

報告 供用 10 年を経た塩害暴露供試体の追跡調査結果

加藤 丈和^{*1}・吉川 進^{*2}・松山 公年^{*3}・丸山 久一^{*4}

要旨：2001 年に橋梁上部構造の桁供試体を塩害環境下に設置した。この桁供試体に 9 種類の塩害対策が施工されており，長期暴露環境下で各種塩害対策効果に関するモニタリングが行われている。本報告では，暴露供試体の構造及び配合を示すと共に，腐食環境調査及び目視観測調査結果，電気防食桁の復極量測定結果，コア試料採取による塩化物イオン浸透状況について示した。また，レーダ法及び自然電位法の非破壊試験による塩害調査結果を報告する。

キーワード：塩害，長期暴露供試体，電気防食桁，EPMA，非破壊試験

1. はじめに

四方を海で囲まれている我が国では，海からの飛来塩分によるコンクリート構造物の塩害は，全国的な問題である。北陸地域では，日本海沿岸部の厳しい塩害環境下に置かれているコンクリート構造物が少なくない。そこで北陸地整では，塩害対策に先駆的に取り組み，2001年に電気防食を施した橋梁を建設した際に長期暴露供試体を作製し，各種塩害対策効果のモニタリングを実施している。この供試体が暴露期間10年を迎えたことから，詳細調査を行った。

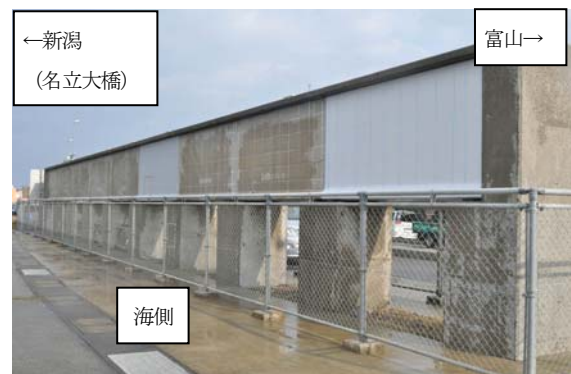
2. 暴露供試体の概要

2.1 暴露供試体の構造

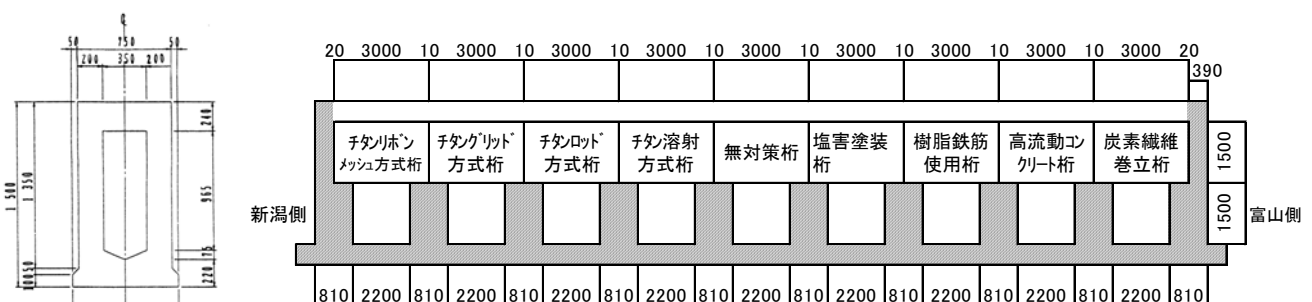
暴露供試体は9種類の塩害対策を施工した中空床版を連ねたものである（写真－1，図－1）。9工法の内訳は，本橋で直接調査ができない電気防食工法4種（チタンリボンメッシュ，チタングリッド，チタンロッド，チタン溶射）とその他対策効果の有無を確認する5種（無対策，塩害塗装，樹脂鉄筋，高流動コンクリート，炭素繊維巻立）とした。

2.2 暴露供試体の設置位置

設置位置は日本海側国道8号の名立大橋近傍の暴露試験場に設置しており，海からの飛来塩分の影響を受けやすい状況である。図－2に供試体の断面図を示す。表－1に暴露供試体の配合を示す。セメントが富配合な理由は，高強度な部材（PC桁）を想定したためである。



