

デッキプレート厚・Uリブ厚・溶接溶け込み量が鋼床版の応力性状に与える影響

The effect of the deck thickness, U-rib thickness

and groove welding depth for the stress distribution of the steel deck

川畑篤敬*, 江崎正浩*, 加藤靖*, 杉村誠*, 鈴木大也*, 原直人*, 矢ヶ部彰*, 横山薫*

Atsunori KAWABATA, Masahiro EZAKI, Yasushi KATO, Makoto SUGIMURA,

Daiya SUZUKI, Naoto HARA, Akira YAKABE, Kaoru YOKOYAMA

* (社) 日本橋梁建設協会 (〒104-0061 東京都中央区銀座2丁目2番18号)

Recently, the fatigue of the steel deck has been observed in some heavy traffic roads. One of the causes of the deck fatigue was the plate bending stress of deck plate for closing direction of the bridge, which has not considered on the bridge deck design. The effects of the deck thickness, U-rib thickness and groove welding depth for the stress distribution of the steel deck were investigated with FEM models.

It was clarified that those structural dimensions had relation with the stress distribution of the welding portion. Especially, the combination of 12mm deck thickness and 8mm U-rib thickness may cause the high stress at the welding metal, and then the fatigue strength of the steel deck may be reduced. This is good agreement with actual fatigue damage of the steel deck.

Key words: steel deck, U-rib, groove welding depth, stress distribution

1. はじめに

近年、交通量の多い橋梁を中心として鋼床版に疲労損傷が報告されている。鋼床版の疲労損傷のなかでもデッキプレート（以下デッキ）とUリブとの縦方向溶接部（以下Uリブ溶接線）において、亀裂がUリブの内面側からデッキ上面に向かって進展した場合その発見が難しく、舗装に直接影響を及ぼす危険性がある。この部位は自動車輪荷重が直接載荷されることで鋼床版を構成する板が局所的な変形挙動を示し、局所的に大きな応力が繰り返し発生することによって疲労損傷に繋がると考えられる。本検討は標準的なUリブを有する鋼床版橋梁を対象として、デッキとUリブとの溶接部に着目した FEM（線形弾性）解析を行い、応力性状を把握することで当該部位の疲労耐久性評価のための基礎資料とすることを目的とする。

2. シェル要素による輪荷重直下の FEM 解析

(1) 解析概要

本検討の解析モデルは図-1 に示すような一般的な鋼床版2主桁桁橋の橋軸方向範囲 30m を取り出したモデルであり、横桁間隔は 10m、横リブ間隔は 2.5m である。また、与える荷重は文献 1) を参考として後輪荷重を幅 150mm、長さ 250mm の全荷重 47853N の等分布荷重を 2 個（合計：95706N）でモデル化した。載荷位置は橋軸方向は縦リブ支間の L/2 位置、橋軸直角方向は着目Uリブとの相対関係が 3 通りとなるような位置とした。

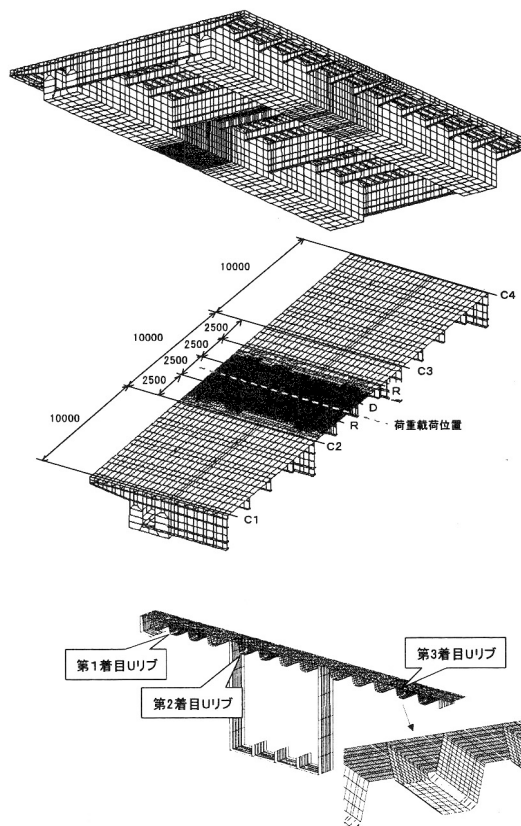


図-1 解析モデル

なお、当該部位の局部応力に対しては舗装による荷重分散効果やデッキとの合成作用の影響も受けると考えられるが、本検討ではこれらの影響は考慮していない。また、死荷重による影響は小さいと考えられるため、荷重として考慮していない。解析は図-1 に示す第1、第2、第3着目Uリブについて実施しているが、以降では第3着目Uリブについて記述する。

