

## CMI 報告

## 既設鋼床版の疲労損傷に対するスタッドボルトを用いた 鋼床版下面からの補強方法に関する研究

小野 秀一・渡辺 真至

### 1. はじめに

重交通路線のUリブ鋼床版で疲労き裂が顕在化<sup>1)</sup>するなか、各関係機関においては対策方法の検討が進められている。当誌「建設の施工企画 2007年4月号」でも一部概要を紹介したように、施工技術総合研究所ではこれまでに、国土交通省や首都高速道路(株)、中日本高速道路(株)、(株)高速道路総合技術研究所などの関係する多くの機関から鋼床版の疲労損傷対策に関する試験検討業務を受託・受注している。

近年、着目されている既設のUリブ鋼床版に生じている疲労き裂としては、デッキプレートとUリブ溶接部に発生するき裂で、溶接ルート部で発生し、溶接ビード内を進展するき裂(以下、「ビード貫通き裂」とデッキプレートの板厚内に進展するき裂(以下、「デッキ貫通き裂」)に大別される。前者については、通常のアスファルト舗装に換えて鋼繊維補強コンクリート(SFRC)をデッキプレート上面に舗装するSFRC補強工法<sup>2)</sup>が有効とされ、実橋での採用事例が見られるが、交通規制が必要な上、施工が天候に左右されるなどの課題がある。一方、後者に対しては、高力ボルト接合によるUリブ取替工法やUリブ内面モルタル充填工法<sup>3), 4)</sup>、溶接補修工法などが検討されている。これらについても、交通規制が必要になるケースがあり、現場施工における品質確保や補修後の疲労耐久性の観点で様々な課題がある。

以上のことから、現場施工における品質を確保した上で、疲労耐久性の向上が期待できる工法、さらには交通規制を不要とし、補修作業が鋼床版下面で完結する対策工法の開発が望まれていることなどの背景に鑑みて、弊所ではデッキプレートとUリブ溶接部、特にビード貫通き裂に対する高耐久な補強方法として、片面から施工可能な「スタッドボルト」に着目し、これを用いたあて板補強工法を阪神高速道路(株)および大阪市立大学と共同で研究開発を行った。研究成果は、論文等<sup>5)~9)</sup>で公表している(一部成果は別途投稿中)ので、詳細はそれらを参照頂き、本稿では、提案構造のコンセプトと開発の取り組み、検討の概要を紹介する。

### 2. 提案構造の概要

予防保全対策として、交通規制を必要とせず、鋼床版デッキプレートの下面から施工可能な工法として、デッキプレートとUリブの「溶接接合」を、既存の溶接ビードを切除し、スタッドボルトを用いたあて板によって「ボルト接合」へ変更する方法(図-1)を考案した。

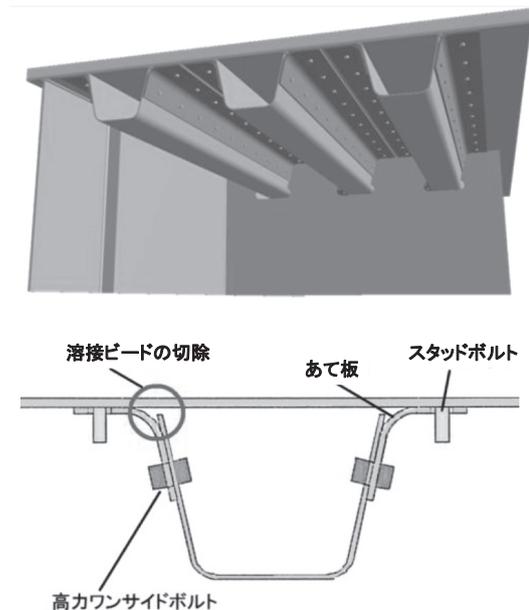


図-1 スタッドボルトによるあて板補強

#### (1) スタッドボルトを用いた摩擦接合

スタッドは従来、合成桁や合成床版のずれ止めとして用いられてきた。提案する方法では、デッキプレート底面に上向きで溶接したスタッドボルトを、摩擦接合用ボルトとして用いる。そのため、あて板とデッキプレートを締め付ける程度の軸力導入が可能な強度と、輪荷重を直接受けるデッキプレートの床組作用に対して十分な疲労耐久性を有することが条件となる。

