

ニッケル被覆炭素繊維シートを陽極に用いた新しい電気防食工法の施工 — 柵島橋補修工事 —

オリエンタル建設(株) 正会員 ○ 中村 雅之
 熊本県上天草市役所建設部 小西 裕彰
 (株)コンサル ハマダ 東 義輝
 オリエンタル建設(株) 中村 隆志

1. はじめに

電気防食工法は、新たに設置した陽極からコンクリートを介して鋼材に微弱な電流を流し、腐食反応を停止させる工法である。コンクリート中の塩化物イオン量の過多に左右されない防食工法である。電気防食工法は、面状陽極方式、線状陽極方式、点状陽極方式の3つに分類される。電気防食工法の施工は、陽極の設置が主要な工種である。線状陽極方式・点状陽極方式では、コンクリートに切削あるいは削孔して陽極材を埋め込み、モルタルやバックフィルで充填する、面状陽極方式では、コンクリート表面に陽極材を固定しモルタルで被覆する、という施工である。この際、コンクリート表面の金属探査および短絡処理などの入念な施工が必要となる。電気防食は通電時の電気化学反応により陽極材から酸素や塩素ガスが発生する可能性がある。ガスの発生は陽極材近傍のコンクリートや陽極材を劣化させ、その結果、抵抗が上昇し電気防食の機能が低下する場合がある。陽極設置にかかわる金属探査や短絡処理を不要とし、陽極の寿命を左右するガスの発生をなくした、新しい電気防食工法を開発した。本稿では、ニッケル被覆炭素繊維シートを陽極材に使用した新しい電気防食工法について述べるとともに、柵島橋に適用した施工について述べる。

2. ニッケル被覆炭素繊維陽極システム

本工法は、陽極材にニッケル被覆炭素繊維シートを用いた外部電源方式の電気防食工法である。陽極の構成図を図-1に示す。陽極システムはFRPカバー内にニッケル被覆炭素繊維シート陽極を配置し、バックフィルを充填している。写真-1に陽極システムを構成する材料を示す。以下に電気防食システムを構成する各材料について説明する。

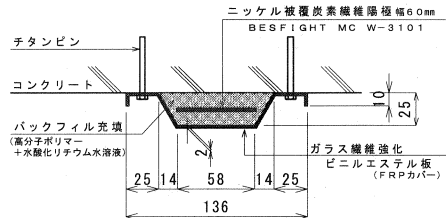


図-1 陽極システムの構成図

(1) ニッケル被覆炭素繊維陽極

陽極材として使用するものは、繊維1本1本にニッケルを均一に被覆した炭素繊維シート(バスファイトMC-W3101)である。炭素繊維の優れた耐久性・経済性と、ニッケルの持つ高い導電性・耐久性を兼ね備えた高性能陽極である。炭素繊維はPAN(ポリアクリロニトリル)型である。表-1にニッケル被覆炭素繊維シートの特性を示す。炭素繊維の直径は7.5 μ mであり、3000本で1本の糸を構成する。繊維一本毎に平均0.25 μ mの厚さのニッケルを被覆している。25mm幅あたり12.2本の糸で平織りシートを構成し、比表面積は



写真-1 陽極システム構成材料

表-1 ニッケル被覆炭素繊維の特性

| | シート | | | フィラメント数 | Ni平均被膜厚 μ m | 繊維直径 μ m | 織度 tex | 引張強度 MPa | 引張弾性厚 Gpa | 伸度 % | 密度 g/cm ³ | 体積抵抗率 ohm·cm |
|---------------|--------------|------|------------------------|---------|--------------------|-----------------|-----------|-------------|--------------|---------|-------------------------|------------------------|
| | 密度(本/25mm)たて | よこ | 重さ g/m ² | | | | | | | | | |
| ニッケル被覆炭素繊維シート | 12.2 | 12.2 | 355 | 3000 | 0.25 | 7.5 | 360 | 2744 | 215 | 1.2 | 2.7 | 7.5 × 10 ⁻⁵ |
| Ni | - | - | - | - | - | - | - | 314 | 206 | 30 | 8.9 | 6.0 × 10 ⁻⁶ |

