

論文 コンクリート試験壁に適用した亜鉛・アルミ擬合金溶射による犠牲陽極工法の防食性能

芦田 公伸*1・山本 賢司*2・松久保 博敬*2・上村 豊*3

要旨：分割鉄筋を内部に有する塩化物イオンを混入した、鉄筋コンクリート製壁状試験体に Zn-Al 擬合金溶射による犠牲陽極法の電気防食を適用し、コンクリートに埋設されている分割鉄筋の電位、および、分割鉄筋間に流入する電流を 2 年間にわたり計測した。また、比較として、犠牲陽極に接続しない分割鉄筋も同一試験体内に埋設し、電位と電流を調査した。犠牲陽極に接続せず、防食されていない分割鉄筋は 1 年後に腐食が発生したのに対し、犠牲陽極により防食されている分割鉄筋は 2 年経過後でも防食電流が供給され、防食状態であることが判明した。

キーワード：犠牲陽極、亜鉛アルミ擬合金、溶射、防食、腐食、分割鉄筋、電気防食工法

1. はじめに

コンクリートに埋設されている鉄筋を腐食から守る方法として、電気化学的防食工法がある¹⁾。電気化学的防食工法の一つである電気防食では外部電源方式が主流である。しかし、外部電源方式では、外部電源装置が高価であり、かつ、半永久的な通電管理と機器のメンテナンスや交換が必要という課題がある。

一方、卑金属の溶射による犠牲陽極工法の電気防食では、コンクリート表面に金属被膜を溶射し、溶射被膜と鉄の電位差により防食電流を鉄筋に供給し、鉄筋を防食する²⁾。外部電源が不要なため、安価であり、かつ、機器メンテナンスも容易であるため、防食機能を有する表面処理として、塩害に対するコンクリート構造物の予防保全や事後保全としての利用が考えられる。

本研究では、実構造物を模擬した壁状の鉄筋コンクリート試験体を用いて、Zn-Al 擬合金溶射による犠牲陽極

工法を適用し、通電直後の既報告³⁾のその後として、2 年間の屋外暴露における防食効果を検証した結果を新たに報告する。

2. 実験

2.1 コンクリート壁試験体

コンクリート壁試験体を高さ 1.2m×長さ 5m×厚さ 0.2m とし、鉄筋(分割鉄筋、図-1)を上段(下から 1m)、中段(下から 0.6m)、下段(下から 0.2m)に水平方向に配置した。直径 11mm のみがき棒鋼(長さ 45cm)をリード線で接続することにより 10 本の分割鉄筋を電氣的に 1 本の鉄筋と見なした。図-2 に分割鉄筋の位置の概要を示す。なお、分割鉄筋は図-2 の左側から順番に 1, 2, 3, …, 10 と番号を付した。また、鉄筋組立のために鉛直方向に使用した D10 の異形鉄筋には、塩化ビニール製パイプをかぶせることにより、分割鉄筋との電氣的な干渉を防止

