

[1091] 流電陽極方式によるコンクリート中の鉄筋の防食

正会員 ○加納伸人 (中川防蝕工業 技術開発部)
 正会員 望月紀保 (中川防蝕工業 技術開発部)
 篠田吉央 (中川防蝕工業 技術開発部)
 千葉丈夫 (中川防蝕工業 技術開発部)

1. まえがき

近年、コンクリート構造物の塩害による鉄筋腐食が問題となっており、コンクリート中の鉄筋の防食についてさまざまな研究がなされている。その中で、電気防食法が有効であることが認められてきており、外国では橋梁や駐車場など多数の実施例がある。^{1) 2) 3)}

一般に実環境におけるコンクリートは、抵抗率が高く、防食電流が流れにくいいため、流電陽極方式の適用は困難であるとの考え方があり、外国での実施例も主として外部電源方式によって行なわれている。しかしながら、電気防食の極間抵抗は塩害環境下にあってはあまり大きな値にならないことが多い。たとえば1㎡における極間抵抗は、コンクリート抵抗率 $20000\Omega \cdot \text{cm}$ 、かぶり厚さ5cmの場合10Ωである。つまり、防食電流密度が20~30mA/㎡とすると極間抵抗による電圧消費は0.2~0.3Vであり、陰分極0.1Vを加えても、陽分極を非常に小さく抑制することが可能であれば、数百mVという小さな電圧で電気防食ができることになり、流電陽極方式の適用も可能と考えられる。本方式を適用した場合、最大の問題点はコンクリート表面に設置された流電陽極の性能をいかにして保持するかという点にある。

本報告は、流電陽極材として亜鉛板を用いたときのバックフィル（陽極性能保持材）の開発およびバックフィルを用いた亜鉛シート方式による鉄筋電気防食試験結果について報告するものである。

2. バックフィル材選定試験

2.1 実験

図1に示すように、直径14cm、高さ10cmの円筒形の容器に、一定の塩分濃度（NaCl濃度で10kg/m³）のモルタル（水セメント比0.50）を打設するとともに、対極として黒皮鋼板（100×70×0.5mm）をかぶり厚さ7cmになるように配置した。

供試亜鉛陽極は、100×70×0.72mmの板状陽極に2か所モルタル固定用の穴をあけたもので、供試面以外は柔軟性のあるウレタン系シール材にて絶縁被覆を行なった。モルタルを20日間大気中にて養生後、モルタル表面に亜鉛板固定用の穴をあけ、亜鉛板状陽極を各種バックフィルを介してプラスチック性のリベット状のピンで固定した。

各陽極は、モルタル中に埋設された鉄筋を対極として、10μA/cm²の定電流アノード電解を行ない、経時的な陽極電位安定性を評価した。

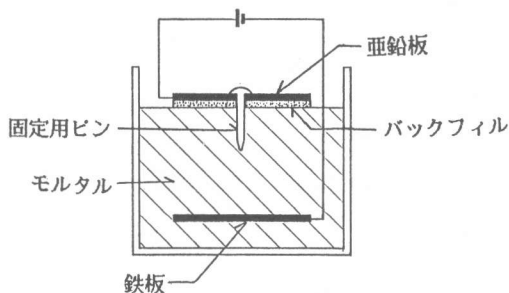


図1 バックフィル選定試験セル

なお、本実験における試験条件を表1に示す。

2.2 結果

(1) 水分保持の影響

図2にバックフィルAの3条件(A1, A2, A3)の試料における陽極電位の経時変化を示す。水を適時補給しているA1は、常時安定した卑電位を示した。また、A1以外の系では、実験スタート時に供給された水以外には、試験期間中を通じて水分の補給を一切行っていないため、試験初期40日間密閉状態においたA2は、40日間経過後徐々に電位が貴化した。一方、試験初期から大気開放下においたA3は、はやくから電位の貴化が進んだ。以上から、安定した卑電位を維持するには、コンクリート・陽極界面に水分が保持されればよいといえる。

(2) バックフィル選定試験

B, C, Dバックフィル系において、長期間安定した卑電位を保持した組成を選び、A2とともにその陽極電位の経時変化を図3に示す(A2, B2, C3, D4)。

実験スタート後40日間セルを密閉状態においたバックフィルA2, B2, C3は、大気中への水分発散が抑制された状態が保持されるため、陽極電位は非常に卑な安定した電位を示し、その後大気開放下に置かれた状態では、電位の貴化がしだいに進み、流電陽極バックフィル材としての特性の維持が困難な状態になる。一方、バックフィルD4(D3, D5も同様の傾向)は、大気開放条件下でも長期間にわたって十分な卑電位を維

