

報告番号	※ 乙 第 7065 号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 鋼床版デッキプレートとUリブの溶接部の疲労性状と対策技術に関する研究

氏 名 村越 潤

論 文 内 容 の 要 旨

鋼床版は、死荷重軽減等の観点から長大橋の床構造や都市内高架橋に広く用いられてきている。もとより、薄板により構成された溶接構造であり、かつ床版として直接輪荷重を支持する構造のため、疲労の影響に対して配慮の必要な構造と考えられてきた。2000年頃に、地方自治体や国土交通省の管理する鋼床版橋において、デッキプレートとUリブの溶接部からデッキプレートを貫通するき裂が初めて報告された。このうち一事例では舗装の陥没により車両の物損事故に至っており、第三者被害の観点から重大視された。その後、鋼床版では、同き裂だけではなく、その他の溶接部からの各種のき裂も顕在化してきている。このうち、デッキプレートとUリブの溶接部には、片側溶接のルート部から、デッキプレート内に進展しデッキ上面に到達するき裂（以下、デッキ進展き裂）、溶接ビード内に進展しビードを貫通するき裂（以下、ビード進展き裂）の、2タイプのき裂もしくは両者が複合したき裂が報告されている。デッキ進展き裂は、進展しても舗装下に隠れることから目視点検が困難であること、長く進展すれば走行路面の舗装の損傷や陥没につながるおそれがあること、き裂発生部の構造がUリブを使用した鋼床版にほぼ共通の構造詳細であることから対応の緊急度の高いき裂と言える。

以上のようなUリブを使用した鋼床版橋のき裂の発生状況に鑑み、本研究ではデッキプレートとUリブの溶接部に発生する2種類のき裂について、1) 発生原因と疲労耐久性向上のための構造詳細の検討、2) 進展初期のデッキ進展き裂を検出可能な超音波探傷法の検討、3) き裂の発生した鋼床版におけるき裂の進展の抑制・防止対策としてのSFRC舗装による補強工法の適用性の検討、を行った。以下に、各章で得られた主な知見を総括して本研究の結論とする。

第1章では、研究の背景・目的、鋼床版の技術基準の変遷、損傷事例と研究動向についてまとめ、本研究の位置付けを明確にした。

第2章では、デッキ進展き裂の報告事例を基に、損傷の発生傾向を分析した。また、損傷事例を踏まえ、実大試験体による輪荷重走行試験を行い、き裂の進展挙動を再現するとともに、FEM解析を行い、以下の結論を得た。

(1) 12mm のデッキプレート厚の鋼床版において、供用開始から 10～30 年程度（累積大型車交通量では 1,200 万台/車線）を超えた程度）でデッキプレートを通るき裂が発生していた。損傷箇所は輪荷重が常時載荷される位置直下の溶接部であり、概ね大型車のダブルタイヤが跨ぐ溶接部であった。

(2) デッキプレートと U リブの溶接部を輪荷重が跨ぐ載荷条件で、輪荷重走行試験を行った結果、デッキプレートの貫通には至らなかったものの、実橋でのき裂と同様の発生形態のき裂が溶接ルート部から発生することを示した。

(3) 載荷条件、横リブ間隔、U リブ厚をパラメータとした FEM 解析より、溶接ルート部の応力に対して載荷条件の影響が大きいこと、ダブルタイヤによる挟み込み載荷の影響の場合に、き裂の起点のルート部に高い圧縮応力が作用することを明らかにした。

(4) 溶接溶込み量のルート部の局部応力への影響に関する FEM 解析により、デッキ進展き裂の発生に支配的な応力への溶込み量の影響は比較的小さいものの、ビード進展き裂に対しては相対的に厳しくなる可能性があることを示した。従って、溶接の溶込み量を確保し、のど厚を大きくすることは、ビード進展き裂の発生抑制に有効な対策と言える。

第 3 章では、デッキ進展き裂の検出を目的として、臨界屈折角探触子に着目し、探傷結果の客観性・信頼性の向上を目指した探傷法の検討を行い、以下の結論を得た。

(1) 疑似表面 SV 波を利用した感度補正方法を提案し、塗装試験片を用いた探傷試験により、その適用性を検討した。その結果、感度補正用の基準試験片と被調査物であるデッキプレートの間で、鋼材の表面状態が異なる場合においても、提案した補正方法が感度補正に効果的であることを示した。

(2) 深さの異なるき裂を模擬した小型試験体による探傷試験において、感度補正後のエコー高さ比とき裂深さの関係を分析した。その結果、エコー高さ比とき裂深さとの相関性を把握するとともに、提案した探傷方法により、仮に L/2 線を超えるレベルをき裂検出のしきい値としても 4mm 程度以上の深さのき裂についてはほぼ確実に検出できることを示した。

(3) 実橋の鋼床版に発生したき裂に対する探傷結果と切り出した破面によるき裂深さを照合し、深さ 2～7mm 程度のき裂を検出でき、溶接線方向に進展するき裂の溶接方向の長さも比較的良好な精度で推定できることを示した。

第 4 章では、SFRC 舗装による鋼床版の補強工法の概要、要求性能を示すとともに、小型試験体を用いた接合面のせん断試験と実大試験体を用いた輪荷重走行試験の結果について分析し、以下の結論を得た。

