

疲労耐久性の高い鋼床版垂直補剛材上端構造の提案

Proposal of the structural detail with high fatigue resistance
for vertical stiffener-to-deck welding connections in orthotropic steel decks

田辺篤史[†], 白石祐一*, 小西日出幸**, 狩野哲也***, 沼勝雄****, 坂野昌弘*****
Astushi Tanabe, Yuichi Shiraishi, Hideyuki Konishi, Tetsuya Kano, Katsuo Numa, Masahiro Sakano

[†]博 (工), (一社) 建設コンサルタント協会, 近畿支部 (〒541-0054 大阪府中央区大手通 1-4-10)

*関西大学, 理工学研究科環境都市工学専攻 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

**博 (工), (一社) 日本橋梁建設協会 (〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町 1-8-2)

*** (一社) 日本橋梁建設協会 (〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町 1-8-2)

****近畿地方整備局, 道路部 (〒540-8586 大阪府中央区大手前 1-5-44)

*****工博, 関西大学教授, 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

Many fatigue cracks were found in weld joints between vertical stiffener and deck plate in orthotropic steel decks (OSDs). Thus, several retrofitting methods were proposed for the joints in existing structures. In case of new OSDs, separating vertical stiffeners on transverse member from decks is recommended, despite of reducing vertical stiffness. High fatigue resistance detail without reducing stiffness of the vertical stiffeners is more efficient. This study is aiming to propose a high fatigue strength detail of vertical stiffeners for newly fabricating OSDs. Half-circle-cut detail and fillet detail were evaluated by FEA and fatigue test. As a result, the fillet detail had no fatigue cracks due to high stress reduction, and it could be proposed as an improved detail.

Key Words: vertical stiffener, orthotropic steel deck, fillet detail, half-circle-cut detail

キーワード: 垂直補剛材, 鋼床版, フィレット構造, 半円切り欠き構造

1. はじめに

鋼橋の鋼床版垂直補剛材上端部は, 疲労損傷が多く発生する箇所の一つである^{1) 2)}. そのため, 鋼道路橋の疲労設計指針³⁾では横リブや横桁の垂直補剛材に対して

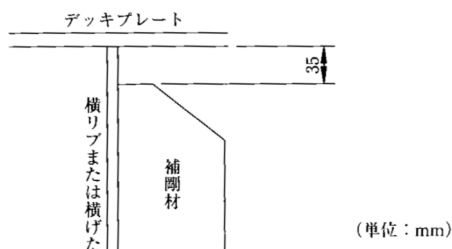


図-5.3.5 横リブまたは横げた垂直補剛材の取付け構造の標準

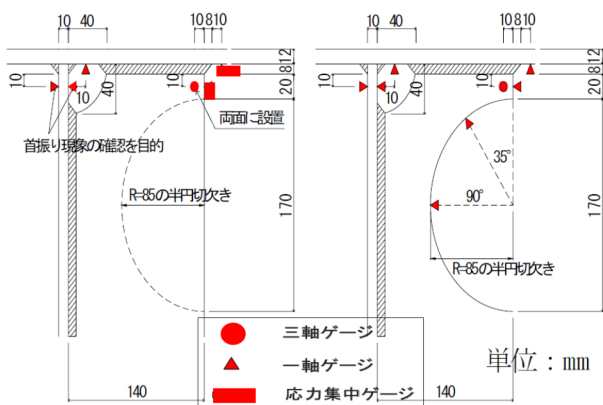
図-1 鋼道路橋の疲労設計指針の推奨構造³⁾

は, 上端をデッキに溶接しない構造が推奨されている (図-1). しかし, 補剛材上端のギャップにより鉛直方向の剛性が低下するほか, ギャップ部に面外変形が集中してウェブ側溶接止端部に疲労き裂が発生する可能性がある⁴⁾⁵⁾. そのため, 主桁の補剛材は対象外とされている. 既設鋼床版に対する対策としては, 補強部材を取付けたり⁶⁾⁷⁾, 溶接部の形状や残留応力を改善したりする手法が提案されている⁸⁾. 対策案の一つに半円切り欠き加工が提案されている⁹⁾¹⁰⁾. 図-2 に示す様に, 垂直補剛材の上端近傍に半円切り欠きを設けて溶接部の応力を低減させる手法である. 半円切り欠きが, 垂直補剛材上端溶接部に近いほど応力低減効果は高いが, 既設橋梁では施工機械の制限により近くまで寄ることが困難である. しかし, 新設であれば, 先に加工できるので, よりデッキに接近させて配置でき, より高い効果が期待できる.

半円切り欠きは垂直補剛材の断面を減少させ, 剛性の低下を伴う問題が残る. そこで, 断面欠損のない構造として, 近年の鋼製ラーメン橋脚隅角部の構造として取り

[†] 連絡著者 / Corresponding author

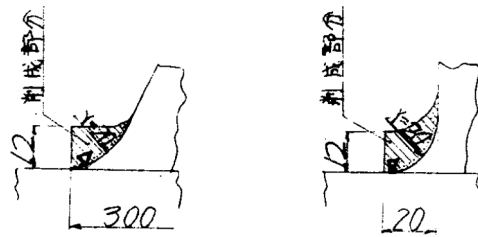
E-mail: tanabe.atsushi@nikken.jp



【半円切欠き施工前】 【半円切欠き施工後】

図-12 ひずみゲージ設置位置および半円の形状

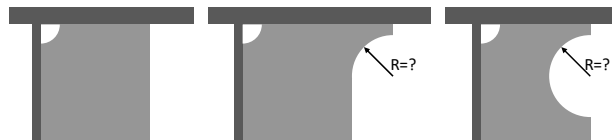
図-2 半円切り欠き構造⁹⁾



(a) 例1

(b) 例2

図-3 鋼鉄道橋のフランジガセット溶接端部構造



(a) 既設

(b) フィレット

(c) 半円切り欠き

図-4 補剛材上端形状の改良構造案

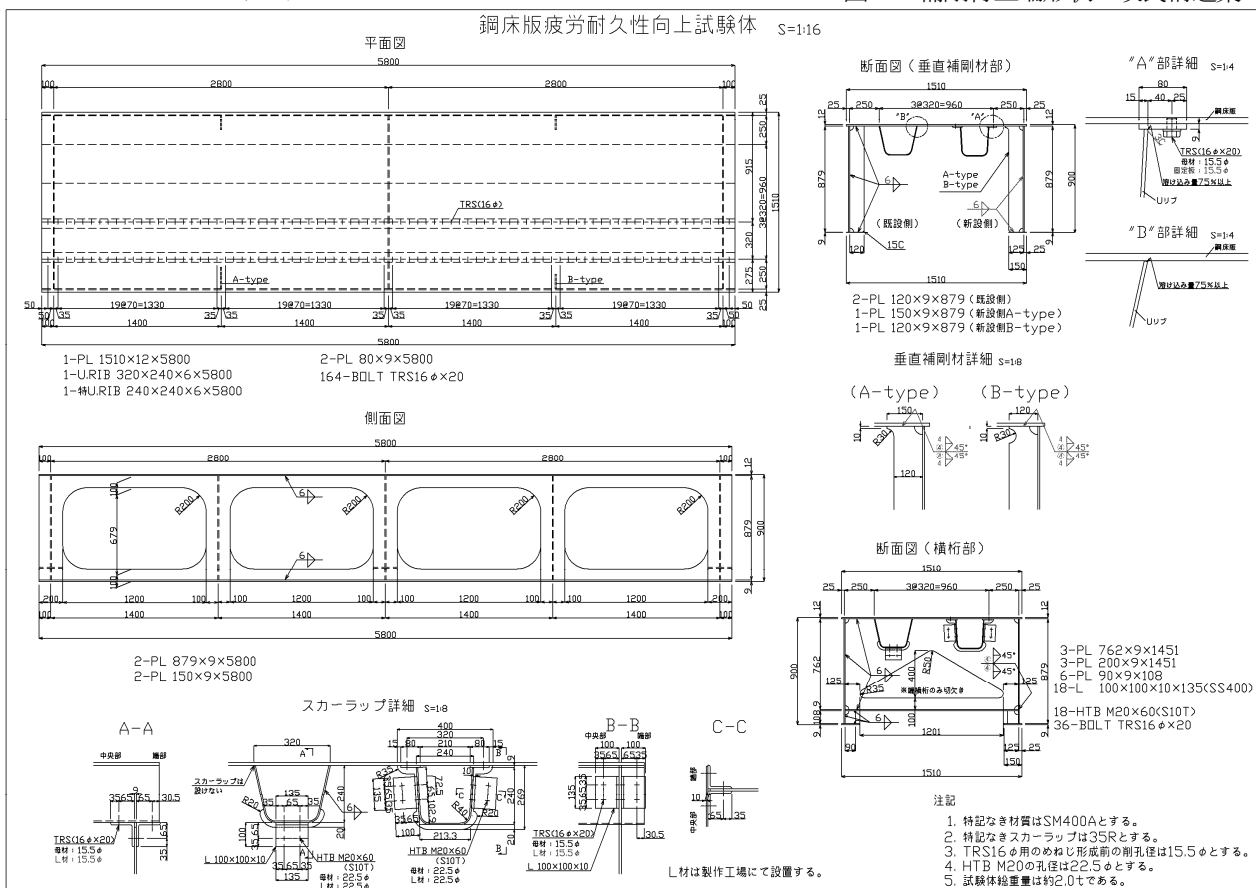


図-5 疲労試験体 一般図

入れているフィレット構造¹¹⁾¹⁴⁾や鋼鉄道橋のフランジガセット溶接部の構造¹⁵⁾(図-3)を参考に、垂直補剛材上端部にフィレットを設ければ、剛性の低下なしに発生応力度の低減が図れる可能性がある。