70 m²/kg 程度である。この大きな表面積により、陽極材として安定した電流を流すことができる。陽極材に使用する炭素繊維シート寸法は、幅 6 cm、厚さ 0.25mm である。

陽極材としての長期耐久性は、NACE (米国腐食防食協会) の陽極耐久性試験 1) を参考とした方法により確認した。¹⁾ これは、110mA/m² の電流を 40 年間継続して通電した場合の積算電流量を、コンクリート環境を模擬した水溶液に浸けた陽極材に通電して、耐久性を評価するものである。同等の積算電流量は 8.9A/m² の電流を 180 日間通電して得られ、陽極の電位変化量が 4 V 以下の場合に合格としている。

(2) バックフィル

バックフィルは、強アルカリ溶液をポリアクリル酸塩系高吸水ポリマー (アクペック HV501ER) に吸収させて成形したものである。強アルカリ水溶液は pH=14 の 18% の水酸化リチウムを使用した。水溶液と高分子の比は 20 : 1 である。

(3) FRPカバー

ガラス繊維で強化されたビニルエステル樹脂 (FRP) をトレイ状に成形したもので耐食性・耐候性に優れている。炭素繊維シート陽極とバックフィル材をコンクリート表面に固定し、これを保持してバックフィルの乾燥を防止する。

3. 工法の特長

(1) コスト縮減

炭素繊維シートを用いた電気防食工法は、炭素系材料を陽極の基材として用いているため、白金系の貴金属を被覆したチタン系材料を基材とした陽極等と比較して経済的である。

(2) 構造物への負担軽減

既設構造物に施工する場合、コンクリート表面に陽極固定用の孔を削孔してプラグを設置するだけである。コンクリート構造物に対しての断面欠損がない。

(3) 施工の省力化

コンクリート中の鋼材が陽極と短絡した場合、①鋼材が陰極になることが出来ず電気防食が達成しされない、②鋼材が陽極になり著しい腐食が起こる、の 2 つの障害が発生する。コンクリートかぶり部分にある番線・結束線・釘・形鋼などが陽極と短絡すると、これらがアノードとなり著しい腐食を起こす。よって陽極の設置前に、かぶりの薄い鋼材の探査や露出金属の探査や、これらを電氣的に絶縁する処置や露出金属の除去などの短絡処理が必要となる。本方式では、バックフィルが陽極を包囲するので露出金属に接触する事がなく短絡処理が不要となる。

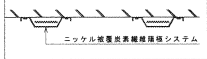
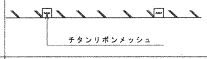
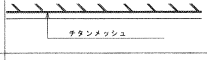
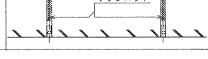
(4) 死荷重の増加を低減

陽極をバックフィル材とともに FRP カバー内に収め、コンクリート表面に設置するために、モルタル被覆などに比べて死荷重の増加を抑えることができる。同じ線状陽極方式のチタンリボンメッシュ陽極方式や点状陽極のチタンロッド工法に比べると、若干の重量増となるが、面状陽極のチタンメッシュ陽極方式に比べると大幅な重量減となる。チタンメッシュの場合 10~20mm のモルタルで被覆するため重量増が 20~50kg/m² となる。本方式の場合、FRP カバー・ニッケル被覆炭素繊維シート・バックフィルの重量の合計が 2.2kg/m、配置間隔を 300mm とすれば 7.3kg/m² となり、被覆モルタルの場合の 1/2~1/6 程度となる。表-2 に陽極システムの比較表を示す

(5) ガス発生回避

電気防食では、陽極反応で発生するガスが陽極の劣化を促進する。炭素繊維を被覆するニッケルは、酸素の発生電位が低いために、酸素ガスを発生させることがなく、塩素ガスや二酸化炭素も発生しない。