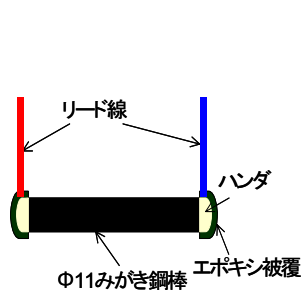


図-1 分割鉄筋

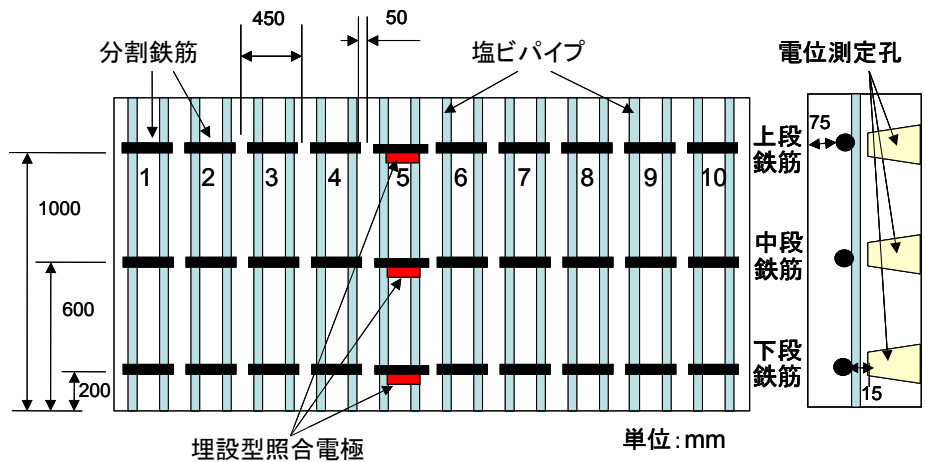
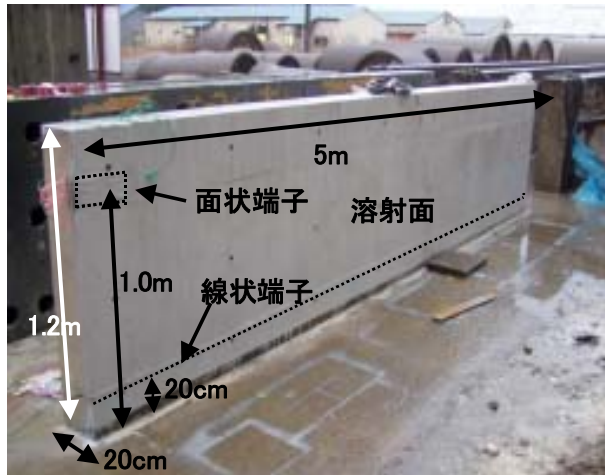


図-2 分割鉄筋の位置

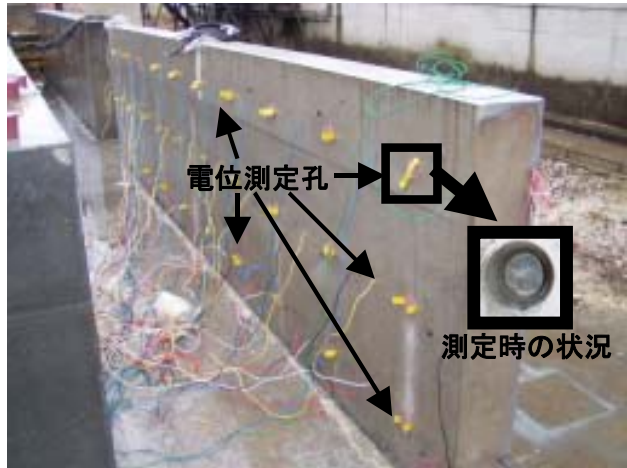
*1 電気化学工業 (株) 青海工場 無機材料研究部 主幹研究員 博士(工学) (正会員)

*2 電気化学工業 (株) 青海工場 無機材料研究部 (正会員)

*3 電気化学工業 (株) 青海工場 セメント部 セメント技術品質管理課長



a) 溶射面(表面)



b) 計測面(背面)