以上より、鋼床版の垂直補剛材上端の改良新設構造として、図-4に示すフィレット構造と半円切り欠き構造の2種類を対象に、FEM解析による検討とその結果を元に疲労試験体を製作して疲労試験を実施し、提案構造の疲労強度改善効果の確認を行った。

2. パラメータ解析検討

ここでは、改良構造とそのRをパラメータとして行った解析検討について示す。

2.1 解析条件

(1) 解析モデル

解析モデルは、疲労損傷が発生している実橋梁の寸法を再現した鋼床版試験体(図-5)を参考に作成した。この試験体においては、垂直補剛材の剛性を低下させるこ

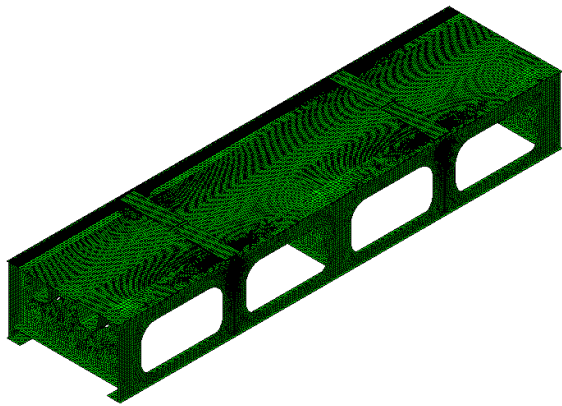
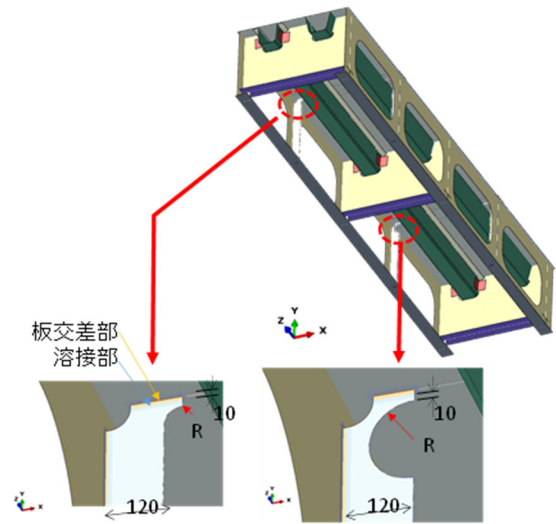
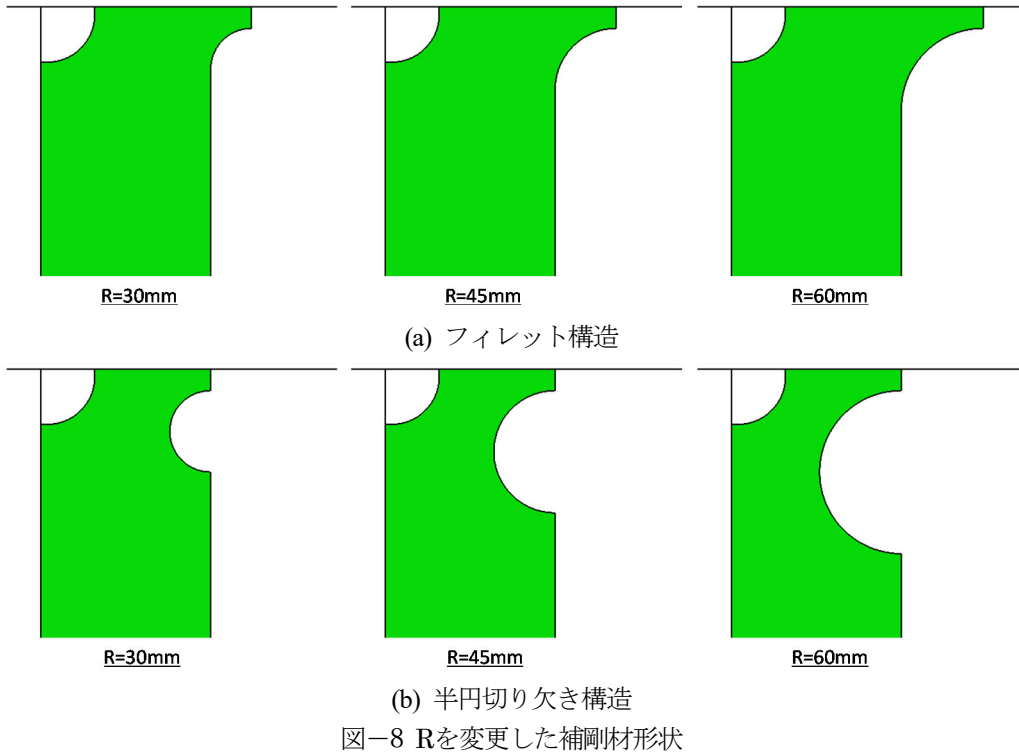


図-6 解析モデル



(a) 新設構造の詳細

図-7 改良構造のモデル化



(a) フィレット構造

(b) 半円切り欠き構造

図-8 Rを変更した補剛材形状

とにより発生応力を低減し、疲労耐久性を向上させることを目的としているため、垂直補剛材の板厚は設計基準の最低値である 9mm となっている。解析モデルの全体図を図-6に、改良構造のモデル化状況を図-7に示す。解析コードには Abaqus2018¹⁶⁾を用いた。鋼材のヤング率は 200GPa、ポアソン比は 0.3 とし、高サイクル疲労を対象とすることから弾性解析とした。

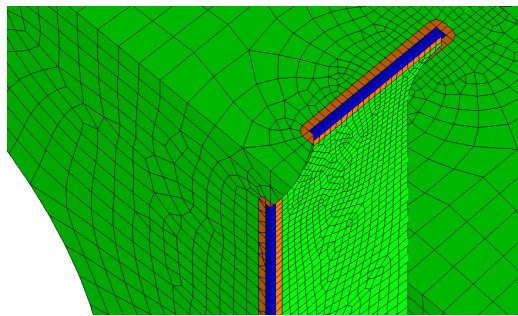
改良構造においては、溶接サイズを考慮して補剛材側の溶接止端から 10 mm の位置から R が始まる様にした。R の大きさについては、図-8に示す 30 mm, 45 mm, 60 mm(補剛材幅の半分)の 3 ケースを作成した。この部分のメッシュの一例を図-9に示す。メッシュサイズは R 部

の曲線を適切に表現できるサイズとなる様に、板厚の半分程度の約 5 mm とした。また、溶接部(図-9の橙色)および板交差部(図-9の青色)については、要素の板厚を変更することでモデル化を行った¹⁷⁾。溶接の脚長は開先形状より若干大きくなることやすみ肉溶接の利用も考慮し、すみ肉溶接の最小脚長である 6 mm でモデル化した。

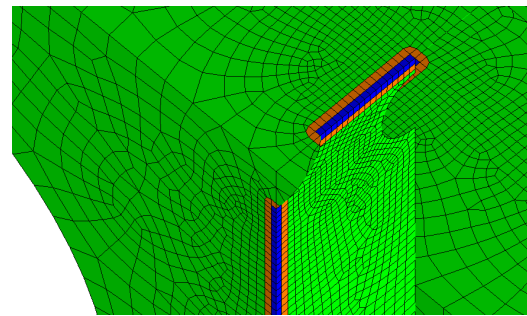
(2) 境界条件および荷重条件

解析モデルの境界条件を図-10に示す。試験時の状況を模擬し、主桁下フランジを完全に固定した。

荷重条件を図-11に示す。荷重条件は、疲労試験での荷重条件を考慮して、垂直補剛材上端に 50 kN の輪荷重



(a) A-Type フィレット



(b) B-Type 半円切り欠き

図-9 垂直補剛材上端部メッシュ (一例, R=30mm)

