、部位の劣化グレード D_j と使用安全性の限界状態である劣化グレード 3 の評点の比を 1 から差し引いた値を部位の健全度 H_j とした。

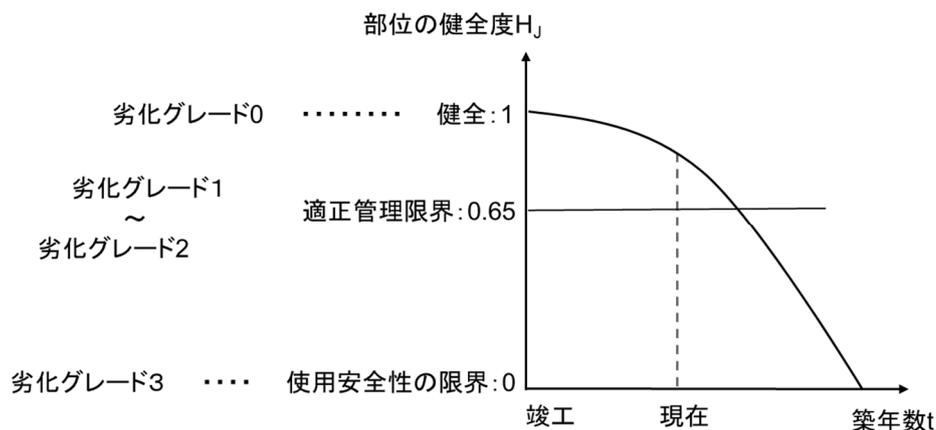
築年数 t における部位 J が保有する健全度 $H_j(t)$ は、解説式 (3.2) で示される。

$$H_j(t) = 1 - \frac{D_j(t)}{\text{(劣化グレード 3 の評点)}} \quad \text{解説式 (3.2)}$$

劣化グレード 3 の評点は、表 3.2.1 に示すとおりとする。

なお、数値の意味および留意点は下記のとおりである。

- ・対象部位の健全度が 0 の状態とは、対象部位の全域において使用安全性が確保されていない状態である。すなわち、対象部位の全域において、部位要素 J_{ei} の範囲内に、一か所でも劣化グレード 3 (剥離・鉄筋露出) が生じている状態である。
- ・使用安全性の限界を超えて、構造安全性への影響が懸念される場合などはマイナスとなる。
- ・健全度が 1 の状態とは、竣工時の状態である。
- ・新築時に劣化への対策がなされている建物もそうではない建物も、新築時には健全度が 1 である。すなわち、建物の耐久性によらず、竣工時の健全度は 1 である。



解説図 3.3.1 部位の劣化グレードに相対する部位の健全度 H_j

3.4 建物の健全度の評価方法

部位の健全度 H_j のうち、最小となるものを、建物の健全度 H とする。

【解説】

実建物を対象とした劣化調査結果から、劣化グレードを建物全体で平均化した場合に比べて、劣化グレードが極端に大きい部位や、小さい部位があることが確認された¹⁴⁾。すなわち、部位 J の健全度を評価した場合にも値が大きく異なることとなる。そのため、複数の部位を対象に部位 J の健全度を評価した際、それらの最小値を建物の健全度として扱い、適正管理限界状態との目安を比較し、建物の管理を行うこととする。すなわち、部位の健全度 H_j のうち、最小となるものを建物の健全度 H とする。

築年数 t における建物の健全度 $H(t)$ は、解説式 (3.3) で示される。

$$H(t) = \text{Min}\{H_j(t)\} \quad \text{解説式 (3.3)}$$

ここに、 $H(t)$: 築年数 t における建物の健全度

なお、本資料では、築年数 t は省略して、建物の健全度 H と記している。

3.5 部位の劣化グレード、部位の健全度および建物の健全度の評価事例

3.5.1 対象とした建物の概要

既存鉄筋コンクリート造公営住宅を主な対象として、建物の健全度 H の評価を実施した。対象とした建物の概要を解説表 3.5.1 に示す。主に、竣工が 1950 年～1970 年代の鉄筋コンクリート造集合住宅であり、4～7 階建て、住戸数は 12～40 程度である。

解説表 3.5.1 対象とした建物の概要

記号	所在地	構造規模	竣工年	調査年
A	富山	鉄筋コンクリート造 4 階	1962	2020
B-1	鹿児島	鉄筋コンクリート造 5 階	1972	2020
B-2	鹿児島	鉄筋コンクリート造 5 階	1974	2020
C-1	福岡	鉄筋コンクリート造 5 階	1971	2020
C-2	福岡	鉄筋コンクリート造 5 階	1971	2020
D	岐阜	鉄筋コンクリート造 4 階	1951	2020
E	東京	鉄筋コンクリート造 7 階	1971	2020
F-1	宮城	鉄筋コンクリート造 4 階	1970	2020
F-2	宮城	鉄筋コンクリート造 4 階	1972	2020
I	長崎	鉄筋コンクリート造 5 階	1972	2020
K-3	長崎	鉄筋コンクリート造 4 階	1959	2022
K-16	長崎	鉄筋コンクリート造 9 階	1918～1922	2022
K-70*	長崎	鉄筋コンクリート造 6 階	1958	2022

*住宅以外の用途

3.5.2 部位の劣化グレード D_j の評価結果

(1) 建物 A 南面外壁 の評価結果

評価対象を南面外壁とし、評価結果を示す。

Ⅲ-1. 耐久性向上

解説図 3.5.1 に、新築時（1962 年）、調査記録図（2020 年）、劣化グレードの評価（2020 年）の図を示す。評価対象とする部位 J を南面外壁としているため、劣化グレードの評価においてはバルコニーや庇のスラブは除いている。

III-1. 耐久性向上

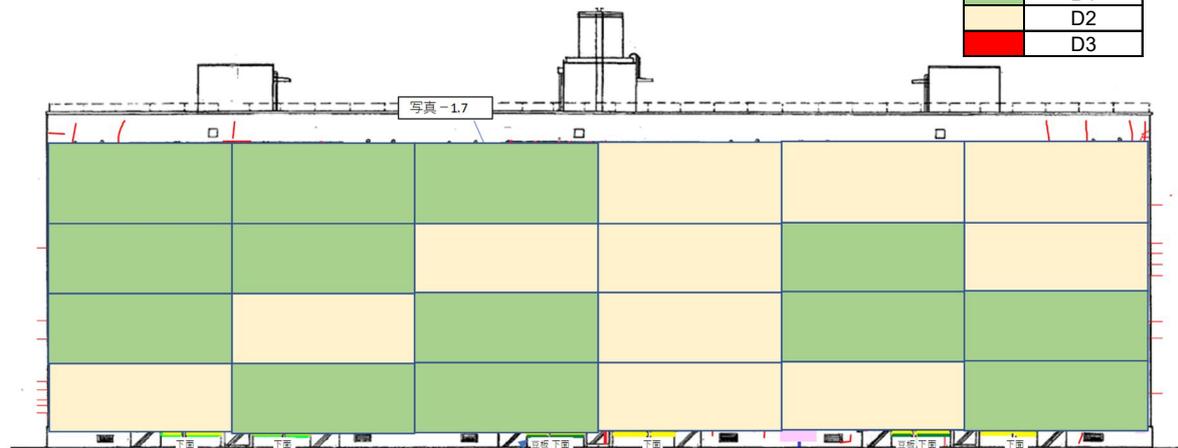


(a) 新築時 (1962年)



(b) 調査記録図 (2020年)

劣化グレード	
	D0
	D1
	D2
	D3



(c) 劣化グレードの評価 (2020年)

解説図 3.5.1 部位の劣化グレードの評価結果

結果より、

部位要素 J_{ei} の総数 $N : 24$ 。

劣化グレード $0 : 0$

劣化グレード $1 : 13$

劣化グレード $2 : 11$

劣化グレード $3 : 0$

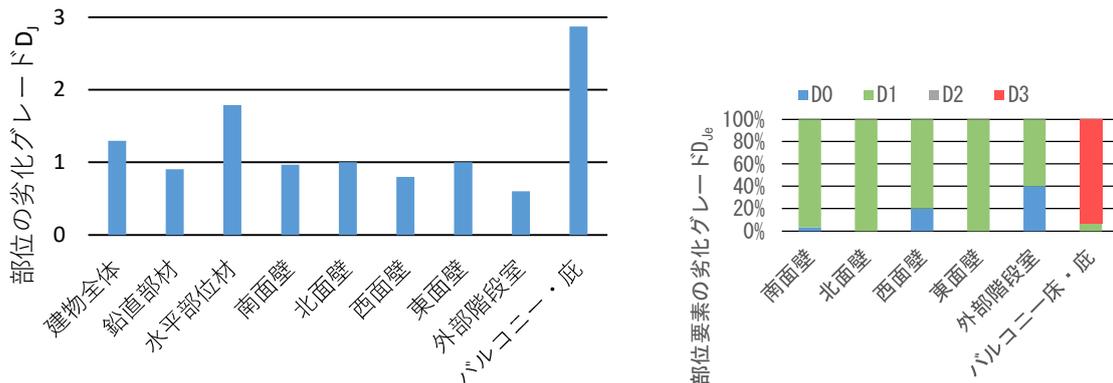
となり、解説式 3.1 を用いて計算すると、南面外壁の劣化グレード D_J は

$$D_J = (0 \times 0 + 1 \times 13 + 2 \times 11 + 3 \times 0) / 24 = 35/24 = 1.46$$

となる。

(2) 建物 B-2 様々な部位 J での評価結果

解説図 3.5.2 (a) に、建物 B-2 の様々な部位 J の劣化グレードの評価結果を示す。各部位の劣化グレード D_J に加えて、これらの劣化グレードを平均した値（建物にわたった平均）、水平部材全部を平均した値、鉛直部材すべてを平均した値も参考として示す。さらに、参考情報として、解説図 3.5.2 (b) に、部位要素 J_{ei} の劣化グレードの評価結果の割合を示す。



(a) 部位の劣化グレード D_J の評価結果

(b) 参考) 劣化グレードの内訳

解説図 3.5.2 部位の劣化グレード D_J の評価結果 (B-2)

結果より、バルコニーの劣化グレード D_J は 2.8 であり、西面壁の劣化グレード D_J は 0.8 であるなど、部位による差が大きく生じたことがわかる。バルコニーでは部位要素 J_{ei} の 9 割が劣化グレード 3（剥離・鉄筋露出）であり、西面壁では部位要素 J_{ei} の 8 割が劣化グレード 1（仕上げ等の劣化）であった。

解説図 3.5.2 (a) の建物全体（建物にわたり平均化した場合）の結果に比べて、部位 J の劣化グレード D_J が極端に大きい場合や、小さい場合があることがわかる。

3.5.3 部位の健全度 H_J の評価結果

(1) 建物 A 南面外壁 の評価結果

部位の健全度 H_J は、解説式 (3.2) を用いて算出する。

- ・使用安全性の限界の劣化グレードの評点は 3。

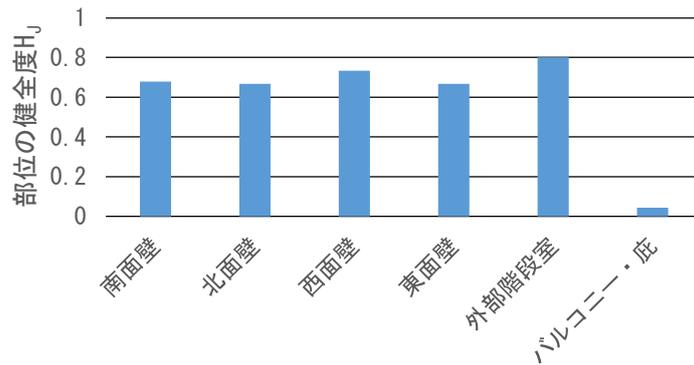
III-1. 耐久性向上

・劣化グレード D_j は 1.46。

であるから、解説式 (3.2) より、 $1-1.46/3=0.513$ となる。

(2) 建物 B-2 の各部位の評価結果

解説図 3.5.3 に、部位の健全度 H_j の評価結果を示す。部位 J によって健全度の大きさは異なり、特にバルコニーで小さい値となっている。そのため、使用安全性の確保に向けて、部位 J の健全度 H_j の最小値を建物の健全度 H とし、管理の指標とすることとしている。



解説図 3.5.3 部位の健全度 H_j の評価結果 (B-2)

3.5.4 建物の健全度の評価結果

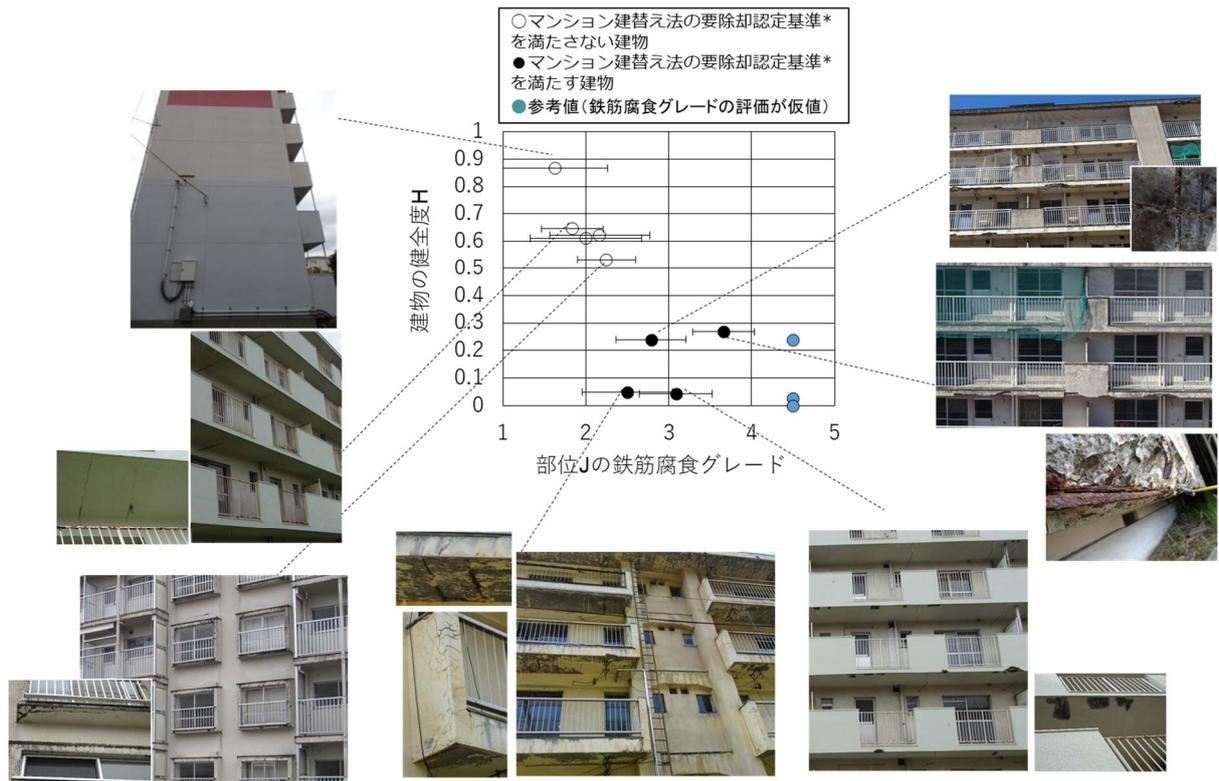
(1) 建物 B-2

解説図 3.5.3 の評価結果より、部位の健全度 H_j のうち最小となるものを、その建物の健全度 H とする (解説式 (3.3)) ことから、バルコニーの健全度が採用され、建物の健全度 H は 0.04 となる。

(2) 築 45 年から 70 年の建物の健全度 H の評価例

解説図 3.5.4 に、日本各地の築 45 年から 70 年の建物 (解説表 3.5.1) の健全度 H の評価結果および外観の例を示す。横軸は、対象となった部位 J の鉄筋腐食グレード (5 段階)¹⁸⁾ の平均値である。鉄筋腐食グレードは、はつり等により鉄筋表面を露出させて評価した複数の結果を用いている。また、マンションの建替え等の円滑化に関する法律 (マンション建替え法) に係る国土交通省告示第 1522 号 (R3.12) 除却の必要性に係る認定に関する基準等を定める告示の基準のうち、外壁等が剝離し、落下することにより周辺に危害を生ずるおそれがあるものに関する基準を満たす建物にはプロットを塗りつぶしており、建物の健全度が 0.3 以下では要除却認定の対象となっていることが分かる。

Ⅲ-1. 耐久性向上



解説図 3.5.4 日本各地の築 45 年から 70 年の建物の健全度の評価例

*マンションの建替え等の円滑化に関する法律に係る国土交通省告示第 1522 号 (R3.12) 除却の必要性に係る認定に関する基準等を定める告示の基準のうち、外壁等が剝離し、落下することにより周辺に危害を生ずるおそれがあるものに関する基準による判定

第3章 参考文献

- 1) 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
- 2) 土屋 直子、三島 直生、中田 清史、松沢 晃一、鹿毛 忠継、棚野 博之、阿部 道彦、井川 倫宏、横山 博、彦坂 信之、マンションの老朽化認定の評価方法に関する検討、日本建築学会技術報告集、Vol.28、No.68、pp.70-75、2022
- 3) 独立行政法人建築研究所、建築物の長期使用に対応した外装・防水の品質確保ならびに維持保全手法の開発に関する研究、建築研究資料 No.145、2013.8
- 4) 国土交通省大臣官房官庁営繕部監修、建築保全センター、建築改修工事監理指針、2022
- 5) 国土技術政策総合研究所、地域安心居住機能の戦略的ストックマネジメント技術の開発、国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告、No.62、2019.1
- 6) 建設大臣官房官庁営繕部監修、建築保全センター編集、建築物修繕措置判定手法、2006
- 7) 建設大臣官房技術調査室監修、技報堂、建築物の耐久性向上技術シリーズ建築構造編 I 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術、2007
- 8) 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
- 9) 国土技術政策総合研究所、多世代利用超長期住宅および宅地の形成・管理技術の開発、国土技術政策総合研究所プロジェクト研究報告、No.42、2013.3
- 10) 国土技術政策総合研究所、マンションの建替えか修繕かを判断するためのマニュアル、国土技術政策総合研究所資料、No.84、2013.1
- 11) 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
- 12) 日本建築防災協会、既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準同解説、2017
- 13) 土屋 直子、根本 かおり、脇山 善夫、三島 直生、既存鉄筋コンクリート住宅の長寿命化に係る耐久性評価に関する研究その2_既存鉄筋コンクリート部材の劣化の段階と耐久性評価について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.925-926、2020
- 14) 土屋 直子、三島 直生、中田 清史、松沢 晃一、鹿毛 忠継、棚野 博之、阿部 道彦、井川 倫宏、横山 博、彦坂 信之、マンションの老朽化認定の評価方法に関する検討、日本建築学会技術報告集、Vol.28、No.68、pp.70-75、2022
- 15) 土屋 直子、三島 直生、中田 清史、松沢 晃一、鹿毛 忠継、棚野 博之、阿部 道彦、マンションの老朽化認定の評価方法に関する検討その2 判定式および判定基準、日本建築学会技術報告集、Vol. 29、No.71、pp.52-57、2023
- 16) 中田 清史、松沢 晃一、棚野 博之、鹿毛 忠継、土屋 直子、三島 直生、目視検査に基づく鉄筋コンクリート造壁面におけるコンクリート剥離・剥落の危険性判定手法、日本建築学会技術報告集、Vol.27、No.65、pp.81-86、2021
- 17) 土屋 直子、中田 清史、井川 倫宏、横山 博、三島 直生、松沢 晃一、鹿毛 忠継、棚野 博之、モルタル仕上げのある鉄筋コンクリート壁部材表面において確認される鉄筋腐食を原因とするひび割れ、浮き・剥離の顕在化過程に関する研究、日本建築学会構造系論文集、Vol.87、No.799、pp.854-865、2022

Ⅲ-1. 耐久性向上

- 18) 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
- 19) 土屋 直子、根本 かおり、三島 直生、既存鉄筋コンクリート住宅の長寿命化に係る耐久性評価に関する研究その 3 使用安全性の限界状態および鉄筋腐食進行に及ぼす要因について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1109-1110、2021
- 20) 武若耕司および松本進、コンクリート中の鉄筋腐食が鉄筋コンクリート部材の力学的性状に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 6、pp.177-180、1984
- 21) 渡辺健、鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食によるかぶりの剥落評価手法、第 291 回鉄道総研月例発表会講演要旨、pp. 19-22、2015
- 22) 荒木弘祐、服部篤史、宮川豊章、鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離現象とその予測、土木学会論文集、Vol. 2005、No. 802、pp. 209-222、2005 (DOI: https://doi.org/10.2208/jscej.2005.802_209)
- 23) 篠原保二、塩害環境下における鉄筋コンクリート柱の鉄筋腐食ひび割れ挙動および横補強筋のひずみ上昇、日本建築学会構造系論文集、第 81 巻、第 720 号、pp. 323-333、2016 (DOI <http://doi.org/10.3130/aijs.81.323>)

4. 長寿命化のための適正管理手法

4.1 適正管理手法の概要

建物の管理は、建物の状態をモニタリングにより把握し、適正管理限界状態を定め、これを目安に対策を実施する。また、モニタリング結果および実施した対策は記録して保管する。

【解説】

建物を適正な状態に保つためには、建物の状態を定期的に把握し、必要に応じて補修・改修等の対策を実施する必要がある。

本手法では、使用安全性を適正な状態に保つことを目的とし、適正管理の指標として建物の健全度 H を用いる。すなわち、供用期間中に鉄筋腐食による使用安全性に関する危険が大きくなるようにするための対策を取ることを推奨するため、健全度 0.65 を「適正管理限界状態」と定め（詳細は 4.4 において後述する）、この水準以上を維持するよう、健全度のモニタリングを行い、保全対策を実施する。また、過去の情報は重要な情報となるため、モニタリング手法や調査結果、また実施した対策については、図面と関連づけて記録し、保管する必要がある。

4.2 モニタリング

建物の状態の把握は、管理を行う上で参照とする指標を定め、これを定期的に評価することによる。本資料においては、適正管理を行う上で参照とする指標は、建物の健全度 H とする。

【解説】

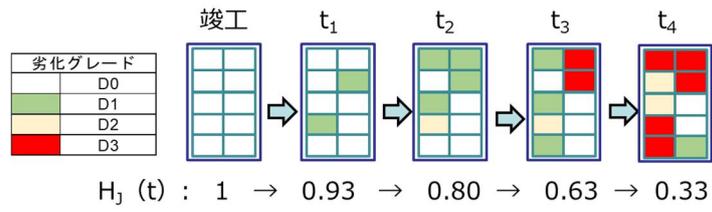
建物の状態の把握は、管理を行う上で参照とする指標を定め、その指標の特徴にあわせた頻度で定期的に評価することが必要である。解説図 4.2.1 に、健全度の時間経過に伴う低下のイメージを示す。

