ＩＳＳＮ 0386－5878
土木研究所資料第3950号

土 木 研 究 所 資 料

コンクリートのひび割れ部における塩分浸透

平成16年11月

独立行政法人土木研究所
技術推進本部構造物マネジメント技術チーム

Copyright © (2004) 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。

土木研究所資料
第3950号2004年11月

コンクリートのひび割れ部における塩分浸透

構造物マネジメント技術チーム　主席研究員　河野広隆[1]
主任研究員　渡辺博志[2]
研究員　田中良樹[3]

要旨

コンクリートのひび割れ部における塩分浸透特性を把握するため、日本海沿岸部に道路橋として建設されたプレストレストコンクリート桁の補強部コンクリート、鉄筋コンクリート橋脚及び橋台のさまざまなひび割れ部や打継目から計15本のコアを採取して、ひび割れ部のEPMA面分析を行った。その結果、ほとんどのコアで外部からの多量の塩化物イオンの浸透が見られたが、ひび割れ部では塩化物イオンの濃縮は見られず、むしろ塩化物イオンが減少する傾向が認められた。この傾向はひび割れの発生原因やひび割れの程度に関係なく見られた。ひび割れ部の塩分減少のメカニズムは明確でない部分を多く残しているが、いずれの事例もコンクリートのひび割れ部の中性化と関連していることがわかった。本文では、これらの結果を示すとともに、今後の設計、維持管理への提案、ひび割れ部の耐久性設計に関する今後の研究課題をとりまとめた。

キーワード：コンクリート、ひび割れ、打継目、EPMA、塩化物、硫化物、ナトリウム、カルシウム、中性化、含水分布

1）現　材料地盤研究グループ長
2）現　技術推進本部構造物マネジメント技術チーム主席研究員
3）現　構造物研究グループ橋梁構造チーム主任研究員

目　次

1．はじめに …… 1

2．既往の研究 …… 3

2.1　既往の研究におけるひび割れ部の腐食事例 …… 3

2.2　ひび割れ部の塩化物イオンの浸透 …… 6

2.3　ひび割れ部の中性化 …… 8

2.4　中性化と塩化物イオンの移動 …… 8

2.5　ひび割れ部の腐食セル形成 …… 9

3．調査方法 …… 10

3.1 各構造物共通試験 …… 10

3.2 旧芦川橋（PC 主桁一般部） …… 10

3.3 旧芦川橋（PC 主桁定着部） …… 11

3.4 旧岩川大橋 P8 橋脚 …… 11

3.5 弁天大橋 A2 橋台 …… 11

4．旧芦川橋の調査 …… 13

4.1 旧芦川橋の概要と既往の調査結果 …… 13

4.1.1 諸元と補修・補強 …… 13

4.1.2 主桁の塩分浸透状況 …… 15

4.2 調査箇所と調査項目 …… 16

4.3 主桁コンクリートの調査結果 …… 20

4.4 補強部コンクリートの調査結果 …… 32

4.5 PC 定着部の調査結果 …… 44

5．旧岩川大橋 P8 橋脚の調査 …… 47

5.1 旧岩川大橋 P8 橋脚の概要 …… 47

5.2 調査箇所と調査項目 …… 53

5.3 一般部の塩化物イオン浸透状況 …… 54

5.3.1 基本データ測定結果 …… 54

5.3.2 既設構造物の含水率分布 …… 56

5.3.3 海岸部における橋脚の塩分浸透状況 …… 57

5.4 ひび割れ・打継目の塩化物イオン等浸透状況 …… 60

5.4.1 ひび割れ等状況 …… 60

5.4.2 分析結果 …… 60

6．弁天大橋 A2 橋台の調査 …… 78
6.1 弁天大橋 A2 橋台の概要 …… 78
6.2 調査箇所と調査項目 …… 82
6.3 結果 …… 83
6.3.1 採取したコアのひび割れ状況 …… 83
6.3.2 圧縮強度 …… 86
6.3.3 中性化深さ …… 87
6.3.4 含水率分布 …… 88
6.3.5 ひび割れ部の塩化物イオン等浸透状況 …… 89
6.3.6 膨張量 …… 94
7．コンクリートのひび割れ部における塩分浸透
7.1 EPMA 試験結果の総括 …… 95
7.2 表面付近の中性化領域の塩化物イオン …… 95
7.3 ひび割れ部の塩化物イオンの減少 …… 100
7.4 塩分環境の影響 …… 100
7.5 塩化物イオンが流出する可能性 …… 100
7.6 ひび割れ幅，深さの影響 …… 101
7.7 打継目の塩分浸透 …… 101
7.8 ひび割れ部におけるナトリウムイオンの濃縮 …… 102
8．ひび割れ部の鉄筋腐食と耐久性設計 …… 103
9．まとめ …… 106
謝辞等 …… 108
参考文献 …… 109

付録資料
付録１．旧岩川大橋 P5～P7 橋脚の外観写真 …… 115
付録２．塩化物イオン量測定結果 …… 118
付録３．中性化深さ測定結果 …… 120
付録４．含水率測定結果 …… 123

1．はじめに

近年，維持管理の負担軽減をはかるため，道路橋の長寿命化が不可欠となっている。沿岸部に建設されるコンクリート橋の場合，これまでに著しい塩害により架け替えられた事例も見られており[1.1)]，その架設地点の塩分環境に応じた適切な塩害対策が長寿命化の必須条件となっている。しかし，日本海沿岸部及び沖縄では季節風や台風の影響により塩分環境が特に厳しいため，十分な塩害対策を見出すことが容易でなく，さまざまな防食手法の検討が続けられている。その中で，経済性と耐久性向上を両立させるためには，まずかぶりコンクリートの防食性能を明確にし，効果的に活用することが重要である。かぶりコンクリートの塩分浸透性状については，さまざまな試験，調査が実施され，Fick の拡散方程式に基づく設計手法が提案され[1.2-5)]，耐久性向上をめざした現行道路橋示方書[1.6)]にもそれらの新しい知見が取り入れられた。しかし，コンクリートのひび割れ部の塩分浸透性状など，実構造物における塩分浸透の実態はまだ不明な点が多く残されている。

現行道路橋示方書のかぶり規定の前身である道路橋の塩害対策指針(案)[1.7)]では，有害なひび割れ(ひび割れ幅 0.1 ～ 0.2 mm 程度を超えるもの)が生じないように鉄筋により抑制することを前提とした上で，塩分環境とコンクリートの品質に応じた適切なかぶりを設けて，所要の耐久性を確保していた。近年のコンクリート道路橋の多くを占めているプレストレストコンクリート部材（PC 部材）は構造的なひび割れが生じにくいが，乾燥収縮による微細なひび割れが生じることはあり得るし，床版や箱桁の下床版といった鉄筋コンクリート部材(RC 部材)も含めると，厳密に全くひび割れのない道路橋の建設は容易でない。また，道路橋の下部構造についてはこれまで上部構造に比べて著しい塩害の事例報告が少ないものの，全くないわけではない。1980 年代後半より下部構造に高炉セメントが使用されることが多くなっていることに加えて，2001 年の国土交通省通達（国官技第 61 号）より下部構造コンクリートの水セメント比が実質的に引き下げられたことで，かぶりコンクリートの塩分浸透抵抗性は改善される方向にあるが，マスコンクリートに見られる水和熱に伴う温度ひび割れ発生の可能性は従来に比べて高くなっている。これらの点から，コンクリートの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して，設計や維持管理におけるひび割れに対する考え方に反映する必要がある。

既往の研究では，コンクリートのひび割れ部で鉄筋腐食が確認された事例が多く，ひび割れ部には多くの塩化物イオン量が存在したとの報告もある(２章で述べる)。2000 年版コンクリート標準示方書では，ひび割れがある場合に塩分浸透が促進されるものとして，塩化物イオンの拡散係数を割り増すこととなった[1.2, 3)]。また，現行の 2002 年版コンクリート標準示方書では，ひび割れ幅を考慮した拡散係数の割増係数が採用されている[1.8, 9)]。しかし，土木研究所が行った塩害を受けた PC 桁の補修部コンクリートのひび割れ部の EPMA 分析では，1 本のコアデータだけではあるが塩化物イオンがひび割れ部で特に多くなるということは認められなかった[1.10)]。

本報告では，日本海沿岸部の厳しい塩分環境に建設された道路橋のさまざまなひび割れ部や打継目から採取したコアの EPMA 面分析結果を各種基礎的なデータとともにとりまとめる(4 章から 6 章)。また，これらの結果を踏まえて，コンクリートのひび割れ部における塩分浸透について考察するとともに(7 章)，設計，維持管理への提案及びひび割れ部の耐久性に関する今後の研究課題を整理する(8 章)。なお，対象とした構造物は，PC 桁の補強用ケーブル定着体を覆っていたコンクリート，鉄筋コンクリート橋脚及び橋台であり，このうち PC 桁及び橋脚は供用を終え，既に解体・撤去された。

2．既往の研究

2.1　既往の研究におけるひび割れ部の腐食事例

RC 構造物において，コンクリートの水和熱等に起因する施工時のひび割れや構造的なひび割れが生じている場合に，そのひび割れ付近の鉄筋はひび割れのない部分に比べて腐食し易いと言われる。既往の文献では，その主な理由として以下の点が挙げられている[2.1-21)]。

a)　ひび割れを介して酸素，水分や塩化物イオンなどの腐食因子が鉄筋の位置まで到達し易くなる。

b)　ひび割れに沿ってコンクリートの中性化が進行し，これが鉄筋の腐食環境を形成する。

c)　ひび割れ近傍ではこれらの腐食因子の濃度差が生じ，マクロセルが形成される。

表-2.1 に，既往の調査・研究におけるコンクリートまたはモルタル中に埋め込まれた鉄筋のひび割れ部の腐食の有無を示す。多くの実験的研究（文献 2.15, 2.16, 2.18 以外）において，鉄筋と直交するひび割れ部で局所的な鉄筋腐食が発生していたことが，試験後解体時の目視により確認されている。いずれの結果もその腐食の程度は定性的な表現で示されており，統一的な比較は難しい。ひび割れ部の腐食は，曲げや直接引張によるひび割れ導入時に生じた鉄筋の付着切れの影響もあって，鉄筋位置でのひび割れ幅以上のひろがりが報告されている(文献 2.10 など)。

これらの研究では，文献 2.10 を除いて，短期間で腐食性状を確認するために，塩分の練り込みまたは外部からの塩分供給により腐食促進が行われた。外部からの塩分供給方法は個々に違いがあるが，概ね表-2.1 の「分類」項のように大別した。多くの試験では，塩水噴霧か塩水浸漬による方法が採用された。塩水浸漬の場合は，塩化物イオンの浸透をより促進するため（あるいは干満帯を再現するため），乾湿繰り返しが組み合わせられるものが多かった。なお，これらの各促進試験方法と実際の塩分環境の関係について，個々の文献では必ずしも明確に記されていないが，強いて分類すると概ね表-2.2 のようになると考えられる。表中の備考は，ひび割れのないコンクリートコアの自然暴露試験の結果を引用したものである[2.20)]。

表-2.1　既往の研究におけるひび割れ部の腐食の有無

腐食促進方法				ひび割れ導入方法	ひび割れ幅 (mm)	腐食確認方法	他の測定項目	供試体寸法 (mm)	かぶり (mm)	コンクリート，モルタル	配合 W/C (%)	ひび割れ部の局所的な腐食の有無（目視による）	備考	文献
分類		概要	塩分練り込み											
自然暴露		早稲田構内に 6～8 年間，水平に暴露	なし	直接引張	概ね 0.03-0.05	解体	－	最大 185*185*600	25, 30, 50, 75	コンクリート	55	腐食あり	・ひび割れ部が中性化していた。	2.10) 神山
		内陸屋外暴露のみ，暴露 1 ,3 年目	約 1.3kg/m^3 (可溶性?Cl$^-$?)	曲げ	最大 0.2 程度	解体，発錆面積	塩分量	150*150*1200	15, 35, 55	コンクリート	56, 61	腐食なし 3 年目の結果は不明	・ひびわれ部の鉄筋に腐食は見られず，ひびわれのないところで表面さびが見られた。 ・3 年目も発錆面積に大差なし。 (R C はり，55mm, 61%の場合)	2.15) 渡辺ら 2.16) 渡辺ら
		海岸，15 年，平均気温 16□	Cl$^-$, 約 1.5kg/m^3	4 点曲げ治具	0.2-0.3 程度	解体	耐荷力，塩分量	100*100*1100	20, 30	コンクリート	50, 60	不明	・腐食が著しく，ひびわれ部の確認ができなかった。	2.18) 星野ら
塩水噴霧		1 時間，1 分塩水噴霧，30 分乾燥 1.16Hz,20 万回曲げ疲労試験	なし	4 点曲げ	0.1-0.3	解体，自然電位	ひび割れ部の塩分量	PC3，RC3 200*400*3300	35	コンクリート	36	腐食あり（RC, PRC とも）	・ひび割れ幅が大きいほど腐食範囲が大きい。 ・PRC の方が RC より腐食が生じにくい。	2.1) 西川ら 2.3) 淵上ら
		塩水噴霧(NaCl3.1wt%)を伴う 24 時間の湿潤(90%R.H.)と 60 時間の乾燥(50%R.H.)が繰り返し，室温 60℃，13 週までの結果	なし	3 点曲げ SUS をひびわれにはさむ	0.3	自然電位， マクロセル電流密度， ミクロセル電流密度， 解体，腐食減量	ひび割れ部の塩分量(可溶性)	100*100*400	約 50	モルタル	30, 50, 70 (S/C: 2.5)	腐食あり	・ひび割れ部の鉄筋の腐食量および塩分量は，W/C が大きいほど多かった	2.5) 大即ら
		東工大で屋外暴露，1 週間に 1 度，コンクリート表面に 2.42kg/m2 の塩水(NaCl3.5wt%)を噴霧，1 年目の結果	なし	4 点曲げ治具	不明	自然電位	－	150*150*1250	不明	コンクリート	50, 70	不明（腐食あり）	・自然電位の傾向はモルタルの結果と類似していた。	2.5) 大即ら
		1 日 1 回 3.13%NaCl 水溶液散水，最大 3ヶ月	0, 3.13%水溶液	直接引張	0.1-0.2, 0.2-0.3 以上	自然電位 解体	－	No.1 供試体 50*50*760	20	コンクリート	40, 50, 60, 70	腐食あり 初期塩がない場合も塩水噴霧によって腐食していた。	・ひびわれの存在は腐食を局部化するが，腐食領域はひびわれ部のみならず近傍を含んだ領域である。	2.11) 岡田ら
		5 種類の腐食液（飽和 $CaCl_2$ を含む），週 2 回散布，380 日間	不明	4 点曲げ治具	0.02-0.55	解体	塩分(X 線分析)	200*400*約 3600	不明	コンクリート	不明	腐食あり	・ひび割れ 0.2mm 以下では顕著な腐食は見られなかった。	2.17) 倉内
塩水浸漬＋乾湿		高温湿潤（70±2℃の海水中に 3.5 日浸漬）と低温乾燥（15±2℃, 相対湿度 55±5%の気中に 3.5 日保持）を 1cycle とする乾湿繰り返し，21 週までの結果	NaCl 2 kg/m^3 混入	4 点曲げ治具	0.01-0.06	自然電位，分極抵抗， 解体，腐食面積	曲げ耐力	100*150*1200	20	コンクリート	55	腐食あり	・曲げひびわれ本数が多いほど鉄筋の腐食範囲が広かった。	2.7) 横田ら
		乾湿繰り返し，詳細不明 水中浸漬もある	水道水，人口海水	型枠による切り欠き	10	電流密度 解体	－	75*75*400	約 33	コンクリート	45, 65	腐食あり	・ひびわれ部はアノード電流密度が大きく，鉄筋の腐食が見られた。	2.9) 大即
		65℃で NaCl3.2%水溶液中に 24 時間浸漬，24 時間乾燥 実験Ⅰ70 日，実験Ⅱ266 日（一部，アノード分極下）	Cl 2.3 kg/m^3 ひびわれなしのみ	3 点曲げ治具	0.1～0.2	腐食電流積分値 (質量減との相関確認) 自然電位，分極抵抗	－	最大 131*93*450	20, 40	コンクリート	30, 50, 70	不明（腐食あり）	・ひび割れ部で腐食あるなしで積分値に顕著な差。 ・W/C30%はひびわれがあっても腐食量が小さい。	2.13) 大野ら
		4 日浸漬（3%NaCl 水溶液），3 日乾燥(RH60%)，20℃，13 サイクル	なし	3 点曲げ	0.09	解体，腐食面積， 自然電位	ひび割れ部の塩分量	100*100*400	20	コンクリート	60	腐食あり		2.19) 塚原ら
塩水浸漬	塩水注入＋塩水浸漬	曲げ載荷中，所要のひびわれ幅のときに 3.13%NaCl 水溶液をひびわれに注入する。さらに最大荷重まで載荷した後，同溶液中に浸漬した。25℃，43 日間	一部，NaCl 3.13%水溶液使用	4 点曲げ	0.1, 0.3, 0.5, 1.0	自然電位，解体	－	100*150*1000	15	コンクリート	65	腐食あり	・43 日後の自然電位より，すべての領域で腐食していた。	2.8) 岡田ら
	塩水浸漬	人工海水中に 1 年間	なし	割裂，平坦	0-0.9	腐食面積，解体，腐食深さ	－	φ100*200	86	コンクリート	55	腐食あり	・ごく軽微な腐食。	2.12) 蛭川ら
	塩水浸漬＋アノード分極	3%食塩水，25℃，負荷	なし	直接引張，スリット	0.25～5 (試験開始時)	破断時間，解体，断面減少，自然電位	－	φ50	18-19	モルタル	65 (S/C: 2)	腐食あり	・ひびわれ幅が小さくなると，腐食速度は著しく低下する。	2.14) 小林ら
塩水通水	塩水通水	鉄筋を有するひびわれに強制的に塩水を通水。圧力 0.3, 1MPa(水深 30,100m)	なし	割裂，平坦	0-0.9	解体，腐食面積，腐食深さ	－	φ100*200	86	コンクリート	55	腐食あり		2.12) 蛭川ら
	通水+乾湿繰り返し	通水 1 週，乾燥 1 週を 4 サイクル	なし	割裂，平坦	0-0.9	解体，腐食面積，腐食深さ	－	φ100*200	86	コンクリート	55	腐食あり	・3 種の中でもっとも腐食していた。	2.12) 蛭川ら

表-2.2　コンクリート中の鉄筋促進試験方法と実際の塩分環境の関係

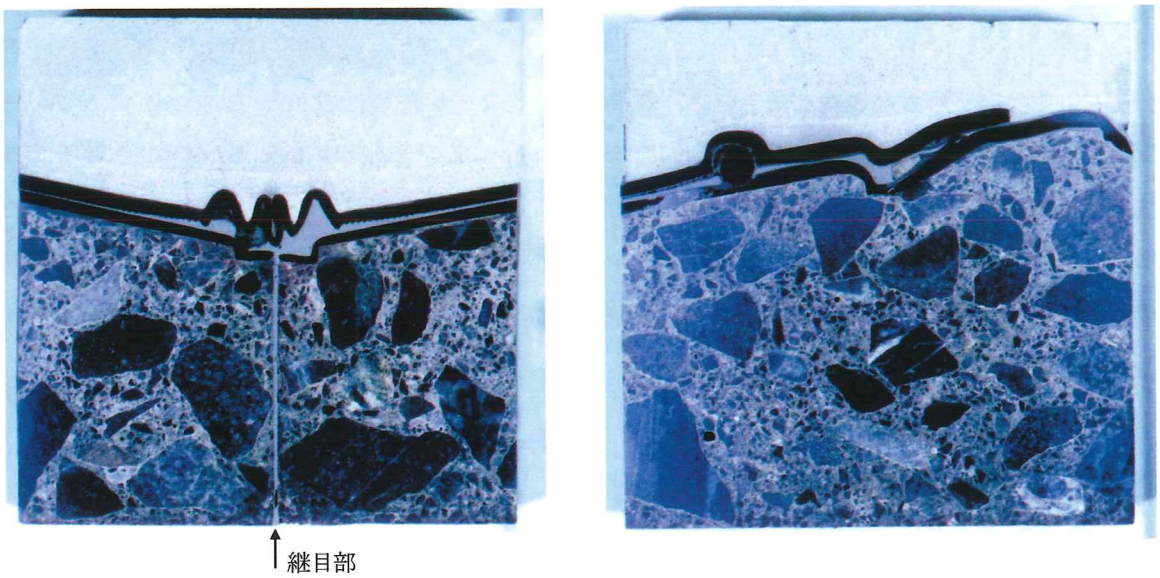
試験方法	実際の環境	コンクリート構造物の塩分浸透と鉄筋腐食の程度 (ひび割れのない部位を対象)
塩水浸漬	海中	塩化物の浸透は早いが，酸素の供給が少ないため腐食の程度は軽微である。[2.20]
塩水浸漬＋乾湿繰り返し	干満帯	塩化物の浸透が早く，かつある程度酸素が供給されるため，腐食の程度は海中よりやや厳しい。[2.20]
塩水噴霧	しぶき帯	塩化物の浸透は海中，干満帯よりも遅いが，腐食の程度は海中，干満帯よりも厳しい。[2.20] しぶきがかかる程度は構造物の位置・形状や，周囲の岩礁やブロックの位置・形状，気象条件などによって大きく異なるが，定量化されていない。
－	陸上	塩化物の浸透は海中，干満帯，しぶき帯に比べて遅い。[2.20] 沿岸部では，飛来塩分量に応じて塩化物が浸透し，著しい腐食が生じることがある。

2.2　ひび割れ部の塩化物イオンの浸透

塩水中においてかぶりコンクリートにひび割れが存在する場合，そのひび割れ部ではひび割れを介して塩化物イオンの浸透が容易になるというのが一般的な考え方であろう。文献 2.5)では塩水噴霧試験の場合においてもひび割れ部の塩化物イオン量がひび割れのない箇所よりも多くなっていたことが確認された。

セグメント継目部供試体に曲げにより強制的に開き(コンクリートのひび割れ)を与えた後，塩水浸漬試験を実施した結果，ひび割れ周辺の塩分浸透状況は図-2.1 のとおりであった(著者らを含む土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会の共同研究において実施した[2.21])。浸漬中のひび割れ幅は 0.2 mm であり，3%NaCl 水溶液に 6 ヶ月浸漬した後，継目面と直角の断面について EPMA 分析を行った。この事例はセグメント継目部を想定した試験であったため，ひび割れの片側はエポキシ樹脂接着剤が残っており(ひび割れの左側)，塩分の浸透が図の右側に偏っていた。この事例からも明らかなように，塩水に浸漬した場合，ひび割れ内部への塩分浸透は容易であることがわかる。この供試体の場合，ポリエチレンシースの内側まで塩化物イオンが侵入することはなく，シースの表面に沿って浸透し，コンクリート中に拡散している様子が確認できる。なお，この試験はポリエチレンシースカップラの性能確認を目的としたために塩水浸漬を行ったが，実際の道路橋上部構造のセグメント継目部の一般環境としては，塩水浸漬は極めて厳しい条件であったと考える。

文献 2.22)では，日本海沿岸部に 34 年間供用され，塩害により撤去となった PC 橋の上部構造の補修断面のひび割れ箇所から採取したコアについて EPMA 分析を行った。採取した補修材は無機系プレパックトコンクリートであった。調査時点で補修後からの年数は 8 年程度である。この結果では，ひび割れ内部への塩化物イオンの浸透は見られなかった。この結果は，塩分環境によってはひび割れ部の塩化物イオンの浸透が一般部と同程度である場合もあり得ることを示唆した。しかし，この構造物は波しぶきが直接かかることがないよう応急措置として周囲をベニヤ板で覆われていたことなどから実際の塩分環境はわかり難かったこと，ひび割れ発生時期が必ずしも明確でないこと，1 本のコアデータであることから，ひび割れに塩化物イオンが卓越して浸透しない場合があることについて確証を得るには至らなかった。

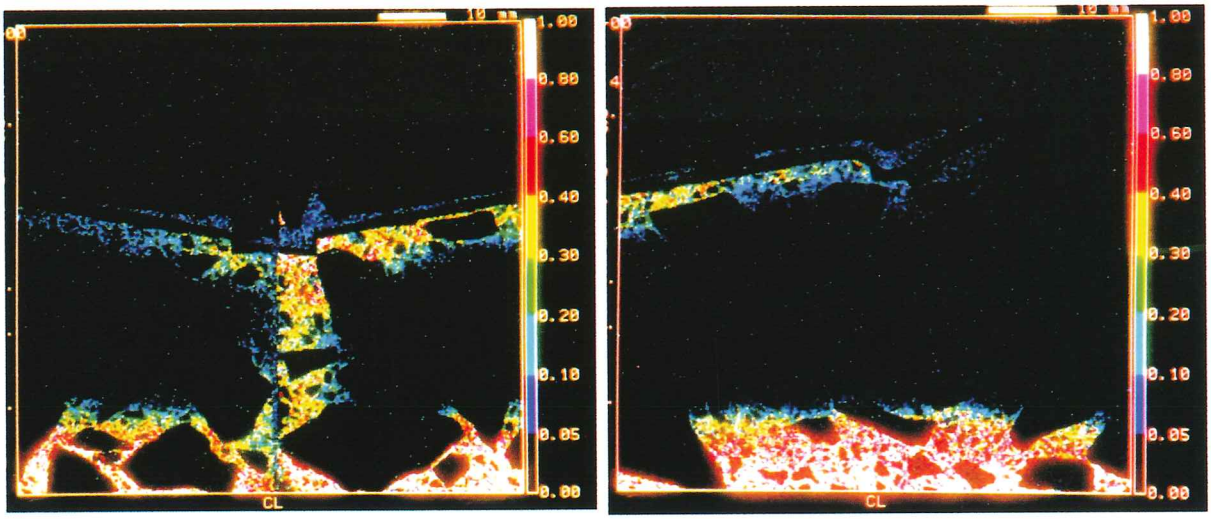


(a) EPMA 用試料の試験面

コンクリート：W/C＝38％，グラウト：W/C＝45％，

接着剤：エポキシ樹脂系接着剤，シースカップラ：高密度ポリエチレン

塩水浸漬前に曲げ載荷により接合面にひび割れ(残留ひび割れ 0.2 mm)を導入した。



(b) EPMA 試験結果

3%NaCl 水溶液への塩水浸漬 6 ヶ月後に測定。写真下辺が塩水に面していた。

ひび割れの片面は接着剤が残っていたため，塩分浸透が偏っていた。

エポキシ接着剤は微量の塩化物イオンを含むため，青く反応している。

図-2.1　6 ヶ月塩水浸漬後のひび割れ部の塩分浸透状況（一例）

2.3　ひび割れ部の中性化

コンクリート中は高アルカリ環境にあるため，鉄筋は腐食しにくい環境に置かれているが，コンクリートの中性化によってそのアルカリ性が低下して鉄筋腐食の可能性が高くなる。中性化は大気中の二酸化炭素との反応により進行することから一般にはコンクリートの表面付近で生じるが，ひび割れがあるとコンクリートの表面付近だけでなくひび割れに沿って内部でも中性化が生じる場合がある[2.23)]。文献 2.10)では，塩分で促進せずに自然暴露されたコンクリートのひび割れ部で鉄筋腐食(腐食程度は不明)とコンクリートの中性化が確認された。

2.4　中性化と塩化物イオンの移動

文献 2. 24 は塩化物イオンを混入したモルタルを用いた炭酸化促進試験（20℃，60%RH，CO_2 濃度 10 %）や実構造物の調査を実施して，中性化と塩化物イオン等の移動に関して次の結果が導かれた。

① 試験開始時に供試体内で均一だった塩化物イオン濃度は，炭酸化部分で著しく低下し，非炭酸化部分において濃縮していた。このことは，炭酸化によってコンクリート内部の塩化物イオンは炭酸化部分から非炭酸化部分に移動したことを示唆した。

② ”炭酸化によりイオンに解離した塩化物イオンが濃度拡散によって内部に移動し，再びフリーデル氏塩として固定されたために濃縮を生じた”という仮説を立て，検証が試みられた。化学分析結果では，炭酸化開始前にくらべて非炭酸化部の固定化された塩化物イオン量が増加していた。

③ 西日本の道路橋橋脚から採取されたコアの EPMA 分析の結果，フェノールフタレインによる炭酸化領域で塩素濃度が特に低かったことがわかった。

注）これらの文献では，文献 2.25)に基づき炭酸化はゲル中の水酸化カルシウムが二酸化炭素と反応して炭酸化する一般的に言われるところの中性化の他，C-S-H，フリーデル氏塩，エトリンガイトの炭酸化を含むものと定義されている。

文献 2.24)では，固定化されていた塩素が炭酸化によってイオンに解離し、細孔溶液中の塩素濃度が内部より高くなり，その濃度勾配を駆動力として塩素が内部へ拡散すると説明された。

2.5　ひび割れ部の腐食セル形成

コンクリートのひび割れが鉄筋位置まで達した場合，ひび割れ周辺の水や酸素，塩化物イオンなどの濃度変化により，マクロセルの形成により腐食が生じると言われている[2.13,26]。文献2.9)では，ひび割れで露出している箇所は，乾湿の条件によって，アノード(湿潤過程)またはカソード(乾燥過程)と変化するので，ひび割れ部の鉄筋表面が常にアノードになるとは限らないと述べられている。また，コンクリートのW/Cが小さいほどカソード電流が小さくなって，ひび割れ部の腐食速度が遅くなることが確認されている。

ひび割れ部にマクロセルが形成された場合，コンクリートに覆われている鉄筋表面積とひび割れによって露出している鉄筋表面積の比はマクロセル電流と相関があるとされている（露出面積の割合が大きいほど腐食速度が大きい）[2.5,8,9,13]。

3．調査方法

3.1 各構造物共通試験

(1) EPMA 分析

採取したコアから 80mm(表面からの深さ)×80mm(幅)×20mm(厚さ)の試験片を切り出し，前処理(乾燥後に観察面研磨，炭素蒸着)を行った後，EPMA 面分析を行った。切断，研磨は塩化物イオンが移動しないよう水ではなく専用油を使用した。分析の対象とする元素は，Cl，Na，S，Ca の４元素とし，カラーマッピングを行った。図-3.1.1～2 にひび割れ部の試料採取方法を示す。ひび割れが貫通していたものは，メタクリル樹脂により結合した後に試料の調整を行った。試験装置は，日本電子社製電子線マイクロアナライザーJXA-8621M であり，測定条件は以下のとおりとした。

加速電圧：15kV，プローブ電流：1×10^{-7}A，プローブ径：100 μ m，計数時間：60msec，

ピクセル数：380×380，ピクセルサイズ：200 μ m，ステージスキャン法

(2) 含水分布の測定

ϕ 100mm のコアを深さ方向に約 20mm ピッチで割裂し(写真-3.1.1)[3.1),3.2)]，105℃，48 時間の炉乾燥を行った。炉乾燥前後の質量差を乾燥後の質量で除した値を自然乾燥状態の含水率とした。なお，この含水率の測定に用いるコンクリートコアは，コア採取後，側面が表乾状態になった状態で側面及び奥の面をアルミテープで覆った。表面は露出させたままとした。割裂試験の直前までそのまま保管した。

なお，コア抜き時の水の影響を見るため，旧芦川橋の含水率調査時に乾式と湿式の両方で行った。

(3) 圧縮強度

採取したコンクリートコアを用いて JIS A 1108 に準拠して圧縮強度試験を行った。

(4) 中性化

圧縮強度試験のコアを用いてフェノールフタレインアルコール溶液の噴霧により中性化深さを測定した。

(5) 塩化物イオン量の分布

コアの一部を深さ方向に 10mm 間隔(旧岩川大橋 CS シリーズ，弁天大橋は 20mm 間隔，旧芦川橋桁端部コアは任意幅)で切断して，JCI-SC4 に準じて深さ方向の全塩化物イオン量の分布を測定した。

(6) ナトリウムイオン量の分布

塩化物イオン量の測定に用いた溶液から試料を採取して，原子吸光光度法によりナトリウムイオンの定量分析を行った。弁天大橋については，セメント協会法 JCAS I-12 によりアルカリ含有率を測定した。

3.2 旧芦川橋（PC 主桁一般部）

(1) 気泡径分布 (リニアトラバース)

図-3.1.2 に示すとおり，コアから試料を採取して，ASTM C457 により気泡径分布及び気泡間隔係数を測定した。

(2) 細孔径分布 (ポロシメータ)

図-3.1.2 に示したとおり，コア 1 本につき 3 個ずつ，コアの深さ方向に約 10mm 間隔で試料を採取した。前処理として，コンクリート片をアセトンに浸漬後，風乾し，これから粗骨材を除いたモルタルを約 5mm 角に砕き，凍結乾燥真空装置を用いて 1 週間真空乾燥させた。測定には，水銀圧入式ポロシメータ AUTOPURE Ⅱ 9220（M 社製）を使用した。

(3) 示差熱分析 (TG-DTA)

試料は，図-3.1.2 に示したとおり，コア 1 本につき 3 個ずつ，コアの深さ方向に約 10mm 間隔で採取した。このコンクリート片を 150 μm ふるいに通過するまで粗粉砕し，さらにメノウ乳鉢で微粉砕した。示差熱分析試験には，示差熱天秤 TAS200（R 社製）を用いた。測定条件は，昇温速度 10℃／分，測定温度 30~1000℃，窒素雰囲気（50ml／分）とした。その結果のうち，450℃付近の質量減量を $Ca(OH)_2$ の脱水によるものとし，600～700℃付近の質量減量を $CaCO_3$ の脱炭酸によるものとした。

(4) 含水率（表乾状態）

採取したコアから試料を切り出し，24 時間真空吸水させ，表面の付着水を除去して表乾状態とした後，質量変化がなくなるまで 105℃の炉乾燥により水分を蒸発させた。この表乾状態時と乾燥後の質量差を乾燥後の質量で除した値を含水率とした。

3.3 旧芦川橋（PC 主桁定着部）

(1) 定着端部の PC 鋼材の引張試験

定着部から取り出したボタンヘッド加工された PC 鋼素線 10 本を抽出して引張試験を行った。ボタンヘッド付け根部の強度もみるため，PC-1～4 は 5 mm 幅の隙間を作った鋼板にボタンヘッド部を引っ掛けて試験を行い，PC-5～10 はボタンヘッドを試験機のチャックで直接つかんで試験を行った。

3.4 旧岩川大橋 P8 橋脚

(1) テストハンマーによる反発度

テストハンマーにより，圧縮試験用コアの採取位置付近で反発度の試験を実施した。

3.5 弁天大橋 A2 橋台

(1) 膨張試験

「コンクリート構造物におけるアルカリシリカ反応の実態調査法(案)」[3.3]のうち，コア膨張量測定方法に準じてコアの膨張量を測定することとした。供試体は ϕ100 mm×200 mm とし，この供試体にチップ（ステンレスバンド）を取り付け。40℃，95%RH の恒温槽に入れて，随時，コンタクトゲージにより膨張量を測定した。

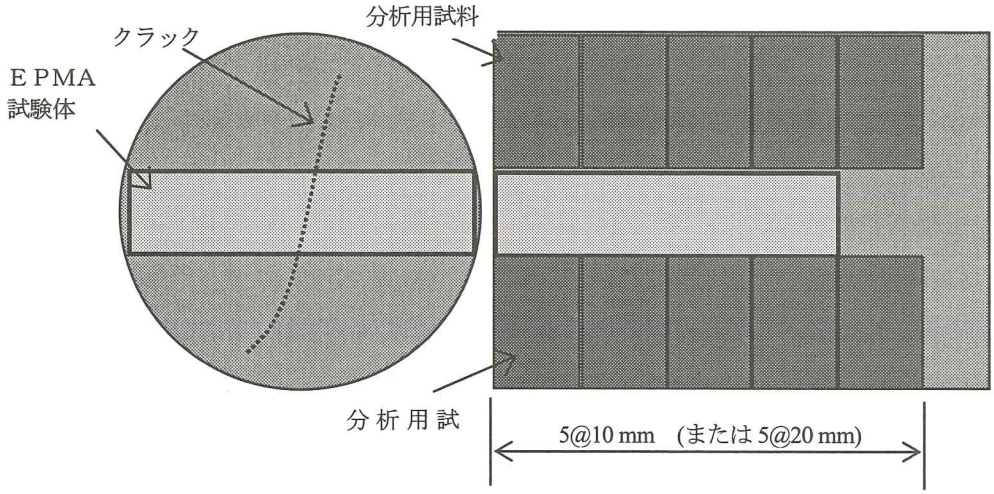


図-3.1.1　EPMA 試料採取方法

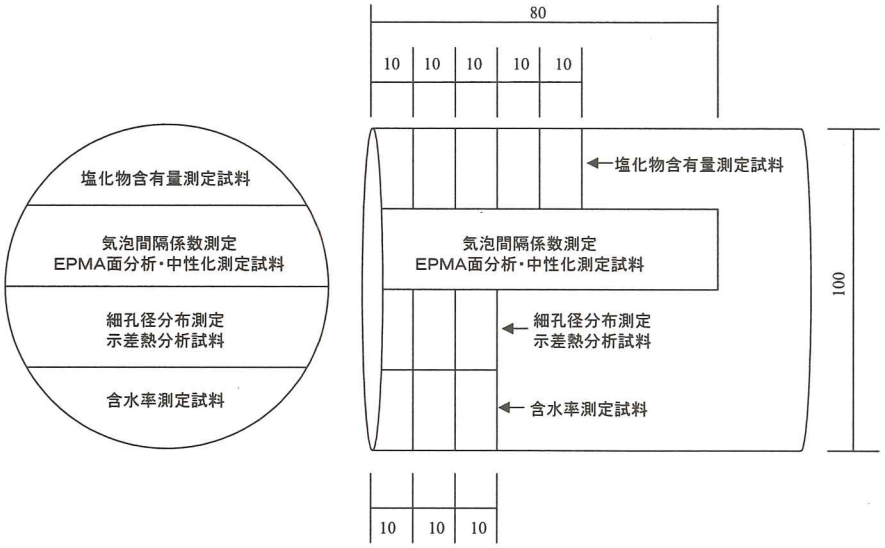


図-3.1.2　旧芦川橋 OP1～3 の試料採取方法　(単位：mm)

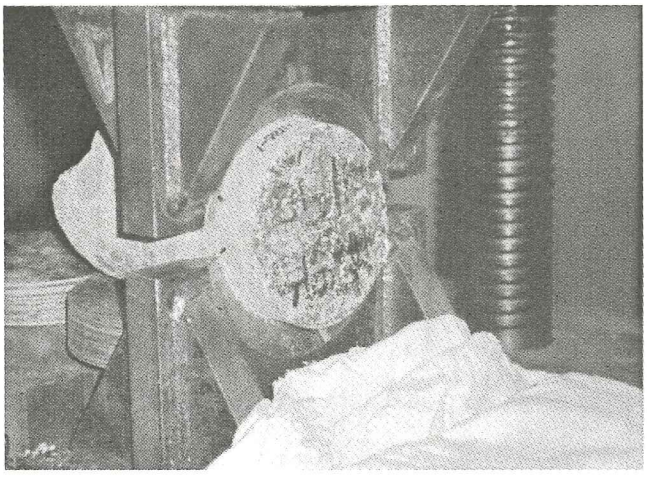


写真-3.1.1　含水率分布測定時の割裂状況

(割裂後，炉乾燥前後に質量測定)

4．旧芦川橋の調査

4.1 旧芦川橋の概要と既往の調査結果[4.1)]

4.1.1 諸元と補修・補強

図-4.1.1 に旧芦川橋主桁の建設時の基本断面図を示す。また，表-4.1.1 に旧芦川橋の諸元等を示す。本橋は秋田県内の日本海沿岸部，海岸線から 40mのところに架設された支間 34.2m，単径間のポストテンションＰＣ橋であった。写真-4.1.1 に架橋地点の周囲の環境を示す。桁下面から海面までの距離は約 12m であった。1966 年に建設されてから 10 数年後に著しい塩害劣化が生じていたため，1980 年にすべての桁に断面修復及び補強が実施された。補強として，すべての桁に F130T の PC ケーブルが下フランジの両側に 1 本ずつ配置された(図-4.1.2)。この付加ケーブルは，防食のためにコンクリートで覆われた。写真-4.1.2 に補修直後の橋の外観を示す。

その後，再び塩害劣化が見られるようになったことから，主桁 G3～G5(海側が G1)について補修・補強が実施された。このとき，付加ケーブルが撤去され，断面補修の後にポリエチレン被覆 PC 鋼材(F100T)を用いた外ケーブルによる補強が新たに施された。また，ひび割れの抑制及びひび割れ部の防食のため，CFRP シートが下フランジを覆うように貼り付けられた。G1，G2 は，比較的損傷の程度が軽微であったため，再補修されなかった。いずれの桁も，ウェブの損傷はほとんど認められず，ウェブの断面補修やコンクリート塗装などは実施されていなかった。

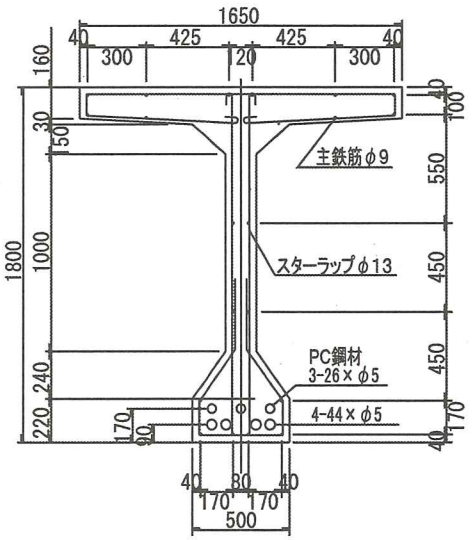


図-4.1.1　試験桁の基本断面

表-4.1.1 試験桁の主な諸元等

試験体名	G1,G2	G3,G4,G5
採取位置	第 1, 2 主桁	第 3, 4, 5 主桁
橋梁形式	ポストテンション PC 単純桁	
	非合成 T 桁 5 主桁	
ｺﾝｸﾘｰﾄ設計基準強度	主桁　39 MPa (400 kgf/cm^2) 床版　29 MPa (300 kgf/cm^2)	
主要鋼材	BBRV 3 - 26φ5,　4 - 44φ5	
PC 鋼材の規格	SWPR1　5mm	
引張強度	1620 MPa (16500 kgf/cm^2)	
初期導入張力	1130 MPa (11500 kgf/cm^2)	
有効ﾌﾟﾚｽﾄﾚｽ	773 MPa	
竣工年月	1966 年 3 月	
補修・補強履歴	80 年（1 回）	80 年，'97 年（2 回）
撤去年月	2000 年 6 月	
載荷試験，解体	2000 年 8～9 月	
今回の調査	2001 年秋	

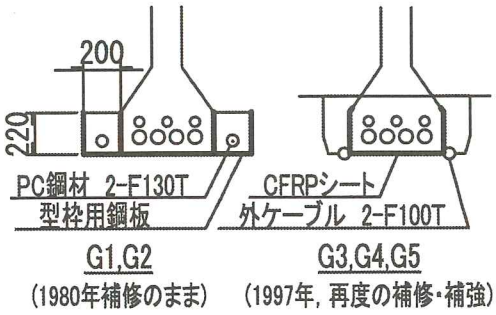


図-4.1.2　補修・補強の概要

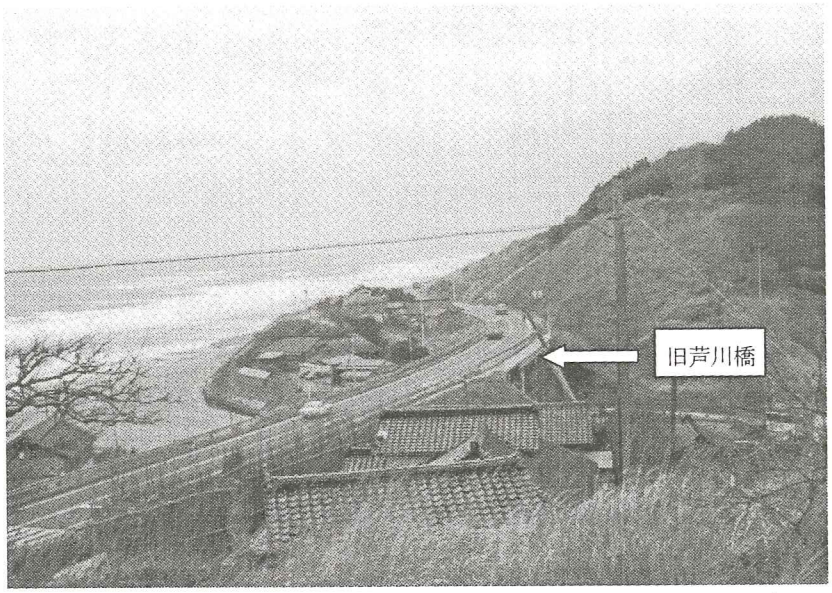


写真-4.1.1　架橋地点の周囲の環境

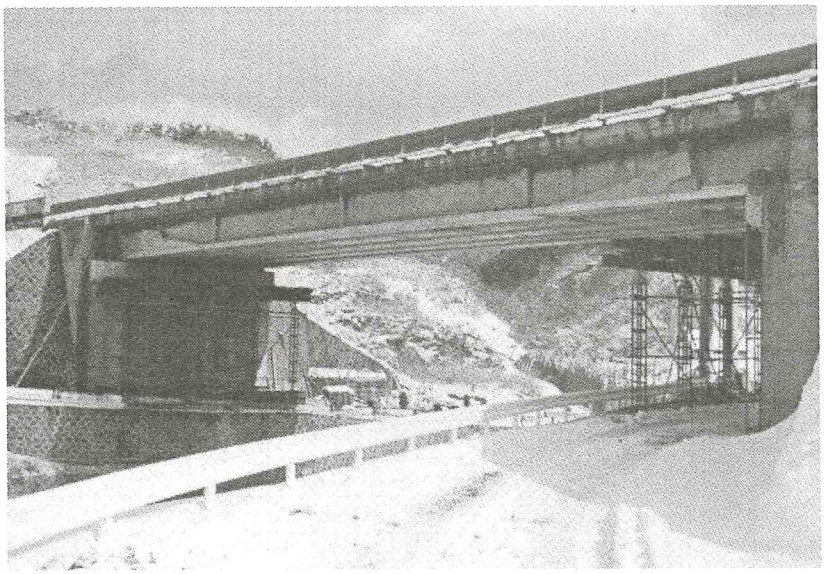


写真-4.1.2　第 1 回補修直後の橋の外観

(写真手前の桁が今回の調査対象)

4.1.2 主桁の塩分浸透状況

図-4.1.3～4 に各試験桁ごとにウェブで 3 箇所（両面）ずつ，塩化物イオン量の含有状況を調査した結果を示す。図-4.1.3 の中にコア圧縮強度の平均値も合わせて示した。G1，G2 桁は他の桁に比べてコンクリートのコア強度が大きく，塩化物の拡散係数も小さい傾向にあることから，コンクリートの塩分浸透抵抗性が比較的高かったことがわかった。また，塩化物イオンの分布より算出したコンクリート表面の塩化物イオン量は G3, G4, G5 の方が G1, G2 に比べて大きい傾向にあり，G1, G2 の塩分の付着量が比較的少なかったことがわかった。これらの２つの点から，G1, G2 の桁の劣化が比較的軽微であったものと考えられる。

