

論文 外付け線状陽極を用いた電気防食システムの通電性状

皆川 浩^{*1}・川俣 孝治^{*1}・増田 正孝^{*2}・荒木 弘祐^{*3}

要旨：電気防食に用いる線状陽極は，部材表面を切削し設置する方法が一般的である。この場合，切削による部材への影響や陽極と鉄筋との距離など，設計および施工の各段階において詳細な検討や配慮が必要となる。本研究では，この種の設計・施工過程の簡略化を目的として，外付けフレームを用いた線状陽極設置方法を開発した。そして，本陽極方式を適用した電気防食システムの通電性状を実験的および数値解析的に検討した。その結果，本陽極方式は，防食電流を広く分布させるための陽極材 - 鉄筋間距離が確保でき，従来の陽極方式と同等の性能を有することが確認できた。

キーワード：電気防食，線状陽極，防食電流，分極試験，有限要素法

1. はじめに

1.1 本研究の背景

海水飛沫や凍結防止剤に起因する外来塩分や，海砂の使用などに起因する内在塩分により，コンクリート構造物中の鋼材が腐食し，コンクリート構造物の耐力が低下する。この劣化現象は塩害と呼ばれ，近年社会的に大きな問題となっている。このような現状を受け，各方面においてさまざまな補修や防食対策工法が検討されている。これら工法のうち，電気防食工法は厳しい塩害環境下でも有効かつ抜本的な防食効果が得られる方法として注目され，平成13年には設計施工指針（案）¹⁾が発刊されるに至っている。

ところで，コンクリート構造物に対する電気防食工法は，その陽極材の形状により，面状陽極方式，線状陽極方式，点状陽極方式に分類される¹⁾。このうち線状陽極方式は，施工後の死荷重増加が小さいなどの長所を有する。その一方，部材表面に溝を切削してそこに陽極を設置するため，部材断面やかぶり厚さが極めて小さい構造物に線状陽極方式を適用する場合，切削による部材への影響や陽極と防食対象鋼材との距離などについて，設計および施工の各段階におい

て詳細な検討や配慮が必要となっている。

1.2 本研究の目的と構成

そこで本研究では，この種の設計・施工過程の簡略化を目的として，外付フレームを用いた線状陽極の設置方法（以下，外付線状陽極方式）を開発した。そして，本方式を適用した電気防食システムの通電性状を数値解析的および実験的に検討した。

数値解析的な検討を実施するにあたっては，既往の研究において構築した有限要素法による方法を用い，鉄筋に流入する防食電流量の分布を計算した。一方，実験的な検討では，NaClをあらかじめ混和させた鉄筋コンクリート供試体に対して分極試験を実施した。

なお，本研究では，外付線状陽極方式の他に，溝を切削してそこに陽極材を設置する従来の線状陽極（以下，溝切線状陽極方式）および面状陽極方式についても同様の検討を行い，これらを比較することで，外付線状陽極方式の性能を確認することとした。

2. 外付線状陽極方式の概要

外付線状陽極方式で用いる陽極システムの断

*1 住友大阪セメント（株） 建材事業部 博(工) (正会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院材料工学部門 助教授 工博

*3 西日本旅客鉄道株式会社 鉄道本部 施設部 工修 (正会員)

