

各種工法による補強済みRC床版の維持管理手法について

Maintenance Management Techniques For Rc Slabs Strengthened By Various Rehabilitation Methods

佐藤辰巳¹・岡俊蔵²・岡田昌澄³・木虎久人⁴・鈴木 永之⁵・関口 幹夫⁶・小林朗⁷

Tatsumi Sato, Syunzou Oka, Masasumi Okada, Hisato Kitora, Noriyuki Suzuki, Mikio Sekiguchi and Akira Kobayashi

¹正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社 構造部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿2丁目7-1)

E-mail: Tatsumi.Satou@os.pacific.co.jp

²正会員 工修 三菱重工業株式会社鉄構建設事業本部橋梁部 (〒108-0014 東京都港区芝5-34-6新田町ビル9F)

³正会員 工修 首都高速道路公団 保全施設部 (〒100-8930 東京都千代田区霞ヶ関1丁目4-1)

⁴正会員 株式会社ケミカル工事 エンジニアリング部 (〒658-0024 兵庫県神戸市東灘区魚崎浜町5-5)

⁵正会員 日本道路公団 試験研究所道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1丁目4-1)

⁶正会員 東京都 土木技術研究所技術部 (〒136-0075 東京都江東区新砂1丁目9-15)

⁷正会員 工修 日鉄コンポジット株式会社 技術部 (〒103-0024 東京都中央区日本橋小舟町3-8)

The steel plate bonding method and carbon fiber sheet bonding method are widely used as methods of strengthening RC slabs. When deteriorated slabs are strengthened by these methods on bottom surfaces, cracks on the bottom surfaces of the slab concrete cannot be observed directly, and it is necessary to establish a new inspection method for further maintenance. Tapping inspection on the bottom surfaces is ordinary carried out. As new inspection methods, an ultrasonic method and an infrared thermography method seems to be applicable to RC slabs strengthened by steel plate bonding and those strengthened by carbon fiber sheet bonding, respectively. Also, a new inspection method using Falling Weight Deflect (FWD) meters, which monitor the slab deflections at the weight impact, is being developed. By FWD, you can inspect the slab performance from upper surface. In this paper, these maintenance techniques for the RC slabs strengthened by various methods are discussed.

Key Words : deck slab, strengthening, maintenance, IR thermography, FWD

1. はじめに

昭和39年道路橋示方書で設計された鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)は抜け落ちが発生し、多くの損傷実態調査および研究が実施された。その研究成果をふまえて、最小部材厚、設計曲げモーメントの算定式、許容応力度等の諸規定の改訂が行われた。その後、損傷事例の報告が少ないことから、疲労耐久性が大きく改善されたことを物語っている。また、輪荷重による床版下面の疲労損傷形態は①一方向ひび割れの生成、②二方向ひび割れの生成、③二方向ひび割れの発達と亀甲状化、④角落ち・ひび割れのスリット化、⑤抜け落ちに変化することが明らかとなった。この疲労損傷の進行過程におけるひび割れ形態の変化を利用して損傷度判定基準が作成されている。

しかし、床版下面を鋼板接着工法、炭素繊維シート接着工法等で補強された場合、ひび割れを目視で観察できず、新たな点検手法を確立することが不可欠となっている。このような観点から、鋼板と床版下面との接着面が剥離していないか、打音によるたたき点検で用いて実施されている。

コンクリート面が露出しているハンチ部の変状あるいは舗装のひび割れが発生しても、たたき点検を行わない限り損傷度を判定できない問題も指摘されている。また、鋼板の剥離の発生および進展は研究がほとんど実施されていないため、剥離部での再注入あるいは不良部の撤去・再接着による補修が実施されている。

今後、補強床版についても、経年的な劣化により、無補強床版と同様に、新たな損傷劣化が発生し、さらに、進行がすすむ状況にいたると、「補強箇所は損傷が進行

しない」と仮定して一律的に取り扱うことができないと考える。

そこで、新たな点検手法として、「床版下面のひびわれ密度とたわみによる劣化度が供用限界内では相関性が高い」との既存の研究成果に着目して、補強床版についてもその適用性について検討することとした。

