

既設鋼床版の合成鋼床版化による疲労耐久性向上に関する研究

Improvement of Fatigue Durability of Orthotropic Steel Deck by changing into Composite Deck

服部 雅史*, 的場 栄孝**, 松井 繁之***, 古市亨****, 伊藤正一*****

Masafumi HATTORI, Hidetaka MATOBA, Shigeyuki MATSUI, Toru HURUICHI, Seiichi ITO

*大阪大学 工学部地球総合工学科土木工学科目 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**大阪大学大学院 工学研究科土木工学科 博士前期過程 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

***工博 大阪大学大学院 工学研究科土木工学科 教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

**** (財) 海洋架橋・橋梁調査会 (〒540-0012 大阪府大阪市中央区谷町 1-3-5 オグラ天満橋ビル 8F)

***** 国土交通省近畿地方整備局 京都国道事務所 (〒600-8234 京都市下京区西洞院通塩小路下る南不動堂町 808)

Several fatigue damage accidents of orthotropic steel decks of highway bridges have been reported up to now. Fatigue damage had occurred by stress concentration around the welding part between steel elements. The reason is considered to be the remarkable increase of traffic volume and existence of overloaded vehicles. The fatigue problems of orthotropic steel decks are forecasted to increase. Therefore rational maintenance and management are also necessary in future.

As a way of reducing these fatigue damages of steel decks, it is proposed that a layer of Steel fiber reinforced concrete (SFRC) on the steel deck surface is put to change the whole system into a composite deck. The composite structure is through to enhance the durability of the deck and pavement by improving the stiffness and load distribution of original steel deck. However the design technique for this method is not well established. To observe the fatigue cracks and their mechanism of steel deck and the effect of composite with concrete, the authors carried out fatigue tests of steel deck and composite steel deck.

Key Words: orthotropic steel decks, composite steel deck, SFRC, reinforcement, fatigue durability

キーワード: 既設鋼床版, 合成鋼床版, SFRC, 補強, 疲労耐久性

1. はじめに

近年、既設鋼床版の疲労損傷事例が多数報告されている。これらの疲労損傷は道路のサービス水準の低下を招くために対策が必要である。車両の大型化、自動車交通量の増大、供用年数の延長などから、今後疲労損傷事例は増加していくことが予想される。一方で、公共財源は縮小傾向にある。そのため、既設鋼床版を早急かつ合理的に補修・補強を行うことが必要不可欠である。

鋼床版の疲労損傷の原因として、デッキプレートの剛性不足が上げられる。特に、既往の研究^{1) 2)}で、ダブルタイヤがリブを跨いで載荷することにより、デッキプレートの局所的な板曲げ変形が生じ、デッキプレートと縦リブの溶接部に高い応力集中が発生することが明らかとなっている。既往の研究は全てUリブについてのものであるが、縦リブにバルブプレートを用いた開断面鋼床版においても同様の原因が考えられる。

以上をふまえ、既設鋼床版の疲労対策として合成鋼床版化が有効な手法と考えられる。合成鋼床版は新規橋梁に適用された例がある^{3) 4)}。合成鋼床版化とは、既設鋼床版にスタッドジベルを溶接し、その上に鋼繊維補強コンクリ

ート（以下、SFRC）を打設することでデッキプレートの剛性を上げる補強方法である（図1）。アスファルト舗装をSFRCに変更するため死荷重への影響は小さく、構造表面を改良するのみであるため施工が容易である。