#### (2) 溶接接合からボルト接合への変更

多くの既報<sup>例えば1)</sup>において、デッキ貫通き裂の原因はデッキプレートの橋軸直角方向の局所的な変形とそ

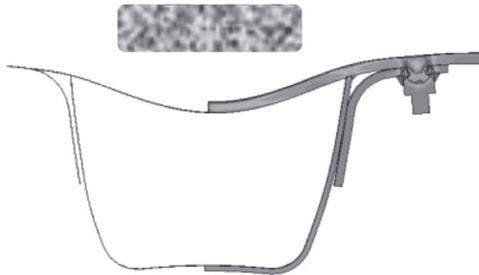


図-2 Uリブの内側に車輪が載荷された場合のUリブの変形

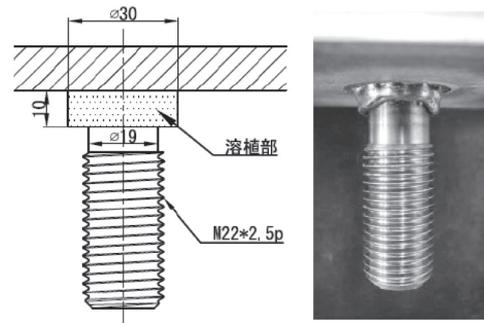


図-3 スタッドボルトの形状 (単位: mm)

れにより生じる溶接ルート部の応力集中であると示されている。すなわち、デッキプレートとUリブが溶接されたまま、上述のあて板による補強を実施しても図-2のようにシングルタイヤの荷重がUリブ内側に作用した場合、デッキプレートの局所的な変形による溶接ルート部の応力集中は改善しないと考えられる。さらに、あて板を設置した場合、溶接部の点検が困難となり、維持管理性を考慮すると、き裂発生リスクを排除しておくことが望ましい。そのため、デッキプレートとUリブの溶接部は切断機を用いて構造的に切り離した上で、あて板を固定することにした。

図-3にスタッドボルト溶接部、図-4にはあて板の固定方法を示す。鋼板にスタッドボルトを溶接する際、図-3に示すようにその溶接部形状がボルト径より大きくなること(約φ30mm)、溶接部高さがあて板(9mm)より厚くなること(約10mm)から、あて板のボルト孔はφ32mmの拡大孔とし、さらに図-4に示すようにM30高力ボルト用平座金を挿入している。

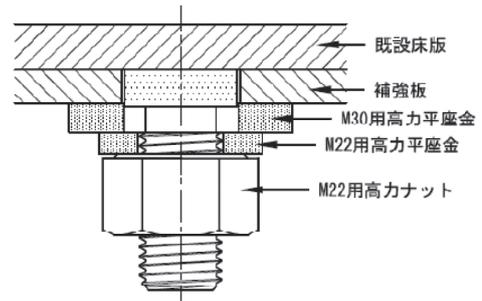


図-4 スタッドボルトによるあて板の固定方法

### 3. 開発の取り組み概要

上記提案構造の開発に向けた研究テーマ及び検討項目を表-1に示す。また、想定する施工手順及び施工イメージを図-5に示す。実橋適用に向けては供用下での鋼床版下面からのスタッド溶接に関する施工・品質管理方法や、熱影響の少ない溶接部の切断方法なども合わせて検討した。

表-1 研究テーマと検討概要

研究手法	研究テーマ	検討項目
要素実験	① 上向きに溶接可能な高強度スタッドボルトの開発	・高強度ネジスタッド及び上向き溶接専用フェールールを開発 ・引張強度及びトルク係数値を実験より確認
	② 軸力を導入したスタッドボルト溶接鋼板の疲労強度の解明	・軸力導入したスタッド溶接鋼板の疲労強度 (E等級以上) を引張疲労試験より確認
	③ スタッドボルトを用いた摩擦接合継手特性の明示	・すべり荷重及びすべり係数 (0.45以上) をすべり試験より確認 ・軸力低下の影響が小さいことをリラクゼーション試験より確認
FEM解析	④ スタッドボルトを用いてあて板したUリブ鋼床版の応力性状の解明	・提案構造の変位、応力性状をFEM解析より評価 ・ボルトピッチの妥当性を接合面に働く摩擦せん断力より確認
応用実験	⑤ スタッドボルトを用いてあて板したUリブ鋼床版の変形特性 (小型梁試験) の明示	・提案構造の安定した一体挙動を曲げ試験より確認 ・曲げ疲労試験より提案構造の形状保持性能を確認
	⑥ スタッドボルトを用いてあて板したUリブ鋼床版の終局特性 (小型梁試験) の明示	・提案構造の終局特性 (ボルト破断なし、十分な終局荷重で耐荷力として問題なし) を破壊試験より確認
	⑦ スタッドボルトを用いてあて板したUリブ鋼床版の疲労耐久性 (鋼床版試験体を用いた輪荷重試験) の評価	・トラックによる静的載荷試験より提案構造の応力性状を確認 ・輪荷重疲労試験による疲労耐久性の検証

