

耐荷力および耐久性の向上と省力化を実現した 電気防食工法の開発

アラミド繊維・電気防食併用工法

清水 宏一朗・安藤 重裕・樋口 正典

沿岸部や寒冷地のコンクリート橋では、海水飛沫や凍結防止剤散布などに伴う塩害により、耐久性能や耐荷性能が著しく低下するような劣化が確認されている。塩害により劣化したコンクリート橋には補修補強対策を行ったとしても、既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンにより、再劣化する事例も多い。そこで、塩害により劣化したコンクリート橋の劣化の進行抑制と補強を可能にした「アラミド繊維・電気防食併用工法」を開発した。

キーワード：塩害、電気防食工法、アラミド連続繊維シート、テープ式陽極材、省力化

1. はじめに

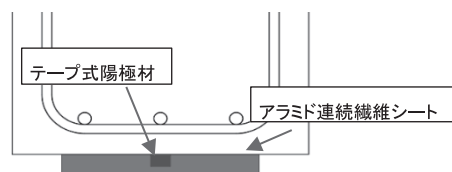
沿岸部や寒冷地のコンクリート橋では、海水飛沫や凍結防止剤散布などに伴う塩害により、耐久性能や耐荷性能が著しく低下するような劣化が確認されている。塩害により劣化したコンクリート橋における補修対策としては、一般に劣化部を除去して修復する断面修復と、新たな塩化物イオンなどの劣化因子の侵入を低減する表面保護が行われ、必要に応じて補強対策も講じられる。しかしながら、既にコンクリート中に侵入した塩化物イオンを完全に除去することは困難であり、再劣化する可能性があることから、既に腐食が開始している鉄筋の腐食進行を抑制することも重要である。

そこで、塩害により劣化したコンクリート橋の補修・補強工法として、アラミド繊維シートによる補強工法と電気防食工法を併用した「アラミド繊維・電気防食併用工法」を開発した。鉄筋腐食の進行抑制については、継続的な通電を行うことによってコンクリート中の鉄筋の腐食反応を電気化学的に制御する電気防食工法を採用した。従来の電気防食工法では陽極材をコンクリートに埋め込んでいたが、本工法ではテープ式陽極材(チタン製の薄いテープ状の陽極材)をコンクリート面に貼り付ける方式とし、陽極材の施工の省力化と経済性の向上を図った。また、アラミド繊維シートによる補強工法については、アラミド繊維シートが非伝導材料で、防食電流の分布を阻害せず均一な防食効果が得られることや、テープ式陽極材を保持、保護することによって、防食効果の長期安定性が期待できることから選定した。

本稿では、実橋の応力変動を考慮した静的載荷試験や実橋を模擬した施工性試験などの結果をもとに、本工法の防食性能や施工性、経済性などについて検討したので報告する。

2. 工法の概要

陽極材は扱いやすいチタン製のテープ式陽極材(厚さ 0.08 mm)を使用する。この陽極材をコンクリート表面に薄く塗布したセメントペーストで貼り付け、その上にアラミド連続繊維シートを貼り付けて固定する構造である。本工法の概要(断面)を図一1に、写真一1にテープ式陽極材の設置状況を示す。



図一1 本工法の概要(断面)



写真一1 テープ式陽極材の設置状況

3. 梁試験体による性能確認試験

(1) 梁試験体の概要

梁試験体の概要を図一2に示す。試験体は、橋梁の使用時の応力状態を再現できるように試験体の寸法、プレストレスやアラミド連続繊維シートの補強量、載荷荷重を決定した。コンクリートは一般的なポストテンションタイプのPC橋梁に使用されるレディーミクストコンクリート（40-12-20N）とした。なお、コンクリートの圧縮強度は、1度目の載荷試験時が55.9 N/mm²、暴露後の載荷試験時が64.0 N/mm²であった。

試験体の補強鉄筋はすべてエポキシ鉄筋とし、陽極との間で電流を流すための対極を軸方向鉄筋に沿って設置した。対極には13×150 mmのチタンメッシュを用い、主として電流の分配を評価する目的で、載荷時の等曲げ区間（図一2に示した支間中央500 mmの範囲）に3本設置した。表一1に主要使用材料を、写真一2に陽極材およびアラミド繊維シートを貼り付けた試験体下面の状況を示す。

性能確認試験は、橋梁の使用時を再現した載荷試験、屋外暴露試験、耐荷力がやや低下した状態を再現した載荷試験の順番で行った。

(2) 橋梁の使用時を再現した載荷試験

載荷する荷重は、橋梁の使用時に近いひび割れ幅0.4 mm程度まで載荷することとし、ひび割れの発生やひび割れ幅に着目して除荷と載荷を3回繰り返すこととした。荷重ステップを図一3に示す。