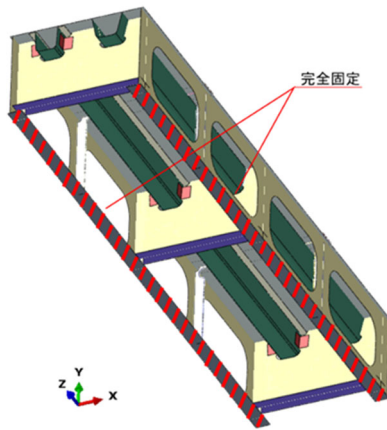


図-10 境界条件

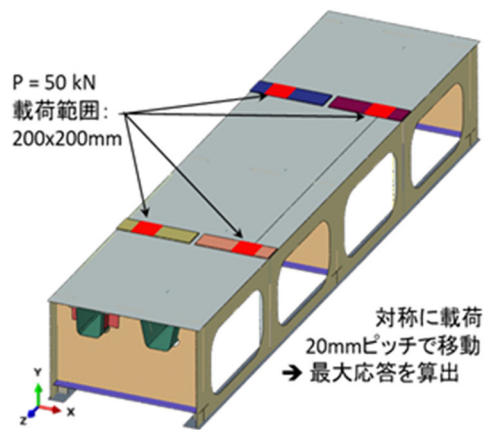


図-11 荷荷条件

を $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の範囲の等分布荷重 (1.25 N/mm^2) として設定した。ただし、着目部の応力に与える影響が大きい橋軸直角方向の荷荷位置が実橋においてはばらつくことを考慮し、荷荷位置を 20 mm ピッチで変化させて解析を行い、応答が最も厳しくなる結果を用いて評価することにした。

2.2 解析結果及び考察

(1) 結果評価位置 (着目位置)

垂直補剛材のミゼス応力分布の比較を図-12 に示す。応力集中は補剛材のコバの R 部とデッキの回し溶接部付近で発生しており、ミゼス応力が大きい領域は、R 部コバ面近傍や補剛材上端回し溶接部近傍など、狭い範囲に限定されていることがわかる。そこで、解析結果の評価においては、文献 9)等を参考に、応力が集中し、疲労上影響が大きいと考えられる以下の 2 か所に着目して比較し、評価を行った。これらの他に、スカーラップ部の溶接止端部とルートき裂を想定して溶接ビード要素についても評価したが、前者は発生応力度が明確に小さかったことから、後者はここの溶接を完全溶け込み溶接にすることで、対処できることから、評価の対象外とした。

1: 垂直補剛材コバ面 (接線方向成分応力) (図-13)

2: デッキ下面 垂直補剛材回し溶接止端 (橋軸直角方向成分応力) (図-14)

(2) コバ面応力の変化

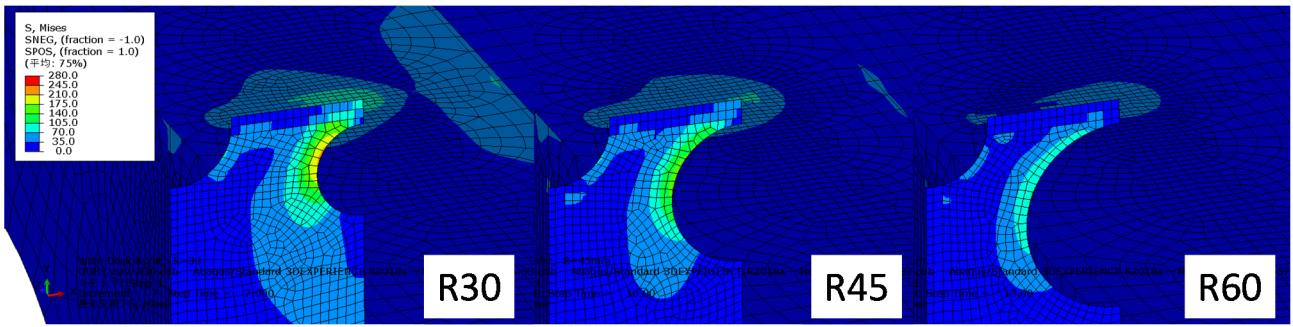
荷荷位置を移動させながら行った解析による、垂直補

剛材コバ面の最大及び最小の応力度と着目部位の座標の関係を図-15 に示す。既設構造に比べて、補強構造はおおむね小さい応答を示している。特にコバ面上端の溶接止端部の応力はほぼゼロになるまで低減できている。なお、半円切り欠きの底部の応力度は、既設構造の上端の応力度よりも大きくなっている。しかし、ここは母材部であり疲労強度は高いため、疲労損傷の原因とはなりにくいと考えられる。

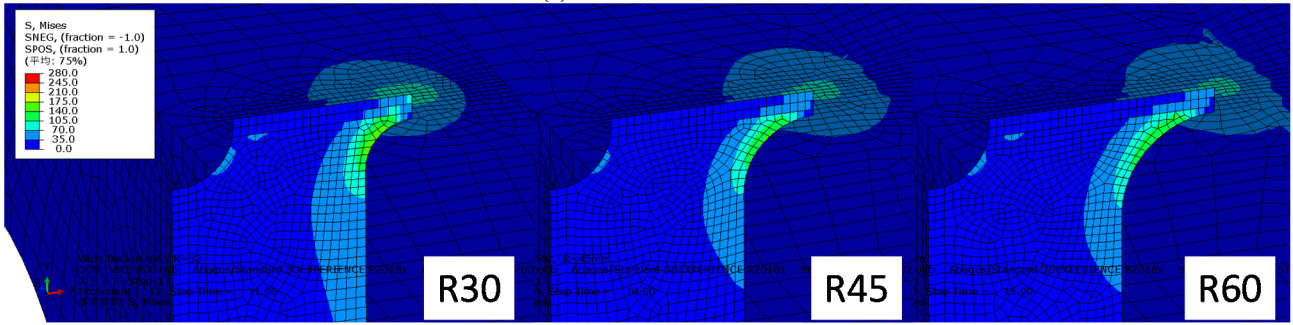
次に、コバ面の R 加工された母材部と上端溶接止端部に着目して検討する。それぞれの位置での最小応力度と加工半径 R の関係を図-16 に示す。補強構造について R を大きくした場合についてみると、半円切り欠きの底部の応力度はあまり変化しなかったが、フィレット構造の場合は R が大きくなるにつれて、R 部の最大応力度は低下する傾向にあった。この違いは、R 拡大に伴う垂直補剛材の残存断面積の変化と応力集中係数の変化の影響によるものと考えられる。すなわち、半円切り欠きでは、R が大きくなり応力集中係数が小さくなくても、残存断面積が減ることで公称応力が増加するため、両者の効果が打ち消しあうことにあり、最大応力の変化が小さかったものと考えられる。

(3) デッキ下面回し溶接応力の検討

デッキ下面回し溶接止端部の橋軸直角方向応力の影響線を図-17 に示す。図の横軸は補剛材コバを基準とした荷荷範囲の中心位置までの水平距離を表しており、以降荷荷位置と称す。また、図-17 を元に作成した、最大

