

中性化による鉄筋の腐食膨張に伴うかぶりコンクリートの
ひび割れ発生予測に関する研究

前原 聡

目 次

1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的	3
1.3 本研究の構成	5
2 章 既往の研究	9
2.1 塩害劣化に関する実構造物を対象とした調査結果の整理と分析	9
2.1.1 塩化物イオン浸透に着目した調査結果の整理と分析	9
2.1.2 ひび割れおよび剥離・剥落に着目した調査結果の整理と分析	12
2.2 鉄筋腐食によるひび割れ発生メカニズムに関する既往の研究	13
2.2.1 コンクリート表面のひび割れ発生時期と鉄筋の腐食程度に関する研究	13
2.2.2 腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響	15
2.2.3 腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響	17
2.3 中性化によるかぶりコンクリートの剥離・剥落に関する実態調査	19
2.4 中性化における鉄筋腐食の腐食速度に関する既往の研究	21
2.5 中性化に起因する鉄筋腐食の劣化予測における既往の研究のまとめ	22
3 章 実構造物の調査結果に基づく剥離・剥落に及ぼす影響要因の評価	27
3.1 はじめに	27
3.2 各要因が中性化に進行に及ぼす影響に関する調査	28
3.2.1 対象構造物	28
3.2.2 調査方法	30
3.2.3 調査結果および考察	32
3.3 中性化進行によるコンクリートの物性変化に関する分析	34
3.3.1 分析概要	34
3.3.2 分析方法	35
3.3.3 分析結果および考察	36
3.4 施工年代の違いが中性化の進行特性に及ぼす影響に関する分析	40
3.4.1 調査概要	40
3.4.2 調査結果および考察	41
3.5 各要因が剥離・剥落に及ぼす影響に関する調査	42
3.5.1 調査概要	42
3.5.2 調査結果および考察	42
3.6 中性化により腐食した鉄筋の詳細分析	48

3.6.1	対象構造物および分析試料	48
3.6.2	分析方法	50
3.6.3	分析結果および考察	51
3.7	雨掛かりの有無がコンクリート中の含水率に及ぼす影響に関する調査	56
3.7.1	調査概要	56
3.7.2	調査結果および考察	57
3.8	鉄筋腐食の進展機構	59
3.9	まとめ	64
4 章	モルタル供試体を用いたひび割れ発生に及ぼす実験的検討	67
4.1	はじめに	67
4.2	劣化機構の違いが鉄筋の腐食形態に及ぼす影響に関する検討	68
4.2.1	塩害および中性化の劣化機構の違いに着目した実験（シリーズ 1）	68
4.2.2	内在塩分濃度の違いに着目した実験（シリーズ 2）	80
4.2.3	まとめ	82
4.3	腐食形態がモルタル表面のひずみ挙動に及ぼす影響に関する実験的検討	82
4.3.1	実験概要	82
4.3.2	実験結果および考察	83
4.3.3	まとめ	90
4.4	発錆機構の違いが腐食生成物および体積膨張倍率に及ぼす影響に関する検討	91
4.4.1	実験概要	91
4.4.2	分析結果および考察	93
4.4.3	まとめ	100
4.5	かぶりコンクリートの発生応力	102
4.5.1	厚肉円筒理論	102
4.5.2	腐食促進試験におけるモルタル表面ひずみとの比較	104
5 章	かぶりコンクリートのひび割れ発生予測に関する検討	109
5.1	はじめに	109
5.2	中性化の進行および鉄筋の腐食開始時期	110
5.3	かぶりコンクリートのひび割れ発生予測	111
5.4	予測手法の検証	117
6 章	結論	118

1章 序論

1.1 研究の背景

コンクリートは、1900年代初頭から建設材料のひとつとして、社会資本の整備に欠かせないものとして使用されてきた。これまでの社会資本の整備において、膨大な量のコンクリートがストックされており、今後も主要な建設材料として使用され続けるものと考えられる。コンクリートが建設材料として使用され始めた当初は、コンクリート構造物は半永久的にメンテナンスフリーなものと思われていたが、現在、100年以上の間、健全な状態で供用されているコンクリート構造物が現存している一方で、適切な材料選定や配合設計、施工および維持管理を施さないと早期に劣化が生じることが常識的に認知されている。現在供用中のコンクリート構造物には昭和初期に構築され、80年以上経過したものや、戦後間もない建設資材不足の社会情勢下において構築されたもの、高度経済成長期の最中に急速に構築されたものなどが多様に存在しており、これらのコンクリート構造物の中には、経年劣化の進行や、施工・材料不良に起因する耐久性が低下している事象が顕在化しているものも少なくない。

ここで、国土交通白書によると、1964年の東京オリンピック以降に整備された首都高速1号線等、高度経済成長期以降に整備したインフラが今後一斉に老朽化し、今後20年間で、建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなることを見込まれている。今後、人口減少や少子高齢化に伴い我が国における財政状況がより一層厳しくなることが予測されている中で、表1.1に示されているように、2013年度の更新費が約3.6兆円であるのに対して、20年後には、約4.6～5.5兆円となり、現状の約3～5割高くなると推計されている。¹⁻¹⁾

表1.1 社会資本の維持管理・更新費および老朽化状況¹⁻¹⁾

将来の維持管理・更新費の推計結果		社会資本の老朽化の現状			
年度	推計結果	《建設後50年以上経過する社会資本の割合》			
			H25年3月	H35年3月	H45年3月
2013年度	約3.6兆円	道路橋 [約40万橋 ^{注1)} (橋長2m以上の橋約70万のうち)]	約18%	約43%	約67%
2023年度 (10年後)	約4.3～5.1兆円	トンネル [約1万本 ^{注2)}	約20%	約34%	約50%
2033年度 (20年後)	約4.6～5.5兆円	河川管理施設(水門等) [約1万施設 ^{注3)}	約25%	約43%	約64%
		下水道管きよ [総延長:約45万km ^{注4)}	約2%	約9%	約24%
		港湾岸壁 [約5千施設 ^{注5)} (水深-4.5m以深)]	約8%	約32%	約58%
※1. 国土交通省所管の社会資本10分野(道路、治水、下水道、港湾、公営住宅、公園、海岸、空港、航路、標識、官庁施設)の、国、地方公共団体、地方道路公社、(独)水資源機構が管理者のものを対象に、建設年度毎の施設数を調査し、過去の維持管理・更新実績等を踏まえて推計。 ※2. 今後の新設、除却量は推定が困難であるため考慮していない。 ※3. 施設更新時の機能向上については、同等の機能で更新(但し、現行の耐震基準等への対応は含む。)するものとしている。 ※4. 用地費、補償費、災害復旧費は含まない。 ※5. 個々の社会資本で、施設の立地条件の違いによる損傷程度の差異や維持管理・更新工事での制約条件が異なる等の理由により、維持管理・更新単価や更新時期に幅があるため、推計額は幅を持った値としている。		注1) 建設年度不明橋梁の約30万橋については、割合の算出にあたり除いている。 注2) 建設年度不明トンネルの約250本については、割合の算出にあたり除いている。 注3) 国管理の施設のみ。建設年度が不明な約1,000施設を含む。(50年以内に整地された施設については概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。) 注4) 建設年度が不明な約1万5千kmを含む。(30年以内に布設された管きよについては概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約30年以上経過した施設として整理し、記録が確認できる経過年数毎の整備延長割合により不明な施設の整備延長を按分し、計上している。) 注5) 建設年度不明岸壁の約100施設については、割合の算出にあたり除いている。			

このように、劣化が顕在化し、今後、経過年数が 50 年を迎えようとするコンクリート構造物が数多く存在する中、2012 年 12 月に発生した中央自動車道笹子トンネル天井板落下事故により、改めてインフラの老朽化が深刻な問題であることが再認識された。それを受け、国土交通省では、2013 年を「メンテナンス元年」として、老朽化対策を進展させてきた。2013 年 11 月に国民生活やあらゆる社会経済活動を支える各種施設をインフラとして幅広く対象とした戦略的な維持管理・更新等の方向性を示す基本的な計画として、「インフラ長寿命化基本計画」をとりまとめた。国土交通省は、この基本計画に基づき 2014 年 5 月、あらゆるインフラの維持管理・更新等を着実に推進するための中長期的な取組の方向性を明らかにした「国土交通省インフラ長寿命化計画」を策定した。今後は、この行動計画に基づき、新設から撤去までの、いわゆるライフサイクルの延長のための対策という狭義の長寿命化の取り組みに留まらず、更新を含め、将来にわたって必要なインフラの機能を発揮し続けるための取り組みを実行することで、これまで進めてきたメンテナンスサイクルの構築と継続的な発展につなげるとしている¹⁻²⁾。また、地方公共団体等においても 2016 年度までの行動計画の策定が進められている。これらの計画の実行により、既存の社会資本の安全確保とメンテナンスに係るトータルコストの縮減・平準化を両立できるようにするため、戦略的なメンテナンスを徹底する必要がある、コンクリート構造物における劣化予測やヘルスマonitoring など延命化に関する技術の高度化を図り、インフラの維持管理、長寿命化技術を確立することが急務となっている。

コンクリート構造物の劣化現象としては、塩害および中性化、アルカリ骨材反応、凍害、疲労、化学的侵食などが挙げられる。それらの中で、我が国は海に囲まれていることや山間部において凍結防止剤、融雪剤が散布されることから塩害による劣化と、立地的特性の影響をあまり受けない中性化が鉄筋コンクリート構造物の鉄筋腐食に起因する代表的な劣化として挙げられる。塩害ではコンクリート中に塩化物イオンが浸透すること、中性化ではコンクリート中のアルカリ性が低下することで、鉄筋の不動態被膜を破壊し、鉄筋腐食を引き起こす。これらの鉄筋腐食が進行すると腐食生成物の膨張圧により、かぶりコンクリートにひび割れや剥離・剥落を発生させる。そして、鉄道や交通量の大きい幹線道路を跨ぐ橋梁などの構造物では、かぶりコンクリートの剥落は、直接的かつ甚大な第三者災害につながる可能性が大きいことから、鉄筋コンクリート構造物を維持管理していくうえで適切な対策を施す必要がある。上記のように鉄筋コンクリート構造物の維持管理の重要性が改めて認識されている中、鉄筋コンクリート構造物の代表的な劣化である塩害および中性化に対して、適切な劣化過程の把握とその後の正確な劣化予測をすることは、構造物を健全な状態で長期間供用するためにも重要であり、さらに既存の社会資本の安全確保とメンテナンスに係るトータルコストの縮減・平準化の両立に資するものである。

コンクリート標準示方書[維持管理編]¹⁻³⁾では、塩害および中性化による劣化過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分類している。表 1.2、図 1.1 に塩害と中性化のそれぞれにおける劣化過程の定義と期間を決定する要因および劣化進行の概念図を示す。潜伏期は、塩化物イオンや二酸化炭素の劣化因子が侵入し、鉄筋腐食が開始するまでの期間であり、その期間を決定する要因は、塩化物イオンの拡散や二酸化炭素の侵入に影響を受ける。次に、進展期は鉄筋腐食から腐食ひび割れ発生までとされ、加速期は鉄筋腐食によるひび割れが発生する時期以降とされている。加速期以降は

ひび割れを介して、酸素や水分などの劣化因子の侵入が増大し、鉄筋腐食の速度が著しく大きくなる。ひび割れが発生することで鉄筋腐食の速度は大きくなることから、その後のコンクリート構造物の劣化進行に大きく影響を及ぼす。よって、ひび割れ発生時期を鉄筋の腐食程度から定量的に把握することは、その後の適切な劣化予測をするにあたり極めて重要となる。

表1.2 劣化過程の定義と期間を決定する要因¹⁻³⁾

劣化過程	定義	塩害 期間を決定する要因	中性化 期間を決定する要因
潜伏期	鋼材腐食が開始するまでの期間	塩化物イオンの拡散 初期含有塩化物イオン濃度	中性化進行速度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度	鋼材の腐食速度
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	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間		

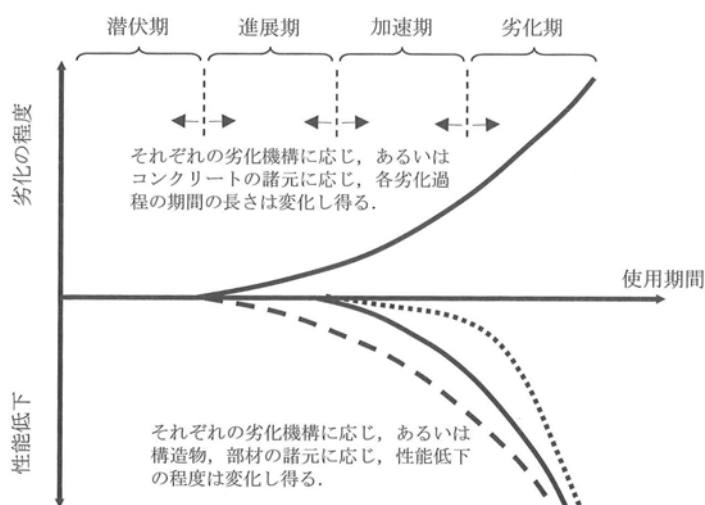


図 1.1 劣化進行過程の概念図¹⁻³⁾

1.2 研究の目的

これまで、ひび割れ発生時における鉄筋の腐食程度に着目した研究は、電食実験や塩害を想定した乾湿繰返しによる腐食促進試験などにより研究が進められている^{1-4)~1-8)}。ただし、電食実験ではひび割れが発生したかぶり側の鉄筋側面に腐食が集中し、局所的に著しく腐食する形態に大きく偏ること¹⁻⁴⁾や電食実験と実環境下では腐食生成物が異なること¹⁻⁸⁾が言われており、腐食形態および

腐食生成物の種類や割合により、ひび割れ発生に与える影響が異なるものと考えられる。一方で、中性化に着目した場合、中性化による鉄筋腐食は、塩害によるものと比較して著しく遅くなることが実務的に認識されている。そのため、中性化による鉄筋腐食がひび割れ発生に及ぼす影響に言及した実験的検討はなされていないのが現状である。また、実構造物の劣化事例に着目しても、塩害におけるかぶりコンクリートの剥離・剥落は、中性化によるものよりも早期に顕著化し、劣化が甚大になることが認識されている。その一方で、中性化による劣化の進行は塩害と比較すると緩慢であることから、高架橋の高欄などのかぶりが小さい箇所において発生することが報告されているが^{1-9),1-10)}、かぶりがある程度確保されている場合での劣化事例は、極めて少ないのが現状である。現状、かぶりがある程度確保されている場合で、中性化によって長期間かけて鉄筋の腐食が進展すると塩害の劣化のようにかぶりが全面的に剥離・剥落するといった甚大な劣化となるかは不明である。また、中性化により劣化した実構造物の調査に基づく検討結果では^{1-9),1-10)}、水分供給の有無により、かぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響に違いがあることが示されており、中性化の場合でも水分供給の有無により腐食形態が変化し、ひび割れ発生に与える影響が異なることが推測される。以上のことから、塩害および中性化における腐食形態の違いを明確にし、その腐食形態がひび割れ発生に与える影響を整理する必要があると考えられる。

ここで、JCI-SC1 コンクリート中の鋼材腐食評価方法¹⁻¹¹⁾によると鉄筋の腐食形態は、表面が均一に腐食するものと局所的に著しく腐食するものに大別される。表面が均一に腐食する形態は、微視的なアノードとカソードからなるマイクロセルを多数形成し、鋼材表面から全面的に腐食するものと考えられている。また、局所的に著しく腐食する腐食形態は、微小面積のアノードと広い面積のカソードが乖離することでアノードに腐食が集中し、腐食深さが大きくなり、塩害では孔食のように局所的に著しく腐食する形態になり易いと考えられている。塩害による劣化進行が中性化によるものよりも早期になることは、腐食の進展速度が塩害のほうが速いのみならず、腐食形態の違いも影響するものと考えた。

次に、中性化による劣化過程において、鉄筋は、かぶりから中性化深さを減じた中性化残りが「ある値」となると腐食が開始するものとされており、土木学会コンクリート標準示方書¹⁻³⁾では、中性化残り 10mm が鉄筋腐食の開始の時期としている。鉄筋腐食が開始する以前での劣化予測では、中性化残りがこの「ある値」となるまでの期間を予測することになり、その中性化の進行には、水セメント比やセメント種類および環境条件などが影響を及ぼすとされている¹⁻¹²⁾。その中でも、コンクリートの乾燥状態により中性化の進行は変化し、雨掛かりなどによる水分供給がある場合では、乾燥状態にある場合よりも進行は遅くなるといわれている。そして、鉄筋腐食が開始した後は、腐食面積率、腐食減量および腐食深さなどの腐食程度に着目して劣化程度を予測することになる。例えば、鉄道構造物等維持管理標準¹⁻¹³⁾では、中性化による鉄筋の腐食速度は剥離・剥落に至るまでの期間で鉄筋の腐食深さで $3.0 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ としている。ここで、鉄自体の腐食に関して水分供給の有無により腐食速度が異なることが知られていることを考慮すると、コンクリート内での鉄筋腐食の進行においても、雨掛かりの有無などの環境条件が大きく影響を及ぼすものと考えられる。ただし、それらを定量的に示した事例は少ない。つまり、雨掛かりがある場合は中性化の進行は遅くなるが、鉄筋腐食の進行は速くなることが想定されるものの、鉄筋腐食の進行において環境条件を考

慮しての劣化予測がなされていないのが現状である。そこで、中性化の進行から鉄筋腐食、かぶりコンクリートの剥離・剥落に至るまでの全体の劣化過程における雨掛かりの影響を整理する必要があると考える。

以上を踏まえ、表 1.3 に各劣化過程における期間を決定する要因とその要因に影響を及ぼす因子を整理した。本研究では、鉄筋の腐食によるひび割れが発生するまでの潜伏期および進展期を対象として、塩害および中性化の劣化機構の違いが腐食形態に及ぼす影響と腐食形態の違いがコンクリートのひび割れに及ぼす影響を、さらに、中性化における雨掛かりの有無がひび割れ発生に至るまでの時期に与える影響を整理、分析した。そして、中性化の進行を加味した鉄筋腐食の進展機構を提示し、かぶりおよび雨掛かりの有無を考慮した腐食速度を定式化することで、中性化に起因する鉄筋腐食による劣化予測手法の構築、高度化を図ることを目的とする。なお、本研究では中性化に起因する鉄筋腐食による劣化予測手法を構築するにあたり、道路施設などの凍結防止剤散布などによる塩害と中性化の双方の劣化を受ける複合劣化については対象外とした。

表 1.3 劣化過程の期間を決定する要因とその影響因子

劣化過程	塩害・中性化 期間を決定する要因	分類	影響因子
潜伏期	塩化物イオンの拡散 初期含有塩化物イオン濃度 中性化進行速度	材料・設計	かぶりコンクリートの品質（セメント、骨材、混和剤、混和材、水セメント比、空気量、単位量）
		環境	劣化因子の供給程度（温度、湿度、日射、風量、風向、雨掛かり）
		施工	かぶりコンクリートの品質（締固め、養生、打継、打重ね）
進展期	鋼材の腐食速度、腐食形態、 腐食生成物の膨張倍率	材料・設計	かぶりコンクリートの品質（セメント、骨材、混和剤、混和材、水セメント比、空気量、単位量） 配筋条件（かぶり、鉄筋径、鉄筋間隔）
		環境	劣化因子の供給程度（温度、湿度、日射、風量、風向、雨掛かり）
		施工	かぶりコンクリートの品質（締固め、養生、打継、打重ね）配筋条件（施工誤差）
加速期 劣化期	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度、腐食形態、 腐食生成物の膨張倍率	材料・設計	配筋条件（かぶり、鉄筋径、鉄筋間隔）
		環境	劣化因子の供給程度（温度、湿度、日射、風量、風向、雨掛かり）
		施工	配筋条件（施工誤差）

1.3 本研究の構成

本論文は 6 章から構成し、各章における概要は以下に示すとおりである。

1 章は序論として、研究の背景およびその目的を述べ、本論文の構成について概説する。図 1.2 に本論文の構成の概略を示す。

2 章は既往の研究として、まず、塩害および中性化による劣化の実態調査を整理し、塩害による劣化が中性化と比較して、早期かつ甚大になることを示すとともに、中性化における劣化事例の実態における雨掛かりの有無の影響を示した。そして、鉄筋腐食によるひび割れ発生メカニズムに関

する研究における腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響および腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響、腐食形態の違いがひび割れ発生に及ぼす影響を整理し、中性化に起因する鉄筋腐食による劣化予測手法の構築、高度化における課題を抽出した。

3章では、報告事例の少ない昭和初期に構築されたものから経過年数10年程度と幅広い施工年代の36基の実構造物の様々な部材において、圧縮強度、中性化深さおよび鉄筋の腐食度を調査し、それらの221測点の調査結果に基づき、巨視的な観点から雨掛かりの有無が中性化、鉄筋腐食の進行およびかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響を整理し、雨掛かりが中性化による劣化に及ぼす影響を定量的に示した。そのことで、まず中性化による劣化状況の整理をした。さらに、実構造物より採取したコア供試体を対象に各種分析をすることで、長期間供用されたコンクリートでの中性化の進行における特異点を見出した。また、施工年代と中性化速度係数の関係を整理し、構造物の施工年代ごとに劣化過程に及ぼす特徴的な要因を整理、分析した。そして、実構造物より採取した鉄筋の質量減少率の結果からかぶりと質量減少率の関係を整理し、中性化による鉄筋腐食の腐食速度を定式化した。

4章では、モルタル供試体を対象として実験的検討として、塩害と中性化における劣化機構の違いが腐食形態に及ぼす影響を、乾湿繰返しによる腐食促進試験で腐食減量、腐食面積率および3次元の形状測定による腐食深さを求めることで把握した。腐食形態に及ぼす要因として塩害では、初期塩化物イオン濃度(外来塩化物イオンおよび内在塩化物イオン)およびかぶりの違いに着目した。中性化においては、酸素および水分の浸透性に大きく影響を及ぼすと考えられる水セメント比とかぶりの違いに着目した。また、乾湿繰返しによる腐食促進試験において、モルタル供試体表面のひずみの経時変化と任意の時点での鉄筋の腐食減量、腐食面積率を求め、腐食形態の違いがモルタルの表面のひずみ挙動に与える影響を整理した。また、腐食促進試験開始前の乾燥期間中におけるモルタル表面のひずみ変化を求め、腐食促進試験直後の膨潤によるひずみ変化に及ぼす影響を示した。さらに、腐食促進試験期間中の質量変化より含水率を求め、実構造物におけるコンクリート中の含水率分布の調査結果を踏まえ、乾湿繰返しによる含水率分布の変動を考察した。そして、腐食促進試験の腐食した鉄筋から、腐食生成物を採取し、X線回折リートベルト法により腐食生成物の種類の定量を行った。その結果から、腐食生成物の体積膨張倍率を算出し、塩害と中性化の劣化機構の違いが体積膨張倍率に与える影響を示し、ひび割れ発生に至るまでの過程においての違いを示した。以上を踏まえ、腐食促進試験により得られたモルタルの表面のひずみを厚肉円筒理論にて再現し、塩害と中性化による鉄筋腐食での膨張圧がかぶりコンクリート表面に作用する応力を算出した。その計算値と腐食促進試験による実験値を比較することで、適用性を検討した。

5章では、3章で求めた中性化の進行を加味した鉄筋の腐食進展機構と4章で検討した厚肉円筒理論によるかぶりコンクリート表面の平均引張応力を求めることで、中性化に起因する鉄筋腐食によるひび割れに至るまでの劣化予測手法を構築した。

6章は、本研究で得られた結果を取りまとめ、本研究の結論とした。

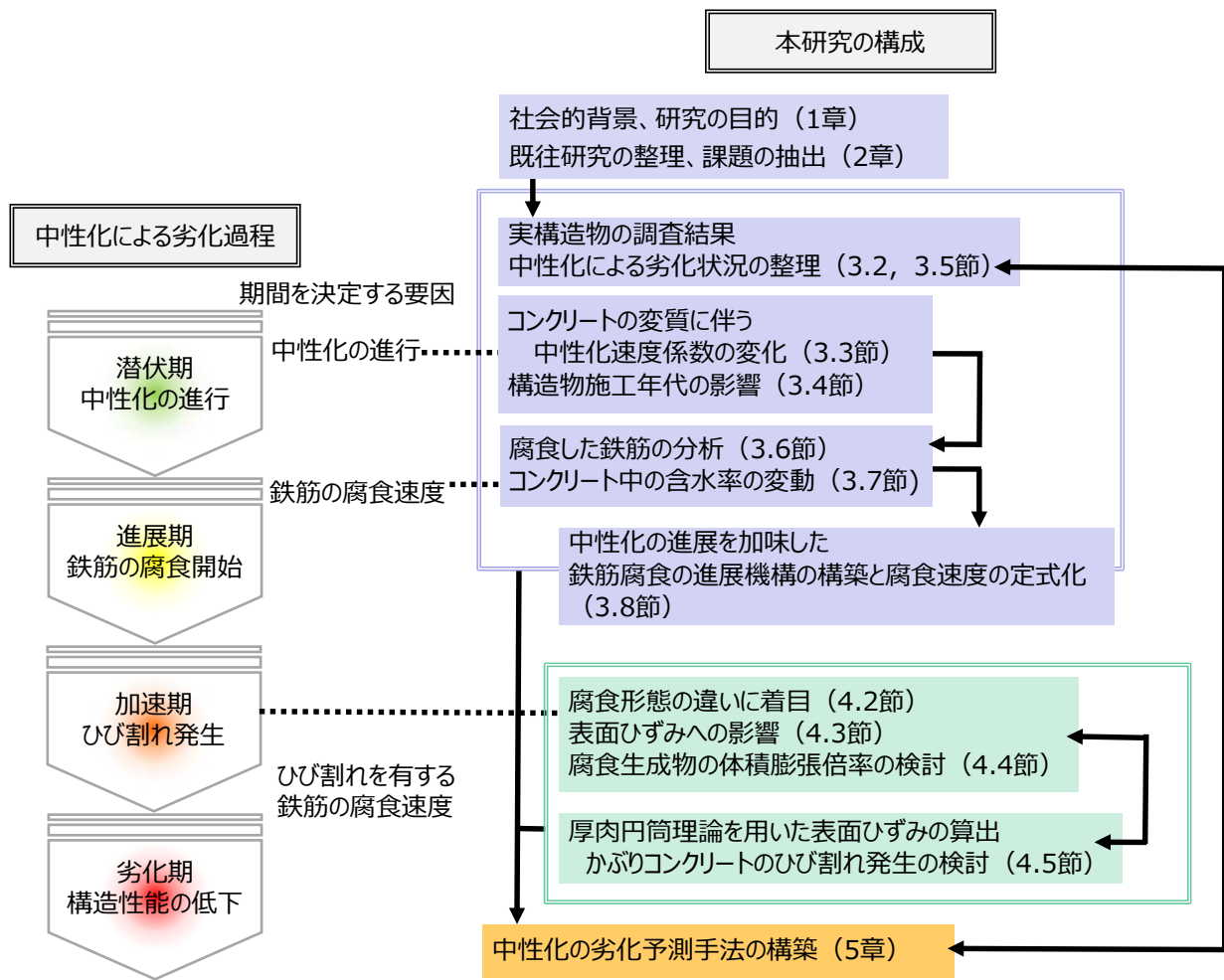


図 1.2 本論文の構成の概略

【1章 参考文献】

- 1-1) 国土交通省：平成 27 年度 国土交通白書
- 1-2) 国土交通省：国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）平成 26 年度～平成 32 年度，2014.5
- 1-3) 公益社団法人土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]，2013
- 1-4) 松島学，横田優，関博：鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1669-1674，2004.7
- 1-5) 中川裕之，田中大博，横田優，松島学：塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量，土木学会論文集 E，Vol.64，No.1，pp.110-121，2008.2
- 1-6) 鈴木三馨，堀口賢一，福浦尚之，丸屋剛：鉄筋腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1081-1086，2009.7
- 1-7) 鈴木三馨，福浦尚之，丸屋剛：ひび割れ発生限界腐食量と腐食生成物の膨張率の定量化に基づく耐久・構造連成解析システムの高精度化，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp. 773-778，2010.7
- 1-8) 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp. 154-165，2013.
- 1-9) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集 No.711/V-56，pp.125-134，2002.8
- 1-10) 前原聡，鈴木将充，早川健司，伊藤正憲，伊代田岳史：水分供給がかぶりコンクリートのはく離・はく落に与える影響に関する調査報告，土木学会第 70 回年次学術講演会，V-041，pp.81-82，2015.9
- 1-11) 社団法人日本コンクリート工学協会：JCI 規準集（1977～2002 年度），pp.91-94，2004.4
- 1-12) 松田芳範，上田洋，石田哲也，岸利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.629-634，2010
- 1-13) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，2007

2章 既往の研究

2.1 塩害劣化に関する実構造物を対象とした調査結果の整理と分析

2.1.1 塩化物イオン浸透に着目した調査結果の整理と分析

塩害では、早期に劣化が顕著化し、被害が甚大なものになることから、これまでに数多くの研究がなされてきた。その中で、実構造物を対象に調査研究したものや自然環境下に供試体を曝露する実験が実施され、それらの研究成果として、これまでにコンクリート中の塩化物イオンの浸透に関する実測データが多数蓄積されてきた。そこで、塩害における既往の研究を整理し、中性化における劣化過程でも着目すべき課題を抽出する。

前田ら²⁻¹⁾は、1975年から28年間における我が国の土木・建築分野のセメント・コンクリート関係の論文集や学会誌に報告された実構造物もしくは自然環境下での曝露実験から得られた調査結果に基づき塩害データベースを構築している。ここで、引用された文献数およびデータ数は表2.1に示すとおり、222件の文献、ならびに1840組の塩化物イオン濃度分布の調査結果である。それらの調査結果に基づき、塩化物イオン拡散係数に及ぼす要因として、水セメント比、セメントの種類、単位セメント量、実構造物の施工年および調査対象物に着目し、整理、分析をしている。塩化物イオン拡散係数に着目していることから、塩害の劣化過程における潜伏期から進展期を対象とし、各要因の影響を検討したものである。これによると図2.1に示すように文献発表年が1980年以前は、年間数件しかなかった塩害に関する文献が、実構造物における実害が顕著化し、各研究機関において研究が進められるようになった1980年代後半以降に、文献数が増加したことがわかる。また、実構造物を対象として調査したものに着目し、施工年代ごとに整理した図2.2では、1945年以前の戦前に構築され80年以上経過した構造物の事例もあるが、全体的に供用年数が60年に至らない構造

表2.1 引用文献数および調査データ数²⁻¹⁾

関連学会等	文献数	データ数
土木学会	91	505
日本コンクリート工学会	91	773
セメント協会	20	200
日本建築学会	20	362
合計	222	1840

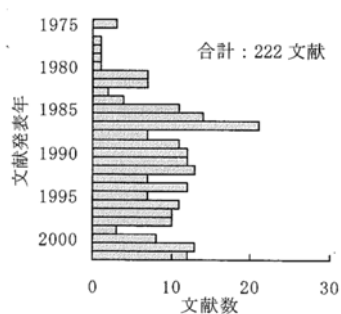


図2.1 発表年ごとの引用文献数²⁻¹⁾

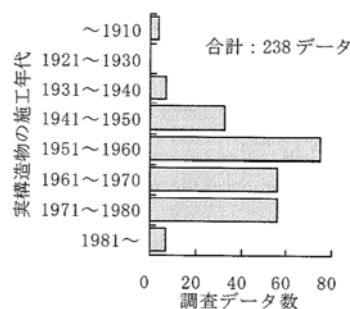


図2.2 引用文献数および調査データ数²⁻¹⁾

物における調査事例が大半を占めている。特に、高度経済成長期の1955～1970年や除塩不足の海砂が使用されていた可能性がある1970～1980年に施工された構造物も多く見受けられ、1980年以降では、減少している。

日本建築学会では、昭和32年(1957年)に細骨材中の塩分の許容量をNaCl換算0.01%(JASS 5)と定めている^{2-2),2-3)}。しかし、この規制値は厳しいものであるとともに、当時、適切な分析手法の整備が十分になされていなかったことから、急速な社会資本の整備に伴い、西日本を中心として海砂の使用が急増していた。昭和50年(1975年)改正のJASS 5では、防錆剤の使用やかぶりなどの条件を満たすことで塩分量(NaCl)を最大細骨材の0.1%まで緩和した²⁻⁴⁾。土木学会も昭和49年度版コンクリート標準示方書²⁻⁵⁾で細骨材の0.1%以下とした。昭和52年10月(1977年)の建設省通達では、原則0.04%、条件付きで0.1～0.2%を上限とされた²⁻⁶⁾。以上のような基準類の変遷の経緯を受け、1940～1980年に施工された構造物においては、塩害による劣化が顕著化する傾向にあり、1980年以降では減少したものである。

さらに、前田ら²⁻¹⁾は、実構造物における施工年ごとの見掛けの塩化物イオン拡散係数を示している(図2.3)。これによると実構造物での塩化物イオン拡散係数は施工年代によらず概ね $1\text{cm}^2/\text{year}$ となり、構造物の強度や耐久性に関する要求性能は、同程度であるとされている。ただし、施工年代ごとに着目すると、1940年以前では $5\text{cm}^2/\text{year}$ を上回る塩化物イオン拡散係数となるコンクリートはほとんど見られず、良好なコンクリートであることが伺える。一方で、高度成長期となる1940年代以降からは混和剤の開発により単位水量の低減などが図られ、塩化物イオン拡散係数が $10^{-1}\text{cm}^2/\text{year}$ 以下の良質なコンクリートも見られるが、 $5\text{cm}^2/\text{year}$ 以上のコンクリートも散見される。

ここで、日本コンクリート工学会、社会情勢とコンクリート産業構造の関連性検討委員会報告書²⁻⁷⁾によると、コンクリート工事における施工技術は、その時代の社会情勢のもと変遷してきた。図2.4に昭和初期以降から現在に至るまでのコンクリート工事変遷の概要と打設量の推移を示す²⁻⁷⁾。初期のコンクリートの工事においては、硬練りコンクリートを人力で運搬し、突き棒で丁寧に搗(つき)固める方法が一般的であった。その後、建築分野ではエレベータタワーやシュート打設などを使ったコンクリートの垂直運搬技術などが主に発達し、土木分野では大型の構造物の建設において

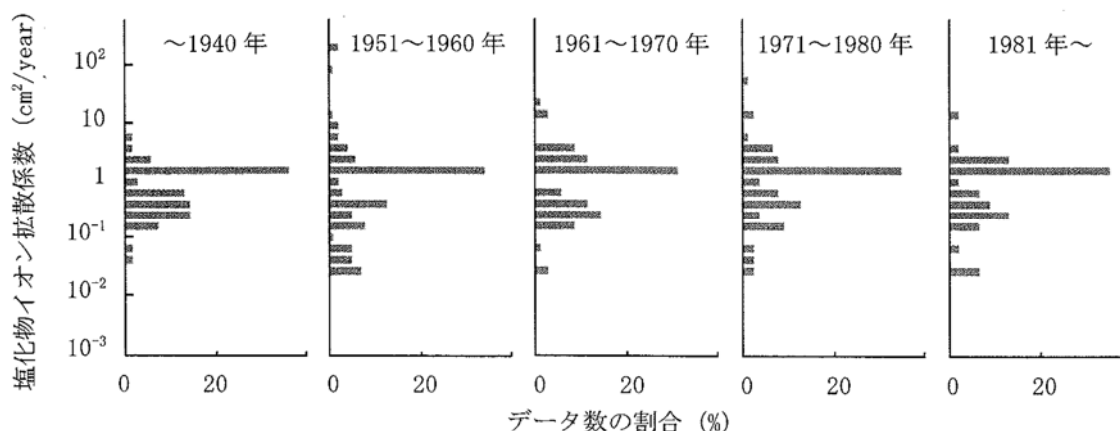


図2.3 実構造物における施工年ごとの塩化物イオン拡散係数(普通ポルトランドセメント)²⁻¹⁾

トロッコ、手押し車、ベルトコンベアーを使ったコンクリートの水平運搬技術が主に発達し、どちらもコンクリートの急速施工、大量打設などの時代の要求に応じて振動締固めなど、運搬、打込みにおいて機械化されてきたことがわかる。

つまり、図 2.3 における 1940 年代以降に施工された構造物でのコンクリートにおける塩化物イオン拡散係数が $5\text{cm}^2/\text{year}$ 以上のものが見受けられたことは、少なからず施工技術の影響を受けていることが推測できる。高度経済成長期に施工された構造物におけるコンクリートは、コンクリートの配合改善や混和剤の開発による品質の向上がなされる一方で、急速施工や機械化施工に伴う大量打設などによるコンクリートの施工方法が、塩化物イオン係数に影響を及ぼしていると考えられる。実構造物の維持管理において施工年の異なる実構造物のコンクリートの性質を詳細に評価し、材料の品質、施工の優劣等の情報を把握したうえで、劣化予測や補修、補強対策の検討をすることは、より適切な維持管理をするためにも有効な手法のひとつであると考えられる。

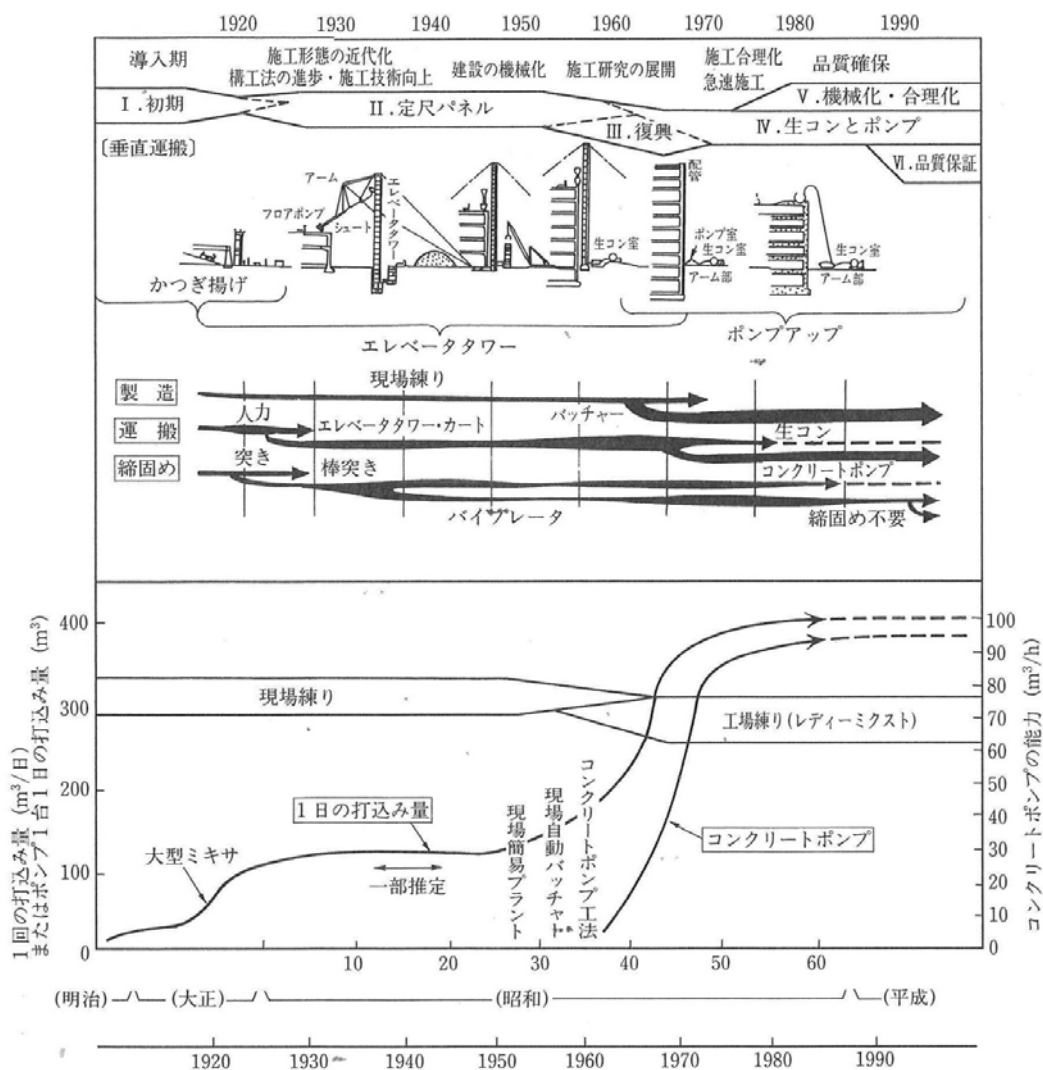


図2.4 コンクリート工事の変遷の概要と打設量の推移²⁻⁷⁾

2.1.2 ひび割れおよび剥離・剥落に着目した調査結果の整理と分析

中谷ら²⁻⁸⁾は、国内の沿岸部付近の国道に建設させている橋長 15m 以上のコンクリート橋を対象に、海岸線からの距離、供用年数、損傷状況を調査することで全国的な塩害による被害の実態状況を整理、分析している。調査数は、海岸線から数 km 程度の内陸部まで建設された橋梁 1011 橋梁を対象として、塩害劣化の有無を調査している。塩害の判定は、ひび割れ、剥離・剥落、錆汁などの損傷実態を目視により各道路管理者が確認したものを基本とし、別途、コア供試体による塩分量測定および橋梁維持管理台帳のデータを参考に判断している。なお、塩害の判定を目視による変状の有無を基本としていることから、これらは塩害の劣化過程における進展期から加速期を対象とし、各要因の影響を検討したものである。

図 2.5 に調査結果の一部を示す²⁻⁸⁾。図 2.5 では、地域区分を 3 区分 (A 沖縄県, B 北海道と東北の日本海側, C それ以外) に分類し、さらに、道路橋の塩害対策指針(案)²⁻⁹⁾が通達された 1984 年以前と以降に架設されたコンクリート橋梁の塩害の劣化発生状況について比較している。沖縄県において、塩害の劣化が発生している橋梁の割合をみると 1984 年以前の橋梁では 57%であるのに対して、1984 年以降では 3%と、1984 年以前のほうが塩害の劣化が発生している割合が大きいことがわかる。これは、経過年数および海岸線からの距離の影響を考慮して整理しても上記の傾向が示されている。また、北海道・東北の日本海側・北陸地方についても同様に、1984 年以前の橋梁では 33%であるのに対して、1984 年以降では 6%と明らかに 1984 年以前のほうが塩害劣化の発生割合が大きいことがわかり、地域区分 A, B 以外の地域 C についても 1984 年以前のほうが塩害を受けている傾向が示されている。この結果は、前田ら²⁻¹⁾の潜伏期から進展期における塩化物イオンの浸透に着目した分析結果と同様の傾向を示している。さらに、地域的特性を考慮すると、沖縄県および北海道・東北の日本海側・北陸地方において塩害劣化の発生割合が大きいことが示されている。

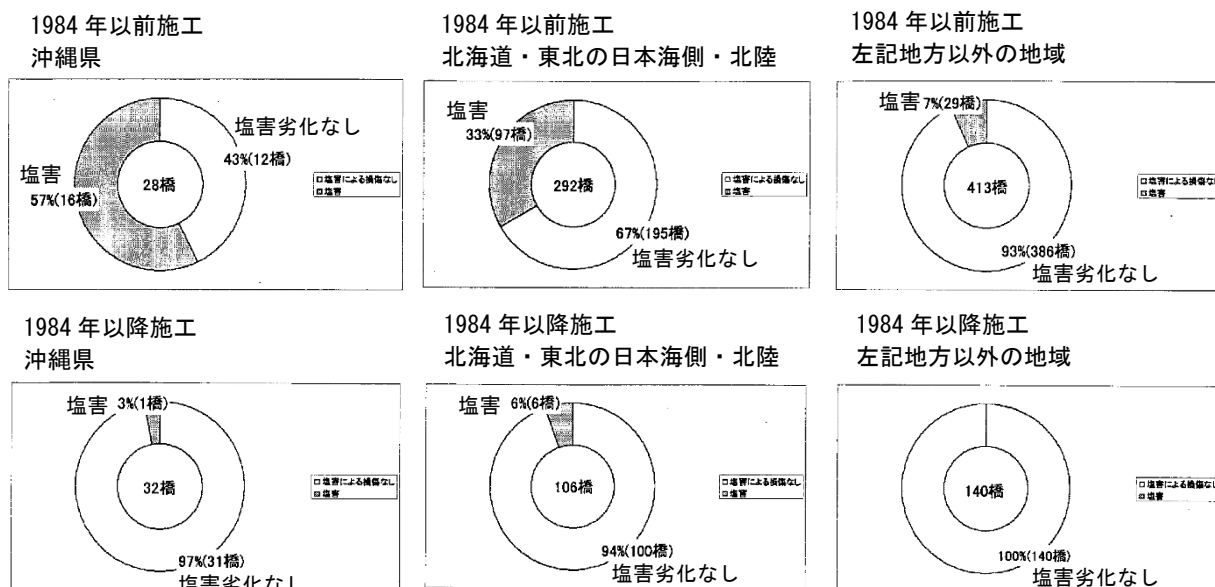


図2.5 道路橋上部工における塩害実態の内訳²⁻⁸⁾

図 2.6 に海岸線からの距離と塩害劣化の発生状況の関係を示す²⁻⁸⁾。図 2.6 より、海岸線から 500m 以上離れた内陸部においても塩害が発生していることが確認された。特に、沖縄県および北海道・東北の日本海側・北陸地方において、その傾向が大きい。また、海岸線からの距離が 1km 以上離れた箇所でも塩害を受けているものも見受けられた。この原因としては、立地条件としてその架橋環境が、海水が河川内を遡上していく環境であるという報告が一部あり、1km 以上の箇所で塩害が発生している箇所の殆どが特殊な環境条件によるものであるとされている。また、供用年数 10～20 年程度の比較的速い時期において既に塩害による劣化が発生しているものが確認されている。

以上のことから、塩害では、早期に劣化が顕著化することが実構造物の調査結果からも示されており、被害が甚大なものになることから、これまでに数多くの研究がなされてきたことが分かる。ただし、数多くの実構造物の調査結果を巨視的な観点から整理・分析したものに関しては、調査結果の中に、コンクリートの打込み不良に伴う緻密性が低下しているものやかぶりが極端に小さいものなどの施工不良に起因する劣化やコンクリートの初期に生じる温度ひびわれや乾燥収縮ひび割れ中に塩分が浸透し、塩害が生じた劣化も含むことから、ある程度のバラツキを含むものとして整理・分析することが必要であると考えられる。

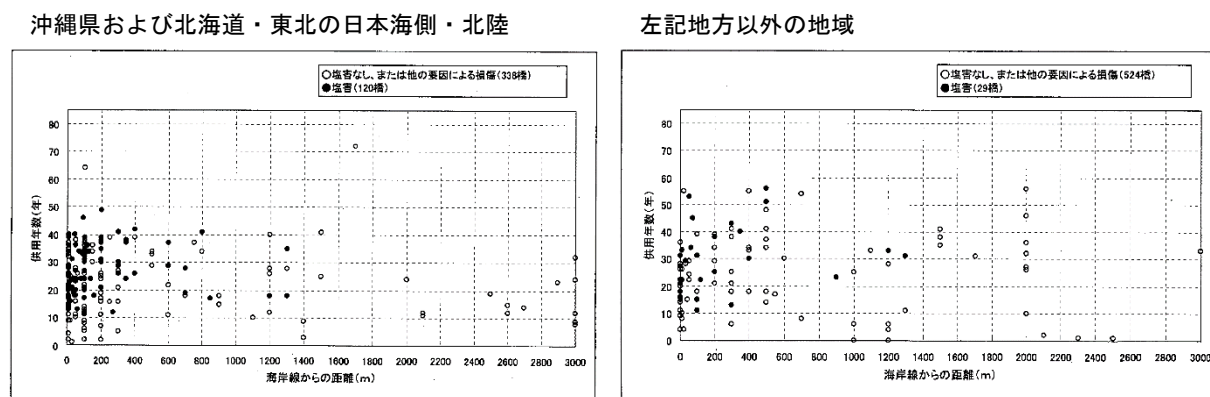


図2.6 海岸線からの距離と塩害劣化の発生状況の関係²⁻⁸⁾

2.2 鉄筋腐食によるひび割れ発生メカニズムに関する既往の研究

2.2.1 コンクリート表面のひび割れ発生時期と鉄筋の腐食程度に関する研究

コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338)委員会報告書²⁻¹⁰⁾では、表 2.2 に示す腐食劣化過程および構造物の区分に対応する調査の方法をまとめている。コンクリート構造物の劣化過程におけるそれぞれの期間を決定する事象は、潜伏期から進展期に移行する「鉄筋腐食の開始」、進展期から加速期に移行する「腐食ひび割れの発生」、加速期から劣化期に移行する「構造性能の低下」となる。ここで、コンクリート構造物を維持管理するうえでは、構造物の要求性能を設定するとともに現状の構造物の性能を、定量的に把握することが重要となる。構造物の要求性能を設定することは構造物の限界状態(使用限界および管理限界)を設定することであり、新設構造物においては、予防保全の考え方で維持管理されることで主体的である。つまり、鋼材腐食開始を使用限界状態とする考え方が支配的であり、腐食を許容しても腐食ひび割れの発生を使用限界状