本資料においては、管理を行う上で参照とする指標を建物の健全度 H としたが、他に、下記も指標として該当する。

- ・中性化深さ（鉄筋コンクリート躯体の耐久性の把握を目的とし、場合によっては残存耐用年数の評価に用いる。）
- ・塩化物イオン含有量分布（鉄筋コンクリート躯体の耐久性の把握を目的とし、場合によっては残存耐用年数の評価に用いる。）
- ・腐食電位（鉄筋腐食の状態の把握）
- ・残存耐用年数

これらの指標は、詳細調査（2 次インスペクション）による調査、診断、判定が必要となる。そのため、これらを指標とする場合には、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術（建設大臣官房技術調査室監修）」や「建築保全標準・同解説 3-RC 調査・診断標準仕様書（日本建築学会）」等の信頼できる資料に記載の方法、あるいは性能評価機関による評価であることが望ましい。

Ⅲ-1. 耐久性向上



解説図 4.2.1 健全度の時間経過に伴う低下のイメージ

4.3 適正管理限界状態の設定方法

建物の健全度 H の適正管理限界状態は、補修・改修等の措置が困難となる状態に至る前の状態を目安とする。

【解説】

日本建築学会の指針^{1) 2)}によれば、「維持保全限界状態」が定義されており、建築物の構造体および部材の性能の低下を生じさせる劣化状態のうち、耐久設計の段階でそれ以上低下すると維持保全が極めて困難になると予想される限界の劣化状態、とされている。保全によって建築物の性能が要求性能を下回らないようにするには、建築物の性能が維持保全限界状態を下回らない期間内に、何らかの保全を実施する必要があるとも解説されている。

また、国土交通省総合技術開発プロジェクト「地域安心居住機能の戦略的ストックマネジメント技術の開発（2015-2017）」³⁾では、長寿命化のための修繕・改善プログラム化の手順と考え方にふれており、要求性能水準の設定においては、想定する供用期間およびコストの面を考慮するよう指摘している。

このことから、「適正管理限界状態」の設定においても、計画供用期間や保全計画によって水準は異なるものであることを基本的な考え方とする。その上で、本手法においては、適正管理の指標として建物の健全度 H を用い、供用期間中に鉄筋腐食による使用安全性への危険が大きくなるようにするために対策を取ることを推奨する状態を「適正管理水準」とし、この限界状態の目安として「適正管理限界状態」を設定することとした。

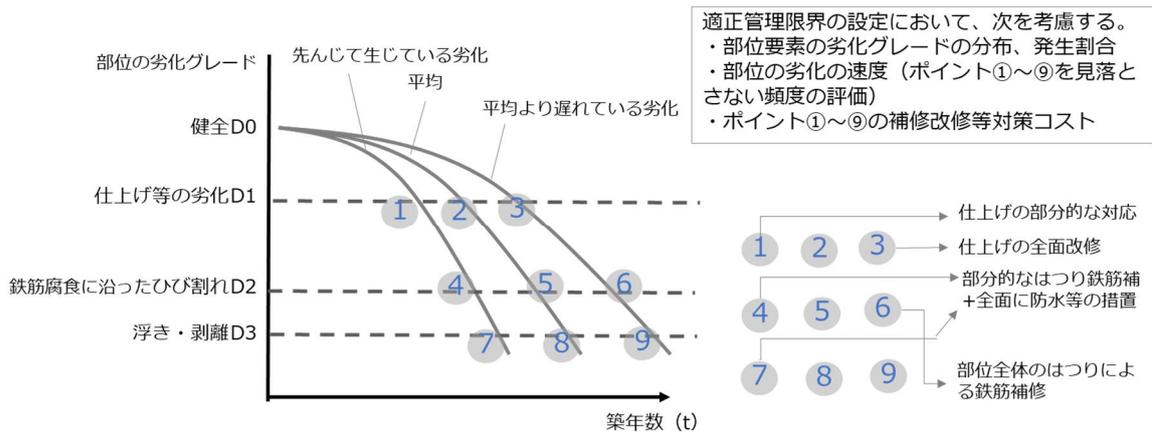
適正管理限界状態を設定するにあたり、コスト面および技術面において、補修・改修等の措置が困難となる状態に至る前の状態とすることが望ましいとした。特に、建物の健全度 H が適正管理限界状態を下回り、補修・改修等の措置が困難となることは避けることが望ましい。従って、建物の健全度 H の低下傾向を参考にしながら、次に評価した時の健全度が適正管理限界状態を下回っていることが予想される場合には、補修・改修等の措置を行うことが適切である。

このとき、建物の健全度 H が同じ評価値であっても、評価の実施頻度によっては、次の評価をした時の建物の健全度 H が適正管理限界状態より大きいのか、下回っているかが異なることがあり得る。例えば、適正管理限界状態を建物の健全度 H を 0.65 と設定し、建物の健全度 H が 1.0 で評価の実施頻度が 12 年の場合と、建物の健全度 H が 0.70 で評価の実施頻度が 12 年の場合を想定すると、前者は次に評価した時に建物の健全度 H が適正管理限界状態を下回る可能性が少ないが、後者は前者に比べて下回る可能性が高い。一方で、建物の健全度 H が 0.70 であっても評価の実施頻度が 1 年であれば、次に評価した時に建物の健全度 H が適正管理限界状態を下回る可能性は、評価の実施頻度を 12 年とする場合と比べて小さいと言えよう。

さらに、コスト面を考慮する上で重要な点として、劣化の状態に応じた補修・改修対策があることが挙げられる。解説図 4.3.1 に劣化進行のばらつきのイメージを示す。例えば、一部の部位要素 J_{ei} の一部のみにて鉄筋腐食によるひび割れが発見され始めた時期であれば、部分的な補修と全面的な鉄筋腐食を遅らせる措置をとるが、部位 J の全面で鉄筋腐食によるひび割れが発見された時期であれば、部位 J の全面ではつり補修を実施する、などである。すなわち、部位要素 J_{ei} において同じ劣化グレードの値でも部位 J の健全度 H_j に応じて、対策の費用が異なることが予想さ

III-1. 耐久性向上

れる。



解説図 4.3.1 劣化進行のばらつきのイメージ

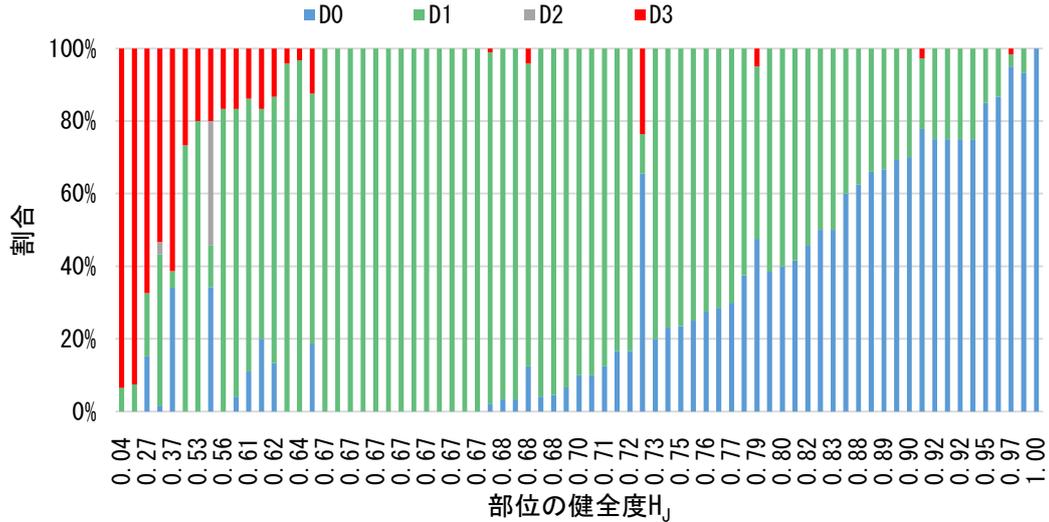
解説図 4.3.2⁴⁾ に、部位の健全度 H_j の評価値とそのときの部位要素 J_{ei} で判定された劣化グレード D_{je} の割合の関係を示す。部位要素の劣化グレード 0 の判定割合が大きくなるにつれて部位の健全度 H_j は大きくなり、一方で、部位要素の劣化グレード 1 や劣化グレード 3 の判定割合が大きくなるにつれて部位 J の健全度 H_j は小さくなっていることがわかる。従って、劣化の進行はおおよそ提案した劣化グレード（表 3.2.1）の順で進行することが確認できる。

しかし一方で、解説図 4.3.2⁴⁾ の横軸の部位の健全度 H_j が 0.70~0.75 の付近で、部位要素の劣化グレード 0、劣化グレード 1 および劣化グレード 3 の割合が、イレギュラーな結果となっていることが散見される。このイレギュラーな結果は、かぶり厚さやコンクリートの条件の違いによって、提案した劣化グレード 1 や劣化グレード 2 として判定する現象が生じている期間が短い可能性があるためと考えられる。解説図 4.3.2 は、実建物の調査から得たが、検証数が十分とは言えないことは注意を要する。

従って、指定する部位要素の劣化グレード D_{je} の判定割合が一定水準を上回った際、または下回った際に、補修・改修に係る費用を考慮して、改修を実施するという判断等を行うことが望ましい。ただし、参考とする部位要素の劣化グレード D_{je} の判定割合を 1 つ定めた際、他の部位要素の劣化グレード D_{je} の判定割合により、部位の健全度 H_j の値は異なることから、設定した劣化グレード以外の劣化グレードのばらつきを考慮することも必要である。

なお、特定の対象として区分した部位 J においても、鉄筋腐食グレードはばらついており⁵⁾、鉄筋腐食が進むにつれて、劣化グレード分布が広がることが予想される。同様に、仕上げの劣化も、劣化度は分布するものと考えられ、さらに部位要素 J_{ei} の範囲内においてもばらつきは存在する。

III-1. 耐久性向上



解説図 4.3.2 部位要素の劣化グレード D_{Je} の判定割合⁵⁾

部位 J における部位要素の劣化グレード D_{Je} のばらつきを考慮するため、パラメトリックスタディを実施した。解説表 4.3.1 に、部位要素 J_{ei} の総数 N を 40 とした場合のパラメトリックスタディの仮定と結果を示す。Case10 と case15 は、部位 J の健全度 H_J がそれぞれ 0.67 と 0.7 と近い値であるが、劣化グレードの内訳は、前者は劣化グレード 1 が 40/40=1 (100%) であり、後者は劣化グレード 3 が 12/40=0.3 (30%) で残りの 70% はすべて劣化グレード 0 である。

ここで、解説表 4.3.2 に、部位の劣化グレードごとの鉄筋の腐食速度（鉄筋径の減少速度）(mm/年) の結果⁶⁾ を示す。結果より、バルコニーの劣化グレード 2 や劣化グレード 3 では、鉄筋腐食の進行速度が速くなることから、部位の健全度の低下速度（次の劣化グレードに移るまでの時間）も速くなる可能性も示唆される。

従って、部位の健全度 H_J が同じ数値のときの部位要素の劣化グレード D_{Je} の割合や、部位の健全度 H_J の低下速度（次の劣化グレードに移るまでの時間）または評価の実施頻度、およびこれらに係る対策の費用を配慮して、適正管理限界状態を設けることが望ましい。

III-1. 耐久性向上

解説表 4.3.1 部位要素 J_{ei} の総数 n を 40 とした場合のパスタの仮定と結果

(a) 劣化グレード 0 から 4 までグラデーション的に劣化することを想定

		case 1	case 2	case 3	case 4	case 5	case 6	case 7	case 8
仮定	部位要 J_{ei} の総数 N	40	40	40	40	40	40	40	40
	劣化グレード 0 の数	40	30	20	10	0	0	0	0
	劣化グレード 1 の数	0	10	10	10	10	0	0	0
	劣化グレード 2 の数	0	0	10	10	10	20	10	0
	劣化グレード 3 の数	0	0	0	10	20	20	30	40
結果	部位の劣化グレード D_j	0	0.25	0.75	1.5	2.25	2.5	2.75	3
	部位の健全度 H_j	1	0.92	0.75	0.5	0.25	0.17	0.08	0

(b) 劣化グレード 0 から 4 まで偏って劣化することを想定

		case 9	case 10	case 11	case 12	case 13	case 14	case 15	case 16	case 17	case 18
仮定	部位要 J_{ei} の総数 N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	劣化グレード 0 の数	40	0	0	0	36	32	28	20	12	0
	劣化グレード 1 の数	0	40	0	0	0	0	0	0	0	20
	劣化グレード 2 の数	0	0	40	0	0	0	0	0	0	20
	劣化グレード 3 の数	0	0	0	40	4	8	12	20	28	0
結果	部位の劣化グレード D_j	0	1	2	3	0.3	0.6	0.9	1.5	2.1	1.5
	部位の健全度 H_j	1	0.67	0.33	0	0.9	0.8	0.7	0.5	0.3	0.5

解説表 4.3.2 鉄筋の腐食速度（鉄筋径の減少速度）(mm/年)⁶⁾

部位の劣化グレード D_j		鉄筋腐食速度（深さ減量）(mm/年)				
		バルコニー	妻壁	居室界壁床	浴室壁床	妻壁居室側
健全	0	0.01		0.01	0.00	0.02
初期の劣化	1	0.01		0.02	0.02	0.06
中期の劣化	2	0.04		0.02		0.03
限界状態	3	0.04				

* 斜線は目視グレードで劣化現象が確認されなかったため取得されていないか、中性化が鉄筋に未到達である。

4.4 長寿命化のための対策および適正管理限界状態の目安

- ・建物の健全度 H が適正管理限界状態以上であることを定期的に確認する。建物の健全度 H とその主な状態および状態の例を表 4.4.1 に示す。
- ・健全度 H が適正管理限界状態を下回る場合には、建物の健全度 H の評価値および目標とする供用期間を考慮した上で、使用安全性の確保のための対策、または残存耐用年数向上のための対策を実施する。

表 4.4.1 建物の健全度 H とその主な状態

健全度	主な状態	状態の例
1.00	健全	劣化事象が見られない。
0.8	初期の劣化。	・部位要素 J_{ei} の判定の 10 割が仕上げの劣化。 ・局所的な剥離・鉄筋露出。
0.65	適正管理限界状態	・部位要素 J_{ei} の判定の多くで仕上げの劣化であることに加え、鉄筋腐食による劣化が散見される。 ・部位要素 J_{ei} の判定の 3 割が剥離・鉄筋露出。
0.50	劣化への抵抗性がごく小さい状態。 健全度の低下速度が速くなっている。	・部位要素 J_{ei} の判定の 5 割が剥離・鉄筋露出。 ・部位要素 J_{ei} の判定の 5 割が鉄筋腐食による劣化、かつ 5 割が仕上げの劣化。
0.30	同上。	・部位要素 J_{ei} の判定の 10 割が鉄筋腐食によるひび割れ。 ・部位要素 J_{ei} の判定の多くが鉄筋腐食によるひび割れであることに加え、剥離・鉄筋露出が散見される。 ・部位要素 J_{ei} の判定の 7 割が剥離・鉄筋露出。
0	使用安全性の限界	・部位要素 J_{ei} の判定の 10 割が剥離・鉄筋露出。

【解説】

ここで設定した適正管理限界状態は、使用安全性の限界に至らないようにするために、対策を取ることを推奨する状態の限界としているため、この水準を下回った場合でも、ただちに部位の使用安全性の限界に至るとは限らず、また一方で、この水準以上でも、ごく部分的に使用安全性の欠落が生じる可能性はある。

なお、建物の健全度 H が適正管理限界状態を下回る場合には、建物の健全度 H の評価結果および目標とする供用期間を考慮した上で、長寿命化のための対策を実施することを推奨する。長寿命化のための対策は、材料劣化 1 つ 1 つへの劣化診断・評価および対策を行うことに他ならない。そのため、建築改修工事監理指針（建築保全センター）¹⁾ や建築保全標準（日本建築学会）²⁾などを参照するとよい。ただし、建物の健全度 H が適正管理限界状態を下回る場合でも、今後使用を予定している供用期間が短期間であれば、必ずしも長寿命化のための対策を実施する必要はない。ただしその場合でも、引続きモニタリングを実施し、適宜、使用安全性を確保するための応急的な処置（落下防止措置、立入り禁止措置等）を行うことは必要である。

また、建物の健全度 H が適正管理限界状態を下回ったが、すぐに対策を実施しない場合にも、健全度 H の評価を定期的実施し、状況の把握に務める。

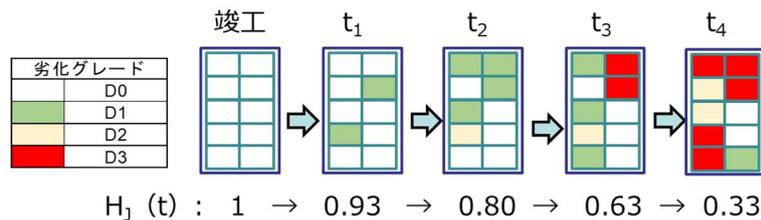
III-1. 耐久性向上

表 4.4.1 に示す建物の健全度 H と適正管理限界状態の目安は、4.3 の適正管理限界状態の設定方法の考え方にに基づき、目安として示した。すなわち、①部位の健全度 H_j が同じ数値のときの部位要素の劣化グレード D_{je} の割合や、②部位の健全度 H_j の低下速度（次の劣化グレードに移るまでの時間）または評価の実施頻度、および③これらに係る対策の費用を配慮した。それぞれ考慮した内容について詳細を下記に示す。

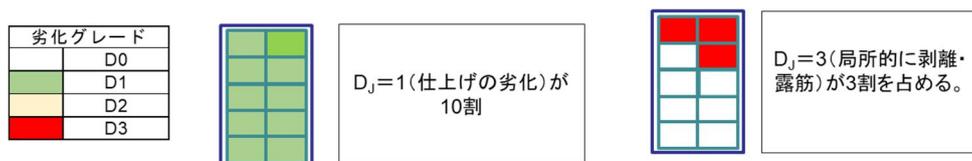
- ① 部位の健全度 H_j が同じ数値のときの部位要素の劣化グレード D_{je} の割合、については解説図 4.3.1 および解説表 4.3.1 を参照した。
- ② 部位の健全度 H_j の低下速度（次の劣化グレードに移るまでの時間）または評価の実施頻度、については、解説表 4.3.2 鉄筋の腐食速度（鉄筋径の減少速度）(mm/年) を参照し、部位の劣化グレード D_j が劣化グレード 2 以上では、劣化のスピードが速くなることを考慮した。また、調査の実施は専門的な知識を有する者が実施することから、毎年実施するようなものではないことも考慮した。
- ③ 補修・改修技術の現状として、鉄筋腐食に対する補修方法は、仕上げを剥がし、かぶりコンクリートをはつり、鉄筋を取り替える、など手間（コスト）がかかること、加えて、これらの鉄筋腐食に対する補修方法の耐用年数は明らかになっていない状況であるため、部位要素で判定される劣化グレード D_{je} は、劣化グレード 2 が多くならない状態で、補修・改修を実施することが望ましい。

これら①②③を総合的に勘案すると、建物の健全度が 0.5 では、劣化の進行が早くなり、すなわち健全度の低下速度が速くなっている状態であることから、対策をとることを推奨する状態の限界として手遅れである。このため、建物の健全度 0.65 を適正管理限界状態とした。解説図 4.4.1 に、妻壁を想定した部位の健全度 H_j と劣化の状態の例を示す。

また、評価の実施頻度は、竣工後は建築基準法 12 条による定期点検で定められる年数を参考にし、建物の健全度 H が低下し、適正管理限界状態に近づいたとき、および下回った際には、建物の健全度 H が小さいほど使用安全性の限界に至るまでの期間が短くなることを推測されることを考慮し、建物の健全度 H が小さいほど評価の実施頻度の年数を短くするとよい。



(a) 部位の健全度 H_j と部位要素の劣化グレードの分布のイメージ



(b) 健全度がおよそ 0.7 のケース 均一劣化 (左) と偏在的劣化 (右) のどちらもあり得る。

解説図 4.4.1 部位の健全度 H_j と劣化の状態のイメージ (妻壁想定)

第4章 参考文献

- 1) 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
- 2) 日本建築学会、建築保全標準・同解説指針 JAMS1 主旨／一般共通事項、2021
- 3) 国土技術政策総合研究所、地域安心居住機能の戦略的ストックマネジメント技術の開発、国総研プロジェクト研究報告第62号、2019
- 4) N. Tsuchiya etc., Proposal of Soundness Index for Existing RC Apartment Building for Proper Management Through Visual Monitoring, Proceeding of XVI International Conference on Durability of Building Materials and Components, 2023
- 5) 土屋直子他、高経年した鉄筋コンクリート造集合住宅の妻壁およびバルコニーの鉄筋腐食の発生分布の実態、コンクリート工学年次論文集、Vol.44、pp.418-423、2022
- 6) 土屋直子、根本かおり、三島直生、既存鉄筋コンクリート住宅の長寿命化に係る耐久性評価に関する研究その3 使用安全性の限界状態および鉄筋腐食進行に及ぼす要因について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1109-1110、2021

第Ⅲ-2 編

付録 1

既存鉄筋コンクリート造集合住宅の 残存耐用年数の評価手法の検討

1. はじめに

既存建築物の長寿命化に向けては、計画供用期間および建物の残存耐用年数の両方を踏まえて、補修・改修等の実施計画を立てることが望ましい。そのため、既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価手法について検討した。評価手法の素案を示したが、例えば実建物を対象とした調査等を通じた十分な検証ができていないこと、また、実用的な試験方法の検証実験ができなかったことを踏まえて、評価手法は素案とした。そのため、本報告書第Ⅲ-2編付録1では、既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価手法について検討した内容を付録として残すとともに、今後の課題や展望を記す。

2章では、既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価手法（素案）として、ガイドライン体裁として、検討していた内容を示す。

3章では、2章で提案した評価手法において必要となる健全度の低下速度の評価についてスタディした内容を記す。

4章では、2章で提案した残存耐用年数の評価についてスタディした内容を示す。

3章および4章のいずれにおいても、本報告書第Ⅲ-1編で提案した部位の健全度 $H_j(t)$ を用いた場合、および従来からの耐久性の指標として一般的に用いられている中性化や鉄筋腐食の進行速度に着眼した場合について検討した。

2. 既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価手法（素案）

2.1 評価手法の全体概要

既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価の手順は、①現在の健全度を評価し、②健全度の低下速度を評価し、③残存耐用年数を評価する。

【解説】

図 2.1.1 に既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価の全体イメージを示す。健全度を縦軸とし、築年数（竣工時からの経過年数）を横軸とした場合、築年数が 0 年である新築時の健全度は、時間の経過とともに劣化が進行することにより低下し、やがては使用安全性の限界に至る。現在が供用期間中のある時期 T1、使用安全性の限界状態に至るのは T2 だと仮定すると、既存鉄筋コンクリート部位の残存耐用年数は T1 と T2 の差である。このとき、現在 T1 から使用安全性の限界状態の T2 に至る時間は、健全度の低下速度を用いて推測が可能である。