写真－1 暴露供試体状況



図－1 暴露供試体の断面図および正面図

表－1 暴露供試体の配合

打設箇所	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
						水W	セメントC	混和材F	細骨材S	粗骨材G	混和剤A
暴露供試体 (高流動コンクリート以外)	25	15	33.6	4.5	39.3	160	476	—	650	1014	7.14
暴露供試体 (高流動コンクリート)	25	65*	30.8	4.5	50.2	160	519	—	812	816	12.716

※:スランプフローを示す。

*1 国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 (正会員)

*2 国土交通省 北陸地方整備局 北陸技術事務所 (正会員)

*3 日本工営 (株) 工博 (正会員)

*4 長岡技術科学大学 Ph.D. (正会員)

表-2 暴露供試体の調査および試験スケジュール

項目	対象	過去	1年目 2001年度	2年目 2002年度	3年目 2003年度	4年目 2004年度	5年目 2005年度	6年目 2006年度	7年目 2007年度	8年目 2008年度	9年目 2009年度	10年目 2010年度	10年目以降
腐食環境調査	気象調査	—	1998.12~				各月毎						
	飛来塩分量調査	実橋、供試体		1回/月				2回/年					
	凍結防止材散布量調査	実橋					各月毎						
目視観測	ひび割れ、錆汁、塗膜、電気防食装置の目視観測	実橋、供試体					1回/年						
物理・力学・電気化学試験	打音法	実橋、供試体				目視観測により、損傷が確認された時のみ							
	反発硬度法	実橋、供試体				目視観測により、損傷が確認された時のみ							
	鉄筋位置測定	供試体											
	復極量、電流・電圧、自然電位の測定	実橋、供試体				常時(遠隔によるモニタリング)							
	コア採取	供試体											
	塩化物イオン含有量分析	供試体											
	中性化深さの測定	供試体											
	一軸圧縮試験	供試体											
保守点検	通常点検	実橋、供試体				常時							
	定期点検	実橋、供試体				外観目視は1回/年、外観目視以外は常時							
	詳細点検	実橋、供試体				1回/年							

3. 調査・試験スケジュール

「新名立大橋電気防食技術検討会」で決定した10年間の調査・試験スケジュール（表-2）に基づき、調査・試験を行った。調査項目は、腐食環境調査、目視観測、物理・力学・電気化学試験、補修点検の4項目に大別される。

（1）腐食環境調査

腐食環境調査としては、名立大橋近傍で気象調査および凍結防止剤散布量調査を実施した。暴露供試体では飛来塩分量調査を1回/月または2回/年の頻度で実施した。また、コンクリート表面の拭き取り調査を実施した。

（2）目視観測

暴露供試体のひび割れ、錆汁、塗膜の割れ、電気防食装置の異常等に関して目視観測を1回/年実施した。

（3）物理・力学・電気化学試験

打音法と反発硬度法は、目視観測により損傷が確認された時のみ実施した。これまで、打音法と反発硬度法は、施工時のみ実施され、打音による異常は認められなかった。反発硬度は58～61であり、日本材料学会式による強度推定は55.7～59.5N/mm²となり、設計基準強度40 N/mm²を大きく上回っていた。自然電位測定は1回/年で実施し、コア採取、塩化物イオン含有量分析、中性化深さ測定等は1回/5年で実施した。本報告では、供用後10年目に実施した打音法および反発硬度法以外を報告する。

（4）保守点検

通常点検（巡視）は常時、定期点検および詳細点検は1回/年で実施した。

4. 調査・試験内容

4.1 腐食環境調査

（1）飛来塩分量調査

飛来塩分は、土研式飛来塩分捕集器を用い、暴露供試体の新潟側に設置して調査を実施した。写真-2に塩分捕集器の設置状況を示す。



写真-2 飛来塩分捕集器の設置状況

1) 方法

写真-2に示すように塩分捕集器を橋梁の近傍に設置した。試料は、一定期間（1ヶ月間）放置後、ステンレス製捕集器に付着している塩分を精製水により洗い、下のポリタンクの中に溶液を捕集した。分析は、電位差滴定法により行った。

