

論文 電気防食による防食電流分布に関する実験的検討

山本 誠^{*1}・武若 耕司^{*2}・川俣 孝治^{*3}

要旨: 本研究では、電気防食法における陽極の施工間隔、陽極と鉄筋との間隔および塩化物の有無がコンクリート中の防食電流分布に与える影響について検討を行った。実験にあたってはコンクリート中の等電圧分布を測定し、その結果から陽極施工範囲外のコンクリート中での防食電流の流れを把握するとともに、鉄筋各部ごとの防食効果を定量評価するため、独立した複数の鉄筋を電氣的に一本の鉄筋となるように短絡したモデル鉄筋を用い鉄筋上での防食電流分布の測定も行った。その結果、陽極施工範囲外の鉄筋の防食効果が十分に発揮できる陽極施工間隔を定量的に把握することができた。

キーワード: 電気防食, 陽極施工間隔, 防食電流, 電流線

1. はじめに

電気防食法は、コンクリート構造物に対する塩害補修工法として信頼性が高く、効果的な防食法である。今後は、電気防食法がより効果的で、しかも経済的なものとなるための防食設計・施工システムの確立が課題となる。例えば、十分にその防食効果を発揮できる陽極の施工範囲が明確になれば、施工の合理化を図ることができる。一方、電気防食の防食電流は、その施工上必ずコンクリートを介して鋼材に供給される。従って、確実に無駄のない電気防食システムを開発するためには、コンクリート中での防食電流の流れについて適確に把握することが重要である。そこで、本研究では、陽極の施工状況、陽極と鉄筋との間隔および塩化物が防食電流の流れに及ぼす影響について検討するため、まず、コンクリート中における防食電流の分布を実験的に把握することを試みた。さらに、独立した複数の鉄筋を電氣的に一本の鉄筋となるように短絡したモデル鉄筋を用い、鉄筋上での流入電流分布の把握およびその値と防食効果の関係について定量的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本実験には、**図-1**に示す 165×1105×100 mm のモルタル供試体を用いた。モルタルは、セメントとして普通ポルトランドセメント、細骨材として富士川産川砂（比重：2.62、吸水率：1.6）を使用し、水セメント比 60%、目標フロー値を 200±10 mm として、**表-1**に示す配合で作製した。実験にあたっては、陽極と鉄筋との間の垂直距離（以下、陽極－鉄筋間隔と記す）および塩化物の有無が防食電流の流れに及ぼす影響を検討するため、陽極－鉄筋間隔を 40, 60, 80 mm とし、それぞれについてモルタル中にあらかじめ塩化物を 10kg/m³ 混入したものと混入していないもの、計 6 体の供試体を作製した。これら実験の要因と水準を**表-2**に示す。供試体中には、陽極の施工間隔と鉄筋の通電状況との関係を明確にするため供試体上部から 20 mm の位置に長さ 250 mm のチタンメッシュ陽極 3 枚と 300 mm の

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	単位 (kg/m ³)			
		W	C	S	NaCl
60	2.7	308	514	1387	10