試験体は、載荷荷重136 kNでひび割れが発生した。その後、荷重が大きくなるにしたがってひび割れが進展した。図一4に最大荷重時のひび割れ図を示す。

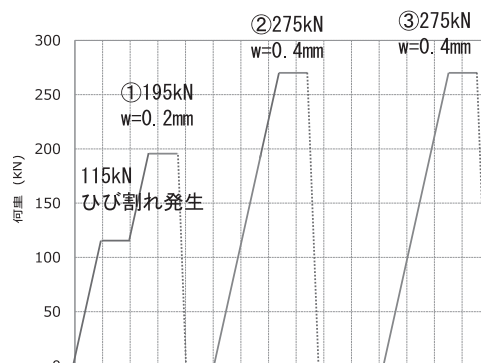
また、載荷試験中は、アラミド連続繊維シートの剥離はなく、鉄筋やアラミド連続繊維シート、陽極のひずみはほぼ近い値を示したことから、載荷試験時はそれぞれの材料が付着を確保し、同じ挙動をしていたと考えられる。3回目の荷重載荷時の荷重－ひずみ曲線

表一1 主要使用材料

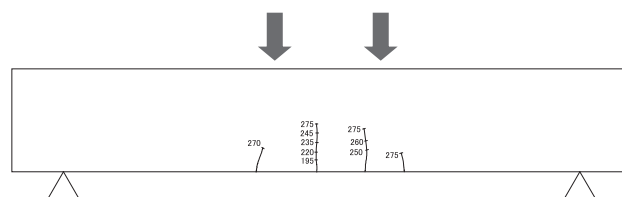
種類	仕様等
コンクリート	レディーミクストコンクリート(40-12-20N)
鉄筋	SD345 (D13)
PC 鋼材	SBPR930/1180B 種2号 φ32 (ポリエチレンシースを使用)
アラミド繊維シート	AK-40 (1層)
陽極材	Titanium Grade 1 (幅20 mm×厚さ0.08 mm)



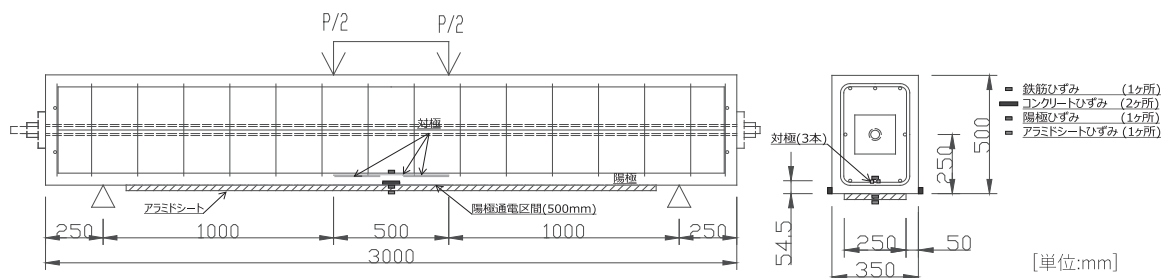
写真一2 試験体下面の状況



図一3 荷重ステップ



図一4 最大荷重時のひび割れ図



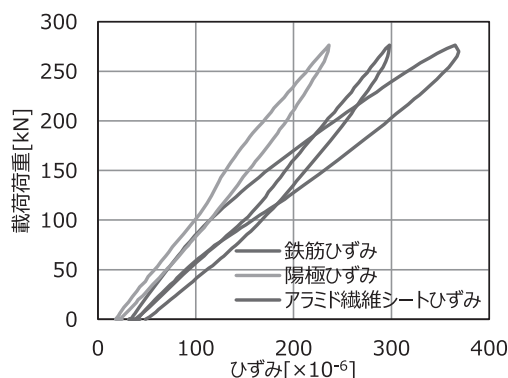
図一2 梁試験体の概要

を図—5に示す。

電気防食については、各対極に供給された防食電流量は、いずれも載荷前と比較して、各荷重において同程度であり、本試験の範囲内では載荷による防食電流の分配に影響がなかったものと評価できた。表—2に各荷重ステップの電流分配率を示す。

