

ISSN 0386-5878

土木研究所資料第 4397 号

# 土木研究所資料

## 中性化したコンクリートの塩分浸透に関する検討

—屋外暴露試験及び塩水浸漬試験—

令和2年3月

国立研究開発法人土木研究所  
構造物メンテナンス研究センター

Copyright © (2020) 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、国立研究開発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、国立研究開発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。

# 中性化したコンクリートの塩分浸透に関する検討

## —屋外暴露試験及び塩水浸漬試験—

国立研究開発法人土木研究所

構造物メンテナンス研究センター

上席研究員 石田 雅博

総括主任研究員 田中 良樹

### 要旨

中性化したコンクリートの塩分浸透性状を明らかにするため、中性化深さ約45 mmのコンクリート床版を用いて、沖縄沿岸部で5年間の屋外暴露試験及び採取したコアで1年間の塩水浸漬試験を行った。屋外暴露試験、塩水浸漬試験ともに、45 mmの厚い中性化領域であっても、外部からコンクリート中に浸入した塩化物イオンが非中性化領域に向かって移動して、中性化の境界付近、多くはその非中性化領域側で濃縮し、さらに深い方へ拡散することがわかった。

キーワード：コンクリート、中性化、塩分浸透、暴露試験、塩水浸漬試験、含水率、飽水度、フリーデル氏塩





## 目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 屋外暴露試験	2
2.2 塩水浸漬試験	10
2.3 測定	11
3. 試験に用いた床版コンクリート	16
4. 屋外暴露試験の結果	20
4.1 暴露試験における塩化物イオン濃度分布	20
4.2 暴露終了後の塩化物イオン濃度分布の変化	27
4.3 中性化したコンクリートにおける強固定塩化物イオン濃度分布と F 塩の分布	27
4.4 暴露中に生じた腐食によるひび割れの影響	29
4.5 ひび割れ部の塩分浸透	30
5. 塩水浸漬試験の結果	32
6. まとめ	36
謝辞等	37
参考文献	38
付録 データ集	41
コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果	
コンクリート中の含水状態の測定結果	



## 1. はじめに

凍結防止剤に由来する塩化物の影響が懸念される既設の鉄筋コンクリート部材では、大気に露出したコンクリートの大部分が既にある程度の深さまで中性化している事例が多いと考えられる。道路橋では、伸縮装置や排水装置の損傷によって突然漏水が生じると、供用後ある程度年数を経過してコンクリートの中性化が進行した箇所に、塩化物を含む路面水が流下して、中性化した面からコンクリート中に塩化物イオンが供給されることが想定される。この観点から、中性化したコンクリートへの塩分浸透の特性を把握しておく必要がある。中性化したコンクリートは、中性化によってコンクリートの細孔構造が緻密になり、塩分浸透が妨げられるとする報告がある<sup>1)7)</sup>。一方で、中性化したコンクリートは塩分浸透が速いとする報告もある<sup>8)17)</sup>。本文では、既設橋から撤去された中性化深さ約 45 mm の鉄筋コンクリート床版を用いて、2009 年から 5 年間にわたり沖縄沿岸部で実施した屋外暴露試験、及び同床版から採取したコンクリートコアで行った 1 年間の塩水浸漬試験について報告する。その結果に基づき、中性化したコンクリート中における塩化物イオンの浸透性状を明らかにする。

## 2. 試験方法

### 2.1 屋外暴露試験

1972年に千葉県船橋市内の東京湾沿岸部に建設された非合成鋼板桁橋で、2007年に鉄筋コンクリート床版の一部が取り換えられた。その際、撤去された床版を入手して、つくば市にある土木研究所の実験棟屋内で約2年間保管していた。床版は2体あり、1体は暴露供試体に用い、残り1体はつくばの屋内に保管した。

図-2.1に暴露供試体の設置場所を示す。また、図-2.2に暴露供試体の外観と暴露状況、及び海面との位置関係を示す。暴露供試体は、沖縄県で建設中であった伊良部大橋の建設現場のうち、伊良部島側護岸ブロックの上に設置した。2009年10月から暴露を開始した。同橋の建設の進行に応じて、暴露供試体を移動させる必要が生じたため、図-2.3のとおり暴露環境が大きく変化しない範囲で同供試体を移設した。図-2.4～5に移設後の暴露供試体の状況を示す。

図-2.6に暴露供試体の形状寸法と供用中に見られた床版下面のひび割れ状況（透視図）及びコア採取位置を示す。暴露面は床版の下面のみとし、護岸ブロックとの間に遊間を設けるため、主桁と接していた面に架台を取り付けた。暴露面と護岸ブロックの間は270 mmであった。図-2.7に暴露供試体下の遊間の状況を示す。ただし、図-2.8に示すように、主桁と接していた面（以下、主桁上）は一部暴露される状態とした。この面は、撤去後、屋内保管中及び暴露試験の間に中性化しているが、主桁上の中性化深さは床版部に比べて小さい。床版の上面はアスファルト舗装の一部（厚さ約20 mm）が残存したままとした。また、側面は鉄筋位置を観察した後、防水テープとシリコンで覆った。

図-2.9に屋内保管供試体の外観を示す。同供試体は、土木研究所内の耐風工学実験施設に、温湿度管理がされていない状態で保管した。

暴露5年目の2014年9月に供試体を撤去して、つくばの土木研究所に移設した。暴露終了後、図-2.6(b)に示すように、床版下面に塩害による新たなひび割れが見られ、広い範囲に浮きが生じていた。



a : 当初設置位置 b : 移設後の位置

写真出典：国土地理院「地理院地図」

図-2.1 伊良部大橋と暴露位置

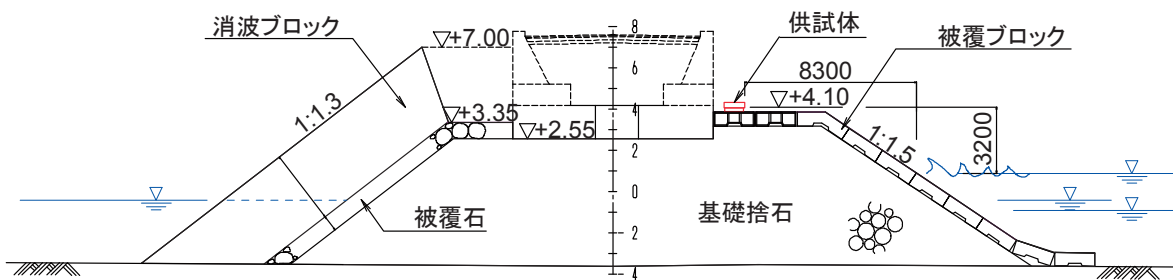




(a) 北東に向かって撮影



(b) 南西に向かって撮影



(c) 海中道路断面図と暴露供試体の設置位置（海面との位置関係）

図-2.2 暴露開始時の設置状況

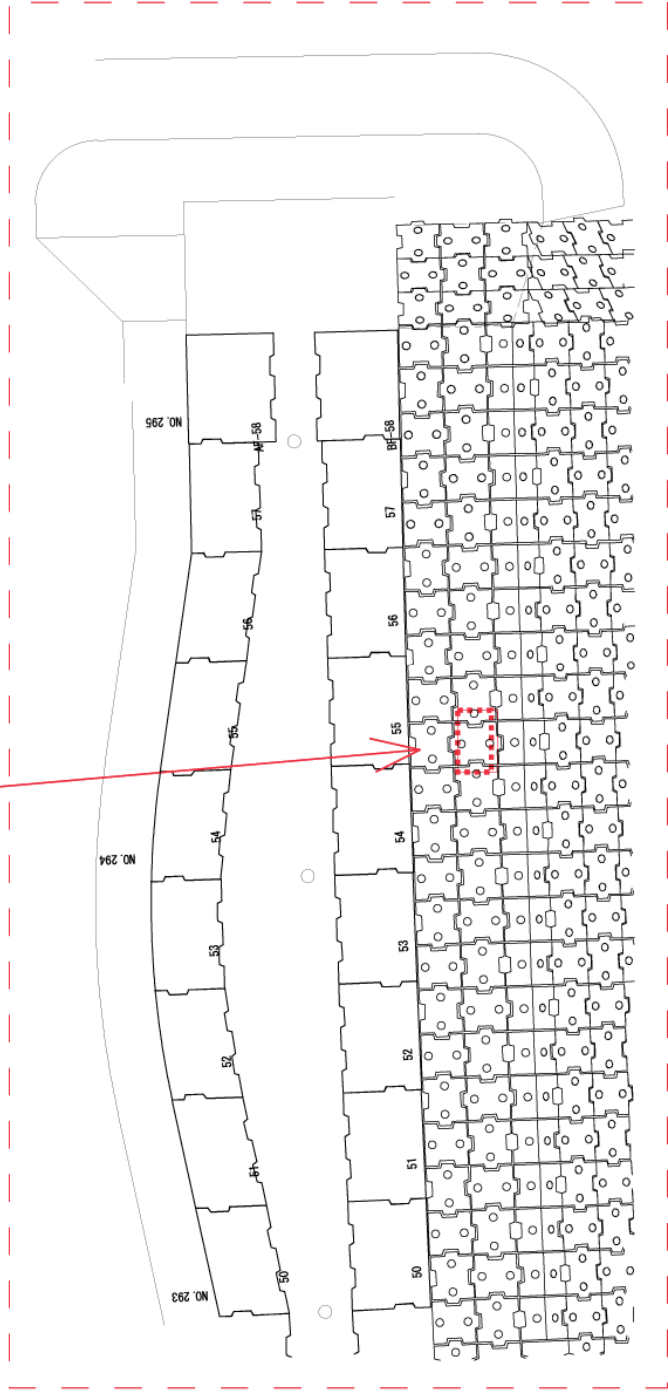
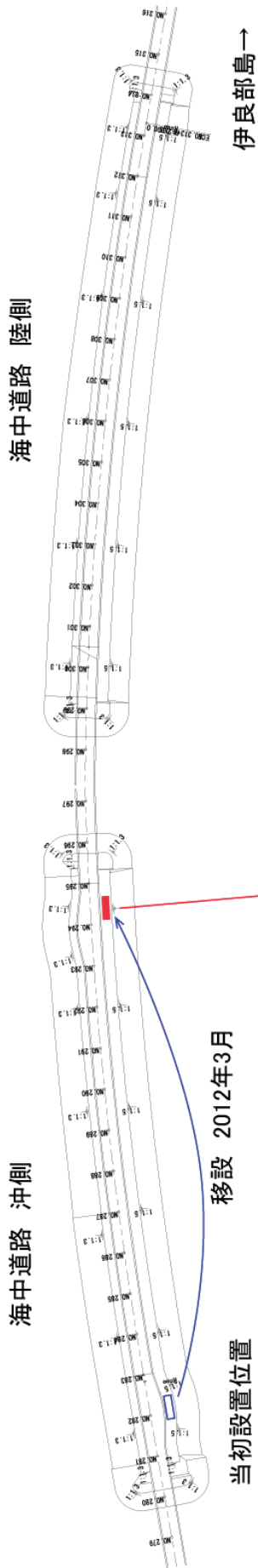


図-2.3 暴露供試体の設置位置及び移設図



(a) 移設直後 2012年3月撮影



(b) 移設後 2014年7月撮影

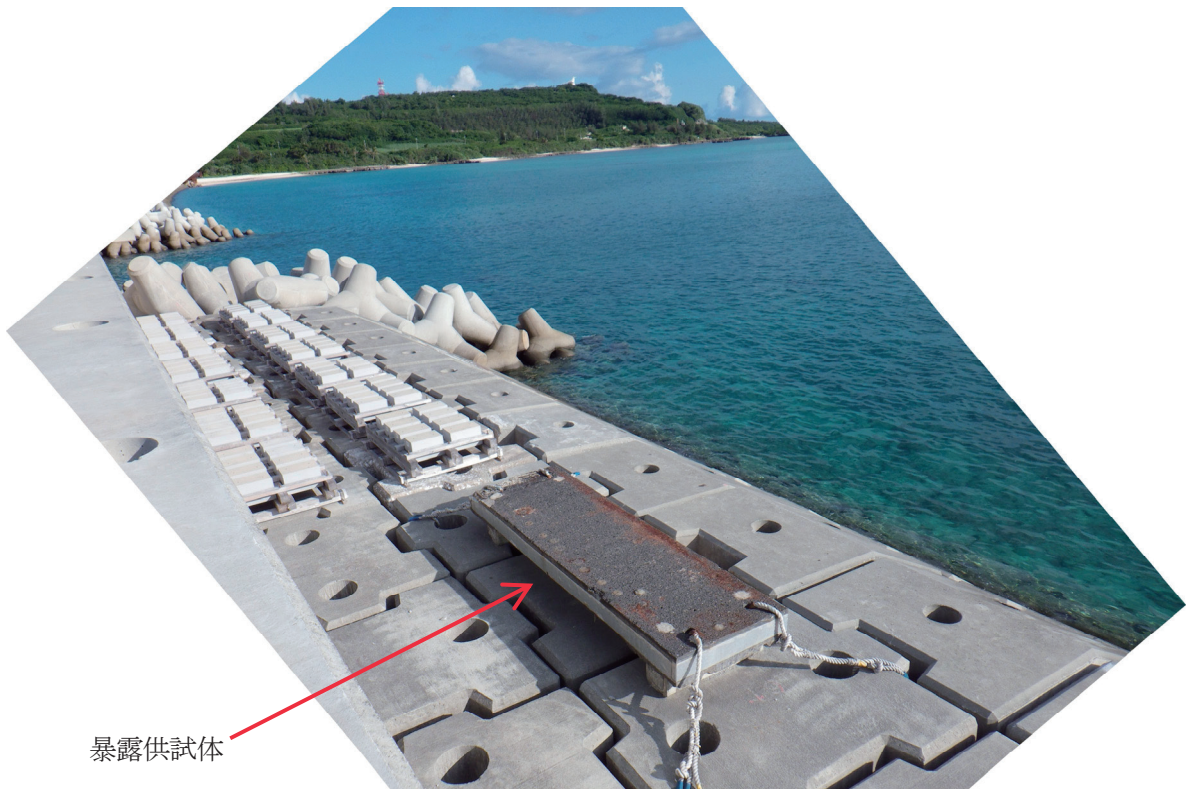
図-2.4 移設後の設置状況





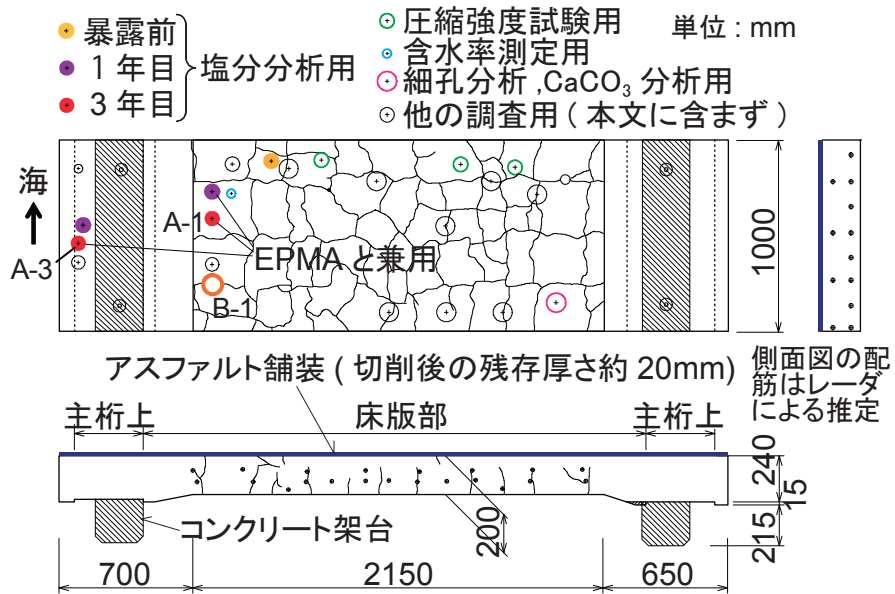
a : 当初設置位置 b : 移設後の位置

(a) 伊良部島側から撮影



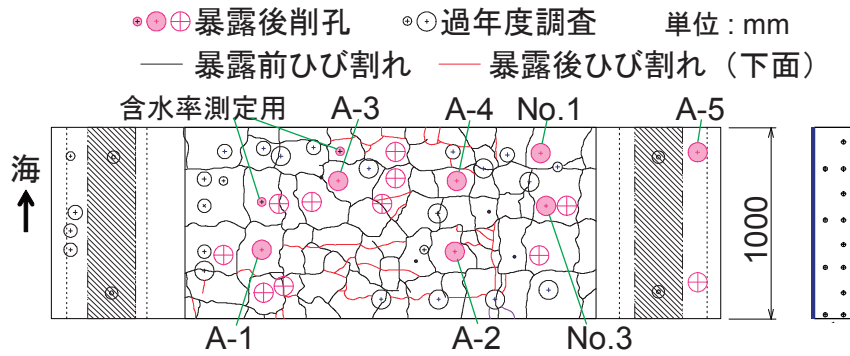
(b) 伊良部大橋工事道路から撮影 (移設後, 伊良部島を望む)