しかしながら、本手法の設計手法は確立しておらず、合成鋼床版の疲労耐久性や合成効果は明確ではない。合理的かつ有効な設計手法を確立するために、既設鋼床版の破

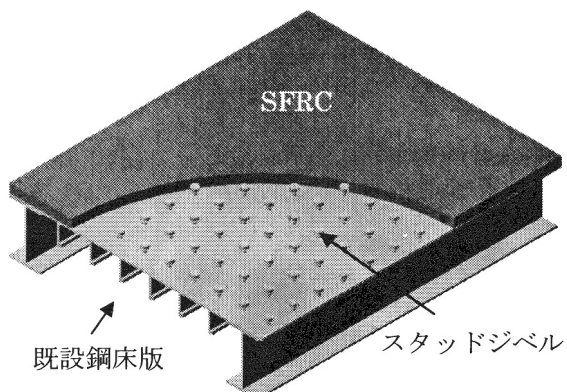


図1 合成鋼床版化のイメージ

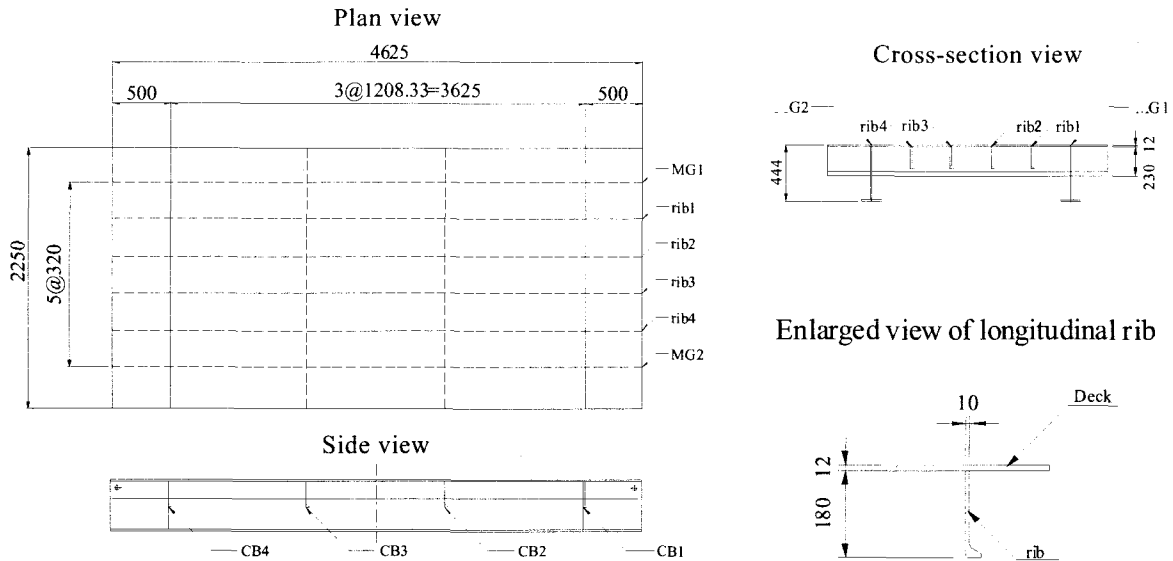


図2 試験体図

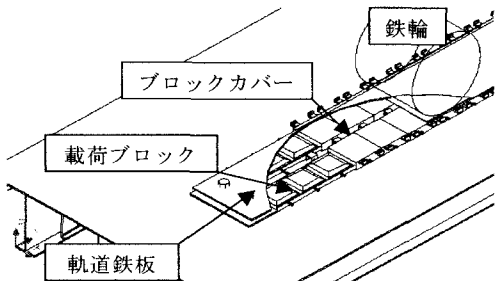
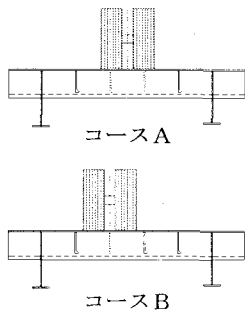