表2.2 腐食劣化過程および構造物の区分に対応する調査の方法²⁻¹⁰⁾

調査の方法			腐食劣化過程					構造物区分	
調査の区分	調査方法	評価項目	潜伏期	進展期	加速期		劣化期	既設	新設
					前期	後期			
目視点検 (たたき調査含む)	ひび割れ, 剥離, 剥落, 錆汁, 遊離石灰, 変色, 漏水, 変位・変形, 鉄筋 腐食状況 (鉄筋露出時)	構造物の外観上のグレード	○	○	○	○	○	○	○
		鉄筋の腐食のグレード							
破壊検査	はつり調査	鉄筋径		○	○	○	○	○	○
		腐食減量・腐食深さ		○	○	○	○	○	○
微破壊 非破壊検査	自然電位	自然電位	○	○	○	×	×	○	—
	交流インピーダンス法	分極抵抗	○	○	○	×	×	○	—
	直線分極抵抗法	分極抵抗	○	○	○	×	×	○	—
	四電極法	コンクリート抵抗率	○	○	○	×	×	○	—
	位相角法	電気二重層容量	○	○	○	×	×	○	—
非破壊検査 (研究段階)	電磁パルス法		○	○	○	—	—	○	—
	AE法		○	○	—	—	—	○	—
	電磁誘導加熱法		○	○	—	—	—	○	—
埋設センサ	自然電位	腐食の可能性	○	○	—	—	—	○	○
	マクロセル腐食電流	深さ方向の腐食環境の変化 を評価	○	—	—	—	—	○	○
	電気抵抗		○	—	—	—	—	○	○
	電位差		○	—	—	—	—	○	○
	分極抵抗	腐食の有無, 速度	○	○	○	—	—	○	○
	pHセンサ	腐食環境	○	—	—	—	—	○	○
非破壊 非接触	近赤外分光法	コンクリート表層部の塩化物量	○	○	○	—	—	○	—
非破壊	電磁波法	かぶりコンクリートの塩化物量	○	○	○	—	—	○	—

凡例 ○: 適用可, ×: 測定不可, —: 対象外

態とするのが一般的であると考えられる²⁻¹⁰⁾。しかし、2.1で示したように既設構造物においては、進展期または加速期以降まで劣化が進行している構造物が多く見受けられ、既設構造物においては腐食ひび割れの発生や構造性能の低下を使用または管理限界状態とする場合がある。

つまり、既設構造物の維持管理では、現状の性能を定量的に把握し、その後の劣化過程を予測し、どの時期に腐食ひび割れを発生するのか、または、構造性能が低下するのかを把握すること（劣化予測）が重要となる。そのため、表2.2に示す腐食劣化過程および構造物の区分に対応する調査の方法に関する研究がなされている。ただし、表2.2を見て分かれるとおり、腐食ひび割れ発生に大きく影響を及ぼす腐食減量や腐食深さなどの鉄筋の腐食程度を直接的に把握する手法には、はつり調査のみであり、鉄筋を切断・採取して質量減少率や腐食深さを求めることになる。はつりおよび鉄筋の切断による方法では、構造物の性能低下を招く恐れがあることから、実務的にははつり調査において鉄筋の腐食程度を目視にて定性的にグレーディングする手法が一般的である。そのため、自然電位や分極抵抗といった電気化学的手法により鉄筋の腐食程度と関連付ける研究が、各研究機関においてなされている^{2-11~2-16)}。

次に、加速期および劣化期の判断の基準となる「ひび割れの発生」と「構造性能の低下」と鉄筋の腐食程度との関係を定量的に把握することが出来れば、鉄筋の腐食程度からひび割れの発生時期を予測、もしくは既にひび割れが発生している場合はいつ発生したのかを推測することが可能となる。例えば、はつり調査により鉄筋を露出し、レーザー変位計などで形状測定をすることで、鉄筋を切断せずに鉄筋の腐食程度を求める研究がなされている²⁻¹⁷⁾。また、ひび割れ幅と鉄筋の腐食程度との関係を定量的に示すことで、かぶりコンクリートに発生したひび割れ幅から鉄筋の腐食程度を推測し、構造物の劣化状況を判断する手法を確立することを目的とした研究がなされている^{2-18) 2-19)}。これらのひび割れ発生時における鉄筋の腐食程度に着目し、ひび割れ発生時期を予測することを目的とした研究は、電食実験や塩害を想定した乾湿繰返しによる腐食促進試験などにより研究が進められている^{2-18)~2-33)}。以降にそれらの研究の概要を示す。

2.2.2 腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響

鈴木ら²⁻²²⁾は、ひび割れ発生時における鉄筋の腐食程度に着目した既往の実験^{2-23)~2-32)}を整理し、かぶり、鉄筋径とひび割れ発生限界腐食量の関係（図2.7）を示している。なお、それぞれの実験において、鉄筋径、腐食条件、ひび割れ発生の判断基準や腐食量の測定方法などが異なっている。ひび割れ発生限界腐食量の定義は、ひび割れが生じた時点での腐食量を、実際に腐食した面積あたりに換算するものと、鋼材の全表面積で除するものがある。ここでは、表記のあるものでは鋼材の全表面積で除するもので整理されている。腐食発生条件は、図中の文献3) 4) 5) が塩害を想定した乾湿繰返し試験によるもの（図2.7中：○印）であり、それ以外は電食試験によるもの（図2.7中：●印、+印）である。ひび割れ発生の判定基準は、乾湿繰返し試験の内、文献3), 4) は目視0.1mm以上のものであり、文献5) はヘアクラックを目視で観察した時点である。電食試験によるもの内、文献6), 7), 8) はひび割れ判定基準が表面ひずみの急変部あるいは 600×10^{-6} 以下のもの（図2.7中：●印）である。腐食促進条件の違いに着目すると、ひび割れ発生限界腐食量は、乾湿繰返し試験で大きくなった。文献5)のひび割れ発生の判定基準がヘアクラック観察時の場合で

あり、ひび割れ発生限界腐食量が小さいことから、ひび割れ判断基準の違いに影響を受けているものの、腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に影響を及ぼすことが示唆されている。

松島ら²⁻¹⁸⁾は、腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生メカニズム与える影響を解明するために、電食実験および塩害を想定した乾湿繰返しによる腐食促進試験を行い、それぞれの腐食促進条件における鉄筋の腐食状況(図2.8)を示している。これによれば、ひび割れ発生時の腐食減量は、電食実験の場合 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 程度であり、乾湿繰返しでは $20\sim 80\text{mg}/\text{cm}^2$ である。ただし、電食実験では、溶液中に浸水していることから腐食生成物が溶出している。このことから腐食膨張に作用する腐食生成物の量は、鉄筋採取後に測定した腐食減量よりも少ないと推測している。図2.8(a)に電食実験後の腐食状況を示している。なお、図中の写真は腐食生成物をクエン酸二アンモニウム溶液にて除去した後であることから腐食生成物の状況は示されていない。電食実験では、図2.8(b)の乾湿繰返しによるものよりも線状の腐食状況となり、ひび割れが発生する位置に腐食が集中している。乾湿繰返しでは、腐食面積が大きく、この範囲は鉄筋の下側と一致しており、ブリーディングの影響等により隙間が生じている位置との関係があることが考えられている。電食実験の腐食形態は、著しく局所的になり腐食量が集中することで少ない腐食量でも腐食ひび割れを発生させることが出来るものと考えられる。

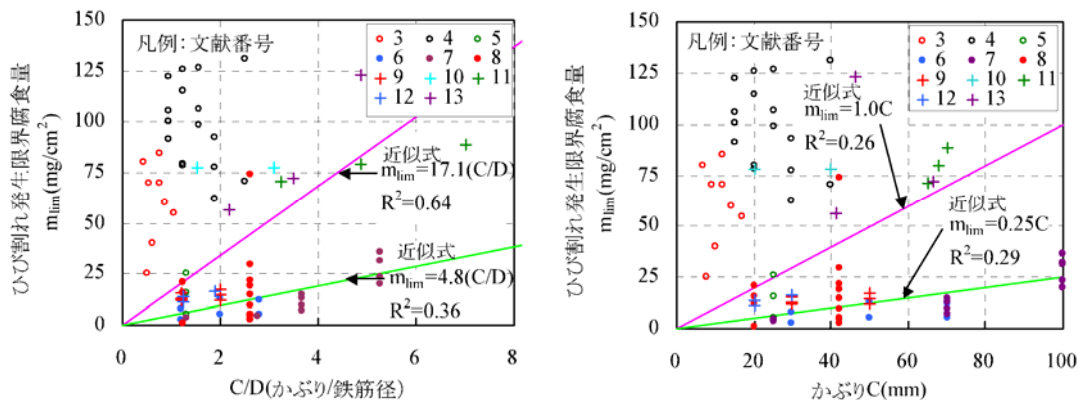


図2.7 かぶり、鉄筋径とひび割れ発生限界腐食量の関係²⁻²²⁾

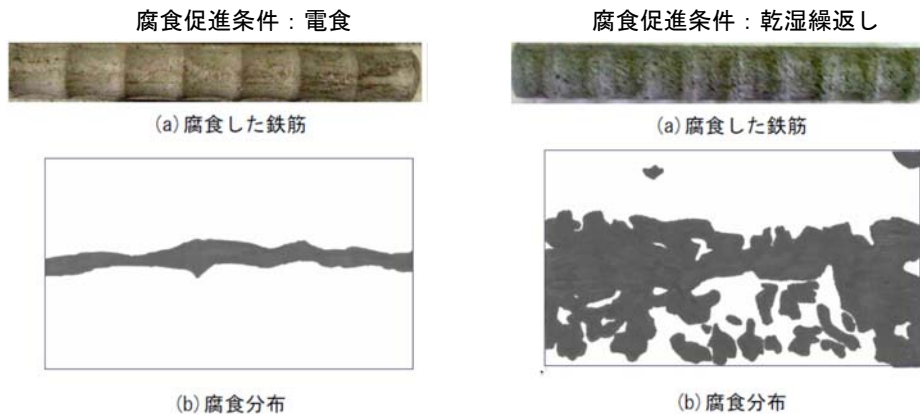


図2.8 腐食促進条件の違いによる鉄筋の腐食状況²⁻¹⁸⁾

以上のことから、腐食形態が腐食ひび割れ発生時における鉄筋の腐食程度に影響を及ぼすものと考えられ、塩害と中性化による鉄筋腐食を比較した場合においても同様であると考え。1章に示したように塩害では、マクロセル腐食のように微小面積のアノードと広い面積のカソードが乖離することでアノードに腐食が集中し、腐食深さが大きくなり、孔食のように局所的に著しく腐食する形態になり易いと考えられている。塩害による劣化進行が中性化によるものよりも早期になることは、腐食の進展速度が塩害のほうが速いのみならず、腐食形態の違いも影響するものと考え、4、5章にてそれらの影響について検証した。

2.2.3 腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響

須田ら²⁻³⁴⁾は、海岸干満帯に5年間曝露した鉄筋コンクリート供試体の腐食生成物についてX線回折およびEPMA分析を行い、コンクリート中に生成される鉄錆の成分とその含有割合を求めている。なお、海岸大気中の腐食に関しては、錆の腐食生成過程やその種類について明らかになっている部分も多く、その概ねの含有割合も示されている^{2-35)~2-37)}。これによると塩害によるコンクリート中の腐食生成物は、 Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ が主であり、腐食生成物の体積膨張倍率は2.5~3.0程度であるとされている。

ここで、腐食生成物のひとつである $\beta\text{-FeOOH}$ は、塩化物イオンの共存した環境において生成されることが言われている^{2-35)~2-37)}。 $\beta\text{-FeOOH}$ の体積膨張倍率は4.2と、他の生成物よりも大きいことから腐食膨張に大きく寄与しているものと考えられる。コンクリート中には、混和剤などにより塩化物イオンが初期から混入されているが、中性化の場合、塩害と比較するとコンクリート中に存在する塩化物イオンは極端に小さい。つまり、中性化による鉄筋腐食では、腐食生成物の種類および割合、特に、 $\beta\text{-FeOOH}$ の有無または含有割合が塩害によるものと異なり、腐食生成物の膨張倍率も変化するものと考えられる。

また、高谷ら²⁻³³⁾は、塩害における実環境下にて生成される腐食生成物と電食実験での腐食生成物の種類が異なるものとして、電食実験により腐食した鉄筋から採取した腐食生成物の種類と割合を示している。これによると、電食実験による腐食生成物の中には、一般的に知られていない腐食生成物の塩化酸化鉄(III)カルシウムが存在することを示しており、塩化酸化鉄(III)カルシウムの体積膨張倍率は6.9と極端に大きくなることから電食実験における腐食生成物の体積膨張倍率が大きくなることを示している。これは、**図 2.8**におけるひび割れ発生時の腐食量が電食実験の場合、小さくなることの要因の一つとして説明ができる。また、電食実験ではNaCl水溶液に浸漬していることから細孔溶液中は、NaCl水溶液および $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 水溶液に満たされていると考えられ、鉄筋近傍の細孔溶液中に溶解している Ca^{2+} およびCl⁻が取り込まれて塩化酸化鉄(III)カルシウムが生成したと推測している。III価鉄であることを考慮すると $\beta\text{-FeOOH}$ の生成過程で結晶中に Ca^{2+} およびCl⁻が取り込まれて生成した可能性もあるとされている。さらに、実験結果より塩化酸化鉄(III)カルシウムは一度生成すると他の腐食性生物に変化し難い化合物であり、酸化速度の影響が小さいとすれば実環境下においても湿潤状態にある環境において、生成される可能性があることを示唆している。

以上のことから、塩害による鉄筋腐食においては $\beta\text{-FeOOH}$ および塩化酸化鉄(III)カルシウムの体積膨張倍率の大きい結晶相が生成されるが、中性化においてはそれらの腐食生成物の有無や割合

が影響し、塩害よりも体積膨張倍率が小さくなるものと考えられる。つまり、中性化による鉄筋腐食では、塩害による鉄筋腐食と比較し、同じ腐食量であってもかぶりコンクリートに作用する応力が異なり、ひび割れ発生に至る過程が異なるものと想定し、3.5にて中性化と塩害における腐食生成物の違いに関する影響について検証した。

表2.3 腐食生成物の種類とその性質^{2-34),2-35),2-36),2-37)}

化合物	色調	密度 (g/cm ³)	体積 膨張倍率	鉄錆の成分(%)	
				SO ₄ ²⁻ 支配	Cl ⁻ 支配
Fe(OH) ₂	白～淡緑	3.4	3.7		
FeO	黒	5.9	1.7		
Fe ₃ O ₄	黒	5.2	2.1	0～20	10～85
α-FeOOH	褐～黄	3.3～4.3	3.8～2.9	30～65	15～80
β-FeOOH	淡褐～白	3.0	4.2	0	<30
γ-FeOOH	オレンジ	4.1	3.0	20～30	0～10
δ-FeOOH	褐	3.95(4.32)	3.2(2.9)		
α-Fe ₂ O ₃	赤褐～黒	5.2	2.2		
γ-Fe ₂ O ₃	褐	4.88	2.3		
緑錆 I	緑	緑錆 I の生成には Cl ⁻ の共存が必要			
緑錆 II	緑	緑錆 II の生成には SO ₄ ²⁻ の共存が必要			
無定形な錆物質 (非晶質錆)	(褐)	大気腐食錆層に含まれ、X 線的にブロードな回折図形を与える鉄化合物。無形オキシ水酸化鉄 FeO _x (OH) _{3-2x} であると推定される。			

表2.4 各種環境におけるひび割れ発生時の体積膨張倍率の推定値²⁻³³⁾

		体積 膨張倍率	電食	実構造物	
				乾湿	湿潤
Goethite	α-FeOOH	2.9	○	○	○
Akaganeite	β-FeOOH	3.5			
Lepidocrocite	γ-FeOOH	3.1			
Magnetite	Fe ₃ O ₄	2.1	○	○	○
塩化酸化鉄(III) カルシウム	CaFeO ₂ Cl	6.9	○		△
体積膨張倍率 (平均値)			2.1～6.9 (4.0)	2.1～2.9 (2.5)	2.1～

2.3 中性化によるかぶりコンクリートの剥離・剥落に関する実態調査

石橋ら²⁻³⁸⁾は、かぶりコンクリートに剥離・剥落が発生している高架橋等の95基の構造物において、かぶりおよび中性化深さ、鉄筋の腐食度、雨掛かりの有無について調査し、剥離・剥落に及ぼす影響を整理している。調査した対象構造物は、鉄道高架橋等であり、一部首都圏以外も含まれているが、ほとんどが首都圏地区の高架橋等であり、塩害の影響を受けていない環境条件下に立地している。また、調査対象構造物の経過年数は、15～80年程度までの高架橋等であるが、1970年以降に建設されたものが7割以上を占めており、経過年数30年以内の高架橋等がほとんどである。

石橋ら²⁻³⁸⁾は、鉄筋の腐食によってコンクリートが剥落した箇所と剥落していない箇所の割合を、雨掛かりの影響を受ける箇所と受けない箇所別に示し、雨掛かりの影響を整理している(図2.9)。この調査は、一つの高架橋の同一部位において、雨掛かりの影響を受ける箇所と受けない箇所が近接する場所で行っている。なお、雨掛かりの影響を受ける箇所の調査数(鉄筋数)は188本で、雨掛かりの影響を受けない箇所の調査数(鉄筋数)は137本である。図2.9によると雨掛かりの無い箇所において剥落している割合は5%程度で、雨掛かりのある箇所における剥落の割合は45%程度と、雨掛かりがあるほうが剥離・剥落が発生し易いことを示している。また、雨掛かりがある箇所における中性化深さは、雨掛かりの無い箇所と比べると小さく、中性化の進行が遅い傾向にある。なお、雨掛かりがある箇所では、無い箇所と比較して中性化深さは平均で7mm程度小さくなっている。これは、松田ら²⁻³⁹⁾が行った、高炉セメント等を用いたコンクリートの実構造物における調査結果と同様の傾向を示している。このことから、雨掛かりのある箇所は、中性化の進行は抑制されているが、かぶりコンクリートの剥離・剥落に大きく影響を及ぼしていることが分かる。

次に、図2.10に剥離・剥落に影響を及ぼすかぶりと中性化深さの関係を雨掛かりの有無別に図示²⁻³⁸⁾し、図2.11に鉄筋の腐食度に影響を及ぼすそれらの関係²⁻³⁸⁾を示している。雨掛かりがある箇所では、中性化残り10mm以下でかぶりコンクリートの剥離・剥落が生じている。なお、中性化残りが10mm以上ある箇所では、概ね剥離・剥落が生じていない。鉄筋の腐食度は、腐食状況を目視にて定性的にグレーディングして判別している。中性化残りが10mm以下となると鉄筋の腐食度は「断面欠損はないが全周または全長にわたり浮き錆が生じている」Ⅲ以上となることがわかる。雨掛かりがない箇所では、鉄筋の腐食度がⅢで、中性化残りが10mm以下となっている箇所でも剥離・剥落が発生していないものも確認される。

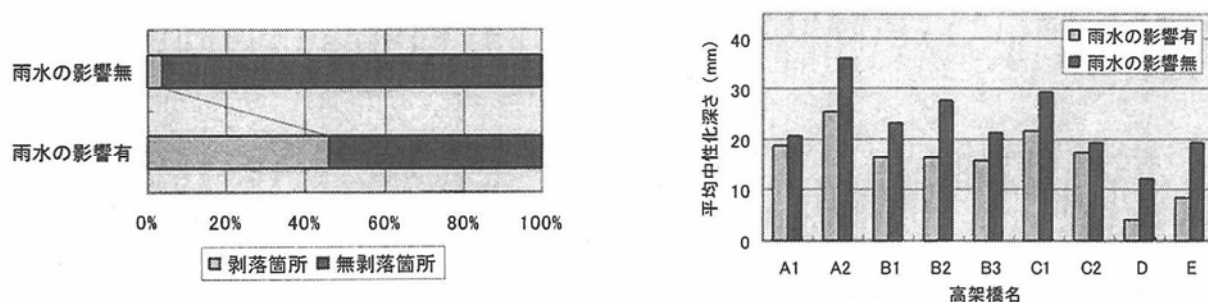
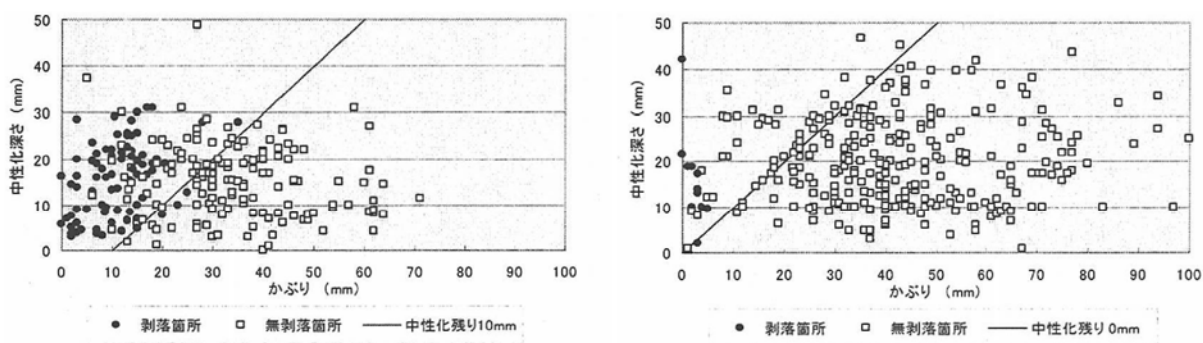


図2.9 雨掛かりの有無と剥離・剥落、中性化深さの関係²⁻³⁸⁾

以上のことから、雨掛かりがある箇所では、中性化残りが10mm以下となると鉄筋の腐食度が大きくなり、かぶりコンクリートが剥離・剥落する傾向となる。一方で、雨掛かりのない箇所では、かぶりが5mmと極端に小さい箇所において剥離・剥落が生じるが、中性化残りが10mm以下で腐食度Ⅲでも剥落にいたらない箇所もあることから、かぶりコンクリートの剥離・剥落に雨掛かりの影響が大きく作用することが示唆されている。

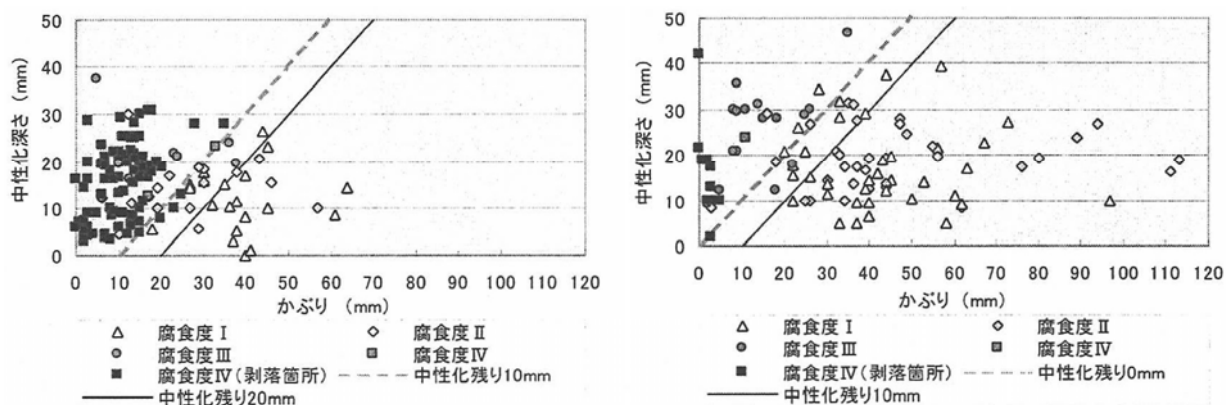
ここで、中性化によるコンクリート構造物の劣化過程では、進展期から加速期に至るまで、つまりひび割れが発生するまでの期間を決定する要因は腐食速度である。そこで、上記の調査結果を踏まえると中性化による鉄筋腐食では雨掛かりの有無により腐食速度が異なるものと推測することができる。よって、3章においては、昭和初期に構築され80年以上経過した構造物から経過年数10年程度と幅広い施工年代の実構造物36基（調査数221点）において、中性化深さ、鉄筋の腐食度およびかぶりを調査した。その調査結果に基づき調査時点の経過年数と中性化速度係数から中性化残りが10mmとなる時点からの経過年数を算出し、腐食度ごとの平均経過年数を用いて、雨掛かりの影響を比較した。



(a) 雨水等の影響を受ける箇所

(b) 雨水等の影響を受けない箇所

図2.10 剥離・剥落に及ぼす雨掛かりと中性化深さの関係²⁻³⁸⁾



(a) 雨水等の影響を受ける箇所

(b) 雨水等の影響を受けない箇所

図2.11 鉄筋の腐食度に及ぼす雨掛かりと中性化深さの関係²⁻³⁸⁾

2.4 中性化における鉄筋腐食の腐食速度に関する既往の研究

森永²⁻⁴⁰⁾は、W/C=55%で寸法 20×40×148mm の角柱モルタル供試体の全断面を促進中性化させた状態で、各々の環境条件に供試体を約 3 年間暴露して鉄筋の腐食量を求めた。環境条件は、温度 20, 50℃、湿度 50, 95%、酸素濃度 0, 10, 20%および屋内外としている。この実験から、鉄筋の腐食量は、時間の経過とともに増加し、腐食量の重回帰分析から上記の要因を変数とした腐食速度を定量的に示している。

図 2.12 に森永²⁻⁴⁰⁾が提案している温度、湿度と腐食速度の関係を示す。温度および湿度が大きいほど、腐食速度が大きくなることを示している。これは、実構造物の調査結果に基づいた検討において、雨掛かりがある場合のほうが剥離・剥落し易くなることと同様の傾向を示しており、雨掛かりがない場合では、かぶりコンクリートが乾燥状態となり鉄筋周辺のコンクリートの湿度が小さくなり、腐食が遅くなるものと考えられる。

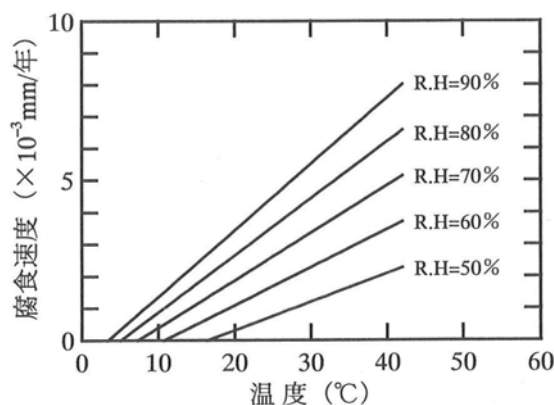


図2.12 温度、湿度と腐食速度の関係²⁻⁴⁰⁾

$$q=28.14-1.35X_1-35.43X_2-234.76X_3+2.33X_4+4.44X_5+250.55X_6 \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.1)}$$

ここに、 q : 腐食速度 ($\times 10^{-4} \text{g/cm}^2/\text{years}$),
 X_1 : 温度 ($^{\circ}\text{C}$), X_2 : 湿度 ($\%/100$), X_3 : 酸素濃度 ($\%/100$),
 X_4 : 温度 \times 湿度, X_5 : 温度 \times 酸素濃度, X_6 : 湿度 \times 酸素濃度

$$dq/dt=(3.58-0.172X_1-4.51X_2-29.91X_3+0.297X_4+0.563X_5+31.92X_6) \times 10^{-3} \quad \dots \dots \dots \text{(式 2.2)}$$

ここに、 dq/dt : 腐食速度 (mm/years)

また、佐伯ら²⁻⁴¹⁾は、モルタル供試体を促進中性化させ、種々の環境条件下において 20 週間の暴露試験を実施して鉄筋腐食量を求めている。鉄筋腐食と電気抵抗の低下に関係性があるとしおり、腐食電流密度をモルタルの比抵抗の関数として腐食速度を定式化している。

鳥取²⁻⁴²⁾は、W/C=60、70%で寸法 500×500×85mm の平板コンクリート供試体にて中性化深さ 10mm または 20mm まで促進中性化させた後に約 5 年程度の屋外暴露試験を行い、腐食量を求めている。平板コンクリート供試体は、格子状に鉄筋を配置して、表面側鉄筋(下端筋)のかぶりは 15mm で、内部側鉄筋(上端筋)のかぶりは 24mm としている。図 2.13 に示すように下端筋よりも上端筋の腐食深さが小さいことがわかる。下端筋の中性化残りは-4~4mm で、上端筋の中性化残りが 5~13mm と中性化残りが下端筋と上端筋とで異なる。暴露試験開始時の中性化深さは示されていないが、かぶりの大きい上端筋のほうが、腐食速度が遅いことが示されている。暴露試験期間中における中性化の進行が極めて小さいものとする、中性化残りもしくはかぶりが影響し、下端筋と上端筋において腐食量に差異が生じたものである。

森永の提案式によれば、一般環境下(温度 20°C, 湿度 70%)における腐食速度は 2×10^{-3} mm/年程度であることが示されている。佐伯らの提案式によれば、一般的なモルタルの比抵抗が 10~20k $\Omega \cdot \text{cm}$ 程度とすれば、腐食速度 $1 \sim 6 \times 10^{-3}$ mm/年である。また、鳥取の暴露試験結果から腐食量の多い下端筋の腐食速度の平均値が 2.3×10^{-3} mm/年であることから、実務的に用いられている腐食速度 3×10^{-3} mm/年²⁻⁴³⁾は、雨掛かりがある箇所など水分の影響を大きく受ける場合における腐食速度として適切なものと判断でき、雨掛かりがない箇所などの乾燥状態における場合では、安全側の考えを踏まえていることがわかる。

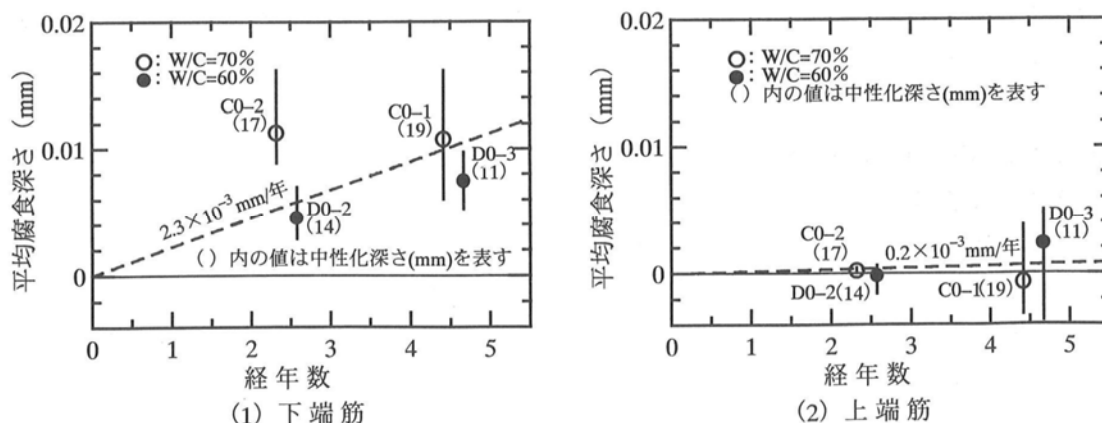


図2.13 鉄筋腐食量の経時変化²⁻⁴²⁾

2.5 中性化に起因する鉄筋腐食の劣化予測における既往の研究のまとめ

中性化に起因する鉄筋腐食による劣化予測手法を構築するために、既往の研究をまとめると次の課題に着目する必要がある。2.1 で示したように塩害において、構造物の施工年代ごとに劣化過程に及ぼす特徴的な要因が示されていることから、塩害だけではなく、中性化においても実構造物を維持管理していくうえで、構造物の施工年代の違いが劣化進行に及ぼす影響を整理、分析する必要がある。

次に、2.2.2 に示したように、腐食ひび割れ発生時期と鉄筋の腐食程度に関して、腐食形態が影響をするものと考えられ、塩害と中性化による鉄筋腐食を比較した場合においても同様である。マク

ロセル腐食のようにアノードとカソードが乖離することでアノードに腐食が集中し、腐食深さが大きくなり、孔食のように局部的に著しく腐食する形態と、均一に腐食した場合ではかぶりコンクリートのひび割れに及ぼす影響が異なると考えられる。塩害による劣化進行が中性化によるものよりも早期になることは、腐食の進展速度が塩害のほうが速いのみならず、腐食形態の違いの影響を検証する必要がある。また、2.2.3 に示したように、塩害と中性化では腐食生成物の結晶相の種類および割合が異なるものと推測され、鉄筋腐食による体積膨張倍率が異なり、かぶりコンクリートに作用する応力が異なることが考えられ、塩害と中性化による劣化機構の違いが腐食生成物に及ぼす影響を検討する必要がある。

そして、2.3 で示したように、実構造物の調査結果に基づき、中性化の劣化進行には、雨掛かりの有無が大きく影響を及ぼしており、かぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼしている影響を定量的に示す必要がある。また、2.4 で示したように鉄筋の腐食速度は、鉄筋周辺の温度、湿度および酸素濃度に影響を受けること、さらに中性化の進行程度とかぶりの大小に影響を受けることが分かった。鉄筋の腐食速度を、温度、湿度および酸素濃度を考慮して定量的に示した事例はあるが、中性化の進行とかぶりの大小による影響を定量的に示す必要がある。

【2章 参考文献】

- 2-1) 前田聡, 武若耕司, 山口明伸: 塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価, 土木学会論文集 No.760/V-63, pp.109-120, 2004.5
- 2-2) 川元茂: 建設行政建築コンクリート構造物の耐久性について, 建設マネジメント技術, pp.44-48, 2000.2
- 2-3) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書 5 鉄筋コンクリート工事(JASS5), 昭和 32 年改正
- 2-4) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書 5 鉄筋コンクリート工事(JASS5), 昭和 50 年改正
- 2-5) 土木学会: 昭和 49 年制定コンクリート標準示方書, 1974.9
- 2-6) 建設省建築指導課長通達: コンクリートに使用される細骨材中に塩分が含まれる場合の取扱いについて, 住指発第 759 号, 昭和 52 年 10 月 24 日
- 2-7) 日本コンクリート工学会: 社会情勢とコンクリート産業構造の関連性検討委員会報告書, 2012
- 2-8) 中谷昌一, 玉越隆志, 内田賢一, 廣松新, 池田明寛: コンクリート橋の塩害対策資料集—実態調査に基づくコンクリート橋の塩害対策の検討—, 国土交通省国土技術政策総合研究所資料, 2002.11
- 2-9) 社団法人日本道路協会: 道路橋の塩害対策指針(案), 1984. 2
- 2-10) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 86, コンクリート中の鋼材の腐食性評価と防食技術研究小委員会(338 委員会)委員会報告書, 2009.10
- 2-11) P.Bamforth: Enhancing reinforced concrete durability, Concrete society Technical report 61, The concrete society, 2004
- 2-12) 網野貴彦, 羽瀧貴士, 守分敦郎: 種々の条件を変化させたコンクリートの鉄筋の腐食速度および腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.30, pp1113-1118, 2008
- 2-13) Polder, R. B.: Critical chloride content for reinforced concrete and its relationship to concrete resistivity, Materials and Corrosion, Vol.60, No.8, pp623-630, 2009
- 2-14) 山路徹, Tarek Uddin Mohammed, 青山敏幸, 濱田秀則: 海洋コンクリートの耐久性に及ぼす曝露環境およびセメント種類の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp577-582, 2001
- 2-15) Mohammed, T.U., Yamaji, T., Aoyama, T. and Hamada, H.: Marine durability of 15-year old concrete specimens made with Ordinary Portland, Slag and Fly ash cements, ACI SP-199, Vol.2, pp.541-560, 2001
- 2-16) 審良善和, 山路徹, 小林浩之, 濱田秀則: 練混ぜ水に海水を用いたコンクリートの干満帯における長期耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, pp820-825, 2012.7
- 2-17) 鬼頭直希, 本田翔平, 渡辺健, 轟俊太朗: 鉄筋の変位に着目したかぶりコンクリートのひび割れ性状評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp. 1351-1356, 2014.
- 2-18) 松島学, 横田優, 関博: 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1669-1674, 2004.7
- 2-19) 中川裕之, 田中大博, 横田優, 松島学: 塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割

- れモードとひび割れ発生時の腐食量, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.110-121, 2008.2
- 2-20) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集第 532 号, V-30, pp. 159-166, 1996.
- 2-21) 鈴木三馨, 堀口賢一, 福浦尚之, 丸屋剛: 鉄筋腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1081-1086, 2009.7
- 2-22) 鈴木三馨, 福浦尚之, 丸屋剛: ひび割れ発生限界腐食量と腐食生成物の膨張率の定量化に基づく耐久・構造連成解析システムの高精度化, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp. 773-778, 2010.7
- 2-23) 鈴木三馨, 福浦尚之, 丸屋剛: 拘束下における鋼材の腐食生成物の膨張率の測定と腐食ひび割れの進展解析, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 5-533, pp.1065-1066, 2009.
- 2-24) 堀口賢一, 丸屋剛, 武若耕司: 塩害環境下における鉄筋コンクリートの腐食ひび割れ発生時期の推定, 土木学会第 62 回年次学術講演会, 5-533, pp.1065-1066, 2007.
- 2-25) 森川雅行, 関博, 奥村隆: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれの発生機構に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.378, V-6, pp.97-105, 1987.
- 2-26) 田森清美, 丸山久一, 小田川昌史, 橋本親典: 鉄筋の発錆によるコンクリートのひびわれ性状に関する基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988.
- 2-27) 梅村靖弘, 飯島知哉, 原田宏: 鉄筋腐食に伴うコンクリートの表面応力の挙動, 土木学会第 48 回年次学術講演会講演概要集, 5-114, pp.254-255, 1993.
- 2-28) 横田優, 佐々木孝彦, 飯島亨, 松島学: 塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1041-1046, 2004.
- 2-29) G.J.Al-Sulaimani, M.Kaleemullah, I.A.Basunbul, Rasheeduzzafar: Influence of Corrosion and Cracking on Bond Behavior and Strength of Reinforced Concrete Members, ACI STRUCTURAL JOURNAL, Vol.87, pp.220-231, 1990.
- 2-30) C.Andrade, C.Alonso, F.J.Molina: Cover cracking as a function of bar corrosion; Part1: experimental test, Materials and Structures, Vol.26, pp.453-464, 1993.
- 2-31) Ghanderari M, Zulli M, Ahah S.P.: Influence of corrosion on bond degradation in reinforced concrete, fourteenth engineerion mechanics conference, ASCE, 2000.
- 2-32) 吉岡保彦, 米澤敏男: 鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な検討, 土木学会第 37 回年次学術講演会講演概要集, 5-136, pp.271-272, 1982.10.
- 2-33) 高谷哲, 中村士郎, 山本貴士, 宮川豊章: コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp. 154-165, 2013.
- 2-34) 須田久美子, S.Misra, 本橋賢一: 腐食ひびわれ発生限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.1, pp. 751-756, 1992.
- 2-35) 三沢俊平: さびの腐食科学, 防食技術, Vol.37, No.8, pp.501-506, 1988.8
- 2-36) 三沢俊平: 鉄錆の腐食機構, 大気腐食と試験法, 日本材料学会, 腐食防食部門委員会, 165, 1, pp. 1-16, 1991.
- 2-37) 岡本剛, 井上勝也: 新版 腐食と防食, 日本化学学会編集産業化学シリーズ, 大日本図書,

pp.95

- 2-38) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集 No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 2-39) 松田芳範, 上田洋, 石田哲也, 岸利治: 実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.629-634, 2010.
- 2-40) 森永繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学博士論文, 1986.
- 2-41) 佐伯竜彦, 大即信明, 長滝重義: 中性化によるモルタル中の鉄筋腐食の定量的評価, 土木学会論文集, No.532/V-30, pp.55-66, 1996.
- 2-42) 鳥取誠一: 鉄筋腐食に関する暴露試験等に基づいたコンクリート構造物の劣化予測, 京都大学博士論文, 2003.
- 2-43) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編) コンクリート構造物, 2007.

3章 実構造物の調査結果に基づく剥離・剥落に及ぼす影響要因の評価

3.1 はじめに

3章では、実構造物の調査結果に基づき、かぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響要因について評価する。まず、3.2では、報告事例の少ない昭和初期に構築された構造物から経過年数10年程度と幅広い施工年代の36基の実構造物の様々な部材において、圧縮強度、中性化深さおよび鉄筋の腐食度を調査した。それらの221測点の調査結果に基づき、巨視的な観点から雨掛かりの有無が中性化、鉄筋腐食の進行に及ぼす影響を整理した。なお、3章で対象とした実構造物は、中性化により劣化した構造物であり、塩害の影響を受けていないものに限定している。

3.3では、長期間供用された実構造物より採取したコア供試体を分析することで、中性化の進行に伴うコンクリートの物性変化に関して把握し、中性化の進行に影響を及ぼす要因について整理する。分析においては、二酸化炭素の侵入程度に影響を及ぼすとされる細孔構造とセメント水和物である水酸化カルシウム($\text{Ca}(\text{OH})_2$)と炭酸化生成物である炭酸カルシウム CaCO_3 の生成量に着目した。なお、3.4では、施工年代と中性化速度係数の関係を整理し、構造物の施工年代ごとに中性化における劣化過程に及ぼす特徴的な要因を整理、分析した。

次に、3.5では、221測点の調査結果に基づき、雨掛かりの有無がかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響を整理した。そして、想定腐食開始からの経過年数にて分類することで、雨掛かりが中性化による劣化に及ぼす影響を定量的に示し、実構造物における中性化による劣化状況を整理した。3.6では、雨掛かりの有無が腐食速度のみならず、腐食形態や腐食生成物の種類・割合にも変化を及ぼすかを確認するために、実構造物より採取した鉄筋を対象に、XRD分析による腐食生成物の定量と光学顕微鏡による断面観察を行い、詳細に分析した。雨掛かりがある場合、水分の影響により腐食速度が大きくなるだけでなく、鉄筋断面における腐食の傾向が変化し、かぶりコンクリートの剥離・剥落に影響を及ぼすものと考えられる。さらに、3.7では、雨掛かりの有無によりコンクリート中の含水率の違いを把握するために、実構造物を対象にコンクリート表層から深さ方向の含水率の分布を把握した。

以上を踏まえ、3.8では、実構造物より採取した鉄筋の質量減少率の結果からかぶりと鉄筋の質量減少率の関係を整理し、中性化による鉄筋腐食の腐食速度を定式化し、中性化の進行を加味した鉄筋腐食の進展機構を検討した。

3.2 各要因が中性化に進行に及ぼす影響に関する調査

3.2.1 対象構造物

表 3.1 に対象構造物の諸元を示す。構造物は、主に鉄道構造物の高架橋、橋梁、擁壁およびトンネルなどで合計 36 基を対象として、柱、梁、スラブ下面、高欄、壁部および有筋区間の覆工などの様々な部材において調査を実施した。施工年は 1927 年（昭和 2 年）から 2003 年（平成 15 年）であり、経過年数 11～87 年間の構造物である。それらの中で、23 基の構造物が竣工から 40 年以上が経過しており、全体の 6 割程度を占めている。全ての対象構造物は、首都圏内の市街地で一般環境下に立地し、劣化要因として中性化が主となる環境条件である。

対象構造物のそれぞれの部材において任意の箇所を調査箇所とした。それぞれの調査箇所において、目視・打音にてひび割れや剥離・剥落の有無を確認し、雨掛かり、漏水による水跡や構造物、部材の周辺状況から調査箇所の雨掛かりの有無を判断した。図 3.1 に経過年数における雨掛かりの有無および健全部と剥離・剥落箇所の調査測点数の内訳を示す。調査測点は合計 221 点であり、その内の雨掛かりのある箇所は概ね全体の半数となる 102 点であった。また、かぶりコンクリートが剥離・剥落していた箇所は 47 点であった。

表3.1 調査対象構造物の諸元

No.	構造物種類	部位	竣工年	調査年	調査測点	
					かぶり, 中性化	圧縮強度
1	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1927	1982	8	8
2	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1927	2011	12	-
3	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1927	2014	4	4
4	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1928	2011	9	9
5	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1928	2014	13	-
6	擁壁	壁部	1928	2014	6	6
7	高架橋	柱、梁	1929	1999	3	3
8	高架橋	スラブ下面	1929	2014	2	2
9	橋梁	橋台	1932	2012	4	-
10	高架橋	柱	1937	2014	5	5
11	高架橋	柱	1950	2014	1	1
12	高架橋	柱、梁	1957	2008	10	10
13	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1961	2010	6	-
14	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1964	2010	9	-
15	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1964	2014	5	5
16	高架橋	梁	1965	2014	1	-
17	人工地盤	スラブ下面	1966	2008	7	-
18	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1966	2011	3	-
19	トンネル	覆工	1966	2014	3	-
20	トンネル	覆工	1966	2014	4	-
21	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1968	2010	7	7
22	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1968	2010	17	17
23	トンネル	覆工	1972	2014	1	-
24	トンネル	覆工	1977	2010	4	4
25	トンネル	覆工	1977	2014	6	-
26	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1982	2014	5	5
27	高架橋	柱、梁、スラブ下面	1984	2011	6	-
28	擁壁	壁部	1987	2008	6	6
29	擁壁	壁部	1987	2013	14	14
30	擁壁	壁部	1987	2014	6	6
31	トンネル	覆工	1987	2014	2	-
32	橋梁	スラブ上面	1989	2008	4	2
33	橋梁	高欄	1989	2010	19	19
34	トンネル	覆工	2003	2014	2	-
35	トンネル	覆工	2003	2014	3	-
36	高架橋	柱、梁、スラブ下面	2003	2015	4	4
合 計					221	137

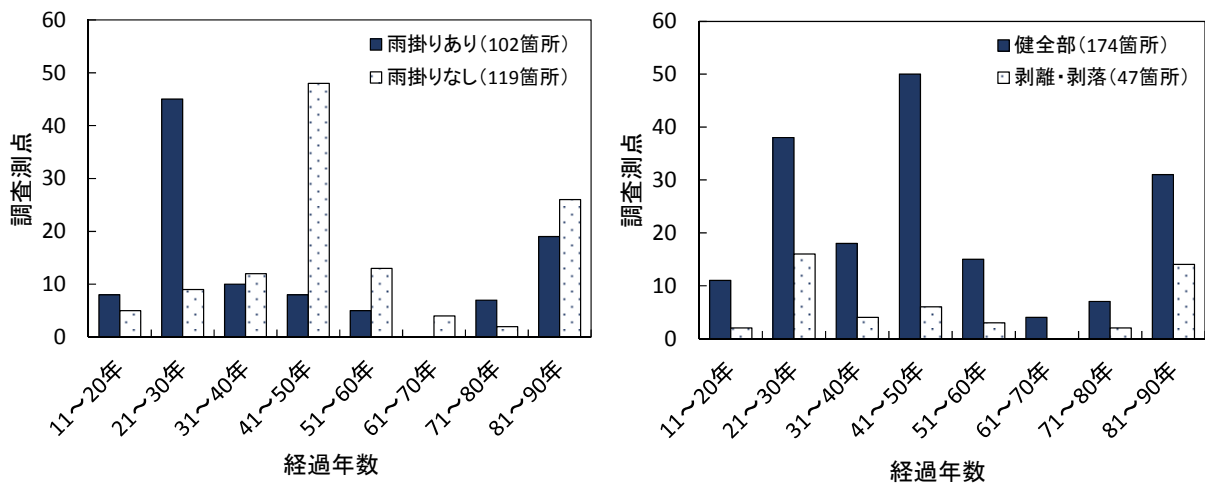


図3.1 調査対象構造物の内訳

3.2.2 調査方法

(1) かぶり、中性化深さおよび腐食度

表 3.2 に調査項目を示す。調査方法は、ひび割れや剥離・剥落等のない健全部においては、電磁レーダ法等の非破壊試験により鉄筋位置を把握し、剥離・剥落箇所では、目視および打音にてその位置を特定した。剥落した箇所では、かぶりコンクリートが剥落し、鉄筋が露出しているため、調査時点における中性化深さと鉄筋腐食が著しく進行していると考えられる。各調査箇所において剥離・剥落した時期を特定することが困難であったため、剥離・剥落による中性化および鉄筋腐食の進展の影響を除くため、剥離・剥落箇所では、その近傍でかぶりが残っている箇所を基本に調査した。