図-2.5 暴露地点の周囲の状況



注) B-1 は第3章考察で引用した鉄筋入りコアの位置を示す。

(a) 初期ひび割れと暴露1,3年目のコア削孔位置



(b) 暴露後のひび割れと暴露5年目のコア削孔位置

図-2.6 暴露供試体の形状寸法とコア採取位置





図-2.7 暴露供試体の設置状況（近接）



(a) 削孔後，シリコンで埋めた跡



(b) 暴露3年目のコア削孔後，埋める前

図-2.8 暴露供試体の端部付近，主桁に接していた位置とコア削孔後の状況

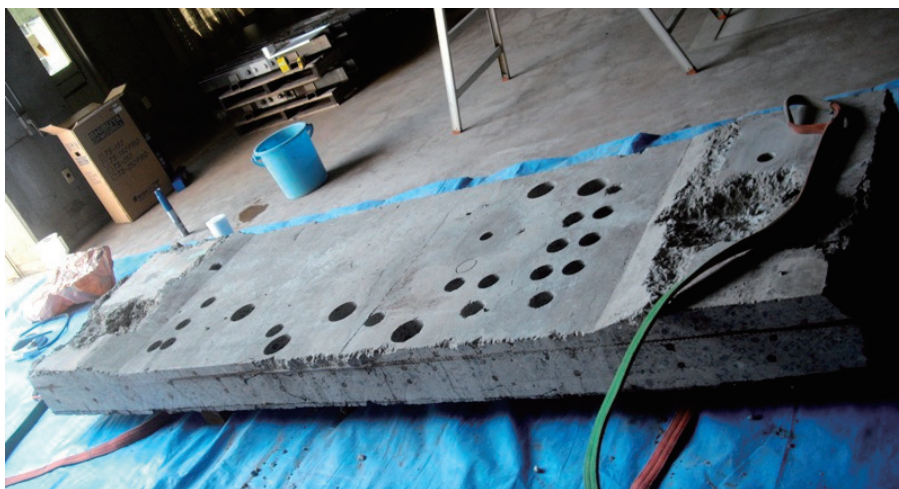


図-2.9 屋内保管供試体のコア削孔（暴露3年目の含水率測定時）

## 2.2 塩水浸漬試験

屋内保管供試体からφ68 mmのコアを採取して、塩水浸漬試験を1年間実施した。図-2.10に塩水浸漬試験の概要を、図-2.11に同試験状況をそれぞれ示す。採取したコアは、側面をエポキシ樹脂系塗料で覆い、下面のみを3%NaCl水溶液に浸した。試験は空調のない屋内で実施した。浸漬後9箇月間は塩水濃度を管理していなかったため、3.5%まで濃度が増加していた。残りの3箇月は3%を保持するように塩水の濃度管理を行った。

中性化していない場合の結果を得るため、一部のコアは深さ100 mmのところまで切断した面を塩水に浸した。また、切断面と型枠面では表面の細孔構造の違いによる影響があるかもしれないので、切断したコアの残り（中性化領域のあるコア）についても、中性化した表面から10 mmを切断して、その切断面を塩水に浸した。供試体は屋内で約2年間保管されていたことから、コンクリートが乾燥している可能性があると考え、コア側面の塗装後、塩水浸漬前の30日間、イオン交換水に漬けて事前に吸水させた（以下、事前吸水という）。比較のため、事前吸水のない場合についても同様の塩水浸漬試験を行った。表-2.1に、塩水浸漬試験の主な工程を示す。塩水浸漬用コアの中性化深さは塩分分析時に測定した。中性化深さ測定と塩分分析（全塩分）は、暴露試験と同様に行った。

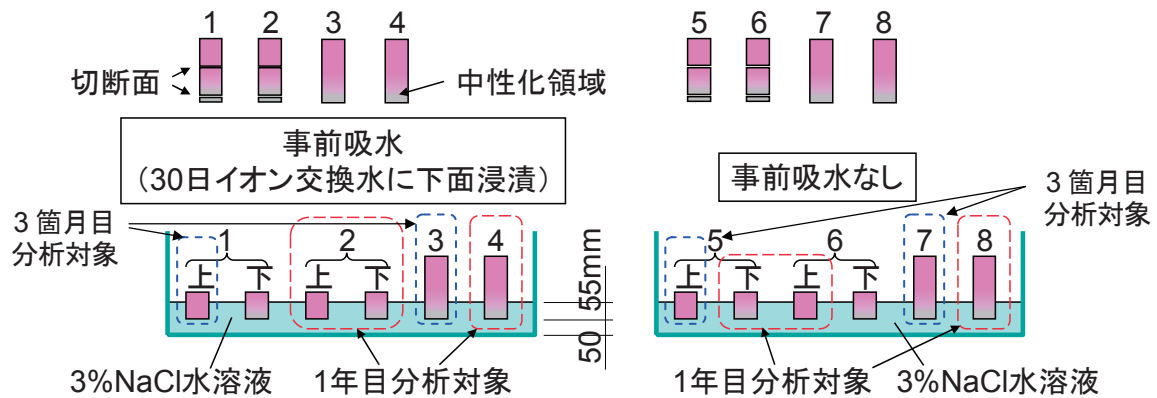


図-2.10 塩水浸漬試験の概要

表-2.1 塩水浸漬試験の主な工程

年月日	浸漬期間 (月)	作業内容	
2011.8.9	—	コア抜き	
2011.8.9~16	—	コア側面塗装	
		事前吸水あり	事前吸水なし
2011.8.29	—	イオン交換水浸漬開始	
2011.9.26	0	イオン交換水浸漬終了, 3%塩水に浸漬開始	3%塩水に浸漬開始
2011.12.26	3	コア No. 1 上, 3 を回収, 中性化深さ測定	—
2011.12.27~		同コア 2 本の塩分分析	—
2012.1.10		—	コア No. 5 上, 7 を回収, 中性化深さ測定
2012.1.11~		—	同コア 2 本の塩分分析
2012.7.13	9	塩水濃度 NaCl 3.5% → 3.0%に調整	
2012.9.24	12	コア No.2 上, 同下, 4, 5 下, 6 上, 8 を回収	
2012.11.1~		同コア 6 本の中性化深さ測定, 塩分分析	



図-2.11 塩水浸漬試験の状況

## 2.3 測定

### (1) 暴露前

暴露試験の直前に、床版の鉄筋やひび割れのない位置でφ68 mmのコアを抜き、圧縮強度試験及びフェノールフタレイン1%アルコール溶液（以下、フェノールという）による中性化深さの測定を行った。同様に採取したφ68 mmのコアで、暴露試験開始時の塩化物イオン濃度分布（打設時含有塩分及び供用期間中の外来塩分が含まれる）をJIS法（全塩分）により測定した。またφ100 mmのコアを用いて、床版下面から0～10、20～30、40～50、60～70 mmの各深さにおける空隙率及び全細孔比表面積を水銀王入法により（細孔直径の測定範囲は3 nm～400 μm）、CaCO<sub>3</sub>含有率を示差熱分析によりそれぞれ測定した。

### (2) 暴露後の経過調査（暴露1,3年目）

暴露1年目及び3年目に、床版上面からφ68 mmのコアを採取した。コア採取位置は図-2.6(a)に示した。図-2.12に、現地でのコア削孔状況を示す。9月初旬の伊良部島でのコア削孔は、供試体の表面温度が高く、床版上面のアスファルト混合物の粘性が高くなることや削孔深さ（上面からの貫通削孔）が比較的深いことから、乾式削孔で行うと却って削孔時間が長くなり、他の影響が出ることも懸念されたので、湿式で行うこととした。本文で示すコアは、コアB-1を除き、いずれも床版下面のひび割れのない部分から採取した。比較のため、主桁上からもコアを採取した。コア採取から分析までの間は、コアの側面と上面をアルミテープで覆った。なお、コア採取した箇所は、その後の暴露試験に影響しないように、無収縮モルタルまたはシリコンで補修した。

採取したコアを用いて、塩化物イオン濃度分布の測定（JIS、全塩分）と、EPMA分析（深さ80 mm×幅68 mmまたは80 mm、本文では塩化物イオンの面分析結果を示す）を行った。その際にも各コアの中性化深さを測定した。また、暴露3年目に、暴露供試体と屋内に保管している供試体の含水率分布を測定した。含水率分布は、採取したφ45 mmのコアを割裂でスライス状にして、割裂直後、真空飽水処理後、105℃での168時間絶乾後、それぞれの時点で各スライスの質量を測定することにより、自然状態での含水率及び飽和含水率を算定した（いずれも絶乾質量に対する率で表わす）<sup>18)</sup>。

### (3) 暴露後の調査（暴露5年目）

回収した床版を反転させた上で、暴露面からφ100 mmのコアを湿式により採取した。図-2.13に、暴露後5年目のコア削孔状況を示す。暴露後5年目に削孔したコアのうち、塩分分析に用いたコアは図-2.14に示す7本である。コア採取位置は、図-2.6(b)に示した。表-2.2に、各コアの調査項目とコアの状態を示す。コアA-5とNo.3を除くすべてのコアの側面に、鉄筋腐食によると思われるひび割れが見られた。コアA-4は、半割にする前に、樹脂でひび割れ補修を行った。コアA-5は、主桁の上フランジに接していて暴露前の中性化が軽微な部分として採取したが、コア採取後に、コンクリートが部分的に全厚にわたり打ち換えられていたことがわかった。打ち換えられていた範囲は、A-5を採取した側の主桁上の一部である。

表-2.3にコア抜きと切断の時期を示す。供試体の撤去日を基準に、暴露終了後の期間を示す。移設等のため、コア切断までに約1箇月を要した。塩分分析を行うコアは、いずれも軸対称に半割にした。暴露終了後1箇月目にすべてのコア（半割の片側）の塩分分析を行った。残りの半割は、室内に保管して、暴露終了後2, 4, 10, 14箇月後にそれぞれ塩分分析を行った。残りの半割コアのうちA-1～5は全面を、No.1, 3は暴露面を



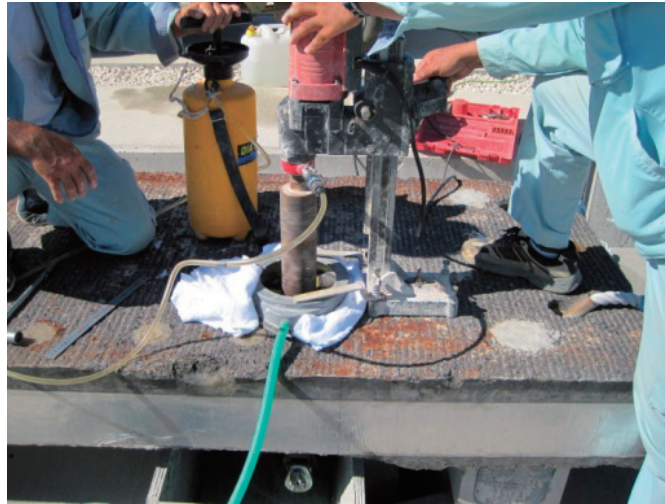


図-2.12 3年目の現地でのコア抜き



(a) 床版下面の状況 (天地反転したところ)



(b) コア抜きの状況

図-2.13 暴露後5年目の試料採取





A-5\*



A-4



A-3



A-2



A-1



No.3



No.1

注) 写真上が床版下面

\*) A-5は補修コンクリート

図-2.14 暴露5年目のコアの外観

表-2.2 暴露5年目の調査項目とコアの状態

コア番号	切断時期(箇月後)	塩分分析の項目	中性化深さ(mm)	ひび割れ位置(mm)	アルミテープによる被覆範囲
A-1	1	全塩分, 可溶性, F塩*	52	40	—
A-2	1	全塩分	50	50	—
	2	全塩分	48	50	全面
A-3	1	全塩分	46	80	—
	4	全塩分	47	80	全面
A-4	1	全塩分	41	60	—
	10	全塩分	41	60	全面(樹脂)
A-5	1	全塩分, 可溶性, F塩*	0	なし	—
No.1	1	全塩分	44	25	—
	14	全塩分, 可溶性, F塩	51	25	暴露面を除く全面
No.3	1	全塩分	44	なし	—
	10	全塩分	44	なし	暴露面を除く全面

注1) ひび割れ位置は, 床版下面からの深さ

2) A-4は半割前にひび割れ補修のため, 切断面を除く全面が樹脂で覆われた.

3) A-5は床版補修時のコンクリート

4) \*: A-1, A-5は, F塩を測定したが検出されなかった.