健全度の低下速度が大きい場合（図 2.1.1 での傾きが大きい場合）には使用安全性の限界状態に至るまでの期間は短くなるが、健全度の低下速度が小さい場合（図 2.1.1 での傾きが小さい場合）には、使用安全性の限界状態に至るまでの期間は長くなる。また、劣化箇所の補修や改修により、健全度を回復させた場合にも、使用安全性の限界状態に至るまでの期間は長くなる（T1 と T3 の差）。

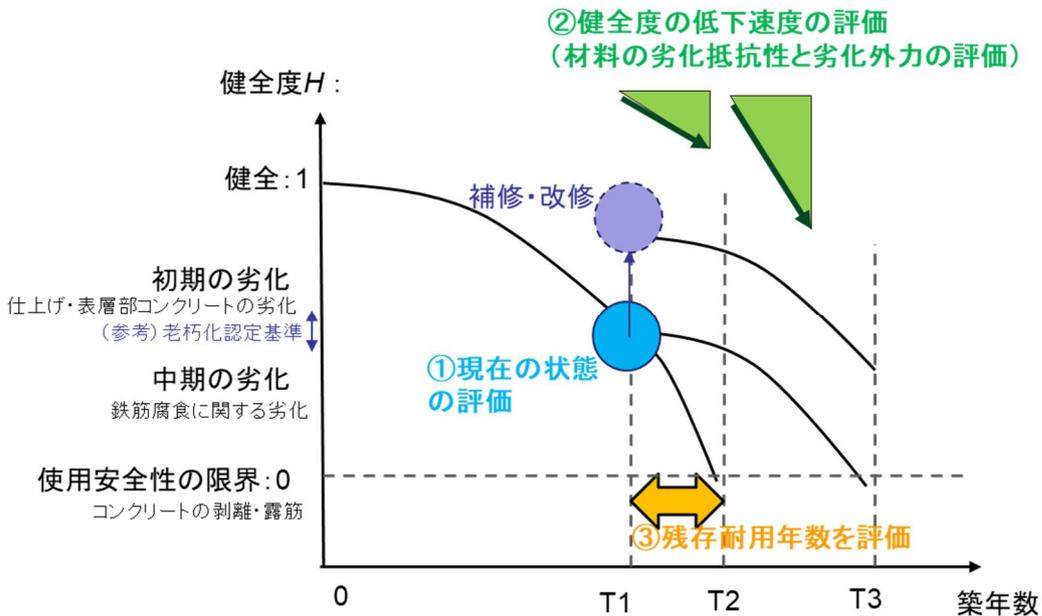


図 2.1.1 既存鉄筋コンクリート部位の残存耐用年数の評価の全体イメージ

2.2 現在の健全度の評価

現在の建物の健全度の状況は、下記 1) ～3) の手順により評価する。

1) 対象部位の劣化グレードの評価

- ・対象とする部位 J を複数に分割した一要素を部位要素 J_{ei} とし、部位要素の劣化グレード D_{je} の評点 α を加重平均したものを、部位 J の劣化グレード D_J とする。
- ・部位 J は、評価対象とする部位のうち、特定の対象の部位を指す。評価対象とする部位は外壁（東面、南面、西面および北面の各方位）、階段室、バルコニー、共用廊下、屋根等、とする。
- ・部位要素 J_{ei} は、鉛直方向は各階で区切り、水平方向は 1 住戸ごとに区切ったものを 1 要素とすることを基本とする。
- ・部位要素 J_{ei} の劣化グレードは、1 つの要素範囲内で出現している劣化グレードのうち最も大きな劣化グレードを採用する。
- ・劣化グレードは、本報告書第Ⅲ-1 編表 3.2.1 に示すとおりとする。（表の再掲は省略）
- ・劣化グレードの評価を目視等において判定する場合は、本報告書第Ⅲ-1 編表 3.2.2 による。（表の再掲は省略）

2) 対象部位の健全度の評価

- ・部位 J の劣化グレード D_J と劣化グレード 3 の評点の比を 1 から差し引いた値を対象部位の健全度 H_J とする。

3) 建物の健全度の評価

- ・部位の健全度 H_J のうち、最小となるものを、建物の健全度 H とする。

【解説】

現在の建物の健全度 H の評価については、本報告書第Ⅲ-1 編既存鉄筋コンクリート造集合住宅の健全度の評価手法および長寿命化のための適正管理手法（案）第 3 章と同じである。ただし、時間の概念をいれるために、部位の劣化グレード D_J 、部位の健全度 H_J および建物の健全度 H の評価において、築年数 t を用いている。

1) 部位の劣化グレード D_J を式 1 により評価する。

$$D_J(t) = \frac{\sum \alpha_{je}}{N} \quad \text{式 1}$$

ここに、

$D_J(t)$: 築年数 t における部位 J の劣化グレード

α_{je} : 部位要素 J_{ei} において判定された劣化グレードの評点

J : 評価対象とする特定の部位

J_{ei} : 部位要素（部位 J を複数に分割した一要素）（ $i: 1, 2, 3 \cdots n$ ）

N : 部位要素 J_{ei} の総数

t : 築年数

2) 築年数 t における部位 J が保有する健全度 $H_J(t)$ は、式 2 で示される。

$$H_J(t) = 1 - \frac{D_J(t)}{\text{(劣化グレード 3 の評点)}} \quad \text{式 2}$$

劣化グレード 3 の評点は、本報告書第Ⅲ-1 編表 3.2.1 に示すとおりとする。

3) 築年数 t における建物の健全度 $H(t)$ は、式 3 で示される。

$$H(t) = \text{Min}\{H_J(t)\} \quad \text{式 3}$$

ここに、 $H(t)$: 築年数 t における建物の健全度

2.3 健全度の低下速度の評価

健全度の低下速度 $V(t)$ の評価は、材料の劣化抵抗性と劣化外力を評価するものとし、健全度 $H(t)$ および築年数 t を用いて単位期間あたりの変化量を評価する。

低下速度を評価する際に用いる健全度 $H(t)$ および築年数 t は、定期点検にて健全度の評価を実施することを前提とし、直近の 2 点の健全度 $H(t)$ を用いることを基本とする。

【解説】

ある性能の変化速度を得ることにより、ある時点から、未来のある時点に至るまでの時間が推定できる。すなわち、健全度の低下速度が把握できると、現時点の健全度から使用安全性が懸念される水準に至るまでの時間を推定できる。そのため健全度の低下速度は残存耐用年数を推定する上で必要となる。なお、ここで扱う健全度とは、部位 J の健全度 $H_J(t)$ および建物の健全度 $H(t)$ いずれも該当するが、以降は健全度 $H(t)$ として表記する。

健全度の低下速度 $V(t)$ は、新築から時間が経過している既存鉄筋コンクリート建築物を対象として、オンサイトの測定により、劣化事象の変化の速度を評価する。そのため、健全度の低下速度 $V(t)$ は、劣化外力および材料の持つ劣化抵抗性を合わせて評価した指標となっている。

時間変化に伴う、健全度の変化 ΔH は式 4 となり、健全度の低下速度 $V(t)$ は、式 5 で示される。健全度の低下速度を得るためには、測定の結果が 2 点必要である。

$$\Delta H = H(t) - H(t - \Delta t) \quad \text{式 4}$$

$$V(t) = -\frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{式 5}$$

ここに、

$H(t)$: 築年数 t の健全度

ΔH : 時間変化に伴う健全度の変化

$V(t)$: 健全度の低下速度。ただし、 $V(t) \leq 0$ とする。

なお、健全度の低下速度 $V(t)$ は築年数 t や健全度 $H(t)$ 、補修・改修の有無に依存すると想定している。例えば、竣工後から築年数 5 年では、健全度の変化の程度は小さく、そのため低下速度の絶対値は小さく、築年数 40 年から 45 年では、健全度の変化の程度は大きく、そのため低下速度の絶対値は大きいと予想される（あくまでも一般的に想定されているもので、数値的な根拠は

ない)。すなわち、図 2.1.1 に示すように、補修や改修等を実施しない場合には、築年数が大きいほど、または健全度が小さいほど、低下速度の絶対値は大きくなることが想定され、一方で補修・改修等の耐久性向上のための措置を実施した場合には、健全度の低下速度 $V(t)$ は維持または向上することが想定される。さらに、健全度の低下速度 $V(t)$ の算出に用いる測定値が適切ではなかった場合、残存耐用年数の推定が大きく外れる可能性が高いことに留意が必要である。例えば、築年数が 40 年の残存耐用年数を推定しようとした場合に、竣工後の健全度と築年数 10 年の健全度から得た性能低下速度を用いてしまうと、残存耐用年数を大きく見積もってしまうことが予想されるなどである。

従って、健全度の低下速度は精緻に取得することが必要であり、そのために、低下速度の算出においては、直近の 2 点の健全度を用いることが望ましいと考えられる。その際、定期的な調査の頻度が粗いほど信頼性は低くなり、頻度が細かいほど値の信頼性は高くなることが考えられる。ただし、補修・改修により、直近の健全度が向上した場合には、健全度の低下速度の算出に用いることはできない。

このほか、建物の劣化状況や改修・補修の履歴等の過去の建物の保全に関するデータ管理も重要である。竣工時点で築年数 $t=0$ 、健全度 $H(t)=1$ であるが、建物の全体にわたり補修・改修を実施した時点でも健全度 $H(t)=1$ である。また、部分的に補修・改修した場合、健全度 $H(t)$ は 1 まで完全に回復はしなくても、やや回復した値を示すことがある¹⁾。このような、健全度の低下および上昇の挙動の原因を正しく認識するためには、改修・補修の履歴が必須である。

なお、現段階では健全度に関する十分な実績データの取得ができていないため、健全度の低下速度の標準値を示すことができなかった。そのため、多くの事例を集積し、標準値や参考値を示すことは、今後の課題である。

また、健全度の低下速度 $V(t)$ の評価においては、健全度の単位期間あたりの変化量 ΔH より評価する方法のほか、劣化機構に則った各材料や部材の劣化進行に係る物性の変化速度により評価する方法も可能である。

一般的に、材料や部材の劣化の速度は下記の 2 点から決まる。

- ・材料や部材が曝される環境から受ける劣化外力の強さ
- ・材料や部材がもつ劣化への抵抗性

劣化外力が大きいほど劣化は速く、劣化への抵抗性が大きいほど劣化は遅くなる。これに関し、鉄筋腐食の進行に関するメカニズム研究は多く、これらの多くの知見の延長において鉄筋腐食の進行速度の取得および活用が見込まれる。なお、仕上げの劣化、中性化の進行も鉄筋腐食の進行と関係している。

表 2.3.1 に、鉄筋の腐食速度（鉄筋径（mm）の減少速度）（mm/年）の一例を示す²⁾。表 2.3.1 は、鉄筋の腐食速度を表す方法として、鉄筋径の減少量を測定したものであるが、腐食電流量を測定する手法などの活用の可能性もある。ただし、いずれの方法も、一般標準化するに至る知見の整理には至っておらず、今後も研究および知見の集積を行う必要がある。

表 2.3.1 鉄筋の腐食速度（鉄筋径の減少速度）（mm/年）²⁾

部位の劣化グレード D _j		鉄筋腐食速度（深さ減量）（mm/年）				
		バルコニー	妻壁	居室界壁床	浴室壁床	妻壁居室側
健全	0	0.01		0.01	0.00	0.02
初期の劣化	1	0.01		0.02	0.02	0.06
中期の劣化	2	0.04		0.02		0.03
限界状態	3	0.04				

* 斜線は目視グレードで劣化現象が確認されなかったため取得されていないか、中性化が鉄筋に未到達である。

なお、旧建設省の総合技術開発プロジェクトの報告書³⁾や日本建築学会の指針⁴⁾において、「耐久性」は「建築物またはその部分の劣化に対する抵抗性^{3) 4)}」と定義されている。従って、健全度の低下速度 $V(t)$ は、耐久性の逆数に相当すると考えることができる。

ちなみに、「耐久性能」も用語の定義がなされており、その定義は、「建築物またはその部分の劣化に対する抵抗性のある水準以上の状態で継続して維持する能力³⁾」や「建築物またはその部分の性能のある水準以上の状態で継続して維持する能力⁴⁾」である。すなわち、耐久性はある点における性能を示すことに対し、耐久性能は一定の期間における性能も含まれていると解釈できる。本報告書第Ⅲ-1編表 3.2.1の劣化グレードの評点を再検討し、図 2.1.1における②健全性の低下速度が一定となるような劣化グレードの評点の設定を行うことができれば、健全性を耐久性能と読み替えることができ、保有している耐久性能として扱うことができる。

2.4 残存耐用年数の評価

残存耐用年数 T の評価は、健全度の低下速度 $V(t)$ を用いて、築年数 t の健全度 $H(t)$ から、設定する限界状態 H_{LIMIT} までの期間を評価することによる。

【解説】

築年数 t_i のとき、健全度 $H(t_i)$ とする。健全度が、 $H(t_0)$ 、 $H(t_1)$ 、 $H(t_2)$ 、・・・と変化し、設定する限界状態 H_{LIMIT} に至るまでにかかる時間を、残存耐用年数 T とする。限界状態の設定は、目的に応じて使用安全性の限界状態や適正管理限界状態などを設定する。ここでは、限界状態 H_{LIMIT} は、使用安全性が懸念される状態とし、健全度 H_{LIMIT} が 0 のときとする。残存耐用年数 T は、健全度 $H(t_{i-1})$ が健全度 $H(t_i)$ だけ遷移にかかる時間 T_i の和となり、式 6 で示される。

$$T = \sum_i T_i \quad \text{式 6}$$

ここに、

T : 残存耐用年数

T_i : 健全度 $H(t_i)$ から健全度 $H(t_{i+1})$ の遷移にかかる時間

ただし、 $1 \geq H(t_0) > H(t_1) > H(t_2) > \dots > H(t_{i-1}) > H(t_i) > \dots > H_{LIMIT} = 0$

i : 0 以上の整数。

次に、健全度 $H(t_i)$ が $H(t_{i+1})$ に変化するまでにかかる時間 T_i の推測は、直近の健全度の低下速度 $V(t_i)$ 、を用いて、式 7、式 8 で示される。

$$T_i = \frac{H(t_{i+1}) - H(t_i)}{V(t_i)} \quad \text{式 7}$$

ここに、

$V(t_i)$: 健全度 $H(t_{i-1})$ から健全度 $H(t_i)$ に変化するときの健全度の低下速度

健全度の低下速度 $V(t_i)$ は、一般化された参照値を用いるか、または式 8 のように、実測したデータである直近の 2 点の健全度 $H(t_{i-1})$ 、健全度 $H(t_i)$ 、を用いる。ただし、健全度の低下とともに健全度の低下速度が速くなることが想定される場合、式 8 による推定は、残存耐用年数を大きく見積もってしまう可能性がある点に留意が必要である。

$$V(t_i) = \frac{H(t_i) - H(t_{i-1})}{t_i - t_{i-1}} \quad \text{式 8}$$

なお、健全度のかわりに、中性化深さや鉄筋腐食量を指標として用いる方法も考えられる。

第 2 章 参考文献

- 1) 土屋 直子、根本 かおり、三島 直生：既存鉄筋コンクリート住宅の長寿命化に係る耐久性評価に関する研究その 4 実建物を対象としたケーススタディ、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1237-1238、2022
- 2) 土屋 直子、根本 かおり、三島 直生：既存鉄筋コンクリート住宅の長寿命化に係る耐久性評価に関する研究その 3 使用安全性の限界状態および鉄筋腐食進行に及ぼす要因について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1109-1110、2021
- 3) 建設大臣官房技術調査室監修：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術、技報堂出版、1986
- 4) 日本建築学会：建築物・部材・材料の耐久設計手法・同解説、2003

3. 健全度の低下速度の評価の検討

3.1 健全度の定期的なモニタリングを用いた例

3.1.1 対象とした建物の概要

対象とする部位の健全度 H_j の低下速度 $V_j(t)$ を評価するケーススタディを実施した。対象とした建物の概要を表 3.1.1 に示す。建物 A および C-1 の南面外壁、西面外壁、およびバルコニー水平部を対象とした。建物の補修・改修に関する履歴を確認したところ、建物 A は、1993 年に全面改修がなされており、また建物 C-1 は、2016 年以降にところどころ鉄筋露出に対する応急処置がなされていた。建物 I および C-1 は、供用途中において全面改修がされたと考えられるものの、これらに関する情報は残されていない。

表 3.1.1 対象とした建物の概要

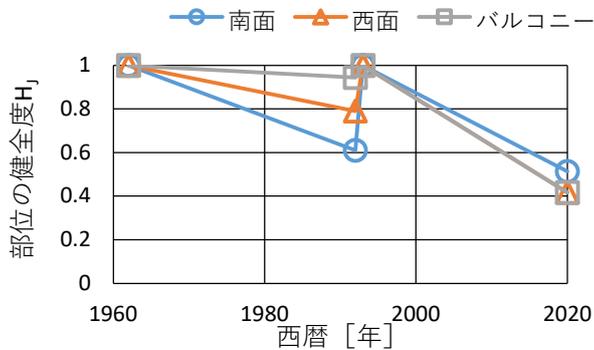
ケース	建物名	部位	竣工年	調査年	備考
1	A	南面外壁、 西面外壁、 バルコニー水平部	1962	1992	1993 年に全面改修
2	A		1962	2020	
3	I		1972	2020	
4	C-1		1971	2016	2016 年以降に所々応急処置
5	C-1		1971	2020	

3.1.2 結果

(1) 部位の健全度 H_j の評価結果

図 3.1.1 に、評価対象とした部位の健全度 H_j の評価結果を示す。部位の健全度 H_j は目視で評価しているため、全面改修の実施後は劣化グレード H_j を 0 としている。そのため、全面改修の履歴があった建物 A については実線で示し、建物 I および建物 C-1 においては、全面改修の実施がされていると想定されるものの履歴情報が残されていなかったため点線としている。

結果より、多くの部位で、竣工時より調査を実施した各年次において部位の健全度 H_j が小さくなっていることがわかる。また、2020 年において、建物 I の南面および東面の外壁および建物 C-1 の南面外壁は、相対的に部位の健全度 H_j が大きく、いずれの建物においてもバルコニーの健全度 H_j が小さいことがわかる。



(a) 建物 A

III-2. 耐久性向上 付録 1

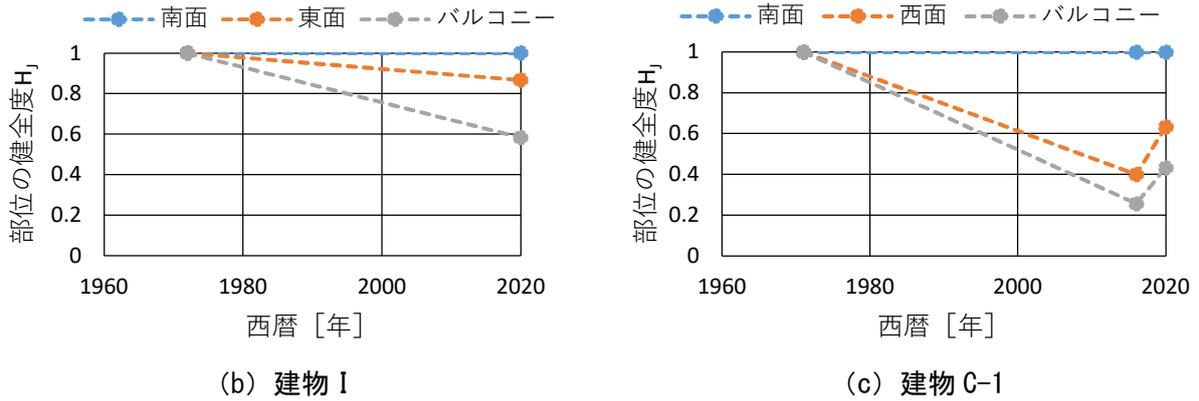


図 3.1.1 部位の健全度 H_j の評価結果

(2) 部位の健全度の低下速度 $V_j(t)$ の算出結果

表 3.1.2 に、評価対象とした特定の部位の健全度の低下速度 $V_j(t)$ の算出結果を示す。建物 I および建物 C-1 は履歴情報が残されていなかったため参考値である。

表 3.1.2 部位の健全度の低下速度 $V_j(t)$

ケース	建物	Δt	南面	西面	バルコニー
1	A	1962~1992	-0.013	-0.007	-0.002
2	A	1993~2020	-0.018	-0.022	-0.022
3	I	1972~2020	0	-0.003	-0.009
4	C-1	1971~2016	0	-0.013	-0.017
5	C-1	2016~2020	0	+0.058	+0.044

ケース 1 とケース 2 を比較すると、竣工後の最初の 30 年（ケース 1）より、全面改修後の 27 年（ケース 2）の部位の健全度の低下速度 V_j の絶対値が大きいことが分かる。南面外壁で健全度の低下速度 V_j の絶対値が少し大きくなっており、西面外壁およびバルコニーでは特に大きくなっている。1993 年に補修した箇所は、2020 年において再劣化は確認されなかった。すなわち、補修した箇所とは別の箇所において経年劣化が進んでおり、その劣化の量が経年とともに増えていると考察できる。

従って、ケース 1 の算出結果を用いて次の 30 年後の健全度 H_j の予測を行った場合、西面外壁やバルコニーの予測値は乖離すると考えられる。残存耐用年数の予測のためには、今回のケーススタディのように、30 年ごとの評価結果ではなく、例えば 3 年ごとの評価結果を用いることなどが必要であると考えられ、検討を続ける必要がある。

また、ケース 5 について、値が正となっている理由は、2016 年以降に鉄筋露出部の応急処置を実施していることが一因であると考えられる。

3.2 中性化および鉄筋腐食の進行速度を用いた例

3.2.1 測定概要

調査を行った建物を、表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 対象とした建物の概要

記号	所在地	構造規模	竣工年	調査年
A	富山	鉄筋コンクリート造 4 階	1962	2020
B-1	鹿児島	鉄筋コンクリート造 5 階	1972	2020
B-2	鹿児島	鉄筋コンクリート造 5 階	1974	2020
C-1	福岡	鉄筋コンクリート造 5 階	1971	2020
C-2	福岡	鉄筋コンクリート造 5 階	1971	2020
D	岐阜	鉄筋コンクリート造 4 階	1951	2020
E	東京	鉄筋コンクリート造 7 階	1971	2020
F-1	宮城	鉄筋コンクリート造 4 階	1970	2020
F-2	宮城	鉄筋コンクリート造 4 階	1972	2020
I	長崎	鉄筋コンクリート造 5 階	1972	2020

調査部位および箇所数は、バルコニー：住戸数の約 4 割、妻壁：片面について階数の 4 倍、居室界壁・床：3～6 箇所、浴室の壁・床：3～6 箇所、および階段室の壁床：3～6 箇所を基本とした。調査項目は、目視による劣化事象の確認、JIS A 1152 に準じた中性化深さ、かぶり厚さおよび鉄筋径である。