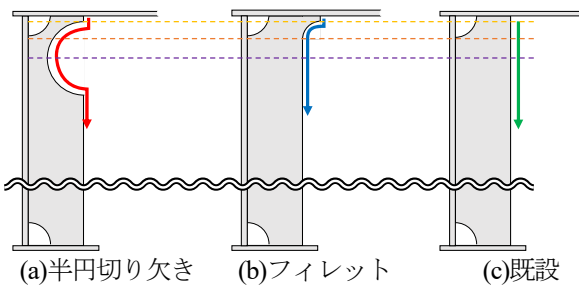


(a) フィレット構造



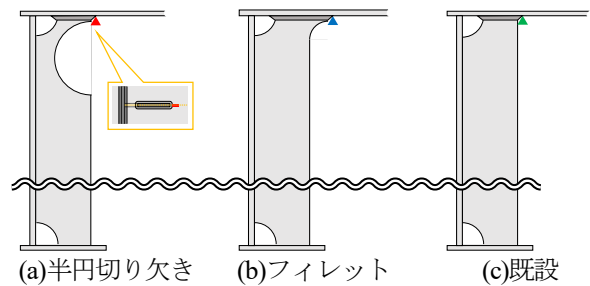
(b) 半円切り欠き構造

図-12 補剛材の応答値が最大となる荷重位置におけるミゼス応力分布 (コンター) の比較



(a)半円切り欠き (b)フィレット (c)既設

図-13 応力評価位置1：垂直補剛材コバ面



(a)半円切り欠き (b)フィレット (c)既設

図-14 応力評価位置2：デッキ下面

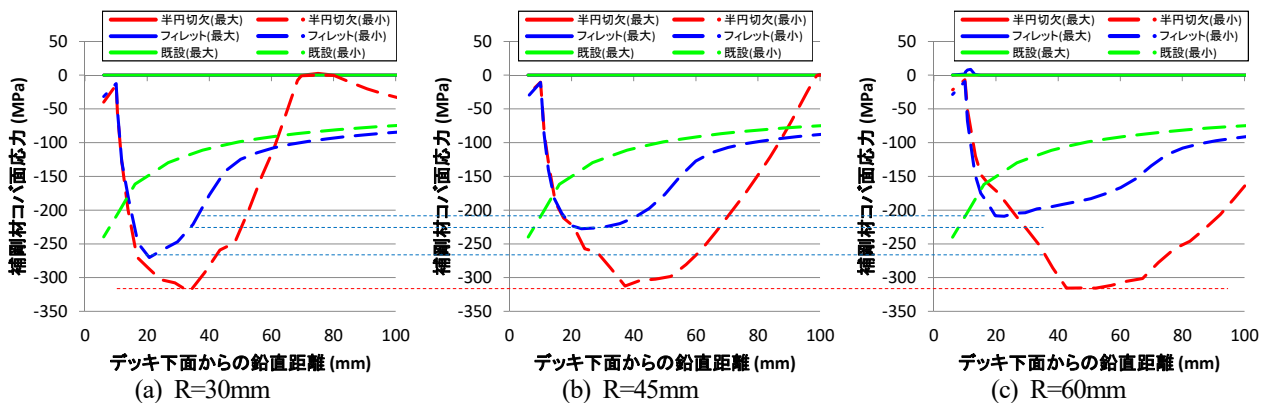


図-15 垂直補剛材コバ面の最大・最小応答値の分布

及び最小応力度と加工半径 R の関係を図-18 に示す。既設構造では荷重位置 180 mm で最小の応力度 -133.5 MPa が発生している。半円切り欠きでは R が大きくなるにつれて最小応力度を生じる荷重位置がだんだん離れていき、最小応力度も -86.3 MPa から -57.7 MPa へと大

きく (絶対値は小さく) なっていく傾向にある。本解析条件における最大応力度は荷重位置 0 mm の付近で発生し、 $R=30$ mm ではほぼゼロであるが、 R が大きくなるにつれて増加する傾向にあり、 $R=60$ mm では 52.2 MPa まで増加した。フィレット構造も同様に R が大きくなるに

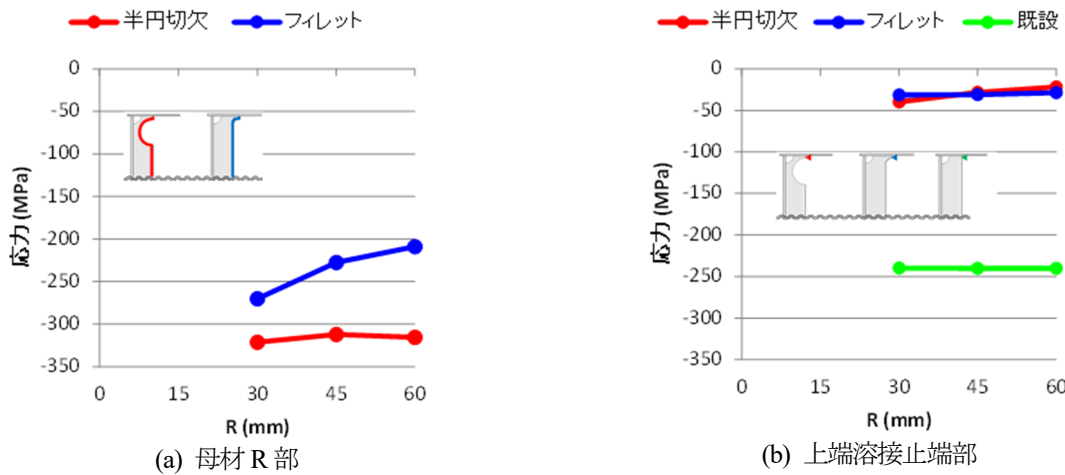


図-16 垂直補剛材コバ面の最小応力度とRの関係

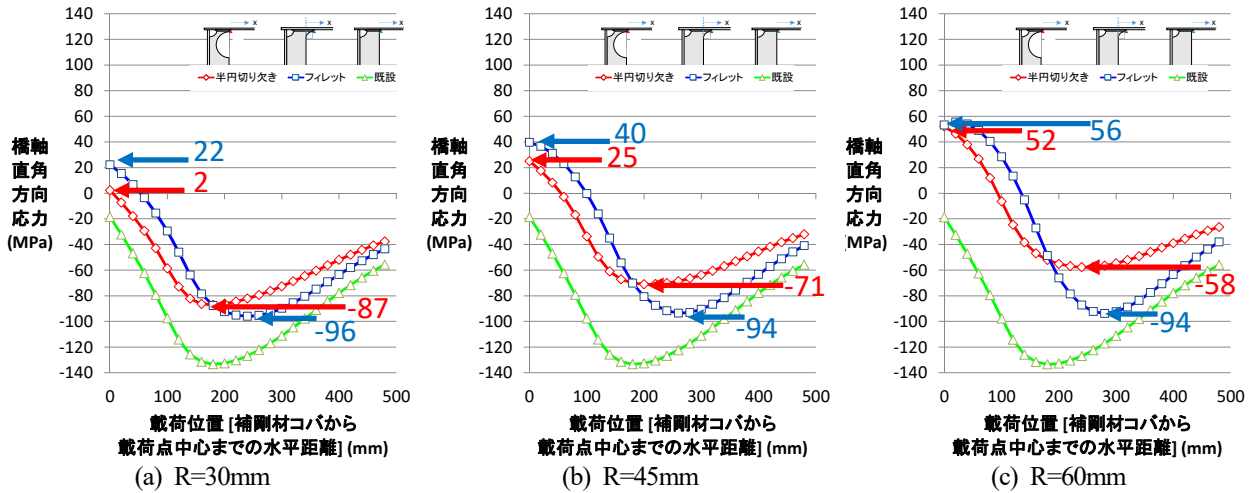


図-17 デッキ側溶接止端部の応力と荷重位置の関係の比較

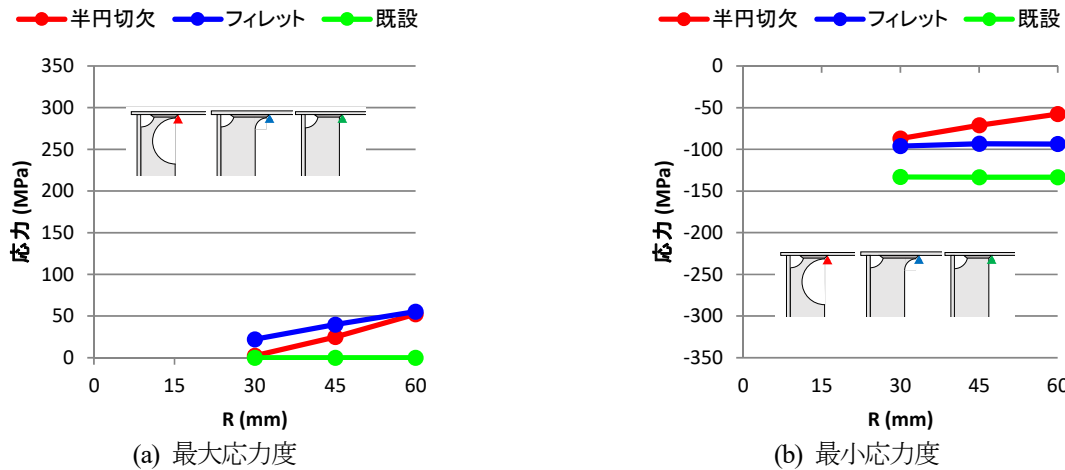


図-18 デッキ下面溶接止端部の最大・最小応力度とRの関係

つれて最小応力度を生じる荷重位置が離れるとともに、最小応力度も大きくなる傾向にあるが、最小応力度の変化はフィレット構造に比べるとわずか (-96.0 MPa → -93.8 MPa) であった。最大応力度は、R=30 mm でも 22.3 MPa ほど発生しており、R=60 mm になると 55.5 MPa まで増加した。また、R=60 mm では荷重位置 20 mm で最