(2) 表面拭き取り調査

1) 方法

試料の採取方法および分析は、鋼橋塗膜調査 JISS IV03（日本鋼構造協会）に示される「塗膜汚染物質とさびの分析」に準拠して行った。以下のその要領を示す。

2) 調査位置および面積の設定

調査対象は、9供試体各1箇所および4箇所（過年度調査で桁下面で付着量の多かった無対策、塩害塗装、高流動コンクリート、炭素繊維の側面）追加し合計13箇所で行った。

調査位置を選定し、2500cm²（例えば50×50cm）に相当する面積をメジャーで正確に測って、マジックインキ等で線引きするか、マスキングテープで仕切る。

3) 採取方法

(ア) 採取者はゴム手袋を着用し、手袋の表面を蒸留水でよく洗う。

(イ) ポリビーカーに蒸留水（脱イオン水でも可）を50～60ml入れる。

(ウ) 次にガーゼ（蒸留水で煮沸洗浄したもの）を1組ポリビーカーに入れる。

(エ) ガーゼを軽く絞って採取塗膜面を図-3に示した1～4の要領で拭き取り、ビーカー内の蒸留水で濯ぐ。

(オ) ガーゼを取りかえて図-3に示した1～4を繰り返す行う。

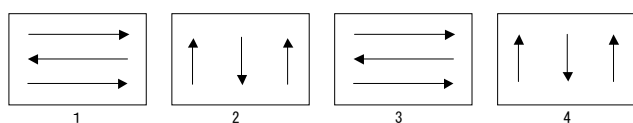


図-3 表面塩分採取時の拭き取り要領

(カ) 拭き取ったガーゼはビーカー内の蒸留水と共にポリビーカーに採取する。このとき手袋の表面もよく洗浄水でビーカー内に洗い流し、この水も一緒にポリビーカーに採取する。

(キ) 分析は電位差滴定法により行う。

4.2 目視観測調査

目視観測調査は、補修点検の定期点検及び詳細点検と合わせて実施した。供試体に近接し、ひび割れや浮き、剥離、錆汁などの変状の有無を目視で確認した。

4.3 物理・力学・電気化学試験

(1) 自然電位及び復極量測定

供試体の自然電位及び復極量を1回/年で測定した。対象は電気防食を施工した桁に対して実施した。これらの桁の内部には照合電極が埋め込まれており、鋼材の電位及び復極量がモニタリングされている。

(2) コア試験

コア採取、塩化物イオン含有量分析、中性化深さ測定等は、1回/5年で実施した。コア採取はJIS A 1107、塩化物イオン含有量分析はJIS A 1154、中性化深さ測定はJIS A 1152に準じて実施した。また、コンクリート表面から内部への塩分浸透状況を把

握するために、採取したコアを縦に分割し、EPMA分析を実施した。

(3) 詳細調査（10年目）

供用後10年目に、表面塩分量とコンクリート内部の腐食の可能性の状況を今後継続的に非破壊で確認するために、レーダ法による表面塩分分布推定および自然電位法による鉄筋腐食分布を測定した。レーダ法による表面塩分分布推定は、電磁波が塩分の存在で減衰することを利用したものである。自然電位法による鉄筋腐食分布測定は、JSCE-E 601に基づき実施した。

5. 調査・試験結果

5.1 腐食環境調査

(1) 飛来塩分量調査

供試体近傍の飛来塩分量調査結果（2002～2005）を図-4に示す。調査の結果、計測結果はどの年度もほぼ同様の傾向を示し、季節風が強くなる11月から3月までが飛来塩分の付着量も多くなる傾向が見られた。

