

論文 約 30 年暴露された RC 梁へ陽極を点状配置する流電陽極方式の適用による防食効果の確認実験

香田 真生*1・青山 敏幸*2・山本 大介*3・濱田 秀則*4

要旨：約 30 年暴露された RC 梁を用い、陽極を点状配置する流電陽極方式の適用による防食効果について、実験を行った。RC 梁の引張鉄筋を主な防食対象として、陽極材には亜鉛を用い、陽極被覆材には亜硝酸リチウムを添加したセメントモルタルを用いた A・B の 2 通りの方式を適用した。約 11 ヶ月の測定期間において、自然電位および分極曲線の測定結果から、引張鉄筋側の腐食環境の改善が確認された。また、分極曲線による不動態のグレード判定は、妥当な結果が得られた。一方、分極曲線にターフェル外挿法を適用した腐食判定と分極抵抗法による腐食判定を比較し、本実験の範囲では、概ね一致する結果が得られた。

キーワード：流電陽極方式、亜鉛、亜硝酸リチウム、分極曲線、ターフェル外挿法、分極抵抗

1. はじめに

電気防食工法のひとつである流電陽極方式は、防食対象の鋼材よりもイオン化傾向の高い金属を犠牲陽極材として使用し、両者間の電位差を利用して防食電流を流す方式である。小型の試験体を用いた既往の研究¹⁾により、陽極材に電気防食用亜鉛合金（以降、亜鉛と記す）を用い、陽極被覆材には亜硝酸リチウムを添加したセメントモルタルを用いた流電陽極方式において、鉄筋に対する防食効果が確認されている。本実験では、30 年以上暴露された RC 梁を用い、陽極を点状配置する流電陽極方式の適用による防食効果について、実験により確認した。

2. 実験概要

2.1 流電陽極方式について

本実験に用いた流電陽極方式は、コンクリート部材に孔を設け、陽極を点状配置する方式である。陽極材はφ10mm、長さ180mmの亜鉛を使用し、陽極材の周りに充填する陽極被覆材(以降、被覆材と記す)は、A、Bの2通りとした。それぞれの配合を表-1に示す。各種のプレミックス材を用い、40%亜硝酸リチウム水溶液を練混ぜ水として用いた配合である。各プレミックス材は、ノンポリマーの普通セメントを主成分とする材料であり、プレミックス材 A には有機系繊維が添加されている。

2.2 約 30 年暴露された RC 梁

RC 梁の暴露期間は 30 年以上となっており、山形県酒田港の港内に 20 年以上暴露され、その後、九州大学の敷地内（屋外）へ移設された。使用されたコンクリートの配合を表-2に示す。港内での暴露により、コンクリート中の塩化物含有量は、鉄筋近傍で概ね 5kg/m³以上とな

っていることが報告²⁾されている。

試験体とした RC 梁の寸法と配筋、およびコアを削孔して亜鉛を設置した位置を図-1に示す。亜鉛は引張鉄筋から 50mm 離れた位置に設置した。鉄筋の腐食状態を確認するため、試験体の端部をはつり出した。鉄筋の状態を写真-1に示す。腐食状態から推察される鋼材の腐食グレード³⁾を表-3に示すが、断面欠損が生じていることから、グレード d に該当すると考えられる。

3. 電流・電位の測定

3.1 測定項目

陽極を設置してから 5 日後、亜鉛と鉄筋を短絡して通電を開始した。亜鉛と鉄筋間に流れる電流量、通電中の亜鉛と鉄筋の電位、および短絡を切断した直後の電位（以降、インスタントオフ電位と記す）を測定した。また、短絡切断後 24 時間が経過した時点での電位を自然電位として測定した。

なお、環境条件は屋内での気中暴露とし、亜鉛および鉄筋の電位測定は、湿潤状態を 30 分以上維持した後、可搬式の照合電極（飽和カロメル：SCE）で測定した。

表-1 陽極被覆材 A, B の配合

被覆材	粉体(P)	W/P(%)	備考
A	プレミックス材 A	26	断面修復材系
B	プレミックス材 B	73	注入材系

表-2 RC 梁のコンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
		W	C	S	G	減水剤
68	47.0	204	300	793	964	1.20

