

原子力規制庁 御中

平成 27 年度原子力施設等防災対策等委託費（高経年
化技術評価高度化（コンクリート構造物の長期健全性
評価に関する調査研究））事業

成果報告書（1 / 3）

平成 28 年 3 月

MRI株式会社三菱総合研究所

本報告書は、原子力規制庁の委託業務により、三菱総合研究所が、首都大学東京、東京工業大学、名古屋大学、東北大学、広島大学との連携により作成し、原子力規制庁へ納品したものです。

したがって、本資料の公開、複製、転載、引用等には、原子力規制庁の承認が必要です。

目 次

1 序論	1-1
1.1 事業目的	1-1
1.2 事業項目	1-1
1.3 事業遂行体制	1-1
1.4 実施スケジュール.....	1-2
1.5 事業概要	1-2
2 コンクリート構造物の複合劣化評価.....	2-1
2.1 はじめに	2-1
2.2 コンクリート構造物の長期健全性評価の検討.....	2-2
2.2.1 はじめに.....	2-2
2.2.2 長期健全性評価の枠組.....	2-2
2.2.3 材料特性の評価.....	2-11
2.2.4 構造性能の評価.....	2-15
2.2.5 まとめ	2-21
2.3 熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討.....	2-23
2.3.1 研究の背景および目的.....	2-23
2.3.2 破壊特性の評価方法.....	2-25
2.3.3 100℃未満で長期の加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性.....	2-26
2.3.4 100℃以上で加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性.....	2-40
2.3.5 100℃未満で中性化したコンクリートのひび割れ特性.....	2-59
2.3.6 まとめ	2-69
2.4 複合劣化を受けた鉄筋コンクリートのひび割れ発生に関する検討.....	2-71
2.4.1 研究の背景および目的.....	2-71
2.4.2 実験概要.....	2-72
2.4.3 実験結果および考察.....	2-79
2.4.4 まとめ	2-100
2.5 複合劣化を受けた鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食に関する検討.....	2-102
2.5.1 研究の背景および目的.....	2-102
2.5.2 実験概要.....	2-103
2.5.3 実験結果および考察.....	2-109
2.5.4 まとめ	2-123
2.6 鉄筋コンクリート部材の劣化による構造性能の低下に関する検討.....	2-125
2.6.1 鉄筋腐食による腐食膨張ひび割れ挙動に関する検討.....	2-125

2.6.2	経年劣化材料と鉄筋コンクリート部材の構造物の性能に関する検討.....	2-188
2.6.3	まとめ	2-218
2.7	まとめ	2-219
付録	コンクリート構造物の複合劣化による長期健全性評価（案）説明書.....	付-1
3	放射線照射によるコンクリート強度劣化評価.....	3-1
3.1	はじめに	3-1
3.2	コンクリートおよび構成要素のガンマ線影響評価.....	3-11
3.2.1	物理特性試験（コンクリート）	3-11
3.2.2	物理特性試験（セメントペースト）	3-66
3.2.3	物理特性試験（骨材）	3-74
3.2.4	まとめ	3-138
3.3	コンクリートおよび構成要素の中性子線影響評価.....	3-141
3.3.1	照射試験の実施状況.....	3-141
3.3.2	相互作用試験.....	3-167
3.3.3	物理特性試験.....	3-217
3.3.4	試験結果の分析.....	3-325
3.3.5	JEEP II 炉内の照射に係る解析的検討	3-366
3.3.6	まとめ	3-442
3.4	熱・乾燥影響に関するメカニズム解明の試験的検討.....	3-445
3.4.1	異なる温度におけるコンクリート内部の湿度測定.....	3-445
3.4.2	コンクリート強度に対する温度の影響.....	3-452
3.4.3	セメントペーストの乾燥と強度の関係.....	3-458
3.4.4	セメントペースト中の水分と体積変化.....	3-468
3.4.5	まとめ	3-483
3.5	数値解析的検討.....	3-484
3.5.1	CCBM と中性子／ガンマ線輸送計算の連成	3-484
3.5.2	コンクリートと放射線の相互作用とそのモデル化.....	3-487
3.5.3	JPDR 炉を用いた検証	3-497
3.5.4	PWR 炉の解析	3-508
3.5.5	まとめ	3-516
3.6	放射線影響に関する国際動向.....	3-517
3.7	まとめ	3-521
付録	数値解析的検討（案）の使用説明書.....	付-1

4	コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究.....	4-1
4.1	はじめに	4-1
4.2	コンクリートの ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法.....	4-8
4.2.1	既存の骨材試験による長期膨張特性の評価.....	4-10
4.2.2	有効な骨材試験方法の選択と改善.....	4-26
4.2.3	有効な骨材試験方法の根拠データの取得.....	4-44
4.2.4	まとめ	4-51
4.3	既存コンクリート構造物の ASR 診断方法.....	4-54
4.3.1	劣化進行段階の異なる試験体の作成および基礎データの取得.....	4-58
4.3.2	外観観察、岩石学的評価等による ASR 反応性評価.....	4-70
4.3.3	劣化進行段階の異なる試験体による ASR 反応性評価.....	4-86
4.3.4	促進膨張試験による膨張のポテンシャル評価.....	4-108
4.3.5	まとめ	4-163
4.4	ASR による部材性能変化の予測評価手法の調査	4-167
4.4.1	ASR 膨張予測モデルの調査	4-169
4.4.2	国内外の予測評価手法の調査.....	4-181
4.4.3	予測評価手法の有効性確認.....	4-197
4.4.4	まとめ	4-201
4.5	ASR に関する国際動向	4-205
4.6	まとめ	4-214
5	事業進捗の管理と成果報告の実施.....	5-1
5.1	実施履歴	5-1
5.2	報告会	5-1
5.3	第三者有識者委員会.....	5-2
5.4	研究会	5-3
5.5	定例報告	5-3
5.6	品質管理活動.....	5-3
6	結論	6-1
	謝辞	

1. 序論

1.1 事業目的

運転開始後 30 年を超えて運転する経年プラントの健全性評価をより高度化するため、高経年化技術評価に対して最新知見を取り入れて、コンクリート材料の経年劣化進展に伴う安全裕度の低下に係る予測手法の導入や予測精度の改善を図り、コンクリート構造物の長期健全性評価の高度化に資するものである。

1.2 事業項目

以下の項目について実施する。

- (1) コンクリート構造物の複合劣化評価
- (2) 放射線照射によるコンクリート強度劣化評価
- (3) コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究
- (4) 事業進捗の管理と成果報告の実施

1.3 事業遂行体制

本事業は、三菱総合研究所が受託機関代表となり、国立大学法人東北大学（以下、東北大学）、国立大学法人東京工業大学（以下、東京工業大学）、国立大学法人名古屋大学（以下、名古屋大学）、国立大学法人広島大学（以下、広島大学）、公立大学法人首都大学東京（以下、首都大学東京）とコンソーシアムを組み、業務を遂行した。図 1.3-1 に事業遂行体制図を記す。

なお、本事業で実施した各研究の遂行体制については、1.5 の事業概要に記載した。

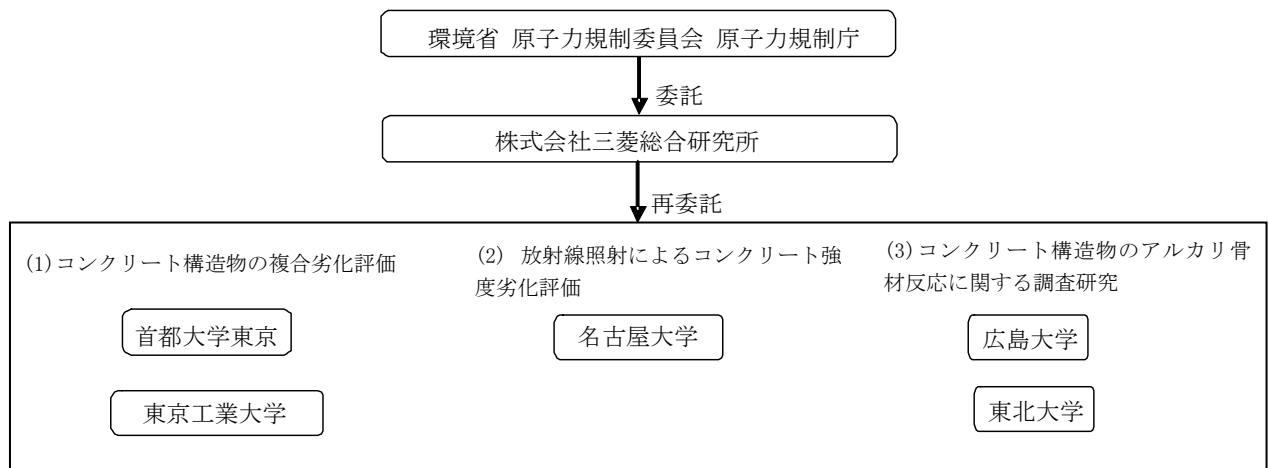


図 1.3-1 事業遂行体制

1.4 実施スケジュール

実施スケジュールは以下の通りである。

平成 27 年 4 月 13 日から、平成 28 年 3 月 31 日まで

1.5 事業概要

1.3 に記載した事業遂行体制に加え、関係各所の協力を仰ぐ形での研究実施体制を構築し、1.2 に示した 3 項目の研究を実施する。この(1)～(4)が、2 章～5 章に対応する。各研究の実施概要を以下に示す。

(1) コンクリート構造物の複合劣化評価

1) 実施内容

劣化要因の複合によるコンクリート構造物の材料劣化並びに構造性能の低下が、原子力発電施設の長期健全性に及ぼす影響を評価するための枠組を整備する。

2) 実施方法

コンクリート構造物の材料劣化並びに構造性能の低下に及ぼす中性化、塩分浸透、熱の劣化要因による複合劣化の影響を調査し、複合劣化を受けたコンクリートのひび割れ発生メカニズム、複合劣化による鉄筋腐食と強度の関係を試験等により明らかにするとともに、鉄筋腐食を受けた鉄筋コンクリート部材の構造性能について検討する。

これらの検討結果に基づき、複合する劣化因子の作用量と材料劣化の関係を定式化し、経年劣化進展を推定するためのコンクリート構造物の長期健全性評価の枠組を提案する。

平成 27 年度は、熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討、複合劣化を受けた鉄筋コンクリートのひび割れ発生に関する検討、複合劣化を受けた鉄筋コンク

リートの鉄筋腐食に関する検討及び鉄筋コンクリート部材による構造性能に関する検討を実施し、これまでの成果を取りまとめ長期健全性評価の枠組を提案する。また、長期健全性評価（案）の説明書を併せて取りまとめる。

3) 研究体制

図 1.5-1 に研究実施体制を示す。

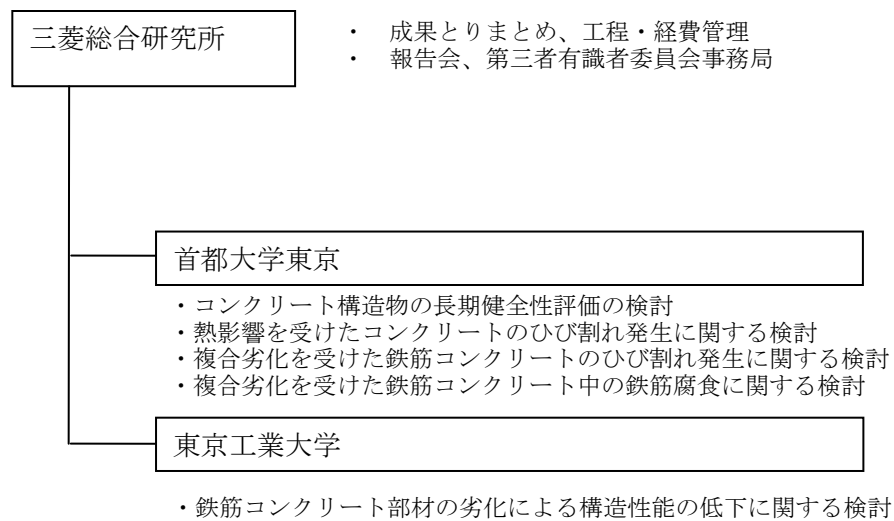


図 1.5-1 研究実施体制

(2) 放射線照射によるコンクリート強度劣化評価

1) 実施内容

原子力発電施設の遮蔽機能及び支持機能が要求される、ガンマ線や中性子線の照射環境下にある安全上重要なコンクリート構造物に対して、放射線照射によるコンクリート劣化に関するメカニズムの解明と累積照射量の制限値としている目安値の妥当性を確認する。

また、コンクリート部材中の応力・ひび割れの発生予測を含めた部材の影響評価に基づく長期健全性評価手法を検討する。

2) 実施方法

ガンマ線及び中性子線の累積照射量の制限値として参考になっている目安値の設定根拠の妥当性検証並びに放射線がコンクリートの物理特性に及ぼす影響を把握するため、試験条件や試験方法を選定しガンマ線及び中性子線の照射試験を実施する。

ガンマ線については、長期間の照射がコンクリート構成材料（骨材）及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響を評価するためのデータ取得と分析を行い、劣化メカニズムの解明、累積照射量と劣化の関係を評価する。

中性子線については、60 年運転時に想定される累積照射量を超える照射試験を実施し、中性子線がコンクリート構成材料（セメントペースト、骨材）及びコンクリートの物理特性に及ぼす影響を評価するためのデータ取得と分析を行う。その他、非照射で照射試験と同一温度条件の加熱試験を行い、熱による劣化メカニズムを解明するためのデータ取得と分析を行う。併せて、熱および乾燥がコンクリート強度へ与える影響を評価し、コンクリート部材の構造性能変化を予測可能な数値解析的検討を行う。

これらの実験的検討と数値解析的検討を基に、放射線照射の影響を受ける原子力発電施設のコンクリート構造物に対する長期健全性評価手法を検討する。

平成 27 年度は、ガンマ線の影響については、ガンマ線による照射試験を実施し、照射による骨材の変質、長期間の照射によるコンクリートの強度・剛性の変化に関するデータ取得と分析を行う。中性子線の影響については、中性子線による照射試験を実施し、照射によるセメントペーストや骨材の変質、長期間の照射によるコンクリートの強度・剛性の変化に関するデータ取得と分析を行う。熱の影響については、乾燥と温度の影響を区分した物性変化とメカニズムを解明するための実験、水分移動に関する実験を実施する。数値解析的検討については、平成 26 年度までに実施した長期健全性評価手法の内容を取りまとめ、使用説明書を作成する。

また、放射線影響に関する国際会議等に参加し、参加各国の情報を収集する。

3) 研究体制

図 1.5-2 に研究実施体制を示す。

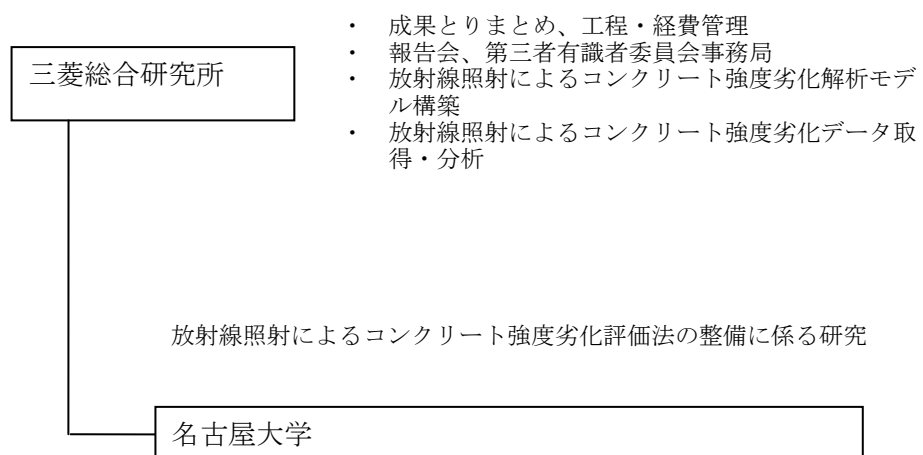


図 1.5-2 研究実施体制

(3) コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究

1) 実施内容

アルカリ骨材反応（以下、「ASR」という。）に関する国内外の学术论文や技術関連情報による最新知見の調査結果を基に検討した骨材試験方法と ASR 診断方法による総合的な ASR 評価システムの検証を行い、適用性と有効性を確認する。また、既往の ASR 予測評価手法を調査し、その適用性について検討する。

2) 実施方法

原子力発電施設の高経年化技術評価に係るコンクリート構造物の健全性については、既往の規格基準類により ASR 評価を実施している。近年、ASR の原因である急速膨張性骨材以外に、遅延膨張性骨材（10 数年以上経過してからコンクリートにひび割れを生じる。）による劣化事例が報告されている。現在、国内外の関係機関でも様々な検討が実施されているが、遅延膨張性骨材を含むすべての反応性骨材を対象にした ASR 評価手法は策定されていない。そこで、高経年化技術評価の ASR 評価に反映するため、遅延膨張性骨材を含むすべての反応性骨材の ASR に係るデータを整備し、最新知見を基にした総合的な ASR 評価システムの適用性と有効性を確認する。

平成 27 年度は、総合的な ASR 評価システムのうち、骨材の ASR ポテンシャル評価のための骨材試験方法については、国内の急速膨張性骨材及び遅延膨張性骨材を用いた試験（例：JIS モルタルバー法、RILEM AAR-3、RILEM AAR-4）を実施し、長期膨張特性を評価する。さらに、平成 26 年度当該事業で実施した試験結果と併せて、有効と考えられる試験方法を選択し必要な改善を行い、有効な骨材試験方法の根拠データを取得する。

総合的な ASR 評価システムのうち、既存コンクリート構造物の ASR 診断方法については、コアを用いた外観観察、岩石学的評価等によるコンクリート構造物の反応性評価と促進膨張試験による残存膨張のポテンシャル評価に関する試験を実施し、ASR 診断方法の根拠データを取得する。ASR による部材性能の経年変化については、平成 26 年度当該事業で調査した予測評価手法の有効性の可否を検討する。

また、ASR に関する国際会議等に参加し、参加各国の情報を収集する。

3) 研究体制

図 1.5-3 に研究実施体制を示す。

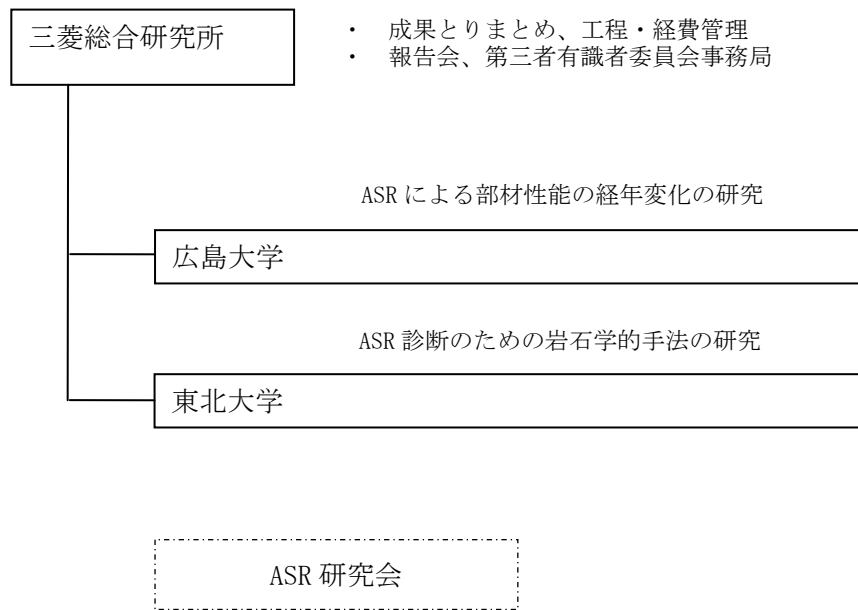


図 1.5-3 研究実施体制

(4) 事業進捗の管理と成果報告の実施

1) 実施内容

本事業で実施する(1)、(2)及び(3)の各個別調査研究について、研究計画に対する進捗度の確認、研究目標に対する実施内容の妥当性の確認、研究成果の取りまとめ等に係る管理を行い、事業開始時説明、中間成果報告及び最終成果報告を行う。

2) 実施方法

本事業で実施する(1)コンクリート構造物の複合劣化評価、(2)放射線照射によるコンクリート強度劣化評価及び(3)コンクリート構造物のアルカリ骨材反応に関する調査研究に対して、研究計画の確認や進捗度の把握、研究目標に対する実施内容の妥当性の確認及び研究成果の取りまとめ等に係る管理を行う。

受注者は、上記の管理を満足するため、下記の a. ～c. について記述する品質保証計画書を提出するとともに、品質保証計画書の記載内容について発注者の了解を得る。

a. 品質保証体制

- ・品質保証部署が、業務実施部署と独立していること
- ・品質保証責任者は、実施責任者と兼務していないこと
- ・品質保証に関わる責任及び役割が明確になっていること

b. 品質保証活動

- ・品質を保証するため、業務手順及び成果品（インプット、アウトプット）の審査・検証を確実に実施する活動フローが明確になっていること
- ・品質を保証するため、審査項目、審査内容、審査基準、審査者等を明記したチェックリストが作成されていること
- ・過年度までに実施した各調査研究の成果が、確実に取り入れられて業務を実施しているか確認すること
- ・その他、品質保証活動に必要な事項を記載すること

c. 文書管理

- ・業務で発生する文書の維持・保管方法について明確にされていること

また、発注者と1～2ヶ月に1回程度の打合せを行い、発注者との打合せ議事録、並びに月ごとの研究の進捗状況、課題状況及び課題への対応案をまとめた月報を提出する。

さらに、各調査研究について、事業開始時に実施計画書の提出及び説明、中間での進捗状況及び成果取りまとめ状況の報告(3回程度)、並びに最終成果取りまとめ報告を実施する。なお、実施者は第3者有識者(3名程度)による委員会を設置し、進捗状況、成果の妥当性等に関する意見聴取を行い、その結果を成果とりまとめの参考とすることとする。

2. コンクリート構造物の複合劣化評価

2.1 はじめに

コンクリート構造物の材料劣化並びに構造性能の低下に及ぼす中性化、塩分浸透、熱等の劣化要因による複合劣化の影響を調査し、複合劣化を受けたコンクリートのひび割れ発生メカニズム、複合劣化による鉄筋腐食と強度の関係を試験等により明らかにするとともに、鉄筋腐食を受けた鉄筋コンクリート部材の構造性能について検討する。

これらの検討結果に基づき、複合する劣化因子の作用量と材料劣化の関係を定式化し、経年劣化の進展を推定するためのコンクリート構造物の長期健全性評価の枠組を提案する。

平成 27 年度は、熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討、複合劣化を受けた鉄筋コンクリートのひび割れ発生に関する検討、複合劣化を受けた鉄筋コンクリートの鉄筋腐食に関する検討及び鉄筋コンクリート部材による構造性能に関する検討を実施し、これまでの成果を取りまとめ長期健全性評価の枠組を構築する。また、構築した長期健全性評価（案）の説明書を併せて取りまとめる。

図 2.1-1 に、コンクリート構造物の複合劣化評価の全体概要を示す。

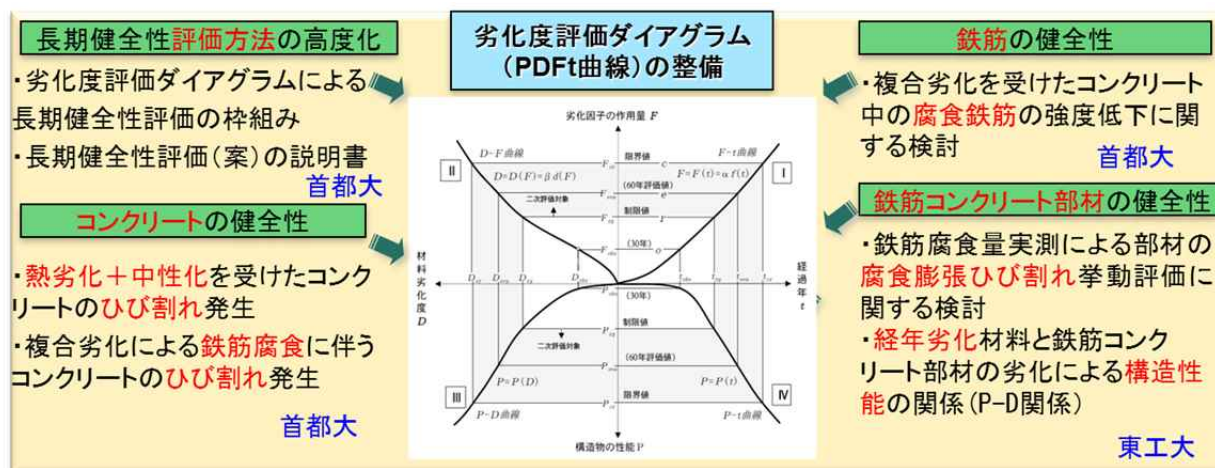


図 2.1-1 コンクリート構造物の複合劣化評価の全体概要

2.2 コンクリート構造物の長期健全性評価の検討

2.2.1 はじめに

原子力発電施設の長期健全性評価において複合劣化によるコンクリート構造物の材料劣化並びに構造性能の低下を評価する枠組を提案するとともに、長期健全性評価（案）の説明書を作成することを目的とする。昨年度までは、劣化因子の作用量と時間変化及び材料劣化度と劣化因子の作用量に関し単一要因での関係を整理した¹。また、鉄筋腐食、コンクリート強度低下等材料劣化度と構造物の性能である部材のひび割れ、曲げ耐力、せん断耐力低下との関係を調査した。本年度は、複合要因での材料特性及び構造性能の評価について検討し、昨年度までの調査結果・研究結果を取りまとめ長期健全性評価（案）の説明書を作成した。

2.2.2 長期健全性評価の枠組

(1) 長期健全性評価の概要

原子力発電施設に使用される鉄筋コンクリート構造物(以下、「RC 構造物」という)は、広範囲の地域にあり多様な環境条件下に長期間おかれるため外的要因が多岐にわたり複合的に作用する。また、鉄筋とコンクリートとの複合材である RC 構造物の性能を評価するためには材料単体の劣化作用因子及び劣化度だけでなく複合的な作用を考慮し、RC 構造物での性能を総合的に検討する必要がある。これらの課題の解決策として、「RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム (PDFt 曲線)」²を用いる。PDFt 曲線は、劣化関数の基本評価式を定め劣化度の測定データ等を外挿し、劣化指数及び評価曲線を帰納的に決定すること、複合体の評価のために経過年 t 、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D 、構造物の性能 P 相互の各関係を定式化し、それらを組み合わせることにより、RC 構造物の長期健全性評価が可能である点が特徴である。

(2) 複合劣化評価対象

対象とする原子力発電所施設のコンクリート部位は、特に中性化、塩分浸透、熱の影響を受ける部分であり、さらにそれらが複合的な作用を受ける部分である。高経年化技術評価審査マニュアル³（コンクリートの強度低下及び遮へい能力低下）においては、劣化要因ごとに、経年劣化の影響がもっとも厳しくなると想定される部位を選定とあり、そこでの代表的な部位選定例には以下の表 2.2.2-1 がある。この中で本研究での対象を赤枠で示す。また、この中で特に複合劣化の可能性が考えられる劣化要因を、*1) 中性化、*2) 塩分浸透、*3) 熱として示した。

¹ 首都大学東京：“平成 26 年度高経年化対策強化基盤整備事業「コンクリート構造物の健全性二次評価に係わる評価法の調査・試験研究」成果報告書”、三菱総合研究所委託、(2014)

² 橋高義典：“鉄筋コンクリート構造物の高経年化技術評価における健全性評価の方法”、日本建築学会技術報告集、No.32、pp.27-30 (2010)

³ 独立行政法人 原子力安全基盤機構：“高経年化技術評価審査マニュアル コンクリートの強度低下及び遮へい能力低下（含む鉄骨構造の強度低下）”、JNES - SS - 0512 - 04、(2009)

表 2.2.2-1 経年劣化要因と評価対象部位 (例)

経年劣化要因	BWR プラント	PWR プラント
熱	原子炉ペデスタル	内部コンクリート ^{*1)}
放射線照射	原子炉ペデスタル	内部コンクリート
中性化	外周コンクリート ^{*2)} 、内壁コンクリート ^{*3)}	外部遮蔽壁 ^{*2)} 、原子炉格納施設基礎、内部コンクリート ^{*3)}
塩分浸透	取水構造物 ^{*1)} 、外周コンクリート ^{*1)}	取水構造物 ^{*1)} 、外部遮蔽壁 ^{*1)}
アルカリ骨材反応	コンクリート構造物全般	コンクリート構造物全般
機械振動	タービン架台、非常用ディーゼル発電機基礎	タービン架台、非常用ディーゼル発電機基礎
凍結融解	取水構造物、外周コンクリート	取水構造物、外部遮蔽壁
化学的侵食	コンクリート構造物全般	コンクリート構造物全般

*複合劣化の可能性が考えられる要因: 1) 中性化、2) 塩分浸透、3) 熱

(3) $PDFt$ 曲線による複合劣化の評価

1) $PDFt$ 曲線による評価

RC 構造物の劣化度予測に関して、「RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム ($PDFt$ 曲線)」を用い、実際の劣化度測定データに基づいた RC 構造物の健全性評価の方法⁴ (以下、 $PDFt$ 曲線による健全性評価) がある。図 2.2.2-1 に $PDFt$ 曲線を示す。 $PDFt$ 曲線の考え方は、劣化関数の基本形を予め定め、構造物の実際の複合劣化度測定データを外挿し、劣化関数の係数を帰納的に決定し、劣化関数を決定し劣化予測を行うというものである。劣化関数の係数により様々な構造物 (ここでは各地域の原子力発電施設) の耐久性に関する特性を共通的な尺度で評価できる。また、時間 t 、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D 、構造物の性能 P について各因子間の関係を独立事象として明確にとらえることで推定精度が上がる。

劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係を $F-t$ 曲線 (レベルⅠ)、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係を $D-F$ 曲線 (レベルⅡ)、構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係を $P-D$ 曲線 (レベルⅢ) とする。これらを統合すると、図 2.2.2-1 に示す RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム ($PDFt$ 曲線) が得られる。本図のレベルⅣが構造性能の時間変化

⁴ 橋高義典: “鉄筋コンクリート構造物の高経年化技術評価における健全性評価の方法”、日本建築学会技術報告集、No.32、pp.27-30 (2010)

を評価する $P-t$ 曲線となる。現在の健全性一次評価では、劣化因子の作用量 F あるいは材料劣化度 D について制限値を定めているが、 $PDFt$ 曲線を用いることで、構造物の性能 P に基づく制限値から、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D の制限値を定めることができる。

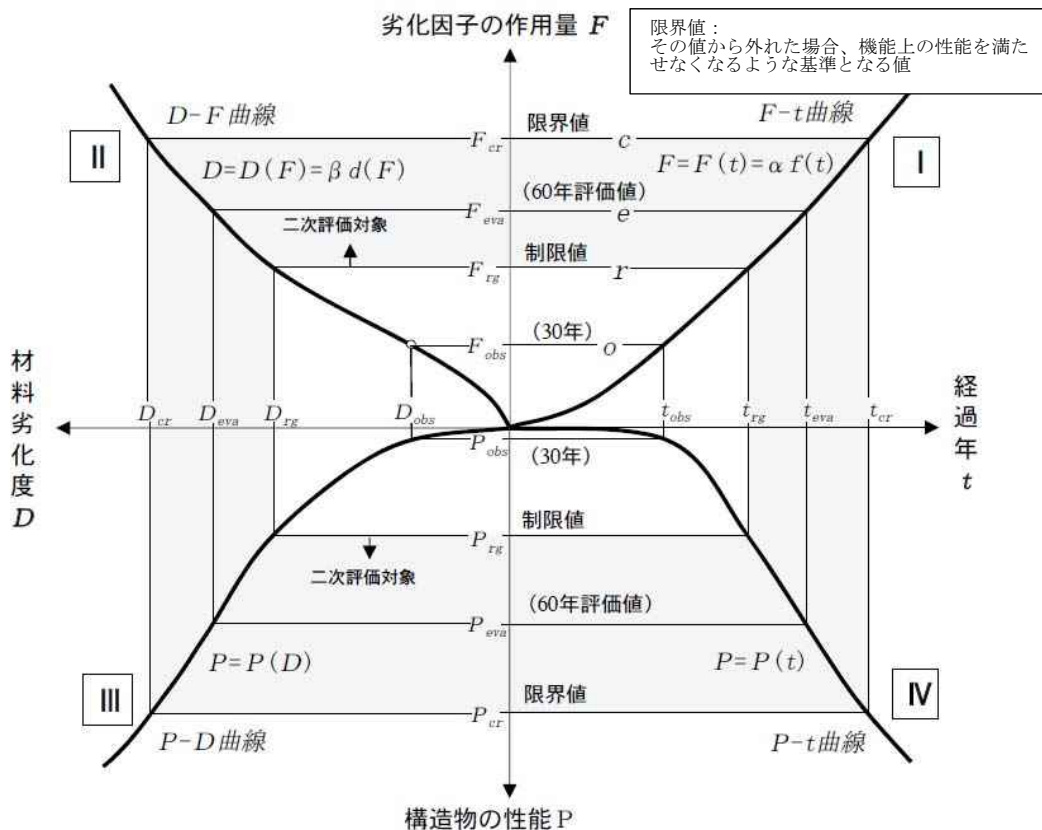


図 2.2.2-1 RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム($PDFt$ 曲線)

2) 複合劣化を考慮した $PDFt$ 曲線

(a) 劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係($F-t$ 曲線)

経過年 t と劣化因子の作用量 F との関係 $F(t)$ を係数 α と評価基本式 $f(t)$ により式 (2.2.2-1) で表し $F-t$ 曲線とする (図 2.2.2-1 でのレベル I)。

$$F(t) = \alpha f(t) \quad (2.2.2-1)$$

ここに、 α :劣化因子指数

劣化因子指数 α は劣化因子が複合的に作用する場合は、式 (2.2.2-2) となる。

$$\alpha = \alpha(I_1, I_2, \dots, I_n) \quad (2.2.2-2)$$

ここに、 $I_1 \sim I_n$:劣化要因 (温度、湿度、材料条件、炭酸ガス濃度、塩化物イオン濃度等)

複合的な劣化因子に対して式 (2.2.2-1) が成立つ評価基本式 $f(t)$ とすることで、実測値に基づく外挿法により α で劣化因子の複合作用を一律に評価する (α の中に複合的な環境因子を含ませ評価する)。

(b) 材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係(D - F 曲線)

材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 $D(F)$ を係数 β と式 (2.2.2-3) に表す評価基本式 $d(F)$ により表し D - F 曲線とする (図 2.2.2-1 でのレベルⅡ)。

$$D(F) = \beta d(F) \quad (2.2.2-3)$$

ここに、 β :材料劣化指数

材料劣化指数 β は複合因子が作用する場合は、式 (2.2.2-4) で表せる。

$$\beta = \beta(F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (2.2.2-4)$$

ここに、 $F_{1 \sim n}$:劣化因子 (中性化深さ、塩化物イオン濃度、温度等)

複合的な劣化因子に対して式 (2.2.2-3) が成立つ評価基本式 $d(F)$ とすることで、実測値に基づく外挿法により β で劣化因子の複合作用を一律に評価する (β の中に複合的な劣化因子を含ませ評価する)。

(c) 構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係(P - D 曲線)

構造物の性能 P と複数の材料の劣化度 D との関係を定式化し P - D 曲線とする (図 2.2.2-1 でのレベルⅢ)。

$$P(D) = P(D_1, D_2, \dots, D_n) \quad (2.2.2-5)$$

ここに、 $D_{1 \sim n}$:材料劣化度

P - D 曲線については実際の構造物の性能 P を実測することが難しいこと、 P - D の関係は地域性、作用因子に関わらず普遍性があること等から、劣化後の材料特性を用いた数値解析、設計式、推定式等で直接求める。

(d) 経過年 t と構造物の性能 P との関係 (P - t 曲線)

上記の(a)~(c)を統合すると、図 2.2.2-1 に示す RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム ($PDFt$ 曲線) が得られる。右下の P - t 曲線 (レベルⅣ) は、右上 (レベルⅠ) 及び左下 (レベルⅢ) の t 及び P の数値を数点プロットすることで得られる。材料劣化度 D が多数で複合的な作用を受ける場合は評価式に複数ある材料劣化度 D を代入して P - t 曲線を決定する。

3) 評価物理量の概要

原子力発電施設の RC 構造物の健全性評価を行う上で評価対象となる評価物理量の例を劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D 、構造物の性能 P それぞれについて表 2.2.2-2 に示す。本報告書で対象とする劣化因子の作用量 F は、中性化 F_1 、塩分浸透 F_2 、熱 F_3 である。表 2.2.2-3 に F_1 、 F_2 、 F_3 に対する材料劣化度 D の対応例を示す。主要となる劣化事象は、構造性能に影響を及ぼす圧縮強度 D_1 、ヤング係数 D_2 、鉄筋腐食度 D_3 である。また、表 2.2.2-4 に構造物の性能 P に対する材料劣化度 D の対応例を示す。

表 2.2.2-2 原子力発電施設での健全性評価での評価物理量の例

劣化因子の作用量 F		材料劣化度 D		構造物の性能 P	
F_1	中性化深さ	D_1	圧縮強度	P_1	部材の剛性
F_2	塩化物イオン濃度	D_2	ヤング率	P_2	部材の耐荷力
F_3	熱（温度）	D_3	鉄筋腐食度	P_3	構成則（復元力特性）
F_4	放射線	D_4	断面欠損	P_4	地震応答
F_5	骨材膨張	D_5	引張強度	P_5	鉄筋の付着強度
F_6	機械振動	D_6	ひび割れ抵抗性	P_6	ボルトの引抜耐力
F_7	凍結融解	D_7	—	P_7	気密性
F_8	化学物質	D_8	—	P_8	ひび割れ
F_9	—	D_9	—	P_9	水密性
F_0	その他	D_0	その他	P_0	その他

■ 本説明書で評価対象としている物理量

表 2.2.2-3 劣化因子の作用量 F に対する材料劣化度 D の対応例

	圧縮強度 D_1	ヤング係数 D_2	鉄筋腐食度 D_3	断面欠損 D_4	引張強度 D_5	ひび割れ抵抗性 D_6
中性化深さ F_1			●			
塩化物イオン濃度 F_2			●			
熱（温度） F_3	●	●			●	●

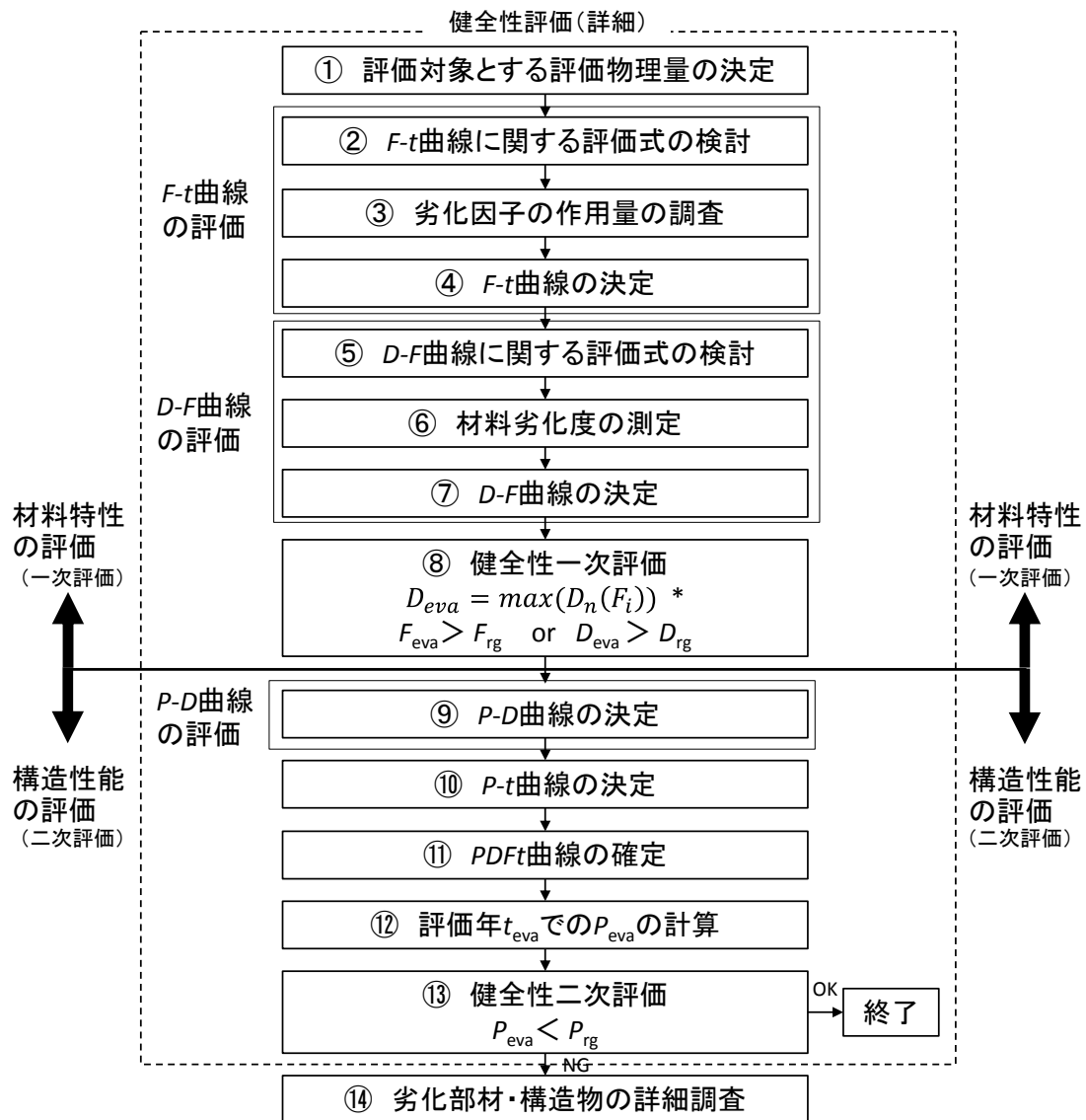
（●本報告書で評価対象としている）

表 2.2.2-4 構造物の性能 P に対する材料劣化度 D の対応例

	圧縮強度 D_1	ヤング率 D_2	鉄筋腐食度 D_3	断面欠損 D_4	引張強度 D_5	ひび割れ抵抗性 D_6
部材の剛性 P_1	●	●	●	●		
部材の耐荷力 P_2	●		●	●	●	●
構成則 P_3	●	●	●	●	●	●
地震応答 P_4	●	●	●			
鉄筋の付着強度 P_5	●		●		●	●
ボルトの引抜耐力 P_6	●				●	●
気密性 P_7	●			●		●
ひび割れ P_8	●		●		●	●
水密性 P_9	●					●

4)健全性評価の方法

図 2.2.2-2 に $PDFt$ 曲線による評価プロセスを示す。また、高経年化対策審査ガイドでの評価プロセスにおける位置付けを図 2.2.2-3 に示す。



*異なる種類の劣化因子 (F1、F2...Fn) の作用で同種の材料劣化度Dの評価値が算出された場合は、劣化度の大きな方を選択する。

t_{eva} : 評価年
 F_{eva} : 評価年 t_{eva} における劣化因子の作用量
 F_{rg} : 劣化因子の作用量の制限値
 D_{eva} : 評価年 t_{eva} における材料劣化度
 D_{rg} : 材料劣化度の制限値
 P_{eva} : 評価年 t_{eva} における構造物の性能
 P_{rg} : 構造物の性能の制限値

図 2.2.2-2 PDFt 曲線による評価プロセス

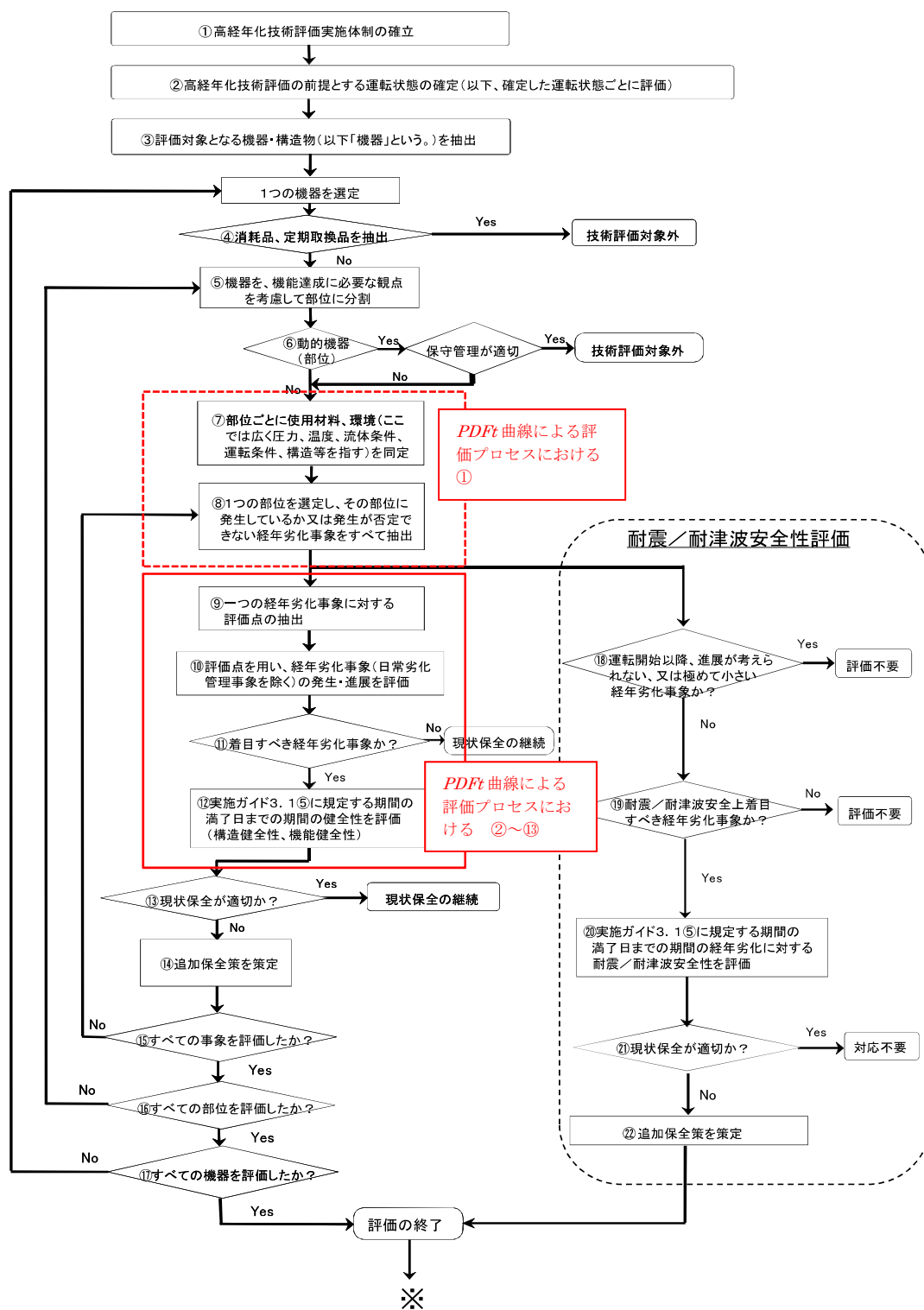


図 2.2.2-3 高経年化対策審査ガイド⁵での評価プロセス

⁵ 原子力規制庁：” 実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド” 2013.7

以下に $PDFt$ 曲線による評価プロセスの詳細を示す。

① 評価対象とする評価物理量の決定

着目する劣化因子の作用量 F 、材料の劣化度 D 、構造物の性能 P を定める。

② $F-t$ 曲線に関する評価式の検討

①で定めた劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係 ($F-t$ 曲線) として適切な評価式を選定する。

③ 劣化因子の作用量の調査

選定した部位に関して、温度、湿度、放射線照射量、炭酸ガス濃度、塩化物イオン濃度等の劣化因子の作用量 F_{obs} を実測により求める。

④ $F-t$ 曲線の決定

③で得られた結果から、劣化因子指数 α を定め、劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係 ($F-t$ 曲線) を決定する。

⑤ $D-F$ 曲線に関する評価式の検討

①で定めた材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 ($D-F$ 曲線) として適切な評価式を選定する。

⑥ 材料劣化度の測定

評価時期での実際の構造物のコンクリートの強度や鉄筋の腐食量等の材料劣化度 D_{obs} を選定部位で一般的な破壊試験、非破壊試験等を行い測定する。

⑦ $D-F$ 曲線の決定

⑥で得られた結果から、材料劣化指数 β を定め、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 ($D-F$ 曲線) を決定する。

⑧ 健全性一次評価

評価対象とした劣化因子の作用量 F 、材料の劣化度 D に対する制限値 F_{rg} or D_{rg} を定める。評価年 t_{eva} での劣化因子の作用量 F_{eva} or 材料の劣化度 D_{eva} とそれぞれに対応する制限値を比較し、 $F_{\text{eva}} > F_{\text{rg}}$ or $D_{\text{eva}} > D_{\text{rg}}$ を満足するかどうかを確認する。

満足しない場合は、評価年 t_{eva} に達すると評価対象とした部位は劣化の可能性があるとは判断し、二次評価に進み、構造性能の評価、詳細調査を行う。

異なる種類の劣化因子 ($F_1, F_2, \dots, F_n$) の作用で同種の材料劣化度 D の評価値が算出された場合は、劣化度の大きな方を選択する。

⑨ $P-D$ 曲線の決定

構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係 ($P-D$ 曲線) に関する評価式 (エクセル計算シート) を用いて $P-D$ 曲線を決定する。

⑩ $P-t$ 曲線の決定

④⑦⑨で得られた劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係 ($F-t$ 曲線)、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 ($D-F$ 曲線)、構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係 ($P-D$ 曲線) を用いて、 t 及び P の数値を数点プロットすることで、経過年 t と構造物の性能 P

との関係（ P - t 曲線）を得る。

材料劣化度 D が多数で複合的な作用を受ける場合は評価式に複数ある材料劣化度 D を代入して、 P - t 曲線を決定する（図 2.2.2-4 参照）。

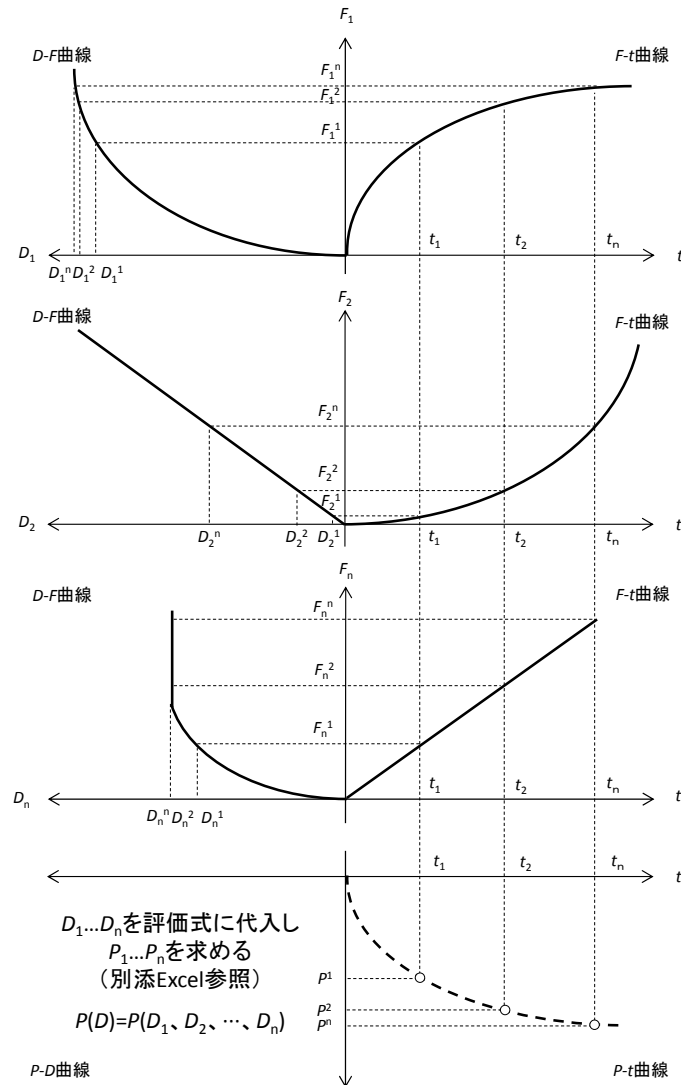


図 2.2.2-4 複合的な材料劣化因子による構造性能（ P - t 曲線）の評価概念

⑪ $PDFt$ 曲線の確定

④⑦⑨⑩で決定した劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係（ F - t 曲線）、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係（ D - F 曲線）、構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係（ P - D 曲線）、経過年 t と構造物の性能 P との関係（ P - t 曲線）を統合することで RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム（ $PDFt$ 曲線）を得る。

⑫ 評価年 t_{eva} での P_{eva} の計算

RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム（ $PDFt$ 曲線）を用いて、推定したい年度 t_{eva} での構造物の性能 P_{eva} を求める。

⑬ 健全性二次評価

評価対象とした構造物の性能 P に対する制限値 P_{rg} を定める。⑫で求めた構造物の性能 P_{eva} と制限値を比較し、 $P_{eva} < P_{rg}$ を満足するかどうかを確認する。満足しない場合は、評価年 t_{eva} に達すると評価対象とした部位は劣化の可能性がある判断する。

⑭ 劣化部材・構造の詳細調査、対策立案と効果の評価

健全性二次評価を行い、NG となった劣化部材・構造体の詳細調査を行い、その劣化への対策を立案する。

2.2.3 材料特性の評価

(1) 概要

以下に、 $PDFt$ 曲線による評価プロセスの①～④劣化因子作用量 F と時間 t との関係 ($F-t$ 曲線) ⑤～⑦、材料劣化度 D と劣化因子作用量 F との関係 ($D-F$ 曲線) それぞれの劣化評価基本式を示す。劣化評価基本式の劣化因子指数及び材料劣化指数には、複合要因の影響を含むこととする。

(2) 中性化

中性化での劣化因子の作用量は中性化深さで代替する。中性化深さに関しての $F-t$ 評価基本式には式 (2.2.3-1) が提案されている⁶。

$$F_1 = \alpha_1 \sqrt{t} \quad (2.2.3-1)$$

F_1 : 中性化深さ (mm)

α_1 : 中性化での劣化因子指数(mm/ $\sqrt{\text{year}}$)

t : 年数(year)

影響因子 I_i として、複合的な影響要因について基本式が成立すると考えられ、各因子の影響は α_1 に含ませることで、実測結果の外挿により、式 (2.2.3-1) で各因子の複合的な影響を評価できる。なお、文献^{7, 8}では、温度条件 (20、60、80℃)、湿度条件 (30、60%R.H.) で促進中性化試験を行い、温湿度が複合的に作用しても α_1 で現わせることを示している。

中性化深さと鉄筋腐食度に関しては以下の評価式がある⁹。

$$W_c = \frac{1}{38.1} (1.35T + 2.76H + 1.800O_2 - 163) \cdot \sqrt{t} \quad (2.2.3-2)$$

⁶ 岸谷孝一：“鉄筋コンクリートの耐久性”、鹿島建設技術研究所出版部 (1963)

⁷ 首都大学東京：“平成 20 年度高経年化対策強化基盤整備事業「原子炉建屋コンクリートの健全性の微視的評価方法に関する研究」報告書”、三菱総合研究所委託、(2009)

⁸ 太田貴士、橘高義典、松沢晃一：様々な温湿度環境下におけるコンクリートの中性化に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1 分冊、pp.557-558、(2011.8)

⁹ 友沢史紀、福士勲、森永繁：“中性化及び鉄筋腐食速度にもとづく鉄筋コンクリートの速度論的耐久性予測手法に関する予備的考察”、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.101-102 (1985)

W_c : 腐食による鉄筋の質量減少量 (10^{-4}g/cm^2)

T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$)

H : 相対湿度 (%)

O_2 : 酸素濃度 (%)

t : 鉄筋部分へ中性化達成後の期間 (day)

ここで、式 (2.2.3-2) に関して、腐食量 W_c は、中性化速度式に用いられる $\sqrt{t}$ と線形関係にあることより、中性化深さと鉄筋の腐食度 D_1 との $D-F$ 関係として以下の劣化評価基本式 (2.2.3-3) が提案されている¹⁰。

$$D_3 = \beta_1 \sqrt{F_1^2 - F_0^2} \quad (2.2.3-3)$$

D_3 : 鉄筋の腐食減量 (mg/cm^2)

β_1 : 材料劣化指数 ($\text{mg/cm}^2/\text{mm}$) (各種影響因子: 温度、相対湿度、酸素濃度を含む)

F_1 : 中性化深さ (mm)

F_0 : 鉄筋が腐食し始める時の中性化深さ^{*注} (mm)

^{*注} 屋外側はかぶり厚さ、屋内側はかぶり厚さ+20mm とする。

(3) 塩分浸透

塩化物イオンの作用量に関しては式 (2.2.3-4) が提案されている¹¹。

$$F_2 = \int_0^{t_n} C_t dt, \quad C_t \geq C_{cr} \quad (2.2.3-4)$$

F_2 : 塩化物イオンの作用量 ($\text{kg/m}^3 \cdot \text{year}$)

C_t : 鉄筋位置での塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

t : 年数 (year)

t_n : 評価年 (year)

C_{cr} : 鉄筋腐食開始塩化物イオン濃度 = 1.2kg/m^3

C_t は下式となる。

$$C_t = C_0 \left\{ 1 - \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\alpha_2 x^2}{t}\right)} \right\}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{\pi D} \quad (2.2.3-5)$$

C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

¹⁰ Kitsutaka Y. and Tsukagoshi M. : “Method on the aging evaluation in nuclear power plant concretes structures”、Nuclear Engineering and Design、pp.286-290(2014)

¹¹ 橘高義典 : “塩害による鉄筋腐食における劣化因子の作用量と材料劣化度との関係について”、2013 年度日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1、pp.423-424 (2013)

x : かぶり厚さ (mm)

α_2 : 塩分浸透での劣化因子指数 (year/mm²)

D : みかけの拡散係数 (mm²/year)

α_2 は材料条件等に影響される劣化因子の作用量に関する定数である。 α_2 は各評価年での鉄筋位置の塩化物イオン濃度の実測値等から求める。影響因子 I_1 として、各種調合、温湿度等の影響は α_2 に含ませることで、式 (2.2.3-5) で複合的な影響を評価する。特に温度が変化した場合でも式 (2.2.3-5) の拡散係数で現わせるとの文献もある¹²。

塩化物イオンの作用量と鉄筋腐食度に関しての劣化評価基本式には下式が提案されている^{13, 14}。

$$D_3 = \beta_2 F_2 \quad (2.2.3-6)$$

D_3 : 腐食による鉄筋の質量減少量 (mg/cm²)

β_2 : 塩分浸透による鉄筋腐食での材料劣化指数

F_2 : 塩化物イオンの作用量 (kg/m³・year)

腐食量に影響する因子は β_2 に含ませることで、実測結果を外挿することにより、式 (2.2.3-6) で塩分浸透による鉄筋腐食の複合的な影響を評価する。

(4) 熱

長期的に加熱の作用を受けたコンクリートの強度特性は大きな変化がなく^{たとえば15, 16}、温度履歴の中である一定期間での最高受熱温度により評価が可能と考えられるため、熱での劣化因子の作用量 F は最高受熱温度 F_3 とし、熱に関する F - t 関係の劣化基本式は式 (2.2.3-7) で表す。

$$F_3 = \max(T) \quad (2.2.3-7)$$

T : 温度 (°C)、(ただし最高受熱温度の継続期間は1日以上とする)

高温下に曝露されたコンクリートの強度の低下は図 2.2.3-1 に示すような傾向がある。

¹² 高橋英孝、湯浅昇、松井勇、笠井芳夫：温度の違いがコンクリートの塩化物イオン浸透性に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-1 分冊、pp.1295-1296、(2010)

¹³ 首都大学東京：“平成 24 年度高経年化対策強化基盤整備事業「コンクリート構造物の健全性二次評価に係わる評価法の調査・試験研究」成果報告書”、三菱総合研究所委託、(2013)

¹⁴ 橘高義典：塩害による鉄筋腐食における劣化因子の作用量と材料劣化度との関係について、日本建築学会大会学術講演梗概集、材料施工、pp.423-424、(2013)

¹⁵ 依田彰彦：10 年間 100°C の熱を受けたモルタルの強度及び重量の変化、セメント技術年報、37、pp.370-373、(1983)

¹⁶ 首都大学東京：“平成 26 年度高経年化対策強化基盤整備事業「コンクリート構造物の健全性二次評価に係わる評価法の調査・試験研究」成果報告書”、三菱総合研究所委託、(2015)

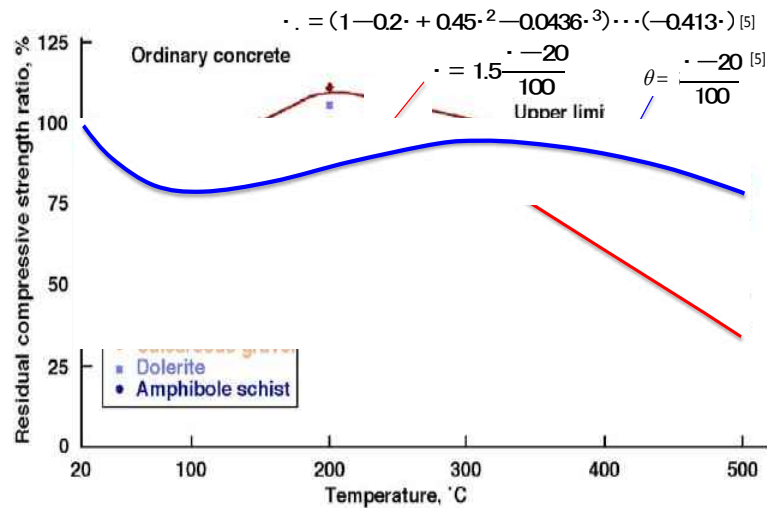


図 2.2.3-1 コンクリートの圧縮強度と温度の関係¹⁷

本結果等より、熱の作用とコンクリートの圧縮強度低下率の関係 $D-F$ 曲線について、加熱温度と強度低下率 D_1 との関係は、阿部らの表示式¹⁸を参考に各種粗骨材でのコンクリートに合致するように式 (2.2.3-8) とする。

$$D_1 = (1 - 0.2\theta + 0.45\theta^2 - 0.0436\theta^3)\exp(-0.413\theta) \quad (2.2.3-8)$$

$$\theta = G \frac{F_3 - 20}{100} \quad (2.2.3-9)$$

G : 骨材定数 (砂岩 : 1.2、玄武岩 : 1.4、石灰岩 : 1.6) ¹⁸

また、コンクリートの圧縮強度低下率 D_1 と同様に、最高受熱温度 F_3 と高温下に曝露されたコンクリートのヤング係数低下率 D_2 に関する劣化評価基本式は下式とする ¹⁸。

$$D_2 = 34.0\exp(-0.234\theta) \quad (2.2.3-10)$$

$$\theta = G \frac{F_3 - 20}{100} \quad (2.2.3-11)$$

G : 骨材定数 (砂岩 : 1.6、玄武岩 : 2.0、石灰岩 : 1.4) ¹⁸

コンクリートのひび割れ抵抗性 D_6 は、破壊エネルギー G_F による。CEB¹⁹や土木学会²⁰では、圧縮強度から破壊エネルギーを評価する下式が提案されており、式 (2.2.3-10) ～式 (2.2.3-11) より、破壊エネルギーと最高受熱温度の関係を表す。

¹⁷ U.S.Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research Washington、 2006.

¹⁸ 安部武雄、大塚貴弘、小林裕、道越真太郎：“高温度における普通強度コンクリートの力学的特性”、日本建築学会構造系論文集、pp7-13、(2007)

¹⁹ CEB Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990、Bulletin d'Information、No.203、pp.2-1-2-16、July、(1991)

²⁰ 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書[設計編]、(2013)

$$G_F(T) = \alpha(T) \cdot G_{F0} \left(\frac{F_C(20)}{10} \right)^{0.7} \quad (2.2.3-12)$$

$$G_F(T) = \alpha(T) \cdot 10(d_{\max})^{1/3} \cdot F_C(20)^{1/3} \quad (2.2.3-13)$$

$$\alpha(T) = -0.06 \left(\frac{T-100}{100} \right)^2 + 0.28 \frac{T-100}{100} + 1.54 \quad (2.2.3-14)$$

ここに、 $G_F(T)$ ：加熱温度 T における破壊エネルギー（N/m）

$\alpha(T)$ ：加熱温度 T における影響係数

$d_{\max}$ ：粗骨材の最大寸法（mm）

$F_C(20)$ ：20℃における圧縮強度（N/mm²）

T ：加熱温度（℃）{100 ≤ T ≤ 800}

$G_{F0} = 0.025$ （N・mm/mm²） $d_{\max} = 8\text{mm}$

0.030（N・mm/mm²） $d_{\max} = 16\text{mm}$

0.058（N・mm/mm²） $d_{\max} = 32\text{mm}$

2.2.4 構造性能の評価

(1) 評価の概要

材料特性の評価（一次評価）で、劣化因子の作用量あるいは、材料劣化度が制限値を超える場合には構造性能の評価（二次評価）を行う。二次評価では、劣化の進行が予想される柱・梁、壁の部材の健全性評価を行う。

この構造性能の評価には、数値解析による性能評価、設定された地震力に対する応答解析による性能評価等の方法があるが、実際の構造物の性能 P を実測することが難しいこと、 P と材料の劣化度 D との関係は地域性や作用因子に関わらず普遍性があることなどから、本事業の長期健全性評価（案）では、柱・梁部材と壁部材のせん断耐力を計算するエクセル計算シートを用いた簡便な評価方法の構築について検討することにした。

エクセル計算シートを用いて P - D 曲線を決定し、これまでに得られた F - t 曲線、 D - F 曲線を用いて、 t 及び P の数値を数点プロットすることで、経過年 t と構造物の性能 P との関係（ P - t 曲線）を得ることができる。次に、 P - D 曲線を用いて、推定したい年度 t_{eva} での構造物の性能 P_{eva} を求め、制限値に対する比較を行うことで、構造性能を評価することができる。

(2) せん断耐力による構造性能の評価

図 2.2.2-2 の評価プロセスにおける⑨ P - D 曲線の決定に対応するものとして、原子力発電施設は壁部材、大断面部材が多く使用されており、せん断耐力に対する建屋の健全性評価が主に行なわれていることから、構造物の性能 P の評価物理量を表 2.2.2-2 に示す部材の耐荷力 P_2 とした。さらに部材の耐荷力の中でも、せん断耐力に関する一般的な物理量である

せん断強度保持率について着目した。せん断強度保持率とは、1 からせん断耐力低下率を引いたもので、この物理量でせん断強度がどれだけ保持されているかを表すこととした。また、せん断強度保持率は耐力比と同義である。

1) せん断耐力

現行の一般建造物に対する耐震設計では、一次設計（許容応力度計算：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説²¹による）と二次設計（保有水平耐力計算：部材の終局強度が建造物に於いて要求される水平耐力を上回っていることを確認する。部材の終局強度は「建築物の構造関係技術基準解説書²²」に記載されている荒川式、靱性指針式で算出）の2段階で構成されている。一次設計は建造物の使用期間中に数度経験する可能性のある中小地震動に対して、建造物が損傷することなく、継続使用ができることを確認するものであり、基本的には弾性設計である。二次設計は極めて稀に発生する大地震での人命保護が目標となっており、建造物が倒壊しないことを確認するものであり、局所的な塑性化を許容している。

2) せん断耐力計算用エクセル計算シート

地震時のせん断力抵抗機構として、本事業では柱・梁部材と壁部材のせん断耐力の計算用のエクセル計算シートを作成している（2.6.2 節参照）。

各エクセル計算シートの中には、各設計規準の設計例と計算結果を含む複数のワークシートで構成されている。エクセル計算シートは、いずれも部材形状、使用材料、材料劣化度をインプットする。ただし、各設計規準による試算は、部材寸法、使用材料強度、境界条件、荷重・外力条件などが不明であるため、各規準書に記載のある設計例を想定した健全部材の耐力と経年劣化した部材の耐力を算定し、健全部材の耐力に対するせん断強度保持率（耐力比）をアウトプットする計算シートとなっている。このエクセル計算シートを用いて P - D 曲線を決定する。

(3) PDF_t 曲線を用いた建造物の健全性評価

1) P - t 曲線の決定と PDF_t 曲線の確定

建造物の性能 P と、材料劣化度 D 、劣化因子の作用量 F 、経過年 t との関係より、建造物の性能 P の経年変化を表す P - t 曲線が得られ（図 2.2.4-1）、 PDF_t 曲線が確定する。本項は、 PDF_t 曲線による評価プロセスの⑩⑪に対応する。

2) 評価年での建造物の性能の計算

P - t 曲線を基に、任意の経過年での建造物の性能低下が予測できる。つまり、評価年 t_{eva}

²¹ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、2010

²² 建築物の構造関係技術基準解説書、国土交通省住宅局建築指導課・国土交通省国土技術政策総合研究所・建築研究所・日本建築行政会議監修、2007、2015

での構造物の性能の評価値 P_{eva} を P - t 曲線により求めることができる。本項は、 $PDFt$ 曲線による評価プロセスの⑫に対応する。

3) 健全性二次評価

$PDFt$ 曲線を用いることで、点検時 t_{obs} での構造物の性能の評価値 P_{obs} 、構造物の性能の制限値 P_{rg} 、限界値 P_{cr} となる経過年 t_{rg} と t_{cr} 、評価年 t_{eva} での構造物の性能の評価値 P_{eva} の推定などの健全性評価が行える。健全性二次評価では、 $P_{eva} < P_{rg}$ を満足するかどうかを確認する。本項は、 $PDFt$ 曲線による評価プロセスの⑬に対応する。

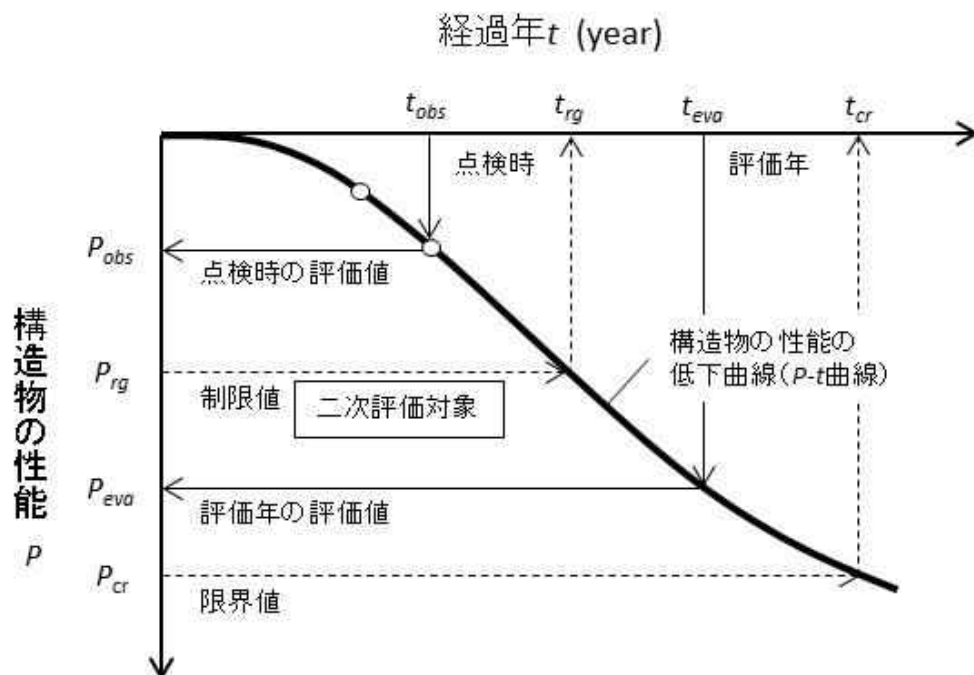


図 2.2.4-1 P - t 曲線による健全性評価

4) 継続的検査及び健全性評価の検証

評価の枠組で重要となる、 F - t 曲線、 D - F 曲線に関しては、実際の構造物の劣化状態から評価するためその精度は高いが、その妥当性の検証も必要である。これに関しては、その後の構造物の経年変化での継続的検査及び実測値の蓄積により、基本式より求められた外挿式の妥当性を検証することが必要となる。原子力発電所ごとに数年ごとの定期点検を基に、中性化深さ、塩化物イオン濃度、温度条件、強度特性等を評価し、 F - t 関係、 D - F 関係をデータベース化することで、劣化基本式の適用性、評価の妥当性を検証することができる。

(4) $PDFt$ 曲線による評価例

作成した RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム ($PDFt$ 曲線) を用いて、評価年 t_{eva} での評価値の算定例を図 2.2.4-2～図 2.2.4-6 に示す。

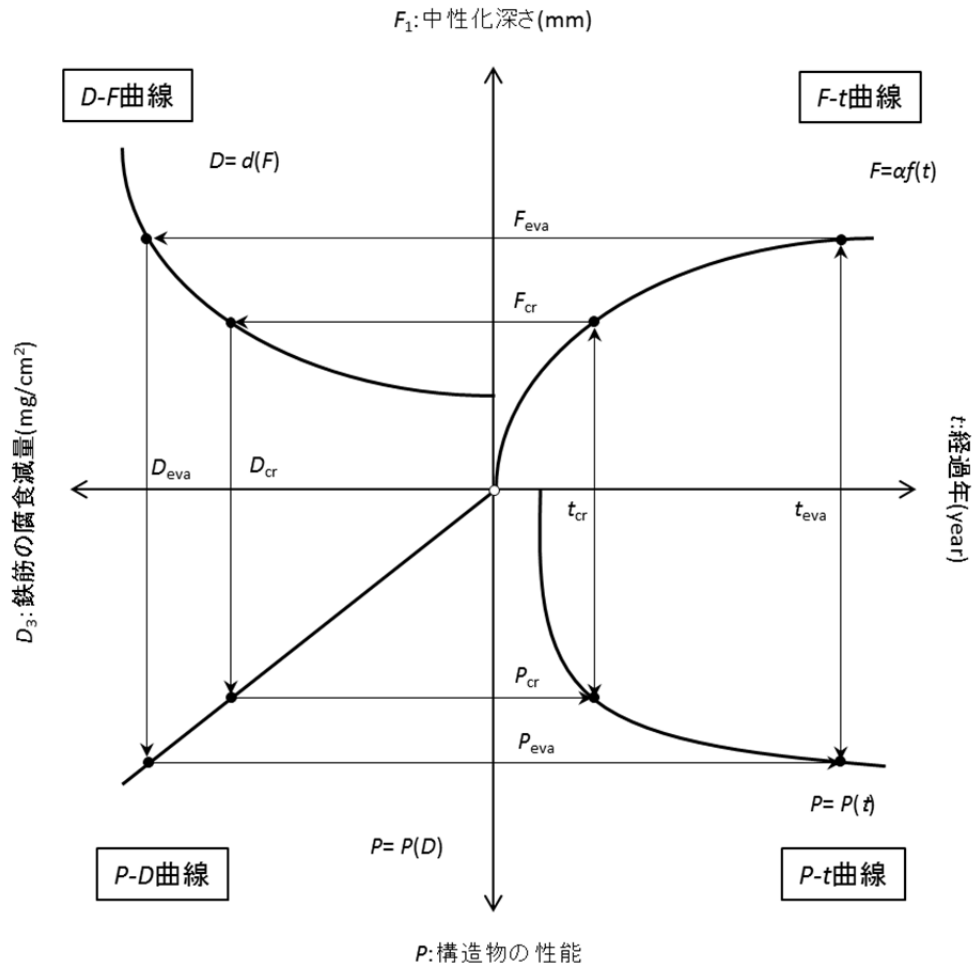


図 2.2.4-2 中性化の $PDFt$ 曲線による評価値の算定例

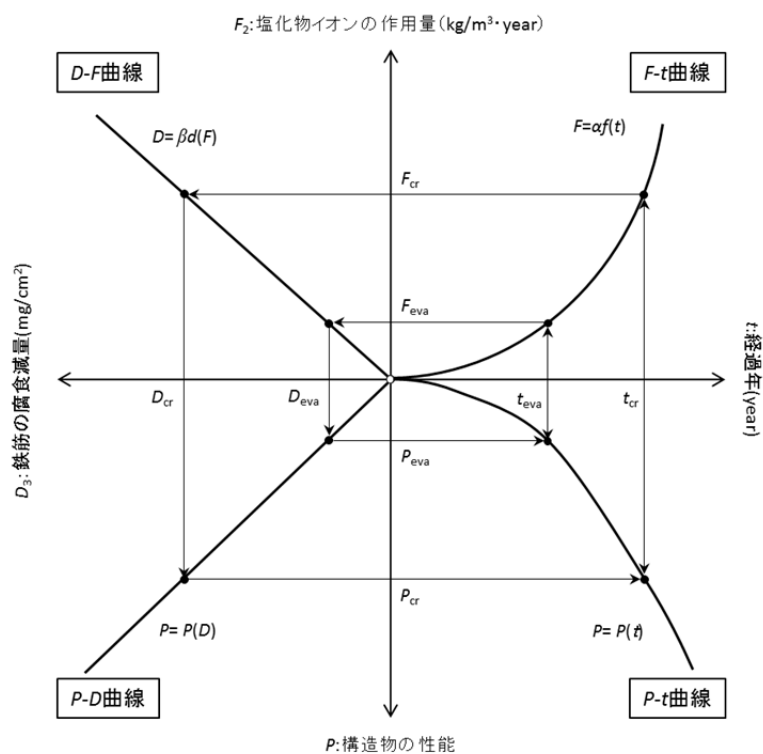


図 2.2.4-3 塩分浸透の $PDFt$ 曲線による評価値の算定例

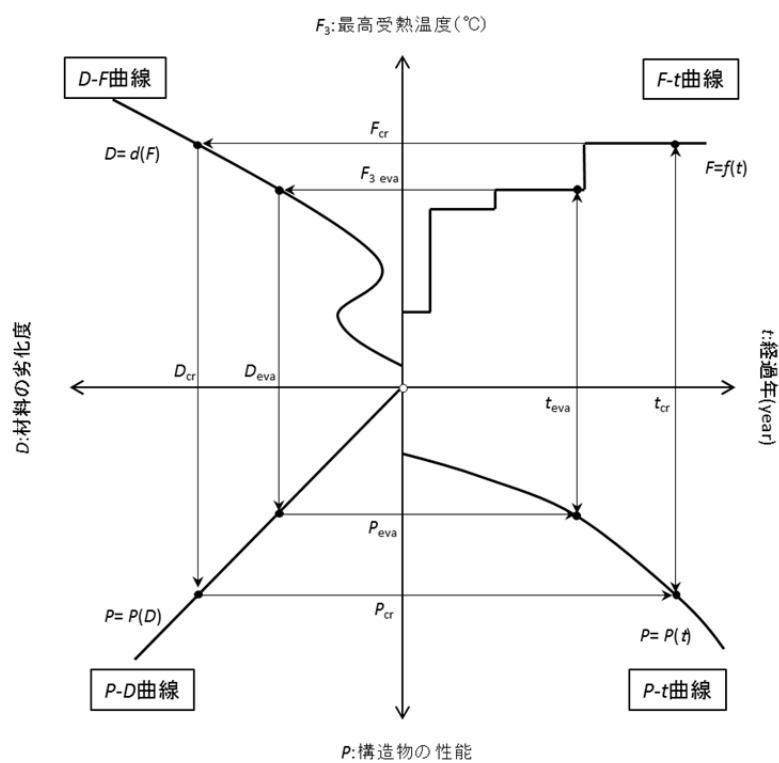


図 2.2.4-4 熱の $PDFt$ 曲線による評価値の算定例

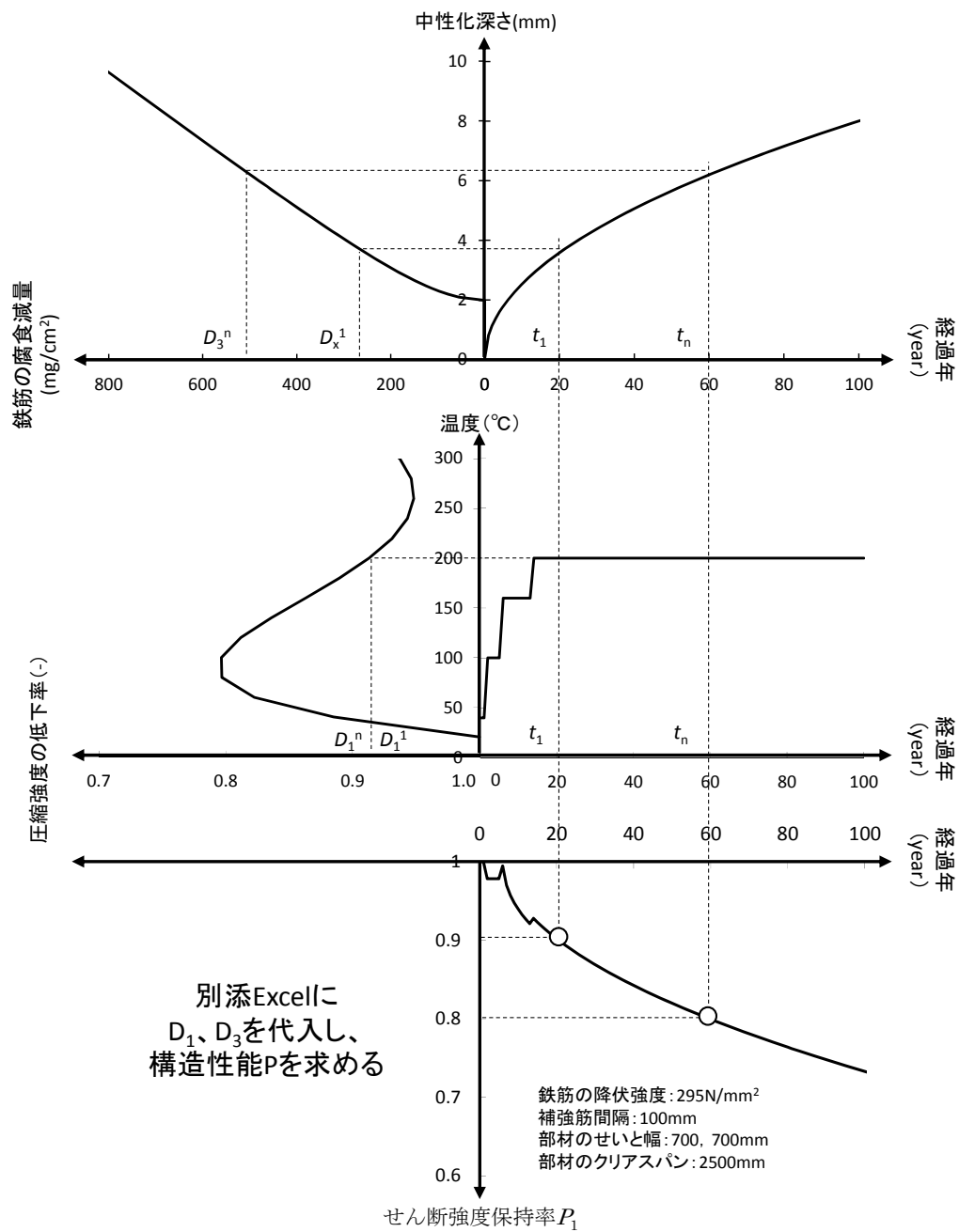


図 2.2.4-5 中性化と熱が作用した場合の PDF t 曲線による評価値の算定例

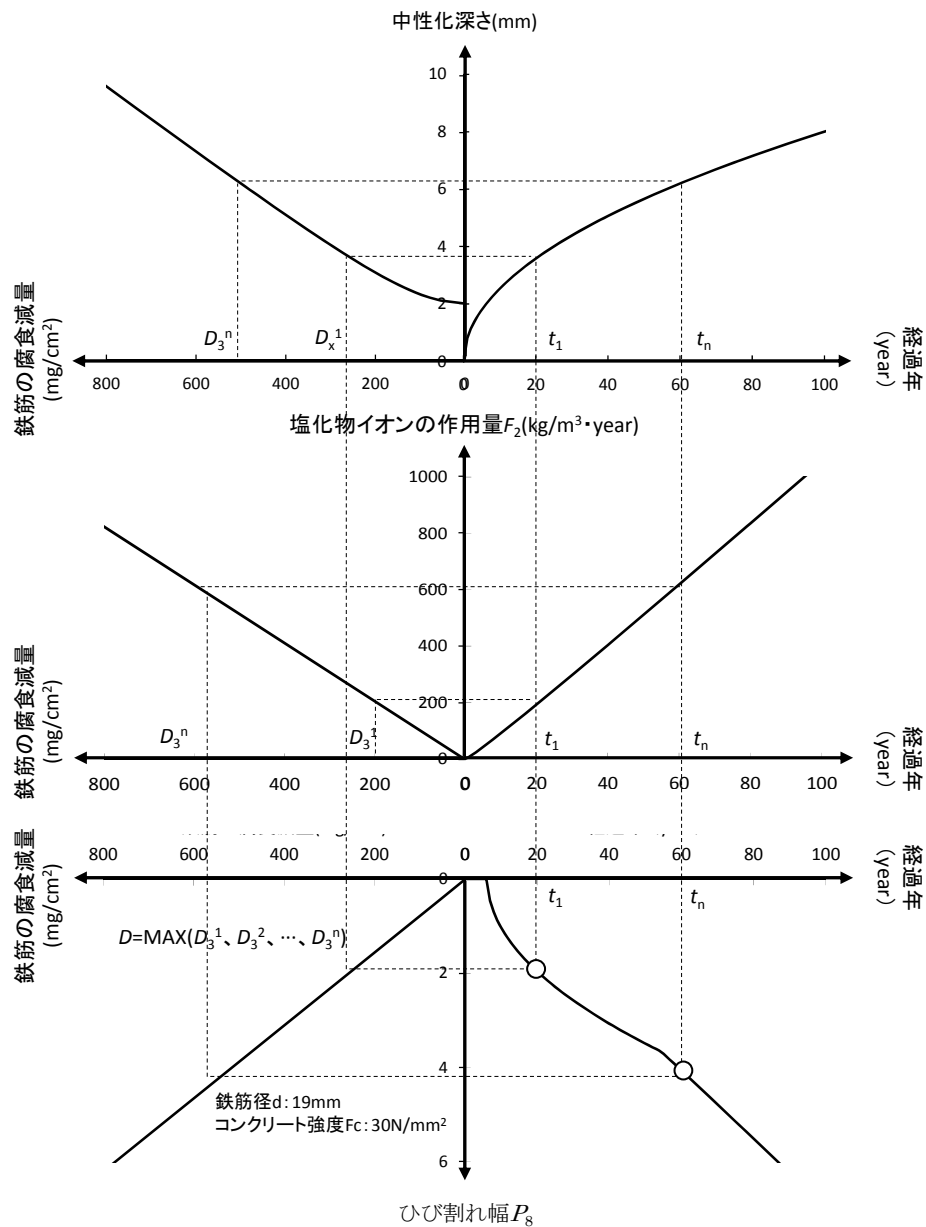


図 2.2.4-6 中性化と塩分浸透が作用した場合の $PDFt$ 曲線による評価値の算定例

2.2.5 まとめ

RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム ($PDFt$ 曲線) を用いた、経年劣化の進展を推定するためのコンクリート構造物の長期健全性評価の枠組を提案した。 $PDFt$ 曲線は、劣化関数の基本評価式を定め劣化度の測定データ等を外挿し、劣化指数及び評価曲線を帰納的に決定すること、複合体の評価のために経過年 t 、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D 、構造物の性能 P 相互の各関係を定式化し、それらを組み合わせることにより、RC 構造物の長期健全性評価が可能である点が特徴である。

今年度の具体的な成果のまとめとしては以下の通り。

- ① 具体的な健全性評価が可能となるコンクリート構造物の複合劣化による長期健全性評価（案）の枠組を提案した。(2.2.2)
- ② 中性化、塩分浸透による材料劣化として鉄筋腐食に着目し、両者の関係式を $D-F$ 曲線（材料劣化と劣化因子の作用量との関係）として提案した。(2.2.3)
- ③ 熱劣化による劣化因子の作用量としては、最高受熱温度履歴を用いた $F-t$ 曲線（劣化因子の作用量の時間変化）による評価方法を提案した。(2.2.3)
- ④ 同一の材料劣化について複合的な劣化因子が作用した場合の材料劣化の評価式 $D-F$ 曲線の評価方法を提案した。(2.2.4)
- ⑤ 材料劣化と構造性能の関係式である $P-D$ 曲線について、材料劣化が複合的に作用する場合の鉄筋腐食及び強度低下等の材料劣化度のインプットによる構造性能の評価方法を提案した。(2.2.4)