(3) 屋外暴露試験

載荷試験後、試験体のプレストレスを除荷し、約1年間千葉県船橋市の雨掛かりのある屋外で暴露した。暴露中は載荷試験中と同様の方法で3つの対極への電流量を測定した(図—6)。電流量は、降雨の影響により変化が生じており、載荷試験時に発生したひび割れから水が浸入したことによると考えられた。ただし、その変化は小さく、電流分配に大きな影響を与えていないことが確認できた。写真—3に屋外暴露試験状況を示す。



図—5 3回目載荷時の荷重-ひずみ曲線

表—2 各荷重ステップの電流分配率

(mA)

	対極1	対極2	対極3	合計
載荷前	1.02	0.90	1.04	2.99
② 275 kN-1 回目 載荷前	0.99	0.93	1.05	2.99
③ 275 kN-2 回目 載荷前	1.00	0.92	1.05	2.99
除荷後	1.01	0.92	1.04	2.99

(4) 耐力力がやや低下した状態を再現した載荷試験

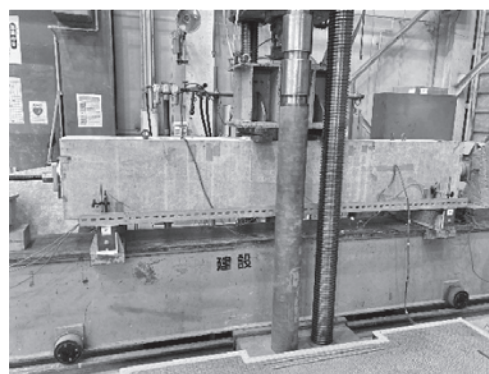
暴露試験後、再び試験体にプレストレスを導入し、載荷試験を行った。荷重は、耐力力がやや低下した状態を再現するため、鉄筋降伏に近い 350 kN まで載荷した。最初に 350 kN までの載荷を 2 回行い、その後、活荷重変動分の荷重 195 kN で繰り返し載荷を 10 回行った。載荷試験状況を写真—4に示す。

図—7に暴露後の荷重-ひずみ曲線を示す。暴露後の試験においても、鉄筋やアラミド連続繊維シート、陽極のひずみはほぼ近い値を示したことから、それぞれ同じ挙動をしていたと考えられる。

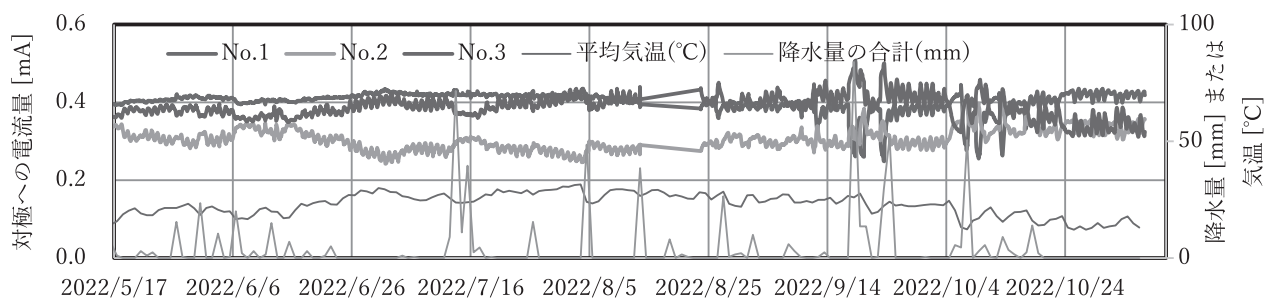
また、今回の試験では鉄筋降伏に近い状態まで載荷したため、アラミド連続繊維シートの剥離が発生した。ひび割れが発生している支間中央部やひび割れ付近の陽極に沿ってアラミド連続繊維シートの剥離が確



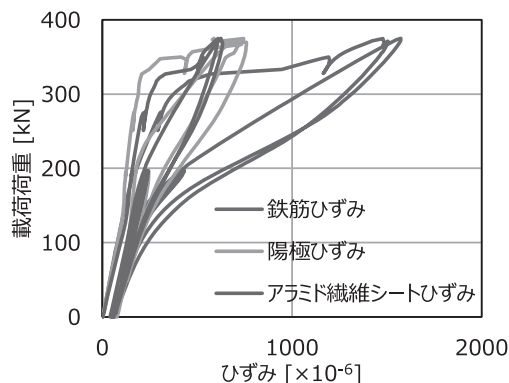
写真—3 屋外暴露試験状況



写真—4 載荷試験状況



図—6 屋外暴露中の各対極への電流量の経時変化



図ー7 暴露後の荷重－ひずみ曲線

認できた（図ー8）。

表ー3に荷重ステップ毎に測定した各対極への電流分配率を示す。暴露後の載荷直前に測定した電流分配率は、図ー5の最終時の傾向通り対極1が若干大きくなり、対極3が若干小さくなっていた。2回の載荷後、若干ではあるが対極1と対極3の電流分配率の差が広がっている。一方、195 kNでの10回の繰り返し載荷の影響は確認されなかった。陽極の剥離が生じたりやひび割れが進展したことの影響であると考えられる。