大応力度が発生しており、他とは若干応答が異なっている。

以上より、デッキ下面回し溶接止端部については、フィレット構造よりも半円切り欠きのほうが応力低減効果は高いと考えられる。

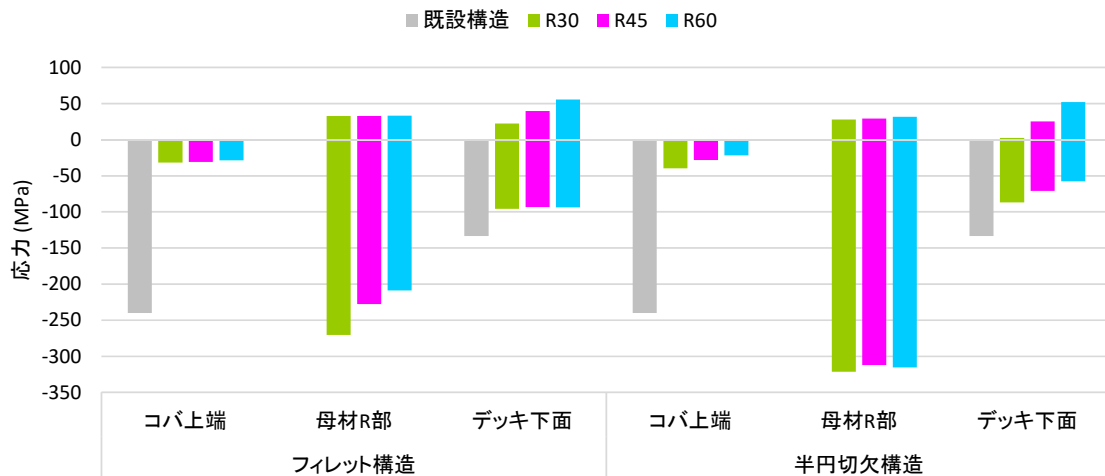


図-19 載荷位置のばらつきを考慮した場合の最大・最小応力度の比較

(4) R 寸法の検討

最大及び最小応力度について、補強構造とその R ごとに整理したものを図-19 に示す。図中の灰色は既設構造の場合の応答を示している。まず、既設構造で疲労損傷が多く発生しているコバ上端の圧縮応力度は、フィレット構造で 32 MPa、半円切り欠き構造で 40 MPa へと補強前の 240 MPa のそれぞれ約 1/8、1/6 へと大きく低減できている。次に、R 部について見ると、半円切り欠きでは圧縮応力度が R にかかわらず 300 MPa 以上と無補強時の 240 MPa に比べてかなり大きくなっている。一方、フィレット構造では圧縮応力度は 200~250 MPa と無補強と同程度にとどまった。この時、R が大きいほど圧縮応力は小さくなる。R 部は母材部なので、疲労上の問題は発生しづらいものの、半円切り欠き構造の様に圧縮応力度が大きいと、鋼材の降伏によるひずみの増加と応力増分の再配分による別の箇所での応力増加などの悪影響が懸念される。最後にデッキ下面回し溶接止端部について見ると、フィレット構造では R が変化しても圧縮応力度はほとんど変化しないが、半円切り欠き構造では、R が大きくなるにつれて圧縮応力度が小さくなった。引張応力度については、両構造とともに R が大きくなるにつれて大きくなる結果となった。R 部に比べて溶接部の疲労強度は低いことや、デッキ側へのき裂発生・進展は避けるべきであると考えられるので、加工半径 R は 30 mm とするのが良いと考えられる。

2.3 解析検討まとめ

フィレット構造と半円切り欠き構造について、R をパラメータとした検討により、以下の結果が得られた。

- 1) 補剛材上端の補剛材側溶接止端部の応力に対して、両構造ともに高い低減効果を有し、補強前の 1/6~1/8 に低減できる。
- 2) 補剛材上端回し溶接部のデッキ側止端部の応力は、載荷位置の変動を考えると、R が大きくなるほど最大の引張応力度が大きくなる。

3) 母材 R 部に生じる圧縮応力はフィレット構造では R が大きくなるほど明確に低下する (270 MPa ⇒ 228 MPa ⇒ 209 MPa)。半円切り欠き構造でも R を大きくすることで圧縮応力は 321 MPa から 316 MPa へと低減するが、低減量は少ない。また、全体的に半円切り欠き構造のほうが発生応力は高い。これらは、半円切り欠き構造を設けることで残存断面が減少することが影響したものと考えられる。

以上より、改良構造では R 部に高い圧縮応力が生じるものの、その位置は母材部であり疲労損傷が生じるリスクは低いことから、デッキ側溶接止端部に生じる引張応力の影響に主に着目すると、両構造ともに半径 R は 30 mm が適切と考えられる。よって、R=30 mm で疲労試験体を製作し、疲労試験によりその改善効果について検証する。

3. 疲労試験による効果の確認

3.1 試験条件

(1) 疲労試験体

試験体の寸法と形状、載荷位置を図-20 に、試験体製作に使用した鋼材を表-1 に、新設構造の補剛材上端部の詳細を図-21 に示す。試験体は U リブ 2 本、横リブ 3 本、主桁 2 本を有する実物大試験体である。U リブのうち 1 本はデッキと U リブの間の疲労損傷対策のため特殊な構造をしているが、既往の U リブと同等の断面剛性となる様に設計されており、過去の検討において、着目部である補剛材上端部への影響はほとんど無いことが確認されている¹⁹⁾。試験部は、A 断面と B 断面の計 2 ヶ所とした。A-A 断面の新設補剛材上端部はフィレット構造となっており、B-B 断面の新設補剛材上端部は半円切り欠き構造となっている。両者ともにレーザー切断 (NC) により切り出したままとなっているが、R 部に傷等は見られず、コバ面の粗度にも違いは見られなかった。溶接ルート部からのき裂発生を防止するため、補剛材上端の

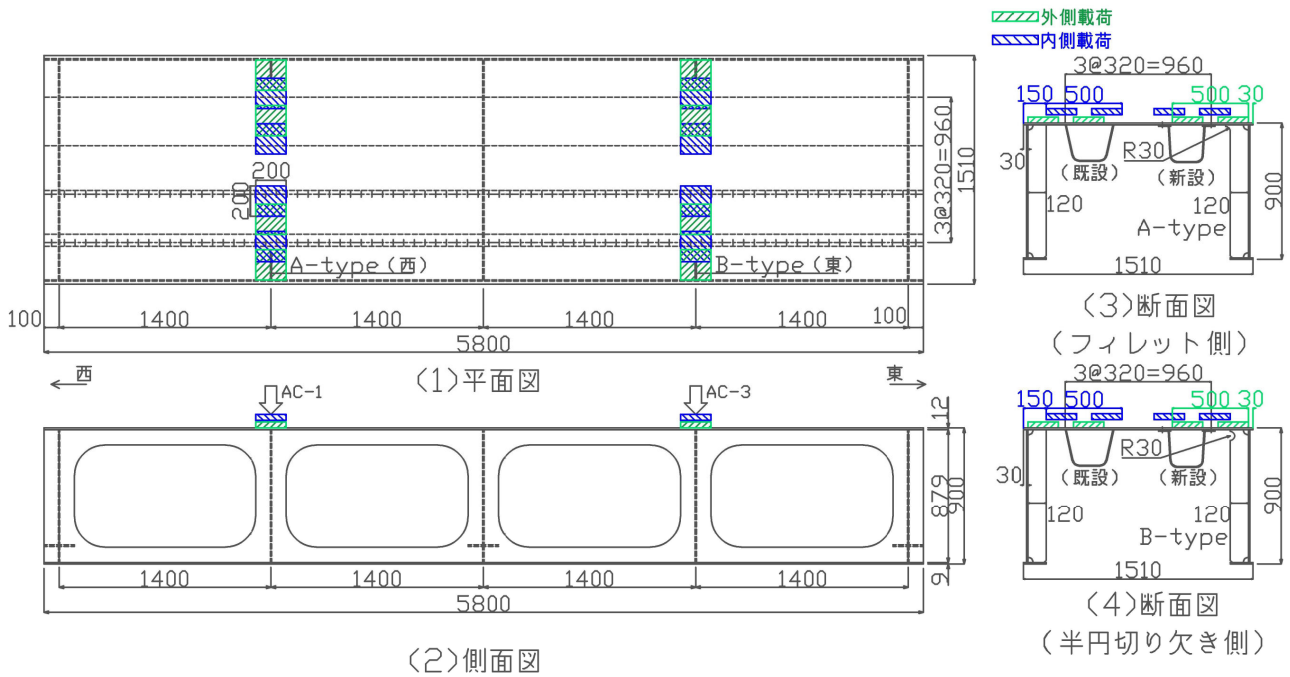


図-20 試験体の載荷位置

表-1 疲労試験体の使用材料

部材	材質	板厚 (mm)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)
デッキ	SM400A	12	319	430	27
Uリブ		6	333	467	30
垂直補剛材		9	332	459	29
横リブ		9	325	458	30
下フランジ		9	332	459	29
ウェブ		9	332	459	29
				(≧245)	(400 ~510)