*1 (株)ピーエス三菱 九州支店 土木技術部 (正会員)

*2 (株)ピーエス三菱 技術本部 博士(工学) (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 工学府 建設システム工学専攻 修士(理学) (正会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門教授 博士(工学) (正会員)

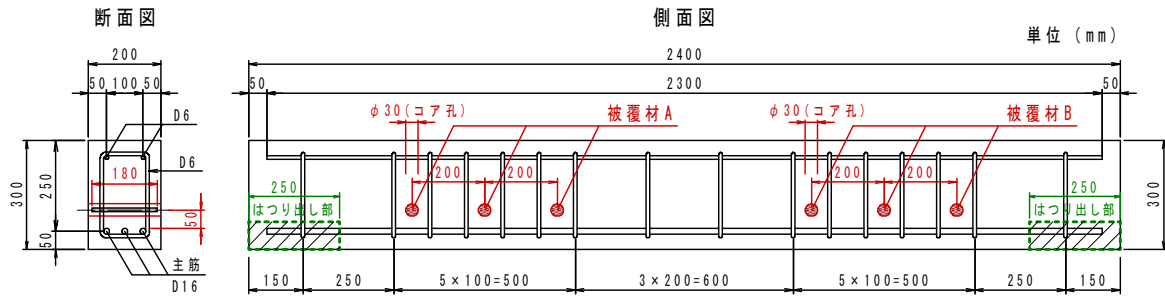


図-1 試験体の概要図



写真-1 鉄筋の腐食状態

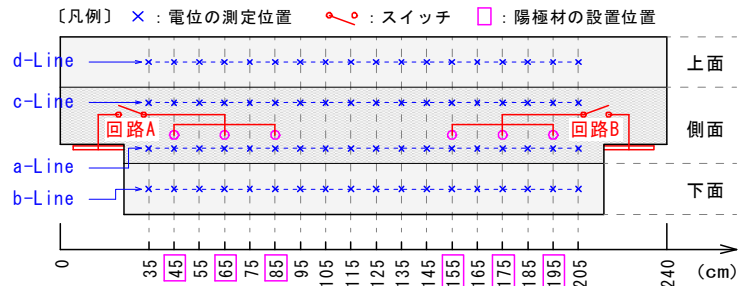


図-2 回路図および電位の測点位置

3.2 測定位置

被覆材 A・B を用いた陽極を試験体にそれぞれ 3 箇所
に設置し、陽極間をリード線で接続した。また、はつり
出した鉄筋に接続したリード線とスイッチを介して接続
し、回路を形成した。回路図および電位の測定位置を
図-2 に示す。亜鉛と鉄筋間に流れる電流量は、スイ
ッチ部にて測定した。鉄筋電位の測定は、試験体の長手
方向に対して、端部より 35cm 位置から 10cm 間隔を測
点とし、205cm 位置までを測定した。また、引張鉄筋
の側面位置および下面位置、ならびに圧縮鉄筋の側面
位置および上面位置をそれぞれ a, b, c, d-Line の記号
で示す。

なっている。不動態のグレーディングおよびグレー
ディングに対応する分極曲線の形状をそれぞれ表-4 およ
び図-3 に示す。一方、従来の分極曲線の測定は、対象
物を水に浸漬させた状態で測定を行う必要があるが、本
試験体は大型であるため、水に浸漬させることが困難
である。そこで、二重対極センサを用いた分極曲線の測
定方法⁵⁾ (以降、接触法と称す) を適用した。接触法は、
かぶり厚さが 30mm 以下の場合、従来の方法と概ね一
致する結果が得られることが確認されている一方で、か
ぶりが 50mm 以上では、更なる検討の必要性が示され
ている。

4. 分極曲線の測定

4.1 分極曲線について

腐食に関する電気化学的測定方法のひとつとして、鉄
筋の分極曲線を求めることにより、不動態被膜の状態
を推定する方法がある。現在、分極曲線法については大
即が提案した方法⁴⁾ があり、アノード分極曲線の形状
から不動態の状態を 6 つのグレードによって評価する
方法と