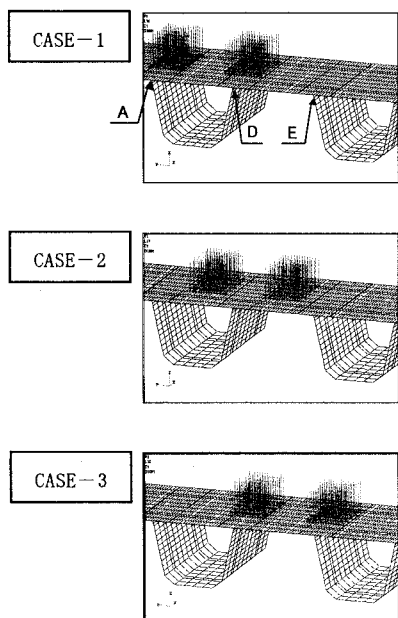


図-2：荷重載荷ケース

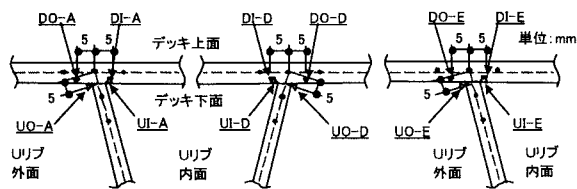


図-3 応力表示記号図

(2) 解析結果

解析の結果得られた輪荷重直下のデッキおよびUリブに発生する応力を図-4～7 に示す。図中において応力値を示している箇所は図-3 に示す記号位置の応力値でありUリブ溶接線に着目したものである。図-4 と図-5 の比較からUリブ溶接線に発生する応力は通常の鋼床版の設計時に考慮している橋軸方向応力よりも橋軸直角方向応力が卓越していることが判る。また、図-5 よりD点位置のデッキ下面はUリブウェブを支点とした負曲げに伴う比較的大きな橋軸直角方向圧縮応力が発生している。また、同図のE点のUリブ側には荷重の偏心に伴う板曲げが発生している。図-6 と図-7 のD点位置のUリブ溶接線のUリブ側内面に着目すると CASE-1 では圧縮応力が発生しているが、CASE-3 では引張応力が発生しており、輪荷重の位置によって応力が交番していることが判る。

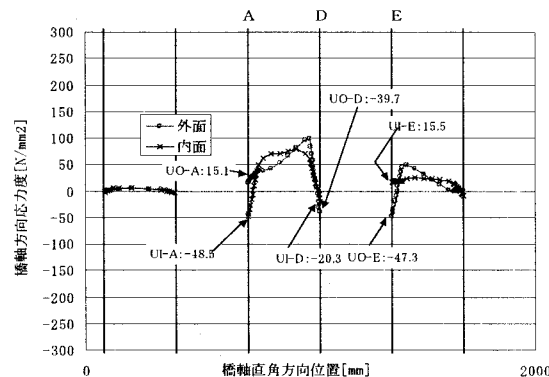
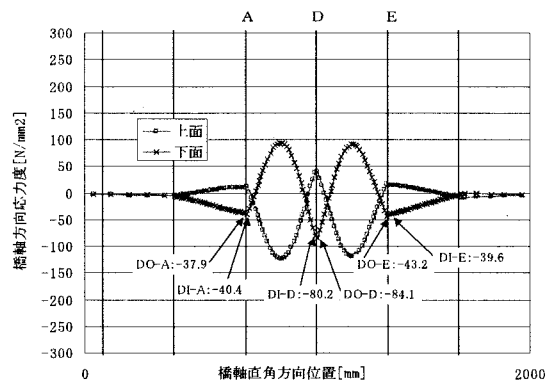


図-4 CASE-2 橋軸方向応力図
(上段：デッキ、下段：Uリブ)