目視による劣化事象の確認では、本報告書第Ⅲ-1 編表 3.2.1 および本報告書第Ⅲ-1 編表 3.2.2 により目視インデックスおよび劣化グレードを評価した。鉄筋腐食速度は、鉄筋腐食減量（深さ）（mm）を中性化が鉄筋に到達して以降の築年数 t で除したものである。すなわち、鉄筋腐食の開始する時期を JIS A 1152 による中性化深さが鉄筋に到達した時期とした。中性化が鉄筋に到達した年次は、測定した中性化深さから中性化速度係数を算出し、その係数を用いて計算した。

3.2.2 結果¹⁾

図 3.2.1 に、部位の劣化グレードと鉄筋腐食速度（mm/年）の関係を、図 3.2.2 に部位の劣化グレードと中性化速度係数（mm/√年）の結果示す。ここでの鉄筋腐食速度（mm/年）とは、鉄筋直径の減少量（mm）を、中性化が鉄筋に到達してからの年数で除したものである。なお、複数の建物において内在塩分であろう塩化物イオン含有量が測定された建物があり、これらの調査結果を含んでいる。

結果より、部位により劣化の進行に違いがあることがわかる。また、既往の知見で示されるように中性化速度係数は非常にばらつきがみられるものの^{2) 3)}、居室で値が大きい傾向がみられることが確認された。また、鉄筋腐食速度もばらつきが見られ、劣化グレードが大きくなるにつれて大きくなる傾向であることが分かる。

また、これらの結果の平均値を表 3.2.2 に示す。

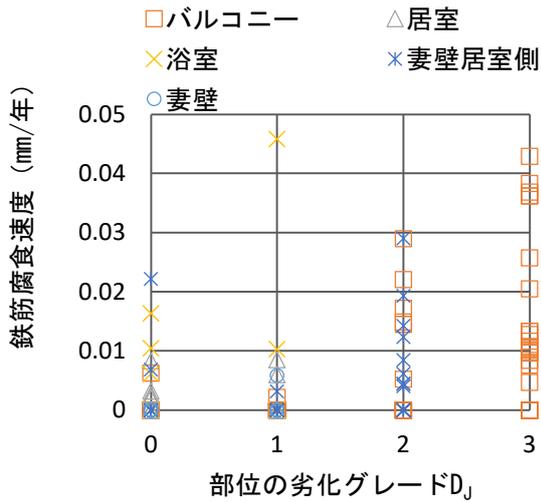


図 3.2.1 部位の劣化グレードと鉄筋腐食速度 (mm/年) の関係¹⁾

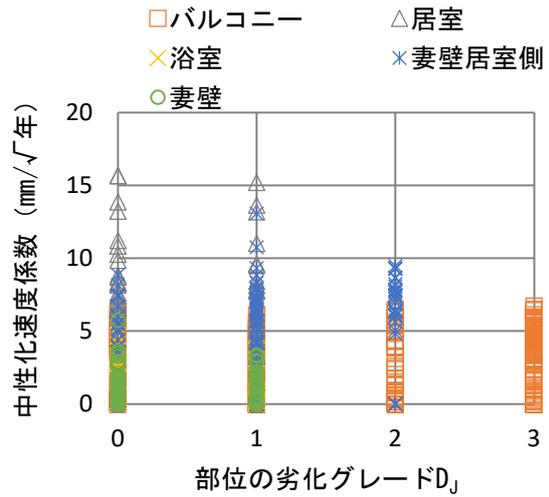


図 3.2.2 部位の劣化グレードと中性化速度係数 (mm/√年) の関係¹⁾

表 3.2.2 中性化速度係数、鉄筋腐食速度および鉄筋腐食減量 (深さ) (mm) の平均¹⁾

目視 イン デッ クス No.	劣化 グレ ード	鉄 筋 腐 食 グレ ード	鉄 筋 腐 食 減 量 mm	鉄筋腐食速度					中性化速度係数				
				mm/t					mm/√ t				
				バル コニー	妻 壁	居 室 界 壁 床	浴 室 壁 床	妻 壁 居 室 側	バル コニー	妻 壁	居 室 界 壁 床	浴 室 壁 床	妻 壁 居 室 側
1	0	2.11	0.23	0.01	/	0.01	0.00	0.02	2.65	0.92	6.97	0.44	8.58
3	1	2.03	0.34	0.01	/	0.02	0.02	0.06	3.11	5.93	7.37	0.50	7.17
6	2	2.85	0.48	0.04	/	0.02	/	0.03	5.17	/	15.19	/	7.49
7	3	3.42	0.67	0.03	/	/	/	/	4.94	/	/	/	/
8		3.29	0.75	0.07	/	/	/	/	3.97	/	/	/	/
9		2.94	0.86	0.04	/	/	/	/	4.50	/	/	/	/

なお、表 2.3.1 鉄筋の腐食速度 (鉄筋径の減少速度) (mm/年) はこのデータから得られたものである。

ここでの手法は、個別の建物を対象とした鉄筋腐食の進行速度の取得例ではなく、一般的な値を得ることを目標とし、多くの調査結果を平均して示したものである。知見のひとつとして示すが、今後も検証が必要なものであることに注意されたい。

4. 残存耐用年数の評価の検討

4.1 健全度の定期的なモニタリングを用いた例

4.1.1 ケーススタディについての設定

式 6 および式 7 を用いて残存耐用年数 T を算出する。ただし、ここで設定する限界状態は、使用安全性の限界ではなく、適正管理限界状態とした。そのため、適正管理限界状態までの残年数 T' と表す。3.1 で健全度の低下速度の算出検討を行った建物 A を対象としてスタディする。以下の設定に基づき、ケーススタディを行った。

- ・健全度の低下速度 $V(t)$: 表 3.1.2 のケース 1 を用いる。
 - ・健全度 $H(t)$ 評価の実施年 : 竣工時および 2000 年に実施したと仮定する。
 - ・設定する限界状態 : 適正管理限界状態とする。値は、本報告書第Ⅲ-1 編表 4.4.1 の設定とする。
- なお、健全度の低下速度 $V(t)$ は、健全度によらず一定と仮定した。

4.1.2 結果

南面の壁の計算例 :

- ・健全度の低下速度は -0.013 (-/年)
- ・現在の健全度は 0.9
- ・適正管理限界状態は 0.65

であり、健全度の低下速度は健全度 (時間) によらず一定であるため、式 7 より

$$T' = (0.65 - 0.9) / (-0.013) = 19.23 \text{ (年)}$$

結果一覧を、表 4.1.1 に示す。

表 4.1.1 残存耐用年数 T のケーススタディ結果例

	南面	西面	バルコニー	備考
部位の健全度の低下速度 V_j (-/年)	-0.013	-0.007	-0.002	表 3.1.2 より
現在の部位の健全度 (-)	0.9	0.85	0.85	西暦 2000 年時点を想定
適正管理限界状態 (-)	0.65	0.65	0.65	
適正管理限界状態までの残年数 T' (年)	19.23	28.57	100	式 6、式 7 より

実際の建物の調査結果である図 3.1.1 の結果では、特にバルコニーや西面壁では、表 4.1.1 の算出結果より早く、健全度が 0.65 を下回っている。すなわち、残存耐用年数の推定結果は、実際より大きい結果となった。この誤差は、竣工から 20 年での健全度の低下速度よりも、その後の 20 年のほうが性能の低下が速いことが原因であると考えられる。従って、健全度の低下速度の取得は、より頻繁にモニタリングした結果から、近年のデータを用いて外挿することで、誤差を小さくすることができると思われる。

4.2 中性化および鉄筋腐食の進行速度を用いた例

4.2.1 ケーススタディについての設定

式 6 および式 7 を用いて残存耐用年数 T を算出する。以下の設定に基づき、ケーススタディを行った。

- ・最小かぶり厚さは 2cm とする。
- ・中性化が最小かぶりに到達したときを劣化グレード 1 の時とし、それ以降、鉄筋の腐食が開始することとする。
- ・部位の健全度の低下速度 $V_j(t)$ は、中性化速度係数および鉄筋腐食減量（深さ）を用いた速度とし、実建物調査から得た表 3.2.2 を用いる。
- ・設定する限界状態は、使用安全性に係る限界状態（劣化グレード 3）とする。つまりこのとき残存耐用年数を 0 年とする。また、鉄筋腐食減量（深さ）(mm) は 0.8mm とする。

4.2.2 結果

図 4.2.1 に、各劣化グレードにおける残存耐用年数 T の結果を示す。また、残存耐用年数 T から逆算した、築年数 t と部位の劣化グレード D_j の関係を図 4.2.2 に示す。結果より、バルコニーを想定した場合、劣化グレード 2（鉄筋腐食による劣化が確認される）の時の残存耐用年数は 10 年未満で、劣化グレード 1（仕上げや表層コンクリートの劣化が確認される）に比べて非常に小さくなった。

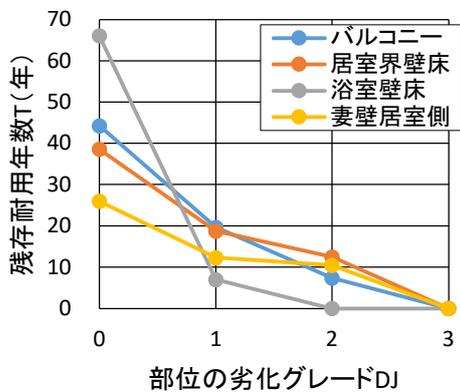


図 4.2.1 部位の劣化グレード D_j における残存耐用年数ケーススタディ結果

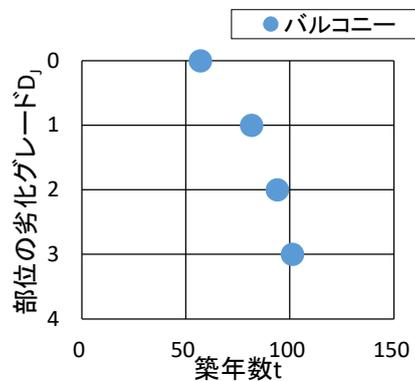


図 4.2.2 築年数 t と部位の劣化グレード D_j の関係

次に、劣化グレード 3 の時の詳細を確認するため、目視インデックス（本報告書第Ⅲ-1 編表 3.2.2）と残存耐用年数 T の関係を図 4.2.3 に示す。また、残存耐用年数 T から逆算した、築年数 t と目視インデックスの関係を図 4.2.4 に示す。目視インデックス 7 以降では残存耐用年数 T がおよそ 5 年以下となった。

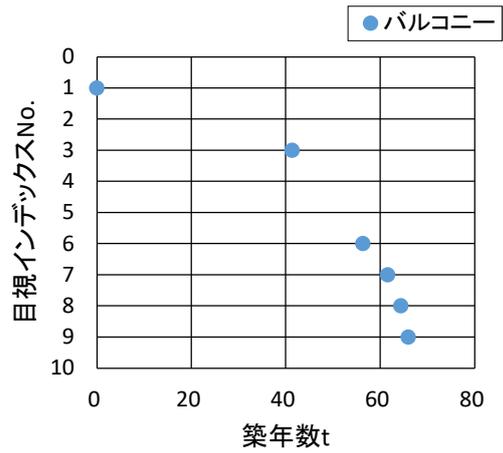
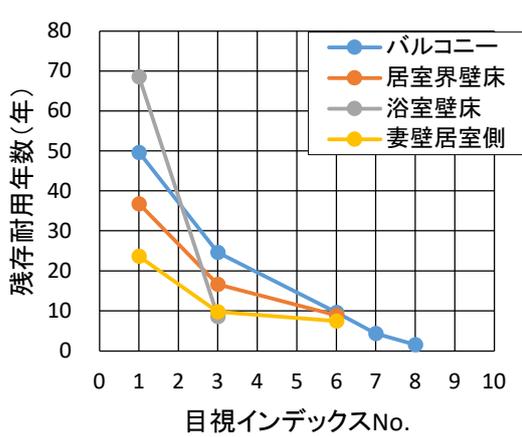
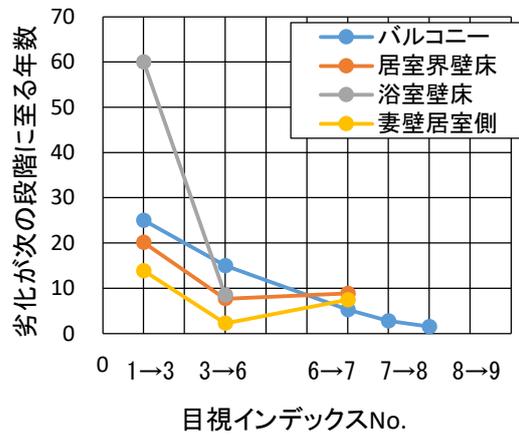
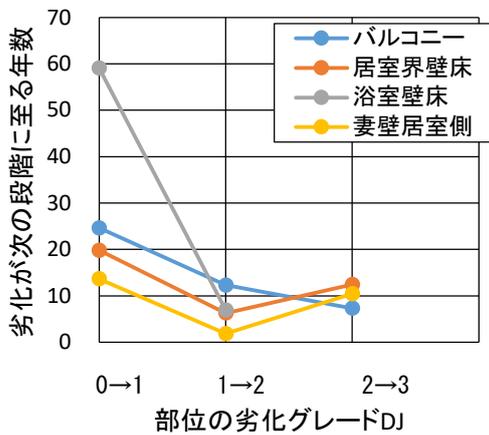


図 4.2.3 目視インデックスにおける残存耐用年数 T ケーススタディ結果

図 4.2.4 築年数 t と目視インデックス No. の関係

また、部位の劣化グレード D_j および目視インデックスが次の段階に至る（例えば、現在劣化グレードが 2 のときに劣化グレード 3 に至る、など）年数を図 4.2.5 に示す。結果より、劣化グレードが 0 から 1 へ至る年数より、1 から 2 へ至るまでの年数および 2 から 3 へ至るまでの年数のほうが小さくなる傾向となった。雨がかりであるバルコニーでは、劣化グレードが大きくなるほど次の劣化グレードへ至る年数が小さくなる一方、屋内部位である居室界壁床や妻壁居室側では、劣化グレード 2 から 3 へ至る年数よりも 1 から 2 へ至る年数のほうが小さい結果となった。

これらの結果は、点検や調査診断の効率的な期間を検討する上で参考になる可能性がある。ただし、建物全体で検討する際には、劣化進行のばらつきに注意する必要がある。



(a) 部位の劣化グレード D_j (b) 部位の目視インデックス
 図 4.2.5 劣化が次の段階に至る年数（中性化深さが鉄筋かぶりへ到達時以降）

4.2.3 まとめ

部位 J の残存耐用年数 T の算出を試みた。また、これらの関係を応用して鉄筋腐食開始以降における劣化が次の段階の劣化に至る年数の算出も試みた。設定した値の妥当性の検討は必要であるため、最終的な結果も参考値として扱うようなものであるが、例えばバルコニーの結果より、劣化グレードおよび目視インデックスが大きいほど、劣化が次の段階に至る年数は小さくなり、

使用安全性の限界状態に至るまでの期間が小さくなるなど、点検や調査診断の効率的な期間を検討する上で参考になる可能性があることが示唆された。

第 4 章 参考文献

- 1) 土屋 直子、根本 かおり、三島 直生：既存鉄筋コンクリート住宅の長寿命化に係る耐久性評価に関する研究その 3 使用安全性の限界状態および鉄筋腐食進行に及ぼす要因について、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 1109-1110、2021

5. おわりに

既存鉄筋コンクリート造集合住宅の残存耐用年数の評価手法（素案）を示し、次に適用可能性を検討した。適用可能性の検討では、本報告書第Ⅲ-1編で提案した部位の健全度 $H_i(t)$ を用いた場合、および従来からの耐久性の指標として知られる中性化や鉄筋腐食の進行速度に着眼した場合について検討した。しかしいずれも、まだ検証不十分であり、今後はデータの蓄積あるいは適用の条件の検討を行う必要がある。一方で、ここで示した評価手法（案）に倣い、新しいモニタリング手法や試験方法の活用への発展も期待される。

第Ⅲ-3 編

付録 2

健全度の低下および鉄筋腐食の進行の要因の分析

1. 目的

健全度が低下する原因を明らかにするため、鉄筋腐食の進行に影響を及ぼす要素について検討する。メカニズムの視点から分析するため、本報告書第III-1編で提案したような建物全体での分析ではなく、1m×1mなどの微小部位に着目し、健全度の低下速度 V_j に影響を及ぼす要素の検討とした。2章から6章までは特に、鉄筋腐食の進行の要因について検討した内容を記し、7章および8章は特に、目視により確認される劣化事象（劣化グレード（本報告書第III-1編表3.2.1）および目視インデックス（本報告書第III-1編表3.2.2））と鉄筋腐食の程度の関係について検討した内容を記す。

2. 鉄筋腐食の進行のメカニズム

コンクリートが中性溶液を有するとき、鉄筋の電気化学反応は、



である。

つまり、コンクリート中の鉄筋の化学反応には、中性溶液が存在することが前提で、 H_2O と O_2 の供給量により反応する量が定まってくると考えられる。

さらに、電気化学システムにおける電気仕事は、電子エネルギー準位に応じた分だけ、仕事するとされる¹⁾。そのため、反応速度は、一般的に反応進行度の時間微分であり、電子の反応量であるが、 H_2O および O_2 の供給量および電子のエネルギー準位により定まると考えることができる。

ここで、電子エネルギー準位とは反応に関与する電子のエネルギーのことであり¹⁾、ここでは電極電位または内部電位として考えることができる。つまり電位差分だけ仕事をする。

一方、Fe- H_2O 系の電位-pH図²⁾（Pourbaix diagram）で示されるように、鉄筋の電極電位は、pHに依存することが知られる。コンクリートは強いアルカリであるが、セメント等構成材料に含まれる物質の種類（例えばセメント種類）や炭酸化反応等によりpHが変わると考えられる。

以上より、コンクリート中の鉄筋の電気化学反応の速度は、

- ・ 中性溶液が存在することが前提
- ・ 水と酸素の供給量
- ・ pH

に影響を受けるものと考えられる。

なお、既往の研究知見³⁾で知られるように、コンクリートの炭酸化反応は、コンクリート中の拡散現象により供給された CO_2 と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ との反応であり、その反応速度は二酸化炭素の拡散現象が支配的である。つまり、コンクリートのかぶり厚さと時間と CO_2 の供給量に依存し、反応の速度としては中性化速度係数が知られ、セメント種類および含水率、強度（密度）により異なる。

第2章参考文献

- 1) 石原顕光、太田健一郎：原理からとらえる電気化学、裳華房、2010
- 2) 邑瀬 邦明：錯体や化合物を含む Pourbaix 図：その作図と応用、Review of Polarography、60 巻

Ⅲ-3. 耐久性向上 付録 2

1号、2014

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

3. 実建物調査結果を用いた鉄筋腐食の進行の要因に関する分析

3.1 分析方法

建物の実態調査にて、鉄筋周囲部の含水率、中性化深さ、かぶり厚さを測定しているため（詳細は事項で示す）、2章で示したコンクリート中の鉄筋の腐食反応の速度に影響する要素を、下記の指標に代えて、これらの項目と鉄筋腐食グレード、鉄筋腐食減量（深さ）との関係について考察する。

- ・中性溶液が存在することおよび pH→かぶり厚さを基準とした中性化深さ（中性化深さからかぶり厚さを差し引いた値）
- ・水と酸素の供給量→水と酸素の供給のし易さ→含水率およびかぶり厚さ

3.2 建物の調査方法

3.2.1 建物の概要

調査した建物の概要を表 3.2.1 に示す。

表 3.2.1 調査建物の概要

記号	所在地	構造規模	竣工年	調査年	塩化物含有量 (kg/m ³)	材料強度 (N/mm ²)
A	富山	鉄筋コンクリート 4 階	1962	2020	0.21	38.5
B-1	鹿児島	鉄筋コンクリート 5 階	1972	2020	2.19	19.1
B-2	鹿児島	鉄筋コンクリート 5 階	1974	2020	2.17	35.1
H	東京	鉄筋コンクリート 4 階	1952	2019	—	22.2
I	長崎	鉄筋コンクリート 5 階	1972	2020	—	21.0
J	奈良	鉄筋コンクリート 3 階	1963	2020	—	19.6

3.2.2 調査箇所

図 3.2.1 に、調査箇所の基本例を示す。各階の最西側の 3 住居並びに階段室を調査対象の基本とし、バルコニー床、外壁（妻壁）、居室界壁、居室床、浴室床、浴室壁、階段室壁、階段室床を調査箇所とした。また、妻壁およびバルコニーにおいては、3 住居に加えて、最西側住居すべてについて調査した。さらに、基本の調査箇所に加えて、外周部目視において本報告書第Ⅲ-1 編表 3.2.2 の目視インデックス No.6~9 が確認された箇所を追加している。調査箇所数は住戸規模により、1 棟につき 40 箇所~100 箇所程度である。

なお、表 3.2.1 の塩化物含有量の測定は、妻壁およびバルコニーの躯体幅の中央から φ75×h20mm 試料を 3 つ以上採取して試験し、材料強度は、階段室などの雑壁から φ100×200mm のコアを 3 つ以上採取して試験した。

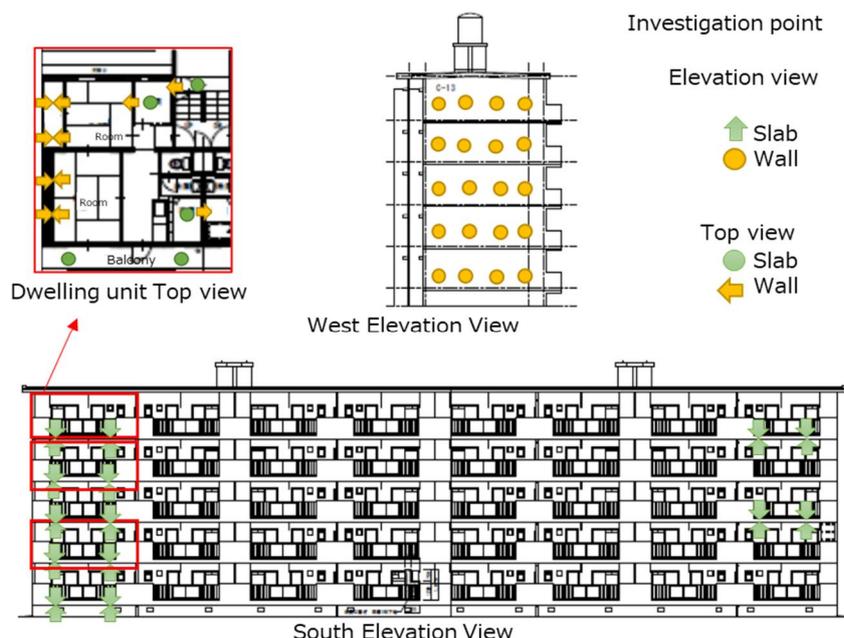


図 3.2.1 調査箇所の基本例

3.2.3 調査項目

調査項目は、1) 鉄筋腐食グレード、2) 鉄筋腐食減量（鉄筋径の減少量）、3) かぶり厚さ、4) 中性化深さ、5) 鉄筋近傍のコンクリートの含水率、とした。

1) 鉄筋腐食グレード

劣化グレードの調査範囲を鉄筋探査機によって鉄筋探査し、縦筋および横筋の交差部に対して鉄筋をはつり出し、最もかぶり面に近い鉄筋を対象として、5段階の鉄筋腐食グレード¹⁾を評価した。