なお、評価の枠組で重要となる、 $F-t$ 曲線、 $D-F$ 曲線に関しては、実際の構造物の劣化状態から評価するため、その精度は高いが、その妥当性の検証も必要である。これに関しては、その後の構造物の経年変化での継続的検査及び実測値の蓄積により、基本式より求められた外挿式の妥当性を検証することが必要となる。

2.3 熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討

2.3.1 研究の背景及び目的

コンクリート構造物は様々な用途に用いられているが、その供用期間中に多くの劣化因子の影響を受ける。熱の影響を受ける場合は、強度特性等の性質が変化するため、長期にわたり熱の影響を受ける原子力発電施設では、供用期間中のコンクリートに対して温度制限値が設けられる²³。また、火災時においても、短期間ではあるが高温加熱の影響を受けて、コンクリートの性質は変化する。そのため、熱の影響を受けたコンクリートに関しては多くの検討がなされている。

コンクリート構造物におけるコンクリートの役割は、主に圧縮応力を負担することであるため、強度特性に関しては多くの検討がなされている。100℃未満の長期加熱に関しては、高温乾燥による含水状態の変化によって強度が50℃付近で低下すること^{24, 25, 26}、一方、シールの有無や養生条件に関係なく加熱後の強度低下がないこと²⁷、温度65℃、湿度30%R.H.に5ヶ月間放置したコンクリートの強度変化がなかったこと²⁸等が報告されている。また、100℃以上の高温加熱に関しては、普通強度及び高強度コンクリートについて、熱間及び加熱冷却後における検討が行われ、熱間の圧縮強度は100℃で低下し、200℃で常温とほぼ同等まで再上昇して低下していくこと、加熱冷却後では温度上昇に伴い徐々に低下すること²⁹、超高強度コンクリートの加熱冷却後の圧縮強度は100℃で低下し、200℃で常温とほぼ同等の強度まで再上昇して低下していくこと³⁰等が報告されている。

高温加熱の影響によるコンクリートの引張強度は、割裂引張試験により高温になるほど低下し、600℃では20℃と比較して30%程度まで低下すること^{31, 32}が報告されており、高強度及び一般強度のコンクリートについて、1200℃まで加熱の影響を受けた場合の引張強度低下

²³ 日本建築学会、“原子炉建屋構造設計指針・同解説”(1988)

²⁴ 岸谷孝一、嵩英雄、椎葉大和、奥野亨：“各種セメントモルタルの耐熱性に関する研究”、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.157-158 (1971)

²⁵ 岸谷孝一、嵩英雄、奥山治也、奥野亨：“20～300℃の高温にさらされたコンクリートの諸性状に関する研究(その1)”、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.143-144 (1972)

²⁶ 岸谷孝一、嵩英雄、奥山治也、奥野亨：“20～300℃の高温にさらされたコンクリートの諸性状に関する研究(その2)”、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.145-146 (1972)

²⁷ 長尾覚博、中根淳：“高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究”、日本建築学会構造系論文集、No.457、pp.1-10 (1994)

²⁸ 廣永道彦、蔵重勲、井元晴丈：“セメント硬化体の熱影響に関する検討—温度 65℃におけるセメント系材料の変質状況について—”、電力研究所報告、N04013 (2004)

²⁹ 安部武雄、古村福次郎、戸祭邦之、黒羽健嗣、小久保勲：“高温度における高強度コンクリートの力学特性に関する基礎的研究”、日本建築学会構造系論文集、第 515 号、pp.163-168 (1999)

³⁰ 松戸正士、西田浩和、片寄哲務、安部武雄：“高温加熱後の超高強度コンクリートの力学的性質に関する実験的研究”、日本建築学会構造系論文集、第 603 号、pp.171-177 (2006)

³¹ 本田義博、大岡督尚、藤巻敏之：“高強度コンクリートの耐火性能に関する実験的研究(その1 定常温度の一軸試験)”、日本建築学会大会学術講演梗概集、A-2 分冊、pp.23-24 (1996)

³² 河辺伸二、一瀬賢一、川口徹、長尾覚博：“高温加熱を受けたコンクリートの強度特性に関する研究”、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.25、No.1、pp.377-382 (2003)

が、圧縮強度低下と比較して大きいことも報告されている^{33, 34, 35}。

上述のように、高温加熱の影響を受けたコンクリートは強度が低下するため、ひび割れも発生しやすくなることが予想される。しかし、高温加熱の影響を受けたコンクリートの、ひび割れ発生や進展に関する検討はなされていない。

また、鉄筋コンクリート構造物の安全性や耐久性を考慮する場合に検討しなければならぬ要因の1つに中性化がある。炭酸ガスの浸透によりコンクリート表面から中性化が進み、コンクリート内部の鉄筋まで中性化が進むと鉄筋が腐食する等して、コンクリート構造物の安全性及び耐久性の低下を招いてしまう。コンクリートの中性化は、温度が高くなると、そして、湿度が低くなるほど進みやすく³⁶、湿度40%R.H.で極大値をとるとの報告もある³⁷。しかし、中性化がコンクリートのひび割れ特性にどのように影響するかは検討されておらず、コンクリートの中性化とひび割れ発生特性の関係についても明らかにされていない。

ひび割れは、主に引張破壊によって起こるため、ひび割れ発生や進展を検討する際には、引張変形による破壊進展の評価が必要となる。そのためには、コンクリートの引張変形時における最大荷重以降の軟化域（荷重低下時の荷重－変形関係）を含め、安定した荷重－変位関係が得られる破壊靱性試験を応用し、間接的に引張軟化曲線を求める方法が有効であると考えられる。

そこで、本研究では、原子炉建屋特有の温度 100℃未満の環境下で供用されるコンクリート及び SA 時等を想定し、以下の 3 項目についてひび割れの発生や、その後のひび割れ進展に関して破壊靱性試験により検討を行った。

- ・ 100℃未満で長期の加熱を受けたコンクリート
- ・ 100℃以上で短期の加熱を受けたコンクリート
- ・ 100℃未満で中性化したコンクリート

³³ Sammy Y. N. Chan, Gai-fai Peng and John K. W. Chan : “Comparison between high strength concrete and normal strength concrete subjected to high temperature”, Material and Structure, Vol.29, pp.616-619 (1996)

³⁴ A. N. Noumowe, P. Clasters, G. Debicki, M. BolvinY. : “High Temperature Effect on High Performance Concrete (70-600C) Strength and Porosity”, SP-145 Durability of Concrete, Third International Conference, pp.157-172 (1994)

³⁵ P. A. Jahren : “Fire Resistance of High Strength/Dense Concrete with Particular Reference to the Use of Condensed Silica Fume”, SP-114, pp.1013-1049 (1989)

³⁶ K. Matsuzawa, Y. Kitsutaka, M. Tsukagoshi : “Effect of Humidity on Rate of Carbonation of Concrete Exposed to High-Temperature Environment”, International Symposium on the Ageing Management & Maintenance of Nuclear Power Plants (ISaG2010) Proceedings, pp.109-114 (2010)

³⁷ 阿部道彦、梶田佳寛、田中斉、柳啓、和泉意登志、友沢史紀 : “コンクリートの促進中性化試験法の評価に関する研究”、日本建築学会構造系論文報告集、第 409 号、pp.1-10 (1990)

2.3.2 破壊特性の評価方法

(1) 引張軟化曲線の推定方法

引張軟化曲線は、破壊靱性試験により得られる荷重－開口変位（CMOD）曲線の解析プログラムにより、実験結果を多直線近似法^{38, 39, 40}により逆解析して求めた。逆解析による多直線近似方法は、実験により求められた荷重－開口変位（CMOD）曲線のデータを利用して結合応力－開口変位（COD）の関係を非線形ひび割れ方程式の繰り返し演算により求める際に、計算により既に求めている一部の結合応力－開口変位（COD）関係を繰り返し演算の構成則として適用し、逐次解析をするという手法を採用している。

本研究では、100℃未満の長期加熱及び100℃以上の短期加熱を受けたコンクリートの検討にはくさび割れ試験、100℃未満で中性化したコンクリートの検討には切欠きはりによる3点曲げ試験を破壊靱性試験に採用した。なお、くさび割れ試験による引張軟化曲線の推定も、切欠き梁3点曲げ試験による方法^{38, 39}と同様に求めることが可能であるが、応力拡大係数が切欠き梁3点曲げ試験の場合と異なっている。その応力拡大係数は、コンパクトテンション試験⁴¹（破壊靱性試験の一種でASTME399規格としてまとめられている）によっている。また、解析に用いる、くさび割れ試験における形状関数は、既往研究⁴⁰により求めている。

(2) 破壊力学パラメータ

本研究では、熱影響を受けたコンクリートのひび割れに関して、ひび割れ発生及びひび割れ進展の両観点から評価を行った。そのため、ひび割れ発生に関しては初期結合応力、ひび割れの進展に関しては破壊エネルギーにより評価した。なお、両破壊力学パラメータとも、多直線近似法により算出した引張軟化曲線により評価される。

引張軟化曲線は、結合力モデルにより破壊進展をモデル化した場合の結合力とひび割れ開口変位の関係を示す指標となり、その初期結合応力は、材料の本質的な引張強度を反映するパラメータとなる。初期結合応力は、ひび割れ発生抵抗性を示す値となり、この値が大きいほどひび割れが発生しにくいことを意味する。

引張軟化曲線で囲まれた面積は破壊エネルギーとなる。破壊エネルギーは、ひび割れ進展抵抗性を示す値となり、この値が大きいほどひび割れが進展しにくいことを意味する。

³⁸ 橘高義典、上村克郎、中村成春：“コンクリートの引張軟化曲線の多直線近似解析”、日本建築学会構造系論文集、No.453、pp.15-25（1993）

³⁹ 橘高義典：“引張軟化曲線の多直線近似解析によるコンクリートの弾塑性破壊パラメータの評価”、日本建築学会構造系論文集、No.469、pp.17-24（1995）

⁴⁰ 橘高義典、高橋仁智：“破壊力学手法によるひび割れ分散を考慮した繊維補強軽量コンクリートパネルの曲げ破壊解析”、日本建築学会構造系論文集、No.541、pp.37-42（2001）

⁴¹ G. V. Guinea, M. Elices and J. Planas：“Stress Intensity Factors for Wedge-splitting Geometry”、Int. J. of Fract. 81、pp.113-124（1996）

2.3.3 100℃未満で長期の加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性

(1) はじめに

ここでは、粗骨材に一般のコンクリート構造物で多く用いられている砂岩碎石を用いた強度の異なるコンクリートについて 20～60℃という 100℃未満で長期間（156 週）加熱を行った場合のひび割れ発生に関する検討を行った。なお、加熱温度に関しては、80℃の試験も行っていたが、試験装置の故障により中止した。また、本研究ではシールの有無による検討を行っているが、シールあり供試体のシールが完全でなかったが、参考値として示している。

(2) 実験概要

1) 供試体概要

表 2.3.3-1 に使用材料、表 2.3.3-2 に調合、表 2.3.3-3 に実験の要因と水準を示す。コンクリートは、4 週標準養生における圧縮強度が 18、27、36N/mm²（以下、 σ 18、 σ 27、 σ 36）となるように 3 水準とした。加熱温度は 20、40、60℃の 3 水準とした。また、加熱による水分の逸散を考慮して、供試体はシールを行うもの（シールあり）及びシールを行わないもの（シールなし）を設定した。加熱期間は 26、52、104、156 週とし、加熱時の湿度は 60%R.H. とした。なお、本研究では、全ての条件で試験を行うと供試体数が莫大な量となり、試験材齢を統一した試験が行えないことが想定されたため、20、60℃でコンクリート強度の比較を、そして、 σ 27 に関して温度の検討を行うこととした。

コンクリートは、レディーミクストコンクリート工場（神奈川県相模原市）の強制 2 軸強制練りミキサ（公称容量 1.7m³）を用いて製造されたものを用いた。なお、製造から打込みまでの時間は約 15 分である。

供試体は、各試験条件につき破壊特性を評価するためのくさび割裂試験用供試体（100×100×120mm）3 体、圧縮強度試及びヤング係数測定用供試体（ ϕ 100×200mm）3 体、質量変化測定用供試体 1 体（ ϕ 100×200mm）とした。供試体は打込み後 2 日で脱型し、材齢 13 週まで標準養生を行った。表 2.3.3-4 にフレッシュ性状及び材齢 4 週での強度試験結果を示す。4 週標準養生圧縮強度は、設定した強度に対して 3～4N/mm²程度高かった。

表 2.3.3-1 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm ³
細骨材	砂岩砕砂（相模原産）	S1	表乾密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 1.15%、粗粒率 3.00
	砂岩砕砂（八王子産）	S2	表乾密度 2.63g/cm ³ 、吸水率 1.15%、粗粒率 3.00
	陸砂（君津産）	S3	表乾密度 2.56g/cm ³ 、吸水率 1.19%、粗粒率 1.80
粗骨材	砂岩碎石（相模原産）	G1	表乾密度 2.66g/cm ³ 、吸水率 1.14%、実積率 60.0%
	砂岩碎石（八王子産）	G2	表乾密度 2.66g/cm ³ 、吸水率 1.14%、実積率 60.0%
混和剤	AE 減水剤	Ad1	リグニンスルホン酸塩、オキシカルボン酸塩とポリカルボン酸系化合物
	高性能 AE 減水剤	Ad2	ポリカルボン酸系化合物

表 2.3.3-2 調合

呼び強度	Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S1	S2	S3	G1	G2	Ad1	Ad2
18	20	18	4.5	69.6	51.2	183	263	368	323	230	447	447	2.63	—
27	20	18	4.5	57.2	50.1	173	303	359	314	225	455	455	—	2.73
36	20	18	4.5	48.3	48.7	173	359	339	297	212	456	456	—	3.23

表 2.3.3-3 実験の要因と水準

要因	水準
呼び強度 (N/mm ²)	18 (σ 18)、27 (σ 27)、36 (σ 36)
加熱温度 (°C) ※	20、40、60 (40 は呼び強度 27 のみ)
加熱期間 (週)	26、52、104、156
シールの有無	あり、なし

※加熱温度 80°C に関しては、試験装置故障により試験を中止した。

表 2.3.3-4 フレッシュ性状及び材齢 4 週の強度試験結果

呼び強度	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
18	17.0	5.8	22.1	22.0
27	20.0	5.8	31.4	25.2
36	19.0	4.5	39.0	27.3

2) 試験方法

(a) 加熱方法

100°C未満加熱は恒温恒湿槽（図 2.3.3-1）を用いて行った。



図 2.3.3-1 恒温恒湿槽

(b) 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じて行った。また、同時にコンプレッソメータを用いてヤング係数を測定した (JIS A 1149)。

(c) 破壊靱性試験方法

コンクリートの破壊特性を評価する方法として、モード I 型 (引張型) の破壊が得られる切欠き梁による 3 点曲げ試験方法が示されているが^{42, 43}、この試験では、例えば 100×100×400mm のように寸法の大きな供試体が必要であり、このような供試体を用いて破壊特性の評価を行う場合は、供試体の自重の影響が無視できない。本研究のように高温加熱の影響を受けたコンクリートは、加熱前と比較して加熱後ではコンクリートが脆性的となり、自重が破壊特性に及ぼす影響が大きくなることが予想された。そのため、小型の供試体を用いる方が実験値の誤差が小さいと考えられた。また、炉内でコンクリートを均一に加熱するという観点からは、試験に用いる供試体寸法を可能な限り小さくする方がよい。そこで、本研究では、切欠き梁による 3 点曲げ試験と同様にモード I 型 (引張型) の破壊が小型供試体 (100×100×120mm) (図 2.3.3-2) で得られるくさび割裂試験 (図 2.3.3-3) を採用した。なお、くさび割裂試験も、切欠き梁 3 点曲げ試験同様に引張軟化特性を評価できることが確認されている⁴⁴。

くさび割裂試験用供試体は、加熱前に供試体中央にダイヤモンドカッター (刃厚 1mm) を用いてリガメント高さ (切欠き上部の断面長さ) が 50mm となるように切欠きを入れ、くさびの挿入により引張破壊を生じさせることとした。試験に用いた治具の寸法等は、RILEM⁴⁵で提案されている方法⁴⁶に準じた。高温加熱の影響を受けたコンクリートは、加熱を受ける前と比較して脆性的となるため、引張力に対する抵抗性が著しく弱くなることが予想された。従って、安定した荷重-開口変位曲線 (L-CMOD 曲線) を計測するためには、最大荷重以降の軟化域を精度良く検出する必要がある。そのため、試験装置として加力部、油圧装置及びフィードバック機能を有する制御装置からなるクローズドループシステム型 (閉回路機構) のサーボ・コントロール式油圧試験機 (MTS 社製) を用いた。また、供試体の安定破壊が得られるように、切欠き端部の開口変位の変位速度を 0.02mm/min に設定し、開口変位 (CMOD) の計測には変位制御用の高感度クリップゲージを使用した。

⁴² RILEM AAC13.1 : “Determination of the specific fracture energy and strain softening of AAC”、RILEM Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials、pp.156-158 (1994)

⁴³ “切欠きはりを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法”、JCI-S-001-2003

⁴⁴ 神山力、橘高義典、田村雅紀 : “各種コンクリートの破壊特性の試験方法に関する研究”、コンクリート工学年次論文集、Vol23、No.3、pp.91-96 (2001)

⁴⁵ 国際建設材料構造研究機関・専門家連合

⁴⁶ G. V. Guinea, M. Elices and J. Planas : “Stress Intensity Factors for Wedge-splitting Geometry”、Int. J. of Fract. 81、pp.113-124 (1996)

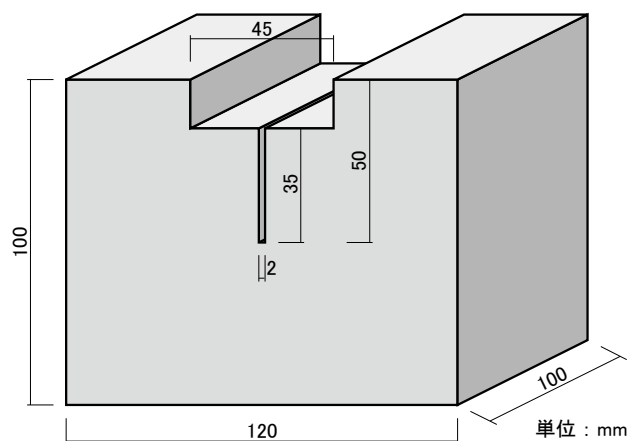


図 2.3.3-2 くさび割裂供試体

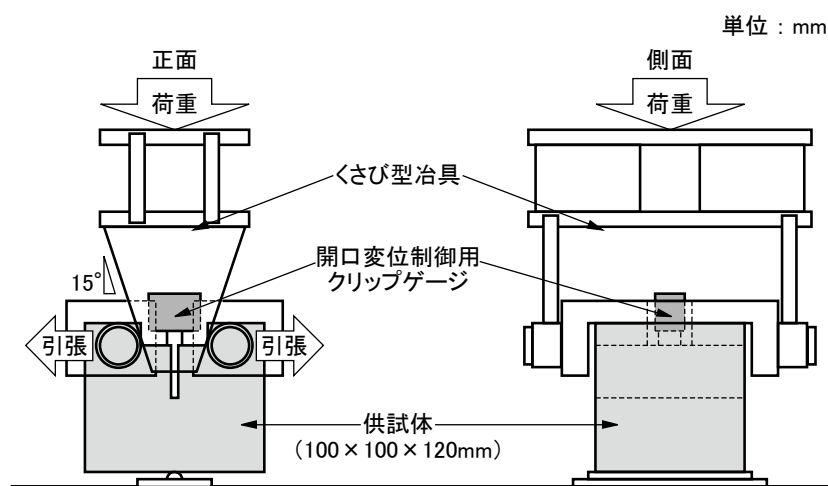


図 2.3.3-3 破壊靱性試験（くさび割裂試験）概要

(d) 破壊特性の評価方法

引張軟化曲線の推定方法は、多直線近似法により逆解析して求めた。破壊力学パラメータは、初期結合応力及び破壊エネルギーによった。

(3) 実験結果及び考察

1) 質量変化

図 2.3.3-4 にシールなし供試体の質量変化率と加熱期間の関係を示す。加熱なし供試体については、単位水量の多い $\sigma 18$ の質量減少率が、 $\sigma 27$ 、 $\sigma 36$ と比較して大きいのがわかる。また、加熱温度が高くなるほど質量減少率も大きくなっている。しかし、加熱温度 40、60℃では差が小さい。そして、加熱時間が長くなると質量減少率も大きくなる傾向があるが、加熱期間 104 週からの変化はほとんどない。

図 2.3.3-5 にシールあり供試体の質量変化率と加熱期間の関係を示す。シールを行ったにも関わらず、加熱期間とともに質量が変化している。シールが完全ではないため、時間と

ともに供試体中の水分が逸散していると考えられる。質量減少はシールなし供試体と同様に、単位水量が多い $\sigma 18$ が大きく、また、加熱温度が高いと、そして、加熱期間が長くなると大きくなっている。また、 $\sigma 27$ の加熱期間 104 週の質量減少率が 156 週と比較して大きくなっているが、これは、104 週の供試体のシールが加熱中に弱まってしまったと考えられる。

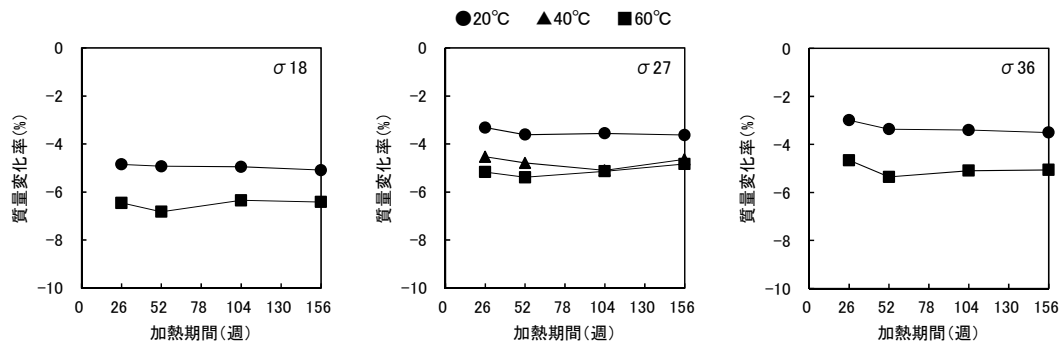


図 2.3.3-4 質量変化率と加熱期間の関係（シールなし）

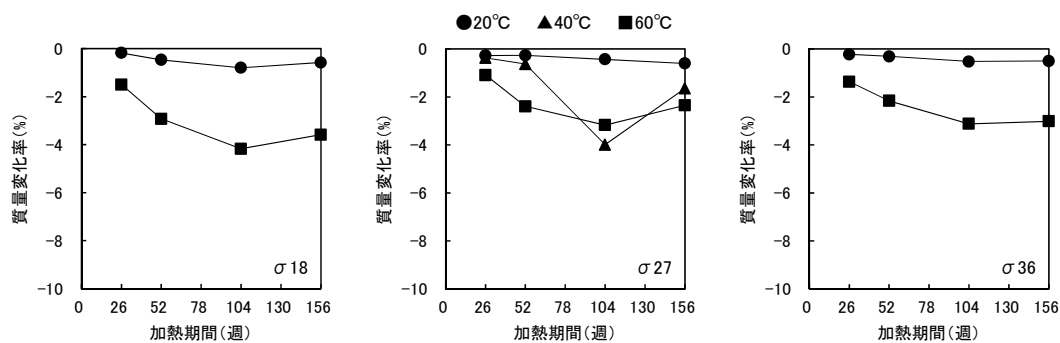


図 2.3.3-5 質量変化率と加熱期間の関係（シールあり）

2) 力学特性

(a) 圧縮強度

図 2.3.3-6 にシールなし供試体の圧縮強度と加熱期間の関係を示す。加熱の有無に関係なく、水セメント比が小さくなると圧縮強度は大きくなり、加熱温度が高くなると圧縮強度は小さくなっている。これは、水分の逸散によって水和が阻害されているためであると考えられる。なお、加熱期間 156 週では、加熱時間に伴う圧縮強度の変化は小さい。

図 2.3.3-7 にシールあり供試体の圧縮強度と加熱期間の関係を示す。加熱期間 52 週までは圧縮強度が増加するものもあったが、加熱期間 104 週以降では増加は見られず、若干減少するものもある。加熱期間 52 週程度までは未水和セメントの水和促進により強度が増加する傾向にあるが、それ以降は未水和セメントの水和促進がほとんどないこと、また、シールが完全でないことによる水分の逸散も影響していると推察される。シールなし供試体では、加熱温度が高い方の強度が小さいが、シールあり供試体では異なっている。加熱温

度 20℃の圧縮強度と比較して、 $\sigma 18$ では 60℃の方が大きく、 $\sigma 27$ では 40℃で上昇し、60℃で下降、そして $\sigma 36$ では加熱期間 52 週まではほとんど同じだが、104 週以降は小さくなっている。

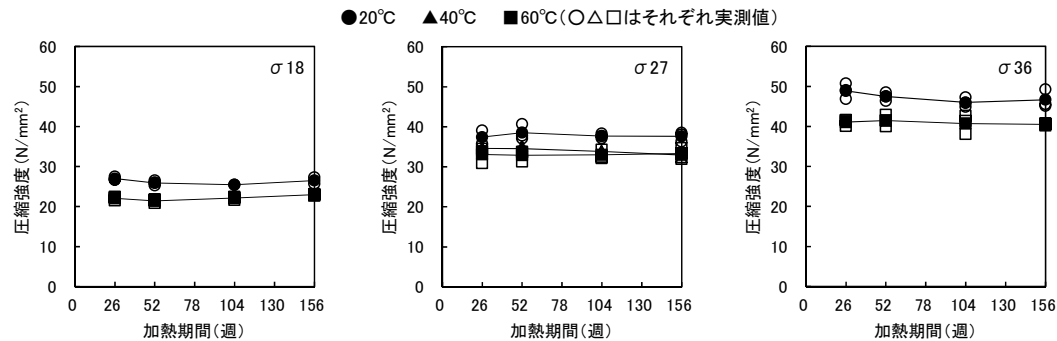


図 2.3.3-6 圧縮強度と加熱期間の関係 (シールなし)

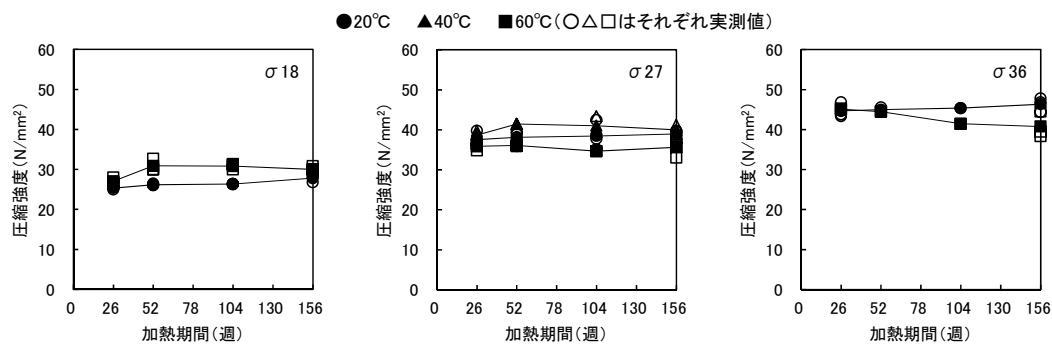


図 2.3.3-7 圧縮強度と加熱期間の関係 (シールあり)

(b) ヤング係数

図 2.3.3-8 にシールなし供試体のヤング係数と加熱期間の関係を示す。加熱の有無に関係なく、水セメント比が小さくなるとヤング係数は大きくなっている。なお、シールなし供試体においては、加熱温度に関係なくヤング係数は同程度となっている。また、加熱期間による影響もみられない。

図 2.3.3-9 にシールあり供試体のヤング係数と加熱期間の関係を示す。シールあり供試体もシールなし供試体と同様に水セメント比が小さくなるとヤング係数が大きくなっている。しかし、加熱温度が高くなるとヤング係数が小さくなっている。これは、加熱温度が高くなると質量減少も大きくなっていることから、水分逸散に伴い供試体内部に空隙が増加し、圧縮载荷時に閉じようとするために、みかけの弾性ひずみとして現われていると考えられる。

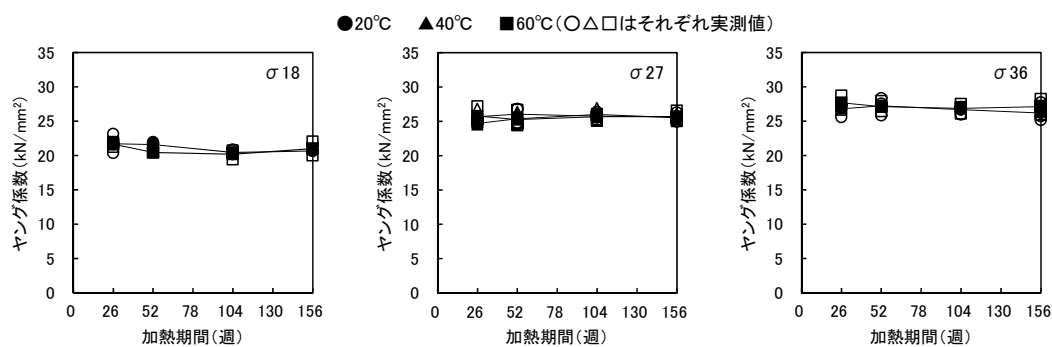


図 2.3.3-8 ヤング係数と加熱期間の関係（シールなし）

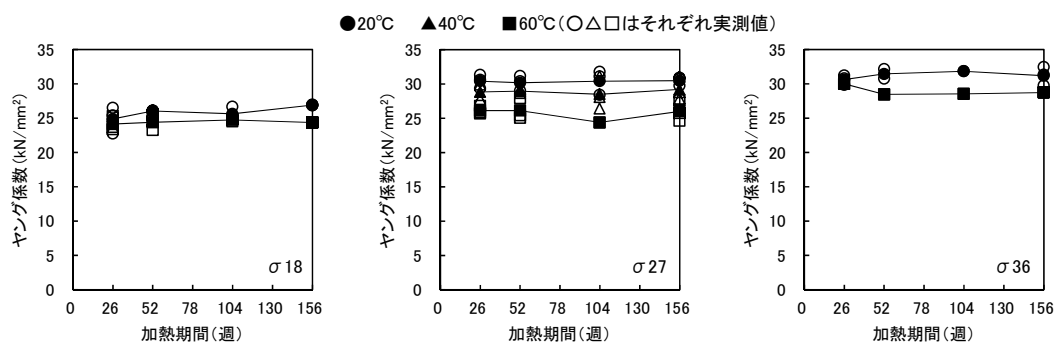


図 2.3.3-9 ヤング係数と加熱期間の関係（シールあり）

3) 破壊靱性試験結果（荷重－開口変位曲線）

図 2.3.3-10、図 2.3.3-11 に荷重－開口変位曲線を示す。水セメント比が小さくなると最大荷重が大きくなっている。シールなし供試体と比較して、シールあり供試体の最大荷重が小さくなる傾向にある。シールなし供試体は、加熱期間が長くなるとともに、加熱温度が高くなると最大荷重以降の低下が急勾配となっている。これは、加熱に伴う乾燥により、ひび割れが脆性的に進行していると考えられる。シールあり供試体は、加熱期間が長くなるとともに、20℃と比較して加熱温度 40℃では上昇するものもあるが、加熱温度 60℃では最大荷重が小さくなる傾向にある。これは、加熱により微細ひび割れが発生しており、その影響があると思われる。

4) 引張軟化曲線

図 2.3.3-12、図 2.3.3-13 に引張軟化曲線を示す。調合、加熱温度、加熱期間等に関係なく、開口変位の増加に伴い結合応力は低下している。これは、結合応力は開口変位（仮想ひび割れ幅）に応じて変化し、開口変位が大きいほど結合応力を小さくすることで軟化現象を数値的に表現しているためである。

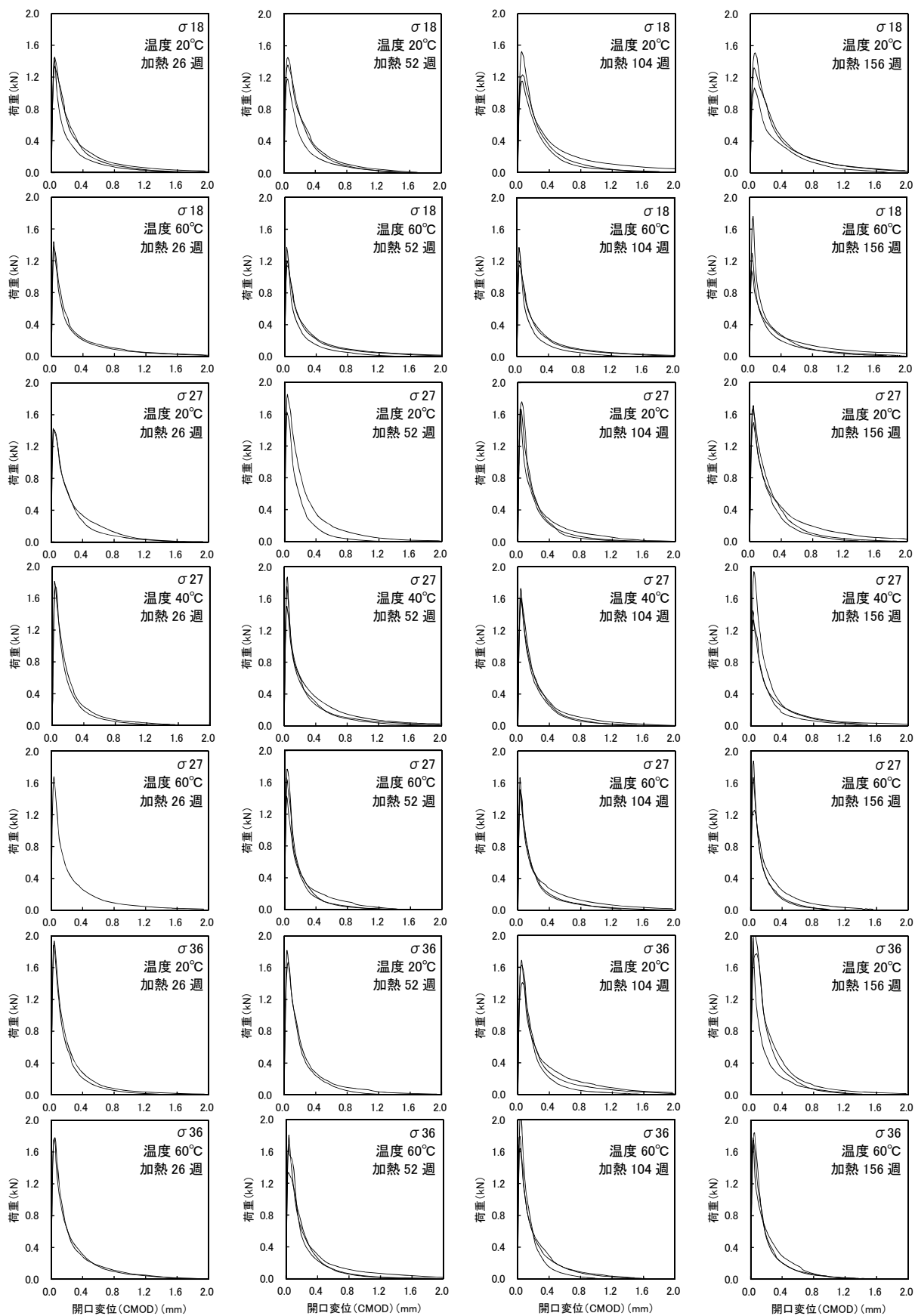


図 2.3.3-10 荷重－開口変位曲線（シールなし）

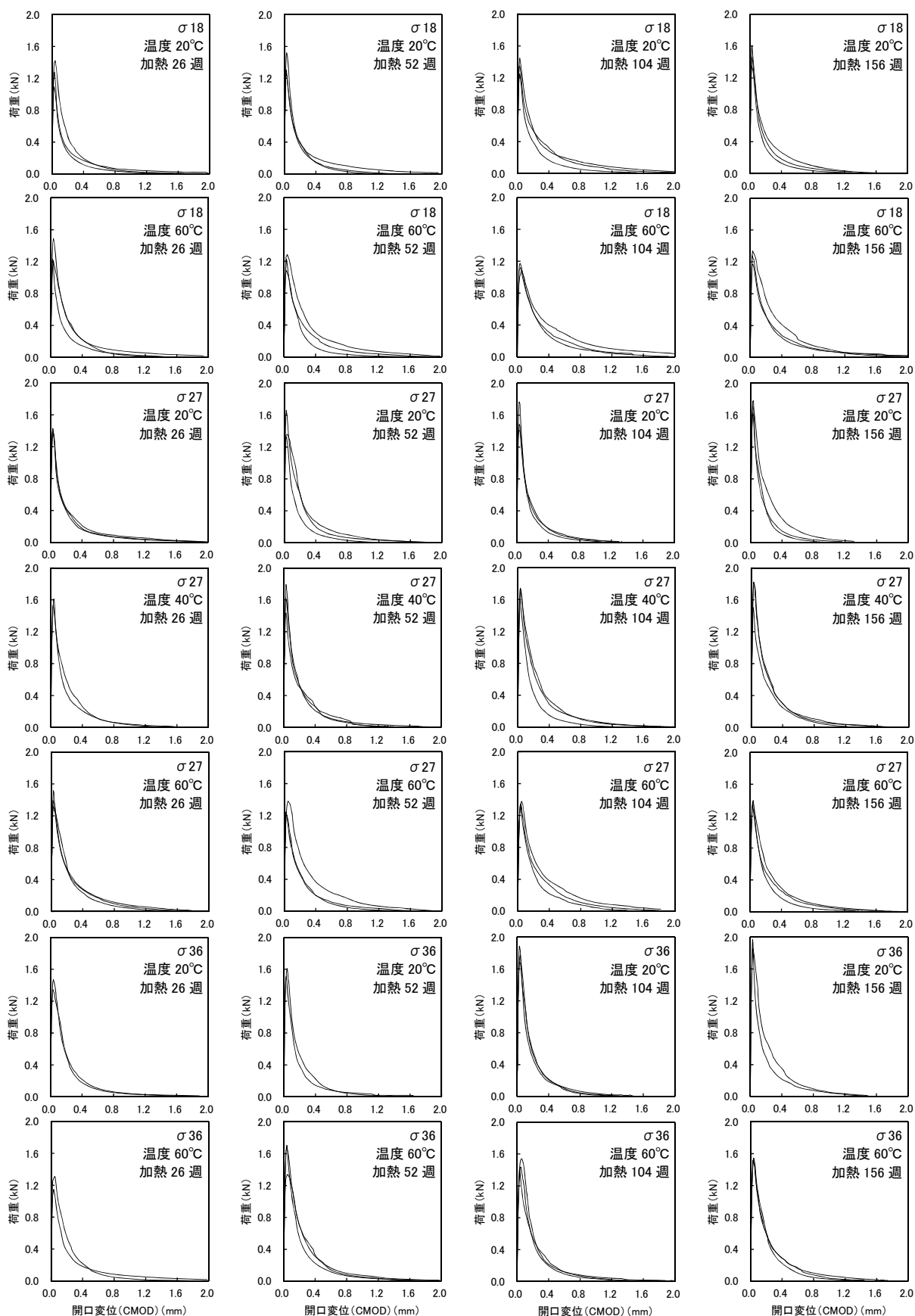


図 2.3.3-11 荷重－開口変位曲線（シーลあり）

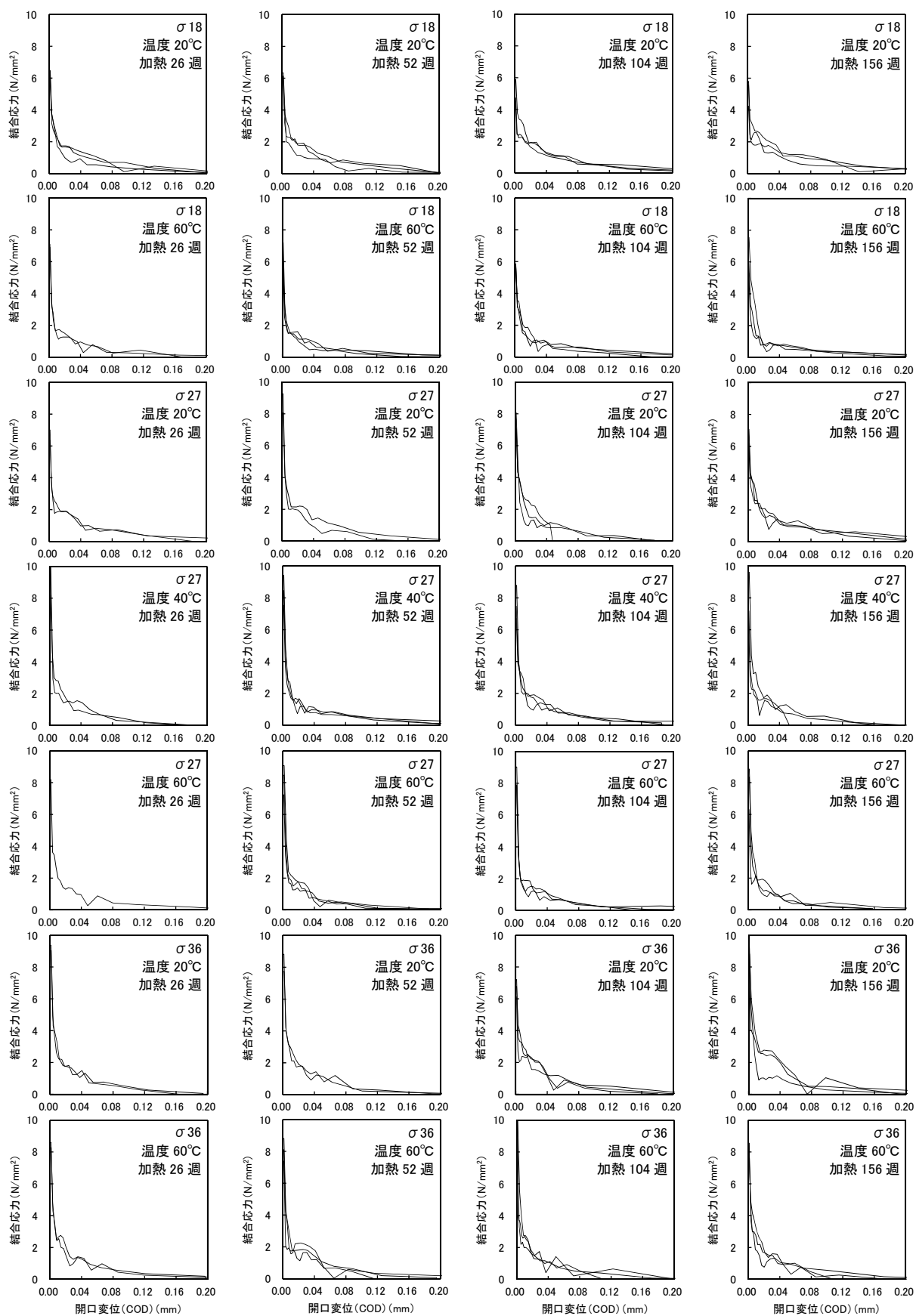


図 2.3.3-12 引張軟化曲線 (シーラなし)

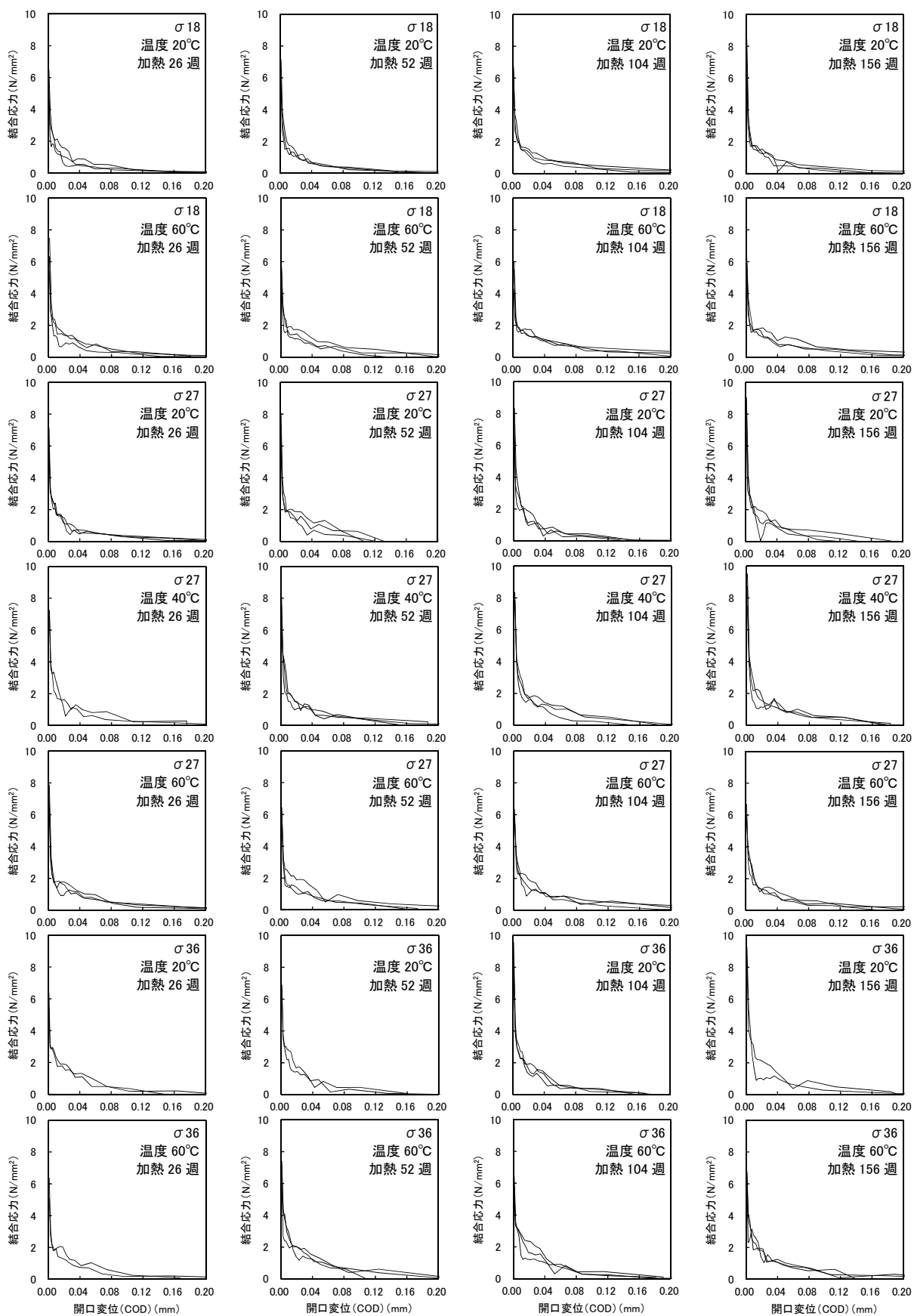


図 2.3.3-13 引張軟化曲線 (シールあり)

5) 破壊特性

(a) 初期結合応力

図 2.3.3-14 にシールなし供試体の初期結合応力と加熱期間の関係を示す。水セメント比が小さくなると初期結合応力が大きくなっている。また、加熱期間が長くなるに伴い初期結合応力が低下している。これは、供試体の乾燥により微細クラックが発生し、初期結合応力も低下していると考えられる。なお、シールなし供試体については、加熱温度に関係なく同じような初期結合応力となっており、加熱温度による影響はほとんどないものと推察される。

図 2.3.3-15 にシールあり供試体の初期結合応力と加熱期間の関係を示す。加熱なし供試体と同様に、水セメント比が小さくなると初期結合応力が大きくなっている。加熱期間に関しては、加熱なし供試体の傾向と異なり、20℃及び加熱温度 40℃では加熱期間とともに初期結合応力が増加している。これは、シールされていることにより供試体中の水分が逸散せず、長期にわたり水和が進行していると考えられる。なお、加熱温度 60℃の初期結合応力が低下しているのは、シールが完全ではなかったため、水分が逸散してしまい、低温度と比較して水和が進行せず、また、乾燥による微細ひび割れの発生等が影響していると推察される。

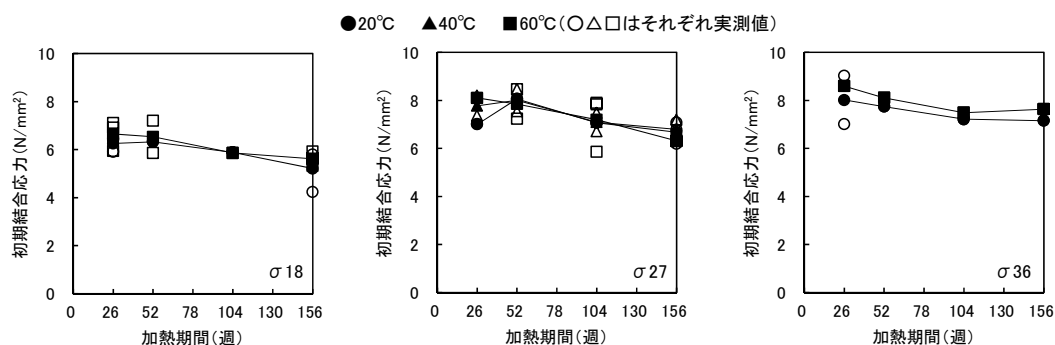


図 2.3.3-14 初期結合応力と加熱期間の関係（シールなし）

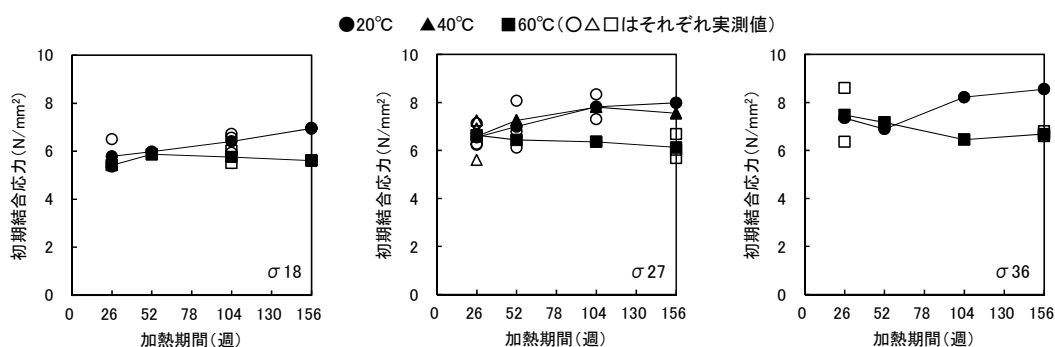


図 2.3.3-15 初期結合応力と加熱期間の関係（シールあり）

(b) 破壊エネルギー

図 2.3.3-16 にシールなし供試体の破壊エネルギーと加熱期間の関係を示す。加熱温度が高くなると破壊エネルギーが小さくなっている。また、加熱温度が高くなると、加熱期間が長くなるとともに破壊エネルギーが若干ではあるが低下する傾向にある。これは、加熱に伴う乾燥により、ひび割れが脆性的に進行しているためであると考えられる。

図 2.3.3-17 にシールあり供試体の破壊エネルギーと加熱期間の関係を示す。加熱なし供試体と異なり、加熱温度が高くなると破壊エネルギーが大きくなっている。本試験ではシールを行っても水分の逸散が確認されたが、その量はシールなしと比較して小さいことにより供試体から逸散せずに留まっていた水分が未水和セメントと水和し、加熱温度の上昇に伴い、水和反応が促進されたために結合応力が大きくなり、破壊エネルギーが上昇していると思われる。そして、加熱期間が長くなるとともに破壊エネルギーが若干ではあるが増加する傾向にある。

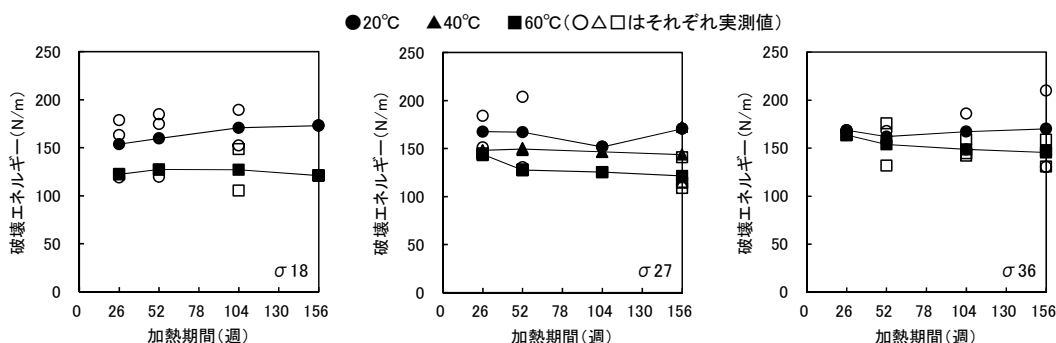


図 2.3.3-16 破壊エネルギーと加熱期間の関係（シールなし）

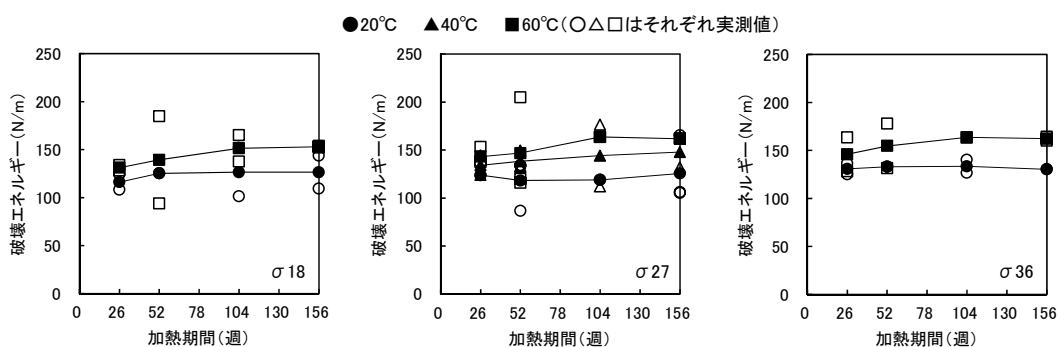


図 2.3.3-17 破壊エネルギーと加熱期間の関係（シールあり）

(4) まとめ

ここでは、強度の異なるコンクリートについて 100℃未満で長期間（156 週）加熱を行った場合のひび割れ発生に関する検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- ① シールなし供試体の初期結合応力は、水セメント比が小さくなると大きくなるが、加

熱期間が長くなるに伴い低下する。

- ② シールあり供試体の初期結合応力は、水セメント比が小さくなると大きくなり、加熱期間が長くなるに伴い 20℃及び 40℃では増加するが、60℃では低下する。
- ③ シールなし供試体の破壊エネルギーは、加熱温度が高くなると小さくなり、加熱温度が高くなると、加熱期間が長くなるとともに若干ではあるが低下する傾向にある。
- ④ シールあり供試体の破壊エネルギーは、加熱温度が高くなると大きくなり、加熱期間が長くなるとともに若干ではあるが増加する傾向にある。

上述の関係について、今年度の試験データでは、100℃未満での熱と材料劣化度の関係の定式化には至っていないが、熱によるひび割れ発生の傾向を把握することができた。本成果は、熱を劣化因子の作用量 F に、圧縮強度、ヤング係数、引張強度、ひび割れ抵抗性を材料劣化度 D とした長期健全性評価での D - F 曲線を決定する際の定性的な知見として活用できる。

2.3.4 100℃以上で加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性

(1) はじめに

ここでは、粗骨材に一般のコンクリート構造物で多く用いられている砂岩（産地は関東地方）、収縮ひび割れ低減効果を有する石灰岩（産地は東北地方）、また、砂岩及び石灰岩とは岩種及び産地が異なるチャート（産地は中部地方）を用いたコンクリートについて800℃まで加熱を行った場合のコンクリートのひび割れ発生特性に関して検討を行い、コンクリートの破壊特性である初期結合応力及び破壊エネルギーと加熱温度の関係式、また、高温加熱後の圧縮強度と破壊エネルギーの関係式を示すことを目的とした。なお、粗骨材に石灰岩を用いた供試体は、加熱温度 600℃より高い温度で加熱した際に供試体が崩壊したため（図 2.3.4-1）、加熱温度 800℃のデータは取得できなかった。



図 2.3.4-1 粗骨材に石灰岩を用いた供試体の加熱後の状況（加熱温度 700℃）

(2) 実験概要

1) 供試体概要

表 2.3.4-1 に使用材料、図 2.3.4-2 に使用した骨材を示す。粗骨材には一般的にコンクリートに用いられている 4 種類の岩種を用いた。図 2.3.4-3 に用いた骨材の粉末 X 線回折結果を示す。粉末 X 線回折の測定は、粉末 X 線回折装置（BrukerAXS 社製）により、X 線源 Cu-K α 、管電圧 30kV、管電流 10mA、走査範囲 $2\theta=5\sim65^\circ$ 、ステップ幅 0.02° で行った。なお、表 2.3.4-1 中に示す鉱物組成は、X 線回折結果から得られた主な鉱物組成である。これをみると、砂岩、花崗閃緑岩、チャート、陸砂には石英、そして、石灰岩には方解石が含まれることがわかる。



砂岩

石灰岩

チャート

陸砂

図 2.3.4-2 使用した骨材

表 2.3.4-1 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm ³
細骨材	陸砂 (大井川産)	S	表乾密度 2.58g/cm ³ 、吸水率 2.15%、粗粒率 2.68 鉱物組成：石英 (SiO ₂)、曹長石 (NaAlSi ₃ O ₈)、 白雲母 (KAl ₂ (AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₂)
粗骨材	砂岩碎石 (青梅産)	G1	表乾密度 2.66g/cm ³ 、吸水率 0.53%、実積率 62.4% 鉱物組成：石英 (SiO ₂)、灰長石 (CaAl ₂ Si ₂ O ₈)、曹長石 (NaAlSi ₃ O ₈)、 白雲母 (KAl ₂ (AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₂)
	石灰岩碎石 (下北郡産)	G2	表乾密度 2.71g/cm ³ 、吸水率 0.27%、実積率 61.0% 鉱物組成：方解石 (CaCO ₃)
	チャート碎石 (郡上産)	G3	表乾密度 2.64g/cm ³ 、吸水率 1.10%、実積率 58.0% 鉱物組成：石英 (SiO ₂)、白雲母 (KAl ₂ (AlSi ₃)O ₁₀ (OH) ₂)
混和剤	AE 減水剤	Ad	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体

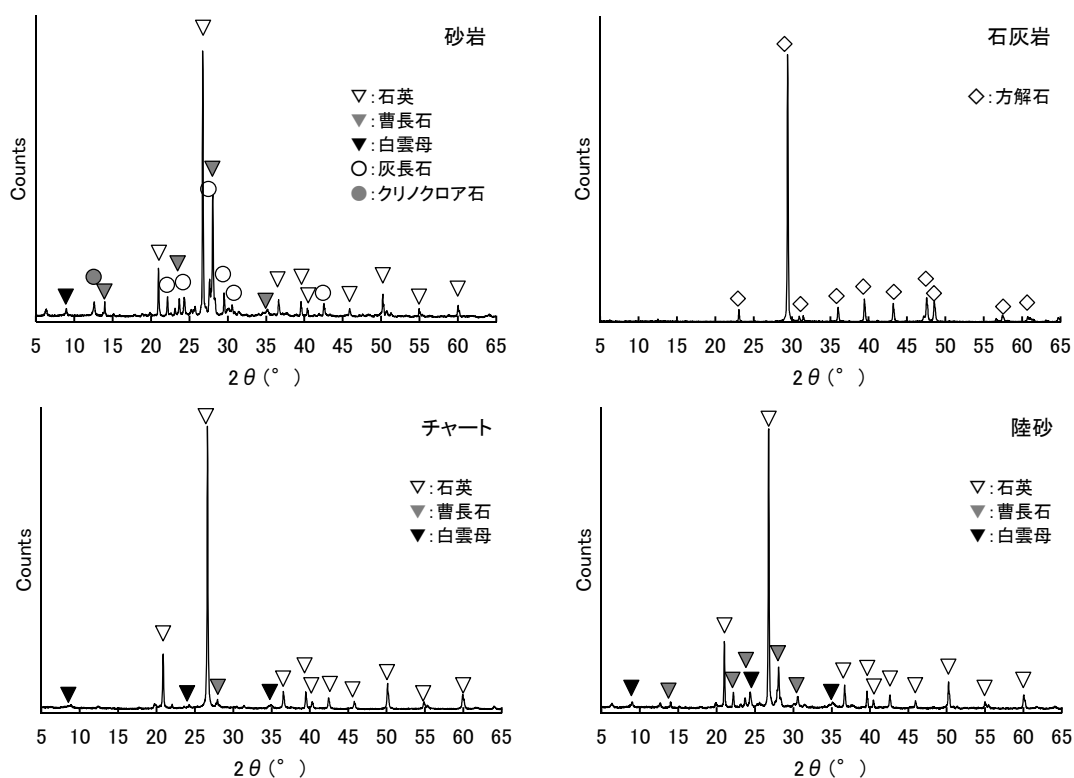


図 2.3.4-3 骨材の粉末 X 線回折結果

表 2.3.4-2 に調合、表 2.3.4-3 に実験の要因と水準を示す。粗骨材は岩種の異なる 3 種類を用い、水セメント比 57%、目標スランプ 18cm、目標空気量 4.5%とした。また、粗骨材量は容積 356l/m³一定とし、スランプ及び空気量は混和剤量で調整した。

供試体の練混ぜには、容量 100 リットルのパン形ミキサを使用した。コンクリートの練り混ぜは、ミキサにセメントと細骨材を投入し 10 秒間、水及び混和剤を投入し 30 秒間練混ぜを行った後に粗骨材を投入、さらに 90 秒間練混ぜを行った。モルタルの練混ぜは、ミ

キサにセメントと細骨材を投入し 10 秒間、水及び混和剤を投入し 30 秒間練混ぜを行った後に掻き落とし、さらに 90 秒間練混ぜを行った。練混ぜ量は 1 バッチにつき 100 リットルとし、各調合 3 バッチの練混ぜを行い、それぞれフレッシュ試験後に型枠に打ち込んだ。

供試体は、各試験条件につき破壊特性を評価するためのくさび割裂試験用供試体（100×100×120mm）3 体、圧縮強度試及びヤング係数測定用供試体（φ100×200mm）3 体とした。供試体は打込み後 2 日で脱型し、材齢 26 週まで 20℃水中養生を行った後に加熱及び試験を行った。表 2.3.4-4 にフレッシュ性状及び材齢 4、26 週における 20℃水中養生後の強度試験結果を示す。

表 2.3.4-2 調合（単位：kg/m³）

粗骨材	G _{max} (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	W	C	S	G1	G2	G3	Ad
砂岩	20	18	4.5	57.0	47.9	175	307	844	947	—	—	2.46
石灰岩	20	18	4.5	57.0	47.9	175	307	844	—	965	—	2.46
チャート	20	18	4.5	57.0	47.9	175	307	844	—	—	940	4.61
なし（モルタル）	—	—	—	57.0	100.0	292	512	1409	—	—	—	—

表 2.3.4-3 実験の要因と水準

要因	水準
粗骨材の有無	あり（コンクリート）、なし（モルタル）
粗骨材種類	砂岩、石灰岩、チャート
加熱時最高温度（℃）	100、200、400、600、800

表 2.3.4-4 フレッシュ性状及び各材齢での強度試験結果

粗骨材	バッチ	スランプ (cm)	空気量 (%)	スランプ 平均 (cm)	空気量 平均 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)		ヤング係数 (kN/mm ²)	
						4 週	26 週	4 週	26 週
						20℃水中	20℃水中	20℃水中	20℃水中
砂岩	1	17.5	4.3	17.5	4.3	39.3	45.5	27.9	31.7
	2	17.0	4.3						
	3	18.0	4.3						
石灰岩	1	17.5	4.3	17.5	4.4	39.0	47.3	31.1	33.1
	2	17.5	4.4						
	3	17.0	4.4						
チャート	1	17.5	5.4	17.5	5.1	38.2	43.5	27.7	30.3
	2	17.0	4.9						
	3	17.5	5.1						
なし （モルタル）	1	222×221*	—	222*	—	46.0	57.0	24.0	27.1
	2	223×220*	—						
	3	223×221*	—						

* フロー値（mm）

2) 試験方法

(a) 加熱方法

図 2.3.4-4 に炉内での加熱履歴を示す。加熱時の炉内最高温度は 100、200、300、400、600、800℃とし、比較用として加熱なし（20℃）についても試験を行った。加熱にはプログラム調整器付きマッフル炉（炉内寸法 W310×D610×H310mm、左右 2 面加熱、図 2.3.4-5）2 機を用いた。供試体は、炉内での均一加熱を行うために、左右のヒーターからの距離が同一になるように炉内中央に配置した。

炉内の昇温は、表面及び中心部に K 型熱電対を設置した $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 供試体を用いた昇温試験により、供試体表面と内部中央との温度差が小さくなるように $0.5^\circ\text{C}/\text{min}$ とした。炉内温度が目標温度に達した後は、その温度を 168 時間保持して加熱を終了し、供試体温度が外気温度と同程度になるまで炉内で自然除熱し、試験を行うこととした。

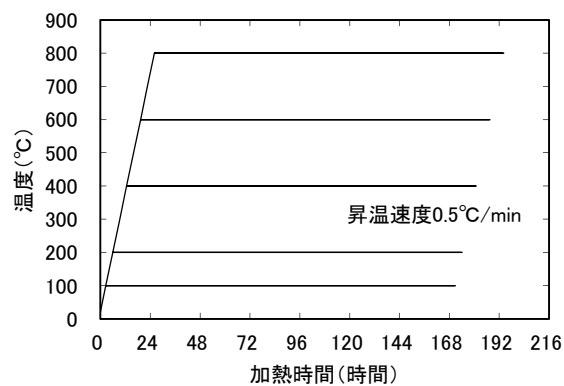


図 2.3.4-4 加熱履歴



図 2.3.4-5 マッフル炉

(b) 熱膨張率測定方法

粗骨材に用いた岩石 3 種類及びマトリックスであるモルタルに関して、熱膨張を熱機械分析装置（NETZSCH 社製）により測定した。岩石及びモルタルを約 $7 \times 7 \times 20\text{mm}$ 角の大きさに整形したものを試験片とした。

測定は、岩石は気乾状態、モルタルは表乾状態のものを室温から 1000℃まで昇温速度 5℃/min、N₂ フロー（200ml/min）環境下で行った。なお、本研究では、試験片を設置した装置内温度を 30℃の状態に 1 時間保持した後に測定を開始した。

(c) 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じて行った。また、同時にコンプレッソメータを用いてヤング係数を測定した（JIS A 1149）。

(d) 破壊靱性試験方法

破壊靱性試験は、くさび割裂試験によった。試験には、クローズドループシステム型（閉回路機構）のサーボ・コントロール式油圧試験機（MTS 社製）を用い、切欠き端部の開口変位の変位速度を 0.02mm/min に設定した。

(e) 破壊特性の評価方法

引張軟化曲線の推定方法は、多直線近似法により逆解析して求めた。破壊力学パラメータは、初期結合応力及び破壊エネルギーによった。

(3) 実験結果及び考察

1) 熱膨張特性

図 2.3.4-6 に熱膨張率と温度の関係を示す。粗骨材に用いた岩石は、全てが温度上昇とともに膨張している。また、砂岩、チャートは約 550℃までは緩やかに膨張するが、550～600℃程度で膨張が大きくなっている。細骨材に陸砂を用いたモルタルは、約 550℃まではほとんど変化がない。そして、モルタルも 550～600℃程度で膨張が大きくなっている。なお、石灰岩は温度の上昇とともに膨張するものの、890℃から収縮に転じている。

砂岩、チャート、陸砂には石英が含まれている。石英は 575℃で α 型から β 型に転移する際に急激に膨張するために⁴⁷、砂岩、チャート、また、細骨材に陸砂が用いられているモルタルの膨張が、550～600℃程度で大きくなっていると考えられる。石灰岩は、主要鉱物である方解石が 650～900℃で熱分解により炭酸ガスを放出するために⁴⁸、890℃から収縮していると考えられる。なお、砂岩及び石灰岩の膨張率と温度の関係は既往の研究と同様の傾向である⁴⁹。

⁴⁷ セメント協会. “C&C エンサイクロペディア [セメント・コンクリート化学の基礎解説] ”、p.246(1996)

⁴⁸ 吉木文平 著. “鉱物工学”、技報堂、pp.107-108(1959)

⁴⁹ 原田有. “建築耐火構法”、工業調査会(1973)

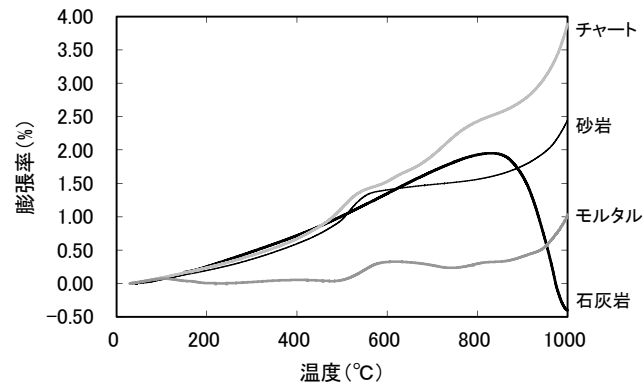


図 2.3.4-6 熱膨張率と温度の関係

2) 質量変化

図 2.3.4-7 に質量変化率と加熱温度の関係を示す。コンクリートと比較して、モルタルの質量減少率が高い。これは、モルタルの単位水量がコンクリートより多いためである。なお、コンクリートに関しては、粗骨材種類による差はほとんどみられない。

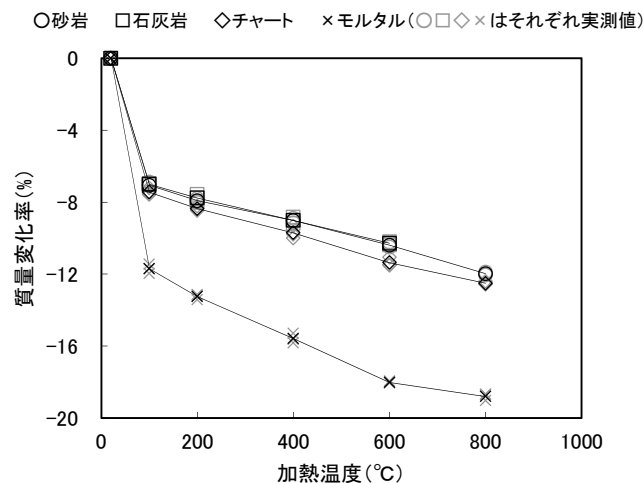


図 2.3.4-7 質量変化率と温度の関係

3) 力学特性

(a) 圧縮強度

図 2.3.4-8 に圧縮強度と加熱温度の関係、図 2.3.4-9 に 20°C に対する圧縮強度残存比と加熱温度の関係を示す。圧縮強度は、コンクリートと比較してモルタルの方が大きい。コンクリートでは砂岩、チャートがほぼ同じ強度であるが、石灰岩が若干小さい⁵⁰。これは、石灰岩が加熱後に冷却する際の収縮率が高いことにより、冷却時にモルタルと石灰岩の界面に隙間やひび割れが多く発生していると考えられる^{51, 52}。なお、加熱温度 100°C 以上

⁵⁰ 一瀬賢一、川口徹、長尾覚博.“高温加熱を受けた高強度コンクリートにおける粗骨材の影響”、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.24、No.1、pp.285-290(2002)

⁵¹ U. シュナイダー 著、森永繁、山崎庸行、林章二 訳.“コンクリートの熱的性質”、技報堂(1983)

⁵² 森実.“骨材の性質・性能—熱的性質・耐火性”、コンクリート工学、Vol.16、No.9、pp.36-40(1978)

では、粗骨材の有無や種類に関係なく、圧縮強度は低下している。これは、主に 100～300℃で C-S-H、400～500℃で水酸化カルシウムの熱分解により結合水が脱水するために、モルタルが脆弱化していると考えられる。

加熱温度 100℃における圧縮強度残存比は、粗骨材が異なる場合でそれぞれ、砂岩が 0.97、石灰岩が 0.86、チャートが 1.03、また、粗骨材が混入されていないモルタルが 1.07 であり、モルタルが上昇、砂岩、チャートがほとんど変化なし、石灰岩で低下した。これは、モルタルは加熱による未水和セメントが水和促進の影響により組織が緻密化して圧縮強度が増加するが、コンクリートは粗骨材とモルタルの熱膨張係数の差により、両者の間でひずみ差が生じ、微細ひび割れも発生するために強度がほとんど変化しないか、低下すると考えられる。なお、石灰岩は、砂岩、チャートと比較すると、高温加熱後の圧縮強度残存比が小さくなる傾向にある。

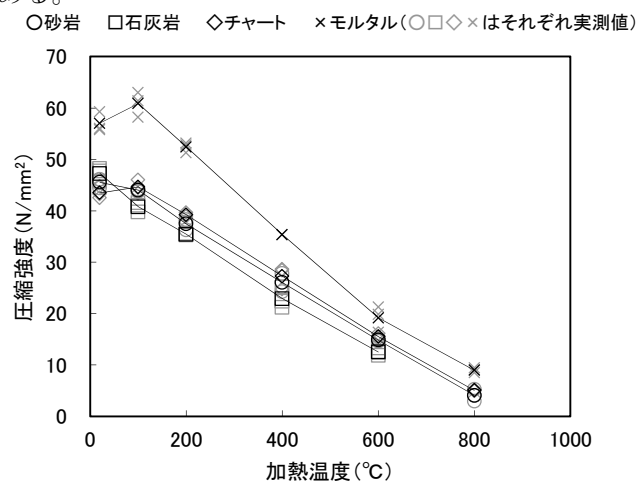


図 2.3.4-8 圧縮強度と加熱温度の関係

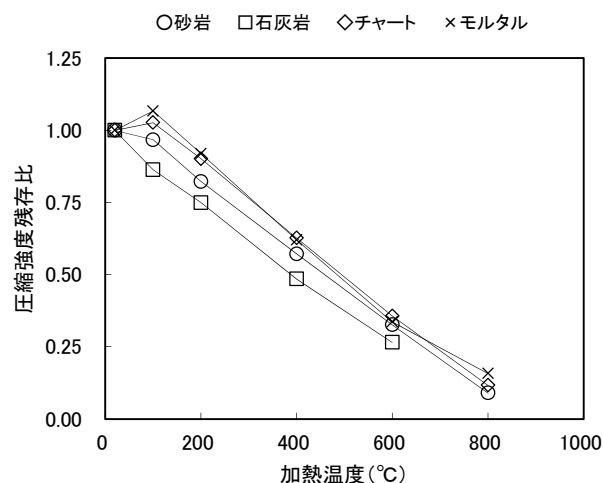


図 2.3.4-9 圧縮強度残存比と加熱温度の関係

(b) ヤング係数

図 2.3.4-10 にヤング係数と加熱温度の関係、図 2.3.4-11 にヤング係数残存比と加熱温度の関係を示す。ヤング係数は、加熱なしではモルタルがコンクリートと比較して小さいが、加熱後はモルタル、コンクリートとも加熱温度の上昇とともに低下している。また、石灰岩を用いたコンクリートのヤング係数が、圧縮強度と同様に他の骨材を用いた場合と比較して小さくなっている。これは、石灰岩の冷却時の収縮率が大きいことにより、冷却時にモルタルと石灰岩の界面に隙間やひび割れが多く発生していると考えられる。

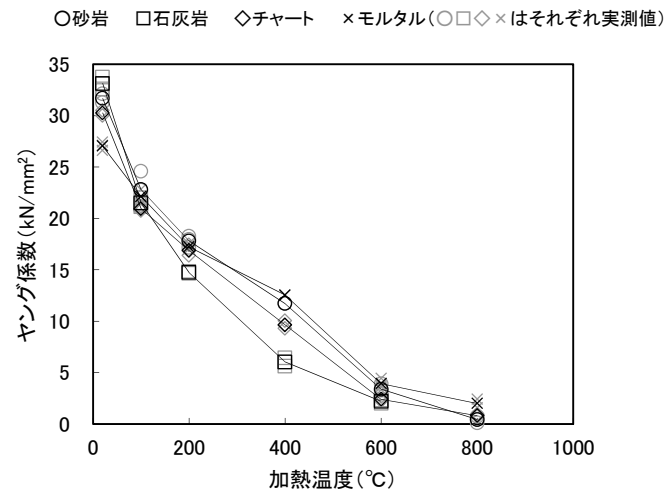


図 2.3.4-10 ヤング係数と加熱温度の関係

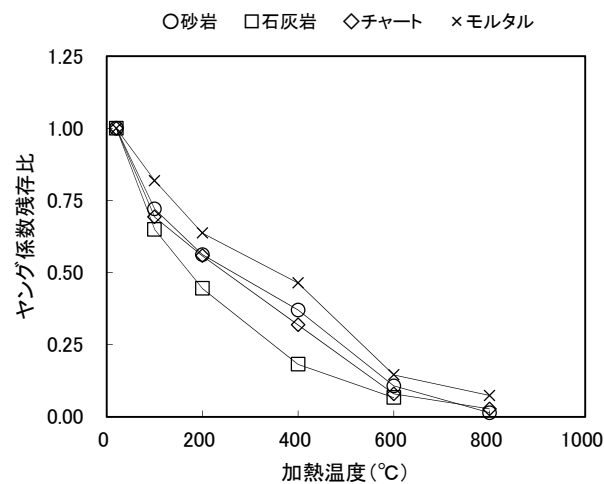


図 2.3.4-11 ヤング係数残存比と加熱温度の関係

3) 破壊靱性試験結果（荷重－開口変位曲線）

図 2.3.4-12～図 2.3.4-15 に荷重－開口変位曲線を示す。荷重－開口変位曲線の最大荷重は、砂岩は加熱温度 300°C まではほとんど変化がないが、その他は 20°C と比較して加熱温度 100°C 大きくなっている。各加熱温度における最大荷重は、モルタルが大きく、石灰岩が小

さい。これは、モルタルは結合材であるペーストが多いため、また、石灰岩の加熱後の収縮率が大きいいため、冷却時にモルタルと石灰岩の界面に隙間やひび割れが多く発生していると思われる。砂岩、チャートに関しては、加熱に伴う熱膨張特性が同じような傾向にあることから、荷重－開口変位曲線も同様の傾向にあると考えられる。

グラフ形状は、粗骨材種類に関係なく、加熱温度が低い場合は開口変位の増加に伴う荷重増加時の傾きが大きく直線的であり、最大荷重以降の低下も急勾配となっている。しかし、加熱温度が高くなると、次第に荷重増加時の傾きが小さくなり、最大荷重以降の低下勾配も緩やかになっている。これは、加熱温度が低いときは破壊進行領域に加熱による微細ひび割れ等の欠陥が少ないために、載荷によるひび割れが直線的に進展するために破壊が脆性的となる。しかし、加熱温度が高くなると破壊進行領域に微細ひび割れ等の欠陥が多数存在するために、ひび割れがそれらの欠陥を介して進展するために、破壊が脆性的とはならず、荷重低下も緩やかになると考えられる。

4) 引張軟化曲線

図 2.3.4-16～図 2.3.4-19 に引張軟化曲線を示す。引張軟化曲線は、開口変位の増加に伴い結合応力は低下するが、低下は粗骨材の有無や粗骨材種類によって異なっている。モルタルは、コンクリートと比較して初期結合応力が大きく、開口変位の増加に伴う結合応力の低下も緩やかになっている。コンクリートは、砂岩、チャートが同じような傾向となっているが、石灰岩の開口変位の増加に伴う結合応力の低下が若干大きい。これは、石灰岩の冷却時の収縮率が大きいために、他の骨材を用いた場合と比較して開口変位の増加に伴う結合応力の低下が大きくなっていると考えられる。

5) 破壊特性

(a) 初期結合応力

図 2.3.4-20 に初期結合応力と加熱温度の関係、図 2.3.4-21 に 20℃に対する初期結合応力残存比と加熱温度の関係を示す。初期結合応力は、加熱前は砂岩及びチャートが 7N/mm^2 程度、石灰岩、モルタルが 6N/mm^2 程度であった。加熱後は結合材であるペーストが多いモルタルで大幅に増加し、コンクリートでは砂岩、チャートで若干増加、石灰岩は低下した。砂岩、チャートの初期結合応力が加熱温度 100℃で若干増加したのは、加熱による未水和セメントの水和促進によるものと考えられる。一方、石灰岩の初期結合応力が加熱温度 100℃で低下しているのは、石灰岩の加熱後の収縮率が大きいために、モルタルと石灰岩の界面に隙間やひび割れが多く発生したためであると考えられる。なお、加熱温度 100℃以上で全ての供試体で加熱温度の上昇とともに初期結合応力が低下している。これは、C-S-H や水酸化カルシウム熱分解による結合水の脱水に伴うセメント水和物の変質や、消失、セメントペーストの収縮と骨材の膨張という相反する膨張収縮特性により、微細ひび割れが発生しており、その影響が大きくなっていると考えられる。

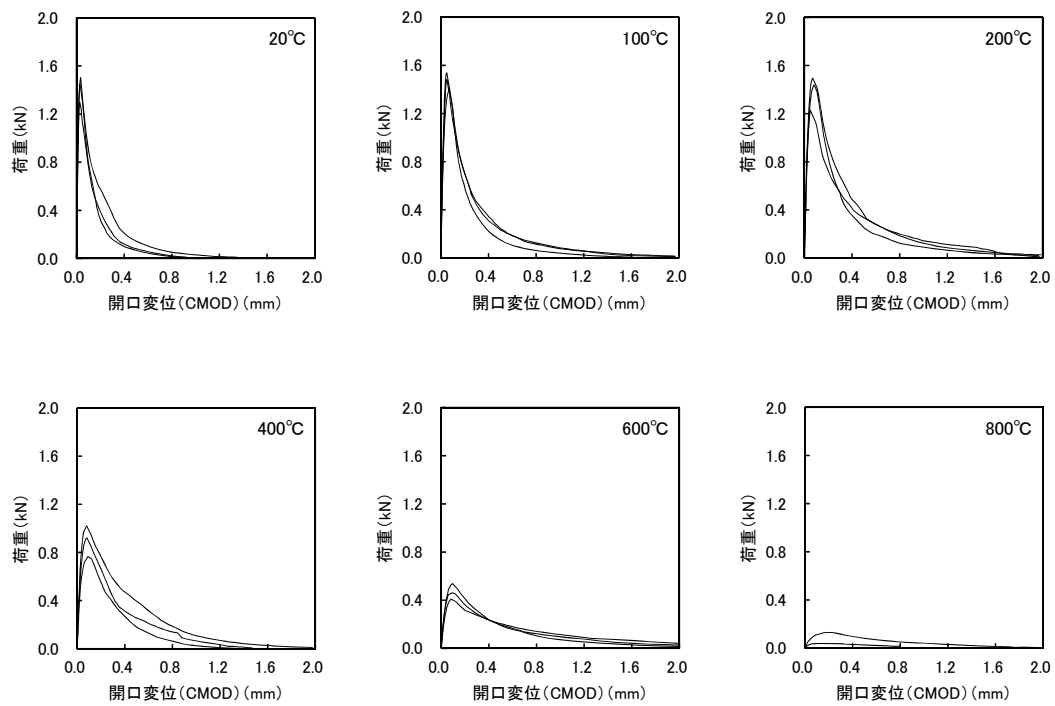


圖 2.3.4-12 荷重－開口變位曲線（砂岩）

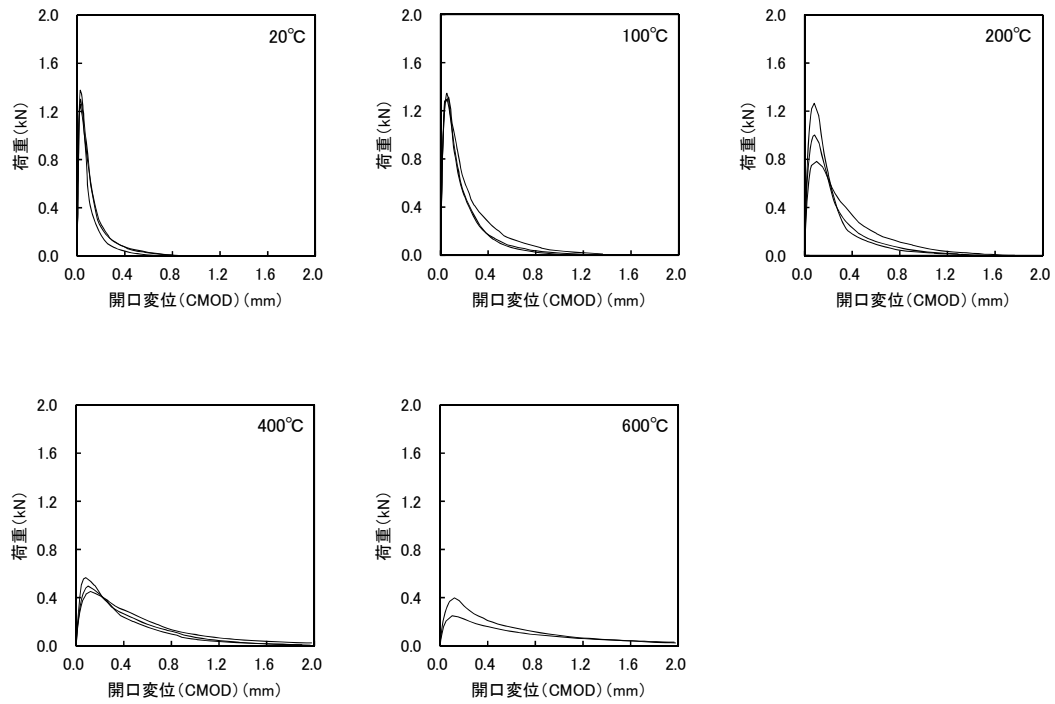


圖 2.3.4-13 荷重－開口變位曲線（石灰岩）

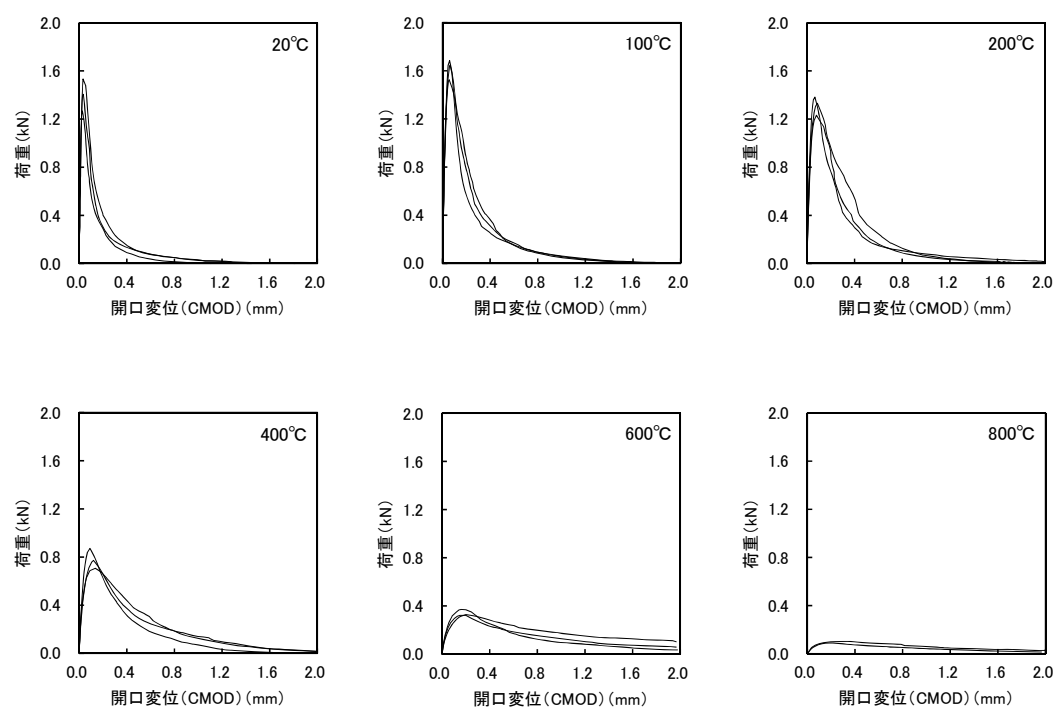


図 2.3.4-14 荷重－開口変位曲線 (チャート)

