

連続繊維シートの表面保護工の再劣化防止に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 28～令 1

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：安中新太郎、菊田悦二、内藤勲、野々村佳哲

【要旨】

連続繊維シートによる橋脚の耐震補強箇所において、表面保護モルタルの経年劣化により繊維部分が外部に露出するケースが確認されている。繊維部分が露出すると、紫外線劣化による性能低下や河川流下物の衝突による断裂等が発生し、耐震補強効果が低下する懸念があるため、再劣化防止対策の立案が求められている。連続繊維で補強された北海道内の橋梁のうち、繊維露出が生じている橋脚を調査した結果、発生要因の1つに材料選定や施工管理方法があることを確認した。また、長期暴露試験の中間結果として、従来の点検とそれに続く補修対応で十分に維持管理できる可能性があることを確認した。

キーワード：橋脚補強、連続繊維シート、保護モルタル、再劣化、暴露試験

1. はじめに

連続繊維シートによる耐震補強工では、主たる補強材である連続繊維シート層を外的因子による劣化や損傷から守ることを目的として、表面保護工が施工される。この表面保護工には、一般的に、建築用仕上塗材(JIS A 6909)に準拠した材料が使われており、山間部などの高橋脚では厚さ1mmの薄付け仕上げ材が、走行車両や河川流下物などの衝突の危険性がある橋脚では厚さ10mmの厚付け仕上げ材が使用されている。

近年、これらの表面保護工のうち、10mm仕上げの表面保護工にて変状が発生し、補強後5年程度で連続繊維シート層が露出する事例が複数確認されている¹⁾。露出した連続繊維シート層において、紫外線劣化による性能低下や河川流下物の衝突による断裂等が発生すると、耐震補強効果が低下する懸念がある。このようなケースを防止するため、繊維露出の原因の解明とその対策が必要である。

当研究所において繊維露出事例を現地調査したところ、繊維露出に至るパターンとして、写真-1に示す3パターンが確認できた。写真-1のうち、(a)洪水時流

下物の衝突による剥落や(b)波浪によるすり減りに関しては変状の主要因が明確である一方、(c)浮き箇所の剥落に関しては主要因が不明確であり、その発生数も他の2パターンに比べて多い。そのため、(c)のような表面保護工の再劣化による変状の実態を把握し、その対策を提案することを目的として調査研究を行った。

本報告では、連続繊維シート補強工の10mm仕上げ保護モルタルにおいて、浮き変状の原因を解明し、対策を提案することすることを目的に、現地構造物の調査や、施工試験を実施した結果について報告する。また、露出後の連続繊維シートに対する紫外線の影響を確認するために開始した暴露試験の途中経過についても報告する。

2. 浮きなどの再劣化が生じた橋脚の詳細調査²⁾

2.1 諸元および補強工法

詳細調査を実施した橋梁は、北海道の山間部に位置する6径間単純桁橋である。昭和30年代の竣工であり老朽化が進んでいることなどの理由から、新橋への



(a) 洪水時流下物の衝突による剥落



(b) 波浪によるすり減り



(c) 浮き箇所の剥落

写真-1 繊維露出パターン

架け替えが予定されていたため、今回、はつり出し調査等の実施が可能となった。

本橋梁では、平成 19 年 (2007 年) に全橋脚で連続繊維シート工法による耐震補強が行われた。橋脚補強図を図-1 に示す。橋脚は全て T 型 RC 橋脚であり、直径 2 m の円形断面である。

耐震補強工の材料構成図を図-2 に示す。耐震補強工は、段落とし部の補強を目的として、目付量 200 g/m² の高強度系炭素繊維が縦横 1 層ずつ、エポキシ系の含浸接着樹脂によって巻立て補強されている。また、補強区間が計画高水位よりも低い位置にあるため、表面保護工として、厚さ 10 mm の保護モルタルが施工されている。現在の施工法では、厚さ 10 mm の保護モルタルを 1 回で施工することが一般的であるが、調査対象橋梁では、当時の使用材料の最大施工厚の都合上、施工手順書では 2 回に分けての仕上げが推

