既設鋼床版の疲労性能向上を目的とした補強検討

小野秀一¹・下里哲弘²・増井隆³・町田文孝⁴・三木千壽⁵

¹正会員 工修 社団法人日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

E-mail:ono@cmi.or.jp

²正会員 工修 首都高速道路公団 保全施設部 (〒100-8930 東京都千代田区霞が関 1-4-1)

³正会員 首都高速道路公団 東東京管理局 (〒103-0015 東京都中央区日本橋箱崎町 43-5)

⁴正会員 財団法人首都高速道路技術センター (〒105-0001 東京都港区虎ノ門 3-10-11)

⁵フェロー 工博 東京工業大学教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

近年、既設の鋼床版に疲労損傷が見つかった。特にデッキプレート直下に生じた疲労損傷については、直接作用する輪荷重の影響によるデッキプレートの局所的な変形と、それによる応力集中が原因と考えられ、損傷が直接通行車両へ影響を及ぼすこと、また同一の橋梁内には同じディテールが多数存在することから、疲労損傷は広範囲にわたる可能性が高く、適切な補修・補強工法の確立が求められている。

本研究は、デッキプレートの補強に着目した鋼床版の補強工法として選定した3種類の工法について、実橋の一部を取り出した実物大試験体を用いた載荷試験により、補強効果について検討を行ったものである。ここでは、載荷試験によって得られた鋼床版の応力挙動とともに、各補強工法の有効性を述べる。

Key Words: orthotropic steel deck, fatigue, retrofit, SFRC, reinforcement

1. はじめに

近年、首都高速道路をはじめとした主要道路の鋼床版で疲労損傷が報告されてきている¹⁾。鋼床版は通行車両を直接支える部材であることから、鋼床版の損傷が通行車両へ悪影響を及ぼすことが懸念されることと、鋼床版箱桁のように主桁の一部として用いられる場合には、その取り替えは極めて困難であることから、既設鋼床版の疲労損傷対策が強く求められている。

鋼床版は一般に、輪荷重の影響を直接受けることや、デッキプレートや縦リブ、横リブなどの薄肉鋼板で構成されていることから、鋼床版に生じる応力は複雑である^{1),2),3)}。また、輪荷重ごとに応力変動が生じることから疲労に対して非常に厳しい環境におかれていると言える。

鋼床版の疲労損傷は、文献4)に示されるように鋼床版の各部で発生するケースが見られ、同一の橋梁内には同様なディテールが多数存在することから、発生するきれつも広範囲かつ膨大な数に上る可能性が高い。

これまでに報告されている鋼床版の疲労損傷の

うち、デッキプレートと縦リブ(トラフリブ)溶接部に生じたきれつを図-1、垂直補剛材上端部に生じたきれつを図-2に示す。これらの疲労きれつは進展によってデッキプレートを貫通する恐れがあり、貫通した場合にはデッキプレートの陥没を引き起こし、通行車両への悪影響が懸念される。

デッキプレートとトラフリブ溶接部に生じる疲労きれつについては、図-3に示すように溶接ルート部からデッキプレートの板厚方向に進展するケースが見られる。この方向に進展する疲労きれつは、トラフリブの内側で発生・進展するため、きれつがデッキプレートを貫通し、さらに舗装を除去しなければ目視による点検が不可能である。また、ルート部から進展するきれつであることから、デッキプレート下面からの非破壊検査による探傷では検出が困難なきれつである。したがって、デッキプレートとトラフリブの溶接部に発生する疲労きれつの対策は、極めて重要な検討課題である。

文献3)には、実橋を対象とした実橋計測、橋梁全体からディテールにわたる詳細な立体 FEM 解析により、図-1に示したデッキプレートとトラフリブの交差部に生じる疲労損傷の原因が示されている。こ

れによると既設の鋼床版に見られる疲労損傷の主な原因は、輪荷重によって発生するデッキプレートの橋軸直角方向の局所的な変形およびそれに起因する応力集中であると示されている。このことから、デッキプレートの剛性を上げ、輪荷重による局所的な変形を抑制することが、鋼床版の疲労損傷を防止するための有効な方法であると考えられる。