(1) 3 種類のエポキシ系接着材に対して、接着材接合面を模擬した小型試験体を用いたせん断試験を行い、環境負荷が強度低下や破壊性状に与える影響を明らかにした。せん断試験により接着材の性能の相対的な違いを明らかにすることができ、同試験が、構造体としての耐久性を評価する輪荷重走行試験と併せて、重要な試験項目であることを示した。

(2) 水張り状況下での輪荷重走行試験では、負曲げ作用を受ける主桁ウェブ上、横リブ上にコンクリートのひび割れが発生することを示した。しかしながら、ひび割れの顕著な進行等の変状、輪荷重直下のデッキ下面側のひずみの大幅な変化、接合面の接着強度の低下は見られず、少なくとも水張り状態で輪荷重 150kN の 200 万回載荷に対して供用安全性に支障を来す変状は生じないことを明らかにした。

(3) (1)、(2) を踏まえ、耐久性評価のための試験項目・方法を整理した。補強工法としての

性能を満たすには、デッキプレートと舗装の接合面及び舗装体の耐久性を確保するための適切な接着材と舗装材料の選定が重要となる。特にデッキプレート、接着材及びSFRC舗装で構成される接合面に関して、舗装と鋼床版の一体化が図れるように、大型の自動車の繰返し走行、温度変化及び水の影響に伴う経年的な劣化に対して耐久性を有することを試験により確認する必要があることを示した。

第5章では、SFRC舗装を施した実大試験体に、ビード進展き裂を模擬したスリットと観察孔を施工した上で、静的載荷試験及び定点疲労試験を行い、観察孔の応力性状とFEM解析結果を比較分析するとともに、輪荷重と応力性状の関係及びき裂の進展性状を調査した。また、実鋼床版を対象として、き裂の位置・長さ、鋼床版の構造諸元及び溶接形状をパラメータとしたFEM解析を行い、観察孔の局部応力に与える影響を分析するとともに疲労耐久性の評価を行い、以下の結論を得た。

(1) 観察孔周りの3部位（こぼ面ルート部近傍、デッキ下面、こぼ面R部）では、こぼ面ルート部近傍が疲労耐久性の観点から厳しい部位であることを示すとともに、輪荷重移動に伴って観察孔に比較的近い位置に載荷した場合に、観察孔に応力最大値（引張応力）と応力最小値（圧縮応力）が交番して発生する応力性状を明らかにした。

(2) スリット長が長くなるにつれて、き裂進展に関する観察孔ルート部要素の主応力の最大値、最小値は増加した。また、観察孔部分のデッキ上面の引張応力も増加しSFRC舗装への影響も懸念されるため、長いき裂を残存させるべきではないことを明らかにした。

(3) 150kN輪荷重走行に対する定点疲労試験の結果、観察孔ルート部から、疲労き裂が比較的早い回数で発生し、デッキプレート下面側に進展した。ただし、400万回載荷時点でもき裂は最大で表面長さ8mm、深さ7mm程度であり、SFRC舗装と一体化が図られているデッキプレート内では、き裂の急速な進展は見られなかった。

(4) 疲労耐久性評価により、基本ケース（溶込み量50%、脚長6mm、縦リブ支間2750mm）に対して観察孔ルート部からのき裂の進展に係る等価年数（実活荷重を想定した場合の、き裂が溶接ビードを破断させるまでの年数）を試算した。その結果、大型車交通量5,000台/車線/日で応力が最も厳しい載荷条件の場合、スリット長400mmに対して、等価年数は30年程度の値であった。

(5) SFRC舗装に対して、アスファルト舗装の場合の観察孔ルート部の着目要素の応力範囲は、支間部で約4.7倍、交差部で約3.7倍と厳しい状態であった。同部位からのき裂発生を防ぐためには、観察孔施工後、SFRC舗装等による応力軽減対策を早い時期に実施する必要がある。

第6章では、デッキプレートの厚板化によるデッキ進展き裂に対する耐久性向上効果について検討するため、デッキ厚16、19mmとUリブ厚6、8mm（以下、デッキ厚とUリブ厚さを、それぞれD○、U○と略して表す）を組み合わせた実大鋼床版試験体を用いて輪荷重走行試験（輪荷重:150kN、載荷回数:400万回）を行うとともに、FEM解析を行い、以下の結論を得た。

(1) 輪荷重走行試験の結果、デッキ進展き裂はU6側、U8側ともに、D16、D19の一般部には発生しなかった。交差部では、U6側、U8側ともに厚板化してもD19の中間横リブ交差部に発生し、ダブルタイヤの直上載荷の場合、交差部の方が相対的にき裂が進展しやすい傾向にあることを示した。

(2) 本研究及び他機関による既往試験結果との比較により、デッキ進展き裂の挙動にばらつきがあるものの、デッキプレートの厚板化によりき裂の進展が遅くなる傾向にあることを明らかにした。

(3) FEM解析により、デッキ厚板化による溶接ルート部の直上載荷時の応力低減効果を確認した。直上載荷時の溶接ルート部の最小主応力を基に、線形累積被害則 ($m=3$) が成立するとした場合の D12 に対する疲労耐久性 (損傷度の逆数) は、一般部では D14 で約 2.5 倍、D16 で約 6 倍、D19 で約 20 倍に、交差部では D14 で約 2 倍、D16 で約 4 倍、D19 で約 8 倍であった。

最後に、第 7 章では、以上の成果を要約して総括するとともに、今後の研究課題をまとめた。