以上の試験により、橋梁の使用状態において、本法の防食効果と補強効果が保持されることが確認できた。

4. 施工性確認試験

(1) 試験概要

施工性確認試験は、吊り足場内から橋梁下面の施工を想定し、箱桁内の床版下面部で実施した。本試験に先立って、複数ある施工方法を比較検討する事前確認試験を行った。施工方法を確定後、準備作業からテープ式陽極の設置完了までの施工を行い、施工性の確認や歩掛の採取などを行った。

(2) 事前確認試験

実証橋の試験に先立ち、施工方法の確認として、ディストリビュータの貼り付け方法、テープ式陽極材の貼り付け方法、ディストリビュータとテープ式陽極材の

表ー3 各荷重ステップの電流分配率（%）（暴露後）

	対極 1	対極 2	対極 3
載荷前	36.7	32.8	29.2
1 回目（350 kN）載荷時	41.0	32.5	27.9
2 回目（370 kN）載荷時	37.4	33.1	26.0
除荷後	41.4	34.2	24.5
繰り返し載荷後	41.6	36.1	23.7

接続部の溶接方法の検討を行った。

(a) ディストリビュータの貼り付け方法

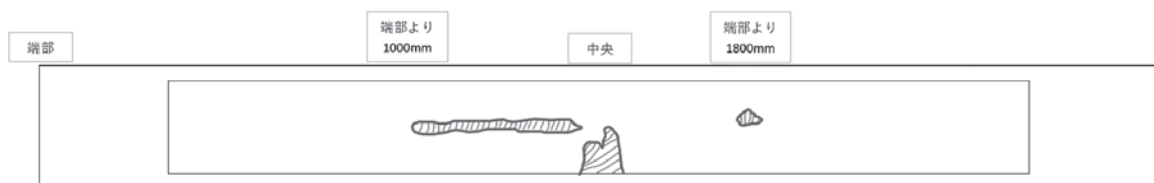
ディストリビュータのコンクリートへの設置方法は、ディストリビュータから下地コンクリートへの通電が不要であることから、エポキシ樹脂で貼り付ける方法とした。テープ式陽極材とディストリビュータが重なる箇所では、溶接時にエポキシ樹脂が損傷する事が判明したため、テープ式陽極材とディストリビュータが重なる 80 mm 程度は、エポキシ樹脂を塗布せずに施工し、陽極材の通電などの不具合が生じない事を確認した。ディストリビュータ貼り付け状況を写真ー5に示す。

(b) テープ式陽極材の貼り付け方法

テープ式陽極材のコンクリート面への貼り付けは、低電気抵抗性で薄付け施工可能なセメントペーストを使用した。ペースト塗布前にペースト塗布部の幅が 30 mm となるようにマスキングを行った。その後、ペースト施工部を刷毛により湿らせ、ペースト材料をコテによりセメントペーストを塗り付けた。セメントペーストの塗り付けの作業を追いかけるようにテープ式陽極材を指により押し付けながらコンクリート面へ貼りつけた（写真ー6）。



写真ー5 ディストリビュータ貼り付け状況



図ー8 アラミド連続繊維シートの剥離（試験体下面）



写真—6 テープ式陽極材貼り付け

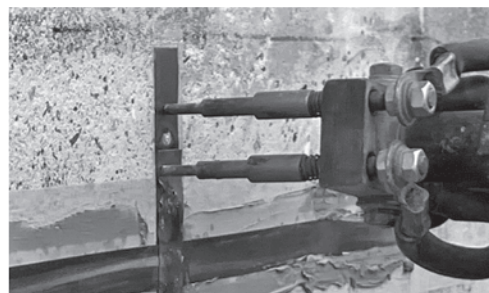
セメントペーストの塗り厚が薄すぎる場合、テープ式陽極材の浮きが生じやすいことが判明し、浮きが生じにくいペーストの塗り厚は1 mm 程度必要であることが確認できた。