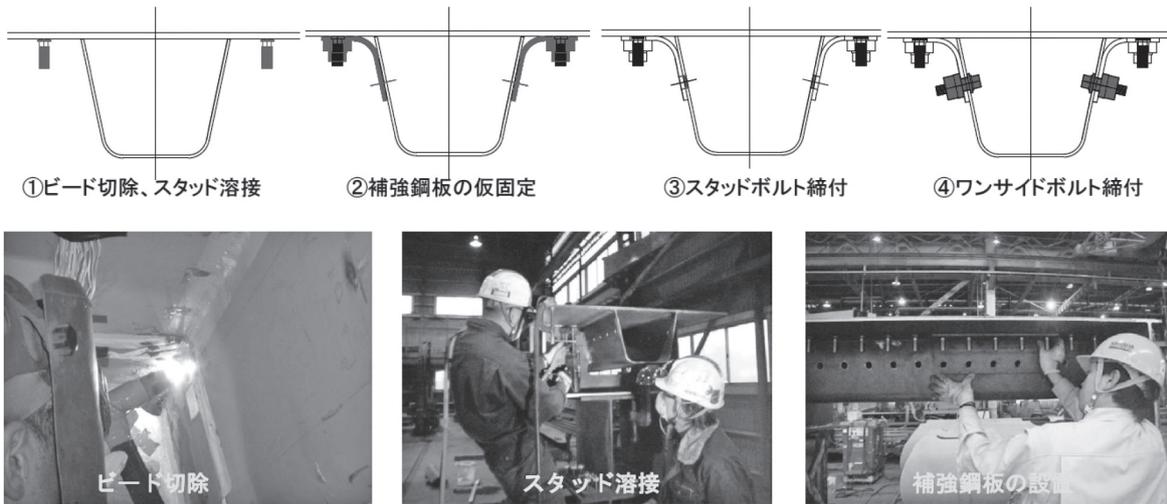


図-5 想定する施工手順および施工イメージ

以下に、実施した主な検討概要を紹介する。

(1) スタッドボルト溶接部の引張試験および疲労試験

鋼床版のデッキプレート下面に上向き溶接した高強度スタッドボルト溶接部の静的強度を確認するための引張試験と、疲労耐久性を確認するための引張試験および疲労試験を実施した。

本研究では、スタッドボルトとして、溶接構造用圧延鋼材 SM570 相当の機械的性質を有し、スタッド溶接用に適するよう化学成分を調整した HT570 (呼称) のネジ付きスタッドを使用した。またフェールについても専用のフェールを開発した。

引張試験状況を図-6、引張試験結果を表-2 に示す。引張強さは規定強度  $570 \text{ N/mm}^2$  に対し、最大  $620 \text{ N/mm}^2$  となり、溶接およびカラー部には欠損はなく、破断位置はスタッドボルト軸部であった。以上のように、軸径  $\phi 19 \text{ mm}$  の上向き姿勢による溶接で



図-6 スタッドボルトの引張試験

表-2 引張試験結果

No.	HH-1	HH-2	HH-3	HH-4	HH-5
最大荷重 (kN)	176.5	172.5	175.5	175.5	173.0
引張強さ ( $\text{N/mm}^2$ )	622	608	619	610	615

軸径  $\phi 19$  断面積:  $A_s=283.5 \text{ mm}^2$

も安定した品質と高い静的強度が得られることを確認した。

引張疲労試験状況を図-7 に示す。試験体は幅  $90 \text{ mm}$ 、厚さ  $12 \text{ mm}$  の鋼板 (母板) であり、鋼床版への適用を想定している。スタッドボルトについては、母板に中央に M22、軸部  $\phi 19 \text{ mm}$  のスタッドを 1 本溶接した。母板の鋼種は SM490YA、あて板を想定した正方形板は SS400 である。試験ケースとしては、スタッドに軸力を導入するケース (締め付けあり; Case1)、スタッド溶接ままのケース (締め付けなし; Case2) を基本とした。また、正方形板の応力分担を出来るだけ低下させ、締め付けによる摩擦の影響を排除するために、母板と正方形板の間に摩擦低減剤を塗布して締め付けたケース (Case3) も設定した。

疲労試験の結果を S-N 線図としてプロットしたものを図-8 に示す。同図より、全てのケースの疲労強度は、頭付きスタッドが溶接された鋼板の E 等級と同等以上であった。また、いずれの試験体の疲労き裂も図-9 に示すようにスタッド溶接止端部で発生した。