2) 鉄筋腐食減量（鉄筋径の減少量）

鉄筋腐食グレードを測定した際、鉄筋直径を測定し、もとの鉄筋径から差し引くことで、鉄筋径の減少した深さを測定した。なお、もとの鉄筋径には、設計図書の鉄筋径あるいは調査箇所と同じ部位の健全部における鉄筋径を参考とした。

3) 中性化深さ

中性化深さは、JIS A 1152:2018「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し、採取したコアの表面もしくは割裂面、あるいは躯体はつり部断面にフェノールフタレイン 1%溶液を噴霧し呈色反応の深さを測定した。中性化深さの測定は測定箇所 1 箇所につき 4 点測定を行い、その平均値を中性化深さとした。

4) かぶり厚さ

鉄筋腐食グレードの調査に併せて、かぶり厚さ（mm）を測定した。4点計測し、その平均値を採用した。

5) 鉄筋近傍部の含水率

乾式方法により $\phi 10\text{cm}$ のコンクリートコアを採取し、中性化深さ測定が終了した後に、鉄筋を挟んでの前後または上下 10mm の位置から 2 試料を採取した。採取時の質量を測定し、 $105 \pm 5^\circ\text{C}$

で一定質量となるまで乾燥させ、乾燥させた試料は室温まで除熱した後に質量を測定した。乾燥時の質量に対する採取時の質量および乾燥時の質量の差を、質量含水率 (%) とした。

なお、調査は 1 棟につき 1 週間ほどであり、調査期間中に雨となっている建物も見られた。調査が解体中であったため、雨水管が切断されてバルコニーが水浸しになるなど、供用期間中では通常生じない状態となった建物も複数みられた。そのため、通常より含水率が高くなっている結果が含まれている可能性がある。従って、質量含水率は試料採取前の天気の影響を少なからず含むものと考えて考察する。

3.3 結果・考察

3.3.1 かぶり厚さ分類の結果

図 3.3.1 に、かぶり厚さを基準とした中性化深さ (mm) と鉄筋腐食グレードの関係 (かぶり厚さ別) を、図 3.3.2 に、かぶり厚さを基準とした中性化深さ (mm) と鉄筋腐食減量 (深さ) (mm) の関係 (かぶり厚さ別) を示す。凡例はかぶり厚さで区別しており、3cm 以下、3~5cm、5~15cm 分けている。

図 3.3.1 より、ばらつきが非常に大きいものの、かぶり厚さを基準とした中性化深さが大きいほど、鉄筋腐食グレードが大きくなっていることが分かる。また、鉄筋に中性化が達したのちに、鉄筋腐食グレードが大きくなっていることも確認できる。和泉らの研究²⁾で示されている結果と同じ傾向が確認された。

特にかぶり厚さが 5cm 以上と大きい場合には、まだ、中性化深さが鉄筋に達していないため鉄筋腐食グレードが大きな部分のデータが不足しているが、かぶり厚さ 3cm 以内と 3~5cm 大きな違いは見られない。ただし、鉄筋腐食グレードが 5 では、かぶり厚さ 3cm 内のケースが多く、3~5cm ケースは少ない。

図 3.3.2 より、鉄筋腐食減量 (深さ) が 0.6 を超えているものの多くはかぶり厚さが 3cm 以内の場合である。

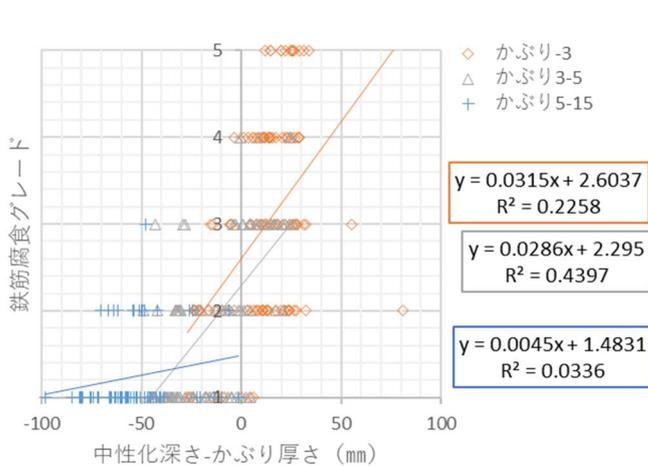


図 3.3.1 かぶり厚さを基準とした中性化深さ (mm) と鉄筋腐食グレードの関係 (かぶり厚さ別)

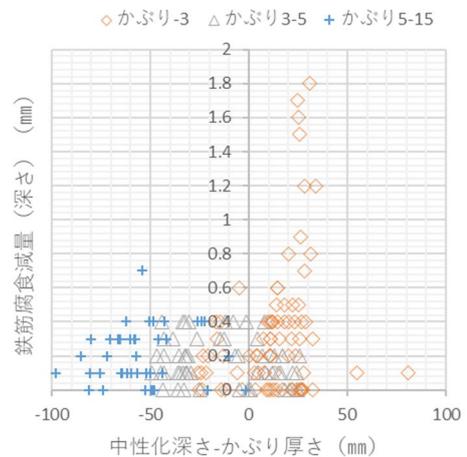


図 3.3.2 かぶり厚さを基準とした中性化深さ (mm) と鉄筋腐食減量 (深さ) (mm) の関係 (かぶり厚さ別)

3.3.2 含水率別の結果

次に、図 3.3.3 に、かぶり厚さを基準とした中性化深さ (mm) と鉄筋腐食グレードの関係 (含水率別) を、図 3.3.4 に、かぶり厚さを基準とした中性化深さ (mm) と鉄筋腐食減量 (深さ) (mm) の関係 (含水率別) を示す。凡例は、質量含水率 0~3%、3~6%、6~9%、9~12% で分けており、図 3.3.3 (a) には回帰直線も表示している。

図 3.3.3 (a) より、いずれの含水率においても、ばらつきが大きいものの、かぶり厚さを基準とした中性化深さが大きいほど、鉄筋腐食グレードが大きくなっている。特にその傾向は含水率が高いほど顕著である (含水率が高いほど回帰直線の傾きが大きくなっている)。従って、含水率が低い場合、鉄筋腐食の進行の速度は、含水率が高い場合に比べて緩やかであるといえる。ここで、含水率の結果は、測定日時の前後の天候に左右されるため変動がある点に注意が必要である。そこで、図 3.3.3 (b) および (c) に、雨などの天候により含水率の変動が大きいと考えられる雨がかり部と変動が小さいと考えられる室内部位に分けて結果を示す。含水率が 0~3% でかぶり厚さを基準とした中性化深さが大きい結果の多くは雨がかり部ではない部位であることが分かる。

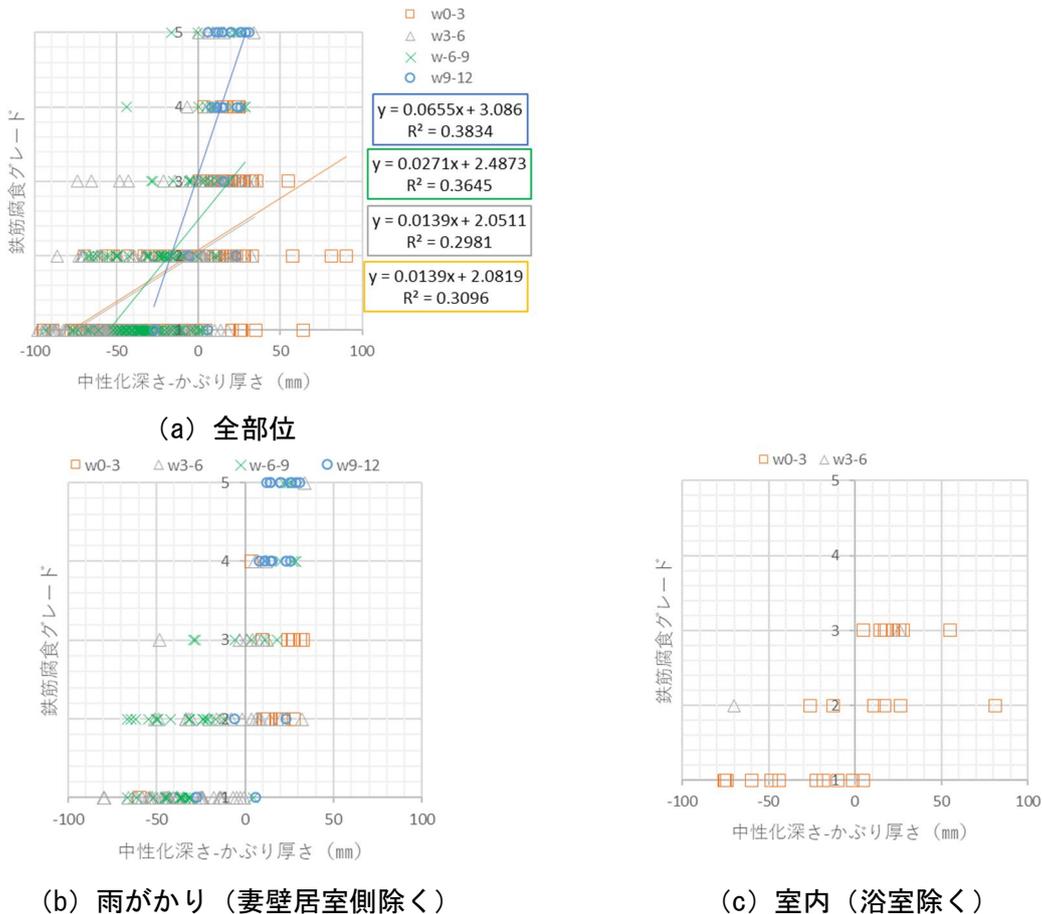


図 3.3.3 かぶり厚さを基準とした中性化深さ (mm) と鉄筋腐食グレードの関係 (含水率別)

また、図 3.3.4 より、鉄筋腐食減量 (深さ) が 0.6 以上と大きくなるのは、含水率が 6%以上のケースが多いことがわかる。かぶり厚さを基準とした中性化深さが 25mm 以上となっている。また、かぶり厚さを基準とした中性化深さが 25mm 以上となっているものの鉄筋腐食グレードが 3

以下であるのは、すべて室内部位の結果である。

以上より、鉄筋腐食減量（深さ）が 0.5mm 以上となるような著しく鉄筋腐食が進行しているケースは、中性化深さが最小かぶりより 25mm 超え、含水率が 6% 以上のときであるといえる。

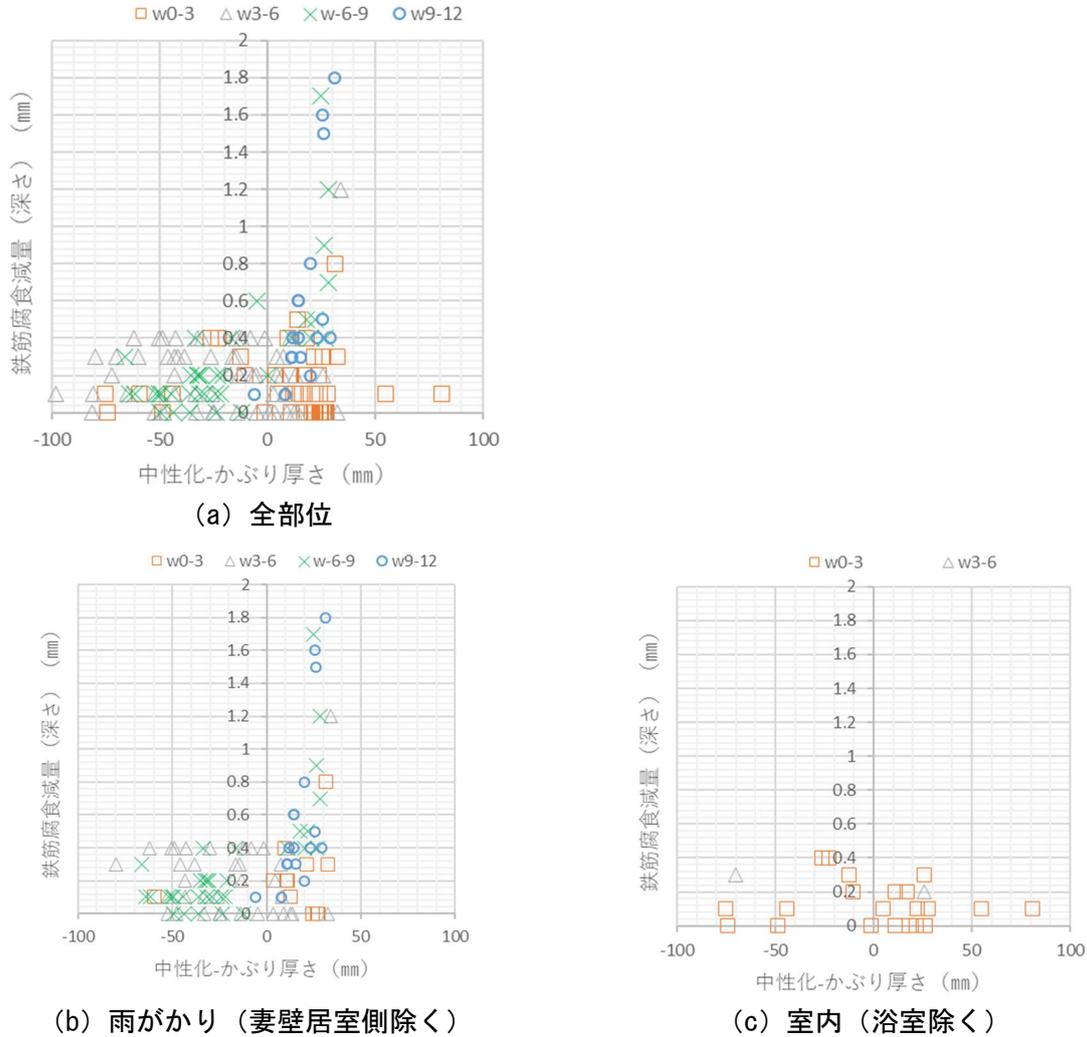


図 3.3.4 かぶり厚さを基準とした中性化深さ (mm) と鉄筋腐食減量 (深さ) (mm) の関係 (含水率別)

3.3.3 かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した場合の結果

次に、図 3.3.5 に、かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値（(中性化深さ - かぶり厚さ) / かぶり厚さ）と鉄筋腐食グレードの関係（含水率別）を、図 3.3.6 に、かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値（(中性化深さ - かぶり厚さ) / かぶり厚さ）と鉄筋腐食減量（深さ）(mm) の関係（含水率別）を示す。凡例は質量含水率 0~3%、3~6%、6~9%、9~12% で分けており、図 3.3.5 (a) には回帰直線も表示している。

図 3.3.5 より、含水率が 3% 以下では鉄筋腐食グレードが小さく、かつ、かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値が大きいデータも見られ、回帰直線の傾きが比較的小さい。x 軸は、かぶり厚さが小さいほどまたは中性化深さが大きいほど値が大きくなるものであるから、鉄筋腐食の進行に対して含水率が 3% 以下の場合、かぶり厚さが小さいことおよび中性化深さが

大きいことは鉄筋腐食グレードへの影響が小さいことを示唆する。含水率が 6%以上では、ばらつきが大きいものの、正の関係を示しており、含水率が高いほど鉄筋腐食グレードが大きいデータもあるため、切片の位置が大きくなっている。つまり、含水率が高い場合にはかぶり厚さが小さいことおよび中性化深さの大きさが鉄筋腐食の進行に及ぼす影響は比較的大きく、含水率が低い場合にはこれらの影響がみられにくいことを示唆する。

部位を分けた図の結果でも同様の結果であり、特に室内の結果では、図は横ばいの関係であり、含水率が低い場合にはかぶり厚さが小さいことおよび中性化深さの大きさが鉄筋腐食の進行に及ぼす影響は小さい。

図 3.3.6 より、鉄筋腐食減量（深さ）が 0.6mm 以上となっているのは、含水率が 6%以上のケースである。一方、含水率が 3%以下では、かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値が 3 以上のデータが複数みられるが、鉄筋腐食減量（深さ）が 0.3mm 以下と比較的小さいことが分かる。

図 3.3.7 に、かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値と鉄筋腐食速度（mm/年）の関係を示す。鉄筋腐食速度は、鉄筋腐食減量（深さ）（mm）を中性化到達以降の年数で除した値である。図より、かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値と鉄筋腐食速度の関係を含水率ごとに整理すると、含水率 6%以上の場合は比較的、線形関係が見られる。一方、含水率が 6%以下の場合、関係は横ばいで一定値である。

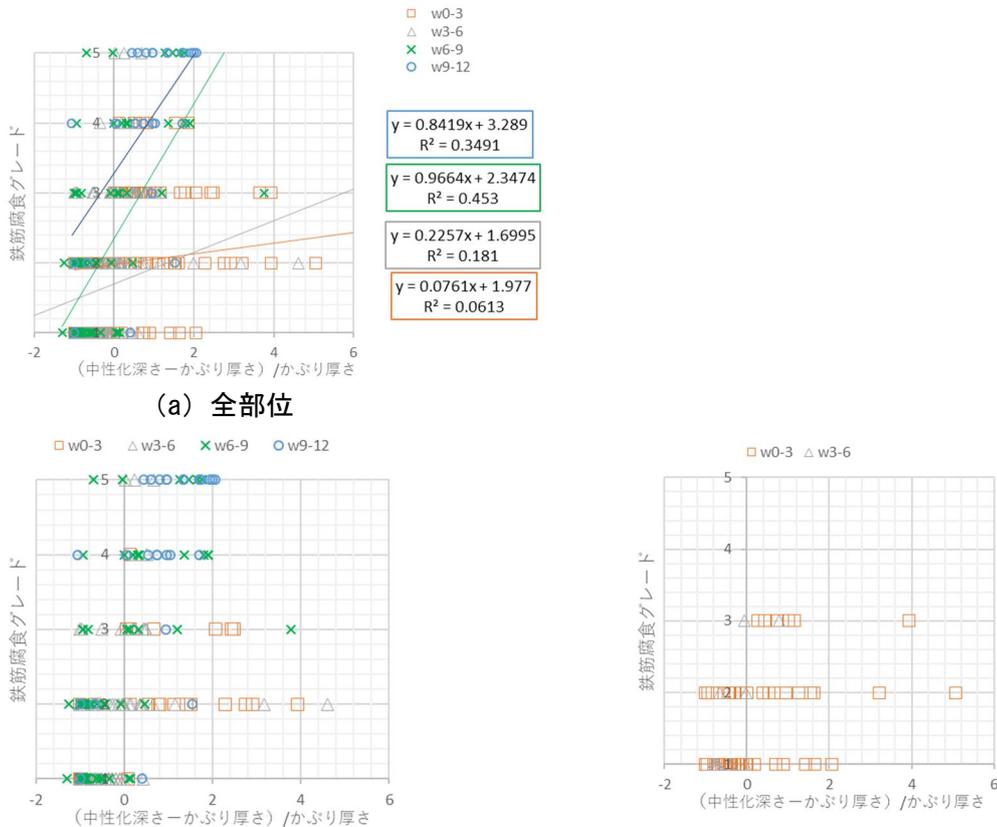
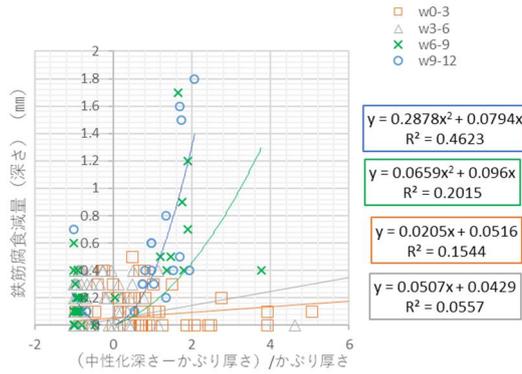
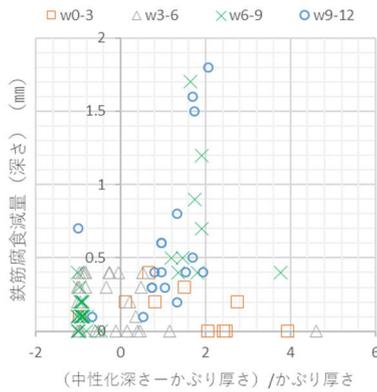


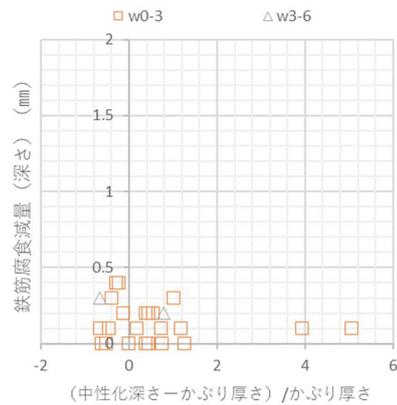
図 3.3.5 かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値と鉄筋腐食グレードの関係（含水率別）



(a) 全部位



(b) 雨がかり（妻壁居室側除く）



(c) 室内（浴室除く）

図 3.3.6 かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値と鉄筋腐食減量（深さ）（mm）の関係（含水率別）

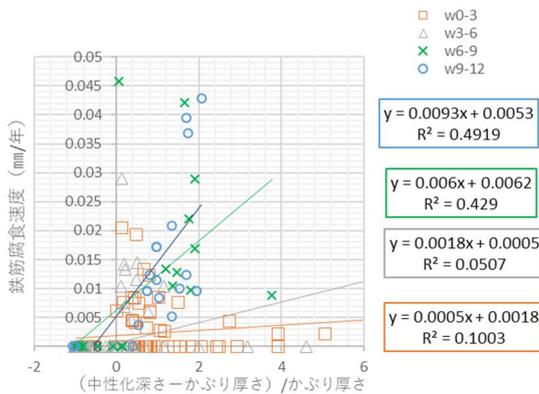


図 3.3.7 かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値と鉄筋腐食速度（mm/年）の関係

図 3.3.1～3.3.7 より、次のことが言える。

- (1) 鉄筋腐食グレードが 5 のような、または鉄筋腐食減量（深さ）が 0.6mm を超えるような著しい腐食は、かぶり厚さが 3cm 以下の場合で、中性化が最小かぶりに到達して以降、含水率が 6%以上のときに生じている。（あくまでも築年数 t が 70 年程度まで）
- (2) 特に含水率が 3%以下の場合、中性化深さがかぶり厚さを大幅に超えても、鉄筋腐食グレードが 5 のような、または鉄筋腐食減量（深さ）が 0.6mm を超えるような著しい腐食にはなりに

