

報告

連続繊維シート接着による床版補強工の変状調査

野々村 佳哲*, 内藤 勲**, 安中 新太郎***

*研究員, 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

**主任研究員, 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所

***上席研究員, 国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所

近年, 床版の疲労損傷対策として高強度で軽量の連続繊維シート接着工法が施工されている。しかしながら, その耐久性については十分に明らかとなっておらず, 連続繊維シートが床版コンクリートからはく離して浮きが生じている事例も確認されている。本報では, 連続繊維シート接着工法を適用した橋梁の変状調査結果について報告する。調査の結果, 有効な調査方法に関する知見が得られた。また, 全面貼りの橋梁において浮き変状が多く発生する傾向が見られた。

キーワード: 炭素繊維, 連続繊維シート接着工法, 変状事例, 浮き

1. はじめに

RC 床版の補強方法としては, 鋼板や連続繊維シートによる下面補強, 上面増厚, 多主桁化などの工法がある。このうち, 連続繊維シートによる下面補強は, 貫通ひび割れが発達していない床版までは補強が可能で, また, 交通規制することなく施工が可能であることから, RC 床版の補強方法として広く普及している。

下面からの補強工法のうち, 鋼板接着工法については, 近年, 阪神高速道路公団を中心に補強後の再劣化の報告^{1,2)}がされており, 再劣化後の疲労耐久性³⁾についてや, 調査方法, 補修方法についても報告されている。一方, 連続繊維シート接着工法も床版下面を覆う工法であるため同様に再劣化が生じている懸念があるものの, 施工後の追跡調査に関する事例は少ない。

本報告では, 床版の疲労損傷対策として連続繊維シート接着工法を適用した橋梁の経年変化調査の結果について報告する。

2. 調査概要

調査対象は, 平成 15~22 年に連続繊維シート接着工法が施工された積雪寒冷地内の 9 橋梁である。これらは全て炭素繊維とエポキシ樹脂の組合せにより床版が補強されている。9 橋梁ともに鋼鈑桁橋で, 当初設計時の適用示方書は 3 橋梁が昭和 31 年

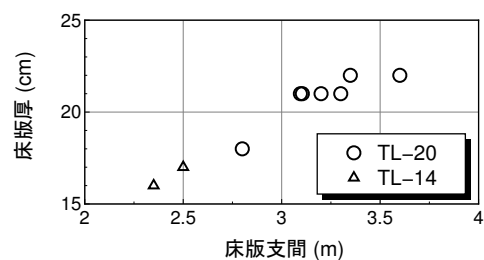


図-1 調査対象橋梁の構造諸元分布

版, 6 橋梁が昭和 39 年版である。図-1 に調査対象橋梁の床版支間および床版厚の分布を示す。調査は, 経年変化を観察する目的で平成 21 年から 25 年にかけて 1 橋梁につき 1~2 年に 1 回の頻度で実施した。

調査では, 橋梁定期点検要領⁴⁾の標準的な点検方法である目視による観察のほか, 必要に応じて採用することができると思われる打音調査および赤外線サーモグラフィ調査を実施した。

打音調査は, 初年度の調査では点検ハンマー (写真-1(a)) を用いて, 調査 2 年目以降は点検ハンマーとパールハンマー (写真-1(b)) を併用して調査した。点検ハンマーは対象物の表面を叩くことで, パールハンマーは先端の球を対象物の表面で転がすことで音を生じさせ, 健全箇所と浮き箇所との音の変化によって変状を検出するものである。

点検ハンマーは, コンクリート構造物の浮きの点検調査に使用されている器具で, 今回の調査では重量が 100~130 g 程度のものを用いた。打点間隔は, 縦横 2~5 cm 程度に 1 箇所を目安に実施しており,



(a) 点検ハンマー (b) パールハンマー

写真-1 打音調査器具



写真-2 赤外線サーモグラフィ



写真-3 塗装のはく離



写真-4 エフロレッセンス



写真-5 直径 5cm 程度の浮き

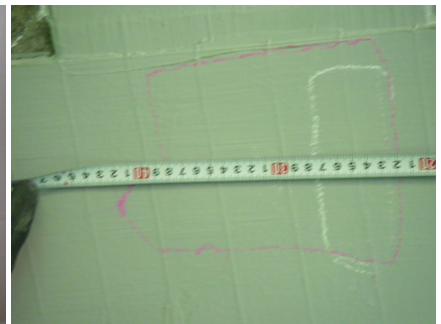


写真-6 浮きの拡大
(白線: H21 → 赤線: H23)