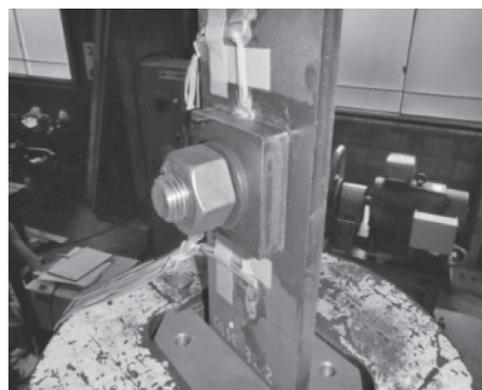
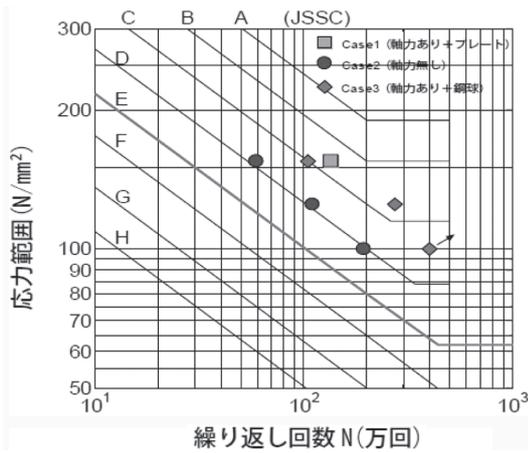
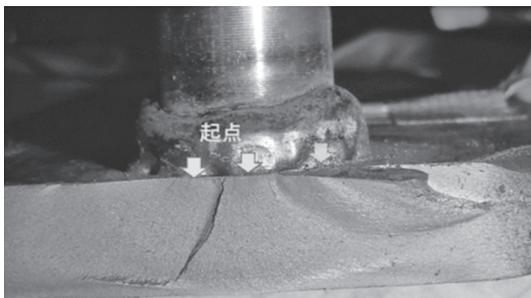


図-7 スタッドボルト溶接鋼板の引張疲労試験



図一八 引張疲労試験結果 (S-N 線図)



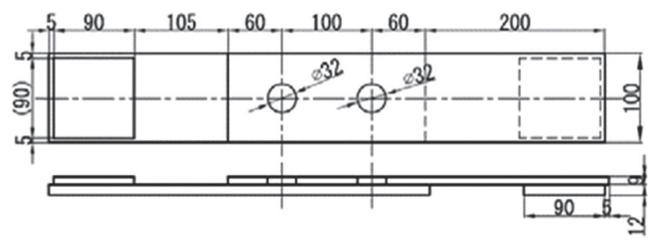
図一九 破断面

締め付けの有無では、スタッド締め付けなしの Case2 に比べて、締め付けありの Case1, 3 の疲労強度が上昇した。また、摩擦低減剤ありの Case3 に比べて、摩擦低減剤なしの Case1 の疲労強度が若干上昇した。これは、引張载荷によって付加された引張応力が、鋼板と正方形板との摩擦により正方形板に伝達され、溶接部周辺の応力が低減されたためと考えられる。

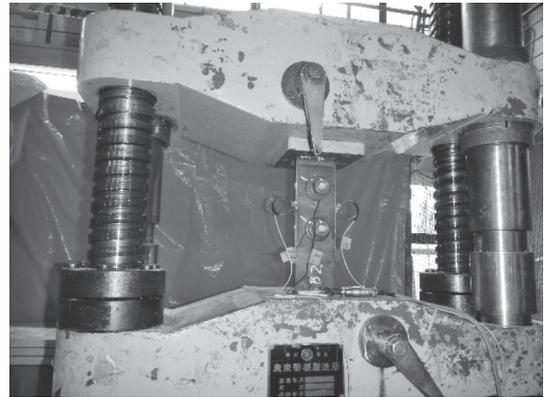
したがって、スタッドを締め付けた場合、締付けによる接触圧力により正方形板へ応力分配がなされた結果、鋼板の疲労強度は低下しなかったと考えられる。また、あて板への応力伝達の程度は接合面の条件により変化することもわかった。

(2) スタッドボルト接合継手のすべり試験および軸力変化計測

デッキプレートとあて板をスタッドボルトで締め付けた摩擦接合継手を想定したすべり試験を実施し、すべり係数を求めるとともに、軸力を導入したスタッドボルトの軸力減衰を測定した。図一10 にすべり試験体の形状寸法を、図一11 にはすべり試験状況を示す。鋼板の片側は既設の鋼床版を想定し、摩擦面の処理は、スィープブラスト (Rz jis 20 μm 狙い) とした。あて板はグリッドブラスト処理後に無機ジंकリッチペイ



図一10 すべり試験体の形状寸法 (単位: mm)



図一11 すべり試験状況

表一3 すべり試験結果

すべり基準	最大荷重時			
	P <sub>1</sub>			
軸力値	締付け直後		すべり時	
	N <sub>1</sub>		N <sub>2</sub>	
試験体 No.	No.1	No.2	No.1	No.2
荷重 (kN)	142.3	137.9	142.3	137.9
変位 (mm)	0.173	0.149	0.173	0.149
軸力 (kN)	121.5	125.2	98.6	109.0
すべり係数值	μ <sub>1</sub>		μ <sub>2</sub>	
	0.586	0.551	0.722	0.632
	0.568		0.677	