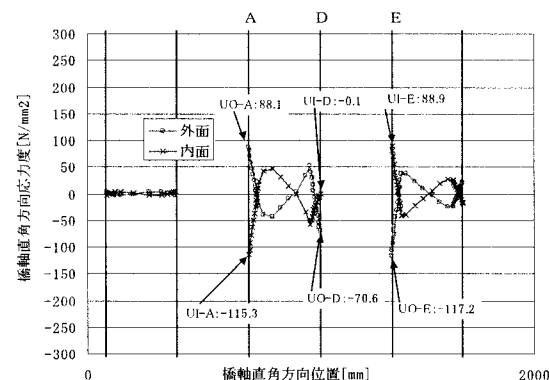
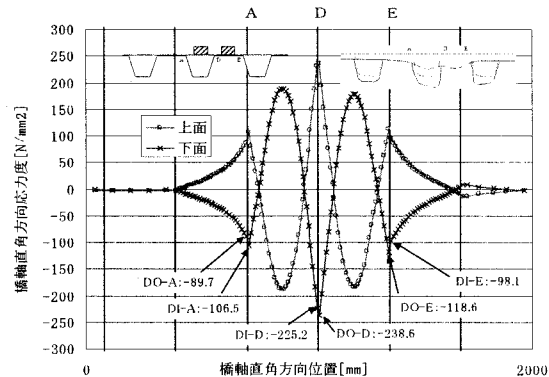


図-5 CASE-2 橋軸直角方向応力図
(上段：デッキ、下段：Uリブ)

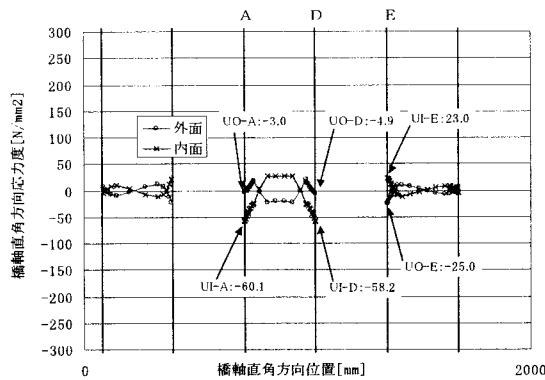
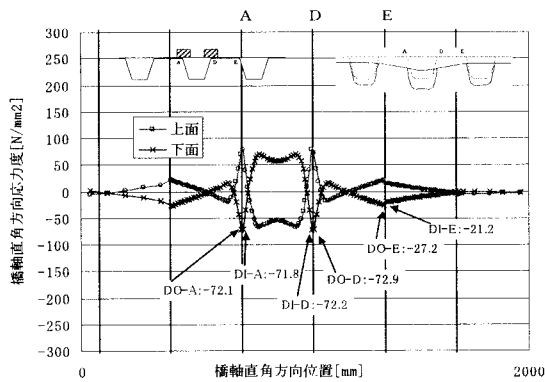


図-6 CASE-1 橋軸直角方向応力図
(上段：デッキ，下段：Uリブ)

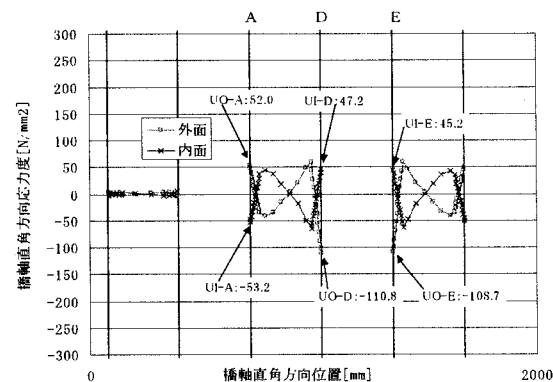
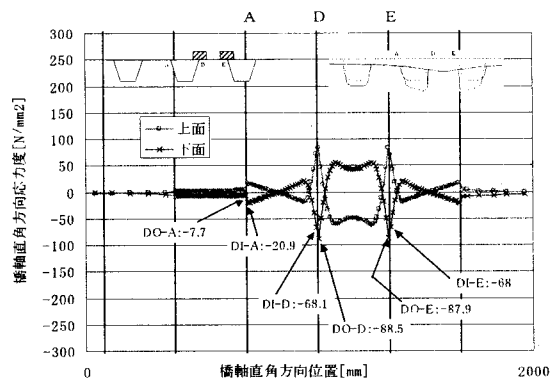