そこで本研究は、既設鋼床版の恒久的な疲労対策および疲労耐久性向上を目的として、デッキプレートとトラフリブ溶接部、垂直補剛材上端部を主な着目点とし、輪荷重の通過によって生じる当該交差部の応力・変形挙動を調査するとともに、鋼床版デッキプレートの補強に着目した補強工法の実橋への適用検討に向けた基礎資料を得るために行ったものである。具体的には、実橋の一部を取り出した部分試験体に補強工法を適用し、静的載荷試験によって各工法の補強効果について検討したものである。

なお、疲労損傷が生じた既設鋼床版については、発生したき裂に対するストップホールやき裂除去・再溶接などの個別のき裂補修検討を行うことはもちろんであるが、補修箇所からの疲労き裂の再発、あるいはき裂が生じていない同ディテールからのき裂の発生を防止するためには、鋼床版に生じる応力を下げること、すなわち鋼床版の補強が

必要である。このような観点から、本研究では鋼床版の補強方法について検討した。

2. 試験要領

本研究では、実橋の一部を模した試験体を用いて、実トラックによる静的載荷試験と応力測定を行い、無補強時の応力挙動を把握した上で、補強前後の応力挙動を比較することにより補強による応力低減効果について考察した。以下に試験要領を示す。

(1) 試験体の形状寸法

試験体は、疲労損傷が報告されている鋼床版箱桁橋をケーススタディとして、輪荷重の影響範囲を考慮して実橋の一部を取り出した実物大部分試験体とした。

試験体は図-4に示すとおり、横リブと箱桁ウェブに囲まれる2パネル分を対象として、板厚12mmのデッキプレートにトラフリブ3本を取り付け、試験体の両端と中央には横リブを設けた。また、箱桁ウェブに相当する縦桁をトラフリブの両外側に取り付け、縦リブ支間中央の縦桁ウェブ面には、垂直補剛材を設けた。トラフリブのサイズは、幅310mm、高さ234mm、板厚8mmである。

図-1 デッキプレートとトラフリブ溶接部のき裂

図-2 デッキプレートと垂直補剛材上端部のき裂

図-3 デッキプレートとトラフリブ溶接部に生じるき裂

図-4 試験体の形状寸法

図-5 荷重車

(2) 載荷試験方法

本試験では図-5に示す2種類の実トラック（中型車、大型車）を荷重車として使用した。鋼床版に生じる応力は、荷重の載荷方法や載荷位置に影響を受ける⁵⁾ため、より実際に近い挙動を測定するには、実際のトラックタイヤを用いた載荷試験が必要である。さらに、実タイヤを用いた場合においても、タイヤの接地幅とトラフリブサイズの関係によって応力挙動が異なることが指摘されており⁶⁾、特にタイヤ接地面の全幅がトラフリブ上端部の幅以下の場合には、デッキプレートの局所的な変形モードが変わると考えられるため、トラフリブ幅よりも広い接地幅

図-6 トラフリブとタイヤ幅

中型車は、前後各シングル軸で、前輪はシングルタイヤ、後輪はダブルタイヤである。輪荷重は、前輪 19.6kN (2tf)、後輪 34.3kN (3.5tf) とした。一方の大型車は、前後タンデム軸、各後輪はダブルタイヤであり、後輪荷重は後前輪、後後輪ともに 35.3kN (3.6tf) であった。

応力測定位置については、試験体の着目断面を横

応力測定は、デッキプレートとトラフリブの溶接部に着目し、デッキプレートの橋軸直角方向およびトラフリブの周方向の応力を測定した。また、トラフリブ内部のトラフリブ内面およびデッキプレート下面にもひずみゲージを貼付し、応力測定を行った。

デッキプレートとトラフリップの溶接部から生じるき裂つの原因は、前述のとおり、デッキプレートの橋軸直角方向の局所的な変形と、それによって生じる溶接ルート部の応力集中であると考えられている。さらに、文献 1) では解析的検討によりデッキプレートの剛性を上げることが、疲労き裂つの起点となるデッキプレートとトラフリップ溶接部のルート部に生じる応力の低減に効果があることが示されている。そこで、本研究では補強工法の選定方針としてデッキプレートの補強に着目した 3 つの工法を選定した。

