

5. 我が国の鋼床版疲労対策技術と最近のプロジェクト

技術委員会 鋼床版小委員会

5. 我が国の鋼床版疲労対策技術と最近のプロジェクト

技術委員会 鋼床版小委員会

川畑篤敬、井口進、小笠原照夫
工藤祐琢、齊藤史朗、夏秋義広
林 暢彦、松下裕明、山内誉史

1. はじめに

鋼床版は、軽量で架設工期が短いなど多くのメリットを有した床版構造で、最近では、老朽化した都市内高架橋のコンクリート床版における取替え用として注目されている。

一部の重交通下のデッキプレート（以下、デッキ）で疲労損傷が発見されたことが契機となり、鋼床版の疲労損傷対策が抜本的に進められている。大型車交通量に応じてデッキの最低板厚を12mmから16mm以上に増厚¹⁾するよう道路橋示方書²⁾が改められたほか、より疲労に強い鋼床版構造の確立を目指し、当協会をはじめ、各方面で様々な研究が行われている。

そこで本稿では、2章で鋼床版の特長と課題をあらためて整理し、3章で鋼床版に関する最近の疲労対策技術を紹介する。そして、4章で高耐久性鋼床版の実現を目指して当協会で行っている取組みを紹介する。最後に、5章で鋼床版の活用によって実現した最近のプロジェクトの概要を紹介する。

2. 鋼床版の特長と課題

2. 1 鋼床版の特長

(1) 軽量

鋼床版は、自重がコンクリート系床版の半分以下と軽量である。そのため、

① 死荷重軽減が求められる長大橋に適している

しまなみ海道の因島大橋では、長大吊橋としてはじめて鋼床版が採用された。以来、大鳴門橋や瀬戸大橋、横浜ベイブリッジ、名港トリトン、明石海峡大橋など、多くの長大橋で鋼床版が採用されている。

② 桁橋の長支間化が図れる

我が国で、最初に中央支間が200mを超えた第二摩耶大橋（神戸市）をはじめ、250mを超えた海田大橋（広島県）（写真-1 参照）、なみはや大橋（大阪市）などの長支間桁橋において、鋼床版の軽量という特長が活



写真-1 海田大橋

かされている。

③ 上部工の軽量化で下部構造への負担を軽減できる

臨海地域などの軟弱地盤上に建設される橋梁に適している。また、上部工の重心が低くなることで耐震性の向上も期待できる。

(2) 主桁と一体構造

① 上部工の構造高の制約を受ける場合に適している

鋼床版は、デッキを主桁の上フランジを兼ねるように設計することにより、主桁の断面をコンパクトにできる。またコンクリート系床版を採用する場合に比べて、床版厚（ハンチ含む）分だけ上部工の構造高を低く抑えることができる。例えば、写真-2 は、上空の鉄道営業線による構造高の制限を受けた都市内高速道路橋での採用例である。



写真-2 首都高速1号上野線

② 現場工程を短縮できる

工場で作成する鋼床版は、床版コンクリートの打設作業がなく現場工程を短縮できるため、急速施工が必要な現場に適している。阪神大震災により大きな被害を受けた阪神高速3号神戸線では、早期復旧を図るため、現場工程の短い鋼床版構造が多く採用された。

また、**写真-3**に示すような交差点部の急速立体交差工事においても、上部構造の軽量化に加えて工期短縮の観点から鋼床版が採用される事例が多い。



写真-3 小坂高架橋の一括架設

(3) 複雑な線形に対応しやすい

鋼床版は、曲率の大きな曲線区間や急激な幅員変化などにも対応でき、これらの条件が重なる都市高速道路や高速道路のジャンクション橋などに多く採用されている（**写真-4**参照）。



写真-4 阪神高速 阿波座ジャンクション

2. 2 鋼床版の課題

(1) 構造詳細の熟成

近年、一部の重交通下の鋼床版で、様々な疲労損傷が顕在化している。増加する大型車交通量や、法定軸重を大きく超える過積載車両の横行など、外的要因を直接的に解消することは難しいため、現在の標準構造詳細をより疲労に強いものに熟成させることが望まれ

る。実橋の疲労損傷傾向からさらなる改善が望まれる主な部位として、デッキと閉断面リブの溶接部、縦リブ横リブ交差部、垂直補剛材とデッキの溶接部が挙げられる³⁾。

(2) 疲労設計手法の充実

現在我が国では、鋼床版の構造各部に発生する局部応力に対する疲労設計は、標準構造詳細に倣うという方法⁴⁾で行われることがほとんどである。鋼床版構造各部の疲労設計曲線を適切に設定することは決して容易ではないが、疲労設計をより合理的に行うためには、応力度による疲労照査法も整備して、疲労設計手法を充実させることが望ましい。海外を見ると、昨年の橋梁技術発表会で紹介した通り、FHWA (Federal Highway Administration: 米国連邦道路庁) のマニュアル「米国における鋼床版の設計・施工・維持管理」⁵⁾では、局部応力による鋼床版構造各部の疲労照査手法が掲載されている。

3. 鋼床版に関する疲労対策技術

(1) 合理化鋼床版

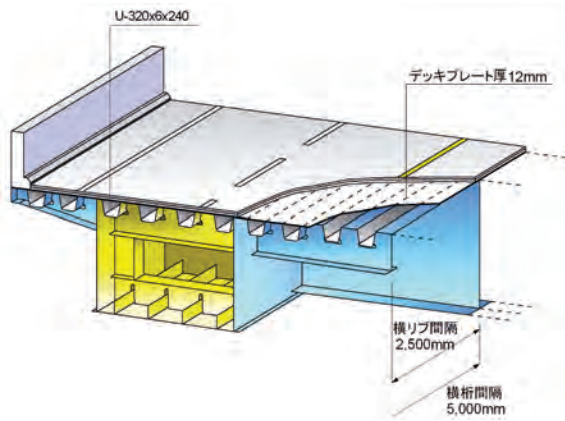
鋼床版の製作における省力化を図るため、1990年代後半から、鋼床版構造の合理化に関する検討が行われた。

合理化鋼床版は、断面寸法が従来の1.5倍程度の大型Uリブを用いるとともに、デッキ厚を18mmとすること、縦リブ支間を4.0mに拡大し、横リブを廃止（全横桁化）したことが特徴である（**図-1**参照）。

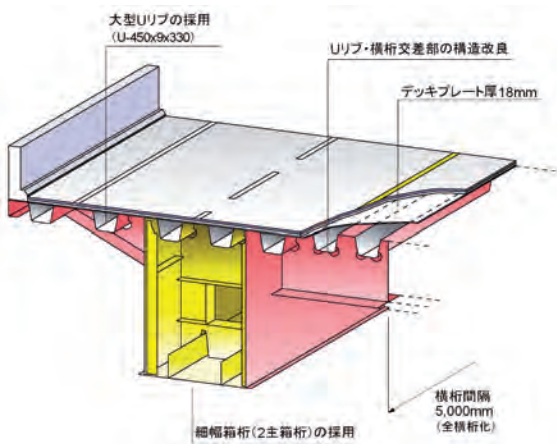
従来構造に比べて鋼重は同程度であるのに対し、大型および小型材片数は55%、溶接延長や塗装面積も同程度にまで低減できる（**図-2**参照）。

1990年代後半に、当時の本州四国連絡橋公団で検討がなされ、大型Uリブを用いて、横桁間隔を9m程度に拡大した場合の応力性状について実験的検討が行われた⁶⁾。

2000年に入ると、旧日本道路公団を中心に実用化に向け、構造詳細についての検討が行われた⁷⁾（**写真-5**参照）。合理化鋼床版の構造詳細の特徴として、縦リブと横桁交差部の疲労損傷を抑制するため、縦リブ底面を横桁ウェブと溶接で固定する構造とした点が挙げられる（**図-3**参照）。



