

鋼床版デッキプレートと垂直補剛材溶接部の疲労き裂 に対する予防保全工法の効果検証

阪神高速道路(株)管理本部管理企画部保全技術課 高田 耕庸
阪神高速道路(株)管理本部大阪保全部改築・更新事業課 森 謙吾
(一財)阪神高速先進技術研究所調査研究部 山本 修嗣

要 旨

阪神高速の鋼床版では疲労損傷が多数報告されており、その中でもデッキプレート（以下、デッキ）と主桁ウェブの垂直補剛材上端とのすみ肉溶接部に発生するき裂（以下、タイプ③き裂）は、鋼床版に発生するき裂全体の約 3 割に及んでいる。デッキに発生したタイプ③き裂は、板厚方向に進展・貫通することでデッキの変形を増大させ、舗装の損傷を誘発し車両の走行安全性に影響を与える恐れがあるため、予防保全の考えに基づいた対策を実施することが望ましいとされている。阪神高速のタイプ③き裂に対する予防保全対策では、損傷が発生している径間の垂直補剛材に半円孔を設置し、デッキの変形拘束を緩和することで溶接部の応力を低減させる工法がこれまで採用されており、溶接止端部への圧縮残留応力の導入により疲労強度を改善させるピーニング処理による工法も提案されている。一方で、半円切欠き工法については、溶接部の応力集中の低減効果は確認されているが、疲労寿命の向上効果に着目した検討は十分にされておらず、半円孔の位置による影響やピーニングとの比較についても明らかになっていない。そこで本検討では、垂直補剛材と鋼床版デッキを模擬した試験体の板曲げ疲労試験（以下、疲労試験）を行い、各工法の疲労寿命の向上効果を検証した。また、疲労試験の結果を解析的に分析し、半円切欠き工法による応力低減効果の影響要因を検証した。

キーワード: 鋼床版, 疲労き裂, 垂直補剛材, 半円切欠き, ピーニング

はじめに

阪神高速では多くの橋梁で鋼床版が採用されており、その多くが重交通路線に位置することから鋼構造物の損傷全体の約 4 割を鋼床版の疲労き裂が占めている。これらのき裂のうち図-1 に示すようなデッキと主桁ウェブの垂直補剛材上端とのすみ肉溶接部（以下、溶接部）に発生するき裂は、鋼床版に発生するき裂全体の約 3 割に及んでいる。この溶接部のき裂はデッキに直接発生するため、

デッキの板厚方向に進展、貫通することでデッキ

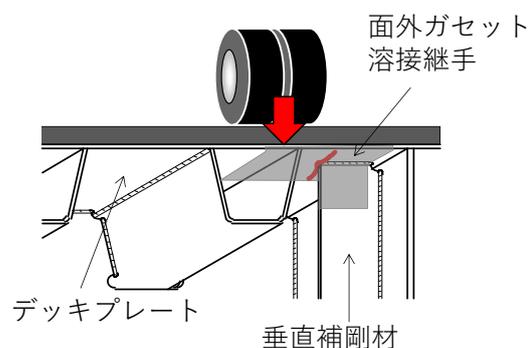


図-1 タイプ③き裂

の変形を増大させる場合がある。これにより、舗装の損傷を誘発し車両の走行安全性に影響を与える恐れがあるため、早急な対策が必要となっている。一方で、垂直補剛材は主桁ウェブに一定間隔で取り付けられていることから、損傷未発生の場合についても損傷発生箇所と同程度の損傷リスクを有していると考えられるため、損傷が発生している径間の垂直補剛材に対して予防保全対策を実施することが望ましいとされている。

阪神高速のタイプ③き裂に対する予防保全対策では、損傷が発生している径間の垂直補剛材に対して垂直補剛材上部に半円孔を設置し、デッキの変形拘束を緩和することで溶接部の応力を低減させる工法（以下、半円切欠き工法）がこれまで採用されている。半円切欠き工法では半円の径を大きくするほど溶接部の応力を低減できることがFEMを用いた解析的検討で確認されている¹⁾。また、垂直補剛材の幅の半分を切欠き径とした場合には溶接部の応力が半円孔設置前に比べ大きく低減されることが鋼床版モデルを用いたFEMによる解析的検討および実験供試体への静的载荷試験の結果から確認されている²⁾。一方で、疲労試験での検討では半円切欠きの設置位置によって疲労寿命に差が出ることを確認されており、既往検討²⁾や阪神高速での実績である半円孔がデッキから20mm離れた場合には、応力の低減効果が見られなかったことが報告されている³⁾。これらより、半円切欠き工法では応力の低減効果は確認されているが疲労寿命の向上効果や半円孔の設置位置による影響については十分検討されていない。

