

福 岡 大 学  
博 士 学 位 論 文

コンクリートの透気性を考慮した  
実構造物の劣化進展予測法に関する研究

令和 3 年 10 月

林 亮太

工学研究科 エネルギー・環境システム工学専攻

# 目 次

	頁
<b>第1章 序論</b>	
1-1 研究の背景 .....	1
1-1-1 国土交通省の公共事業関係費の推移 .....	1
1-1-2 土木学会の定める基本的な維持管理の手順と 社会基盤の維持管理の現状 .....	2
(1) 構造物の維持管理計画の現状 .....	3
(2) 診断の現状 .....	4
(3) 対策の現状 .....	9
1-2 研究の目的 .....	12
1-3 各章の構成 .....	13
1-4 本研究の定義.....	15
[参考文献].....	15
<b>第2章 既往の研究</b>	
2-1 概説 .....	17
2-2 鋼材腐食 .....	17
2-2-1 メカニズム .....	17
2-2-2 鋼材腐食の評価方法 .....	18
2-2-3 鋼材腐食による影響 .....	19
2-3 鋼材腐食の要因.....	19
2-3-1 かぶり不足 .....	19
2-3-2 塩害 .....	20
(1) メカニズム .....	20
(2) 塩化物イオンの拡散モデル .....	22
2-3-3 中性化 .....	22
(1) メカニズム .....	22
(2) 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食 .....	23
2-4 実構造物および暴露試験の研究報告.....	24
2-4-1 実構造物を対象とした研究報告 .....	24
2-4-2 暴露試験の研究報告 .....	31
2-5 透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する研究.....	33
2-5-1 透気係数とは .....	33
2-5-2 非破壊、微破壊試験の透気係数による 物質移動抵抗性の評価に関する研究 .....	34
2-5-3 コアを用いた加圧法の透気係数による 物質移動抵抗性の評価に関する研究 .....	44

2-6	予測の手法 .....	46
2-6-1	塩害の予測 .....	46
	(1) 塩化物イオンの拡散の予測 .....	46
	(2) 鋼材腐食の進行予測 .....	49
2-6-2	中性化の予測 .....	52
	(1) 中性化の進行予測 .....	52
	(2) 鋼材腐食の進行予測 .....	53
2-6-3	予測に関する研究 .....	56
2-7	まとめ .....	59
2-7-1	実構造物および暴露試験の研究報告 .....	59
2-7-2	透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する研究.....	60
	(1) 非破壊、微破壊試験の透気係数による 物質移動抵抗性の評価に関する研究 .....	60
	(2) コアを用いた加圧法の透気係数による 物質移動抵抗性の評価に関する研究 .....	60
	(3) 予測の手法 .....	60
2-7-3	課題 .....	61
	[参考文献] .....	61

### 第3章 かぶりが鋼材腐食に与える影響に関する研究

3-1	概説 .....	65
3-2	実構造物の調査概要.....	66
3-2-1	概要 .....	66
3-2-2	調査項目および内容 .....	68
	(1) かぶりの計測 .....	68
	(2) 塩化物イオン含有量試験（鋼材位置の塩化物イオン濃度） .....	69
	(3) はつり調査（腐食グレード） .....	70
	(4) 鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 .....	71
3-3	結果および考察.....	72
3-3-1	部材ごとの建設年とかぶりの関係 .....	72
3-3-2	かぶりごとの鋼材位置の塩化物イオン濃度と鋼材腐食の関係性.....	73
3-4	まとめ .....	77
	[参考文献] .....	77

### 第4章 海岸からの距離と表面における塩化物イオン濃度の関係性に関する研究

4-1	概説 .....	79
4-2	実構造物の調査概要.....	80
4-2-1	概要 .....	80
4-2-2	調査項目および内容 .....	82
	(1) 塩化物イオン含有量試験（全塩化物イオン濃度） .....	82
	(2) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 .....	82
	(3) 表面における塩化物イオン濃度 .....	82
4-3	結果および考察.....	83
4-3-1	塩化物イオンの見掛けの拡散係数と 表面における塩化物イオン濃度の関係 .....	83

4-3-2 海岸からの距離と表面における塩化物イオン濃度の関係 .....	84
(1) 上部工における海岸からの距離と 表面における塩化物イオン濃度の関係 .....	84
(2) 下部工における海岸からの距離と 表面における塩化物イオン濃度の関係 .....	85
4-4 まとめ .....	86
[参考文献] .....	86

## 第5章 透気係数による鋼材腐食に影響を及ぼす物質移動抵抗性評価，鋼材腐食抵抗性に関する研究

5-1 概説 .....	88
5-2 実構造物の物質移動抵抗性および外観変状の関係性 .....	90
5-2-1 実構造物の調査概要 .....	90
5-2-2 調査項目および内容 .....	92
(1) コア法による圧縮強度 .....	92
(2) リバウンドハンマーを用いたコンクリートの 反発度による推定圧縮強度 .....	93
(3) 中性化試験 .....	94
(4) 塩化物イオン含有量試験（全塩化物イオン濃度） .....	95
(5) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 .....	95
(6) はつり調査（腐食グレード） .....	95
(7) 鋼材腐食の開始時期 .....	96
5-2-3 結果および考察 .....	97
(1) 建設年ごとの圧縮強度，中性化速度係数 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 .....	97
(2) 圧縮強度，推定圧縮強度と中性化速度係数 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 .....	99
(3) 海岸からの距離と塩化物イオンの見掛けの拡散係数， 表面における塩化物イオン濃度 .....	101
(4) 腐食グレードと中性化，塩害の関係 .....	102
5-3 透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および適用性の評価 .....	105
5-3-1 室内実験の概要 .....	105
(1) 使用材料 .....	105
(2) 圧縮強度試験 .....	106
(3) 中性化促進試験 .....	107
(4) 塩水浸漬試験（全塩化物イオン濃度， 塩化物イオンの見掛けの拡散係数） .....	107
(5) 加圧透気試験 .....	108
5-3-2 実構造物から採取したコア供試体の概要 .....	109
(1) 圧縮強度試験 .....	111
(2) 中性化試験 .....	111
(3) 塩化物イオン含有量試験（全塩化物イオン濃度， 塩化物イオンの見掛けの拡散係数） .....	111
(4) 加圧透気試験 .....	111



5-3-3	結果および考察 .....	112
(1)	圧縮強度および透気係数 .....	112
(2)	中性化速度係数および透気係数 .....	113
(3)	塩化物イオンの見掛けの拡散係数および透気係数.....	114
5-4	透気係数による鋼材腐食の評価.....	116
5-4-1	透気係数と鋼材腐食の関係性 .....	116
(1)	実験概要 .....	116
(2)	結果および考察 .....	123
5-4-2	腐食電流密度と透気係数の関係式の有用性 .....	132
(1)	対象の構造物および採取したコア供試体の概要.....	132
(2)	加圧透気試験 .....	132
(3)	鋼材腐食の進行予測モデルにおける条件の設定.....	132
(4)	結果および考察 .....	135
(5)	腐食電流密度と透気係数の関係式（鋼材腐食の進行予測モデル） .....	138
5-5	鋼材腐食抵抗性に関する検討.....	139
5-5-1	実験概要 .....	139
(1)	使用材料.....	139
(2)	圧縮強度試験 .....	141
(3)	塩水浸漬試験（全塩化物イオン濃度， 塩化物イオンの見掛けの拡散係数） .....	141
(4)	電気泳動試験 .....	141
(5)	鋼材腐食促進試験 .....	142
5-5-2	結果および考察 .....	146
(1)	圧縮強度 .....	146
(2)	塩化物イオンの見掛けの拡散係数，実効拡散係数.....	146
(3)	分極抵抗 .....	149
5-6	まとめ .....	151
5-6-1	実構造物の物質移動抵抗性および外観変状の関係性.....	151
5-6-2	透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および適用性の評価.....	152
5-6-3	透気係数による鋼材腐食の評価 .....	152
5-6-4	鋼材腐食抵抗性に関する検討 .....	153
	[参考文献].....	154

## 第6章 コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の提案に関する研究

6-1	概説 .....	158
6-2	鋼材腐食の進行予測の概要.....	159
6-2-1	かぶり，鉄筋径の設定 .....	160
6-2-2	鉄筋の腐食過程 .....	160
6-2-3	腐食速度の設定 .....	161
(1)	潜伏期～進展期 .....	161
(2)	加速期前期 .....	161
(3)	加速期後期～劣化期 .....	162
6-2-4	鋼材の腐食深さ .....	162

6-3	コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測 .....	165
6-3-1	構造物 A, B, C の鋼材腐食の進行予測結果 .....	165
6-3-2	構造物 D, G の鋼材腐食の進行予測結果 .....	165
6-3-3	構造物 E の鋼材腐食の進行予測結果 .....	167
6-4	提案 .....	168
6-4-1	定期点検 .....	169
6-4-2	対策・調査の要否判定 .....	169
6-4-3	詳細調査 .....	169
6-4-4	予測 .....	169
	(1) 透気係数の計測 .....	170
	(2) かぶり, 鉄筋径の設定 .....	170
	(3) 腐食速度の設定 .....	170
	(4) 鋼材の腐食深さの算出 .....	170
6-4-5	劣化要因の推定, 対策要否の判定 .....	171
6-4-6	活用時の留意点 .....	171
	(1) 測定した透気係数の腐食速度へ与える影響 .....	171
	(2) かぶり不足による鋼材腐食への影響 .....	172
6-5	まとめ .....	172
	[参考文献] .....	172

## 第 7 章 総括

7-1	総括 .....	174
7-2	今後の展望 .....	176
	本論文に関連する発表論文 .....	178
	謝辞 .....	179

# 第 1 章 序論

## 1-1 研究の背景

我が国の社会基盤は、高度経済成長期に数多く整備されているが、最近ではこの時期に整備された社会基盤の老朽化が深刻となっている。この社会基盤の中で数多くを占めるコンクリート構造物は、かつて半永久構造物あるいはメンテナンスフリーの構造物と言われてきた。しかしながら、使用材料、施工条件、晒される環境条件などによっては、経年劣化によるものではなく、何らかの劣化機構によって劣化し、劣化の状態に応じて補修、もしくは、更新を余儀なくされる事例も生じている。

一方、我が国日本は、東日本大震災、熊本地震、中越地震などの地震災害、御岳山、阿蘇、口永良部、新燃岳などの火山災害、大島、常総、広島、九州などの豪雨災害など、様々な災害大国であり、今日の自然災害を踏まえると、コンクリート構造物によって人々の安全・安心な生活を構築しているのは言うまでもない。

このように、我々の生活を支える社会基盤に対して、今後も持続可能な維持管理を進めていくことが必要である。

### 1-1-1 国土交通省の公共事業関係費の推移

国土交通省の公共事業関係費は、政府全体の公共事業関係費の約 8 割を占め、当初予算の公共事業費は、図 1-1 より、2001 年度から 2012 年度までは減少傾向にあったが、2014 年度以降はほぼ横ばいで推移している。こうした中、相次ぐ自然災害を受けて 2018 年 12 月に閣議決定された「防災・減災、国土強靱化のための 3 か年緊急対策」を集中的に実施するために、2019 年度および 2020 年度は、「臨時・特別の処置」として当初予算の増額が図られている状況である。

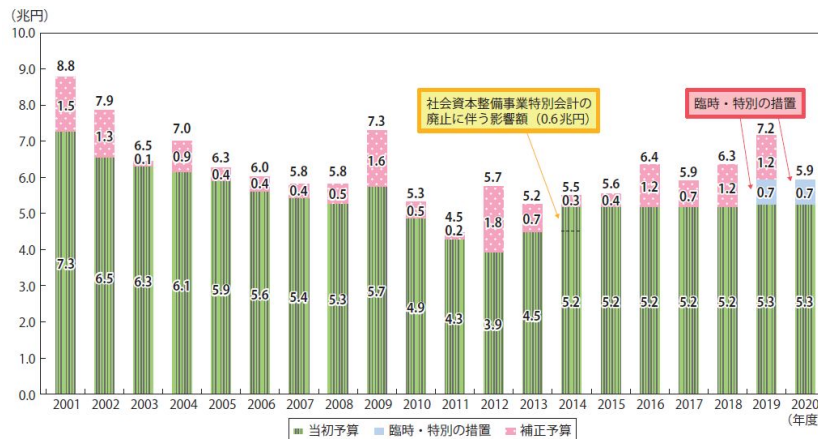


図 1-1 国土交通省の公共事業関係費の推移<sup>1)</sup>

### 1-1-2 土木学会の定める基本的な維持管理の手順と社会基盤の維持管理の現状

我々の生活を支える社会基盤のコンクリート構造物に対して、適切な維持管理を行うために、土木学会では構造物の維持管理の手順を図 1-2 のように定めている<sup>2)</sup>。

維持管理計画の手順として、「維持管理計画」とは、構造物の状況を考慮して、診断、対策、記録などの実施時期、頻度、方法および体制（組織、人員、予算など）などを総合的に計画した結果を示すものである<sup>2)</sup>。

「診断」とは、点検、劣化予測、評価および判定を含み、維持管理において構造物や部材の変状の有無を調べて状況を判断するための一連の行為の総称である<sup>2)</sup>。「診断」では、定期点検結果、経時的変化を基に、劣化機構の推定、予測、構造物の性能評価および対策の要否判定を行うもので、自然災害、火災、事故、基準などの改定に伴う設計荷重の変更などが生じた場合の診断も含まれる。また、近接目視による点検だけでは劣化機構の推定が困難な場合やコンクリート品質、耐荷性能は確認できないため、その際に実施する調査（以下、詳細調査と示す）も含まれる。

「対策」とは、診断において対策が必要と判断されたものに対して行うもので、点検強化、補修、補強、供用制限、解体・撤去（更新）に分類される<sup>2)</sup>。

「記録」とは、構造物に対する点検、劣化予測、性能の評価、対策の要否判定の結果、点検、劣化機構の推定、予測、性能の評価、対策の内容を記録し、構造物の供用期間中保管するものである<sup>2)</sup>。

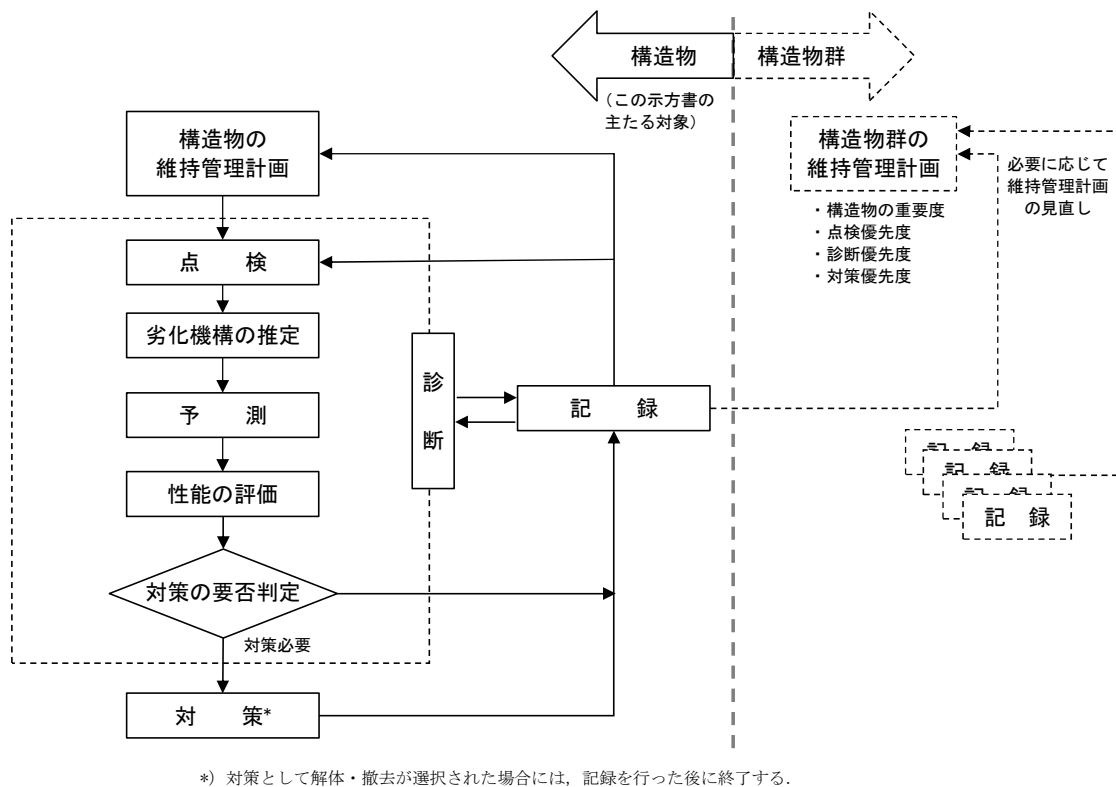


図 1-2 構造物の維持管理の手順<sup>2)</sup>

#### (1) 構造物の維持管理計画の現状

政府全体の取り組みの中に、計画的な維持管理・更新など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」が取りまとめられている。国土交通省では、この基本計画を基に管理・所管するインフラの維持管理・更新などを着実に推進するための中期的な取り組みの方向性を明らかにする計画として、予防保全の考え方を導入した「国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）」を他省庁に先駆けて2014年（平成26年）に策定している<sup>2)</sup>。現在ではこの行動計画に基づき、各施設の管理者が点検や修繕などを行うとともに、個別施設ごとの具体の対策方針を定める長寿命化計画（個別施設計画）を策定するなど、計画的な維持管理・更新に取り組んでいる（図 1-3、図 1-4）<sup>3)</sup>。地方公共団体では、国土交通省と同様に各施設の管理者が個別施設ごとの長寿命化計画（個別施設計画）を策定し、予算の確保、修繕・更新の対策時期の選定などに活用している。

この計画書内において構造物ごとに今後の経時変化を予測し、この予測から対策時期を設定している。この対策時期に必要な事業費（維持管理、もしくは更新）を各年度で試算し、管理者はこの事業費を基に予算を確保している状況である。ただし、長寿命化計画（個別施設計画）策定時に用いられている予測の方法は様々であるが、いずれの方法も各管理施設に応じた環境条件（例えば、水掛かりの有無、凍結防止剤の散布の有無、感潮区間など）、かぶりなどの構造諸元を考慮した予測ではないため、その精度はさほど高くないのが現状である。

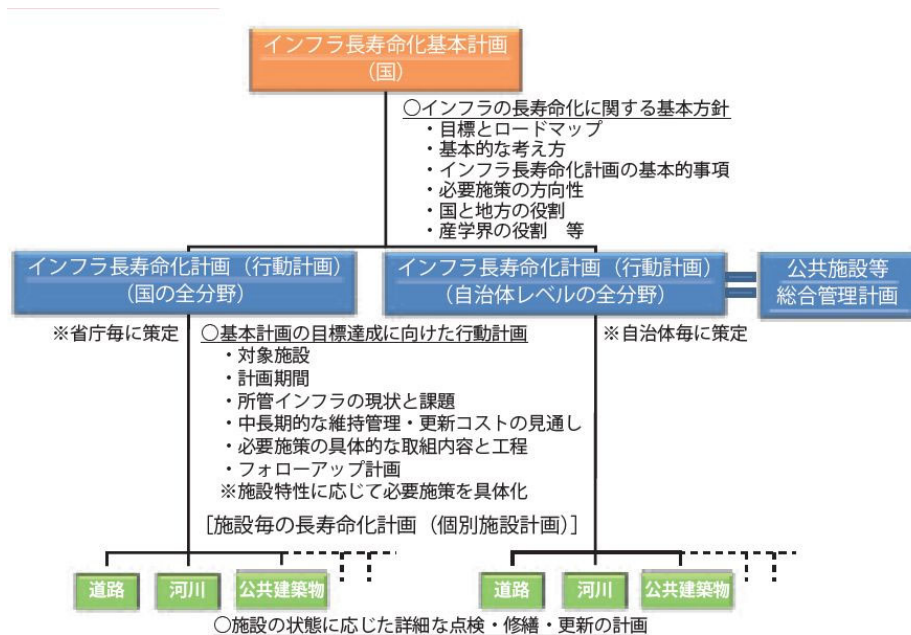


図 1-3 インフラ長寿命化に向けた計画の体系<sup>3)</sup>

個別施設毎の長寿命化計画（個別施設計画）を核として、点検・診断、修繕・更新、情報の記録・活用といったメンテナンスサイクルを構築

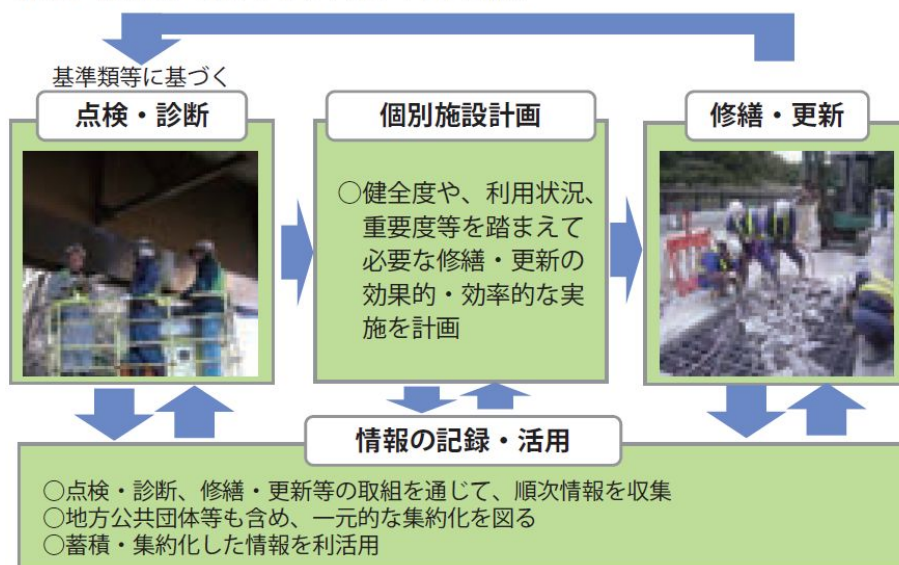


図 1-4 長寿命化計画（個別施設計画）を核としたメンテナンスサイクルの構築<sup>3)</sup>

## (2) 診断の現状

### 1) 点検の現状

図 1-5、表 1-1 より、現在日本の高度経済成長期以降に整備された社会基盤のうち、建設後 50 年以上経過する施設の割合は、2033 年（令和 15 年）時点において、道路橋で約 63%，トンネルで約 42%，河川管理施設で約 62%，下水道管きよで約 21%，港湾岸壁で約 58%と見込まれており、その割合は今後も増加傾向にある<sup>4)</sup>。

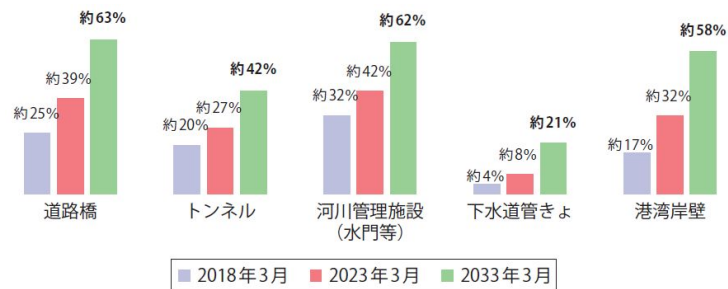


図 1-5 建設後 50 年以上経過するインフラの割合 <sup>4)</sup>

表 1-1 建設後 50 年以上経過するインフラの割合 <sup>4)</sup>

	2018年3月	2023年3月	2033年3月
道路橋 [約73万橋 <sup>注1)</sup> (橋長2m以上の橋)]	約25%	約39%	約63%
トンネル [約1万1千本 <sup>注2)</sup> ]	約20%	約27%	約42%
河川管理施設 (水門等) [約1万施設 <sup>注3)</sup> ]	約32%	約42%	約62%
下水道管きよ [総延長：約47万km <sup>注4)</sup> ]	約4%	約8%	約21%
港湾岸壁 [約5千施設 <sup>注5)</sup> (水深-4.5m以深)]	約17%	約32%	約58%

(注) 1 道路橋約73万橋のうち、建設年度不明橋梁の約23万橋については、割合の算出にあたり除いている。(2017年度集計)  
2 トンネル約1万1千本のうち、建設年度不明トンネルの約400本については、割合の算出にあたり除いている。(2017年度集計)  
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年以内に整備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。)(2017年度集計)  
4 建設年度が不明な約2万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。)(2017年度集計)  
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。(2017年度集計)

これらの社会基盤に対して、定期的な点検は各管理者によって幅広く行われており、早急に補修が必要な設備を要緊急対策施設として対策が進められている <sup>4)</sup>。具体的には、表 1-2 に示すように点検を行った道路構造物の橋梁 717,391 施設のうち 69,051 施設、河川堤防約 14,300km のうち約 3,600km、砂防設備約 83,000 基のうち約 3,000 基、海岸堤防など約 5,900km のうち約 780km、港湾 58,839 施設のうち、10,178 施設などの施設が要緊急対策施設であることが判明している <sup>4)</sup>。

表 1-2 各分野の点検対象施設数と要緊急対策施設数 <sup>4)</sup>

分野 <sup>※2</sup>	点検対象施設数 <sup>※3</sup>	うち 要緊急対策施設数
道路	橋梁	717,391 施設 (2019.3.31) 69,051 施設 (2019.3.31)
	トンネル	10,718 施設 (2019.3.31) 4,416 施設 (2019.3.31)
	道路附属物等	39,873 施設 (2019.3.31) 6,062 施設 (2019.3.31)
河川 <sup>※4</sup>	堤防：約 14,300km	堤防：約 3,600km
	樋門・樋管、水門：約 8,500 施設	樋門・樋管、水門：約 1,800 施設
	(2020.3.31)	(2020.3.31)
砂防	砂防設備：約 83,000 基	砂防設備：約 3,000 基
	地すべり・急傾斜：約 37,000 区域	地すべり・急傾斜：約 6,000 区域
	(2020.3.31)	(2020.3.31)
海岸 (海岸堤防等)	約 5,900km (2019.3.31)	約 780km (2019.3.31)
下水道 (管路施設)	4,274km (2019.3.31)	11.6km (2019.3.31)
港湾	58,839 施設 (2019.3.31)	10,178 施設 (2019.3.31)
空港 (土木施設 <sup>※5</sup> )	80 空港 (2019.3.31)	7 空港 (2019.3.31)
航路標識	2,400 施設 (2019.3.31)	267 施設 (2019.3.31)
公園	86,662 施設 (2019.3.31)	21,480 施設 (2019.3.31)
公営住宅	2,162,484 戸 (2019.3.31)	1,150,506 戸 (2019.3.31)
官庁施設	9,283 施設 (2019.4.1)	743 件 <sup>※6</sup> (2019.8.20)

(注) 1：各施設数は括弧内の時点の数字 (注) 4：点検対象施設数、要緊急対策施設数は直轄施設のみ  
(注) 2：要緊急対策施設がない分野は除く (注) 5：空港土木施設 (幹線排水、共同溝、地下道、橋梁、護岸)  
(注) 3：点検対象施設数には点検未了のものも含む (注) 6：老朽を理由とした修繕計画のうち、緊急を要すると判定された計画の件数

表 1-2 を見ると日本の様々な施設の中で、特に橋梁の点検対象施設の割合は多いことが分かる。そこで、道路構造物の橋梁に着目すると、図 1-6 に示すように、日本全国で 2.0m 以上の道路橋は約 72.6 万橋あり、そのうち、3.8 万橋（5%）が直轄管理、2.4 万橋（4%）が高速道路会社、66.4 万橋（90%）が地方公共団体によって管理されている<sup>5)</sup>。

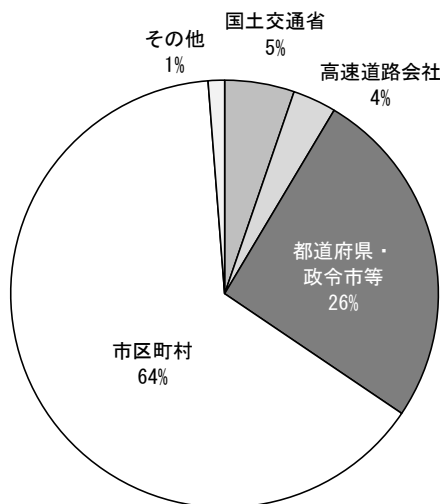


図 1-6 2.0m 以上の道路橋の割合<sup>5)</sup>（数値を基に作成）

国土交通省では、2012 年（平成 24 年）の笹子トンネルの天井板落下事故を皮切りに道路の老朽化対策に関する強化が行われ、2013 年（平成 25 年）6 月に道路法の改定、2014 年（平成 26 年）3 月の定期点検に関する省令・告示により 5 年に 1 回の近接目視を基本とした定期点検が義務付けられた<sup>6)</sup>。現在の全道路橋における定期点検の進捗は、一巡目の定期点検を概ね完了しており、二巡目に差し掛かっている状況である。

国土交通省における道路橋の定期点検は、国土交通省の定める「橋梁定期点検要領」に基づいて近接目視による状態の把握が行われ、表 1-3 に基づき部材ごとに対策区分の判定後、その結果を基に、表 1-4 より部材単位および橋単位での健全性を診断し、点検調書として記録・蓄積している<sup>7)</sup>。

表 1-3 対策区分の判定区分<sup>7)</sup>

判定区分	判定の内容
A	損傷が認められないか、損傷が軽微で補修を行う必要がない。
B	状況に応じて補修を行う必要がある。
C1	予防保全の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
C2	橋梁構造の安全性の観点から、速やかに補修等を行う必要がある。
E1	橋梁構造の安全性の観点から、緊急対応の必要がある。
E2	その他、緊急対応の必要がある。
M	維持工事に対応する必要がある。
S1	詳細調査の必要がある。
S2	追跡調査の必要がある。



表 1-4 健全性の診断<sup>7)</sup>

判定区分		定義
I	健全	道路橋の機能に支障が生じていない状態。
II	予防保全段階	道路橋の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。
III	早期措置段階	道路橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。
IV	緊急措置段階	道路橋の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。

一方、地方公共団体（都道府県、政令市、市区町村）における道路橋の定期点検は、各地方公共団体で定められた定期点検要領、もしくは国土交通省の「橋梁定期点検要領」を基に近接目視による状態の把握が行われ、各地方公共団体で定められた点検調書、あるいは「橋梁定期点検要領」の点検調書に記録している。地方公共団体では、各地方公共団体で記録した点検調書の他に、国土交通省の定める「道路橋定期点検要領」に基づいた様式に、橋単位での健全性の診断結果を取りまとめ、国土交通省に提出している<sup>8)</sup>。

国土交通省および地方公共団体で実施される「点検」では、各管理者ともに部位・部材に生じた損傷程度を近接目視で確認（判定区分にて評価）することを目的としており、あくまでも劣化機構の推定、予測、性能の評価、対策要否の判定は、その後に委ねられている状況である。

## 2) 劣化機構の推定の現状

定期点検の際に劣化機構の推定などのための詳細調査、もしくは経時的な追跡調査が必要と判断された場合（S1、S2 の判定）には、その対象となる箇所の詳細調査、追跡調査が行われている。詳細調査では、詳細調査の内容は管理者によって様々であるが、劣化機構の推定、コンクリート品質・耐荷性能の把握を目的として、一般的に中性化試験、塩化物イオン含有量試験、反発硬度試験、コアを採取して一軸圧縮強度試験などが行われる。また、鋼材腐食による腐食ひび割れやコンクリートの剝離・剥落により耐荷力低下が懸念される場合は、はつり調査によって腐食グレードを確認する場合もある。中でも圧縮強度は構造性能にとって重要な指標の 1 つであるため、既設構造物からコアを採取して圧縮強度の測定が行われる場合や近年汎用的に反発度から圧縮強度を推定する反発硬度試験が用いられることも多いが、反発硬度試験の測定結果は表層部の評価で、ばらつきは大きいことが分かっている<sup>9)</sup>。

一方、コンクリートの剝離・剥落に起因する鋼材腐食は、水、酸素、二酸化炭素、塩化物イオンの浸透などの物質の移動に依存するため、単純に圧縮強度を指標として鋼材腐食を評価することは難しい。

最近ではこれらの物質移動抵抗性を評価できる指標として、透気係数が着目されており、その計測方法として非破壊、非破壊試験もしくはコアを用いた加圧透気試験がある。前者は、簡易的に計測でき、かつ、表層部の評価が可能で、これまでに二酸化炭素により生じる中性化は、

ある程度評価できることが報告されているが、塩化物イオンの浸透によって生じる塩害は関係性が見い出せず、実用化に至っていないのが現状である。後者のコアを用いた加圧透気試験は、コアを採取することで鋼材近傍の品質を評価することができ、さらに実効拡散係数との細孔構造の類似から、鋼材腐食を評価することに期待されている<sup>10), 11)</sup>。

### 3) 予測の現状

構造物の維持管理においては、診断時点の構造物の性能のみならず、劣化の進行によって生じる構造物の性能の将来の変化を予測し、評価することが不可欠である。

予測の方法として、劣化機構に基づく劣化予測と統計データに基づく劣化予測が規定されている<sup>12)</sup>。前者は、劣化機構が推定できる場合、劣化の進行モデルなどを用いて、各劣化機構に応じたその進行を予測することとされている。例えば、劣化機構が塩害の場合、塩化物イオンの拡散の予測によって、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 ( $C_{lim}$ ) に達する時期を予測するものであるが、実構造物では鋼材腐食の目安よりも高濃度の塩化物イオン濃度が確認される事例など、構造諸元、環境条件によってはその結果が大きく乖離する場合もあり、過大あるいは過少の予測となることも懸念されている。さらに、コンクリート標準示方書に定められている劣化機構ごとの予測方法は、主に腐食ひび割れが生じる前の段階の予測（潜伏期から進展期）であり、それ以降（加速期～劣化期）の予測方法は確立しておらず、さらに鋼材腐食の進行予測は定量化されるまでに至っていないとされている<sup>13)</sup>。

一方後者は、劣化機構を推定することが難しい場合、複数の劣化機構が考えられ単独の劣化機構のみに絞れない場合、劣化機構に対する適切な予測手法が存在しない場合などには、部位・部材ごとで点検結果の経時変化が数多く蓄積されていれば、統計学的に分析して劣化の進行予測を行う方法である。ただし、日本における道路橋は現在二巡目の点検を実施している段階であり、現時点で統計学的に分析して劣化の進行予測を行うことは難しい。

また、実際の業務では、全ての構造物に対して供用予定期間内の進行予測は、実施されていないのが現状である。

### 4) 性能評価および対策の要否判定の現状

性能評価では、点検、劣化機構の推定、予測結果を考慮し、将来の構造物の性能をできるだけ定量的に評価することとされている<sup>14)</sup>。構造物の性能の評価方法は、外観上のグレードなどによる方法、設計での性能評価式による方法、非線形有限要素解析による方法がある。一般的な性能評価の手順としては、外観上のグレードなどによる方法を用いて、構造物や部材の性能の低下の有無や低下の程度、あるいは変状の程度に応じて分類し、より詳細な評価が必要と判断される場合に、設計での性能評価式による方法や非線形有限要素解析による方法を用いて定量的に評価する流れである。外観上のグレードなどによる方法は、より詳細な方法による性能評価を実施する必要性の有無を判断するためのスクリーニングに用いられるため非常に重要で

ある。この方法でコンクリート表面のひび割れと鋼材腐食の状態が代表的に着目されるが<sup>14)</sup>、これらの変状はその程度が同じであっても発生する部位・部材によって構造物の性能に与える影響は異なる。特に、鋼材腐食の場合には、最悪の場合コンクリートの剥離・剥落が生じる恐れがあり、第三者被害への影響も懸念されるため<sup>15)</sup>、鋼材腐食の進行を予測し把握することは非常に重要である。

対策の要否判定では、前述の性能評価結果と対策の要否判定のための基準の維持管理限界を基に行うこととされているが、実際の維持管理に関する業務の大半は、鋼材腐食開始時期の $C_{lim}$ 、中性化残り 10mm などを基準に判断しているのが現状である。

しかしながら、 $C_{lim}$ 、中性化残り 10mm の判定基準は、コンクリートにおける最小かぶりが確保されていることが前提であるが、これまでの実構造物の調査結果を見ると、かぶり規定の改定、スパーサー設置の規定などにより、設計上最低限必要な最小かぶりを確保できていない（かぶり不足）事例も数多く確認されている。また、かぶり不足、中性化残り 10mm 以下、高濃度の塩化物イオン濃度の混入、水掛かりの有無などの条件によっては、コンクリート中の鋼材が腐食していない事例なども見られている。これらのことから、かぶり、塩害、中性化による劣化事例、水掛かりの有無による影響などについて実構造物の状況を把握することは重要である。

### (3) 対策の現状

2018 年度末時点において判定区分が III と判定された橋梁は 10%、IV と判定されたものは 0.1%であるが、図 1-7 より判定区分 III・IV と判定された橋梁のうち対策（修繕）に着手された割合は、国管理 53%、高速道路会社管理が 32%、地方公共団体管理が 20%であった<sup>16)</sup>。

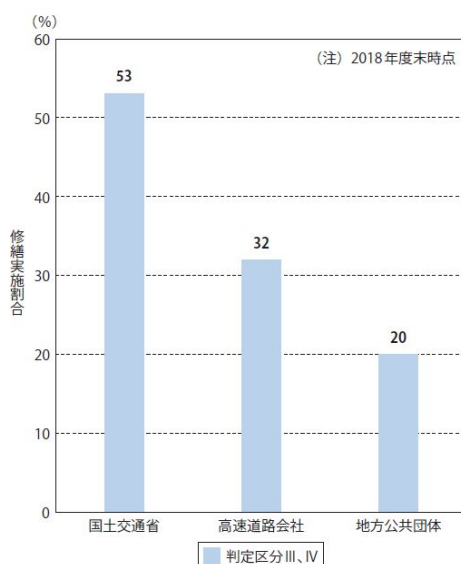


図 1-7 橋梁における修繕着手率<sup>16)</sup>

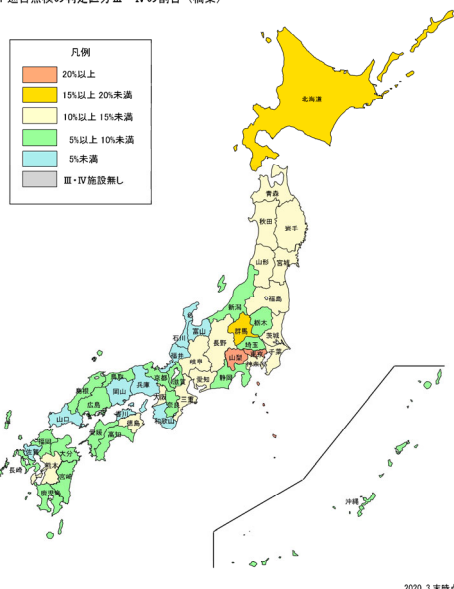
2018 年度末時点の修繕着手率の状況から、およそ 2 年後の 2020 年 9 月に発行された「道

路メンテナンス年報」によれば、図 1-8～図 1-10 より一巡目の点検で健全度 III、IV と判定された橋梁に対する対策（修繕などの措置）が実施された状況として、国土交通省管理の橋梁の割合は、地方公共団体と比べるとある程度高いものの、いずれも対策（修繕などの措置）が先送りされている状況が見られる<sup>17)</sup>。

### 【判定区分 III・IV の割合】

1) 国土交通省

○1 巡目点検の判定区分 III・IV の割合（橋梁）

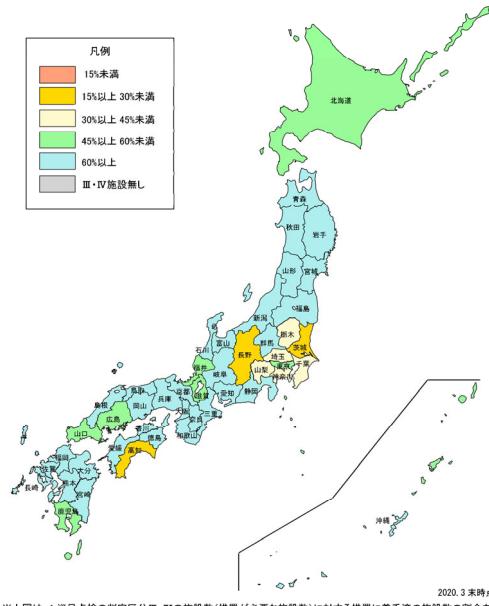


※上図は、1 巡目点検の判定区分 III・IV の施設数(措置が必要な施設数)を基に作成。  
※都道府県別の 1 巡目点検の判定区分の割合は巻末資料(4)を参照。

2020.3 末時点

### 【判定区分 III・IV に対する対策の状況】

○1 巡目点検の III・IV 施設に対する修繕等措置の実施状況（橋梁）



※上図は、1 巡目点検の判定区分 III・IV の施設数(措置が必要な施設数)に対する措置に着手済の施設数の割合を基に作成。  
※都道府県別の修繕等措置の実施状況は巻末資料(5)を参照。

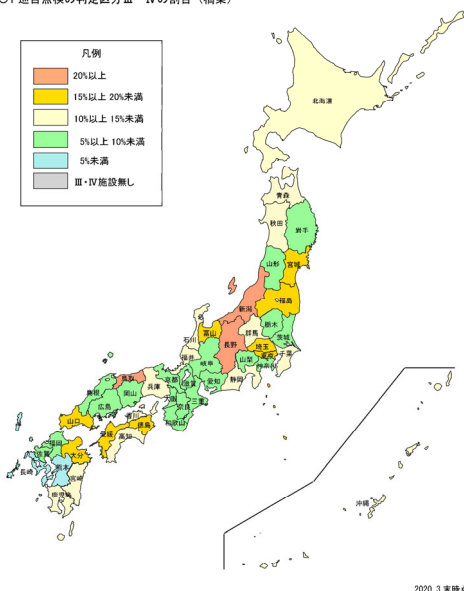
2020.3 末時点

図 1-8 対策（修繕などの措置）の状況（国土交通省）<sup>17)</sup>

### 【判定区分 III・IV の割合】

4) 都道府県・政令市等

○1 巡目点検の判定区分 III・IV の割合（橋梁）

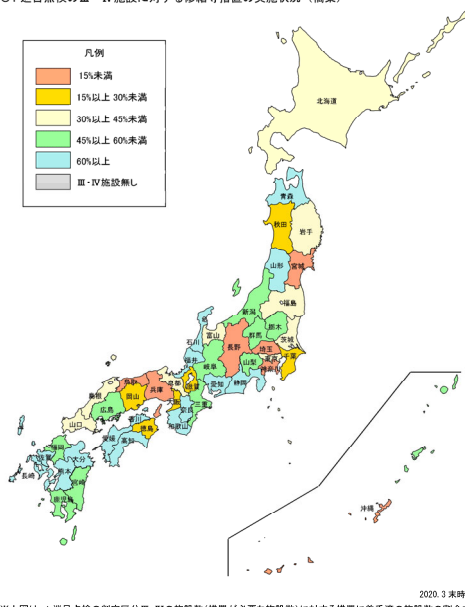


※上図は、1 巡目点検の判定区分 III・IV の施設数(措置が必要な施設数)を基に作成。  
※都道府県別の 1 巡目点検の判定区分の割合は巻末資料(4)を参照。

2020.3 末時点

### 【判定区分 III・IV に対する対策の状況】

○1 巡目点検の III・IV 施設に対する修繕等措置の実施状況（橋梁）



※上図は、1 巡目点検の判定区分 III・IV の施設数(措置が必要な施設数)に対する措置に着手済の施設数の割合を基に作成。  
※都道府県別の修繕等措置の実施状況は巻末資料(5)を参照。

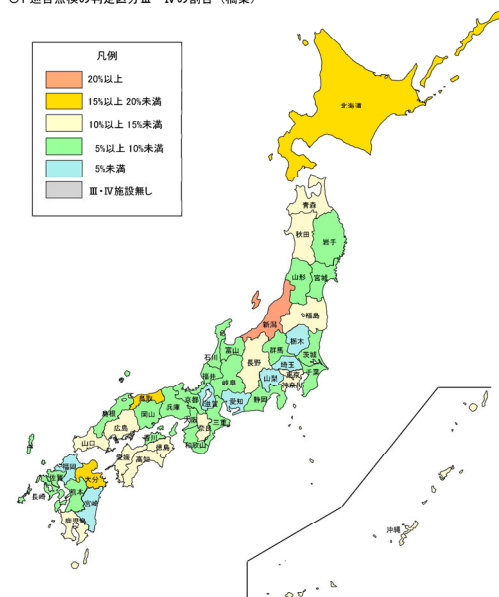
2020.3 末時点

図 1-9 対策（修繕などの措置）の状況（都道府県・政令市など）<sup>17)</sup>

## 【判定区分Ⅲ・Ⅳの割合】

5) 市区町村

○1 巡目点検の判定区分Ⅲ・Ⅳの割合（橋梁）

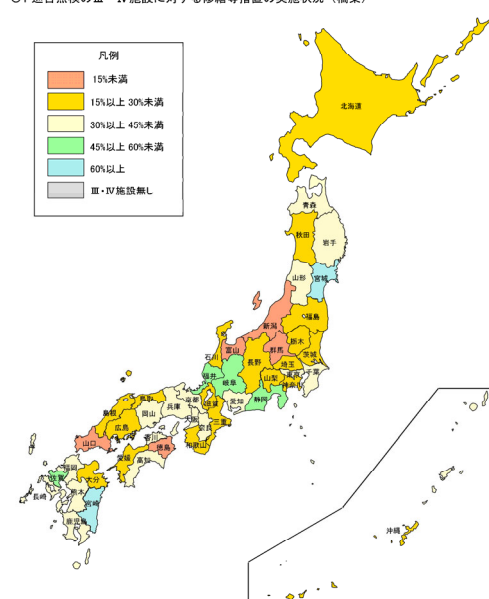


※上図は、1 巡目点検の判定区分Ⅲ・Ⅳの施設数(措置が必要な施設数)を基に作成。  
※都道府県別の1 巡目点検の判定区分の割合は巻末資料(4)を参照。

2020.3 末時点

## 【判定区分Ⅲ・Ⅳに対する対策の状況】

○1 巡目点検のⅢ・Ⅳ施設に対する修繕等措置の実施状況（橋梁）



※上図は、1 巡目点検の判定区分Ⅲ・Ⅳの施設数(措置が必要な施設数)に対する措置に着手済の施設数の割合を基に作成。  
※都道府県別の修繕等措置の実施状況は巻末資料(5)を参照。

2020.3 末時点

図 1-10 対策（修繕などの措置）の状況（市区町村）<sup>17)</sup>

これは、いずれも財政の逼迫が要因と考えられる。国土交通省の場合、図 1-1 で示したように近年の国土交通省の公共事業関係費は、近年横ばいで推移してきているものの、対策の実態としては、未だ 15%～30%未満の進捗に留まっている地域もある。

国土交通省では、戦略的な予防保全（適切な時期に点検・調査・対策による長寿命化）を目標としているが、実際には様々な制約条件（財政の逼迫、老朽化する構造物の拡大）により部材ごとの判定区分が C1, C2 に該当する損傷に対して「対策」を基本に実施（事後保全）し、判定区分が B は C1, C2 を補修する中で、その周辺にある場合に「対策」を行うかどうかを検討しているのが現状である。

一方、地方公共団体では、国土交通省の割合と比べて低く、財政の逼迫は国土交通省よりも深刻な状況である。地方公共団体の管理する橋梁は、5m～10m 以下の比較的小規模のものも数多く含まれるが、橋梁の管理数は全体の 9 割を占める。また、「道路局調べ」によれば、約 72.6 万橋のうち、建設年が明確な橋梁は約 49.6 万で、その多くが高度経済成長期に建設されており、老朽化が深刻となっている。その他、約 23 万橋は建設年が不明な橋梁で<sup>18)</sup>、実際にはさらに多いことが想定されることから、すべての橋梁に対して同レベルで維持管理することは現実的に難しい現状である。

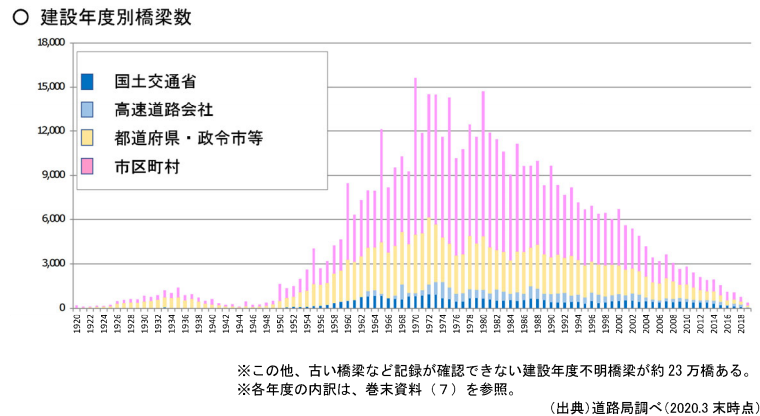


図 1-11 建設年度別の橋梁数<sup>18)</sup>

これらの背景に加え、5年に1回の定期点検費用は一定の割合で必要であり、対策（修繕などの措置）を行うための財政確保は、今後さらに厳しくなると推察される。

このように、国土交通省では、「予防保全」による対策を目指しているが、実際には管理される構造物のほとんどが「事後保全」による対策に留まっているのが現状である。特に、塩害の場合には、コンクリート中の鋼材が発錆してから腐食ひび割れなどの劣化に至るまでの期間が比較的短いという特徴があることから、コンクリートの剥離・剥落が生じる前に鋼材腐食の進行予測を行う必要がある。

## 1-2 研究の目的

本研究では、まず実構造物の実態の把握を目的として、様々な環境下にあるコンクリート構造物の中で、最も点検対象施設数の多い道路構造物の橋梁を主な調査対象として、実構造物のかぶり、鋼材腐食に影響を及ぼす塩害および中性化、水掛かりについて実構造物を調査して現状を把握した。かぶりの調査では、かぶりの変遷、スペーサーの設置、建設された時期の時代背景などを考慮して、かぶり不足の実態を把握した。また、鋼材腐食に起因する中性化、塩害と水掛かりの有無に着目し、これらの損傷を受けた実構造物を調査した。調査結果を基に、かぶりの大小が塩化物イオンや鋼材腐食に与える影響（かぶりが $C_{lim}$ に与える影響）、既往の研究実績に基づく方法として類似の環境および構造物の点検結果などがない場合に用いる現行規定の表面における塩化物イオン濃度（ $C_0$ ）に対し、実構造物の調査結果の安全性の判定について時代背景などを踏まえて考察を行った。

次に、室内実験により作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体における透気係数と各種物質移動抵抗性の関係性を明らかにして、実構造物への適用性を把握した。さらには、透気係数による鋼材腐食の評価の可否を確認するために、腐食電流密度、相対湿度、可溶性塩化物イオン濃度、腐食重量の関係性を明らかにした後で、透気係数と腐食電流密度の関係性を明らかにして関係式を導き出した。この関係式を用いて、実構造物のコア供試体から計測した透気係数を基に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合することで関係

式の有用性を確認するとともに、鋼材の腐食抵抗性に関する検討を行った。

上記で得られた結果を基に、鋼材腐食の進行予測方法の確立に向けて、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の方法を提案することを目的とした。

### 1-3 各章の構成

本論文は、「コンクリートの透気性を考慮した実構造物の劣化進展予測法に関する研究」と題し、第1章～第7章の全7章構成とした。各章の概要は、以下に示すとおりである。図1-12には、本論文の構成を示す。

第1章では、研究の背景として土木学会の定める基本的な維持管理の手順を基に、日本における社会基盤の維持管理の現状を概説し、本論文の研究目的と本論文の各章の構成を示した。

第2章では、実構造物の調査結果および暴露試験を対象とした研究報告、透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する既往の研究、予測方法、予測に関する研究について概説し、これまでに明らかとなっている点と課題点について記した。

第3章では、鋼材腐食の進行に大きく影響を及ぼすかぶりに着目し塩害環境下の実構造物の状況を把握することを目的として、実構造物の実測かぶりと設計上必要な最小かぶりを年代ごとで整理し、その関係性を明らかにした。また、鋼材位置の塩化物イオン濃度と腐食グレードをかぶりごとで整理し、かぶりが鋼材腐食に与える影響について明らかにした。これらの関係性を基に、鋼材腐食開始の指標となる $C_{lim}$ に関する知見を示した。

第4章では、塩害環境下の2つの異なる地域の構造物に着目し、既往の研究実績に基づく方法として類似の環境および構造物の点検結果などがない場合に用いる現行規定の $C_0$ に対し、実構造物の調査結果が安全側であるか、あるいは危険側であるのかを部材および水掛かりの有無ごとに海岸からの距離と $C_0$ の関係性を述べた。

第5章では、塩害、中性化により劣化が生じた実構造物の状況を把握することを目的として、様々な環境下の実構造物を対象に、コンクリート品質試験、鋼材の腐食グレードの結果を整理し、建設年、時代背景、水掛かりの有無、構造諸元などの関係性を述べた。

次に、室内実験により作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体における透気係数と各種物質移動抵抗性の関係性を明らかにして、実構造物への適用性があることを述べた。その上で、透気係数による鋼材腐食の評価の可否を確認するために、腐食電流密度、相対湿度、可溶性塩化物イオン濃度、腐食重量の関係性を明らかにした後で、透気係数と腐食電流密度の関係式を導き出した。この関係式を用いて、実構造物のコア供試体から計測した透気係数を基

に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合して、関係式の有用性について述べた。

第6章では、第5章で得られた腐食電流密度と透気係数の関係式と実構造物のコア供試体から計測した透気係数を用いて腐食電流密度を推定し、この腐食電流密度から腐食速度へ変換させて、かぶりと鉄筋径を考慮した鋼材腐食の進行予測を行い、外観変状の状態と比較してその有用性を述べた。これらの結果を基に、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の確立に向けた予測モデルの提案を行った。

第7章では、本研究で得られた成果を取りまとめ、今後の展望を述べて本論文の結びとした。

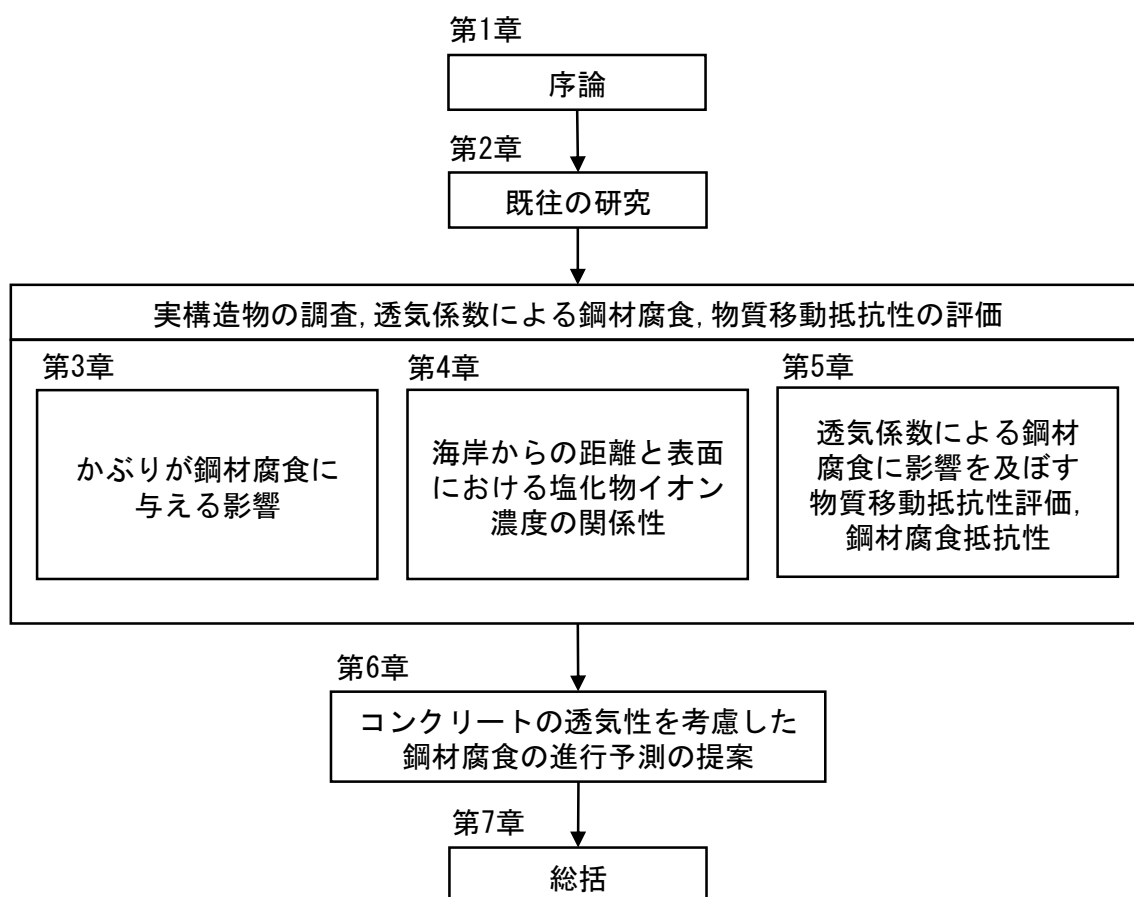


図 1-12 本論文の構成



## 1-4 本研究の定義

本研究で用いる用語、数値の取り扱いの範囲は、以下のように定義し、その他は原則として、日本産業規格（JIS）、土木学会「コンクリート標準示方書」などでの定義に従うものとした。

**かぶり**： かぶりとは、コンクリート表面から鋼材（鉄筋）までの深さ（距離）を示す。かぶりには、純かぶり（コンクリート表面から最縁端部の鋼材の表面までの深さ）、芯かぶり（コンクリート表面から最縁端部の鋼材（鉄筋）の中心位置までの深さ）に大別される。本論文では、純かぶりを「かぶり」として整理している。

**かぶり不足**： 設計時に求められる最低限必要な最小かぶりに対し、実構造物の実測値のかぶりが不足している状態を示す。

**物質移動抵抗性** 物質移動とは、吸収、蒸留、吸着、乾燥、沈殿、蒸留などといった過程の中で、物質がある位置から別の位置へ移動する際の正味の移動を示す。  
本研究では、酸素、二酸化炭素、水、塩化物イオンがコンクリート中を移動することを示し、その評価指標を総称して物質移動抵抗性としている。

**透気係数**： コンクリートの透気性とは、コンクリート内を気体（酸素、二酸化炭素）が透過する性質を示し、その透気性を評価するための指標が透気係数である。

### 【透気係数の計測深度】

加圧透気試験で取り扱うコア供試体は、かぶり方向に 30～150mm 程度とし、鋼材近傍の物質移動抵抗性を評価することを想定している。

### 【透気係数の範囲】

本論文で取り扱う透気係数は、室内実験の円柱供試体の場合  $W/B=45\% \sim 65\% : 1.0E-11 \sim 1.0E-07 \text{ (cm}^4/\text{N} \cdot \text{s)}$  の範囲である。

実構造物の場合は、室内実験と比べて養生条件の違い、圧送性確保のため  $W/B$  が高い場合があり、計測の結果  $1.0E-09 \sim 1.0E-05 \text{ (cm}^4/\text{N} \cdot \text{s)}$  の範囲である。

**第三者被害**： コンクリート中の鋼材腐食によって、コンクリート部材の一部が剥落し、落下したコンクリート片によって第三者へ与える被害を示す。

**円柱供試体**： 室内実験で作製した供試体を示す。

**コア供試体**： 実構造物から採取した供試体を示す。

## [参考文献]

- 1) 国土交通省：令和 2 年版国土交通白書，p.42，2018.10
- 2) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編：本編】，pp.14-21，2018.10
- 3) 国土交通省：令和 2 年版国土交通白書，pp.184-185，2018.10

- 4) 国土交通省：令和2年版国土交通白書，p.141，p.143，p.184，2018.10
- 5) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，pp.2-7，2020.9
- 6) 国土交通省，道路 HP 維持管理，道路の老朽化対策，老朽化対策の取組み，  
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobohozen.html>
- 7) 国土交通省道路局国道・技術課，橋梁定期点検要領，p.2，2019.3
- 8) 国土交通省道路局，道路橋定期点検要領，pp. 3-5，2019.3
- 9) 斯波明宏，石川伸介，渡邊聡，河上浩司：リバウンドハンマーによる強度推定式の提案とその評価，コンクリート工学，Vol. 43, No. 2, pp. 35-40, 2005.2
- 10) 三浦明，樫原弘貴，添田政司，金堀雄伍，西嶋大貴：透気係数による各種コンクリートの塩化物イオン浸透性の評価に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第15巻，pp. 253-258, 2015.10
- 11) Katpady, D. N., Hazehara, H., Soeda, M., Kubota, T. and Murakami, S.: Durability assessment of blended concrete by air permeability, International Journal of Concrete Structures and Materials, DOI 10.1186/s40069-018-0260-9, ISSN 1976-0485 / eISSN 2234-1315, 2018
- 12) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編：本編】，pp.70-73，2018.10
- 13) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編：本編】，p.144，2018.10
- 14) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編：本編】，pp.74-87，2018.10
- 15) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁における第三者被害予防措置要領(案)，p.2，2016.12
- 16) 国土交通省：令和2年版国土交通白書，p.142，2018.10
- 17) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，pp.46-55，2020.9
- 18) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報，p.94，2020.9

## 第 2 章 既往の研究

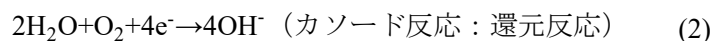
### 2-1 概説

本章では、実構造物の調査結果および暴露試験を対象とした研究報告、透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する既往の研究、予測方法、予測に関する研究について整理した。その結果、これまでに明らかとなっている点と課題点を明らかにした。

### 2-2 鋼材腐食

#### 2-2-1 メカニズム

コンクリートは、セメントの水和反応によって水酸化カルシウムが生成され、これにより、細孔溶液中の pH は 12 以上の強アルカリ性を示す。コンクリート内部が強アルカリ性を示す健全な状態であれば、コンクリート中の鋼材表面に鋼材腐食に抵抗する酸化被膜の「不動態被膜」を形成し、腐食から保護している。しかしながら、コンクリート内へ酸素や水の供給、後述する塩化物イオンの浸透、二酸化炭素の浸透による pH の低下などによって、保護層の不動態被膜を破壊される。不動態被膜が破壊されると、式(1)、(2)の酸化還元反応が起こり、鋼材の腐食が開始することとなる。



この 2 種類の反応が同時に生じるのが腐食反応であり、式(3)のように水酸化第一鉄（錆）がコンクリート中の鋼材表面に析出する現象である。図 2-1 に示すように、この反応で析出された腐食生成物の体積膨張によって、コンクリートにひび割れを生じさせる。また、このひび割れなどを介して、さらに酸素、水、塩化物イオン、二酸化炭素が供給されて、鋼材腐食は進行し、鋼材の断面減少やコンクリートの剥離・剥落に至る。

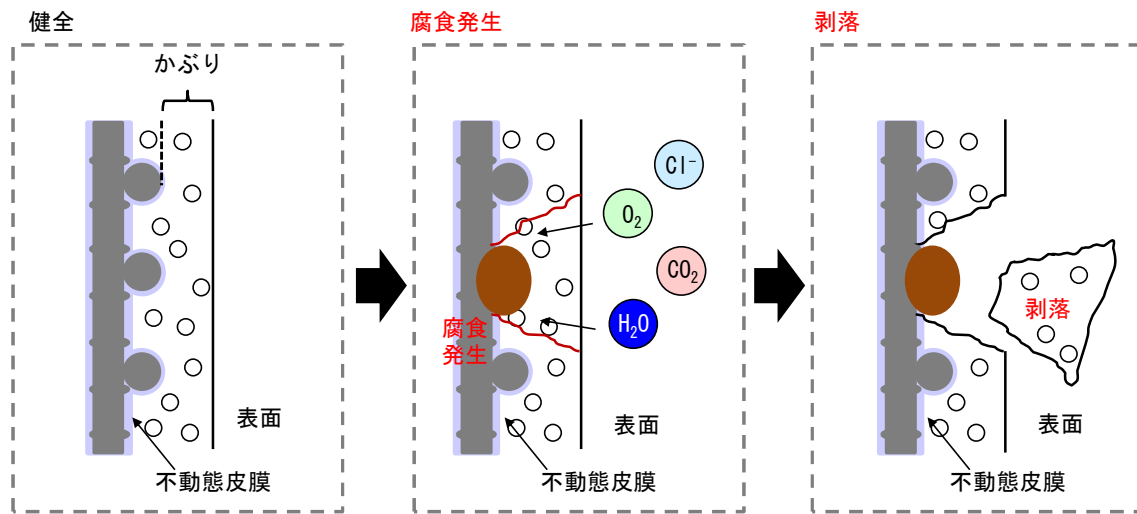
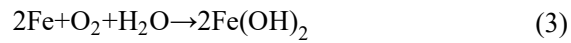


図 2-1 鋼材腐食のメカニズム

## 2-2-2 鋼材腐食の評価方法

鋼材腐食の評価方法は、様々な評価基準があり<sup>1)~5)</sup>、各評価基準で鋼材の状態を評価する表現も異なっている。これらを一概に取り入れることは困難であるが、本研究では、コンクリート標準示方書【維持管理編】、コンクリート診断技術に示された鋼材腐食のグレードと鋼材の状態、鋼材腐食の目安（写真）を基本として評価した（表 2-1、表 2-2、写真 2-1）。

表 2-1 鋼材腐食グレードと鋼材の状態<sup>4)</sup>

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態，または錆は生じているが全体的に薄い緻密なさびであり，コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが，小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが，鋼材の全周または全長にわたって浮き錆が生じている。
IV	断面欠損を生じている。

表 2-2 鋼材腐食グレードと鋼材の状態<sup>5)</sup>

鉄筋腐食度	鉄筋の状態
I	黒皮の状態，または錆は生じていないか全体的の薄い緻密な錆であり，コンクリート面に錆が付着していることはない．
II	部分的に浮き錆があるが，小面積の斑点状態である．
III	断面欠損は目視観察では認められないが，鉄筋の周囲または全長にわたって浮き錆が生じている．
IV	断面欠損を生じている．