(a) 従来型鋼床版



(b) 合理化鋼床版

図-1 鋼床版構造の比較



図-2 従来構造に対する合理化構造の数量比率

旧日本道路公団により、新名神高速道路で本格的な採用がなされた後、現在まで十数橋の採用実績がある(写真-6、7参照)。

(2) ピーニング処理^{8)~14)}

従来、溶接の止端仕上げはグラインダーにより行っていたが、近年、超音波衝撃処理(Ultrasonic Impact Treatment:UIT、写真-8)が用いられることがある。

UITは、超音波振動による打撃を溶接止端部に加えることによって、溶接残留応力を引張から圧縮に変化させるとともに、止端形状を滑らかにして、疲労強度を改善する工法である。1970年代初頭に

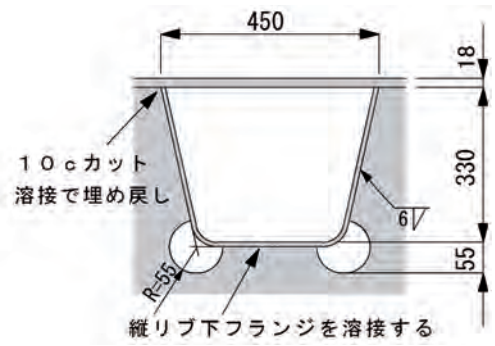


図-3 縦リブと横桁交差部の構造詳細



写真-5 JHによる合理化鋼床版の実験



写真-6 新名神高速道路(栄高架橋)



写真-7 曾波神高架橋(東北地整)

E. Sh. Stanikovにより提案され、国際溶接学会(IIW)やLeigh大学を中心として盛んに研究が行われている。我が国においても、小型~中型試験体においてそ



写真-8 UIT

の効果が確認され、実用化が始まった。

鋼床版の垂直補剛材に疲労損傷が発生している橋梁に適用した例を紹介する。図-4 に UIT 処理前後の残留応力計測結果を示す。残留応力は、X 線応力測定装置を用いて計測しており、死荷重の影響が含まれている。

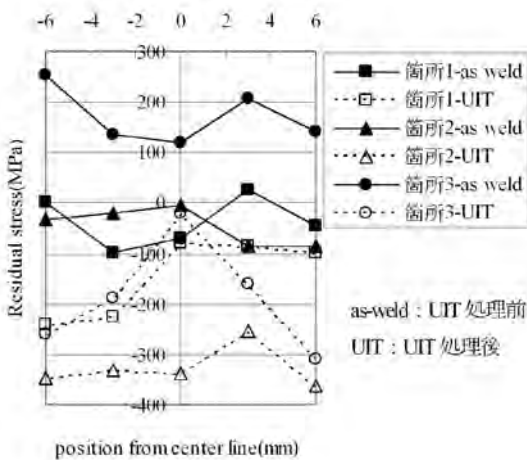
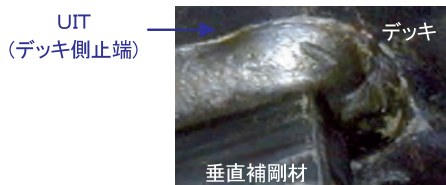


図-4 UIT 処理前後の残留応力

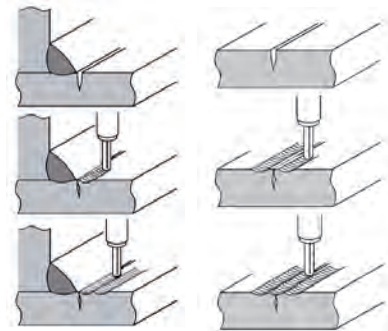
UIT 処理前は箇所 1 と箇所 2 で圧縮、箇所 3 で引張の残留応力が計測された。UIT 処理後は全て圧縮の残留応力が計測された。この計測結果を分析した結果、UIT 処理前の残留応力は 200MPa、UIT 処理後は -200MPa と、残留応力が引張から圧縮に変化していることが確認できた。

疲労き裂の簡易で安価な補修工法として、衝撃き裂閉口処理 (Impact Crack Closure Retrofit Treatment : ICR、写真-9) が提案されている。



写真-9 ICR

ICR 処理は、鋼構造物の溶接止端部近傍の母材に、ハンマーピーニングの一種である ICR 処理を行って圧縮の残留応力を導入し、溶接継手の疲労強度を向上させる工法である (図-5 参照)。疲労き裂がある程度大



(a) 止端き裂 (b) 表面き裂

図-5 ICR 処理のメカニズム

きくても、疲労き裂を閉じさせ、作用荷重によっても疲労き裂が開かないようにする。そうすることで、発生した疲労き裂を停留させるか疲労き裂進展速度を遅くさせて延命化を図るものである。

鋼床版桁橋の疲労き裂 (N10) へ適用した例を紹介する。垂直補剛材直上付近を左側車輪が通過しており、デッキが繰返し面外に曲げられることから、9 割以上の垂直補剛材直上の溶接部より疲労き裂が発生していた。

ICR 処理後にき裂表面が閉口し、ひずみを伝達していることを確認するために垂直補剛材直上の溶接止端から 12mm の位置のデッキにひずみゲージを貼付して、大型車の走行によって生じるひずみ変動を測定した結果を図-6 に示す。as-welded のケースで、前輪が通過する際に引張ひずみ、後輪が通過する際には大きな圧縮ひずみが発生している。き裂が N10 程度まで進展したケースでは、前後輪が通過する際に引張ひずみが

発生している。しかしながら、N10 のき裂に ICR 処理を行うことにより、ひずみ波形が as-welded と同様な波形に回復していることが分かる。

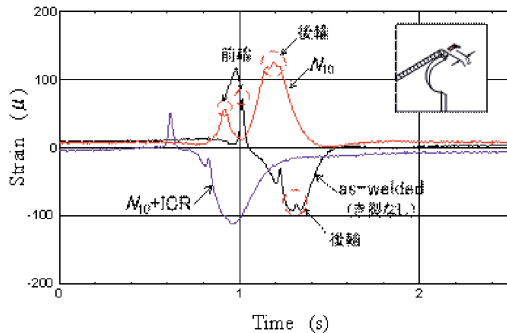


図-6 ICR 処理前後のひずみ

(3) Uリブ両面溶接^{15), 16)}

デッキとUリブの縦溶接部に発生する疲労き裂は、この溶接が片面溶接のため、溶接ルート部に応力集中することが原因と考えられる。そこで、疲労耐久性を向上させるため、閉断面のままデッキとUリブの縦溶接部を両面すみ肉溶接とする工法が開発された(図-7参照)。デッキを増厚して鋼重を増加させることなく、疲労き裂の起点となる溶接ルート部の応力集中を緩和することができる。

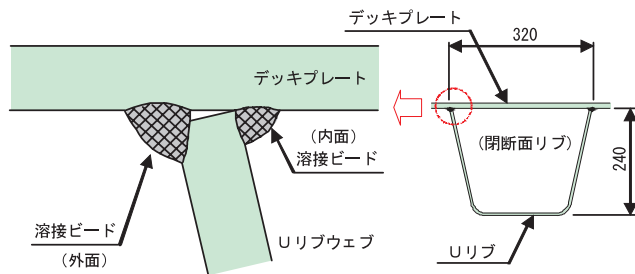
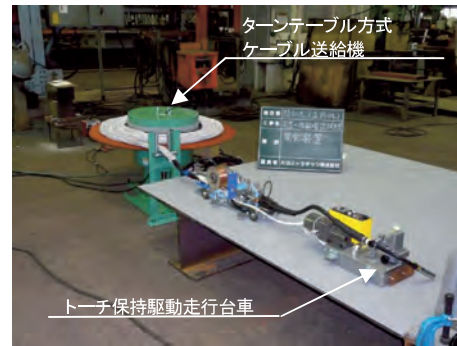