橋梁における第三者被害予防措置要領(案)⁵⁾で示される打音検査の目安である「縦横 20 cm 程度に 1 箇所」と比較して密に実施した。

パールハンマーは、写真-1(b)に示すように 1 m 程度まで伸縮可能な棒の先端に直径 1~1.5 cm 程度の球がついている器具で、建築構造物の外壁タイルの浮き検査等で使用されている。点検ハンマーに比べて打撃力が小さいものの、広範囲を素早く調査できる利点がある。

また、一部の橋梁では、調査開始から 1~4 年目の間に赤外線サーモグラフィカメラによる浮きの有無の調査を実施した。当該機器により浮き調査を実施する場合、一般に日陰部では温度変化が小さいため差異の判断が難しい。しかし、晴天で外気温と橋梁コンクリートの温度に差が生じる場合は、橋梁下面部でも、写真-2に示すように遠距離から浮きや漏水などの変状を検出することができる。

今回の調査では、目視調査および赤外線サーモグラフィ調査については施工箇所全面を対象に実施し、打音調査については橋台土手や橋座付近などの打音可能な範囲のみで実施した。打音調査によって判明した浮きについては、その浮き範囲および数を調査年度毎に記録し、経年変化を観察した。

3. 目視調査結果

橋梁定期点検要領⁴⁾において、連続繊維シート

(繊維補強材)については漏水・エフロレッセンス・ふくれ・断裂を、表面塗装については、はく離を報告することとなっている。

今回の調査対象橋梁では、塗装のはく離(写真-3)が 1 橋梁で、また、連続繊維シート表面でのエフロレッセンスの発生が 1 橋梁(写真-4)で確認された。塗装のはく離は張出し床版下面のみに生じており桁間の床版下面では生じていなかったことや、経年で拡大していく傾向が見られたことから、雨水の流下によってはく離が促進されたと考えられる。

4. 打音調査結果

連続繊維シート表面を打音法によって調査した結果、調査対象の 9 橋梁全てにおいて浮きを確認した。以下に、下面接着工法の施工面で確認した主な浮き事例について紹介する。

4.1 主な変状事例

(1) 直径 5 cm 以下の円形または楕円形の浮き

浮きの形態で最も多かったのは、写真-5に示す直径 5 cm 以下の円形または楕円形の浮きであり、9 橋梁で確認した。この浮きの 9 割以上は、年数が経過しても浮きの拡大が生じなかったことから、施工時のプライマーや接着樹脂の部分的な不足や空気溜まりの除去不足などの要因により、施工初期から浮きが発生していた可能性が疑われる。

表-1 各橋梁の浮き面積率

	貼付方法	施工年度	調査面積 (m ²)	浮き面積 (m ²)	浮き面積率	浮き範囲の経年変化	浮きの形状			舗装面補修痕	備考
							円形 (≦φ5)	多角形	スジ状		
A	格子	H20	238.0	0.08	0.0%	拡大あり	○	○	—	—	
B	格子	H19	6.8	0.01	0.1%	なし	○	—	—	あり	
C	格子	H22	57.6	0.20	0.3%	なし	○	—	—	—	
D	格子	H20	20.4	0.19	0.9%	なし	○	—	—	あり	
E	格子	H20	8.4	0.36	4.3%	拡大あり	○	○	—	あり	ASR の疑いあり
F	全面	H15	20.0	0.33	1.7%	拡大あり	○	○	—	あり	主にハンチ部
G	全面	H17	17.6	0.47	2.7%	拡大あり	○	○	—	あり	
H	全面	H20	49.6	3.11	6.3%	拡大あり	○	○	○	あり	
I	全面	H17	66.3	8.65	13.0%	拡大あり	○	○	○	—	エフロ発生



写真-7 ハンチ部の浮き



写真-8 スジ状の浮き



写真-9 施工前の型枠痕除去

(2) 角張った浮き

次に多く発生していた浮きの形態は、写真-6 に示すような多角形の浮きであり、6 橋梁で確認した。この浮きの多くは、一辺が 10cm を超える浮きとなっており、経年で拡大していることを確認している。浮きが拡大した要因としては、輪荷重や浸透水の影響、床版コンクリートや断面修復部のひび割れ・浮きなどが考えられる。