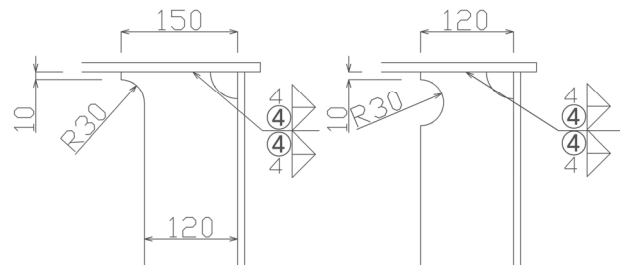
溶接はすみ肉溶接ではなく、開先溶接とした。溶接は有資格者によるCO₂半自動溶接とし、回転治具等を用いて可能な限り下向きまたは水平姿勢で行った。

(2) ひずみ計測位置

図-23 にひずみゲージ貼り付け位置を示す。デッキ下面には溶接止端から水平に5mmの位置に貼付されている。補剛材コバ面には、解析で最大応力が発生するとされる位置（フィレット構造はデッキ下面から21mm、半円切り欠き構造はデッキ下面から33mm）に貼付した。ゲージはゲージ長1mmの1軸ひずみゲージを貼付した。き裂の発生と進展は、ひずみゲージにより推定し、磁粉探傷試験（MT）により確認した。

(3) 載荷条件

図-22 に試験体のセットアップ状況を載荷位置毎に示す。載荷にはダブルタイヤ2組を模擬したゴム板（200mm×200mm×40mm）を4枚使い、図-20に示すように外側載荷と内側載荷の2ケースで静的載荷試験を行った。この載荷位置はダブルタイヤで考えた際に応力が最大となると考えられる値を図-17(a)に示す解析結果より求めて切りの良い値に丸めた位置とした。具体的には、それぞれ補剛材コバを起点として、外側載荷が20mmと280mm、内側載荷が100mmと400mmの位置となる。



(a) フィレット構造

(b) 半円切り欠き構造

図-21 新設用補剛材上端部の詳細

なお、載荷点間距離があまり離れていないことから、その影響度合いについて推定したところ1割程度であった。

疲労試験は、後述する検討の結果より内側載荷で行った。載荷は2つのアクチュエータ（図-20中のAC-1およびAC-3）を用いて位相を180度ずらして行った。荷重範囲は阪神高速の湾岸線で24時間に計測された最大軸重¹⁸⁾である260kN（最小荷重20kN）とした。繰り返し速度は2~3Hzである。



(a) 外側載荷



(b) 内側載荷

図-22 疲労試験体の載荷状況

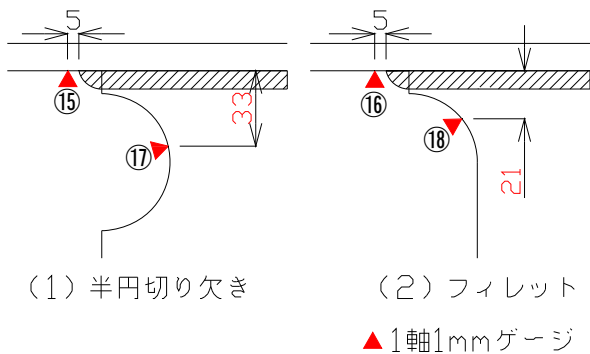


図-23 ゲージ貼り付け位置

3.2 静的載荷試験結果

(1) 疲労試験載荷位置の検討

図-24 に新設構造の各載荷位置の静的載荷試験結果を示す。処女載荷ではなく、2~3回繰り返して載荷し、安定した時の結果を用いている。静的載荷では同等の3つの載荷位置でのひずみ変化を比較するとフィレット構造のデッキ下面以外に内側載荷で最大のひずみ変化が計測された。このことから、内側載荷で疲労試験を行うこととした。なお、過去の検討⁹⁾により、ウェブの外側へ載荷した場合に、内側の補剛材上端部には大きな応力が生じないこともわかっている。

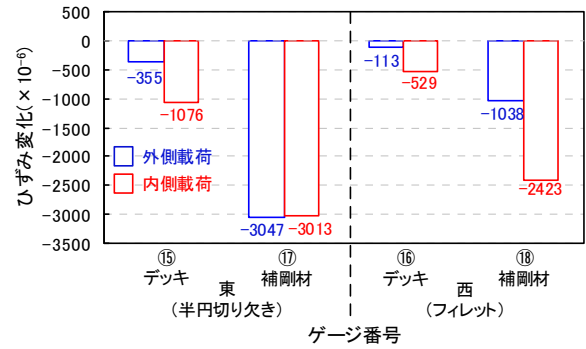


図-24 各載荷位置のひずみ変化の比較 (N=0万回, ΔP=260kN)

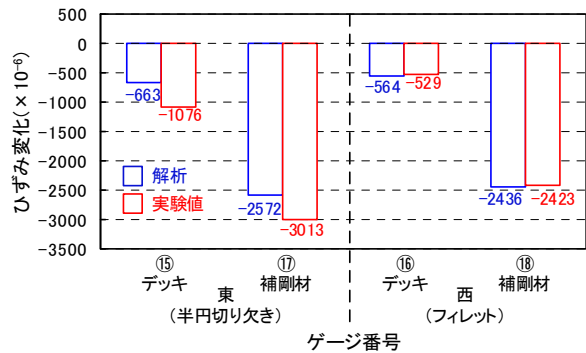


図-25 解析と実験値の比較 (ΔP=260kN)

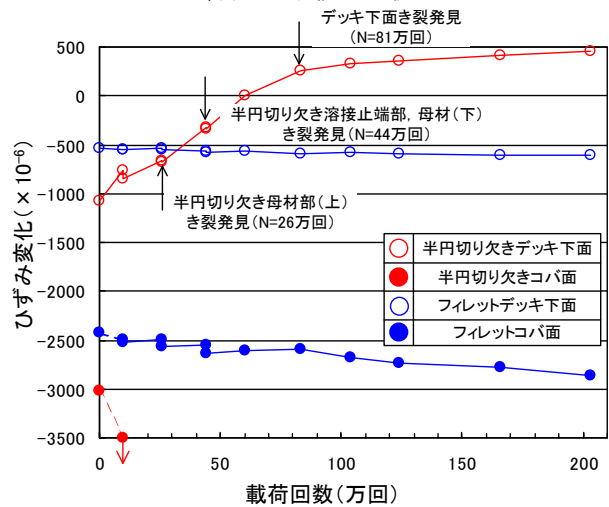


図-26 疲労試験中の新設構造のひずみ変化

(2) 解析結果との比較

図-25 に解析と実験のひずみの比較を示す。解析のひずみは、解析による影響線を用いて実験の荷重条件にあわせて算出した。

フィレット構造では解析値に比べて、デッキは94%、補剛材では99%のひずみ値となっているのに対し、半円切り欠き構造ではデッキで162%、補剛材で117%と解析よりも大きなひずみが計測された。半円切り欠き構造ではひずみがミルシートによる降伏強度 332 MPa から換算した降伏ひずみ 1660×10^{-6} の2倍近くにまで達しており、補剛材上端を溶接した際に溶接ビードが収縮し、

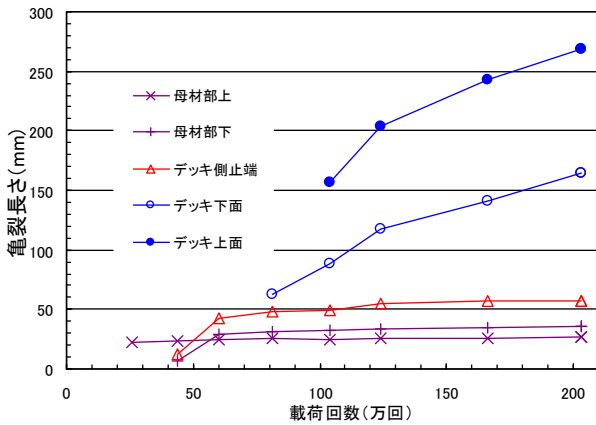


図-27 疲労試験中のき裂長さの変化 (半円切り欠き構造)