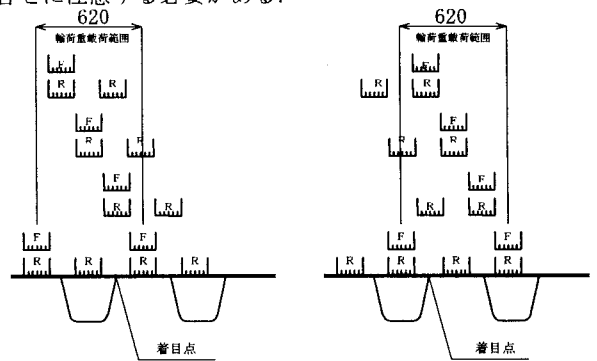
図-7 CASE-3 橋軸直角方向応力図
(上段：デッキ，下段：Uリブ)

(3) パラメータ検討

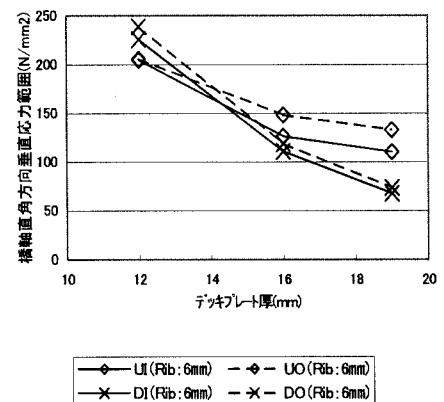
次に、デッキの板厚とUリブの板厚の影響を確認するために、デッキ厚 (12, 16, 19mm) とUリブ厚 (6, 8mm) をパラメータとしてUリブ溶接線の応力範囲の変化を確認する。応力範囲算出にあたっての輪荷重載荷範囲は、道路橋示方書・同解説の記述『車輪の軌跡はおよそ 500mm 幅程度の範囲に集中している』を受けて、図-8 とする。

図-9 より、

- ① 応力範囲はデッキ厚を上げることで緩和される。
 - ② デッキの増厚が応力範囲の緩和におよぼす寄与率は部位により異なる。
 - ③ $t=6\text{mm}$ のUリブと $t=8\text{mm}$ ではほぼ同等な応力度が発生している。このことは、溶接部はUリブ板厚に比例した溶接サイズが必要であることを意味し、 $t=6\text{mm}$ に比べて $t=8\text{mm}$ の場合は同じ溶接サイズでは $1.8=(8/6)^2$ 倍の応力が発生していると予想される。つまり、以下の事項がわかる。
- 1) デッキの板厚を上げることで橋軸直角方向の垂直応力の変動域が小さくなり、デッキ厚が疲労強度に影響する。
 - 2) デッキ厚=12mm とUリブ厚=8mm の組合せとなっている場合、上記③を踏まえると応力範囲が大きくなり部材厚の組合せに注意する必要がある。



図中の“F”は、前輪，“R”は後輪を示す。
図-8 輪荷重の載荷範囲



| U-Rib 厚 (mm) | デッキ厚 (mm) | 応力範囲 (N/mm ²) | | | |
|--------------|-----------|---------------------------|-----|------|-----|
| | | U-Rib | | Deck | |
| | | UI | UO | DI | DO |
| 6 | 12 | 204 | 205 | 225 | 239 |
| | 16 | 126 | 148 | 110 | 118 |
| | 19 | 110 | 132 | 68 | 73 |
| 8 | 12 | 205 | 206 | 231 | 243 |

図-9 輪荷重直下溶接部の橋軸直角方向応力範囲

3. ソリッド要素による輪荷重直下の FEM 解析

(1) 解析概要

「2. シェル要素による FEM 解析」の溶接部の詳細な応力性状を把握するために、デッキ厚を 12mm, Uリブ厚を 6, 8mm として Uリブ溶接線の溶け込み深さをパラメータとしたソリッド要素による検討を行う。荷重は後輪が Uリブウェブをまたぐような載荷状態とする。図-10 に着目点位置と座標系の定義を、表-1 に解析時のパラメータ、表-2 にルート部の橋軸直角方向の応力、表-3 にルート部の橋軸直角方向の応力比を示す。

