

論文 FEM 解析による貼付け型シート陽極の配置方法に関する検討

太田 翔*1・三村 典正*2・鹿島 篤志*3・河野 広隆*4

要旨：港湾栈橋の梁を模擬した鉄筋コンクリート梁を対象に貼付け型シート陽極を設置し、その陽極の適切な設置間隔や配置方法を検討した。小型供試体から得られた鋼材および貼付け型シート陽極の分極特性を整理し、その分極特性を用いて FEM 解析を実施した。その結果、貼付け型シート陽極間隔や配置方法の違いに応じて鋼材への流入電流分布に偏りが生じるものの、適切な間隔や配置によりその偏りを小さくできることを確認した。また、FEM 解析より得られた流入電流密度と分極量は実験で得られたものと整合性が見られ、実験結果を FEM 解析で精度よく再現できることを確認した。

キーワード：電気防食工法, 貼付け型シート陽極, 電流分布, 分極特性, FEM 解析

1. はじめに

外部電源方式による電気防食工法は、陽極システムの形状により面状陽極方式、線状陽極方式、点状陽極方式に区分される。面状陽極方式では、他の方式に比べて防食電流を均一に鋼材へ分配させることができるメリットがある。防食電流を均一に分配できれば、防食電流の偏りを小さくでき、鋼材の腐食抑制の確実性につながると考えられる。防食電流を鋼材へ均一に分配させるためには、陽極材の設置範囲を広げることや印加電圧を大きくすることが考えられる。しかし、前者を行えば経済性が、後者を行えば通電時の陽極反応による生成物の影響が問題となる可能性がある。そのため、適切な陽極材の配置方法や間隔による検討が重要となる。

本研究では港湾栈橋の梁を模擬した鉄筋コンクリート梁である大型供試体を用いて検討した。塩化物イオンを予め混入させた大型供試体に対して、貼付け型シート陽極の間隔や配置方法を変化させた場合、各鋼材に流入する電流量と分極量にどのような差異が生じるかを確認した。さらに、得られた実験結果を計算にてシミュレーションできるかを確認した。

従来、シミュレーションの 1 つである FEM 解析で Laplace 方程式を計算し、流入電流量や分極量を求める手法が報告されている¹⁾。FEM 解析では陽極材、鋼材およびコンクリートの幾何学形状をモデル化し、境界条件に陽極材・鋼材の分極特性とコンクリート抵抗率を入力する。本研究では境界条件の算出のために、小型供試体を作製し、陽極材・鋼材の分極特性を求めた。得られた境界条件を用いて FEM 解析を実施し、大型供試体で得られた流入電流量と分極量を再現できるかを確認した。

2. 貼付け型シート陽極

面状陽極方式の 1 つである貼付け型シート陽極の概略を図-1 に示す。貼付け型シート陽極はフィルム状のカーボン陽極材とアクリル樹脂系導電性粘着材で構成された粘着型陽極材と、フッ素樹脂フィルムを積層した厚み約 1mm の積層シートである。シートはハサミ等で裁断可能であり、適当な寸法にすることができる。通電部のカーボン陽極材とコンクリート躯体面の間にはアクリル樹脂系導電性粘着材を介す構造で、露出鋼材を撤去せず有機絶縁材による被覆処理のみで設置可能である。また、通電時の陽極反応による生成物に対する対策として、シート層内の通気性確保および通気性を有するフッ素樹脂フィルムを用いている。貼付け型シート陽極への印加はチタン線を介して行われ、貼付け型シート陽極とチタン線は圧着接合端子により導通を確保している。

貼付け型シート陽極の接着性や耐久性については十分な性能を有しており²⁾、試験施工を実施している橋梁では十分な防食性能を発揮している^{3),4)}。

下記に貼付け型シート陽極の設置工程を示す。

- 1) コンクリート躯体面の下地処理
- 2) 露出鋼材がある場合、有機絶縁材による被覆処理

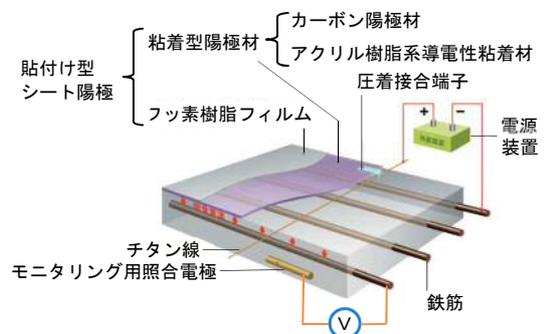


図-1 貼付け型シート陽極

*1 ショーボンド建設 (株) 補修工学研究所研究員 (正会員)