図-7 両面すみ肉溶接

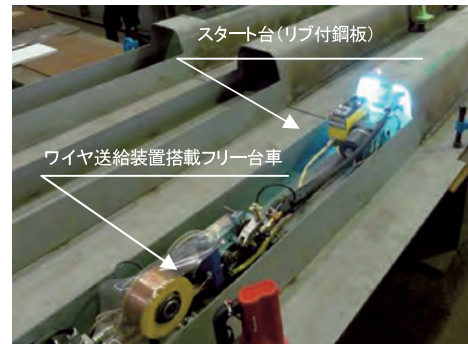
Uリブ内面溶接は、狭隘な閉空間での連続すみ肉溶接となるため、写真-10に示すような自走式のUリブ内面溶接装置を使用して施工する。本装置は、延長12mのUリブを約25分(分速50cm)で溶接できる。

デッキとUリブの縦溶接部における応力性状を把握するため、FEM解析が実施された。解析の詳細は参考文献15)で報告しているので、ここでは解析結果の概要を簡単に報告する。

横リブ交差部に着目した解析結果を図-8に示す。溶接ルート部の応力は、片面溶接のD1、D2に比べて両



(a) Uリブ内面溶接装置とケーブル送給機



(b) Uリブ内面の溶接状況(スタート時)

写真-10 Uリブ内面溶接装置

面溶接のD3が大幅に低減され、デッキからUリブウェブへの応力伝達がスムーズになっている状況が確認できる。一方、デッキ側の溶接止端部応力がルート部より大きいのが、D1の溶接ルート部よりもD3では35%程度低減されている。また、縦リブ支間部に着目した解析結果でも、横リブ交差部と同様の結果が得られた。

定点疲労試験により、U1(デッキ厚16mm、片面溶接)とU3(デッキ厚12mm、両面溶接)の比較を行った。試験体は横リブ交差部の実物大試験体を用いた。試験体と载荷方法を図-9に示す。また、試験状況を写真-11に示す。载荷荷重は下限を10kNとし、荷重範囲を200kN、260kN、300kNとした。

図-10に疲労試験結果を示す。U1、U3ともに軸重200kN、20万回程度の繰返し载荷で疲労き裂が発生したものと考えられる。き裂はその後進展したと推定されるが、軸重200kNで80万回、260kNで140万回および300kNで80万回の繰返し载荷を受けてもデッキ上面への貫通き裂は認められなかった。U1、U3ともに同程度の疲労強度であると考えられる。

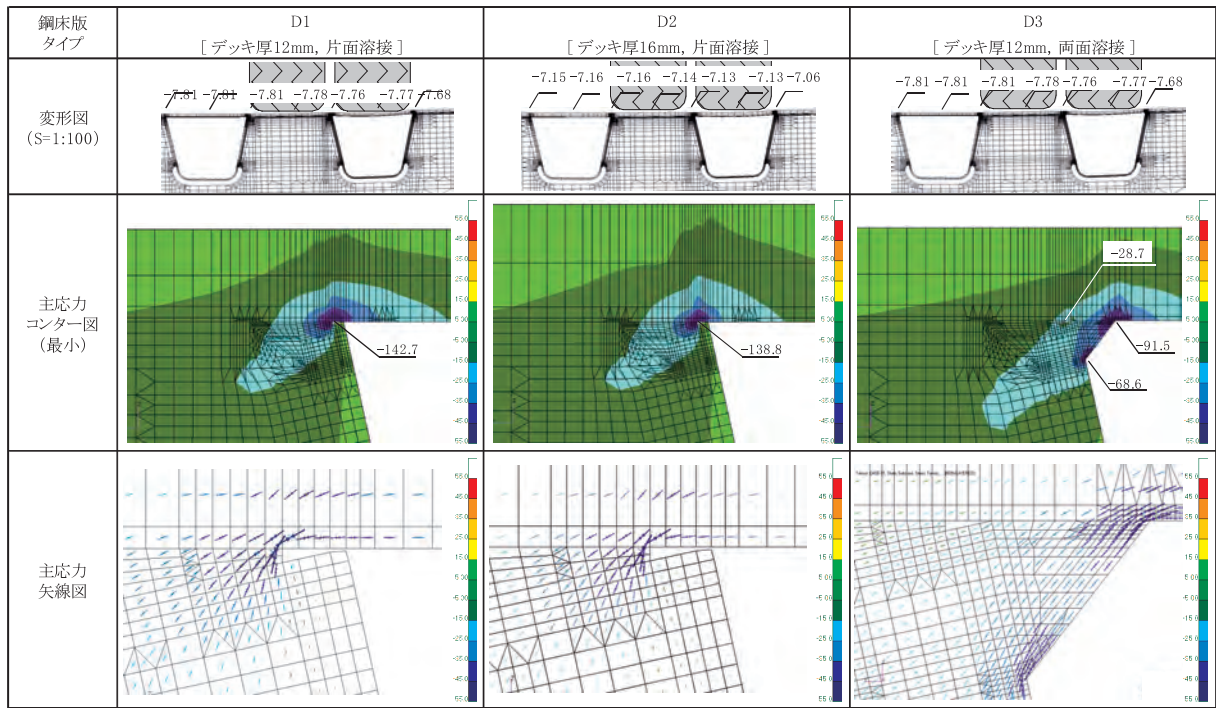


図-8 FEM 解析結果

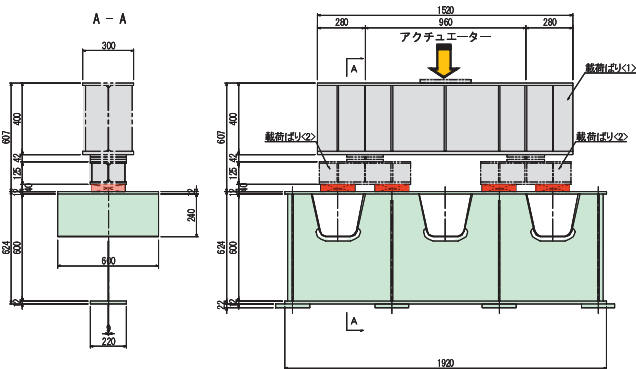


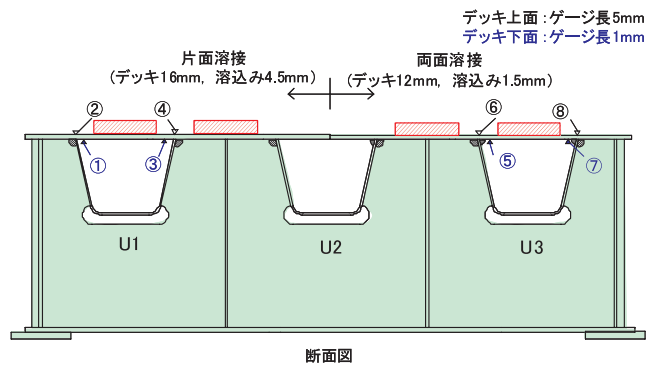
図-9 試験体と荷重方法



写真-11 疲労試験状況

疲労試験後のコア抜き結果 (写真-12 参照) より、U1 ではすみ肉溶接のルート部から疲労き裂が発生してデッキに進展しており、U3 では、Uリブ内面すみ肉溶接の止端およびビード表面から疲労き裂が発生してデッキに進展していたことが分かった。