また、JSSCの疲労設計指針においては疲労強度の改善方法として、溶接止端形状を改善する方法と残留応力を改善する方法があるとされている⁴⁾。これらのうち、残留応力を改善する方法の一つとしてハンマーピーニングや超音波ピーニング(UIT)、エアード式ニードルピーニング(PPP)などの溶接止端のピーニング処理による方法があり、高い疲労強度改善効果が確認されている⁵⁾⁸⁾。ピーニングによる方法は適切に施工が実施されれば既設部材を欠損させることなく疲労強度を改善で

きるため、より良い工法となる可能性があるが、半円切欠き工法と横並びで疲労試験が実施された事例はなく、疲労寿命の向上効果の比較は同一条件で実施できていない。

そこで本検討では、既往検討で十分検討されていない半円切欠き工法の疲労寿命向上効果をピーニング工法と比較したうえで確認することを目的として、垂直補剛材が鋼床版デッキに溶接された部位を模擬した試験体の疲労試験を実施した。また、試験結果を解析的に分析することで、疲労試験の境界条件が既往検討²⁾で確認されている半円切欠き工法の応力低減効果に与える影響を検証した。

1. 実験的検討

1-1 試験体概要

試験体形状を図-2に示す。試験体はデッキを模擬した700×200×12mmの主板に垂直補剛材を模擬した340×200×12mmのプレートをまわし溶接した面外ガセット溶接継手の試験

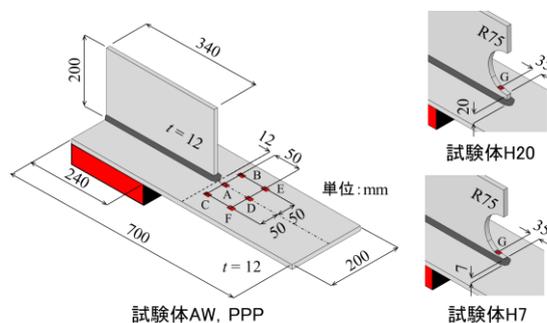


図-2 試験体形状

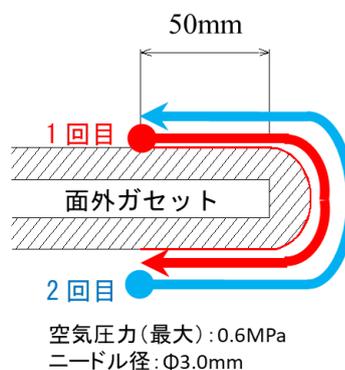


図-3 PPP処理範囲

体であり，溶接は半自動 CO₂ ガスシールドアーク溶接（溶接材料 MX-Z200[JIS 規格：Z3313 T49J0 T1-0 C A-U]）とし，溶接電流 215 A，溶接電圧 31.5 V，溶接速度 350 mm/min で実施した．試験体は溶接のままの試験体（AW），デッキから 20 mm 離れた位置に半円切欠きを施した試験体（H20），デッキから 7 mm 離れた位置に半円切欠きを施した試験体（H7），図-3 に示す処理範囲でエアードリルピーニングを施した試験体（PPP）⁹⁾の4種類を用いて試験を実施した．半円切欠きを施した試験体では，半円孔の設置位置によって疲労寿命に差が出ることを確認されていることから阪神高速での予防保全の実施時の設置位置である 20 mm 位置の試験体に加え，既往検討³⁾で応力低減効果が大きいとされている 7 mm 位置の2種類の試験体で試験を実施した．また，本試験では試験機に完全固定される範囲をガセット幅に考慮せず，曲げ試験の荷重が伝達される範囲である 100 mm までをガセット幅とした．H20, H7の半円切欠きはガセット幅の3/4である R75 とし，半円切欠きの施工はガセット溶接後に実施した．

1-2 試験条件

疲労試験は山田ら^{3),10)}により開発された板曲げ振動疲労試験機（図-4）を用いて行った．本試験では，ガセット先端から 245 mm 位置に加振機を取り付けることで垂直補剛材から離れた箇所に載荷される輪荷重による曲げを再現している．