図3 ダブルタイヤ用の軌道装置



試験体名称	状態	走行位置
O-A-1	既設	A
O-B-1	既設	B
O-A-2	既設	A
O-B-2	既設	B
G-A	合成	A
G-B	合成	B

図4 試験体名称と走行位置

壊状況を明確にすることや、合成鋼床版化による疲労耐久性向上度を確認することが必要不可欠となってくる。

そこで本研究では、

- (1) 実橋で供用されていた既設鋼床版を大寸法で切り出して、ダブルタイヤを模した輪荷重装置で载荷することによって破壊状況を明確にすること。
- (2) 上面に SFRC を打設し合成鋼床版化することによる疲労耐久性向上度を、補強していない既設鋼床版と比較し、確認すること。

を目的とし、輪荷重走行試験機を用い疲労試験^{5) 6) 7)}を行った。

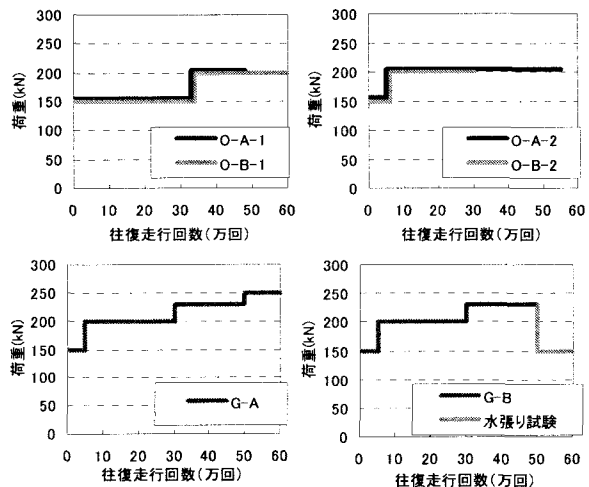


図5 载荷プログラム

2. 輪荷重走行試験機を使用した疲労試験

2.1 試験体の概要

主要地方道・京都守口線(旧国道1号線)の御幸橋(淀川)より一部を切り出した大寸法の試験体6体用いる。切り出し位置は累積走行車数が同じになるように全て上り車線(京都方面)より切り出した。鋼床版は27年間供用されたものである。6体の形状や寸法は全て等しく、うち2体を合成鋼床版化した。

試験体図を図2に示す。試験体は2本の縦桁と縦リブ・横リブにバルブプレートを用いた開断面鋼床版である。縦リブが横リブに分断され、横リブにすみ肉溶接されており、スカラップはない。合成床版化した2体については70mm厚のSFRCを打設するが、SFRCと鋼床版の合成を図るため、両者の間には、橋軸方向に302mm間隔、橋軸直角方向に320mm間隔、計98個のスタッドジベルを溶接した。

2.2 輪荷重走行試験の概要

鋼床版の局部的な板曲げによる変形を再現するためにダブルタイヤ用の軌道装置を用いて輪荷重走行試験を行った。ダブルタイヤ用の軌道装置を図3に示す。軌道下に敷くブロックの載荷面積は200mm×190mmである。これは道路橋示方書⁸⁾に規定されているT荷重の載荷面500mm×200mmのうちダブルタイヤ輪分の大きさである。このブロックを橋軸直角方向120mmの間隔を開けて橋軸直角方向に2個、橋軸方向に11個配置した。

試験体名称と走行位置を図4に示す。鋼床版は輪荷重の影響を受けやすいため、リブ直上に載荷したコースAとリブを跨いで載荷したコースBの2種類の走行位置とした。

載荷プログラムを図5に示す。既設鋼床版において縦リブ・横リブ交差部に100MPaの応力が発生するように、輪荷重を150kNから疲労試験を開始し、適宜荷重を上昇させて各試験体の疲労損傷を調べることとした。既設鋼床版