表-3 腐食のグレードと鋼材の状態³⁾

腐食のグレード	鋼材の腐食状態
グレード a	黒皮の状態。または、錆は生じているが全体的に薄い緻密な錆であり、コンクリート表面に錆が付着していることはない。
グレード b	部分的に浮き錆があるが、小面積の斑点状である。
グレード c	断面欠損は、目視で認められないが、鉄筋の全周または全長にわたって浮き錆が生じている。
グレード d	断面欠損が生じている。

表-4 不動態のグレーディング⁴⁾

グレード	分極曲線の形状	不動態の状態
グレード 0	電流密度が一度でも 100 (μA/cm ²) を超えるもの	全く不動態がない
グレード 1	電流密度が 10~100 (μA/cm ²) にあるもの	若干は不動態がある
グレード 2	電流密度が一度でも 10 (μA/cm ²) を超え、かつグレード 1 または 3 に含まれないもの	↑ 不動態の状態は悪くなる
グレード 3	電流密度が 1~10 (μA/cm ²) にあるもの	
グレード 4	電流密度が一度でも 1 (μA/cm ²) を超え、かつグレード 1, 2 および 3 に含まれないもの	
グレード 5	電流密度が 1 (μA/cm ²) を超えないもの	非常に良好な不動態がある

鉄筋の自然電位を En として、電位 E が En+200mV < E < +600mV (vs.SCE) の範囲で判定する

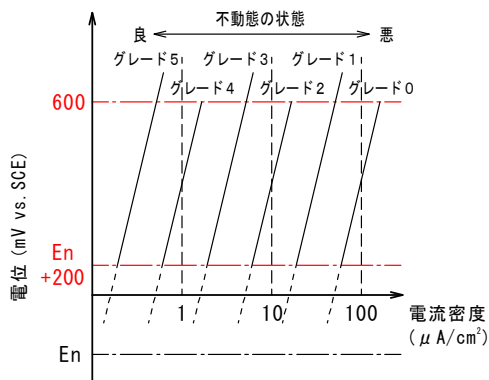


図-3 分極曲線の形状によるグレーディング⁴⁾

4.2 接触法の概要

(1) 二重対極センサについて

接触法に用いた二重対極センサは、分極抵抗測定用の携帯型腐食診断器の付属品として既に実用化されているセンサである。本センサは、本来、交流インピーダンス法による分極抵抗の測定に用いられるものであり、センター対極とガード対極の2つの対極により分極させ、測定範囲を限定する方法で使用される。一方、接触法においては、接続の関係上、ガード電流は流さない1対極による測定を行った。

(2) 測定方法

接触法による測定方法の概念図を図-4に示す。測定方法は、大即が提案した方法に準拠した。センサに設置されている照合電極は銀塩化銀電極 (Ag/AgCl) が用いられているため、飽和カロメル電極 (SCE) 基準に換算し、自然電位から+650mVまで電位を掃引し、そのときに流れる電流量を測定した。電位の掃引速度は、本実験で使用した装置の仕様上、50mV/min.とした。

かぶりコンクリートの抵抗による電圧降下を考慮する場合、以下の(1)式を用いて補正することができる。

$$E' = E - \Delta E \quad , \quad \Delta E = \frac{r^2}{(r + R)} \cdot i \quad (1)$$

E' は補正した電位、 E は測定電位、 ΔE は電圧降下、 r はコンクリート抵抗、 R は電位差計の内部抵抗、 i は電流量を示す。電位差計の内部抵抗に対し、交流インピーダンス法により測定したコンクリート抵抗が十分に小さかったことから、本検討では、電圧降下の補正は省略した。

5. 電流・電位の測定結果

電流密度の経時変化を図-5に示す。亜鉛と鉄筋間に流れる電流量を陽極表面積あたりの電流密度に換算した。時間経過に伴い、電流密度が低下していくが、約150日までは陽極Aの方が大きな電流密度であったが、約240日以降では大きな差は確認されなくなった。