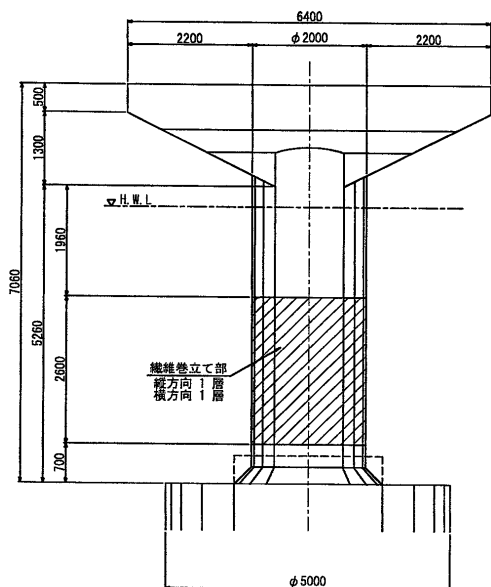


図-1 橋脚補強図 (P1~P5 共通) [単位: mm]

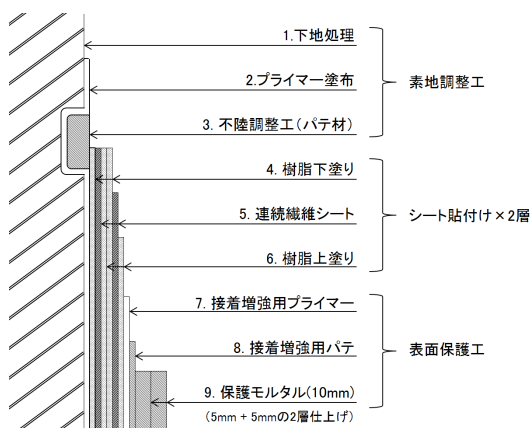


図-2 調査対象橋梁の材料構成

奨されており、先に 5 mm 塗り付けた後、残り 5 mm のモルタルが施工されている。

2. 2 補強箇所の変状と経年変化

本橋梁では、耐震補強工の施工 2 年経過後から、橋梁が撤去される 10 年経過後までの期間、変状の経年変化を目視調査および打音調査により観察した。

調査で確認した主な変状は保護モルタルのひび割れと浮きであった。変状箇所の事例を写真-2~写真-3 に示す。なお、浮き変状は全て保護モルタル表面の平滑面で生じており、打音調査によって検出した。目視のみでは判別できないことから、各写真では、浮き範囲をハッチングで示している。

P1 橋脚では、橋脚の南面 (下流側) において、写真-2 に示すような直径 5 cm 程度の円形の浮き 3 つを確認した。写真-2 の浮きは、経過観察を開始した施工 2 年目に確認した。その後、10 年目まで変化は見られず、浮きサイズが変化することや、ひび割れが後から発生することはなかった。

P3 橋脚では、主に南面 (下流側) において、写真-3 に示すような浮きが大規模に発生しており、経過 4 年後までに、ひび割れに沿う形で徐々に浮きが拡大していた。経過 4 年以降は大規模な拡大はなく、最終的には幅 2.5 m × 高さ 1 m 程度の浮きとなった。

2. 3 はつり調査による浮き界面の確認

2. 3. 1 経年で拡大する浮き (P3 橋脚)

ひび割れを伴い、経年で拡大する浮きである P3 橋脚の浮き (写真-3) を対象に、はつり調査を行った。

最初に、浮き範囲の保護モルタルを電動スクレーパーではつり落としたところ、写真-4 に示すような、厚さ 4~7 mm 程度、一辺 5~15 cm 程度のモルタル片となって簡単に剥落した。はつり後の露出面の材質はモルタルであり、その表面は平滑であった。これは、当時の材料の最大施工厚の都合上、5 mm ずつ 2 回に分けての仕上げが推奨されていたことから、2 層仕上げた保護モルタルのうち、1 層目が露出したものと考えられる。



写真-2 円形の浮き (P1, 経年変化なし)

次に、浮きの範囲外についても電動スクレーパーを用いて同様にはつり作業を実施したところ、写真-5に示すように、広範囲で平滑なモルタル面が露出した。はつり落としによって露出した1層目(内部側)のモルタル表面を見ると、一部が赤茶色や白色に変色していた。変色箇所は、浮きの範囲の形状や、2層目(表面側)モルタルのひび割れがあった位置と一致しており、ひび割れから雨水や土などの微粒分が浸入していたものと推測される。本橋梁は積雪寒冷地に位置するため、浸入した水分の凍結融解によって浮きが経年で拡大していった可能性が考えられる。また、水分の影響によって、浮きには至らない場合でも2層仕上げの層間の付着力が低下したため、広範囲に平滑な面が露出したと考えられる。なお、モルタルの付着力を別途測定した結果として、ひび割れを伴う浮きの近傍では、水の影響によって付着力が低下する傾向があることを確認している²⁾。