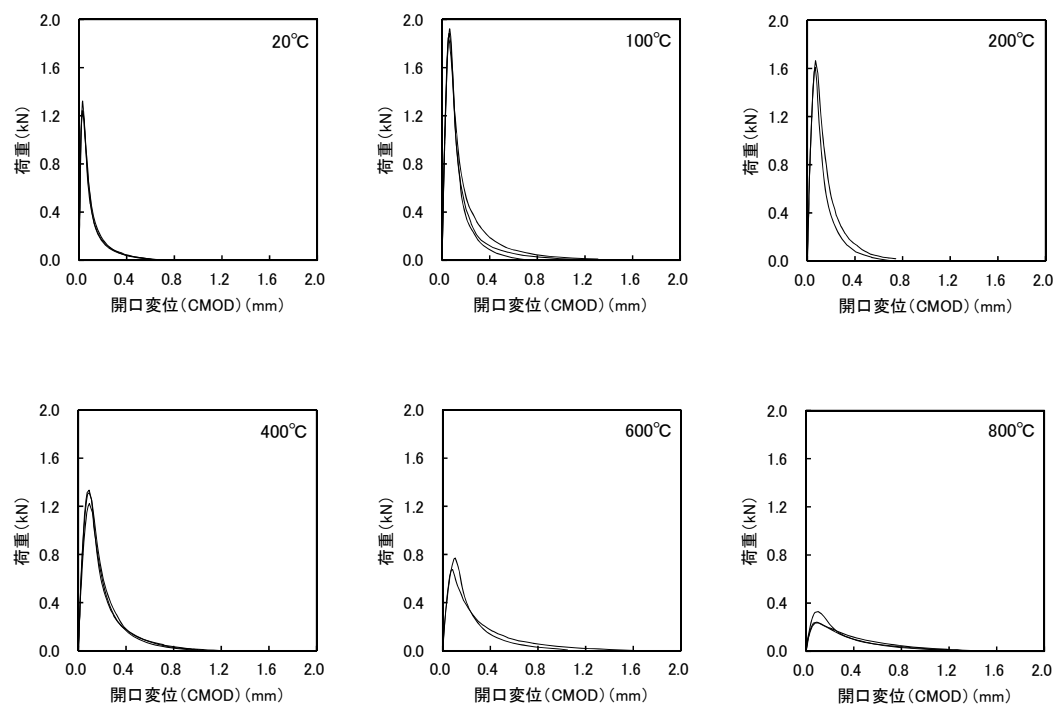


図 2.3.4-15 荷重－開口変位曲線 (モルタル)

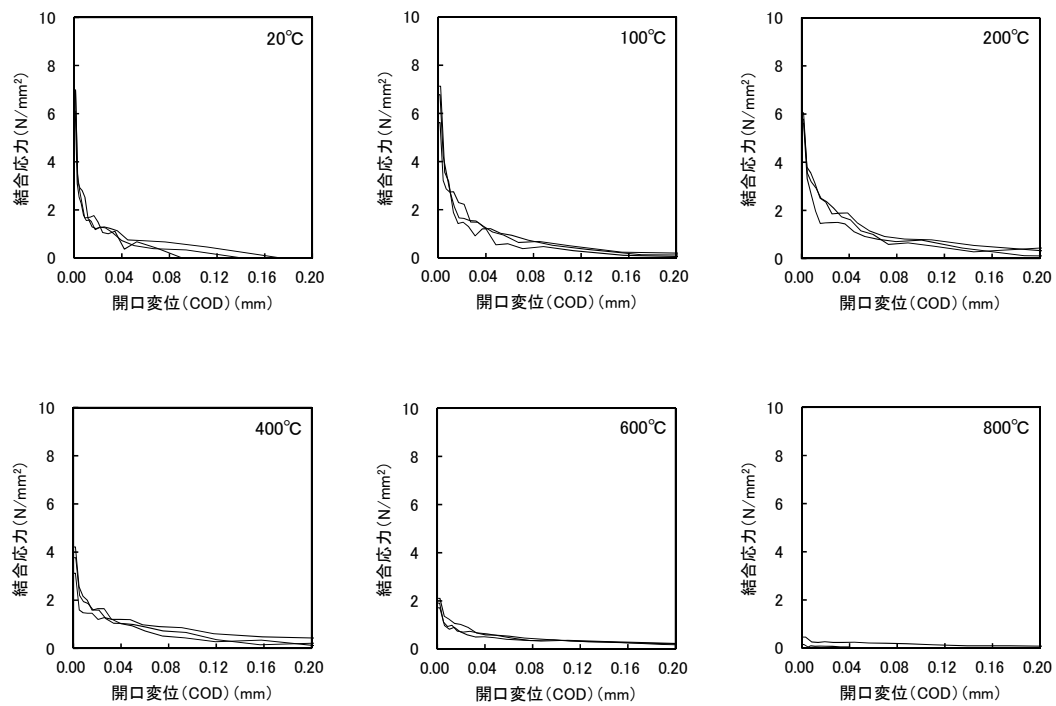


図 2.3.4-16 引張軟化曲線（砂岩）

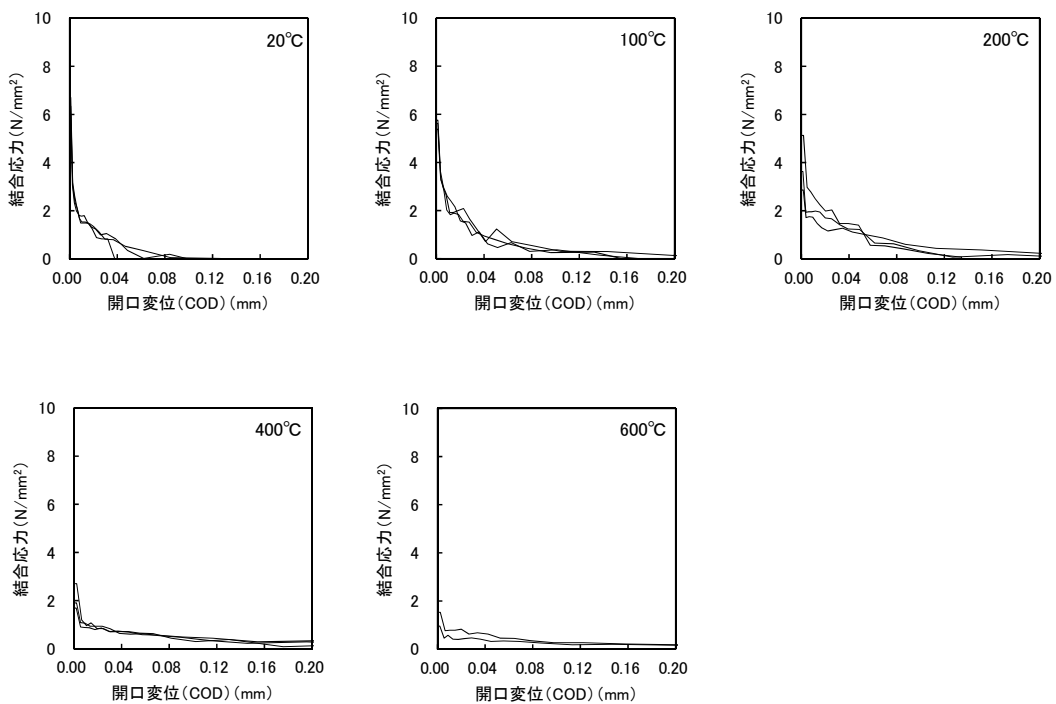


図 2.3.4-17 引張軟化曲線（石灰岩）

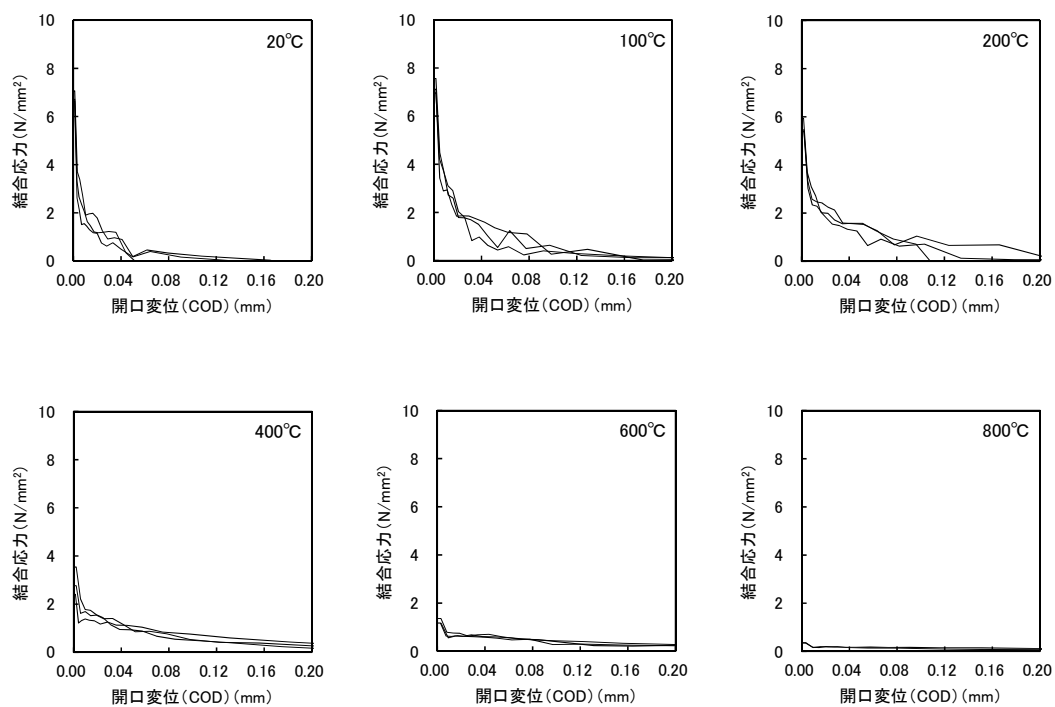


図 2.3.4-18 引張軟化曲線 (チャート)

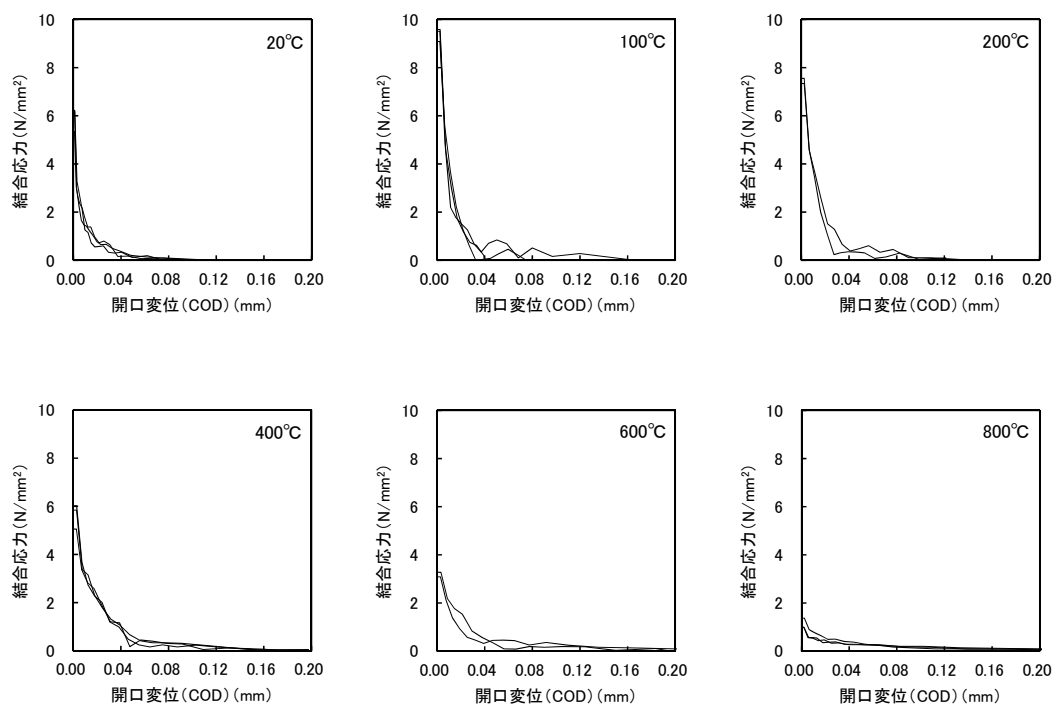


図 2.3.4-19 引張軟化曲線 (モルタル)

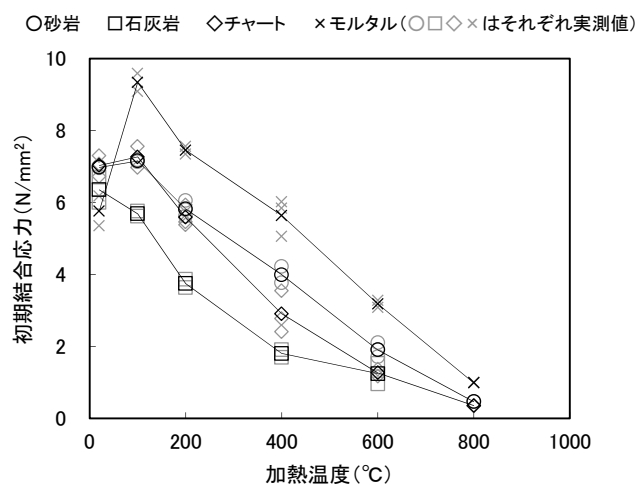


図 2.3.4-20 初期結合応力と加熱温度の関係

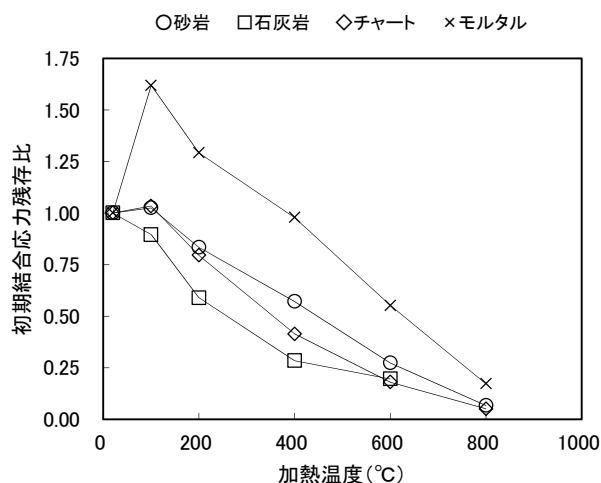


図 2.3.4-21 初期結合応力残存比と加熱温度の関係

(b) 破壊エネルギー

図 2.3.4-22 に破壊エネルギーと加熱温度の関係、図 2.3.4-23 に破壊エネルギー残存比と加熱温度の関係を示す。破壊エネルギーは、加熱前は砂岩が 130N/m、チャートが 110N/m、石灰岩が 80N/m、モルタルが 60N/m 程度であった。加熱後は、全ての供試体で加熱温度の上昇とともに破壊エネルギーが加熱温度 200～400℃まで増加し、その後は低下している。加熱温度 400℃程度までは未水和セメントの水和反応による結合応力の増加、また、加熱により C-S-H や水酸化カルシウムの熱分解による結合水の脱水によるセメント水和物の変質や、消失、セメントペーストの収縮と骨材の膨張という相反する膨張収縮特性により、微細ひび割れが発生しており、破壊進行領域が拡大するために破壊が枝分かれするように進展し、破壊進展時のひび割れが増加するために、破壊に要するエネルギーが大きくなっていると考えられる。しかし、その後は、セメント水和物の熱分解による結合水の脱水に

よるセメント水和物の変質や、消失の影響が大きくなり、破壊進行領域は拡大するものの結合応力が低下し、破壊が進展する際のエネルギーが小さくなっていると考えられる。

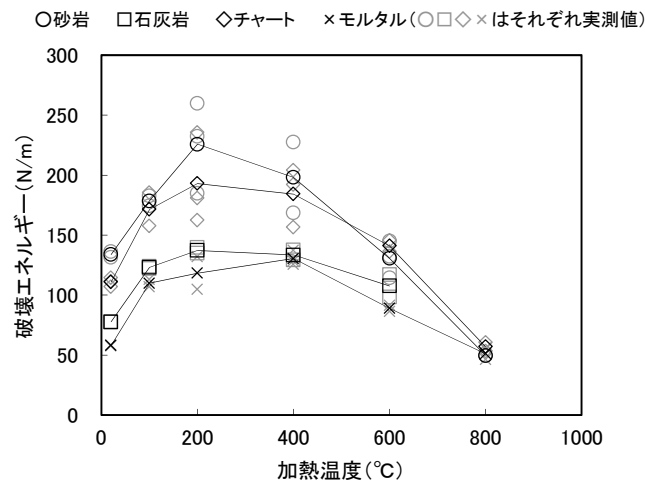


図 2.3.4-22 破壊エネルギーと加熱温度の関係

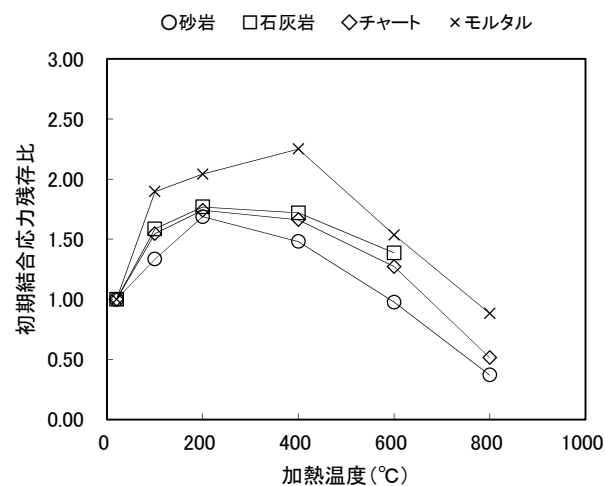


図 2.3.4-23 破壊エネルギー残存比と加熱温度の関係

5) 高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊特性の定式化

(a) 初期結合応力

平成 25 年度の成果等^{53, 54}により、加熱時間が長くなるに伴い初期結合応力が一定の値となる傾向が示された。ここでは、本年度の結果及び平成 25 年度の結果（ともに加熱時間 168 時間）から、初期結合応力と加熱温度の関係式を回帰式により示すこととした。その

⁵³ 首都大学東京：“平成 25 年度高経年化対策強化基盤整備事業「コンクリート構造物の健全性二次評価に係わる評価法の調査・試験研究」成果報告書”、三菱総合研究所委託(2013)

⁵⁴ 松沢晃一、橘高義典：“高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊特性に及ぼす加熱時間の影響”、コンクリート工学年次論文集、第 36 巻、第 1 号、pp.1318-1323(2014)

結果を式(2.3.4-1)に示す⁵⁵。また、図 2.3.4-24 に加熱時間 168 時間におけるンクリートの初期結合応力残存比及び式(2.3.4-1)による計算結果と加熱温度の関係を示す。実験定数 α は、加熱温度 100℃における初期結合応力により得られる定数であり、本研究においては粗骨材に砂岩 1 種類を用いた場合 1.02、石灰岩を用いた場合 0.95、チャートを用いた場合 1.03 となった。なお、平均値は 1.05 となった。

$$rF_t(T) = 0.01 \left(\frac{T-100}{100} \right)^2 - 0.21 \left(\frac{T-100}{100} \right) + \alpha \quad (2.3.4-1)$$

$rF_t(T)$: 加熱温度 T における初期結合応力残存比

ここに、 T : 加熱温度 (℃) $\{100 \leq T \leq 800\}$

α : 実験定数 (平均値は 1.05)

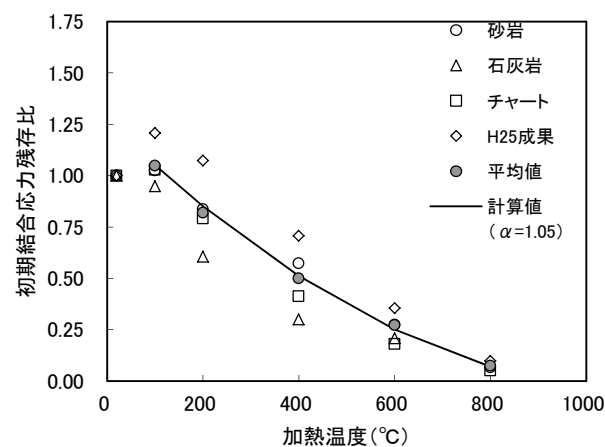


図 2.3.4-24 初期結合応力残存比に関する実測値及び計算値と加熱温度の関係

(b) 破壊エネルギー

破壊エネルギーも、初期結合応力と同様に本年度の結果及び平成 25 年度の結果（ともに加熱時間 168 時間）から回帰式により示すこととした。その結果を式(2.3.4-2)に示す⁵⁵。また、図 2.3.4-25 に加熱時間 168 時間におけるンクリートの破壊エネルギー残存比及び式(2.3.4-2)による計算結果と加熱温度の関係を示す。実験定数 α は、加熱温度 100℃における破壊エネルギーにより得られる定数であり、本研究においては粗骨材に砂岩 1 種類を用いた場合 1.28、石灰岩を用いた場合 1.59、チャートを用いた場合 1.54 となった。なお、平均値は 1.54 となった。

$$rG_F(T) = -0.06 \left(\frac{T-100}{100} \right)^2 + 0.28 \frac{T-100}{100} + \alpha \quad (2.3.4-2)$$

ここに、 $rG_F(T)$: 加熱温度 T における破壊エネルギー残存比

T : 加熱温度 (℃) $\{100 \leq T \leq 800\}$ α : 実験定数 (平均値は 1.54)

⁵⁵ 松沢晃一：“高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊特性に関する研究” 首都大学東京 学位論文(2016)

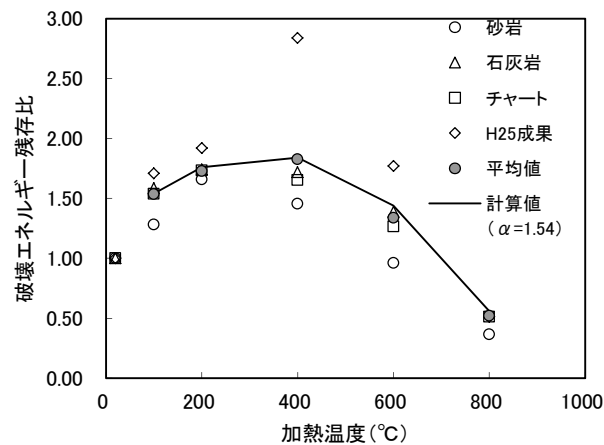


図 2.3.4-25 破壊エネルギー残存比に関する実測値及び計算値と加熱温度の関係

(c) 圧縮強度と破壊エネルギーの関係

圧縮強度より破壊エネルギーを算出する式が、CEB（式(2.3.4-3)）⁵⁶及び土木学会（式(2.3.4-4)）⁵⁷から提案されている。

$$G_F = G_{F0} \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{0.7} \quad (2.3.4-3)$$

ここに、 G_F ：破壊エネルギー（N/m） f_{cm} ：圧縮強度（N/mm²）

$$\begin{aligned} G_{F0} &= 0.025 \text{ (N} \cdot \text{mm/mm}^2\text{)} & d_{\max} &= 8\text{mm} \\ &0.030 \text{ (N} \cdot \text{mm/mm}^2\text{)} & d_{\max} &= 16\text{mm} \\ &0.058 \text{ (N} \cdot \text{mm/mm}^2\text{)} & d_{\max} &= 32\text{mm} \end{aligned}$$

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f'_{ck}{}^{1/3} \quad (2.3.4-4)$$

ここに、 G_F ：破壊エネルギー（N/m） $d_{\max}$ ：粗骨材の最大寸法（mm）

f'_{ck} ：圧縮強度の特性値（設計基準強度）（N/mm²）

しかし、高温加熱の影響を受けたコンクリートの場合は、既往の推定式から算出した破壊エネルギーと実測値と関係性は低い。そこで、本研究では、CEB（式(2.3.4-3)）及び土木学会（式(2.3.4-4)）に高温加熱による影響係数 $\alpha(T)$ を乗じることで、高温加熱の影響を受けたコンクリートの圧縮強度と破壊エネルギーの関係式を示すこととする。

本研究では、式(2.3.4-2)を $\alpha(T)$ として、式(2.3.4-5)及び式(2.3.4-6)により高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊エネルギーと圧縮強度の関係を式(2.3.4-7)示す。

⁵⁶ CEB Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990、 Bulletin d'Information、 No.203、 pp.2-1-2-16、 July (1991)

⁵⁷ 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕（2013）

$$G_F(T) = \alpha(T) \cdot G_{F0} \left(\frac{F_C(20)}{10} \right)^{0.7} \quad (2.3.4-5)$$

$$G_F(T) = \alpha(T) \cdot 10(d_{\max})^{1/3} \cdot F_C(20)^{1/3} \quad (2.3.4-6)$$

$$\alpha(T) = -0.06 \left(\frac{T-100}{100} \right)^2 + 0.28 \frac{T-100}{100} + 1.54 \quad (2.3.4-7)$$

ここに、 $G_F(T)$ ：加熱温度 T における破壊エネルギー（N/m）

$\alpha(T)$ ：加熱温度 T における影響係数（式(2.3.4-2)）

$d_{\max}$ ：粗骨材の最大寸法（mm） $F_C(20)$ ：20℃における圧縮強度（N/mm²）

T ：加熱温度（℃）{100 ≤ T ≤ 800}

$G_{F0} = 0.025$ （N・mm/mm²） $d_{\max} = 8\text{mm}$

0.030（N・mm/mm²） $d_{\max} = 16\text{mm}$

0.058（N・mm/mm²） $d_{\max} = 32\text{mm}$

図 2.3.4-26 に $\alpha(T)$ を考慮した圧縮強度と破壊エネルギーの関係を示す。 $\alpha(T)$ を考慮することで、加熱前の圧縮強度から、加熱後の破壊エネルギーをおおよそ推定できる

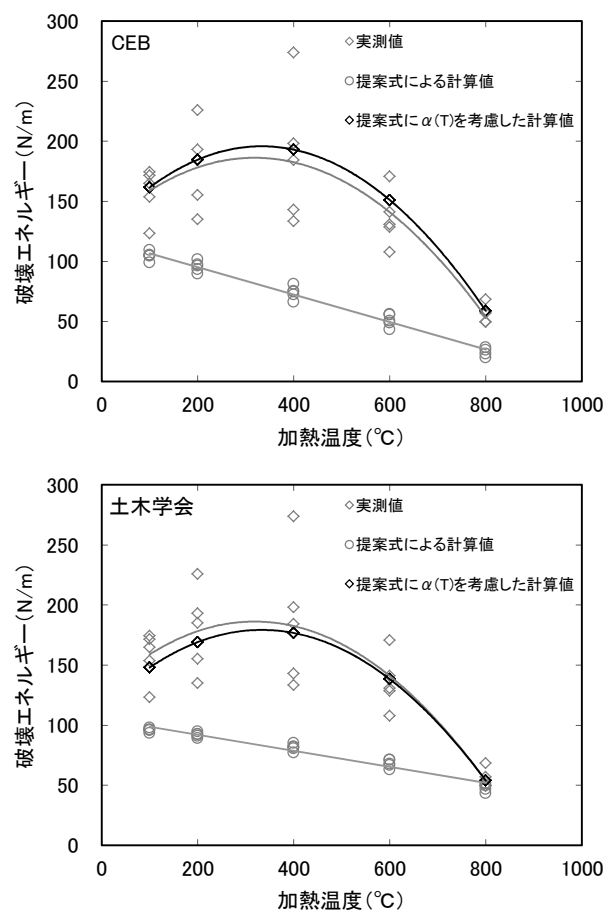


図 2.3.4-26 $\alpha(T)$ を考慮した圧縮強度と破壊エネルギーの関係

(4) まとめ

ここでは、粗骨材の異なる供試体について 800℃まで加熱を行った場合のコンクリートのひび割れ発生特性に関して検討を行い、コンクリートの破壊特性である初期結合応力と加熱温度、破壊エネルギーと加熱温度の関係式、また、高温加熱後の圧縮強度と破壊エネルギーの関係式を示すことを目的とした。その結果、得られた知見を以下に示す。

- ① 初期結合応力は、加熱後は結合材であるペーストが多いモルタルで大幅に増加し、コンクリートでは砂岩、チャートで若干増加、石灰岩は低下した。そして、加熱温度 100℃以上で全ての供試体で加熱温度の上昇とともに初期結合応力が低下した。
- ② 破壊エネルギーは、全ての供試体で加熱温度の上昇とともに加熱温度 200～400℃まで増加し、その後は低下した。
- ③ 実験結果より、破壊エネルギーと加熱温度の関係式、また、高温加熱後の圧縮強度と破壊エネルギーの関係式を既往の常温時の式を基に示した。

上記で得られた、熱と破壊エネルギー、圧縮強度の関係性を表す定式(2.3.4-1)～(2.3.4-7)を基に、熱を劣化因子の作用量 F に、圧縮強度を材料劣化度 D とした長期健全性評価での D - F 曲線に反映することが可能である（なお、本事業で得られた関係式は、式(2.3.4-1)、式(2.3.4-2)、式(2.3.4-5)～式(2.3.4-7)である）。

2.3.5 100℃未満で中性化したコンクリートのひび割れ特性

(1) はじめに

ここでは、100℃未満で中性化したコンクリートのひび割れ特性について、破壊靱性試験により検討を行うことを目的とした。

100℃未満の加熱と中性化の複合的な作用を受けたコンクリートについては平成 20 年度に検討を行っており、「促進加熱中性化を受けたコンクリートの強度及び微視的構造に関する検討」として、60℃程度の高温加熱及び中性化の影響に着目し、セメント 3 種類（普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、フライアッシュセメント B 種）、水セメント比 3 水準（40%、50%、60%）、加熱温度 2 水準（20℃、60℃）、炭酸ガス濃度 2 水準（0%、10%）、曝露試験期間 3 種類（0 日、30 日、60 日）の異なるセメントペースト供試体について、割裂引張強度試験、圧縮強度試験、中性化深さ測定、細孔径分布測定を実施した。その結果、試験期間が 60 日になると温度による引張割裂強度の差が小さくなる傾向にあること、普通ポルトランドセメント及び中庸熱ポルトランドセメントを用いた試験片は 20℃に対し 60℃で圧縮強度が若干下がる傾向を示すこと、フライアッシュセメント B 種を用いた試験片は 20℃に対し 60℃で圧縮強度が若干上がる傾向を示すこと等が判明した⁵⁸。

今年度は、加熱温度を 20℃及び 65℃に設定し、100℃未満の加熱と中性化による複合的な作用を受けたコンクリートの強度及び耐久性に着目し、そのひび割れ抵抗性について、モルタル供試体を用いた破壊靱性試験により検討を行った。なお、供試体をコンクリートとすると、供試体断面が骨材粒径の 3 倍以上必要となる。この場合、供試体全体を今年度中に中性化させることが困難となることが想定された。そのため、供試体はモルタルとした。

(2) 実験概要

1) 供試体概要

ここでは、水セメント比の異なるモルタルについて 100℃未満の温度環境下で促進中性化を行った場合のひび割れ発生特性に関して検討を行う。

表 2.3.5-1 に使用材料、表 2.3.5-2 に調合、表 2.3.5-3 に実験の要因と水準を示す。モルタルは、水セメント比が 60、80、100%の 3 水準とし、フロー値が $180 \pm 10\text{mm}$ となるように砂セメント比 (S/C) をそれぞれ定めた。促進中性化時の温度は 20、65℃とし、炭酸ガス濃度は 0、5%、湿度は 60%R.H.とした。

供試体の作製は、温度 20℃の恒温室で行った。練混ぜには容量 10 リットルのモルタルミキサを使用した。セメント、細骨材をミキサに投入し空練を 30 秒間、水を投入し 30 秒間練混ぜを行い、掻き落とし、さらに 60 秒間練混ぜを行った後に型枠に打ち込んだ。練混ぜ

⁵⁸ 首都大学東京：「平成 20 年度高経年化対策強化基盤整備事業「原子炉建屋コンクリートの健全性の微視的評価方法に関する研究報告書」、三菱総合研究所委託、(2008)

量は1バッチにつき7リットルとした。

供試体は、各試験条件につき破壊特性を評価するための切欠きはり3点曲げ試験用供試体(40×40×160mm)3体、中性化深さを測定するためのダミー供試体(40×40×160mm)3体とした。圧縮強度試験は切欠き梁3点曲げ試験を終えた試験片を用いて行った。供試体は打込み後2日で脱型し、材齢4週まで標準養生を行った後に各条件で促進中性化を行った。その後は定期的に中性化深さ測定を行い、炭酸ガス濃度5%供試体が中性化したことを確認した時点で、炭酸ガス濃度0%供試体とともに破壊靱性試験を実施した。本試験における破壊特性は、40×40×160mm供試体による切欠き梁3点曲げ試験にて評価することとしたが、これは短期間で供試体内部まで中性化するように断面を小さくするためである。

表 2.3.5-4 にフロー値及び材齢4週での圧縮強度試験結果を示す。

表 2.3.5-1 使用材料

材料	種類	記号	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度 3.16g/cm ³ 比表面積 3300cm ³ /g
細骨材	硬質砂岩砕砂（相模原産）	S	表乾密度 2.61g/cm ³ 絶乾密度 2.56g/cm ³ 吸水率 2.15% 粗粒率 3.25

表 2.3.5-2 調合

W/C(%)	S/C(kg/kg)	質量(kg/m ³)		
		W	C	S
60	3.0	243	500	1500
80	4.3	243	376	1616
100	5.0	214	314	1571

表 2.3.5-3 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比(%)	60、80、100
試験時温度(℃)	20、65
炭酸ガス濃度(%)	0、5

表 2.3.5-4 フロー値及び強度試験結果

W/C(%)	フロー値(mm)	圧縮強度(N/mm ²)
--------	----------	--------------------------

60	185	53.1
80	173	41.4
100	185	24.7

2) 試験方法

(a) 促進中性化方法

促進中性化は促進中性化試験装置（図 2.3.3-1）を用いて行った。

(b) 圧縮強度試験方法

圧縮強度試験は、切欠き梁 3 点曲げ試験を終えた試験片を用い、JIS R 5201 に準じて行った。

(c) 破壊靱性試験方法

破壊靱性試験は、40×40×160mm 供試体を用い、JCI-S-001-2003「切欠きはりをを用いたコンクリートの破壊エネルギー試験方法」に準じて行った。

所定の促進中性化を終えた後に、供試体中央にダイヤモンドカッター（刃厚 1mm）を用いてリガメント高さが 12mm となるように切欠きを入れ、リガメント部分にひび割れが発生するよう 3 点曲げを行うこととした（図 2.3.5-1）。試験にはクローズドループシステム型（閉回路機構）のサーボ・コントロール式油圧試験機（MTS 社製）を用いた。また、供試体の安定破壊が得られるように、切欠き端部の開口変位の変位速度を 0.02mm/min に設定し、開口変位の計測には変位制御用の高感度クリップゲージを使用した。

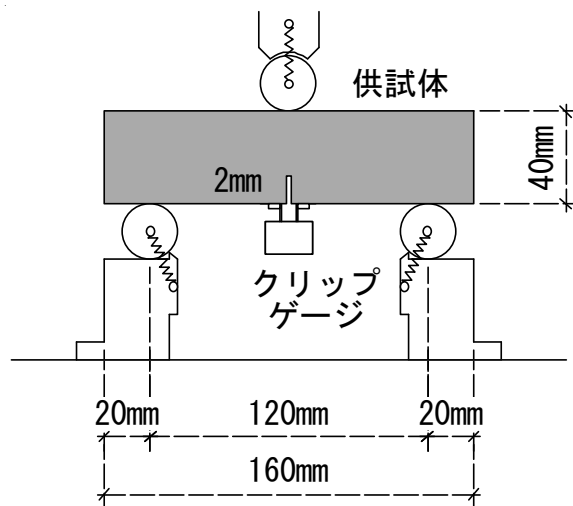


図 2.3.5-1 破壊靱性試験（切欠きはり 3 点曲げ試験）概要

(d) 破壊特性の評価方法

引張軟化曲線の推定方法は、多直線近似法により逆解析して求めた。破壊力学パラメータは、初期結合応力及び破壊エネルギーによった。

(3) 実験結果及び考察

1) 促進中性化試験条件

表 2.3.5-5 に促進中性化試験条件を示す。試験期間は、促進中性化開始時から、炭酸ガス濃度 5% 供試体の中性化完了を確認する時点までの期間とした。

表 2.3.5-5 促進中性化試験条件（炭酸ガス濃度 5%）

水セメント比(%)	60		80		100	
試験時温度(℃)	20	65	20	65	20	65
試験期間(週)	48	11	11	6	6	4

2) 力学特性

(a) 圧縮強度

図 2.3.5-2 に圧縮強度を示す。20℃養生の供試体は 4 週時点より強度が上昇したが、65℃養生の供試体は強度が低下していた。20℃養生、65℃養生ともに中性化により強度が上昇しており、特に 65℃養生では大幅に上昇した。また、W/C の低下とともに強度の上昇がより急激になる傾向がみられた。この原因としては、W/C の低下に伴う単位セメント量の増による空隙の増加が挙げられる。空隙の増加に伴い、中性化により緻密化する割合が大きくなったため、強度の上昇がより急激になったと考えられる。

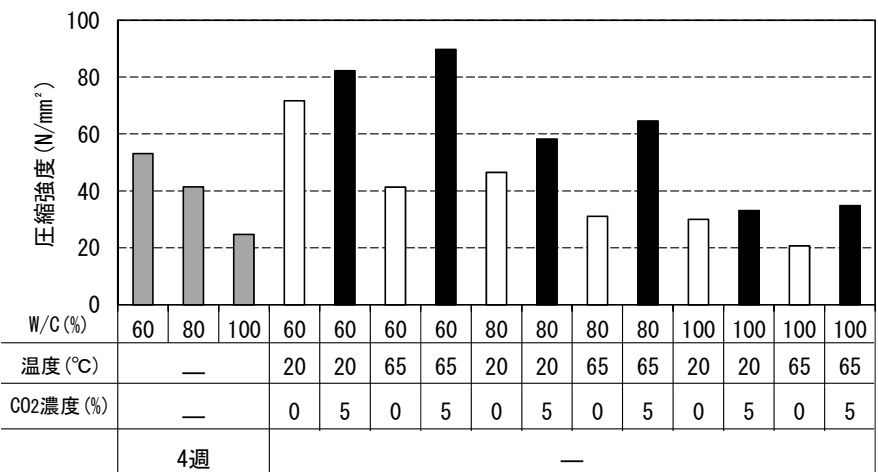


図 2.3.5-2 圧縮強度

3) 破壊靱性試験結果（荷重－開口変位曲線）

図 2.3.5-3 に荷重－開口変位曲線を示す。20℃養生の供試体はいずれも 4 週時点より最大荷重が上昇している。20℃で中性化した供試体も最大荷重は上昇していたが、水セメント比 80%、100%については上昇が小さく、中性化していない供試体に比べ低い強度を示した。しかし水セメント比 60%については、20℃で中性化しても最大荷重が大きく上昇した。水セメント比 80%、100%については中性化に伴い含水率が増加したためであり、水セメント比 60%のみ強度が大きく上昇したのは、材齢が長くなった結果含水率が低下したためと考えられる。65℃養生の供試体は 20℃養生より強度が低く、この要因としては、加熱による水和反応の阻害、水分散逸に伴う供試体内部の空隙の粗大化、微小ひび割れの発生等が挙げられる。しかし 65℃において中性化すると強度が大きく上昇しており、中性化による組織の緻密化や重量増加の影響が考えられる。また、強度の上昇が著しいものは曲線の下降が急になる傾向がみられ、これらの供試体は破壊挙動が脆性的になっているといえる。

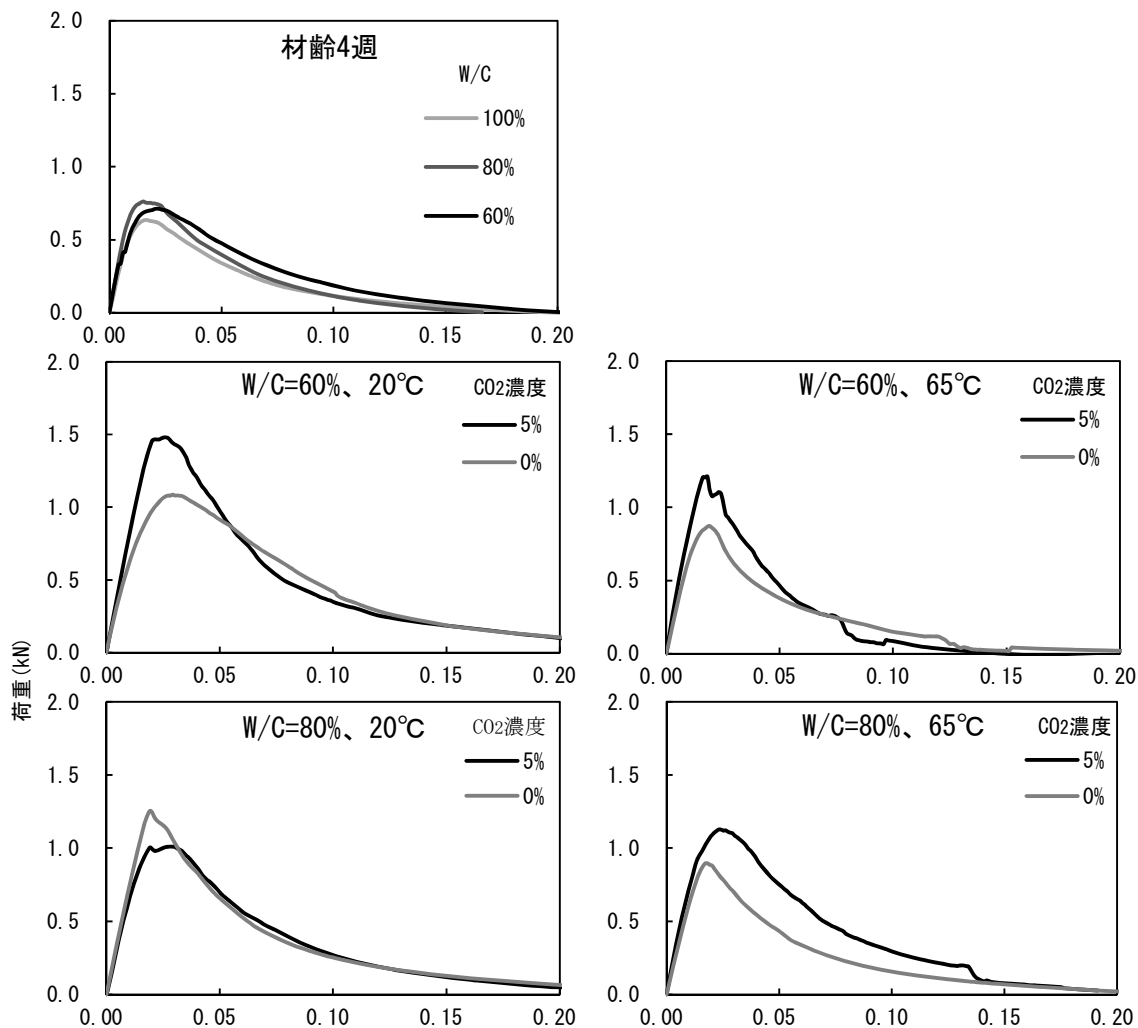


図 2.3.5-3(1) 荷重－開口変位曲線

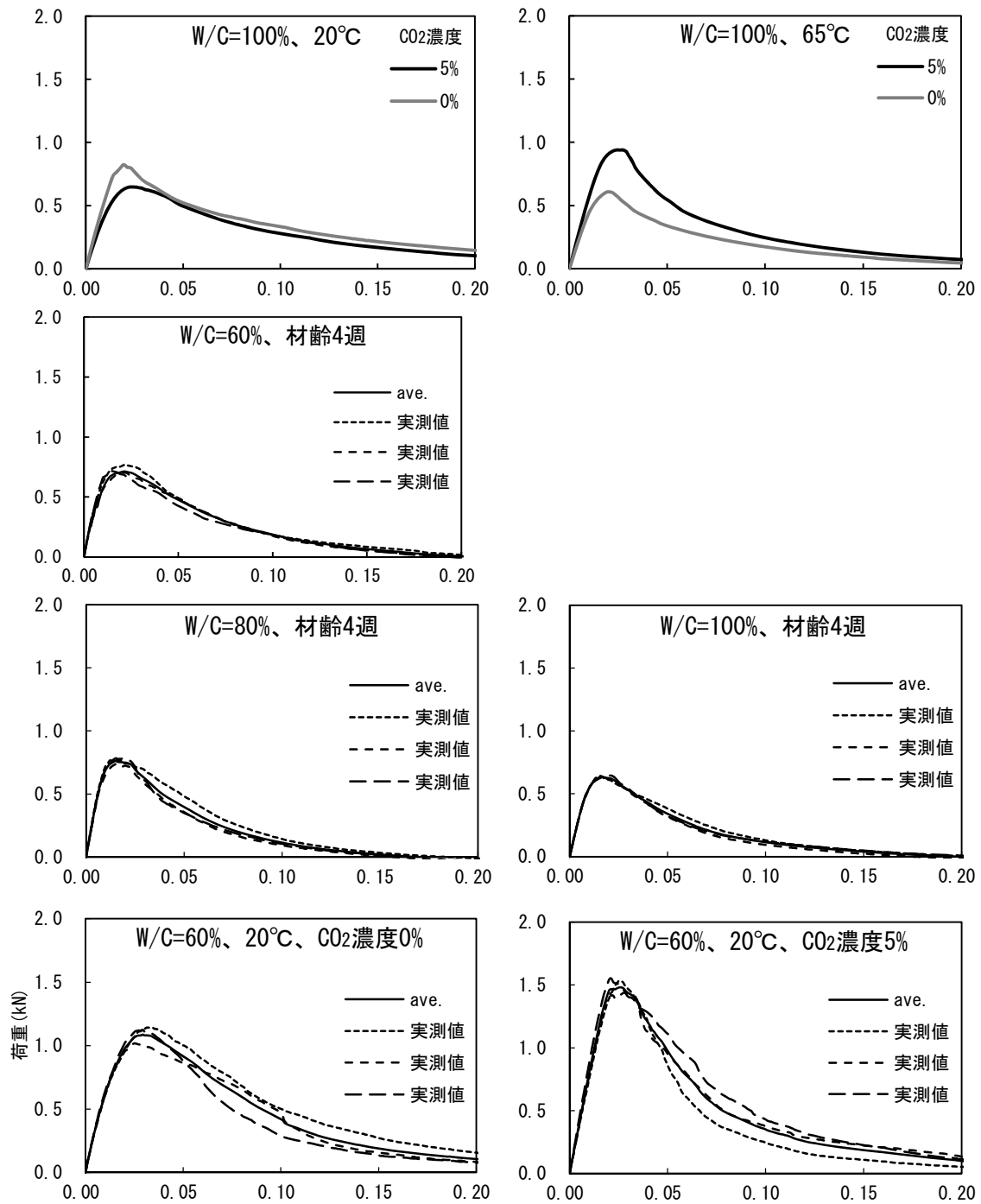


図 2.3.5-3(2) 荷重—開口変位曲線

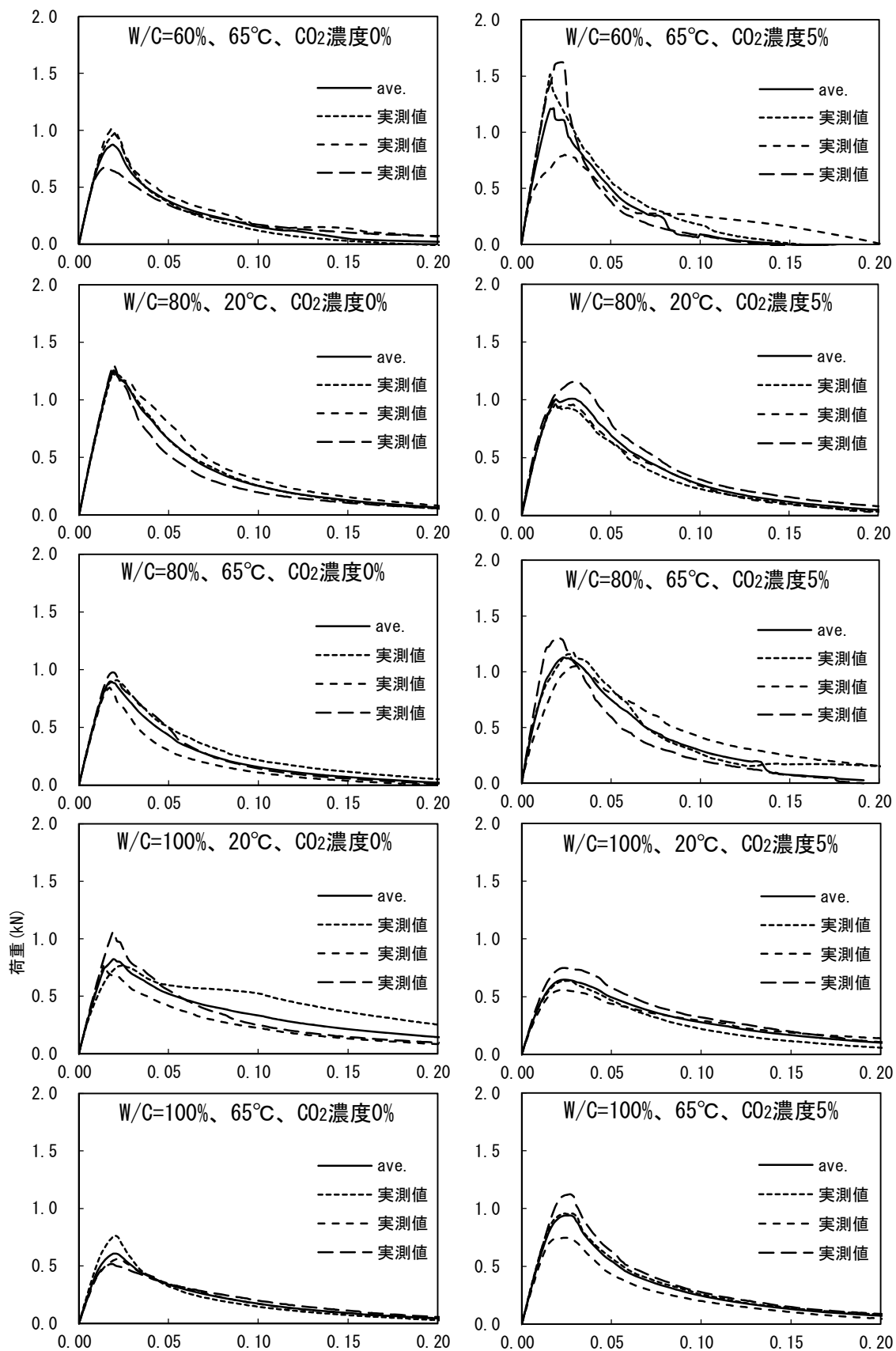


図 2.3.5-3(3) 荷重－開口変位曲線

4) 引張軟化曲線

図 2.3.5-4 に引張軟化曲線を示す。荷重－開口変位曲線において下降が急激な供試体は、初期結合応力 F_t が大きく、曲線の下降が急激になる傾向がみられ、これらの供試体は最大強度が大きいものの脆性的な性質を持つと考えられる。

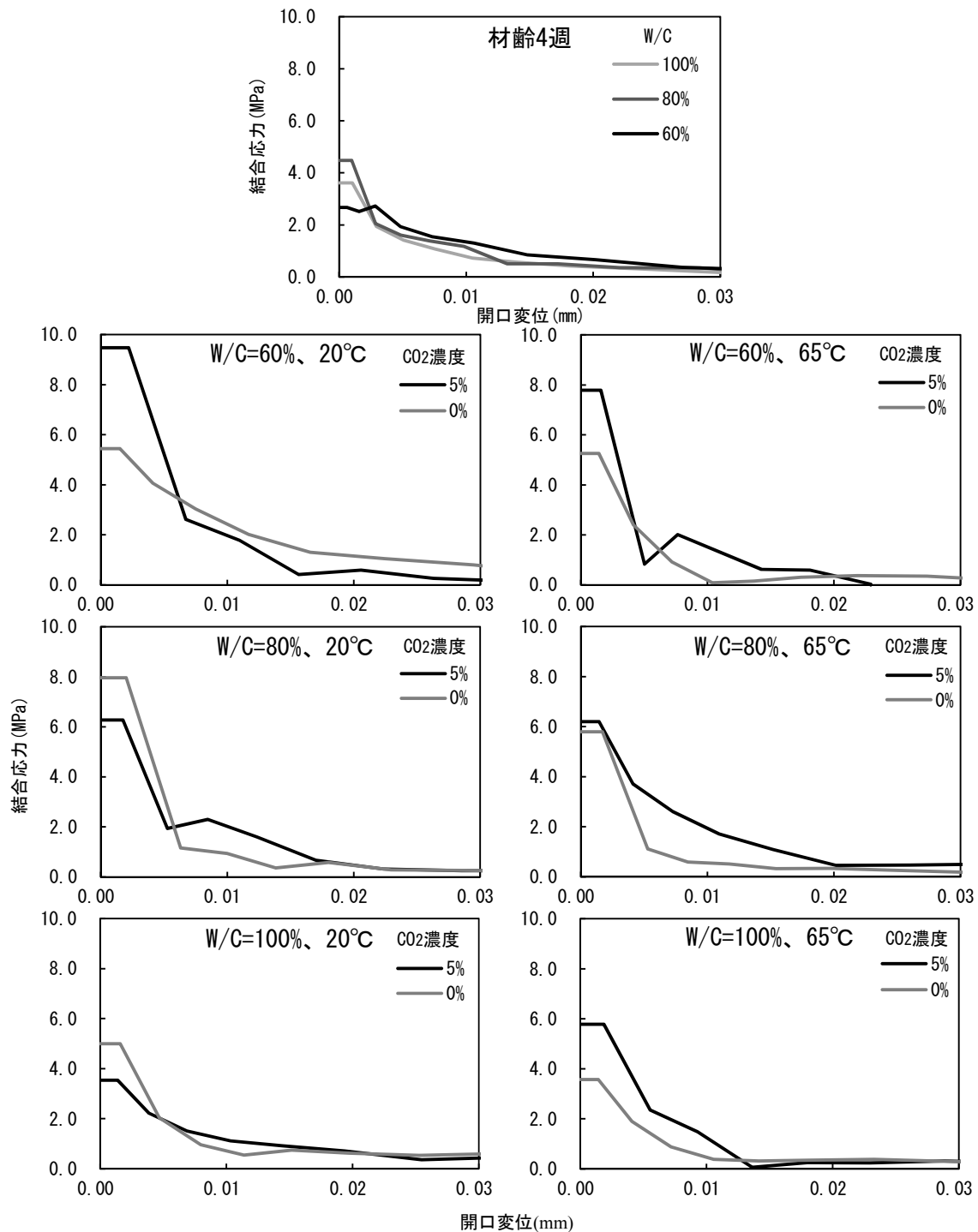


図 2.3.5-4 引張軟化曲線

5) 破壊特性

(a) 初期結合応力

図 2.3.5-5 に初期結合応力 F_t を示した。20℃養生、65℃養生ともに材齢 4 週時点より上昇しており、同じ水セメント比で比較すると、20℃養生が 65℃養生より大きい。65℃養生で中性化すると結合応力が上昇するが、20℃養生においては、水セメント比 80%及び 100%では中性化すると小さくなり、水セメント比 60%では中性化すると大きく上昇した。また荷重－開口変位曲線における最大荷重が大きい供試体は、初期結合応力も大きい値を示す傾向にある。

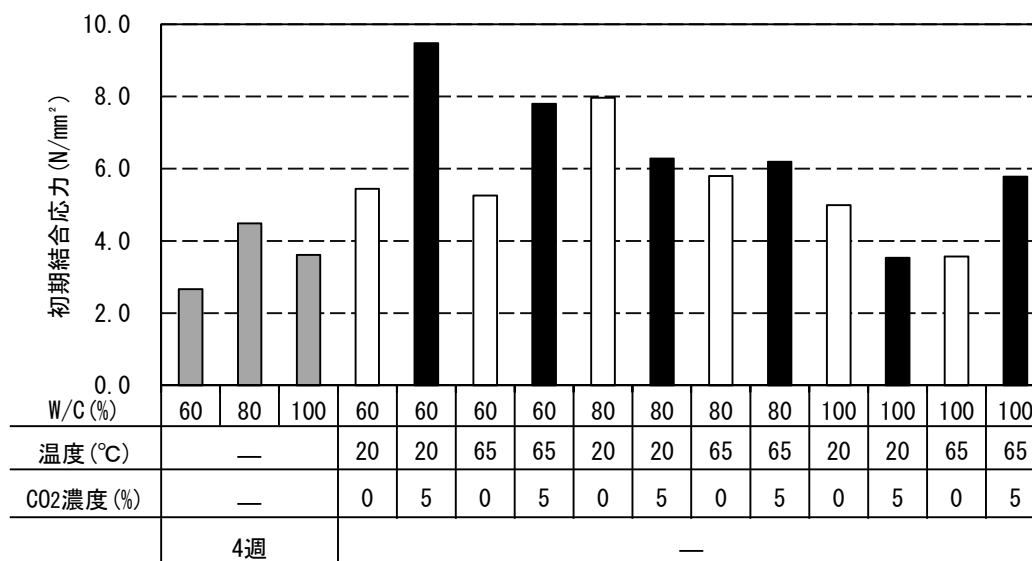


図 2.3.5-5 初期結合応力

(b) 破壊エネルギー

図 2.3.5-6 に破壊エネルギー G_F を示す。初期結合応力や圧縮強度と同様、65℃養生で中性化すると破壊エネルギーが大きく上昇する傾向が確認できた。原因としては、中性化による組織の緻密化等が挙げられる。また、初期結合応力が高いにも関わらず破壊エネルギーが小さい供試体もあるが、これは開口変位の増加に伴う結合応力の低下が大きく、破壊が脆性的なためであると考えられる。

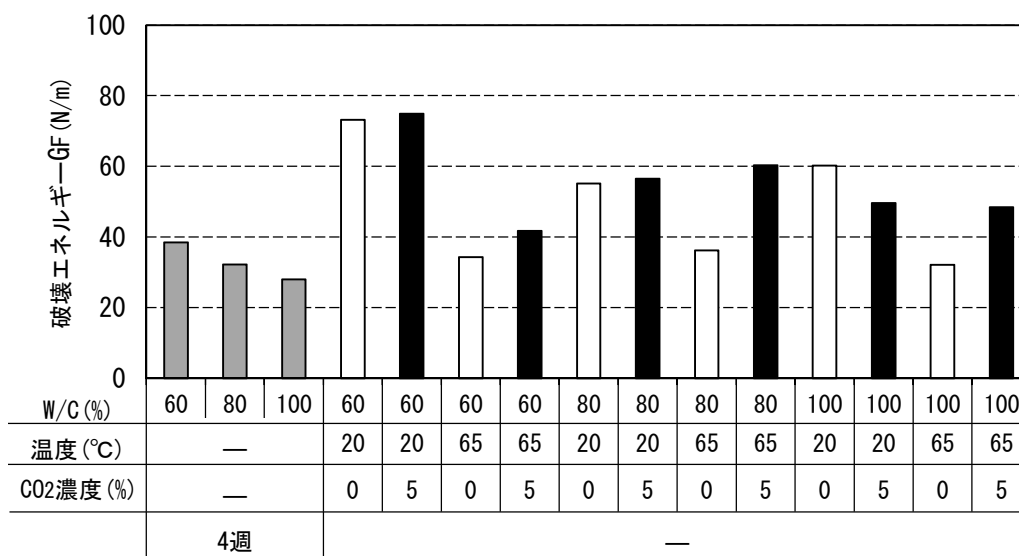


図 2.3.5-6 破壊エネルギー

(4) まとめ

ここでは、100℃未満の加熱と中性化による複合的な作用を受けたモルタル供試体のひび割れ抵抗性について、破壊靱性試験により検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- ① 20℃養生では材齢4週時点より圧縮強度、初期結合応力、破壊エネルギーが上昇する。中性化すると圧縮強度はさらに上昇するが、初期結合応力や破壊エネルギーの上昇は抑制される傾向がみられた。
- ② 65℃養生では材齢4週時点より圧縮強度が低下し、初期結合応力や破壊エネルギーは上昇が抑制され、20℃養生の供試体よりも低い値を示す。65℃で中性化するといずれも数値が上昇した。
- ③ 中性化による圧縮強度の上昇は、水セメント比の低下に伴い著しくなる。
- ④ 中性化により強度が上昇した供試体は軟化が著しくなる傾向にある。そのため、荷重—開口変位曲線の最大強度や初期結合応力が増大した場合でも、破壊エネルギーが増大しにくい。

以上より、加熱温度65℃で中性化の影響を受けても、圧縮強度及び破壊エネルギーは低下しない。このことは中性化と熱が複合的に作用した場合でも、熱による劣化作用が卓越することを意味する。つまり、本事業における長期健全性評価（案）において中性化と熱が複合劣化した場合は、熱単独の劣化因子だけを考慮して評価してよいことを示している。

2.3.6 まとめ

各節のまとめを以下に示す。

(1) 100℃未満で長期の加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性

強度の異なるコンクリートについて 100℃未満で長期間（156 週）加熱を行った場合のひび割れ発生に関する検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- ・ シールなし供試体の初期結合応力は、水セメント比が小さくなると大きくなるが、加熱期間が長くなるに伴い低下する。
- ・ シールあり供試体の初期結合応力は、水セメント比が小さくなると大きくなり、加熱期間が長くなるに伴い 20℃及び 40℃では増加するが、60℃では低下する。
- ・ シールなし供試体の破壊エネルギーは、加熱温度が高くなると小さくなり、加熱温度が高くなると、加熱期間が長くなるとともに若干ではあるが低下する傾向にある。
- ・ シールあり供試体の破壊エネルギーは、加熱温度が高くなると大きくなり、加熱期間が長くなるとともに若干ではあるが増加する傾向にある。

上述の関係について、今年度の試験データでは、100℃未満での熱と材料劣化度の関係の定式化には至っていないが、熱によるひび割れ発生の傾向を把握することができた。本成果は、熱を劣化因子の作用量 F に、圧縮強度、ヤング係数、引張強度、ひび割れ抵抗性を材料劣化度 D とした長期健全性評価での D - F 曲線を決定する際の定性的な知見として活用できる。

(2) 100℃以上で加熱を受けたコンクリートのひび割れ特性

粗骨材の異なる供試体について 800℃まで加熱を行った場合のコンクリートのひび割れ発生特性に関して検討を行い、コンクリートの破壊特性である初期結合応力及び破壊エネルギーと加熱温度の関係式、また、高温加熱後の圧縮強度と破壊エネルギーの関係式を示すことを目的とした。その結果、得られた知見を以下に示す。

- ・ 初期結合応力は、加熱後は結合材であるペーストが多いモルタルで大幅に増加し、コンクリートでは砂岩、チャートで若干増加、石灰岩は低下した。そして、加熱温度 100℃以上で全ての供試体で加熱温度の上昇とともに初期結合応力が低下した。
- ・ 破壊エネルギーは、全ての供試体で加熱温度の上昇とともに加熱温度 200～400℃まで増加し、その後は低下した。
- ・ 実験結果より、破壊エネルギーと加熱温度の関係式、また、高温加熱後の圧縮強度と破壊エネルギーの関係式を既往の常温時の式を基に示した。

熱と破壊エネルギー、圧縮強度の関係性を表す定式(2.3.4-1)～(2.3.4-7)を基に、熱を劣化因子の作用量 F に、圧縮強度を材料劣化度 D とした長期健全性評価での D - F 曲線に反映することが可能である（なお、本事業で得られた関係式は、式(2.3.4-1)、式(2.3.4-2)、式(2.3.4-5)～式(2.3.4-7)である）。

(3) 100℃未満で中性化したコンクリートのひび割れ特性

100℃未満の加熱と中性化による複合的な作用を受けたモルタル供試体のひび割れ抵抗性について、破壊靱性試験により検討を行った。その結果、得られた知見を以下に示す。

- ・ 20℃養生では材齢4週時点より圧縮強度、初期結合応力、破壊エネルギーが上昇する。中性化すると圧縮強度はさらに上昇するが、初期結合応力や破壊エネルギーの上昇は抑制される傾向がみられた。
- ・ 65℃養生では材齢4週時点より圧縮強度が低下し、初期結合応力や破壊エネルギーは上昇が抑制され、20℃養生の供試体よりも低い値を示す。65℃で中性化するといずれも数値が上昇した。
- ・ 中性化による圧縮強度の上昇は、水セメント比の低下に伴い著しくなる。
- ・ 中性化により強度が上昇した供試体は軟化が著しくなる傾向にある。そのため、荷重－開口変位曲線の最大強度や初期結合応力が増大した場合でも、破壊エネルギーが増大しにくい。

以上より、加熱温度65℃で中性化の影響を受けても、圧縮強度及び破壊エネルギーは低下しない。このことは中性化と熱が複合的に作用した場合でも、熱による劣化作用が卓越することを意味する。つまり、本事業における長期健全性評価（案）において中性化と熱が複合劣化した場合は、熱単独の劣化因子だけを考慮して評価してよいことを示している。

2.4 複合劣化を受けた鉄筋コンクリートのひび割れ発生に関する検討

2.4.1 研究の背景及び目的

コンクリート構造物の複合劣化の中でも、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れは、さらなる鉄筋腐食を誘発する。特に、原子力発電施設で問題となるのは、海水と接する環境下にある取水構造物、潮風等の影響を受ける構造物である。また、東日本大震災のように、鉄筋コンクリート構造物が津波の影響で海水に曝された場合にどのような劣化現象が生じるかは明らかではない。

コンクリート内部の鉄筋腐食やひび割れを非破壊的に把握する手法として、X線透過技術を用いる方法がある。この方法は物体のX線透過量の違いを利用し部材を破壊せずに目視で構造物の鉄筋の配置・かぶり厚さ・配管等の内部構造及びその異常箇所を確認することが出来るため、様々な検査や評価に用いることができる。また、鉄筋腐食の評価法の代表的なものとして、鉄筋表面の不動態被膜と錆の部分での電位差により内部鉄筋の腐食状態を推定する自然電位法がある。本手法はコンクリート構造物内部の鉄筋が腐食し、腐食によりかぶりコンクリートにひび割れが発生するまでの初期の段階での診断に有効であるが、鉄筋の腐食の進行度合いとそれに伴うかぶりコンクリートへの影響を経時的に観察することには適していない。また、鉄筋の詳細な腐食状態を立体的に把握することが難しいと考えられる⁵⁹。X線画像によって、鉄筋の腐食の進行度合いを把握し、それによるコンクリート構造物のかぶり面に起こるひび割れの発生時期及びその幅を経時的に観察することによって、何らかの関係を把握することが出来れば、コンクリート構造物にひび割れが起きる時期やひび割れ幅等を予測することができ、早期の補修・改善が可能になる。

本研究では、コンクリート構造物内部の鉄筋の腐食状態と表層のひび割れとの関係を推定する手法の検討を行う。特に中性化を想定した均一な鉄筋腐食、塩分浸透を想定した孔食等の鉄筋の立体的な腐食性状とコンクリート表面のひび割れとの関係を検討する。

平成22年度に、ひび割れ発生時の腐食減量をFEM非線形解析により求め、実験結果との比較検討を行い、その結果、高経年技術評価での塩分浸透での評価項目として、コンクリート強度、鉄筋径及びかぶり厚からひび割れ発生時の鉄筋腐食減量を推定する評価図を提案した⁶⁰。また平成24年度に、デジタルX線装置により取得したX線画像から、鉄筋コンクリート構造物のコンクリート部分及び鉄筋部分の遮蔽率の二次元分布を評価する方法を提案するとともに、物体内部の腐食による変化を細部にわたって検討できる可能性を示した⁶¹。そして平成25年度に、鉄筋腐食とひび割れ幅との関係を評価することを想定した小型RC供試体を作製し、X線画像を用いた内部鉄筋の三次元的観察手法の検討を行い⁶²、

⁵⁹ 社団法人 日本コンクリート工学協会:“コンクリート診断学”、pp162-163

⁶⁰ 首都大学東京:“平成22年度高経年化対策強化基盤整備事業「コンクリート構造物の健全性二次評価に係る評価法の調査・試験研究」成果報告書”、“三菱総合研究所委託、(2011)

⁶¹ 首都大学東京:“平成24年度高経年化技術評価高度化事業「コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究」成果報告書”、“三菱総合研究所委託、(2013)

⁶² 首都大学東京:“平成25年度高経年化技術評価高度化事業「コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究」成果報告書”、“三菱総合研究所委託、(2014)

平成 26 年度に長期間の腐食促進試験を行った同供試体に対して、X 線画像を用いて非破壊かつ経時的に鉄筋腐食とひび割れ幅との関係の検討を行った⁶³。本年度は、継続的に複合劣化作用を受ける小型 RC 供試体の腐食促進実験を行い、コンクリート構造物内部の鉄筋の腐食状態を明らかにし、表面のひび割れとの関係を検討した。

2.4.2 実験概要

(1) 概要

中性化、温度、塩分等の複合劣化作用を受けたコンクリート内部鉄筋の腐食状態を観察することを目的とし、鉄筋を埋込んだコンクリート試験体に継続的に外部劣化作用を付与し、一定期間ごとにデジタル X 線撮影装置により X 線撮影を行い、得られた X 線画像から腐食の程度を評価する指標として鉄筋腐食減量を計測した。また、鉄筋腐食減量 D とコンクリート表面のひび割れ幅との関係を把握した。

(2) 供試体

表 2.4.2-1 に実験の要因と水準を、図 2.4.2-1 に実験で使用する供試体寸法を示す。寸法 40×40×40mm 立方体、塩化物含有量 0、50kg/m³ のモルタルに鉄筋(SD295・D10)をかぶり厚さ 5、10mm で埋め込んだ試験体を 3 体ずつ用意した。

そして、それらの試験体に外部劣化作用(腐食方法)を、促進中性化試験(温度 35℃・湿度 60%R.H.・二酸化炭素濃度 10%)、塩水噴霧試験(温度 35℃・3%NaCl 水溶液常時噴霧)、屋外曝露(東京都八王子市南大沢)とした。

表 2.4.2-1 実験の要因と水準

要因	水準
水セメント比 (%)	60、80、100
かぶり厚さ (mm)	5、10(水セメント比 80%の供試体のみ)
外部劣化作用の種類	促進中性化試験 塩水噴霧試験 屋外曝露試験
塩化物量 (kg/m ³)	0、50

⁶³ 首都大学東京: “平成 26 年度高経年化技術評価高度化事業「コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究」成果報告書 “、三菱総合研究所委託、(2015)

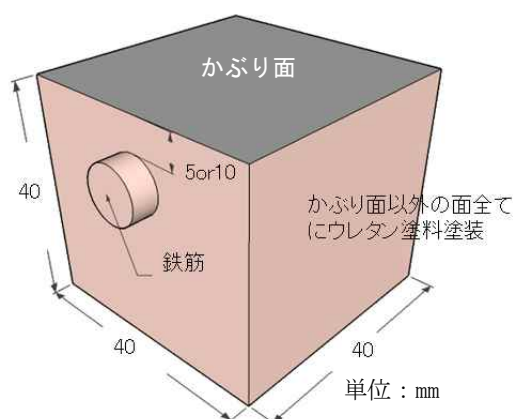


図 2.4.2-1 供試体寸法

表 2.4.2-2 に使用材料、表 2.4.2-3 にモルタルの調合を示す。セメントと細骨材をミキサに入れ 30 秒混ぜ、予め塩化物を混入あるいは無混入の水を投入し、30 秒間混ぜた。その後、掻き落としを行い、再度、60 秒間練り混ぜを行った。試験体の作製は、温度 20℃の恒温室で行った。打込み後 4 日で脱型し、露出した鉄筋端部に防水塗料を塗装し、材齢 1 週まで水中養生を行った。かぶり面への外部劣化作用のみの影響によって、供試体内部の鉄筋の腐食が進むように、養生後、かぶり面以外の 5 面に防水性、耐候性に優れた油性ウレタン塗料の塗装を施した。図 2.4.2-2 に実験フローを示す。

表 2.4.2-2 使用材料

材料	種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	表乾密度 3.16g/cm ³
細骨材	硬質砂岩砕砂	表乾密度 2.56g/cm ³ 絶乾密度 2.58g/cm ³
練り混ぜ水	東京都八王子市南大沢の上水道	20℃
鉄筋	SD295・D10	

表 2.4.2-3 モルタルの調合

W/C (%)	S/C (kg/kg)	質量(kg/m ³)			
		水	セメント	砕砂(表乾状態)	NaCl
60	3.2	280	467	1494	0
	6.0	180	299	1795	82.4
80	4.3	289	362	1556	0
					86.7
100	5.5	292	292	1606	0
	6.0	266	266	1596	82.4

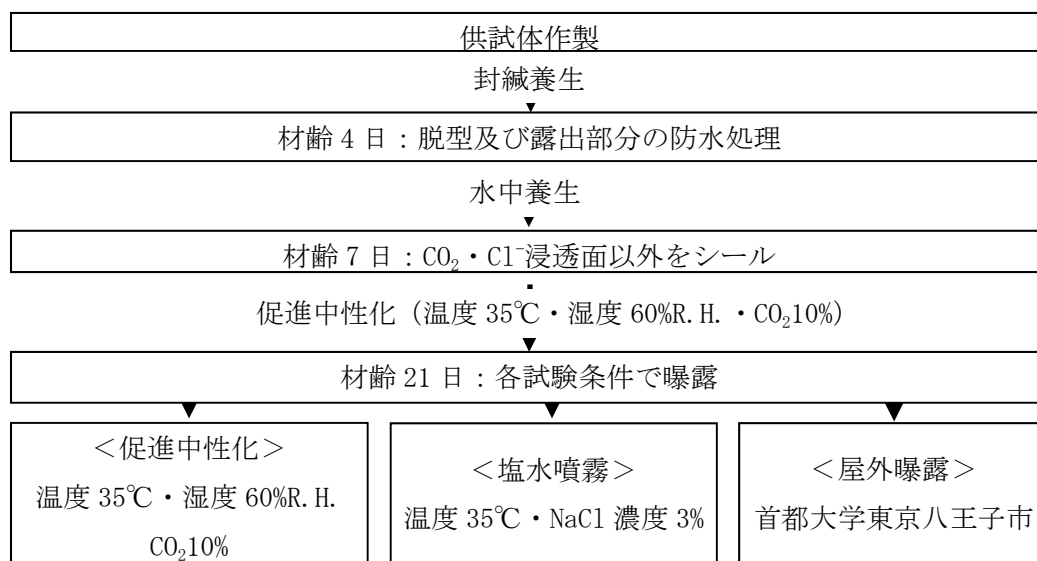


図 2.4.2-2 実験フロー

(3) 試験概要

1) デジタル X 線撮影装置概要

本実験で使用した産業用 X 線撮影装置の概要を図 2.4.2-3 に、外観を図 2.4.2-4 に示す。装置内部の X 線発生部よりコーンビーム状に、X 線が照射室に設置した試験体に照射され、二次元検出器(FPD)に入力された電気信号により、255 階調の二次元 X 線画像データを取得することが出来る。本装置の X 線照射仕様は、管電圧 0～160 (kV)、管電流 0～500 (μ A)、照射時間 1～5 (sec) である。既往の研究⁶⁴を踏まえ、本研究における撮影条件は、管電圧 160kV、管電流 200 μ A、照射時間 3 秒間とした。

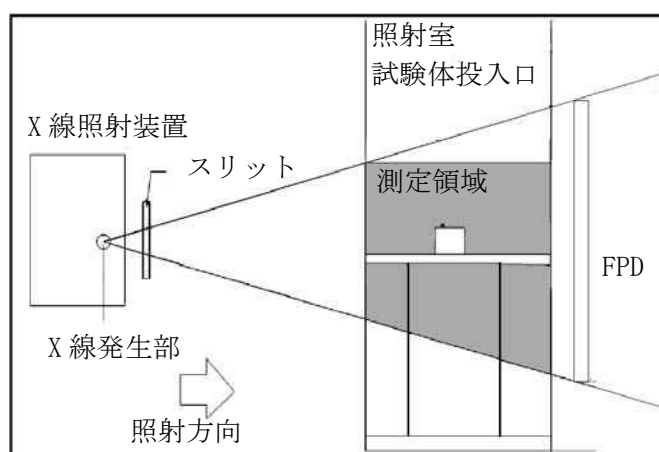


図 2.4.2-3 デジタル X 線撮影装置概要

⁶⁴ 兵庫和佳奈、橘高義典、松沢晃一、“デジタル X 線画像を用いたコンクリートの性能評価に関する研究”、日本建築学会学術講演梗概集 2013(材料施工)、pp.427-428 (2013)



図 2.4.2-4 X 線撮影装置外観

2) 鉄筋腐食減量計測概要

1)で先述したX線撮影装置を用いて、得られたX線画像の例を図2.4.2-5に示す。本図に示すように、鉄筋部分はX線の透過度が低いため明度が低く、モルタル部は透過度が大きいために明度が大きく記録される。鉄筋表面の中間の明度の部分が錆部分と推定される。この錆部分の面積は、錆の生成時に生じる膨張圧により圧縮されていることが想定され、必ずしも錆の生成量にはならないと考えられるため、本研究では、モルタル中の鉄筋において、錆びていない部分の投影面積を計測し、腐食試験前のイニシャルの同一鉄筋のX線画像による投影面積との比較から、腐食により減少した部分の断面積を評価することとした。

図 2.4.2-6 に断面減少率の測定フロー、図 2.4.2-7 にコンクリートに埋め込まれた鉄筋の腐食減量計測概要を示す。鉄筋のコンクリート中に埋め込まれた部分を計測対象とし、腐食試験前の X 線画像と、腐食後の画像で、モルタルより外側の、ウレタン塗装により防食処理が施された見腐食の鉄筋部分が、画面上で合致するように画像を重ね合わせ、投影面積の減少を計測した。実際の断面積への換算は、予め計測しておいた鉄筋の長さ と X 線画像上の鉄筋長さのドット数との関係から換算した。

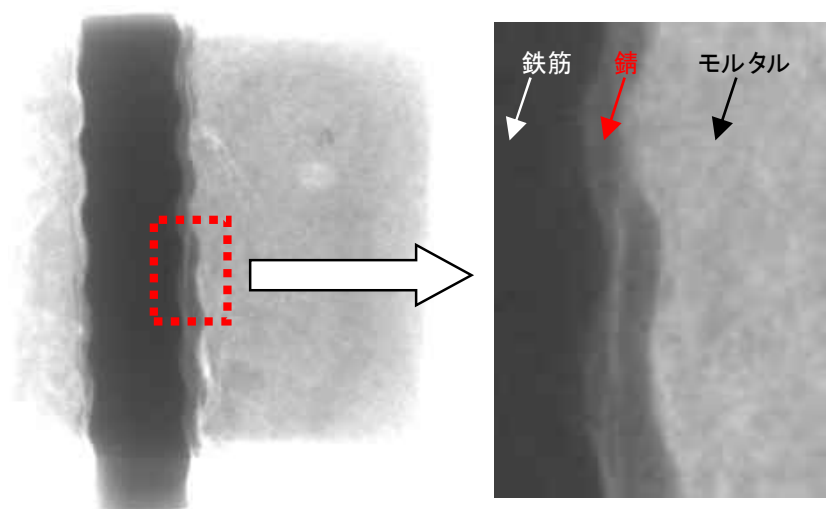


図 2.4.2-5 X線画像の例

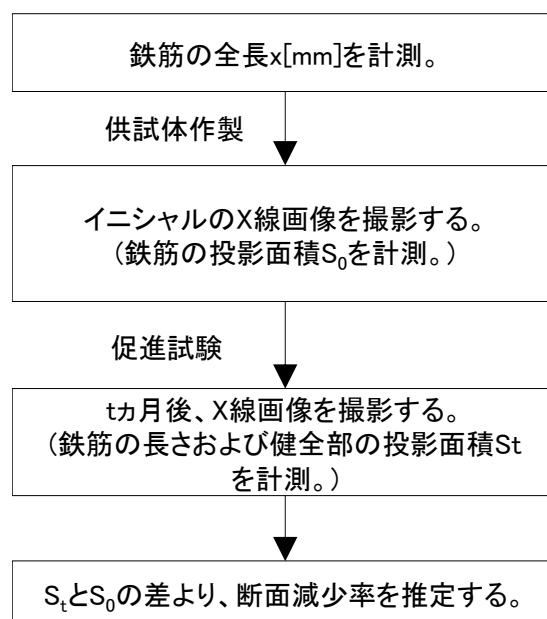


図 2.4.2-6 断面減少率測定の流れ

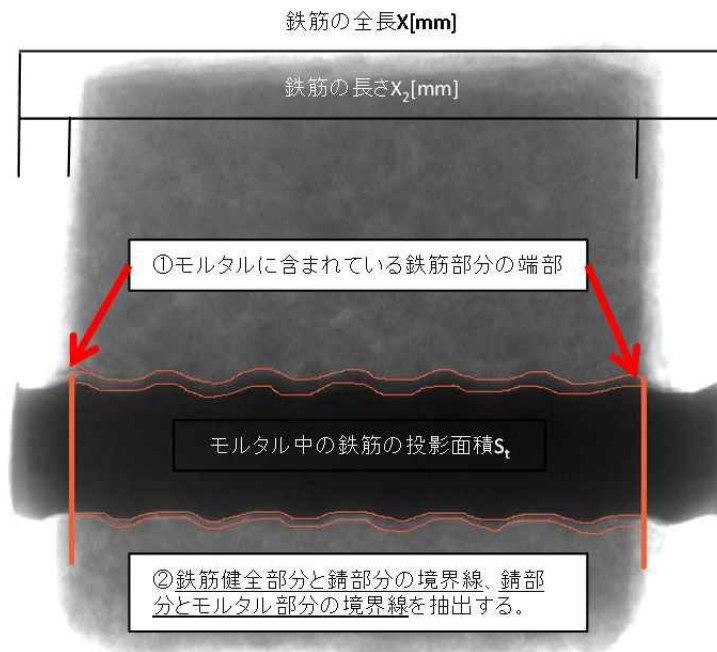


図 2.4.2-7 腐食減量計測概要

投影面積の計測結果から下式により、腐食による平均的な断面減少率 m (%) を算出した。

$$m = \left\{ 1 - \left(\frac{S_t}{S_0} \right)^2 \right\} \times 100 \quad (2.4.2-1)$$

ただし、 S_0 ：腐食前のモルタル中の鉄筋の投影面積 (mm^2)、 S_t ：腐食後のモルタル中の鉄筋健全部の投影面積 (mm^2) である。

また、下式⁶⁵により、単位表面積当たりの腐食量を腐食減量 D (mg/cm^2) として求めた。

$$D = \frac{md\rho}{4} \quad (2.4.2-2)$$

ただし、 d ：鉄筋の直径 (mm)、 ρ ：鉄筋の比重=7.85。

⁶⁵ Kitsutaka Y. and Tsukagoshi M. : “Method on the aging evaluation in nuclear power plant concretes structures”、Nuclear Engineering and Design、 pp.286–290、(2014)

3) ひび割れ計測概要

図 2.4.2-8 に供試体かぶり表面のひび割れ幅計測位置を示す。鉄筋の供試体の鉄筋に沿ったひび割れを対象として、鉄筋軸方向のかぶり面の端部から 5mm 離れたところから 6mm 間隔で、鉄筋軸と垂直に線を引き、ひび割れの交点を計 6 か所計測し、そのひび割れ幅を平均したものをその供試体の平均ひび割れ幅 $P(\text{mm})$ とした。なお計測する際には、計測位置を示す線を予め描いた OHP フィルムを供試体かぶり面に貼り付け、マイクロスコープ（図 2.4.2-9）を用いてひび割れ幅を計測した。マイクロスコープは最小目盛り 0.02mm である。

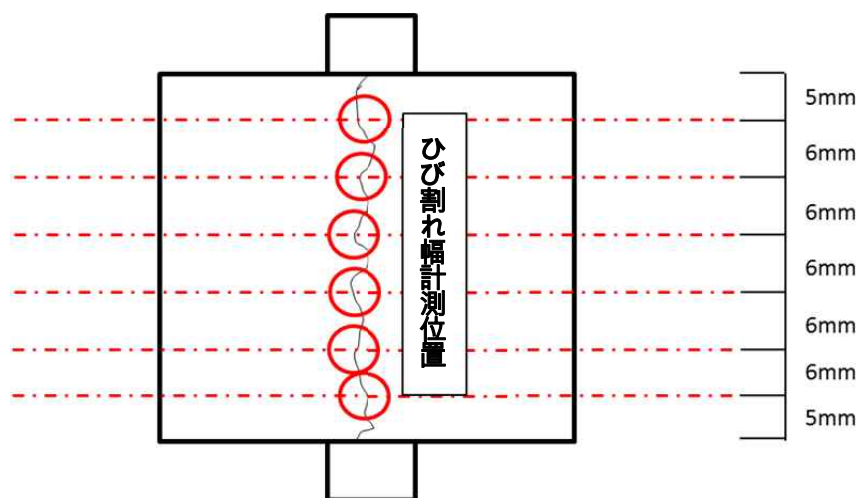


図 2.4.2-8 ひび割れ幅計測位置



図 2.4.2-9 マイクロスコープ

2.4.3 実験結果及び考察

(1) 計測結果

腐食促進開始後 18 か月目、20 か月目、22 か月目、24 か月目に各供試体の内部鉄筋の腐食減量とひび割れ幅の計測を行った（表 2.4.3-1～表 2.4.3-9）。

表 2.4.3-1 腐食減量及びひび割れ幅の計測結果(水セメント比 60%、促進中性化)

促進中性化試験				
名称	腐食期間 (月)	ひびわれ幅 (mm)	断面減少率 (%)	腐食減量 (mg/cm ²)
中-60-5-0-N1	0	0.00	0	0
	4	0.00	4.61	86.20
	6	0.00	9.50	177.69
	8	0.00	10.19	190.52
	10	0.00	19.86	371.46
中-60-5-0-N2	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	0.31	5.83
	6	0.00	1.10	20.52
	8	0.00	7.47	139.75
	10	0.00	9.42	176.11
中-60-5-0-N3	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	4.04	75.61
	6	0.00	4.82	90.23
	8	0.00	5.66	105.80
	10	0.00	6.59	123.17
中-60-5-50-N1	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.48	1.41	26.46
	6	0.52	8.77	164.09
	8	0.60	8.79	164.38
	10	0.70	8.86	165.74
中-60-5-50-N2	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	0.29	5.36
	6	0.07	1.27	23.80
	8	0.20	1.59	29.78
	10	0.27	2.82	52.68
中-60-5-50-N3	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.07	9.96	186.29
	6	0.07	13.41	250.83
	8	0.29	16.53	309.06
	10	0.30	21.18	396.07

供試体名称: □ - □ - □ - □ - □

→ 供試体番号: N1,N2,N3

→ Cl-量(kg/m³):0.50

→ かぶり厚さ(mm):5,10

→ 水セメント比(%):60、80、100

→ 腐食促進方法:(促進中性化→中
塩水噴霧→塩
屋外曝露→屋)

表 2.4.3-2 腐食減量及びひび割れ幅の計測結果(水セメント比 60%、塩水噴霧)