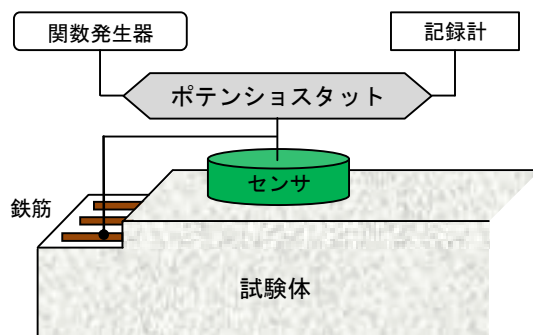


図-4 測定方法の概念図

亜鉛のインスタントオフ電位および自然電位の経時変化を図-6に示す。なお、通電開始から約2ヵ月以降の結果を示す。自然電位は陽極A・Bに大きな差はないが、インスタントオフ電位は、約150日までは陽極Aの方が70~150mV単なる値を示しており、同期間において、陽極Aの方が大きな電流密度であったことに関連していると考えられる。

ここで、ASTM-C876の鉄筋腐食評価を飽和カロメル電極基準に外気温25°Cで換算した評価表を表-5に示す。これは、自然電位の値によって鉄筋腐食の可能性を評価する方法である。

鉄筋の自然電位の測定結果として、a・b-Line (引張鉄筋側) およびc・d-Line (圧縮鉄筋側) の平均値の経時変化をそれぞれ図-7および図-8に示す。

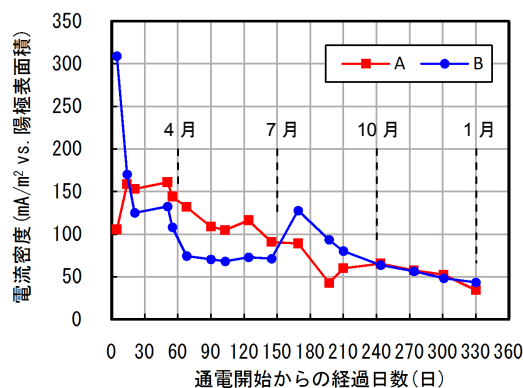


図-5 電流密度の経時変化

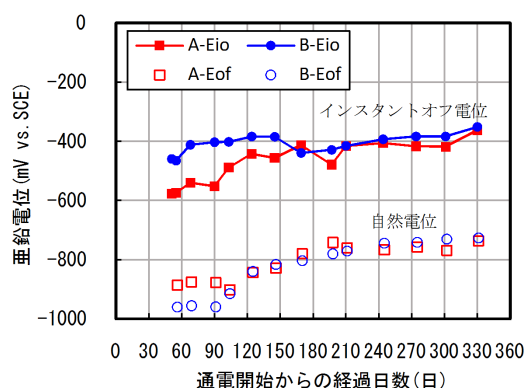


図-6 亜鉛電位の経時変化

a・b-Lineの通電前の自然電位は、90%以上の確率で腐食ありの評価に該当し、はつり出した鉄筋の目視観察の結果とも整合していると考えられる。なお、通電前の結果は、a-Lineのみの測定であり、通電後の測点と試験体長手方向に5cm離れた位置の測定結果である。通電が継続されることで、自然電位の貴化が確認されるため、腐食環境は改善していると考えられるが、11ヵ月後は冬季(1月)であり、気温の低下によって鉄筋の腐食反応が低下したことが貴化の一因となっている可能性がある。

一方、圧縮鉄筋側であるc・d-Lineの自然電位は、通電から5ヵ月後までは、陽極Aの設置範囲は貴化する傾向が確認されるが、全体的には大きな変動はなく、90%以上の確率で腐食ありの評価に概ね該当する状態であった。8~11ヵ月後は、全体的に貴化する傾向が確認されるが、a・b-Lineと同様に、気温の低下によって貴化している可能性がある。

表-5 ASTM-C876をSCE基準(25°C)とした腐食評価

自然電位 (E vs.SCE)	鉄筋腐食の可能性
$-126\text{mV} \leq E$	90%以上の確率で腐食なし
$-276\text{mV} < E < -126\text{mV}$	不確定
$E \leq -276\text{mV}$	90%以上の確率で腐食あり

