

論文

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

儀賀大己*, 田畑晶子**, 青木康素***, 小野秀一****, 山口隆司*****

*大阪市立大学大学院, 工学研究科都市系専攻前期博士課程 (〒558-8585大阪市住吉区杉本3-3-138)

**修士(工学), 阪神高速道路(株)技術部大規模修繕・更新技術推進室
(〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

***修士(工学), 阪神高速道路(株)保全交通部保全企画課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

****博士(工学), 一般社団法人日本建設機械施工協会, 施工技術総合研究所, 研究第二部
(〒417-0801 静岡県富士市大淵 3154)

*****博士(工学), 大阪市立大学大学院教授, 工学研究科都市系専攻(〒558-8585 大阪市住吉区杉本 3-3-138)

筆者らは, Uリブ鋼床版の交通規制を必要としないデッキプレート下面からの補強方法として, スタッドボルトを用いたあて板補強工法を提案している. 本補強工法は, スタッドボルトと高力ワンサイドボルトを用いてあて板を固定し, き裂発生の原因となる溶接部を切除することで, き裂の発生を抑制することを狙ったものである. 本研究では, 提案する補強工法の応力性状について, FEM解析より検討した.

キーワード: 鋼床版, 下面対策工, あて板補強, スタッドボルト, FEM解析

1. 研究背景および目的

近年, Uリブを用いた道路橋鋼床版において, 大型車交通量が多い路線を中心に多数の疲労き裂の発生が報告されている¹⁾. これらのき裂の対策として, 阪神高速道路(株)では, デッキプレートとUリブ溶接ビードの貫通き裂に対しては溶接補修を, デッキプレート貫通き裂に対しては橋面舗装を鋼繊維補強コンクリート²⁾に置き換える補強を主として実施している. しかし, 前者は, 補修後の疲労耐久性が既存の溶接部相当と考えられ, より耐久性の高い補修方法が望ましい. また, 後者は, 施工が天候に左右される上, 施工に伴い必要となる交通規制や通行止めは渋滞発生の要因となる. そのため, 鋼床版下面で完結する対策工法の開発が望まれている.

さらに, 下面からの補強法として「Uリブ内面モルタル充填工法」³⁾が開発されているが, モルタル充填の施工確認が困難なうえ, 逆U型鋼板を接着接合する際の接着剤の長期耐久性に課題がある.

そこで著者らは, Uリブ鋼床版の交通規制を必要としないデッキプレート下面からの補強法として, 図-1に示すようなスタッドボルトを用いたあて板補強工法を提案している. 本補強工法は, スタッドボルトと高力ワンサイドボルトを用いてあて板を固定し, き裂発生の原因となる溶接部を切除することで, 将来き裂が発生するリスクを最小限にすることを狙ったものである.

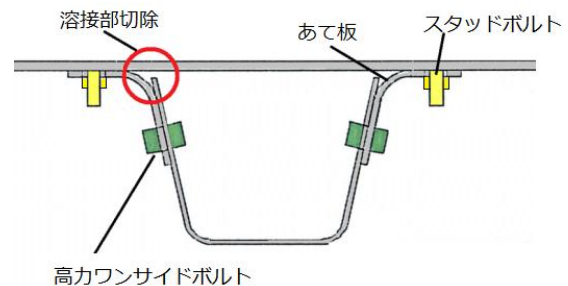


図-1 提案構造

本研究では, 提案する補強構造を鋼床版に適用した場合の変形特性や応力性状, ボルトピッチの妥当性について, FEM解析により検討を行ったので報告する.