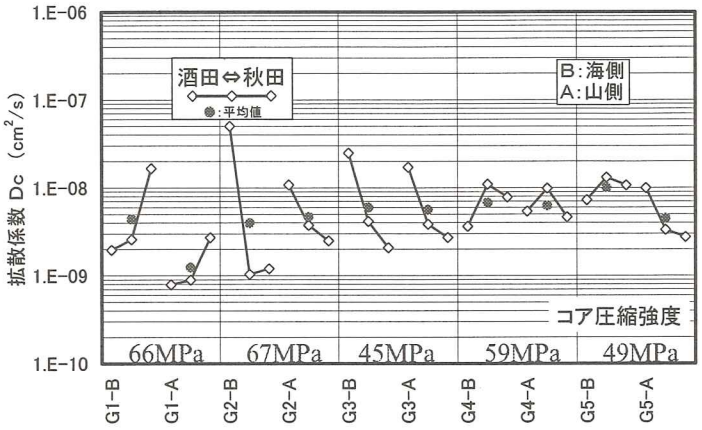


図-4.1.3　コンクリートの塩化物拡散係数 Dc

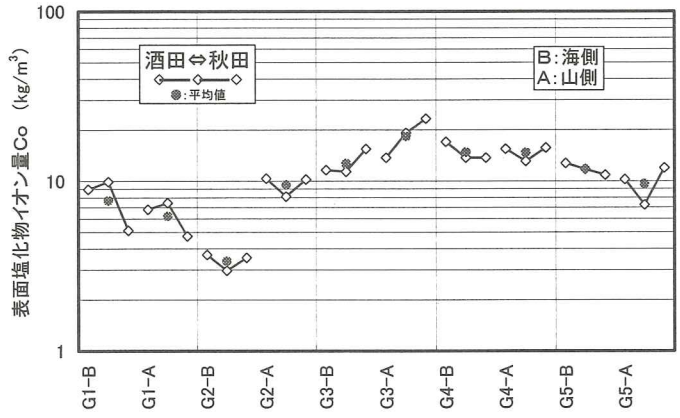


図-4.1.4　試験桁の表面塩化物イオン量 Co

4.2 調査箇所と調査項目

(1) 主桁コンクリートの調査

各主桁のコンクリートが異なっていることを利用して，それぞれのコンクリートの性質，状態と塩分浸透との関係についてデータを収集することとした。図-4.2.1～3 に，主桁コンクリートの調査箇所を示す。旧芦川橋は，塩害劣化のほとんどが下フランジに見られ，ウェブはコンクリート塗装等がなく，建設から撤去までの 34 年間，元のコンクリートのまま架橋地点に置かれていた。特に外桁の外面を除いては，直接雨がかからない箇所であった。主桁は撤去後約 3 ヶ月は載荷試験のため屋外に置かれ，載荷試験後は各桁の破壊箇所付近のブロックと G1 桁(無載荷)の一部を土木研究所実験棟屋内に搬送された。今回の調査はその後約 1 年後(2001 年秋)に実施した。調査対象とした主桁は G1，G3，G5 の 3 主桁とした。表-4.2.1 に調査項目を示す。

(2) 補強部コンクリートの調査

図-4.2.3～4 に，G1 桁の補強部コンクリートの調査箇所を示す。補強部コンクリートは 1980 年の補修・補強の際，付加ケーブルの防食を目的として施工されたものである。付加ケーブルの定着体近傍のコンクリートは施工後比較的早いうちに生じたと考えられるひび割れが見られた。このひび割れ部の塩分浸透状況を把握することに主眼を置いて，コンクリートの品質，含水状態，ひび割れ幅と塩分浸透の関係についてデータを収集した。表-4.2.1 に補強部コンクリートの調査項目も合わせて示した。

表-4.2.1　調査項目

	項　　目	主桁コンクリート	補強部コンクリート	備　考
1	圧縮強度	φ70mm，3 本 (C4～C6)	φ100mm，3 本 (C1～C3)	
2	中性化	3 本 (C4～C6)	3 本 (C1～C3)	
3	ＥＰＭＡ	1 個×3 本 (OP1～OP3)	1 個×5 本 (SE1～SE5) ひび割れ部	深さ 80mm まで
4	Cl 量の分布	5 ｽﾗｲｽ×3 本 (OP1～OP3)	5 ｽﾗｲｽ×5 本 (SE1～SE5)	10mm ピッチ，ひび割れ部近傍を除く
5	Na の分布	－	5 ｽﾗｲｽ×5 本 (SE1～SE5)	
6	気泡径分布(ﾘﾆｱﾄﾗﾊﾞｰｽ)	1 個×3 本 (OP1～OP3)	－	
7	細孔径分布(ﾎﾟﾛｼﾒｰﾀ)	3 個×3 本 (OP1～OP3)	－	10mm ピッチ
8	示差熱分析 (TG-DTA)	3 個×3 本 (OP1～OP3)	－	10mm ピッチ
9	含水率(表乾状態)	3 ｽﾗｲｽ×3 本 (OP1～OP3)	－	10mm ピッチ
10	含水率分布 (自然乾燥状態)	3 本 (HR7～HR9) 湿式コア採取のみ	6 本 (HR1～HR6) 湿式 3 本，乾式 3 本 [1)]	20mm ピッチ

注 1) コア採取方法
注 2) 1～2，3～9 はそれぞれ同じコアを用いた。
注 3) OP1～3 の分析はすべて海側の面を対象とした。

(3) PC 定着部の調査

G1 桁の秋田側桁端部の PC 定着体付近を解体して，PC 鋼材，シース及び定着体の腐食状況と桁端から塩分浸透状況を調査した。対象とした定着体は C4 の PC 鋼材の定着体であった。塩化物イオン量測定及び圧縮強度を把握するため，桁端部の定着体直上からコア 1 本を採取した(図-4.2.5，TT1)。また，定着体付近の PC 鋼線の腐食状況を確認するため，外観調査を行うとともに，10 本の PC 鋼材の引張試験を行った。

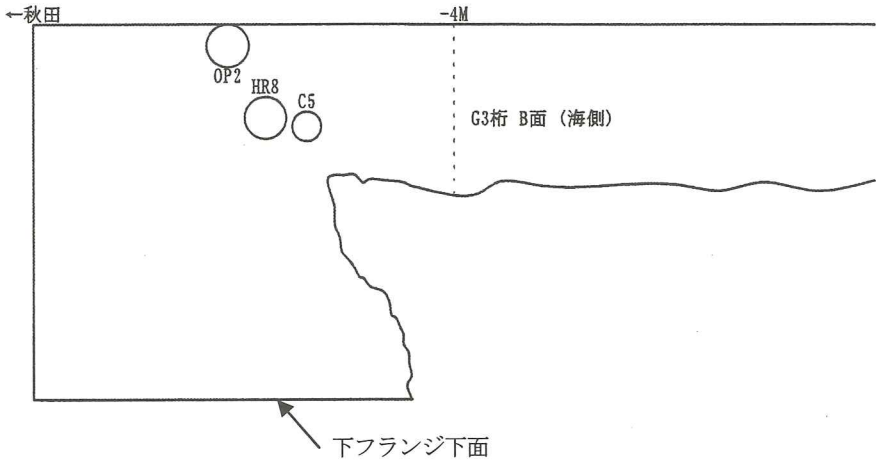


図-4.2.1　主桁コンクリートの調査箇所（G3 桁）

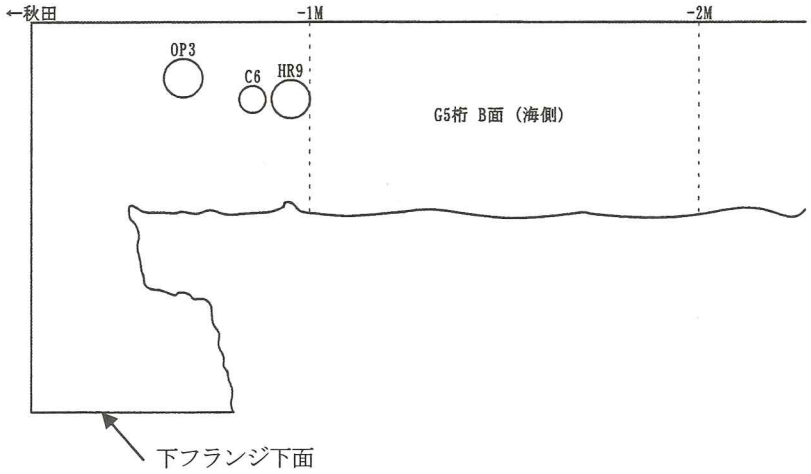


図-4.2.2　主桁コンクリートの調査箇所（G5 桁）

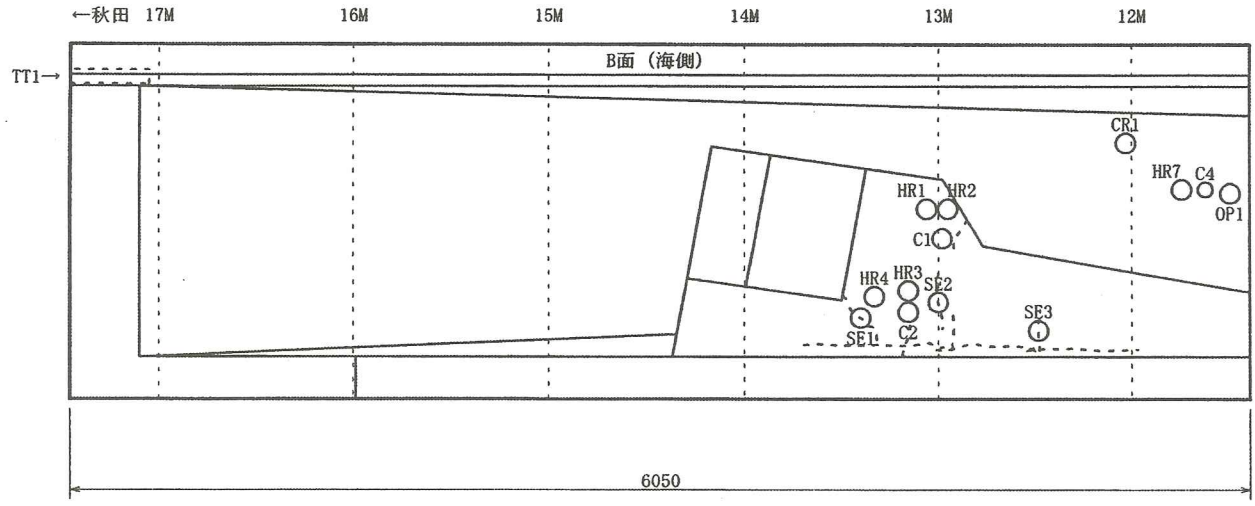


図-4.2.3　主桁コンクリート及び海側補強部コンクリートの調査箇所（G1 桁）

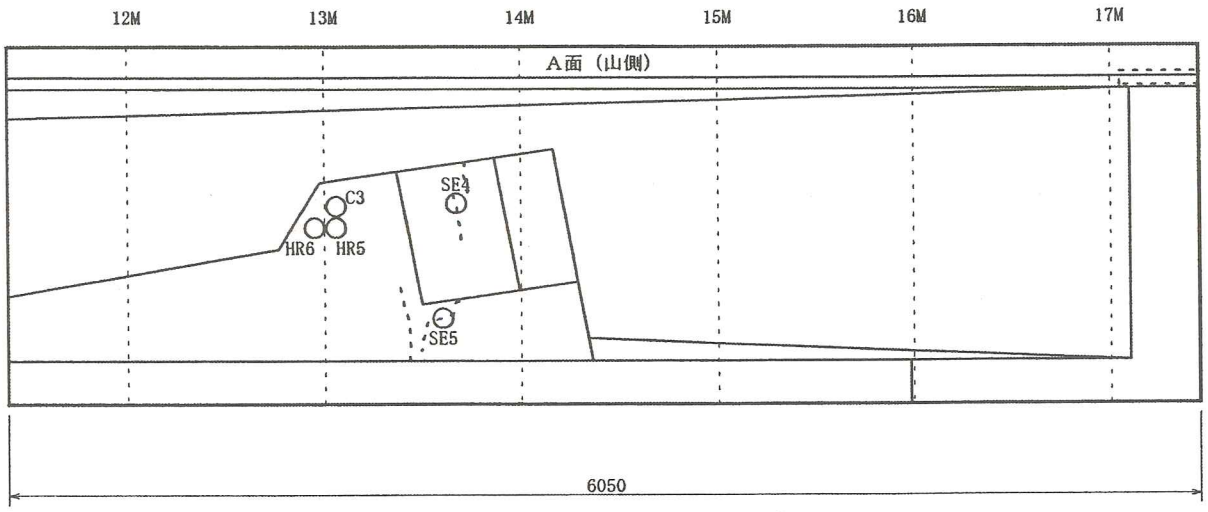


図-4.2.4　陸側補強部コンクリートの調査箇所（G1 桁）

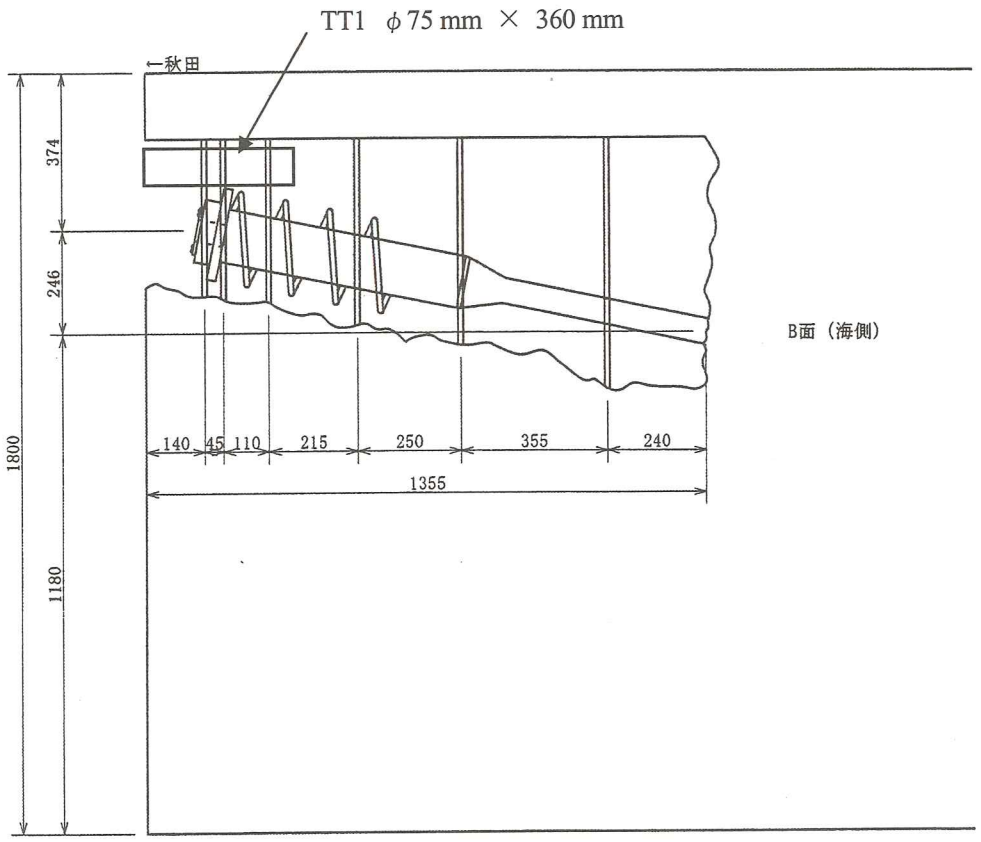


図-4.2.5　桁端部 PC 定着体の調査箇所

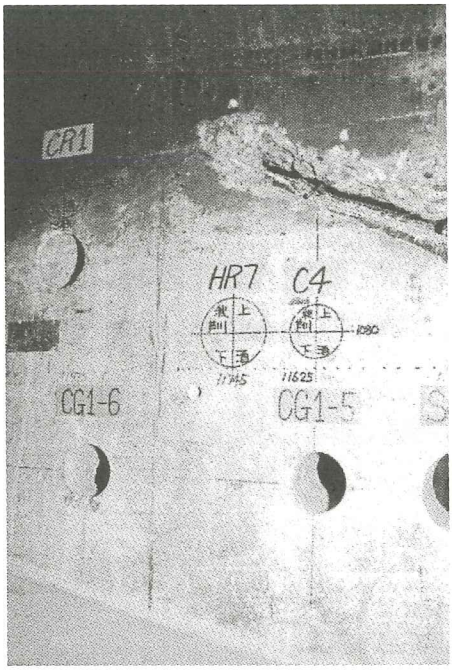


写真-4.2.1　主桁コンクリートのコア採取箇所
(G1 桁)

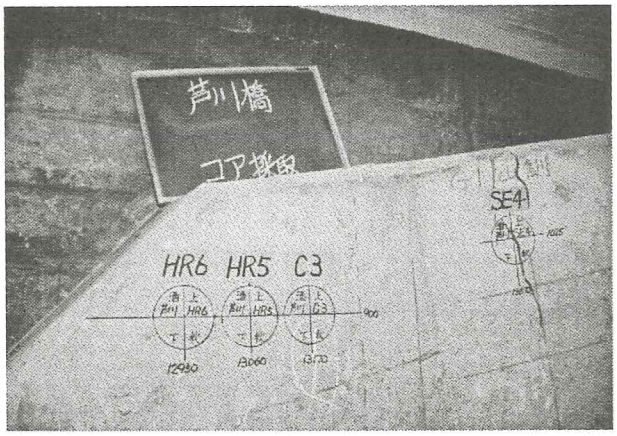


写真-4.2.3　補強部コンクリートのコア採取状況
(G1 桁，陸側)

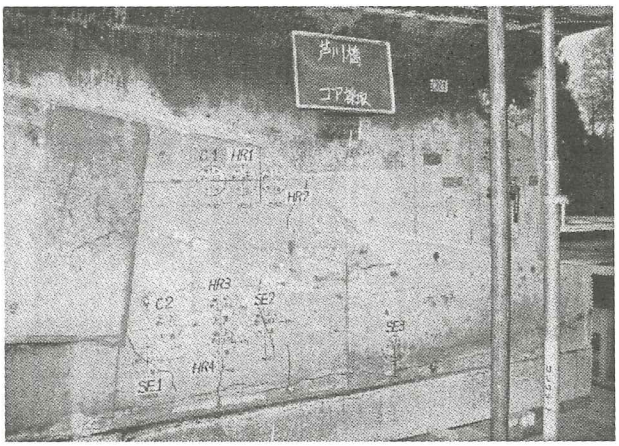


写真-4.2.2　補強部コンクリートのコア採取箇所
(G1 桁，海側)



写真-4.2.4　桁端部コア採取箇所
(G1 桁，秋田側)

4.3 主桁コンクリートの調査結果

表-4.3.1 に圧縮強度試験結果を示す。また，参考として，表-4.3.2 に前回調査時[4.1)]における圧縮強度試験結果を示す。前回の結果では，G1 桁及び G3 桁の圧縮強度は同じ主桁コンクリートであっても場所によって大きく異なっており，ばらついていた。今回の試験結果のうち，C4 は，そのコア採取位置が CG1-5 と近接していたが，圧縮強度は CG1-3 に近く，G1 桁の中では比較的低い値であった。C5 の圧縮強度は，CG3-3 ほどではないが，G3 桁の中で低い傾向にあるとともに，他の主桁と比べても低い傾向にあった。C6 の結果は，前回の結果よりもやや高い傾向にあった。

表-4.3.3，4.3.4 にそれらのコアの中性化深さ測定結果を示す。G3 桁の中性化深さが他の桁よりも大きい傾向を示していた。前回の調査[4.1)]では，G1 桁と G5 桁の中性化深さの差が見られたが，今回のコアでは差がなかった。

表-4.3.5 は，C4～C6 のコア近傍で採取した OP1～OP3 のコアについて測定した結果である（EPMA 測定位置の近傍）。これらの中性化深さは，EPMA 試料以外の部分でフェノールフタレインにより測定した(写真-4.3.1～3)。

表-4.3.1 圧縮強度試験結果

コア番号 (主桁番号)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
C4 (G1 桁)	53.1	24.9
C5 (G3 桁)	35.8	18.6
C6 (G5 桁)	54.7	39.8

表-4.3.2 載荷試験時圧縮強度試験結果

主桁番号	コア番号	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
G1	CG1-1	71.0	29.3
	CG1-3	55.2	24.9
	CG1-5*	70.9	29.8
	平均	65.7	28.0
G3	CG3-1	58.9	28.0
	CG3-3*	30.6	20.4
	CG3-5	45.9	21.8
	平均	45.2	23.4
G5	CG5-1	51.2	22.9
	CG5-3*	49.9	24.7
	CG5-5	44.8	23.9
	平均	48.6	23.8

*) C4～C6 に最も近いコア

表-4.3.3 中性化深さ(海側)

コア番号 (主桁番号)	平均値 (mm)	最大値 (mm)
C4 (G1 桁)	1	5
C5 (G3 桁)	4	7
C6 (G5 桁)	1	3

表-4.3.4 載荷試験時中性化深さ(海側)

主桁番号	コア番号	平均値 (mm)	最大値 (mm)
G1	CG1-1	0	0
	CG1-3	1	2
	CG1-5*	0	0
	平均	0	1
G3	CG3-1	14	17
	CG3-3*	7	14
	CG3-5	8	14
	平均	10	15
G5	CG5-1	5	11
	CG5-3*	6	7
	CG5-5	2	8
	平均	4	9

*) C4～C6 に最も近いコア

表-4.3.5 中性化深さ(海側)

コア番号 (主桁番号)	平均値 (mm)	最大値 (mm)
OP1 (G1 桁)	3	4
OP2 (G3 桁)	5	7
OP3 (G5 桁)	1	2



写真-4.3.1　OP1 の中性化試験結果 (G1 桁)



写真-4.3.3　OP3 の中性化試験結果 (G5 桁)



写真-4.3.2　OP2 の中性化試験結果 (G3 桁)

図-4.3.1～4.3.3 に，OP1(G1 桁)，OP2(G3 桁)，OP3(G5 桁)それぞれの EPMA 分析結果を示す。各コアともに，塩化物イオン，ナトリウムイオン，カルシウムイオン，硫化物イオンについて測定した結果を示す。ナトリウム，カルシウム，硫化物は酸化物に換算した濃度で示されている。塩化物イオンの浸透深さ，浸透量は多い方から G3 桁，G1 桁，G5 桁の順であった。

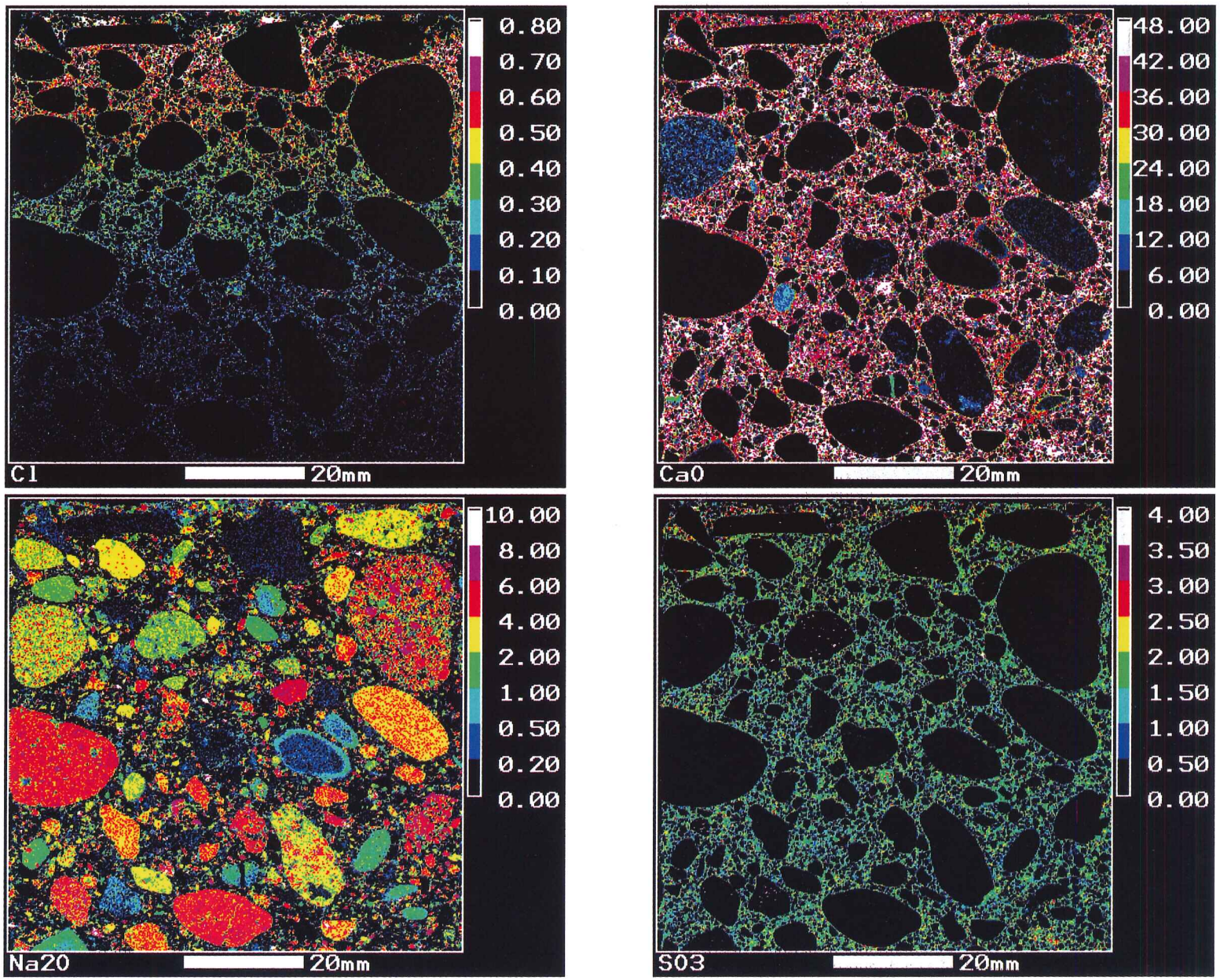
フェノールフタレインによる中性化試験の結果(写真-4.3.1～3)と合わせて見ると，中性化の領域でカルシウム濃度が内部に比べて小さくなっていたことがわかる(Ca の結果で表層部の赤色濃度が低い傾向にある)。これによると，中性化深さは，深い方から G3 桁(3-13mm，ばらつき大きい)，G5 桁(1-3mm)，G1 桁(0-3mm，OP3 よりも中性化の程度が弱い)の順であった。

中性化が比較的深かった OP2 の結果を見ると，中性化領域で塩化物イオン及び硫化物イオンがほとんどない部分が見られた。また，硫化物イオンは中性化領域のすぐ外側(コンクリートの内部側)で顕著な濃縮が見られた。塩化物イオン濃度もコンクリートの内側で高くなっているが，硫化物イオンの濃縮とやや異なり，中性化領域の直近でピークが出ておらず，外部からの塩化物イオンの浸透と区別できなかった。一方，ナトリウムイオンは，濃度差が判別しにくいものの，塩化物イオンや硫化物イオンに比べて中性化の範囲で逆に多くなっていた。

硫化物イオンやナトリウムイオンは中性化領域の内か外かの違いはあるもののコンクリートの表層付近で濃度の高い部分が確認されているが，塩化物イオンのような外部からの拡散浸透とは大きく異なっており，外部から侵入したものか，中性化に伴うなんらかの濃度変化によるものなのかは判別できていない。仮にある程度の浸透があったとしても，硫化物イオンやナトリウムイオンの浸透は塩化物イオンに比べて著しく遅いものと推察される。

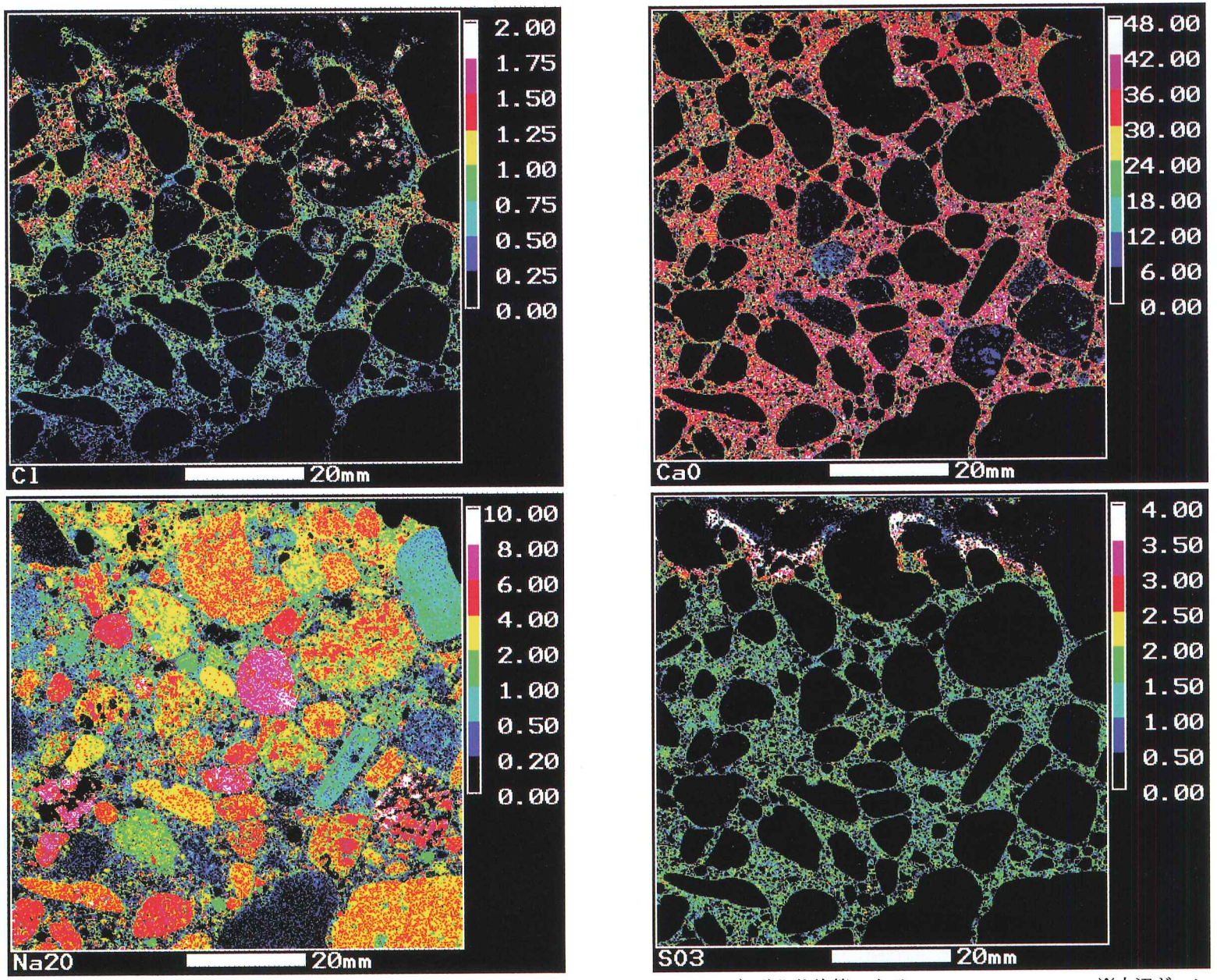
表層部の濃度変化部分を除く内部のコンクリートのカルシウムイオン濃度をコア間で比較すると，OP2 のカルシウムイオン濃度が OP1 や OP3 に比べて小さい(赤色が濃い)傾向が見られた。これは OP2 のコンクリートのセメント量が OP1 や OP3 に比べてもともと少なかったことを示すものと考えられる。このことは，圧縮強度，中性化深さ，塩化物イオンの拡散係数に関するコア間の差と符合するものである。

図-4.3.4～4.3.6 に，OP1～OP3 の塩化物イオン量の分布を示す。また，表-4.3.6 にこれらの分布から算出したコンクリート中の塩化物イオンの拡散係数を示す。OP2 の拡散係数は OP1, OP3 に比べて 1 桁大きかった。また，従来の既設橋の調査結果と同様に，OP2 の場合，表層から 10mm までの塩化物イオン量が内部に比べて著しく小さくなっていた。OP3 でもややその兆候が見られた。OP1 ではこのような傾向は見られなかった。



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示　　※上辺がコンクリート表面。

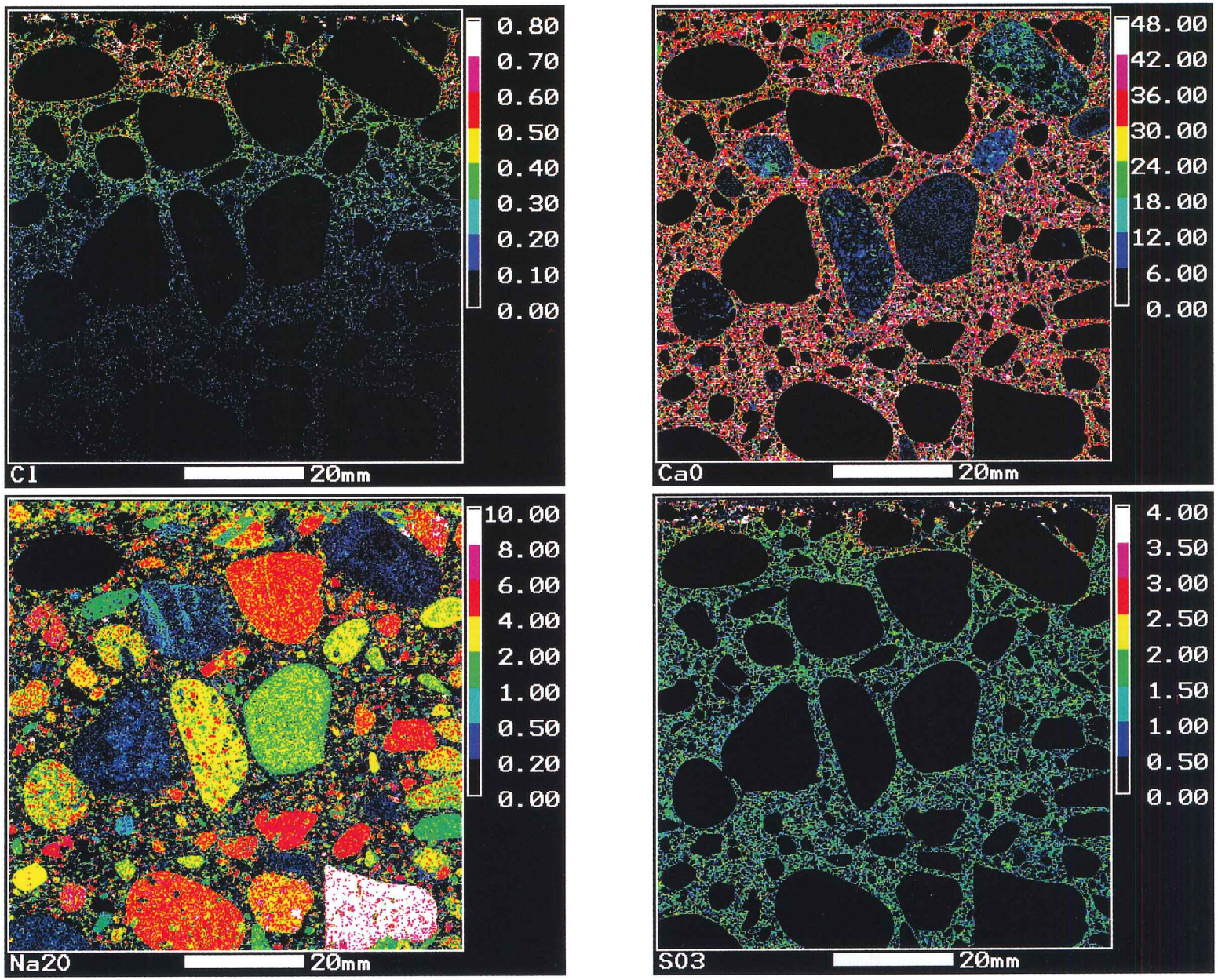
図-4.3.1　EPMA 面分析結果（OP1，G1 桁）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

図-4.3.2　EPMA 面分析結果（OP2，G3 桁）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

図-4.3.3　EPMA 面分析結果（OP3，G5 桁）

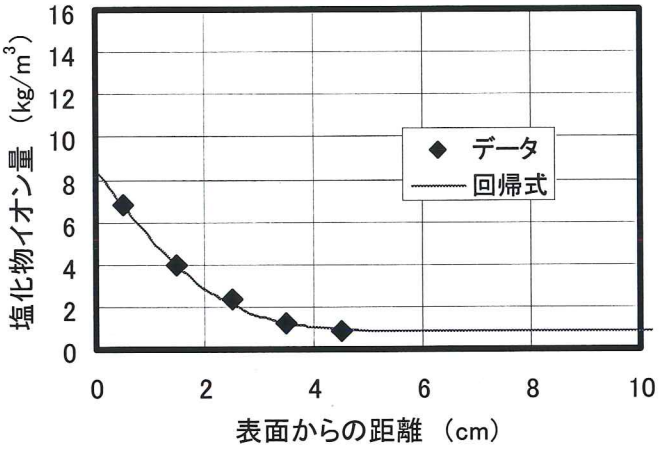


図-4.3.4　OP1 の塩化物イオン分布（G1 桁，海側）

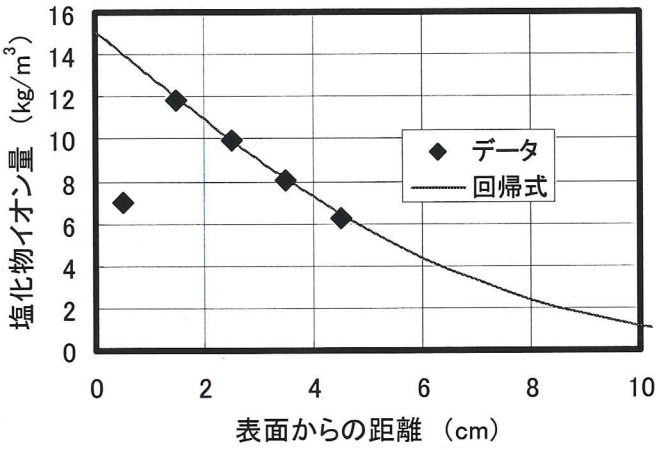


図-4.3.5　OP2 の塩化物イオン分布（G3 桁，海側）

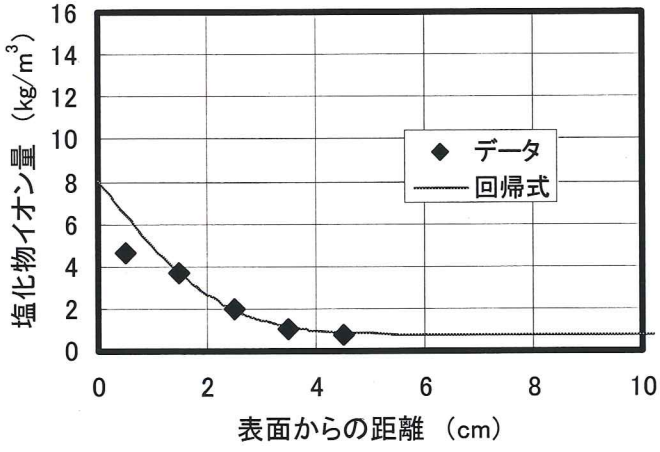


図-4.3.6　OP3 の塩化物イオン分布（G5 桁，海側）

表-4.3.6 塩化物イオン量の拡散係数 (海側)

コア番号 (主桁番号)	拡散係数 (cm^2/s)	表面塩化物イオン量 (kg/m^3，参考値)
OP1 (G1 桁)	1.5×10^{-9}	8.5
OP2 (G3 桁)	1.5×10^{-8}	15.1
OP3 (G5 桁)	1.5×10^{-9}	8.0

図-4.3.7 に OP1～OP3 の気泡径分布を示す。また，図-4.3.8 に，参考として，一般的な AE コンクリートの気泡径分布の例を示す[4.2)]。空気量 5.5%程度の一般的な AE コンクリートの場合，直径 5～300 μm のエントレインドエアが見られるが，OP1～OP3 ではこのような気泡径の範囲の気泡がほとんど見られなかった。このことから，旧芦川橋の主桁コンクリートは Non-AE コンクリートであったと考えられる。参考として，表-4.3.7 に気泡間隔係数測定結果を示す。一般的な AE コンクリートの場合，気泡間隔係数は 250 μm 以下となることからも，Non-AE であったことがわかる。

表-4.3.7　気泡間隔係数測定結果

コア番号 (主桁番号)	空気量 (%)	気泡数	気泡間隔係数 (μm)
OP1(G1 桁)	1.4	108	687
OP2(G3 桁)	1.2	113	611
OP3(G5 桁)	0.8	71	737

図-4.3.9～4.3.11 に OP1～OP3 の細孔径分布を示す。比較のため，図-4.3.12 に，材齢 30 日のコンクリート(W/C=25, 35, 55%)の例を示す[4.2)]。文献 4.2 のコンクリートでは，細孔直径 0.05～0.1 μm 付近で顕著なピークが見られたが，OP1，OP2 では，このようなピークは見られなかった。OP3 の場合，小さいピークが見られるが，顕著とは言い難いものであった。また，図-4.3.12 では細孔直径が 0.1 μm 以上の細孔空隙がほとんど存在していなかったが(他の事例でも 0.1 μm とは限らないものの同様の傾向が見られる)，OP1～OP3 の細孔空隙は，細孔直径 0.1～3 μm の範囲に広く分布していた。

図-4.3.12 の調査の際に深さ方向の採取位置の違いはほとんど見られなかったのと同様に，OP1 および OP3 の場合も，それぞれの空隙率分布の深さ方向の違いはほとんど見られなかった。OP2 の場合も空隙率分布の深さ方向の違いは小さいが，OP1，OP3 に比べるとややばらついていた。これらの結果を見ると，細孔空隙の空隙率分布は個々のコンクリートごとに固有の分布を有しているように見受けられた。表-4.3.8 にかさ密度と細孔径分布から得られる全細孔容積，全空隙率及び全空隙率の平均値を示す。全空隙率は深さ方向の傾向がコアによって異なっており，一定の傾向が見られなかった。

表-4.3.9　細孔径分布測定結果

コア番号 (主桁番号)	試料位置 (mm)	全細孔容積 (ml/g)	かさ密度 (g/ml)	全空隙率(%)	全空隙率 平均値(%)
OP1(G1 桁)	0～10	0.0531	2.31	12.3	11.0
	10～20	0.0516	2.11	10.9	
	20～30	0.0467	2.11	9.8	
OP2(G3 桁)	0～10	0.0455	2.27	10.4	12.9
	10～20	0.0704	2.14	15.1	
	20～30	0.0656	2.03	13.3	
OP3(G5 桁)	0～10	0.0469	2.21	10.4	11.9
	10～20	0.0546	2.12	11.6	
	20～30	0.0605	2.26	13.7	

全空隙率=全細孔容積×かさ密度

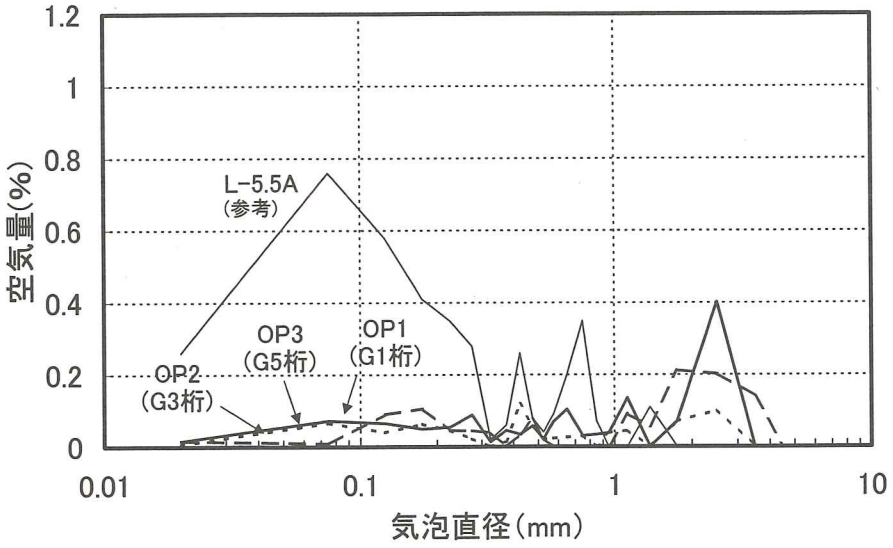


図-4.3.7　OP1～OP3 の気泡径分布

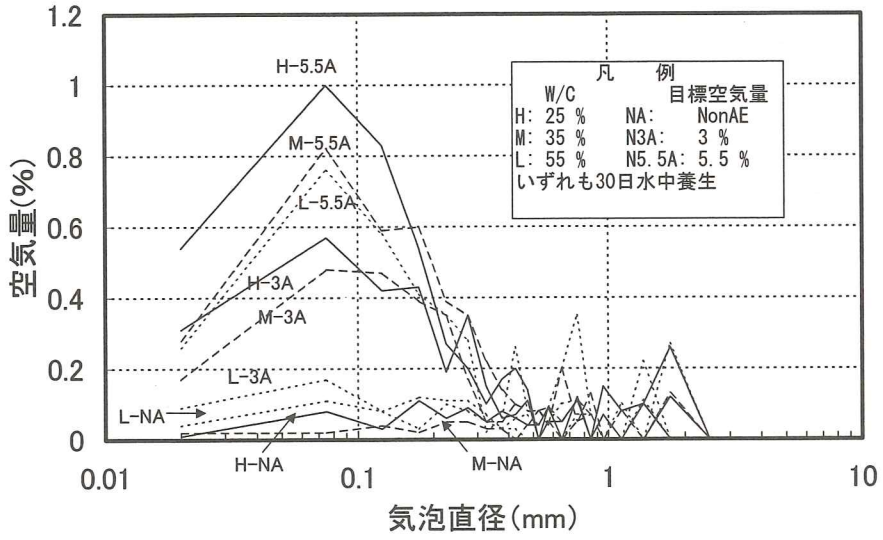
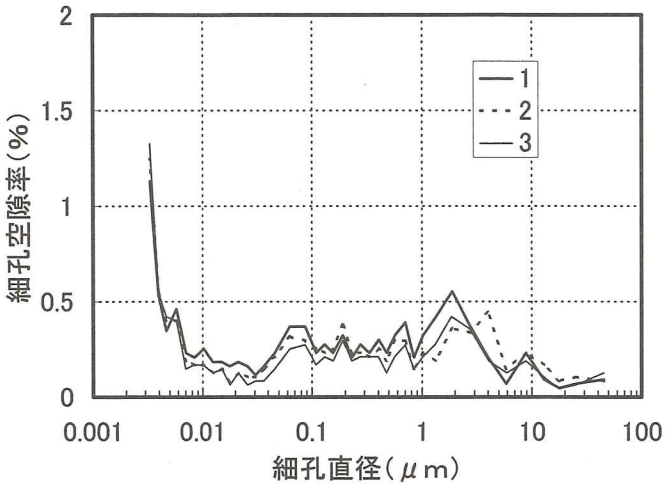


図-4.3.8　一般的なＡＥコンクリートの気泡径分布（参考）[4.2)]