各調査箇所において、はつり法によりかぶり、中性化深さ、腐食度および鉄筋径を測定した。調査する位置で 100×100mm 程度の範囲を、かぶり側の鉄筋が露出するまではつり、かぶりの測定とフェノールフタレイン溶液の噴霧により中性化深さを求めた。また、鉄筋の腐食度は、表 3.3 および表 3.4 に示す鉄筋腐食度の評価基準³⁻¹⁾に従い、露出させた鉄筋を目視にて評価し、5段階に分類した。

(2) 圧縮強度

圧縮強度は、かぶり、中性化深さおよび腐食度を求めた箇所の近傍で健全な箇所を対象に、JIS A 1107「コンクリートからのコア採取方法及び圧縮強度試験方法」もしくは JSCE-G 504「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法(案)」に準拠して実施した。なお、圧縮強度はかぶり、中性化深さおよび腐食度を調査した調査測点 221 点のうち、137 点にて実施した。

表3.2 調査項目

調査項目	実施内容
目視調査	目視による変状の調査，ひび割れ，剥離・剥落の有無，雨掛かりの有無を確認。
かぶり	100×100mm 程度の範囲をはつり，ノギスにて測定。
中性化深さ	100×100mm 程度の範囲をはつり，フェノールフタレイン溶液の噴霧，未呈色深さをノギスにて測定。
腐食度	100×100mm 程度の範囲をはつり，表 3.3，図 3.2 に従い目視にて腐食状況を 5 段階に評価。
圧縮強度	JIS A 1107「コンクリートからのコア採取方法及び圧縮強度試験方法」もしくは JSCE-G 504「硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法(案)」に準拠。

表3.3 鉄筋の腐食度の評価基準³⁻¹⁾

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

表3.4 鉄筋の外観と腐食度との対応例³⁻¹⁾

外 観	腐食度および評価基準
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 腐食度：0 ○ 評価基準：施工時の状況を保ち，以降の腐食が認められない。 ○ 質量減少率：0%
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 腐食度：I ○ 評価基準：部分的に軽微な腐食が認められる。 ○ 質量減少率：2%
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 腐食度：II a ○ 評価基準：表面の大部分に腐食が認められる。 ○ 質量減少率：4%
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 腐食度：II b ○ 評価基準：部分的に断面欠損が認められる。 ○ 質量減少率：6%
	<ul style="list-style-type: none"> ○ 腐食度：III ○ 評価基準：鉄筋の全周にわたり断面欠損が認められる。 ○ 質量減少率：10%

3.2.3 調査結果および考察

図 3.2 に健全部と剥離・剥落箇所ごとの経過年数と中性化深さの関係を示す。図中には、土木学会コンクリート標準示方書における中性化予測式³⁻²⁾による中性化の進展をあわせて示す。中性化の進展を算出するにあたっては、普通ポルトランドセメントで、W/C=70%とした場合の乾燥しやすい環境 ($\beta e=1.6$) と乾燥しにくい環境 ($\beta e=1.0$) における中性化深さの経年変化を求めた。

なお、表 3.1 における No.3, No.11, No.15 および No.26 の構造物から採取したコア供試体を対象に、セメント協会法 (F-18), NDIS によるコンクリートの配合推定および中性化深さから水セメント比の推定を実施した (表 3.5)。それらは、施工年が異なるが同一位置に立地し、構造物ごとの環境条件の違いが少ないものとして比較できる。配合推定の結果より水セメント比は 51~61% の範囲であり、単位水量は 118~192kg/m³ であった。施工年に着目すると、昭和 25 年のコア供試体では骨材量が 2000kg/m³ 以上と大きく、昭和 2 年のコア供試体では、水セメント比が 59%, 61% と他の供試体と比較して若干大きい結果となった。試験方法の違いでは、NDIS 3422 による配合推定は、単位水量が大きくなる結果となったが、水セメント比は 5% 以内の差となり、比較的良く評価されているものと考えられる。次に、それらの配合推定より求めた水セメント比と中性化深さより推定した水セメント比の比較を図 3.3 に示す。水セメント比は、配合推定の結果と中性化深さから求めた水セメント比には差が見られる。配合推定より求めた水セメント比は 50~60% 程度であったが、中性化深さより推定した水セメント比は 60~70% 程度と中性化深さより推定した水セメント比のほうが大きくなる傾向を示した。これは、配合推定に用いた試料は、コア供試体における未中性化域のコア供試体内部を用いている。そのことから、構造物のコンクリートの内部と表層における養生などの施工の影響による品質の違いも含んでいるが、対象とした構造物は、30~80 年と長期にわたり供用されていることから表層コンクリートの化学的変質が影響している可能性がある。これについては 3.3 において詳細に検討する。

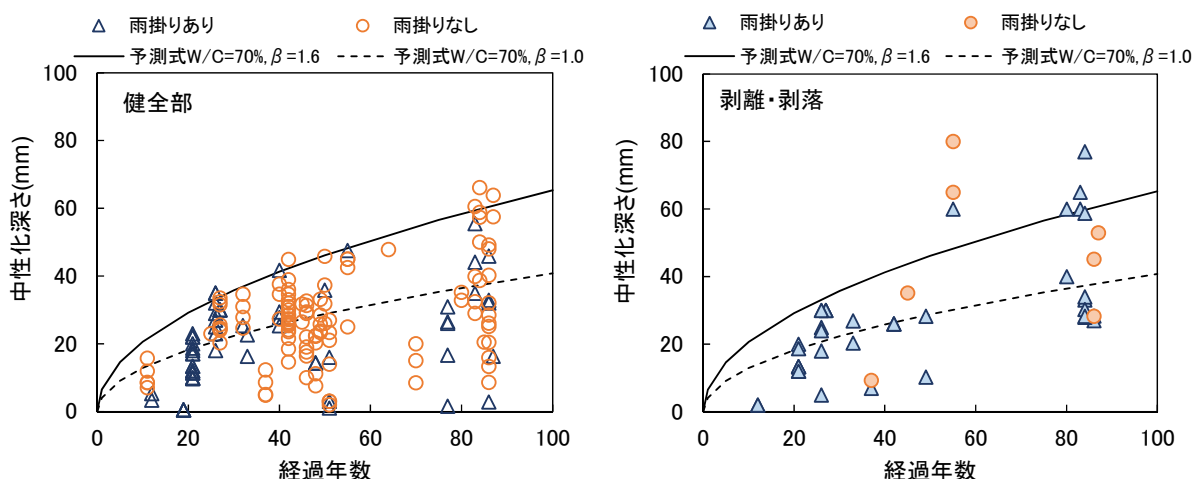


図3.2 経過年数と中性化深さの関係

表3.5 実構造物より採取したコア供試体の配合推定結果

構造物 No.	施工年	試験方法	W/C (%)	単位量(kg/m ³)		
				水	セメント	骨材 [※]
No.3	1927年 昭和2年	F-18	59	153	259	1921
		NDIS	61	179	292	1874
No.11	1950年 昭和25年	F-18	52	118	225	2042
		NDIS	56	139	249	2004
No.15	1964年 昭和39年	F-18	58	176	303	1820
		NDIS	53	192	360	1775
No.26	1982年 昭和57年	NDIS	51	149	290	1926

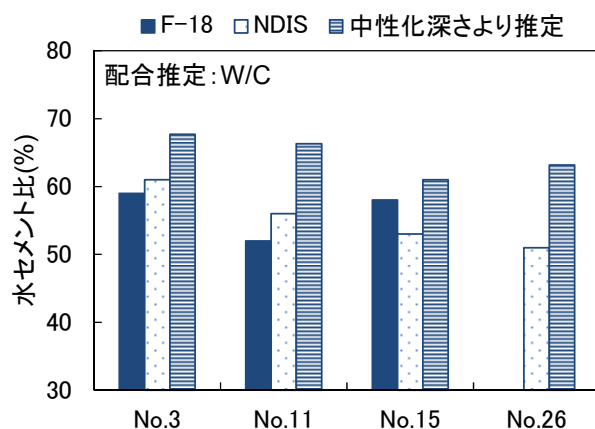


図3.3 配合推定結果と中性化深さより推定した水セメント比

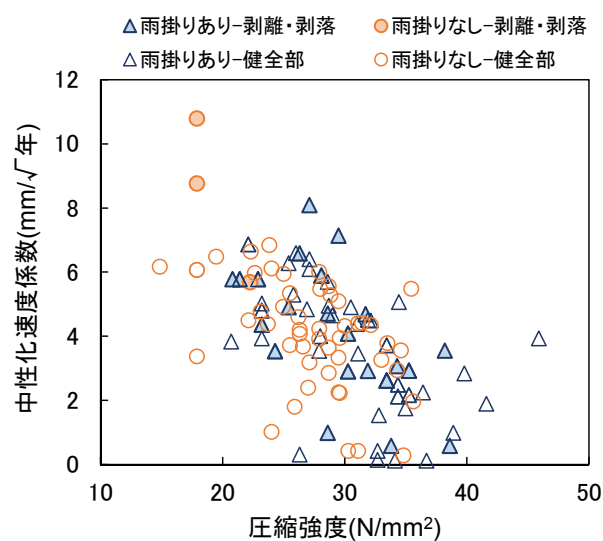


図3.4 圧縮強度と中性化速度係数の関係

ここで、図 3.2 の剥離・剥落箇所において、例えば、経過年数 55 年で中性化深さ 80mm など W/C=70%の予測式よりも極めて大きくなる結果も得られた。健全部においては、概ね W/C=70%の予測式よりも小さくなり、図 3.3 の水セメント比の推定と同様の傾向を示している。このことから、剥離・剥落箇所において大きく逸脱した結果は、調査時点において剥離・剥落が確認されているものであるが、剥離・剥落が発生した時期を特定することが困難であり、必ずしも中性化による鉄筋腐食に起因する剥離・剥落ではない可能性もある。つまり、W/C=70%の予測式よりも大きくなる結果となった箇所では、乾燥収縮などの初期ひび割れなどが顕在的に存在し、中性化の進行が著しく大きくなった特異点であると考えられる。これは、2.1.2 における中谷らの研究と同様に、数多くの実構造物の調査結果を巨視的な観点から整理・分析したのに関して、調査結果の中には、コンクリートの打込み不良に伴う緻密性が低下しているものやかぶりが極端に小さいものなどの施工不良に起因する劣化、コンクリートの初期に生じる温度ひびわれや乾燥収縮ひび割れ中に劣化因子が浸透し、劣化が生じた調査結果も含むことから、ある程度のバラツキを含むものである。

次に、図 3.4 に圧縮強度と中性化速度係数の関係を示す。圧縮強度が大きくなると中性化速度係数は小さくなる傾向を示したが、雨掛かりの影響による中性化の進行の違いは明確には確認することは出来なかった。ただし、2 章で既往の研究を整理した通り、石橋ら³⁻³⁾や松田ら³⁻⁴⁾は、同一位置に立地する構造物において、雨掛かりがある箇所では、ない箇所よりも中性化深さが小さくなることを報告しており、外部環境としてコンクリート表面の乾燥、湿潤状態が中性化進行に影響を及ぼすことを示している。今回のように様々な構造物、部材における調査結果を用いて巨視的な視点から中性化の進行を把握する場合、雨掛かりの有無のみによる分類では、それらの影響を明確に捕らえることが困難であり、同一部材などにおける雨掛かりの有無による中性化の進行を把握することができるものと考えられ、中性化の進行においては、日射による乾燥や湿潤状態の程度などの細かな環境要因も影響することがわかる。

3.3 中性化進行によるコンクリートの物性変化に関する分析

3.3.1 分析概要

表 3.1 における No.3, No.11, No.15 および No.26 の構造物から採取したコア供試体を対象に、コンクリートの配合推定および中性化深さから水セメント比の推定を実施した(表 3.5)。それらは、施工年が異なるが同一位置に立地し、構造物ごとの環境条件の違いが少ないものとして比較できる。その結果、配合推定より求めた水セメント比は 50~60%程度であったが、中性化深さより推定した水セメント比は 60~70%程度と中性化深さより推定した水セメント比のほうが大きくなる傾向を示した。対象とした構造物は、30~80 年と長期にわたり供用されていることから表層コンクリートの化学的変質が影響している可能性がある。そこで、コア供試体の表層と内部を対象に、水銀圧入法による細孔径分布と示差熱重量分析(TG-DTA)および XRD 分析による炭酸化による生成物の分析を行い、中性化進行に伴う物性変化を把握した。

3.3.2 分析方法

(1) 細孔径分布

コア供試体の表層から 10mm 程度の中性化した範囲（以後、中性化域と称す）とコア供試体内部の未中性化域で 10mm 幅に切断したものを数 mm 角に割裂して試料とした。その後、試料をアセトンに浸漬して水分を除去し、真空乾燥器中で脱気・乾燥させ、水銀圧入法により細孔径分布を測定した。表層の中性化域を対象とした分析では、表 3.1 における No.3（昭和 2 年）、No.11（昭和 25 年）および No.26（昭和 57 年）の 3 部材において 1 本ずつを、No.15（昭和 39 年）では柱より採取したコア供試体 2 本を分析に用いた。内部の未中性化域では、昭和 2 年、39 年、57 年で梁より採取したコア供試体を、昭和 25 年で柱より採取したコア供試体の 1 本ずつを分析に用いた。

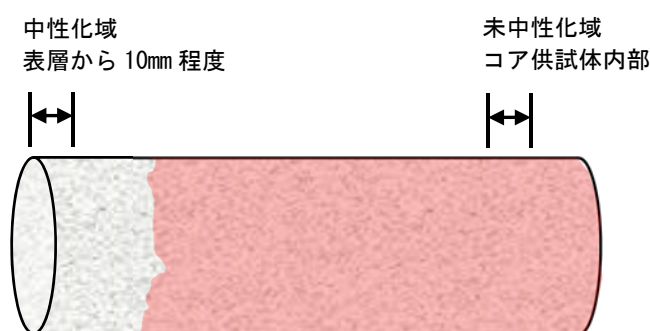
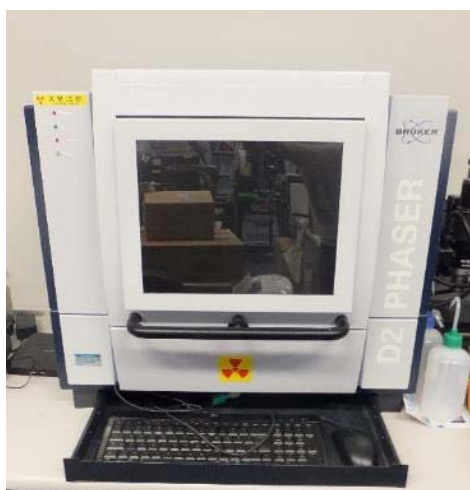


図3.5 細孔径分布の分析試料の概要

(2) 示差熱重量分析および XRD 分析

示差熱重量分析および XRD 分析では、コア供試体の表層から約 10mm 間隔で 7 層に切断し、試料を採取した。その後、粗粉碎した後に試料をアセトンに浸漬して水分を除去し、真空乾燥器中で脱気・乾燥させ、分析用の試料とした。層毎に含む骨材量が異なっているため、コンクリート（粗骨材を含む試料）に占める生成物の割合とするとバラつきが大きくなることから、骨材をあらかじめ取り除いたものを用いた。また XRD においても、試料に骨材が含まれると骨材成分の回折ピークが大きくなり、他物質の回折ピークがわかりにくくなるため同様に骨材を取り除いた。メノー乳鉢にて粗骨材に付着したペースト部をそぎ落とし、150 μ m ふるい以下の試料を採取し、振動ミルにて微粉碎した。TG-DTA では、DTA 曲線の変曲点から TG 曲線の重量変化量を用いて CaCO_3 と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量を算出した。XRD では、 CaCO_3 のうち Calcite と Vaterite の定性分析を行った。各層ごとの Calcite, Vaterite の各生成量を比較するために、内部標準試料として Al_2O_3 を試料の 10% 置換した。



(a) 粉末 X 線回折 XRD 分析



(b) 示差熱重量分析 TG-DTA

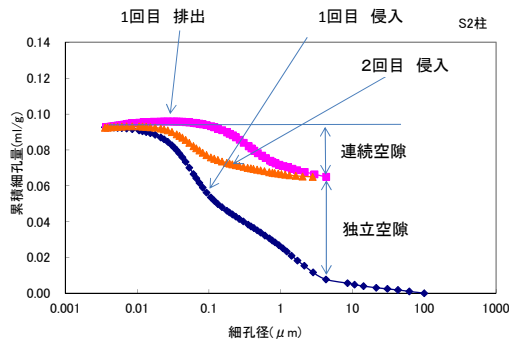
写真3.1 分析に用いた使用機器の外観

3.3.3 分析結果および考察

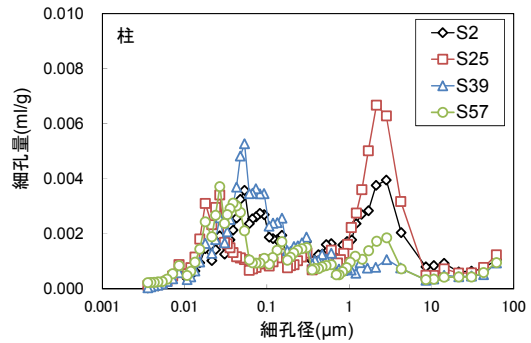
(1) 細孔径分布

図 3.6 に中性化域における細孔径分布の測定結果を示す。細孔径分布の測定結果では、水銀の圧入を繰返し行い、1 回目の侵入曲線と 2 回目に侵入曲線の差分より連続空隙の割合（図 3.6 (a)）も算出した。図 3.6(b)より細孔径分布の特徴として、昭和 25 年柱のコア供試体では、細孔径 $1\sim 10\mu\text{m}$ の範囲の細孔量が多くなる傾向を示した。昭和 39 年柱のコア供試体では、細孔径 $1\sim 10\mu\text{m}$ の範囲よりも細孔径 $0.01\sim 0.5\mu\text{m}$ の範囲の細孔量が多くなり、コア供試体ごとに細孔径 $1\sim 10\mu\text{m}$ が多くなるものと細孔径 $0.01\sim 0.5\mu\text{m}$ の範囲が多くなるものと異なる細孔径分布となった。図 3.6 (c)より施工年の違いでは、昭和 2 年のコア供試体の細孔量が他施工年のものよりも若干、細孔量が大きくなる傾向を示し、これは、配合推定の結果における水セメント比が昭和 2 年のものが大きくなった結果と同様な傾向を示している。また、部材の違いに着目すると、一般にコンクリートの打込みにおける締固め対象面積が小さくなり、締固め効率が大きい柱のほうが他部材よりも緻密になると考えられる。ただし、昭和 39 年では柱と梁を比較すると柱の方が梁よりも $0.1\mu\text{m}$ 以下の割合が大きかった。（総細孔量に対する $0.1\mu\text{m}$ 以下の割合、S39 柱 58.2%、梁 41.7%）

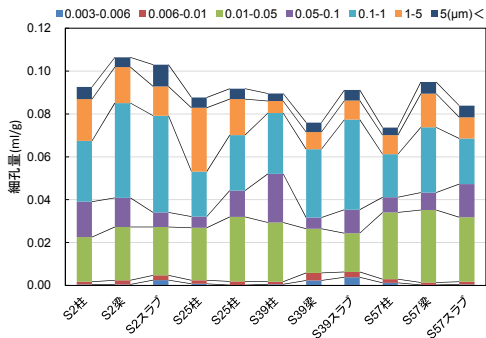
また、連続空隙の割合は、S39 柱 50.9%、梁 25.1%となり、柱の方が連続空隙の割合が大きくなった。つまり、S39 柱は $0.1\mu\text{m}$ 以下の微小な細孔が多いにも関わらず、連続空隙の割合も大きくなる結果となった。昭和 2 年と昭和 57 年の細孔径分布は、総細孔量が多くなると連続空隙量も多くなる傾向を示しているが、昭和 39 年柱の細孔径分布は異なる傾向を示していることが確認された。



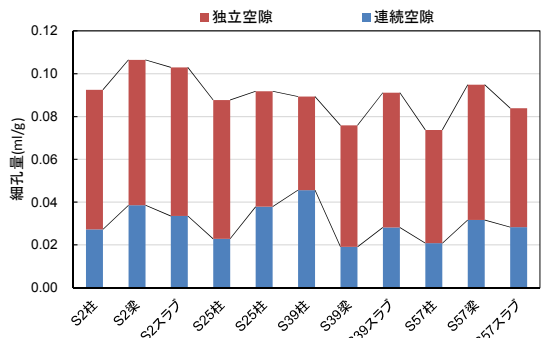
(a) 連続空隙の測定方法



(b) 中性化域における細孔径分布



(c) 各細孔径と総細孔量



(d) 連続空隙の細孔量

図3.6 細孔径分布の測定結果

図 3.7 に中性化域と未中性化域の細孔径分布を示す。コア供試体の中性化域と未中性化域の細孔径分布に着目すると、未中性化域の細孔径分布では、細孔径 $0.005 \sim 0.01 \mu\text{m}$ の範囲において細孔量が多いのに対して、中性化域では、細孔径 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ の範囲の細孔量が多くなった。これは、その他の昭和 2 年、昭和 25 年および昭和 39 年のコア供試体の中性化域と未中性化域においても同様の傾向を示しており、表層部分は中性化することで細孔径 $0.005 \sim 0.01 \mu\text{m}$ の範囲の細孔が細孔径 $0.01 \sim 0.1 \mu\text{m}$ の範囲に移行したものと考えられる。

セメント協会セメント化学専門委員会³⁻⁵⁾では、 $0.003 \sim 0.006 \mu\text{m}$ の細孔量が中性化域で著しく減少することを報告しており、この細孔径は C-S-H 内部に存在するゲル空隙に相当すると考えられており³⁻⁵⁾、中性化により C-S-H が分解して細孔構造が粗大化した可能性がある。

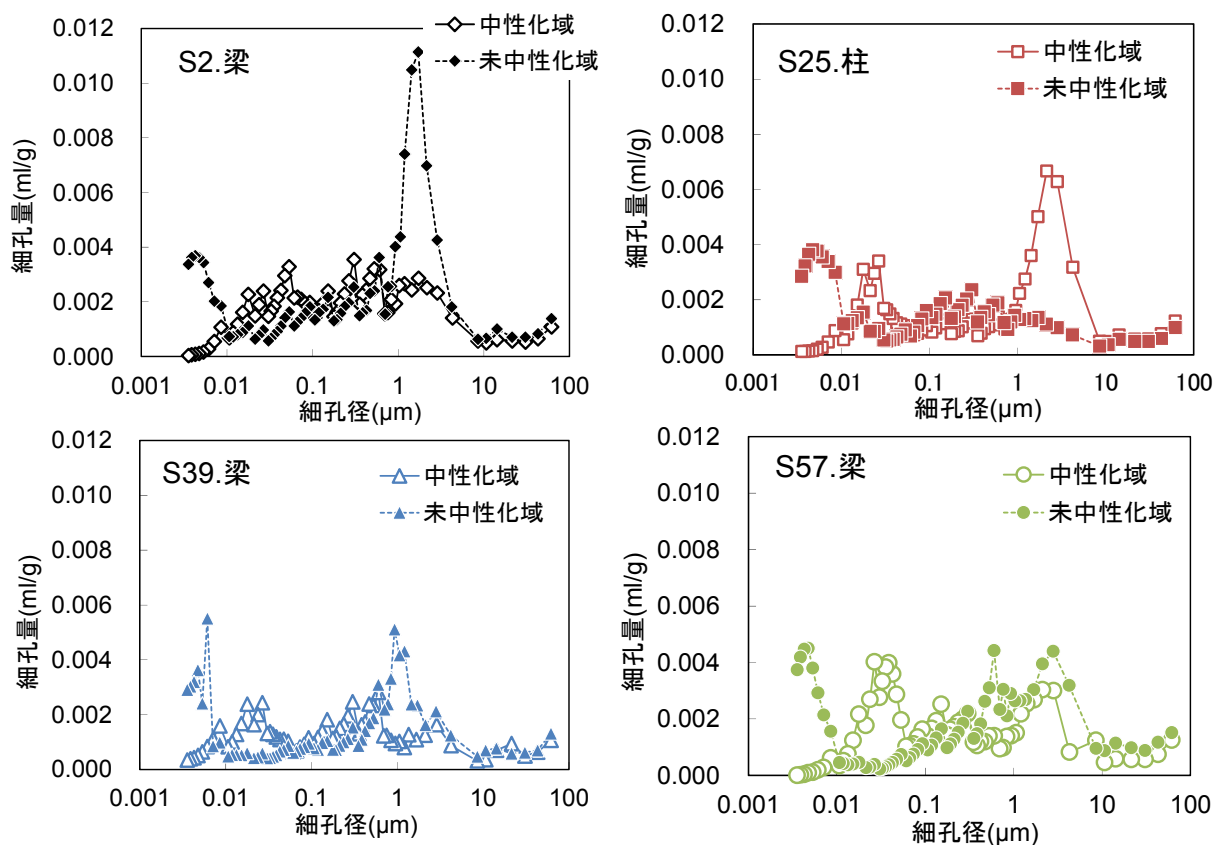


図3.7 中性化域と未中性化域の細孔径分布

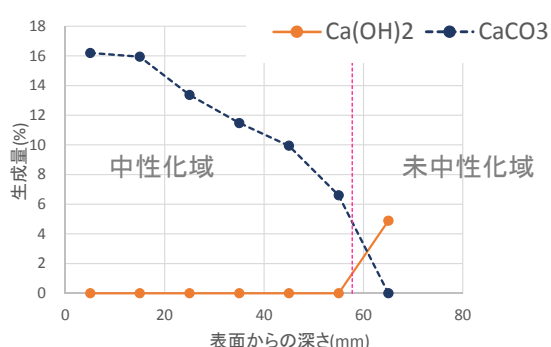
(2) 示差熱重量分析および XRD 分析

図 3.7 の中性化域と未中性化域の細孔径分布の変化から C-S-H の分解している可能性が示唆された。つまり、中性化の進行に伴い細孔構造が変化し、中性化の進行に影響を及ぼしているものと考えられる。そこで、昭和 2 年柱のコア供試体を対象に表層から深さ方向の生成物の変化を確認するために TG-DTA および XRD による化学分析を行った。CaCO₃ は結晶構造によって Calcite と Vaterite に分けられる。CaCO₃ のうち Vaterite は C-S-H が分解し炭酸化することで生成されると言われていることから、Ca(OH)₂ および CaCO₃ の生成量と CaCO₃ の結晶構造を Calcite と Vaterite に分離を行った。

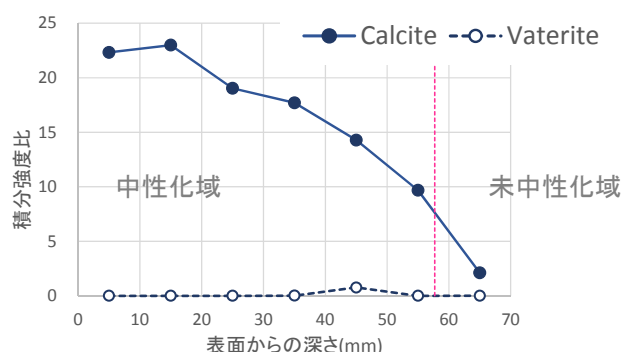
図 3.8 に TG-DTA および XRD による分析結果を示し、コンクリート表面からの深さ方向における各生成物の分布を示す。図 3.8(a) の TG-DTA の結果から、Ca(OH)₂ と CaCO₃ の生成量の分布より中性化域では CaCO₃ が生成され、未中性化域においては Ca(OH)₂ が消費されていないことが確認できる。しかし、XRD の結果から生成された CaCO₃ は、殆どが Calcite であり Vaterite の生成は確認されなかった。Vaterite は CaO/SiO₂ 比の小さいセメントペースから生成されやすいことや水分の有無により Vaterite から Calcite に移行することなどが言われており、それらが影響して、Vaterite の生成が確認されなかったと考えられる。細孔径分布より C-S-H の分解が示唆されたが、TG-DTA および XRD による分析からは C-S-H の分解を明確に確認することは出来なかった。しか

し、コア供試体の表面から深さ方向の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CaCO_3 の生成量をみると中性化域の1~6層では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が確認されなかった。これは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が炭酸化により全て消費されたものと考えられ、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に起因する炭酸化が完全に終了したものと考えられる。次に、 CaCO_3 の生成量に着目すると表層のほうが多く生成されていた。深さ方向で初期の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の生成量に大きな違いがないものとする、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に起因する炭酸化により生成される CaCO_3 は深さ方向で同程度となる。しかし、表層で CaCO_3 の生成量が多くなったものは $\text{Ca}(\text{OH})_2$ に起因する炭酸化だけではなく、C-S-Hの分解による炭酸化も進行しているものと推測する。

以上の結果より、長期間供用している構造物においては、 CaCO_3 の生成による緻密化と C-S-H の分解による粗大化を伴いつつ細孔構造が変化しながら中性化が進行していくものと考えられる。配合推定より求めた水セメント比と中性化深さから求めた水セメント比に相違がみられたことは、長期間用供され続ける中で、この細孔構造の変化が影響して中性化が進行したことが影響しているものと考えられる。ただし、本検討の範囲内ではそれらを定量的に示すまでには至らなかった。これらの細孔構造の変化には、構築直後の初期材齢における C-S-H や $\text{Ca}(\text{OH})_2$ など水和生成物の生成量や中性化の劣化過程における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の消費、C-S-H の分解速度の違いが影響を及ぼすものと考えられ、中性化の進行においては、それらも考慮して整理する必要があると考えられる。上記の要因を含め整理することで、中性化の進行と細孔構造の関係を示すことが出来るものと考えられる。



(a) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CaCO_3 の生成量



(b) Calcite と Vaterite の生成量

図3.8 TG-DTA および XRD による分析結果

3.4 施工年代の違いが中性化の進行特性に及ぼす影響に関する分析

3.4.1 調査概要

ここでは、施工年代と中性化速度係数の関係を整理し、構造物の施工年代ごとに劣化過程に及ぼす特徴的な要因を分析した。表 3.1 に示す 36 基の構造物における調査測点 221 点に、さらにドリル法にて調査した中性化深さの結果も追加して整理する。ここで追加した調査測点は、鉄道高架橋の柱、梁、スラブおよび高欄において中性化深さのみを調査した結果である。調査測点の合計は 424 点であり、それぞれの構造物の施工年代の内訳を図 3.9 に示す。

対象とした構造物の中には、供用後 80 年以上のものから、数年前に竣工したものなど、幅広く存在している。一方、時代とともにコンクリートを打設する技術や施工機械が進歩し³⁻⁶⁾、示方書の改定、設計法、維持管理の考え方なども変化してきた。(図 2.4) そこで、対象とする構造物は施工年代を調査点の数に偏りがないように 1939 年以前、1950～1979 年および 1980 年以降の 3 区分に分けて、中性化の進行度を整理した。表 3.7 に示すように 1939 年以前は昭和初期から戦前となり、施工方法は人力施工が主となる。1950～1979 年は、高度成長期となり、機械化施工が導入された時期である。1980 年以降は、バブル期となり大型開発が進められ、施工の合理化が求められた時期である。

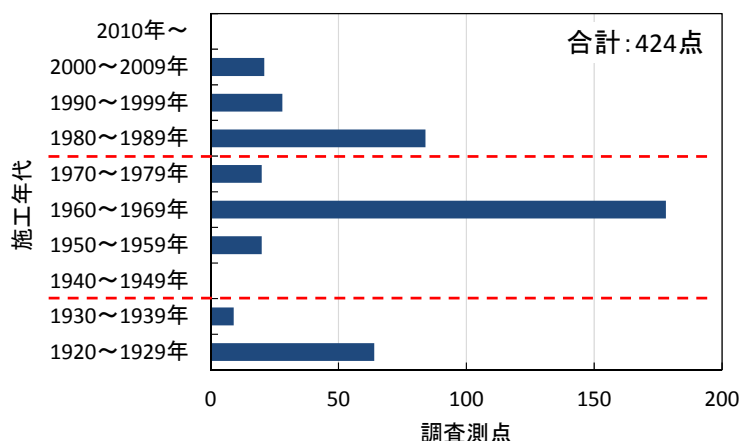


図3.9 対象構造物の施工年代の内訳

表3.6 各施工年代における施工方法と特徴

竣工時期	年代	内容
第一期	～1944 年	昭和初期～戦前 人力施工, 現場練り, 物資不足
第二期	1945 年～1959 年	戦後～高度経済成長期前 機械化導入
第三期	1960 年～1979 年	高度経済成長期 機械化導入, 生コン, 大量打設・急速施工
第四期	1980 年～2000 年	バブル期 大型開発の推進, 施工の合理化,
第五期	2000 年～	維持管理の時代 寿命予測, 品質重視

3.4.2 調査結果および考察

図 3.10 に施工年代ごとの中性化速度係数を示す。各施工年代における平均中性化速度係数は、1939 年以前で 4.26mm/√年、1950～1979 年で 3.39mm/√年および 1980 年以降で 4.06mm/√年であった。1939 年以前では、構造物の施工は、コンクリートは現場練りされ、人力運搬、棒突きによる締固めがなされる人力による施工であり、硬練りコンクリートが主流であったと推測される。1950～1979 年では、1940 年以降から減水剤の使用による単位水量の低減がなされたが、一方で、1960 年代初頭よりコンクリートポンプ車が導入され、大量打設や急速施工がなされる機械化施工に移行した時期となり、施工における不具合が危惧され時期である。塩害を対象とした既往の研究³⁻⁷⁾では、1939 年以前においては良質なコンクリートが施工されていたことが伺えたが、本研究の範囲内では、1939 年以前のコンクリートにおいて、中性化速度係数が 6.0 mm/√年以上となる結果も散見され、塩害とは異なる傾向が示された。1939 年以前における施工方法と既往の研究³⁻⁷⁾を考慮すると、1939 年以前において、施工の不具合の影響は少ないものと考えられる。図 3.10 における調査結果は、1939 年以前に施工させた構造物では概ね 70～90 年が経過し、1950～1979 年では概ね 35～70 年、1980 年以降で概ね 10～35 年が経過した時点での結果である。1939 年以前のコンクリートにおいて中性化速度係数が 6.0 mm/√年以上となったものは、3.3 で前述した長期間供用されていく中で、コンクリートの物性変化が大きく影響しているものと推測する。

また、中性化の進行に影響を及ぼす規準類の変遷として、2003 年「レディーミクストコンクリートの品質確保について」（平成 15 年 10 月 2 日、国官技第 185 号）³⁻⁸⁾などが挙げられるが、今回の検討においては、それら以降に構築された構造物を対象とした調査結果が少ないことから、単位水量に関する規準の影響を加味することができなかった。今後、中性化の進行に関する調査結果を蓄積することでそれらの影響を見出すことができると考える。

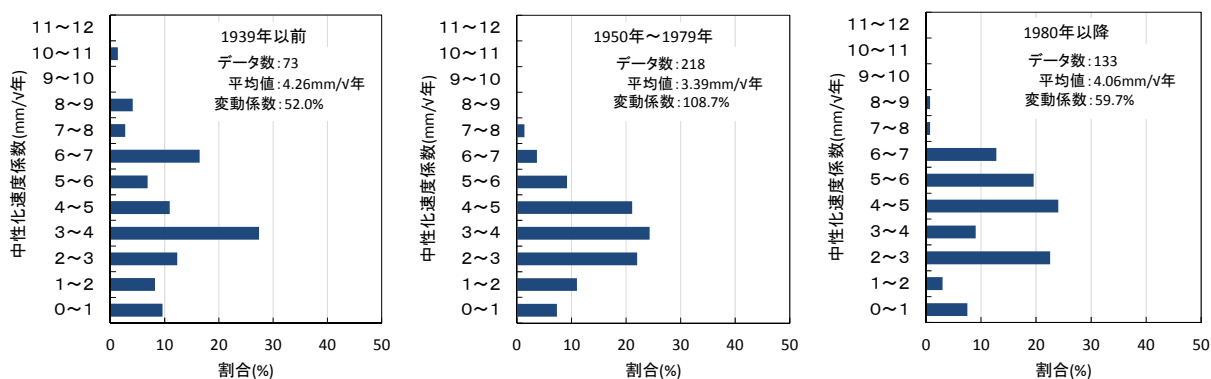


図3.10 施工年代と中性化速度係数の関係

3.5 各要因が剥離・剥落に及ぼす影響に関する調査

3.5.1 調査概要

表 3.1 に対象構造物の諸元を示す。対象構造物は、3.2 にて調査した高架橋、橋梁、擁壁およびトンネルなどで表 3.1 の 36 基の構造物とした。調査方法は、3.2.2 と同様の方法としている。

3.5.2 調査結果および考察

(1) 剥離・剥落に及ぼす影響

図 3.11, 図 3.12, 図 3.13 にかぶりと中性化深さの関係を示す。図 3.11 では腐食度ごとに分類し、図 3.12 では雨掛かりの有無の影響を、それぞれ健全部と剥離・剥落箇所に分けて図示した。なお、図 3.13 では圧縮強度ごとに分類している。図中の破線は中性化残り 10mm を示しており、破線より左側に分布している調査結果は中性化残りが 10mm 以下のもので、土木学会コンクリート標準示方書で示されている発錆限界以上の中性化が進行しているものである。

図 3.11 より、鉄筋の腐食度がⅡa 以上のものは、概ね中性化残りが 10mm 以下となる箇所で発生していた。つまり、中性化により腐食度Ⅱa「鉄筋の表面の大部分に腐食が認められる」程度まで腐食するためには中性化残りが 10mm 以下となるまで、中性化が進行することが条件となる。ただし、腐食度Ⅱaであってもかぶりコンクリートの剥離・剥落に至らない箇所も散在していた。次に図 3.12 より、雨掛かりの有無の影響も考慮すると雨掛かりのない場合では、腐食度がⅡa 以上であっても剥離・剥落に至らない箇所も多く存在した。また、雨掛かりがある場合では、概ね中性化の進行が中性化残り 10mm 以下となるまで中性化が進行すると鉄筋の腐食度がⅡa 以上となり、かぶりコンクリートの剥離・剥落に至る傾向が明確に示されている。同程度の腐食程度であっても雨掛かりがない場合では、剥離・剥落に至らない箇所も散在されていることから、かぶりコンクリートの剥離・剥落に至るまでの過程が雨掛かりの有無により異なり、剥離・剥落が発生する際の腐食の程度も異なるものと推測される。なお、圧縮強度 30N/mm² 以上に注目するとかぶりが 20mm 程度以下であると剥離・剥落に至っているが、かぶりが 20mm 程度以上であれば、中性化の進行が発錆限界付近であっても剥離・剥落に至らない箇所があった。

これら、雨掛かりがない場所で、腐食度がⅡa であっても剥離・剥落に至らない要因として、塩害では腐食速度によって腐食生成物が異なり、腐食膨張倍率が変化し、剥離・剥落に影響を及ぼすことが報告³⁻⁵⁾されているが、中性化においても、雨掛かりの有無により同様な現象が起こる可能性がある。そこで、3.6 において、実構造物より採取した腐食した鉄筋を詳細に分析した。

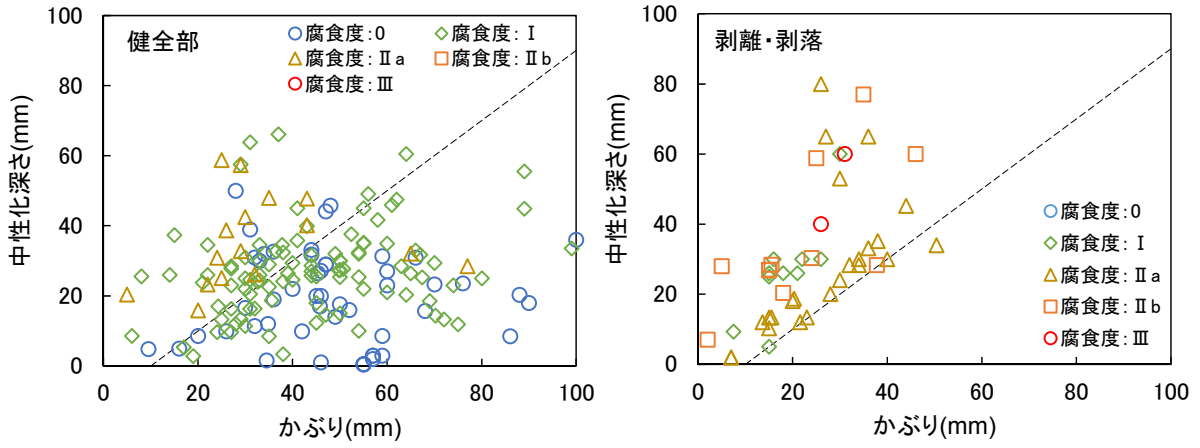


図3.11 剥離・剥落に及ぼす腐食度の影響

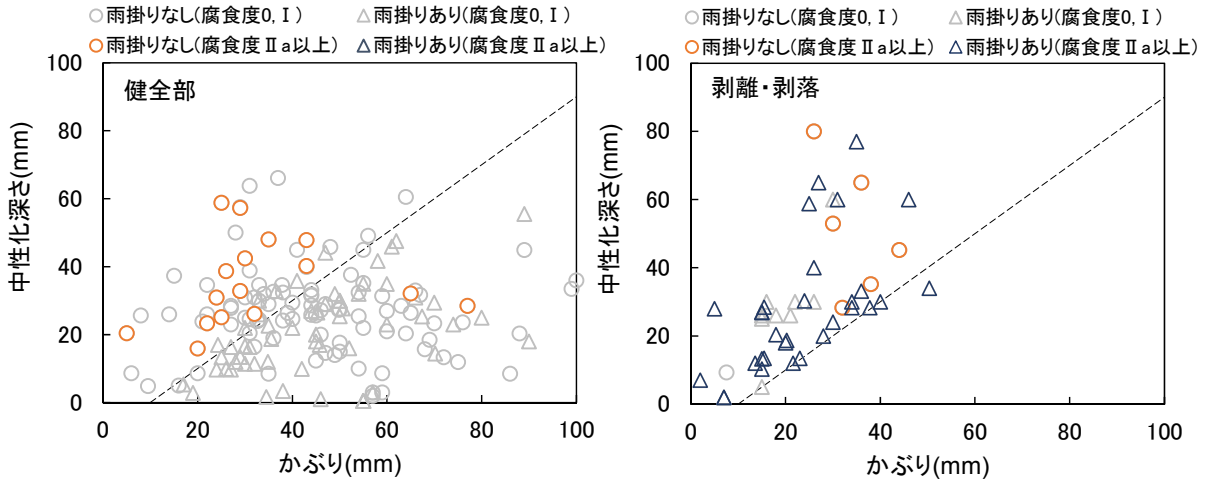


図3.12 剥離・剥落に及ぼす腐食度の影響

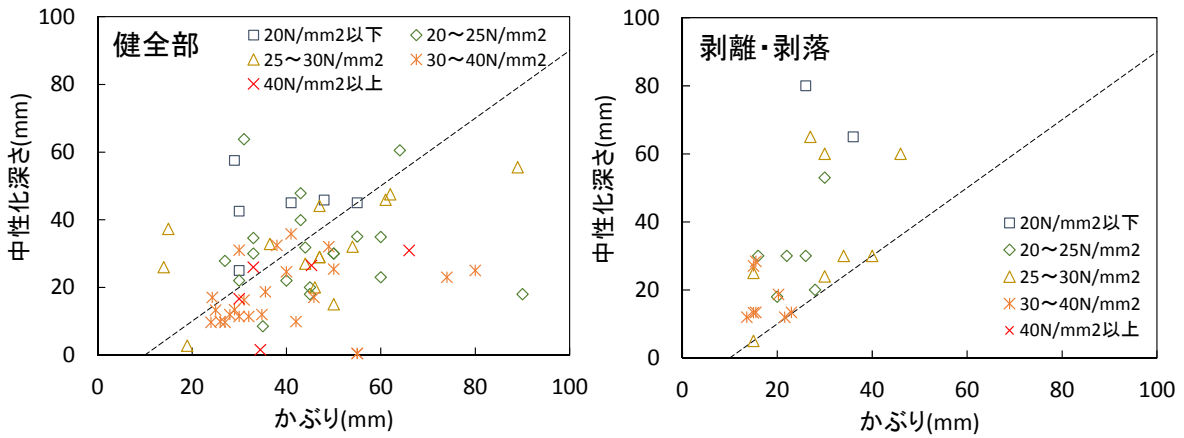


図3.13 剥離・剥落に及ぼす圧縮強度の影響

(2) 腐食速度および腐食深さ

図 3.14 に鉄筋の腐食度と雨掛かりの有無がかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響を示す。雨掛かりの無い箇所において剥落している割合は 5%程度で、雨掛かりのある箇所における剥落の割合は 40%程度と、雨掛かりがあるほうが剥離・剥落が発生し易いことを示している。これは、石橋ら³⁻³⁾の報告と同程度であり、調査結果の妥当性を示している。雨掛かりの有無の違いがかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響を定量的に示すために鉄筋の腐食度ごとに想定腐食開始からの経過年数を求めた。これは、かぶりと中性化深さおよび経過年数から、中性化残り 10mm となる時点を算出し、その時点からの経過年数を想定腐食開始からの経過年数とした。想定腐食開始からの経過年数とすることで、かぶりコンクリートの品質や厚さに影響を受ける中性化の進行、潜伏期の影響を除外するためである。

表 3.7, 図 3.15 に想定腐食開始からの経過年数と腐食度の関係を示す。想定腐食開始は、中性化残りが 10mm となる時点と仮定し、式 (3.1) により、中性化速度係数を用いて中性化残りが 10mm となる経過年数を算出した。そして、調査時点での構造物の経過年数から減じることで中性化残りが 10mm となった時点からの経過年数を求めた。想定腐食開始年数が 0 以下のものは、調査時点において中性化残りが 10mm に達していないものである。

$$t = t_1 - \left(\frac{c-10}{\alpha}\right)^2 \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.1)}$$

ここで、 t : 想定腐食開始からの経過年数(年), t_1 : 構造物の経過年数(年), c : かぶり(mm),
 α : 中性化速度係数 $\alpha = y/\sqrt{t_1}$ (mm/ $\sqrt{\text{年}}$), y : 中性化深さ(mm)

腐食の程度がある程度進行し、雨掛かりあり、なし両方の調査測点の多い腐食度 II a に着目すると、腐食度 II a における想定腐食開始からの経過年数は、雨掛かりがある箇所で平均 14.8 年、雨掛かりがない箇所で平均 49.4 年となった。つまり、腐食度 II a における腐食速度は、雨掛かりがある場合のほうが、ない場合よりも 3.4 倍程度大きくなった。雨掛かりがある場合、雨掛かりがない場合よりもかぶりコンクリートが剥離・剥落し易くなることは、雨掛かりがある場合のほうが鉄筋の腐食がし易いところを示している。雨掛かりがある場合、中性化の進行は、乾燥しているよりも抑制されるものの鉄筋の腐食速度が大きくなり、かぶりコンクリートの剥離・剥落が早期に発生するものである。なお、腐食度 II a における想定腐食開始からの経過年数にばらつきが見られるが、これは、雨掛かりがある中でも、水分の供給量やコンクリートの緻密性などコンクリート中での鉄筋位置における水分状態が異なることなどが影響しているものと考えられる。