2. 床版下面からの点検方法

(1) 鋼板接着工法

鋼板接着補強後のRC床版の維持管理は、表-1に代表される点検項目と判定区分を用いて、床版下面から行うのが一般的である¹⁾。具体的には、足場もしくは高所作業車上から、ハンマーを用いた鋼板のたたき点検による不良音の検出、目視による漏水および遊離石灰、錆および腐食、鋼板の変形を確認して健全度判定し、補修時期や点検頻度を決定している。

鋼板の剥離分布の調査は、一般に打音法によっておこなわれるが、超音波法による方法は、反射波のエコー結果より、その剥離分布が精度良く確認可能である²⁾。さらに、超音波法によって腐食による鋼板の減肉やアンカーボルトの破断も検出可能である。

これらの結果に基づいて鋼板接着床版の再補修を実施することになるが、現状のところ、その補修方法は確立されていない。その一方で、補強後5年程度経過した鋼板接着鋼板の一部が剥離して陥没が発生したため、床版の取替えをした事例も発生している³⁾。

鋼板接着した床版の再補修工法を検討するためには、

表1 補修済床版判定基準（阪神高速道路公団の例）

判定区分 点検項目	A	B	C
不良音	たたき点検において、鋼板1枚の1/3程度以上の範囲に不良音がある。	たたき点検において、鋼板1枚の1/3程度以下の範囲に不良音がある。	たたき点検において、不良音がわずかにある。
漏水及び遊離石灰	鋼構造物にAランクの腐食を生じさせている。	①漏水、遊離石灰の著しい流出がある。 ②鋼構造物にBランクの腐食を生じさせている。	漏水、遊離石灰がわずかにある。
錆および腐食	①鋼板に0.2㎡程度以上の腐食がある。 ②鋼板全面積(パネル)の1/2以上に錆がある。	③鋼板に0.2㎡程度未満の腐食がある。 ④鋼板全面積(パネル)の1/2未満に錆がある。	鋼板に錆が点在している。
鋼板の変形	鋼板の著しい変形や、ずれが認められる。	鋼板の一部に変形が認められる。	変形があるが、軽微である。

前述の点検結果に加えて、床版の健全度をより正確に確認することが必要である。鋼板接着床版は、上面が舗装、下面は鋼板で挟まれており、目視で床版内部の状況を確認することは困難である。鋼板接着工法の床版内の損傷状況としては、鋼板の浮きや腐食以外にも、床版コンクリート内のひび割れの進行や鉄筋の腐食および上面コンクリートの損傷等が想定され、今後、現状の点検方法に加えて、これらの損傷を定量的に検出する方法が求められている。

(2) 炭素繊維シート接着工法

a) はく離（浮き、膨れ）の影響

炭素繊維シート接着工法による床版補強において、施工中あるいは施工後の供用期間中に懸念される変状としては、コンクリートと炭素繊維シート間の浮き、膨れの発生（以下総称して、「はく離」と呼ぶ）および進展があげられる。施工中のはく離の発生原因としては、下地処理不足による段差、コンクリート表層のエアホール内の空気の膨張、樹脂の塗りむら、含浸不良などが考えられる。これらのはく離は、連続繊維の種類によらずガラス繊維やアラミド繊維シートでも発生する可能性があるものである。施工時の接着不良については、施工中あるいは施工完了時に打音検査によりはく離の有無について確認し、樹脂注入や不良部の切除・再接着などにより補修するのが一般的である。

施工後の供用中のはく離の発生および進展については、炭素繊維シート接着工法が実橋に適用されて日も浅いことから、現在までのところほとんど報告されていない。はく離の発生原因としては、供用中の繰返し自動車荷重あるいは過大荷重によるコンクリートのひび割れ損傷の発生や進行に伴うひび割れ周辺での炭素繊維シートのはく離の発生、床版コンクリート内部に浸透した水分の凍結融解によるコンクリートのはく離に伴う炭素繊維シートの剥離などが考えられる。