また、写真-7 に示すように、橋軸方向にもハンチを有する橋梁において、断面変化部を起点として浮きが発生し、経年で拡大している例もあった。

(3) スジ状の浮き

橋軸方向に発生した細長い浮き（写真-8）を 2 橋梁で確認した。長いものでは 1 m 以上となっており、経年で拡大していることを確認している。いずれの浮きも幅は 5 cm 程度であり、その間隔は 18～20 cm 程度であった。施工前の床版下面を見ると、竣工当初から存在する型枠痕の間隔と浮きの間隔が一致していた。型枠痕はサンダーケレン（写真-9）によって除去した後、パテによる不陸調整工によって平滑化していたものの、わずかに残った段差部が弱点となり、輪荷重や浸透水等の影響によって浮きが拡大していった可能性が考えられる。

4.2 浮き面積率

打音調査により確認した浮きの面積と調査面積の

比を浮き面積率とし、各橋梁について整理した結果を表-1 に示す。なお、浮き面積は打音調査で特定した浮きのみを計上している。

格子貼りの橋梁のうち、ASR の疑いのある E 橋で浮き面積率が大きかったものの、それ以外の 4 橋では浮き面積率が 1% 未満であり、格子貼りの橋梁は浮きが少ない傾向であった。一方、全面貼りの橋梁では浮き面積率 1.7～13.0% と、格子貼りよりも大きな割合で浮きが発生していた。

三上らの界面はく離に関する研究⁶⁾によると、連続繊維シート補強材の剛性が大きくなるほど、RC 床版と連続繊維シートの接着界面の応力が大きくなり、浮きが発生しやすくなる可能性が指摘されている。そこで、図-2(a),(b) に、連続繊維シートの浮き面積率と、連続繊維シートの弾性係数および剛性との関係を整理した。ここで、連続繊維シート補強材の剛性は、簡易的な指標として、弾性係数、目付量、層数の積を用いた。

また、図-2(c) には施工から浮き面積率算定時までの累積大型車交通量と浮き面積率との関係を示す。なお、累積大型車交通量は H22 道路交通センサスの 24 時間交通量より推計した。

図-2(a)～(c) を見ると、連続繊維シートの弾性係数や層数・目付量、交通量と浮き面積率を比べても明確な相関は見られず、今回の 9 橋梁の調査では、全面貼るか格子貼りの貼付け方法の違いにより