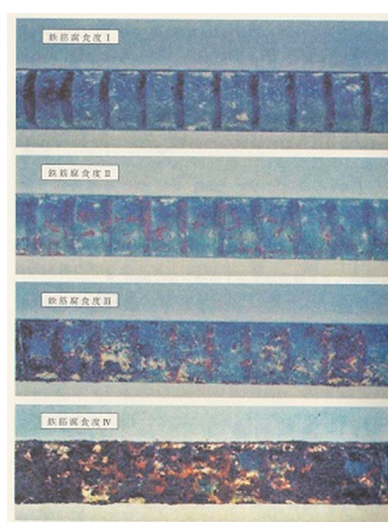


写真 2-1 鉄筋腐食度の目安<sup>5)</sup>

### 2-2-3 鋼材腐食による影響

コンクリート中の鋼材腐食が進行することによってコンクリートが剥離・剥落し，構造物の耐荷力が低下するだけでなく，コンクリート片が落下することで第三者被害を生じさせる可能性があることも懸念されている。国土交通省では，第三者被害の重大性に鑑みた第三者被害予防措置も必要に応じて実施している状況である<sup>6)</sup>。

このように，鋼材腐食はコンクリートの剥離・剥落に密接に関係しており，構造物の耐荷力の低下だけでなく，第三者被害へ影響を及ぼすものである。

## 2-3 鋼材腐食の要因

### 2-3-1 かぶり不足

かぶり不足の場合には，ひび割れがない場合でも鋼材腐食に必要な酸素，水，二酸化炭素，塩化物イオンが供給され易い。また，コンクリート打設時にはひび割れが生じやすくなるため，このひび割れから供給される可能性も考えられる。

かぶり不足となる要因は、設計、施工のそれぞれの段階で考えられる。設計時の場合には、部材ごとに最小かぶりが規定されており、部材ごとで経時的に改定されている。また、施工時の場合には、スペーサーの設置が1985年に規定されている。このように、最小かぶりの改定、スペーサーの設置が規定されるよりも前に竣工した構造物では、かぶりが不足している可能性が考えられる。また、かぶり不足とは直接的に関係ないが、1986年の塩化物量総量規制、1989年のASR反応抑制対策も規定されており、かぶり不足の場合には鋼材腐食を伴うコンクリートの剝離・剝落の要因となる可能性がある。

表2-3には、JIS、基準、技術資料などを基に<sup>7), 8), 9)</sup>、設計段階における各基準の変遷を整理した。

表 2-3 設計段階における各基準の変遷<sup>7), 8), 9)</sup>

主な要因	内容	改定年	最小かぶり (mm)
設計	かぶりの変遷		
	・床版	1968年以前	20
		1968年以降	30
	・主桁	1978年以前	20
		1978年以降	25
	・柱	1978年以前	30
		1978年以降	40
	・フーチング	1980年以前	75
		1980年以降	70
施工	スペーサーの設置	1985年	-
その他	塩化物量総量規制	1986年	-
	ASR反応抑制対策	1989年	-

## 2-3-2 塩害

### (1) メカニズム

コンクリートの塩害とは、まず塩化物イオンがコンクリート中に浸透することで、鋼材表面を保護している不動態被膜が破壊される。不動態被膜が破壊された箇所に、さらに酸素、水、塩化物イオンが供給されることで鋼材腐食が促進され、以下の損傷事例（写真2-2）ように、腐食生成物の体積膨張によってコンクリートにひび割れや剝離・剝落を生じさせ、鋼材の断面減少などを伴って、構造物の性能が低下する現象である。

塩化物イオンが供給される要因は、海水の飛来塩分、潮汐による影響、凍結防止剤などの外部環境から供給される場合（外的要因）とコンクリート製造時に材料から供給される場合（内的要因）がある。我が国では、1986年にコンクリート中の塩化物量総量規制（0.3kg/m<sup>3</sup>以下）

が制定されたことにより、1986 年以降に建設された実構造物では、内的要因の塩害劣化事例は無くなっている。しかしながら、我が国では塩化物量総量規制以前の高度経済成長期に数多くの構造物を建設しているため、外的要因だけでなく内的要因による劣化事例についても依然として確認されているのが現状である。

塩害は鋼材の腐食が開始していない状態では構造物の諸性能の低下は生じていないが、鋼材の腐食が開始すると構造物の性能は低下し始める。コンクリートの剥離・剥落や鋼材の断面減少が生じるまで劣化が進行すると、構造物の性能は著しく低下する。また、塩害の場合は、コンクリート中の鋼材が発錆してから腐食ひび割れなどの劣化に至るまでの期間が比較的短いという特徴があり、写真 2-3 に示すように、腐食ひび割れ発生後わずか 7 年で鉄筋露出に至った事例もある。

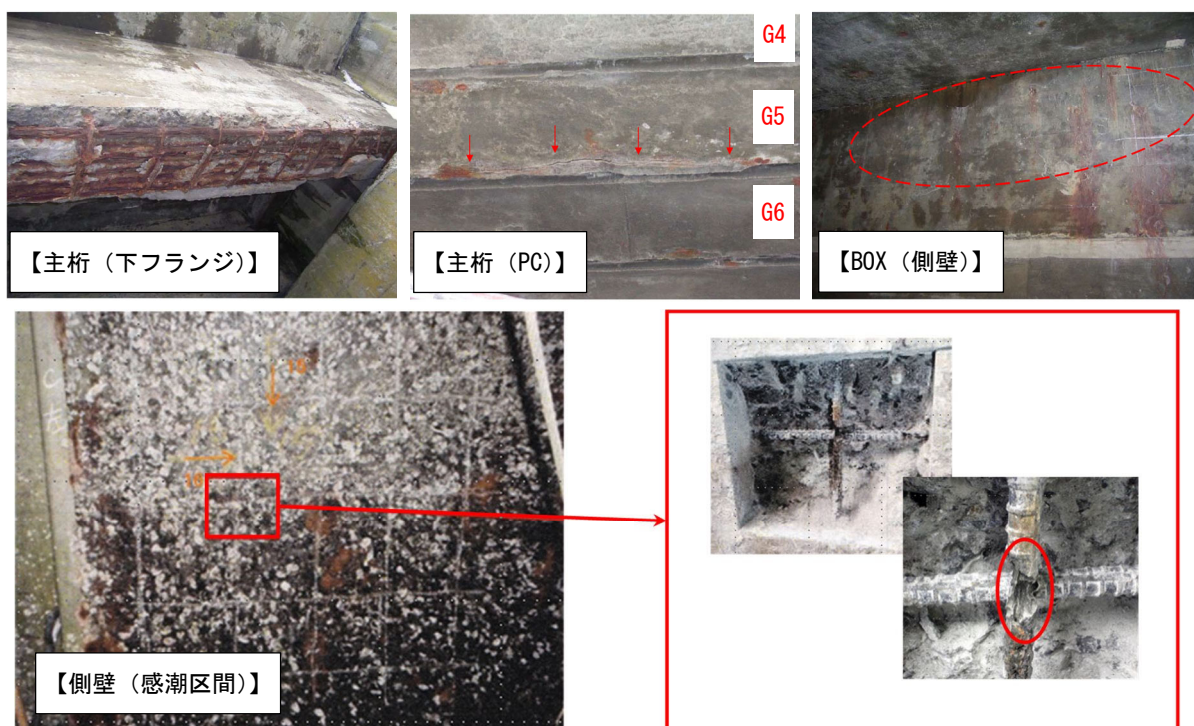


写真 2-2 塩害による損傷事例



写真 2-3 塩害の短期間における劣化進行事例



## (2) 塩化物イオンの拡散モデル

コンクリート中に浸透する塩化物イオンは、大きく固定化塩化物イオンと自由塩化物イオンに分類される（図 2-2）。そのうち、固定化塩化物イオンは、固相塩素としてコンクリート中で固定化されているフリーデル氏塩、吸着塩素として物理的、化学的にコンクリート中で吸着される塩化物イオンに分類される。ここで、物理的吸着とは吸着分子と表面との相互作用が弱い分子間力（ファンデルワールス力）によるもの、化学的吸着とは、複数の原子間の結合（イオン結合・共有結合・金属結合）による化学結合によるものを示している。一方で、自由塩化物イオンは、コンクリートの細孔溶液中を移動することが可能な塩化物イオンで、これを評価する拡散性状が実効拡散係数であり、鋼材の腐食に起因すると言われている。全塩化物イオン濃度は、これらの塩化物イオンの和であり、これを評価する拡散性状が塩化物イオンの見掛けの拡散係数である。また、全塩化物イオン濃度の抽出は、微粉碎したコンクリートを強酸で溶解した時に抽出するのに対し、水で抽出される塩化物イオン濃度を可溶性塩化物イオン濃度と定められている。可溶性塩化物イオンは、自由塩化物イオンと物理的・化学的吸着した一部の塩化物イオン濃度を含んでいる。

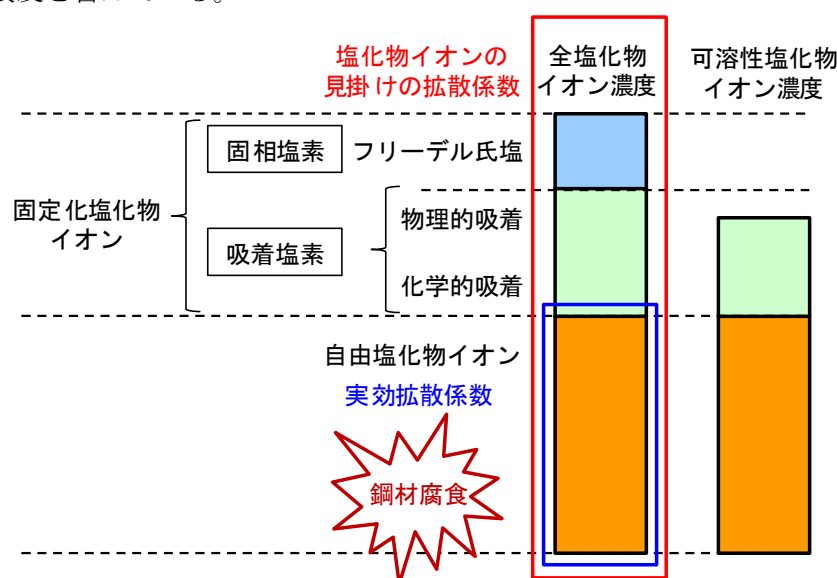


図 2-2 塩化物イオンの拡散モデル

## 2-3-3 中性化

### (1) メカニズム

コンクリートの中性化は、大気中の二酸化炭素がコンクリート内に侵入し、炭酸化反応を起こすことによって細孔溶液の pH が低下する現象である。これにより、鋼材表面の不動態被膜が破壊され、酸素、水が供給されることで鋼材の腐食が進行する。鋼材腐食が進行することで、腐食生成物の体積膨張がコンクリートにひび割れや剥離を生じさせ、鋼材の断面減少などを伴って、構造物の性能が低下する現象である。また、中性化は水和物の変質と細孔構造の変化を伴うため、中性化が進行すると強度変化などを引き起こす可能性もある。なお、中性化は酸性



物質がコンクリートに作用することで進行する場合もあるが、本論文では大気中の二酸化炭素による中性化が対象である。

## (2) 中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食

中性化が進行していても、水の供給が無くコンクリートが乾燥状態に保たれる場合には、鋼材腐食は進行しにくい。そのため、2018年制定コンクリート標準示方書では、構造物表面の水掛かりの区分を評価するための規定がなされている（表 2-4、図 2-3）<sup>10)</sup>。

表 2-4 構造物表面の水掛かりの区分<sup>10)</sup>

構造物表面の分類	区分	該当する部位および環境の例
0	水掛かりがなく常時乾燥する部位	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 橋梁や高架橋の下で水切り等が機能し、上部からの水の供給がない部位</li> <li>・ 霧や結露が発生する頻度が低い環境（地域）</li> </ul>
I	降水は掛かるが、降水がやめばすぐに乾燥が始まる部位	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 橋梁や高架橋の高欄</li> <li>・ 下路桁の主桁</li> <li>・ 排水が良好なスラブの上面</li> <li>・ 霧や結露が発生する頻度が高い環境（地域）</li> </ul>
II	湿潤状態が長く続く部位	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 飛沫帯にある部位</li> <li>・ 上部からの漏水が生じる部位</li> <li>・ 降水後に水たまりができる部位</li> <li>・ ひび割れや打継部など水が保持されて乾燥しにくい状況となる部位（湿潤状態が継続する箇所）</li> <li>・ 地中からの水の供給を受け乾湿が繰り返される部位（地際）</li> </ul>
III	湿潤状態であっても乾湿の環境変化が少ない部位	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 常時水中にある部位</li> <li>・ 常時土中にある部位</li> </ul>

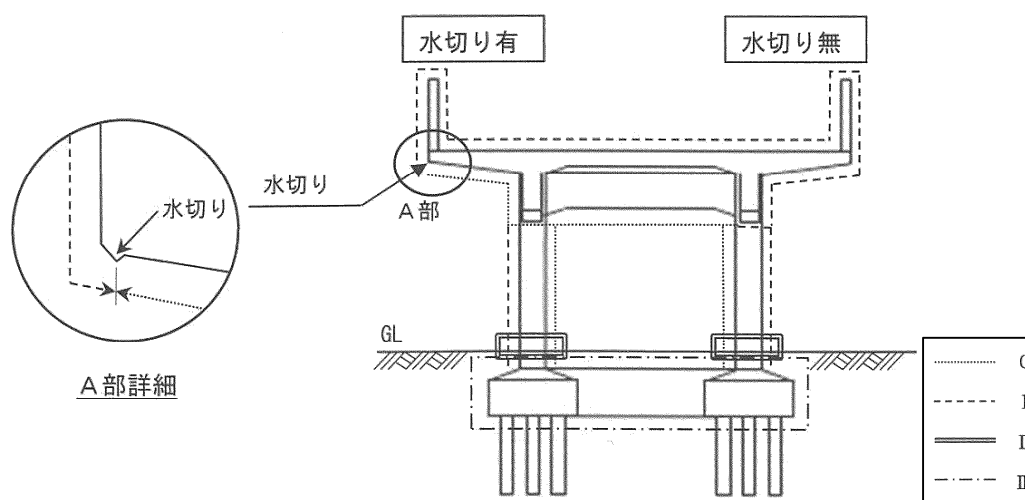


図 2-3 水掛かりを受ける部位の区分例<sup>10)</sup>

水掛かりによる鋼材腐食への影響として、以下の損傷事例（写真 2-4）ように、地覆側面のよ  
うに直接降雨が掛かる箇所だけでなく、地覆下面、床版下面の水切りの有無、橋面からの漏水  
の有無によっても、水が供給される場合は、鋼材腐食が生じる。さらに、高温多湿の場合でも、  
結露により鋼材腐食が進行し、うき、剥離・剥落の要因となる。



写真 2-4 中性化による損傷事例

## 2-4 実構造物および暴露試験の研究報告

コンクリートの劣化機構は、中性化、塩害、アルカリ骨材反応、凍害などがあるが、本研究  
では鋼材腐食に影響のある中性化、塩害に着目し、現在報告されている実構造物を対象とした  
研究報告、暴露試験の研究報告を整理して、実構造物の現状、暴露試験結果を把握した。

### 2-4-1 実構造物を対象とした研究報告

前原ら<sup>11)</sup>は、実構造物 221 測定を対象に中性化深さ、かぶりおよび鉄筋腐食度を調査し、調  
査結果に基づいて雨掛かりの有無が鋼材腐食の進行とかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響を整理  
している。その結果、かぶりの剥離・剥落に至るまでの過程で、雨掛かりの有無が大きく影響  
することが示唆され、雨掛かりがある場合には、水分供給による乾湿繰り返しの影響を受け、  
含水率の変動がコンクリート表面の方が大きくなることもある。これにより、鉄筋の腐食速度  
がコンクリート表面の方が大きくなると報告している。

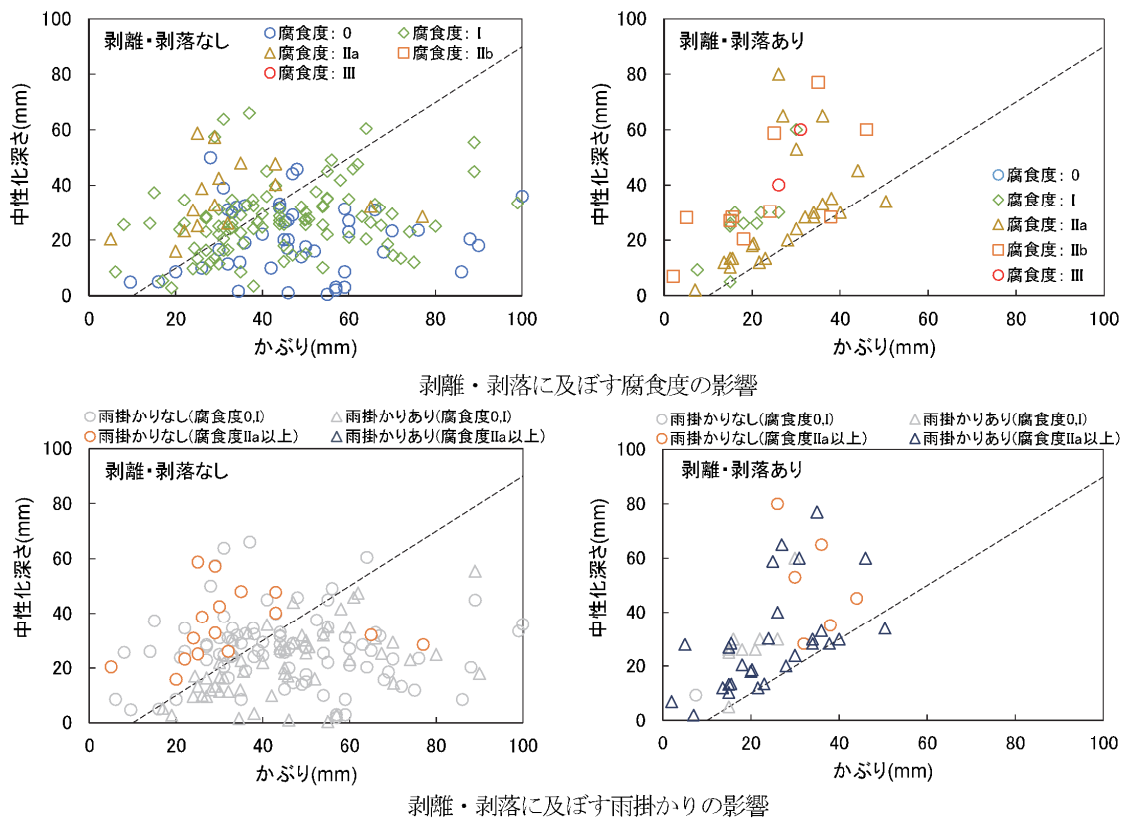


図 2-4 剥離・剥落に及ぼす腐食度，雨掛かりの影響<sup>11)</sup>

松岡ら<sup>12)</sup>は，87 年間共用された RC 鉄道高架橋の中間スラブを対象に，かぶり，中性化深さについて調査し，変状状態，劣化因子に関する分析を行っている。その結果，剥離・剥落の変状には，かぶりが大きく影響を及ぼすことを確認している。また，鉄筋腐食度における補正係数などを用いて，雨掛かりがある場合には，鉄筋不足速度が 1.1～1.5 倍程度早くなることが報告されている。

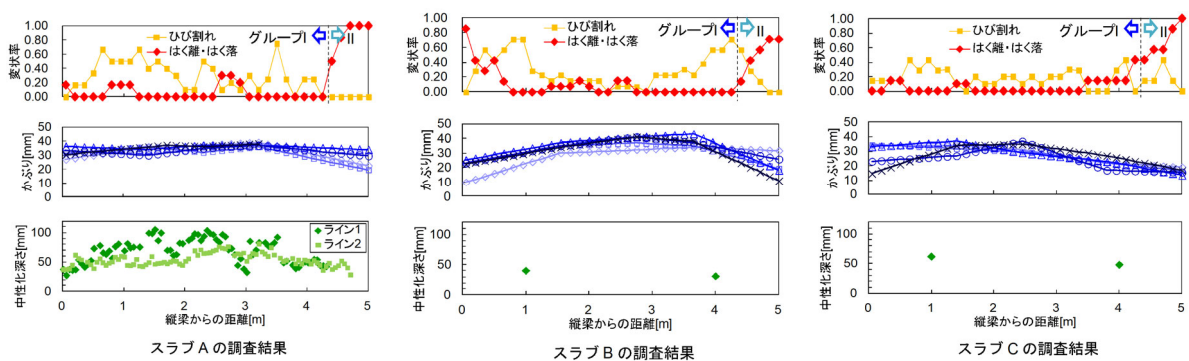


図 2-5 の縦梁からの距離と変状率，かぶり，中性化深さ<sup>12)</sup>

松田ら<sup>13)</sup>は，鉄道関連構造物を主体とした橋梁 21 箇所，トンネル 2 箇所，道路関連構造物 6 箇所，水路施設 2 箇所，建築構造物 3 箇所，海洋構造物 2 箇所の計 36 箇所を対象に中性化深さ

を調査するとともに、調査した同構造物から採取したコアによる中性化促進試験の結果を比較検討した。その結果、コンクリート表面に水の影響を受けると中性化の進行が遅くなること  
が示された。実環境下における実構造物の中性化深さは、普通ポルトランドセメントの使用が  
想定されたコンクリートと高炉セメントの使用が想定されたコンクリートは経年に関らず、そ  
の差は小さい結果となることを報告している。

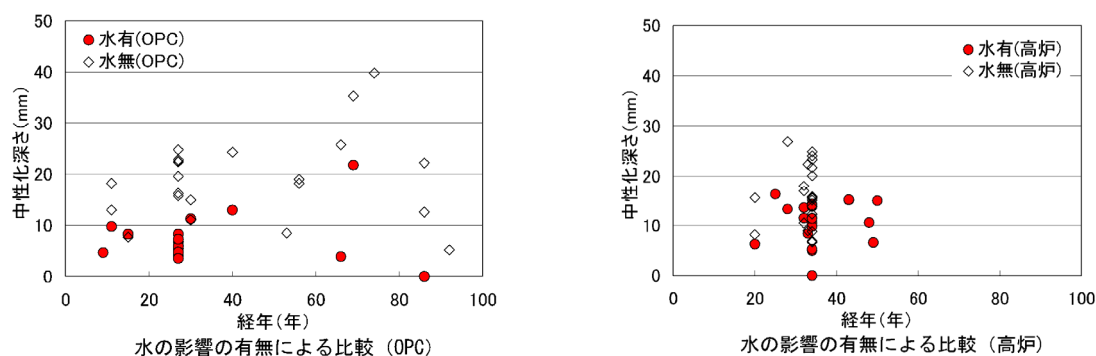


図 2-6 実環境下における雨水の影響の有無による比較<sup>13)</sup>

その一方で、中性化促進試験において、高炉セメントの使用が推定されたコンクリートは、  
普通ポルトランドセメントの使用が推定されたコンクリートに比べて中性化深さが早い結果を  
報告している。

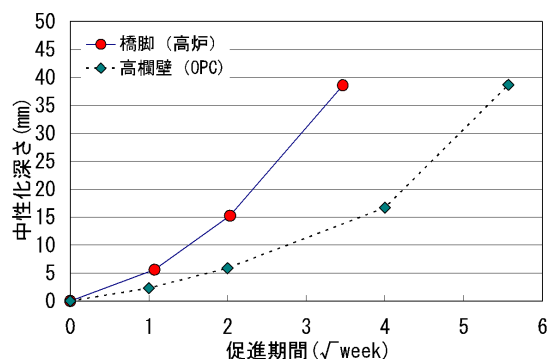


図 2-7 中性化促進試験結果<sup>13)</sup>

轟ら<sup>14)</sup>は、かぶり 30mm 以下、中性化残り 10mm 以下で剥離・剥落が確認された供用中の鉄  
道高架橋を対象として、部位ごとに水掛かりとコンクリートの中性化が、かぶりの剥離・剥落  
の発生や鉄筋腐食度に与える影響を検討している。その結果、水掛かりがある場合には、中性  
化残り 10mm 以下で剥離・剥落が発生する可能性が高まるのに対して、水掛かりが無ければ中  
性化残りが 10mm 以下でも剥離・剥落は発生する可能性が比較的低いことが明らかとされた。  
また、水掛かりがある場合の鉄筋腐食速度は  $0.2 \sim 9.3 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ 、水掛かり無しの鉄筋腐食速度  
は  $0.2 \sim 2.7 \times 10^{-3} \text{mm/年}$  であり、中性化残りが 10mm 以下であっても水掛かりが無ければ腐食は  
進行しにくいことが報告されている。

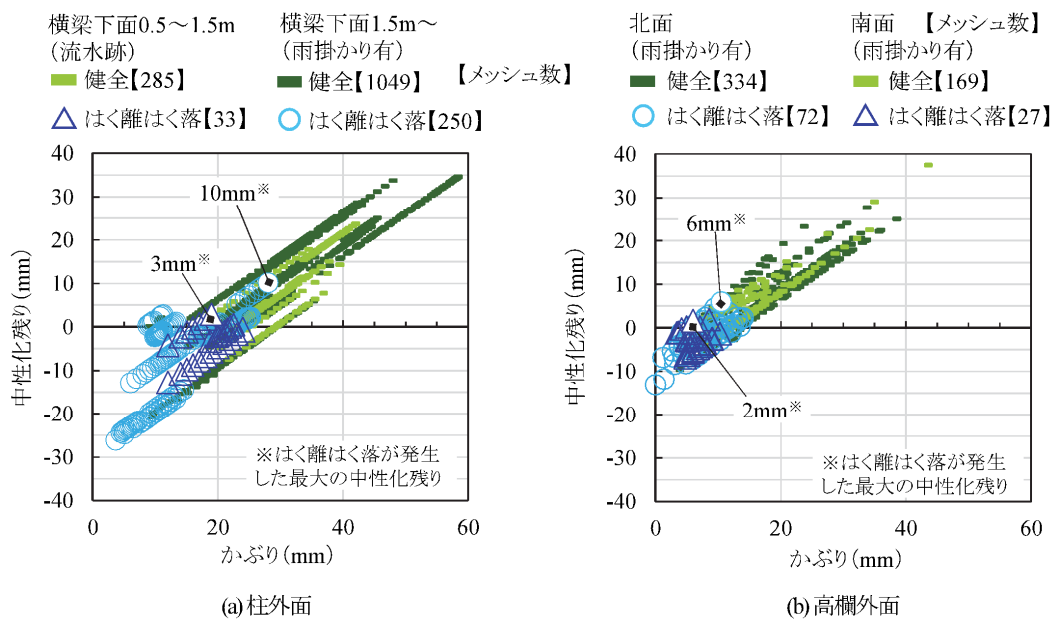


図 2-8 部位ごとの剥離・剥落発生傾向 (1) <sup>14)</sup>

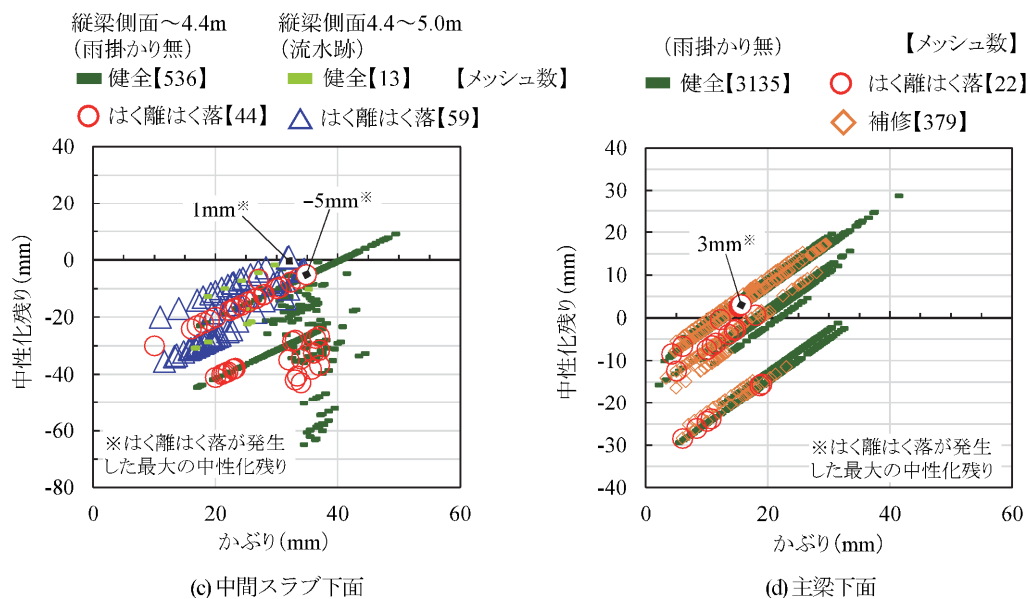


図 2-9 部位ごとの剥離・剥落発生傾向 (2) <sup>14)</sup>

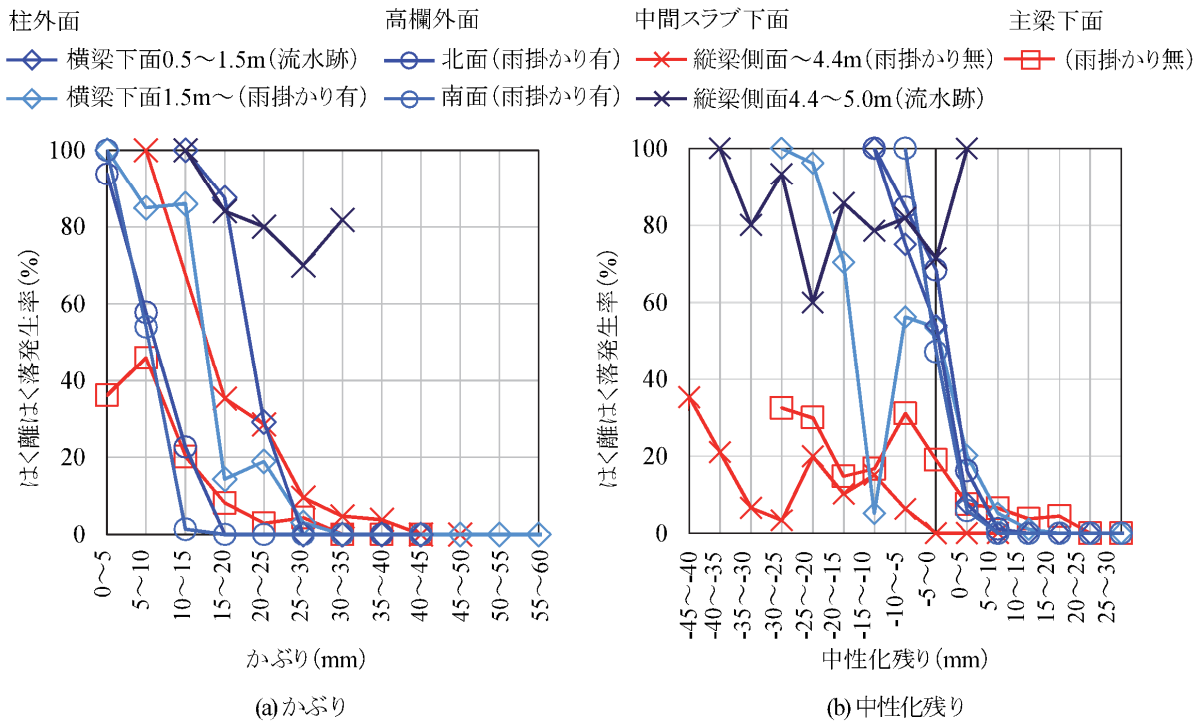


図 2-10 部位ごとの剥離・剥落発生率<sup>14)</sup>

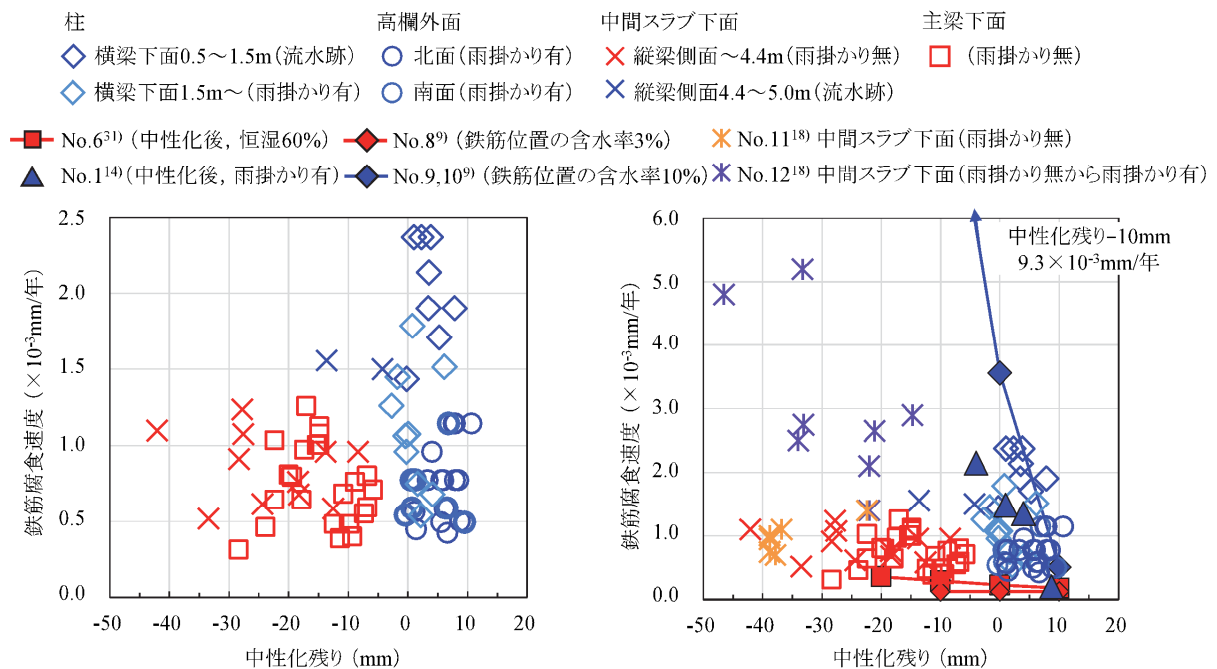


図 2-11 鋼材腐食と中性化残り<sup>14)</sup>

石橋ら<sup>15)</sup>は、コンクリート片の剥落が生じた鉄道高架橋、跨道橋、跨線橋のかぶり、コンクリートの中性化深さ、鉄筋腐食度を調査し、剥落要因などについて検討している。その結果、コンクリート片の落下部位は様々であるが、コンクリート片の落下原因は 44%が鉄筋の腐食膨張圧によるもので、そのほとんどがかぶり 20mm 未満の箇所で生じている。また、コンクリー



ト片の剥落が生じている 1965 年以降に建設された高架橋などは、1965 年以前に建設されたものと比べて中性化の進行が速いものも多く、これは水セメント比が大きいことが要因と報告されている。

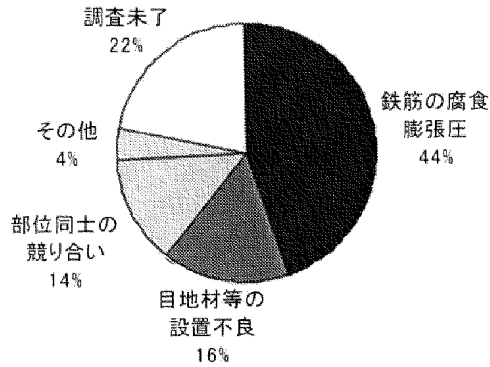


図 2-12 コンクリート片の落下原因<sup>15)</sup>

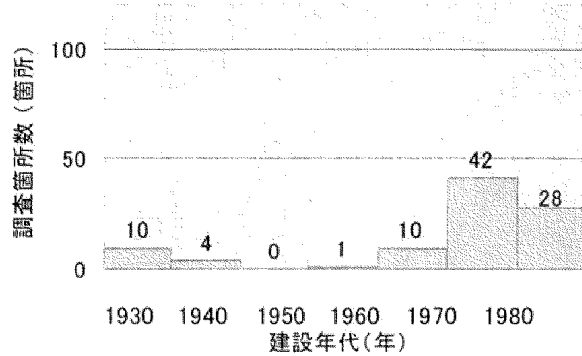


図 2-13 建設年別の内訳<sup>15)</sup>

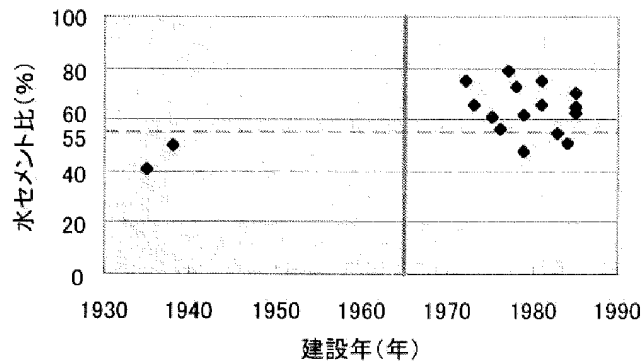


図 2-14 水セメント比と建設年との関係<sup>15)</sup>

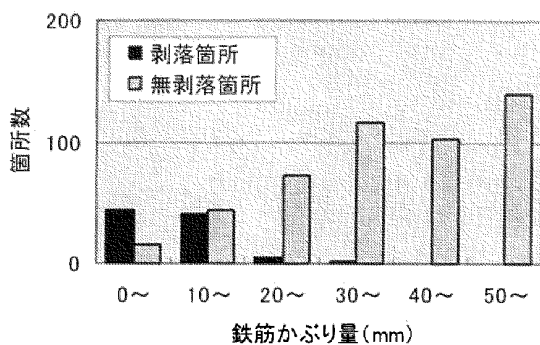


図 2-15 コンクリート片の剥落とかぶりとの関係<sup>15)</sup>

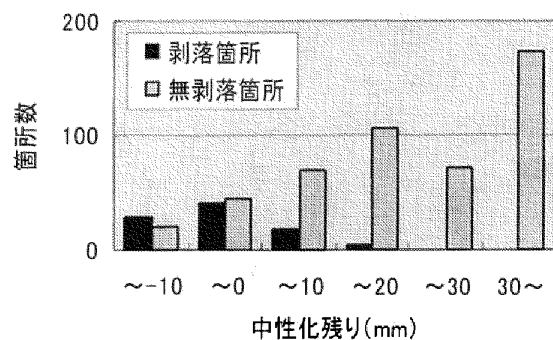


図 2-16 コンクリート片の剥落と中性化残りとの関係<sup>15)</sup>

さらに、1965 年以降に建設された高架橋などにおいて、雨水などの影響を受ける箇所は、受けない箇所に比べ中性化深さが小さく、コンクリート片の剥落が生じるには、概ね雨水などの影響を受ける箇所で中性化残り 10mm、雨水などの影響を受けない箇所では中性化が鉄筋位置

に達し、かつかぶりが極端に小さい場合である。これらの結果より、かぶり、中性化残り、雨水、漏水の影響は、コンクリート片の剥落および鉄筋腐食と密接に関係していることが報告されている。

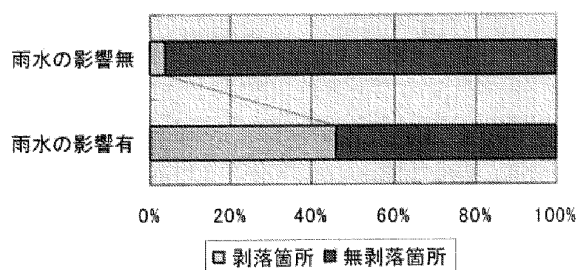


図 2-17 雨水などの影響の有無によるコンクリート片の剥落割合<sup>15)</sup>

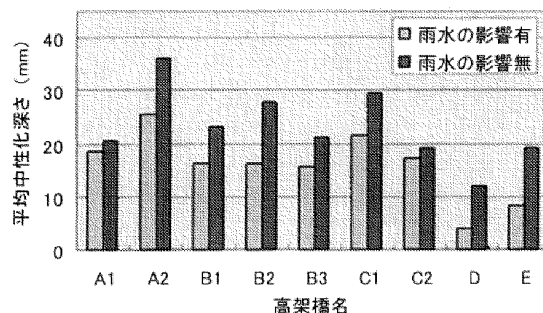
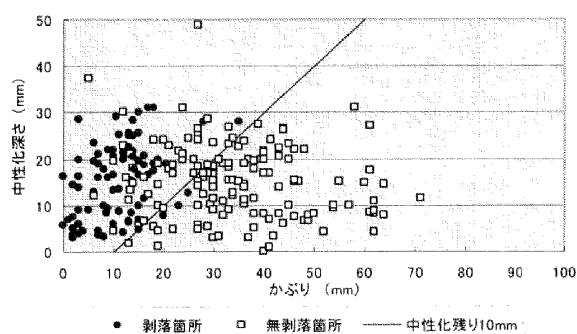
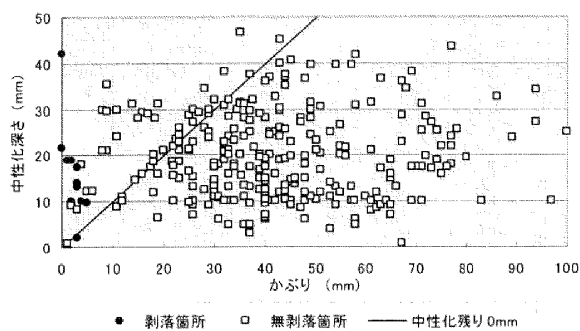


図 2-18 雨水などの影響の有無による中性化深さ<sup>15)</sup>

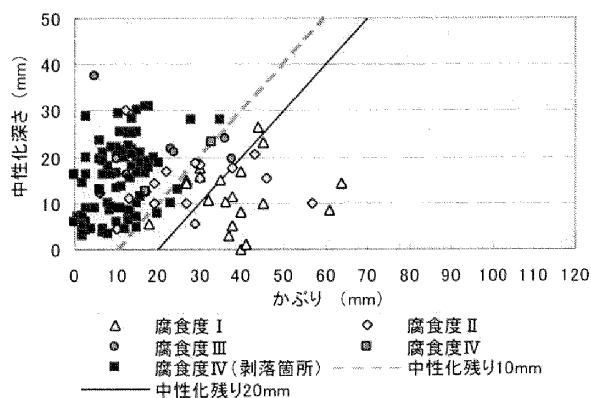


(a) 雨水などの影響を受ける箇所

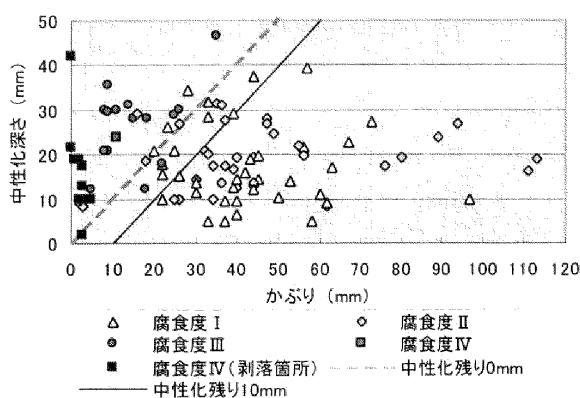


(b) 雨水などの影響を受けない箇所

図 2-19 コンクリート片の剥落と中性化残り，雨水などとの関係<sup>15)</sup>



(a) 雨水などの影響を受ける箇所



(b) 雨水などの影響を受けない箇所

図 2-20 コンクリート片の剥落と鉄筋腐食度，雨水などとの関係<sup>15)</sup>

松下<sup>16)</sup>は、本来、耐久的なコンクリート構造物が特殊環境で生じる経年劣化機構について概説するとともに、施工に伴うコンクリートの初期欠陥がこれを助長する機構について説明している。また、これらの初期欠陥や劣化機構からコンクリートの崩落状況に対して、コンクリー



トの品質の変遷などからその原因について私見を述べ、今後のコンクリート構造物の施工に対する要望がまとめられている。その結果、竣工年代と中性化速度係数との関係より、1965 年を境にそれ以降に竣工した構造物の中性化速度係数が早いことを指摘している。その原因は、この時代の背景としてポンプによるコンクリート打設が始まった時期であり、フレッシュコンクリートの圧送性確保のために加水されたことが影響として考えられることが報告されている。次に、竣工年代と塩化物イオン量との関係より、1984 年までに竣工した構造物のコンクリート中における塩化物イオン量は、年々増加する傾向にあったことが分かる。これは、川砂の枯渇化に伴う海砂の使用の増加および塩化物イオン量の多い混和剤の使用によるものが影響していることが述べられている。しかし、1985 年以降に竣工した構造物においては、そのほとんどが 0.05%未満であり、1986 年の建設省通達による塩化物量総量規制が影響していることが報告されている。

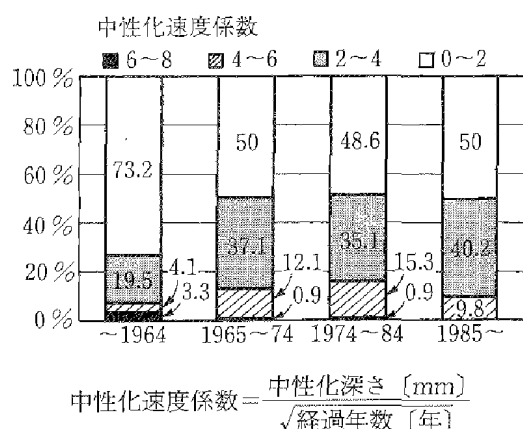


図 2-21 竣工年代と中性化速度係数<sup>16)</sup>

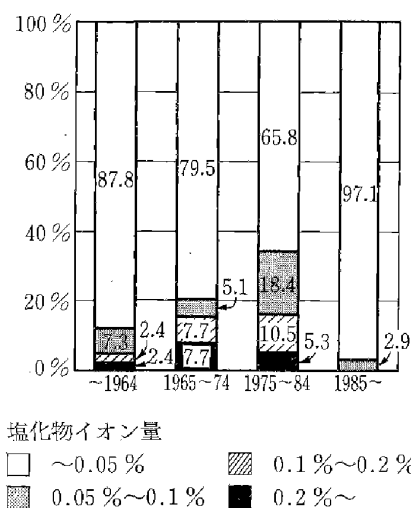


図 2-22 竣工年代と塩化物イオン量  
(深さ 5cm)<sup>16)</sup>

## 2-4-2 暴露試験の研究報告

山路ら<sup>17)</sup>は、防錆剤が添加されたコンクリート試験体を用いて、異なる海洋環境下（3 港の飛沫帯・干満帯）および暴露期間（1, 3, 5 年）における塩化物イオン拡散性状の調査を報告している。その結果、表面における塩化物イオン濃度（ $C_0$ ）は、暴露期間で見ると 3 年と 5 年では増加傾向が見られないものが多く、環境の違いでは浸漬時間の長い干満帯よりも飛沫帯の  $C_0$  の方が大きくなる傾向が見られた。一方で、塩化物イオンの見掛けの拡散係数（ $D_{ap}$ ）は、暴露期間 3 年から 5 年で漸減する傾向が見られ、環境の違いでは干満帯の塩化物イオンの見掛けの拡散係数の方が飛沫帯よりも若干大きくなる傾向が見られることを報告している。

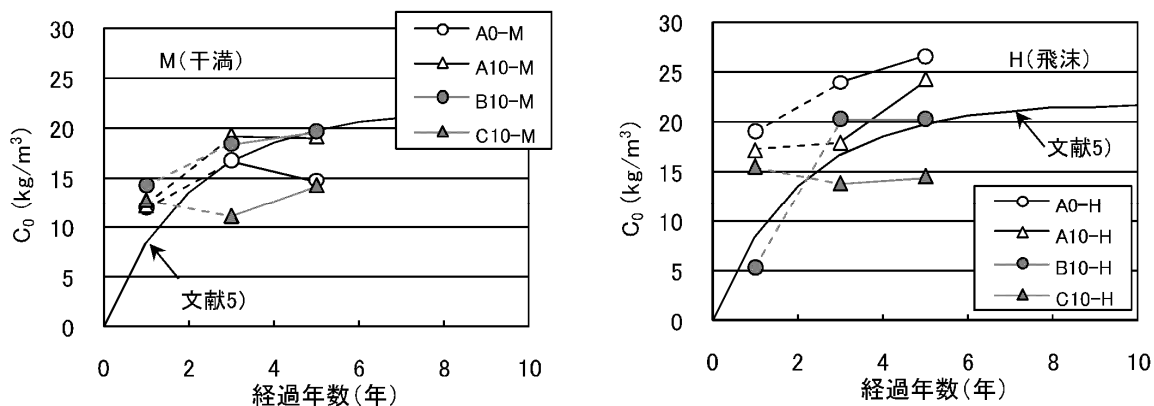


図 2-23  $C_0$ の時間変化<sup>17)</sup>

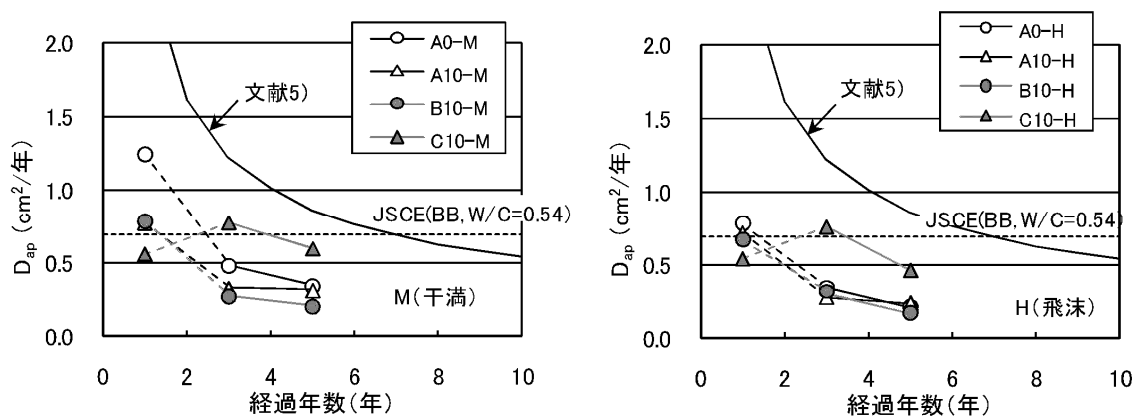


図 2-24  $D_{ap}$ の時間変化<sup>17)</sup>

また、山路ら<sup>18)</sup>は、海洋環境下に 15 年間暴露したコンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境（干満帯および海中部）およびセメント種類の影響について検討を行っている。その結果、海中部暴露供試体において、鋼材腐食はほとんど生じないが、干満帯暴露供試体では鋼材腐食発錆限界塩化物イオン濃度が  $1.2\text{kg/m}^3$  よりも大きくなり、さらにかぶりの影響を受ける傾向が見られることを報告している。

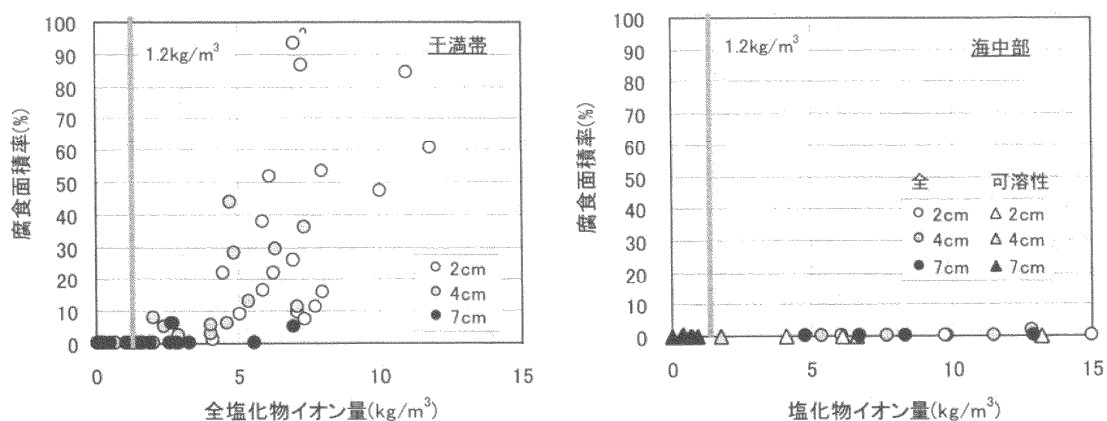


図 2-25 塩化物イオン量（全・可溶性）と腐食面積率<sup>18)</sup>

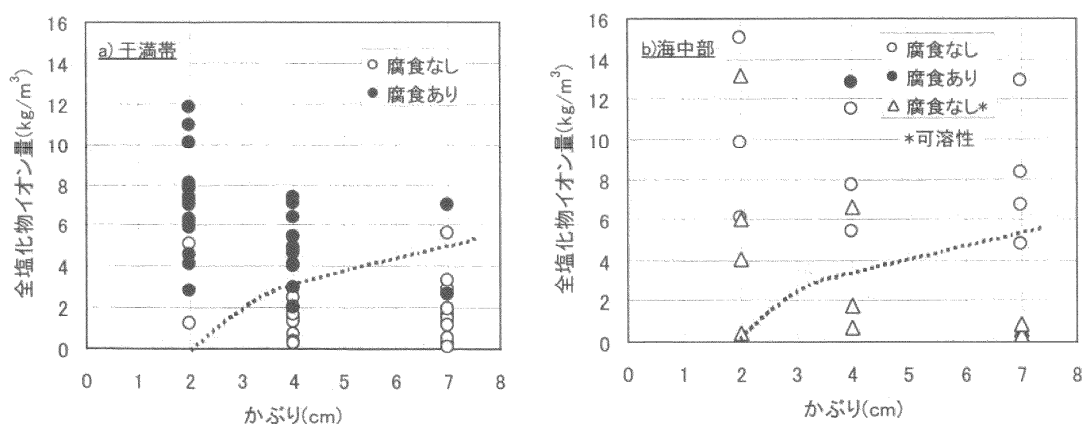


図 2-26 かぶり・全塩化物イオン量と腐食の関係<sup>18)</sup>

## 2-5 透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する研究

### 2-5-1 透気係数とは

コンクリートの品質を確保する方法として、従来はコアを採取し圧縮強度などで確認がなされてきたが、圧縮強度だけでは耐久性を評価することは難しい。

そこで、近年ではコンクリート中を移動する酸素、水、塩化物イオン、二酸化炭素などの物質移動に着目し、コンクリートが持つ物質移動に対する抵抗性（以下、物質移動抵抗性と示す）を評価する方法が提案され、その一つに透気係数がある。透気係数の測定方法には、かぶり以浅の表層部を評価できる非破壊、微破壊による透気試験（図 2-27）と鋼材近傍までを評価できるコアを用いた加圧法による透気試験（図 2-28）の大きく 2 種類がある。

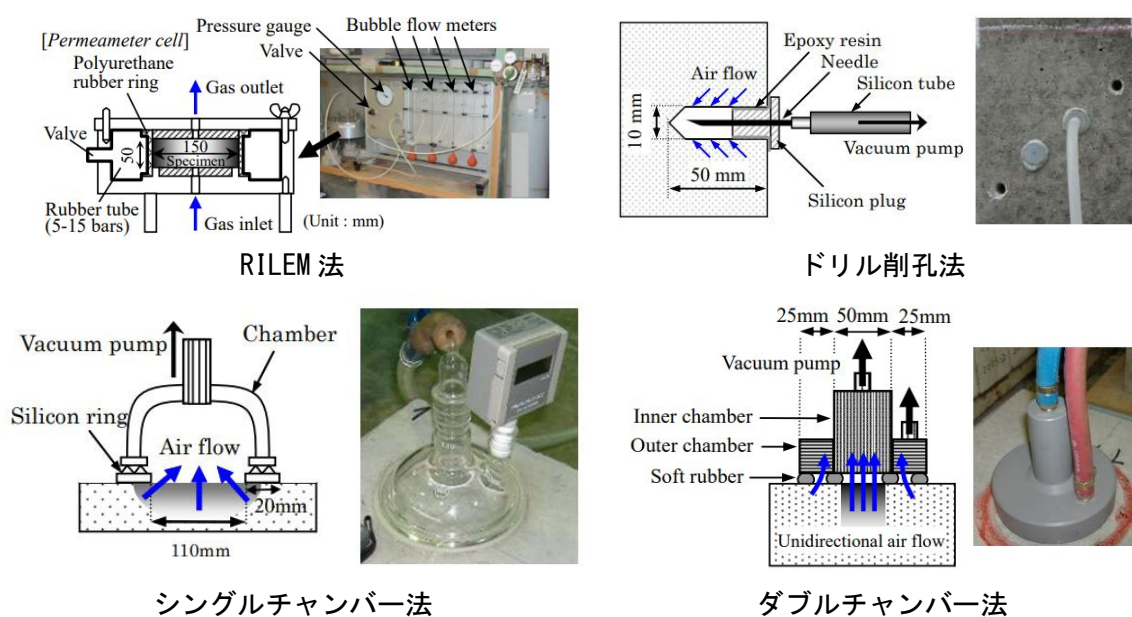


図 2-27 非破壊、微破壊による透気試験<sup>19)</sup>

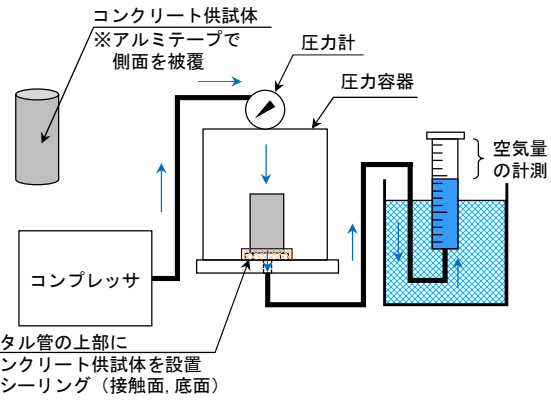


図 2-28 コアを用いた加圧法による透気試験

透気係数は、コンクリート内を通る気体の透過性を評価するものであるが、鋼材近傍までを評価できるコアを用いた加圧法による透気試験であれば、中性化の劣化因子である二酸化炭素の評価だけでなく、塩化物イオンの移動、鋼材腐食を評価できることが期待されている<sup>20), 21)</sup>。そこで、本研究では、鋼材近傍までを評価できるコアを用いた加圧法による透気試験の透気係数に着目した。以降には、非破壊、微破壊試験の透気係数、コアを用いた加圧法の透気係数において、各試験方法でこれまでに明らかとなっている内容を整理した。

## 2-5-2 非破壊、微破壊試験の透気係数による物質移動抵抗性評価に関する研究

下澤ら<sup>19)</sup>は、コンクリート構造物の耐久性能を検証するための基礎的な研究として、RILEM法、ドリル削孔法、シングルチャンバー法、ダブルチャンバー法により、それぞれの透気係数を測定し、中性化深さとの関連性について検討している。その結果、水セメント比や養生条件の違いによる透気性を、有意水準1～5%の有意差をもって概ね評価できることを確認している。また、全16種類のコンクリートによる実験結果より、透気性と自然暴露による中性化深さには相関性が見られ、概ね透気性に基づいて中性化の進行予測が可能であることを報告している。

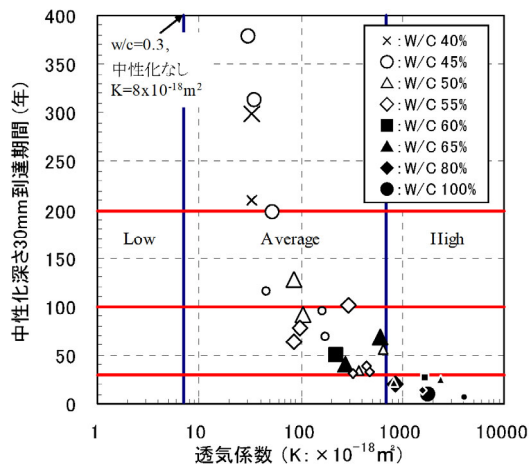


図 2-29 RILEM 法による透気係数と中性化深さ 30mm の到達時間<sup>19)</sup>

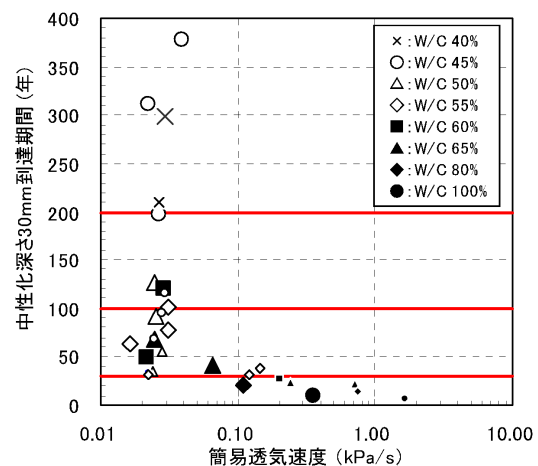


図 2-30 ドリル削孔法による透気係数と中性化深さ 30mm の到達時間<sup>19)</sup>

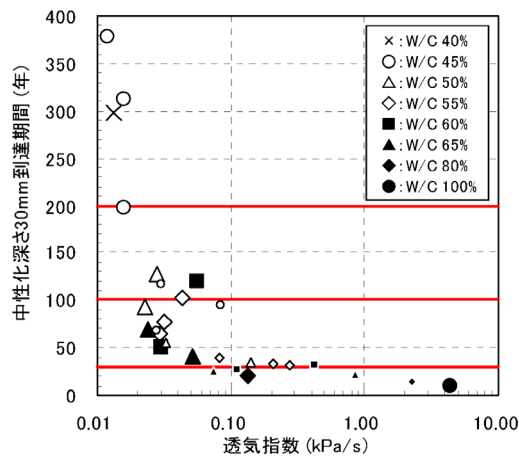


図 2-31 シングルチャンバー法による透気係数と中性化深さ 30mm の到達時間<sup>19)</sup>

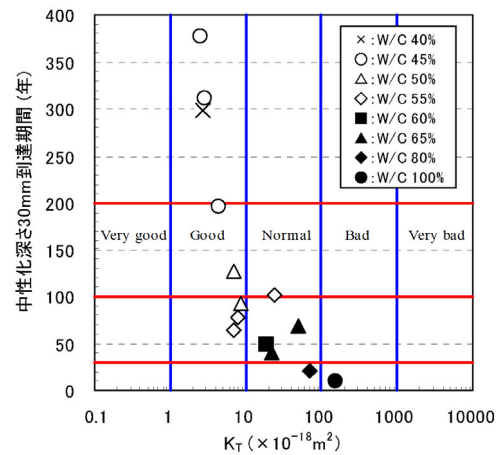


図 2-32 ダブルチャンバー法による透気係数と中性化深さ 30mm の到達時間<sup>19)</sup>

氏家<sup>20)</sup>は、中性化速度係数および塩化物イオン拡散係数を適切に推定するための点検方法を開発することを目的として、ダブルチャンバー法、ドリル削孔法から求まる透気係数と含水率の関係性を明らかにしている。その結果、透気係数と含水率の間には線形関係が得られ、この直線の勾配を用いることで含水率の影響を排除してかぶりの密実性を定量的に評価している。また、この直線の勾配と同じコンクリートから得られた中性化速度係数は、水セメント比あるいは養生の違いによらず、ほぼ直線的になることが得られており、その評価が可能と示している。一方で、実効拡散係数では養生条件によって異なった直線関係が得られており、拡散係数の経時変化の機構を明らかにすることが今後の課題として報告している。

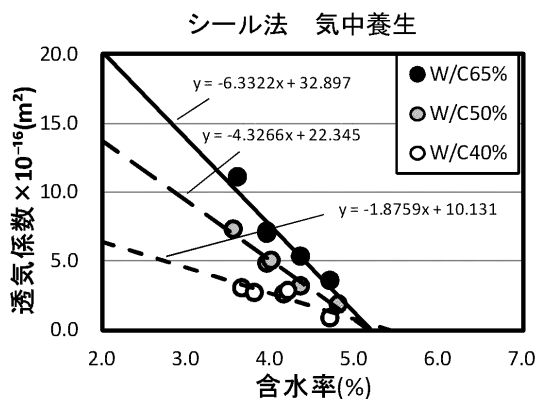


図 2-33 透気係数と含水率の関係<sup>20)</sup>

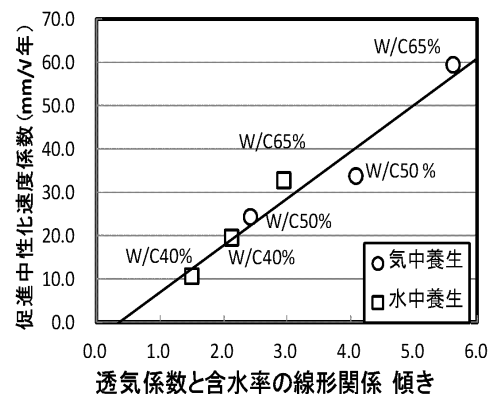


図 2-34 促進中性化速度係数と透気係数の関係<sup>20)</sup>

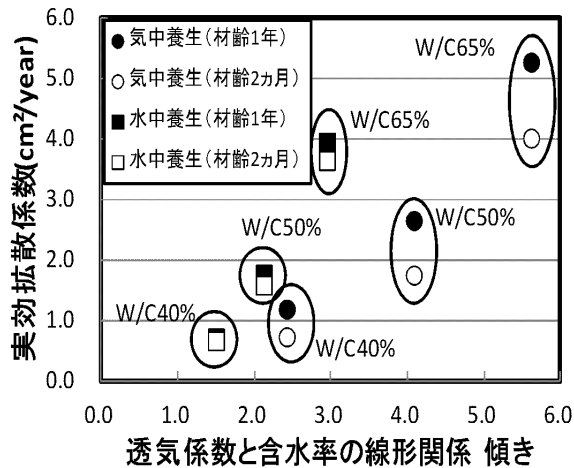


図 2-35 実効拡散係数と透気係数の関係<sup>20)</sup>

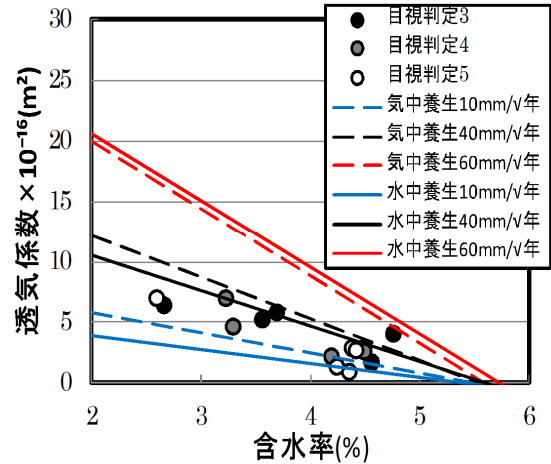


図 2-36 品質評価図の実構造物への適用（促進中性化速度係数）<sup>20)</sup>

山崎ら<sup>21)</sup>は、水セメント比 30～100%の範囲のコンクリート供試体を作製し、促進中性化および材令 4 年までの自然暴露を行い、中性化速度係数と簡易透気性の関連性を評価している。また、実大 RC 壁を作製し、各種の簡易透気性試験を行っている。その結果、中性化速度係数と簡易透気性には高い相関が見られ、簡易透気試験によってコンクリートの中性化速度が予測できることが明らかとなっている。また、これらの関連性を適用して、原位置でのかぶりの簡易透気性から、実構造物の耐久性予測手法の提案がなされている。