炭素繊維シート接着工法では、一般に床版下面全面を炭素繊維シートが覆うことから、補強後の床版の健全度、劣化の進行状況の確認が困難である。しかしながら、床版コンクリートに損傷が発生あるいは進行した場合、炭素繊維シートとコンクリートのはく離が生じることが予想され、これを検知することが可能であれば、定期的に床版の劣化状況をモニタリングすることが可能となる。また、近年、床版下面のひび割れ観察や橋面からの浸透水の排水や点検を目的として、炭素繊維シートの間隔を空けて格子状に接着する方法も検討されている。

炭素繊維シートとコンクリートのはく離が、補強構造物に及ぼす影響については、実験室で模擬はく離を発生させて検討したものが数例報告されている。吉沢らは、両引き型の連続繊維シートとコンクリートの付着試験体を用いて、炭素繊維シートとコンクリートの接着面に人工的にはく離を発生させ、はく離が付着耐力に及ぼす影響を調べた⁴⁾。その結果、約10mm角のはく離が全面積の

13%となるように配置しても、付着耐力は完全接着したものとほとんど変わらなかった。このように、炭素繊維シートにはく離がある程度生じていても、静的な耐荷力に与える影響はあまり大きくないことが報告されている。

宇佐美らは、直径を2mmから60mmに変化させた円形のはく離を設けて炭素繊維シートを貼り付けたコンクリート供試体の凍結融解試験を実施した⁵⁾。JISE-G503「コンクリートの凍結融解試験方法」に準じて-18℃～+5℃の凍結融解を300サイクル実施した。凍結融解後のはく離の範囲を、目視、打音検査、赤外線撮影により観察した。はく離範囲は、いずれも凍結融解サイクルを与える前後ではほぼ同じで、はく離の範囲が明確に拡大したものはなかった。ただし直径40mm以上のはく離は、すべて凍結融解サイクル中に内部に水が進入していた。したがって、直径30mm以下のはく離については、凍結融解によってはく離の拡大が生じる可能性は低いが、直径40mm以上のはく離については、更に厳しい条件で凍結融解が繰り返された場合には内部に侵入した水の凍結に伴う膨張により、初期はく離の周辺にはく離の範囲が拡大する可能性があるとしている。これより日本道路公団では、施工管理要領で炭素繊維巻き立て工法について、施工後の検査で直径30mm以上の浮きや膨れがないこと、直径10mm以上30mm未満の浮きや膨れが局所的に集中していないこと（概ね1㎡あたり10個未満）を貼り付け状態の良否の判断基準としている⁶⁾。

b) はく離検知手法

炭素繊維シートとコンクリートのはく離検知手法としては、①目視、②打音検査、③赤外線サーモグラフィ法などが行われている。目視では、炭素繊維シートとコンクリート間のはく離距離が大きい場合にしか検知することができず、炭素繊維シートとコンクリート空隙が少ない場合には、はく離の検知は困難である。

テストハンマーによる打音検査は、現在最も広く行われているものである。炭素繊維シートとコンクリートの空隙がほとんどなく接触している場合でも、はく離部で異音が発生し、また直径10mm程度のはく離でも検知することが可能である。打音検査は現在の検査法では、最も確実に精度の高いものであるが、検査者の技能によって検査結果が異なる、写真や図面など客観的なデータの保存が困難である、橋梁床版への適用を考えた場合、足場を用いた近接点検でなければ適用できないなどの課題がある。

赤外線サーモグラフィを用いて炭素繊維シートとコンクリートのはく離を検知する方法が、近年研究されている。これは、コンクリート構造物と炭素繊維シートの間にはく離による空隙があると、この空隙が大きな熱抵抗を持つため、コンクリート構造物と外気に温度差があったり、外部から熱が加えられた場合、はく離部と接着部の炭素繊維シートに温度差が生じ、これを熱赤外線で検知する方法である。外部熱源を用いる方法（アクティブ熱源法）と、外気温の変化や日光による輻射を利用す