さらにはつり作業を継続し、1層目(内部側)の保護モルタルをはつり落とすと、黒色の炭素繊維シート層が露出した(写真-6)。はつり落とした1層目のモルタル片は一辺が1cm以下の細かいものが多かったことから、10年経過後も接着増強用のプライマーが効果を持続し、連続繊維シート層と保護モルタル1層目とが強く付着していたと考えられる。

このような2層仕上げの界面を起因とする浮きは今回の詳細調査橋梁とは別に2橋梁で確認している。そ

のうちの1つでは、写真-7に示すように、層間の付着力を増すために1層目の表面の目粗しを行っていたが、施工2年後には浮きが確認され、8年後には保護モルタルが剥落した。そのため、表面保護モルタルの施工において、時間間隔を空けて複数層の施工を行うことは避ける必要があると考えられる。また、やむを得ず複数層にて施工する必要がある場合には、目粗し等によって付着面積を増やすような手法ではなく、接着増強剤などによる化学的な作用によって付着力を増強させる方法を選ぶことが望ましいと考えられる。

2. 3. 2 経年変化の無い円形の浮き (P1 橋脚)

次に、経年変化の無い浮きのうち、写真-2に示した円形の浮きを調査した。浮きのサイズが小さく、浮き箇所のみのはつり落としが難しいため、写真-8に示すように、電動カッターで浮き箇所を縦に2等分した後、片側のみを電動スクレーパーではつり落とした。

はつり落とし後、写真-8に示す断面を観察すると、モルタル層内におけるひび割れの発生が確認できた。しかしながら、はつり落とし面は凸凹しており、P3橋脚の浮き箇所のような平滑な面ではなかったことから、P1橋脚における保護モルタルの1層目と2層目は、良好に付着していたと考えられる。そのため、2層仕上げの層間が浮きの原因か否かについては断定できなかった。

この浮きは、施工10年経過後まで経年変化がなかった。浮きおよびその周辺にはひび割れが生じてい



写真-3 ひび割れを伴う浮き



写真-4 浮き範囲のはつり落とし



写真-5 浮き範囲外のはつり落とし



写真-6 保護モルタル1層目のはつり落とし



写真-7 2層施工を起因とする保護モルタルの剥落事例

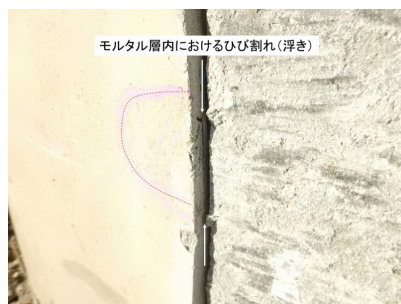


写真-8 円形の浮き(P1)の剥離界面

ないことから、施工後の早い段階で生じたものの、ひび割れが無く、水の浸入が無かったため、浮きが拡大しなかったと考えられる。

3. 撤去予定橋梁を利用しての施工試験

詳細調査対象とした撤去橋梁では、新橋への切り替えから旧橋の撤去まで約1年の猶予があったため、その期間を利用して表面保護工の使用材料に関する比較試験を実施した。

これまでの現地調査の結果、生じたひび割れに沿って、浮きが発生・拡大していくケースが多く見られたことから、施工試験では無収縮モルタルを用い、従来のモルタル材料と比較した。

また、過去に15橋梁29橋脚を調査した結果¹⁾では、保護モルタル用プライマー(接着増強剤)を使用している場合には浮きの発生率が低くなる傾向が見られた。そのため、プライマーの有無による比較試験もあわせて行った。

なお、施工時期は10月中旬であり、施工期間中における日平均気温は7~14℃であった。また、施工試験では、補強当時の施工面に近づけるため、露出した炭素繊維シート層の上に含浸接着用のエポキシ樹脂を再塗布(写真-9)した後に各種の試験用材料を施工した。