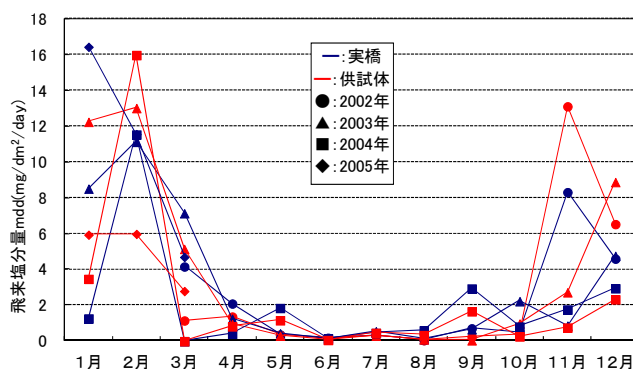


図-4 飛来塩分量調査結果（2002年～2005年）

(2) 表面拭き取り調査

供試体の表面拭き取り調査結果を図-5示す。計測結果は、どの年度でもほぼ同様の傾向を示したため、本結果は、2001年10月から2002年9月の期間に得られたものを示す。供試体の内、塩害塗装桁と炭素繊維巻き立て桁への塩分の付着が大きい。その他の桁ではチタンロッドが僅かに大きい傾向が見られた。

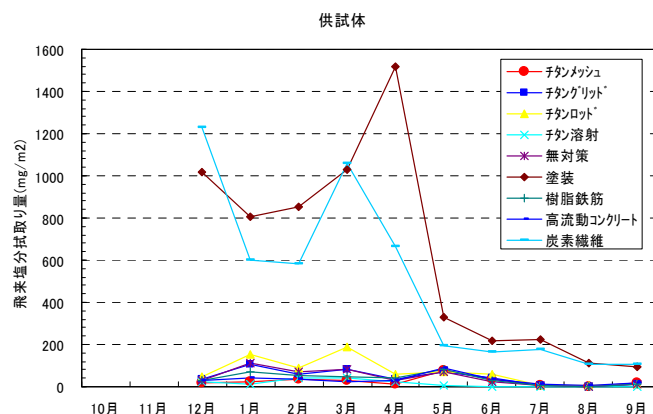


図-5 供試体拭き取り調査結果（2001.10～2002.9）

5.2 目視観測調査

各供試体において、下フランジ部にひび割れと桁側面上側にひび割れが確認された（写真－3）。また、塗装桁に関しては、塗装のわれやふくれに加え、新たにはがれが確認された（写真－4）。

下フランジおよび桁側面上側のひび割れについては、ほとんど0.1mm以下であることから、現状においては特に問題ないと思われるが、今後の調査においては継続的に監視を行う予定である。塗装のわれ、ふくれ、はがれに関しても、継続的に監視を行う予定である。その他においては、特に大きな変化は見られなかった。



写真－3 下フランジ部ひび割れ上側ひび割れ



写真－4 塗装面のひび割れ及び剥れ

5.3 物理・力学・電気化学試験

(1) 自然電位及び復極量測定

供試体の復極量測定結果を図－6に示す。復極量は夏季に減少し、冬季に増加する傾向を繰り返している。いずれの電気防食方式においても防食基準100mVを満足している状況が確認された。

(2) コア試験等の試験・分析

1) 試験項目及びコア採取状況

試験項目を表－3に示す。コア採取位置を図－7に示す。表－4にコア採取状況を示す。

表－3 試験項目

項目		箇所
詳細調査	コア採取(下面)	無対策,塩害塗装,高流動コンクリート
	コア採取(側面)	チタンロッド,チタン溶射,無対策,高流動コンクリート
	鉄筋腐食状況観察	チタンロッド,チタン溶射,無対策,高流動コンクリート
	塩分濃度測定	無対策,塩害塗装,高流動コンクリート
	EPMA分析	チタンロッド,チタン溶射,無対策,高流動コンクリート
	表面塩分分布推定	全面
	鉄筋腐食分布測定	全面

2) 塩化物イオン量測定結果

最も塩化物イオンの浸透が見られた高流動コンクリート桁の塩化物イオン量測定結果を図－8に示す。併せて、無対策桁の結果も示す。塩分は表面から約2～3cm浸透しており鉄筋位置に達していない。中性化深さは、0.5mm未満であった。