試験体にはひずみゲージを貼付し，まわし溶接止端から板長手方向には 12 mm と 62 mm 位置かつ板幅方向には 0 mm と ± 50 mm 位置の合計 6 箇所（Ch A～Ch F）とした（図-2）．公称応力範囲はき裂発生前のゲージ B, C のひずみの平均値とゲージ E, F のひずみの平均値の比に，試験中の E, F のひずみの平均値と弾性係数を乗ずることで算出した．本試験の公称応力範囲は AW, H20, H7 は $\Delta\sigma = 100, 120, 150 \text{ N/mm}^2$ で実施し， $\Delta\sigma = 120$ でき裂が発生しなかった PPP は $\Delta\sigma = 120, 150, 180 \text{ N/mm}^2$ で実施した．応力比は鋼床版上面から

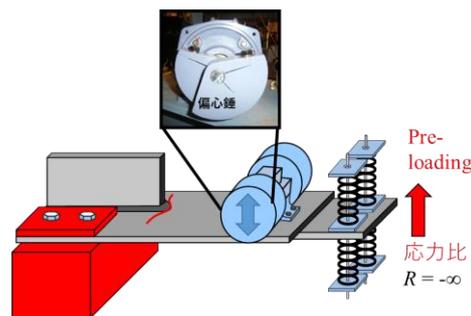


図-4 板曲げ振動疲労試験機

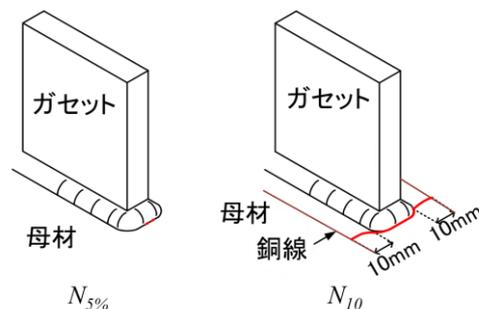


図-5 疲労き裂の定義

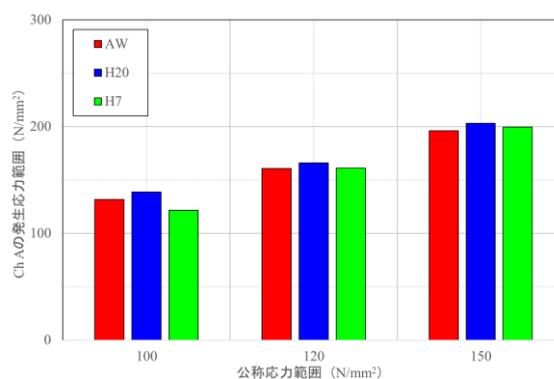


図-6 Ch A の応力範囲

の輪荷重を想定して全試験体で $R = -\infty$ とした．

疲労き裂の定義を図-5 に示す．試験体にはき裂発生確認のための被覆銅線（φ0.05 mm）を止端から 10 mm 離れたデッキ側に添付した．溶接止端に近いひずみゲージ（Ch A）から得られた応力範囲が初期から 5%低下した繰返し回数を $N_{5\%}$ ，疲労き裂が溶接止端部から 10 mm 離れた位置に到達して被覆銅線が破断した段階の繰返し回数を N_{10} と定義した．各工法の疲労き裂発生寿命の評価には $N_{5\%}$ を用い，き裂発生から進展までの進展抑制効果は $N_{5\%}$ から N_{10} までの回数を用いて評価した．

1-3 試験結果および考察

(1) 疲労試験結果

各試験体の荷重 1 回目時点の Ch A で計測した応力範囲を図-6 に示す。これより、溶接止端近傍位置である Ch A の応力範囲は各試験体間で大きな差は見られなかった。これは、既往検討^{1),2)}で確認されていた半円切欠きによる溶接止端部の応力低減効果が今回の試験条件では発揮されなかったためと考えられ、要因としては既往検討との試験体形状の違いや試験時の境界条件、荷重荷重位置の影響が考えられる。