図-3 コンクリート壁試験体

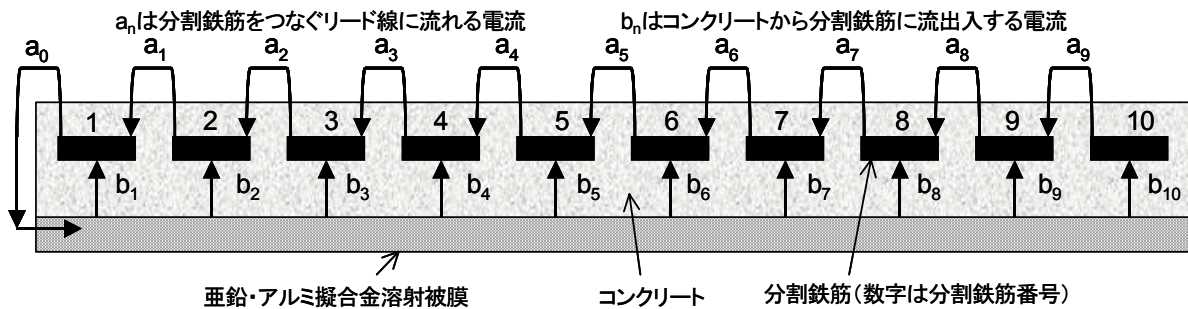


図-4 分割鉄筋に流出入する電流イメージ

した。

コンクリートの配合は、普通ポルトランドセメント=337kg/m³、水セメント比=60%、S/a=52%、Gmax=25mmとし、塩化物としてNaClを外割で12kg/m³添加し、スランブ=21cmとした。図-3に壁試験体の外観を示す。

壁試験体の分割鉄筋と溶射被膜を電氣的に接続するための排流端子として、図-3 a)溶射面に示すように壁体表面の上段鉄筋に面状と下段鉄筋に線状を設置した。上段鉄筋には図-2の分割鉄筋番号1の近傍に端子を取付け、下段鉄筋には平行に带状に端子を設置し、各端子の設置面積は同一とした。なお、排流端子は図-2に示す上段鉄筋と下段鉄筋の番号1の分割鉄筋にのみ接続した。したがって、中段鉄筋は溶射被膜と接続せず、防食電流を供給しない比較用とした。

壁試験体の表面に、エアスプレーによる粗面形成剤を塗布した後、常温金属溶射法による亜鉛・アルミニウム擬合金をコンクリートに付着する最大膜厚 250μmとして溶射した。また、溶射被膜の劣化を抑制するため、エアスプレーにより封孔剤を溶射被膜の上に塗布した。

2.2 評価項目と測定方法

(1) 分割鉄筋の電位

壁試験体の溶射を形成した面の反対側の面に電位測

定のための測定孔を設けた(図-2、図-3 b)計測面)。この電位測定孔は常時赤ゴム栓にて密閉しているが、電位測定時のみ赤ゴム栓をはずした。赤ゴム栓をはずした電位測定孔(図-3 b)計測面)から鉛照合電極を押し当てること(分割鉄筋までのかぶり=15mm)により各分割鉄筋の電位を測定した。測定値は飽和硫酸銅電極基準(CSE)に換算した。溶射被膜と分割鉄筋を電氣的に接続した状態のON電位、接続を断つた直後のインスタントOFF電位、および、24時間後OFF電位を測定した。24時間後OFF電位とインスタントOFF電位の差から復極量を求めた。

(2) 分割鉄筋に流出入する電流

図-4に分割鉄筋間に流出入する電流のイメージを示す。溶射被膜からコンクリートを介してn番目の分割鉄筋へ供給される防食電流は b_n であるが、この電流を直接測定することはできない。そのために、各分割鉄筋をつなぐリード線に流れる電流 a_n を無抵抗電流計にて測定し、式(1)にて b_n を求めた。

$$b_n = a_{n-1} - a_n \quad (1)$$

$b_n \geq 0$ はn番目の分割鉄筋へコンクリートを介して防食電流が供給されていることを示し、逆に $b_n < 0$ は分割鉄筋からコンクリートへ腐食電流が流出している

ことを示している。

(3) 腐食の目視観察

分割鉄筋の電位測定時に、赤ゴム栓をはずした電位測定孔の内面に滲み出る錆汁やひび割れの有無を目視にて判定する。

(4) 分割鉄筋の腐食量

2年間の屋外暴露終了後、コンクリート壁試験体を解体して分割鉄筋を取り出し、鉄筋の腐食量を調査した。取り出した分割鉄筋を10%濃度のクエン酸二アンモニウム水溶液(60℃)に浸漬し⁴⁾、錆を除去することにより、腐食重量を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 分割鉄筋の電位