ント 75 μm を塗布した。

設計ボルト軸力は下式に基づき求めた。本提案構造では、ボルトの設計ボルト軸力 N は 111 kN, 標準ボルト軸力 N<sub>s</sub> は 122 kN となる。

設計ボルト軸力 N =

$$\text{最小断面積 } A \times \text{材料規定耐力 } \sigma \times a$$

ここに、a : ねじりおよび降伏比の影響を考慮して設定する低減係数 (0.85) とする。

すべり試験の結果、表一3 に示すように、ボルト軸力として締付け直後あるいはすべり時の値を用いても、すべり係数はそれぞれ 0.568, 0.677 となり、道路橋示方書に示される無機ジंकリッチペイントを塗布した場合のすべり係数 0.45 と比べても、十分なすべり係数が得られた。本試験では、スタッド溶接部とあて板の干渉を回避するため、あて板のボルト孔は φ

32 mm と拡大孔としているが、すべりに対しては影響のない範囲であったと考えられる。

本研究で対象とした継手は、スタッドボルトを用いた摩擦接合であることから、締め付け後の軸力の挙動（リラクゼーション）を調査した。まず、スタッドボ

ルトに導入される軸力および軸力変動を確認するため、事前にスタッドボルトにひずみゲージを貼り付けた後、スタッドボルトに軸力を導入し、軸力とひずみの関係を求めた。その後、得られた関係を用い、ひずみを参照しながら標準ボルト軸力まで軸力導入し、その後1週間ほどの軸力変化を測定した。測定した軸力の経時変化を図-12に示す。軸力残存率は4%程度となり、通常75 $\mu$ mの無機ジンクリッチペイントのリラクゼーションが10%程度<sup>10)</sup>であることと比較すると、本試験では無機ジンクリッチペイントを片面のみにしか塗布していないことから、その値は小さい結果となった。

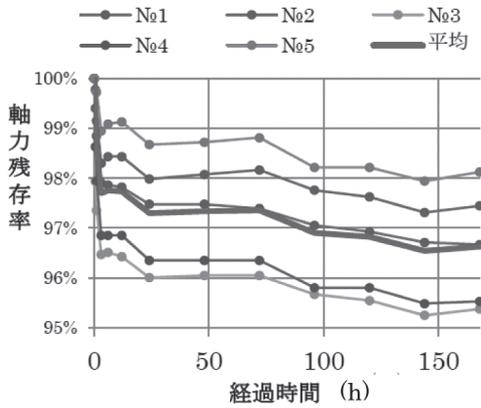


図-12 リラクゼーション試験結果

(3) 小型試験体による基本性能確認試験

継手構造の変形特性や形状保持性能などの基本特性を確認することを目的として、Uリブ鋼床版小型試験体による静的載荷試験および疲労試験を行った。

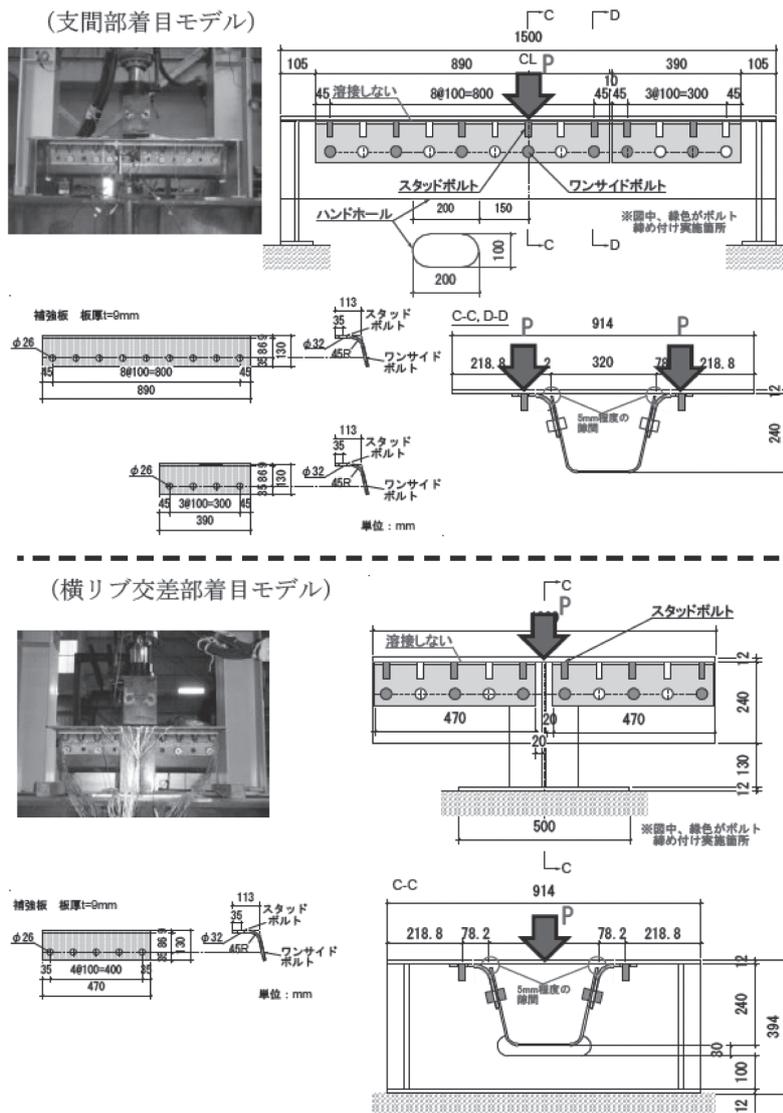
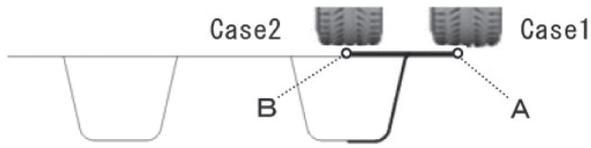