各試験体の $N_{5\%}$ をプロットした $S-N$ 線図を図-7 に示す。 $S-N$ 線図には JSSC の疲労設計指針で示されている疲労強度等級をあわせて示している。また、PPP 試験体で確認されたガセット側の溶接止端から発生した試験体についてはマークの上に“g”を付け区別している。これは、ピーニングを実施することによりデッキ側の溶接止端の疲労寿命が向上したことでガセット側の溶接止端の疲労寿命が相対的に低下したためと考えられる。図-7 より、PPP による予防保全の効果は非常に高く、AW や H20、H7 に比べ大幅に疲労寿命が向上していることが分かる。一方で、半円切欠きを施した H20 と H7 の疲労寿命は AW に比べほとんど差が見られなかった。これは Ch A で計測した応力範囲と同じ傾向であり、本試験条件では応力の低減効果が発揮されなかったためと考えられる。

AW と H20、H7 のき裂進展の抑制効果を比較するため、 $N_{5\%}$ から N_{10} までのき裂進展に要した回数をプロットした $S-N$ 線図を図-8 に示す。これより、H20 と H7 は AW の結果とほぼ同様の分布をしていることから、本試験の荷重状態に対しては、AW と H20、H7 のき裂進展の繰返し回数に大きな差がないことがわかる。

(2) 疲労き裂と応力の関係

疲労き裂の進展による試験体内での応力伝達状態を確認するために公称応力に近い Ch E、F のひずみと止端近傍の Ch A の応力の関係を確認した。各試験体の $\Delta\sigma = 120 \text{ N/mm}^2$ における Ch A のひずみから算出した応力と Ch E、F のひずみの平均値

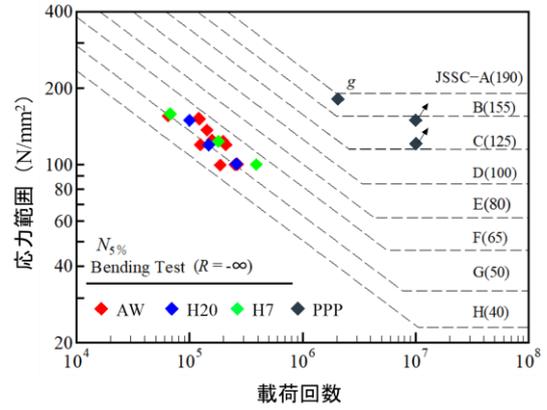


図-7 $S-N$ 線図 ($N_{5\%}$)

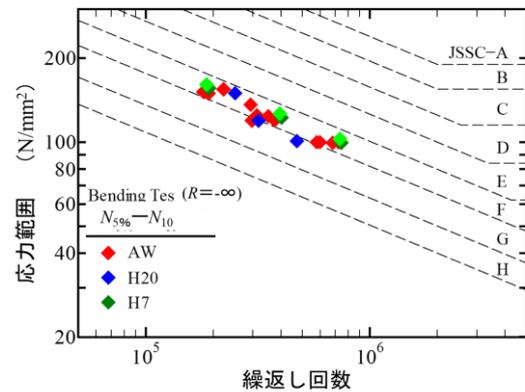


図-8 $S-N$ 線図 ($N_{5\%} \rightarrow N_{10}$ 進展寿命)

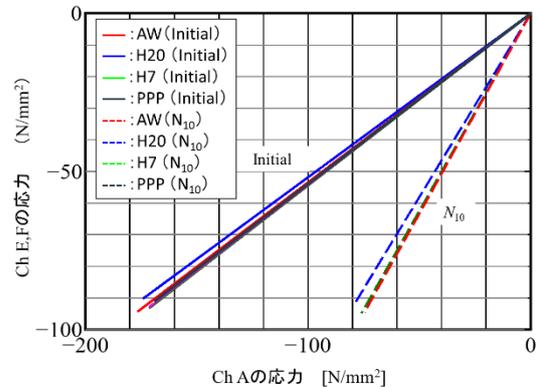


図-9 Ch A と Ch E、F の応力の関係

から算出した応力の関係を図-9 に示す。試験開始時の応力状態を Initial、き裂が N_{10} まで進展した時点としてプロットしている。AW、H20、H7 の Initial では、Ch A の応力はガセットによる応力集中を受けるため、Ch E、F の平均値に比べ大きくなり傾きが大きくなっているが、き裂が N_{10} へ進展することで傾きが小さくなっていることから、Ch A への応力伝達がなくなっていることがわかる。AW、H20、H7 では半円切欠きの有