表-2 陽極システム比較表

| 陽極 | 概要 | 重量増 kg/m ² | 切削量 mm |
|----------------------|--|--------------------------|-----------|
| Ni/CFS 線状 システム |  ニッケル被覆炭素繊維線状システム | 7~8 | 0 |
| チタンリボン メッシュ 陽極 |  チタンリボンメッシュ | 0 | 25×25 |
| チタン メッシュ 陽極 |  チタンメッシュ | 20~50 | 0 |
| チタン ロッド 陽極 |  チタンロッド | 0 | φ12×L |

4. 施工概要

(1) 工事概要

- ・ 工事名 梶島橋橋梁補修工事
- ・ 工事場所 熊本県上天草市龍ヶ岳町樋島地区内
- ・ 工期 平成17年2月16日～5月31日
- ・ 桁形式 プレテンションPCホロー桁
- ・ 橋長 15.0m, 構造幅員 5.8m

(2) 劣化状況

塩化物含有量とかぶりの関係を図-2に示す。耳桁であるG1桁とG8桁が、かぶりコンクリートの30mmまで、 1.2kg/m^3 の発生限界を超えている。写真-2にG1桁の鋼材腐食状況を示す。写真上方が海側最外縁の鋼材である。鋼材の腐食が始まっている。鋼材はPC鋼より線1S10.8mm, スターラップは $\phi 6\text{mm}$ であった。

鋼材の自然電位は、G3桁： $-234\text{mVvsCSE}(-320\text{mVvsMnO}_2)$, G6桁： $-247\text{mVvsCSE}(-333\text{mVvsMnO}_2)$ であり、ASTMの判定基準での、“鋼材腐食の確率が不確定 $[-200 \geq E > -350]$ ”の領域であった。写真-3に桁下面の露出金属を示す。吊金具と思われる $\phi 22\text{mm}$ 丸鉄筋, 釘, ボルト・ナットなどが露出し発錆している。

(3) 電気防食施工手順

施工手順を図-4に示す。マーキングから通電開始まで、8日間で施工した。電気防食対象面積は 62m^2 であった。

1) 陽極設置前処理

導通確認および排流端子を取り付けるために、かぶりコンクリートを除去する。スターラップに排流端子を溶接により設置し、PC鋼材とスターラップを電気的に一体化させるために3mmのナマン鉄線を配置した。排流端子は各桁1箇所設置した。G3桁とG6桁に二酸化マンガン照合電極を設置した。設置完了後モルタルにより復旧した。

2) 陽極設置工

FRPカバーに、陽極を設置して陽極の周囲にバックフィルを充てんする。コンクリート表面に陽極固定用の孔を削孔し、固定用の絶縁プラグを挿入した。陽極とバックフィルを充てんしたFRPバーをコンクリート表面にセットし、絶縁プラグにチタンピンを挿入して固定した。

