

# タイヤ荷重による U リブ鋼床版の静的載荷試験

## Static Loading Test by Tire Load on Orthotropic Steel Deck with U-Shaped rib

服部雅史\*1, 大西弘志\*1, 青木康素\*2, 田畑晶子\*2, 松井繁之\*3,  
Masafumi Hattori, Hiroshi Ohnishi, Yasumoto Aoki, Akiko Tabata, Shigeyuki Matsui

\*1 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871, 大阪府吹田市山田丘 2-1)  
\*2 阪神高速道路株式会社 技術部 技術開発グループ (〒541-0056, 大阪府中央区久太郎町 4-1-3)  
\*3 大阪工業大学 八幡工学実験場 構造実験センター (〒614-8289, 京都府八幡市美濃山一ノ谷 4)

In recent years, many fatigue damages are reported in orthotropic steel deck with U-shaped rib. When considering the action to those damages, probe these cause of fatigue damages is pressing need. Then, in order to examine local stress action, static loading test by tire load was performed.

In this paper, damages to longitudinal welding portions of U-shaped rib to deck plate are targeted. First, influence which difference between tire load and T-load has on local stress action of longitudinal welding portions of U-shaped rib to deck plate is shown. Next, influence which difference in loading position of transverse direction has on local stress action of longitudinal welding portions of U-shaped rib to deck plate is shown.

*Key words: Orthotropic Steel Deck, Fatigue, Intersection of U-shaped Rib and Deck, Tire Load*

### 1. はじめに

近年、鋼床版の疲労損傷事例が多数報告されている<sup>1)2)</sup>。特に、縦リブに U リブを有する鋼床版（以下、U リブ鋼床版）については、供用後十分な期間を経過したもので損傷が発見されていない径間は、ランプ等交通量の少ない個所を除くとほとんどない<sup>1)</sup>。U リブ鋼床版の主な疲労損傷発生位置を図 1 に示す。これらの疲労損傷のうち、U リブとデッキプレートの溶接部の損傷は現段階では多くないが、今後発生数の増加が予想されること、舗装の損傷や路面陥没に繋がること、き裂発生部の構造ディテールは U リブ鋼床版にほぼ共通であることなどから、対策は急務である。そして、対策を講じる上で局部応力挙動の把握は必要不可欠である。

薄肉の版を補剛した床版構造において版（デッキ

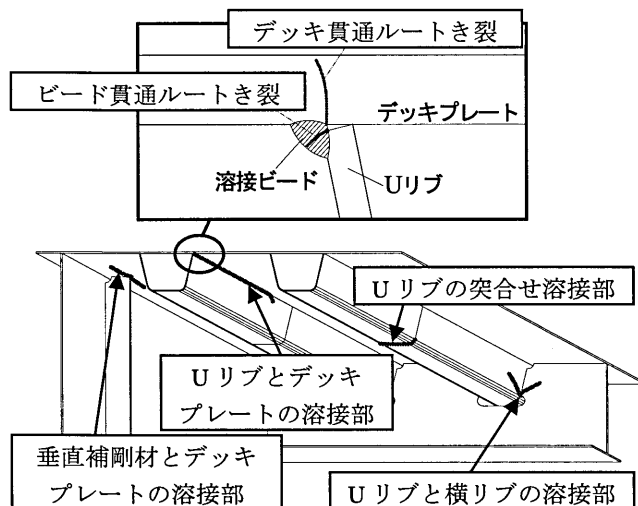


図 1 U リブ鋼床版の主な疲労損傷発生位置

プレート) 付近の応力は載荷荷重の影響を大きく受けることが知られている<sup>3)</sup>。すなわち、ダブルタイヤの載荷位置のわずかな違いによっても大きく挙動が異なる<sup>4)</sup>。よって、U リブとデッキプレートの溶接部の局部応力挙動は、実際の荷重と同じゴムタイヤを用いた荷重を載荷し、様々な位置に荷重を載荷することで検討することが望ましいと考えられる。

以上のことより、本研究の目的は、載荷荷重や載荷位置が U リブとデッキプレートの溶接部のデッキ貫通ルートき裂およびビード貫通ルートき裂に対する局部応力挙動に与える影響を調べることである。そこで、ダブルタイヤ荷重による静的載荷試験および FEM 解析を行った。

### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体

試験体を図 2 に示す。試験体は U リブを 4 本と断面 C に横リブを 1 本、そして端横リブを 2 本有するものがある。寸法は試験室に搬入可能な限り実橋に近い寸法で作成した。デッキプレートの板厚は 12mm、U リブの板厚は 6mm であり、横リブ間隔は 2400mm と実橋と同程度の寸法である。U リブとデッキプレートの溶接部の溶接溶け込み量は U リブ厚の 10~20% の溶け込みとした。以下、図 2 のように橋軸方向の断面を断面 A~K、橋軸直角方向の断面を line1~7、U リブの名称を U1~4 とする。断面 C には横リブがあり、断面 I は横リブ間の中央である。以下、例えば、載荷点 C4 とは断面 C と line4 との交点を中心に荷重を載荷することを意味する。

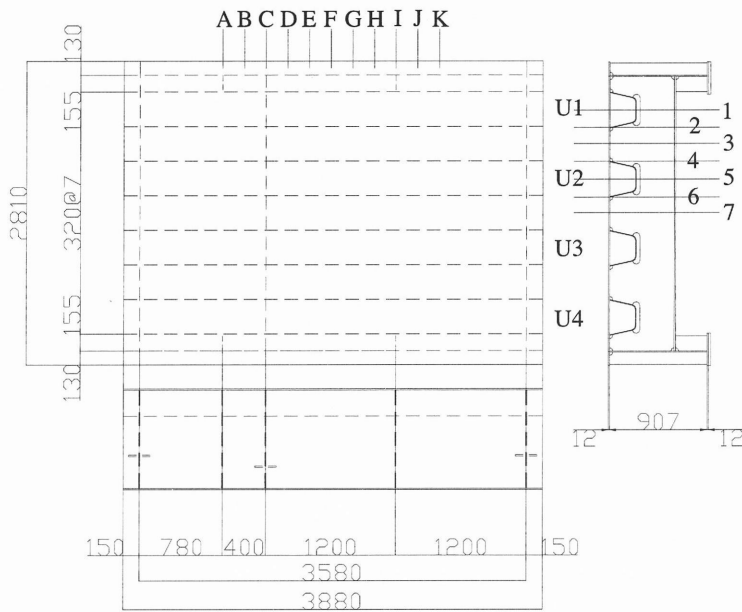


図2 試験体

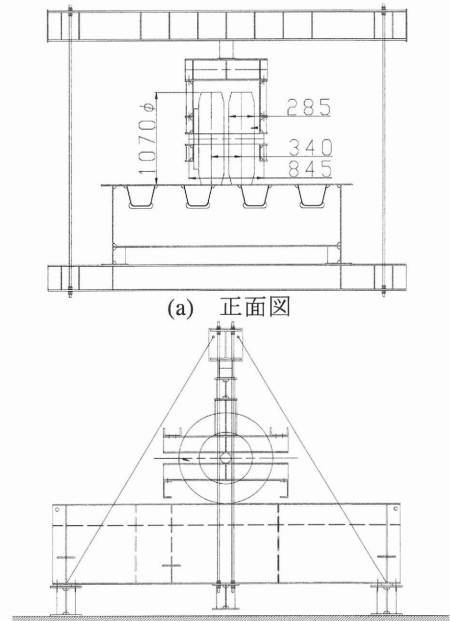


図3 タイヤ荷重の載荷装置

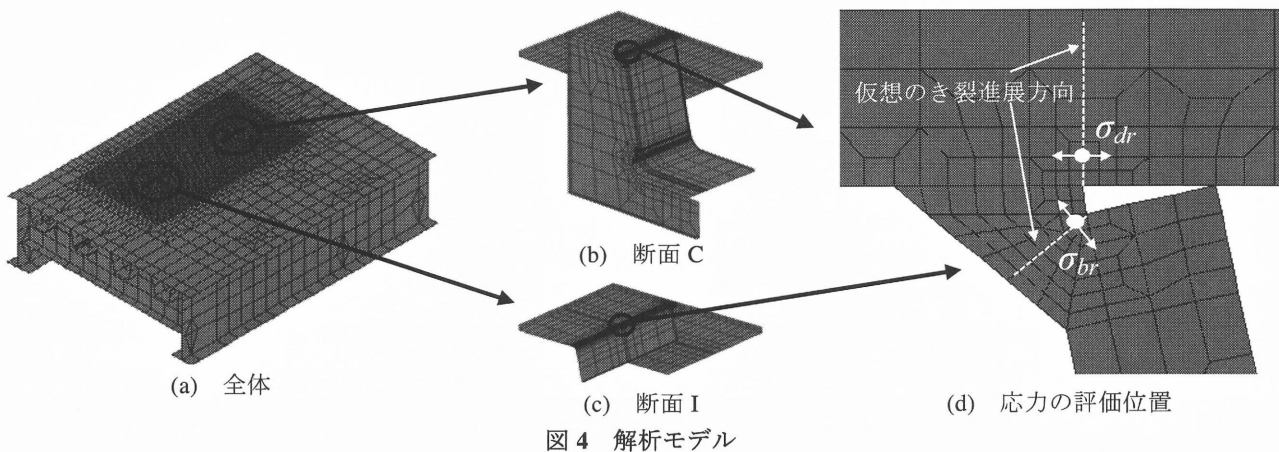


図4 解析モデル

## 2.2 タイヤ荷重の載荷装置

薄肉の版を補剛した床版構造におけるデッキプレートの応力は載荷荷重の影響を大きく受ける<sup>3)</sup>。そこで、輪荷重としてT荷重<sup>5)</sup>を基本とした載荷版を介しての載荷と、実ダブルタイヤによる載荷の2種類で行った。タイヤによる載荷は、外形1070mm、断面幅285mm、トレッド幅210mm、輪の中心間距離340mmのダブルタイヤを用いて行った。載荷版による載荷は、橋軸方向200mm×橋軸直角方向190mmの載荷面を持つ鋼製ブロックを橋軸直角方向に120mmの距離を置いて2枚床版上に設置し、その上よりタイヤ荷重を載荷した。この載荷版による載荷はT荷重の載荷面積(橋軸方向200mm×橋軸直角方向500mm)をダブルタイヤのように2分割した面荷重を与える。

タイヤによる載荷は図3に示す、試験体の上下に配置した載荷梁、反力梁をPC鋼棒で連結した自己平衡型のフレームを用いて行った。

