

論文 阪神大震災により被災し補強された栈橋上部工の塩害劣化に対する電気防食の適用

羽渕 貴士^{*1}・安井 秀人^{*2}・守分 敦郎^{*3}・下川 和夫^{*4}

要旨：阪神大震災による被災直後に曲げ補強およびせん断補強のための鋼板および炭素繊維の接着補強がなされた栈橋上部工において、塩害劣化への補修対策が必要と判断され、電気防食および断面修復工法による補修を実施した。本文では、鋼板および炭素繊維接着補強により部材表面が被覆された梁に対して、線状陽極および点状陽極を用いた電気防食工法により適切な補修が可能であること、そのときの鉄筋の分極量、復極量および防食電流分布が安定するのに要する時間は部材表面が被覆されない場合よりも長くなることを示した。

キーワード：耐震補強、栈橋上部工、塩害劣化、電気防食、点状陽極、線状陽極

1. はじめに

港湾コンクリート構造物の中でも栈橋上部工では、これまで数多くの施設において塩害による劣化損傷および補修対策の実施が報告されている。また、平成7年の阪神大震災以降、被災した構造物はもちろんのこと、被災していない構造物においても耐震基準等の見直しにより各種の耐震補強対策が実施されてきている。栈橋上部工においても、鋼板や炭素繊維等の接着による耐震補強が比較的多く実施されている。塩害環境に位置する部材にこのような耐震補強が実施された場合、補強された後に塩害劣化への補修対策が必要になることも考えられるが、その場合の適切な補修方法やその効果について検討された報告はない。

本文において検討対象とした栈橋では、阪神大震災による被災直後に主に梁に対して曲げおよびせん断補強のための鋼板および炭素繊維接着補強がなされており¹⁾、その後の詳細調査により塩害補修対策が必要と判断された。耐震補強により部材が被覆されている梁の大部分に対しては、塩化物イオンの浸透予測の結果から電

気防食工法を適用することとし、耐震補強効果に影響を与えないことを目的として線状および点状陽極を用いる方式を採用した。

本文では、線状および点状陽極を用いた電気防食工法による補修対策の、鋼板および炭素繊維接着補強がなされた実構造物への適用性とその効果について、現地計測とモデル実験の結果をもとに検討した結果を示す。

2. 構造物の概要と実施された耐震補強

対象構造物は阪神間の臨海地区に位置する荷役栈橋であり、昭和45年に建設された。当栈橋の標準断面を図-1に示す。ここでは塩害による劣化損傷に対して、昭和60年に床版の表面塗装が実施され、さらに平成3年には一部の梁および床版に対して部分的な断面修復がなされた。

その後、平成7年の阪神大震災により被災し、特に梁に多くの曲げおよびせん断ひび割れが発生した。その際、震災復興の社会的重要性および使命から早急に荷役作業を再開するため、被災後数ヶ月以内には耐震補強工事を完成させた。補強の内容としては、ひび割れへのエポキシ樹