*1 鹿児島大学大学院 工学研究科海洋土木工学専攻（正会員）

*2 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科 工博（正会員）

*3 住友大阪セメント（株） 工博（正会員）

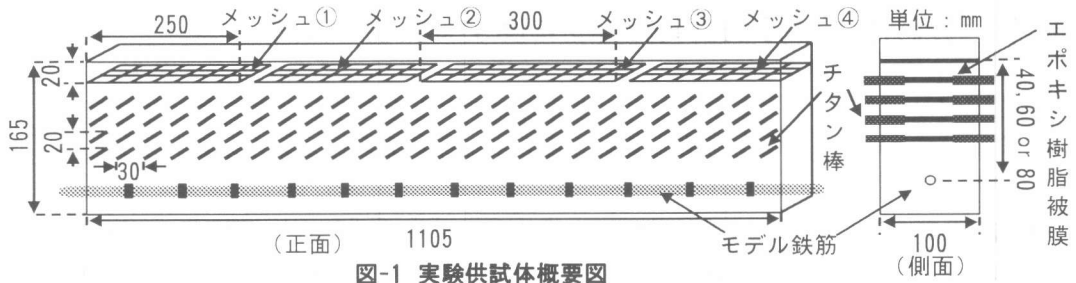


図-1 実験供試体概要図

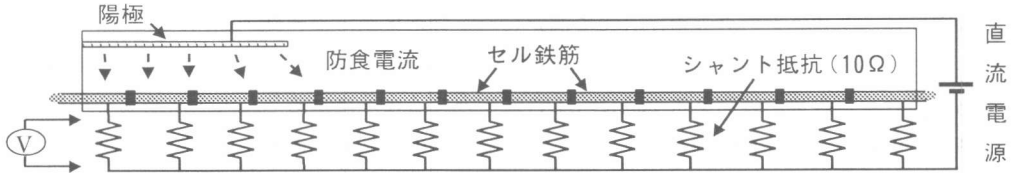


図-3 セル鉄筋の短絡回路と防食電流の測定方法

チタンメッシュ陽極 1 枚をそれぞれ 15 mm の施工間隔をあけて配置した。なお、各陽極は、電氣的に独立とした。また、供試体中には、リード線を接続した長さ 83 mm、 $\phi 10$ mm の異形鉄筋を厚さ 2 mm のゴム板を介して 13 本連結し、リード線を全て短絡すれば電氣的には一本の鉄筋になるモデル鉄筋を埋設した。以下、各小鉄筋片をセル鉄筋と呼ぶ。なお、セル鉄筋はリード線で短絡しない限り電氣的に独立していることをあらかじめ確認している。このセル鉄筋の拡大図を図-2 に示す。さらに、通電時の陽極一鉄筋間のモルタル中における電位分布を測定するため¹³⁾、棒状に切断したチタンメッシュを図-1 に示すように、縦 20 mm、横 30 mm の間隔でモルタル中に埋設した。なお、電位分布測定の際、供試体表面を流れる電流の影響を避けるため、各チタン棒の両端からコンクリート内部 5 mm までの区間には、図-1 に示すようにエポキシ樹脂による被覆を施した。

2.2 通電方法

本実験における通電方法は、陽極をチタンメッシュ、陰極を 13 本のセル鉄筋から構成されたモデル鉄筋とし外部電源方式の定電流制御による通電を温度 20°C、湿度 80% の恒温恒湿室で行った。通電時の各セル鉄筋の短絡状況を図-3 に示す。実験にあたっては、電気防食効果を十分に発揮できる陽極施工状況、特に陽極施工間隔を明確にするため、図-1 に示す①~④のチ

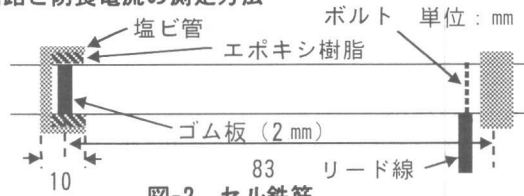


図-2 セル鉄筋

表-2 要因と水準

塩化物	有り, 無し
陽極-鉄筋間隔	40, 60, 80 mm
陽極施工間隔	無限, 330, 595 mm
通電電流量	1, 5mA

タンメッシュの中から通電時に陽極として用いるものの組合わせを変化させることにより以下に示す検討を行った。

まず、陽極最端部から陽極施工範囲外へどの程度離れた鉄筋まで防食電流が供給され、防食効果を発揮できるのか検討するため、図-1 に示すチタンメッシュ①のみを陽極とし、通電電流量 1mA および 5mA で通電を行った。

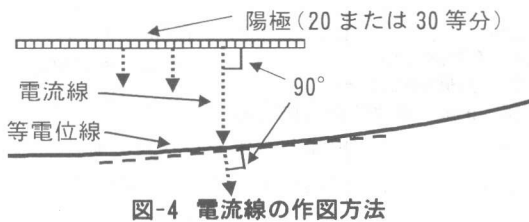
次に、陽極を施工する際に、隣接する陽極の施工間隔をある程度離れた場合を想定した実験を行った。現在、陽極の施工間隔が 300 mm 程度までは、鉄筋の防食効果に影響がないのではないかとされているが、これを定量的に評価するために、陽極施工間隔が 330 mm となるようにチタンメッシュ③を除く①、②、④を短絡して陽極とし、通電を行った。さらに、330 mm 以上陽極施工間隔を開けた場合の検討を行うため、陽極施工間隔が 595 mm であるチタンメッシュ①、④を陽極として同様に通電を行った。なお、こ