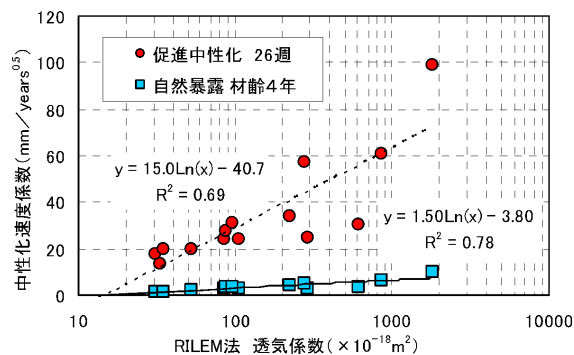


図 2-37 中性化速度係数と RILEM 法による透気係数<sup>21)</sup>

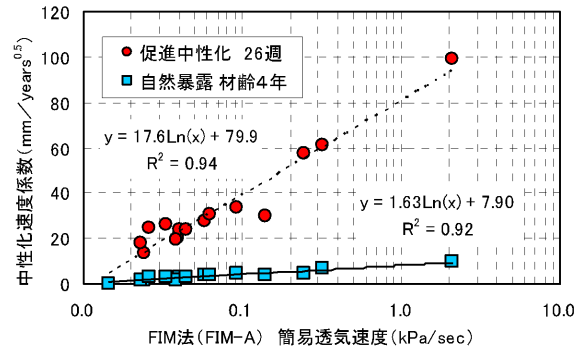


図 2-38 中性化速度係数と FIM-A 法による透気係数<sup>21)</sup>

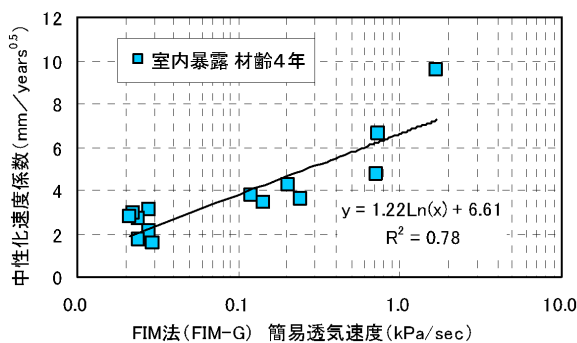


図 2-39 中性化速度係数と FIM-G 法による透気係数<sup>21)</sup>

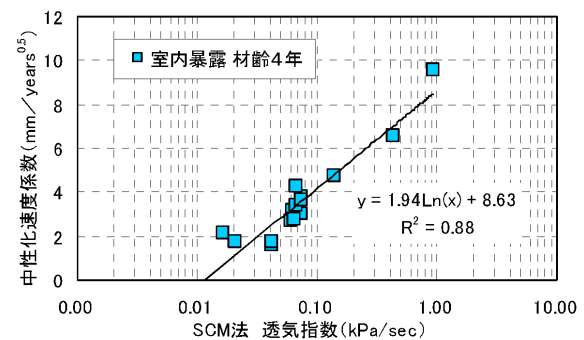


図 2-40 中性化速度係数と SCM 法による透気係数<sup>21)</sup>



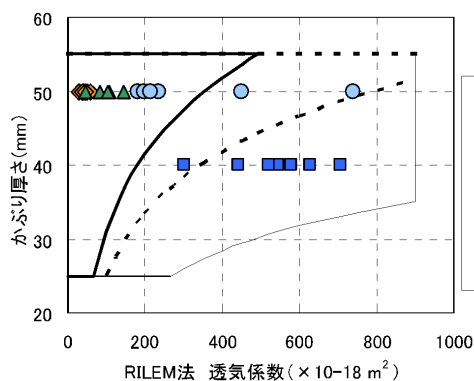


図 2-41 耐久性チャート：RILEM 法<sup>21)</sup>

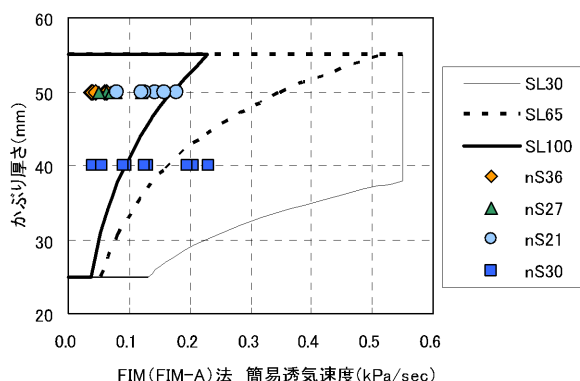


図 2-42 耐久性チャート：FIM-A 法<sup>21)</sup>

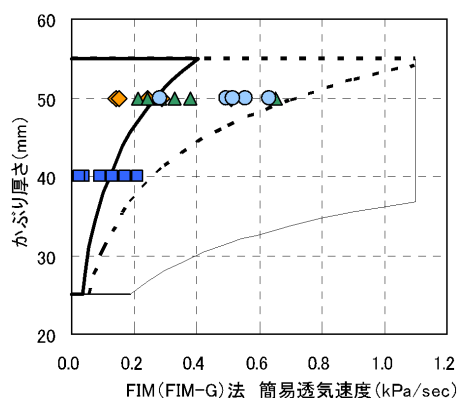


図 2-43 耐久性チャート：FIM-G 法<sup>21)</sup>

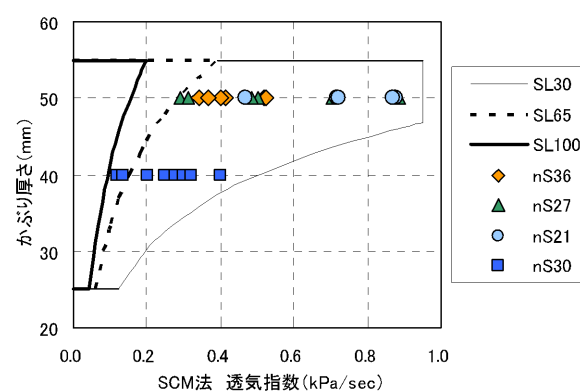
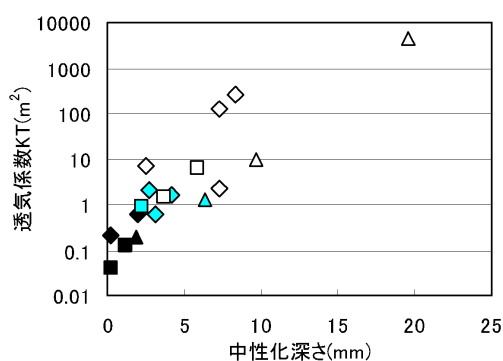
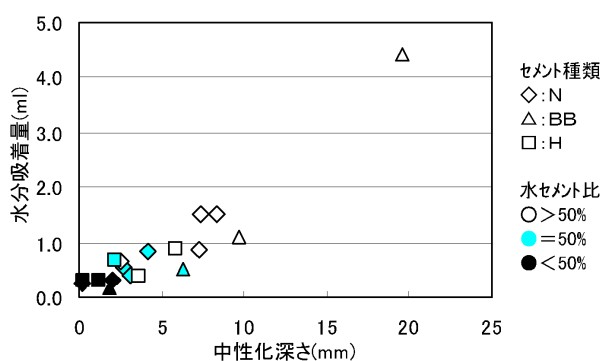


図 2-44 耐久性チャート：SCM 法<sup>21)</sup>

小野ら<sup>22)</sup>は、透気性と水分吸着性に着目して、沖縄の暴露試験場に暴露された供試体のダブルチャンバー法による表層透気係数および水分吸着試験による水分吸着量と中性化深さ、塩化物イオン量との関係性を評価している。その結果、透気係数、水分吸着量は中性化深さと相関性が高く、いずれも中性化による劣化の進行予測が可能であることを報告している。塩害の場合は、中性化ほどの相関性は見られないが、ある程度の精度で評価が可能であることを報告している。



(1) 透気試験



(2) 水分吸着試験

図 2-45 中性化深さと透気係数、水分吸着量の関係<sup>22)</sup>

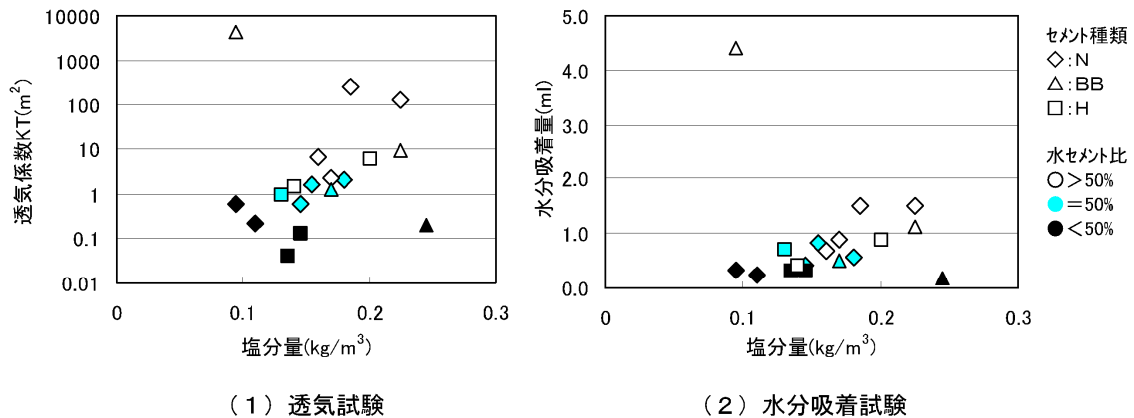


図 2-46 塩化物イオン量と透気係数，水分吸着量の関係<sup>22)</sup>

下澤ら<sup>23)</sup>は、透気係数を RILEM 法とドリル PR 法（ドリル削孔法による透気係数とコンクリートの比抵抗試験（四点電極法）を組み合わせた方法）で測定し、簡易透気速度、促進中性化深さ、比抵抗値の関係性から、かぶりの物理的な腐食抑制性能を評価する手法としての妥当性を検証している。その結果、ドリル PR 法による透気係数は、ドリル孔内周辺のコンクリート組織の均質性に左右されるものであり、局所的なひびわれや粗骨材などが透気係数に大きく影響を及ぼすことが推察されている。ドリル PR 法による透気係数によって、水セメント比 50%以上の透気性能を簡易的に評価できる可能性が高く、四点電極との組み合わせによる評価図により、コンクリート表層部の含水状態の影響を考慮した判定が可能であることを報告している。ただし、透気係数に影響を及ぼす含水率の関係性、現場試験としての合理的なドリル孔数の検討が今後の課題であることを報告している。

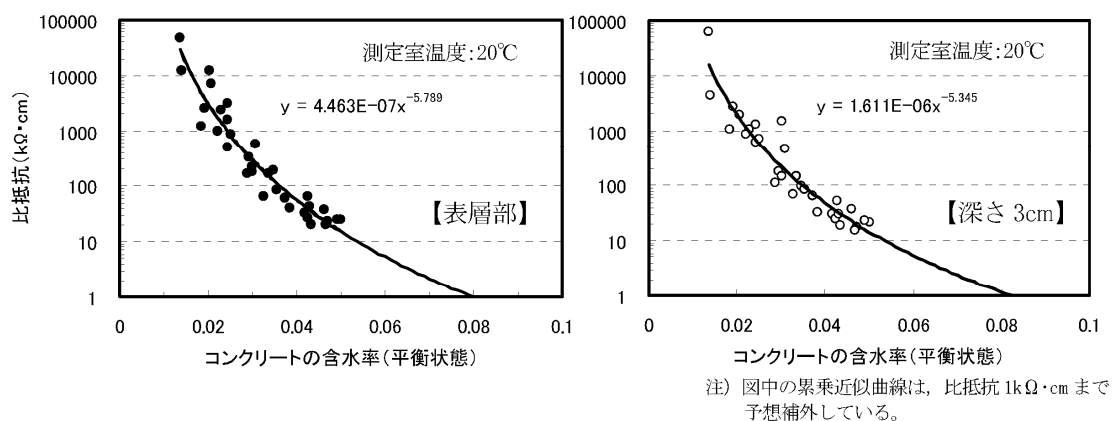


図 2-47 ドリル PR 法による比抵抗測定値と含水率の関係<sup>23)</sup>



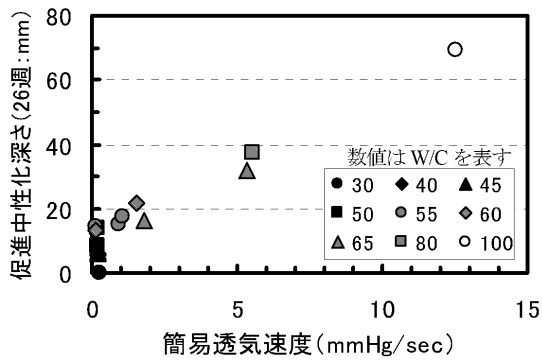


図 2-48 簡易透気速度と促進中性化の関係<sup>23)</sup>

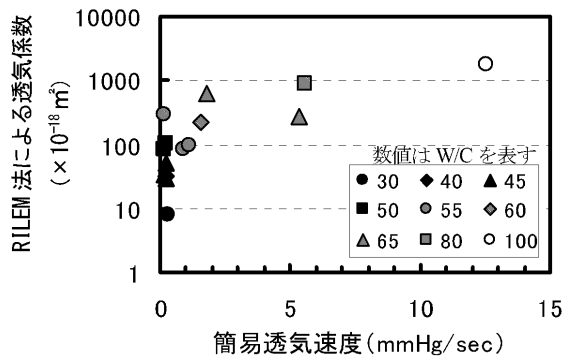


図 2-49 簡易透気速度と RILEM 法による透気係数の関係<sup>23)</sup>

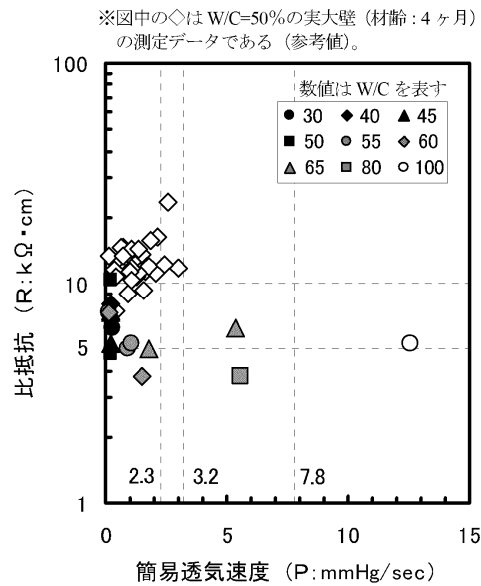


図 2-50 ドリル PR 法による試験結果<sup>23)</sup>

早川ら<sup>24)</sup>は、品質評価に関する基礎的な研究として、ダブルチャンバー法による表層透気係数に着目し、測定材齢の影響や中性化深さについて検討している。その結果、コンクリートの乾燥に伴って表層透気性は増加するが、増加割合は供試体寸法や緻密度に限らず概ね同等であり、基準供試体の試験結果との比較により実構造物の品質を評価できることを示している。

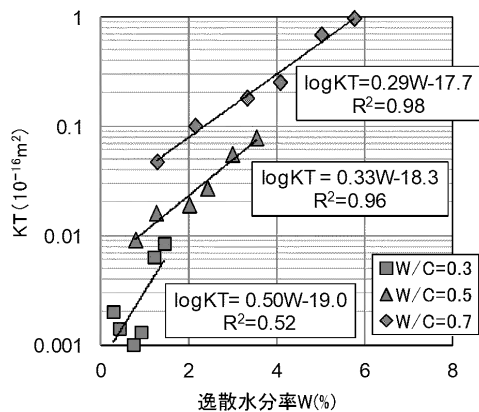


図 2-51 逸散水分率と表層透気係数の関係<sup>24)</sup>

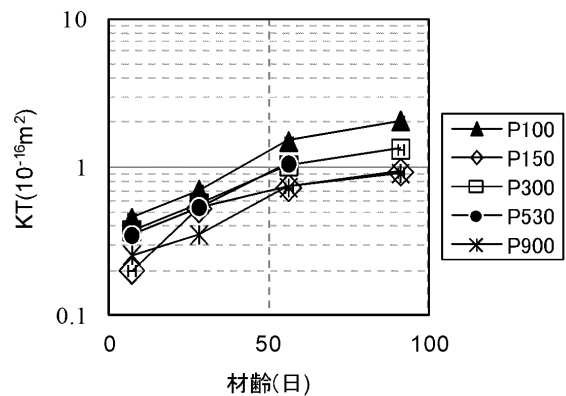
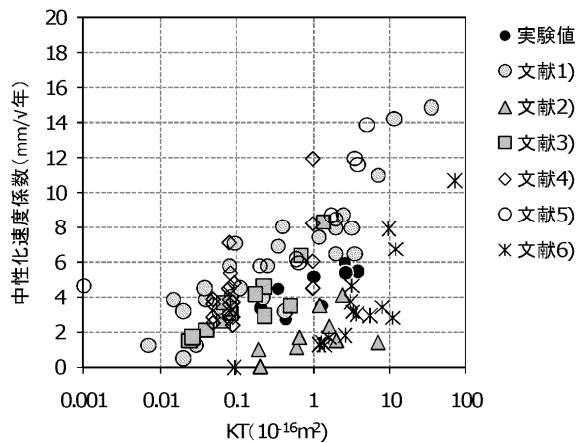


図 2-52 材齢と表層透気係数の関係<sup>24)</sup>



	出典	養生条件	透気試験 材齢	中性化 試験条件,材齢
1)	RILEM TC189 2007 <sup>19)</sup>	—	28日	Dry room 1.4年
2)	小野ら 2005 <sup>17)</sup>	2日まで湿潤 ⇒1年まで 20℃60%RH	1年	屋外曝露(沖縄) 3年
3)	今本ら 2009 <sup>18)</sup>	28日まで水中 ⇒56日まで 20℃60%RH	56日※	雨掛りない 屋外曝露 4年
4)	蔵重ら 2010 <sup>19)</sup>	28日までの養 生条件変化⇒ 20℃60%RH	91日	20℃, 60%RH, CO <sub>2</sub> 5%, 促進 1.4,13,26週
5)	白根ら 2010 <sup>20)</sup>	28日までの養 生条件変化⇒ 60%RH	56日	20℃, 60%RH CO <sub>2</sub> 5%, 促進 8週
6)	田中ら 2010 <sup>20)</sup>	屋内	5年	20℃, 60%RH CO <sub>2</sub> 5%, 促進 26週

※RILEM法によるKとKTの相関関係から推定

図 2-53 表層透気係数と中性化速度係数の関係<sup>24)</sup>

また、配合条件が表層透気性に及ぼす影響について検討した結果、水セメント比に加えブリーディングの影響が大きいので、ブリーディング性状の設定と施工時における確認がコンクリート品質確保に有効であることを示している。

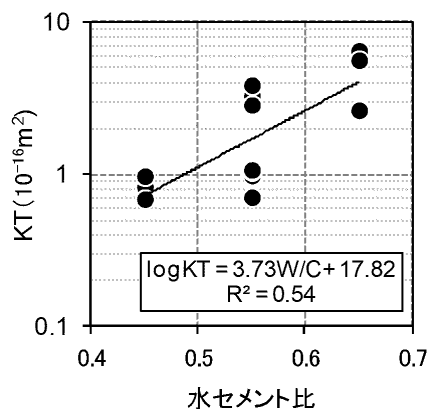


図 2-54 水セメント比と表層透気係数の関係<sup>24)</sup>

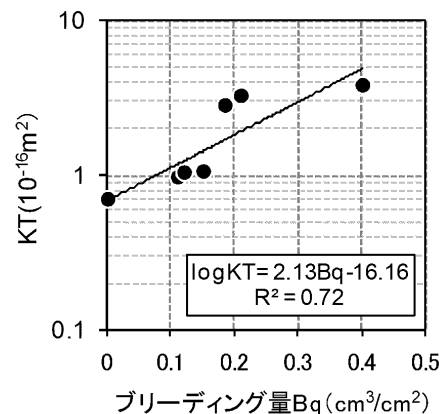


図 2-55 ブリーディング量と表層透気係数の関係<sup>24)</sup>

蔵重ら<sup>25)</sup>は、気温 20℃、相対湿度 60%の環境に暴露した水セメント比や脱型材齢の異なる 15 種類のコンクリート供試体を対象に、材齢約 1 年間までダブルチャンバー法で表層透気係数を経時的に計測し、実用化に向けて課題と指摘されている含水依存性に対する解決策を検討している。その結果、乾燥の進展により長期的に渡り測定結果が増大することから、見掛け上品質が悪化するような評価になる恐れがあることを確認している。

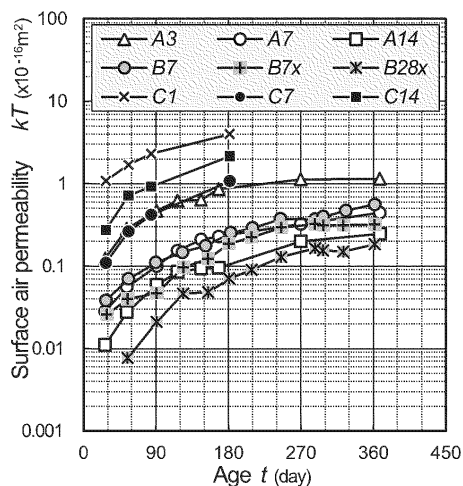


図 2-56 表層透気係数の材齢推移<sup>25)</sup>

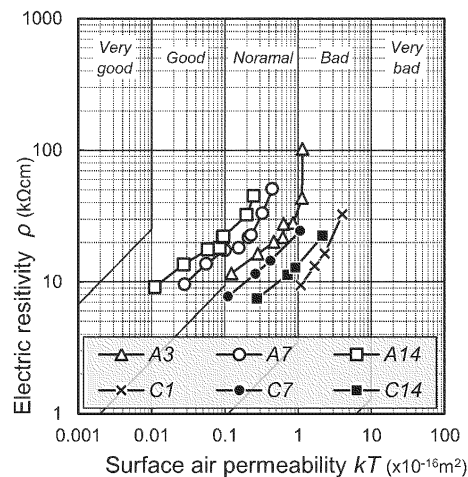


図 2-57 ブリーディング量と表層透気係数の関係<sup>25)</sup>

そこで、表層透気係数の含水依存性を考慮した評価の検討として、乾燥に伴う電気抵抗率と表層透気係数の変化に着目した評価方法で検討した結果、表層透気係数はコンクリート品質や暴露環境に依存するため、近似データの選定根拠には課題が残るが、表層透気係数と電気抵抗率の関係を直線近似できることは、コンクリート中の空隙の総量や物質移動抵抗性の評価も可能となる可能性があることを示唆している。しかしながら、促進中性化速度係数と表層透気係数指数の相関は見られなかったことなどから、実用化に向けての今後の検討課題を示している。

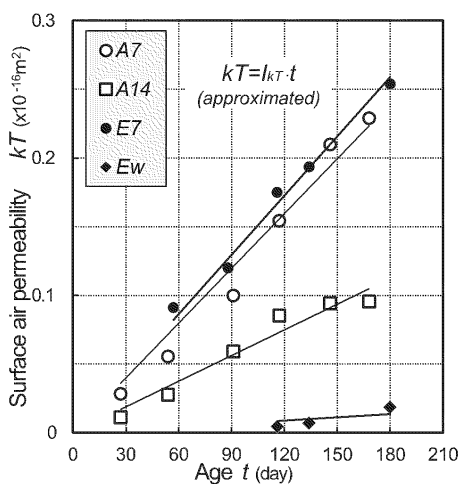


図 2-58 表層透気係数の材齢推移<sup>25)</sup>

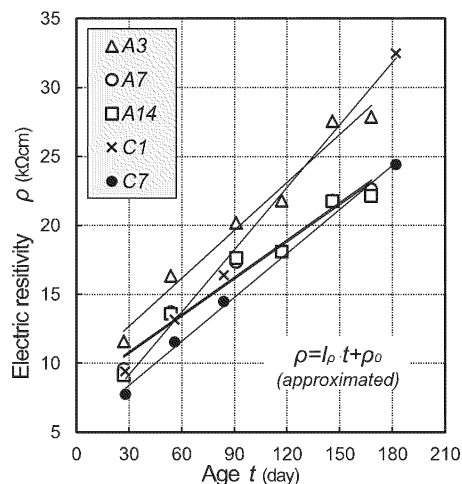


図 2-59 電気抵抗率の材齢推移<sup>25)</sup>



横山ら<sup>27)</sup>は、複数の配合・養生条件で供試体を作製し、屋外に暴露した供試体を対象に継続的に表層透気試験を実施することで、実環境に置かれたコンクリートの表層透気係数に及ぼす養生および配合の長期的な影響の把握を検討している。その結果、脱型時期や養生による表層透気係数の差は時間の経過とともに減少し、約1年間で明確な差は見られなくなったことを報告している。また、養生によって初期の含水率は大きく異なるが、材齢の経過に伴い含水率や水和反応の進行程度の差が小さくなることに起因すると考察している。一方、水セメント比による影響は長期的で、最低でも材齢5年6ヶ月時点でも影響が残存することを報告している。

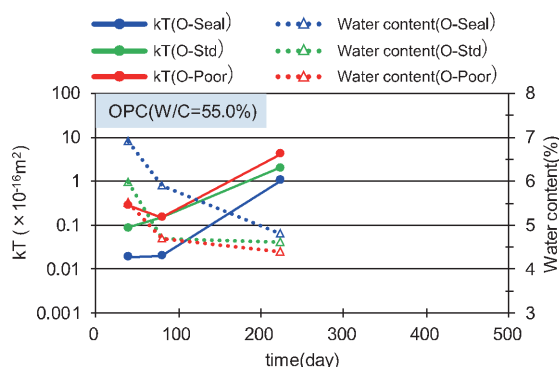


図 2-65 表層透気係数と含水率の材齢推移 (OPC)<sup>27)</sup>

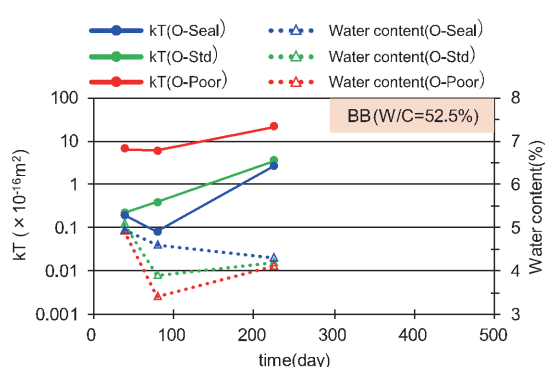


図 2-66 表層透気係数と含水率の材齢推移 (BB)<sup>27)</sup>

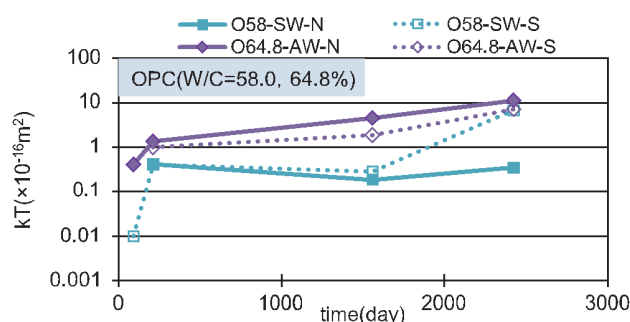


図 2-67 高水セメント比の表層透気係数の材齢推移<sup>27)</sup>

蔵重ら<sup>28)</sup>は、新設構造物の竣工品質に基づいたコンクリート構造物の耐久性能検証システムの導入を目的に、脱型材齢やその後の暴露環境といった養生条件を考慮し、各種コンクリート供試体を作製し、テストハンマー試験、ダブルチャンバー法による表層透気試験、中性化試験を行って、各々非破壊試験方法の適用性を検証している。その結果、テストハンマー試験の推定圧縮強度と表層透気係数を用いることで、養生の良否に左右されるコンクリートの表層品質を評価可能であることを報告している。また、表層透気係数と中性化深さは相関性が高いことから、表層品質を施工後段階において評価できる可能性があることを報告している。

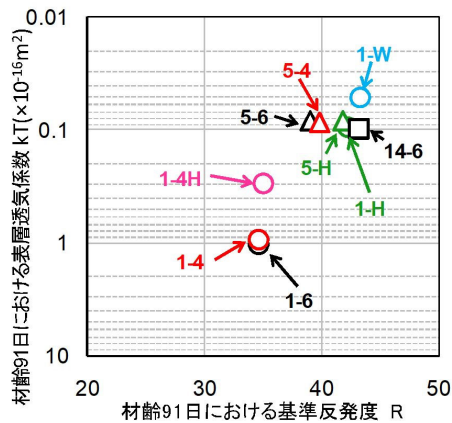


図 2-68 基準反発度と表層透気係数の関係（材齢 91 日）<sup>28)</sup>

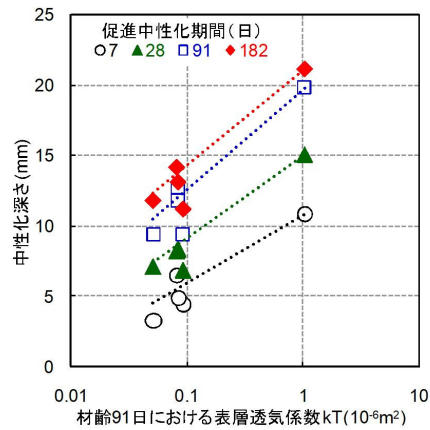


図 2-69 表層透気係数と中性化深さの関係<sup>28)</sup>

山本ら<sup>29)</sup>は、室内試験および実構造物を対象に行った塩化物イオンの見掛けの拡散係数とダブルチャンバー法の表層透気係数との関係性を分析している。その結果、ある程度の相関性は見られたものの、室内試験から得られた結果とは大きく乖離する結果を報告している。

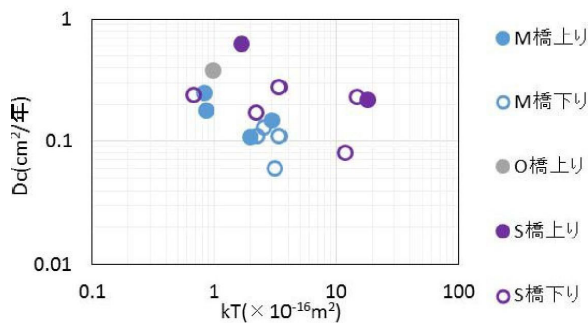


図 2-70 既設構造物の表層透気係数と塩化物イオンの見掛けの拡散係数<sup>29)</sup>

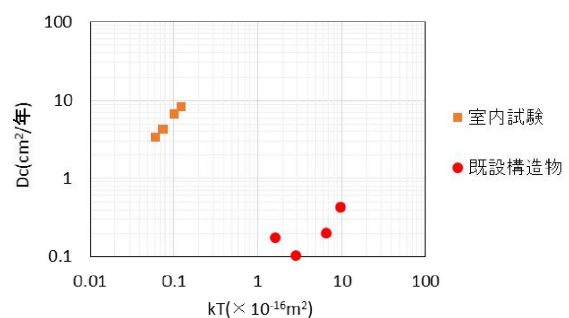


図 2-71 室内試験および既設構造物の比較（表層透気係数と見掛けの塩化物イオン拡散の関係）<sup>29)</sup>

### 2-5-3 コアを用いた加圧法の透気係数による物質移動抵抗性評価に関する研究

林ら<sup>30)</sup>、松本ら<sup>31)</sup>は、透気係数による物質移動抵抗性の評価を目的として、コアを用いた加圧法による透気係数に着目し、セメント種類（普通ポルトランドセメント、高炉セメント）、配合、養生の違いが透気係数に及ぼす影響、ならびに圧縮強度、中性化速度係数、塩化物イオン拡散係数（塩化物イオンの見掛けの拡散、実効拡散係数）との関係性について検討している。その結果、透気係数と中性化速度係数の関係性として、普通ポルトランドセメントを使用した場合には、養生条件ごとに相関性が確認され、高炉セメントを使用した場合には、養生条件に拘らず、一律で相関性が確認されたことを報告している。また、実効拡散係数の関係性では、水中養生のように十分に水和反応が進行しているコンクリートの場合、セメント種類に関係無く相関性が確認されたことから、透気係数によって物質移動抵抗性を評価できる可能性がある

ことを報告している。

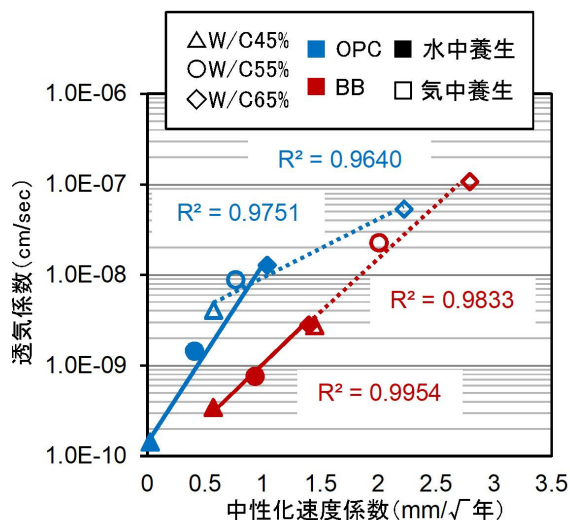


図 2-72 中性化速度係数と透気係数の関係<sup>30)</sup>

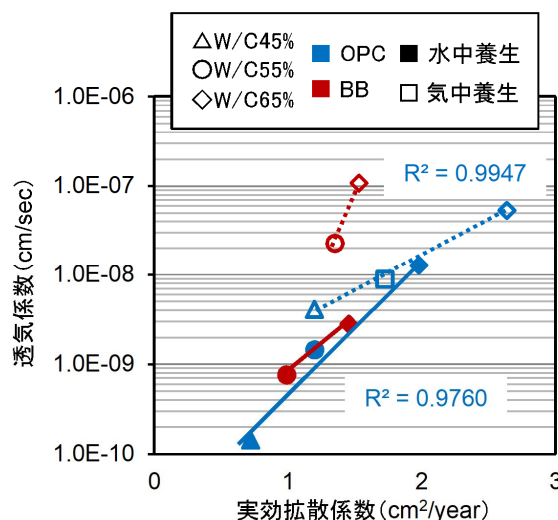


図 2-73 実効拡散係数と透気係数の関係<sup>30)</sup>

三浦ら<sup>32)</sup>, Dhruva ら<sup>33)</sup>は、実構造物から採取したコア供試体と室内試験で作成した供試体を用いて、塩水浸漬試験、電気泳動試験、加圧法による透気試験を行い、透気係数と塩化物イオンの見掛けの拡散係数、実効拡散係数の関係性を検討している。また、細孔径分布に測定により、各種係数の支配的な空隙径を把握している。その結果、透気係数と実効拡散係数の測定値に影響を及ぼす空隙径は類似しており、両者に相関性が高いことから、含水率の影響を明らかにすることで、透気係数の値から実効拡散係数を推定できる可能性があることが報告されている。また、水中養生を行ったものに対しては、透気係数を測定することで、セメント種類などの情報を加味せずに実効拡散係数を推定できることが報告されている。

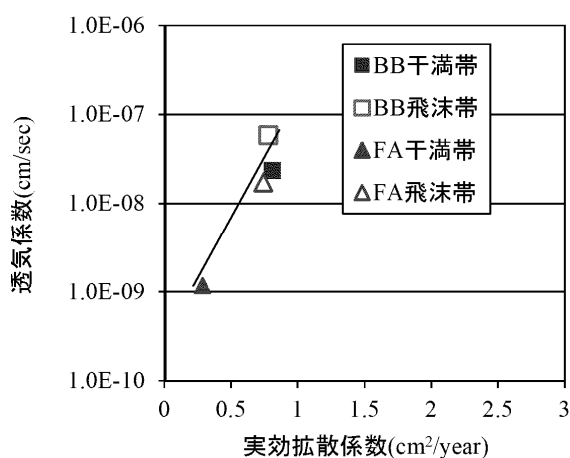


図 2-74 細孔径と各種係数との関係（実構造物）<sup>32)</sup>

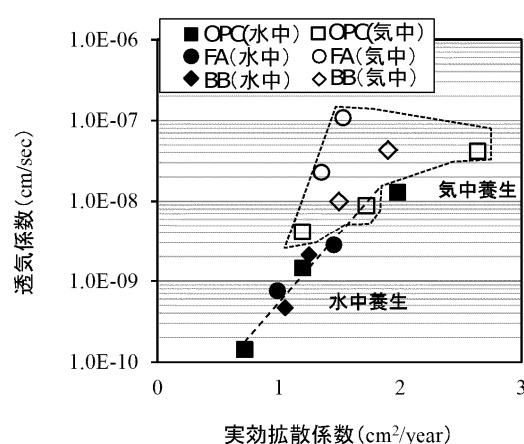


図 2-75 細孔径と各種係数との関係（室内試験）<sup>32)</sup>

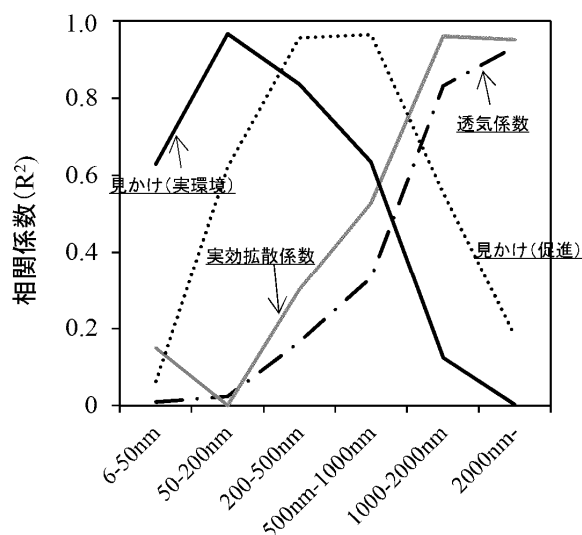


図 2-76 細孔径と各種係数との関係（実構造物）<sup>32)</sup>

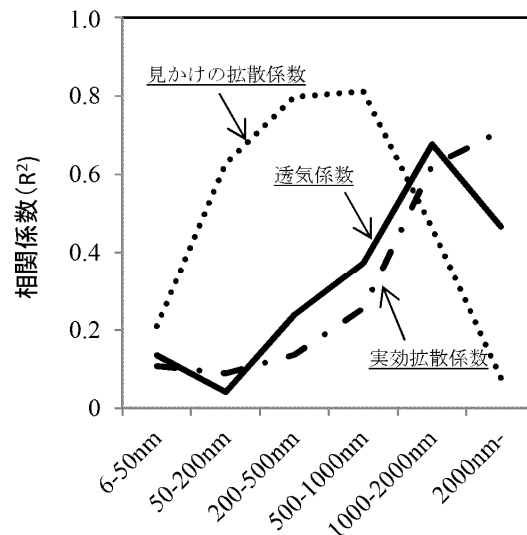


図 2-77 細孔径と各種係数との関係（室内試験）<sup>32)</sup>

## 2-6 予測の手法

### 2-6-1 塩害の予測

#### (1) 塩化物イオンの拡散の予測

塩化物イオンの供給される地域では、コンクリートの品質と構造物の環境条件を適切に考慮して行うこととされている。2018 年制定コンクリート標準示方書では、塩化物イオンの拡散の予測として、以下の 2 つの方法が定められている<sup>34)</sup>。

- ・ 見掛けの拡散現象として予測する方法
- ・ 塩化物イオンの反応や移動のメカニズムに基づいて予測する方法

一般には前者の見掛けの拡散現象として予測する方法が用いられていることが多いが、後者による理論的な計算方法についての研究も進められている。

#### 1) 見掛けの拡散現象として予測する方法

本方法は、液相中の塩化物イオン濃度ではなく、コンクリート単位体積当たりの全塩化物イオン濃度が対象となり、塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面における塩化物イオン濃度などを設定して、式(4)を用いて将来の塩化物イオンの拡散の予測を行うものである。また、見掛けの拡散現象として予測する方法の中に、対象構造物における点検結果を用いる方法、類似の環境および構造物の点検結果を用いる方法、既往の研究実績に基づく方法、促進試験によるコンクリートの拡散係数を用いる方法がある<sup>34)</sup>。



$$C(x,t) = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}}\right) + C_i \quad (4)$$

$C(x,t)$  : 深さ  $x$  (mm), 供用期間  $t$  (年) における塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_0$  : 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$D_{ap}$  : 見掛けの塩化物イオン拡散係数 (cm<sup>2</sup>/year)

$C_i$  : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数  $\gamma_{cl}$  : 予測の精度に関する安全係数

a) 対象構造物における調査結果を用いる方法

対象構造物の調査結果を用いる場合には、対象構造物からコア供試体またはドリル削孔法により試料を採取し、コンクリート表面からの塩化物イオン濃度を測定し、この分布に式(5)に帰することで塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面における塩化物イオン濃度、初期含有塩化物イオン濃度を算出するものである<sup>34)</sup>。

$$C(x,t) - C_i = C_{0s} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{0.1 \cdot x}{2\sqrt{D_{aps} \cdot t}}\right) \quad (5)$$

$C(x,t)$  : 深さ  $x$  (mm), 供用期間  $t$  (年) において測定された塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_{0s}$  : 実構造物から採取されたコンクリートの表面における塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$D_{aps}$  : 実構造物から採取されたコンクリートの見掛けの塩化物イオン拡散係数 (cm<sup>2</sup>/year)

$C_i$  : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

なお、この方法で得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ( $D_{aps}$ ) や表面における塩化物イオン濃度 ( $C_{0s}$ ) を式(4)に適用する場合には、塩化物イオンの見掛けの拡散係数  $D_{aps}$  を  $D_{ap}$ 、表面における塩化物イオン濃度  $C_{0s}$  を  $C_0$  と設定することとなる<sup>34)</sup>。

b) 類似の環境および構造物の点検結果を用いる方法

対象構造物における点検結果がない場合、あるいは点検結果から塩化物イオンの見掛けの拡散係数や表面における塩化物イオン濃度が推定できない場合は、類似の環境および構造物における点検結果などに基づく塩化物イオンの見掛けの拡散係数および表面における塩化物イオン濃度を用いて、式(4)により予測を行ってよいとされている<sup>34)</sup>。

ただし、対象構造物に対し、類似の構造物の環境条件やコンクリート品質が大きく異ならないことが前提であり、一般には予測の精度に関する安全係数 1.3 を用いることとされている<sup>34)</sup>。

c) 既往の研究実績に基づく方法

類似の環境および構造物の点検結果などが無い場合には、式(6)～式(9)による塩化物イオンの見掛けの拡散係数、表 2-5、または、式(10)による表面における塩化物イオン濃度を用いてよいとされている<sup>34)</sup>。また、式(4)によって予測を行う場合、初期塩化物イオン $C_i$ は  $0.3\text{kg/m}^3$  とし、予測の精度に関する安全係数 1.3 を用いることとされている<sup>34)</sup>。

【塩化物イオンの見掛けの拡散係数】

- ・ 普通ポルトランドセメントの場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.0 (W/C) - 1.8 \quad (6)$$

- ・ 低熱ポルトランドセメントの場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.5 (W/C) - 1.8 \quad (7)$$

- ・ 高炉セメント B 種相当の場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.2 (W/C) - 2.4 \quad (8)$$

- ・ フラッシュセメント B 種相当の場合

$$\log_{10} D_{ap} = 3.0 (W/C) - 1.9 \quad (9)$$

$D_{ap}$  : 塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{year}$ )

$W/C$  : 水セメント比 ( $0.30 \leq W/C \leq 0.55$ )

【表面における塩化物イオン濃度】

表 2-5 表面における塩化物イオン濃度  $C_0$  ( $\text{kg/cm}^3$ )<sup>34)</sup>

		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道、東北、北陸、沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東、東海、近畿、中国、四国、九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

$$C_0 = -0.016C_{ab}^2 + C_{ab} - 1.7 \quad (C_{ab} \leq 30.0) \quad (10)$$

$C_0$  : 表面における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$C_{ab}$  : 飛来塩分量 ( $\text{mg/dm}^2/\text{day}$ )

#### d) 促進試験によるコンクリートの拡散係数を用いる方法

式(6)～式(9)による塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、対象構造物のコンクリートに使用されたセメントの種類や水セメント比の情報を、設計図書や施工時の記録などから入手できる場合に適用できるが、既設構造物ではこれらの情報が残存していないことも多い。このように、既設構造物の情報が入手できない場合には、促進試験によるコンクリートの拡散係数を用いる方法を用いることとされている<sup>34)</sup>。

塩化物イオンの拡散係数を求める促進試験には、電位差により塩化物イオンを強制的に移動させる方法である JSCE-G571「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」や、試験環境の塩化物イオン濃度を高くする方法である JSCE-G572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」などがある。なお、これらの方法によって得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数を式(4)に適用するには、適切な安全係数を設定する必要があるとされている<sup>34)</sup>。また、これらの方法による場合には、対象構造物から採取した試料、対象構造物と同等の材料および配合のコンクリート供試体を用いることがよいとされている<sup>34)</sup>。

#### 2) 塩化物イオンの反応や移動のメカニズムに基づいて予測する方法

本方法による場合には、塩化物イオン濃度をコンクリート中の単位体積中の量として計算するのではなく、液相中の塩化物イオン濃度を用いることが基本である。

### (2) 鋼材腐食の進行予測

塩害による鋼材腐食の進行予測は、コンクリートの品質および環境条件を適切に考慮する必要がある。これは、前述のとおり、腐食反応には酸素、水が必要で、鋼材への酸素供給速度、相対湿度の状態が腐食速度に影響を及ぼすためであり、乾湿繰返しなどの環境条件を適切に評価し、酸素の供給量とコンクリートの含水状態のバランスを考慮して行う必要がある。

塩害による鋼材腐食の進行予測では、以下のように鋼材腐食の開始時期の設定、腐食ひび割れ発生までの鋼材腐食の進行予測、腐食ひび割れの発生予測、腐食ひび割れ発生後の鋼材腐食の進行予測を行う方法が定められているものの、現状の技術レベルでは定量化されるまでには至っていない<sup>34)</sup>。

#### 1) 鋼材腐食の開始時期

鋼材腐食の開始時期は、鋼材表面におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度（鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 $C_{lim}$ ）で判定してよいとされている。これは、鋼材表面における塩化物イオンが $C_{lim}$ を超えると、不動態被膜が破壊されて鋼材の腐食が開始するためである。ただし、 $C_{lim}$ は、コンクリートの使用材料や配合、コンクリートの含水状態などに影響するため、個々の構造物によって状況は異なることを踏まえて、原則として対象構造物の点検結果に基づき、鋼

材の腐食状態と鋼材表面におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度の関係から設置することとされている<sup>34)</sup>。

一方で、対象構造物や類似構造物の点検結果がない場合、あるいは点検結果から $C_{lim}$ を設定できない場合は、構造形式や環境が類似した構造物における点検結果などかの調査実績に基づく $C_{lim}$ を用いてもよいとされている<sup>34)</sup>。ただし、対象構造物に対し、類似の構造物の環境条件やコンクリート品質が大きく異ならないことが前提であり、設計や施工記録などの情報からセメント種類および水セメント比を確認し、以下の式(11)～(14)を用いて $C_{lim}$ を設定してよいとされている<sup>34)</sup>。

- ・ 普通ポルトランドセメントを用いた場合

$$C_{lim} = -3.0 (W/C) + 3.4 \quad (11)$$

- ・ 高炉セメント B 種、フラッシュセメント B 種相当を用いた場合

$$C_{lim} = -2.6 (W/C) + 3.1 \quad (12)$$

- ・ 低熱ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメントを用いた場合

$$C_{lim} = -2.2 (W/C) + 2.6 \quad (13)$$

- ・ シリカフェームを用いた場合

$$C_{lim} = 1.2 \quad (14)$$

$C_{lim}$  : 鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$W/C$  : 水セメント比 ( $0.30 \leq W/C \leq 0.55$ )

## 2) 腐食ひび割れ発生までの鋼材腐食の進行予測

腐食ひび割れ発生までの鋼材腐食（鋼材表面におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度が $C_{lim}$ に達した後の鋼材腐食の予測）は、以下の2つの方法が定められている<sup>34)</sup>。

- ・ 点検結果が得られた腐食量に基づく方法
- ・ 鋼材の腐食反応速度に基づく方法

### a) 点検結果が得られた腐食量に基づく方法

非破壊試験である分極抵抗などにより鋼材の腐食速度が推定できる場合、その結果を用いて腐食量の経時変化を予測してよいとされている<sup>34)</sup>。また、コンクリートをはつり、直接的に鋼材の腐食面積や断面減少量などの定量的な変化が把握できる場合には、その結果を基に鋼材の

腐食の進行を予測することが規定されている<sup>34)</sup>。ただし、塩害では鋼材が局所的に激しく腐食する孔食が生じる場合もあるため、これを考慮して適切に評価することが重要である。また、鋼材表面におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度と鋼材の腐食グレードとの関係などが事前に把握しておくことで、塩化物イオンの拡散予測の結果から腐食グレードの進行を予測することも可能となることが示されている<sup>34)</sup>。

#### b) 鋼材の腐食反応速度に基づく方法

塩化物イオンの拡散に加え、酸素の供給量などもパラメータとして鋼材の腐食反応速度を推定する方法が実用化に向けて検討されている。

#### 3) 腐食ひび割れの発生予測

腐食ひび割れの発生予測は、鋼材の腐食進行の予測を行うことにより、ひび割れ発生時の腐食量を定めることに帰着し、以下の2つの方法が定められている。

- ・ 腐食量から判定する方法
- ・ 力学的モデルを用いる方法

##### a) 腐食量から判定する方法

ひび割れ発生時の腐食量を求める方法は、電食試験による方法がある。電食試験結果と対象構造物における鋼材腐食に関する調査結果を併用させることで、腐食ひび割れの発生時期を予測することが定められている<sup>34)</sup>。ただし、腐食生成物の組成は環境条件によって異なるため、その膨張量も実際の状況と必ずしも同一とはならないことに注意する必要がある。

##### b) 力学的モデルを用いる方法

ひび割れ発生時の鋼材の腐食量は、かぶり、コンクリート強度、鋼材の径などの影響を受ける。これらの影響を取り込んだ弾性解析および弾塑性解析の手法が種々提案されており、力学モデルのパラメータを適切に定めて利用してもよいとされている<sup>34)</sup>。

#### 4) 腐食ひび割れ発生後の鋼材腐食の進行予測

腐食ひび割れ発生後の鋼材腐食の進行を定量的に予測する方法は、確立していないのが現状である。現実的な対応としては、腐食ひび割れのない場合を対象として提案されている各種腐食モデルのパラメータの中で、塩化物イオンの見掛けの拡散係数、酸素移動速度や水分移動速度などを腐食ひび割れがある場合の値と置き換えて予測を行うとよいとされている<sup>34)</sup>。

## 2-6-2 中性化の予測

### (1) 中性化の進行予測

中性化が生じ、水の浸透による鋼材腐食が懸念される構造物では、点検時の構造物の性能を定量的に把握し、かつ性能の将来予測を行うこととされている<sup>35)</sup>。中性化の進行速度の予測は、潜伏期の長さを正確に推定するために重要である。中性化の進行速度は、コンクリート中における二酸化炭素の移動速度と空隙中の水分の pH 保持能力により決定する。二酸化炭素の移動速度は、セメント硬化体および骨材の空隙量と空隙構造に影響を受けるため、液相における移動速度は気相に比べて極めて小さく、湿潤状態（空隙が水で満たされている状態）では中性化の進行は事実上無視でき、乾燥し過ぎた場合にも炭酸化反応が起きない。

一方、空隙中の水分の pH の保持能力は、水酸化カルシウム量やアルカリ量で決定する。つまり、セメントや混和材の種類、水セメント比（水結合材比）、単位セメント量（単位結合材量）、結合材の水和度等の影響を受けるため、これらの影響を適切に評価することが望ましいとされている<sup>35)</sup>。

中性化の進行予測には、以下の 3 つの方法が定められている。

- ・  $\sqrt{t}$  則
- ・ 促進試験の利用
- ・ 物理化学的モデルの利用

#### 1) $\sqrt{t}$ 則

中性化深さは、以下の式(15)のように、中性化期間の平方根に比例することが多くの研究により確認されている。中性化深さの測定値がある場合は、以下の式(15)を用いて中性化速度係数を測定結果と構造物の竣工年から求め、その後の予測を行ってよいとされている<sup>35)</sup>。

$$y = b\sqrt{t} \quad (15)$$

$y$  : 中性化深さ (mm)

$t$  : 中性化期間 (年)

$b$  : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )

中性化深さの点検結果がない場合は、コンクリートの材料、配合や構造物が供用されている環境条件を適切に考慮し予測を行う必要があるが、適切に予測できる式がない場合として、以下の式(16)を用いてよいとされている<sup>35)</sup>。なお、式中の $\gamma_{cb}$ は、予測の精度全般にかかる安全係数で、一般的には 1.0 を用いてよいとされている<sup>35)</sup>。

$$y = \gamma_{cb} \cdot (-3.57 + 9.0W/B) \sqrt{t} \quad (16)$$

$y$  : 中性化深さ (mm)

$t$  : 中性化期間 (年)

$W/B$  : 有効水結合材比  $= W / (C_p + k \cdot A_d)$

$W$  : 単位体積あたりの水の質量

$B$  : 単位体積あたりの有効結合材の質量

$C_p$  : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

$A_d$  : 単位体積あたりの混和材の質量

$k$  : 混和材の種類により定まる定数

フライアッシュの場合 :  $k=0$

高炉スラグ微粉末の場合 :  $k=0.7$

$\gamma_{cb}$  : 予測の精度に関する安全係数

## 2) 促進試験の利用

促進中性化試験は、短時間で相対的な中性化速度を評価するには便利な方法であるが、促進倍率（自然状態の中性化速度に対する促進試験での中性化速度の割合）が材料、配合、促進開始までの初期養生条件、供試体形状などに依存することから、絶対的な評価は難しい。そのため、対象となるコンクリートの他に、自然曝露試験や実構造物において中性化深さが明らかになっているものと同じ配合のコンクリート供試体についても同時に促進試験を実施して、促進試験の促進倍率を確認することが必要であるとされている<sup>35)</sup>。

## 3) 物理化学的モデルの利用

水分や二酸化炭素、水酸化カルシウムなどの中性化に関与する物質のコンクリート中での移動と反応をモデル化し、数値計算により予測を行う方法が実用化に向けて検討されている。

## (2) 鋼材腐食の進行予測

中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の進行予測は、コンクリートの特性および構造物が供用される環境条件の影響を適切に考慮する必要がある。これは、前述のとおり、腐食反応には酸素、水が必要で、鋼材への酸素供給速度、相対湿度の状態が腐食速度に影響を及ぼすためである。

中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食の進行予測では、以下のように鋼材腐食の開始時期の設定、腐食ひび割れ発生までの鋼材腐食の進行予測、腐食ひび割れの発生予測、腐食ひび割れ発生後の鋼材腐食の進行予測を行う方法が定められているものの、ひび割れを有するコンクリート中の鋼材腐食を精度良く予測する手法は確立されていない<sup>35)</sup>。

#### 1) 鋼材腐食の開始時期

鋼材腐食の開始時期は、中性化残りとの水の供給状態で判定することが定められている<sup>35)</sup>。一般に、中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食は、中性化深さが鋼材位置に到達する事前に開始することが多くの研究や実構造物の結果から明らかになっている。また、腐食開始時期は、かぶりとの中性化深さの差である中性化残りで整理されている場合が多い。一般的に水掛かりの環境下（表 2-4 構造物表面の分類「I」相当）の腐食開始の判定は、中性化残り 10mm としてよいと定められており<sup>35)</sup>、これは中性化残り 10mm 以上では腐食しても構造物の機能を損うような重大な腐食が生じた事例が極めて少ないためである。一方で、湿潤状態が長く続く環境下（表 2-4 構造物表面の分類「II」相当）では、中性化の進行は遅いが、中性化残り 10mm 以上であっても腐食が開始している可能性が高いと判断する必要がある。

#### 2) 腐食ひび割れ発生前の鋼材腐食の進行予測

中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食は、その進行が比較的遅いことから、研究例はそれほど多くないが、現状の予測方法として、以下の 2 つの方法が定められている。

- ・ 点検結果で得られた腐食量に基づく方法
- ・ 鋼材の腐食速度に基づく方法

##### a) 点検結果で得られた腐食量に基づく方法

点検によって腐食量の経時変化が測定されている場合は、その結果を回帰して腐食の進行を予測できるとされている。これまでの調査研究より、中性化と水の浸透に伴う腐食量の経時変化曲線は、直線に近い形状になる事例が多く、電気化学的モデルを用いた解析でも同様の傾向が確認されている。そのため、腐食量と腐食開始時期を把握することでその後の予測を行う方法とされている<sup>35)</sup>。

##### b) 鋼材の腐食速度に基づく方法

腐食量の測定結果がない場合は、既存の腐食速度算定式を用いて腐食速度を適切に評価して予測を行ってよいとされており、コンクリート中の酸素供給速度や含水率の考慮できる電気化学的モデルを用いて劣化予測する方法とされている<sup>35)</sup>。



### 3) 腐食ひび割れの発生予測

腐食ひび割れの発生予測は、鋼材の腐食進行の予測を行うことにより、ひび割れ発生時の腐食量を定めることに帰着し、以下の2つの方法が定められている。

- ・ 腐食量から判定する方法
- ・ 力学的モデルを用いる方法

#### a) 腐食量から判定する方法

中性化と水の浸透に伴う鋼材腐食は、全面腐食となる場合が多い。そのため、均一に腐食が進行する電食試験結果と対象構造物における鋼材腐食に関する調査結果を併用することで、腐食ひび割れの発生時期を予測することが可能とされている<sup>35)</sup>。

#### b) 力学モデルを用いる方法

ひび割れ発生時の腐食量は、かぶり、コンクリート強度、鋼材径などの影響を受けることが明らかである。これらの影響を取り込んだ弾性解析および弾塑性解析の手法が種々提案されており、モデルのパラメータを適切に定めて利用してよいとされている<sup>35)</sup>。

### 4) 腐食ひび割れ発生後の鋼材腐食の進行予測

腐食ひび割れが生じた後の鋼材腐食の予測手法は、現在研究途上にあるものがほとんどで、確立されていないのが現状である。腐食ひび割れのない場合を対象として提案されている各種腐食モデルのパラメータの中で、酸素移動速度や水分移動速度を腐食ひび割れがある場合の値と置き換えて予測を行うのがよいとされている<sup>35)</sup>。

2-6-3 予測に関する研究

荒木ら<sup>36)</sup>は、鋼材腐食膨張圧をモデル化した実験を行い、腐食膨張圧や見かけ上の鉄筋半径の増加量を把握するとともに、かぶりや腐食長さが両者に与える影響について検討している。その結果、剥離に至る半径変化量や腐食膨張圧はかぶりに比例すること、腐食長さとも指数関数の関係にあることを明らかにしている。また、補修計画策定方法の提案の中で、確立手法を用いて様々な提案されている腐食速度算定式、劣化因子、安全確率、かぶりごとに剥落余裕期間の算出の計算例を示している。

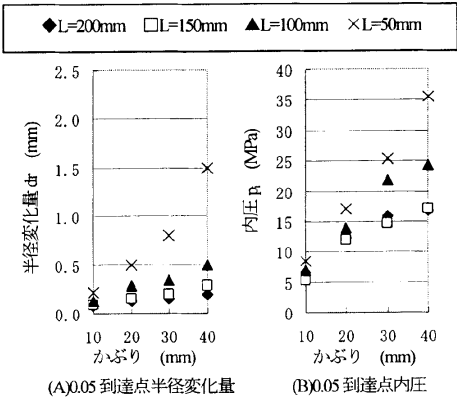


図 2-78 0.05 到達点の半径変化量、内圧とかぶりの関係<sup>36)</sup>

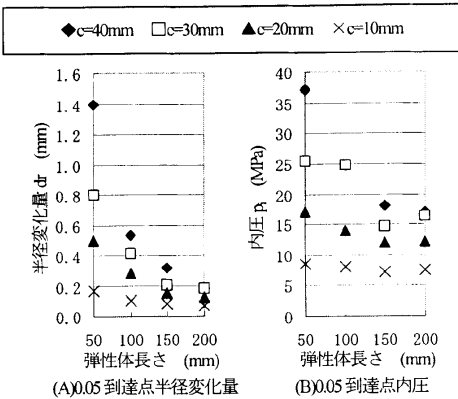


図 2-79 0.05 到達点の半径変化量、内圧と弾性体長さの関係<sup>36)</sup>

表 2-6 腐食速度<sup>36)</sup>

劣化機構	腐食速度算出式 $\Delta r / \Delta t$ (mm/年)	摘要
中性化	$3.0 \times 10^{-3}$	c : かぶり (mm), $Cl^-$ : 初期塩化物イオン量 (kg/m <sup>3</sup> ), W/C : 水セメント比 (%)
内部塩害	$\frac{10^{-3}}{\sqrt{c}} (7.7Cl^- + 0.503 W/C - 40.6)$	
外部塩害	$35 \times 10^{-3}$	
複合劣化 <sup>※</sup> (前期)	$\frac{10^{-3}}{\sqrt{c}} (7.7Cl^- + 0.503 W/C - 40.6)$	
複合劣化 <sup>※</sup> (後期)	$\frac{10^{-3}}{\sqrt{c}} (19.34Cl^- + 0.748 W/C - 49.4)$	

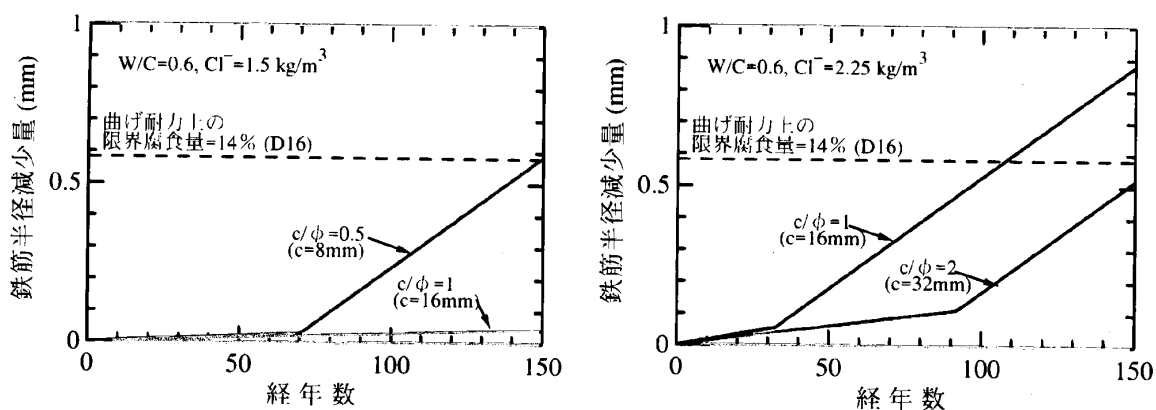
※ 複合劣化は、中性化と内部塩害の複合劣化  
※ 前期は中性化残り15mm以上、後期は15mm以下

表 2-7 剥落余裕期間<sup>36)</sup>

剥離余裕期間 (鉄筋径20mm, W/C=62%, 安全係数1.3)

かぶり (mm)	腐食延長 (mm)	剥離余裕期間 (日)											
		安全確率											
		中性化				複合劣化				外的塩害			
		93%	88%	80%	70%	93%	88%	80%	70%	93%	88%	80%	70%
30	200	1981	2973	3968	4963	592	889	1186	1483	475	712	951	1189
	150	3336	5010	6688	8371	997	1497	1999	2502	799	1200	1603	2006
	100	5658	8504	11362	14231	1691	2542	3396	4254	1356	2038	2722	3410
	50	9706	14608	19542	24509	2901	4366	5841	7325	2326	3500	4683	5873
20	200	1427	2141	2857	3573	348	523	697	872	342	513	685	856
	150	2300	3452	4607	5764	561	843	1125	1407	551	827	1104	1381
	100	3722	5591	7466	9345	909	1365	1822	2281	892	1340	1789	2239
	50	6066	9199	12185	15265	1480	2226	2974	3726	1453	2185	2920	3658
10	200	811	1217	1623	2030	140	210	280	350	194	292	389	486
	150	1092	1639	2186	2734	189	283	377	472	262	393	524	655
	100	1471	2208	2946	3685	254	381	509	636	353	529	706	883
	50	1985	2980	3976	4974	343	514	686	859	476	714	953	1192

鳥取ら<sup>37)</sup>は、除塩不足の海砂が使用された昭和 40 年代～50 年代前半の構造物を想定して、既往の研究を分析することにより、鉄筋の腐食速度を再評価するとともに、かぶり、初期塩化物イオン量および水セメント比をパラメータとする腐食速度算定式を立案している。さらに、大型暴露試験により、立案した腐食速度算定式の適用性を確認し、これらの結果を基に構造物の劣化予測法を立案している。その結果、既往の研究や暴露試験結果を基に、鉄筋の腐食課程をモデル化し、腐食ひびわれが生じる際の鉄筋の腐食深さ、剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さと腐食速度の関係をj用いて、鉄筋半径減少量が曲げ耐力上の限界腐食量に到達する時点jを予測する計算例を示している。



(1) W/C60%, 初期塩化物イオン量 1.5kg/m<sup>3</sup> (1) W/C60%, 初期塩化物イオン量 2.25kg/m<sup>3</sup>