2. 補強構造の概要

2-1 摩擦接合用スタッドボルトの開発

本研究で用いるスタッドは, 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)のネジ付きの高強度スタッドボルトである. 表-1, 表-2, および図-2にHT570の機械的性質とスタッドボルトの形状寸法を示す. また, 本研究で設定するスタッドボルトの設計ボルト軸力 N , および標準ボルト軸力 N_s は, 写真-1および表-3に示すとおり, 事前に引張試験および締付け性

表-1 HT570の機械的性質

項目	機械的性質		
	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び GL=5.65√A (%)
HT-570	460 以上	570~720	14%以上

表-2 スタッドボルトの形状および寸法 (単位: mm)

M(呼称)	φD	L	Lo【溶接後】	S
M22	19	65	60	43

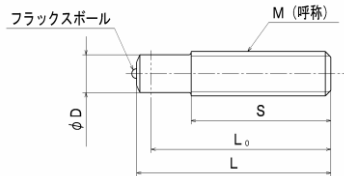


写真-1 引張試験後の上向き溶接したスタッドボルト

表-3 引張・締付け性能試験の結果(平均値)

HT570	最大荷重	kN	174.6
	引張強さ	N/mm ²	615.9
	締付最大	kN	154

能確認試験を実施し、その結果から式(1)によって算定し、設計ボルト軸力 N は111 (kN)、標準ボルト軸力 N_s は122 (kN)とした。

$$N = \alpha \times A \times \sigma \quad \dots(1)$$

ここに、

α : 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)

A : 最小断面積, σ : スタッドボルト耐力

2-2 必要ボルト本数

FEM解析に先立ち、スタッドボルトの必要本数を初等梁理論から導いた。図-2に示すとおり、単純支持された梁の、着目断面にT荷重 (100kN) による曲げモーメント M およびせん断力 Q が作用すると仮定し、あて板とデッキプレートの間の摩擦せん断力に対して必要なスタッドボルト本数を、ボルト1本あたりの許容摩擦力を用いて算出した。支持位置は、横リブ位置を仮定する。なお、静的挙動を考慮するため、衝撃を考慮していない。

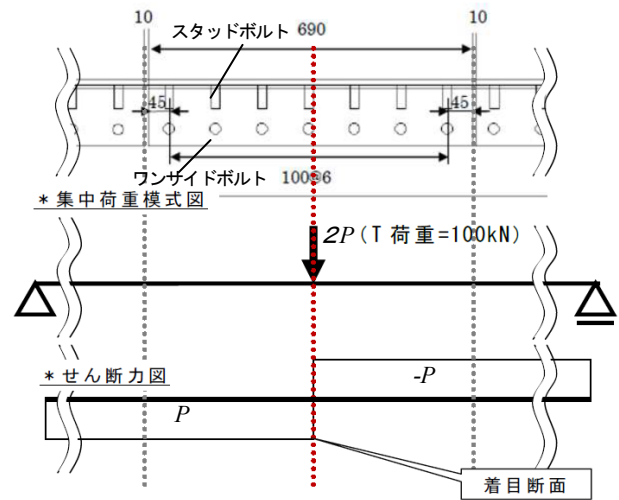


図-2 橋軸直角方向断面およびせん断力図 (単位: mm)

スタッドボルト1本の限界摩擦力 T_u と許容摩擦力 T_c は、標準ボルト軸力122kN、すべり係数 $\mu=0.4$ 、安全率を1.7として $T_u=48,800(N)$ 、 $T_c=28,706(N)$ である。

その結果、摩擦せん断力に対して必要なスタッドボルト本数は、実施工において想定される長さ 690mm の当て板に対して3本となった。高力ワンサイドボルトの必要ボルト本数は、T荷重によるUリブとあて板の接合面の作用力に対して、高力ワンサイドボルト1本あたりのすべり耐力 (M24, 標準ボルト軸力 177kN) で除して算出した。以上より、スタッドボルト間隔は100mm、高力ワンサイドボルト間隔は200mmに設定した。