図-13 小型鋼床版試験体の形状および寸法 (単位: mm)

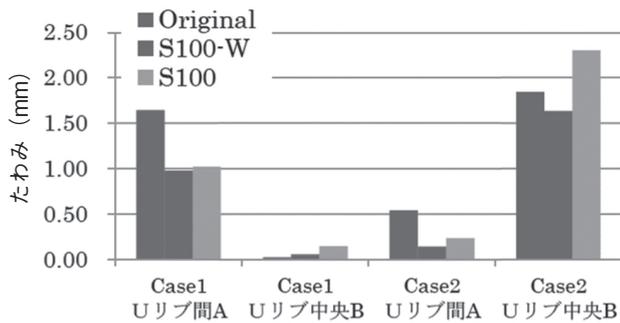




図一 17 荷重位置

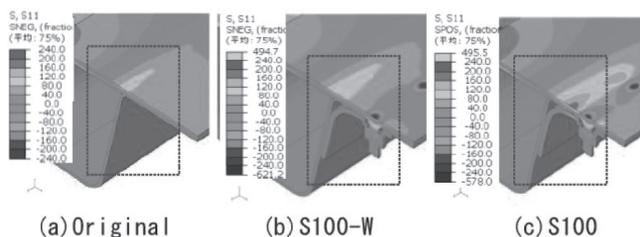
接有り：S100-W，無し：S100)とした。荷重は図一 17に示すように，シングルタイヤを想定した 50 kN，L200 mm × W250 mm の等分布荷重とした。荷重位置は Uリブ間 (Case1) と，Uリブ中央直上 (Case2) の 2 ケースとした。

解析結果のうち，荷重時のたわみの着目点である Uリブ間 (A 点)，Uリブ中央 (B 点) のたわみの比較を図一 18 に示す。Case1 荷重時の Uリブ間は，あて板直上となり，たわみが低減された。しかし，Case2 荷重時の Uリブ中央では，溶接部を切除することで，無補強時に比べて 0.5 mm 以上たわみが増加する結果が得られた。



図一 18 解析結果 (たわみの比較)

各モデルにおける，Case2 でのデッキプレート表面の橋軸直角方向応力コンターを図一 19 に示す。溶接部が残置される場合，溶接部の応力集中に加え，溶接部のデッキプレート上面において 110 MPa 程の応力が発生した。一方，溶接部を切除することにより，溶接部の応力集中は無くなったが，Uリブとスタッドボルトの間のデッキプレートとあて板に 175 MPa を超える高い応力が発生した。これは，溶接部を切除することによってデッキプレート支間が増加し，作用モー



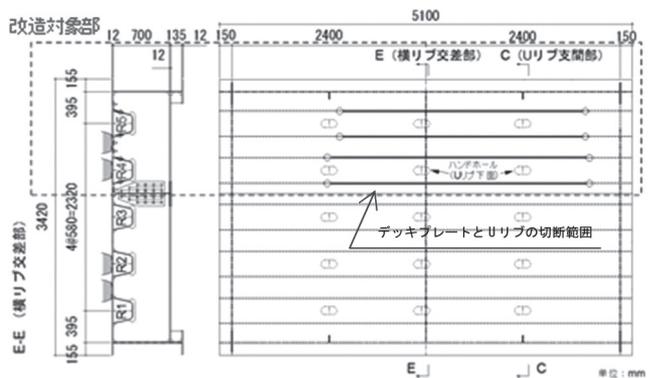
図一 19 解析結果 (応力コンター)

