

報告 北陸地区における施工後 15 年を経た各種電気防食工事の評価報告

五寶 光基^{*1}・荒本 貴司^{*2}・朝倉 功^{*3}・野村 昌弘^{*4}

要旨：本論文は，北陸地区に施工後 15 年経過した 4 つの電気防食工法（帯状陽極方式，導電性塗料方式，チタンメッシュ方式，流電陽極方式）における復極量，防食電流（発生電流），コンクリート抵抗率，陽極システムの性能を調べた。9 年後までの報告では，各電気防食工法において復極量 100mV が確保され，良好な防食状態にあった。しかし，15 年経過した現在，復極量 100mV が確保できない箇所が現われはじめた。この原因として陽極システムを構成する 2 次電極や仕上被覆材など副材の劣化の可能性があり，さらに詳細な調査が必要であることが確認された。

キーワード：電気防食，塩害，陽極システム，復極量，アノード分極試験

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化要因には，内部鋼材を腐食させる中性化や塩害が挙げられる。これらの劣化は電気化学的な反応で鋼材を腐食させることから，電気防食工法が有効な対策の一つとして注目されている¹⁾。電気防食工法は，主として既設コンクリート構造物の劣化が顕在化した場合に適用されるだけでなく，将来の構造物の劣化に対する予防保全処置としての適用も可能である²⁾。また，断面修復工法に比較して初期コストが高いが，更新等の維持費用が安く，ライフサイクルコスト的には有利な場合がある³⁾。しかし，このコストの算出は仮定に基づくところが多く，電気防食工法を構成する部材の寿命が明確になっていないのが現状である^{4),5)}。

北陸自動車道，大慶寺川橋は，道路橋に対し日本ではじめて電気防食工法を試験採用した経緯がある⁶⁾。平成 10 年の 9 年経過後の調査結果では，復極量 100mV⁷⁾が確保され，内部鋼材の腐食進行が停止していたことが確認された。また，外部電源方式におけるチタン系陽極材の性能は低下しておらず耐用年数は 40 年，流電陽極方式

における亜鉛陽極材の耐用年数は 15 年と推測した。本稿では，継続して実施した復極量，コンクリート抵抗率および陽極システムの性能の推移について評価するとともに，15 年経過後に電気防食工法の一部にて復極量 100mV を確保できない箇所が発生した原因について検討を行った。

2. 調査概要

2.1 電気防食工法の概要

大慶寺川橋は，昭和 47 年に建設された PC ポストテンション単純けた橋（橋長 26.05m）である。当橋は，海岸から 80m の所に位置し，飛来塩分による塩害が顕在化したことから，平成元年 11 月に下り線 G2 けた（海側から 2 番目のけた）で電気防食工法の試験施工を実施した。施工は図 - 1 に示すように，外部電源方式 3 ケース（帯状陽極方式，導電性塗料方式，チタンメッシュ方式）流電陽極方式 1 ケースの計 4 ケースであり，防食範囲は主けたを対象としている。

各電気防食の概要を図 - 2 に，陽極システムの構成部材を表 - 1 に示す。帯状陽極方式は，本橋で初めて提案されたものでコンクリート面に

*1 日本道路公団 北陸支社 金沢技術事務所 技術指導課（正会員）

*2 日本道路公団 北陸支社 保全部 保全部第二課

*3 日本道路公団 北陸支社 金沢管理所 改良二課

*4 (株)クエストエンジニア 土木調査設計部 土木調査設計課（正会員）

一定間隔の溝を切り，その溝に白金めっきチタン線を設置，さらに導電性パテを充填したものである。なお，チタン線の間隔の違いによる電気防食工法の効果を確認するため溝の間隔を15，30，60cmの3パターンと変化させている。導電性塗料方式は，コンクリート面に60cm間隔で白金めっきチタン線を設置し，その上に2次陽極材として導電性パテ，導電性塗料および上塗材を塗布したものである。チタンメッシュ方式は，コンクリート面にチタンメッシュを固定

し，その上をモルタルで被覆したものである。流電陽極方式は，コンクリート面に垂鉛シート（ $t=1\text{mm}$ ）と特殊バックフィル材が一体構造となった部材を固定し，その上からコーティング材を施したものである。

2.2 調査方法

調査は，復極量，防食電流（流電陽極方式の場合，発生電流）ならびにコンクリート抵抗率の測定である。また，陽極システムの性能評価は，アノード分極試験⁸⁾，垂鉛シート板の残存