*1 東亜建設工業（株）技術研究所材料・構造研究室主任研究員（正会員）

*2 甲南埠頭（株）代表取締役社長

*3 東亜建設工業（株）技術研究所材料・構造研究室長 工博（正会員）

*4 東亜建設工業（株）大阪支店神戸営業所技術課長

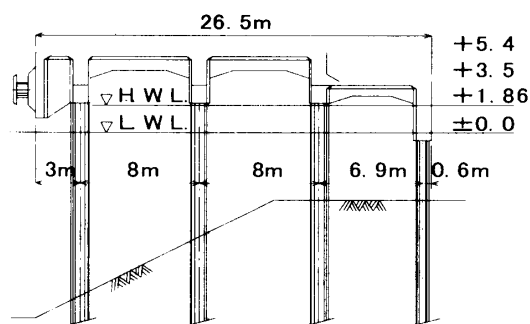


図-1 栈橋の標準断面

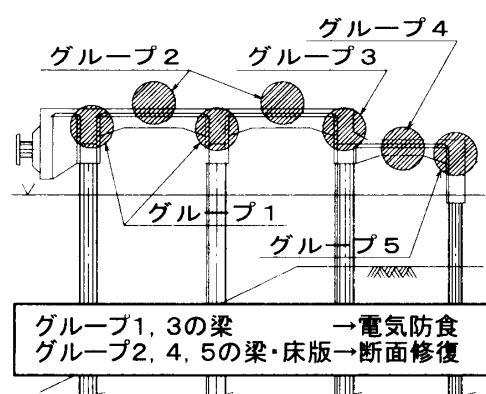


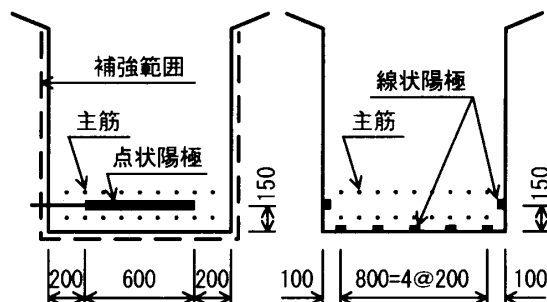
図-2 部材グループと補修工法選定結果

脂注人と剥落部への無収縮モルタルによる断面修復を行った後、底面に曲げひび割れが生じたのみの箇所に対しては主として炭素繊維接着、側面のせん断ひび割れを伴う場合には主として鋼板接着による耐震補強が実施された。

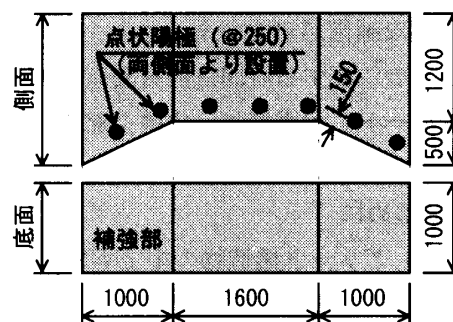
3. 塩害補修工法の選定

当栈橋においては、平成12年の日視点検において鋼板および炭素繊維の端部から錆汁が確認されたことを受けて、コンクリート中の塩化物イオン量測定を中心とした詳細調査を実施した。

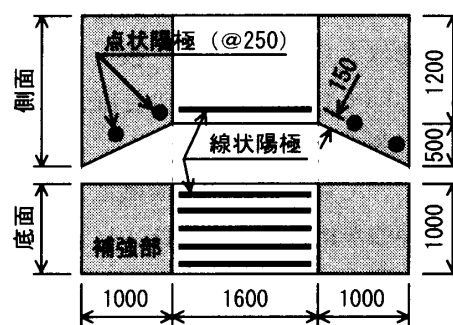
調査は、栈橋延長方向に3断面を選定し、各断面において部材の位置の影響を評価するために図-2に示す5種類の部材グループに分けて実施した。調査結果に対してはフィックの拡散則に基づく塩化物イオン浸透予測および一次元差分法による表面塗装工法の有効性の検討を行うとともに²⁾、部材の海面からの高さ等も考慮して、図-2に示すように、栈橋前面側の梁に対して電気防食工法を、床版のうち劣化が顕在



A: 全面補強 B: せん断部のみ補強



A: 全面補強



B: せん断部のみ補強

図-3 陽極配置の例(補強部の場合)

化した部分と護岸側の梁に対して断面修復工法を適用すべきであると判断した。

4. 電気防食工法の適用

4.1 電気防食工法の設計

電気防食方式の選定および陽極の配置については、図-3に示すように、施工対象の梁の多くが鋼板または炭素繊維接着により補強されていることから、既設の鋼板および炭素繊維はそのまま存置することを前提として、底面が補強されていない断面については線状陽極を、底面が補強されている断面に対しては点状陽極を梁側面から挿入する方式を採用した。

表－１ 電気防食条件の設定

防食範囲	梁底面から 30cm の範囲 (主として主筋を対象とする)
防食基準	24 時間後の復極量 : 100mV 以上 インスタントオフ電位 : -1100mV(vs. CSE)より貴
回路	1 ブロック(約 180m ²) 当たり 1 回路
陽極	チタン製リボン(幅 13mm×厚 0.6mm) 点状陽極の形状は図－３を参照 目標分極量 : 100mV～500mV (事前調査結果と防食基準より設定)
検討条件 (仮定)	鉄筋のカソード分極抵抗 : 5Ωm ² (かなり腐食している状態を想定)
	アノード分極抵抗 : 1Ωm ² (陽極の分極試験データより想定)
	コンクリート抵抗率 : 20KΩcm (Cl ⁻ が十分に存在する状態を想定)
検討結果	点状陽極の間隔 : 250mm
	線状陽極の間隔 : 200mm
	アノード電流密度 : 20mA/m ²