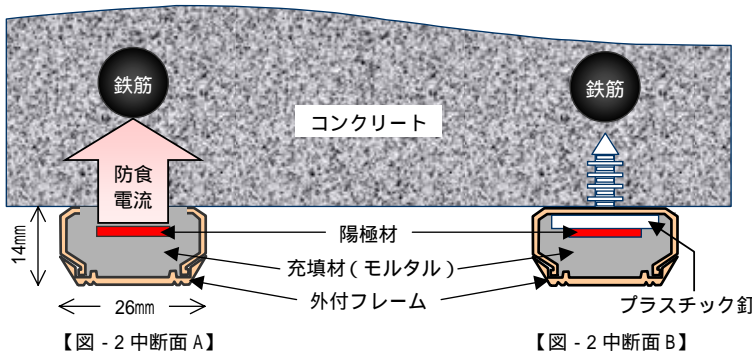


図 - 1 陽極システムの断面概略図



写真 - 1 外付線状陽極方式の設置例

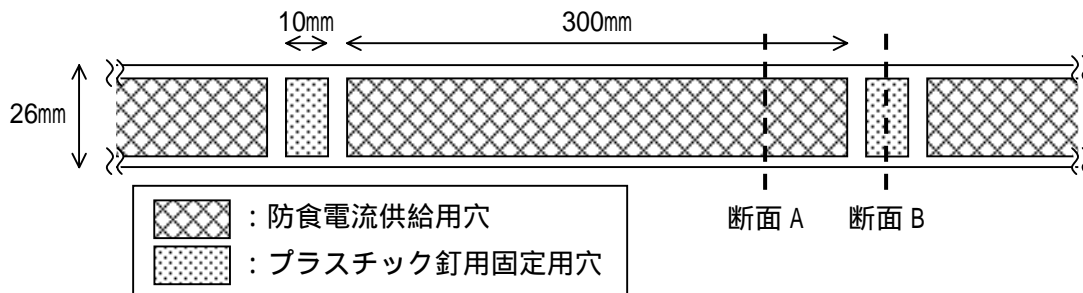


図 - 2 外付フレーム底面の概略図

面概略図を図 - 1 に示す。また、外付フレームがコンクリート表面と接する部分（外付フレーム底面）の概略を図 - 2 に示す。さらに、本システムの設置工程を図 - 3 に示す。

これらの図に示すように、本システムでは、外付フレームをプラスチック釘によりコンクリート部材に固定し、その後、陽極材を外付フレーム内に設置する。そして、充填材を外付フレーム内に充填することにより、陽極材とコンクリート部材を電氣的に一体化させる。なお、本システムの設置例を写真 - 1 に示す。

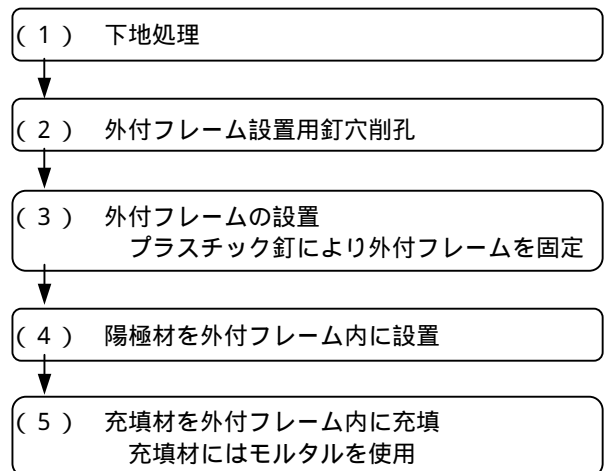


図 - 3 陽極システムの設置工程

3. 検討対象供試体と実験および数値解析の概要

3.1 検討対象供試体と実験の概要

(1) 検討対象供試体の概要

供試体は、外付線状陽極方式、溝切線状陽極方式、面状陽極方式の 3 種類である。供試体概要を図 - 4、陽極設置位置を図 - 5 に示す。

外付および溝切線状陽極方式では、陽極材を長さ 400mm の鉄筋に沿って配置した。面状陽極方式では、陽極材を 2 枚に分割して配置し、それぞれについて電流分配材であるディストリビュータを接続した。

なお、これら 2 枚の面状陽極は電氣的に絶縁されるように設置した。線状陽極材および面状陽極材はそれぞれチタンリボンメッシュおよびチタンメッシュを用いた。

供試体内部には打設時に鉛照合電極を 1 供試体あたり 3 本埋め込んだ。これら照合電極にて測定した鉄筋の自然電位を図 - 6 に示す。

(2) 使用材料と配合

供試体作成に使用したコンクリートの水セメント比、単位水量、細骨材率はそれぞれ $W/C=60\%$ 、 $W=165\text{kg/m}^3$ 、 $s/a=44.8\%$ であり、使