表-2.3 コア抜きと切断の時期

	年月日	暴露期間(年)	暴露終了後期間(月)	作業内容
暴露期間	2009/10/6	0	—	設置, 暴露開始
	2010/9/16	1	—	1年目コア抜き
	2012/9/13	3	—	3年目コア抜き
	2014/9/17	5	—	撤去, 暴露終了
暴露終了後	2014/9/25-26	—	—	コア抜き, A-1~5
	2014/9/30-10/2	—	—	コア抜き, No.1, 3
	2014/10/27-30	—	1	半割コア切断, A-1~5, No.1, 3
	2014/11/17	—	2	半割残りコア切断, A-2
	2015/1/19	—	4	半割残りコア切断, A-3
	2015/8/2	—	10	半割残りコア切断, A-4, No.3
	2015/10/29	—	14	半割残りコア切断, No.1



除く全面をアルミテープで覆った。なお、保管室内は特に温度管理されていなかったが、2015年の夏季に他の実験作業に伴い空調が入れられたため、半割コア No.1 は乾燥が進んだ可能性がある。

中性化深さの測定は、主としてコアを半割にする際及び残りの半割コアの塩分分析時に、フェノールにより行った。すべてのコアについて、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布を JIS 法（全塩分）により測定した。また、3 本のコアについては、可溶性塩分も併せて測定した。全塩分、可溶性塩分ともに、塩化物イオン濃度の測定は電位差滴定法によった。可溶性塩化物イオン濃度には、固定化されていた塩化物イオン、吸着されていた塩化物イオンの一部も含まれる傾向にあり、全塩分との差は固定塩化物イオン濃度として過少評価する可能性があるが、参考としてここでは、全塩分の測定結果から可溶性塩分の測定結果を減じた値を強固定塩化物イオン濃度として示す。

床版供試体のコンクリートにおけるフリーデル氏塩（F 塩）の深さ方向分布の測定を試みた。最初、コア A-1、A-5 を用いて分析を行ったが、JIS 法の塩分分析に用いるために骨材ごと粉碎した試料を用いたため、明瞭な検出ができなかった。2 度目は、コア No.1 を用いて、試料調整の際に骨材分を図-2.15 のようにできるだけ除去するとともに、密度  $2.1 \text{ g/cm}^3$  に調整した溶液を用いた重液分離処理<sup>19)</sup>により浮遊分を微粉試料として抽出した上で、F 塩の分析を行った。コア No.1 のうち、14 箇月後測定用の半割供試体を、さらに半分縦割りにして、その片方を F 塩分析に供した。また微粉試料に残存する微量骨材の割合を推定するため、セメント協会 F-18 法<sup>20)</sup>に準じて、塩酸を用いて微粉試料の不溶残分の測定を行った。F 塩の測定は、示差走査熱量計により行った。測定条件は、R 社製 DSC8231 を用いて、昇温速度  $20^\circ\text{C}/\text{min}$ 、測定温度  $450^\circ\text{C}$  まで、測定試料量約  $20 \text{ mg}$  とした。2 度目の測定のうち、非中性化領域の試料で、 $380^\circ\text{C}$  付近に脱水による吸熱ピークが見られた。

暴露 5 年目においても、暴露供試体の含水率分布を 3 年目と同様の方法で測定した。



図-2.15 コア No.1 の F 塩分析用の試料（左）と除去した骨材（右）  
（深さ 50～60 mm の試料の例）

### 3. 試験に用いた床版コンクリート

表-3.1 に、床版コンクリートの圧縮強度、弾性係数及び中性化深さを示す。両供試体ともに、圧縮強度が小さく、圧縮試験用コアの中性化深さはいずれも 45 mm であった。測定位置や測定時期によって中性化深さが異なることから、本文に用いるコアの中性化深さを図-3.1 に示す。主桁上での中性化は床版の撤去後に生じたが、中性化速度は床版部と概ねよく一致した。

表-3.2 に、コンクリートの空隙率、全細孔容積、全細孔比表面積及び  $\text{CaCO}_3$  含有率を示す。深さ 0~10 mm、20~30 mm では、中性化していない部分に比べて  $\text{CaCO}_3$  含有率が高いこと、及び空隙率が小さくなることは、コンクリートの中性化領域で見られる特徴であり<sup>21),22)</sup>、その変化の範囲の傾向は、フェノールによる中性化領域の判定と一致する。特に中性化の有無による  $\text{CaCO}_3$  含有率の差が顕著であった。また、中性化領域の全細孔比表面積は、非中性化領域に比べて顕著に小さく、測定の対象とした細孔直径の範囲で、硬化セメントペーストが比較的粗い細孔構造に変化していたことを表わすと考えられる。なお、比表面積の減少が塩化物イオンの拡散に及ぼす影響は明らかでないが、透水性は比表面積の 2 乗に反比例すると考えられている<sup>23)</sup>。

図-3.2 に、暴露前の初期塩化物イオン濃度分布を示す。供用中の橋で 1982 年にガーゼ法により 1 年間測定されたときの年平均飛来塩分量は 0.19 mdd ( $\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$ ,  $1 \text{ dm}^2 = 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ ) であり、沿岸部の塩分環境として厳しくなかったが、供用中における外部からの塩化物イオンの浸入が認められた。中性化領域の境界付近に塩化物イオンの濃縮がわずかに見られた。

図-3.3 に、暴露 3 年目に測定したコンクリート中の含水率分布を示す。また、図-3.4 に、暴露 5 年目に測定したコンクリート中の含水率分布を示す。図中凡例の「切断直後含水率」は切断直後の自然状態での含水状態を表わす。また、飽水状態含水率はコンクリートの空隙率の分布を間接的に表わす指標と考えられる。いずれの図においても飽水状態含水率は 10% を超える部分が多く見られ、コンクリートの密実度が低かった。このことは、低い圧縮強度、著しい中性化深さとともに、コンクリートの品質を表わす指標として傾向が一致する。屋内保管供試体のうち主桁上の乾燥は、屋内に 5 年間保管されていた間に生じたものである。

屋内保管供試体の床版部は、主桁上の場合よりも、概ね供用中に乾燥した分だけ含水率が低かったと考えられる。屋内保管供試体の床版部では、中性化領域を超えて深さ 60 mm までの含水率が低く、撤去後に中性化した主桁上に比べて、含水率の分布形状に違いが見られ、乾燥の影響が深くに及んでいた。一方、屋外暴露供試体の床版部では、飽水状態含水率に対する切断直後含水率の割合（後述の飽水度）が屋内保管供試体に比べて大きくなっており、暴露後にコンクリート中の水分が増加したと考えられる。

図-3.5 に、コンクリート中の飽水度分布を示す。飽水度は、切断直後の含水率を飽水状態の含水率で除して百分率で表わした値である。屋内保管供試体の床版部の飽水度は、平均で 55% とコア全体に低かった。特に、深さ 60 mm までの飽水度が 50% 以下で、著しく乾燥した状態にあった。屋外暴露供試体の床版部の飽水度は、3 年目で平均 77% であり、深さにほとんど関係なく暴露後に概ね 20%（平均で 22%）増加していた。5 年目の結果は表面付近を除いて 3 年目の結果との差がほとんどなかった。5 年目の表面付近の飽水度は、3 年目の結果よりやや大きい傾向が見られた。

表-3.1 圧縮強度試験結果と床版下面の中性化深さ

供試体	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> )	中性化深さ (mm)
屋外暴露	16.9	17.3	45
屋内保管	19.7	14.9	45

注) いずれも3体の平均値, 中性化深さは圧縮コアでの測定値

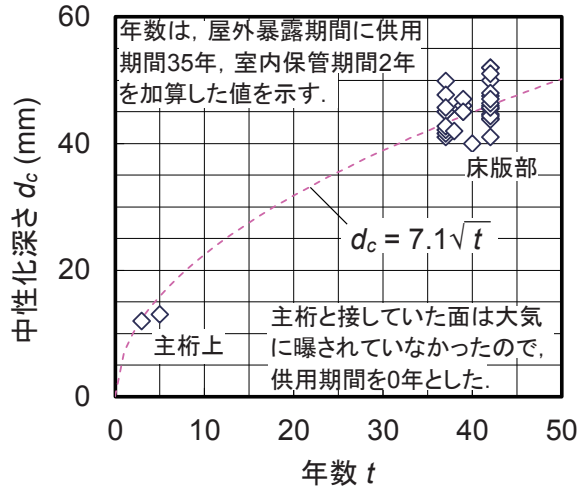


図-3.1 床版供試体の暴露年数と中性化深さ

表-3.2 コンクリート（モルタル部）の深さ方向の変化

床版下面からの深さ (mm)	中性化の有無	空隙率 (%)	全細孔容積 (cm <sup>3</sup> /g)	全細孔比表面積 (mm <sup>2</sup> /g)	CaCO <sub>3</sub> 含有率 (%)
0~10	あり	25.3	0.133	8.7	37.2
20~30	あり	25.1	0.133	7.6	37.8
40~50	一部あり	26.0	0.148	33.9	8.2
60~70	なし	26.3	0.149	37.4	3.9

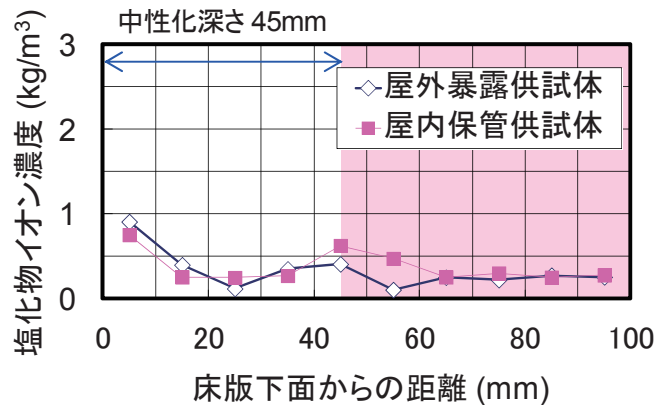
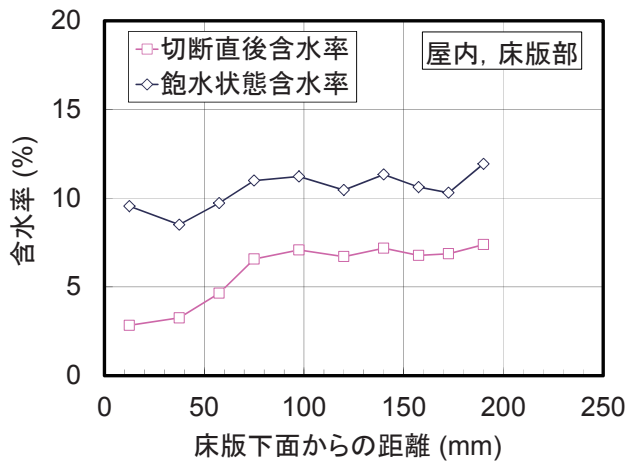
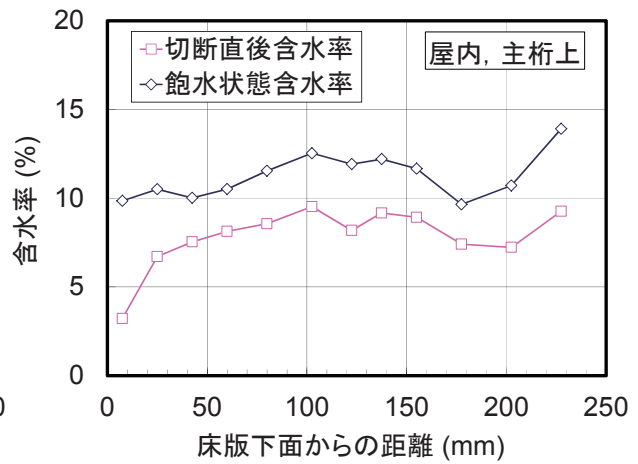


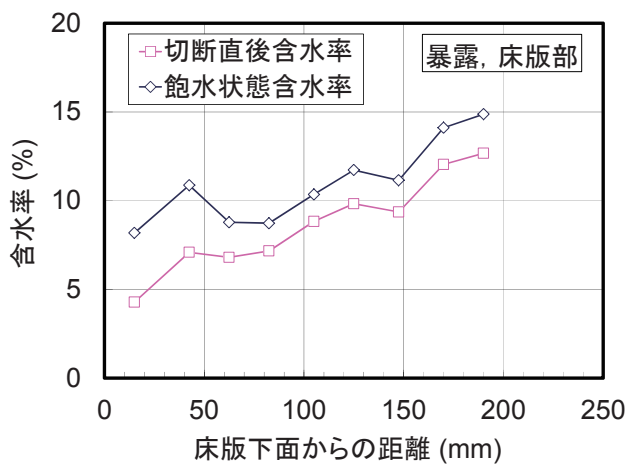
図-3.2 暴露前の初期塩化物イオン濃度分布



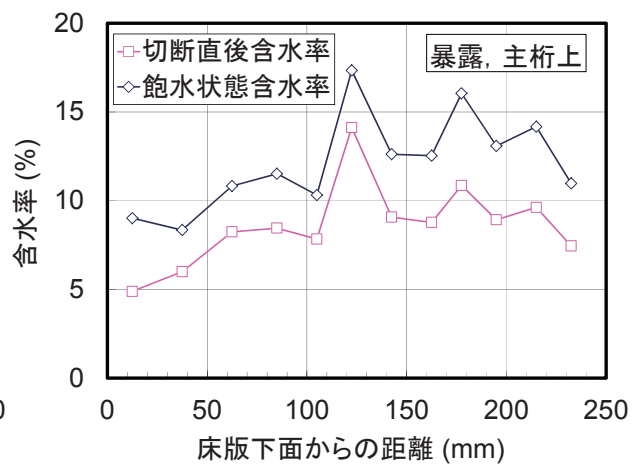
(a) 屋内保管供試体の床版部



(b) 屋内保管供試体の主桁上

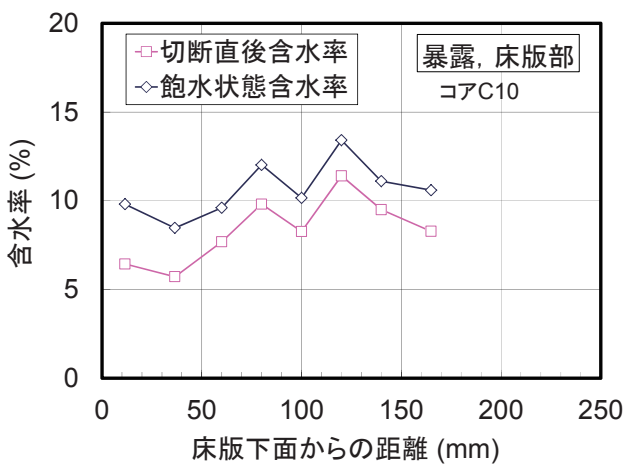


(c) 屋外暴露供試体の床版部

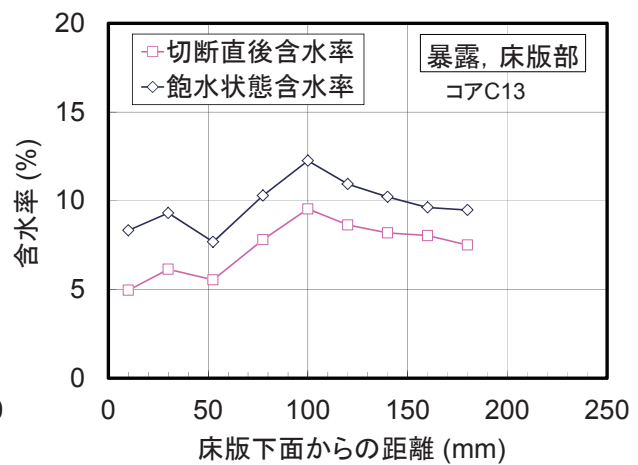


(d) 屋外暴露供試体の主桁上

図-3.3 コンクリート中の含水率分布  
(暴露3年目時点)



(a) コア C10



(b) コア C13

図-3.4 コンクリート中の含水率分布  
(暴露5年目、いずれも床版部)

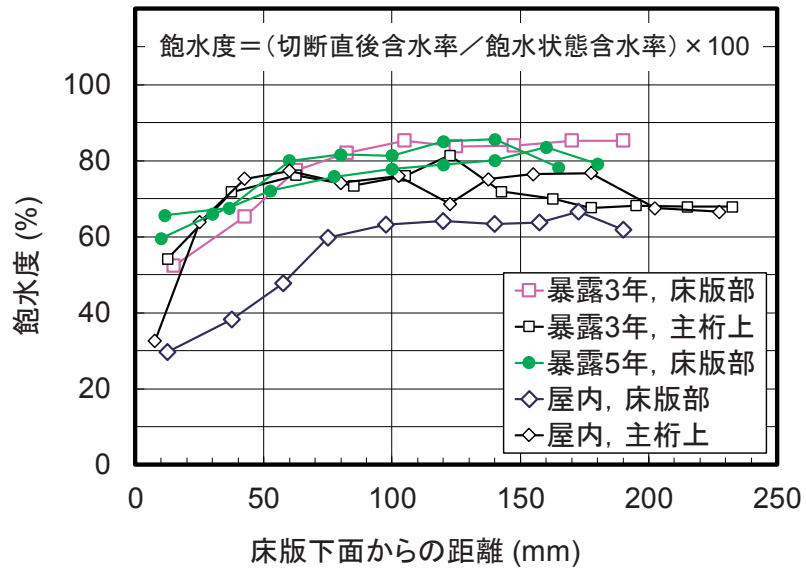


図-3.5 コンクリート中の飽水度分布

## 4. 屋外暴露試験の結果

### 4.1 暴露試験における塩化物イオン濃度分布

#### (1) 暴露1年目

図-4.1に、暴露1年目の床版部におけるEPMAによるコンクリート中の塩化物イオン分布を、フェノールによる中性化深さの測定面（EPMAのための研磨前に測定）とともに示す。図の上縁が暴露面である。中性化深さ42 mmのうち、深さ20 mm程度まで外部からの塩化物イオンの浸透が見られた。この時点では、非中性化領域での塩化物イオンの濃縮は初期値のままであり、暴露後の塩分浸透は非中性化領域に至らなかった。同コアの塩化物イオン濃度分布と暴露前の測定値を除いた分布を図-4.2に示す。暴露前の測定値を除くと、中性化の境界付近における塩化物イオンの濃縮がほとんどないことから、図-4.1で見られた中性化の境界付近における塩化物イオンの濃縮は、暴露前に既に生じていたと考えられる。