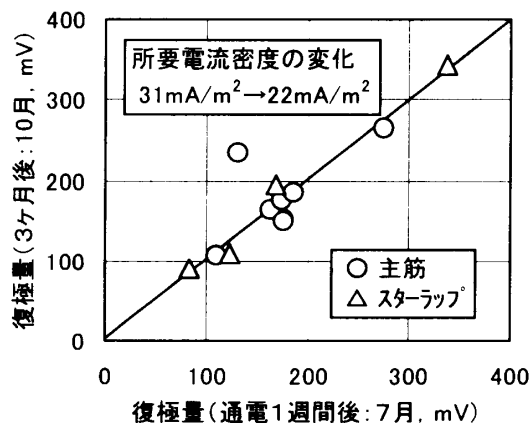
陽極の配置については、表－１に示す電気防食条件と現地調査の結果等を考慮して有限要素法により鉄筋の分極量を推測し³⁾、その結果から設置間隔を設定した。また高さ方向には、配筋間隔に十分余裕があったこともあり、２段に配筋された主筋の中央部に挿入することとした。

4.2 点状陽極の設置

点状陽極の設置に際しては、特に以下の点に注意して施工した。鋼板接着により補強されている部分では鋼板を 125mm 角に切断撤去してから設置し、陽極と鋼板との短絡を防止した。また、点状陽極と鉄筋との短絡および局所的な電流の集中を防止するために必要に応じて部分的に陽極表面を絶縁処理した結果、挿入孔内の陽極と排流端子との電位差は 10mV 以上と測定された。さらに、陽極挿入後にバックフィル材として無収縮モルタルを注入した。

4.3 防食効果の確認

当栈橋の電気防食範囲に設置した参照電極における 24 時間後の復極量の、通電開始 2 週間後と通電 3 ヶ月経過時での比較を図－４に示す。ただし、通電は夏季に開始されたものであるが、通電開始後 3 ヶ月には鉄筋の電位が開始当初の値よりも卑に移行したため、防食電流密度を低減 (31mA/m²→22mA/m²; コンクリート表面積当



図－４ 通電電流密度と復極量

たり) している。なお、既設の補強鋼板および炭素繊維を極力欠損させないために、参照電極はこれらの接着されていないコンクリート露出部の鉄筋に設置している。

この結果からは、気温の低下により分極抵抗が増加して分極が促進され⁴⁾、同程度の復極量を得るために必要な電流密度が約 70%にまで減少したものと考えられ、通電開始後はほぼ全ての測定点で 100mV 以上の復極量を確認できた。また、インスタントオフ電位も全て -400mV～-800mV (vs. CSE) 程度であり、表－１に示す防食基準を満足することを確認した。今後とも継続してモニタリングする必要があるが、現状では良好な防食効果を有していると考えられる。

5. 耐震補強部の防食効果の確認実験

5.1 実験概要

梁の底面および側面全体に補強鋼板および炭素繊維が接着されている部材への点状陽極による電気防食効果を評価するために、モデル実験を行った。供試体は、図－５に示すように、幅 400×高さ 400×長さ 1000mm のコンクリートに、長さ 100mm の分割鋼材 (SGP15A) と長さ 10mm の塩ビパイプを交互に接続した主筋を上下段各 3 本配置したものであり、さらに同様に 6 要素に分割・接続されたスターラップも 2 箇所に配置した。なお、分割鉄筋は全てリード線により電氣的に導通の取れた状態にしてある。コンクリートの配合を表－２に示す。