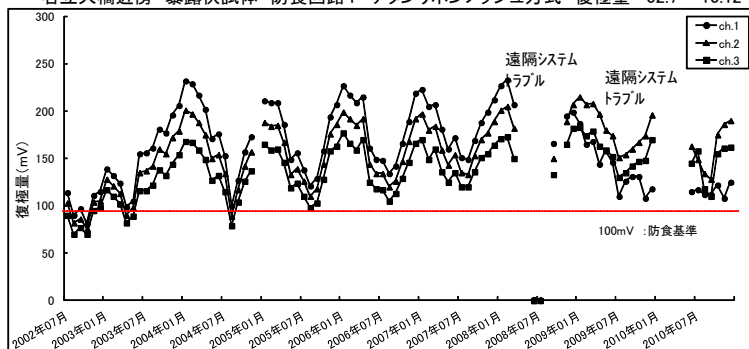
3) コア孔鉄筋腐食状況確認結果

コアを採取した箇所において鉄筋をはつりだし、腐食の有無を確認した。コアを採取した桁において、鉄筋の腐食は見られなかった（写真－5）。

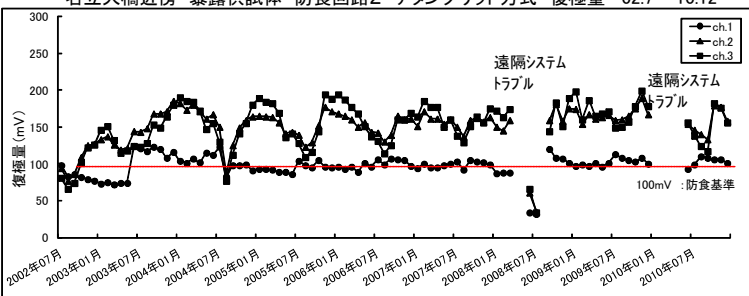
4) EPMA分析結果

チタンロッド方式と塩害塗装のコア試料のEPMA分析結果（塩化物：Cl）を図－9に示す。両者を比較することで塩害塗装の遮塩効果が確認できる。

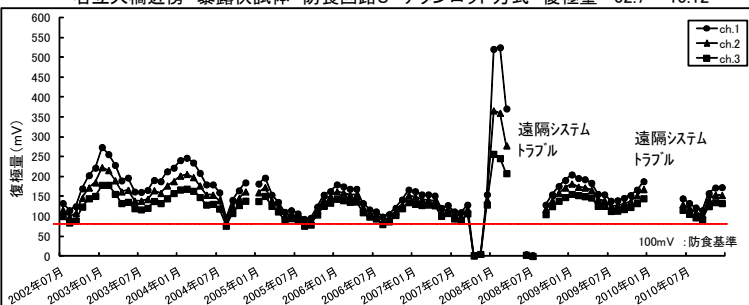
名立大橋近傍 暴露供試体 防食回路1 チタンリボンメッシュ方式 復極量 '02.7～'10.12



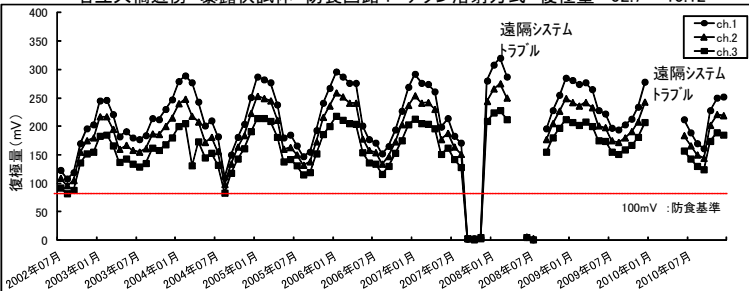
名立大橋近傍 暴露供試体 防食回路2 チタングリッド方式 復極量 '02.7～'10.12