塩水噴霧試験				
名称	腐食期間 (月)	ひびわれ 幅 (mm)	断面減少 率 (%)	腐食減量 (mg/cm ²)
塩-60-5-0-N1	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	4.01	74.92
	6	0.00	6.67	124.66
	8	0.00	9.10	170.23
	10	0.00	14.02	262.28
塩-60-5-0-N2	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	1.80	33.63
	6	0.00	4.07	76.17
	8	0.00	5.00	93.52
	10	0.00	6.20	115.89
塩-60-5-0-N3	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	1.85	55.95
	6	0.00	9.21	172.20
	8	0.00	10.89	203.67
	10	0.00	11.57	216.34
塩-60-5-50-N1	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	3.45	64.51
	6	0.00	4.48	83.76
	8	0.00	6.11	114.28
	10	0.00	8.55	159.88
塩-60-5-50-N2	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	13.59	254.21
	6	0.00	15.29	285.99
	8	0.00	15.98	298.86
	10	0.00	17.13	320.35
塩-60-5-50-N3	0	0.00	0.00	0.00
	4	0.00	15.14	283.09
	6	0.00	16.22	303.29
	8	0.00	16.61	310.61
	10	0.00	17.97	336.02

供試体名称: □ - □ - □ - □ - □

→ 供試体番号: N1,N2,N3

→ Cl-量(kg/m³):0,50

→ かぶり厚さ(mm):5,10

→ 水セメント比(%):60、80、100

→ 腐食促進方法:(促進中性化→中
塩水噴霧→塩
屋外曝露→屋)

表 2.4.3-3 腐食減量及びひび割れ幅の計測結果(水セメント比 60%、屋外曝露)

屋外曝露試験					
名称	計測日	腐食期間 (月)	ひびわれ 幅 (mm)	断面減少 率 (%)	腐食減量 (mg/cm ²)
屋-60-5-0-N1	2015/3/3	0	0	0	0
	2015/6/12	4	0.00	3.23	60.34
	2015/8/12	6	0.00	6.88	128.66
	2015/10/12	8	0	8.01	149.83
	2015/12/10	10	0	8.57	160.37
屋-60-5-0-N2	2015/3/3	0	0	0	0
	2015/6/12	4	0.00	4.98	93.13
	2015/8/12	6	0.00	11.29	211.10
	2015/10/12	8	0	12.20	228.25
	2015/12/10	10	0	12.96	242.45
屋-60-5-0-N3	2015/3/3	0	0	0	0
	2015/6/12	4	0.00	3.71	69.30
	2015/8/12	6	0.00	5.69	106.46
	2015/10/12	8	0	7.28	136.25
	2015/12/10	10	0	7.96	148.85
屋-60-5-50-N1	2015/3/3	0	0	0	0
	2015/6/12	4	0.78	7.71	144.26
	2015/8/12	6	1.74	8.14	152.21
	2015/10/12	8	2.3	11.29	211.21
	2015/12/10	10	2.86	11.66	218.01
屋-60-5-50-N2	2015/3/3	0	0	0	0
	2015/6/12	4	0.61	9.39	175.59
	2015/8/12	6	1.57	13.31	248.97
	2015/10/12	8	2.2	18.83	352.26
	2015/12/10	10	2.82	19.21	359.19
屋-60-5-50-N3	2015/3/3	0	0	0	0
	2015/6/12	4	0.58	10.39	194.26
	2015/8/12	6	0.69	15.95	298.34
	2015/10/12	8	3.1	19.32	361.28
	2015/12/10	10	3.27	20.03	374.65

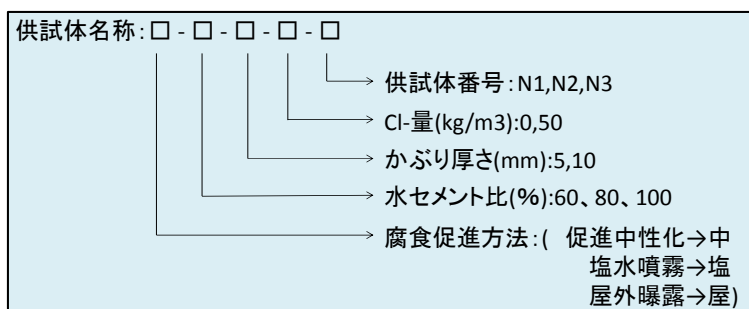


表 2.4.3-4 腐食減量及びひび割れ幅の計測結果(水セメント比 80%、促進中性化)

促進中性化試験				
名称	腐食期間 (月)	ひびわれ幅 (mm)	断面減少率 (%)	腐食減量 (mg/cm ²)
中-80-5-0-N2	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	2.41	45.06
	20	0.00	4.63	86.63
	22	0.00	4.87	91.15
	24	0.00	6.88	128.70
中-80-5-0-N3	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	2.45	45.75
	20	0.00	5.51	103.00
	22	0.00	5.59	104.45
	24	0.00	7.04	131.73
中-80-5-50-N2	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.71	2.67	49.88
	20	0.85	6.58	123.15
	22	0.85	9.68	181.09
	24	0.86	10.95	204.88
中-80-5-50-N3	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.18	9.44	176.52
	20	0.38	9.62	179.91
	22	0.40	10.02	187.31
	24	0.62	10.02	187.31
中-80-10-0-N2	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	1.39	25.98
	20	0.00	1.91	35.81
	22	0.00	3.49	65.31
	24	0.00	3.94	73.72
中-80-10-0-N3	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	8.63	161.40
	20	0.00	10.66	199.32
	22	0.00	11.32	211.77
	24	0.00	11.65	217.84
中-80-10-50-N2	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.55	9.48	177.32
	20	0.73	9.83	183.93
	22	0.84	12.31	230.20
	24	1.00	13.81	258.33
中-80-10-50-N3	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.78	10.88	203.51
	20	0.90	18.58	347.50
	22	0.96	18.65	348.80
	24	0.96	18.70	349.69

供試体名称: □ - □ - □ - □ - □

→ 供試体番号: N1, N2, N3

→ Cl-量(kg/m³): 0.50

→ かぶり厚さ(mm): 5, 10

→ 水セメント比(%): 60, 80, 100

→ 腐食促進方法: (促進中性化→中
塩水噴霧→塩
屋外曝露→屋)

表 2.4.3-5 腐食減量及びひび割れ幅の計測結果(水セメント比 80%、塩水噴霧)

塩水噴霧試験				
名称	腐食期間 (月)	ひびわれ 幅 (mm)	断面減少 率 (%)	腐食減量 (mg/cm ²)
塩-80-5-0-N1	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	12.42	232.33
	20	0.00	17.87	334.16
	22	0.00	19.26	360.15
	24	0.00	22.89	428.13
塩-80-5-0-N2	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	4.20	78.59
	20	0.00	5.13	96.00
	22	0.00	5.81	108.70
	24	0.00	6.64	124.20
塩-80-5-0-N3	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	4.73	88.39
	20	0.00	5.09	95.27
	22	0.00	6.00	112.29
	24	0.00	6.29	117.72
塩-80-5-50-N1	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.14	21.02	393.19
	20	0.14	23.39	437.52
	22	0.14	24.87	465.18
	24	0.14	25.30	473.22
塩-80-5-50-N2	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	12.07	225.77
	20	0.00	12.45	232.92
	22	0.00	12.72	237.88
	24	0.00	12.96	242.38
塩-80-5-50-N3	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	8.17	152.78
	20	0.00	9.08	169.78
	22	0.00	9.25	172.96
	24	0.00	9.59	179.35
塩-80-10-0-N1	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	6.99	130.64
	20	0.00	7.18	134.28
	22	0.00	8.33	155.70
	24	0.00	8.33	155.70
塩-80-10-0-N2	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	6.71	125.42
	20	0.00	6.71	125.42
	22	0.00	6.71	125.42
	24	0.00	6.71	125.42
塩-80-10-0-N3	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	2.79	52.23
	20	0.00	2.84	53.06
	22	0.00	4.51	84.40
	24	0.00	4.51	84.40
塩-80-10-50-N1	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.29	9.13	170.78
	20	0.29	21.90	409.56
	22	0.29	21.90	409.56
	24	0.29	22.14	413.99
塩-80-10-50-N2	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	1.65	30.79
	20	0.00	2.62	48.91
	22	0.00	3.89	72.78
	24	0.00	3.89	72.78
塩-80-10-50-N3	0	0.00	0.00	0.00
	18	0.00	4.97	92.89
	20	0.00	6.99	130.71
	22	0.00	7.16	133.87
	24	0.00	7.49	140.09

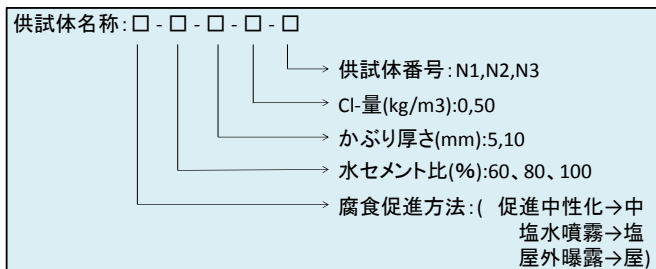


表 2.4.3-6 腐食減量及びひび割れ幅の計測結果(水セメント比 80%、屋外曝露)

屋外曝露試験					
名称	計測日	腐食期間 (月)	ひびわれ 幅 (mm)	断面減少 率 (%)	腐食減量 (mg/cm ²)
屋-80-5-0-N1	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	0.00	2.36	44.22
	2015/8/12	20	0	4.24	79.35
	2015/10/12	22	0	4.64	86.74
	2015/12/10	24	0	6.61	123.64
屋-80-5-0-N2	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	0.00	4.75	88.82
	2015/8/12	20	0	5.64	105.45
	2015/10/12	22	0	5.64	105.45
	2015/12/10	24	0	5.88	109.98
屋-80-5-0-N3	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	0.00	8.84	165.30
	2015/8/12	20	0	9.58	179.26
	2015/10/12	22	0	10.81	202.23
	2015/12/10	24	0	10.9	203.88
屋-80-5-50-N1	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	1.02	21.29	398.27
	2015/8/12	20	1.673333	25.85	483.44
	2015/10/12	22	3.83	28.98	542.07
	2015/12/10	24	3.8	29.21	546.34
屋-80-5-50-N2	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	0.64	17.33	324.12
	2015/8/12	20	1.036667	18.34	342.93
	2015/10/12	22	3.33	18.55	346.93
	2015/12/10	24	3.9	18.73	350.24
屋-80-5-50-N3	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	0.84	8.62	161.17
	2015/8/12	20	1.033333	9.07	169.56
	2015/10/12	22	-	10.39	194.38
	2015/12/10	24	-	11.12	207.97
屋-80-10-0-N1	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	0.00	4.24	79.32
	2015/8/12	20	0	6.45	120.71
	2015/10/12	22	0	6.72	125.72
	2015/12/10	24	0	6.72	125.72
屋-80-10-0-N2	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	0.00	5.49	102.62
	2015/8/12	20	0	6.63	124.03
	2015/10/12	22	0	6.63	124.03
	2015/12/10	24	0	6.63	124.03
屋-80-10-0-N3	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	0.00	5.28	98.67
	2015/8/12	20	0	7.49	140.06
	2015/10/12	22	0	10.29	132.47
	2015/12/10	24	0	10.29	132.47
屋-80-10-50-N1	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	0.00	19.39	362.62
	2015/8/12	20	0	19.45	363.75
	2015/10/12	22	0.19	19.65	367.49
	2015/12/10	24	-	20.4	381.54
屋-80-10-50-N2	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	2.22	22.13	413.89
	2015/8/12	20	3.5	25.4	475.12
	2015/10/12	22	3.92	25.47	476.28
	2015/12/10	24	4.3	25.49	476.67
屋-80-10-50-N3	2013/12/10	0	0	0	0
	2015/6/12	18	2.66	21.21	396.63
	2015/8/12	20	3.333333	22.35	417.96
	2015/10/12	22	3.83	27.39	512.3
	2015/12/10	24	4.1	29.23	546.67

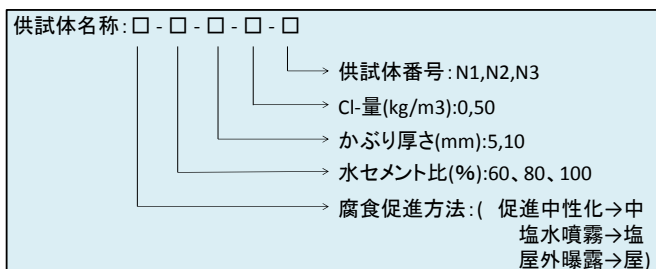


表 2.4.3-7 腐食減量及びひび割れ幅の計測結果(水セメント比 100%、促進中性化)

促進中性化試験				
名称	腐食期間 (月)	ひびわれ幅 (mm)	断面減少率 (%)	腐食減量 (mg/cm ²)
中-100-5-0-N1	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	3.77	70.54
	8	0.00	6.94	129.85
	10	0.00	7.27	135.99
	12	0.00	7.73	144.65
中-100-5-0-N2	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	3.45	64.45
	8	0.00	4.32	80.83
	10	0.00	5.19	97.13
	12	0.00	5.55	103.75
中-100-5-0-N3	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	1.10	20.58
	8	0.00	6.13	114.71
	10	0.00	6.91	129.31
	12	0.00	8.00	149.65
中-100-5-50-N1	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.28	2.01	37.56
	8	0.46	5.65	105.89
	10	0.50	6.00	112.28
	12	0.57	6.68	124.91
中-100-5-50-N2	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.27	4.88	91.28
	8	0.48	5.41	101.23
	10	0.59	5.54	103.60
	12	0.59	8.37	156.63
中-100-5-50-N3	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	1.65	30.86
	8	0.22	2.65	49.58
	10	0.22	3.33	62.23
	12	0.33	4.04	75.54

供試体名称: □ - □ - □ - □ - □	
→ 供試体番号: N1, N2, N3	
→ Cl-量(kg/m ³): 0, 50	
→ かぶり厚さ(mm): 5, 10	
→ 水セメント比(%): 60, 80, 100	
→ 腐食促進方法: (促進中性化→中 塩水噴霧→塩 屋外曝露→屋)	

表 2.4.3-8 腐食減量及びひび割れ幅の計測結果(水セメント比 100%、塩水噴霧)

塩水噴霧試験				
名称	腐食期間 (月)	ひびわれ 幅 (mm)	断面減少 率 (%)	腐食減量 (mg/cm ²)
塩-100-5-0-N1	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	1.79	33.46
	8	0.00	4.74	88.67
	10	0.00	5.36	100.30
	12	0.00	6.84	128.01
塩-100-5-0-N2	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	1.00	18.61
	8	0.00	3.91	73.06
	10	0.00	7.68	143.63
	12	0.00	7.98	149.21
塩-100-5-0-N3	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	0.76	14.30
	8	0.00	3.32	62.11
	10	0.00	3.65	68.21
	12	0.00	4.36	81.46
塩-100-5-50-N1	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	1.55	28.90
	8	0.00	2.19	40.98
	10	0.00	3.27	61.09
	12	0.20	4.11	76.79
塩-100-5-50-N2	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	7.74	144.75
	8	0.00	8.81	164.70
	10	0.00	9.88	184.71
	12	0.00	12.04	225.26
塩-100-5-50-N3	0	0.00	0.00	0.00
	6	0.00	1.78	33.31
	8	0.00	5.88	109.92
	10	0.00	6.78	126.78
	12	0.00	7.11	133.06

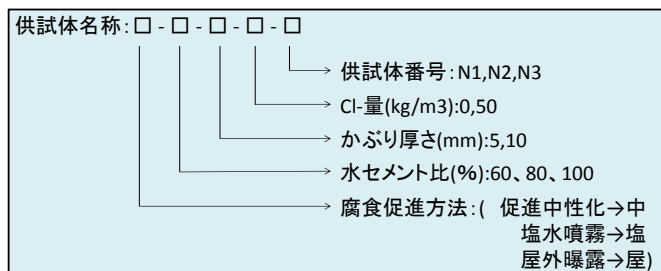
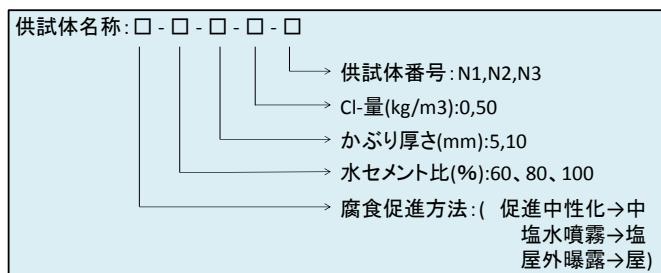


表 2.4.3-9 腐食減量及びひび割れ幅の計測結果(水セメント比 100%、屋外曝露)

屋外曝露試験					
名称	計測日	腐食期間 (月)	ひびわれ 幅 (mm)	断面減少 率 (%)	腐食減量 (mg/cm ²)
屋-100-5-0-N1	2015/1/5	0	0	0	0
	2015/6/12	6	0.00	2.27	42.54
	2015/8/12	8	0.00	5.92	110.75
	2015/10/12	10	0.00	6.30	117.78
	2015/12/10	12	0	7.99	149.45
屋-100-5-0-N2	2015/1/5	0	0	0	0
	2015/6/12	6	0.00	5.78	108.11
	2015/8/12	8	0.00	6.79	127.08
	2015/10/12	10	0.00	7.93	148.32
	2015/12/10	12	0.00	9.28	173.47
屋-100-5-0-N3	2015/1/5	0	0	0	0
	2015/6/12	6	0.00	6.19	115.81
	2015/8/12	8	0.00	10.42	194.91
	2015/10/12	10	0.00	10.61	198.39
	2015/12/10	12	0.00		
屋-100-5-50-N1	2015/1/5	0	0	0	0
	2015/6/12	6	0.49	9.02	168.65
	2015/8/12	8	0.77	10.08	188.55
	2015/10/12	10	1.00	10.59	198.01
	2015/12/10	12	1.01	10.68	199.81
屋-100-5-50-N2	2015/1/5	0	0	0	0
	2015/6/12	6	0.45	5.76	107.67
	2015/8/12	8	1.13	11.43	213.83
	2015/10/12	10	1.20	11.43	213.83
	2015/12/10	12	1.24	14.46	270.46
屋-100-5-50-N3	2015/1/5	0	0	0	0
	2015/6/12	6	0.58	9.16	171.23
	2015/8/12	8	2.37	10.33	193.15
	2015/10/12	10	2.37	11.65	217.83
	2015/12/10	12	2.37	12.33	230.61



(2) 腐食減量及びひび割れ幅の経時変化

図 2.4.3-1～図 2.4.3-9 に腐食減量 D (mg/cm^2) の経時変化を、図 2.4.3-10～図 2.4.3-18 にひび割れ幅 P (mm) の経時変化を示す。

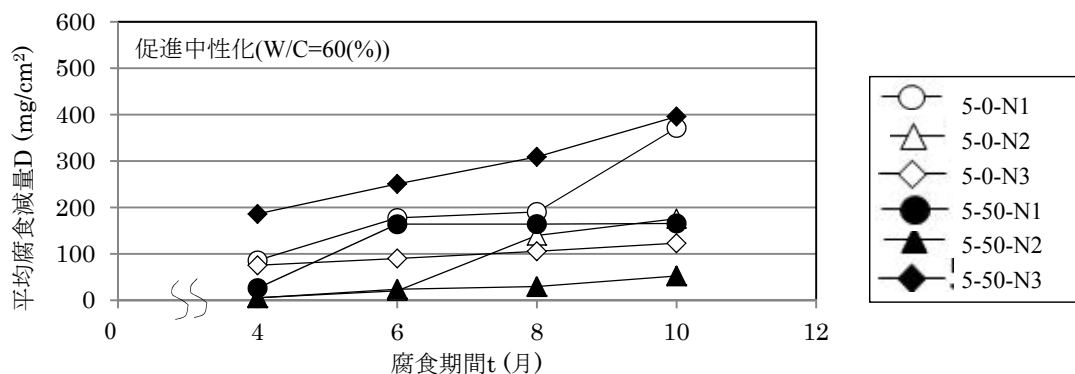


図 2.4.3-1 促進中性化による腐食作用を受ける供試体の腐食減量(水セメント比 60%)

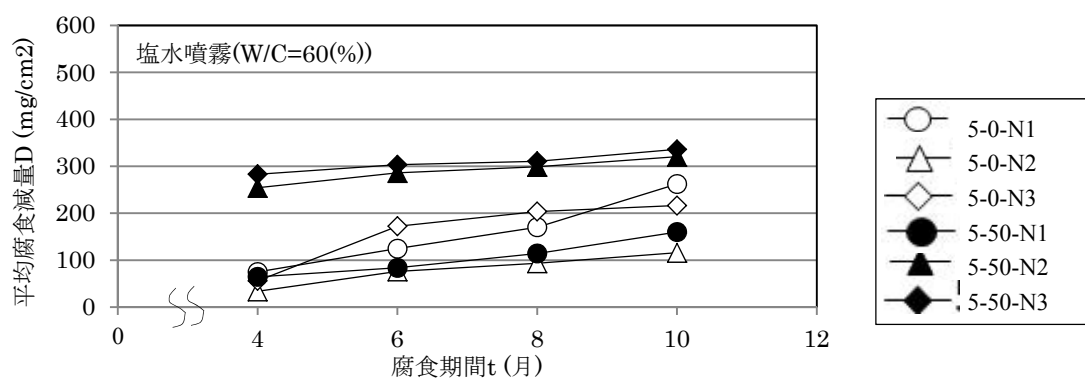


図 2.4.3-2 塩水噴霧による腐食作用を受ける供試体の腐食減量(水セメント比 60%)

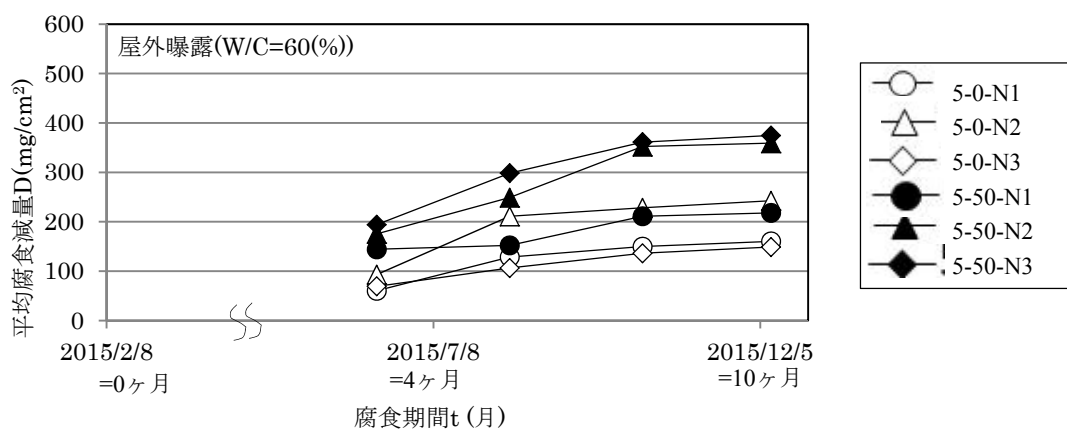


図 2.4.3-3 屋外曝露による腐食作用を受ける供試体の腐食減量(水セメント比 60%)

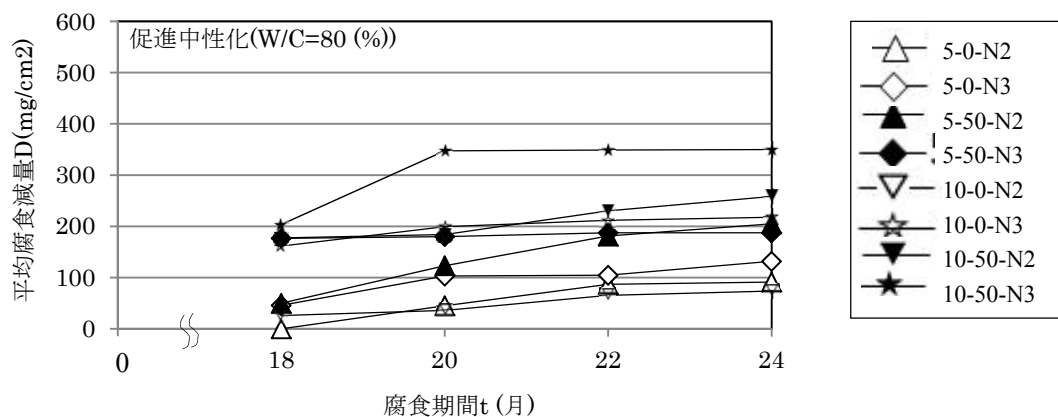


図 2.4.3-4 促進中性化による腐食作用を受ける供試体の腐食減量(水セメント比 80%)

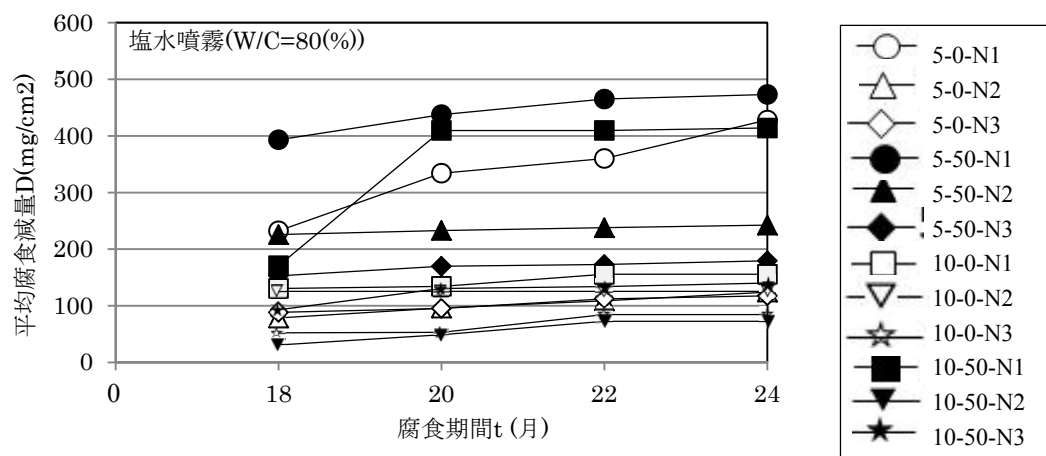


図 2.4.3-5 塩水噴霧による腐食作用を受ける供試体の腐食減量(水セメント比 80%)

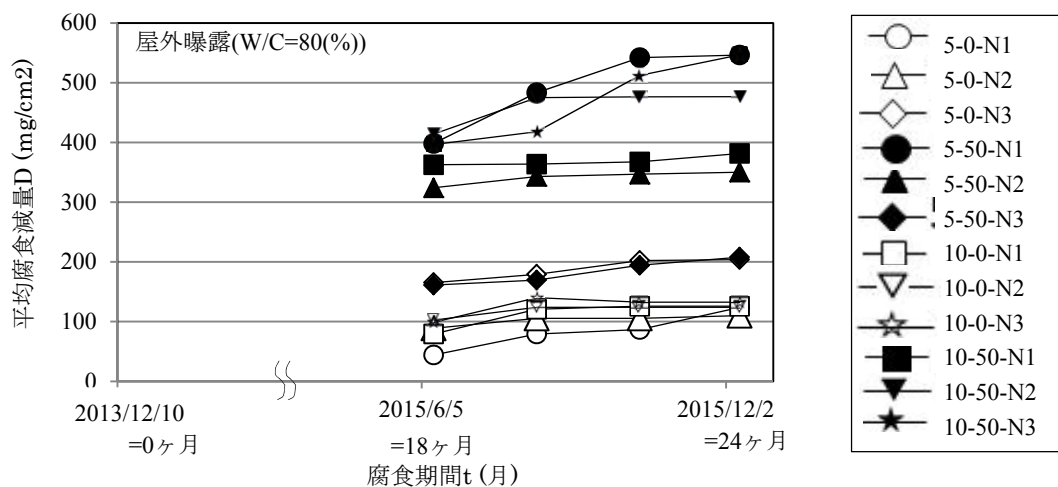


図 2.4.3-6 屋外曝露による腐食作用を受ける供試体の腐食減量(水セメント比 80%)

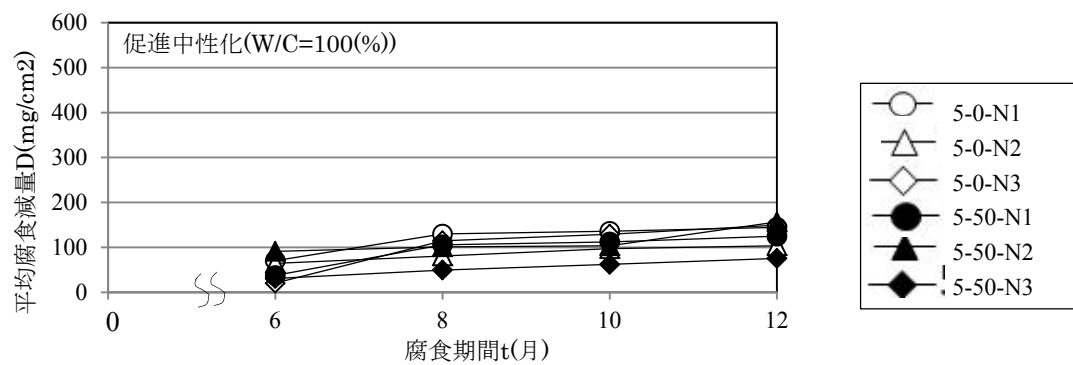


図 2.4.3-7 促進中性化による腐食作用を受ける供試体の腐食減量(水セメント比 100%)

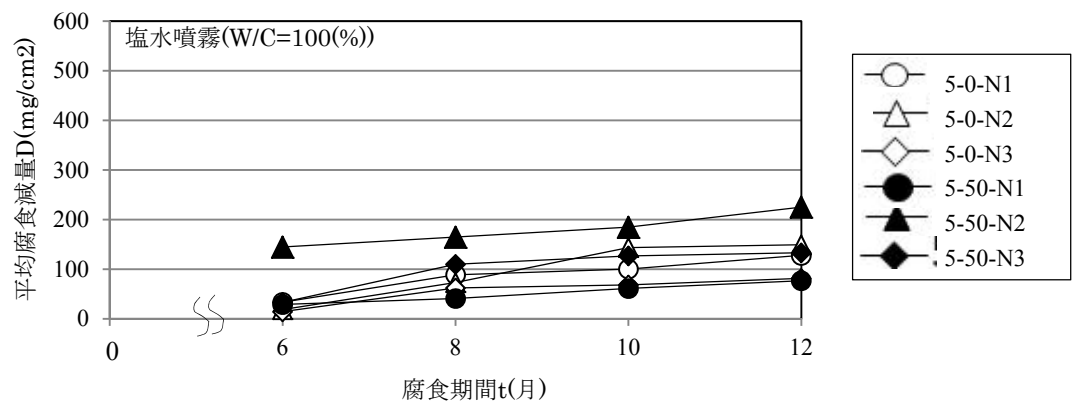


図 2.4.3-8 塩水噴霧による腐食作用を受ける供試体の腐食減量(水セメント比 100%)

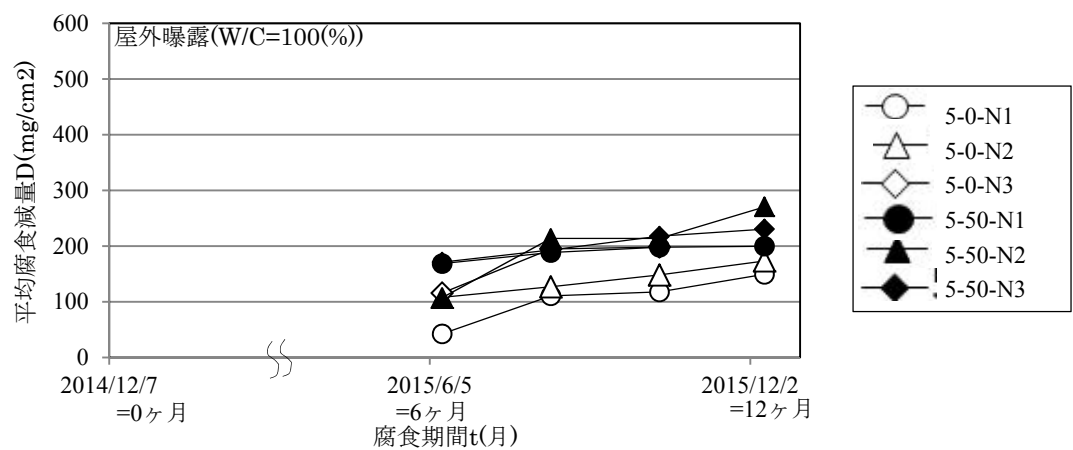


図 2.4.3-9 屋外曝露による腐食作用を受ける供試体の腐食減量(水セメント比 100%)

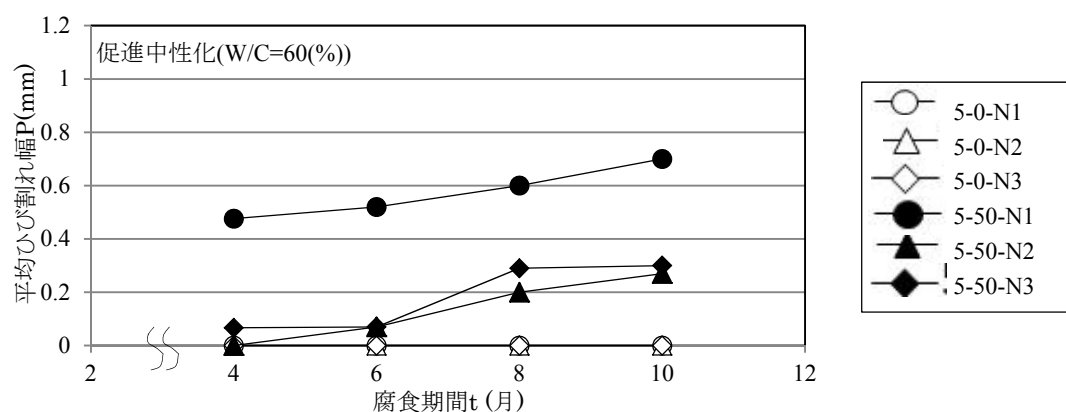


図 2.4.3-10 促進中性化による腐食作用を受ける供試体のひび割れ幅(水セメント比 60%)

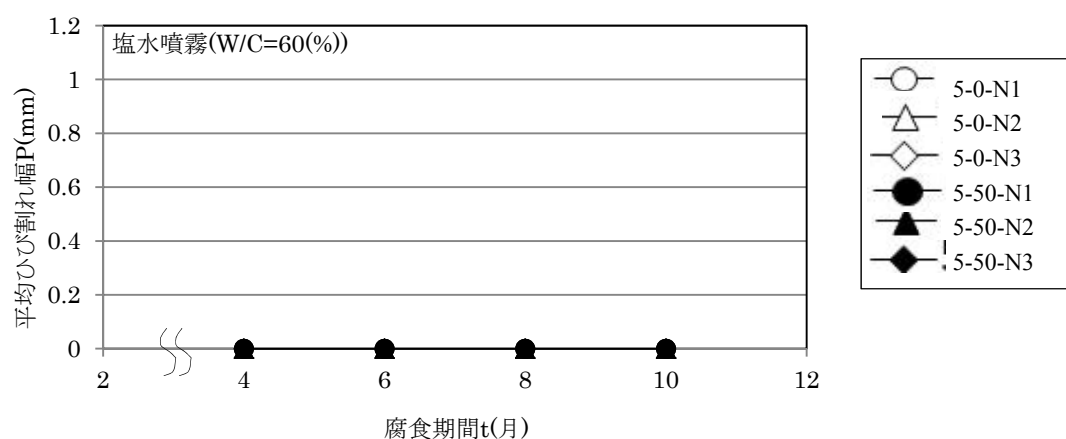


図 2.4.3-11 塩水噴霧による腐食作用を受ける供試体のひび割れ幅(水セメント比 60%)

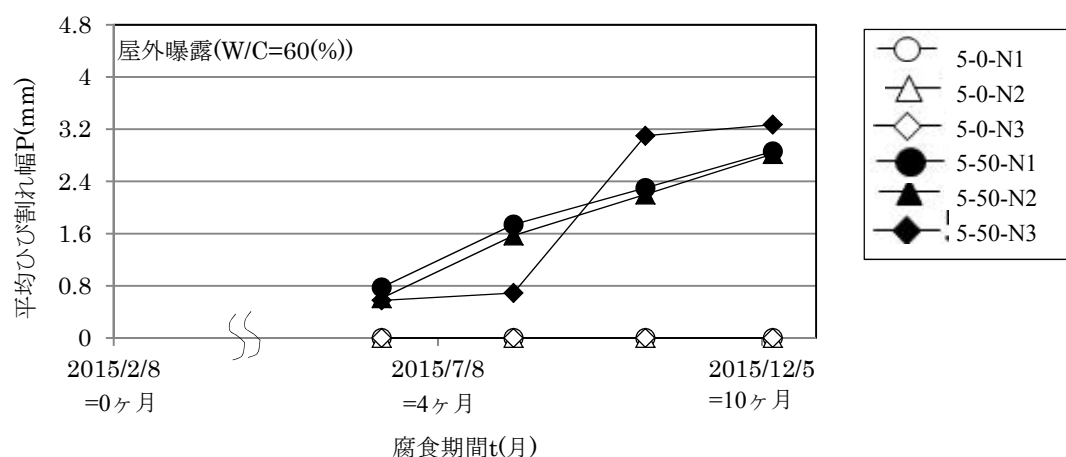


図 2.4.3-12 屋外曝露による腐食作用を受ける供試体のひび割れ幅(水セメント比 60%)

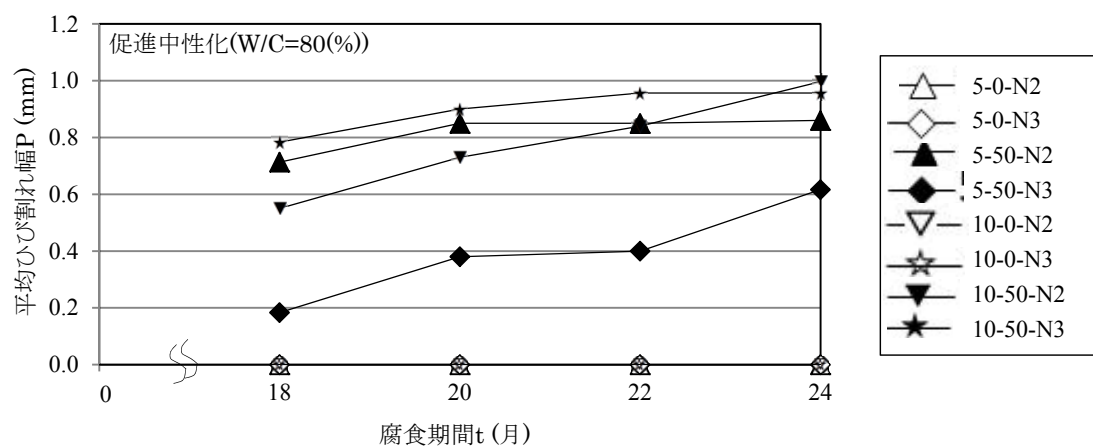


図 2.4.3-13 促進中性化による腐食作用を受ける供試体のひび割れ幅(水セメント比 80%)

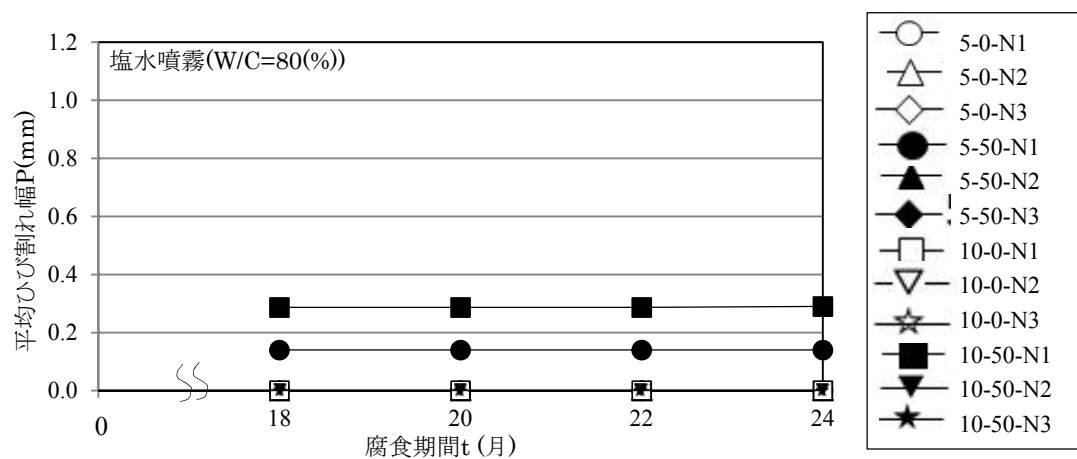


図 2.4.3-14 塩水噴霧による腐食作用を受ける供試体のひび割れ幅(水セメント比 80%)

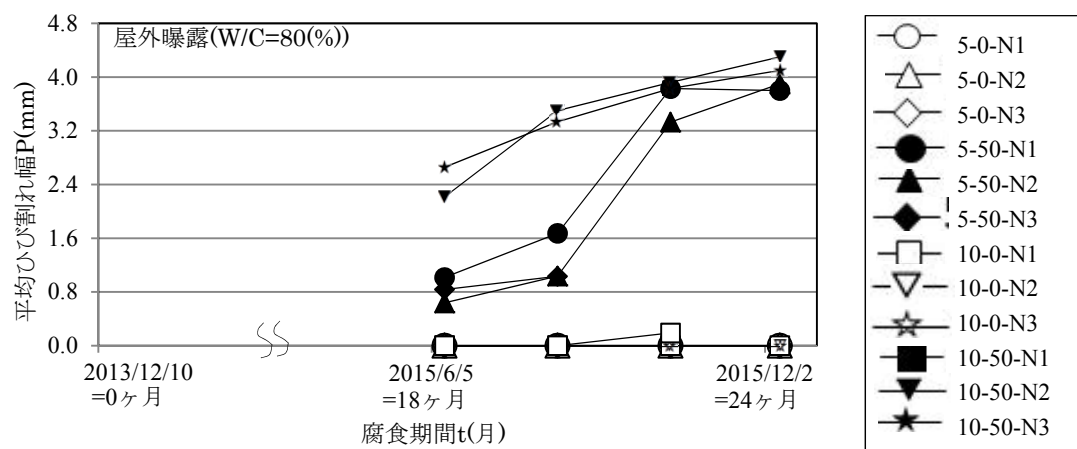


図 2.4.3-15 屋外曝露による腐食作用を受ける供試体のひび割れ幅(水セメント比 80%)

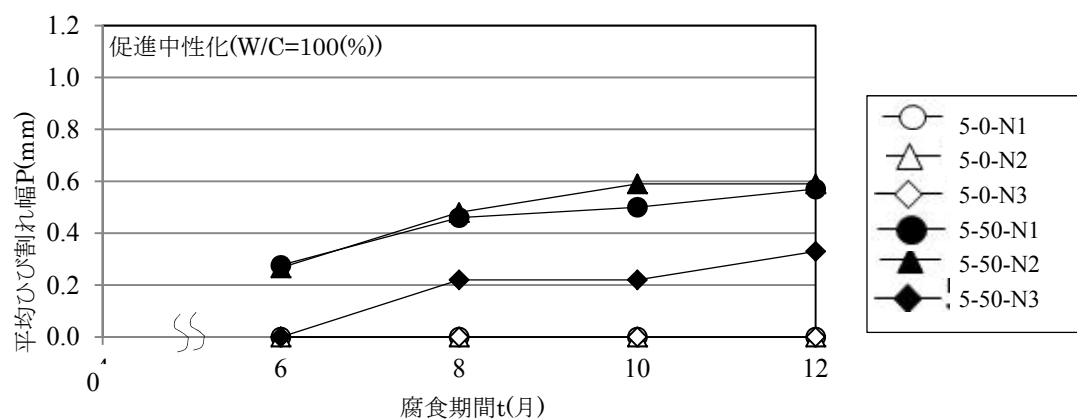


図 2.4.3-16 促進中性化による腐食作用を受ける供試体のひび割れ幅(水セメント比 100%)

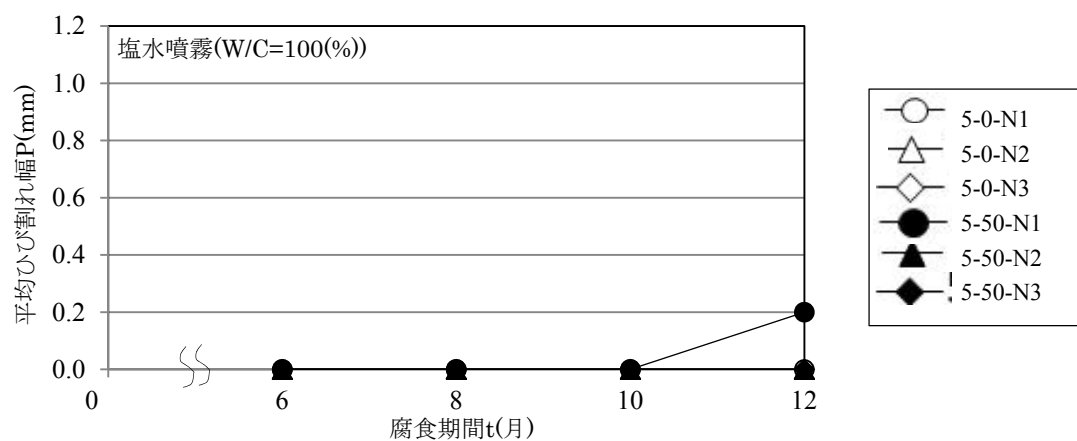


図 2.4.3-17 塩水噴霧による腐食作用を受ける供試体のひび割れ幅(水セメント比 100%)

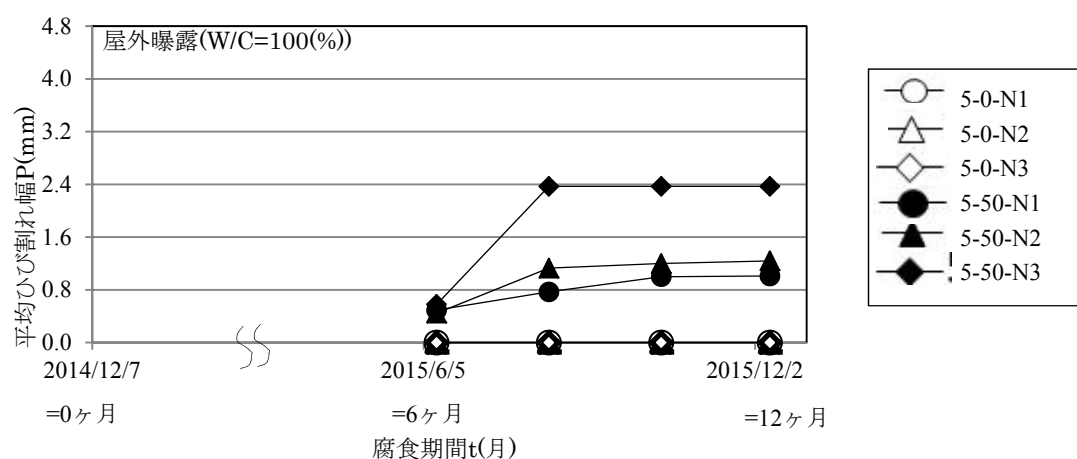


図 2.4.3-18 屋外曝露による腐食作用を受ける供試体のひび割れ幅(水セメント比 100%)

腐食減量の経時変化に関しては、各供試体において、腐食促進期間が長くなるに伴い鉄筋の平均腐食減量は大きくなっており、腐食が進んでいることがわかる。しかし、腐食促進期間が長くなると平均腐食減量の増加割合は小さくなる傾向がある。なお、促進中性化、塩水噴霧試験、屋外曝露試験とも、塩化物を含んだものは平均腐食減量の増加が大きく、塩化物の存在で鉄筋腐食が促進されている。かぶり厚さでの腐食の差異は見られないが、これは今回の腐食促進試験では予め鉄筋位置まで中性化を促進させたためと考えられる。

ひび割れの経時変化に関しては、腐食促進期間が長くなるに伴い平均ひび割れ幅は大きくなっている。ひび割れが観察されたのは、促進中性化、屋外曝露試験とも、塩化物を含んだ試験体であり、塩化物を含まない供試体では、鉄筋の腐食は進んでいるが本試験期間の範囲では、表面ひび割れは生じなかった。かぶりの影響に関しては、促進中性化、屋外曝露試験とも、かぶりが 5mm よりも 10mm と大きい方が、ひび割れ幅は大きくなる傾向があった。特に屋外曝露試験ではその傾向が明確である。

(3) 腐食減量とひび割れ幅の関係

図 2.4.3-19～図 2.4.3-30 に腐食減量 D とひび割れ幅 P の関係を各要因と水準ごとに示す。

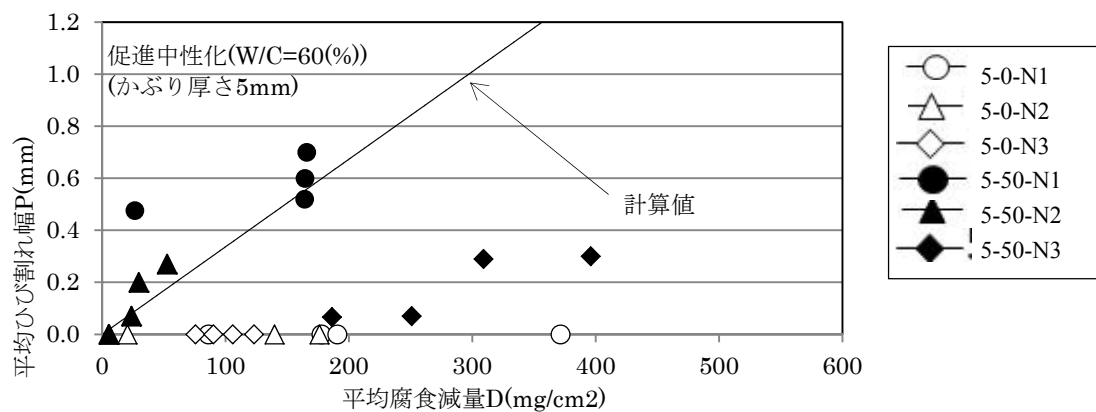


図 2.4.3-19 促進中性化による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

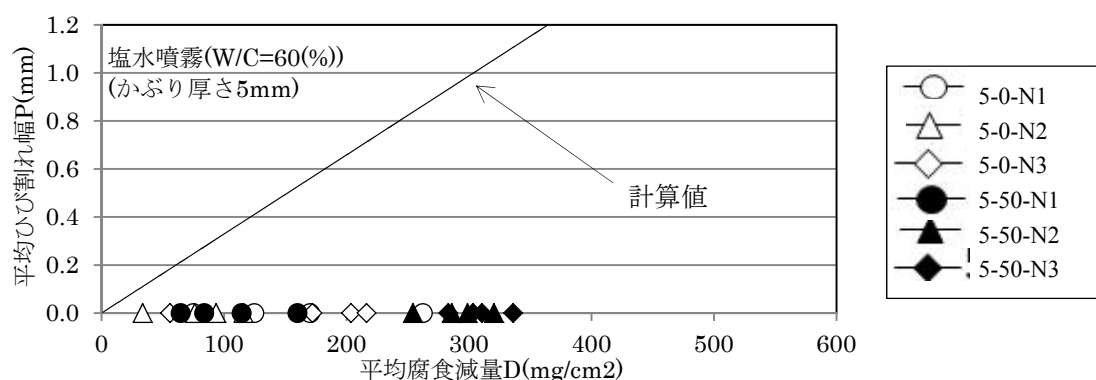


図 2.4.3-20 塩水噴霧による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

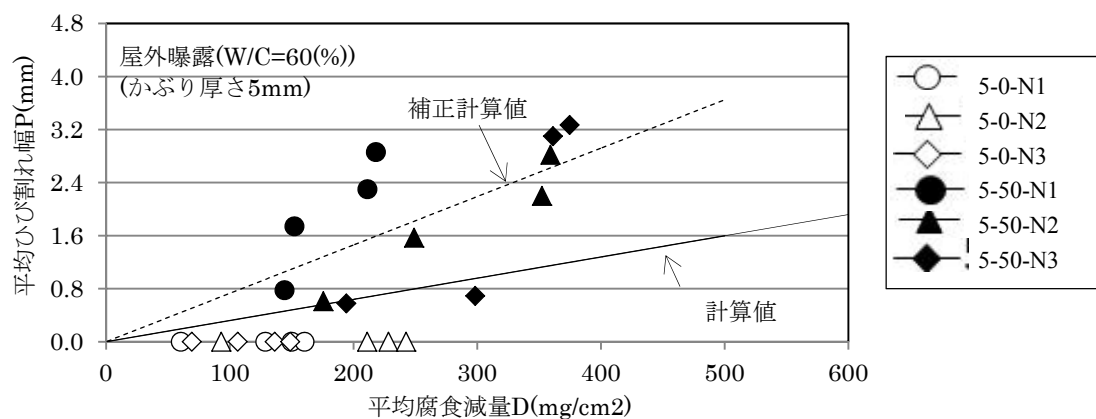


図 2.4.3-21 屋外曝露による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

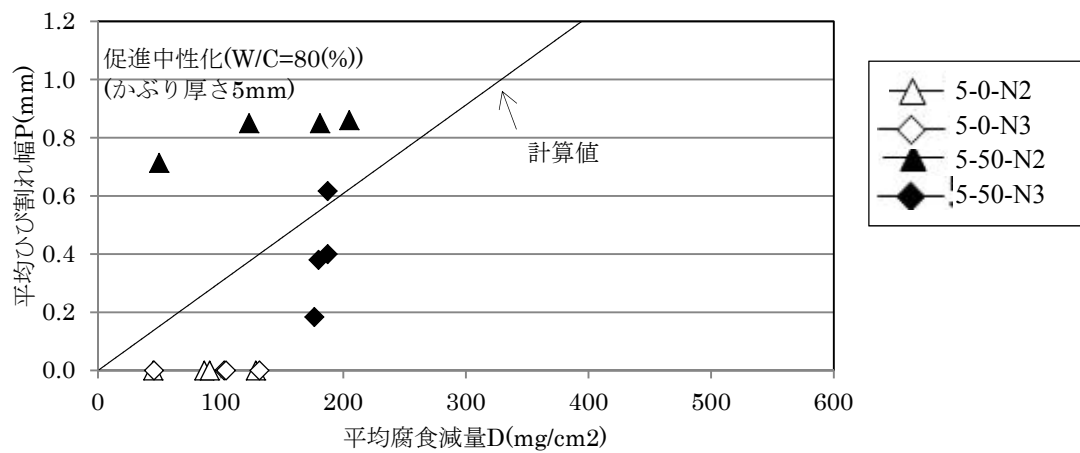


図 2.4.3-22 促進中性化による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

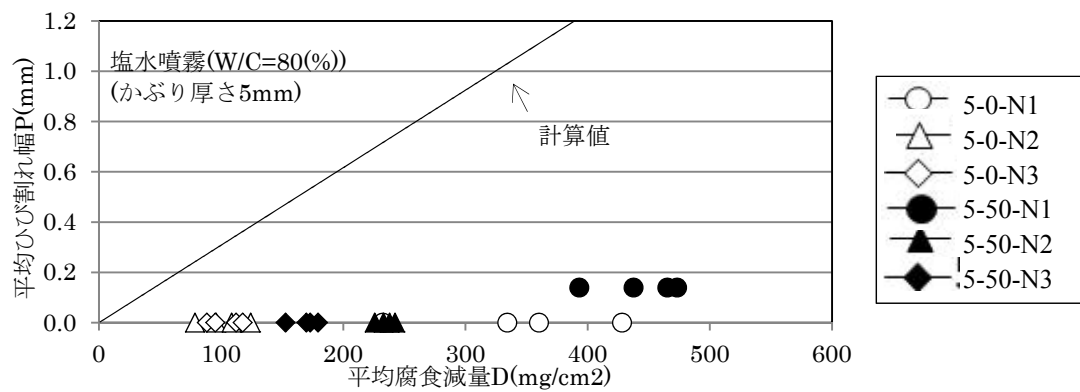


図 2.4.3-23 塩水噴霧による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

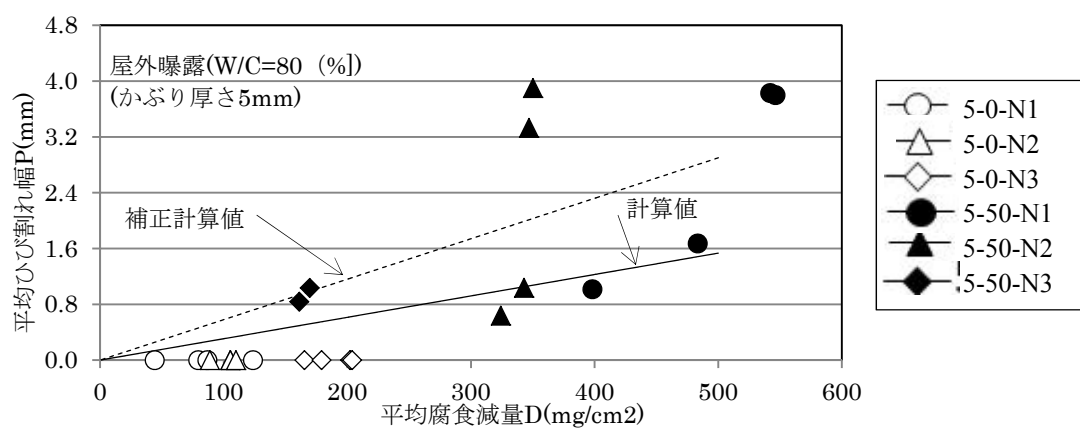


図 2.4.3-24 屋外曝露による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

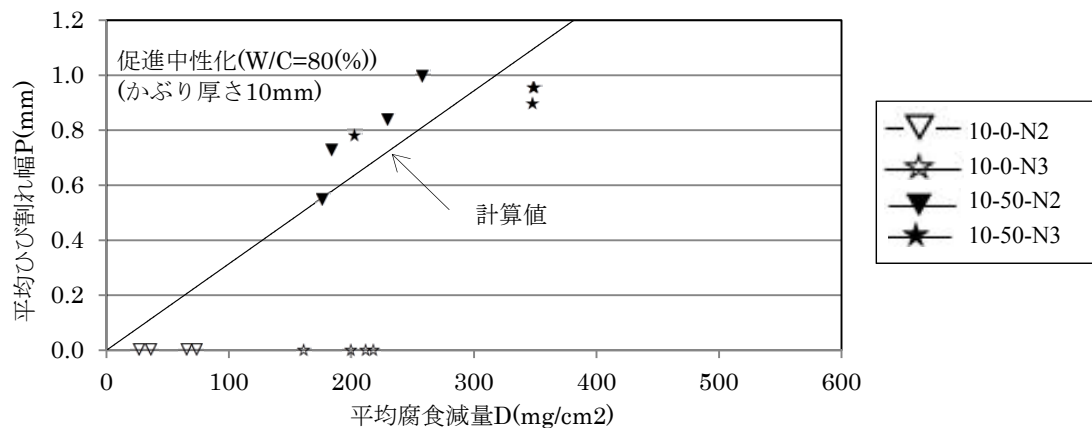


図 2.4.3-25 促進中性化による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

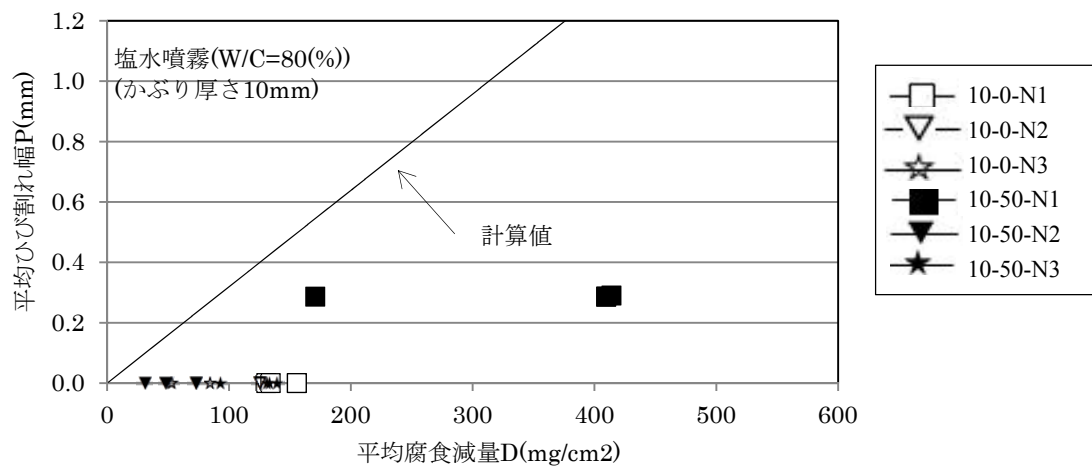


図 2.4.3-26 塩水噴霧による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

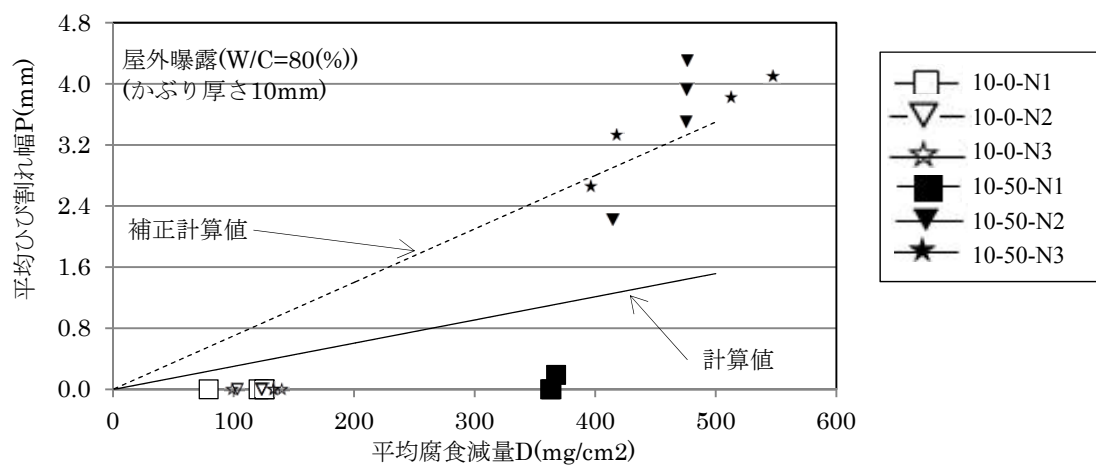


図 2.4.3-27 屋外曝露による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

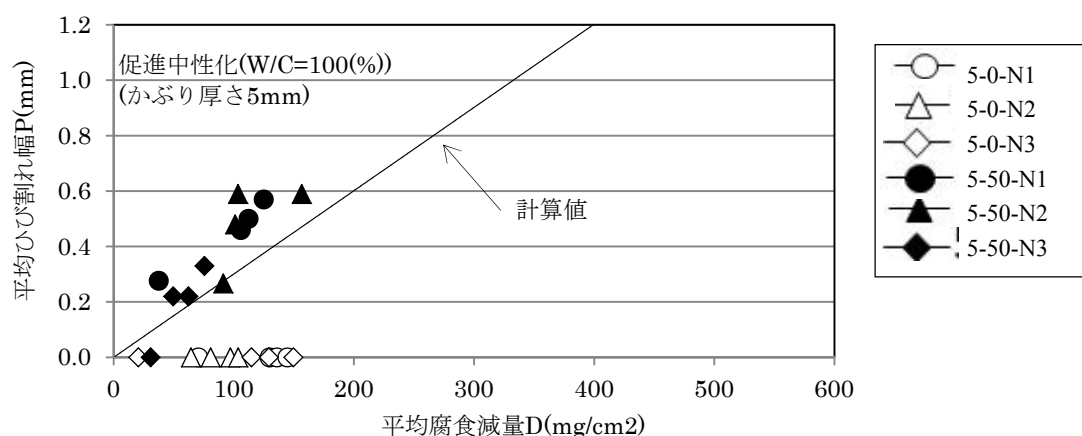


図 2.4.3-28 促進中性化による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

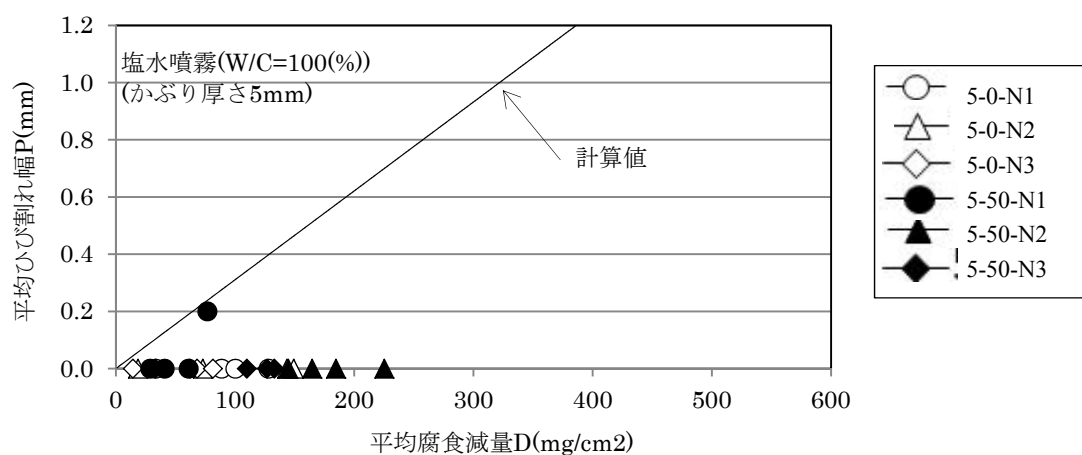


図 2.4.3-29 塩水噴霧による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

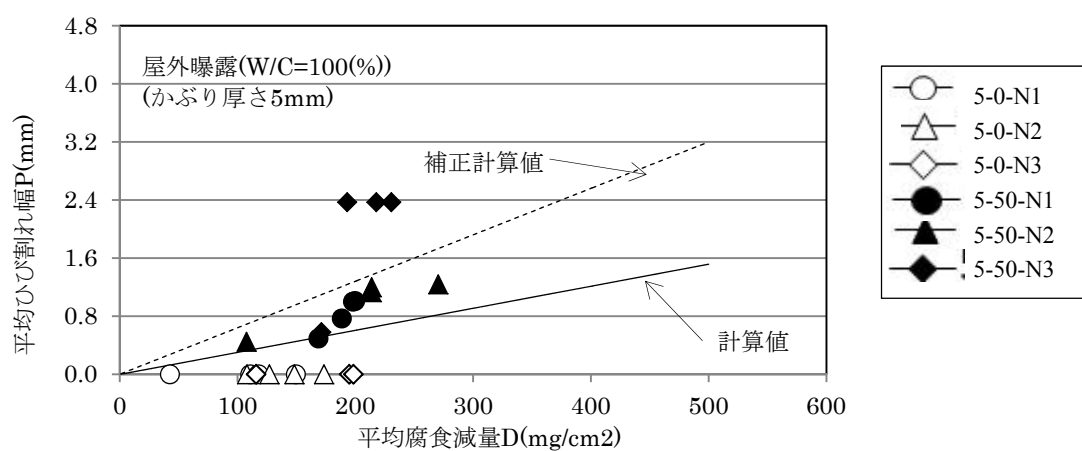


図 2.4.3-30 屋外曝露による腐食作用を受けた供試体の腐食減量とひび割れ幅の関係

腐食減量とひび割れ幅の関係に関しては、ひび割れが見られる供試体について、平均腐食減量と平均ひび割れ幅との間にはあまり明確な関係は見られない。促進中性化においてはかぶり厚さ 5mm では明確な関係は見られないが、かぶり厚さ 10mm では平均腐食減量が大きくなると平均ひび割れ幅も大きくなっている。また、屋外曝露においてもかぶり厚さ 5mm ではばらつきが大きいがかぶり厚さ 10mm では平均腐食減量が大きくなると平均ひび割れ幅も大きくなっている。この理由として、かぶり厚さが 5mm と薄い場合には、表面の乾燥収縮、欠陥等に影響されひび割れが不安定に生じ、かぶり厚さが大きいほど安定してひび割れが生じるためであると考えられる。一方で塩水噴霧は鉄筋腐食が進行しているが、ひび割れが起きていない。この理由として、本研究における塩水噴霧試験は水温 35℃、3%の NaCl 水溶液を常時噴霧していたことから、供試体が湿潤環境にあったためではないかと考えられる。

最後に計測した値と既往の研究に示された理論式との比較を行う。鉄筋の腐食減量 D と表面ひび割れ幅 $P(\text{mm})$ との関係は既往の研究⁶⁶より下式で表せる。

$$P = 0.1 \times D / D_u \quad (2.4.3-1)$$

ここで、 D_u ：試験体表面に 0.1mm のひび割れが生じるときの鉄筋の腐食減量 (mg/cm^2) を指し、 D_u は以下となる。

$$D_u = -(0.19d + 0.06x + 2.0) \times \ln(F_c) + 0.1d + 47 \quad (2.4.3-2)$$

ここで、 d ：鉄筋径 (mm)、 x ：かぶり厚さ (mm)、 F_c は試験体の圧縮強度 (N/mm^2) である。

(2.4.3-1) 式の計算結果を図 2.4.3-19～図 2.4.3-30 中に実験結果とともに示した。なお、試験体の圧縮強度 (N/mm^2) は、シュミットハンマーにより求めた。その結果、促進中性化を行った供試体は、塩化物なしで 52～55 (N/mm^2)、塩化物ありで 19～25 (N/mm^2) となった。塩水噴霧を行った供試体は、塩化物なしで 39 (N/mm^2)、塩化物ありで 42～48 (N/mm^2) となった。屋外曝露を行った供試体は、塩化物なしで 41～48 (N/mm^2)、塩化物ありで 32 (N/mm^2) となった。

各促進中性化においては、計算結果は測定結果と傾向が似ており、特にかぶり厚さ 10mm で相関が高い。塩水噴霧においては、計算結果よりも測定結果が小さくなる傾向がある。屋外曝露においては、計算結果よりも測定結果が大きくなる傾向がある。本研究では屋外曝露試験においては、同じ鉄筋腐食量でも、ひび割れの進展の大きさは促進中性化よりも大きくなる。この理由としては、屋外曝露では一定温湿度条件の促進試験条件に比べて、

⁶⁶ 橘高義典、L. P. Nguyen、塚越雅幸、松沢晃一：“鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する検討”、コンクリート工学年次論文報告集、(2011)

雨水の作用、乾湿の繰返し作用の影響等により、ひび割れの開口が大きくなっているものと考えられる。従って、ひび割れの推定では、促進試験で得られた結果より、割り増す必要がある。そこで塩化物を含んだ供試体に対して、 α をひび割れ劣化補正係数として定義し、以下の補正式(2.4.3-3)とする。

$$P' = \alpha \times 0.1 \times D / D_u \quad (2.4.3-3)$$

補正式を各腐食促進試験のグラフの補正計算値に当てはめると、 α の値は促進中性化試験、塩水噴霧試験では約1、屋外曝露試験では約2となった。このことから実構造物に対して鉄筋腐食とひび割れ幅の評価を行う際には、屋内では $\alpha=1$ 、屋外、取水構造物では $\alpha=2$ とすることが妥当と考えられる。

2.4.4 まとめ

本実験から得られた知見を以下に示す。

- ① 腐食促進期間の増加と共に腐食減量、ひび割れ幅は大きくなる。
- ② 全ての腐食促進試験において、塩化物を含んだ供試体は腐食減量が塩化物を含まない供試体と比較すると大きい。
- ③ 塩化物を含まない供試体では、鉄筋の腐食は進んでいるが本試験期間の範囲では、供試体は湿潤環境にあったため、表面ひび割れは生じなかった。
- ④ 平均腐食減量と平均ひび割れ幅との間に明確な相関は見られないが、かぶり厚さ10mmの供試体においては良い対応が見られた。
- ⑤ 促進中性化試験を行った供試体においては、計算値は測定結果と傾向が類似しており、特にかぶり厚さ10mmの供試体においては良い対応が見られた。
- ⑥ かぶり厚さが小さい場合には、表面の乾燥収縮、欠陥等に影響されてひび割れが不安定に生じると考えられる。
- ⑦ 塩水噴霧試験を行った供試体においては、鉄筋腐食は進んでいるが、ひび割れは起こらない傾向が見られた。この理由としては、本実験における塩水噴霧試験は塩水を常時噴霧しており、供試体が湿潤環境に置かれたためであると考えられる。
- ⑧ 屋外曝露試験を行った供試体においては、計算値よりも測定結果が大きくなる傾向がある。この理由として一定温湿度条件の促進試験条件に比べて、雨水の作用。乾漆の繰返し作用の影響等により、ひび割れの開口が大きくなると考えられる。
- ⑨ ひび割れ劣化補正係数 α は、屋内においては $\alpha=1$ 、屋外や取水構造物においては $\alpha=2$ として評価を行う必要があると考えられる。

以上より、鉄筋の腐食に対するひび割れの関係について、鉄筋の腐食減量を材料劣化度 D 、ひび割れ幅を構造物の性能 P とした線形関係を式(2.4.3-2)～(2.4.3-3)の通りに定式化し、

長期健全性評価での P - D 曲線に反映することが可能である。

2.5 複合劣化を受けた鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食に関する検討

2.5.1 研究の背景及び目的

従来、鉄筋コンクリート構造は優れた耐久性を有しているとされてきたが、一方で近年、塩分浸透、アルカリ骨材反応、中性化等の様々な要因による構造物の劣化現象が報告されている^{67, 68}。また、原子力発電所施設には取水構造物もあり、それらの構造物は海水と接する環境下にあるため、飛来塩化物の影響を受け、コンクリート構造物内部の鉄筋が腐食する場合がある。コンクリート構造物中の鉄筋の腐食は、部材の耐久性能の低下を引き起こすため、鉄筋腐食と鉄筋の強度性状の把握は構造物の耐久性の観点から極めて重要である。

鉄筋の腐食の程度が、腐食した鉄筋の力学的性能に及ぼす影響についての研究はいくつか見られるが、SD490やD41等の高強度太径鉄筋の腐食が力学的の性状の変化に及ぼす影響について検討を行った例は少ない。また、コンクリートはその性質上、乾燥収縮や自己収縮によるひび割れが発生する恐れがあり、ひび割れが発生した鉄筋コンクリート構造において、内部の鉄筋は発錆しやすくなる。しかし、ひび割れのあるコンクリート構造物内部の鉄筋腐食について検討を行った例は少ない。

本研究では、SD490やD41等の高強度太径鉄筋を含む、種類及び径の異なる異形鉄筋が、電食試験や塩水噴霧試験等により、腐食した場合の断面形状を回転式3次元レーザー変位計によって鉄筋軸方向に沿って測定し、腐食領域の形状ならびに断面減少率を把握し⁶⁹、鉄筋の力学的性質との関係について明らかにすることを目的とする。

本検討は平成 25 年度に、高強度太径鉄筋を電食により腐食させた場合の力学的性質の低下に関する検討を終えている⁷⁰。また平成 26 年度に、塩水噴霧試験による高強度太径鉄筋の腐食状況の途中経過の報告を行った⁷¹。

本年度は、コンクリート構造物内部の鉄筋が均一に腐食した場合を想定し、鉄筋そのものを塩水噴霧により腐食させた場合（以下、鉄筋単独腐食試験）と、コンクリートのひび割れ等により、内部の鉄筋の一部が孔食により腐食した場合を想定し、予めひび割れを発生させたモルタル中の鉄筋を塩水噴霧により腐食させた場合（以下、コンクリート中の鉄筋腐食試験）の二つにおける鉄筋の力学的性能の低下に関しての検討を行った。

⁶⁷ 土木学会:鉄筋腐食・防食及び補修に関する研究の現状と今後の動向、コンクリート委員会腐食防食小委員会報告(1997)

⁶⁸ 社団法人日本コンクリート工学協会:複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告書(2001)

⁶⁹ 金螢来、野口貴文、長井宏憲:腐食形態を考慮した腐食鉄筋の力学的性能の評価に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 73 巻、第 624 号、pp181-188(2008)

⁷⁰ 首都大学東京:“平成 25 年度高経年化技術評価高度化事業「コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究」成果報告書 “、三菱総合研究所委託、(2014)

⁷¹ 首都大学東京:“平成 26 年度高経年化技術評価高度化事業「コンクリート構造物の長期健全性評価に係る調査研究」成果報告書 “、三菱総合研究所委託、(2015)

2.5.2 実験概要

(1) 供試体概要

表 2.5.2-1 に実験の要因と水準、表 2.5.2-2 に使用鉄筋の主な機械的性質、表 2.5.2-3 に使用鉄筋の寸法・質量を示す。鉄筋種類は、異形棒鋼として JIS G 3112⁷²に規定されている SD295A、SD345、SD390、SD490 とし、SD295A は D13、SD345 及び SD390 は D13、D19、D29、D41、SD490 は D19、D29、D41 について試験を行った。また、腐食方法は塩水噴霧及び電食の 2 種類、腐食長さは 25、50、100mm の 3 水準、腐食による目標断面減少率は 0～30.0% の 9 水準とした。また、鉄筋孔食試験において使用したモルタルの使用材料を表 2.5.2-4、調合を表 2.5.2-5 に示す。モルタル中の鉄筋が腐食しやすいように、また、フロー値が $180 \pm 0.5\text{mm}$ なるように水セメント比を 80%、砂セメント比 4.3 とした。

昨年度は塩水噴霧試験による断面減少率 0～10%の鉄筋について行った。本年度は、塩水噴霧試験による目標腐食断面減少率 15～30%について検討を行った。

表 2.5.2-1 実験の要因と水準

試験名	要因		水準			
鉄筋 単独 腐食 試験*	鉄筋種類		SD295A、	SD345、	SD390、	SD490
	呼び名(径)		D13、	D19、	D29、	D41
	腐食方法		塩水噴霧、電食			
	腐食長さ (mm)		25、	50、	100	
	腐食による目標腐食減量 (mg/cm ²)		0、2.5、5.0、7.5、10.0、	15.0、	20.0、	25.0、30.0
	対応する断面 減少率(%)	D19	16、21、27、32			
		D29	11、15、18、21			
		D41	7、10、12、16			
コンクリ ート中の 鉄筋 腐食 試験*	鉄筋種類		SD295A、	SD345、	SD390、	SD490
	呼び名(径)		D13、	D19、	D29、	D41
	腐食方法		塩水噴霧			
	腐食長さ(mm)		50			
	腐食促進期間(週)		0、4、	8、	12、	16
	中性化促進試験		有り(温度 60℃、相対湿度 60%、CO ₂ 濃度 10%)			

* 枠が本年度の検討内容

表 2.5.2-2 機械的性質

種類の記号	降伏点または 0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
SD295A	295 以上	440～600
SD345	345～440	490～
SD390	390～510	560～
SD490	490～625	620～

⁷² 日本工業規格 JIS G 3112、鉄筋コンクリート用棒鋼(2010)

表 2.5.2-3 鉄筋径ごとの寸法・質量

呼び名	公称寸法			外経 φ D (mm)
	直径 (mm)	断面積 (cm ²)	単位重量 (kg/m)	
D13	12.7	1.267	0.995	14.0
D19	19.1	2.865	2.25	21.5
D29	28.6	6.424	5.04	32.1
D41	41.3	13.40	10.50	46.3

表 2.5.2-4 モルタル使用材料

材料	種類	物性
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³
細骨材	砂岩砕砂	表乾密度 2.56g/cm ³ 、絶乾密度 2.58g/cm ³

表 2.5.2-5 モルタル調合

水セメント比 W/C (%)	砂セメント比 S/C(wt)	質量(kg/m ³)			フロー値 (mm)
		水	セメント	細骨材	
80	4.3	289	362	1556	175

図 2.5.2-1 に鉄筋単独腐食試験で用いた供試体、図 2.5.2-2 にコンクリート中の鉄筋腐食試験で用いた供試体概要を示す。鉄筋長さは 600mm のねじ節鉄筋とし、腐食面以外をシリコン樹脂及びビニールテープでシールした。コンクリート中の鉄筋腐食試験では、鉄筋単独腐食試験で用いた供試体を 0.5mm 幅のひび割れを有するブロック状のモルタルに埋め込んだ。なお、モルタル部分の腐食劣化促進面に 0.5mm のひび割れを再現するため、型枠に設置した 0.5mm 厚のプラスチック板により切欠きを入れた。ひび割れ位置はちょうど鉄筋の腐食対象領域の中心位置の真上となるようにした。またモルタルと鉄筋のかぶり厚さは全て 5mm となるようにした。

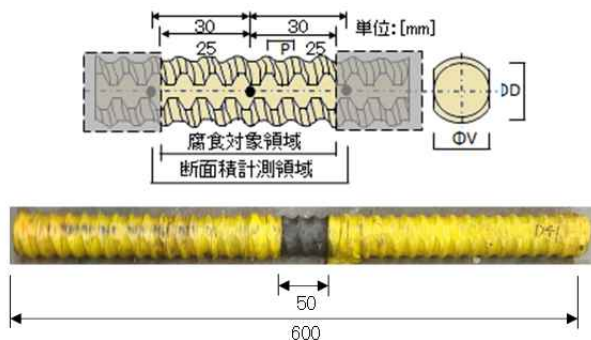


図 2.5.2-1 鉄筋単独腐食試験用供試体

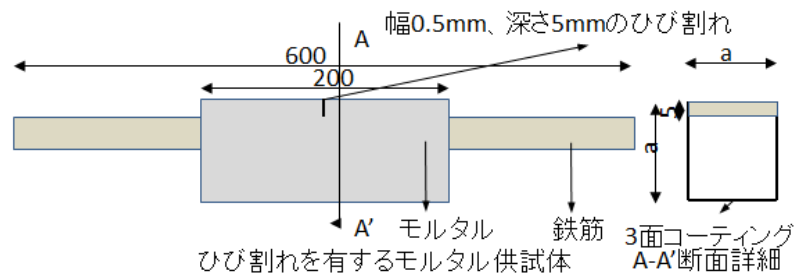


図 2.5.2-2 コンクリート中の鉄筋腐食試験用供試体

(2) 鉄筋腐食試験

1) 鉄筋単体の腐食試験

鉄筋単独腐食試験における鉄筋の腐食には複合劣化促進試験装置を用いての塩水噴霧（図 2.5.2-3、図 2.5.2-4）にて行った。塩水噴霧は温度 35℃環境下で 3%NaCl 水溶液を連続噴霧して行った。腐食期間は、鉄筋の目標断面減少量が 15、20、25、30%になるまでとし、所定の腐食を終えた供試体は、10%クエン酸二アンモニウム水溶液浸漬にて錆を除去し、断面計測後、引張試験を実施した。

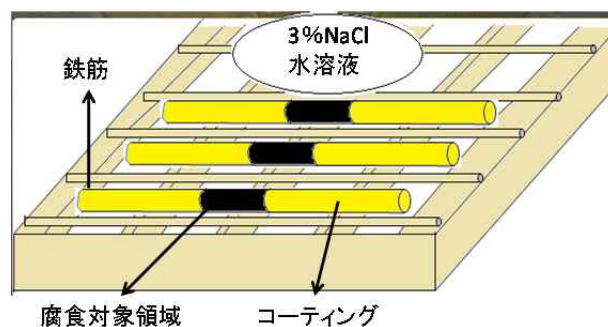


図 2.5.2-3 塩水噴霧試験概要



図 2.5.2-4 塩水噴霧試験の様子

2) コンクリート中の鉄筋腐食試験

また、コンクリート中の鉄筋腐食試験における腐食劣化促進試験は温度 35℃、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 10%の条件で二週間中性化促進試験を行い、モルタル表面から鉄筋までのモルタル部分を中性化させてから、温度 35℃環境下で 3%NaCl 水溶液を連続噴霧して、塩水噴霧試験を行った(図 2.5.2-5)。

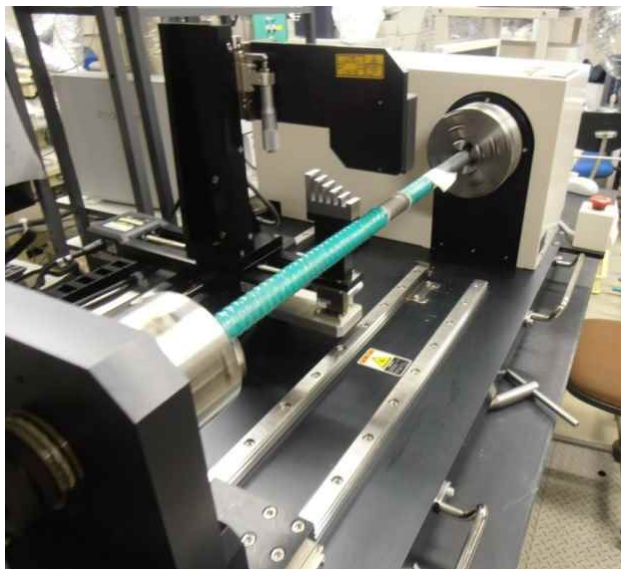


図 2.5.2-5 ひび割れを有するモルタル供試体の塩水噴霧試験の様子

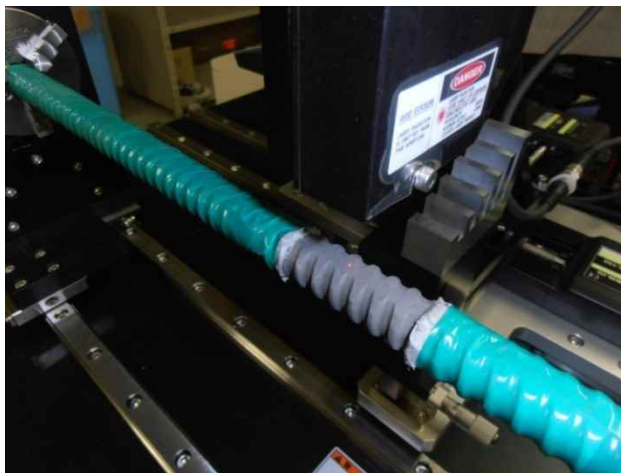
2) 断面積測定方法

図 2.5.2-6 に断面測定に用いた測定装置を示す。本装置はレーザー変位計を用いて ϕ 50mm 程度までの棒鋼の断面を長手方向 100mm まで 0.1mm ピッチで測定できる装置である。なお、円周方向では 0.36° 間隔でデータを測定している。

本研究では、長手方向 1mm ピッチで断面を測定することとした。



(a) 外観



(b) 測定状況

図 2.5.2-6 断面測定装置

3) 引張試験方法

供試体は断面の測定後、万能試験機（容量 1000kN）を用いて引張試験を行う。供試体には試験前にポンチによる打跡により標点を作製し、ノギスを用いて標点間距離並びに腐食領域部の材軸方向距離を測定した（図 2.5.2-7）。標点間距離は 120 mm とし、試験前には鉄筋と試験機のチャックとのすべりを防ぐため、試験体に防水の目的で巻きつけたビニールテープやシリコンを除去した。なお、試験の際には、図 2.5.2-8 に示すように変位測定治具を用いて変位も測定することとした。



図 2.5.2-7 標点作製状況



図 2.5.2-8 引張試験状況

2.5.3 実験結果及び考察

(1) 鉄筋単独腐食試験

1) 断面積測定結果

図 2.5.3-1 に断面積測定時の 3D 表示例、図 2.5.3-2 に鉄筋供試体名称の概要、図 2.5.3-3～図 2.5.3-10 に塩水噴霧により各鉄筋の断面積測定地点ごとの断面減少率を示す。断面積減少率は、腐食劣化促進試験前後で断面積測定開始地点を揃え、節は節というように対応する腐食後の断面積を腐食前の断面積で除した値とした。また、腐食後の断面積の平均値は間隔 1mm ごとに測定した計測地点ごとの鉄筋断面の平均、最小断面はその最小値である。平均腐食断面減少率は平均腐食断面積を公称断面積で除したもので、最大腐食断面減少率は最小腐食断面積を公称断面積で除したものである。

塩水噴霧によって全面腐食させた鉄筋の断面減少率は腐食領域 50mm においてほぼ均一に腐食する傾向が分かった。また、節の頂点部分では節と節の間の部分と比較すると断面減少が緩やかな傾向を見せ、節が残るような腐食形態をみせた。