3.1 プライマー無しの場合

施工面であるエポキシ樹脂表面に、プライマー無しで無収縮モルタルを直接施工した際の施工翌日の状況を写真-10に示す。

プライマー無しの場合、モルタルの付着力が弱いため、施工翌日には最大で0.5mm幅のひび割れが生じ、また、施工面の半分程度で浮きが発生した。

連続繊維シートの表面保護モルタルの材料を選定する際、エポキシ樹脂とモルタルとの付着力を確保するため、効果の確認されたプライマー(接着増強剤)を採用することが重要であることがわかる。

3.2 従来材料の場合

施工面であるエポキシ樹脂表面に、接着増強用プライマーを塗布した後に従来の表面保護モルタルを施工した際の施工翌日の状況を写真-11に示す。

施工翌日から鉛直方向のひび割れが発生し、一部で浮きを伴っていた。ひび割れは10cmに1本程度の間隔で生じており、最大ひび割れ幅は浮き箇所近傍の1.4mmであった。施工後1週間程度までひび割れの進展が見られ、その後は1年後まで変化がなかった。

そのため、ひび割れはモルタルの材料収縮に起因するものであり、鉛直方向のみにひび割れが生じたのは、円柱橋脚で施工面が曲率を有していたためであると考えられる。また、今回の施工試験では養生工をしていなかったことから、施工直後の日射や風の影響による乾燥がひび割れの発生を助長した可能性がある。

なお、1年経過後に施工試験箇所を観察したところ、初期に発生した浮きやひび割れの状態から変化はなく、水の浸入による浮きやひび割れの拡大については検証できなかった。

3.3 無収縮モルタルの場合

施工面であるエポキシ樹脂表面に、接着増強用プライマーを塗布した後に無収縮モルタルを施工した際の施工翌日の状況を写真-12に示す。

無収縮モルタルでも施工翌日には最大0.25mm幅のひび割れが発生していた。ひび割れは、従来材料と同様に施工後1週間程度までひび割れの進展が見られ、その後は1年後まで変化がなかったことから、材料収縮に起因するひび割れであると考えられる。従来材料に比べて収縮量が小さいため、ひび割れ幅を小さくすることができたと考えられる。

なお、1年経過後に施工試験箇所を観察したところ、初期に発生したひび割れの状態から変化はなかった。

3.4 封緘養生による再施工

施工翌日という予期していなかったひび割れが発生した原因の一つに風による急激な乾燥が考えらえら



写真-9 エポキシ樹脂の再塗布



写真-10 プライマー無しの場合 (施工翌日)



写真-11 プライマー+従来材料 (施工翌日)



写真-12 プライマー+無収縮モルタル (施工翌日)

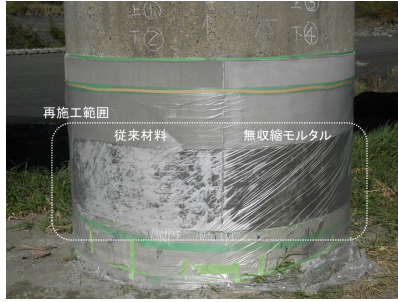


写真-13 封緘養生の状況

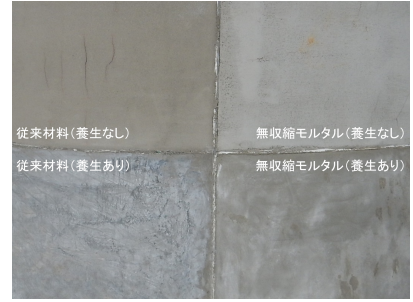


写真-14 養生の有無による表面性状の差

れたことから、確認のため、封緘養生による再施工を行った。

再施工では、エポキシ樹脂の再塗布、プライマー塗布、保護モルタルの施工を行った後、写真-13に示す乾燥対策として24時間の封緘養生を行った。その結果、写真-14に示すように施工したモルタルの表面はツヤを持った仕上がりとなり、ひび割れの発生も無かった。

また、施工1年経過後もひび割れの発生が無かったことから、仮囲いやシート養生などによる水分逸散対策の実施が非常に有効であることがわかった。

4. 暴露試験調査

シート工法に用いる材料のうち、炭素繊維は紫外線劣化することはないが、エポキシ樹脂が劣化するため、引張強度は変わらないものの、引張剛性などが緩やかに低下する³⁾。また、アラミド繊維は繊維そのものが紫外線劣化するため、紫外線を直接受けることによって引張強度が低下することが報告されている^{4,5)}。その一方で、紫外線の影響を受けるのは表層部のみであり、補強効果への影響は小さいとの指摘もある。