選定した工法は、デッキプレート上面に鋼板を敷設する「鋼板敷設工法」、デッキプレート上面に鋼繊維補強コンクリートを敷設する「鋼繊維補強コンクリート敷設工法」、トラフリップの内部に軽量骨材コンクリートを充填する「トラフリップ充填工法」とした。図-8に各工法のイメージを示し、以下に各工法の概要を述べる。

(1) 鋼板敷設工法の概要

鋼板敷設工法は、デッキプレート上面に鋼板を敷設し、デッキプレートへの荷重分散と応力低減をねらったものである。また、既にデッキプレートとトラフリップの溶接部から疲労き裂が発生してしまったような場合には、路面の陥没を防止するための応急対策として用いられている工法である。

鋼板敷設による補強は、補強鋼板とデッキプレートの一体化が重要であるが、実際のデッキプレートは裏面側の補剛材（縦リブや横リブ）などの溶接により平坦ではなく、閉断面のトラフリップが用いられている場合には、トラフリップ内側へのボルト配置ができないため、完全に一体化させることが困難である。また、実橋に適用するに当たっては、鋼板の敷設範囲、敷設鋼板の板厚や面積なども検討する必要があると考えられるが、本研究では、鋼板敷設によ

る応力挙動の傾向を把握することを目的として、敷設した鋼板の厚さはデッキプレートと同じ12mmとし、大きさ1.2m×2.4mの鋼板をデッキプレート全面に敷設した。デッキプレートと鋼板の固定方法については、図-9に示すように、高力ボルトS10T（サイズM20）を用いてトラフリップ間でデッキプレートと固定した。固定の間隔は概ね150mmとし、トラフリップ間の中央1列配置とした。トラフリップの内側にはボルトは配置していない。

(2) 鋼繊維補強コンクリート敷設工法の概要

鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRC）敷設工法は、デッキプレート上面に荷重の分散効果とデッキプレートの剛性向上を図ることが可能と考えられるSFRCを敷設したものである。本工法は、デッキプレートの形状に追従して補強が可能で、デッキプレートとSFRC層の付着面全面で両者の一体化を図ることが可能な工法であると考えられる。

鋼床版上にSFRCを敷設する工法は、文献7)～10)に示されるように、自動車のランプなどの急勾配、急カーブな道路において適用された事例が見られる。これは、一般的な鋼床版舗装として用いられるグースアスファルトに対して、舗装体の耐流動性、耐摩耗性およびひび割れ抵抗性、靱性に優れる材料とし

(1)通常の鋼床版（無補強）

(2)鋼板敷設補強

(3)鋼繊維補強コンクリート敷設補強

(4)トラフリップ内軽量骨材コンクリート充填補強

図-8 適用した補強工法のイメージ

て SFRC が採用されているものである。また、文献 9)、10)では、SFRC と鋼床版の合成効果についての研究が行われており、合成効果が確認されると同時に、デッキプレートの応力が低減されるという結果が示されている。しかし、トラフリップを有す鋼床版の応力挙動については詳細な検討は行われておらず十分とは言えない。また、これまでの事例にみられる SFRC 舗装の層厚は 80mm 前後が多く、本研究で採用した層厚は、それよりもさらに薄く 50mm とした。このようなことから、鋼床版の応力挙動に及ぼす影響を、より詳細に検討する必要がある。

敷設した SFRC は、設計基準強度 30N/mm^2 (30MPa) し、材齢 3 時間において強度発現が期待できる超速硬セメントを用いた。これは供用中の橋梁での急速施工を考慮したものである。補強鉄筋は配置していない。層厚は 50mm とした。これは図-8 に示したように、現在の舗装厚 80mm の範囲で補強を行うことと、補強後の舗装厚を 30mm とすることを考慮（現舗装厚 80mm－補強後舗装厚 30mm）と

して決定した。

SFRC の配合仕様を表-1 に、使用材料を表-2 に示す。これらの仕様は、RC 床版の補強工法として行われる上面増厚工法を参考として、試験体上の比較的狭い範囲での施工であることを考慮して決定した。材齢 3 日時点（載荷試験時）での圧縮強度は 47.3MPa 、引張強度は 4.6MPa （割裂引張試験）、弾性係数