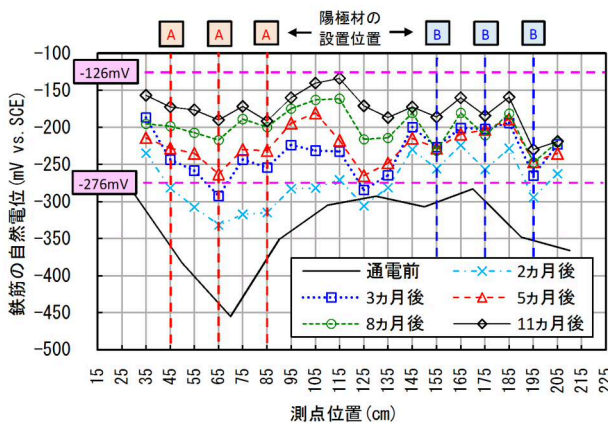


図-7 a・b-Line(引張側)鉄筋の自然電位

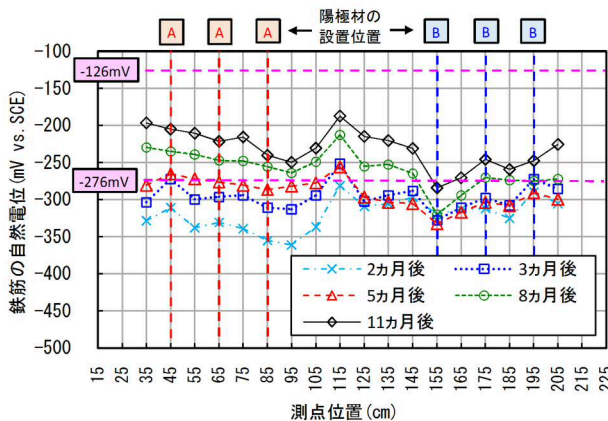


図-8 c・d-Line(圧縮側)鉄筋の自然電位

鉄筋の復極量として、a・b-Lineおよびc・d-Lineの平均値の経時変化をそれぞれ図-9および図-10に示す。a・b-Lineの復極量は、通電から5ヵ月後までは、陽極Aの設置範囲では30~100mV、陽極Bの設置範囲では20~50mVとなったが、時間経過に伴って復極量は小さくなった。一方、c・d-Lineの復極量は、通電から5ヵ月後までは、陽極Bに対して、陽極Aの設置範囲は30~80mVと大きな値となっており、同範囲の同期間に自然電位が貴化したことに影響したと考えられる。また、a・b-Lineおよびc・d-Line共に、測点95~145の範囲は復極量がマイナスの値を示す場合があり、特に圧縮鉄筋側へは防食効果が及んでいないものと考えられる。

小型の試験体を用いた既往の研究¹⁾では、被覆材A・BはW/Pが大きく異なるものの、防食効果には有意な差は生じない結果となっており、両者ともに100mV以上の復極量が確保された。一方、鉄筋の自然電位(腐食状態)にばらつきがあり、また鉄筋の腐食も進行している本試験体においては、通電開始から5~8ヵ月後までは、陽極A・Bにおける発生電流量に差が生じる結果となった。しかし、鉄筋の自然電位のばらつきが小さくなって以降は、発生電流量に差が生じない結果となっており、通電前の腐食状態の違いが、各陽極からの発生電流量に影響したと推察される。