(2) 解析結果

解析結果を図-11(次ページ)に示す。

(i) 応力値の傾向

1) デッキ側のルート部の応力性状

着目位置 D のルート部において高い圧縮応力 (-389 ~ -414N/mm²) が発生している。また、Uリブ厚や溶け込み深さに起因する応力性状の顕著な違いはない。

2) Uリブ母材の応力性状

Uリブ厚や溶け込み深さに起因する応力性状の顕著な違いはなく、シェル要素と同様の傾向を示している。

3) Uリブ側のルート部の応力性状

板曲げ成分が卓越する着目位置 E では、6mm に比べて 8mm の Uリブに大きな引張応力が発生している。以下に同部の比較結果を述べる。

① Uリブ厚一定で溶け込み量の違いによる比較

溶け込み量が増えると、6mm・8mm共に Uリブ側の応力が緩和される反面、デッキ側の応力が増える傾向を示す。

② 溶け込み量一定(4.5mm)で Uリブ厚の違いによる比較

8mm の Uリブは 6mm に比べて約 2.42 倍 (=163.9/67.6) の応力が発生している。

③ 溶け込み比率一定(75%)で Uリブ厚の違いによる比較

8mm の Uリブは 6mm に比べて約 1.89 倍 (=127.6/67.6) の応力が発生し、溶け込み量を 75%確保しても発生応力は 6mm に比べて 8mm が大きい。

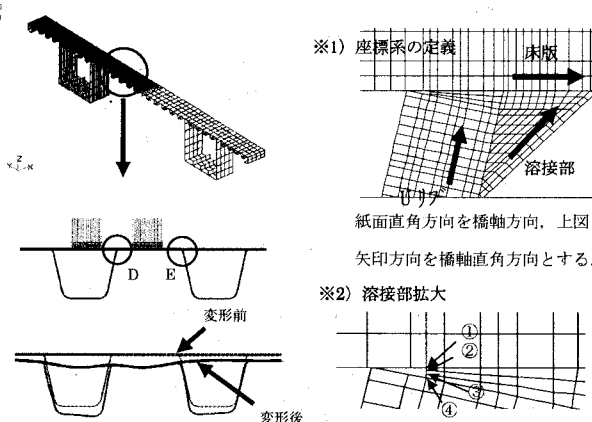


図-10 着目点と座標系の定義

表-1 ソリッド要素による輪荷重直下の FEM 解析パラメータ

| 解析ケース番号 | Uリブ厚 | 溶接溶け込み量 | | 備考 |
|---------|------|------------|-----|--|
| | | Uリブ厚に対する比率 | | |
| I | 6mm | 4.5mm | 75% | ①Uリブ厚一定で溶け込み量の違いによる比較 (I/II, III/IV) ②溶け込み量一定でUリブ厚の違いによる比較 (IV/I) ③溶け込み比率一定でUリブ厚の違いによる比較 (III/I) |
| | | 75% | | |
| II | 6mm | 2.5mm | 40% | |
| | | 40% | | |
| III | 8mm | 6.0mm | 75% | |
| | | 75% | | |
| IV | 8mm | 4.5mm | 55% | |
| | | 55% | | |

※疲労設計指針の発刊以前に建設された鋼床版の場合、デッキと縦リブの溶接溶け込み量が規定されていなかったため溶接溶け込み量をパラメータとする。

表-2 ルート部の橋軸直角方向の応力(N/mm²)

| 解析ケース番号 | D点 | | E点 | |
|---------|--------|--------|--------|-------|
| | デッキ下面 | Uリブ内面 | デッキ下面 | Uリブ内面 |
| I | -413.9 | -129.8 | -110.7 | 67.6 |
| II | -389.8 | -133.9 | -105.2 | 105.4 |
| III | -428.3 | -95.7 | -84.4 | 127.6 |
| IV | -411.6 | -86.1 | -83.5 | 163.9 |