る方法（パッシブ熱源法）がある。

アクティブ熱源法は、投光器などの熱源により、熱負荷を与えて、炭素繊維シートの温度上昇時、または加熱後の温度低下時に生じる、剥離部と接着部の温度差を検知する手法である。先に述べた宇佐美らの実験では、シリコンスペーサーを用いて人工的にはく離を設けた供試体に表面から投光器により輻射熱を与え、供試体から約1mの距離に設置した赤外線カメラにより観察した。その結果、直径30mm、60mmのはく離の範囲は、熱赤外線画像により明瞭に判定され、またその大きさもシリコンスペーサーの大きさとほぼ一致した。また凍結融解試験によりはく離の内部に水が進入した場合は、はく離の部分と接着部の濃淡が乾燥状態と逆転したが（はく離部が低温、接着部が高温）、水が入った状態でもはく離の有無を検知することができた。このはく離内部の水を水抜き穴を設けて排出すると、初期状態と同様の赤外線映像が得られた。

このように、適切な熱源を用いた場合、赤外線サーモグラフィ法により炭素繊維シートとコンクリートのはく離を検知することが可能である。しかしながら、実際の橋梁のRC床版への適用を考えた場合、この方法には以下のような課題がある。高架橋の場合、路下からの点検では床版まで10m前後の距離があり、外部熱源で効果的に均一に加熱することが困難である。点検者が、徒歩により移動するケースが多く、ヒーターや投光器などの加熱装置、発電機などの機器を持ち運ぶことが困難である。また、これまでの研究では、炭素繊維シートと赤外線カメラの距離が1m程度としていることが多く、実際の点検時と同じように、カメラまでの距離が10m前後になっても、はく離検知可能か確認する必要がある。

三井らは、人工的にはく離を設けて炭素繊維シートおよびアラミド繊維シートを貼り付けたコンクリート平板に対して、外部熱源を用いず室外に暴露した状態（日射あり、日射なし）で、赤外線カメラにより熱赤外線画像を撮影し、はく離を検知する実験的研究を行っている⁷⁾。赤外線熱画像の撮影は、液体窒素冷却型で、最小検知温度差が0.025℃、60452画素（254×238）を有する高精度の赤外線カメラを用いた。外気温が上昇する時間帯では、欠陥部が健全部に比べて温度が高くなり、日射のない時間帯では逆に欠陥部が健全部に比べて温度が低くなり、この温度差を赤外線カメラが検知し、熱赤外線画像上で識別することが可能であることを報告している。

外部熱源を用いない場合でも日射や外気温の変化によって、連続繊維シートとコンクリートの接着欠陥を検知することが可能であることがわかった。筆者らは、実際の道路橋の炭素繊維シート補強済みRC床版への適用を念頭に、実験的検討を行った。

鉄筋コンクリート床版の下面に、繊維目付量400g/m²の中弾性型炭素繊維シートを格子状に2層接着した。この床版を図-1に示すように、屋外の地上約5mの位置に設置し、床版上面には直射日光が当たるようにした。供試