凡　例
1: 表面から 10 mm の試料
2: 10～20 mm の試料
3: 20～30 mm の試料

図-4.3.9　OP1 の細孔径分布

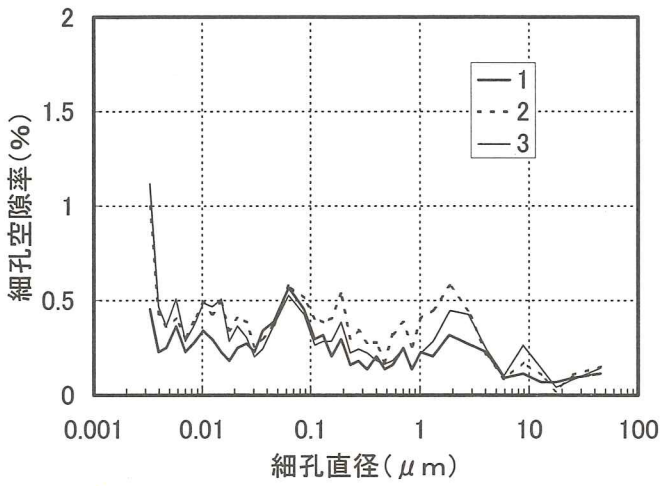


図-4.3.10　OP2 の細孔径分布

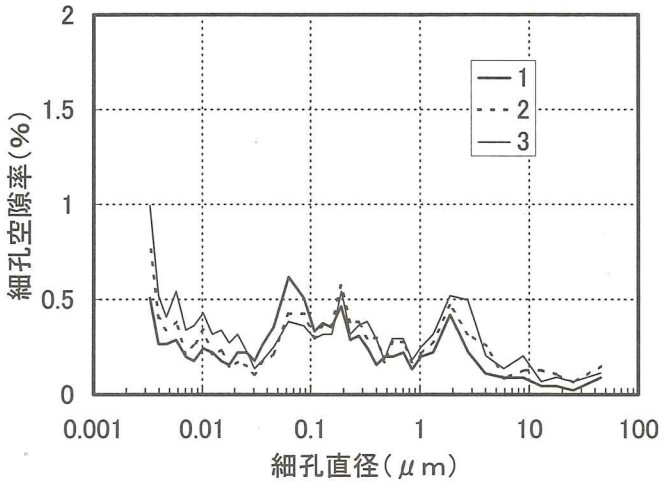


図-4.3.11　OP3 の細孔径分布

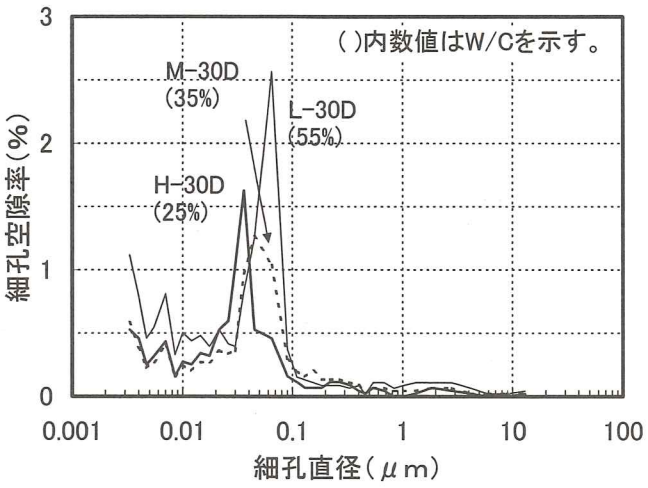


図-4.3.12　材齢 30 日のコンクリートの細孔径分布の例（W/C=25, 35, 55%）[4.2)]

表-4.3.10 に，OP1～OP3 の TG-DTA の結果から得られた各温度範囲での質量減量値から算出した $Ca(OH)_2$ と $CaCO_3$ の含有量推定値を示す。前掲表-4.3.5 に示したとおり，中性化が見られていた OP1～OP3 の表面から 10mm 以内では，$CaCO_3$ 含有量が深さ 10mm 以上の範囲での値に比べて顕著に大きくなっていた。それに伴って，表面から 10mm 以内の $Ca(OH)_2$ 含有量がそれより以深での含有量に比べて小さくなっていた。中性化深さが 3 本のコアの中で最も深かった OP2 の 0～10mm の $Ca(OH)_2$ 含有量 2.4%は他のコア(同 4.2%)よりもさらに小さかった。

表-4.3.10　示差熱分析試験結果

コア番号 (主桁番号)	試料位置 (mm)	$Ca(OH)_2$		$CaCO_3$		30～1000℃ (参考)
		減量値(%)	含有量(%)	減量値(%)	含有量(%)	減量値(%)
OP1(G1 桁)	0～10	1.01	4.2	4.65	10.6	19.5
	10～20	1.61	6.6	0.73	1.7	15.9
	20～30	1.35	5.6	0.40	0.9	14.2
OP2(G3 桁)	0～10	0.59	2.4	4.38	10.0	17.6
	10～20	1.54	6.3	1.35	3.1	17.8
	20～30	1.14	4.7	0.66	1.5	16.8
OP3(G5 桁)	0～10	1.02	4.2	4.20	9.5	17.9
	10～20	1.64	6.7	0.86	2.0	16.6
	20～30	1.50	6.2	0.49	1.1	13.4

・各分子量は $Ca(OH)_2$＝74.08，$CaCO_3$＝100.08，H_2O＝18.00 および CO_2＝44.00 とした。

・$Ca(OH)_2$：450℃付近の減量を $Ca(OH)_2$ の脱水によるものとした。

試料中 $Ca(OH)_2$＝100%とした場合の減量：18.00／74.08×100＝24.3(%)

$Ca(OH)_2$ 含有量(%)＝(測定値)／24.3×100

・$CaCO_3$：600～700℃付近の減量を $CaCO_3$ の脱炭酸によるものとした。

試料中 $CaCO_3$＝100%とした場合の減量：44.00／100.08×100＝44.0(%)

$CaCO_3$ 含有量(%)＝(測定値)／44.0×100

表-4.3.11 に OP1～OP3 の真空飽水処理後の含水率を示す。

表-4.3.11　含水率測定結果

コア番号 (主桁番号)	試料位置 (mm)	表乾質量 (g)	絶乾質量 (g)	含水率 (%)	含水率 平均値 (%)
OP1(G1 桁)	0～10	40.2	38.5	4.2	4.7
	10～20	42.1	39.8	5.5	
	20～30	43.0	41.1	4.4	
OP2(G3 桁)	0～10	42.1	39.9	5.2	4.8
	10～20	43.7	41.5	5.0	
	20～30	45.3	43.4	4.2	
OP3(G5 桁)	0～10	41.0	39.0	4.9	5.0
	10～20	42.6	40.6	4.7	
	20～30	42.7	40.4	5.4	

図-4.3.13 に HR7(G1 桁), HR8(G3 桁)及び HR9(G5 桁)の含水率分布を示す。各主桁のウェブを貫通したコアを用いて測定しており，横軸は海側表面からの距離を示している。ウェブ中心付近の含水率は表-4.3.11 に示した含水率と概ね一致していたことを踏まえて本図を見ると，両面の表層から 50mm 程度までの範囲は表層部に近いほど乾燥によって含水率が小さくなっていたことがわかる。表層部の含水率は中心に比べて約 1%の低下が見られ，中心の約 80%程度であった。３本のコアの含水分布は概ね同程度であり，主桁間の明確な差は見られなかった。また，海側と山側の差も顕著ではなかった。

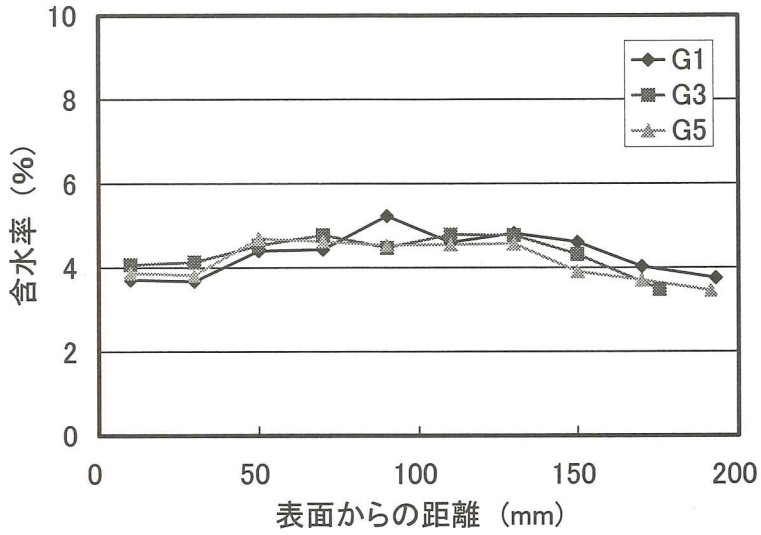


図-4.3.13　一般部(HR7～HR9)の含水分布

4.4 補強部コンクリートの調査結果

表-4.4.1 に補強部コンクリートの圧縮強度試験結果を示す。補強部コンクリートは，構造部材ではなく，専ら付加ケーブルの防食を目的とされていたので，耐久性の面から W/C が低く設定されていた可能性があり，結果としてこのような高い圧縮強度が得られたものと考えられる。付加ケーブルの定着体付近では，補強部のコンクリートの厚さが比較的大きかったことから，温度ひび割れが生じ易い状況にあったと考えられる。表-4.4.2 にそれらのコアのフェノールフタレインによる中性化深さ測定結果を示す。ごく局所的に数 mm の中性化が見られたが，いずれのコアもほとんど中性化が生じていなかった。

表-4.4.1 圧縮強度試験結果

コア番号	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
C1 (海側)	55.3	25.6
C2 (海側)	59.7	28.1
C3 (陸側)	71.0	28.0

表-4.4.2 中性化深さ

コア番号	平均値 (mm)	最大値 (mm)
C1 (海側)	0	4
C2 (海側)	0	7
C3 (陸側)	0	0

表-4.4.3 に SE1～SE5 のひび割れ幅とひび割れ深さを示す(目視による)。ひび割れ幅は，コア抜き前にコンクリート表面で測定したものである。ひび割れ深さはコア側面の両側で測定した。写真-4.4.1～5 に SE1～SE5 の EPMA 試料の試験面を示す。

表-4.4.3 補強部コンクリートコアのひび割れ状況 (単位：mm)

コア番号	ひび割れ幅	ひび割れ深さ (側面 A)	ひび割れ深さ (側面 B)	備　　考
SE1(海側)	0.06	2	40	
SE2(海側)	0.1	91	88	
SE3(海側)	0.08	31	37	
SE4(陸側)	0.1	100	83	コア全長にわたってひび割れ
SE5(陸側)	0.2	110	222	側面 B はコア全長にわたってひび割れ

図-4.4.1～4.4.5 に，SE1～SE5 それぞれの EPMA 分析結果を示す。各コアともに，塩化物イオン，ナトリウムイオン，カルシウムイオン，硫化物イオンについて測定した結果を示した。SE1～SE4 の塩化物イオンの浸透深さは大差が見られなかったが，SE5 は SE1～SE4 に比べて顕著に大きくなっていた。SE5 の表層部に塩化物イオン，硫化物イオンが顕著に少ない箇所が不均一に見られた。写真-4.4.1 に SE5 の EPMA 試験面より，表層部で塩化物イオン，硫化物イオンが少なかった中性化領域は淡黄色に変色していた。主桁コンクリートの場合には中性化領域におけるカルシウムイオン濃度の減少が把握できたが，補強部コンクリートでは明確でなかった。

SE4 を除いては写真やナトリウムイオン，カルシウムイオンの EPMA 分析結果でひび割れ位置を把握し難

いが，各コアともにコアの中心付近に表-4.4.3 に示した幅，深さのひび割れが生じていた。これを踏まえて，各コアの塩化物イオンの濃度分布を見ると，ひび割れ付近では，塩化物イオンの濃度は周囲と同等か少ないことがわかる。

なお，SE2 の塩化物イオンの図で，深さ 50～70mm の粗骨材の周囲で塩化物イオン濃度が高くなっていたのは，打設時点で塩化物イオンが付着した骨材が混入していたものと推察される。

図-4.4.6～4.4.10 に，SE1～SE5 の塩化物イオン量の分布を示す。また，表-4.4.4 にこれらの分布から算出したコンクリート中の塩化物イオンの拡散係数を示す。

EPMA の結果を見るかぎり，ナトリウムイオン濃度の変化は SE5 の中性化の範囲で濃度が高くなっていること以外に顕著な変化が認められなかった。図-4.4.11～4.4.15 に，SE1～SE5 のナトリウムイオン量の分布を示す。また，表-4.4.5 にこれらの分布から算出したコンクリート中のナトリウムイオンの拡散係数を示す(塩化物イオンと同様に算出した)。ナトリウムイオン濃度はごく表層で高くなっているが，その拡散速度は塩化物イオンに比べると著しく遅いことがわかる。各コアともに，少なくとも約 2 kg/m^3 程度のナトリウムイオン量が入っていたが，これは骨材中のナトリウムイオンが大きく影響していたことが EPMA の測定結果から把握できる。ペースト部分では，中性化部分を除いてほとんどナトリウムイオンは含まれていなかった。

図-4.4.16 にコンクリートの含水率分布を示す。図中には，湿式，乾式それぞれのコア採取方法での結果を示す。いずれの測定結果においても，湿式，乾式の測定方法の有意な差は見られなかった。陸側の測定結果は海側に比べて含水率が小さかった。陸側のコンクリートの圧縮強度は海側に比べて高かったことと合わせて考えると，陸側のコンクリートの W/C が海側よりも小さくなっていたものと考えられる。海側下部と陸側の結果は，含水率の程度が異なっていたが，いずれもコンクリートの表層部が内部よりも含水率で１％程度小さくなっていた。しかし，海側上部は含水率の深さ方向の変化が小さかった。

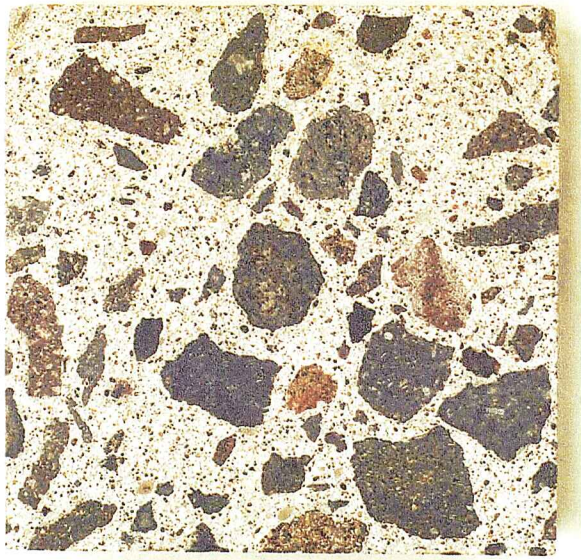


写真-4.4.1　EPMA 試料測定面 (SE1)



写真-4.4.3　EPMA 試料測定面 (SE3)

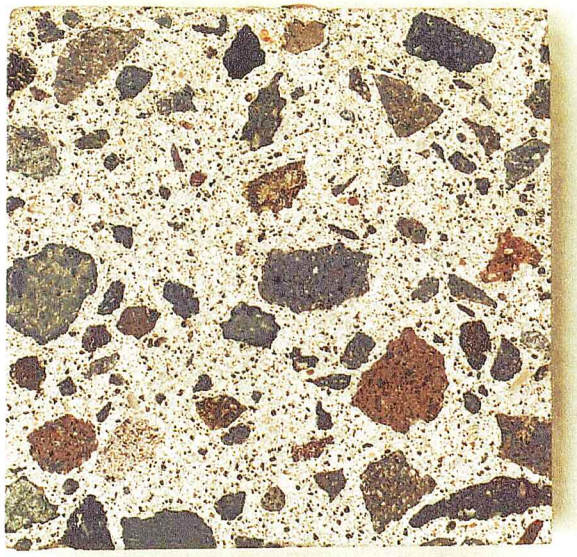


写真-4.4.2　EPMA 試料測定面 (SE2)



写真-4.4.4　EPMA 試料測定面 (SE4)　※上辺がコンクリート表面。

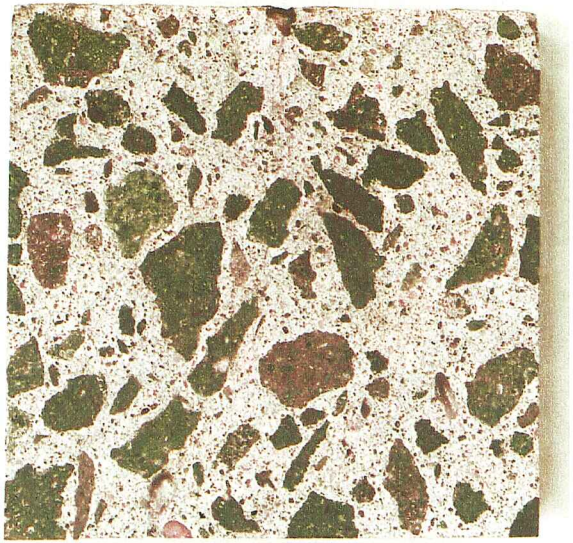
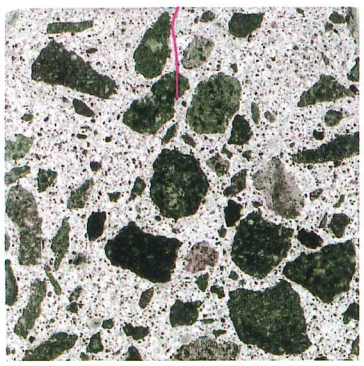
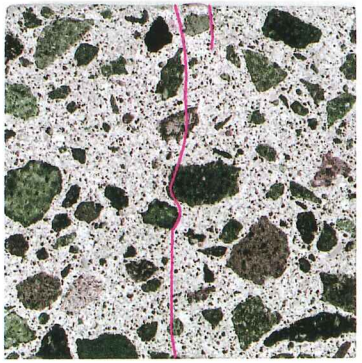


写真-4.4.5　EPMA 試料測定面 (SE5)　　※上辺がコンクリート表面。

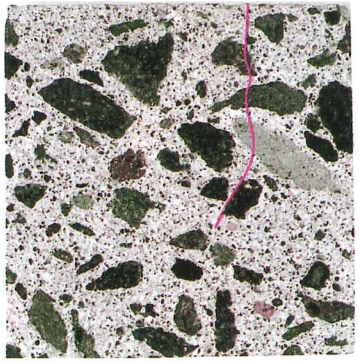
（参考）ひび割れ位置（20 倍拡大鏡による観察に基づく。カッコ内数値はひび割れ幅）



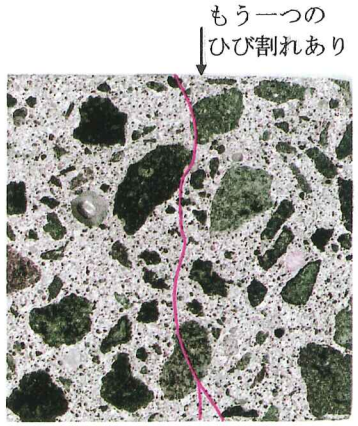
SE1
(0.01 mm 以下)



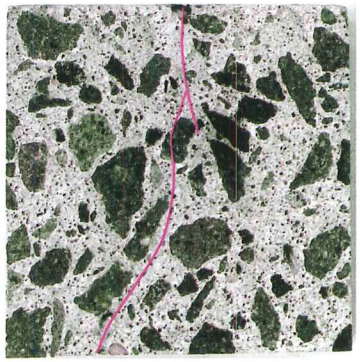
SE2
(0.01 mm 以下)



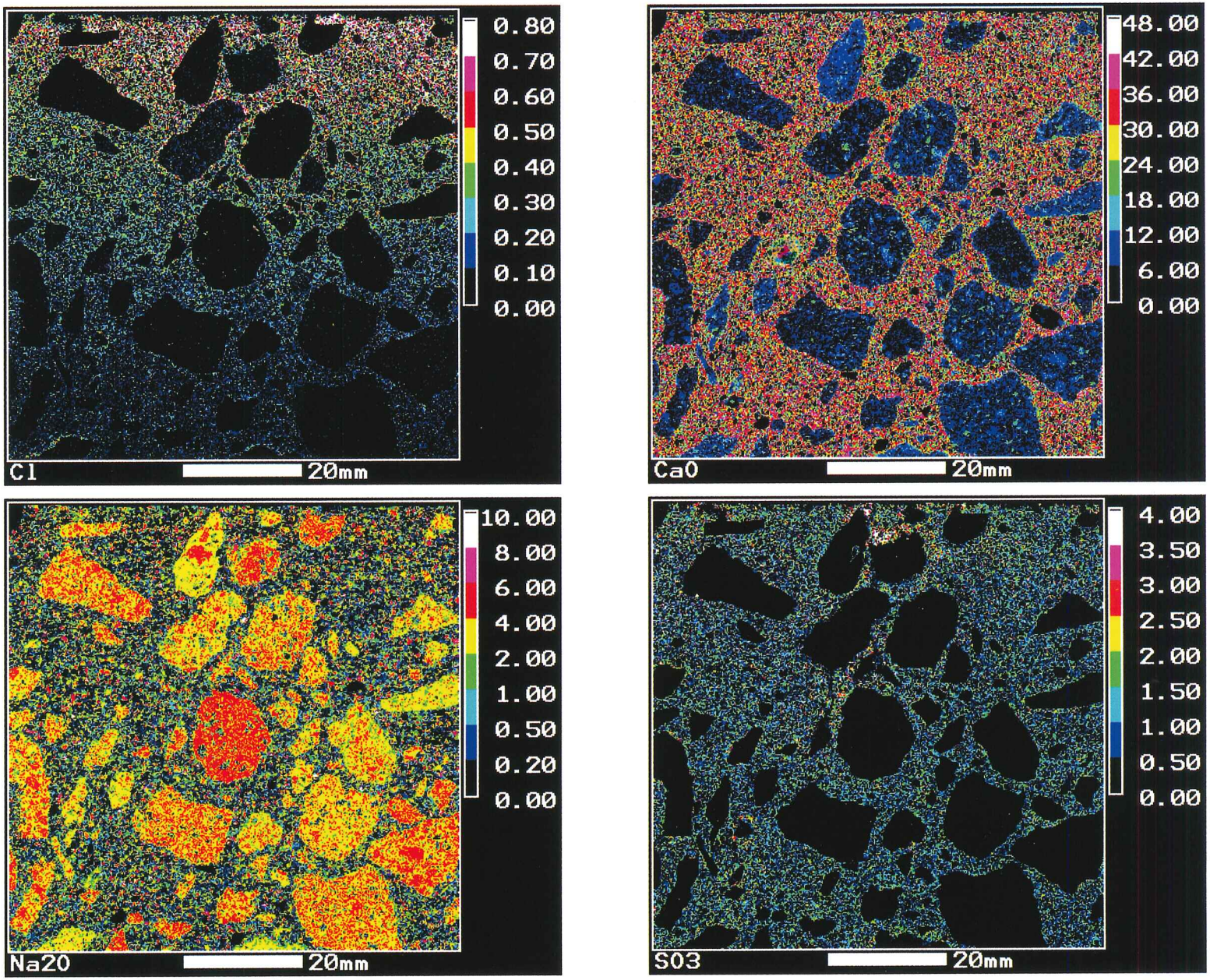
SE3
(0.01 mm 以下)



SE4
(上端 0.5 mm，下端いずれも 0.1 mm)



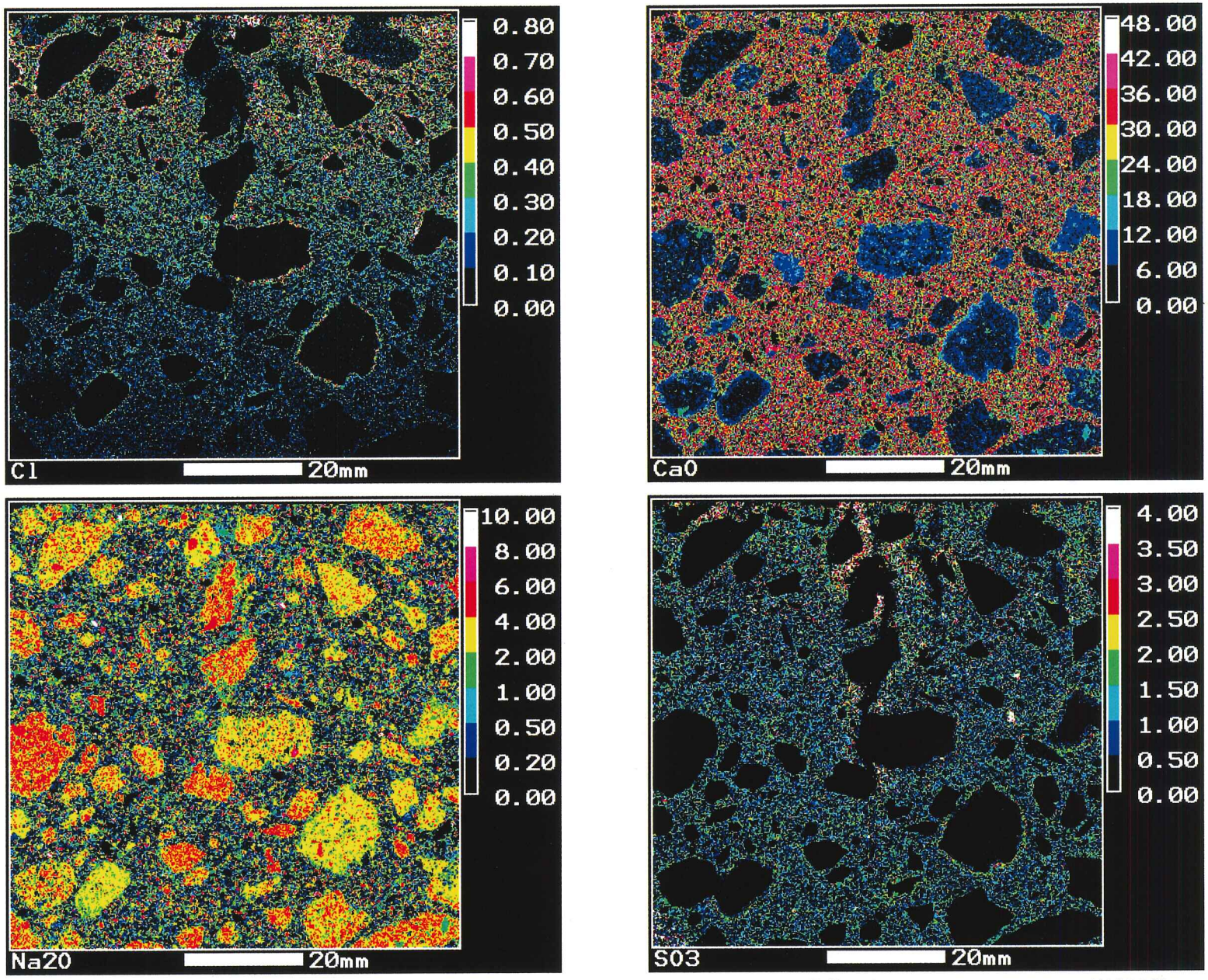
SE5
(上端 0.15 mm，下端 0.01 mm 以下)



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*) 酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

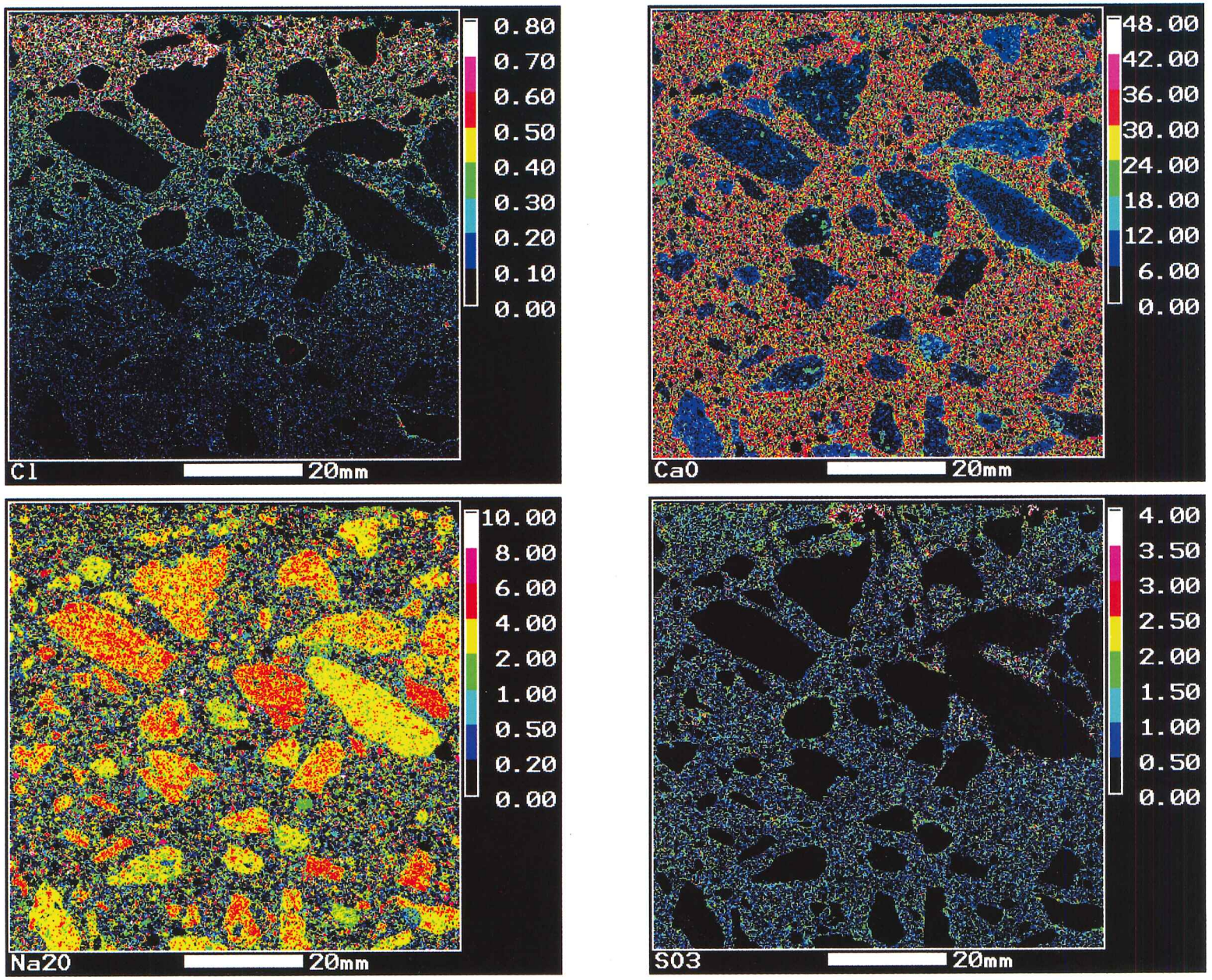
図-4.4.1　EPMA 面分析結果（SE-1）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*) 酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

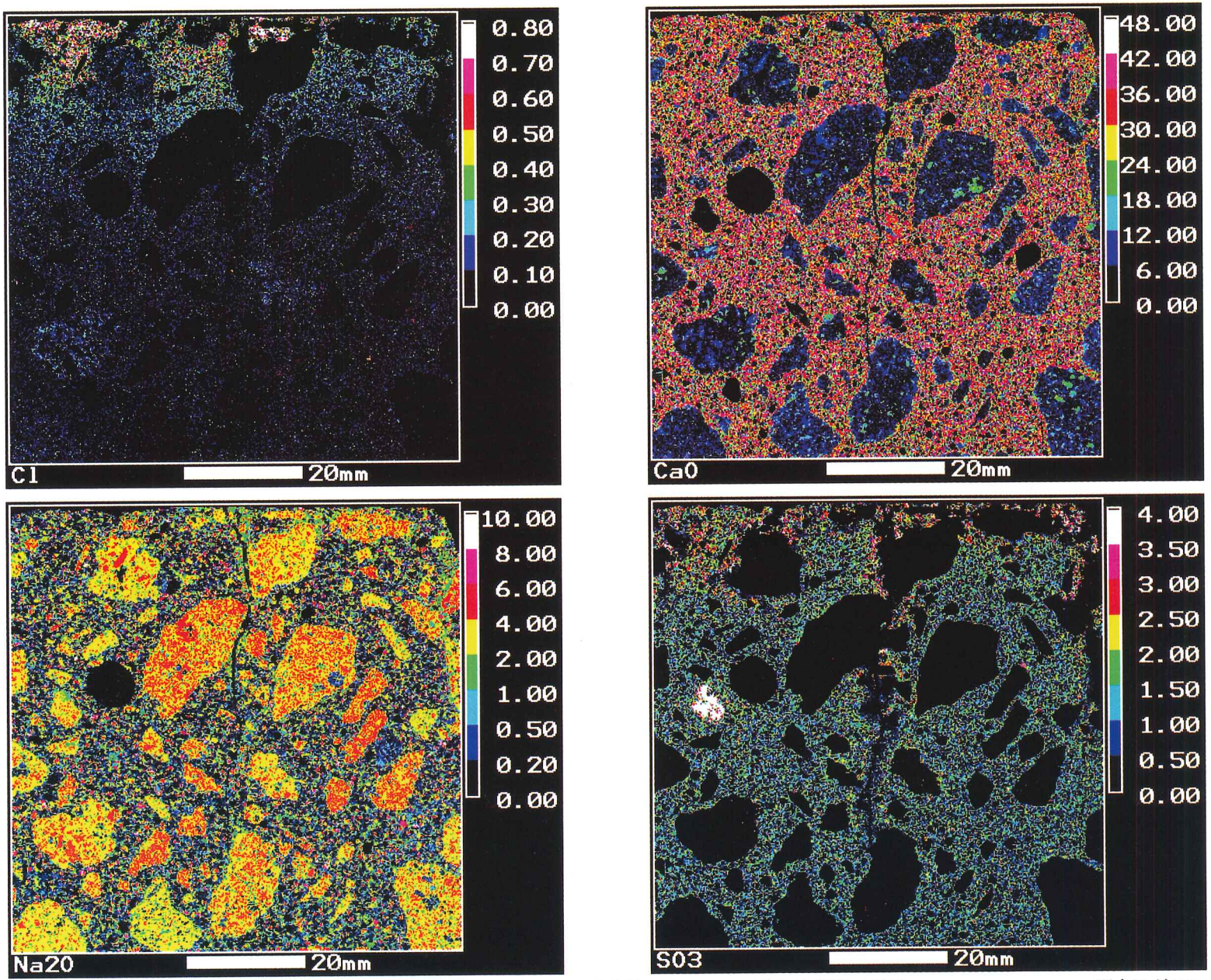
図-4.4.2　EPMA 面分析結果（SE-2）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

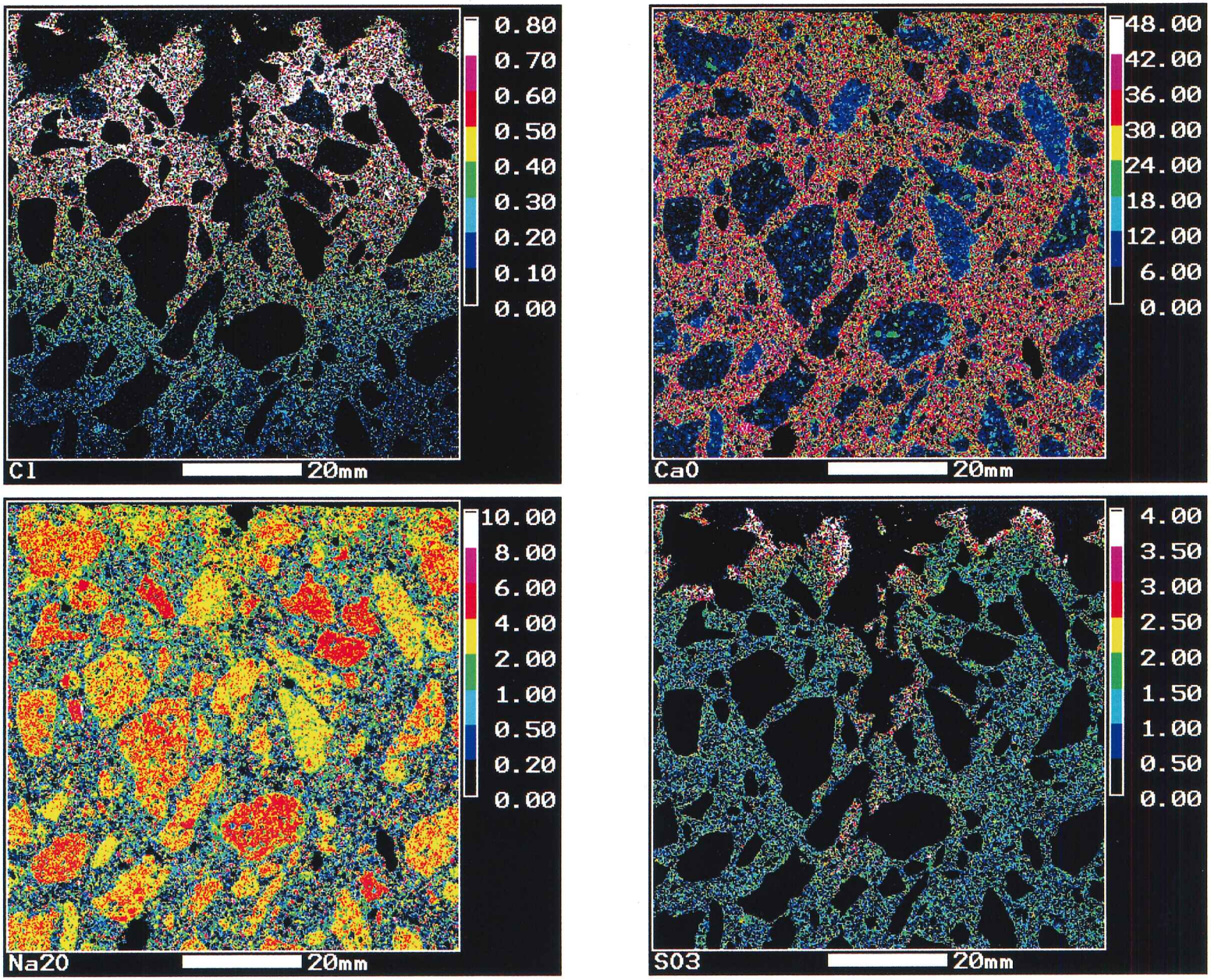
図-4.4.3　EPMA 面分析結果（SE-3）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*) 酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

図-4.4.4　EPMA 面分析結果（SE-4）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*) 酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

図-4.4.5　EPMA 面分析結果（SE-5）

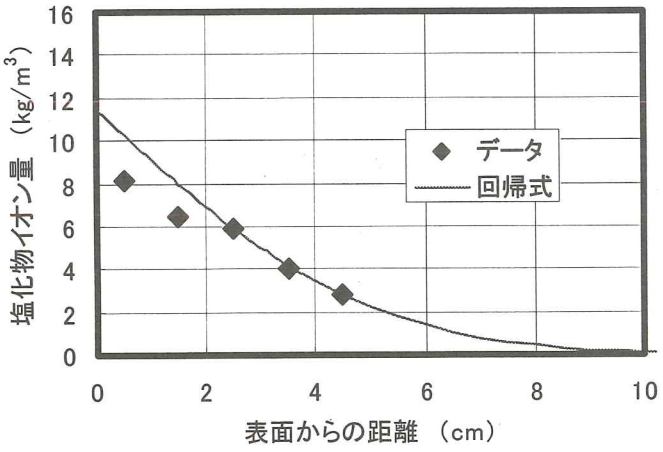


図-4.4.6　SE1 の塩化物イオン分布（G1 桁，海側）

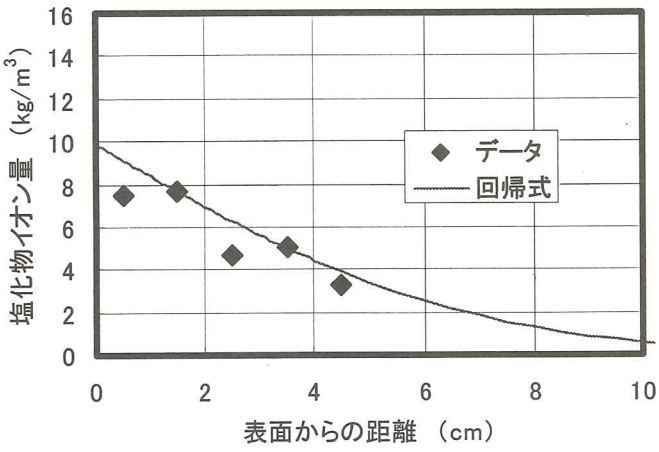


図-4.4.7　SE2 の塩化物イオン分布（G1 桁，海側）

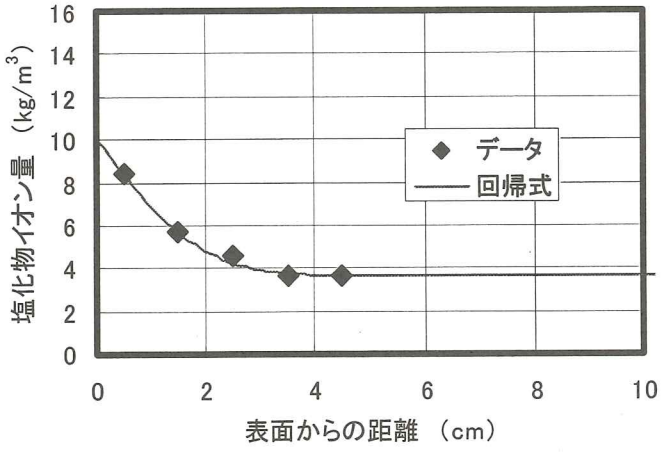


図-4.4.8　SE3 の塩化物イオン分布（G1 桁，海側）

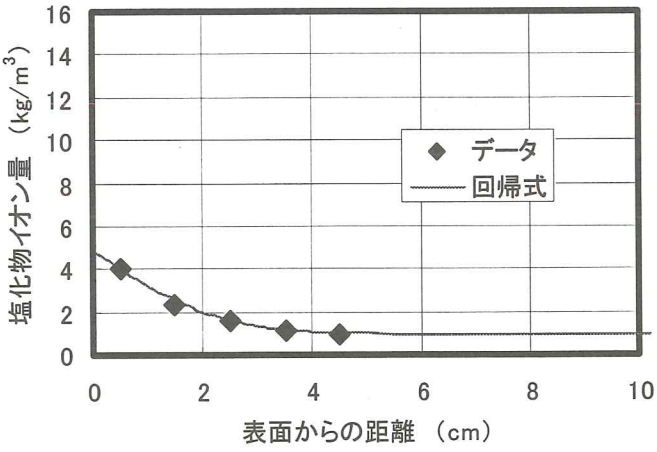


図-4.4.9　SE4 の塩化物イオン分布（G1 桁，陸側）

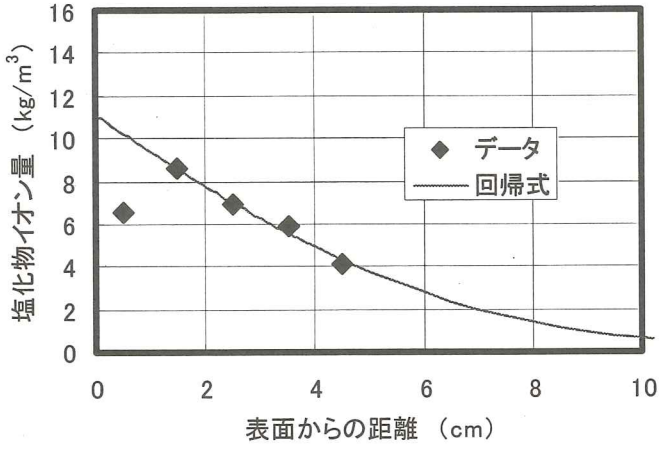


図-4.4.10　SE5 の塩化物イオン分布（G1 桁，陸側）

表-4.4.4 塩化物イオン量の拡散係数

コア番号	拡散係数 (cm^2/s)	表面塩化物イオン量 (kg/m^3，参考値)
SE1 (G1 桁海側)	1.2×10^{-8}	11.4
SE2 (G1 桁海側)	2.2×10^{-8}	9.9
SE3 (G1 桁海側)	1.8×10^{-9}	10.1
SE4 (G1 桁陸側)	2.6×10^{-9}	4.9
SE5 (G1 桁陸側)	2.2×10^{-8}	11.1

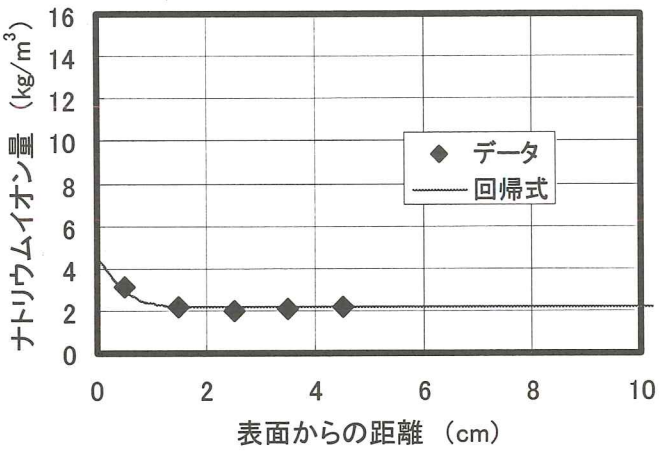


図-4.4.11 SE1 のナトリウムイオン分布（G1 桁，海側）

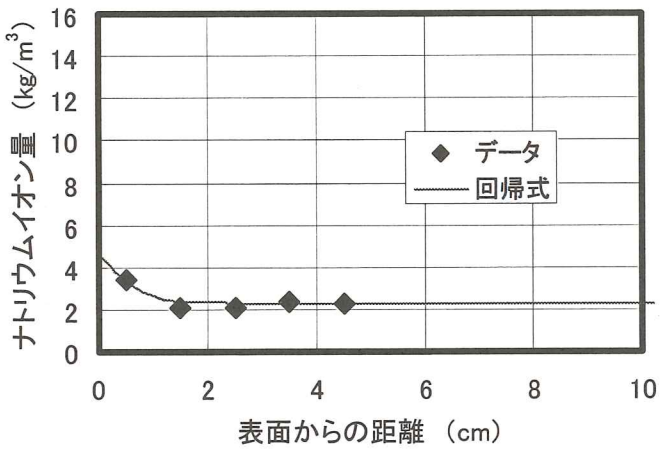


図-4.4.12 SE2 のナトリウムイオン分布（G1 桁，海側）

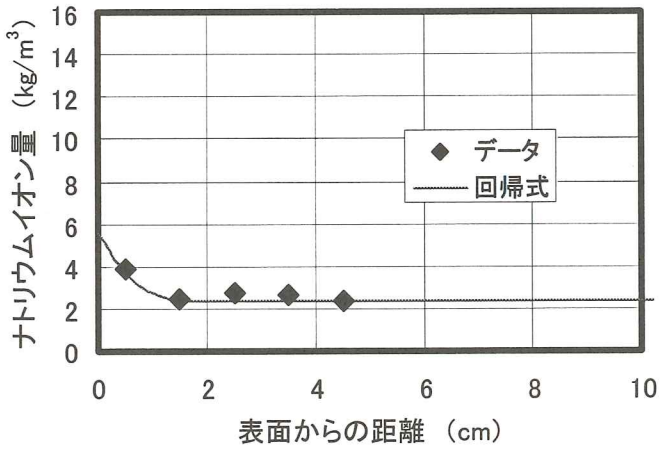


図-4.4.13 SE3 のナトリウムイオン分布（G1 桁，海側）

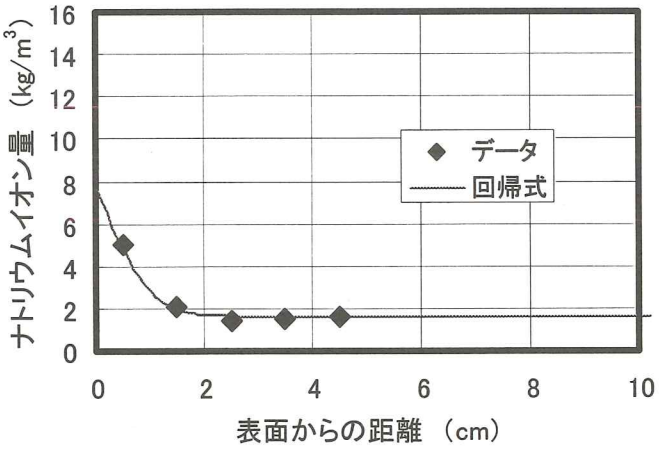


図-4.4.14 SE4 のナトリウムイオン分布（G1 桁，陸側）

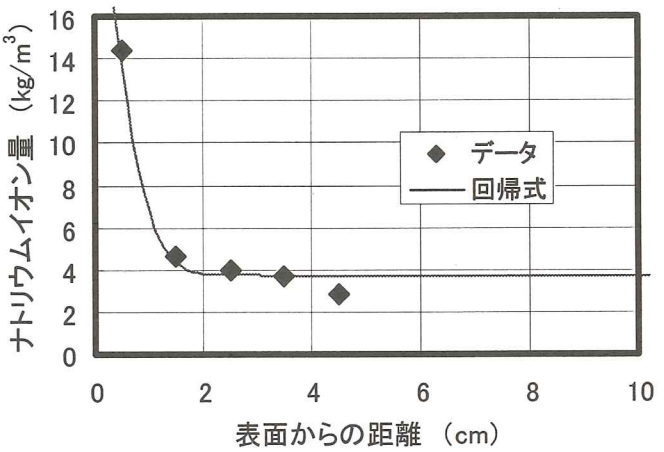
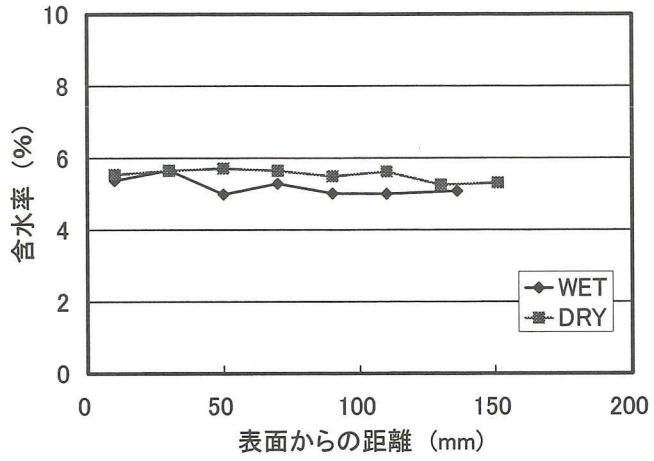