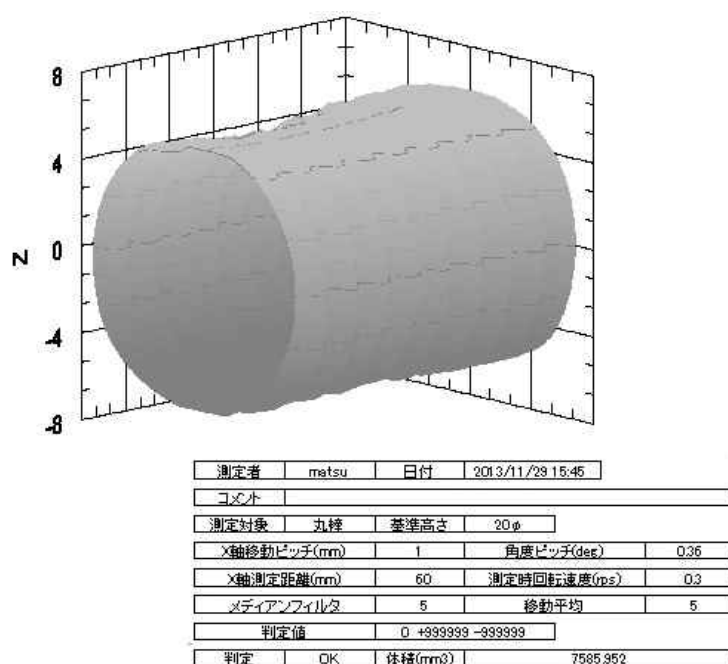


図 2.5.3-1 断面積 3D 表示例

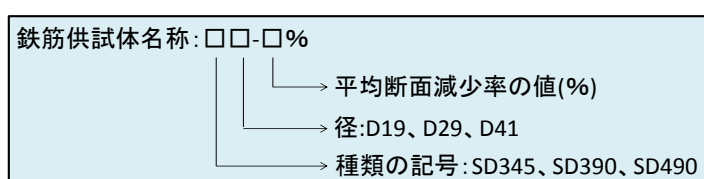


図 2.5.3-2 鉄筋供試体名称概要

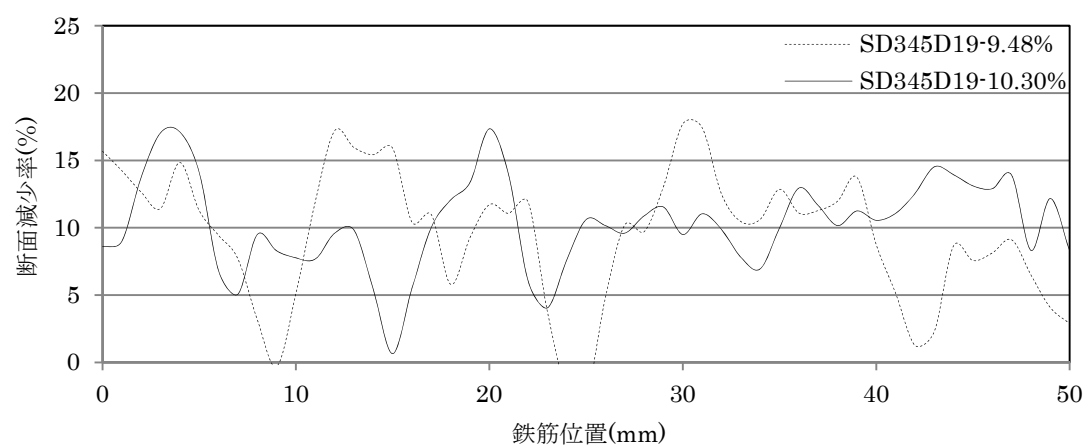


図 2.5.3-3 測定地点ごとの断面減少率(SD345・D19)

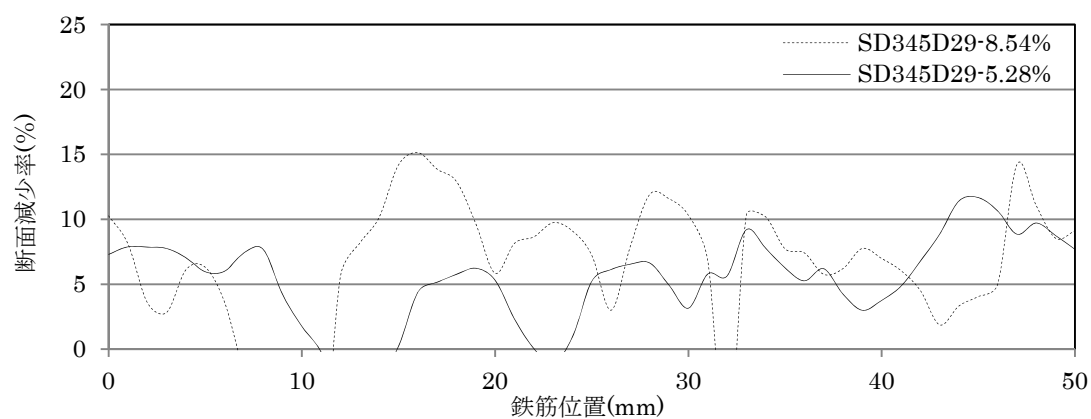


図 2.5.3-4 測定地点ごとの断面減少率(SD345・D29)

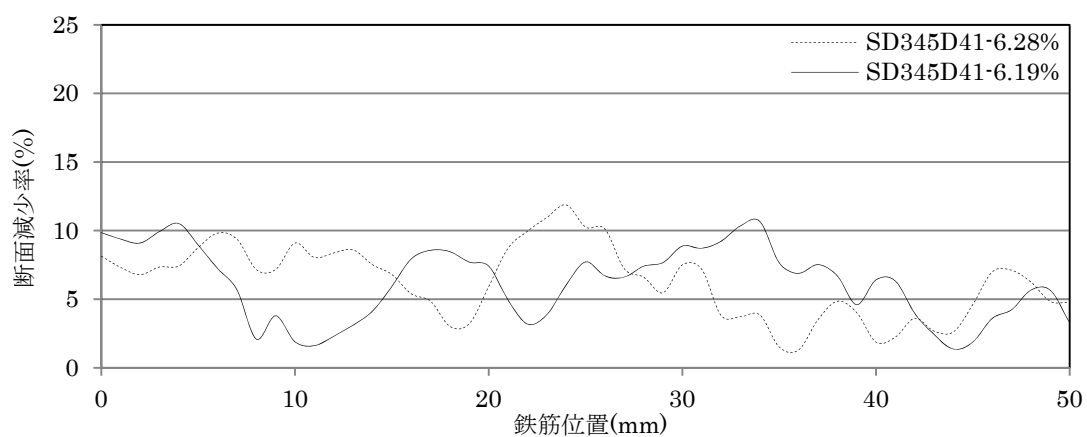


図 2.5.3-5 測定地点ごとの断面減少率(SD345・D41)

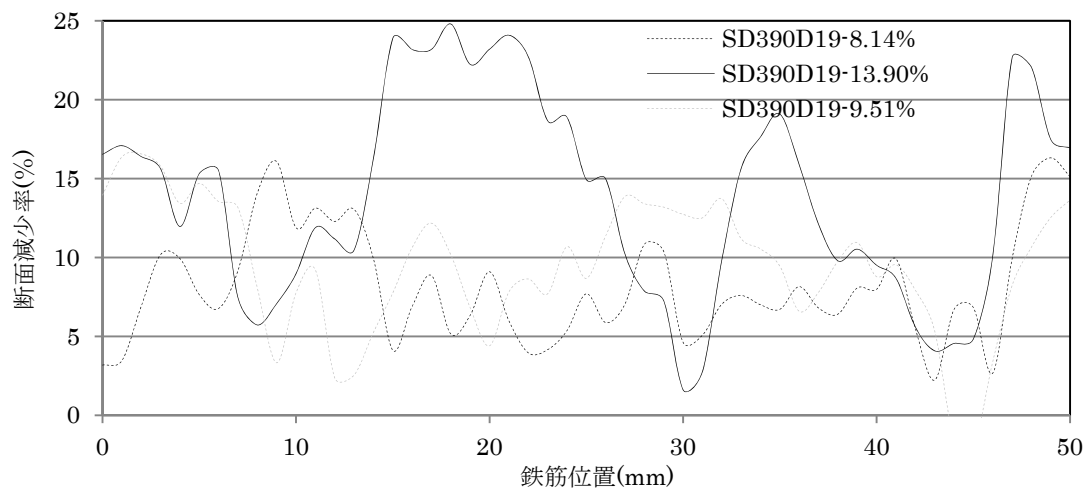


図 2.5.3-6 測定地点ごとの断面減少率(SD390・D19)

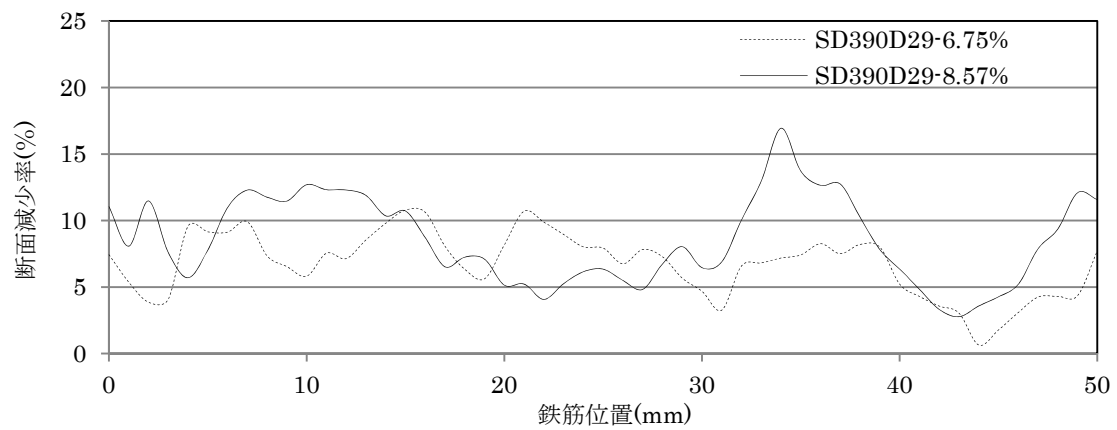


図 2.5.3-7 測定地点ごとの断面減少率(SD390・D29)

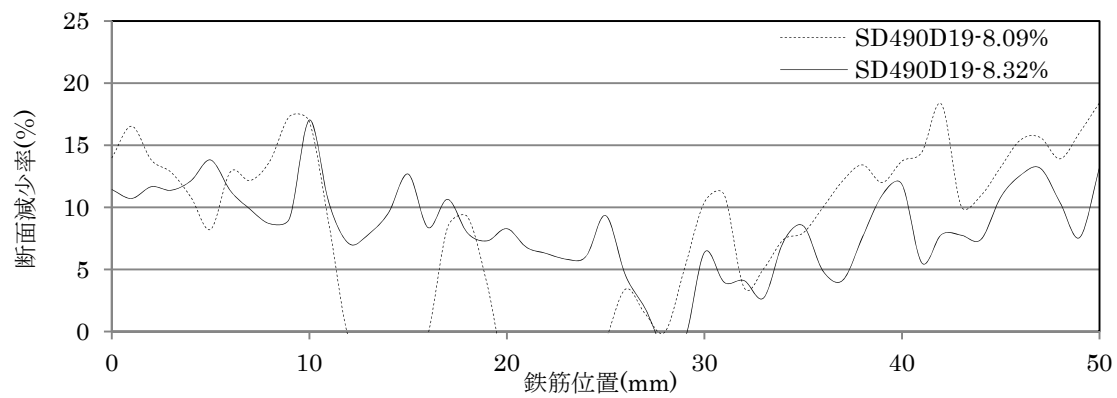


図 2.5.3-8 測定地点ごとの断面減少率(SD490・D19)

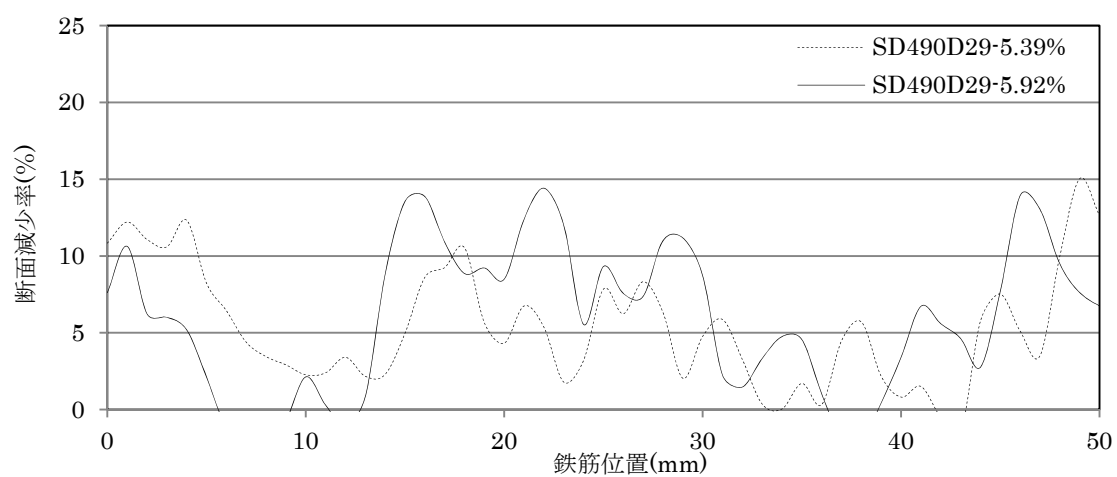


図 2.5.3-9 測定地点ごとの断面減少率(SD490・D29)

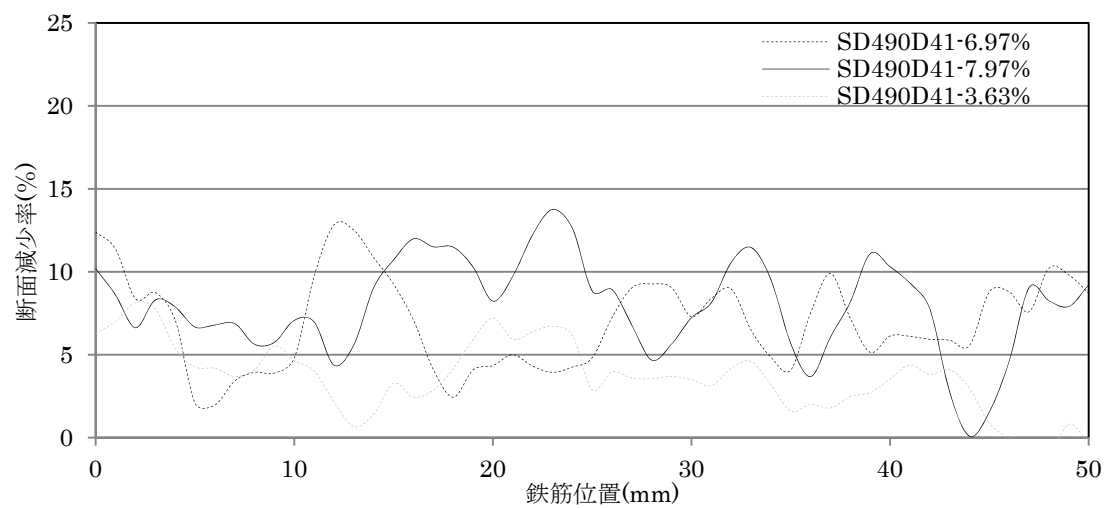


図 2.5.3-10 測定地点ごとの断面減少率(SD490・D41)

2) 降伏点残存率

図 2.5.3-11 に腐食した鉄筋の平均腐食断面減少率と降伏点残存率の関係、図 2.5.3-12 に腐食した鉄筋の最大腐食断面減少率と降伏点残存率の関係を示す。グラフ上には本年度得られたデータと一昨年得られたデータを合わせて示している。なお、降伏点は降伏荷重を公称断面積で除した見かけの値である。降伏点残存率は、腐食した鉄筋の降伏点を健全な鉄筋の降伏点で除した値である。鉄筋が腐食し、断面減少すると鉄筋の種類や径によらず降伏点は線形に低下している。また、その低下の割合は平均断面減少率の低下の割合とほぼ等しい。

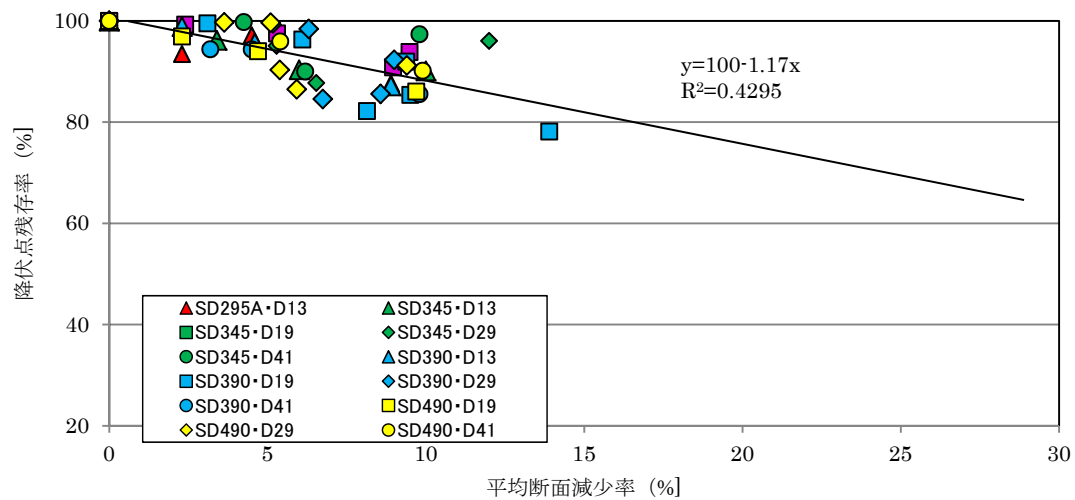


図 2.5.3-11 平均断面減少率と降伏点残存率との関係

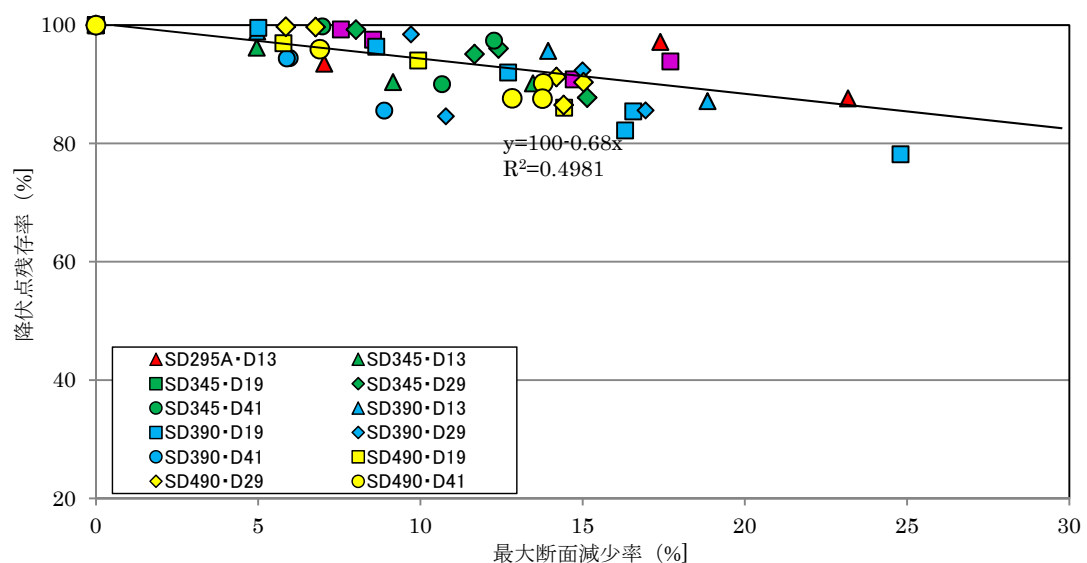


図 2.5.3-12 最大断面減少率と降伏点残存率との関係

3) 引張強さ残存率

図 2.5.3-13 に腐食した鉄筋の平均腐食断面減少率と引張強さ残存率の関係、図 2.5.3-14 に腐食した鉄筋の最大腐食断面減少率と引張強さ残存率の関係を示す。グラフ上には本年度得られたデータと一昨年得られたデータを合わせて掲載している。なお、引張強さは引張荷重を公称断面積で除した見かけの値である。引張強さ残存率は、腐食した鉄筋の引張強さを健全な鉄筋の引張強さで除した値である。鉄筋が腐食し、断面減少すると鉄筋の種類や径によらず引張強さは線形に低下している。また、その低下の割合は平均断面減少率の低下の割合とほぼ等しい。

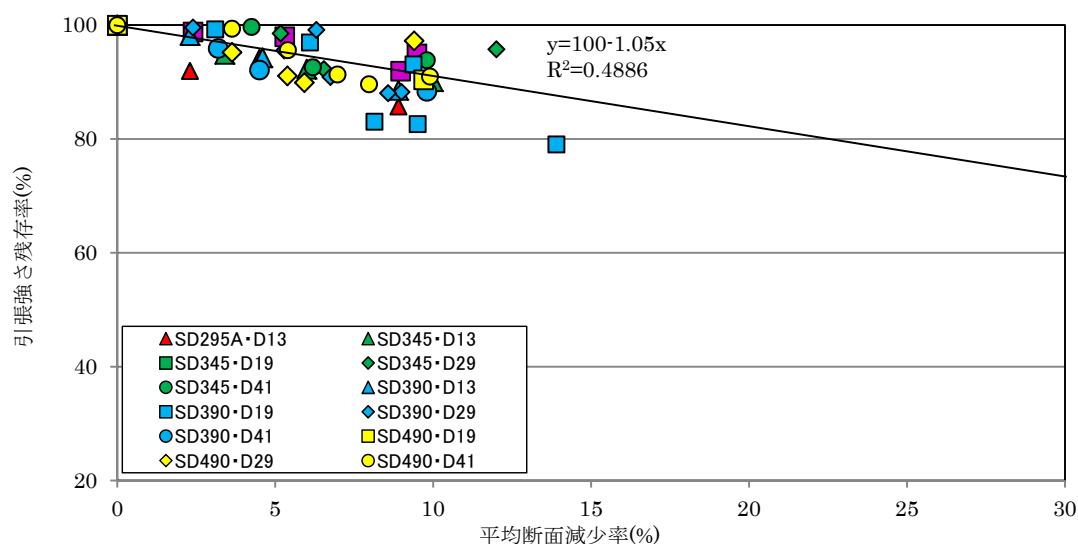


図 2.5.3-13 平均断面減少率と引張強さ残存率の関係

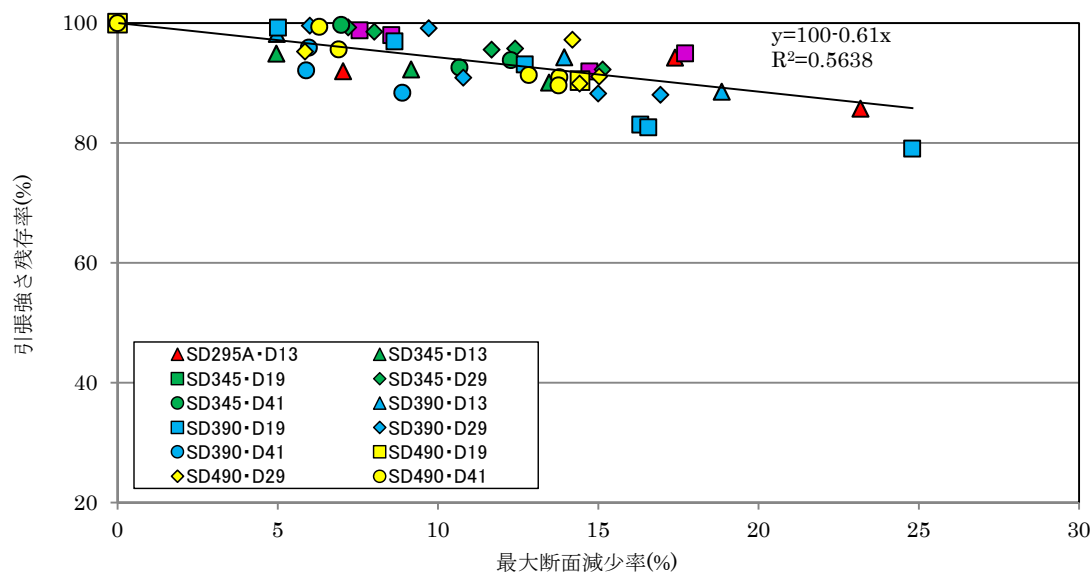


図 2.5.3-14 最大断面減少率と引張強さ残存率の関係

4) ヤング係数残存率

腐食部の見かけのヤング係数 E_2 は、試験で得られた荷重-変位関係から腐食していない健全部のヤング係数を実測値から求めたヤング係数の平均の値である 191.755kN/mm^2 とし、下式により求めた。

$$E_2 = l_2 / (S \times \Delta l / \Delta P - l_1 / E_1) \quad (2.5.3-1)$$

ここに、 E_1 、 E_2 は健全部のヤング係数及び腐食部の見かけのヤング係数、 l_1 及び l_2 は試験区間における健全部及び腐食部の鉄筋長さ、 ΔP は降伏点の 1/3 及び 2/3 時の荷重差、 Δl は降伏点の 1/3 及び 2/3 時の変位差である。鉄筋腐食に伴い、見かけのヤング係数も線形に低下している。鉄筋のヤング係数は一般的に鉄筋種類にかかわらず 205kN/mm^2 として用いられるが、腐食した鉄筋の断面積は不均一であり、その結果として応力集中で全体の伸びが小さくなっている。従って健全な鉄筋に対して、同じような変形を生じさせる荷重が腐食した鉄筋では小さくなり、見かけのヤング率は小さくなることが考えられる。腐食減少率が大きいものほどヤング係数は小さくなり、鉄筋の強度が小さいほどヤング係数の低下度は大きくなる。

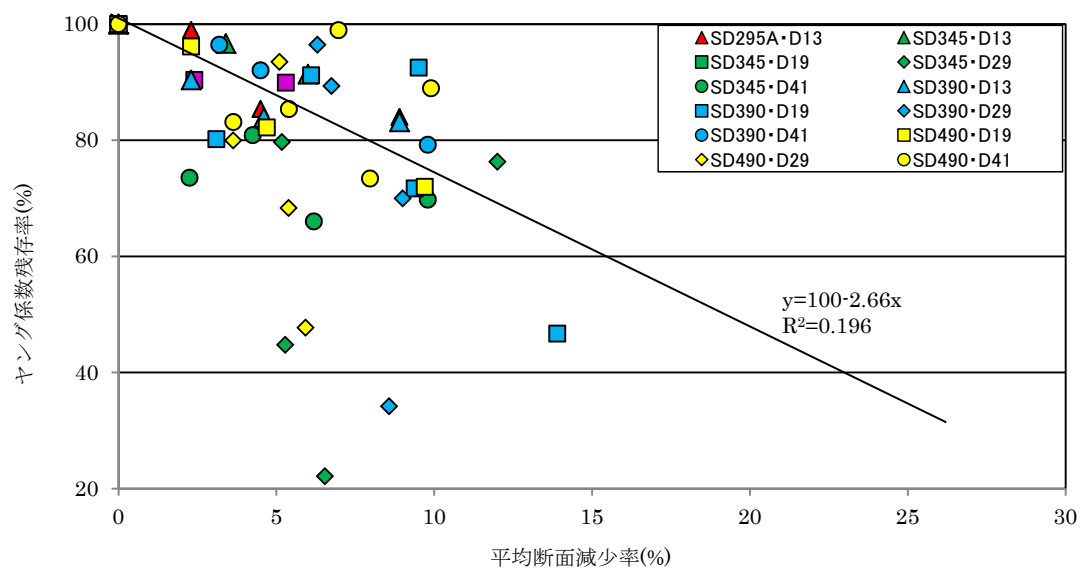


図 2.5.3-15 平均断面減少率とヤング係数残存率の関係

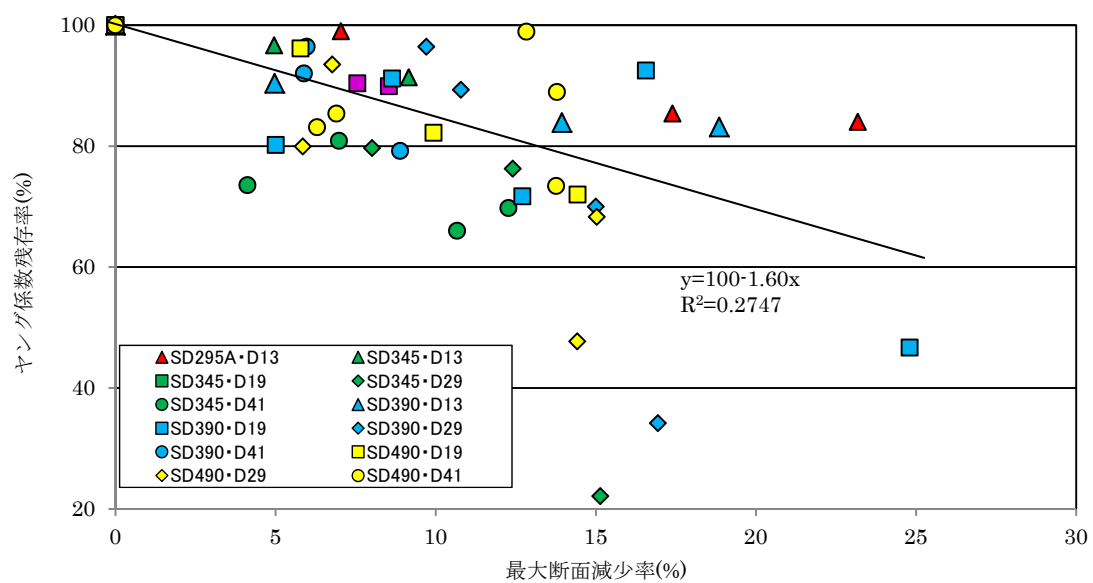


図 2.5.3-16 最大断面減少率とヤング係数残存率の関係

(2) コンクリート中の鉄筋腐食試験

1) 断面積測定結果

図 2.5.3-17～図 2.5.3-28 に各鉄筋の測定地点ごとの断面減少率を示す。各鉄筋は腐食領域全体が腐食する結果となった。これは塩水噴霧試験が長期間なために、塩分の浸透がひび割れ部だけでなくかぶり面全体で起こったためであると考えられる。

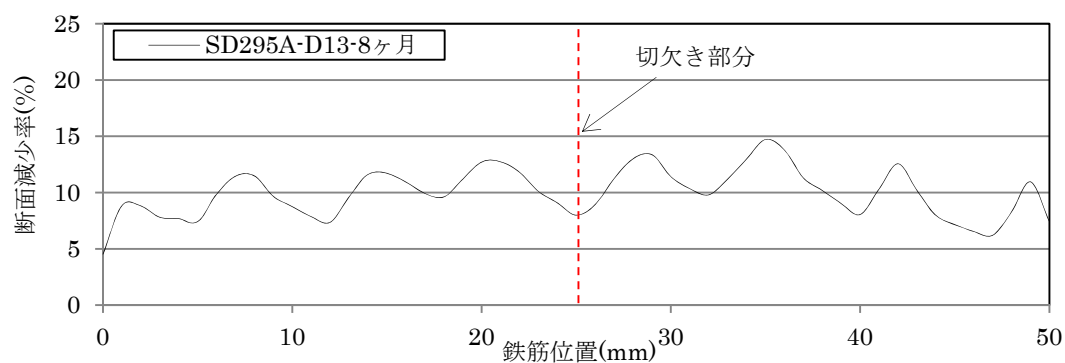


図 2.5.3-17 測定地点ごとの断面減少率(SD295A ・ D13)

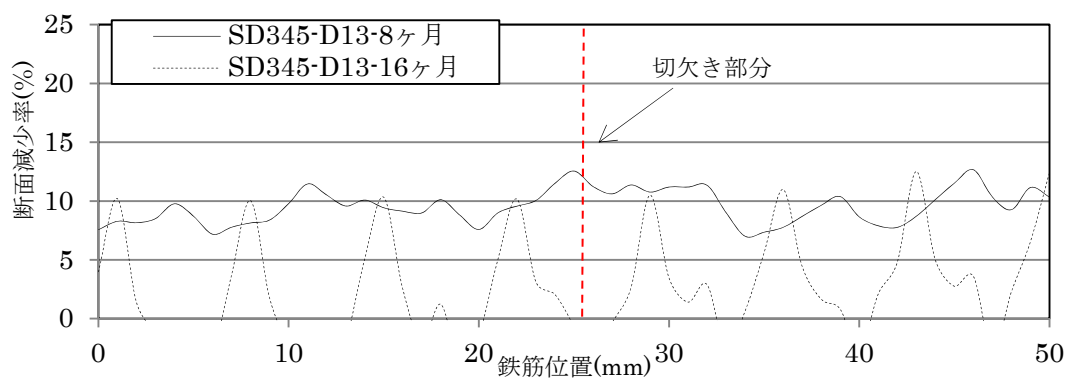


図 2.5.3-18 測定地点ごとの断面減少率(SD345 ・ D13)

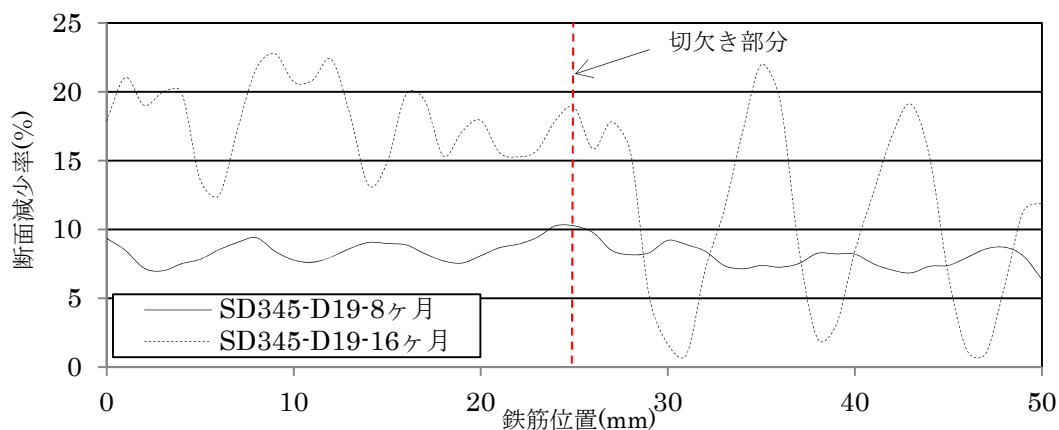


図 2.5.3-19 測定地点ごとの断面減少率(SD345 ・ D19)

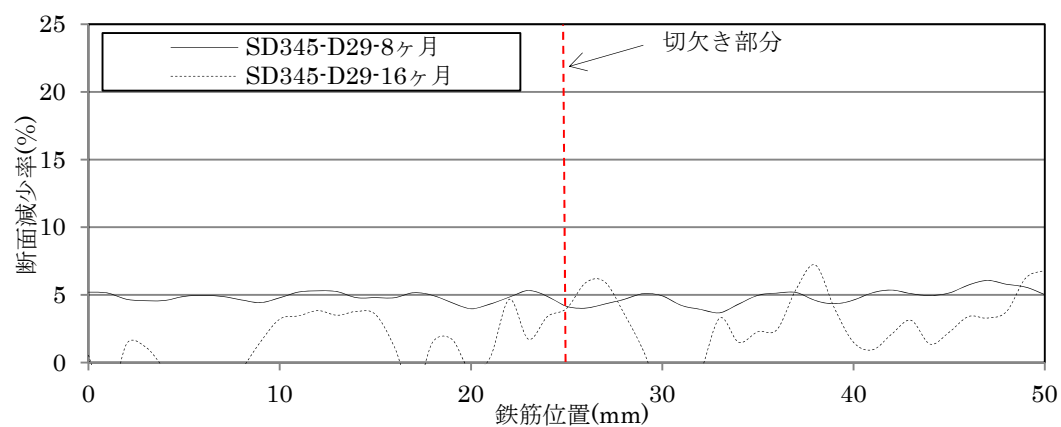


図 2.5.3-20 測定地点ごとの断面減少率(SD345・D29)

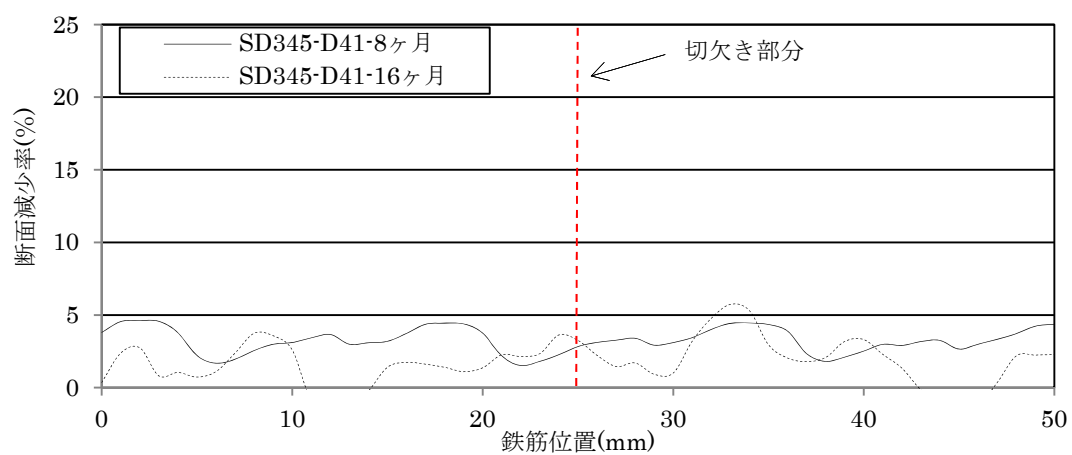


図 2.5.3-21 測定地点ごとの断面減少率(SD345・D41)

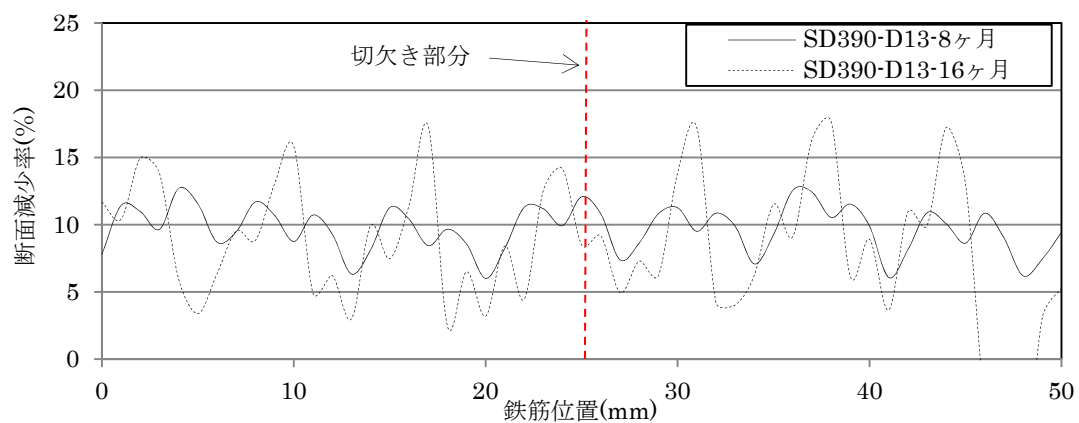


図 2.5.3-22 測定地点ごとの断面減少率(SD390・D13)

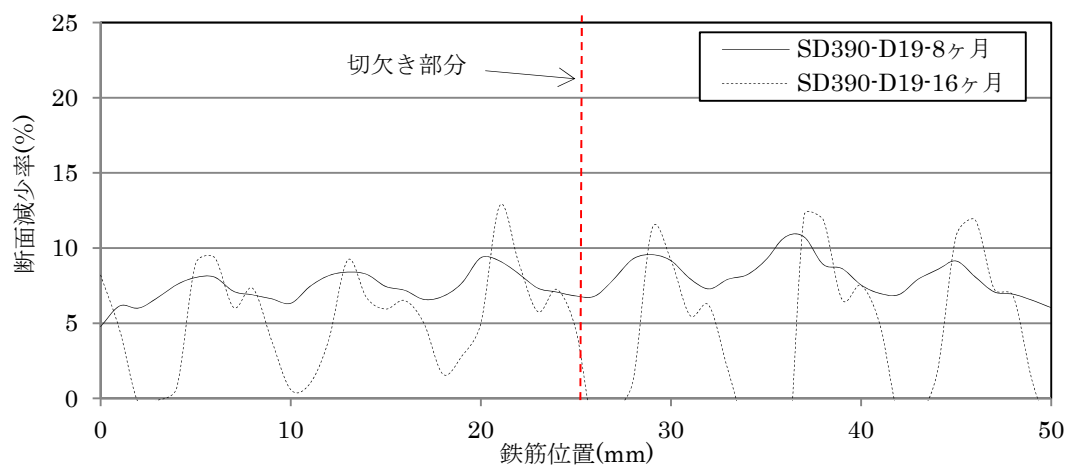


図 2.5.3-23 測定地点ごとの断面減少率(SD390・D19)

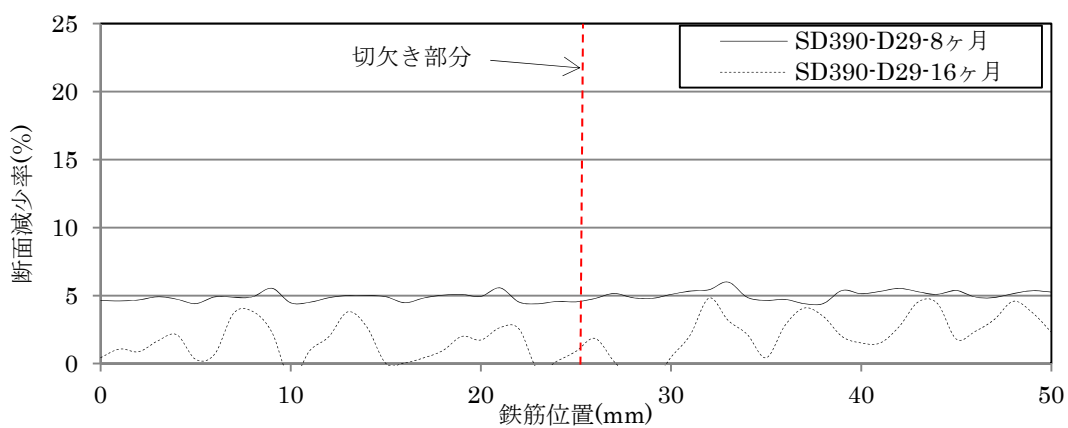


図 2.5.3-24 測定地点ごとの断面減少率(SD390・D29)

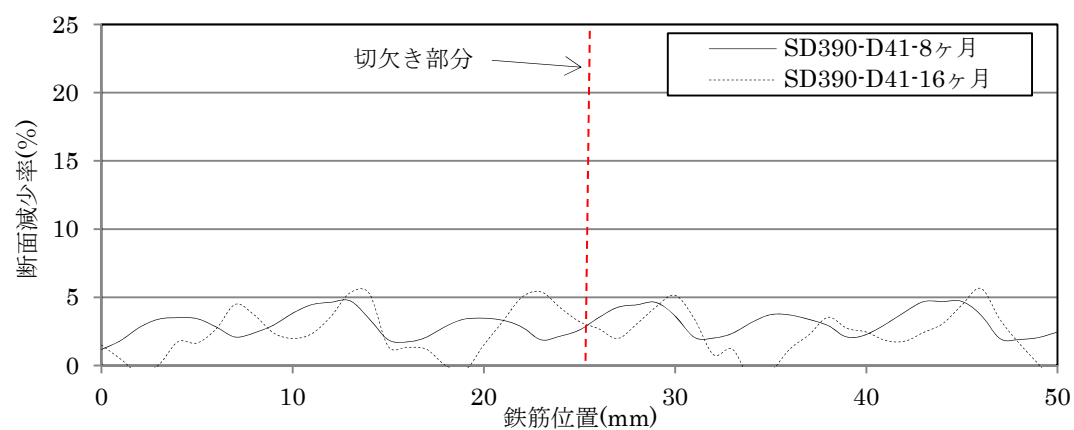


図 2.5.3-25 測定地点ごとの断面減少率(SD390・D41)

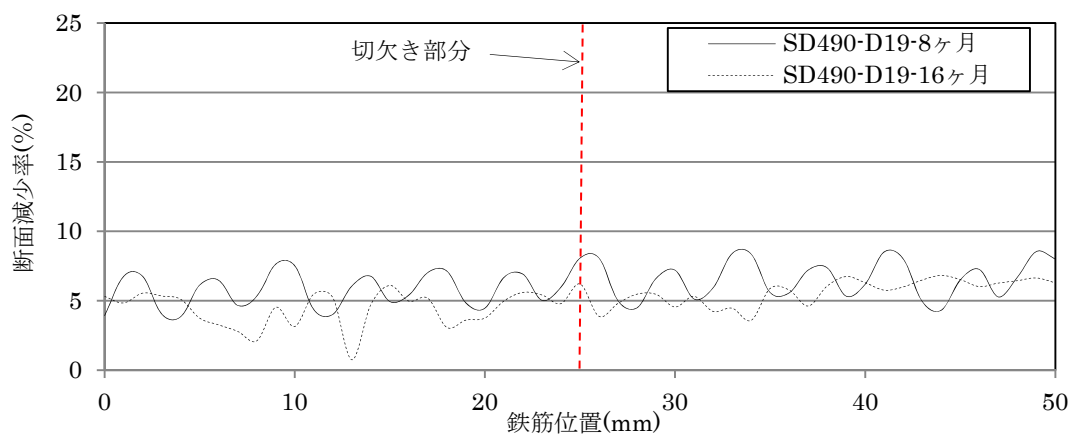


図 2.5.3-26 測定地点ごとの断面減少率(SD490・D19)

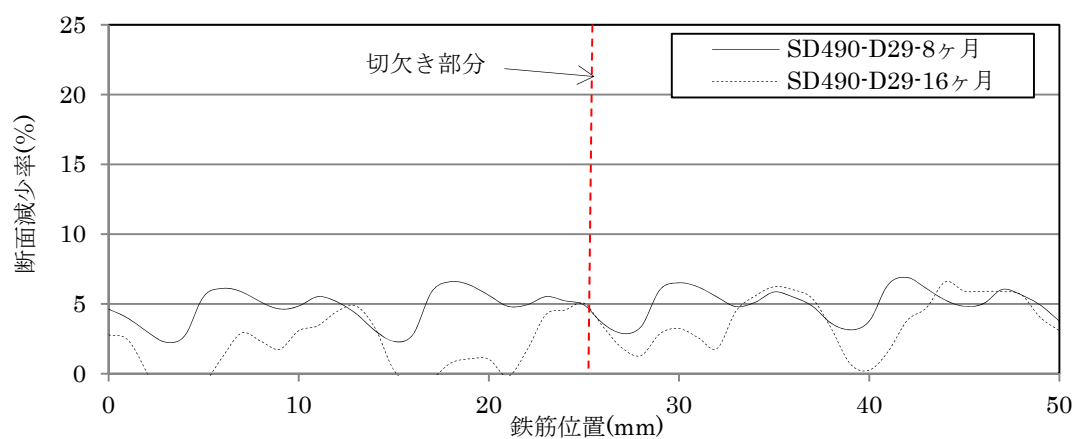


図 2.5.3-27 測定地点ごとの断面減少率(SD490・D29)

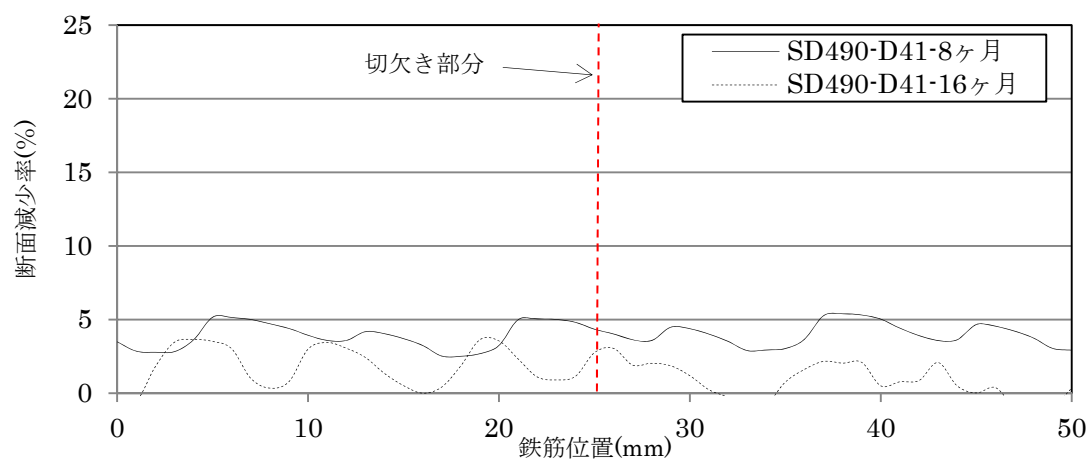


図 2.5.3-28 測定地点ごとの断面減少率(SD490・D41)

2) 降伏点残存率

図 2.5.3-29 に腐食した鉄筋の平均腐食断面減少率と降伏点残存率の関係、図 2.5.3-30 に腐食した鉄筋の最大腐食断面減少率と降伏点残存率の関係を示す。グラフ上には本年度得られたデータと一昨年得られたデータを合わせて掲載している。なお、降伏点は降伏荷重を公称断面積で除した見かけの値である。降伏点残存率は、腐食した鉄筋の降伏点を健全な鉄筋の降伏点で除した値である。鉄筋が腐食し、断面減少すると鉄筋の種類や径によらず降伏点は線形に低下している。また、その低下の割合は断面減少の割合とほぼ等しい。

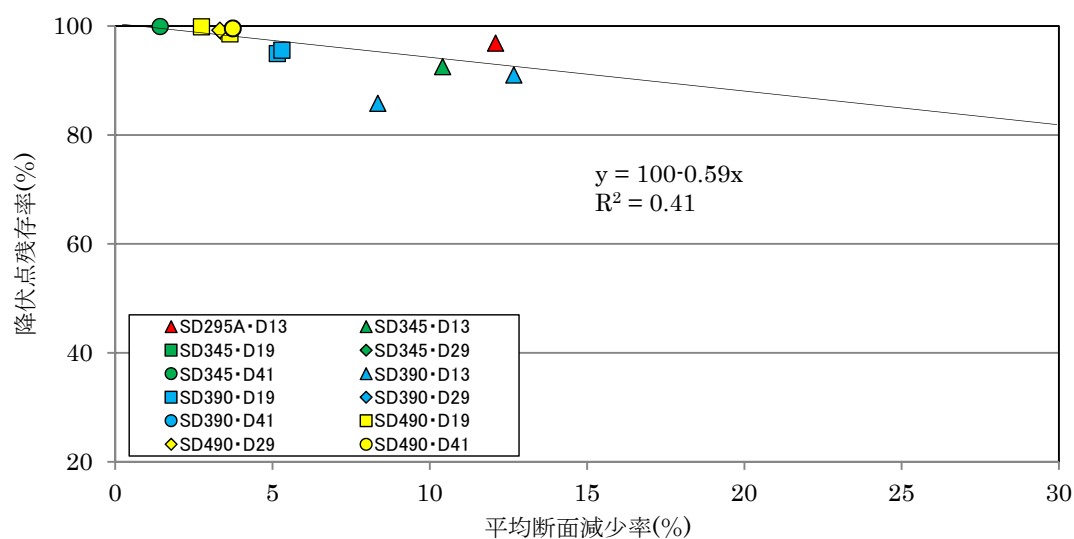


図 2.5.3-29 平均断面減少率と降伏点残存率の関係

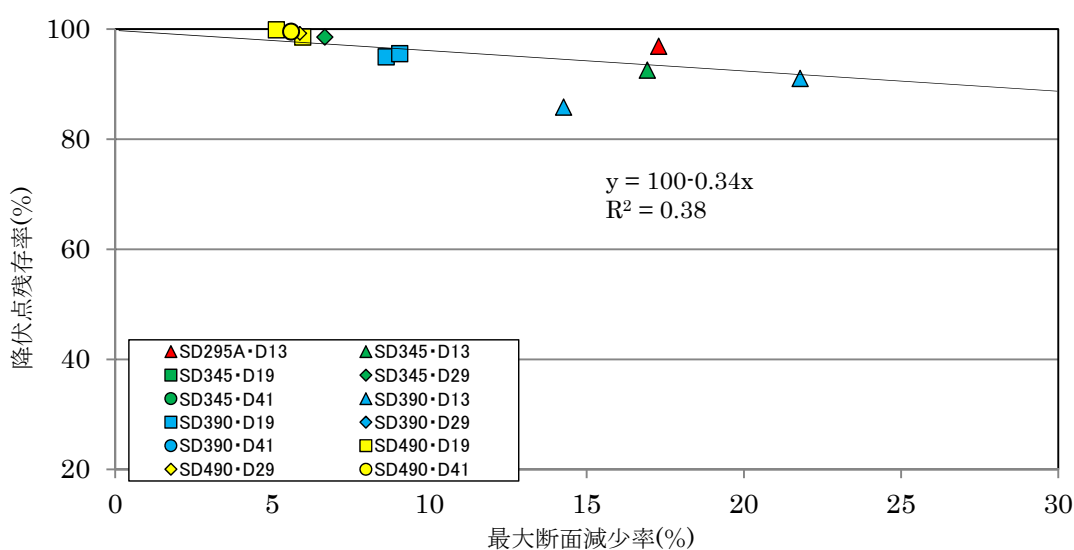


図 2.5.3-30 最大断面減少率と降伏点残存率の関係

3) 引張強さ残存率

図 2.5.3-31 に腐食した鉄筋の平均腐食断面減少率と引張強さ残存率の関係、図 2.5.3-32 に腐食した鉄筋の最大腐食断面減少率と引張強さ残存率の関係を示す。グラフ上には本年度得られたデータと一昨年得られたデータを合わせて掲載している。鉄筋が腐食し、断面減少すると鉄筋の種類や径によらず引張強さは線形に低下している。

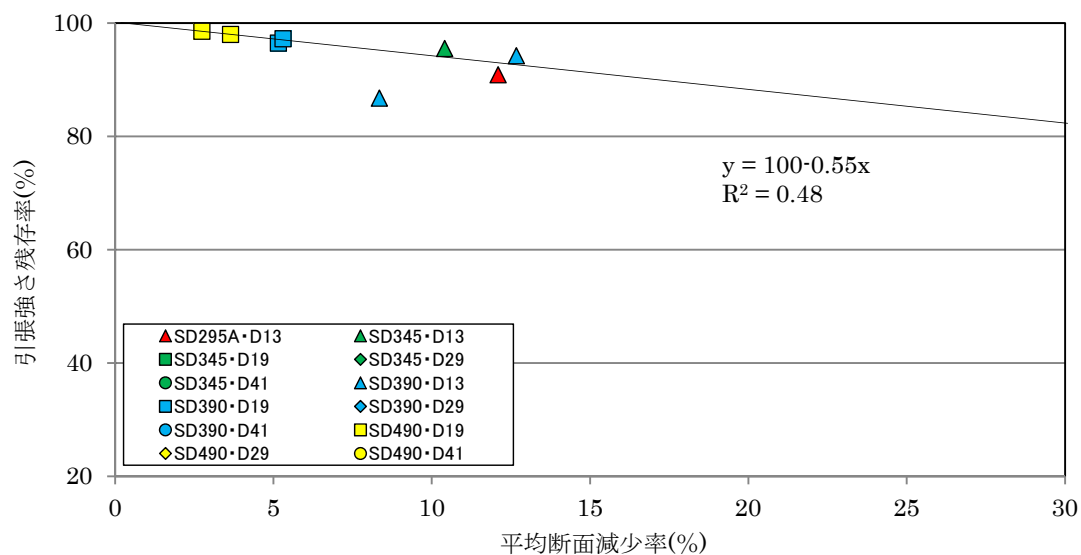


図 2.5.3-31 平均断面減少率と引張強さ残存率の関係

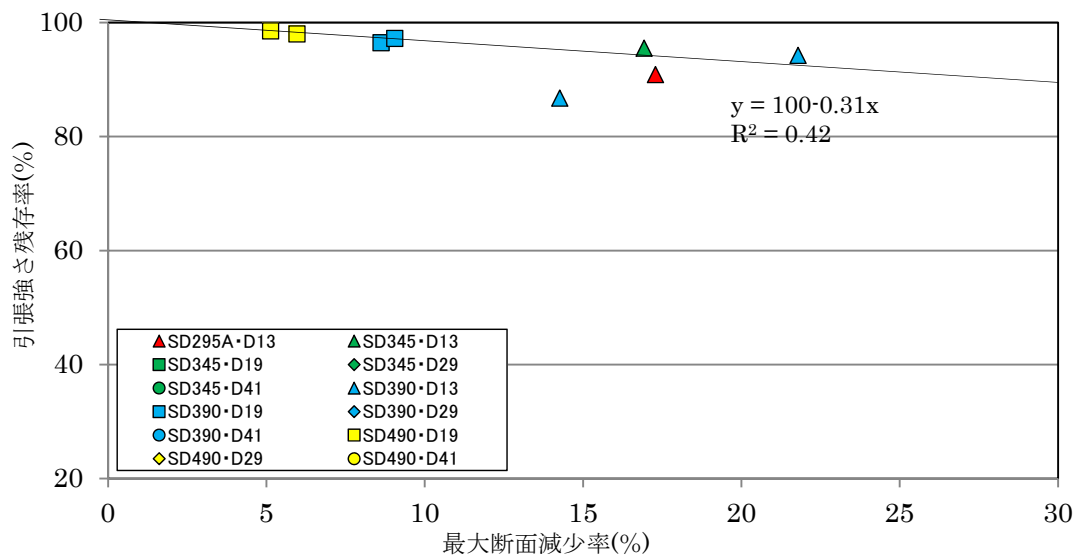


図 2.5.3-32 最大断面減少率と引張強さ残存率の関係

(3) 各腐食方法の比較

本試験における降伏点残存率、引張強さ残存率、ヤング係数残存率のそれぞれの線形低下式の係数 β の一覧を表 2.5.3-1 に示す。

$$y=100-\beta x \quad (2.5.3-2)$$

ここで y :各種残存率、 β は線形低下係数、 x は断面減少率とする。

本年度の成果と一昨年度の電食の成果を合わせて掲載している。電食による腐食試験や塩水噴霧試験による腐食試験等、同一試験で平均腐食断面減少率と最大腐食断面減少率を比較すると、平均腐食断面減少率の方が強度低下度は大きい。最大断面減少率と降伏点、及び引張強さの関係図はもっとも腐食断面減少した地点における強度低下を示しているため、実際の強度低下の傾向と近い結果が出ていると考えられる。

表 2.5.3-1 腐食方法ごとの線形低下係数一覧

腐食方法		腐食断面減少率	降伏点残存率	引張強さ残存率	ヤング係数残存率
電食*		平均	1.07	1.05	1.30
		最大	0.77	0.77	0.92
塩水噴霧	鉄筋単独腐食**	平均	1.17	0.49	2.66
		最大	0.68	0.56	1.60
	コンクリート中の鉄筋腐食	平均	0.59	0.55	-
		最大	0.34	0.31	-

*:一昨年度の成果
**:一昨年度の成果を含む

2.5.4 まとめ

本研究から得られた知見を以下に示す。

- ① 鉄筋単独腐食において、広範囲の鉄筋径、種類において、降伏点、引張強さ、ヤング係数は鉄筋の断面減少率の間には 良い対応があり、断面減少率の値が高くなると、鉄筋の降伏点、引張強さ、ヤング係数はいずれも線形に低下する。
- ② 鉄筋単独腐食において、鉄筋強度の低下は、最大断面減少率よりも平均断面減少率と関係の方が低下の割合が大きくなる。
- ③ コンクリート中の鉄筋腐食において、広範囲の鉄筋径、種類において、降伏点、引張強さと、鉄筋の断面減少率の間には 良い対応があり、断面減少率の値が高くなると、鉄筋の降伏点、引張強さはいずれも線形に低下する。
- ④ コンクリート中の鉄筋腐食において、鉄筋強度の低下は、最大断面減少率よりも平均断面減少率と関係の方が低下の割合が大きくなる。

以上より、鉄筋腐食による断面減少 D に対して構造物の性能 P は線形に低下することが分かり、定式化の検討において、表 2.5.3-1 に示す通り線形低下係数 β を導出することができた。この断面減少率 D と構造物の性能 P との関係は長期健全性評価での P - D 曲線に反映できる。

2.6 鉄筋コンクリート部材の劣化による構造性能の低下に関する検討

2.6.1 鉄筋腐食による腐食膨張ひび割れ挙動に関する検討

(1) はじめに

近年、高度経済成長期に急ピッチで建設された数多くの鉄筋コンクリート（以下「RC」という。）構造物の経年劣化に注目が集まっており、RC 構造物の長期健全性評価手法を確立することが RC 構造物の補修・補強計画及び安全利用上の寿命の予測をするうえで急務となっている。特に、海岸付近に建設される原子力発電施設の RC 構造物にとって、塩害による鉄筋腐食は最も深刻な経年劣化の一つである。しかしながら、塩害を受けた RC 構造物の健全性の評価には適切な方法が確立されておらず、現在のところ塩害による鉄筋腐食の程度を正確に評価するには、コンクリートから腐食鉄筋を研出し鉄筋の質量減少を測定する必要がある、使用中の RC 構造物から鉄筋を研出すことは時間・費用の面で実用的ではない。

そのため、昨年度まで実際の RC 部材における配筋を考慮した促進腐食実験を行い、鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅及び主筋の腐食による横補強筋のひずみ上昇などを明らかにしてきた。しかしながら、各鉄筋の腐食量（質量減少）は、促進実験終了後に鉄筋をコンクリートから取り出し、10%クエン酸アンモニウム水溶液中及びワイヤーブラシで腐食生成物を完全に除去した後に行っており、実測値は最終腐食量のみであった。促進腐食実験途中の腐食量は積算電流量に比例するとし、線形補完して推定した。この推定腐食量を用いると、腐食膨張ひび割れが表面に到達した時点の腐食量を既往の実験結果^{73, 74, 75}と比較して過大評価となることが判明した。この要因として、腐食膨張ひび割れが表面に達する前は、塩化物イオンや酸素の供給が少なく、腐食速度が小さくなることも考えられる。したがって鉄筋腐食量の推定を高度化するためには、要素試験体を多数用意し、腐食ひび割れ発生前後の腐食量を複数回実測することによって、腐食ひび割れ前の腐食進展期と腐食ひび割れ後の腐食加速期の腐食速度の相違を明らかにする必要がある。

今年度は繰り返し数3の要素実験を行うことによって、腐食ひび割れ発生前の腐食進展期と発生後の腐食加速期の腐食速度の相違を明らかにする。さらに鉄筋の腐食膨張ひび割れに伴う割裂強度の低下を定量的に把握し、引張強度低下による剥落危険度を評価する手法を提案することによって、RC 構造物の長期健全性評価を高度化する。

⁷³ C. Andrade, C. Alonso, and F. J. Molina : Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I – Experimental test, *Materials and Structures*, 26, pp.453-464, 1993

⁷⁴ 橘高義典, LE PHONG NGUYEN, 塚越正行, 松沢幸一：鉄筋コンクリート表面のひび割れ発生時の鉄筋腐食量に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.33, No1, pp. 1145-1150, 2011.7

⁷⁵ Kim Vu, Mark G. Stewart, and John Mullard : Corrosion-Induced Cracking: Experimental Data and Predictive Models, *ACI Structural Journal*, 102 (5), pp. 719-726, 2005.10

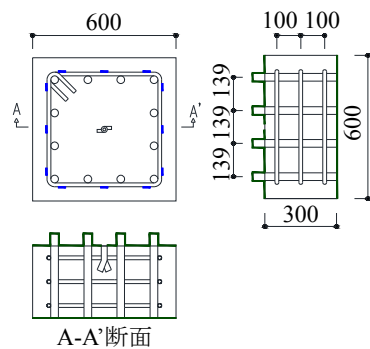
(2) 促進腐食実験

1) 試験体概要

平成 26 年度の促進腐食試験体のうち、実験が終了しなかったかぶり厚 60 mm 試験体 12-C60 に対し、促進腐食を継続した。昨年度試験体と合わせて、12-C60 の試験体諸元を表 2.6.1-1 に示す。また試験体 12-C60 の配筋図を図 2.6.1-1 に示す。

表 2.6.1-1 RC 柱要素試験体諸元

試験体名	圧縮強度 (N/mm ²)	主 筋			横補強筋			かぶり厚さ (mm)
		配筋	p _t (%)	p _g (%)	外周筋	中子筋	p _w (%)	
12-F _c 48	44. 7	12-D32	0. 88	2. 65	D16 @100	－	0. 66	40
12-F _c 72	59							
12-F _c 24	22. 3							
8-F _c 48	44. 7	8-D38	0. 95	2. 53	D13 @100	D10 @100		
20-F _c 48		20-D25	0. 84	2. 82				
20-T-F _c 48								
20-T-F _c 72								
20-T-F _c 24	22. 3							
12-C20	44. 7	12-D32	0. 88	2. 65	D16@100	－		20
12-C60	44. 7	12-D32	0. 88	2. 65	D16@100	－	0. 66	60



注) 青色マーカーはひずみゲージ位置。
 注) 上下面はエポキシ樹脂による防水加工。
 注) 単位は mm

図 2.6.1-1 試験体 12-C60 の配筋図及びひずみゲージの貼付位置

2) 試験方法

図 2.6.1-2 に促進腐食試験の概念図を示す。試験体は 28 日間の気中養生後、側面からのみ塩化物イオンが侵入することを想定して上下面にエポキシ樹脂コーティングを施した。エポキシ樹脂硬化後、3%NaCl 水溶液に 24 時間浸漬し、通電を開始した。

かぶりコンクリート中の塩化物イオンの移動に関しては、拡散過程と考え、一次元拡散方程式をコンクリート表面の塩化物イオン濃度を一定 C_0 とした解である(2.6.1-1)式が一般によく用いられている⁷⁶。

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \quad (2.6.1-1)$$

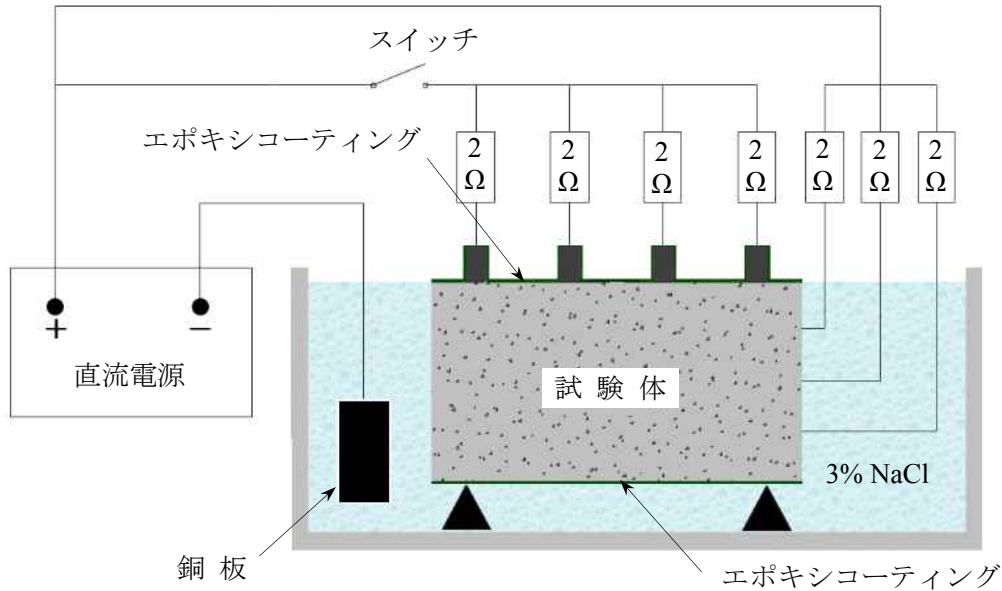
ここに、 $C(x, t)$ は深さ $x(\text{cm})$ 、時間 $t(\text{年})$ における塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_0 は表面の塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 D_{ap} は塩化物イオンの見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)であり、水セメント比 W/C の関数である(2.6.1-2)式を採用した。さらに、 $\operatorname{erf}(s)$ は誤差関数(2.6.1-3)式である。

$$\log_{10} D = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (2.6.1-2)$$

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \quad (2.6.1-3)$$

⁷⁶ 土木学会：コンクリート標準示方書、維持管理編、2007.3

図 2.6.1-2 電食による柱要素試験体の促進腐食実験概念図



主筋と横補強筋とでは、かぶり厚さが異なるため、実際の RC 部材では塩化物イオン濃度も異なっている。腐食ひび割れがコンクリート表面に現れる劣化過程の進展期までは、内部鉄筋の腐食量が塩化物イオン濃度に比例するものとして、主筋と横補強筋の通電時間を制御できるように、主筋と横補強筋は個別に並列接続のリード線を接続し、さらに主筋側のリード線にはスイッチを設置した。主筋と横補強筋のかぶり厚さにおける塩化物イオン濃度を(1)式によって評価し、その比率に基づいて主筋の通電を OFF にした。主筋の回路を遮断した時間割合は、基準試験体で 50%程度、拡散係数の大きい Fc24 で 25%程度になった。腐食ひび割れ発生後の劣化過程の加速期に対しては、主筋の通電を ON に保持した。

3) 測定項目

測定項目は積算電流量・横補強筋ひずみ及び表面腐食ひび割れ幅である。積算電流量に関しては、促進腐食中の各鉄筋の腐食量は積算電流量に比例するとして推定するため、各鉄筋のリード線に 2Ω の抵抗を接続し、この抵抗間の電圧を 1 時間ごとにデータロガーで計測した。この電圧から各鉄筋に導入される電流を算定し、促進試験期間中(約 3 か月間)における積算電流量を随時求めた。また、横補強筋ひずみもデータロガーを使用し、1 時間ごとに各ゲージのひずみを計測した。

表面腐食ひび割れ幅の測定には、図 2.6.1-3 に示す分解能 $1/100\text{mm}$ のデジタルマイクロスコープを用いた。腐食ひび割れ幅の測定時には、に示すように試験体を塩化ナトリウム水溶液から引き上げた状態で行った。

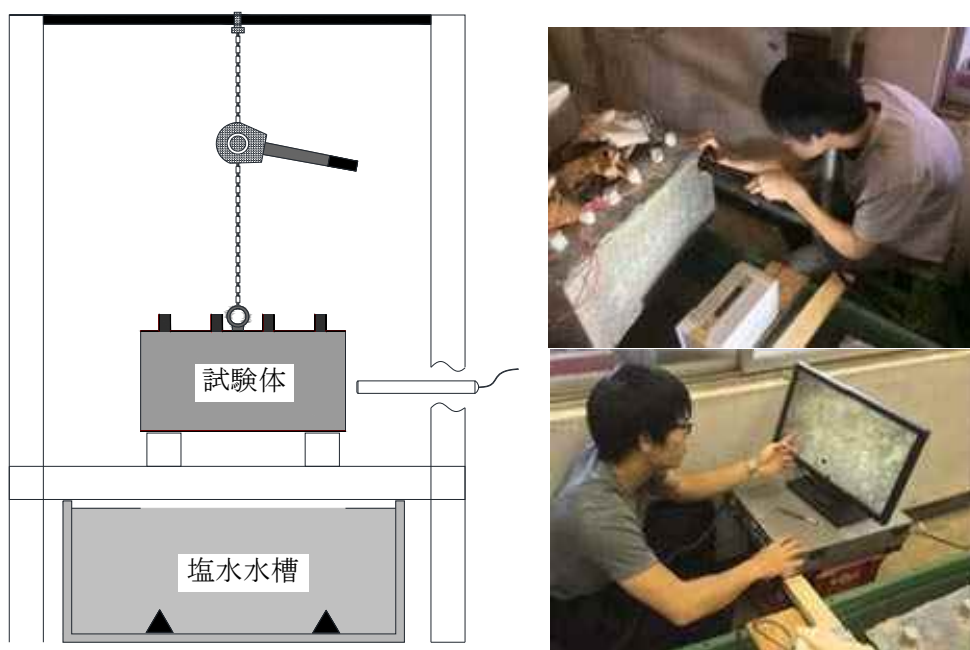


図 2.6.1-3 デジタルマイクロスコープによる腐食ひび割れ幅の計測

促進腐食試験終了後、コンクリート内部の腐食ひび割れ進展状況の観察及び鉄筋をコンクリートから取り出すためにかぶりコンクリートの斫り出しと鉄筋の取り出しを行った。図 2.6.1-4 に試験終了後の試験体から鉄筋を斫り出す様子を示す。かぶりコンクリートの斫り出しにはタガネとハンマー及び電動ハンマーを用いた。



図 2.6.1-4 鉄筋の取り出し

4) 質量減少率

表 2.6.1-2 に促進腐食試験による各鉄筋の最終腐食量の実測値 W_{loss} (mg/cm²) 及び積算電流量から予測した質量減少率 W_{cal} (mg/cm²) を昨年度の試験体と併せて示す。各試験体の主筋の腐食量は隅角部主筋と中間部主筋に分けて平均化し、横補強筋の腐食量は 3 本の平均である。全試験体を通した平均値を最終行に示す。中間部主筋に対して隅角部主筋の腐食量は全体の平均で約 2 倍となった。これは中間部では塩化物イオンの侵入が 1 方向からであるのに対し、隅角部では 2 方向から侵入することに起因していると考えられる。また一昨年度までの実験においても類似の試験結果が示されており、隅角部主筋の腐食量は中間部に対して 1.5 倍となる結果⁷⁷を得ている。しかし、一昨年度までの実験では、塩水はスポンジを通して梁試験体の下面に 1 方向から供給したため、今年度実験より、腐食量の差が小さかったと考えられる。

表 2.6.1-2 最終平均腐食量の計測値とファラデー則による計算値一覧

試験体名	主 筋								横補強筋			
	隅角部主筋				中間部主筋							
	(mg/cm ²)		(%)		(mg/cm ²)		(%)		(mg/cm ²)		(%)	
	W_{loss}	W_{cal}	W_{loss}	W_{cal}	W_{loss}	W_{cal}	W_{loss}	W_{cal}	W_{loss}	W_{cal}	W_{loss}	W_{cal}
12-Fc24	50	130	0.81	2.1	39	101	0.63	1.6	154	64	5.0	2.0
12-Fc48	57	107	0.92	1.7	19	118	0.30	1.9	141	96	4.5	3.1
12-Fc72	39	124	0.63	2.0	27	64	0.43	1.0	112	118	3.6	3.8
20-T-Fc24	82	110	1.6	2.2	50	112	1.0	2.2	212	66	8.5	2.7
20-T-Fc48	113	175	2.3	3.5	46	81	0.92	1.6	219	108	8.8	4.4
20-T-Fc72	60	146	1.2	2.9	29	76	0.58	1.5	134	87	5.4	3.5
8-Fc48	43	132	0.58	1.8	28	113	0.37	1.5	195	146	6.3	4.7
20-Fc48	46	173	0.93	3.5	43	113	0.86	2.3	132	86	4.2	2.7
12-C20	48	196	0.78	3.1	17	136	0.27	2.2	170	69	5.5	2.2
12-C60	29	129	0.46	2.1	20	85	0.32	1.4	97	105	3.1	3.4
平 均	57	142	1.0	2.5	32	100	0.57	1.7	157	95	5.5	3.2

注) 太字は、今年度実験終了試験体

⁷⁷ Aris ARYANTO, Yasuji SHINOHARA : Effect of Confinement and Concrete Strength upon Crack Behaviors Induced by Corrosion-Product Expansion for Reinforced Concrete Members, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), 日本建築学会構造系論文集, No.696, pp.305~313, 2014.2

横補強筋と主筋で W_{loss}/W_{cal} を比較すると、主筋は平均で 0.41(隅角部)と 0.32(中間部)であるのに対し、横補強筋は平均で 1.7 となり、主筋より 4 倍以上大きくなっている。この原因として、鉄筋表面で生じている腐食反応が横補強筋ではアノード側へ、主筋ではカソード側へ偏っていくマクロセルが形成されたと考えられる。マクロセルに関してはこれまで多くの研究⁷⁸が行われており、部材位置によって塩化物イオン濃度が不均一である場合には塩化物イオン濃度の高い部分の鉄筋においてアノード反応が卓越し、これ以外の部分にある鉄筋でカソード反応が起こるマクロセル回路が形成されることが知られている。本促進腐食試験では、塩害環境下の RC 構造物に、外部から浸透する塩化物イオン量が部材位置によって不均一となることを考慮し、主筋と横補強筋それぞれのかぶり位置における塩化物イオン濃度を評価し、主筋側の電流を ON/OFF している。このことにより塩化物イオン濃度の高い横補強筋の腐食速度が加速され、積算電流量から算出した予測腐食量より大きな腐食量となったと考えられる。

上述のように、実測による腐食量とファラデー則による腐食量に大きな差異があったため、以降、促進腐食中の腐食量は、積算電流量に比例していると仮定して最終的な積算電流量と実測腐食量から算出した換算値(Calibrated corrosion)を用いる。

⁷⁸ 土木研究所：塩害環境下にあるコンクリート中鉄筋のマクロセル腐食形成機構，土木研究所資料，土木研究所編，pp. 38，2009.1

5) 腐食ひび割れの発生

促進腐食を開始してから3日後、コンクリート強度の低いF_c24試験体、続いてかぶりの小さい12-C20試験体の上部横補強筋位置に沿って腐食膨張ひび割れが発生した。かぶりの大きい12-C60試験体を除くすべての試験体は、横補強筋上の腐食ひび割れ発生が主筋上の腐食ひび割れより先行した。表2.6.1-3に各試験体の表面に腐食ひび割れが最初に観測された位置と対応する鉄筋の換算腐食量及び腐食ひび割れ幅を横補強筋(上段)と主筋(下段)に分けて示す。主筋上の腐食ひび割れは最終腐食量の大きい隅角部位置で発生している。

表 2.6.1-3 腐食ひび割れが現れた時点の位置と腐食量

試験体名	発生位置	腐食量 (mg/cm ²)		ひび割れ幅 (mm)
		実験値	実験値／ (2.6.1-4)式	
12-F _c 24	横補強筋-上 主筋-南面東	14	24	0.08
		17	17	0.08
12-F _c 48	横補強筋-下 主筋-東面北	38	25	0.01
		46	18	0.12
12-F _c 72	横補強筋-下 主筋-南面西	28	25	0.02
		23	18	0.08
20-T-F _c 24	横補強筋-上 主筋-東面南	17	29	0.01
		24	20	0.12
20-T-F _c 48	横補強筋-上 主筋-南面東	75	31	0.06
		49	21	0.14
20-T-F _c 72	横補強筋-下 主筋-南面東	51	31	0.13
		23	21	0.02
8-F _c 48	横補強筋-上 主筋-西面南	61	24	0.03
		17	14	0.15
20-F _c 48	横補強筋-下 主筋-北面東	49	25	0.01
		33	22	0.11
12-C20	横補強筋-上 主筋-東面南	18	12	0.03
		18	11	0.05
12-C60	横補強筋-上 主筋-東面北	75	38	0.10
		23	24	0.05

さらに、塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度(%/年)は、塩化物イオン供給状況や温湿度等の環境条件に大きく影響⁷⁹⁾されるが、腐食ひび割れがコンクリート表面に到達する鉄筋腐食量 W_{cr} (mg/cm²)に関しては、かぶりと鉄筋径の比に依存する簡便な式が提案⁸⁰⁾されている。(2.6.1-4)式による腐食量も比較のため表 2.6.1-3 に示す。

$$W_{cr} = 10 \times d / \phi \quad (2.6.1-4)$$

ここに、 d ：かぶり(mm)、 ϕ ：鉄筋径(mm)である。

コンクリート強度の低い F_c24 試験体の上部横補強筋位置の腐食膨張ひび割れが早期に発生したのは、コンクリート強度やブリージングによるセメント硬化体の空隙が影響したと思われる。しかしながらコンクリート強度が高くなるとブリージングの影響が少なくなり、下部横補強筋位置に沿う腐食膨張ひび割れが先行している。これは Aris ら⁸¹⁾や Kukrit ら⁸²⁾ が指摘するように、セメント硬化体の空隙が少なくなると腐食生成物が空隙に拡散できず、周囲のコンクリートに対する膨張圧が高くなるため、より少ない腐食量でひび割れを形成する可能性が高くなることに起因していると思われる。さらにコンクリート強度の異なる試験体 12-または 20-T-F_c24、F_c48、F_c72 の腐食ひび割れが表面に到達する腐食量を比較すると、F_c24 が最も小さく、F_c48 で最大となり、F_c72 では再び腐食量が小さくなる傾向を示した。コンクリート強度が高くなると引張強度の増加によりひび割れに対する抵抗性も増加するが、セメントペーストの空隙量⁸³⁾が少なくなり、腐食生成物がひび割れ面に集中する。その結果 F_c72 では強度が上昇したにもかかわらず表面腐食ひび割れ発生時の腐食量が小さくなったと考えられる。またコンクリート強度が同じでかぶりの異なる試験体 12-C20、12-F_c48、12-C60 を比較すると、かぶりが 20 mm から 20 mm 厚くする毎に、横補強筋上の腐食ひび割れ発生時の腐食量は倍増していることが分かる。

⁷⁹⁾ 松林裕二、榊田佳寛、笹渕優樹：塩化物を含んだコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する屋外暴露実験 日本建築学会構造系論文集、No.536、pp. 9-15、2000.10

⁸⁰⁾ 土木学会：鉄筋腐食・防食及び補修に関する研究の現状と今後の動向（その2）、コンクリート技術シリーズ 40、pp. 185-193、2000.12

⁸¹⁾ Aris ARYANTO、Yasuji Shinohara：Effect of Confinement and Concrete Strength upon Crack Behaviors Induced by Corrosion-Product Expansion for Reinforced Concrete Members、日本建築学会構造系論文集、Vol.79、No.696、pp. 305-313、2014.2

⁸²⁾ Kukrit Toongonthong、Koichi Maekawa、：Simulation of Coupled Corrosive Product Formation、Migration into Crack and Propagation in Reinforced Concrete Sections、Journal of Advanced Concrete Technology Vol.3、No.2、pp. 253-265、2005.6

⁸³⁾ 田中享二、胡桃澤清文：セメント硬化体の細孔観察手法の開発、日本建築学会構造系論文集、No.532、pp. 21-26、2009.6

(2.6.1-4)式による推定腐食量に対する実験による換算腐食量の比実験値/(2.6.1-4)式は、0.6~2.6 と大きなばらつきを示している。そこで腐食ひび割れが観測された全主筋及び上部と下部横補強筋の腐食ひび割れ発生時の換算腐食量を d/ϕ に対して図 2.6.1-5 に示す。図 2.6.1-5 には、他の研究者のデータも白抜きで併せてプロットしており、実線は(2.6.1-4)式、破線は(2.6.1-4)式の3倍の腐食量を示している。実験データの大部分は実線と破線の間にあり、実験結果は(2.6.1-4)式による腐食ひび割れ発生時の推定腐食量より大きな腐食量を示している。本実験では、促進腐食実験終了後の質量減少のみ実測し、実験中の腐食量は積算電流量に比例すると仮定した換算腐食量を用いているが、表面腐食ひび割れ発生までは塩化物イオンや酸素の供給が少なく、腐食速度が小さくなることも考えられる。このことによって、実験による腐食量が(2.6.1-4)式より大きくなった可能性もあり、腐食ひび割れ発生までの腐食量に関しては、今後詳細に検討する必要がある。

さらに、最初に腐食ひび割れを確認した時点の腐食ひび割れ幅は、確認が遅れた 20-T-F₆72 の横補強筋上の腐食ひび割れ、及び横補強筋から流出した腐食生成物の影響で観測が難しくなった一部の主筋上の腐食ひび割れを除くと、すべて 0.1mm 以下であった。

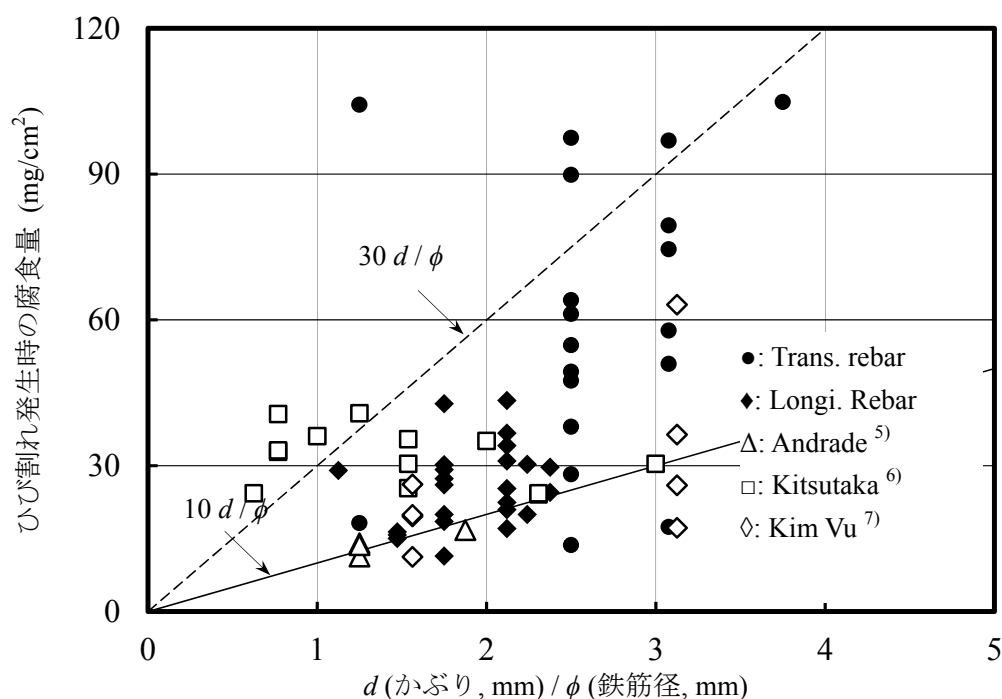


図 2.6.1-5 腐食ひび割れ発生時の腐食量と d/ϕ の関係

6) 腐食ひび割れの進展挙動

図 2.6.1-6 に促進腐食開始から約 1 か月経過後の基準試験体 12-F_c48 に対し、コンクリート強度の異なる 12-F_c24 と 12-F_c72 試験体及びかぶり厚さの異なる 12-C20 と 12-C60 試験体の腐食ひび割れ性状を比較して示す。いずれの試験体も同じ電圧(10V)を用いて促進腐食試験を行っているが、電流は各試験体さらに各鉄筋によって異なるため、積算電流量に基づいて換算した各試験体の主筋と横補強筋の平均腐食量を表 2.6.1-4 に示す。主筋と横補強筋ともに、コンクリート強度が高いほど、またかぶりが厚いほどコンクリート内部への塩化物イオンの侵入に対する抵抗性が高くなるため、積算電流量が小さくなり換算腐食量も小さくなっている。

図 2.6.1-6 の写真から、換算腐食量が小さくなった高強度コンクリート 12-F_c72 試験体及び厚いかぶり 12-C60 試験体の表面には、コンクリートの劣化の予兆であるエフロレッセンスが見られるものの腐食生成物の流出はなかった。一方、12-F_c24 と 12-C20 試験体は表面に腐食ひび割れが見られるとともに、大量の腐食生成物がひび割れを通して流出していることがわかる。