そこで、保護モルタルが剥落して連続繊維シートが露出した場合に、紫外線が補強効果にどのような影響を及ぼすかを把握するため、紫外線の影響の強い朝霧暴露試験場(標高910m)において暴露試験を開始した。暴露期間は橋梁点検2巡分となる10年間(2017~2027年)を予定しており、本成果報告では暴露2年目までの結果を報告する。

4.1 プレート型試験片の暴露

暴露した連続繊維シートは計6種類で、炭素が3種類(A, B, C)、アラミド1が2種類(D, E)、アラミド2が1種類(F)である。いずれも含浸樹脂にはエポキシ樹脂を用いている。暴露は写真-15に示すような

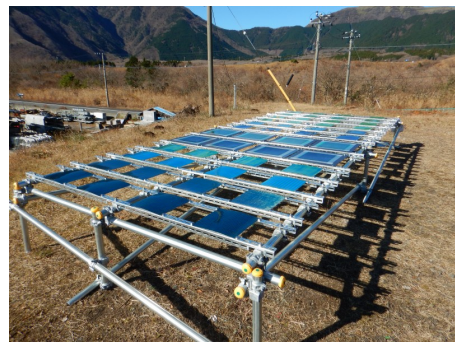


写真-15 暴露試験開始時の様子 (プレート型試験片)

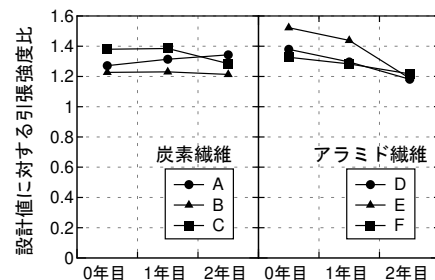


図-3 引張強度の推移

30×30 cmのプレート型試験片で行った。暴露面側は上塗り樹脂が露出した状態になっている。一方、暴露面の反対側(地面側)では、照り返しによる紫外線劣化が起きないように紫外線に対する保護塗料を塗布している。

暴露による引張強度の推移を図-3に示す。繊維の種類によって強度が異なるため、図-3では引張強度の設計値に対する強度比として示している。炭素繊維、アラミド繊維ともに2年経過後も設計値を上回っていた。しかし、炭素繊維は強度変化が小さかった一方で、アラミド繊維では経年で強度が低下するような傾向が見られた。紫外線の影響による強度低下の可能性があり、今後の暴露試験の継続により、傾向を確認したい。

次に、暴露による引張ヤング係数の推移を図-4に

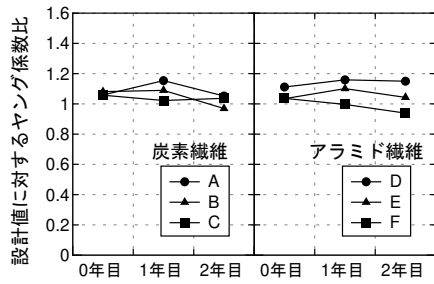


図-4 ヤング係数の推移

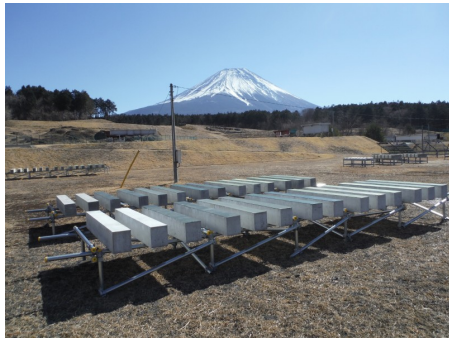


写真-16 暴露試験開始時の様子 (RC 梁)

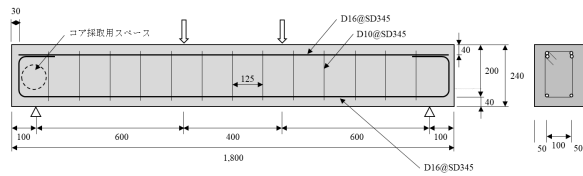


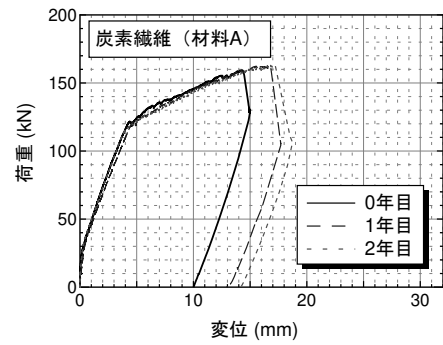
図-5 RC 梁の寸法 [単位: mm]