*2 ショーボンド建設 (株) 補修工学研究所副所長 (正会員)

*3 住友大阪セメント (株) 建材事業部

*4 京都大学大学院 工学研究科都市社会工学専攻 教授 工博 (正会員)

- 3) 貼付け型シート陽極の設置
- 4) エポキシ樹脂にてシート端部を封止処理

3. 大型供試体と実験概要

3.1 大型供試体の概要

大型供試体 (800×500×1100mm) は港湾栈橋の梁を模擬した鉄筋コンクリート梁である。形状と寸法、測定する鉄筋の番号および鉛照合電極の位置を図-2 に示す。コンクリートは表-1 に示す配合とし、塩化物イオン量で 10kg/m³ となるよう練混ぜ水に予め塩化ナトリウムを混入しておき、コンクリートを打設した。鋼材は黒皮が付いた状態のままとし、主鉄筋には異形鉄筋 D29、配力鉄筋には異形鉄筋 D16 を使用した。コンクリートに充填されない鋼材部はエポキシ樹脂にて被覆した。各鋼材への流入電流量を測定するため、それぞれ電気的導通のないよう配筋し、打設前に導通がないことを確認した。コンクリート内部から鋼材電位を測定するために供試体中央部に 2 か所鉛照合電極を埋設した。鉛照合電極は主鉄筋 (主 4, 7) に沿うように設置した。

本実験では貼付け型シート陽極の配置方法や間隔をいくつか検討するために、下地処理等を行わずコンクリート躯体面に貼付け型シート陽極を貼付けるのみとした。一度設置した貼付け型シート陽極はエポキシ樹脂で封止していないため剥がすことができ、新たに貼付け型シート陽極を設置することが可能である。本実験では同一の大型供試体に、図-3 に示す配置パターンで貼付け型シート陽極を設置した。貼付け型シート陽極の通電部の幅は 300mm である。

3.2 実験概要

鋼材の自然電位は、供試体面に直接貼付けるのみで測定可能な貼付け型の銀塩化銀照合電極を用いた。貼付け型シート陽極の設置前に、鋼材の腐食状況を確認した。

分極試験は貼付け型シート陽極と鋼材間に定電流電源装置 (最大電圧: 10V) を接続した後に、所定の電流量にて鋼材のオン電位が安定するまで印可し続けた。通電時の鋼材と貼付け型シート陽極のオン電位、通電遮断直後のインスタントオフ電位および通電電圧の測定を行った。通電前のオフ電位から通電遮断直後のインスタントオフ電位を減じて、鋼材・貼付け型シート陽極材の分極量を算出した。2 か所埋設した鉛照合電極の分極量がともに 100mV 以上を達成するまで、電流量を漸増させてその度に測定を実施した。なお、分極試験はコンクリート材齢が 2~7 か月の間に屋外で実施し、測定後は供試体が雨等で濡れないよう養生した。

各鋼材への流入電流量は鋼材に接合したリード線と定電流電源装置 (最大電圧: 10V) の間に 1Ω のシャント抵抗を挿入し、電圧計にて測定した。測定した電圧を 1Ω