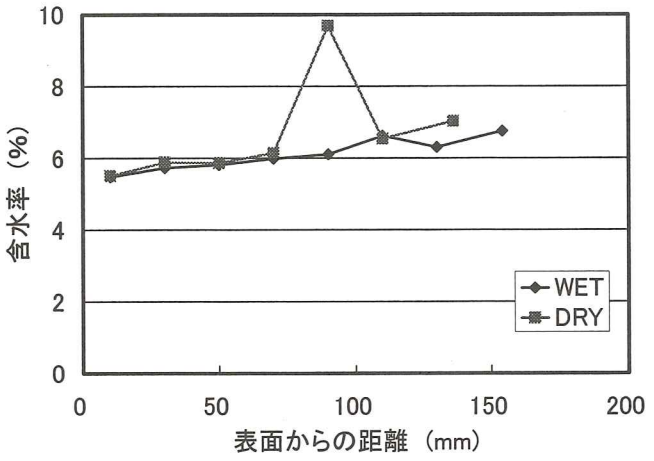
図-4.4.15 SE5 のナトリウムイオン分布（G1 桁，陸側）

表-4.4.5 ナトリウムイオン量の拡散係数

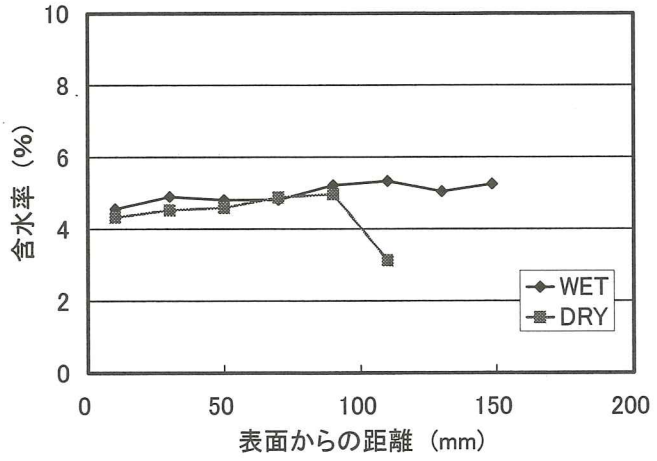
コア番号	拡散係数 (cm^2/s)	表面ﾅﾄﾘｳﾑｲｵﾝ量 (kg/m^3，参考値)
SE1 (G1 桁海側)	2.2×10^{-10}	4.5
SE2 (G1 桁海側)	3.5×10^{-10}	4.6
SE3 (G1 桁海側)	3.1×10^{-10}	5.6
SE4 (G1 桁陸側)	4.8×10^{-10}	7.7
SE5 (G1 桁陸側)	3.7×10^{-10}	25.1



(a) HR1, 2 (G1 桁，海側上)



(b) HR3, 4 (G1 桁，海側下)



(c) HR5, 6 (G1 桁，陸側)

凡　例

WET: 湿式でコア採取

DRY: 乾式でコア採取

図-4.4.16　補強部コンクリートの含水率分布

4.5 PC 定着部の調査結果

写真-4.5.1～4.5.5 に PC 定着部の解体状況を示す。定着体端部(写真-4.5.1)を見ると，PC 鋼材のボタンヘッド及び定着板に初期さびが見られた。また，ステンレス製の定着具の下半分にも軽微なさびが見られた。側面の写真(写真-4.5.2)よりダクトの下面にさびが見られ，孔が開いていたが，それ以外の部分はほとんど腐食していなかった。グラウトは充填されていた(写真-4.5.3)。解体直後，PC 鋼材の表面に初期さびのようなものが見られたが(写真-4.5.4, 4.5.5)，布で拭き取ると，写真-4.5.6 のようにほとんど錆のない状態になったことからダクトまたは定着板からのさび汁が付着していたものと考えられる。

図-4.5.1 に桁端部の塩化物イオン量の分布を示す。この定着部付近の塩化物イオン量は 1.2 kg/m^3 程度であった。定着部付近(境界部付近)の塩化物イオンの侵入経路について，本荘側の測定結果では桁端部からの浸透だけでなく，主桁本体のコンクリートと後埋めコンクリートの境界部からの侵入も確認されたが[4.1)]，今回の秋田側の桁端部は，桁端部からの塩分浸透によるものが支配的であったと考えられる。表層部の塩化物イオン量は大きくばらついているのであてはめは必ずしも確実ではないが，概ね 1×10^{-7}cm^2/s であった。後埋めコンクリートの圧縮強度は 28.6 MPa，弾性係数は 16.0 GPa であった。また，中性化深さは平均で 3mm，最大で 6mm であった。

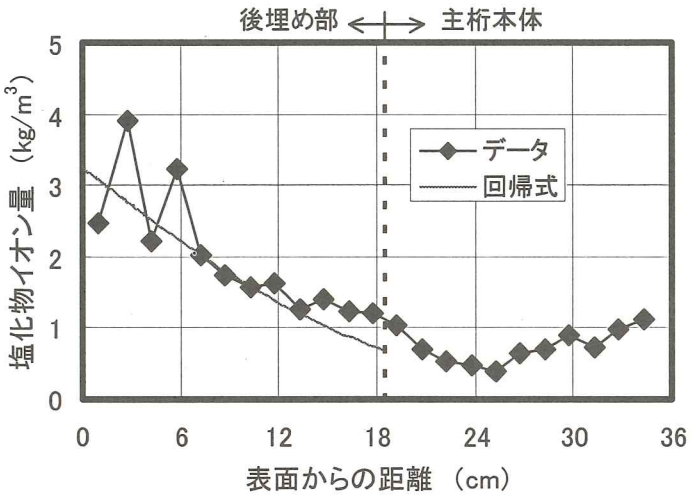


図-4.5.1　桁端部の塩化物イオン量の分布

表-4.5.1 に定着部のボタンヘッドを残したままの PC 鋼材の引張試験結果を示す。PC1～PC4 は定着体を想定した孔開き鋼板を用いてボタンヘッド側を固定した。PC5～PC10 はボタンヘッド部分をチャックでつかんだが，PC 鋼材を直接つかんでいたものもあった。0.2%耐力(0.2%永久伸びに対する応力)及び引張強度はいずれも規格値を満足していた。ボタンヘッドをつかむことができた試験片はいずれもボタンヘッドの付け根のところで破断していた。そのうち，PC2, PC3, PC7 の 3 本の引張強度は他の結果よりも低い傾向にあり，規格値に近い値となっていた。しかし，前述のとおり，今回の引張試験前の外観観察によれば，顕著な腐食は見られなかったので，これらの 3 本の引張強度の低下が腐食によるものとは考えにくい。標点間で破断した PC5, PC9 はいずれも十分な伸びが保持されていた。なお，PC 鋼材のステンレス製定着具との接触範囲を目視で観察したが，腐食による断面欠損は見られなかった。

表-4.5.1 PC鋼線引張強度試験結果

試験片	0.2%耐力 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	突合せ伸び (%)	破断位置* (mm)
PC1	1520	1730	208	-	ﾎﾞﾀﾝﾍｯﾄﾞ
PC2	1520	1640	204	-	ﾎﾞﾀﾝﾍｯﾄﾞ
PC3	1540	1670	205	-	ﾎﾞﾀﾝﾍｯﾄﾞ
PC4	1510	1730	203	-	ﾎﾞﾀﾝﾍｯﾄﾞ
PC5	1510	1730	208	6.6	8
PC6	1470	1740	208	-	54
PC7	1470	1650	205	-	ﾎﾞﾀﾝﾍｯﾄﾞ
PC8	1500	1730	207	-	ﾎﾞﾀﾝﾍｯﾄﾞ
PC9	1520	1750	207	6.5	11
PC10	1490	1750	207	-	ﾎﾞﾀﾝﾍｯﾄﾞ
平均値	1500	1710	206	6.6	—
前回調査	1530	1740	205	6.2	—
規格値	1420 以上	1620 以上	—	4 以上	—

* 標点間中心からの位置
標点間距離は 100mm



写真-4.5.1　PC 定着体の腐食状況



写真-4.5.2　PC 定着体の側面



写真-4.5.3　グラウト充填状況



写真-4.5.4　PC 鋼材の外観

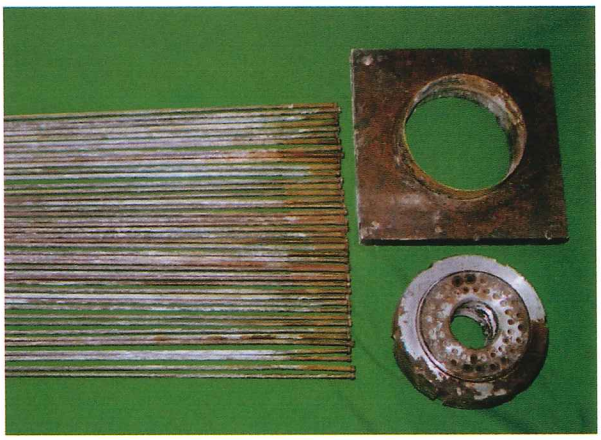


写真-4.5.5　PC 鋼材と定着具

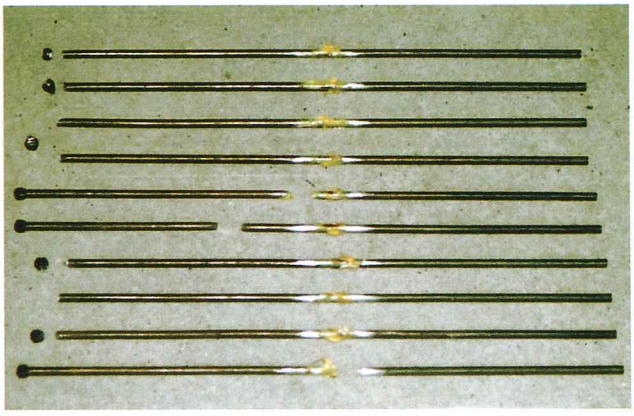


写真-4.5.6　引張試験後の PC 鋼材

5．旧岩川大橋 P8 橋脚の調査

5.1 旧岩川大橋 P8 橋脚の概要[5.1)]

図-5.1.1 に旧岩川大橋の平面図を，写真-5.1.3 に旧岩川大橋の周辺環境を示す。また，写真-5.1.2～5.1.3 に旧岩川大橋と調査対象とした P8 橋脚の外観を示す。同橋は，9 径間単純ポストテンションプレストレストコンクリート T 桁橋で，1966 年に完成した(表-5.1.1)。国道 7 号山形県温海地区の海岸に位置して，季節風による波を直接受けるなど，厳しい腐食環境に置かれていたことから，上部構造に塩害劣化が見られた。このため，1980 年代前半に全径間の上部構造を対象とした断面補修およびコンクリート塗装が施された。その後，1990 年代前半に再劣化が確認され，第 1～5 径間の再補修および補強(第 1, 2 径間の CFRP 補強，第 4, 5 径間の CFRP 及び外ケーブル補強)が実施された。一方，下部構造については，供用中，塩害補修は実施されなかった。沓座拡幅を除き、外見上は建設当時の様子を残していた。

調査対象とする橋脚を選定するため，P5～P8 橋脚を目視観察したところ，P6～P8 橋脚にひび割れが見られた(写真-5.1.4～9，P5～P7 は付属資料)。特に，P6 及び P8 の陸側で多く見られたことから，P8 橋脚を調査対象とすることとした。図-5.1.2 に，P8 橋脚の主要な寸法形状を示す。また，図-5.1.3 に P8 橋脚のひび割れの状況及びコア採取位置を示す。なお，P1～P4 は海中に位置しているか，砂に埋もれて柱高が低かったことから調査の対象からはずした。

写真-5.1.10～11 にコア採取時の内部の状況を示す。これらのコア採取位置では，ひび割れは必ずしも鉄筋位置まで伸展していなかった。鉄筋位置付近でコンクリート内部のひび割れ(浮き)が確認され、錆汁がそのひび割れ内で拡がっていた。

P8 橋脚では，柱部に鉄筋腐食によると考えられるひび割れが見られた他，乾燥収縮ひび割れ，温度に起因すると考えられるひび割れが見られたので，これらを対象として EPMA 分析を主体とした化学分析を実施した。また，橋脚の柱部と梁部の間に打継目が見られたので，この箇所も合わせて同様の調査を実施した。

調査時点では既にとなりの新岩川橋の供用が開始されており，旧橋は供用を終えていたが，上部構造が載っていたこと，夏季には橋下が海水浴場として多くの人が集うことから解体調査は行わず，コア採取位置は無収縮モルタルで補修した。

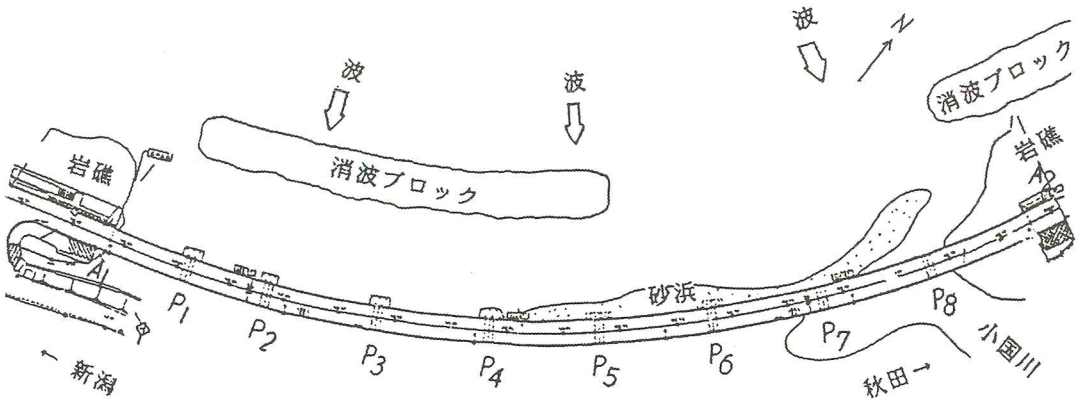


図-5.1.1　旧岩川大橋の平面図 [5.1)]

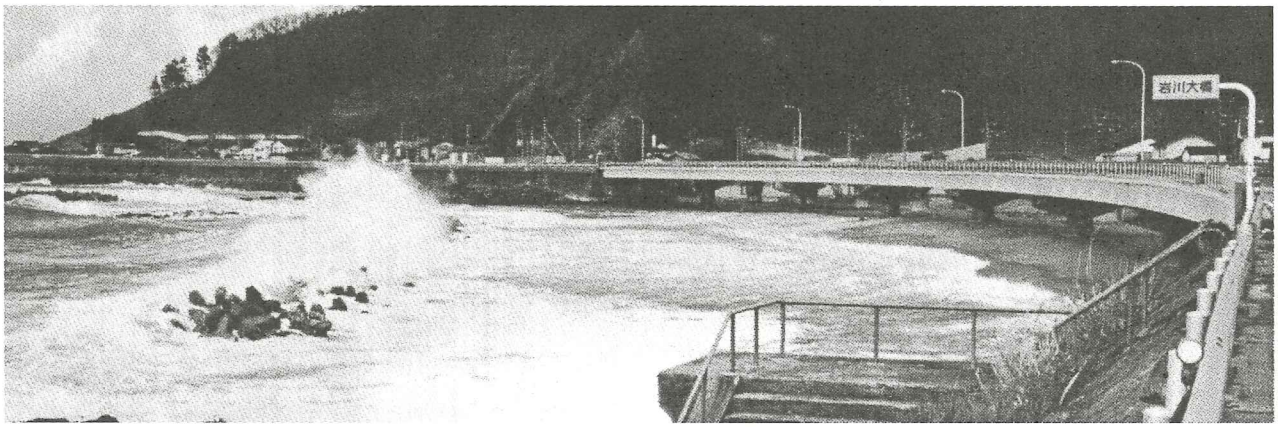


写真-5.1.1　旧岩川大橋の塩分環境 [5.1)]

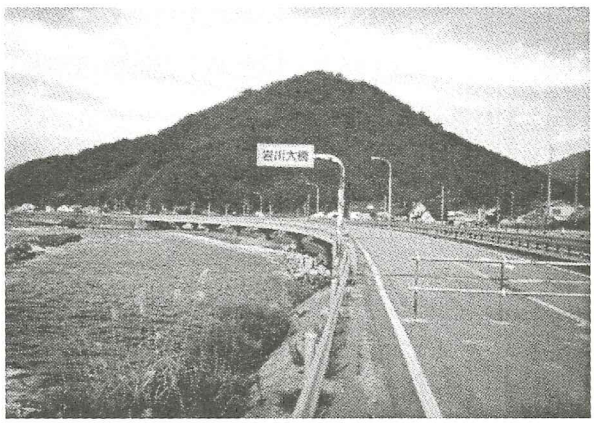


写真-5.1.2　旧岩川大橋の外観（供用終了後）

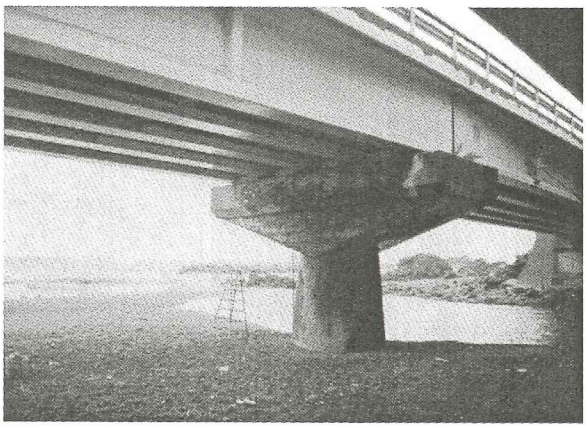


写真-5.1.3　調査対象とした P8 橋脚の外観

表-5.1.1 旧岩川大橋の主な諸元と変遷

橋梁形式	ポストテンションＰＣＴ桁
	9径間単純桁
橋長	336.94 m (2@29.5 + 7@39.7)
竣工年月	1966 年 10 月
補修・補強履歴	1982～1986 年　上部構造　塩害補修 1993～1994 年　上部構造　塩害補修・補強（第 1-5 径間のみ） 下部構造　塩害補修なし，橋座拡幅(1980 年以前)
供用終了年月	2000 年 7 月 17 日
調査年月日	2001 年 10 月 16～17 日

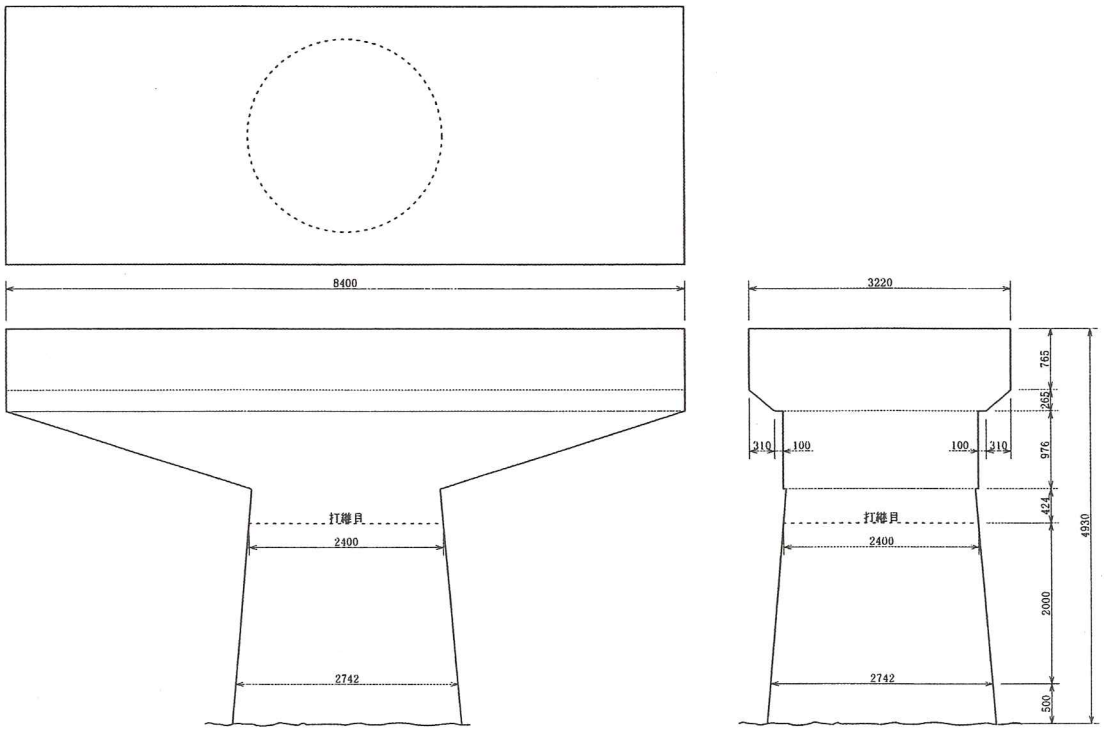


図-5.1.2　P8 橋脚の主要な寸法形状

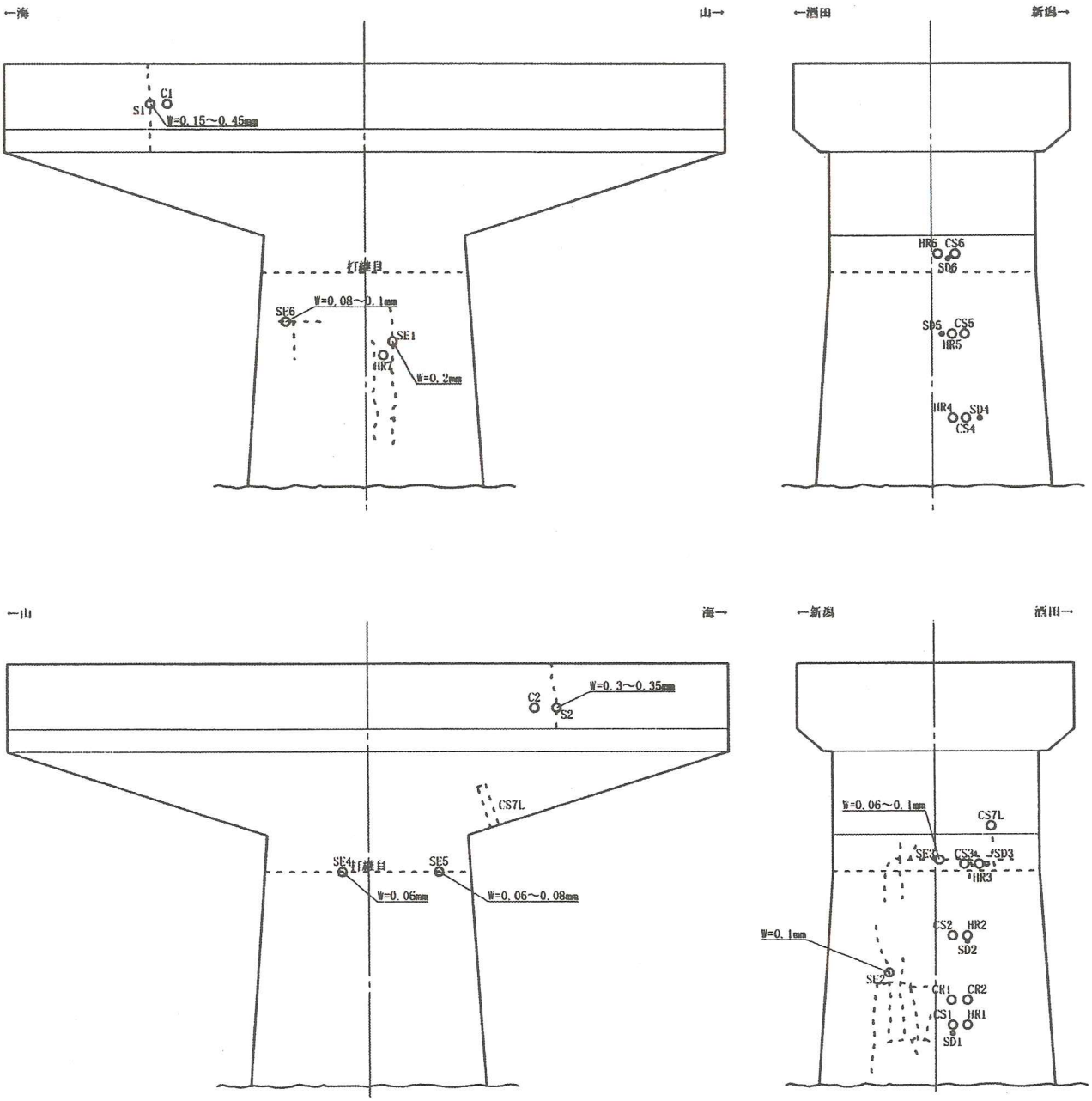


図-5.1.3　P8 橋脚のひび割れの状況及びコア採取位置



写真-5.1.4　P8 ひび割れ状況（海側）



写真-5.1.5　P8 ひび割れ状況（陸側）



写真-5.1.6　P8 ひび割れ状況（新潟側）



写真-5.1.7　P8 ひび割れ状況（酒田側）

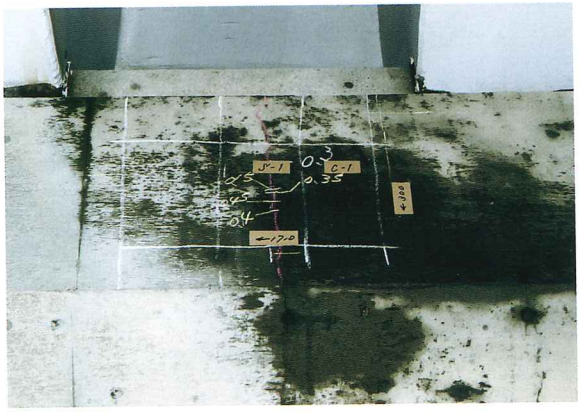


写真-5.1.8　P8 梁部ひび割れ状況（新潟側）



写真-5.1.9　P8 梁部ひび割れ状況（酒田側）



写真-5.1.10　P8 橋脚柱部の鉄筋腐食（SE1 のコア抜き後）



写真-5.1.11　P8 橋脚柱部の鉄筋腐食（SE3 のコア抜き後）

5.2 調査箇所と調査項目

調査はひび割れのない一般部とひび割れ部(打継目を含む)の両方について実施した。以下に調査項目を記す。表-5.2.1 に調査項目と採取コアの概要を示す。コア採取位置は前掲図-5.1.3 に示した。

(1) 一般部(ひび割れのない箇所)の塩化物イオン浸透状況

以下の項目について，海側，陸側それぞれの高さ別（高，中，低）に測定した。

1) 基本データ

圧縮強度，中性化深さ，テストハンマーによる反発度

2) 既設構造物の含水率分布

実際の構造物のコンクリート中の含水率を把握するため，採取前の自然の状態をできるだけ保持して，含水率の分布を測定した。

3) 海岸部における橋脚の塩分浸透状況

コンクリート中の塩化物イオン量の分布

(2) ひび割れ・打継目の塩化物イオン等浸透状況

次に示す箇所それぞれで EPMA 面分析，塩化物イオン量分布の測定，ナトリウムイオン量分布の測定を実施した。

a) 鉄筋腐食に起因したひび割れ部

b) 施工に起因したひび割れ部

c) 打継目（コア採取箇所は上下の付着がなくコールドジョイントに相当する状況であった）

表-5.2.1 調査項目と採取コア

	項　目	柱部	はり部	備　考
一般部	圧縮強度試験, 一般部の塩化物イオン量分析	φ100mm，6 本 (CS1～6)	φ100mm，3 本 (CS7，C1～2)	表層部で塩化物イオン量分析，内部側で圧縮強度試験用コアを採取。C は圧縮のみ
	中性化	圧縮用コアを利用	圧縮用コアを利用	
	反発度	各圧縮用コア付近 1 箇所	各圧縮用コア付近 1 箇所	C1 は測定なし
	含水率分布 (自然乾燥状態)	φ100mm，6 本 (HR1～HR6)	なし	20mm ピッチ 湿式コア採取
ひび割れ部・打継目	EPMA 面分析 塩化物イオン量分析 Na イオン量分析	φ100mm，6 本 (SE1～6) 塩害によるひび割れ 2 箇所 乾燥収縮ひび割れ 2 箇所 打継目 2 箇所	φ100mm，2 本 (S1～2) 温度収縮ひび割れ 2 箇所	深さ 80mm まで 10mm ピッチ

5.3 一般部の塩化物イオン浸透状況

5.3.1 基本データ測定結果

表-5.3.1 に圧縮強度試験結果を示す。CS3 の圧縮強度が極端に小さかったのでこれを除いた上でみると，打継目より上側のブロックの方が圧縮強度は大きい傾向にあるが，弾性係数はむしろ小さい傾向が見られた。柱の陸側の試験結果は，圧縮強度，弾性係数ともに海側より大きい傾向が見られた。CS3 の圧縮強度が小さかったのはコア中に異物が入っていたためであった。

表-5.3.2 にそれらのコアの中性化深さ測定結果を示す。上側ブロックの方が下側よりも中性化深さ(平均値，最大値)が小さい傾向にあった。柱の陸側の試験結果は，平均値，最大値ともに海側より大きい傾向が見られた。はり下面の CS7 及び梁側面の C1 の中性化深さは 0 mm であった。

表-5.3.1 圧縮強度試験結果

部位	コア番号	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	打継目からみた位置
柱，陸側下	CS1	27.1	29.9	下
〃　中	CS2	29.4	30.9	下
〃　上	CS3	11.2*	25.2	上
柱，海側下	CS4	24.3	28.7	下
〃　中	CS5	20.8	22.8	下
〃　上	CS6	31.8	23.5	上
梁，下面	CS7	28.6	25.2	上
〃，側面	C1	32.6	23.2	上
〃，側面	C2	35.0	22.5	上

* CS3 は試験後，コンクリート中に木片，番線片等が混在していたことがわかった。

表-5.3.2 中性化深さ

部位	コア番号	平均値 (mm)	最大値 (mm)	打継目からみた位置
柱，陸側	CS1	12.1	28.5	下
〃	CS2	10.1	17.5	下
〃	CS3	3.4	11.5	上
柱，海側	CS4	8.1	12.5	下
〃	CS5	7.8	12.0	下
〃	CS6	2.4	5.0	上
梁，下面	CS7	0.0	0.0	上
〃，側面	C1	0.0	0.0	上
〃，側面	C2	4.1	6.5	上

表-5.3.3 にテストハンマーによる反発度の測定結果を示す。また，図-5.3.1 に反発度と近傍のコア圧縮強度の関係を示す。同図より，ばらつきはあるが，反発度と圧縮強度の間に相関関係が見られ，CS1(1 回目)，CS3 の結果を除けば，コア圧縮強度と同様，打継目より上側のブロックの方が反発度も大きい傾向にあること，柱の陸側の試験結果は海側より大きい傾向にあることがわかった。この結果より，CS3 の表層部の圧縮強度は概ね 30 MPa 以上であったことが推察される。なお，表-5.3.3 には，反発度測定時のエラー回数を示した。原因はわからないが，特に打継目よりも下側で測定エラーが多く発生していた。

表-5.3.3 反発度の測定結果

測定位置	コアから見た測定位置	コアからの距離 mm	反発度	測定時のエラー数	備考
陸下 1	CS1 上	50	44.7	1	1 回目
陸下 1-2	CS1 上	50	46.3	3	1 回目やり直し
陸下 2	CS1 上	300	36.4	6	2 回目
陸中	CS2	0	39.0	10	
陸上	CS3 左	200	48.3	1	
海下	CS4 左	200	31.2	22	
海中	CS5 左下	300	32.4	17	
海上	CS6 左	500	42.5	1	
はり下面	CS7 左上	300	45.6 *	3	
はり酒田	C2 右	700	47.5	1	

* 角度補正後の値

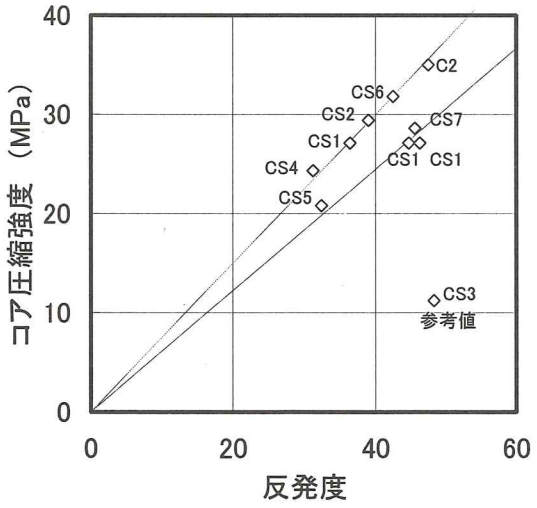


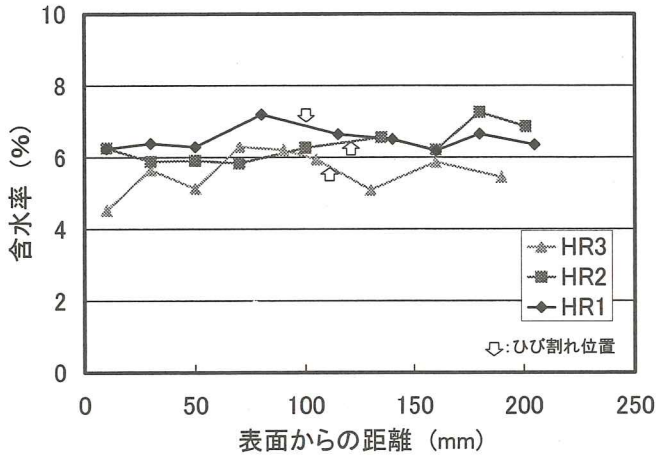
図-5.3.1　コンクリートの反発度とコア圧縮強度の関係

5.3.2 既設構造物の含水率分布

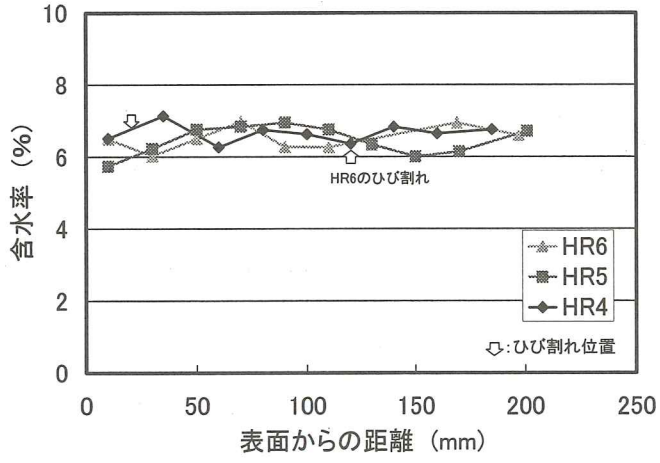
図-5.3.2 に供試体 HR1～HR6 のコンクリート中の含水率分布を示す。図中には，コア採取時点で確認された内部のひび割れ位置を矢印で示した。これらの図より，P8 柱部における含水率は，陸側で 5～7%，海側で 6～7%の範囲にあり，陸側の方が含水率の変動が大きい傾向が見られた。

コンクリート中の含水率は W/C の影響を受け，W/C が小さいほど含水率が小さくなる傾向にある[5.2)]。P8 橋脚の場合，打継目より上の部分の圧縮強度が高い傾向にあり，上側ブロックで測定された HR3 の含水率が HR1，HR2 よりも小さい傾向が見られたものの，海側では HR4～HR6 の間に顕著な差が見られなかった。

比較的 W/C が大きいコンクリートの場合，波や降雨などによる水の供給がなければ，型枠を撤去した時点から表面付近が乾燥するため，表層部では内部に比べて 1～2%程度の含水率の低下が見られる場合があるが[5.4)]，P8 橋脚の場合は HR3 を除いて表層部の含水率の明確な低下が認められなかった。調査中，雨により柱部表層が濡れていたことから，降雨時には容易に水が供給されていたと考えられる。冬季には季節風を伴う降雨や波しぶきにより，海側のコンクリート面の方が水が供給され易い傾向にあったと考えられる。



(a) HR1～3 (陸側)



(b) HR4～6 (海側)

図-5.3.2　柱の含水率分布

5.3.3 海岸部における橋脚の塩分浸透状況

図-5.3.2～5.3.8 にひび割れのない一般部コンクリート中における塩化物イオン量の分布を示す。また，表-5.3.4 にこれらの測定結果をフィックの拡散式にあてはめて得られた拡散係数と表面塩化物イオン量を示すとともに，その結果を図-5.3.2～5.3.8 に示した。これらの測定結果より，柱部の陸側の方が，塩化物イオン量が多い傾向にあることがわかる。今回の測定結果では，柱側の分布が拡散式にあてはめ難いことから，海側の結果で見ると，コンクリート中の塩化物イオン量の拡散係数はいずれも 3×10^{-8} cm^2/s 程度であった。陸側の方が含水率分布はやや小さい傾向が見られたが，拡散に大きな影響を与えるほどではなかった。陸側の塩化物イオン量が比較的多く浸透していたのは，陸側の方が外部からの塩分供給が多かったためと考えられる。海側は波しぶきを直接受けることもあったと考えられるが，表面に付着した塩化物イオンが降雨で洗い流されることも多かったのかもしれない。このことは，前項の含水率分布で陸側の方がやや乾燥している傾向が見られたことと一致する。なお，今回の結果は，既往の暴露試験[5.3)]で，陸側の塩分環境の方が海側より厳しかったこと，大気中の屋外暴露試験でこのP8橋脚程度の配合のコンクリートの場合に拡散係数が 3×10^{-8} cm^2/s 程度であったことと概ね一致した。

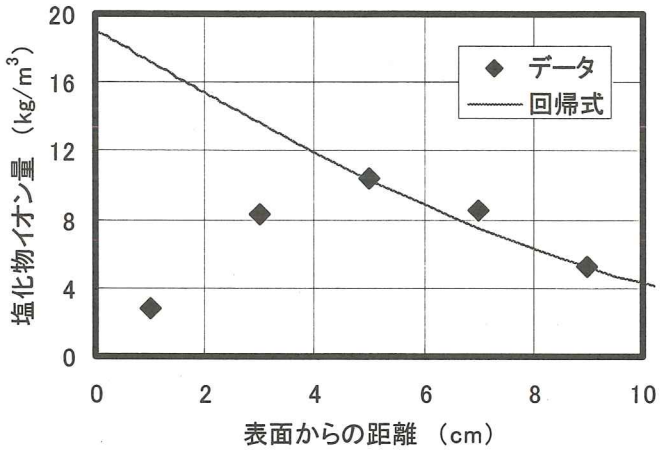


図-5.3.3　CS1 の塩化物イオン分布（柱部，陸側下）

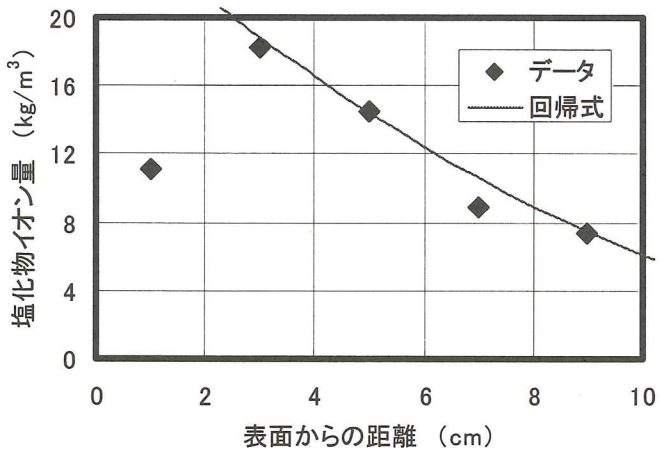


図-5.3.4　CS2 の塩化物イオン分布（柱部，陸側中）

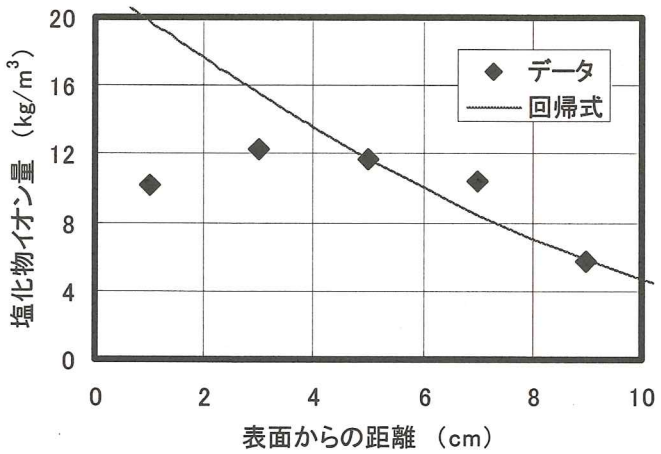


図-5.3.5　CS3 の塩化物イオン分布（柱部，陸側上）

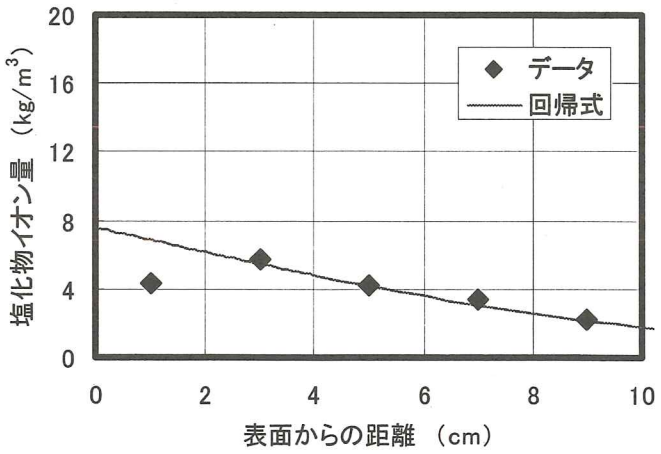


図-5.3.6　CS4 の塩化物イオン分布（柱部，海側下）

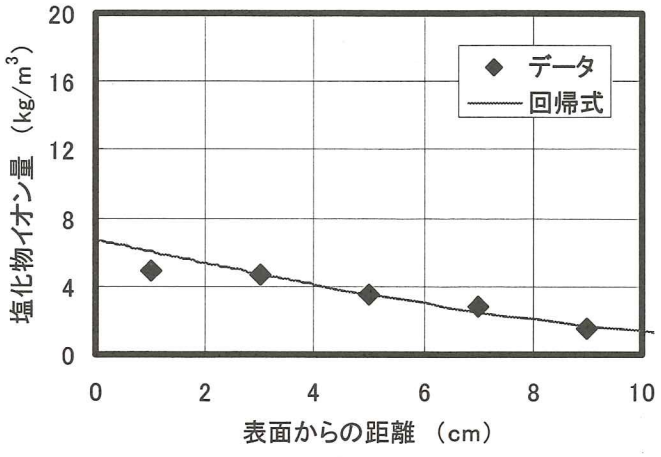


図-5.3.7　CS5 の塩化物イオン分布（柱部，海側中）

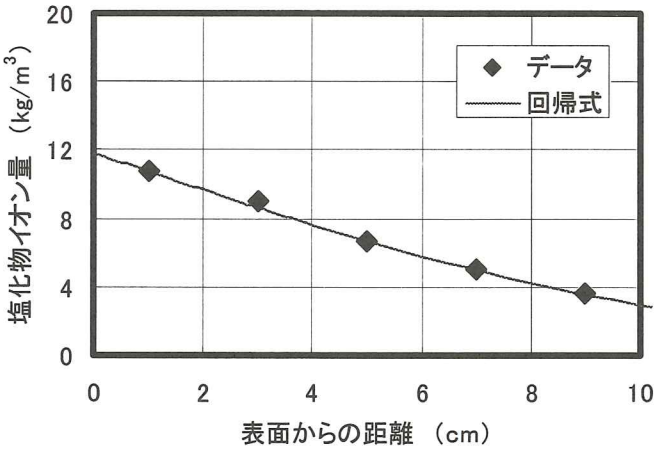


図-5.3.8　CS6 の塩化物イオン分布（柱部，海側上）

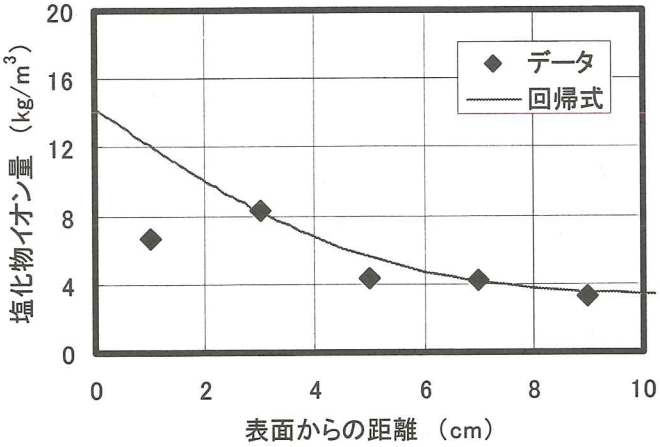


図-5.3.9　CS7 の塩化物イオン分布（梁部，下面）

表-5.3.4 塩化物イオン量の拡散係数

コア番号	拡散係数 (cm^2/s)	表面塩化物イオン量 (kg/m^3，参考値)
CS1 (柱部，陸側下)	3.1×10^{-8}	19.1
CS2 (柱部，陸側中)	3.2×10^{-8}	26.2
CS3 (柱部，陸側上)	2.9×10^{-8}	21.9
CS4 (柱部，海側下)	3.2×10^{-8}	7.6
CS5 (柱部，海側中)	2.8×10^{-8}	6.7
CS6 (柱部，海側上)	3.4×10^{-8}	11.8
CS7 (梁部，下面)	7.1×10^{-9}	11.0

5.4 ひび割れ・打継目の塩化物イオン等浸透状況

5.4.1 ひび割れ等状況

表-5.4.1 に採取したコア SE1～SE6 及び S1～S2 の表面におけるひび割れ状況を示す。ひび割れ幅はコア抜き前にクラックスケールで測定したものである。ひび割れ深さはコアの側面で測定した。橋脚表面のひび割れ状況及びコアの外観からひび割れの種類を推察して表中に示した。写真-5.4.1～8 に EPMA 試料の試験面の写真を示す。

表-5.4.1　コンクリートコアのひび割れ等状況　　(単位：mm)

コア番号	ひび割れ幅 [1)]	ひび割れ深さ (側面 A) [2)]	ひび割れ深さ (側面 B) [2)]	ひび割れ・打継目の概要 [3)]
SE1 (新潟側)	0.2	69	34	鉄筋腐食によるひび割れ。上方(側面 A)のみコア全長にわたってひび割れていた。
SE2 (陸側)	0.1	46	24	鉄筋腐食によるひび割れ
SE3 (陸側)	0.1	2	1	乾燥収縮ひび割れ
SE4 (打継目，酒田側)	0.06	-	-	打継目。コア採取箇所では上下のコンクリートが割れていた。
SE5 (打継目，酒田側)	0.08	44	69	打継目。コア採取箇所では上下のコンクリートが割れていた。
SE6 (新潟側)	0.1	0	2	乾燥収縮ひび割れ
S1 (梁部，新潟側)	0.45	82	115	温度ひび割れ。 コア全長にわたってひび割れていた。
S2 (梁部，酒田側)	0.35	115	112	温度ひび割れ。 コア全長にわたってひび割れていた。