(4) FRP 製密閉ダイヤフラム¹⁷⁾



断面図

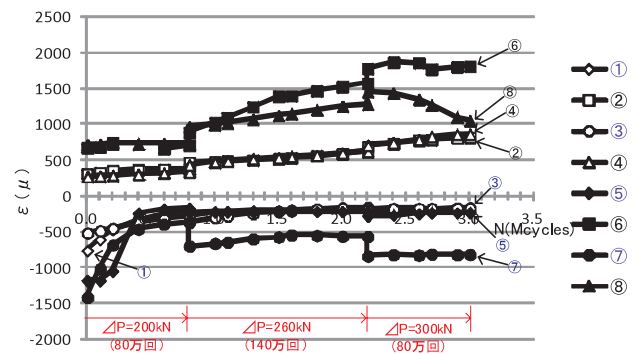
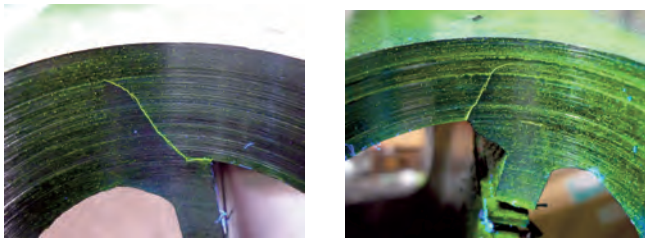


図-10 疲労試験結果

横リブとUリブの交差部において、横リブウェブに設けられたスリットの回し溶接部に疲労き裂が発生する可能性がある (図-11 参照)。このき裂は、Uリブに高力ボルトを使用した現場継手部に隣接する横リブでの発生頻度が高い。

Uリブのボルト継手部前後には、Uリブ内面の気密性確保のために「密閉ダイヤフラム」と呼ばれる隔壁



(a) U1 (b) U3
写真-12 コア抜き結果

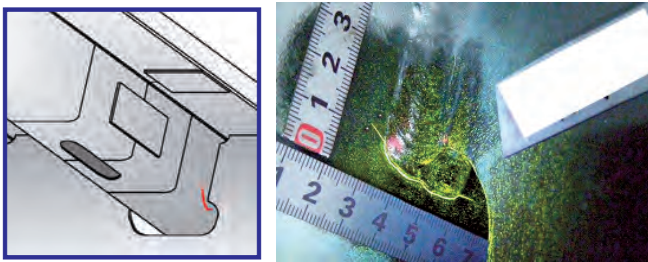


図-11 スリット回し溶接部の疲労き裂の例

が設けられる。荷重の偏載でUリブに発生するねじりモーメントは、横リブとの溶接部で横リブウェブに伝達されるが（図-12 参照）、Uリブの断面変形を拘束する（すなわちねじり剛性を高める）密閉ダイヤフラムが近くにあると、このねじりモーメントの伝達効率が良くなる。このため、密閉ダイヤフラムに隣接する横リブでは、他の横リブに比べて上記溶接部に発生する応力が高く、疲労き裂が発生しやすいことが明らかにされている。

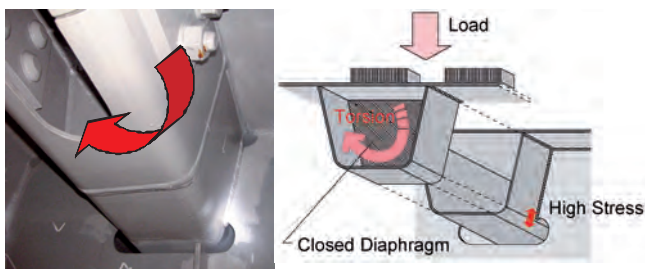


図-12 輪荷重の偏載でUリブに発生するねじりモーメント

この問題への対策の一つとして、密閉ダイヤフラムによるUリブ断面の拘束を緩和する方法が検討されている。写真-13はその一例であり、密閉ダイヤフラムの材料に鋼板より剛性が著しく小さい紫外線硬化型のGFRPを採用している。Uリブ形状に加工したGFRPの周囲を同素材のシートでUリブ内部に接着固定する構

造で、接着部は輪荷重の繰返し载荷やグースアスファルト舗装施工時の高温に対する耐久性の確認がなされている。このGFRP製のダイヤフラムは、すでに一部の実橋に適用されて供用中である。

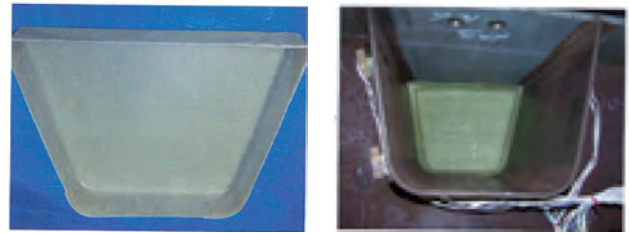


写真-13 GFRP製ダイヤフラム

(5) Uリブ溶接溶け込み管理¹⁸⁾

道路橋の鋼床版において、Uリブとデッキの縦方向溶接継手は、リブ板厚の75%以上の溶込み量を確保することが規定されている。一般的なUリブの板厚が6mmであるため、溶込み量は4.5mm以上、未溶着部が1.5mm未満となり、溶込み量の測定には1/10mm単位の高い精度が要求される。しかし、従来の超音波探傷試験には以下の課題があり、適用が困難であった。

- ① 探傷位置を前後に移動させ、その移動量によって寸法を測定する方法であり、探傷操作や探傷位置の読み取りに多くの時間が必要となる
- ② 測定精度が概ね1mm単位である

そこで、先ず探傷時間を短縮するため、探傷位置を常に固定して測定を行う方法が検討された。写真-14は、それを実現するために開発された専用探傷治具である。探傷位置の自己保持機構、長尺の溶接線を容易に平行移動するローラー備い装置を搭載しており、探傷時間を著しく短縮できるようになった。



写真-14 専用探傷治具

次に、測定を高精度化するため、未溶着部からのエ

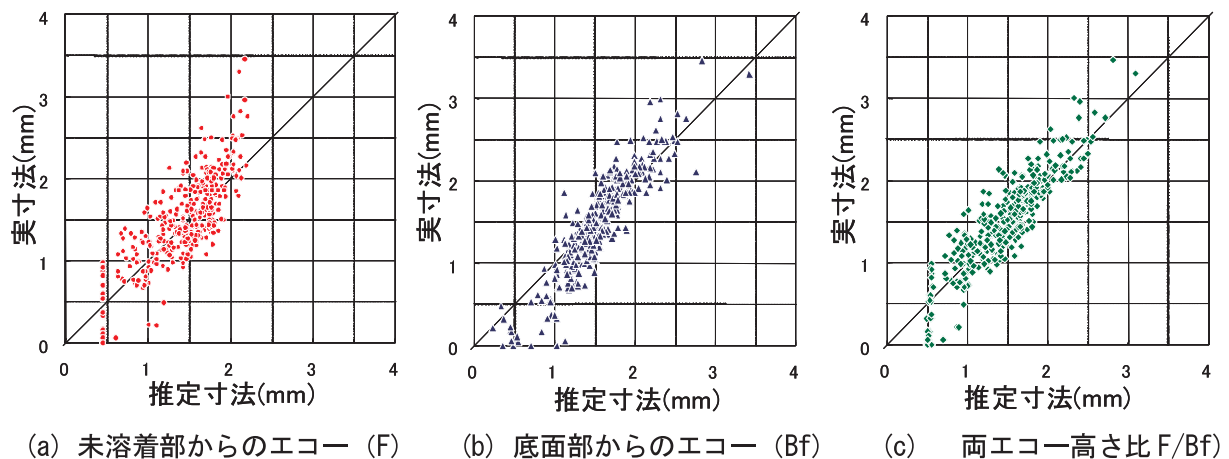


図-13 未溶着部の実寸法と推定寸法の関係

コーと底面部（デッキ）からのエコーの2種類に着目し、さまざまな探触子と探傷位置の組み合わせについて調査が行われた。

図-13は、2種類のエコー高さと両エコー高さ比を用いて、未溶着部の実寸法と推定寸法の関係を調査した結果である。

未溶着部からのエコー（F）では、実寸法が2mmを超える場合に過小評価の傾向にあり、0.5mm程度よりも小さいものは若干過大評価の傾向である。また、その他のエコー高さと比較すると全体的にバラツキが大きい。

底面部からのエコー（Bf）では、実寸法が小さい場合に過大評価の傾向にあるが、3mm程度までは良く整合しており、バラツキも少なくなっている。（Bf）を指標とすると、未溶着部の形状に依存せず、安定した評価が可能となる。