無に関わらずその傾きに大きな差は見られなかった。これより、本試験では半円切欠きによるき裂発生後の溶接止端部近傍の応力低減の効果は小さいことがわかる。一方で、PPP では $\Delta\sigma = 150 \text{ N/mm}^2$ で疲労き裂が発生しなかったため Initial からの傾きの変化は見られなかった。

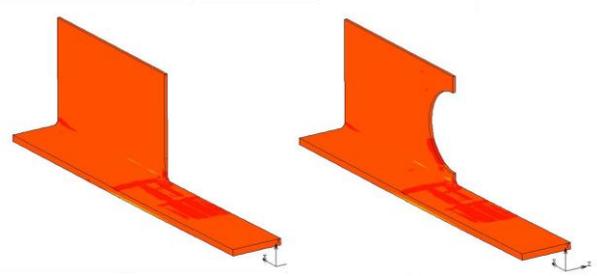


図-10 解析モデル形状

2. 解析的検討

疲労試験において半円切欠きの応力低減効果が確認できなかった要因を解析的に検証した。

2-1 解析条件および解析モデル

解析には汎用の有限要素解析プログラム SC MARC を用い、線形有限要素解析を行った。解析モデルは AW, H20, H7 を対象として作成し、

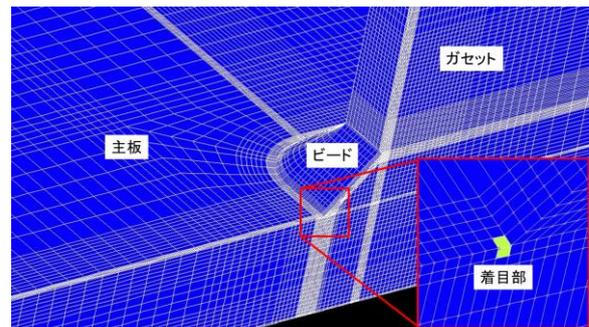


図-11 溶接止端部のメッシュサイズ

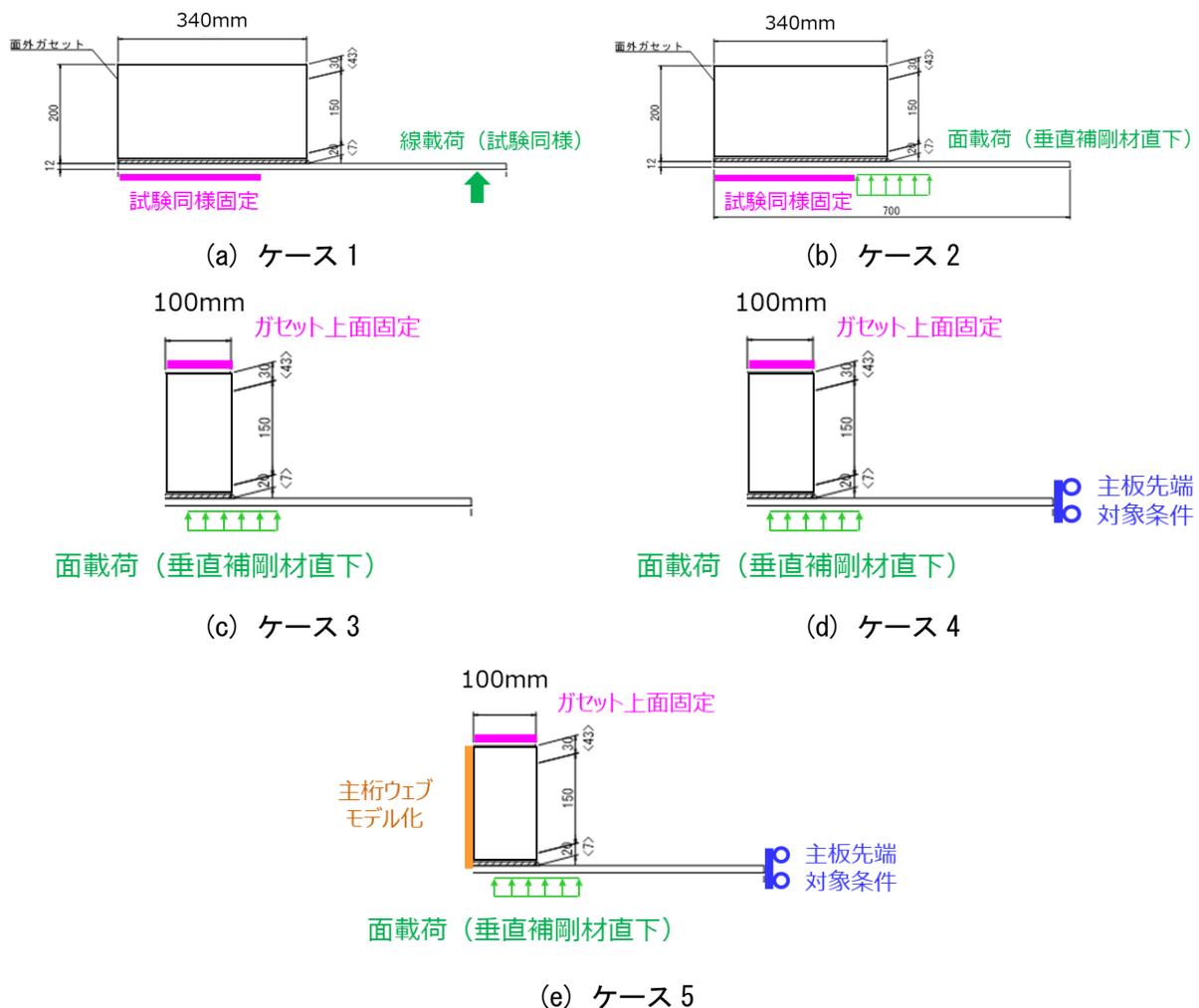


図-12 解析ケースごとの解析条件

基本形状は疲労試験体と同等の形状の 1/2 モデルとした。図-10 に各試験体の解析モデルの基本形状を示す。要素は全てソリッド要素であり、ヤング係数は 200,000 N/mm²、ポアソン比は 0.3 とした。また、着目部は主板側の溶接止端部とし、着目部のメッシュサイズは 0.1 × 0.1 × 0.1 mm とした (図-11)。ガセットと主板の間には 0.1 mm の隙間を設け、試験体と同様に溶接ビードのみでデッキからガセットに応力を伝達するモデルとした。