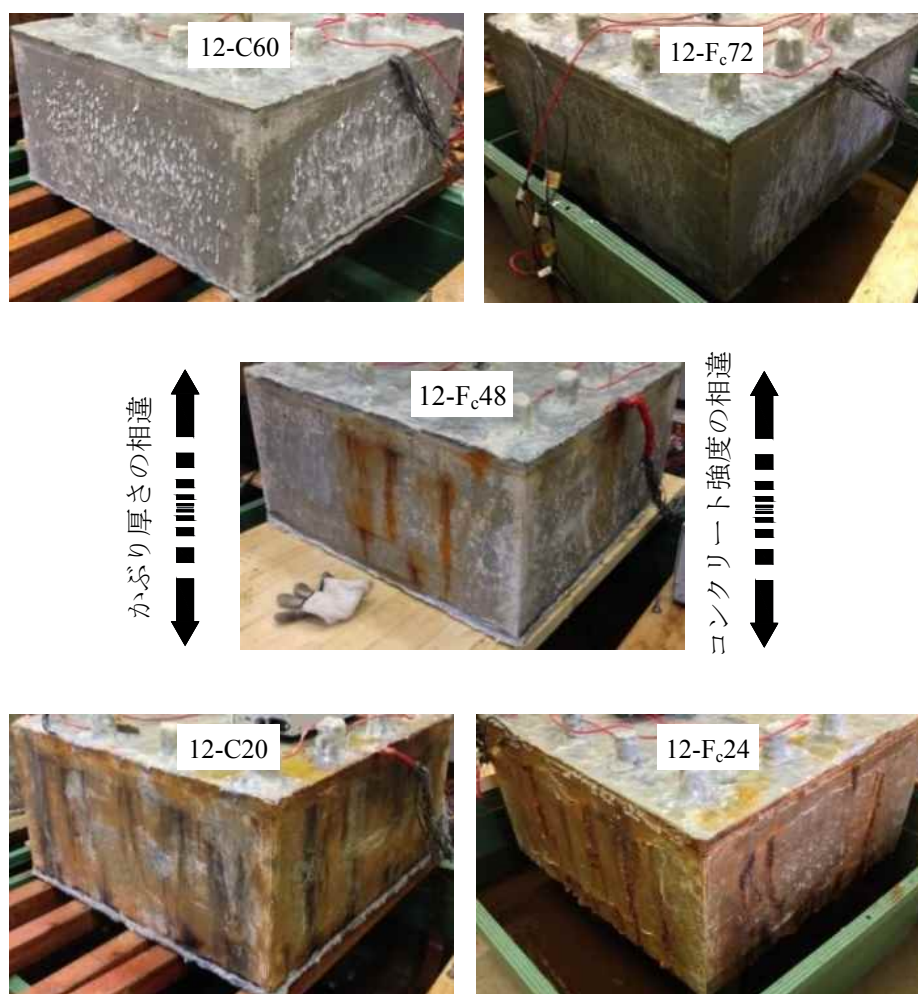
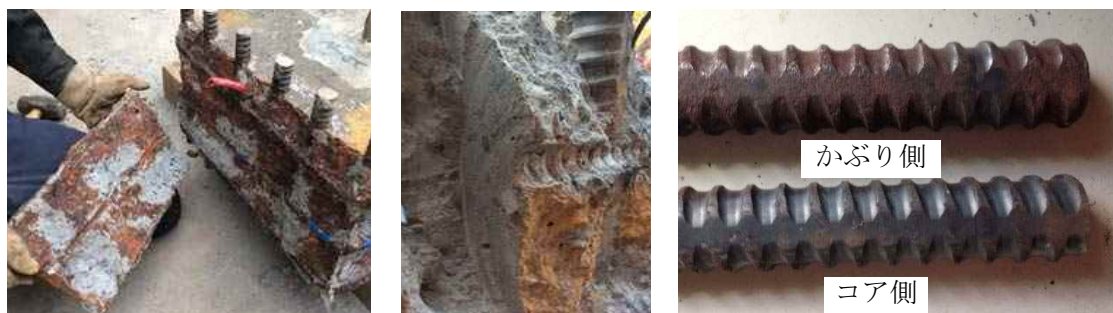


図 2.6.1-6 最終腐食ひび割れ性状

表 2.6.1-4 通電開始約 1 か月後の換算腐食量

試験体名	平均換算腐食量 (mg/cm ²)	
	主筋	横補強筋
12-F _c 24	45	150
12-F _c 48	21	61
12-F _c 72	12	39
12-C20	33	170
12-C60	8.0	29

図 2.6.1-7 に促進腐食試験終了後の試験体内部における腐食生成物の浸透状況とひび割れ面の形成の様子を示す。図 2.6.1-7 (a)に示すように、腐食生成物は主筋間及び横補強筋間に大量に残留しており、かぶりコンクリートをコア部から切り離すような腐食ひび割れが形成されている。この腐食ひび割れ進展のため、タガネとハンマーによる打撃によって容易にかぶりコンクリートを外すことができた。腐食生成物は横補強筋間で連結するひび割れ面及び上下の横補強筋からかぶりコンクリート表面へ達するひび割れ面に最も多く残留していた。このことから鉄筋に沿う腐食ひび割れが発生しなかった中間部の主筋及び横補強筋の腐食生成物も、浸透の容易な上下の横補強筋上の腐食ひび割れを通してコンクリート表面へ流出したと思われる。図 2.6.1-7 (b)は、かぶりコンクリートと鉄筋を取り外した後、コア側コンクリートをダイヤモンドカッターによって切断した断面である。横補強筋よりコア側では、腐食生成物の浸透によるひび割れ進展は確認できず、コア側への腐食生成物の侵入がないことを示している。



(a) かぶりコンクリート (b) コアコンクリート (c) 鉄筋の腐食性状 の相違

図 2.6.1-7 腐食生成物の侵入経路と鉄筋の腐食性状

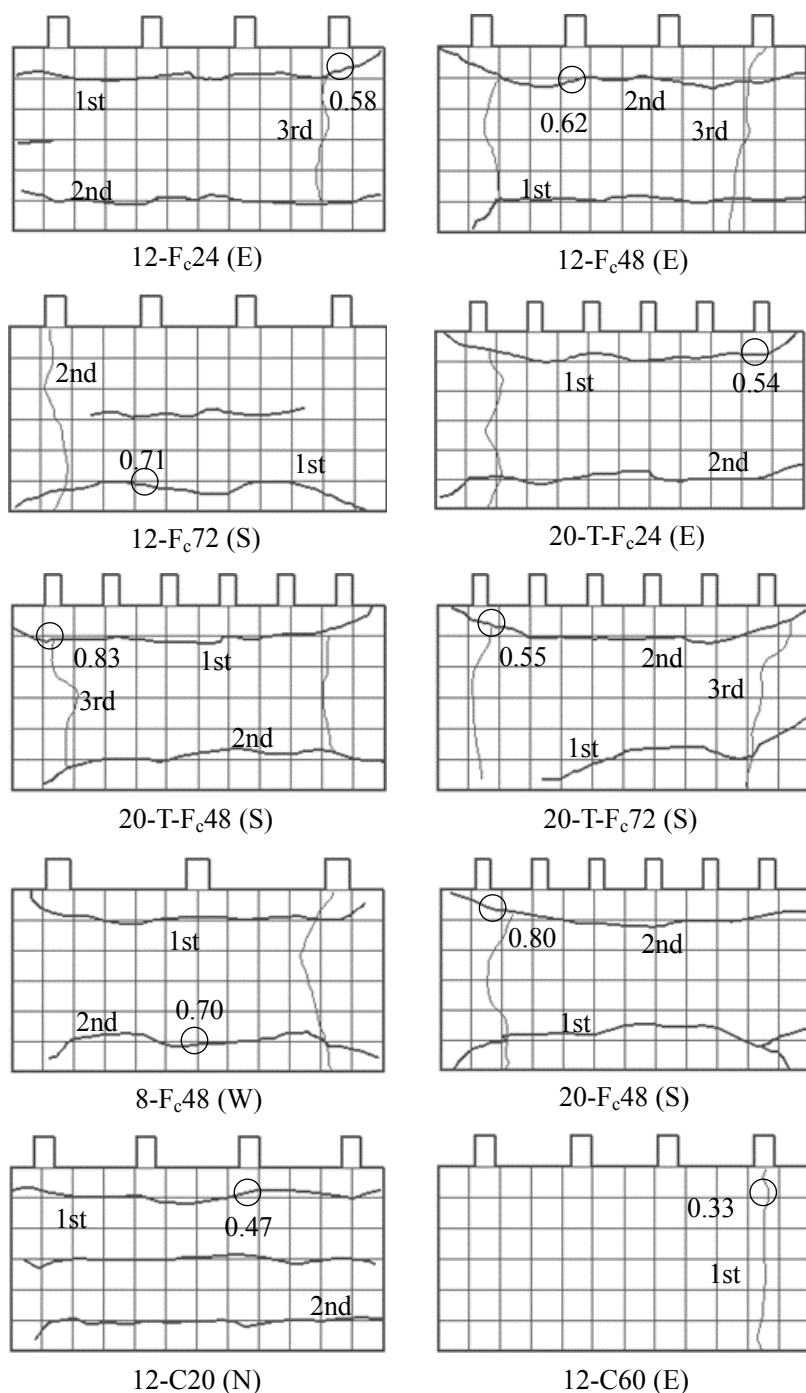
以上のことから、上下の横補強筋上の腐食ひび割れが先行してコンクリート表面まで達したために、腐食生成物がコア側へ浸透せず、抵抗の少ないひび割れ面が腐食生成物の流

出経路となったと想定される。

図 2.6.1-7 (c)は、塩化物イオンが侵入するかぶり側とコア側の鉄筋の腐食性状を比較するため、最も太径の 8-F_c48 試験体の主筋(D38)を示しているが、その他の鉄筋も同様の腐食性状となった。かぶり側の表面には一部孔食も見られるが、コア側の表面はほとんど腐食していない。このことから、塩害のように短期間に鉄筋腐食が進行する場合、コアコンクリートの強度特性に及ぼす影響は限定的となり、かぶりコンクリートの剥落、鉄筋の断面減少による曲げ耐力、横補強筋のひずみ上昇によるせん断耐力が問題になると思われる。

7) 最終腐食ひび割れ性状

図 2.6.1-8 に各試験体の促進腐食試験終了時において、最大腐食ひび割れ幅を記録した面のひび割れ図を示す。E、W、S、N は東西南北の方位を示し、○と数値で最大腐食ひび割れの位置と幅(mm)を記している。



○: 最大ひび割れ幅位置とひび割れ幅 (unit: mm)

図 2.6.1-8 最大ひび割れ幅を記録した面における最終腐食ひび割れ性状の比較

図 2.6.1-8 に示すように、主筋上の腐食ひび割れが先行した 12-C60 以外の最大ひび割れ幅は、上下に配した横補強筋上で記録されており、中間に配した横補強筋及び主筋に沿う腐食ひび割れは少なくなっている。これは前述したように、上下の横補強筋に沿ったコンクリート表面の腐食ひび割れが先行し、流出が容易になったことによって、腐食生成物がこのひび割れ面に集中したことと整合している。

また、主筋上の腐食ひび割れは全試験体を通して隅角部主筋のみに現れた。表 2.6.1-2 に示した通り、中間部主筋に対して隅角部主筋の質量減少率が 2 倍以上となったことに起因していると考えられる。

8) 横補強筋の腐食量と腐食ひび割れ幅の関係

前項で述べたように、主筋の腐食量は横補強筋に比べて小さく、さらにその腐食生成物の一部は早期に形成された上下の横補強筋に沿う腐食ひび割れを通してコンクリート表面に流出したため、主筋に沿う腐食ひび割れの成長は比較的小さくなった。それ故、コンクリート表面の腐食ひび割れが最も拡幅した横補強筋 (図 2.6.1-8 参照) について、換算腐食量がひび割れ挙動に影響を与える各パラメータを考察する。横補強筋上の腐食ひび割れ幅は、主筋からの腐食生成物を含んでいるため、単筋で行う腐食実験より大きくなる可能性があるが、実構造物の配筋を考慮すると妥当な評価基準になると思われる。

図 2.6.1-9 にコンクリート強度 (a) 12- F_c 24、 F_c 48、 F_c 72 と (b) 20-T- F_c 24、 F_c 48、 F_c 72、主筋径(c) 8、12、20- F_c 48 及びかぶり(d) 12-C20、C40、C60 による腐食ひび割れ挙動を比較して示す。横軸は対象とする横補強筋(12- F_c 72、8- F_c 48 試験体は下部、その他は上部横補強筋)の換算腐食量(mg/cm^2)、縦軸は対象とする横補強筋上の各面で計測した最大腐食ひび割れ幅の平均値である。

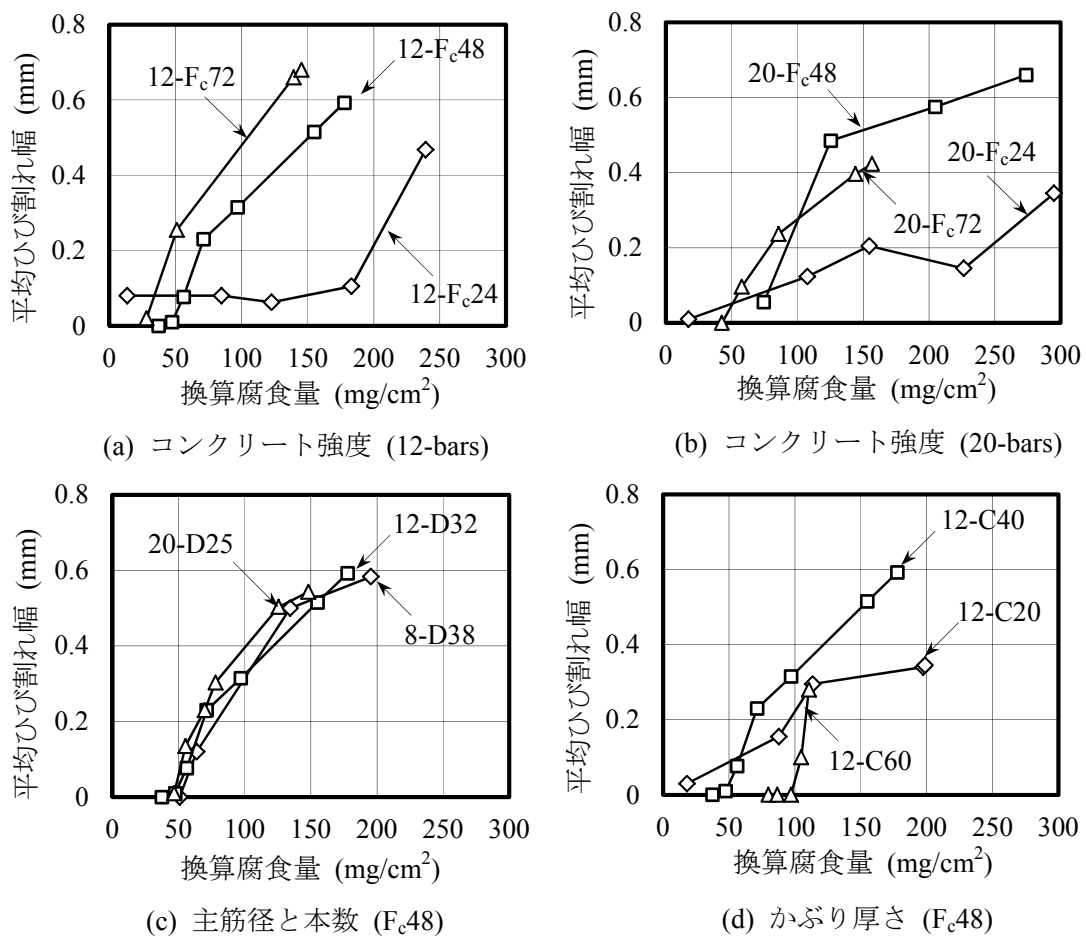


図 2.6.1-9 横補強筋の腐食ひび割れ挙動に影響を及ぼす各パラメータの比較

図 2.6.1-9 の全体を通して、表 2.6.1-3 に示したひび割れ発生時の腐食量に相当する 20 から 70 mg/cm² 程度から腐食ひび割れ幅が増加している。しかしながら腐食ひび割れ幅が 0.2mm を超えると、ひび割れを通して腐食生成物の流出が多くなるため(Fig.6)、腐食ひび割れの拡幅速度が低下する傾向がある。

図 2.6.1-9 (a)と(b)から、コンクリート強度が低い F_c24 試験体は腐食量が 200 mg/cm² 程度まで腐食ひび割れ幅の増加が小さくなっている。田中ら⁸⁴は水セメント比が大きくなるとセメントペースト内の空隙が増加することを示しており、腐食生成物が鉄筋周りの空隙に拡散することに起因していると考えられる。一方、コンクリート強度が高くなると、セメントペースト内の空隙量が減少し、腐食生成物がひび割れ面に集中するため、より少ない腐食量でひび割れが急速に拡幅している。また図 2.6.1-9 (c)は、主筋径及び本数の異なる試験体の比較であるが、腐食ひび割れ幅の上昇傾向(グラフの傾き)はほぼ同程度であった。各試験体のコンクリート強度 F_c48、かぶり 40mm 及び横補強筋 D16 が同一であり、さらに主筋量も同じであることを考慮すると、予想できる結果である。さらに図 2.6.1-9 (d)は、かぶりの異なる試験体の比較であるが、かぶりの小さい C20 試験体は、腐食生成物がかぶりコンクリートのひび割れを通して流出するのが容易になり、腐食ひび割れの拡幅は小さくなっている。一方、かぶりの大きい C60 試験体は、かぶりコンクリートが多くの腐食生成物を吸収するため、腐食ひび割れが表面に達するまでに多くの腐食量を必要としている。

⁸⁴ Tanaka, K. and Kurumisawa, K.: Development of technique for observing pores in hardened cement paste. Cement and Concrete Research Vol.32, pp.1435-1441, 2001

9) 鉄筋腐食膨張ひび割れに伴う横補強筋のひずみ上昇

Aris ら⁸⁵の RC 梁の促進腐食実験では、ひずみゲージの保護と一定拘束力の確保のため、横補強筋にビニールテープを巻いて防食処置を施した。その結果、主筋に沿う腐食ひび割れのみ発生し、腐食ひび割れの拡幅と共にひび割れを横切る横補強筋のひずみが上昇した。このように、ひび割れ幅と補強筋ひずみには強い相関があり⁸⁶、横補強筋のひずみ挙動を検討することによって、コンクリート内部の腐食ひび割れ損傷を推定することができる。そこで図 2.6.1-10 に、各試験体で最大ひずみを記録した横補強筋のひずみとそのひずみ上昇に最も影響を及ぼす横補強筋に接する主筋の平均腐食量との関係を示す。

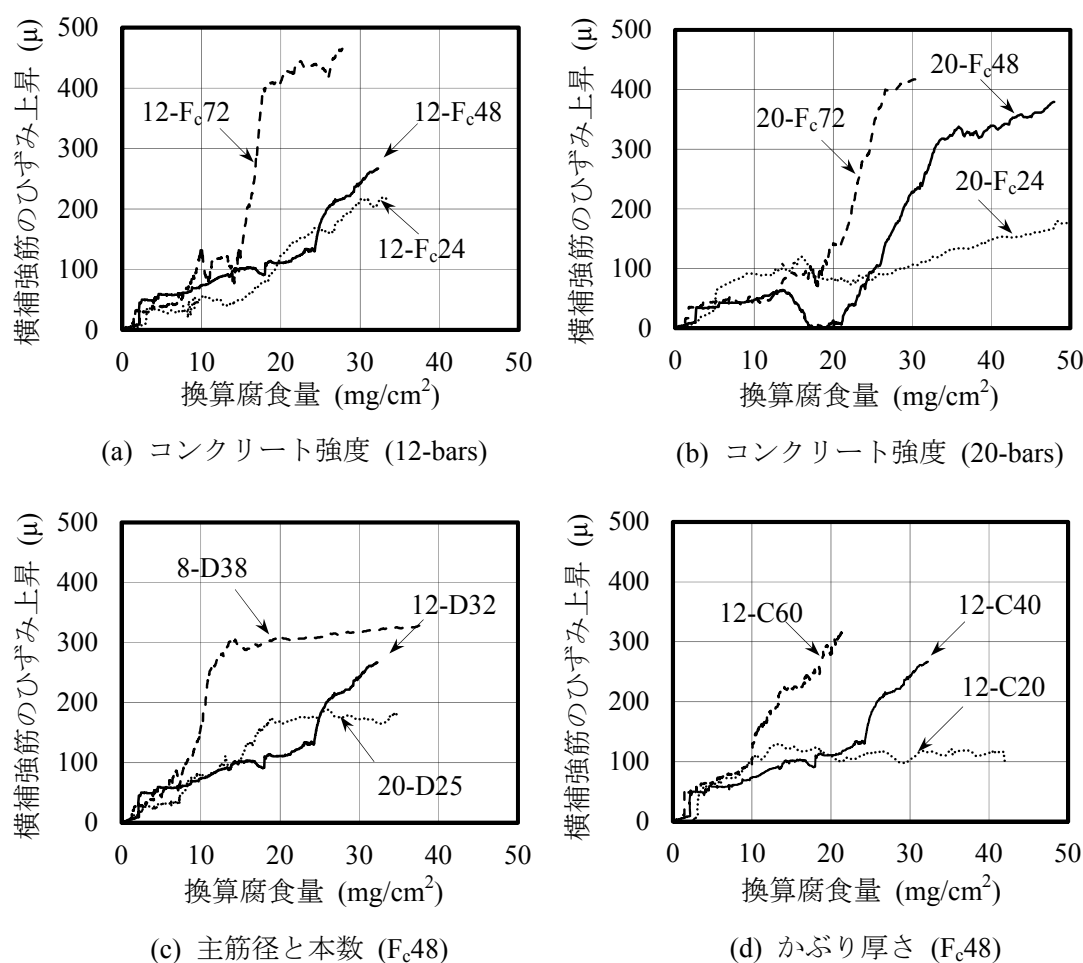


図 2.6.1-10 主筋の腐食に起因する横補強筋のひずみ上昇の比較

⁸⁵ Aris ARYANTO, Yasuji Shinohara : Effect of Confinement and Concrete Strength upon Crack Behaviors Induced by Corrosion-Product Expansion for Reinforced Concrete Members, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.696, pp. 305-313, 2014.2

⁸⁶ 篠原保二, 林静雄 : 鉄筋コンクリート柱の損傷過程におけるせん断伝達メカニズムに及ぼす軸力の影響, 日本建築学会構造系論文集, No.639, pp. 897-905, 2009.5

コンクリート強度の異なるひずみ挙動を比較した図 2.6.1-10 (a)と(b)から、コンクリート強度が高いほど最大横補強筋ひずみの上昇が大きくなる傾向がある。これは前項で述べたように、水セメント比が小さい場合には腐食生成物のセメントペースト中の空隙への侵入が少なくなるため、腐食ひび割れ損傷が大きくなったことに起因していると思われる。F_c72 試験体では、ひずみが 400 μ を超え、通常強度鉄筋の降伏ひずみの 25%に達しているが、かぶりコンクリートの腐食ひび割れ面を通して腐食生成物が流出すると、ひずみ上昇率も鈍化している。横補強筋を防食した Aris ら³⁾の RC 梁実験では、腐食生成物が横補強筋上の腐食ひび割れを通して流出しなかったため、横補強筋のひずみは 800 μ 以上に達したが、実構造物を想定した本実験では、横補強筋上の腐食ひび割れを通して腐食生成物が大量に流出したため、横補強筋ひずみの上昇はその半分程度であった。

主筋径と本数が異なる試験体を比較した図 2.6.1-10 (c)から、主筋径が大きい 8-D38 試験体は、10mg/cm² 以下の小さな腐食量から横補強筋ひずみが増加している。これは主筋径が大きくなると、鉄筋腐食による膨張圧力が同程度でも、圧力が作用する円周が長くなり、大きなリングテンションが生じたことによって、少ない腐食量でひび割れを誘発したためと考えられる。しかしながら腐食量が増加すると、横補強筋ひずみは 300 μ 程度に収束していく傾向が見られ、腐食生成物がひび割れ面へ侵入、流出したと推察される。

かぶりの異なる試験体を比較した図 2.6.1-10 (d)から、かぶりが大きくなると、コンクリート表面の腐食ひび割れの発生が遅れるが、横補強筋のひずみ上昇から主筋周りのコンクリート内部の損傷は大きくなっていると推察され、耐久性の評価に注意が必要である。

10) 超音波内部探傷による腐食ひび割れ挙動

前項では、主筋の腐食膨張に起因する腐食ひび割れ進展に関して、横補強筋を横切る腐食ひび割れ損傷を横補強筋のひずみ上昇から推察した。コンクリート内部の腐食鉄筋周りのひび割れは放射線状に進展することを踏まえ、主筋間の横補強筋に平行な内部腐食ひび割れ損傷(図 2.6.1-7)を検討するために、超音波透過法による内部探傷測定を行った。測定は腐食実験開始前の健全時に 1 回、促進腐食開始後ほぼ 1 週間隔で 3 回、その後 3 週間隔で 2 ～3 回行った。測定点は、図 2.6.1-11 に示す各試験体の主筋と横補強筋を避けた位置とし、送受信探触子は接触媒質を介して当てた。探触子は超音波の指向性が鋭い大径(76mm)を使用した。発振器から出力した超音波は試験体内を透過し、反対側の受信探触子で波形データを採取した。

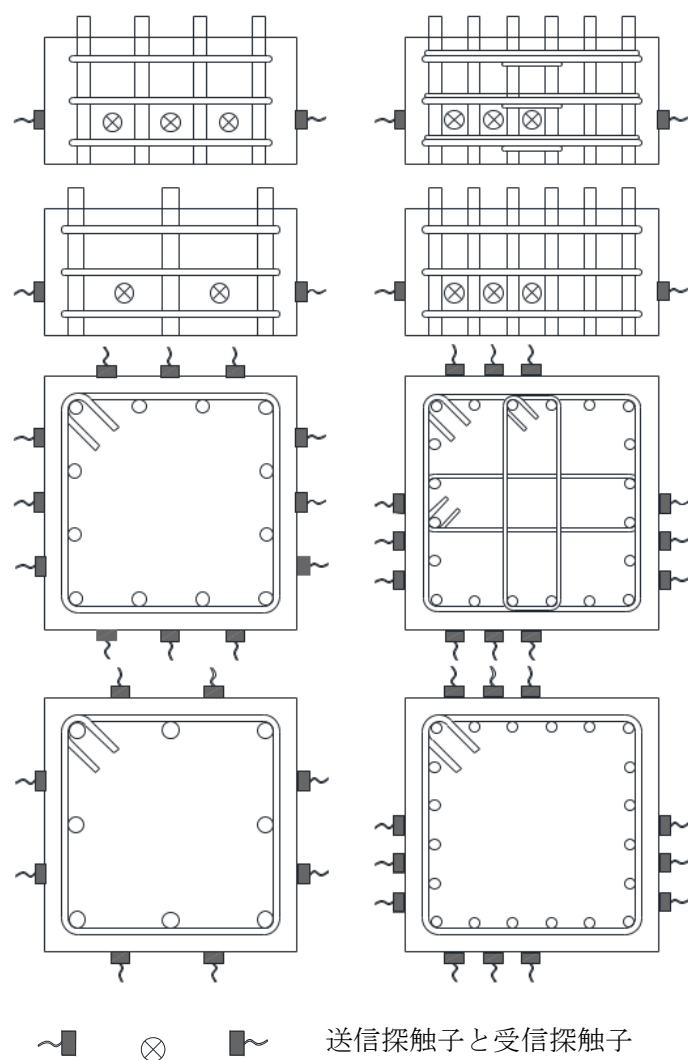


図 2.6.1-11 超音波内部探傷における送受信探触子位置

データ解析は図 2.6.1-12 に示す受信波形の初動波形に着目し、振幅は第 1 波目の正の信号レベル、音速は第 1 波のピーク点の伝搬時間から求めた。波形振幅に関しては、腐食量に伴う振幅の挙動を検討するため、受信感度の設定を各試験体・各測定点ごとに固定値とした。

図 2.6.1-13 に各変動要因に対する換算腐食量 (mg/cm^2) と振幅 (%) 及び音速 ($\times 10^3 \text{ m/s}$) の関係を示す。ここで腐食量は超音波透過挙動に最も影響を与えると思われる中段と下段の横補強筋(図 2.6.1-11 参照)の平均値であり、振幅と音速は測定点数(6 または 4)の平均である。腐食量は、超音波特性が大きく変動する $100 \text{ mg}/\text{cm}^2$ までを示している。図 2.6.1-13 (a)、(b)に示すように、全試験体を通して、腐食量が数 mg/cm^2 程度の極めて小さな範囲で、振幅、音速共に増加する傾向がある。この傾向は、セメントペースト内の空隙量が多くなる F_c24 試験体において強くなっているため、腐食生成物が空隙を充填したこと起因していると思われる。音速に関しては、コンクリート強度すなわちセメントペースト内の細孔構造の影響は大きい、腐食ひび割れ損傷の進行に伴う音速の減少は大きくはない。一方振幅については、川越ら⁸⁷が内部構造の違いによって大きく変動すると報告しているように、小さな腐食量の範囲で急激に減少している。

川越らはコンクリート内部の欠陥の検出を目的として、超音波透過法による探傷実験を行っている。柱部材への適用を想定した $800 \times 800 \times 800 \text{ mm}$ のコンクリートブロックの中心部に模擬ジャンカを埋め込み、透過超音波の振幅と音速を測定した。その結果、ジャンカ部の振幅は健全部よりかなり減少し、両者の境界部では、両者のほぼ平均振幅となった。また、健全部を伝播した超音波の振幅の標準偏差($=\sigma$)の 2 倍を減じた値を指標にすることによって模擬ジャンカ位置をほぼ検出できることを示した。

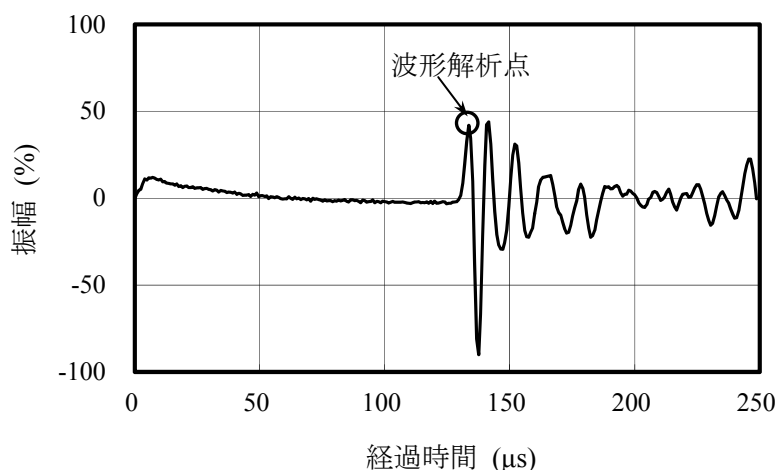
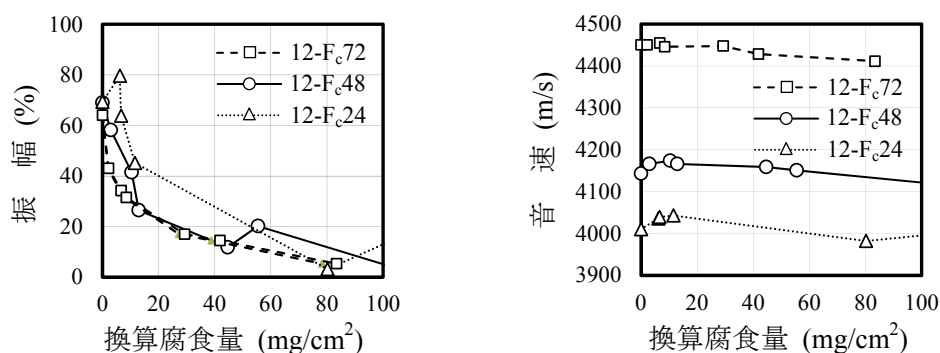
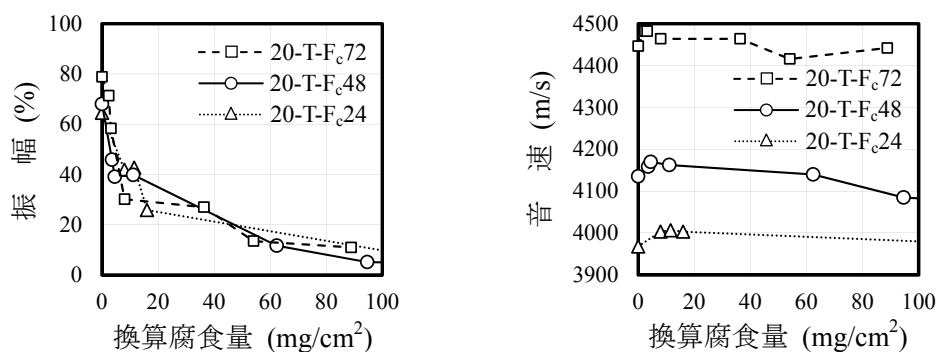


図 2.6.1-12 超音波波形と波形解析位置

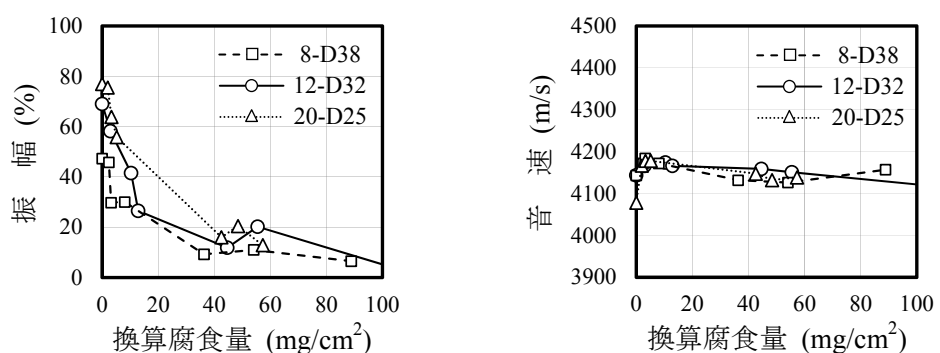
⁸⁷ 川越洋樹, 柳瀬高仁, 池ヶ谷靖, 村田光, 柳沢学: 超音波透過法によるジャンカ検出の実験, 日本建築学会学術講演梗概集, A-1, 材料施工, pp. 1255-1256, 2009.8



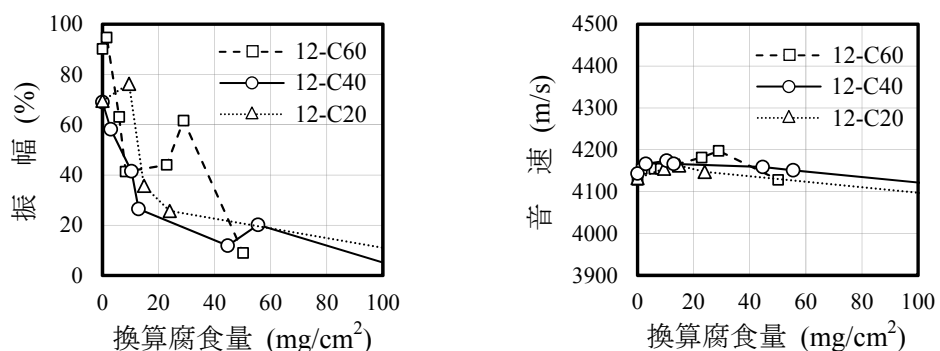
(a) コンクリート強度の影響 (12-bars)



(b) コンクリート強度の影響 (20-bars)



(c) 主筋径及び本数の影響 (F_c48)



(d) かぶり厚さの影響 (F_c48)

図 2.6.1-13 腐食量の増加に伴う振幅と音速の変動

本実験でも同様の内部探傷測定により、内部欠陥(内部腐食ひび割れ損傷)と鉄筋腐食量の関係を、試験体を透過する超音波の振幅性状から検討する。振幅は図 2.6.1-7 で示した横補強筋間を連結する内部腐食ひび割れ損傷の進展とともに小さくなると考えられる。図 2.6.1-13 から全試験体を通して、腐食量 10 mg/cm^2 までに振幅が急激に減少しており、腐食量が 20 mg/cm^2 を超えると、振幅の低下率は緩やかになっている。この腐食量は、表 2.6.1-3 に示した最初に腐食ひび割れがコンクリート表面に現れる腐食量(14 mg/cm^2 から 75 mg/cm^2)よりかなり小さく、コンクリート内部の鉄筋周りの腐食ひび割れは、早い段階で発生したと推察できる。

表 2.6.1-5 に各試験体の健全時の平均超音波振幅 A_h (%)と標準偏差 σ (%)及び $A_h-2\sigma$ (%)を示す。振幅 $A_h-2\sigma$ は Fig. 12 において超音波振幅の急激な減少途上の振幅、あるいは急激な減少がほぼ終了する振幅に相当する。それ故、Fig. 6 に示した鉄筋間の内部腐食ひび割れ損傷を模擬ジャンカと見なすことができれば、川越らが指摘するように、内部腐食ひび割れの成長過程は $A_h-2\sigma$ を指標として検出できる可能性がある。以上より、超音波透過法は、鉄筋腐食前の RC 部材の振幅特性が既知の場合、鉄筋周り腐食ひび割れ損傷領域を検出する有効な手段であるといえる。また、かぶりの大きい C60 試験体以外の全試験体は、最終の透過超音波計測時までに腐食生成物が試験体表面に流出していた。腐食生成物の流出後、コンクリート内部の流出経路もほぼ確定していると考えられ、腐食量 50 mg/cm^2 を超えると、腐食量の増加に伴う振幅の変動は少なくなっている。ただし C60 試験体は、腐食量 10 mg/cm^2 から 30 mg/cm^2 の間で振幅が上昇に転じているが、音速も上昇傾向にあり、さらに腐食生成物が試験体外に流出していないことを考慮すると、腐食生成物がかぶりコンクリートの空隙に堆積し、密実になっていることも考えられる。

表 2.6.1-5 促進腐食試験前の振幅と標準偏差

Specimen	Amplitude	Standard deviation	$A_h-2\sigma$ (%)
	A_h (%)	σ (%)	
12-F _c 24	69.3	20.5	28.4
12-F _c 48	69.0	13.0	43.0
12-F _c 72	64.0	5.7	52.6
20-T-F _c 24	64.6	20.4	23.8
20-T-F _c 48	68.0	13.3	41.4
20-T-F _c 72	78.8	20.7	37.4
8-F _c 48	47.3	8.1	31.1
20-F _c 48	77.0	24.9	27.1
12-C20	69.5	11.3	46.9
12-C60	90.1	10.8	68.5

11) 促進腐食実験のまとめ

実構造 RC 柱部材及び実環境に近い塩害を想定した促進腐食実験を行い、腐食ひび割れ挙動、横補強筋ひずみ上昇及び内部腐食ひび割れ損傷に及ぼす各種要因の影響について検討した。本実験で得られた主な結論を以下に示す。

- ① 促進腐食による主筋の腐食量に関しては、塩化物イオンが 2 方向から侵入する隅角部鉄筋は中間部鉄筋の約 2 倍となった。
- ② 主筋と横補強筋のかぶり厚の違いによる塩化物イオン濃度の差異及びマクロセルにより、横補強筋の実測腐食量はファラデー則による腐食量より大きく(1.7 倍程度)、逆に主筋の実測腐食量は小さく(0.4 倍程度)となった。
- ③ コンクリート表面に最初に現れる腐食ひび割れは、ブリージングとコンクリート強度による空隙構造及びかぶりの影響を受け、空隙の多い低強度コンクリート(Fc24)は上部横補強筋上、高強度コンクリート(Fc72)は下部横補強筋上、かぶりが大きくなる(C60)と隅角部主筋上の腐食ひび割れが先行した。
- ④ コンクリート表面の腐食ひび割れ発生時の腐食量に関しては、塩化物イオン侵入と腐食生成物の流出が容易となる空隙の多い低強度コンクリート(Fc24)及びかぶりの小さい(C20)試験体は小さくなる。一方、空隙の少ない高強度コンクリート(Fc72)は腐食生成物が空隙に侵入できず、少ない腐食量で流出した。
- ⑤ 同じ電圧で約 1 か月間、促進腐食実験を継続した場合、かぶり及びコンクリート強度が大きいほど鉄筋腐食に対する抵抗性が高くなった。
- ⑥ コンクリート内部の腐食生成物は、横補強筋間と主筋間に大量に残留しており、かぶりコンクリートは簡単に外せる状態であった。一方、コアコンクリート側への腐食生成物の侵入は見られず、鉄筋の腐食性状もかぶり側とコア側で異なっていた。
- ⑦ 腐食量と共に表面腐食ひび割れは拡幅するが、腐食生成物の試験体外への流出が始まると、拡幅が緩やかになった。
- ⑧ 空隙の多い低強度コンクリートの表面腐食ひび割れの拡幅は、腐食生成物が空隙を満たす 200 mg/cm^2 程度まで小さく、コンクリート強度が高くなると、拡幅速度は大きくなった。
- ⑨ かぶりが小さくなると、腐食生成物の流出が簡単になり、表面腐食ひび割れ幅の成長は小さくなった。
- ⑩ 腐食ひび割れ挙動に関しては、コンクリート強度とかぶりの影響が大きく、配筋による相違は僅かであった。
- ⑪ 横補強筋のひずみは、コンクリート強度が高いほど大きくなる傾向があり、通常強度鉄筋の 25%に達した。また、かぶりが大きい場合、表面腐食ひび割れが発生する前に、腐食鉄筋周りの内部損傷によって横補強筋ひずみ上昇は 300μ に達しており、耐久性の評価に注意が必要である。

- ⑫ 塩害のように短期間に鉄筋腐食が進行する場合、コアコンクリートの強度特性に及ぼす影響は限定的となり、かぶりコンクリートの剥落、鉄筋の断面減少による曲げ耐力、横補強筋のひずみ上昇によるせん断耐力が問題になる。
- ⑬ 超音波内部探傷試験によって、鉄筋周りの腐食ひび割れ損傷をコンクリート表面の腐食ひび割れ発生より、かなり早い腐食段階で検出できた。
- ⑭ 超音波透過法は、腐食前の平均振幅からの低下性状を検討することによって、コンクリート内部の損傷状況を推定することができ、鉄筋腐食前の振幅特性が既知の場合、鉄筋周り腐食ひび割れ損傷領域を検出する有効な手段である。

以上より、実際の RC 部材の配筋を有する試験体を用いることによって、主筋の腐食膨張ひび割れによる横補強筋のひずみ上昇などを把握できることから、経年劣化した RC 部材の腐食性状と、構造物の性能としての耐力度の評価に参考になる基礎的な知見が得られた。

本成果は、鉄筋腐食度 D と構造物の性能 P の関係として、長期健全性評価での P - D 曲線を決定する際の定性的な知見として活用できる。

(3) 鉄筋腐食量実測による腐食膨張ひび割れ挙動に関する検討

1) 促進腐食実験の目的

前項で示したように、昨年度の促進腐食実験において、腐食ひび割れがコンクリート表面に到達する鉄筋腐食量 W_{cr} (mg/cm^2) は、既往の推定式や実験による腐食ひび割れ発生時の腐食量より大きな値を示した。本実験では、促進腐食実験終了後の質量減少のみ実測し、実験中の腐食量は積算電流量に比例すると仮定した換算腐食量を用いていることが、その要因と考えられる。すなわち RC 構造部材内部の鉄筋腐食のプロセスは、腐食速度が一様ではなく、コンクリート標準示方書⁸⁸にも定義されているように、次の4段階の劣化過程に区分されると考えられる。

- 1) 潜伏期：鉄筋の腐食が開始するまでの期間。塩化物イオンの侵入が主要因。
- 2) 進展期：鉄筋の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間。ひび割れ前の腐食速度
- 3) 加速期：腐食ひび割れ発生により腐食速度が増大する期間。ひび割れ後の腐食速度
- 4) 劣化期：腐食量の増加により体力の低下が顕著な期間。ひび割れ後の腐食速度

この際、3)の腐食ひび割れ発生後、塩化物イオンや酸素の供給が多くなり、2)の腐食ひび割れ発生前より鉄筋腐食速度が増加する。このため、促進腐食試験終了後に腐食鉄筋の質量減少量を測定し、鉄筋腐食量は積算電流量に比例するとして推定する既往の評価手法では、図 2.6.1-14 に示すように、腐食ひび割れ発生時の鉄筋腐食量などを過剰評価する可能性がある。

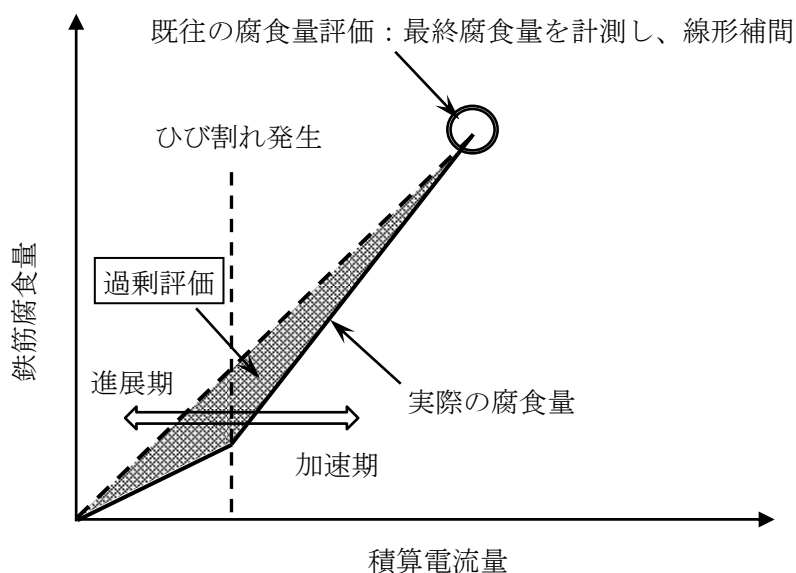


図 2.6.1-14 腐食ひび割れ発生前後の鉄筋腐食速度と鉄筋腐食量

⁸⁸ コンクリート標準示方書、維持管理編、土木学会、2013

今年度は腐食ひび割れ発生前後の腐食速度の相違を詳細に検討し、コンクリート表面の腐食ひび割れ幅から、コンクリート内部の鉄筋の腐食量推定精度を向上させることを目的としているため、図 2.6.1-15 に示すように腐食ひび割れ発生前後の鉄筋を複数回コンクリートから取り出し、腐食量（質量減少量）を実測する。さらに、本手法で推定した鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅の実験結果に基づいて、計測が容易なコンクリート表面の腐食ひび割れ幅からコンクリート内部鉄筋の腐食量を推定する回帰式を提案する。

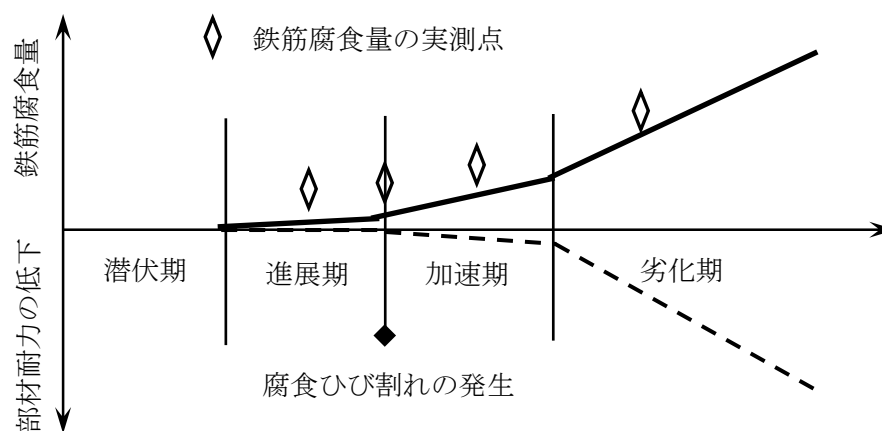


図 2.6.1-15 鉄筋腐食の潜伏期、進展期、加速期の概念図

また、前項で示したように、昨年度柱要素促進腐食実験では、腐食生成物が横補強筋上のコンクリート表面に現れるほかに、横補強筋間を連結するように進展していることが腐食実験中の超音波探傷（図 2.6.1-13 参照）や腐食実験終了後のかぶりコンクリート取外し時（図 2.6.1-7 参照）に判明した。この腐食生成物の侵入経路によって、かぶりコンクリートは剥落しやすい状態となり、剥落に対する危険度を定量的に評価する必要がある。そのため、腐食実験終了後、所定の付着割裂実験を行い、鉄筋腐食量（または表面腐食ひび割れ幅）による割裂強度低下率を定式化することを第2の目的とする。

2) 縮小試験体の概要

今年度の腐食実験目的を達成するために、多数の試験体を製作する必要がある。そこで昨年度の柱要素試験体で最も腐食量が顕著となったせん断補強筋（D16）の腐食進展挙動に着目し、図 2.6.1-16 に示すような矩形断面 150×150 mm、長さ 300 mm のコンクリートに、D16 の鉄筋 1 本のみを配した小型試験体を計画した。かぶり厚さは JASS 5⁸⁹（鉄筋コンクリート工事）で標準的な 40 mm 及び JASS 5N⁹⁰（原子力発電所施設における鉄筋コンクリート工事）で標準的な 60 mm とする。これらの矩形断面を有する試験体は、腐食ひび割れ発生前後の腐食速度の相違を詳細に検討するための試験体であるが、腐食実験終了後、所定の割裂実験を行い、鉄筋腐食後の割裂強度も評価する。ただし、矩形断面であるため JIS 試験による割裂強度式の適用範囲外となる。そこで割裂強度式が適用できるように JIS 試験に準拠した直径 150 mm の円形断面试験体を計画し、矩形断面试験体と同様に腐食実験を行った。

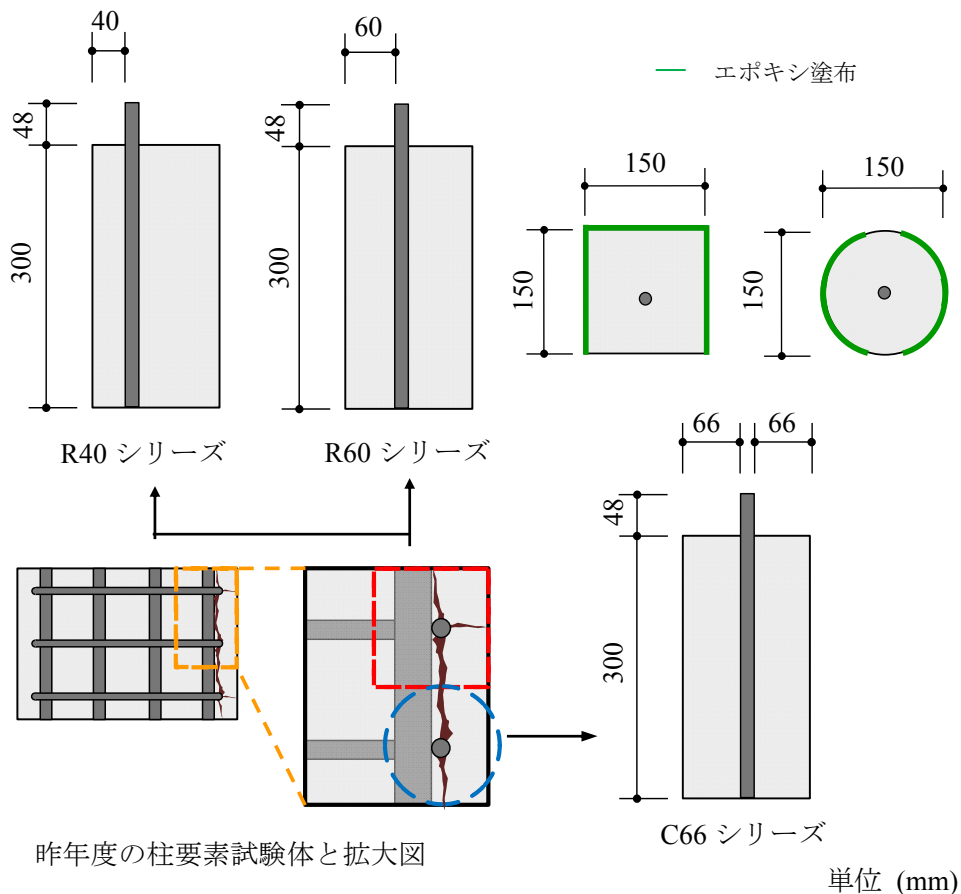


図 2.6.1-16 縮小試験体の概念図

⁸⁹ 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事、日本建築学会、2009

⁹⁰ 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5N 原子力施設における鉄筋コンクリート工事、日本建築学会、2013

3) 縮小試験体のパラメータ

試験体一覧を表 2.6.1-6 に示す。試験体名は最初のアルファベットが矩形断面 R または円形断面 C、次の数値がかぶり厚さ(mm)、最後の数値が鉄筋を取り出す目標積算電流量($\text{mA}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$)である。R40-45、R60-100 及び C66-100 試験体は、昨年度の腐食実験を参考に、各シリーズにおいて腐食膨張ひび割れが表面に達する積算電流量として設定している。各変動要因に対する繰り返し数は 3 体としている。

コンクリートの調合を表 2.6.1-7 に、フレッシュコンクリートと力学特性を表 2.6.1-8 に示す。コンクリートの圧縮強度・ヤング係数は、4 週間の気中養生後と促進腐食実験終了後に行った試験結果の差異が小さいため、平均値を示している。

表 2.6.1-6 促進腐食試験体一覧

試験体名	断面形状	かぶり厚さ (mm)	目標積算電流 密度 ($\text{mA}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$)	コンクリート 圧縮強度 (N/mm^2)	試験体数
R40-0	矩形	40	0	28.6	1
R40-22			22		3
R40-45			45		3
R40-160			160		3
R60-30	矩形	60	30	35.3	3
R60-65			65		3
R60-100			100		3
R60-200			200		3
R60-400			400	30.2	3
C66-0	円形	66	0	28.8	3
C66-30			30		3
C66-100			100		3
C66-200			200		3
C66-400			400		3

表 2.6.1-7 コンクリート調合

調合強度	W/C (%)	セメント (kg/m^3)	水 (kg/m^3)	細骨材 (kg/m^3)	粗骨材 (kg/m^3)	混和剤 (kg/m^3)
F _c 30	60	314	188	729	1025	1.2

表 2.6.1-8 フレッシュコンクリートの性状と力学特性

試験体名	スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
R40	17.8	3.8	28.6	23.8
R60	10.0	2.7	35.3	26.0
	11.6	2.9	30.2	24.6
C66	12.0	3.5	28.8	24.6

4) 促進腐食実験方法

試験体は 28 日間の気中養生後、R 試験体はカバーコンクリート面のみから塩化物イオンが侵入することを想定し、試験体のカバーコンクリート以外の 5 面にはエポキシ樹脂によるコーティングを施した。C 試験体は横補強筋間の腐食ひび割れの連結を想定し、塩化物イオンの侵入経路を限定するために、上下面と側面の腐食ひび割れを導入する幅 $150 \times 50 \text{mm}$ の帯状 2 か所以外を、エポキシ樹脂によるコーティングを施した。図 2.6.1-17 に電食による促進腐食実験方法を示す。エポキシ樹脂硬化後、試験体を 3%NaCl 水溶液に 24 時間浸漬し、鉄筋を陽極、銅板を陰極として、一定の電圧 10V を通電した。

測定項目は積算電流密度と表面腐食ひび割れ幅である。積算電流密度は、各鉄筋のリード線に 2Ω の抵抗を接続し、データロガーを用いてこの抵抗間の電圧を 1 時間ごとに計測した。この電圧から各鉄筋に導入される電流を算定し、促進試験期間中(約 2.5 月間)における積算電流密度を求めた。表面腐食ひび割れ幅の測定は、腐食ひび割れの発生以降、分解能 $1/100 \text{mm}$ のデジタルマイクロスコープを用いて、試験体を塩水より引き上げた状態で適宜行った。

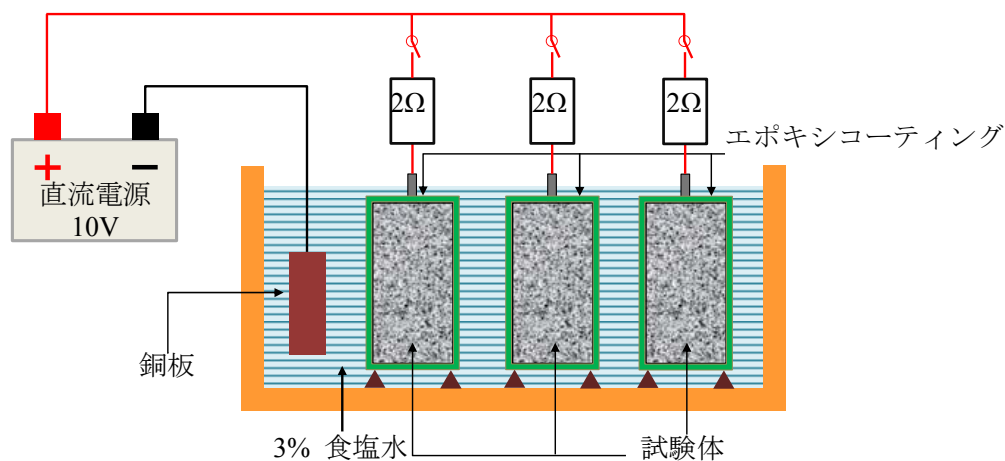


図 2.6.1-17 電食による促進腐食実験の概念図

5) 腐食試験体割裂試験

促進腐食が終了した試験体は、鉄筋腐食ひび割れによる割裂強度の低下を評価するために、所定の割裂試験によって腐食鉄筋を取り出した。割裂試験は、図 2.6.1-18 に示す 2000 kN 万能試験機を使用した。試験体の寸法と同じ長さ 300mm の鋼製の加圧板を設置し、腐食ひび割れ面が割裂面になるように加力した。R シリーズ試験体は図 2.6.1-18 のように、塩水暴露側の腐食ひび割れ発生位置とその背面に径 23mm の PC 鋼棒を設置した。一方、C シリーズ試験体は、JIS1113 コンクリートの割裂引張強度試験方法に準拠し、腐食ひび割れ位置が加圧板に直接接触するように設置し、割裂試験を行った。

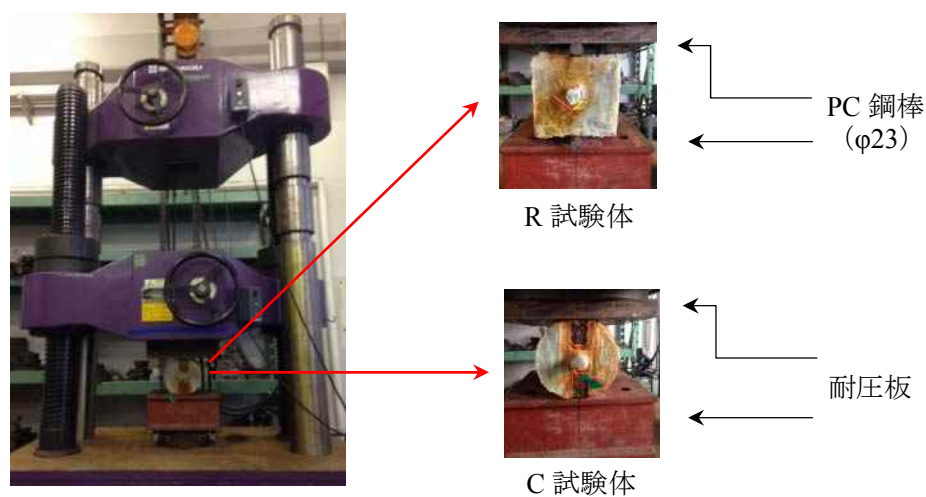


図 2.6.1-18 割裂試験概要

6) 実験結果・考察-腐食鉄筋の質量減少量

割裂引張試験終了後、試験体から鉄筋を取り出し、10%クエン酸アンモニウム水溶液中に24時間浸漬させた。その後、ワイヤーブラシで腐食生成物を完全に除去した鉄筋腐食後の質量を計測し、健全時の質量と比較することによって各鉄筋の質量減少量を実測した。表2.6.1-9にR40シリーズ試験体、表2.6.1-10にR60シリーズ試験体、表2.6.1-11にC66シリーズ試験体の腐食鉄筋の実測による単位面積当たりの質量減少量 W_{loss} (mg/cm^2)、及び健全鉄筋からの質量減少率(%)を示す。また同表には、積算電流密度からファラデー則を用いて算出した単位面積当たりの質量減少量 W_{cal} (mg/cm^2)と質量減少率(%)、さらに実測値と計算値の比率 $W_{\text{loss}}/W_{\text{cal}}$ を示している。

太字は、昨年度の実験結果を参照に、コンクリート表面に腐食性生物が現れる目標積算電流量を設定した試験体である。腐食性生物が出現する腐食ひび割れ発生前の試験体に関しては、促進腐食終了後試験体を放置した時間が長く、その間に腐食が進行した可能性があるため参考値である。腐食ひび割れ発生時の計算値に対する実測値の比は、かぶりの小さいR40シリーズで0.6、R60とC66シリーズで0.5程度であり、その後増大し、1に近づいている。このことより、腐食ひび割れ発生前と発生前後では鉄筋に流れる電流量が異なることが予想される。

表 2.6.1-9 R40 シリーズ試験体の鉄筋腐食量

試験体名	No.	W_{loss} mg/cm^2 (%)	W_{cal} mg/cm^2 (%)	$W_{\text{loss}}/W_{\text{cal}}$
R40-22	1	33.3 (1.10)	22.7 (0.75)	1.47
	2	19.2 (0.64)	22.6 (0.75)	0.85
	3	23.4 (0.78)	22.7 (0.75)	1.03
	平均	25.3 (0.84)	22.7 (0.75)	1.12
R40-45	1	35.4 (1.18)	47.5 (1.58)	0.75
	2	27.5 (0.92)	48.4 (1.61)	0.57
	3	27.2 (0.91)	47.2 (1.58)	0.58
	平均	30.0 (1.00)	47.7 (1.59)	0.63
R40-160	1	128 (4.25)	168 (5.58)	0.76
	2	128 (4.24)	170 (5.65)	0.75
	3	135 (4.50)	169 (5.63)	0.80
	平均	130 (4.33)	169 (5.62)	0.77

注1) 太字は腐食ひび割れが表面に達する目標腐食量

注2) 薄墨部は、促進腐食終了後試験体を放置したため、参考値

表 2.6.1-10 R60 シリーズ試験体の鉄筋腐食量

試験体名	No.	W_{loss} mg/cm ² (%)	W_{cal} mg/cm ² (%)	$W_{\text{loss}}/W_{\text{cal}}$
R60-30	1	16.6 (0.55)	31.3 (1.04)	0.53
	2	17.5 (0.58)	31.3 (1.04)	0.56
	3	21.1 (0.70)	31.0 (1.03)	0.68
	平均	18.4 (0.61)	31.2 (1.04)	0.59
R60-65	1	17.3 (0.57)	67.9 (2.25)	0.25
	2	26.4 (0.88)	67.6 (2.24)	0.39
	3	13.6 (0.45)	67.6 (2.26)	0.20
	平均	19.1 (0.63)	67.7 (2.25)	0.28
R60-100	1	47.7 (1.58)	104 (3.47)	0.46
	2	55.1 (1.83)	104 (3.46)	0.53
	3	50.0 (1.66)	106 (3.53)	0.47
	平均	50.9 (1.69)	105 (3.49)	0.49
R60-200	1	107 (3.55)	214 (7.13)	0.50
	2	134 (4.45)	214 (7.09)	0.63
	3	110 (3.65)	214 (7.11)	0.51
	平均	117 (3.88)	214 (7.11)	0.55
R60-400	1	280 (9.34)	416 (13.9)	0.67
	2	291 (9.61)	417 (13.8)	0.70
	3	294 (9.78)	417 (13.8)	0.71
	平均	288 (9.58)	417 (13.8)	0.69

注1) 太字は腐食ひび割れが表面に達する目標腐食量

注2) 薄墨部は、促進腐食終了後試験体を放置したため、参考値

表 2.6.1-11 C66 シリーズ試験体の鉄筋腐食量

試験体名	No.	W_{loss} mg/cm ² (%)	W_{cal} mg/cm ² (%)	$W_{\text{loss}}/W_{\text{cal}}$
C66-30	1	21.4 (0.71)	31.3 (1.04)	0.68
	2	20.0 (0.66)	31.4 (1.04)	0.64
	3	18.1 (0.60)	31.3 (1.04)	0.58
	平均	19.8 (0.66)	31.2 (1.04)	0.63
C66-100	1	35.2 (1.17)	104 (3.47)	0.34
	2	75.5 (2.50)	104 (3.45)	0.73
	3	41.0 (1.36)	104 (3.47)	0.39
	平均	50.6 (1.67)	104 (3.46)	0.49
C66-200	1	117 (3.89)	210 (6.98)	0.56
	2	119 (3.96)	208 (6.91)	0.57
	3	122 (4.05)	209 (6.94)	0.58
	平均	119 (3.97)	209 (6.94)	0.57
C66-400	1	311 (10.3)	417 (13.8)	0.75
	2	311 (10.3)	416 (13.8)	0.75
	3	299 (9.95)	417 (13.9)	0.72
	平均	307 (10.2)	417 (13.8)	0.74

注1) 太字は腐食ひび割れが表面に達する目標腐食量

注2) 薄墨部は、促進腐食終了後試験体を放置したため、参考値

7) 実験結果・考察-通電時間と積算電流量

腐食量理論値に対する実測値の比 $W_{\text{loss}}/W_{\text{cal}}$ は、腐食ひび割れ発生前後で異なることがわかった。本促進試験は直流電圧を 10V の一定値とする電食試験を行ったが、腐食ひび割れ発生前後で電気抵抗が異なり、各鉄筋に流れる電流量も異なると考えられる。そこで各試験シリーズで最も積算電流量の大きい R40-160、R60-400 及び C66-400 試験体に対し、通電時間と電流量の関係を図 2.6.1-19 に示す。かぶり厚が小さいほど電流量は大きく、腐食ひび割れ発生までの通電時間は、かぶりの小さい R40 が 100 時間(45mAh/cm²)、C66 が 300 時間(100mAh/cm²)、R60 が 400 時間(100mAh/cm²)の順であり、腐食ひび割れ発生後さらに加速する。R60-400 よりかぶり厚の大きい C66-400 の通電量が大きく、腐食ひび割れが早期に発生するのは、両側より塩水が浸入すること、及び円形断面は矩形断面より腐食性生物を吸収する容量が小さいことに起因していると思われる。かぶり大きいほど腐食ひび割れ進展挙動の違いにより、3 体の試験体の電流量の差が大きくなることがわかる。

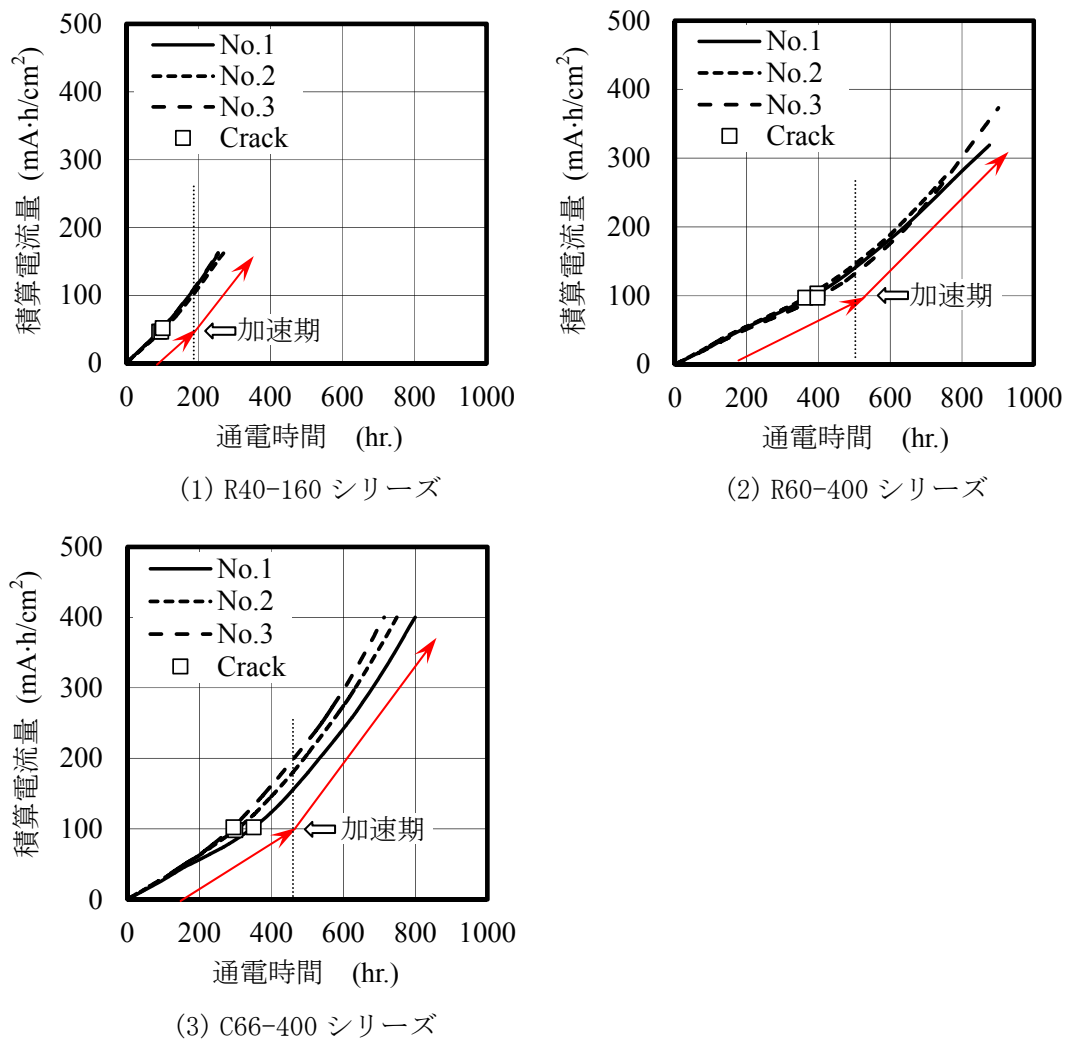
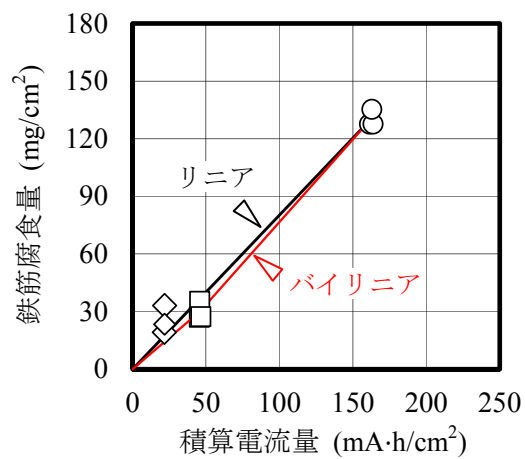


図 2.6.1-19 通電時間と積算電流量の関係

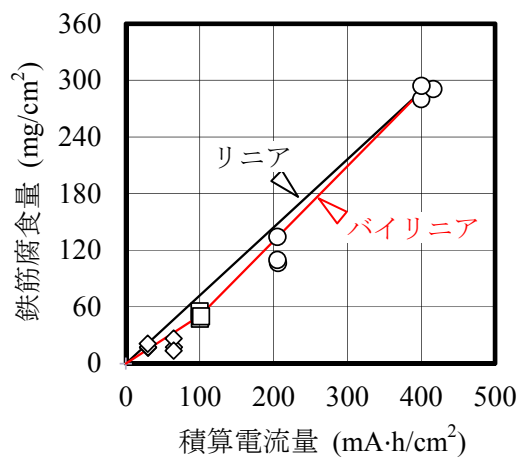
8) 実験結果・考察-積算電流量と鉄筋腐食量

昨年度までの促進腐食実験では、鉄筋腐食量は積算電流量に比例するものとして評価した。積算電流量と鉄筋腐食量が比例関係であるか検討するため、試験シリーズの積算電流量と腐食量関係を図 2.6.1-20 に示す（ただし、R40 シリーズは、軸スケールが異なることに注意）。◇マーカーは腐食ひび割れ前、□マーカーは腐食ひび割れ発生時、○マーカーは腐食ひび割れ発生後の実測腐食量を示している。腐食ひび割れ発生時の腐食量は、R40-160 で 30 mg/cm^2 程度、R60-400 で 50 mg/cm^2 程度とかぶり厚が大きいほど大きくなっている。目標積算電流量の試験体 3 体の腐食量は、ほぼ同程度であることから、積算電流量によって、腐食量評価は妥当であるといえる。

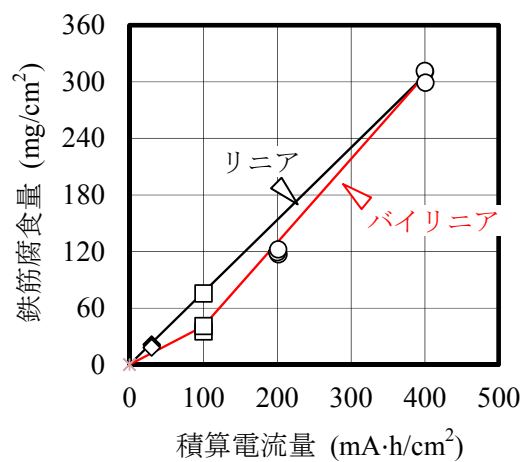
鉄筋腐食量は積算電流量とほぼ線形関係にあり、最終腐食量から線形補間によって、電食中の腐食量を推定することは、ある程度可能である。しかしながら、線形補間で腐食ひび割れ発生時の腐食量进行评估すると、R40-160 シリーズで約 20%弱、R60-400 と C66-400 シリーズでは約 30%強の過大評価となる。したがって積算電流量から内部鉄筋の腐食量をさらに高精度に評価するためには、腐食ひび割れ発生前後で、比例係数が異なることを考慮し、バイリニアで評価するのが妥当である。



(3) R40-160 シリーズ



(2) C66-400 シリーズ



(1) C66-400 シリーズ

図 2.6.1-20 積算電流量と鉄筋腐食量の関係

9) 実験結果・考察-腐食ひび割れ進展挙動

図 2.6.1-21 に R40-160 シリーズの腐食ひび割れ進展挙動として、積算電流量に対する最大腐食ひび割れ幅(左図)と 3 か所の測定点の平均腐食ひび割れ幅(右図)の拡張挙動を示す。促進腐食中の鉄筋腐食量は、従来の線形補間による評価(上図)と図 2.6.1-20 に示す実験結果に基づいてバイリニア補間による高精度評価(下図)したのもである。バイリニア評価により、鉄筋腐食量は少ないほうへシフトする。また、腐食ひび割れ幅が 0.2 から 0.4mm 程度になると、ひび割れを通して腐食生成物が試験体外に流出するため、拡張速度は低下している。

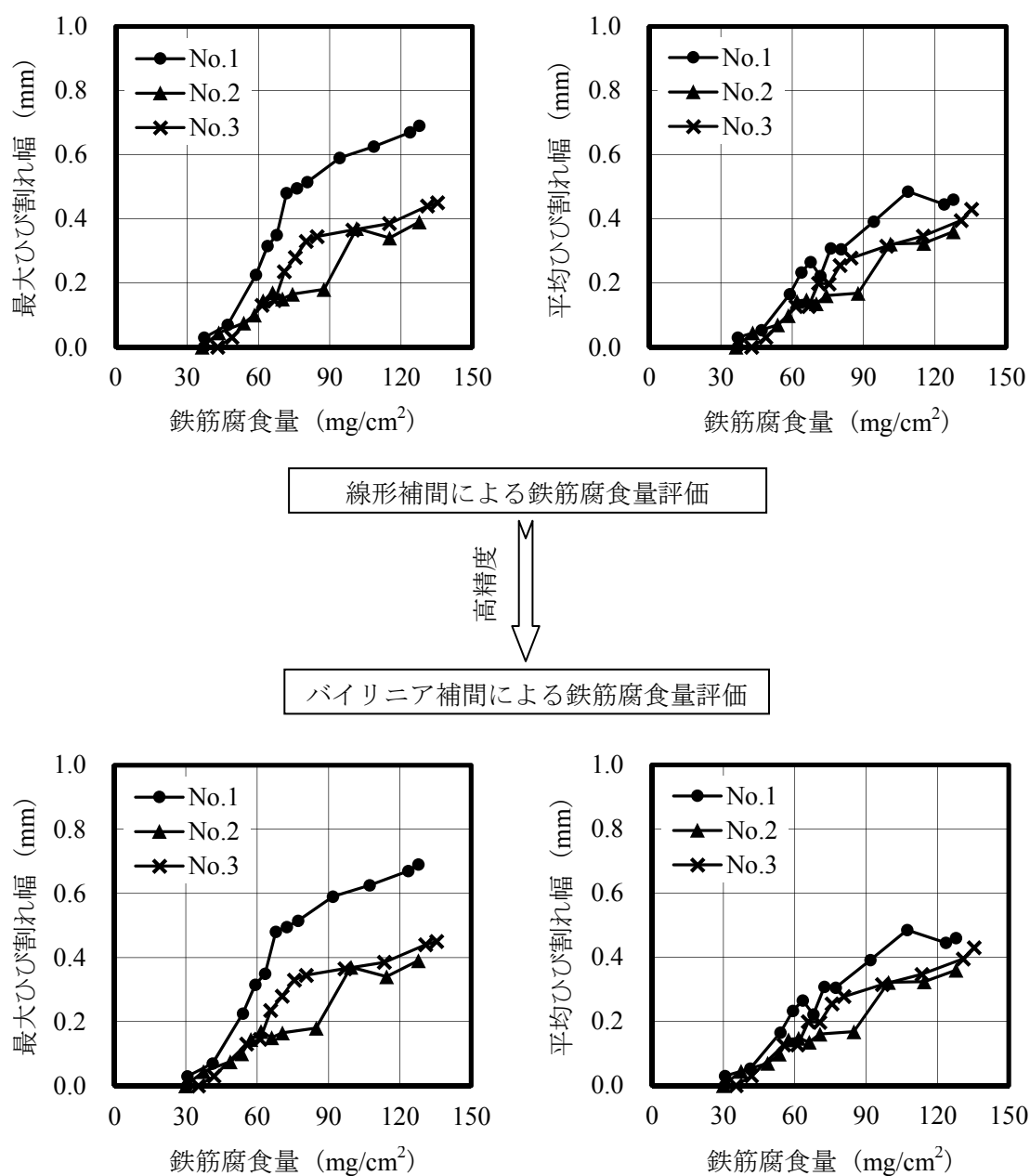


図 2.6.1-21 R40-160 シリーズの鉄筋腐食量と腐食ひび割れ挙動の関係

図 2.6.1-22 に R60-200 シリーズの腐食ひび割れ進展挙動として、積算電流量に対する最大腐食ひび割れ幅(左図)と 3 か所の測定点の平均腐食ひび割れ幅(右図)の拡張挙動を示す。促進腐食中の鉄筋腐食量は、従来の線形補間による評価(上図)と図 2.6.1-20 に示す実験結果に基づいてバイリニア補間による高精度評価(下図)したのもである。バイリニア評価により、鉄筋腐食量は少ないほうへシフトするのがわかる。また、腐食ひび割れ幅が 0.2 から 0.4mm 程度になると、腐食生成物が試験体外に流出するため、拡張速度が低下している。

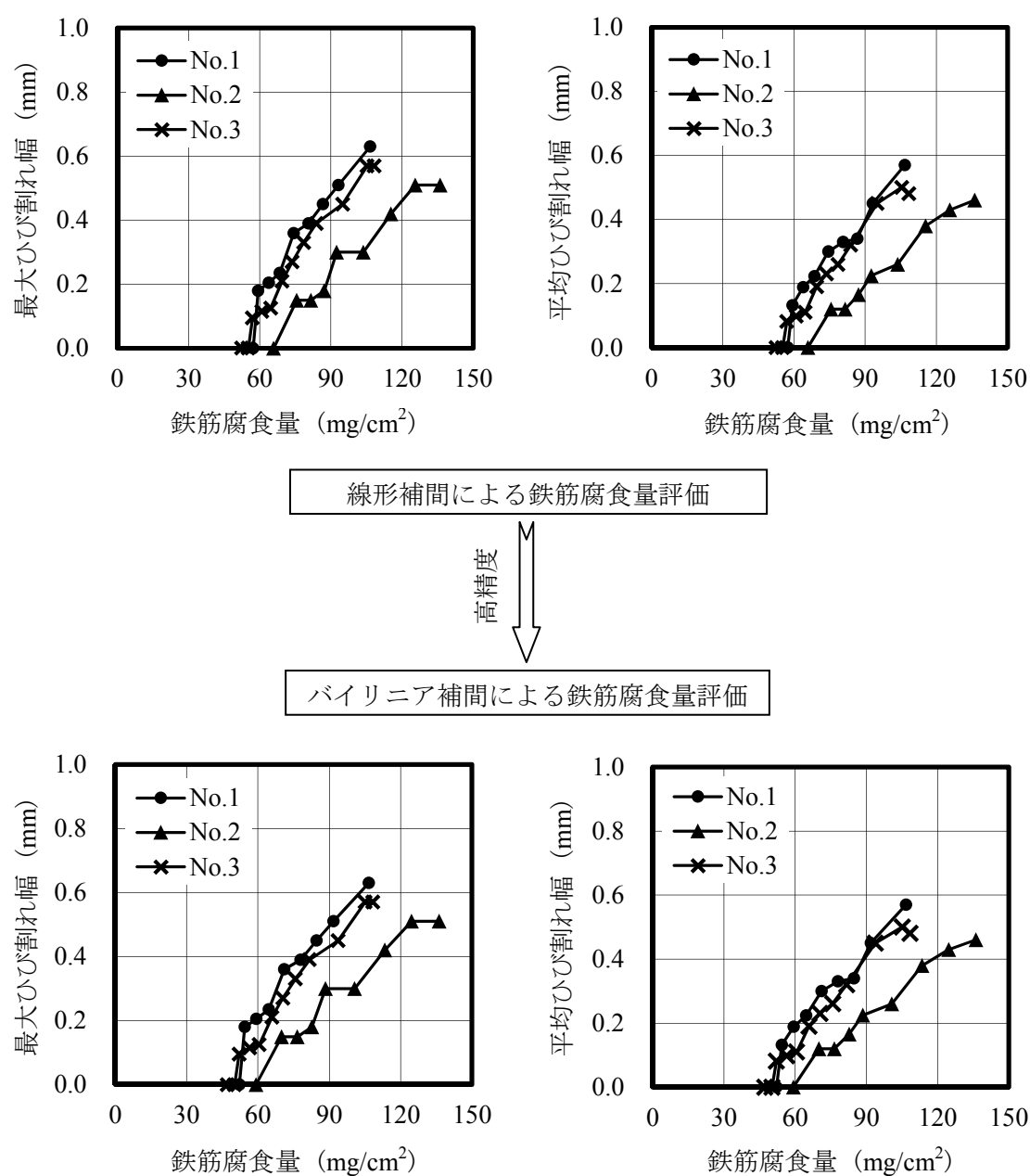


図 2.6.1-22 R60-200 シリーズの鉄筋腐食量と腐食ひび割れ挙動の関係

図 2.6.1-23 に R60-400 シリーズの腐食ひび割れ進展挙動として、積算電流量に対する最大腐食ひび割れ幅(左図)と 3 か所の測定点の平均腐食ひび割れ幅(右図)の拡張挙動を示す。促進腐食中の鉄筋腐食量は、従来の線形補間による評価(上図)と図 2.6.1-20 に示す実験結果に基づいてバイリニア補間による高精度評価(下図)したのもである。バイリニア評価により、鉄筋腐食量は少ないほうへシフトするのがわかる。また、R40-160 シリーズと同様に、腐食ひび割れ幅が 0.2 から 0.4mm 程度になると、拡張速度が低下している。

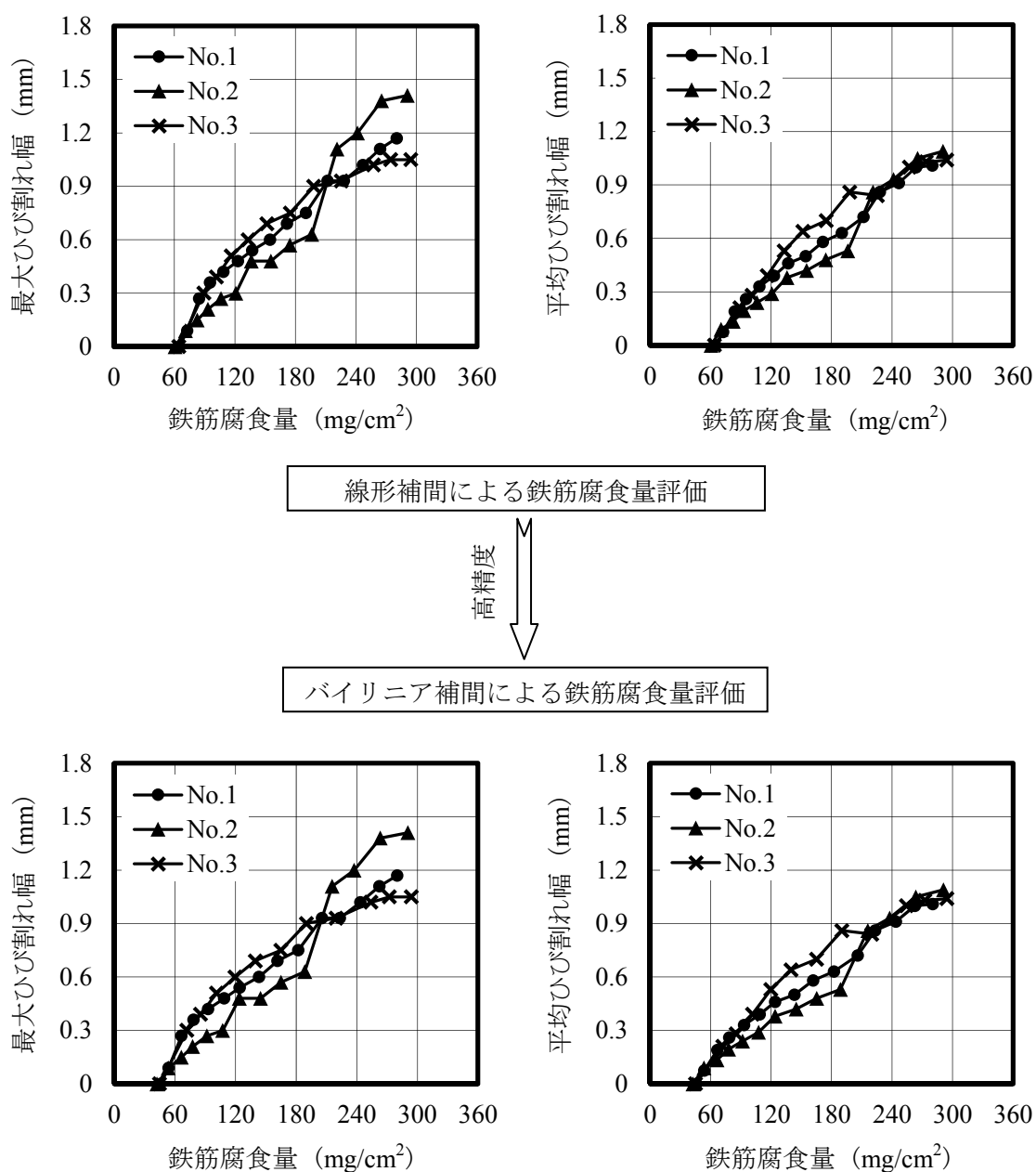


図 2.6.1-23 R60-400 シリーズの鉄筋腐食量と腐食ひび割れ挙動の関係

図 2.6.1-24 に C66-200 シリーズの腐食ひび割れ進展挙動として、積算電流量に対する最大腐食ひび割れ幅(左図)と 3 か所の測定点の平均腐食ひび割れ幅(右図)の拡張挙動を示す。促進腐食中の鉄筋腐食量は、従来の線形補間による評価(上図)と図 2.6.1-20 に示す実験結果に基づいてバイリニア補間による高精度評価(下図)したのもである。バイリニア評価により、鉄筋腐食量は少ないほうへシフトするのがわかる。腐食ひび割れ進展挙動は、矩形断面とは若干異なるが、最終的な腐食ひび割れ幅については、ほとんど相違が見られない。