図 2-80 鋼材腐食の進行予測の例<sup>37)</sup>

また、鳥取ら<sup>38)</sup>は、大型の鉄筋コンクリート供試体を促進的に中性化した後、約 5 年間屋外暴露試験を行い、鋼材腐食の進行予測方法を検討している。その結果、かぶりを 15mm とした下端鉄筋の中央付近まで促進的に中性化させた場合、下端鉄筋の平均腐食速度は、 $2 \times 10^{-3}$ mm/年程度で、同一供試体中で中性化残りが 10mm 程度となる上端鉄筋の平均腐食速度は、下端鉄筋の 1/10 程度となることが確認されている。また、暴露初期にはマクロセルと想定される影響により、腐食速度がやや大きくなる傾向が見られるが、経年とともに徐々に低下し、マクロセルによる影響も小さくなることが推測されることが示された。さらに、既往の研究とこれらの結果を基に、腐食ひびわれが生じる際の鉄筋の腐食深さ、剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さと腐食速度の関係をj用いて、腐食深さが曲げ耐力上の限界腐食量に到達する時点jを予測する劣化予測方法を示している。

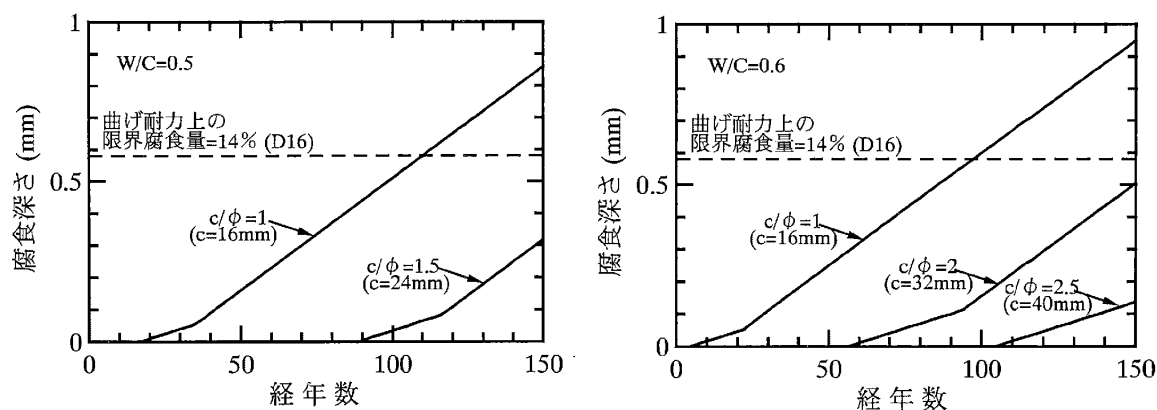


図 2-81 鋼材腐食の進行予測の例<sup>38)</sup>

さらに、鳥取ら<sup>39)</sup>は、初期塩化物イオンを含み、促進中性化を施したコンクリート供試体の暴露試験、実構造物の調査結果を基に、中性化と初期塩化物イオンの複合的影響を受ける場合の鉄筋腐食速度を把握し、鋼材腐食の進行予測方法を検討している。その結果、暴露試験の結果より、供試体の下端鉄筋は暴露初期においてマクロセルの影響により、腐食速度が大きくなるが、経年とともに腐食速度が低下し、概ね梶田式による腐食深さに達することが把握されている。また、実構造物から推定される腐食速度も同様に梶田式に近似することが確認有れている。これらの結果を基に、腐食ひびわれが生じる際の鉄筋の腐食深さ、剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さと腐食速度の関係を用いて、鉄筋半径減少量が曲げ耐力上の限界腐食量に到達する時点进行予測する劣化予測方法を示している。

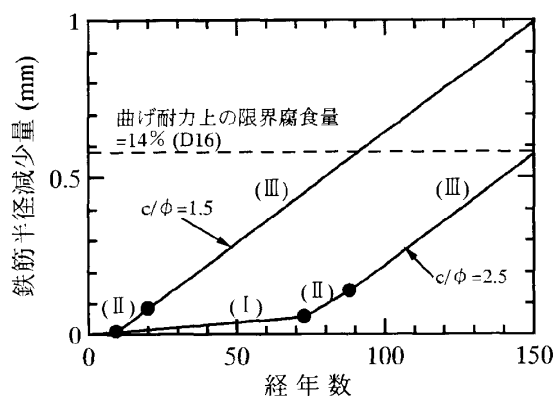


図 2-82 鋼材腐食の進行予測の例<sup>39)</sup>

## 2-7 まとめ

実構造物の調査結果および暴露試験を対象とした研究報告，透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する既往の研究，予測方法，予測に関する研究について整理した。これらの既往の研究結果を踏まえて，これまでに明らかとなっている点と課題点を以下に列記する。

### 2-7-1 実構造物および暴露試験の研究報告

- ・ コンクリート内の鋼材腐食には，最小かぶりの確保の要否，水掛かりの有無が大きく影響しており，水掛かりがある場合には，中性化の進行が遅くなるが，水分供給による乾湿繰返しの影響を受け，鋼材の腐食速度が速くなる。
- ・ 水掛かりがある場合には，中性化残り 10mm 以下で剥離・剥落が発生する可能性が高まるのに対して，水掛かりが無ければ中性化残りが 10mm 以下でも剥離・剥落は発生する可能性が比較的低い。
- ・ 雨水などの影響を受ける箇所は，受けない箇所に比べ中性化深さが小さく，かぶり，中性化残り，雨水，漏水の影響は，コンクリート片の剥落および鋼材腐食と密接に関係している。
- ・ 竣工年代と中性化速度係数との関係より，1965 年を境にそれ以降に竣工した構造物の中性化速度係数が大きい。これは，時代背景としてポンプによるコンクリート打設が始まった時期であり，フレッシュコンクリートの圧送性確保のために加水されたことが要因として考えられる。
- ・ 竣工年代と塩化物イオン量との関係より，1984 年までに竣工した構造物のコンクリート中における塩化物イオン量は，年々増加する傾向であったが，1985 年を境に含有量が極端に減少している。これは，1984 年までのコンクリート中の塩化物イオン量の増加は，川砂の枯渇化に伴う海砂の使用の増加が影響し，1985 年以降の塩化物イオン量の減少は，1986 年の建設省通達による塩化物量総量規制が要因として考えられる。
- ・  $C_0$  は，暴露期間で見ると 3 年と 5 年では増加傾向が見られないものが多く，環境の違いでは浸漬時間の長い干満帯よりも飛沫帯における  $C_0$  の方が大きくなる傾向が見られた。
- ・ 塩化物イオンの見掛けの拡散係数は，暴露期間 3 年から 5 年で漸減する傾向が見られ，環境の違いでは干満帯の塩化物イオンの見掛けの拡散係数の方が飛沫帯よりも若干大きくなる傾向が見られる。

- ・ 鋼材腐食は海中部暴露供試体ではほとんど生じないが、一方で干満帯暴露供試体では鋼材腐食発錆限界塩化物イオン濃度が  $1.2\text{kg/m}^3$  よりも大きくなり、さらにかぶりの影響を受ける傾向にある。

## 2-7-2 透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する研究

### (1) 非破壊、微破壊試験の透気係数による物質移動抵抗性評価に関する研究

- ・ RILEM 法、ドリル採孔法 (FIM 法)、シングルチャンバー法 (SCM 法)、ダブルチャンバー法 (トレント法) などの非破壊、微破壊試験による中性化の評価が行われ、室内実験および実構造物に対して水セメント比、養生条件に限らず概ね相関が見られており、中性化の評価、進行予測などが可能である。
- ・ 非破壊、微破壊試験の透気係数は、かぶり以浅を評価するものであり、コンクリート表面の含水状態に依存する。
- ・ 非破壊、微破壊試験による塩害の評価は、室内実験ではある程度の相関性が見られるものの、実構造物に対しては室内実験から得られた結果とは大きく乖離し相関性が得られていない。

### (2) コアを用いた加圧法の透気係数による物質移動抵抗性評価に関する研究

- ・ コアを用いた加圧法による透気係数と各種劣化因子に対する物質移動抵抗性との関係性として、透気係数と実効拡散係数、中性化速度係数との相関性が確認されている。このことから、透気係数によって実効拡散係数、中性化速度係数などの物質移動抵抗性の評価が可能である。
- ・ コアを用いた加圧法による透気係数と実効拡散係数に影響を及ぼす空隙径 (細孔構造) は類似していることから、透気係数によって実効拡散係数を評価できる。このことから、コア法による透気係数によって鋼材腐食の評価が可能である。

### (3) 予測の手法

- ・ 確立手法を用いた様々な提案されている腐食速度算定式、劣化因子、安全確率、かぶりごとに剥落余裕期間の算出の計算例が示されている。
- ・ 除塩不足の構造物を想定して、初期塩化物イオン量および水セメント比をパラメータとする腐食速度算定式を立案し、大型暴露試験により、立案した腐食速度算定式の適用性を確認している。これらの結果を基に構造物の腐食ひびわれが生じる際の鉄筋の腐食深

さ、剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さと腐食速度の関係を用いた劣化予測方法が提案されている。

- ・ 中性化の影響を受けた構造物を想定して、屋外暴露試験結果を基に、腐食ひびわれが生じる際の鉄筋の腐食深さ、剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さと腐食速度の関係をを用いた劣化予測方法が提案されている。
- ・ 中性化と初期塩化物イオンの複合的影響を受け場合の鉄筋腐食速度を暴露試験、実構造物の調査結果から設定し、これらの結果を基に、腐食ひびわれが生じる際の鉄筋の腐食深さ、剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さと腐食速度の関係をを用いた劣化予測方法を示している。

### 2-7-3 課題

- ・ かぶりの状況、塩害、中性化による劣化の状況、水掛かりの有無の影響など実構造物の状況を把握するが重要である。
- ・ コアを用いた加圧法の透気係数による鋼材腐食の評価の可否について明らかにされていない。
- ・ 実構造物から採取したコアを用いた加圧法による透気係数の適用性については明らかにされていない。
- ・ 鋼材腐食の要因として、酸素、水、二酸化炭素、塩化物イオンの浸透の他に、かぶり、水掛かりによる影響も考えられるが、劣化機構ごとの予測方法では、かぶりが考慮されていない。
- ・ 塩化物イオンの拡散の予測、中性化の進行予測などの方法が劣化機構ごとに定められているが、これらの予測方法は潜伏期から進展期を予測するもので、加速期以降の予測方法が確立されていない。
- ・ 鋼材腐食の進行予測は、ある程度体系的に整理されているものの、現状の技術レベルでは定量化されるまでには至っていない。

#### [参考文献]

- 1) 鉄道総合技術研究所：楊陽新幹線コンクリート構造物検討委員会報告書，2000

- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針（案）・同解説，1997
- 3) 独立行政法人土木研究所，日本構造物診断技術協会：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，2010
- 4) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp.136
- 5) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'19 [基礎編]，p. 190，2019
- 6) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁における第三者被害予防措置要領（案），p.2，2016.12
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料 コンクリート橋の塩害対策資料集，pp.173-175，2002.11
- 8) 日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧，1985
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，p.71,2017
- 10) 土木学会：2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編：標準附属書】，pp.113-114，2018.10
- 11) 前原聡，伊代田岳史：雨掛かりの有無が中性化によるかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol. 74, No. 2, pp. 80-87, 2018.
- 12) 松岡弘大，仁平達也，伊藤正憲，山田久美：87年間供用された RC 鉄道高架橋スラブの劣化因子分析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37, No. 2, pp. 1351-1356, 2015
- 13) 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. 1351-1356, 2010
- 14) 轟俊太郎，石田哲也，田所敏弥，上田洋：コンクリート中の鉄筋腐食に与える水とコンクリート中の中性化の影響，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol. 75, No. 4, pp. 226-238, 2019
- 15) 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研究，土木学会論文集，No. 711/V-56, pp. 125-134, 2002.8
- 16) 松下博通：コンクリート構造物の初期欠陥および劣化のメカニズム，安全工学，Vol. 39, No. 4, pp. 234-246, 2000
- 17) 山路徹，濱田秀則，審良善和：異なる海洋環境下および曝露期間における塩化物イオン拡散性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No. 1, pp. 1003-1008, 2009
- 18) 山路徹，Tarek Uddin Mohanmed，青山敏幸，濱田秀則：海洋コンクリートの耐久性に及ぼす暴露環境およびセメントの種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 2, pp. 577-582, 2001
- 19) 下澤和幸，今本啓一，山崎順二，永山勝：鉄筋コンクリート構造物の耐久性能検証のための透気性試験による指標値と中性化深さの関連について，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No. 1, pp. 2005-2010, 2009
- 20) 氏家勲：実構造物コンクリートにおいて劣化予測に用いる定量的指標を得るための点検



方法の開発，科学研究費助成事業 研究成果報告書，2015.6

- 21) 山崎順二，今本啓一，下澤和幸，永山勝：原位置での簡易透気性とかぶり厚さによる RC 構造体の耐久性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No.1, pp.1999-2004, 2009
- 22) 小野聖久，上東泰：非破壊試験による密実性評価とコンクリートの耐久性に関する考察，土木学会第 60 回年次学術講演会，5-259, pp. 517-518, 2006.9
- 23) 下澤和幸，永山勝，今本啓一，山崎順二，二村誠二：かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する簡易試験法の開発，シンポジウム，コンクリート構造物への非破壊検査の展開(2006) JSNDI, pp. 291-296, 2006
- 24) 早川健司，水上翔太，加藤佳孝：表層透気試験による構造体かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol. 68, No. 4, pp. 385-398, 2012
- 25) 蔵重勲，廣永道彦：透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案，セメント・コンクリート論文集，No. 65, pp. 225-232, 2011
- 26) 細田暁，小松怜史，中川恵理，佐藤和徳：コンクリート構造物の品質向上の取組みと非破壊試験による効果の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 37, pp. 1273-1278, 2015
- 27) 横山勇気，酒井雄也，半井健一郎，岸利治：異なる配合と養生を与えたコンクリートの表層透気係数の経年変化，セメント・コンクリート論文集，No. 71, pp. 410-417, 2017
- 28) 蔵重勲，廣永道彦：脱型材齢や曝露環境がコンクリートの強度特性や表層透気性ならびに中性化抵抗性に及ぼす影響の実験的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32, No. 1, pp. 623-628, 2010
- 29) 山本雅行，下瀬千江里，半井健一郎：既設コンクリート構造物における塩分拡散係数と透気係数の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41, No. 1, pp. 623-628, 2019
- 30) 林亮太，櫛原弘貴，添田政司，松本涼：透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35, No. 1, pp. 745-750, 2013
- 31) 松本涼，林亮太，櫛原弘貴，添田政司：各種コンクリートの透気係数と物質移動抵抗性との関係性に関する研究，第 67 回セメント技術大会講演要旨，3304, pp. 320-321, 2013
- 32) 三浦明，櫛原弘貴，添田政司，金堀雄伍，西嶋大貴：透気係数による各種コンクリートの塩化物イオン浸透性の評価に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 15 巻，pp. 253-258, 2015.10
- 33) Katpady, D. N., Hazebara, H., Soeda, M., Kubota, T. and Murakami, S.: Durability assessment of blended concrete by air permeability, International Journal of Concrete Structures and Materials , DOI 10.1186/s40069-018-0260-9, ISSN 1976-0485 / eISSN 2234-1315, 2018
- 34) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編：標準附属書】，pp.140-146,

2018.10

- 35) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編：標準附属書】，pp.119-125，2018.10
- 36) 荒木弘祐，服部篤史，宮川豊章：鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離現象とその予測，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.209-222，2005.11
- 37) 鳥取誠一，宮川豊章：初期塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.781/V-66，pp.157-170，2005.2
- 38) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.767/V-64，pp.35-46，2004.8
- 39) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化と初期塩化物イオンの複合的影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.181-196，2005.11

## 第 3 章 かぶりが鋼材腐食に与える影響に関する研究

### 3-1 概説

日本における実構造物は、5 年に 1 回の定期点検が定められている。国土交通省の管理する道路橋で言えば、橋梁定期点検要領に基づき点検された道路橋ごとの健全性の診断結果がⅢ、Ⅱと判定されたものは、次回点検までの対策が義務付けられている。対策を実施するにあたり、詳細調査を実施し劣化要因を把握しているが、中でも塩害の場合は、一度鋼材に腐食が生じるとその進行が早く、かぶり不足や中性化との複合劣化によってもコンクリートが剥離・剥落する場合もある。実構造物に対して、適切な維持管理を進めるためには、鋼材が腐食しコンクリートが剥離・剥落すると予測される箇所において、塩化物イオン濃度を測定し鋼材腐食発生時期を予測することが非常に重要である。2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】では、鋼材腐食の進行予測として、鋼材表面におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度で判定してよいと規定されている<sup>1)</sup>。また、原則として点検結果に基づき、鋼材の腐食状態と鋼材表面におけるコンクリート中の塩化物イオン濃度の関係から設定することとなっているが、点検結果がない場合には、類似の構造物の点検結果を用いるか、設計や施工記録などの情報を用いて設定する場合もある<sup>1)</sup>。

一方、例えば道路橋示方書では最小かぶり（版部材：30mm，桁：35mm）<sup>2)</sup>，コンクリート道路橋施工便覧では適切なかぶりを確保するため、スパーサーの設置が定められている<sup>3)</sup>。最小かぶりの基準は、これまでに何度か改定されてきているが、スパーサーの設置が定められた 1985 年以前の構造物は最小かぶりを確保できていない可能性がある。かぶりは、耐久性に密接に関係しており、今後維持管理を行っていくに当たっても、既設構造物の状況を把握しておく必要がある。

そこで本研究は、まず初めに実構造物のかぶりの状況を把握するために、様々な環境下の実構造物の調査結果を基に、実構造物の実測かぶりと設計上必要な最小かぶりを年代ごとで整理し、その関係性を明らかにした。次に、鋼材位置の塩化物イオン濃度と腐食グレードをかぶり

ごとで整理し、かぶりが鋼材腐食に与える影響を明らかにした。また、水掛かりの有無は、中性化の鋼材腐食や塩化物イオンの浸透に起因するため、水掛かりの違いについても整理した。整理結果を踏まえて、効率的な維持管理を行うために、鋼材腐食開始の指標となる鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度に関する知見を得た。

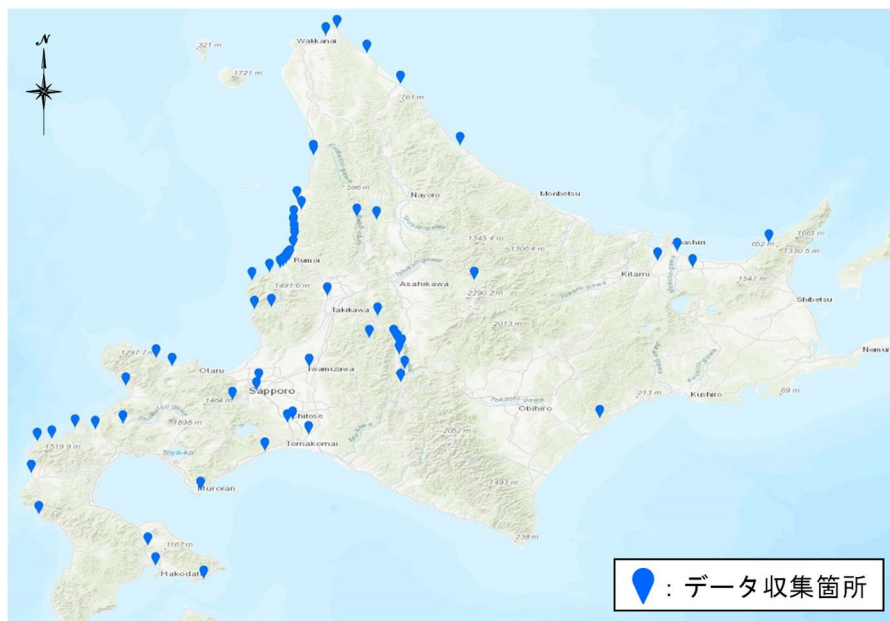
## 3-2 実構造物の調査概要

### 3-2-1 概要

実構造物の調査は、図 3-1～図 3-3 に示す日本各地の 1940 年～2000 年に竣工した延べ 405 箇所の実構造物を対象としてかぶりを計測した。そのうち、はつり調査を実施、もしくは、データを収集できた構造物は延べ 97 箇所、その結果を基にかぶりが鋼材腐食に与える影響について整理した。

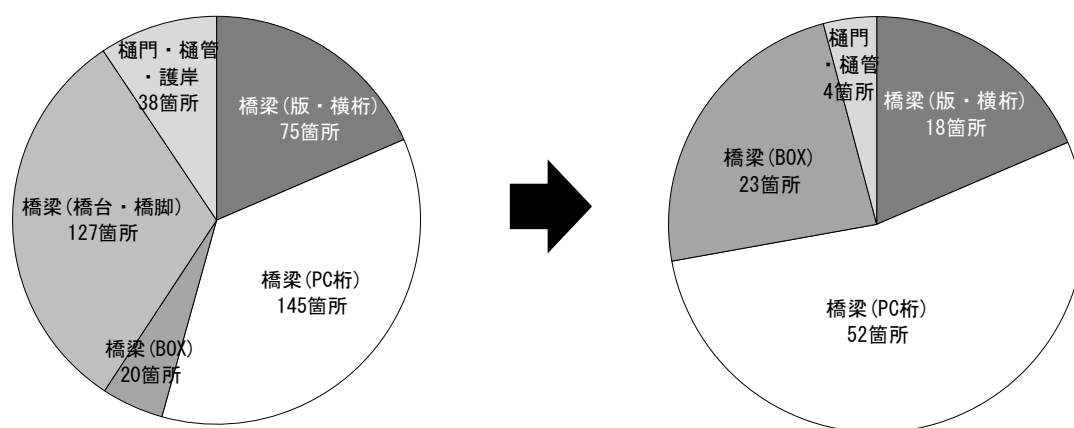


図 3-1 データ収集箇所の位置図（地図情報システムの地図に加筆）



【実構造物の調査：延べ 405 箇所】

【はつり調査：延べ 97 箇所】



実構造物の諸元は、河川・水路・道路・線路などを跨ぐ道路橋（ボックスカルバートも含む。以下、BOX と示す。）、樋門・樋管（感潮区間も含む）、沿岸部の護岸である。かぶりの計測を対象とした 405 箇所の構造物の環境条件は、一般環境、大潮時と干潮時の潮位差の大きく河川に海水が遡上する地域（感潮区間）、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地、飛来塩分が多い地域など様々である。また、はつり調査を実施、もしくはデータを収集できた構造物の環境条件を表 3-1 に示す。はつり調査の対象の構造物は、樋門・樋管の 4 箇所を除き、93 箇所が飛来塩分の影響を受ける環境である。一方の樋門・樋管の 4 箇所は、飛来塩分の影響を受けないが、感潮区間に位置する構造物で海水が河川を遡上する環境である。また、鋼材腐食には、水掛かりの影響が大きく影響するため、後述するが地覆、床版下面の水切りの設置の有無、降雨の影響、漏

水・漏水跡，潮位の影響を受けるかなどの現地状況を考慮して水掛かりの有無を整理した。水掛かりの影響を受ける橋梁（版・横桁）および橋梁（BOX：頂版）のうち，漏水・漏水跡が見られる場合には，橋面からの凍結防止剤の影響を受けるものと判断して整理した。

表 3-1 はつり調査を実施した実構造物の環境条件

調査箇所/数量（箇所）		飛来塩分の影響		水掛かりの影響		凍結防止剤の影響	
		受ける	受けない	あり	なし	受ける	受けない
橋梁（版・横桁）	16	16	0	14	2	14	2
橋梁（PC桁）	54	54	0	25	29	0	54
橋梁（BOX）	23	23	0	23	0	1	22
樋門・樋管	4	0	4	4	0	0	4
小計	-	93	4	66	31	15	82
合計	97	97		97		97	

### 3-2-2 調査項目および内容

調査では，かぶりの計測，はつり調査を実施し，その結果をそれぞれ整理した。はつり調査は，構造物ごとの管理者の判断で調査箇所は限定されるが，コンクリート中の鋼材の状態を把握するために実施した。調査方法は以降に後述するが，電動ピックで鋼材を露出させ，腐食グレード<sup>4)</sup><sup>5)</sup>を整理した。また，はつり調査を実施した付近の近傍で塩化物イオン濃度の算出のための試料を採取した。さらに，塩化物イオン浸透には水掛かりの有無が大きく影響するため，水掛かりの有無を整理した。

#### (1) かぶりの計測

実構造物のかぶりの状況を確認するために，写真 3-1 に示すように電磁波レーダー探査を用いて，かぶりを計測した。後述するはつり調査を実施した箇所は，実測値も併せて計測し，電磁波レーダー探査の結果に相違が無いことを確認した。なお，調査した構造物の設計かぶりの情報は，ほとんど残っていなかった。

かぶりの整理方法として，調査対象の実構造物の中でも道路橋の割合が最も多いことから，405 箇所の部材ごとのかぶりは，版・横桁，PC 桁，下部工（橋台・橋脚）で整理した。また，橋梁（BOX）および樋門・樋管の場合，側壁を柱，頂版は版・横桁，底版は下部工（橋台・橋脚）に分類して整理した。97 箇所のはつり調査結果は，橋梁（横桁・版），橋梁（PC 桁），橋梁（BOX）および樋門・樋管で整理した。



①電磁波レーダー探査による計測



②はつり箇所の計測

写真 3-1 かぶりの計測状況

## (2) 塩化物イオン含有量試験（鋼材位置の塩化物イオン濃度）

塩化物イオン濃度は、写真 3-2 に示すようにドリル法、あるいは、採取したコア供試体により試料を採取し、JIS A 1154 : 2020「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、電位差滴定装置により測定した。実構造物におけるかぶり深さ方向の塩化物イオン濃度を算出するにあたり、一部の構造物では中性化による塩分の濃縮現象が見られたため、このような環境条件の構造物では、塩化物イオンが濃縮された以深の塩化物イオン濃度分布から算出した。また、鋼材位置の塩化物イオン濃度は、塩化物イオン濃度分布から算出した。なお、塩化物イオン浸透には、水掛かりの有無が大きく影響するため、水掛かりの有無を整理した。水掛かりの有無は、表 3-2 を基に<sup>9)</sup>、地覆、床版下面の水切りの設置の有無、降雨の影響、漏水・漏水跡、潮位の影響を受けるかなどの現地状況を考慮して水掛かりの有無を整理した。

### 【全塩化物イオン濃度の測定手順】

- 1) 塩水浸透面から各深さの粉末試料を、φ10mm のコンクリート用ドリルを用いて採取する（写真 3-2）。
- 2) 200mL ビーカーに採取した試料を 0.3g はかりとり、2mol/l の硝酸を 5mL、過酸化水素水を 0.1mL 加え、蒸留水を 45mL 加え混合する。
- 3) 混合した検液を加熱し、5 分間静かに煮沸した後、常温まで冷却する。
- 4) NaCl 溶液を 1mL 加え、蒸留水を 50mL 加える。
- 5) 作製した検液を電位差滴定装置に設置した後、0.005mol/l の硝酸銀標準溶液で滴定し、全塩化物イオン濃度の測定を行う（写真 3-2）。





①試料採取の状況



②電位差滴定装置

写真 3-2 塩化物イオン含有量試験の状況

表 3-2 構造物表面の水掛かりの区分<sup>6)</sup>

構造物表面 の分類	区分	該当する部位および環境の例
0	水掛かりがなく常時 乾燥する部位	<ul style="list-style-type: none"> <li>・橋梁や高架橋の下で水切り等が機能し、上部からの水の供給がない部位</li> <li>・霧や結露が発生する頻度が低い環境（地域）</li> </ul>
I	降水は掛かるが、降水がやめば すぐに乾燥が始まる部位	<ul style="list-style-type: none"> <li>・橋梁や高架橋の高欄</li> <li>・下路桁の主桁</li> <li>・排水が良好なスラブの上面</li> <li>・霧や結露が発生する頻度が高い環境（地域）</li> </ul>
II	湿潤状態が長く続く部位	<ul style="list-style-type: none"> <li>・飛沫帯にある部位</li> <li>・上部からの漏水が生じる部位</li> <li>・降水後に水たまりができる部位</li> <li>・ひび割れや打継部など水が保持されて乾燥しにくい状況となる部位（湿潤状態が継続する箇所）</li> <li>・地中からの水の供給を受け乾湿が繰り返される部位（地際）</li> </ul>
III	湿潤状態であっても乾湿の 環境変化が少ない部位	<ul style="list-style-type: none"> <li>・常時水中にある部位</li> <li>・常時土中にある部位</li> </ul>

### (3) はつり調査（腐食グレード）

現在の構造物における維持管理の方法として、コンクリートに錆汁を伴うようなひび割れ、剥離・剥落などの損傷が見られる場合に、一般的にはつり調査による腐食グレードの評価が行われている。本調査においても、錆汁を伴うひび割れや漏水を伴う貫通ひび割れ、剥離・剥落などの変状が著しく見られる箇所において、はつり調査による腐食グレードの評価を実施した。はつり調査の結果を整理するにあたり、鋼材腐食の評価基準は様々で、表現も異なっているが、2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】およびコンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針に準拠して、表 3-3、写真 3-3 に示した腐食グレード（I, II, III, IV）、写真を基に整理した<sup>4) 5)</sup>。本研究のはつり調査における腐食グレードは、コンクリート表面から鋼材の最縁端部の腐食グレードの結果を整理しており、結果の中にはスターラップの結果も含んでいる。

なお、外観上コンクリート表面に変状が顕著に現れていない場合は、管理者の方針としてコ



ンクリート内部の鋼材腐食を確認するまでに至らないケースもあった。

表 3-3 腐食のグレードと鋼材の状態<sup>4)</sup>

腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態，または錆は生じているが全体的に薄い緻密なさびであり，コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが，小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが，鋼材の全周または全長にわたって浮き錆が生じている。
IV	断面欠損を生じている。



写真 3-3 はつり調査の状況

#### (4) 鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度

鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 ( $C_{lim}$ ) の算出方法として，2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】では，対象構造物と類似の構造物の点検結果がない場合，セメント種類および水セメント比を考慮し，算出してもよいと規定されている<sup>1)</sup>。ただし，本研究で調査した構造物は，いずれもセメント種類および水セメント比が不明であるため，竣工年から普通ポルトランドセメントが使用されたものと想定した。また， $W/C$  も不明であるため， $W/C$  の上限・下限値 (0.30, 0.55) を用いて以下の式(1)で算出した。

【普通ポルトランドセメントを用いた場合】

$$C_{lim} = -3.0 (W/C) + 3.4 \quad (1)$$

$C_{lim}$  : 鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)

$W/C$  : 水セメント比( $0.30 \leq W/C \leq 0.55$ )

### 3-3 結果および考察

#### 3-3-1 部材ごとの建設年とかぶりの関係

図 3-4 には、部材ごとの建設年とかぶりの関係を示す。また、竣工時期に使用されていた基準を基に、最小かぶりの変遷（設計値）を併せて作図した<sup>7)</sup>。設計値の見方として、版・横桁の設計値を例にすると、1968 年に最小かぶりが改定されているため、改定された年の設計値の数値を変化させて作図している。図 3-4 より、建設された時期は 1960 年～1980 年に集中しており、この時期の実測かぶりは各部材に関らずばらつく結果を示したが、版・横桁および PC 桁では、設計かぶり 20mm よりも下回る割合が数多く見受けられた。これは、1985 年にスパーサー設置が規定されているが<sup>3)</sup>、それ以前に建設された構造物は、スパーサーに関する基準は無く、竣工時に設計上必要な最小かぶりを確保できていない可能性が考えられる。また、この時期の時代背景として、高度経済成長期で建設量が急増しているが、それに呼応するようにコンクリートポンプ車が急速に普及し、同時期に数多くの構造物が建設されている。このことから、構造物によっては、別工事のための人員確保、省力化などで施工管理が不十分となり、かぶりの確保が十分に行われなかった可能性も想定される。また、かぶり不足だけでなく、施工性を重視するあまり、フレッシュコンクリートに加水して圧送性を確保したことで品質が低下した可能性も考えられる<sup>8) 9)</sup>。さらには、1986 年の塩化物量総量規制や 1989 年のアルカリ骨材反応抑制対策が規定されたが、それ以前に建設された構造物の割合が多いため、かぶり不足、中性化との複合劣化、内在塩分が見られる場合には、鋼材が腐食しコンクリートが剥離・剥落する可能性も考えられる。

一方で、柱の場合には、調査結果の大半が設計上必要な最小かぶり 30mm を満足している。柱には、ボックスカルバートの側壁が該当するが、版・横桁および PC 桁と比べて施工規模が小さく、施工管理がしやすかったことが要因として考えられる。

橋台・橋脚の調査箇所は橋台の堅壁、橋脚の梁・柱であるが、明確な最小かぶりの規定は無く、設計時に用いられた最小かぶりの基準がフーチング（土中）の最小かぶり 70～75mm であったと想定すると、その半数が設計上必要な最小かぶりを下回る結果となる。しかしながら、橋台の堅壁や橋脚の梁・柱は、柱の最小かぶり 30mm が適用されている可能性もあり、その場合にはほとんどが基準を満足する結果を示した。

以上のことから、竣工時に設計上必要な最小かぶりが確保されていない構造物もあり、今後かぶり不足や複合劣化によって鋼材が腐食しコンクリートが剥離・剥落する可能性が考えられ

る。また、実構造物におけるかぶりは各部材において様々であるため、次項以降でかぶりが鋼材腐食に与える影響について検討した。なお、橋台・橋脚の設計上必要な最小かぶりは、上部工と比べて大きいため、橋台・橋脚を除いた版・横桁、PC 桁、柱に着目して検討を行った。

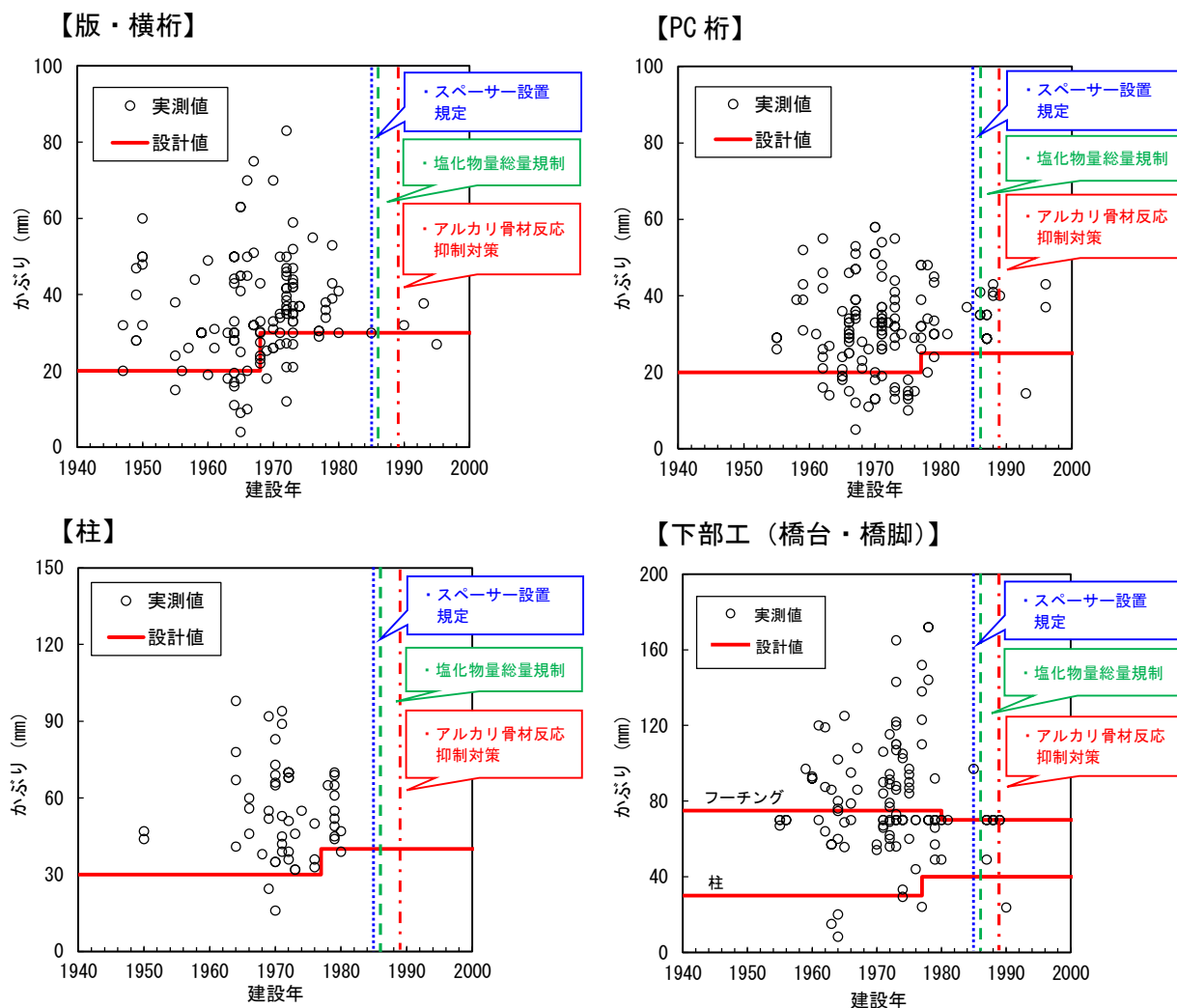


図 3-4 部材ごとの建設年とかぶりの関係

### 3-3-2 かぶりごとの鋼材位置の塩化物イオン濃度と鋼材腐食の関係性

図 3-5 には、かぶりごとの鋼材位置の塩化物イオン濃度と腐食グレードの関係を示す。図 3-5 より、かぶりが 30mm 以下と浅い場合には、水掛かりの有無に関らず鋼材位置の塩化物イオン濃度にばらつきが見られた。今回調査した構造物は、錆汁を伴うひび割れや漏水を伴う貫通ひび割れ、剥離・剥落などの変状が著しく見られる箇所を対象としたことから、鋼材に腐食の見られない腐食グレード I や鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 ( $2.5\text{kg/m}^3$ ) 付近の結果が得られず、明確な傾向は見られなかった。腐食グレード II を見ると  $5.0\text{kg/m}^3$  以上の塩化物イオン濃度が確認された。まず、高濃度となった要因は、環境条件より飛来塩分による影響、凍結防止剤の散布などの外的な要因が考えられ、かぶりが浅い場合にはその影響が顕著に現れたものと

考えられる。また、高濃度であるにも関わらず、腐食が進展していない理由として、腐食には水と酸素が必要であるが、比較的長い間湿潤状態が保たれている構造物では、酸素欠乏により腐食の進展が遅くなったものと考えられる<sup>9)</sup>。次に、かぶりが30-60mmの場合を見ると、全体的に鋼材位置の塩化物イオン濃度が高くなるにつれて、腐食グレードもII, III, IVと高くなる傾向が見られる。かぶり30-60mmの場合も、水掛かりの有無による明確な違いは見られず、水掛かりがない場合でも塩化物イオンが浸透している。腐食グレードIII, IVを見ると、塩化物イオン濃度が $5.0\text{kg/m}^3$ 以上の構造物が数多く見られた。

	飛来塩分の影響	水掛かりの影響	凍結防止剤の影響	鋼材腐食発生限界 塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )
橋梁(版・横桁)	受ける	▲ あり △ なし	受ける 受けない	<div style="border-top: 2px solid red; width: 100px; margin-bottom: 5px;"></div> 1.75~2.50 (普通ポルトランドセメント)
橋梁(PC桁)	受ける	● あり ○ なし	受ける 受けない	
橋梁(BOX:側壁) 橋梁(BOX:頂版)	受ける	■ あり □ なし	受ける※ 受けない※	
樋門・樋管	受けない	◆ あり ◇ なし	受ける 受けない	

※橋梁(BOX:頂版)の水掛かりの影響がある場合は、凍結防止剤の影響を受ける。

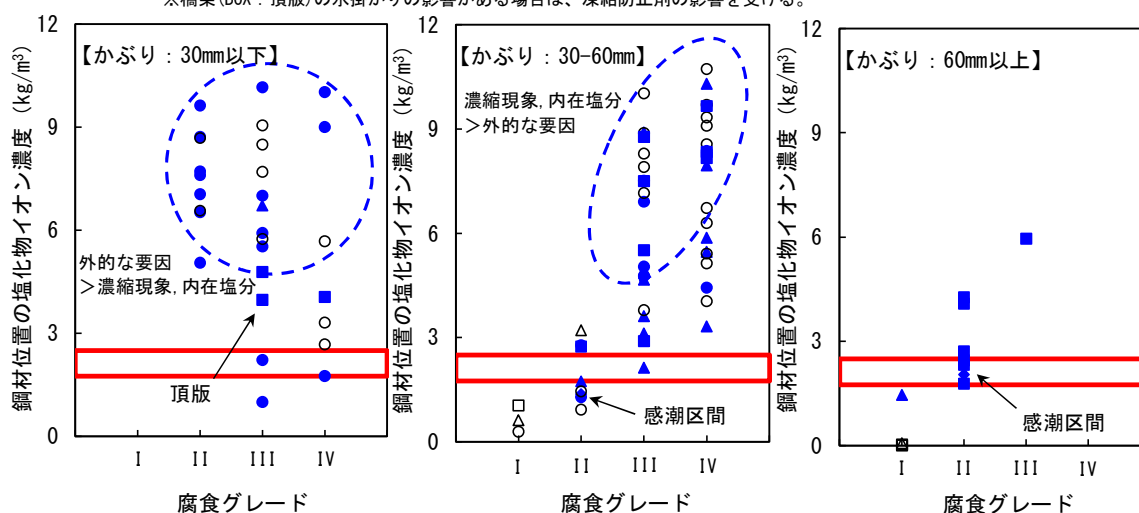


図 3-5 かぶりごとの鋼材位置の塩化物イオン濃度と腐食グレードの関係

図 3-6, 図 3-7 には、高濃度の塩化物イオン濃度を示す構造物の事例として、はつり調査結果の腐食グレード、塩化物イオン分布に、かぶりおよび中性化深さを記載したものを示している。いずれの事例においても飛来塩分による影響を受ける構造物であるが、図 3-6 では中性化による濃縮現象、図 3-7 ではかぶり以深の塩化物イオン濃度でも $2.0\text{kg/m}^3$ 以上を示し、建設年からも塩化物量総量規制前であるため、内在塩分が影響したものと考えられる。一方で、かぶりが60mm 以上の場合、水掛かりのない場合には塩化物イオンは深部まで浸透せず、水掛かりのある場合にのみ腐食グレードII, IIIを示した。

【1973 年竣工】

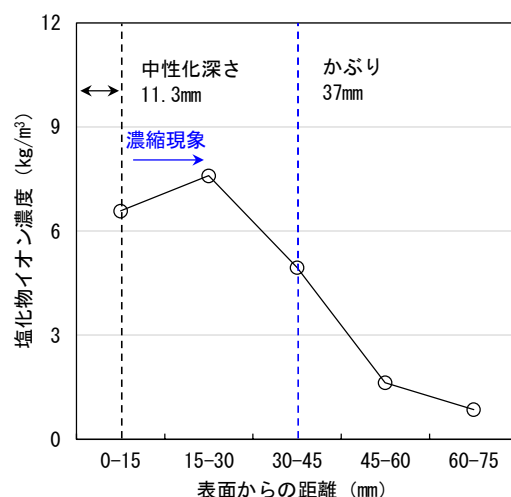
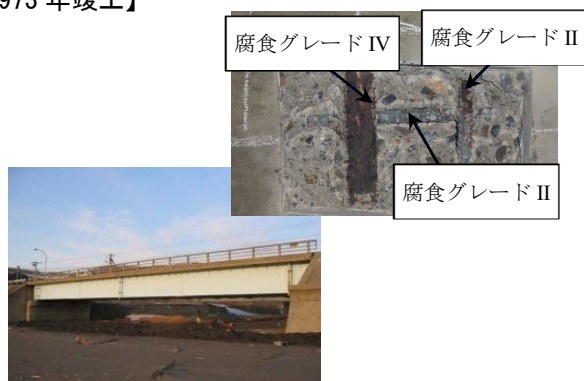


図 3-6 高濃度の塩化物イオン濃度を示す構造物の事例（中性化による濃縮現象）

【1966 年竣工】

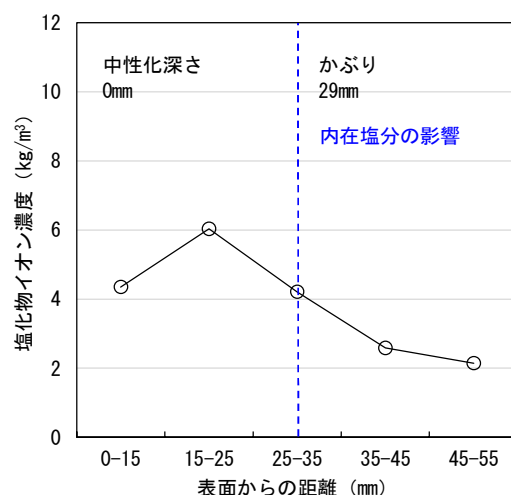


図 3-7 高濃度の塩化物イオン濃度を示す構造物の事例（内在塩分）

ここで、腐食グレードへのかぶりの影響を確認するために、図 3-8 には、図 3-5 のかぶり 30-60mm と 60mm の鋼材位置の塩化物イオン濃度について、かぶりごとのデータを水掛かりの影響の有無で分類して集計し、分類ごとに算出した中央値と腐食グレードの関係を示す。また、コンクリート標準示方書【維持管理編】に規定された普通ポルトランドセメントの鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を  $1.75 \sim 2.50 \text{ kg/m}^3$  を併せて記載する。腐食グレード II を鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度となる時期と同等とみなして見ると、かぶりが 30-60mm の水掛かりありにおける鋼材位置の塩化物イオンは  $1.37 \text{ kg/m}^3$  で、普通ポルトランドセメントの下限值 ( $1.75 \text{ kg/m}^3$ ) よりも小さくなるのに対して、かぶりが 60mm 以上の場合には  $2.39 \text{ kg/m}^3$  を示し、上限値 ( $2.5 \text{ kg/m}^3$ ) と同程度で、かぶりが深い方が鋼材位置の塩化物イオン濃度が高くなっていることが分かる。また、腐食グレード III を見ても、かぶりが深い方が鋼材位置の塩化物イオン濃度が高くなる傾向が見られた。これは、かぶりが深い場合には、かぶりが浅い場合と比べて

鋼材腐食に必要な酸素が欠乏することが要因と考えられる。このことから、かぶりが深い場合には、かぶりが浅い場合と比べて鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度が高くなると推察された。

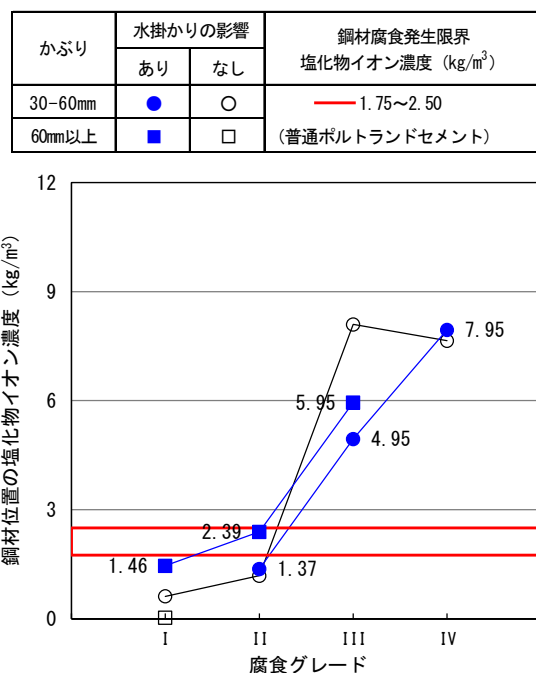


図 3-8 かぶりごとの鋼材位置の塩化物イオン濃度（中央値）と腐食グレードの関係

以上の結果より、鋼材位置の塩化物イオン濃度は、かぶりの影響を受け、特にかぶりの浅い場合には外的からの影響が支配的であるため、塩化物イオン濃度だけでは鋼材腐食の環境を推定することが難しい。一方で、設計上必要な最小かぶりを確保することで、コンクリート標準示方書【維持管理編】に定められている鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度の適用が可能であることが示された。併せて、かぶりごとの鋼材腐食への影響が確認されたことから、かぶりの要素を加味することによって、実構造物の点検・調査業務に有用な鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度の設定が可能となることが示唆された。



### 3-4 まとめ

本章では，以下の知見を得ることができた。

- ・ 1960 年から 1980 年にかけて建設された構造物は，竣工時に設計上必要な最小かぶりが確保されていない構造物は多数見られた。かぶり不足が見られた構造物は，高度経済成長期の施工状況，塩分物量総量規制，アルカリ骨材反応抑制対策の規定などの時代背景を考慮すると，今後鋼材腐食によってコンクリートの剥離・剥落が生じる可能性がある。
- ・ かぶりの浅い場合には外的からの影響が支配的であるため，塩化物イオン濃度だけでは腐食環境を把握することが難しい。
- ・ かぶりが 30mm 以上になると，鋼材位置の塩化物イオン濃度の増加とともに，腐食グレードが高くなる傾向が見られた。
- ・ かぶりが浅い場合と比べて，かぶりが深くなると鋼材腐食に必要な酸素が欠乏し，鋼材位置の塩化物イオン濃度が高くなる傾向が見られた。このことから，かぶりが深い場合は，かぶりの浅い場合と比べて鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度が高くなることが推察された。
- ・ 設計上必要な最小かぶりを確保することで，現行の鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度の算出式の適用が可能である。
- ・ かぶりごとの鋼材腐食への影響が確認されたことから，かぶりを加味することによって，実構造物の点検・調査業務に有用な鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度の設定が可能となることが示唆された。

#### [参考文献]

- 1) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp.144-146，2018.10
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，p.71,2017
- 3) 日本道路協会：コンクリート道路橋施工便覧，1985
- 4) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，p.136，2018.10
- 5) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'19 [基礎編]，p. 190，2019
- 6) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp.113-114
- 7) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：コンクリート橋の塩害対策資料集，pp.173-175，2002.11

- 8) 松下博通：コンクリート構造物の初期欠陥および劣化のメカニズム，安全工学，Vol. 39, No. 4, pp. 234-246, 2000
- 9) 林亮太，櫛原弘貴，添田政司，深見桜：透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および外観変状との関係性に関する研究，土木学会論文集 E2, Vol.76, No.4, pp.332-348, 2020



## 第 4 章 海岸からの距離と表面における塩化物イオン濃度の関係性に関する研究

### 4-1 概説

かぶりが比較的薄い場合は、外的な要因（二酸化炭素の浸透による pH の低下、塩化物イオンの浸透による鋼材腐食）の影響を受けやすいため、かぶりの品質を適切に評価し、維持管理することが重要である。2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】（以下、現行規定と示す）では、類似の環境および構造物の点検結果などが無い場合、既往の研究実績に基づく方法として、飛来塩分の影響の程度および海岸からの距離ごとで表面における塩化物イオン濃度 ( $C_0$ ) が定められている<sup>1)</sup>。この  $C_0$  は、経時的に一定とされ全国調査データと距離減衰の近似式から地域ごとに算出した飛来塩分量を基に換算したものであるが<sup>2)</sup>、実際に実構造物の調査を行うと、実測される  $C_0$  は同一構造物であっても測定箇所（水掛かりの有無）や部位・部材（上部工、下部工）によって大きく乖離が生じているケースが散見される。

そこで、①海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地の構造物、②海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域の構造物に着目した。本研究は、既往の研究実績に基づく方法として類似の環境および構造物の点検結果などが無い場合に用いる現行規定の  $C_0$  に対し実構造物の調査結果が、安全側であるか、あるいは危険側であるのかを部材および水掛かりの有無ごとに海岸からの距離と  $C_0$  の関係性を整理・評価した。

## 4-2 実構造物の調査概要

### 4-2-1 概要

実構造物の調査は、図 4-1～図 4-3 に示す 1950 年～1980 年代に竣工し、いずれも竣工 40 年以上を経過した実構造物として、道路橋および樋門・樋管を対象に塩化物イオン含有量試験を行った。実構造物の区分としては、上部工および下部工で調査結果を整理した。

試料を採取した地域の主な環境条件として、①海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地の構造物から 123 箇所、②海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域の構造物から 26 箇所の合計 149 箇所採取した。

また、鋼材腐食には、水掛かりの影響が大きく影響するため、後述するが地覆、床版下面の水切りの設置の有無、降雨の影響、漏水・漏水跡、潮位の影響を受けるかなどの現地状況を考慮して水掛かりの有無を整理した。水掛かりの影響を受ける橋梁（版・横桁）および橋梁（BOX：頂版）のうち、漏水・漏水跡が見られる場合には、橋面からの凍結防止剤の影響を受けるものと判断して整理した。

【海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地（123 箇所）】

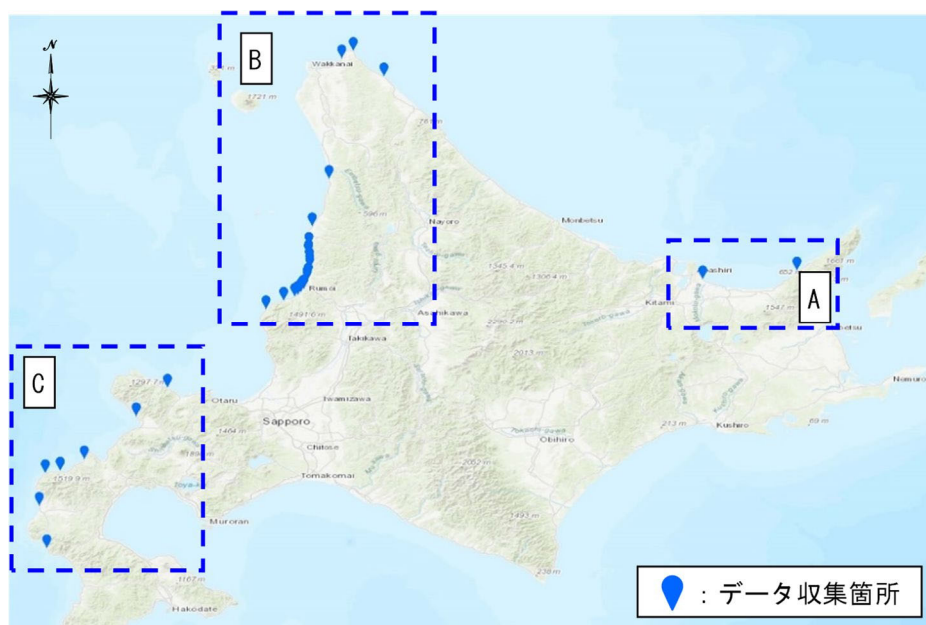


図 4-1 データ収集箇所の位置図（地図情報システムの地図に加筆）

📍 : データ収集箇所

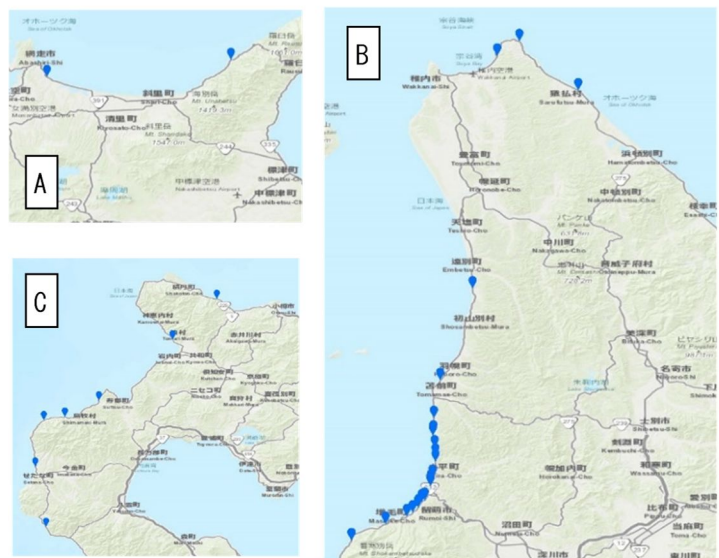


図 4-2 データ収集箇所の位置図（拡大：地図情報システムの地図に加筆）

【海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく  
河川に海水が遡上する地域(26 箇所)】

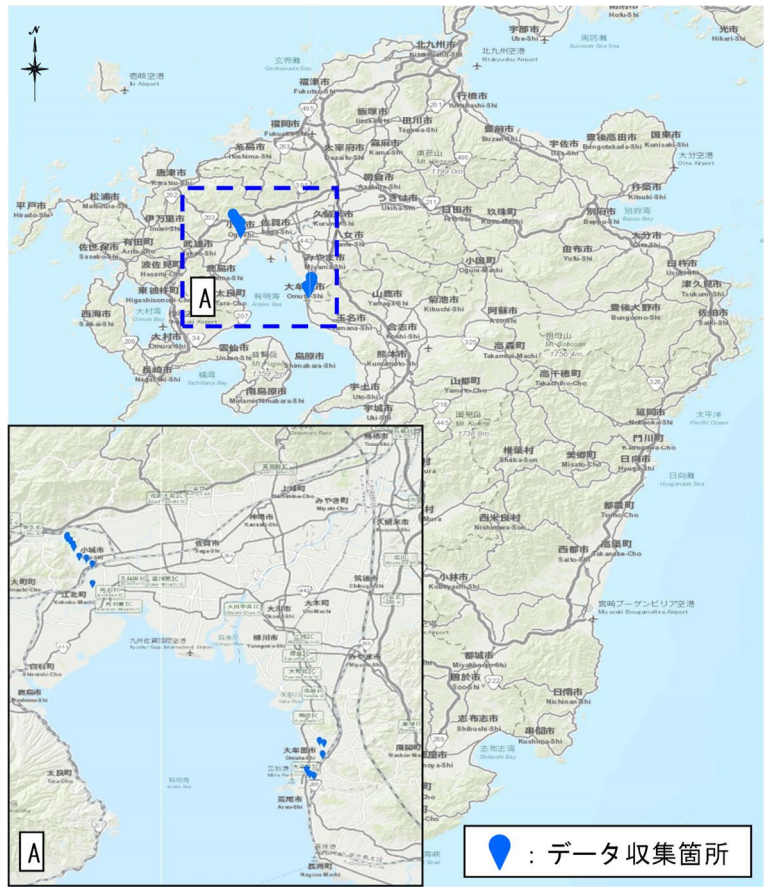


図 4-3 データ収集箇所の位置図（地図情報システムの地図に加筆）

## 4-2-2 調査項目および内容

実構造物から試料を採取し、塩化物イオンの見掛けの拡散係数、 $C_0$ を算出し、その結果と実構造物の海岸からの距離、水掛かりの有無の関係を整理した。

### (1) 塩化物イオン含有量試験（全塩化物イオン濃度）

塩化物イオン濃度は、「第3章」と同様に、ドリル法、あるいは、採取したコア供試体からかぶり深さ方向の試料を採取し、JIS A 1154 : 2020「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、電位差滴定装置により測定した。

### (2) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

かぶり深さごとに得られた全塩化物イオン濃度を基に、JSCE-G572-2010「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に準拠して、Fickの拡散方程式（式(1)）により塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。実構造物における塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出するにあたり、一部の構造物では中性化による塩分の濃縮現象が見られたため、このような環境条件の構造物では、塩化物イオンが濃縮された以深の塩化物イオン濃度分布から算出した。

$$C(x,t) - C_i = C_{0s} \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{0.1 \cdot x}{2 \sqrt{D_{aps} \cdot t}} \right) \quad (1)$$

$C(x,t)$  : 深さ  $x$  (mm)、供用期間  $t$  (年) において測定された塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$C_{0s}$  : 実構造物から採取されたコンクリートの表面における塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$D_{aps}$  : 実構造物から採取されたコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/year)

$C_i$  : 初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

調査結果より得られた塩化物イオンの見掛けの拡散係数 $D_{aps}$ は $D_{ap}$ 、表面における塩化物イオン濃度 $C_{0s}$ は $C_0$ と設定した。

### (3) 表面における塩化物イオン濃度

$C_0$ は、上述した塩化物イオンの見掛けの拡散係数から算出した。調査結果は、海岸からの距離と $C_0$ の関係性を見出すために、調査した構造物を上部工と下部工に分類した。上部工と下部工の区分として、調査対象の実構造物の中でも道路橋の割合が最も多いことから、道路橋の版・横桁、PC桁、樋門・樋管の頂版を上部工、橋台・橋脚、樋門・樋管の側壁を下部工とした。ま

た、塩化物イオン浸透には、水掛かりの有無が大きく影響するため、「第3章」と同様に、地覆、床版下面の水切りの設置の有無、降雨の影響、漏水・漏水跡、潮位の影響を受けるかなどの現地状況を考慮して水掛かりの有無を整理した。なお、調査結果にばらつきが見られたため、ばらつきの見られた結果については、平均値、移動平均をそれぞれ算出した。海岸からの距離と $C_0$ の関係を整理するにあたり、表4-1に示す2018年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】に類似の環境および構造物の点検結果などが無い場合、既往の研究実績に基づく方法として定められた $C_0$ を併せて図示し<sup>1)</sup>、現行規定と実測値を比較した。

表 4-1 表面における塩化物イオン濃度 $C_0$  (kg/m<sup>3</sup>)<sup>1)</sup>

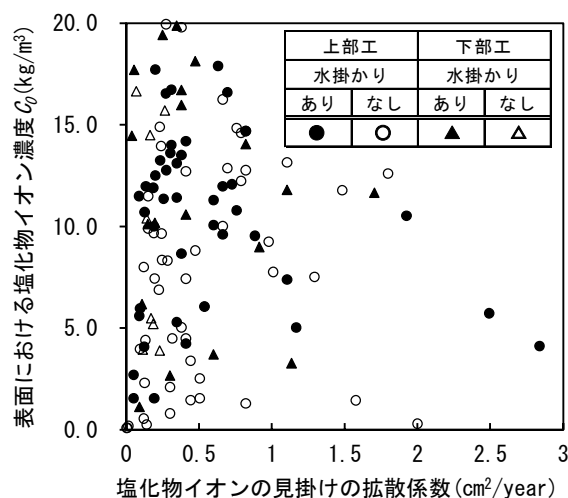
		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			汀線付近	0.1	0.25	0.5	1.0
飛来塩分が多い地域	北海道、東北、北陸、沖縄	13.0	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域	関東、東海、近畿、中国、四国、九州		4.5	2.5	2.0	1.5	1.0

### 4-3 結果および考察

#### 4-3-1 塩化物イオンの見掛けの拡散係数と表面における塩化物イオン濃度の関係

図4-4には、①海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地、②海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域の塩化物イオンの見掛けの拡散係数と $C_0$ の関係をそれぞれ示す。図4-4より、いずれの地域においても全体的にばらつきは見られるものの、上部工の「水掛かりあり」は、「水掛かりなし」よりも $C_0$ が高い傾向が見られる。一方、下部工は水の影響に関係無くばらつきが見られ、塩化物イオンの見掛けの拡散係数と $C_0$ の間に相関性は見られなかった。

【海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地】



【海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域】

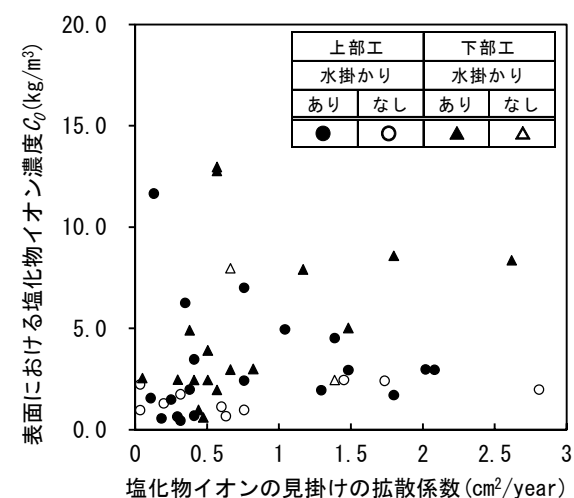


図 4-4 塩化物イオンの見掛けの拡散係数と $C_0$ の関係

## 4-3-2 海岸からの距離と表面における塩化物イオン濃度の関係

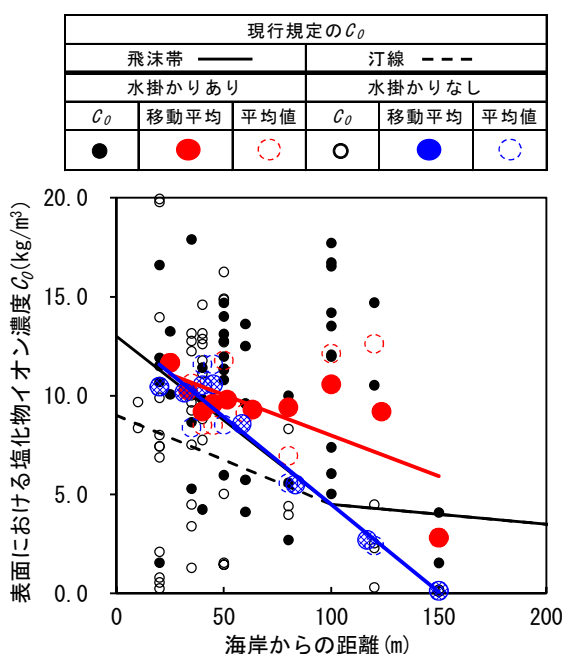
### (1) 上部工における海岸からの距離と表面における塩化物イオン濃度の関係

図 4-5 には、①海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地、②海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域における上部工の海岸からの距離と $C_0$ の関係をそれぞれ示す。

まず、①海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地における上部工の「水掛かりなし」の場合、海岸からの距離が 50m 以内の測定値では、現行規定を上回るような $C_0$ も見られるが、移動平均で見ると概ね海岸から 100m までの範囲では現行規定の $C_0$ と同等の値を示した。さらに、100m 以降になると移動平均は、現行規定の $C_0$ よりも安全側に評価される結果となった。一方の、「水掛かりあり」の場合の移動平均は、現行規定以上の値を示した。特に、海岸から 75m ～125m の範囲では、移動平均と現行規定の乖離が大きくなった。これは、凍結防止剤の散布が必要な地域であることから、凍結防止剤の影響により現行規定の $C_0$ より大きく、危険側に評価されるものと考えられる。