れら2ケースでは、通電電流量を1mAとした。

2.3 電圧分布の測定および電流分布の作図

通電時のモルタル中の電圧分布の測定にあたっては、通電後鉄筋の電位が安定したことを確認した後、マルチメーターを用いて電源電圧、陽極と各チタン棒間の電位差およびモデル鉄筋と各チタン棒間の電位差を各々測定した。さらに、通電前に同様の方法で測定したモルタル中の各点の電位差で補正することによって通電時の陽極に対するモルタル中の電圧分布を求めた。

以上の方法により得られた電圧分布に対し通電を行ったチタンメッシュの領域を20等分あるいは30等分し、各区間から等電位線に向かって垂直に電流線をひき、電流線が等電位線と交わった場合は、等電位線に垂直になる方向に電流線の方法を修正することによって防食電流の流れを推定した。図-4に電流線の作図方法を示している。



2.4 防食電流量の測定

陽極からモルタル中の鉄筋に供給される防食電流量の分布を通電時にそれぞれのセル鉄筋へ流入する防食電流量から求めた。測定方法は、供試体内の各セル鉄筋に10Ωのシャント抵抗を直列に接続し、マルチメーターを用いて測定した各抵抗の電圧値から各セル鉄筋に流入する防食電流量を算出した。図-3には、防食電流量の測定回路も併せて示してある。

3. 実験結果および考察

3.1 防食電流の流れに関する検討

図-5には、チタンメッシュ①のみを陽極として通電電流量1mAで通電を行った場合に得られた等電位線と電流線ならびに、併せて測定した鉄筋の分極量の分布について、一例を示した。

この結果から、陽極直下のモルタル中では、等電位線は陽極とほぼ平行であり、さらに、電流線もほぼ均一に、しかも密に描かれていることから、陽極直下の鉄筋には防食電流が十分に流れ込んでいる状況を確認できる。しかし、陽極施工範囲外のモルタル中では、陽極から離れるに従って、電流線が不規則な流れを示し、陽極直下に比べて疎に描かれていることから、陽極から離れた鉄筋には十分な防食電流が供給されにくい状況となり、防食効果が低下することが推測された。これを裏付ける結果として陽極直下の鉄筋分極量がほぼ一定であるのに対して、陽極施工範囲外の鉄筋分極量は、陽極から離れるにしたがって陽極直下の鉄筋分極量に比べしだいに分極量は低下することが確認できる。これらの状況は、塩化物の有無や陽極-鉄筋間隔の如何に関わらずほぼ同様であった。

また、図-6には、陽極施工間隔を330mmだけ開けて通電を行った場合の通電実験から得られた等電位線、電流線および鉄筋分極量の一例を、通電直前に別途、二重対極式交流分極測定装置を用いて測定した鉄筋の見かけの分極抵抗と併せて示した。なお、図中、電流線の一部が交差する状況が見られるが、これは図-4に示した作図方法の精度上の問題である。但し、これによって電流分布の検討の支障となることはないと考え、ここでは、あえて作図結果をそのまま示した。この場合においても、陽極直下のモルタル中では、等電位線が陽極とほぼ平行であり、電流線が均等かつ密に描かれていることから、陽極直下の鉄筋には十分な防食電流が流れ込んでいるものと考えられた。一方、陽極施工範囲外のモルタル中では、それぞれの陽極からの電流線が描かれているものの陽極直下に比べると鉄筋に流れ込む電流線の間隔は広い。このため、この部分にある鉄筋の防食効果は、陽極直下に比べ低下することが考えられ、この部分の鉄筋分極量が陽極直下に比べて小さくなっていることもこの状況を裏付けている。さらに、電流線と鉄筋の分極抵抗の関係を見ると、同じ

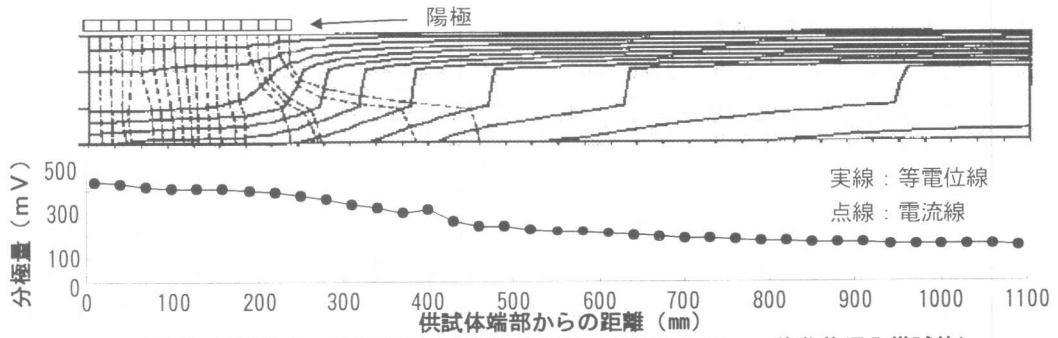


図-5 等電位線、電流分布図の一例 (陽極-鉄筋間隔 40 mm、塩化物混入供試体)