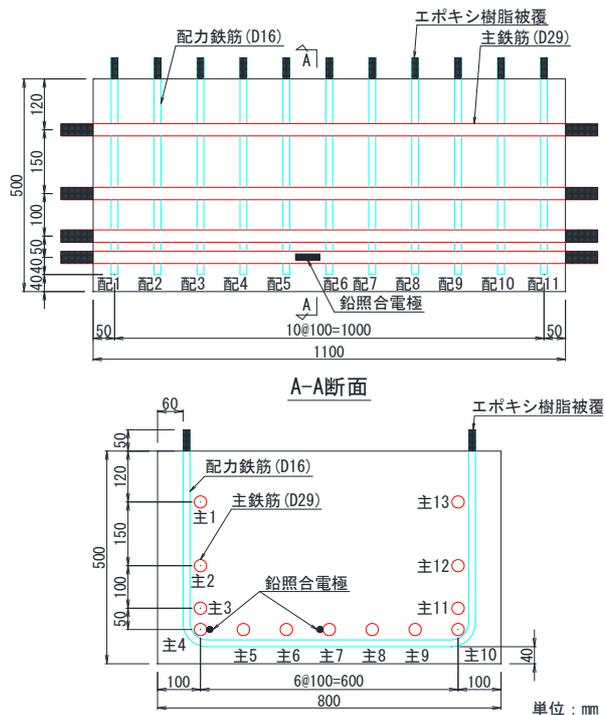


図-2 大型供試体

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	S/a (%)	スランブ (cm)	単位量(kg/m ³)				
			C	W	S	G	AE 減水剤
58.3	45.5	12	286	167	863	1083	2.86

※ 骨材の最大寸法は 20mm

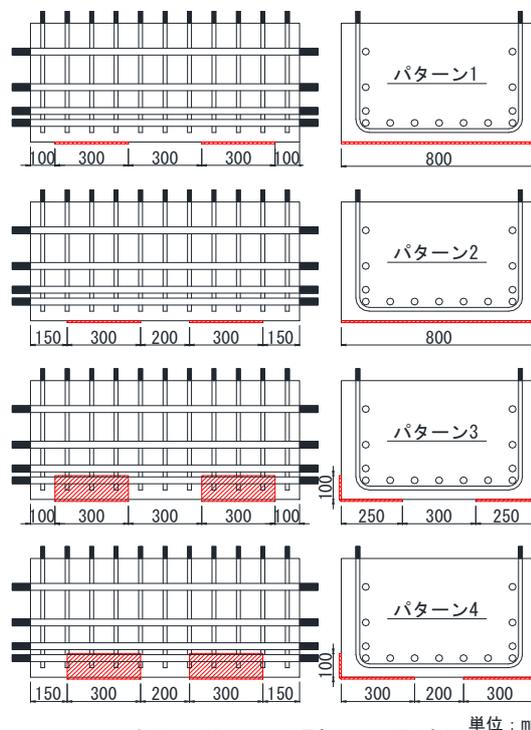


図-3 貼付け型シート陽極の配置パターン

の抵抗で除して電流量を算出した。各鋼材は外部で導通しており、使用したリード線は各リード線の抵抗が同一となるように長さを揃えた。本研究では、各鋼材への流入電流量を鋼材表面積で除した電流密度で評価した。

4. 大型供試体の実験結果

通電前に自然電位法にて鋼材の状態を確認した。鋼材の自然電位の測定結果を図-4に示す。測定時のコンクリート材齢は約2か月で、測定箇所の電位はすべて-350mVvsCSE以下となっており、ASTM C 876の鋼材腐食判定基準では「90%以上の確率で腐食がある」となった。なお、コンクリート材齢約7か月後の分極試験時においても、ひび割れ等の変状は一切発生していなかった。

分極試験において、2か所埋設した鉛照合電極の分極量がともに100mV以上を達成した時の流入電流密度にて評価を行った。

(1) パターン1と2の流入電流分布の比較

貼付け型シート陽極の間隔を変化させた場合（パターン1と2）、鋼材へ流入する電流密度分布を図-5に示す。両パターンともに貼付け型シート陽極から離れた位置にある主鉄筋（主1～3、11～13）や配力鉄筋（配1、5～7、11）への電流流入量は他の鉄筋に比べて小さいことがわかる。しかし、貼付け型シート陽極から380mm離れた主鉄筋（主1、13）においても約0.01A/m²、パターン1であれば貼付け型シート陽極から150mm離れた配力鉄筋（配6）においても約0.02A/m²の流入電流密度を確保できていた。主鉄筋へ流入した最大流入電流密度を見ると、パターン1で約0.045A/m²（主8）、パターン2で約0.04A/m²（主7）、配力鉄筋においてはパターン1で約0.08A/m²（配3）、パターン2で約0.09A/m²（配8）であった。電流が流入しにくい主鉄筋（主1、13）・配力鉄筋（配6）においても、最大流入電流密度の約25%が流入していた。