3) 陽極接続工・配線配管工

チタン製プレート2枚により端部の陽極を挟み込んで圧着して陽極に電流を分配する通電点を設置した。写真-4に電気防食工の完成写真を示す。

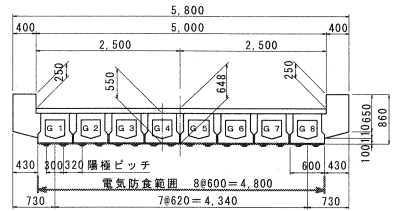


図-2 断面図

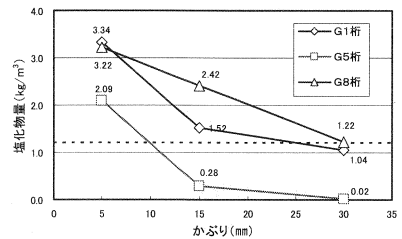


図-3 塩化物量



写真-2 G1桁腐食状況

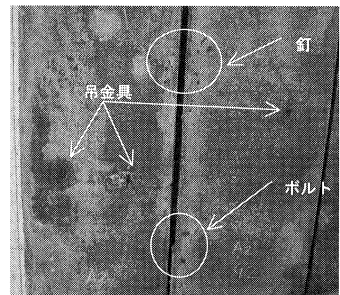


写真-3 露出金属

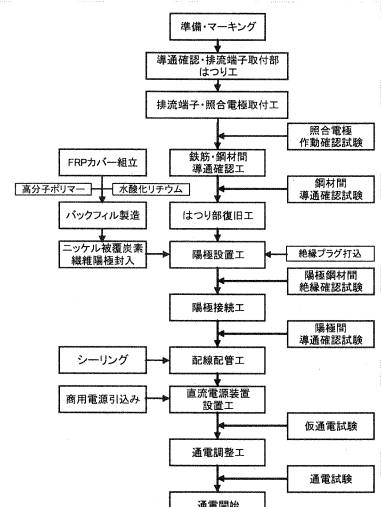


図-4 施工フロー

5. 施工管理

電気防食工事では、鋼材の導通および陽極・鋼材間の絶縁が重要である。施工中の品質管理試験として、①鋼材間導通確認試験、②陽極鋼材間導通確認試験、③分極量試験をおこなった。

(1) 鋼材間導通確認試験

鋼材間導通確認試験は、直流電圧計を用いて、スターラップに溶接した排流端子とPC鋼材間の導通を確認した。測定される電位差が1mV未満の値のとき導通が確保されると判断した。導通していないPC鋼材が約7割であった。導通していないPC鋼材に対しては、写真-5に示すように、導通用の鋼材として3mmの番線を配置し、なまし鉄線により緊縛した。

(2) 陽極鋼材間絶縁確認試験

陽極鋼材間絶縁確認試験は、照合電極の埋込み完了後、直流電圧計を用いて各陽極の通電点と排流端子の電位差を測定し、かつ、交流抵抗計を用いて抵抗を測定した。写真-6に測定する排流端子と陽極を示す。10mV以上の電位差あるいは0Ωを越える極間抵抗で電気的絶縁が確保されていると判断した。極間抵抗の測定には交流抵抗計を用いた。表-3に陽極鋼材間絶縁確認試験の結果を示す。本工法の特長であるニッケル被覆炭素繊維陽極と、アルカリ水溶液を含ませた高分子ポリマーによるバックフィルの組み合わせにより、10mV以下の値が見られ、低い電位差となっている。強アルカリ中の陽極(Ni被覆炭素繊維)電位は、コンクリート中の鋼材電位と同等なため、測定される電位差が小さいと考えられる。

(3) 分極試験

防食対象鋼材を確実に防食するために必要な防食電流の大きさは、構造物の設置環境・鋼材の腐食状況・コンクリート中の塩分量などにより異なる。防食電流の大きさを決定するために分極試験をおこなう。設置した陽極から鋼材に向けて様々な大きさの電流を流し、電流と鋼材電位の関係から、防食基準を満たす防食電流を決定する。表-4と図-5に試験結果を示す。分極試験の結果、最低分極量(防食基準)が100mA/m²以上となる3.0mA/m²で通電開始した。

6. おわりに

ニッケル被覆した炭素繊維シートを陽極材に用いて新しい電気防食工法を開発した。塩害を受けたPC桁に本方式の電気防食を行ない、実用的な電気防食工法であることを確認した。今後はデータを収集して発表したい。

本工法の研究開発と施工に、(株)ナカボータックにご支援と協力を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 小林俊秋, 吳承寧: ニッケル被覆炭素繊維シートの電気防食における通電性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.27, No.1, pp1531-1536, 2005