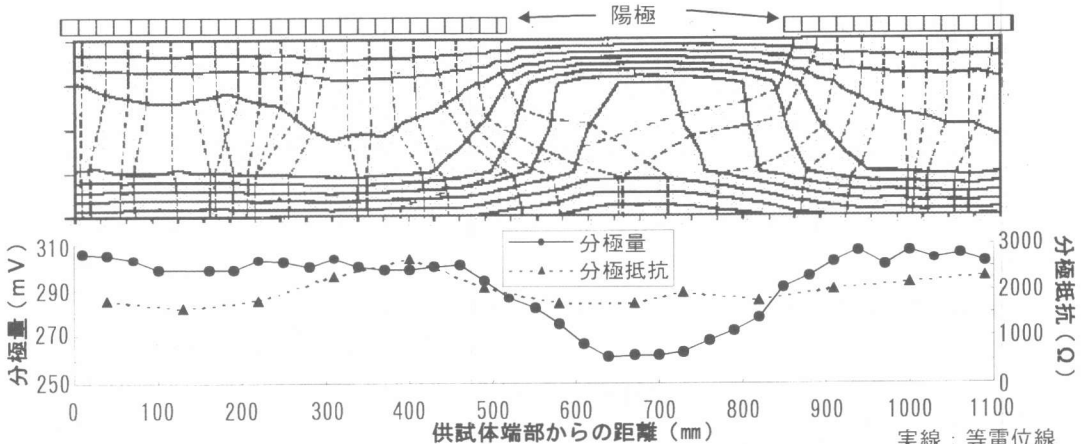


図-6 等電位線、電流分布図、分極抵抗の一例 (陽極施工間隔 330 mm 陽極-鉄筋間隔 60 mm、塩化物混入供試体)

ように陽極直下にある鉄筋でも、特に分極抵抗が小さい部分に電流線は密に描かれる傾向が認められた。これは、防食面全面に陽極が施工されたとしても、防食電流は分極抵抗の小さい箇所に流れ込み易くなることを示唆している。これらの状況は、塩化物の有無あるいは陽極-鉄筋間隔が 40 および 80 mm の場合においてもほぼ同様に認められた。

また、陽極施工間隔を 595 mm として通电した場合についても陽極直下および陽極施工範囲外のモルタル中における防食電流線の状況は、陽極施工間隔を 330 mm とした場合とほぼ同じであった。

3.2 鉄筋表面での防食電流分布と防食効果

図-7 には、チタンメッシュ①のみを陽極とし電流量 5mA で通电を行った場合について、陽極直下の鉄筋に流入する防食電流量の全電流量に対する比率 (以下、陽極直下供給電流率と称す) を電流線の密度から求めた場合と各セル鉄

筋において直接測定した値から求めた場合を比較して示した。この結果から、間接的に電流線の密度から求めた防食電流の供給電流率は、実測値とほぼ同程度の値を示していることが確認できた。しかし、以下に示す防食電流量分布に関する検討では、より信頼性の高いと考えられる実測値によるものを用いた。

図-8 は、チタンメッシュ①のみを陽極として通電電流量 1mA および 5mA で通电を行った場合の陽極直下供給電流率を陽極-鉄筋間隔との関係で示したものである。この結果から、陽極直下のセル鉄筋には、通電電流量 1mA、5mA でそれぞれ供給電流の 60~70%、70~80% 程度の電流が供給され、通電電流量の大きな 5mA の方が陽極直下に供給される電流配分量は大きくなっている。また、いずれの通電電流量においてもモルタル中の塩化物の有無により陽極直下への供給電流率は異なり、特に陽極-鉄筋間の距離が小さい場合には塩化物を混入したもの

の方が大きくなる傾向が見られた。これは、塩化物の存在により鉄筋の腐食性が高まり分極抵抗が小さくなり、防食電流が陽極直下に流れ込み易くなるためと考えられる。さらに、塩化物の有無に関わらず陽極—鉄筋間隔が大きくなるに従って陽極直下に供給される電流量の割合は小さくなる傾向も認められる。