大型供試体の下面にある主鉄筋（主4～10）には両パターンとも均等に電流が流入した。配力鉄筋では貼付け型シート陽極の設置を300mm（パターン1）から200mm（パターン2）に間隔を狭めると、配力鉄筋の一部（配8）に局部的に電流量が流入する傾向にあった。

ただし、パターン2では3.5Vから5.2Vへ印加電圧を上昇させたところ、図-6のように配力鉄筋の一部（配8）への局所的な電流の流入は解消された。

(2) パターン3と4の流入電流分布の比較

貼付け型シート陽極の配置方法を変化させた場合（パターン3と4）、鋼材への流入する電流密度分布を図-7に示す。パターン3、4では大型供試体の下面より側面に向けて100mm貼付け型シート陽極を立上げており、上面に近い主鉄筋（主1～3、11～13）にも電流が流入することを期待した。しかしながら、上面に近い主鉄筋（主1～3、11～13）の他にシート陽極から離れた位置にある主鉄筋（主6～8）や配力鉄筋（配1、配5～7、配11）への電流流入量は他の鉄筋に比べて小さくなった。パターン3では貼付け型シート陽極から離れた位置にある主鉄筋（主

1、13）、配力鉄筋（配1、11）ともに約0.01A/m²が最小流入電流量である。一方、最大流入電流量は主鉄筋（主10）で約0.33A/m²、配力鉄筋（配9）で約0.51A/m²となり、最小流入電流密度は最大の2～3%程度しかない。ま