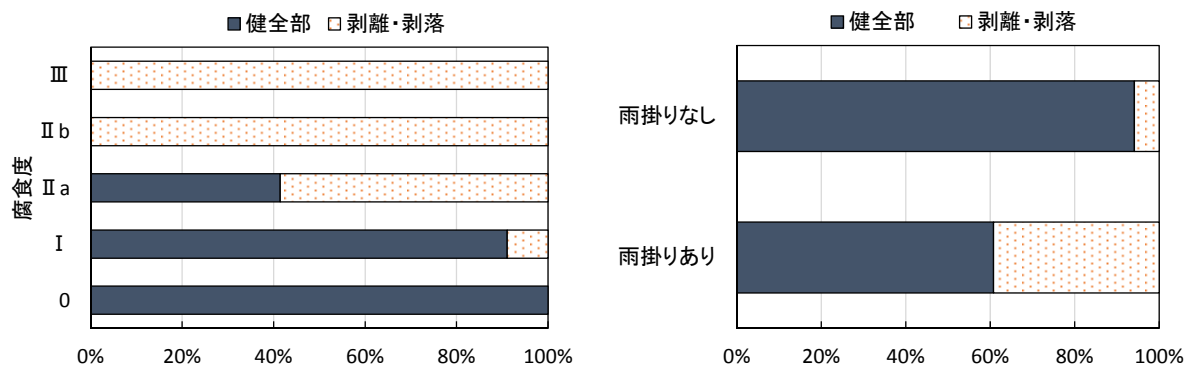


図3.14 鉄筋の腐食度および剥離・剥落に及ぼす雨掛かりの影響

表3.7 想定腐食開始からの経過年数

	腐食度	最小値	最大値	平均値
雨掛りあり	III	67.2	70.2	68.7
	II b	2.9	83.1	53.7
	II a	-34.6	77.3	14.8
雨掛りなし	II a	16.5	80.2	49.4

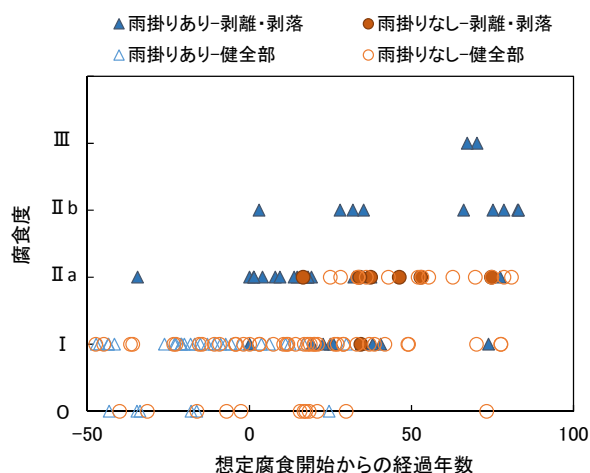


図3.15 想定腐食開始からの経過年数と腐食度の関係

次に、表 3.3 および表 3.4 の鉄筋の腐食度と質量減少率の関係より腐食深さを算出する。腐食深さと質量減少率の関係は、図 3.16 に示す 2 つのケースを想定した。図 3.16(a)は、鉄筋断面におけるかぶり側から鉄筋が腐食する場合であり、図 3.16(b)は鉄筋断面において均一的に腐食する場合である。(a)における腐食深さは、式 (3.2) により、(b)における腐食深さは、式 (3.3) により算出した。それぞれの調査結果において、鉄筋の腐食度から定まる質量減少率と鉄筋の径から 2 つのケースの腐食深さを算出している。図 3.17 に求めた腐食深さと配筋条件(c/D)の関係を示す。また、図中には鉄道構造物等維持管理標準³⁻¹⁾に示されている式 (3.4) の剥離・剥落に至る腐食深さの関

値をあわせて示す。

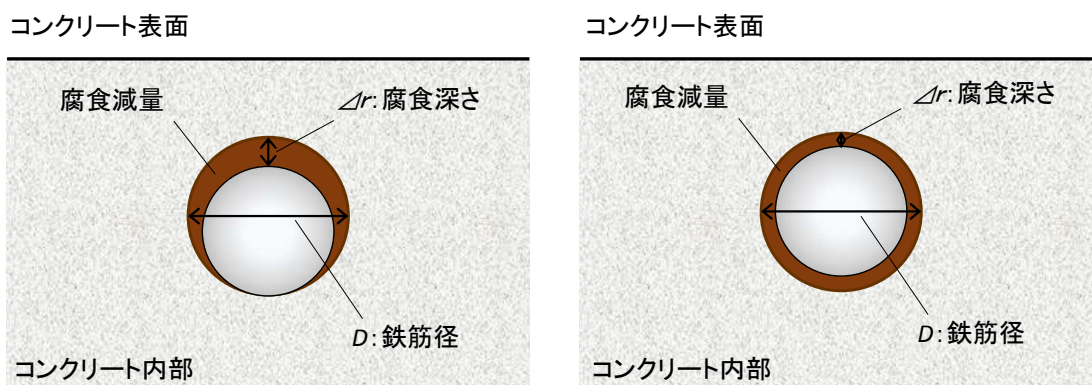
図 3.17 より、雨掛かりの有無ともに c/D が小さいと腐食深さが大きい傾向となった。雨掛かりがある箇所では、腐食深さが Δr_{sp} 以上となると剥離・剥落している傾向となるが、雨掛かりのない箇所では Δr_{sp} 以上であっても多くの調査箇所において剥離・剥落していないことが見て取れる。つまり、かぶり、鉄筋径 (c/D) と腐食深さの関係からも図 3.12 と同様の傾向を示しており、雨掛かりの有無によって、かぶりコンクリートが剥離・剥落する際の腐食の程度も異なるものと推測される。

$$m = \left[\frac{D^2 - (D - \Delta r)^2}{D^2} \right] \times 100 \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.2)}$$

$$m = \left[\frac{D^2 - (D - 2\Delta r)^2}{D^2} \right] \times 100 \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.3)}$$

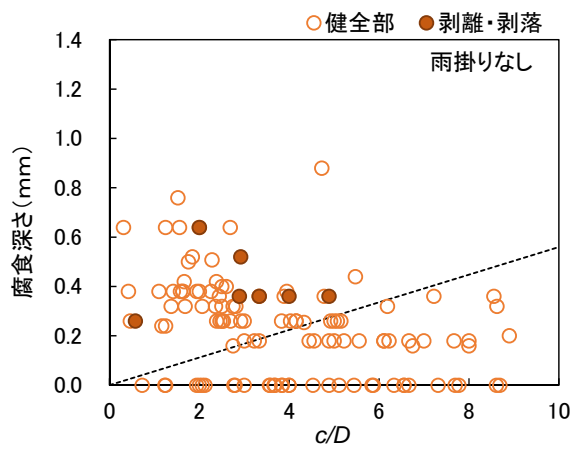
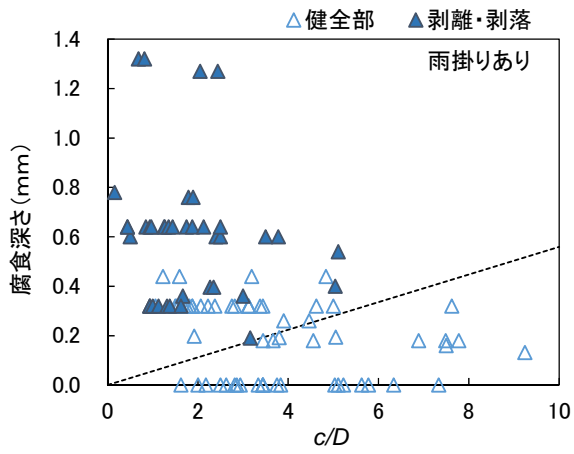
$$\Delta r_{sp} = 56(c/D) \times 10^{-3} \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.4)}$$

ここで、 m : 質量減少率(%), D : 鉄筋径(mm), Δr : 腐食深さ(mm),
 Δr_{sp} : 剥離・剥落時の鉄筋の腐食深さ(mm), c : かぶり(mm)

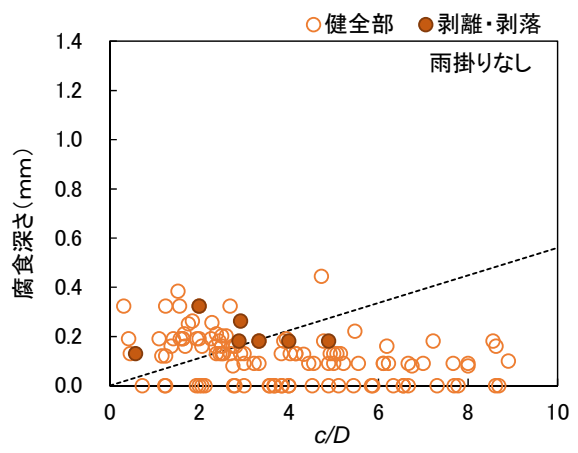
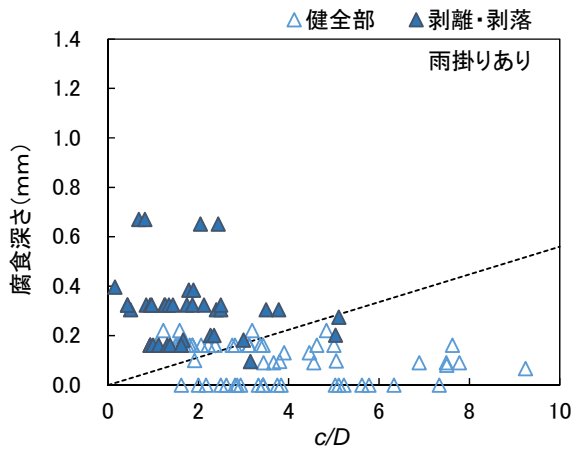


(a)かぶり側から鉄筋が腐食する場合 (b)鉄筋断面において均一的に腐食する場合

図3.16 腐食深さと質量減少率の関係の模式図



(a)かぶり側から鉄筋が腐食する場合における腐食深さ



(b)鉄筋断面において均一的に腐食する場合における腐食深さ

図3.17 腐食深さと配筋条件 (c/D) の関係

3.6 中性化により腐食した鉄筋の詳細分析

3.6.1 対象構造物および分析試料

ここでは、雨掛かりの影響は腐食速度のみならず、腐食形態や腐食生成物の種類・割合にも変化を及ぼすかを確認するために、実構造物より採取した鉄筋を対象に詳細分析を行った。ここで、2.2.3で示したようにコンクリート中の鉄筋腐食では、オキシ水酸化鉄や酸化鉄などの結晶相が確認されている。それらの腐食生成物はそれぞれの密度が異なることから、腐食生成物の結晶相の割合によって体積膨張倍率が変化する。雨掛かりの有無により水分供給量が異なり、腐食生成物の種類、割合に影響を及ぼすと考え、採取した鉄筋の腐食生成物の結晶相を XRD 分析にて同定した。また、中性化の進行がかぶり側までのみの場合と鉄筋背面まで進行している場合とでは、鉄筋のかぶり側と内部において、腐食のし易さは異なると考えられる。つまり、中性化の進行程度および雨掛かりの有無により、鉄筋断面における腐食の傾向は図 3.16 に示す 2 つのケースのどちらに分けることができるかを把握することとした。そこで、分析対象の鉄筋断面を光学顕微鏡で観察し、腐食の偏りを把握した。

表 3.8, 表 3.9 に分析試料とする腐食した鉄筋と構造物の諸元を示す。分析試料とする腐食した鉄筋は、A 高架橋および B 高架橋のスラブであり、実構造物よりスラブの一部を切出して、保管していた試験体より採取した。分析試料 No.1, No.2 の鉄筋を採取した A 高架橋のスラブ試験体は、供用年数 45 年時に切出して、スラブ下面が上面となるように 10 年間、屋外に暴露した後、中性化深さやかぶり、鉄筋の腐食度を調査し、分析試料 No.1 と No.2 を採取した。図 3.18 に分析試料 No.1, No.2 および No.3 の概略図を示す。調査時点で 55 年が経過しているが、分析試料 No.1 は、スラブハンチ部の下面からのかぶりは 86.3mm で、調査時点での中性化深さは 65.5mm あった。切出した試験体の切断面からのかぶりが 25mm で、中性化深さは 22.3mm であったことから、試験体を切出した後に中性化が進行し、鉄筋が腐食したものである。分析試料 No.1 は、採取時の中性化残りが 2.3mm で中性化の進行が鉄筋背面まで到達していない状況であった。分析試料 No.2 は、スラブ下面からのかぶりが 8.1mm、中性化深さ 42.1mm であり、中性化残りが -34mm で鉄筋背面まで中性化が進行していた。中性化の進行は、供用開始から 55 年をかけて進行したもので、切出す前の 45 年間は雨掛かりがない環境で、切出してから 10 年間に於いて雨掛かりの有る環境下で暴露したものである。分析試料 No.3 は、供用年数 64 年が経過した B 高架橋より切出したスラブ試験体を雨掛かりのないように養生して保管していたスラブ試験体から採取した。分析試料 No.3 の B 高架橋のスラブ試験体は、供用年数 64 年が経過しているが、供用年数 32 年時に於いて吹付け補修がなされていた。吹付け補修前のかぶりは不明であるが、調査時点において鉄筋背面よりも中性化が進行していたことから、中性化の期間は吹付け補修がなされる前までの 32 年であり、吹付け補修によるかぶりが 70mm 確保されていることから吹付け補修後の中性化と鉄筋腐食の進行は著しく少ないものと推察でき、分析試料は 32 年間、雨掛かりのない環境下で腐食したものである。なお、それぞれの分析試料は、目視で確認すると外観上は腐食度 II a であり、目視による判別は同程度の腐食状況であった。



A 高架橋より切出したスラブ試験体

B 高架橋より切出したスラブ試験体

写真3.2 分析試料を採取したスラブ試験体

表3.8 構造物およびコンクリートの諸元

分析試料 No.	構造物種類	部材	供用年数 (年)	中性化期間 (年)	腐食期間 (年)	圧縮強度 (N/mm ²)	全塩分量 (kg/m ³)
No.1	A 高架橋	スラブ	55	10 ^{※1}	10 ^{※1}	13.0	0.14
No.2				55	45, 10 ^{※2}		
No.3	B 高架橋	スラブ	64	32	32	22.7	—
—	C 高架橋	スラブ	87	87	87	23.8	—

※1 A 高架橋が供用年数 45 年時に実構造物から 1×2m 範囲のスラブを切出して保管

※2 45 年間は雨掛かりのない環境, 10 年間は雨掛かりのある環境

表3.9 分析試料の諸元

分析試料 No.	鉄筋径 (mm)	腐食度	かぶり (mm)	中性化深さ (mm)	中性化残り (mm)	雨掛かりの有無	備考
No.1	φ 8	II a	25.0 ^{※3}	22.7 ^{※3}	2.3	あり	健全部
No.2	φ 8	II a	8.1	42.1	-34		剥離・剥落
No.3	φ 19	II a	70.0 ^{※4}	92.4 ^{※4}	-22.4	なし	補修部

※3 切断面からのかぶりと中性化深さ, ※4 吹付け補修箇所での補修厚さを含む

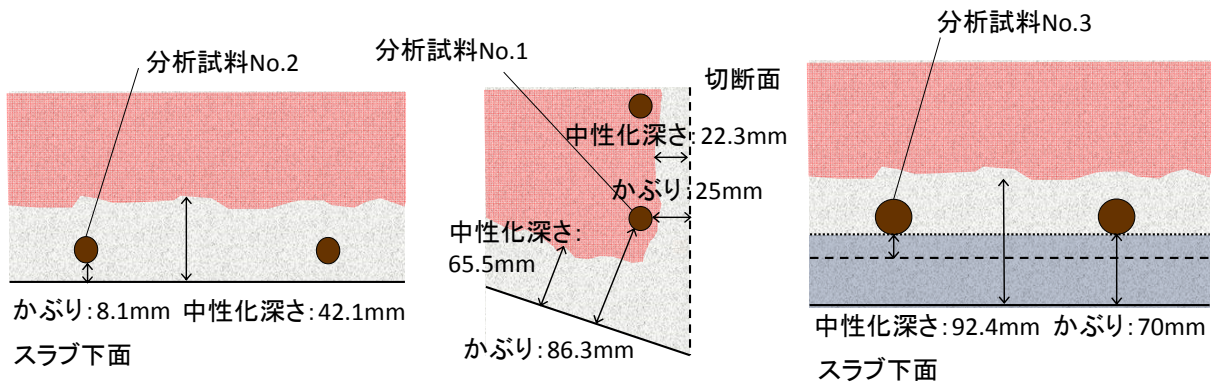


図3.18 分析試料の概略図

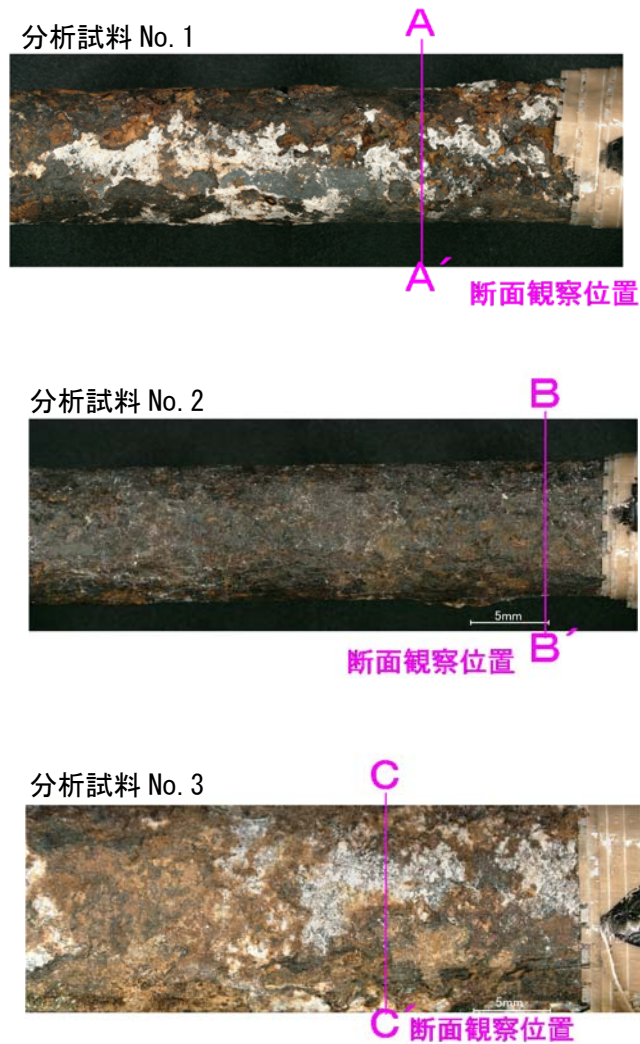


写真3.3 採取した分析試料の外観

3.6.2 分析方法

それぞれの鉄筋は、スラブ試験体より 400mm 程度の長さ采取了し、腐食生成物の結晶相を XRD 分析に用いる範囲と断面観察に用いる範囲に分割した。なお、それぞれの分析試料は、鉄筋の長手方向において、目視において著しく腐食深さが大きい箇所は確認されず、腐食している範囲においては表面が均一的に腐食している状況であった。そのため、断面観察をする箇所は任意の箇所において実施した。

まず、XRD 分析に用いる試料は、鉄筋表面に付着したコンクリートを可能な限り、やすりやペンチ等にて除去した後、腐食生成物を手持ち回転研磨機(ルーター)にて削り落としながら採取した。採取した腐食生成物に内部標準試料として ZnO を 15wt% 添加してメノー乳鉢にて粉碎、混合し、測定用試料とした。X 線回折法による結晶相の定性分析および内部標準試料を用いたリートベルト解析により結晶相の定量分析を行った。リートベルト解析による非晶質の定量方法を以下に示す。

定量式 (R.J.Hill and C.J.Howard, 1987)

$$W_m = \frac{S_m Z_m M_m V_m}{\sum_{k=1}^N S_k Z_k M_k V_k} \quad (\text{式 3.5})$$

ここで、 W_m : 第 m 相の重量分率、 S_k : 各々の相のスケール因子、
 Z_k : 単位格子中に含まれる化学式単位の個数、 M_k : 分子量、 V_k : 単位格子体積

非晶質相の定量 (D.L.Bish and S.A.Howard, 1988)

$$C = \frac{W_{is}}{S_{is}(ZMV)_{is}}$$

$$W_j = CS_j(ZMV)_j \quad (\text{式 3.6})$$

$$W_{amorphous} = 1 - \sum_{j=1}^{N-1} W_j$$

ここで、 W_{is} : 内部標準試料の重量分率、 S_{is} : 内部標準試料の相のスケール因子、
 Z_{is} : 内部標準試料単位格子中に含まれる化学式単位の個数、
 M_{is} : 内部標準試料の分子量、 V_{is} : 内部標準試料の単位格子体積
 W_j : 定性分析により得られた各相の重量分率、
 S_j : 定性分析により得られた各相の相のスケール因子、
 Z_j : 定性分析により得られた各相の単位格子中に含まれる化学式単位の個数、
 M_j : 定性分析により得られた各相の分子量、
 V_j : 定性分析により得られた各相の単位格子体積

次に、断面観察用の分析試料は、真空脱気環境下にて樹脂包埋した。その後、目視では孔食のように局部的に著しく腐食している箇所は見られなかったため、任意の断面にて切断した。そして、切断面を粒度 320~4000 番の耐水研磨紙と 1 μ ダイヤモンドスプレーを用いて鏡面研磨を行った。倍率 12.5~500 倍の光学顕微鏡にて、断面の全形とかぶり側、左右、内部の方向で断面組織観察を行い、断面減少量と各箇所での最大腐食深さを求めた。

3.6.3 分析結果および考察

(1) 腐食生成物の種類、割合

図 3.19 に腐食生成物の XRD 分析による測定結果を、図 3.20 に XRD 分析による腐食生成物の定量分析結果とそれぞれの結晶相の密度と分子量から算出した腐食生成物の体積膨張倍率を示す。なお、非晶質の腐食生成物はコンクリートの細孔溶液中に液化し、腐食膨張には寄与しないと想定して、非晶質+未同定相を除外して算出した³⁻¹⁰⁾。

ここで、腐食生成物の主な特徴について以下に示す。

Fe_3O_4 (Magnetite) は、アルカリ環境下で生成されやすく、 Fe_3O_4 は高アルカリ環境下で塩化物イ

オンが共存しない環境では不動態皮膜の役割を果たす。しかし、塩化物イオンが存在すると不動態皮膜として役割を果たせず、黒錆として析出することが報告されている³⁻¹¹⁾。

α -FeOOH (Goethite) は、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の加水分解により生成する。中性環境下では $\text{Fe}(\text{OH})_2$ の酸化により生成されることもあり、アルカリ環境下では Fe_3O_4 や β -FeOOH, γ -FeOOH などが溶解して、非晶質オキシ水酸化鉄を経て生成する³⁻¹²⁾。この他の生成物から α -FeOOH に変化する過程を Aging と表され、水分の存在が必要と考えられている³⁻¹³⁾。

β -FeOOH (Akagancite) は、塩化物イオンが共存する環境下のみで Green Rust (I) を経て生成する。中性から酸性環境下で生成しやすいことが報告されており、アルカリ環境下では溶解し、 Fe_3O_4 や α -FeOOH に変換することが報告されている^{3-12) 3-14)}。

図 3.19 より No.1 と No.2 における X 線回折強度は同様の傾向を示し、腐食生成物の種類としては、 Fe_3O_4 , α -FeOOH, β -FeOOH, γ -FeOOH が生成されていることがわかる。No.3 においては β -FeOOH の X 線回折強度が確認されないため、 β -FeOOH が生成されていないことがわかる。図 3.20 より No.1 と No.2 では、塩化物イオンの共存により生成される β -FeOOH が検出され、体積膨張倍率が 2.77 と 2.70 で、No.3 の 2.60 よりも若干大きくなった。電食実験や塩害を模擬した腐食促進実験では、条件によって密度が小さく体積膨張倍率に大きく寄与する塩化酸化鉄や塩化水酸化鉄が生成されると報告がある³⁻⁵⁾。今回の分析においては、それらの生成物は検出されなかった。コンクリート中の全塩分量は 0.14kg/m^3 と少なく、中性化による鉄筋腐食では、塩化酸化鉄や塩化水酸化鉄は生成されないと推測する。No.1 と No.2 では雨掛かりがある環境であることから、水分の移動の影響により、コンクリート中の微量の塩化物イオンが細孔溶液中を移動することで、鉄筋周辺において塩化物イオンが濃縮され、 β -FeOOH が生成されたものと考えられる。雨掛かりの有無により腐食生成物の種類には違いがみられたが、腐食生成物の膨張倍率を算出すると、膨張倍率 2.60~2.77 と多少の違いがみられるものの、試料採取箇所や採取方法によるバラツキを考慮するとこれらの体積膨張倍率は同程度であり、雨掛かりの有無によって腐食生成物の体積膨張倍率に大きな違いは現れないと考える。

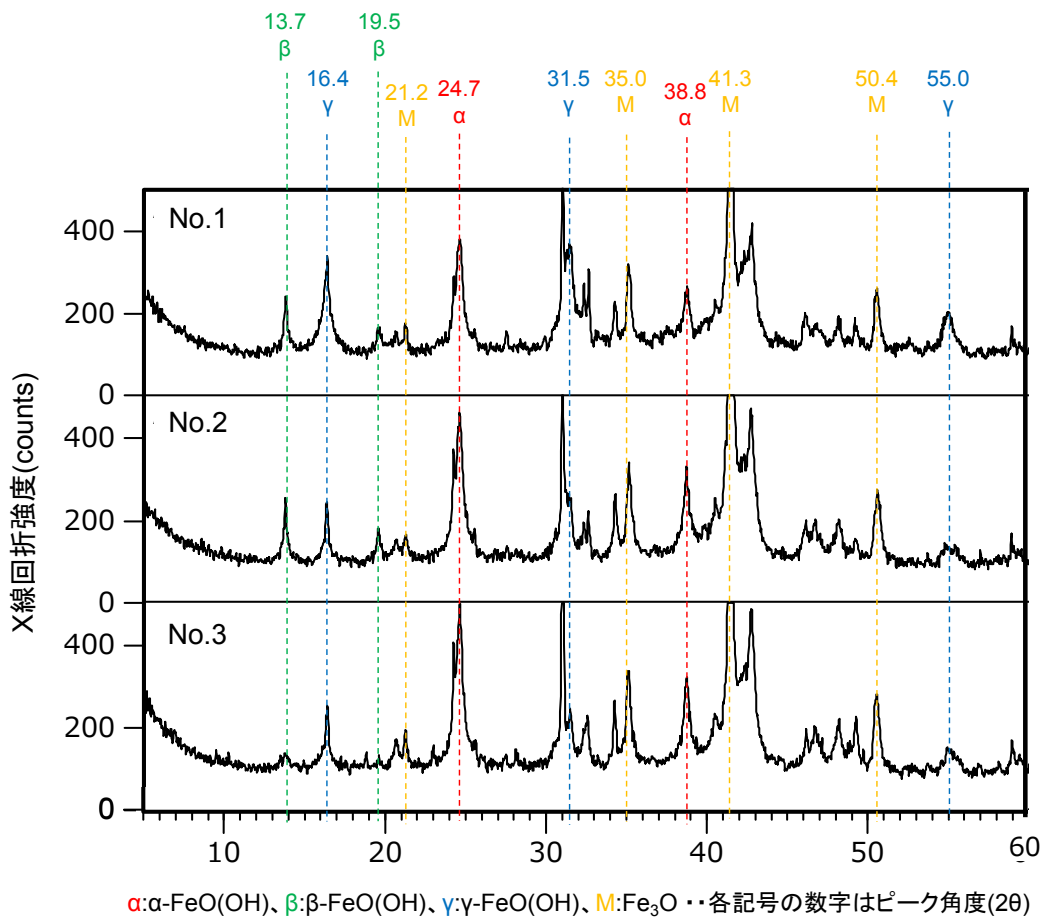


図3.19 腐食生成物の XRD 分析の測定結果

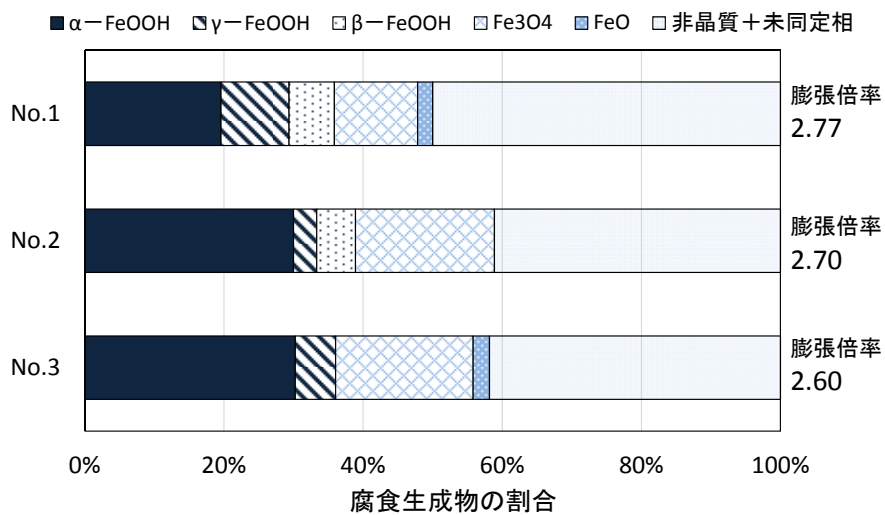


図3.20 腐食生成物の重量割合および膨張倍率

(2) 断面観察

図 3.21 に腐食深さと断面減少量の測定結果を、図 3.22 に断面観察結果の一例を示す。なお、図 3.22 には断面減少量と腐食生成物の体積膨張倍率から算出した膨張率を示す。膨張率は、腐食前の元鉄筋断面に対する腐食後の鉄筋断面の増加割合である。雨掛かりのある No.1 と No.2 では、かぶり側の腐食深さが、左右および内部よりも大きくなり、鉄筋断面において腐食がかぶり側に偏る傾向を示した。雨掛かりのない No.3 では各 4 方向での腐食深さは同程度となり、鉄筋断面において均一的に腐食している。つまり、雨掛かりがある場合は、図 3.10 におけるかぶり側から鉄筋が腐食する傾向を示し、雨掛かりがない場合は鉄筋断面において均一に腐食する傾向を示す。また、中性化の進行が鉄筋背面まで達していない No.1 の内部では腐食深さは著しく小さいが、No.2 および No.3 より中性化の進行が鉄筋背面に達することで、内部においても腐食が開始することが分かる。鉄筋断面において腐食する範囲は、中性化の進行に影響を受け、まず、鉄筋のかぶり側において腐食が開始し、中性化が内部に進行することに伴い、鉄筋の内部においても腐食環境下となり、腐食が開始するものである。中性化の進行が同程度であっても、腐食速度は雨掛かりがある場合のほうが大きくなることから、中性化の進行と鉄筋の腐食速度の関係から、鉄筋断面においてかぶり側の腐食深さが大きくなったものと考えられる。なお、断面減少量は、雨掛かりのある No.2 で 2.36mm^2 と雨掛かりのない No.3 の 1.98mm^2 で、元鉄筋断面に対する増加割合の膨張率は No.2 で 2.78%、No.3 で 0.38%となった。No.2 と No.3 では、左右および内部の腐食深さは同程度であることから、No.2 ではかぶり側の腐食が大きくなることで断面減少量が増加したと考える。

以上、腐食生成物の分析と断面観察の結果より、雨掛かりがある場合には、腐食生成物は $\beta\text{-FeOOH}$ が生成され、若干の膨張倍率が大きくなる傾向があるものの、雨掛かりがある場合は、水分供給に伴いかぶり側の腐食が速くなり腐食量が多くなることの影響が大きく、雨掛かりがない場合よりもかぶりコンクリートに作用する応力が大きくなり、剥離・剥落し易くなることが考えられる。なお、今回の分析では、鉄筋の長手方向において任意の箇所において断面観察を行った。目視では鉄筋の長手方向での腐食は同程度であり、違いは少ないと考えるが、断面観察位置の違いによる影響に関しては、4 章において詳細な分析と検討を行った。

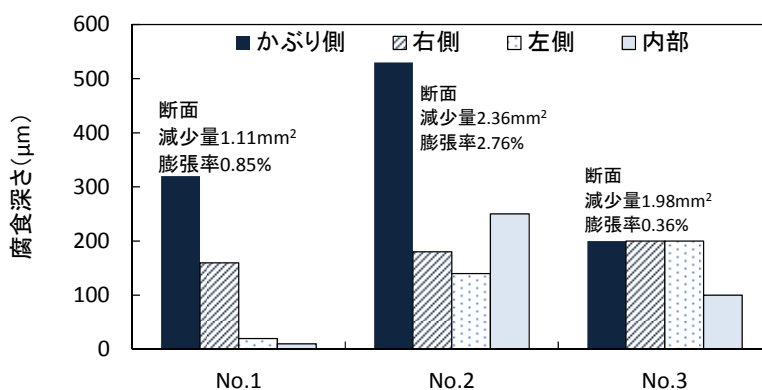
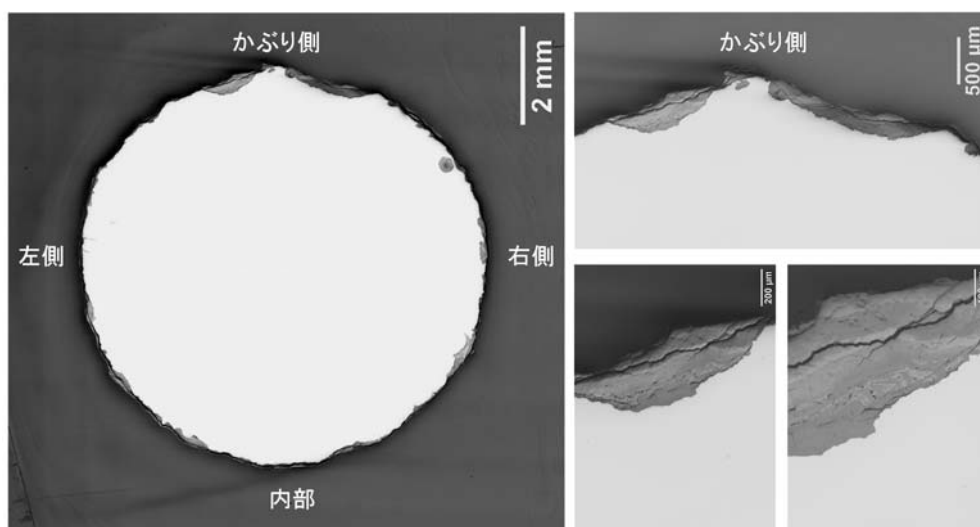


図3.21 断面減少量および腐食深さ

析試料 No. 2



分析試料 No. 3

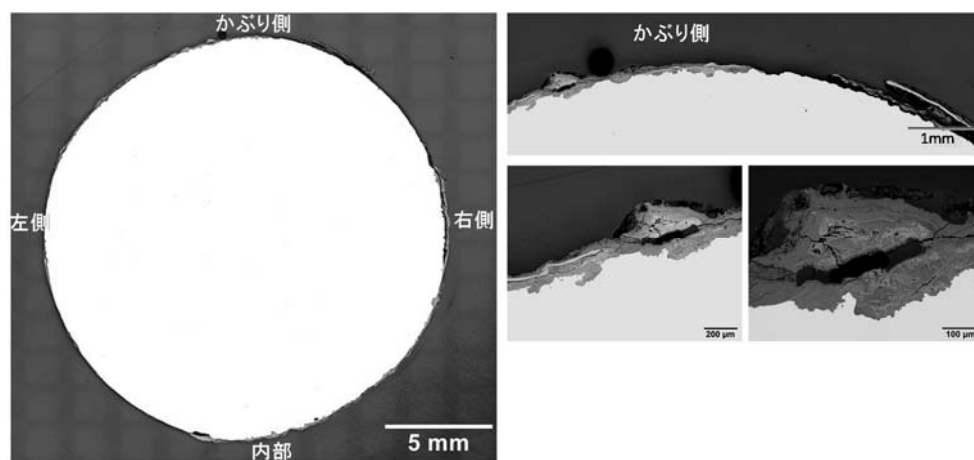


図3.22 光学顕微鏡による断面観察結果

3.7 雨掛かりの有無がコンクリート中の含水率に及ぼす影響に関する調査

3.7.1 調査概要

3.5 において、雨掛かりがある場合のほうが、中性化による鉄筋の腐食速度が大きくなり、かぶりコンクリートが早期に剥離・剥落する傾向にあることが示された。ここでは、雨掛かりの有無によるコンクリート中の含水率の違いを把握するために、実構造物を対象に調査した結果を示す。なお、調査とした構造物は、表 3.8 に示す A 高架橋および C 高架橋より切出したスラブ試験体を対象に実施した。

さらに、表 3.1 に示す中性化に関する調査を実施した構造物とは、別途、海岸線近傍に立地し、供用開始から約 50 年以上経過している実鉄道高架橋 (D 高架橋) を対象とした。構造物の形式は、3 径間 2 柱式 RC ラーメン高架橋であり、全長約 150m の構造物である。対象構造物は、東海地方太平洋海岸に近接し、海岸が北南方向に連なり、構造物は海岸線と平行に並んで位置し、東側に海岸を望むように立地している。なお、対象構造物は、供用開始後 15 年程度から、塩害による劣化が顕著化し、柱を中心とした断面修復と表面被覆の補修がなされていたが、補修部などは除外し、極力、塩害の影響を受けていない範囲を対象とした。

雨掛かりの有無によって、コンクリート表面からの内部にかけて含水率が異なることが考えられるため、対象構造物の各部材でコンクリート表面から深さ方向の含水率の測定を実施した。含水率の測定は、電気抵抗式の測定器 (ケット科学研究所社製 HI-800) を用いて行った。図 3.23 に含水率の測定方法の概要を示す。含水率の測定にあたってはφ6mm、長さ 100mm 程度の削孔穴を 30mm 間隔で 2 本設け、そこに電極 (長さ約 20mm) を挿入して深さ 10mm 毎の含水率を測定した。測定箇所は、対象構造物の柱、梁およびスラブ (張出部を含む) の各部材で 3 箇所ずつを基本として行った。

A 高架橋のスラブ試験体では、試験体を屋内にて 7 日間以上、乾燥した状態と、乾燥状態で測定した後に、雨掛かりの状態を模擬するため、コンクリート表面を 1 日および 3 日間湿封養生を行い、湿潤状態とした環境で測定を行った。D 高架橋の柱および梁は、雨掛かりがある箇所で行い、スラブは雨掛かりのない環境下である。なお、実構造物を測定した際は、数日の間、晴天が続き、各測定箇所の表面は目視において乾燥した状態であった。

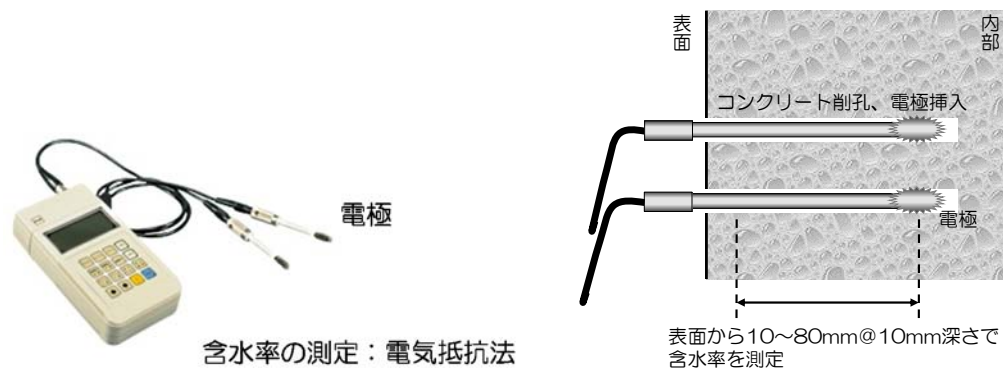


図3.23 コンクリート表面からの深さ方向の含水率の測定概要

3.7.2 調査結果および考察

図 3.24 に D 高架橋における柱と梁およびスラブでのコンクリート表面からの距離と含水率の関係を示す。なお、対象構造物における含水率の計測方法は電気抵抗式の計測器で測定したものである。含水率の測定には、質量法によるものがあるが測定方法が異なるため両者を定量的な比較をする際には留意が必要である。ここでは、対象構造物での各部位や深さ方向における含水率の違いを相対的な比較により評価とすることとした。柱と梁およびスラブのそれぞれにおいて、コンクリートの内部と表層では、表層のほうが乾燥の影響を受けるため、含水率は小さくなった。また、コンクリート内部と表層の含水率の差は、柱と梁では内部と表層で 2%以内の差で収まっているのに対して、スラブでは 2%以上の差が確認された。これは、雨掛かりがある柱と梁よりも雨掛かりのないスラブのほうが乾燥によりコンクリート表層の含水率が低下し易いことが示されている。

雨掛かりがある柱および梁において、雨掛かり直後や表面が湿潤状態にある際のコンクリート内部の含水率の把握は行っていないが、湿潤状態にある場合、コンクリート表面は、測定結果であるコンクリート内部の 3~5%の含水率よりも大きいと推測される。雨掛かりがある場合、水分供給に伴いコンクリート内部の含水率が大きくなり、雨掛かりがない場合よりも鉄筋が腐食しやすい環境になることが示されている。

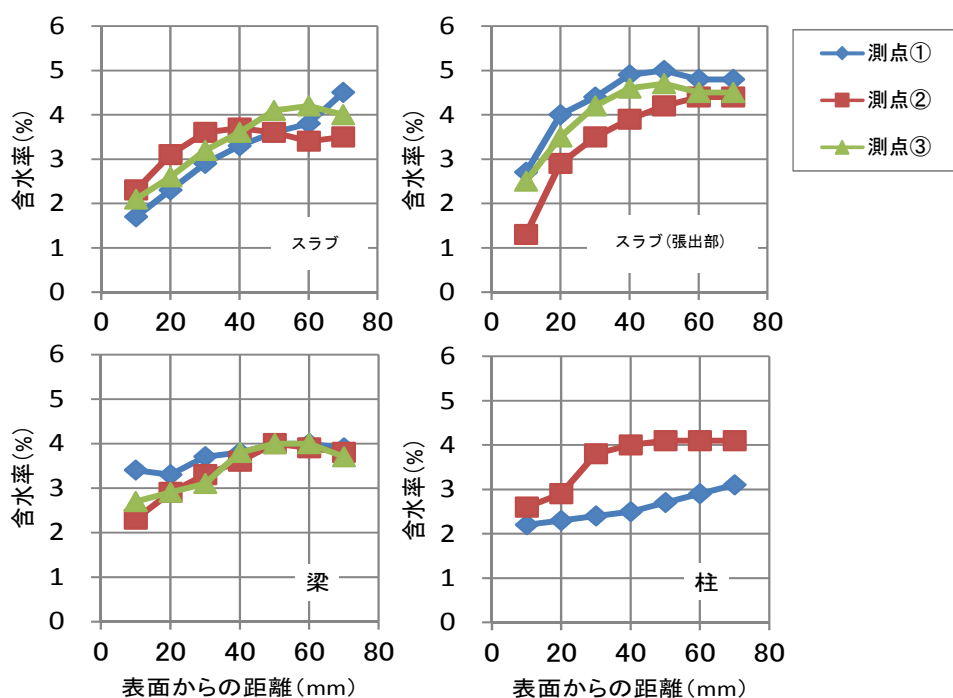


図3.24 コンクリート表面からの深さ方向の含水率

図 3.25 に A 高架橋および B 高架橋のスラブ試験体におけるコンクリート表面からの深さ方向の含水率の分布を示す。A 高架橋および C 高架橋のコンクリートの乾燥状態の表層と内部では、表層のほうが乾燥の影響を受けるため、含水率は 1~2%程度小さくなった。また、雨掛かりのある A 高架橋では、コンクリート表面から 10~50mm の範囲の含水率は 3~5%であるのに対して、C 高架橋では含水率が 2~4%と雨掛かりのないほうが、全体的に含水率が小さくなる傾向を示した。また、A 高架橋において、湿潤状態を 1 日間保つことで、コンクリート表面から 10~20mm の範囲の含水率が大きくなり、コンクリート内部と同程度の含水率となった。さらに、3 日間湿潤状態を保つとコンクリート表面から 10~20mm の範囲の含水率は、コンクリート内部の含水率よりも大きくなった。ただし、3 日間湿潤状態を保つことで含水率が変動する範囲はコンクリート表面から 10~30mm の範囲であり、コンクリート表面から 40~60mm の範囲における含水率の変動は小さかった。

以上のことから、雨掛かりのある構造物では、ない場合よりもコンクリート中の含水率が大きくなる傾向を示し、特に、コンクリート表面からの 30mm 程度の範囲において乾湿繰り返しによる影響を受け、含水率の変動が内部よりも大きくなるものと推測される。このことにより、雨掛かりがある場合、水分供給に伴いコンクリート中の含水率が大きくなり、中性化による鉄筋腐食において、かぶり側が腐食しやすい環境となるものと考えられる。

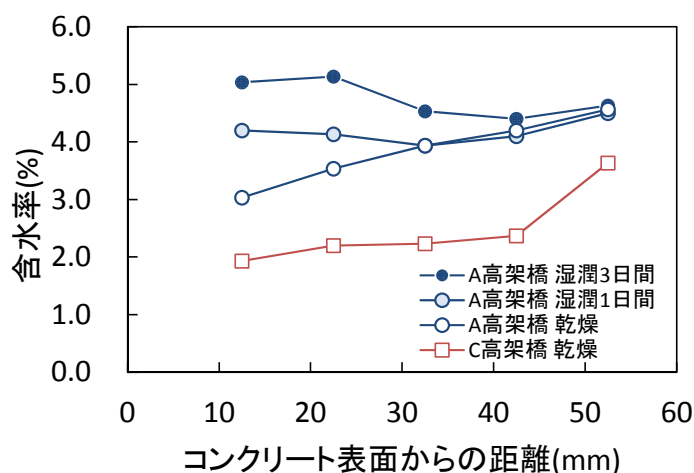


図3.25 コンクリート表面からの深さ方向の含水率

3.8 鉄筋腐食の進展機構

実構造物より採取した鉄筋の断面観察の結果から、中性化の進行が鉄筋背面まで達していない場合では鉄筋の内部では腐食深さは著しく小さいが、中性化の進行が鉄筋背面に達することで、内部においても腐食が開始することが示されている。また、4章にて後述するが腐食促進試験の中性化を想定した条件では、腐食減量・質量減少率と中性化残りの関係を示している。これより、中性化残りが小さいと腐食面積率および質量減少率が大きくなる傾向を示した。これは、鉄筋の腐食において、中性化の進行が影響を及ぼすものであり、中性化により劣化した実構造物より採取した鉄筋の分析結果と同様の傾向を示している。そこで、中性化の進展を加味した鉄筋腐食の進展機構を図3.26に中性化における鉄筋腐食の進展の概念図として示す。潜伏期において、中性化の進行に伴い中性化残りが10mmとなった時点において鉄筋の腐食が開始する。ただし、中性化残りが10mmとなった時点においては、鉄筋のかぶり側が腐食対象範囲となり、鉄筋の背面側は、腐食対象範囲とはならない。中性化が進展し、中性化深さがかぶりと鉄筋直径-10mm以上となった時点で鉄筋円周における腐食対象範囲が鉄筋全周となるものと考えた。鉄筋円周における腐食対象範囲の算出方法を式3.7に示す。

$$F \leq C-10$$

$$R=0$$

$$C-10 < F < C+D-10$$

$$R = D \cdot \cos^{-1}(2(D-F-C+10)/D) \quad \dots \dots \dots (式 3.7)$$

$$F \geq C+D-10$$

$$R = \pi D$$

ここに、 F ：中性化深さ $F=a\sqrt{t}$ (mm)， a ：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)，

C ：かぶり (mm)， D ：鉄筋径 (mm)， R ：鉄筋円周における腐食対象範囲 (mm)

