

鋼床版疲労損傷の調査、補修そして予防保全へ

Investigation on the Steel Bridge Deck to Improve its Fatigue Performance

田中信治*, 中本丈視**, 杉浦和樹***
Shinji Tanaka, Takemi Nakamoto, Kazuki Sugiura

*工博, 技術士, 中部復建(株), 技師長(〒466-0059 名古屋市昭和区福江1丁目1805番地)
**工修, 技術士, 中部復建(株), 設計本部(〒466-0059 名古屋市昭和区福江1丁目1805番地)
***中部復建(株), 設計本部(〒466-0059 名古屋市昭和区福江1丁目1805番地)

Recently fatigue cracks have been observed at weld joints connecting deck plate and U-rib in an orthotropic steel deck. Some of the cracks initiate from the weld roots and then propagate through the thickness of the deck plate. This research discusses our investigation of the mechanism of fatigue damage that occurred in an orthotropic deck bridge. The investigation was performed by comparing field measurement result with the analytical results from FEM model.

Key Words: box girder bridge, orthotropic steel deck, fatigue crack, SFRC pavement
キーワード: 鋼箱桁, 鋼床版, 疲労き裂, SFRC 舗装

1. はじめに

近年, 首都高速や主要幹線道路に架かる鋼床版での損傷が多く報告¹⁾²⁾³⁾されている。中でも, 鋼床版のデッキプレートと箱桁の腹版に隣接したUリブの溶接ルート部から疲労き裂が発生し, デッキの上面方向に進展する損傷が多い。疲労き裂を放置すると, 写真-1(次頁)に示すように, 舗装は度重なってひび割れ, 路面が陥没し, やがて車両の安全走行が確保できなくなる可能性がある。また, き裂貫通部から, 舗装材料や雨水がUリブ内に浸入Uリブの腐食損傷も懸念される。

今回, 名古屋市が管理する天白大橋(3径間連続鋼床版箱桁)において, 上記と同様な損傷が発生し, き裂損傷の調査, 発生応力度の確認, 原因の追及, 疲労寿命の推定, 過積載車両の実態, および補修設計, 予防保全等を実施する機会が得られ, 全ての施工が完了したので以下に報告する。

2. 対象橋梁とき裂損傷調査

2.1 対象橋梁

対象橋梁である天白大橋の概要等を以下に示す。

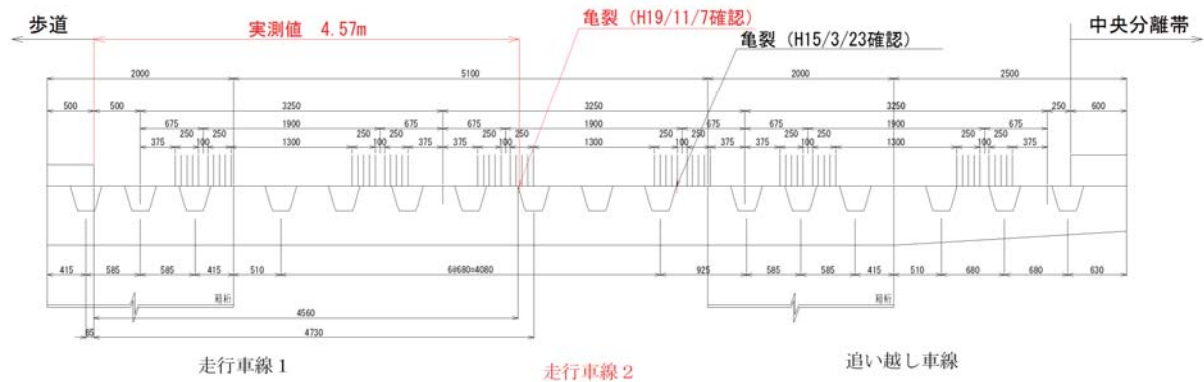
架橋地点: 名古屋市南部工業地帯, 天白川最下流
供用開始: 昭和54年一期線, 昭和59年二期線
橋梁形式: 3径間連続鋼床版箱桁

橋長: 193.0m(59+74+59), 橋梁全体は約500m
幅員: 15.85m(上下線供: 3車線+歩道)
交通量: 約5万台/日両方向, 大型混入率: 約50%
(現地の状況より, 二期線に満載車が多い)
履歴: 平成15年3月二期線端支点付近にき裂発生
平成16年度上記損傷対し調査・補修検討
平成16年3月上記損傷に対し当て板補修
平成19年11月二期線支間中央にき裂発生
平成21年度上記損傷対し補修とSFRC舗装
平成22年度一期線SFRC舗装