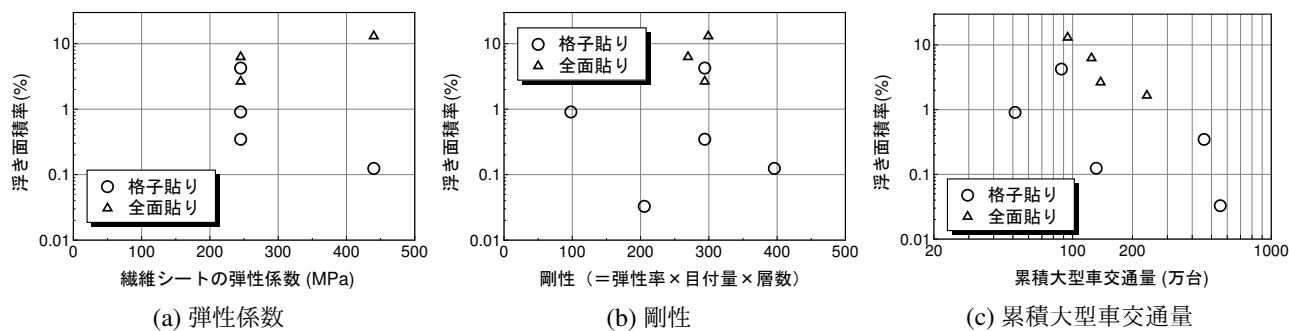


図-2 浮き面積率と諸特性との関係

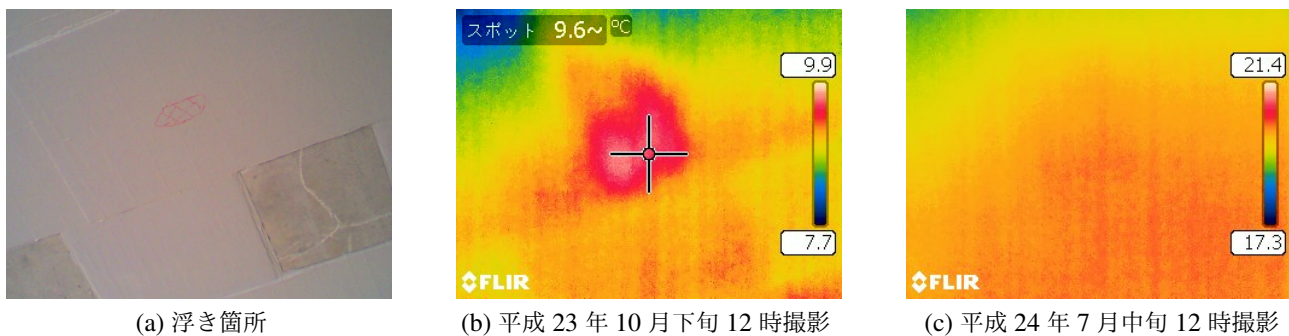


写真-10 サーマグラフィによる浮きの検出

傾向が二分されるのみであった。

次に、個々の浮きに着目した場合、表-1 に示すように、浮き範囲の経年変化による拡大は、全面貼りの橋梁で多い傾向となった。全面貼りは格子貼りに比べて、コンクリートに浸透した水の逃げ場が無く、連続繊維シートとの界面に滞水しやすいと推測される。このような浸透水によって間隙水圧の上昇やコンクリートの凍結融解が発生し、コンクリートと連続繊維シートとの接着に影響が出たと考えられる。なお、水の浸入経路としては、いずれの床版においても連続繊維シート施工時に床版防水工が施工されていることから、地覆等の未施工面が考えられる。また、表-1 に示すように半数以上の橋梁で舗装の再補修が行われていることから、防水工の劣化・損傷の可能性もある。

5. 赤外線調査結果

赤外線サーモグラフィカメラによる浮き調査では、橋梁下面是常に日陰となるものの、晴天時には写真-2 に示すように浮きを検出することができた。その一方で外気温の変化の小さい曇天時には浮きの検出は難しかった。

例として、写真-10 に示すように、1 つの浮き箇所を複数年に渡って撮影した際、晴天時に同じ時間帯で撮影したにも関わらず浮きの検出が難しくなるケースがあった。写真-10(b) のケースでは外気温

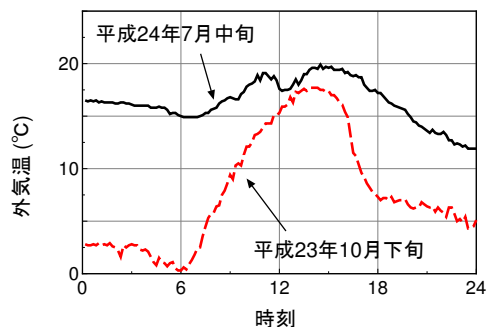


図-3 撮影当日の外気温の推移

19℃で連続繊維シート表面温度 9℃と十分な温度差があったのに対し、写真-10(c) のケースでは外気温 23℃で連続繊維シート表面温度 20℃と温度差が小さくなっており、温度差が不十分なために浮きの検出ができなかったと考えられる。ここで、対象橋梁の最寄りの気象観測点における撮影当日の外気温を図-3 に示す。温度差が小さかった平成 24 年 7 月中旬(写真-10(c)) の撮影当日における天候を気象庁の記録より確認したところ、撮影した時間帯は晴天であったものの、前夜から調査開始の 1 時間前までは曇天であったことから、図-3 に示すように、1 日の気温の変化が小さくなり、浮きを検出するために必要な温度差とならなかったと考えられる。

このため、赤外線サーモグラフィカメラを用いて床版下面の浮き調査を実施する場合、撮影時の時間帯や天候の他に、撮影対象の表面温度と外気温も

しっかり確認した上で撮影を行い、調査記録として残す必要がある。

なお、今回の一連の調査では採用しなかったが、加熱ヒーターや投光器などの人工熱源を用いて表面を加熱することで、時間帯や天候に関係なく調査を可能とする手法もある。費用や時間がかかるため、橋梁の詳細調査等において必要に応じて採用するのがよい。

6. 橋梁点検における浮きの調査方法

今回、連続繊維シートによる床版補強工において確認された変状のうち、塗装の剥がれ、エフロレシセンスについては目視で判別できたが、浮きについては、打音調査や赤外線サーモグラフィ調査を実施する必要があった。これら2つの調査方法は、橋梁定期点検要領⁴⁾において必要に応じて採用することのできる方法とされている。