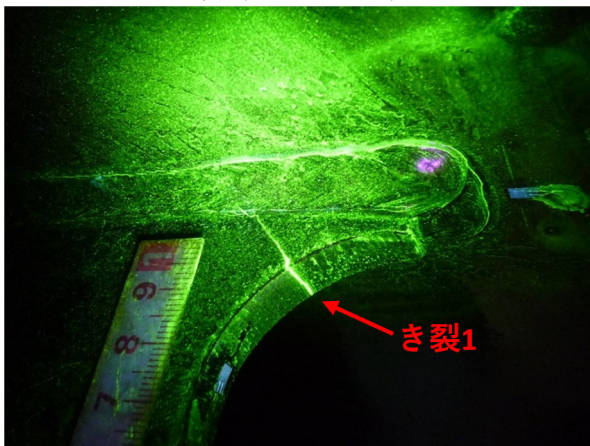


図-28 半円切り欠き構造母材R部に発生したき裂 (N=26万回時)

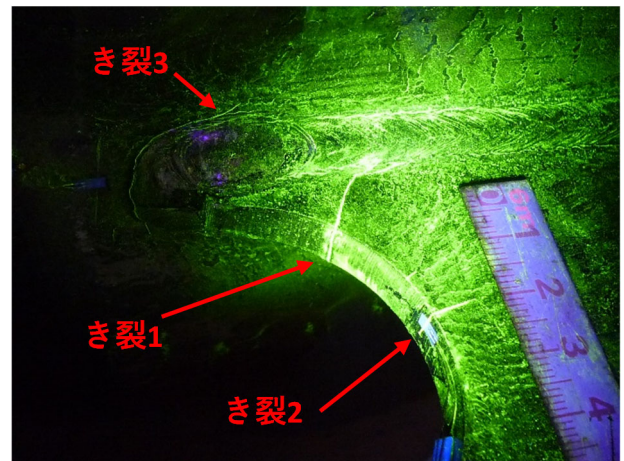
補剛材上端部がデッキ側に引っ張られて半円切り欠きが開口することにより導入される引張残留応力の影響を考慮したとしても、塑性変形によりひずみが増加した可能性がある。また、この補剛材 R 部の塑性変形の影響でデッキの変形 (たわみ量) が大きくなり、デッキのひずみも解析より大きくなったものと考えられる。

フィレットについても、降伏ひずみの 1.5 倍程度のひずみが発生しているが、半円切り欠きほどではない。また同様に上端溶接部の収縮の影響を受けると考えられるが、半円切り欠きに比べて補剛材の残存断面が大きいことにより導入される引張残留応力度も小さくなったことで、き裂が発生しなかったと想定される。

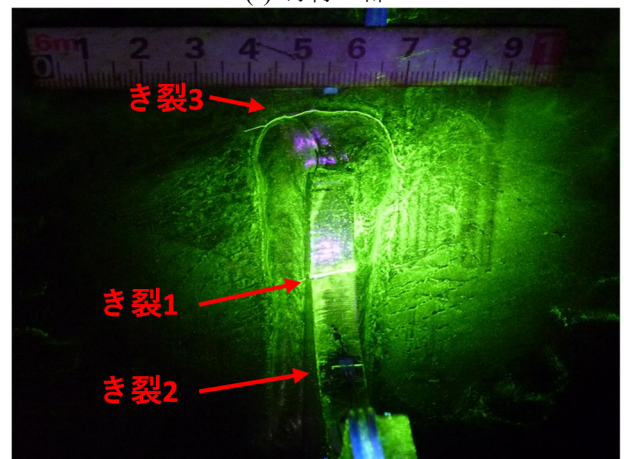
3.3 疲労試験結果

図-26 に疲労試験中のひずみ変化、図-27 に疲労試験中のき裂長さ、図-28 から図-31 にき裂の発生・進展状況を示す。

半円切り欠き構造のひずみ変化は、疲労試験開始直後から大きく変化しており、補剛材コバ面に貼付したゲージは N=10 万回時点で計測不能となった。その後、N=26 万回で補剛材母材部のデッキ下面から 15 mm の位置からき裂が発生し、溶接部まで進展している状況で発見さ



(a) 母材 R 部



(b) 回し溶接止端部

図-29 半円切り欠き構造に新たに発生したき裂 (N=44万回時)

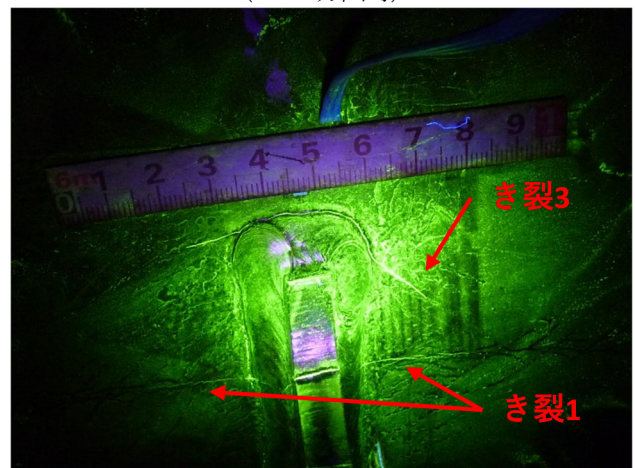


図-30 R部からデッキ進展したき裂 (N=81万回時)

れた (図-28 のき裂 1)。このき裂は、解析での最大応力発生箇所とデッキ下面の中間で発生したが、この原因として、新設構造は鋼板を切り欠いてからデッキに溶接して製作したため、補剛材上端部に近い位置には大きな引張残留応力が導入されたことが推定され、それが影響したものと考えられる。この引張残留応力の影響で、き裂発生位置が解析の最大応力発生位置と一致しなかった

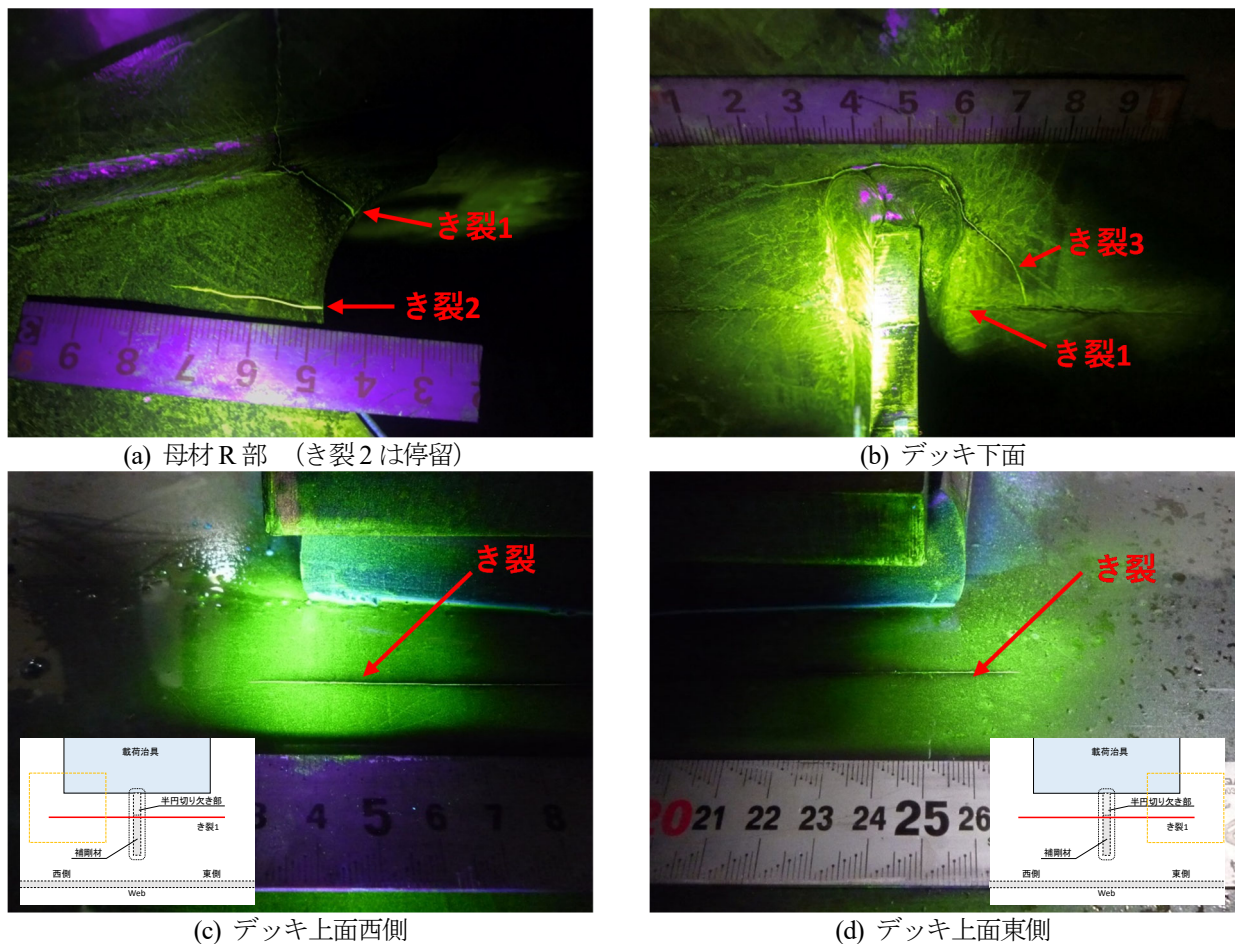


図-31 試験終了時 (N=203万回) の半円切り欠き構造のき裂状況

と想定される。

その後、N=44 万回に、補剛材コバ面のひずみゲージ貼り付け位置 (FEM での最大応力発生位置) とデッキ側溶接止端部からき裂が発生しているのが確認された (図-29 のき裂2 及びき裂3)。