メントが大きくなったためと考えられる。

(5) 実物大鋼床版試験体による実トラック荷重試験

上述の検討結果に示すように，提案している構造が補強構造として適用できる可能性が高いことが示された。そこで，より実際に近い鋼床版での改造前後の応力性状の変化を調べることを目的として，実物大試験体を用いた実トラックによる静的荷重試験を実施した。

試験体は図一 20 に示すようにデッキプレート (長さ 5,100 mm × 幅 3,420 mm) を Uリブ 5 本，横リブ 3 本で補剛する鋼床版で，板厚はデッキ 12 mm，Uリ



図一 20 実物大鋼床版試験体



写真一 1 あて板の取付状況



写真一 2 実トラック荷重試験の状況

ブ6 mm, あて板9 mmである。スタッドボルトの締め付け軸力は122 kNとし, 200 mm間隔で締め付けた。Uリブ5本のうち, R4, R5をあて板により改造し, R1,R2はそのままとし, 改造効果を確認できるようにした。試験体の製作は実際の施工を想定し, Uリブ鋼床版を組立てた後, Uリブ上部のビードを切断し, デッキプレートへのスタッド溶接, あて板設置の順に行った。あて板の取付状況を写真-1に示す。

載荷方法は, 後軸重を100 kNに調整したトラックの後軸タイヤを所定の位置に順次合わせ, 各部のひずみ計測を行った(写真-2参照)。タイヤの載荷位置は橋軸直角方向に7箇所, 橋軸方向に17箇所を設定し, 改造前後の応力性状比較のため, 改造側と無改造側について同位置相当に載荷した。

試験結果については, 誌面および他論文投稿の都合上, 別の機会に報告させて頂きたい。

#### (6) 実物大鋼床版試験体による輪荷重疲労試験

本試験では実際のトラック用ダブルタイヤを前後に2輪配置した輪荷重疲労試験機(図-21参照)により, 改造した鋼床版の疲労耐久性について検討した。輪荷重はダブルタイヤ1組当たり78.5 kNとした。また輪荷重の繰り返しは試験体中央部で200万回とした。

幅員方向の載荷位置は, 先述のトラック載荷試験結果から, 試験体のデッキプレートや横リブ交差部のひずみが最大となり, かつスタッドの直上となる載荷位置とし, ダブルタイヤの片輪がR4-R5間のスタッド直上載荷となるよう選定し, R4, R5リブ間でR4リ

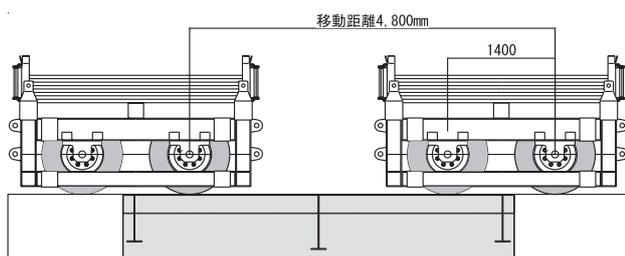


図-21 輪荷重疲労試験セットアップ

ブのウェブを跨ぐ位置とした。

輪荷重疲労試験(78.5 kNで200万回)の結果, あて板とデッキプレート間にずれは発生せず, スタッドの軸力変動もなく, 試験終了時まで安定していた。また, 試験終了後の非破壊検査の結果, 軸力を導入したスタッド溶接部や横リブ交差部に疲労き裂は確認されなかった。

詳細の試験結果については, 紙面および他論文投稿の都合上, 別の機会に報告させて頂きたい。

#### 4. まとめ

鋼床版の疲労に対する予防保全として, 交通規制を必要とせず, 下面から施工可能な工法で, デッキプレートとUリブの「溶接接合」を「ボルト接合」へ構造変更するコンセプトに基づき, 既存の溶接ビードを切除し, スタッドボルトを用いてあて板を締結する方法を提案し, 実橋への適用に向けた検討を行った。以下に, 本試験で得られた結果をまとめる。