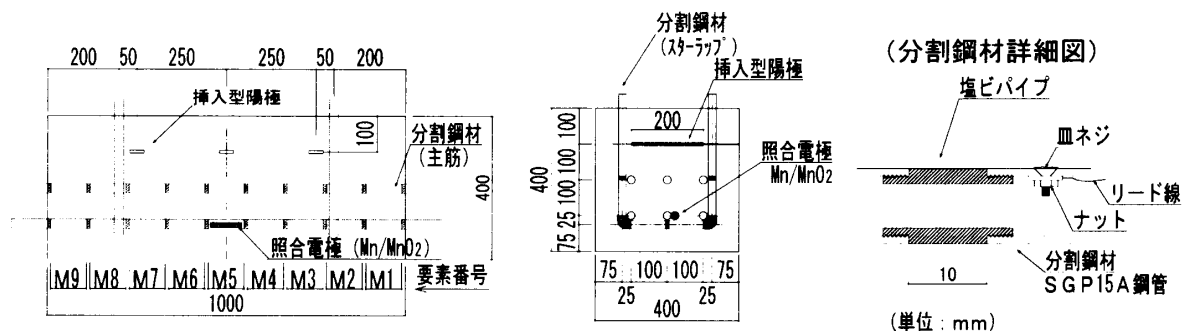


図-5 供試体の形状・寸法と分割鋼材

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)						AE 減水剤
		W	C	S	G	Cl ⁻		
55.7	43.0	157	282	791	1083	0.5		2.82

セメント : 高炉セメントB種(比重 3.04)
 細骨材 : 千葉県君津産山砂(表乾比重 2.60)
 粗骨材 : 北海道十勝産石灰砕石(表乾比重 2.69)
 AE 減水剤 : リグニンスルホン酸塩系

表-3 供試体の種類

供試体名	暴露状態	Cl ⁻ 量(交流抵抗)
供試体A	気中暴露	0kg/m ³ (23.2kΩ・cm)
供試体B		5kg/m ³ (25.2kΩ・cm)
供試体C	模擬鋼板貼付	

点状陽極は、前述の実構造物の場合よりも厳しい条件として上段主筋の100mm上方に通電部の長さ200mmのチタン製リボンメッシュ陽極を配置することとし、延長方向に250mm間隔で3本設置した。照合電極は、二酸化マンガン電極を下段中央の主筋(M5)に設置した。

本実験では、コンクリートへの塩化物イオンの混入の有無(0または5kg/m³)と、鋼板等が接着された部材を想定してコンクリート表面全体にシリコンを塗布した後にアクリル板を貼り付けた場合の防食効果への影響について検討した。供試体の種類を表-3に示す。

5.2 復極および分極の速度

通電は、供試体内の電流分布のばらつきを考慮して参照電極を設置した鉄筋(M5)の電位変化量の日標値を250mV程度とし、図-6の結果を参考に供試体Aで2.0mA、供試体Bで3.0mA、供試体Cで3.5mAの定電流制御とした。