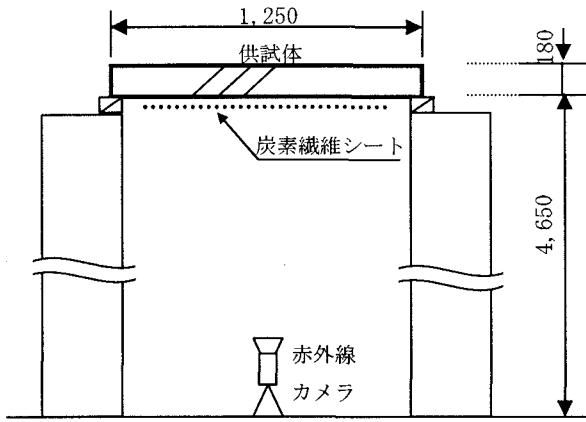


図-1 赤外線カメラによる炭素繊維シート補強床版のはく離観察状況

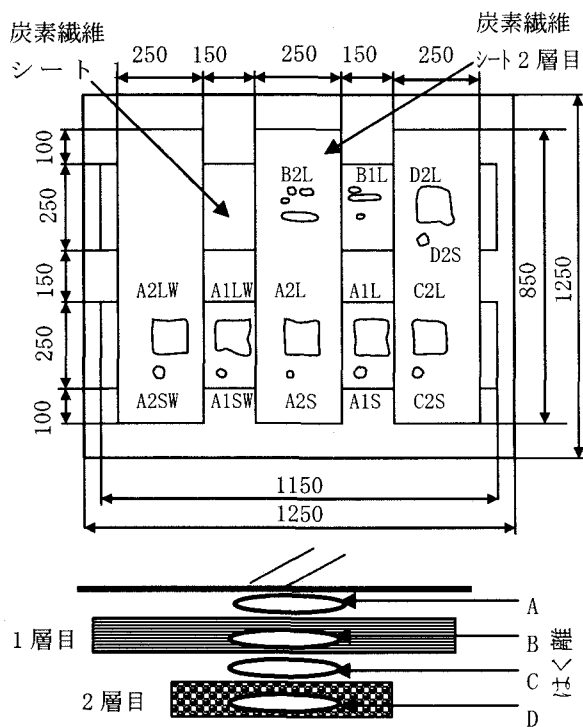


図-2 炭素繊維シートの人工はく離の分布

体の設置場所は、兵庫県神戸市内であり、赤外線カメラによる撮影は、夏季(9/3 8:00-19:00)、日気温差の大きい秋季(11/14 10:00-20:00)の2回実施した。撮影日の天候は、いずれも晴れであった。赤外線カメラは、実橋での点検を考慮して、バッテリー駆動可能な非冷却型の小型携帯型のものを使用した。温度分解能は、0.1℃、表示画素数は、320H×240V、最小検知寸法は、測定距離1mで1.4mm、10mで14mmである。

図-2、表-2に示すように、コンクリートと炭素繊維シートの層間、炭素繊維シートの1層目と2層目の層間、炭素繊維シートの層内に人工的にはく離を設けた。既往の研究では、はく離の作成のため厚さ1mm以上のスペーサーを用いたり、発泡スチロールなどの介在物を用いて

表-2 炭素繊維シートのはく離一覧

Type	剥離界面	剥離位置	寸法	注水
A1S	A	1層部	30×30	
A1L		1層部	100×100	
A2S	A	2層部	30×30	
A2L		2層部	100×100	
B1L	B	1層部	100×100	
B2L	B	2層部	100×100	
C2S	C	2層部	30×30	
C2L		2層部	100×100	
D2S	D	2層部	30×30	
D2L		2層部	100×100	
A1SW	A	1層部	30×30	あり
A1LW		1層部	100×100	あり
A2SW	A	2層部	30×30	あり

いる例が多い。しかしながら、実際の補強構造物で生じるはく離は、コンクリートと炭素繊維シートが樹脂により接着されていないものの、ほとんど接触しているものが多い。そこで本実験では、スペーサーや介在物を使用せず、欠陥部の樹脂を塗布しないことではく離を作成した。従って、はく離部でも、炭素繊維シートとコンクリートあるいは炭素繊維シート間の空隙の距離はほとんどないものといえる。写真-1は、床版下面の可視画像であるが、白線は打音検査により検知したはく離領域を示している。