## 3. 解析概要

### 3.1 解析モデル

Uリブ鋼床版のUリブとデッキプレートの溶接部の局部応力特性を調べるため、弾性解析を行った。解析モデルを図4に示す。解析モデルの寸法は図2の試験体と同じである。解析モデルの断面I(横リブ間中央断面)と断面C(横リブ断面)のUリブとデッキプレートの溶接部の周辺は、溶接部の局部応力を求めるために8節点ソリッド要素(Marc<sup>6)</sup>の要素番号7)を用いて溶接ビードをモデル化できる程度に細かく要素分割し、その他の部分は4節点シェル要素(Marcの要素番号139)でモデル化した。Uリブとデッキプレートの溶接部の溶け込み深さは損傷の発生している橋梁に合わせてUリブ板厚の25%とした。最小メッシュサイズは着目する節点近傍で0.5×0.5mmである。境界条件は端横リブと主桁が交差する4隅点において橋軸方向に単純支持となるようにした。材料定数はヤング係数200GPa、ポアソン比0.3としている。荷重は橋軸方向

200mm×橋軸直角方向 200mm の載荷面を橋軸直角方向に 120mm の間隔をあけて面載荷した。

### 3. 2 評価応力

溶接継手近傍の応力は溶接形状によるピーク応力と構造的応力集中による応力 (Geometric stress) の 2 つの成分に分けられ、疲労強度を評価する場合には評価応力として構造的応力集中による応力を求めるのが一般的である。その構造的応力集中による応力を求める方法の一つに 1mm 法<sup>7)</sup>がある。1mm 法とは板厚方向 (き裂進展方向) の応力分布より板表面から 1mm の深さまでしかピーク応力の影響がないことに着目し、その位置を構造的応力集中による応力とする方法である。以下、本論文中的 FEM 解析は図 4(d)の仮想のき裂進展方向に対して直角な応力成分  $\sigma_{dr}$ ,  $\sigma_{br}$  を求める。 $\sigma_{dr}$  はデッキ貫通ルートき裂に、 $\sigma_{br}$  はビード貫通ルートき裂に対応する。なお、 $\sigma_{br}$  に関しては、溶接ビードの厚さ 3.5mm と薄肉なものに対して 1mm 法を用いることが困難であったため、文献 7) に従い有限要素のメッシュサイズの影響を受けない板表面からの距離を確認し、0.5mm の位置の応力を求めている。