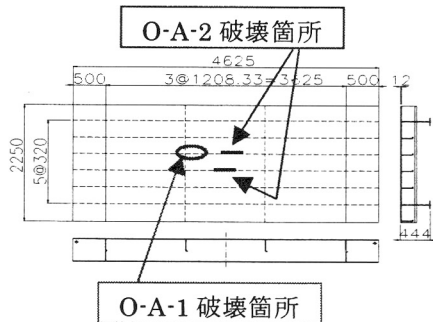


図6 O-A 破壊箇所

については、疲労損傷が大きくなった時点で試験を終了し、合成鋼床版については、往復60万回(120万回)走行終了した時点で試験を終了した。

支点は縦桁と横リブが交差する4隅点とし、各点の支持方法は鉛直方向の沈下と、橋軸直角方向の回転を拘束した単純支持とした。

溶接部近傍に発生する疲労亀裂のモニタリングは2点間の電位差を測って判定するFSM(Field Signature Method)を適用した⁹⁾。

2.3 水張り試験の概要

床版のコンクリート上面は水の存在下で繰り返し輪荷重を受けると、遊離石灰の発生や骨材の砂利化が起こり、疲労耐久性が著しく低下する¹⁰⁾。実橋で適応される合成鋼床版は供用中雨水にさらされる。そこで、合成鋼床版に対する水の影響を調べるためにG-Bにおいて水張り試験を行った。試験は軌道周辺のSFRC上面に水を張り、移動

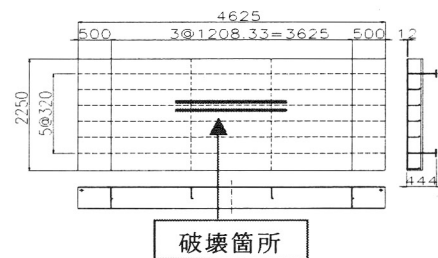


図9 O-B 破壊箇所

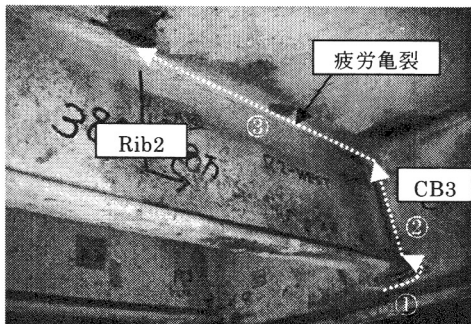


図7 破壊状況 (O-A-1)

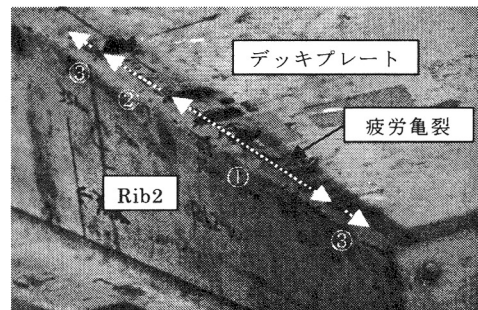


図10 破壊状況 (O-B-1)

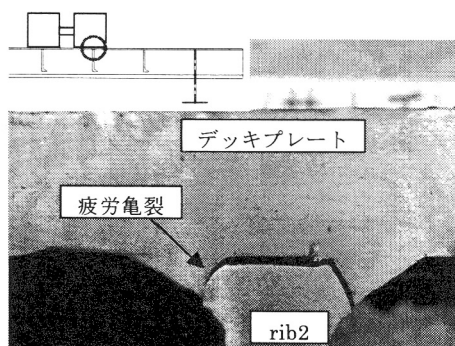


図8 破壊箇所断面 (O-A-1)

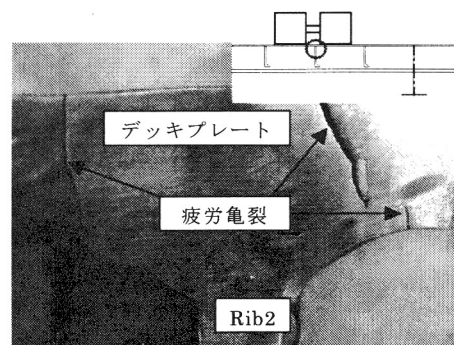


図11 破壊箇所断面 (O-B-1)