床版下面の外気温、炭素繊維シートの表面温度の健全部とはく離部(A1とC2部)の温度較差の時間変化を図-3(夏季測定)、図-4(秋季測定)にそれぞれ示す。夏季測定においては、気温の日較差が小さく、ほとんどの時刻で炭素繊維シートの健全部とはく離部で検出可能な温度差が生じず、赤外線画像では明確には判別はできなかった。18時の熱赤外線画像では、A1、A2、C2、D2のはく離部が健全部より低温域として識別できた(写真-2)。この時の健全部とはく離部と温度較差は、約0.5度であった。一方秋季測定においては、明瞭にはく離部を赤外線画像上で確認することができた。午前10時の観察画像を写真-3に示す。100mm角の大型のはく離は検知可能だが、30mm角の小型のはく離は識別できていない。またA:コンクリートと炭素繊維シートの層間、C:炭素繊維シートの1層目と2層目の層間のはく離は明瞭に識別できるが、炭素繊維シートの層内にはく離を設けたもの(B、D)は、2層目層内のD2Lのみ識別できている。撮影時にはく離部に注水したものは、注水しなかったものに比べ識別が困難で1層部のA1LWのみ識別できた。10時から13時の間は、はく離部を検知することが可能で、この時間帯ではく離部が外気温の上昇にあわせて、健全部より温度が高くなっていた。14時から15時の間は、床版下面温度がほぼ均一ではく離部を検知することができなかった。その後、気温の降下にあわせて、16時から18時の間は、はく離部の温度が、健全部に比べて低くなり、赤外線画像上で識別することができた。

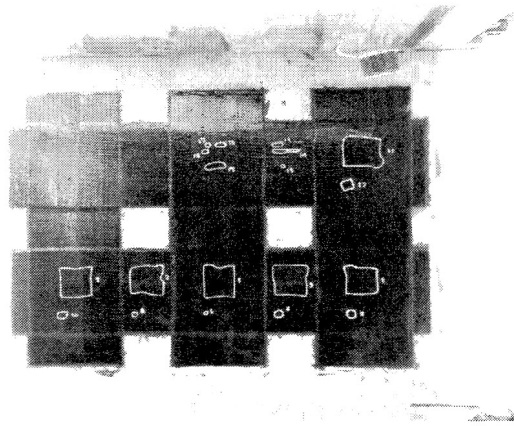


写真-1 炭素繊維シートのはく離の可視画像

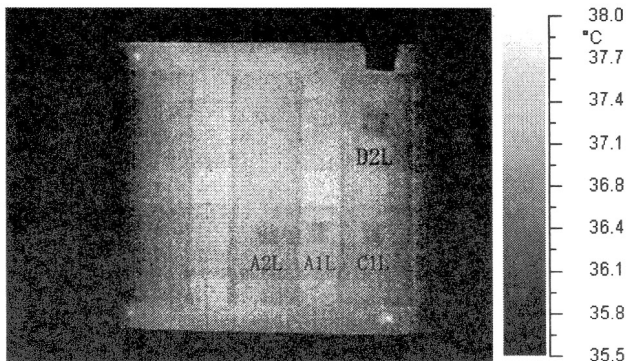


写真-2 熱赤外線画像 (夏季測定18:00)

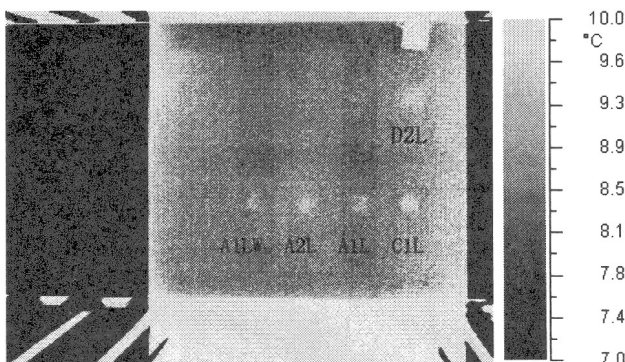


写真-3 熱赤外線画像 (秋季測定10:00)

以上のように、気温の上昇時または降下時に、炭素繊維シートの接着部とはく離部で温度差が生じ、熱赤外線画像上ではく離部を検知できることがわかった。しかしながら、外部熱源を用いていないので赤外線カメラにより検知可能な時間帯と検知できない時間帯が存在すること、また検知可能な時間帯は、日温度格差などの気象条件に左右されることがわかった。床版下面から4m離れた位置で観測すると、検知できるはく離の大きさは100mm角程度であった。実橋での利用にあたっては、検査結果の信頼性向上のため、検知可能な気象条件の定量的評価、小型で持ち運び可能な高感度赤外線カメラの開発などの技術的課題を解決する必要がある。