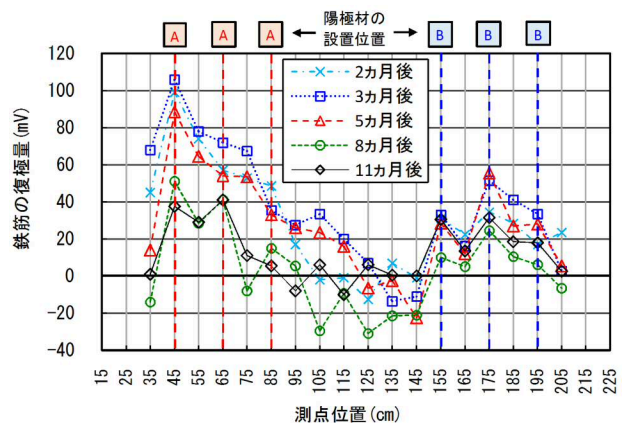


図-9 a・b-Line(引張側)鉄筋の復極量

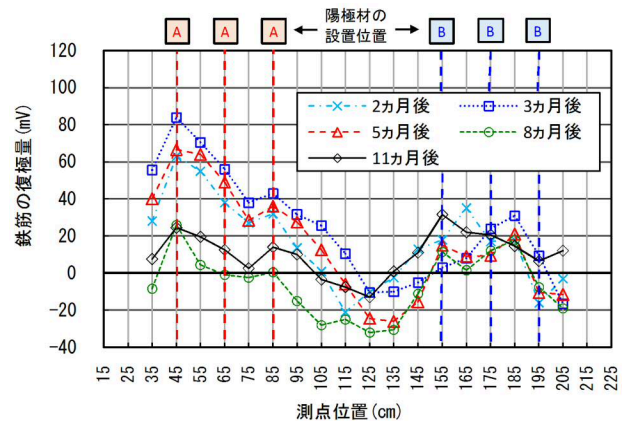


図-10 c・d-Line(圧縮側)鉄筋の復極量

6. 分極曲線の測定結果と考察

6.1 電流の分散範囲の検討

(1) 被測定面積について

電位の掃引によって、鉄筋の分極する範囲は電流の分散を考慮する必要がある。電流の分散は、鉄筋の周方向より軸方向に分散する傾向があり、また鉄筋が腐食していない場合は広く分散し、腐食がある場合は対極直下に集中すると報告⁶⁾がある。本検討では、鉄筋が腐食していることから、電流は広く分散しないと想定し、接触法における鉄筋の被測定面積は、鉄筋の周方向は全周、軸方向はセンサの幅内と仮定した。

(2) 測定位置と測定条件

配筋条件による違いを確認するため、測定箇所は図-11に示す位置とし、スターラップと引張鉄筋の交差位置をS+T、引張鉄筋位置をT、圧縮鉄筋位置をC、およびスターラップ位置をSの記号とした。測定箇所は湿潤状態を30分以上維持した後、接触法により測定し、それぞれの箇所の測定は、4時間以上の間隔を空けた。

(3) 接触法による分極曲線の測定結果

通電開始より約5ヵ月経過した時点での分極曲線の測定結果を図-12に示す。自然電位および復極量の結果より、防食効果が及んでいないと考えられる測点CおよびSは、グレード1の判定となり、はつり出した鉄筋の腐食状態とも整合していると考えられる。一方、自然電位の貴化により、腐食環境が改善していると考えられる測点S+TおよびTは、電流密度が小さくなり、グレード2の判定となった。グレードの判定結果より、仮定した被測定面積は一定の妥当性があると考えられる。

6.2 陽極設置範囲における分極曲線

分極曲線の測定位置を図-13に示す。陽極を設置した箇所の中間位置を各2箇所測定した。通電開始より約5ヵ月および約10ヵ月経過した時点での分極曲線をそれぞれ図-14および図-15に示す。なお、鉄筋の被測定面

積は、6.1(1)と同様に仮定した。引張鉄筋側の不動態の状態は、約5ヵ月後はグレード2~3に該当する結果であったが、約10ヵ月後では、電流密度がより小さくなったことで、グレード3に該当する結果となり、腐食環境の改善が確認された。ただし、約10ヵ月後は冬季(12月)の測定であるため、気温低下による影響も含まれていると考えられる。

6.3 被測定面積に関する考察

接触法による測定において、鉄筋の被測定面積を仮定したが、分極曲線にターフェル外挿法を適用し、自然電位との交点を求めることで得られる腐食電流量と、交流インピーダンス法による分極抵抗の測定により得られる腐食電流量を比較することで、被測定面積に関する考察を行った。

分極曲線におけるターフェル領域は、一般的には過電圧 $\pm 100\text{mV}$ 程度で現れるとされており、本考察においては、アノード分極曲線へのターフェル外挿法の適用は、鉄筋の自然電位を E_n とし、 $E_n + 50\text{mV}$ から $E_n + 150\text{mV}$ の範囲に対して近似直線(常用対数軸に対して)を挿入し、腐食電流密度を算定した。通電から約10ヵ月における分極抵抗と分極曲線による腐食電流密度の比較を表-6に示す。なお、()内の値は約5ヵ月後の結果、また近似直線の傾きをターフェル勾配とし、 mV/decade (電

