

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第 4223 号

# 土木研究所資料

コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と  
鋼材腐食に関する暴露試験  
(暴露 5 年後の調査結果)

平成 24 年 3 月

独立行政法人土木研究所  
材料資源研究グループ基礎材料チーム

Copyright © (2012) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

# コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と 鋼材腐食に関する暴露試験 (暴露5年後の調査結果)

つくば中央研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム

上席研究員  
主任研究員  
研究員  
交流研究員  
交流研究員

渡辺 博志  
古賀 裕久  
中村 英佑  
山田 宏  
鈴木 聡

## 要 旨

本報告書は、ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に与える影響を検証するために実施した暴露試験の試験開始から約5年後までの調査結果をまとめたものである。本暴露試験では、ひび割れ幅とかぶりを主な実験パラメータとした268体の鉄筋コンクリート供試体をつくば、新潟、沖縄の3ヶ所に暴露し、試験開始から約1年後、約2.5年後、約5年後に回収して解体調査を行い、コンクリートひび割れ部における塩分浸透と鋼材腐食について検討した。この結果、鋼材の腐食面積は、暴露環境や暴露期間、塩化物イオン浸透量の違いにかかわらず、ひび割れ幅が小さく、かぶり大きい供試体で小さくなる傾向にあった。また、暴露期間を長くしても鋼材表面の腐食面積の大幅な増加は確認されなかったが、一部の供試体では孔食による断面欠損を伴う鋼材腐食が生じていた。ただし、この断面欠損は鋼材の力学性能を低下させるほどのものではなかった。

キーワード： ひび割れ、塩分浸透、鋼材腐食、コンクリート構造物、暴露試験

# 目次

1. はじめに .....	1
2. 暴露試験の概要 .....	2
2.1 供試体の形状 .....	2
2.2 実験パラメータ .....	3
2.3 供試体の暴露状況 .....	4
2.4 測定及び解体調査の方法 .....	8
3. 測定及び解体調査の結果 .....	10
3.1 供試体表面の状態 .....	10
3.2 ひび割れ幅の変動 .....	10
3.3 自然電位 .....	11
3.4 鋼材の腐食状態 .....	12
3.5 鋼材の腐食面積率 .....	15
3.6 鋼材の質量減少率 .....	19
3.7 鋼材の断面形状 .....	19
3.8 塩化物イオンの浸透状況 .....	20
3.9 EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析 .....	22
3.10 鋼材の力学特性 .....	30
4. ひび割れ部における塩分浸透性と鋼材腐食に関する考察 .....	31
4.1 ひび割れ部における塩化物イオンの見掛けの拡散係数 .....	31
4.2 ひび割れ部の塩分浸透性, 中性化と鋼材腐食 .....	37
4.3 コンクリート表面のひび割れ幅の許容値 .....	38
5. 結論 .....	41
謝辞 .....	43
参考文献 .....	44
参考資料 .....	45

## 1. はじめに

コンクリート構造物のひび割れは塩化物イオンや水、酸素など腐食因子の浸透を容易にしてコンクリート内部の鋼材の腐食を助長する可能性が高いと考えられており、コンクリート構造物の耐久性を低下させる主な要因とされてきた。このため、コンクリート構造物に生じるひび割れに対しては、設計と施工の両面において、耐久性上有害とされない範囲にひび割れ幅を制御することが求められている。しかしながら、ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響については、必ずしも統一した見解が得られていない。例えば、国内外のコンクリート構造物に関する設計規準を比較すると、これらで規定されているひび割れ幅の許容値やその制御方法は様々であり、設計規準ごとにひび割れの取り扱いは大きく異なったものとなっている。また、既往研究ではひび割れがコンクリート中の鋼材の腐食を助長すると指摘するものがある一方で、両者には必ずしも明確な関係はみられないと指摘するものもある。これらの既往研究では供試体の形状やひび割れ幅、かぶり、暴露期間、暴露環境など試験結果に多大な影響を与えると考えられる実験パラメータが様々に設定されていたため、異なる結果が得られた可能性がある。

今後、性能照査型の設計規準の導入に伴い、コンクリート構造物の設計においても大幅な自由度が与えられることが予想されるが、その際には構造物の安全性や耐久性が損なわれることが無いよう適切な設計体系を構築しておくことが不可欠である。特にコンクリートのひび割れはコンクリート構造物の耐久性と密接な関係があるため、これが耐久性に及ぼす影響を適切に把握しておくことが重要である。

これらのことを踏まえ、ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に与える影響を検証することを目的として、2006年4月からひび割れを導入した鉄筋コンクリート供試体の暴露試験をつくば、新潟、沖縄の3ヶ所で実施している。本報告書では、試験開始から約5年後の解体調査の結果を整理するとともに、コンクリートひび割れ部の塩分浸透と鋼材腐食について検討した。本暴露試験では、実験パラメータとしてひび割れ幅、かぶり、暴露期間、暴露環境など試験結果に多大な影響を及ぼす可能性が高いものを採用し、供試体の回収及び解体調査を定期的に行うことにより、コンクリートひび割れ部における塩分浸透性と鋼材の腐食性状を明らかにすることを試みた。

なお、既往研究のレビュー、国内外の設計規準におけるひび割れの取扱い方法の比較、試験開始から約1年後と約2.5年後の解体調査の詳細な結果については、既報<sup>1), 2), 3)</sup>を参照されたい。

## 2. 暴露試験の概要

ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響を明らかにするため、これまでも様々な実験が行われてきた。代表的な暴露試験の結果によれば、短期的な実験ではひび割れが鋼材腐食を助長するとの結果が得られているが、長期的な実験ではひび割れと鋼材腐食の関係は必ずしも明確ではないとされており、ひび割れ幅が鋼材腐食に及ぼす影響については統一的な見解は得られていない。

このように過去の試験で異なる見解が得られた原因は、供試体形状やコンクリート配合、暴露期間、暴露環境など試験結果に影響を及ぼす可能性の高い試験条件がそれぞれ異なっていたためと考えられる。ひび割れがコンクリート構造物の耐久性に及ぼす影響を明確にするためには、ひび割れ幅やかぶりなど試験結果に多大な影響を及ぼすと考えられる実験パラメータを網羅した供試体を用い、長期的な暴露試験を多様な環境条件下で同時に実施することが不可欠である。

こうした問題意識のもと、ひび割れ部からの塩分浸透と鋼材腐食に影響を及ぼすと考えられる実験パラメータ（ひび割れ幅、かぶり、水セメント比など）を網羅した供試体を製作し、つくば、新潟、沖縄の3ヶ所において暴露試験を開始した。本暴露試験の実施計画を表-2.1に示す。

表-2.1 暴露試験の実施計画

実施時期	内容
2005年11月～2006年3月	土木研究所の実験棟内で供試体製作
2006年4月～6月	つくば、新潟、沖縄で暴露試験開始
2007年5月～6月	約1年後の調査（約12ヶ月後に実施 土木研究所資料No.4130 <sup>1)</sup> で報告）
2008年9月～10月	約2.5年後の調査（約28ヶ月後に実施 土木研究所資料No.4130 <sup>1)</sup> で報告）
2011年9月～10月	約5年後の調査（約65ヶ月後に実施 本報告書で報告）
2015年	約10年後の調査（予定）

### 2.1 供試体の形状

図-2.1に、暴露した供試体の形状を示す。供試体は、長さ1mの異形鉄筋(SD295A, D13)を1本有する200×200×1,000mmの角柱である。鋼材の両端部は、鋼材端部の腐食を防ぐため塩ビパイプで覆い、供試体側面をエポキシ樹脂で被覆した。ひび割れは、材齢28日以降に所定のひび割れ幅となるよう二点曲げ荷重で供試体中央付近に導入した。また、ひび割れ幅の長期的な変動の有無を確認するためのコンタクトゲージ測定用チップをひび割れの左右に設置した。

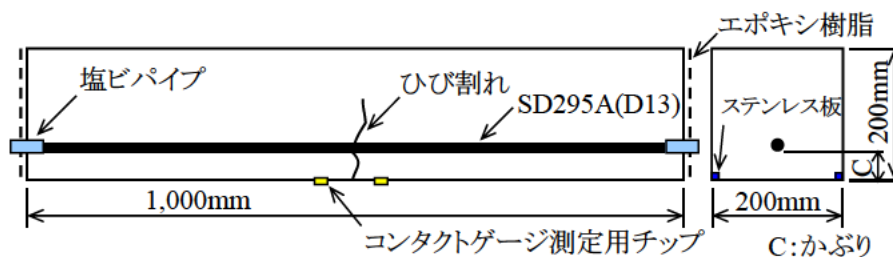


図-2.1 供試体の形状

## 2.2 実験パラメータ

表-2.2 に、本暴露試験の実験パラメータを示す。

暴露環境は、つくば、新潟、沖縄の3ヶ所とした。つくばは内陸部に位置するため塩害環境下にはないが、新潟と沖縄の暴露場は沿岸部の厳しい塩害環境下にある。

ひび割れ幅は、「なし」、「0.2mm 以下」、「0.3mm 前後」、「0.5mm 以上」の4水準とした。二点曲げ載荷で厳密に所定の幅を有するひび割れを導入することが技術的に困難であったため、一定の範囲内でひび割れ幅を管理した。ひび割れ導入後、供試体下面の中央、中央から両側 50mm の3点のひび割れ幅をクラックスケールで測定し、目標とするひび割れ幅の条件を満たしていることを確認した。3点の実測値の平均は「0.2mm 以下」で 0.05~0.2mm、「0.3mm 前後」で 0.25~0.45mm、「0.5mm 以上」で 0.5~0.77mm の範囲にあり、複数のひび割れが発生した場合には最も幅の大きいひび割れで供試体を分類した。試験中のひび割れ幅の変動を抑制するため、「0.3mm 前後」と「0.5mm 以上」の供試体には、ひび割れ導入後に約 10mm×約 10mm の厚さ 0.1m あるいは 0.3mm のステンレス板を供試体の端部のみに挿入し（図-2.1 参照）、エポキシ樹脂で覆って固定した。

かぶりは 20, 30, 50, 70mm の4種類とした。

暴露期間は、試験結果の経時的な変化を把握できるように 1, 2.5, 5, 10 年の4期間を予定した。本報告書では、暴露期間 5 年（試験開始から約 65 ヶ月後）の調査結果を主に報告する。

コンクリートの水セメント比（以下、W/C）は 55% を基本とし、比較のため一部で 35% の供試体も製作した。本暴露試験の供試体に使用したコンクリートの配合を表-2.3 に示す。

なお、コンクリート中にあらかじめ内在する塩化物イオンがひび割れを有する供試体中の鋼材の腐食に及ぼす影響を検討するため、つくばに暴露する供試体の一部では、塩化物イオン濃度  $0.3\text{kg/m}^3$  相当の塩化ナトリウムを練混ぜ時にコンクリートに混入した供試体も製作した。

表-2.2 実験パラメータ

暴露環境	ひび割れ幅	かぶり (mm)	暴露期間 (年)	水セメント比 (%)
つくば <sup>※1</sup>	なし	20 <sup>※3</sup>	1	35 <sup>※4</sup>
新潟 <sup>※2</sup>	0.2mm 以下	30	2.5	
	0.3mm 前後	50	5	
沖縄	0.5mm 以上	70	10	

※1：塩化物イオン濃度  $0.3\text{kg/m}^3$  換算の塩化ナトリウムを練混ぜ時に混入した供試体も暴露

※2：ひび割れ面が上向きとなるように設置した供試体も暴露（W/C55%，かぶり 30, 70mm）

※3：暴露期間 1, 2.5 年の供試体のみ

※4：つくばはかぶり 30mm，新潟はかぶり 50mm，沖縄はかぶり 70mm の供試体のみ

表-2.3 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位重量 ( $\text{kg/m}^3$ )				
		W	C	S	G	混和剤
35	40.0	155	443	684	1065	4.43
55	44.8	160	294	820	1044	3.12

※普通ポルトランドセメント，最大粗骨材寸法 20mm，スランプ 8cm，空気量 4.5%

※混和剤は W/C35% で高性能 AE 減水剤，W/C55% で AE 減水剤を使用

## 2.3 供試体の暴露状況

写真-2.1に、試験開始時、試験開始から約28ヶ月後、約65ヶ月後の各暴露試験場における供試体の暴露状況を示す。供試体は架台の上に120mm間隔で、ひび割れ面を下向きにして設置した。橋梁上部工など実際のコンクリート構造物で生じることの多い部材下面の曲げひび割れを模擬するためである。架台の高さは、つくばと新潟で約1m、沖縄で約0.5mとした。



(a)つくば



(b)新潟



(c)沖縄

試験開始時 (2006年4月～5月撮影)



(a)つくば



(b)新潟



(c)沖縄

試験開始から約28ヶ月後 (2009年9月～10月撮影)



(a)つくば



(b)新潟



(c)沖縄

試験開始から約65ヶ月後 (2011年9月～10月撮影)

写真-2.1 各暴露試験場における供試体の暴露状況



つくばの暴露地点は、茨城県つくば市の土木研究所の構内にある地質野外実験場とした。新潟の暴露地点は新潟県上越市の国道8号に隣接する海岸線沿いの暴露試験場とし、沖縄の暴露地点は沖縄県国頭郡大宜見村の国道58号に隣接する海岸線沿いの暴露試験場とした。新潟と沖縄の暴露試験場はいずれも海岸線沿いに位置する。新潟の暴露試験場は、海水が供試体に直接降りかかることはないものの、海中の消波ブロックや波打ち際に生成された海水の飛沫によって飛来塩分が供給される環境である。一方、沖縄の暴露試験場は、そのような飛来塩分に加えて、天候によっては海水が供試体に直接降りかかることもある環境である。

図-2.2に、各暴露試験場の最寄りの気象観測所における試験期間中の気温、湿度の毎月の平均値と月間降水量を示す<sup>4)</sup>。つくばと新潟の気温は概ね同程度で推移しているが、沖縄の気温はこれらよりも高い。湿度は、夏季に高く冬季に低く、いずれも同程度で推移していた。月間降水量は、新潟の冬期に多くなっているが、これは降雪のためと考えられる。また、月間降水量は沖縄の夏季にも多く、これは台風の影響によるものと考えられる。

なお、本暴露試験に用いた供試体の一覧、各暴露試験場の位置図、各暴露試験場における供試体の配置図については、本報告書巻末の参考資料に示す。

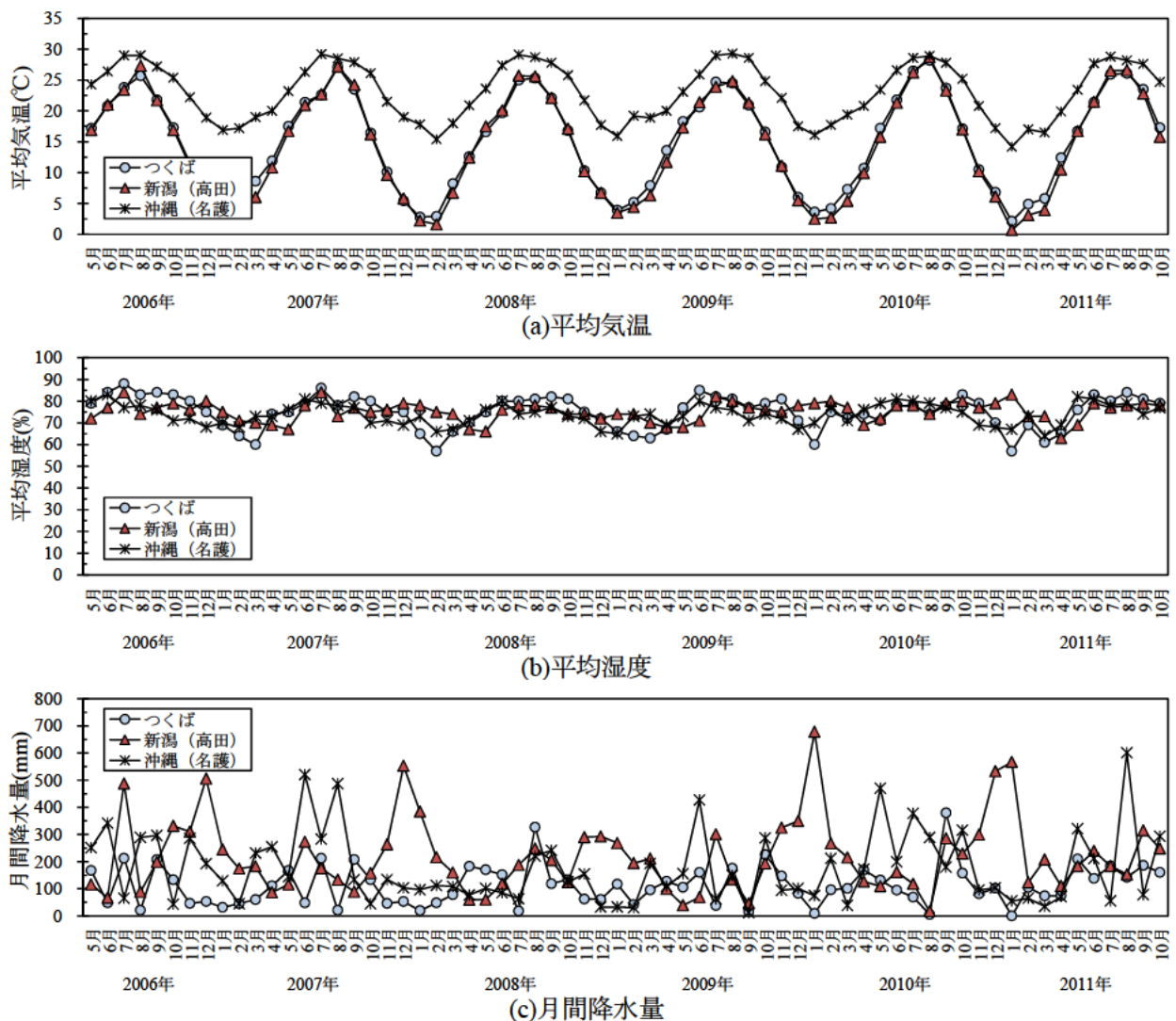


図-2.2 各暴露試験場の最寄りの気象観測所における気象データ

図-2.3に、過去に新潟と沖縄の暴露試験場の最寄りの調査地点で得られた飛来塩分量の測定結果を示す<sup>3)</sup>。田海橋と姫川橋（国道）、姫川橋（県道）は新潟の暴露試験場から約30km、塩屋大橋と平南橋（国道58号）は沖縄の暴露試験場から約4km離れているが、いずれも海岸線に比較的近い場所に位置する。これらの測定結果は今回使用した暴露試験場の環境条件と一致するものではないが、新潟では日本海からの季節風により冬に飛来塩分量が多くなること、沖縄では台風の影響により飛来塩分量が極端に多くなる場合があることなど、地域による飛来塩分量の特徴が読み取れる。

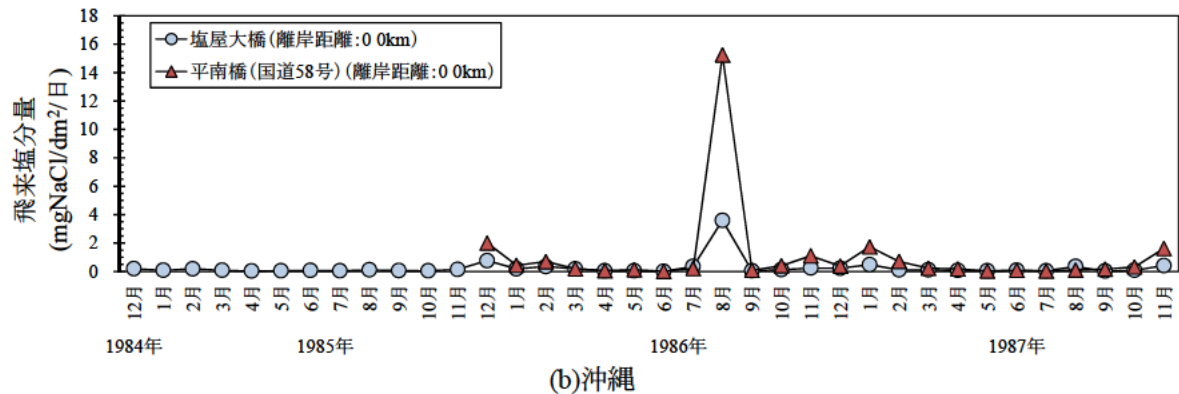
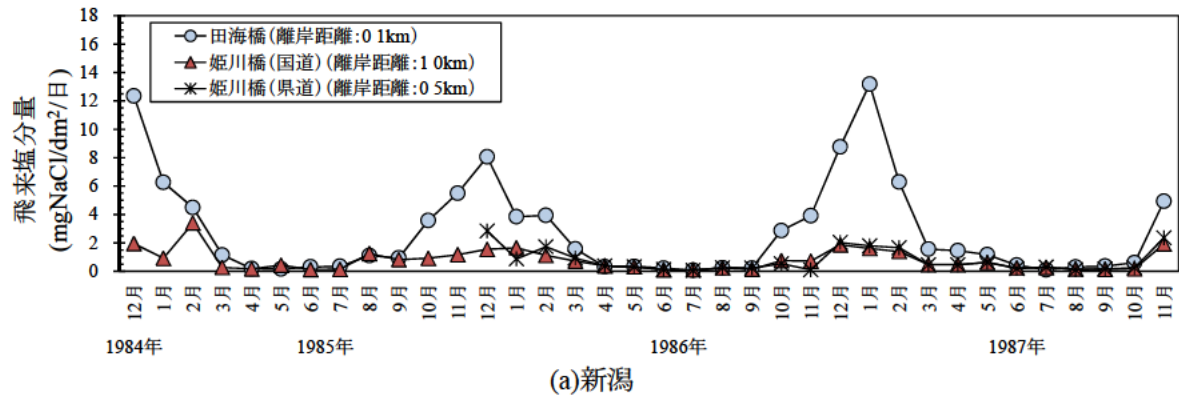