6.1 打音調査

今回実施した打音調査では、点検ハンマーとパールハンマーを併用した。パールハンマーでは、点検ハンマーで検出した浮きのうち1 cm以下の小さな浮きを見逃すケースがあったが、1 cm以上の浮きについてはどちらの器具でも検出できた。次に、個々の浮き範囲の経年による面積拡大の有無に着目すると、直径5 cm以下の円形または楕円形の浮きの9割以上は年数が経過しても浮き範囲が拡大せず、施工当初からの不具合が疑われる一方で、1辺が10 cmを超える浮きは経年で浮き範囲が拡大する傾向が見られた。なお、1辺が6~9 cm程度の浮きは2橋梁のみで確認されたが、どちらの橋梁も10 cm以上の拡大する浮きを有する橋梁であった。

橋梁の維持管理上、進行性のある損傷の検出は非常に重要であり、点検診断時には、経時変化によって拡大する可能性のある浮きを有する橋梁を抽出できることが望ましい。今回の調査結果の範囲から判断すると、点検ハンマーを用いて縦横10 cmに1箇所程度の打音する、もしくは、パールハンマーを用いて面的に打音することが必要であると考えられる。なお、このとき、調査面積あたりの作業速度はパールハンマーが優れ、総作業時間がおおよそ10分の1程度になるケースもあることから、連続繊維シート施工部の打音調査ではパールハンマーの使用を推奨したい。

6.2 赤外線サーモグラフィ調査

赤外線サーモグラフィ調査については、非常に効

率的に浮き範囲を把握できたものの、写真-10に示すように、天候や時間帯などの撮影のタイミングによっては打音調査で検出した浮きを見逃すケースがあった。このため、浮きについて大まかに確認されている橋梁を対象に、撮影に適した日時を選定する場合や、人工熱源などの機材を使用する場合には、浮き範囲の詳細調査手法として有効な調査方法である。しかし、定期的な橋梁点検のように多数の橋を連続して調査する場合には不向きであると考えられる。

7. 課題

連続繊維シート接着工法における浮きの管理水準については、施工直後の完成検査について定めた規準類はいくつかあるものの、施工後の経年的な管理水準について定めた規準類は見当たらない。完成検査時の管理水準としては、目視検査によって浮き・ふくれ・接着不良等がある場合には不合格とする施工指針⁷⁾や、打音検査(1 m² × 3箇所)によって直径3 cm以下の浮き1個以上、または直径1 cmの浮き10個以上がある場合には不合格とする施工管理要領⁸⁾などがある。

しかし、今回の調査では、供用中の橋梁において、完成検査における管理水準である3 cmを大きく超える浮きが多数確認された。連続繊維シートで補強した床版の輪荷重走行試験の既報論文⁹⁾を見ると、輪荷重走行の過程で10 cm程度以上の浮きが発生し、走行回数の増加に伴って浮きが拡大することが報告されていることから、浮きは力学的要因によっても発生・進行することがわかる。しかしながら、連続繊維シートで補強した床版の輪荷重走行試験は数多く実施されているものの、疲労寿命の向上効果や最終的な破壊形状に着目した報告が多く、途中で生じる浮きの範囲に関する報告例^{10,11)}は少ないのが現状である。

今後、橋梁の維持管理の観点から、連続繊維シート補強床版の輪荷重走行試験における浮きの発達過程などの実験結果や施工後の調査事例の集積が望まれる。そして、それらを基に、連続繊維シートで補強したRC床版の疲労寿命と浮きの関係について、整理されていくことを期待したい。

また、今回の調査では、全面貼りの場合に、格子貼りよりも浮き面積率が大きくなる傾向があった。特に、図-2(c)に示したように、それまでの活荷重履歴(交通量)に関係なく、水を閉じ込めやすい全面貼りの橋梁で多くの浮きが発生していた。そのため、活荷重による力学的な作用だけではなく、浸透

水やその凍結融解作用などの影響によって浮き損傷が促進されていく可能性が疑われる。例えば、積雪寒冷地での事例¹²⁾として、連続繊維シートによる剥落防止工を施工した主桁下面において、水を閉じ込めたことにより、力学的な作用がほとんどない状態でコンクリートが脆弱化するケースがあった。そのため、特に全面貼りの床版に関しては、橋梁上面側の防水や、橋梁全体としての排水への配慮がより重要となる。