本検討の疲労試験では面外ガセット溶接継手の試験体を用いて曲げ疲労試験を実施しているのに対し、応力低減効果を確認した既往検討²⁾では鋼床版や主桁ウェブを模擬した試験体を用いて垂直補剛材直上に近い位置での荷重を実施していることから、荷重位置、境界条件、ガセット幅の違いや主桁ウェブの有無が応力低減効果に影響を与えていると仮定し、これらをパラメータとして解析を実施した。図-12 に影響要因を考慮した解析ケースを示す。ケース 1 は疲労試験と同条件としたケースであり、ケース 2 は荷重位置の影響を確認するために荷重位置をガセット直下に面荷重 (幅 200 mm × 長さ 100 mm) したケース、ケース 3 はガセットの剛性の影響を確認するためにガセット幅を 100 mm とし、ガセット上端部を固定したケース、ケース 4 は実橋のデッキの連続性による影響を確認するためにケース 3 のモデルに主板先端の対象条件を追加したケース、ケース 5 は主桁ウェブによる影響を確認するためにケース 4 に主桁ウェブをモデル化したケースである。主桁ウェブのモデル化範囲はモデル幅と同等の 200 mm とした。なお、後述するとおり着目部の応力を無次元化して評価するため、荷重値は単位荷重としている。

2-2 解析結果および考察

図-13 に AW, H20, H7 に対し、各ケースで求めた溶接止端部着目要素に発生する主応力を AW の応力で無次元化した結果を示す。ケース 1 の結果より、AW と H20 の応力はほぼ同等であり、H7