溶射被膜と上段鉄筋および下段鉄筋との電気的な接続を開始してから、3ヶ月後、6ヶ月後、12ヶ月後、18ヶ月後、および、24ヶ月後の復極量(=24時間後 OFF 電位 - インスタント OFF 電位)を図-5~図-7に示す。

図-5に示す上段鉄筋では、接続開始後3ヶ月で復極量が200mV程度となり、6ヶ月で400mV、それ以降は300mV付近となっている。また、排流端子との接続点は番号1の分割鉄筋であるが、接続点から最も遠い番号10の分割鉄筋でも300mV前後の復極量が確保できている。

図-6に示す下段鉄筋も、接続開始後3ヶ月で復極量が200mV以上となり、6ヶ月と12ヶ月で300mV、18ヶ月で分割鉄筋番号によりばらつきが生じ、番号1と2が100mVを下回ったが、その他の番号は200mV程度を確保している。また、24ヶ月では、番号1と2が300mVと大きく復極したが、番号8が100mV付近にまで減少した。しかし、いずれにしても、3ヶ月から24ヶ月において、排流端子と接続されている分割鉄筋番号1から最も遠い番号10まで十分な復極量が得られていると判断できる。

一方、上段鉄筋や下段鉄筋と比較して、中段鉄筋は溶射被膜と電気的に接続していないため、図-7に分割鉄筋番号5の計測結果を示すように、いずれの測定時期においても復極量はほとんど計測されていない。

以上から、測定時期による復極量の大小のばらつきは存在していても、上段鉄筋と下段鉄筋の復極量が100~400mV程度計測されていることは、溶射被膜による防食効果が2年間にわたって安定して継続していることを示している。

3.2 分割鉄筋に流出入する電流

図-4の $a_0 \sim a_9$ は分割鉄筋と分割鉄筋をつなぐリード線(図-3 b)計測面(背面)に示す各色のリード線)に流れる電流であるので、この電流を無抵抗電流計にて測