輪荷重を載荷した。

3. 破壊状況および考察

輪荷重走行試験を行った結果、既設鋼床版に疲労亀裂が発生し、進展して破壊に至った。

3.1 O-Aの破壊状況（既設鋼床版，コースA）

O-Aの破壊箇所を図6に示す。O-A-1ではFSMを設置しておらず、O-A-2では着目点である縦リブ・横リブ交差部で破壊が起きなかったためにFSMで亀裂を感知することが出来なかった。

O-A-1については輪荷重直下のrib2とCB3との溶接部のrib2下端すみ肉溶接CB3側止端部（図7の①）より亀裂が発生した。疲労亀裂は39万往復の時に目視で確認した。亀裂は横リブから縦リブを引き離すように進展し（図7の②）、その後デッキプレートから縦リブを引き離すように亀裂が進展した（図7の③）。亀裂は比較的短時間に進展し、脆性的に破壊に至った。溶接部の断面を確認すると、ルート部からのど厚方向に亀裂がみられた（図8）。亀裂発生の原因を考察する。輪荷重の走行に伴う縦リブのねじり変形が横リブによって節となる。そのために縦リブ・横リブ交差部のバルブプレート先端部の溶接部に応力が集中し亀裂が発生したと考えられる。

O-A-2については輪荷重直下のrib2とデッキプレートとの溶接部と、rib3とデッキプレートとの溶接部より亀裂が発生した。疲労亀裂は走行終了時の54万往復の時に目視で確認した。亀裂はルート部より発生して、のど厚方向に進展している。亀裂発生箇所がO-A-1と異なった原因として、O-A-2の縦リブと横リブとの溶接部の溶接形状がO-A-1と比較すると良好だったため、溶接部の疲労強度が高くなったと考えられる。

3.2 O-Bの破壊状況（既設鋼床版，コースB）

O-Bの破壊箇所を図9に示す。O-B-1、O-B-2共に輪荷重が跨いで載荷したrib2・デッキプレート交差部のデッキプレート側の溶接止端部より発生した。

O-B-1については亀裂をFSMによって36万往復で検出し、41万往復で亀裂を目視で確認した。亀裂は溶接止端部に沿って図10の矢印の方向に進展した。亀裂は輪荷重の移動範囲全域にわたり発生した。試験終了後デッキプレート上面に亀裂を確認した。溶接部断面を観察すると、デッキプレートを貫通している亀裂であると確認できた（図11）。合成鋼床版化の際、デッキプレートが型枠の底板代わりになる。このような貫通亀裂が生じた場合、亀裂部から漏水が懸念される。したがって、このような亀裂が発生する前に合成化による補強が必要であると考えられる。

O-B-2については亀裂をFSMによって11万往復で検出し、目視で18万往復のとき確認した。O-B-1と同じ箇所でも亀裂が発生し、同じように進展して行った。

デッキプレートの局所的な板曲げ変形（図13）により縦リブ・デッキプレート交差部に高い応力が発生し、亀裂の原因となると考えられる。O-B-1とO-B-2の亀裂発生回数が大きく異なるが、その原因は輪荷重を200kNにした

のがO-B-2の方が早いためと考えられる。

3.3 合成鋼床版の損傷

G-A、G-B共に目立った損傷は無かった。鋼床版部分には亀裂は発生せず、SFRC上面にひび割れは確認されなかった。試験終了後G-AのSFRCを取り除きスタッドジベルをハンマーで叩き損傷を調べたが健全であった。G-Bの水張り試験においても遊離石灰の発生や骨材の砂利化は見られなかった。

4. 鋼床版の合成床版化効果および考察

以下、試験体や走行回数によって荷重が異なるため、すべて輪荷重98kNで換算してある。また、図中にある解析値は解析ソフト-COMPO-により求めた。その際、合成鋼床版のデッキプレートとSFRCは剛結としてある。