表-3 ルート部の橋軸直角方向の応力比

| 比較結果 | ① | リブ厚一定で溶け込み量の違いによる比較 | D点 | | E点 | |
|------|---|---------------------|--------|-------|-------|-------|
| | | | デッキ下面 | Uリブ内面 | デッキ下面 | Uリブ内面 |
| 比較結果 | ① | I/II | 1.06 | 0.97 | 1.05 | 0.64 |
| | | | III/IV | 1.04 | 1.11 | 1.01 |
| | ② | IV/I | 0.99 | 0.66 | 0.75 | 2.42 |
| | | | ③ | III/I | 1.03 | 0.74 |

(ii) 主応力方向の傾向

亀裂が発生する方向は、主応力方向と直角であることが推測されることから、デッキ厚=12mm, Uリブ厚=8mm のケースについて主応力方向を確認する(Uリブ厚=6mm についても同様の傾向であるので解析結果は省略する)。

図-12 より、以下のことが判る。

①溶け込み量が主応力方向におよぼす影響は小さい。

②引張応力が発生している E 点では、ビード貫通型の亀裂が発生する可能性がある。

| Uリブ板厚 | 溶け込み量 | 着目位置: D | | 着目位置: E | |
|-------|-------------|---------|------|---------|------|
| | | D部拡大 | E部拡大 | D部拡大 | E部拡大 |
| 8mm | 6.0mm (75%) | | | | |
| | 4.5mm (55%) | | | | |