### 4. タイヤ荷重と載荷版載荷との比較

ここでは主に、一般に疲労照査で用いられる載荷版による載荷とタイヤによる載荷の違いが U リブとデッキプレートの溶接線の局部応力挙動に与える影響を調べる。

#### 4. 1 接地半径

タイヤの接地半径と荷重の関係を図 5 に示す。タイヤとデッキプレート間に感圧紙をはさみ載荷することで、感圧紙の発色した部分から接地半径を求めた。接地半径  $r$  は図 5 のようにタイヤの橋軸方向の接地長さを 2 で割ったものである。また、図 5 中には文献 3) のタイヤの接地半径と荷重の関係式 (式(1)(2)) を示してある。式(1)(2)はタイヤの接地面積が円型から楕型へと変化していくとしたとき、タイヤの接地半径と荷重の関係である。

$$r = \sqrt{\frac{1563P + 2733}{\pi}} \quad (2.5kN \leq P \leq 20.4kN) \quad (1)$$

$$r = \frac{1000P}{3.743P + 2.108 \times 10^2} + 33.7 \quad (20.4kN \leq P \leq 50kN) \quad (2)$$

ここで、 $r$ : 接地半径(mm)  
 $P$ : 一輪あたりの載荷荷重 (kN)

式(1)(2)はタイヤの空気圧が標準空気圧 (700kPa) で剛床に載荷した場合のものである。タイヤ荷重の載荷位置は荷重直下の鋼床版構造の違いを考慮して、載荷点 C4, C5, I4, I5 とした。

接地半径については、試験結果は式(1)(2)よりやや大きな値を示しているがおおむね一致している。載荷版では荷重の変化に対して接地半径 (接地面積) の変化がないが、タイヤ荷重の場合は荷重が大きくなるに伴い接地半径 (接地面積) が大きくなること分かる。荷重が 90kN (一輪あたり 45kN) のときには、接地半径が 150~175mm となり T 荷重を基にした本載荷版の約 1.5~1.75 倍の接地面積となること分かる。一方、載荷位置の違いによる影響はほとんど見られない。

#### 4. 2 荷重と応力の関係

タイヤと載荷版の違いを調べるため、荷重と応力の関係を求めた。U リブ U2 とデッキプレートの溶接部の U1 側溶接線近傍の荷重と応力の関係を図 6 に示す。

(a)(b)は横リブ間中央断面のもの、(c)(d)は横リブ断面のものである。載荷点は各測定点において、FEM 解析および静的載荷試験で大きな応力が発生した位置とした。

主にデッキプレートの測定点において、タイヤによる載荷は下に凸の曲線であるが、載荷版による載荷はほぼ直線の傾向がある。これは、タイヤは荷重の増加とともに載荷面積が大きくなるため、タイヤの接地圧力と荷重は線形関係にならないためである。一方、載荷版による載荷は載荷面積が一定であるため接地圧力と荷重は線形関係になるためである。載荷版による載荷は 70kN までしか行っていないが、この先も荷重と応力の関係が線形であるとする、0kN から約 80kN までは同じ荷重でもタイヤによる載荷の方が応力は大きくなることになる。U リブウェブもデッキプレートと同様の関係が見受けられるが、その程度は小さい。

次に、タイヤによる載荷が載荷版による載荷と比べてどの程度疲労寿命に影響を及ぼすかを試算する。JSSC 疲労設計指針<sup>8)</sup>では、鋼材の溶接継手に対して直応力を受ける場合は S-N 曲線の傾きを -1/3 としている。そこで、図 6 に示したデッキプレートの測定点のタイ