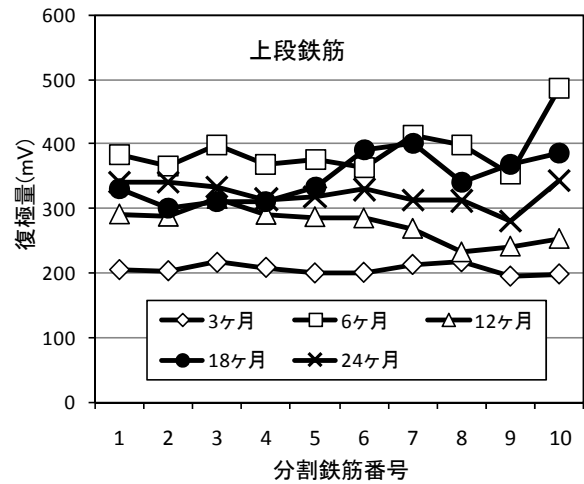


図-5 上段鉄筋の復極量

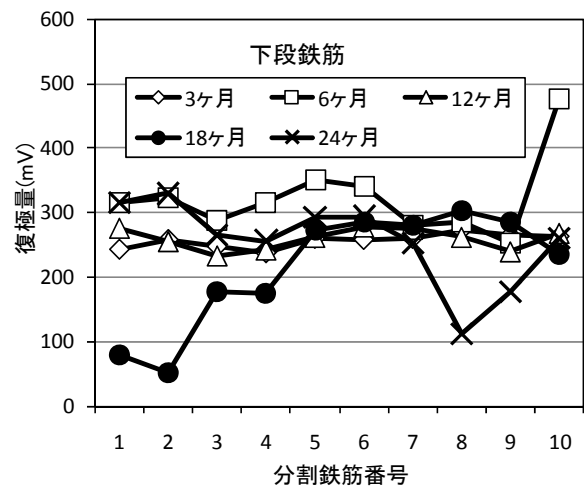


図-6 下段鉄筋の復極量

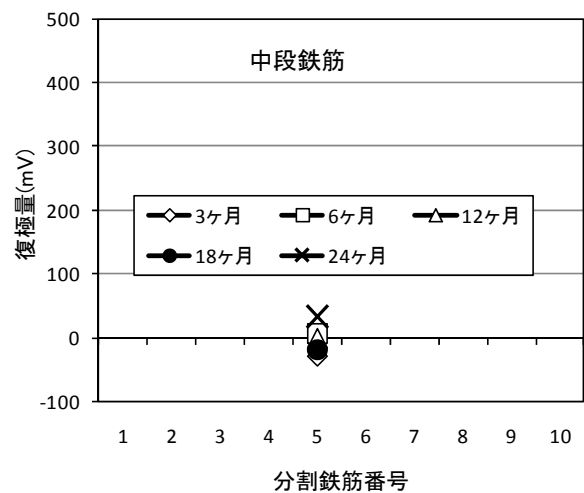


図-7 中段鉄筋の復極量

定し、式(1)にて分割鉄筋に流出入する電流量 $b_1 \sim b_{10}$ を求めた。なお、 $b_{10} = a_9$ とした。3ヶ月後、12ヶ月後、

18 ヶ月後、および、24 ヶ月後の電流量を図-8～図-10に示す。なお、図-8～図-10において、電流量の符号がプラスであるということは、図-4から溶射被膜から分割鉄筋へコンクリートを介して電流が供給されている、すなわち、防食電流が流れていることを示し、逆に、電流量の符号がマイナスであるということは、分割鉄筋からコンクリートへ電流が流出している、すなわち、腐食電流が流れていることを示している。

図-8に示す上段鉄筋の電流量は、接続開始後3ヶ月と12ヶ月では0.3mA前後であるが、18ヶ月や24ヶ月では0.2～1.2mAとばらつきが大きくなっている。18ヶ月と24ヶ月において、分割鉄筋の番号により電流量が大きく異なるのは、本来均一なカソードである分割鉄筋の中でコンクリートの変動(含水率やイオンバランスの変化)によりアノード的な反応を示す部分が現れるためと推測される。アノード的な反応を示す分割鉄筋も、時間の経過とともにカソードへ変化する。また、その逆も見られる。このような変動をしている分割鉄筋の番号は1, 4, 5, 6, 9である。しかし、いずれの測定時期も、いずれの分割鉄筋も、電流量はすべてプラスであることから、上段鉄筋は常に防食電流が供給され、防食状態であると判断できる。

図-9に示す下段鉄筋の電流量は、接続開始後3ヶ月、12ヶ月、18ヶ月、24ヶ月ともに、0.3mA前後を中心とした比較的安定した電流量が供給されている。この電流量が安定している理由は、排流端子を下段鉄筋に沿って線状に配置したことによると推測されるが、本実験の範囲では理由を断定することはできない。いずれにしても、測定時期も、どの分割鉄筋も、電流量はすべてプラスであることから、下段鉄筋は常に防食電流が供給され、防食状態であると判断できる。

上段鉄筋や下段鉄筋と比較して、中段鉄筋は溶射被膜と電気的に接続していないため、コンクリートに練り込んだ塩化物により、図-10に示すように電流量がプラスとマイナスで計測されている。すなわち、防食電流と腐食電流の両方が検出されている。これは、隣り合う分割鉄筋がアノードとカソードに分かれ、その間に電流が流れている、すなわち、マクロセル腐食が発生していることを示している。たとえば、3ヶ月の番号2と4と6がカソード、3と5がアノード、また、18ヶ月の1と3と6と8と10がカソード、2と7と9がアノード、である。また、図-10のほとんどの分割鉄筋が時間の経過とともに、アノードとカソードとを繰り返している。この繰り返しをすることにより、1本の鉄筋が全面腐食することにつながる。