図-12 デッキ厚 12mm, Uリブ厚 8mm のケースの主応力方向図

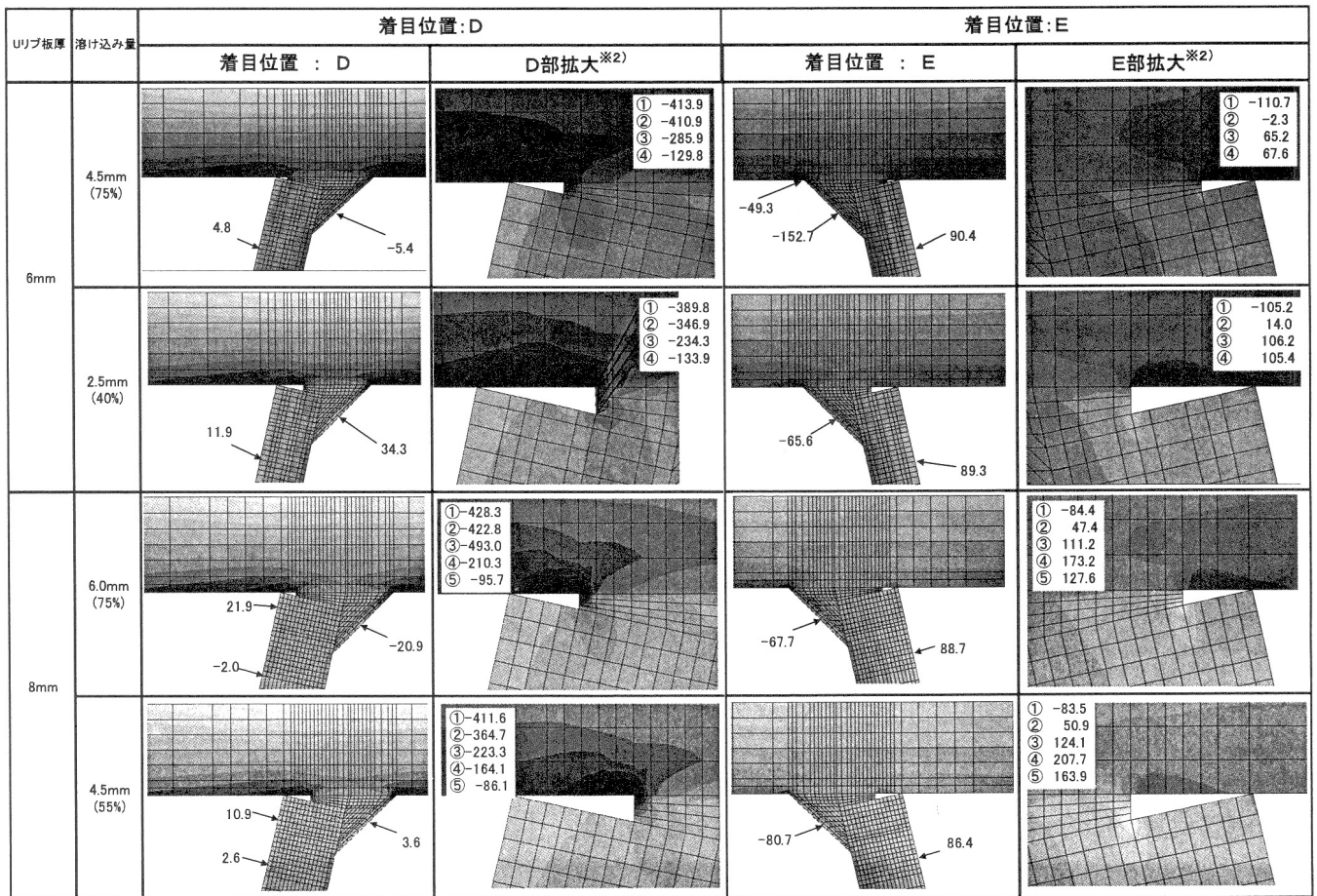


図-11 ソリッド要素による解析結果

4. 平面ひずみ要素による輪荷重直下のFEM解析

(1) 解析概要

前段の解析モデルは、デッキ-Uリブ間の溶接溶け込み角度をデッキに対して90°としている。ところが、Uリブ溶接線の施工試験の断面マクロを参照すると、当該部の溶接はデッキに対して角度を持っているケースもあることが確認された。そこで、溶接溶け込み形状(角度)が、ピーク応力の発生位置・値、主応力方向に影響を与えるか否かを確認するために、平面ひずみ要素モデルによる解析を行う。

解析モデルは、引張応力が発生するE点のデッキ、リブ間の溶接部周辺の断面を抜き出した形のモデル化を行う。

ソリッド要素の解析結果と比較するために、メッシュ分割はソリッド要素と同様とし、単位幅1mmの平面ひずみ要素とする。図-13にモデル化範囲および平面ひずみ要素により作成したモデルを示す。

荷重は、ソリッド要素の後輪-縦リブウェブ直上(CASE-2)の橋直方向応力をもとに作成する(モデル化手法と載荷荷重の妥当性は、着目点近傍についてソリッド要素の解析結果と比較することで確認している)。

(2) 解析結果

要素座標系の定義はソリッド要素解析と同様とし、平均応力として評価する。

図-14(次ページ)に最大・最小主応力のコンター図と矢線図を示す。

これらより、溶接溶け込み形状(角度)は、ピーク応力の値と亀裂発生方向(最大主応力方向)に大きな影響を与えないが、ピーク応力の発生位置にはわずかに影響を与える(デッキ側にずれる)ことが確認できる。