さらに、橋軸方向のハンチ部の浮き（写真-7）や型枠痕と間隔が一致する浮き（写真-8）のように断面変化や不陸に起因するものと疑われる浮きの発生や拡大が確認された。また、床版コンクリートの断面修復範囲と疑われる角張った浮きも生じていた。このような段差や断面修復の影響については、通常、輪荷重走行試験などによる評価では考慮されていない。

今後、浸透水や段差、断面修復等の影響についても加味して調査・試験・解析を行い、より適切な施工方法や維持管理方法を検討していく必要がある。

8. まとめ

連続繊維シート接着工法による疲労損傷対策工が施工された積雪寒冷地の橋梁を対象に変状の有無を調査し、その経年変化を観察した。その結果、以下に示す知見が得られた。

1. 目視調査では変状は2橋梁のみであったのに対し、打音調査では9橋梁全てで浮き変状を確認しており、連続繊維シート接着工法施工箇所では浮き変状が相当な頻度で発生していることが明らかとなった。そのため、連続繊維シート接着工法施工箇所の定期点検においては、近接目視だけではなく、打音調査を併用することが望ましい。
2. 赤外線サーモグラフィによる調査は、遠距離から広範囲を測定できるという利点があるものの、天候や外気温などの測定条件に制約があるため、実施に当たっては測定に適した架設状況の橋梁の選定や調査スケジュールの設定をする必要がある。
3. 直径5cm以下の円形または楕円形の浮きの9割以上は年数が経過しても拡大しなかった一方で、1辺が10cmを超える浮きは経年で拡大する傾向が見られた。
4. 浮きの発生面積率は、格子貼りよりも全面貼りの方が大きくなる傾向がある。また、経年変化

による浮きの拡大も、全面貼りの橋梁で多い傾向がある。

5. 橋軸方向のハンチや、型枠痕による段差といった通常の輪荷重走行試験で考慮していない断面変化部を起点として発生する浮きがあった。

参考文献

- 1) 前川敬彦，久利良夫，佐々木和則，飛ヶ谷明人，青木康素：鋼板接着補強 RC 床版の維持管理に関する検討，第七回道路橋シンポジウム論文報告集，土木学会，pp.13-18，2012
- 2) 福島誉央，甲元克明，青木康素：鋼板接着 RC 床版における損傷事例，第八回道路橋シンポジウム論文報告集，土木学会，pp.111-114，2014
- 3) 佐野正，山下幸生，松井繁之，堀川都志雄，久利良夫，新名勉：浮きを有する鋼板接着補強 RC 床版の疲労耐久性および樹脂再注入の評価，土木学会論文集 A1，Vol. 67，No. 1，pp.27-38，2011
- 4) 国土交通省：橋梁定期点検要領（案），2004
- 5) 国土交通省 道路局 国道・防災課：橋梁における第三者被害予防措置要領（案），p.8，2008
- 6) 三上浩，高島輝雄，廣瀬清泰，堀川都志雄：二方向アラミド繊維シート補強床版の界面剥離に関する数値解析，構造工学論文集，土木学会，Vol.59A，pp.1065-1074，2013
- 7) 土木研究所：炭素繊維シート接着工法による道路橋コンクリート部材の補修・補強に関する共同研究報告書（III），1999
- 8) 東日本高速道路株式会社ほか：構造物施工管理要領，p.3-61，2011
- 9) 小林朗，蔡華堅，下西勝，松井繁之：炭素繊維シート格子接着工法により補強した RC 床版の疲労耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol. 27，No. 2，pp.1513-1518，2005
- 10) 三上浩，柑本哲哉，鍋島益弘，堀川都志雄：二方向ケブラー繊維シートで下面補強した，損傷床版の疲労耐久性，第二回道路橋床版シンポジウム論文集，土木学会，pp.83-88，2000
- 11) 村越潤，田中良樹，吉田英二：繊維シートによる RC 床版の補強設計法に関する研究，平成 25 年度重点研究報告書，独立行政法人土木研究所，No. 重 25，2013
- 12) 野々村佳哲，内藤勲，島多昭典：連続繊維シートを用いた剥落防止工に生じた浮き変状に関する調査事例報告，北海道開発技術研究発表会，第 57 回，IK-7，2014

（2016 年 7 月 19 日受付）