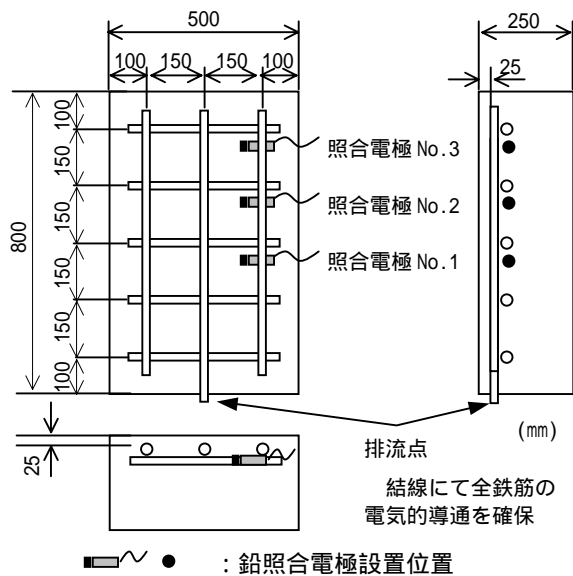


図 - 4 供試体概要（配筋図）

用セメントは普通ポルトランドセメントである。また、コンクリート練り混ぜ時に、内在塩分として 5kg/m^3 の NaCl を添加した。さらに、鉄筋は D19 異形鉄筋を使用した。

(3) 打設および養生

コンクリートの打設は、棒状パイプレータを用いて振動を与えながら行った。打設終了後、初期養生として打設面を湿ったウェスで覆い、打設後約 24 時間で脱型を行った。なお、打設約 2 時間後において、陽極設置面の目荒しを実施した。その後、ブルーシートにて供試体を包み、屋外にて約 1 ヶ月間の気中養生を行った。

この後、それぞれの供試体に外付線状陽極、溝切線状陽極、面状陽極を設置し、再びブルーシートにて覆い、約 1 ヶ月間、屋外にて気中養生を実施した。なお、溝切線状陽極の溝切深さは 5mm である。

(4) 通電方法と鉄筋電位の測定方法について

図 - 7 に示すように、本研究で実施した通電方法は A-type, B-type, C-type の 3 種類である。

A-type は線状陽極方式のみを対象とし、線状陽極 1 本の防食電流分配性状を確認する目的で実施した。B-type は、陽極設置面端部から外側の部分に配筋されている鉄筋への防食電流分配性状を確認する目的で実施した。さらに C-type は、防食対象面に対して陽極を均等に配置した

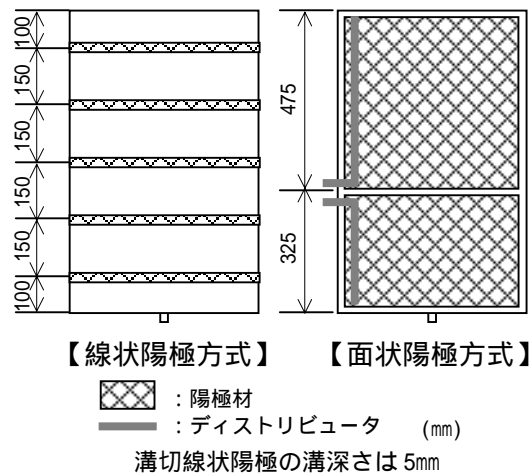


図 - 5 陽極設置位置

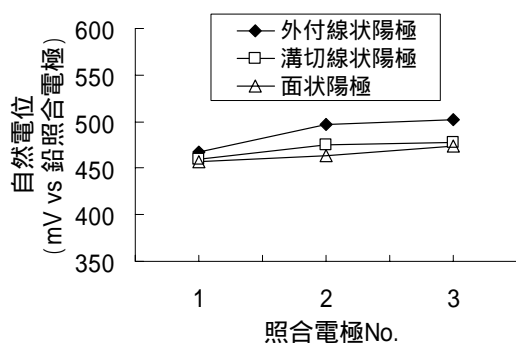


図 - 6 供試体中铁筋の自然電位

時の分極性状を確認する目的で実施した。なお、直流電源の負極と接続する排流点は、全供試体とも図 - 4 に示す位置とした。

以上の供試体および通電方法に対して、実験的および数値解析的に陽極の通電性状について検討を実施した。

鉄筋の電位は、コンクリート中に埋め込んだ鉛照合電極を用いて、高入力抵抗の直流電圧計の端子を鉛照合電極ケーブルと排流端子とに接続することで測定した。なお、通電中の鉄筋電位は通電を停止した直後の電位（インスタントオフ電位）である。