名立大橋近傍 暴露供試体 防食回路3 チタンロッド方式 復極量 '02.7～'10.12



名立大橋近傍 暴露供試体 防食回路4 チタン溶射方式 復極量 '02.7～'10.12



図－6 暴露供試体の復極量測定結果

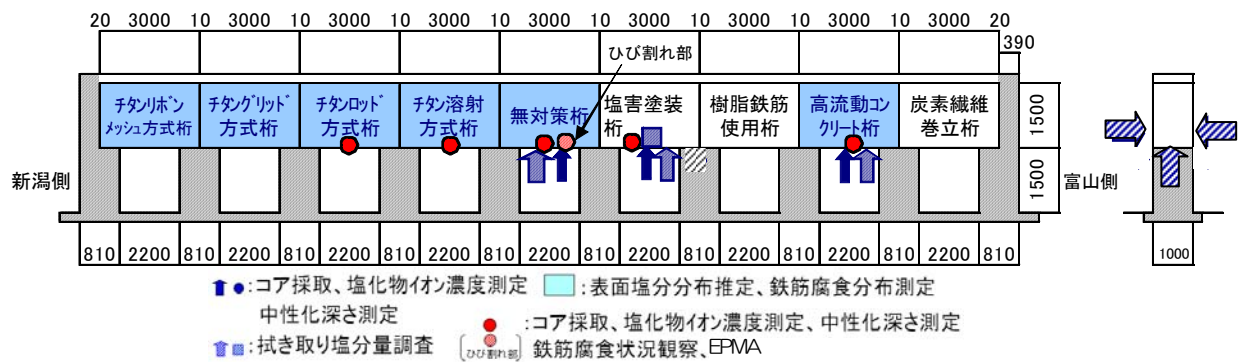


図-7 コア試料採取位置（暴露供試体）

表-4 コア採取状況

	コア寸法	採取箇所	コア状況
過年度結果 比較用コア (鉄筋間)	直径50mm× 長さ100mm	無対策、塩害塗装 高流動コンクリート の下面	
今年度新規 調査用コア (鉄筋上)	直径80mm× 鉄筋位置まで	チタン溶射、チタン溶射 無対策、塩害塗装、高 流動コンクリートの側面 フランジ(6箇所)	 フランジ部で採取したため、斜めの部分も存在する

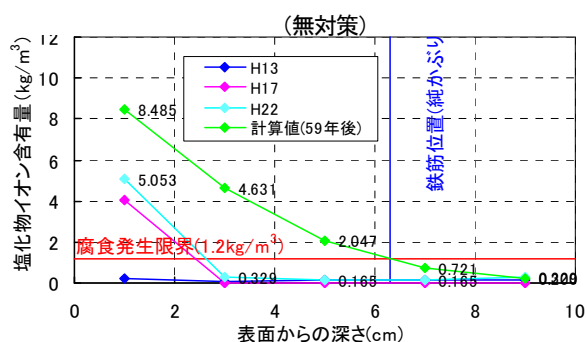
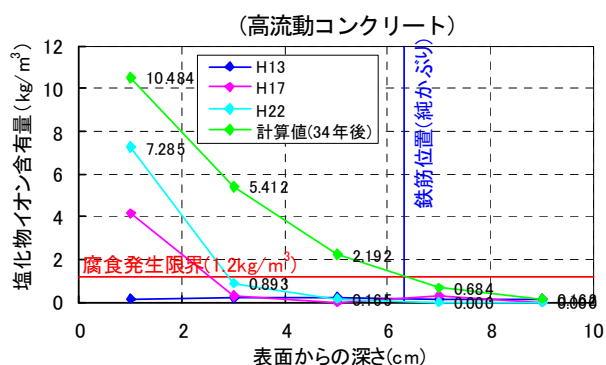