2.2 き裂損傷調査

今から約8年前, 写真-1に示す格子状のひびわれが舗装に発生し, 舗装撤去後, 写真-2に示す橋軸方向に直線的なき裂の発生が鋼床版の表面から認められた。当時, この地方では, まだ鋼床版のき裂は想定外であり, 補修等の準備が全く出来ない状態のまま, 新しく舗装を打設した。

その後, 舗装打替え時に確認できたき裂位置に基づき, 交通規制を伴わない鋼床版下面からの超音波検査とCCDカメラによる目視調査, および全てのUリブの打音検査と熱赤外線カメラによる漏水検査を実施した。損傷位置とタイヤ位置の関係を図-1に, 超音波探傷結果を図-2, 熱赤外線カメラによるUリブ内での漏水状況を写真-3示す。



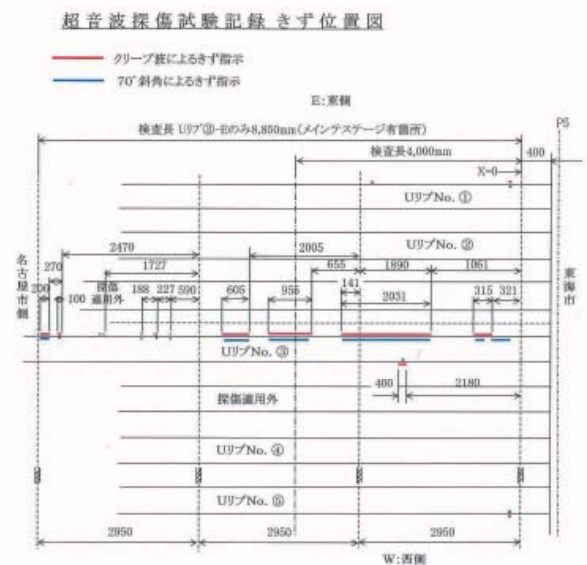
図－１ 損傷位置とタイヤ位置関係図



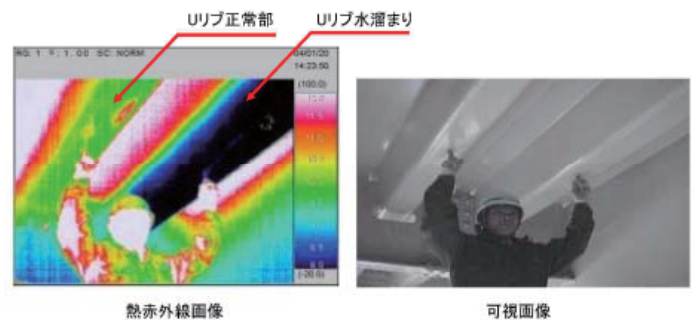
写真－１ 舗装損傷状況



写真－２ 鋼床版き裂状況



図－２ 超音波探傷結果



写真－３ 熱赤外線カメラによる漏水状況

３．発生応力度の確認

き裂の要因として疲労損傷が考えられたため、試験車と一般車による実応力測定と、シェル要素を用いた FEM 解析を実施した。検討対象の位置は、輪荷重載荷の近傍となるデッキ下面、および計測・解析結果の比較検証が可能となるトラフリップ側面、下面とした。なお、実応力の測定箇所は、き裂の無いパネルで実施した。

３．１ 応力測定

試験車による実応力測定では、20t ダンプトラックを 3 車線それぞれの車線で停車・走行を行い、静的・動的な応力と変動範囲を測定し、走行速度は約 30, 50, 60km/h とした。一般車による実応力測定では、72 時間の通常走行状態で、実応力及びその頻度を測定した。計測には歪ゲージを用い、測定箇所と表－２に示すグループの関係を図－３に示す。また、発生する応力と通行車両の軸重や総重量等との相関性を確認するため、BWIM(Bridge