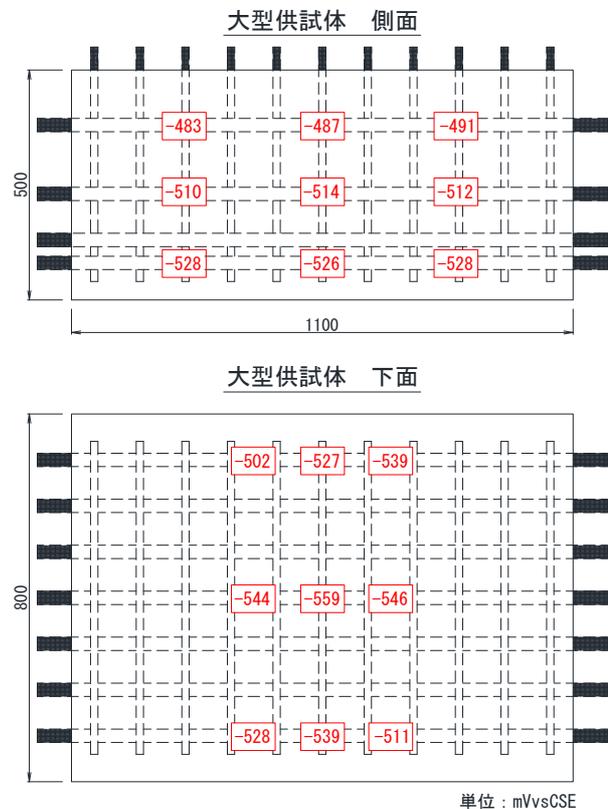


図-4 鋼材の自然電位

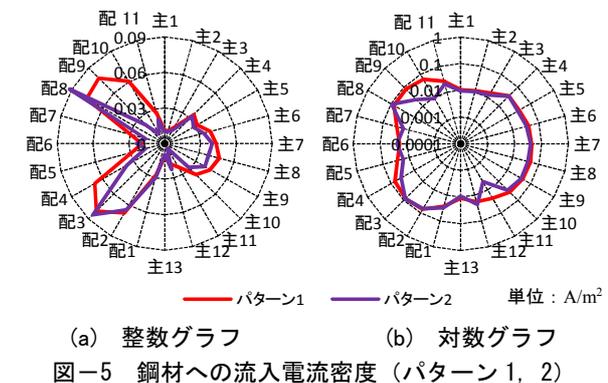


図-5 鋼材への流入電流密度（パターン1、2）

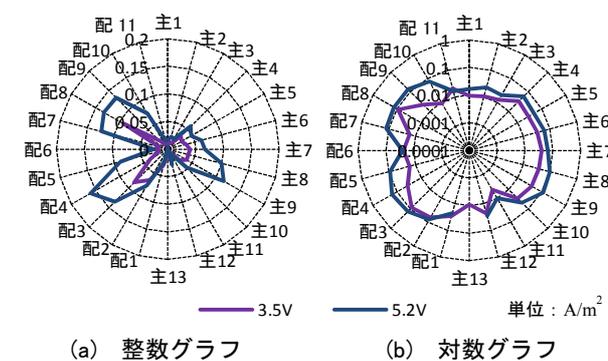


図-6 印加電圧変更時における鋼材への流入電流密度（パターン2）

た、パターン4でもその割合は1~7%程度であった。

また、電流密度分布を見ると貼付け型シート陽極の配置方法を変化させても、設置間隔が300mm(パターン3)と200mm(パターン4)で鋼材へ流入する電流密度分布に大きな差は生じていない。

パターン3, 4ではパターン1, 2に比べると流入電流量の偏りが大きくなった。これは貼付け型シート陽極を4分割したために、大型供試体の中央部の主鉄筋と配力鉄筋まで電流が分配されず、電流量に偏りが生じたと考えられる。

なお、どのパターンにおいても貼付け型シート陽極個々の電流分布に差はなかった。

(3) 分極量について

大型供試体に埋設した鉛照合電極を用いて測定した各パターンの分極量と通電時の印加電圧および流入電流量を表-2に示す。パターン1, 2では2カ所の埋設した鉛照合電極とも100mV以上分極できた。パターン3, 4では2カ所の埋設した鉛照合電極で100mV以上分極させるためには大きな印加電圧と流入電流量を必要とした。これは前述のように電流の偏りが生じているためだと考えられる。パターン3では中央の主鉄筋(主7)を定電流電源装置(最大電圧:10V)の性能内で100mV以上分極させることはできず、50mVの段階で終了とした。パターン3は主鉄筋(主7)に埋設された鉛照合電極と貼付け型シート陽極に最も距離があるため、鋼材を分極させることが困難であったと考えられる。その根拠として、パターン4ではシート間隔を狭めたために、中央の主鉄筋(主7)を100mV以上分極できた。

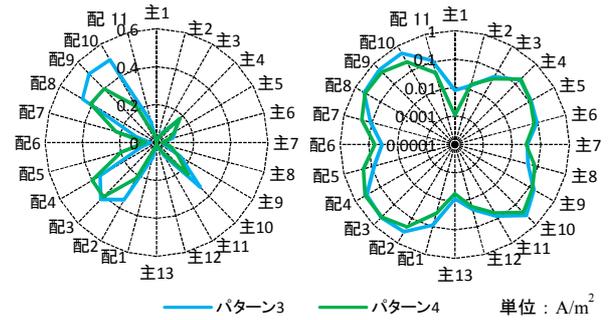
パターン1, 2の分極量は、ともに同等の値を示しており、流入電流密度分布通りに各主鉄筋(主4~10)に均一に電流が流入し、分極したと考えられる。一方、パターン3, 4ではそれぞれの分極量に差異があり、流入電流量の偏りが生じたことが原因だと考えられる。

5. 大型供試体の数値解析結果

ここでは、大型供試体で得られた鋼材に流入する電流密度分布と埋設した鉛照合電極にて測定した分極量を解析結果と比較した。

5.1 解析モデル

既往の研究⁵⁾と同様にLaplace方程式を使用し、汎用有限要素解析ソフトにて電流分布を計算した。図-8のようにコンクリート、鋼材・陽極の幾何学形状をモデル化した。主鉄筋と配力鉄筋の間に導通はなく、両者の間にはコンクリートがモデル化されており、それぞれ独立している。境界条件として鋼材・陽極に分極特性を入力した。なお、主鉄筋と配力鉄筋は同様の境界条件を与えた。コンクリートはソリッド要素、鋼材・貼付け型シ



(a) 整数グラフ (b) 対数グラフ
図-7 鋼材への流入電流密度 (パターン3, 4)

表-2 分極量とその他の値

パターン	計測日	印加電圧 (V)	流入電流量 (mA)	実験	
				主4 (mV)	主7 (mV)
1	2015/11/17 打設後約2ヵ月	2.55	80.82	151	167
2	2016/1/13 打設後約4ヵ月	3.50	63.80	176	157
3	2016/4/11 打設後約7ヵ月	9.71	350.20	209	50
4	2016/4/21 打設後約7ヵ月	8.44	304.49	269	110