図-2.3 各暴露試験場の最寄りの調査地点における飛来塩分量測定結果

また、図-2.4 に、沖縄の暴露試験場で試験開始から約1年間実施した飛来塩分量の測定結果を示す。ここで得られた結果は、図-2.3 に示した沖縄の飛来塩分量の測定結果と比べて大幅に大きい値である。この原因は、今回使用した沖縄の暴露試験場が台風時など天候によっては海水が供試体に直接降りかかる環境であり、飛来塩分捕集器に海水が直接流入したためではないかと考えられる。測定当時の沖縄気象台の記録<sup>9)</sup>によれば、2006年の沖縄地方は7月から10月にかけて台風の影響を受けたとのことである。台風の経路や位置、強さによって暴露試験場への飛来塩分量も異なると予測されるため、必ずしも台風の接近時のみで飛来塩分が多くなるとは断定できないが、2006年の9月と10月の突出して多い飛来塩分量の原因は台風の接近によるものではないかと考えられる。従って、今回の暴露試験における塩化物イオンの供給量は、新潟よりも沖縄の暴露試験場で多くなると考えられる。

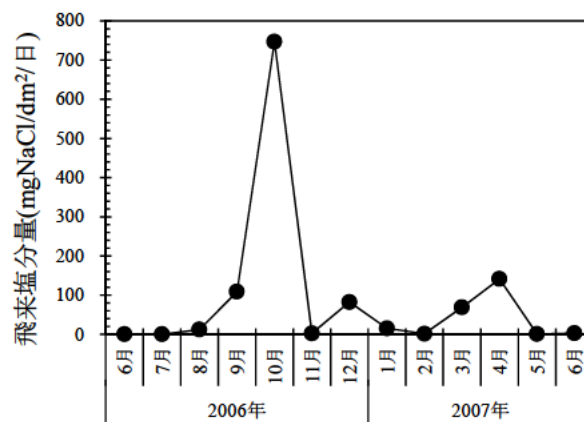


図-2.4 沖縄の暴露試験における飛来塩分量測定結果

## 2.4 測定及び解体調査の方法

### (1) 暴露試験開始時の測定

供試体は、土木研究所の実験棟内でひび割れを導入した後、速やかに各暴露試験場に移設した。移設前後にコンタクトゲージによる測定を行い、移設作業によるひび割れ幅の変動の有無を確認した。

移設直後に、各暴露試験場で供試体内部の鋼材の自然電位を測定した。測定は、供試体表面に約30分間散水した後、銅-飽和硫酸銅電極を用いて行った。測定点は、図-2.5の鋼材直上のひび割れ部近傍あるいは供試体中央と、この両側50, 100, 200, 300mmの計9点とした。

### (2) 回収時の測定

試験開始から約12, 28, 65ヶ月後に、暴露期間1, 2.5, 5年で予定していた供試体の回収を行った。回収時にも各暴露場でコンタクトゲージによる測定を行い、暴露試験中のひび割れ幅の変動の有無を確認した。また、暴露試験開始時と同様の方法で、各暴露場において自然電位を測定した。

### (3) 解体調査

回収後、供試体を解体し、鋼材を取り出して腐食の範囲を目視観察・記録し、この結果から腐食面積率を求めた。また、ひび割れ部の塩化物イオン濃度とその分布状況を把握するため、塩化物イオン濃度の測定とEPMA法による面分析を行った。このため、図-2.5に示すように、コンクリート表面のひび割れがコア表面の中央となるようにφ50mmとφ75mmのコアを鋼材の直近で採取した。

塩化物イオン濃度の測定は、φ50mmのコアを採取して厚さ10mmでスライスし、JIS A 1154:2003に準拠して電位差滴定法により行った。

EPMA法による面分析には、φ75mmのコアを用いた。φ75mmのコアは約100mmの深さまで採取し、ひび割れ部が中央となるように厚さ10mmの版状の試料を切り出した。面分析は62mm×85mmの範囲を対象とし、JSCE G574-2005に準拠して行った。対象元素は、塩素に加えて、炭素、ナトリウム、硫黄の4種類とした。

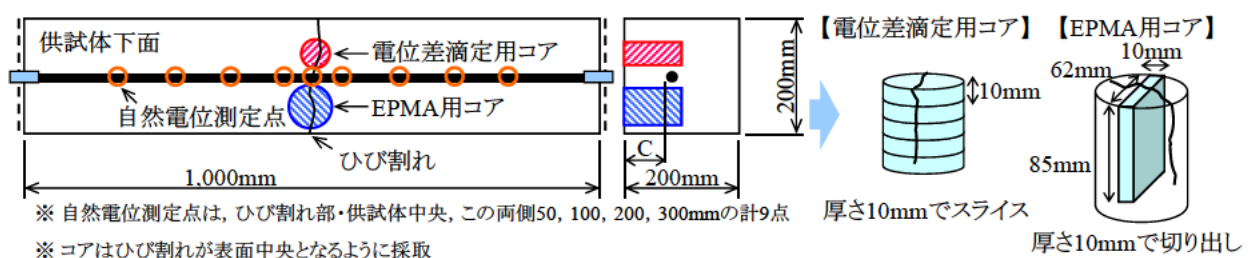


図-2.5 自然電位測定点とコア採取位置，試料製作方法

試験開始から約 28, 65 ヶ月後に回収した供試体から取り出した鋼材については、JCI-SC1 に準拠して濃度 10%のクエン酸二アンモニウム溶液に浸せきして除錆した後に質量を測定し、腐食による鋼材の質量減少率を求めた。

試験開始から約 65 ヶ月後に回収した供試体から取り出した鋼材については、JIS Z 2241: 1998 に準拠して引張試験を行い、最大荷重と降伏荷重、破断後の伸びを測定した。特に激しい腐食が生じていた鋼材 14 本については、引張試験の実施前に 3D スキャナを用いた断面計測を行い<sup>7)</sup>、腐食による断面の欠損状態を 3 次元的に把握することを試みた。3D スキャナによる測定は、鋼材の周方向に約 1 度の角度、軸方向に約 0.6mm の間隔で行った。

本暴露試験で実施した調査項目の一覧を表-2.4 に示す。

表-2.4 調査項目の一覧

測定項目	暴露試験開始時	1 年目の調査 (約 12 ヶ月後)	2.5 年目の調査 (約 38 ヶ月後)	5 年目の調査 (約 65 ヶ月後)
コンタクトゲージによるひび割れ幅	○	○	○	○
自然電位	○	○	○	○
鋼材の腐食面積率	×	○	○	○
鋼材の質量減少率	×	×	○ 切断せずに実施	○ 腐食位置が中心となるように長さ 400mm に鋼材を切断して実施
鋼材の断面形状	×	×	×	○ 断面欠損の著しい鋼材 14 本を選出して実施
塩化物イオン濃度	×	○ 新潟と沖縄の W/C55%の供試体で実施	○ 新潟と沖縄の W/C55%の供試体で実施	○ 新潟の W/C55%かぶり 70mm と W/C35%かぶり 50mm の供試体、沖縄の W/C35%と 55%かぶり 70mm の供試体で実施
EPMA 法による元素の面分析	×	○ 新潟と沖縄の W/C55%かぶり 70mm の供試体で実施	○ 新潟と沖縄の W/C55%かぶり 70mm の供試体で実施	○ 沖縄の W/C55%かぶり 70mm の供試体で実施
鋼材の引張試験	×	×	×	○

### 3. 測定及び解体調査の結果

本章では、試験開始から約 65 ヶ月後までの測定及び解体調査の結果をまとめる。

#### 3.1 供試体表面の状態

写真-3.1 に、試験開始から約 55 ヶ月後の回収時に撮影した新潟の供試体の近接写真を示す。各暴露試験場で回収した供試体のコンクリート表面の状態は 65 ヶ月間の暴露により変化が生じていた。暴露開始直前の状態と比較すると、供試体の上面ではコンクリート表面が粗くなっていた（写真-3.1(a)）。また、供試体の下面（ひび割れ面）ではコケ等の付着が付いた供試体が多く見られ、ひび割れ部分ではモルタル分が洗われていた（写真-3.1(b)）。これらの変状はつくば、新潟、沖縄のいずれの暴露試験場の供試体においても生じていたが、その程度は暴露試験場により異なっていた。最も顕しい変状が確認されたのは、スケーリングの影響を最も受けやすいと考えられる新潟の暴露試験場暴露した供試体であった。



(a)上面

(b)下面（ひび割れ面）

写真-3.1 試験開始から約 65 ヶ月後の新潟の供試体の状態

#### 3.2 ひび割れ幅の変動

供試体の移設前、暴露試験開始時（移設直後）、回収時（試験開始から約 12, 28, 65 ヶ月後）に、コンタクトゲージによるひび割れ幅の変動の測定を行った。試験開始から約 28 ヶ月後までの測定では、移設作業や暴露試験中におけるひび割れ幅の変動はほとんど無く、全ての供試体が所定のひび割れ幅の範囲内にあることを確認した。しかしながら、試験開始から約 65 ヶ月後の測定では、一部の供試体でコンクリート表面に設置したコンタクトゲージチップが腐食し、測定が困難なものがあった。これらの供試体では目視観察あるいはクラックゲージによる測定でひび割れ幅の確認を行い、ひび割れが所定のひび割れ幅の範囲内にあることを確認した。試験開始から約 65 ヶ月後の時点でもコンタクトゲージチップが健全な供試体では、以前の測定と同様に、コンタクトゲージの測定でひび割れ幅が所定のひび割れ幅の範囲内にあることを確認した。

### 3.3 自然電位

図-3.1 に、試験開始時、試験開始から約 12、28、65 ヶ月後に各暴露試験場で測定した自然電位を示す。いずれも試験開始から約 65 ヶ月後に回収した供試体の 4 時点での測定結果であり、ひび割れ部近傍あるいは供試体中央とこの両側 50mm の計 3 点での測定値の平均値を示す。なお、図中には、測定時の各暴露試験場の気温と天気も併記し、測定値の温度補正は行っていない。

この結果によると、試験開始時の自然電位はひび割れ幅やかぶりの大小にかかわらず同程度の値となっていたが、試験開始後の自然電位はひび割れを導入した供試体で卑になる傾向にあった。この傾向は、一部の例外を除いて、試験開始後の 3 回の測定結果で共通していた。しかし、ある時点で卑な自然電位が得られた供試体において、その後の測定で大幅に貴な自然電位が得られた場合もあり、長期的な自然電位の測定結果は大きく変動する結果となった。ひび割れを導入して屋外に暴露した供試体の内部の鋼材の自然電位は、測定時の気象条件や鋼材の置かれた腐食環境の変化により、長期的に大きく変動すると考えられる。

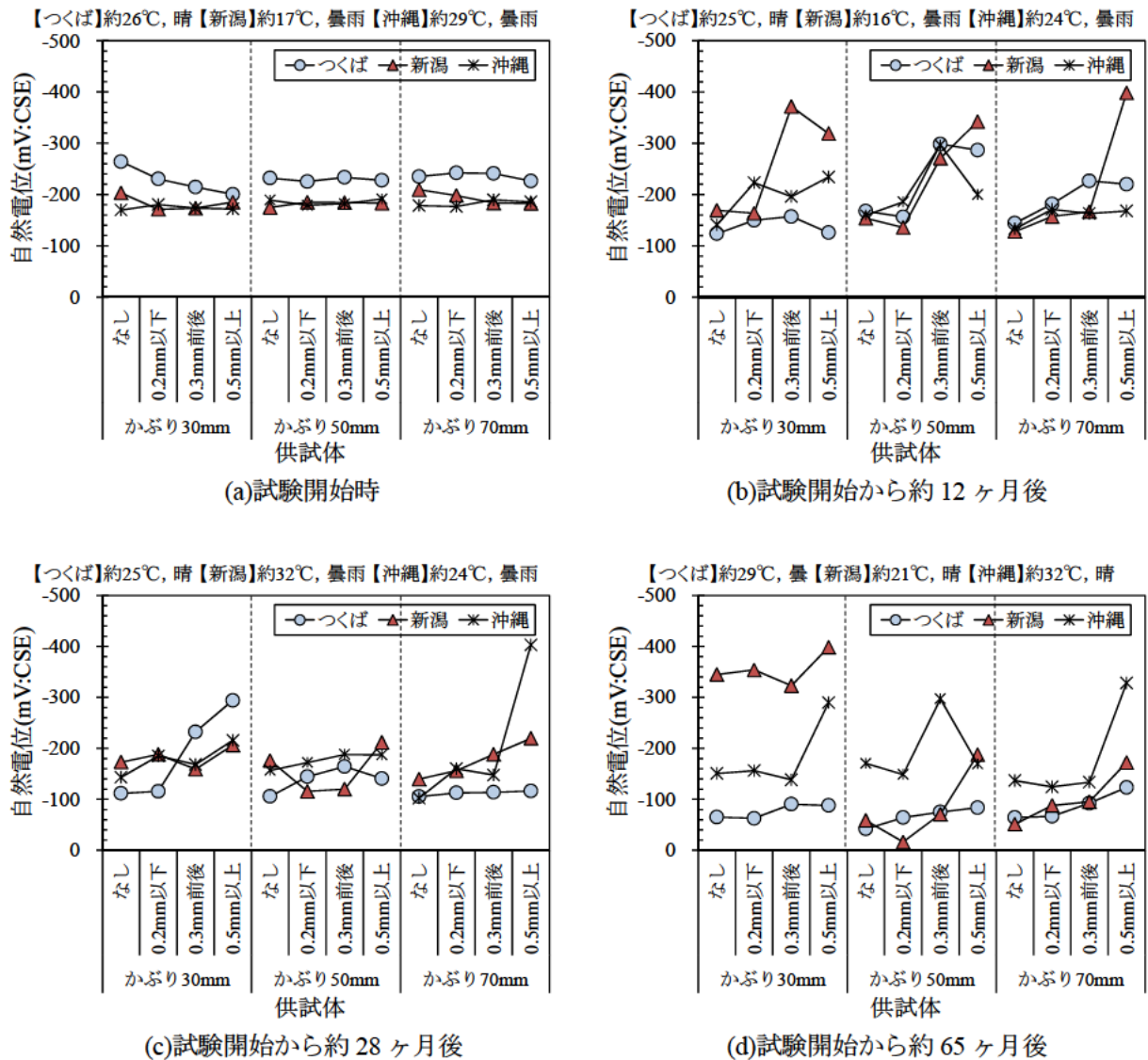


図-3.1 自然電位の測定結果

### 3.4 鋼材の腐食状態

回収した供試体を土木研究所の実験棟内で解体し、取り出した鋼材の腐食状態を目視観察した。いずれの暴露環境においても、鋼材に腐食が生じていた供試体ではひび割れと腐食の発生位置が一致し、ひび割れを導入していない供試本の鋼材では目視による腐食を確認することはできなかった。

写真-3.2に、試験開始から約15ヶ月後に回収した供試体から取り出した鋼材の腐食状態を示す。ここでは、W/C55%のひび割れを有するかぶり50mmの供試体の除錆前の鋼材の状態を示す。腐食の範囲はひび割れ幅が大きいほど長くなる傾向にある。これは、ひび割れ幅の大きい供試体ほどコンクリートと鋼材の付着が切れた区間が長くなったこと、ひび割れ幅の大きい供試体ほど塩化物イオンや水、酸素など腐食因子の浸透が容易であったことなどが原因と考えられる。

また、写真-3.3に、写真-3.2の鋼材のうち新潟と沖縄から回収した供試体から取り出した鋼材の除錆後の状態を示す。これらの鋼材の表面には断面欠損を伴う腐食が生じていたが、つくばから回収した供試体から取り出した鋼材ではこのような断面欠損が生じていなかった。

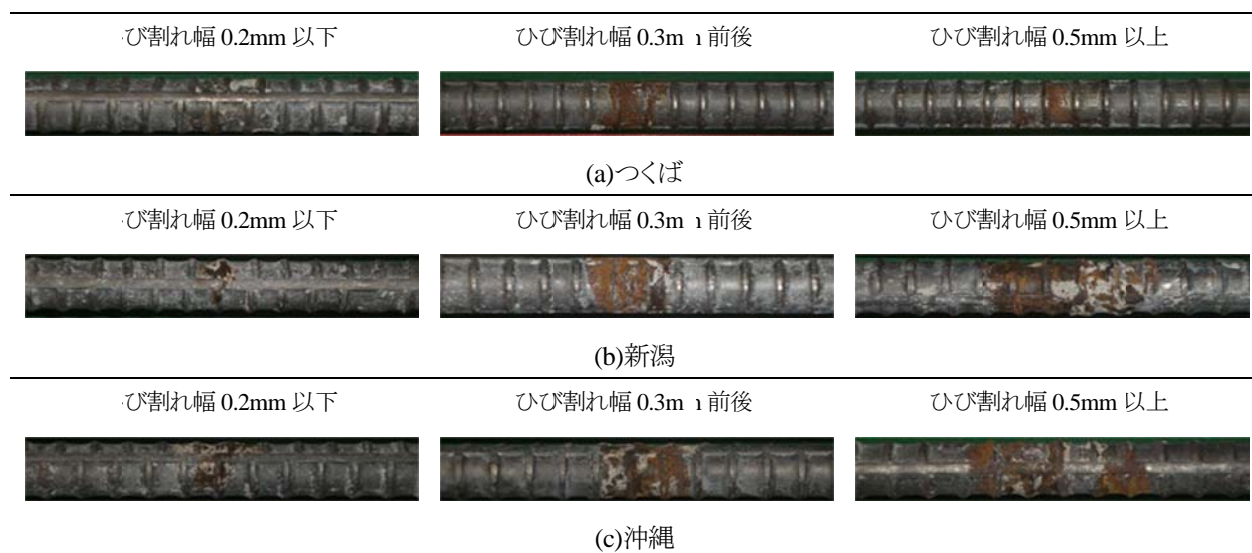


写真-3.2 各暴露環境における鋼材の腐食状態（かぶり 50mm, W/C55%, 除錆前）

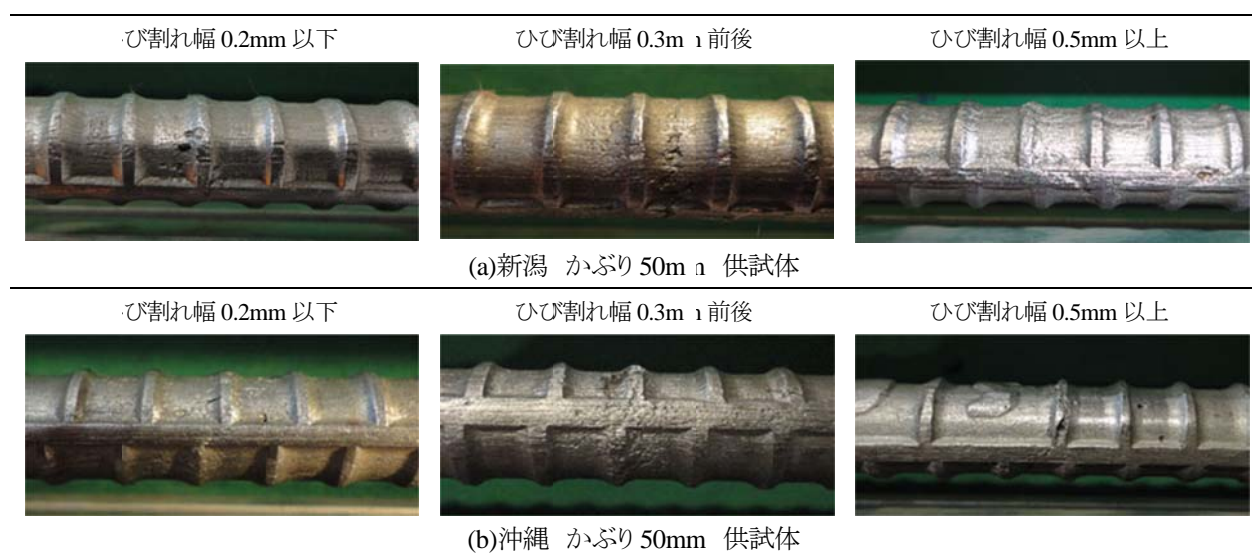


写真-3.3 各暴露環境における鋼材の腐食状態（かぶり 50mm, W/C55%, 除錆後）



次に、鋼材の腐食状態の経年的な変化を明らかにするため、鋼材の目視観察の結果から鋼材の腐食状態を、①孔食による断面欠損を伴う腐食、②比較的軽微な断面欠損を伴う腐食、③鋼材表面のみの腐食（断面欠損なし）、④腐食なしの4種類に分類し（写真-3.4）、鋼材の腐食の程度を定量的に評価することを試みる。表-3.1ではW/C55%の供試体、表-3.2ではW/C35%の供試体に着目し、上記の分類に基づいた各暴露環境における鋼材の腐食状態の経年的な推移を示す。

この結果によると、暴露期間が長いほど断面欠損を伴う腐食が生じた鋼材が多くなったこと、かぶりが小さくひび割れ幅が大きい供試体で断面欠損を伴う腐食が生じた鋼材が多くなったこと、つくばでは約15ヶ月の暴露を経ても断面欠損を伴う腐食が生じていなかったが、新潟と沖縄では腐食あるいは比較的軽微な断面欠損を伴う腐食が生じていたことなどが分かる。塩害環境下である新潟と沖縄においては、かぶりが小さくひび割れ幅が大きい供試体ほど、経年的な腐食の程度が激しくなる傾向にあると考えることができる。

また、W/Cの違いに着目すると、目視観察の結果に基づく定性的な評価となるが、W/C55%の供試体よりもW/C35%の供試体の方が腐食の程度が軽微であったことが分かる。



(a)孔食による断面欠損を伴う腐食



(b)比較的軽微な断面欠損を伴う腐食

写真-3.4 分類された鋼材の腐食状態の典型例

表-3.1 鋼材の腐食状態の経年変化 (W/C55%)