1) ひび割れ幅は，コア採取前にクラックスケールにより測定した。
2) ひび割れ深さはコア側面の目視による。
3) ひび割れの分類は P8 橋脚表面のひび割れ観察及びコアの観察から推察した。

5.4.2 分析結果

図-5.4.1～5.4.8 に各コアのひび割れ・打継目と概ね直角方向の断面での EPMA 面分析結果を示す。各コアともに塩化物，ナトリウム，カルシウム，硫化物それぞれのイオン濃度分布を測定したものである。いずれも図の上辺がコンクリートの表層部分に相当する。

図-5.4.9～5.4.16 に各コアの EPMA 用試料以外の部分を用いて測定した塩化物イオン量の分布を示す。

図-5.4.17～5.4.22 に塩分分析のために粉砕された粉から別途試料を採取して測定したナトリウムイオン量の分布を示す。

1) 鉄筋腐食に起因したひび割れ部（SE1, SE2）

SE1 の内部の腐食状況は前掲写真-5.1.10 で把握できる。SE1 の鉄筋位置での塩化物イオン量は，表層 50 mm までの定量と EPMA の測定結果から概ね 4 kg/m^3 程度と推察される。また，SE2 については鉄筋位置(約 80 mm)での塩化物イオン量が近傍の CS1，CS2 の結果（図-5.3.3～4）より概ね 6～9 kg/m^3 に及んでいたと考えられる。かぶりが厚い場合にコンクリート中の発錆限界塩化物イオン量は大きくなる傾向にあると考えられるが(最大 2.5 kg/m^3 程度)，それでも鉄筋に腐食が生じ始めるには充分な塩化物イオン量が浸透していた。これらの塩化物イオンの侵入により鉄筋に腐食が発生し，その膨張によってかぶりコンクリートに内側からの曲げが作用してコンクリート表面にひび割れが発生したものと考えられる(図-5.4.22)。

SE1 の EPMA 測定結果(図-5.4.1)より，ひび割れのない部分では多量の塩化物イオンが浸透していたが，表層部の一部とひび割れ部では塩化物イオン量が著しく少なくなっていた。硫化物イオンは塩化物イオンが少なくなっていた箇所で同様に著しく少なくなっていた。しかし，その周囲では，硫化物イオンは，塩化物イオンと異なり，強い濃縮を示していた。

SE1 のひび割れ深さは目視では 34～69 mm であったが(表-5.4.1)，ひび割れによる塩化物イオンや硫化物イオンの濃度変化の範囲は 80 mm まで達しており，目視によるひび割れ深さよりも深くまで達していた。また，カルシウムイオンは塩化物イオンや硫化物イオンほど顕著ではないが，ひび割れに沿って減少していた。

このひび割れは多量の塩化物イオンの浸透による鉄筋腐食により発生したものであることから，ひび割れ発生後にこれらの濃度変化(ひび割れ部における塩化物イオン，硫化物イオン，カルシウムイオンの減少とその周囲の硫化物イオンの濃縮)が現れたことが明らかである。

SE2 の場合，中性化範囲が明確に出ていなかったものの，ひび割れ周辺の塩化物イオン，硫化物イオンの濃度変化は概ね SE1 と同様の傾向が見られた。

2) 乾燥収縮に起因したひび割れ部（SE3, SE6）

SE3 及び SE6 は，ともにコア内部で錆汁が確認されたが(SE3 は前掲写真-5.1.11)，ひび割れ深さが 1～2 mm 程度とごく浅いものであったことから鉄筋の腐食膨張に起因したひび割れとは断定し難い。ここでは，表面付近の乾燥収縮に起因したひび割れであると考える。

SE3 の EPMA の結果より，外部からの塩化物イオンの侵入によると考えられる濃縮が見られるものの，表面から 1～10 mm の範囲で塩化物イオンがほとんどない部分が見られた。この部分については硫化物イオンもほとんどなく，内部(図中の青い部分)に比べても少なくなっていた。しかし，SE1, SE2 と同様に，その内側には硫化物イオンの多量の濃縮が見られた。SE3 の場合，ひび割れの影響は顕著ではないが，塩化物イオン，硫化物イオンの濃度変化が一部深くまで見られるところはひび割れの影響があった部分と考えられる。なお，硫化物イオンの測定結果より，内部の骨材で硫化物イオンを多量に含む粗骨材が一つ存在しており，周囲のペースト部分に拡散していた。

SE6 の場合も塩化物イオン，硫化物イオンの濃度変化は SE3 と同様の傾向が見られるが，ひび割れ部の濃度変化は SE3 よりも顕著に現れていた。特に，SE6 の場合，ひび割れの影響が表層よりも内部(表面から 20～50 mm の範囲)でより広範囲に顕著に見られた。この部分では，塩化物イオン及び硫化物イオンがほとんど

ない部分が見られた。硫化物イオンはその周囲で濃縮が見られた。

3) 水和熱に起因したひび割れ部（S1, S2）

S1，S2 は，構造物の外観観察からひび割れ幅が比較的大きかったこと，コンクリートの深い位置までひび割れが発生していたことからコンクリート打設時における水和熱による温度収縮に起因したひび割れであると考えられる。ひび割れ幅が大きかったことから，EPMA の測定結果のうち，カルシウムイオン，ナトリウムイオンの結果でもひび割れ発生位置をある程度確認することができる。

S1 の場合，ひび割れの表層部で一般部よりも多くの塩化物イオンの濃縮が見られたが，内部ではひび割れに沿って塩化物イオンが少なくなっていた。一方，硫化物イオンはひび割れに沿って空白部分が見られるものの，その周囲には強い濃縮が生じていた。塩化物イオン，硫化物イオンの測定結果より，約 40 mm の位置から，カルシウムイオン，ナトリウムイオンの図で確認できるひび割れとは別に，もう 1 つひび割れが発生していた可能性がある。これらのひび割れの間で硫化物イオンの強い濃縮が生じていた。表層部での硫化物イオンの濃縮はわずかに見られる程度であった。S1 の近傍は中性化深さがほとんど 0 mm であったことから，中性化が生じていない場合に硫化物イオンの濃縮は生じないことを示唆している。S1 の結果は，コンクリート表面で中性化し難い場合であっても，ひび割れ内部では中性化が生じていた。

S2 の場合，ひび割れ周辺の濃度変化は S1 と類似しており，深さ 40～80 mm の範囲でより広範囲に塩化物イオン，硫化物イオンの顕著な濃度変化が見られた。しかし，表面から約 4 mm 程度の範囲では S1 と異なり，塩化物イオン，硫化物イオンの空白部分が認められた。その直近の C2 の中性化深さが 4 mm 程度であったことから，これらの表層部の濃度変化は中性化の影響があったことが確認できる。

4) 打継目（SE4, SE5）

SE4，SE5 は上下コンクリートの打継目から採取したものであり，採取時点で上下コンクリートの境界面の付着がなく，半割りの状態であった。これらの EPMA の測定結果（図-5.4.4，図-5.4.5）では図の中心付近に下ブロックのレイタンスと見られる約 2～3 mm の層が見られた（SE4 は図の左側が上ブロック，SE5 は図の右側が上ブロックと，左右反転しているので注意されたい）。

上ブロックのコア圧縮強度が下ブロックより高い傾向にあったこと，上ブロックのコンクリートの中性化深さが下ブロックより小さかったことから，上ブロックのコンクリートは下ブロックに比べて W/C が小さい傾向にあったと推察される。カルシウムイオンの EPMA 測定結果より，打継目近傍を除き，上ブロックのカルシウムイオン濃度が下部ブロックよりも平均的に高い傾向にあり，このことからも上ブロックの方が W/C の小さいコンクリートであったことが認められる。

しかし，打継目の塩化物イオン，硫化物イオンの空白部分は上ブロック側のみで見られ，レイタンス部も含めて下ブロック側は付着のない打継目による顕著な濃度変化が見られなかった。ひび割れ部でカルシウムイオンの減少が見られたが，上ブロックの打継目ではそれ以上にカルシウムイオンの顕著な減少が見られた（黒か青みがかった部分）。これより，打継目ではなんらかの理由によりカルシウムイオンの溶出 [5.4)] が生じていた可能性が高い。また，打設時に型枠内の水を除去しきれず，局所的に W/C が極端に大きくなっていた

場合には，カルシウムイオンの溶出がより速くなっていた可能性も考えられる。

カルシウムイオンの図において，打継目より下のコンクリート表面にカルシウムイオンの強い濃縮が見られるが，これは打継目から溶出したカルシウムイオンが固化したものかもしれない。この下ブロックの表層部のカルシウムイオンの濃縮箇所では塩化物イオンの強い濃縮も見られる。また，カルシウムイオン，塩化物イオンほどではないが，表層の物質中に硫化物イオンも見られる。これらの点から，表層の物質は，打継目から溶出したカルシウムイオンが長年の間に表層部に流れ出し，塩化カルシウムに近い物質として下側コンクリートの表面を覆ったものかもしれない。なお，これらの打継目のコア採取位置は，雨天時に張り出し部からの雨水の流下や伸縮装置からの漏水などにより，表面が洗われることがあった。

SE4 では，下ブロックの表層のカルシウムイオンの濃縮部分の内側約 10 mm の範囲で塩化物イオンの空白部分が見られた。この空白部分は，表層の物質が形成される前に生じていたものと考えられる。

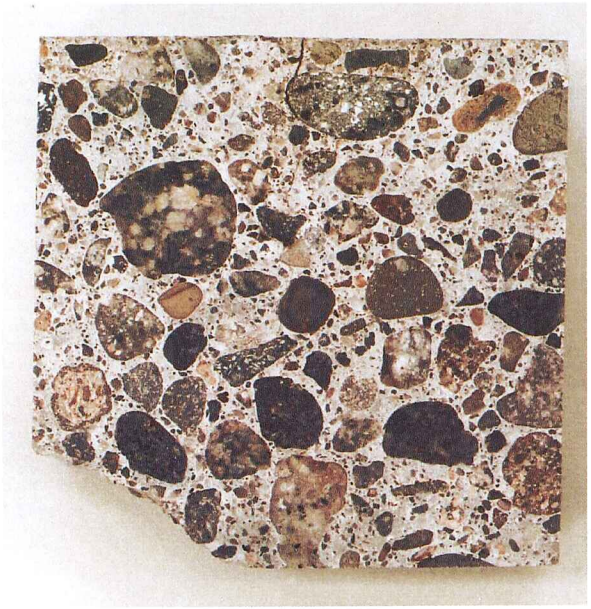


写真-5.4.1　EPMA 試料測定面 (SE1)

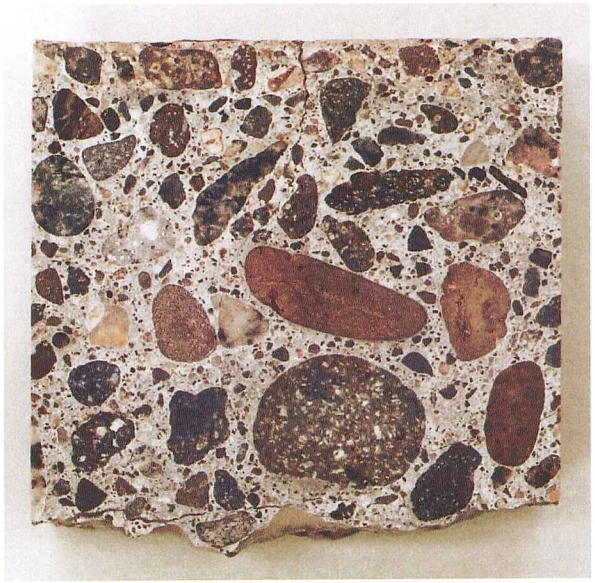


写真-5.4.2　EPMA 試料測定面 (SE2)

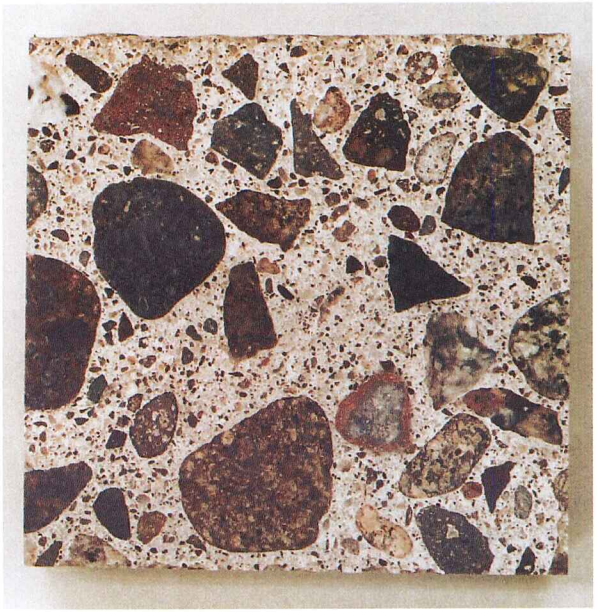


写真-5.4.3　EPMA 試料測定面 (SE3)

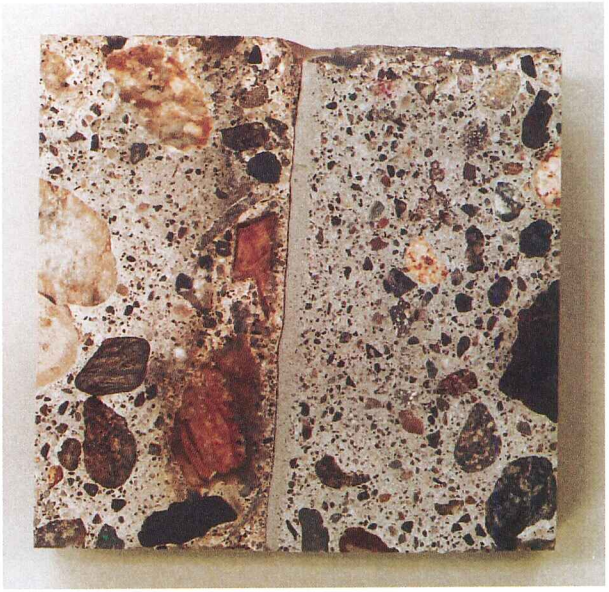


写真-5.4.4　EPMA 試料測定面 (SE4)　※上辺がコンクリート表面。

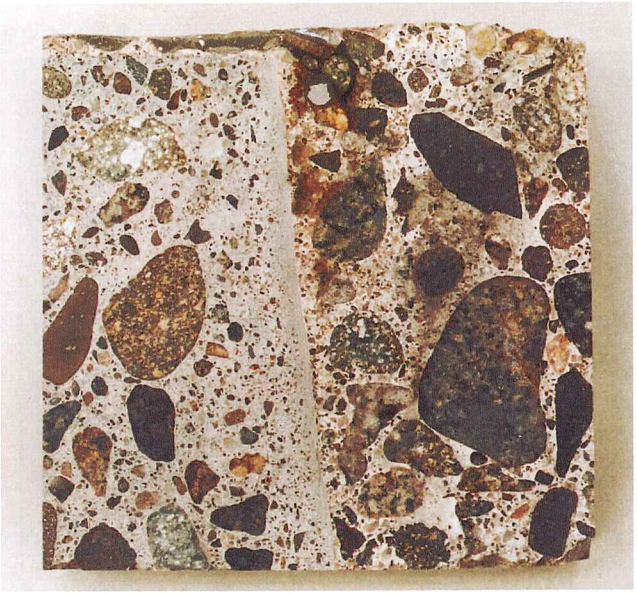


写真-5.4.5　EPMA 試料測定面 (SE5)

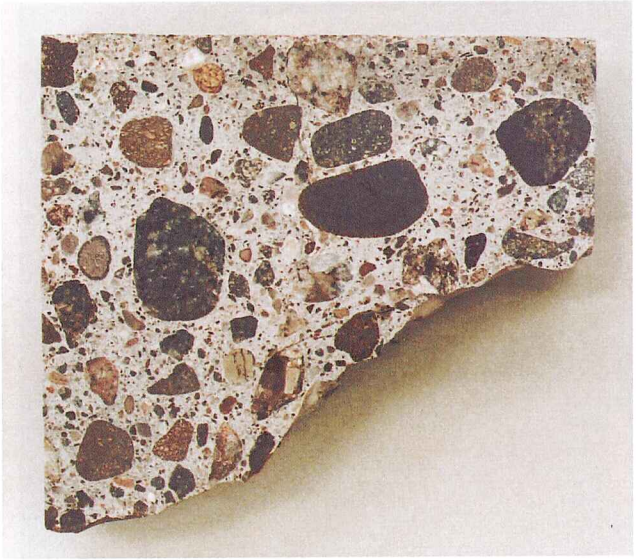


写真-5.4.6　EPMA 試料測定面 (SE6)



写真-5.4.7　EPMA 試料測定面 (S1)

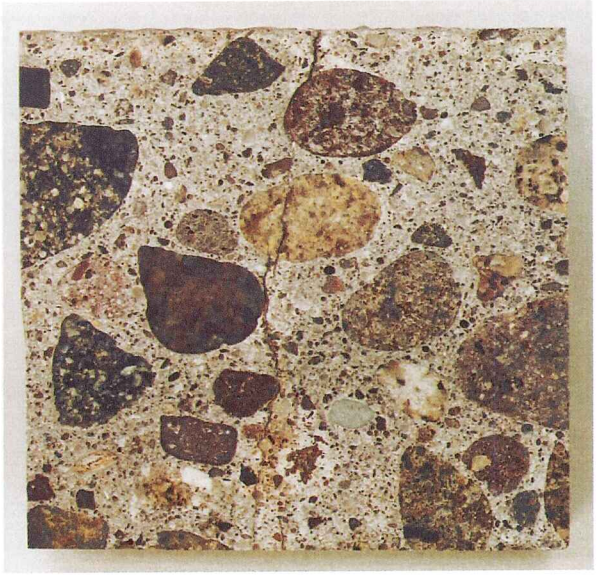
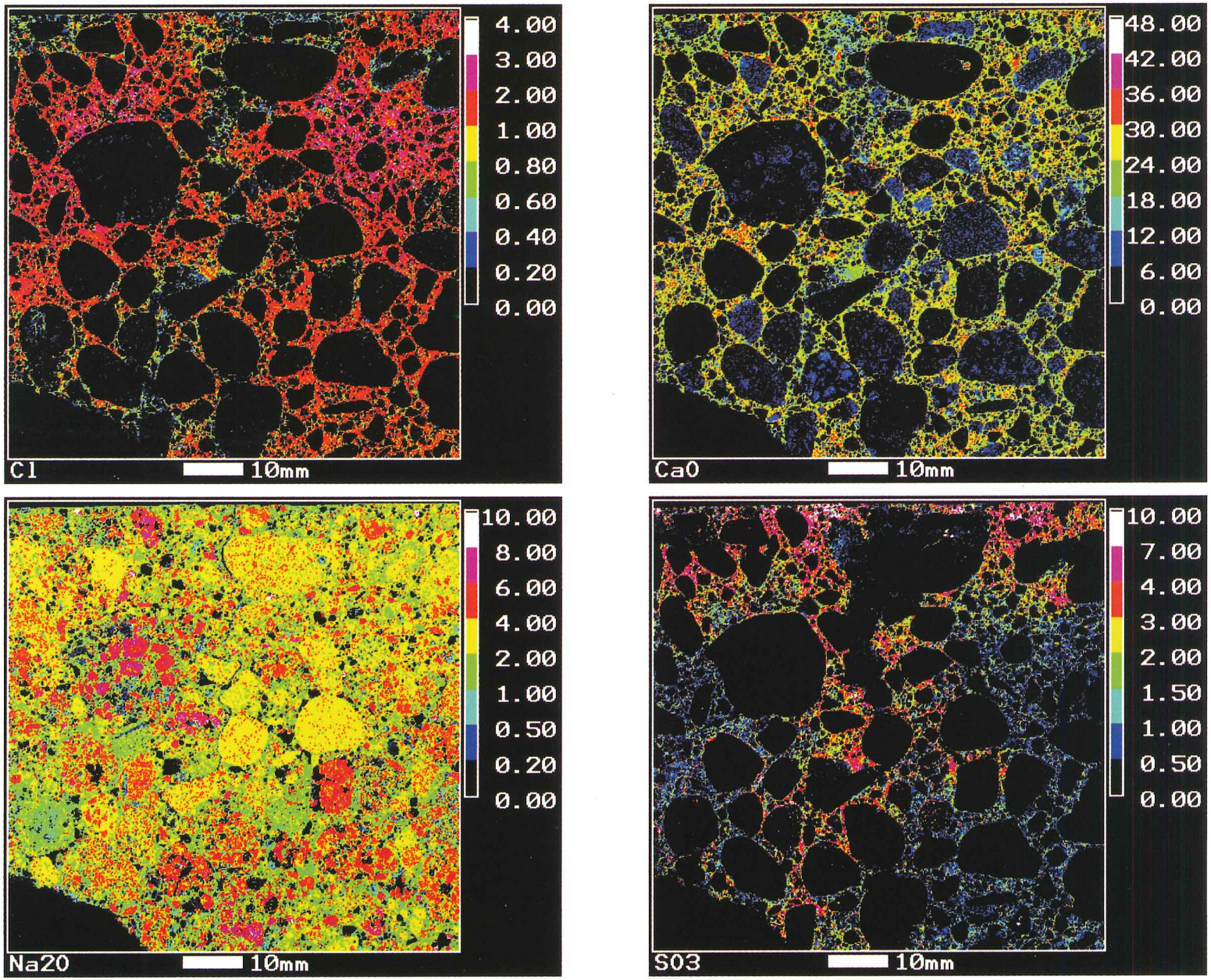


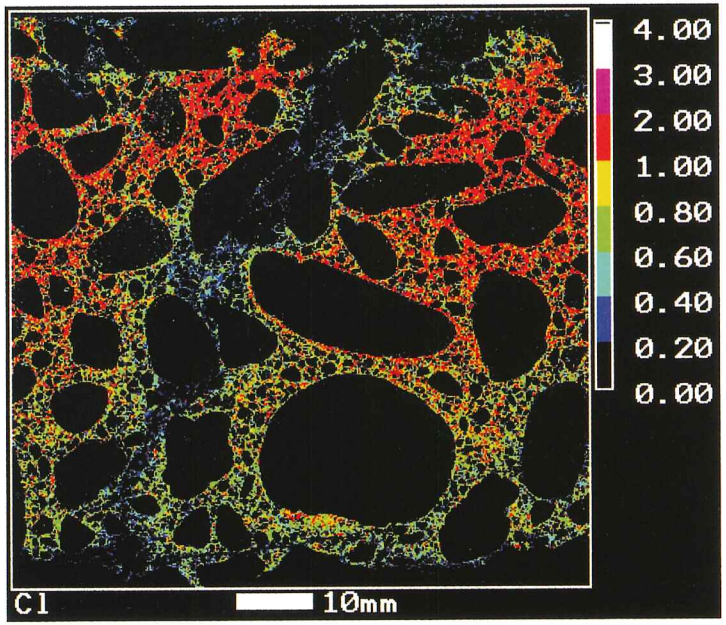
写真-5.4.8　EPMA 試料測定面 (S2)　※上辺がコンクリート表面。

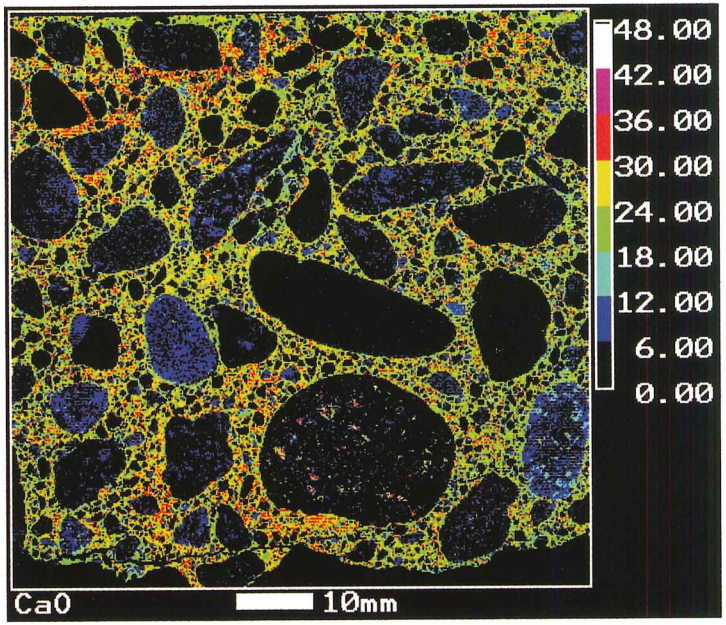


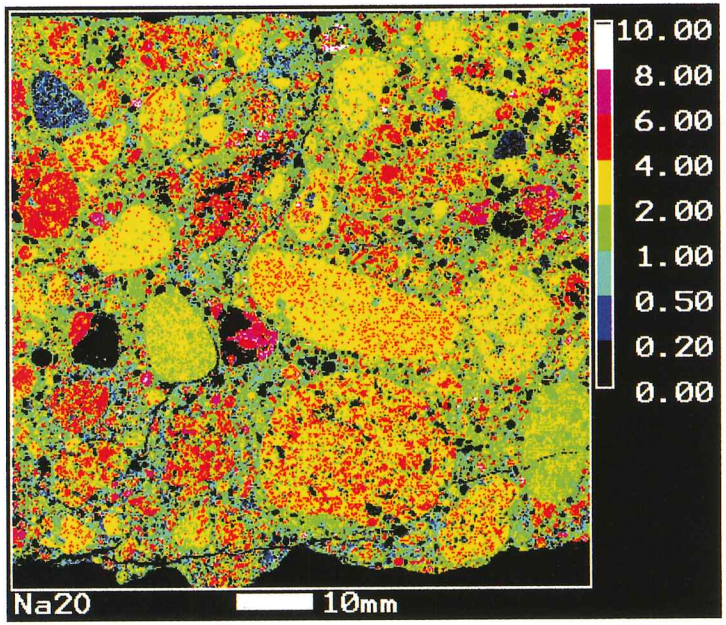
左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示

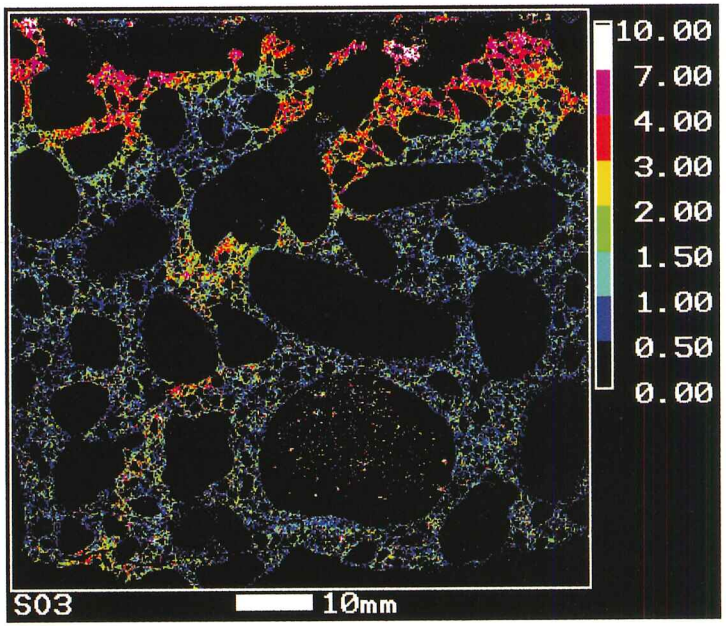
※上辺がコンクリート表面。

図-5.4.1　EPMA 面分析結果（SE1）





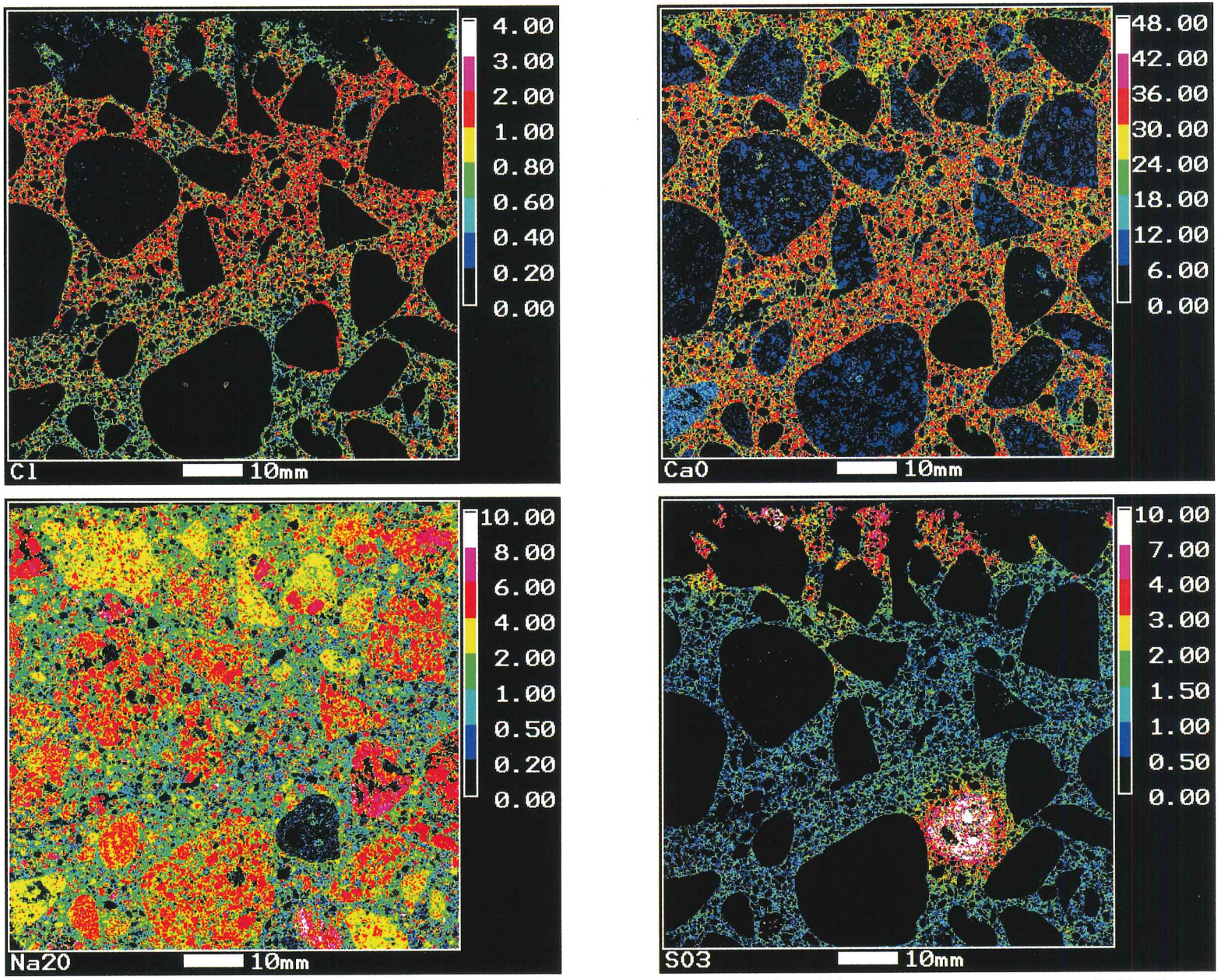




左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

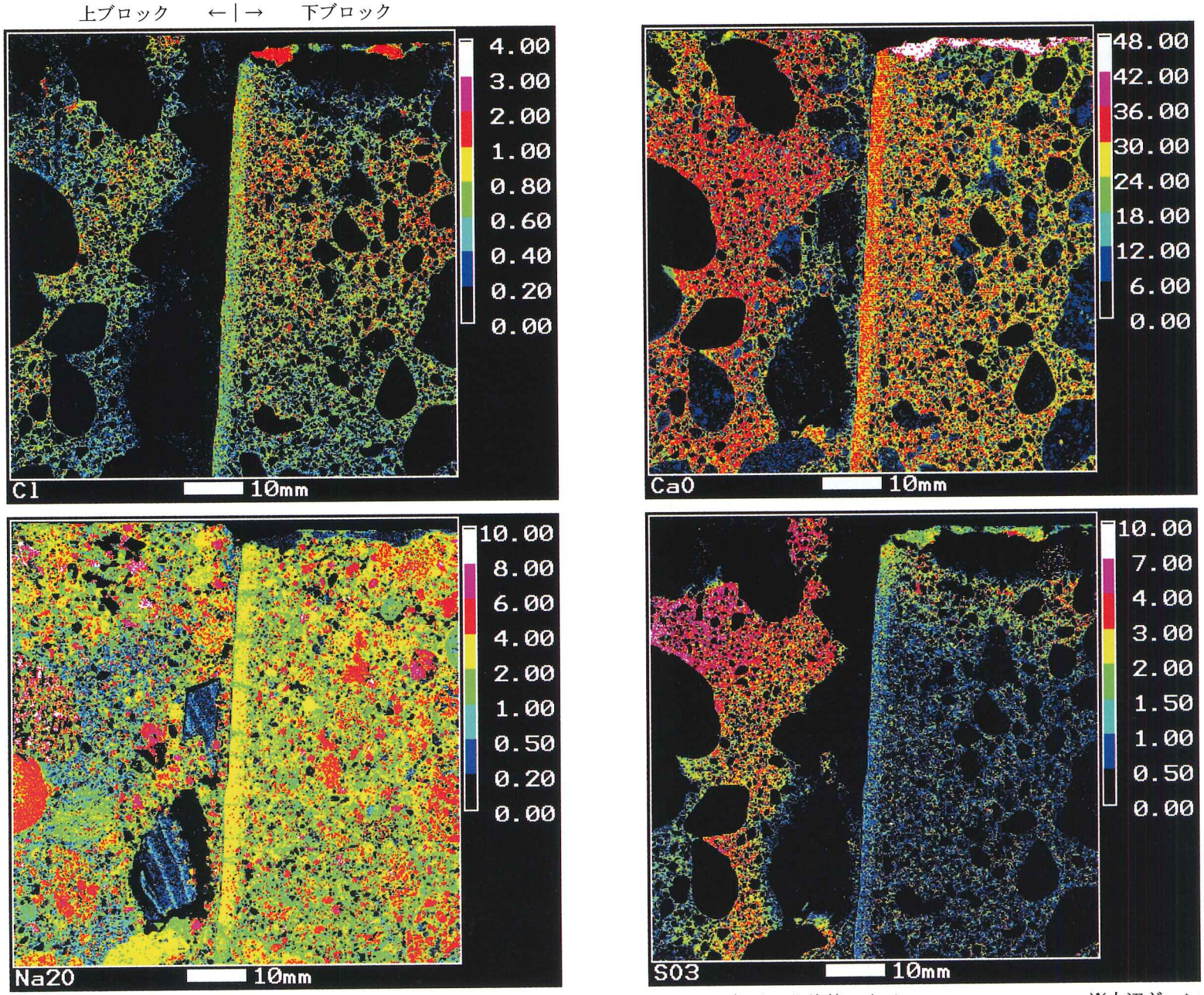
図-5.4.2 EPMA 面分析結果（SE2）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

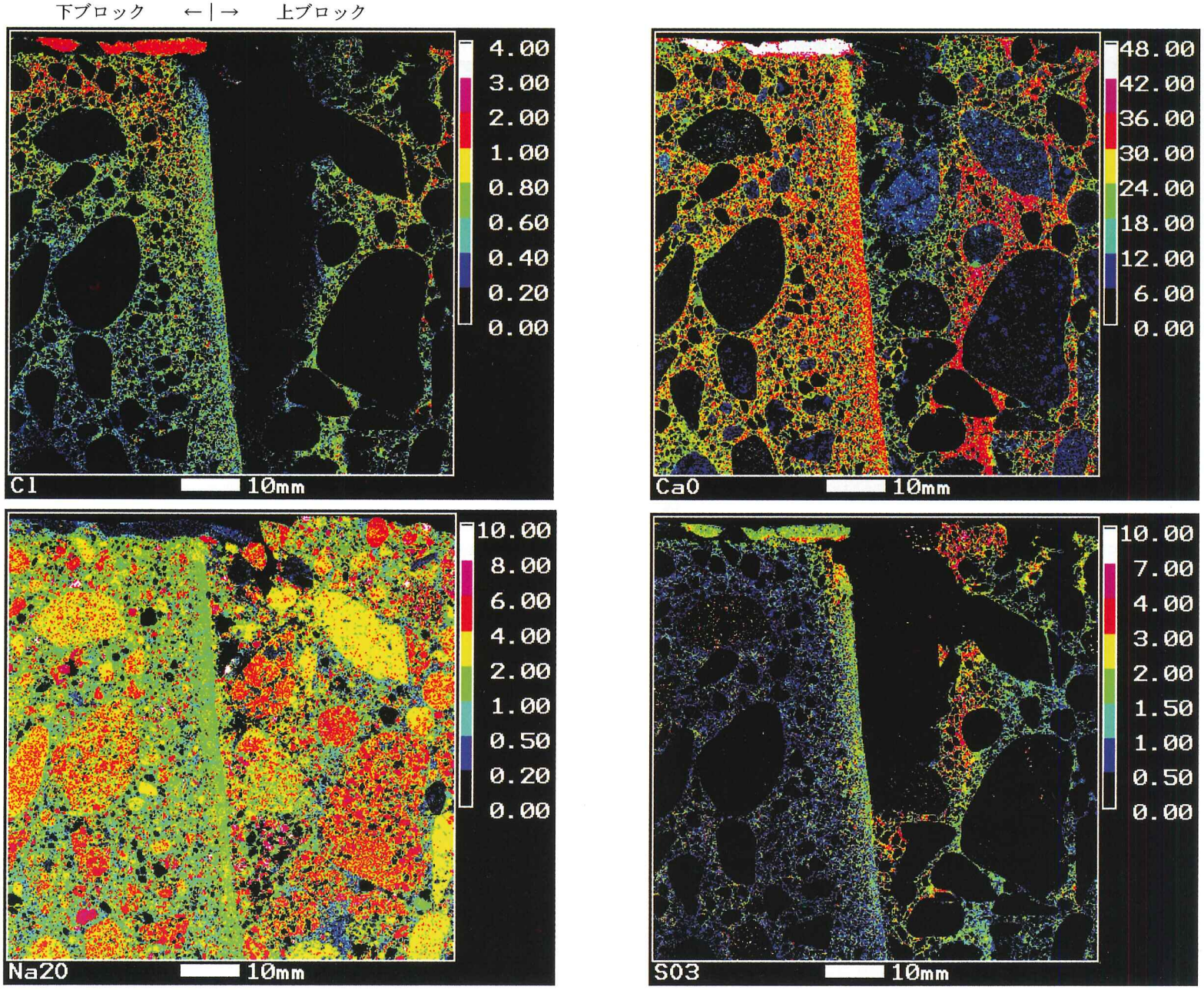
図-5.4.3　EPMA 面分析結果（SE3）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示

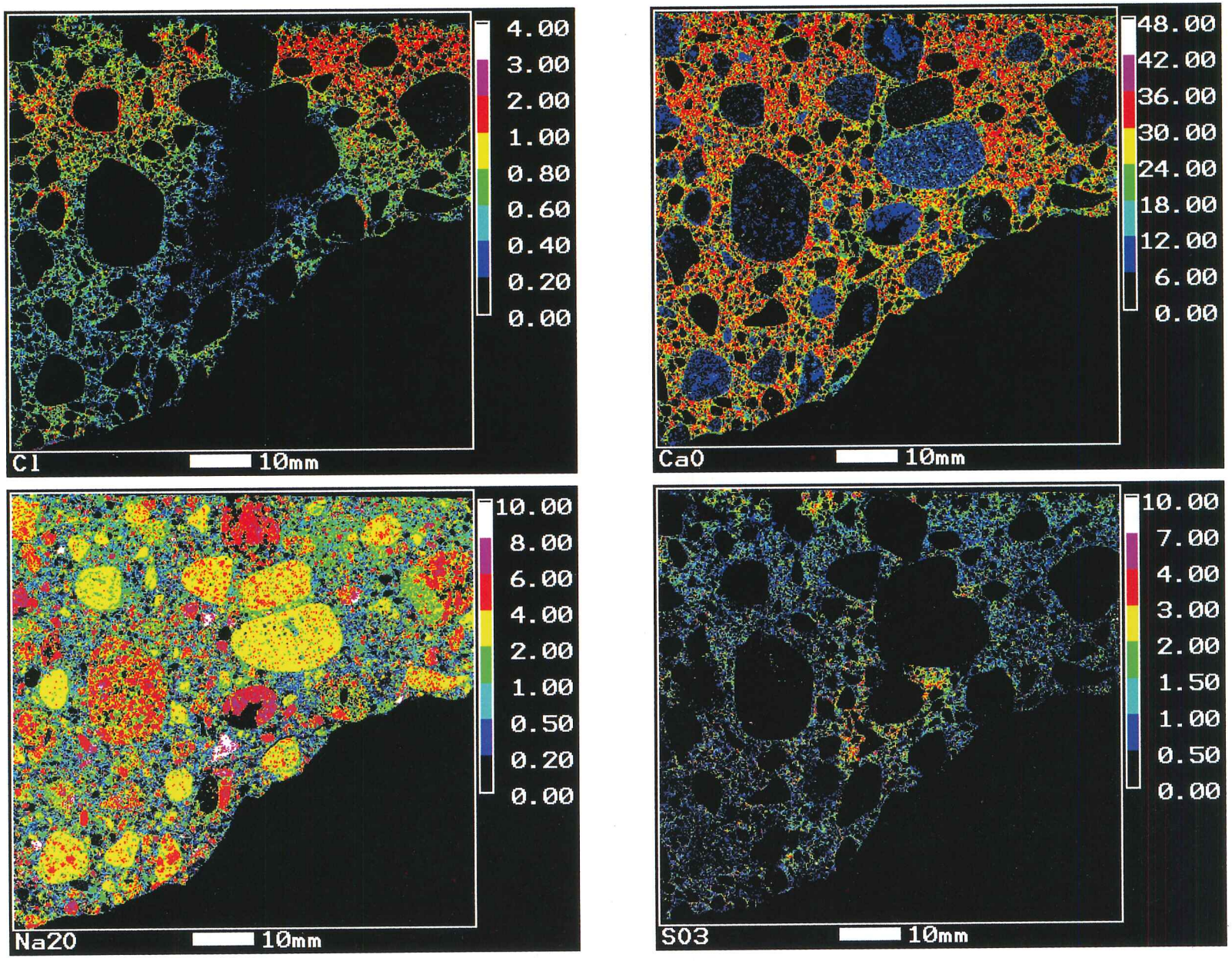
※上辺がコンクリート表面。

図-5.4.4　EPMA 面分析結果（SE4）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン* *）酸化物換算で表示　※上辺がコンクリート表面。

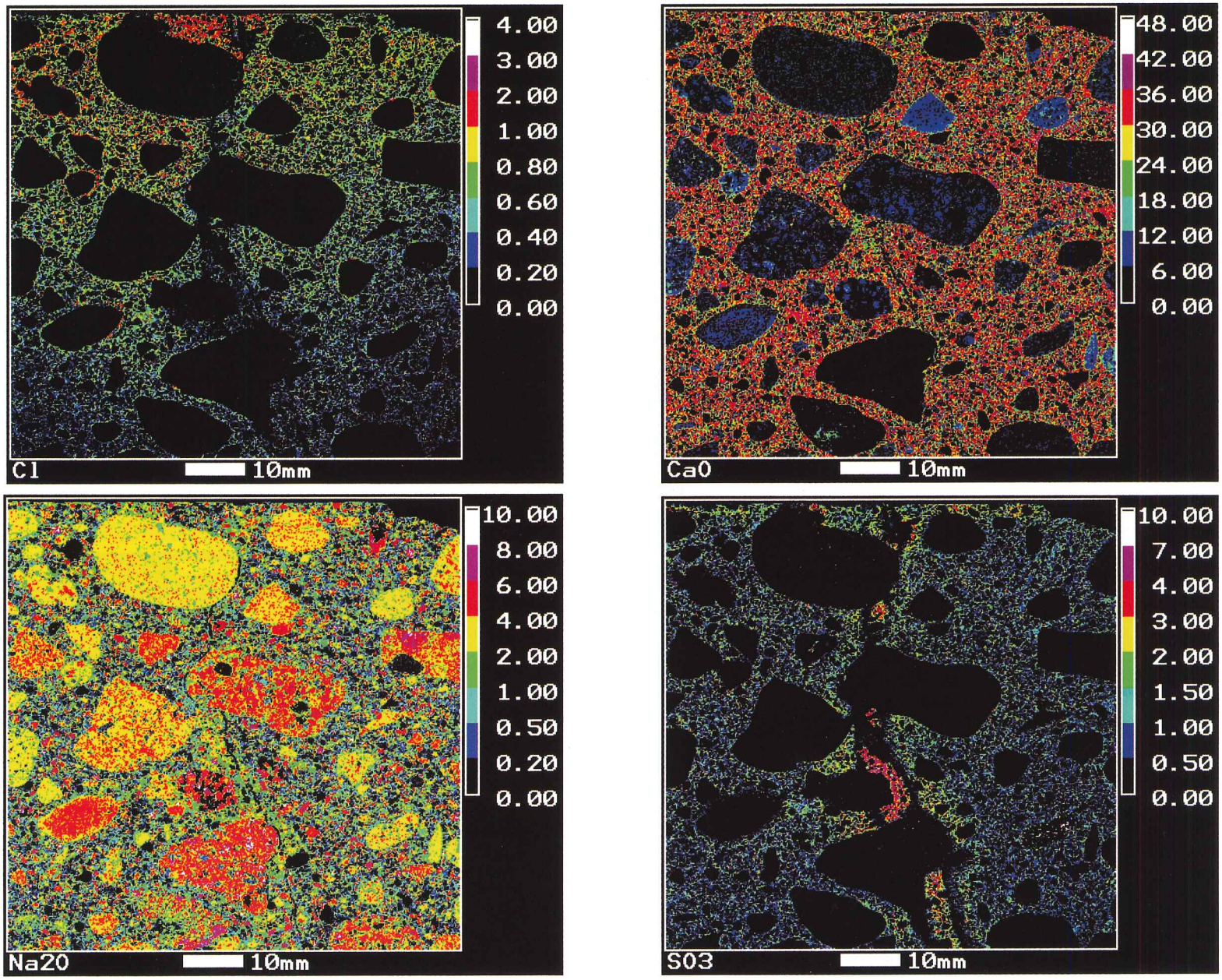
図-5.4.5　EPMA 面分析結果（SE5）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示