くい。

- (3) 含水率が高い場合には、かぶり厚さが小さいまたは中性化深さが大きいほど鉄筋腐食の進行がしやすい。
- (4) かぶり厚さを基準とした中性化深さは、ばらつきが大きいものの、鉄筋腐食グレードや鉄筋腐食減量（深さ）と一定の相関が見られたため、鉄筋腐食の進行速度の要素として考えることができる可能性がある。この場合、含水率が高いほど進行速度は早い傾向といえる。また、含水率が高い場合は、（かぶり厚さを基準とした中性化深さをかぶり厚さで除した値）も、鉄筋腐食の進行速度の要素として考えることができる可能性がある。
- (5) 上記（2）より、中性化が鉄筋に到達した以降での、鉄筋腐食の進行を遅らせるための対策として、鉄筋部における含水率を 3%以下に抑えることがあげられる。このとき、かぶり厚さを増すことも一つの有効手段であると考えられる。

第 3 章参考文献

- 1) 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
- 2) 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報告集 第 406 号、pp. 1-12、1989

4. 実建物調査結果を用いた鉄筋腐食の進行のばらつきに関する分析

4.1 目的

3章の検討において、鉄筋腐食の程度とかぶり厚さや含水率等との間には一定の関係が認められ、鉄筋腐食を進行させる要因の傾向がつかめたものの、鉄筋腐食の進行の度合いには大きなばらつきも見られた。すなわち、鉄筋腐食の進行には複数の要因が影響していると考えられる。そこで、鉄筋腐食の進行に影響する要因の影響度について検討するため、ばらつきの原因を検討した。

4.2 検討手法

3章と同様に、実建物調査から得たデータを用いて、かぶり厚さから中性化深さを差し引いた値（以降、中性化残りと呼ぶ）と鉄筋腐食グレードの関係について、想定しうる要因別に箱ひげ図を用いて分析する。分析に用いたデータは、表 4.2.1 に示す建物に対して調査して得られたデータとした。

表 4.2.1 調査した建物の概要

記号(所在地)	構造種別・階数	竣工年	調査実施年	塩化物含有量 (kg/m ³)	材料強度 (N/mm ²)
A(富山)	RC造、4階建	1962 (S.37)	2020 (R2)	0.21	38.5
B-1(鹿児島)	RC造、5階建	1972 (S.47)	2020 (R2)	2.19	19.1
B-2(鹿児島)	RC造、5階建	1974 (S.49)	2020 (R2)	2.17	35.1
C-1(福岡)	RC造、5階建	1971 (S.46)	2020 (R2)	1.25	34.7
C-2(福岡)	RC造、5階建	1971 (S.46)	2020 (R2)	1.66	38.4
D(岐阜)	RC造、4階建	1951 (S.26)	2020 (R2)	0.15	10.9
E(東京)	RC造、7階建	1971 (S.46)	2020 (R2)	0.12	24.6
F-1(宮城)	RC造、4階建	1970 (S.45)	2020 (R2)	0.15	28.3
F-2(宮城)	RC造、4階建	1972 (S.47)	2020 (R2)	0.18	24.4
G(兵庫)	RC造、4階建	1956 (S.31)	2021 (R3)	0.49	27.0
I(長崎)	RC造、5階建	1972 (S.47)	2020 (R2)	—	21.0

4.3 結果

図 4.3.1 に、中性化残りと鉄筋腐食グレードの関係を箱ひげ図で示す。想定しうる要因別にしており、下記の分類である。図上側の数字はデータ数である。

- (a) すべてのデータを用いた場合
- (b) 屋内外で区別した場合
- (c) かぶり厚さで区別した場合
- (d) 塩化物イオン含有量 0.6kg/m³ 以上か未満か
- (e) 含水率を 3 区分した場合
- (f) 絶乾密度を 2 区分した場合
- (g) 中性化速度係数を 3 区分した場合

なお、(b) 屋内外の区別については、次のとおりの分類とした。

妻壁の屋外側、バルコニー、屋外の供用廊下、階段室の屋外側は、屋外部位（屋外側）とした。

居室界壁および居室床、屋内にある供用階段室の床は、屋内部位とした。さらに、近年の研究では、湿度環境が中性化および鉄筋腐食の進行に影響がある可能性が指摘されている¹⁾。そのため、妻壁の居室側や供用階段室の屋外側とならない面の部位など、屋内環境にさらされている部位であるが、反対側が屋外環境にさらされているために、温湿度の変化が大きいことが想定される部位は、その他とした。なお、浴室壁、浴室床は、屋内に位置する部位であるものの、含水率が高くなる可能性も否めないため、未分類とした。

結果より、鉄筋腐食グレード 2 以上において、四分位の幅が小さいケースは、下記であることが分かる。なお、データ数が 10 以下の場合には、データの信頼性の観点から、無視することとした。

- ・ (b1) 屋外部位
- ・ (b1c1) かぶり厚さ<20mm 屋外部位
- ・ (b1c2) 20≦かぶり厚さ<50mm 屋外部位、
- ・ (b1c3) 50≦かぶり厚さ<150 mm 屋外部位
- ・ (b1d1) $Cl \geq 0.6\text{kg/m}^3$ 屋外部位
- ・ (b3d1) $Cl \geq 0.6\text{kg/m}^3$ その他の部位
- ・ (b2c2) 20≦かぶり厚さ<50mm 屋内部位
- ・ (g2) $2 \leq$ 中性化速度係数< 5
- ・ (g3) $5 \leq$ 中性化速度係数< 15

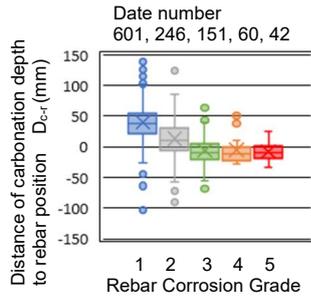
屋外部位においては、 $Cl < 0.6\text{kg/m}^3$ 屋外部位のケースを除いていずれのケースでもばらつきは小さく、従って屋外部位であることは鉄筋腐食の進行において影響度が比較的大きいことが分かる。また、その他の部位においても、塩化物イオン含有量が大きい場合に、ばらつきが小さいことも分かる。さらに、中性化速度係数を分類して整理した場合にも、中性化速度係数が小さくない場合、四分位のばらつきが小さいことが分かる。従って、屋内部位を除いた場合の塩化物イオン含有量および中性化速度係数が小さくない場合、鉄筋腐食への影響度が大きいと考えられる。

また、鉄筋腐食グレード 3 以上に着目すると、

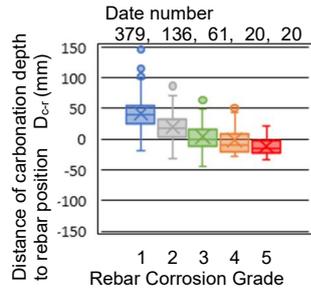
- ・ (e1) $0\% \leq$ 含水率 <3%
- ・ (e2) $3\% \leq$ 含水率 <6% 含水率

のばらつきも小さいことが分かる。

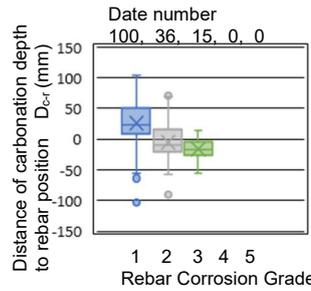
III-3. 耐久性向上 付録 2



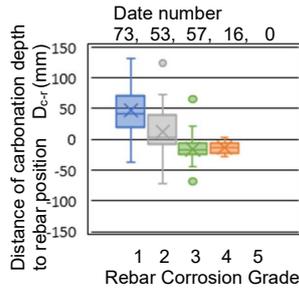
(a) 全データ



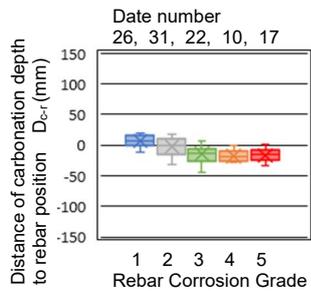
(b1) 屋外部位



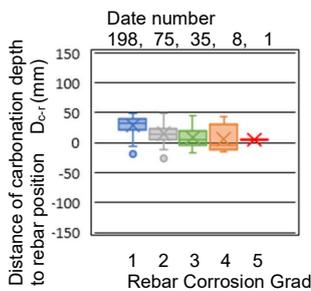
(b2) 屋内部位



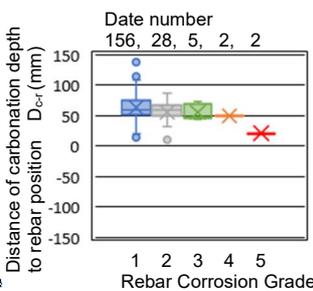
(b3) その他の部位



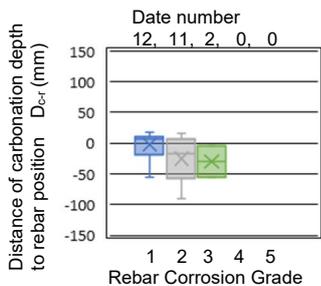
(b1c1) かぶり厚さ<20mm
屋外部位



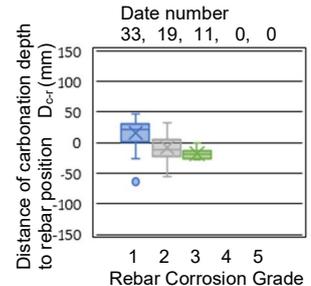
(b1c2) 20≦かぶり厚さ<50mm
屋外部位



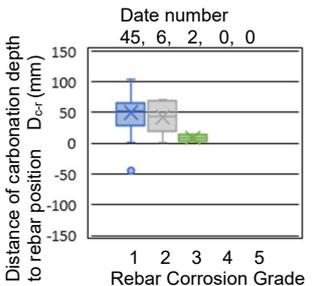
(b1c3) 50≦かぶり厚さ<150 mm
屋外部位



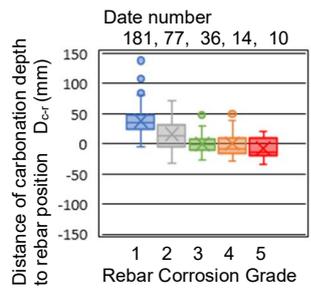
(b2c1) かぶり厚さ<20mm
屋内部位



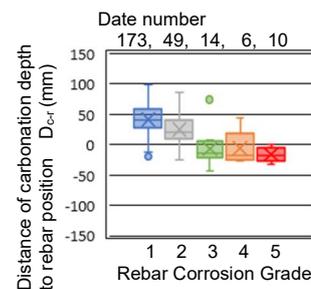
(b2c2) 20≦かぶり厚さ<50mm
屋内部位



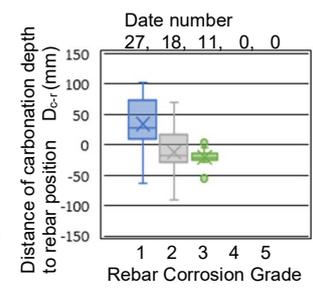
(b2c3) 50≦かぶり厚さ<150 mm
屋内部位



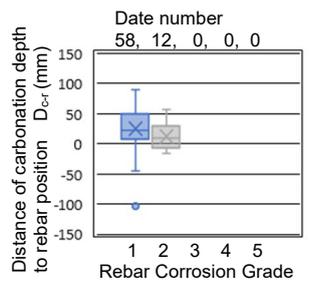
(b1d1) $CI \geq 0.6\text{kg/m}^3$
屋外部位



(b1d2) $CI < 0.6\text{kg/m}^3$
屋外部位



(b2d1) $CI \geq 0.6\text{kg/m}^3$
屋内部位



(b2d2) $CI < 0.6\text{kg/m}^3$
屋内部位

図 4.3.1 中性化残りと鉄筋腐食グレードの関係

III-3. 耐久性向上 付録 2

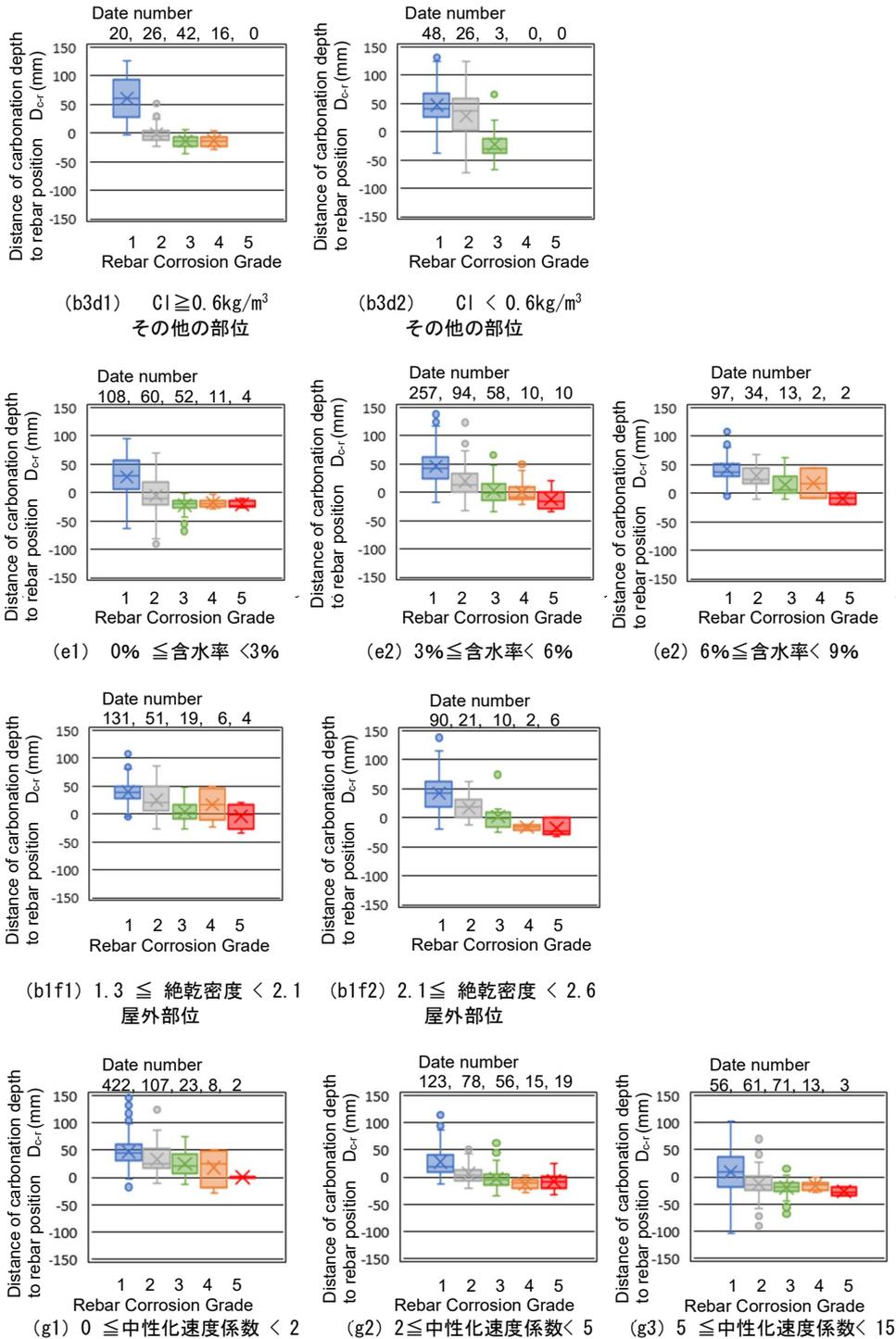


図 4.3.1 中性化残り と鉄筋腐食グレードの関係 (つづき)

図 4.3.1 (a) ~ (g) ごとに、下記にさらなる考察を加える。

(a) すべてのデータ

中性化残りが小さいほど、鉄筋腐食グレードが大きくなることが分かる。ただし、鉄筋腐食グレード 3 以上では、中性化残りは同じくらいである。また、中性化残りが 0 以上であっても鉄筋腐食グレード 2 や鉄筋腐食グレード 3 となる箇所が散見される。既往の知見¹⁾でも、中性化残り

が 10mm や 20mm でも腐食しているものもあることが確認されている。従って、JIS A 1154 によって判定される中性化深さが鉄筋に到達する前から、鉄筋の不導体被膜が壊れ、鉄筋腐食の進行は少しずつ進んでいるものと考えられる。

(b) 屋内外

(b1)屋外部位、(b2)屋内部位、(b3)その他で分類して結果を示す。いずれも、中性化残りが小さいほど、鉄筋腐食グレードが大きくなることが分かる。ただし、屋外部位において鉄筋腐食グレード 5 まで確認されたのに対し、屋内部位では、鉄筋腐食グレード 3 まで、その他部位では鉄筋腐食グレード 4 までであった。屋内部位と屋外部位を比較すると、屋外部位では、中性化残りが大きい状態（中性化が比較的浅い状態）で、鉄筋腐食グレードが大きくなっている。この傾向は既往の知見と同じである²⁾。同じ中性化残りの状態でも、部位がさらされている環境、すなわち劣化外力の違いによって、鉄筋腐食の進行速度に差が生じることを示していると考えられる。

(c) かぶり厚さ

(b1)屋外部位に分類されたデータをさらに、(b1c1)かぶり厚さ 20mm 未満（屋外）、(b1c2)かぶり厚さ 20mm 以上 50mm 未満（屋外）、(b1c3) かぶり厚さ 50mm 以上 150mm 未満（屋外）で分類し、結果を示している。(b2)屋内部位に分類されたデータも同様に分類し、結果を、(b2c1)かぶり厚さ 20mm 未満（屋内）、(b2c2)かぶり厚さ 20mm 以上 50mm 未満（屋内）、(b2c3)かぶり厚さ 50mm 以上 150mm 未満（屋内）に示す。

(b1c1)(b1c2)(b1c3)のかぶり厚さ別の屋外部位の結果は、(b1)屋外部位の結果に比べて、第 1 四分位数から第 3 四分位数の区間（箱ひげ図の箱の区間）の幅が小さいことが分かる。すなわち、比較的ばらつきが小さくなっているため、屋外部位において、かぶり厚さが鉄筋腐食の進行における比較的大きな要因であることが分かる。一方、(b2c1)(b2c2)(b2c3)かぶり厚さ別の屋内部位の結果では、一概に第 1 四分位数から第 3 四分位数の区間（箱ひげ図の箱の区間）の幅が小さくなっていると言えない。そのため、鉄筋腐食の進行において、他の要素の影響度が比較的大きいことが考えられる。

なお、かぶり厚さ 20mm 未満に比べて 20mm 以上では、中性化残りが大きい状態（中性化が比較的浅い状態）で、鉄筋腐食グレードが大きくなっているが、これは、かぶり厚さが小さいほど、中性化残りも小さくなるのは必然であることが一因であると考えられる。そのため、かぶり厚さが大きいほど、中性化残りが大きい状態（中性化が比較的浅い状態）で、鉄筋腐食が進みやすいとは言い切れない。

なお、かぶり厚さ 50mm 以上は、特に鉄筋腐食グレード 2 以上のデータ数が多くないため比較を避けることとする。

(d) 塩化物イオン含有量

(b1d1) ～ (b3d2) に、屋外部位、屋内部位およびその他部位に分けた後に、塩化物イオン含有量が 0.6kg/m^3 以上か未満かに区別して、中性化残り と鉄筋腐食グレードの関係を示す。

屋外部位において、各々の鉄筋腐食グレードにおける中性化残りの平均値は概ね同じである。今回の調査結果からは、塩分の有無が、屋外部位の鉄筋腐食の進行に対する影響度は少ない結果となった。

屋内部位において、塩化物イオン含有量が 0.6kg/m^3 以上の場合には、鉄筋腐食グレード 3 があ

るが、 0.6kg/m^3 未満の場合は鉄筋腐食グレード 2 以下のみである。また、その他部位の塩化物イオン含有量が 0.6kg/m^3 以上の場合には、鉄筋腐食グレード 4 があるが、 0.6kg/m^3 未満の場合は鉄筋腐食グレード 3 以下のみである。すなわち、屋内部位およびその他部位においては、塩分の有無により、鉄筋腐食の進行に差が生じていることが分かる。以上より、塩分の有無は、屋内部位およびその他部位の鉄筋腐食の進行への影響度が比較的大きく、一定量あるといえる。また、その他部位で塩化物イオン含有量が 0.6kg/m^3 以上の場合において、第 1 四分位数から第 3 四分位数の区間（箱ひげ図の箱の区間）の幅が小さいことが分かる。すなわち、中性化残りのばらつきが小さいことから、鉄筋腐食の進行の要因として、塩化物イオン含有量の影響度が大きいと考えられる。

(e) 含水率

(e1) から (e3) に、質量含水率 (%) (kg/kg) が 0%以上 3%未満、3%以上 6%未満、および 6%以上 9%未満に分けて、中性化残りとの鉄筋腐食グレードの関係を示す。また、質量含水率は試料採取前の天気の影響されるが、1 棟につき 1 週間ほどの調査期間中に雨となっている建物が多く見られた。調査が解体中であつたため、雨水管が切断されてバルコニーが水浸しになるなど、供用期間中では通常生じない状態となつた建物も複数みられたため、特に、含水率が高い結果には、通常より含水率が高くなっている結果が含まれている可能性がある。

結果より、含水率が低いほど、鉄筋腐食グレード 3 および鉄筋腐食グレード 4 となる中性化残りは小さい状態（中性化が比較的深い状態）であり、含水率が高いほど鉄筋腐食グレード 3 および鉄筋腐食グレード 4 となる中性化残りが大きい状態（中性化が比較的浅い状態）であることが分かる。含水率が低い場合には鉄筋腐食が生じにくい既往の知見²⁾と一致した。ただし、先述したとおり、質量含水率は試料採取前の天気の影響されると考えられ、傾向を示唆するものではあるが、定量的にデータを扱う場合には、時間に伴う含水率変化を測定し、これを考慮した値として表現する必要がある、今後の課題である。

(f) 絶乾密度

(f1e1) および (f1e2) に、屋外部位を対象に、質量含水率 (%) を 2.1 未満と 2.1 以上で分けて、中性化残りとの鉄筋腐食グレードの関係を示す。

絶乾密度が小さいほうが、中性化残りが大きい状態（中性化深さが浅い状態）で鉄筋腐食が進んでおり、絶乾密度が大きいほうが、中性化残りが小さい状態（中性化深さが深い状態）で鉄筋腐食となっていることが分かる。これは、劣化外力への抵抗性により鉄筋腐食の進行に差が生じ、劣化外力への抵抗性が大きいほど鉄筋腐食が進みにくいことを示唆していると考えられる。ただし、第 1 四分位数から第 3 四分位数の区間（箱ひげ図の箱の区間）の幅は、小さいと言えるほどではなく、すなわちばらつきが小さいということでもないため、鉄筋腐食の進行速度に与える影響度として、他の要素の影響が大きい可能性が示唆される。また、屋外部位のみの結果を示しているが、部位の分類をせずに、絶乾密度が 2.1 未満か以上で分類した場合も同様の傾向であつた。なお、今回の調査では鉄筋近傍での試料採取であつたため、表層コンクリートの品質の影響を考慮できていない点は留意点である。

(g) 中性化速度係数

(g1) (g2) および (g3) に、中性化速度係数 ($\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$) を 0 以上 2 未満、2 以上 5 未満、