テープ式陽極材の剥がれ落ちについては、試験時の路面の通行がない箱桁内の天井面施工においてセメントペーストのみで剥がれ落ちないことを確認した。実際の橋梁の施工では、路面の通行や風などの影響があることから、マスキングテープによる剥がれ落ち防止対策も実施して有効性を確認した。また、このマスキングテープはテープ式陽極材に直交して貼り付け、アラミド連続繊維シートの施工前にコンクリート表面からはいで除去するものである。そのため、はがす際に、テープ式陽極材と一緒に剥がれ、陽極とペースト間に浮きを生じさせる可能性があった。したがって、剥がれ防止措置を行う場合には、マスキングテープとテープ式陽極材が直接付着しないようにする必要があることを確認した。

マスキングテープの除去を施工翌日に実施した場合、ペーストの硬化によりマスキングテープを除去することが困難な箇所が多数あった。この状況に対処するため、施工完了直後にマスキングテープを除去することとし、テープ式陽極材の浮きが発生するような問題が生じないことを確認した。

(c) ディストリビュータとテープ式陽極材の接続部の溶接方法

ディストリビュータとテープ式陽極材の接続部の溶接には専用溶接機を使用した(写真—7)。この箇所は通電性を確保する必要があることからテープ式陽極材の上下をディストリビュータで挟んだ3枚を重ねて溶接する構造としたが、溶接時の陽極材の変形が大きくなりアラミド繊維シートの貼り付け施工に影響を及ぼすことが懸念された。そのため接続部はそれぞれ1枚ずつで接続する構造とし、通電性や施工性を確認した。また、溶接箇所が多数ある場合、テープ式陽極材が溶接の熱により変形量が大きくなるため、交差部の溶接箇所については3カ所程度とし、導通が確保でき



写真—7 専用溶接機端子部

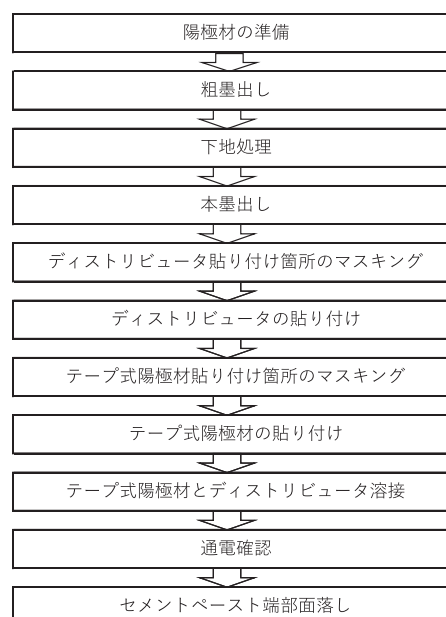


写真—8 テープ式陽極材とディストリビュータ溶接

ることを確認した(写真—8)。

(3) 施工性確認試験

事前試験で施工方法を確定させたのち、準備から陽極材設置完了までの施工性を確認した。テープ式陽極材は厚さ0.08 mm、幅20 mmを使用し、ディストリビュータは厚さ0.1 mm 幅20 mmのテープ状のものを使用した。テープ式陽極材の施工長さは10 m、ディストリビュータ設置箇所は2カ所とし、天井面への施工を行い、各工程における施工性の確認と施工時間を測定した。施工フローを図—9に示す。



図—9 実証橋における施工フロー

本工法は、テープ式陽極材をコンクリート表面に貼り付ける工法であり、一般的なリボンメッシュを用いた工法のように陽極を埋め込む溝切の作業が不要である。そのため、本試験で実施した10mの陽極設置にかかる作業は、一般的に使用されているリボンメッシュ陽極材を使用した電気防食工法に対して50%省力化できることが確認できた。

5. おわりに

アラミド繊維シートによる補強工法と電気防食工法を併用した「アラミド繊維・電気防食併用工法」の防食性能や施工性、経済性について確認を行い、実用化に目途をつけた。今後は、塩害により劣化した中小規模のコンクリート橋に対して本工法の適用を積極的に提案し、サステナブルな社会の実現に貢献していきたいと考える。

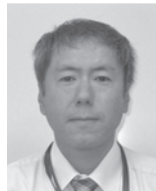
J C M A

《参考文献》

- 1) 清水宏一郎, 佐々木 亘, 山本誠, 安藤重裕: アラミド連続繊維シート補強と併用可能な電気防食工法の実験的検討, 第31回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.429-432, 2022.10

【筆者紹介】

清水 宏一郎 (しみず こういちろう)
三井住友建設㈱
土木本部 土木技術部 リニューアル技術グループ
課長



安藤 重裕 (あんどう しげひろ)
住友大阪セメント(株)
セメント・コンクリート研究所
建材製品研究グループ
グループリーダー



樋口 正典 (ひぐち まさのり)
三井住友建設㈱
土木本部
次長