- (1) 上向き溶接したスタッドボルトの静的引張試験の結果, 規定強度を上回る引張強度と, 鉛直度など安定した溶接品質が得られることを確認した。
- (2) スタッドボルトを溶接した鋼板の引張疲労試験の結果, スタッドボルトへの軸力導入の有無に関わらず, 全てのケースにおいて, 頭付きスタッドを溶接した鋼板の疲労強度(E等級)と同等以上となった。
- (3) デッキプレートとあて板をスタッドボルトで締め付けた摩擦接合継手を想定したすべり試験及びリラクゼーション試験の結果, 十分なすべり荷重が得られるとともに, 軸力減衰も小さく, 摩擦接合継手として十分機能することが確認できた。
- (4) 継手構造の変形特性や形状保持性能などを確認することを目的として, Uリブ鋼床版小型試験体による静的載荷試験および疲労試験を行った結果, 支間部では, スタッドボルトによる継手構造として安定したデッキプレート-Uリブの一体挙動が確認でき, 繰り返し載荷後も形状保持していた。ただし, あて板母材で高い圧縮ひずみが生じることや, 横リブ交差部では載荷荷重が低いにも関わらず, 上側スカラップ近傍で高いひずみが発生することが確認されたため, 対策の必要性も含めて今後更に検討すべきである。
- (5) Uリブ間載荷時はデッキプレートのたわみが減少するが, Uリブ中央載荷時ではたわみは増加する。溶接部を切除する場合, あて板直上載荷では補強

効果が認められるが、Uリブ中央載荷ではデッキプレートの応力が増加するため、対策が必要である。

- (6) 200万回の輪荷重疲労試験の結果、軸力を導入したスタッド溶接部や横リブ交差部に疲労き裂は確認されなかったことから、提案する補強構造は一定の疲労耐久性を有していると考えられる。

## 5. おわりに

本研究は、阪神高速道路㈱および大阪市立大学と共同研究として実施したもので、実用化に向けて第一歩が踏み出せる成果が得られたものと考えている。

また本研究の実施にあたっては、大阪大学 松井繁之名誉教授にはひとかたならぬご指導・ご鞭撻を賜り、さらに川田工業㈱、日鉄住金ボルテン㈱、日本スタッドウェルディング㈱の関係者からも貴重なご意見、アドバイスを頂くなどの協力を頂いた。この場を借りて関係各位に感謝の意を表したい。

本工法は現在、実橋への適用に向けた検討が進められており、今後の普及・展開を期待するものである。ここで紹介しきれなかった検討内容や成果については、別の機会を頂き紹介したいと考えている。

施工技術総合研究所では今後も新技術・新工法について積極的な検討・性能評価を行い、有効な技術・工法については普及促進につながる活動に取り組んでいきたいと考えている。

JICMA

## 《参考文献》

- 1) 土木学会鋼構造委員会：鋼床版の疲労，丸善，2010.
- 2) 小野秀一，平林泰明，下里哲弘，稲葉尚文，村野益己，三木千壽：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 A.Vol.65, No.2, pp.335-347, 2009.4
- 3) 田畑晶子，青木康素，服部雅史，大西弘志，松井繁之：Uリブ内面モルタル充填による既設鋼床版の疲労耐久性向上検討，構造工学論文集 Vol.56A, pp.1356-1369, 2010.3
- 4) 丹波寛夫，木村聡，山口隆司，杉山裕樹，田畑晶子，高田佳彦：既設鋼床版に対する下面補強工法である鋼板補強モルタル充填併用工法の構造合理化の検討，構造工学論文集 Vol.59A, pp.767-780, 2013.3
- 5) 田畑晶子，青木康素，小野秀一，山口隆司：Uリブ鋼床版のスタッドボルトを用いた補強方法の提案，土木学会第 69 回年次学術講演会，I-466, pp.931-932, 平成 26 年 9 月
- 6) 馬場敏，田畑晶子，青木康素，吉田賢二，吉見正頼，小野秀一，山口隆司：上向きに溶接した高強度スタッドボルトの開発と疲労強度，土木学会第 69 回年次学術講演会，I-445, pp.889-890, 平成 26 年 9 月
- 7) 吉見正頼，田畑晶子，山口隆司，馬場敏，小野秀一：上向きに溶接したスタッドボルト摩擦接合のすべり試験，土木学会第 69 回年次学術講演会，I-444, pp.887-888, 平成 26 年 9 月
- 8) 青木康素，田畑晶子，小野秀一，渡辺真至，馬場敏，山口隆司：スタッドボルトを用いてあて板した Uリブ鋼床版の載荷試験，土木学会第 69 回年次学術講演会，I-467, pp.933-934, 平成 26 年 9 月
- 9) 儀賀大己，山口隆司，田畑晶子，小野秀一，青木康素：スタッドボルトを用いてあて板した Uリブ鋼床版の力学特性，土木学会第 69 回年次学術講演会，I-019, pp.37-38, 平成 26 年 9 月
- 10) 狩野正人，石原靖弘，谷平勉，小林剛，亀井正博：塗膜のクリープが高力ボルトの軸力低下に及ぼす影響，土木学会第 57 回年次学術講演会，I-131, pp.261-262, 平成 14 年 9 月

## 【筆者紹介】



小野 秀一（おの しゅういち）  
施工技術総合研究所  
研究第二部  
次長



渡辺 真至（わたなべ まさし）  
施工技術総合研究所  
研究第二部  
主任研究員