両エコーの高さ比（F/Bf）では、実寸法が小さい場合に若干過大評価の傾向にあるが、0.5～3mm程度までは良く整合し、バラツキが少ない。

また、（F/Bf）は同一の探傷環境から得られたエコー同士の高さ比であることから、感度調整作業の簡略化など現場的に扱いやすく、探傷時間を短縮できるため、（F/Bf）を用いてシステムが開発された。

本システム（写真-15参照）の機能を以下に示す。

- ① 溶け込み量の測定が1/10mm単位と高精度
- ② 測定結果の記録（データ収集）が可能
- ③ 収集したデータの統計処理が可能

4. 鋼床版小委員会の取組み



写真-15 探傷システム

(1) 縦リブ溶接ビード貫通き裂¹⁹⁾

阪神高速道路の重交通路線に位置する鋼床版橋梁では、デッキとUリブ溶接のルート部から発生するき裂のうち、溶接ビードを切る方向に進展するタイプのき裂（以下、ビード貫通き裂。図-14参照）の発生比率が多く、その原因の解明が求められている。

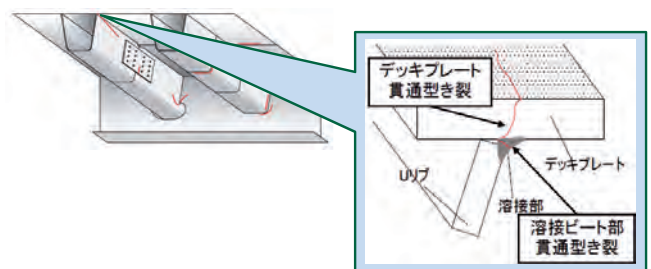


図-14 ビード貫通き裂

当委員会では、このビード貫通き裂の発生メカニズム解明と効果的な補修補強方法の確立を目標として、2009年より阪神高速道路株式会社と共同研究を行っている。FEM解析と輪荷重走行試験を実施しており、デッキとUリブの溶接部のモデル化は、実際に損傷が

発生した鋼床版の溶接状態を参考に、溶け込み量をUリブ厚の20~40%程度とした。輪荷重走行試験は、施工技術総合研究所にて実施している。

本研究では、現在までにき裂の再現に成功している。輪荷重走行試験によって、Uリブウェブの直上に荷重を載荷したケースでビード貫通き裂が発生することを確認した(写真-16 参照)。き裂の発生起点はデッキ側のルート部であり、これはFEM解析結果の応力集中位置(図-15 参照)、および実橋でのき裂発生位置観

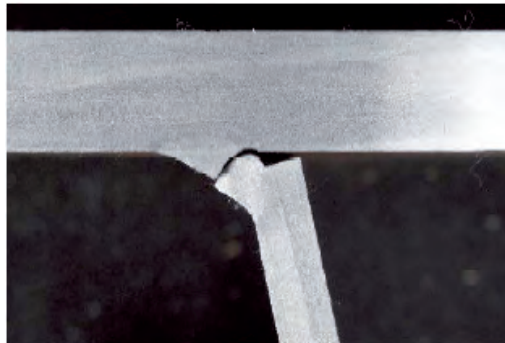


写真-16 輪荷重走行試験のき裂

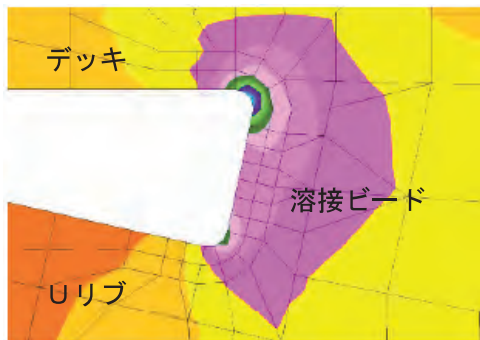


図-15 デッキとUリブ溶接ルート部のFEM解析結果

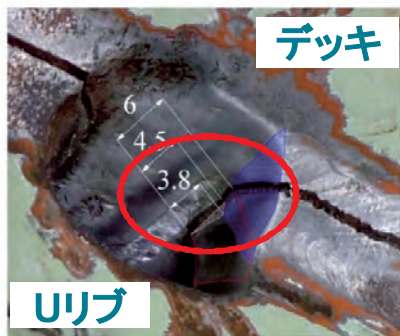


写真-17 実橋のき裂

察結果(写真-17 参照)と整合している。

今後は、ビード貫通き裂に対するSFRC舗装の効果の確認、および溶接補修方法の検討を行っていく予定である。

(2) 縦リブ横リブ交差部のデッキ貫通き裂^{20), 21)}

鋼床版の縦リブ横リブ交差部のデッキとUリブの溶接ルート部から発生してデッキに進展するき裂(以下、デッキ貫通き裂)は、早期発見が難しく、過度に進展するとデッキの陥没を引き起こす恐れがある危険な損傷である(写真-18 参照)。

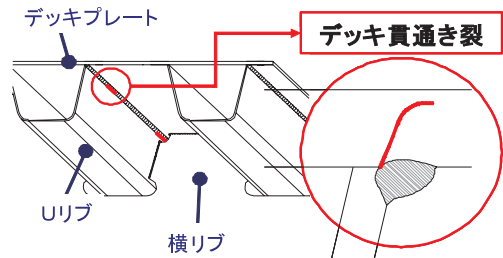


写真-18 デッキ貫通き裂

このデッキ貫通き裂の対策を考える上では、き裂の発生・進展性状を明らかにすることが重要であり、実物大試験体により疲労試験を行った(写真-19 参照)。



写真-19 疲労試験状況

図-16 は、ひずみ範囲が初期ひずみ範囲の50%となったときの荷重繰り返し载荷数を示している。スカラップなしに比べてスカラップありで、デッキ厚12mmに比べて16mmで繰り返し载荷数が増えているため、本部位の疲労耐久性は、スカラップを設けること

により、またデッキ厚を大きくすることにより向上することが分かった。

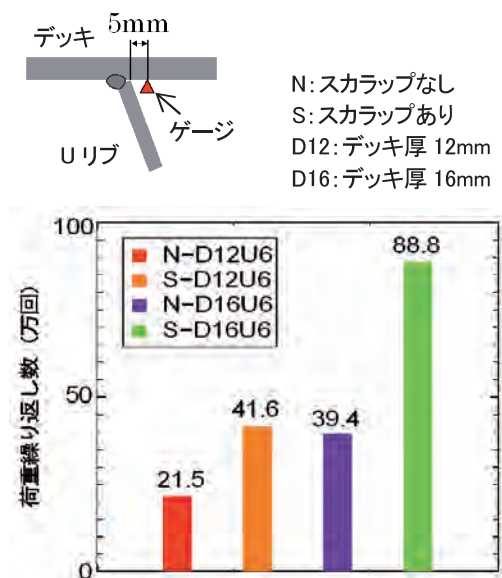


図-16 ひずみが初期ひずみの50%となったときの荷重繰り返し数

さらに、デッキ貫通き裂の発生寿命は非常に早く、進展はき裂が板厚方向に深くなるにしたがって遅くなることが分かった。

本研究は、縦リブ横リブ交差部のデッキ貫通き裂の疲労照査を目的とし、疲労試験から疲労設計曲線を構築することを目指している。

(3) 横リブスリット部の形状検討と疲労寿命評価方法

閉断面リブと横リブ交差部に設けられたスリットまわりのき裂は、図-17に示す通り、鋼床版の疲労損傷全体の約4割を占めるといわれている³⁾。本部位の疲労設計は標準構造詳細⁴⁾に従うこととなっているが、疲労損傷の発生状況から、今以上の対策法の確立が必要と考えられる。