示す。メーカーによって異なるが、ヤング係数の実測値は設計値に対して $\pm 10 \sim 19\%$ 程度の範囲内であることが求められる。暴露試験片のヤング係数を見ると、範囲内に概ね収まっていた。また、ヤング係数は繊維の種類に共通した傾向は確認できず、暴露2年ではヤング係数に及ぼす影響は小さいことが確認できた。

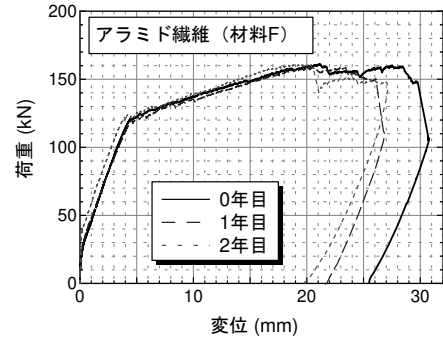
4.2 RC 梁の暴露

紫外線が補強効果に及ぼす影響を確認するため、RC 梁の引張側に連続繊維シートを貼り付けた試験体についても暴露を行った。RC 梁の寸法を図-5 に、暴露状況を写真-16 に示す。

暴露による荷重変位曲線の推移の例を図-6 に示す。暴露2年後であっても、連続繊維シート自身のヤング係数の変化が小さいため、剛性や降伏荷重、最大荷重はほとんど変わらなかった。そのため、暴露2年では、補強方向の連続繊維シートが紫外線を受けたとしても、補強効果に及ぼす影響は小さいことが確認できた。



(a) 炭素繊維 (材料 A)



(b) アラミド繊維 (材料 F)

図-6 荷重変位曲線

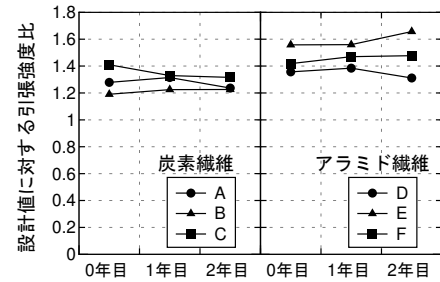


図-7 引張強度の推移 (2層・交差補強)

4.3 2層補強 (交差補強) した暴露試験体

連続繊維シートによる橋脚の曲げ補強では、2層以上の層数で補強し、耐力計算の対象となる軸方向の連続繊維シートを内側に、はらみ出し防止の帯鉄筋の役割を果たす周長方向の連続繊維シートを外側に配置することが一般的である。

そこで、暴露試験体については、前節までに示した主鉄筋と同じ方向に補強した1層補強の他に、1層補強後その直角方向にもう1枚連続繊維シートを交差させて重ねた2層補強した試験体についても、プレート型試験片およびRC 梁試験体を作製し、同様に暴露している。そのため、本節で述べる2層補強の暴露試験体は、実構造物に近い層構成となっている。

暴露による引張強度の推移を図-7 に示す。図-7 に示した1層補強の場合と異なり、アラミド繊維であっ

ても引張強度の低下は生じなかった。また、ここには示さないが、同様にヤング係数や、RC 梁の剛性や耐力についても低下は生じなかった。これは、外側に配置された軸直角方向のアラミド繊維のみが紫外線の影響を受け、主となる軸方向のアラミド繊維が劣化しなかったためと考えられる。

そのため、紫外線による劣化の程度や、実施工時の層構成を考慮すると、繊維補強橋脚の曲げ耐力に対し紫外線の劣化の影響の程度は小さい可能性がある。ただし、紫外線劣化の影響の程度が小さい場合であっても、河川流下物の衝突による断裂等の懸念があるため、繊維露出箇所については予防保全の観点から速やかに補修等を行う必要がある。なお、断裂については連続繊維シートを貼り重ねることで補強効果を回復させることが可能であるため、その点検間隔については、従来の5年間隔の橋梁点検と、それに続く補修対応で十分に維持管理できると考えられる。