かぶり	かぶり 30mm				かぶり 50mm				かぶり 70mm				
	ひび割れ幅	なし	0.2mm 以下	0.3mm 前後	0.5mm 以上	なし	0.2mm 以下	0.3mm 前後	0.5mm 以上	なし	0.2mm 以下	0.3mm 前後	0.5mm 以上
つくば													
約12ヶ月後	×	△	△	△	×	×	×	△	×	×	×	×	×
約28ヶ月後	×	△	△	△	×	×	△	×	×	×	×	×	×
約65ヶ月後	×	△	△	△	×	×	△	△	×	×	×	×	△
新潟													
約12ヶ月後	×	△	△	△	×	×	△	△	×	×	×	×	△
約28ヶ月後	×	◎	△	◎	×	×	◎	○	×	×	◎	◎	◎
約65ヶ月後	×	△	○	◎	×	◎	◎	◎	×	×	◎	◎	◎
沖縄													
約12ヶ月後	×	△	△	△	×	×	×	△	×	×	×	×	×
約28ヶ月後	×	△	◎	◎	×	△	△	△	×	×	×	×	◎
約65ヶ月後	×	◎	○	◎	×	○	◎	◎	×	△	○	○	○

※◎：孔食による断面欠損を伴う腐食，○：比較的軽微な断面欠損を伴う腐食，  
△：鋼材表面のみの腐食（断面欠損なし），×：腐食なし

表-3.2 鋼材の腐食状態の経年変化 (W/C35%)

かぶり	かぶり 30mm				かぶり 50mm				かぶり 70mm				
	ひび割れ幅	なし	0.2mm 以下	0.3mm 前後	0.5mm 以上	なし	0.2mm 以下	0.3mm 前後	0.5mm 以上	なし	0.2mm 以下	0.3mm 前後	0.5mm 以上
つくば													
約12ヶ月後	×	×	△	△									
約28ヶ月後	×	×	△	△									
約65ヶ月後	×	△	△	△									
新潟													
約12ヶ月後					×	△	×	△					
約28ヶ月後					×	×	△	△					
約65ヶ月後					×	○	◎	◎					
沖縄													
約12ヶ月後									×	×	×	×	×
約28ヶ月後									×	×	×	×	△
約65ヶ月後									×	△	△	◎	◎

※◎：孔食による断面欠損を伴う腐食，○：比較的軽微な断面欠損を伴う腐食，  
△：鋼材表面のみの腐食（断面欠損なし），×：腐食なし

※W/C35%の供試体は、つくばでかぶり 30mm，新潟でかぶり 50mm，沖縄でかぶり 70mm のみ

### 3.5 鋼材の腐食面積率

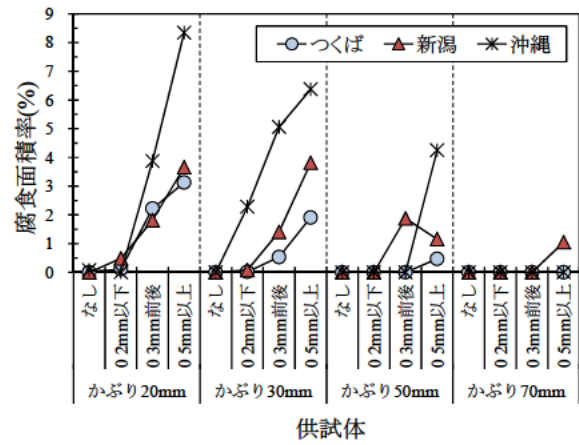
各鋼材の腐食の程度を相対比較するため、ひび割れ部から両側 200mm の鋼材の表面積 (16,000mm<sup>2</sup>) に占める腐食部分の割合を腐食面積率として算定した。腐食部分の面積は、目視観察によって作成した鋼材の腐食状態のスケッチ図から腐食部分を積算して求めた。この際、複数のひび割れが生じている供試体では最も幅の大きいひび割れ近傍の腐食のみを考慮することとした。

#### (1) 暴露環境と腐食面積率

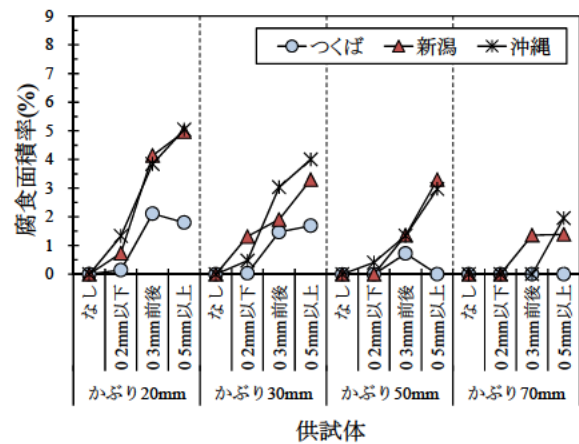
図-3.2 に、試験開始から約 12, 28, 65 ヶ月後に解体した供試体の鋼材の腐食面積率を示す。暴露環境の違いが腐食面積率に及ぼす影響を検証するため、暴露期間ごとに 3 ヶ所の暴露試験場に暴露した供試体で得られた腐食面積率を比較する。

いずれの暴露期間においても、新潟と沖縄に暴露した供試体から取り出した鋼材の腐食面積率は、つくばに暴露した供試体から取り出した鋼材よりも大きくなった。この傾向は、ひび割れ幅の大きい供試体でより明確に確認することができる。塩害環境下である新潟と沖縄の暴露試験場に暴露した供試体は、塩害環境下ではないつくばよりも腐食が生じやすい環境に置かれたためと考えられる。つくばに暴露した供試体で生じた腐食は塩化物イオンの浸透とは無関係であり、ひび割れ部のコンクリートの中性化や、ひび割れ部の鋼材が水や酸素と接触することにより生じたものである可能性が高い。

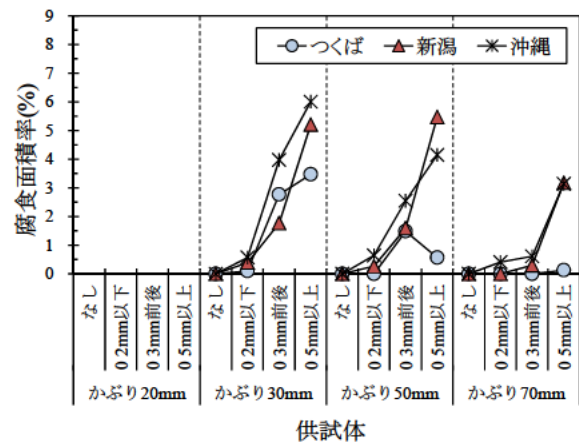
また、暴露環境の違いにかかわらず、かぶり厚が小さくひび割れ幅の大きい供試体では、鋼材の腐食面積率が大きくなることも読み取れる。



(a)試験開始から約 12 ヶ月後



(b)試験開始から約 28 ヶ月後



(c)試験開始から約 65 ヶ月後

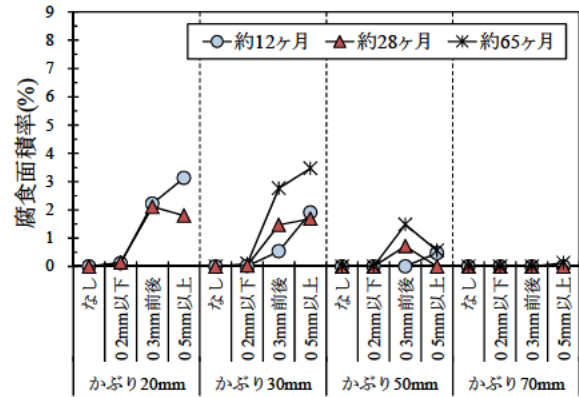
図-3.2 暴露期間ごとの鋼材の腐食面積率 (W/C55%の供試体の結果)

## (2) 暴露期間と腐食面積率

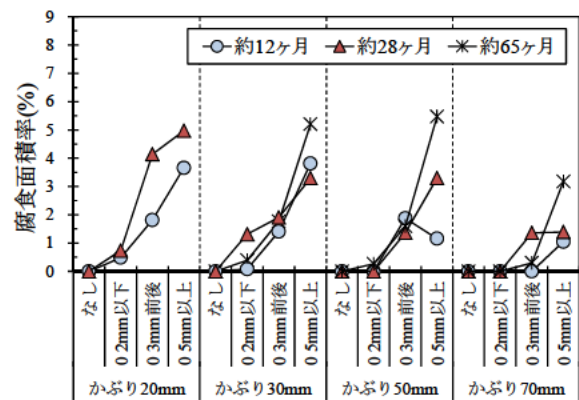
図-3.3 に、つくば、新潟、沖縄の各暴露試験場に暴露した供試体から得られた鋼材の腐食面積率を示す。暴露期間の違いが腐食面積率に及ぼす影響を検証するため、3ヶ所の暴露試験場ごとに3時点で得られた腐食面積率を比較する。

若干のばらつきはあるものの、いずれの暴露環境においても、経年的に鋼材の腐食範囲が大幅に増加するような傾向は見られない。また、経年的な腐食面積率の変化に比べると、ひび割れ幅の違いによる腐食面積率の大小の方に明確な差が現れている。すなわち、本暴露試験で用いた供試体では、鋼材の腐食は試験開始から比較的初期の段階で広い範囲に生じ、その後の面的な進展はほとんど無かったと考えられる。

また、その面的な腐食の範囲はひび割れ幅が大きいほど、かぶり小さいほど、広がる傾向にある。これらの供試体ではひび割れ導入時にコンクリートと鋼材の付着切れの生じる範囲が広くなり、塩化物イオンや水、酸素など腐食因子の侵入も容易となる可能性が高いため、腐食の生じた範囲が広がったと考えられる。

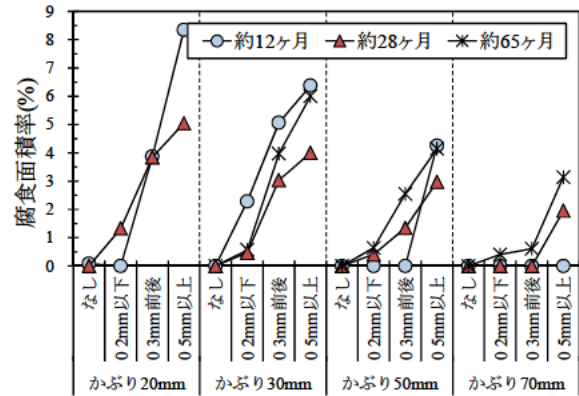


(a)つくば



供試体

(b)新潟



供試体

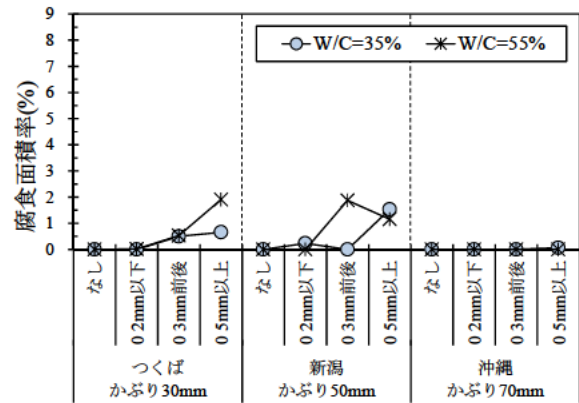
(c)沖縄

図-3.3 暴露環境ごとの鋼材の腐食面積率  
(W/C55%の供試体の結果)

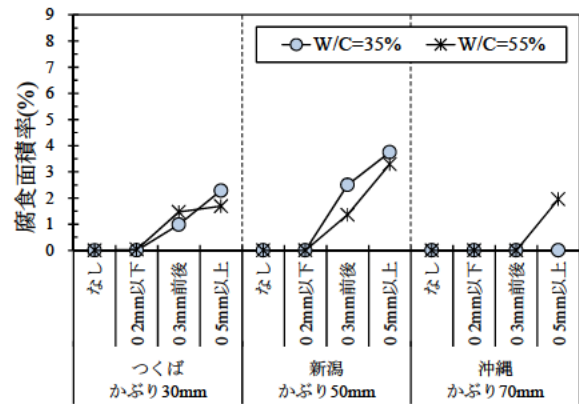
### (3) W/C と腐食面積率

図-3.4 に、W/C の違いが腐食面積率に及ぼす影響を検証するため、3 時点で解体した供試体の鋼材の腐食面積率を W/C ごとに示す。つくばのかぶり 30mm，新潟のかぶり 50mm，沖縄のかぶり 70mm の場合のみで W/C35% の供試体を製作したため、ここではこれらで得られた結果と W/C55% の供試体の腐食面積率を比較する。

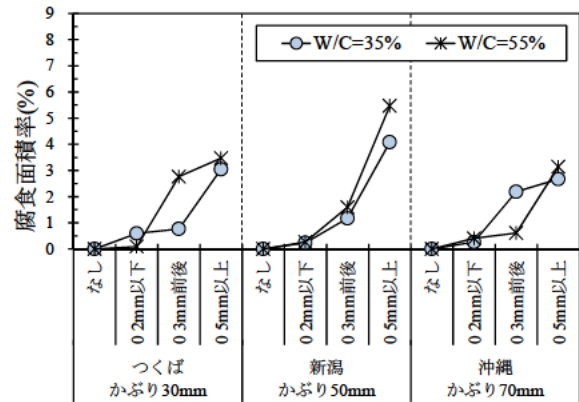
この結果によると、若干のばらつきは認められるが、いずれの暴露期間と暴露環境においても W/C の違いによって腐食面積率の大小に大きな差は生じていない。このため、今回の調査の結果の範囲内では、コンクリートの W/C の違いが腐食面積率に与える影響は比較的小さかったと考えられる。



(a)試験開始から約12ヶ月後



(b)試験開始から約28ヶ月後



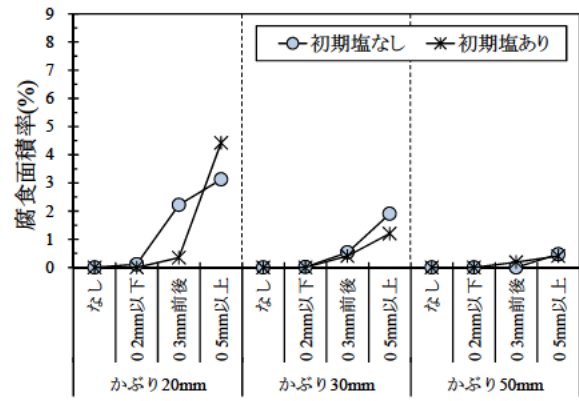
(c)試験開始から約65ヶ月後

図-3.4 W/C と鋼材の腐食面積率

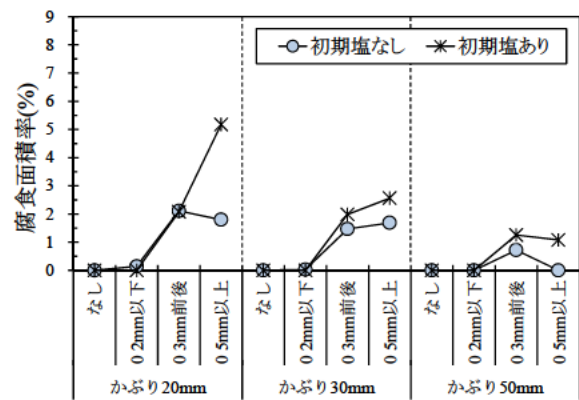
#### (4) 初期塩化物イオン濃度と腐食面積率

図-3.5 に、塩化物イオン濃度  $0.3\text{kg/m}^3$  相当の塩化ナトリウムを練混ぜ時にコンクリートに混入し、つくばに暴露した供試体の鋼材の腐食面積率を暴露期間ごとに示す。

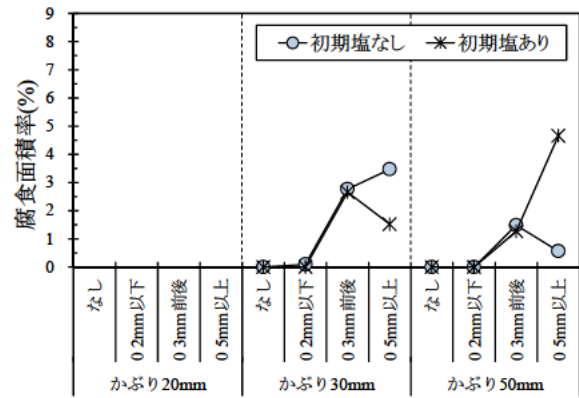
この結果によると、練混ぜ時に塩化ナトリウムを混入した供試体と混入していない供試体の腐食面積率は同程度であった。また、塩化物イオン濃度  $0.3\text{kg/m}^3$  相当の塩化ナトリウムの混入では、ひび割れの生じていない供試体やひび割れ幅  $0.2\text{mm}$  前後の供試体においては、ほとんど腐食が生じていないことが読み取れる。



(a)試験開始から約12ヶ月後



(b)試験開始から約28ヶ月後



(c)試験開始から約65ヶ月後

図-3.5 初期塩混入の有無と鋼材の腐食面積率 (W/C55%の供試体の結果)

### 3.6 鋼材の質量減少率

図-3.6 に、試験開始から約 65 ヶ月後に回収した供試体から取り出した鋼材の質量減少率と腐食面積率を示す。

腐食面積率の結果によると、ひび割れ幅の大きい供試体で腐食の生じている範囲が広がった。一方、質量減少率ではこのような傾向は見られなかった。この原因は、ここで得られた質量減少率が 2.0%以下と比較的小さく、除錆後に確認された断面欠損の程度も軽微であり（写真-3.3, 3.4）、質量減少率で評価できる程度まで腐食が進展していなかったためと考えられる。

また、ひび割れを導入していない供試体では鋼材腐食が生じていなかったが、腐食の生じていない鋼材についても腐食の生じた鋼材と同時にクエン酸二アンモニウム溶液に浸せきし、鋼材の溶出による質量減少率を測定した。図-3.6(a)の結果によると腐食の有無による質量減少率の差は明確ではなく、このことから今回の供試体で生じていた腐食は軽微であり、質量減少率で評価できるほどの腐食量ではなかったと考えられる。

### 3.7 鋼材の断面形状

特に激しい断面欠損が生じていた鋼材 14 本を選び、3D スキャナを用いて鋼材の断面形状を 3 次元的に計測した。写真-3.3, 3.4 に示したように試験開始から約 65 ヶ月後に回収した供試体内部の鋼材の一部では孔食による断面欠損が生じていたものもあったが、今回の 3D スキャナの計測ではこれらの断面欠損の状態を明確に把握することができなかった。従って、腐食による断面欠損の程度については、今後予定されている供試体の回収時にも継続して調査する必要がある。

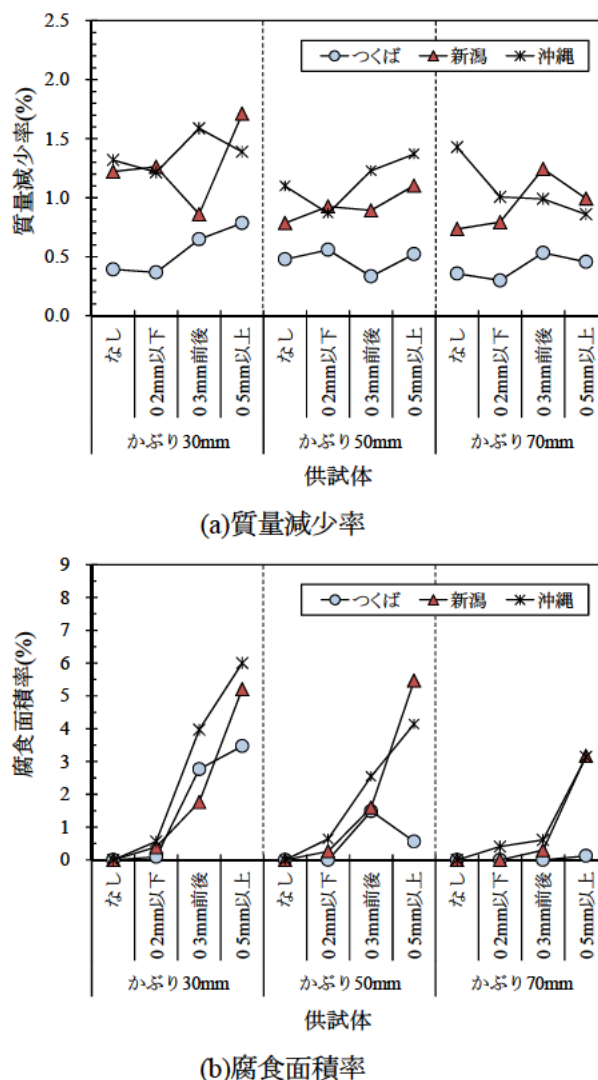


図-3.6 鋼材の質量減少率と腐食面積率  
(試験開始から約 65 ヶ月後, W/C55%)

### 3.8 塩化物イオンの浸透状況

図-3.7 に、試験開始から約 65 ヶ月後に新潟と沖縄から回収した供試体で得られた塩化物イオン濃度の測定結果を示す。ここでは、W/C の違いによる塩化物イオンの浸透状況も比較するため、W/C が 55% と 35% の供試体の測定結果を示す。

ひび割れの有無に着目すると、沖縄の W/C55% の供試体の一部で例外が認められるが、ひび割れを有する供試体ではひび割れのない供試体よりもコンクリート内部の塩化物イオン濃度が高くなったことがわかる。ただし、ひび割れ幅の大小と塩化物イオン濃度との関係は明確ではなく、ひび割れ幅の大きい供試体ほどコンクリート内部での塩化物イオン濃度が高くなるような傾向は必ずしも現れていない。W/C55% の供試体の一部ではコンクリート表面よりも内部で塩化物イオン濃度が高くなったものもあるが、これはコンクリート表面付近の中性化により塩化物イオンが内部へ移動・濃縮したためと考えられる。

W/C の違いに着目すると、W/C35% の供試体よりも W/C55% の供試体で塩化物イオンが内部まで浸透していたことがわかる。W/C の小さいコンクリートで塩化物イオンの浸透抵抗性が向上する傾向が現れており、今回の暴露試験の結果に基づくと、ひび割れが存在する場合においても W/C が小さいほどコンクリート内部への塩化物イオンの浸透量が小さくなることが窺える。一方、コンクリート表面の塩化物イオン濃度は W/C35% の供試体で高くなった。