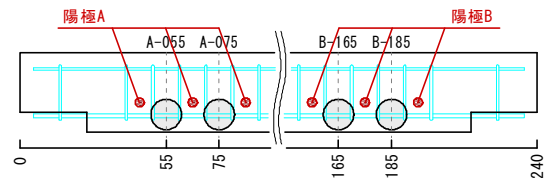


図-13 分極曲線の測定位置

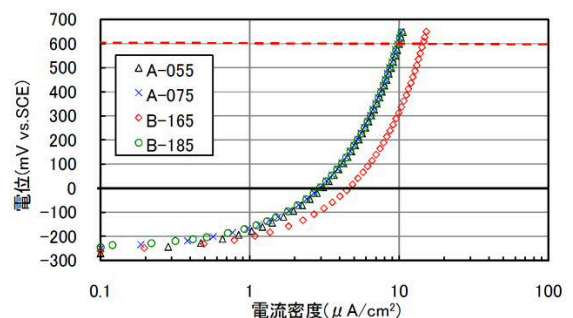


図-14 通電から約5ヵ月後のアノード分極曲線

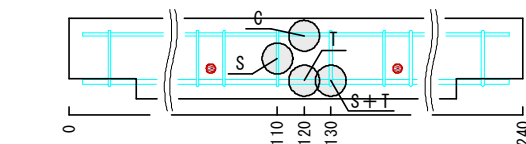


図-11 分極曲線の測定位置

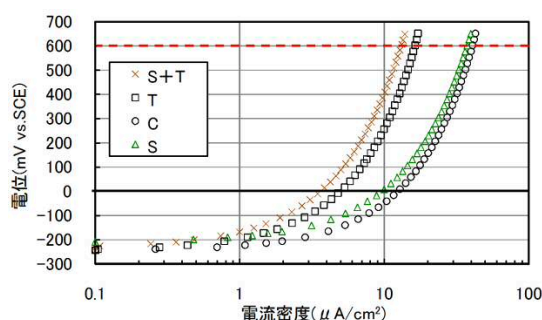


図-12 通電から約5ヵ月時点のアノード分極曲線

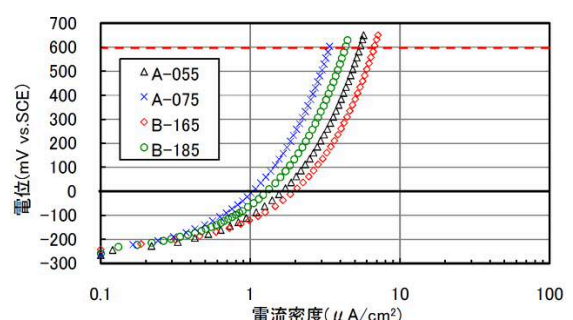


図-15 通電から約10ヵ月後のアノード分極曲線

流密度の常用対数軸 1 目盛りあたりの電位変化量) の単位で示す。腐食している鉄筋のアノード反応に対するターフェル勾配は通常 100 mV/decade 以下である一方で、腐食が緩やかな方がアノード分極曲線の傾きは大きくなる⁷⁾こと、また CIPE 法を用いたアノードのターフェル勾配は、鉄筋が埋設された塩化物イオンを 10kg/m³ 含むコンクリート供試体で、飽和湿度および乾燥条件において 150~200mV/decade となる⁸⁾ことが示されており、約 200 mV/decade の勾配は適当な値であると考えられる。

ここで、CEB における分極抵抗に基づく腐食判定(表-7)に従い、分極抵抗と分極曲線による腐食判定を比較した結果を表-8 に示す。両者の腐食判定は概ね一致する結果が得られ、本実験の範囲では、接触法における被測定面積は適当な設定であることが確認された。