3.2 数値解析の概要

本研究では数値解析による検討を行うにあたり、既往の研究²⁾で構築した方法を用いた。

本方法で使用する支配方程式は、以下に示す Laplace 式である。

$$-\nabla(\sigma \nabla u) = 0 \quad (1)$$

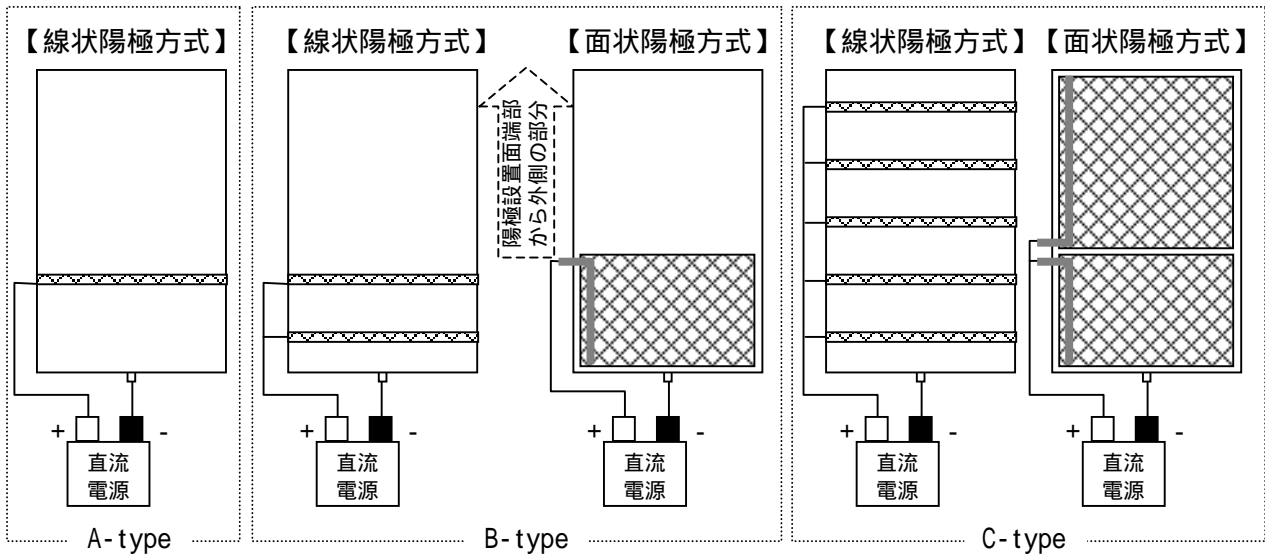


図 - 7 通電方法の種類

ここで, u : コンクリート中での内部電位, σ : コンクリートの導電率である。

また, 境界条件となる陽極と鉄筋表面の電気化学的な分極現象は, 飽和水酸化カルシウム水溶液中で計測した動分極曲線により実験的に決定した。コンクリートの導電率は, コンクリートの抵抗率を $200\text{k-}\Omega\cdot\text{mm}$ として決定した。