#### (2) 暴露3年目

同様に、図-4.3に暴露3年目の床版部及び主桁上におけるEPMA分析結果を示す。また、図-4.4に、暴露1年目及び3年目の塩化物イオン濃度分布を示す。これらは、EPMA分析に用いたコアの残り部分を用いて測定した結果である。3年目の床版部では、非中性化領域の塩化物イオン濃度が増加しており、深さ40 mmの中性化領域であってもその領域を塩化物イオンが通過して非中性化領域まで移動したことがわかる。また、中性化領域でも多量の塩化物イオンを含有していた。EPMAの結果で見られるごく表面付近の塩化物イオンの濃縮を除き、塩化物イオンのピークは中性化の境界付近で見られた。暴露3年目の結果において、中性化深さが深い床版部の方が主桁上に比べてピーク値が小さいが、中性化深さが深いことから、より深い位置で濃縮が見られた。

これまでの事例でも見られるように、非中性化領域における塩化物イオン濃度分布は、一般的なFickの拡散方程式の解（以下、フィック式という）でよく表わされる形状であり、拡散現象に支配されていることが分かる。一方、中性化領域の塩化物イオン濃度は深さ方向の変化が緩慢であり、外部から浸入した塩化物イオンが概ね定常的に非中性化領域に向かって流入しているような分布形状であった。

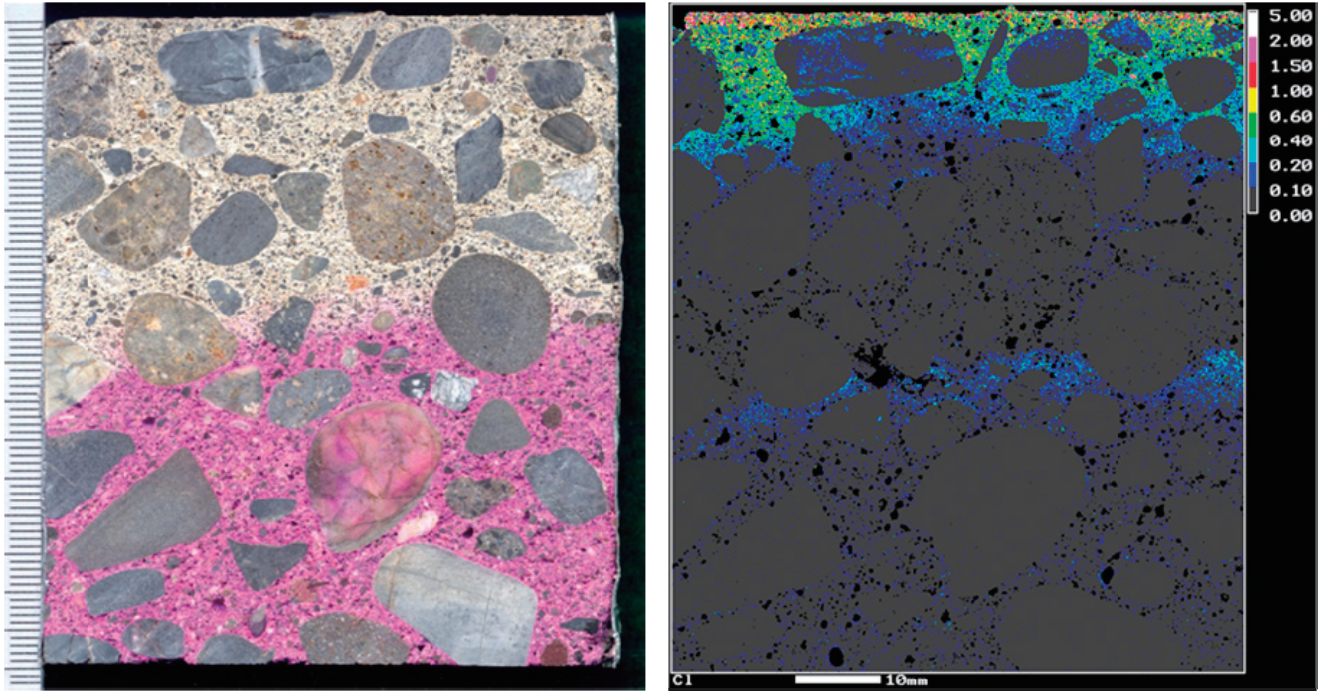
#### (3) 暴露5年目

図-4.5～6に、暴露5年目の全塩化物イオン濃度分布を示す。図-4.5では、記号を変えて、残りの半割コアで測定した暴露終了後の変化を示す。図-4.6では、記号を変えて強固定塩化物イオン濃度分布をそれぞれ示す。また、図中の赤線は、各コアの実測中性化深さを示す。暴露3年目の塩化物イオン濃度分布では中性化の境界付近でピークが見られ、約 $4 \text{ kg/m}^3$ であったが、5年目では、中性化領域、非中性化領域ともに、コアA-3と補修コンクリートであったコアA-5を除くほとんどのコアで $10 \text{ kg/m}^3$ を超えていた。コアA-3は他の部位に比べると、塩化物イオン濃度が低い傾向にあった。本文に示していないコアも含めてA-3のように塩分浸透が比較的少ないコアが数本見られた。しかし、それらの位置はランダムであり、削孔位置によって大きく異なる理由は分かっていない。

暴露3年目の結果と同様に、非中性化領域だけで見ると、中性化の境界部を暴露表面と想定して、なお

フィック式で表わせる分布形状であり，中性化領域の分布は非中性化領域の分布に比べると勾配が緩やかであった．このことから，やはり非中性化領域に比べて中性化領域の塩化物イオンの浸透が速い傾向にあると考えられる．また，中性化したコンクリート中の塩化物イオン濃度分布は，非中性化領域に比べて単純なフィック式では表わされない形状の事例が多く見られた．

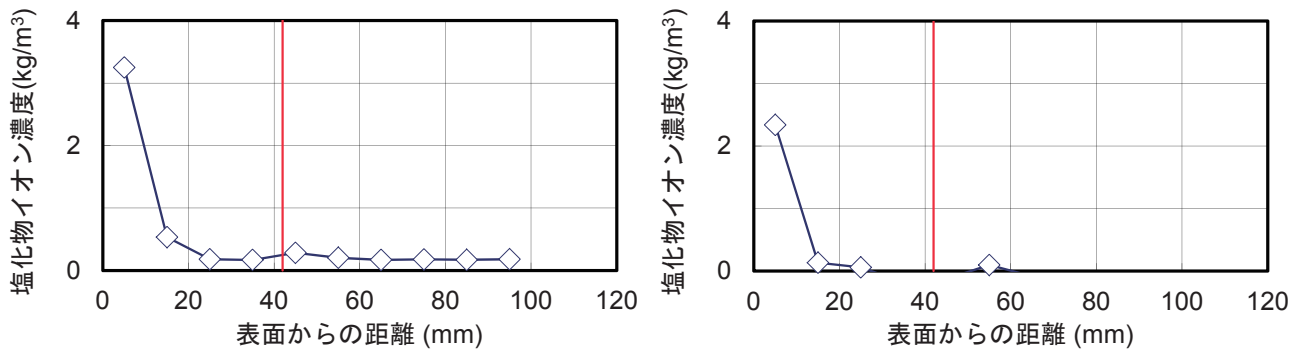




中性化深さ 42 mm

(左は研磨前の中性化深さ測定時の写真，上縁が暴露面)

図-4.1 暴露1年目，床版部のEPMAによる塩化物イオン面分析結果

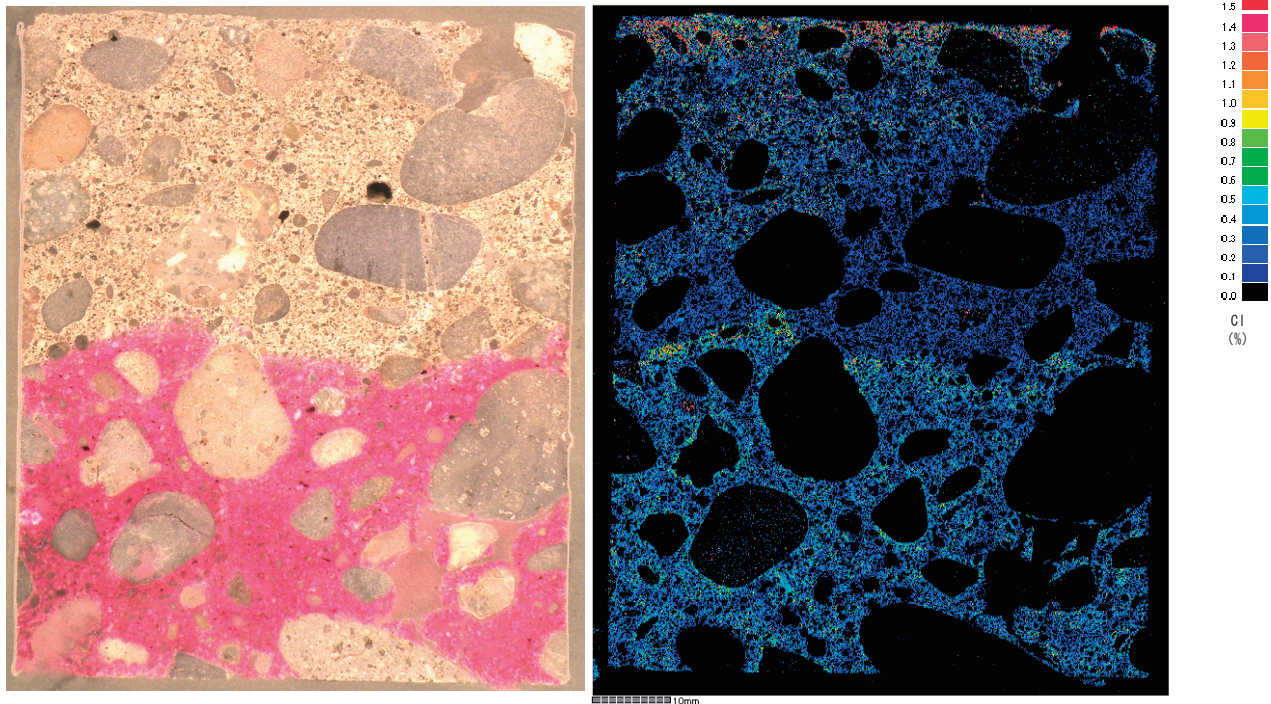


(a) 実測値

(b) 暴露前の測定値を除いた値

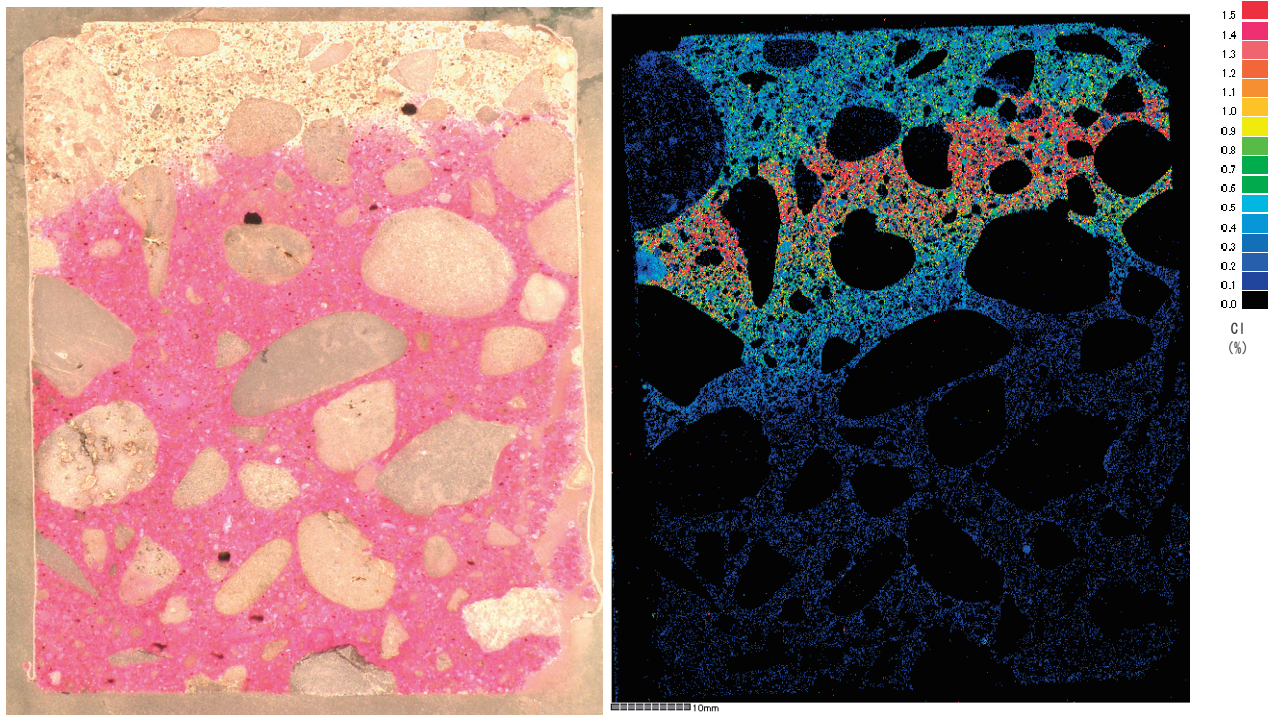
図-4.2 暴露1年目，床版部の塩化物イオン濃度分布（赤線は中性化深さ）





中性化深さ 40 mm

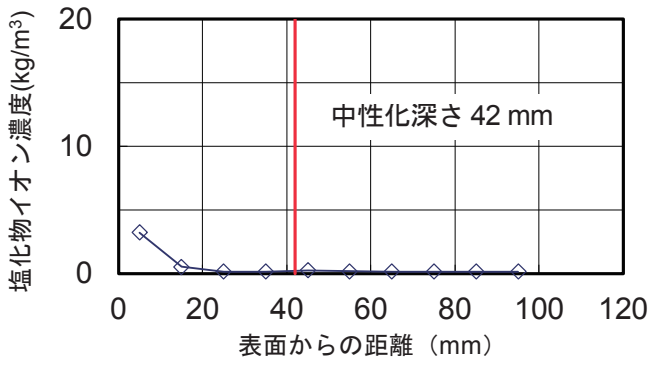
(a) 床版部 (A-1)