図-9 鋼板固定ボルトの位置

表-1 SFRC の配合

Gmax mm	SF 混入後 スランブ cm	空気量 %	W/C %	S/a %	水	セメント	砂	砂利	流動化剤
					(W)	(C)	(S)	(G)	
20	10±2.5	3.0±1.0	39.1	50.0	176	450	819	864	9.00

表-2 SFRC の使用材料

項目	諸元	備考
圧縮強度	30N/mm^2 以上	
単位セメント量	450kg/m^3	
スランブの範囲	$10\pm 2.5\text{cm}$	
骨材の寸法	粗骨材20mm以下	
セメント	超速硬セメント	デンカスーパーセメントS30
鋼繊維	混入量1.27vol% (100kg/m^3)	シンコーファイバーSFR2 $\phi 0.6 \times 30\text{mm}$
接着剤	塗布量 0.3kg/m^2	コニシ ボンドE200
細骨材	砂, FM=2.65	結城市鹿窪先
粗骨材	砂利, FM=6.70	栃木市鍋山
流動化剤		デンカFT-50
凝結遅延剤		デンカセッターD500

表-3 トラフリップ充填コンクリートの配合

Gmax mm	スランブ フロー mm	空気量 %	W/C %	S/a %	単位量 (kg/m^3)				
					水	セメント	砂	砂利	膨張材
mm	mm	%	%	%	(W)	(C)	(S)	(G)	
15	650±50	5.0±1.5	35~40	45~50	155	438	601	537	30

29.2GPa, ポアソン比 0.23 であった。

また, SFRC 打設直前にはデッキプレート面にエポキシ系接着剤を塗布し, デッキプレートと SFRC 層の接着を図った。デッキプレートと SFRC を一体化するための方法として, スタッドなどの連結部材の設置が考えられるが, 実橋でのスタッド施工が難しいこと, SFRC 層が薄く適切なサイズのスタッドが現在では入手できないことなどから, 本研究ではエポキシ系接着剤の塗布のみにより連結を図り, SFRC 層の敷設による鋼床版デッキプレートの補強効果の検討を行った。

(3) トラフリブ充填工法の概要

本工法は, トラフリブ内に軽量骨材コンクリートを充填したものである。これは, トラフリブ内にコンクリートを充填することによってトラフリブの剛性を上げ, トラフリブおよびデッキプレートの変形を抑制し, 結果としてデッキプレートとトラフリブ溶接部に生じる応力の低減を期待したものである。

前述の 2 工法(鋼板敷設, SFRC 敷設)はいずれも, デッキプレート上面から舗装を除去して施工することを想定しているため, 実施工では車線規制が必要となる。これらに対して本工法は, デッキプレートの下面側からの補強となるため, 車線規制が不要あるいは比較的短時間で済む可能性がある。しかしトラフリブへのコンクリート充填は, そのまま橋梁本体の死荷重増となることから, 別途, 死荷重増に対する検討が必要である。ここではトラフリブにコンクリートが充填された鋼床版の応力挙動を把握することを目的として行った。

充填コンクリートの配合を表-3 に示す。死荷重の増加を極力抑えるために充填コンクリートは粗骨材および細骨材ともに軽量骨材を用いた軽量骨材コンクリートとし, さらに狭小断面内への充填となることから高流動コンクリートとした。載荷試験時(材齢 14 日)の充填コンクリートの圧縮強度は 43.6MPa, 引張強度は 3.3MPa, 弾性係数は 15.2GPa であった。

コンクリートの充填方法については, 試験体両端に開口するトラフリブ端面にコンクリート注入用バルブとエア抜き口を設け, 注入口からコンクリートポンプで充填した。コンクリートはトラフリブ 3 本すべてに充填した。

4. 載荷試験結果と考察

載荷試験は, 試験体に何も補強を施さない無補強

ケース, 鋼板を敷設した鋼板敷設ケース, 鋼繊維補強コンクリートを施工した SFRC ケース, そしてトラフリブ内に軽量骨材コンクリートを充填したリブ充填ケースの 4 ケースを実施し, 各ケースで得られた応力挙動を比較することによって各補強工法の効果を検討した。