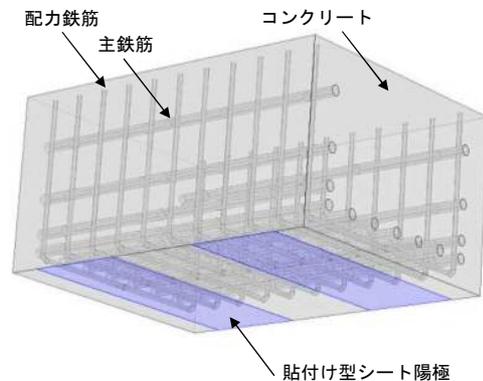


図-8 解析モデル

ト陽極は板要素を用いた。

5.2 境界条件

鋼材・陽極の分極特性は図-9に示す小型供試体を用いて求めた。小型供試体は大型供試体と同一日に打設し、塩化物イオン量も同様とした。小型供試体に貼付け型シート陽極を設置し、鋼材・陽極材の電流流入量は大型供試体と同様に鋼材・陽極材に接合したリード線と定電流電源装置(最大電圧:10V)の間に1Ωのシャント抵抗を挿入し、電圧計にて測定した。小型供試体の上面中央部に鋼材の分極量を測定するために、貼付け型の銀塩化鉛照合電極を設置した。

小型供試体にて分極試験を実施して鋼材と貼付け型シ

ート陽極の分極特性を求めた。鋼材・陽極の分極特性は図-10のように2つの対数関数で表現する。分極量が小さい場合(case1)にはオームの法則が成立し、その後、分極量が大きくなる場合(case2)にはオームの法則が成立しなくなる。そのため、分極量が小さい場合に対数近似すれば、解析精度が若干低下することになる。しかし、電気防食工法では防食管理基準として分極量 100mV シフトが適用されているため、分極量が小さな場合に解析精度へ与える影響は小さいと思われる。分極特性は 5℃ 60%RH, 20℃60%RH の環境下にてそれぞれ測定した。分極特性の係数一覧を表-3 に示す。

大型供試体での分極試験の実施日が異なるため、実施日の気温に応じて分極特性を使い分けた。また、コンクリート抵抗率はコンクリートの乾燥の進行や温度状況によって変化するため 100~300Ω・m の値を適宜選定し、計算した。

5.3 解析結果

(1) 流入電流分布について

図-11 に実験と解析の鋼材への流入電流密度を示す。主鉄筋・配力鉄筋ともに流入電流密度分布の形状を表せており、どのパターンにおいても実験値と解析値の整合性が確認できる。また、流入電流密度の値も実験と解析ではほぼ同等といえる。ただし、貼付け型シート陽極から離れた位置にある主鉄筋(主1~3, 11~13)や配力鉄筋(配1, 6, 11)においては解析値の方が実験値よりも小さくなる傾向にあった。貼付け型シート陽極から大きく離れた鋼材の流入電流密度の推定には課題が残るものの、安全側の評価になっている。

パターン2では配力鉄筋の流入電流密度分布に差異が

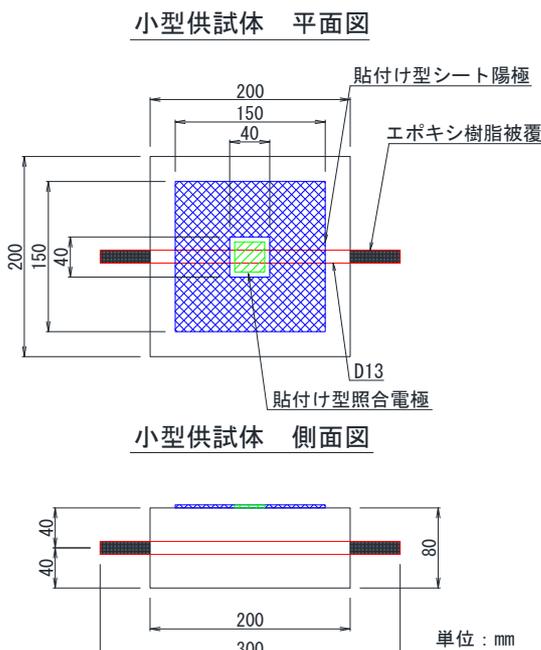


図-9 小型供試体

見られる。解析では、配力鉄筋における電流分布の偏りが実験よりも小さくなっている。ただし、前述のとおり実験にて印加電圧を上げると、配力鉄筋における電流分布の偏りが解消されていることから、実験に起因する要因によりパターン2では実験と解析に差が生じたと考えられる。