図-8 塩化物イオン量測定結果



写真-5 鉄筋腐食状況（チタンロッド、無対策）

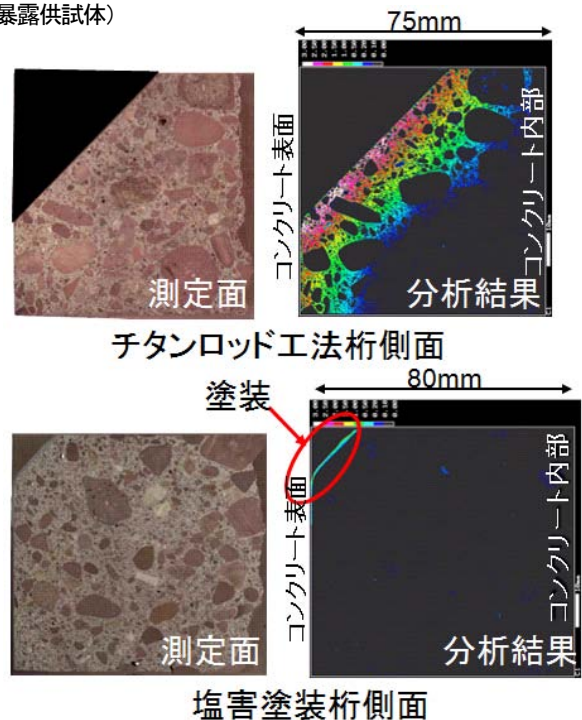


図-9 EPMA 分析結果（チタンロッド及び塩害塗装）

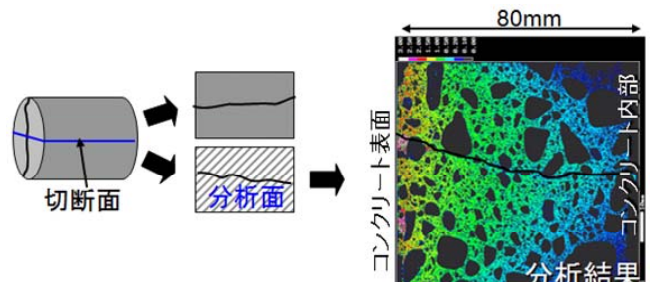


図-10 EPMA 分析結果（無対策ひび割れ部）

ひび割れ部の分析結果を図-10に示す。ひび割れの無い場合、表面から約2.5～3cmの浸透が見られるが、ひび割れが存在する場合、表層部のClは鉛直面の影響で比較的小さいが、ひび割れに沿って内部にClが浸透している状況が分かる。

4) レーダ法による表面塩分分布推定結果

レーダ法を用いて供試体表層部の面的な塩分浸透状況を推定した結果（代表例：無対策）を図-11に示す。塩分分布に明瞭な傾向は見られないが、側面及び下面に局部的に塩分が浸透している可能性があることを示唆していると考えられる。

5) 自然電位法による鉄筋腐食分布測定結果

代表例として、陽極材が下面全面に施工されているチタン溶射桁の通電時の電位測定結果を図-12に示す。陽極材が設置されている底面部の電位が低く、電気防食効果が確認できる。チタン溶射は面状陽極であり、陽極材表面上から電位を測定すると陽極電位の影響を受ける。しかし、電位の測定に際し、陽極材を除去することはできないため、通電時と通電停止後でどのような変化があるか確認することを目的に実施した。