次に、②海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域の調査箇所数は少ないものの、海岸からの距離が 500m 以内の $C_0$ は現行規定よりも小さくなり安全側であった。一方で、海水の遡上により塩化物イオンが運ばれ、海岸からの距離が 2,000m と内陸部に位置する場合でも $C_0$ が確認された。

【海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地】



【海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域】

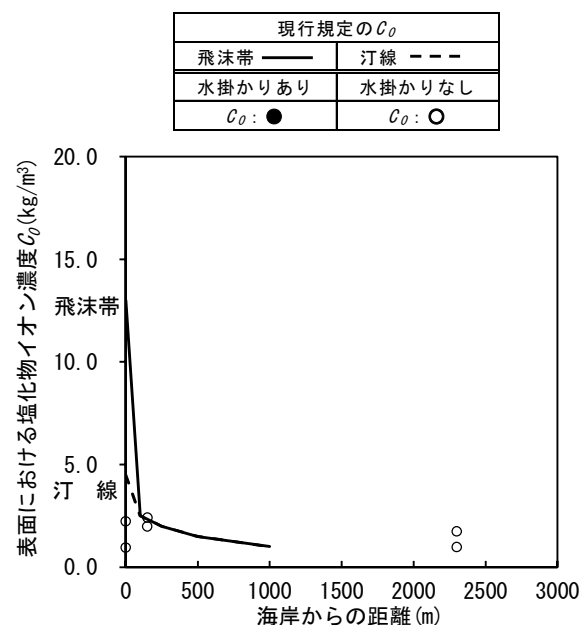


図 4-5 海岸からの距離と $C_0$ の関係（上部工）



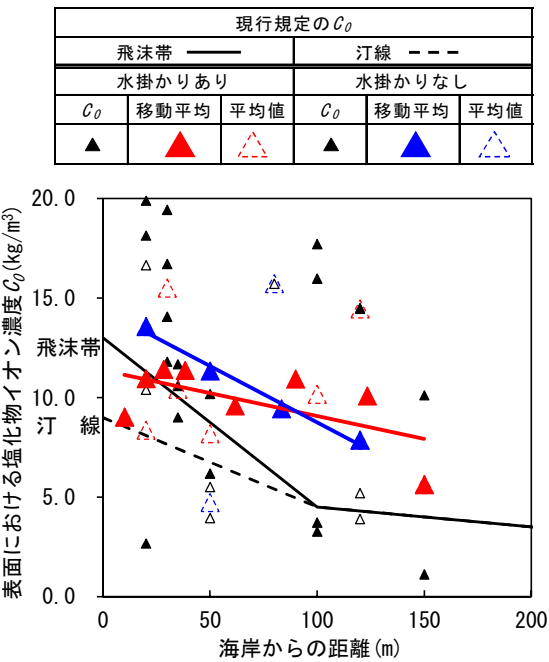
(2) 下部工における海岸からの距離と表面における塩化物イオン濃度の関係

図 4-6 には、①海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地、②海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域における下部工における海岸からの距離と $C_0$ の関係を示す。

まず、①海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地における下部工の関係性は、上部工の様な水掛かりの有無による違いは見られず、移動平均はいずれも現行規定の $C_0$ よりも高く危険側となる結果を示した。これは、飛来塩分や海水の潮汐の影響だけでなく、上部工からの漏水などで、上部工に散布される凍結防止剤が運ばれた可能性が考えられる。

一方の、②海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域における下部工の結果を見ると、海岸からの距離が 1,000m 以上の内陸部の箇所では現行規定の $C_0$ よりも測定値は高く、危険側に評価される結果を示した。これは、調査した実構造物の地域特性として海水が河川を遡上する感潮区間であることが要因として考えられ<sup>3)</sup>、図 4-5 の結果と比較すると、上部工よりも下部工の方が感潮区間による影響が大きいことが分かる。

【海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地】



【海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく河川に海水が遡上する地域】

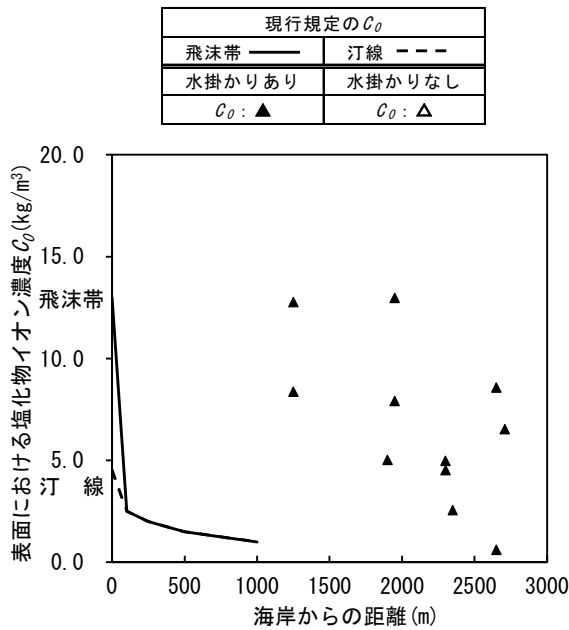


図 4-6 海岸からの距離と $C_0$ の関係（下部工）

以上の結果より、①海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地の構造物における上部工の「水掛かりなし」の 100m 未満の場合は、現行規定と同等、100m 以上の場合は、現行規定より小さく安全側と評価される。上部工の「水掛かりあり」では、全体的に現行規定よりも高く、危険側に評価されるため、凍結防止剤の影響を考慮した高い $C_0$ の設定が必要である。

下部工では、水掛かりの有無に関わらず、全体的に現行規定よりも高く、危険側に評価されている。

一方、②海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく、河川に海水が遡上する地域の構造物のうち、海岸沿いにおける上部工の「水掛かりなし」の場合は、現行規定より安全側と評価される。ただし、内陸部の場合でも感潮区間における海水の遡上の影響がある。下部工の「水掛かりあり」では、内陸部において全体的に現行規定よりも高く、危険側に評価されるため、海水の遡上する感潮区間ではその影響を考慮した高い $C_0$ の設定が必要である。

#### 4-4 まとめ

本章では、以下の知見を得ることができた。

##### 【海岸沿いに位置し、凍結防止剤の散布が必要な寒冷地の構造物】

- ・ 上部工の「水掛かりなし」の 100m 未満の場合は、現行規定と同等、100m 以上の場合は、現行規定より小さく安全側と評価される。
- ・ 上部工の「水掛かりあり」では、全体的に現行規定よりも高く、危険側に評価されるため、凍結防止剤の影響を考慮した高い $C_0$ の設定が必要である。
- ・ 下部工では、水掛かりの有無に関わらず、全体的に現行規定よりも高く、危険側に評価されている。

##### 【海岸沿いあるいは内陸部に位置し、大潮時と干潮時の潮位差が大きく

河川に海水が遡上する地域の構造物】

- ・ 海岸沿いにおける上部工の「水掛かりなし」の場合は、現行規定より安全側と評価される。ただし、内陸部の場合でも感潮区間における海水の遡上の影響がある。
- ・ 下部工の「水掛かりあり」では、内陸部において全体的に現行規定よりも高く、危険側に評価されるため、海水の遡上する感潮区間ではその影響を考慮した高い $C_0$ の設定が必要である。

#### 【参考文献】

- 1) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp.140-144
- 2) コンクリート工学：土木学会「2012 年制定コンクリート標準示方書[設計編]」の塩害照査に関する改定資料，pp.510-518，2014



- 3) 林亮太，櫛原弘貴，添田政司，深見桜：透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および外観変状との関係性に関する研究，土木学会論文集 E2, Vol.76, No.4, pp.332-348, 2020

## 第 5 章 透気係数による鋼材腐食に影響を及ぼす物質移動抵抗性評価, 鋼材腐食抵抗性に関する研究

### 5-1 概説

実構造物は様々な環境下に晒されており、例えば塩害環境下の場合、飛来塩分や潮汐の影響によって塩化物イオンが供給されて不動態被膜を破壊し、さらにコンクリート中に浸透することで鋼材の腐食を助長させ、錆汁を伴うひび割れ、あるいは、剥離・剥落が生じる事例などが報告されている。また、降雨の影響や潮汐の影響を受ける飛沫帯、干満帯は、乾湿の繰返しによって塩害だけでなく、中性化との複合劣化によって鋼材が著しく腐食し、コンクリートの剥離・剥落を伴う場合もある。現在、上記のような環境下の構造物において、定期点検の結果、腐食ひび割れの発生や錆汁、剥離が生じて外観に変状が確認され、コンクリートの中の鋼材が著しく腐食していると想定される場合は、詳細調査を実施して劣化因子の推定や腐食グレードを適切に把握して対策を行うことが求められている。近年では、コンクリート構造物の表層品質を把握する手法として、コンクリートの透気性に着目したドリル採孔法 (FIM 法)、シングルチャンバー法 (SCM 法)、ダブルチャンバー法 (トレント法) などの非破壊、微破壊試験が提案され、研究が行われてきている<sup>1)~7)</sup>。これらの試験方法で計測した透気係数と物質移動抵抗性との関係性が得られることが期待されている。中でも、ダブルチャンバー法による透気係数と中性化の関係性は、ある程度の相関性が確認されており<sup>8), 9), 10)</sup>、コンクリートの表層における物質移動抵抗性を把握する指標として期待されている。現状としては、竣工時における耐久性評価に関するものが多く<sup>11), 12)</sup>、曝露供試体での検討では、雨水の影響により表層透気係数が経年変化を示すことも報告されている<sup>13)</sup>。その他にも、測定位置における表層コンクリートの含水状態や、コンクリート素地の凹凸が測定結果に大きく影響を与えることが報告されており<sup>14)</sup>、実構造物に対する適用性は、今のところ難しいのが現状である。さらに最近では、中性化以外にもダブルチャンバー法による表層透気係数と塩化物イオン浸透との関係性についても検討が行われているが、室内試験においては関係性が見出せるものの、実構造物になると塩化物イオンに対する抵抗性を評価するのはやはり難しい様である<sup>15)</sup>。

一方、各種環境下における実構造物を調査すると、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を大幅に超えているにも関わらず、腐食の発生が確認されないケースや、中性化残りが 10mm 以下、あるいは、鋼材近傍よりも深く中性化が進行しているにも関わらず、腐食が発生していないケースが散見されている。現在の点検技術などではこのようなケースにおける腐食グレードや将来の鋼材腐食の進行予測が難しく、今後の長寿命化対策を適切に適用していくことが難しい状況にある。

そこで著者らは、既存のコンクリートの劣化因子に対する抵抗性を評価する際、これまでに圧縮強度試験用のコアを用いた加圧法による透気係数の測定に着目してきている<sup>16)~20)</sup>。圧縮強度用のコアを用いた加圧法を採用することで、鋼材近傍までのコンクリート品質を評価できるため、非破壊試験による透気係数と比べてコンクリート表面の含水状態の影響を受けにくく、さらに表面の凹凸の影響を受けない計測が可能となる。また、鋼材の腐食発生（腐食生成物の生成）やその進行は、鋼材位置の劣化因子（塩化物イオンの含有量、二酸化炭素の浸入に伴う pH 値の低下）や相対湿度、酸素供給によって決定される<sup>20), 21), 22)</sup>。一方の透気係数は、空気の透過性を測定するものであるが、この透気係数は物質移動抵抗性以外にも相対湿度の影響を受けるため、透気係数と腐食の発生、さらには腐食の進行程度とも関係性が得られると思われる。そのため、透気係数による物質移動抵抗性の評価に留まらず、今後腐食が進展する腐食環境なのか否かなどの情報も同時に取得できる可能性があり、採取したコアから可能な限り多くの情報を取得できれば、点検や維持管理の負荷を低減することに繋がる。しかしながら、室内試験においてセメント種類、養生条件などを考慮した加圧法による透気係数と中性化速度係数との相関性や実効拡散係数との空隙径などの類似の知見が得られているものの<sup>18), 19)</sup>、複合劣化している実構造物における透気係数と物質移動抵抗性との関係性については、未だ検討を行っていない。また、透気係数を用いて実構造物における鋼材腐食の評価などに関する知見も得られていないのが現状である。

そこで本研究は、まず初めに中性化および塩害により損傷を受けた実構造物の状況を把握することを目的として、著者らが透気係数に着目する以前に実施してきた九州地区の様々な環境下の実構造物を対象に、コンクリート品質試験、腐食グレードの結果を整理した。また、2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】では、中性化と鋼材腐食の間に水掛かりの有無が大きく影響するため、構造物表面の水掛かりの区分が追加されたことも考慮して<sup>23), 24)</sup>、水掛かりの有無による違いについても整理し、実構造物の状況を把握した。

次に、室内実験により作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体における透気係数と各種物質移動抵抗性の関係性を明らかにして、実構造物への適用性を明らかにした。

さらには、透気係数による鋼材腐食の評価の可否を確認するために、腐食電流密度、相対湿度、可溶性塩化物イオン濃度、腐食重量の関係性を明らかにした後で、透気係数と腐食電流密度の関係性を明らかにして関係式を導き出した。この関係式を用いて、実構造物のコア供試体から計測した透気係数を基に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合するこ

とで関係式の有用性を確認するとともに、鋼材の腐食抵抗性に関する検討についても行った。

## 5-2 実構造物の物質移動抵抗性および外観変状の関係性

### 5-2-1 実構造物の調査概要

実構造物の調査は、図 5-1、図 5-2 に示す九州地区の延べ 377 箇所の実構造物を対象にコンクリート品質試験を実施した。そのうち、はつり調査を実施、もしくは、データを収集できた構造物は、腐食グレードについても整理した。調査箇所は、九州を 3 つに区分し、主に A：福岡・佐賀県内、B：熊本県内、C：鹿児島・宮崎県内を対象に実施した。



図 5-1 データ収集箇所の位置図（地図情報システムの地図に加筆）



図 5-2 データ収集箇所の位置図（拡大：地図情報システムの地図に加筆）

実構造物の諸元は、河川・水路・道路・線路などを跨ぐ道路橋（ボックスカルバートも含む。以下、BOX と示す。）、樋門・樋管（感潮区間も含む）、沿岸部の護岸である。構造物の環境条件は、一般環境、大潮時と干潮時の潮位差の大きく河川に海水が遡上する地域（感潮区間）など様々である。また、鋼材腐食には、水掛かりの影響が大きく影響するため、「第 3 章」と同様に、地覆、床版下面の水切りの設置の有無、降雨の影響、漏水・漏水跡、潮位の影響を受けるかなどの現地状況を考慮して整理した。

## 5-2-2 調査項目および内容

調査では、圧縮強度試験（コア法による圧縮強度、リバウンドハンマーを用いたコンクリートの反発度による推定圧縮強度）、中性化試験、塩化物イオン含有量試験を実施した。また、調査箇所は限定されるが、はつり調査を実施できた場合は、「第3章」と同様に、電動ピックで鋼材を露出させ、腐食グレード<sup>25)</sup>、<sup>26)</sup>を整理した。さらに、塩化物イオン浸透には水掛かりの有無が大きく影響するため、水掛かりの有無を整理した。

### (1) コア法による圧縮強度

構造物ごとの管理者における判断により調査項目は異なるが、コア法による圧縮強度に用いたコアは、実構造物からφ50mm～φ100mm程度を採取し、JIS A 1108 : 2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」に基づき、このコアを用いて圧縮強度を算出した。

#### 【圧縮強度試験の測定手順】

- 1) 供試体の成形面を研磨した後、上部、中部、下部の直径、高さおよび重量を測定する。
- 2) 供試体の上下端面および上下の加圧版の圧縮面を清掃する。
- 3) 供試体を、供試体直径の1%の誤差で、その中心軸が加圧版の中心と一致するように設置する。
- 4) 供試体に衝撃を与えないように、一様な速度で荷重を加える。荷重を加える速度は、圧縮応力度の増加が毎秒 $0.6 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2$ になるようにする。
- 5) 供試体が破壊するまでに試験機（写真 5-1）が示す最大荷重を有効数字3桁まで読み取る。その後、圧縮強度を式(1)、(2)より算出し、JIS Z 8401に基づき有効数字3桁にする。

$$d = \frac{(d_1 + d_2 \cdot \cdot \cdot + d_x)}{x} \quad (1)$$

$d$  : 供試体の直径 (mm)

$d_1 + d_2 \cdot \cdot \cdot + d_x$  : 方向の直径 (mm)

$$F_c = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (2)$$

$F_c$  : 圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )

$P$  : 最大荷重 (N)



写真 5-1 圧縮強度試験の状況

(2) リバウンドハンマーを用いたコンクリートの反発度による推定圧縮強度

反発度法は、JIS A 1155 : 2012「コンクリートの反発度の測定方法」に準拠してコンクリート表面をリバウンドハンマーで打撃し（写真 5-2）、その反発度から日本材料学会式による式(3)を用いて圧縮強度を推定した。また、実構造物の試験箇所は部材ごとで異なるため、各試験位置に応じて角度補正を行った（図 5-3）。なお、既設の実構造物を対象として行っているため、材齢補正はないものとし、水掛かりの有無で乾湿による補正（測定面が気乾の場合：0，測定面が湿っており、打撃の跡が黒点になる場合：3，測定面が濡れている場合：5 をそれぞれ反発度に加える）を行っている（表 5-1，表 5-2）<sup>27)</sup>。

$$F_c = -18.0 + 1.27R \quad (3)$$

$F_c$ ：推定圧縮強度（N/mm<sup>2</sup>）

$R$ ：反発度



写真 5-2 リバウンドハンマーの実施状況



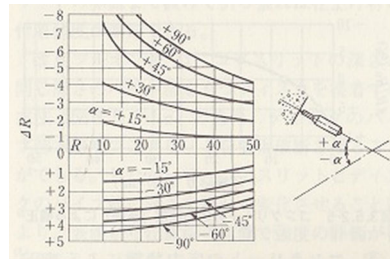


図 5-3 角度による補正<sup>27)</sup>

表 5-1 材齢補正方法の事例<sup>27)</sup>

区分	補正係数
材齢10日で試験を行う場合	1.55
材齢20日で試験を行う場合	1.12
材齢28日から，材齢91日に試験を行う場合	補正なし
材齢92日以降に試験を行う場合	補正なし

表 5-2 コンクリート表面の乾湿による補正の例<sup>27)</sup>

測定面が気乾の場合	補正なし
測定面が湿っており打撃の後が黒点になる場合	反発度に3を加える
測定面が濡れている場合	反発度に5を加える

### (3) 中性化試験

中性化深さは，ドリル法，あるいは，採取したコア供試体を割裂させ，JIS A 1152 : 2018「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し，フェノールフタレイン液を噴霧して，呈色反応により測定した（写真 5-3）。その後，測定した中性化深さから式(4)により中性化速度係数を算出した。なお，中性化と水掛かりの有無の関係性は，これまで数多く報告され<sup>28), 29), 30)</sup>，2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】では，構造物表面の水掛かりの区分により，水掛かりがなく常時乾燥する部位では鋼材腐食の可能性は低いと判断してよいと規定されている<sup>23)</sup>。本研究の調査結果についても，中性化と鋼材腐食の関係性において水掛かりによる影響を評価するため，「第 3 章」と同様に，地覆，床版下面の水切りの設置の有無，降雨の影響，漏水・漏水跡，潮位の影響を受けるかなどの現地状況を考慮して水掛かりの有無を整理した。

$$y = b\sqrt{t} \quad (4)$$

$y$  : 中性化深さ (mm)

$t$  : 中性化期間 (年)

$b$  : 中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{year}}$ )





(1) ドリル法による中性化試験



(2) コア法による中性化試験

写真 5-3 中性化試験状況

#### (4) 塩化物イオン含有量試験（全塩化物イオン濃度）

塩化物イオン濃度は、「第 3 章」，「第 4 章」と同様に，ドリル法，あるいは，採取したコア供試体により試料を採取し，JIS A 1154：2020「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，電位差滴定装置により測定した。

#### (5) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

「第 4 章」と同様に，かぶり深さごとに得られた全塩化物イオン濃度を基に，JSCE-G572-2010「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に準拠して，Fick の拡散方程式により塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。

#### (6) はつり調査（腐食グレード）

はつり調査は、「第 3 章」と同様に，錆汁を伴うひび割れや漏水を伴う貫通ひび割れ，剥離・剥落などの変状が著しく見られる箇所において，はつり調査による腐食グレードの評価を実施した。なお，外観上コンクリート表面に変状が顕著に現れていない場合は，管理者の方針としてコンクリート内部の鋼材腐食を確認するまでに至らないケースもあった。

本調査では，これまで水掛かりのない箇所では中性化残り 10mm 以下であっても変状が見られていない場合<sup>31)・32)</sup>や鋼材位置の塩化物イオン濃度が普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートにおいて鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度  $1.2\text{kg/m}^3 \sim 2.5\text{kg/m}^3$  以上の混入がある場合でも，鋼材腐食が顕著に現れていない場合なども報告されている<sup>33)・34)</sup>。このような外観に変状が現れていないことで，はつり調査による腐食グレードの評価を実施していない構造物については，外観変状なしとして処理（表 5-3）し，その他，腐食グレードの評価を実施したものは，腐食グレード（I，II，III，IV）<sup>25)・26)</sup>として結果を整理した。

表 5-3 外観の状態および腐食のグレードと鋼材の状態 <sup>25)</sup> , <sup>26)</sup>

外観の状態	
外観変状なし	変状がコンクリート表面に顕著に現れていない，軽微な損傷，あるいは，調査項目になく，はつり調査による鉄筋腐食度の評価を実施していない構造物である。
腐食グレード	鋼材の状態
I	黒皮の状態，または錆は生じているが全体的に薄い緻密なさびであり，コンクリート面にさびが付着していることはない。
II	部分的に浮きさびがあるが，小面積の斑点状である。
III	断面欠損は目視観察では認められないが，鋼材の全周または全長にわたって浮き錆が生じている。
IV	断面欠損を生じている。

#### (7) 鋼材腐食の開始時期

各劣化機構における鋼材腐食時期は，塩害では鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 $C_{lim}$ ，中性化では中性化残りが定められている <sup>35)</sup>。本項では，以下に定める鋼材腐食時期を目安に考察を行った。

##### 1) 鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度

鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度 ( $C_{lim}$ ) は，2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】において類似の構造物の実測結果や試験結果を参考に定めることされていたが，これらによらない場合では  $1.2\text{kg/m}^3$  を目安に用いられてきた <sup>36)</sup>。本項では，腐食開始の判定基準として，鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  を目安に調査結果の判定を行った。

##### 2) 中性化残り 10mm

一般的な水掛かり的环境下では，腐食開始の判定は中性化残り 10mm としてよいとされており <sup>35)</sup>，本項では，腐食開始の判定基準として，中性化残り 10mm と設定して調査結果の判定を行った。

### 5-2-3 結果および考察

#### (1) 建設年ごとの圧縮強度, 中性化速度係数, 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

##### 1) 建設年とコア法による圧縮強度, 反発度法による推定圧縮強度の関係

図 5-4, 図 5-5 には, 建設年とコア法による圧縮強度, 反発度法による推定圧縮強度の関係を示す。図 5-4 より, コア法による圧縮強度試験結果と建設年の関係性は, ばらつきが大きいものの, 1960 年以降から近年にかけて圧縮強度が大きくなる傾向を示した。

一方, 図 5-5 より, 反発度法による推定圧縮強度では, 上部工, 下部工に関らず, ばらつきも大きく, 建設年と圧縮強度の間に相関は見られなかった。また, 反発度法による推定圧縮強度の水掛かりの有無では, 「水掛かりあり」の方が「水掛かりなし」と比べて推定圧縮強度が小さい傾向が見られた。反発度は表面数ミリのコンクリートの状態に依存するため<sup>37)</sup>, 50 年程度を経過した構造物では, 水掛かりの有無によって, コンクリートの表層部の経年劣化の程度が異なるため, 水掛かりがある場合の表面部と内部の品質に差異が生じていたものと考えられる。

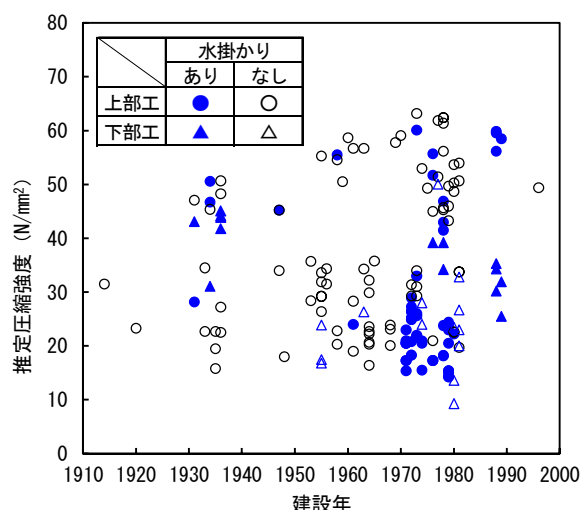
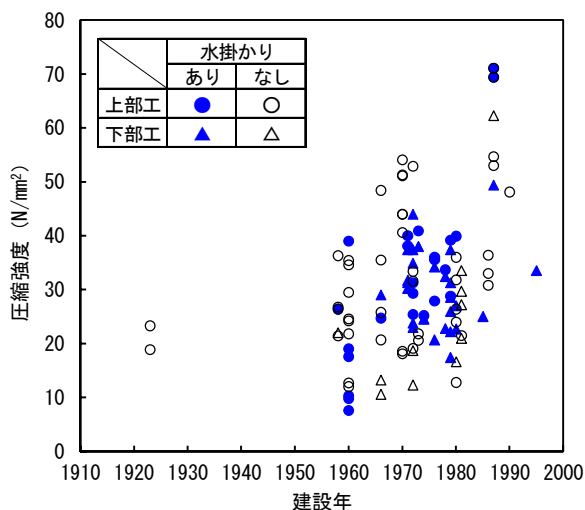


図 5-4 建設年と圧縮強度（コア法）の関係      図 5-5 建設年と推定圧縮強度（反発度法）の関係

##### 2) 建設年と中性化速度係数, 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

図 5-6, 図 5-7 には, 建設年と中性化速度係数, 塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係をそれぞれ示す。図 5-6 より, 錆汁を伴うひび割れや漏水を伴う貫通ひび割れ, 剥離・剥落などの変状が著しく見られて調査を行った構造物は, 1950 年代から 1980 年代に建設され竣工した構造物に集中しており, 各部材に関らず中性化速度係数はばらつく結果を示した。この時代の背景として, ポンプ車が急速に普及しており, 同時期に建設された構造物はフレッシュコンクリートの圧送性確保を目的として加水されていた可能性が指摘されている<sup>38)</sup>。この加水により当初設計で想定した水セメント比よりも大きくなったことや, 材料分離抵抗性が低下して分離しやすいコンクリートとなった可能性もあり, 現場練り（手練り, 機械練り）で施工されたもの

と比べてコンクリートの初期品質が十分に確保できていなかったことが要因と考えられる。さらに、調査した九州地区におけるこの時代の構造物の使用セメントとして、上部工には普通ポルトランドセメントが使用され、1975 年以降になると下部工には、国土交通省九州地方整備局関連工事において高炉セメントが使用され始めている。その数年後には、地方自治体（九州地区）の下部工にも高炉セメントが使用され始めている。1975 年以前の中には普通ポルトランドセメントで建設されたと思われる下部工でも、中性化速度係数が高いものも散見されるが、1975 年以降に建設された下部工の中性化速度係数は近年になるにしたがって同年の上部工よりも高い傾向にあり、高炉セメントの使用され始めた時期と一致していることが分かる。また、竣工当時の配合における水セメント比は不明であるが、中性化速度係数が高くなる要因として水掛かりの有無が影響しており、特に上部工で中性化速度係数が高いのは、「水掛かりなし」に多く見られる。「水掛かりあり」の中性化速度係数は、「水掛かりなし」よりも小さくなる傾向にある。これは、水の供給によって相対湿度が比較的に高く保たれる期間が存在するため、二酸化炭素が浸入し難くなったことが影響していると考えられ、松田らの結果<sup>30)</sup>と同様の傾向を確認することができた。

図 5-7 より、1930 年代から 1950 年代に建設された構造物の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、1960 年代から 1980 年代に建設された構造物の塩化物イオンの見掛けの拡散係数にばらつきは見られるものの、全体的に小さくなっている。これは前述したように、現場練り（手練り、機械練り）で施工された 1930 年代から 1950 年代の構造物と比べて、コンクリートの初期品質が十分に確保できていなかったことが要因と考えられる。

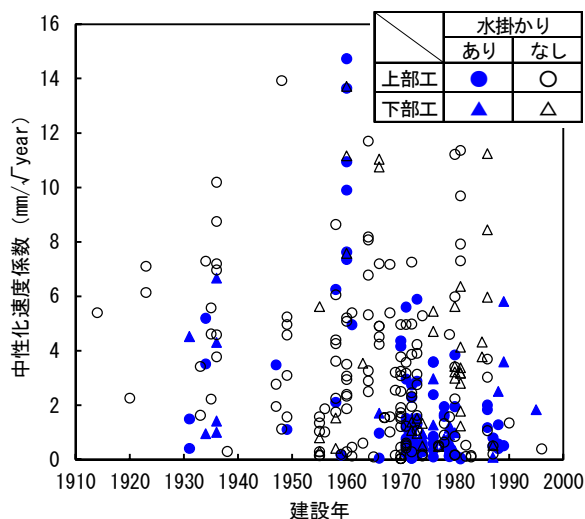


図 5-6 建設年と中性化速度係数の関係

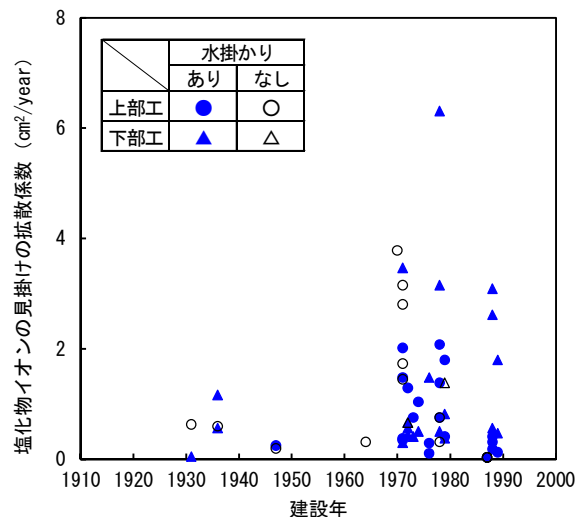


図 5-7 建設年と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

(2) 圧縮強度、推定圧縮強度と中性化速度係数、塩化物イオンの見掛けの拡散係数

1) 圧縮強度、推定圧縮強度と中性化速度係数の関係

図 5-8、図 5-9 には、コア法による圧縮強度、反発度法による推定圧縮強度と中性化速度係数の関係をそれぞれ示す。図 5-8 より、コア法による圧縮強度結果と中性化速度係数の関係では、ばらつきが大きいですが、全体的な傾向として見ると圧縮強度が高いものほど中性化速度係数は小さくなっている。圧縮強度が  $40\text{N/mm}^2$  を超えるものになると、その大半が中性化速度係数  $2.0\text{mm}/\sqrt{\text{year}}$  以下である。100 年経過した場合でも中性化深さは、20mm 程度であることから、かぶりが確保されている場合には、中性化によってコンクリート中の鋼材腐食は生じず、コンクリートの剝離・剝落が生じる可能性は低いと言える。また、水掛かりの有無について見ると、「水掛かりあり」の中性化速度係数は、同圧縮強度において、「水掛かりなし」よりも小さいことが分かる。上述したように、長期的な含水状態の違いが中性化の進行に大きく影響を与えていることが分かる。一方の、図 5-9 の反発度法による推定圧縮強度と中性化速度係数の関係性は、コア法による圧縮強度の結果よりもばらつきが大きくなっており、相関を確認することはできなかった。これは、斯波らの研究から、反発度は表面から数ミリのコンクリートの状態に左右され<sup>37)</sup>、中性化による影響や水掛かりの有無、部材に関係なく推定圧縮強度のばらつきが大きくなったものと考えられる。

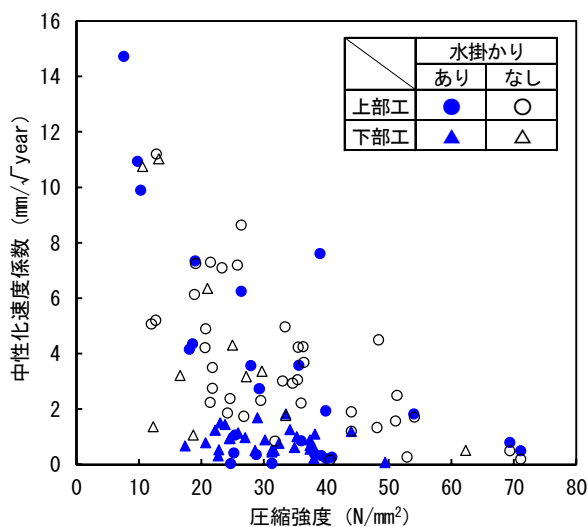


図 5-8 圧縮強度（コア法）と中性化速度係数の関係

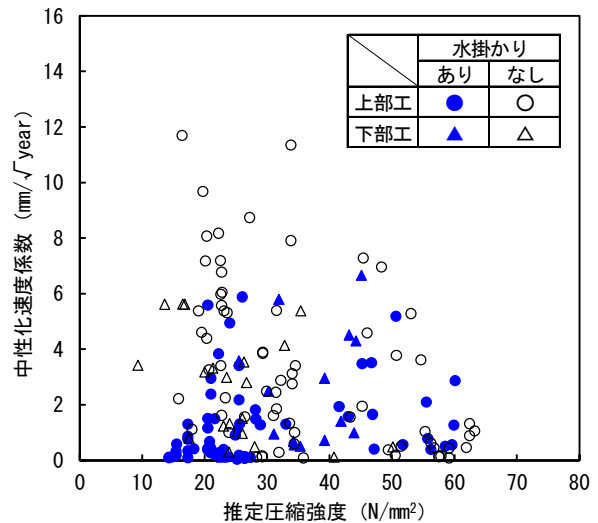


図 5-9 圧縮強度（反発度法）と中性化速度係数の関係

## 2) 圧縮強度，推定圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

図 5-10, 図 5-11 には，コア法による圧縮強度，反発度法による推定圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係をそれぞれ示す。図 5-10 より，塩化物イオンの見掛けの拡散係数との関係における計測点数は少ないが，傾向として圧縮強度が同程度の場合に塩化物イオンの見掛けの拡散係数は，下部工の方が上部工に比べると小さいことが分かる。後述するが，表面における塩化物イオン濃度 ( $C_0$ ) は，上部工よりも下部工の方が大きくなる傾向を示していることから，下部工には高炉セメントが使用されていると推察され，その結果，上部工よりも塩化物イオンに対する抵抗性が得られていると考えられた。図 5-11 の反発度法による推定圧縮強度では，図 5-9 の中性化速度係数との関係と同様に，塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係性を確認できなかった。

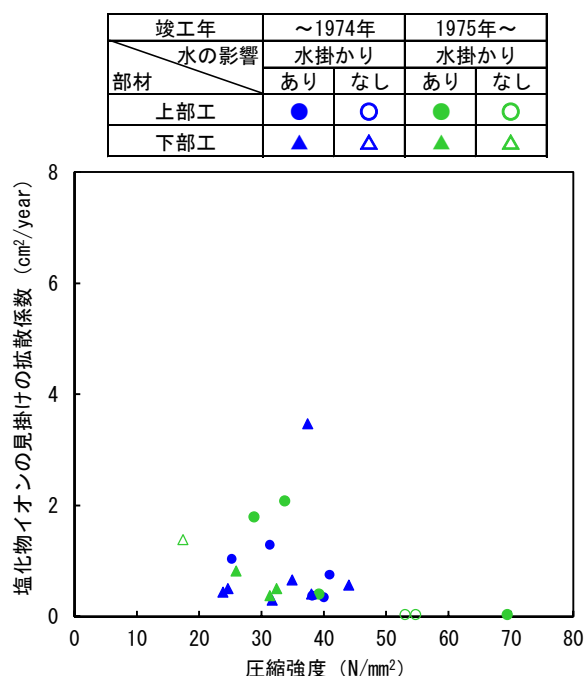


図 5-10 圧縮強度（コア法）と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

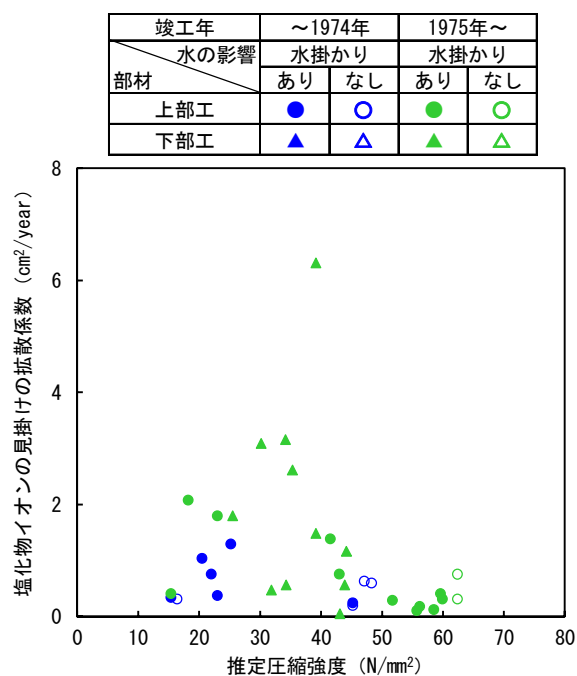


図 5-11 圧縮強度（反発度法）と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

(3) 海岸からの距離と塩化物イオンの見掛けの拡散係数、表面における塩化物イオン濃度

図 5-12 には、竣工 1974 年までの構造物の海岸からの距離と実構造物における塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ( $D_{aps}$ )、表面における塩化物イオン濃度 ( $C_0$ ) の関係、図 5-13 には、竣工 1975 年以降の構造物の海岸からの距離と実構造物における塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ( $D_{aps}$ )、表面における塩化物イオン濃度 ( $C_0$ ) の関係を示す。まず、図 5-12 より、塩化物イオンは、河口部付近だけでなく、塩害の影響を受けにくいと区分される地域についても確認され<sup>39)</sup>、図 5-13 でも同様の結果が見られた。これは、今回の調査箇所の中に、有明海に流下する六角川水系の湾奥部の構造物も含まれており、日本の中でも有明海沿岸は大潮時と干潮時との潮位差の大きい地域で、六角川水系の感潮区間は約 29km である<sup>40)</sup>。また、塩化物イオン分布より、深部で塩化物イオンが確認されなかったことから、海水が河口部から河川を遡上し、塩化物イオンが供給されていると考えられる<sup>41)</sup>。そのため、塩害の影響を受けにくいと区分される地域であっても、海水の遡上により塩化物イオンが供給される地域特性が存在していることが確認された。中には、内陸部の山間部などでは凍結防止剤の散布も要因として考えられる。次に、図 5-12 および図 5-13 より、塩化物イオンの見掛けの拡散係数から算出した  $C_0$  を見ると、下部工ではいずれも海岸からの距離が長くなるに従って低下する結果であったのに対し、上部工では海岸からの距離に伴う違いは見られなかった。特に、図 5-13 より 1975 年以降、下部工には高炉セメントが使用されたことで、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は上部工と比べて小さくなり、下部工の  $C_0$  は上部工と比べて高い傾向が顕著に見られている。

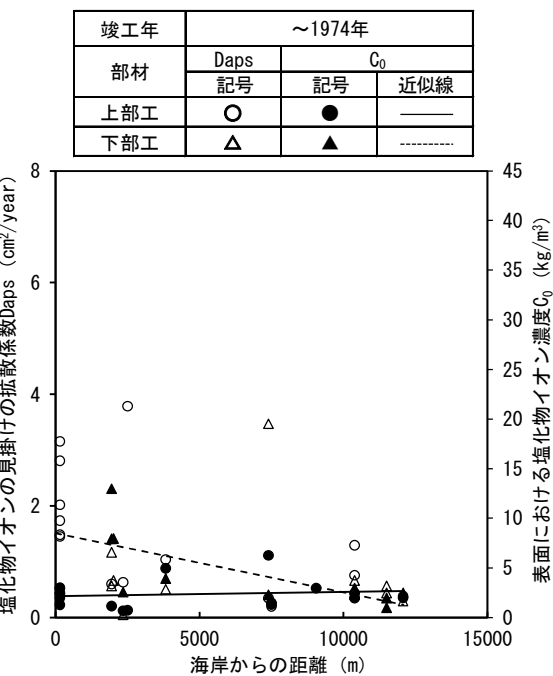


図 5-12 海岸からの距離と  $D_{aps}$ ,  $C_0$  の関係  
(竣工 1974 年までの構造物)

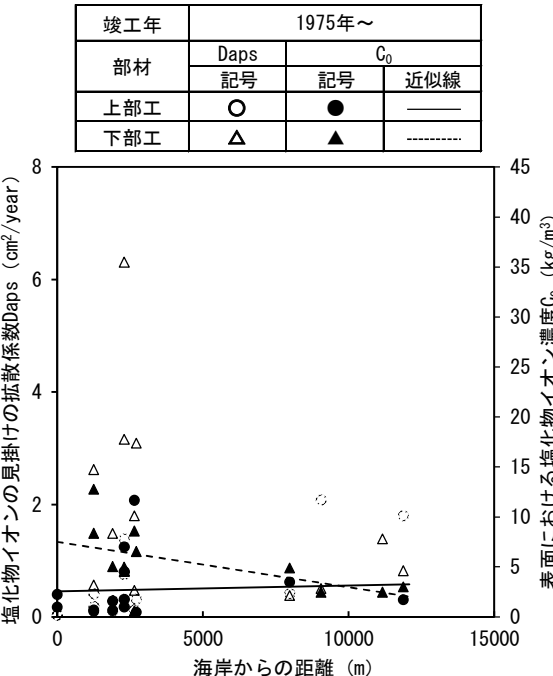


図 5-13 海岸からの距離と  $D_{aps}$ ,  $C_0$  の関係  
(竣工 1975 年以降の構造物)



#### (4) 腐食グレードと中性化、塩害の関係

##### 1) 腐食グレードと中性化の関係

図 5-14 には、腐食グレード別の中性化残りを示す。腐食グレード I から IV に着目すると、鋼材の腐食が確認された構造物の多くが、「水掛かりあり」の構造物であった。その一方で、外観変状なしでは、鋼材近傍よりも中性化が進行している構造物でも、鋼材腐食が見られず、コンクリートの剥離・剥落が生じていないため、はつり調査を実施していないことが分かる。特に、外観変状なしにおける「水掛かりなし」の構造物は、中性化が大きく進行していても、腐食の進展は極めて遅いと考えられる<sup>31), 32)</sup>。

そこで、かぶりと中性化残りの関係を図 5-15 に示す。道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編において、塩害の影響を受けにくい地域での鋼材の最小かぶりは床版で 30mm、主桁で 35mm 以上確保することが定められている<sup>42)</sup>。図 5-15 より、ほとんどの構造物で最小かぶりの 30mm 以上が確保されており、外観変状が見られていないことが分かる。次に、30mm 程度のかぶりが確保され、中性化残りが 10mm 以下の構造物に着目すると、上部工の「水掛かりなし」で腐食グレード II, IV を示したものは、中性化による鋼材腐食と考えられる。一方で中性化残り 10mm 以上であっても、腐食グレード II, III, IV を示す構造物は、中性化によるものではなく、「水掛かりあり」が占めていたことから、塩化物イオンが影響していたものと考えられる。さらに、図 5-14 および図 5-15 より、今回調査した箇所の下部工においては、中性化による鋼材腐食、コンクリートの剥離・剥落は確認されなかった。

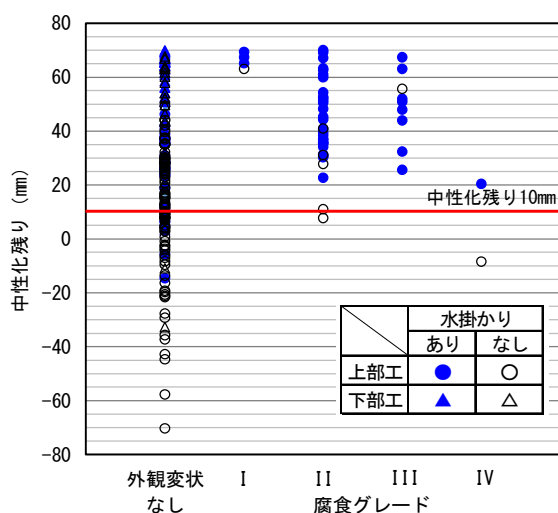


図 5-14 腐食グレード別の中性化残り

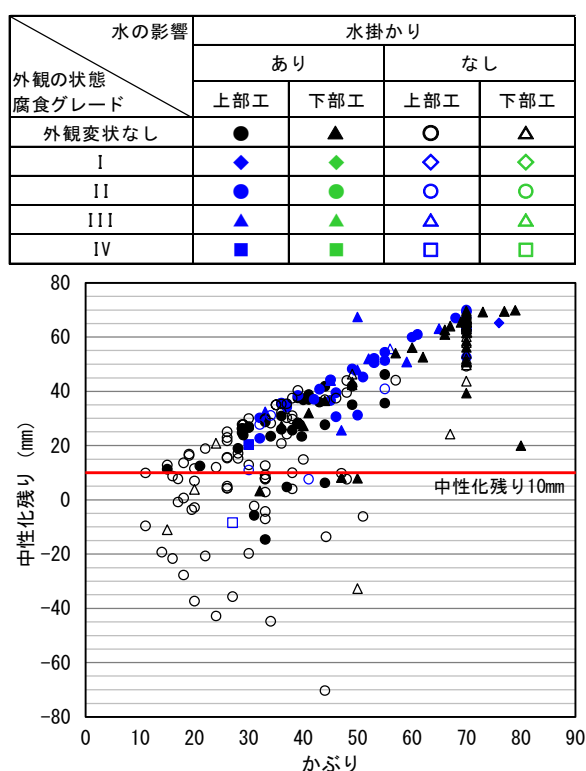


図 5-15 かぶりと中性化残りの関係



## 2) 腐食グレードと塩害の関係

図 5-16 には、腐食グレード別の鋼材位置の塩化物イオン濃度を示す。管理者によって調査項目は様々であるため、塩化物イオン濃度を調査できた構造物は限定され、計測数が中性化深さと比べて少なくなっている。塩害による鋼材腐食の場合には、写真 5-4 に示すように劣化の進行速度が比較的早いことから、はつり調査段階における腐食グレードは、I から III を示すものであった。これらの腐食グレードにおける結果として計測数は少ないが、鋼材位置の塩化物イオン濃度が  $1.2\text{kg/m}^3$  以下の場合でも、腐食グレード II を示すものが存在していた。その一方で、外観変状なしを見ると塩化物イオン濃度  $1.2\text{kg/m}^3$  以上を大きく上回っていても、鋼材腐食が生じず、コンクリートの剥離・剥落が見られなかったものも数多く確認された。中には、鋼材位置で塩化物イオン濃度が  $10\text{kg/m}^3$  近くを示す構造物であっても腐食グレード I のものも存在していた。この構造物を写真 5-5 に示しているが、感潮区間に位置する河川の樋門であり、常に湿潤状態となる構造物であった。この樋門にはひび割れが確認され、ひび割れ箇所をはつり調査した結果、ひび割れ位置のみに著しい孔食が見られていたが、その周辺の鋼材は、高濃度の塩化物イオンであるにも関わらず腐食は軽微なものであった。このようにかぶりが確保され、常に湿潤状態が保たれている構造物においては、酸素欠乏により腐食の進展は極めて遅いと思われる<sup>22), 34)</sup>。図 5-17 には、かぶりと鋼材位置の塩化物イオン濃度の関係を示す。ほとんどの構造物で最小かぶりの 30mm 以上が確保されており、外観変状が見られていないことが分かる。かぶりが 30mm 未満の構造物でも、鋼材位置の塩化物イオン濃度は、 $1.2\text{kg/m}^3$  と同等もしくはそれ以下であるため、水掛かりの有無に関らず、鋼材腐食が生じずコンクリートの剥離・剥落が見られなかったことが分かる。一方で、かぶりが 30mm 以降の構造物では、鋼材腐食が生じ、コンクリートの剥離・剥落が見られたものが少数確認されたものの、その他多数の構造物は、鋼材位置の塩化物イオン濃度が  $1.2\text{kg/m}^3$  よりも多量に含有した状態でも鋼材腐食が生じず、コンクリートの剥離・剥落が見られなかった。その構造物は、「水掛かりあり」のものがほとんどを占め、これらの構造物は、常に湿潤状態が保たれるような樋門の側壁であった。なお、今回の調査範囲において、かぶりが 70mm 以上になると、鋼材腐食によるコンクリートの剥離・剥落が見られる構造物は確認されなかった。

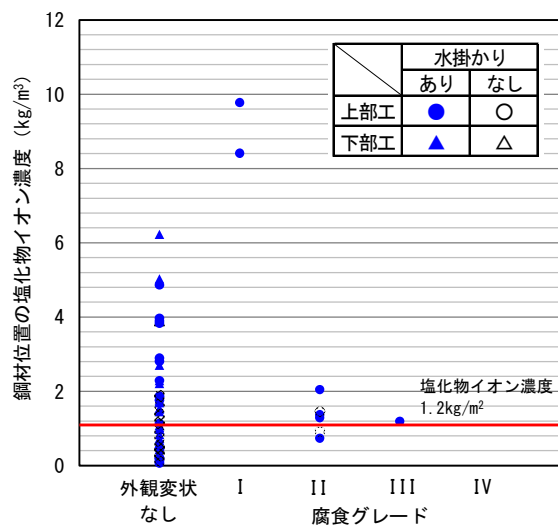


図 5-16 腐食グレード別の塩化物イオン濃度

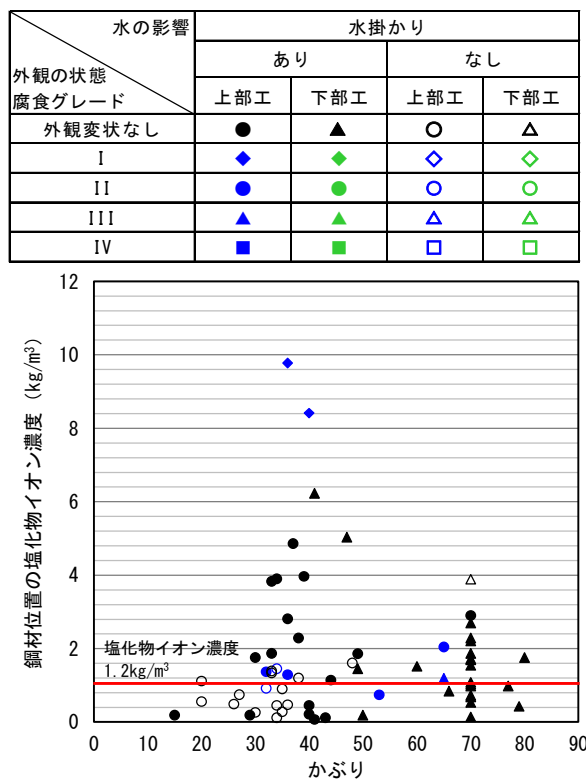


図 5-17 かぶりと鋼材位置の塩化物イオン濃度の関係



7年後



写真 5-4 塩害の短期間における鋼材腐食の進行情形

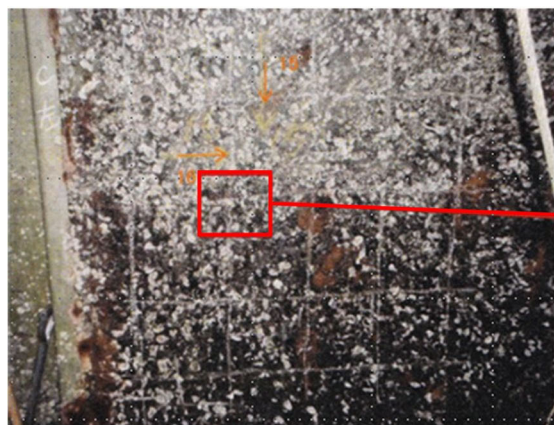


写真 5-5 実構造物の高濃度塩の化物イオン濃度を示したコンクリート内部の鋼材の状態

以上の結果より、常に湿潤状態が保たれている場合やかぶりが 70mm 以上確保されている場合は、酸素欠乏により腐食の進行が遅くなり、外観に変状が現れていないものと考えられる。鋼材腐食には、中性化、塩化物イオンなどの劣化因子による影響だけではなく、内部の酸素や相対湿度が鋼材腐食に大きく影響していることが分かった。また、圧縮強度はコンクリート品質の重要な要素であるが、圧縮強度のみでは物質移動抵抗性や耐久性を評価することは困難であることが分かった。

## 5-3 透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および適用性の評価

### 5-3-1 室内実験の概要

室内実験では、コンクリートで円柱供試体を作製し、圧縮強度試験、中性化促進試験、塩水浸漬試験、加圧透気試験を行った。

#### (1) 使用材料

本実験に用いた材料およびその物性は、表 5-4 に示すとおりである。

表 5-4 材料および物性値

略語	材料	物理的性質
OPC	普通ポルトランドセメント	密度( $3.16\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $3,280\text{cm}^2/\text{g}$ )
BB	高炉セメントB種4000ブレーン	密度( $3.02\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $3,660\text{cm}^2/\text{g}$ )
FA	フライアッシュJIS II 種	密度( $2.33\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $4,130\text{cm}^2/\text{g}$ )
S	細骨材(海砂)	表乾密度( $2.58\text{g/cm}^3$ ),吸水率(1.40%)
G	粗骨材(碎石)	表乾密度( $2.67\text{g/cm}^3$ ),吸水率(1.14%)
AE減水剤	JIS A 6204 AE減水剤標準形( I 種)	
AE剤	マイクロエア303A,785	

#### 1) セメント

室内実験で作製したコンクリートには、セメントとして普通ポルトランドセメント(略語 OPC, 密度  $3.16\text{g/cm}^3$ ), 高炉セメント B 種 4000 ブレーン(略語 BB, 密度  $3.02\text{g/cm}^3$ )を用い, フライアッシュ JIS II 種(密度  $2.33\text{g/cm}^3$ )は普通ポルトランドセメントの重量の 20%に置換したもの(略語 FA)を使用した。

#### 2) 練混ぜ水

練混ぜ水は、水道水を使用した。

#### 3) 骨材

細骨材は福岡県玄海産海砂(密度  $2.58\text{g/cm}^3$ ), 粗骨材は福岡県産の安山岩碎石(密度  $2.67\text{g/cm}^3$ )

を使用した。

#### 4) 混和剤

混和剤はマスターエア 303A (AE 剤 (I 種)), マスターエア 785 (FA 用 AE 剤 (I 種)), マスターポゾリス No.70 (AE 減水剤標準形 (I 種)) を使用した。

#### 5) 配合, 練混ぜ方法および供試体形状

各セメント種類で W/B=45%, W/B=55%, W/B=65% の 3 水準の供試体を作製した。コンクリートの練混ぜには, 容量 55L の強制二軸練混ぜミキサーを用いた。なお, いずれの配合も目標スランプ 8±1cm, 目標空気量 4.0±1% とした。配合表は, 表 5-5 に示すとおりである。供試体の形状は, 加圧透気試験, 中性化促進試験の測定用に φ75mm×150mm, 圧縮強度試験, 塩水浸漬試験用に φ100mm×200mm の円柱供試体をそれぞれ作製した。

表 5-5 配合表

配合名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )								SL (cm)	Air (%)
			W	C			S	G	AE剤 (%)	AE 減水剤 (%)		
				OPC	BB	FA						
OPC	45	44	165	366	-	-	765	1007	1.5	5.4	8.0	3.5
	55	46		300	-	-	825	995	1.2	4.8	8.5	4.0
	65	48		255	-	-	877	984	1.0	3.9	8.0	3.5
BB	45	44		-	366	-	765	1007	1.5	5.6	8.0	4.0
	55	46		-	300	-	826	1003	1.1	4.6	8.0	5.0
	65	48		-	255	-	880	987	1.1	4.3	7.0	4.0
FA	45	38	160	284	-	71	666	1125	14.9	3.6	8.0	4.0
	55	40	162	233	-	59	721	1112	8.8	2.9	9.0	3.5
	65	44	162	199	-	50	810	1067	7.5	2.5	7.0	3.5

#### 6) 養生

養生は, 打設から 24 時間後に脱型を行った後, 気中養生 (温度 20℃, 湿度 60%) および水中養生 (温度 20℃) を材齢 28 日まで行った。

#### (2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は, 「5-2 実構造物の物質移動抵抗性および外観変状との関係性」と同様に, 作製した円柱供試体を用いて, JIS A 1108 : 2018 「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠し材齢 28 日で行った。いずれの水準においても 3 体で圧縮強度を測定し, 平均値を測定結果として記した。

### (3) 中性化促進試験

中性化促進試験は、円柱供試体の打設底面を試験面として、それ以外をエポキシ樹脂、もしくは、アルミテープで被覆した。その円柱供試体に対して、JIS A 1153：2012「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠し、温度  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度  $5\pm 0.2\%$  の環境で中性化促進試験を行った。促進期間は、30、60、90、120、150 日で円柱供試体を万能試験機により割裂し、JIS A 1152：2018「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠して、フェノールフタレイン液の噴霧による呈色反応で中性化深さを測定した（写真 5-6）。



写真 5-6 中性化促進試験の状況

なお、室内実験結果と実構造物から採取したコア供試体の試験結果を比較するにあたり、それぞれの結果は相違が生じる。そのため、各促進期間で測定した中性化深さを基に、魚本らが提案した自然環境下の中性化予測式として式(5)を用いて<sup>43)</sup>、中性化速度係数を算出し、その平均値を各配合の中性化速度係数として整理した。

$$X = (2.804 - 0.847 \log C) A \sqrt{(C \cdot t)} \quad (5)$$

$X$ ：中性化深さ（mm）， $C$ ：炭酸ガス濃度（%）

$t$ ：経過時間（年）

$A$ ：屋内自然環境下における中性化速度係数

ここで、 $C$ は 0.07%を用いた。

### (4) 塩水浸漬試験（全塩化物イオン濃度、塩化物イオンの見掛けの拡散係数）

塩水浸漬試験は、JIS A 1154：2020「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」および JSCE-G572-2010「浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に準拠して行った。作製した  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  の円柱供試体は、高さ 100mm 位置でカットし、切断面以外をエポキシ樹脂で被覆し、温度  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  環境下で 10%濃度の NaCl

溶液に3ヶ月間の浸漬を行った。

所定の期間浸漬を行った後、コンクリート用ドリルを用いて、試験面から5カ所で深さ方向に5mm間隔で試料を40mm位置まで採取した。「5-2 実構造物の物質移動抵抗性および外観変状との関係性」と同様の試験方法で、全塩化物イオン濃度の測定は、深さごとに採取した試料を用いて電位差滴定装置により測定した。また、深さごとに得られた全塩化物イオン濃度を基に、Fickの拡散方程式により塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。

#### (5) 加圧透気試験

加圧透気試験は、写真5-7、図5-18に示す圧力容器内部のメタル管の上に円柱供試体を設置し、メタル管と供試体の接触面、メタル管の底面の隙間を速効型硬化樹脂でシールして行った。

円柱供試体の設置後は、コンプレッサから载荷圧力を与え、水を張った容器とメスシリンダーを用いた水中置換法により、円柱供試体を通過した空気量を一定間隔で測定していき、空気量が時間の経過とともに一定の増加量を示した時点で、式(6)を用いて透気係数を算出した<sup>44)</sup>。また、水中養生と気中養生とでは、内部相対湿度の違いによる透気係数に与える影響が大きいため、測定前は温度20℃、前述した環境下に静置させて、質量変化が一定となった段階で、透気係数の測定を行った。

$$K = \frac{2hP_2r}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (6)$$

ただし、 $K$ ：透気係数( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ )、 $h$ ：供試体厚さ( $\text{cm}$ )

$P_1$ ：载荷圧力( $\text{N}/\text{cm}^2$ )、 $P_2$ ：流出側圧力( $\text{N}/\text{cm}^2$ )

$Q$ ：透気量( $\text{cm}^3/\text{s}$ )、 $A$ ：透気面積( $\text{cm}^2$ )

$r$ ：標準気圧( $\text{N}/\text{cm}^2$ )

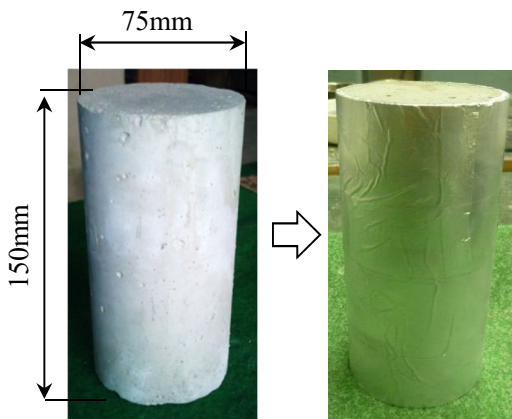


写真 5-7 供試体の概要

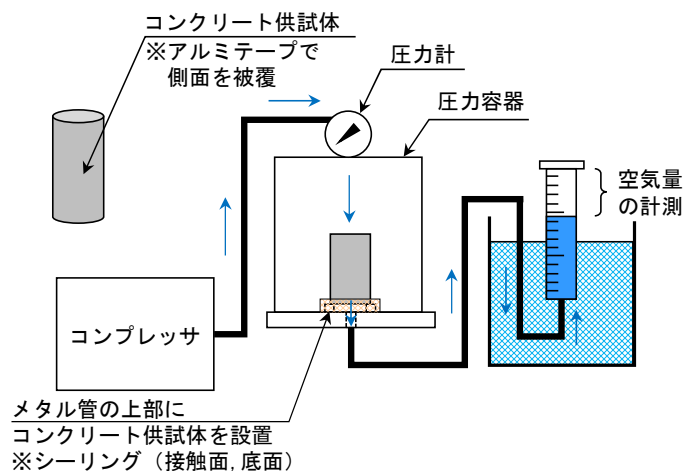


図 5-18 加圧透気試験方法



### 5-3-2 実構造物から採取したコア供試体の概要

対象の構造物は、建設年や環境条件の異なる 7 箇所から形状の異なるコア（以下、コア供試体と示す）を採取した。コア供試体の外観、実構造物の諸元および採取した箇所（実構造物）の状況は、それぞれ写真 5-8、表 5-6、写真 5-9 に示すとおりである。コア供試体の径は、採取する部位・部材、損傷の状況、配筋などの状況を踏まえて、 $\phi 50\text{mm}$ ～ $\phi 100\text{mm}$  で採取した。採取したコア供試体の含水率は、57～65%程度であった。

採取箇所として、構造物 A, B, C, D, G は上部工、構造物 E, F は下部工から採取している。構造物 A, B, C は、構造物における劣化部と健全部よりそれぞれ採取した。なお、ここで言う劣化部のコア供試体は、劣化部で採取した際にひび割れの存在や剥落などでコア供試体として成立しない恐れがあったため、劣化部に最も近く外観上健全と思われた周辺部から採取したものである（写真 5-8）。ちなみに、構造物 A は海岸から約 900m に位置したアルカリシリカ反応（以下、ASR と示す）によるひび割れが生じた構造物である。構造物 B は海岸部に位置しており、飛来塩分などの塩害によって鋼材腐食が生じ、コンクリートが剥離・剥落した構造物である。構造物 C は海岸より 200m に位置し、構造物 B と同様に飛来塩分および内在塩分などの塩害によって鋼材腐食が生じ、コンクリートが剥離・剥落した構造物である。構造物 D は飛沫帯および干満帯、構造物 E および F はそれぞれ海岸から約 1.9km、約 2.6km に位置（感潮区間）する構造物である。構造物 G は、海岸から約 50m に位置する構造物である。構造物 D, E および F は、潮汐による潮位の影響を受ける環境にある。構造物 D および G の使用セメントは高炉セメント微粉末（略語 BFS）、あるいは、FA が混和材として使用されている。管理者へのヒアリングでは、BFS の使用されたコンクリートは、水セメント比 65%で混和材として BFS による置換率は A 種相当（詳細不明）であり、FA が使用してあるコンクリートは、水セメント 45%で FA を普通ポルトランドセメント量に対して 30%置換されたものである。その他の構造物 A, B, C, E, F の使用セメントは不明であるが、竣工年より普通ポルトランドセメント（略語 OPC）を使用していると想定して整理した。

採取したコアは、コンクリート内部の相対湿度の変化を最小限にするために、加圧法による透気試験を実施するまでは、直ちにラップフィルムで包んで保管することで乾燥を防ぎ、透気係数の測定までは現地状況に近い条件を保った。この実構造物から採取したコア供試体を用いて、加圧法による透気試験を行った。

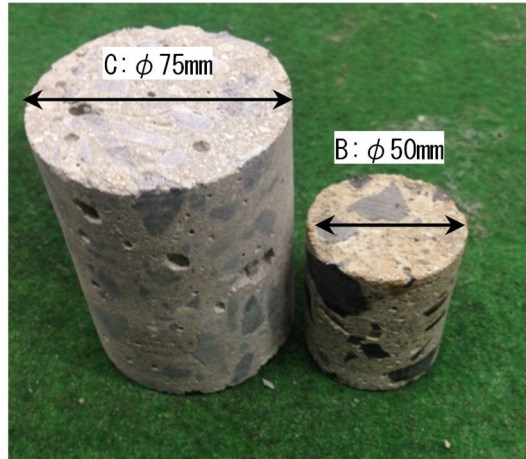


写真 5-8 採取したコアの外観

表 5-6 実構造物の諸元

名称	A	B	C	D		E	F	G	
架設年次	1979年 (昭和54年)	1969年 (昭和44年)	1974年 (昭和49年)	1995年 (平成7年)	2003年 (平成15年)	1989年 (平成元年)	1936年 (昭和11年)	1995年 (平成7年)	2003年 (平成15年)
経過年	40年	50年	45年	24年	16年	30年	83年	24年	16年
環境条件	海岸から 900m	海岸部	海岸から 200m	飛沫帯 干満帯	飛沫帯 干満帯	感潮区間	感潮区間	海岸から 50m	海岸から 50m
コア径	φ75mm	φ50mm	φ75mm	φ100mm	φ100mm	φ75mm	φ75mm	φ100mm	φ100mm
潮位の影響	影響なし	影響なし	影響なし	影響あり	影響あり	影響あり	影響あり	影響なし	影響なし
降雨の影響	影響なし	影響あり	影響なし	影響あり	影響あり	影響なし	影響なし	影響あり	影響あり
使用セメント (混和材の 置換率)	不明:OPC 想定	不明:OPC 想定	不明:OPC 想定	OPC (BFS A種 相当 ※詳細 不明)	OPC (FA:30%)	不明:OPC 想定	不明:OPC 想定	OPC (BFS A種 相当 ※詳細 不明)	OPC (FA:30%)