そこで、本部位の疲労損傷発生原因を解明し、疲労耐久性を改善できるスリット形状の検討を行うとともに、疲労寿命評価方法の提案を行うことを目的として研究を行っている。

疲労損傷発生原因の解明と、疲労耐久性を改善できるスリット形状を検討するため、FEM解析を実施した。解析の詳細は、参考文献22)で報告しているため、ここでは解析結果の概要を簡単に報告する。

疲労損傷の発生原因は、

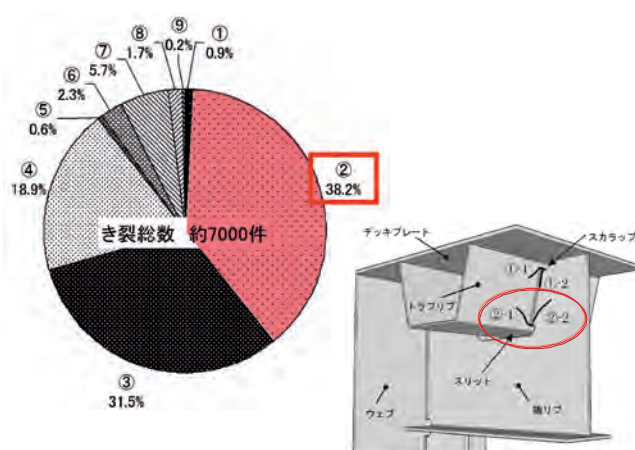


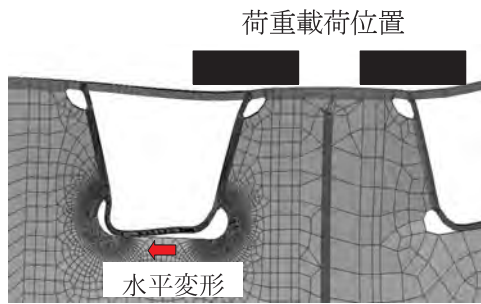
図-17 損傷タイプの構成比率

- ① Uリブ側の局部応力は、着目横リブから橋軸方向に1m程度離れた位置でUリブに荷重が偏載すると、図-18(a)に示すように、Uリブ底面が橋軸直角方向に変形しようとする。しかし、横リブがその変形を拘束しているため、Uリブ側で大きな面外曲げ応力が生じる
- ② また、Uリブから橋軸方向に1m程度離れた位置でUリブ直上に荷重が載ると、図-18(b)に示すように、Uリブの鉛直方向の変形によって横リブウェブが面外方向に変形する。そのため、横リブウェブ側で大きな面外曲げ応力が生じる

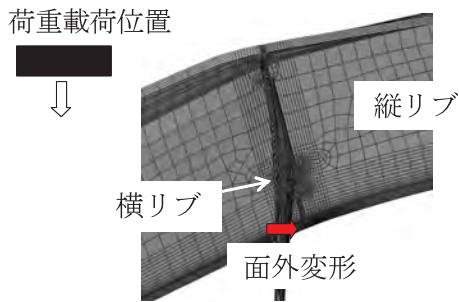
と考えられる。

横リブウェブ側止端部とUリブ側止端部の局部応力範囲の比較結果を図-19に示す。タイプAを基準とすると、タイプBでは大きな違いはなく、タイプCでは横リブ側で若干小さくなっている。タイプDでは側面部(DS)で応力が減少しているが、底面部(DL)でも同程度の応力が生じている。タイプEでは横リブ側、縦リブ側ともに応力が小さくなっている。タイプFでは、溶接止端部を仕上げていないにもかかわらず、タイプEと同じように比較的大きな応力低減がみられた。

密閉ダイヤフラムによる応力の増加分を赤色で示してある。密閉ダイヤフラムの影響は、タイプA、B、Cにおいて大きく、横リブ側で約20%、Uリブ側で約50%の増加となり、Uリブ側で影響が顕著である。その一方で、タイプDとEでは密閉ダイヤフラムによる影響は小さくなっている。タイプFでは横リブ側で密閉ダイヤフラムの影響がみられるが、密閉ダイヤフラム



(a) 縦リブの変形



(b) 横リブの変形

図-18 損傷発生原因

を考慮してもタイプA～Cと比べて応力は小さい。

よって、スリットまわりの局部応力を低減するためには、Uリブ底面の橋軸直角方向への変形を拘束する、もしくはUリブの変形を横リブスリット部で柔軟かく支持すること、および横リブの面外変形を抑制することが効果的であると考えられる。

今後は、スリットまわりの疲労寿命評価方法につい

て検討を行っていく予定である。

(4) 吊金具残置による疲労損傷²³⁾

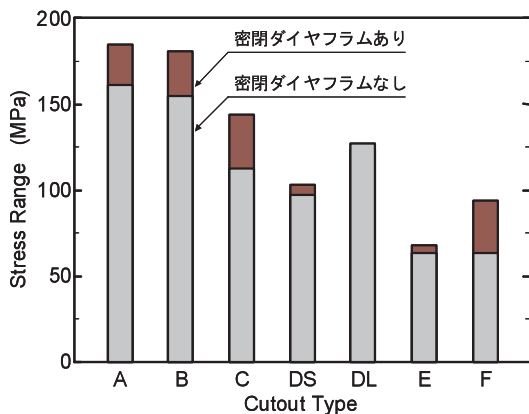
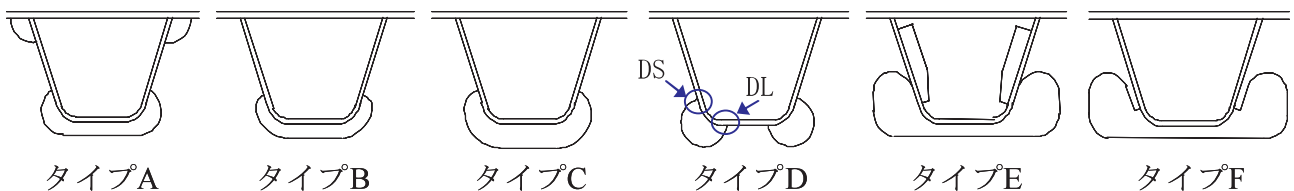
近年、鋼床版橋梁において、架設用吊金具を切断して撤去した後の残置部分から、疲労き裂が発生したとの報告がある。このため、疲労き裂の発生を防止する目的で、吊金具を完全に除去する施工も実施されている。

これに対し、吊金具残置部の高さと同接止端部の応力集中係数との関係を解析的に検討したものや、板曲げ疲労試験より疲労強度を推定したものがあるが、いずれも鋼床版の一部を取り出して評価したものであり、鋼床版全体と吊金具残置部を一体に捉えて評価した事例はない。

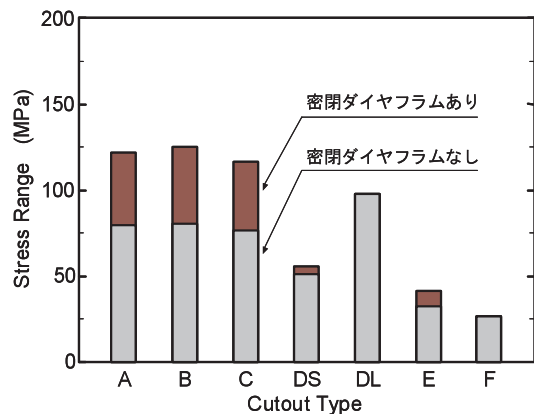
そのため当協会では、輪荷重作用下において、吊金具残置部が鋼床版の疲労耐久性に及ぼす影響を明らかにするために、FEM解析と、鋼床版試験体による疲労試験を実施している。

最終的には、鋼床版上面に取り付く付加物に対する疲労設計の確立が目標である。

解析的なアプローチとしては、実橋を再現した鋼床版モデルに吊金具残置部を設けたFEMモデルに輪荷重を作用させ、吊金具直下のデッキとUリブ溶接部および吊金具取り付け溶接部の応力性状の確認を行っている。解析の結果、吊金具直下のデッキとUリブ溶接部