実橋の鋼床版上には通常, アスファルト舗装が施工されるが, アスファルト舗装の剛性には温度依存性があり, 夏季のような舗装温度が高温になる期間ではアスファルトの剛性は期待できない^{5),11)}ため, 本研究ではアスファルト舗装は考慮しないこととした。

以下に, 載荷試験結果を示すが, まず無補強ケースによる鋼床版各部の応力挙動を示し, その後各補強ケースによる応力挙動の変化と補強効果を示す。

(1) 無補強試験体を用いた鋼床版の応力挙動

a) デッキプレートとトラフリブ溶接部近傍の応力挙動

無補強試験体を用いて, 着目部位での応力挙動を測定した。図-10 に, デッキプレートとトラフリブ溶接部に着目し, 中型車を用いた L1 ライン載荷, 後輪(ダブルタイヤ)載荷時の測定結果を示す。横軸は載荷位置, 縦軸は着目部に生じた応力を示す。なお, 載荷位置が 5500mm 付近で応力が生じているのは, トラック前輪が試験体に載った影響である。

デッキプレートの応力は, 載荷と同時にデッキプレートの上面が圧縮, 下面が引張の応力となっており, 鋼床版のたわみによる曲げ応力が生じている。しかし, 輪荷重が直上に載荷されたときには, デッキプレート上面が引張, 下面が圧縮となり, 応力の方向が反転している。輪荷重の直上載荷により, デッキプレートがトラフリブウェブ上端を支点として局部的に変形しているためと考えられる。また, トラフリブについては, 内面が圧縮, 外側が引張となっており, 外側に凸の変形モードとなっている。

次に, 後輪ダブルタイヤと前輪シングルタイヤが通過したときの応力挙動の違いを検討するために, トラックの前輪を載荷荷重として同様に影響線載荷を行って, そのときの応力挙動を比較した。

図-11 に前輪タイヤの載荷位置と応力測定結果を示す。ここでは, 前輪がトラフリブの内側に位置し, タイヤ接地面のエッジ部がトラフリブのウェブと一致させた C2 ケース, タイヤがトラフリブの中央に位置させた C3 ケースの測定結果を示す。比較対象として, ダブルタイヤを載荷したケースとして L1 ライン影響線載荷の結果を示す。なお, 荷重車として用いたトラックの前輪と後輪の位置関係は, 概ね

ダブルタイヤ L1 とシングルタイヤ C2 の関係となっている。図中のグラフは、縦リブ支間 1/4 点におけるデッキプレートとトラフリブ溶接部近傍の応力測定結果を示したものである。

上段(1)はデッキプレートの応力を、(2)はトラフリブの応力を示す。タイヤが直上に荷重された時のデッキプレートの応力挙動についてダブルタイヤ L1 荷重とシングルタイヤ C2 荷重で比較すると、ダブルタイヤの場合は、デッキプレート上面が引張、下面が圧縮のモードとなっているが、シングルタイヤ C2 では全く逆のモードとなっていることが分かる。シングルタイヤ C3 荷重では、ダブルタイヤ L1 と同じモードとなっている。

トラフリブの応力挙動については、ダブルタイヤ L1 荷重ではトラフリブ外側で圧縮応力が卓越していることから、トラフリブの内側に凸となる変形モードとなっていると考えられるが、シングルタイヤの C2, C3 荷重では内側が圧縮、外側が引張となっていることから、トラフリブは外側に凸となる変形モードが発生していることが分かる。

以上から、輪荷重通過時のデッキプレートとトラフリブの溶接部近傍に生じる変形モードを推定すると、図-12 に示すようになると考えられる。(1)に示すように、荷重(ダブルタイヤ)が荷重されたときの箱桁ウェブ間のたわみによる版としてのモードと、ダブルタイヤの直上荷重による局所的な変形モード

図-10 デッキプレートとトラフリブ溶接部近傍の応力挙動 (縦リブ支間中央)