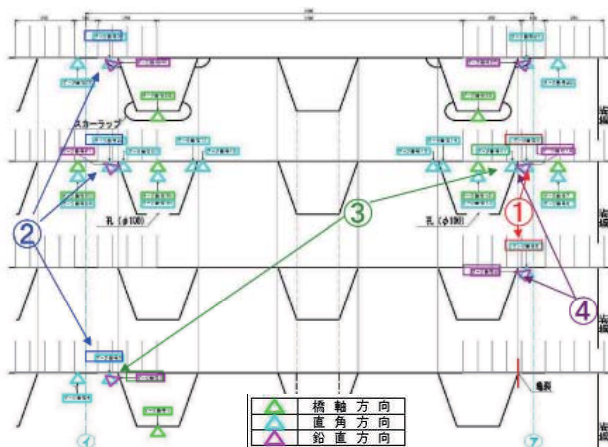


図-3 ゲージ添付位置とグループ関係

表-2 最大級一般車（6軸トレーラー）概要

中央車線走行(1)							
	月日		3/3				
	時刻		6:14:12				
	時速(km/h)		45.0				
	軸数		6				
	総重量(tf)		95.3				
	軸重(tf)						
	1	2	3	4	5	6	
7.8	15.3	11.5	21.6	21.7	17.5		



写真-3 過積載車両の一例

Weigh-in-Motion)測定⁴⁾⁵⁾を併用し、隣接する鉸桁橋を利用して、歪ゲージを端部垂直補剛材の鉛直方向に貼付し、138.5 時間の測定を実施した。写真は1秒間に3枚撮影し、測定機器と時計を一致させ、測定後も撮影した車両と発生応力が確認出来るように設定した。表-2に最大級の軸重が測定された過積載車両の概要を示す。また、3日間で測定された過積載車両の一例を写真-3に示す。試験車の後後輪(軸重:7.3tf)と、表-1に示した一般車両が載荷された時の応力分布を図-4に示す。最大級一般車による応力は、20t 試験車の概ね2倍程度であ

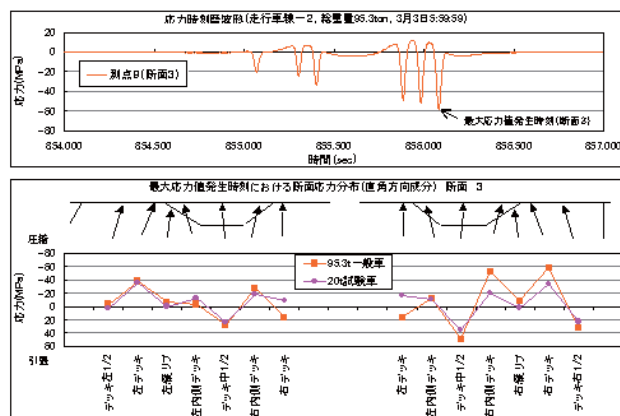


図-4 20t 試験車・最大級一般車による応力分布

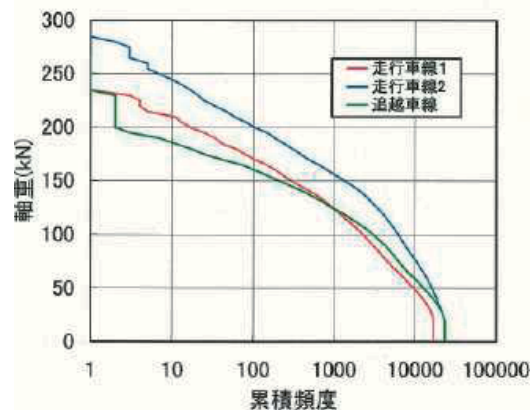


図-5 軸重累積頻度分布

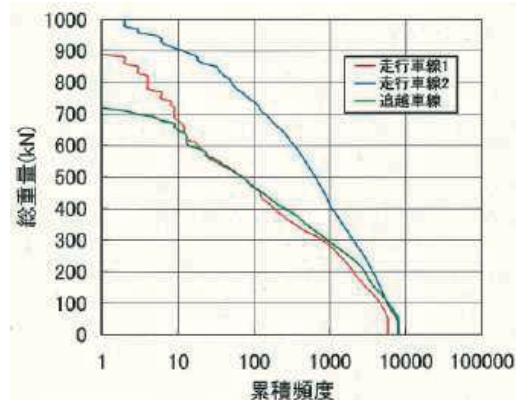


図-6 総重量累積頻度分布

った。

また、箱桁ウェブに隣接したトラフリブ周辺のデッキには、大きな圧縮応力が発生するが、トラフリブ本体にはそれほど大きな応力は発生していない。BWIMによる3車線合計の軸重累積頻度分布を図-5に、総重量累積頻度分布を図-6に示す。一般車荷重測定では、200kNを超える軸重が数軸観測されたこと、第2走行車線では他の2車線に比べて軸重・総重量が大きい車両が多数走行していることが判明した。