図-13 AW に対する着目部発生応力の比率

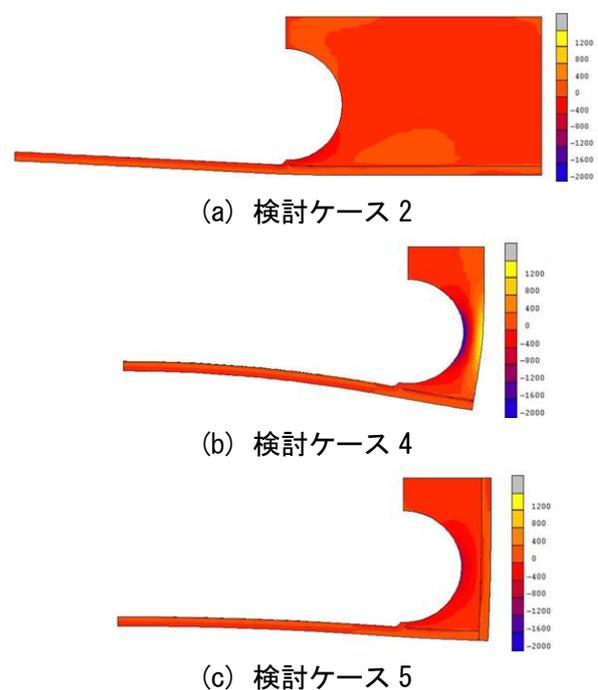


図-14 荷重時のコンター図

で約 2 割の応力低減効果が見られた。H20 では応力の低減効果が確認できなかったが、H7 で若干の応力低減効果が確認できた要因としては半円孔をデッキに近づけることでガセットの立ち上がり部が短くなり、局所的な応力集中が低減したためと考えられる。ケース 2 および 3 の結果はケース 1 とほぼ同等の結果となった。これより、荷重位置およびガセットの剛性の違いが半円切欠き工法の応力低減に及ぼす影響は小さいと考えられる。ケース 4 では、H20 と H7 の両モデルで AW に比べ大きな応力低減効果が見られた。これは主板先端に対象条件を追加したことで主板の変形モード

が変化し、溶接止端部の発生応力が大きく低減したためと考えられる。ケース5では主桁ウェブを再現することでケース4に比べH20およびH7の応力低減効果は小さくなり、AWに比べH20は約2割、H7は約4割の応力低減効果が見られた。H20については既往検討²⁾の傾向と同様であり、ケース5の解析条件が最も既往検討²⁾における応力低減効果を再現できたと考えられる。また、全てのケースにおいてH20に比べ、H7の発生応力が小さいことから既往検討³⁾で確認された半円孔の設置位置による影響を確認できた。これは、半円孔の設置位置によりガセットの立ち上がり部の長さが変わり、局所的な形状の影響による応力集中に差が出ているためと考えられる¹⁾。疲労試験時のCh Aの応力範囲でこの傾向が見られなかった原因としては、解析では止端位置での応力集中を比較しているが、Ch Aの応力は止端から12mm離れた位置であるため、半円切欠きによる局所的な応力集中の緩和が捉えられなかったことが原因と考えられる。

図-14にケース2, 4, 5の载荷時のコンター図を示す。ケース4は最も半円切欠きの応力低減効果が出たケースであるが、実験と同様の境界条件であるケース2に比べ主板が上に反り、半円の中央部に応力集中していることが分かる。これより、対称条件により主板の変形状および半円内の応力発生位置が大きく変化していることが分かる。一方で、ケース5では主桁ウェブを再現することでウェブがガセット部の変形を抑えるため、主板の変形および半円中央部の応力集中を抑え、ケース4に比べ溶接止端部の応力集中低減効果が小さくなっていることを確認できた。これらより、主板の境界条件による変形モードの違いは半円切欠き工法による応力低減効果に大きな影響を及ぼす要因であり、その影響はガセットの剛性によって大きく変化することが確認できた。

3. まとめ

本検討では既往検討で十分検討されていない半

円切欠き工法の疲労寿命向上効果をピーニング工法と比較したうえで確認することを目的として、垂直補剛材が鋼床版デッキに溶接された部位を模擬した試験体の疲労試験を実施した。また、疲労試験結果を解析的に分析することで、疲労試験の境界条件が既往検討²⁾で確認されている半円切欠き工法の応力低減効果に与える影響を検証した。以下に結果をまとめる。

- ①今回実施した疲労試験の条件下では、半円切欠き工法による応力低減効果は見られなかった。
- ②PPPによる疲労寿命の向上効果は非常に大きくAWやH20、H7に比べ大幅に疲労寿命が向上した。
- ③主板の境界条件による変形モードの違いは半円切欠き工法による応力低減効果に大きな影響を及ぼす要因であり、その影響は主板の変形を拘束するガセットの剛性によって大きく変化することが確認された。