通電停止後の自然電位測定結果を図-13に示す。供試体全面において電位が高くなり（-350mV以上）、腐食を生じている

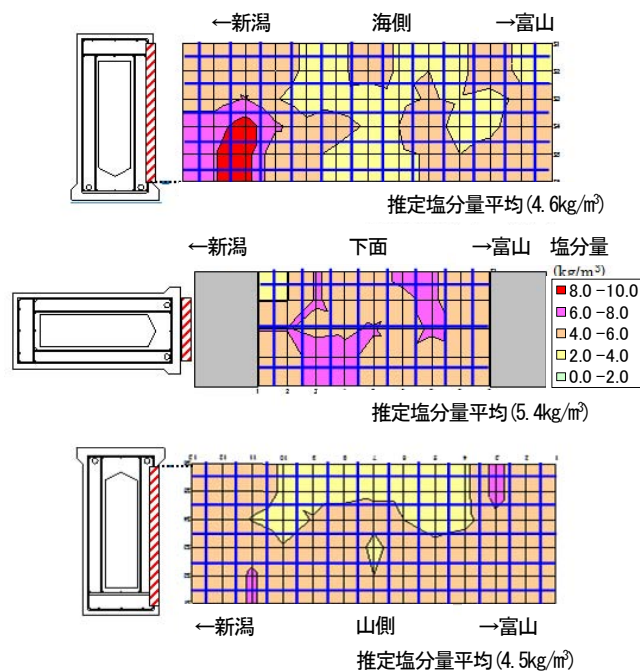


図-11 表面塩分分布推定結果（無対策桁）

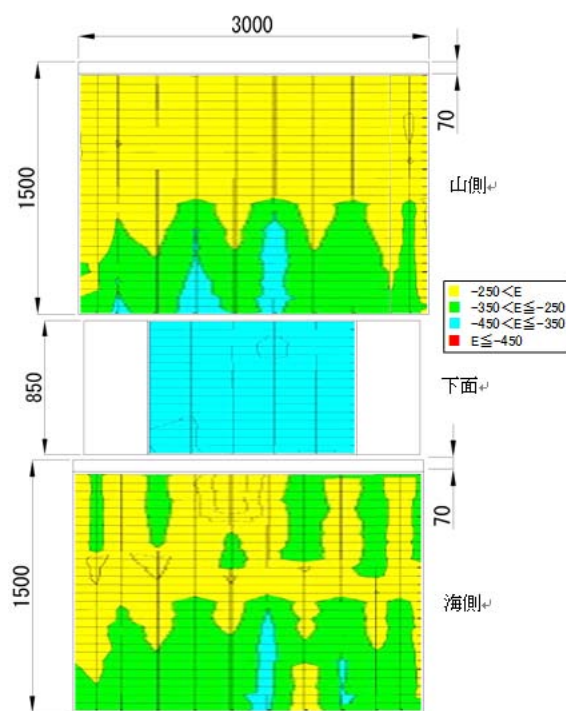


図-12 通電時電位測定結果（チタン溶射）

可能性が認められない。通電停止後に、電位が高くなったことから、通電時は防食電流が流れていることが確認できた。陽極材を設置している下面も、陽極材の電位の影響を受けているが、通電時より通電停止後の電位が高くなったことが確認された。

6. まとめ

10年経過した長期暴露供試体の追跡調査及び詳細調査結果から次のことが分かった。

- 1) 飛来塩分は海からの季節風が強くなる11月から4月までが多く、これに伴い暴露供試体の付着量が増加する。
- 2) 暴露供試体にコンクリートのひび割れや塗装の割れ等の軽微な変状が見られた。
- 3) 電気防食の効果を示す復極量は、季節により変動するが防食基準100mVを満足している。
- 3) 塩分は表面から2～3cm浸透していた。EPMA分析で塩分が表面から2.5～3cm浸透し、ひび割れから内部に浸透していた。
- 4) レーダ法で推定されたコンクリート表層部の面的な塩分分布は局部的であった。
- 5) 通電時の電位は低く電気防食効果が確認された。通電停止後の自然電位は基準値よりも高い状況であった。

7. 謝辞

本報告作成に対し、ご指導をいただいた新潟大学佐伯准教授、長岡技術科学大学下村准教授、田中助教に感謝の意を表します。

8. 参考文献

- 1) 橋梁塩害対策検討委員会：塩害橋梁維持管理マニュアル（案），橋梁塩害対策検討委員会，2008

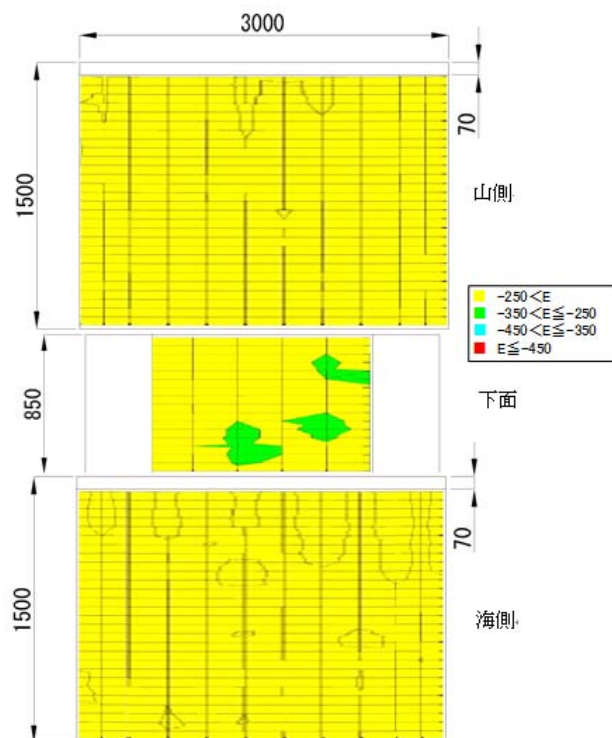


図-13 通電停止後自然電位測定結果