3. 2 応力解析

鋼床版の各部材に、輪荷重で発生する応力状態を確認するためFEM解析を実施した。解析モデルを横リブとトラフリブで構成される直交異方性版とし、輪荷重直下でデッキに作用する曲げ応力の影響、き裂発生部の局所的な応力集中の発生等を考慮して、シェル要素を用いたFEM解析による応力を算出した。また、アスファルト舗装の荷重分散を考慮するため、輪荷重載荷付近の舗装をソリッド要素としてモデル化し、舗装厚方向のメッシュ分割を80mm(舗装厚)の3分割とした。

FEMモデルの妥当性確認は、試験車による静的載荷実応力測定値と、同位置での試験車荷重によるFEM解析応力値を比較することで検証した。検証での計測値と解析値の近似においては、20t車の後輪荷重を載荷荷重とし、舗装のヤング係数をパラメーター¹⁾として、収束計算を実施した。検証結果として、舗装剛性を2000N/mm²とすることで、解析値が測定値と概ね整合した。さらに、SFRC舗装を想定したモデルとして、舗装剛性を約10倍⁶⁾にして解析を行った。その結果、発生応力が約40～50%程度になり、補修工法としてSFRC舗装が有効であることも確認できた。

き裂発生のない場合の各部材応力は、舗装ヤング係数をE=2000 N/mm²とし、20t車の前輪荷重(29.4kN・2箇所)を載荷荷重として、FEM解析で算出した。荷重の載荷位置をパラメーターとし、動的載荷試験による実応力測定値と比較した。その結果、解析値と計測値の整合性には多少のバラツキが見られるが、応力分布においては、輪荷重載荷位置の影響が大きいことが判明した。実際の走行位置に最も近いと考えられる輪荷重の載荷位置は、第2走行車線の中心から、G1桁側に約130mmずらしたケースであった。

4. 疲労寿命の推定

72時間応力測定の波形における発生応力値と頻度を解析して、累積疲労損傷の観点から疲労寿命の推定を行った。表-2に、疲労寿命計算対象箇所と計算結果を示す。各箇所での疲労寿命において、疲労き裂発生箇所となった、主桁に近接したトラフリブ部と同等な箇所(グループ①)では、疲労寿命が比較的短く、疲労き裂が発生しやすい状態であるといえる。

車輪位置とトラフリブの位置関係がき裂発生箇所と同等箇所(グループ②)では、グループ①に比べて疲労寿命は3倍以上と長い。グループ①と②では、応力発生メカニズムが同等であると考えられるにもかかわらず、寿命が異なる要因としては、箱桁ウェブが位置することによって剛性が局部的に大きくなることによる、応力集中度の割合の影響が考えられる。

グループ①と溶接部を挟んで相対する箇所(グループ④)については、グループ①の次に疲労寿命が短い結果

表-2 疲労寿命計算対象箇所及び疲労寿命計算結果

グループ	構造的位置	測点番号	疲労寿命	疲労寿命 (試験車以上の 応力 カット)	疲労寿命 (応力 20%減)	継手 等級
①	亀裂発生箇所と同等関係 (箱桁近接部)	5	16.3 年	52.5 年	40.7 年	E(80MPa)
		9	13.1 年	23.5 年	30.3 年	E(80MPa)
②	車輪とトラフリブの位置関係が、 亀裂発生箇所と同等 (箱桁遠隔部)	3	37.7 年	310.8 年	120.7 年	E(80MPa)
		22	34.7 年	118.2 年	90.1 年	E(80MPa)
③	その他、トラフリブ溶接部近傍 2:測点3のトラフリブ側 11:測点9の隣接デッキ部	31	88.0 年	∞	320.2 年	E(80MPa)
		2	34.0 年	238.0 年	87.7 年	F(65MPa)
④	6:測点5のトラフリブ側 10:測点9のトラフリブ側	11	42.1 年	249.4 年	118.8 年	E(80MPa)
		6	21.5 年	106.6 年	52.7 年	F(65MPa)
④		10	18.4 年	∞	43.3 年	F(65MPa)

グループについては図-3参照

となっている。これは、先にデッキ部材側にき裂が発生するというを示しており、デッキ側にき裂が発生した後は、応力が再配分され、トラフリブ側の応力は低減されると考えられることから、デッキ側に続いてき裂が発生する可能性は低いと考えられる。