コンクリート内部への塩化物イオンの浸透状況の経年的な変化を検証するため、図-3.8 に、試験開始から約 12, 28 ヶ月後に新潟と沖縄から回収した W/C55% の供試体での塩化物イオン濃度の測定結果を示す。

各暴露期間後に調査した供試体が異なるため供試体間の固体差が含まれているが、これまでの調査結果に基づくと、試験開始から約 28 ヶ月までの結果では新潟よりも沖縄の供試体でコンクリート中への塩化物イオンの浸透量が多いことが分かる。しかし、試験開始から約 65 ヶ月後の結果では新潟と沖縄の供試体のコンクリート中への塩化物イオンの浸透量は概ね同程度となった(図-3.7)。また、新潟では試験開始から約 65 ヶ月後でこれ以前の調査時よりも多くの塩化物イオンがコンクリート内部へ浸透していたが、沖縄では必ずしもそのような傾向はなく、試験開始から約 12, 28, 65 ヶ月のコンクリート内部の塩化物イオン浸透量は概ね同程度であった。この原因のひとつは、図-2.3 に示したように、新潟では冬期に定期的に飛来塩分量が多くなる一方で、沖縄では台風の接近の有無などによって飛来塩分量が年によって大幅に異なるため、暴露環境が異なったことで供試体に供給される塩分量が異なり、経年的なコンクリート中の塩化物イオンの浸透量にも違いが生じたためではないかと推察される。

また、新潟の W/C55% のひび割れ幅 0.2mm 以下の供試体では、コンクリート内部への塩化物イオンの浸透量が特に多く、先に述べたコンクリート表面付近の中性化による塩化物イオンの移動・濃縮で生じるような塩化物イオン濃度の分布形状とは異なる。この原因については、必ずしも明確ではないが、ひび割れ幅の小さい供試体では毛細管現象により塩化物イオンが水とともにコンクリート内部まで侵入したこと、今回の暴露試験に用いた供試体では側面をシールしていなかったため供試体側面のひび割れを通じて塩化物イオンが内部まで浸透したことなどが考えられる。



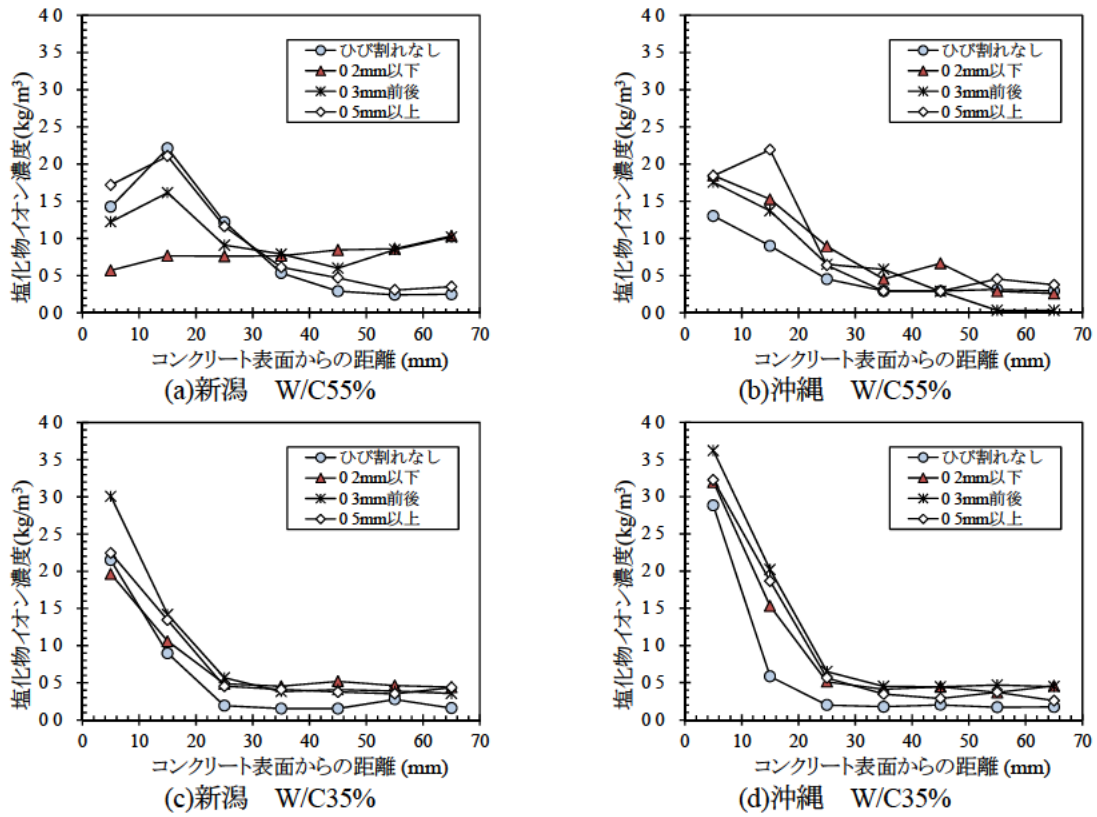


図-3.7 コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布 (試験開始から約 65 ヶ月後)

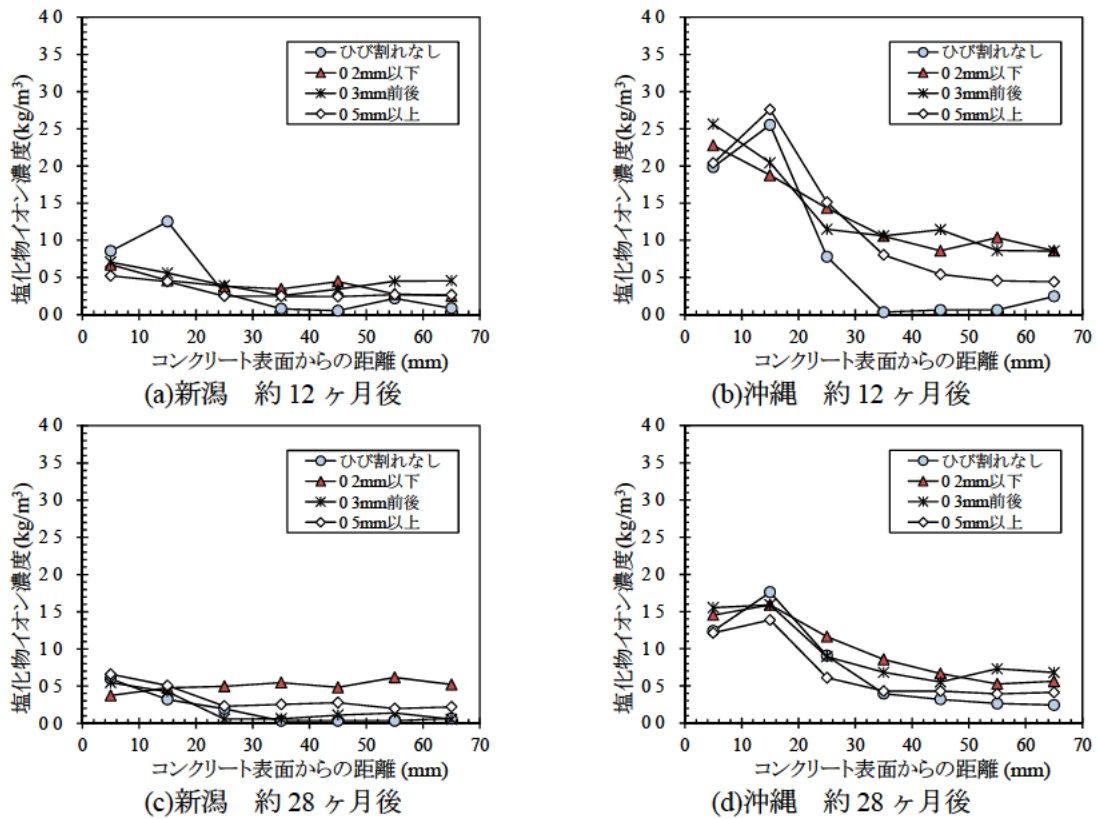


図-3.8 コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布 (試験開始から約 12, 28 ヶ月後, W/C55%)

### 3.9 EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析

図-3.9, 3.10, 3.11 に、試験開始から約 65 ヶ月後に沖縄から回収した供試体から採取したコアを用いて実施した EPMA 法による面分析の結果を示す。ここでは、塩素、炭素、ナトリウム、硫黄の 4 元素の分布画像を示す。また、図-3.12, 3.13 に、塩素と硫黄の分布画像の拡大図を示す。

まず、塩素の分布に着目すると、いずれの供試体においてもコンクリート表面近傍において塩素の濃度の低い領域が存在した。コンクリートの中性化により塩化物イオンが内部へ移動・濃縮したためと考えられる。また、これらの供試体では、供試体深部のひび割れ部周辺において僅かに塩素の濃度が高くなる領域が存在するようにも思われるが、ひび割れに沿った塩化物イオンの浸透を明確に確認するには至らなかった。供試体表面付近に比べると供試体深部のひび割れ部周辺の塩素の濃度は小さく、ひび割れ幅の大小とひび割れ周辺の塩化物イオンの浸透量の関係も明確ではない。図-3.14, 3.15 に、試験開始から約 12, 28 ヶ月後に新潟と沖縄から回収したひび割れを有する供試体の塩素の分布画像を示す。粗骨材の偏りや配置に違いがあるため供試体の個体差があるが、ここでもひび割れ幅の大きい供試体ほどひび割れに沿った塩化物イオンの浸透量が大きくなるような傾向は確認できない。むしろ、ひび割れ幅が最も大きい「0.5mm 以上」の供試体よりもひび割れ幅の小さい「0.2mm 以下」と「0.3mm 前後」の供試体において、試験開始から約 12, 28 ヶ月後の結果でひび割れに沿った塩化物イオンの浸透を明確に確認することができる。また、暴露期間が長くなるほどひび割れ部周辺の塩化物イオンの浸透量が大きくなるような傾向も現れていない。従って、ひび割れが発生しているコンクリート構造物においては、ひび割れ幅の大小にかかわらず比較的容易かつ短期的にひび割れに沿って塩化物イオンが浸透する可能性があるが、その浸透程度は必ずしもひび割れ幅の大小と一致しないと考えられる。

次に、炭素と硫黄の分布に着目すると、いずれの供試体においてもコンクリート表面付近で炭素が高濃度となり、この高濃度領域で硫黄が低濃度となっていた。これらの領域は塩素の濃度が低くなっていた領域とも概ね一致する。硫黄は、塩素と同様に中性化により移動・濃縮することが知られており、ここでの結果はコンクリート表面付近においてコンクリートの中性化が進行していたことを示すものと考えられる。また、供試体内部のひび割れ部近傍において、硫黄が低濃度となった部分を僅かに確認することができる。このため、コンクリート内部のひび割れ近傍においても中性化が進行していた可能性がある。

また、ナトリウムの分布についても分析を行ったが、ここではコンクリート表面及びひび割れ部のどちらにおいても外部からの浸透を確認するには至らなかった。

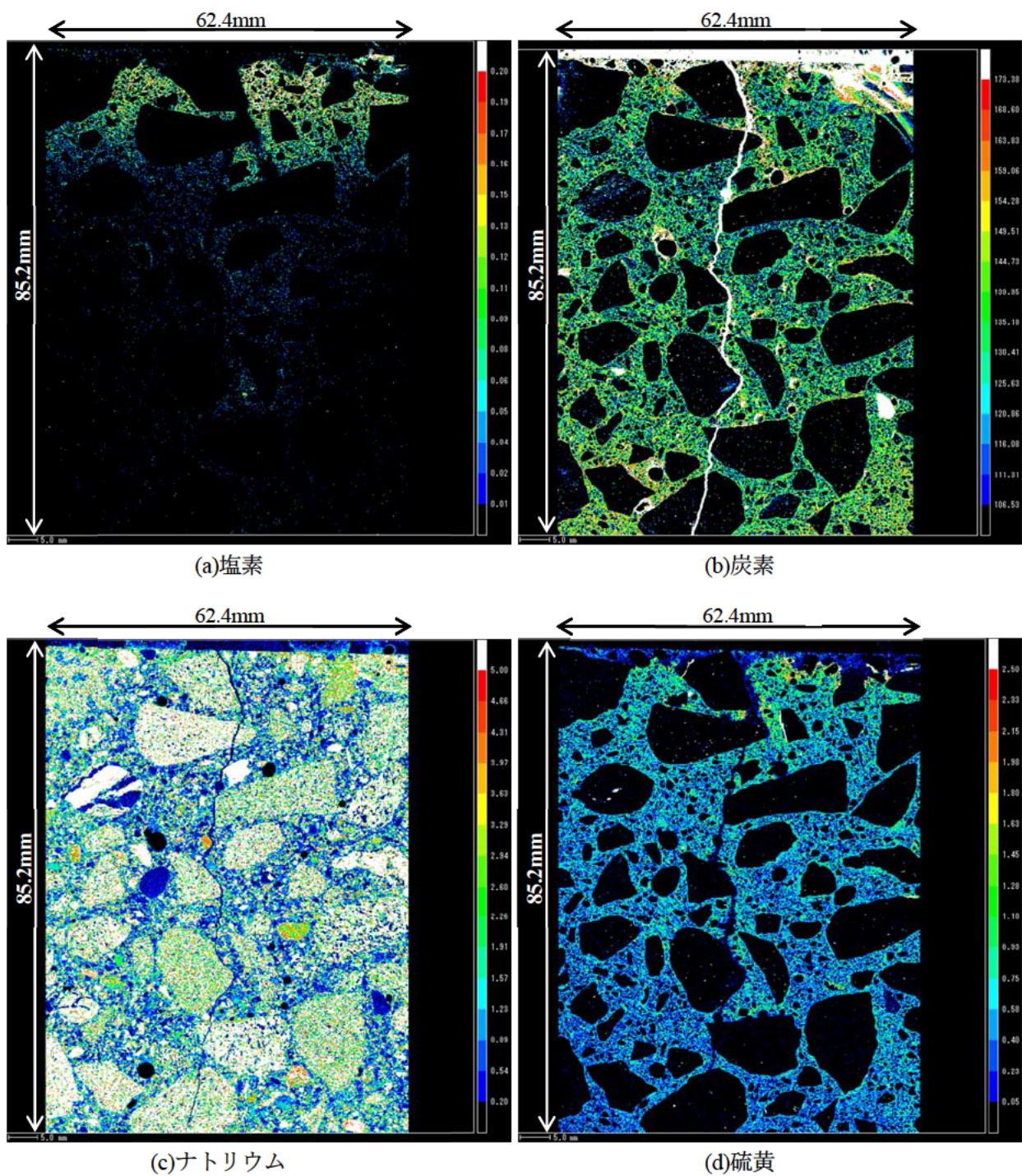


図-3.9 面分析による 塩素, 炭素, ナトリウム, 硫黄の分布

※沖縄, ひび割れ幅 0.2mm 以下, 試験開始から約 65 ヶ月後, かぶり 70mm, W/C55%の供試体

※コンクリート表面とひび割れ内部では, 試料の固定に用いた樹脂が白色となっている.