表1 バックフィル材選定試験条件

バックフィル	物質名	分類	重量比	暴露条件
A	ヘントナイト, 生石膏, $MgSO_4$	A 1	7:2:1	適時水を補給(密閉)
		A 2	7:2:1	
B	ヘントナイト, 生石膏, $MgSO_4$, シリカゲル	B 1	7:2:1:1	試験スタート時のみ水を補給
		B 2	7:2:1:2	
		B 3	7:2:1:4	
C	ヘントナイト, 生石膏, $MgSO_4$, $CaCl_2$	C 1	7:2:1:1	試験初期40日間は密閉状態以後大気開放状態
		C 2	7:2:1:2	
		C 3	7:2:1:4	
A	ヘントナイト, 生石膏, $MgSO_4$	A 3	7:2:1	試験スタート時のみ水を補給
D	ヘントナイト, 生石膏, $MgSO_4$, $MgCl_2$	D 1	7:2:1:1	
		D 2	7:2:1:2	
		D 3	7:2:1:3	
		D 4	7:2:1:4	
		D 5	7:2:1:5	

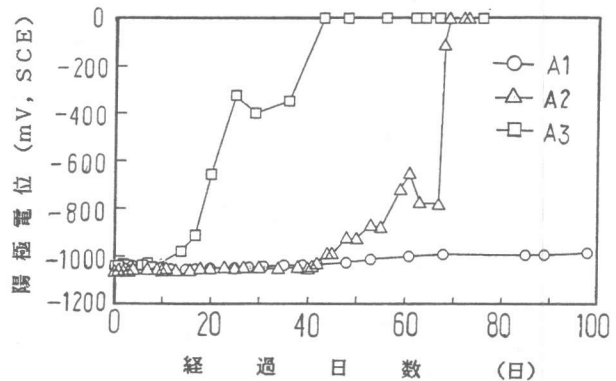


図2 陽極電位の経時変化
(水分保持の影響)

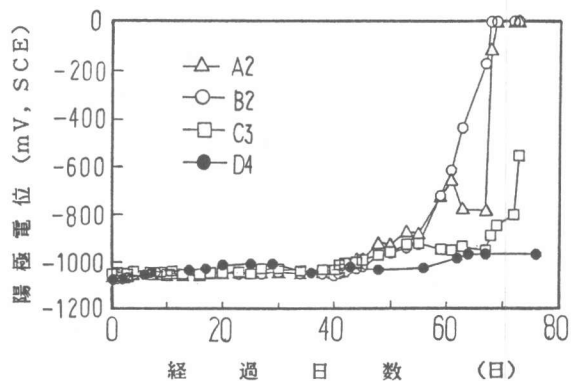


図3 陽極電位の経時変化
(バックフィル選定試験)

持し、つまり水の保持がされており、本系の流電陽極バックフィル材として、適当なものであった。

3. 電気防食下における硫酸イオンのコンクリート物性に及ぼす影響

流電陽極法において用いられるバックフィル材には、コンクリートの劣化を促進するといわれている各種塩類を含有していることから、バックフィル材のコンクリート劣化に及ぼす影響についての検討が必要である。本実験では、その中で硫酸イオン (SO_4^{2-}) をとりあげ、次のような実験を行なった。

3.1 実験

図4に示すように、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ のモルタル試片 (水セメント比 0.50, 湿空養生 30日間) を、2つの塩ビセルに固定し、 $40 \times 160\text{mm}$ の一面とその反対面がそれぞれコンクリート内外を模擬した水溶液環境に接触させた。各水溶液がモルタルと接する面積は、 $2 \times 12\text{cm}$ (24cm^2) である。試験は、電気防食の適用有無によって2つの系に分けられるが、各系とも2つのセル中にはコンクリート表面および内部の模擬溶液としてそれぞれ1N硫酸ナトリウム水溶液、飽和水酸化カルシウム水溶液を添加し、供試部以外のモルタル面はすべてシリコン系の

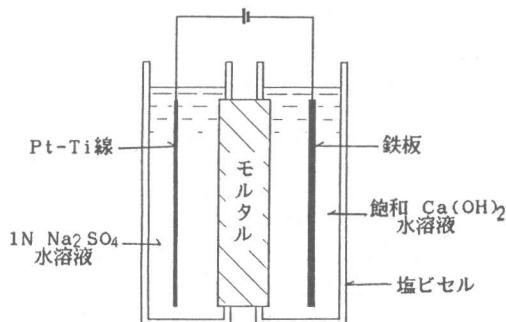


図4 硫酸イオンの影響の試験装置
(電気防食適用系)