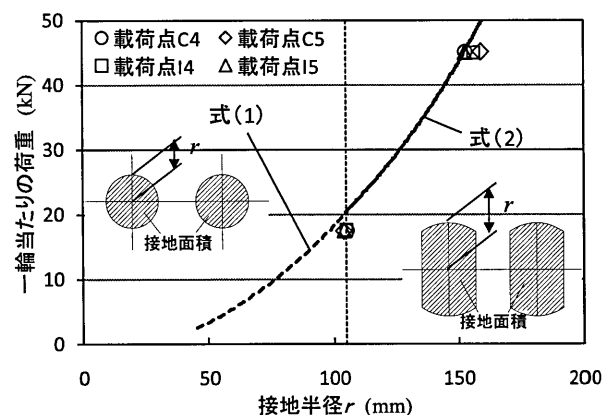


図 5 タイヤの接地半径と荷重の関係

ヤによる荷重に対する応力と載荷版による荷重に対する応力の比を3乗することで疲労寿命の比を求めた。その結果、タイヤによる荷重は載荷版による荷重と比べて10kNでは0.4~0.5倍、50kNでは0.6~0.7倍の疲労寿命となる。全国軸重調査結果<sup>9)</sup>によれば、車両の平均軸重は23.3kN(輪荷重:11.7kN)であり、軸重100kN(輪荷重:50kN)までで全体の95%以上を占めている。実橋に作用する荷重レベルでは、従来のT荷重をもとにした載荷版による疲労照査では場所によっては危険側の評価になる。

## 5. 載荷位置と局部応力の関係

ここでは主に、レーンマーク内を走行するタイヤ荷重の走行位置の橋軸直角方向のばらつきを想定し、横リブ間中央断面および横リブ断面において、Uリブとデッキプレート溶接部の局部応力の橋軸直角方向影響線を求める。

### 5.1 実験結果

試験体を用いて着目断面における橋軸直角方向の影響線を求めた。UリブU2とデッキプレートの溶接部のU1側溶接線近傍の応力の橋軸直角方向影響線を図7に示す。測定方向はすべて橋軸直角方向であり、測定位置は溶接止端やコーナーより5mmである。載荷荷重は90kNである。また、ここでは面外応力、面内応力を $\sigma_1, \sigma_2$ および $\sigma_3, \sigma_4$ の二対の値を元に計算する。面外応力は二対の測定値の差を2で割ったもの、面内

応力は二対の平均値とした。

断面Iについてみると、デッキプレートでは応力のピークがline4 ( $x=0\text{mm}$ )にあるのに対し、Uリブウェブではline2 ( $x=-320\text{mm}$ )とline6 ( $x=320\text{mm}$ )にある。デッキプレートとUリブウェブの挙動は異なることが分かる。そして、どの場合でもUリブとデッキプレートの溶接部をダブルタイヤが跨いで載荷の場合( $x=-320, 0, 320\text{mm}$ )に応力のピークがある。応力のピークはデッキプレート側で9.6倍、Uリブウェブ側で3.5倍、面内応力に比べ面外応力が大きい。

断面Cについても同様にみていくと、応力のピークがデッキプレート側、Uリブウェブ側ともにline4 ( $x=0\text{mm}$ )とline6 ( $x=320\text{mm}$ )にある。また、デッキプレート側とUリブウェブ側の挙動は類似している。line4, 6ではダブルタイヤの片輪がUリブにはまるように載荷する位置に当たる。断面Cでは、断面Iのように面外応力が卓越しているわけではなく、デッキプレート側にいたっては面外応力と面内応力は同程度である。横リブの存在や横リブ上側スカラップの影響で横リブ間中央に比べて複雑な挙動をしていると考えられる。

### 5.2 解析結果

解析モデルを用いて $\sigma_{dr}, \sigma_{br}$ の橋軸直角方向影響線を求めた。荷重はT荷重98kNである。その結果を図8に示す。

$\sigma_{dr}$ の影響線(a)および(c)の形状は、図7(a)および(c)