※上辺がコンクリート表面

※測定範囲は 85.2mm×横 62.4mm の範囲

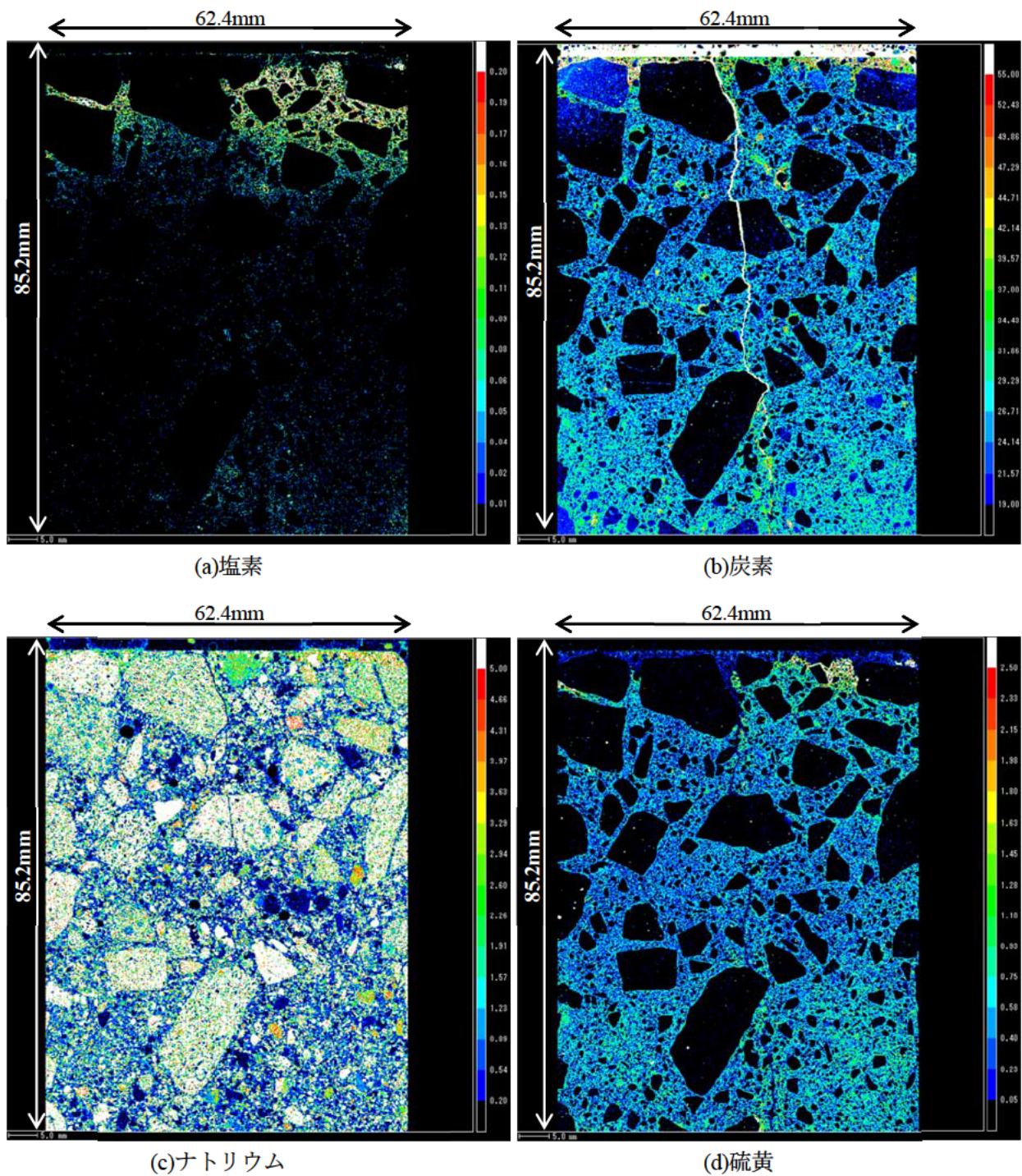


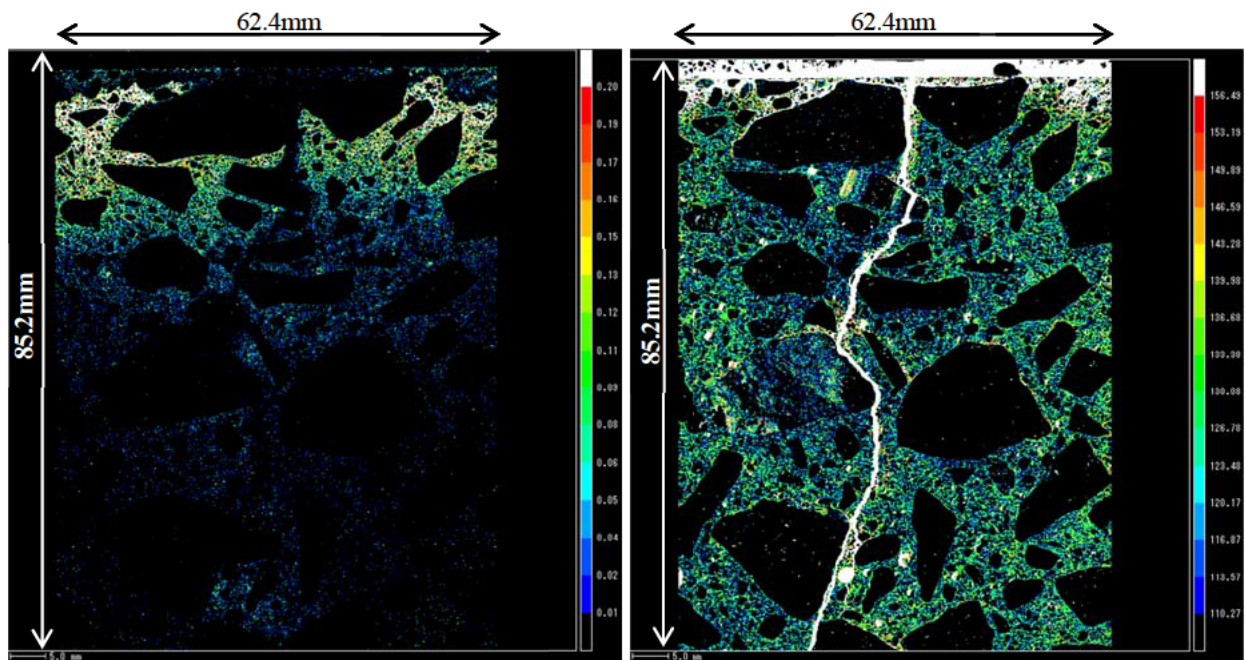
図-3.10 面分析による 塩素，炭素，ナトリウム，硫黄の分布

※沖縄，ひび割れ幅 0.3mm 前後，試験開始から約 65 ヶ月後，かぶり 70mm，W/C55%の供試体

※コンクリート表面とひび割れ内部では，試料の固定に用いた樹脂が白色となっている。

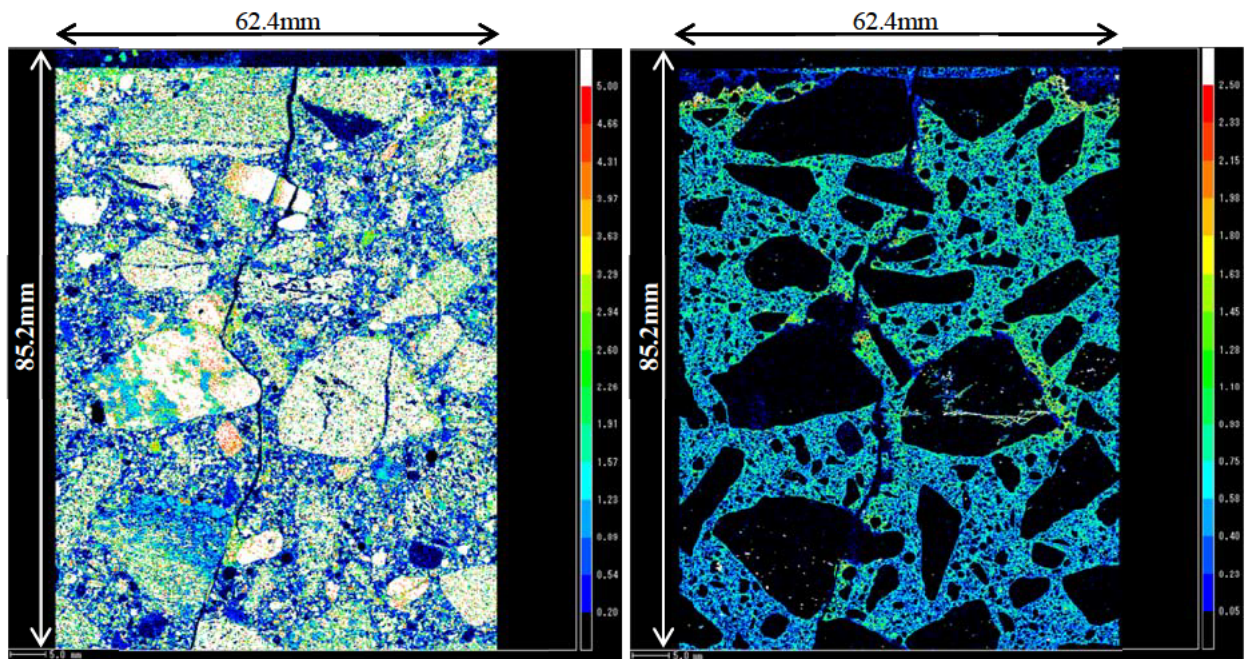
※上辺がコンクリート表面

※測定範囲は 85.2mm×横 62.4mm の範囲



(a)塩素

(b)炭素



(c)ナトリウム

(d)硫黄

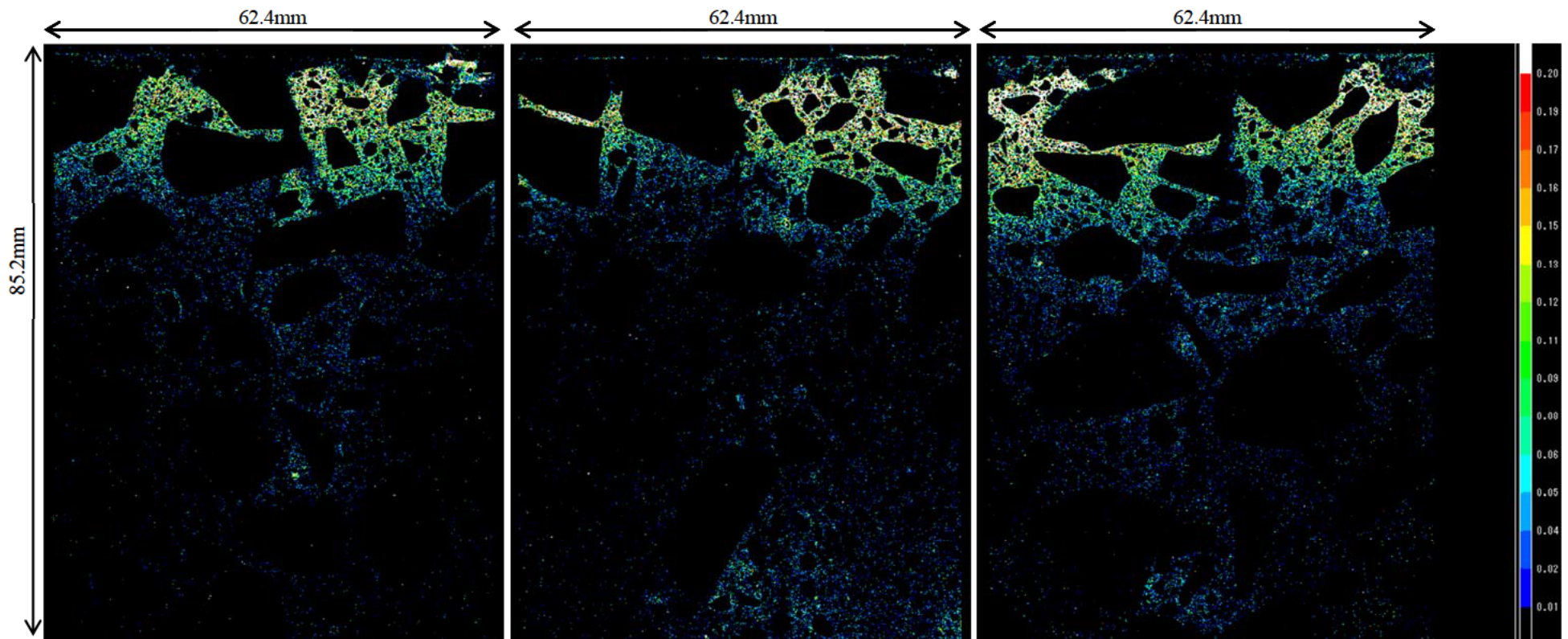
図-3.11 面分析による塩素，炭素，ナトリウム，硫黄の分布

※沖縄，ひび割れ幅 0.5mm 以上，試験開始から約 65 ヶ月後，かぶり 70mm，W/C55%の供試体

※コンクリート表面とひび割れ内部では，試料の固定に用いた樹脂が白色となっている。

※上辺がコンクリート表面

※測定範囲は 85.2mm×横 62.4mm の範囲



(a)ひび割れ幅 0.2mm 以下

(b)ひび割れ幅 0.3mm 前後

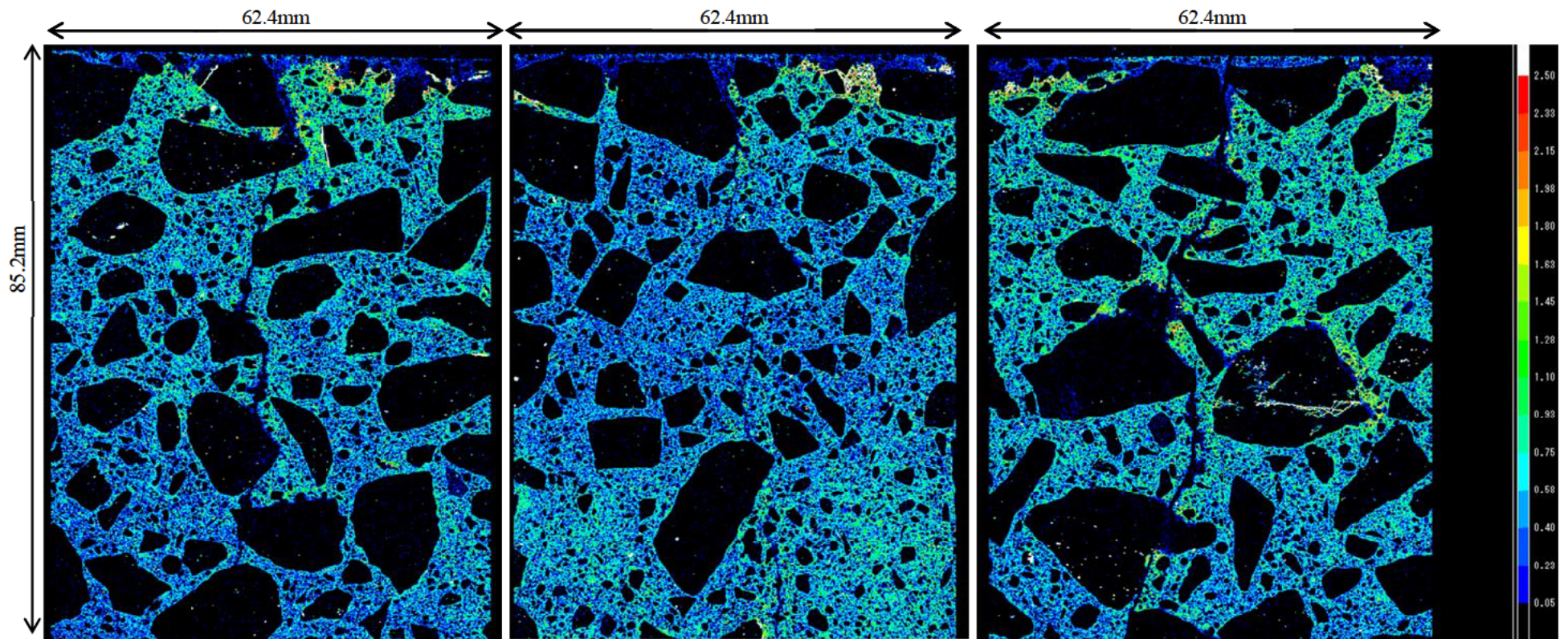
(c)ひび割れ幅 0.5mm 以上

図-3.12 塩素の分布の拡大図

※沖縄，試験開始から約 65 ヶ月後，かぶり 70mm，W/C55%の供試体

※上辺がコンクリート表面

※測定範囲は縦 85.2mm×横 62.4mm の範囲



(a)ひび割れ幅 0.2mm 以下

(b)ひび割れ幅 0.3mm 前後

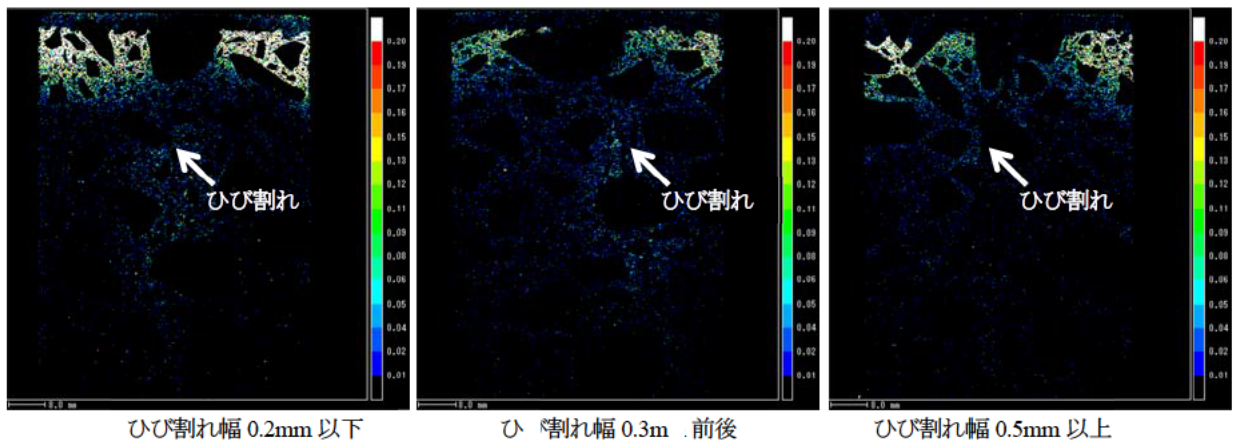
(c)ひび割れ幅 0.5mm 以上

図-3.13 硫黄の分布の拡大図

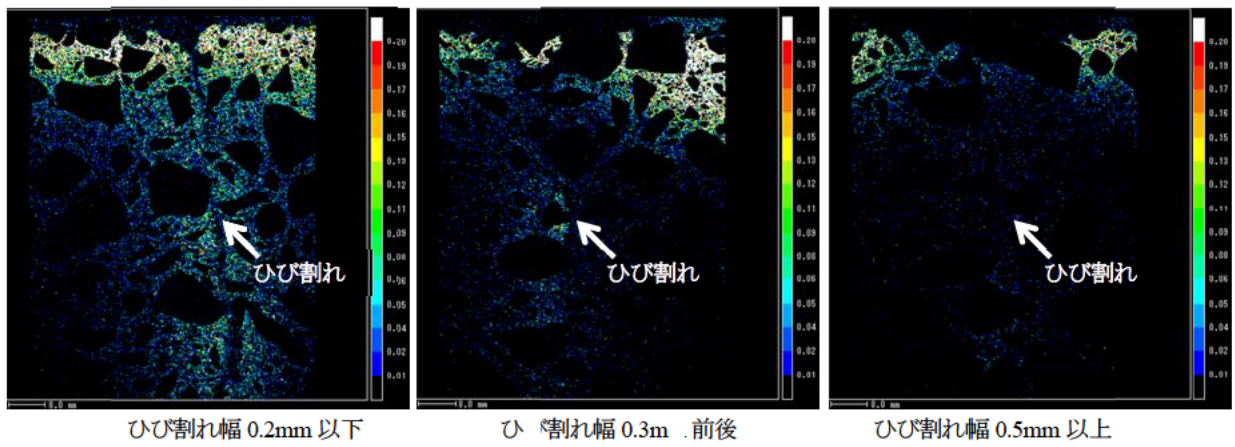
※沖縄, 試験開始から約 65 ヶ月後, かぶり 70mm, W/C55%の供試体

※上辺がコンクリート表面

※測定範囲は縦 85.2mm×横 62.4mm の範囲



(a)新潟 試験開始から約12ヶ月



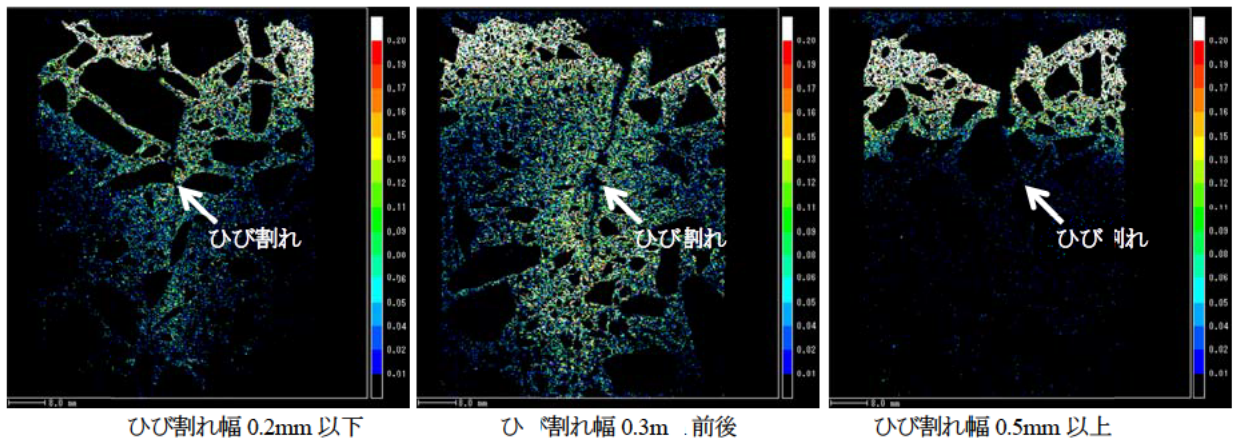
(b)新潟 試験開始から約28ヶ月

図-3.14 塩素の分布の経年変化（新潟）

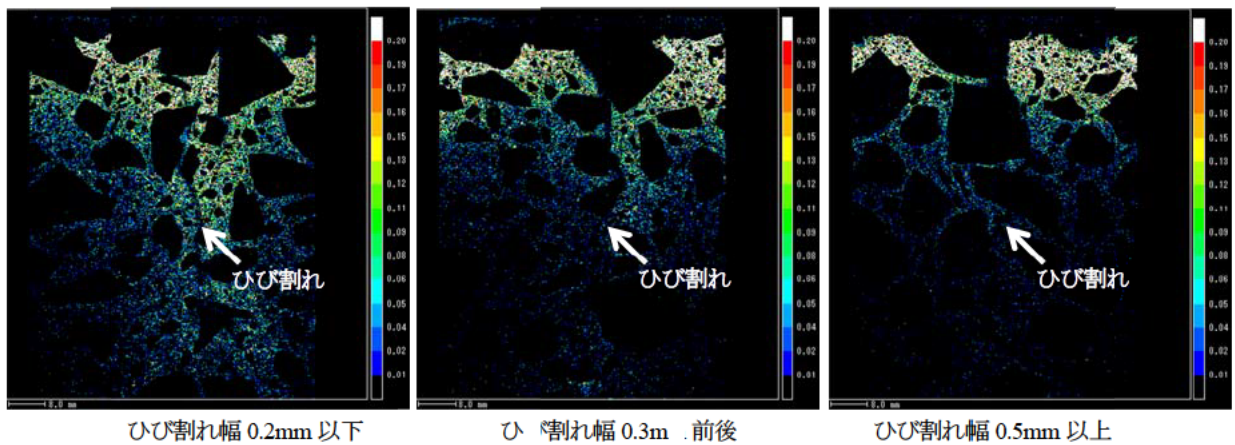
※かぶり 70mm, W/C55%の供試体

※上辺がコンクリート面

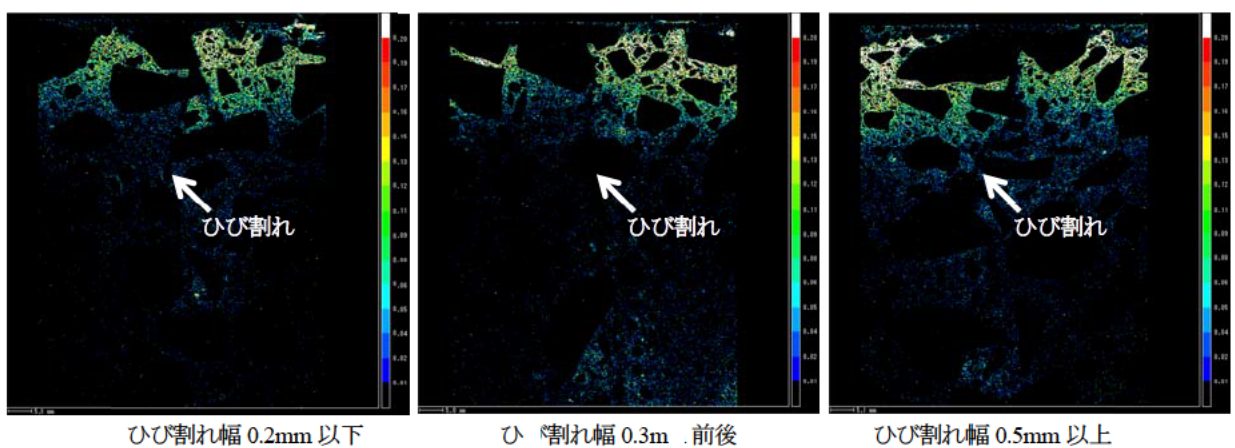




(a) 沖縄 試験開始から約 12 ヶ月



(b) 沖縄 試験開始から約 28 ヶ月



(c) 沖縄 試験開始から約 65 ヶ月

図-3.15 塩素の分布の経年変化 (沖縄)

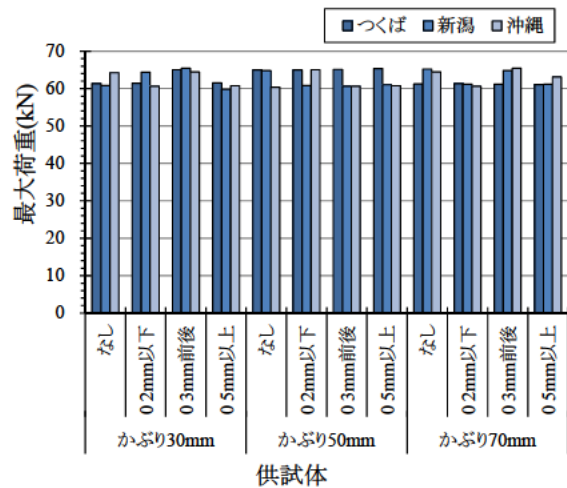
※かぶり 70mm, W/C55%の供試体

※上辺がコンクリート面

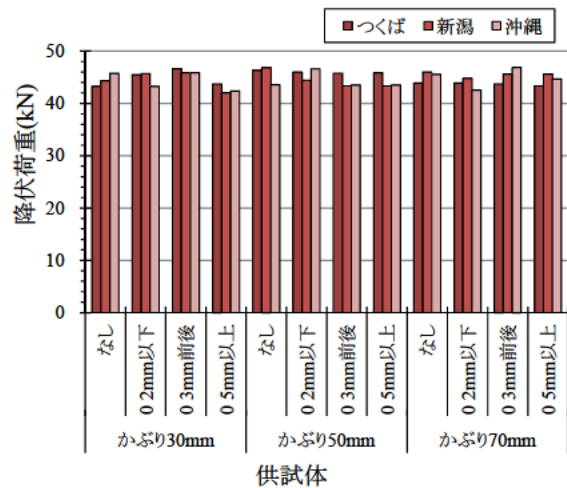
### 3.10 鋼材の力学特性

図-3.16 に、W/C55%の供試体から取り出した鋼材の引張試験の結果を示す。各鋼材の最大荷重、降伏荷重、破断後の伸びの結果を示す。

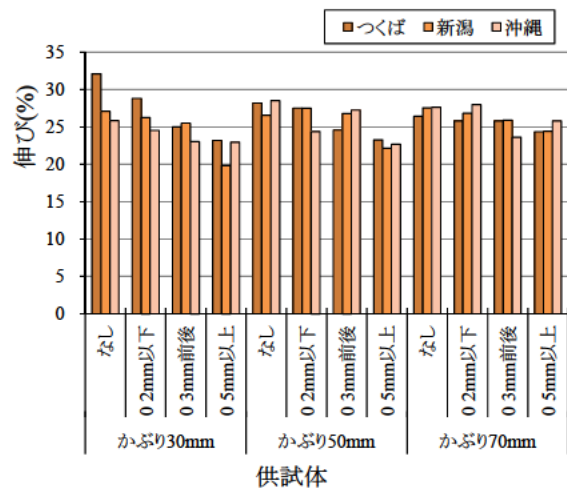
これらの結果を比較すると、最大荷重、降伏荷重、伸びのいずれの力学特性においても、ひび割れ幅やかぶりの違いによる差を明確に確認することはできず、試験開始から約65ヶ月の供試体においても鋼材に力学特性が低下するほどの腐食は生じていなかったと考えられる。