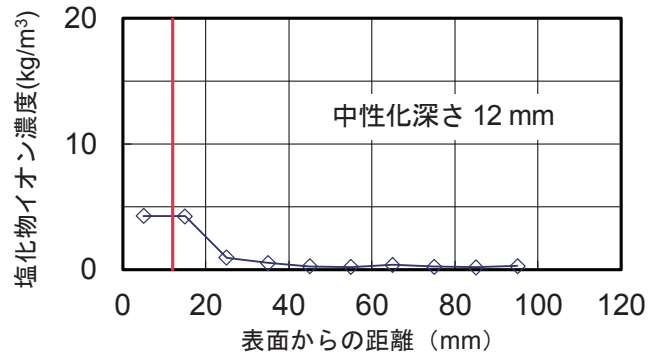
中性化深さ 13 mm

(b) 主桁上 (A-3)

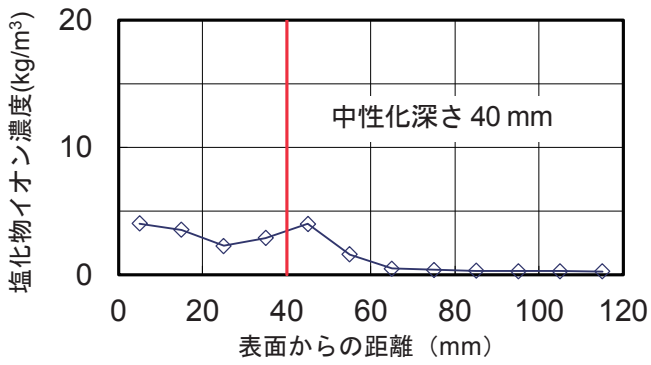
図4.3 暴露3年目のEPMAによる塩化物イオン面分析結果  
(それぞれ左は研磨前の中性化深さ測定時の写真, 上縁が暴露面)



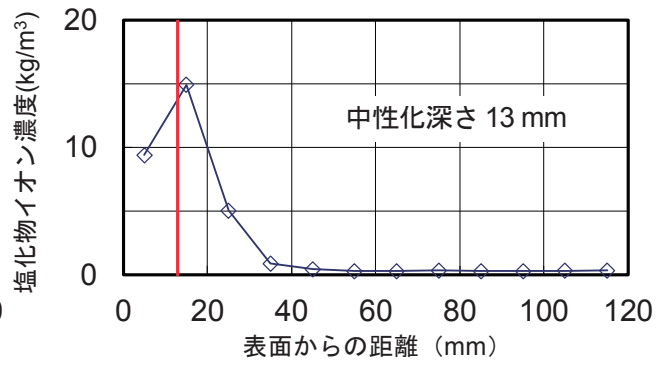
(a) 1年目, 床版部



(b) 1年目, 主桁上

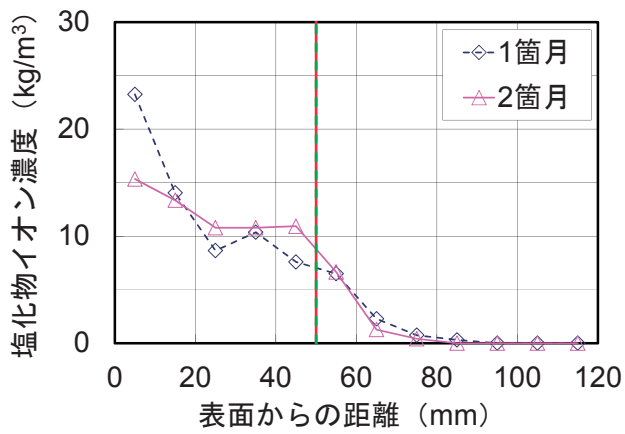


(c) 3年目, 床版部

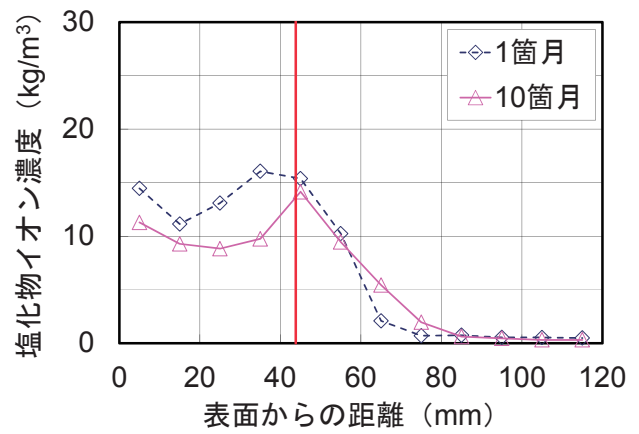


(d) 3年目, 主桁上

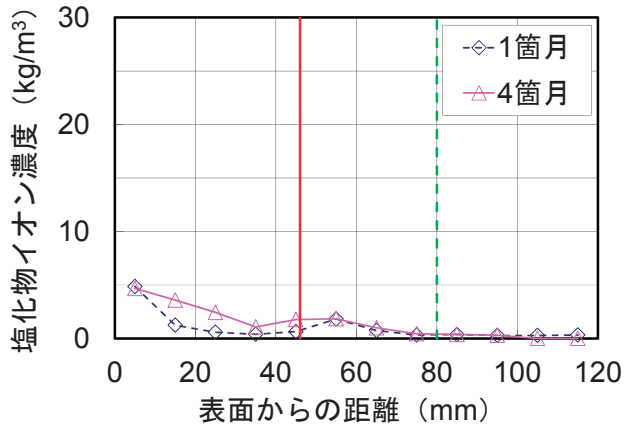
図-4.4 暴露1年目及び3年目の暴露供試体の塩化物イオン濃度分布 (赤線は中性化深さ)



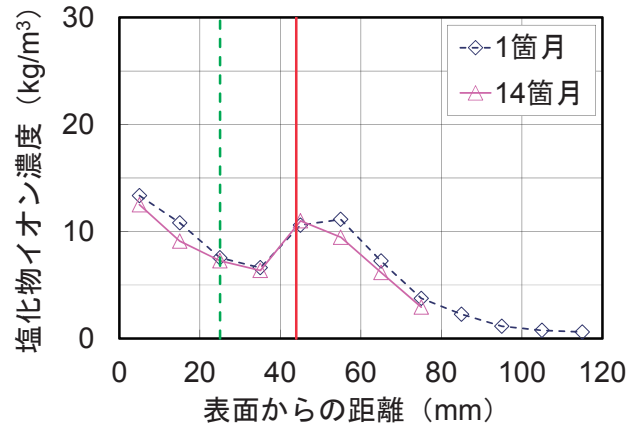
(a) コア A-2, 暴露終了後 1 及び 2 箇月



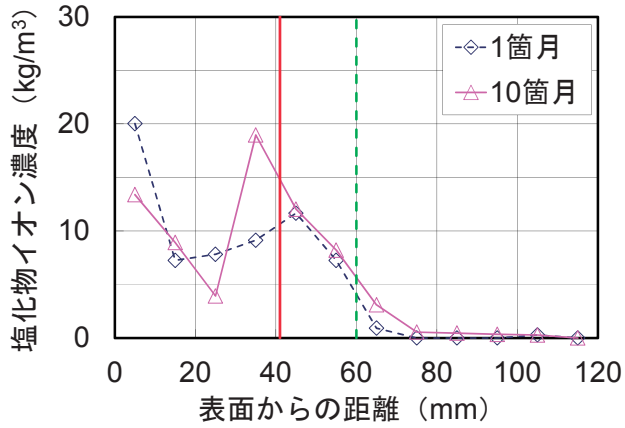
(d) コア No.3, 暴露終了後 1 及び 10 箇月



(b) コア A-3, 暴露終了後 1 及び 4 箇月

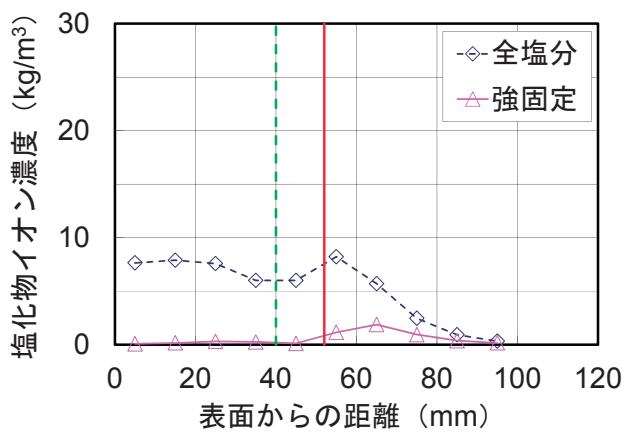


(e) コア No.1, 暴露終了後 1 及び 14 箇月

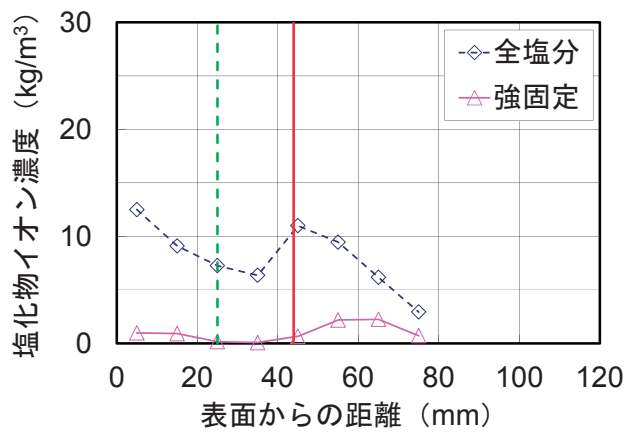


(c) コア A-4, 暴露終了後 1 及び 10 箇月

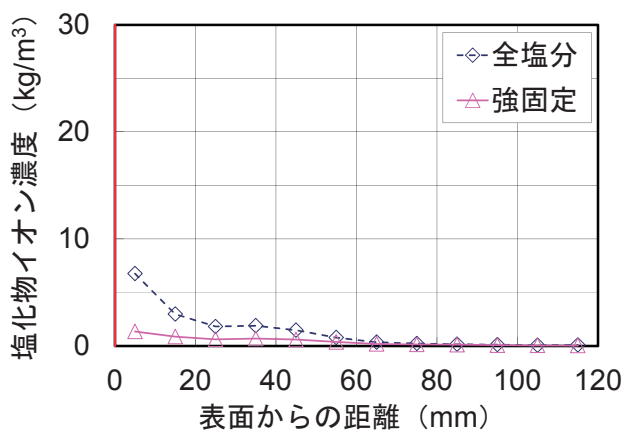
図4.5 暴露終了後の塩化物イオン濃度分布の変化  
(いずれも全塩分, 赤線は中性化深さ, 緑破線はひび割れ位置)



(a) コア A-1, 暴露終了後 10 箇月



(c) コア No. 1, 暴露終了後 14 箇月



(b) コア A-5, 暴露終了後 10 箇月 (補修コンクリート)

図4.6 暴露5年目, 全塩化物イオン濃度及び強固定塩化物イオン濃度の測定結果  
(赤線は中性化深さ, 緑破線はひび割れ位置)



## 4.2 暴露終了後の塩化物イオン濃度分布の変化

図-4.5 には、暴露 5 年目の全塩化物イオン濃度分布とともに、暴露終了から数箇月間で見られた濃度分布の変化を示した。暴露終了後の中性化領域の分布は、非中性化領域に比べて分布の変化が大きい傾向が見られたが、既往の青山らの調査結果<sup>6)</sup>に比べると変化が軽微であった。青山らの調査結果<sup>6)</sup>では、表面を塗装せずに自然暴露させた場合に、ごく短期間で、かつ中性化領域の塩化物イオン濃度がほとんど 0 に近づくほどに、中性化領域の塩化物イオンが非中性化領域に移動する傾向が見られた。青山らの調査では、道路橋 RC 床版から採取した中性化したコンクリートコアを用いて塩水噴霧試験を行い、塩化物イオンを浸透させた後、屋外で降雨のある環境で自然暴露させたことから、暴露初期の飽水度が比較的高く、降雨や周囲の湿度に応じて、コンクリート中の塩化物イオンが比較的移動しやすい環境にあったと考えられる。一方、図-4.5 に示したコアにおいて、暴露終了後の塩化物イオンの移動が比較的緩慢であったのは、飽水度が比較的低く、また自然暴露のような水分が移動しやすい環境に置かれていなかったことが要因として挙げられる。

## 4.3 中性化したコンクリートにおける強固定塩化物イオン濃度分布と F 塩の分布

表-4.1 に、コンクリートの深さ方向の変化として、前掲表-3.2 に示した空隙率、全細孔比表面積及び  $\text{CaCO}_3$  含有率（暴露前に測定）に加えて、深さ方向の F 塩の測定結果とそれに関連する分析結果を示す。ここで示す F 塩の割合は、セメントペーストに対する割合を想定しているが、厳密な重液分離処理はできなかったため、F 塩の分布の傾向を見るための概略の割合として示す。F 塩は、非中性化領域で検出されたが、中性化領域では検出されなかった。また、中性化深さ付近の深さ 40～50 mm における  $\text{CaCO}_3$  含有率、空隙率、全細孔比表面積及び F 塩は、いずれも中性化領域と非中性化領域の各値の中間にあり、非中性化領域の値に、より近い傾向が見られた。

前掲の図-4.6 には、暴露 5 年目の全塩化物イオン濃度分布とともに、強固定塩化物イオン濃度の分布を示した。コア A-1 及び No.1 では、強固定塩化物イオン濃度が非中性化領域で認められたが、中性化領域ではわずかであった。図-4.7 に、暴露終了後 14 箇月目のコア No.1 の強固定塩化物イオン濃度分布と F 塩の割合の分布を示す。浮きが見られた位置よりも深い約 20 mm 以深では、中性化領域、非中性化領域ともに、両分布の傾向が概ね一致した。前述のとおり、非中性化領域に比べて、中性化領域における塩化物イオンの移動が速い傾向が見られ、また、中性化領域の強固定塩化物イオン濃度や F 塩の割合が小さかった。これらの結果は、中性化により塩分固定が弱くなると、塩分浸透の抑制が不利になること<sup>24)</sup>を間接的に裏付けるものと考えられる。

表-4.1 コンクリートの深さ方向の変化

床版下面からの深さ(mm)	中性化の有無	空隙率 <sup>1)</sup> (%)	全細孔比表面積 <sup>1)</sup> (mm <sup>2</sup> /g)	CaCO <sub>3</sub> 含有率 <sup>1)</sup> (%)	重液分離処理後の浮遊物割合 a (%)	浮遊物に含まれるF塩の割合 b (%)	不溶残分(微量骨材の割合) c (%)	F塩の割合 <sup>2)</sup> a×b/(1-c) (%)
0~10	あり	25.3	8.7	37.2	18	0	41	0
10~20	あり	—	—	—	4.0	0	35	0
20~30	あり	25.1	7.6	37.8	16	0	35	0
30~40	あり	—	—	—	3.9	0	36	0
40~50	一部あり	26.0	33.9	8.2	32	6.1	27	1.1
50~60	なし	—	—	—	65	10	17	3.0
60~70	なし	26.3	37.4	3.9	68	5.5	18	1.8
70~80	なし	—	—	—	70	2.8	19	1.1

注 1) 空隙率, 全細孔比表面積, CaCO<sub>3</sub>含有率は表-3.2の再掲.

2) F塩は, セメントペーストに対する割合を想定している. ただし, 厳密な重液分離処理は行っていないので, ここでは概略の割合として示す.