および 5 以上 15 未満に分類して、中性化残り と鉄筋腐食グレードの関係を示す。

中性化速度係数が小さいほど、中性化残りが大きい状態（中性化深さが浅い状態）で鉄筋腐食が進んでおり、中性化速度係数が大きいほど、中性化残りが小さい状態（中性化深さが深い状態）で鉄筋腐食となっていることが分かる。中性化残り と鉄筋腐食グレードの関係について定量化する際には、中性化速度係数を考慮する必要がある。

4.4 まとめ

鉄筋腐食の程度と中性化残りの関係において、実建物の調査データからは非常にばらつきが見られたことから、四分位図によりばらつきを定量化して図化し、ばらつきの原因、すなわち鉄筋腐食の進行において影響度が大きい要因、を検討した。その結果、下記が示唆された。

- 1) 部位が置かれる環境の鉄筋腐食への影響は大きく、屋外部位であることは影響度が大きいと考えられる。
- 2) 屋内部位を除いて、塩化物イオン含有量の影響度が大きいと考えられる。
- 3) 中性化残り と鉄筋腐食グレードの関係を定量化する際には、中性化速度係数を考慮する必要があり、特に中性化速度係数が小さくない場合、鉄筋腐食への影響度が大きいと考えられる。
- 4) 本調査の結果では、含水率が小さい場合の影響度も大きいことが示唆された。

第 4 章参考文献

- 1) 日本建築学会材料施工委員会：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（1）、2017
- 2) 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報告集 第 406 号、pp. 1-12、1989

5. 鉄筋腐食へのコンクリートのひび割れ等局所劣化の影響

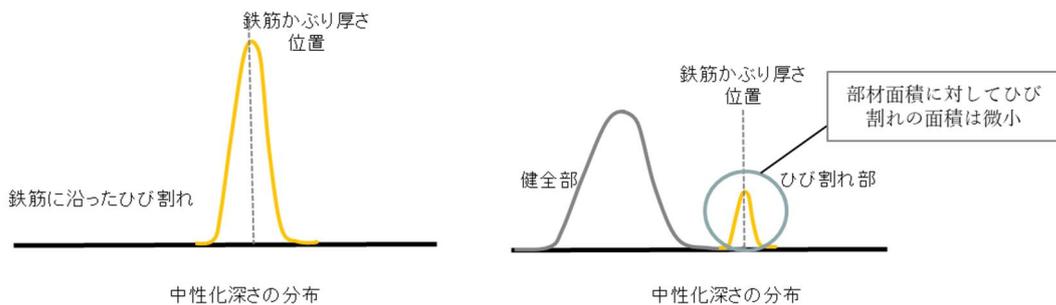
5.1 コンクリートのひび割れと中性化

耐久設計の考え方の基となっている主たる手法には、鉄筋腐食確率がある。これは一本の鉄筋における中性化深さの到達をかぶり厚さの誤差および中性化深さの進行の誤差を含めて評価している¹⁾。

コンクリートにひび割れがある場合、ひび割れの部分での中性化は早い^{例えば 2) 3)}。一方、サンプル採取方法による代表的な中性化深さと建物全体に発生しているひび割れの発生量には相関はない。つまり、中性化深さとひび割れは、ミクロ的(数 100cm²程度)には関係するが、マクロ的な評価(建物全体での評価)であると相関しない。

ここで、鉄筋腐食確率の中性化深さの分布を、ひび割れが発生した際を考慮してイメージしてみると図 5.1.1 のようになる。鉄筋に沿わないひび割れの場合、図 5.1.2 の中性化促進試験結果に示すように、ひび割れ周囲 2cm ほどの中性化深さは非常に大きいものの⁴⁾、現実的には、ひび割れの面積量が部材の面積量に対して非常に小さいため、鉄筋腐食確率 15%を基準値¹⁾とすると、部分的な腐食は問題ないとして処理されてしまうことが生じる。一方、鉄筋に沿うひび割れの場合、ひび割れの長さの分だけ、中性化が鉄筋かぶりの位置に到達するのはとても早い。従って、既存建物の耐久性評価へのひび割れの考慮は、鉄筋に沿うひび割れ、および鉄筋に沿わないひび割れ、で区別が必要である。

一方、実際の建物での調査からは、鉄筋腐食による剥離・剥落等の劣化は、本報告書第Ⅲ-1編の部位の健全度の評価例にも示したとおり、例えばバルコニーの鼻先などの主要構造部以外で生じていることが報告されている⁵⁾。水分が供給されかつ鉄筋部分の中性化が進行する場合、水分が供給されない場合に比べて鉄筋の腐食の進行は早いことから⁶⁾、これらバルコニーや共用廊下・階段の局所的な劣化の原因としては、雨がかり部であることやかぶり厚さが小さいことが一因であると考えられるが、ひび割れとの相関は不明である。



(a) 鉄筋に沿ったひび割れ

(b) 鉄筋に沿わない斜めのひび割れ

図 5.1.1 ひび割れのあるコンクリートの中性化分布のイメージ

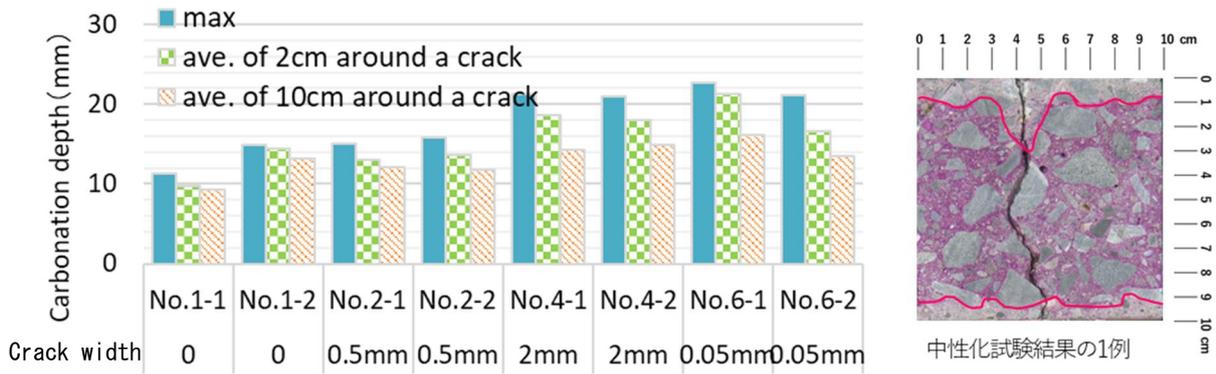


図 5.1.2 ひび割れのあるコンクリートの中性化促進試験結果⁵⁾

5.2 コンクリートのひび割れと水の浸透

5.2.1 事例調査による考察

文献^{7)~9)}や実調査および管理者ヒアリングなどより、27 事例について、不具合等の原因の考察および躯体への影響について調査し、傾向を抽出した。

1) 不具合（漏水を除く）発生箇所とその原因について

- ・水の浸入が原因として不具合（漏水を除く）が生じる箇所（発見される箇所）としては、外壁およびバルコニーが多く、外部廊下・天井も比較的多い。
- ・発見される不具合の種類としては、ひび割れ、剥離、変色（白亜化・よごれなど）
- ・水の浸入の原因としては、雨が直接かかる場合や、雨がつたっていく箇所と推測される。
- ・雨の浸入口の部位として、外壁、屋上、窓周り、スラブ上階が想定される。

上記より、水の浸入の経路を大きく類型化すると、水平方向部材で上面から下面へ、垂直方向部材の上部から下方向へと考えられる。また、いずれも、浸入口・周辺部位に不具合（防水機能の低下、ひび割れの介在）が生じている。

2) 漏水発生箇所とその原因、および診断の方法について

- ・漏水発生箇所は、多岐にわたる。
- ・原因は給排水管周りの劣化や窓周りサッシ、シーリングの劣化の印象が強い。
- ・シーリングの劣化が原因の場合、水の浸入の経路としては、雨水が劣化部より浸入し、躯体と壁内装の間を流れ、床部にも回り、ひび割れや配線周りの空洞があれば下の階へ漏れる。
- ・屋根防水層の劣化の場合、劣化の原因は、防水層のみの劣化、躯体を伴う劣化があり、更に補修を見据えると設備機器等設置による問題点を配慮する必要がある。

3) 原因を見過ごしがちな不具合の例

原因を見過ごしがちな不具合の例を図 5.2.1 に示す。

不具合発生箇所とその原因の位置が同じ箇所ではない場合や、表層からは見えない欠陥があるとき、原因を見過ごしやすいため、注意が必要である。



図 5.2.1 原因を見過ごしがちな不具合の例

5.2.2 部材を用いた漏水実験

直接雨がかかる箇所から、どの程度（範囲・含水率）水が広がり浸水していくのかを明らかにするため、模擬壁および模擬床とした RC 部材を用いた水の浸透実験を行った¹⁰⁾。

図 5.2.2 および図 5.2.3 に、供給開始から 1 時間後の漏水量および 24 時間後の漏水量の結果を示す。結果より、ひび割れ幅が 0.05mm およびひび割れ無しの場合には、部材厚さ（ひび割れの長さ）が 120mm でも、漏水が発生しなかった。既往の知見の傾向と一致する¹¹⁾。また、ひび割れ幅が 1mm であっても 部材厚さ（ひび割れの長さ）が 915mm の場合には漏水は発生しなかった。一方、漏水した場合、供給量が多いほど漏水量も多くなっていることが分かる。

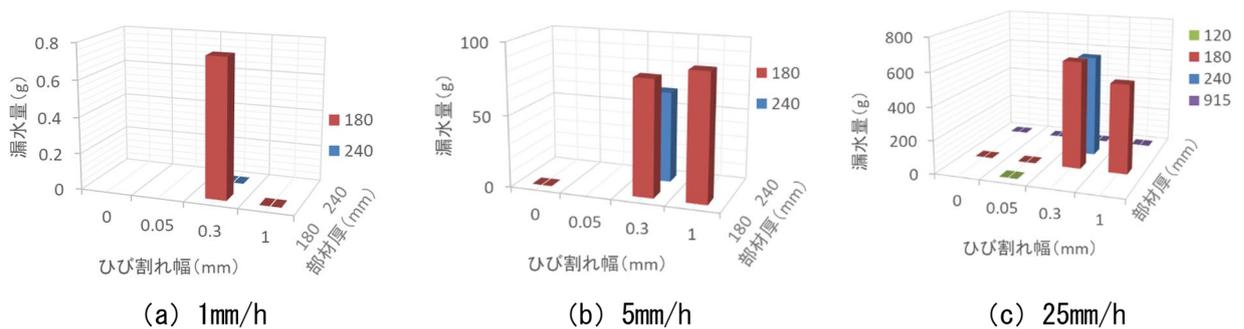


図 5.2.2 供給開始から 1 時間後の漏水量¹⁰⁾
 (空欄は実験なし、底面の色付きは実験したものの漏水なしを示す。)

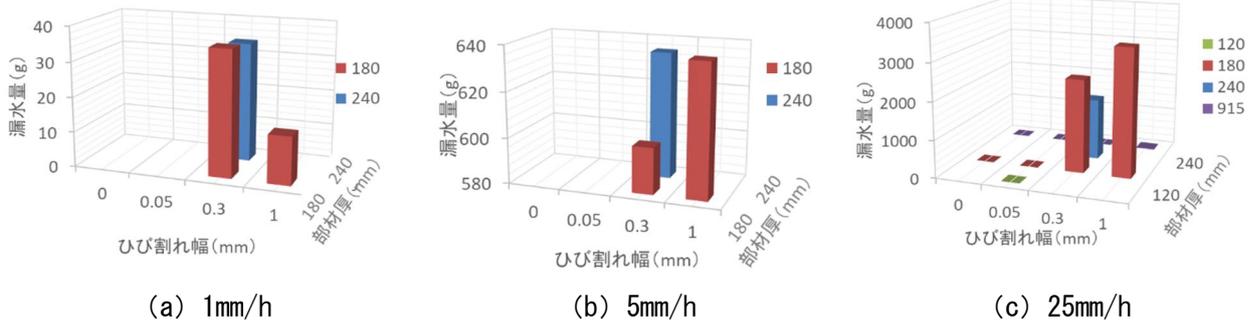


図 5.2.3 供給開始から 24 時間後の漏水量¹⁰⁾
 (空欄は実験なし、底面の色付きは実験したものの漏水なしを示す。)

5.2.3 吸水実験

ひび割れ幅、仕上げ、補修有無を水準とした 10×10×20cm の角柱コンクリートを用いて、吸水実験を行った¹²⁾。結果を図 5.2.4 に示す。結果より、ひび割れのあるコンクリートの吸水量は、ひび割れがない場合に比べて大きいことが分かる。また、例外はあるものの、ひび割れを補修した場合、補修していない場合に比べて吸水量が小さいことが分かる。

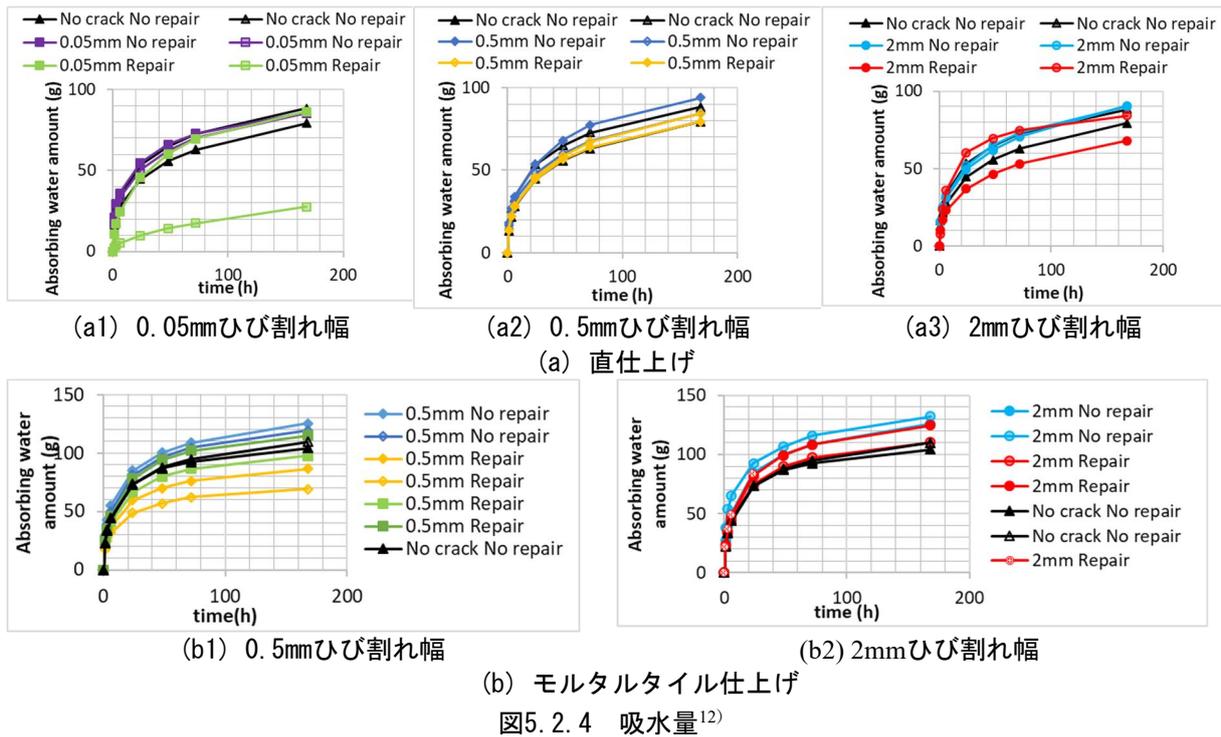


図5.2.4 吸水量¹²⁾

5.3 まとめ

鉄筋腐食へのコンクリートのひび割れ等局所劣化の影響を検討した。検討から示唆された点を下記にまとめる。

- 1) 鉄筋に沿ったひび割れと鉄筋に沿っていないひび割れは、鉄筋への影響度は異なると思われる。

- 2) 仕上げの劣化に加えてひび割れがある場合、水の侵入口より離れた箇所では不具合を引き起こす可能性がある。
- 3) ひび割れがある場合、中性化および水の侵入がしやすくなることが実験により確認された。ただし、その程度と鉄筋腐食への影響度については検討されていない。
- 4) 特に、ひび割れ幅が 0.3mm 以上で供給水が多い場合、コンクリートへの吸収以上に、ひび割れの長さ分だけ水が移動する。

第 5 章参考文献

- 1) 和泉意登志、構造物の耐久設計手法例—鉄筋のかぶり厚さの信頼性設計手法—、コンクリート工学、Vol. 26、No.11、pp.38-42、1988
- 2) 松田紗弥、島田崇博、大野義照、岸本一蔵：曲げひび割れを有するコンクリートの中性化に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、vol.30、No.1、pp.657-662、2008
- 3) xiao-Hui Wang、Dimitri V.Val、Li Zheng、M.Roderick Jones：Influence of loading and cracks on carbonation of RC elements made of different concrete types、Construction and Building Materials、164、pp.12-28、2018
- 4) Tsuchiya N and Nemoto K、EXPERIMENTAL STUDY ABOUT CARBONATION RESISTIBILITY IN BOTH CASE OF REPAIR A CRACK OR NOT OF THE CONCRETE、proceeding of The 3rd ACF Symposium、2019
- 5) 土屋直子、三島直生、中田清史、松沢晃一、鹿毛忠継、棚野博之、阿部道彦、井川倫宏、横山博、彦坂信之、マンションの老朽化認定の評価方法に関する検討、日本建築学会技術報告集、Vol.28、No.68、pp.70-75、2022
- 6) 唐沢智之、榎田佳寛、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、2004
- 7) 建築研究所・住宅リフォーム・紛争処理支援センター、鉄筋コンクリート造の既存住宅における調査方法の適用性および補修方法の実態等に関する調査研究業務報告書、2004年
- 8) 社団法人日本建築学会、戸建住宅を巡る建築紛争、2006
- 9) H27～H29 年度総プロ「地域安心居住機能の戦略的ストックマネジメント技術の開発」実態調査データ
- 10) 土屋直子他、コンクリートのひび割れ、供給水量および漏水開始時間に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.43、pp.1133-1138、2021
- 11) チェルニン・特根吉郎（訳）：建設技術者のためのセメント・コンクリート化学、技報堂出版、pp.32-40、1985
- 12) Naoko Tsuchiya and Kaori Nemoto、Experimental Study on Carbonation Resistance and Water Absorbing Property of Concrete Crack with repair、proceeding of the XV International Conference on Durability of Building Materials and Components、2020

6. 鉄筋腐食の進行の要因の整理

3～5章の分析結果および関連規格^{1) 2)}を踏まえ、表 6.1 に、鉄筋腐食のしやすさに影響を及ぼす各条件を整理した。関連規格は、劣化外力に関する規準である、ISO22965-1 : 2007 TableA.1¹⁾に示される Exposure classes および建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事²⁾に示される劣化環境や、劣化抵抗性をもとに規定された品確法の劣化対策等級の考え方を、参考にした。

また、これらは鉄筋腐食の原因としてもとらえることができるため、得られた知見から鉄筋腐食の進行を遅らせるための対策、すなわち長寿命化の対策への知見に活用されたい。

表 6.1 鉄筋腐食のしやすさに影響を及ぼす条件

腐食環境 グレード	鉄筋腐食のしやすさ	条件の例
1	極めて発生しにくい	<ul style="list-style-type: none"> ・常に湿潤。(地下部など。) ・かぶり厚さが十分に大きい。 ・中性化深さが一定水準未満かつ中性化速度係数が小さい。
2	発生しにくい が一定量の確率で発生する	<ul style="list-style-type: none"> ・中性化深さが一定水準を超え、かつ、常に乾燥。(居室界壁・居室床など。) ・かぶり厚さや中性化速度係数が標準的。
3	極めて発生しやすい	<ul style="list-style-type: none"> ・中性化深さが一定水準を超え、かつ、雨ががりとなる部位(外周部の壁およびスラブ。防水の機能が果たされていない屋上階の天井や水回りの壁や床を含。また防水仕上げの劣化箇所やひび割れ劣化箇所。) ・かぶり厚さが小さい。 ・塩化物含有量(飛来塩分および内在塩分)が多い。

第 6 章参考文献

- 1) ISO 22965-1 : 2007 Concrete — Part 1: Methods of specifying and guidance for the specifier TableA.1 Exposure classes
- 2) 日本建築学会、建築工事標準仕様書 JASS5 鉄筋コンクリート工事、2022

7. 各物性と目視評価の関係の検討

7.1 目的

本報告書第Ⅲ-1 編で示した劣化グレード（本報告書第Ⅲ-1 編表 3.2.1）および目視インデックス（本報告書第Ⅲ-1 編表 3.2.2）と鉄筋腐食の進行の関係について検討したデータを付録として示す。併せて、この関係に影響を及ぼす要素について検討する。

7.2 調査方法

表 7.2.1 に、調査した建物の概要を示す。これらの建物に対して、本報告書第Ⅲ-1 編の表 3.2.1 および表 3.2.2 に基づき、1×1m 範囲を目視評価し、その後その部分をはつる等して鉄筋腐食の状態を測定した。

表 7.2.1 調査建物の概要

記号	所在地	構造規模	竣工年	調査年	材料強度 (N/mm ²)
A	富山	鉄筋コンクリート 4 階	1962	2020	38.5
B-1	鹿児島	鉄筋コンクリート 5 階	1972	2020	19.1
B-2	鹿児島	鉄筋コンクリート 5 階	1974	2020	35.1
H	東京	鉄筋コンクリート 4 階	1952	2019	22.2
I	長崎	鉄筋コンクリート 5 階	1972	2020	21.0
J	奈良	鉄筋コンクリート 3 階	1963	2020	19.6

7.3 結果

7.3.1 目視インデックスと鉄筋腐食減量の関係

図 7.3.1 に目視インデックス（第Ⅲ-1 編表 3.2.2）の事象ナンバーと鉄筋腐食減量（mm）の関係を示す。鉄筋腐食減量（mm）は、もとの鉄筋径から、今回測定された鉄筋径を引いた値とした。もとの鉄筋径は、設計図書値を参考し、設計図書がなかった場合は各部位の鉄筋腐食グレードが 1 の平均値を用いた。結果より、本調査では目視インデックス No.4（エフロッセンス・白華）および No.5（錆汁）は現象として出現しておらず、検出されなかったことが分かる。これらを除く確認された目視インデックスに関していえば、かなりばらつきはあるものの、目視インデックスナンバーが大きくなるにつれて鉄筋腐食減量が大きくなる傾向が見られた。バルコニーでは鉄筋腐食減量が進んでいる箇所も多く、かつ目視インデックス No.1 から No.9 にわたり確認された。また、妻壁居室側でも鉄筋腐食減量が多くなる箇所があり、目視インデックスも比較的大きな値を示した。

一方、浴室や妻壁では鉄筋腐食減量は小さく、確認された事象は、目視インデックス No.3 以下であった。

なお、鉄筋腐食減量が大きくても目視として確認される現象として顕在化してこない理由にはコンクリートのかぶり厚さやモルタル仕上げの厚さ、コンクリート強度による影響が考えられる。以上より、目視インデックスのナンバーの順番は、概ね鉄筋腐食の進行と相関していることが確認された。