さらに, 各対象供試体の計算実施に際しては, 図 - 8 に示すような2次元簡易モデルを用いた。

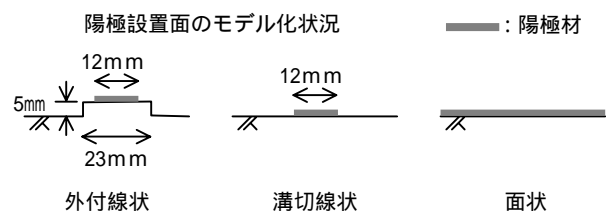
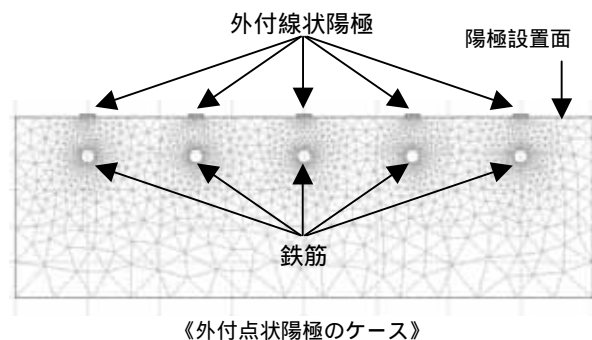


図 - 8 数値解析に用いたモデル

4. 実験および数値解析結果

本章では, 実験および数値解析結果をもとに, 各陽極の通電性状に関する検討を行った。また, それに先立ち, 線状陽極の接地抵抗¹⁾を LCR メータにて測定した。

4.1 線状陽極の接地抵抗

図 - 9 に外付線状陽極方式および溝切線状陽極方式の接地抵抗を示す。これを見ると, 外付線状陽極方式の接地抵抗が溝切線状陽極方式のそれよりも大きいことがわかる。この原因は以下の2点が考えられる。1点目は, 外付線状陽極方式の陽極材から鉄筋までの距離が, 溝切線状陽極方式のそれと比較して大きいことである。2点目は, 外付線状陽極方式の防食電流供給面積が, 外付フレームのために小さくなったことに起因

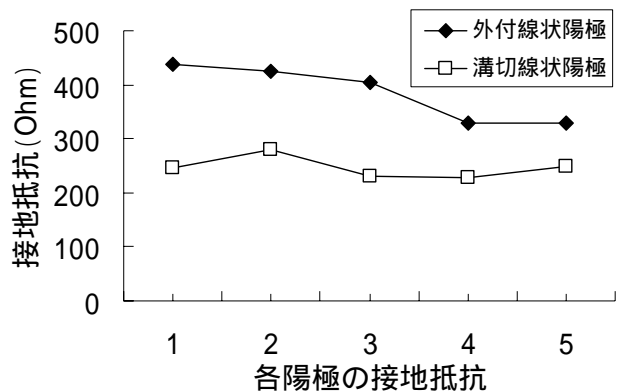


図 - 9 線状陽極の接地抵抗

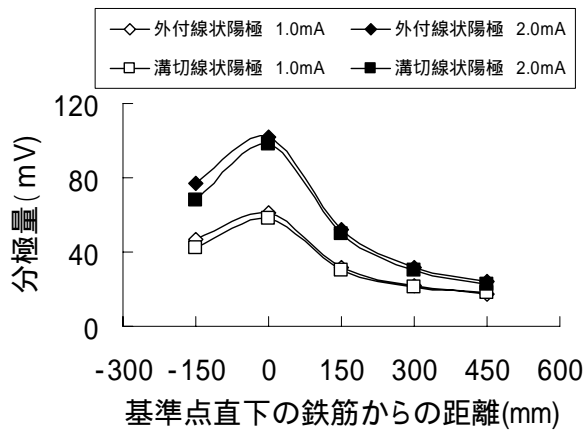


図 - 10 通电 A-type の実験結果(分極量)

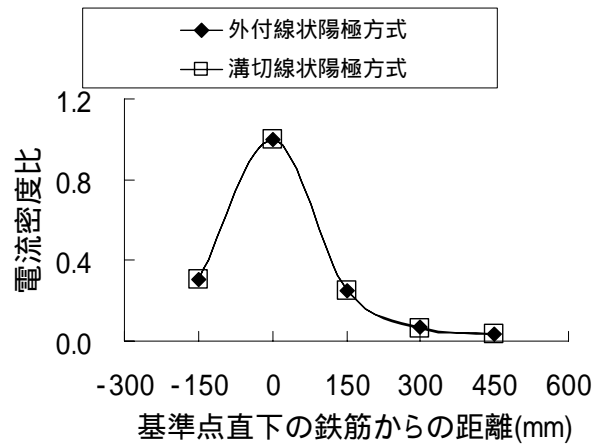


図 - 11 通电 A-type の解析結果(電流密度比)