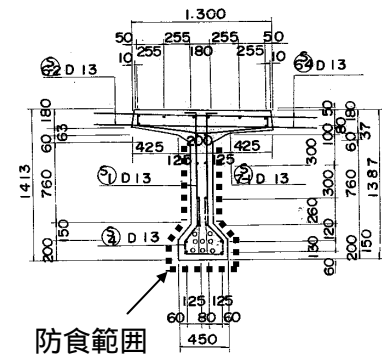


図 - 1 電気防食ブロック割付およびPCけた断面

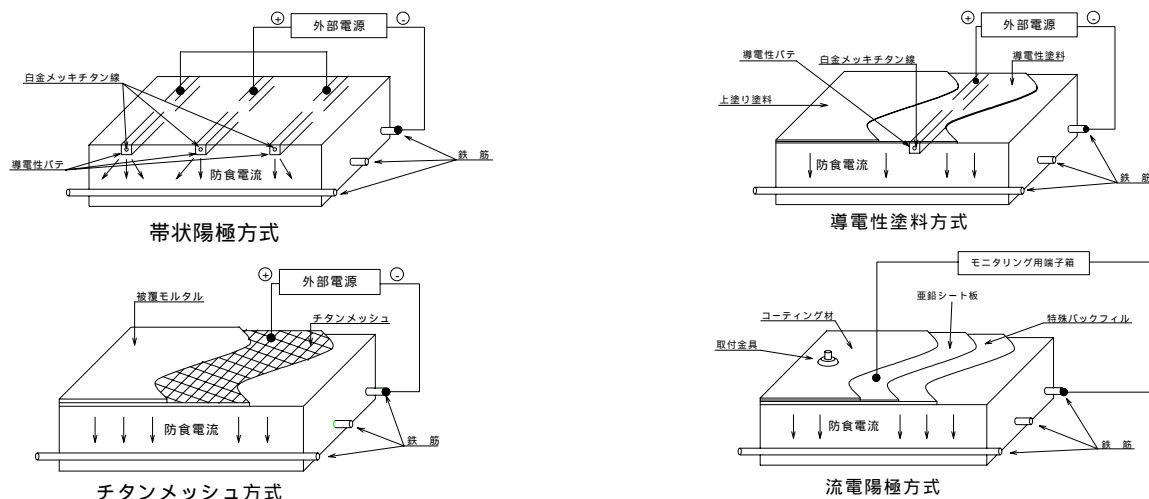


図 - 2 各電機防食工法の概要

表 - 1 陽極システムの構成部材

種別	面積 (m^2)	主材		
		1次電極	2次電極	仕上被覆材
带状陽極方式	@15cm	白金めっきチタン線	導電性パテ ¹	
	@30cm			
	@60cm			
導電性塗料方式	8.7		導電性パテ ¹ ，導電性塗料	上塗り塗料
チタンメッシュ方式	8.7	チタンメッシュ		被覆モルタル ²
流電陽極方式	18.1	垂鉛シート板		バックフィル材 ³ ，コーティング材

1：水溶性アクリルエマルジョン，カーボングラファイト粉末， 2：補修用モルタルE社製

3：ペントナイト，塩化マグネシウム，硫酸マグネシウム

質量の測定ならびに副材に対する目視・打音調査である。復極量の測定は、主桁下フランジ底面に設置した埋込式照合電極（以下照合電極）と電気防食全体の復極量を把握するため設置した計測孔（@30～50cmに設置）で可搬式照合電極（飽和カロメル電極 SCE）により、高抵抗電位差計を用いて実施した。外部電源方式の防食電流の測定は直流電源装置にて通電電流を確認し、流電陽極方式の発生電流は無抵抗電流計を用いて測定した。コンクリート抵抗率は、電気防食の通電を OFF にした状態でコンクリート表面の計測孔を利用し、可搬式特殊センサーを押し当てセンサーと鉄筋の間のコンクリート抵抗率を分極抵抗試験器にて測定した。アノード分極試験に使用する試験体は、主材のチタン系陽極材と副材の導電性パテや被覆モルタルを含む形でコア（50～100mm）を採取した。また、流電陽極方式では、亜鉛シート板（15×90cm：8枚、40×90cm：2枚）を取外し、飽和酢酸アンモニウム水溶液に浸漬し、腐食生成物を除去したのち、重量を測定し、消耗率を算出した。