被覆材で完全被覆した。また、電気防食の適用系には、硫酸ナトリウム水溶液中に陽極として白金めっきチタン線、水酸化カルシウム水溶液中には対極として黒皮鋼板を挿入し、水溶液と接するモルタル表面積で3水準の電流密度で通電を行なった。これらの試験は、モルタルの劣化を加速するために、 70°C 恒温槽中にて138日間行なったが、それと並行して、同一温度条件下の水道水中に浸漬されたモルタル試片をブランクとして供試した。

通電試験終了後、モルタル試片の曲げ強度より硫酸イオンの影響を評価した。

3.2 結果

曲げ強度試験結果を表2に示す。なお、結果はそれぞれ2~3個の試験片の平均値である。

いずれの試験片も、ブランクに比べて著しい強度の低下は認められず、硫酸イオンの影響はあまり明瞭ではない。しかしながら、電気防食系においては、通電電流が大きいほど高い強度が得られており、電気防食の適用条件下では、コンクリート表面に硫酸イオンが存在してもコンクリートの物性に対して悪影響を及ぼさないことが確認できた。

4. 中型供試体による電気防食試験

4.1 供試体

供試体は、図5に示すように、 $1700 \times 1100 \times 270\text{mm}$ の形状を持つ中型のもので、下面が塩害環境下にあるRC構造

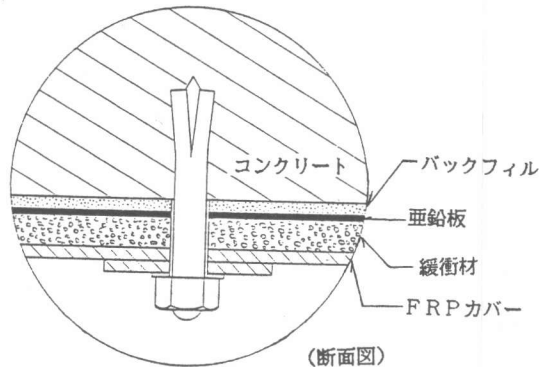
表2 曲げ強度試験結果

電流密度 ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	曲げ強度 (kg/cm^2)
0	90.2
2	93.5
4	104.5
6	120.5
ブランク	94.0

注：曲げ強度は中心載荷法による

物を模擬したことから、次のような特色を有している。

下面より10cmまで（下層）は、塩分含有コンクリート（NaCl濃度で $15\text{kg}/\text{m}^3$ ）が、その上部（上層）に無塩コンクリートが打設されている。コンクリートは、腐食を起こしやすい条件にするため、水セメント比を大きくした（ $W/C=0.60$ ）。鉄筋は 13ϕ の丸鋼を用い、上層部と下層部にそれぞれ格子状に配置されているが、下層部にはあらかじめ海水中にて発錆させた丸鋼、上層部には腐食のない黒皮付丸鋼を、それぞれ下面と上面よりかぶり厚さ 2cm と 5cm の位置に配置してある。なお、縦鉄筋（長さ方向鉄筋）は、上層、下層とも 200mm 間隔で6本配筋されており、横鉄筋は、下層が 400mm 間隔で5本、上層が 200mm 間隔で9本配筋されている。また、各鉄筋交差部には絶縁物を挿入し、鉄筋相互の導通は各鉄筋より立ち上げたリード線のON-OFFにより任意に設定できるようにした。



4.2 電気防食試験

上記試験体を地上から 1m の鉄棒上に設置し、下面を対象に亜鉛シートによるカソード防食試験を行なった。用いた陽極は、図5に示すような形状を持つ3枚の亜鉛板（裏面シール）で相互の取付け間隔は、 10cm と 20cm とした。亜鉛板は、バックフィルを介してコンクリート表面に設置するとともに、緩衝材およびFRPカバーによって、あらかじめコンクリート表面に立てたアンカーボルトを用いて固定した。