があると考えられる。さらに(2)に示すように前輪と後輪の直上載荷では、車輪の通過位置によって、局部的な変形モードが変化していると推定される。

また、着目部に生じる応力値については、図-11(2)に示すように、荷重の小さい前輪が通過したときの方が、荷重の大きい後輪が通過したときより

も大きいケースが見られ、鋼床版の疲労検討を行う際には前輪の影響も考慮する必要があると考えられる。

すなわち、実橋においては、デッキプレートとトラフリブの溶接部には、車両1台の通過により、前輪と後輪、さらに車輪の載荷位置によって複雑かつ

図-11 前輪通過による応力挙動

多様な変形モードが生じていることが考えられ、このような複雑な挙動が疲労耐久性に影響を及ぼしていると考えられる。

b) デッキプレートの応力分布

縦リブ支間中央断面に着目し、輪荷重が載荷されたときのデッキプレートの橋軸直角方向応力の分布を図-13に示す。この図では、大型車と中型車がそれぞれ、着目断面の直上載荷されたときの分布を示している。垂直補剛材上端部では大型車と小型車による応力の差が見られるものの、それ以外の部位では大型車と中型車による応力分布に差は見られず、トラフリブ幅以上のタイヤ接地幅があれば、応力挙動に及ぼすタイヤの接地幅の影響は小さくなる可以说える。またこの結果から、トラフリブのサイズが若干異なった場合においても、本載荷試験で得られた結果と同様の応力挙動が得られると考えられる。

(2) 補強後の応力挙動と補強効果

a) デッキプレートとトラフリブ溶接部

L1ライン(ダブルタイヤ中心がトラフリブのウェブを跨ぐケース) 載荷時、縦リブ支間中央部のデッキプレートとトラフリブ溶接部の応力挙動を図-14に示す。

デッキプレートとトラフリブ溶接部近傍のうち、トラフリブの内側に位置するデッキプレート下面(図中“A”)の応力では、無補強ケースでの最大応力振幅 21MPa に対し、鋼板敷設で 17MPa, SFRC 敷設で 7MPa, リブ充填では 2MPa となっている。応力の低減効果としては、無補強ケースでの応力を 1.00 とすると、鋼板敷設は 0.81, SFRC 敷設は 0.33, リブ充填は 0.10 となっており、SFRC 敷設およびリブ充填による補強効果が高い結果となっている。鋼板敷設については、20%程度の応力低減がみられた

図-12 荷重車通過時の変形モードの変化

図-13 中型車と大型車による応力分布の比較

が、最大応力には変化がみられず、トラフリブの内側ではボルトによる連結がないことから、補強効果が低くなっていることが考えられる。

一方、トラフリブの外側に位置するデッキプレート下面（図中“B”）の応力については、無補強ケースでの応力振幅 57MPa(1.00)に対し、鋼板敷設 22MPa(無補強との比 0.39), SFRC 敷設 6MPa(0.11), リブ充填 34MPa (0.60) となっており、SFRC 敷設はこの部位でも高い補強効果を示し、リブ充填ケースでは補強効果が低くなっている。鋼板敷設については、60%程度の応力低減がみられた。

デッキプレートとトラフリブ溶接部のトラフリブ内側の応力については、無補強ケースで

23MPa(1.00), 鋼板敷設 8MPa(0.35), SFRC 敷設 4MPa(0.17), リブ充填 5MPa(0.22)であった。この部位についてはどの補強工法においても60%以上の補強効果が確認された。

次に L2 ライン（タイヤがトラフリブの直上に載荷されるケース）載荷時のデッキプレートとトラフリブ交差部のうち、デッキプレートのトラフリブ外側に位置する応力挙動を図-15に示す。

この図においても、無補強ケースの場合は、載荷により版としてのモードと、輪荷重の直上載荷時によるデッキプレートの局所的な変形モードがみられる。無補強時の応力振幅は30MPaであり、SFRC 敷設 7MPa, 鋼板敷設 25MPa, トラフ充填が 42MPa と