3. FEM 解析モデル

提案構造を適用した場合の変形特性や応力性状、ボルト間隔の妥当性について、FEM解析より検討した。汎用構造解析プログラムABAQUSにより弾性解析を行った。解析対象は文献4)を参考に図-3に示す周辺単純支持のUリブで補剛された板の1/4部分とした。モデルやモデル化範囲の妥当性は文献4)によって示されている。図-3に示すように着目部位を8節点ソリッド要素または6節点ソリッド要素で、その他の部位を4節点低減積分シェル要素でモデル化した。板厚はデッキプレート12mm、Uリブ6mm、あて板9mmである。スタッドボルト、および高力ワンサイドボルトの設置間隔は前述の検討に基づきそれぞれ100, 200mmとした。図-4に示すように、本モデルにおけるあて板はスタッドボルト3.5本、ワンサイドボルト2本で取り付けられている。Uリブとデッキプレートとのすみ肉溶接部の脚長6mm、溶込み量を0とした。なお、解析によって算出される応力は、要素サイズの影響を強く受けるが、ここでは相対比較を目的として実施した。

解析に使用した材料定数は全ての部材について、弾性係数200MPa、ポアソン比0.3とした。また、解析モデル

を表-5 および図-5 に示す。無補強 (Original) の状態に対して、あて板およびUリブとデッキプレートの溶接の有無をパラメータとしている。荷重は、荷重位置ごとの補強効果を明確にするため、シングルタイヤとし、50kN、L200mm×W250mm の等分布荷重とした。荷重位置は図-6 のようにUリブ間(Case1)と、Uリブ中央直上(Case2)の2ケースとした。荷重時のたわみの着目点は図-6 に示すようにUリブ間 (A点)、Uリブ中央 (B点) である。継手部の接触条件を含む高力ボルトは文献4)を参考にモデル化を行った。Uリブおよびデッキプレートとあて板の接触面にはすべりや離間を考慮できる接触境界を設定し、静止摩擦係数0.4とした。

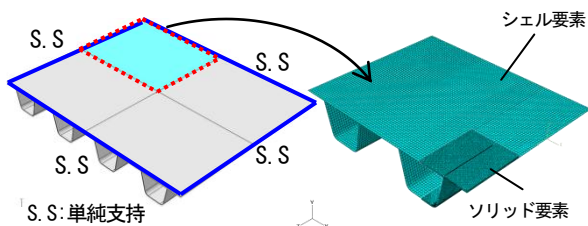


図-3 解析対象および解析モデル

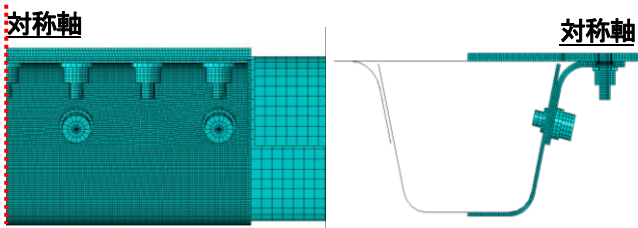


図-4 解析に用いた対称軸の考え方

表-5 解析モデルの内訳

解析モデル	Original	S100-W	S100
当て板	無	有	有
溶接部	有	有	切除

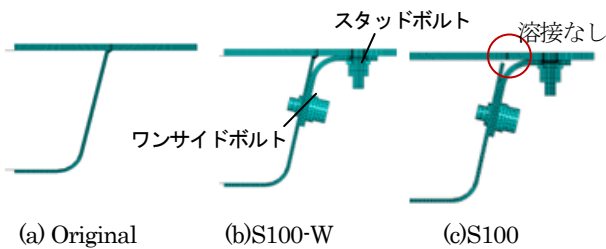


図-5 解析モデルの断面の比較

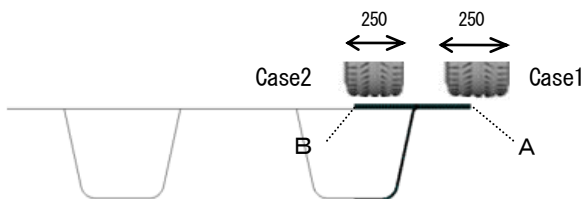


図-6 荷重ケース (単位: mm)