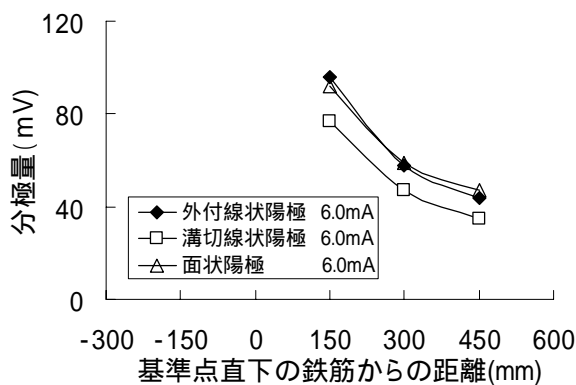


図 - 12 通电 B-type の実験結果(分極量)

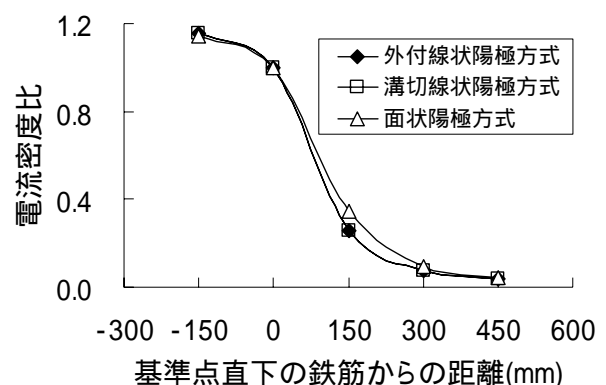


図 - 13 通电 B-type の解析結果(電流密度比)

するものと思われる。

4.2 線状陽極 1 本の通电性状 (A-type の検討)

図 - 10 および図 - 11 に通电 A-type の実験結果 (通电電流: 1.0, 2.0mA) および解析結果を示す。

なお本研究では、解析結果の出力値として電流密度比を用いた。ここで電流密度比とは、ある鉄筋に流入する電流密度 (vs 鉄筋表面積) を、基準となる鉄筋に流入する電流密度 (vs 鉄筋表面積) で除した値である。基準となる鉄筋は、排流点から 250mm の位置にある鉄筋 (図 - 4, 図 - 7 参照) とした。

本研究で用いた解析方法において、この電流密度比は通电する電流値によって変化しない。これは、電流分布が供試体の幾何形状のみに依存すると仮定したためである。

図 - 10 および図 - 11 を見ると、外付線状陽極方式と溝切線状陽極方式の通电性状はほぼ同等と判断できる。

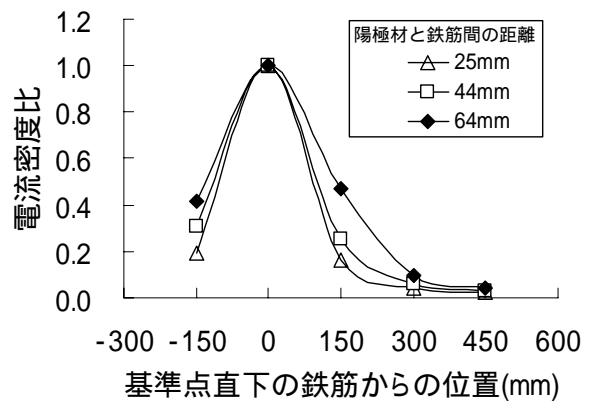


図 - 14 陽極材と鉄筋間の距離が電流密度比に与える影響 (通电 A-type の解析結果)

4.3 陽極設置面端部から外側に配筋されている鉄筋への通电性状 (B-type の検討)