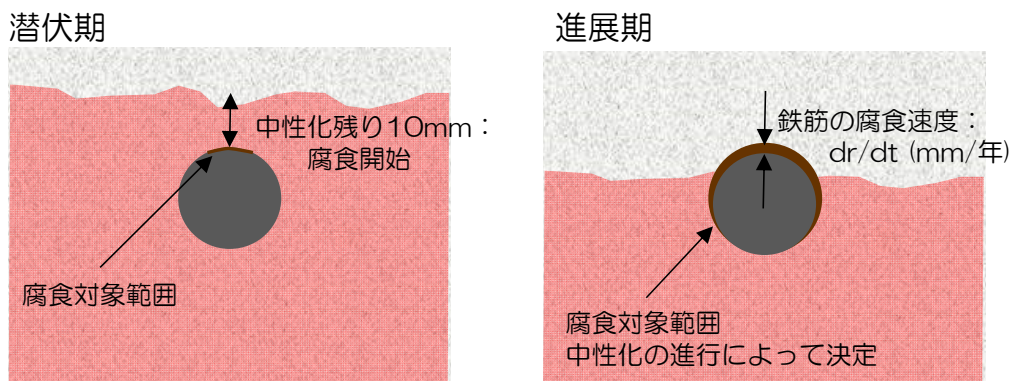


図3.26 中性化における鉄筋腐食の進展機構の概念図

図 3.26 および式 3.1 に示す中性化の進展を加味した鉄筋腐食の進展機構を用いた腐食対象範囲の算出事例を以下に示す。腐食対象範囲は表 3.10 に示すケースにて実施した。算出ケースでは、かぶりが 50mm、鉄筋径が 16mm で同一として、中性化速度係数を 4.90~8.49mm/√年に変化させた場合における腐食対象範囲を算出した。図 3.27 に腐食対象範囲の算出結果を示す。

算出ケースの No.1 では、経過年数 23 年で中性化残りが 10mm となって腐食が開始し、経過年数 44 年で腐食対象範囲が鉄筋円周において全周となる。算出ケース No.3 では、経過年数 67 年で中性化残りが 10mm となって腐食が開始し、経過年数 131 年で腐食対象範囲が鉄筋円周において全周となる。算出ケース No.1 と No.3 では、中性化残りが 10mm となる時点の経過年数の差は、44 年であるが、中性化の進展を加味することで、腐食対象範囲が鉄筋円周において全周となる経過年数の差は、87 年となる。中性化の進展を加味した鉄筋腐食の進展機構を用いることで、鉄筋腐食の進展において、中性化速度係数および鉄筋径、かぶりの影響を反映することが可能となる。

次に、この中性化の進展を加味した鉄筋腐食の進展機構を用いて、中性化により劣化した実構造物から採取した鉄筋の質量減少量との比較を行った。検証に用いる対象構造物は、表 3.8 および表 3.9 における No.2 の分析試料を採取したスラブ試験体とした。表 3.11 に対象構造物の諸元を、表 3.12 に対象構造物より採取した鉄筋のかぶりおよび質量減少量を示す。表 3.11 における分析試料 No.2-1 が表 3.9 おいての分析試料 No.2 であり、断面観察および腐食生成物の分析に用いた試料となる。分析試料 No.2-1 の質量減少率は、断面観察により求めた断面減少率より算出している。また、分析試料 No.2-1 では断面観察に用いた箇所と近傍の長さ 80mm 程度の範囲を分析試料として、

表3.10 腐食対象範囲の算出ケース

Case No.	かぶり(mm)	鉄筋径(mm)	経過年数(年)	中性化深さ(mm)	中性化速度係数(mm/√年)
No.1	50	16	50	60	8.49
No.2			100	60	6.00
No.3			150	60	4.90

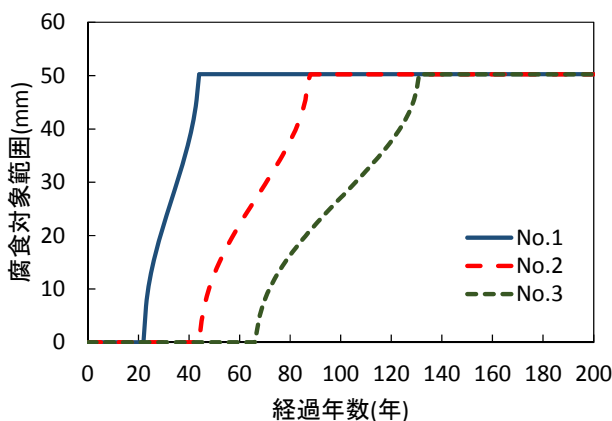


図3.27 腐食対象範囲の算出結果

表3.11 対象構造物およびコンクリートの諸元

分析試料 No.	構造物種類	部材	供用年数 (年)	中性化期間 (年)	腐食期間 (年)	圧縮強度 (N/mm ²)	全塩分量 (kg/m ³)
No.2-1	A 高架橋 ^{※1}	スラブ	55	55	45, 10 ^{※2}	13.0	0.14
No.3-1	B 高架橋	スラブ	64	32	32	22.7	—
No.4-1	C 高架橋	スラブ	87	87	87	23.8	—

※1 A 高架橋が供用年数 45 年時に実構造物から 1×2m 範囲のスラブを切出して保管

※2 45 年間は雨掛かりのない環境, 10 年間は雨掛かりのある環境

表3.12 分析試料のかぶりと断面減少量の測定結果

鉄筋 分析試料	経過年数 雨掛かりの有無	鉄筋径 (mm)	中性化深さ (mm)	かぶり (mm)	断面減少量 (mm ²)
No.2-1	45 年 雨掛かり なし 10 年 雨掛かり あり	φ8	42.1	8.1	2.36 ^{※1}
No.2-2			42.1	8.8	2.95
No.2-3			42.1	20.1	1.35
No.2-4			42.1	20.1	1.54
No.2-5			50.8	4.3	2.89
No.2-6			50.8	17.7	1.86
No.2-7			50.8	36.0	1.97
No.2-8			57.1	36.0	1.83
No.3-1	32 年, 雨掛かり なし	φ19	52.4	30.0	1.98 ^{※1}
No.4-1	87 年 雨掛かり なし		63.8	25.0	3.26
No.4-2			63.8	25.0	4.21
No.4-3			63.8	25.0	4.45
No.4-4			63.8	26.0	3.06
No.4-5			63.8	27.0	4.58

※1 断面観察により算出した断面減少量

採取後、クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬させ、腐食生成物を除去した後の質量を求めた。分析試料 No.2-2～No.2-8 は、鉄筋の長さが 80mm 程度となるように採取し、その後、クエン酸二アンモニウム水溶液浸漬により、腐食生成物を除去した後に質量を求めた。分析試料の腐食前の質量(単位長さに対する質量)は、不明であることから、分析試料 No.2-1 の断面減少量は断面観察により求めた断面減少量より算出した。そして、No.2-1 の断面減少量と腐食生成物を除去した後の単位長さに対する質量との関係から、分析試料 No.2-2～No.2-8 の断面減少量を算出した。また、鉄筋径 19mm の No.3-1 および No.4-1～No.4-5 においても、No.3-1 の断面観察より求めた断面減少量と単位長さに対する質量との関係から断面減少量を求めた。

まず、No.3-1 および No.4-1～No.4-5 において、雨掛かりのない場合の断面方向の腐食速度を算出した。B, C 高架橋の経過年数と中性化深さから中性化の進行を想定し、経過年数期間における腐

食対象範囲の累計を、式 3.7 を用いて求めた。その腐食対象範囲の累計に鉄筋断面方向の腐食速度 dr/dt を乗ずることで鉄筋の断面減少量となることから表 3.12 の断面減少量から、式 3.8 により腐食速度 dr/dt を求めた。

図 3.28 に断面方向の腐食速度の算出結果を示す。雨掛かりのない B, C 高架橋における鉄筋の腐食速度は、 $0.7\sim 1.4\times 10^{-3}$ (mm/年)となった。次に、A 高架橋から採取した分析試料は、45 年間は雨掛かりがない環境で、スラブ試験体を切出してから 10 年間において雨掛かりのある環境で腐食したものである。そこで、断面方向の腐食速度を算出するにあたり、雨掛かりのない 45 年間では、No.3-1 および No.4-1~No.4-5 から求めた腐食速度の平均値 1.0×10^{-3} (mm/年)として、その後の雨掛かりのある環境下での腐食速度を、No.3-1 および No.4-1~No.4-5 と同様に断面減少量および式 3.2 により求めた。

図 3.28 に鉄筋の腐食速度とかぶりの関係を示す。また、図中には参考文献 3-15) 3-16)に示されている中性化による鉄筋の腐食速度をあわせて示す。雨掛かりのある No.2-1~No.2-8 の腐食速度は、 $1.4\sim 5.2\times 10^{-3}$ (mm/年)となり、雨掛かりのない場合よりも大きくなった。さらに、雨掛かりのある場合は、かぶりが小さいほど腐食速度が大きくなる傾向を示した。これは、図 3.25 のコンクリート中の含水率分布で示したように、雨掛かりによる水分供給によって乾湿繰り返しの変動が、かぶりが小さいほど大きくなるものが影響しているものと考えられる。なお、雨掛かりがない場合は、コンクリート中の含水率の変動は少なく、鉄筋の腐食速度もかぶりに応じての変化は少ないものと推測する。

なお、雨掛かりのある No.2-1~No.2-8 の腐食速度は、 $1.4\sim 5.2\times 10^{-3}$ (mm/年)となり、2.4 の既往の研究で示されている $0.001\text{mm/年}\sim 0.006\text{mm/年}$ と同様の傾向を示している。

$$M_n = \frac{dr}{dt} \cdot \sum_{i=1}^n R_n \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.8)}$$

- ここに、 M_n : 経過年数 n における質量減少量 (mm²),
- dr/dt : 鉄筋断面方向における鉄筋の腐食速度 (mm/年)
- R_n : 経過年数 n における鉄筋円周での腐食対象範囲 (mm)

ここで、中性化による鉄筋コンクリート構造物の劣化予測手法を構築するにあたり、腐食速度を定式化する必要がある。腐食速度の定式化では、調査結果の近似により以下の通りとした。調査結果を近似するにあたり、かぶり 0mm における腐食速度は、コンクリートが被覆されていない鉄素地における腐食速度であるとして 8.0×10^{-3} (mm/年)とした。式 3.9 における実験定数 a , b は、雨掛かりがある調査結果 No.2-1~No.2-8 と参考文献 3-15)の腐食速度の指数近似することで、定数 $a=8.0$, $b=-0.051$ とされた。ここで、雨掛かりがある場合の腐食速度は、式 3.9 による腐食速度が実務的に用いられている腐食速度 3.0×10^{-3} (mm/年)以上となるかぶり 20mm 以上において、式 3.9 に律するとし、かぶり 20mm 以上では腐食速度 3.0×10^{-3} (mm/年)と一定であるものとした。雨掛かりのない場合には、含水率の分布と同様にコンクリート内部と表層で大きな違いがないものと考え、

No.3-1 および No.4-1～No.4-5 から求めた腐食速度の平均値 $1.0 \times 10^{-3}(\text{mm}/\text{年})$ とした。

なお、これらの実験定数は、コンクリートの品質や雨掛かりによる水分供給程度などに影響を受けるものと考えられ、今後、より詳細な検討が必要であるとする。

$C < 20\text{mm}$, 雨掛かりのある場合

$$\frac{dr}{dt} = a \cdot \exp(b \cdot C) \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.9)}$$

ここに、 dr/dt : 鉄筋断面方向における鉄筋の腐食速度 ($\times 10^{-3}\text{mm}/\text{年}$),

a, b : 実験定数 $a=5.0, b=-0.051$

$C \geq 20\text{mm}$, 雨掛かりのある場合

$$dr/dt=3.0 \times 10^{-3} (\text{mm}/\text{年})$$

雨掛かりのない場合

$$dr/dt=1.0 \times 10^{-3} (\text{mm}/\text{年})$$

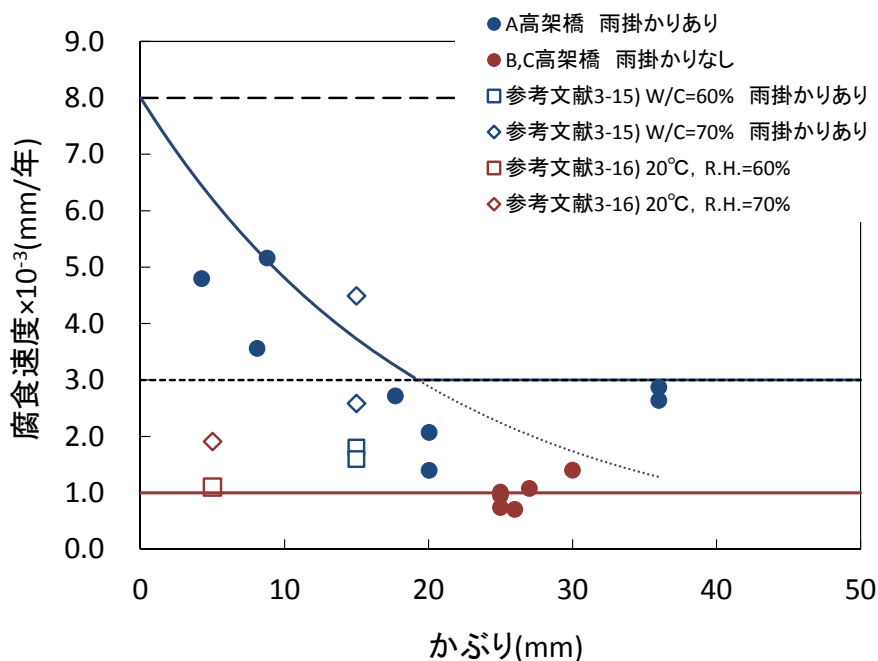


図3.28 腐食速度とかぶりの関係

3.9 まとめ

3章では、実構造物の調査結果に基づき、かぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響要因について評価した。3.2では、36基の実構造物の様々な部材において、圧縮強度、中性化深さおよび鉄筋の腐食度を調査した。

次に、3.3では、長期間供用された構造物より採取したコア供試体を分析することで、中性化の進行に伴うコンクリートの物性変化に関して把握した。また、3.4では、施工年代と中性化速度係数の関係を整理し、構造物の施工年代ごとに中性化の進行に及ぼす特徴的な要因を分析した。その結果、施工年代の違いよりも、長期間供用されていく中で、コンクリートの物性変化が大きく影響しているものと推測された。長期間供用しているコンクリートにおいては、 CaCO_3 の生成による緻密化とC-S-Hの分解による粗大化を伴いつつ細孔構造が変化しながら中性化が進行していくものと考えられ、特に長期間供用されるとC-S-Hの分解による細孔構造の粗大化の影響が大きいと考えられる。これらの細孔構造の変化には、構築直後の初期材齢におけるC-S-Hや Ca(OH)_2 など水和生成物の生成量や中性化の劣化過程における Ca(OH)_2 の消費、C-S-Hの分解速度の違いが影響を及ぼすものと考えられ、中性化の進行においては、それらも考慮して整理する必要があると考える。つまり、中性化速度係数は一定のものとして中性化が進行すると考えられてきたが、長期間供用されていく中で、空隙構造が変化し、中性化速度係数も変化する。例えば、経過年数10年時点での調査において得られた中性化速度係数を用いて、中性化の進行を予測しても、経過年数50年における中性化深さは、予測値よりも実際には大きくなる可能性がある。

3.5では、実構造物の221測点の調査結果に基づき、巨視的な観点から雨掛かりの有無が中性化、鉄筋腐食の進行およびかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響を整理し、想定腐食開始からの経過年数にて分類することで、雨掛かりが中性化による劣化に及ぼす影響を定量的に示した。その結果、腐食度Ⅱaにおける想定腐食開始からの経過年数は、雨掛かりがある箇所では平均14.8年、雨掛かりがない箇所では平均49.4年となった。

3.6では、雨掛かりの有無が腐食速度のみならず、腐食形態や腐食生成物の種類・割合にも変化を及ぼすかを確認するために、実構造物より採取した鉄筋を対象に、XRD分析による腐食生成物の同定と光学顕微鏡による断面観察を行い、詳細に分析した。雨掛かりがある場合には、腐食生成物は $\beta\text{-FeOOH}$ が生成され、若干の膨張倍率が大きくなる傾向があるものの、コンクリート中の塩化物イオン濃度が 0.14kg/m^3 程度であれば、雨掛かりの有無によらず腐食生成物の体積膨張倍率は同程度であることが確認できた。雨掛かりがある場合は、水分供給に伴いかぶり側の腐食が速くなり腐食量が多くなることで、雨掛かりがない場合よりもかぶりコンクリートに作用する応力が大きくなり、剥離・剥落し易くなることが推測された。ただし、目視では鉄筋の軸方向での腐食程度は同じであり違いは少ないと考えられたが、断面観察位置の違い（鉄筋の長手方向による腐食のバラつき）の影響に関しては、検証の余地を残した。さらに、3.7では、雨掛かりの有無によりコンクリート中の含水率の違いを把握するために、実構造物を対象にコンクリート表層から深さ方向の含水率の分布を把握した。

以上を踏まえ、3.8では、実構造物より採取した鉄筋の質量減少率の結果からかぶり質量減少率の関係を整理し、中性化による鉄筋腐食の腐食速度を定式化し、中性化の進行を加味した鉄筋腐

食の進展機構を検討した。その結果、実構造物より採取した鉄筋の断面減少量は、 $1.35\sim 2.95\text{mm}^2$ であり、かぶり大きいほど断面減少量は小さくなった。また、分析試料の断面減少量は、腐食速度が $1.4\sim 5.2\times 10^{-3}(\text{mm}/\text{年})$ の範囲となり、2.4の既往の研究で示されている $0.001\text{mm}/\text{年}\sim 0.006\text{mm}/\text{年}$ と同様の傾向を示した。腐食速度は、かぶりが 10mm 未満では $0.004\text{mm}/\text{年}$ 以上であるのに対して、かぶりが 20mm 程度では、腐食速度 $0.003\text{mm}/\text{年}$ 程度となり、鉄筋腐食の進展は、中性化の進行のみならず、かぶりの大小によって腐食速度が異なることが示された。

【3章 参考文献】

- 3-1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，2007.
- 3-2) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2012
- 3-3) 石橋忠良，古谷時春，浜崎直行，鈴木博人：高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究，土木学会論文集 No.711/V-56，pp.125-134，2002.8
- 3-4) 松田芳範，上田洋，石田哲也，岸利治：実構造物調査に基づく中性化に与えるセメントおよび水分の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.629-634，2010.
- 3-5) 社団法人セメント協会セメント化学専門委員会：セメント硬化体の炭酸化，セメント・コンクリート，No.574，pp.26-32，1994.
- 3-6) 日本コンクリート工学会：社会情勢とコンクリート産業構造の関連性検討委員会報告書，2012
- 3-7) 前田聡，武若耕司，山口明伸：塩害データベースを用いたコンクリート中への塩化物イオン拡散の定量評価，土木学会論文集 No.760/V-63，pp.109-120，2004.5
- 3-8) レディーミクストコンクリートの品質確保について，平成15年10月2日，国官技第185号
- 3-9) レディーミクストコンクリートの品質確保についての運用について，平成15年10月2日，国コ企第3号
- 3-10) 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp.154-165，2013.
- 3-11) 奥野翔也，本田正和，佐藤眞市，高谷哲：鉄腐食生成物の環境依存性に関する基礎的研究，物理化学的解釈に基づく電気化学的計測手法の体系化に関するシンポジウム論文集，pp361-366，2015.
- 3-12) Cornell, R. M. and Schwertmann, U. : The Iron Oxides, VHC, 1996.
- 3-13) 三沢俊平：鉄鋼腐食科学の温故知新，材料と環境，Vol.50，pp.538-545，2001.
- 3-14) J.L.JAMBOR, J.E.DUTRIZAC : Occurrence and Constitution of Natural and Synthetic Ferrihydrite, a Widespread Iron Oxyhydroxide, Chemical Reviews, Vol.98, pp.2549-2585, 1998.
- 3-15) 鳥取誠一：鉄筋腐食に関する暴露試験等に基づいたコンクリート構造物の劣化予測，京都大学博士論文，2003
- 3-16) 森永繁：鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究，東京大学博士論文，1986.

4章 モルタル供試体を用いたひび割れ発生に及ぼす実験的検討

4.1 はじめに

2章における既往の研究を整理した結果より、塩害におけるかぶりコンクリートの剥離・剥落は、中性化によるものよりも早期に顕著化し、劣化が甚大になることが示された。塩害では、早期に劣化が顕著化することが実構造物の調査結果からも示されており、被害が甚大な劣化事例が多く報告されている。そのことから、塩害に関する劣化では、これまでに数多くの研究がなされてきた。一方で、中性化による劣化の進行は塩害と比較すると緩慢であることから、高架橋の高欄などのかぶりが小さい箇所において発生すること⁴⁻¹⁾⁴⁻²⁾が多く報告されており、かぶりがある程度確保されている場合での劣化事例は、極めて少ないのが現状である。これは、3.5における中性化により劣化した構造物の調査結果に基づく分析結果からも上記の傾向を示している。

3章では、中性化によるかぶりコンクリートの剥離・剥落について、雨掛かりの有無に着目して整理、分析した。その結果、雨掛かりがある場合には、鉄筋の断面方向において、鉄筋のかぶり側に腐食が偏ることで、雨掛かりがない場合より、剥離・剥落し易い傾向が示された。そこで、塩害と中性化による鉄筋腐食におけるかぶりコンクリートの剥離・剥落について比較、検討した場合にも同様に腐食が偏ることが、かぶりコンクリートの剥離・剥落に影響を及ぼすものと考えられる。特に、塩害の場合においては、孔食といったように鉄筋の長手方向においても、腐食が著しくなる腐食形態になり易いことが知られている。ここで、JCI-SC1 コンクリート中の鋼材腐食評価方法⁴⁻³⁾によると鉄筋の腐食形態は、表面が均一に腐食するものと局所的に著しく腐食するものに大別される。表面が均一に腐食する形態は、微視的なアノードとカソードからなるマイクロセルを多数形成し、鋼材表面から全面的に腐食するものと考えられている。また、局所的に著しく腐食する腐食形態は、微小面積のアノードと広い面積のカソードが乖離することでアノードに腐食が集中し、腐食深さが大きくなり、塩害では孔食のように局所的に著しく腐食する形態になり易いと考えられている。塩害による劣化進行が中性化によるものよりも早期になることは、腐食の進展速度が塩害のほうが速いのみならず、腐食形態の違いも影響するものと想定した。

そこで、4.2 では、塩害と中性化における劣化機構の違いが腐食形態に及ぼす影響を、乾湿繰返しによる腐食促進試験を行うことで検証した。腐食促進試験後のモルタル供試体より腐食した鉄筋を採取し、採取した鉄筋を対象に腐食減量、腐食面積率および3次元の形状測定による腐食深さを求めることで腐食形態の違いを把握した。腐食形態に及ぼす要因として塩害では、鉄筋位置での塩化物イオン濃度の存在程度により変化するものと想定した。また、海砂の使用など内在塩分による塩害の場合、鉄筋位置での塩化物イオンは、ある程度、均一に存在するものと考えられ、そのような場合では、腐食形態は均一的に腐食するものと考えた。一方で、外来塩分による塩害の場合では、かぶりコンクリートに塩化物イオンが浸透することに伴い、鉄筋位置における塩分濃度にバラつきが生じ、腐食形態は局所的に著しく腐食する形態になり易いと考えた。そこで、腐食促進試験における試験条件として、初期の鉄筋位置での塩化物イオン濃度（外来塩化物イオンおよび内在塩化物イオン）およびかぶりの違いに着目した。中性化においては、3.5に示したように、鉄筋断面方向における腐食の偏りは、中性化の進行程度と水分の供給によって異なることが示されている。鉄筋

の長手方向における腐食形態についても、中性化の進行程度と酸素および水分の浸透程度によって、腐食形態に影響を及ぼすと考えた。中性化を想定した腐食促進試験では、中性化深さと、酸素および水分の浸透に影響を及ぼす水セメント比とかぶりに着目して、検証した。

4.3 では、この腐食形態の違いがモルタル表面のひずみおよびひび割れ発生に及ぼす影響を検証する。モルタル表面のひずみ挙動は、乾湿繰返しによる腐食促進試験における腐食促進期間を通じたモルタル表面のひずみを連続的に求めることで把握した。そのモルタル表面のひずみ挙動と 4.2 において求めた腐食減少/腐食面積との関係を示すことで腐食形態の影響を分析した。

4.4 では、腐食生成物の体積膨張倍率を算出し、塩害と中性化の劣化機構の違いが体積膨張倍率に与える影響を示す。腐食促進試験後の鉄筋から腐食生成物を採取し、X線回折リートベルト法により腐食生成物の結晶相の種類を定量を行った。既往の研究では、塩害によるコンクリート中の腐食生成物は、 Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ 、 $\beta\text{-FeOOH}$ 、 $\gamma\text{-FeOOH}$ が主であり、腐食生成物の体積膨張倍率は 2.5～3.0 程度であるとされている。これら腐食生成物のうち、 $\beta\text{-FeOOH}$ は、塩化物イオンの共存した環境において生成され、体積膨張倍率は 4.2 と、他の生成物よりも大きいことから腐食膨張に大きく寄与しているものと考えられる。中性化の場合、塩害と比較するとコンクリート中に存在する塩化物イオンは極端に小さいことから、中性化による鉄筋腐食では、腐食生成物の種類および割合、特に、 $\beta\text{-FeOOH}$ の有無または含有割合が塩害によるものと異なり、腐食生成物の膨張割合も変化するものと考えられる。また、高谷ら²⁻³³⁾は、塩害における実環境下にて生成される腐食生成物と電食実験での腐食生成物の種類が異なるものとして、電食実験により腐食した鉄筋から採取した腐食生成物の種類と割合を示している。これによると、電食実験による腐食生成物の中には、一般的に知られていない腐食生成物の塩化酸化鉄(III)カルシウムが存在することを示しており、塩化酸化鉄(III)カルシウムの体積膨張倍率は 6.9 と極端に大きくなることから電食実験における腐食生成物の体積膨張倍率が大きくなることを示している。以上のことから、塩害による鉄筋腐食においては $\beta\text{-FeOOH}$ および塩化酸化鉄(III)カルシウムの体積膨張倍率の大きい生成物が生成されるが、中性化においてはそれらの腐食生成物の有無や割合が影響し、塩害よりも体積膨張倍率が小さくなるものと考えられる。つまり、中性化による鉄筋腐食では、塩害による鉄筋腐食と比較し、同じ腐食量であってもかぶりコンクリートに作用する応力が異なり、ひび割れ発生に至る過程が異なるものと想定し、本章にて中性化と塩害における腐食生成物の違いに関する影響について検証した。

4.2 劣化機構の違いが鉄筋の腐食形態に及ぼす影響に関する検討

4.2.1 塩害および中性化の劣化機構の違いに着目した実験（シリーズ 1）

(1) 実験概要

(1.1) 使用材料、配合および供試体

表 4.1 にモルタル供試体の使用材料を、表 4.2 にモルタル供試体中に設置した鉄筋の化学成分表を示す。セメントは普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm^3 ）を、細骨材は君津産山砂（表乾密度 2.64g/cm^3 ）を用いた。表 4.3 にモルタルの配合表を示す。モルタルの配合は、水セメント比が 65%、砂セメント比が 3.0 を基本とした。また、中性化を模擬した条件において腐食を著しく促進させるために、比較として水セメント比が 150%、砂セメント比が 5.0 の配合も用いた。水セメン

ト比 150%のモルタルでは、材料分離を抑制するために、アルキルアリルスルホン酸塩およびアルキルアンモニウム塩系の高機能特殊増粘剤を単位水量の 3.0wt%を内割り添加した。モルタル供試体の形状は、60×60×80mmの角柱供試体として、かぶり 5, 7.5, 10mm となるように鉄筋を配置した。鉄筋は、径 10mm, 長さ 90mm のみがき丸鋼で、型枠設置前に 80 番の研磨紙を用いて粗研磨し、アセトンにて表面の油分を除去した。なお、鉄筋の両端部から 15mm ずつの範囲はエポキシ樹脂にて被覆し、鉄筋の長手方向で 60mm の範囲が腐食するようにした。また、モルタル供試体は暴露面一面以外をエポキシ樹脂にて被覆し、暴露面の一面より水分や酸素および塩化物イオン等の劣化因子が浸透するようにした。各水準において、モルタル供試体は、腐食減量・腐食面積率測定用のモルタル供試体 (n=2) と、モルタル表面のひずみ測定用のモルタル供試体 (n=2) を作製した。図 4.1 にモルタル供試体の概要を示す。表面のひずみ測定用のモルタル供試体は、腐食減量・腐食面積率測定用のモルタル供試体と同寸法で同様に作製し、防水型ひずみゲージを供試体の曝露面中央部で鉄筋直角方向に添付した。つまり、表面のひずみ測定用のモルタル供試体は、暴露面の一部が防水型ひずみゲージに被覆されており、実質の暴露面の範囲が、腐食減量・腐食面積率測定用のモルタル供試体よりも小さい状態である。

表4.1 使用材料

材料	記号	物性
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³)
細骨材	S	君津産山砂 (表乾密度 2.64 g/cm ³)
増粘剤	Vis	アルキルアリルスルホン酸塩およびアルキルアンモニウム塩系の高機能特殊増粘剤

表4.2 鉄筋の化学成分表

記号	化学成分(%)				
	C	Si	Mn	P	S
SGD3M	16	19	65	11	42

表4.3 モルタルの配合表

W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)			
		W	C	S	Vis
65	3.0	309	475	1427	—
150	5.0	404	270	1348	W*3.0%

モルタル供試体60×60×80mm

防水型ひずみゲージ60×25mm
(表面のひずみ測定用の供試体のみ配置)

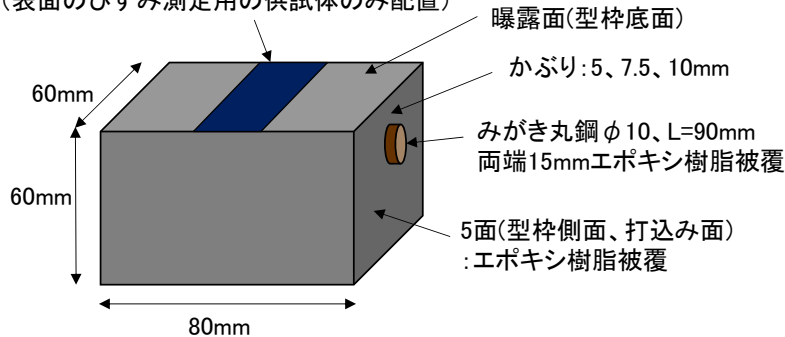


図4.1 モルタル供試体の概要

(1.2) 養生条件

モルタル供試体は、打込みから材齢 24 時間までは封緘養生とし、その後に脱型して材齢 7 日まで標準水中養生もしくは封緘養生とした。ここで、鉄筋の腐食形態は、鉄筋位置の塩化物イオン濃度および中性化深さの程度によって異なるものと考え、モルタル供試体の水準として初期の塩化物イオン浸透深さと中性化深さを変化させた。まず、初期の塩化物イオン浸透深さと中性化深さを把握するため、腐食促進試験に用いるモルタル供試体とは、別に、鉄筋を配置していない同寸法、同水セメント比のモルタル供試体を作製した。塩害を模擬する条件では、モルタル供試体の曝露面を上面とし、供試体全体が 10%NaCl 水溶液中に浸るように静置した。中性化を模擬した条件では、封緘養生後に材齢 14 日まで恒温恒湿度室内 (20℃, 60%RH) での気中養生とし、その後、二酸化炭素濃度 5%の促進中性化環境下 (20℃, 60%RH) に曝露した。それぞれの促進条件において、任意の塩水浸漬および促進中性化期間でモルタル供試体を割裂して、0.1mol/L 硝酸銀水溶液の噴霧にて塩化物イオンの浸透深さを、フェノールフタレイン溶液の噴霧にて中性化深さを求めた。図 4.2 に塩化物イオンの浸透深さと中性化深さの結果を示す。

次に、図 4.3 にモルタル供試体の水準と養生条件を示す。塩害を模擬した条件のモルタル供試体は、以下の 3 水準とした。1 つは、塩化物イオンが浸透していないものとして標準水中養生を材齢 14 日まで継続した。他 2 つは、鉄筋表面までと芯かぶりまで塩化物イオンが浸透している状態を模擬するため、それぞれの期間、10%NaCl 水溶液に浸漬させた。図 4.2 より初期塩化物イオンの浸透深さを 5mm とする水準では材齢 14 日まで 10%NaCl 水溶液に浸漬させ、浸透深さを 10mm とする水準は材齢 35 日、浸透深さ 15mm とする水準では材齢 63 日まで、塩水浸漬を継続した。

中性化を模擬した条件では、中性化深さが所定の深さとなるまで促進中性化環境下に曝露した。その後、供試体は恒温恒湿度室内での気中養生とした後に腐食促進試験に供した。

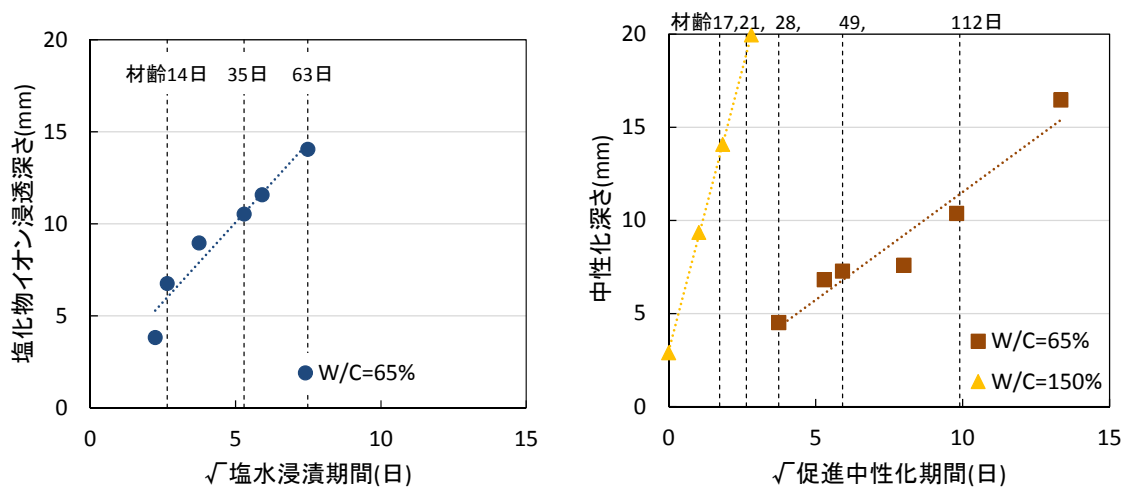
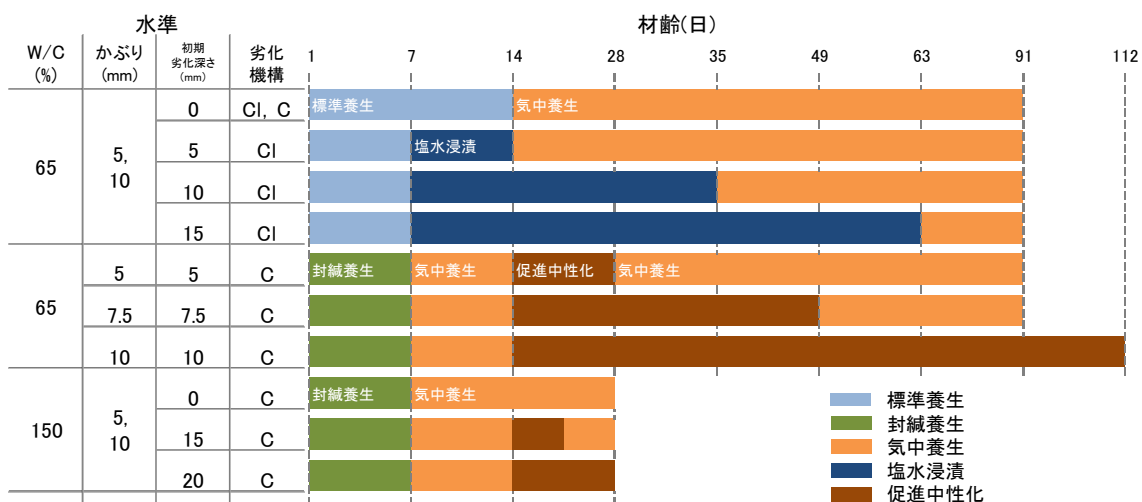


図4.2 初期塩化物イオン浸透深さおよび中性化深さの経時変化



供試体記号：(W/C)-(かぶり)-(初期劣化深さ)-(劣化機構 CI 塩害, C 中性化)

図4.3 モルタル供試体の水準と養生条件

(1.3) 腐食促進試験

(1.3.1) 試験概要

腐食促進試験は、塩害を模擬した条件では 40℃、10%NaCl 水溶液に 3 日間浸漬、その後 20℃、60%RH の環境下で 4 日間乾燥させる乾湿繰返しを 1 サイクルとした。中性化では、40℃の水道水に 3 日間浸漬、4 日間の乾燥とした。腐食促進試験では、腐食減量・腐食面積率測定用のモルタル供試体 (n=2) をそれぞれのかぶり、養生条件ごとに準備した。モルタル表面のひずみ測定用のモルタル供試体 (n=2) は、かぶり 5mm でそれぞれの養生条件ごとのモルタル供試体 (n=2) を試験に供した。

(1.3.2) 腐食減量・腐食面積率

腐食減量・腐食面積率用のモルタル供試体では、塩害を模擬した条件の腐食促進期間 65 日および 157 日（9 サイクル後、22 サイクル後）において、モルタル供試体を割裂し、鉄筋を採取して腐食減量・腐食面積率を求めた。中性化を想定した条件では、水セメント比 65%で腐食促進期間 171 日、水セメント比 150%で腐食促進期間 121 日とした。腐食面積率は、採取した鉄筋に透明シートを巻きつけ、鉄筋表面上の明らかに腐食している部分を写し取り、二値化画像処理にて腐食している面積を求めた。その面積と鉄筋表面積（鉄筋円周×60mm の範囲）に対する比率を腐食面積率として算出した。腐食減量は、腐食面積率を測定した後、60℃、10%クエン酸二アンモニウム水溶液に 12 時間程度浸漬させ、腐食生成物を除去した後に鉄筋重量を測定して元の鉄筋重量に対する質量減少率を算出した。なお、塩害を想定した条件では、それぞれの腐食促進期間におけるモルタル供試体中の全塩化物イオン濃度分布を把握するため、割裂したモルタル供試体を表層から 7~10mm 程度ごとの層に切断して、JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法に準拠して、各層の全塩化物イオン量を求めた。

また、鉄筋の腐食形態は、酸素および水分の供給量にも影響を受けるものと考え、腐食促進試験を開始する前のモルタル供試体の表層を対象に、酸素および水分の透過性を間接的に評価するため、それぞれのモルタル供試体の細孔径分布を求めた。細孔径分布の分析用試料は、モルタル供試体の表層から 7~10mm 程度に切断した後、数 mm 角に粉碎した。試料をアセトンに浸漬して水分を除去、真空乾燥器中で脱気・乾燥により、試料を作製した。その分析用試料を水銀圧入法により 0.006~6 μ m の範囲における細孔径の容積を測定した。

中性化を模擬した条件では、モルタル供試体を割裂し、腐食した鉄筋を採取すると同時に、割裂面にフェノールフタレイン溶液を噴霧して腐食減量・腐食面積率を測定した時点での中性化深さと鉄筋のかぶりの実測値を求めた。

(1.3.3) 3次元形状測定

腐食生成物を除去した鉄筋を対象に腐食深さを求めるため、3D 測定マイクロスコープを用いて鉄筋形状を測定した。形状測定では、3D 画像の取得と線分析として鉄筋の長手方向の腐食深さを求めた。また、線分析における腐食深さの測点（24 μ m 間隔、約 2000 点）を対象として変動係数を算出し、腐食深さのバラつきを求めた。局所的な腐食形態では、腐食深さが著しく大きくなる箇所があることから、腐食深さの測点のバラつきが大きくなり、変動係数が大きくなるものである。

(2) 実験結果および考察

(2.1) 腐食減量および腐食面積率

写真 4.1 に腐食促進試験後に採取した鉄筋の腐食状況を、図 4.4 に腐食面積率と質量減少率を示す。採取した鉄筋は、腐食促進期間が 65 日のかぶり 5mm で初期塩化物イオン浸透深さが 5mm の供試体（65-5-5-Cl）の左側のように表面が均一的に腐食している範囲と、同条件（65-5-5-Cl）での表面のひずみ測定用のモルタル供試体（腐食促進期間 141 日）の右側のように、腐食深さが深く、著しく腐食している範囲が確認された。

塩害を模擬した条件では、腐食期間 65 日において初期塩化物イオンを 15mm まで浸透させたもの (65-10-15-Cl) 以外において腐食が確認された。図 4.4 より、腐食促進期間が 65 日の場合、かぶり 5mm、初期塩化物イオン浸透深さ 10mm の供試体 (65-5-10-Cl) において、腐食面積率が最も大きくなり 41.1%であり、鉄筋のかぶり側のみに腐食が確認された。また、かぶり 10mm、初期塩化物イオン浸透深さ 15mm (65-10-15-Cl) では、腐食促進期間 65 日では腐食が確認されなかった。腐食促進期間 157 日では、全ての供試体において腐食面積率が 50%以上となり、供試体内部側の面まで鉄筋腐食が進行していることが確認された。腐食面積率と質量減少率の経時変化から、かぶり 5mm のものでは、初期塩化物イオン浸透深さが大きいものほど、腐食の程度が大きくなる傾向を示した。しかし、かぶり 10mm のものに注目すると、65-10-15-Cl は、他条件の供試体と比較して、腐食面積率および質量減少率が小さくなる傾向となった。65-10-15-Cl では、腐食促進試験開始時点での塩化物イオン浸透深さが他条件よりも大きい、塩水浸漬期間が他条件よりも長いことから、塩水浸漬期間中もセメントの水和が進行したことや塩化物イオンが固定化することで、モルタルの細孔構造が変化し、緻密化したことが影響したと考えられる。

中性化を模擬した条件では、水セメント比 65%において、かぶり 10mm (65-10-10-C) で腐食面積率 35.8%、質量減少率 0.22%と、かぶり 5mm と 7.5mm よりも腐食程度が小さくなった。また、水セメント比 150%のかぶり 5mm では、初期の中性化深さが 20mm (150-5-20-C) で、腐食面積率 100%、質量減少率 1.34%と、初期の中性化深さが 0mm と 15mm のものよりも腐食程度が大きくなった。つまり、水セメント比 65%と 150%のそれぞれの条件において、かぶりが小さいほど、また初期の中性化深さが大きいほど腐食の程度は大きくなった。なお、初期に中性化が進行していない 65-5-0-C では、腐食促進期間 171 日においても腐食が確認されなかった。



(a) 65-5-5-Cl 腐食促進 65 日 (b) 65-5-5-Cl ひずみ測定 (c) 65-5-0-C 腐食促進 171 日
腐食促進 141 日

写真4.1 腐食促進試験後の鉄筋の腐食状況

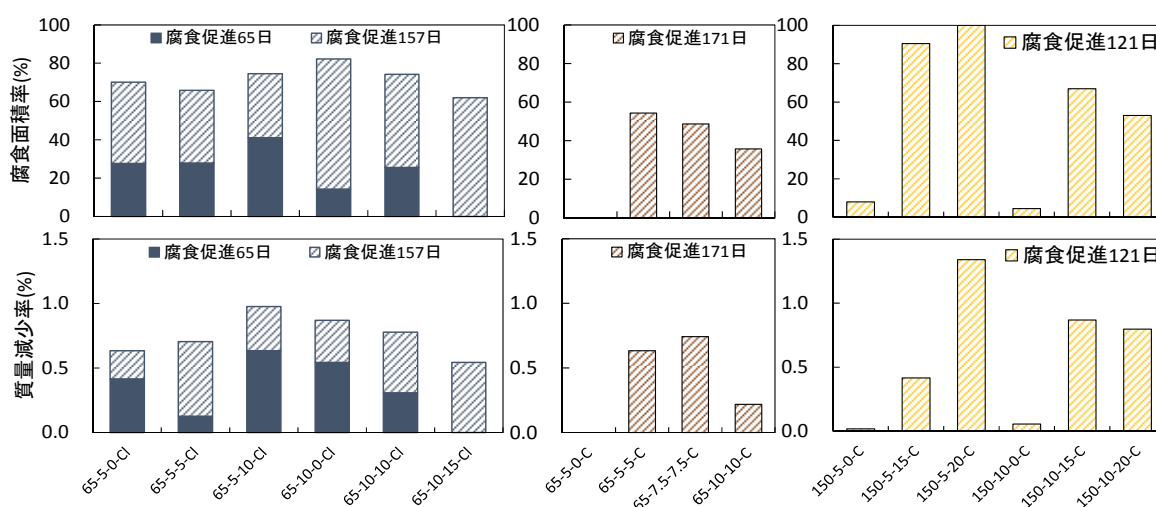


図4.4 腐食面積率と質量減少率の結果

(2.2) 腐食減量および腐食面積率に及ぼす影響

塩害を模擬した条件の腐食促進試験において、65-10-15-CIは、他条件の供試体と比較して、腐食面積率および質量減少率が小さくなる傾向となった。このことから、腐食程度は、腐食促進期間中の水分および酸素の供給程度によって影響を受けると考えられる。

ここで、図 4.5 に塩害を模擬した条件での各腐食促進期間での全塩化物イオン濃度分布を示す。65-5-0-CI、65-5-5-CI および 65-5-10-CI では、腐食促進開始後から 1, 2 層目（表面からの深さ 0～10mm, 10～20mm）の全塩化物イオン量が、腐食促進 65 日、157 日と経過すると大きく増加している。それに対して、65-10-15-CI では、2 層目の全塩化物イオン量の増加量が小さかった。つまり、65-10-15-CI では、腐食促進試験に伴う塩水の乾湿繰り返しによる塩化物イオンの浸透が他の供試体よりも小さくなった。ここで、図 4.6 に腐食促進試験開始前におけるモルタル供試体 1 層目の細孔径分布を示す。65-10-15-CI で塩化物イオンの浸透性が小さくなった要因として、細孔径分布の結果より、65-10-15-CI では、0.1 μ m 付近の細孔量が他条件のモルタル供試体よりも若干ではあるが小さくなったことが影響していると考えられる。

次に、図 4.7 に腐食減量・腐食面積率測定用のモルタル供試体を対象に、腐食促進期間が 65 日と 157 日におけるかぶり位置（鉄筋表面）での全塩化物イオン量と腐食面積率および質量減少率の関係を示す。なお、かぶり 10mm のモルタル供試体におけるかぶり位置での全塩化物イオン量は、1 層目と 2 層目の全塩化物イオン量の平均値とした。かぶり位置での全塩化物イオン量が大きくなると腐食面積率および質量減少率は大きくなる傾向を示した。

以上のことより、65-10-15-CI では、塩水浸漬期間が他条件よりも長いことから、塩水浸漬期間中もセメントの水和が進行することや塩化物イオンが固定化されることで、モルタルの細孔構造が変化し、緻密化したものと推測する。そして、腐食促進開始後においては、鉄筋位置での酸素と水分の供給量が他条件よりも少なくなることで鉄筋の腐食面積率および質量減少率が小さくなったものと考えられる。つまり、腐食の進展においては、かぶりコンクリートの緻密性やかぶりの大きさなどによる酸素および水分の供給程度に大きく影響を受けると示された。