3. 調査結果および評価

3.1 復極量、防食電流および発生電流

計測孔および照合電極から算出した平均の復極量および防食電流の調査結果を図-3に示す。外部電源方式は、復極量にばらつきがあるため、最低の復極量が100mVを確保できるよう防食電流を調節してきた。防食電流は20mA/m²から徐々に低下させ、現在、1～4mA/m²で通電を行っている。流電陽極方式では、発生電流が5年経過時点まで減少し、その後横ばいになっている。現在の発生電流は0.6mA/m²であるが、平均の復極量100mV以上が確保されている。

図-4は、15年経過時点の計測孔および埋設電極で測定した復極量とインスタントOFF電位（防食電流を遮断した直後の電位）との関係を示したものである。復極量は、大きくばらつきがある。带状陽極方式では、チタン線が15cm間隔で復極量がすべて100mV以上であるの対

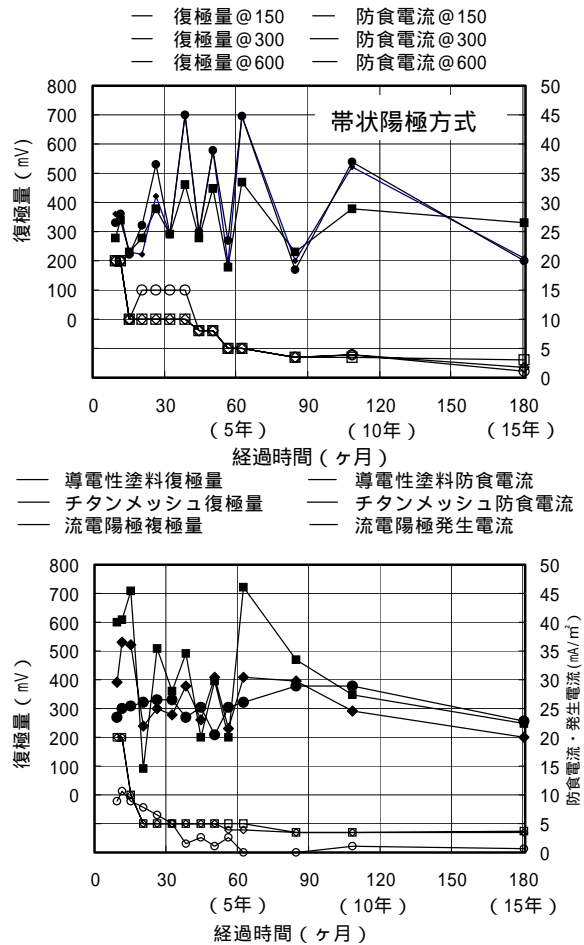


図-3 復極量および防食電流の経過

し、30cm間隔では30計測点中4点(13%)、60cm間隔では32計測点中5点(16%)、また導電性塗料方式では49計測点中2点(4%)、チタンメッシュ方式では41計測点中16点(39%)、流電陽極方式では41計測点中6点(15%)において復極量100mVが確保されていなかった。復極量を確保するため防食電流を増加させると電位が-1000mVを越え、PC鋼材で水素脆化が生じる可能性も考えられる⁷⁾。また、带状陽極方式におけるチタン線の間隔は、復極量のばらつきがもっとも少ないことに着目すれば30cm間隔が妥当と思われる。外部電源方式では、照合電極で測定した復極量は、240～760mVと100mVを大きく上回っているが、全体の復極量のばらつきが大きいいため、照合電極で復極量100mV付近の経済的な通電量を管理した場合、十分な防食効果が得られない可能性がある。照合電極による確認のみならず、電気防食全体の復極量を定期的に確認する必要があると考える。