(a)最大荷重



(b)降伏荷重



(c)伸び

図-3.16 鋼材の力学特性  
(W/C55%の供試体の結果)

## 4. ひび割れ部における塩分浸透性と 鋼材腐食に関する考察

### 4.1 ひび割れ部における塩化物イオンの見掛けの拡散係数

ひび割れを有するコンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数について検討するため、試験開始から約 65 ヶ月後に回収した供試体の測定結果を用いて塩化物イオンの見掛けの拡散係数を算出した。見掛けの拡散係数の算出は、図-3.7 に示したコンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果を用いて、フィックの拡散方程式の解に基づいて行った。ただし、W/C55%の供試体から採取したコアではコンクリート表面周辺の塩化物イオンが中性化の影響を受けて内部へ移動・濃縮しているため（図-3.7(a), (b)）、ここでは W/C35%の供試体の測定結果（図-3.7(c), (d)）を用いて算出した見掛けの拡散係数を示す。

また、異なる試験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比較するため、ひび割れを導入した供試体に用いたものと同じコンクリートを使用して製作した円柱供試体（ $\phi 100 \times 200\text{mm}$ ）の浸せき試験と暴露試験で得られた見掛けの拡散係数の算出結果も示す。円柱供試体の浸せき試験は、土木研究所の室温約 20°C に管理された実験室内において塩分濃度 10% の塩化ナトリウム水溶液に円柱供試体を浸せきし、浸せき開始から 12 ヶ月後と 28 ヶ月後に厚さ 10mm で供試体を切断し、コンクリート中の塩化物イオン濃度の深さ方向の分布を電位差滴定法により測定した。W/C の違いによる拡散係数の差も把握するため、浸せき試験の結果 W/C35% と W/C55% の両方の供試体の結果を示す。一方、円柱供試体の暴露試験は、写真-4.1 に示すように、新潟と沖縄のひび割れを導入した供試体と隣接する場所に転倒を防ぐためプラスチック製のケースに入れた状態で円柱供試体を暴露し、ひび割れを導入した供試体と同時に回収して厚さ 10mm で供試体を切断し、コンクリート中の塩化物イオン濃度の深さ方向の分布を電位差滴定法により測定した。試験開始から約 65 ヶ月後の回収時には、写真-3.1 と同様に、円柱供試体の上側の表面も粗くなっていた。なお、いずれの円柱供試体も  $\phi 100\text{mm}$  の円形型枠面を暴露面として、この面が上向きとなるように設置し、側面をエポキシ樹脂塗料で塗装した。



(a)新潟

(b)沖縄

写真-4.1 円柱供試体の暴露状況

図-4.1 に、新潟と沖縄の試験開始から約 65 ヶ月後に回収した W/C35%の暴露供試体、W/C35%と W/C55%の円柱供試体の 12 ヶ月と 28 ヶ月の浸せき試験、暴露供試体と同時に新潟と沖縄で回収した円柱供試体での塩化物イオンの見掛けの拡散係数の算出結果を示す。

ひび割れの有無の影響に着目すると、見掛けの拡散係数はひび割れのない供試体よりもひび割れを有する供試体で大きくなる傾向にあることが分かる。しかし、ひび割れ幅の影響は明確ではなく、新潟では「0.2mm 以下」、沖縄では「0.3mm 前後」の供試体で見掛けの拡散係数が最も大きくなっており、ひび割れ幅の大小と見掛けの拡散係数の大小には必ずしも明確な関係は見受けられない。

ひび割れのない供試体に着目すると、ひび割れを有する供試体と同形状の角柱供試体は暴露面が下向き、円柱供試体は暴露面が上向きとなるように新潟と沖縄で暴露していたが、得られた見掛けの拡散係数は同程度であり、暴露面の向きが見掛けの拡散係数に及ぼす影響は比較的小さいと考えられる。また、新潟と沖縄に暴露した供試体で見掛けの拡散係数を比較すると、両地域に暴露した供試体から算出された見掛けの拡散係数はおおむね同程度となった。

一方、室内促進試験である浸せき試験から得られた見掛けの拡散係数は、ひび割れのない供試体や円柱供試体から得られた値よりも大幅に大きく、浸せき期間を 12 ヶ月から 28 ヶ月へと長くすることで小さくなる傾向にあった。また、W/C55%の供試体で得られた見掛けの拡散係数は W/C35%の供試体で得られたものよりも大幅に大きく、今回の浸せき試験では塩水の塩分濃度を 10%としていたため、比較的早期にコンクリート内部へ塩化物イオンが浸透して拡散係数が大きくなったのではないかと考えられる。浸せき試験の実施方法の妥当性については、引き続き検討していく必要がある。

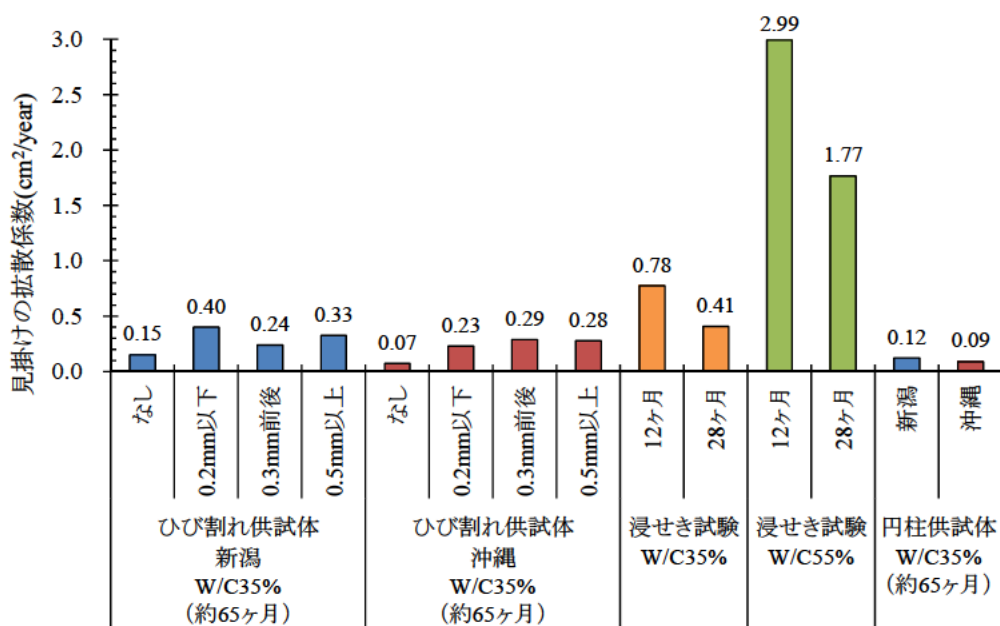


図-4.1 見掛けの拡散係数

図-4.2 に、見掛けの拡散係数の算出時に同時に求めたコンクリート表面の塩化物イオン濃度の算出結果を示す。

新潟と沖縄に暴露した供試体の結果に着目すると、コンクリート表面の塩化物イオン濃度は新潟よりも沖縄で大きくなる傾向にある。ひび割れの有無やひび割れ幅の大小との関係は明確ではなく、暴露環境の影響の方が大きいと考えられる。また、円柱供試体のコンクリート表面の塩化物イオン濃度はひび割れ供試体よりも大きくなっている。この原因は、円柱供試体は暴露面が上向き、ひび割れ供試体は暴露面が下向きとなるように設置されており、円柱供試体の方がコンクリート表面に多量の塩化物イオンが供給される環境にあったためではないかと考えられる。一方、浸せき試験から得られたコンクリート表面の塩化物イオン濃度は、暴露した供試体よりも大幅に大きな値となった。浸せき試験では供試体が塩水中に常時浸せきされた状態にあったこと、今回用いた塩水の塩分濃度が10%と一般的な海水の塩分濃度よりも大幅に大きかったことなどが原因ではないかと考えられる。

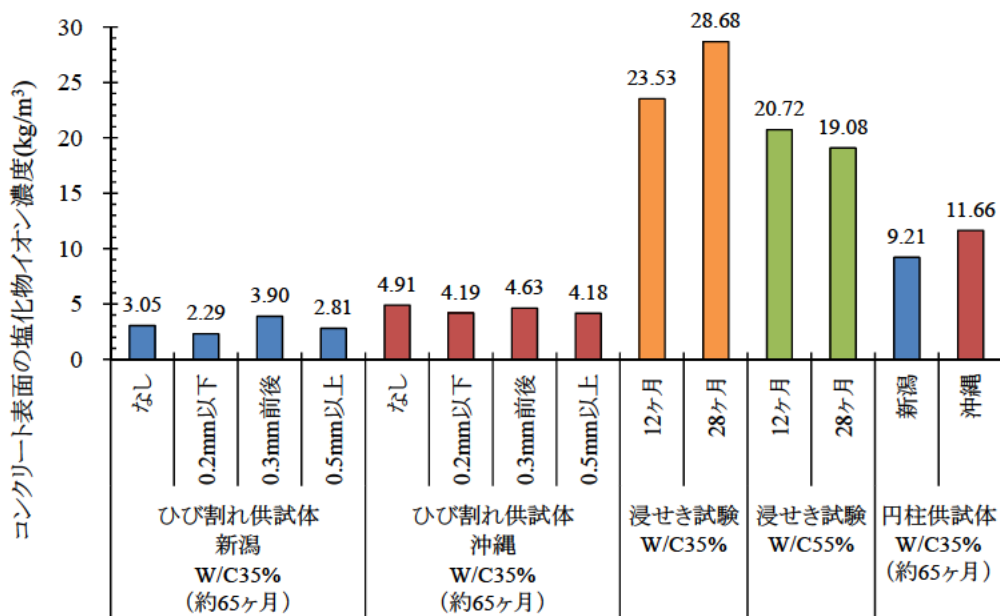


図-4.2 コンクリート表面の塩化物イオン濃度

また、特に新潟の供試体ではスケーリングによるものと思われるコンクリート表面の変状が確認されたが(写真-3.1)、図-4.1の見掛けの拡散係数の算出結果では新潟と沖縄の供試体では同程度の値が得られた。また、図-4.2のコンクリート表面の塩化物イオン濃度の算出結果では新潟よりも沖縄で大きな値となった。これらのことから、今回の暴露試験に用いた供試体で生じたスケーリングによると思われるコンクリート表面の変状及びそのような環境条件の違いが塩化物イオンの浸透速度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-4.1, 4.2 で示した算出結果は、式(1)に示すフィックの拡散方程式の解において、初期に含有される塩化物イオン濃度  $C_i$  を  $0.15\text{kg/m}^3$  として求めたものである。

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

ここで  $x$  : 暴露面から全塩化物イオンを測定した箇所までの距離(cm)  
 $t$  : 暴露期間(year)  
 $C(x, t)$  : 距離  $x$ (cm), 暴露期間  $t$ (year)において測定された塩化物イオン濃度( $\text{kg/m}^3$ )  
 $C_0$  : コンクリート表面の塩化物イオン濃度( $\text{kg/m}^3$ )  
 $C_i$  : 初期に含有される塩化物イオン濃度( $\text{kg/m}^3$ )  
 $D_{ap}$  : 見掛けの拡散係数( $\text{cm}^2/\text{year}$ )  
 $\operatorname{erf}$  : 誤差関数

$$\text{ただし, } \operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$$

これまでに示したコンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果によれば (図-3.7, 3.8), 塩化物イオンはひび割れの存在により比較的容易に短期間でコンクリート内部まで浸透していたと考えられた。見掛けの拡散係数を算出した新潟と沖縄の W/C35%の供試体では、コンクリート表面から 30mm よりも深い位置では塩化物イオン濃度は概ね一定値であり、その値はひび割れを有する供試体で大きくなっていた (図-3.7(c), (d))。このため、ひび割れが生じた場合の見掛けの拡散係数を算出する際には、従来のように式(1)において  $C(x, y)$ と  $C_0$ から  $C_i$  (今回の計算過程では  $0.15\text{kg/m}^3$  と設定) のみを差し引くのではなく、式(2)のように  $C_i$ に加えてひび割れの存在によってコンクリート深部に浸透した塩化物イオン濃度  $C_{cr}$ を差し引いた方がより正確な見掛けの拡散係数を算出することが可能ではないかと考えられる。

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

ここで,  $C_{cr}$  : コンクリート深部のひび割れ周辺における塩化物イオン濃度( $\text{kg/m}^3$ )

図-4.3, 4.4 に、 $C_i=0.15\text{kg/m}^3$ として式(1)を用いて算出した見掛けの拡散係数 (図-4.1 に示した値) とコンクリート表面の塩化物イオン濃度 (図-4.2 に示した値), 式(2)を用いて算出した見掛けの拡散係数とコンクリート表面の塩化物イオン濃度を比較して示す。ただし、式(2)の  $C_{cr}$ については、図-3.7(c), (d)の実測値を参照し、供試体内部のひび割れ周辺の塩化物イオン濃度が概ね一定値であるコンクリート表面から 30~70mm の塩化物イオン濃度の平均値を供試体ごとに計算して用いた。また、図-4.5 に、塩化物イオン濃度の実測値と式(1)と式(2)を用いて得られた計算値を示す。これらの結果は、いずれも試験開始から約 65 ヶ月後に回収した W/C35%の供試体の結果である。

既に述べたように、式(1)から算出した見掛けの拡散係数はひび割れを有する供試体で大きくなったが、ひび割れ幅の大小との間に明確な関係は見られなかった。一方、式(2)から算出した見掛けの拡散係数は、ひび割れを有する供試体とひび割れない供試体の見掛けの拡散係数の差が小さくなったが、新潟と沖縄のいずれにおいてもひび割れ幅の大きい供試体ほど大きくなる傾向にあった。これまでに示した塩化物イオン濃度の測定結果や EPMA 法による塩素の分布画像などではひび割れ幅の大小に

よる塩化物イオンの浸透量の違いを明確に確認するには至らなかったが、ここで行ったように供試体内部のひび割れ周辺の塩化物イオン濃度を差し引いて得られた塩化物イオン濃度の見掛けの拡散係数はひび割れ幅に応じて大きくなる結果となった。ただし、これらの供試体の見掛けの拡散係数の差は、浸せき試験から得られた見掛けの拡散係数に比べて大幅に小さい値である。また、コンクリート表面の塩化物イオン濃度は、式(1)と式(2)のいずれを用いても概ね同程度の値が得られた。さらに、図-4.5によると、式(1)から得られた塩化物イオン濃度の計算値よりも式(2)から得られた塩化物イオン濃度の計算値の方が、実測値により適合する結果となった。これらのことを総合すると、式(2)のようにコンクリート深部のひび割れ部周辺の塩化物イオン濃度  $C_r$  を差し引くことで、ひび割れが生じた場合の塩化物イオンの見掛けの拡散係数を適切に算定することができる可能性があると考えられる。ただし、実際のコンクリート構造物を対象とする場合には、現時点では  $C_r$  の設定方法が明確ではないため、この点については引き続き検討を行っていく必要がある。

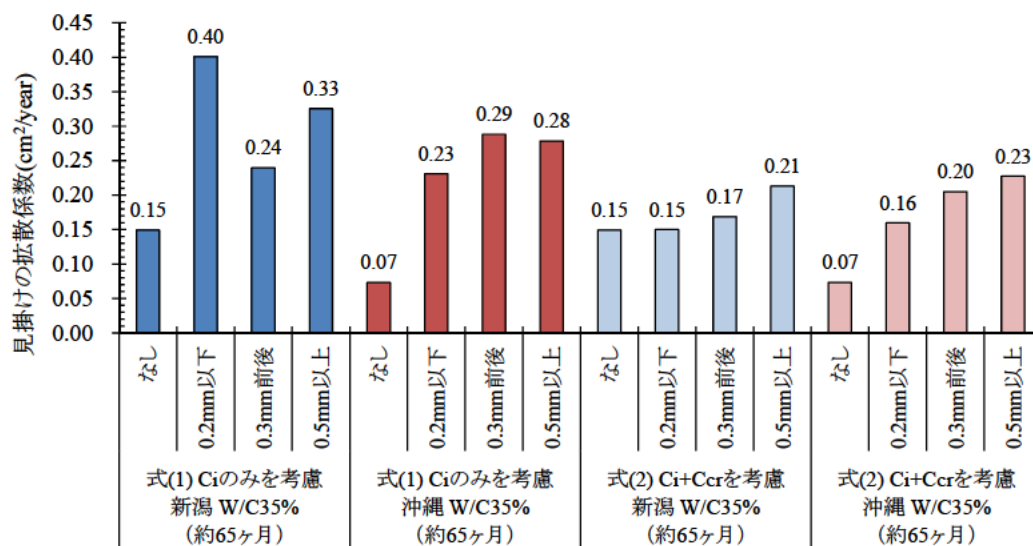


図-4.3 異なる方法で算出した見掛けの拡散係数の比較

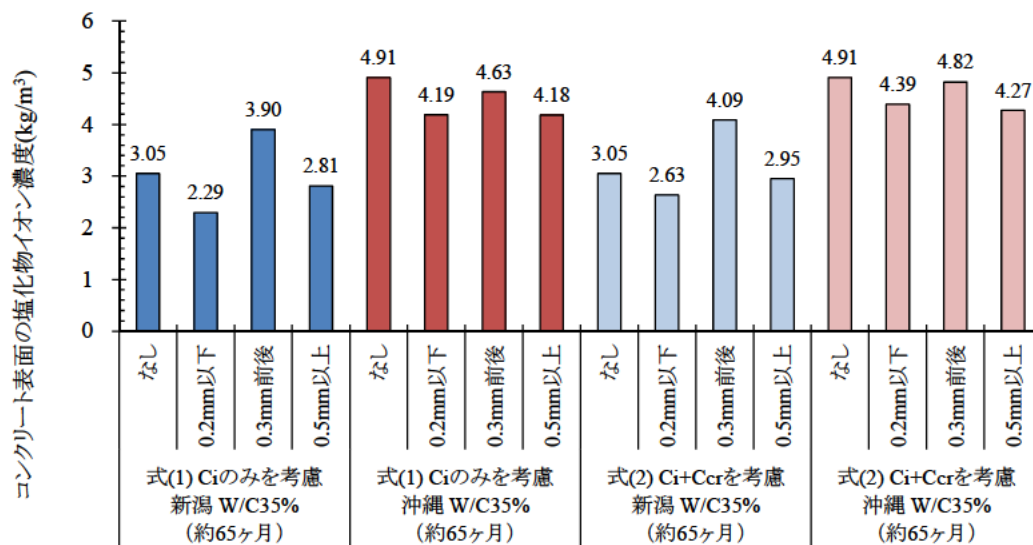
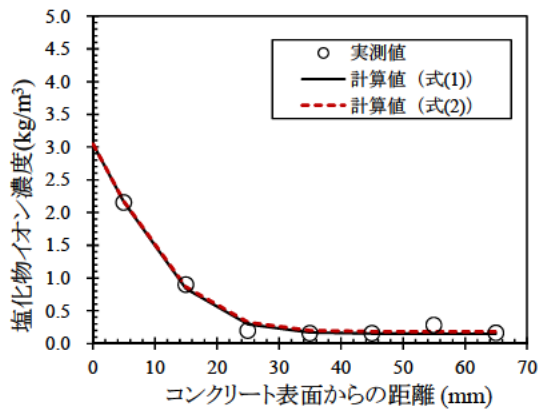
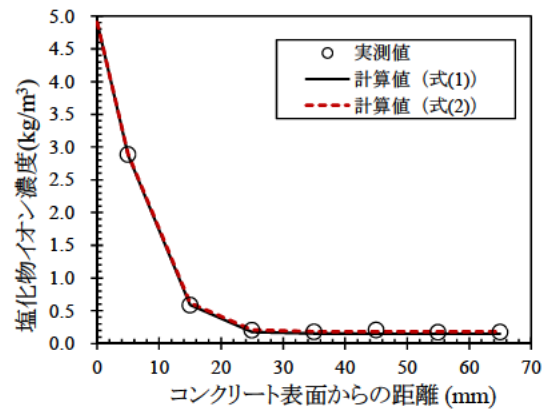