また、疲労寿命に対し、設計軸重を超える車両がどれほど影響しているかを確認するため、静的・動的載荷試験に用いた20tトラックによる発生応力より大きな応力を全てカットして疲労寿命を求めた。疲労寿命が延びる結果となり、過積載車両の絶滅も疲労の観点から重要であることが判明した。

また、デッキ厚を12mmから20mmに約65%増厚することにより、応力が約20%低減するという報告¹⁾もあるため、全ての応力を20%低減させた場合の疲労寿命を求めた。この場合も疲労寿命は大きく増加する結果を得たが、経済性等を踏まえた検討を加えることが、今後の疲労損傷対策には重要と考えられる。

5. 補修から予防保全へ

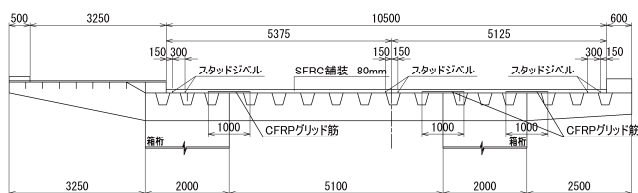
5. 1 き裂部の補修方法の検討

鋼床版き裂部の応急処置として、鋼版をボルトによって添接する当て板補修を行った。設計にあたっては以下の2点に留意した。

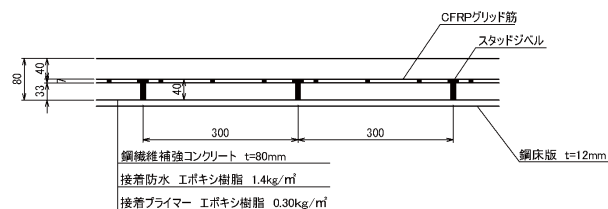
①鋼版のボルト固定を、Uリブ内側の範囲で行うと、舗装80mmに対しボルトが約48mm入り、舗装損傷時において通過車両に対し、危険である為Uリブ外側のみで固定することとした。

②Uリブの外側に鋼版を添接する場合、耐力が向上する事は期待できないため、母材のみに鋼版を添接することとした。

さらに、疲労き裂の進展を防止するため、ストップホールの施工を行った。ストップホールの位置は舗装切削後の磁粉探傷、超音波探傷結果を基に決定し、トラフリブの片側2箇所とした。効果検証として、ストップホール開口後に浸透探傷検査を実施して、き裂の進展がないことを確認した。



図－7 標準断面図



図－8 舗装構成図



写真－3 SFRC 舗装施工状況

5. 2 恒久処置 (SFRC 舗装)

(1) SFRC 舗装

前述の通り、平成 15 年度のき裂損傷に対しては、応急処置としての当て板補修を行ったが、平成 19 年度の橋梁点検により、応急処置以外の箇所でも、新たな鋼床版のき裂（図－1 参照）が確認された。平成 15 年のき裂発生箇所が支点付近であったため、伸縮装置による衝撃の影響の可能性も想定していた。しかし、今回のき裂は支間中央付近で発生しており、どこでき裂が発生してもおかしくない状態となった。恒久処理の手段として、鋼繊維補強コンクリート (SFRC) 舗装によりデッキプレートの面外剛性を高め、溶接部近傍の局所応力を低減させる工法⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾が有効であることが検討されていた。

(2) 施工方法

SFRC 舗装の施工事例として、スタッドジベルなし、グリッド筋は主桁ウェブ上のみが主流となってきたが、過積載車両が多いことや数箇所にき裂が発生していること、通行止め施工が可能等、本橋梁の状況を考慮して、端部にスタッドジベル、グリッド筋を主桁ウェブ上のみに設置した SFRC 舗装を恒久処置として提案した。図－7 に標準断面、写真－4 に施工状況を示すとともに、計画時の留意点を以下に示す。

- ① タッドジベル高は、将来の切削オーバーレイや表層アスファルト舗装化への変更に対応できるように $h=40\text{mm}$ とした（図－8 参照）。
- ② 高性能連続強化繊維を樹脂に含浸させながら格子状に一体成形して防錆に優れた CFRP グリッド筋を用いて、耐久性に配慮した。
- ③ 全面 SFRC 舗装施工においては、短時間施工の場合は超早強コンクリート使用の分割施工となるが、材料費を含めた施工費、構造的・施工性で上流側に一般交通切廻しを行い、下流側の全面通行止めによる一括施工を推奨した。
- ④ 本橋梁の施工幅員 10.5m であり、1 回のコンクリート