※経過年は、2019年時点を基準年として算出している。



写真 5-9 コア採取箇所（実構造物）の状況



#### (1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、室内実験と同様に、採取したコア供試体を用いて、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。

#### (2) 中性化試験

実構造物における中性化試験は、室内実験と同様に、採取したコア供試体を割裂させ、JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し、側面と割裂面に直接フェノールフタレイン液を噴霧して、呈色反応により中性化深さを測定した。その後、測定した中性化深さから $\sqrt{t}$ 則により中性化速度係数を算出した。

#### (3) 塩化物イオン含有量試験（全塩化物イオン濃度、塩化物イオンの見掛けの拡散係数）

実構造物における塩化物イオン含有量試験は、実構造物より採取したコア供試体を図 5-19 に示すように塩化物イオンが浸透している範囲から、1cm の深さごとに試料を採取した。また、塩化物イオンが未浸透域のコア端部をコンクリートカッターで切り出し、加圧法による透気試験をそれぞれ実施した。なお、十分な長さや径のコア採取が困難な箇所には、ドリル法により粉体を実構造物から直接深さごとに採取し、室内試験と同様に、JIS A 1154 : 2020「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、電位差滴定装置により塩化物イオン含有量を算出した。また、深さごとに得られた全塩化物イオン濃度を基に、JSCE-G572-2010「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」に準拠して、Fick の拡散方程式により塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。

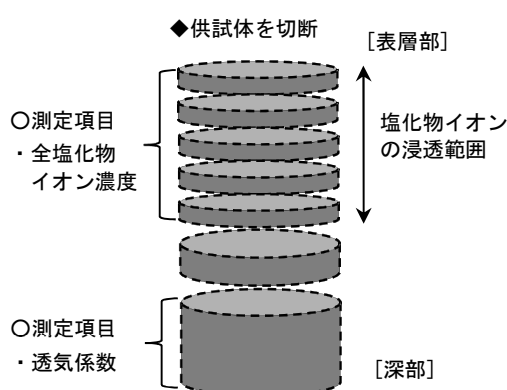


図 5-19 実構造物から採取したコア供試体の概要

#### (4) 加圧透気試験

加圧透気試験は、室内実験と同様に、円柱供試体を用いて水中置換法により透気量を測定し、透気係数を算出した。

### 5-3-3 結果および考察

#### (1) 圧縮強度および透気係数

図 5-20 には、室内で作製した円柱供試体と実構造物より採取したコア供試体の圧縮強度および透気係数の関係を併せて示す。室内で作製した円柱供試体の透気係数は、いずれのセメント種類においても、養生条件や水セメント比に関らず、圧縮強度の大きいものほど低下する結果を示した。各セメント種類の指数近似において透気係数と圧縮強度の関係は、養生条件に関係なく高い相関性が得られている。ここで、OPC の決定係数は、 $R^2=0.96$  であったのに対し、BB では  $R^2=0.93$ 、FA で  $R^2=0.93$  であった。BB や FA は、養生敏感性が OPC よりも大きいことから<sup>16), 45)</sup>、BB、FA の場合には決定係数も幾分か小さくなったものと考えられる。また、気中養生の透気係数は、測定時の相対飽水度が水中養生に比べて約 5~8%程度低くなっていたため、水中養生よりも同圧縮強度において大きくなる傾向にあった。そのため、相対飽水度を揃えることで、より高い相関性が得られると思われる。本結果では、それに関らず決定係数が  $R^2=0.93$  以上となっていることから、5~8%程度の相対飽水度の違いが、透気係数へ与える影響は比較的小さいと考えられる。

一方の、実構造物から採取したコア供試体では、同一の部材箇所から採取された健全部のコアでも圧縮強度が同程度であるにも関わらず、透気係数は大きく異なる結果となった。特に、圧縮強度が大きい劣化部から採取したコアを見ると、明らかに透気係数は、健全部よりも高い値を示している。劣化部における構造物 A では、ASR の劣化によるひび割れが散見されていたことから、採取したコア内に圧縮強度への低下に影響を及ぼさない程度の微細なひび割れが生じていたと推察され、健全部に比べて透気量が増加したものと考えられる。構造物 B においても健全部の圧縮強度は、劣化部と比較して小さくなっているのにも関わらず、透気係数は劣化部の方が明らかに大きくなっている。また、構造物 C においては、圧縮強度は同程度であったが比較的劣化部の透気係数は、健全部よりも大きい傾向にあった。室内実験で作製した円柱供試体においては、セメント種類ごとに透気係数と圧縮強度の間に高い相関性を確認することができたが、実構造物から採取したコア供試体では、相関性を確認することができなかった。

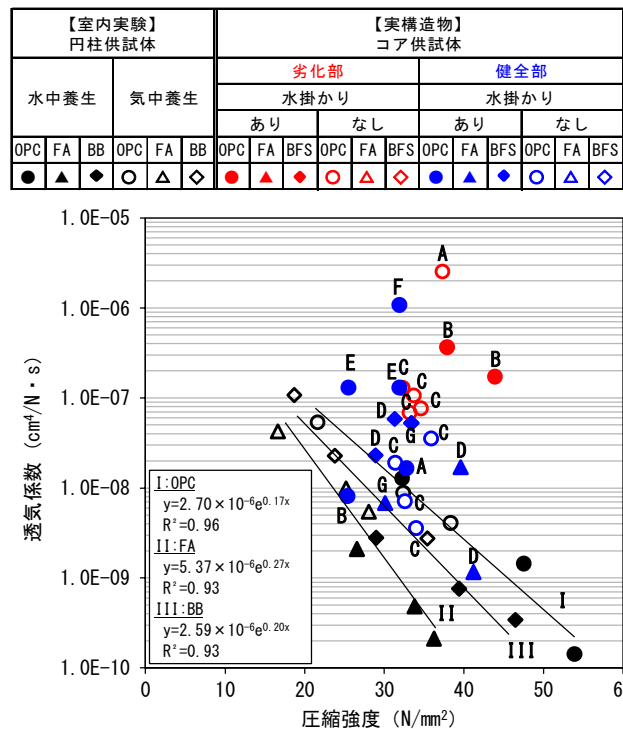



図 5-20 圧縮強度および透気係数 (OPC, FA, BB, BFS)

## (2) 中性化速度係数および透気係数

図 5-21 には、室内で作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体による中性化速度係数と透気係数の関係を示す。構造物 D は BFS を使用した構造物であるが、BFS の置換率は A 種相当である採取コアにおける健全部や劣化部に関らず、透気係数と中性化速度係数との間に高い相関性を確認することができた。また、構造物 D の BFS の置換率が A 種相当の場合には、OPC と近似した透気係数と中性化速度係数の関係性を示した。図 5-21 に示す近似曲線は、構造物 A および構造物 C の劣化部を除き、BFS の A 種相当の構造物 D を含めて近似させた結果、決定係数  $R^2=0.84$  と高い相関性を示している。

図 5-22 には、BB, FA における室内で作製した円柱供試体と実構造物より採取した BFS, FA のコア供試体の中性化速度係数と透気係数の関係を示す。作製した円柱供試体では、いずれのセメント種類においても透気係数が増加するのに従って、中性化速度係数も増加しているのが分かる。図 5-21 の OPC の結果と比較して、透気係数が同等の場合には、BFS および FA の中性化速度係数は高くなる結果となった。これは、セメントの一部に BFS を混和材として置換することで、コンクリート内部の  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  量が OPC よりも少ないことが影響していると考えられる。また、構造物 D における BFS のコア供試体は、全体的に透気係数が大きいものの、中性化速度係数は小さい値を示している。BFS の置換率が A 種相当の場合には、OPC と同等として取り扱うのが適当であると思われる<sup>46)</sup>。構造物 D における BFS のコア供試体を除いて、近似曲線を示した結果、決定係数  $R^2=0.79$  と相関性を確認することができた。

【室内実験】 円柱供試体		【実構造物】 コア供試体			
水中 養生	気中 養生	劣化部		健全部	
		水掛かり		水掛かり	
		あり	なし	あり	なし
OPC		OPC（想定）			
●	○	●	○	●	○

※構造物D: BFS (置換率: A種相当) ≒ OPC同等 (D) 

【室内実験】 円柱供試体		【実構造物】 コア供試体							
水中 養生	気中 養生	劣化部				健全部			
		水掛かり				水掛かり			
		あり		なし		あり		なし	
FA	BB	FA	BB	FA	BFS	FA	BFS	FA	BFS
▲	◆	△	◇	▲	◆	△	◇	▲	◆

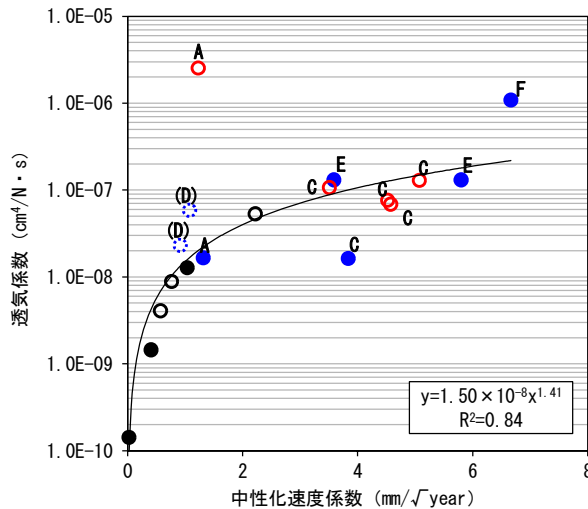


図 5-21 中性化速度係数および透気係数 (OPC)

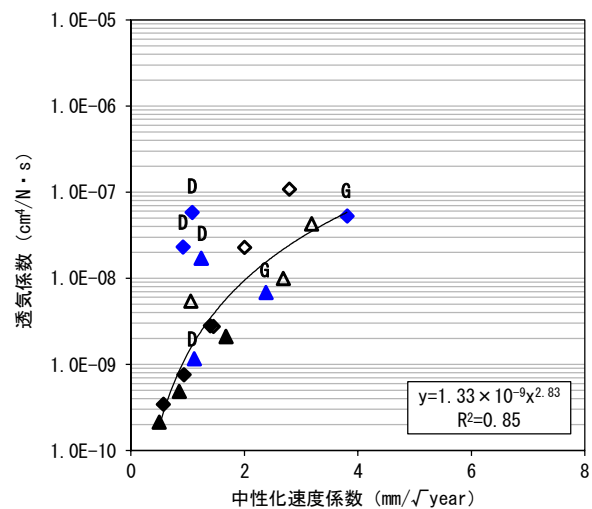


図 5-22 中性化速度係数および透気係数 (FA, BB, BFS)

以上のことから、透気係数と中性化速度係数の間には、室内実験で作製した円柱供試体や実構造物のコア供試体を含めてセメント種類ごとで高い相関性が確認され、透気係数によって物質移動抵抗性の優劣を評価できる指標となることが分かった。

### (3) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および透気係数

図 5-23 には、OPC における室内で作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体における塩化物イオンの見掛けの拡散係数と透気係数の関係を示す。室内で作製した供試体では、透気係数が高いものほど塩化物イオンの見掛けの拡散係数は増加しており、養生条件に関らず、相関性を確認することができた。一方の、実構造物から採取したコア供試体では、透気係数は比較的に大きいものの、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなる結果を示している。これは、塩水浸漬試験を行った円柱供試体と飛来塩分や干満などの影響による実構造物とでは、コンクリートに供給される塩化物イオン濃度に乖離が生じていたことが要因として考えられる。また、実構造物における塩化物イオンの見掛けの拡散係数には、供試体ごとに差は見られていないが、健全部と劣化部の両者から採取できた構造物 A, B, C における透気係数は、健全部と劣化部で異なっており、劣化部の透気係数が高くなる結果を示した。塩化物イオンの浸透および空気の透過性に及ぼす空隙径や空隙構造は異なっており<sup>18), 19)</sup>、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が同程度であっても、透気係数が高いものほど酸素供給量も多くなるため、腐食の進行が早く、早期に鋼材腐食が生じコンクリートの剥離・剥落に至るものと考えられる。た

だし、構造物 F の透気係数は、他の構造物の劣化部と同程度の値を示しているが、未だ健全な構造物であり、劣化部は存在していなかった。構造物 F の諸元を見ると、1936 年に建設されてから 85 年が経過しており、施工当時は、川砂利、川砂が使用されていた。また、手押車による人力施工が行われていた時代のものであり、その時代においては、かぶりも十分に確保されていることから鋼材腐食が生じずコンクリートの剝離・剝落に至っていないものと思われる。このような長期耐久性を誇る構造物に関しては、今後より詳細に調査していく必要がある。

図 5-24 には、BB, FA における室内で作製した円柱供試体と実構造物より採取した BFS, FA のコア供試体の塩化物イオンの見掛けの拡散係数と透気係数の関係を示す。室内試験における円柱供試体では、透気係数が増加するに従って、塩化物イオンの見掛けの拡散係数も大きくなっており、セメント種類ごとに相関性を確認することができた。しかし、内陸部に位置する構造物 G については、塩化物イオン含有量試験を実施していないため、プロットできていないが、干満滞位置で採取したコア供試体 D においては、BFS および FA とともに透気係数が室内試験よりも高くなっているにも関わらず、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、小さくなる結果となった。塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、経年に伴って低下することや<sup>33)</sup>、近年では塩化物イオンの停滞現象が生じるとの報告がある<sup>47)・48)</sup>。そのため、室内試験と実構造物との間で、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が大きく異なったと思われる。

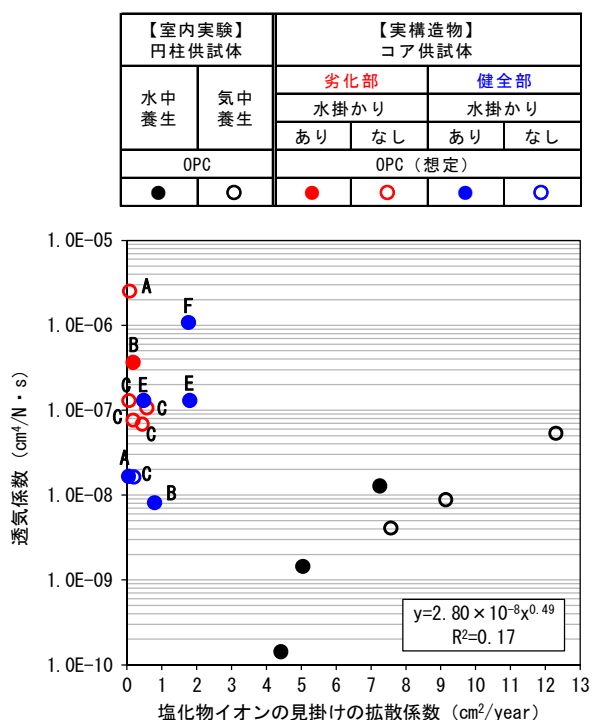


図 5-23 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および透気係数 (OPC)

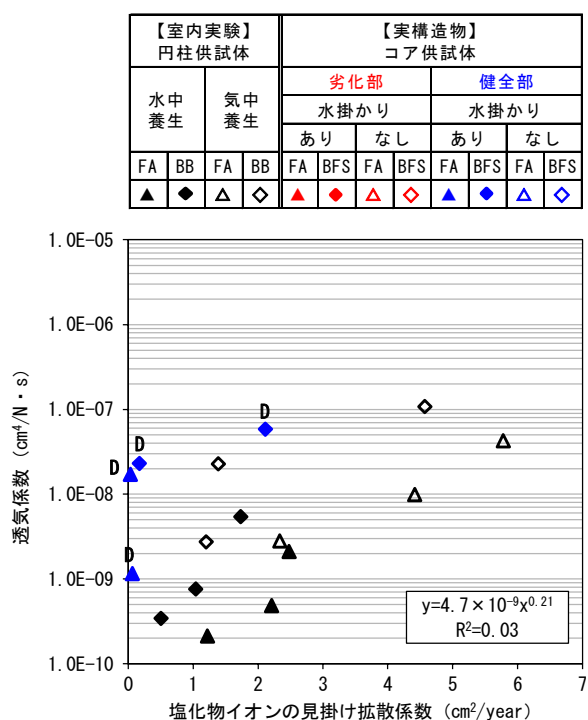


図 5-24 塩化物イオンの見掛けの拡散係数および透気係数 (FA, BB, BFS)

以上のことから、塩化物イオンの供給量や経時的な塩化物イオンの見掛けの拡散係数の低下により、実構造物における塩化物イオンの見掛けの拡散係数を透気係数によって予測することは、難しいと考えられた。劣化部と健全部において塩化物イオンの見掛けの拡散係数が同等であるにも関わらず、劣化部の透気係数は健全部よりも高いことから、酸素供給量の違いによって鋼材腐食の進展性が異なるものと思われる。以上の結果より、透気係数は、劣化が生じやすいか否かを評価する指標として適用が可能と考えられる。

## 5-4 透気係数による鋼材腐食の評価

### 5-4-1 透気係数と鋼材腐食の関係性

#### (1) 実験概要

本実験では、モルタルで角柱供試体、円柱供試体を作製し、鋼材腐食促進試験、塩水浸漬試験、加圧透気試験を行った。

#### 1) 使用材料

本実験に用いた材料およびその物性は、表 5-7 に示すとおりである。

表 5-7 材料および物性値

略語	材料	物理的性質
H	早強ポルトランドセメント	密度( $3.14\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $4,480\text{cm}^2/\text{g}$ )
B4	高炉スラグ微粉末4000	密度( $2.91\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $4,260\text{cm}^2/\text{g}$ )
B6	高炉スラグ微粉末6000	密度( $2.91\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $5,970\text{cm}^2/\text{g}$ )
S	細骨材(海砂)	表乾密度( $2.58\text{g/cm}^3$ ),吸水率(1.40%)

#### a) セメント

モルタルには、セメントとして早強ポルトランドセメント（略号 H，密度  $3.14\text{g/cm}^3$ ）を用いた。また、早強ポルトランドセメントの混和材には、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に適合する高炉スラグ微粉末 4000（略号 B4，密度  $2.91\text{g/cm}^3$ ），高炉スラグ微粉末 6000（略号 B6，密度  $2.91\text{g/cm}^3$ ）をそれぞれ早強ポルトランドセメントの重量に対して置換率を変化させて使用した。

#### b) 練混ぜ水および初期塩分

練混ぜ水は、水道水を使用した。本実験では、供試体の作製時に鋼材の腐食を促進させるため、初期塩分として NaCl（W/B=45%の場合：0, 3, 6,  $10\text{kg/m}^3$ ，W/B=55%の場合：6, 10,  $15\text{kg/m}^3$ ）を混和させた。NaCl は、練混ぜ水にあらかじめ投入して溶解させた。

c) 骨材

細骨材は、福岡県玄海産海砂（密度 2.58g/cm<sup>3</sup>）を使用した。

d) 混和剤

混和剤は、未使用である。

2) 配合，練混ぜ方法および供試体形状

W/B=45%，W/B=55%の 2 水準の供試体を混和材，NaCl 添加量を変えて作製した。モルタルの練混ぜには、自動練混ぜ機を用いて行い、いずれの配合も目標スランプフロー160mmとした。配合表は、表 5-8 に示すとおりである。

供試体の形状は、鋼材腐食促進試験用に 100mm×100mm×30mm，加圧透気試験，塩水浸漬試験用に φ100mm×200mm の円柱供試体をそれぞれ作製した。加圧透気試験に用いる円柱供試体は、φ100mm×200mm を 30mm 程度ずつにカット（φ100mm×30mm）した。本実験では各水準につき 3 体ずつ供試体を作製した。供試体形状の詳細は、以降の各試験方法に記述する。

表 5-8 配合表

配合名	W/B (%)	置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					s/a (%)	NaCl 添加量 (kg/m <sup>3</sup> )
			W	B=N+H+B4+B6			S		
				H	B4	B6			
H45	45	50	271	602	—	—	1385	2.3	10.0
H45 B4			269	299	299	—	1375	2.3	10.0
H45 B6			269	299	—	299	1375	2.3	10.0
H55	55		313	568	—	—	1306	2.3	6.0
									10.0
									15.0
H55 B4			310	282	282	—	1297	2.3	6.0
									10.0
									15.0
H55 B6			310	282	—	282	1297	2.3	6.0
									10.0
									15.0

3) 養生

打込み後は、温度 20℃の環境下で水分を含んだ吸水シートで覆い、その上からビニールシートで密封した湿布環境で養生を 14 日間行った。

4) 静置環境

養生終了後、打込み底面を試験面とし、試験面以外をエポキシ樹脂で被覆した。透気係数は、含水状態に影響するため、供試体の保管は、温度 20℃，飽和塩法により相対湿度 60%，75%，90%に調整した環境（表 5-9，写真 5-10）にそれぞれ供試体を分けて静置した。なお，各相対湿

度の環境を維持するために、容器槽にシートより密閉し、各環境の目標相対湿度が $\pm 2\%$ となるように、経時的に相対湿度を調整した。また、加圧透気試験で用いる供試体は、恒温恒湿機に入れて同様の相対湿度とした状態で試験を行った。

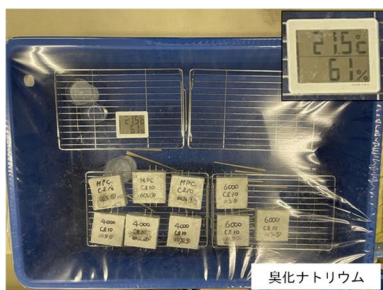
※飽和塩法とは・・・

「塩化ナトリウムなどの塩類の飽和水溶液と熱的平衡状態にある空気の相対湿度は、塩の種類と溶液の温度で定まる」という原理を用いて湿度傾向を校正する方法である (JIS B 7920:2000)。本研究では、相対湿度 90%, 75%, 60%の環境にするために、硝酸カリウム水溶液 ( $\text{KNO}_3$ )、塩化ナトリウム水溶液 ( $\text{NaCl}$ )、臭化ナトリウム水溶液 ( $\text{NaBr}$ ) を入れ相対湿度を調整し、塩化カルシウム ( $\text{CaCl}_2$ ) で微調整した<sup>49), 50)</sup>。

表 5-9 塩の飽和水溶液と平衡にある空気の相対湿度<sup>49), 50)</sup>

温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )	設定：相対湿度 (%)		
	臭化ナトリウム ( $\text{NaBr}$ )	塩化ナトリウム ( $\text{NaCl}$ )	硝酸カリウム ( $\text{KNO}_3$ )
20	$59.1 \pm 0.5$	$75.47 \pm 0.14$	$94.62 \pm 0.66$
	60	75	90

【相対湿度：60%】



【相対湿度：75%】



【相対湿度：90%】



写真 5-10 相対湿度の調整状況

## 5) 相対湿度の測定

相対湿度の計測方法は、絶乾重量と飽水重量の差に加え、各相対湿度（60%, 75%, 90%）において重量を計測し、重量変化が一定となるまで静置した。

## 6) 鋼材腐食促進試験

供試体は、図 5-25 に示すような  $100 \times 100 \times 30 \text{ mm}$  のモルタル供試体を作製した。本実験では、外部の湿度の影響を大きくするためにかぶりを 10mm とし、モルタルで供試体を作製した。供試体中央部のかぶり 10mm となる位置に  $\phi 10 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$  の鋼材（磨き丸鋼鉄筋）と、そこから 10mm 間隔をあけてアノード・カソード分極により腐食電流密度を算出する際の対極として用



いるために、 $\phi 10\text{mm} \times 70\text{mm}$  のステンレス棒を埋設した。また、鋼材およびステンレス棒の両端部には、ねじ穴をあけており、測定用コードを接続するためのステンレス製のビスを取り付けた。

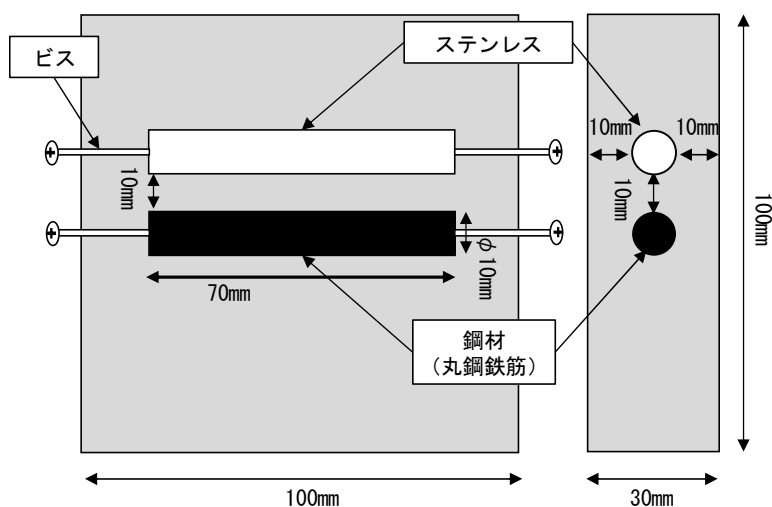


図 5-25 供試体の概略図

各環境への静置後は、自然電位および分極抵抗を測定し、腐食状況および腐食時期を適切に判断した。鋼材に「腐食」が確認された供試体は、各種塩化物イオン濃度および pH を測定後、供試体を解体し、コンクリートに埋設した鋼材の腐食面積率および腐食重量を測定した。各種測定方法は、以下に示すとおりである。

#### a) 自然電位の測定

各環境への静置後は、鋼材の腐食状況を経時的に確認するために、写真 5-11 で示すマルチメーターおよび直流電流計と鉛照合電極(Pb/PbO<sub>2</sub>)を用いて、JCSE 601-2007「コンクリート構造物における自然電位測定方法」に準拠して自然電位を測定した。自然電位の測定箇所は、図 5-26 に示した位置とし、測定面を水で湿潤状態にした後に測定した。



写真 5-11 自然電位の測定状況

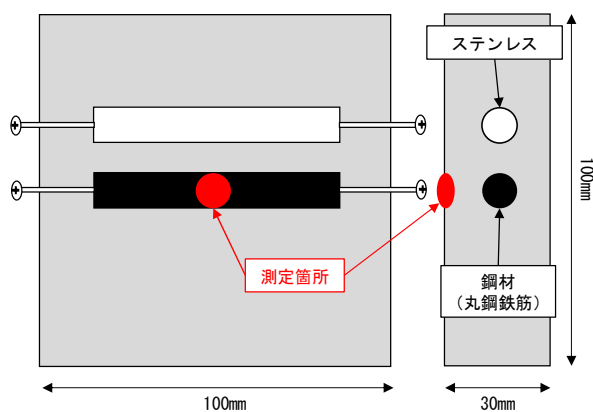


図 5-26 自然電位の測定位置

測定して得られた自然電位は、式(7)、表 5-10 から飽和硫酸銅電極規準換算値に換算した。換算した値は、表 5-11 の鋼材腐食判定基準（ASTM C 876）と比較し、供試体の電位が 90%以上の確立で腐食ありと判定される-350mV 以下になった時点腐食として判定した<sup>51), 52)</sup>。

$$E_{t,CSE}^{Fe} = E_{t,PRE}^{Fe} - 800.0 + 0.24 \cdot (t-25) \quad (7)$$

$E_{t,CSE}^{Fe}$  : CSE 換算・温度補正值 (mV)

$E_{t,PRE}^{Fe}$  : 温度  $t$  [°C] における鉛照合電極測定値

$t$  : 温度 [°C]

表 5-10 各種照合電極測定値から CSE 換算・温度補正值への換算式<sup>51)</sup>

照合電極 Ref	$E_{t,CSE}^{Fe}$ [mVvsCSE]	=	$E_{t,Ref}^{Fe}$ [mVvsRef]	+	$E_{25,CSE}^{0,Ref}$	+	$dE_{CSE}^{Ref}/dt \cdot (t-25)$ [mVvsCSE]
MNO	$E_{t,CSE}^{Fe}$	=	$E_{t,MNO}^{Fe}$	+	85.8	-	$2.66 \cdot (t-25)$
CSE	$E_{t,CSE}^{Fe}$	=	$E_{t,CSE}^{Fe}$	+	0.0	+	$0.00 \cdot (t-25)$
SCE	$E_{t,CSE}^{Fe}$	=	$E_{t,SCE}^{Fe}$	-	74.5	-	$1.66 \cdot (t-25)$
SSE	$E_{t,CSE}^{Fe}$	=	$E_{t,SSE}^{Fe}$	-	120.1	-	$2.00 \cdot (t-25)$
SHE	$E_{t,CSE}^{Fe}$	=	$E_{t,SHE}^{Fe}$	-	316.0	-	$0.90 \cdot (t-25)$
PRE	$E_{t,CSE}^{Fe}$	=	$E_{t,PRE}^{Fe}$	-	800.0	+	$0.24 \cdot (t-25)$

表 5-11 鋼材腐食判定基準（ASTM C 876）<sup>52)</sup>

自然電位E (mV)	腐食確率 (%)
$-200\text{mV} < E$	90%以上で腐食なし
$-350\text{mV} < E \leq -200\text{mV}$	不確定
$E < -350\text{mV}$	90%以上の確率で腐食あり

#### b)分極曲線の測定

分極曲線の測定は、ポテンシオスタットを用いて、写真 5-12 に示すように銀塩化銀電極 (Ag/AgCl)を鋼材直上の供試体表面に設置して行った。測定手順として、電位速度は 20mV/min とし、鋼材の自然電位からカソード側に-20mV/min の走査速度で-250mV まで分極させた。その後、1 日置いてアノード側に同走査速度で+250mV まで分極させた。

腐食電流密度は、鋼材のアノード分極曲線とカソード分極曲線の測定を行い、ターフェル外挿法を用いて両分極曲線のターフェル勾配より算出し<sup>53), 54), 55)</sup>、表 5-12 を基に腐食速度を判定した。なお、本研究における分極曲線の測定結果は、IR ドロップ（材料を通る電子の流れに起因する過電圧）を考慮せずに評価した。



写真 5-12 ポテンシオスタットによる測定状況

表 5-12 腐食速度の判定基準の一例<sup>55)</sup>

腐食電流密度 $I_{corr}$ ( $\mu A/cm^2$ )	腐食速度の判定	分極抵抗 $R_p$ ( $k\Omega cm^2$ )	質量損失速度 ( $mg/cm^2/年$ )	侵食速度PDY ( $\times 10^{-3} mm/年$ )
0.2未満	不動態状態 or 極めて遅い腐食速度	130より大	(1.8未満)	(2.3未満)
0.2以上0.5以下	低～中程度の腐食速度	52以上130以下	1.8以上4.6以下	2.3以上5.8以下
0.5以上1以下	中～高程度の腐食速度	26以上52以下	4.6以上9.1以下	5.8以上11.6以下
1より大	激しい、高い腐食速度	26未満	9.1以下	11.6以下

c) 塩化物イオン濃度の測定（全塩化物イオン濃度、可溶性塩化物イオン濃度）

a) 自然電位の測定において、コンクリート中の鋼材が「腐食」と判断した供試体は、乾燥した後、JIS A 1154 に準拠して、溶液浸透箇所から試料を採取した。試料の採取箇所は、図 5-27 の 4 箇所から採取した。採取した試料は、「5-2 実構造物の物質移動抵抗性および外観変状の関係」の(4)塩化物イオン含有量試験と同様の手順で電位差滴定装置により、全塩化物イオン濃度、可溶性塩化物イオン濃度を測定した。

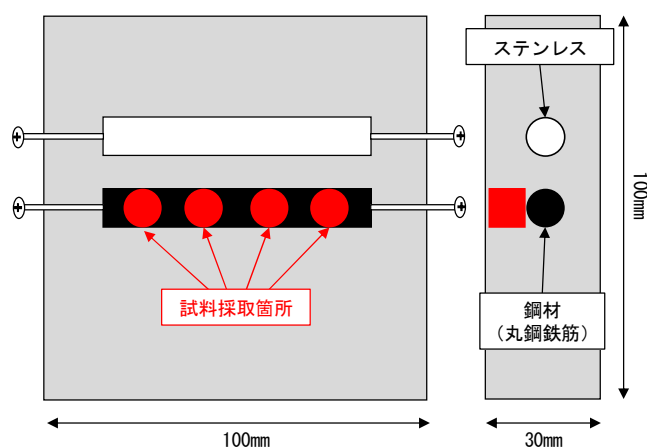


図 5-27 試料採取箇所の概要

d) 鋼材の腐食面積率および腐食重量

供試体から取り出した鋼材は、付着したモルタルを除去した後、腐食面積率および腐食重量を測定した。腐食面積率は、鋼材にセロハンテープを巻き付け、写真 5-13 のように腐食部分を書き出した。その後、「JTrim」（フリーソフト）を用いて画像処理を行い、式(8)により、腐食面積率を算出した。面積率を測定した後、鋼材の腐食重量を、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」を参考に測定した。鋼材は、濃度 10%のクエン酸二アンモニウム水溶液に 2 日間浸漬して腐食生成物を除去した（写真 5-14）。その後、鋼材の重量減少量を測定し、腐食重量を算出した。なお、腐食重量は、腐食していない鋼材の単位面積当たりの皮膜重量を差し引くことで補正した。

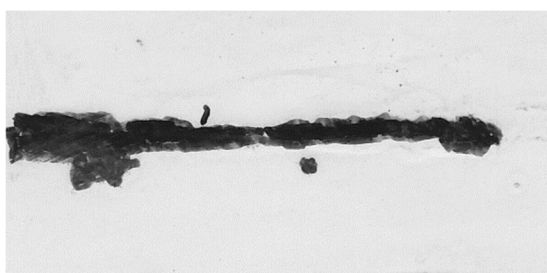


写真 5-13 腐食部分を書き出したテープ



写真 5-14 クエン酸浸漬状況

$$\text{腐食面積率 (\%)} = \frac{\text{画像処理で得られた腐食面積}}{\text{鋼材の表面積 (cm}^2\text{)}} \times 100 \quad (8)$$

7) 加圧透気試験

加圧透気試験は、「5-3 透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および適用性の評価」と同様の試験方法で透気量を計測し、透気係数を算出した（写真 5-15、図 5-28）。

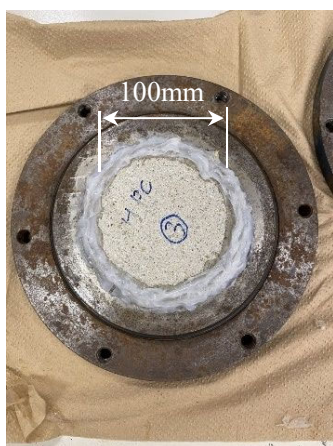


写真 5-15 供試体概要

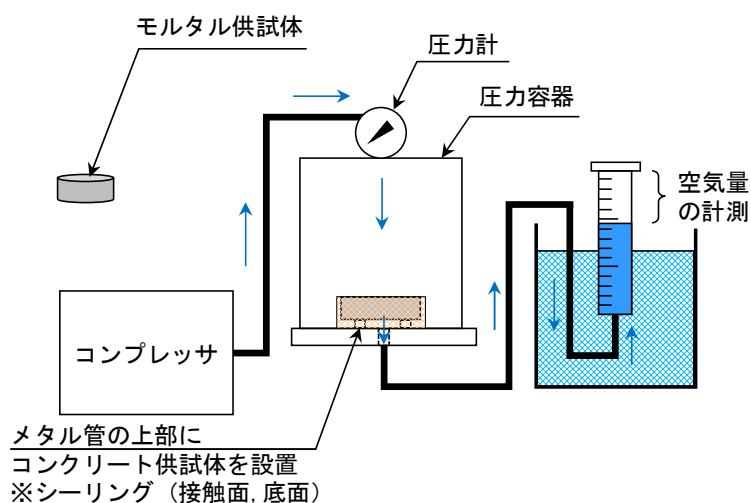


図 5-28 加圧透気試験方法

## (2) 結果および考察

### 1) 相対湿度と腐食電流密度の関係

#### a) 水結合材比ごとの相対湿度と腐食密度の関係

図 5-29 には、W/B=45%、W/B=55%における水結合材比ごとの相対湿度と腐食電流密度の関係を示す。W/B=45%における腐食電流密度は、いずれも相対湿度 90%が最も高い値を示したが、相対湿度 60%、75%では同程度であった。また、H45、H45B4、H45B6 の結合材種類ごとの腐食電流密度は、いずれの相対湿度においても H45 が最も大きく、H45B4、H45B6 の順であった。しかし、いずれの腐食電流密度においても  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  未満であることから、不動態状態もしくは極めて遅い腐食速度と推定された。

一方で W/B=55%における腐食電流密度は、いずれも相対湿度が高くなるに従って増加傾向を示し、W/B=45%と比較すると大きな値を示している。H55、H55B4、H55B6 の結合材種類ごとの腐食電流密度で比較すると、H55 はいずれの環境でも腐食電流密度が  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  以上であり低～中程度の腐食速度と推定されるが、H55B4 および H55B6 の相対湿度 75%以下で  $0.2\mu\text{A}/\text{cm}^2$  未満であり、不動態状態もしくは極めて遅い腐食速度と推定される結果であった。

これらのことから、高炉スラグ微粉末を添加することによって、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度は低下するが<sup>56)</sup>、腐食発生後の腐食速度は、抑制されることが分かった。

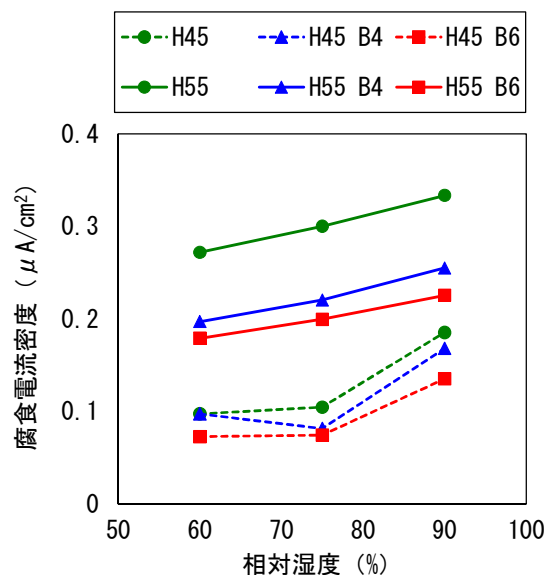


図 5-29 相対湿度と腐食電流密度の関係

#### b) NaCl 添加量ごとの相対湿度と腐食電流密度の関係

図 5-30 には、NaCl 添加量ごとにターフェル直線で算出した H45、H55 の相対湿度と腐食電流密度の関係を示す。H45 における相対湿度 65%および 75%の一部は、実験期間中腐食が確認された結果のみプロットしている。H45 の腐食電流密度は、NaCl 添加量  $10\text{kg}/\text{m}^3$  のみで、プロット数も少ないが、湿度が高くなるに連れて増加傾向を示している。また、H55 の腐食電流密

度についても、NaCl 添加量に関係なくいずれも湿度が高くなるにしたがって微増傾向にある。NaCl 添加量で比較すると、6kg/m<sup>3</sup> の腐食電流密度は、相対湿度に関係なくいずれも小さいが、NaCl 添加量が 10kg/m<sup>3</sup> から 15kg/m<sup>3</sup> と増加するにしたがって大きくなっていることが分かる。これについて、一般的に腐食電流密度は、アノード反応とカソード反応により決定されることが分かっているため、アノード反応とカソード反応の分極曲線により、評価を行った結果について以降に考察する。

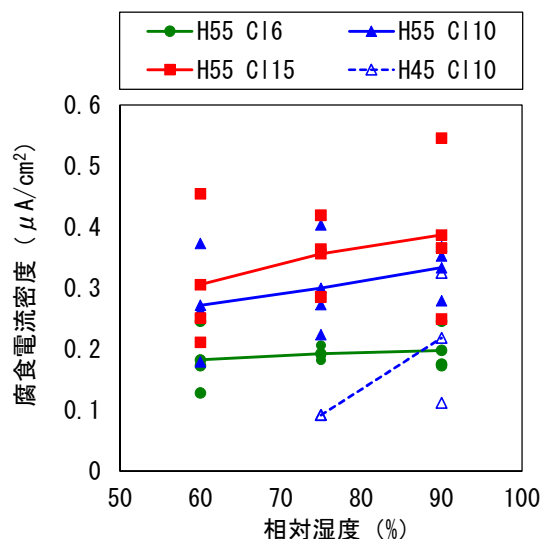


図 5-30 NaCl 添加量ごとの相対湿度と腐食電流密度の関係

#### c) 結合材種類ごとの相対湿度と腐食電流密度の関係

図 5-31 には、NaCl 添加量 6kg/m<sup>3</sup> の結合材種類ごとにターフェル直線で算出した腐食電流密度を示す。図 5-31 より、腐食電流密度は、結合材の種類に関わらず、相対湿度が高いものほど微増傾向を示した。この結果より、結合材種類による腐食電流密度の違いは、確認できなかった。図 5-32 には、NaCl 添加量 10kg/m<sup>3</sup> の結合材種類ごとにターフェル直線で算出した相対湿度と腐食電流密度の関係を結合材の種類ごとに示す。H45 における相対湿度 65%および 75%の一部は、実験期間中腐食が確認された結果のみプロットしている。図 5-32 より、腐食電流密度は、いずれの結合材種類においても湿度が高くなるにしたがって増加傾向を示し、相対湿度が腐食電流密度に与える影響は、図 5-31 よりもその増加が顕著に見られた。また、腐食電流密度は、同相対湿度において H55>H55B4>H55B6 の順で大きい値を示した。このことから、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を混和することで、腐食速度が抑制されることを確認できた。なお、H45B4 および H45B6 は、実験期間内での腐食が見られておらず、結果からは除外している。

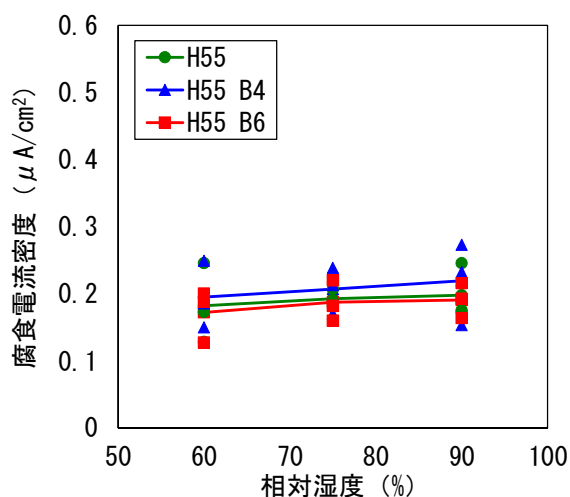


図 5-31 結合材種類ごとの相対湿度と腐食電流密度の関係  
(NaCl 添加量 6kg/m³)

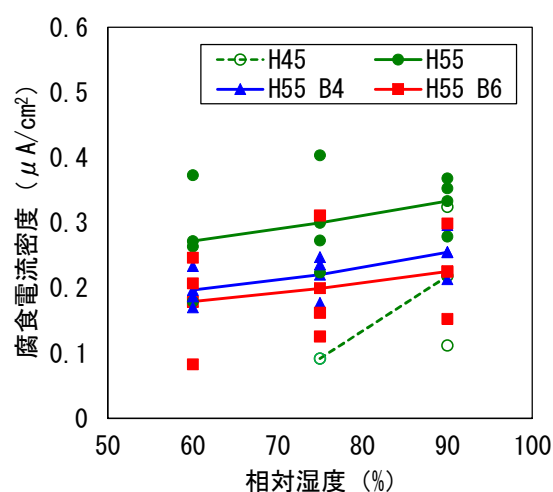


図 5-32 結合材種類ごとの相対湿度と腐食電流密度の関係  
(NaCl 添加量 10kg/m³)

## 2) 相対湿度，NaCl 添加量，結合材種類ごとの分極曲線

### a) 相対湿度ごとの分極曲線

図 5-33 には，NaCl 添加量 10 kg/m³ の H45 における相対湿度ごとの分極曲線を示す。図 5-33 より，カソード反応は，いずれの相対湿度においても同程度の値を示しており，明確な差が見られなかった。しかしながら，アノード反応は相対湿度が高くなるにつれて増加する結果を示した。これは，相対湿度が高くなることにより，コンクリート内部の水分量が増加し，可溶性塩化物イオン濃度が増加したものと考えられる。図 5-34 には，NaCl 添加量 15 kg/m³ の H55 における各相対湿度の分極曲線を示す。図 5-34 より，図 5-33 と同様にアノード反応は，湿度が高くなるに従って増加しているが，カソード反応では湿度 60%，75%，90%のいずれも概ね同等

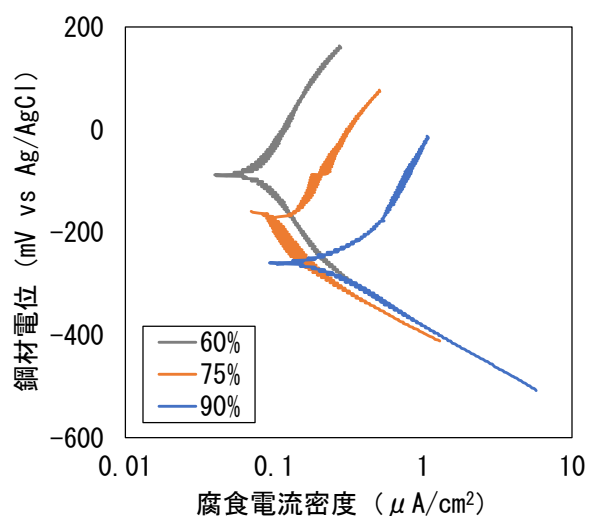


図 5-33 相対湿度ごとの分極曲線  
(H45 NaCl 添加量 10kg/m³)

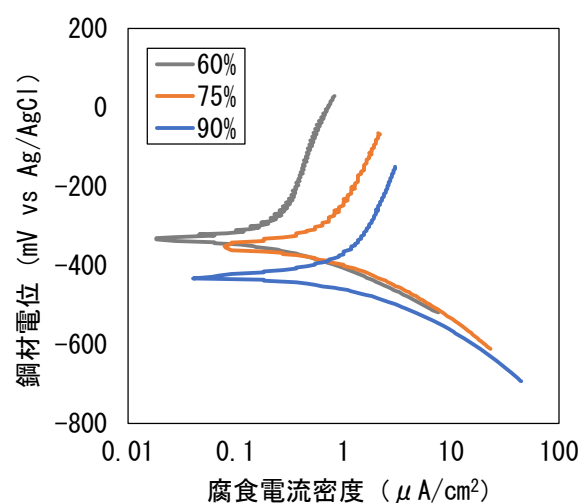


図 5-34 相対湿度ごとの分極曲線  
(H55 NaCl 添加量 15kg/m³)



であり、アノード反応ほどの明確な違いは確認されなかった。このことから、相対湿度の影響は、アノード反応が卓越する結果が確認された。これについて、b) NaCl 添加量ごとの分極曲線、c) 相対湿度、結合材種類ごとの分極曲線などの考察と併せて考察する。

#### b) NaCl 添加量ごとの分極曲線

図 5-35 には、相対湿度 90% の H55 における NaCl 添加量ごとの分極曲線を示す。図 5-35 より、アノード反応は、NaCl 添加量が増加するにしたがって促進していることが分かる。一方でカソード反応は、NaCl 添加量が増加するにつれて減少傾向を示したものの、アノード反応ほどの明確な違いは確認されなかった。

以上のことから、相対湿度 60%～90% の範囲では、相対湿度がカソード反応に与える影響は小さく、NaCl 添加量（コンクリート中の塩化物イオン含有量）および相対湿度の両者ともに、アノード反応に影響する結果となった。

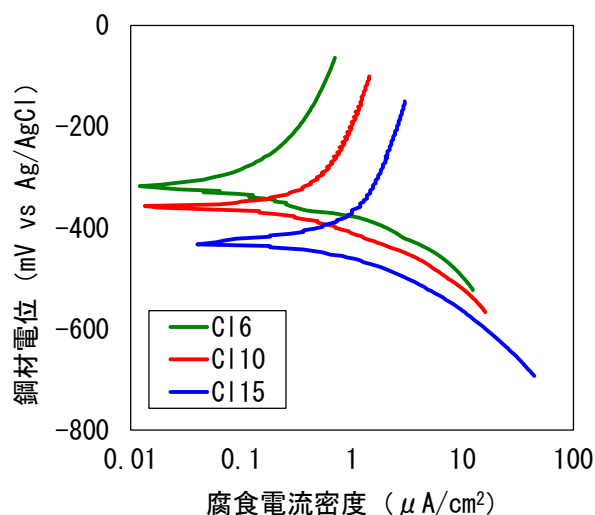


図 5-35 Cl 量ごとの分極曲線 (H55, 相対湿度 90%)

#### c) 相対湿度、結合材種類ごとの分極曲線

図 5-36 には、NaCl 添加量 10 kg/m<sup>3</sup> の H45, H55 における相対湿度ごとの分極曲線を示す。相対湿度 90% の場合は、H45, H55 においてアノード反応およびカソード反応は同程度を示し、明確な差は見られなかった。相対湿度 75% になると、H45, H55 のいずれの場合もアノード反応の場合は同様の傾向見られているが、カソード反応の場合は、H55 の腐食電流密度が大きくなっている。これは、W/B の低いものほど内部組織が緻密になるため、酸素量に依存するカソード反応が抑制されたものと考えられる。相対湿度 60% になると、H45, H55 の腐食電流密度は同程度であるが、電位差が生じる結果を示した。これは、上記と同様に W/B の低いものほど内部組織が緻密であるため、腐食電流密度が同程度であっても電位差が生じたものと考えられる。



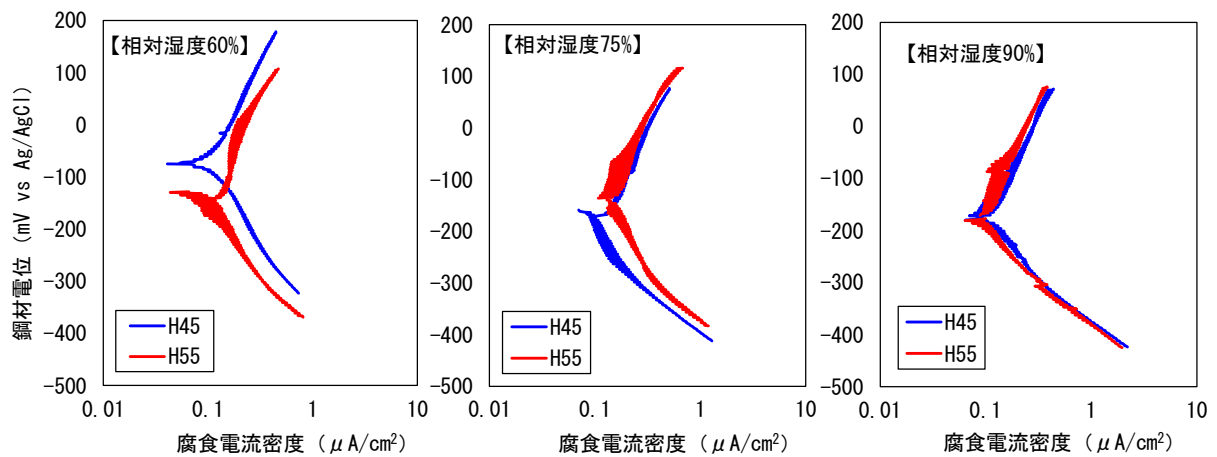


図 5-36 W/B ごとの分極曲線 (NaCl 添加量 10 kg/m³)

図 5-37 には、NaCl 添加量 10 kg/m³、相対湿度 90%の結合材種類ごとの分極曲線を示す。図 5-37 より、H55B4 および H55B6 は、H55 に比べてカソード反応が小さいことが分かる。また、若干ではあるが、H55B4 よりも H55B6 のカソード反応は抑制されている。これは、コンクリートが緻密化したことで、空隙容積の減少に伴って酸素量も減少したものと考えられる。一方のアノード反応は、いずれの結合材の種類においても同等であり、違いは確認できなかった。

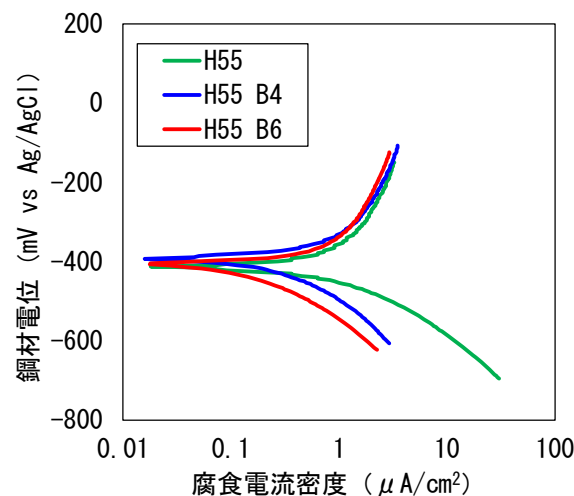


図 5-37 W/B=55%の結合材種類ごとの分極曲線 (NaCl 添加量 10kg/m³, 相対湿度 90%)

### 3) 各種塩化物イオン濃度と鋼材腐食の関係

#### a) 全塩化物イオン濃度と腐食電流密度、腐食重量の関係

図 5-38 には、W/B=55%における結合材種類ごとの全塩化物イオン濃度と腐食電流密度の関係を示す。図 5-38 より、全塩化物イオン濃度と腐食電流密度の間には、結合材の種類ごとに相関（相関係数  $R=0.81, 0.84, 0.84$ ）が見られた。H55 および H55B4 における全塩化物イオン濃度が同濃度である場合、腐食電流密度は同等であるが、H55B6 の場合は、その値が顕著に小さい値を示している。

図 5-39 には、W/B=55%における結合材種類ごとの全塩化物イオン濃度と腐食重量の関係を示す。図 5-39 より、図 5-38 と同様に全塩化物イオン濃度と腐食重量の間には、結合材の種類ごとに相関（相関係数  $R=0.81, 0.86, 0.88$ ）が見られた。全塩化物イオン濃度が同量の場合の腐食重量は、 $H55>H55B4>H55B6$  の順で高炉スラグ微粉末を混和したものが小さくなった。しかしながら、全体的にばらつきが見られるため、可溶性塩化物イオン濃度と腐食電流密度の関係により評価した。

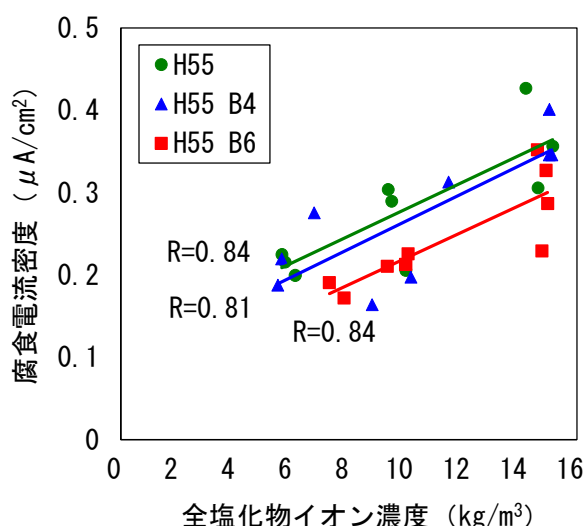


図 5-38 全塩化物イオン濃度と腐食電流密度の関係

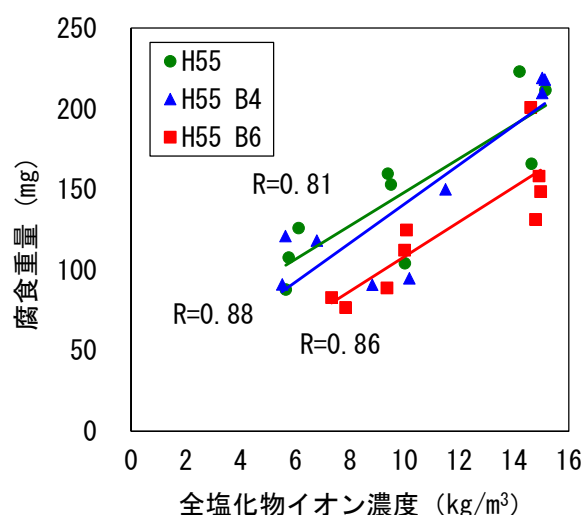


図 5-39 全塩化物イオン濃度と腐食重量の関係

表 5-13 には、水準ごと全塩化物イオン濃度と固定化割合を示す。いずれの水準においても初期添加した NaCl 量と同等の全塩化物イオン濃度を示した。また、いずれの結合材種類においても全塩化物イオン濃度が増加するにしたがって、固定化割合は低下した。これは、セメント自体は塩化物イオンをフリーデル氏塩として固定化するが、一定量を超えた塩化物イオンが存在する場合には、一定量以上の塩化物イオンは固定化されなかったものと考えられる。

次に、結合材種類ごとで比較すると、高炉スラグ微粉末を混和したものは、早強ポルトランドセメント単味のものよりも高い固定化割合を示した。これは、高炉スラグ微粉末の使用により、セメントのフリーデル氏塩による固定化の他に、C-S-H やカルシウムアルミネートによる塩化物イオンの固定化が生じたものと考えられる<sup>57)</sup>。また、H55B4 よりも H55B6 において固定化割合が高い理由として、H55B6 は H55B4 と比べ細孔組織が緻密であり、細孔壁面の比表面積が大きいことで固定化相の面積が増大したため、C-S-H やカルシウムアルミネートが多く、塩化物イオンの固定化量が増加したものと考えられる<sup>58)</sup>。

表 5-13 各水準における全塩化物イオン濃度と固定化割合

相対湿度 (%)	NaCl 添加量 (kg/m <sup>3</sup> )	セメント種類							
		H45		H55		H55B4		H55B6	
		全塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	固定化割合 (%)	全塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	固定化割合 (%)	全塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	固定化割合 (%)	全塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	固定化割合 (%)
60	6	—	—	5.91	44.91	6.13	48.10	6.07	52.78
	10	※	※	9.84	34.44	10.25	34.89	10.28	37.34
	15	—	—	15.11	26.08	14.92	29.83	14.91	32.07
75	6	—	—	5.84	39.81	6.27	43.71	5.99	47.26
	10	10.16	36.06	9.8	31.57	10.15	33.00	10.21	34.66
	15	—	—	15.15	23.49	14.89	26.39	14.99	28.57
90	6	—	—	5.82	36.11	5.86	40.62	6.15	40.41
	10	11.26	32.72	9.91	26.38	9.9	28.43	9.94	29.89
	15	—	—	15.04	19.54	14.92	22.72	15.04	24.57

※H45 における相対湿度 60%の供試体は、実験期間中に腐食が確認されなかった。

b) 可溶性塩化物イオン濃度と腐食電流密度、腐食重量の関係

図 5-40 には、W/B=55%における結合材種類ごとの可溶性塩化物イオン濃度と腐食電流密度の関係を示す。図 5-40 より、可溶性塩化物イオン濃度と腐食電流密度の間には、結合材の種類ごとで高い相関が見られた。また、相関係数 R は、それぞれ 0.95, 0.97, 0.99 と図 5-38 よりも高い数値を示し、H55 と H55B4 の間にも差が確認された。

図 5-41 には、W/B=55%における結合材種類ごとの可溶性塩化物イオン濃度と腐食重量の関係を示す。可溶性塩化物イオン濃度と腐食重量の間には、結合材の種類ごとで高い相関が見られた。相関係数 R は、それぞれ 0.94, 0.95, 0.97 を示しており、全塩化物イオン濃度と比べてもより精度が高いと言える。同可溶性塩化物イオン濃度の腐食重量は、H55 を 1 とした場合に、

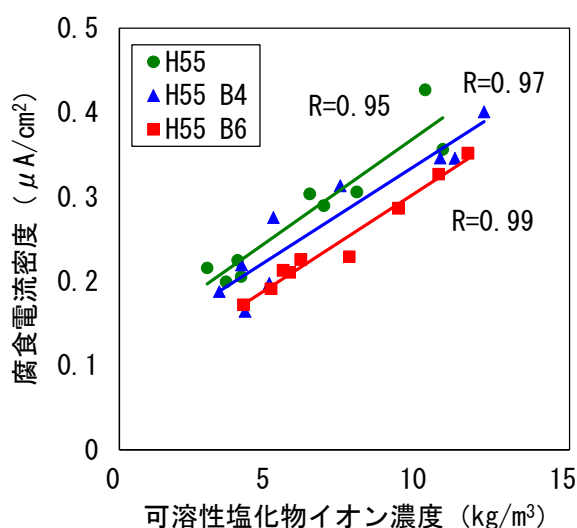


図 5-40 可溶性塩化物イオン濃度と腐食電流密度の関係

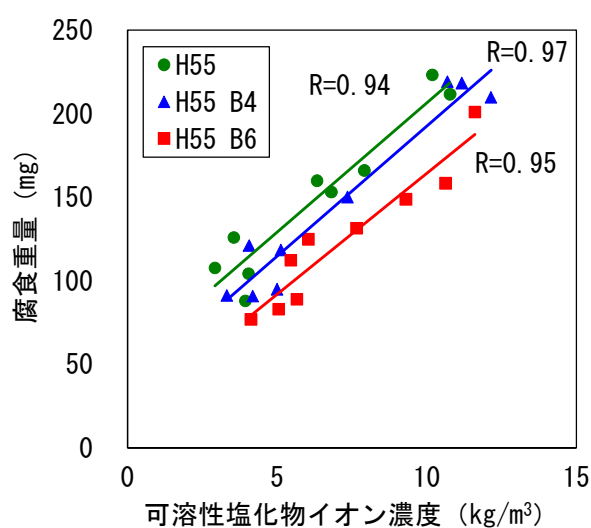


図 5-41 可溶性塩化物イオン濃度と腐食重量の関係

H55B4 は 0.9, H55B6 は 0.7 であった。これは、高炉スラグ微粉末を混和することで腐食電流密度が抑制され、腐食発生後の腐食の進展が抑制されたものと考えられる。

#### 4) 腐食電流密度と腐食重量の関係

図 5-42 には、W/B=55%における結合材種類ごとの腐食電流密度と腐食重量の関係を示す。図 5-42 より、いずれの結合材の種類においても腐食電流密度と腐食重量の間には相関（相関係数  $R=0.95$ ,  $0.97$ ,  $0.97$ ）が見られた。結合材種類による明確な違いは確認されなかったが、いずれの結合材種類においても、腐食電流密度で腐食の進展を評価することが可能であることが分かった。

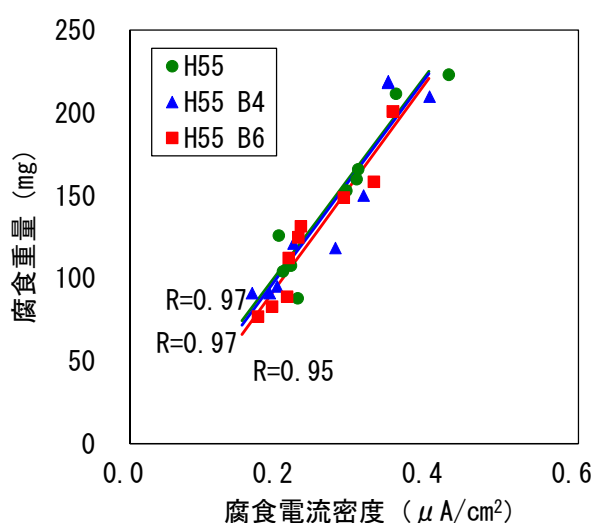


図 5-42 腐食電流密度と腐食重量の関係

#### 5) 相対湿度と透気係数の関係

図 5-43 には、W/B=45%, W/B=55%の結合材種類ごとの相対湿度と透気係数の関係を示す。図 5-43 より、まずは、W/B=45%および W/B=55%の透気係数で比較すると、内部組織が W/B=55%よりも緻密な W/B=45%の透気係数は、いずれも W/B=55%よりも小さくなる結果を示した。相対湿度ごとと比較すると、相対湿度が大きくなるにつれて、透気係数は若干の減少傾向が見られるものの、著しい透気係数の変化は見られず、相対湿度と透気係数の関係性は明らかにできなかった。これは、一般的にコンクリート中の含水率は透気係数に影響を及ぼすことが知られているが<sup>リ 8)</sup>、コンクリート中の含水率と本研究の静置環境とした相対湿度は、必ずしも同じでは無いことが要因として考えられる。そこで、各相対湿度で腐食電流密度と透気係数の関係を確認した。

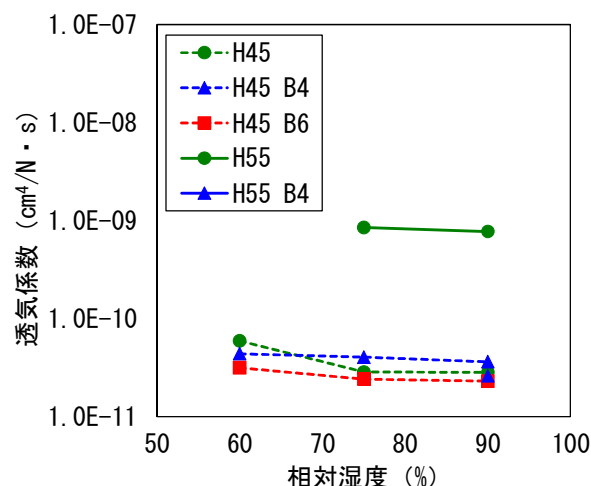


図 5-43 相対湿度と透気係数の関係

#### 6) 腐食電流密度と透気係数の関係

図 5-44 には、相対湿度ごとの腐食電流密度と透気係数の関係を示す。図 5-44 より、相対湿度ごとに見ると、いずれも W/B が高くなるに従って腐食電流密度が増加し、透気係数も増加する傾向が見られた。室内実験の結果より、腐食電流密度と透気係数の関係式(9), (10)を導き出した。なお、相対湿度 60%は、実験期間中に腐食が見られず、関係式は得られなかったため除外した。