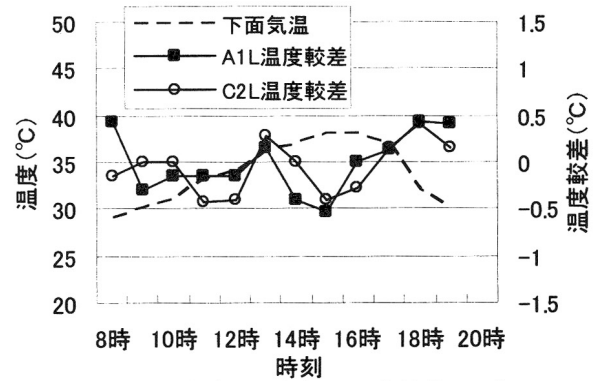


図-3 はく離部と健全部の温度較差(夏季)

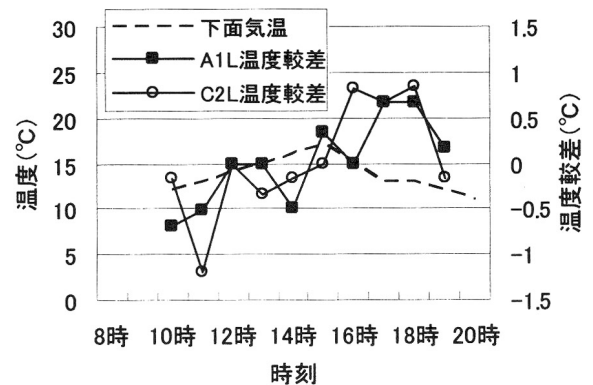


図-4 はく離部と健全部の温度較差(秋季)

3. 床版上面からの点検方法

(1) 従来の点検方法

床版の疲労損傷は昭和39年示方書で設計されたRC床版の場合、路面からの雨水が貫通ひび割れに浸透し、遊離石灰、土粒子等が析出するため、疲労損傷が著しく進行した段階では、補強効果は大きく低下する可能性がある。このようなRC床版では、床版上面部に、砂利化が進み、舗装に亀甲上のひび割れ、最終的には、ポットホールを発生する可能性があるため、目視点検の際、十分留意する必要がある。

(2) 床版のたわみに着目した点検

床版の健全度は下面のひびわれ密度によって健全度が評価可能であるが、このひび割れ密度はたわみと供用限界内では相関性が高いことが知られている。

東京都土木技術研究所では、ウェイトを床版中央に落下させ、その衝撃加振により発生するたわみによって床版の補強効果の確認をおこなっている。この方法は、フォーリングウェイトデフレクトメータ(以下FWDと記す)と呼ばれる舗装の落下衝撃たわみ測定機を使用する。写真-4は床版専用開発された測定機であり、路面の床版支間中央上と両主桁上に計3個の振動センサーを設置してウェイトを落下させ、床版中央の動たわみを相対的に計測するものである。