4. 解析結果と考察

4.1 たわみ

荷重荷重時のたわみについて、Case1、Case2 荷重時、Uリブ間 (点A) およびUリブ中央 (点B) の結果を図-7 に示す。Case1 荷重時のUリブ間は、あて板の直上となり、たわみが低減した。Case2 荷重時のUリブ中央では、無補強時に比べて約 1.5 倍たわみが増加した。これは、接合方法の変更による拘束条件の変化と、支持点が溶接位置からあて板の曲げ加工端まで移動しデッキプレートの曲げスパンが伸びた影響と考えられる。

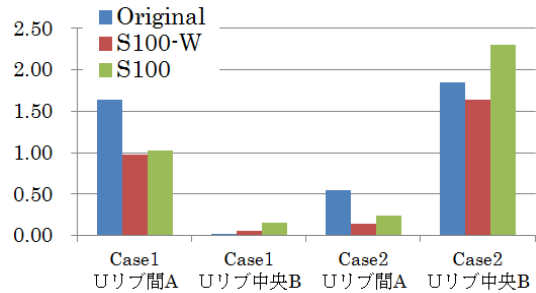


図-7 輪荷重荷重時のたわみ

4.2 発生応力

(1) あて板が補強効果に与える影響

応力が集中する溶接部周辺に着目し、Original と S100-W の溶接部の応力を比較した。応力評価要素を図-8 に示す。Original の場合の発生応力 (最小主応力) で無次元化した結果を図-9 に示す。図中では、Case1、Case2 を C1、C2 と表記し、□囲みに示す数字は Original の応力(MPa)を表している。なお、Case1 の UR は引張応力が卓越していたため最大主応力で比較した。

図-9 より、Case1 は全ての着目位置で応力低減効果が認められたが、Case2 では、大きな低減効果は見られず、UR 部では依然として高い圧縮応力が発生した。また、DT や UT では補強により応力が増加した。図-10 に示すとおり、あて板補強を行ったとしても溶接部を残置する場合疲労損傷が発生する可能性がある。

(2) 溶接部切除が補強効果に与える影響

各モデルの Case2 でのデッキ表面の橋軸直角方向応力コンターを図-11 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、溶接部のデッキ上面において 110MPa 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解消されているが、Uリブとスタッドボルトの間のデッキとあて板に 175MPa を超える高い応力が発生した。これは、溶接部を切除したことで、デッキプレートの変形により、あて板の曲げ加工端付近に応力が集中したためと考えられる。また、スタッド直上のデッキプレートに、ボルトの軸力導入に伴うひずみが発生しており、デッキプレートの疲労耐久性への影響の有無を確認する必要がある。

4.3 あて板とUリブ間の摩擦せん断力

あて板とデッキプレートおよびUリブの接合面に働く摩擦力を図-12に示す。摩擦力は接触境界を設定している節点における摩擦せん断力による合計値を示す。Uリブと当て板の接合面では両ケースでS100はS100-Wを上回った。溶接部を切除したことで、ワンサイドボルトによるあて板摩擦接合の荷重分担が増加したと考えられる。また、摩擦力はそれぞれの接合面の許容値（＝ボルト軸力×本数×設定すべり係数÷安全率）を下回り、設定したボルトピッチの妥当性を確認した。