以上から、塩化物を練り込んだコンクリート中においても、上段鉄筋と下段鉄筋は常にカソードであり、防食

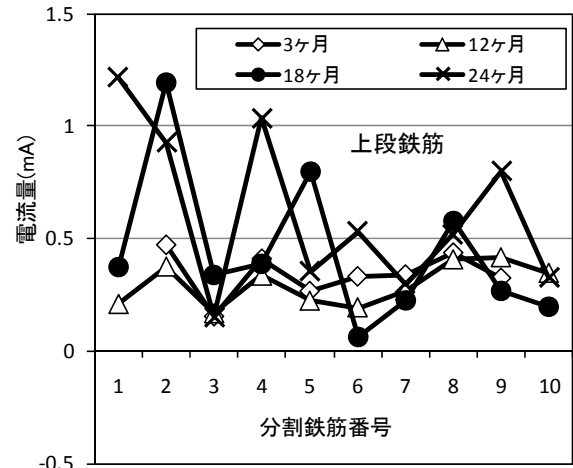


図-8 上段鉄筋の電流量

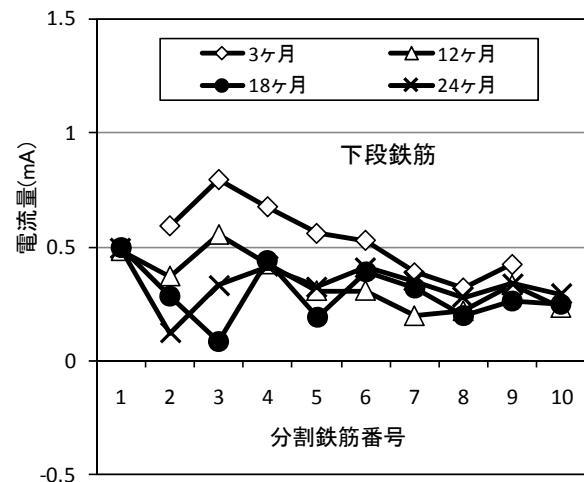


図-9 下段鉄筋の電流量

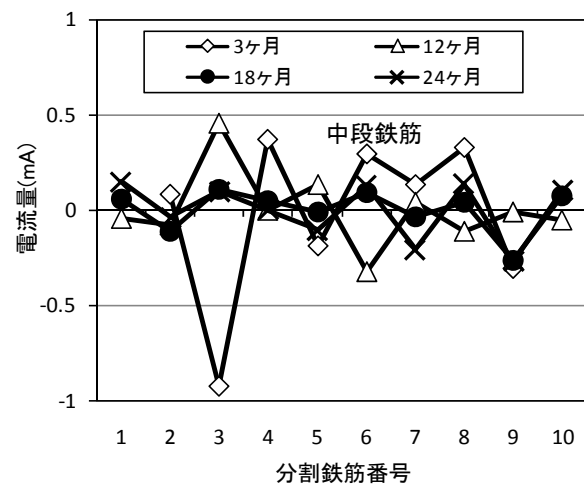


図-10 中段鉄筋の電流量

電流が供給されているため、溶射被膜による防食効果が2年間にわたって安定して継続していると判断できる。



上段鉄筋

中段鉄筋

下段鉄筋

図-11 12ヶ月後の電位測定孔(分割鉄筋番号9)



上段鉄筋

中段鉄筋

下段鉄筋

図-12 24ヶ月後の電位測定孔(分割鉄筋番号7)

3.3 腐食の目視観察

赤ゴム栓をはずした電位測定用孔(図-3 b)計測面を参照)の内部を目視観察し、錆汁やひび割れの有無を調査した。

接続開始後12ヶ月目に中段鉄筋の番号9に錆汁を認めた(図-11)。図-9に示すように、中段鉄筋の番号9は3ヶ月の時点でも、12ヶ月の時点でもアノードであるため、3ヶ月から12ヶ月まで腐食反応が継続していたものと思われる。その結果として、12ヶ月目に錆汁を認めた。図-11には、12ヶ月目の上段鉄筋と下段鉄筋も比較として示す。