亜鉛板と鉄筋の導通は、各亜鉛板より取り出したリード線を、先に立

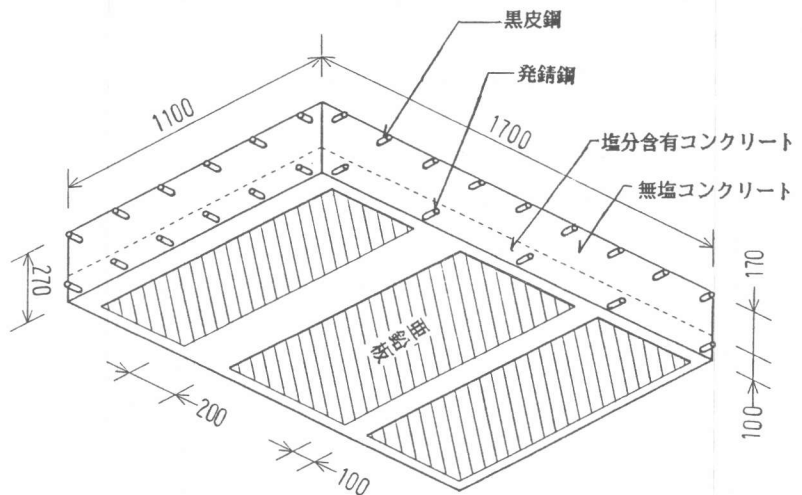
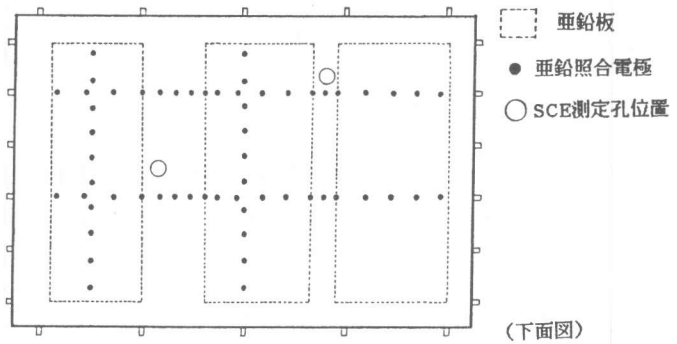


図5 中型供試体

ち上げた個々の鉄筋からのリード線とともに、測定箱内でそれぞれスイッチを介して短絡することによって行なった。

電流および極間抵抗は、測定箱内でゼロ抵抗電流計および抵抗計で測定した。

電位測定は、上層鉄筋については、照合電極 (SCE) を直接コンクリート上面の測定点に接触することによって計測したが、SCEを直接コンクリート表面に接触できない下層鉄筋に対しては、コンクリート下面にあらかじめ取付けた微小亜鉛照合電極によって行なった。なお、亜鉛照合電極の電位チェックは、FRPカバー表面にあげられた2か所のSCE挿入孔にSCEを接触させて、通電電流がOFF状態で測定時ごとに行なっている。さらに計測電位のIR補正は5kHzの交流を用いた。

4.3 結果

図6に亜鉛陽極からの発生電流密度、図7に鉄筋への平均流入電流密度の経時変化を示す。その結果、試験スタート約100日以後はほぼ安定した電流密度 (下層鉄筋への平均電流密度で約20mA/m²) となり、本方式で十分な防食電流が得られることがわかった。

図8に極間抵抗の経時変化を示す。極間抵抗は、多少変化はあったが、コンクリート中に塩分の存在している陽極・鉄筋間で5Ω程度、塩分のない上層・下層鉄筋間で10Ω程度という小さな値であった。