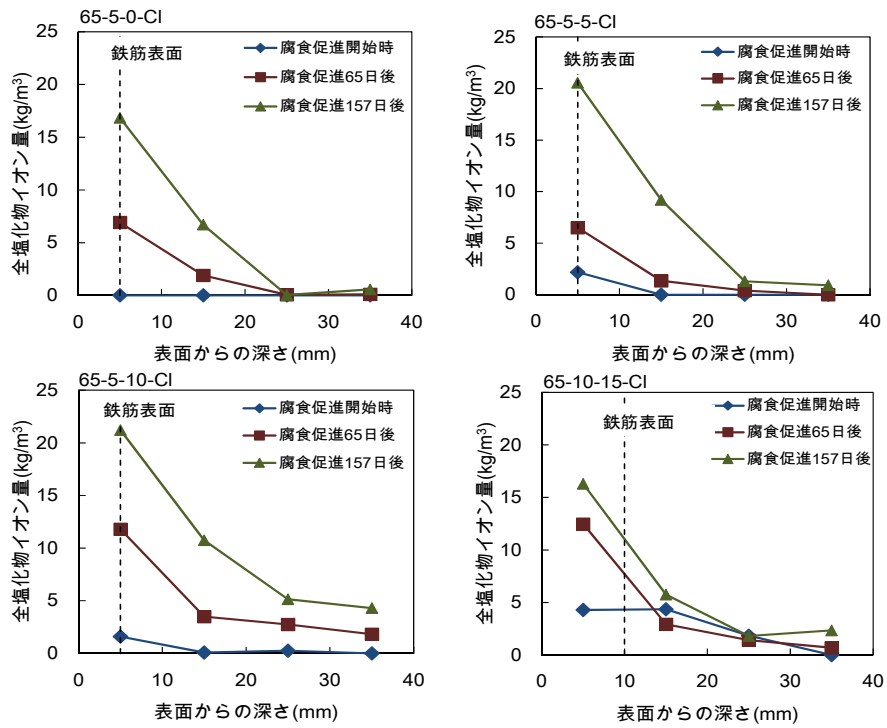


図4.5 全塩化物イオン濃度の経時変化

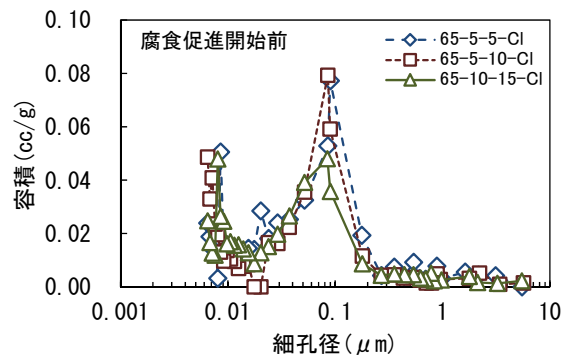


図4.6 表層の細孔径分布

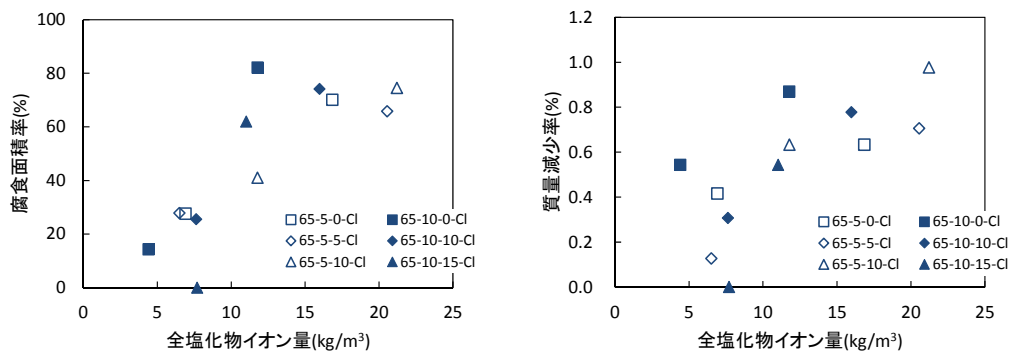


図4.7 全塩化物イオン量と腐食程度の関係

図 4.8 に中性化を模擬した条件において、腐食減量・質量減少率を求めた時点での中性化深さとかぶりの関係から中性化残りを算出し、中性化残りとの腐食面積率および質量減少率の関係を示す。これより、中性化残りが小さいと腐食面積率および質量減少率が大きくなる傾向を示した。これは、鉄筋の腐食において、中性化の進行が影響を及ぼすものであり、3.6 での中性化により劣化した実構造物より採取した鉄筋の分析結果と同様の傾向を示している。

また、初期に中性化が進行していない 65-5-0-C では、腐食促進期間 171 日において腐食が確認されなかった。しかし、水セメント比 150%の初期に中性化させていない 150-5-0-C および 150-10-0-C では腐食促進期間 121 日にて腐食が確認されている。これは、写真 4.2 に示すように水セメント比 150%のモルタル供試体は、極めて中性化の進行が速いことから、気中養生および腐食促進試験における乾燥期間において中性化が進行したことによるものである。

中性化による鉄筋腐食において腐食が開始する中性化残りについては、既往の研究^{4-4)~4-6)}で概ね 0~10mm の範囲であることが示されているが、一定の値に定まるものではなく、コンクリート中の水分などの影響があると考えられている。初期に中性化が進行していない 65-5-0-C において、腐食していないことを考慮すると、鉄筋は、中性化していないコンクリートが 5mm 程度被覆してあれば、腐食しないものと考えられる。ただし、中性化が進行して鉄筋周辺の pH が低下することで鉄筋が腐食することになる。これらは、今後、フェノールフタレイン噴霧による呈色 pH と鉄筋腐食が開始する pH の関係や中性化の進行に伴うコンクリート中の pH の分布状況などについて検討を進めることで腐食開始の中性化残りを定量的に示すことができるものとする。

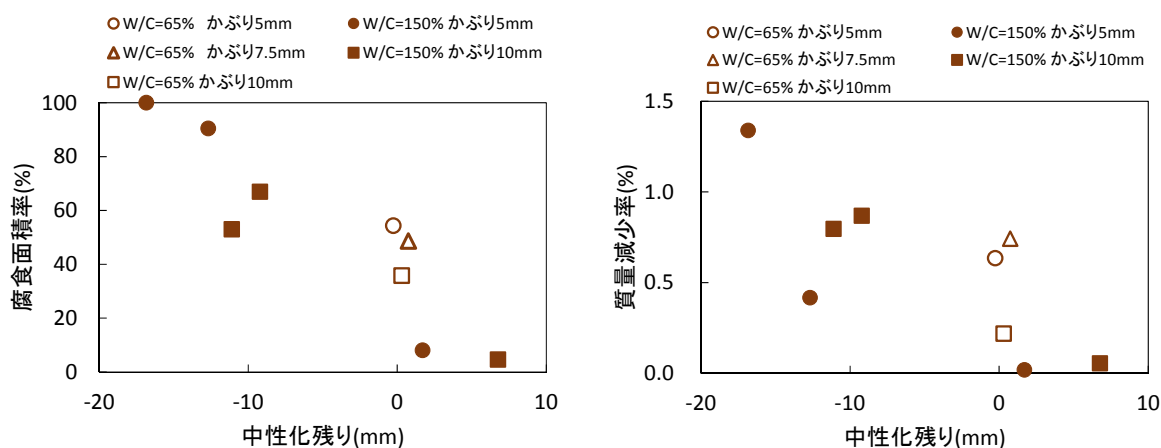


図4.8 中性化残りとの腐食程度の関係



写真4.2 腐食促進試験後の鉄筋の腐食状況

(2.3) 腐食形態

次に、図 4.9 に腐食面積率と質量減少率の関係を示す。なお、図中には、表面のひずみ測定用の供試体における腐食面積率、質量減少率および腐食面積に対する腐食減量の関係（腐食減量/腐食面積）を併せて示す。腐食面積率と質量減少率の関係は、塩害および中性化の劣化機構ごとで異なる傾向を示した。中性化を模擬した条件では、腐食減量/腐食面積が $0.01\sim 0.05\text{g}/\text{cm}^2$ の範囲となるのに対して、塩害を模擬した条件では、腐食減量/腐食面積が $0.01\sim 0.2\text{g}/\text{cm}^2$ の範囲となり、バラつきが大きくなるとともに塩害のほうが、腐食減量/腐食面積は大きくなる傾向を示した。局所的に著しく腐食している範囲が大きい場合、腐食面積が同程度であっても腐食減量が大きくなり、腐食減量/腐食面積が大きくなるものとする。

図 4.10、図 4.11 に 3次元形状測定の一例を示す。3D 画像および線分析では、腐食していない箇所鉄筋断面の頂点を 0mm として、鉄筋長手方向の腐食深さを求めた。図中の 65-5-5-C1 と 150-10-15-C の質量減少率は、 0.72% と 0.87% で同程度であるが、腐食減量/腐食面積は 65-5-5-C1 が $0.12\text{g}/\text{cm}^2$ で、150-10-15-C は $0.04\text{g}/\text{cm}^2$ である。3D 画像および線分析の結果から、塩害の 65-5-5-C1 では、測定位置 $15\sim 50\text{mm}$ 程度の範囲ではほとんど腐食していないが、測定位置 $0\sim 15\text{mm}$ 程度の範囲において最大腐食深さが 0.19mm となり、局所的に著しく腐食していることが分かる。中性化を模擬した条件である 150-10-15-C では、測定対象範囲で全体的に腐食している傾向を示した。図 4.11 の 150-10-15-C の腐食深さは、腐食している箇所と腐食していない箇所が近接している。これは、微視的なアノードとカソードからなるマイクロセルを多数形成し、鋼材表面から全面的に腐食する形態を現していると考ええる。また、塩害の 65-5-5-C1 では、測定位置 $0\sim 15\text{mm}$ 程度の範囲がアノードで、腐食していない測定位置 $15\sim 50\text{mm}$ 程度の範囲がカソードとなり、それらが乖離することでアノードに腐食が集中し、腐食深さが大きくなるマクロセル腐食の形態を示したものとする。また、線分析における腐食深さの測点の変動係数は、65-5-5-C1 は 1.53 で、150-10-15-C では 0.74 となり、塩害を想定した条件で変動係数が大きくなり、腐食深さのバラつきが大きくなった。

図 4.12 に腐食減量/腐食面積と形状測定により求めた腐食深さの変動係数の関係を示す。腐食減量/腐食面積が大きくなると腐食深さの変動係数は大きくなり、局所的に著しく腐食する形態にな

る傾向を示した。つまり、腐食面積に対する腐食減量の関係（腐食減量/腐食面積）は、腐食形態を示す指標として、局所的に著しく腐食する腐食形態もしくは表面が均一に腐食する腐食形態かを適切に表していると考えられる。なお、塩害においては、腐食減量/腐食面積と腐食深さの変動係数が大きくなり、局所的な腐食形態を示すものもあれば、中性化を想定とした条件と同様な腐食形態を示すものもあった。図4.9より、表面のひずみ測定用の供試体では、腐食減量/腐食面積が $0.05\sim 0.2\text{g}/\text{cm}^2$ の範囲となり、腐食減量・腐食面積率測定用のモルタル供試体よりも大きくなった。表面のひずみ測定用の供試体では、モルタル表面の中央部にひずみゲージを貼付し被覆したことから、実質の曝露面が腐食減量と腐食面積率を把握した供試体よりも少ない。曝露面が小さくなることで、酸素および水分の供給程度が減少したことで、腐食形態に影響したものと考えられる。また、腐食促進試験の開始時点における鉄筋位置での初期塩化物イオン濃度の違いによって、異なる腐食形態を示すものと考えたが、65-5-0-Cl では、同条件にも関わらず、供試体によって腐食減量/腐食面積が $0.07\text{g}/\text{cm}^2$ と $0.15\text{g}/\text{cm}^2$ で異なる腐食形態を示した。表面のひずみ測定用の供試体において、腐食減量/腐食面積が大きくなる傾向であったことを考慮すると腐食形態に及ぼす要因として、鉄筋の長手方向で曝露面の被覆した範囲の直下とその他の範囲の鉄筋位置で、水分および酸素の供給程度が変化し、腐食形態が局所的になったものと考えられる。中性化を模擬した条件では、実験要因として水セメント比およびかぶりを変化させたが、概ね、鉄筋表面が均一的に腐食する形態となり、鉄筋の長手方向における腐食の偏りは少ないものと考えられる。

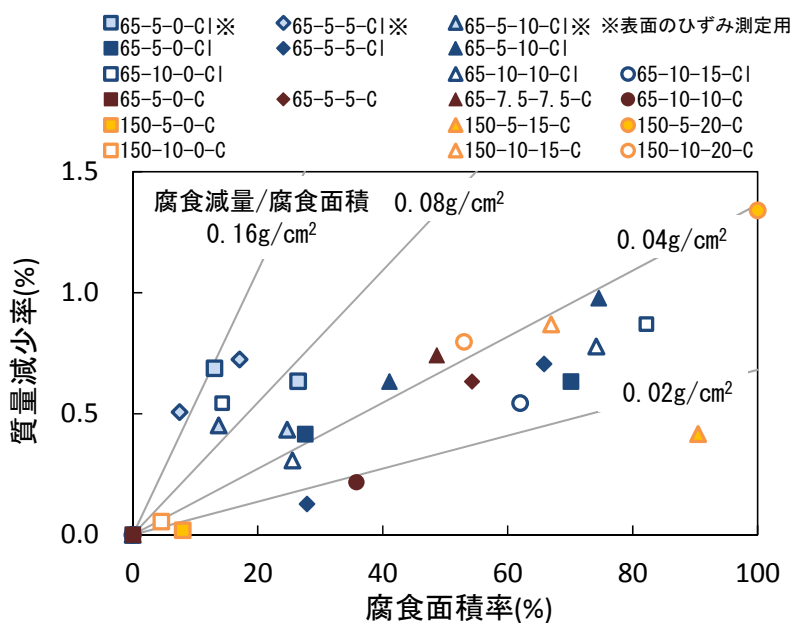


図4.9 腐食面積率と質量減少率の関係

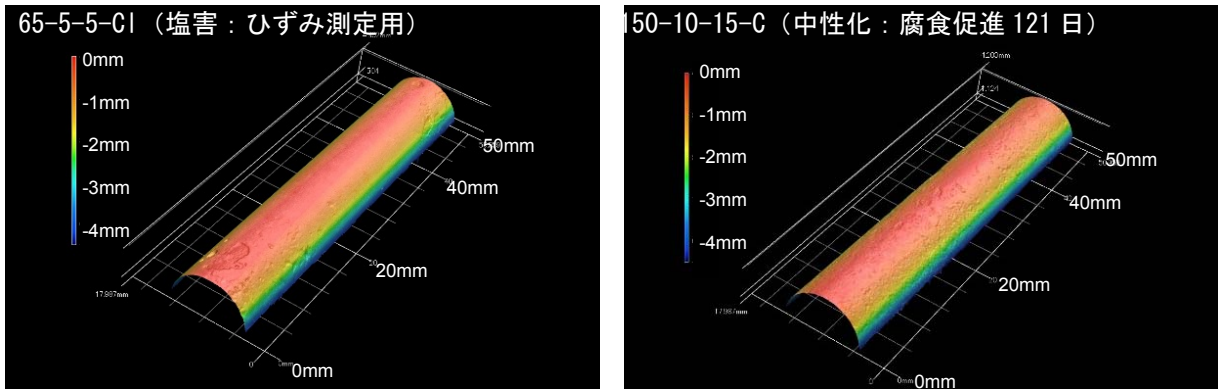


図4.10 3次元形状測定結果の一例

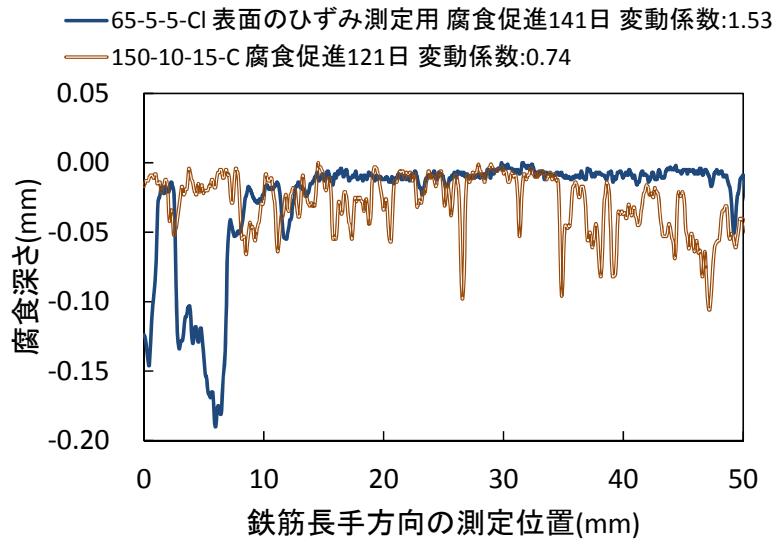


図4.11 線分析腐食深さの測定結果の一例

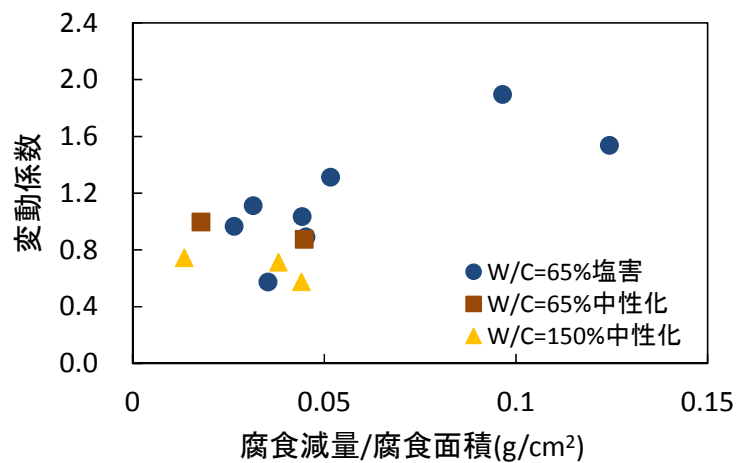


図4.12 腐食減量/腐食面積と変動係数の関係

4.2.2 内在塩分濃度の違いに着目した実験（シリーズ2）

(1) 実験概要

外来塩分による塩害を模擬した腐食促進試験の結果より、腐食促進試験開始時点における鉄筋位置での初期塩化物イオン濃度の違いによって、異なる腐食形態を示すと考えられたが、明確な違いを見出すことができなかった。そこで、内在塩分濃度を变化させたモルタル供試体にて腐食促進試験を実施し、モルタル供試体中の塩化物イオン濃度の違いが腐食形態に及ぼす影響を検討し、鉄筋位置での塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食形態に及ぼす影響を確認した。

モルタル供試体は、図 4.1 と同様の寸法とし、かぶりが 5mm となるように鉄筋を配置した。モルタルの配合は、表 4.4 に示す水セメント比が 65%で、砂セメント比が 3.0 を基本とした。内在塩分として、NaCl の含有量が 3.0 および 10.0kg/m³ となるように、練混ぜ水に NaCl を溶解してモルタルを作製した。モルタル供試体は、打込みから材齢 24 時間までは封緘養生とし、その後に脱型して材齢 7 日まで封緘養生を継続した。養生終了後は、材齢 21 日まで恒温恒湿度室内（20℃、60%RH）にて気中養生した後に、腐食促進試験に供した。腐食促進試験の乾湿繰り返しの環境条件は、4.2.1 と同様である。

モルタル供試体は、腐食減量・腐食面積率測定用の供試体と暴露面の一部を被覆したモルタル表面のひずみ測定用の供試体を、それぞれ 1 体ずつを腐食促進試験に用いた。腐食減量・腐食面積率測定用の供試体は腐食促進期間 52 日にて、モルタル表面のひずみ測定用の供試体は、内在塩分量を 10.0kg/m³ とした供試体にて、モルタル表面のひずみ変化が 300×10⁻⁶ 程度膨張した時点（腐食促進期間 87 日）まで腐食促進試験を継続した。その後に、腐食面積率および質量減少率を求め、腐食減量/腐食面積を算出し、腐食形態の違いを把握した。

表4.4 モルタルの配合表

W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)			NaCl (kg/m ³)
		W	C	S	
65	3.0	309	475	1427	0
					3.0
					10.0

供試体記号：(W/C)-(かぶり)-(Cl 内在塩分量)-(劣化機構 Cl 塩害)

(2) 実験結果および考察

図 4.13 に腐食促進試験後のそれぞれのモルタル供試体の鉄筋の腐食状況を示す。腐食促進期間 52 日において、内在塩分量が 10kg/m³ 混入している条件（65-5-Cl10-Cl）で、腐食面積率は 34.9%と最も大きくなった。なお、質量減少率は、3 条件とも 0.5%程度であった。図 4.14 に腐食面積率と質量減少率の関係を示す。内在塩分量が混入されていない外来塩分による腐食を想定した条件（65-5-0-Cl）では、腐食減量・腐食面積率測定用の供試体とモルタル表面のひずみ測定用の供試体ともに、腐食形態の指標とする腐食減量/腐食面積は 0.1~0.14g/cm² と他の条件よりも大きく、局所的な腐食形態を示した。内在塩分量が 3 kg/m³ および 10kg/m³ 混入している条件（65-5-Cl3-Cl および 65-

5-C110-Cl) では、腐食減量/腐食面積は $0.02\sim 0.05\text{g}/\text{cm}^2$ と小さく、暴露面の一部を被覆している表面のひずみ測定用の供試体においても、比較的、均一的な腐食形態となる傾向を示した。これは、内在塩分が混入することで、鉄筋周辺において塩化物イオンが均等に存在し、表面の一部を被覆し、水分および酸素の供給を偏らせても孔食のようなマクロセル腐食となる形態になり難いものと考えられる。

4.2 および 4.3 における検証を整理すると、塩害による鉄筋腐食では、外来塩分のように鉄筋位置での塩化物イオン量に変化し、さらに、水分および酸素の供給程度が偏ることで、孔食のような局所的な腐食形態になり易いことが示された。

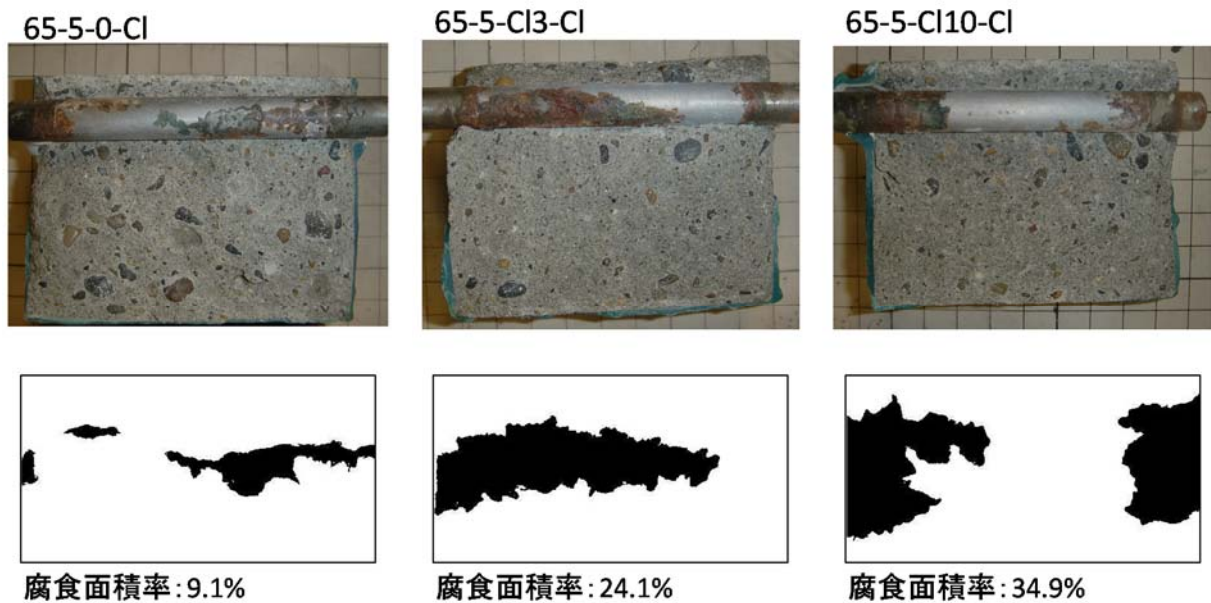


図4.13 腐食促進試験後の鉄筋の腐食状況（腐食促進期間 52 日）

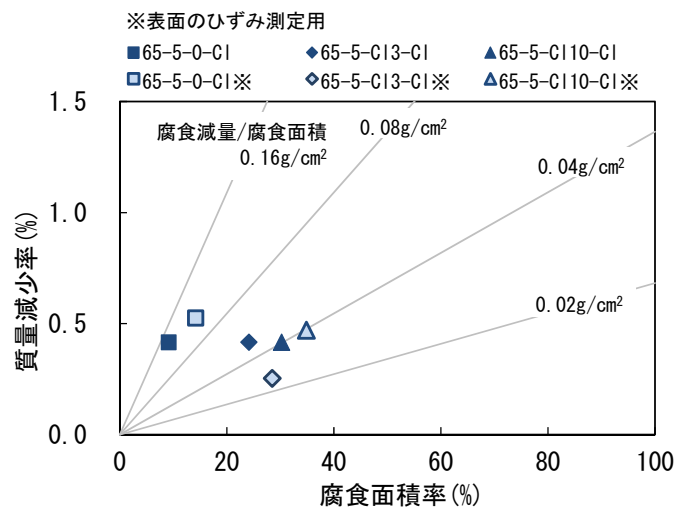


図4.14 腐食面積率と質量減少率の関係

4.2.3 まとめ

4.2 では、塩害と中性化における劣化機構の違いが腐食形態に及ぼす影響を、乾湿繰返しによる腐食促進試験を行うことで検証した。腐食促進試験後のモルタル供試体より腐食した鉄筋を対象に腐食減量、腐食面積率および3次元の形状測定による腐食深さを求めることで腐食形態の違いを把握した。本章で得られた知見を以下に示す。

- 1) 形状測定および腐食減量、腐食面積率の結果より、腐食減量/腐食面積を用いることで腐食形態の違いを表すことができる。
- 2) 3D 形状計測の線分析により、腐食深さを 25 μm 間隔で測定することでアノードとカソードとなったと考えらえる箇所を識別でき、マイクロセル腐食とマクロセル腐食の形態の違いを示すことができる。と考える。
- 3) 中性化を模擬した乾湿繰返しによる腐食促進試験において、モルタル供試体中の鉄筋は、比較的、表面が均一に腐食する形態となった。
- 4) 中性化を模擬した条件において、腐食減量・質量減少率を求めた時点での中性化残りとの腐食面積率および質量減少率の関係から、中性化残りが小さいと腐食面積率および質量減少率が大きくなる傾向を示した。これは、鉄筋の腐食において、中性化の進行が影響を及ぼすものであり、3.3 での中性化により劣化した実構造物より採取した鉄筋の分析結果と同様の傾向を示した。
- 5) 鉄筋腐食の進展は、かぶりコンクリートの緻密性やかぶりの大きさなどによる酸素および水分の供給程度に大きく影響を受けると考える。
- 6) 塩害を模擬した乾湿繰返しによる腐食促進試験において、モルタル供試体中の鉄筋は、比較的、表面が均一に腐食する形態と局所的に著しく腐食する異なる腐食形態が確認された。
- 7) 塩害による鉄筋腐食では、外来塩分のように鉄筋位置での塩化物イオン量が変化し、さらに、水分および酸素の供給程度が偏ることで、孔食のような局所的な腐食形態になり易い。

4.3 腐食形態がモルタル表面のひずみ挙動に及ぼす影響に関する実験的検討

4.3.1 実験概要

(1) 使用材料、配合および供試体

使用材料、モルタルの配合および供試体は、4.2 と同様とし、表面のひずみ測定用供試体を用いた。モルタル供試体の水準として、塩害を模擬した条件では、かぶり 5mm で初期の塩分浸透深さが 0mm、5mm および 10mm とした供試体にて、モルタル表面のひずみ挙動を把握した。中性化を想定した条件では、水セメント比が 65%と 150%において、図 5.1 および図 4.3 に示すそれぞれの条件にて、モルタル表面のひずみ挙動を求めた。

(2) 養生条件および腐食促進試験

養生条件は、4.2.1 と同様に所要の標準養生および封緘養生を施した後に、初期の塩化物イオン浸透深さと中性化深さを変化させるため、それぞれの期間、10%NaCl 水溶液の浸漬または促進中性化を実施した。図 4.2 より初期の塩化物イオンの浸透深さを 5mm とする水準では材齢 14 日まで

10%NaCl 水溶液に浸漬させ、浸透深さを 10mm とする水準は材齢 35 日まで、塩水浸漬を継続した。中性化を模擬した条件では、促進中性化環境下に曝露し、中性化深さが所定の深さとなるまで初期に中性化させた。その後、供試体は恒温恒湿度室内での気中養生とした後に腐食促進試験に供した。

腐食促進試験は、塩害を模擬した条件では 40℃、10%NaCl 水溶液に 3 日間浸漬、その後 20℃、60%RH の環境下で 4 日間乾燥させる乾湿繰返しを 1 サイクルとした。中性化では、40℃の水道水に 3 日間浸漬、4 日間の乾燥とした。

(3) 測定項目

表面のひずみ測定用の供試体は、防水型ひずみゲージを供試体の曝露面中央部で鉄筋直角方向に配置し、鉄筋直上のモルタル表面のひずみ変化を連続的に計測した。なお、コンクリートからの水分および腐食促進試験における湿潤状態での水分の影響による絶縁低下を防ぐため、防水型ひずみゲージは、ステンレス製のメタルベース（長さ 60mm）にポリエステル樹脂をベースとした線ゲージを貼付し、ブチルゴム系被覆剤で防水加工させたものを用いている。塩害を模擬した条件では、所定の試験期間中にひび割れが発生したことから、ひび割れ発生後に鉄筋を採取してその時点での腐食減量・腐食面積率を求めた。

また、腐食促進試験を開始する時点で、それぞれの養生条件において一定の乾燥期間を設けている。中性化を模擬した 65-5-5-C では、封緘養生終了後に腐食促進試験を実施するまでに、84 日間の乾燥期間があり、塩害を模擬して初期の塩化物イオン浸透深さを 10mm とした 65-5-10-CI では、乾燥期間が 56 日間となり、試験水準によって乾燥期間が異なる。このことにより、腐食促進試験開始時点でのモルタル供試体の表面における乾燥収縮によるひずみ変化量が、それぞれの試験水準によって異なる。このことが、腐食促進試験開始後のひずみ変化に影響を及ぼすことが考えられることから、腐食促進試験に用いるモルタル供試体と同形状の供試体を準備し、腐食促進試験開始前までの乾燥収縮によるひずみ変化を求めた。乾燥収縮によるひずみ変化を求める試験水準は、図 4.3 における 65-5-5-C、65-5-0-CI、65-5-5-CI および 65-5-10-CI において実施した。

4.3.2 実験結果および考察

(1) 腐食促進におけるモルタル表面のひずみ変化

図 4.15 にモルタル表面のひずみを連続的に計測した結果の一例を示す。全ての条件において、モルタル供試体の表面のひずみは、腐食促進開始直後に $200\sim 400\times 10^{-6}$ 程度の膨張挙動を示した。これは、腐食促進試験を開始する以前のモルタル供試体は、それぞれの条件で一定期間の乾燥期間を設けていることから、水分の浸透および 20℃から 40℃への温度変化によるひずみ変化であると考えられる。その後、表面のひずみは、10%NaCl 水溶液もしくは水道水への浸漬と乾燥の影響によって、乾湿繰返し 1 サイクルの期間において $100\sim 150\times 10^{-6}$ 程度の収縮と膨張挙動を示した。塩害を想定した条件である 65-5-0-CI と 65-5-5-CI では、腐食促進試験を開始して 50 日程度までは、1 サイクルの期間中における表面のひずみの最大値は一定の値を示した。この 1 サイクルの期間中における表面のひずみの最大値は湿潤状態から乾燥状態に移行する時点でのひずみである。65-5-0-CI と 65-5-5-CI では、腐食促進期間 50 日程度以降から膨張傾向を示した。この腐食促進試験開始直後

から乾湿繰り返しサイクルの一定の値からモルタル供試体表面のひずみの変化量が鉄筋腐食に起因するものであると考えられる。

塩害を想定した条件では、供試体数 2 体の内 1 体をこの鉄筋腐食に起因するひずみ変化であることを確認するため、鉄筋腐食に起因する表面のひずみ変化が 100×10^{-6} 程度増加したところで、鉄筋を採取して腐食状況を確認し、腐食減量と腐食面積率を求めた。腐食促進試験を継続したものは、鉄筋腐食に起因するひずみ変化が $150 \sim 200 \times 10^{-6}$ 程度増加した時点で、表面のひずみの挙動が乾湿繰り返しによる変動が少なくなり、腐食促進試験初期とは異なる挙動を示した。図 4.15 の 65-5-5-CI では、腐食促進期間 90 日程度以降において表面のひずみが不規則な挙動を示した。その後、乾湿繰り返しを 2~4 サイクル継続し、鉄筋腐食に起因する 300×10^{-6} 程度に増加した際に腐食促進試験を終了した。なお、腐食促進試験終了時点において、モルタル供試体の表面を目視とクラックスケールにて確認したところ、モルタル表面の鉄筋直上に鉄筋と沿うようにひび割れ幅 0.1mm 以下のひび割れが確認された。表面のひずみが不規則な挙動を示した時点においてひび割れが発生したものと考える。図 4.16 に乾湿繰り返し 1 サイクルの期間中における表面のひずみの最大値の経時変化を示す。ここで、65-5-5-CI では鉄筋腐食に起因する表面のひずみが急激に増加傾向を示したが、65-5-10-CI では、明確な変曲点は確認されず、緩やかに表面のひずみが増加する挙動となり、塩害を想定した条件での腐食膨張によるひずみ変化は、条件および供試体によって異なる傾向を示した。そこで、腐食膨張によるひずみ変化が確認された後の 1 サイクル内での表面のひずみの最大値を線形近似し、その傾きを表面のひずみの増加速度 de/dt として算出した。なお、表面のひずみの増加速度 de/dt を算出するにあたり、線形近似する期間は、腐食膨張に起因するひずみ変化が確認されてからひび割れ発生と想定した時点までの期間とした。

次に、中性化を模擬した条件では、中性化させていない 65-5-0-C および 150-5-0-C は、促進腐食期間中において、表面のひずみの 1 サイクル内での最大値は一定の値を示した。それに対して、腐食促進試験前に中性化させたものは、水セメント比 65% および 150% ともに若干ではあるが腐食促進試験開始後、徐々に膨張傾向を示した。中性化を想定した条件のものは、150-5-15-C 以外では所要の腐食促進期間において、ひび割れは確認されていないため、モルタル表面のひずみ測定用の供試体においては、腐食状況を確認し、腐食減量および腐食面積率を求めている。しかし、写真 4.2 に示すように腐食減量と腐食面積率測定用の供試体では腐食の進行を確認できている。そのことから、初期に中性化させた条件では、腐食促進試験期間中において、表面のひずみ測定用の供試体でも腐食が進行しているものと推定でき、腐食促進試験開始後の表面のひずみの膨張挙動は、鉄筋腐食に起因するものであると考えられる。そこで、塩害と同様に表面のひずみの増加速度 de/dt を算出した。中性化における de/dt は、水セメント比 65% および 150% のモルタル供試体において、かぶりが小さいほど de/dt が大きくなった。水セメント比 65% では、65-10-10-C のかぶり 10mm で de/dt が 0.27 と最も大きくなり、水セメント比 150% では、150-5-15-C のかぶり 5mm で de/dt が 0.97 と 150-10-15-C のかぶり 10mm の de/dt が 0.52 よりも大きくなった。これは、図 4.4 の腐食減量と腐食面積の結果と比較すると、かぶりが小さく腐食し易い条件ほど de/dt が大きくなる傾向を示した。つまり、鉄筋の表面が均一的に腐食する形態となる中性化においては、モルタル表面のひずみの増加速度は、腐食のし易さをも示していると考えられる。

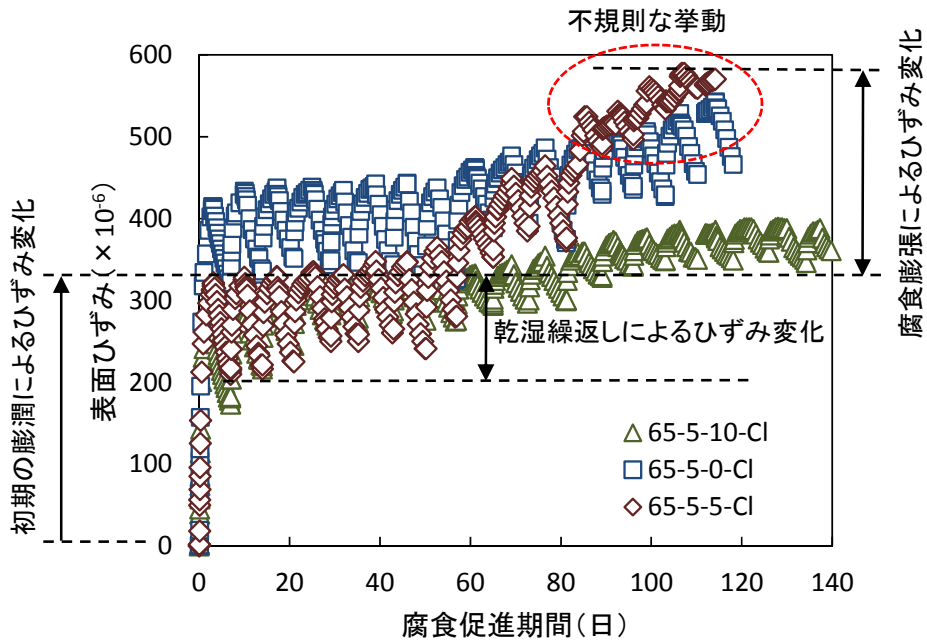


図4.15 腐食面積率と質量減少率の関係

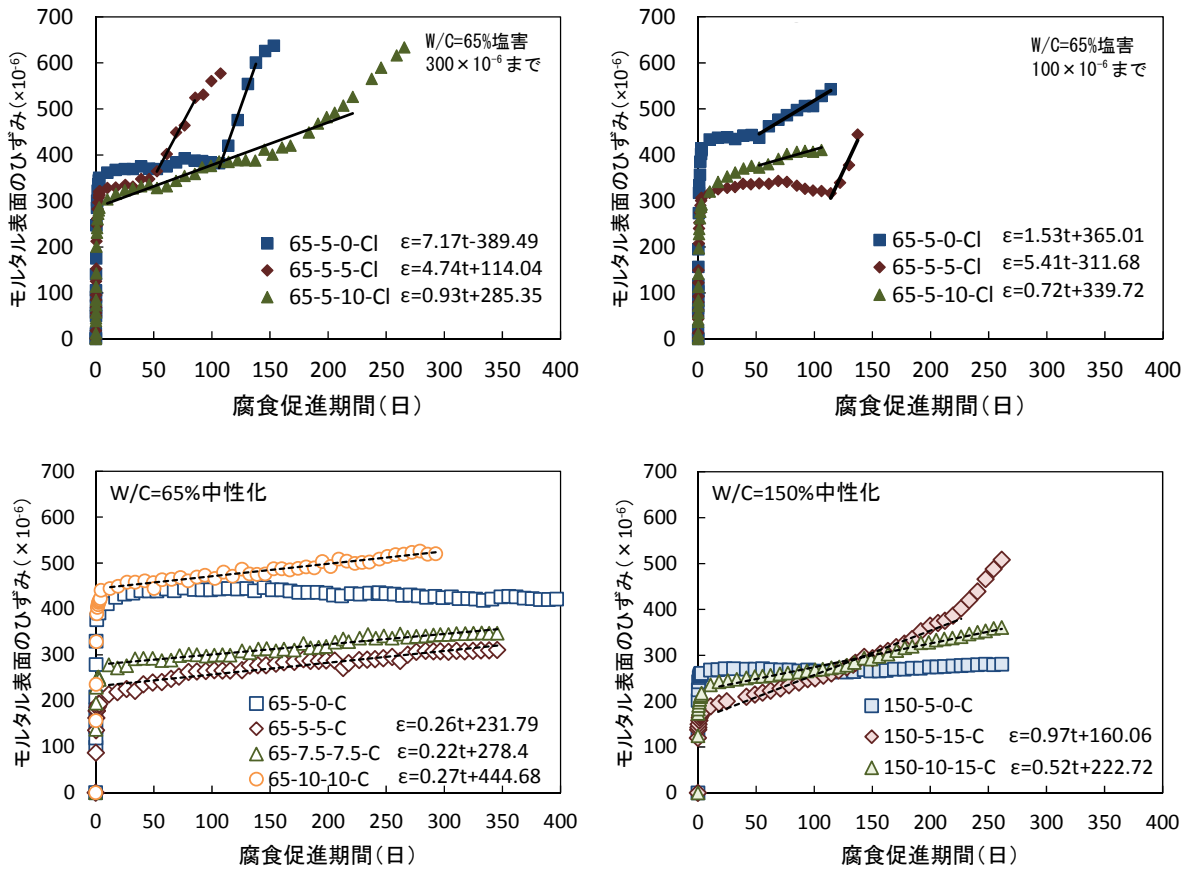


図4.16 腐食膨張によるモルタル供試体表面のひずみ変化

(2) 腐食形態とモルタル表面のひずみ挙動との関係

次に、図 4.17 に 4.2 で求めた腐食減量/腐食面積と腐食促進試験におけるモルタル供試体の表面のひずみの増加速度 $d\varepsilon/dt$ の関係を示す。なお、塩害を模擬した条件のものは、表面のひずみ測定用の供試体における腐食減量/腐食面積を用いている。中性化においては、表面のひずみ測定用の供試体において、腐食減量/腐食面積を求めているため、腐食減量・腐食面積率用の供試体より把握した腐食減量/腐食面積を用いた。塩害を模擬した条件では、腐食減量/腐食面積が $0.05\sim 0.2\text{g/cm}^2$ の範囲で、腐食減量/腐食面積が大きくなると $d\varepsilon/dt$ は大きくなる傾向を示した。塩害を想定した条件では、65-5-10-Cl のようにモルタル表面のひずみが、中性化を想定した条件のように比較的緩やかに増加するもの ($d\varepsilon/dt$ が 0.7 および 0.9)，と 65-5-5-Cl のように急激な変化となるものに分かれる傾向を示した。腐食減量/腐食面積が 0.1g/cm^2 以上で著しく腐食している範囲の割合が多い腐食形態では、モルタル表面のひずみが腐食膨張により急激な変化を示す傾向となった。表面のひずみとその増加速度の結果より、局所的に著しく腐食する形態と表面が均一に腐食する形態とでは、モルタル表面のひずみ挙動に影響を及ぼし、局所的に著しく腐食する箇所の腐食速度が大きくなることの影響していると考えられる。つまり、中性化と塩害とでは、異なる腐食形態となり、それぞれの腐食形態によって、ひび割れに至るまでの表面のひずみの挙動に違いが現れ、ひび割れに至る時期は塩害では早期に、中性化では遅くなるものと推測する。

なお、本研究の範囲内では、塩害を模擬した条件では、モルタル表面にひび割れ幅 0.1mm 以下のひび割れが目視にて確認できる段階までを対象とした。図 5.3 に示すモルタル供試体の表面のひずみ変化における 65-5-10-Cl と 150-5-15-C のようにひび割れ発生後のひずみの増加速度が大きくなる傾向を示していることから、この後、ひび割れ幅が増大し、ひび割れを介して酸素および水分の供給が多くなる段階では、腐食減量/腐食面積と腐食形態の関係性は異なる傾向を示すものと考えられる。また、写真 4.1 のような腐食深さが著しく大きくなる範囲の位置によっても、表面のひずみ挙動に影響を及ぼすものと考えられ、それらの要因の影響に関しては、今後の課題として挙げられる。

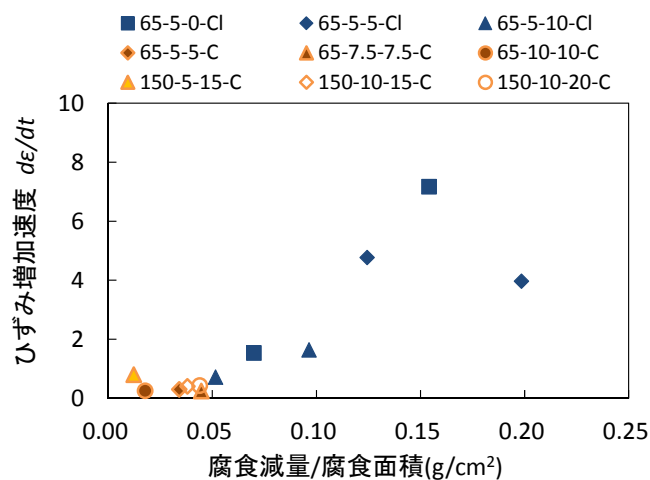


図4.17 腐食減量/腐食面積と表面のひずみの増加速度($d\varepsilon/dt$)の関係

(3) 乾燥収縮によるモルタル表面のひずみと含水率の変化

腐食促進試験における全ての条件において、モルタル供試体の表面のひずみは、腐食促進開始直後に $200\sim 400\times 10^{-6}$ 程度の膨張挙動を示し、そのひずみ変化量は試験水準によって異なるものとなった。これは、腐食促進試験を開始する以前のモルタル供試体は、それぞれの条件で異なる乾燥期間を設けていることから、水分の浸透および 20°C から 40°C への温度変化によるひずみ変化であり、腐食促進試験開始時における乾燥収縮によるひずみ変化および質量減少量の違いが影響しているものと考えられた。そこで、腐食促進試験に用いるモルタル供試体と同形状の供試体を準備し、図 4.3 における 65-5-5-C、65-5-0-Cl、65-5-5-Cl および 65-5-10-Cl において、腐食促進試験開始前までの乾燥収縮によるひずみ変化を求めた。

図 4.18 に養生終了後の乾燥期間におけるモルタル供試体表面のひずみ変化と乾燥に伴う質量減少率の経時変化を示す。図 4.3 に示すようにそれぞれの試験水準によって、養生期間と乾燥期間が異なることから、腐食促進試験開始時点における乾燥収縮によるモルタル表面のひずみと質量減少率が異なる。65-5-0-Cl および 65-5-5-Cl は、標準養生および塩水浸漬期間が材齢 14 日まで実施し、その後、材齢 91 日までの 77 日間の乾燥状態となっている。65-5-10-Cl では、標準養生および塩水浸漬を材齢 35 日まで実施し、材齢 91 日までの 77 日間の乾燥状態となっている。乾燥収縮によるモルタル表面のひずみ変化は、塩害を模擬した条件において、65-5-0-Cl が最も大きくなり、塩水浸漬期間が長い 65-5-10-Cl が最も小さくなる傾向を示した。質量減少量の経時変化の関係と比較すると、65-5-0-Cl の質量減少率が最も大きくなり、質量減少率が大きくなると乾燥収縮によるひずみ変化が大きくなる結果となった。これは、モルタル供試体から乾燥により水分が逸散することでモルタル表面のひずみが大きくなったものである。次に、図 4.19 に質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係を示す。質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係では、同一の質量減少率における乾燥収縮ひずみは、塩害を模擬した条件において 65-5-10-Cl が最も大きくなった。これは、乾燥収縮によるひずみ変化と質量減少との関係において、モルタルの細孔構造に影響を受けることが考えられる^{4-7)~4-11)}。図 4.6 より、塩害を想定した条件における細孔径分布は、65-10-15-Cl では、 $0.1\mu\text{m}$ 付近の細孔量が他条件のモルタル供試体よりも若干ではあるが小さくなっており、セメント硬化体中から水分が逸散する際、より小さな空隙径から水分が逸散するほうが水分の表面張力の影響を大きく受け、収縮ひずみが大きくなるものである。中性化を模擬した 65-10-10-C は、塩害を模擬した条件よりも質量減少率が小さくなるものの、乾燥収縮ひずみは大きくなった。これは、養生方法の違いが影響しているものであり、中性化を模擬した条件では封緘養生とし、塩害を想定した条件では標準養生としたことが影響していると考えられる。標準養生では、養生期間中にモルタル内に水分が供給され、乾燥期間において供給された水分が乾燥期間において逸散され、標準養生とした塩害を模擬した条件において質量減少率が大きくなったものであると考える。

図 4.20 に腐食促進試験開始時点の乾燥収縮ひずみと腐食促進試験直後の初期の膨潤によるひずみ変化の関係を示す。腐食促進試験開始時点の乾燥収縮ひずみが大きいほど、初期の膨潤によるひずみ変化は大きくなった。このことより、腐食促進開始直後の膨張挙動は、腐食促進試験開始時点における乾燥収縮によるひずみ量の違いによって影響を受けるものと考えられる。つまり、腐食促進試験開始直後の膨潤によるひずみを初期値として、そこからの乾湿繰り返し 1 サイクル内の最大