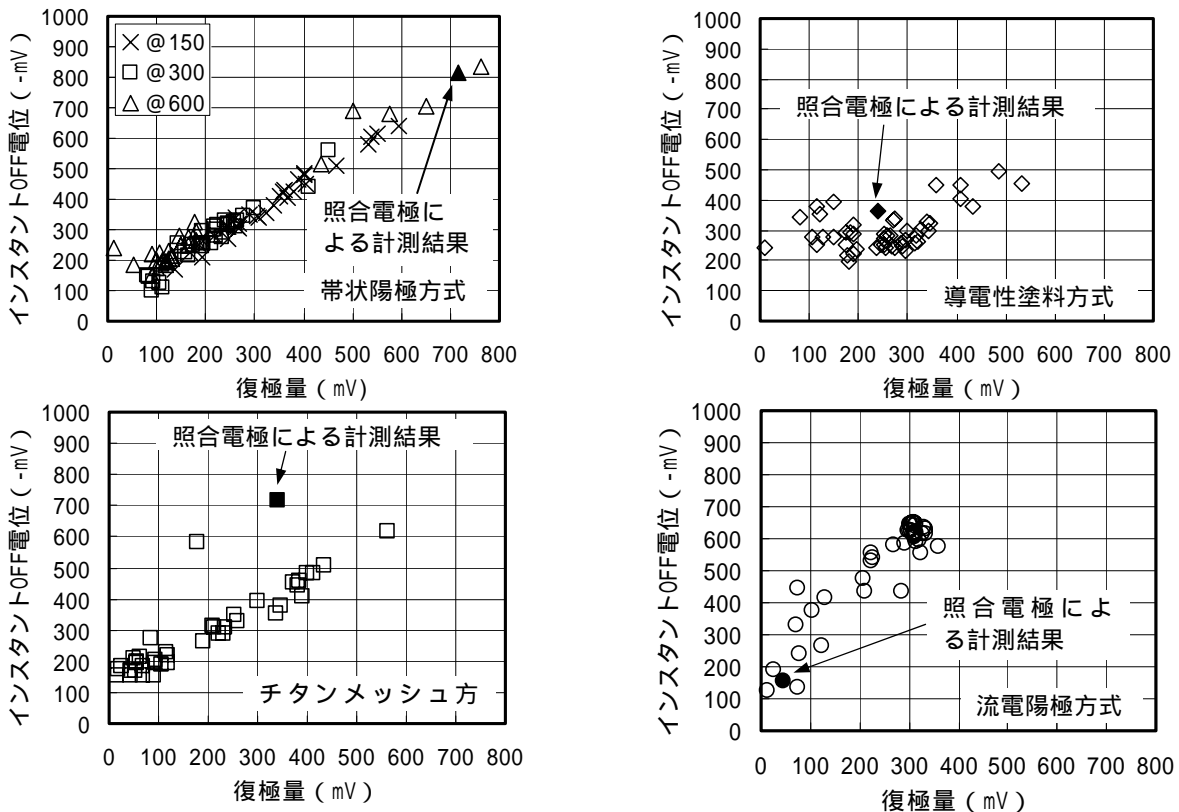


図 - 4 計測孔および照合電極による復極量とインスタント OFF 電位との関係

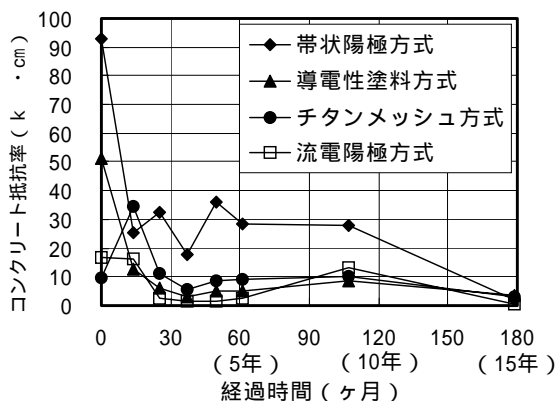


図 - 5 コンクリート抵抗率の推移

今回の調査では、9年間確保されてきた復極量が15年経過後、一部、100mV以上が確保できない部分が明らかとなった。この原因として、コンクリート抵抗率の増加および電気防食を構成する陽極システムの劣化が考えられる。

3.2 コンクリート抵抗率

コンクリート抵抗率は、塩害環境が厳しくなりコンクリート中の水分量が多くなるに従い低下する。逆にコンクリートが乾燥するほど抵抗率は増加し、電流は流れにくくなる。コンクリート抵抗率の調査結果を図 - 5 に示す。抵抗率

は、時間の経過とともに減少しており、また15年目では工法による差はほとんど表れていない。よってコンクリート抵抗率は復極量が確保できなかった原因ではないようである。