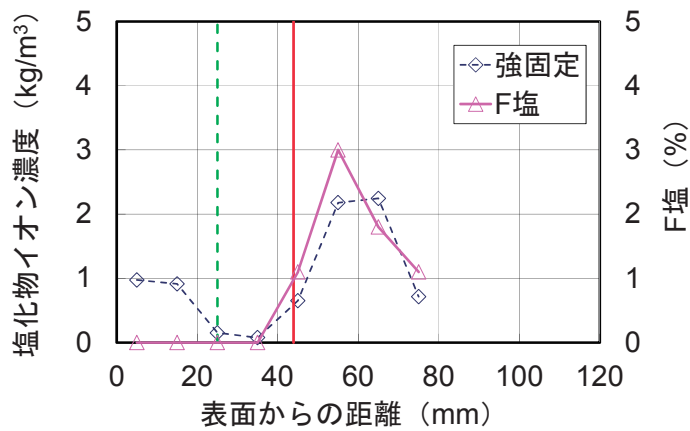


図-4.7 強固定塩化物イオン濃度分布とF塩含有量分布の測定結果

(コア No.1, 暴露終了後 14 箇月)

(赤線は中性化深さ, 緑破線はひび割れ位置)

#### 4.4 暴露中に生じた腐食によるひび割れの影響

暴露中の鉄筋腐食による浮きにより、多くのコアは概ね水平のひび割れが見られた。ひび割れ発生時期は明確でないが、暴露3年目のコアでは見られなかったことから、暴露3～5年の間に浮きが発生したと考えられる。このひび割れによって、暴露中の塩分浸透を妨げ、その後の分布に影響を及ぼすこと、回収後はひび割れたコアもアルミテープで1本のコアのようにまとめて固定し、ひび割れ面を接触させて保管したが、ひび割れ以深の塩分の移動に影響を及ぼすことが想定される。このことから、No.3以外の暴露5年目の測定結果はその点について留意する必要がある。ただし、ひび割れがなかったNo.3の結果と比べて、他のコアの分布に、ひび割れの影響があるような顕著に異なる性状は見られなかったことから、暴露終了に比較的近い時期に浮きが生じ始めたと推察される。

#### 4.5 ひび割れ部の塩分浸透

既往の文献<sup>25), 26)</sup>では、日本海沿岸部に建設された道路橋のコンクリートのひび割れ部から採取したコア 15 本の EPMA 分析を行った結果、調査対象とした構造物の塩分環境で、いずれもコンクリート中（ひび割れのない一般部）に塩化物イオンが拡散浸透していたが、ひび割れ部における塩化物イオン濃度は一般部よりも少ない事例があることが報告された。これらは、コンクリートの水セメント比やひび割れの発生原因・発生時期に関係なく見られ、ひび割れ幅やひび割れ深さとの明確な関係は見られなかった。ひび割れ部で塩化物イオンが顕著に減少していた範囲は、中性化領域と概ね一致することから、ひび割れ部の塩化物イオン濃度の減少が中性化と何らかの関係があるとしている。

暴露試験の 3 年目に、鉄筋に沿ったひび割れを有するコンクリート断面の EPMA 分析を行った（コア B-1、図-2.6(a)に採取位置を示す）。図-4.8 に、研磨前に測定したフェノールによる中性化範囲と、EPMA による塩化物イオンの分布を示す。中性化の境界の内側には、これまでも見られたように、塩化物イオンの濃縮が見られた。幅 80mm の範囲での結果であるが、図の中心付近にあるひび割れ部の中性化深さが深い分だけ、塩化物イオンもより深い位置に濃縮する傾向が見られた（図中の A の位置）。また、塩化物イオンは、中性化領域であっても、ひび割れの周囲に濃縮が見られ、ひび割れに沿って海水が浸入した可能性があると考えられる。コア採取の約 2 週間前に台風（宮古島の気象データで北風が卓越した台風 15 号、2012 年 8 月 26 日）が接近していたことから、その際、一時的に暴露面に波しぶきまたは海水がかかる状況にあった可能性がある。図-4.9 に、図-4.8(b)に示した深さ a-a 及び b-b における水平方向の塩化物イオンの分布を示す。深さ a-a の図は、中性化領域の水平方向の分布であり、ひび割れ付近に強い濃縮があったことが、この図からも確認できる。一方、深さ b-b の図は、中性化の境界よりも深い非中性化領域の水平方向の塩化物イオンの分布を示す。前述のとおり、測定した 80mm×80mm の範囲全体に見ると、ひび割れ付近で塩化物イオンがより深い位置に濃縮する傾向が見られたが（図中 A）、ひび割れ直近では、むしろ塩化物イオンが少ない傾向が見られた（図中 B）。

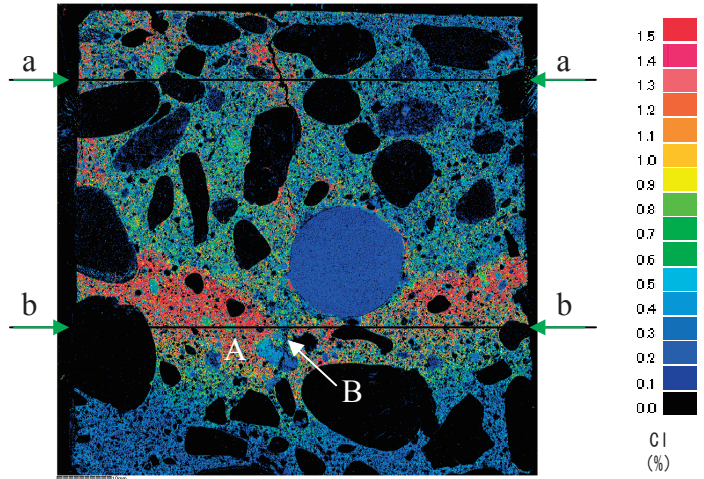
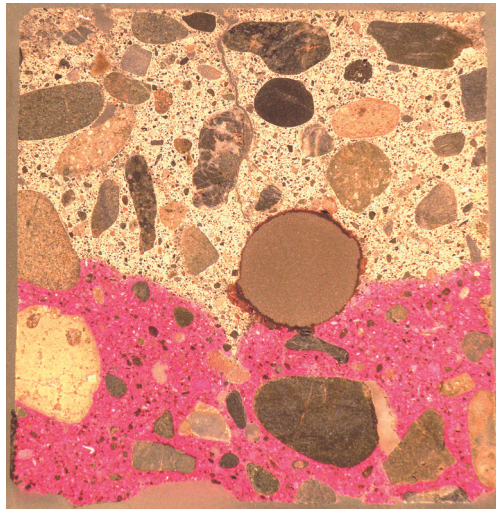
既往の結果を含めて、ひび割れ部の塩化物イオンの浸透と減少についてまとめると次のとおりである。

- (a) 中性化領域であっても、ひび割れに沿って塩化物イオンが浸入する。
- (b) ひび割れ付近で中性化の範囲が深くなるに従って、塩化物イオンの濃縮もより深い位置に移動する。
- (c) 中性化の境界付近で塩化物イオンが濃縮しても、ひび割れ直近で中性化している範囲には、塩化物イオンの濃縮が見られなかった。
- (d) 非中性化領域のひび割れの先端に塩化物イオンが濃縮することはなかった。

ひび割れからの移流により浸透した塩化物イオンも、中性化の境界付近の非中性化領域（B より深い位置ではなく、A の付近、あるいはひび割れ先端）で固定、吸着されることが想定されたが、A 付近やひび割れ先端での塩化物イオンの明確な濃縮は認められなかった。

なお、鉄筋の塩化物イオン濃度が粗骨材位置よりもやや大きいのは、切断後に鋼材表面に塩化物イオンが吸着したものと推察される。鉄分を含む骨材も同様のことが起こり得ると考えられ、測定結果を見る時に注意する必要がある。



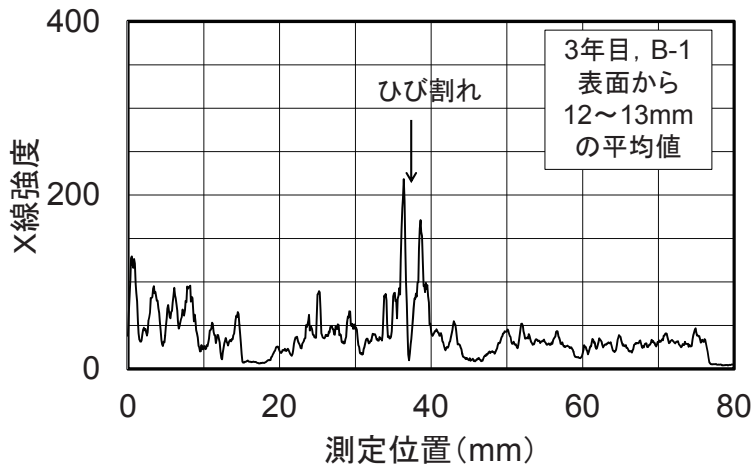


(注) 上辺が暴露面, 80mm×80mm

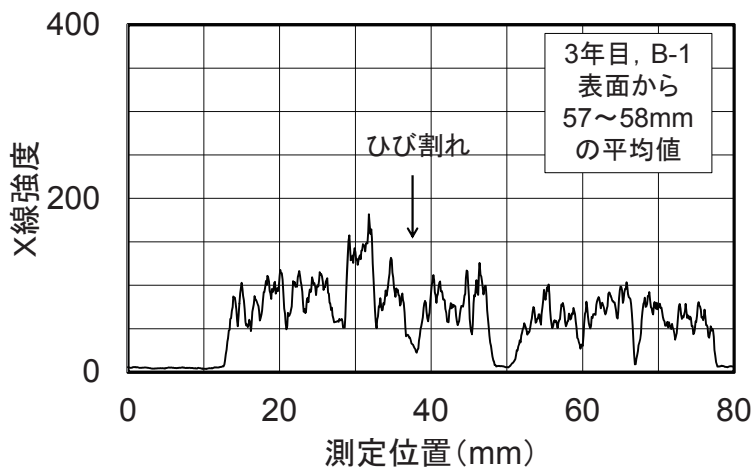
(a) 研磨前のフェノールによる中性化の範囲

(b) 塩化物イオン濃度分布

図-4.8 EPMA 面分析結果 (暴露3年目のコア B-1)



(a) 表面から深さ 12~13mm における水平方向分布 (a-a 断面)



$$\text{塩化物イオン含有量(\%)} = 0.0115 \times (\text{X線強度}) - 0.09$$

(b) 表面から深さ 57~58mm における水平方向分布 (b-b 断面)

図-4.9 EPMA による塩化物イオンの X 線強度分布 (図-4.8(b)に示す断面, 水平方向は 5 点平均で示す)

## 5. 塩水浸漬試験の結果

図-5.1～3に、1年間の塩水浸漬試験におけるコア供試体の塩化物イオン濃度分布を示す。表面切断の有無、中性化の有無に関係なく、事前吸水せずに乾燥したまま浸漬すると、事前吸水の場合に比べて深い部分での値が大きく、より深部まで塩化物イオンが浸透する傾向が見られた。事前吸水した場合であっても、塩化物イオンの浸透が比較的短期間により深くまで達していた。事前吸水を行った場合、深さ10mmの位置で切断したときの結果は、塩水に浸す面が床版下面そのまま（型枠面）の場合と比べて、塩化物イオンの浸透が顕著に速くなる傾向が認められなかった。

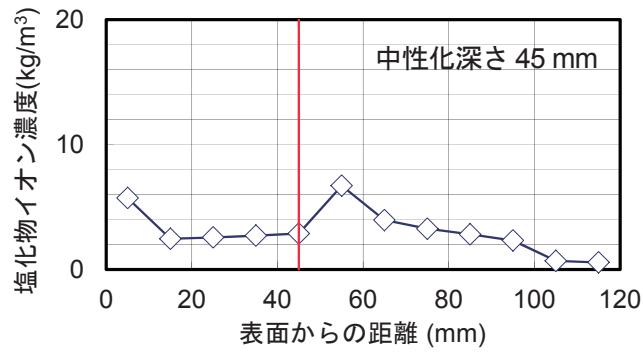
暴露試験の結果と同様に、a) 非中性化領域の塩化物イオン濃度が増加しており、厚い中性化領域であっても塩化物イオンが通過して非中性化領域に移動すること、b) 中性化した後に浸透した塩化物イオンであっても、中性化の境界における非中性化領域側で塩化物イオンが濃縮すること、すなわち中性化したコンクリートでは、中性化していない場合に比べて深い位置で塩化物イオンの濃縮が見られること、c) 中性化領域の塩化物イオン濃度は中性化の境界付近のピーク値ほどではないものの比較的高く、かつ深さ方向の変化が非中性化領域に比べて緩慢であることが確認された。

図-5.4に、試験開始時における乾燥状態の影響を見るため、事前吸水なしのデータから事前吸水ありのデータを差し引いた値を示す。参考として、3箇月目に測定したデータも示す。床版下面は乾燥していることが想定されたことから、イオン交換水に30日間にわたり浸漬して事前吸水した。このことにより、いずれのコアにおいても、事前吸水をしていない場合に比べて、塩化物イオン濃度が少ない部分が見られた。また、中性化していたコアでは、事前吸水により塩化物イオンが相対的に少ない範囲が、中性化深さより以深で見られた。

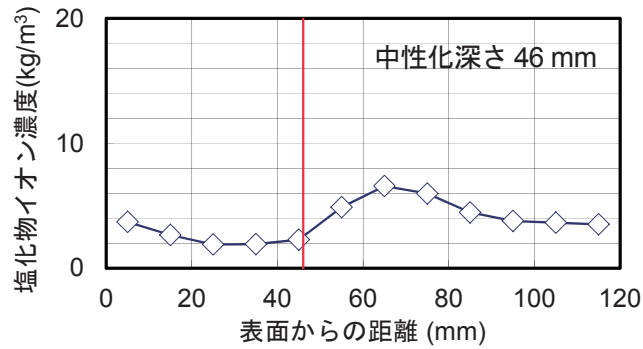
中性化が生じていたコアは、事前吸水の有無による塩化物イオン濃度の差が概ね $3\sim 4\text{ kg/m}^3$ で頭打ちになる傾向が見られたが、中性化なしのコアに比べると $2\text{ kg/m}^3$ 程度大きかった。中性化していたコアは、概ね中性化深さの範囲で著しく乾燥していたことから、事前吸水せずに塩水に浸漬した際に塩水が急速に流入したと考えられる。この傾向は、表層を10mm切断したコアでも概ね同様に見られた。また、中性化していたコアの3箇月目の結果では、中性化領域にも事前吸水による濃度差が見られたが、1年後は中性化領域における濃度差がほとんど解消されていた。1年目の結果だけで見ると、中性化領域は、事前吸水の影響が一見ほとんどないように見えるが、より深い位置の濃度差が時間の経過とともに増加していることから、乾燥していたことによって中性化領域に流入した塩化物イオンは、比較的早期に非中性化領域に移動した可能性があると考えられる。

暴露試験では、事前吸水していないが、塩水浸漬で見られたような、奥深くまで塩化物イオンが浸透する傾向は見られなかった。暴露供試体は、台風時に波しぶきを直接受ける場合もあり得る環境に設置されていたが、暴露供試体が著しく浸水する機会は少なかったと考えられる。塩水浸漬試験の事前吸水のないコアでは、表面張力による細孔溶液の移流を伴って、塩化物イオンがより深い位置まで浸透したと考えられる。しかし、暴露試験では、図-3.5に示したとおり、暴露前（屋内保管供試体）に比べてコンクリート中の水分が

全体に高くなっていたにもかかわらず，塩化物イオンは内部まで浸透していなかった．このことから，暴露試験では，海水の直接的な吸水によって水分が増加したのではなく，主として，大気中の湿度に応じてコンクリート内部の水分が蒸気拡散により増加したものと考えられる．