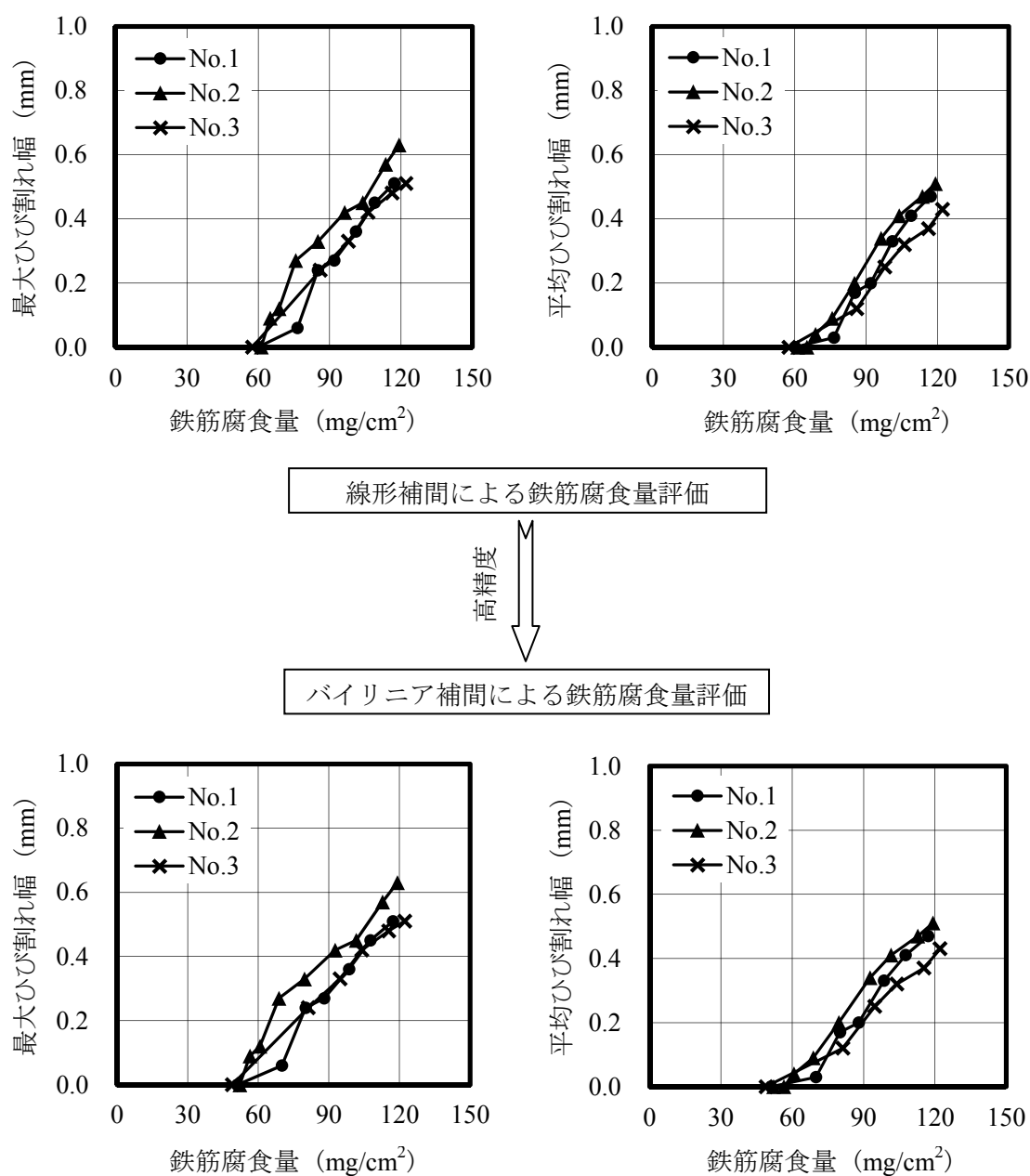


図 2.6.1-24 C66-200 シリーズの鉄筋腐食量と腐食ひび割れ挙動の関係

図 2.6.1-25 に C66-400 シリーズの腐食ひび割れ進展挙動として、積算電流量に対する最大腐食ひび割れ幅(左図)と 3 か所の測定点の平均腐食ひび割れ幅(右図)の拡張挙動を示す。促進腐食中の鉄筋腐食量は、従来の線形補間による評価(上図)と図 2.6.1-20 に示す実験結果に基づいてバイリニア補間による高精度評価(下図)したのもである。バイリニア評価により、鉄筋腐食量は少ないほうへシフトするのがわかる。通電量が多くなると、円形断面は矩形断面より断面積の小さい腐食生成物を蓄積する容量が小さいため、腐食ひび割れ幅は大きくなる。

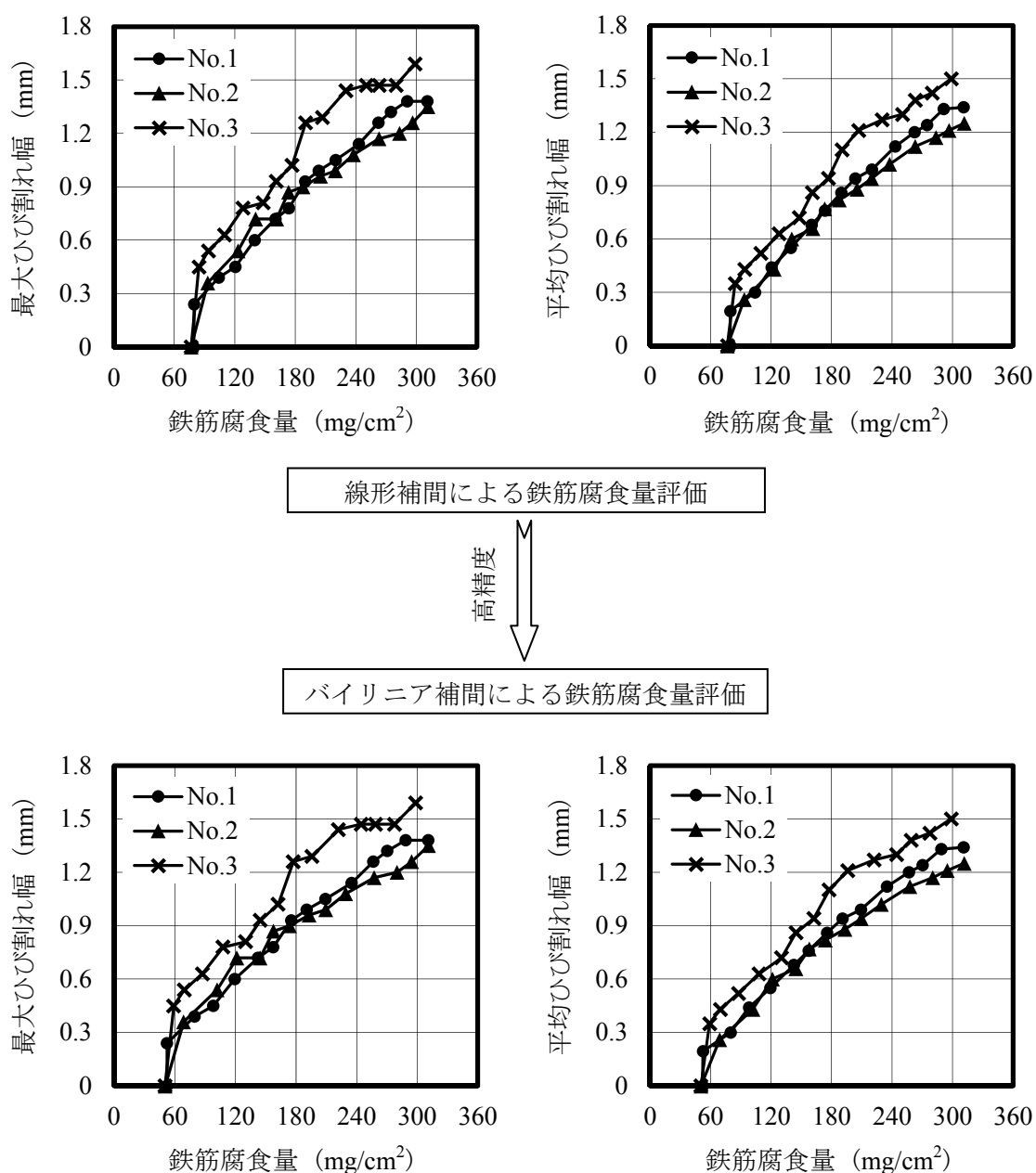


図 2.6.1-25 C66-400 シリーズの鉄筋腐食量と腐食ひび割れ挙動の関係

10) 実験結果・考察-腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食量を評価する式

計測の容易なコンクリート表面の腐食ひび割れ幅から、内部鉄筋の腐食量を推定するために、前述の実験結果及び昨年度の腐食実験結果を用いて、回帰式を作成する。腐食ひび割れ幅は、最大腐食ひび割れ幅を使用すると鉄筋腐食量を過小評価するため、平均腐食ひび割れ幅を使用し、腐食ひび割れ挙動に最も影響のあるかぶり厚さとセメントペーストの細孔構造（コンクリート強度または水セメント比）の影響を考慮する。

(a) 回帰式対象試験体

回帰式を検討する試験体は、昨年度柱要素試験体から、かぶり厚さ 40 mm (12-Fc24, 48, 72, 20-T-Fc24, 48, 72, 8-Fc48, 20-Fc48)の 8 体とかぶり厚さ 20mm (12C-20)1 体、今年度試験体から、R40-45 及び R40-160 シリーズの 6 体、R60-100、R60-200 及び R60-400 シリーズの 9 体の計 24 体である。

昨年度試験体のかぶり厚さ 40mm で Fc48 以上の試験体は、図 2.6.1-20 に示すバイリニア補間によって、腐食量を再評価している。ただし、かぶり厚さ 20mm と低強度 Fc24 の試験体については、腐食ひび割れ発生時の腐食量が小さいため、線形補間としている。

今年度試験体の R40-45 シリーズと R60-100 シリーズについては、腐食ひび割れ発生時の腐食量を評価するためにのみ使用している。また今年度円形断面試験体は、前項で述べたように、腐食生成物をセメントペースト内の細孔部に蓄積できる容量が小さく、矩形断面とは異なる腐食ひび割れ挙動を示したため、対象試験体とはしていない。

(b) 腐食ひび割れ進展挙動のモデル化

腐食ひび割れ進展挙動は前項で述べたように、ある鉄筋腐食量でコンクリート表面に腐食ひび割れが現れ、その後腐食量の増加と共にひび割れ幅は広がる（拡幅）。さらに腐食ひび割れ幅が 0.2 から 0.4mm 程度まで拡幅すると、腐食生成物がひび割れを通して試験体の外に流出するため、拡幅速度は緩やかになる。このひび割れ挙動を図 2.6.1-26 に示すバイリニアでモデル化する。ただし、ひび割れ幅から腐食量を推定することを考慮し、横軸を腐食ひび割れ幅、縦軸を腐食量としている。本検討では、拡幅速度が変化する腐食ひび割れ幅を 0.2mm とし、多数の実験結果が利用可能な腐食ひび割れ幅 0.6mm までを対象とする。

このモデルを同定するためには、腐食ひび割れ発生時の腐食量 β 、第 1 勾配 α_1 及び第 2 勾配 α_2 を、かぶり厚さとコンクリート強度の関数としてあらわす必要がある。そこで検討対象試験体の腐食ひび割れ挙動を 0.1mm 間隔で線形補間し、算定した腐食ひび割れ発生時の腐食量 β 、第 1 勾配 α_1 及び第 2 勾配 α_2 を表 2.6.1-12 に示す。

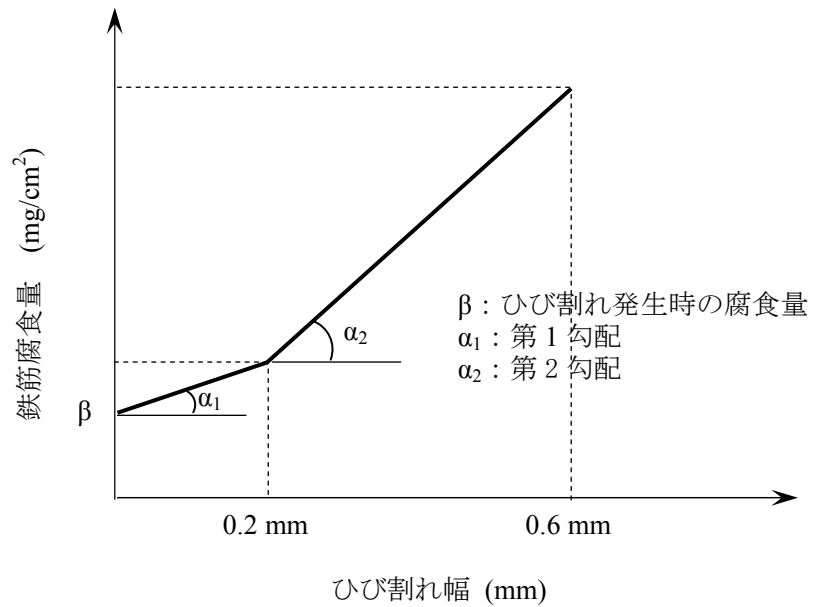


図 2.6.1-26 腐食ひび割れ進展挙動のモデル化

以上より、腐食ひび割れ幅 w_{cr} (mm)から、鉄筋腐食量 w_{corr} (mg/cm²)を推定す式は、(2.6.1-5)式となる。

$$\begin{aligned}
 0 &\leq w_{cr} \leq 0.2 \\
 w_{corr} &= \alpha_1 \cdot w_{cr} + \beta \\
 0.2 &\leq w_{cr} \leq 0.6 \\
 w_{corr} &= \alpha_2 \cdot (w_{cr} - 0.2) + w_{corr(w_{cr}=0.2)}
 \end{aligned}
 \tag{2.6.1-5}$$

ここで、 $w_{corr(w_{cr}=0.2)}$ は $w_{cr}=0.2$ mm の時の鉄筋腐食量 w_{corr} (mg/cm²)である。

表 2.6.1-12 各試験体の腐食ひび割れ発生時の腐食量 β 、第 1 勾配 α_1 及び第 2 勾配 α_2

試験体名	ひび割れ発生時の腐食量 β (mg/cm ²)	第 1 勾配 α_1 (mg/cm ² /mm)	第 2 勾配 α_2 (mg/cm ² /mm)
R40-45-1	35	-	-
R40-45-2	28	-	-
R40-45-3	27	-	-
R40-160-1	30	131	273
R40-160-2	30	290	250
R40-160-3	35	178	281
R60-100-1	44	-	-
R60-100-2	46	-	-
R60-100-3	49	-	-
R60-200-1	49	62	123
R60-200-2	59	134	193
R60-200-3	47	99	127
R60-400-1	51	74	246
R60-400-2	50	132	220
R60-400-3	50	92	231
12-Fc24	14	921	155
12-Fc48	38	112	299
12-Fc72	20	94	216
20-T-Fc24	17	672	989
20-T-Fc48	60	92	359
20-T-Fc72	46	115	398
8-Fc48	49	297	434
20-Fc48	39	76	252
12-C20	18	390	708

(c) 腐食ひび割れ発生時の腐食量 β とコンクリート強度の関係

腐食ひび割れ発生時の腐食量 β とコンクリート強度の関係を検討するために、かぶり厚さが同じ 40mm の試験体 14 体について図 2.6.1-27 示す。同図の破線の 2 次式の近似曲線で、相関係数 R が 0.81 となる。コンクリート強度 $40(\text{N/mm}^2)$ 程度を頂点とする 2 次曲線となるのは、図 2.6.1-28 に示すセメントペーストの細孔構造の影響と考えられる。すなわちコンクリート強度が低い (W/C が高い) 場合は空隙が多く、腐食生成物が容易にコンクリート表面まで進展できる。コンクリート強度が高く (W/C が低く) になると、腐食生成物の進展が困難になり、腐食生成物がコンクリート表に到達するまで、多くの腐食生成物がかぶりコンクリートの細孔部へ侵入するため、ひび割れ発生時の腐食量は多くなる。

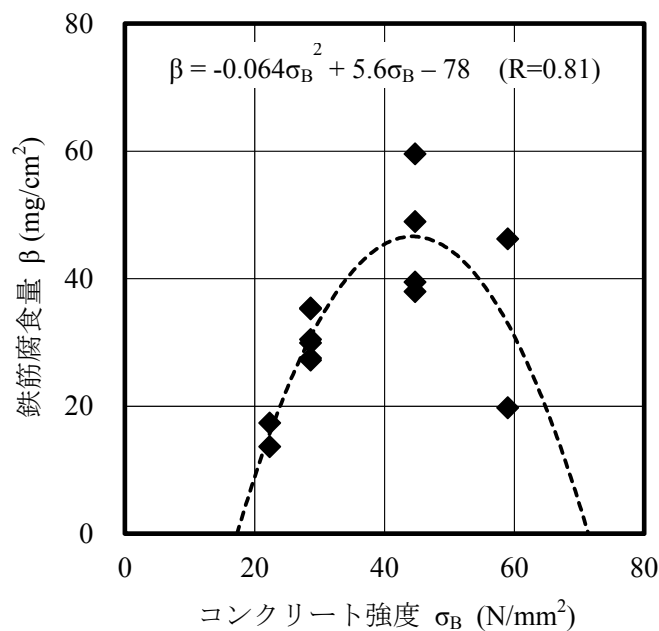


図 2.6.1-27 腐食ひび割れ発生時の腐食量 β とコンクリート強度の関係 (かぶり 40mm)

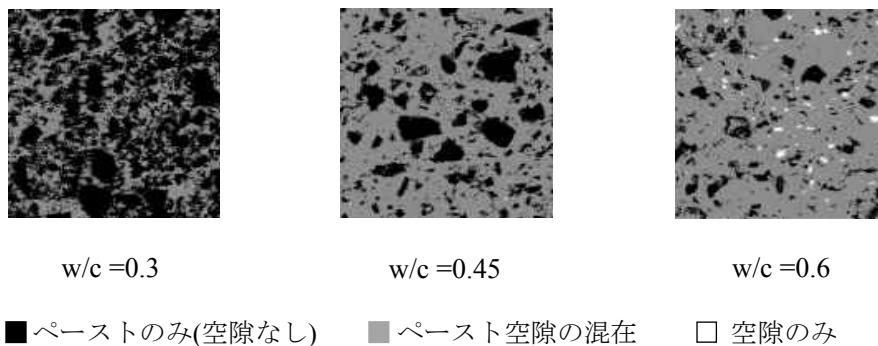


図 2.6.1-28 セメントペーストの空隙構造に及ぼす水セメント比の影響

さらにコンクリート強度が高くなると、細孔部が少なくなり、腐食生成物の細孔部への侵入量も少なくなるため、少ない腐食量でコンクリート表面に達するようになる。

(d) 腐食ひび割れ発生時の腐食量 β とかぶり厚さの関係

腐食ひび割れ発生時の腐食量 β とかぶり厚さの関係を検討するために、コンクリート強度が同等な試験体 16 体について図 2.6.1-29 に示す。同図に示す簡単な指数関数（かぶり厚が 0 で β も 0、かぶり厚が無限大で β も無限大）高い相関係数が得られた。

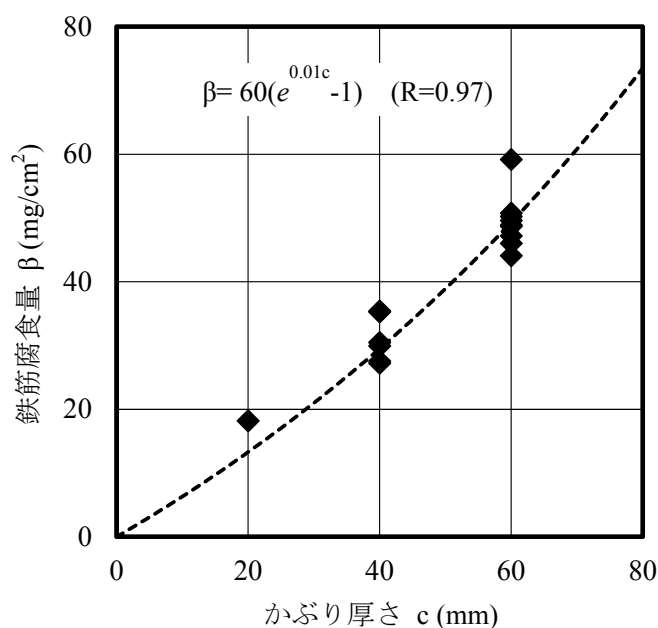


図 2.6.1-29 腐食ひび割れ発生時の腐食量 β とかぶり厚の関係 ($\sigma_B \div 30 \text{ N/mm}^2$)

(e) 第 1 勾配 α_1 とコンクリート強度及びかぶり厚さの関係

第 1 勾配 α_1 とコンクリート強度の関係を検討するために、かぶり厚さが同じ 40mm の試験体 11 体について図 2.6.1-30 に示す。コンクリート強度が 0 で大きな勾配、コンクリート強度が無限大で 0 となる指数関数で近似している。

第 1 勾配 α_1 とかぶり厚さの関係を検討するために、コンクリート強度が同等な試験体 10 体について図 2.6.1-31 に示す。かぶり厚さが 0 で大きな勾配、かぶり厚さが無限大で 0 となる指数関数で近似している。

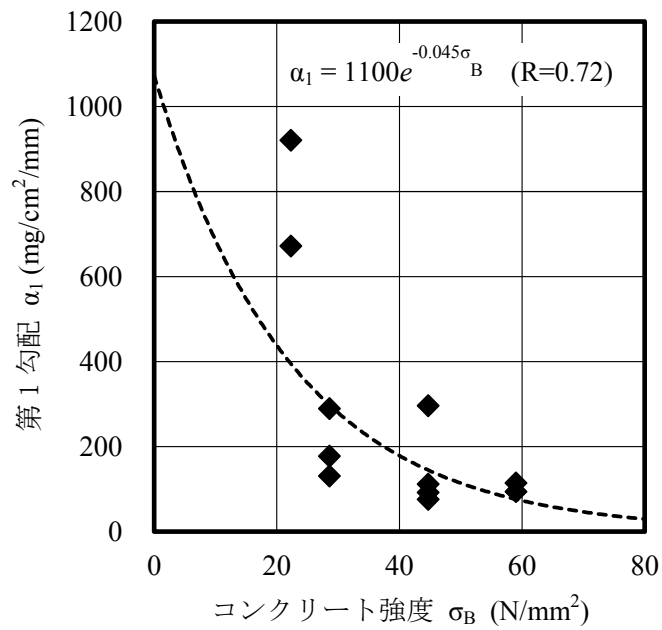


図 2.6.1-30 第1勾配 α_1 とコンクリート強度の関係 (かぶり 40mm)

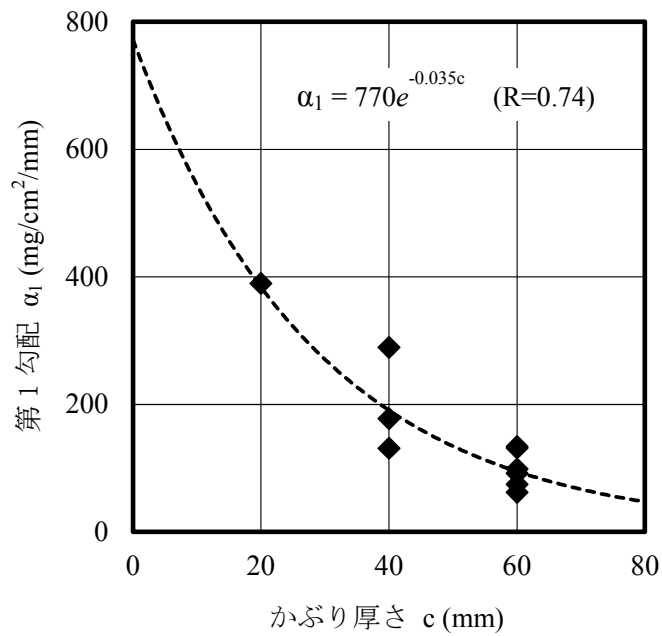


図 2.6.1-31 第1勾配 α_1 とかぶり厚の関係 ($\sigma_B \approx 30$ N/mm²)

(f) 第2勾配 α_2 とコンクリート強度及びかぶり厚さの関係

第2勾配 α_2 とコンクリート強度の関係を検討するために、かぶり厚さが同じ 40mm の試験体 11 体について図 2.6.1-32 に示す。図からわかるように第2勾配はコンクリート強度に依存しない。腐食ひび割れ幅が 0.2mm を超えると、かぶりコンクリートの細孔部が腐食生成物で埋め尽くされ、図 2.6.1-28 に示す強度による細孔構造の相違が消失するためと思われる。

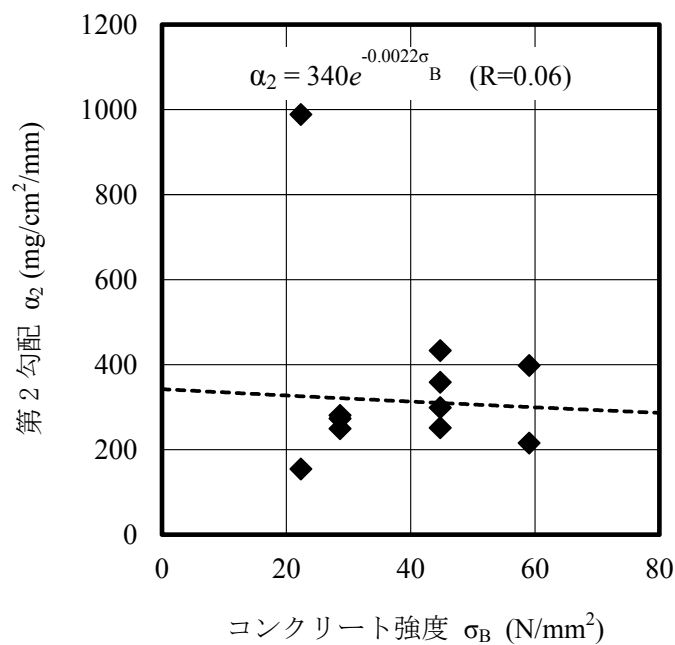


図 2.6.1-32 第2勾配 α_2 とコンクリート強度の関係（かぶり 40mm）

第2勾配 α_2 とかぶり厚さの関係を検討するために、コンクリート強度が同等な試験体 10 体について図 2.6.1-33 に示す。かぶり厚さが 0 で大きな勾配、かぶり厚さが無限大で 0 となる指数関数で近似している。

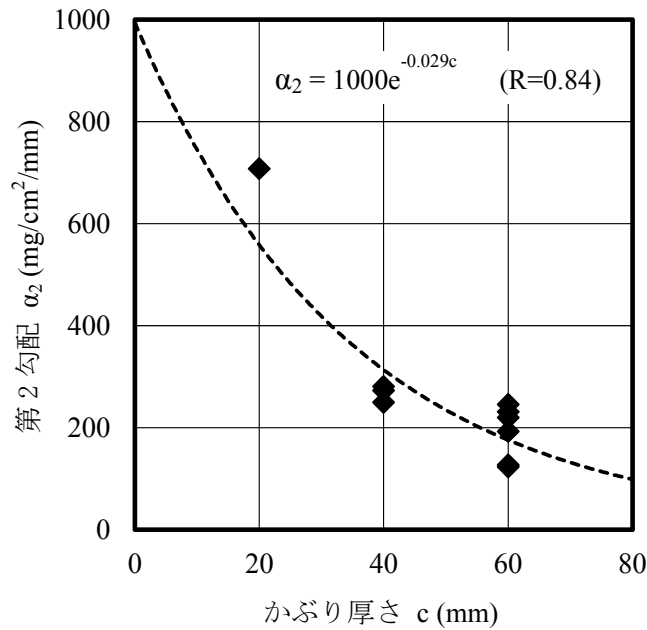


図 2.6.1-33 第2勾配 α_2 とかぶり厚の関係 ($\sigma_B \doteq 30 \text{ N/mm}^2$)

(g) 回帰式のまとめ

以上の回帰分析より、鉄筋腐食量推定式(2.6.1-5)の腐食ひび割れ発生時の腐食量 β 、第1勾配 α_1 及び第2勾配 α_2 は、コンクリート強度 σ_B (N/mm^2)の影響を考慮した(2.6.1-6)式とかぶり厚さ c (mm)の影響を考慮した(2.6.1-7)式となる。

$$\begin{aligned}\beta &= (-0.064 \cdot \sigma_B^2 + 5.6 \cdot \sigma_B - 78) \\ \alpha_1 &= 1100 \cdot e^{-0.045 \cdot \sigma_B} \\ \alpha_2 &= 340 \cdot e^{-0.0022 \cdot \sigma_B}\end{aligned} \quad (2.6.1-6)$$

$$\begin{aligned}\beta &= 60 \cdot (e^{0.01c} - 1) \\ \alpha_1 &= 770 \cdot e^{-0.035c} \\ \alpha_2 &= 1000 \cdot e^{-0.029c}\end{aligned} \quad (2.6.1-7)$$

(2.6.1-6)式は $c=40\text{mm}$ に対して得られた回帰式であるから、かぶり厚さの影響を考慮するため、(2.6.1-7)式を $c=40\text{mm}$ で1を取るようにし、(2.6.1-6)式に代入することによって、コンクリート強度とかぶり厚さを考慮した鉄筋腐食評価式(2.6.1-8)が得られる。

$$\begin{aligned}
0 &\leq w_{cr} \leq 0.2 \\
w_{corr} &= \alpha_1 \cdot w_{cr} + \beta \\
0.2 &\leq w_{cr} \leq 0.6 \\
w_{corr} &= \alpha_2 \cdot (w_{cr} - 0.2) + w_{corr(w_{cr}=0.2)}
\end{aligned}
\tag{2.6.1-8}$$

$$\begin{aligned}
\beta &= (-0.13 \cdot \sigma_B^2 + 11.5 \cdot \sigma_B - 160) \cdot (e^{0.01 \cdot c} - 1) \\
\alpha_1 &= 4300 \cdot e^{(-0.045 \cdot \sigma_B - 0.035 \cdot c)} \\
\alpha_2 &= 1100 \cdot e^{(-0.0022 \cdot \sigma_B - 0.029 \cdot c)}
\end{aligned}$$

ここで、 $w_{corr(w_{cr}=0.2)}$ は $w_{cr}=0.2\text{mm}$ の時の鉄筋腐食量 w_{corr} (mg/cm^2)である。

(h) 腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食を評価する提案式の整合性

腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食を評価する提案式の整合性を確認するため、図 2.6.1-34 に R40-160 シリーズ、図 2.6.1-35 に R60-200 及び 400 シリーズの実験結果と提案式を比較して示す。さらに昨年度試験体の圧縮強度とかぶり厚さの異なる実験結果との比較を図 2.6.1-36 に示す。今年度試験体はもちろん、昨年度試験体に対しても、腐食ひび割れ挙動が大きくばらついた低強度コンクリートを除いて、良い対応を示している。

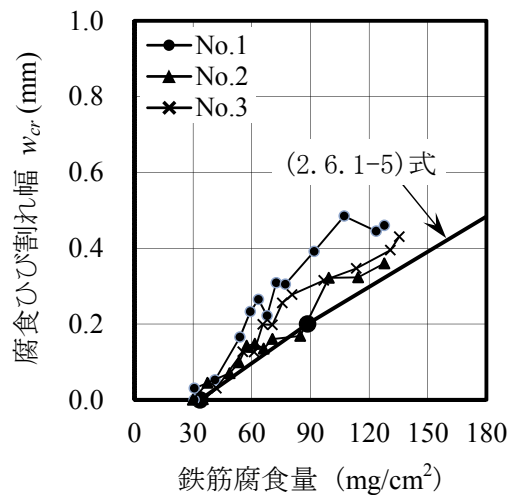


図 2.6.1-34 提案式と実験結果の比較 (R40-160 シリーズ)

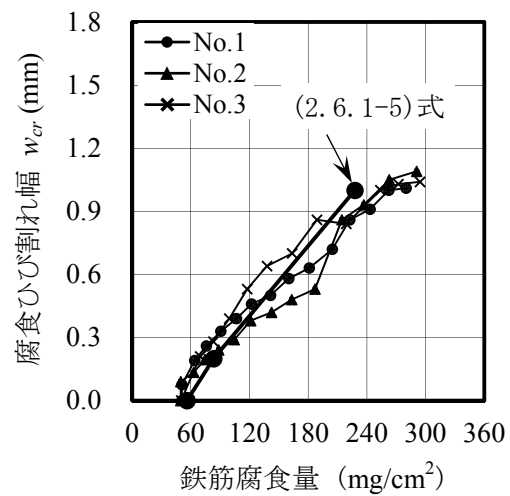
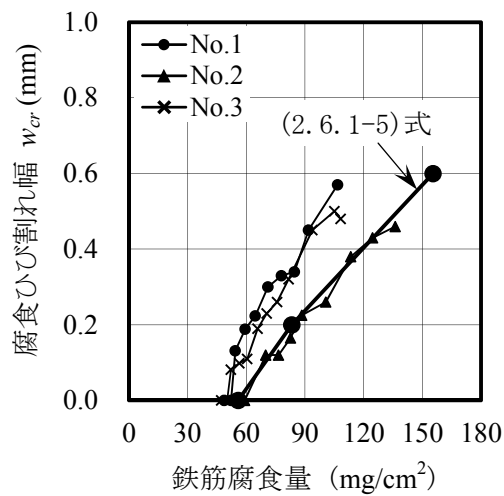
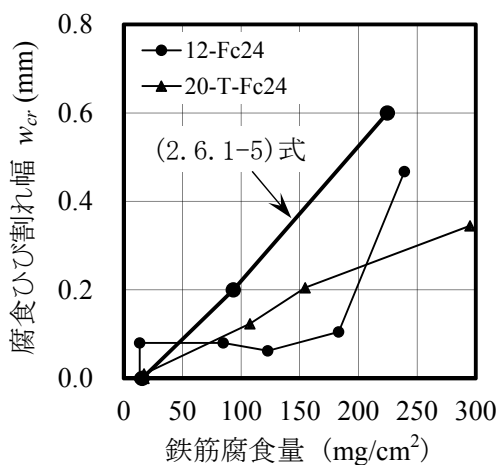
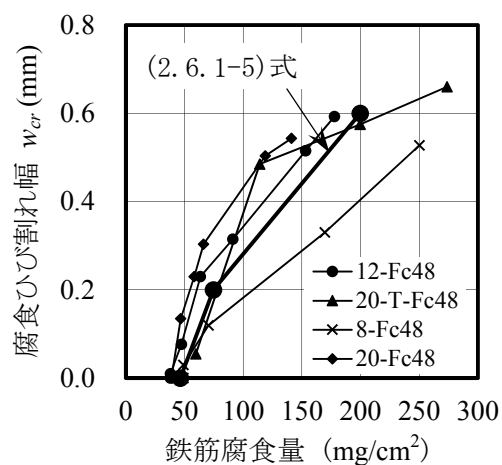


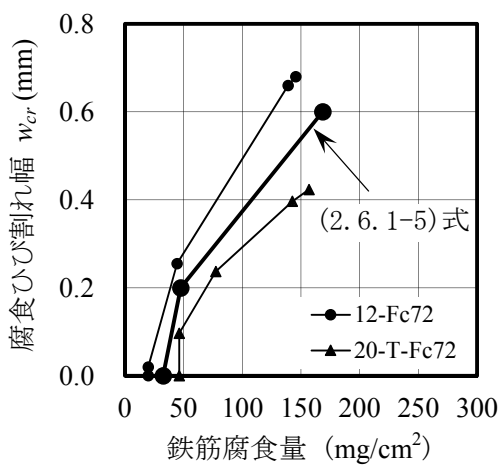
図 2.6.1-35 提案式と実験結果の比較 (R60-200(左)と R60-200(右)シリーズ)



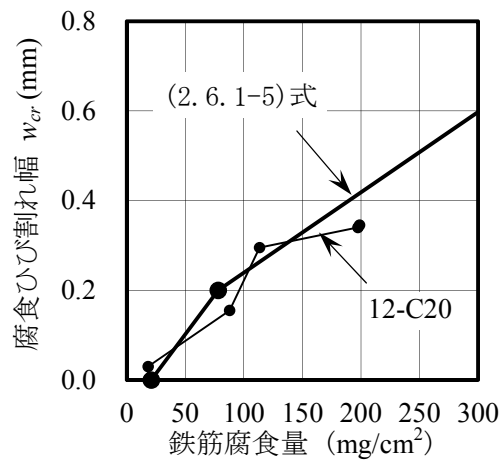
(1) コンクリート強度 $\sigma_B=22.3 \text{ N/mm}^2$



(2) コンクリート強度 $\sigma_B=44.7 \text{ N/mm}^2$



(3) コンクリート強度 $\sigma_B=59.0 \text{ N/mm}^2$



(4) かぶり厚さ $c=20 \text{ mm}$

図 2.6.1-36 提案式と昨年度実験結果の比較 ($\sigma_B=22.3 \sim 59.0 \text{ N/mm}^2$)

11) 実験結果・考察－腐食鉄筋を有するコンクリートの割裂強度

R40 シリーズの促進腐食終了後、所定の割裂引張試験によって得られた割裂強度を表 2.6.1-13 に示す。割裂強度は、円形断面に対する強度式を代用するが、鉄筋部（最大径 18mm は考慮しない。腐食ひび割れが表面に現れる前後では、腐食ひび割れ面が連結しているわけではないため、割裂強度はほとんど低下しない（表の薄墨部、図の○）。しかしながら積算通電量 $160\text{mA}\cdot\text{h}/\text{cm}^2$ （腐食量 4.3%）になり、腐食生成物が外部に流出する経路（腐食ひび割れ）が明確になると、割裂強度は 3 割程度低下している。図 2.6.1-37 は表をグラフ化したものである。マーカーは◇が腐食ひび割れ発生前、□が腐食ひび割れ発生時、○が腐食ひび割れ発生後である。

表 2.6.1-13 R40 シリーズ試験体の割裂強度

試験体		σ_t (N/mm ²)	σ_t (平均) (N/mm ²)
R40-0	No.1	1.38	1.38
R40-22	No.1	1.78	1.58
	No.2	1.22	
	No.3	1.74	
R40-45	No.1	1.30	1.51
	No.2	1.70	
	No.3	1.54	
R40-160	No.1	1.20	1.09
	No.2	1.14	
	No.3	0.93	

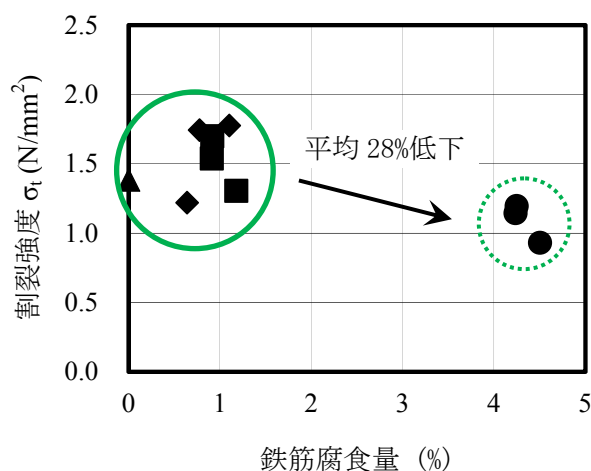


図 2.6.1-37 R40 シリーズ試験体の腐食量と割裂強度の関係

同様に、R60 シリーズの割裂強度を表 2.6.1-14 と図 2.6.1-38 に示す。R40 シリーズより腐食ひび割れ面が長くなるため、ひび割れ発生時 (R60-100) で若干の割裂強度低下がみられ、最終的には、R40 シリーズの 2 倍の低下率となっている。

表 2.6.1-14 R60 シリーズ試験体の割裂強度

試験体		σ_t (N/mm ²)	σ_t (平均) (N/mm ²)
R60-30	No.1	1.37	1.47
	No.2	1.59	
	No.3	1.46	
R60-65	No.1	1.27	1.64
	No.2	1.98	
	No.3	1.67	
R60-100	No.1	1.27	1.28
	No.2	1.21	
	No.3	1.36	
R60-200	No.1	1.00	0.86
	No.2	0.84	
	No.3	0.73	
R60-400	No.1	0.54	0.71
	No.2	0.82	
	No.3	0.76	

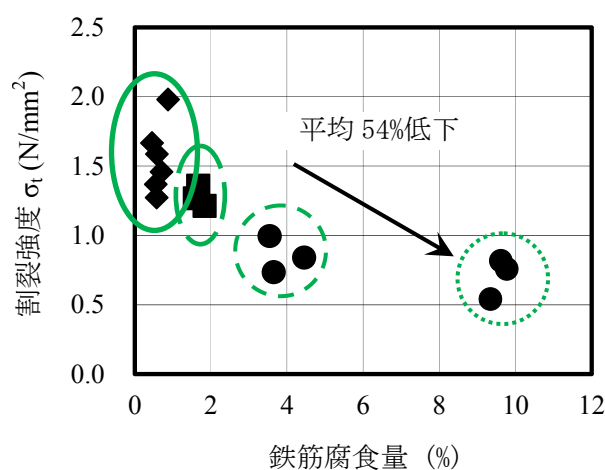


図 2.6.1-38 R60 シリーズ試験体の腐食量と割裂強度の関係

同様に、C66 シリーズの割裂強度を表 2.6.1-15 と図 2.6.1-39 に示す。本試験体は JIS の割裂引張試験に準拠しており、計 23mm の PC 鋼棒を介した矩形断面に比べて、割裂強度は高く、鉄筋腐食による割裂強度低下も緩やかである。

表 2.6.1-15 C66 シリーズ試験体の割裂強度

試験体		σ_t (N/mm ²)	σ_t (平均) (N/mm ²)
C66-0	No.1	1.43	1.77
	No.2	2.25	
	No.3	1.64	
C66-30	No.1	1.94	1.85
	No.2	1.55	
	No.3	2.07	
C66-100	No.1	1.73	1.85
	No.2	1.96	
	No.3	1.85	
C66-200	No.1	1.31	1.35
	No.2	1.29	
	No.3	1.46	
C66-400	No.1	1.04	1.14
	No.2	1.19	
	No.3	1.21	

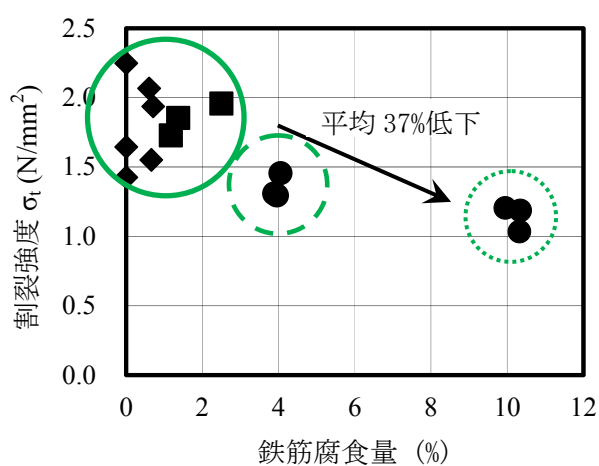


図 2.6.1-39 C66 シリーズ試験体の腐食量と割裂強度の関係

各試験体シリーズの割裂引張試験後の代表的な腐食ひび割れ面における腐食生成物の性状を図 2.6.1-40 に示す。矩形断面 R40 と 60 シリーズでは塩水が侵入し、腐食生成物が流出した方向を矢印で示す。円形断面 C66 シリーズについては、図 2.6.1-16 に示すように、2 方向から塩水が侵入する設計であったが、実際には 1 方向のみから腐食生成物が流出したため、その方向を矢印で示す。この図からわかるように、腐食生成物は、流出経路が定まるとその経路に集中し、反対側にはほとんど侵入していない。したがって、前述の割裂強度は腐食ひび割れ部と健全部に対する強度が混在しているため、腐食ひび割れ面に対する割裂強度を過大評価していると思われる。

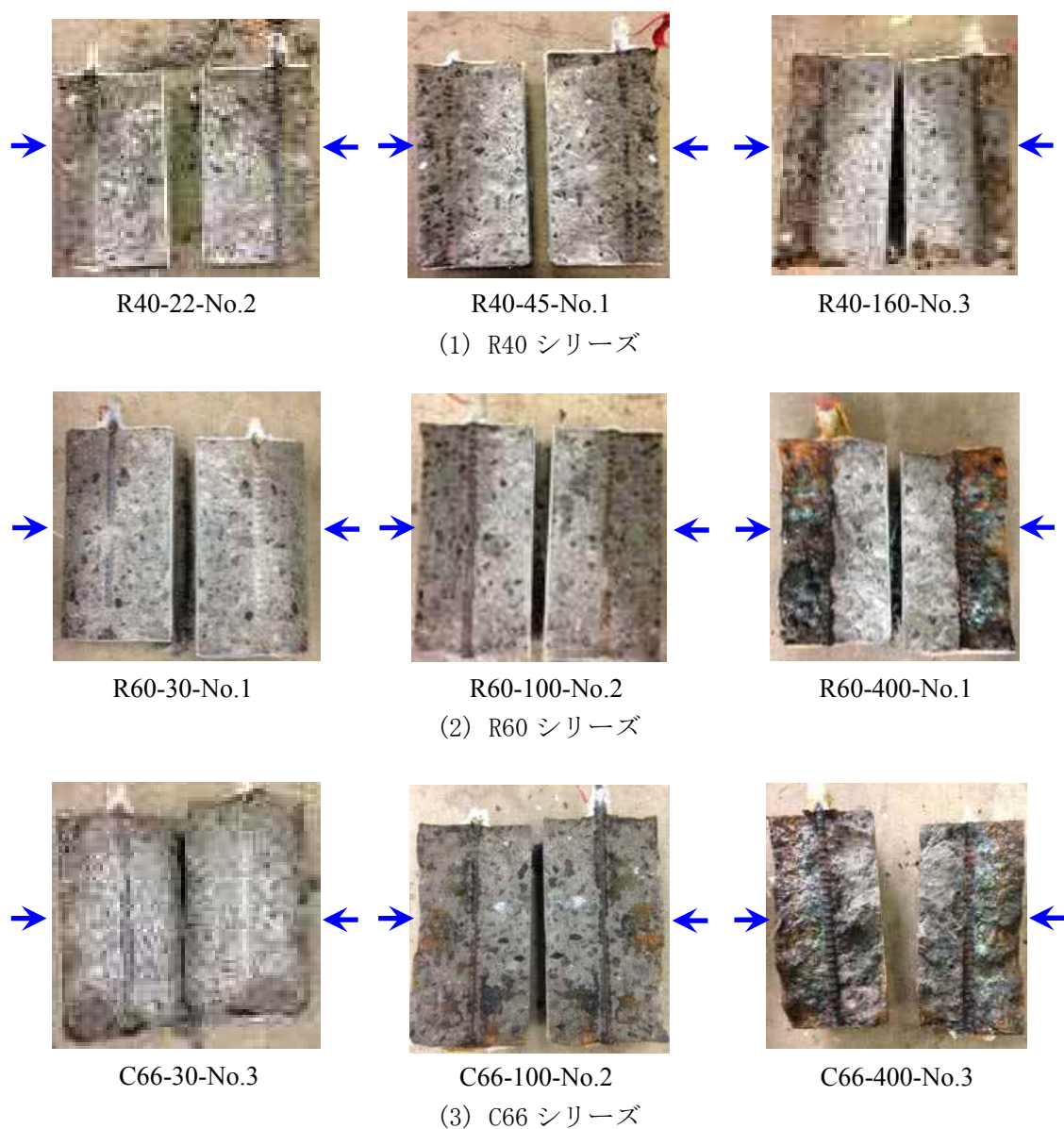


図 2.6.1-40 割裂引張試験後の代表的な腐食ひび割れ面における腐食生成物の性状

かぶりコンクリートの剥落に影響を及ぼす腐食ひび割れ面における割裂強度を評価するために、以下の手順により、腐食ひび割れ部に対する割裂強度を算出した。

- ① 鉄筋腐食による割裂強度の低下がほとんど見られなかった表 2.6.1-13、表 2.6.1-14 及び表 2.6.1-15 の薄墨部の試験体を健全試験体とし、その平均荷重 P_{helth} を求める（R40 は $P_{helth}=94.79$ kN、R60 は $P_{helth}=96.79$ kN、C66 は $P_{helth}=113.44$ kN）。
- ② 各腐食試験体の腐食生成物がほとんど侵入しなかった反対側を健全部とし、割裂荷重量 P から健全部が負担する荷重（R40 は $P_{helth} \times 92/132$ 、R60 は $P_{helth} \times 72/132$ 、C66 は $P_{helth} \times 66/132$ ）を差引いて、腐食部が負担する荷重 $P_{corr.}$ を求める。

$P_{corr.}$ から円形断面に対する割裂強度式である(2.6.1-9)式によって、腐食ひび割れ部の割裂強度を算出する。

$$\sigma_{t(corr.)} = \frac{2P_{corr.}}{\pi d_{corr.} l} \quad (2.6.1-9)$$

ここで、 $d_{corr.}$ は腐食ひび割れ部の深さ（R40 は 40mm、R60 は 60mm、C66 は 66mm）であり、 l は試験体長さ 300mm である。

以上の方法で評価した腐食ひび割れ部の割裂強度を図 2.6.1-41、図 2.6.1-42 及び図 2.6.1-43 において白抜きで示す。ただし、割裂試験に潜在する誤差や健全部鉄筋周りの多少の損傷を無視しているため、腐食ひび割れ部の割裂強度が負となる場合はゼロとしている。健全ひび割れ部が相対的に大きくなる矩形断面試験体は、腐食ひび割れ面の割裂強度が大きく低下している。実際には健全部とみなしたひび割れ面にも、図 2.6.1-40 に示すようにある程度損傷がみられるため、両者の中間程度の割裂強度と考えられる。

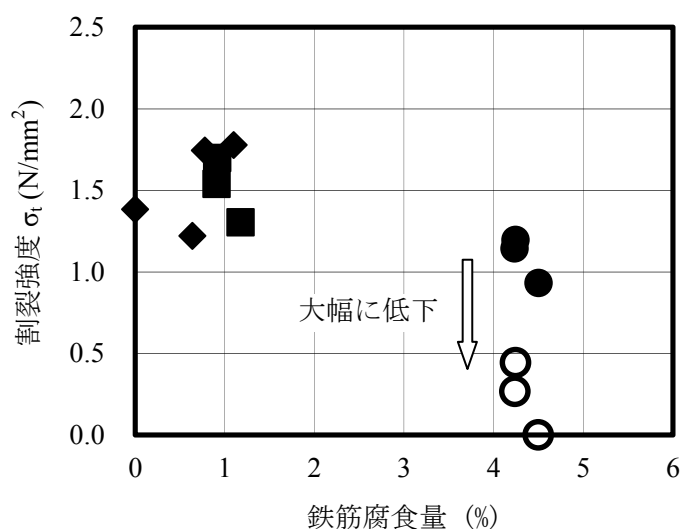


図 2.6.1-41 R40 シリーズ試験体の腐食量と腐食ひび割れ面の割裂強度の関係

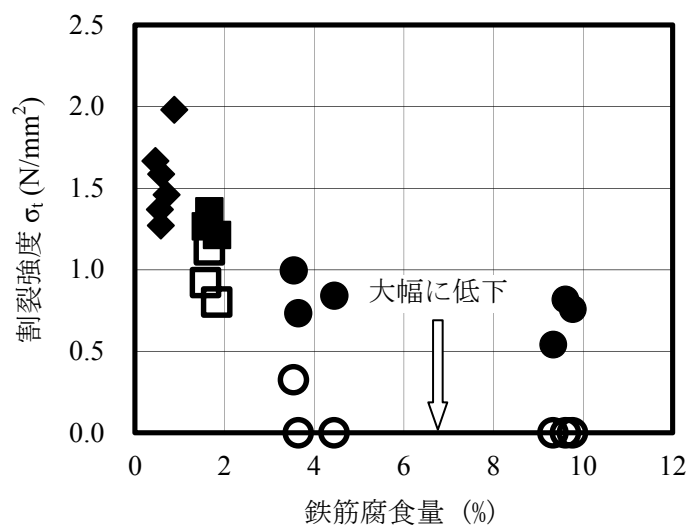


図 2.6.1-42 R60 シリーズ試験体の腐食量と腐食ひび割れ面の割裂強度の関係

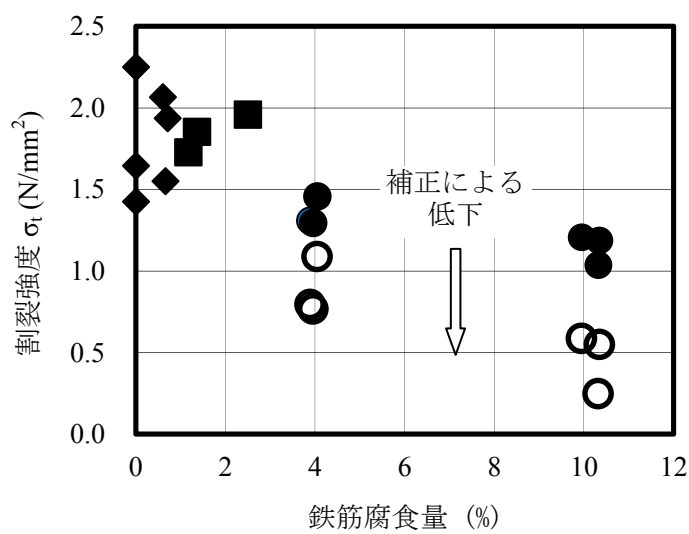


図 2.6.1-43 C66 シリーズ試験体の腐食量と腐食ひび割れ面の割裂強度の関係

12) 実験結果・考察—鉄筋腐食量による割裂強度低下率の定式化

鉄筋腐食量からかぶりコンクリートの剥落危険度を評価するために、鉄筋腐食量による割裂強度低下率を推定する式を提案する。鉄筋腐食に伴う割裂強度低下は、健全試験体の割裂強度を1とする比率で表現する。定式化は以下の方針で行う。

- ① 健全試験体で1、腐食量無限大で0となる関数として、簡便な指数関数 $\exp(-ax)$ を使用する。
- ② e 関数では割裂強度が0の場合、係数 a が不定となるため、微小な 0.02 を代用する。
- ③ PDFt 曲線の第3象限になるように、強度低下率を下向きにとる。

上記方針で得られた提案式と実験結果を図 2.6.1-44、図 2.6.1-45 及び図 2.6.1-46 に示す。いずれも相関係数 0.8 程度の回帰式となっている。前述したように補正後の割裂強度は、腐食ひび割れ以外をすべて健全部としているため下限値と考えられる。実際の腐食ひび割れ部位の付着割裂強度は、補正前と補正後の間に存在すると考えるのが妥当である。

10) 実験結果・考察で定式化した腐食ひび割れ幅から鉄筋腐食量を評価する式と鉄筋腐食量から割裂強度低下率を評価する式を用いることによって、計測が容易なコンクリート表面の腐食ひび割れ幅から内部鉄筋の腐食量並びにかぶりコンクリートの剥落危険度を同時に求めることができる。ただし、ここでいうひび割れ幅は、乾燥収縮や外力によるひび割れは対象としておらず、あくまでも鉄筋の腐食膨張に起因する腐食ひび割れであることに注意しなければならない。

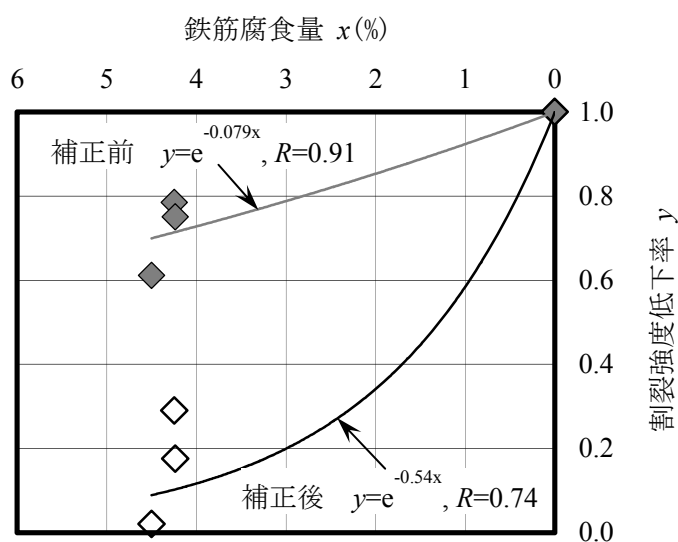


図 2.6.1-44 R40 シリーズ試験体の鉄筋腐食量と割裂強度低下率の関係

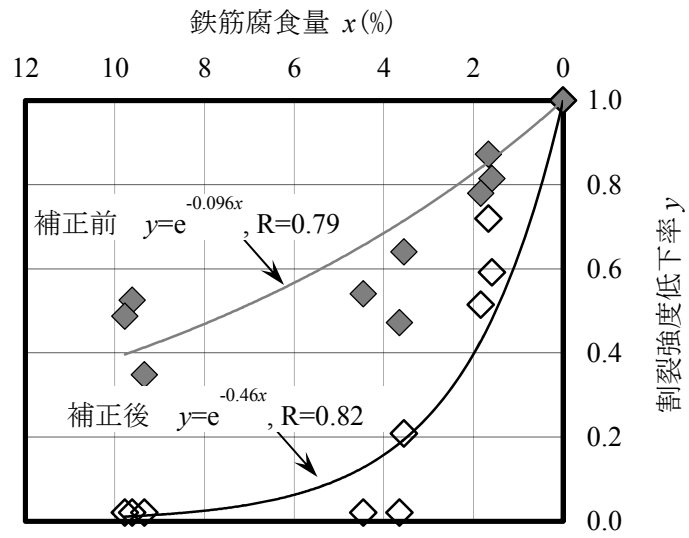


図 2.6.1-45 R60 シリーズ試験体の鉄筋腐食量と割裂強度低下率の関係

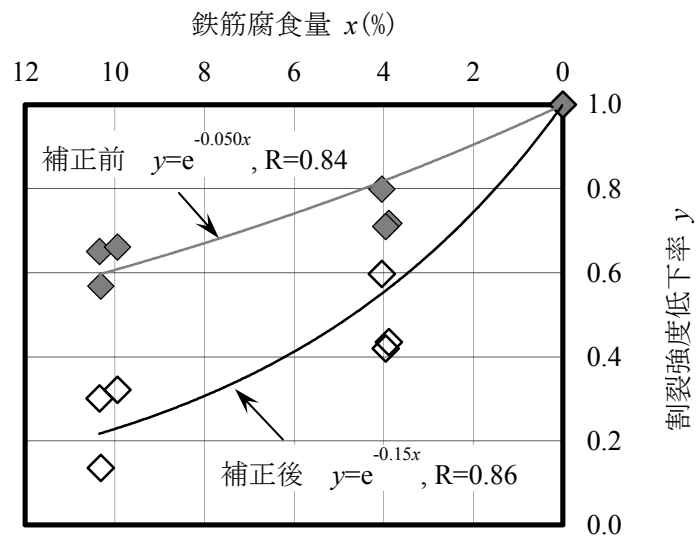


図 2.6.1-46 C66 シリーズ試験体の鉄筋腐食量と割裂強度低下率の関係

(4) まとめ

腐食ひび割れ発生前後の腐食量を複数回実測することによって、腐食ひび割れ発生前後の腐食速度の相違に基づき、腐食ひび割れ挙動及び腐食によるコンクリートの割裂強度低下率を明らかにした。その結果、鉄筋腐食と割裂強度低下率の関係を示す定式を得ることができた。主な結論を以下に示す。

- ① 腐食ひび割れ発生前後で、腐食速度が異なり、腐食量は積算電流量に比例しない。
- ② 最終腐食量から線形補間によって腐食量を推定する場合、腐食ひび割れ発生時の腐食量を2割から3割程度過大評価する。
- ③ 腐食ひび割れ発生時の腐食量を折れ点とするバイリニアにより、鉄筋内部の腐食量を推定した。
- ④ かぶりコンクリートが大きいほど腐食生成物を空隙に蓄積する容量が大きくなり、腐食ひび割れの発生は、遅れる（発生時点で腐食はかなり進行している）。
- ⑤ 表面腐食ひび割れの拡幅速度は、腐食生成物が試験体の外に流出する腐食ひび割れ幅0.2 から 0.4 mm 程度になると減速する。
- ⑥ C66 の円形断面は、矩形断面より腐食生成物を蓄積する容量が小さいことから、R60 より腐食ひび割れ幅が増大する。
- ⑦ C66 を除く試験体と昨年度までの実験結果を用いて、コンクリート表面の腐食ひび割れ幅から内部鉄筋の腐食量を推定する回帰式を提案した。
- ⑧ 腐食鉄筋を取り出す際、所定の割裂試験を行い、鉄筋腐食による割裂強度の劣化（剥落の危険性）を定量化した。
- ⑨ 実際の腐食ひび割れ挙動に基づき、腐食ひび割れ部位の割裂強度を補正した。
- ⑩ 鉄筋腐食量と割裂強度低下率の関係を定式化した。
- ⑪ コンクリート表面の腐食ひび割れ幅から、鉄筋腐食量ばかりでなく、かぶりコンクリートの剥落危険度を評価可能とした。

以上より、計測が容易なコンクリート表面の腐食ひび割れ幅によって、コンクリート内部の鉄筋の腐食量及びかぶりコンクリートの剥落危険度を把握できることから、経年劣化した RC 部材の腐食性状と構造性能の評価に参考になる知見が得られた。

本事業で得られた、図 2.6.1-44～図 2.6.1-46 の図中に示す鉄筋腐食と割裂強度低下率の定式は、鉄筋腐食度を D 、腐食によるコンクリートの割裂強度低下率を P とした場合の長期健全性評価での P - D 曲線に反映することが可能である。

2.6.2 経年劣化材料と鉄筋コンクリート部材の構造物の性能に関する検討

(1) はじめに

海岸付近に建設される原子力発電施設の鉄筋コンクリート構造物にとって、塩害による鉄筋腐食は最も深刻な経年劣化の一つである。塩害により鉄筋が腐食すると鉄筋の健全な断面が減少し、腐食生成物が鉄筋とコンクリートの界面に生成する。腐食生成物は健全鉄筋よりも体積が大きく、鉄筋腐食の進行とともに周囲のコンクリートに膨張圧力が生じる。その結果として鉄筋周囲のコンクリートには鉄筋を中心としたリング状の引裂き力が作用し、この引裂き力によりコンクリートにひび割れが発生・進展する。さらに柱・梁部材においては、主筋の腐食膨張によるひび割れが横補強筋を横切ると、横補強筋のひずみが上昇し、見かけの強度が減少することによって、RC 柱・梁部材の構造性能、特にせん断耐力の低下を招く危険性があることを昨年度までの研究により明らかにしてきた。

今年度は、これまでの実験結果及び文献調査に基づき、経年劣化材料の力学特性を整理し、鉄筋腐食量が鉄筋コンクリート部材の構造性能の低下、特に耐震設計上最も重要なせん断耐力に及ぼす影響を評価するための解析的な検討を実施する。

日本の中規模以上の RC 構造物は、ほとんどが大地震時を想定したせん断耐力で配筋量などが決定するため、設計条件など構造詳細が不明の段階で経年劣化した RC 構造物の構造性能を評価する場合、せん断強度保持率に着目するのが最も合理的である。地震時のせん断力抵抗機構として、最も重要な柱・梁部材と壁部材を対象とし、原子力発電施設及び一般の RC 構造物の安全性に係わるせん断破壊に対し、各学会の設計式・指針式に基づいて耐力評価を行い、 P - D 曲線に反映させることを目的とする。

はじめに、これまで本研究で行った鉄筋腐食量と材料特性の関係を整理し、 P - D 曲線に反映させる。 PDF_t 曲線の第 3 象限は、本来、材料劣化度 D と構造性能 P の関係であるが、構造部材の性能に影響するパラメータが材料劣化を含め極めて多いため、グラフ化すると煩雑になる。それ故、構造物の性能に関しては、材料劣化を考慮した鉄筋コンクリート部材のせん断強度保持率を各種設計規準式に基づいて、定量的に評価できるエクセル計算シートを作成し、経年劣化した鉄筋コンクリート部材の耐力低下を試算する。劣化材料による部材耐力低下挙動を検討することによって、どのような材料劣化が構造物の性能に最も影響を及ぼすのか把握することができる。

(2) 経年劣化材料と構造物の性能

1) 経年劣化材料と構造物の性能の整理

本節の課題である「経年劣化材料と鉄筋コンクリート部材の構造物の性能の関係」として、本事業で行った鉄筋腐食量と構造物の性能の関係を図 2.6.2-1 に示す $PDFt$ 曲線の第 3 象限に整理する。

以降は、 $PDFt$ 曲線の P - D 曲線との関係に係る鉄筋腐食量と構造物の性能の関係について、過年度までの成果を整理したものである。

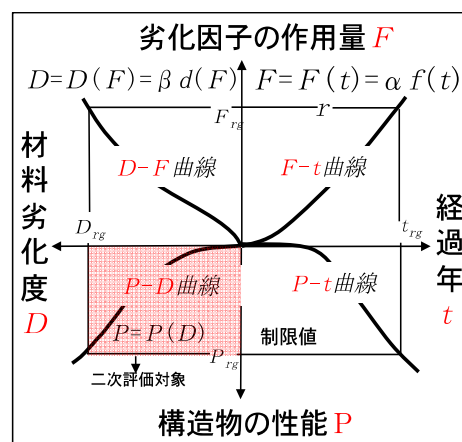


図 2.6.2-1 材料劣化度 D と構造物の性能 P の関係 ($PDFt$ 曲線の第 3 象限)

(a) 鉄筋腐食量とコンクリートの割裂強度の関係

昨年度の実験では、鉄筋の腐食生成物が横補強筋間を連結するように進展することによって、かぶりコンクリートの剥落の危険性が高くなることが明らかになった。そこで今年度は、2.6.1 節で示したように、横補強筋間を連結する腐食生成物の進展挙動をシミュレートする促進腐食実験を行い、腐食ひび割れ面について割裂引張試験を行い、割裂強度を定量化することによって、かぶりコンクリートの剥落危険性を評価する尺度を提案した。

鉄筋腐食量 x とコンクリートの割裂強度低下率 y の関係を図 2.6.2-2 に示す。2.6.1 節で述べたように、割裂強度低下率の上限は健全ひび割れ部と腐食ひび割れ部が混在した強度であり、下限は腐食ひび割れ部のみで評価した強度であるため、実際の強度低下率は両者の間の薄墨部とするのが妥当である。

なお、本成果で得た鉄筋腐食量とコンクリートの割裂強度低下率の関係式は、 PDF_t 曲線の $P-D$ 曲線を決定する際の定性的な知見として活用できる。

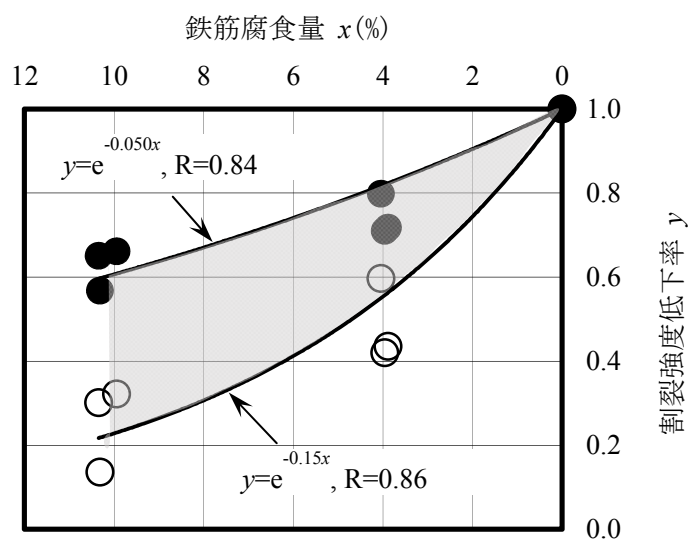


図 2.6.2-2 鉄筋腐食量と割裂強度低下率の関係

(b) 鉄筋腐食量と付着強度低下率及び引張強度低下率の関係

平成 23 年度の腐食鉄筋とコンクリートとの付着性状を検討するために行った両引き試験より得られた、鉄筋腐食量と付着強度低下率及び引張強度低下率の関係を図 2.6.2-3 に示す。同図には、次項(3)のエクセル計算シートで使用する李・野口による付着強度式を併せて示しているが、両引き試験より得られた付着強度とは大きな相違がみられる。付着強度は鉄筋腐食のばらつきばかりではなく、試験に用いる鉄筋の種類や部材の形状・寸法の違いに大きく依存しているものと考えられる。

平成 23 年度の付着実験は直径 125mm のシリンダーの対称軸に D19 の鉄筋を 1 本配した両引き試験体を使用しており、付着強度は FEM による逆解析で求めている。

なお、本成果で得た鉄筋腐食量と付着強度低下率及び引張強度低下率の関係式は、PDFt 曲線の P-D 曲線を決定する際の定性的な知見として活用できる。

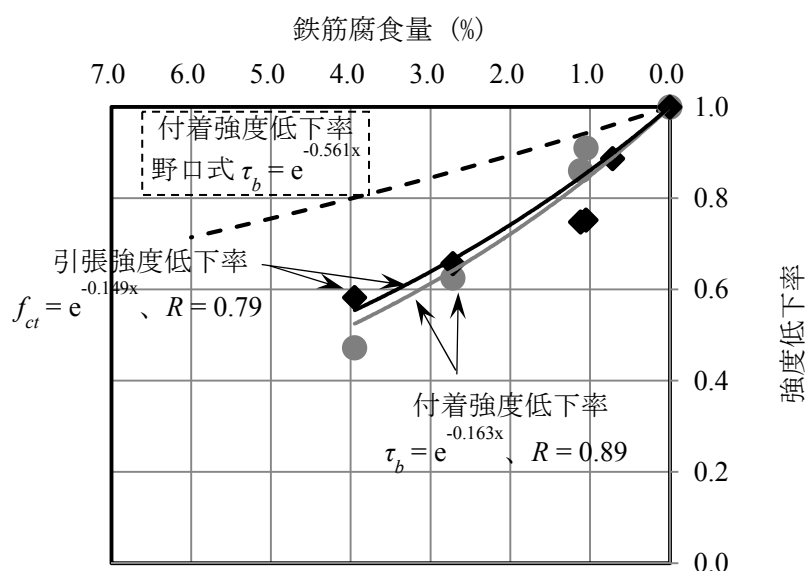


図 2.6.2-3 鉄筋腐食量と付着強度低下率及び引張強度低下率の関係

(c) 鉄筋腐食量と付着割裂強度の関係

平成 24～25 年度の鉄筋腐食による付着割裂強度の劣化を検討するために、異なる横補強筋比 ($p_w=0$ 、0.15、0.3%) を有する鉄筋コンクリート梁部材を用いて、部材側面が横補強筋に沿って分裂するサイドスプリット破壊を対象とした付着割裂実験を行った。鉄筋腐食量と付着割裂強度低下率の関係を図 2.6.2-4 に示す。横補強筋量が多いほど、付着割裂破壊に対する拘束が高くなり、鉄筋腐食による付着割裂劣化は抑えられる傾向にある。今回の実験では、試験体数が少なかったことから、得られたデータの数が限られたものになったが、下図に示すように鉄筋腐食量と付着割裂強度低下率の関係式を導出した。

なお、本成果で得た鉄筋腐食量と付着割裂強度低下率の関係式は、 PDF_t 曲線の $P-D$ 曲線を決定する際の定性的な知見として活用できる。

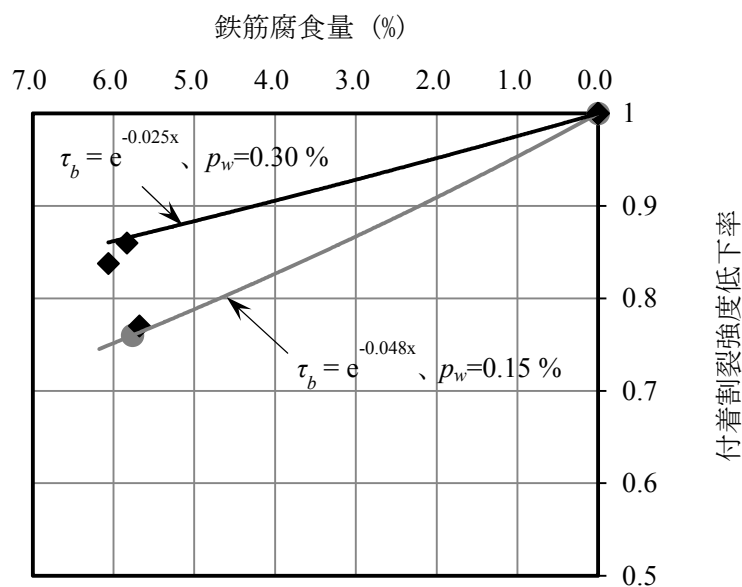


図 2.6.2-4 鉄筋腐食量と付着割裂強度低下率の関係

(d) 鉄筋腐食量と横補強筋強度低下率の関係

平成 24～25 年度の鉄筋腐食による付着割裂強度の劣化及び昨年度の柱要素試験体の腐食実験において、主筋の腐食膨張ひび割れが横補強筋を横切る場合、横補強筋のひずみが上昇することが判明した。このひずみ上昇は横補強筋の残存降伏強度を低下させることになり、鉄筋コンクリート部材のせん断耐力低下に直結する。それ故、主筋の鉄筋腐食量と横補強筋の降伏強度低下率の関係を図 2.6.2-5 に示す。この図より、通常強度鉄筋 SD 295 の場合、降伏強度が半減することがわかる。しかしながら、付着割裂実験に用いた梁試験体は、ひずみゲージの保護と一定の横拘束を保持するため、横補強筋はビニールテープを巻いて腐食しないように設計した。昨年度行った柱要素試験体は、より実環境に近い塩害条件を再現できるように、主筋と横補強筋の両方をそれぞれのかぶり厚を考慮して促進腐食させた。その結果、かぶり厚の小さい横補強筋が先行して腐食し、腐食ひび割れが横補強筋に沿って形成され、このひび割れを通して腐食生成物が大量に流出した。その結果、横補強筋を横切る主筋に沿う腐食ひび割れは少なく、横補強筋のひずみ上昇は梁試験体の約半分 400 μ 程度 (2.6.1 節の図 2.6.1-10 参照) となった。

横補強筋のひずみ上昇については、RC 部材個々の配筋詳細や使用材料強度に大きく依存するため、2)の耐力計算には考慮していないが、詳細検討の段階では注意すべき項目である。

なお、本成果で得た鉄筋腐食量と横補強筋の降伏強度低下率の関係式は、PDF t 曲線の P-D 曲線を決定する際の定性的な知見として活用できる。

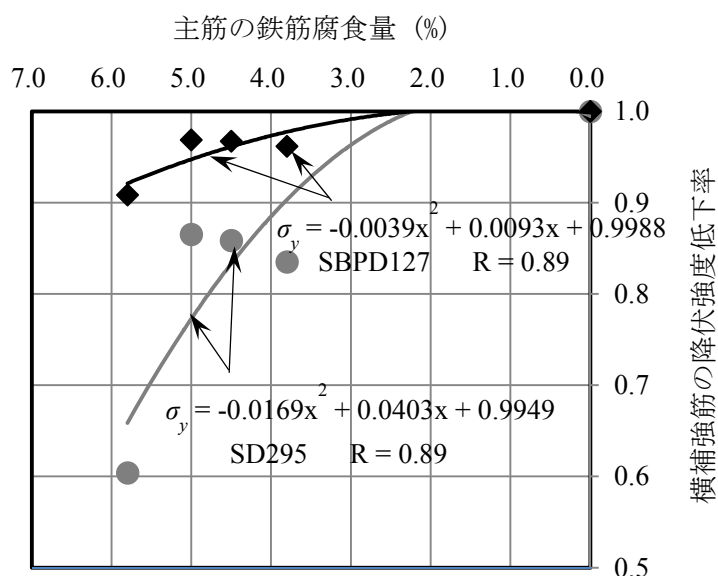


図 2.6.2-5 主筋の腐食量と横補強筋の降伏強度低下率の関係

2) エクセル計算シートで使用する材料劣化モデル

PDF_t 曲線の第3象限は、材料劣化度 D と構造性能 P の関係であるが、構造物の性能に影響するパラメータは極めて多いため、グラフ化すると煩雑になる。それゆえ、実構造物の性能を実際に評価するためには、次項(3)に示すような複数のパラメータのインプットが可能なエクセル計算シートによってせん断耐力を評価することが現実的である。

エクセル計算シートでは、コンクリートの圧縮強度低下と鉄筋腐食による力学的な劣化特性を考慮している。コンクリートの極限劣化は金津ら⁹¹の高温下に長期間暴露したコンクリートの力学的性質を参考にして、コンクリートの強度が 40%低下した極限劣化までを想定する。一方、鉄筋の劣化レベルに関しては、孔食を考慮した鉄筋腐食量と降伏強度、弾性係数及び付着強度との関係式で示されている下記の李・野口モデル⁹²を使用している。李・野口らは、鉄筋の腐食程度と RC 構造部材の構造性能との関係を明確にするために、鉄筋の腐食程度を変数とした腐食鉄筋及び付着挙動の構成則を、多数の実験データに基づいて構築したものである。当該関係の高精度な構成則は他になく、鉄筋腐食によるコンクリートの力学的な劣化特性の評価を目的とした本エクセル計算シートにとって、李・野口らの構成則は最適なモデルである。耐力計算では、(2.6.2-1)式の降伏強度と(2.6.2-3)式の付着強度のみ必要となる。(2.6.2-2)式の弾性係数と(2.6.2-4)式の付着剛性は、部材の変形性能を検討するより詳細な解析（例えば FEM など）で必要になる。また、付着強度についても、靱性指針による耐力計算においてのみ必要になるが、ほかの設計規準による耐力式では、付着強度は考慮されていない。

・降伏強度 (N/mm^2) の劣化モデル

$$\sigma_{ycor} = \sigma_{y0} \cdot (1 - 1.98w_{cor}) \quad (2.6.2-1)$$

σ_{ycor} : 腐食鉄筋の降伏強度、 σ_{y0} : 健全鉄筋の降伏強度、 w_{cor} : 鉄筋の腐食量（質量減%）

・弾性係数 (N/mm^2) の劣化モデル

$$E_{scor} = E_{s0} \cdot (1 - 1.13w_{cor}) \quad (2.6.2-2)$$

E_{scor} : 腐食鉄筋の弾性係数、 E_{s0} : 健全鉄筋の弾性係数、 w_{cor} : 鉄筋の腐食量（質量減%）

⁹¹ 金津務，松村卓郎，西内達雄：高温下に長期間暴露したコンクリートの力学的性質の変化，電力中央研究所報告，研究報告 U95037，pp.1～35，1996.3

⁹² 李翰承，野口貴文，友沢史紀：引張鉄筋の腐食した RC 梁の有限要素法による耐力性能評価に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，No.506，pp.43～50，1998.4

・付着強度 (N/mm²) の劣化モデル

$$\tau_{bcor} = \tau_{b0} \cdot e^{-0.0561w_{cor}} \quad (2.6.2-3)$$

τ_{bcor} : 腐食鉄筋の付着強度、 τ_{b0} : 健全鉄筋の付着強度、 w_{cor} : 鉄筋の腐食量 (質量減%)

・付着剛性 (N/mm²/mm) の劣化モデル

$$K_{\tau cor} = K_{\tau 0} \cdot w_{cor}^{-1.01} \quad (2.6.2-4)$$

$K_{\tau cor}$: 腐食鉄筋の付着剛性、 $K_{\tau 0}$: 健全鉄筋の付着剛性、 w_{cor} : 鉄筋の腐食量 (質量減%)

李・野口モデルは、孔食を考慮する場合、腐食量 x %で鉄筋の降伏強度は $2x$ %低下するモデルである。したがって、材料劣化が鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に及ぼす影響を検討する際の劣化レベルは、コンクリートは極限の 40%強度低下まで、鉄筋腐食量は 20% (強度低下は約 40%) まで同じ割合で劣化すると想定し、材料劣化が鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に及ぼす影響を試算する。

(3) 材料劣化を考慮した鉄筋コンクリート部材のせん断耐力評価

1) エクセル計算シート

材料劣化を考慮した鉄筋コンクリート部材のせん断強度保持率を各種設計規準式に基づいて、定量的に評価できるエクセル計算シートについて説明する。

現行の一般構造物に対する耐震設計では、一次設計（許容応力度計算：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説⁹³による）と二次設計（保有水平耐力計算：部材の終局強度が構造物に応じて要求される水平耐力を上回っていることを確認する。部材の終局強度は「建築物の構造関係技術基準解説書⁹⁴」や「原子力施設 RC 規準⁹⁵の付録」に記載されている荒川式、あるいはより精度の高い靱性指針式などで算出）の 2 段階で構成されている。一次設計は構造物の使用期間中に数度経験する可能性のある中小地震に対しては、構造物が損傷することなく、継続使用ができることを確認するため、基本的には弾性設計である。二次設計は極めて稀に発生する大地震での人命保護が目標となっており、構造物が倒壊しないことを確認するものであり、局所的な塑性化を許容している。

(1)はじめにで述べたように、境界条件などの構造詳細や荷重条件が不明の状態で経年劣化した RC 構造物の構造性能を評価する場合、せん断強度保持率に着目するのが最も合理的である。ここでは、地震時のせん断力抵抗機構として、最も重要な柱・梁及び壁を対象部材とし、せん断設計で一般に使用されている規準などに基づいて、以下の表 2.6.2-1 に示す 7 種のエクセル計算シートを作成している。

⁹³ 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、2010

⁹⁴ 建築物の構造関係技術基準解説書、国土交通省住宅局建築指導課・国土交通省国土技術政策総合研究所・建築研究所・日本建築行政会議監修、2007、2015

⁹⁵ 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、日本建築学会、2013

表 2.6.2-1 エクセル計算シートの一覧

番号	エクセル計算シートの名称	出典とした基準名	対象となる地震（注）	対象部材	エクセル計算シートの説明
01	梁・柱のせん断終局強度(荒川式)	原子力施設 RC 規 準	大地震	柱・梁	柱・梁部材を対象に、大地震時に対する安全性を検証するための終局強度を算定する計算シートである。多数の実験結果に基づく回帰式である荒川式を用いた計算シートである。実務設計で一般的に使用されている <u>基本的な耐力式</u> である。
02	柱・梁のせん断強度(A 法)	靱性指針	大地震	柱・梁	01 と同じケースで使用できる計算シートであるが、01 の荒川式より高いせん断耐力を示す。
03	梁・柱のせん断に対する算定	RC 規準	中小地震	柱・梁	中小地震に対する使用性・損傷制御性を検証する許容応力度（長期荷重・短期荷重）を算定する計算シートである。
04	耐震壁のせん断終局強度(荒川式)	原子力施設 RC 規 準	大地震	壁	壁部材を対象に、大地震時に対する安全性を検証するための終局強度を算定する計算シートである。多数の実験結果に基づく回帰式である荒川式を用いた計算シートである。実務設計で一般的に使用されている <u>基本的な耐力式</u> である。
05	耐震壁のせん断強度	ストラット&タイの方法 ⁹⁶	大地震	壁	04 と同じケースで使用できる計算シートである。ストラット&タイの方法（半理論式）を用いた計算シートであり、実験結果との整合性が高い。04 の荒川式より高いせん断耐力となる。なお、学会等でコンセンサスが得られた方法ではなく、個人の研究者の論文に基づくものである。06 より詳細な計算となる。
06	耐震壁のせん断強度	靱性指針	大地震	壁	04 と同じケースで使用できる計算シートである。トラス&アーチ機構に基づく半理論式を用いた計算シートであり、実験結果との整合性が高い。04 の荒川式より高いせん断耐力となる。建築学会の指針式であり、05 より簡便な計算である。
07	壁部材の許容せん断力	RC 規準	中小地震	壁	03 と同じケースで使用できる計算シートであるが、対象部材が壁である点が異なる。

（注）大地震とある表記は、大地震時に対する安全性を検証するための終局強度を算定し、構造物が大地震に対して倒壊しないことを確認することを意味する。中小地震とある表記は、中小地震に対する使用性・損傷制御性を検証（長期荷重・短期荷重）し、中小地震動に対して、構造物が損傷することなく、継続使用できることを確認することを意味する。

⁹⁶ 塩原等, コンクリート工学：耐震壁のせん断耐力（タイ・ストラットモデル）-力の分配と下界の定理, Vol 25, No.8 pp.101-114, 1987;論文 No. 87. 8-1

エクセル計算シートは、いずれも部材形状、使用材料、材料劣化度をインプットし、健全時と経年劣化時のせん断耐力を導出し、耐力比をアウトプットする。なお、エクセル計算シートのアウトプットとなる耐力比とは、*P-D* 曲線で評価するせん断強度保持率と同義である。

各エクセルファイルの中には、各設計規準の設計例と計算結果を含む複数のワークシートで構成されている。ただし、各設計規準の設計例による試算は、部材寸法、使用材料強度、境界条件、荷重・外力条件などが不明であるため、各規準書に記載のある設計例を想定した構造部材断面に対する健全時耐力と経年劣化時耐力を算定し、健全部材耐力に対するせん断強度保持率（耐力比）をアウトプットする計算シートとなっている。

【01,02,04,05,06 のエクセル計算シートについて】

大地震時に対する安全性を検証する場合、実務設計ではよく使用されている基本的な耐力式である荒川式を用いた 01（柱・梁）と 04（壁）のエクセル計算シートの使用が基本である。

しかし、01 と 04 の荒川式で算出したせん断耐力では耐力不足であるが、より高精度に耐力を与える半理論式⁹⁷の 02（柱・梁）、05（壁）、06（壁）の計算シートを使用すると基準を満たしている可能性がある。健全時耐力から経年劣化時の耐力低下率で評価する場合は、より高精度な耐力式を用いた 02、05、06 の計算シートを使用してもよい。なお、05（壁）と 06（壁）の違いについて、05 は学会等の委員会でコンセンサスが得られた方法ではなく、個人研究者の論文に基づくものであるのに対し、06 は建築学会の指針式に基づくものである。06 の指針式は学会で作成されたものであるため、05 よりも 06 の使用が推奨される。

【03,07 のエクセル計算シートについて】

03（柱・梁）及び 07（壁）のは、中小地震に対する使用性・損傷制御性を検証するいわゆる許容応力度計算規準（長期荷重・短期荷重）のエクセル計算シートである。前述したように、わが国の鉄筋コンクリート柱・梁・壁部材の配筋量は、大地震を想定した 2 次設計で決定されることがほとんどである。したがって構造材料の経年劣化による構造性能を評価する場合、最も余裕度のない終局強度を検証するのが合理的である。なぜならば終局耐力の低下率が許容内であれば、その他の構造性能も満たされている可能性が高いからである。ただし、柱部材（重要構造物の梁部材を含む）のように、長期荷重下でせん断ひび割れを許容しない場合は、荷重・外力の諸条件にもよるが、長期荷重で部材寸法が決定する可能性があるため、03 の計算シートを使用して検討する。その他、柱・梁部材の 03 ファイルの短期荷重及び壁部材の 07 ファイルは、配筋量に対して支配的ではないが、上述のせん断ひび割れなど一次設計で要求される使用性・損傷制御性を検討するための計算シート

⁹⁷ 構造性能に関わる理論式に実験で得られたデータを代入して導出した式

である。ただし、一次設計を行う場合、断面詳細だけではなく、長期荷重と短期荷重条件や構造部材の境界条件などの設計条件が必要になる。

エクセル計算シートを構造性能の評価に用いる際は、いずれかのエクセル計算シートを用いることになる。エクセル計算シートの選定にあたっては、評価で要求される構造性能が一次設計を対象としたものか、二次設計を対象としたものかを最初に判断する。次に対象とする部材が柱・梁であるか、壁であるか、さらには原子力施設の実務設計でよく使われる荒川式を用いるかどうかを判断し、構造性能の評価に用いるエクセル計算シートを決定する。エクセル計算シートの選定フローを図 2.6.2-6 に示す。

エクセル計算シートには、構造断面諸元、使用材料強度、材料劣化レベルなどをインプットすることによって、せん断強度保持率を算出し、許容内であるか判断する。せん断強度保持率が評価者側で定めた許容値以上の場合は、FEM 等を用いた、さらに詳細な検討が必要になる。

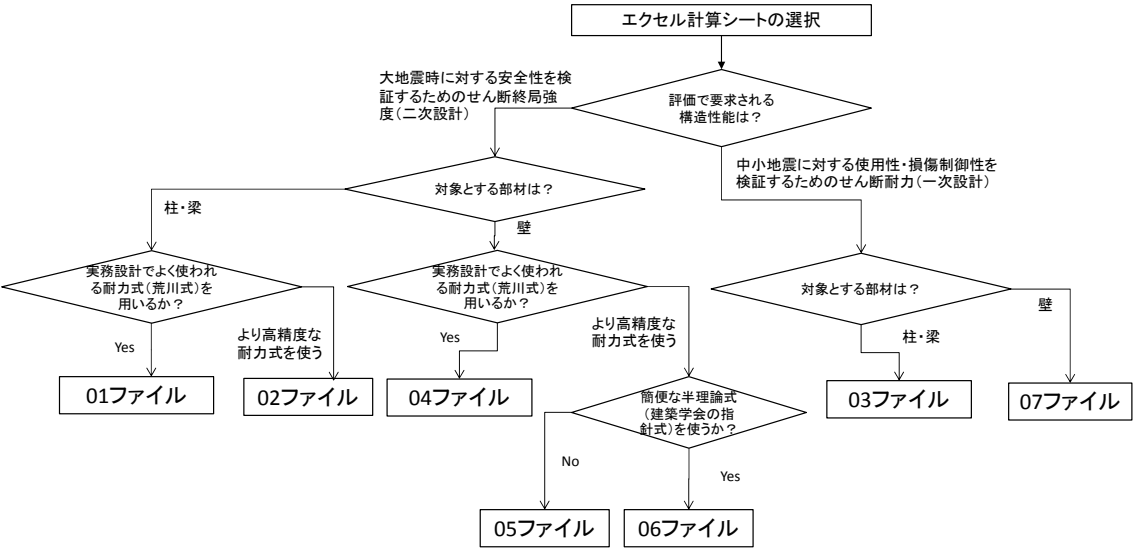


図 2.6.2-6 エクセル計算シートの選定フロー

2) 01 梁・柱のせん断終局強度(荒川式)_原子力施設 RC 規準による計算シートの説明

図 2.6.2-7 に 01 梁・柱のせん断終局強度(荒川式)_原子力施設 RC 規準の計算シートのハードコピーを示す。

The spreadsheet shows the following structure:

- Input data (rows 4-12):** Includes beam width b , effective depth d , concrete strength f_c , steel strength f_s , and section modulus Z .
- Calculation area (rows 13-15):** Contains formulas for shear capacity V_u and moment capacity M_u based on the AEA method.
- Output results (rows 16-18):** Displays calculated values for shear capacity, moment capacity, and their ratio.
- Diagram (row 19):** A schematic of a rectangular cross-section with dimensions $b=950$ mm and $d=505$ mm.
- Tables (rows 20-22):** Summary tables for design parameters and results.