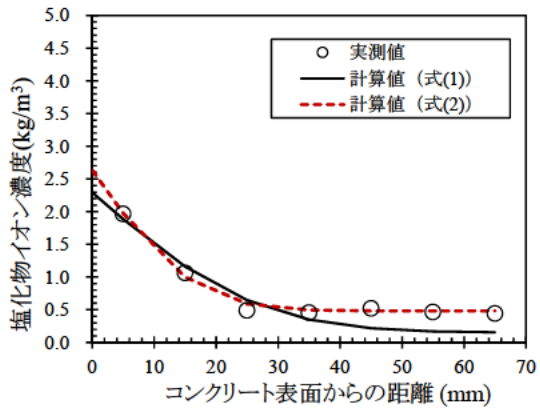
図-4.4 異なる方法で算出したコンクリート表面の塩化物イオン濃度の比較



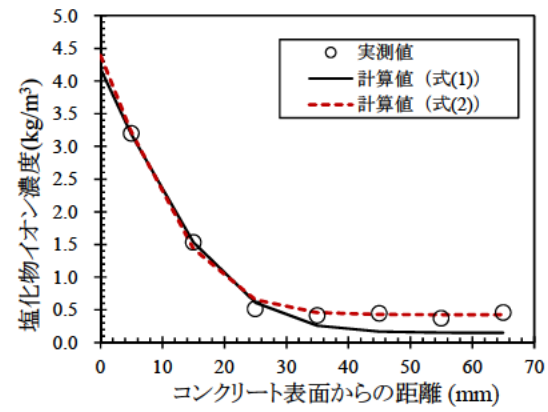
(a)新潟 ひび割れなし



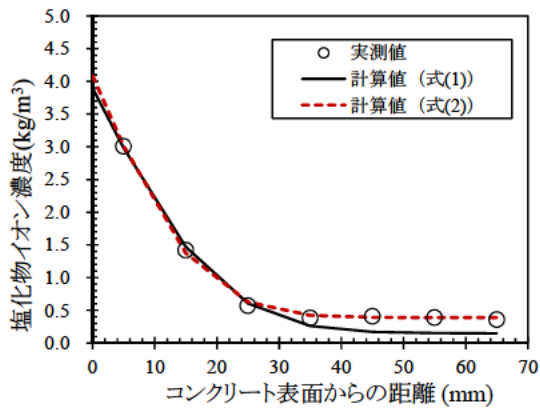
(b)沖縄 ひび割れなし



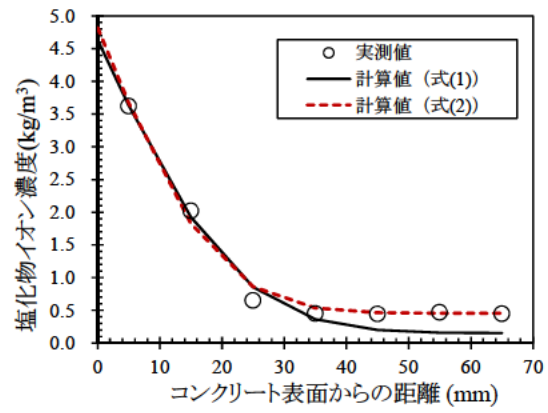
(c)新潟 ひび割れ幅 0.2mm 以下



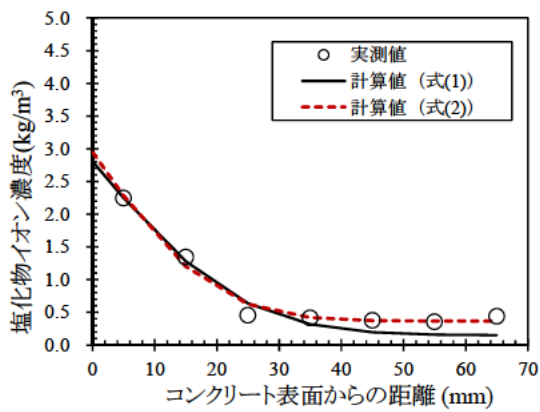
(d)沖縄 ひび割れ幅 0.2mm 以下



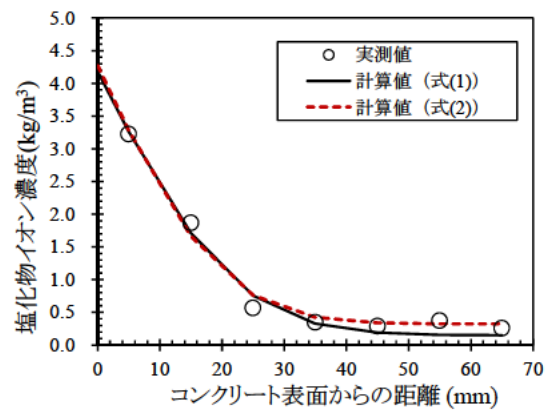
(e)新潟 ひび割れ幅 0.3mm 前後



(f)沖縄 ひび割れ幅 0.3mm 前後



(g)新潟 ひび割れ幅 0.5mm 以上



(h)沖縄 ひび割れ幅 0.5mm 以上

図-4.5 塩化物イオン濃度の実測値と計算値



## 4.2 ひび割れ部の塩分浸透性, 中性化と鋼材腐食

表-4.1 に、これまでに述べた試験開始から約 65 ヶ月後までの調査結果を塩化物イオンの浸透, 中性化, 鋼材の腐食速度の 3 つの観点から整理する。

塩化物イオンの浸透については, 暴露供試体から採取したコアの塩化物イオン濃度の測定結果から, ひび割れを有する供試体で塩化物イオン濃度が大きくなることを確認したが, ひび割れ幅の大小とコンクリート内部への塩化物イオンの浸透量に明確な関係は見られなかった。また, EPMA 法による分析結果では, ひび割れ幅の小さい「0.2mm 以下」と「0.3mm 前後」の供試体でひび割れに沿った塩化物イオンの浸透を確認できることがあった。このため, 塩化物イオンの浸透に関しては, ひび割れの有無は「影響大」, ひび割れ幅は「不明確」とした。また, 新潟と沖縄ではコンクリート中への塩化物イオンの浸透量が調査時期によって異なっていた。試験開始から約 28 ヶ月後までは沖縄の供試体の塩化物イオン浸透量が多かったが, 約 65 ヶ月後では沖縄と飛来塩分が冬期に定期的に供給される新潟の塩化物イオン浸透量は同程度であった。このため, 暴露環境と暴露期間は「影響大」とした。

中性化については, 試験開始から約 65 ヶ月後の結果において, 供試体表面周辺に加えて内部のひび割れ近傍でも僅かに進行が確認されたため, ひび割れの有無と暴露期間を「影響大」とし, これ以外を「影響小」とした。

鋼材の腐食については, ひび割れを有する供試体の多くで鋼材腐食が生じており, 腐食位置がひび割れ位置と一致した。また, かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体で腐食面積が大きくなり, 約 65 ヶ月後の調査では孔食による断面欠損を伴う腐食も生じていたものもあった。さらに, 新潟と沖縄の供試体の腐食面積はつくばよりも大きくなる傾向にあり, 断面欠損を伴う腐食は新潟と沖縄の供試体のみで生じていた。このため, 鋼材の腐食速度に関しては, いずれも「影響大」とした。

なお, かぶりについては, 塩化物イオンや中性化による鋼材の腐食リスクには影響を及ぼすが, かぶり自体の大小は塩化物イオン濃度の浸透や中性化進展の速度や程度とは無関係と考えられる。このため, かぶりの影響は, 鋼材の腐食速度のみに記載した。

なお, 表-4.1 は試験開始から約 65 ヶ月後までの結果をもとに整理したものであるため, 今後も暴露試験ならびに解体調査を継続し, 得られた成果を反映していくことが重要である。

表-4.1 試験結果のまとめ (暴露期間 5 年まで)

項目	各項目に及ぼす影響の程度				
	ひび割れの有無	ひび割れ幅	暴露環境	暴露期間	かぶり
ひび割れ部の塩化物イオンの浸透	影響大	不明確	影響大	影響大	—※
ひび割れ部の中性化	影響大	影響小	影響小	影響大	—※
ひび割れ部の鋼材の腐食速度	影響大	影響大	影響大	影響大	影響大

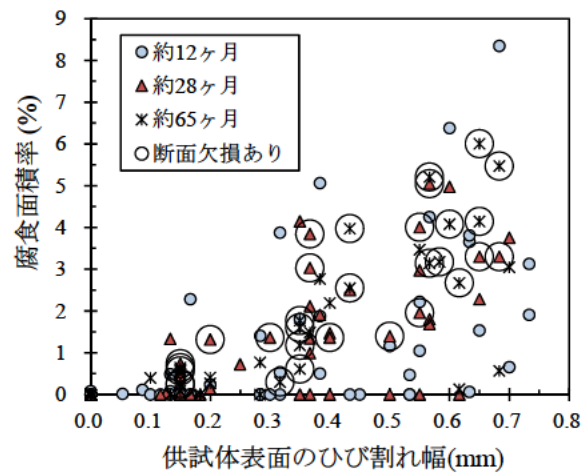
※ : かぶりの大小は塩化物イオンや中性化による鋼材の腐食リスクに影響を及ぼすが, 塩化物イオンの浸透や中性化進展の速度や程度とは無関係である。

### 4.3 コンクリート表面のひび割れ幅の許容値

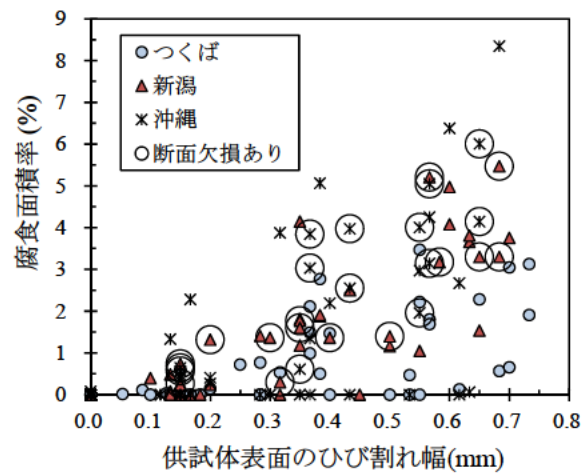
図-4.6 に、供試体表面のひび割れ幅と鋼材の腐食面積率の関係を示す。ここでは、これまでに W/C55%と W/C35%の供試体で得られた結果を暴露期間、暴露環境、かぶりの違いごとに表示し、断面欠損の生じていた鋼材に○印を追記した(表-3.1, 3.2で「孔食による断面欠損を伴う腐食(写真-3.4(a))」、「比較的軽微な断面欠損を伴う腐食(写真-3.4(b))」に分類された鋼材)。なお、供試体表面のひび割れ幅は、曲げひび割れ導入後にコンクリート表面の3ヶ所でクラックゲージを用いて測定したひび割れ幅の平均値を用いた。

既に図-3.2, 3 で示したように、鋼材の腐食面積率は、暴露期間を長くしても大幅な増加は見られなかったが、つくばに暴露した供試体よりも新潟と沖縄に暴露した供試体で大きく、いずれの暴露環境においてもかぶりの小さい供試体とひび割れ幅の大きい供試体で大きくなる傾向にあった。一方、図-4.6によると、鋼材の断面欠損は表面ひび割れ幅が0.15mm以上の供試体で生じ、ひび割れ幅が大きくなるほど断面欠損の生じた供試体の数が多くなった。また、かぶりの大きい供試体では腐食面積率が小さくなる傾向にあるが、新潟と沖縄では腐食面積率の比較的小さい供試体においても断面欠損が生じていた鋼材が存在する。すなわち、かぶりの大きい供試体では腐食面積率が小さく面的な腐食の進展度合いが小さいとみなされるものが多くあったが、塩害環境下ではこのような腐食面積率の小さい鋼材においても断面欠損が生じたものがあり、ひび割れ幅によってはかぶりを大きくすることだけでは断面欠損を伴う腐食を抑制できない可能性がある。

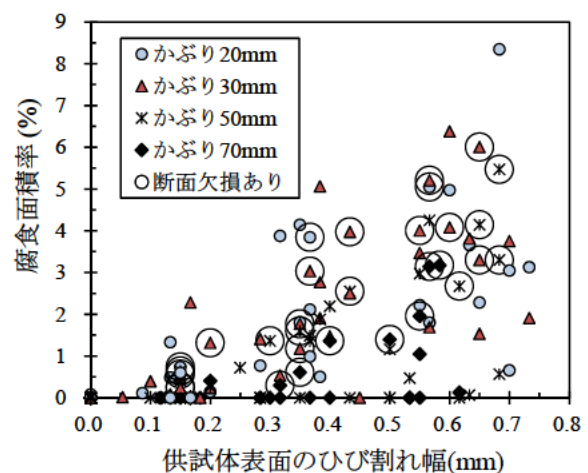
また、表面ひび割れ幅が0.35mm以上の供試体でも、腐食面積率が比較的小さく断面欠損の生じていないものがあるが、これらの大部分は、暴露期間が約12ヶ月と比較的短い供試体、つくばに暴露した供試体、かぶり70mmの供試体のいずれかであった。



(a)暴露期間



(b)暴露環境



(c)かぶり

図-4.6 ひび割れ幅と腐食面積率  
(暴露期間, 暴露環境, かぶり)

供試体表面のひび割れ幅と腐食面積率、断面欠損の無の関係を検討するにあたっては、ひび割れ部分の鋼材の付着喪失区間に留意することが重要である。図-4.7に、Goto<sup>8)</sup>によって示されるひび割れの生じたコンクリート中の鋼材の付着喪失区間の模式図を示す。この模式図は、コンクリート中に異形鉄筋を埋設して引張試験を実施し、コンクリートと異形鉄筋の付着が失われた部分をインクで着色することによって得られた実験結果をもとに作成されたものである。Gotoは、この実験結果に基づき、異形鉄筋を埋設したコンクリートの表面にひび割れが生じた場合、付着ひび割れの発生によりひび割れ近傍のコンクリートと鋼材の付着が失われること、この付着喪失区間はコンクリート内で鋼材に沿って進展すること、载荷後に鋼材の応力を取り除いても骨材のかみ合わせによりひび割れが完全に閉じることはないことなどを指摘している。この知見に基づくと、今回の暴露試験に用いた供試体では、曲げひび割れ導入時にひび割れ近傍においてコンクリートと鋼材の付着が失われた区が生じたと考えられる。また、曲げひび割れ導入時に平面保持の法則が成立すると仮定すると、図-4.8に示すように、かぶりが小さいほど、また、ひび割れ幅が大きいほど、曲げひび割れ導入時に鋼材に大きな引張ひずみが生じ、付着喪失区間も大きくなったと推定される。今回の暴露試験では、試験開始から約65ヶ月後までの調査では腐食面積率の経時的な増加は見られず、かぶりが小さいほど、また、ひび割れ幅が大きいほど腐食面積率が大きくなった。この原因は、鋼材の腐食範囲が付着喪失区間に留まっていたためと考えられる。また、新潟と沖縄の供試体では腐食面積率の小さい鋼材でも断面欠損を伴う腐食が生じており、これらの鋼材では腐食の顕著な進展は付着喪失区間に限定されたものの、鋼材の上部に向かって腐食が進展して断面欠損が生じたと考えられる。

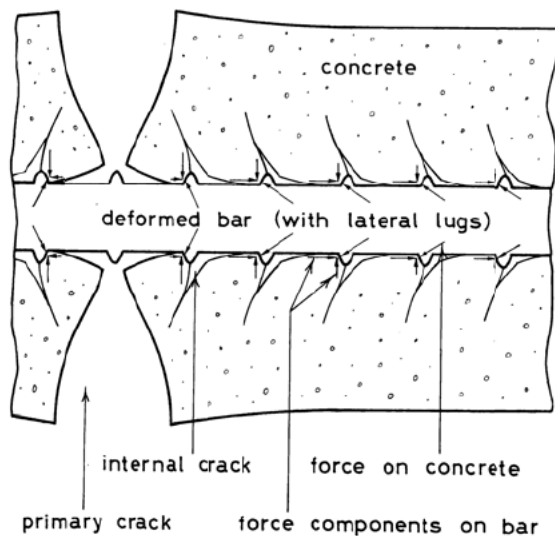


図-4.7 ひび割れ近傍の鋼材の付着喪失区間<sup>8)</sup>

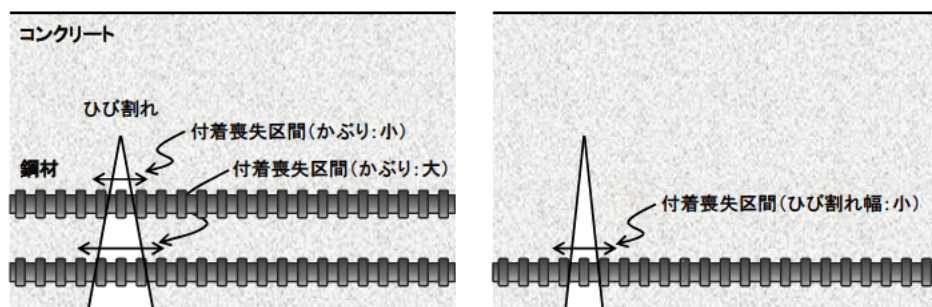


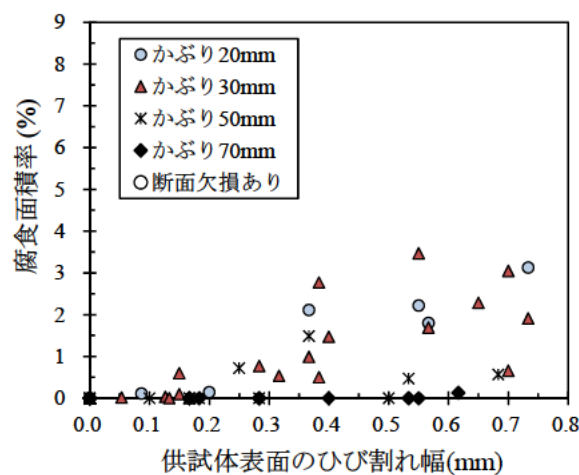
図-4.8 異なる条件下でのひび割れ近傍の付着喪失区間のイメージ

図-4.9に、図-4.6のグラフをかぶりの大小のみに着目して、つくば、新潟、沖縄の3暴露環境ごとに示す。

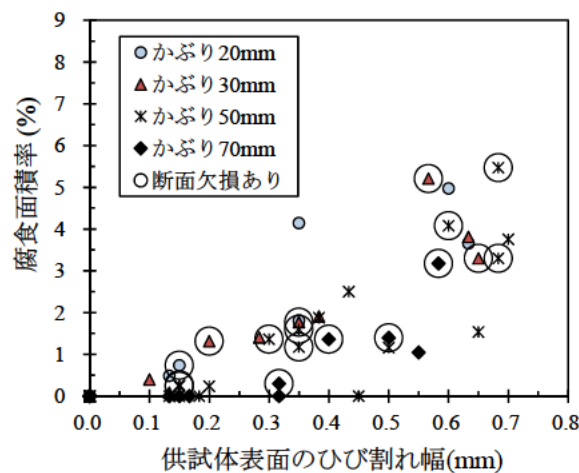
つくばでは、表面ひび割れ幅0.35mm以上の供試体で腐食面積率が大きくなったことが分かる。また、かぶり70mmの供試体では、表面ひび割れ幅が0.6mm程度となってもほとんど腐食は生じていない。つくばの供試体の鋼材には断面欠損が生じていなかったことから、耐久性上は、かぶり50mm以下の場合には表面ひび割れ幅を0.35mm程度、かぶり70mmの場合は表面ひび割れ幅を0.6mm程度に制御する必要があると考えられる。ただし、各種設計規準においてひび割れ幅の許容値を設定する際には、本報告書で示した耐久性面からの検討以外にも、美観や水密性なども考慮した検討を行うことが不可欠である。

一方、新潟と沖縄では、表面ひび割れ幅が0.15mm程度であっても、かぶり50mm以下の供試体で断面欠損を伴う腐食が生じていた。また、かぶり70mmの供試体では表面ひび割れ幅0.2mm程度で僅かに鋼材表面に腐食が生じ、表面ひび割れ幅0.3mm程度で断面欠損を伴う腐食が生じていた。このため、厳しい塩害環境下においては、かぶり50mm以下の場合には表面ひび割れ幅を0.15mm程度、かぶり70mmの場合は表面ひび割れ幅を0.2mm程度に制御することが妥当と考えられる。

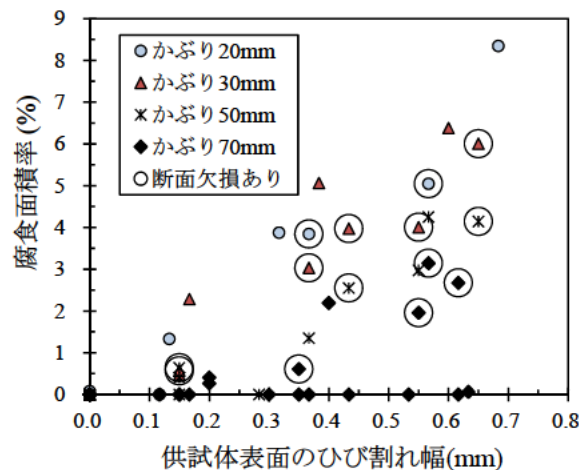
なお、上記は試験開始から約65ヶ月後までの結果を用いて検討したものであるため、今後も暴露試験を継続して検討を加えていくことが必要である。



(a)つくば



(b)新潟



(c)沖縄

図-4.9 ひび割れ幅と腐食面積率

## 5. 結論

本報告書は、つくば、新潟、沖縄の3ヶ所で、ひび割れ幅とかぶりを主な実験パラメータとした鉄筋コンクリート供試体の暴露試験の試験開始から約5年（約65ヶ月）後の解体調査の結果をまとめたものである。本報告書の範囲内で得られた知見を以下にまとめる。

### 【塩化物イオンの浸透について】

塩化物イオンは、ひび割れの存在によりコンクリート内部へ浸透した。塩化物イオンの浸透量とひび割れ幅の大小とに明確な関係は見られず、EPMA法による分析結果ではひび割れ幅の比較的小さい供試体（「0.2mm以下」、「0.3mm前後」）の方がひび割れ幅の大きい供試体（「0.5mm以上」）よりも浸透の程度が大きくなることもあった。また、試験開始から約65ヶ月後の調査においても、ひび割れ部における塩化物イオン濃度の大幅な増加は見られなかった。このため、ひび割れ部への塩化物イオンの浸透は、ひび割れ幅の大小にかかわらず、比較的短期間のうちに生じる可能性があると考えられた。

ひび割れ部への塩化物イオンの浸透が比較的短期間のうちに生じる可能性があることから、見掛けの拡散係数を算出する際に初期に含有される塩化物イオン濃度に加えて供試体内部のひび割れ周辺の塩化物イオン濃度を差し引いたところ、ひび割れを有する供試体とひび割れない供試体で算出された見掛けの拡散係数の差が小さくなったが、ひび割れ幅の大きい供試体ほど見掛けの拡散係数が大きくなる結果となった。また、いずれの算出方法を用いても、新潟と沖縄に暴露した供試体で算出された見掛けの拡散係数は概ね同程度であった。