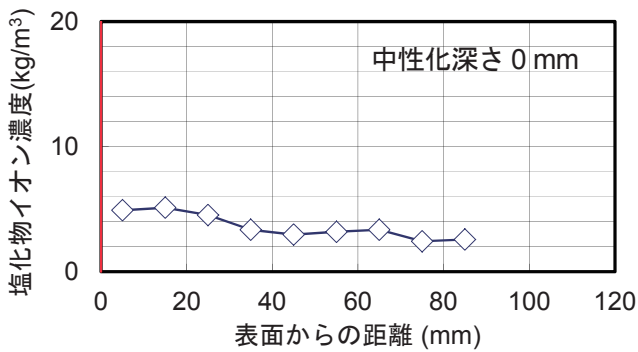


(a) 事前吸水あり，切断なし

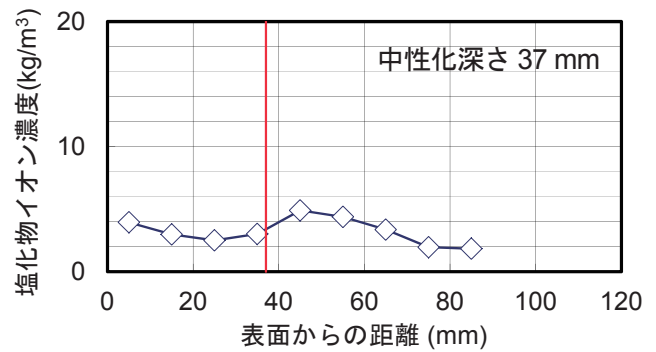


(b) 事前吸水なし，切断なし

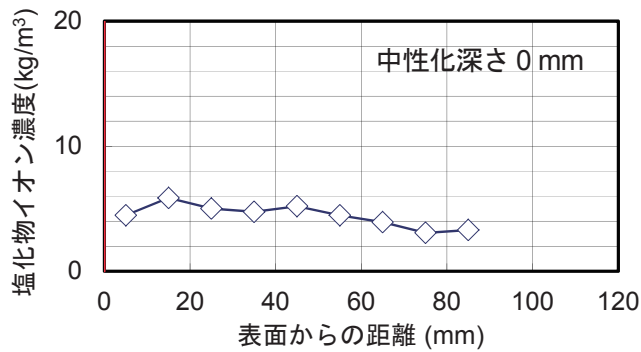
図-5.1 塩水浸漬試験の塩化物イオン濃度分布  
(切断せず，そのまま浸漬したコア供試体)



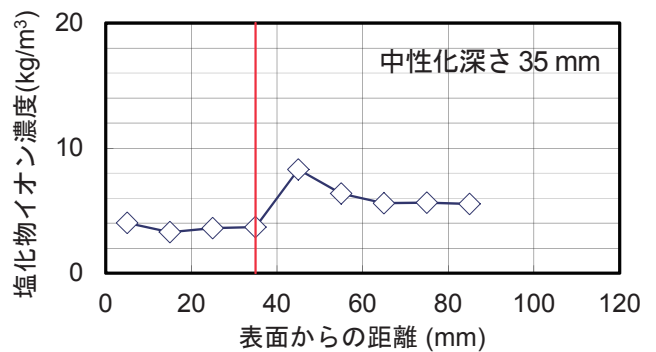
(a) 事前吸水あり，100 mm 切断



(a) 事前吸水あり，10 mm 切断



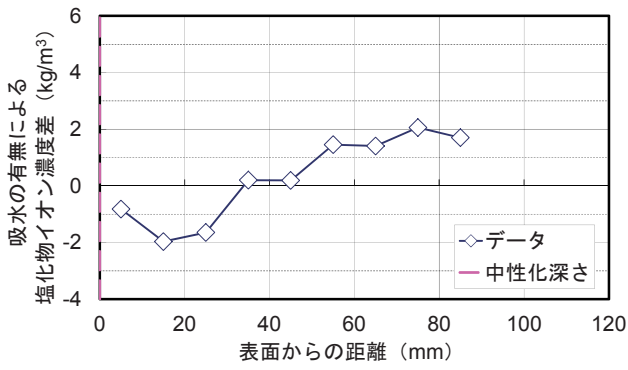
(b) 事前吸水なし，100 mm 切断



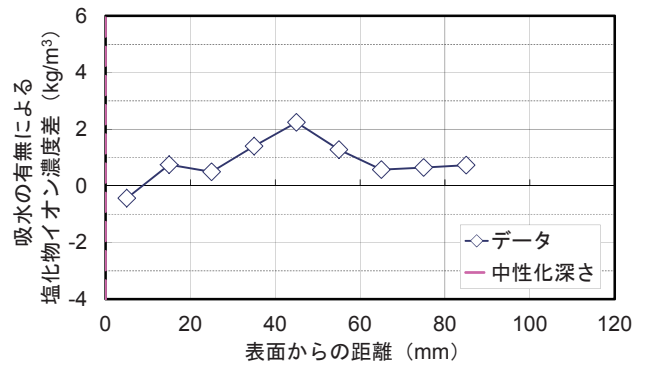
(b) 事前吸水なし，10 mm 切断

図-5.2 塩水浸漬試験の塩化物イオン濃度分布  
(深さ 100 mm で切断，中性化のないコア供試体)

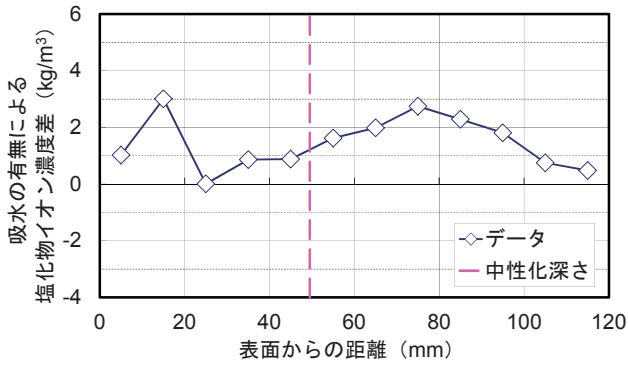
図-5.3 塩水浸漬試験の塩化物イオン濃度分布  
(深さ 10 mm で切断したコア供試体)



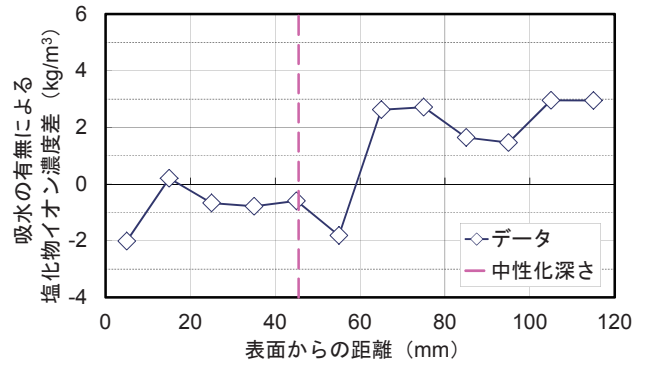
(a) 3箇月, 中性化なし



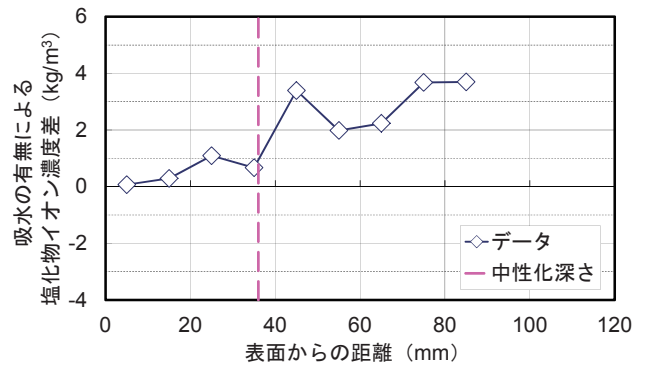
(c) 1年, 中性化なし



(b) 3箇月, 中性化あり



(d) 1年, 中性化あり



(e) 1年, 中性化あり, 表面切断

図-5.4 試験開始時における乾燥状態の影響

(事前吸水なしのデータから事前吸水ありのデータを差し引いた値)

## 6. まとめ

既設橋から撤去された、中性化深さ約 45 mm のコンクリート床版を用いて、沖縄沿岸部で 5 年間の暴露試験及び 1 年間の塩水浸漬試験を行った。また、暴露終了後の塩化物イオン濃度分布の変化を調査した。それらの試験から、次の結果が得られた。

- (1) 暴露試験、塩水浸漬試験ともに、45 mm の厚い中性化領域であっても、外部からコンクリート中に浸入した塩化物イオンが非中性化領域に向かって移動して、中性化境界付近（多くはその非中性化領域側）で濃縮し、さらに深い方へ拡散することを確認した。その濃縮は、中性化領域と非中性化領域の拡散係数の顕著な違いによるものか、あるいは何らかの現象で中性化領域を通過した塩化物イオンが非中性化領域でなお拡散現象に支配されることによるものかのいずれかであると推察される。
- (2) 暴露 5 年目では、3 年目までの結果に比べて多量の塩化物イオンがコンクリート中に浸透していた。暴露 3 年目、5 年目ともに中性化領域の塩化物イオン濃度の分布は、非中性化領域に比べてなだらかであった。
- (3) 中性化領域の強固定塩化物イオン濃度や F 塩の割合が、非中性化領域に比べて非常に小さかった。これらの結果と上記(1)の結果は、中性化による塩分の固定化が弱くなると、塩分浸透の抑制が不利になることを間接的に裏付けるものと考えられる。
- (4) 暴露試験後、コアを採取して、採取直後と数箇月後の塩化物イオン濃度を比較した結果、塩化物イオン濃度の分布に変化が見られ、中性化領域の塩化物イオン濃度分布は、非中性化領域に比べて変化が大きい傾向が見られた。ただし、既往の研究結果<sup>6)</sup>（塩水噴霧試験後の自然暴露）に比べると、屋外暴露試験直後のコアの飽水度が低かったと考えられ、かつ暴露後、比較的乾燥した環境に保管したことから、塩化物イオンの移動の程度が軽微であった。
- (5) 塩水浸漬試験では、床版供試体下面の表層が著しく乾燥していたことから、暴露試験の場合に比べて、塩化物イオンの浸透が早期により深い位置に及んでいた。塩水浸漬の前にイオン交換水に 1 箇月間、浸漬した場合（事前吸水あり）には、事前吸水なしの場合に比べて、塩化物イオンの浸透が抑制された。これらの点と、屋外暴露試験では事前吸水を行っていないにもかかわらず、塩化物イオンの浸透が深部に及んでいなかったことから、屋外暴露試験の暴露供試体は、暴露期間中に海水に著しく浸水するような機会は少なかったと考えられる。



## 謝辞等

本暴露試験は、「沖縄県離島架橋 100 年耐久性検証プロジェクト」の下、沖縄県及び公益財団法人沖縄県建設技術センターの協力を得て実施した。特に、建設現場内での暴露場所の確保、供試体移動等については、沖縄県土木建築部宮古土木事務所、伊良部大橋建設現場事務所の宜保勝氏、仲嶺智氏、渡久山直樹氏をはじめ、同事務所の方々にご協力をいただいた。これらのご協力の下で、5 年間にわたる屋外での大型供試体を用いた暴露試験を円滑に進めることができた。部材を提供していただいた道路管理者の方々も含め、暴露試験にご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

なお、本文では、既報<sup>27)</sup>の屋外暴露試験の3年目までの結果及び塩水浸漬試験の結果を含めて、とりまとめた。また巻末に、本検討で得られた測定データの一覧を添付した。

## 参考文献

- 1) Verbeck, G. : Carbonation of hydrated portland cement, *Cement and Concrete*, ASTM STP 205, pp.17-36, 1958.
- 2) Claisse, P. A., El-Sayad, H. I. and Shaaban, I. G. : Permeability and pore volume of carbonated concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 96, No. 3, pp. 378-381, 1999.
- 3) Puatatsananon, W. and Saouma, V. E. : Nonlinear coupling of carbonation and chloride diffusion in concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 264-275, 2005.
- 4) Yoon, I-S. : Simple approach for computing chloride diffusivity of (non)carbonated concrete, *Key Engineering Materials*, Vols. 385-387, pp. 281-284, 2008.
- 5) Delnavaz, A. and Ramezani-pour, A. A. : The assessment of carbonation effect on chloride diffusion in concrete based on artificial neural network model, *Magazine of Concrete Research*, Vol. 64, No. 10, pp. 877-884, 2012.
- 6) 青山實伸, 石川裕一, 武内道雄, 川村満紀 : 中性化の進行した実道路構造物の塩化物イオン浸透特性, *コンクリート工学年次論文集*, Vol. 33, No. 1, pp. 809-814, 2011.
- 7) Jin, M., Gao, S., Jiang, L., Chu, H., Lu, M. and Zhi, F. : Degradation of concrete with addition of mineral admixture due to free chloride ion penetration under the effect of carbonation, *Corrosion Science*, Vol. 138, pp. 42-53, 2018.
- 8) Dhir, R. K., Jones, M. R. and McCarthy, M. J. : PFA Concrete: Chloride ingress and corrosion in carbonated cover, *Proc. of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, Vol. 99, No. 2, pp. 167-172, 1993.
- 9) Wierig, H. J. and Langkamp, H. : The penetration of chlorides in uncarbonated and carbonated concrete, *ZKG International : Zement-Kalk-Gips*, Vol. 48, pp. 184-192, 1995.
- 10) Ngala, V. T. and Page, C. L. : Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 7, pp. 995-1007, 1997.
- 11) Yoon, I-S. : Deterioration of concrete due to combined reaction of carbonation and chloride penetration: experimental study, *Key Engineering Materials*, Vols. 348-349, pp. 729-732, 2007.
- 12) Lee, M-K., Jung, S-H. and Oh, B-H. : Effects of carbonation on chloride penetration in concrete, *ACI Materials Journal*, Vol. 110, No. 5, pp. 559-566, 2013.
- 13) Kuosa, H., Ferreira, R. M., Holt, E., Leivo, M. and Vesikari, E. : Effect of coupled deterioration by freeze-thaw, carbonation and chlorides on concrete service life, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 47, pp. 32-40, 2014.
- 14) Wang, Y., Nanukuttan, S., Bai, Y. and Basheer, P. A. M. : Influence of combined carbonation and chloride ingress regimes on rate of ingress and redistribution of chlorides in concretes, *Construction and Building Materials*, Vol. 140, pp. 173-183, 2017.
- 15) Liu, J., Qiu, Q., Chen, X., Xing, F., Han, N., He, Y. and Ma, Y. : Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol. 95, pp. 217-225, 2017.
- 16) Malheiro, R., Camões, A. and Meira, G. : Behaviour of Concrete Under Severe Environment - Effect of

Carbonation on the Chloride Diffusion Coefficient from Non-Steady-State Migration Test, *Romanian Journal of Materials*, Vol. 48, No. 1, pp. 64-69, 2018.