図-9には、陽極端部から水平方向に300mm以上離れた位置にあるセル鉄筋に流れ込む電流量の全電流量に対する割合を示した。この結果によると陽極直下の場合とは逆に、通電電流量の小さな1mAの場合には、陽極端部から300mm以上離れた位置への供給電流率は15%程度であるが、5mAと大きくなるとその値は、5%程度と極めて小さいものとなった。ただし、いずれの場合も塩化物の有無による差は認められなかった。一方、図-10には、陽極直下の鉄筋分極量の平均に対する陽極端部から300mm以上離れた鉄筋分極量の平均を陽極—鉄筋間隔との関係で示した。この結果から、陽極から300mm以上離れた位置の鉄筋の分極量は、陽極直下の値に対して大きいもので60%弱、小さいものでは20%程度しか得られていないことがわかる。このことは、隣接する陽極が存在しない場合、陽極端部から300mm程度離れた鉄筋において防食基準を満足するためには、陽極直下の鉄筋の分極量が防食基準の2~5倍となるように通電を行わなければならない、陽極直下では過防食となる危険性も考えなければならない。

図-11には、陽極施工間隔を330mmとした場合の各セル鉄筋への流入電流密度およびそれぞれのセル鉄筋の見かけの分極抵抗値について、陽極—鉄筋間隔60mmで塩化物が混入されている供試体に関して示した。この結果から、陽極直下にあるセル鉄筋であっても分極抵抗の違いによって流入電流量にも相違が見られ、分極抵抗の小さい箇所により多くの防食電流が供給されていることを確認できる。また、このことは、先に示した電流線の集中の傾向と一致するものである。しかし、このような防食電流の供給量

に差が見られたにも関わらず、先の図-6に示したように、陽極直下の各セル鉄筋の分極量はほぼ均一となっており、防食効果の点からは差はないと考えられた。同様の状況は、他の供試体においても認められた。