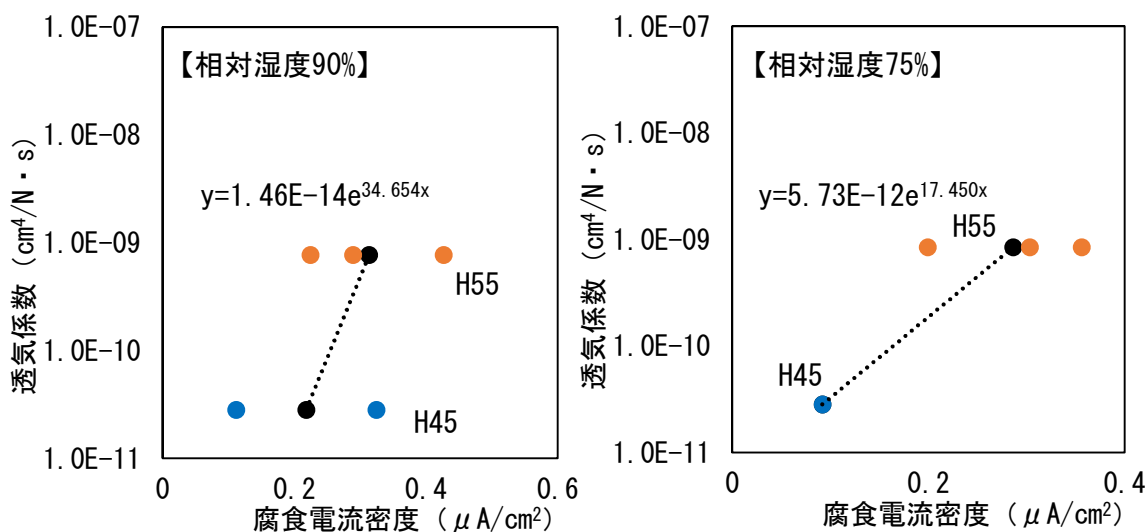


図 5-44 腐食電流密度と透気係数の関係

【相対湿度 90%（実験環境下）から得られた式】

$$y = 1.46E - 14e^{34.654x} \quad (9)$$

【相対湿度 75%（実験環境下）から得られた式】

$$y = 5.73E - 12e^{17.450x} \quad (10)$$

$x$  : 透気係数 ( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ ),  $y$  : 腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

## 5-4-2 腐食電流密度と透気係数の関係式の有用性

前項の室内実験において導き出した腐食電流密度と透気係数の関係式の有用性を確認するために、相対湿度ごとに得られた関係式と実構造物から採取したコア供試体の透気係数を用いて腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合することで関係式の有用性を検証した。

### (1) 対象の構造物および採取したコア供試体の概要

有用性を確認するために使用したコア供試体は、「5-3-2 透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および適用性の評価」で実構造物から採取したコア供試体を用いた。

### (2) 加圧透気試験

実構造物における加圧法による透気試験は、「5-3-2 透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および適用性の評価」と同様の試験方法で透気量を測定し、透気係数を算出した。

### (3) 鋼材腐食の進行予測モデルにおける条件の設定

#### 1) 室内実験で得られた腐食電流密度と透気係数の関係式

室内実験で得られた腐食電流密度と透気係数の関係式は、以下の式(9), (10)である。これらの式の妥当性を確認するため、鋼材腐食の進行予測モデルの条件を設定した。

【相対湿度 90%（実験環境下）から得られた式】

$$y = 1.46E - 14e^{34.654x} \quad (9)$$

【相対湿度 75%（実験環境下）から得られた式】

$$y = 5.73E - 12e^{17.450x} \quad (10)$$

$x$  : 透気係数 ( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ ),  $y$  : 腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

#### 2) 相対湿度

式(9), (10)は、それぞれ相対湿度 90%, 75%の実験環境下で関係式を導き出したものであるが、実構造物の相対湿度は環境条件、状況条件、配合などによって様々である。前述したが実構造物から採取したコア供試体の含水率は 57~65%程度で、式(9), (10)を用いてそれぞれ検証した。

### 3) セメント種類

実構造物に用いられたセメントとして、構造物 D, G は BFS, FA が混和材として使用されていることが分かっている。その他構造物の使用セメントは不明であり、これらの構造物は竣工年から OPC が使用されたものと想定し、セメント種類が異なった場合の適用性を検証した。

### 4) 水結合材比

水結合材比として、構造物 D, G において、BES が用いられた箇所は  $W/B=65\%$ , FA が用いられた箇所は  $W/B=45\%$  である。その他の構造物の  $W/B$  は不明であるが、式(11)で中性化を測定した構造物 A の  $W/B$  を推定すると  $W/B=55\%$  程度であった。一方、構造物 C, E, F は、著しい中性化の進行により  $W/B=75\%$  以上を示し、養生条件、施工方法、健全部、劣化部などの違いが影響していると考えられる。本研究では、 $W/B$  の明らかな  $W/B=45\sim65\%$  の間で検証することとした。

$$y = \gamma_{cb} \cdot (-3.57 + 9.0W/B) \sqrt{t} \quad (11)$$

$y$  : 中性化深さ (mm),  $t$  : 中性化期間 (年)

$W/B$  : 有効水結合材比  $= W / (C_p + k \cdot A_d)$

$W$  : 単位体積あたりの水の質量,  $B$  : 単位体積あたりの有効結合材の質量

$C_p$  : 単位体積あたりのポルトランドセメントの質量

$A_d$  : 単位体積あたりの混和材の質量,  $k$  : 混和材の種類により定まる定数

フライアッシュの場合 :  $k=0$ , 高炉スラグ微粉末の場合 :  $k=0.7$

$\gamma_{cb}$  : 予測の精度に関する安全係数

### 5) 透気係数の適用範囲

本論文で取り扱う透気係数の範囲として、室内実験の円柱供試体の場合は  $W/B=45\sim65\%$  :  $1.0E-11 \sim 1.0E-07$  ( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ ) である。一方、実構造物の場合は、室内実験と比べて養生条件、圧送性確保のため  $W/B$  が高いことなどが影響し、透気係数も  $1.0E-09 \sim 1.0E-05$  ( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ ) の範囲と高くなっている。そのため、図 5-45 に示すように、式(9), (10)の関係式を外挿させて、表 5-14 に示す実構造物のコア供試体から計測した透気係数により、各構造物の腐食電流密度の推定値を算出した。関係式を外挿させて推定した腐食電流密度と外観変状の状況を照合させることで、腐食電流密度と透気係数の関係式の妥当性を検証した。

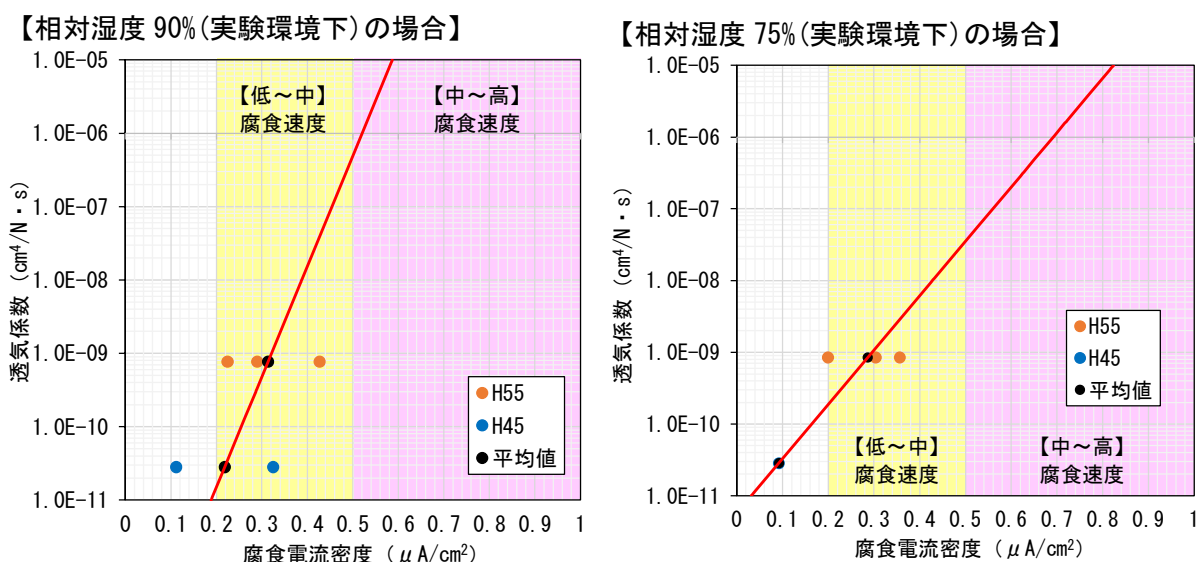


図 5-45 外挿した腐食電流密度と透気係数の関係式

表 5-14 実構造物から採取したコア供試体の透気係数

番号	構造物	透気係数 (cm <sup>4</sup> /N・s)		番号	構造物	透気係数 (cm <sup>4</sup> /N・s)	
		健全部	劣化部			健全部	劣化部
1	A	—	2.53E-06	11	C	3.58E-09	—
2	A	1.66E-08	—	12	C	3.54E-08	—
3	B	8.12E-09	—	13	C	7.11E-09	—
4	B	—	1.72E-07	14	D	2.31E-08	—
5	B	—	3.66E-07	15	D	5.83E-08	—
6	C	—	1.07E-07	16	D	1.16E-09	—
7	C	—	6.84E-08	17	D	1.71E-08	—
8	C	—	7.63E-08	18	E	1.30E-07	—
9	C	—	1.29E-07	19	F	1.08E-06	—
10	C	1.90E-08	—	20	G	5.26E-08	—
—	—	—	—	21	G	6.81E-09	—

#### 6) 鋼材腐食の進行予測モデル

鋼材腐食の進行予測モデルは、(3)の鋼材腐食の進行予測モデルにおける条件の設定を基に、以下の式(12)、(13)と設定した。

【相对湿度 90% (実験環境下) から得られた式】

$$y = 1.46E - 14e^{34.654x} \quad (12)$$

【相对湿度 75% (実験環境下) から得られた式】

$$y = 5.73E - 12e^{17.750x} \quad (13)$$

$W/B$  : 水結合材比 ( $0.45 \leq W/B \leq 0.65$ )

$x$  : 透気係数 (cm<sup>4</sup>/N・s) ( $1.0E-11 \leq x \leq 1.0E-05$ )  $y$  : 腐食電流密度 (μA/cm<sup>2</sup>)



(4) 結果および考察

1) 使用セメントが OPC（想定）の構造物の腐食環境の評価

表 5-15 には、相対湿度 90%（実験環境下）から得られた式を用いて、使用セメントが OPC（想定）の構造物 A, B, C, E, F の透気係数から推定した腐食電流密度の結果、図 5-46 には、推定した腐食電流密度と透気係数の関係を示している。また、写真 5-16 には、構造物 A, B, C, E, F の状況を示す。図 5-46 より、健全部、劣化部に関係なく、ほとんどの構造物の腐食電流密度が 0.2 以上 0.5 以下の低～中程度の腐食速度を示しており、写真 5-16 と比較すると構造物 B, C の劣化部は過少評価されていることが分かる。構造物 A の劣化部は、ASR によるひび割れが生じている箇所であり、外観変状より錆汁は見られていないが、透気係数には顕著にその影響が見られている。

表 5-15 透気係数から推定した腐食電流密度（OPC：想定）

番号	構造物	腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	透気係数 ( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ )	腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	透気係数 ( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ )
		健全部	健全部	劣化部	劣化部
1	A	—	—	0.558	2.53E-06
2	A	0.413	1.66E-08	—	—
3	B	0.393	8.12E-09	—	—
4	B	—	—	0.481	1.72E-07
5	B	—	—	0.503	3.66E-07
6	C	—	—	0.467	1.07E-07
7	C	—	—	0.454	6.84E-08
8	C	—	—	0.457	7.63E-08
9	C	—	—	0.473	1.29E-07
10	C	0.417	1.90E-08	—	—
11	C	0.369	3.58E-09	—	—
12	C	0.435	3.54E-08	—	—
13	C	0.389	7.11E-09	—	—
14	E	0.473	1.30E-07	—	—
15	F	0.534	1.08E-06	—	—

【相対湿度 90%（実験環境下）から得られた式】

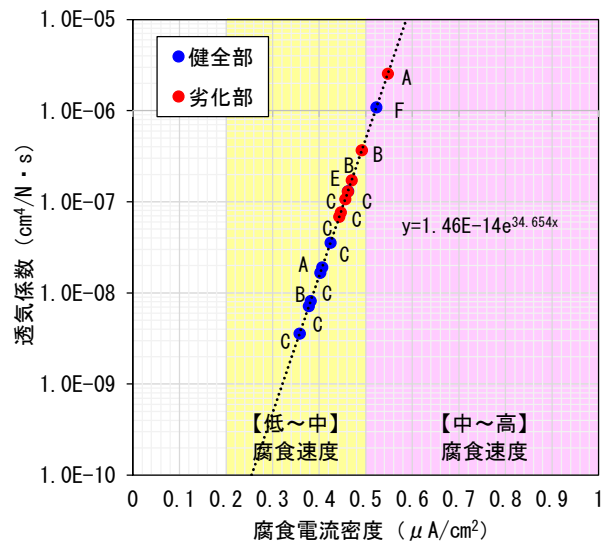


図 5-46 透気係数から推定した腐食電流密度（OPC：想定）



写真 5-16 構造物 A, B, C, E, F の状況

一方、表 5-16 には、相対湿度 75%（実験環境下）から得られた式を用いて、使用セメントが OPC（想定）の構造物 A, B, C, E, F の透気係数から推定した腐食電流密度の結果、図 5-47 には、推定した腐食電流密度と透気係数の関係を示している。相対湿度 75%（実験環境下）から得られた式を用いた場合には、健全部の腐食電流密度は 0.2 以上 0.5 以下の低～中程度の腐食速度を示し、劣化部の腐食電流密度は 0.5 以上 1 以下の中～高程度の腐食速度を示した。また、写真 5-16 より、腐食速度と外観変状を比較すると、外観変状の状態と相応な結果であった。これは、コア供試体の含水率は 57～65%程度であったが、相対湿度 75%（実験環境下）から得られた式の方が実構造物の晒されている環境下に近い状態であったことが要因と考えられる。

また、構造物 E, F は、健全部であっても透気係数が高く、健全部であっても低～中程度の腐食速度、もしくは中～高程度の腐食速度を示した。これについては、いずれも下部工から採取したコア供試体であり、上部工よりも W/B が高い貧配合のコンクリートであったことが要因と考えられる。さらに、構造物 E, F は感潮区間に位置する構造物であり、潮位の影響により水が供給されたことにより、鋼材腐食が進行している可能性も考えられる。ただし、下部工の場合は、設計時に最低限必要なかぶりが上部工と比べて大きいため、実際には腐食が進行していない場合も考えられる。

表 5-16 透気係数から推定した腐食電流密度（OPC：想定）

番号	構造物	腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	透気係数 ( $\text{cm}^4/\text{N}\cdot\text{s}$ )	腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	透気係数 ( $\text{cm}^4/\text{N}\cdot\text{s}$ )
		健全部	健全部	劣化部	劣化部
1	A	—	—	0.742	2.53E-06
2	A	0.454	1.66E-08	—	—
3	B	0.413	8.12E-09	—	—
4	B	—	—	0.588	1.72E-07
5	B	—	—	0.631	3.66E-07
6	C	—	—	0.561	1.07E-07
7	C	—	—	0.535	6.84E-08
8	C	—	—	0.542	7.63E-08
9	C	—	—	0.572	1.29E-07
10	C	0.462	1.90E-08	—	—
11	C	0.366	3.58E-09	—	—
12	C	0.498	3.54E-08	—	—
13	C	0.406	7.11E-09	—	—
14	E	0.572	1.30E-07	—	—
15	F	0.693	1.08E-06	—	—

【相対湿度 75%（実験環境下）から得られた式】

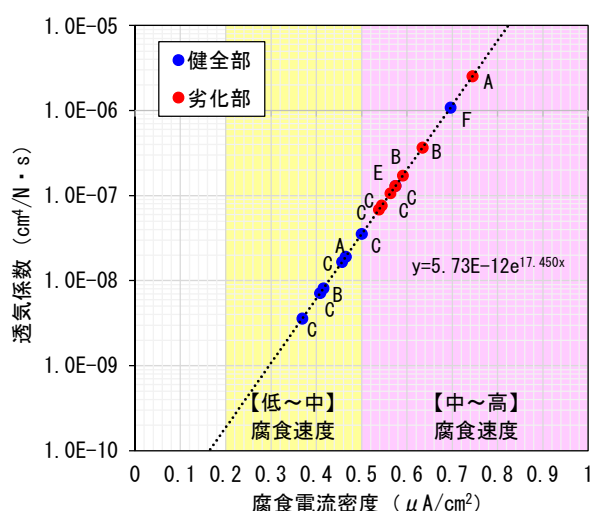


図 5-47 透気係数から推定した腐食電流密度（OPC：想定）

## 2) BFS, FA を混和材として使用した構造物の腐食環境の評価

表 5-17 には、相対湿度 90%（実験環境下）から得られた式を用いて、BFS, FA を混和材として使用した構造物 D, G の透気係数から推定した腐食電流密度の結果、図 5-48 には、推定した腐食電流密度と透気係数の関係を示している。また、写真 5-17 には、構造物 D, G の状況を示す。図 5-48 では、図 5-46 と同様に、相対湿度 90%（実験環境下）から得られた式の場合、腐

食電流密度が 0.2 以上 0.5 以下の低～中程度の腐食速度を示している。構造物 D, G は、 $W/B=45$ 、65%による影響で、健全部であっても透気係数に変化が見られたが、写真 5-17 より、外観変状が見られていない構造物であったため、図 5-46 のような外観変状との違いは見られなかった。

表 5-17 透気係数から推定した腐食電流密度 (BFS, FA)

番号	構造物	腐食電流密度 ( $\mu A/cm^2$ )	透気係数 ( $cm^4/N \cdot s$ )
1	D	0.423	$2.31E-08$
2	D	0.450	$5.83E-08$
3	D	0.337	$1.16E-09$
4	D	0.414	$1.71E-08$
5	G	0.447	$5.26E-08$
6	G	0.388	$6.81E-09$

【相対湿度 90% (実験環境下) から得られた式】

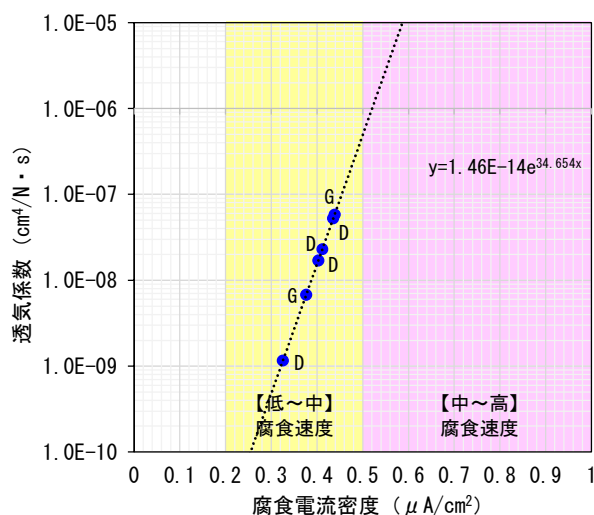


図 5-48 透気係数から推定した腐食電流密度 (BFS, FA)

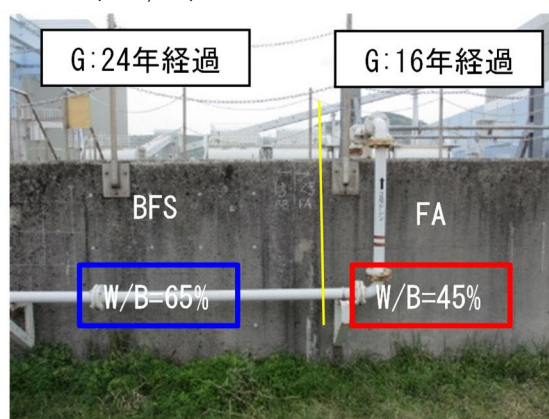
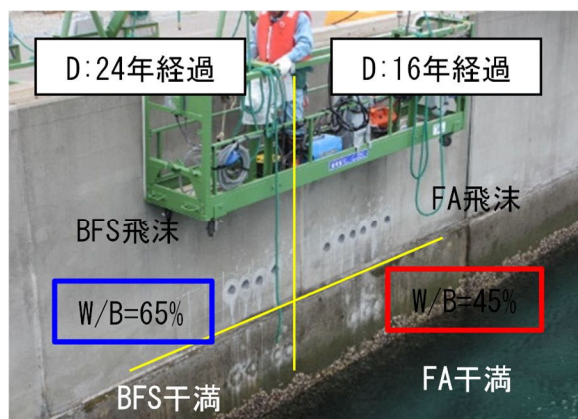


写真 5-17 構造物 D, G の状況

表 5-18 には、相対湿度 75% (実験環境下) から得られた式を用いて、BFS, FA を混和材として使用した構造物 D, G の透気係数から推定した腐食電流密度の結果、図 5-49 には、推定した腐食電流密度と透気係数の関係を示している。相対湿度 75% (実験環境下) から得られた式の場合には、ほとんどが腐食電流密度 0.2 以上 0.5 以下の低～中程度の腐食速度であるが、一部腐食電流密度が 0.5 以上 1 以下の中～高程度の腐食速度を示した。前述のとおり、構造物 D, G で外観変状を伴う劣化は見られていないものの、構造物 D は、飛沫滞、干満滞、構造物 G は海岸から 50m の飛来塩分の影響範囲であるため、今後腐食に発展する可能性も考えられる。

表 5-18 透気係数から推定した腐食電流密度 (BFS, FA)

番号	構造物	腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	透気係数 ( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ )
1	D	0.473	2.31E-08
2	D	0.526	5.83E-08
3	D	0.302	1.16E-09
4	D	0.456	1.71E-08
5	G	0.520	5.26E-08
6	G	0.403	6.81E-09

【相対湿度 75% (実験環境下) から得られた式】

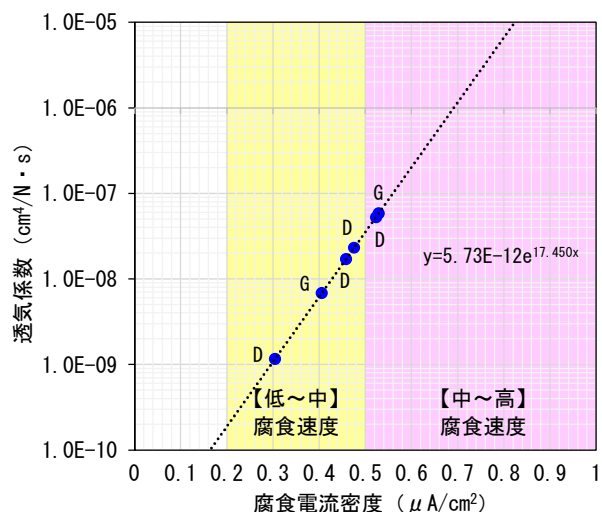


図 5-49 透気係数から推定した腐食電流密度 (BFS, FA)

(5) 腐食電流密度と透気係数の関係式 (鋼材腐食の進行予測モデル)

構造物から採取したコア供試体の透気係数を用いて、室内実験から得られた関係式に代入して腐食電流密度を推定し、この腐食電流密度と実構造物の外観変状の状態を照合した結果、相対湿度 75% (実験環境下) で得られた関係式の場合には、想定した腐食電流密度と外観変状の状態は相応な結果を示し、実構造物のコア供試体の含水率 57～65%程度と概ね同等であることが明らかとなった。また、セメントの種類、混和材の使用による違いは見られなかった。このことから、腐食電流密度と透気係数の関係式で鋼材腐食を評価できることが示された。なお、部位によって W/B、かぶりの違いによる影響が生じるため、透気係数による鋼材腐食の進行予測を行う際は留意する必要がある。

以上の結果より、鋼材腐食の進行予測モデルは、実構造物との検証結果を踏まえて、以下の式(14)と設定した。

$$y = 5.73E-12e^{17.750x} \quad (14)$$

$W/B$  : 水結合材比 ( $0.45 \leq W/B \leq 0.65$ )

$x$  : 透気係数 ( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ ) ( $1.0E-11 \leq x \leq 1.0E-05$ )

$y$  : 腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

## 5-5 鋼材腐食抵抗性に関する検討

### 5-5-1 実験概要

本実験では、コンクリートで円柱供試体および角柱供試体を作製し、圧縮強度試験、塩水浸漬試験、電気泳動試験、鋼材腐食促進試験を行った。

#### (1) 使用材料

本実験に用いた材料およびその物性は、表 5-19 に示すとおりである。

表 5-19 材料および物性値

略語	材料	物理的性質
N	普通ポルトランドセメント	密度( $3.16\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $3,280\text{cm}^2/\text{g}$ )
H	早強ポルトランドセメント	密度( $3.14\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $4,480\text{cm}^2/\text{g}$ )
B4	高炉スラグ微粉末4000	密度( $2.91\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $4,260\text{cm}^2/\text{g}$ )
B6	高炉スラグ微粉末6000	密度( $2.91\text{g/cm}^3$ ),比表面積( $5,970\text{cm}^2/\text{g}$ )
S	細骨材(海砂)	表乾密度( $2.58\text{g/cm}^3$ ),吸水率(1.40%)
G	粗骨材(碎石)	表乾密度( $2.67\text{g/cm}^3$ ),吸水率(1.14%)
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体 (標準形 I 種)	
AE剤	アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤 (I 種)	

#### 1) セメント

作製したコンクリートには、セメントとして普通ポルトランドセメント（略号 N，密度  $3.16\text{g/cm}^3$ ），早強ポルトランドセメント（略号 H，密度  $3.14\text{g/cm}^3$ ）を用いた。また，早強ポルトランドセメントの混和材には，JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」に適合する高炉スラグ微粉末 4000（略号 B4，密度  $2.91\text{g/cm}^3$ ），高炉スラグ微粉末 6000（略号 B6，密度  $2.91\text{g/cm}^3$ ）をそれぞれ早強ポルトランドセメントの重量に対して置換率を変化させて使用した。

#### 2) 練混ぜ水

練混ぜ水は，水道水を使用した。

#### 3) 骨材

細骨材は福岡県玄海産海砂（密度  $2.58\text{g/cm}^3$ ），粗骨材は福岡県産の安山岩碎石（密度  $2.67\text{g/cm}^3$ ）を使用した。

#### 4) 混和剤

混和剤は，リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体（標準形I種），アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤（I種）を使用した。

# 5) 配合，練混ぜ方法および供試体形状

供試体は，W/B40%， W/B45%， W/B50%， W/B55%の 4 水準で，置換率を変化させた供試体を作製した。いずれの配合も目標スランプ 10±2.0cm，目標空気量 4.5±1.5%とした。配合表は，表 5-20 に示すとおりである。供試体の形状は，圧縮強度試験，塩水浸漬試験および電気泳動試験用に φ100mm×200mm の円柱供試体，鋼材腐食促進試験用に鋼材（異形鉄筋：D10×110mm）を埋設させた 100mm×80mm×400mm の角柱供試体をそれぞれ作製した。

表 5-20 配合表

配合名	W/B (%)	置換率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )									s/a (%)
			W	B=N+H+B4+B6				S	G	AE減水剤 (%)	AE剤 (%)	
				N	H	B4	B6					
N45	45	—	162	360	—	—	—	776	1022	5.3	1.3	43.2
N45 B4 50		50	164	182	—	182	—	755	1035	5.5	1.4	42.2
N45 B4 60		60	162	144	—	216	—	759	1041	5.5	1.4	42.2
N45 B4 70		70	160	107	—	249	—	762	1046	5.3	1.3	42.1
N45 B4 80		80	157	70	—	279	—	768	1054	4.9	1.2	42.2
H40	40	—	164	—	410	—	—	722	1031	6.2	1.6	41.2
H40 B4 30		30	162	—	284	122	—	725	1037	6.2	1.5	41.1
H40 B4 50		50	163	—	204	204	—	723	1034	6.2	1.5	41.1
H40 B6 30		30	174	—	305	—	131	680	1012	7.5	1.8	41.0
H40 B6 50		50	165	—	207	—	207	702	1046	6.3	1.6	40.2
H40 B6 70		70	166	—	125	—	291	701	1043	6.5	1.6	40.2
H45	45	—	164	—	364	—	—	772	1017	5.5	1.3	43.2
H45 B4 30		30	163	—	253	109	—	774	1020	5.5	1.4	43.1
H45 B4 50		50	161	—	179	179	—	778	1025	5.4	1.4	43.2
H45 B6 30		30	172	—	267	—	115	739	1014	6.6	1.6	43.0
H45 B6 50		50	166	—	185	—	185	751	1030	5.8	1.4	42.2
H45 B6 70		70	163	—	109	—	253	757	1038	5.7	1.4	42.2
H50		50	—	164	—	328	—	—	803	1016	5.0	1.2
H50 B4 30	30		160	—	224	96	—	829	1007	4.9	1.2	45.2
H50 B4 50	50		158	—	158	158	—	815	1030	4.4	1.1	44.2
H50 B6 30	30		174	—	244	—	104	778	984	5.7	1.4	45.0
H50 B6 50	50		159	—	159	—	159	741	1103	4.1	1.0	40.2
H50 B6 70	70		157	—	94	—	220	744	1108	4.0	1.0	40.2
H55	55	—	168	—	305	—	—	854	958	4.8	1.1	48.0
H55 B6 30		30	171	—	218	—	93	839	960	5.0	1.2	47.5
H55 B6 50		50	172	—	157	—	157	829	967	4.5	1.2	47.0
H55 B6 70		70	173	—	95	—	221	809	983	5.0	1.3	46.0

# 6) 養生

養生は，打設から 24 時間後に脱型を行った後，水中養生（温度 20℃）を材齢 28 日まで行った。



## (2) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、「5-2 実構造物の物質移動抵抗性および外観変状との関係性」と同様に、作製した円柱供試体を用いて、JIS A 1108 : 2018「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて、材齢 28 日で行った。いずれの水準においても 3 体で圧縮強度を測定し、平均値を測定結果として記した。

## (3) 塩水浸漬試験（全塩化物イオン濃度、塩化物イオンの見掛けの拡散係数）

塩水浸漬試験は、「5-2 実構造物の物質移動抵抗性および外観変状との関係性」と同様に、塩化物イオンが浸透している範囲から 1cm の深さごとに試料を採取し、JIS A 1154 : 2020「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、電位差滴定装置により塩化物イオン含有量を算出した。また、深さごとに得られた全塩化物イオン濃度を基に、SCE-G572-2010「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法（案）」に準拠して、Fick の拡散方程式により塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。

## (4) 電気泳動試験

電気泳動試験は、JSCE-G571-2010「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法（案）」に準拠して行った。供試体は、28 日間の水中養生を行った  $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  の円柱コンクリートを切断し、 $\phi 100\text{mm} \times 50\text{mm}$  の供試体を 3 体作製した。以下には、電気泳動試験の測定手順を示す。

### 【電気泳動試験の測定手順】

- 1) 供試体の円周面を乾燥させた後、エポキシ樹脂を被覆する。
- 2) 供試体を水で飽和させるために、真空飽和处理を行う。供試体を水の入ったデジケータ内に静置し、真空度が 150Pa 以下になるように真空ポンプで吸引し、供試体が水没するまで蒸留水を注入する。
- 3) 真空飽和处理後、蒸留水から取り出した供試体は、試験面が乾燥しないように注意しながら、試験装置に設置する。
- 4) 陽極槽に水酸化ナトリウム (NaOH) 水溶液 0.3mol/l を、陰極槽に塩化ナトリウム (NaCl) 水溶液 0.5mol/l をそれぞれ注入し、直流電源で 15V 印加する。(写真 5-18)
- 5) 所定の間隔で、溶液間の電位差および陽極槽の塩化物イオン濃度の測定を行う。
- 6) 陽極槽の塩化物イオン濃度をグラフにより確認し、式(15)により実効拡散係数を算出する。

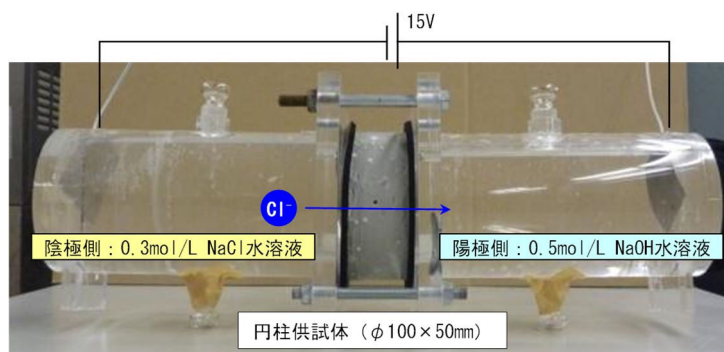


写真 5-18 電気泳動試験の状況

$$D_e = \frac{(J_{cl}RTL)}{|Z_{cl}|FC_{cl} (\Delta E - \Delta E_c)} \times 100 \quad (15)$$

$D_e$  : 実効拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{year}$ ),  $R$  : 気体定数 ( $8.31\text{J}/\text{mol} \cdot \text{K}$ )  
 $J_{cl}$  : 塩化物イオンの定常状態における流束 ( $\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{year})$ )  
 $T$  : 絶対温度測定値 ( $\text{K}$ ),  $Z_{cl}$  : 塩化物イオンの電荷 ( $=-1$ )  
 $F$  : ファラデー定数 ( $96,500\text{C}/\text{mol}$ ),  $L$  : 供試体の厚さ ( $\text{mm}$ )  
 $C_{cl}$  : 陰極側の塩化物イオン濃度測定値 ( $\text{mol/l}$ )  
 $\Delta E - \Delta E_c$  : 供試体表面間の測定電位 ( $\text{V}$ )

##### (5) 鋼材腐食促進試験

図 5-50 には、作製した供試体の概略図を示す。供試体は、D10×110mm の鋼材（異形鉄筋）を埋設させた 100mm×80mm×400mm の角柱供試体を作製し、28 日間の水中養生を行った後、100×80×80mm（5 分割）ごとに切断した。鋼材には、あらかじめ導線を取り付け、かぶりは 20mm とした。切断後は、供試体を乾燥させ、鋼材の中央上部にプラスチック容器を取り付け、温度  $20 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 、湿度  $60 \pm 5\%$  の環境下で、濃度 10% の NaCl 溶液を浸透させた（写真 5-19）。

NaCl 溶液の浸透期間中は、自然電位および分極抵抗を測定し、腐食状況および腐食時期を適切に判断した。腐食が確認された供試体は、各種塩化物イオン濃度および pH を測定後、供試体を解体し、コンクリートに埋設した鋼材の腐食面積率および腐食重量を測定した。各種測定方法は、「5-4-1 透気係数と鋼材腐食の関係性」と同様の方法で、腐食を判定した。



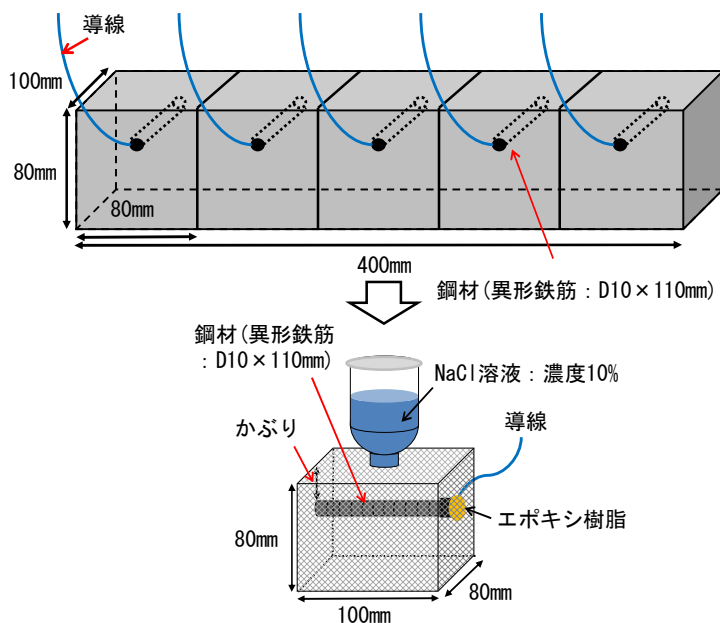


図 5-50 供試体の概略図

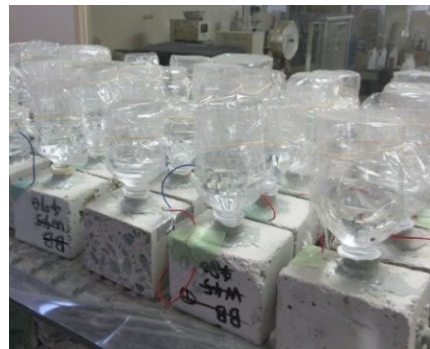


写真 5-19 NaCl 溶液の浸透状況

### 1) 自然電位の測定

NaCl 溶液の浸透期間中は、鋼材の腐食状況を経時的に確認するために、「5-4-1 透気係数と鋼材腐食の関係性」と同様の方法で、写真 5-20 で示すマルチメーターおよび直流電流計と鉛照合電極を用いて、JCSE 601-2007「コンクリート構造物における自然電位測定方法」に準拠して自然電位を測定した。自然電位の測定箇所は、図 5-51 に示した箇所において、測定面を水で湿润状態にした後に測定した。



写真 5-20 自然電位の測定状況

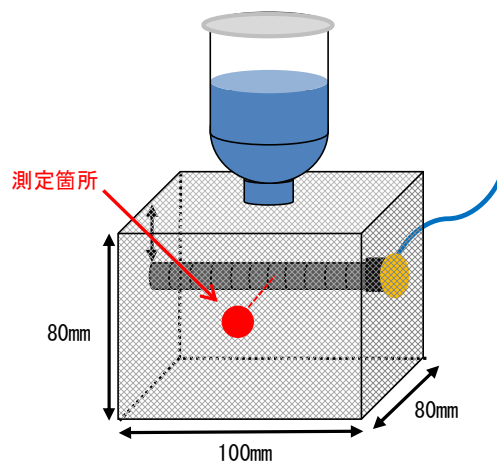


図 5-51 自然電位の測定位置

### 2) 分極抵抗の測定

分極抵抗は、写真 5-21 に示す鋼材腐食診断器、ガラス電極、ステンレス板を使用して交流インピーダンス法により測定した。なお、自然電位の測定結果より、腐食と判断された供試体において、解体直前に分極抵抗の測定を行った（図 5-52）。



写真 5-21 分極抵抗の測定機器

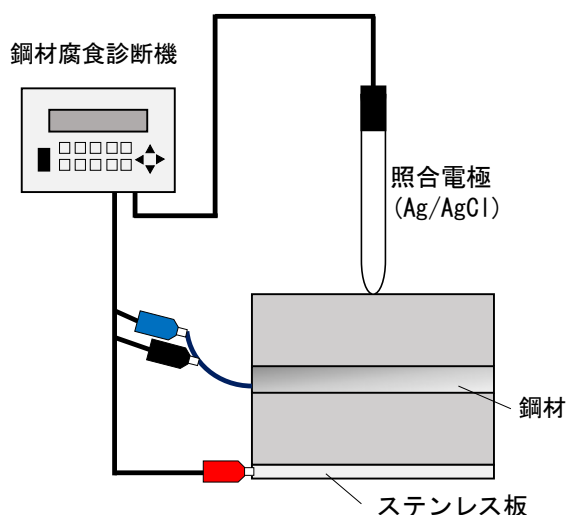


図 5-52 分極抵抗の測定位置

### 3) 各種塩化物イオン濃度の測定（可溶性塩化物イオン濃度）

1) 自然電位の測定において、腐食と断定した供試体は、プラスチック容器を取り外し、乾燥した後、JIS A 1154 に準拠して溶液浸透箇所（図 5-53）から試料を採取した。かぶり 10mm の供試体においては、5mm 間隔で浸透深さ 20mm まで、かぶり 20mm は、深さ 30mm まで、かぶり 30mm は、深さ 40mm まで試料を採取した。試料を採取した後は、供試体を圧縮強度試験機で解体した。その後、図 5-54 に示している鋼材とコンクリートの付着位置から深さ 2mm 程度で試料を採取した。採取した試料は、(3) 塩水浸漬試験と同様の手順で全塩化物イオン濃度および鋼材とコンクリートの付着位置の可溶性塩化物イオン濃度を測定した。

### 4) 鋼材の腐食面積率および腐食重量

供試体から取り出した鋼材は、「5-4-1 透気係数と鋼材腐食の関係性」と同様の方法で、付着したモルタルを除去した後、腐食面積率および腐食重量を測定した。

### 5) pH の測定

pH の測定は、図 5-54 の位置から採取したコンクリートの粉末試料 0.3g と蒸留水を混合して検液重量を 30g とし、スターラーで 24 時間攪拌することで可溶性イオンを抽出し、防水ペーハー計により測定を行った。（写真 5-22）。

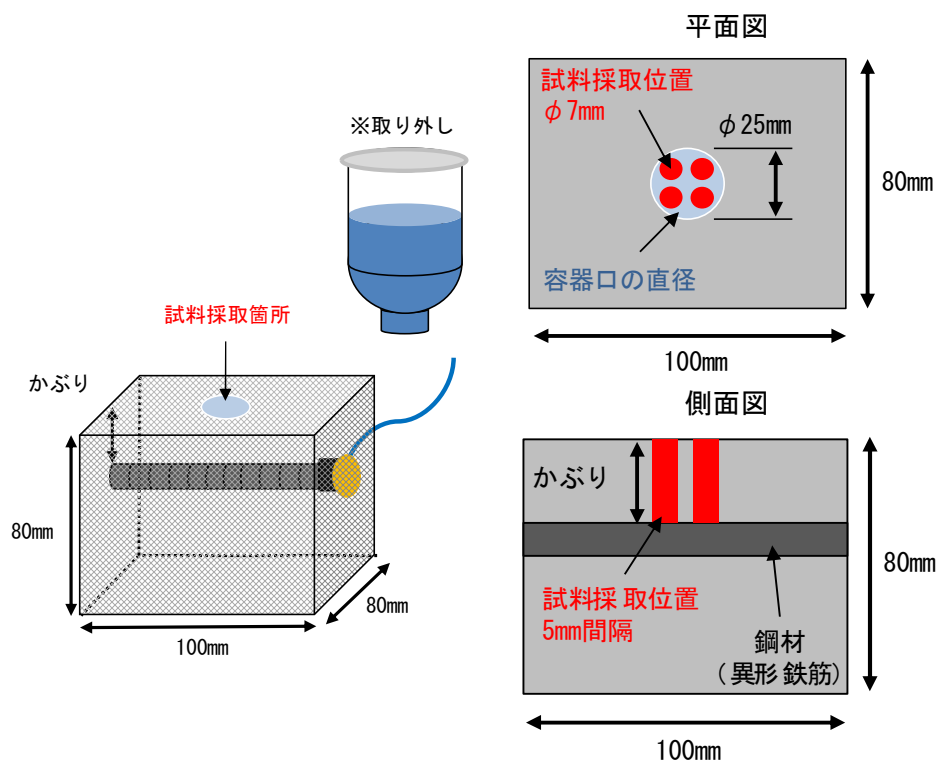


図 5-53 試料採取箇所の概要

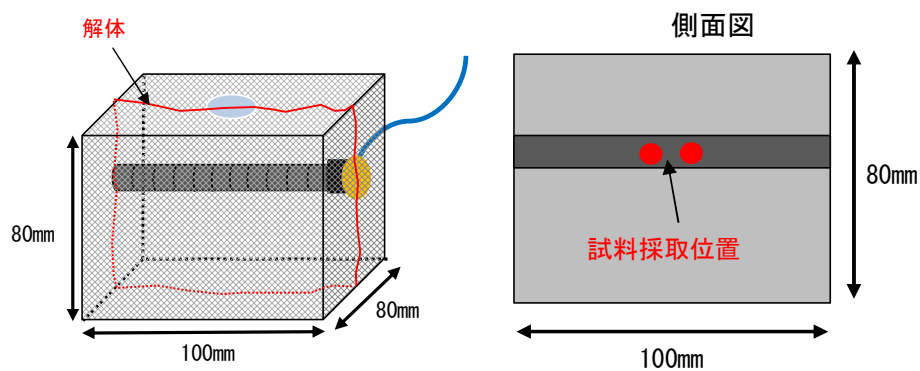


図 5-54 解体後の試料採取箇所の概要



写真 5-22 pH 測定の状態

## 5-5-2 結果および考察

### (1) 圧縮強度

図 5-55 には、水結合材比 40%の比表面積 4000 ブレーンおよび 6000 ブレーンを早強ポルトランドセメントに混和した供試体の圧縮強度の経時変化を一例として示す。まず、4000 ブレーンを置換したのを見ると、材齢 7 日目における圧縮強度は、高炉スラグの置換率 0%と 30%で同等であり、50%になると低下していた。しかしながら、材齢が進むにつれて、高炉スラグを置換した供試体に強度発現性を見られ、材齢 91 日目での圧縮強度では、高炉スラグの置換率 0%が最も低く、置換率 30%、50%で同等の圧縮強度を示した。

次に、6000 ブレーンを置換したのを見ると、材齢 7 日における圧縮強度は、置換率に関らず、いずれも同程度の値を示した。比表面積 6000 ブレーンを使用することで、材齢 7 日目における圧縮強度を早強ポルトランドセメントと同等まで向上できることが分かった。また、材齢 91 日目における圧縮強度の置換率の違いでは、置換率 50%が最も高く、置換率 30%、70%の順であった。

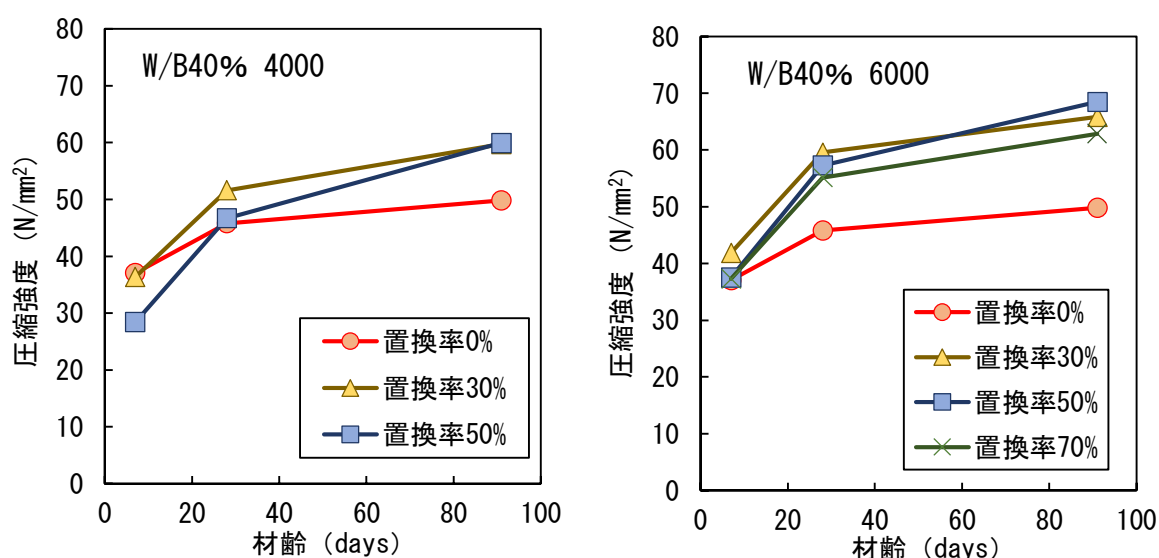


図 5-55 材齢ごとの圧縮強度 (W/B40%)

### (2) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数，実効拡散係数

図 5-56 には、塩水浸漬試験から得た全塩化物イオン濃度から算出した配合ごとの塩化物イオンの見掛けの拡散係数の結果を示している。塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、いずれも長期の浸漬期間、置換率が増加するに従って低下した。同置換率においてブレーン値が異なる H45 B4 50 と H45 B6 50 を比較すると、浸漬期間 6 ヶ月での塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、同等であったが、浸漬期間 12 ヶ月になると、H45 B6 50 < H45 B4 50 となっており、塩化物イオン浸透抵抗性は、高炉スラグの比表面積が大きいものほど、空隙がより緻密になることが分かっている。さらに、浸透した塩化物イオンが硬化体界面に吸着することで生じる電気的相互作用

が強く働いていたことで、その後の塩化物イオンが浸透し難くなった結果、長期的な塩化物イオン浸透に対する抵抗性が優れると考えられた<sup>20)</sup>。

次に、セメントの種類の違いでは、H45（早強ポルトランドセメント単味）の塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、N45（普通ポルトランドセメント単味）よりも高くなっており、また、高炉スラグを置換したもので比較すると、4000 ブレーンを置換した H45 B4 50 は、同置換率における N45 B4 50 よりも高くなっている。6000 ブレーンを置換した H45 B6 50, H45 B6 70 では、N45 B4 50, N45 B4 70 と同等であった。以上のことから、早強ポルトランドセメントに高炉スラグを置換した場合の塩化物イオン拡散係数特性値  $D_k$  は、4000 ブレーンの場合普通ポルトランドセメントに置換したものよりも高く、6000 ブレーンの場合同等となることが考えられる。

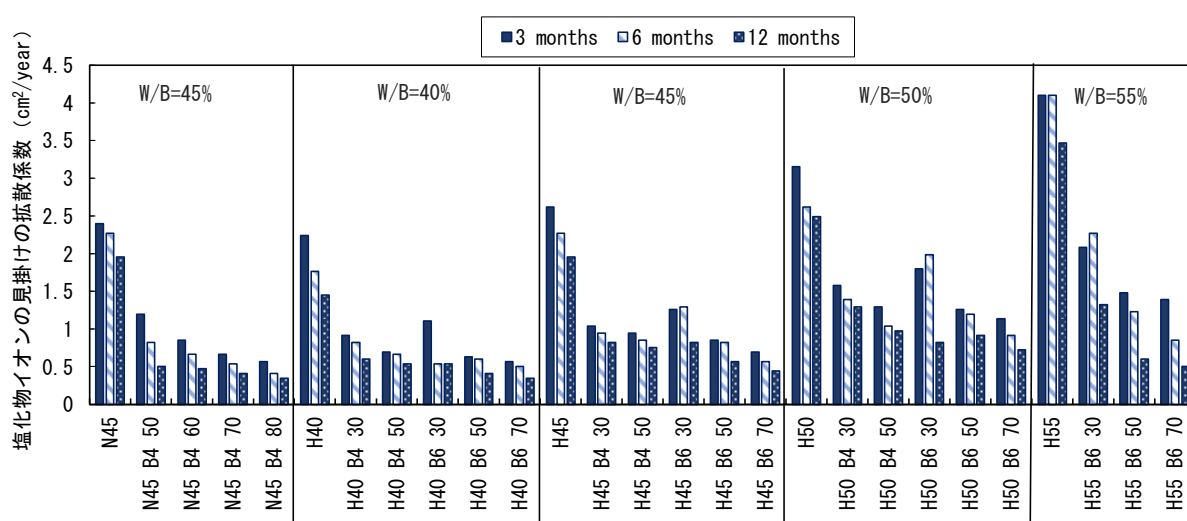


図 5-56 配合ごとの塩化物イオンの見掛けの拡散係数

図 5-57 には、電気泳動試験から算出された配合ごとの実効拡散係数を示す。実効拡散係数は、高炉スラグを置換することで塩化物イオンの見掛けの拡散係数と同様に低くなり、さらに置換率の増加に伴い低下した。また、早強ポルトランドセメント単味（H40, H45, H50, H55）の実効拡散係数は、普通ポルトランドセメント単味（N45）よりも高くなっているが、高炉スラグを置換したものは、早強ポルトランドセメント方が高置換率になるにつれて低くなる傾向を示した。この点については、例えば H45 B4 50 と N45 B4 50 の電気泳動試験の養生期間である材齢 28 日の圧縮強度を比較すると、 $43.1\text{N/mm}^2$  と  $40.8\text{N/mm}^2$  であったことから、早強ポルトランドセメント方がスラグを混和したことによる塩化物イオンに対する抵抗性が早く発現していると思われる。また、塩水浸漬試験と電気泳動試験では、塩化物イオンが移動する支配的な空隙径が異なることから<sup>19)</sup>、細孔構造の違いが影響していると考えられるが、この点については、今後詳細に検討を行っていく必要がある。

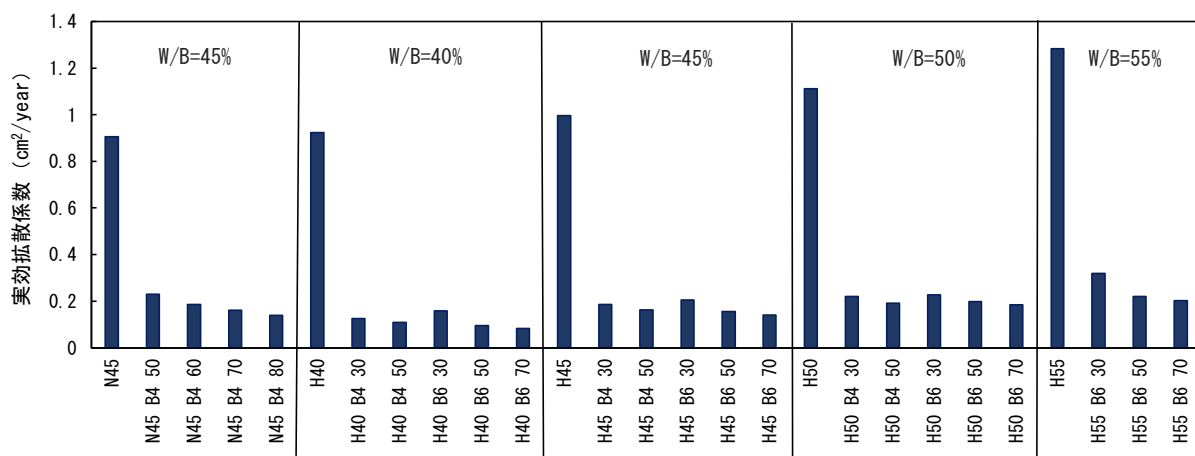


図 5-57 配合ごとの実効拡散係数

図 5-58 は、6 ヶ月間の塩水浸漬による塩化物イオンの見掛けの拡散係数と電気泳動試験による実効拡散係数の関係を示す。本研究では、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末（4000 ブレーン）を置換した供試体について W/B=45%の配合しか作製していないため、置換率 50%～80%の結果を図示している。また、一部の供試体において、塩水浸漬期間 12 ヶ月に達していないものもあるため、6 ヶ月の結果を示している。この結果より、全ての配合において、両者の拡散係数の間には相関性が見られているが、上述に示した様に早強ポルトランドセメントに高炉スラグを置換したものは、普通ポルトランドセメントへの置換に比べて、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が同等の場合、実効拡散係数が小さくなっていた。

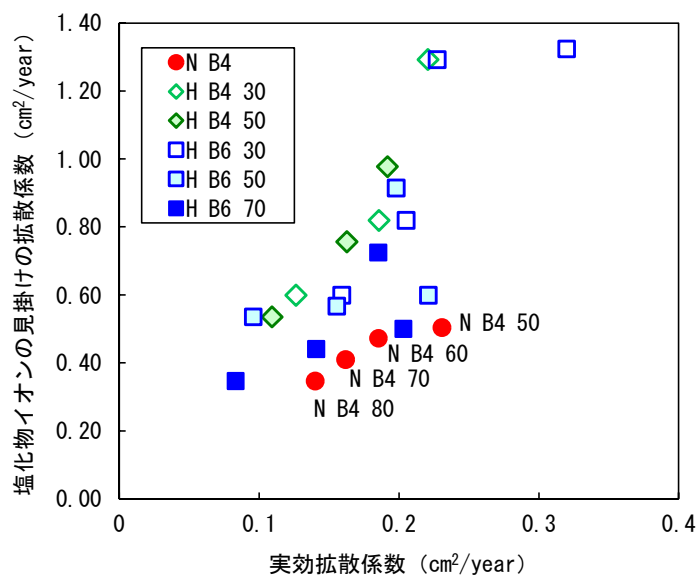


図 5-58 実効拡散係数と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

### (3) 分極抵抗

図 5-59 は、配合ごとの分極抵抗を示している。セメント種類ごとで見ると、分極抵抗は、早強ポルトランドセメントの方が普通ポルトランドセメントに比べると低くなっており、さらに、スラグの置換率の増加に伴い、高くなる傾向を示した。

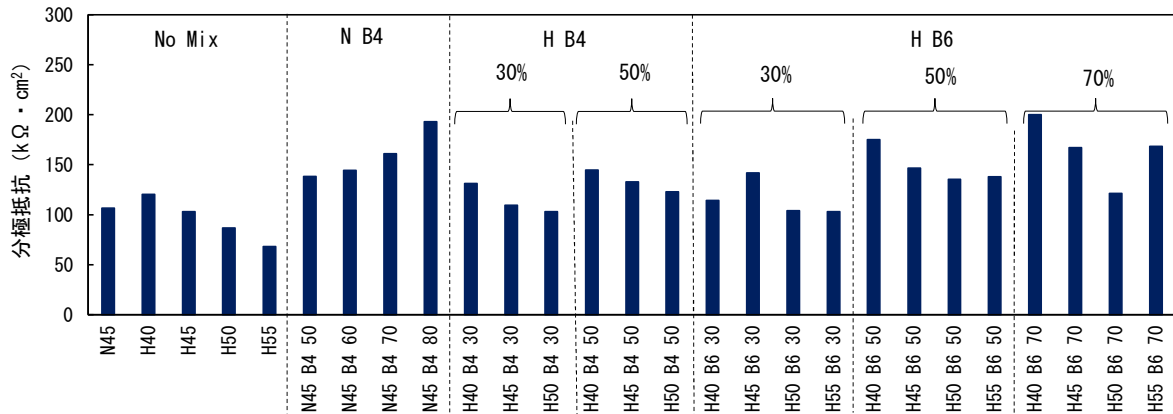


図 5-59 配合ごとの分極抵抗

鋼材の腐食環境を表す分極抵抗値と塩化物イオンに対する抵抗性を示す塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係性より、塩害劣化に対する抵抗性を評価するため、図 5-60 には塩化物イオンの見掛けの拡散係数と分極抵抗（浸漬期間 12 ヶ月）の関係を示す。いずれの配合においても、分極抵抗の上昇とともに、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は低下する傾向を示した。セメントの種類が異なる場合でも、分極抵抗と拡散係数の関係には相関性が見られ、高炉スラグが高置換であるほど分極抵抗が高く、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が低い傾向にあった。

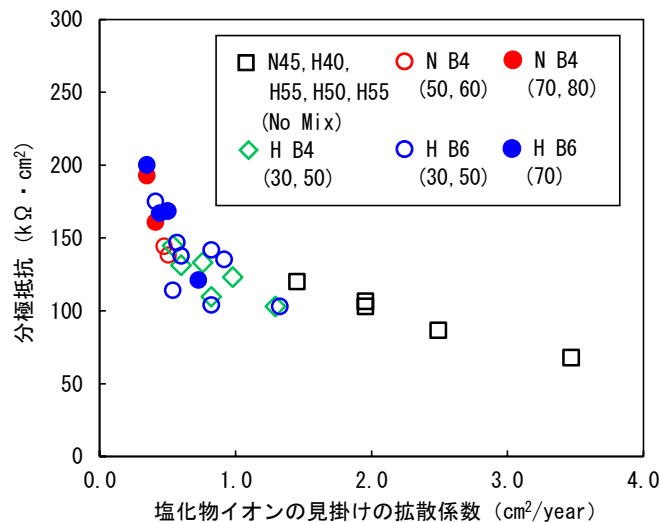


図 5-60 塩化物イオンの見掛けの拡散係数と分極抵抗の関係



この結果から、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末 4000 ブレーンを置換したものは、同程度の腐食に対する抵抗性があると推察された。また、スラグ 6000 ブレーンを置換したものは、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が同等の場合、分極抵抗が 4000 ブレーンよりも高くなる傾向にあることから、さらなる腐食に対する抵抗性を期待できると考えられる。

図 5-61 は、一例として測定日数と自然電位の関係（経時変化）を示している。供試体の解体の目安として自然電位を定期的に計測し、-350mV から卑化した時点(b, d, e)で「腐食」と判断した。解体した供試体は、全塩化物イオン濃度および pH を測定し、腐食状況は、腐食面積率と腐食重量の測定により評価した。

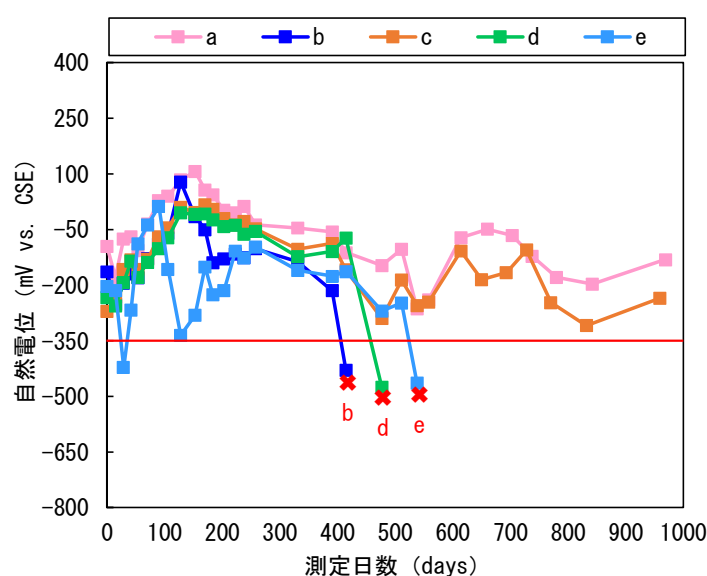


図 5-61 解体時の目安：測定日数と自然電位の関係（経時変化）

図 5-62 は、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を算出するための試験において、鋼材の腐食面積率とかぶり 2cm 位置の全塩化物イオン濃度の関係を示している。なお、実験期間中に腐食が確認された配合(W/B=45%)のみを記載している。腐食面積率は、鋼材位置の全塩化物イオンが多いものほど増加する傾向を示している。スラグ置換率で違いが見られ、スラグ置換率 70% の腐食面積率は、スラグ置換率 50%と比較すると、全塩化物イオン濃度が同程度であっても大きいことが分かる。これは、従来から言われているとおり、図 5-63 に示す pH の測定結果を見ると、置換率の増加に伴って pH の低下を確認することができた。分極抵抗が高いことから電気的な抵抗に対しては向上するが、やはり pH の低下の影響により、普通ポルトランドセメントにスラグを置換したものと同様に、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度は、低下するものと考えられる。



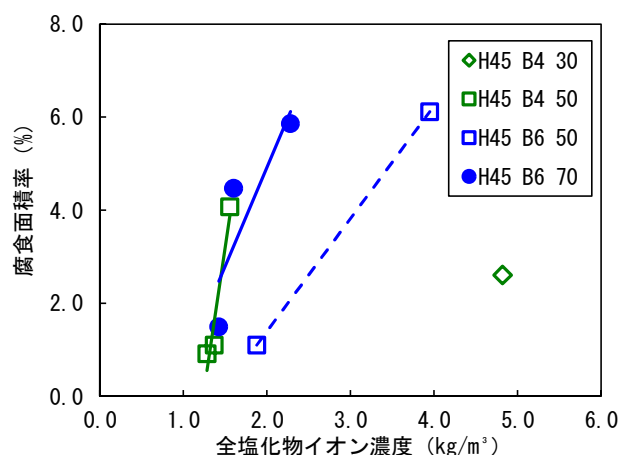


図 5-62 全塩化物イオン濃度と腐食面積率の関係

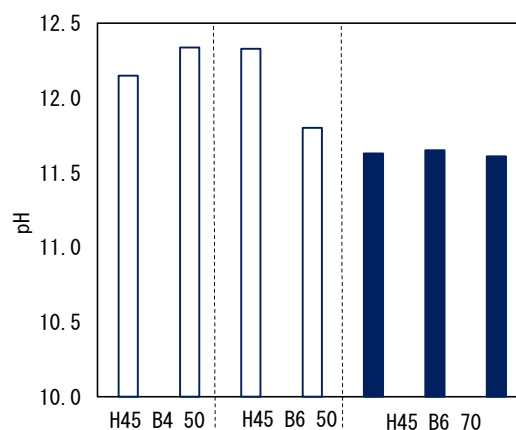


図 5-63 pH の測定結果

## 5-6 まとめ

本章では、以下の知見を得ることができた。

### 5-6-1 実構造物の物質移動抵抗性および外観変状の関係性

- ・ 実構造物のコア法による圧縮強度は、1960 年代以降から増加する傾向を示した。また、水掛かりの有無による圧縮強度への影響は確認されなかった。
- ・ 実構造物のコア法による圧縮強度と反発度法による圧縮強度では、反発度法による圧縮強度の方が全体的に大きく算出され、ばらつきも大きくなっている。
- ・ 有明海のような干満の潮位差が最大 6.0m 程度の地域において、塩化物イオン含有量を調査した結果、河口部（起点）から実構造物までの距離が 12,500m 離れた河川構造物で、塩化物イオンの浸透が確認された。また、飛来塩分などの影響がないとされる地域でも、感潮区間では、海水が河川を遡上する影響で塩害による鋼材腐食が生じてコンクリートの剥離・剥落が生じる可能性が示唆された。
- ・ 実構造物における腐食グレード別の中性化残りとして、外観変状なしの中で、「水掛かりなし」の場合には中性化残り 10mm 以下を示す構造物が数多く確認された。このことから、「水掛かりなし」の箇所においては、かぶりよりも深部に中性化が至っていても鋼材腐食が生じにくく、腐食ひび割れの発生、錆汁、剥離が生じて外観に変状を発生させないと推察された。

### 5-6-2 透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および適用性の評価

- ・ 実構造物からの採取したコア供試体における透気係数と圧縮強度の間には、相関性が確認されず、実構造物の圧縮強度だけでは、劣化因子に対する物質移動抵抗性を評価することが難しいことが示された。また、圧縮強度が同等であっても透気係数が大きいものほど、鋼材腐食によるコンクリートの剥離・剥落が生じていた。
- ・ 透気係数と中性化速度係数の間には、室内実験で作製した円柱供試体や実構造物のコア供試体を含めてセメント種類ごとで高い相関性が確認され、透気係数によって物質移動抵抗性の優劣を評価できる指標となることが分かった。
- ・ 透気係数の測定によって、実構造物の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を推定することは難しい結果が得られた。ただし、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が同等であっても外観変状が見られた劣化部の透気係数は、健全部よりも明らかに大きくなっていた。これは、透気係数が大きいものほど、酸素の供給量が多いため、鋼材腐食の進行が早くコンクリートの剥離・剥落が生じる可能性がある。
- ・ 今回室内で作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体で比較した結果、透気係数と物質移動抵抗性の間である程度の相関が見られた。このことから、実構造物の採取コアを用いて透気係数を測定することで、鋼材腐食によるコンクリートの剥離・剥落が生じ易いか否かを評価する指標として適用できると考えられた。