- 17) Li, K., Zhang, Y., Wang, S., and Zeng, J. : Impact of carbonation on the chloride diffusivity in concrete: experiment, analysis and application, *Materials and Structures*, Vol. 51, No. 164, 2018.
- 18) 藤原忠司, 佐藤嘉一郎, 小西俊之 : 乾湿に伴うコンクリート内部での水分移動について, セメント技術年報, Vol. 42, pp. 427-430, 1988.
- 19) 鈴木一孝, 西川直宏, 山出善章, 谷口幾哉 : コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol. 1, No. 2, pp. 39-49, 1990.
- 20) コンクリート専門委員会報告 F-18, 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告, セメント協会, 1967.9.
- 21) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長瀧重義 : コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, No. 414, pp. 99-108, 1990.
- 22) Ashraf, W. : Carbonation of cement-based materials: Challenges and opportunities, *Construction and Building Materials*, No. 120, pp. 558-570, 2016.
- 23) Bear, J. : *Dynamics of Fluids in Porous Media*, Elsevier, New York, 1972.
- 24) 佐伯竜彦, 植木聡, 嶋毅 : 塩害と中性化の複合による塩化物イオンの浸透予測モデルの構築, 土木学会論文集, No. 697, pp. 131-142, 2002.2.
- 25) 河野広隆, 渡辺博志, 田中良樹 : コンクリートのひび割れ部における塩分浸透, 土木研究所資料, 第 3950 号, 2004.11.
- 26) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志 : 実構造物コンクリートのひび割れ部における塩分浸透, 土木学会論文集 E, Vol. 62, pp. 38-51, 2006.
- 27) 田中良樹, 木村嘉富, 村越潤, 本間英貴 : コンクリートの中性化領域における塩分浸透に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 1, pp. 1006-1011, 2014.



## 付録 データ集

付表-1.1.1 コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果（屋外暴露試験，コア採取直後）（単位：kg/m<sup>3</sup>）

深さ (mm)	暴露1年目			暴露3年目			暴露5年目						
	初期値	A-1	A-3	A-1	A-3	A-2	A-3	A-4	No.1	A-1	A-1*	A-5	A-5*
0-10	0.91	3.25	4.27	4.04	9.41	23.25	4.85	20.03	13.35	7.64	7.57	6.76	5.41
10-20	0.40	0.53	4.26	3.53	14.93	14.05	1.24	7.25	11.14	7.89	7.73	2.97	2.09
20-30	0.12	0.18	0.96	2.27	5.06	8.65	0.58	7.82	13.09	7.54	7.27	1.82	1.2
30-40	0.35	0.17	0.53	2.89	0.89	10.37	0.39	9.13	16.06	6.61	5.75	1.89	1.2
40-50	0.41	0.28	0.27	4.01	0.46	7.59	0.64	11.66	15.38	10.59	5.89	1.47	0.87
50-60	0.11	0.20	0.22	1.61	0.31	6.49	1.82	7.25	10.24	11.12	7.06	0.78	0.41
60-70	0.25	0.17	0.41	0.51	0.29	2.28	0.74	0.92	2.09	7.24	3.82	0.35	0.16
70-80	0.23	0.18	0.25	0.40	0.35	0.74	0.32	0.21	0.69	3.75	2.46	0.23	0.09
80-90	0.28	0.17	0.19	0.32	0.29	0.30	0.37	0.23	0.74	2.26	0.92	0.55	0.05
90-100	0.26	0.18	0.29	0.31	0.31	0.21	0.28	0.23	0.54	1.14	0.32	0.16	0.05
100-110	-	-	-	0.30	0.33	0.28	0.28	0.28	0.53	0.75	0.07	0.07	0.02
110-120	-	-	-	0.28	0.34	0.37	0.32	0.25	0.49	0.60	0.16	0.07	0.05
中性化深さ (mm)	45	42	12	40	13	50	46	41	44	52	52	0	0

注) \*印は可溶性塩分の測定結果を示す。

付表-1.2 コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果（屋外暴露試験，コア採取後の経時変化）（単位：kg/m<sup>3</sup>）

深さ (mm)	暴露5年目，床版部											
	A-2-2m 2箇月後	A-3-4m 4箇月後	A-4-10m 10箇月後	No.3-10m 10箇月後	No.1-14m 14箇月後	No.1-14m* 14箇月後						
0-10	15.34	4.67	13.40	11.28	12.50	11.52						
10-20	13.36	3.59	8.92	9.28	9.10	8.19						
20-30	10.79	2.44	3.92	8.84	7.26	7.11						
30-40	10.79	1.08	18.97	9.75	6.35	6.27						
40-50	10.93	1.77	12.04	14.15	10.99	10.34						
50-60	6.65	1.84	8.21	9.46	9.46	7.28						
60-70	1.27	0.99	3.10	5.43	6.17	3.93						
70-80	0.41	0.44	0.55	1.96	2.93	2.22						
80-90	0.25	0.37	0.46	0.62	-	-						
90-100	0.23	0.30	0.35	0.46	-	-						
100-110	0.25	0.21	0.27	0.31	-	-						
110-120	0.23	0.23	0.23	0.31	-	-						
中性化深さ (mm)	48	47	-	-	51	51						

注) \*印は可溶性塩分の測定結果を示す。



付表・1.3 コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定結果（塩水浸漬試験）（単位：kg/m<sup>3</sup>）

深さ (mm)	暴露前 初期値		浸漬3箇月					浸漬1年				
	1上 事前吸水	3 事前吸水	5上	7	2上 事前吸水	2下 事前吸水	4 事前吸水	6上	5下	8		
0-10	0.76	4.43	-	5.45	4.91	3.95	5.72	-	-	-		
10-20	0.26	2.13	3.87	5.14	5.12	2.98	2.46	4.48	4.02	3.71		
20-30	0.25	1.61	2.30	1.61	4.52	2.51	2.57	5.86	3.28	2.66		
30-40	0.27	1.83	2.81	2.70	3.35	3.01	2.71	5.02	3.60	1.90		
40-50	0.63	2.22	2.20	3.10	2.96	4.89	2.88	4.75	3.68	1.93		
50-60	0.48	4.00	2.37	5.62	3.19	4.38	6.70	5.20	8.29	2.29		
60-70	0.26	3.57	2.16	5.56	3.35	3.36	3.95	4.47	6.36	4.89		
70-80	0.30	1.97	2.54	4.72	2.43	1.96	3.26	3.93	5.60	6.58		
80-90	0.25	0.90	2.85	3.19	2.57	1.84	3.07	3.07	5.64	5.98		
90-100	0.28	0.92	-	2.73	-	-	2.32	-	-	4.46		
100-110	-	0.78	-	1.53	-	-	0.69	-	-	3.78		
110-120	-	0.78	-	1.26	-	-	0.56	-	-	3.64		
中性化深さ (mm)	46	48	0	51	0	37	45	0	35	46		

付表-2.1 コンクリートの含水状態の測定結果（暴露3年目，床版部）

床板下面からの距離(mm)	割裂直後質量 (g)	絶対質量 (g)	真空飽水後質量 (g)		含水率 (%)		飽水後表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽水度 (%)	空隙率 (%)
			水中質量	表乾質量	割裂直後	表乾状態			
0~30	100.75	96.62	61.0	104.52	4.3	8.2	2.40	52.3	15.4
30~55	77.36	72.24	45.3	80.09	7.1	10.9	2.30	65.2	18.4
55~70	54.97	51.47	32.2	55.99	6.8	8.8	2.35	77.4	16.0
70~95	73.92	68.98	43.2	75.00	7.2	8.7	2.36	82.1	15.9
95~115	67.19	61.74	38.6	68.13	8.8	10.3	2.31	85.3	17.8
115~135	58.34	53.12	33.5	59.35	9.8	11.7	2.30	83.8	19.4
135~160	74.76	68.36	42.6	75.98	9.4	11.1	2.05	84.0	18.6
160~180	61.13	54.56	34.4	62.26	12.0	14.1	1.96	85.3	21.7
180~200	68.03	60.38	37.5	69.36	12.7	14.9	1.90	85.2	22.0
平均値	-	-	-	-	-	-	2.08	77.8	18.3

注) 絶対質量は168時間後の値を示す。

付表-2.2 コンクリートの含水状態の測定結果（暴露3年目，主桁上）

床板下面からの距離(mm)	割裂直後質量 (g)	絶対質量 (g)	真空飽水後質量 (g)		含水率 (%)		飽水後表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽水度 (%)	空隙率 (%)
			水中質量	表乾質量	割裂直後	表乾状態			
0~25	73.25	69.84	43.6	76.13	4.9	9.0	2.15	54.2	16.2
25~50	75.70	71.42	44.5	77.38	6.0	8.3	2.17	71.8	15.3
50~75	75.91	70.13	43.7	77.72	8.2	10.8	2.06	76.2	18.2
75~95	66.85	61.64	38.3	68.74	8.5	11.5	2.02	73.4	18.9
95~115	57.82	53.62	33.4	59.15	7.8	10.3	2.08	75.9	17.7
115~130	37.90	33.21	20.6	38.97	14.1	17.3	1.81	81.4	23.9
130~155	71.92	65.94	41.4	74.26	9.1	12.6	2.01	71.9	20.2
155~170	48.86	44.92	28.0	50.55	8.8	12.5	1.99	70.0	20.0
170~185	50.97	45.98	28.6	53.36	10.9	16.1	1.86	67.6	23.0
185~205	57.61	52.89	33.0	59.81	8.9	13.1	1.97	68.2	20.5
205~225	68.48	62.47	39.2	71.32	9.6	14.2	1.94	67.9	21.6
225~240	55.71	51.85	31.7	57.54	7.4	11.0	2.01	67.8	18.0
平均値	-	-	-	-	-	-	2.01	70.5	19.5

注) 絶対質量は168時間後の値を示す。

付表-2.3 コンクリートの含水状態の測定結果（屋内保管3年目，床版部）

床板下面からの距離(mm)	割裂直後質量(g)	絶対質量(g)	真空飽水後質量(g)		含水率(%)		割裂直後	絶対密度(g/cm <sup>3</sup> )	飽水後表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	飽水度(%)	空隙率(%)
			水中質量	表乾質量	表乾状態						
0~25	65.68	63.87	39.1	69.97	2.8	9.6		2.07	2.27	29.7	16.5
25~50	71.11	68.87	42.1	74.73	3.3	8.5		2.11	2.29	38.2	15.2
50~65	46.90	44.82	27.8	49.18	4.6	9.7		2.10	2.30	47.7	16.9
65~85	52.24	49.02	29.3	54.41	6.6	11.0		1.95	2.17	59.7	17.7
85~110	72.86	68.04	40.1	75.68	7.1	11.2		1.91	2.13	63.1	17.7
110~130	69.05	64.71	38.5	71.48	6.7	10.5		1.96	2.17	64.1	17.0
130~150	60.88	56.80	37.3	63.24	7.2	11.3		2.19	2.44	63.4	19.9
150~165	53.87	50.45	30.7	55.81	6.8	10.6		2.01	2.22	63.8	17.6
165~180	49.66	46.47	29.3	51.26	6.9	10.3		2.12	2.33	66.6	17.9
180~200	69.82	65.02	39.0	72.78	7.4	11.9		1.92	2.15	61.9	18.7
平均値	-	-	-	-	-	-	-	2.03	2.25	55.8	17.5

注) 絶対質量は168時間後の値を示す。

付表-2.4 コンクリートの含水状態の測定結果（屋内保管3年目，主桁上）

床板下面からの距離(mm)	割裂直後質量(g)	絶対質量(g)	真空飽水後質量(g)		含水率(%)		割裂直後	絶対密度(g/cm <sup>3</sup> )	飽水後表乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	飽水度(%)	空隙率(%)
			水中質量	表乾質量	表乾状態						
0~15	45.88	44.45	26.8	48.83	3.2	9.9		2.02	2.22	32.6	16.6
15~35	58.19	54.53	33.6	60.26	6.7	10.5		2.05	2.26	63.9	17.7
35~50	38.10	35.43	22.4	38.98	7.5	10.0		2.14	2.35	75.2	17.6
50~70	57.59	53.26	34.1	58.86	8.1	10.5		2.15	2.38	77.3	18.4
70~90	70.62	65.05	39.7	72.56	8.6	11.5		1.98	2.21	74.2	18.6
90~115	77.39	70.66	43.3	79.52	9.5	12.5		1.95	2.20	76.0	19.7
115~130	57.51	53.16	33.4	59.50	8.2	11.9		2.04	2.28	68.6	19.5
130~145	56.43	51.69	32.5	58.00	9.2	12.2		2.03	2.27	75.1	19.8
145~165	71.51	65.65	40.8	73.31	8.9	11.7		2.02	2.25	76.5	19.1
165~190	76.10	70.85	42.9	77.69	7.4	9.7		2.04	2.23	76.8	16.4
190~215	90.76	84.64	52.1	93.71	7.2	10.7		2.03	2.25	67.5	17.9
215~240	77.57	70.99	42.7	80.87	9.3	13.9		1.86	2.12	66.6	20.6
平均値	-	-	-	-	-	-	-	2.02	2.25	69.2	18.5

注) 絶対質量は168時間後の値を示す。

付表-2.5 コンクリートの含水状態の測定結果（暴露5年目，床版部，コアC10）

床板下面からの距離(mm)	割裂直後質量 (g)	絶乾質量 (g)		真空飽水後質量 (g)		含水率 (%)		飽水後表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽水度 (%)	空隙率 (%)
		48時間後	168時間後	水中質量	表乾質量	割裂直後	表乾状態			
0~23	84.77	79.68	94.39	50.3	87.45	6.4	9.8	2.14	65.6	17.4
23~50	99.78	94.39	94.39	60.0	102.38	5.7	8.5	2.23	67.5	15.9
50~70	61.07	56.74	56.71	36.0	62.15	7.7	9.6	2.17	80.0	17.2
70~90	80.29	73.17	73.11	45.5	81.90	9.8	12.0	2.01	81.6	19.4
90~110	85.83	79.32	79.28	49.7	87.33	8.3	10.2	2.11	81.3	17.6
110~130	53.01	47.61	47.59	29.9	53.97	11.4	13.4	1.98	85.0	21.0
130~150	69.31	63.33	63.29	39.5	70.32	9.5	11.1	2.05	85.6	18.6
150~180	79.42	73.41	73.35	45.4	81.12	8.3	10.6	2.05	78.1	17.9
平均値	-	-	-	-	-	-	-	2.09	78.1	18.1

注) 48時間後の絶乾質量は参考として示す。表中の含水率等はすべて168時間後の絶乾質量で計算した値を示す。

付表-2.6 コンクリートの含水状態の測定結果（暴露5年目，床版部，コアC13）

床板下面からの距離(mm)	割裂直後質量 (g)	絶乾質量 (g)		真空飽水後質量 (g)		含水率 (%)		飽水後表乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	飽水度 (%)	空隙率 (%)
		48時間後	168時間後	水中質量	表乾質量	割裂直後	表乾状態			
0~20	65.92	62.84	62.81	39.5	68.04	5.0	8.3	2.20	59.5	15.5
20~40	75.55	71.22	71.18	45.2	77.81	6.1	9.3	2.18	65.9	16.9
40~65	88.11	83.57	83.49	53.5	89.90	5.5	7.7	2.29	72.1	15.0
65~90	89.11	82.69	82.66	50.9	91.17	7.8	10.3	2.05	75.8	17.4
90~110	51.62	47.18	47.13	29.2	52.91	9.5	12.3	1.99	77.8	19.6
110~130	78.65	72.45	72.39	45.5	80.32	8.6	10.9	2.08	78.9	18.5
130~150	76.71	70.97	70.91	43.6	78.15	8.2	10.2	2.05	80.1	17.3
150~170	73.60	68.20	68.12	41.4	74.68	8.0	9.6	2.05	83.5	16.5
170~190	68.31	63.57	63.54	38.7	69.56	7.5	9.5	2.06	79.2	16.3
平均値	-	-	-	-	-	-	-	2.11	74.8	17.0

注) 48時間後の絶乾質量は参考として示す。表中の含水率等はすべて168時間後の絶乾質量で計算した値を示す。

---

土木研究所資料  
TECHNICAL NOTE of PWRI  
No. 4397 March 2020

編集・発行 ©国立研究開発法人土木研究所

---

本資料の転載・複写の問い合わせは

国立研究開発法人土木研究所 企画部 業務課  
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754