打設では不可能であるため、2 断面の分割施工とした。施工目地は、通常走行の輪荷重位置を考慮して、第 2 車線の中央とした。

(3) 予防保全

上記により、二期線はき裂発生から約 6 年の歳月を費やし、現段階で考えられる補修工法が完結した。残る懸案事項は一期線の損傷の有無、対処をどうするかがであった。構造は二期線と全く同じであるが、タンクローリー始め大型車の殆どが空であるという特異な状況であることから、損傷は未だ発生していなかった。ただし、疲労寿命の推定において、試験車以上の応力をカットしたケースにおける箱桁近傍での疲労寿命が 25 年余りという結果や、早い時期に処理をした方が効率的であるとの見解から、予防保全として一期線も SFRC 舗装により対策を行った。

6. おわりに

天白大橋における鋼床版の亀裂損傷に対して、各種検討を行った結果、以下の知見を得た。

- ・ 応力測定と BWIM 測定から、発生する応力は軸重にほぼ比例することが判った。BWIM 測定により過積載車両の存在が明らかになった。総重量での最大は 120tf を超える車両や、軸重においても 30tf を超える車両が存在した。
- ・ FEM 解析と測定結果を検証することにより、舗装剛性の具体値が想定できた。さらに SFRC 舗装と想定される剛性で検討した結果、発生応力が約 40～50%程度になり、補修工法として SFRC 舗装が有効であることも確認できた。
- ・ 疲労寿命計算では、亀裂発生箇所と同等位置で 13.1 年となった。また、過積載車両の判明から、試験車 (20tf) が発生した応力を超える実測値を、全て試験車 (20tf) と同値とした場合は、23.5 年となり、約 10 年延命される

にとどまった。

・応急処置の当て板補修と、恒久処置の SFRC 舗装を行い、現時点で問題は発生していない。

今後は、現状での応力を測定し、SFRC 舗装の効果の大きさを判明したいと考えている。また、これら一連の損傷原因として過積載車両が挙げられ、それに対応することが、今後の課題であろう。

最後に、本橋の補修が比較的順調に進んだ理由として以下の特徴が挙げられる。

・もともと愛知県が計画・施工した経緯があり、その後管理区分の見直しによって名古屋市が管理していた。

・架橋位置が市境であり、補修予算は愛知県と名古屋市の折半であった。

・本橋は全線において検査路が設置されており、いつでも容易に桁下の検査が可能であった。

・架橋地点は名古屋高速の新設工事が長期間に渡って行っており、一般道路に比べて工事占用がやりやすかった。

謝辞

本論文の作成にあたり、名古屋市はじめ解析から補修工法までご助言を頂いた、当時名古屋大学大学院山田健太郎教授、さらに関係各位のご理解とご協力を得ましたことをここに感謝いたします。

参考文献

1) 三木千壽, 管沼久忠, 富澤雅幸, 町田文孝 : 鋼床版箱

桁のデッキプレートに近傍に発生した疲労損傷の原因, 土木学会論文集, No. 780/ I -70, pp. 57-69, 2005. 1 .

2) 西川和廣 : SFRC による鋼床版舗装—鋼とコンクリートの新しい関係—, 橋梁と基礎, pp. 84-87, 2006.

3) 平林泰明, 牛越裕幸, 木ノ本剛 : 首都高速における鋼床版疲労損傷, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, Vol. 10, pp. 39-53, 2007. 8.

4) 小塩達也, 山田健太郎, 小林直人 : 鋼 I 桁橋の縦桁を用いた Bridge Weigh-in-Motion システムの開発, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 1083-1091, 2001. 3 .

5) 小塩達也, 山田健太郎, 若尾政克, 因田智博 : 支点反力による BWIM を用いた自動車軸重調査と加重特性の分析, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 743-753, 2003. 3.

6) 三木千壽ら : 鋼床版の疲労への SFRC 舗装による予防補強とその健全性モニタリング, 土木学会論文集 A, Vol. 62No. 4, pp. 950-963, 2006. 12 .

7) 加形ら : SFRC 舗装による鋼床版の疲労損傷対策, 橋梁と基礎, pp. 27-32, 2004. 10.

8) 菊池孝雄, 児玉孝善, 後藤和満 : 湘南大橋における鋼床版の疲労対策, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, Vol. 10, pp. 1-10, 2007. 8.

9) 小野ら : 既設鋼床版の疲労性状と鋼繊維補強コンクリート敷設工法による疲労強度改善効果に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 165No. 2, pp. 335-347, 2009. 4 .