次に、24ヶ月後において、中段鉄筋の電位測定用孔に最も腐食が激しい分割鉄筋番号7と同じ番号の上段鉄筋、下段鉄筋の写真を示す(図-12)。中段鉄筋では、錆汁とひび割れが観察されるが、上段鉄筋と下段鉄筋には腐食による損傷は全く認められない。

3.4 分割鉄筋の腐食量

24ヶ月の測定後、壁試験体を解体し、分割鉄筋を取り出し、腐食状況を観察した。

10%濃度のクエン酸二アンモニウム水溶液(60℃)に浸

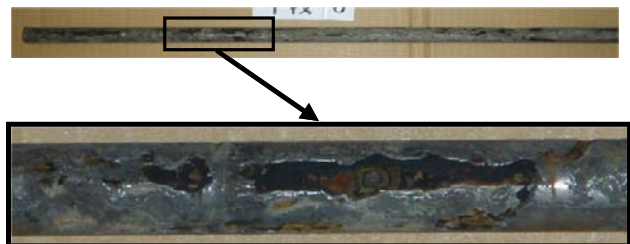


図-13 中段鉄筋の腐食状況

漬し、さびを除去した後、腐食の激しかった中段鉄筋の分割鉄筋番号3を図-13に示す。中段鉄筋の分割鉄筋番号3は明らかに深い孔食があり、マクロセル腐食を誘発していたと思われる。図-9では、3ヶ月において中段鉄筋の分割鉄筋番号3からは0.9mAの腐食電流が流出していた。

図-14に分割鉄筋表面積あたりのさびの重量を示す。溶射被膜と電氣的に接続していた上段鉄筋と下段鉄筋では、さびの重量は、いずれの分割鉄筋においてもほぼ0.1g/cm²以下である。一方、中段鉄筋では、分割鉄筋に生じたさびの重量は0.2~0.6g/cm²と大きく、かつ、その変動も激しい。重量が大きく異なるのは、図-9に示す

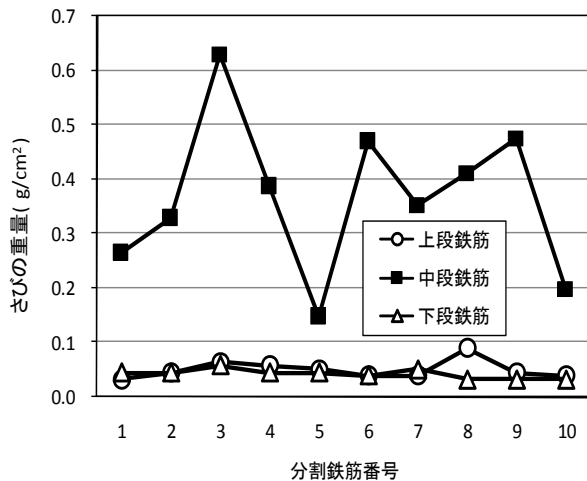


図-14 分割鉄筋の腐食重量

ように、カソードとしての防食電流とアノードとしての腐食電流に大きなばらつきが生じているためである。

図-15に上段鉄筋、中段鉄筋、下段鉄筋の分割鉄筋に生じた表面積当たりのさびの合計重量を示す。上段鉄筋のさびの合計量は 0.5g/cm^2 、下段鉄筋は 0.4g/cm^2 に対し、中段鉄筋は 3.7g/cm^2 であった。中段鉄筋のさびの重量は上段鉄筋の7.4倍、下段鉄筋の9.3倍である。