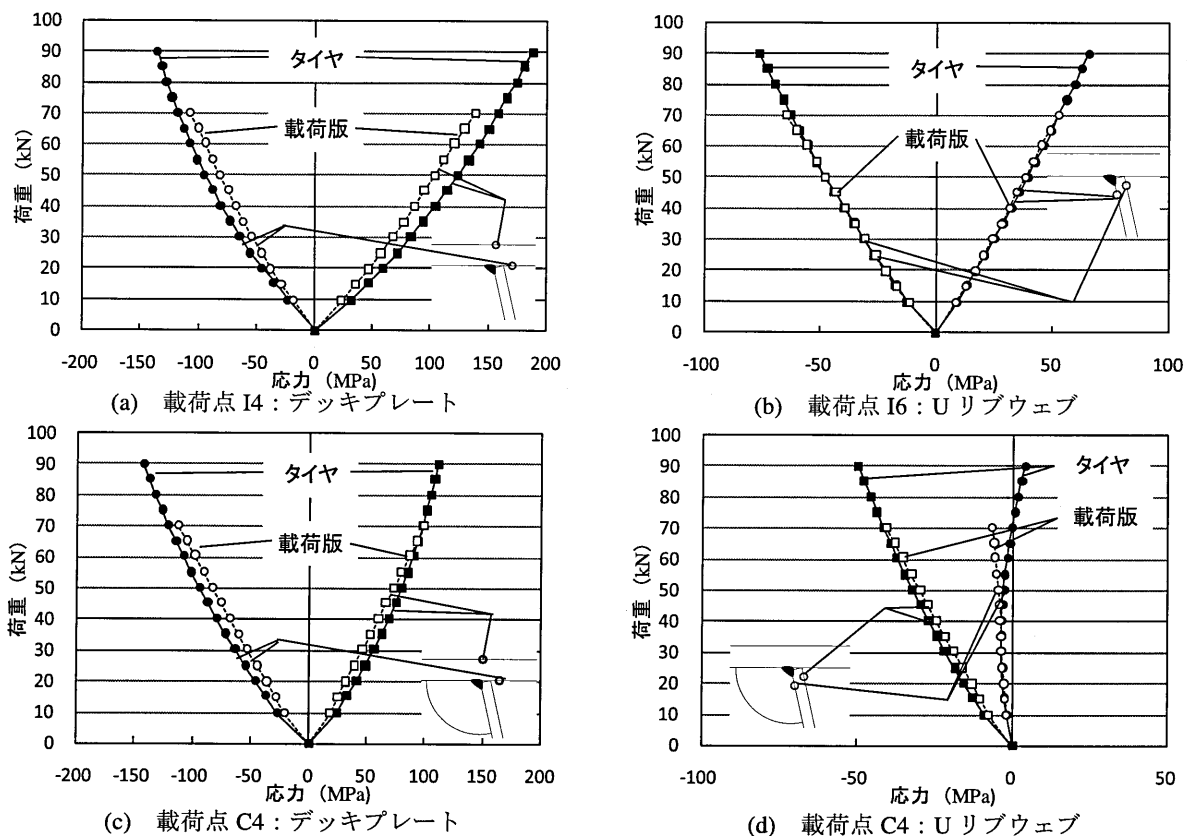
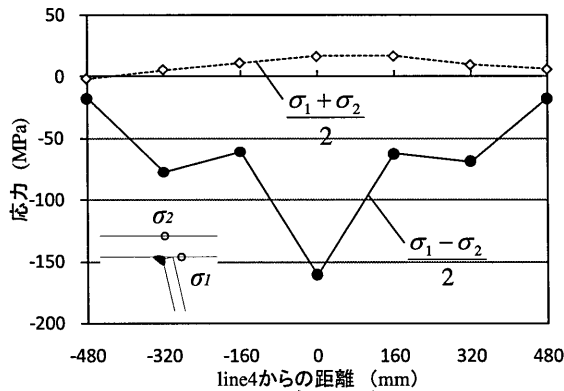
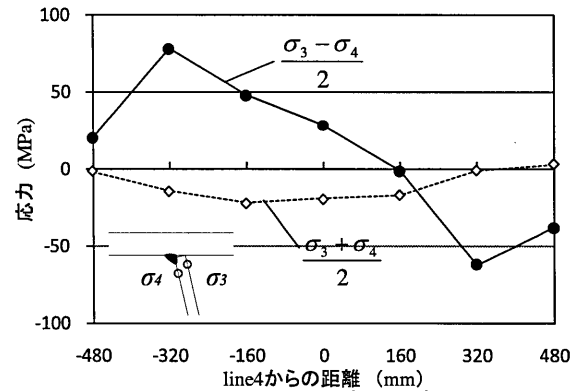