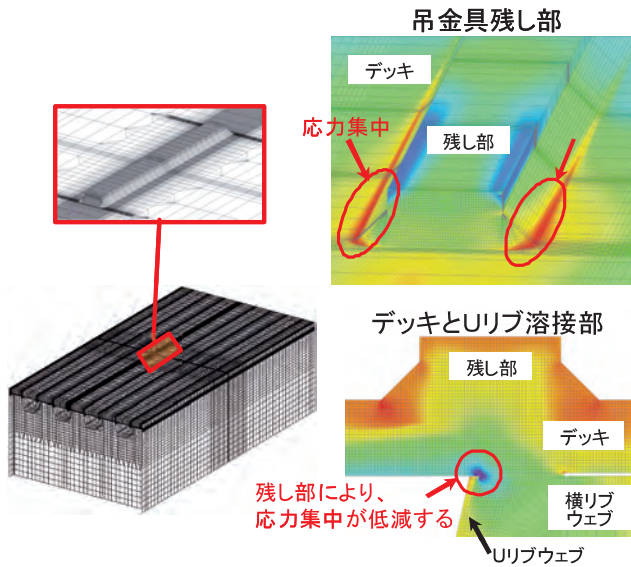
(a) 横リブウェブ側止端部



(b) 縦リブ側面側止端部

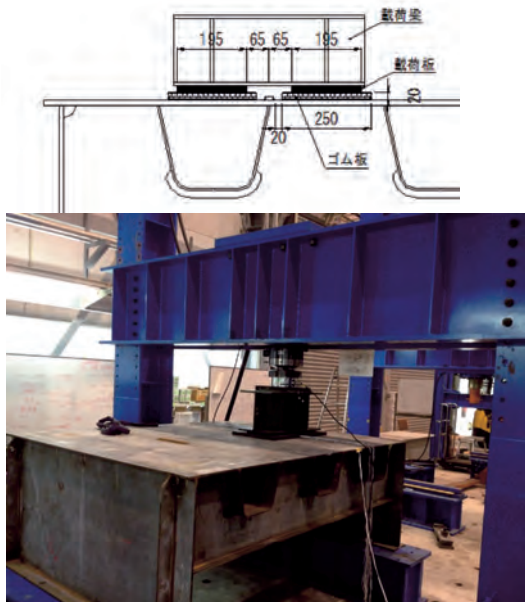
図-19 スリット形状の検討 (局部応力範囲の比較)

の応力に対しては、悪影響を及ぼさないことを確認した。一方、吊金具取り付け溶接部のデッキ側止端には高い応力集中が発生しており、ホットスポット応力（HSS）を用いた疲労照査では、デッキ12mmで吊金具の残し部高さが10mmのケースで、重交通路線において疲労き裂が発生する恐れがあることを確認した（図一20参照）。



図一20 FEM解析結果

そして、昨年度より、実橋試験体を用いた疲労試験に着手している（写真一20参照）。



写真一20 疲労試験の状況

(5) 高耐久性鋼床版マニュアル

鋼床版の疲労対策については、従来より各機関で様々な調査・研究が行われ、多くの知見が蓄積されて

いる。当委員会においても、過年度の発表の通り、き裂の発生メカニズムの解明や対策、設計法などについて道路管理者や大学研究機関などと共同研究を積極的に進めてきた。

当然のことながら、それらの知見は実務で有効に活用されてこそ意味があるものとなる。そこで当委員会では、最新の研究成果や知見を整理し、重交通下でも疲労き裂が発生しにくい鋼床版をつくるために、設計・製作・架設の各段階で留意すべき要点をコンパクトにまとめた「高耐久性鋼床版 設計・施工の手引き（仮題）」を作成中である。

(6) 開断面合理化鋼床版の提案

鋼床版の縦リブには、Uリブが用いられることが多い。Uリブは、ねじり剛性が大きいことや内面塗装が不要であることなどから、開断面リブに比べて経済性に優れるためである。このため、これまで開断面リブを用いた鋼床版の合理化の検討はあまり行われていない。しかし、開断面リブは構造が単純で製作性に優れ、幅員変化への対応なども容易である。実績の点から疲労耐久性にも優れる構造であると考えられる。

このようなことから、経済性、耐久性に優れた開断面リブを用いた鋼床版構造を提案することを目的として研究を行っている。

(7) 各国の鋼床版構造の調査

鋼床版小委員会では、世界各国の鋼床版に関する情報交換や、鋼床版橋梁の視察などを通して、技術力の向上に取り組んでいる。

4年おきに米国で開催される鋼床版国際会議で積極的に成果の発表を行っているほか、欧米の道路管理者や橋梁コンサルタントなどとの技術交流も行っている（図一21参照）。

海外での鋼床版調査では、補修補強現場の視察や縦リブ溶接の溶接形状の測定なども行っており、その成果は、雑誌や論文等^{24),25)}で積極的に公表している。

5. 鋼床版プロジェクト

(1) 新湊大橋（斜張橋の事例）

新湊大橋は、国際ターミナルとして重要な富山新港内の航路を跨ぐために建設された5径間連続鋼・コンクリート複合斜張橋で、2012年9月に開通した。橋長



図-21 海外における技術交流

600m, 中央径間 360m は日本海側に架かる斜張橋として最大であり（写真-21、図-22 参照）、自動車専用道の下に自転車歩行者道を吊り下げたダブルデッキ構造となっている（図-23 参照）。

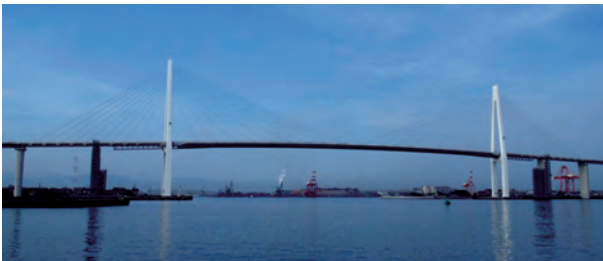


写真-21 新湊大橋

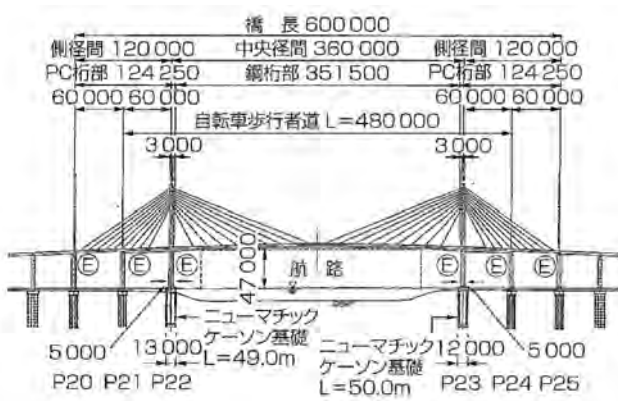


図-22 新湊大橋一般図

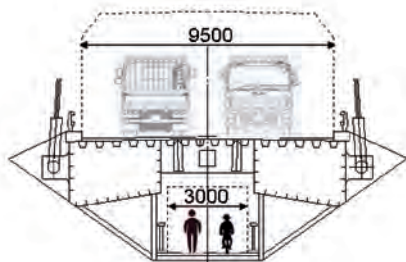


図-23 新湊大橋中央径間断面図

中央径間に死荷重の小さい鋼床版箱桁、側径間に死荷重の大きいPC箱桁とした複合斜張橋とし、死荷重バランスを取ることで中央径間長を大きく、側径間長を小さくしてコスト低減が図られている²⁶⁾。鋼床版のデッキ厚は12mm、縦リブ断面はU-320×240×6-40、舗装厚は80mmで、舗装は基層に融雪用の放熱管を内蔵した60mm厚のSFRC舗装、表層に20mm厚の砕石マスチック舗装が採用されている。