図 2.6.2-7 01 梁・柱のせん断終局強度(荒川式)_原子力施設 RC 規準の計算シート

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力（コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%）
- ⑤ : 基本的な荒川式（最小値と平均値）
- ⑥ : なし
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40%）まで自動計算し、計算例シートに $PDFt$ 曲線の第 3 象限 $P-D$ 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力（梁・柱の最小値と平均値）
- ⑩ : 健全時のせん断耐力（梁・柱の最小値と平均値）
- ⑪ : ⑨/⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本計算シート（設計例は靱性指針の P.383 4 階 C4 柱）
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シートの計算結果
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例（P.176 の柱）の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

3) 02 柱・梁のせん断強度(A 法)_靱性指針によるエクセル計算シートの説明

本計算シートは、いずれも部材形状、使用材料、材料劣化度をインプットし、健全時と劣化後の耐力比をアウトプットする。図 2.6.2-8 に 02 柱・梁のせん断強度(A 法)_靱性指針の計算シートのハードコピーを示す。計算シートはいずれのファイルも同じ構成であるため、本シートを使って詳細に説明する。

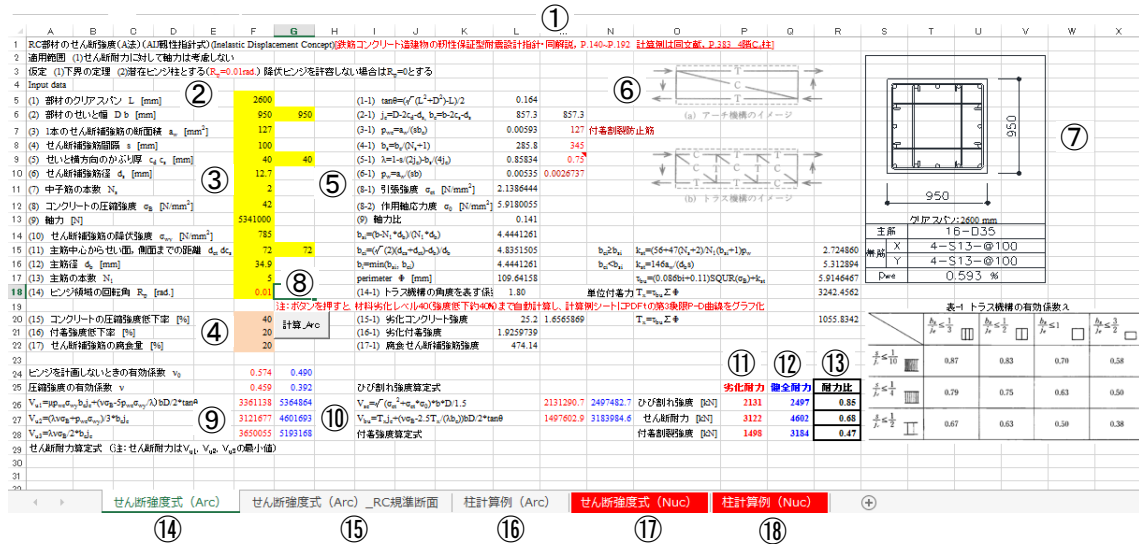


図 2.6.2-8 02 柱・梁のせん断強度(A 法)_靱性指針の計算シート

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力（コンクリートは強度低下％、鉄筋は腐食量％）
- ⑤ : 基本的な計算式
- ⑥ : 理論式に関しては、簡単な力学モデル
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40％）まで自動計算し、計算例シートに PDF t 曲線の第 3 象限 P-D 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力（本指針では 3 式の最小値）
- ⑩ : 健全時のせん断耐力（本指針では 3 式の最小値）
- ⑪ : 劣化後耐力（本指針ではせん断ひび割れ強度、せん断耐力、付着割裂強度）
- ⑫ : 健全時耐力（本指針ではせん断ひび割れ強度、せん断耐力、付着割裂強度）
- ⑬ : ⑪／⑫で健全時耐力に対する耐力比
- ⑭ : 本計算シート（本指針の設計例は P.383 4 階 C4 柱）

- ⑮ : RC 規準の設計例 (P.345 3 階 CB3 柱) の計算シート
 ⑯ : ⑧の計算ボタンにより、⑭と⑮の計算結果を出力するシート (次項参照)
 ⑰ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例 (P.176 の柱) の計算シート
 ⑱ : ⑧の計算ボタンにより、⑰の計算結果を出力するシート

図 2.6.2-9 に同 02 靱性指針計算シートによる RC 規準設計例 (⑮のシート) を示す。設計例の断面⑦のみ異なるが、それ以外は図 2.6.2-8 と同じである。



図 2.6.2-9 02 柱・梁のせん断強度(A 法)_靱性指針による RC 規準設計例

図 2.6.2-10 に同靱性指針計算シートによる原子力施設構造計算規準設計例 (⑰のシート) を示す。設計例の断面のみ異なるが、外は図 2.6.2-8 と同じである。



図 2.6.2-10 02 柱・梁のせん断強度(A 法)_靱性指針による原子力施設設計例

4) 03 梁・柱のせん断に対する算定_RC 規準による計算シートの説明

図 2.6.2-11 に 03 梁・柱のせん断に対する算定_RC 規準の計算シートのハードコピーを示す。

図 2.6.2-11 03 梁・柱のせん断に対する算定_RC 規準の計算シート

図 2.6.2-11 03 梁・柱のせん断に対する算定_RC 規準の計算シート

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力（コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%）
- ⑤ : 基本的な許容せん断強度式（長期・短期）
- ⑥ : なし
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40%）まで自動計算し、計算例シートに PDF t 曲線の第 3 象限 P-D 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力（長期・短期／大地震は荒川式によるため無視）
- ⑩ : 健全時のせん断耐力（長期・短期／大地震は荒川式によるため無視）
- ⑪ : ⑨／⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本柱部材計算シート（設計例は RC 規準の P.194 3 階 C_{B3} 柱）
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果を出力するシート

- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例 (P.176 の柱) の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート
- ⑯ : RC 規準梁部材計算シート (設計例は RC 規準の P.192 4 階 B_{A3} 梁)
- ⑰ : ⑧の計算ボタンにより、⑯の計算結果を出力するシート
- ⑱ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例 (P.176 の大梁) の計算シート
- ⑲ : ⑧の計算ボタンにより、⑱の計算結果を出力するシート

5) 04 耐震壁のせん断終局強度(荒川式)_原子力施設 RC 規準による計算シートの説明

図 2.6.2-12 に 04 耐震壁のせん断終局強度(荒川式)_原子力施設 RC 規準の計算シートのハードコピーを示す。

The spreadsheet is organized into several sections:

- Input data (Input data):** Fields for wall thickness (t), wall length (D), column diameter (Dc), column length (Lc), and reinforcement ratio (ρ).
- Calculation results:** Fields for shear ultimate strength (V_u), shear capacity (V_c), and shear capacity ratio (V_c/V_u).
- Diagram:** A cross-section diagram of the wall showing reinforcement details.
- Notes:** Explanatory text for the calculations and design parameters.

Key calculation results shown in the spreadsheet:

項目	値
せん断終局強度 (V _u)	10486000 [N]
せん断耐力 (V _c)	555241 [N]
せん断耐力比 (V _c /V _u)	0.052

図 2.6.2-12 04 耐震壁のせん断終局強度(荒川式)_原子力施設 RC 規準の計算シート

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力 (コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%)
- ⑤ : 基本的な計算式
- ⑥ : なし
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40 (強度低下約 40%) まで自動計算し、計算例シートに *PDFt* 曲線の第 3 象限 *P-D* 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力
- ⑩ : 健全時のせん断耐力
- ⑪ : ⑨/⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本計算シート (設計例は靱性指針の P.392 X₁ 通り 2 階壁)
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例 (P.176 の壁) の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

図 2.6.2-13 に 05 耐震壁のせん断強度_ストラットとタイの計算シートのハードコピーを示す。



- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力（コンクリートは強度低下％、鉄筋は腐食量％）
- ⑤ : 基本的な計算式
- ⑥ : 理論式に関しては、簡単な力学モデル
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40％）まで自動計算し、計算例シートに *PDFt* 曲線の第 3 象限 *P-D* 曲線をグラフ化

- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力
- ⑩ : 健全時のせん断耐力
- ⑪ : ⑨／⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本計算シート（設計例は靱性指針の P.392 X_1 通り 2 階壁）
- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例（P.176 の壁）の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

7) 06 耐震壁のせん断強度_靱性指針による計算シートの説明

図 2.6.2-14 に 06 耐震壁のせん断強度_靱性指針の計算シートのハードコピーを示す。

①

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
1	耐震壁のせん断強度 (A1 靱性指針式) 設計例: コンクリート造壁のせん断強度設計 (同解説, P.399~P.420 計算例: 同次書, P.392, X1 通り 2 階壁)																				
2	適用範囲 (1) 4 階以下付着耐震壁																				
3	仮定 (1) 壁板の全長で一様なトラス機構が生じる。 (2) 降伏応力を計算する ($0.005 \leq R_w < 0.02$)。 (3) 靱性理論で求めた壁板の引張主筋力度がコンクリートの引張強度に等しい。																				
4	Input data																				
5	(1)	耐震壁の厚さ t_w [mm]	1000	(1-1)	$w = t_w / b$	0.116															
6	(2)	側柱中心間距離 l_w [mm]	8000	(1-2)	$3t_w / D$	850000															
7	(3)	側柱のせい, 筋 D, d [mm]	950 950	(2-1)	圧縮側側柱の断面積 A_{cs} [mm ²]	902500															
8	(4)	コンクリート圧縮強度 σ_{cp} [N/mm ²]	47.1	(2-2)	壁板の柱内法長さ l_c [mm]	7050															
9	(5)	耐震壁の横筋量 a_w [mm ²]	397	(2-3)	$w = l_c / (l_w + 2D)$	0.788															
10	(6)	耐震壁横筋の降伏強度 σ_{yp} [N/mm ²]	295	(3-1)	$\gamma_w = 1 - (1 - \gamma) [1 - \alpha] / (1 - \alpha)$	1.159															
11	(7)	耐震壁横筋の降伏係数 α [mm]	200	(3-2)	コンクリート引張強度 σ_t [N/mm ²]	2.148															
12	(8)	トラス機構のコンクリート圧縮角 $\cot \theta$	1.0	(3-3)	補正係数 $p_w = a_w / (s \cdot b)$	0.00962															
13	(9)	耐震壁の高さ (設計時の距離) h_w [mm]	1600	(10-1)	壁板の圧縮応力度 σ_c [N/mm ²]	21.04															
14	(10)	設計する階の上部における耐震壁の軸力 N_{22}	44495430																		
15	(11)	耐震壁の保正変形角 R_w [rad]	0.01																		
16																					
17	(12)	コンクリートの圧縮強度低下率 [%]	40	注: ボタンを押すと、材料劣化レベル 40 (強度低下約 40%) まで自動計算し、計算例シートに PDF t 曲線の第 3 象限 P-D 曲線をグラフ化。																	
18	(13)	鉄筋の腐食量 [%]	20	(11-1)	劣化コンクリート圧縮強度 [N/mm ²]	28.26															
19	(14)	鉄筋の腐食量 [%]	20	(11-2)	劣化コンクリート引張強度 [N/mm ²]	1.66															
20	(15)	鉄筋の腐食量 [%]	20	(11-3)	腐食鉄筋強度 [N/mm ²]	178.18															
21	(16)	側柱の有効断面積 $A_{cs} = A_{cs} \cdot N_{22} \cdot \alpha_w$ [mm ²]	0	(12-1)	コンクリートの有効係数 γ_w	0.559	0.463														
22	(17)	$\Delta \sigma_{cp} = A_{cs} \cdot l_c$	0	(12-2)	コンクリート有効圧縮強度 γ_{cp} [N/mm ²]	15.9	21.9														
23	(18)	$\Delta \sigma_{cp} = A_{cs} \cdot l_c$	0	(12-3)	降伏コンクリート降伏係数 γ_w	0.447	0.372														
24	(19)	等価壁長さ $l_{eq} = l_w + D + \Delta l_{cs}$ [mm]	8000	(13-1)	$p_w = \sigma_{yp}$	1.179	1.932														
25	(20)	等価壁長さ $l_{eq} = l_w + D + \Delta l_{cs}$ [mm]	8000	(13-2)	$\beta = (1 + \cot^2 \theta) p_w \sigma_{yp} / (\gamma_w \sigma_c)$	0.1667	0.2230														
26	(21)	$\tan \theta = \sqrt{(l_{eq} / l_w)^2 + 1} \cdot l_w / l_{eq}$	0.647	(13-3)	$t_w = \sqrt{(\sigma_c^2 + \sigma_{yp}^2) / \sigma_c}$	6.148	7.037														
27	(22)			(14-1)	$V_w = t_w \cdot l_c \cdot b \cdot p_w \sigma_{yp} \cdot \cot \theta \cdot \tan \theta (1 - \beta) / (l_w + l_{eq}) + \alpha_w / 2$	10000482	15255734														
28	(23)			(15-1)	せん断耐力 V_w [kN]	127244	1461145														
29	(24)			(16-1)	健全時のせん断耐力 V_w [kN]	10800	15236														
30	(25)			(17-1)	耐力比	0.87	0.71														
31	(26)			(18-1)																	
32	(27)			(19-1)																	
33	(28)			(20-1)																	
34	(29)			(21-1)																	
35	(30)			(22-1)																	
36	(31)			(23-1)																	
37	(32)			(24-1)																	
38	(33)			(25-1)																	
39	(34)			(26-1)																	
40	(35)			(27-1)																	
41	(36)			(28-1)																	
42	(37)			(29-1)																	
43	(38)			(30-1)																	
44	(39)			(31-1)																	
45	(40)			(32-1)																	
46	(41)			(33-1)																	
47	(42)			(34-1)																	
48	(43)			(35-1)																	
49	(44)			(36-1)																	
50	(45)			(37-1)																	
51	(46)			(38-1)																	
52	(47)			(39-1)																	
53	(48)			(40-1)																	
54	(49)			(41-1)																	
55	(50)			(42-1)																	
56	(51)			(43-1)																	
57	(52)			(44-1)																	
58	(53)			(45-1)																	
59	(54)			(46-1)																	
60	(55)			(47-1)																	
61	(56)			(48-1)																	
62	(57)			(49-1)																	
63	(58)			(50-1)																	
64	(59)			(51-1)																	
65	(60)			(52-1)																	
66	(61)			(53-1)																	
67	(62)			(54-1)																	
68	(63)			(55-1)																	
69	(64)			(56-1)																	
70	(65)			(57-1)																	
71	(66)			(58-1)																	
72	(67)			(59-1)																	
73	(68)			(60-1)																	
74	(69)			(61-1)																	
75	(70)			(62-1)																	
76	(71)			(63-1)																	
77	(72)			(64-1)																	
78	(73)			(65-1)																	
79	(74)			(66-1)																	
80	(75)			(67-1)																	
81	(76)			(68-1)																	
82	(77)			(69-1)																	
83	(78)			(70-1)																	
84	(79)			(71-1)																	
85	(80)			(72-1)																	
86	(81)			(73-1)																	
87	(82)			(74-1)																	
88	(83)			(75-1)																	
89	(84)			(76-1)																	
90	(85)			(77-1)																	
91	(86)			(78-1)																	
92	(87)			(79-1)																	
93	(88)			(80-1)																	
94	(89)			(81-1)																	
95	(90)			(82-1)																	
96	(91)			(83-1)																	
97	(92)			(84-1)																	
98	(93)			(85-1)																	
99	(94)			(86-1)																	
100	(95)			(87-1)																	

③

④

⑤

⑥

⑦

⑧

⑨

⑩

⑪

⑫

⑬

⑭

⑮

⑯

⑰

⑱

⑲

⑳

㉑

㉒

㉓

㉔

㉕

㉖

㉗

㉘

㉙

㉚

㉛

㉜

㉝

㉞

㉟

㊱

㊲

㊳

㊴

㊵

㊶

㊷

㊸

㊹

㊺

㊻

㊼

㊽

㊾

㊿

㏀

㏁

㏂

㏃

㏄

㏅

㏆

㏇

㏈

㏉

㏊

㏋

㏌

㏍

㏎

㏏

㏐

㏑

㏒

㏓

㏔

㏕

㏖

㏗

㏘

㏙

㏚

㏛

㏜

㏝

㏞

㏟

㏠

㏡

㏢

㏣

㏤

㏥

㏦

㏧

㏨

㏩

㏪

㏫

㏬

㏭

㏮

㏯

㏰

㏱

㏲

㏳

㏴

㏵

㏶

㏷

㏸

㏹

㏺

㏻

㏼

㏽

㏾

㏿

㐀

㐁

㐂

㐃

㐄

㐅

㐆

㐇

㐈

㐉

㐊

㐋

㐌

㐍

㐎

㐏

㐐

㐑

㐒

㐓

㐔

㐕

㐖

㐗

㐘

㐙

㐚

㐛

㐜

㐝

㐞

㐟

㐠

㐡

㐢

㐣

㐤

㐥

㐦

㐧

㐨

㐩

㐪

㐫

㐬

㐭

㐮

㐯

㐰

㐱

㐲

㐳

㐴

㐵

㐶

㐷

㐸

㐹

㐺

㐻

㐼

㐽

㐾

㐿

㑀

㑁

㑂

㑃

㑄

㑅

㑆

㑇

㑈

㑉

㑊

㑋

㑌

㑍

㑎

㑏

㑐

㑑

㑒

㑓

㑔

㑕

㑖

㑗

㑘

㑙

㑚

㑛

㑜

㑝

㑞

㑟

㑠

㑡

㑢

㑣

㑤

㑥

㑦

㑧

㑨

㑩

㑪

㑫

㑬

㑭

㑮

㑯

㑰

㑱

㑲

㑳

㑴

㑵

㑶

㑷

㑸

㑹

㑺

㑻

㑼

㑽

㑾

㑿

㒀

㒁

㒂

㒃

㒄

㒅

㒆

㒇

㒈

㒉

㒊

㒋

㒌

㒍

㒎

㒏

㒐

㒑

㒒

㒓

㒔

㒕

㒖

㒗

㒘

㒙

㒚

㒛

㒜

㒝

㒞

㒟

㒠

㒡

㒢

㒣

㒤

㒥

㒦

㒧

㒨

㒩

㒪

㒫

㒬

㒭

㒮

㒯

- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例 (P.176 の壁) の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

8) 07 壁部材の許容せん断力_{RC 規準}による計算シートの説明

図 2.6.2-15 に 07 壁部材の許容せん断力_{RC 規準}の計算シートのハードコピーを示す。

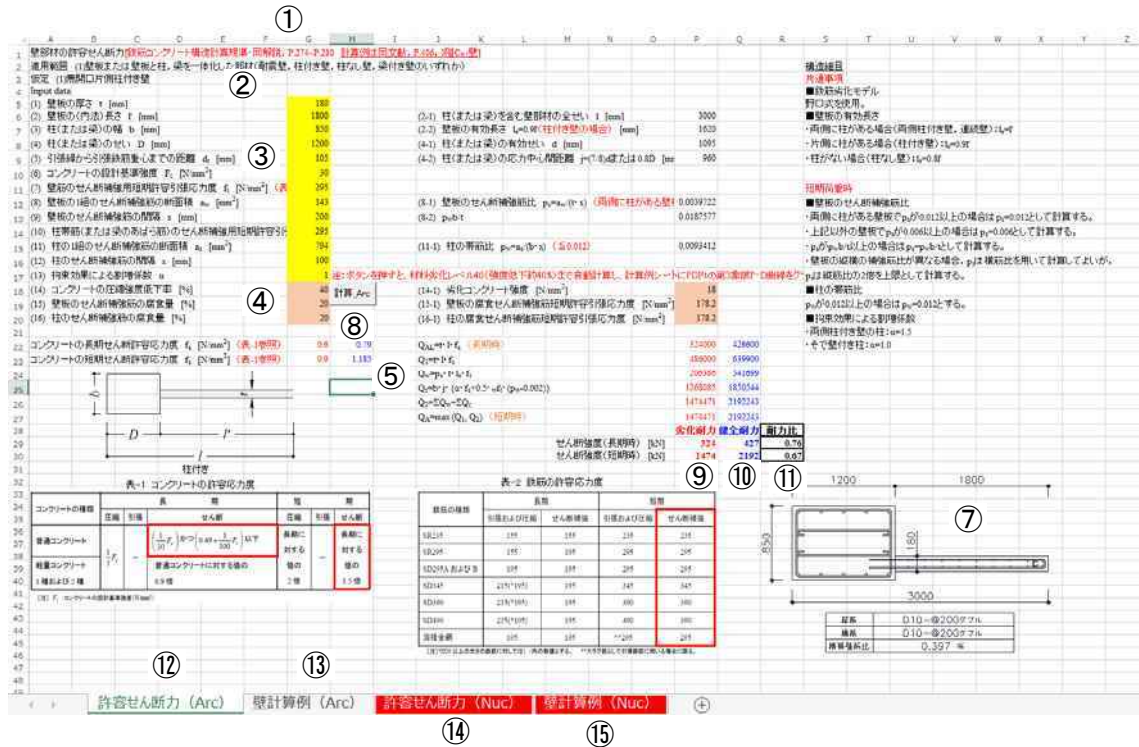


図 2.6.2-15 07 壁部材の許容せん断力_{RC 規準}の計算シート

- ① : 使用した計算規準書及び設計例を記述
- ② : 計算式の基本仮定
- ③ : 黄色のセルに設計例の部材寸法、使用材料強度を入力
- ④ : ピンクのセルに材料劣化度を入力（コンクリートは強度低下%、鉄筋は腐食量%）
- ⑤ : 基本的な計算式
- ⑥ : なし
- ⑦ : 設計例の断面及び配筋図
- ⑧ : ボタンを押すと、材料劣化レベル 40（強度低下約 40%）まで自動計算し、計算例シートに $PDFt$ 曲線の第 3 象限 $P-D$ 曲線をグラフ化
- ⑨ : 材料劣化を考慮したせん断耐力（長期・短期）
- ⑩ : 健全時のせん断耐力（長期・短期）
- ⑪ : ⑨/⑩で健全時耐力に対する耐力比
- ⑫ : 本計算シート（設計例は RC 規準の P.406 3 階 C_{B2} 壁）

- ⑬ : ⑧の計算ボタンにより、本シート⑫の計算結果
- ⑭ : 原子力施設構造計算規準・同解説の設計例 (P.176 の壁) の計算シート
- ⑮ : ⑧の計算ボタンにより、⑭の計算結果を出力するシート

9) 自動計算ボタンのマクロ説明書

想定した材料劣化レベル 0 から 40 に対し、PDFt 曲線の第 3 象限に耐力低下を描く自動計算ボタンのマクロ説明書を図 2.6.2-16、図 2.6.2-17 及び図 2.6.2-18 に示す。

マクロコードの解説

「RC 部材のせん断強度（A 法）_靱性指針」のマクロコードの 1 部を例にとって説明します。

アポストロフィ（'）に続く文字はコードには直接関係のないもので、コードを見やすくするために挿入しています。（VBA では緑色の文字で表示される部分に当たります。）

変数を指定します。
ここでは変数を i という文字でおき、1~20 の範囲を 1 ずつ動くように設定しています。

初めに、コンクリート強度の低下率が 2% ずつ、40% まで増加していくように設定します。前の行でシートを選択しているため、ここで指定するセルはそのシート内のセル番地に対応しています。

「せん断強度式（Arc）」のシート指定。
「コンクリートの圧縮強度低下率の指定」
「付着強度低下率の指定」
「せん断補強筋腐食量の指定」

「せん断耐力の耐力比の値をコピー」
「せん断耐力比の“数値のみをコピー”して、“計算例”のシートに貼り付けます。」

「付着割裂強度の耐力比の値をコピー」
「付着割裂強度の比の“数値のみをコピー”して、“計算例”のシートに貼り付けます。」

「劣化部材のせん断耐力の値をコピー」
「劣化部材のせん断耐力の“数値のみをコピー”して、“計算例”のシートに貼り付けます。」

この範囲で、「コンクリート強度低下率が 40% まで増加した場合」の「せん断耐力比、付着割裂強度、劣化部材のせん断耐力」を“計算例”のシートに入力する作業が終了します。

```

Sub 計算_Arc()
Dim i As Long

'ステップ
'計算シート指定
'コンクリートの圧縮強度低下率の指定
'付着強度低下率の指定
'せん断補強筋腐食量の指定

For i = 1 To 20
    Sheets("せん断強度式（Arc）").Select
    Cells(20, 6) = 2 * i
    Cells(21, 6) = 0
    Cells(22, 6) = 0

    Worksheets("せん断強度式（Arc）").Range("R27").Copy
    Worksheets("柱計算例（Arc）").Cells(i + 5, 3).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False

    Worksheets("せん断強度式（Arc）").Range("R28").Copy
    Worksheets("柱計算例（Arc）").Cells(i + 5, 4).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False

    Worksheets("せん断強度式（Arc）").Range("P27").Copy
    Worksheets("柱計算例（Arc）").Cells(i + 5, 9).PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks:=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
Next i
    
```

図 2.6.2-16 自動計算ボタンのマクロ説明書（その 1）

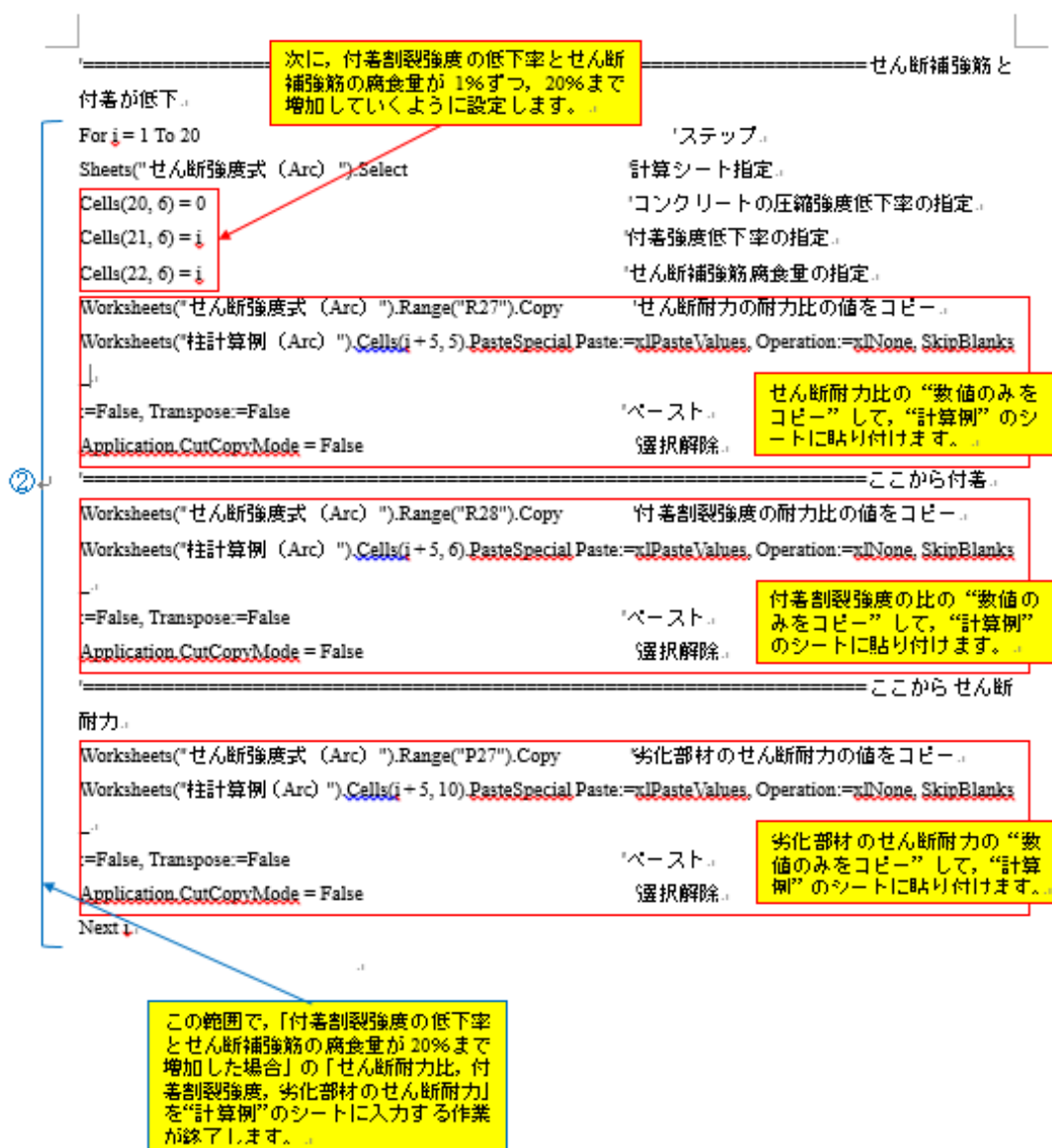


図 2.6.2-17 自動計算ボタンのマクロ説明書（その 2）

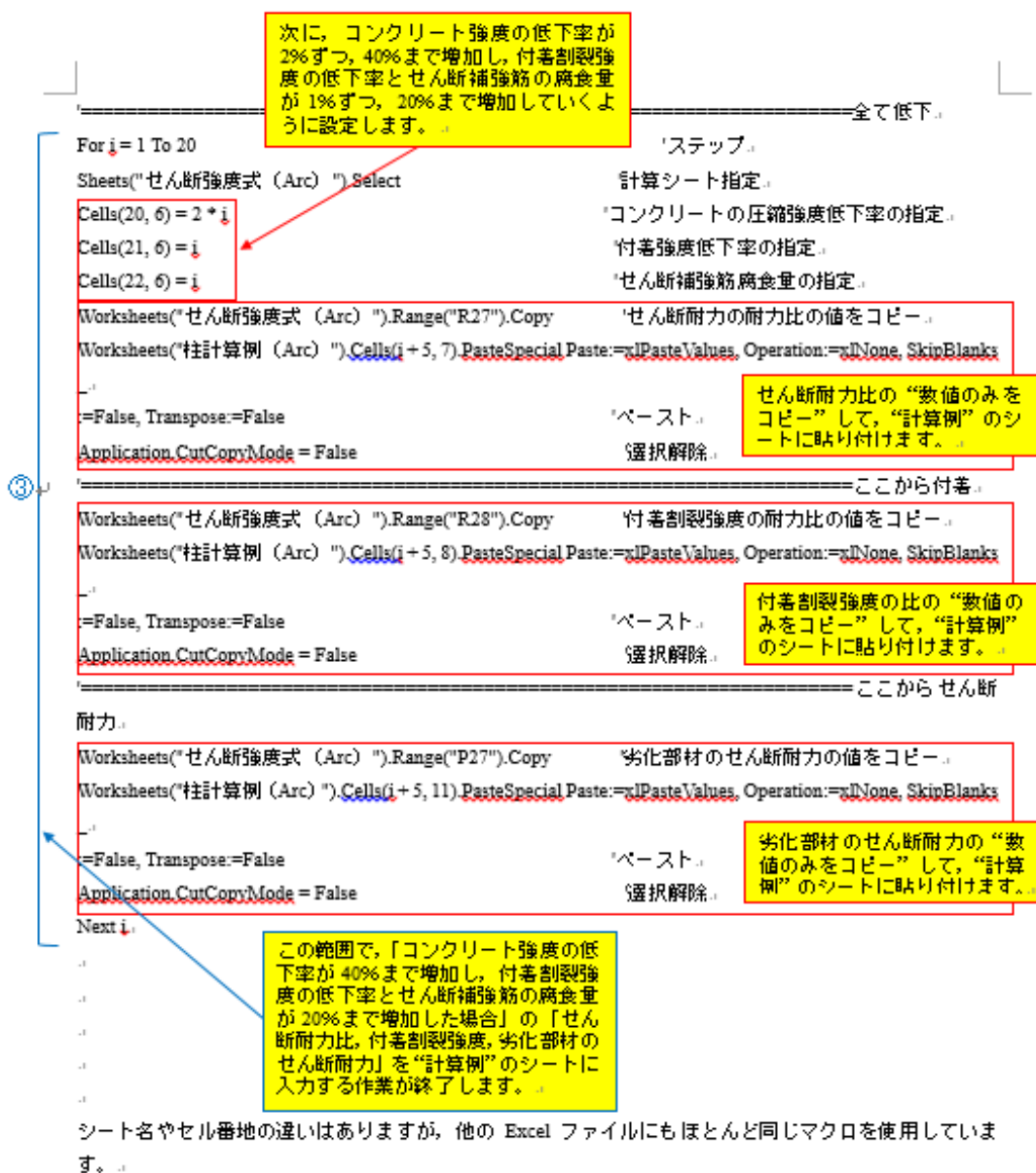
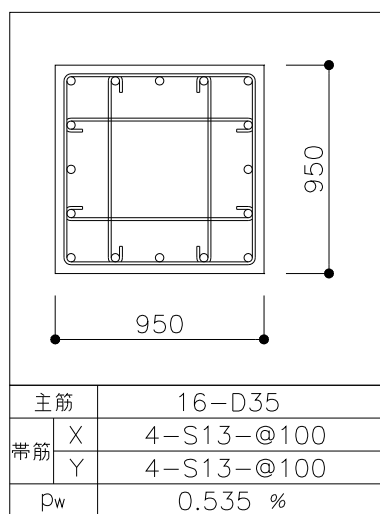


図 2.6.2-18 自動計算ボタンのマクロ説明書（その3）

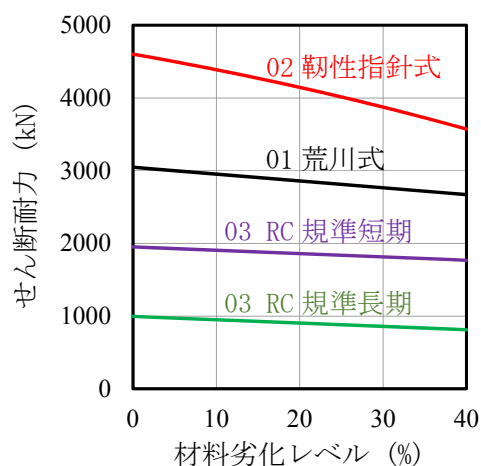
10) 各種設計規準による柱部材せん断耐力の比較

(1)の柱部材に対し、荒川 min.式 (01 ファイル)、靱性指針式 (02 ファイル)、RC 規準式 短期・長期 (03 ファイル) による材料劣化を考慮したせん断耐力挙動を図 2.6.2-19 に示す。

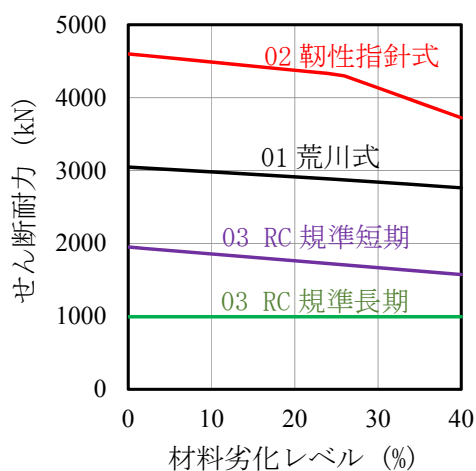
(2)はコンクリートのみ劣化、(3)は鉄筋のみ劣化、(4)は両者とも劣化の場合である。柱部材のような線材は、トラス機構の寄与分が多く、鉄筋の劣化が大きな影響を与えている。安全性の確保に用いられる荒川式は、継続使用性の検証に用いられる RC 規準式よりも高く、半理論式の靱性指針式が最も高い耐力となっているのがわかる。



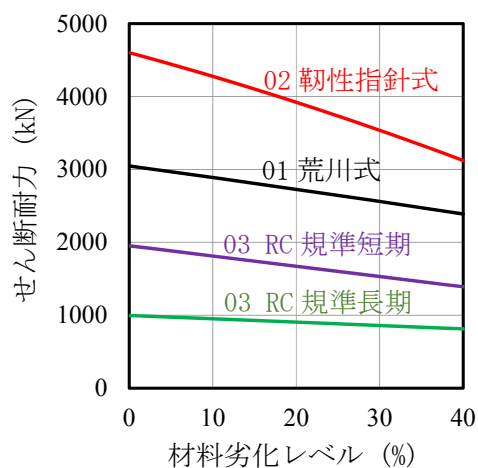
(1) 解析対象柱部材断面



(2) コンクリートのみ劣化



(3) 鉄筋のみ劣化

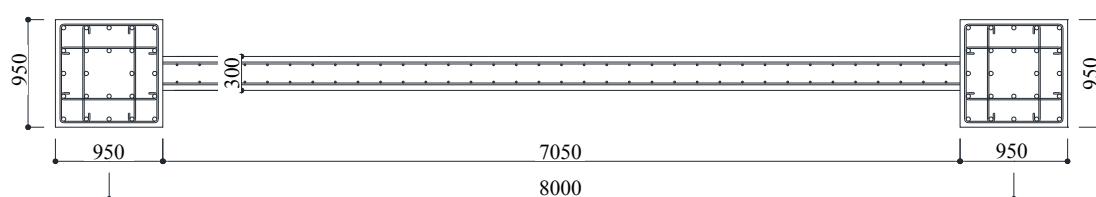


(4) コンクリート+鉄筋の劣化

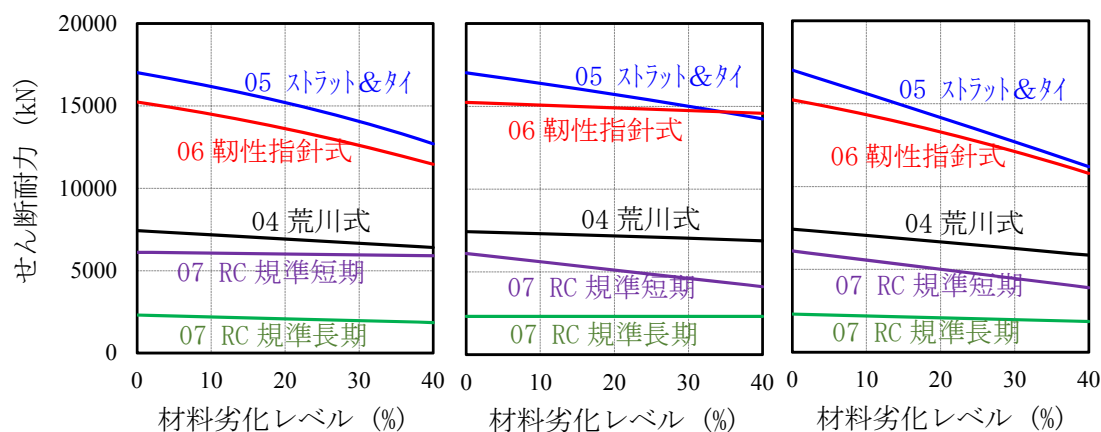
図 2.6.2-19 各種設計規準による柱部材せん断耐力の比較

11) 各種設計規準による壁部材せん断耐力の比較

(1)の壁部材に対し、荒川 min.式 (04 ファイル)、ストラット&タイモデル (05 ファイル)、靱性指針式 (06 ファイル)、RC 規準式短期・長期 (07 ファイル) による材料劣化を考慮したせん断耐力挙動を図 2.6.2-20 に示す。(2)はコンクリートのみ劣化、(3)は鉄筋のみ劣化、(4)は両者とも劣化の場合である。壁部材のようなアスペクト比を持つ部材は、アーチ機構の寄与分が多く、コンクリートの劣化が大きな影響を与えている。安全性の確保に用いられる荒川式は、継続使用性の検証に用いられる RC 規準式よりも高く、半理論式であるストラット&タイモデルや靱性指針式が最も高い耐力となっているのがわかる。



(1) 解析対象柱部材断面



(2) コンクリートのみ劣化 (3) 鉄筋のみ劣化 (4) コンクリート+鉄筋の劣化

図 2.6.2-20 各種設計規準による壁部材せん断耐力の比較

(4) まとめ

過年度の促進腐食実験で行った鉄筋腐食量と材料特性の関係を整理した。一方、 PDF_t 曲線の P - D 曲線の対象である構造物の性能に関しては、構造部材の性能に影響するパラメータが極めて多いため、グラフ化すると煩雑になる。それゆえ、現実的な評価を目的に、材料劣化を考慮した鉄筋コンクリート部材のせん断強度保持率（耐力比）を各種設計規準式に基づいて、定量的に評価できるエクセル計算シートを作成した。さらにエクセル計算シートを用いて、想定した RC 部材のせん断強度保持率を算定した。主な結論を以下に示す。

- ① 過年度の実験結果の整理の一環として、鉄筋腐食量と割裂強度、付着強度、引張強度、付着割裂強度及び横補強筋強度の関係を整理し、 PDF_t 曲線の P - D 曲線を決定する際の基礎知見としてまとめた。
- ② 変数の多い構造物の構造性能に関しては、地震時のせん断力抵抗機構として、最も重要な柱・梁及び壁を対象部材とし、材料劣化を考慮した鉄筋コンクリート部材のせん断強度保持率を定量的に評価できるエクセル計算シートを作成した。
- ③ 各計算シートの使用例を、各種材料劣化を想定し、各計算規準の設計例に基づいて示した。
- ④ 材料劣化を、コンクリート、鉄筋及びコンクリートと鉄筋と 3 ケースに分け、劣化レベルを 0 から 40% まで想定して、せん断耐力を試算した。
- ⑤ 想定した材料劣化に対し、 PDF_t 曲線の第 3 象限で耐力比を評価できるようにした。
- ⑥ 各設計式の特徴（一次設計：使用性・損傷制御性の検証と二次設計：安全性の検証）に対するせん断耐力を比較検討した。

以上より、構造全体の詳細が不明でも、部材断面形状や健全時の材料データ、材料強度の低下率として鉄筋の腐食量が分かれば、本エクセル計算シートを用いてせん断強度保持率を評価することができる。

2.6.3 まとめ

(1) 鉄筋腐食による腐食膨張ひび割れ挙動に関する検討

腐食ひび割れ発生前後の腐食量を複数回実測することによって、腐食ひび割れ発生前後の腐食速度の相違に基づき、腐食ひび割れ挙動及び腐食によるコンクリートの割裂強度低下率を明らかにした。その結果、鉄筋腐食と割裂強度低下率の関係を示す定式を得ることができた。本事業で得られた、鉄筋腐食と割裂強度低下率の定式は、鉄筋腐食度を D 、腐食によるコンクリートの割裂強度低下率を P とした場合の長期健全性評価での P - D 曲線を決定する際の定性的な知見として活用できる。

(2) 経年劣化材料と鉄筋コンクリート部材の構造物の性能の関係

過年度の促進腐食実験で行った鉄筋腐食量と材料特性の関係を整理した。一方、 $PDFt$ 曲線の P - D 曲線の対象である構造物の性能に関しては、構造部材の性能に影響するパラメータが極めて多いため、グラフ化すると煩雑になる。それゆえ、現実的な評価を目的に、材料劣化を考慮した鉄筋コンクリート部材のせん断強度保持率を各種設計規準式に基づいて、定量的に評価できるエクセル計算シートを作成した。エクセル計算シートを用いれば、構造全体の詳細が不明でも、部材断面形状や健全時の材料データ、材料強度の低下率として鉄筋の腐食量が分かれば、せん断強度保持率（耐力比）を評価することができる。

2.7 まとめ

本事業は、複合劣化によるコンクリート構造物の材料劣化並びに構造性能の低下が、原子力発電施設の長期健全性に及ぼす影響を評価できるようにすることを目的とした。

コンクリート構造物の材料劣化並びに構造性能の低下に及ぼす中性化、塩害、熱の複合劣化の影響を調査し、複合劣化を受けたコンクリートのひび割れ発生メカニズム、複合劣化による鉄筋腐食と強度の関係を試験等により明らかにするとともに、鉄筋腐食を受けた鉄筋コンクリート部材の構造性能について検討した。これらの検討結果に基づき、複合劣化因子の作用量と材料劣化の関係を定式化し、経年劣化進展を推定するためのコンクリート構造物の長期健全性評価（案）を提案した。

平成 27 年度は、コンクリート構造物の複合劣化による長期健全性評価（案）説明書の作成、熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討、複合劣化を受けた鉄筋コンクリートのひび割れ発生に関する検討、複合劣化を受けた鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食に関する検討、鉄筋コンクリート部材の付着割裂試験及び促進腐食試験を実施し、長期健全性評価の枠組を整理した。これらの成果は、高経年化技術評価に資するデータ・知見となるものである。

平成 27 年度の検討内容及び成果の概要は以下の通りである。

(1) コンクリート構造物の長期健全性評価の検討

前年度までの調査をもとに、中性化、塩分浸透、熱によるコンクリート構造物の材料劣化並びに構造性能の低下が、原子力発電施設の長期健全性に及ぼす影響の劣化度評価ダイアグラム（PDF_t 曲線）による定量評価についての説明書を作成した（別冊：コンクリート構造物の複合劣化による長期健全性評価（案）説明書 参照）。

(2) 熱影響を受けたコンクリートのひび割れ発生に関する検討

温度 100℃以下の環境下で熱影響を受けたコンクリートを想定し、それらのコンクリートにひび割れが発生・進展するメカニズムを検討した。また、火災時などを想定し、短期間に高温加熱の影響を受けた場合のコンクリートのひび割れ発生及び進展について検討した。さらに中性化と熱影響の複合作用を受けた場合を把握した。

(3) 複合劣化を受けた鉄筋コンクリートのひび割れ発生に関する検討

炭酸ガス、塩化物及び温度・湿度の変化による複合劣化を受けたコンクリート中の鉄筋腐食とそれに伴うコンクリートのひび割れ発生に関して検討を行なった。本年度は、促進中性化、促進中性化と塩水噴霧、屋外暴露によるコンクリート中の鉄筋腐食度を X 線照射により把握するとともに、表面ひび割れとの関係を把握した。

(4) 複合劣化を受けた鉄筋コンクリート中の鉄筋腐食に関する検討

原子炉建屋などで使用される高強度、太径の鉄筋が腐食した場合の耐力低下について、塩化物を促進作用させた場合での検討を行った。塩水噴霧、モルタル中の鉄筋腐食促進実験を行ない、各種促進条件及び鉄筋条件での鉄筋腐食による断面減少率について3次元計測により立体的に把握した。

(5) 経年劣化材料と鉄筋コンクリート部材の構造物の性能に関する検討

1) 鉄筋腐食による腐食膨張ひび割れ挙動に関する検討

腐食ひび割れ発生前後の腐食量を複数回実測することによって、腐食ひび割れ発生前後の腐食速度の相違に基づき、腐食ひび割れ挙動及び腐食によるコンクリートの割裂強度低下率を明らかにした。その結果、鉄筋腐食と割裂強度低下率の関係を示す定式を得ることができた。

2) 経年劣化材料と鉄筋コンクリート部材の構造性能の関係

過年度の促進腐食実験で行った鉄筋腐食量と材料特性の関係を整理した。一方、 $PDFt$ 曲線の P - D 曲線の対象である構造物の性能に関しては、構造部材の性能に影響するパラメータが極めて多いため、グラフ化すると煩雑になる。それゆえ、現実的な評価を目的に、材料劣化を考慮した鉄筋コンクリート部材のせん断強度保持率（耐力比）を各種設計規準式に基づいて、定量的に評価できるエクセル計算シートを作成した。エクセル計算シートを用いれば、構造全体の詳細が不明でも、部材断面形状や健全時の材料データ、材料強度の低下率として鉄筋の腐食量が分かれば、せん断強度保持率を評価することができる。

事業全体のまとめとして、原子力発電施設の RC 構造物の複合劣化（中性化、塩分浸透、熱）による経年劣化進展を推定するために、 $PDFt$ 曲線を用いた長期健全性評価（案）を検討した。

$PDFt$ 曲線は、劣化関数の基本評価式を定め劣化度の測定データ等を外挿し、劣化指数及び評価曲線を帰納的に決定すること、複合体の評価のために経過年 t 、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D 、構造物の性能 P 相互の各関係を定式化し、それらを組み合わせることにより、RC 構造物の長期健全性評価が可能である点が特徴である。

$PDFt$ 曲線には、劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係を F - t 曲線、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係を D - F 曲線、構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係を P - D 曲線がある。これらを統合すると、RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム（ $PDFt$ 曲線）となり、構造性能の時間変化を評価する P - t 曲線が得られる。

現在の健全性一次評価では、劣化因子の作用量 F あるいは材料劣化度 D について制限値を定めているが、 $PDFt$ 曲線を用いることで、構造物の性能 P に基づく制限値から、劣化因

子の作用量 F 、材料劣化度 D の制限値を定めることができる。

コンクリート構造物の複合劣化による 長期健全性評価（案）説明書

平成28年3月

目次

1. はじめに	1
2. 長期健全性評価の枠組.....	2
2.1 長期健全性評価の概要.....	2
2.2 複合劣化の評価対象.....	2
2.3 $PDFt$ 曲線による複合劣化の評価方法	3
2.3.1 $PDFt$ 曲線による評価方法	3
2.3.2 複合劣化を考慮した $PDFt$ 曲線.....	4
2.4 評価物理量の概要.....	5
2.5 評価プロセス.....	7
3. 材料特性の評価	13
3.1 中性化	13
3.1.1 評価プロセス.....	13
3.1.2 評価方法.....	14
3.2 塩分浸透	20
3.2.1 評価プロセス.....	20
3.2.2 評価方法.....	20
3.3 熱	29
3.3.1 評価プロセス.....	29
3.3.2 評価方法.....	29
4. 構造性能の評価	36
4.1 評価の概要	36
4.2 せん断耐力による構造性能の評価.....	36
4.2.1 せん断耐力.....	36
4.2.2 せん断耐力計算用エクセル計算シート.....	37
4.3 $PDFt$ 曲線を用いた構造物の健全性評価	52
4.3.1 $P-t$ 曲線の決定と $PDFt$ 曲線の確定.....	52
4.3.2 評価年での構造物の性能の計算.....	52
4.3.3 健全性二次評価.....	52
5. RC 構造物の健全性評価例	53
5.1 はじめに	53
5.2 各劣化因子における材料特性の評価.....	53
5.2.1 中性化	53

5.2.2	塩分浸透.....	60
5.2.3	熱	68
5.3	構造性能の評価.....	71
5.3.1	概要	71
5.3.2	対象部位における条件.....	71
5.3.3	部材のせん断強度保持率.....	72

1. はじめに

原子力発電施設のコンクリート構造物は運転期間並びに廃炉後も含め長期の健全性が求められる。特に従来の高経年化対策に加えて、運転期間延長に伴う特別点検によるコンクリート構造物の評価、今後必要になるであろう廃止措置中の点検評価を行う必要がある。

コンクリート構造物の主要な劣化要因となる、中性化、塩分浸透は健全性評価を行う上で重要な項目である。コンクリートの中性化に関しては、本来コンクリートは水酸化カルシウムなどの水和生成物によりアルカリ性を呈し、鉄筋の酸化反応を抑制する効果があるが、空気中の炭酸ガス作用により、コンクリート中の水酸化カルシウムが炭酸カルシウムに変化し、それが鉄筋位置まで進展すると鉄筋の腐食が開始する。また鉄筋の腐食による膨張圧によりコンクリート表面にひび割れが生じ、さらなる鉄筋の腐食に伴う鉄筋の断面減少、コンクリートかぶり部の強度低下など、構造性能が低下する。また、このような鉄筋腐食は、特に海岸付近に位置する原子力発電所は、主に海水に含まれる塩化物の作用などにより促進される。通常、海水に接するコンクリート構造物は、塩化物イオンがコンクリート表面から内部に向かって拡散浸透し、塩化物イオンが鉄筋位置まで達すると鉄筋腐食が始まる。また、中性化作用によりコンクリート表面にひび割れがある場合には腐食速度は促進される。さらに、建設当時の条件によってはコンクリート中に塩化物が含まれる場合も考慮する必要がある。また、原子力発電施設の特徴として、コンクリートが局所的に加熱の影響を受ける。

そのような、中性化、塩分浸透、熱のような劣化因子の影響を受けた鉄筋コンクリート構造物の耐久性評価、劣化度予測に関しては、今までに多くの研究がある。しかしながら、劣化因子、材料劣化度、構造物の性能低下などの個別の検討は行われているが、それら相互の関係を明確にし、評価、予測を行える評価手法はない。

本説明書は、原子力発電施設の長期健全性評価において、劣化度評価ダイアグラム(PDF_t 曲線)を用いた複合劣化によるコンクリート構造物の材料劣化並びに構造性能の低下の評価について示したものである。

2. 長期健全性評価の枠組

2.1 長期健全性評価の概要

原子力発電施設に使用される鉄筋コンクリート構造物(以下、「RC 構造物」という)の長期健全性評価とは、「RC 構造物のある時点での劣化度から数年後の劣化度の発生又は進展を予測し RC 構造物の機能に与える影響を評価する」と定義できる。RC 構造物の劣化度予測に関しては、今までに多くの研究があるが、一般的な RC 構造物も含めて、原子力発電施設の RC 構造物の劣化度予測には以下の課題があると考えられる。

- ① 外的要因の多様性 : 構造物が広範囲の地域にあり多様な環境条件下に長期間おかれるため熱や塩分浸透等の外的要因が多岐にわたり複合的に作用する。
- ② 複合材 : 鉄筋とコンクリートとの複合材である RC 構造物の性能を評価するためには、材料単体の劣化因子及び劣化度だけでなく複合的な作用を考慮し、さらに RC 構造物の性能を総合的に検討しなければならない。

以上の課題の解決法として、「RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム (以下、「 PDF_t 曲線」という)」¹を用いる。本手法は、劣化関数の基本評価式を定め劣化度の測定データ等を外挿し劣化指数及び評価曲線を帰納的に決定すること、複合体の評価のために経過年 t , 劣化因子の作用量 F , 材料劣化度 D , 構造物の性能 P 相互の各関係を定式化し、それらを組み合わせた PDF_t 曲線により、RC 構造物の健全性評価を行うことなどで推定精度が向上することが特徴である。また、本研究で提案した評価案の基本は、単独劣化、複合劣化に関わりなく、実測値から劣化曲線を求めることである。

2.2 複合劣化の評価対象

本説明書で対象とする原子力発電施設のコンクリート部位は、特に中性化、塩分浸透、熱の影響を受ける部分とし、さらにそれらが複合的な作用を受ける部分とする。なお、この他にもコンクリートの劣化因子として放射線照射 (中性子、ガンマ線)、アルカリ骨材反応などがあるが今回は対象外とする。高経年化技術評価審査マニュアル² (2.6 コンクリートの強度低下及び遮蔽能力低下) においては、劣化要因毎に、経年劣化の影響がもっとも厳しくなると想定される部位を選定とあり、代表的な評価対象部位の例として以下の表 1 を示す。この中で本説明書の対象となる中性化、塩分浸透、熱が卓越すると考えられる部位を赤枠で示す。また、この中で特に複合劣化の可能性が考えられる劣化要因を、*1) 中性化、*2) 塩分浸透、*3) 熱として示した。

¹ 橘高義典 : “鉄筋コンクリート構造物の高経年化技術評価における健全性評価の方法”、日本建築学会技術報告集、No.32、pp.27-30 (2010)

² 独立行政法人原子力安全基盤機構 : “高経年化技術評価審査マニュアル、2.6 コンクリートの強度低下及び遮へい能力低下 (含む鉄骨構造の強度低下) ”、JNES-RE-2013-9012、pp39-50 (2013)

表 1 経年劣化要因と評価対象部位（例）

経年劣化要因	BWR プラント	PWR プラント
熱	原子炉ペDESTAL	内部コンクリート ^{*1)}
放射線照射	原子炉ペDESTAL	内部コンクリート
中性化	外周コンクリート ^{*2)} 、内壁コンクリート ^{*3)}	外部遮蔽壁 ^{*2)} 、原子炉格納施設基礎、内部コンクリート ^{*3)}
塩分浸透	取水構造物 ^{*1)} 、外周コンクリート ^{*1)}	取水構造物 ^{*1)} 、外部遮蔽壁 ^{*1)}
アルカリ骨材反応	コンクリート構造物全般	コンクリート構造物全般
機械振動	タービン架台、非常用ディーゼル発電機基礎	タービン架台、非常用ディーゼル発電機基礎
凍結融解	取水構造物、外周コンクリート	取水構造物、外部遮蔽壁
化学的侵食	コンクリート構造物全般	コンクリート構造物全般

*複合劣化の可能性が考えられる要因: 1) 中性化、2) 塩分浸透、3) 熱

2.3 PDFt 曲線による複合劣化の評価方法

2.3.1 PDFt 曲線による評価方法

PDFt 曲線の考え方は、劣化関数の基本形を予め定め、構造物の実際の複合劣化度測定データを外挿し、劣化関数の係数を帰納的に決定し、劣化予測を行うというものである。劣化関数の係数により様々な構造物(ここでは各地域の原子力発電施設)の耐久性に関する特性を共通的な尺度で評価できる。また、経過年 t 、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D 、構造物の性能 P について各因子間の関係を独立事象として明確にとらえることで推定精度が向上する。

劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係を F - t 曲線（レベルⅠ）、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係を D - F 曲線（レベルⅡ）、構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係を P - D 曲線（レベルⅢ）とする。これらを統合すると、図 1 に示す RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム(PDFt 曲線)が得られる。本図のレベルⅣが構造物の性能の時間変化を評価する P - t 曲線となる。現在の健全性評価での制限値は、劣化因子の作用量 F あるいは材料劣化度 D について定めている。PDFt 曲線を用いることで、構造物の性能 P に基づく制限値から、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D の制限値を定めることができる。

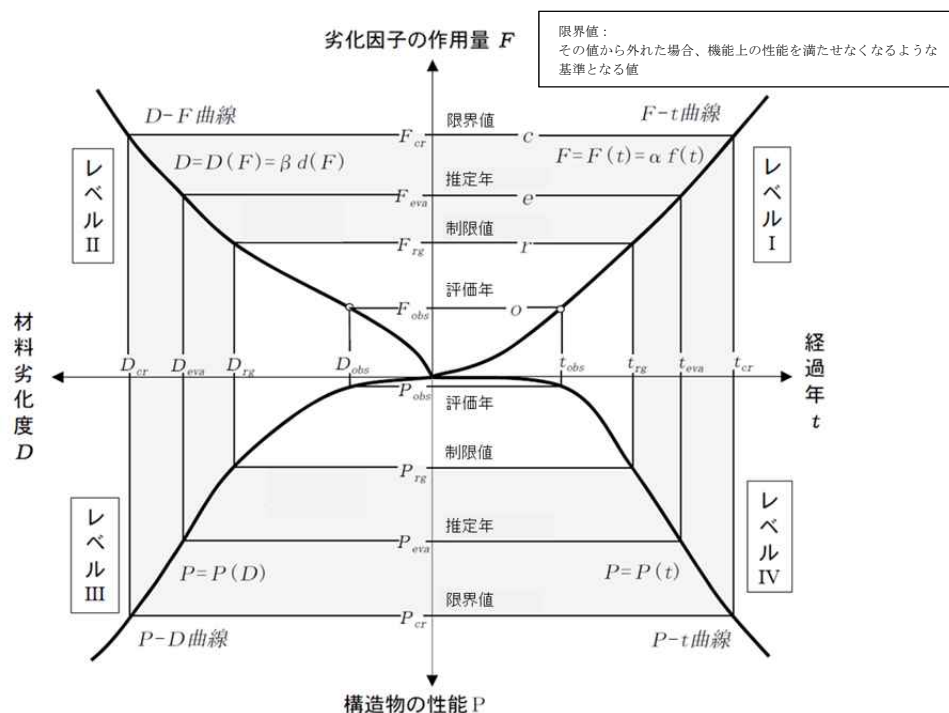


図 1 RC 構造物の劣化度評価ダイアグラム($PDFt$ 曲線)

2.3.2 複合劣化を考慮した $PDFt$ 曲線

複合劣化を考慮した $PDFt$ 曲線は以下による。評価の基本は、単独劣化、複合劣化に関わりなく、実測値から外挿により劣化曲線を求めることである。

(1) 劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係($F-t$ 曲線) (図 1 でのレベル I)

経過年 t と劣化因子の作用量 F との関係 $F(t)$ を係数 α と評価基本式 $f(t)$ により式 (1) で表し $F-t$ 曲線とする。

$$F(t) = \alpha f(t) \quad (1)$$

ここに、 α :劣化因子指数

劣化因子指数 α は劣化因子が複合的に作用する場合は、式 (2) となる。

$$\alpha = \alpha(I_1, I_2, \dots, I_n) \quad (2)$$

ここに、 $I_{1 \sim n}$:劣化因子 (温度、湿度、炭酸ガス濃度、塩化物イオン濃度等)

複合的な劣化因子に対して式 (1) が成立つ評価基本式 $f(t)$ とすることで、実測値に基づく外挿法により α で劣化因子の複合作用を一律に評価する (α の中に複合的な環境因子を含ませ評価する)。

(2) 材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係($D-F$ 曲線) (図 1 でのレベル II)

材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 $D(F)$ を係数 β と評価基本式 $d(F)$ により表し $D-F$ 曲線とする。

$$D(F) = \beta d(F) \quad (3)$$

ここに、 β :材料劣化指数

材料劣化指数 β は劣化因子が複合的に作用する場合は、式 (4) となる。

$$\beta = \beta(F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (4)$$

ここに、 $F_{1\sim n}$: 劣化因子 (中性化深さ、塩化物イオン濃度、温度等)

複合的な劣化因子に対して式 (3) が成立つ評価基本式 $d(F)$ とすることで、実測値に基づく外挿法により β で劣化因子の複合作用を一律に評価する (β の中に複合的な劣化因子を含ませ評価する)。

(3) 構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係 (P - D 曲線) (図 1 でのレベルⅢ)

構造物の性能 P と複数の材料の劣化度 D との関係を定式化し P - D 曲線とする。

$$P(D) = P(D_1, D_2, \dots, D_n) \quad (5)$$

ここに、 $D_{1\sim n}$: 材料劣化度

P - D 曲線については実際の構造物の性能 P を実測することが難しいこと、 P - D の関係は地域性、劣化因子に関わらず普遍性があることなどから、劣化後の材料特性を用いた既往の設計式などで直接求める。

(4) 経過年 t と構造物の性能 P との関係 (P - t 曲線) (図 1 でのレベルⅣ)

上記の(1)~(3)を統合すると、 $PDFt$ 曲線が得られる。 P - t 曲線 (レベルⅣ) は、右上 (レベルⅠ) 及び左下 (レベルⅢ) の t 及び P の数値を数点プロットすることで得られ、材料劣化度 D が多数で複合的な作用を受ける場合は評価式に複数ある材料劣化度 D を代入して、 P - t 曲線を決定する (詳細は後述する図 4 参照)。

2.4 評価物理量の概要

2.4.1 評価対象とする物理量

原子力発電施設の RC 構造物の健全性評価を行う上で評価対象となる評価物理量の例を、劣化因子の作用量 F 、材料劣化度 D 、構造物の性能 P それぞれについて、表 2 に示す。また、本説明書で対象とする劣化因子の作用量 F は、中性化 F_1 、塩分浸透 F_2 、熱 F_3 である。

表 3 に F_1 、 F_2 、 F_3 に対する材料劣化度 D の対応例を示す。本説明書で主要となる劣化事象は、構造性能に影響を及ぼす、圧縮強度 D_1 、ヤング係数 D_2 、鉄筋腐食度 D_3 である。また、表 4 に構造物の性能 P に対する材料劣化度 D の対応例を示す。

2.4.2 複合劣化での評価物理量

複合劣化の場合は、劣化因子の作用量 F は様々な環境因子の影響を受けるが、中性化 F_1 、塩分浸透 F_2 、熱 F_3 、それぞれの単独劣化因子毎に時間変化 (F - t 曲線) を評価する。その場合に環境因子が複数であっても、式 (1) に示すように評価基本式 $f(t)$ と劣化因子指数 α で一律に評価する。材料の劣化度 D に影響する劣化因子 F も多種作用する場合があるが、式 (3) に示すように評価基本式 $d(F)$ と材料劣化指数 β で、材料劣化度毎に独立して評価する。すなわち、圧縮強度 D_1 、ヤング係数 D_2 、鉄筋腐食 D_3 などの着目する材料劣化度毎に単独の

劣化因子の作用量との関係（ D - F 曲線）を評価する。この場合、鉄筋腐食 D_3 に関しては、中性化 F_1 と塩分浸透 F_2 の劣化因子の作用量に基づく 2 つの評価式が出来るが、健全性評価の過程で材料劣化度 D_3 が大きい方を選択する。

構造物の性能 P と材料劣化度 D との関係の評価は、既往の設計式などによるため、複数の材料劣化度が複合的に評価される。

表 2 評価対象とする評価物理量の例

劣化因子の作用量 F		材料劣化度 D		構造物の性能 P	
F_1	中性化深さ	D_1	圧縮強度	P_1	部材の剛性
F_2	塩化物イオン濃度	D_2	ヤング率	P_2	部材の耐荷力
F_3	熱（温度）	D_3	鉄筋腐食度	P_3	構成則（復元力特性）
F_4	放射線	D_4	断面欠損	P_4	地震応答
F_5	骨材膨張	D_5	引張強度	P_5	鉄筋の付着強度
F_6	機械振動	D_6	ひび割れ抵抗性	P_6	ボルトの引抜耐力
F_7	凍結融解	D_7	—	P_7	気密性
F_8	化学物質	D_8	—	P_8	ひび割れ
F_9	—	D_9	—	P_9	水密性
F_0	その他	D_0	その他	P_0	その他

■ 本説明書で評価対象としている物理量

表 3 劣化因子の作用量 F に対する材料劣化度 D の対応例

	圧縮強度 D_1	ヤング係数 D_2	鉄筋腐食度 D_3	断面欠損 D_4	引張強度 D_5	ひび割れ抵抗性 D_6
中性化深さ F_1			●			
塩化物イオン濃度 F_2			●			
熱（温度） F_3	●	●			●	●

（●本説明書で評価対象としている）

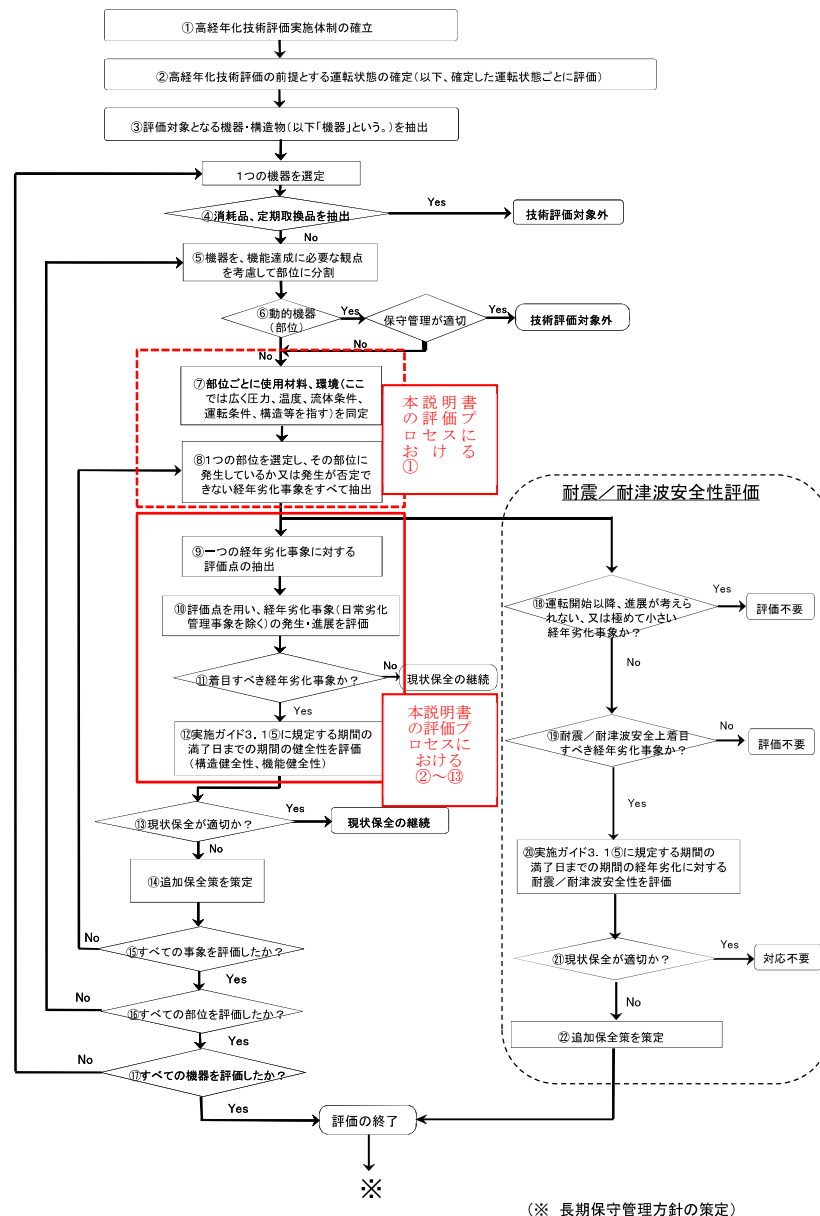
表 4 構造物の性能 P に対する材料劣化度 D の対応例

	圧縮強度 D_1	ヤング率 D_2	鉄筋腐食度 D_3	断面欠損 D_4	引張強度 D_5	ひび割れ抵抗性 D_6
部材の剛性 P_1	●	●	●	●		
部材の耐荷力 P_2	●		●	●	●	●
構成則 P_3	●	●	●	●	●	●
地震応答 P_4	●	●	●			
鉄筋の付着強度 P_5	●		●		●	●
ボルトの引抜耐力 P_6	●				●	●
気密性 P_7	●			●		●
ひび割れ P_8	●		●		●	●
水密性 P_9	●					●

2.5 評価プロセス

2.5.1 評価プロセスの概要

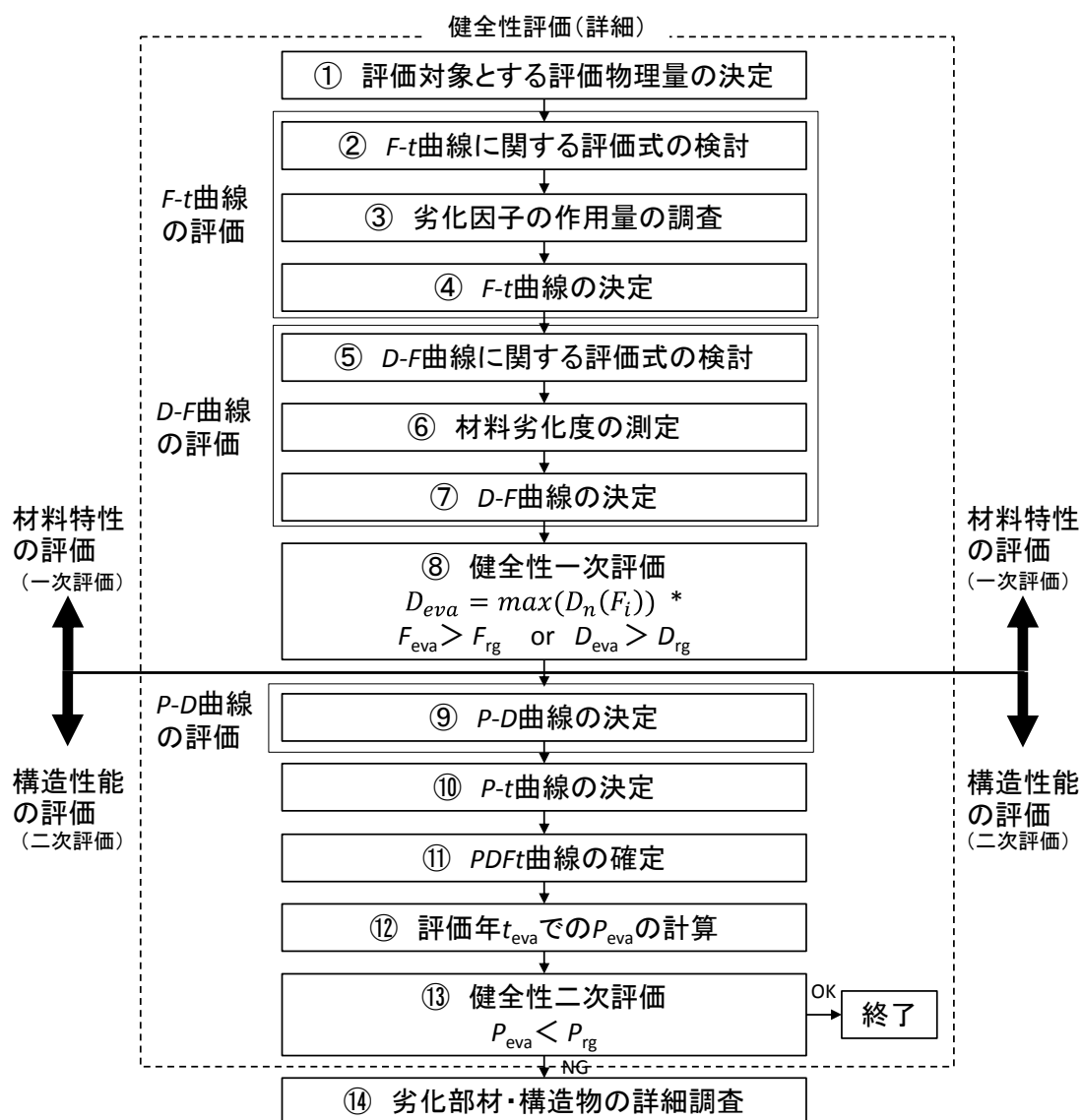
「実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド³」における評価プロセスを図2、本説明書での評価プロセスを図3に示す。高経年化対策審査ガイドにおける評価プロセス⑦⑧が本説明書での評価プロセス①に対応しており、高経年化対策審査ガイドにおける評価プロセス⑨～⑫が本説明書での評価プロセス②～⑤に対応している。



注. ⑲、⑲に該当する場合は、当該評価を上記の評価へ適切に反映。

図2 高経年化対策審査ガイドでの評価プロセス

³ 原子力規制庁：「実用発電用原子炉施設における高経年化対策審査ガイド」2013.7



*異なる種類の劣化因子 ($F_1, F_2, \dots, F_n$) の作用で同種の材料劣化度 D の評価値が算出された場合は、劣化度の大きな方を選択する。

t_{eva} : 評価年
 F_{eva} : 評価年 t_{eva} における劣化因子の作用量
 F_{rg} : 劣化因子の作用量の制限値
 D_{eva} : 評価年 t_{eva} における材料劣化度
 D_{rg} : 材料劣化度の制限値
 P_{eva} : 評価年 t_{eva} における構造物の性能
 P_{rg} : 構造物の性能の制限値

図 3 *PDFt* 曲線による評価プロセス

2.5.2 経年劣化要因の抽出

原子力発電施設の RC 構造物に関する経年劣化要因としては、熱、放射線照射、中性化、

塩分浸透、アルカリ骨材反応、機械振動、凍結融解、化学的侵食がある。この中で、本説明書で対象としている経年劣化要因は中性化、塩分浸透、熱である。

2.5.3 評価対象部位の抽出

2.5.2 節で選定された経年劣化事象と劣化要因について、評価対象構造物の運転条件、環境条件などを考慮して、プラントの安全性に係る経年劣化の影響がもっとも厳しくなると想定される部位を選定する。表 1 に代表的な評価対象部位の例を示す。

2.5.4 健全性評価

RC 構造物の健全性評価は、 $PDFt$ 曲線を用いることで材料の劣化度が構造物の性能に与える影響を考慮した評価とする。以下に健全性評価の詳細を示す。

① 評価対象とする評価物理量の決定

着目する劣化因子の作用量 F 、材料の劣化度 D 、構造物の性能 P の評価物理量を定める。

② $F-t$ 曲線に関する評価式の検討

①で定めた劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係 ($F-t$ 曲線) として適切な評価式を選定する。

③ 劣化因子の作用量の調査

2.5.3 で選定した部位に関して、温度、湿度、炭酸ガス濃度、塩化物イオン濃度などの劣化因子の作用量 F_{obs} を実測により求める。

④ $F-t$ 曲線の決定

③で得られた結果から、劣化因子指数 α を定め、劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係 ($F-t$ 曲線) を決定する。

⑤ $D-F$ 曲線に関する評価式の検討

①で定めた材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 ($D-F$ 曲線) として適切な評価式を選定する。

⑥ 材料劣化度の測定

評価時期での実際の RC 構造物のコンクリートの強度や鉄筋の腐食量などの材料劣化度 D_{obs} を選定部位で一般的な破壊試験、非破壊試験などを行い測定する。

⑦ $D-F$ 曲線の決定

⑥で得られた結果から、材料劣化指数 β を定め、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 ($D-F$ 曲線) を決定する。

⑧ 健全性一次評価

評価対象とした劣化因子の作用量 F 、材料の劣化度 D に対する制限値 F_{rg} or D_{rg} を定める。次に一次評価として評価年 t_{eva} での劣化因子の作用量 F_{eva} or 材料の劣化度 D_{eva} とそれぞれに対応する制限値を比較し、 $F_{\text{eva}} > F_{\text{rg}}$ or $D_{\text{eva}} > D_{\text{rg}}$ を満足するかどうかを確認

する。満足しない場合は、評価年 t_{eva} に達すると評価対象とした部位は劣化の可能性があると判断し、二次評価に進み、構造性能の評価を行う。

異なる種類の劣化因子 (F_1 、 F_2 ... F_n) の作用で同種の材料劣化度 D の評価値が算出された場合は、劣化度の大きな方を選択する。

⑨ P - D 曲線の決定

構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係 (P - D 曲線) に関する評価式 (エクセル計算シート) を用いて P - D 曲線を決定する。

⑩ P - t 曲線の決定

④⑦⑨で得られた劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係 (F - t 曲線)、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 (D - F 曲線)、構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係 (P - D 曲線) を用いて、 t 及び P の数値を数点プロットすることで、経過年 t と構造物の性能 P との関係 (P - t 曲線) を得る。

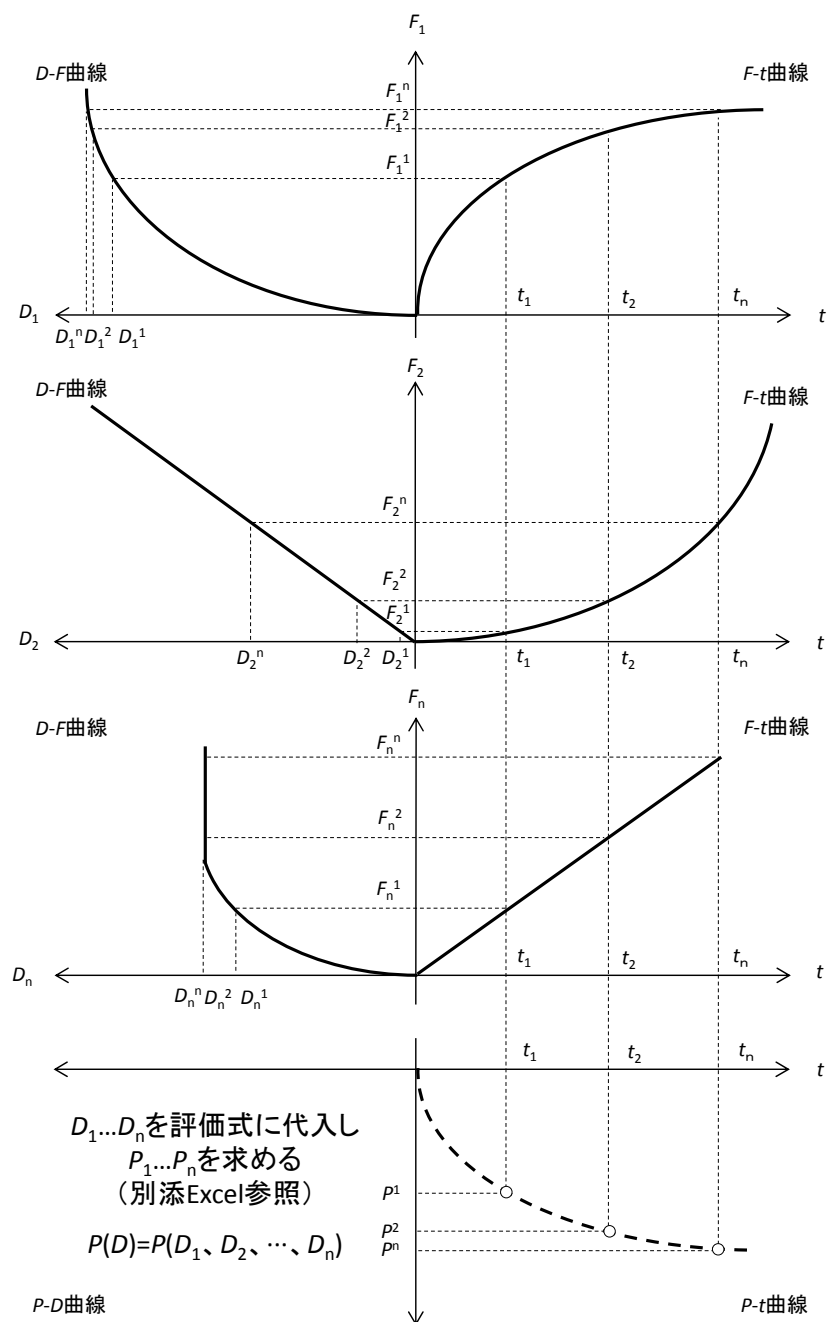


図 4 複合的な材料劣化因子による構造性能 (P - t 曲線) の評価概念

⑪ $PDFt$ 曲線の確定

④⑦⑨⑩で決定した劣化因子の作用量 F と経過年 t との関係 (F - t 曲線)、材料の劣化度 D と劣化因子の作用量 F との関係 (D - F 曲線)、構造物の性能 P と材料の劣化度 D との関係 (P - D 曲線)、経過年 t と構造物の性能 P との関係 (P - t 曲線) を統合することで $PDFt$ 曲線を得る。

⑫ 評価年 t_{eva} での P_{eva} の計算

$PDFt$ 曲線を用いて、推定したい年度 t_{eva} での構造物の性能 P_{eva} を求める。

⑬ 健全性二次評価

評価対象とした構造物の性能 P に対する制限値 P_{rg} を定める。そして、⑫で求めた構造物の性能 P_{eva} と制限値を比較し、 $P_{\text{eva}} < P_{\text{rg}}$ を満足するかどうかを確認する。満足しない場合は、評価年 t_{eva} に達すると評価対象とした部位は劣化の可能性があるとは判断する。

⑭ 劣化部材・構造の詳細調査、対策立案と効果の評価

健全性二次評価を行い、NG となった劣化部材・構造物の詳細調査を行い、その劣化への対策を立案する。

3. 材料特性の評価

3.1 中性化

3.1.1 評価プロセス

図 5 に中性化での評価プロセスを示す。本評価は、中性化以外の複合劣化作用も考慮している。 $F-t$ 曲線、 $D-F$ 曲線による評価について詳細に記す。

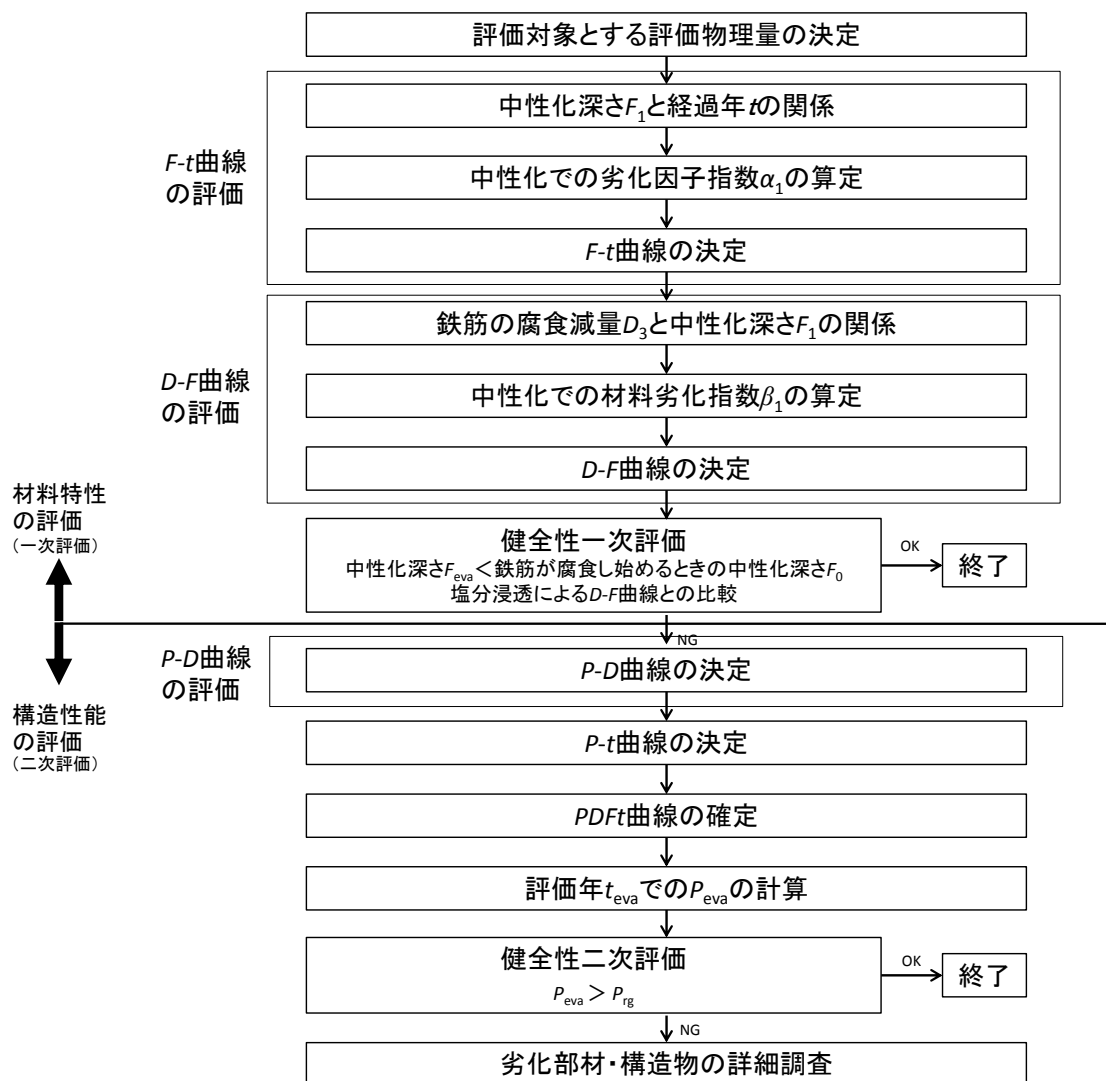


図 5 中性化での評価プロセス