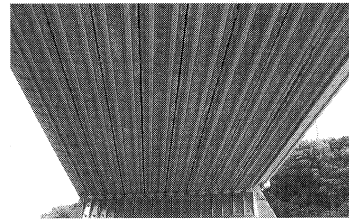


写真-4 電気防食工完成

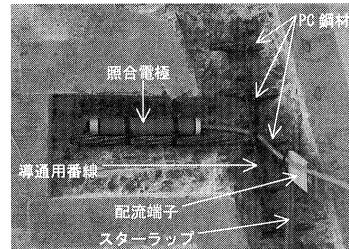


写真-5 鋼材導通確認

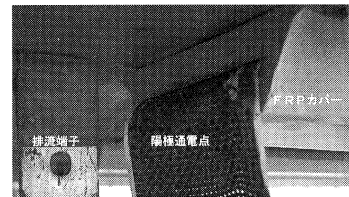


写真-6 排流端子と陽極

表-3 絶縁確認試験結果

| 測定位置 | 測定項目 | 陽極-鋼材間電位差 [mVvsMnO2] | | 陽極-鋼材間極間抵抗 [Ω] |
|------|------|----------------------|---|----------------|
| | | L | R | |
| G1 | L | +12 | | 9.95 |
| | R | +4 | | 9.24 |
| G2 | L | +15 | | 10.90 |
| | R | +23 | | 8.55 |
| G3 | L | +35 | | 10.30 |
| | R | +40 | | 10.00 |
| G4 | L | +85 | | 19.20 |
| | R | +74 | | 18.60 |
| G5 | L | -4 | | 15.30 |
| | R | -23 | | 11.50 |
| G6 | L | +63 | | 16.90 |
| | R | +75 | | 9.24 |
| G7 | L | -10 | | 12.40 |
| | R | -22 | | 13.20 |
| G8 | L | +16 | | 15.90 |
| | R | +4 | | 5.84 |

MnO₂: 二酸化マンガン照合電極

表-4 分極試験結果

| 電流密度 [mA/m ²] | 通電電流 [A] | 出力電圧 [V] | 橋梁格電気防食装置(82m) | | | | | |
|---------------------------|----------|----------|------------------------------|---------|------------------------------|---------|------|-----|
| | | | R1: G1桁(PC線) | | R2: G6桁(PC線) | | | |
| | | | PC電位 [mVvsMnO ₂] | 分極 [mV] | PC電位 [mVvsMnO ₂] | 分極 [mV] | | |
| - | - | - | 自然電位 | -320 | 0 | 自然電位 | -333 | 0 |
| 0.30 | 0.02 | 0.012 | -335 | -334 | 14 | -343 | -342 | 9 |
| 0.50 | 0.03 | 0.040 | -350 | -347 | 27 | -353 | -352 | 19 |
| 0.70 | 0.04 | 0.078 | -371 | -365 | 45 | -368 | -365 | 32 |
| 1.00 | 0.06 | 0.146 | -405 | -396 | 76 | -393 | -389 | 56 |
| 2.00 | 0.12 | 0.276 | -465 | -448 | 128 | -440 | -432 | 99 |
| 3.00 | 0.19 | 0.432 | -531 | -500 | 180 | -495 | -481 | 148 |
| 5.00 | 0.31 | 0.625 | -606 | -557 | 237 | -560 | -537 | 204 |
| 7.00 | 0.43 | 0.818 | -674 | -604 | 284 | -613 | -592 | 249 |
| 10.00 | 0.62 | 1.072 | -758 | -659 | 339 | -679 | -633 | 300 |
| 20.00 | 1.24 | 1.824 | -984 | -792 | 472 | -836 | -747 | 414 |
| 30.00 | 1.86 | 2.450 | -1151 | -880 | 540 | -948 | -813 | 480 |

On: オン電位 Ins Off: インスタントオフ電位
MnO₂: 二酸化マンガン照合電極

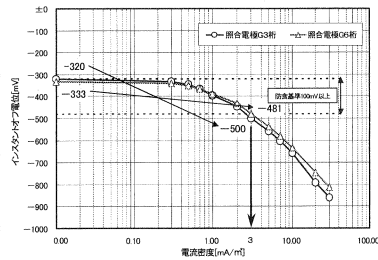


図-5 分極試験結果