N=81 万回でき裂1 がデッキ下面にまで進展しているのが確認された。N=104 万回にはデッキ上面にき裂が貫通していることが確認され、試験終局的にはデッキ上面のき裂長は 270 mm まで達した (図-31(c),(d))。このデッキ上面で確認されたき裂は、位置的に、き裂1 が進展してデッキを貫通したものであると判断された。一方、R の底部で発生したき裂2 は、圧縮応力が作用する部分であるため、き裂は途中で進展しなくなり、停留した。き裂先端が引張残留応力の影響範囲から出たためと考えられる。

半円切り欠き構造は、既設の場合には、残留応力が入った状態で切り欠くために残留応力が減少するのに対し、新設の場合には、引張残留応力が入ったままとなり、かつ断面が減少しているので残留応力の影響が厳しくなったものと考えられる。

一方、フィレット構造は疲労試験終了時の N=203 万回まで大きなひずみ変化は見られず、き裂の発生も確認されなかった。

過去に筆者らが実施した既設構造の垂直補剛材の疲労試験結果¹⁹⁾では、同様の試験体かつ載荷位置で、同じ荷重範囲 ($\Delta P=260$ kN) に対して 160 万回載荷時に回し溶接部のデッキ側止端部に疲労き裂が発生している。これと比較すると、半円切り欠き構造では疲労耐久性は低下したが、フィレット構造では疲労耐久性が向上したことがわかる。

したがって、フィレット構造は半円切り欠きの 7.8 倍 (=203 万回/26 万回) 以上の寿命を有しており、十分な疲労耐久性があり、製作における問題も発生しなかったことがわかる。

4. 結論

本研究では、新設鋼床版の垂直補剛材上端溶接部に着目し、疲労耐久性の高い構造として、フィレット構造と半円切り欠き構造を考え、FEM パラメータ解析により適切な半径 R を決定して試験体を作成し、その疲労試験により改善効果について確認を行った。その結果、以下の知見を得ることができた。

- 1) フィレット構造は、デッキとの溶接部に生じる応力の低減効果により、高い疲労耐久性を有する。FEM 解析では上端溶接止端部の応力を元の 1/8 と

大きく低減できている。R部の応力についても、解析でも静的載荷試験でも半円切り欠き構造に比べて小さい。

2) 半円切り欠き構造は、FEM解析では溶接止端部の応力は1/6に低減でき、この部分からの疲労き裂発生は抑制できたものの、R部でN=26万回時と早期に疲労き裂が発生する結果となり、疲労耐久性の改善には至らなかった。R部にはFEM解析でも降伏強度に近い応力が発生しており、静的載荷試験ではさらに高いひずみが計測されたことから、局部的に降伏し塑性変形が生じていた可能性がある。半円切り欠き構造では垂直補剛材に断面欠損が生じるため、発生応力度が全体的に高くなったものと考えられる。また、FEM解析で応力がピークとなった位置よりもデッキに近い位置で疲労き裂が発生しており、R加工を行った後にデッキに溶接するという工程から、R部のデッキ近傍に大きな引張残留応力が発生していたと考えられ、これが疲労強度を低下させた要因の一つであると考えられる。

3) FEMパラメータ解析の結果より、両改良構造とも、半径Rを30mmから45mm、60mmへと大きくすると、デッキ側回し溶接止端部に生じる引張応力度が大きくなった。一方、今回検討した中で最もRの小さいR=30mmであっても、補剛材側溶接止端部の応力は十分に低減できていたことから、R=30mmが最も適切であると考えられる。

以上より、疲労耐久性の高い新設鋼床版の垂直補剛材上端構造としてフィレット構造を用いるのが良いと考えられるため、ここに提案する。フィレットのRについては、本研究で検討した条件下では、R=30mmが最も良い結果となったが、最適値についてはデッキ厚や垂直補剛材の断面等による影響を受けると考えられる為、今後の課題である。

謝辞

本研究は近畿地方整備局新都市社会技術融合創造研究会「鋼床版の疲労強度向上に関する研究」プロジェクト²⁰⁾の一環として実施されました。ここに記して関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼橋の疲労，1997.
- 2) 鋼構造委員会鋼床版の疲労改訂小委員会編：鋼床版の疲労[2010年改訂版]，土木学会，2010.
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002.
- 4) 南荘淳，吉原聡，時讓太，石井博典，坂野昌弘：鋼床版箱桁全体を対象とした応力性状の把握と疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol. 49A，pp. 773-780，2003.
- 5) 内田大介，齊藤史朗，井口進，村越潤：鋼床版垂直補剛材溶接部の局部応力に関する解析的検討，構造工学

論文集，Vol. 66A，pp. 562-575，2020.

- 6) 森野真之，福永昭彦，坂野昌弘：鋼桁橋垂直補剛材上端部の疲労損傷対策に関する一提案，鋼構造年次論文報告集，Vol.18，pp. 519-524，2010.
- 7) 穴見健吾，竹淵敏郎，米山徹，長坂康史，木ノ本剛：支圧接合用高力ボルトを用いた鋼床版垂直補剛材上端の当て板補修，構造工学論文集，Vol. 65A，pp. 533-543，2019.
- 8) 松本理佐，石川敏之，塚本成昭，栗津裕太，河野広隆：鋼床版の垂直補剛材溶接部のき裂を対象とした各種補強法の効果の比較に関する研究，土木学会論文集A1，Vol.72，No-1，pp.192-205，2016.
- 9) 高田佳彦，川上順子，酒井優二，坂野昌弘：半円切欠きを用いた既設鋼床版橋主桁垂直補剛材上端溶接部の疲労対策，鋼構造論文集，Vol.16，No. 62，pp. 35-46，2009.
- 10) 川村勝，高田佳彦，流田寛之，坂野昌弘，嘉指敦：デッキプレートと垂直補剛材溶接部の予防保全対策，土木学会第60回年次学術講演会，1-401，2005.
- 11) 田辺篤史，三木千壽，市川篤司，佐々木栄一，下里哲弘：既設箱断面鋼製ラーメン橋脚隅角部のリブ取付による疲労強度向上，土木学会論文集，No. 773(I-69)，pp. 137-149，2004.
- 12) 時田英夫，溝口孝夫，町田文孝，澁谷敦，宮森雅之，清川昇悟：新設鋼製橋脚隅角部におけるフィレット構造の応力低減効果(その1)，土木学会第58回年次学術講演会，I-424，2003.
- 13) 清川昇悟，並川賢治，溝口孝夫，町田文孝，澁谷敦：新設鋼製橋脚隅角部におけるフィレット構造の応力低減効果(その2)，土木学会第58回年次学術講演会，I-425，2003.
- 14) 溝口孝夫，並川賢治，町田文孝，澁谷敦，宮森雅之：新設鋼製橋脚隅角部におけるフィレット構造の応力低減効果(その3)，土木学会第58回年次学術講演会，I-426，2003.
- 15) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説鋼・合成構造物，丸善，2009.
- 16) Dassault Systèmes: Abaqus 2018 Analysis User's Guide, 2018.
- 17) Matoba, M., Machida, S., Yoshinari, H. and Nishimura, R: Definition of Hot Spot Stress in Welded Plate Type Structure for Fatigue Assessment Part 2 3rd Report-Derivation of Hot Spot Stress by Finite Element Analysis. IIW 13-1448, 1992.
- 18) 阪神高速道路：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策(三訂版)，2012.
- 19) 坂本千洋・小西日出幸・奥村信太郎・坂野昌弘：Uリブ鋼床版垂直補剛材上端部に対する下面からの疲労対策，鋼構造年次論文報告集，Vol.27，pp. 815-823，2019.
- 20) 坂野昌弘：鋼床版の疲労耐久性向上に関する研究プロジェクト(その3)，第75回年次学術講演会，CS3-1，

2020.

(2020年9月15日受付)

(2021年2月1日受理)