3.3 陽極システム主材

(1) 外部電源方式

アノード分極試験結果を図 - 6 に示す。ここでは、前回の調査結果(9年経過)と今回の調査結果(15年経過)とを対比させている。各分極曲線は、 $10\text{mA}/\text{m}^2$ 以下で直線的、 $10\text{mA}/\text{m}^2$ 以上で立上るといふ基本的な形状は一致している。ただし、導電性塗料方式およびチタンメッシュ方式は、前回に比較して $10\text{mA}/\text{m}^2$ 以上の区間で電流密度が増加するに従い、電位の立上りの勾配が大きくなっている。これは、チタン線の劣化による不動態化が原因で電流が流れにくくなっているものと推察する⁹⁾。また、電気防食で使用する電流密度 $20\text{mA}/\text{m}^2$ 以下では、前回の調査結果より電位が低くなる傾向があるが、これは陽極材付近のpHの差によるものと思われる。今回適用した電流密度付近では影響が現れ

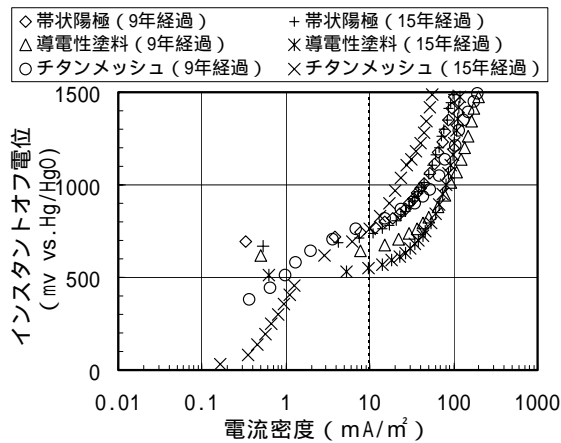


図 - 6 アノード分極試験結果

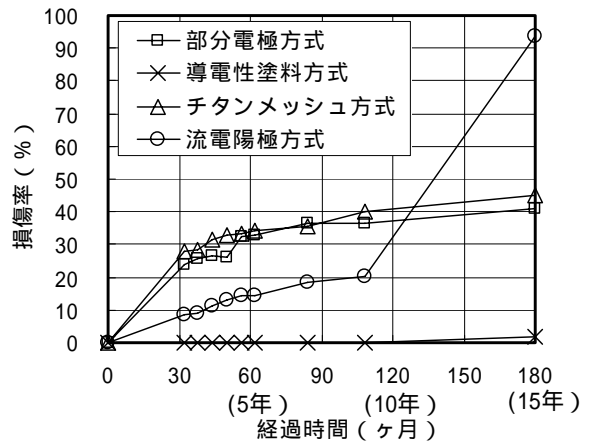


図 - 8 副材の損傷率の推移

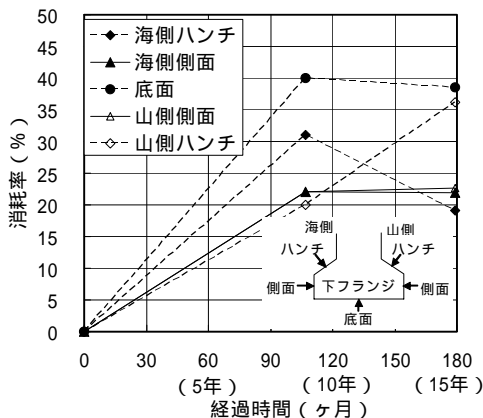


図 - 7 亜鉛シート板の消耗率の推移



写真 - 1 陽極材付近の断面 (带状陽極方式)

ておらず、複極量が確保できなかった原因ではないようである。

(2) 流電陽極方式

亜鉛シート板の消耗率の推移を図 - 7 に示す。15 年経過後、各部位の亜鉛シート板の消耗率は 40% 以下であった。また、山側ハンチを除いては前回の調査結果とほぼ同様あるいは減少している。これは発生電流が小さかったため、亜鉛シート板の消耗が進行しなかったものとする。

3.4 陽極システム副材

目視・打音により、陽極システム副材の状況を調査した。带状陽極方式では導電性パテ材のひび割れ、導電性塗料方式では塗装材の浮き、チタンメッシュ方式では被覆モルタルの浮き、流電陽極方式では空洞（既設コンクリート面とバックフィル材の非接触等）が確認された。これらの損傷範囲を電気防食の施工範囲で割り戻した比率（以下損傷率）の推移を図 - 8 に示す。带状陽極方式およびチタンメッシュ方式では、