通電開始後5ヶ月経過時点で復極量試験を行い、引き続いて、鉄筋電位が安定した時点から

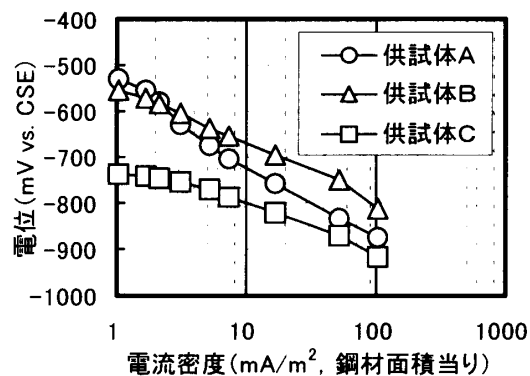


図-6 E-L o g I 試験結果

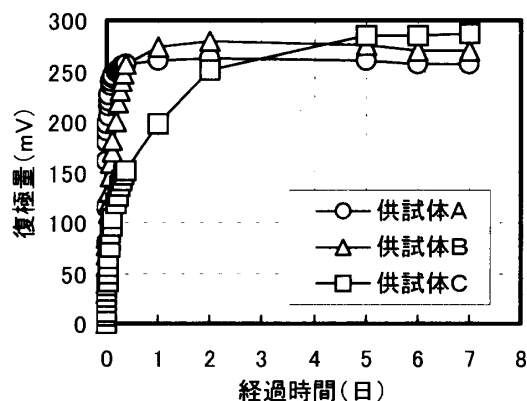


図-7 復極量の変化

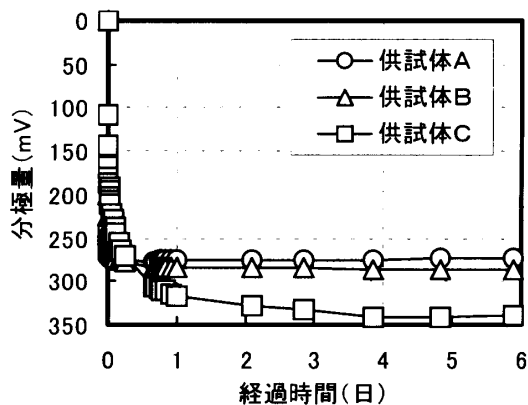


図-8 分極量(IRドロップを含む)の変化

再び通電を開始して、通電時電位の経時変化を測定し、分極量（IRドロップを含む）を算定した。これらの結果を図-7, 8に示す。

これらの図から、全ての供試体において通電停止および開始とともに急激に鉄筋電位が変化し、4時間の後には、復極の際には150mV以上、分極の際には250mV以上の電位変化を生じたが、鋼材電位が安定して復極量、分極量が一定になるまでの時間は供試体によって異なった。

復極量と分極量のいずれの場合にも、最も時間を要したのが、塩化物イオンが混入されて表面に模擬鋼板が貼り付けられた供試体Cであり、次に塩化物イオンが混入された供試体Bであった。一般に、分極電位は酸素や塩化物イオンの量の影響を受けるとされていることから、供試体Cにおいては模擬鋼板が貼り付けられたことにより酸素の供給が十分でないことが大きく影響しているものと考えられる。ただし、このような場合でも復極量および分極量はそれぞれ5日および4日程度で一定となっており、比較的良好に実施される24時間後の復極量の管理のみでは不十分な場合も考えられるが、本工法の適用は大きな問題はないと考えられる。

5.3 防食電流密度分布

供試体BおよびCにおける延長方向の防食電流密度分布を図-9, 10に、断面方向の防食電流密度分布(M2断面)を図-11, 12に示す。これらの図に示す流入電流密度は、全て鋼材の単位表面積当たりの値である。また、図-11, 12には、陽極と各鋼材間の交流抵抗の値も括弧書きで示した。

図-9, 10に示す延長方向の流入電流密度は上・下段各3本の鋼材の平均値を示しており、また同図には通電開始後2週間および5ヶ月経過時点での値を合わせて示している。これらの図より、通電開始当初は供試体B, Cともに電流分布にばらつきが見られたものの、5ヶ月経過時点では均一になる傾向を示した。ただし、供試体Cのようにコンクリートが外気と遮断されているような場合には、下段の鋼材や延長方