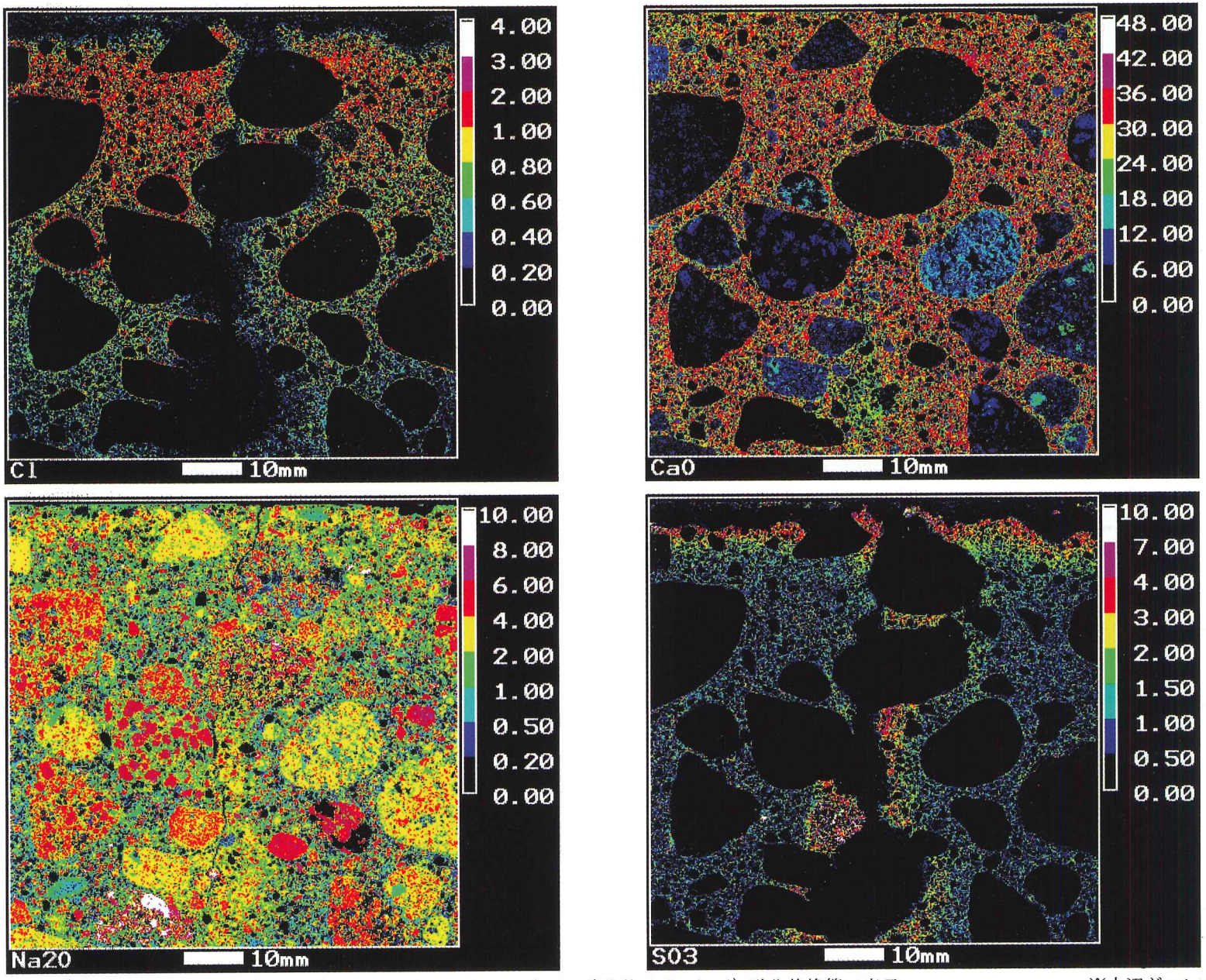
※上辺がコンクリート表面。

図-5.4.6　EPMA 面分析結果（SE6）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示　※上辺がコンクリート表面。

図-5.4.7　EPMA 面分析結果（S1）



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*）酸化物換算で表示

※上辺がコンクリート表面。

図-5.4.8　EPMA 面分析結果（S2）

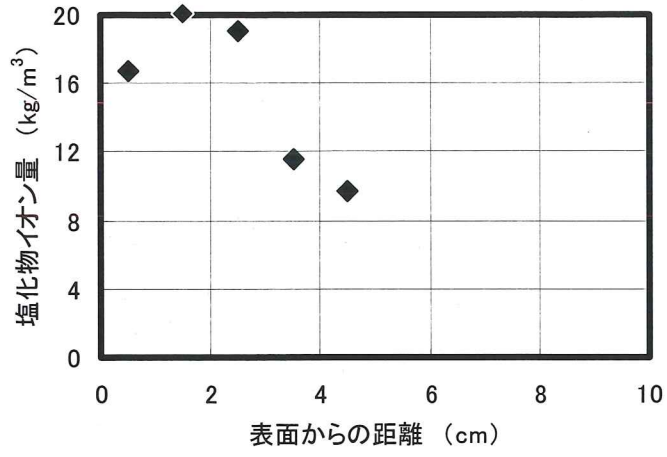


図-5.4.6　SE1 の塩化物イオン分布（柱部，新潟側）

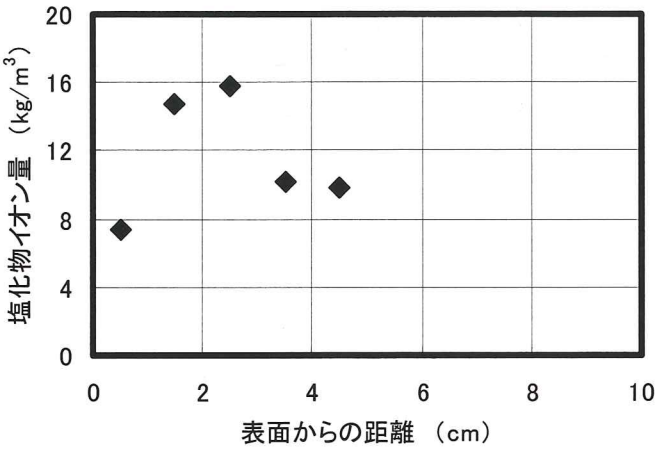


図-5.4.7　SE2 の塩化物イオン分布（柱部，陸側）

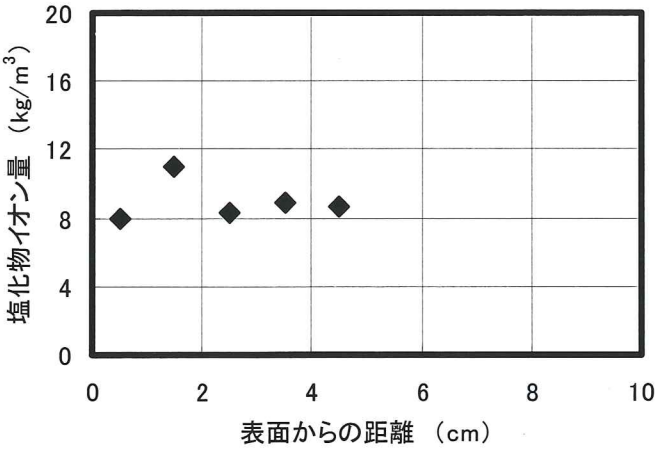


図-5.4.8　SE3 の塩化物イオン分布（柱部，陸側）

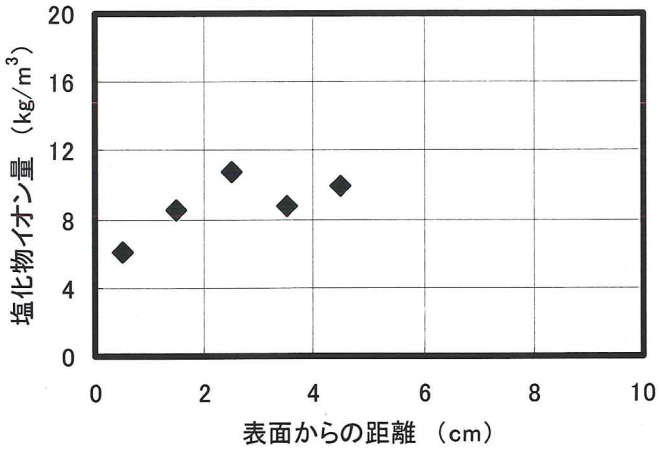


図-5.4.9　SE4 の塩化物イオン分布（打継目，酒田

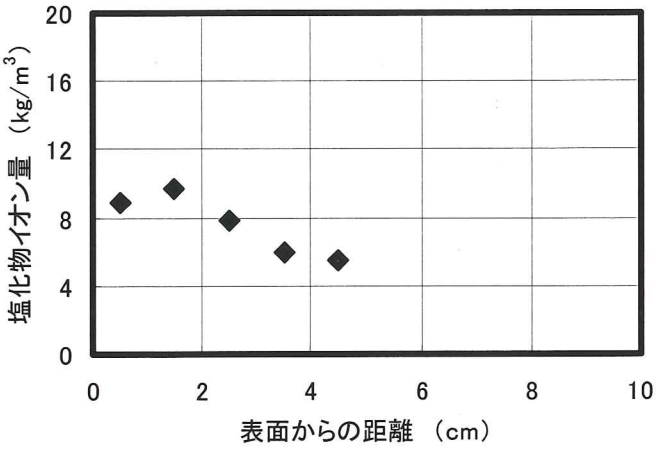


図-5.4.10　SE5 の塩化物イオン分布（打継目，酒田

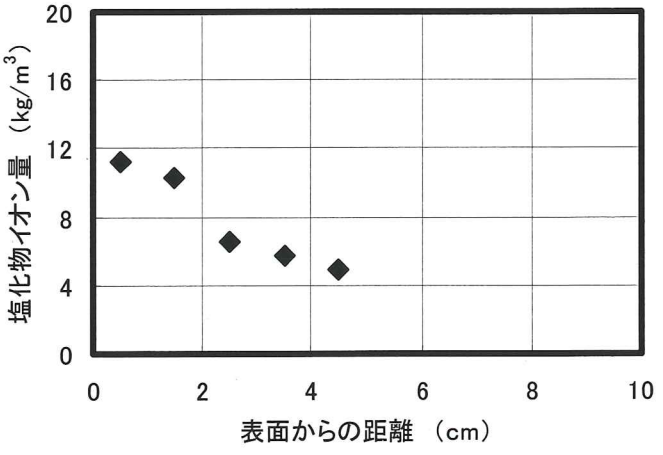


図-5.4.11　SE6 の塩化物イオン分布（新潟側）

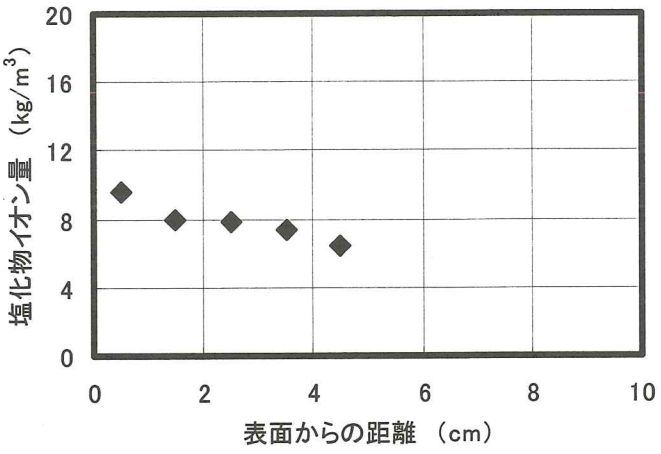


図-5.4.12　S1 の塩化物イオン分布（梁部，新潟側）

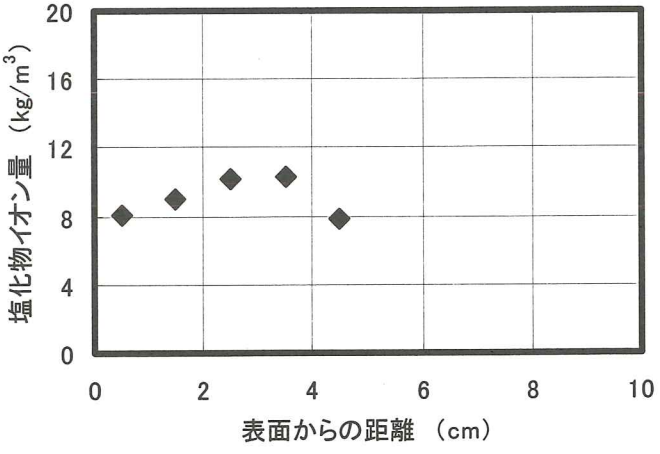


図-5.4.13　S2 の塩化物イオン分布（梁部，酒田側）

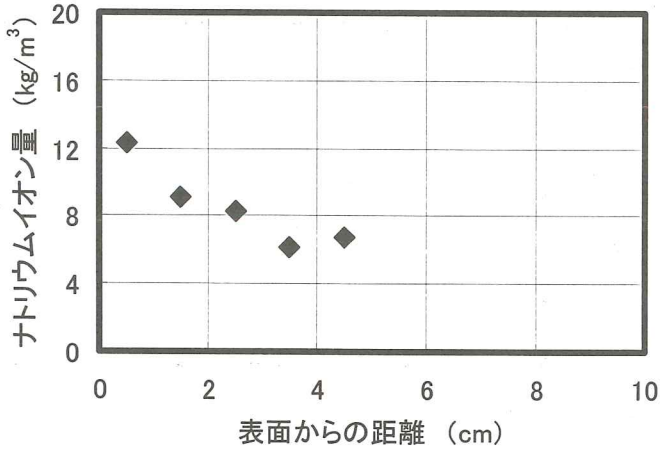


図-5.4.14　SE1 の Na イオン分布（柱部，新潟側）

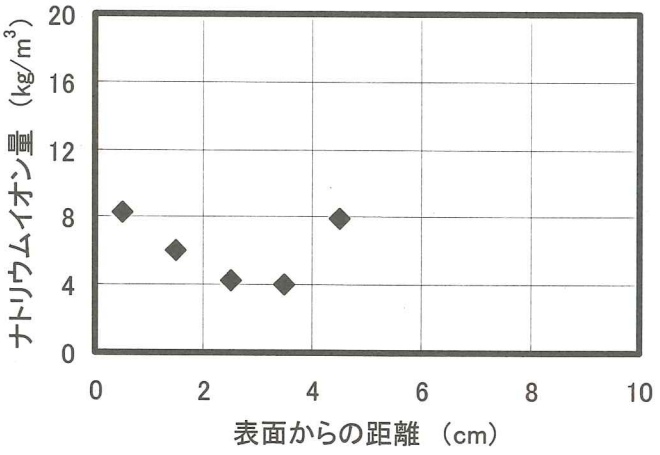


図-5.4.15　SE2 の Na イオン分布（柱部，陸側）

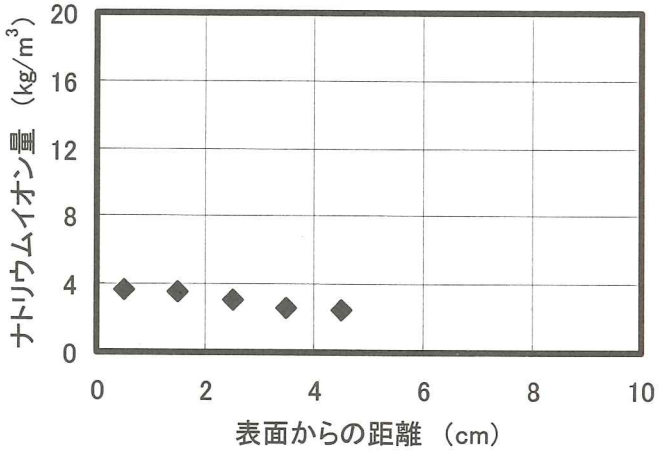


図-5.4.16　SE3 の Na イオン分布（柱部，陸側）

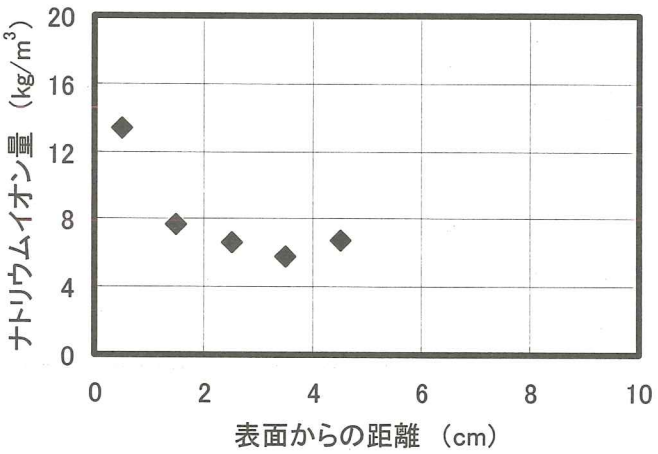


図-5.4.17　SE4 の Na イオン分布（打継目，酒田側）

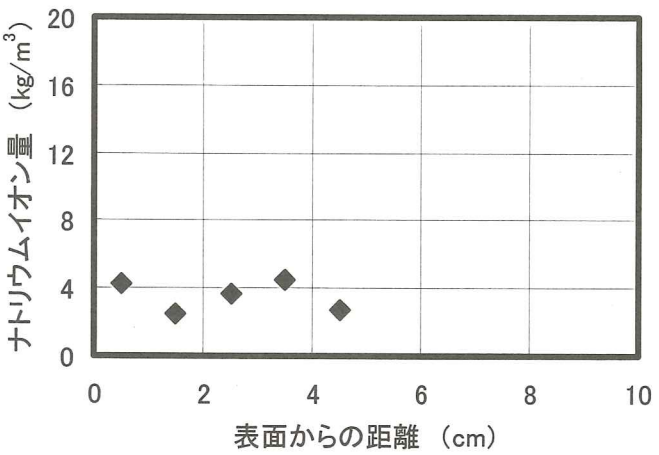


図-5.4.18　SE5 の Na イオン分布（打継目，酒田側）

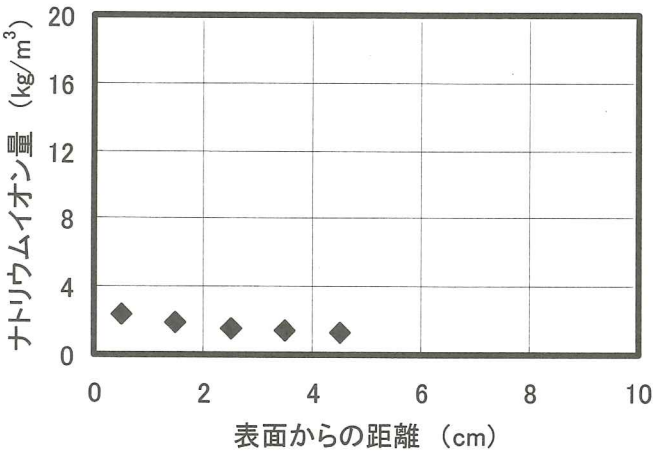


図-5.4.19　SE6 の Na イオン分布（新潟側）

注）　図-5.4.14～21 のナトリウムイオン量は骨材中のものを含む

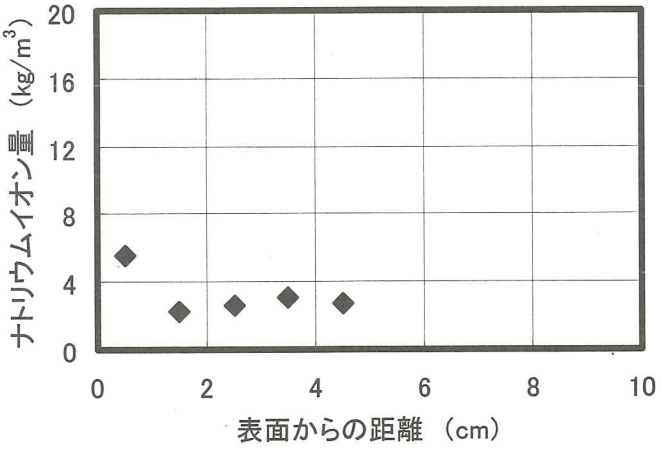


図-5.4.20　S1 の Na イオン分布（梁部，新潟側）

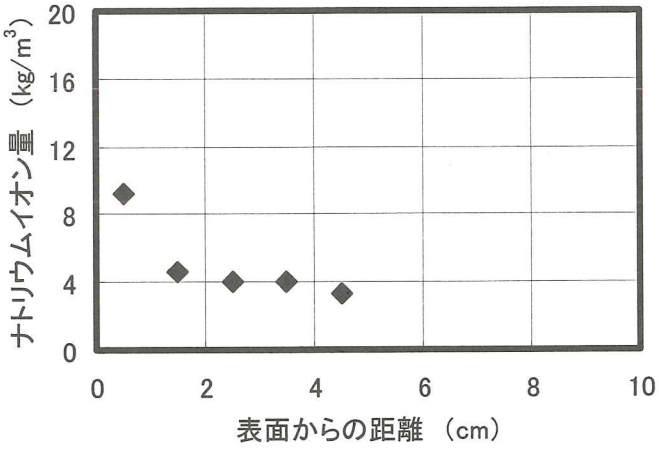


図-5.4.21　S2 の Na イオン分布（梁部，酒田側）

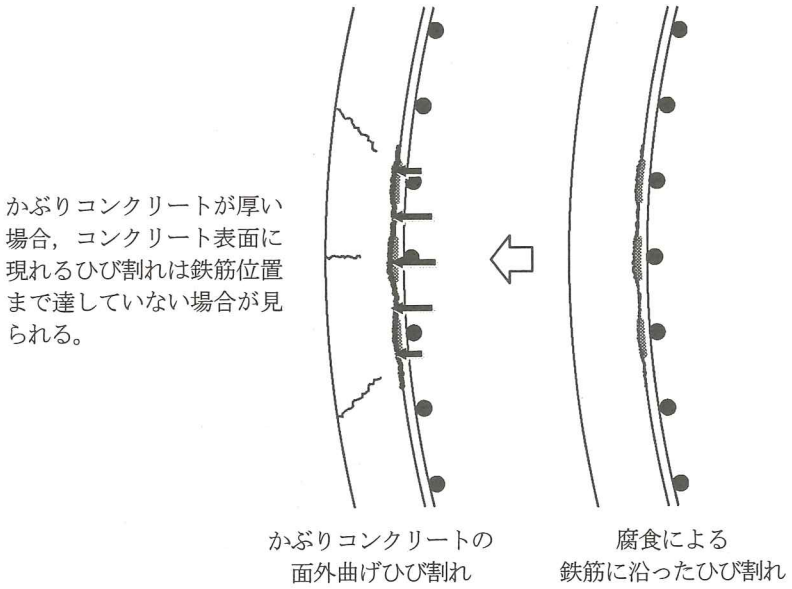


図-5.4.22　かぶりが厚い橋脚の鉄筋腐食によるひび割れ（模式図）

6．弁天大橋 A2 橋台の調査

6.1　弁天大橋 A2 橋台の概要

写真-6.1.1 に弁天大橋 A2 橋台の周囲の環境を示す。写真-6.1.2～6.1.3 に弁天大橋 A2 橋台の外観を示す。同橋は，9 径間単純プレテンションプレストレストコンクリート T 桁橋で，1972 年に完成した。国道 8 号新潟県能生地区の海岸に位置して，季節風による波しぶきによる厳しい塩分環境に置かれていたことから，上部構造に塩害劣化が見られた。このため，1980 年代前半に全径間の上部構造を対象とした断面補修およびコンクリート塗装が施された。その後，1990 年代に入って 2 度目の補修が実施されるとともに，一部径間では電気防食の試験施工が開始された。

調査対象とした A2 橋台は，錆汁や鉄筋腐食によるコンクリートのはくりは見られなかったが，陸側側面に亀甲状のひび割れが見られた(写真-6.1.4)。しかし，桁下の面には温度ひび割れと思われる比較的大きいひび割れが 4 箇所に出ていたが，亀甲状のひび割れは見られなかった。このことから，特に，コアの採取箇所を陸側側面(日照，降雨がある箇所)および桁下の雨水のかからない面(日照，降雨がない箇所)の両方でコア抜き調査を実施した。採取後は速やかに無収縮モルタル充填により修復した。図-6.1.1 に，A2 橋台の主要な寸法形状を示す。また，図-6.1.2 に A2 橋台のひび割れの状況及びコア採取位置を示す。側面，桁下ともに 4 本のコアを採取した。これらのコア採取位置では，鉄筋を避けたため，鉄筋の健全性は確認していない。

表-6.1.1　弁天大橋の主な諸元と変遷

橋梁形式	プレテンションＰＣ桁 17 径間単純桁
橋長	340.02 m　(2@20.01 + 15@20.0)
竣工年月	1972 年
補修・補強履歴	1982～1983 年　第 1 期上部構造塩害補修 1987～1991 年　第 2 期上部構造塩害補修 1995 年　上部構造塩害補修　(第 1 径間及び第 6～10 径間) 電気防食　(第 8 径間) 2003 年　上部構造塩害補修　(第 1～2 径間及び第 7 径間) 電気防食　(第 12 径間) 下部構造　塩害補修なし
コア採取日	2002 年 3 月 18 日

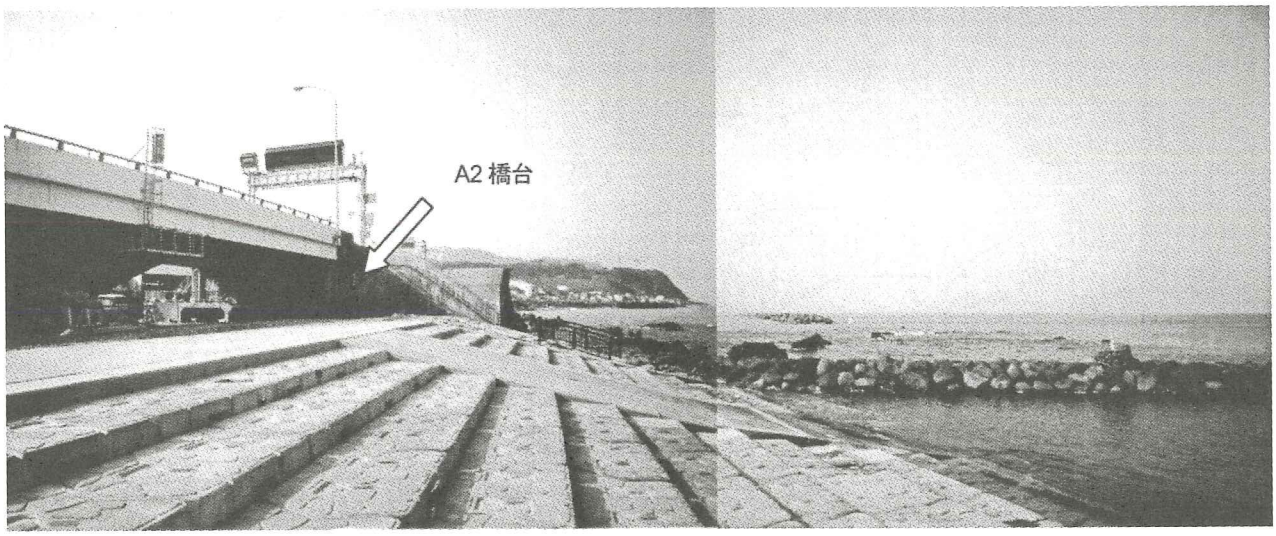


写真-6.1.1　弁天大橋 A2 橋台の周囲の環境



写真-6.1.2　弁天大橋 A2 橋台外観（側面）

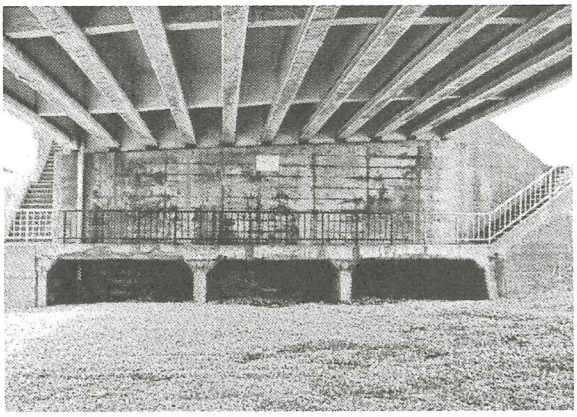


写真-6.1.3　弁天大橋 A2 橋台外観（桁下）

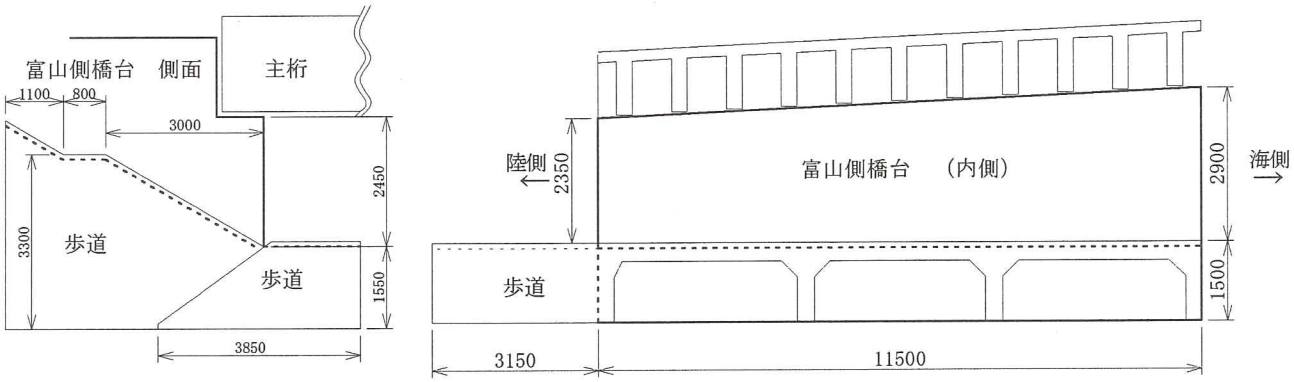
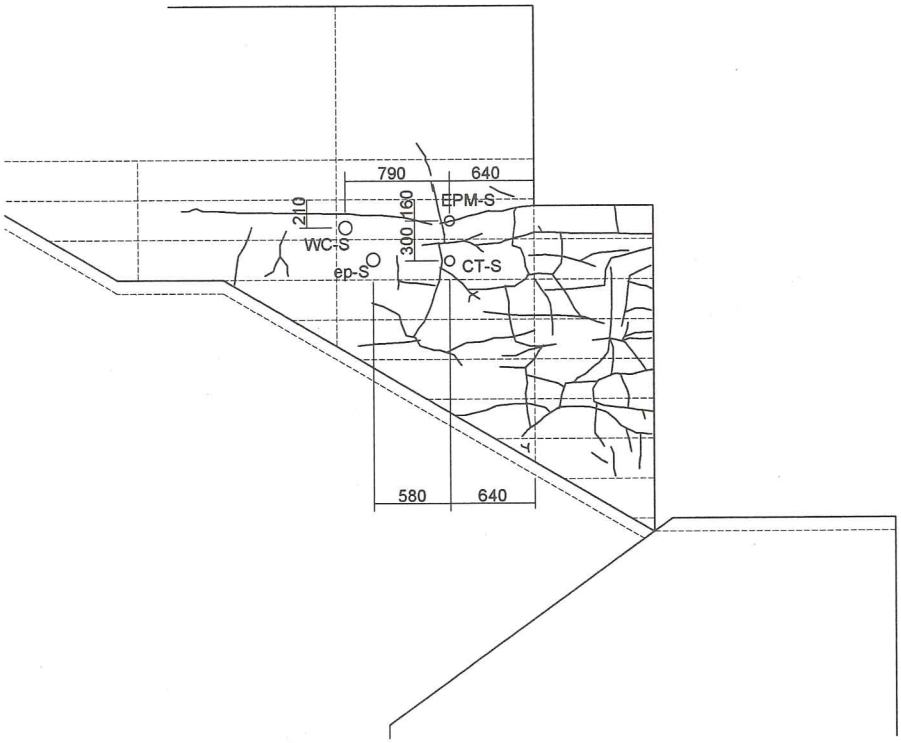
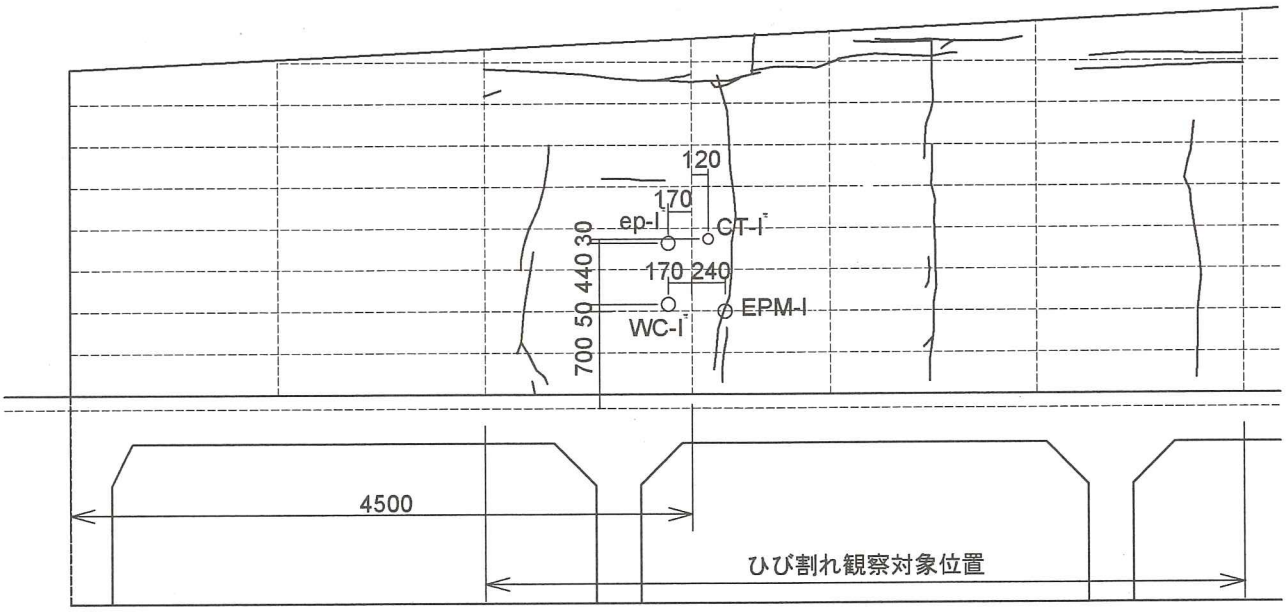


図-6.1.1　A2 橋台の主要な寸法形状



(a) 陸側，側面



(b) 桁下

図-6.1.2　A2 橋台のひび割れの状況及びコア採取位置



写真-6.1.4　陸側，側面のひび割れ状況



写真-6.1.5　桁下のひび割れ状況

6.2 調査箇所と調査項目

コア採取位置は前掲図-6.1.2 に示した。また，表-6.2.1 に調査項目と採取コアを示す。

以下の項目について，側面，桁下それぞれで測定した。

1) 基本データ

圧縮強度，中性化深さ

2) 既設構造物の含水率分布

実際の構造物のコンクリート中の含水率を把握するため，採取前の自然の状態をできるだけ保持して，含水率の分布を測定した。

3) ひび割れ部の塩化物イオン等浸透状況

ＥＰＭＡ分析，塩化物イオン量分布の測定，アルカリイオン量分布の測定

4) ASR 膨張量試験

表-6.2.1　調査項目と採取コア

項　　目	陸側，側面	桁下	備　考
圧縮強度試験	φ75 mm×350 mm，1 本 (CT-S) 試験体は 2 本	φ75 mm×350 mm，1 本 (CT-I) 試験体は 2 本	試験体としては，側面，桁下ともに表層部と内部の 2 本ずつ採取。
中性化	各コアを利用	各コアを利用	
含水率分布 (自然乾燥状態)	φ100 mm×200 mm，1 本 (WC-S)	φ100 mm×200 mm，1 本 (WC-I)	20mm ピッチ 湿式コア採取
ＥＰＭＡ 塩化物イオン量分析 アルカリイオン量分析	φ75 mm×200 mm，1 本 (EPM-S)	φ100mm×200 mm，1 本 (EPM-I)	EPMA: 80 (75) mm×80 mm Cl，Na: 深さ 100mm まで 20mm ピッチ
膨張量試験	φ100 mm×200 mm，1 本 (ep-S)	φ100 mm×200 mm，1 本 (ep-I)	

6.3 結果

6.3.1 採取したコアのひび割れ状況

表-6.3.1 に採取したコアのひび割れ状況を示す。ひび割れ幅はコア抜き前にクラックスケールで測定したものである。また，図-6.3.1(a)～(b)にコア採取後に観察したコア側面のひび割れ状況を示す。

表-6.3.1　コンクリートコアのひび割れ等状況　　(単位：mm)

コア番号	ひび割れ幅 [1]	ひび割れ深さ (側面 A) [2]	ひび割れ深さ (側面 B) [2]	ひび割れの概要 [3]
EPM-S	0.2	107	118	コア表面から内部につながるひび割れ（軸方向）から枝分かれするひび割れが目立った。
CT-S	－	－	－	コア表面から 100mm 程度の位置に周方向全体にひび割れが見られた。また個々に短いひび割れがあった。骨材にもひび割れが見られた。
WC-S	－	－	－	コア表面から 120mm 程度の位置に周方向全体にひび割れが見られた。
ep-S	－	－	－	コア表面から 60～100mm 程度の位置に周方向のひび割れが見られた。
EPM-I	0.25	200 以上	200 以上	ひび割れはコア表面からコア末端まで貫通していた。施工時のコンクリートの水和熱に起因する温度ひび割れと推察される。
CT-I		－	－	ひび割れは認められなかった。
WC-I		－	－	ひび割れは認められなかった。
ep-I		－	－	ひび割れは認められなかった。

1) ひび割れ幅は，コア採取前にクラックスケールにより測定した。
2) ひび割れ深さはコア側面の目視による。

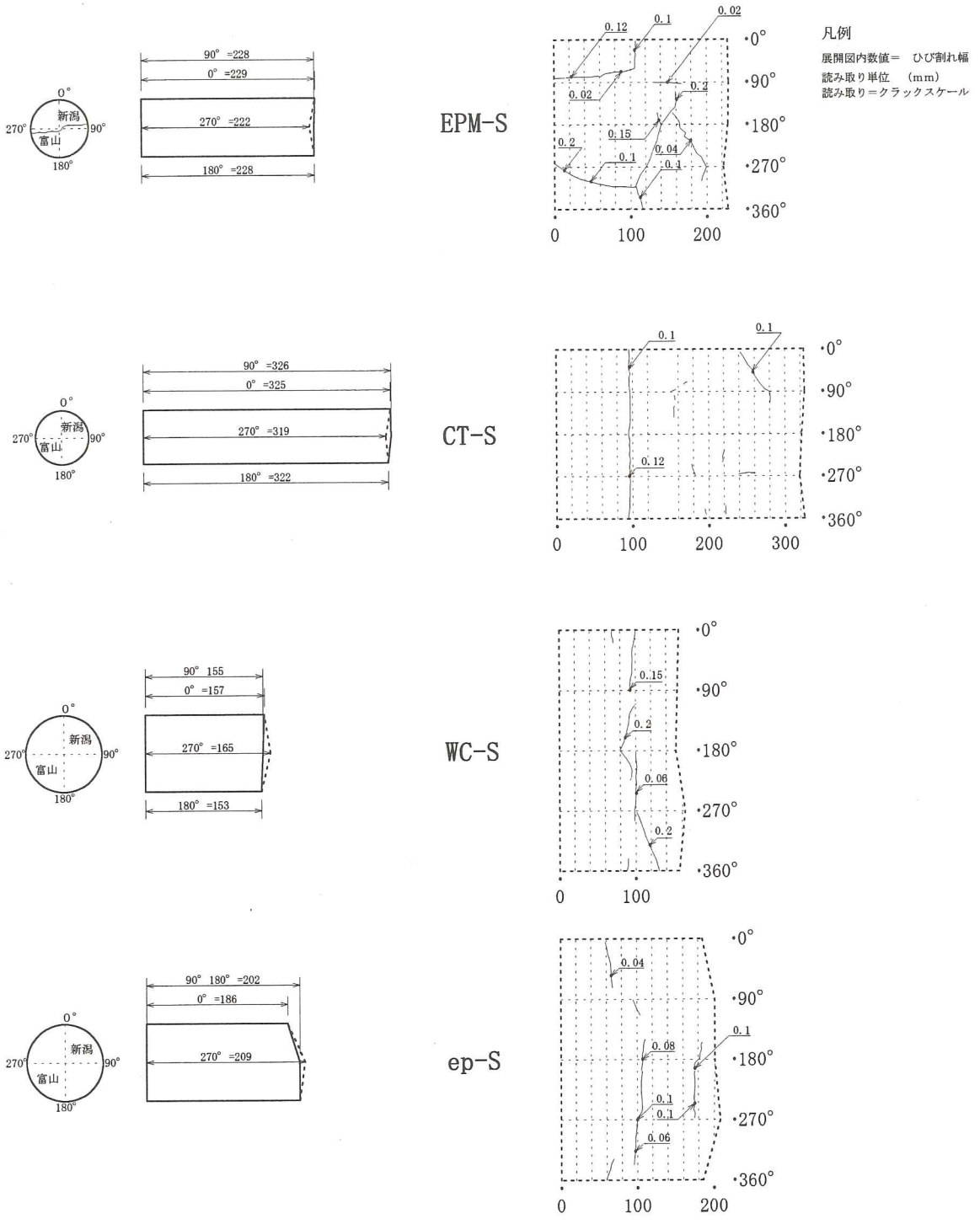


図-6.3.1(a)　コアのひび割れ状況（側面）

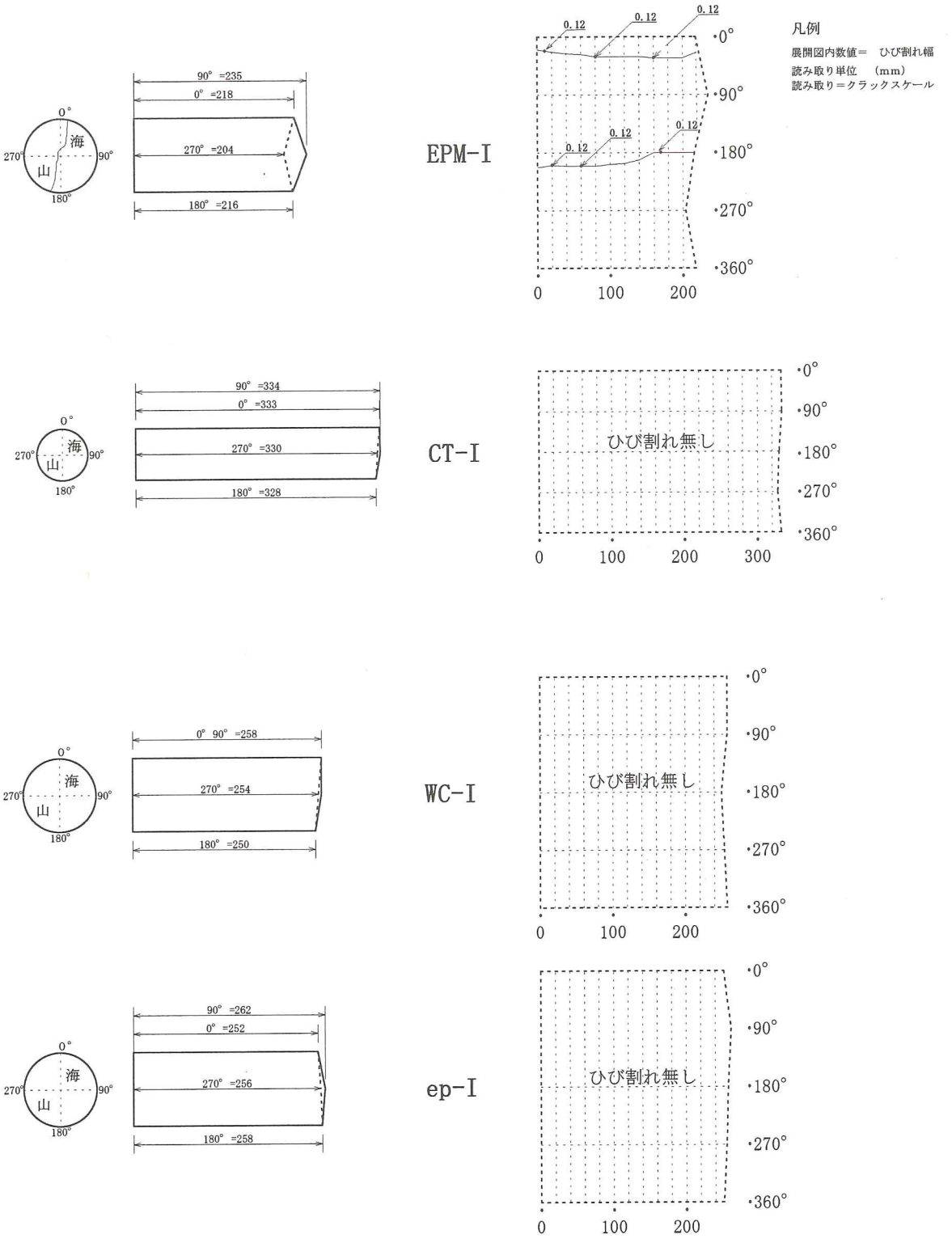


図-6.3.1(b) コアのひび割れ状況（桁下）

6.3.2 圧縮強度

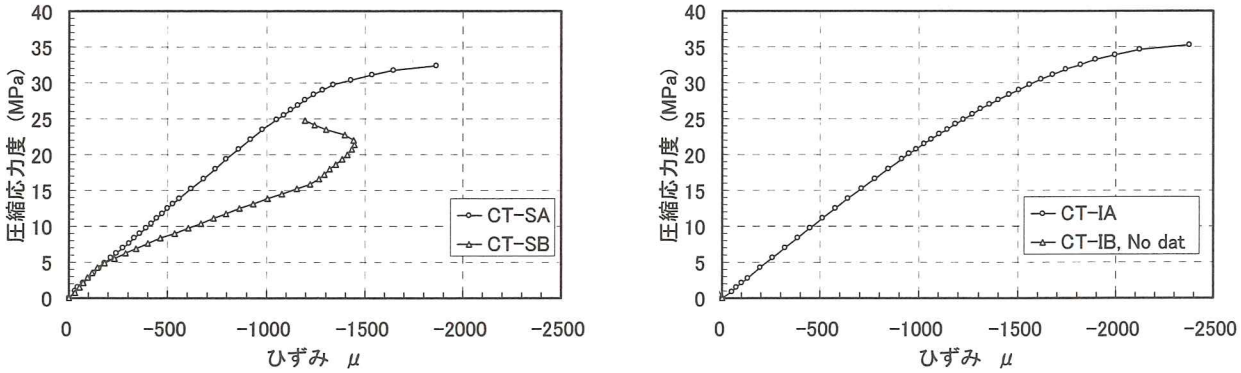
表-6.3.2 に圧縮強度試験結果を示す。側面から採取したコア CT-SA, CT-SB はいずれも圧縮試験前にひび割れが見られたが，圧縮強度は桁下で採取したひび割れのないコア CT-IA, CT-IB とそれぞれ同程度であった。

これらの試験前のひび割れ状況にかかわらず，橋台の側面，桁下ともに表面側のコアの方が内部のコアより明らかに大きい傾向が見られた。図-6.3.2 に各コアの応力－ひずみ曲線を示すが，内側のコアはいずれもひずみが適切に測定できなかった。内側のコアの圧縮強度の方が小さかった原因は明確ではないが，乾燥の程度の違いや内部の水和熱によるマイクロクラックの影響などが考えられる。

表-6.3.2 圧縮強度試験結果

部位	コア番号	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ひび割れの有無*
側面，表面	CT-SA	32.4	24.3	あり
側面，内部	CT-SB	24.9	－	あり
桁下，表面	CT-IA	35.3	22.1	なし
桁下，内部	CT-IB	23.1	－	なし

* 圧縮試験前のひび割れ状況(図-6.3.1)，目視による。



(a) 側面のコア（CT-SA, CT-SB）　　(b) 桁下のコア（CT-IA, CT-IB）

図-6.3.2　コンクリートの応力－ひずみ関係

6.3.3 中性化深さ

表-6.3.3 に各コアの中性化深さ測定結果を示す。側面の方が桁下側よりも中性化深さ(特に最大値)が小さい傾向が見られた。

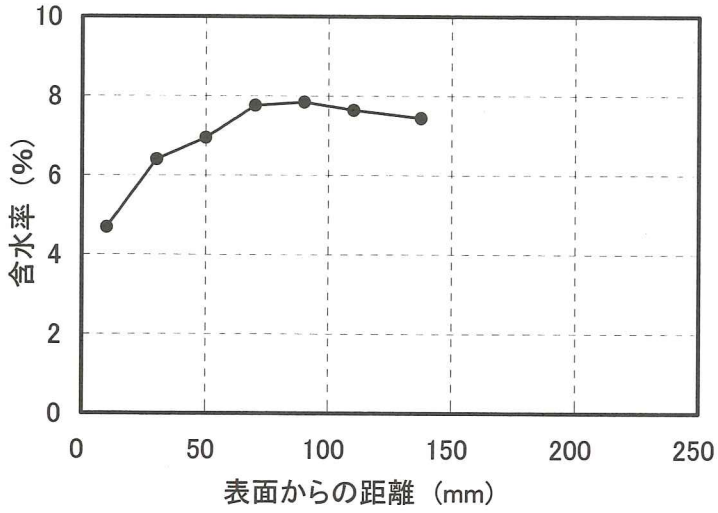
表-6.3.3　中性化深さ測定結果

コア番号		中性化深さ（mm）						最大位置
		0°	90°	180°	270°	平均値	最大値	(°)
側面	EPM-S	3.0	2.5	2.5	1.5	2	5	250
	CT-S	7.5	6.0	0.0	0.0	3	8	0
	WC-S	5.0	0.0	15.0	0.0	5	15	180
	ep-S	0.0	0.0	2.5	0.0	1	5	340
桁下	EPM-I	5.0	0.0	9.5	1.0	4	21	320
	CT-I	10.0	11.0	12.5	8.0	10	14	100
	WC-I	2.0	10.0	0.0	5.0	4	18	135
	ep-I	5.5	10.5	5.0	9.0	8	19	70