Ⅲ-3. 耐久性向上 付録 2

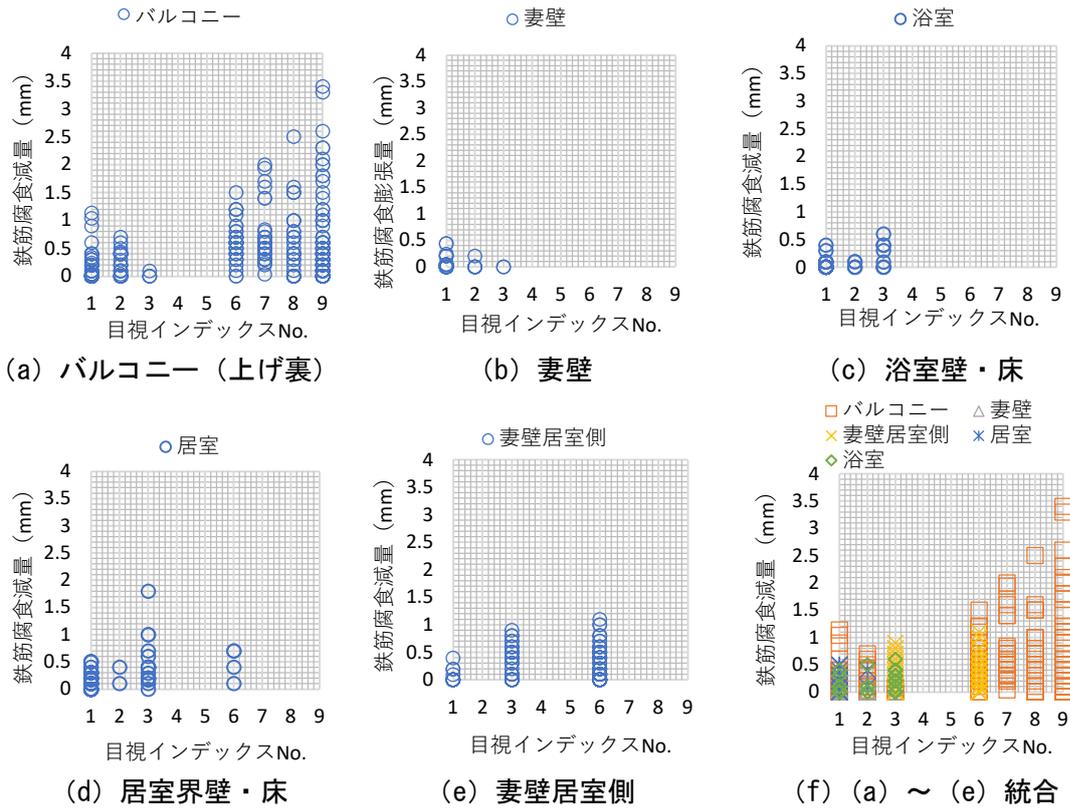


図 7.3.1 目視インデックスと鉄筋腐食減量 (mm) の関係

7.3.2 劣化グレードと鉄筋腐食減量の関係

図 7.3.2 に鉄筋コンクリート建築の部位 J の要素部位 J_{ei} 部分の劣化グレード D_{Je} と鉄筋腐食減量 (mm) の関係を示す。本検討においては、本報告書第Ⅲ-1 編の表 3.2.2 に示すとおり目視インデックス No.1~No.9 をそれぞれ劣化グレード 0~3 に分類した。

図 7.3.2 より、浴室、妻壁では、劣化グレード 2 以上のケースは見られず、一方、バルコニーでは劣化グレードは 0 から 3、妻壁居室側および居室では 0 から 2 が見られた。図 7.3.1 の目視インデックスナンバーと同様、図 7.3.2 はばらつきが大きいものの、劣化グレードが大きいほど鉄筋腐食減量 (mm) は大きくなっており、全体的に相関があることがわかる。

III-3. 耐久性向上 付録 2

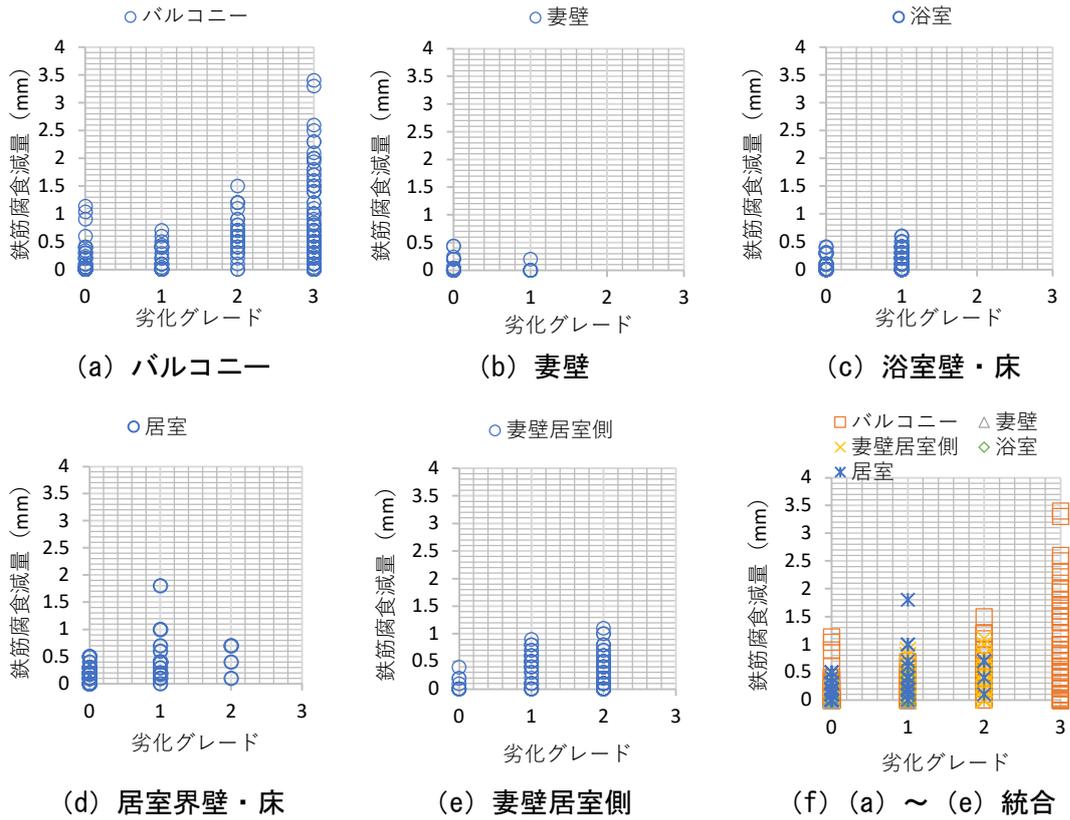


図 7.3.2 劣化グレードと鉄筋腐食減量 (mm) の関係

次に図 7.3.3 に、劣化グレードごとの鉄筋腐食減量 (mm) の平均値を示す。結果より、いずれの部位の場合でも劣化グレード 0 に比べて劣化グレード 1 の時の鉄筋腐食減量は大きくなっている。特に、バルコニーについては、劣化グレードが大きいほど、鉄筋腐食減量も大きくなった。居室および妻壁居室側については、劣化グレード 1 および劣化グレード 2 が同等の値となった。従って、部位を問わず概ね線形関係の傾向であることが示唆された。

次に図 7.3.4 に鉄筋腐食グレードごとの劣化グレードの平均値を示す。結果より、部位による差異が大きいことがわかる。妻壁を除いた鉄筋腐食グレード 4 以上に着目すると、劣化グレードは妻壁居室側で 1.6、バルコニーで 2 となっている。既往の知見では鉄筋腐食のグレードが 4 段階で示されるものもあり¹⁾、これによれば、グレード 3 でひび割れ発生開始、グレード 4 ではひび割れが生じているとしており、図 7.3.4 は妻壁の結果を除くとこれに近い結果となった。なお、妻壁の鉄筋腐食グレードが 4 の結果は、調査測定数 2 点の平均結果であり、中性化が鉄筋かぶりの半分程度であった。

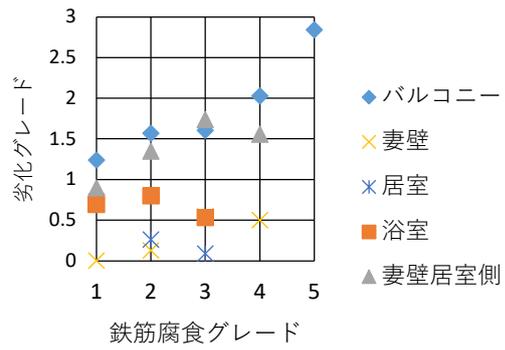
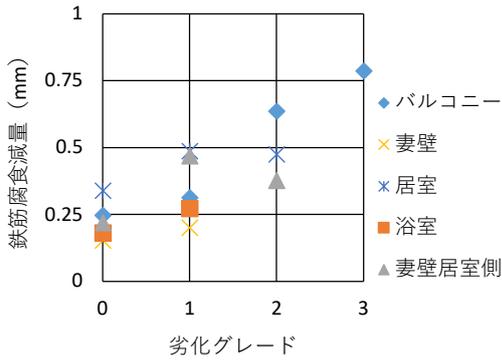
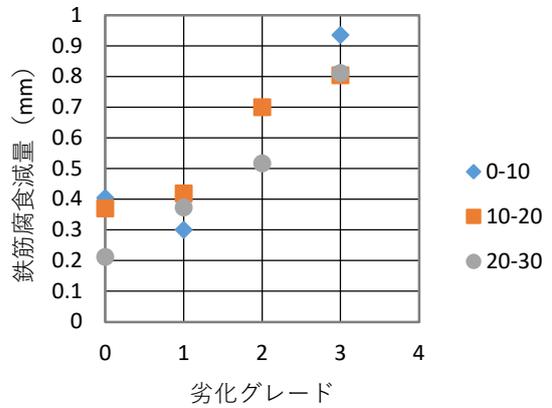
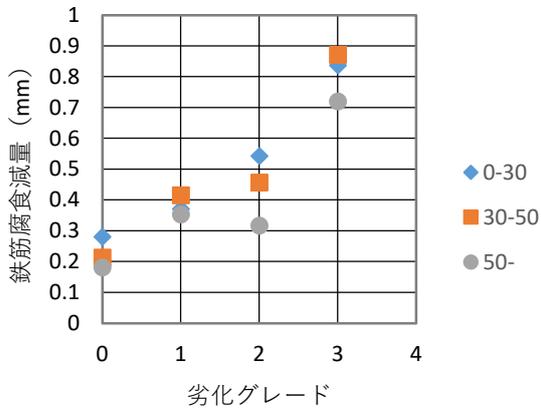


図 7.3.3 劣化グレードと鉄筋腐食減量の平均値

図 7.3.4 鉄筋腐食グレードの劣化グレードの平均値

7.3.3 かぶり厚さの影響

次に、図 7.3.5 にかぶり厚さ (mm) および劣化グレードごとの鉄筋腐食減量 (mm) の結果を示す。建物ごとに分けて、部位は区別して、かぶり厚さ 0-30mm、31-50mm、50mm 以上で分類し、それらの劣化グレードごとの鉄筋腐食減量 (mm) の平均値を算出した。かぶり厚さ 0-30mm についてはさらに、かぶり厚さ 0-10mm、11-20mm、21-30mm で分類し、同様に平均値を算出した。同じかぶり厚さで比べると若干の例外はあるが、劣化グレードが大きいほど鉄筋腐食減量が大きくなっていることが分かる。



(a) かぶり厚さ 0-30mm、31-50mm、50mm 以上で分類

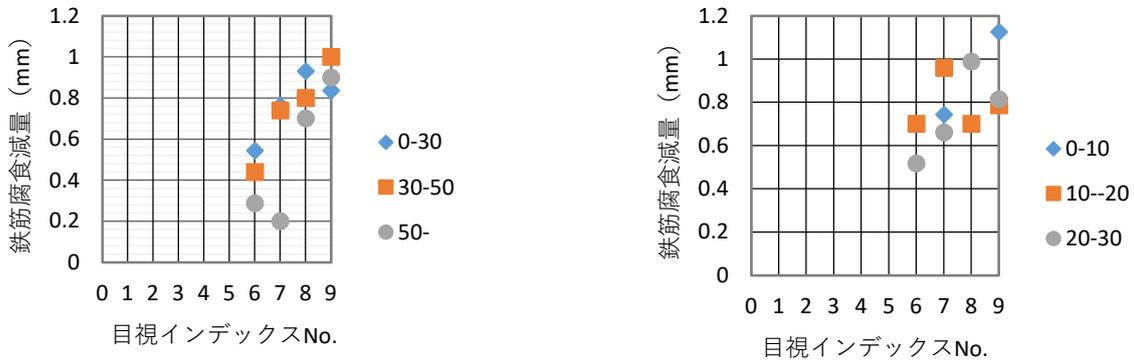
(b) かぶり厚さ 0-10mm、11-20mm、21-30mm 以上で分類

図 7.3.5 かぶり厚さおよび劣化グレードごとの鉄筋腐食減量 (mm) の結果

次に、図 7.3.6 にかぶり厚さ (mm) および目視インデックス No.6~9 ごとの鉄筋腐食減量 (mm) の結果を示す。結果より、(a) かぶり厚さ 0-30mm、31-50mm、50mm 以上で分類では、目視インデックスナンバーが大きくなるほど鉄筋腐食減量が大きくなっており、かぶり厚さによる傾向は見られない。ただし、かぶり厚さ 0-10mm においては目視インデックス No.6 および No.8 が確認されず、これはかぶり厚さが 10mm 以内の場合、鉄筋腐食によるひび割れや 20cm 以上の剥離が検出されることは少なく、剥離が 20cm 以上の大きさに広がる前に剥落していることを示唆

していると考えられる。

鉄筋露出が確認される目視インデックス No.9 における鉄筋腐食減量は約 0.8mm となった。



(a) かぶり厚さ 0-30mm、31-50mm、50mm 以上 (b) かぶり厚さ 0-10mm、11-20mm、21-30mm 以上で分類

図 7.3.6 かぶり厚さおよび目視インデックス No. 6~9 ごとの鉄筋腐食減量 (mm) の結果

7.4 まとめ

鉄筋腐食の程度と目視評価の関係について検討して得られた結果を下記にまとめる。

- 1) ばらつきが大きいものの、提案した目視インデックスナンバーが大きくなるにつれて鉄筋腐食減量 (mm) が大きくなる傾向が確認された。鉄筋露出時の鉄筋腐食減量の平均値は約 0.8mm であった。
- 2) 目視インデックスナンバーを劣化グレード 0~3 に分類して、鉄筋腐食減量との関係を確認した結果、ばらつきは大きいものの劣化グレードが大きくなるにつれて鉄筋腐食減量 (mm) が大きくなる傾向が確認された。
- 3) 鉄筋腐食の進行は、部位により差異が見られた。

第 7 章参考文献

- 1) 日本建築学会、鉄筋コンクリート構造物の耐久性調査・診断および補修指針 (案)・同解説

8. 鉄筋腐食グレードごとの劣化グレードの発生割合

8.1 目的

7章において、鉄筋腐食の進行と劣化グレードの出現には一定の相関があることが確認された。そのため、さらに建物調査のデータを増やして、鉄筋腐食グレードと劣化グレードの関係を明らかにする。

8.2 調査方法

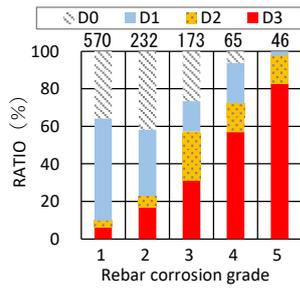
表 4.2.1 に示す建物を対象にし、1×1m 範囲で計 1086 箇所の劣化グレードを判定し、その部分の鉄筋腐食グレードを確認した。

8.3 結果

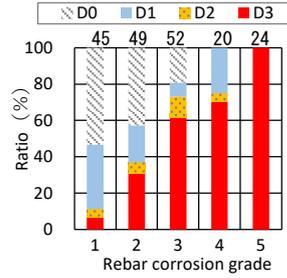
図 8.3.1 に、劣化グレードの発生割合の結果を示す。グラフ上側の数値は、データ数である。

図 8.3.1 (a)すべてのデータの結果から、鉄筋腐食グレードが大きいほど、劣化グレードが小さい状態の割合が減少し、劣化グレードの大きい状態の割合が増加していることが分かる。また、一部、データ数が 10 以下となるなどデータ数が少ない場合もあるが、かぶり厚さで区別して示した図 8.3.1 (b1) (b2) (b3) も同様である。ただし、その増加・減少の傾向は、かぶり厚さによって異なる。例えば、図 8.3.1 (b1)かぶり厚さが 20mm 未満では、鉄筋腐食グレード 3 以上で、劣化グレード D3 は 6 割を超え、劣化グレード D2 および D3 を合せた割合が 7 割を超えていることに対し、図 8.3.1 (b2)20mm 以上 50mm 未満では、鉄筋腐食グレード 3 以上の状態で、劣化グレード D3 の割合が 2 割未満、鉄筋腐食グレード 3 及び 4 において劣化グレード D2 および D3 を合せた割合が 6 割以下、図 8.3.1 (b3)50mm 以上 150mm 未満では、鉄筋腐食グレード 3 以上で、劣化グレード D3 の割合が 1 割未満、劣化グレード D2 および D3 を合せた割合が 5 割以下となっている、などである。

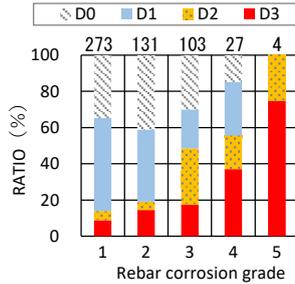
図 8.3.1 (c1) ~ (c6) に、かぶり厚さが 20mm 未満およびかぶり厚さが 20mm 以上 50mm 未満を対象に、モルタル仕上げの厚さを区分して、鉄筋腐食グレード別の劣化グレードの発生割合を示す。モルタル仕上げの厚さは、10mm 未満、10mm 以上 30mm 未満、30mm 以上 80mm 未満で分類した。結果より、鉄筋腐食グレードが大きいほど、劣化グレードが小さい状態の割合が減少し、劣化グレードの大きい状態の割合が増加しているが、モルタル厚さによる明確な傾向は見られない。ただし、かぶり厚さが 20mm 未満の場合、モルタル厚さが 30 mm 未満では、劣化グレード D0、D1 および D3 が発生しているにも関わらず、劣化グレード D2 (鉄筋腐食によるひび割れ) の事象がほぼ発生していないことが特徴として挙げられる。これは、モルタルおよびコンクリートのかぶり厚さが小さい場合には、鉄筋腐食の進行に伴うコンクリートの劣化現象として、ひび割れが発生すると同時に剥離している状況となっていることが考えられる。



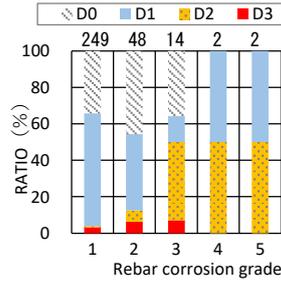
(a) 全データ



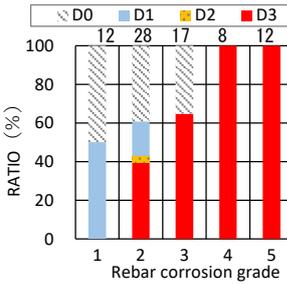
(b1) かぶり厚さ<20mm



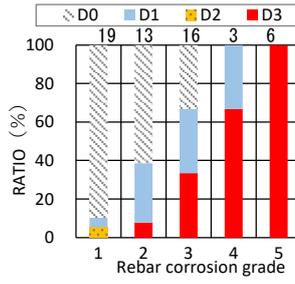
(b2) 20 ≤ かぶり厚さ < 50 mm



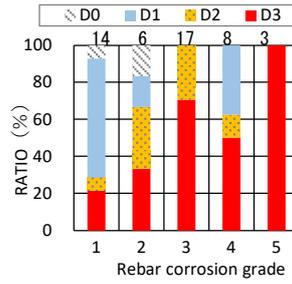
(b3) 50 ≤ かぶり厚さ < 150 mm



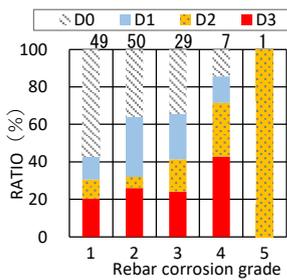
(c1) かぶり厚さ<20mm
モルタル厚さ<10mm



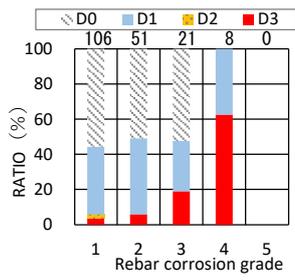
(c2) かぶり厚さ<20mm
10 ≤ モルタル厚さ < 30 mm



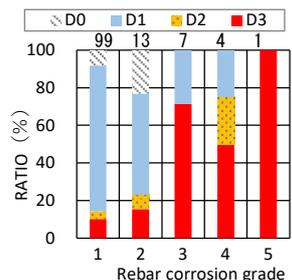
(c3) かぶり厚さ<20mm
30 ≤ モルタル厚さ < 80 mm



(c4) 20 ≤ かぶり厚さ < 50 mm
モルタル厚さ<10mm



(c5) 20 ≤ かぶり厚さ < 50 mm
10 ≤ モルタル厚さ < 30 mm



(c6) 20 ≤ かぶり厚さ < 50 mm
30 ≤ モルタル厚さ < 80 mm

図 8.3.1 劣化グレードの発生割合の結果

8.4 まとめ

築46～69年の実建物11棟の調査から得た約1000のデータを用いて分析した結果、下記のこと
が示唆された。

- 1) 鉄筋腐食グレードが大きいかほど、劣化グレードが小さい状態の割合が減少し、劣化グレード

Ⅲ-3. 耐久性向上 付録 2

の大きい状態の割合が増加する。その増加・減少の様子は、かぶり厚さによって異なり、かぶり厚さが小さいほど、鉄筋腐食グレードが小さい段階で劣化グレードの大きなものが出現しやすい。

- 2) モルタル厚さによる明確な傾向は本調査では確認されなかった。

9. まとめ

健全度が低下する原因を明らかにするため、鉄筋腐食の進行に及ぼす要因について検討した。実建物調査より得られたデータを用いて分析し、それらの結果および関連規格を踏まえ、鉄筋腐食の進行の要因について定性的に整理した（表 6.1）。また、鉄筋腐食の程度と目視によって確認できる劣化事象との関係について検討し、鉄筋腐食の進行と劣化グレード（第Ⅲ-1 編表 3.2.1）の出現には一定の相関があることを確認し、これらにはかぶり厚さが影響することが示唆された。

今後は、残存耐用年数の算出のための劣化進行予測モデルの開発に向けて、劣化速度の定量化が課題である。