表-6 分極抵抗と分極曲線による腐食電流密度の比較

測点	分極抵抗		分極曲線(接触法)
	腐食電流密度 (μA/cm ²)		ターフェル勾配 (mV/decade)
	10 ヶ月後	10(5)ヶ月後	
T	0.512	0.22 (0.60)	210
C	1.422	1.20 (1.60)	214
A-055	0.269	0.21 (0.37)	203
A-075	0.174	0.12 (0.37)	216
B-165	0.271	0.21 (0.60)	212
B-185	0.183	0.16 (0.37)	216

表-7 分極抵抗に基づく腐食判定 (CEB)

腐食電流密度 (μA/cm ²)	腐食速度の判定		分極抵抗 R _{ct} (kΩ·cm ²)
0.1~0.2 未満	1	不動態状態(腐食なし)	130~260 より大
0.2 以上 0.5 以下	2	低~中程度の腐食速度	52 以上 130 以下
0.5 以上 1.0 以下	3	中~高程度の腐食速度	26 以上 52 以下
1 より大	4	激しい、高い腐食速度	26 未満

表-8 分極抵抗と分極曲線による腐食判定の比較

測点	腐食速度の判定		判定の相違
	分極抵抗	分極曲線	
T	3(中~高)	2(低~中)	1 段階異なる
C	4(高い)	4(高い)	一致
A-055	2(低~中)	2(低~中)	一致
A-075	1(不動態)	1(不動態)	一致
B-165	2(低~中)	2(低~中)	一致
B-185	1(不動態)	1(不動態)	一致

7. まとめ

約 30 年暴露された RC 梁の引張鉄筋を主な防食対象として、陽極を点状配置する流電陽極方式を適用し、通電開始から約 11 ヶ月間で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 本流電陽極方式の適用により、自然電位および分極曲線の測定結果から、腐食電流の抑制までには至っ

ていないが、100mV 未満の復極量であっても、引張鉄筋側の腐食環境の改善が確認された。

- (2) 防食効果は、陽極から離れた位置にある鉄筋までは及ばないことが確認された。また、各陽極被覆材 A・B は、小型の試験体を用いた既往の研究¹⁾では、防食効果に有意な差は生じなかった一方で、本実験は、鉄筋の自然電位のばらつきが小さくなった通電開始 8 ヶ月後から、発生電流量に差が生じない結果となっており、通電前の鉄筋の腐食状態の違いが、各陽極からの発生電流量に影響したと推察される。
- (3) 本実験の範囲では、接触法による分極曲線の測定結果より、仮定した鉄筋の被測定面積において、不動態の状態のグレード判定は適当な結果が得られた。
- (4) 仮定した鉄筋の被測定面積は、分極曲線にターフェル外挿法を適用することにより算出される腐食電流密度と、分極抵抗法により得られる腐食電流密度の比較により、適当な設定であることが確認された。

参考文献

- 1) 香田真生, 青山敏幸, 山本大介, 濱田秀則: 流電陽極方式における陽極被覆材および乾湿条件が防食効果に与える影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1549-1554, 2015
- 2) 横田弘, 秋山哲治, 濱田秀則, 三上晃, 福手勤: 海洋環境(酒田港 20 年)に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響, 港湾空港技術研究所報告, Vol.38, No.2, 1999
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説, 1997.1
- 4) 大即信明: コンクリート中の鉄筋の腐食に及ぼす塩素の影響に関する研究, 港湾空港技術研究所報告, Vol.24, No.3, 1985
- 5) 濱田秀則, 森川亮太, 佐川康貴, 池田隆徳: 数種の条件の違いがモルタル中鉄筋の電気化学的測定結果に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, p.1085-1090, 2010
- 6) 荒木志帆, 川上純, 吉田秀典, 横田優: 分極抵抗法における被測定面積の評価に関する数値解析的研究, 土木学会第 68 回年次学術講演会講演概要集, pp.761-762, 2013
- 7) 審良善和, 山路徹, 小林浩之: 電気化学的測定による鉄筋腐食と塩化物イオン濃度の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, p.1133-1138, 2011
- 8) 竹子賢士郎, 山本悟, 高谷哲: コンクリート中鉄筋の腐食速度とターフェル勾配の関係に関する検討, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, pp.129-130, 2015