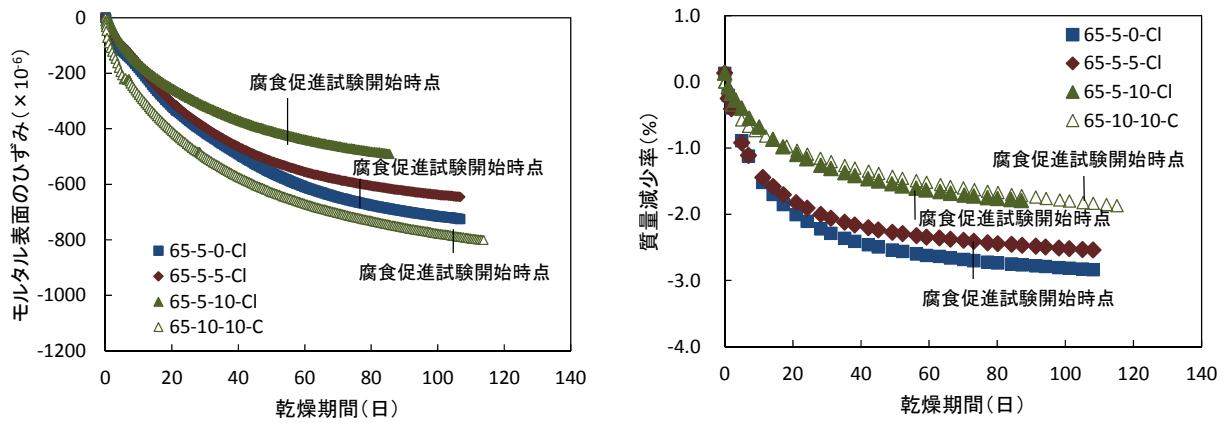


図4.18 乾燥期間中の乾燥収縮におけるモルタル表面のひずみ変化および質量減少率

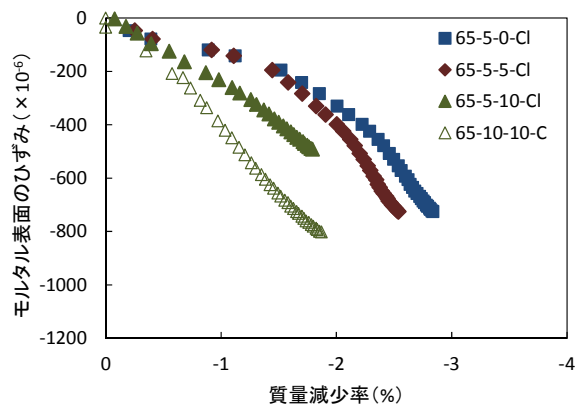


図4.19 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係

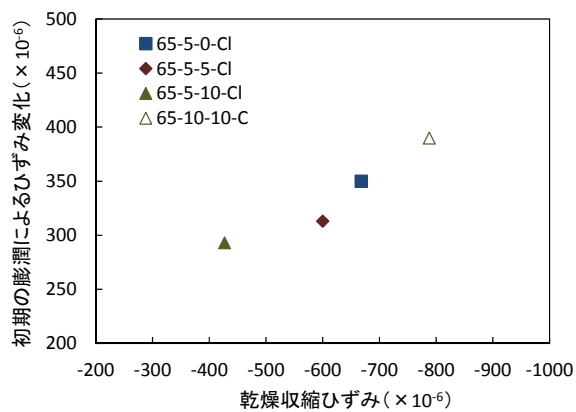


図4.20 腐食促進開始時点の乾燥収縮ひずみと初期の膨潤によるひずみ変化の関係

値の変化量が鉄筋腐食に起因するものとして妥当であると判断する。

図 4.21 に腐食促進期間中のモルタル供試体の含水率の経時変化を示す。これは、腐食促進試験期間中の質量を計測し、腐食した鉄筋を採取した後に、割裂したモルタル供試体を 105℃の乾燥炉にて 7 日間乾燥させ、絶乾状態としたモルタル供試体の質量に対する質量差から含水率を算出した。塩害を想定した条件でのモルタル供試体の含水率は、腐食促進試験開始時点では 6.0～6.5%程度で、その後、初期の膨潤により水分が供給され、7.0～7.5%となった。腐食促進試験期間中は、乾湿繰り返しの影響により含水率は 0.2%程度変動した。中性化を想定した 65-10-10-C では、初期の膨潤により 8.0%程度まで含水率が増加し、腐食促進試験期間中の乾湿繰り返しの影響による含水率の変動が 1.0%と塩害を想定した条件よりも大きくなった。これは、養生条件の違いにより、塩害を想定した条件のほうが、モルタルが緻密となり水分が浸透され難いことと、腐食促進試験における湿潤状態における溶液の違いも影響していると考えられる。塩害を想定した条件では、10%NaCl 水溶液を用いており、モルタル内の細孔における硬化体の壁面における電荷の影響により、NaCl 水溶液の浸透が中性化を想定した条件における水道水よりも抑制されることが影響しているものと考えられる。

ここで、図 3.24 および図 3.25 に示した実構造物におけるコンクリート表面からの含水率の調査結果と比較し、考察する。ただし、実構造物において求めた含水率の計測方法は、電気抵抗式の計測器を用いて測定したものであり、質量法により求めた含水率とは測定方法が異なる。ここでは、定量的な比較は困難であると考え、定性的な比較とする。なお、腐食促進試験における含水率は、モルタル供試体全体の質量を対象として求めている。図 3.24 および図 3.25 では、雨掛かりがある柱および梁と雨掛かりのないスラブにおけるコンクリート表面からの深さ方向における含水率の分布を示した。腐食促進試験では、乾湿繰り返しにより湿潤と乾燥の状態を再現していることから、図 3.24 における雨掛かりがある柱および梁のほうがスラブよりも腐食促進試験の条件に近いと考えられる。雨掛かりのある柱および梁の含水率の分布より、表層と内部の差は 2%程度であり、表層からの 30mm 以深では、外部環境の影響は少なく、内部の含水率は一定の値となった。一般的なコンクリートの場合、外部環境の影響を受ける範囲は、コンクリート表面から 30mm 程度であり、これは既往の研究と同様の傾向を示している^{4-12), 4-13)}。よって、図 4.21 における 65-10-10-C では、初期の膨潤で 2.0%程度増加し、乾湿繰り返しにより 1.0%の変動であったが、これはモルタル供試体全体（深さ方向 60mm）を対象としていることから、モルタル表層から 30mm 程度の範囲において、含水率が変動していると想定すると、モルタル表層から 30mm の範囲において、初期の膨潤で 4.0%、乾湿繰り返しの影響で 2.0%の含水率の変化があると推測される。以上のことから、図 4.22 に腐食促進試験期間中の乾湿繰り返しによるモルタル供試体中の含水率の分布の概念図を示す。モルタル供試体の表層から 30mm より以深は、乾湿繰り返しの影響をほとんど受けずに含水率は一定となり、表層から 30mm の範囲において、湿潤状態においてモルタル内部よりも含水率が大きくなり、乾燥状態においてモルタル内部と同等もしくは若干、含水率が小さくなるものと考えられる。

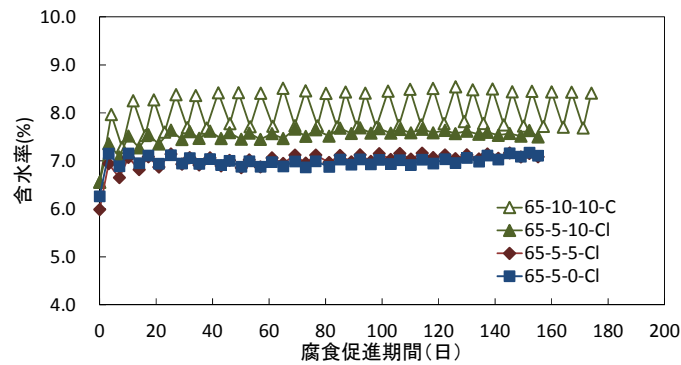


図4.21 腐食促進期間中のモルタル供試体の含水率

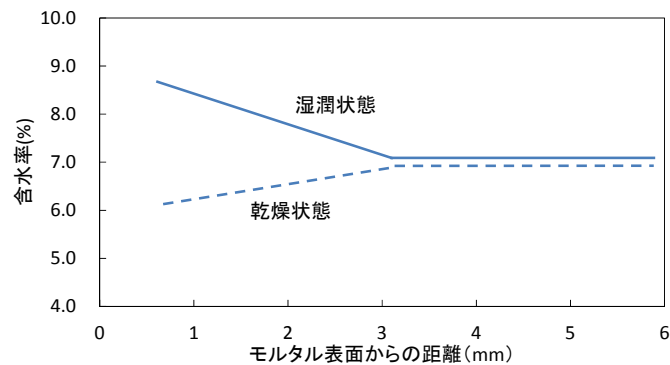


図4.22 乾湿繰り返しによるモルタル供試体中の含水率分布の概念図

4.3.3 まとめ

4.3 では、腐食形態の違いがモルタル表面のひずみおよびひび割れ発生に及ぼす影響を検証した。モルタル表面のひずみ挙動は、乾湿繰り返しによる腐食促進試験における腐食促進期間を通じたモルタル表面のひずみを連続的に求めることで把握し、腐食形態の指標となる腐食減少/腐食面積との関係を示すことで腐食形態の影響を示した。また、さらに、腐食促進試験期間中の質量変化より含水率を求め、実構造物におけるコンクリート中の含水率分布の調査結果を踏まえ、乾湿繰り返しによる含水率分布の変動を考察した。4.3 で得られた知見を以下に示す。

- 1) 塩害を模擬した条件におけるモルタル表面のひずみは、試験条件によって異なる挙動を示し、初期の塩化物イオン浸透深さが鉄筋中心まで浸透させた条件では、モルタル表面のひずみの増加速度は、他条件よりも小さくなった。
- 2) 腐食減量/腐食面積と表面のひずみの増加速度の関係より、局所的に著しく腐食する形態では、腐食膨張によるモルタル表面のひずみの増加速度は、均一に腐食する形態よりも大きくなった。
- 3) 腐食促進試験前の乾燥期間が長く、乾燥収縮によるひずみ変化が大きいと腐食促進試験直後の膨潤によるひずみ変化量が大きくなる傾向を示した。
- 4) 腐食促進試験期間中の質量変化から求めた含水率と、実構造物におけるコンクリート中の含水率分布の調査結果から、乾湿繰り返しによる含水率は、モルタル供試体内部の含水率は一定の値となり、湿潤状態では表層の含水率が内部よりも大きくなるものと考えられた。

4.4 発錆機構の違いが腐食生成物および体積膨張倍率に及ぼす影響に関する検討

4.4.1 実験概要

(1) 分析試料

表 4.5 に腐食生成物の分析に用いた試料の概要を示す。分析試料は、図 4.1 と同様のモルタル供試体内に配置した鉄筋とし、塩害および中性化のそれぞれの劣化機構を模擬した腐食促進試験に供したモルタル供試体より採取した鉄筋を対象とした。モルタル供試体の使用材料および配合は、4.2.1 と同様とし、モルタル供試体の水準として、塩害を想定した条件では、かぶりが 5mm, 7.5mm および 10mm とし、初期の塩化物イオン浸透深さが 0mm, 5mm, 7.5mm および 10mm とした。中性化を想定した条件では、水セメント比が 65%と 150%において、かぶりと初期の中性化深さを变化させたモルタル供試体において、それぞれの期間、腐食促進試験に供した。なお、腐食促進試験の環境条件は、4.2.1 と同様で、塩害を想定した条件では 40℃, 10%NaCl 水溶液に 3 日間浸漬、その後 20℃, 60%RH の環境下で 4 日間乾燥させる乾湿繰返しを 1 サイクルとした。中性化では、40℃ の水道水に 3 日間浸漬、4 日間の乾燥とした。

腐食促進試験後にモルタル供試体を割裂して鉄筋を採取し、腐食面積率を求めた。各分析試料の腐食面積率を表 4.5 にあわせて示す。各分析試料の腐食面積率は、40～70%程度の腐食面積率となった。また、分析試料 No.5 においては、腐食促進試験終了時点において、モルタル表面に目視にて確認できるひび割れが発生していた。そのひび割れ幅は 0.1mm 以下であった。なお、分析試料とした鉄筋では、腐食生成物を対象とした分析を実施するため、クエン酸二アンモニウム水溶液浸漬による腐食生成物の除去は省略した。

表4.5 腐食生成物の分析試料の概要

試料 No.	供試体記号	劣化機構	水セメント比 (%)	かぶり (mm)	塩分浸透深さ, 中性化深さ(mm)	腐食促進期間 (日)	腐食面積率 (%)
1	65-10-0-Cl	塩害	65	10	0	270	48.2
2	65-10-10-Cl				10	270	44.5
3	65-10-10-Cl			10	205	44.5	
4	65-7.5-7.5-Cl			7.5	205	45.3	
5	65-5-5-Cl			5	205	60.5 ひび割れ	
6	65-7.5-7.5-C	中性化	65	7.5	7.5	227	58.5
7	65-5-5-C			5	5	227	60.5
8	150-5-10-C		150	5	10	121	68.2
9	150-5-10-C					143	68.0

(2) 分析方法

(2.1) 定性分析

XRD 分析では、はじめに腐食した鉄筋表面の腐食生成物を対象とした定性分析を行い、概ねの腐食生成物の結晶相を把握した。定性分析では、採取した鉄筋の腐食した箇所にて X 線を照射し、結晶相を把握する手法とした。定性分析では、分析試料の鉄筋をモルタル供試体より採取した状態において分析が可能であることから、簡易的に腐食生成物の結晶相を把握することができる。ただし、X 線の照射範囲は、限定的になるため、含有割合などの定量的な分析は困難であることに留意する必要がある。分析における X 線の照射範囲は、鉄筋断面方向で約 7mm、鉄筋の長手方向では、X 線の照射角度によって変化する。X 線の照射角度が低角度のほど照射範囲の鉄筋長手方向の長さは大きくなり、高角度ほど小さくなる。分析深さは、数 μm ～数 10 μm とされており、X 線の照射角度が低角度のほど浅くなり、高角度ほど分析深さは深くなる。定性分析における測定条件を表 4.6 に示す。

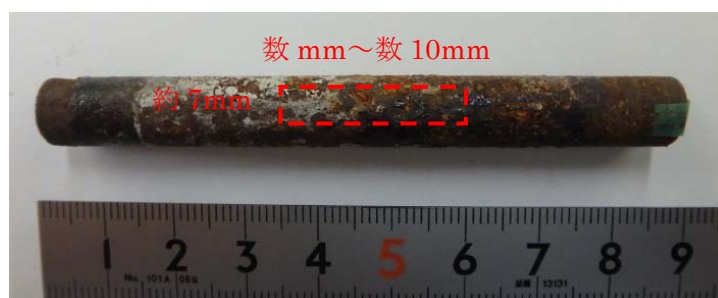


図4.23 定性分析における X 線照射範囲の概念図

表4.6 定性分析における測定条件

測定装置	リガク社製 X 線回折装置 SmartLab	
測定方法	集中法 (集中ビームによる $\theta/2\theta$ スキャン)	
測定条件	X 線源	$\text{Co-K}\alpha$ ($\lambda=1.7902 \text{ \AA}$)
	管電圧/管電流	40kV/36mA
	$\text{K}\beta$ 線の除去	フィルター
	スリット	発散 : $2/3^\circ$, 散乱 : 8mm° , 受光 : 13mm 長手制限スリット幅 : 5mm
	検出器	一次元検出器 (D-teX Ultra2)
	測定モード	連続
	ステップ	0.02°
	スキャン速度	$4.0^\circ / \text{min}$
スキャン範囲	$5^\circ \sim 110^\circ$ (2 θ)	

(2.2) 定量分析

定量分析では、定性分析の結果を踏まえ、分析試料 No.1～No.4 を塩害、分析試料 No.6～No.9 を中性化における腐食条件の平均的な試料として、定量分析を行った。定性分析後の分析試料を対象として、各試料の表面から腐食生成物をステンレスヘラおよび手持ち回転研磨機（ルーター）にて削り落としながら採取した。それぞれの分析試料における採取した腐食生成物の量が定量分析に用いる所要の試料量を採取できなかったため、分析試料 No.1～No.4 を塩害による腐食生成物、分析試料 No.6～No.9 を中性化による腐食生成物として、それぞれ 4 試料を混合して分析に用いた。分析試料 No.1～No.4 および分析試料 No.6～No.9 のそれぞれをメノー乳鉢にて粉碎、混合して、内部標準試料として ZnO を 20wt% 添加して測定用試料として、リートベルト解析により結晶相の定量分析を行った。定量分析における測定条件を表 4.7 に示す。

表4.7 定量分析における測定条件

測定装置	リガク社製 X線回折装置 SmartLab	
測定方法	集中法（集中ビームによる $\theta/2\theta$ スキャン）	
測定条件	X線源	$\text{Co-K}\alpha$ ($\lambda=1.7902 \text{ \AA}$)
	管電圧/管電流	40kV/36mA
	$\text{K}\beta$ 線の除去	フィルター
	スリット	発散： $1/2^\circ$ ，散乱： 8mm° ，受光：13mm 長手制限スリット幅：10mm
	検出器	一次元検出器（D-teX Ultra2）
	測定モード	連続
	ステップ	0.02°
	スキャン速度	$1.0^\circ / \text{min}$
	スキャン範囲	$5^\circ \sim 140^\circ$ (2 θ)

4.4.2 分析結果および考察

(1) 腐食生成物の結晶相の種類および含有割合

表 4.8 に定性分析による腐食生成物の結晶相の同定結果の一覧を、図 4.24 に各分析試料における X 線回折強度を示す。X 線回折強度より No.1～5 の塩害を想定した条件における分析試料では、塩化物イオンの共存下で生成される β -FeOOH が確認された。塩害を想定した条件のうち、No.1～4 の腐食生成物は、主に Fe_3O_4 、 α -FeOOH および β -FeOOH であり、分析試料 No.5 では、 β -FeOOH の単相と、No.5 では他の塩害を想定した条件の分析試料と異なる傾向を示した。これは、分析試料 No.5 はかぶり 5mm で、腐食促進試験終了時点においてひび割れが確認されており、他の条件よりも腐食しやすい条件であることとひび割れを介して塩化物イオンの供給が他条件よりも大きくなったことが影響していると考えられる。また、分析試料 No.4 においては、回折ピークが明確ではないが、 $\text{FeCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$ が検出され、塩化酸化鉄や塩化水酸化鉄が生成されている可能性が示された。

既往の研究より、 β -FeOOH は、塩化物イオンが共存する環境下のみで Green Rust (I) を経て生成

する。中性から酸性環境下で生成しやすいことが報告されており、アルカリ環境下では溶解し、 Fe_3O_4 や $\alpha\text{-FeOOH}$ に変化することが報告されている^{414) 415)}。分析試料 No.1~4 では、中性化させていないことからモルタル供試体中の鉄筋周辺環境は、アルカリ環境下であり、 $\beta\text{-FeOOH}$ が生成されるものの Fe_3O_4 や $\alpha\text{-FeOOH}$ に変化しやすい環境であることが推測される。分析試料 No.5 では、ひび割れを介して NaCl 水溶液が浸透しやすく、モルタル供試体中の鉄筋周辺においてアルカリ性から中性に近づいていると考えられ、 $\beta\text{-FeOOH}$ が生成されやすい環境であったと推測される。

No.6~9 の中性化を想定した条件での腐食生成物は、主に Fe_3O_4 , $\alpha\text{-FeOOH}$ であり、塩害を想定した条件の分析試料と異なる傾向を示した。また、塩害および中性化を想定した両方の条件下において、 $\alpha\text{-FeOOH}$ の生成が確認された。 $\alpha\text{-FeOOH}$ は、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の加水分解により生成し、他の腐食生成物から $\alpha\text{-FeOOH}$ に変化する過程では水分の存在が必要されており、腐食促進試験において乾湿繰り返しにより、十分な水分が供給されている環境であったことが伺える。

表4.8 定性分析における結晶相の同定結果

試料 結晶相	塩害					中性化			
	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8	No.9
Fe_3O_4 [Magnetite]	◎	◎	◎	◎		◎	◎	◎	◎
$\alpha\text{-FeOOH}$ [Goethite]	△	△	△	△		△	△	△	△
$\beta\text{-FeOOH}$ [Akaganeite]	◎	△	◇	△	◎				
$\gamma\text{-FeOOH}$ [Lepidocrosite]								◇	△
$\text{FeCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$				◇					

※各結晶相のメインピークの強度を試料ごとに◎>△で示した

※◇は存在する可能性があるが、回折ピークが小さく、断定はできない結晶相である

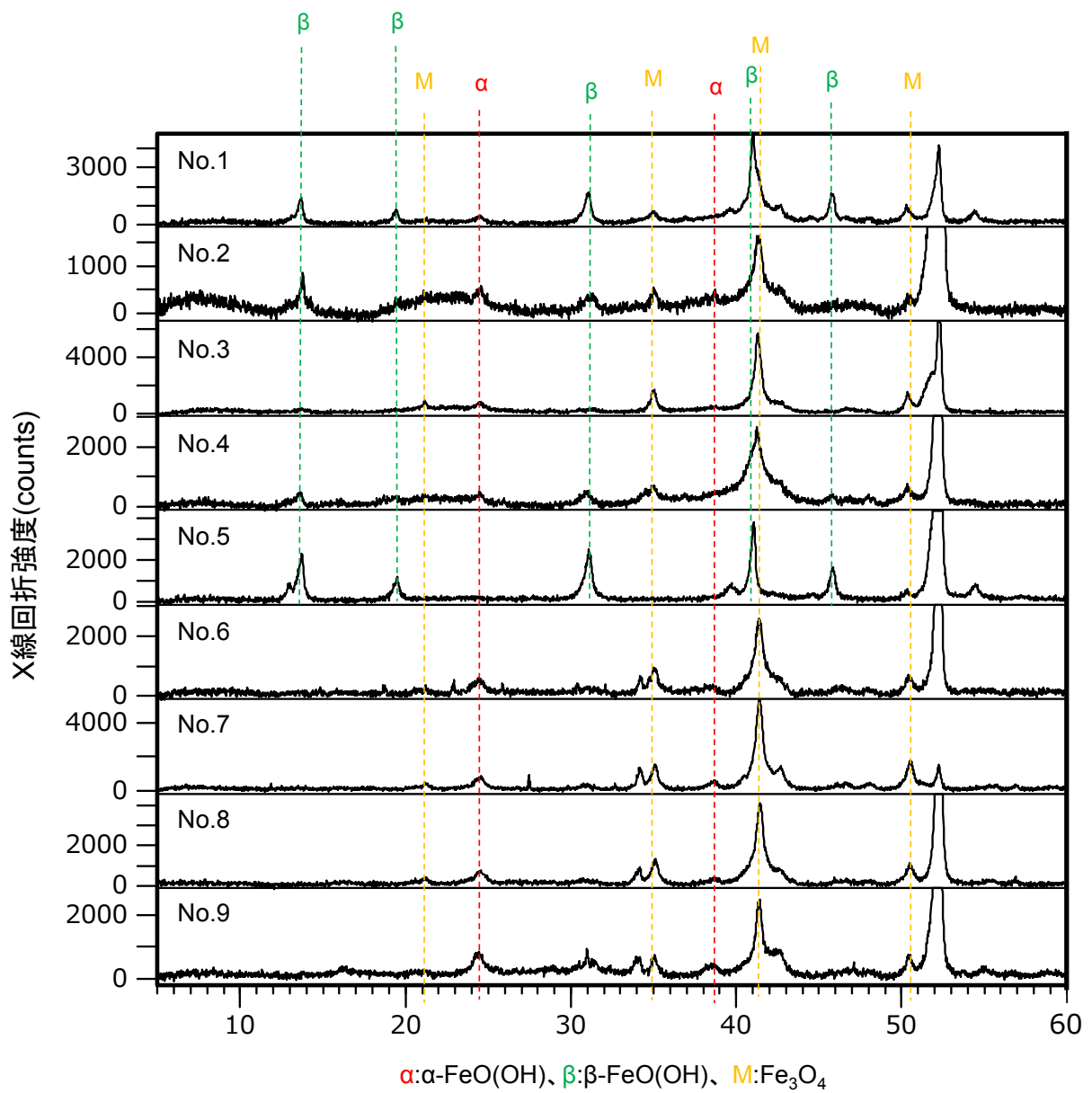


図4.24 腐食生成物の XRD 分析の測定結果

分析試料 No.5 は、 β -FeOOH の単相であり、他の塩害を想定した条件の分析試料と異なる傾向を示した。定性分析の結果を踏まえ、No.1～4 の試料を塩害による腐食生成物として 4 試料を混合し、定量分析に用いた。中性化を想定した条件では、No.6～9 の試料を中性化における腐食生成物として 4 試料を混合して分析した。

表 4.9 に定量分析による腐食生成物の結晶相の定量結果の一覧を、図 4.25、図 4.26 に塩害 (No.1～4) を想定した条件と中性化 (No.6～9) を想定した条件の分析試料における X 線回折強度を示す。塩害 (No.1～4) を想定した条件の分析試料では、 Fe_3O_4 、 α -FeOOH および β -FeOOH がそれぞれ 15%、8% および 11% 検出された。また、定量分析において $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ が 5% 含有していることが分かった。定性分析では、 $\text{FeCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$ が含有している可能性が示されたが、定量分析において $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ が検出された。これは、試料の表層を対象とした定性分析と腐食生成物を削り落とし粉末として腐食生成物の全体を対象とした定量分析の試料の違いによるものと考えられる。また、分析試料の切削から混合する試料処理の過程で $\text{FeCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$ から $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ に変質した可能性も考えられ、定性分析と定量分析の違いと分析試料の試料処理過程の整合性の検証については、今後の課題として挙げられる。

中性化 (No.6～9) を模擬した条件の分析試料では、 Fe_3O_4 と α -FeOOH が検出され、それぞれ 34% と 14% であり、 Fe_3O_4 の含有割合が大きかった。定性分析では、 γ -FeOOH が含有している可能性が示されたが、定量分析では検出されなかったことから、 γ -FeOOH の存在比はわずかであることが考えられる。

図 4.25 および図 4.26 におけるそれぞれの分析試料の X 線回折強度を確認すると、 α -Fe と α - Al_2O_3 が確認され、これらは鉄筋素地由来の α -Fe と切削器具由来の α - Al_2O_3 である。また、 α - SiO_2 や CaCO_3 が検出されたが、これらは、採取した鉄筋に付着したモルタル由来によるものであると考えられる。

表4.9 XRD 分析による定量分析結果 (単位 : wt%)

試料		塩害	中性化
		(No.1～4)	(No.6～9)
結晶相			
Fe_3O_4	[Magnetite]	15	34
α -FeOOH	[Goethite]	8	14
β -FeOOH	[Akaganeite]	11	—
γ -FeOOH	[Lepidocrosite]	—	—
	$\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	5	—
	非晶質+未同定相	61	52

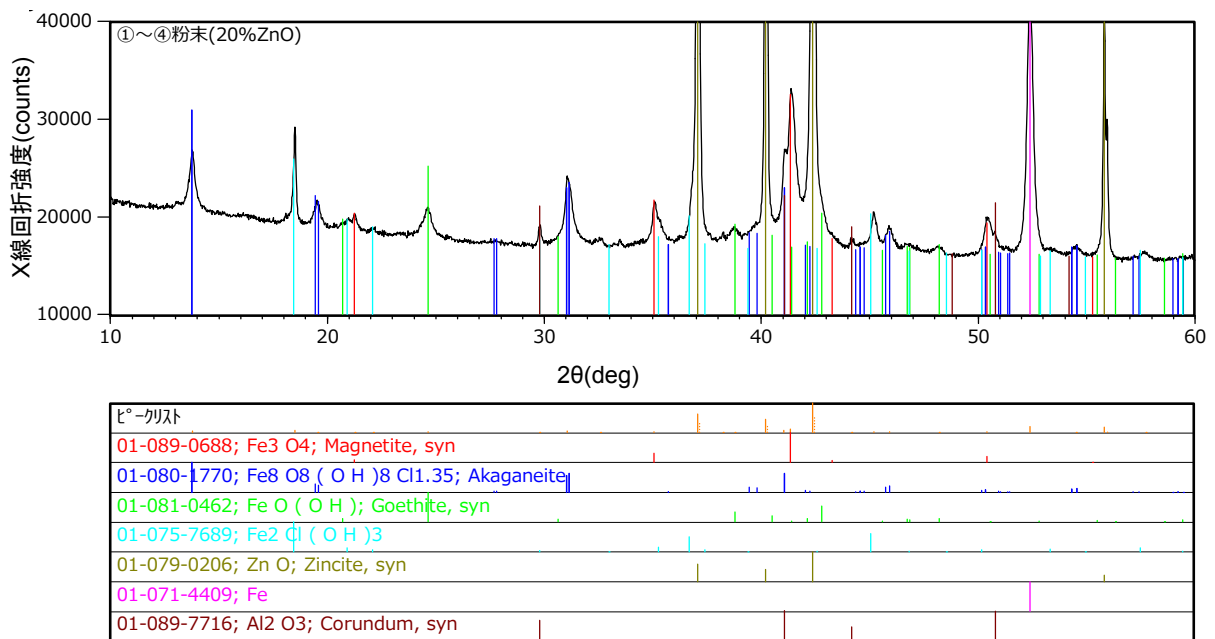


図4.25 腐食生成物の XRD 分析の測定結果 塩害 (No.1~4)

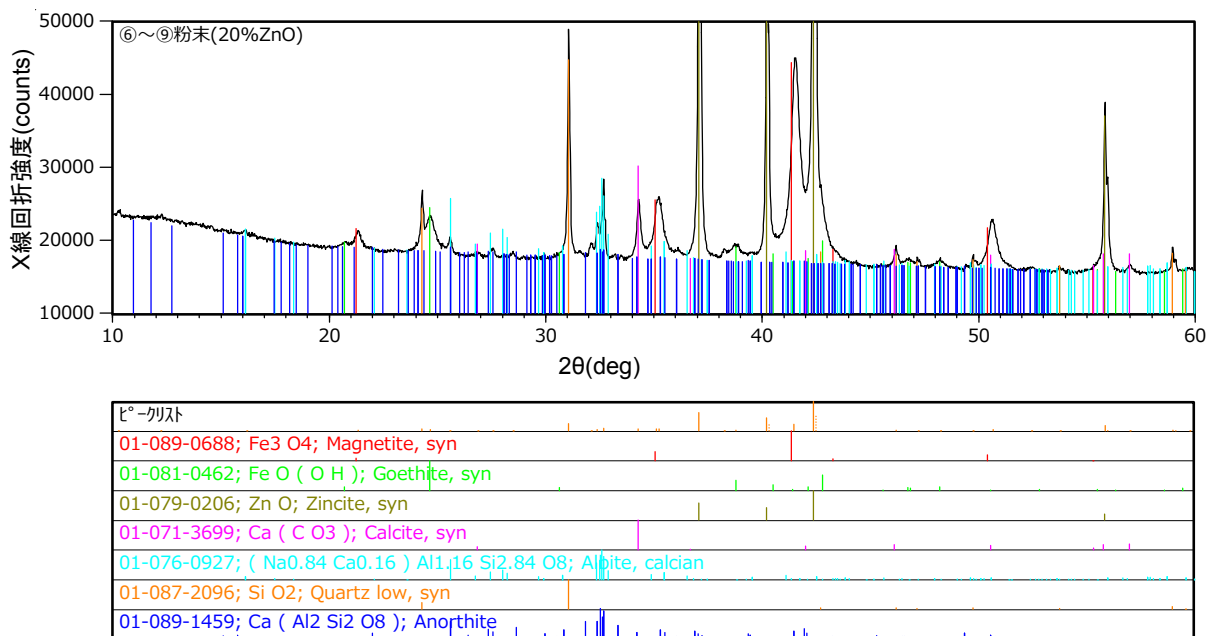


図4.26 腐食生成物の XRD 分析の測定結果 中性化 (No.6~9)

(2) 腐食生成物の結晶相の違いが体積膨張倍率に及ぼす影響

表 4.10 に定量分析に用いた結晶相の PDF (Powder Diffraction File) を示す。表 4.10 に示すように腐食生成物の各結晶相の密度は $2.0\sim 5.2\text{g/cm}^3$ とそれぞれの結晶相で異なり、鉄素地 Fe の密度 7.9g/cm^3 よりも小さい。この各結晶相の密度と分子量を用いて、鉄素地 Fe に対する体積膨張倍率を算出した。図 4.27 に腐食生成物の各結晶相の体積膨張倍率を示す。塩化物イオンの共存下において生成される $\beta\text{-FeOOH}$, $\text{FeClCaO}_2\text{Cl}$ および $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ は、他の Fe_3O_4 , $\alpha\text{-FeOOH}$ といった腐食生成物よりも体積膨張倍率が大きく、腐食生成物全体における寄与率が大きいことがわかる。

次に、腐食生成物の定量分析結果の各結晶相の含有割合 (表 4.9) と各結晶相の体積膨張倍率 (図 4.27) を用いて、塩害 (No.1~4) を模擬した条件の分析試料と中性化 (No.6~9) を模擬した条件の分析試料の腐食生成物のそれぞれの体積膨張倍率を算出した。なお、腐食生成物の体積膨張倍率を算出するにあたり、3.5 における実構造物から採取した鉄筋における腐食生成物の分析の際と同様に、非晶質の腐食生成物はコンクリートの細孔溶液中に液化し、腐食膨張には寄与しないと想定して、非晶質+未同定相を除外して算出した。図 4.28 に塩害および中性化による腐食生成物の含有割合と体積膨張倍率を示す。塩害 (No.1~4) を模擬した条件の分析試料は、体積膨張倍率の寄与率が大きい $\beta\text{-FeOOH}$ と $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ が、腐食生成物中の 11%と 5%含有していることから、腐食生成物全体の体積膨張倍率として 3.29 となった。ここで、既往の研究⁴⁾¹⁶⁾によると $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ は、 $\beta\text{-FeOOH}$ となる初期生成物であり、 α , β , γ 以外の水酸化鉄は結晶性としての安定性が低く、経時的に他結晶相に変化するものと考えられている。塩害 (No.1~4) において検出された $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ が、経時的に $\beta\text{-FeOOH}$ と全て変化すると仮定した場合、塩害 (No.1~4) の腐食生成物の体積膨張倍率は 2.84 となる。また、分析試料 No.5 は、ひび割れが発生したモルタル供試体であり、定性分析の結果は $\beta\text{-FeOOH}$ の単相であったことから、腐食生成物の体積膨張倍率は 3.71 となる。つまり、塩害における鉄筋の腐食生成物の結晶相は、鉄筋腐食が開始されて初期の段階からひび割れ発生した後の期間において経時的に変化し、その結晶相の変化に伴い、腐食生成物の体積膨張倍率が 2.5~4.0 程度の範囲で変化しながら、鉄筋の腐食が進展するものと考えられる。

中性化 (No.6~9) を模擬した条件の分析試料では、腐食生成物全体の体積膨張倍率は 2.33 となった。3.5 における実構造物での中性化により腐食した鉄筋の腐食生成物の分析結果と比較すると、実構造物で雨掛かりのある条件での腐食生成物の体積膨張倍率は 2.70 と 2.77 と中性化を想定した腐食促進試験において得られた中性化 (No.6~9) の分析結果の 2.33 より、若干大きくなった。これは、実構造物から採取した腐食生成物では、体積膨張倍率の寄与率の大きい $\beta\text{-FeOOH}$ が 6, 7% 含有していることが影響している。実構造物から採取した腐食生成物では、経過年数が 10 年および 45 年間と長期間かけて腐食したものであり、時間の経過とともに、コンクリート中の微量の塩化物イオンが細孔溶液中を移動することで、鉄筋周辺において塩化物イオンが濃縮され、 $\beta\text{-FeOOH}$ が生成されたと考える。腐食促進試験と実構造物より採取した中性化による腐食生成物の分析結果の相違は、この腐食した期間の違いによるものと推測する。

腐食促進試験後の鉄筋の腐食生成物と実構造物より採取した鉄筋の腐食生成物の定量分析の結果から、塩害および中性化のそれぞれの発錆機構において、腐食生成物の結晶相が異なることが示された。また、腐食生成物の結晶相は、経時的に変化するものがあり、特に塩害の場合では、体積

膨張倍率の寄与率の高い $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ などが初期の段階で生成され、かぶりコンクリートのひび割れ発生に大きく影響を及ぼすものである。このことは、塩害と中性化による劣化を比較した場合、塩害では腐食速度が中性化よりも速いだけでなく、腐食生成物の体積膨張倍率が中性化による鉄筋腐食よりも経過時間において 2.5~4.0 と変化することで、かぶりコンクリートに作用する応力が大きくなり、ひび割れが発生しやすい条件であることが示された。

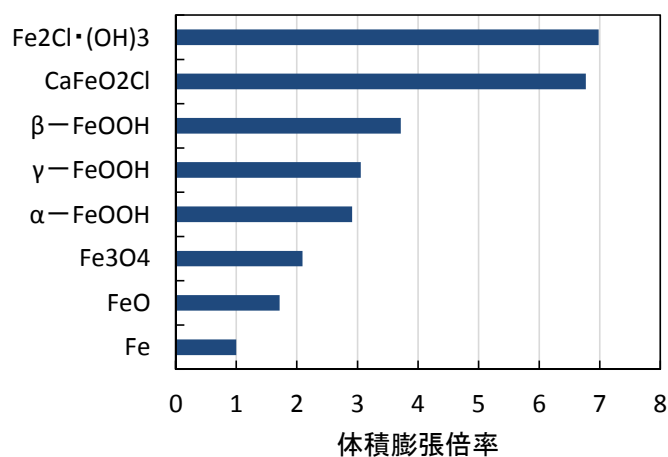


図4.27 各結晶相の体積膨張倍率

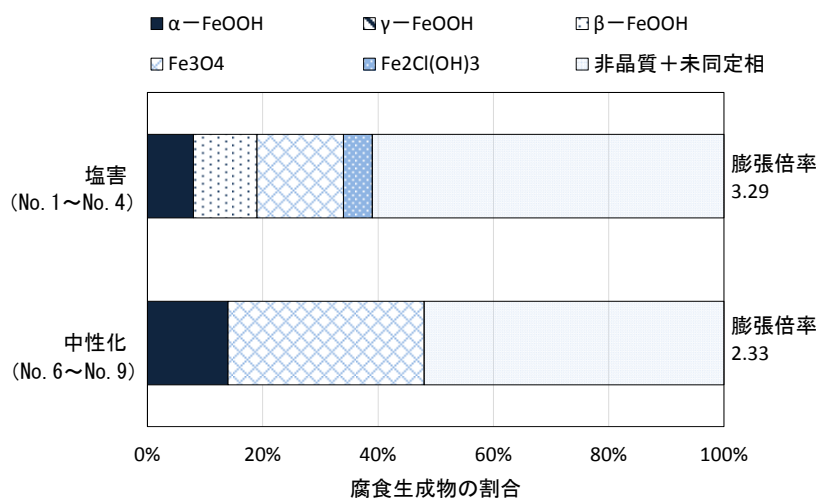


図4.28 塩害および中性化による腐食生成物の含有割合と体積膨張倍率

表4.10 定量分析に用いた各結晶相の PDF

PDF No.+A1:G23	化学式	鉱物名	結晶系	空間群	格子定数(Å・degree)	計算密度
01-089-0688	Fe ₃ O ₄	Magnetite, syn	立方晶	Fd-3m	a=8.40450, b=8.40450, c=8.40450	5.2
01-081-0462	FeO(OH)	Goethite, syn	斜方晶	Pbnm	a=4.61880, b=9.95280, c=3.02360	4.2
01-080-1770	Fe ₈ O ₈ (OH) ₈ Cl _{1.35}	Akaganeite	単斜晶	I2/m	a=10.60000, b=3.03390, c=10.51300, α=90.00000, β=90.24000, γ=90.00000	3.7
01-070-8045	FeO(OH)	Lepidocrocite	斜方晶	Cmcm	a=3.07200, b=12.51600, c=3.87300	4
01-075-7689	Fe ₂ Cl(OH) ₃	-	三方晶	R-3m	a=6.95940, b=6.95940, c=14.78470, α=90.00000, β=90.00000, γ=120.00000	2
01-071-0917	FeCl ₂ (H ₂ O) ₄	-	単斜晶	P21/c	a=5.88500, b=7.18000, c=8.51400, α=90.00000, β=111.09000, γ=90.00000	3.1
01-073-1428	FeSO ₄ (H ₂ O) ₄	Rozenite, syn	単斜晶	P21/n	a=5.97900, b=13.64800, c=7.97700, α=90.00000, β=90.43000, γ=90.00000	2.3
01-079-0206	ZnO	Zincite, syn	六方晶	P63mc	a=3.24992, b=3.24992, c=5.20658	5.7
01-071-4409	Fe	-	立方晶	Im-3m	a=2.86650, b=2.86650, c=2.86650	7.9
01-089-7716	Al ₂ O ₃	Corundum, syn	三方晶	R-3c	a=4.75850, b=4.75850, c=12.99000, α=90.00000, β=90.00000, γ=120.00000	4
01-071-3699	Ca(CO ₃)	Calcite, syn	三方晶	R-3c	a=4.99100, b=4.99100, c=17.06200, α=90.00000, β=90.00000, γ=120.00000	2.7
01-087-2096	SiO ₂	Quartz low, syn	三方晶	P3221	a=4.91270, b=4.91270, c=5.40450	2.7
01-076-0927	(Na _{0.84} Ca _{0.16})Al _{1.16} Si _{2.84} O ₈	Albite, calcian	三斜晶	C-1	a=8.15530, b=12.82060, c=7.13970, α=93.96500, β=116.47500, γ=88.63100	2.6
01-089-1459	Ca(Al ₂ Si ₂ O ₈)	Anorthite	三斜晶	P-1	a=8.17500, b=12.87300, c=14.17000, α=93.11000, β=115.89000, γ=91.28000	2.8

4.4.3 まとめ

腐食促進試験を実施した後の腐食した鉄筋を対象に、XRD 分析により腐食生成物の結晶相の種類と含有割合を求めた。XRD 分析では、はじめに腐食した鉄筋表面の腐食生成物を対象とした定性分析を行い、概ねの腐食生成物の結晶相を把握した。その後、腐食生成物を採取して粉末状の分析試料として、リートベルト法により腐食生成物の含有割合を求めた。その結果から、腐食生成物の体積膨張倍率を算出し、塩害と中性化の発錆機構の違いが鉄筋腐食における体積膨張倍率に与える影響を示した。4.4 で得られた知見を以下に示す。

- 1) 定性分析の結果から、塩害を模擬した条件の分析試料では、腐食生成物の結晶相は主に Fe₃O₄, α-FeOOH および β-FeOOH であり、一部の試料では、β-FeOOH の単相となるものや、X 線回折ピークが明確ではないが、FeCl₂(H₂O)₄ が検出され、塩化酸化鉄や塩化水酸化鉄が生成されている可能性が示された。
- 2) 中性化を想定した条件での腐食生成物は、主に Fe₃O₄, α-FeOOH であり、塩害を模擬した条件の分析試料と異なる傾向を示した。また、塩害および中性化を模擬した両方の条件下において、α-FeOOH の生成が確認された。腐食促進試験において乾湿繰り返しにより、十分な水分が供給されている環境であることから、α-FeOOH が生成され易い環境であったことが示された。
- 3) 定量分析の結果から、塩害を模擬した条件の分析試料では、Fe₃O₄, α-FeOOH および β-FeOOH がそれぞれ 15%, 8% および 11% 検出された。また、定量分析において Fe₂Cl(OH)₃ が 5% 含有

していることが分かった。

- 4) 中性化を模擬した条件の分析試料では、 Fe_3O_4 と $\alpha\text{-FeOOH}$ が検出され、それぞれ 34% と 14% であり、 Fe_3O_4 の含有割合が大きかった。定性分析では、 $\gamma\text{-FeOOH}$ が含有している可能性が示されたが、定量分析では検出されなかったことから、 $\gamma\text{-FeOOH}$ の存在比はわずかであることが考えられる。
- 5) 塩害を模擬した条件の分析試料は、体積膨張倍率の寄与率が高い $\beta\text{-FeOOH}$ と $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ が、腐食生成物中の 11% と 5% 含有していることから、腐食生成物全体の体積膨張倍率として 4.0 となった。また、 $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ は、 $\beta\text{-FeOOH}$ となる初期生成物であり、 α 、 β 、 γ 以外の水酸化鉄は結晶性としての安定性が低く、経時的に他結晶相に変化するものと考えられている。
- 6) 塩害における鉄筋の腐食生成物の結晶相は、鉄筋腐食が開始されて初期の段階からひび割れ発生した後の期間において経時的に変化し、その結晶相の変化に伴い、腐食生成物の体積膨張倍率が 2.5~4.0 程度の範囲で変化しながら、鉄筋の腐食が進展するものと考えられる。
- 7) 中性化を模擬した条件の分析試料では、腐食生成物全体の体積膨張倍率は 2.33 となった。実構造物での中性化により腐食した鉄筋の腐食生成物の分析結果と比較すると、実構造物で雨掛かりのある条件での腐食生成物の体積膨張倍率は 2.70 と 2.77 と中性化を模擬した腐食促進試験において得られた分析結果のほうが小さくなった。
- 8) 実構造物から採取した中性化による腐食生成物では、体積膨張倍率の寄与率の大きい $\beta\text{-FeOOH}$ が 6、7% 含有していることが影響しており、10 年および 45 年間と長期間かけて腐食したことが影響しているものと考えられた。
- 9) 塩害および中性化のそれぞれの発錆機構において、腐食生成物の結晶相が異なることが示された。腐食生成物の結晶相は、経時的に変化するものがあり、特に塩害の場合では、体積膨張倍率の寄与率の高い $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ などが初期の段階で生成され、かぶりコンクリートのひび割れ発生に大きく影響を及ぼすことが示された。
- 10) 中性化による劣化を比較した場合、塩害では腐食速度が中性化よりも速いだけでなく、腐食生成物の体積膨張倍率が中性化による鉄筋腐食よりも経過時間において限定的であるものの大きくなることで、かぶりコンクリートに作用する応力が大きくなり、ひび割れが発生しやすい条件であることが示された。

4.5 かぶりコンクリートの発生応力

4.5.1 厚肉円筒理論

かぶりコンクリートのひび割れ発生を予測するためには、鉄筋の腐食量からかぶりコンクリートの表面に発生する引張応力を算出する必要がある。ここでは、厚肉円筒理論^{4-17~4-21)}を用いて、腐食量からコンクリート表面の引張応力を算出する方法を用いることとした。既往の研究によれば、厚肉円筒理論を用いる場合、腐食量からコンクリート表面の引張応力を検討するにあたり、腐食が均一的に発生することではなく、実際には孔食のように腐食が偏ることで、ひび割れ発生時の腐食量の実験値と厚肉円筒理論から算出される計算値が乖離することが報告されている。そのため、計算値に修正係数を乗ずることで実験値との整合性を確認することがなされている。

4.2, 4.3 において検討した腐食促進試験の結果より、塩害の場合は、腐食形態が局所的になることが示され、中性化の場合は、腐食形態が均一的になることがわかった。そこで、腐食形態が均一となる中性化での鉄筋腐食の場合における厚肉円筒理論の適用性について検証する必要がある。よって、4.3 において検討した腐食促進試験におけるモルタル表面のひずみ変化量と厚肉円筒理論により算出されるモルタル表面にひずみとの比較を行うこととした。4.5 では厚肉円筒理論^{4-17~4-21)}を用いて鉄筋の質量減少率からモルタル表面に発生する平均引張応力を算出し、腐食促進試験における鉄筋の質量減少率とモルタル表面のひずみ変化量の実験結果と比較検討する。以下に、厚肉円筒理論の概要について示す。

図 4.29 に厚肉円筒理論における力学モデルの概略を示す^{4-17~4-19)}。腐食膨張により、腐食していない鉄筋に作用する圧力 q_0 とかぶりコンクリートに作用する圧力 q_1 が発生する。この圧力 q_1 によりかぶりコンクリート表面にひび割れが発生するものと仮定している。腐食膨張によるひび割れ発生として厚肉円筒理論を採用し、かぶりコンクリートのひび割れ発生条件として、既往の研究⁴⁻²⁰⁾に基づき、かぶりコンクリートの引張応力 f_t を算出する (式 4.1)。

腐食していない鉄筋に作用する圧力 q_0 とかぶりコンクリートに作用する圧力 q_1 は、コンクリートの力学的特性、鉄筋の配筋条件および鉄筋の腐食量により表され、以下のような関係となる。かぶりコンクリートは内圧のみを受けると仮定すると内圧 q_1 が作用し、コンクリート内周半径方向の変位 u_c は式 4.2 となる。

$$f_t = \frac{1}{\alpha_0(K_0-1)} q_1 \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.1)}$$

$$u_c = \frac{(1+\nu_c)\{(1-2\nu_c)+K_0^2\}D}{2E_c(K_0^2-1)} q_1 \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.2)}$$

ここに、 $K_0 = (2C+D)/D$ C : かぶり、 D : 鉄筋径、 α_0 : 修正係数 0.5~0.8、ここでは 0.8
 E_c : コンクリートの静弾性係数 (クリープを考慮する場合 $E'_c = E_c/(\phi_c+1)$)
 ν_c : コンクリートのポアソン比