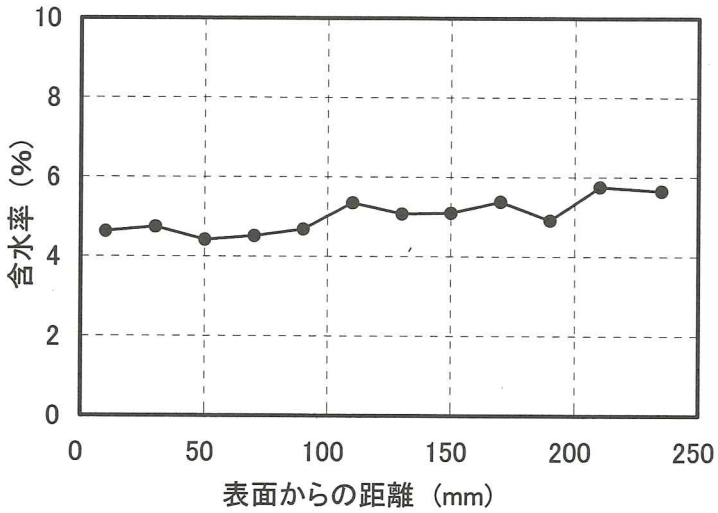
＊ 測定位置は図-6.3.1(a)(b)参照

6.3.4 含水率分布

図-6.3.3 に側面，桁下それぞれのコンクリート中の含水率分布を示す。A2 橋台の含水率分布は側面と桁下で大きく異なっていた。側面での含水率は 4.7～7.9 %の範囲で，表面付近 60 mm 程度まで乾燥していた。一方，桁下での含水率は 4.4～5.8 %の範囲にあり，表面に近い方がやや小さい傾向にあるものの，側面ほど顕著な変化ではなかった。この橋台のコンクリートで乾燥の影響が小さかった場合の含水率が側面内部の値(約 8 %)と同程度であったと考えられることから，雨に濡れることのなかった桁下では乾燥の影響がコア全長にわたって深くまで達していたものと推察される。



(a) WC-S　(側面)



(b) WC-I　(桁下)

図-6.3.3　橋台の含水率分布

6.3.5 ひび割れ部の塩化物イオン等浸透状況

A2 橋台側面のひび割れの原因は，表層にアルカリ骨材反応特有の亀甲状ひび割れが発生していること，鉄筋位置の塩化物イオン量が 0.7 kg/m^3 であったので鉄筋腐食の可能性が低いこと，ひび割れ幅が比較的大きいことからアルカリ骨材反応の可能性が高いと考えられる。桁下のひび割れは幅が広く，深いひび割れが鉛直に等間隔に生じていたことから温度ひび割れと考えられる。

図-6.3.4～6.3.5 に A2 橋台側面及び桁下それぞれのひび割れ部の EPMA 面分析結果を示す(EPM-S, EPM-I)。各コアともに塩化物，ナトリウム，カルシウム，硫化物それぞれのイオン濃度分布を測定した。いずれも図の左辺がコンクリートの表層部分に相当する。写真-6.3.1～2 に各試料の測定面を示す。橋台側面，桁下ともに，旧芦川橋補強コンクリートや旧岩川大橋 P8 橋脚のひび割れ部と同様に，外部からの塩分浸透が見られ，またひび割れの周囲で塩化物イオンが少なくなる現象が見られた。また，EPMA の結果より，表面付近の塩化物イオン，硫化物イオンが減少する領域でナトリウムイオンの増加が確認された。ただし、EPM-S のみはひび割れ部において硫化物イオンの濃縮が見られなかった点が特異であった。

図-6.3.6～7 に各コアの EPMA 用試料以外の部分を用いて測定した塩化物イオン量の分布を示す。これらの結果をフィックの拡散式にあてはめて得られた拡散係数及び表面塩化物イオン量を表-6.3.4 に示す。桁下の表面塩化物イオン量の方が側面よりも大きい傾向にあり，また塩化物イオンの拡散係数も桁下の方が大きかった。側面と桁下の間で圧縮強度に大差が見られなかったものの，側面のカルシウムイオン濃度が桁下より大きかったことと，側面の塩分拡散係数が桁下より低いことから，側面のコンクリートの W/C が桁下よりやや小さい傾向にあったことがうかがえる。

図-6.3.8～9 に塩分分析のために粉砕された粉から別途試料を採取して測定したアルカリイオン量の測定結果を示す。ナトリウムイオンが多く含まれる骨材が多かったため，この試料採取方法ではナトリウムイオンの浸透は確認できなかった。

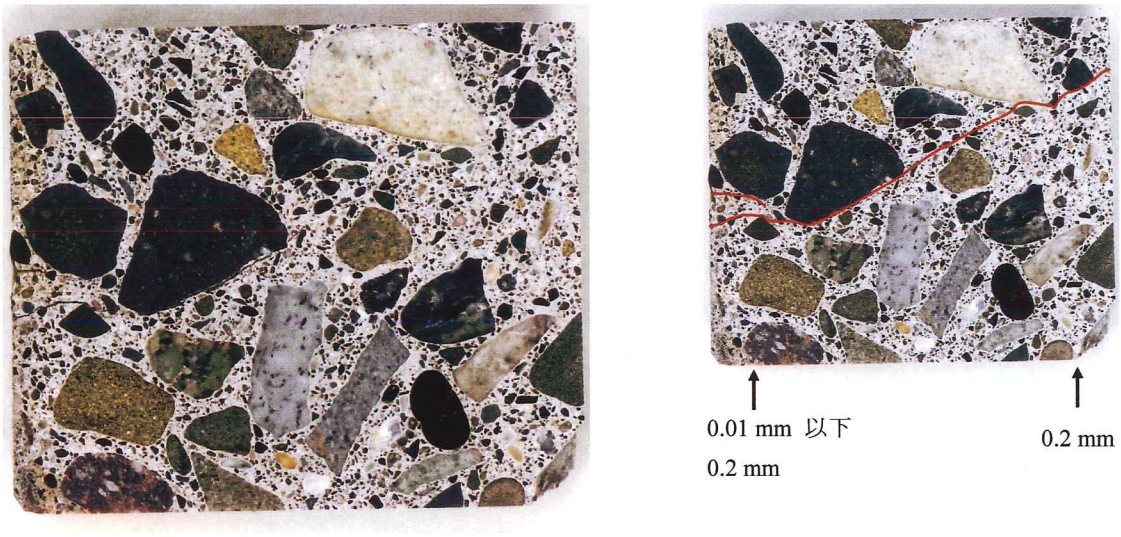


写真-6.3.1　EPM-S の測定面

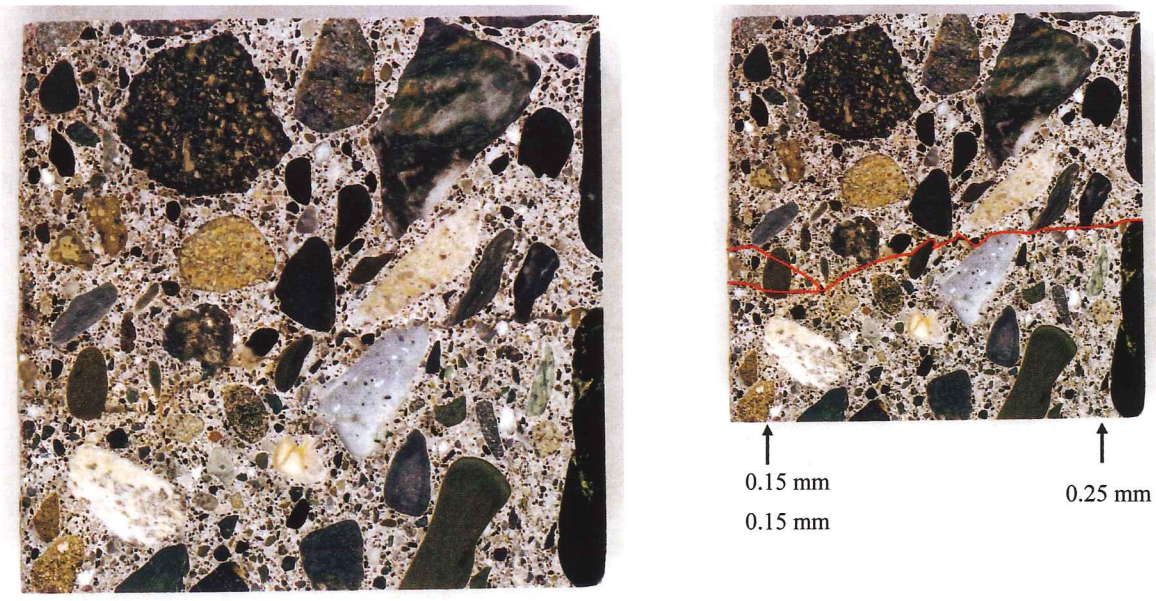
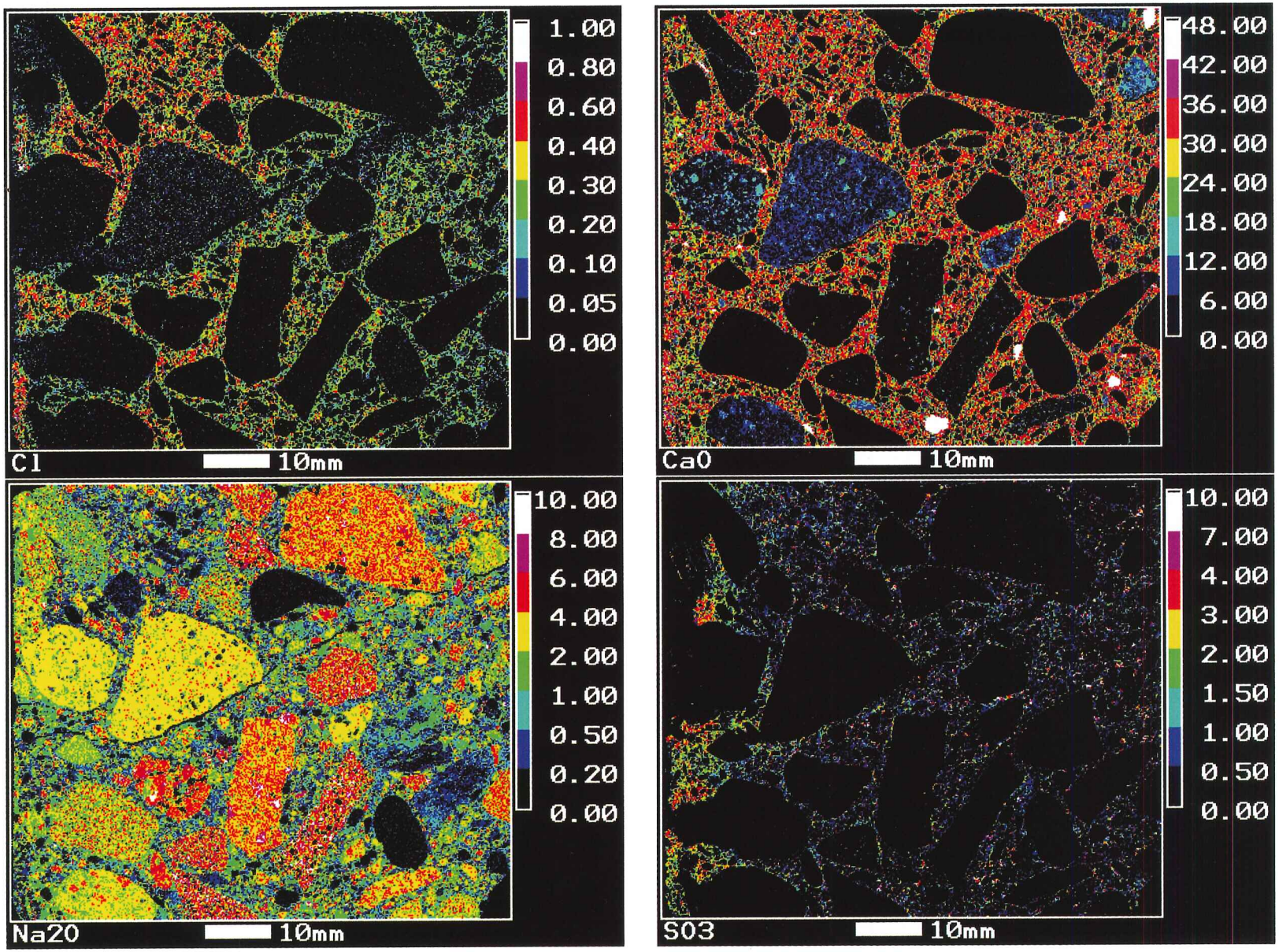


写真-6.3.2　EPM-I の測定面

注 1) 写真-6.3.1～2 は左辺がコンクリート表面。

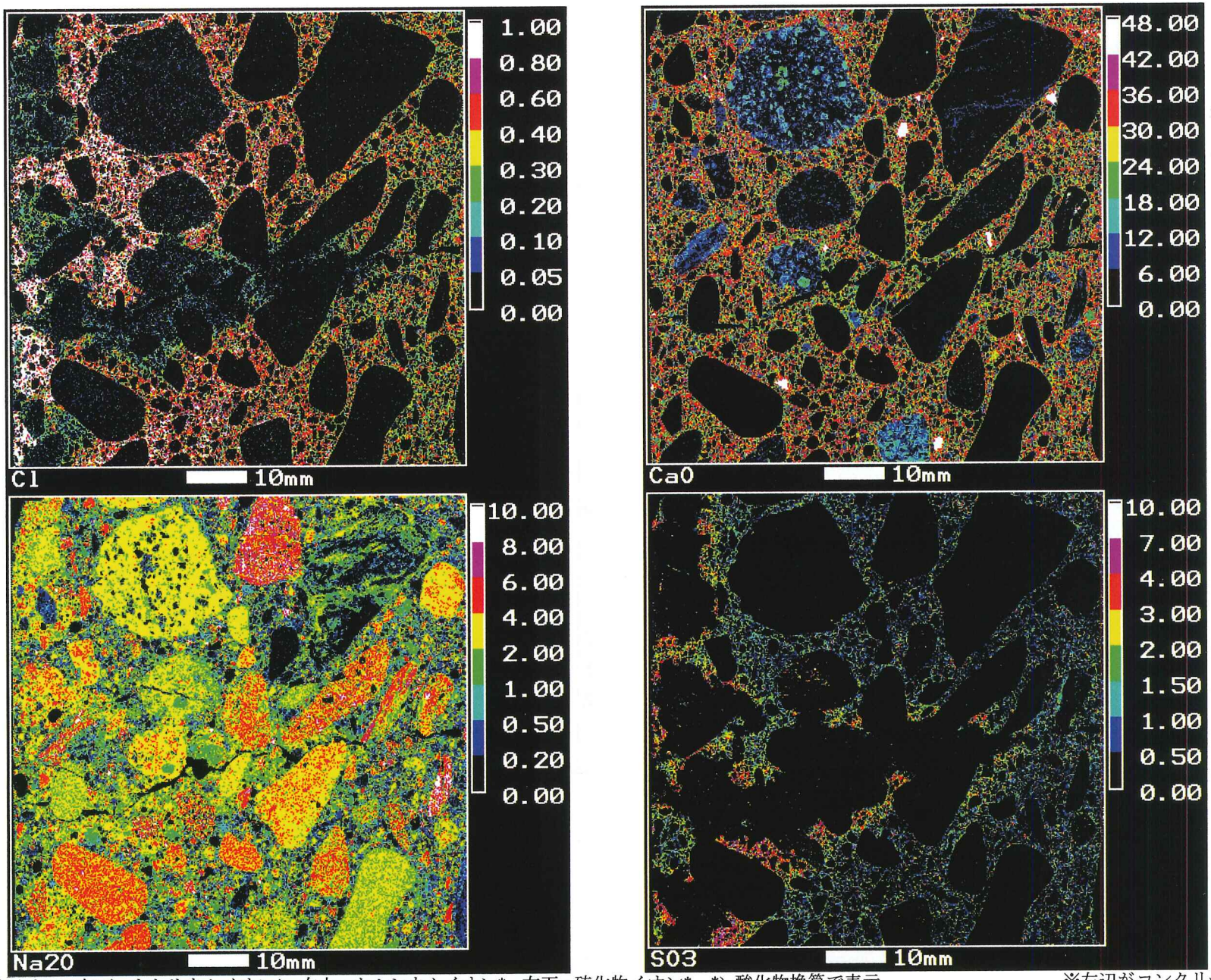
注 2) 右図は 20 倍拡大鏡による観察に基づくひび割れ位置を示す。図中数値はひび割れ幅を示す。



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*) 酸化物換算で表示

※左辺がコンクリート表面。

図-6.3.4　EPM-S の EPMA 面分析結果 (側面)



左上：塩化物イオン，左下：ナトリウムイオン*，右上：カルシウムイオン*，右下：硫化物イオン*　*) 酸化物換算で表示

※左辺がコンクリート表面。

図-6.3.5　EPM-I の EPMA 面分析結果 (桁下)

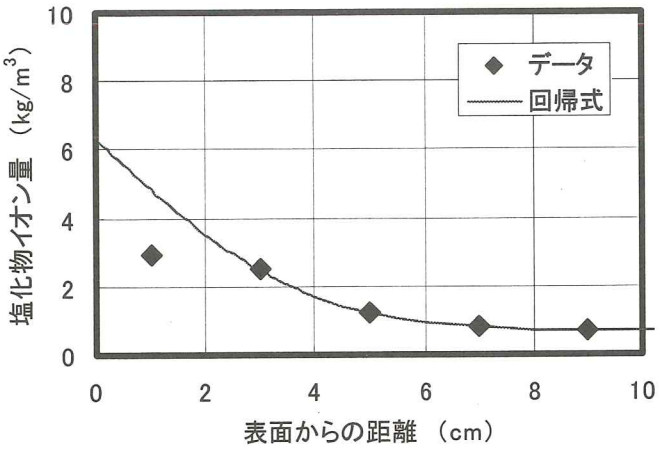


図-6.3.6　EPM-S の塩化物イオン分布（側面）

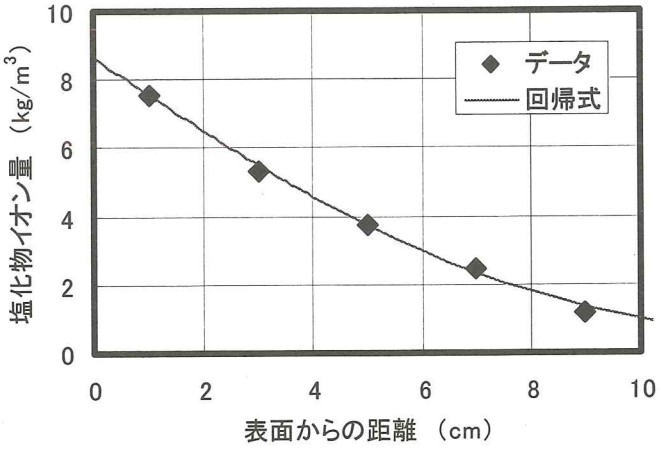


図-6.3.7　EPM-I の塩化物イオン分布（桁下）

表-6.3.4 塩化物イオン量の拡散係数

コア番号	拡散係数 (cm^2/s)	表面塩化物イオン量 (kg/m^3, 参考値)
EPM-S (側面)	4.7×10^{-9}	5.6
EPM-I (桁下)	2.1×10^{-8}	8.6

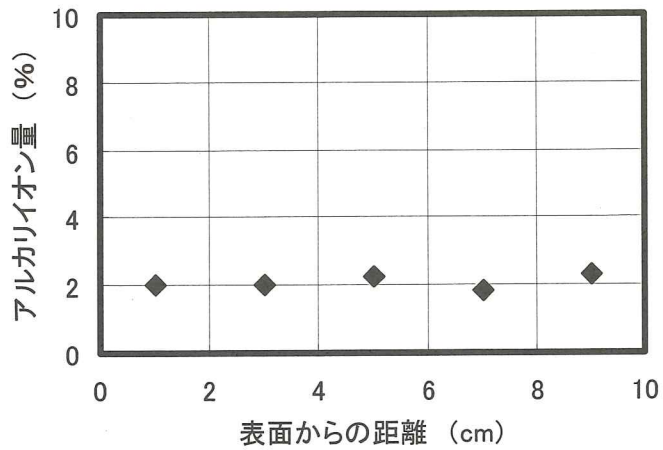


図-6.3.8　EPM-S のアルカリイオン分布（側面）

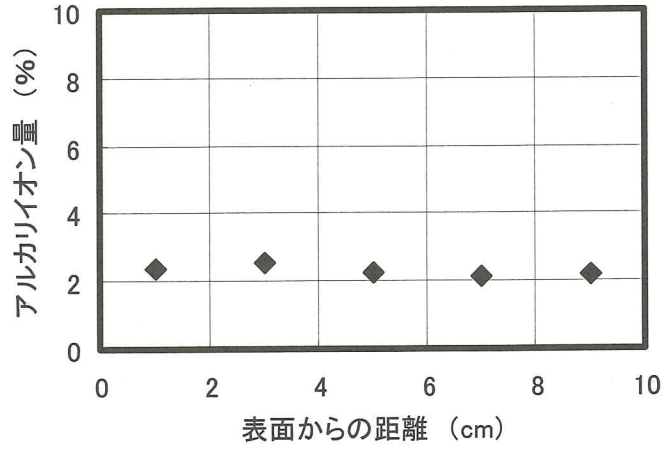


図-6.3.9　EPM-I のアルカリイオン分布（桁下）

6.3.6 膨張量

図-6.3.10 に ep-S，ep-I の膨張量試験結果を示す。測定は約 80 週継続したが，両試験体ともに膨張は認められなかった。

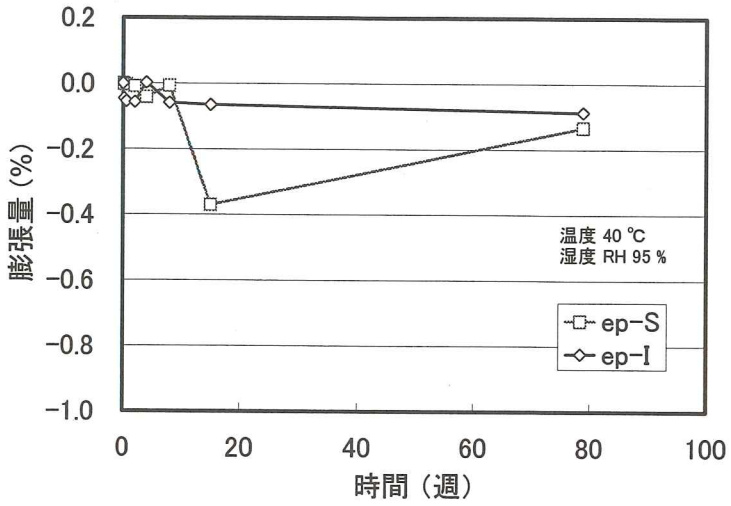


図-6.3.10　ep-S, ep-I の膨張量測定結果

7．コンクリートのひび割れ部における塩分浸透

7.1 EPMA 試験結果の総括

表-7.1 に 4～6 章に示した 15 本のひび割れ部コアの EPMA 試験結果を整理した。旧芦川橋と旧岩川大橋のコア記号が同じであったことから，本章では各橋のコア記号の前に橋梁名の記号(A-, I-)を付加した。いずれの試料とも，沿岸部に建設されたコンクリート構造物のひび割れ部や打継目から採取されたものであり，一般部(ひび割れ部を除く部分)では外部からの塩化物イオンの侵入が確認されている。ひび割れの種類は，乾燥収縮に起因するもの，水和熱に起因するもの，鉄筋腐食に起因するものが含まれていた。コア採取前のコンクリート表面でのひび割れ幅は 0.06～0.45 mm であった。

コンクリートの圧縮強度は 21～71 MPa であった。カルシウムイオンの EPMA 試験結果では平均的な含有量(全体的な色合い)に幅があり，コンクリートの W/C によって異なっていたと考えられる。採取したコアは，さまざまな W/C のコンクリートが含まれていたことがわかる。

表中の中性化深さは，近接するコアのフェノールフタレインによる測定結果と，EPMA の測定結果による推定値を示した。EPMA による推定値は，硫化物イオンが中性化の範囲で顕著に減少する性質[7.1)]を利用して，硫化物イオンが表面付近で減少していた部分と濃縮部の境界から読み取った値である。EPMA の試料ではフェノールフタレインによる中性化深さを測定していないので，本章での中性化深さはこの硫化物イオンから推定した中性化領域の深さをいう。

表中の EPMA の試験結果は，前掲の写真に基づき，ひび割れ部を除いた表面付近とひび割れ部に分けて，Cl，Na，Ca，S の各元素について濃度の減少と濃縮について傾向を整理した。

以下,これらの結果に基づき，コンクリートのひび割れ部における塩分浸透について述べる。

7.2 表面付近の中性化領域の塩化物イオン —— Cl^-は内部へ移動するか

1980 年代より既設構造物のコア抜きによる塩化物イオン分布調査で表層部の塩化物イオンが少ない事例(表層より内部の方が含有量が同等以上)がしばしば見られた[7.2)]。その原因としては，中性化に伴う塩化物イオンの移動[7.1)]，塩化物イオンの供給の減少や乾湿の変化などの外部環境の変化などが挙げられるが，必ずしも明確でない。

図-7.1 にひび割れのない箇所で比較的中性化が深かったコア A-OP2 を例に，フェノールフタレインによる中性化領域と塩化物イオン及び硫化物イオンの濃度分布を対比して示す。図中，緑色の線はフェノールフタレインによる中性化領域をトレースしたものであり，これと全く同じものを EPMA 試験結果の上に重ねて示した(図中，赤線)。この図から，中性化領域の境界線を境にして，塩化物イオン，硫化物イオンが明確に濃度変化していることがわかる。

図-7.2 に塩化物イオン，硫化物イオンの濃度分布の模式図を示す。他のコアの結果も含めてみると，塩化物イオンは A-OP2 のように中性化領域の境界線ではっきりと変化する場合（硫化物イオンほど明確ではない）と中性化領域の手前で塩化物イオン濃度が減少傾向を示す場合があった。硫化物イオンについては，ほとんどの場合，A-OP2 と同様に中性化領域の境界線で明確な変化が生じていた。

A-OP2 の場合，表層約 5mm の範囲は中性化により塩化物イオンがほとんど存在していなかったが、スライスによる塩化物イオン量分析では，中性化部分を含む表層 10 mm の範囲の平均で測定していた。A-OP2 の中性化していた部分を除いて，塩化物イオン量を測定していたなら，図-7.3 に示すように，表面から 5～10 mm の範囲で約 14 kg/m^3 になっていたと推定される。このデータは，深さ 10～50 mm の塩化物イオン量のデータによるプロファイル上に概ね一致していた。これと同様に，比較的中性化深さが大きかった A-OP3，A-SE5，A-SE6，EPM-S について検討した結果を図-7.4～7.7 に示す。必ずしも A-OP2 のように修正点（各図中の△）が回帰式上に一致しないものも見られた。しかし，中性化深さが 5 mm 以上もあると中性化領域の塩化物イオンが内部に移動・濃縮した場合には，回帰式を顕著に超える部分が見られるかもしれないと考えたが，これらの図でそのような傾向は見られなかった。ただし，塩化物イオンが中性化領域の外側に濃縮しても内部へ再拡散することもあり得るので，これらの結果だけでは中性化領域にあった塩化物イオンが内部に移動しないとは断定できない。

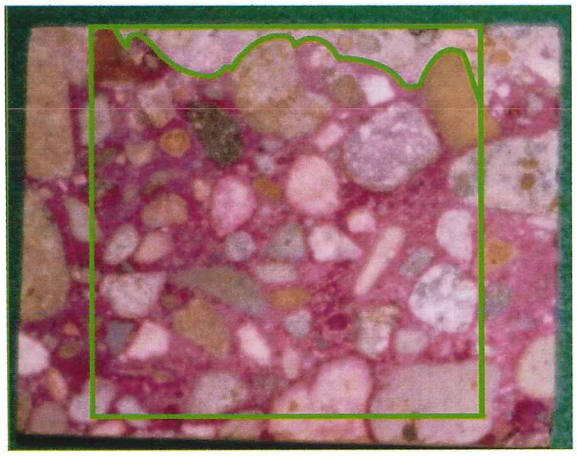
いずれにしても，練り混ぜ時に塩化物イオンを投入した場合と異なり，外部から浸透した塩化物イオンの場合，塩化物イオンが中性化領域の内側に濃縮する傾向があるかどうかは，浸透拡散の分布と重なるために判別し難い。また，コンクリートの中性化領域と内部の中性化していない領域の塩化物イオンの濃度差から中性化領域にあった塩化物イオンが内部に拡散すると考えられているが，この場合に表層部の塩化物イオンがほとんどなくなってしまう現象は説明できていない。中性化した後も外部から塩化物イオンの供給があったと考えられるが，中性化領域における塩分浸透のメカニズムは明確でない。EPMA の結果は，塩化物イオンが中性化領域をごく短時間で通過するか，中性化領域で遮蔽されるかしない限り，説明できないことがわかる。

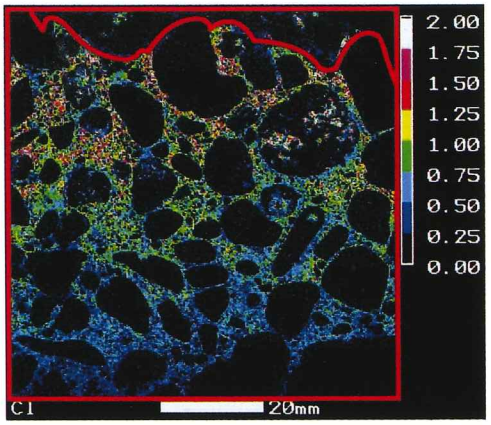
表-7.1 ひび割れ部のEPMA試験結果一覧

構造物	コア採取位置		コア番号	ひび割れ幅[1]	ひび割れ深さ(側面A)	ひび割れ深さ(側面B)	ひび割れ・打継目の概要[3]	圧縮強度 MPa	中性化深さ mm		最大塩分量 kg/m³	EPMA分析結果															
									近接コア	EPMA[6]試料		Ca[7]濃度%と色合い	表面付近(ひび割れ部を除く)での減少				表面付近(ひび割れ部を除く)での濃縮				ひび割れ部での減少				ひび割れ部での濃縮			
													Cl	Na	Ca	S	Cl	Na	Ca	S	Cl	Na	Ca	S	Cl	Na	Ca	S
旧芦川橋 G1桁 補強部	海側	―	A-SE1	0.06	2	40		57.5	0	0	8.2	33 赤	‥	‥	‥	‥	あり	‥	‥	‥	‥	‥	‥	‥	‥	‥	‥	あり
	海側	―	A-SE2	0.1	91	88		57.5	0	0	7.7	33 赤	わずかにあり	‥	‥	わずかにあり	あり	‥	‥	わずかにあり	あり	‥	‥	あり	‥	‥	‥	あり
	海側	―	A-SE3	0.08	31	37		57.5	0	0	8.4	33 赤	‥	‥	‥	‥	あり	‥	‥	わずかにあり	わずかにあり	‥	‥	あり	‥	‥	‥	わずかにあり
	陸側	―	A-SE4	0.1	100	83	コア全長にわたってひび割れ	71	0	0	4.0	33 赤	‥	‥	‥	‥	わずかにあり	‥	‥	あり	あり	‥	‥	あり	‥	‥	‥	わずかにあり
	陸側	―	A-SE5	0.2	110	222	側面Bはコア全長にわたってひび割れ	71	0	4	8.6	33 赤	あり	‥	‥	あり	あり	あり	‥	あり	あり	‥	‥	あり	‥	わずかにあり	‥	あり
旧岩川大橋 P8橋脚	新潟側	下	I-SE1	0.2	69	34	腐食による主鉄筋に沿ったひび割れ。上方(側面A)のみコア全長にわたってひび割れていた。	29.4 (CS2)	10	1	20.1	21 黄緑	あり	‥	わずかにあり	あり	あり	‥	‥	あり(強)	あり	‥	あり	あり	‥	‥	‥	あり(強)
	陸側	下	I-SE2	0.1	46	24	腐食による主鉄筋に沿ったひび割れ	29.4 (CS2)	10	5	15.8	21 黄緑	あり	‥	‥	あり	あり	‥	わずかにあり	あり(強)	あり(強)	‥	わずかにあり	あり	‥	‥	‥	あり(強)
	陸側	上	I-SE3	0.1	2	1	乾燥収縮ひび割れ	[4] 30 (CS3)	3	3	11.0	30 オレンジ	あり	‥	わずかにあり	あり	あり	あり	‥	あり	わずかにあり	‥	‥	あり	‥	‥	‥	あり
	酒田側	打継目，上	I-SE4	0.06	-	-	打継目。コア採取箇所では上下のコンクリートが割れていた。	-	-	12	10.8	33 赤	あり	‥	わずかにあり	あり	あり	あり	‥	あり(強)	あり(強)	‥	あり(強)	あり(強)	‥	あり	‥	あり
		打継目，下								10	10.8	30 オレンジ	あり	あり	わずかにあり	あり	あり[8]	あり	あり	あり	‥	‥	‥	‥	‥	あり	‥	あり
	酒田側	打継目，上	I-SE5	0.08	44	69	打継目。コア採取箇所では上下のコンクリートが割れていた。	-	-	-	9.7	33 赤	あり	‥	あり	あり	あり	‥	‥	あり	あり(強)	‥	あり(強)	あり(強)	‥	‥	‥	あり
		打継目，下								0	9.7	30 オレンジ	あり	あり	あり	あり	あり[8]	‥	あり	‥	‥	‥	‥	‥	‥	‥	‥	あり
	新潟側	下	I-SE6	0.1	0	2	乾燥収縮ひび割れ	20.8 (CS5)	8	1	11.2	30 オレン	‥	‥	‥	‥	あり	‥	‥	わずかにあり	あり(強)	‥	‥	あり	‥	‥	‥	あり
	梁部，新潟側	上	I-S1	0.45	82	115	温度ひび割れ。コア全長にわたってひび割れていた。	32.6 (C1)	0	0	9.6	30 オレン	‥	‥	‥	‥	あり	‥	‥	わずかにあり	あり	‥	‥	あり	‥	‥	‥	あり(強)
	梁部，酒田側	上	I-S2	0.35	115	112	温度ひび割れ。コア全長にわたってひび割れていた。	35 (C2)	4	4	10.3	30 オレン	あり	‥	‥	あり	あり	あり	‥	あり	あり(強)	‥	あり	あり	‥	あり	‥	あり(強)
弁天大橋 A2橋台	側面	―	EPM-S	0.2	107	118	コア表面から内部につながるひび割れ(軸方向)から枝分かれするひび割れが目立った。	32.4	2	2	7.6	30 オレンジ	あり	‥	‥	あり	あり	あり	‥	あり	あり	‥	‥	あり	‥	‥	‥	‥
	桁下	―	EPM-I	0.25	200以上	200以上	ひび割れはコア表面からコア末端まで貫通していた。施工時のコンクリートの水和熱に起因する温度ひび割れと推察される。	35.3	4	4	2.9	30 オレンジ	あり	‥	‥	あり	あり	あり	‥	あり	あり(強)	‥	‥	あり	‥	わずかにあり	‥	あり(強)

1) ひび割れ幅は，コア採取前にクラックスケールにより測定した。
2) ひび割れ深さはコア側面の目視による。
3) ひび割れの分類はP8橋脚表面のひび割れ観察及びコアの観察から推察した。
4) シュミットハンマーによる推定値
5) 圧縮強度のカッコ内記号は圧縮試験用コアの番号
6) EPMAによる中性化深さは硫化物イオンの分布から推定した。
7) 中性化領域等を除く濃度変化のない一般部での結果
8) 外部からの浸透とは別に，下側コンクリート表面に見られた物質中に濃縮

Na濃縮は中性化領域の内側で見られた。
S濃縮は中性化領域の境界部のすぐ外側で見られた。





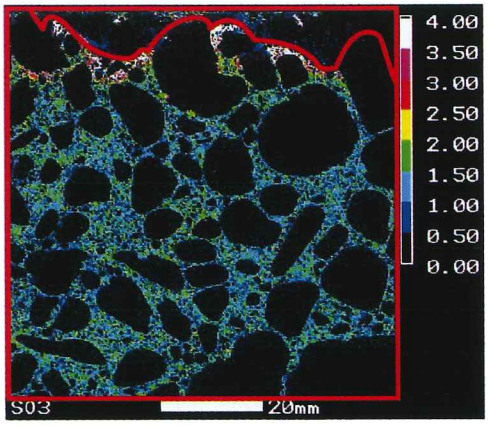
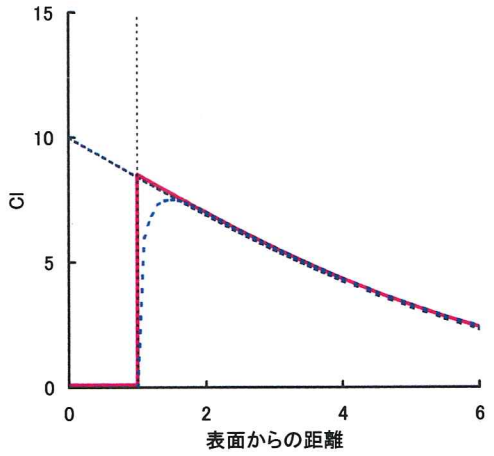


図-7.1　A-OP2 の中性化領域と塩化物イオン，
硫化物イオンの EPMA 試験結果
(上：中性化深さ，中；塩化物イオン，下：硫化物イオン)



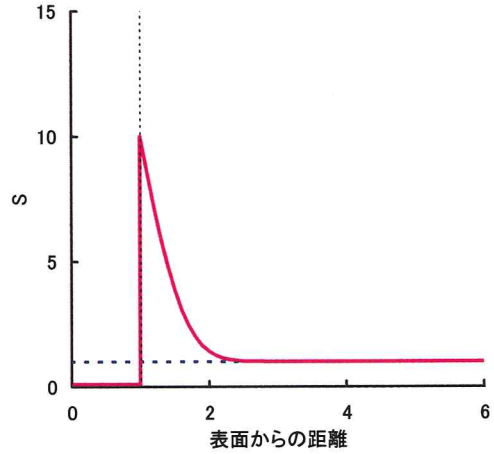


図-7.2　塩化物イオン，硫化物イオンの
浸透の模式図
(上：塩化物イオン，下：硫化物イオン)

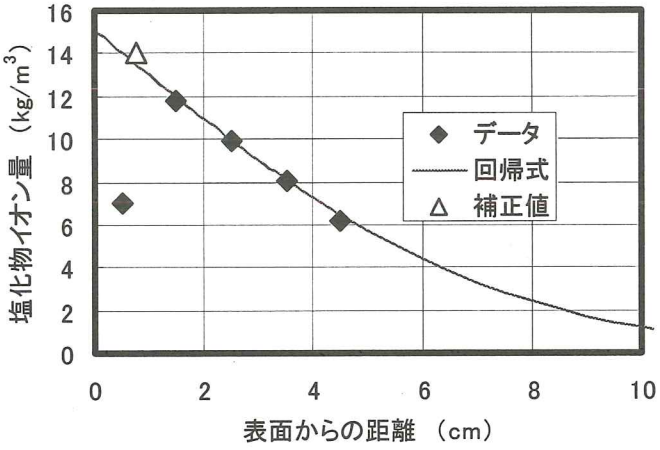


図-7.3　表層部の塩化物イオン量の補正（A-OP2）

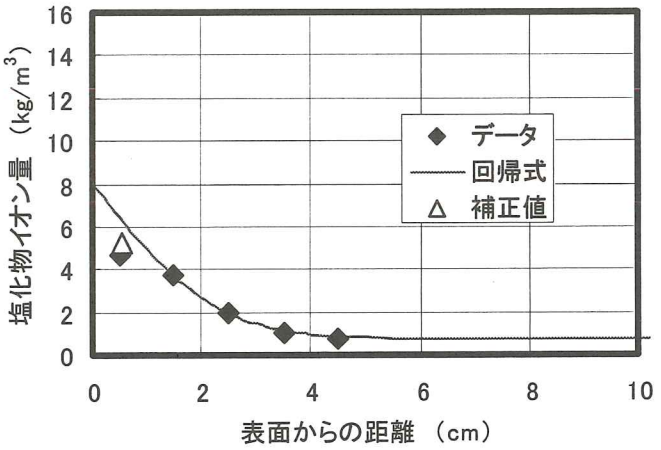


図-7.4　表層部の塩化物イオン量の補正（A-OP3）

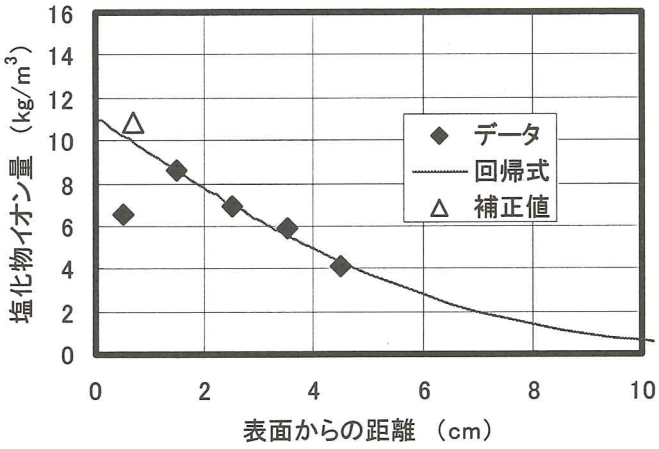


図-7.5　表層部の塩化物イオン量の補正（A-SE5）

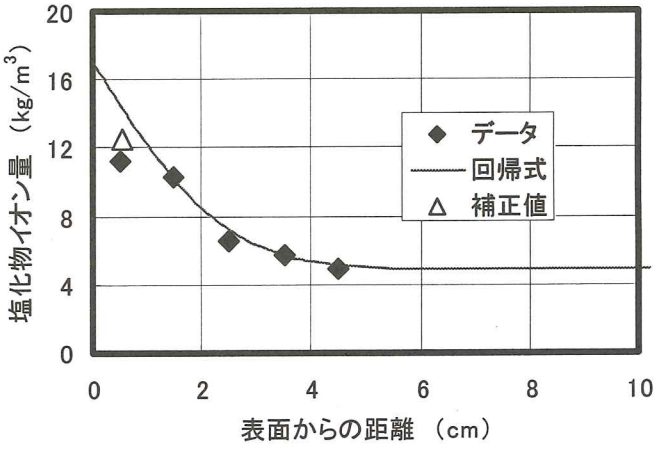


図-7.6　表層部の塩化物イオン量の補正（I-SE6）

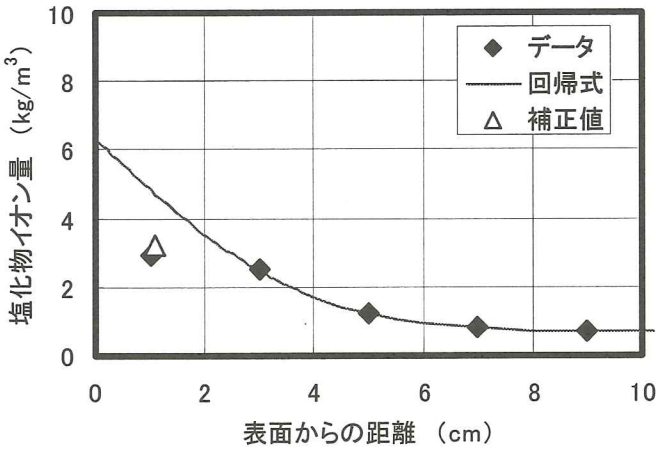


図-7.7　表層部の塩化物イオン量の補正（EPM-S）

7.3 ひび割れ部の塩化物イオンの減少

他のコアに比べて塩化物イオンの浸透自体が少なかった A-SE1 を除き，すべての EPMA 試料で，ひび割れ部において塩化物イオンが少なくなっていた。この結果は，コンクリートの W/C に関係なく，またひび割れの発生原因や幅，深さにほとんど関係なく見られた。

ひび割れ部で塩化物イオンが少なくなる傾向は，表層部の塩化物イオンの減少と類似しており，ひび割れ部の中性化の進行と関連しているものと考えられる。ひび割れ部では比較的容易に中性化が生じることが知られており[7.3]，例えば I-S1 の EPMA 分析結果のように，表層部で中性化がほとんど進行していなくとも，ひび割れ内部で中性化によると考えられる硫化物イオンの顕著な濃度変化が見られた。なお，I-S1 は外部からの塩化物イオンの浸透が比較的浅かったため顕著な濃度変化は見られなかったものの，コンクリート内部のひび割れの周囲の塩化物イオンが元の含有量よりも少なくなっていた。

I-SE1，I-SE2 は塩化物が浸透した後に発生したひび割れの場合でも，ひび割れ部の塩化物イオンが少なくなっていたことから，ひび割れの発生時期に関係なく，ひび割れ部の塩化物イオンの減少が見られることがわかった。

7.4 塩分環境の影響

今回の対象構造物の環境では，ひび割れ部の塩化物イオンはむしろ減少する傾向が見られた。特に，旧岩川大橋 P8 橋脚は海岸の砂浜に立ち，波しぶきを頻繁に受けるだけでなく，直接波をかぶることもあったと考えられるが，そうした環境でもひび割れ部の塩化物イオンの減少が認められた。

一方，海中，干満帯(あるいはその一部)などの塩水中では，従来から考えられているように塩化物イオンがひび割れ部に容易に浸透する(前掲図-2.1)。塩化物イオンがひび割れを通じて鉄筋位置まで早期に浸透するため，ひび割れ箇所の局所的な鉄筋腐食が発生する可能性が高く，特に干満帯では，酸素の供給もあるためにより厳しくなると考えられる。

床版上面については，今回のようなひび割れ部の EPMA データは得られていないが，米国の調査では床版上面のひび割れ部(米国の場合，橋面のアスファルト舗装はまれである)に多量の塩化物イオンが浸透していた事例が報告されている[7.4]。

7.5 塩化物イオンが流出する可能性

旧岩川大橋の P8 橋脚は，上部構造に覆われていたが，雨天の際、柱部は風がある場合に容易に濡れるとともに，張り出し部からの流水や伸縮装置からの漏水により，橋脚表面の大部分で水が流れる状況にあった。一方，旧芦川橋の桁内側は流水に曝されることはなかったにもかかわらず，コア A-SE5，A-OP2，A-OP3 で

も中性化領域の塩化物イオンの減少が見られた。このことから，雨がかかる箇所では，表層部の中性化した部分の塩化物イオンが外部に流出するということを否定できないものの，他に主要な理由があることを示唆している。

表層部と同様、ひび割れ部でもひび割れに沿った中性化領域で塩化物イオン，硫化物イオンの減少とその外側での硫化物イオンの強い濃縮が認められ，表層部の中性化領域と同様の変化が生じることがわかった。表層部の中性化領域における塩化物イオンの内部への移動・濃縮は，外部からの塩化物イオンの濃度分布と重なって明確に判別できなかったが，ひび割れ部の場合，表層部と違って，外部から浸透した塩化物イオンの濃縮と重ならない部分での塩化物イオンの移動が注目される。今回，採取されたコアの範囲では，ひび割れ部の中性化領域の外側で塩化物イオンの濃縮は見られず，硫化物イオンの濃縮部分でもやや減少傾向にあることが確認された。このことから，外部から浸透した塩化物イオンは中性化によって内部に移動・濃縮するとは限らず，むしろ外部に流出する可能性があることがわかった。

7.6 ひび割れ幅，深さの影響

コンクリート表層のひび割れ幅が 0.1 mm でも，A-SE2，I-SE2 のように塩化物イオンの減少は顕著に見られた。また，I-SE6 では，目視によるひび割れ深さが 0.2 mm 程度であっても，塩化物イオンや硫化物イオンの変化が見られた。