4.1 たわみ経時変化

橋軸方向中央に載荷したときの床版中央の活荷重たわみ経時変化を図12に示す。合成鋼床版化によってたわみが1/2~1/3となっている。また、O-Aは走行回数が増加するにつれ、たわみが増加している。それに対し、G-Aはたわみが一定である。なお、G-Aにおいて6万往復以降急激にたわみが増加し解析値より大きな値を示したが、これは、デッキプレートとSFRCの剥離が原因と考えられる。

4.2 たわみ分布

コースBにおいて橋軸方向中央に載荷したときの橋軸直角方向のたわみ分布を図13に示す。図11のセンターからの距離480mm、160mm、-160mm、-480mmの位置には縦リブが存在する。ダブルタイヤの輪荷重が縦リブを跨いで載荷したことにより、O-BはデッキプレートがW型に板曲げ変形している。一方、G-Bには局部変形がみられず滑らかなたわみ形状である。以上のことから、合成床版化によってデッキプレートの剛性が上がり、荷重分散性が向上したと考えられる。

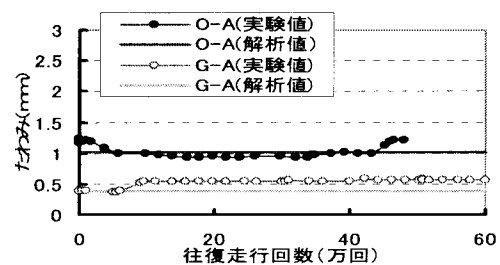


図12 たわみ経時変化(コースA)

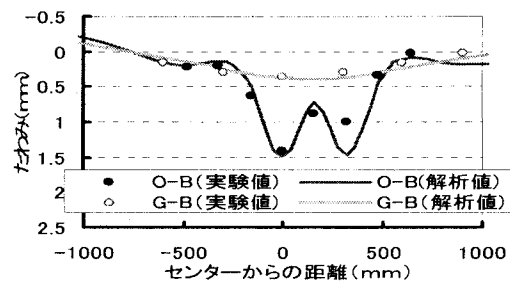


図13 たわみ分布 (コースB)

4.3 影響線載荷による発生応力の比較

本試験体では、輪荷重が走行する際、応力は変動し、場所によっては正負交番応力が発生する。この輪荷重による応力変動・応力範囲を調べるため、測定時の最大荷重を載荷したまま、輪荷重を 200mm ずつ移動させて静的測定を行い、影響線を測定した。

既設鋼床版の影響線は、直上に輪荷重が載荷したときに大きな応力を示し、輪荷重が遠い箇所に載荷しているときはほとんど影響を受けていなかった。一方、合成鋼床版の影響線は、既設鋼床版の影響線と比較すると滑らかな曲線となっており、優れた荷重分散効果がわかる。また、応力範囲も既設鋼床版と比較すると低減されており、疲労強度を考えると合成鋼床版は有利な構造形式と言える。

縦リブ・横リブ交差部 (O-A-1 亀裂発生箇所)、縦リブ・デッキプレート交差部 (O-B 亀裂発生箇所)、の 2 箇所について以下に考察する。

① 縦リブ・横リブ交差部 (O-A-1 亀裂発生箇所)

ひずみの測定位置は図 16 の①である。rib2・CB3 交差部のすみ肉溶接止端部より CB2 側に 10mm の位置の橋軸方向のひずみを測定している。測定点①の影響線を図 14 に示す。測定点①近傍で O-A-1 において疲労亀裂が発生した。O-A については、交番応力が生じていることが分かる。CB3 上載荷 (-600mm) のとき CB3 のたわみにつられ引張応力が発生するが、中央載荷 (0mm) では rib2 自身のたわみと横リブの拘束のため圧縮応力が発生すると考えられる。合成鋼床版についてみると、交番応力は発生していない。発生応力範囲は O-A で 59MPa、O-B で 30MPa(O-A との比 0.51)、G-A で 27MPa(O-A との比 0.46) であった。走行位置の影響によって 50%、合成化効果として 50% 程度の応力低減が見られた。