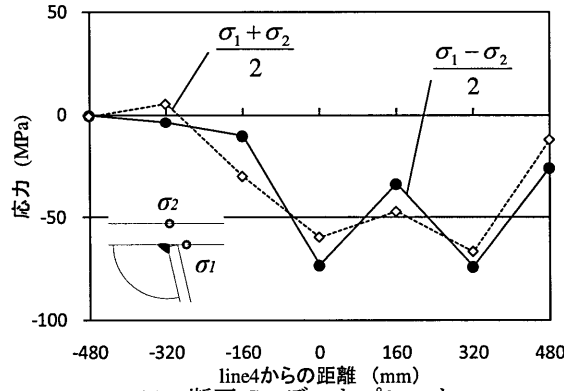
図6 荷重と応力の関係



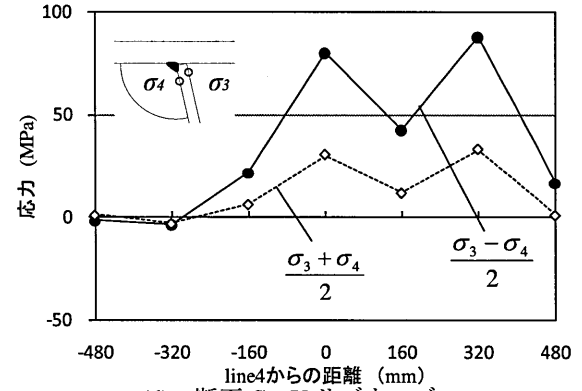
(a) 断面 I: デッキプレート



(b) 断面 I: Uリブウェブ

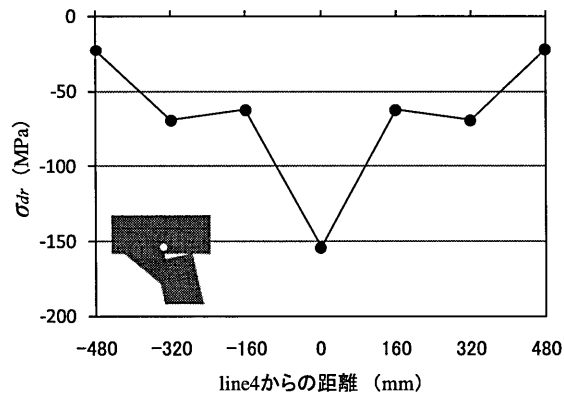


(c) 断面 C: デッキプレート

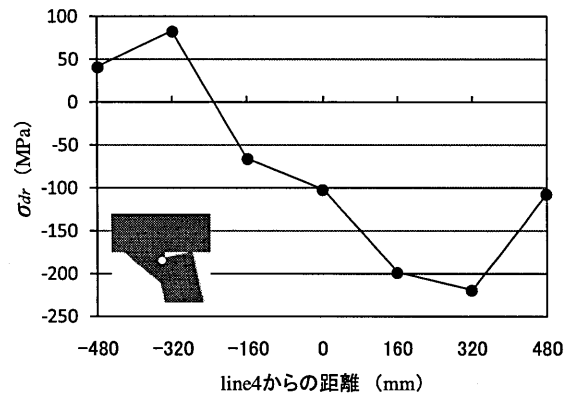


(d) 断面 C: Uリブウェブ

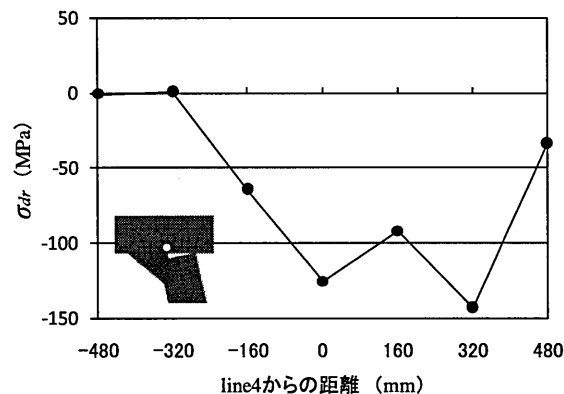
図 7 応力の橋軸直角方向影響線 (実験値)