5. まとめ

連続繊維シート補強した橋脚における10 mm仕上げ保護モルタルの剥落防止のための材料選定や施工管理を提案することを目的に、浮き変状箇所のはつり出し調査や施工試験等を実施した。その結果、以下に示す知見が得られた。

- (1) ひび割れのある箇所では、浮き変状が経年で拡大する一方、ひび割れない箇所では、浮き変状に経年変化は生じなかった。これは、保護モルタル表面のひび割れ箇所において、水が浸入することによって付着力が低下するためである。
- (2) 連続繊維シート工とモルタルとの付着力を確保するため、表面保護モルタルの材料選定において、効果の確認されたプライマー（接着増強剤）を構成材料に含むモルタルを選定する必要がある。
- (3) 表面保護モルタルの施工時において、時間間隔を空けてのモルタルの塗り重ねを避け、10 mm厚を一度に仕上げる必要がある。
- (4) 表面保護モルタルの施工時において、シート養生などによる水分逸散対策がひび割れの抑制対策として非常に有効である。

また、表面保護工の剥落に対して合理的な点検手法の提案するため、紫外線に対する暴露試験を開始した。その結果、暴露試験の中間結果として、以下に示す知見が得られた。

- (5) 表面保護モルタルの剥落によって繊維露出した橋脚を橋梁点検で確認した場合で、かつ河川流下物

の衝突が懸念される場合には、予防保全の観点から速やかに補修等を行う必要がある。

- (6) 繊維補強橋脚の曲げ耐力に対して紫外線劣化の影響の程度は小さい可能性があり、今後、暴露5,10年後も曲げ耐力を保持していることが確認されれば、従来の点検とそれに続く補修対応で十分に維持管理できると考えられる。

謝辞

今回の現地調査の実施に当たり、国土交通省北海道開発局のご協力をいただきました。また、暴露試験は日鉄ケミカル&マテリアル株式会社、前田工織株式会社、三菱ケミカルインフラテック株式会社、菊水化学工業株式会社との共同研究の一環として実施しました。このように現地調査・暴露試験においては、関係機関の皆様にご多大なご理解・ご協力いただきました。ここに記し、お礼申し上げます。

参考文献

- 1) 野々村佳哲、内藤勲、島多昭典、川村浩二、村中智幸、渡辺淳：連続繊維シート接着工による橋脚耐震補強工の変状調査、寒地土木研究所月報, No. 736, pp.2-12, 2014.9
- 2) 野々村佳哲、内藤勲、安中新太郎：連続繊維シート補強工に使用される保護モルタルの浮き原因調査、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、第18巻、2018.10
- 3) 西崎到、守屋進、木嶋健、佐々木徹：被覆系コンクリート補修補強材料の耐久性に関する研究、土木研究所成果報告書, 2009-No.9, pp.20-21, 2009
- 4) 西村次男、加藤佳孝、山口明伸、魚本健人：紫外線促進試験によるFRPロッドの劣化性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, pp.1255-1260, 1997
- 5) 財団法人鉄道総合研究所：アラミド繊維シートによる鉄道高架橋柱の耐震補強工法設計・施工指針, pp.81-83, 1996

A STUDY ON PREVENTING RE-DETERIORATION OF SURFACE PROTECTION FOR CONTINUOUS FIBER SHEETS

Research Period: FY2016-2019

Research Team: Cold-Region Maintenance

Engineering Research

Group (Material)

Author: YASUNAKA Shintaro

KIKUTA Etsuji

NAITOH Isao

NONOMURA Yoshinori

Abstract: It was confirmed that continuous fiber sheets are exposed to the outside due to aging of surface protection mortar at seismic retrofitting sites. If the fiber is exposed, deterioration due to ultraviolet rays or impact occurs. The seismic retrofitting effect decreases with deterioration. Therefore, it is required to formulate measures to prevent re-deterioration. The piers with exposed continuous fiber sheets in Hokkaido were investigated. As a result, the factors of exposure include material selection and construction management method. Additionally, from an interim result of the long-term exposure test, the possibility was confirmed that the structure can be maintained by conventional inspection and repair.

Key words: Seismic retrofitting RC piers, Continuous fiber sheets, Surface protection, Re-deterioration, Exposure test