### 【中性化について】

試験開始から約65ヶ月後の調査では、中性化はコンクリート表面付近に加えて供試体内部のひび割れ部近傍でも僅かに生じていた。しかし、塩化物イオンの移動・濃縮もコンクリート表面付近でのみ生じており、ひび割れ部近傍では生じていなかった。

### 【鋼材腐食について】

腐食の発生位置はひび割れ位置と一致し、ひび割れを導入していない供試体では腐食は発生していなかった。また、鋼材の腐食面積は、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体で大きくなった。

試験開始から約65ヶ月後の調査においても腐食面積の大幅な増加はみられなかったが、この原因は腐食の範囲がコンクリートと鋼材の付着喪失区間に限定されたためと考えられた。また、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体には軽微な断面欠損を伴う腐食が生じていたものもあり、腐食は鋼材の深さ方向に進行していたと考えられた。

### 【暴露地点の影響について】

試験開始から約28ヶ月後までの調査では、沖縄、新潟、つくばの順に、鋼材の腐食面積率と塩化物イオンの浸透量は大きくなった。ところが、約65ヶ月後の調査では、新潟と沖縄の供試体の塩化物イオン浸透量は同程度であり、長期的な塩化物イオンの浸透量は暴露試験場の気象・環境条件等の影響を受けると考えられた。

塩化物イオンの供給のないつくばにおいても、かぶりが小さくひび割れ幅の大きい供試体では腐食が生じており、塩害環境下にはない場合でもひび割れにより腐食が生じることを確認した。ただし、つくばで生じた鋼材腐食は断面欠損を伴うものではなく、塩害環境下である新潟と沖縄に暴露した供

試体とは腐食の状態が異なるものであった。

**【W/C, 初期塩化物イオンの影響について】**

W/C, 初期塩化物イオンの違いが鋼材の腐食面積に与えた影響は必ずしも大きくなかった。ただし、この結果は初期塩化物イオン濃度  $0.3\text{kg/m}^3$  の限られた範囲内でのものである。

なお、今後も継続的に暴露供試体の回収と解体調査を実施し、得られた知見については適宜報告していく予定である。

## 謝辞

本暴露試験を実施するにあたっては、新潟および沖縄の暴露試験場の提供等において、国土交通省北陸地方整備局、同高田河川国道事務所、同直江津国道維持出張所、内閣府沖縄総合事務局北部国道事務所の方々のご協力を賜りました。ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所：コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鋼材腐食に関する暴露試験，土木研究所資料第 4130 号，2009
- 2) 中村英佑，渡辺博志，古賀裕久，青山尚：コンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食に関する暴露試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.735-740，2008
- 3) 中村英佑，渡辺博志，古賀裕久，木村嘉富：暴露試験によるコンクリートひび割れ部の塩分浸透性と鉄筋腐食に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1093-1098，2009
- 4) 気象庁ホームページ：<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>
- 5) 建設省土木研究所：飛来塩分量全国調査（Ⅲ），土木研究所資料第 2687 号，1988
- 6) 沖縄気象台ホームページ：<http://www.jma-net.go.jp/okinawa/menu/syokai/toukei/tenkou.htm>
- 7) 大屋戸理明，金久保利之，山本泰彦，佐藤勉：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響，土木学会論文集，部門 E，Vol.62，No.3，pp.542-554，2006
- 8) Goto, Y.,: Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, ACI Journal, Vol.68, No.4, pp.244-251, 1971



参考資料

参表-1 に、供試体の一覧を示す.

参表-1 供試体の一覧 (次頁へ続く)

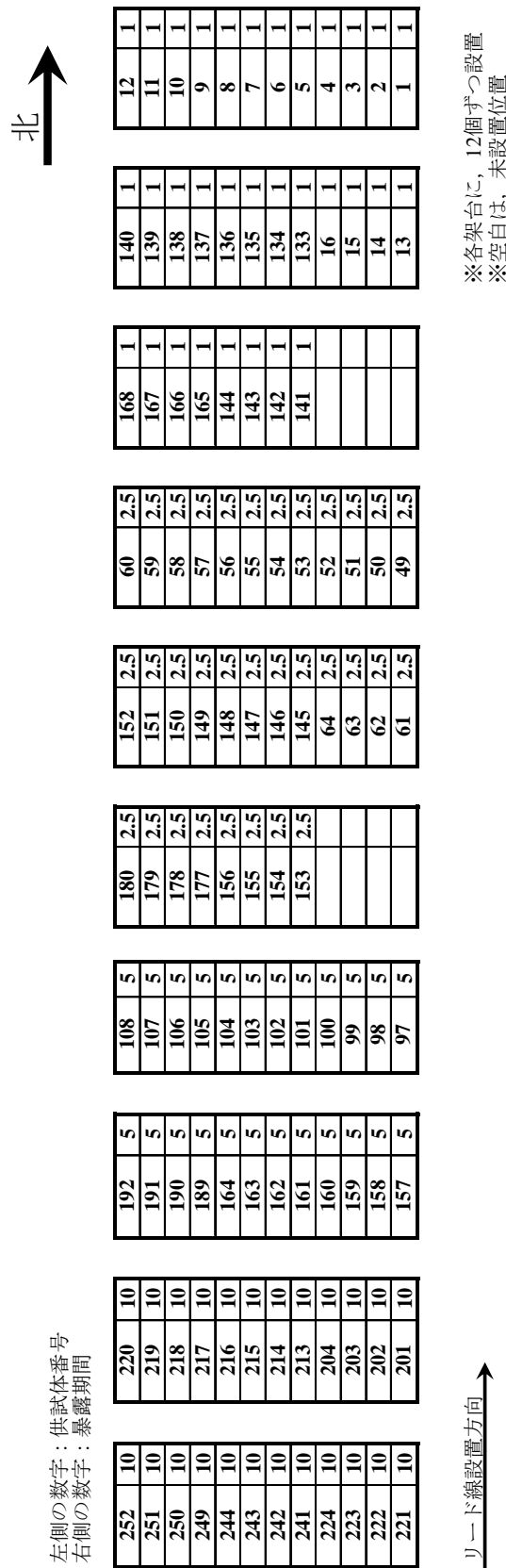
①番号	②ひび割れ幅	③かぶり (mm)	④暴露期間 (年)	⑤W/C (%)	⑥初期塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	⑦暴露地点	①番号	②ひび割れ幅	③かぶり (mm)	④暴露期間 (年)	⑤W/C (%)	⑥初期塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	⑦暴露地点																
1	-	20	1	55	0	つくば	65	-	20	2.5	55	0	新潟																
2	0.2mm以下						66	0.2mm以下																					
3	0.3mm前後						67	0.3mm前後																					
4	0.5mm以上						68	0.5mm以上																					
5	-	30					1	55	0					つくば	69	-	30	2.5	55	0	新潟								
6	0.2mm以下														70	0.2mm以下													
7	0.3mm前後														71	0.3mm前後													
8	0.5mm以上														72	0.5mm以上													
9	-	50													1	55	0					つくば	73	-	50	2.5	55	0	新潟
10	0.2mm以下																						74	0.2mm以下					
11	0.3mm前後																						75	0.3mm前後					
12	0.5mm以上																						76	0.5mm以上					
13	-	70	1	55	0	つくば				77	-	70	2.5										55	0	新潟				
14	0.2mm以下									78	0.2mm以下																		
15	0.3mm前後									79	0.3mm前後																		
16	0.5mm以上									80	0.5mm以上																		
17	-	20					1	55	0	新潟	81	-		20				2.5	55	0	沖縄								
18	0.2mm以下										82	0.2mm以下																	
19	0.3mm前後										83	0.3mm前後																	
20	0.5mm以上										84	0.5mm以上																	
21	-	30									1	55		0	新潟	85	-					30				2.5	55	0	沖縄
22	0.2mm以下															86	0.2mm以下												
23	0.3mm前後															87	0.3mm前後												
24	0.5mm以上															88	0.5mm以上												
25	-	50	1	55	0	新潟							89			-	50					2.5	55	0	沖縄				
26	0.2mm以下												90			0.2mm以下													
27	0.3mm前後												91			0.3mm前後													
28	0.5mm以上												92			0.5mm以上													
29	-	70					1	55	0	新潟			93			-	70	2.5	55	0	沖縄								
30	0.2mm以下												94			0.2mm以下													
31	0.3mm前後												95			0.3mm前後													
32	0.5mm以上												96			0.5mm以上													
33	-	20									1	55	0	沖縄	97	-	30									5	55	0	つくば
34	0.2mm以下														98	0.2mm以下													
35	0.3mm前後														99	0.3mm前後													
36	0.5mm以上														100	0.5mm以上													
37	-	30	1	55	0	沖縄									101	-	50					5	55	0	つくば				
38	0.2mm以下														102	0.2mm以下													
39	0.3mm前後														103	0.3mm前後													
40	0.5mm以上														104	0.5mm以上													
41	-	50					1	55	0	沖縄					105	-	70	5	55	0	つくば								
42	0.2mm以下														106	0.2mm以下													
43	0.3mm前後														107	0.3mm前後													
44	0.5mm以上														108	0.5mm以上													
45	-	70									1	55	0	沖縄	109	-	30									5	55	0	新潟
46	0.2mm以下														110	0.2mm以下													
47	0.3mm前後														111	0.3mm前後													
48	0.5mm以上														112	0.5mm以上													
49	-	20	2.5	55	0	つくば									113	-	50					5	55	0	新潟				
50	0.2mm以下														114	0.2mm以下													
51	0.3mm前後														115	0.3mm前後													
52	0.5mm以上														116	0.5mm以上													
53	-	30					2.5	55	0	つくば					117	-	70	5	55	0	新潟								
54	0.2mm以下														118	0.2mm以下													
55	0.3mm前後														119	0.3mm前後													
56	0.5mm以上														120	0.5mm以上													
57	-	50									2.5	55	0	つくば	121	-	30									5	55	0	沖縄
58	0.2mm以下														122	0.2mm以下													
59	0.3mm前後														123	0.3mm前後													
60	0.5mm以上														124	0.5mm以上													
61	-	70	2.5	55	0	つくば									125	-	50					5	55	0	沖縄				
62	0.2mm以下														126	0.2mm以下													
63	0.3mm前後														127	0.3mm前後													
64	0.5mm以上														128	0.5mm以上													
															129	-	70	5	55	0	沖縄								
															130	0.2mm以下													
															131	0.3mm前後													
															132	0.5mm以上													

参表-1 供試体の一覧 (前頁からの続き)

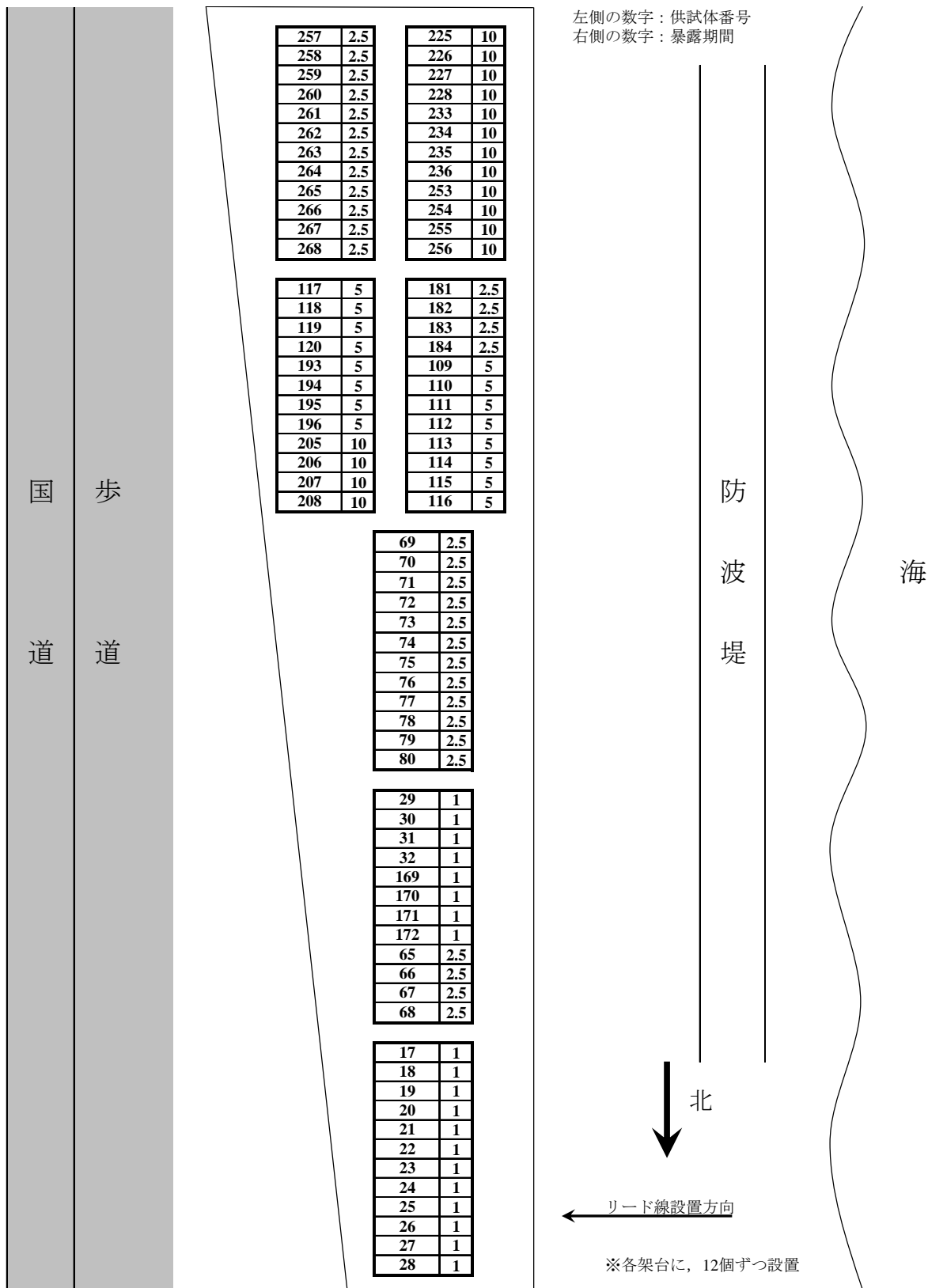
①番号	②ひび割れ幅	③かぶり (mm)	④暴露期間 (年)	⑤W/C (%)	⑥初期塩化物 イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	⑦暴露地点	①番号	②ひび割れ幅	③かぶり (mm)	④暴露期間 (年)	⑤W/C (%)	⑥初期塩化物 イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )	⑦暴露地点	
133	-	20	1	55	0.3	つくば	201	-	30	10	55	0	つくば	
134	0.2mm以下						202	0.2mm以下						
135	0.3mm前後						203	0.3mm前後						
136	0.5mm以上						204	0.5mm以上						
137	-	205					-	50						
138	0.2mm以下	206					0.2mm以下							
139	0.3mm前後	207					0.3mm前後							
140	0.5mm以上	208					0.5mm以上							
141	-	209					-	70						
142	0.2mm以下	210					0.2mm以下							
143	0.3mm前後	211					0.3mm前後							
144	0.5mm以上	212					0.5mm以上							
145	-	213	-	30	10	55	0.3	つくば						
146	0.2mm以下	214	0.2mm以下											
147	0.3mm前後	215	0.3mm前後											
148	0.5mm以上	216	0.5mm以上											
149	-	217	-	50										
150	0.2mm以下	218	0.2mm以下											
151	0.3mm前後	219	0.3mm前後											
152	0.5mm以上	220	0.5mm以上											
153	-	221	-	30					10	35	0	つくば		
154	0.2mm以下	222	0.2mm以下											
155	0.3mm前後	223	0.3mm前後											
156	0.5mm以上	224	0.5mm以上											
157	-	225	-	50										
158	0.2mm以下	226	0.2mm以下											
159	0.3mm前後	227	0.3mm前後											
160	0.5mm以上	228	0.5mm以上											
161	-	229	-	70	10	55	0	つくば						
162	0.2mm以下	230	0.2mm以下											
163	0.3mm前後	231	0.3mm前後											
164	0.5mm以上	232	0.5mm以上											
165	-	233	-	30				10	55	0	つくば			
166	0.2mm以下	234	0.2mm以下											
167	0.3mm前後	235	0.3mm前後											
168	0.5mm以上	236	0.5mm以上											
169	-	237	-	30							10	35	0	つくば
170	0.2mm以下	238	0.2mm以下											
171	0.3mm前後	239	0.3mm前後											
172	0.5mm以上	240	0.5mm以上											
173	-	241	-	50	10	55	0							つくば
174	0.2mm以下	242	0.2mm以下											
175	0.3mm前後	243	0.3mm前後											
176	0.5mm以上	244	0.5mm以上											
177	-	245	-	50				10	55	0				つくば
178	0.2mm以下	246	0.2mm以下											
179	0.3mm前後	247	0.3mm前後											
180	0.5mm以上	248	0.5mm以上											
181	-	249	-	70							10	55	0	つくば
182	0.2mm以下	250	0.2mm以下											
183	0.3mm前後	251	0.3mm前後											
184	0.5mm以上	252	0.5mm以上											
185	-	253	-	70	10	35	0							つくば
186	0.2mm以下	254	0.2mm以下											
187	0.3mm前後	255	0.3mm前後											
188	0.5mm以上	256	0.5mm以上											
189	-	257	0.2mm以下	30				2.5	55	0				つくば
190	0.2mm以下	258	0.3mm前後											
191	0.3mm前後	259	0.5mm以上											
192	0.5mm以上	260	0.2mm以下											
193	-	261	0.3mm前後	70							2.5	35	0	つくば
194	0.2mm以下	262	0.5mm以上											
195	0.3mm前後	263	0.2mm以下											
196	0.5mm以上	264	0.3mm前後											
197	-	265	0.5mm以上	30	2.5	35	0							つくば
198	0.2mm以下	266	0.2mm以下											
199	0.3mm前後	267	0.3mm前後											
200	0.5mm以上	268	0.5mm以上											



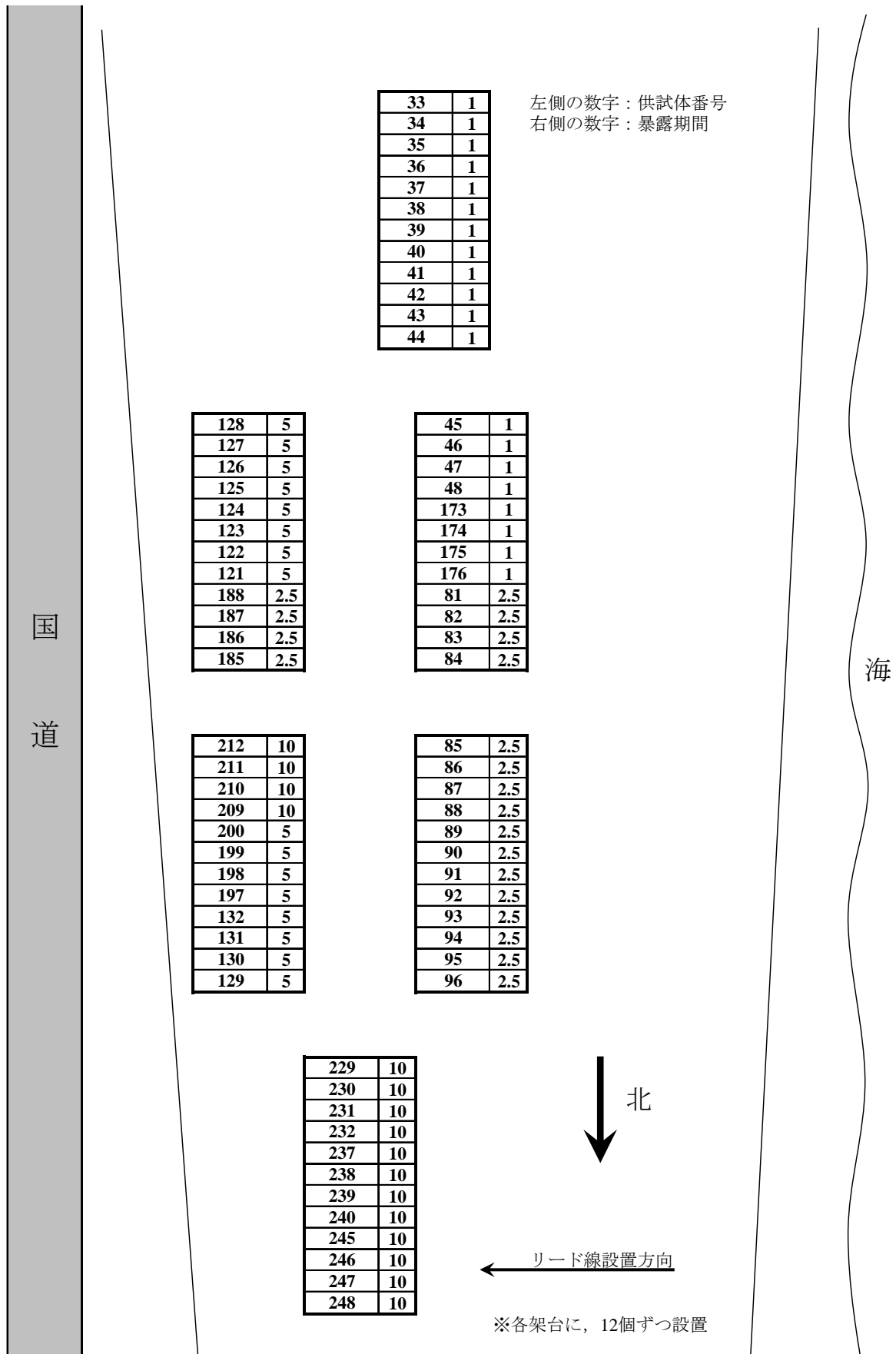
参図-3, 4, 5に, つくば, 新潟, 沖縄の供試体の配置図を示す.



参図-3 つくばの供試体の配置図



参図-4 新潟の供試体の配置図



参図-5 沖縄の供試体の配置図

---

土木研究所資料  
TECHNICAL NOTE of PWRI  
No.4223 March 2012

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課

〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754