衝撃加振を加えた時に発生する振動現象は、①床版の

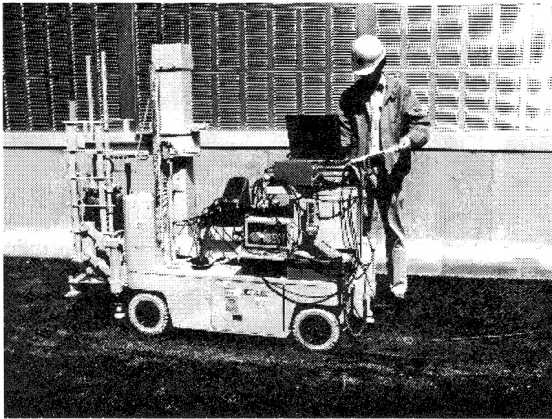


写真-4 FWDによる床版たわみの計測状況

たわみ振動，②桁の曲げ振動③桁のねじれ振動の3つの和と考えられ，この3つの合成された振動波形が次式により分離され，床版のたわみ振動のみが得られる。

$$\text{床版のたわみ振動} = C - (L + R) / 2$$

ここに，C:支間中央のたわみ，L:左側桁のたわみ R:右側桁のたわみである。

以下に，実橋梁における計測結果について示す。各橋梁の補強前後のFWDによる5tf加振時の下面たわみ量の測定結果を基に補強効果は，補強前に比べてたわみ量がどの程度低減したかをもって評価することができる。施工前後の補強効果は図-5に示すとおり，落下衝撃荷重5tf作用時には，アンダーデッキ，鋼板接着，カーボンファイバー，上面増厚，カーボンファイバー+上面増厚の順にたわみ量の低減率が大きく，補強効果も大きくなっている。さらに，鋼板接着未補強部で路面が陥没している箇所では主鉄筋方向，配力筋方向ともFWDのたわみ形状に相違が見られることが判っており，補強効果や損傷状況を評価する方法として活用できる³⁾と考えられる。

具体的な維持管理への適用においては，供用中の床版の動たわみを同様諸元他橋梁の動たわみと比較すると，同一橋梁内での同様なパネル間での動たわみの値を比較することによって健全度を評価することが考えられる。さらに，建設時の計測値を初期値として記録し，その経年変化を見ることにより劣化状況を確認することができる。

4. まとめ

床版下面と補強部材とのはくりの発生，進行に関する

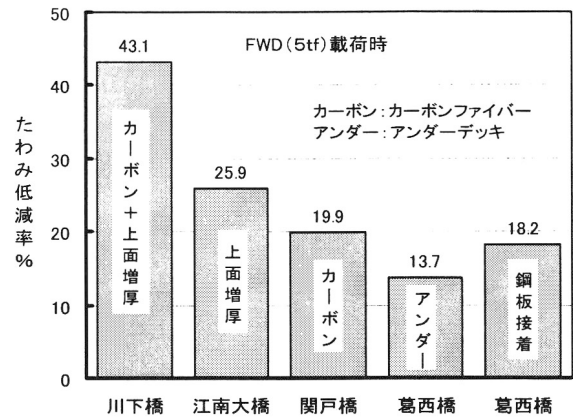


図-5 FWDによる各種補強床版たわみ低減率

メカニズムが解明されれば，詳細にはくり状況を把握する手法が有効な手法となる。

補強効果は床版の疲労劣化状況に大きく依存するため，今後データの蓄積が必要である。

補強工法は床版の疲労劣化に対応して，適切に選択されれば問題はない。現実には，各機関標準的な工法が採用されているため，補強効果が期待できない場合もあり，今後の課題と考えられる。

参考文献

- 1) 道路構造物の点検標準，阪神高速道路公団，平成8年3月
- 2) 田中清幸，松村英樹，中谷眞二，猪八重由之：コンクリート非破壊検査の検証例，土木技術57巻12号，pp.39-46, 2002.12
- 3) 阿部忠行，関口幹夫，小原利美：土木構造物の維持更新と機能向上技術開発，平成8年東京都土木技研年報，pp.115-126, 1996
- 4) 吉沢弘之，島内洋年，木虎久人，國川正勝：炭素繊維シートとコンクリートの定着挙動，土木学会第50回年次講演会概要集，V-201, pp.52-53, 1995.
- 5) 宇佐美惣，長田光司，井ヶ瀬良則，齊藤誠：炭素繊維巻立て工法の施工時の欠陥が耐久性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.2, pp.1225-1230, 1999
- 6) 日本道路公団：構造部物施工管理要領，平成11年7月
- 7) 三井雅一，福沢公夫，沼尾達弥：赤外線サーモグラフィ法を用いたFRPシート・コンクリート間の欠陥検出，土木学会論文集 No.655/B-48, pp107-117, 2000.8