A-SE5, I-SE1 のように，ひび割れの表面付近の方が中性化領域の幅が広い場合もあるが，I-SE6, I-S2, EPM-I などでは，ひび割れ部の比較的深い位置で巣状(ネスト状)に中性化領域が膨らんでいるところが見られ，ひび割れ部の中性化領域の幅は必ずしも深さに比例しない場合があることが確認された。

I-SE2，EPM-I のように明確な中性化領域(硫化物イオン濃度の図中の黒い部分)はひび割れに沿った 1 mm 程度の幅であっても，その周囲で塩化物イオンが減少しているところは 10 mm 程度まで拡がっている場合があることがわかった（濃縮ではなく，むしろ減少傾向にある)。この範囲は，概ね硫化物イオンの濃縮の範囲に相当していた。

7.7 打継目の塩分浸透

打継目(コア I-SE4，I-SE5 のように境界面の付着がほとんどない場合)の塩化物イオンについて，5.4.2 の 4) で述べたので，ここでは中性化領域との関係から補足する。

打継目においてもひび割れ部と同様に打継目に沿った中性化領域が見られ，その領域で塩化物イオンの減少が認められた。しかし，ひび割れ部と異なり，打継目では中性化領域が上側のコンクリートのみで見られ，かつ中性化領域ではカルシウムイオンの顕著な減少も見られた。打継目のレイタンスはコンクリートの表面付近で中性化していたが，内部の打継面では中性化の兆候が見られず，塩化物イオンが浸透していた。

7.8 ひび割れ部におけるナトリウムイオンの濃縮

ナトリウムイオンは塩化物イオンや硫化物イオンとは逆に炭酸化部分において濃縮することが知られている[7.1)]。炭酸化によってコンクリート内部のナトリウムイオンは非炭酸化部分から炭酸化部分に移動したと考えられている。今回のEPMA分析結果をみると，その傾向が把握できるほど明確なものはないが，例えば弁天大橋 A2 橋台の結果で同様の傾向が認められ，他のコアでもよく見れば同様の傾向を示しているものがあることがわかる。また，ひび割れ部の中性化領域でも，骨材のナトリウムイオン量も高いために判別し難いものの，A-SE5，I-SE4，I-S2，EPM-I の結果でナトリウムイオンの濃縮が見られた。塩化物イオンの挙動に違いはあるが、表層部と同様[7.1)]，ひび割れ部においても中性化とさまざまなイオンの移動が相互に関連しているようである。なお、表層部のナトリウムイオンの濃縮はひび割れ部の濃縮と同程度であり、塩化物イオンのような外部からの供給はナトリウムイオンでは確認できなかった。

8．ひび割れ部の鉄筋腐食と耐久性設計

沿岸部の鉄筋コンクリート構造物にひび割れが発生した場合，一般には外部から塩化物イオン，水分，酸素などの腐食因子が鉄筋位置まで容易に供給されるために局部的な腐食発生が懸念される。実際，ひび割れのあった箇所では腐食が見られたとの報告も少なからずある(2 章)。このため，最近のコンクリート標準示方書ではひび割れ部に対する耐久性照査において，ひび割れ部での塩化物イオンの拡散係数を一般部よりも大きくするなど，塩化物イオンの浸透がひび割れ部の鉄筋腐食の主たる要因と見られている[8.1)]。しかし，今回の結果ではひび割れ部で塩化物イオン量が多くなるといった傾向は見られず，むしろひび割れ部の塩化物イオンが周囲の塩化物イオン量よりも少なくなっていた。

沿岸部の構造物におけるコンクリートのひび割れ部の耐久性設計を確立するため，従来の研究に加えて，以下の視点について検討が必要である。

(1) 外部から浸透した塩化物イオンの中性化に伴う移動のメカニズム

本文では，既設構造物のコア調査により，表層部，ひび割れ部ともに外部から浸透した塩化物イオンの中性化に伴う移動・溶出を示唆するデータが多く得られたが，そのメカニズムはまだわからない点が多く残されており，これらの解明が急務である。

(2) ひび割れからの酸素供給量

ひび割れに沿った局部的に深い位置で生じる中性化と，ひび割れを通じて酸素，水分が供給され易くなったことが，局部的な鉄筋腐食を誘発すると考えられる。図-8.1，図-8.2 に PC 鋼材の腐食質量減少量，鋼材周囲の塩化物イオン量とひび割れの有無の関係を示す。これらの図において，ひび割れは専ら PC 鋼材の腐食に起因するひび割れである。同程度の塩化物イオン量であっても，ひび割れの発生によって腐食質量減少量が急激に増加することがわかる[8.2-3)]。こうした傾向は，ひび割れ後の酸素の供給が大きく影響していたと考えられる。ひび割れ部で塩化物イオンが局部的に少なくなっていても，外部からの塩化物イオンが多量に浸透し，鉄筋位置に達している場合に，ひび割れを通じた中性化と酸素，水分の供給によって鉄筋の発錆が促進される懸念は残る。

(3) 硫化物イオンの濃縮

大気環境において硫化物は鋼材の腐食因子の一つとして知られる。硫化物イオンは海水中に約 0.3%含まれるなど，自然界に多く存在している[8.4-5)]。また，コンクリート中にもエトリンガイトやゲル水の構成物質として存在する。しかし，硫化物イオンの外部からコンクリート中への侵入は塩化物イオンのように顕著ではないことがわかった。ただし，中性化領域のすぐ外側で濃縮が見られ，特にひび割れがある場合にひび割れに沿った中性化に伴う硫化物イオンの濃縮は鉄筋位置で生じる可能性もあることから，ひび割れ部の鉄筋周辺の硫化物イオンの濃縮が鉄筋腐食に及ぼす影響について明らかにしておく必要がある。

(4) 濃度差による腐食セルの形成

今回の調査結果より，コンクリートのひび割れ部では，塩化物イオン，硫化物イオン，中性化など，周囲のコンクリートと比べて局部的な濃度変化が見られることから，このような箇所に位置する鉄筋にこれ

らの濃度変化に起因する腐食セルが形成される可能性がある。

現行の基準類では，コンクリートにひび割れが生じた場合に，耐久性に悪い影響を与えるとして，ひび割れを抑制することが通例である。上記(1)～(4)の観点から，ひび割れの制御に関する現行設計方針を変更する必要はないと考えられる。しかし，ひび割れ部の鉄筋腐食の主要因が必ずしも塩化物イオンの浸透でない場合があることに配慮する必要がある。

沿岸部の道路橋下部構造でも今回のような塩分環境にある場合，ひび割れがあるからといってただちに塩化物イオンが多量に浸透するとは限らないが，現時点ではひび割れ幅がある程度以上の場合に早期に補修しておく必要がある。

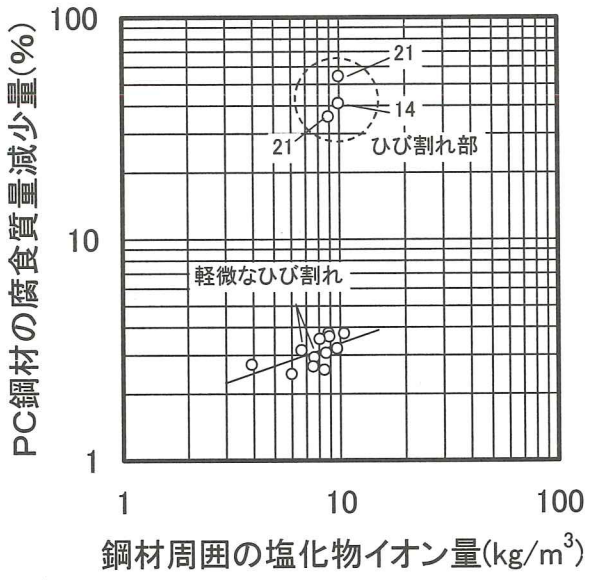


図-8.1　PC 鋼材の腐食質量減少量とその周囲の塩化物イオン量の関係 [8.2)]

（プレテンション PC 桁の例）

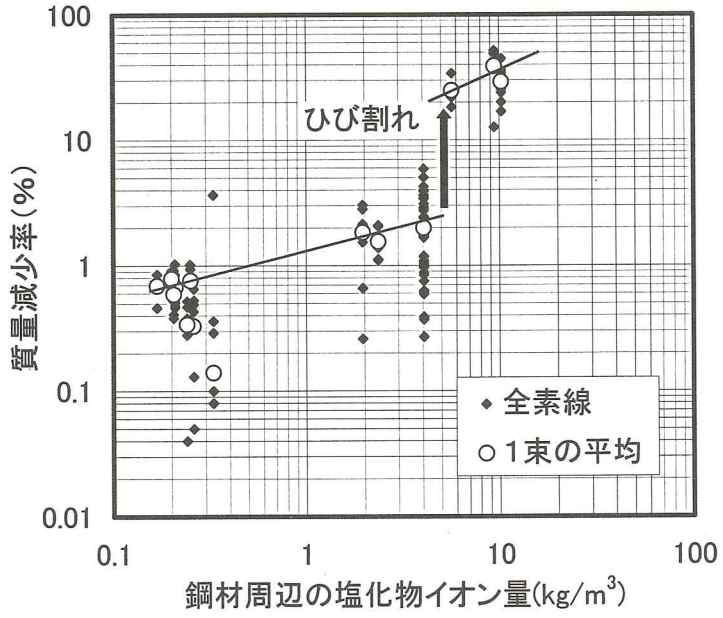


図-8.2　PC 鋼材の腐食質量減少量とその周囲の塩化物イオン量の関係 [8.3)]

（ポストテンション PC 桁の例）

9．まとめ

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のEPMA分析から，以下の結果が得られた。

(1) コンクリートのひび割れ部が塩水中に浸漬された場合，ひび割れ内部に塩化物イオンが容易に浸透・拡散することが知られるが，今回のように海に近い箇所であっても通常大気中にある場合は，ひび割れ部であるからといって塩化物イオンがひび割れのない一般部に比べてより深くまで浸透することはなく，むしろひび割れ部における塩化物イオン量が一般部よりも少なくなっていた。その範囲は，表層部と同様，ひび割れ部においても中性化領域と概ね一致していた。

(2) ひび割れ位置の塩化物イオンは，非中性化領域に移動して濃縮する傾向は見られなかった。この点から，ひび割れ部の塩化物イオンは，何らかの要因によりコンクリートの外部に溶出していることが示唆された。降雨の影響がなかった上部構造の桁内側や橋台の桁下から採取したコアであっても塩化物イオンがひび割れ部で減少していたことから，ひび割れで塩化物イオンが減少する理由が雨水等による洗い出しだけで説明できないことがわかった。

(3) 上記(1)，(2)の結果は，コンクリートの水セメント比やひび割れの発生原因，ひび割れ幅やひび割れ深さにほとんど関係なく見られた。また，鉄筋腐食により生じたひび割れ部でも塩化物イオンが少なくなっていた。このことから、上記(1)，(2)の結果はひび割れ発生時期に関係なく見られることがわかった。

(4) 中性化に伴う塩化物イオンの非中性化領域への移動・濃縮について，表層部では外部からの塩化物イオンの浸透と判別が難しく確認できなかったが，(2)の結果は，表層部においても外部からの塩化物イオンが非中性化領域に移動，濃縮していない可能性があることを示唆した。

(5) 橋脚の打継目から採取したコアは2本とも採取した時点で半割りの状態となっていた。これらのEPMA分析の結果，ひび割れ部と同様に打継目に沿って中性化と中性化領域における塩化物イオンの減少，硫化物イオンの減少と非中性化領域での硫化物イオンの濃縮が認められた。しかし，ひび割れ部から採取したコアと異なり，打継目では上側のコンクリートのみで顕著に中性化や塩化物イオン，硫化物イオン，カルシウムイオンの濃度変化が見られた。打継目のレイタンスはコンクリートの表面付近で中性化していたが，打継目に沿った中性化は見られなかった。

(6) 打継目のコアでは，打継目の下側コンクリートの表層約2～3 mmの範囲に塩化物イオン及びカルシウムイオンの強い濃縮が見られた。この物質は，打継目から溶出したカルシウムイオンが長年の間に表層部に流れ出し，コンクリートの内外から供給される塩化物イオンとともに，塩化カルシウムに近い物質として下側コンクリートの表面を覆うように形成したものと推察された。

(7) 沿岸部の構造物におけるひび割れ部の耐久性設計を確立するため，a) 外部から浸透した塩化物イオンの中性化に伴う移動のメカニズム，b) ひび割れからの酸素供給量の影響，c) 硫化物イオンの濃縮が鉄筋腐食に及ぼす影響，d) ひび割れ部の塩化物イオン等の濃度差による腐食セルの形成といった視点から今後さ

らに検討が必要である。特にa)については，a-1) 中性化領域に中性化前に存在していた塩化物イオンはどこへ移動したか，a-2) なぜ中性化に伴って塩化物イオンが移動するか，塩化物イオンの移動と中性化及び他のカルシウムイオン，ナトリウムイオン，硫化物イオンなどの動きとの関連性はどうなっているか，a-3) 中性化後，外部からの塩化物イオンはごく短時間で内部の非中性化領域に通過するのか，それとも中性化領域で塩化物イオンの浸透が遮蔽されるのか，といった疑問を明確にしていく必要がある。

(8) コンクリートにひび割れが生じた場合に，耐久性に悪い影響を与えるとして，ひび割れを抑制することが通例であり，現行の基準類でも配慮されている。上記の点が解明されない限りは，ひび割れ幅の制御についてこれまでの方針を変更する必要はないと考えられる。しかし，今回の結果から，ひび割れ部の鉄筋腐食の照査において，必ずしも塩化物イオンの拡散係数を割り増す必要はないことがわかった。

また，沿岸部の道路橋下部構造でも今回のような塩分環境にある場合，ひび割れがあるからといってただちに塩化物イオンが多量に浸透するとは限らないが，現時点では従来どおりひび割れ幅がある程度以上の場合に早期に補修することが推奨される。

謝辞等

本調査におけるコア採取および設計資料の入手にあたっては，国土交通省東北地方整備局秋田工事事務所(現秋田河川国道事務所)，同酒田工事事務所(現酒田河川国道事務所)および北陸地方整備局高田工事事務所(現高田河川国道事務所)の方々にご協力をいただきました。ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

なお，本文2章で引用した図-2.1は，今後の新設PC橋の塩害対策に資することを目的に(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会と土木研究所が実施した「ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究」の一環として調査したものである。

参考文献

1 章

1.1) コンクリート橋のライフサイクルコストに関する調査研究―コンクリート橋の損傷状況と維持管理費の実態調査―，土木研究所資料第 3811 号，2001.3

1.2) コンクリート標準示方書施工編－耐久性照査型－，土木学会，2000.1

1.3) コンクリート標準示方書施工編－耐久性照査型－改訂資料，コンクリートライブラリー99，土木学会，2000.1

1.4) ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(Ⅱ)－コンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討－，土木研究所，(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会，共同研究報告書 258 号，2000.12

1.5) ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書(Ⅲ)－PC 橋の塩害対策に関する検討－，土木研究所，(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会，共同研究報告書 270 号，2001.3

1.6) 道路橋示方書・同解説，日本道路協会，2001.12

1.7) 道路橋の塩害対策指針(案)・同解説，日本道路協会，1984

1.8) コンクリート標準示方書，土木学会，2002.3

1.9) 2002 年版コンクリート標準示方書－改訂資料，コンクリートライブラリー108，土木学会，2002.3

1.10) 塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究(Ⅱ)－旧暮坪陸橋の載荷試験－，土木研究所資料 3809 号，2001.3

2 章

2.1) 西川和廣，神田昌幸，内田賢一，淵上優子：PRC 部材の耐食性に関する実験的検討，第 49 回土木学会年次学術講演会 V，pp.808-809，1994.9

2.2) 西川和廣，神田昌幸，内田賢一，淵上優子：腐食環境下におけるコンクリート部材のひびわれ幅と塩分量の関係に関する実験的検討，第 50 回土木学会年次学術講演会 V，pp.298-299，1995.9

2.3) 淵上優子，西川和廣，神田昌幸，内田賢一：腐食環境下における PRC 部材の耐久性に関する実験的検討，第 51 回土木学会年次学術講演会 V，pp.358-359，1996.9

2.4) 西川和廣，神田昌幸，淵上優子：腐食環境下における PRC 部材の耐久性に関する実験的検討，第 21 回日本道路会議一般論文集(B)，pp.914-915，1995

2.5) 大即信明，宮里心一，柴田常徳，久田真，Tarek Uddin Md.，長瀧重義：鉄筋コンクリートの曲げひび割れ部に生じる腐食の形成機構に及ぼす水セメント比の影響，土木学会論文集，No.606，pp.63-73，1998.11

2.6) 伊代田岳史，矢島哲司，魚本健人：コンクリートのひび割れが中性化速度に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，20-2，pp.979-984，1998

2.7) 横田優，三岩敬孝，河野清：ひびわれが生じているコンクリート梁の鉄筋腐食と静的耐力について，セ

メント技術大会講演集，48，pp.620-625，1994

2.8) 岡田清，小柳洽，宮川豊章：コンクリート部材のひびわれと鉄筋腐食に関する研究，土木学会論文集，No.281，pp.75-87，1979.1

2.9) 大即信明：ひびわれがコンクリート中の鉄筋の腐食傾向に及ぼす影響の電気化学的検討，セメント技術年報，No.39，pp.288-291，1985

2.10) 神山一：コンクリートのひびわれと鉄筋の腐食，セメント技術年報，pp.491-493，1972

2.11) 岡田清，宮川豊章：コンクリートの水セメント比およびひびわれが鉄筋腐食に与える影響について，セメント技術年報，No.33，pp.494-497，1979

2.12) 蛭川友司，見坊東光，森芳徳，伊藤洋：海水が浸透するひびわれ中の鉄筋腐食に関する基礎研究，土木学会論文集，No.466，pp.31-39，1993.5

2.13) 大野義照，鈴木計夫，田村博：コンクリート中のマクロセル腐食に及ぼす各種要因の影響，セメント・コンクリート，No.601，pp.41-48，1997.3

2.14) 小林佑規，田中義久：PC 鋼より線の 3%NaCl 水溶液における応力腐食特性，プレストレストコンクリート，33-3，pp.98-106，1991.5

2.15) 渡辺明，出光隆，大和竹史，宮川邦彦：海砂使用コンクリート中の鉄筋および PC 鋼材の腐食に関する研究，セメント技術年報，34，pp.314－316，1980

2.16) 渡辺明，出光隆，高山俊一：塩分の影響を受けるコンクリート中の鉄筋腐食に関する研究，材料，No.376，pp.26-32，1985.1

2.17) 倉内実：PC 鋼材の腐食，コンクリート工学，25-7，p.32 - 36，1987.7

2.18) 星野富夫，魚本健人，小林一輔：海洋環境下に 15 年間暴露したエポキシ樹脂塗装鉄筋ならびに亜鉛メッキ鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁の耐久性と防食効果，コンクリート工学年次論文報告集，19-1，pp.883-888，1997

2.19) 塚原絵万，魚本健人：ひび割れを有するコンクリート中の鉄筋腐食に関する基礎的研究，第 54 回土木学会年次学術講演会，V，pp.628-629，1999.9

2.20) 大即信明，長滝重義，福手勤，中下兼次：港湾での鉄筋コンクリートの塩害に及ぼす海洋環境の影響に関する基礎的検討，土木学会論文集，No. 472，pp.59-68，1993.8

2.21) 品川清和，呉承寧，田中良樹：プレキャストセグメント工法を用いた PC 橋の継目部防食技術に関する実験的研究，PC シンポジウム論文集，pp.563-568，2000.10

2.22) 前掲 1.10 と同じ

2.23) K. G Sharobim, E. Tazawa : Study on Carbonation of Mortar Beam Subjected to Cracking, Proceeding of JSCE, No.408, pp.167-175, August 1989

2.24) 小林一輔，白木亮司，河合研至：炭酸化によって引き起こされるコンクリート中の塩化物，硫黄化合物及びアルカリ化合物の移動と濃縮，コンクリート工学論文集，1-2，pp.69-81，1990.7

2.25) 小林一輔，宇野祐一：コンクリートの炭酸化のメカニズム，コンクリート工学論文集，1-1，pp.37-49，1990.1

2.26) 宮里心一：鉄筋コンクリートの欠陥部に生じる塩害および中性化によるマクロセル腐食に関する研究，博士論文，東京工業大学，2001.4

3 章

3.1) 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，pp.427-430，1988

3.2) 西田浩和ほか：高強度コンクリートの含水率測定方法の提案，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.359-360，2001.9

3.3) コンクリート構造物におけるアルカリシリカ反応の実態調査法(案)，建設省総合技術開発プロジェクト，コンクリートの耐久性向上技術の開発報告書，第二編，建設省，pp.65-143，1988.11

4 章

4.1) 塩害を受けたＰＣ橋の耐荷力評価に関する研究(IV)―旧芦川橋の載荷試験―，土木研究所資料第3816号，2001.3

4.2) 現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法に関する共同研究報告書―高強度コンクリートの凍結融解抵抗性―，土木研究所，(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会，共同研究報告書第271号，2001.3

5 章

5.1) 温海地区塩害橋調査報告書（損傷と対策）建設省東北地方建設局酒田工事事務所，1995.3

5.2) コンクリートの電気抵抗による耐久性評価の基礎的研究，土木研究所資料第3716号，2000.3

5.3) 田中良樹，藤田学，河野広隆，渡辺博志：高強度コンクリートの塩分浸透抵抗性，コンクリート工学年次論文集，23-2，pp.517-522，2001.7

5.4) 大即信明，平山周一，宮里心一，横関康祐：モルタルからの Ca 溶出およびそれに伴う変質の長期予測に関する基礎的研究，土木学会論文集，No. 634，pp.293-302, 1999.11

7 章

7.1) 前掲 2.24 と同じ

7.2) 既存コンクリート構造物の健全度実態調査結果―1999 年調査結果―，土木研究所資料第 3854 号，2002.3

7.3) 前掲 2.23 と同じ

7.4) Smith, J. L.; Virmani, Y. P., Performance of epoxy coated rebars in bridge decks, No. FHWA-RD-96-092, Aug. 1996.

8 章

8.1) 前掲 1.2, 1.8 と同じ

8.2) 塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究(Ⅰ)ープレテンション PC 桁の載荷試験ー，土木研究所資料第 3808 号，2001.3

8.3) 塩害を受けた PC 橋の耐荷力評価に関する研究(Ⅲ)ー塩害により損傷を受けた PC 鋼材の機械的性質ー，土木研究所資料第 3810 号，2001.3

8.4) 理化学辞典，第 5 版，岩波書店，1998.2

8.5) 理科年表，2003.11

付　録　資　料

p115の前

付録１．旧岩川大橋 P5～P7 橋脚の外観写真



酒田側　⇔　新潟側

付・写真-1.1　P5 橋脚の外観（海側）



新潟側　⇔　酒田側

付・写真-1.2　P5 橋脚の外観（陸側）



海側　⇔　陸側

付・写真-1.3　P5 橋脚の外観（新潟側）



陸側　⇔　海側

付・写真-1.4　P5 橋脚の外観（酒田側）



酒田側　⇔　新潟側

付・写真-1.5　P6 橋脚の外観（海側）



新潟側　⇔　酒田側

付・写真-1.6　P6 橋脚の外観（陸側）



海側　⇔　陸側

付・写真-1.7　P6 橋脚の外観（新潟側）



陸側　⇔　海側

付・写真-1.8　P6 橋脚の外観（酒田側）



酒田側　⇔　新潟側

付・写真-1.9　P7 橋脚の外観（海側）



新潟側　⇔　酒田側

付・写真-1.10　P7 橋脚の外観（陸側）



海側　⇔　陸側

付・写真-1.11　P7 橋脚の外観（新潟側）



陸側　⇔　海側

付・写真-1.12　P7 橋脚の外観（酒田側）

付録２．塩化物イオン量測定結果

付・表-2.1　旧芦川橋 OP，SE シリーズの塩化物イオン量測定結果

Cl^- (kg/m^3)

コア名	表面からの距離　(mm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
OP1	6.86	3.97	2.35	1.25	0.82
OP2	7.03	11.80	9.96	8.06	6.20
OP3	4.68	3.73	2.00	1.03	0.78
A-SE1	8.17	6.47	5.92	4.03	2.81
A-SE2	7.46	7.66	4.67	5.03	3.23
A-SE3	8.40	5.72	4.58	3.63	3.62
A-SE4	4.03	2.34	1.63	1.16	0.96
A-SE5	6.52	8.58	6.95	5.91	4.09

付・表-2.2　旧芦川橋桁端部 TT1 の塩化物イオン量測定結果

表面からの距離(mm)	0-15	15-30	30-45	45-60	60-75
塩化物イオン量 (kg/m^3)	2.47	3.89	2.21	3.23	2.03
表面からの距離(mm)	75-90	90-105	105-120	120-135	135-150
塩化物イオン量 (kg/m^3)	1.74	1.58	1.62	1.27	1.40
表面からの距離(mm)	150-165	165-180	180-195	195-210	210-225
塩化物イオン量 (kg/m^3)	1.23	1.20	1.04	0.71	0.54
表面からの距離(mm)	225-240	240-255	255-270	270-285	285-300
塩化物イオン量 (kg/m^3)	0.47	0.39	0.64	0.71	0.90
表面からの距離(mm)	300-315	315-330	330-345	-	-
塩化物イオン量 (kg/m^3)	0.72	0.97	1.11	-	-

付・表-2.3　旧岩川大橋 P8 橋脚 CS シリーズの塩化物イオン量測定結果

Cl^- (kg/m^3)

コア名	表面からの距離　(mm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
CS1	2.75	8.25	10.37	8.49	5.22
CS2	11.10	18.21	14.45	8.90	7.42
CS3	10.17	12.31	11.75	10.37	5.77
CS4	4.33	5.69	4.19	3.42	2.17
CS5	4.93	4.72	3.52	2.83	1.58
CS6	10.74	9.02	6.67	5.05	3.58
CS7	6.68	8.30	4.33	4.19	3.30

付・表-2.4　旧岩川大橋 P8 橋脚 SE シリーズの塩化物イオン量測定結果

Cl^- (kg/m^3)

コア名	表面からの距離　(mm)				
	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50
I-SE1	16.77	20.06	19.05	11.53	9.67
I-SE2	7.41	14.74	15.84	10.17	9.77
I-SE3	8.00	11.01	8.26	8.84	8.64
I-SE4	6.12	8.60	10.80	8.78	9.89
I-SE5	8.86	9.68	7.81	5.98	5.44
I-SE6	11.24	10.24	6.54	5.76	4.90
I-S1	9.59	8.01	7.82	7.37	6.42
I-S2	8.03	8.95	10.19	10.30	7.88

付・表-2.5　弁天大橋 A2 橋台 EPMA シリーズの塩化物イオン量測定結果

Cl^- (kg/m^3)

コア名	表面からの距離　(mm)				
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100
EPM-S	2.91	2.51	1.25	0.85	0.68
EPM-I	7.57	5.31	3.76	2.44	1.20

付録３．中性化深さ測定結果

付・表-3.1　旧芦川橋の中性化深さ測定結果

（単位：mm）

コア番号	上	下	秋田側	酒田側	山側	海側	平均	最大	最大中性化深さの位置
C1	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.0	3.5	秋田側から 60°上方
C2	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.0	6.5	酒田側から 45°下方
C3	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	中性化なし
C4 (海側)	4.5	0.0	0.0	0.0	-	-	1.1	4.5	上
C4 (陸側)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	中性化なし
C5 (海側)	2.0	7.0	2.5	5.5	-	-	4.3	7.0	下
C5 (陸側)	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	中性化なし
C6 (海側)	1.0	0.0	0.0	2.5	-	-	0.9	2.5	酒田側
C6 (陸側)	21.5	1.5	0.0	1.0	-	-	6.0	21.5	上、ジャンカに沿って中性化
TT1	2.0	2.0	-	-	4.0	2.0	2.5	5.5	山側から 45°上方

付・表-3.2　旧岩川大橋 P8 橋脚の中性化深さ測定結果

（単位：mm）

コア No.	上	下	新潟側	酒田側	山側	海側	平均	最大	最大中性化深さの位置
CS1	7.0	3.5	15.0	23.0	-	-	12.1	28.5	酒田側から 45°下方
CS2	17.5	8.0	6.5	8.5	-	-	10.1	17.5	上
CS3	2.0	0.0	11.5	0.0	-	-	3.4	11.5	新潟側
CS4	5.5	8.5	7.0	11.5	-	-	8.1	12.5	酒田側から 45°上方
CS5	12.0	9.0	7.0	3.0	-	-	7.8	12.0	上
CS6	4.5	0.0	5.0	0.0	-	-	2.4	5.0	新潟側
CS7	0.0	0.0	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	中性化なし
SD1	13.5	11.0	7.0	7.0	-	-	9.6	16.5	新潟側から 45°上方
SD2	15.5	16.5	15.5	7.5	-	-	13.8	16.5	下
SD3	0.0	2.0	6.0	2.0	-	-	2.5	6.0	新潟側
SD4	7.0	4.5	17.0	7.0	-	-	8.9	17.0	新潟側
SD5	8.5	9.5	5.5	5.0	-	-	7.1	9.5	下
SD6	6.0	0.0	3.0	0.0	-	-	2.3	6.0	上
CR1	7.0	14.5	12.0	9.0	-	-	10.6	18.0	酒田側から 30°上方
CR2	17.5	11.5	11.0	10.0	-	-	12.5	21.5	酒田側から 45°上方
C1	0.0	0.0	-	-	0.0	0.0	0.0	0.0	中性化なし
C2	6.5	3.0	-	-	4.5	2.5	4.1	6.5	上

付・表-3.3　弁天大橋 A2 橋台の中性化深さ測定結果

コア番号		中性化深さ（mm）						最大位置	備　　考
		0°	90°	180°	270°	平均値	最大値	(°)	
側面	EPM-S	3.0	2.5	2.5	1.5	2.4	4.5	250	コア周 3/4 区間にわたり一様に中性化が認められた。
	CT-S	7.5	6.0	0.0	0.0	3.4	7.5	0	コア周 1/4 区間内で中性化している箇所が認められた。
	WC-S	5.0	0.0	15.0	0.0	5.0	15.0	180	コア周 3/4 区間で中性化が認められた。 最大位置のみ局部的に中性化していた。
	ep-S	0.0	0.0	2.5	0.0	0.6	4.5	340	最大位置のみ局部的に中性化していた。
桁下	EPM-I	5.0	0.0	9.5	1.0	3.9	20.5	320	コア周 3/4 区間にわたり中性化が認められた。
	CT-I	10.0	11.0	12.5	8.0	10.4	14.0	100	コア全周にわたり中性化が認められた。
	WC-I	2.0	10.0	0.0	5.0	4.3	18.0	135	コア周 1/2 区間にわたり中性化が認められた。
	ep-I	5.5	10.5	5.0	9.0	7.5	18.5	70	コア周全周にわたり中性化が認められた。

注）位置を表す角度は上を 0° として時計回り。

付録４．含水率測定結果

付・表-4.1　旧芦川橋の含水率測定結果

HR1　(L=152mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR1-1	20	320.22	303.91	303.28	16.31	5.37	16.94	5.59
HR1-2	40	316.80	299.83	299.53	16.97	5.66	17.27	5.77
HR1-3	60	426.82	406.54	405.83	20.28	4.99	20.99	5.17
HR1-4	80	242.70	230.52	230.25	12.18	5.28	12.45	5.41
HR1-5	100	354.80	337.87	337.52	16.93	5.01	17.28	5.12
HR1-6	120	485.92	462.78	461.63	23.14	5.00	24.29	5.26
HR1-7	(152)	641.72	610.69	608.47	31.03	5.08	33.25	5.46

HR2　(L=162mm)　乾式削孔								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR2-1	20	351.63	333.17	331.85	18.46	5.54	19.78	5.96
HR2-2	40	361.09	341.79	340.99	19.30	5.65	20.10	5.89
HR2-3	60	261.93	247.78	247.43	14.15	5.71	14.50	5.86
HR2-4	80	371.90	352.03	351.36	19.87	5.64	20.54	5.85
HR2-5	100	368.80	349.60	348.97	19.20	5.49	19.83	5.68
HR2-6	120	275.44	260.79	260.23	14.65	5.62	15.21	5.84
HR2-7	140	478.67	454.81	453.63	23.86	5.25	25.04	5.52
HR2-8	(162)	501.67	476.42	475.13	25.25	5.30	26.54	5.59

HR3　(L=152mm)　乾式削孔								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR3-1	20	331.85	314.52	313.78	17.33	5.51	18.07	5.76
HR3-2	40	402.38	380.01	379.16	22.37	5.89	23.22	6.12
HR3-3	60	241.60	228.22	228.11	13.38	5.86	13.49	5.91
HR3-4	80	446.47	420.62	419.67	25.85	6.15	26.80	6.39
HR3-5	100	264.13	240.80	239.53	23.33	9.69	24.60	10.27
HR3-6	120	528.27	495.82	494.29	32.45	6.54	33.98	6.87
HR3-7	(152)	606.66	566.78	564.54	39.88	7.04	42.12	7.46

割裂位置：　コア表面からの距離、( ) はひび割れ位置またはコアの全長を表す
質量①：　割裂直後の質量
質量②：　48h 絶乾質量
質量③：　168h 絶乾質量
48h 含水率：　(質量①-質量②) /質量②　(本文に用いたデータ)
168h 含水率：　(質量①-質量③) /質量③

付・表-4.1　旧芦川橋の含水率測定結果（続き）

HR4（L=168mm）								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR4-1	20	351.74	333.47	332.38	18.27	5.48	19.36	5.82
HR4-2	40	432.41	408.98	407.57	23.43	5.73	24.84	6.09
HR4-3	60	287.11	271.34	270.72	15.77	5.81	16.39	6.05
HR4-4	80	368.40	347.59	346.38	20.81	5.99	22.02	6.36
HR4-5	100	409.95	386.36	384.57	23.59	6.11	25.38	6.60
HR4-6	120	209.09	196.10	195.63	12.99	6.62	13.46	6.88
HR4-7	140	421.61	396.60	395.43	25.01	6.31	26.18	6.62
HR4-8	(168)	697.00	652.90	647.99	44.10	6.75	49.01	7.56

HR5（L=157mm）								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR5-1	20	341.33	326.45	325.82	14.88	4.56	15.51	4.76
HR5-2	40	358.82	342.07	341.52	16.75	4.90	17.30	5.07
HR5-3	60	266.59	254.36	253.96	12.23	4.81	12.63	4.97
HR5-4	80	431.18	411.39	410.68	19.79	4.81	20.50	4.99
HR5-5	100	366.88	348.69	348.13	18.19	5.22	18.75	5.39
HR5-6	120	227.39	215.88	215.60	11.51	5.33	11.79	5.47
HR5-7	140	488.73	465.28	464.38	23.45	5.04	24.35	5.24
HR5-8	(157)	414.45	393.77	393.05	20.68	5.25	21.40	5.44

HR6（L=120mm）　乾式削孔								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR6-1	20	328.95	315.30	314.50	13.65	4.33	14.45	4.59
HR6-2	40	378.90	362.48	361.83	16.42	4.53	17.07	4.72
HR6-3	60	236.02	225.66	225.37	10.36	4.59	10.65	4.73
HR6-4	80	356.82	340.22	339.60	16.60	4.88	17.22	5.07
HR6-5	100	362.14	344.99	344.43	17.15	4.97	17.71	5.14
HR6-6	(120)	393.30	381.38	380.71	11.92	3.13	12.59	3.31

付・表-4.1　旧芦川橋の含水率測定結果（続き）

HR7　(L=206mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR7-1	20	470.37	453.53	451.81	16.84	3.71	18.56	4.11
HR7-2	40	307.04	296.15	295.55	10.89	3.68	11.49	3.89
HR7-3	60	340.37	326.02	325.48	14.35	4.40	14.89	4.57
HR7-4	80	381.18	365.01	364.26	16.17	4.43	16.92	4.65
HR7-5	100	202.78	192.70	192.37	10.08	5.23	10.41	5.41
HR7-6	120	511.05	488.58	486.79	22.47	4.60	24.26	4.98
HR7-7	140	290.48	277.13	276.66	13.35	4.82	13.82	5.00
HR7-8	160	345.98	330.74	330.17	15.24	4.61	15.81	4.79
HR7-9	180	528.17	507.72	506.03	20.45	4.03	22.14	4.38
HR7-10	(206)	397.69	383.30	382.32	14.39	3.75	15.37	4.02

HR8　(L=191mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR8-1	20	321.79	309.22	308.63	12.57	4.07	13.16	4.26
HR8-2	40	476.98	458.08	456.99	18.90	4.13	19.99	4.37
HR8-3	60	232.18	222.12	221.59	10.06	4.53	10.59	4.78
HR8-4	80	386.71	369.09	368.57	17.62	4.77	18.14	4.92
HR8-5	100	408.00	390.53	389.83	17.47	4.47	18.17	4.66
HR8-6	120	192.51	183.72	183.51	8.79	4.78	9.00	4.90
HR8-7	140	365.68	349.04	348.42	16.64	4.77	17.26	4.95
HR8-8	160	282.95	271.24	270.66	11.71	4.32	12.29	4.54
HR8-9	(191)	700.60	677.02	673.93	23.58	3.48	26.67	3.96

HR9　(L=203mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR9-1	20	220.52	212.31	211.89	8.21	3.87	8.63	4.07
HR9-2	40	511.78	492.95	490.54	18.83	3.82	21.24	4.33
HR9-3	60	171.20	163.53	163.37	7.67	4.69	7.83	4.79
HR9-4	80	406.14	388.19	387.14	17.95	4.62	19.00	4.91
HR9-5	100	366.18	350.31	349.60	15.87	4.53	16.58	4.74
HR9-6	120	377.08	360.66	359.84	16.42	4.55	17.24	4.79
HR9-7	140	491.41	469.93	468.25	21.48	4.57	23.16	4.95
HR9-8	160	216.18	208.06	207.77	8.12	3.90	8.41	4.05
HR9-9	180	563.76	543.63	541.35	20.13	3.70	22.41	4.14
HR9-10	(203)	312.89	302.45	301.84	10.44	3.45	11.05	3.66

＊ HR7～HR9 は海側から陸側へ貫通するように削孔した

付・表-4.2　旧岩川大橋 P8 橋脚の含水率測定結果

HR1　(L=219mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR1-1	20	424.28	399.36	398.93	24.92	6.24	25.35	6.35
HR1-2	40	350.75	329.70	329.13	21.05	6.38	21.62	6.57
HR1-3	60	275.99	259.66	259.15	16.33	6.29	16.84	6.50
HR1-4	(100)	580.93	541.92	540.09	39.01	7.20	40.84	7.56
HR1-5	130	639.48	599.64	598.24	39.84	6.64	41.24	6.89
HR1-6	150	245.04	230.07	229.85	14.97	6.51	15.19	6.61
HR1-7	170	482.22	454.16	453.45	28.06	6.18	28.77	6.34
HR1-8	190	408.80	383.31	382.64	25.49	6.65	26.16	6.84
HR1-9	(219)	492.24	462.84	462.02	29.40	6.35	30.22	6.54

HR2　(L=212mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR2-1	20	499.67	470.25	468.86	29.42	6.26	30.81	6.57
HR2-2	40	239.78	226.46	226.12	13.32	5.88	13.66	6.04
HR2-3	60	486.54	459.41	458.61	27.13	5.91	27.93	6.09
HR2-4	80	276.65	261.39	261.17	15.26	5.84	15.48	5.93
HR2-5	(120)	625.20	588.34	587.25	36.86	6.27	37.95	6.46
HR2-6	150	242.07	227.18	227.01	14.89	6.55	15.06	6.63
HR2-7	170	293.61	276.44	276.00	17.17	6.21	17.61	6.38
HR2-8	190	439.09	409.37	408.58	29.72	7.26	30.51	7.47
HR2-9	(212)	449.80	420.92	420.18	28.88	6.86	29.62	7.05

HR3　(L=210mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR3-1	20	368.29	352.34	352.03	15.95	4.53	16.26	4.62
HR3-2	40	138.97	131.53	131.51	7.44	5.66	7.46	5.67
HR3-3	60	535.47	509.36	508.26	26.11	5.13	27.21	5.35
HR3-4	80	220.02	206.99	206.78	13.03	6.29	13.24	6.40
HR3-5	100	529.05	498.12	497.46	30.93	6.21	31.59	6.35
HR3-6	(110)	534.10	504.14	503.67	29.96	5.94	30.43	6.04
HR3-7	150	513.75	488.86	488.42	24.89	5.09	25.33	5.19
HR3-8	170	249.25	235.43	234.94	13.82	5.87	14.31	6.09
HR3-9	(210)	433.83	411.41	410.80	22.42	5.45	23.03	5.61

表記は付・表-4.1 と同じ。

付・表-4.2　旧岩川大橋 P8 橋脚の含水率測定結果（続き）

HR4　(L=200mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR4-1	(20)	417.15	391.64	390.57	25.51	6.51	26.58	6.81
HR4-2	50	512.64	478.49	476.99	34.15	7.14	35.65	7.47
HR4-3	70	207.58	195.34	195.00	12.24	6.27	12.58	6.45
HR4-4	90	304.33	285.09	284.60	19.24	6.75	19.73	6.93
HR4-5	110	347.98	326.35	326.03	21.63	6.63	21.95	6.73
HR4-6	130	532.63	500.78	499.65	31.85	6.36	32.98	6.60
HR4-7	150	314.24	294.14	293.91	20.10	6.83	20.33	6.92
HR4-8	170	312.10	292.65	292.38	19.45	6.65	19.72	6.74
HR4-9	(200)	529.30	495.80	494.67	33.50	6.76	34.63	7.00

HR5　(L=222mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR5-1	20	441.21	417.27	416.40	23.94	5.74	24.81	5.96
HR5-2	40	199.18	187.50	187.26	11.68	6.23	11.92	6.37
HR5-3	60	225.15	210.90	210.57	14.25	6.76	14.58	6.92
HR5-4	80	634.18	593.58	592.19	40.60	6.84	41.99	7.09
HR5-5	100	63.74	59.60	59.53	4.14	6.95	4.21	7.07
HR5-6	120	394.62	369.65	369.06	24.97	6.76	25.56	6.93
HR5-7	140	300.50	282.57	292.22	17.93	6.35	8.28	2.83
HR5-8	160	462.51	436.30	435.75	26.21	6.01	26.76	6.14
HR5-9	180	317.00	298.65	298.23	18.35	6.14	18.77	6.29
HR5-10	(222)	489.46	458.66	457.88	30.80	6.72	31.58	6.90

HR6　(L=207mm)								
試料 No.	割裂位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
HR6-1	20	440.81	413.92	412.82	26.89	6.50	27.99	6.78
HR6-2	40	348.95	329.12	328.84	19.83	6.03	20.11	6.12
HR6-3	60	338.47	317.81	317.42	20.66	6.50	21.05	6.63
HR6-4	80	215.97	201.89	201.69	14.08	6.97	14.28	7.08
HR6-5	100	488.52	459.66	459.15	28.86	6.28	29.37	6.40
HR6-6	(120)	531.31	499.98	499.40	31.33	6.27	31.91	6.39
HR6-7	187	823.82	770.35	768.68	53.47	6.94	55.14	7.17
HR6-8	(207)	502.36	471.27	470.63	31.09	6.60	31.73	6.74

* HR6-7 は 150～187 の範囲で採取した
　HR6-7 のうち 120～150mm の範囲は欠損

付・表-4.3　弁天大橋 A2 橋台の含水率測定結果

WC-S（側面）								
試料 No.	試料位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
WC-S-1	0−20	383.97	366.76	365.77	17.21	4.69	18.20	4.98
WC-S-2	20-40	328.99	309.20	308.64	19.79	6.40	20.35	6.59
WC-S-3	40-60	442.64	413.87	413.05	28.77	6.95	29.59	7.16
WC-S-4	60-80	416.02	386.06	385.11	29.96	7.76	30.91	8.03
WC-S-5	80-100	233.96	216.94	216.62	17.02	7.85	17.34	8.00
WC-S-6	100-120	447.99	416.20	415.32	31.79	7.64	32.67	7.87
WC-S-7	120-155	681.70	634.49	631.97	47.21	7.44	49.73	7.87

WC-I（桁下）								
試料 No.	試料位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
WC-I-1	0-20	383.03	366.08	364.92	16.95	4.63	18.11	4.96
WC-I-2	20-40	361.27	344.90	344.12	16.37	4.75	17.15	4.98
WC-I-3	40-60	295.75	283.23	282.79	12.52	4.42	12.96	4.58
WC-I-4	60-80	339.75	325.06	324.50	14.69	4.52	15.25	4.70
WC-I-5	80-100	448.88	428.79	428.09	20.09	4.69	20.79	4.86
WC-I-6	100-120	406.57	385.92	385.11	20.65	5.35	21.46	5.57
WC-I-7	120-140	299.41	284.95	284.54	14.46	5.07	14.87	5.23
WC-I-8	140-160	416.33	396.14	395.56	20.19	5.10	20.77	5.25
WC-I-9	160-180	307.56	291.86	291.36	15.70	5.38	16.20	5.56
WC-I-10	180-200	468.56	446.62	445.70	21.94	4.91	22.86	5.13
WC-I-11	200-220	362.61	342.88	342.25	19.73	5.75	20.36	5.95
WC-I-12	220-250	578.45	547.50	546.18	30.95	5.65	32.27	5.91

試料位置：　コア表面からの距離
質量①：　割裂直後の質量
質量②：　48h 絶乾質量
質量③：　168h 絶乾質量
48h 含水率：　（質量①-質量②）/質量②　（本文に用いたデータ）
168h 含水率：　（質量①-質量③）/質量③

付・表-4.3　弁天大橋 A2 橋台の含水率測定結果

WC-S（側面）								
試料 No.	試料位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
WC-S-1	0−20	383.97	366.76	365.77	17.21	4.69	18.20	4.98
WC-S-2	20-40	328.99	309.20	308.64	19.79	6.40	20.35	6.59
WC-S-3	40-60	442.64	413.87	413.05	28.77	6.95	29.59	7.16
WC-S-4	60-80	416.02	386.06	385.11	29.96	7.76	30.91	8.03
WC-S-5	80-100	233.96	216.94	216.62	17.02	7.85	17.34	8.00
WC-S-6	100-120	447.99	416.20	415.32	31.79	7.64	32.67	7.87
WC-S-7	120-155	681.70	634.49	631.97	47.21	7.44	49.73	7.87

WC-I（桁下）								
試料 No.	試料位置 (mm)	質量① (g)	質量② (g)	質量③ (g)	含水量 48h (g)	含水率 48h (%)	含水量 168h (g)	含水率 168h (%)
WC-I-1	0-20	383.03	366.08	364.92	16.95	4.63	18.11	4.96
WC-I-2	20-40	361.27	344.90	344.12	16.37	4.75	17.15	4.98
WC-I-3	40-60	295.75	283.23	282.79	12.52	4.42	12.96	4.58
WC-I-4	60-80	339.75	325.06	324.50	14.69	4.52	15.25	4.70
WC-I-5	80-100	448.88	428.79	428.09	20.09	4.69	20.79	4.86
WC-I-6	100-120	406.57	385.92	385.11	20.65	5.35	21.46	5.57
WC-I-7	120-140	299.41	284.95	284.54	14.46	5.07	14.87	5.23
WC-I-8	140-160	416.33	396.14	395.56	20.19	5.10	20.77	5.25
WC-I-9	160-180	307.56	291.86	291.36	15.70	5.38	16.20	5.56
WC-I-10	180-200	468.56	446.62	445.70	21.94	4.91	22.86	5.13
WC-I-11	200-220	362.61	342.88	342.25	19.73	5.75	20.36	5.95
WC-I-12	220-250	578.45	547.50	546.18	30.95	5.65	32.27	5.91

試料位置：　コア表面からの距離
質量①：　割裂直後の質量
質量②：　48h 絶乾質量
質量③：　168h 絶乾質量
48h 含水率：　（質量①-質量②）/質量②　（本文に用いたデータ）
168h 含水率：　（質量①-質量③）/質量③