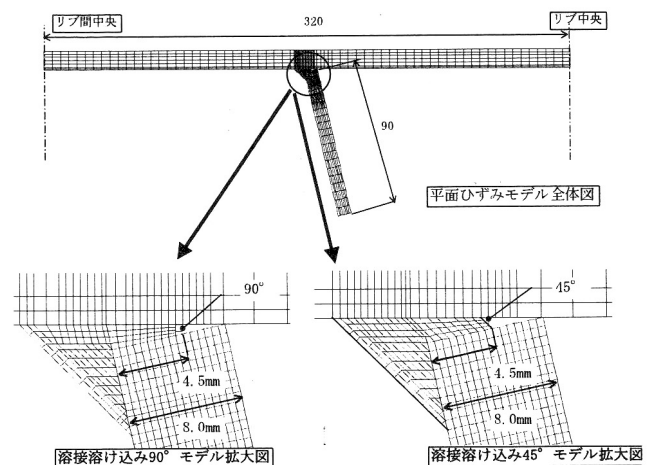


図-13 平面ひずみ要素モデル化範囲

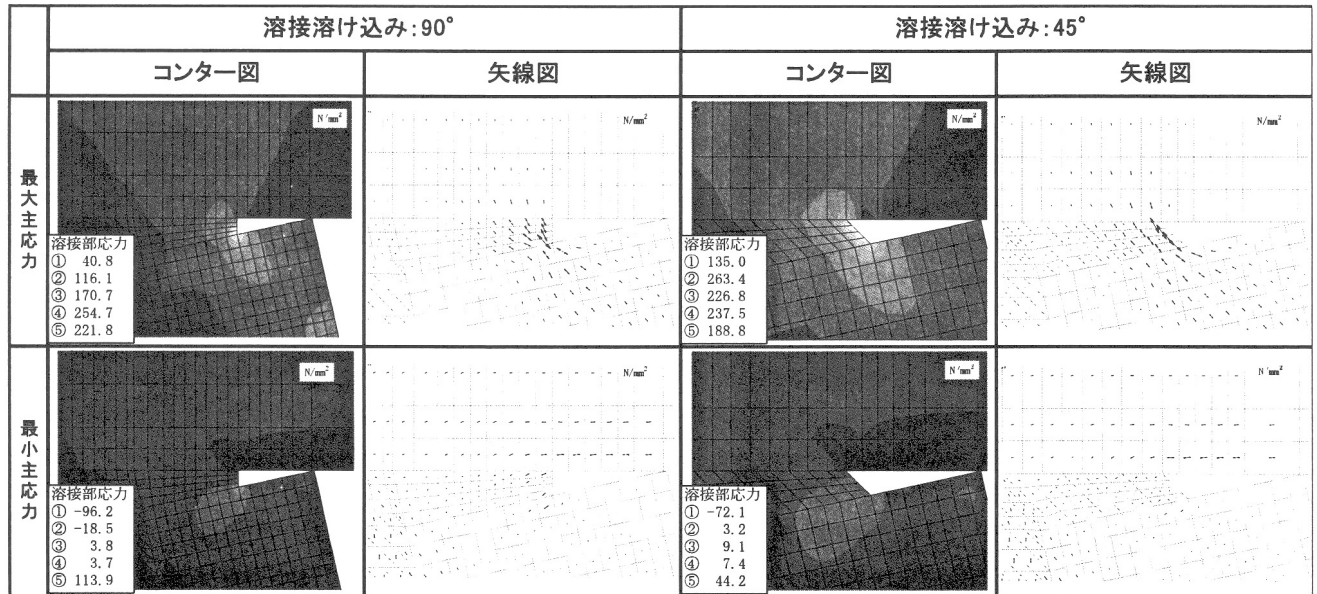


図-14 最大・最小主応力のコンター図と矢線図 (デッキ厚:12mm, Uリブ厚:8mm)

5. まとめ

本検討を通じて、輪荷重直下の鋼床版に発生する応力性状について以下のことが考察される。

- ① UリブのウェブをまたぐCASE-2の荷重ケースにおいてはD点位置のデッキ下面にはUリブウェブを支点とした負曲げに伴う比較的大きな橋軸直角方向圧縮応力が発生する。
- ② ①と同じ荷重ケースではE点のUリブ側には荷重の偏心に伴う板曲げが発生する。
- ③ Uリブ溶接線のUリブ側は輪荷重との相対位置関係により発生する応力が交番し、輪荷重走行位置により応力範囲が大きくなる場合がある。
- ④ デッキの板厚を上げることで橋軸直角方向の垂直応力の変動域が小さくなり、デッキ厚が疲労強度に影響する。
- ⑤ デッキ厚=12mmとUリブ厚=8mmの組合せとなっている場合、ルート部の応力集中が大きくなり部材の板厚の組合せに注意する必要がある。
- ⑥ Uリブ母材断面と比べて、溶接溶け込み量が少ない場合は溶着金属部に大きな応力が発生する。
- ⑦ CASE-2の荷重ケースのE点においては、溶接溶け込み形状(角度)がピーク応力の値と主応力方向に与える影響は小さい。また、主応力方向は溶接溶け込み形状によらず溶接を貫通する方向に亀裂を発生させるような方向となる。

参考文献

- 1) 亀井他：鋼床版 Uトラフの局部強度，三菱重工技報 Vol.24 No.4 1987-7
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，平成14年3月
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，平成14年3月
- 4) 川畑他：輪荷重により鋼床版のデッキプレートとUリブとの縦方向溶接部に発生する応力性状の把握，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，平成16年
- 5) 川畑他：鋼床版疲労損傷へのデッキプレート厚・Uリブ厚・溶接溶け込み量の影響，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，平成16年