図-14 補強後のデッキプレートとトラフリブ溶接部近傍の応力挙動（縦リブ支間中央）

図-15 補強後のトラフリブ直上载荷 (L2) 時の応力挙動

なっており、トラフリブ充填ケースが無補強のケースより応力振幅が大きくなっている。これは、トラフリブへのコンクリート充填によりトラフリブ自体の剛性は向上したものの、補強されていないトラフリブ間では剛性がそのままであると考えられ、トラフリブ外側のデッキプレートに応力が集中したものと考えられる。すなわち、リブ充填ケースの場合は、トラフリブ間、あるいはトラフリブと箱桁ウェブ(縦桁)間にも何らかの補強が必要であると言える。しかし、無補強ケースで生じていた車輪が直上に载荷されたときの局所的な変形モード(図-10 参照)は抑制されている。また同様に、鋼板敷設ケース、SFRC敷設ケースにおいても輪荷重のトラフリブ直上载荷による局所的な変形モードが抑制されている。

b) 垂直補剛材上端部

L1 ライン影響線载荷時の垂直補剛材上端部の応力挙動を図-16 に示す。

図-16(1)に示すように垂直補剛材の応力は、輪荷重が補剛材に近づくにつれ徐々に増加し、補剛材近傍(±175mm)に载荷されたときに急増、最大応力を示している。また応力は圧縮応力が卓越している。最大応力は、無補強ケースで53MPa、鋼板敷設ケース45MPa、SFRC敷設18MPa、リブ充填44MPaとなり、SFRC敷設によって応力が1/3程度まで低減されており、補強効果が最も高く現れている。鋼板敷設およびリブ充填では20%程度の低減効果しか見られなかった。

垂直補剛材上端部デッキプレートの橋軸直角方向の応力挙動を図-16(2)に示す。上段グラフがデッキプレート上面、下段グラフがデッキプレート下面の応力を示す。デッキプレート上面で引張、下面で

圧縮となっていることから、垂直補剛材上端部のデッキプレートでは面外曲げが作用している。無補強時の応力挙動は、垂直補剛材の挙動と同様に、補剛材に近づくにつれ増大し、最大値は補剛材の前後で発生している。これは輪荷重が補剛材近傍に载荷されたときに生じる局所的なデッキプレートの変形によるものと考えられる。

デッキプレート下面の最大応力は、無補強ケースで44MPa、鋼板敷設で33MPa、SFRCは9MPa、リブ充填では47MPaとなっている。SFRC補強によって応力は1/5程度まで低減されている。また、鋼板敷設では30%の低減が見られ、リブ充填については若干応力が増加する傾向が見られた。

5. まとめ

本論文は、既設鋼床版を対象として輪荷重の通過による鋼床版デッキプレート近傍の応力挙動を把握すると同時に、損傷がみられる既設鋼床版の補強工法として、鋼床版デッキプレート上に鋼板を敷設する方法、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を敷設して合成鋼床版化する方法、トラフリブ内にコンクリートを充填する方法を適用した試験体を用いて、実トラックを用いた载荷試験によって各補強工法の応力低減効果および応力挙動の変化について検討した。

これらの結果を以下にまとめる。

1) デッキプレートとトラフリブ溶接部近傍の応力挙動について

- ・ 鋼床版は、輪荷重の通過により版として挙動するモードと同時に、輪荷重の直上载荷により局

図-16 補強後の垂直補剛材上端部の応力挙動

部的な変形モードも混合して発生する。

- ・また、シングルタイヤ（トラック前輪）とダブルタイヤ（トラック後輪）の通過によっても、変形モードが変化するケースがある。
- ・以上より、車両1台の通過位置によって、前輪と後輪が通過すると、あるいは車輪の载荷位置によっては応力が交番するなどの複雑な変形モードが常に生じている可能性があり、疲労検討を行うには注意が必要である。

2) 各種補強工法の補強効果について

- ・SFRC 敷設工法は、無補強ケースと比べ、応力は20%程度まで低減することができ、全般的に高い応力低減効果が見られた。また、輪荷重の直上载荷による局部的な変形モードが大幅に抑制される。
- ・補強効果としてはSFRC 敷設工法が最も高く、本工法適用により疲労性能向上が可能である。