損傷率が徐々に増加し、約 40% となっている。流電陽極方式では、9 年経過後から損傷率が大きく増加し、現在 94%、これに対し、導電性塗料では損傷率が低く、15 年経過後で約 2% である。写真 - 1 は、带状陽極方式にてアノード分極試験のため採取したコアである。チタン線の周りには空洞が発生し、コンクリートの変色も確認できる。この空洞の原因として、通電によるパテ材中のカーボンが消耗したことが考えられる¹⁰⁾。そして空洞が生じたチタン線から流出する電流のバランスが悪化し、鋼材に不均一な電流が流れ、一部、過大な電流が流れたチタン線は、界面反応の変化による塩素ガスの発生とコンクリートの pH が低下したことによるコンクリートの劣化の可能性も考えられる¹¹⁾。導電性塗料方式でも同様な現象が推定されるが、二次陽極の導電性塗料の浮きが小規模であり、図 - 4 から明らかなようにコンクリートにほぼ一様な電流が流れているものと判断できる。チ

タンメッシュ方式および流電陽極方式では、被覆モルタルおよびバックフィル材と既設コンクリート面との付着が絶たれ、十分な電流が流れない状況になっている。よって、復極量 100mV が確保できない主たる原因が、陽極システムを構成する 2 次電極や仕上被覆材など副材の経年劣化である可能性がある。しかし、帯状陽極方式およびチタンメッシュ方式では、9 年経過後から 15 年経過後の損傷率の変化が小さいにもかかわらず、復極量が確保できない箇所が増加し、また各々の工法における箇所数も違う。このため副材劣化状況の詳細調査（浮き、ひびわれ等の質的評価）や、導電性能の調査を行い、さらなる検討が必要である。

なお、副材の劣化により復極量が確保できないことが確認された場合、ライフサイクルコストの算定に副材の寿命を考慮する必要がある。

4. まとめ

15 年経過した電気防食工法の調査で得られた主要な結果をまとめると以下のようである。

- (1) 電気防食工全体の復極量を測定したところ、大きなばらつきが見られ、100 mm V を確保できない部分があることが判明した。従って埋込式照合電極による復極量測定の外に、電気防食工全体の復極量を定期的に確認することが必要であった。
- (2) アノード分極抵抗試験によるチタン系陽極材の性能試験結果では、電気防食工法に使用する電流密度 20mA / m² 以下において、劣化はないものと判断した。
- (3) 流電陽極方式による亜鉛シート板の消耗率は、9 年経過後と比較して進行していなかった。これはバックフィル材と既設コンクリート面との付着が絶たれ電流が流れない状況にあったためであった。
- (4) 陽極システムを構成する副材の劣化が確認され、この影響により復極量が確保できなくなった可能性があった。副材の劣化状況についてさらに詳細な調査をする必要があると考

えた。

なお、復極量 100 mm V を確保できなかった箇所も含め、劣化の進行がないか今後も追跡調査を行う予定である。

謝辞：本調査に協力いただいた飛鳥建設(株)およびナカボーテック(株)の方々に感謝いたします。

参考文献

- 1) 舟川勲ほか：土木学会 電気化学的防食工法設計施工指針(案)の概要、コンクリート工学、Vol.40, No.8, pp. 3-11, 2002.8
- 2) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー107, 2001, 11
- 3) 野村昌弘ほか：LCC による塩害対策工の選定に関する一考察、土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集 -166, pp.332-333, 1999
- 4) コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション委員会報告書, 1998.10
- 5) 上田隆雄：電気化学的補修の現状と課題、コンクリート工学, Vol.42, No.5, pp.73-79, 2004.5
- 6) 野村昌弘ほか：北陸自動車道 大慶寺川橋での電気防食試験の評価、コンクリート工学, Vol.37, No.12, pp.17-21, 1999.12
- 7) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー107, pp. 67, 2001, 11
- 8) NACE Standard TM0294-2001 Item No.21225
- 9) 杉ノ上大我ほか：コンクリート部材の電気防食における陽極システムの性能評価方法について、土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集 -056, pp.111-112, 2003
- 10) 土木学会：電気化学的防食工法設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー107, pp. 56, 2001, 11
- 11) 青山敏幸ほか：10 年間電気防食を施したプレテンション方式 PC 部材の材料及び力学特性、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.541-546, 2001.6