(2) 分極量について

表-4 に実験と解析による鋼材の分極量を示す。解析では、パターン3の中央部の主鉄筋(主7)の分極は見られなかった。これは、前述のように貼付け型シート陽極から大きく離れているためだと考えられる。パターン3の主鉄筋(主7)の分極量測定位置はどのパターンよりも貼付け型シート陽極から離れている。

パターン1, 2では実験と同様に、主4と主7で同程度の分極量が解析で得られた。また、パターン3, 4でも実験と同様に、主4と主7で分極量の差が生じており、そのことを解析でも表すことが出来ている。

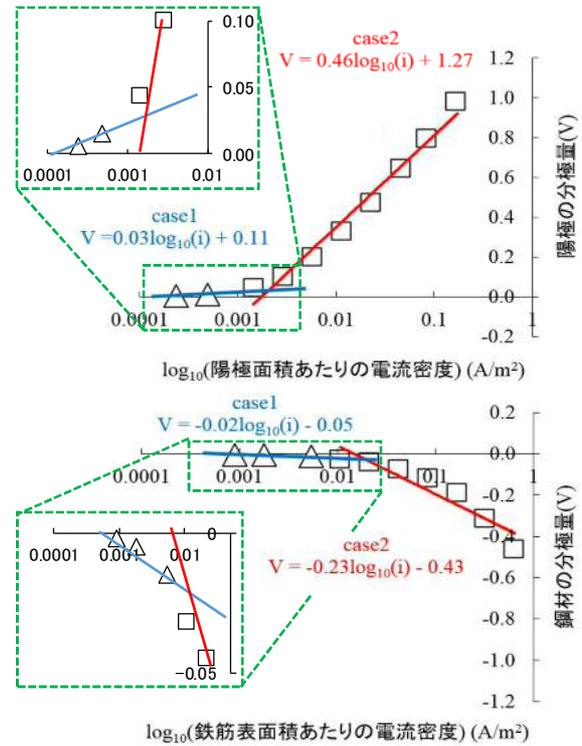


図-10 鋼材・陽極の分極特性 (5℃)

表-3 分極量と印加電圧

		case1		case2	
		交換電流密度 (A/m²)	勾配 (V)	交換電流密度 (A/m²)	勾配 (V)
鋼材	5℃	7.59E-04	-0.02	1.48E-02	-0.23
	20℃	9.64E-05	-0.01	2.49E-02	-0.23
貼付け型シート陽極	5℃	1.55E-04	0.03	1.75E-03	0.46
	20℃	2.29E-05	0.01	2.65E-03	0.62