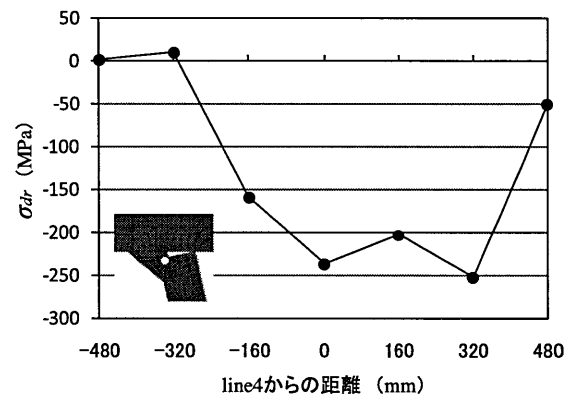
(a) 断面 I:  $\sigma_{dr}$



(b) 断面 I:  $\sigma_{br}$



(c) 断面 C:  $\sigma_{dr}$



(d) 断面 C:  $\sigma_{br}$

図 8 応力の橋軸直角方向影響線 (解析値)

のデッキプレートの面外応力の影響線の形状に似ており、断面 I では line4 ( $x=0$ )、断面 C では line4, 6 ( $x=0$ , 320mm) に荷重が載荷した場合に応力のピークがある。このことから、デッキ貫通ルートき裂はデッキプレートの面外変形に起因していると考えられる。

また、 $\sigma_{br}$  の影響線(b)および(d)の形状は、図 7(b)および(d)の U リブウェブの面外応力の影響線の形状に似ている。断面 I では line2 ( $x=320$ mm) 載荷の場合に引張応力のピークが、line6 ( $x=320$ mm) の場合に圧縮応力のピークがある。断面 C では line4, 6 ( $x=0$ , 320mm) に荷重が載荷した場合に応力のピークがある。このことから、ビード貫通ルートき裂は U リブウェブの面外変形と関係があると考えられる。

いずれにせよ、U リブウェブの面外変形はデッキプレートの面外変形によりもたらされることを考えると、U リブとデッキプレートの溶接部の局部応力は主に輪荷重により生じるデッキプレートの局所的な面外変形に起因していると考えられる。

## 6. まとめ

載荷荷重や載荷位置が U リブとデッキプレートの溶接部のデッキ貫通ルートき裂およびビード貫通ルートき裂に対する局部応力挙動に与える影響を調べるため、タイヤ荷重による静的載荷試験および FEM 解析を行った。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) タイヤ荷重は接地面積が荷重の増加とともに増加することが分かった。輪荷重が 90kN のときには、T 荷重を基本とした剛な載荷版 190×200mm の矩形載荷版 2 個所で載荷するより、実トラックのダブルタイヤによる載荷の方が、約 1.5~1.75 倍の載荷面積となることが明らかになった。
- (2) U リブとデッキプレートの溶接部のデッキプレート側の局部応力は、T 荷重を基本とした 190×200mm の矩形載荷面積 2 個所で載荷するより、実ダブルタイヤによる載荷の方が、輪荷重 70kN 以下では疲労に対して危険側となることが分かった。  
実ダブルタイヤによる載荷の方が大きな応力が発生した理由としては、タイヤの場合、接地面内

で等分布の荷重作用があり、着目点での曲げモーメントが大きくなったためと考えられる。

- (3) U リブとデッキプレートの溶接部の局部応力は主に輪荷重により生じるデッキプレートの局所的な面外変形に起因して生じていると考えられる。細かく見ると、デッキ貫通ルートき裂の発生起点近傍の局部応力はデッキプレートそのものの面外変形に起因して発生しており、ビード貫通ルートき裂の発生起点近傍の局部応力はデッキプレートの面外変形と、それに伴う U リブウェブの面外変形の相互に起因して発生していることが分かった。

## 参考文献

- 1) 平林泰明, 牛越裕幸, 木ノ本剛: 首都高速道路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, pp39-53, 2007.
- 2) 堀江佳平, 高田佳彦: 阪神高速道路の鋼床版疲労損傷の現状と取組み, 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, Vol.10, pp55-69, 2007.
- 3) 大倉一郎, 石川敏之, 筒井将仁, 大澤章吾: トラックタイヤの接地形状がアルミニウム床版の板曲げ応力に与える影響, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp655-666, 2007.
- 4) 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, pp57-69, 2005.
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, 2002.
- 6) MSC Marc, MSC Software Corporation, Version 2003, 2003.
- 7) Xiao ZG, Yamada K, :A method of determining geometric stress for fatigue strength evaluation of steel welded joints, International Journal of Fatigue 26, pp1277-1293, 2004.
- 8) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.
- 9) 建設省土木研究所: 限界状態設計法における設計活荷重に関する検討, 土木技術資料, No.2539, 1988.