図 - 12 および図 - 13 に通电 B-type の実験結果 (通电電流: 6.0mA) および解析結果を示す。これらより、外付線状陽極方式の陽極端部から外部での通电性状は、面状陽極方式のそれとほぼ同等であると判断できる。

一方、外付線状陽極方式と溝切線状陽極方式の実験結果 (図 - 12) を見ると、外付線状陽極

方式の方が溝切線状陽極方式よりも分極量が大きく、電流の分配能力が高いことがわかる。この結果は、図 - 10 でも見られる傾向である。これは、外付線状陽極方式の方が溝切線状陽極方式よりも陽極材と鉄筋間の距離が大きく、電流を広く分配する能力を有したためと考えられる。

この考察を裏付ける結果として、図 - 14 を示す。これは、陽極材と鉄筋間の距離をパラメータとして実施した感度解析結果である。なお解析対象は通電 A-type の溝切線状陽極供試体である。これを見ると、陽極材と鉄筋間の距離が大きいほど、電流が広く分配されることがわかる。外付線状陽極方式では、その構造上、溝切線状陽極方式よりも陽極材と鉄筋間の距離を確保しやすい。このために、外付線状陽極方式において電流が広く分配されたものと思われる。従って、外付線状陽極方式は、かぶりが比較的小さいコンクリートに対して有効な方式であると考えられる。

なお、図 - 11 および図 - 13 の解析結果に上記の結果が反映されなかったのは、外付線状陽極方式および溝切線状陽極方式における陽極材と鉄筋の距離の差が、実験供試体では 10mm 以上であるのに対し、解析モデルでは 5mm と小さかったためと考えられる。

4.4 防食対象面積に一樣に陽極を設置した時の通電性状 (C-type の検討)

図 - 15 に通電 C-type の実験結果を示す。この実験では、分極試験を行った。これを見ると、外付線状陽極方式の分極性状は他の方式と同等であることが認められる。これは、陽極材が防食対象鉄筋に対して適切に配置されたためと考えられる。これより、外付線状陽極では、陽極設置位置を適切に決定することで、従来の方式と同等の通電性状が得られるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、外付線状陽極方式を開発し、その通電性状を数値解析および実験により検討した。以下に得られた知見をまとめる。

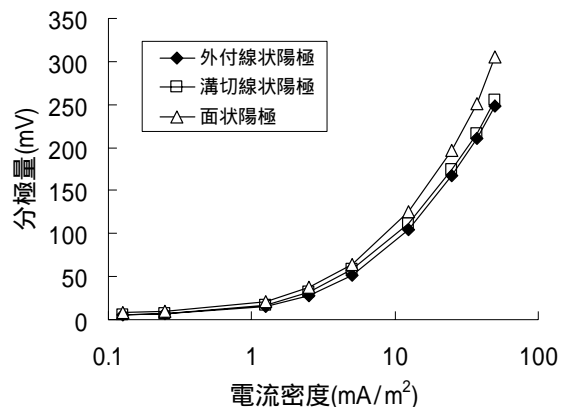


図 - 15 通電 C-type の実験結果 (分極試験)

- (1) 外付線状陽極方式では、陽極の接地抵抗が他方式と比較して大きくなる。これは陽極材と鉄筋間の距離が大きくなることに一因がある。しかし一方で、本方式は防食電流を均一に分配するために必要な陽極材と鉄筋間の距離を確保しやすい。このため、本方式はかぶりが比較的小さい部材に対する適用性が高いと考えられる。
- (2) 外付線状陽極方式は、陽極設置位置を適切に決定することで、従来の方式と同等の通電性状が得られることが、実験的および数値解析的に示された。

謝辞

本研究遂行にあたり、五洋建設(株)内藤英晴部長、小笠原哲也係長ならびにマサル工業(株)から多大なご協力を頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会 電気化学的補修工法研究小委員会: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,(社)土木学会,2001
- 2) 増田正孝,李恩周,川俣孝治,皆川浩,荒瀬圭介:コンクリート構造物の電気防食における FEM による防食性の評価検討,土木学会第 58 回年次学術講演会,第 V 部門,V-055,2003.10