### 5-6-3 透気係数による鋼材腐食の評価

- ・ 高炉スラグ微粉末を添加することによって、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度は低下するが、腐食発生後の腐食速度は抑制される。
- ・ 相対湿度と NaCl 添加量は、アノード反応に影響を及ぼしており、相対湿度、NaCl 添加量ともに増加するに従って反応が促進される。また、結合材の種類が異なると同条件においてカソード反応に違いが見られた。高炉スラグ微粉末を置換することでカソード反応の抑制が確認された。
- ・ 塩化物イオンの固定化割合は、高炉スラグ微粉末を混和することで増加し、腐食に影響を及ぼす可溶性塩化物イオン濃度の抑制効果が期待できる。
- ・ 可溶性塩化物イオン濃度と腐食電流密度の関係性は、結合材の種類ごとで高い相関性が確認された。可溶性塩化物イオン濃度が同等の場合には、H55 の腐食電流密度が 1.0 に

対して、H55B4 は 0.9, H55B6 は 0.7 であった。

- ・ 高炉スラグ微粉末を置換することで、NaCl 添加量や相対湿度の違いに限らず、腐食発生後の腐食の進展を抑制できることが分かった。
- ・ 腐食電流密度と腐食重量の関係性は、結合材の種類による違いを確認できなかったが、いずれの結合材種類においても、腐食電流密度で腐食の進展を評価することが可能であることが分かった。
- ・ W/B=45%の透気係数は、いずれも W/B=55%よりも小さくなる結果を示した。しかしながら、コンクリート中の含水率と静置環境の相対湿度の違いにより、同結合材比における相対湿度の増加に伴った透気係数の変化はほとんど見受けられず、相対湿度と透気係数の関係性は明らかにできなかった。
- ・ 相対湿度 90%（実験環境下）から得られた式を用いて、使用セメントが OPC（想定）の構造物の腐食電流密度を推定し、外観変状の状態と照合した結果、劣化部において過少評価される傾向が見られた。
- ・ 相対湿度 75%（実験環境下）から得られた式を用いて、使用セメントが OPC（想定）の構造物の腐食電流密度を推定し、外観変状の状態と照合した結果、相対湿度が実構造物の晒されている環境下に近い状態であったため、健全部および劣化部ともに相応な結果を示した。
- ・ BFS, FA を混和材として使用した構造物においても、OPC（想定）の構造物の腐食電流密度を推定結果と同様の傾向が見られた。
- ・ 相対湿度 75%（実験環境下）で得られた関係式の場合には、外観変状の状態に類似していることが明らかとなり、腐食電流密度と透気係数の関係式で鋼材腐食を評価できることが示された。

#### 5-6-4 鋼材腐食抵抗性に関する検討

- ・ 早強ポルトランドセメントに高炉スラグ置換した塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、50%置換率において 4000 ブレーンの場合、普通ポルトランドセメントに置換したものよりも高かった。また、6000 ブレーンの場合では、置換率 50%、70%とも同置換率で同等であった。

- ・ 分極抵抗は高炉スラグ微粉末を置換することで上昇するが、pH の低下の影響により、置換率が増加するに従って、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度は低くなる。
- ・ 腐食面積比が同程度の場合には、4000 ブレーンと比べて、6000 ブレーンを置換した方の全塩化物イオン濃度は多いことから、さらなる腐食に対する抵抗性があると推察された。

#### [参考文献]

- 1) 氏家勲：実構造物コンクリートにおいて劣化予測に用いる定量的指標を得るための点検方法の開発，科学研究費助成事業 研究成果報告書，2015.6
- 2) 下澤和幸，今本啓一，山崎順二，永山勝：鉄筋コンクリート構造物の耐久性能検証のための透気性試験による指標値と中性化深さの関連について，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No. 1, pp. 2005-2010, 2009
- 3) 山崎順二，今本啓一，下澤和幸，永山勝：原位置での簡易透気性とかぶり厚さによる RC 構造体の耐久性評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No. 1, pp. 1999-2004, 2009
- 4) 小野聖久，上東泰：非破壊試験による密実性評価とコンクリートの耐久性に関する考察，土木学会第 60 回年次学術講演会，5-259, pp. 517-518, 2006.9
- 5) 下澤和幸，永山勝，今本啓一，山崎順二，二村誠二：かぶりコンクリートの耐久性能評価に関する簡易試験法の開発，シンポジウム，コンクリート構造物への非破壊検査の展開(2006) JSNDI, pp. 291-296, 2006
- 6) 今本啓一，下澤和幸，山崎順二，二村誠二：実構造物の表層透気性の非・微破壊試験方法に関する研究の現状，コンクリート工学，Vol. 44, No. 2, pp. 31-38, 2006.2
- 7) 氏家勲，河合慶有，山川莉希：コンクリートの品質評価のための表層透気試験の測定数について，第 46 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集，pp. 75-80, 2019.11
- 8) 早川健司，水上翔太，加藤佳孝：表層透気試験による構造物かぶりコンクリートの品質評価に関する基礎的研究，土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol. 68, No. 4, pp. 385-398, 2012
- 9) 白根勇二，舟橋政司，松尾健二：施工条件や養生条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32, No. 1, pp. 1313-1318, 2010
- 10) 蔵重勲，廣永道彦：透気係数の含水依存性を考慮したコンクリート表層品質の非破壊評価法の一提案，セメント・コンクリート論文集，No. 65, pp. 225-232, 2011
- 11) 細田暁，小松怜史，中川恵理，佐藤和徳：コンクリート構造物の品質向上の取組みと非破壊試験による効果の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol. 33, No. 37, pp. 1273-1278, 2015
- 12) 半井健一郎，蔵重勲，岸利治：かぶりコンクリートの透気性に関する竣工検査-スイスにおける指針-，コンクリート工学，No. 49, No. 3, pp. 3-6, 2011.3
- 13) 横山勇気，酒井雄也，半井健一郎，岸利治：異なる配合と養生を与えたコンクリートの

- 表層透気係数の経年変化，セメント・コンクリート論文集，No. 71, pp. 410-417, 2017
- 14) 蔵重勲，廣永道彦：脱型材齢や曝露環境がコンクリートの強度特性や表層透気性ならびに中性化抵抗性に及ぼす影響の実験的評価，コンクリート工学年次論文集，Vol. 32, No. 1, pp. 623-628, 2010
  - 15) 山本雅行，下瀬千江里，半井健一郎：既設コンクリート構造物における塩分拡散係数と透気係数の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol. 41, No. 1, pp. 623-628, 2019
  - 16) 林亮太，樋原弘貴，添田政司，松本涼：透気係数による各種コンクリートの物質移動抵抗性評価方法に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35, No. 1, pp. 745-750, 2013
  - 17) 松本涼，林亮太，樋原弘貴，添田政司：各種コンクリートの透気係数と物質移動抵抗性との関係性に関する研究，第 67 回セメント技術大会講演要旨，3304, pp. 320-321, 2013
  - 18) Katpady, D. N., Hazehara, H., Soeda, M., Kubota, T. and Murakami, S.: Durability assessment of blended concrete by air permeability, International Journal of Concrete Structures and Materials , DOI 10.1186/s40069-018-0260-9, ISSN 1976-0485 / eISSN 2234-1315, 2018
  - 19) 三浦明，樋原弘貴，添田政司，金堀雄伍，西嶋大貴：透気係数による各種コンクリートの塩化物イオン浸透性の評価に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 15 巻，pp. 253-258, 2015.10
  - 20) 金堀雄伍，樋原弘貴，添田政司，西嶋大貴：長期間浸透した実構造物と各種促進試験による塩化物イオンの浸透性状に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強アップグレード論文報告集，第 15 巻，pp. 247-252, 2015.10
  - 21) 高谷哲，西澤彩，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中における鉄筋の腐食生成物の生成プロセスおよび電気化学的特性，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 71, No. 3, pp. 235-247, 2015
  - 22) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'19[基礎編]，p. 40, 2019
  - 23) 土木学会：2018 年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】，p. 114, 2018.10
  - 24) 土木学会：コンクリートライブラリー153, 2018 年制定 コンクリート標準示方書 改訂資料 維持管理編・規準編，p. 28, 2018
  - 25) 土木学会：2018 年制定コンクリート標準示方書【維持管理編】，p.136, 2018.10
  - 26) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'19 [基礎編]，p. 190, 2019
  - 27) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術'19 [基礎編]，p. 129, 2019
  - 28) 前原聡，伊代田岳史：雨掛かりの有無が中性化によるかぶりの剥離・剥落に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 74, No. 2, pp. 80-87, 2018.
  - 29) 松岡弘大，仁平達也，伊藤正憲，山田久美：87 年間供用された RC 鉄道高架橋スラブの劣化因子分析，コンクリート工学年次論文集，Vol. 37, No. 2, pp. 1351-1356, 2015
  - 30) 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. 1351-1356, 2010
- 31) 轟俊太郎，石田哲也，田所敏弥，上田洋：コンクリート中の鉄筋腐食に与える水とコンクリート中の中性化の影響，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 75, No. 4, pp. 226-238, 2019
  - 32) 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研究，土木学会論文集，No. 711/V-56, pp. 125-134, 2002.8
  - 33) 山路徹，濱田秀則，審良善和：異なる海洋環境下および曝露期間における塩化物イオン拡散性状，コンクリート工学年次論文集，Vol. 31, No. 1, pp. 1003-1008, 2009
  - 34) 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暴露環境およびセメントの種類の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23, No. 2, pp. 577-582, 2001
  - 35) 土木学会：2018 年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】，p. 122-125, 2018.10
  - 36) 堀口賢一，山口明伸，丸屋剛，武若耕司：腐食発生限界塩化物イオン濃度の測定方法とその定量評価に関する研究，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造物)，Vol. 71, No. 2, pp. 107-123, 2015
  - 37) 斯波明宏，石川伸介，渡邊聡，河上浩司：リバウンドハンマーによる強度推定式の提案とその評価，コンクリート工学，Vol. 43, No. 2, pp. 35-40, 2005.2.
  - 38) 松下博通：コンクリート構造物の初期欠陥および劣化のメカニズム，安全工学，Vol. 39, No. 4, pp. 234-246, 2000.
  - 39) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，p. 183, 2017.
  - 40) 国土交通省，水管理・国土保全 HP 六角川(自然環境)，  
[https://www.mlit.go.jp/river/toukei\\_chousa/kasen/jiten/nihon\\_kawa/0918\\_rokkaku/0918\\_rokkaku\\_04.html](https://www.mlit.go.jp/river/toukei_chousa/kasen/jiten/nihon_kawa/0918_rokkaku/0918_rokkaku_04.html)
  - 41) 二渡了，楠田哲也，大石京子：強混合河川六角川感潮部における懸濁物質濃度の変動特性，土木学会論文集，No. 452/II-20, pp. 71-79, 1992
  - 42) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，p. 71, 2017
  - 43) 魚本健人，高田良章：コンクリートの中性化速度に及ぼす要因，土木学会論文集，No. 451/V-17, pp. 119-128, 1992.8
  - 44) 伊代田岳史，水野博貴，杉山知巳：C-S-H 系硬化促進剤を用いたコンクリートの強度及び物質移動抵抗性発現メカニズムの検討，セメント・コンクリート論文集，Vol. 72, pp. 204-210, 2018
  - 45) 林亮太，崔林，樫原弘貴，添田政司：フライアッシュ原粉を用いたコンクリートの強度，塩化物イオン浸透および乾燥収縮特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.

34, No. 4, pp. 190-195, 2012

- 46) 土木学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの設計・施工指針, p. 28, 2018
- 47) 高橋佑弥, 井上翔, 秋山仁志, 岸利治：実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 803-808, 2010
- 48) 小池賢太郎, 山口明伸, 武若耕司, 福重耕平：水分移動を考慮した塩化物イオンの浸透モデルに関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 843-848, 2016
- 49) 梶井宏修：熱電対利用による表面温度測定, 日本建築学会環境工学委員会熱運営委員会, 第8回シンポジウム報告書, pp.5-16, 1978.8
- 50) 中村士郎, 松崎一郎, 金塚美喜男, 今本啓一：簡易乾燥収縮試験法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.455-460, 2010
- 51) 篠田吉央, 望月紀保：鉄筋自然電位の測定温度に伴う照合電極間の電位換算について, 土木学会第66回年次学術講演会, VI-224, pp.447-448, 2011
- 52) ASTM C 876: Half-cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete
- 53) 金光俊徳, 高谷哲, 山本悟, 竹子賢士郎, 山本貴士：Tafel 外挿法を用いた腐食モニタリングによるコンクリート中の鉄筋腐食進行評価, 材料と環境, 第67巻, 第7号, pp298-303, 2018
- 54) 竹子賢士郎, 山本悟, 高谷哲：分極曲線測定によるコンクリート中鋼材の腐食速度測定方法の開発, コンクリート, 工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp2092-2097, 2014
- 55) 審良善和, 山路徹, 小林浩之：電気化学的測定による鉄筋腐食と塩化物イオン濃度の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1133-1138, 2011
- 56) 深見桜, 樫原弘貴, 添田政司, 佐藤悠士朗：高炉スラグ微粉末を用いた低炭素型コンクリートの塩害劣化抵抗性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp161-166, 2019
- 57) 加藤弘義, 宮川豊章, 中村明則, 土井宏行：高炉スラグ微粉末を使用したモルタル中の塩化物イオンの挙動と鉄筋腐食に与えるセッコウの影響, 土木学会論文集, 746号/V-61, pp1-12, 2003
- 58) 竹上浩史, 石田哲也, 前川宏一：高炉スラグ微粉末を混入したセメント硬化体中の塩化物移動・平衡則, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp633-638, 2002



## 第 6 章 コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の提案に関する研究

### 6-1 概説

現在、コンクリート標準示方書【維持管理編】に定められる劣化機構の予測の方法として、中性化の場合 $\sqrt{t}$ 則、塩害の場合塩化物イオンの拡散の予測の方法がある<sup>1)</sup>。これらの劣化機構の劣化予測は、腐食ひび割れが発生する前の期間（潜伏期～進展期）において詳細調査を行い、詳細調査結果が中性化残り 10mm や鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度の腐食開始の判定（目安）に達しているか否かによって、対策要否の判定に用いている<sup>1)</sup>。これらの劣化機構ごとの劣化予測と併せて、鋼材腐食の進行予測の方法が各劣化過程に定められているが、いずれも定量化されるまでに至っていない<sup>1)</sup>。また、実構造物を調査すると、実構造物の架橋位置、環境条件、部位・部材によっては、鋼材表面において中性化残り 10mm 以下、鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度を超過するような高濃度であっても、鋼材腐食によるコンクリートの剥離・剥落が生じていないなど、水掛かりの有無によって鋼材腐食の進行程度も異なる事例が見られている。このことから、 $\sqrt{t}$ 則や塩化物イオンの拡散の予測は、腐食ひび割れが発生する前までの潜伏期から進展期を予測に用いることが望ましく、加速期前期以降の劣化の進行予測を実施する場合には、過大あるいは過少予測となることが懸念される。しかしながら、現在では加速期前期以降の劣化の進行予測を行う方法が確立していないのが現状である。

一方、これまでの研究で透気係数と腐食電流密度の関係式によって、鋼材腐食の評価をすることが可能であるため、実構造物のコア供試体から得られた透気係数を用いて腐食電流密度を推定し、今後の鋼材腐食の進行予測が可能ではないかと考えた。

そこで本研究は、かぶりと腐食速度を用いた既往の予測方法を基に<sup>2)</sup>、実構造物のかぶり、透気係数で推定した腐食電流密度を腐食速度へ変換し、この腐食速度を用いた場合の鋼材腐食の進行予測と外観変状の状態を比較してその有用性を検証した。これらの結果を基に、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の確立に向けた予測手法の提案を行って、加速期前期（コンクリート剥落前）までの鋼材腐食の進行予測を行うことで、鋼材腐食によるコンク

リートの剥落を防止（第三者被害の防止）することを目的とした。

## 6-2 鋼材腐食の進行予測の概要

鳥取らは、これまでに中性化と初期塩化物イオンを受ける場合の鋼材腐食の進行予測を提案している<sup>2)</sup>。この予測では、30年が経過した実構造物を対象に、W/C=60%，鉄筋径 D16， $c/\phi=1.5$ （かぶり 24mm）， $c/\phi=2.5$ （かぶり 40mm），以下の式(1)，(2)<sup>2), 6), 7)</sup>，図 6-1，表 6-1 の条件を基に，鉄筋の半径減少量が曲げ耐力上の限界腐食量に到達する時点を予測する検討が行われている<sup>2)</sup>。

【腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食深さ】<sup>2), 6), 7)</sup>

$$\Delta r_{cr} = 13(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (1)$$

$\Delta r_{cr}$ ：腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食深さ（mm）

$c$ ：かぶり（mm）， $\phi$ ：鉄筋径（mm）

【剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さ】<sup>2), 6), 7)</sup>

$$\Delta r_{cp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (2)$$

$\Delta r_{cp}$ ：腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食深さ（mm）

$c$ ：かぶり（mm）， $\phi$ ：鉄筋径（mm）

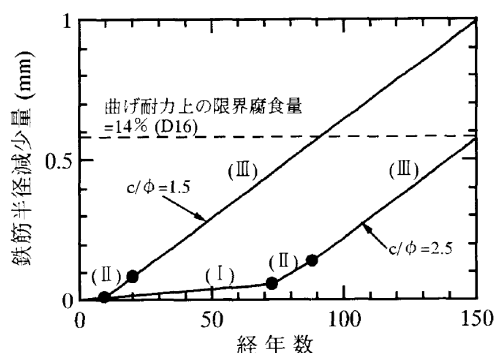


図 6-1 鳥取らによって提案されている鋼材腐食の進行予測の例<sup>2)</sup>

表 6-1 鳥取らによって提案されている鋼材腐食の進行予測の例<sup>2)</sup>

$c/\phi$		1.5	2.5
腐食速度 ( $\times 10^{-3}$ mm/年)	(I)	1.02	0.79
	(II)	6.97	5.40
	(III)	7.00	7.00
腐食ひび割れ発生時平均腐食深さ( $\times 10^{-3}$ mm)		19.5 (10.87年)*	32.5 (72.90年)*
剥離・剥落発生時平均腐食深さ( $\times 10^{-3}$ mm)		84 (20.12年)*	140 (88.19年)*

\*: ( )内の年数は腐食ひび割れあるいは剥離・剥落発生時の年数を表す

本研究では，かぶり，鉄筋径，腐食速度を用いた既往の予測方法を基に<sup>2)</sup>，実構造物のかぶり，透気係数で推定した腐食電流密度を腐食速度へ変換し，この腐食速度を用いた場合の鋼材腐食の進行予測と外観変状の状態を比較してその有用性を検証した。また，これらの結果を基に，コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の確立に向けた予測手法の提案を行った。

### 6-2-1 かぶり，鉄筋径の設定

各構造物のかぶりとして，調査時に構造物 E は 100mm であることを確認できたが，それ以外の構造物のかぶりは不明である。そのため，構造物 A, B, C, D, G のかぶりは，版部材などの最小かぶり 30mm と設定し<sup>3)</sup>，構造物 E は実測値を用いた。構造物 D, G は，飛来塩分の影響が大きく，潮汐による潮位の影響を受ける箇所であるため，特に厳しい腐食性環境の場合の最小かぶり 70mm が確保されている可能性がある<sup>4)</sup>。そのため，構造物 D, G は，かぶり 30mm の場合，70mm の場合をそれぞれ検討し比較した。なお，構造物 F は鉄筋探査の結果，無筋コンクリートであったため，鋼材腐食の進行予測から除外した。

鉄筋径はいずれも不明であり，既往の研究と同様に D16 と設定した。これらの結果を基に，各構造物の  $c/\phi$  は，構造物 A, B, C :  $c/\phi=1.875$  ( $30/16=1.875$ )，構造物 D, G :  $c/\phi=1.875, 4.375$  ( $30/16=1.875, 70/16=4.375$ )，構造物 E :  $c/\phi=6.25$  ( $70/16=6.250$ ) と設定した。

### 6-2-2 鉄筋の腐食過程

図 6-2 より，鳥取らにおける鉄筋の腐食過程の設定方法として，(I)，(II) の期間は「進展期～加速期前期」，(III) の期間は「加速期後期」とされている<sup>2)</sup>。

本研究では，腐食ひび割れ発生までの潜伏期から進展期，コンクリートの剥離・剥落までの加速期前期，コンクリートの剥離・剥落以降の加速期後期から劣化期の腐食過程ごとで腐食速度を設定して鋼材腐食の進行予測を行った（図 6-3）。

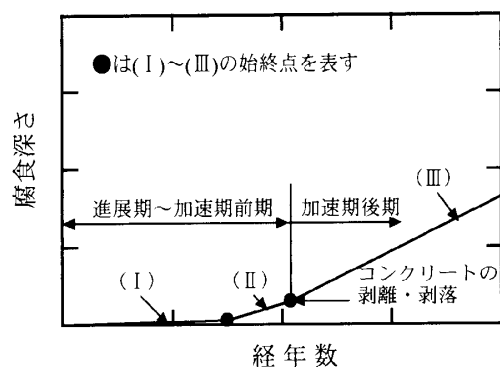


図 6-2 鳥取らによって提案されている鉄筋の腐食過程<sup>2)</sup>

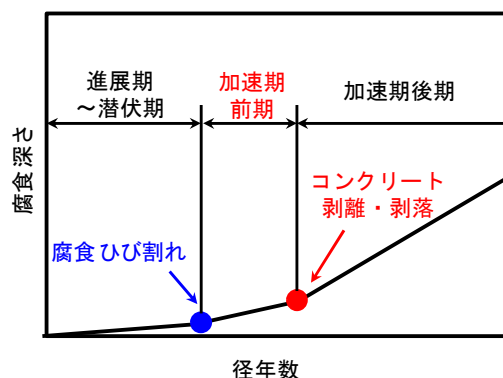


図 6-3 本研究の鉄筋の腐食過程

### 6-2-3 腐食速度の設定

#### (1) 潜伏期～進展期

進展期～潜伏期の期間は、中性化、塩害の劣化因子である二酸化炭素や塩化物イオンが供給され徐々に劣化が進行し、水掛かりがある場合には同時に鋼材腐食も進行する期間である。進展期～潜伏期の期間の腐食速度は、図 6-1 の既往の研究で用いられた腐食速度を基に、 $0.905 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ （平均値： $(1.02+0.79)/2$ ）と設定した<sup>2)</sup>。

#### (2) 加速期前期

加速期前期の腐食速度は、「5-3-2 透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および適用性の評価」で実構造物から採取したコア供試体を用いて透気係数を計測し、この透気係数を用いて、以下の方法で算出しそれぞれ設定した。

##### 1) 腐食電流密度と透気係数の関係式

「第 5 章」で設定した腐食電流密度と透気係数の以下の式(3)を基に、実構造物の透気係数を用いて腐食電流密度の推定値を算出した。

$$y = 5.73E - 12e^{17.750x} \quad (3)$$

$W/B$  : 水結合材比 ( $0.45 \leq W/B \leq 0.65$ )

$x$  : 透気係数 ( $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ ) ( $1.0E-11 \leq x \leq 1.0E-05$ )

$y$  : 腐食電流密度 ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )

##### 2) 腐食電流密度を腐食速度への変換

透気係数から推定した腐食電流密度を用いて、式(4)により腐食速度へ変換した<sup>5)</sup>。

$$1\mu\text{A}/\text{cm}^2 = 11.6 \times 10^{-3} \text{mm/年} \quad (4)$$

##### 3) 各構造物の腐食速度

各構造物におけるコア供試体から算出した透気係数を基に、腐食電流密度を推定し、その腐食電流密度から腐食速度へ変換した。各構造物における腐食速度は、表 6-2 に示すとおりである。

表 6-2 推定した腐食電流密度および腐食速度

構造物	劣化状況	採取箇所	セメント 種類	竣工年	透気係数		腐食電流密度 $y = 5.73E-12e^{17.45x}$		腐食速度への変換 $1\mu A/cm^2 \rightarrow 11.6$ ( $\times 10^{-3}$ ) mm/年	
					健全部	劣化部	健全部	劣化部	健全部	劣化部
A	劣化部	上部工	OPC	40	—	2.530E-06	—	0.745	—	8.641
A	健全部	上部工	OPC	40	1.658E-08	—	0.457	—	5.299	—
B	健全部	上部工	OPC	50	8.125E-09	—	0.416	—	4.825	—
B	劣化部	上部工	OPC	50	—	1.720E-07	—	0.591	—	6.854
B	劣化部	上部工	OPC	50	—	3.661E-07	—	0.634	—	7.356
C	劣化部	上部工	OPC	45	—	1.065E-07	—	0.563	—	6.535
C	劣化部	上部工	OPC	45	—	6.843E-08	—	0.538	—	6.241
C	劣化部	上部工	OPC	45	—	7.628E-08	—	0.544	—	6.313
C	劣化部	上部工	OPC	45	—	1.292E-07	—	0.574	—	6.664
C	健全部	上部工	OPC	45	1.905E-08	—	0.465	—	5.391	—
C	健全部	上部工	OPC	45	3.580E-09	—	0.369	—	4.280	—
C	健全部	上部工	OPC	45	3.542E-08	—	0.500	—	5.804	—
C	健全部	上部工	OPC	45	7.111E-09	—	0.408	—	4.736	—
D	健全部	護岸	BFS	24	2.313E-08	—	0.476	—	5.520	—
D	健全部	護岸	BFS	24	5.831E-08	—	0.529	—	6.135	—
D	健全部	護岸	FA	16	1.162E-09	—	0.304	—	3.532	—
D	健全部	護岸	FA	16	1.707E-08	—	0.458	—	5.318	—
E	健全部	下部工	OPC	30	1.301E-07	—	0.575	—	6.668	—
G	健全部	護岸	BB	24	5.263E-08	—	0.523	—	6.067	—
G	健全部	護岸	FA	16	6.808E-09	—	0.406	—	4.707	—

## (3) 加速期後期～劣化期

加速期後期になると、かぶりの鋼材腐食に対する保護能力は、ほとんど失われると想定される。したがって、この期間の腐食速度には裸鋼材の腐食速度  $7.0 \times 10^{-3}$  mm/年と設定した<sup>2)</sup>。

## 6-2-4 鋼材の腐食深さ

## (4) 鋼材の腐食深さの算出

腐食ひび割れが生じる際の鋼材の腐食深さ、剥離・剥落が生じる際の鋼材の腐食深さは、上記した以下の式(1)、(2)<sup>2), 6), 7)</sup>、各構造物の  $c/\phi$  を用いて算出した。

【腐食ひび割れが生じる際の鋼材の腐食深さ】<sup>2), 6), 7)</sup>

$$\Delta r_{cr} = 13(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (1)$$

【剥離・剥落が生じる際の鋼材の腐食深さ】<sup>2), 6), 7)</sup>

$$\Delta r_{cp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (2)$$

$\Delta r_{cr}$  : 腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食深さ (mm)

$\Delta r_{cp}$  : 腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食深さ (mm)

$c$  : かぶり (mm),  $\phi$  : 鉄筋径 (mm)

式(1), (2)を用いて算出した各構造物の鋼材腐食の進行予測に用いた値は、表 6-3～表 6-6 に示すとおりである。

表 6-3 構造物 A, B, C (健全部) と構造物 E の鋼材腐食の進行予測に用いた値

	鳥取らの研究 <sup>2)</sup>		OPC						
			健全部						
			A1	B1	C1	C2	C3	C4	E
経過年	30	30	40	50	45	45	45	45	30
c/φ	1.5	2.5	1.875						6.25
潜伏期～進展期	1.02	0.79	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905
加速期前期	6.97	5.4	5.299	4.825	5.391	4.280	5.804	4.736	6.668
加速期後期～劣化期	7	7	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
腐食ひび割れ生じる際の鉄筋の腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	19.50	32.50	24.38						81.25
発生時の年数(年)	10.87	72.90	13.07	23.07	18.07	18.07	18.07	18.07	59.78
剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	84.00	140.00	105.00						350.00
発生時の年数(年)	20.14	88.19	28.28	39.78	33.02	36.90	31.96	35.09	100.08
腐食ひび割れが生じて剥離・剥落が生じるまでの鋼材腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	64.50	107.50	80.63						268.75
加速期前期の期間(年)	9.25	19.91	15.22	16.71	14.96	18.84	13.89	17.02	40.30

表 6-4 構造物 A, B, C (劣化部) の鋼材腐食の進行予測に用いた値

	鳥取らの研究 <sup>2)</sup>		OPC						
			劣化部						
			A2	B2	B3	C5	C6	C7	C8
経過年	30	30	40	50	50	45	45	45	45
c/φ	1.5	2.5	1.875						
潜伏期～進展期	1.02	0.79	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905
加速期前期	6.97	5.4	8.641	6.854	7.356	6.535	6.241	6.313	6.664
加速期後期～劣化期	7	7	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
腐食ひび割れ生じる際の鉄筋の腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	19.50	32.50	24.38						
発生時の年数(年)	10.87	72.90	13.07	23.07	23.07	18.07	18.07	18.07	18.07
剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	84.00	140.00	105.00						
発生時の年数(年)	20.14	88.19	22.40	34.83	34.03	30.40	30.98	30.84	30.17
腐食ひび割れが生じて剥離・剥落が生じるまでの鋼材腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	64.50	107.50	80.63						
加速期前期の期間(年)	9.25	19.91	9.33	11.76	10.96	12.34	12.92	12.77	12.10

表 6-5 構造物 D, G の鋼材腐食の進行予測に用いた値（かぶり 30mm の場合）

	鳥取らの研究 <sup>2)</sup>		BFS,FA					
			D1	D2	D3	D4	G1	G2
経過年	30	30	24	24	16	16	24	16
c/φ	1.5	2.5	1.875					
潜伏期～進展期	1.02	0.79	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905
加速期前期	6.97	5.4	5.520	6.135	3.532	5.318	6.067	4.707
加速期後期～劣化期	7	7	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
腐食ひび割れ生じる際の鉄筋の腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	19.50	32.50	24.38					
発生時の年数(年)	10.87	72.90	50.93	50.93	42.93	42.93	50.93	42.93
剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	84.00	140.00	105.00					
発生時の年数(年)	20.14	88.19	65.54	64.08	65.76	58.09	64.22	60.06
腐食ひび割れが生じて剥離・剥落が生じるまでの鋼材腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	64.50	107.50	80.63					
加速期前期の期間(年)	9.25	19.91	14.61	13.14	22.83	15.16	13.29	17.13

表 6-6 構造物 D, G の鋼材腐食の進行予測に用いた値（かぶり 70mm の場合）

BFS,FA								
			D1	D2	D3	D4	G1	G2
経過年	30	30	24	24	16	16	24	16
c/φ	1.5	2.5	4.375					
潜伏期～進展期	1.02	0.79	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905	0.905
加速期前期	6.97	5.4	5.520	6.135	3.532	5.318	6.067	4.707
加速期後期～劣化期	7	7	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000	7.000
腐食ひび割れ生じる際の鉄筋の腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	19.50	32.50	56.88					
発生時の年数(年)	10.87	72.90	86.85	86.85	78.85	78.85	86.85	78.85
剥離・剥落が生じる際の鉄筋の腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	84.00	140.00	245.00					
発生時の年数(年)	20.14	88.19	120.92	117.51	132.11	114.22	117.85	118.81
腐食ひび割れが生じて剥離・剥落が生じるまでの鋼材腐食深さ(×10 <sup>-3</sup> mm)	64.50	107.50	188.13					
加速期前期の期間(年)	9.25	19.91	34.08	30.66	53.27	35.37	31.01	39.97

## 6-3 コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測

### 6-3-1 構造物 A, B, C の鋼材腐食の進行予測結果

図 6-4 には、構造物 A, B, C の鋼材腐食の進行予測結果に既往の研究の予測結果<sup>2)</sup>を追記したものを示す。また、写真 6-1 には構造物 A, B, C の劣化状況を示す。図 6-4 より、構造物 A, B, C の劣化予測において、いずれも健全部と比べて劣化部の方がコンクリートの剥離・剥落時期が早いことが分かる。また、劣化部におけるコンクリート剥落時期の詳細は不明であるが、現在行われている維持管理では、定期点検時に写真 6-1 に示すような著しい劣化が確認された後に、詳細調査が実施されているのが一般的な流れである。このことを踏まえて、詳細調査時期（経過年）を基準として各鋼材腐食の進行予測結果を見ると、いずれの予測結果においても詳細調査時期よりも前にコンクリートの剥離・剥落が生じる予測結果となり、詳細調査時期は加速期後期から劣化期の結果を示した。この予測結果と写真 6-1 の外観変状の状態を比較すると、概ね整合性が確認された。

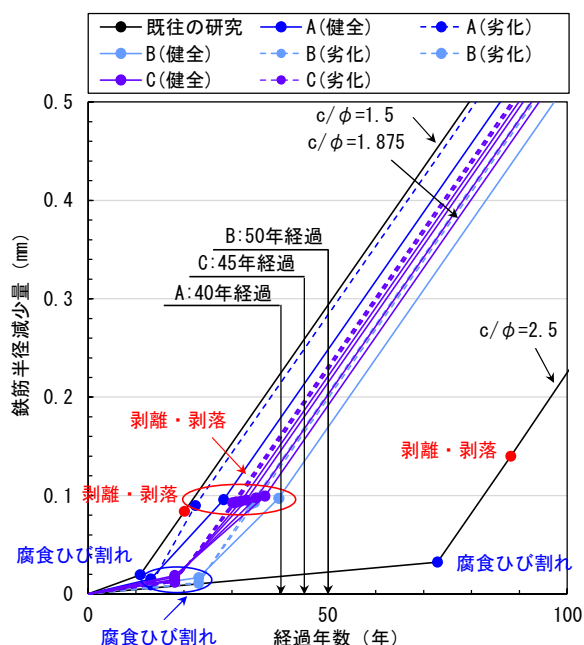


図 6-4 構造物 A, B, C の鋼材腐食の進行予測結果

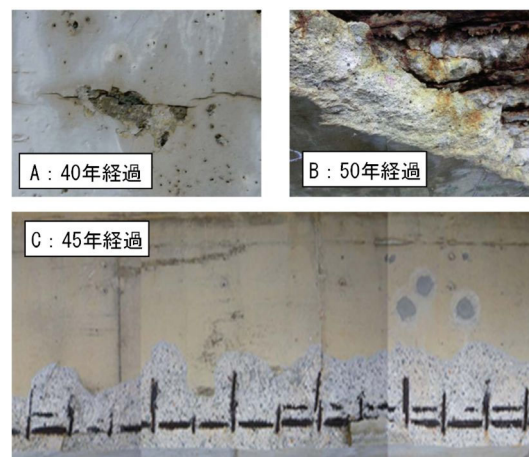


写真 6-1 構造物 A, B, C の劣化状況

### 6-3-2 構造物 D, G の鋼材腐食の進行予測結果

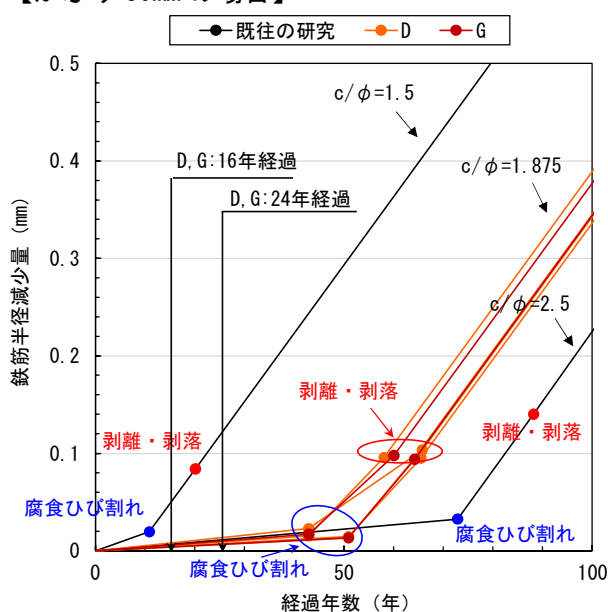
図 6-5 には、かぶり 30mm および 70mm の場合の構造物 D, G の鋼材の進行予測結果に既往の研究の予測結果<sup>2)</sup>を追記したものを示す。また、写真 6-2 には構造物 D, G の状況を示す。まず、かぶり 30mm の場合、写真 6-2 に示すように現時点では腐食ひび割れやコンクリートの剥離・剥落などの変状が見られておらず、図 6-5 の鋼材腐食の予測結果においても、詳細調査時期（経過年）では腐食ひび割れも生じていない潜伏期から進展期の結果を示した。このことから、外観変状の状態と概ね同等と判断できる。ただし、構造物 D, G はそれぞれ飛沫滞・干満



滞、海岸からの距離が 50m の港湾構造物であり、コンクリートの品質が  $W/B=45\%$ 、 $65\%$  と異なるため、特に  $W/B=65\%$  の区間では予測結果よりも早期に鋼材腐食へ発展する可能性も考えられる。

一方で、特に厳しい腐食性環境のかぶり 70mm の場合には、かぶり 30mm ( $c/\phi=1.875$ ) と比べて  $c/\phi=4.375$  と大きくなることで、腐食ひび割れの発生期間が後退し、竣工後 80 年を過ぎたあたりで腐食ひび割れが生じる予測結果となった。環境条件より、耐久性確保のためにかぶりを 70mm 確保している可能性も考えられるが、予測においてかぶりを大きくすると腐食ひび割れ時期が後退し、予測結果は危険側となる可能性が考えられる。このことから、安全側の予測を行っていくためには、かぶり調査によってかぶりを適切に把握し、設定することが必要である。

【かぶり 30mm の場合】



【かぶり 70mm の場合】

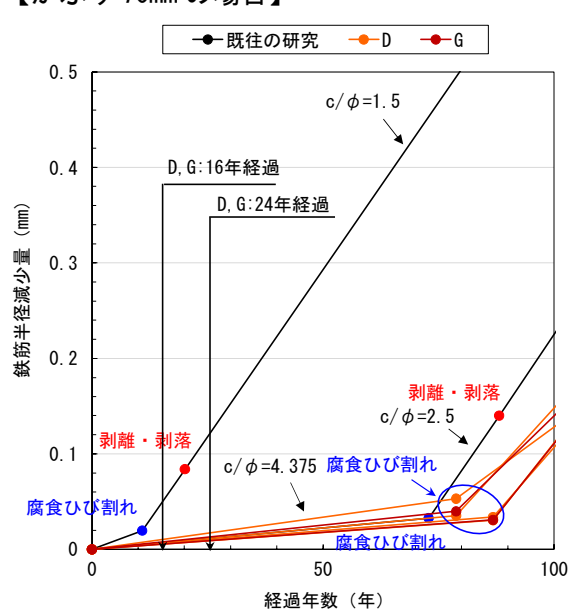


図 6-5 構造物 D, G の鋼材腐食の進行予測結果



写真 6-2 構造物 D, G の状況

### 6-3-3 構造物 E の鋼材腐食の進行予測結果

図 6-6 には、構造物 E の鋼材腐食の進行予測結果に既往の研究の予測結果<sup>2)</sup>を追記したものを示す。また、写真 6-3 には構造物 E の状況を示す。構造物 E は下部工における鋼材腐食の進行予測結果であるが、写真 6-3 に示すように現時点では腐食ひび割れを伴わないひび割れや浮きが見られる程度であり、図 6-6 の鋼材腐食の予測結果においても、詳細調査時期（経過年）では腐食ひび割れも生じていない潜伏期から進展期の結果を示した。このことから、外観変状の状態と概ね同等と判断できる。ただし、構造物 E は感潮区間に位置する構造物で、写真 6-3 より、鋼材腐食の進行予測を行った下部工では、漏水跡が見受けられる。そのため、現状で確認されているひび割れから潮位の影響により水や塩化物イオンが供給され、今後鋼材腐食が進行する可能性が考えられる。

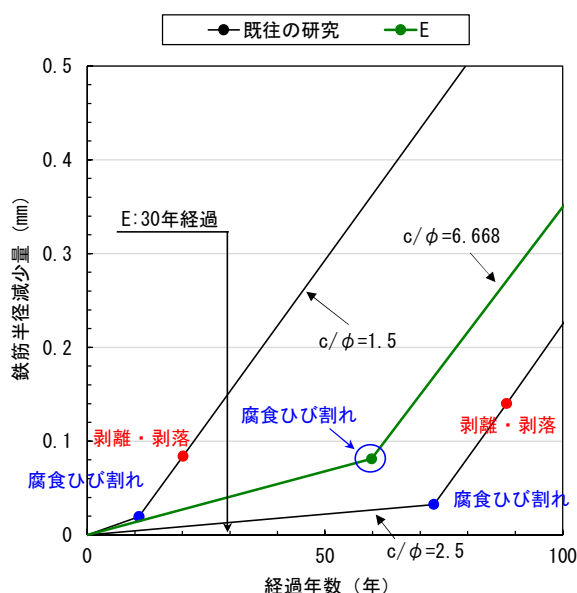


図 6-6 構造物 E の鋼材腐食の進行予測結果



写真 6-3 構造物 E の状況

以上の結果より、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測は、外観変状と概ね整合性が図れたことから、鋼材腐食の劣化予測が可能であることが示唆された。なお、進展期から潜伏期の期間は、 $c/\phi$  が大きく影響し、かぶりが多い場合には腐食ひび割れ発生時期が後退し、予測結果としては危険側に予測する可能性も考えられる。そのため、安全側の予測を行うためには、かぶり調査によってかぶりを適切に把握し、設定することが必要である。

## 6-4 提案

前述までのコンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の方法を踏まえて、今後の鋼材腐食の進行予測の確立に向けた予測手法の提案を行った。予測手法の提案として、コンクリート構造物維持管理技術研究会の維持管理フローを基に<sup>8)</sup>、鋼材腐食の進行予測を加えた維持管理フロー（図 6-7）を示し、鋼材腐食の進行予測の具体的な方法などを以降に記した。

これまでの維持管理は鋼材腐食によるコンクリートの剥離・剥落が生じた後の対策（事後保全）が大半であったが、これにより大規模な補修を強いられる場合もあった。そこで、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測を加えた維持管理を進めていくことで、コンクリートの剥離・剥落生じる前に鋼材腐食の進行を予測し、補修対策が必要な構造物と経過観察を行う構造物を区分すること可能となる。さらに、鋼材腐食の進行予測結果に応じて、コンクリートの剥離・剥落が生じる前に対策を講じることが可能となるため、事業費の削減にも寄与することに繋がり、効率的な維持管理へ繋げていくことが可能となった。

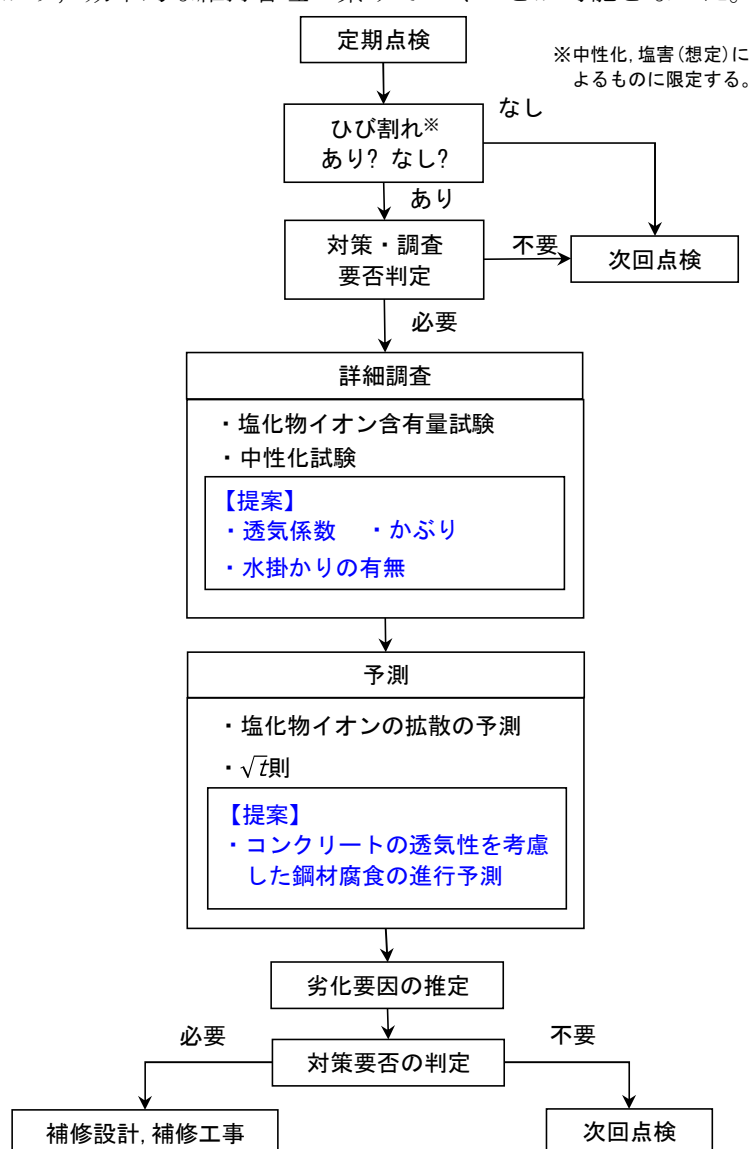


図 6-7 鋼材腐食の進行予測を加えた維持管理フロー（提案）

#### 6-4-1 定期点検

- ・ 定期点検により、ひび割れの有無確認し、ひび割れがある場合には、対策・調査の要否判定を行う。
- ・ ひび割れは、中性化、塩害（想定）によるものに限定する。（疲労や ASR などによるものは除く）
- ・ ひび割れがない場合には、経過観察として次回点検とする。

#### 6-4-2 対策・調査の要否判定

- ・ ひび割れがあった場合、対策・調査の要否判定を行い、必要と判断された場合には、詳細調査を行う。
- ・ 対策・調査の要否判定で不要と判断された場合には、経過観察として次回点検とする。

#### 6-4-3 詳細調査

- ・ 対策・調査の要否判定が必要と判断された場合、詳細調査では従来から行われている塩化物イオン含有量試験、中性化試験を行う。
- ・ 上記の調査項目に加えて、透気係数の計測、かぶり調査、水掛かりの有無を追加で調査することを提案する。

#### 6-4-4 予測

- ・ 塩化物イオン含有量試験、中性化試験から詳細調査で得られた結果を基に、塩化物イオンの拡散の予測、 $\sqrt{t}$ 則により、潜伏期～進展期までの予測を行う。
- ・ 追加で調査した透気係数とかぶりをを用いて、加速期前期における鋼材腐食の進行予測を行う。鋼材腐食の進行予測の方法は、以降に示す。
- ・ 鋼材腐食には、水掛かりの有無が影響するため、水掛かりの有無も考慮して評価する。

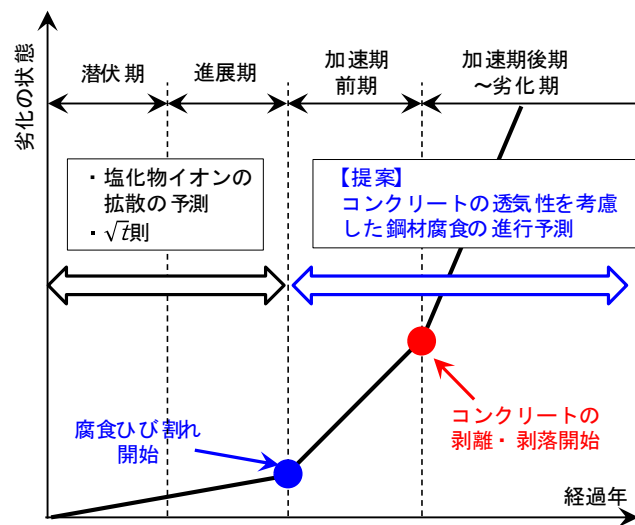


図 6-8 劣化進行過程の概念図と予測の位置付け

(1) 透気係数の計測

- ・ 実構造物からコアを採取し，コアを用いた加圧法による透気試験を行って，透気係数を算出する。

(2) かぶり，鉄筋径の設定

- ・ 詳細調査結果を基に，かぶり（c），鉄筋径（φ）を設定し，c/φを算出する。

(3) 腐食速度の設定

1) 潜伏期～進展期

- ・  $0.905 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ （平均値： $(1.02+0.79)/2$ ）とする<sup>2)</sup>。

2) 加速期前期

加速期前期の腐食速度は，実構造物から算出したコア供試体を用いて透気係数を計測し，この透気係数を用いて，以下の方法で算出しそれぞれ設定する。

a) 腐食電流密度と透気係数の関係式

以下の式(5)を基に，実構造物の透気係数を用いて腐食電流密度の推定値を算出する。

$$y = 5.73E - 12e^{17.750x} \quad (5)$$

$W/B$ ：水結合材比（ $0.45 \leq W/B \leq 0.65$ ）

$x$ ：透気係数（ $\text{cm}^4/\text{N} \cdot \text{s}$ ）（ $1.0E-11 \leq x \leq 1.0E-05$ ）

$y$ ：腐食電流密度（ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ）

b) 腐食電流密度を腐食速度への変換

透気係数から推定した腐食電流密度を用いて，式(6)により腐食速度へ変換する<sup>5)</sup>。

$$1\mu\text{A}/\text{cm}^2 = 11.6 \times 10^{-3} \text{mm/年} \quad (6)$$

3) 加速期後期～劣化期

- ・  $7.0 \times 10^{-3} \text{mm/年}$ とする<sup>2)</sup>。

(4) 鋼材の腐食深さの算出

腐食ひび割れが生じる際の鋼材の腐食深さ，剥離・剥落が生じる際の鋼材の腐食深さは，以

下の式(7), (8)<sup>2), 6), 7)</sup>,  $c/\phi$  を用いて算出する。

【腐食ひび割れが生じる際の鋼材の腐食深さ】<sup>2), 6), 7)</sup>

$$\Delta r_{cr} = 13(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (7)$$

【剥離・剥落が生じる際の鋼材の腐食深さ】<sup>2), 6), 7)</sup>

$$\Delta r_{cp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3} \quad (8)$$

$\Delta r_{cr}$  : 腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食深さ (mm)

$\Delta r_{cp}$  : 腐食ひび割れが生じる際の鉄筋の腐食深さ (mm)

$c$  : かぶり (mm),  $\phi$  : 鉄筋径 (mm)

#### 6-4-5 劣化要因の推定, 対策要否の判定

- ・ 詳細調査結果および予測結果を考慮して, 劣化要因の推定を行い, この結果を基に対策要否の判定を行う。

#### 6-4-6 活用時の留意点

コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の活用にあたり, 以下の留意点が考えられる。

##### (1) 測定した透気係数の腐食速度へ与える影響

本研究において, 実構造物から採取したコアの透気係数は, 室内実験で作製した供試体の透気係数よりも大きく評価される傾向が見られた。例えば, 構造物 A の透気係数 (測定値) を基準として, 透気係数を 1 オーダーずつ変化させて低品質, 高品質の場合を想定すると, 表 6-7 より, 腐食速度への影響は, 低品質で 1.29 倍, 高品質で 0.71 倍となる。このことから, 実構造物からコアを採取した場合には, 以下のような透気係数の測定誤差が見られる可能性があるため, 適切にコンクリート品質を把握することが非常に重要である。

表 6-7 透気係数の腐食速度へ与える影響

構造物	透気係数	コンクリートの品質	腐食電流密度 $y = 5.73E-12e^{17.45x}$	腐食速度への変換 $1\mu A/cm^2 \rightarrow 11.6$ $(\times 10^{-3}) \text{ mm/年}$	倍率
A1	1.658E-07	低品質	0.589	6.829	1.29
	1.658E-08	測定値	0.457	5.299	—
	1.658E-09	高品質	0.325	3.768	0.71

## (2) かぶり不足による鋼材腐食への影響

かぶり不足の場合、腐食ひび割れ、剥離・剥落が生じる際の鋼材の腐食深さが小さくなり、鋼材腐食が進行しやすくなる。そのため、詳細調査時のかぶり調査により、まずは実構造物のかぶりの確保状況を把握して、鋼材腐食が生じる可能性のある箇所を抽出することが重要である。これは、かぶり不足箇所とかぶりが確保できている箇所での鋼材腐食の進行予測を行うための条件設定にも重要な情報となる。

## 6-5 まとめ

本章では、以下の知見を得ることができた。

- ・ 透気係数により推定した腐食電流密度から腐食速度を設定し、鉄筋径、かぶりを加味した鋼材腐食の進行予測結果と外観変状と概ね整合性が図れた。
- ・ 進展期から潜伏期の期間は、 $c/\phi$  が大きく影響し、かぶり大きくなるにつれて腐食ひび割れ発生時期が後退し、予測結果としては危険側となる可能性があるため、安全側の予測を行うためには、かぶり調査によってかぶりを適切に把握し、設定することが必要である。
- ・ コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測を加えた維持管理を進めていくことで、コンクリートの剥離・剥落が生じる前に鋼材腐食の進行を予測し、補修対策が必要な構造物と経過観察を行う構造物を区分することができる。さらに、鋼材腐食の進行予測結果に応じて、コンクリートの剥離・剥落が生じる前に対策を講じることが可能となるため、事業費の削減にも寄与することに繋がり、効率的な維持管理へ繋げていくことが可能となった。
- ・ コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測を活用するにあたり、測定した透気係数の腐食速度へ与える影響やかぶり不足による鋼材腐食への影響に留意する必要がある。

### [参考文献]

- 1) 土木学会：2018年制定 コンクリート標準示方書【維持管理編】，pp. 119-125, pp. 140-146, 2018.10
- 2) 鳥取誠一，宮川豊章：中性化と初期塩化物イオンの複合的影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測，土木学会論文集, No.802/V-69, pp.181-196, 2005.11.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋・コンクリート部材編，p.71, 2017

- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(中巻), p.599, 2018.5
- 5) 永山勝：コンクリートの非破壊試験の理論と実際, コンクリート工学, Vol. 51, No. 2, pp. 194-199, 2013.2
- 6) 鳥取誠一, 宮川豊章：初期塩化物イオンの影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.157-170, 2005.2
- 7) 鳥取誠一, 宮川豊章：中性化の影響を受ける場合の鉄筋腐食に関する劣化予測, 土木学会論文集, No.767/V-64, pp.35-46, 2004.8
- 8) コンクリート構造物維持管理技術研究会：橋梁コンクリート部材の補修設計・施工の手引き, p.7, 2018.12



## 第 7 章 総括

### 7-1 総括

現在コンクリート構造物の維持管理は、定期点検、対策・調査要否の判定、詳細調査、劣化機構の推定、補修設計、補修工事、補修後の維持管理の流れで行われている。構造物の劣化の進行は、各劣化機構や各種環境下、部位・部材などによって大きく異なっているため、その進行を予測することは維持管理を行う上で非常に重要である。現在では、大半の構造物が今後の劣化の進行を予測して維持管理するまでに至っていないのが現状である。

一方、構造物における劣化の進行の予測方法には、中性化の場合は $\sqrt{t}$ 則、塩害の場合は塩化物イオンの拡散の予測などがある。しかしながら、これらの予測は腐食ひび割れが発生する前の期間（潜伏期～進展期）を予測するものであり、加速期前期以降の予測の方法が確立していない。また、鋼材腐食の進行予測方法についても劣化過程ごとに定められているが、いずれも定量化されるまでに至っていないのが現状である。

本研究では、まず実構造物の実態の把握を目的として、様々な環境下にあるコンクリート構造物の中で、最も点検対象施設数の多い道路構造物の橋梁を主な調査対象として、実構造物のかぶり、鋼材腐食に影響を及ぼす塩害および中性化、水掛かりについて実構造物を調査して現状を把握した。かぶりの調査では、かぶりの変遷、スパーサーの設置、建設された時期の時代背景などを考慮して、かぶり不足の実態を把握した。また、鋼材腐食に起因する中性化、塩害と水掛かりの有無に着目し、これらの損傷を受けた実構造物を調査した。調査結果を基に、かぶりの大小が塩化物イオンや鋼材腐食に与える影響（かぶりが $C_{lim}$ に与える影響）、既往の研究実績に基づく方法として類似の環境および構造物の点検結果などがない場合に用いる現行規定の $C_0$ に対し、実構造物の調査結果の安全性の判定について時代背景などを踏まえて考察を行った。

次に、室内実験により作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体における透気係数と各種物質移動抵抗性の関係性を明らかにして、実構造物への適用性を把握した。さらには、透気係数による鋼材腐食の評価の可否を確認するために、腐食電流密度、相対湿度、可溶

性塩化物イオン濃度、腐食重量の関係性を明らかにした後で、透気係数と腐食電流密度の関係性を明らかにして関係式を導き出した。この関係式を用いて、実構造物のコア供試体から計測した透気係数を基に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合することで関係式の有用性を確認するとともに、鋼材の腐食抵抗性に関する検討を行った。

上記で得られた結果を基に、鋼材腐食の進行予測方法の確立に向けて、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の方法を提案することを目的とした。

本研究の目的に対し、本研究から得られた成果を踏まえて以下に総括する。

**第 1 章**では、研究の背景として土木学会の定める基本的な維持管理の手順を基に、日本における社会基盤の維持管理の現状を概説し、本論文の研究目的と本論文の各章の構成を示した。

**第 2 章**では、実構造物の調査結果および暴露試験を対象とした研究報告、透気係数による物質移動抵抗性の評価に関する既往の研究、予測方法、予測に関する研究について整理した。その結果、これまでに明らかとなっている点と課題点について述べた。

**第 3 章**では、鋼材腐食の進行に大きく影響を及ぼすかぶりに着目し、塩害環境下の実構造物の状況を把握することを目的として、実構造物における実測のかぶりと設計上最低限必要な最小かぶりを年代ごとで整理するとともに、鋼材位置の塩化物イオン濃度と腐食グレードをかぶりごとで整理することで、かぶりが鋼材腐食に与える影響を明らかにした。

その結果、かぶり不足の構造物は多数見られ、かぶり不足が見られた構造物は、高度経済成長期の施工状況、塩分物量総量規制、アルカリ骨材反応抑制対策の規定などの時代背景を考慮すると、今後鋼材腐食によってコンクリートの剥離・剥落が生じる可能性がある。また、かぶりの浅い場合には外的からの影響が支配的であるため、塩化物イオン濃度だけでは腐食グレードを推定することが難しいが、かぶりがある程度確保されると、鋼材位置の塩化物イオン濃度の増加とともに、鋼材の腐食グレードが高くなる傾向が見られた。さらに、かぶりが浅い場合と比べて、かぶりが深くなると鋼材腐食に必要な酸素が欠乏し、鋼材位置の塩化物イオン濃度が高くなる傾向が見られた。このことから、かぶりが深い場合は、かぶりの浅い場合と比べて鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度が高くなることが推察された。

**第 4 章**では、塩害環境下の 2 つの異なる地域の構造物に着目し、既往の研究実績に基づく方法として類似の環境および構造物の点検結果などがない場合に用いる現行規定の  $C_0$  に対し実構造物の調査結果が、安全側であるか、あるいは危険側であるのかを部材および水掛かりの有無ごとに海岸からの距離と  $C_0$  の関係性を整理・評価した。

その結果、現行規定  $C_0$  に対し水掛かりあり、かつ、凍結防止剤の散布、感潮区間などの外的要因が影響する場合、危険側に評価される可能性があるため、各種条件の影響を考慮した  $C_0$  の

設定が必要であることを示した。

第5章では、塩害、中性化により劣化が生じた実構造物の状況を把握することを目的として、様々な環境下の実構造物を対象に、実施もしくはこれまで実施されてきたコンクリート品質試験、鋼材の腐食グレードの結果を整理し、建設年、時代背景、水掛かりの有無、構造諸元などの関係性を明らかにした。

次に、室内実験により作製した円柱供試体と実構造物から採取したコア供試体における透気係数と各種物質移動抵抗性の関係性を明らかにして、実構造物への適用性があることを示した。その上で、透気係数による鋼材腐食の評価の可否を確認するために、腐食電流密度、相対湿度、可溶性塩化物イオン濃度、腐食重量の関係性を明らかにした後で、透気係数と腐食電流密度の関係性を明らかにして関係式を導き出した。この関係式を用いて、実構造物のコア供試体から計測した透気係数を基に腐食電流密度を推定し、実構造物の外観変状の状態と照合して、関係式の有用性を示した。

第6章では、第5章で得られた腐食電流密度と透気係数の関係式と実構造物のコア供試体から計測した透気係数を用いて腐食電流密度を推定し、この腐食電流密度から腐食速度へ変換させて、かぶりと鉄筋径を考慮した鋼材腐食の進行予測を行い、外観変状の状態と比較してその有用性を確認した。これらの結果を基に、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の確立に向けた鋼材腐食の進行予測方法の提案を行った。

これにより、これまで予測できなかった鋼材腐食の進行が、実構造物からコアを採取し、透気係数を計測することで、コンクリートの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測が可能となり、効率的な維持管理に繋がっていただけることを示した。

## 7-2 今後の展望

今後、鋼材腐食の進行予測を行うためには、実構造物からコアを採取して透気係数を計測する必要がある。コアを用いた圧縮強度試験は、一般的に  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  で行われ、そのコアを活用し透気係数を計測できれば、効率的にコンクリート品質と透気係数を把握することが可能となる。しかしながら、PC 部材のように鋼材が密に配置されたもの、部材厚が薄い部材では  $\phi 100 \times 200 \text{mm}$  のコアを採取することが困難な場合もある。また、管理者によっては、調査後も供用するため、極力構造物へ与える影響が小さい形状でのコア採取が望まれる場合もある。ただし、小径コアになると断面に占める粗骨材面積の割合が透気係数に影響を及ぼすことも考えられる。

そこで、小径コアを用いて透気係数を計測し、小径コアの透気性を考慮した鋼材腐食の進行予測の可否を検討することが必要である。

また、本研究では延べ 405 箇所の実構造物を対象に調査を行い、その内、7 箇所の実構造物が

ら合計 20 本のコア供試体（φ50～φ100）を採取して鋼材腐食の進行予測を行った。その結果、部位・部材によって、透気係数、鋼材腐食の進行予測結果が大きく異なった。そのため、鋼材腐食の進行予測の精度向上を図るためには、今後もあらゆる部位・部材における鋼材腐食の進行予測を行った事例のデータを蓄積していく必要がある。さらに、蓄積したデータの結果を考慮するとともに、構造物表面の水掛かりの区分ごとの補正に関する研究が望まれる。

## 本論文に関連する発表論文

- (1) FUNDAMENTAL STUDY ON SALT DAMAGE RESISTANCE OF LOW CARBON CONCRETE  
USING BLAST FURNACE SLAG

Ryota Hayashi, Hirotaka Hazehara, Dhruva Narayana Katpady, Junya Nakagawa, Masashi Soeda  
Construction Materials Fukuoka Japan, 2020

- (2) 透気係数による実構造物の物質移動抵抗性および外観変状との関係性に関する研究

林亮太, 櫛原弘貴, 添田政司, 深見桜

土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol.76, No.4, pp.332-348, 2020

- (3) 実構造物の調査結果に基づく表面塩化物イオン濃度と海岸からの距離との関係性

林亮太, 櫛原弘貴, 添田政司

第 75 回セメント技術大会講演要旨, 1306, pp.76-77, 2021.5

- (4) 塩害環境下における実構造物の調査に基づくかぶりと鋼材腐食に与える関係性

林亮太, 櫛原弘貴, 添田政司

コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.1, pp.473-478, 2021.7

## 謝 辞

本論文をまとめる機会を与えて頂き、公私を問わず、終始、貴重な御助言ならびに懇切丁寧な御指導と御配慮を賜りました福岡大学大学院 添田政司教授（主査）に心より御礼申し上げます。また、貴重なお時間を割いて本論文の審査をして頂き、御意見を賜りました福岡大学 村上哲教授（副査）、九州大学大学院 濱田秀則教授（副査）に対し深甚なる感謝の意を表します。

本研究は、著者が添田政司教授の御指導の下で行った博士前期課程の研究成果と、卒業後、中央コンサルタンツ株式会社に在籍しながら、博士後期課程に入学し研究を行った成果を取りまとめたものです。研究の遂行には、在籍する中央コンサルタンツ株式会社 藤本隆史専務、愛敬圭二福岡支店長、富重裕紀技術部長、新村弘道設計 1 部長、山口正剛設計 2 部長、久保田展隆設計 2 部 1 課長をはじめ、福岡支店の皆様方に御理解と激励を頂きました。また、数多くの実構造物の調査および貴重な調査結果につきましては、中央コンサルタンツ株式会社の支援を受けて実施および整理することができました。心より感謝の意を表します。

本論文を作成するにあたっては、福岡大学 樋原弘貴准教授に、研究の計画からまとめ方まで終始一貫しての御指導や貴重な御意見、御助言を賜りましたことに対し、心より御礼申し上げます。インフラテック株式会社の Dhruva Narayana Katpady 氏には、ConMat'20 の論文投稿の際、御指導や貴重な御助言を賜りました。心より感謝の意を表します。

本論文における数多くの実験の遂行にあたっては、令和元年度福岡大学大学院工学研究科資源循環・環境工学専攻卒業生の深見桜さん、児島あかりさん、令和 2 年度福岡大学大学院工学研究科資源循環・環境工学専攻の岡部倖大君、庄野克哉君、中川潤哉君には多くのお力添えを頂きました。心より御礼申し上げます。

最後に、仕事、研究に最善の状態で臨めるよう支援してくれた妻 文、心の支えとなるよう笑顔でいつでも送り出してくれた長男 大葵、長女 実橙、次女 芙季、学生時代には学費や生活費の援助を絶やさず、社会人となってからも健康に常に気を配ってくれた両親（林公彦、林由美）、姉弟（上田麻佐美、林瑛司）、祖父母（故 林公則、林ヨ子、故 高倉次子）、叔母（高倉勝子）、従妹（高倉三穂子）、博士論文の取りまとめの際、子供たちの面倒を快く引き受けてくれた義父母（竹島敏彦、竹島久美子）に感謝し、謝辞と致します。