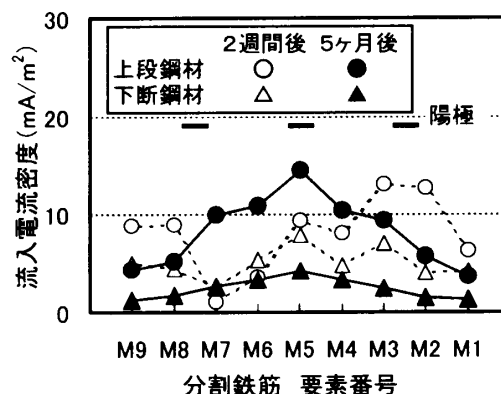


図-9 延長方向電流密度分布（供試体B）

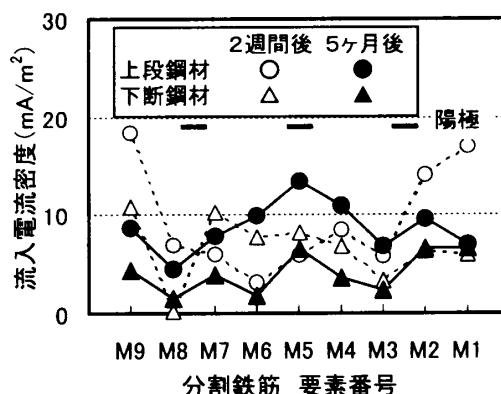


図-10 延長方向電流密度分布（供試体C）

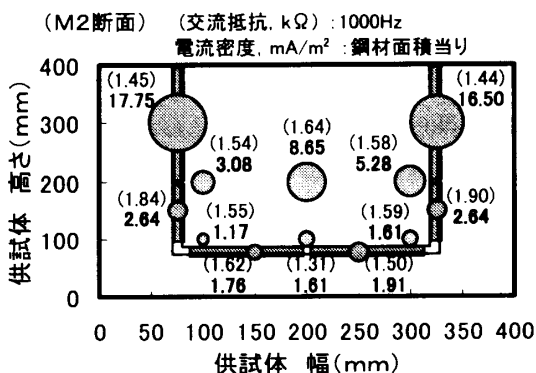


図-11 断面方向電流密度分布（供試体B）

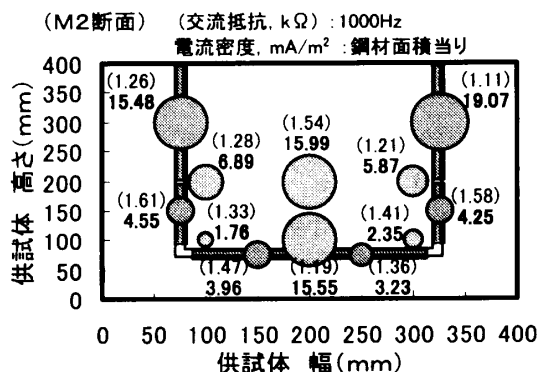


図-12 断面方向電流密度分布（供試体C）

向の端部においてまだ滑らかな電流密度分布になっていない部分を確認された。

従って、本実験の結果からは、補強鋼板等によりコンクリートが外気と遮断されているような場合には、防食電流分布が安定した状態になるのに要する時間も通常の場合よりも長くなることが示唆された。

一方、図-11, 12 に示す断面方向の電流密度分布については、今回の配筋および陽極配置では、いずれの場合も上段の主筋3本と上部のスターラップ(点状陽極が最も接近している部分)に比較的大きな値が確認され、下段の主筋の両端部(断面の隅角部)やそれに近いスターラップには防食電流が流入しにくい状況であった。なお、分割鋼材単位で計測された最小値は最大値の1/10～1/15程度であり、主筋のみに着目すると、下段の主筋の両端部での平均値は上段中央の主筋での値の1/6～1/8程度であった。

これらのことから、本実験のように2段に配筋された主筋のさらに上方に点状陽極を設置する場合、梁の隅角部に近い主筋やスターラップには防食電流が流入しにくく、コンクリートの乾燥状態や鉄筋の腐食状況によっては十分な防食効果が得られないことも考えられる。これに対し、点状陽極から近い上段の主筋には比較的均一な防食電流が供給されたことから、先に示した栈橋上部工の梁での適用例のように、2段に配筋された主筋の中央部に設置することが望ましいと考えられた。また、梁に対する点状陽極を用いた電気防食は、内在塩分や外部からの多量の塩分浸透の影響により下段鉄筋だけではなく上段鉄筋も確実に防食しなければならない場合等には、特に有効であると考えられる。

6. まとめ

本検討の結果、以下の結論を得た。

- 1) 鋼板および炭素繊維の接着により耐震補強された梁部材に対しては、線状および点状陽極を用いた電気防食工法により、適切な塩害劣化対策が実施できる。
- 2) 補強鋼板などの被覆によりコンクリートが外気と遮断された梁に点状陽極による電気防食を適用した場合、通常の場合よりも分極や復極に時間がかかる可能性があるため通電管理の際に留意が必要であるが、工法の適用上は大きな問題はない。
- 3) モデル実験において、点状陽極による通電を開始した当初は防食電流分布にばらつきが見られたが、通電開始後約5ヶ月では電流分布は安定した状態になる傾向を示した。ただし、コンクリートが外気と遮断されている場合には、分布の均一性は劣っていた。
- 4) 多段配筋された梁に対しては、点状陽極を側面から挿入する電気防食方式により均一かつ十分な防食が可能であり、内在塩分等による腐食に対して上段鉄筋へも十分な防食電流を供給したい場合には有効である。

謝辞： 本検討および実構造物への適用にあたりご協力頂いた(株)ナカボーテックの各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 吉田敏ほか：接岸・荷役分離方式と鋼板・炭素繊維接着工法により早期復旧した荷役栈橋の震災復旧，耐震補強・補修技術，耐震診断技術に関するシンポジウム講演論文集，pp. 41～48，1997. 7
- 2) 守分敦郎ほか：塩害を受けた栈橋に対する表面修理工法の設計法に関する検討，土木学会論文集，No. 534／VI-30，pp. 109～123，1996. 3
- 3) 田中健一郎ほか：部分的電気防食における防食範囲の定量化，材料と環境 2001 年講演集，pp. 241～244，2001. 5
- 4) 川俣孝治ほか：積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の電気防食法に関する研究，土木学会論文集，No. 557／V-34，pp. 65～75，1997. 2