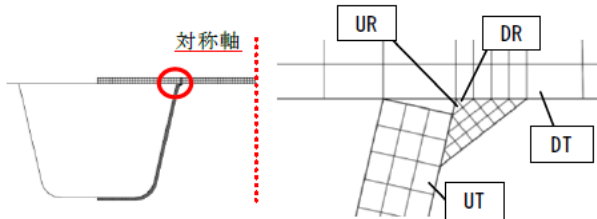


図-8 応力評価要素の位置

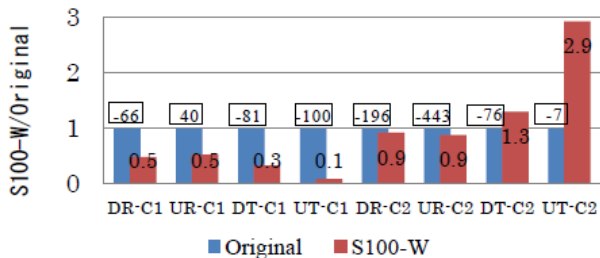
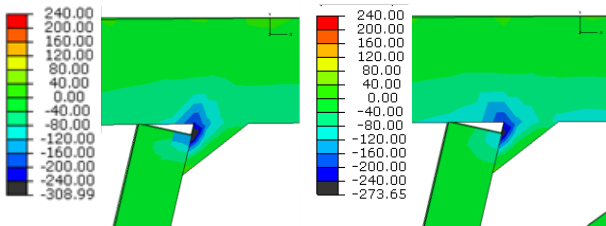
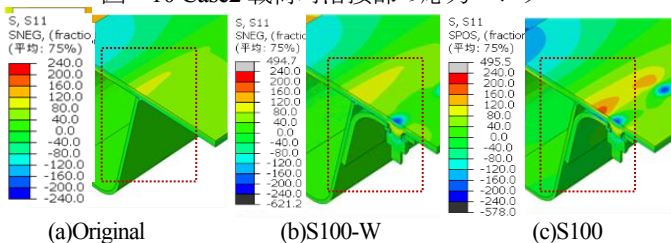


図-9 Original を 1 とした S100-W の最小主応力比



(a) Original (最小主応力) (b) S100-W (最小主応力)

図-10 Case2 荷重時溶接部の応力コンター



(a) Original (b) S100-W (c) S100

図-11 Case2 荷重時橋軸直角方向応力コンター

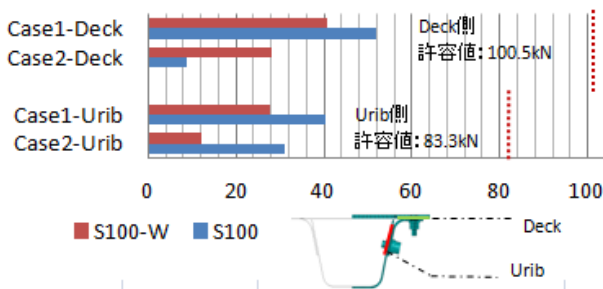


図-12 あて板とデッキプレート又はUリブの接合面に作用する摩擦せん断力と許容値(kN)

5. 結論

本研究では、Uリブ鋼床版の交通規制を必要としないデッキプレート下面からの補強法として、スタッドボルトを用いたあて板補強工法を提案し、鋼床版に適用した場合の変形特性や応力性状についてFEM解析より検討した。得られた結果は以下のとおりである。

- 1) FEM解析の結果、Uリブ鋼床版の溶接部を切除することで、無補強の場合に比べて、Uリブ間載荷時ではデッキのたわみが減少するが、Uリブ中央載荷時ではたわみは約1.5倍(0.5mm)増加した。
- 2) 溶接部を切除した鋼床版に対して、Uリブ中央載荷時、あて板の曲げ加工端において、デッキプレートの曲げに伴い応力が増加した。
- 3) デッキプレートとUリブ溶接ビードを残置してあて板補強を実施する場合、溶接ルート部の応力集中は改善されなかった。
- 4) あて板とデッキプレートおよびUリブの接合面に働く摩擦力はスタッドボルトおよび高力ワンサイドボルトの設計値（許容値）以下であり設定したボルトピッチが妥当であることを確認した。

今後は、溶接部の切除によって発生するデッキの応力増加に対して、デッキあて板の曲げ半径を変更するなどの対策を検討する必要がある。

謝辞：松井繁之大阪大学名誉教授には、本提案工法の開発および実用化に向けた一連の取り組みに対して、ご指導賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

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，村野益巳，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：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A Vol.59 11-2 2013.3。