図-12のa), b)には、それぞれ、陽極施工間

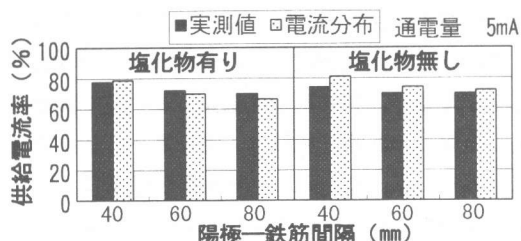


図-7 実測値と電流分布から求めた陽極直下の鉄筋の流入電流量の全電流量に対する比率の比較

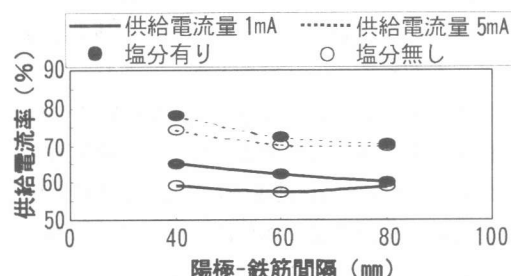


図-8 全電流量に対する陽極直下のセル鉄筋に流れる電流量の平均の比率

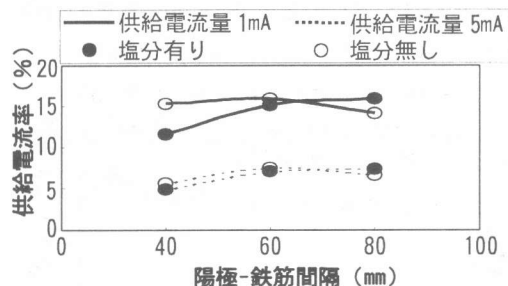


図-9 全電流量に対する陽極端部から水平方向に300mm以上離れたセル鉄筋に流れる電流量の平均の比率

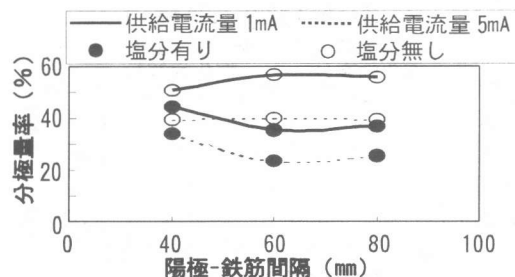


図-10 陽極直下の分極量の平均に対する陽極端部から300mm以上離れた鉄筋の分極量の比率

隔を 330 mm および 595 mm とした場合の陽極直下のセル鉄筋に流入する平均電流密度あるいは平均分極量に対する陽極施工範囲外のセル鉄筋に流入する平均電流密度の比率あるいは平均鉄筋分極量の比率を示したものである。陽極施工間隔を 330 mm とした場合、塩化物の有無に関わらず陽極施工範囲外の鉄筋には、陽極直下の鉄筋に供給される電流密度の 60~90% 程度の電流密度となるが、いずれの供試体においても陽極施工範囲外の鉄筋分極量は、陽極直下の鉄筋分極量に対して 90% 以上の分極量を得ることができていた。従って、現在提唱されているように、少なくとも陽極施工間隔が 300 mm 以内の場合は、陽極施工範囲外に存在する鉄筋においても陽極直下の鉄筋とほぼ同程度の防食効果が得られると考えることができよう。しかし、陽極施工間隔がこれよりも大きな 595 mm の場合には、陽極施工範囲外の鉄筋の電流密度は、陽極直下の鉄筋の 40~60% 程度まで減少し、この時の陽極施工範囲外の鉄筋分極量は、モルタル中の塩化物の有無によって若干異なるようであった。すなわち、塩化物を混入していない場合には陽極直下の分極量に対して 85~90% 程度の分極量が得られるのに対して、塩化物が混入されて

いる場合には 80% を下回る分極量しか得られていない。従って、陽極施工間隔が 600 mm 以上となるとコンクリート中の塩化物量などによっては陽極直下の鉄筋と同様の防食効果を得ることが出来ない場合も生じる可能性が出てくるものと思われる。

4. まとめ

- 1) 防食電流は陽極直下の鉄筋にほぼ均一に供給されるが、陽極から離れるに従い十分な防食電流が供給され難くなる。特に、陽極端部から 300 mm 以上離れた鉄筋位置での防食効果は期待できない。
- 2) 鉄筋への防食電流の供給量は、塩化物の有無、陽極-鉄筋間隔および陽極-鉄筋間隔に影響を受ける。
- 3) コンクリート表面において陽極をある程度の間隔を開けて施工する場合、その距離が 300 mm 程度であれば陽極が施工されていない箇所の鉄筋も陽極直下とほぼ同程度の防食効果を期待できる。しかし、600 mm 以上になると、陽極未施工箇所の防食性は、コンクリートの状況によっては十分とは言えなくなる。

参考文献

- 1) 久田真・大即信明・網野貴彦・Tarek Uddin MD: 通電を施したコンクリート中の電位分布および導電経路に及ぼす諸要因の影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.825-830, 1996
- 2) 山本誠・武若耕司: 電気防食を施したコンクリート中の電流分布に関する基礎的検討、第52回土木学会年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.778-779, 1997

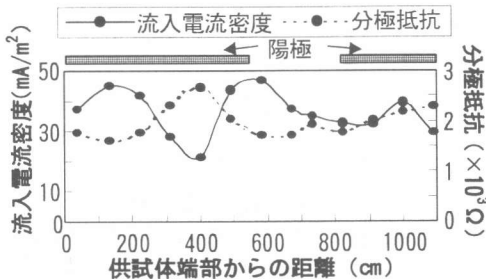
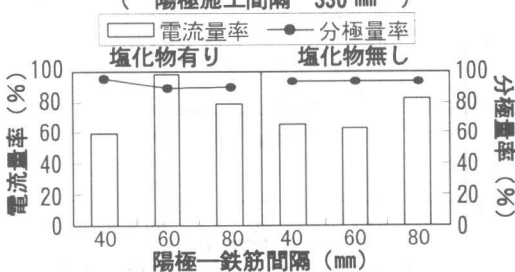
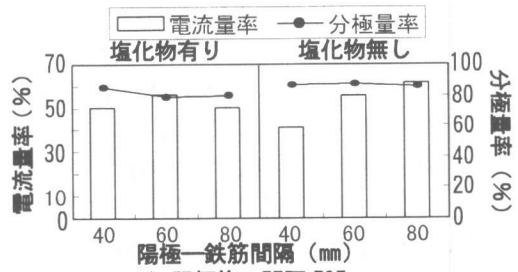


図-11 流入電流密度と鉄筋の分極抵抗の関係 (陽極施工間隔 330 mm)



a) 陽極施工間隔 330 mm



b) 陽極施工間隔 595 mm

図-12 陽極直下の流入電流量に対する陽極施工範囲外の流入電流量の比率と分極量の比