塩害劣化において、コンクリートの腐食ひび割れ発生は腐食量と関連する⁹⁾ため、劣化が顕在化するまでの期間は、上段鉄筋では中段鉄筋よりも7.4倍、下段鉄筋では9.3倍も長くなる。

すなわち、溶射による犠牲陽極工法により、たとえ鉄筋に腐食が発生しても、腐食速度を大幅に抑制することにより、腐食ひび割れの顕在化までの期間が約8倍も延びることになる。

4. まとめ

本検討により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 亜鉛・アルミニウム擬合金溶射被膜と電気的に接続した分割鉄筋の復極量は暴露期間2年間において100~400mV程度であり、防食効果が安定して継続している。
- (2) 塩化物を含有するコンクリート中においても、溶射被膜と電気的に接続した分割鉄筋は常にカソードであり、暴露期間2年間にわたり防食電流が供給されている。
- (3) 溶射被膜と電気的に接続した分割鉄筋を含むコンクリートには、暴露期間2年間において、腐食ひび割れは発生しなかった。
- (4) 溶射被膜と電気的に接続しなかった分割鉄筋は、復極量はほぼゼロであり、暴露期間2年間においてアノードとカソードを繰り返し、マクロセル腐食を発生した。
- (5) 溶射被膜と電気的に接続した分割鉄筋の腐食重量は、溶射被膜と電気的に接続しなかった分割鉄筋の腐食重

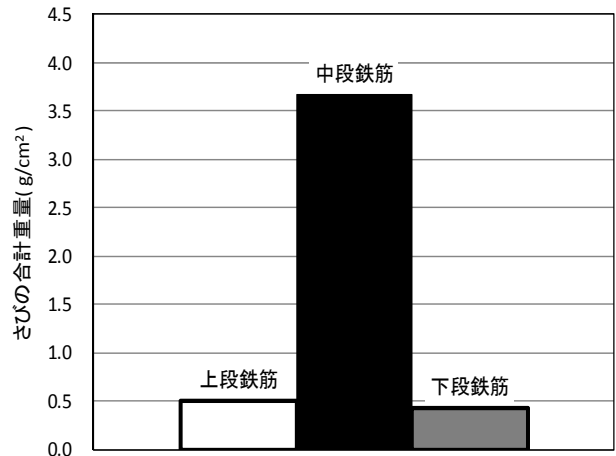


図-15 分割鉄筋の腐食重量

量の1/8と極めて小さかった。

- (6) 腐食ひび割れが顕在化するまでの期間は、溶射被膜と電気的に接続した分割鉄筋では約8倍も長くなる。

5. 謝辞

本研究は、鹿児島大学、飛鳥建設株式会社、大日本塗料株式会社、住友大阪セメント株式会社、電気化学工業の共同研究として実験に着手したものであり、壁試験体の作製にあたり、飛鳥建設の名倉政雄氏、槇島修氏、大日本塗料の里隆幸氏、相澤匡氏、住友大阪セメントの川俣孝治氏の協力を得ました。また、供試体の作製や測定などに関し、鹿児島大学の武若耕司教授、山口明伸准教授より多くのご助言とご指導を得ましたことを記し、ここに各位殿に感謝いたします。

参考文献

- 1) 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No.107, 土木学会, 2001.11
- 2) 蓮井健二, 里隆幸, 武若耕司, 森山守: 常温金属溶射による鉄筋コンクリートへの電気防食の検討, 防せい管理, Vol.43, No.9, pp.335-340, 1999.9
- 3) 山本賢司, 芦田公伸, 槇島修, 武若耕司: 鉄筋コンクリート壁試験体を用いた犠牲陽極法電気防食工法の防食効果に関する実証的研究, 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, No.8, pp.331-336, 2008.10
- 4) コンクリート中の鋼材の腐食評価方法, JCI SC-1, 日本コンクリート工学協会, 1987.4
- 5) 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向-コンクリート委員会腐食防食小委員会報告-, コンクリート技術シリーズ, No.26, 土木学会, 1997.12