- ・鋼板敷設工法は、最大40%程度までの応力低減が見られる部分もあったが、全体的には実測値にばらつきがあり、応力低減効果の見られない箇所も見られた。このため、鋼板敷設工法は、応急対策としては有効であるが、恒久対策とする場合にはさらに検討が必要である。
- ・トラフリブ内充填工法については、充填されたトラフリブ周りの応力は、10%程度まで低減できるが、トラフリブ間（補強が行われていない部分）では、応力が増大するケースも見られ、疲労上の問題が残る。このため、他の補強工法との併用など、さらに検討する必要がある。

6. おわりに

本研究では、既設の鋼床版を対象とした補強方法について検討し、適用した補強工法の応力的な挙動

の把握ができたと考えられる。その結果、鋼繊維補強コンクリートをデッキプレート上に敷設する鋼床版の合成化によって、鋼床版に生じる応力を大幅に低減させることができ、疲労耐久性の向上が可能であることが判った。今後は、疲労試験による SFRC 補強層の疲労耐久性および鋼床版の疲労強度向上効果の確認が必要であると考えられる。また各種補強工法ともに、実橋での実施工を考慮した検討が必要であると考えられる。

謝辞：本研究は、首都高速道路公団の鋼床版 WG での審議を経て行われているものである。関係各位の多大なる協力に感謝の意を表する。

参考文献

- 1)三木千壽, 菅沼久忠, 富澤雅幸, 町田文孝: 鋼床版箱桁橋のデッキプレート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) Gurney, T.: Fatigue of Steel Bridge Decks, State of the art review 8, Transport Research Laboratory, 1992
- 3)小笠原照夫, 勝俣盛, 町田文孝, 川瀬篤志, 溝江慶久: 鋼床版構造の合理化に関する検討・実験, 土木学会構造工学論文集, Vol.45A, pp.1229-1240, 1999 年 3 月
- 4)土木学会: 鋼床版の疲労, 鋼構造シリーズ 4, 1990 年 9 月

- 5)大橋治一, 藤井裕司, 三木千壽, 小野秀一, 村越潤: 鋼床版の現場継手部近傍の局部応力と変形挙動, 土木学会論文集 No.556/I-38, pp.65-76, 1997.1
- 6)大橋治一, 三木千壽, 梁取直樹, 小野秀一: 肉厚デッキプレートと大型トラフリブで構成された鋼床版の実物大モデル載荷試験による構造特性, 土木学会論文集, No.647/I-51, pp.295-303, 2000.4
- 7)高木寛, 浅井隆徳, 浜口匡: 鋼床版上の薄層鋼繊維補強コンクリート舗装の施工, 第 22 回日本道路会議論文集, pp.760-761, 1997
- 8)前野裕文, 鈴木教義, 梅原秀哲, 吉田弥智: 鋼繊維補強コンクリートを用いた鋼床版の舗装, コンクリート工学, Vol.24, No.5, pp.39-46, May 1986
- 9)佐藤章次, 前野裕文, 北原俊男, 中村幸, 寺田博昌: 鋼繊維補強コンクリート舗装を施した鋼床版の合成効果, 橋梁と基礎, Vol.86, No.2, pp.26-32, 1986
- 10)Terada, H., Maeno, H., Nakamura, M. and Koyama, S.: An Experimental Study On SFRC Composite Steel Deck, *Structural Eng./Earthquake Eng.* Vol.3, No.2 (Proc. Of JSCE No.374/I-6), pp.301-308, October 1986
- 11)岩崎雅紀, 永田考, 西川武宏, 小塩達也, 山田健太郎: アスファルト舗装が鋼床版の疲労に及ぼす影響, 土木学会論文集 No.563/I-39, pp.161-171, 1997.4

(2004. 7. 8 受付)

RETROFITTING METHOD FOR EXISTING ORTHOTROPIC STEEL DECK

Shuichi ONO, Tetsuhiro SHIMOZATO, Takashi MASUI, Fumitaka MACHIDA
and Chitoshi MIKI

A number of fatigue cracks have been detected in orthotropic steel decks of highway bridges. The most effective retrofitting method is considered to be improvement of stiffness of the deck because the previous measurements and analysis have shown that the major cause of fatigue damage is the lack of stiffness in bending behavior of the deck. The static loading test with actual trucks was carried out with the specimens applied several types of retrofitting works. In this paper, the results of the loading test and the effectiveness of retrofitting method are presented and discussed.