② 縦リブ・デッキプレート交差部 (O-B 亀裂発生箇所)

ひずみの測定位置は図 16 の②である。Rib2・デッキプレート交差部のすみ肉溶接止端部より 10mm の位置の橋軸直角方向のひずみを測定している。測定点②の影響線を図 15 に示す。測定点②近傍で O-B において疲労亀裂が発生した。O-B では、ダブルタイヤがリブを跨いで載荷することによる局所的な板曲げ変形によって、輪荷重が直上を通過する際に大きな圧縮応力が発生している。一方、合成鋼床版は小さな引張応力が発生しており、局所的な変形ではなく板全体として挙動していると考えられる。発生応力範囲は O-B で 108MPa、O-A で 12MPa(O-B との比 0.11)、G-B で 8MPa(O-B との比 0.07)、G-A で 4MPa(O-A との比 0.33) であった。合成化効果として 90% 以上の応力低減が見られた。走行位置の影響によっても発生応力範囲は大きく異なることから、デッキプレートの貫通亀裂は輪荷重がリブを跨いで載荷することによる影響が大きいことが確認された。

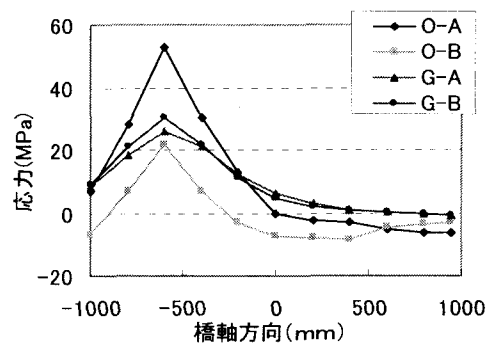


図 14 縦リブ下フランジ影響線 (着目図 16 の①)

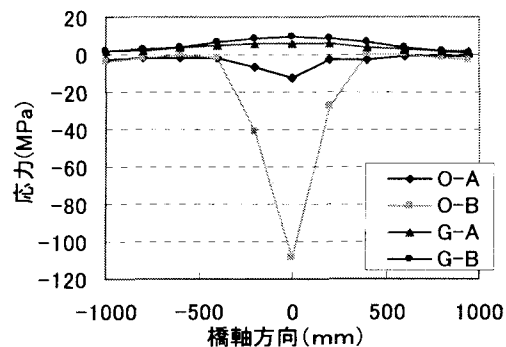


図 15 デッキ下面影響線(着目図 16 の②)

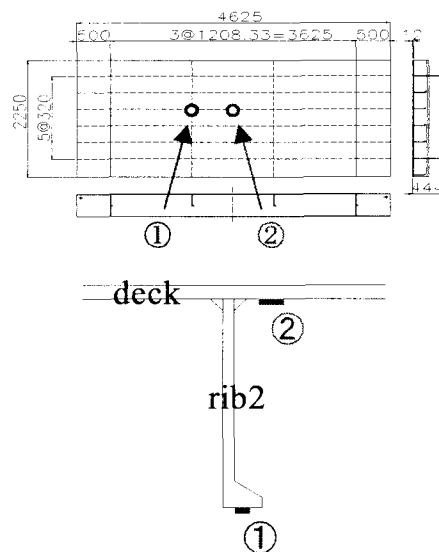


図 16 ひずみ測定位置

4.4 疲労寿命の向上度

本試験で与えた走行回数を表 1 に示す。ここでは JSSC 疲労設計指針¹¹⁾で規定される垂直応力に対する設計 S-N 曲線の傾き 1/3 を用いて輪荷重 98kN での走行回数に換算してある。既設鋼床版については疲労亀裂発生回数を、合成鋼床版については疲労亀裂が発生しなかったため試験終了までの回数を示す。合成鋼床版に対しては、既設鋼床版において疲労亀裂が発生した回数の 3.5 倍以上の繰り返し輪荷重を与えたが SFRC や鋼床版、スタッドジベルに損傷