鉄筋腐食により腐食した後の鉄筋径は減少する。厚肉円筒理論では、腐食生成物が均一の厚さに鉄筋表面に生成されると仮定しており、腐食減少による内径 D_1 と腐食生成物による膨張した外径 D_2 は式 4.3 となる。

$$D_1^2 = D^2 - 4 \cdot A_w / \pi$$

$$D_2^2 = D^2 + 4(n - 1) \cdot A_w / \pi \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.3)}$$

次に、 n は腐食生成物の体積膨張倍率であり、4.4 にて検討したように塩害と中性化では、腐食生成物の結晶相が異なり、ここでは塩害では 2.5~4.0 および中性化では 2.5 とする。

厚肉円筒理論では、腐食生成物は、内径 D_1 、外径 D_2 の円筒であると仮定し、内圧 q_0 、外圧 q_1 が生じており、内径半径方向の変位 u_{r0} 、外径半径方向の変位 u_{r1} 、を式 4.4 と式 4.5 で表している。また、腐食していない鉄筋断面は、外圧 q_0 を受けるものとして半径方向の変位 u_{r0} が式 4.6 にて求められる。

$$u_{r0} = \frac{(1+\nu_r)D_1}{2E_r(K_1^2-1)} \{ (1 - 2\nu_r)(q_0 - q_1K_1^2) + (q_0 - q_1)K_1^2 \} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.4)}$$

$$u_{r1} = \frac{(1+\nu_r)D_2}{2E_r(K_1^2-1)} \{ (1 - 2\nu_r)(q_0 - q_1K_1^2) + (q_0 - q_1) \} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.5)}$$

$$u_s = \frac{(1-\nu_s)D_1}{2E_s} q_0 \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.6)}$$

ここに、 $K_1 = D_2/D_1$,

ν_r : 腐食生成物のポアソン比 $\nu_r = 1/6$,

E_r : 腐食生成物の静弾性係数 $E_r = 196 \text{ (N/mm}^2\text{)}$

(クリープを考慮する場合 $E'_r = E_r / (\phi_r + 1)$)

ν_s : 鉄筋のポアソン比 $\nu_s = 1/6$,

E_s : 鉄筋の静弾性係数 $E_s = 200 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$

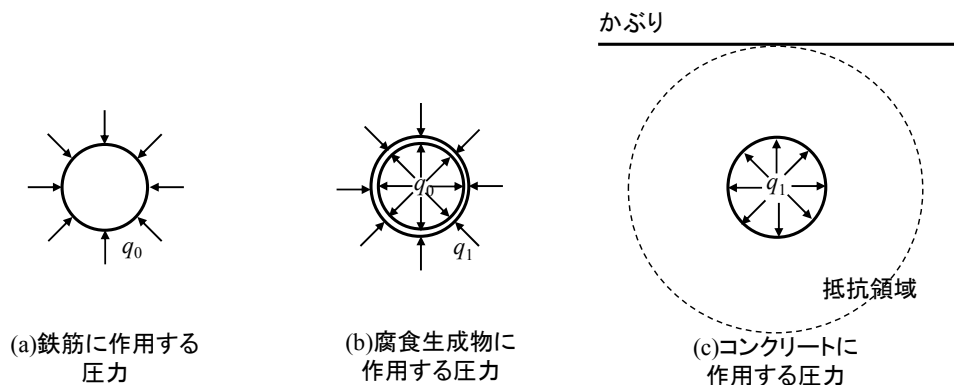


図4.29 厚肉円筒理論の概要

鉄筋と腐食生成物および腐食生成物とコンクリートの力の釣合条件から式 4.7 の変位の境界条件が得られ、腐食生成物の量から腐食していない鉄筋に作用する圧力 q_0 とかぶりコンクリートに作用する圧力 q_1 を求め、式 4.1 よりかぶりコンクリートの引張応力 f_i を算出する。

$$\begin{aligned} u_{r0} &= u_s \\ u_c &= D_2/2 - D/2 - u_{r1} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.7)}$$

4.5.2 腐食促進試験におけるモルタル表面ひずみとの比較

4.3 において検討した腐食促進試験におけるモルタル表面のひずみ変化量と厚肉円筒理論により算出されるモルタル表面にひずみとの比較を行った。表 4.11 に腐食促進試験における実験値と厚肉円筒理論において算出に用いる条件を示す。腐食促進試験後にクエン酸二アンモニウム水溶液浸漬にて求めた質量減少率から腐食による断面減少量 A_w を求め、式 4.1～式 4.7 を用いてモルタル表面の平均引張応力 f_i を算出した。その平均引張応力 f_i を算出するにあたり、表 4.12 に示すモルタルの材齢 70 日における静弾性係数を用い、かぶりはモルタル供試体を割裂して腐食した鉄筋を採取する際に実測した。また、腐食生成物の体積膨張倍率は、4.4 にて検討した内容を考慮して塩害では 2.5～4.0 の範囲と考えられ、ここでは、2.5～4.0 の平均値として 3.25、中性化では 2.5 とした。ここでは、コンクリートと腐食生成物のクリープの影響はないものとした。

表4.11 腐食促進試験における実験値と各条件値

供試体記号	鉄筋径 (mm)	腐食生成物の 体積膨張倍率	かぶり ^{※1} (mm)	質量減少率 ^{※2} (%)	表面のひずみ量 ^{※3} ($\times 10^{-6}$)
65-5-0-CI	φ 10	3.25	6.2	0.69	287
65-5-5-CI			6.0	0.51	264
65-5-10-CI			6.7	0.45	298
65-5-5-C		2.5	6.3	0.18	107
65-7.5-7.5-C			7.5	0.20	97
65-10-10-C			11.8	0.16	58

※1 モルタル供試体を割裂し、鉄筋を採取した際に実測した

※2 腐食促進試験終了後にクエン酸二アンモニウム水溶液浸漬にて求めた

※3 モルタル表面のひずみ変化量、腐食膨張に起因する表面のひずみ変化量（実験値）

表4.12 モルタルの圧縮強度と静弾性係数

材齢	見かけの密度(g/cm ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
7	2.26	24.7	19.7
14	2.25	30.9	22.3
28	2.26	36.2	23.4
70	2.27	46.0	26.6

図 4.30 に腐食促進試験におけるモルタル表面のひずみ変化量と厚肉円筒理論により算出されるモルタル表面にひずみとの比較結果を示す。塩害を想定した条件で初期の塩化物イオン浸透深さを 10mm としたもの (65-5-10-Cl) のほうが、初期の塩化物イオン浸透深さ 0mm としたもの (65-5-0-Cl) より、実験値と計算値が近い結果となった。これは、厚肉円筒理論により算出する際に、図 4.29 に示すように腐食生成物が均一の厚さに鉄筋表面に生成されると仮定している。実際には、塩害を想定した条件では、4.2 で示したように腐食形態が鉄筋の長手方向および鉄筋の断面方向において均一に腐食することはなく、局所的な腐食形態となる。この腐食形態が局所的に偏ることで、質量減少率が増大し、計算上の腐食深さが大きくなり、塩害を想定した条件では実験値と計算値が乖離するものである。塩害を想定した条件では、厚肉円筒理論を用いてコンクリート表面のひずみを算出する場合、腐食形態の違いを考慮する必要がある。一方で、腐食形態が均一的になる中性化においては、計算値と実験値が、塩害を想定した条件よりも近い値を示し、中性化による鉄筋腐食を想定する場合において、厚肉円筒理論により比較的、精度よく再現できるものと考えられる。

また、4.4 で示したように塩害における鉄筋の腐食生成物の結晶相は、鉄筋腐食が開始されて初期の段階からひび割れ発生した後の期間において経時的に変化し、その結晶相の変化に伴い、腐食生成物の体積膨張倍率が 2.5~4.0 程度の範囲で変化しながら、鉄筋の腐食が進展する。これらが影響し、実験値と計算値が乖離した可能性もある。

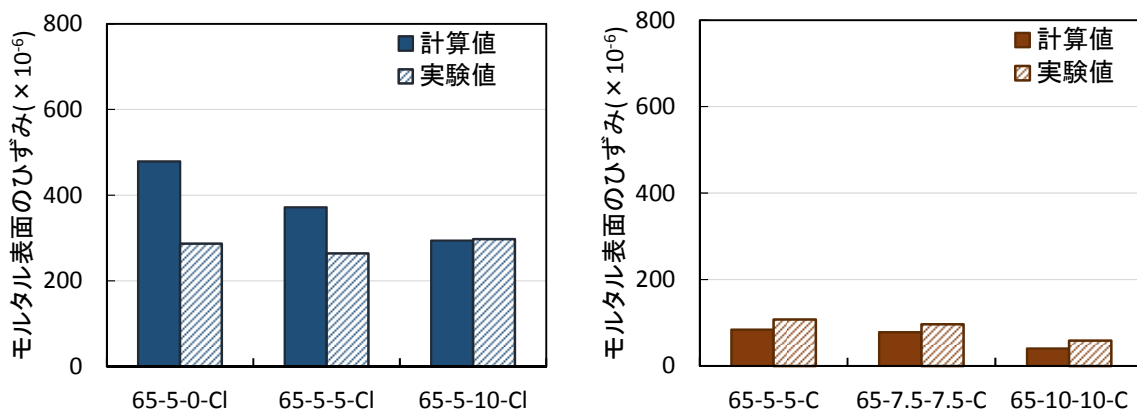


図4.30 モルタル表面のひずみ量の計算値と実験値の比較

【4章 参考文献】

- 4-1) 石橋忠良, 古谷時春, 浜崎直行, 鈴木博人: 高架橋等からのコンクリート片剥落に関する調査研究, 土木学会論文集 No.711/V-56, pp.125-134, 2002.8
- 4-2) 前原聡, 鈴木将充, 早川健司, 伊藤正憲, 伊代田岳史: 水分供給がかぶりコンクリートのはく離・はく落に与える影響に関する調査報告, 土木学会第70回年次学術講演会, V-041, pp.81-82, 2015.9
- 4-3) 社団法人日本コンクリート工学協会: JCI規準集(1977~2002年度), pp.91-94, 2004.4
- 4-4) 嵩英雄, 和泉意登志, 池田美和, 浅井達也, 押田文雄, 川端茂雄: 既存RC構造物におけるコンクリートの中性化と鉄筋腐食について(その1~3), 日本建築学会学術講演梗概集, 1983.
- 4-5) 高橋修平, Qi Lukuan, 高木言芳, 関博: コンクリートの中性化による内部鉄筋の腐食性状について, 土木学会第53回年次学術講演会, 1998.
- 4-6) 鳥取誠一: 鉄筋腐食に関する暴露試験等に基づいたコンクリート構造物の劣化予測, 京都大学博士論文, 2003.
- 4-7) 伊代田岳史: 高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.409-414, 2014.5
- 4-8) セメント協会: 耐久性専門委員会ひび割れ分科会 H-23, コンクリートの乾燥収縮に及ぼす各種要因の検討, pp.16-23, 1992.
- 4-9) 佐川孝広, 名和豊春: ポルトランドセメント-高炉スラグ系の水和反応-微細構造形成と乾燥収縮, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.652, pp.1029-1037
- 4-10) 佐川孝広, 渡邊詩穂子, 濱幸雄: 高炉セメントの空隙構造特性と乾燥収縮, 日本コンクリート工学協会 コンクリートの収縮特性評価およびひび割れへの影響に関するシンポジウム論文集, pp.53-58, 2010.12
- 4-11) 郭度連, 國府勝郎, 宇治公隆: コンクリートの乾燥下における水分存在状態および経時変化, コンクリート工学論文集, 第16巻第3号, pp.1-10
- 4-12) 伊代田岳史, 松崎晋一郎, 井ノ口公寛, 歌川紀之: 養生とその後の環境による内部湿度の相違が乾燥収縮に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.
- 4-13) 井ノ口公寛, 歌川紀之, 伊代田岳史: コンクリートの表層と内部の湿度の相違が乾燥収縮と耐久性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011.
- 4-14) Cornell, R. M. and Schwertmann, U. : The Iron Oxides, VHC, 1996.
- 4-15) J.L.JAMBOR, J.E.DUTRIZAC : Occurrence and Constitution of Natural and Synthetic Ferrihydrite, a Widespread Iron Oxyhydroxide, Chemical Reviews, Vol.98, pp.2549-2585, 1998.
- 4-16) 三沢俊平, 末高洽, 下平三郎: 水溶液における酸化鉄, オキシ水酸化鉄の生成と物性, 材料 19 (201), pp537-542, 1970.
- 4-17) 松島学, 横田優, 関博: 鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.1669-1674, 2004.7
- 4-18) 中川裕之, 田中大博, 横田優, 松島学: 塩水を用いた乾湿繰返し促進腐食実験によるひび割れモードとひび割れ発生時の腐食量, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.1, pp.110-121, 2008.2

- 4-19) 堤知明, 松島学, 村上祐治, 関博: 腐食ひび割れの発生機構に関する研究, 土木学会論文集 第 532 号, V-30, pp. 159-166, 1996.
- 4-20) 松島学, 堤知明, 関博, 松井邦人: 塩害環境下における RC 構造物の設計かぶり, 土木学会論文集, 第 490 号, V-23, pp. 41-49, 1994.
- 4-21) 原田哲夫, 出光隆, 渡辺明: 静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 360 号/V-3, pp.61-70, 1985.

5章 かぶりコンクリートのひび割れ発生予測に関する検討

5.1 はじめに

5章では、3章～4章において得られた知見をまとめ、主に中性化による鉄筋コンクリート構造物の劣化予測手法について検討する。コンクリート標準示方書[維持管理編]では、中性化による劣化過程を潜伏期、進展期、加速期、劣化期に分類している。表5.1に中性化における劣化過程の定義と期間を決定する要因を示す。潜伏期は、二酸化炭素が侵入し、鉄筋腐食が開始するまでの期間であり、その期間を決定する要因は、二酸化炭素の侵入および中性化に影響を受ける。次に、進展期は鉄筋腐食から腐食ひび割れ発生までとされ、加速期は鉄筋腐食によるひび割れが発生する時期以降とされている。本章では、かぶりコンクリートにひび割れが発生するまでの期間とし、潜伏期および進展期の範囲を対象として劣化予測手法について以下にまとめる。

潜伏期を対象とする場合には、実構造物の調査結果および実構造物より採取したコア供試体を対象とした検討より得られた知見を踏まえ、中性化の進行に及ぼす影響と劣化予測するにあたり留意点を示す。進展期を対象とした範囲では、まず、鉄筋腐食の進行は、中性化の進行に影響を受けるものと考え、3.8で示した中性化速度係数を加味した鉄筋腐食の進行機構を用いる。

さらに、鉄筋の腐食膨張がかぶりコンクリートに作用する応力を4.5で示した厚肉円筒理論により算出する。なお、腐食促進試験におけるひずみ変化より算出した応力と比較し、適用性の検証をした。なお、コンクリートに作用する応力を厚肉円筒理論により算出するにあたり、腐食生成物の体積膨張倍率は、4.4にて検討した内容を用いることとした。

表5.1 劣化過程の定義と期間を決定する要因（表1.2の再掲）

劣化過程	定義	塩害 期間を決定する要因	中性化 期間を決定する要因
潜伏期	鋼材腐食が開始するまでの期間	塩化物イオンの拡散 初期含有塩化物イオン濃度	中性化進行速度
進展期	鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度	鋼材の腐食速度
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	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期	腐食量の増加により耐荷力の低下が顕著な期間		

5.2 中性化の進行および鉄筋の腐食開始時期

中性化の進行においては、実構造物の調査結果および実構造物より採取したコア供試体を対象とした検討より以下の点に留意する必要がある。

- (1) 既存構造物において、経過年数および中性化深さの調査結果から中性化の進行を予測するにあたり、供用年数によるコンクリートの物性変化を考慮した修正をする必要がある。
- (2) 鉄筋腐食は、中性化残りが 10mm となる時点が腐食開始時点とすることで実務的には安全側の設計となり、合理的であると考え。ただし、腐食開始からその後の進展において、雨掛かりがある場合など水分の供給により、かぶり側に腐食が偏ることに留意する。

(1) について、3 章では長期間供用された構造物より採取したコア供試体を分析することで、中性化の進行に伴うコンクリートの物性変化に関して把握した。長期間供用されたコンクリートの中性化の進行は、土木学会コンクリート標準示方書における中性化予測式³⁻²⁾よりも大きくなる傾向を示した。これは、長期間供用しているコンクリートにおいては、 CaCO_3 の生成による緻密化と C-S-H の分解による粗大化を伴いつつ細孔構造が変化しながら中性化が進行していくものと考えられ、特に長期間供用されると C-S-H の分解による細孔構造の粗大化の影響が大きいと考えられた。

既設構造物における劣化予測を行う場合には、実際に中性化深さを測定し、得られた中性化速度係数を用いて、その後の中性化の進行を予測することが望ましい。さらに、施工年代と中性化速度係数の関係を整理し、構造物の施工年代ごとに中性化の進行に及ぼす特徴的な要因を分析した。その結果、1939 年以前においては良質なコンクリートが施工されていたことが伺えたが、本研究の範囲内では、1939 年以前のコンクリートにおいて、中性化速度係数が $6.0 \text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$ 以上となる結果も散見された。1939 年以前において、施工の不具合の影響は少ないものとするが、中性化速度係数が $6.0 \text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$ 以上となったものは、長期間供用されていく中で、コンクリートの物性変化が大きく影響しているものと推測する。そのことから、中性化速度係数は一定のものとして中性化が進行すると考えられてきたが、長期間供用されていく中で、空隙構造が変化し、中性化速度係数も変化する。例えば、経過年数 10 年時点での調査において得られた中性化速度係数を用いて、中性化の進行を予測しても、経過年数 50 年における中性化深さは、予測値よりも実際には大きくなる可能性があり、長期間供用されていく中で物性変化を考慮した修正係数などを用いて中性化の進行を予測することが望ましい。

(2) について、中性化による鉄筋腐食では、腐食の開始時点は、中性化残りが概ね 0~10mm の範囲であることが示されているが、一定の値に定まるものではなく、コンクリート中の水分などの影響があると考えられている。写真 4.1 や写真 4.2 から、鉄筋は中性化していないコンクリートを 5mm 程度被覆してあれば、腐食しないものと考えられる。ただし、中性化が進行して鉄筋周辺の pH が低下することで鉄筋が腐食することになる。フェノールフタレイン噴霧による呈色 pH と鉄筋腐食が開始する pH の関係や中性化の進行に伴うコンクリート中の pH の分布状況などについて検討を進めることで腐食開始の中性化残りを定量的に示すことができるものとする。ただし、中性化深さの測定誤差やフェノールフタレイン噴霧による呈色 pH と鉄筋腐食が開始する pH の関係を考慮

し、さらに図 3.5～図 3.7 に示す実構造物における調査結果の中性化の進行と鉄筋の腐食程度およびコンクリートの剥離・剥落の関係を鑑みると、中性化残りが 10mm となる時点が腐食開始時点とすることで実務的には安全側の設計となり、合理的であると考える。

5.3 かぶりコンクリートのひび割れ発生予測

ここでは、表 5.2 に示す調査結果例を用いて、かぶりコンクリートのひび割れ発生予測の検討例を以下に示す。まず、中性化深さと経過年数から中性化速度係数を算出し、式 3.7 に示す中性化の進展を加味した鉄筋腐食の進展機構における腐食対象範囲を算出し、その後、式 3.8 を用いて、鉄筋の質量減少率の経時変化を算出する。なお、長期間供用したコンクリートにおける中性化の進行では、中性化速度係数が経時的に変化することに留意する必要があるが、ここではコンクリートの物性変化を考慮した修正はしないものとした。また、鉄筋断面方向における鉄筋の腐食速度 dr/dt は式 3.9 よりかぶりを考慮して算出した。

表5.2 かぶりコンクリートのひび割れ発生予測の算出ケース

供用年数 (年)	中性化深さ (mm)	かぶり (mm)	鉄筋径 (mm)	コンクリートの 静弾性係数 (kN/mm ²)	環境条件
55	42.1	10～60	φ8	26.6	雨掛かりあり

$$F \leq C - 10$$

$$R = 0$$

$$C - 10 > F > C + D - 10$$

$$R = D \cdot \cos^{-1}(2(D - F - C + 10)/D) \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.7)}$$

$$F \geq C + D - 10$$

$$R = \pi D$$

ここに、 F ：中性化深さ $F = a\sqrt{t}$ (mm)， a ：中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)，
 C ：かぶり (mm)， D ：鉄筋径 (mm)， R ：鉄筋円周における腐食対象範囲 (mm)

$$M_n = \frac{dr}{dt} \cdot \sum_{i=1}^n R_n \quad \dots \dots \dots \text{(式 3.8)}$$

ここに、 M_n ：経過年数 n における質量減少量 (mm²)，
 dr/dt ：鉄筋断面方向における鉄筋の腐食速度 (mm/年)
 R_n ：経過年数 n における鉄筋円周での腐食対象範囲 (mm)

C < 20mm, 雨掛かりのある場合

$$\frac{dr}{dt} = a \cdot \exp(b \cdot C) \quad \dots \dots \dots (式 3.9)$$

ここに, dr/dt : 鉄筋断面方向における鉄筋の腐食速度 ($\times 10^{-3}$ mm/年),

a, b : 実験定数 $a=5.0, b=-0.051$

C \geq 20mm, 雨掛かりのある場合

$$dr/dt=3.0 \times 10^{-3} \text{ (mm/年)}$$

雨掛かりのない場合

$$dr/dt=1.0 \times 10^{-3} \text{ (mm/年)}$$

図 5.1 に算出結果である鉄筋の質量減少率の経時変化を示す。かぶりが 10mm の場合, 中性化残り 10mm 時点において腐食が開始するもので, 初期の状態から鉄筋断面のかぶり側が腐食し始める。質量減少率の増加割合は, 腐食速度に律するため, 式 3.9 より雨掛かりがある場合にかぶりが大きいほど腐食速度が小さくなり, 質量減少率の増加割合は小さくなる。図 5.1 より, 鉄筋の腐食度 II a の目安となっている質量減少率 4% となるまでに, かぶりが 10mm の場合では約 20 年であるが, かぶりが 50mm では約 90 年を要することがわかる。

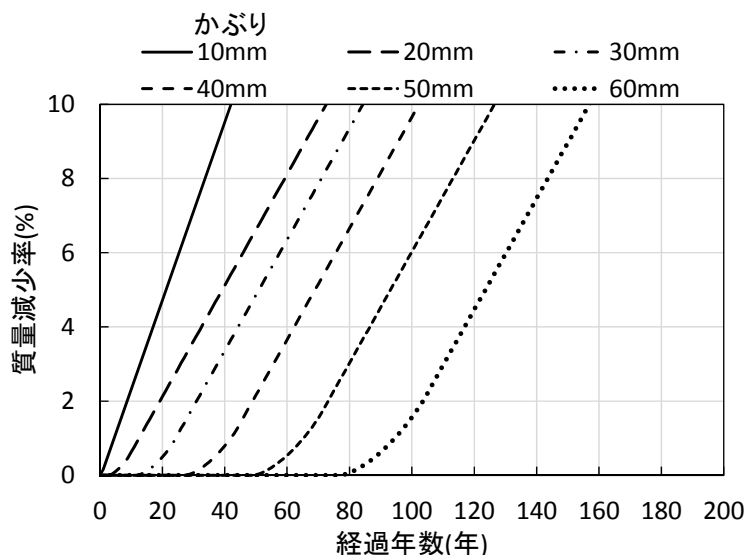


図5.1 鉄筋の質量減少率の経時変化

次に, 式 4.1~式 4.7 の厚肉円筒理論を用いて, コンクリート表面の平均引張応力 f_i をかぶりの関数として算出した。

$$f_t = \frac{1}{\alpha_0(K_0-1)} q_1 \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.1)}$$

$$u_c = \frac{(1+\nu_c)\{(1-2\nu_c)+K_0^2\}D}{2E_c(K_0^2-1)} q_1 \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.2)}$$

ここに、 $K_0 = (2C+D)/D$ C ：かぶり、 D ：鉄筋径、 α_0 ：修正係数 0.5～0.8、ここでは 0.8
 E_c ：コンクリートの静弾性係数（クリープを考慮する場合 $E'_c = E_c/(\phi_c+1)$)
 ν_c ：コンクリートのポアソン比

鉄筋腐食により腐食した後の鉄筋径は減少する。厚肉円筒理論では、腐食生成物が均一の厚さに鉄筋表面に生成されると仮定しており、腐食減少による内径 D_1 と腐食生成物による膨張した外径 D_2 は式 4.3 となる。

$$\begin{aligned} D_1^2 &= D^2 - 4 \cdot A_w / \pi \\ D_2^2 &= D^2 + 4(n-1) \cdot A_w / \pi \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.3)} \end{aligned}$$

次に、 n は腐食生成物の体積膨張倍率であり、4.4 にて検討したように塩害と中性化では、腐食生成物の結晶相が異なり、ここでは塩害では 2.5～4.0 および中性化では 2.5 とする。

厚肉円筒理論では、腐食生成物は、内径 D_1 、外径 D_2 の円筒であると仮定し、内圧 q_0 、外圧 q_1 が生じており、内径半径方向の変位 u_{r0} 、外径半径方向の変位 u_{r1} 、を式 4.4 と式 4.5 で表している。また、腐食していない鉄筋断面は、外圧 q_0 を受けるものとして半径方向の変位 u_{r0} が式 4.6 にて求められる。

$$u_{r0} = \frac{(1+\nu_r)D_1}{2E_r(K_1^2-1)} \{(1-2\nu_r)(q_0 - q_1K_1^2) + (q_0 - q_1)K_1^2\} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.4)}$$

$$u_{r1} = \frac{(1+\nu_r)D_2}{2E_r(K_1^2-1)} \{(1-2\nu_r)(q_0 - q_1K_1^2) + (q_0 - q_1)\} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.5)}$$

$$u_s = \frac{(1-\nu_s)D_1}{2E_s} q_0 \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.6)}$$

ここに、 $K_1 = D_2/D_1$ 、
 ν_r ：腐食生成物のポアソン比 $\nu_r = 1/6$ 、
 E_r ：腐食生成物の静弾性係数 $E_r = 196 \text{ (N/mm}^2\text{)}$
（クリープを考慮する場合 $E'_r = E_r/(\phi_r+1)$)
 ν_s ：鉄筋のポアソン比 $\nu_s = 1/6$ 、
 E_s ：鉄筋の静弾性係数 $E_s = 200 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$

鉄筋と腐食生成物および腐食生成物とコンクリートの力の釣合条件から式 4.7 の変位の境界条件が得られ、腐食生成物の量から腐食していない鉄筋に作用する圧力 q_0 とかぶりコンクリートに作用する圧力 q_1 を求め、式 4.1 よりかぶりコンクリートの引張応力 f_t を算出する。

$$\begin{aligned} u_{r0} &= u_s \\ u_c &= D_2/2 - D/2 - u_{r1} \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \text{(式 4.7)}$$

鉄筋の質量減少率を 1%~32%とした場合の算出結果を図 5.2 に示す。図 5.2 より鉄筋の質量減少率が 4%とした場合にかぶりが 40mm の場合ではコンクリート表面の平均引張応力は 4N/mm² で、かぶりが 20mm の場合ではコンクリート表面の平均引張応力は 8N/mm² であることがわかる。このコンクリート表面の引張応力がコンクリートの引張強度以上となるとかぶりコンクリートにひび割れは発生することになる。コンクリートの引張強度が 2N/mm² と仮定するとかぶり 10mm では鉄筋の質量減少率が 1%、かぶり 20mm では質量減少率が 2%およびかぶり 40mm では質量減少率 4%に至るとコンクリート表面の引張応力が 2N/mm² 以上となり、ひび割れが発生することになる。また、図 5.1 および図 5.2 を組み合わせることで、コンクリート表面の引張応力の経時変化を求めることができる。(図 5.3) これより、コンクリートの引張強度が 2N/mm² と仮定すると、かぶり 10mm では経過年数 9 年で、かぶり 20mm では経過年数 20 年およびかぶり 40mm では経過年数 60 年となるとコンクリート表面の引張応力が 2N/mm² 以上となり、ひび割れが発生することになり、かぶりの大小によってひび割れに至るまでの期間に大きな差が生じることがわかる。

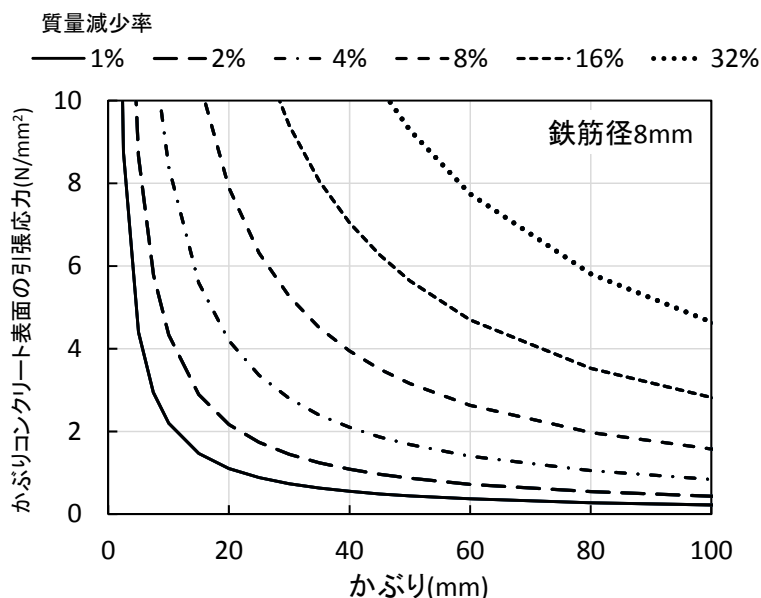


図5.2 かぶりとコンクリート表面の引張応力の関係

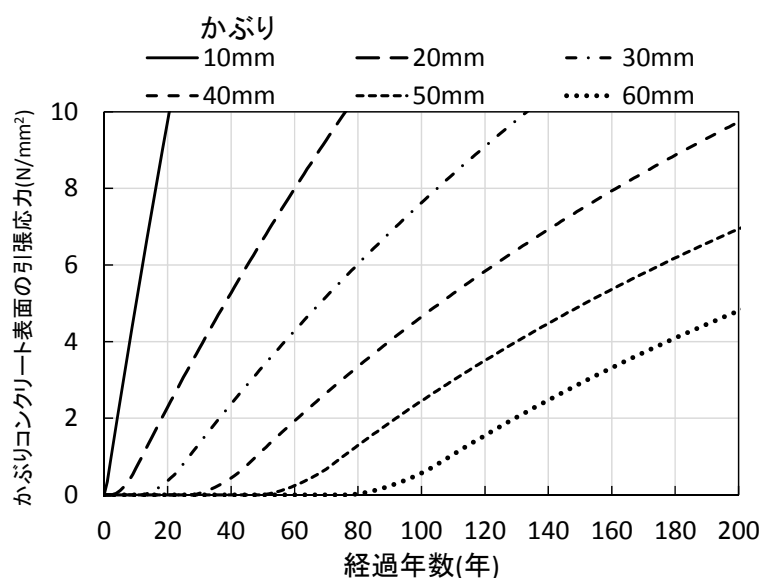


図5.3 コンクリート表面の引張応力の経時変化

次に、雨掛かりの有無に影響を把握するために、表 5.3 における 6 ケースについて、ひび割れ発生までの経過年数を上記の方法にて算出した。算出条件は、かぶりを 15mm、30mm および 45mm とし、雨掛かりがある場合の中性化速度係数を、図 3.10 の実構造物の調査結果における平均的な $4.0\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ とした。そして、雨掛かりのない場合の中性化速度係数は、コンクリート標準示方書に示されている環境条件の係数 $\beta_e=1.6$ を $4.0\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ に乗じた $6.4\text{mm}/\sqrt{\text{年}}$ と設定した。ひび割れ発生年数の算出にあたり、厚肉円筒理論を用いたコンクリート表面の引張応力を求めるため、コンクリートの静弾性係数を用いることになる。そのコンクリートの静弾性係数は圧縮強度から JASS5 に示されるコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係式 (式 5.1) を用いた。また、かぶりコンクリートの引張強度 σ_t を、土木学会コンクリート標準示方書に示される圧縮強度と引張強度の関係式 (式 5.2) から求め、各ケースでの引張応力 f_t /引張強度 σ_t を算出し、引張応力 f_t /引張強度 σ_t が 1.0 以上となる年数をひび割れ発生とした。

表5.3 かぶりコンクリートのひび割れ発生予測の算出ケース

ケース	かぶり (mm)	中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$)	環境条件	鉄筋径 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ発生経過年数
①	15	4.0 ($\beta_e=1.0$)	雨掛かりあり	13	24	18
②		6.4 ($\beta_e=1.6$)	雨掛かりなし			38
③	30	4.0 ($\beta_e=1.0$)	雨掛かりあり	13	24	67
④		6.4 ($\beta_e=1.6$)	雨掛かりなし			87
⑤	45	4.0 ($\beta_e=1.0$)	雨掛かりあり	13	24	142
⑥		6.4 ($\beta_e=1.6$)	雨掛かりなし			143

$$E_c = 3.35 \times 10^4 \times (\gamma/2.4)^2 \times (\sigma_c/60)^{1/3} \quad \dots\dots\dots (式 5.1)$$

ここに、 E_c : コンクリートの静弾性係数(N/mm²), γ : 単位体積重量(g/cm³)
 σ_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

$$\sigma_t = 0.23 \times \sigma_c^{2/3} \quad \dots\dots\dots (式 5.2)$$

ここに、 σ_t : コンクリートの引張強度(N/mm²),
 σ_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

図 5.4 に 6 ケースにおけるひび割れ発生までの劣化予測結果を示す。かぶり 15mm では、中性化による腐食開始時点は、雨掛かりの有無によつての差は小さく、環境条件の影響を受けないが、その後、腐食速度が異なることで雨掛かりのあるケース①の方がケース②よりも早くひび割れが発生することがわかる。次に、かぶり 30mm では、腐食開始時点は雨掛かりのないケース③の方が早い
 が、その後の腐食速度は雨掛かりのあるケース④の方が大きいため、50 年程度で腐食による断面減少量はケース④よりも大きくなり、ケース④の方が早くひび割れる結果となった。かぶり 45mm では、中性化速度係数の違いにより腐食開始時点が大きく異なり、その後の腐食速度が雨掛かりの有無により異なっても、ケース⑤、⑥とも 140 年程度でひび割れる結果となった。

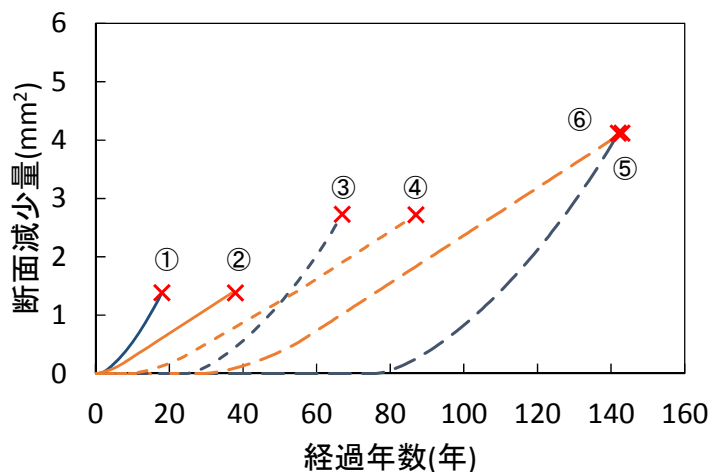


図5.4 ひび割れ発生予測結果

5.4 予測手法の検証

3章では、実構造物の調査結果に基づき、かぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響要因について評価した。表 3.1 に示す各々の調査箇所では、経過年数、中性化深さ、かぶり、鉄筋径および圧縮強度を求めている。そこで、各々の調査箇所におけるかぶりコンクリートに発生する引張応力 f_t と引張強度 σ_t の関係（引張応力 f_t / 引張強度 σ_t ）を 5.3 に示した一連の流れで算出した。

図 5.5 に、かぶりと引張応力 f_t / 引張強度 σ_t の関係を示す。この引張応力 f_t / 引張強度 σ_t が 1.0 以上となるとひび割れが発生するものであるが、図 5.5 によると雨掛かりがない場合では、概ね、健全部で引張応力 f_t / 引張強度 σ_t が 1.0 以下となり、本研究で示した中性化によるひび割れ予測手法の妥当性を示している。

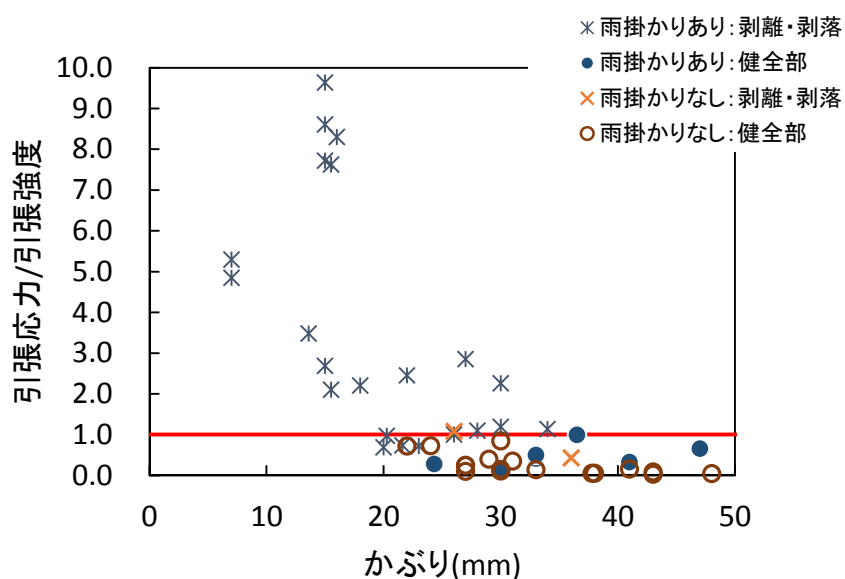


図5.5 かぶりと引張応力 f_t / 引張強度 σ_t の関係

6章 結論

本研究では、実構造物の劣化事例において、塩害におけるかぶりコンクリートの剥離・剥落が、中性化によるものよりも早期に顕著化して劣化が甚大になること、そして、中性化による劣化の進行は塩害と比較すると緩慢であることから、高架橋の高欄などのかぶりが小さい箇所において発生する傾向にあることをうけ、鉄筋の腐食形態および腐食生成物の結晶相に着目し、塩害と中性化による劣化機構の違いがコンクリートのひび割れ発生に及ぼす影響を明確にすることと、さらに中性化によるかぶりコンクリートのひび割れ発生予測をすることを主眼として検討した。中性化における雨掛かりの有無がひび割れ発生に至るまでの時期に与える影響やかぶりの大小が鉄筋の腐食速度に及ぼす影響を整理、分析した。これらの一連の研究成果を総括し、中性化の進行を加味した鉄筋腐食の進展機構を提示し、かぶりおよび雨掛かりの有無を考慮した腐食速度を定式化することで、中性化に起因する鉄筋腐食による劣化予測手法について言及した。本研究の範囲内で明らかとなった知見について以下にまとめる。

3章 3.3 では長期間供用された構造物より採取したコア供試体を分析することで、中性化の進行に伴うコンクリートの物性変化に関して把握した。その結果、長期間供用しているコンクリートにおいては、 CaCO_3 の生成による緻密化とC-S-Hの分解による粗大化を伴いつつ細孔構造が変化しながら中性化が進行していくものと考えられ、特に長期間供用されるとC-S-Hの分解による細孔構造の粗大化の影響が大きいと考えられた。つまり、中性化速度係数は一定のものとして中性化が進行すると考えられてきたが、長期間供用されていく中で、空隙構造が変化し、中性化速度係数も変化することが示唆された。

また、3.5 では、実構造物の調査結果に基づき、かぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響要因について評価した。36基の実構造物の様々な部材の調査結果に基づき、巨視的な観点から雨掛かりの有無が中性化、鉄筋腐食の進行およびかぶりコンクリートの剥離・剥落に及ぼす影響を整理し、想定腐食開始からの経過年数にて分類することで、雨掛かりが中性化による劣化に及ぼす影響を定量的に示した。その結果、腐食度Ⅱaにおける想定腐食開始からの経過年数は、雨掛かりがある箇所では平均14.8年、雨掛かりがない箇所では平均49.4年となった。つまり、腐食度Ⅱaにおける腐食速度は、雨掛かりがある場合のほうが、ない場合よりも3.4倍程度大きくなった。

さらに、3.6 では雨掛かりの有無が腐食速度のみならず、腐食形態や腐食生成物の種類・割合にも変化を及ぼすかを確認するために、実構造物より採取した鉄筋を対象に、XRD分析による腐食生成物の同定と光学顕微鏡による断面観察を行い、詳細に分析した。雨掛かりがある場合には、腐食生成物は $\beta\text{-FeOOH}$ が生成され、若干の膨張倍率が大きくなる傾向があるものの、コンクリート中の塩化物イオン濃度が 0.14kg/m^3 程度であれば、雨掛かりの有無によらず腐食生成物の体積膨張倍率は同程度であることが確認できた。雨掛かりがある場合は、水分供給に伴いかぶり側の腐食が速くなり腐食量が多くなることで、雨掛かりがない場合よりもかぶりコンクリートに作用する応力が大きくなり、剥離・剥落し易くなることが推測された。

3.7 では、実構造物より採取した鉄筋の調査結果より、かぶりが10mm未満では腐食速度が0.004

mm/年以上であるのに対して、かぶりが 20mm 程度では腐食速度が 0.003 mm/年程度であり、中性化による劣化では、中性化の進行を考慮するのみならず、かぶりの大小によって腐食速度が異なり、鉄筋腐食の進展に影響を及ぼすことが示された。

4 章 4.2 では、塩害と中性化における劣化機構の違いが腐食形態に及ぼす影響を、乾湿繰返しによる腐食促進試験を行うことで検証した。腐食促進試験後のモルタル供試体より腐食した鉄筋を対象に腐食減量、腐食面積率および 3 次元の形状測定による腐食深さを求めることで腐食形態の違いを把握した。形状測定および腐食減量、腐食面積率の結果より、腐食減量/腐食面積を用いることで腐食形態の違いを表すことができ、中性化を想定した乾湿繰返しによる腐食促進試験において、モルタル供試体中の鉄筋は、比較的、表面が均一に腐食する形態となった。また、中性化を想定した条件において、腐食減量・質量減少率を求めた時点での中性化残り量と腐食面積率および質量減少率の関係から、中性化残りが小さいと腐食面積率および質量減少率が大きくなる傾向を示した。なお、塩害による鉄筋腐食では、外来塩分のように鉄筋位置での塩化物イオン量が増加し、さらに、水分および酸素の供給程度が偏ることで、孔食のような局所的な腐食形態になり易いことが示された。

4.3 では、腐食形態の違いがモルタル表面のひずみおよびひび割れ発生に及ぼす影響を検証した。モルタル表面のひずみ挙動は、乾湿繰返しによる腐食促進試験における腐食促進期間を通じたモルタル表面のひずみを連続的に求めることで把握し、腐食形態の指標となる腐食減少/腐食面積との関係を示すことで腐食形態の影響を示した。塩害を想定した条件におけるモルタル表面のひずみは、試験条件によって異なる挙動を示し、初期の塩化物イオン浸透深さが鉄筋中心まで浸透させた条件では、モルタル表面のひずみの増加速度は、他条件よりも小さくなった。さらに、腐食減量/腐食面積と表面のひずみの増加速度の関係より、局所的に著しく腐食する形態では、腐食膨張によるモルタル表面のひずみの増加速度は、均一に腐食する形態よりも大きくなった。

また、腐食促進試験期間中の質量変化より含水率を求め、実構造物におけるコンクリート中の含水率分布の調査結果を踏まえ、乾湿繰返しによる含水率分布の変動を考察した。その結果から、乾湿繰返しによる含水率は、モルタル供試体内部の含水率は一定の値となり、湿潤状態では表層の含水率が内部よりも大きくなるものと考えられた。

4.4 では、腐食促進試験を実施した後の鉄筋を対象に、XRD 分析により腐食生成物の結晶相の種類と含有割合を求めた。XRD 分析では、はじめに腐食した鉄筋表面の腐食生成物を対象とした定性分析を行い、概ねの腐食生成物の結晶相を把握した。その後、腐食生成物を採取して粉末状の分析試料として、リートベルト法により腐食生成物の含有割合を求めた。その結果から、腐食生成物の体積膨張倍率を算出し、塩害と中性化の劣化機構の違いが鉄筋腐食における体積膨張倍率に与える影響を示した。定性分析の結果から、塩害を想定した条件では、腐食生成物の結晶相は主に Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ および $\beta\text{-FeOOH}$ であり、一部の試料では、 $\beta\text{-FeOOH}$ の単相となるものや、X 線回折ピークが明確ではないが、 $\text{FeCl}_2(\text{H}_2\text{O})_4$ が検出され、塩化酸化鉄や塩化水酸化鉄が生成されている可能性が示された。中性化を想定した条件での腐食生成物は、主に Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-FeOOH}$ であり、塩害を想定した条件の分析試料と異なる傾向を示した。また、塩害および中性化を想定した両方の条件下において、 $\alpha\text{-FeOOH}$ の生成が確認された。腐食促進試験において乾湿繰返しにより、十分な水分

が供給されている環境であることから、 α -FeOOH が生成され易い環境であったことが示された。定量分析の結果から、塩害を想定した条件では、体積膨張倍率の寄与率が高い β -FeOOH と $\text{FeCl}_2(\text{OH})_3$ が、腐食生成物中の 11%と 5%含有していることから、腐食生成物全体の体積膨張倍率として 3.29 となった。これらの $\text{Fe}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ は、 β -FeOOH となる初期生成物であり、 α 、 β 、 γ 以外の水酸化鉄は結晶性としての安定性が低く、経時的に他結晶相に変化するものと考えられた。つまり、塩害における鉄筋の腐食生成物の結晶相は、鉄筋腐食が開始されて初期の段階からひび割れ発生した後の期間において経時的に変化し、その結晶相の変化に伴い、腐食生成物の体積膨張倍率が 2.5~4.0 程度の範囲で変化しながら、鉄筋の腐食が進展することが示された。中性化を想定した条件では、 Fe_3O_4 と α -FeOOH が検出され、それぞれ 34%と 14%であり、 Fe_3O_4 の含有割合が大きく、塩害および中性化のそれぞれの劣化機構において、腐食生成物の結晶相が異なることがわかり、中性化による腐食生成物の体積膨張倍率は概ね 2.5 程度であることが示された。中性化による劣化と塩害による劣化を比較した場合、塩害では腐食速度が中性化よりも速いだけでなく、腐食生成物の体積膨張倍率が中性化による鉄筋腐食よりも大きくなることで、かぶりコンクリートに作用する応力が大きくなり、ひび割れが発生しやすい条件であることが示された。

5 章では、3 章~4 章において得られた知見をまとめ、主に中性化による鉄筋コンクリート構造物の劣化予測手法についてとりまとめた。中性化による鉄筋腐食において、中性化の進展を加味した鉄筋腐食の進展機構を提示した。また、中性化の進展を加味した鉄筋腐食の進展機構と厚肉円筒理論を用いることで、かぶりコンクリートのひび割れ発生時期を予測することが可能であり、かぶりの大小によってひび割れに至るまでの期間に大きな差が生じることがわかった。

今後、人口減少や少子高齢化に伴い我が国における財政状況がより一層厳しくなることが予測されている中で、コンクリート構造物の代表的な劣化である塩害および中性化に対して、適切な劣化過程の把握とその後の正確な劣化予測をすることは、構造物を健全な状態で長期間供用するためにも重要であり、さらに既存の社会資本の安全確保とメンテナンスに係るトータルコストの縮減・平準化の両立に資するものであると考えている。本研究では、中性化の進行を加味した鉄筋腐食の進展機構とかぶりおよび雨掛かりの有無を考慮した腐食速度を定式化することで、中性化に起因する鉄筋腐食による劣化予測手法について示した。しかしながら、本研究では、かぶりを考慮した腐食速度の検討などにおいて、ある範囲内の品質の材料を対象としている。昭和初期に構築された構造物など様々な社会情勢ものと構築された構造物を維持管理していかなければならないことを考慮すると、今後、多様な材料、施工および環境条件における知見を蓄積し、より合理的な劣化予測手法を構築することが重要であると考えられる。