本検討より、従来の検討と同様に適切な施工が実施されたピーニングの疲労寿命向上効果は非常に大きく、予防保全工法としての可能性が示された。一方で、既設橋梁への適用については、施工条件におけるピーニングの施工管理が困難であることから、現場での品質管理手法の検討が課題となる。また、半円切欠き工法においては変形モードの違いにより応力低減効果が大きく変動することが示されたことから、今回の疲労試験結果をより正確に評価するために、実橋における変形モードを把握し、疲労試験の変形モードとの違いを確認することが必要であると考えられる。

謝辞：本検討の疲労試験および解析的検討を実施していただいた関西大学の石川敏之教授に深く感謝します。

参考文献

- 1) 川村勝, 高田佳彦, 流田寛之, 坂野昌弘: 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.
- 2) 高田佳彦, 川上順子, 青木康素, 坂野昌弘, 酒井優二: 半円切欠き工法による鋼床版垂直補剛材溶接部の疲労対策の検討, 鋼構造年次論文報告集, 第15巻,

- pp.343-350, 2007.
- 3) 山田健太郎, 小藪江朋堯, 小塩達也: 垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造論文集, 第 14 巻第 55 号, pp.1-8, 2007.
 - 4) (一社)日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説一付・設計例一, 技報堂出版株式会社, 2014.
 - 5) 田井政行, 三木千壽, 鈴木啓悟: ハンマーピーニング処理による面外ガセットの溶接止端部の疲労強度改善, 土木学会論文集 A1, Vol.67 No.2, PP.396-409, 2011.
 - 6) 森猛, 島貫広志, 田中睦人, 宇佐美龍一: UIT を施した面外ガセット溶接継手の疲労強度に対する施工時応力レベルと応力比の影響, 土木学会論文集 A1, Vol.67 No.2, pp.421-429, 2011.
 - 7) 北條恵司, 高橋宏治, 安藤柱, 関口祐司: 溶接止端部にき裂を有する構造用圧延鋼のピーニングによる疲労限度向上およびき裂の無害化, 日本機械学会論文集, 79 巻 797 号, pp.110-114, 2013.
 - 8) 木下幸治, 今村明登, 渡邊吉弘, 半田充: 先端曲率半径が小さい Ultrasonic Needle Peening を施した面外ガセットの疲労強度, 鋼構造論文集, 第 21 巻 83 号, pp.11-18, 2014.
 - 9) 井上諒, 細見直史, 入部孝夫: エアー式ニードルピーニングによる面外ガセット溶接継手の疲労強度向上対策, 東京鐵骨橋梁技術報, No.57, pp.38-57, 2016.
 - 10) 山田聡, 渡辺直起, 山田健太郎, 小塩達也: 簡易型振動疲労試験機の開発と適用試験, トピー鉄構技報, No.24, pp.15-22, 2008.
 - 11) 白彬, 柿市拓巳, 石川敏之, 小塩達也, 山田健太郎: 鋼床版上の吊りピースおよびスタッドジベルの板曲げ疲労挙動, 鋼構造論文集, 第 17 巻 65 号, pp.43-52, 2010.

VERIFICATION OF PREVENTIVE MAINTENANCE METHOD FOR FATIGUE CRACKS IN VERTICAL STIFFENER WELDS OF STEEL DECK PLATES

Koyo TAKATA, Kengo MORI and Syuji YAMAMOTO

Fatigue cracks in the welds between vertical stiffeners and steel deck plates account for about 30% of all cracks found in steel deck plates on the Hanshin Expressway. To the bridges with existing damage on the Hanshin Expressway, semicircular holes have been conventionally installed in their vertical stiffeners in an attempt to reduce stress, while peening for improved fatigue strength has also been proposed as another option for preventive maintenance. In this study, bending fatigue tests were conducted on a specimen modeling the welded joints between vertical stiffeners and steel deck plates. It was found that peening was more effective than semicircular hole cutting in extending fatigue life, and that the stress reduction effect of the semicircular holes was smaller than expected under the test conditions in this study. A numerical analysis was also performed on the fatigue test results to investigate the effects of the boundary conditions on the stress reduction effect.

高田 耕庸



阪神高速道路株式会社
管理本部 管理企画部
保全技術課
Koyo TAKATA

森 謙吾



阪神高速道路株式会社
管理本部 大阪保全部
改築・更新事業課
Kengo MORI

山本 修嗣



(一財) 阪神高速先進技術研究所
調査研究部
Syuji YAMAMOTO