は確認されなかった。

S-N 曲線の傾きを-1/3 とし、測定点①、②の疲労寿命の向上度を発生応力範囲から試算した結果を以下に示す。測定点①では O-A と G-A の比較において疲労寿命は約 10 倍、測定点②では O-B と G-B の比較において疲労寿命は約 3000 倍向上している。特に、デッキプレート局部変形に起因するデッキプレート貫通亀裂に対しては、SFRC による補強方法は非常に有効的だと考えられる。

4. まとめ

- (1) 輪荷重をリブ上に載荷した場合と、リブを跨いで載荷した場合とでは破壊状況に違いが生じた。リブ上載荷の場合は縦リブ・横リブ交差部のすみ肉溶接止端部の横リブ側より亀裂が発生し、脆性的に破壊に至った。リブを跨いで載荷した場合は縦リブ・デッキプレートのすみ肉溶接止端部のデッキプレート側より亀裂が発生し、亀裂は橋軸方向に進展し、デッキプレートを貫通した。
- (2) ダブルタイヤがリブを跨いで載荷する際、デッキプレートに W 型の局部的な曲げ変形が発生した。それに伴う大きな曲げ応力が亀裂発生箇所近傍に発生していた。
- (3) 合成鋼床版化することで既設鋼床版の局部変形や発生応力は減少し、走行位置の違いによる影響もほとんどないことが分かった。
- (4) 合成鋼床版は、SFRC とデッキプレートの剥離により多少剛性が低下するものの、試験中たわみ、ひずみの経時変化はほとんどなかった。試験終了後、鋼床版部分、SFRC、スタッドジベルに目立った損傷は見られなかった。
- (5) SFRC は水の存在下においても遊離石灰の発生や砂利化は見られず、雨水の存在下で繰り返し走行輪荷重を受けても十分な耐久性を有するものと思われる。ただし、防水層を上面に設置するのが望ましい。
- (6) 合成鋼床版化により、発生応力範囲は減少した。発生応力範囲の低減率より疲労寿命の向上度を試算すると、リブ上載荷のとき縦リブ・横リブ交差点で約 10 倍、リブ間載荷のとき縦リブ・デッキプレート交差部で約 3000 倍となる。

【参考文献】

- 1) 三木千尋：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 No780/I-70，57-69，2005.1.
- 2) 小野秀一，三木千尋：既存鋼床版の疲労性能向上を目的とした補強検討，土木学会論文集 No801/I73，213-226，2005.
- 3) 真木久幸：凍結抑制型合成鋼床版の疲労耐久性に関する研究，平成 13 年度大阪大学修士論文。
- 4) 宮本重信：自然熱源による路面の融雪・凍結抑制システムに関する研究，名古屋工業大学学位審査論文 1999 年 3 月。
- 5) 松井繁之：床版の技術開発-耐久性の向上，施工合理化，橋梁と基礎，pp.84~94，1997.
- 6) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学学位論文，pp.154~156，1985.
- 7) 前田幸雄・松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋 RC 床版の疲労に関する研究，第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 221~224，1984.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，II 鋼橋編，1996.12.
- 9) 奥健太郎，金裕哲，有田圭介，堀川浩甫：FSM による疲労亀裂進展のモニタリング，土木学会平成 16 年度全国大会，I-010.
- 10) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，pp.627-632，1987.
- 11) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993.

表 1 換算輪荷重走行回数

床版名	換算繰返し走行回数 (98kN換算)
O-A-1	344.7万回
O-A-2	868.8万回
G-A	1308.1万回以上
O-B-1	285.7万回
O-B-2	137.9万回
G-B	1049.7万回以上