図9に陽極電位および鉄筋電位の経時変化を示す。また、表3に

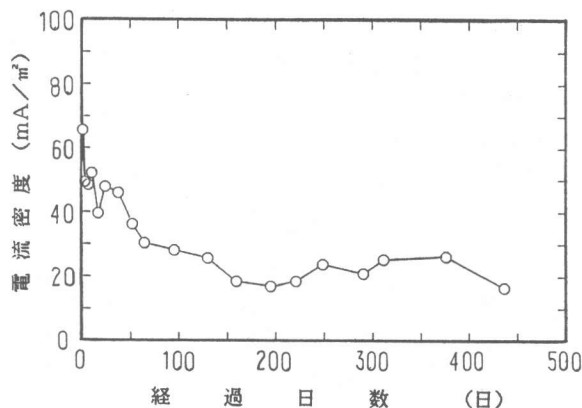


図6 陽極発生電流密度の経時変化

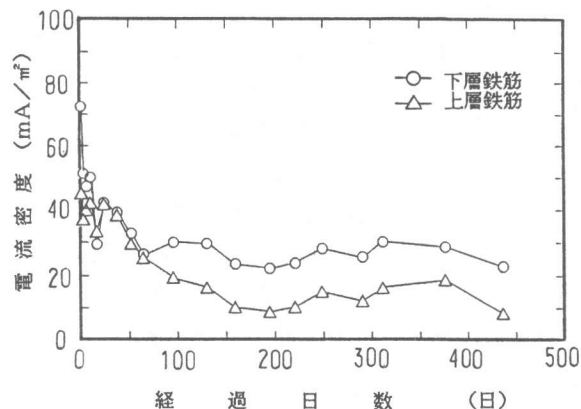


図7 鉄筋流入電流密度の経時変化

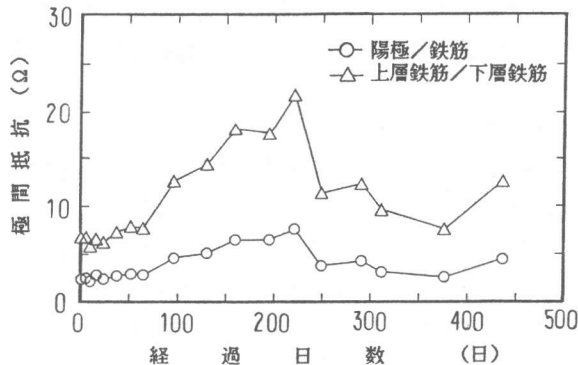


図8 極間抵抗の経時変化

鉄筋電位の分極量を示す。亜鉛陽極電位は、時間の経過とともにやや貴化したものの、鉄筋の分極は、防食基準と考えられる 100mVシフト⁴⁾を達成しており、良好な防食状態であるといえる。

今後、バックフィルの改良により、陽極表面の保水性がより向上し、陽分極を小さく抑制することが可能になれば、亜鉛シートによる鉄筋のカソード防食は、より確実な技術になるとと思われる。

5. まとめ

本研究によって得られた結果を以下に要約する。

- (1) 流電陽極法による電気防食では、陽分極を低減させることが重要であるが、そのためには、コンクリート・陽極界面に水分を保持することが重要である。
- (2) コンクリート・陽極界面に水分を保持するために、吸水性・保水性に優れたベントナイト系のバックフィル材（ベントナイト、生石膏、 $MgSO_4$ 、 $MgCl_2$ の混合物、重量比で7：2：1：3～5）を見出した。
- (3) バックフィル材に含まれる硫酸イオンのコンクリート強度への悪影響は、電気防食下では認められなかった。

- (4) 中型供試体における電気防食試験の結果、十分な防食電流が得られ、またすべての鉄筋に対して 100mV以上のカソード分極が認められ、本方式での防食効果が確認できた。

〔参考文献〕

- 1) William R. Schutt : STEEL-IN-CONCRETE CATHODIC PROTECTION RESULTS OF A 10-YEAR EXPERIENCE, Paper 267 Corrosion '85
- 2) H.C.Schell : Evaluating the Performance of Cathodic Protection Systems on Reinforced Concrete Bridge Substructures, Paper 263 Corrosion '85
- 3) 井川、片脇他：実橋におけるコンクリート中の鉄筋の電気防食試験、Paper 767, 第17回日本道路会議論文集, 1987
- 4) R.A.Gummom : Cathodic protection A Critical Review of NACE standard RP-01-69, Paper 343 Corrosion '86

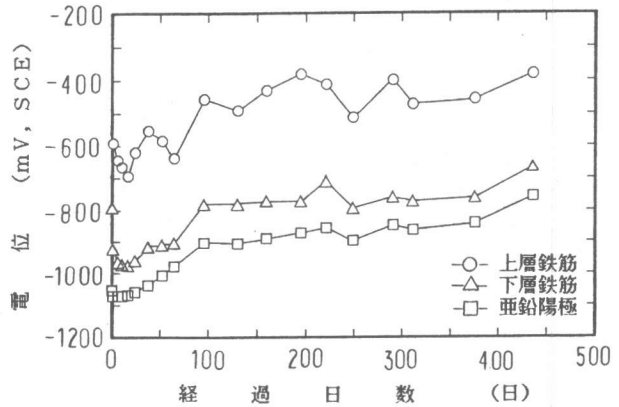


図9 亜鉛陽極および鉄筋電位の経時変化

表3 鉄筋電位の分極量

経過日数 (日)	鉄筋位置	ON 電位 (mV, SCE)	OFF4時間後電位 (mV, SCE)	分極量 (mV)
130	上層	-484	-149	335
	下層	-767	-363	404
291	上層	-392	-151	241
	下層	-747	-306	441
376	上層	-447	-195	252
	下層	-746	-341	405