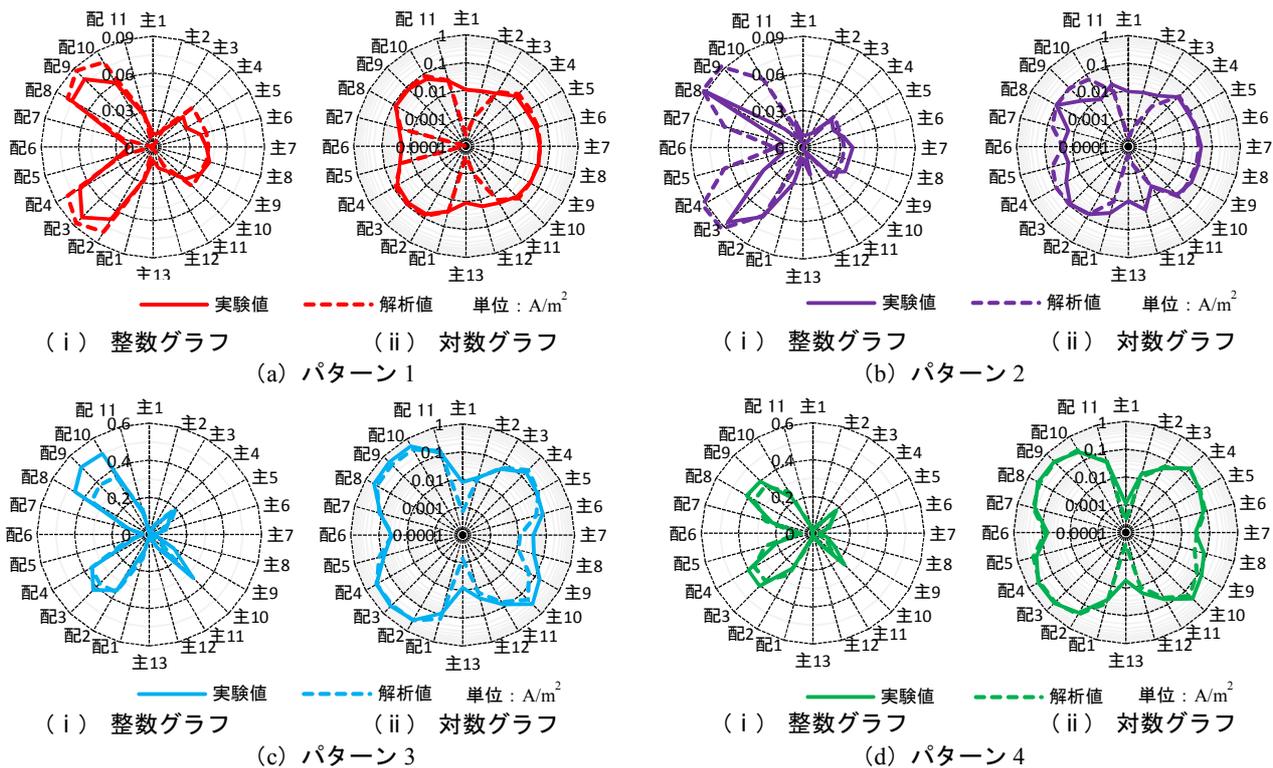


図-11 鋼材への流入電流密度 (パターン1~4)

表-4 実験と解析による鋼材の分極量

パターン	実験		FEM 解析	
	主 4	主 7	主 4	主 7
	(mV)	(mV)	(mV)	(mV)
1	151	167	114	105
2	176	157	128	108
3	209	50	211	0
4	269	110	292	137

全体的に若干誤差があるものの、実験に近い値を求められている。

6. まとめ

塩化物イオン量 10kg/m^3 を含有した供試体を用いた実験と解析で以下の知見を得た。

- (1) 適当な間隔・配置方法で貼付け型シート陽極を設置すると、流入電流量の偏りを抑制できる。
- (2) 貼付け型シート陽極の設置間隔を狭くすると局所的に流入電流量が大きくなり、流入電流量の偏りが大きくなる恐れがある。
- (3) 貼付け型シート陽極の配置方法によっては印加電圧が過大となり、 100mV 以上の分極量が確保できなくなる可能性がある。
- (4) 小型供試体から得た分極特性を入力して FEM 解析したところ、流入電流量と分極量の傾向を比較的精度良く再現することができた。

今後、塩化物イオン量の差に着目した実験と解析による検討の実施を予定している。

参考文献

- 1) 皆川浩, 増田正孝, 川俣孝治: 有限要素法による鉄筋コンクリートの電気防食の電流分布に関する検討, 「コンクリート構造物の長期性能照査支援モデル」に関するシンポジウム, Vol.JCI-C64, pp.351-356, 2004
- 2) 三村典正, 二木有一, 福手勤: 品質改善と通電管理の向上を目的とした貼付け型シート陽極による電気防食工法の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1192-1197, 2014
- 3) 三村典正, 太田翔, 黒川公人, 河野広隆: 通電方法が電気防食工法の防食効果に与える影響に関する検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.16, pp.293-298, 2016.10
- 4) 三村典正, 黒川公人, 鹿島篤志, 河野広隆: 港湾構造物の維持管理の向上に着目した電気防食工法の適用に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1161-1166, 2016
- 5) 鹿島篤志, 佐藤唯, 山本誠, 皆川浩, 久田真: FEM 解析による電気防食工法の電流と分極量分布の再現性に関する実寸大供試体を用いた検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.12, pp.273-280, 2012