(2) 伊良部大橋主航路部(箱桁の事例)^{27), 28)}

伊良部大橋主航路部は、沖縄県宮古島と伊良部島を結ぶ延長6.5kmの離島架橋のうち、長山航路上に架かる橋長420m(=119m+180m+119m)の3径間連続鋼床版箱桁橋である(写真-22参照)。



写真-22 伊良部大橋

本橋は、厳しい塩害環境に加え、多くの台風が近辺を通過する強風環境に架橋するため、全幅員(車道+地覆)より主桁幅を広げた鋼床版の単箱断面が採用された(図-24参照)。

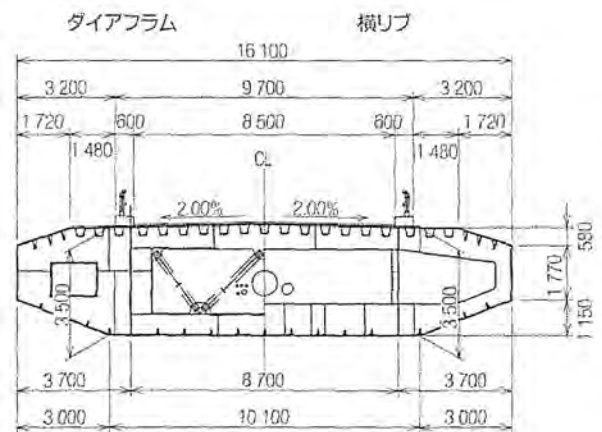


図-24 標準断面

鋼床版のデッキ厚は16mm、縦リブ断面はU-320×240×6-40である。

伊良部島は、宮古島と海峡により隔絶されているた

め、両島を繋ぐ伊良部大橋の整備により、現在の不安定な海上交通を、安定性と随意性が確保された陸上交通に変えて、伊良部島の医療・教育環境の改善、生活環境や福祉の向上及び地域の活性化が期待される。

(3) 東京ゲートブリッジ (トラス橋の事例) ²⁹⁾

東京ゲートブリッジは、東京港第三航路を跨ぐ橋梁であり、主径間部は橋長 760m、中央径間長 440m の鋼 3 径間連続トラス・ボックス複合構造橋梁である (写真-23 参照)。立地の制約条件から支間長が大きくなるため、上部工の軽量化を図る必要があり、全長にわたり鋼床版構造が採用された。



写真-23 東京ゲートブリッジ

鋼床版は、FEM 解析により疲労耐久性の高い構造 (図-25 参照) を検討し、その結果を実物大の供試体を用いた静的載荷試験 (写真-24(a) 参照) と疲労試験 (写真-24(b) 参照) により検証し、採用された。

鋼床版のデッキ厚は 16mm、縦リブ断面は U-400×343×8-40、縦リブ支間は 4.0m、縦リブ横リブ交差部のスリット形状を改良し、内リブを設けている (図-25 参照)。

(4) 朝明川橋 (アーチ橋の事例)

朝明川橋は、中日本高速道路株式会社で施工中の鋼上部工及び PC 上部工の複合橋梁である。三重県三重

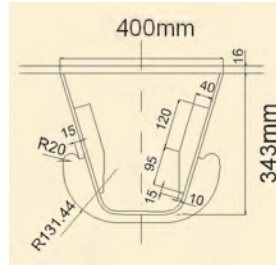
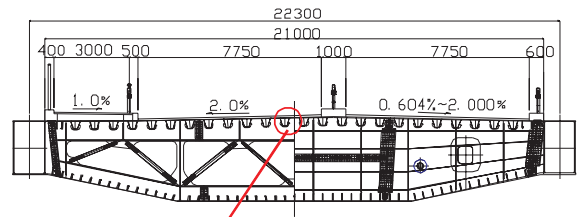


図-25 縦リブ横リブ交差部構造



(a) 静的載荷試験



(b) 疲労試験

写真-24 実物大試験体による確認試験

郡を通る新名神高速道路の橋梁で、橋長 325.0m (38.8m+225.0m+58.8m)、幅員 20.0m の、鋼・PC 混合 3 径間連続アーチ補剛箱桁橋である (図-26 参照)。

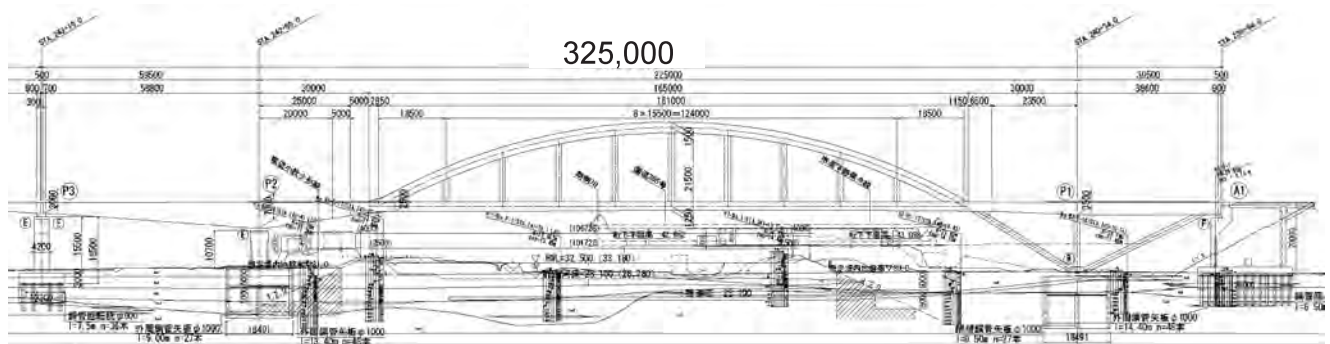


図-26 朝明川橋



(a) 港北 JCT



(b) 生麦 JCT

写真-26 建設中の JCT の例



写真-27 JR 常磐快速線 利根川橋

2014 年の完成に向けて架け替え工事が実施されている。現在の橋梁は河川改修事業に伴う改良工事により建設された。新設された下り線に対して、上り線は 1920 年に製作された旧下り線の桁を補強し再利用していたが、老朽化のため上り線を全面的に架け替えることとなった。

この利根川橋梁には、PC 橋に比べ軽量で経済的になること、および短期施工が可能となることから、床組構造に鋼床版を用いた鋼トラス橋が採用されている。基本構造形式は縦桁式鋼床版トラス橋であるが、県道上空を跨ぐ一部の径間では下弦材と床組みを一体化し

た低床式鋼床版トラス橋として主構高を抑え、桁下空間を確保している³¹⁾ (図-28 参照)。

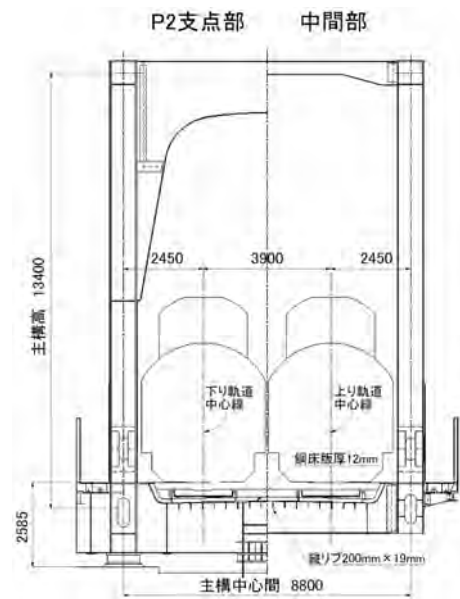


図-28 利根川橋梁断面図

鋼床版はデッキが 12mm 厚で、縦リブに平リブ (高さ 200mm×板厚 19mm) を使用しており、縦リブと横リブとの交差部には道路橋と異なる構造ディテールが見られる。横リブウェブの縦リブ貫通部はスカラップのないスリット構造で、縦リブ全周が溶接されている(写真-28 参照)。また、スリット部で部材間のすき間 1mm 以内の密着度を確保するため、縦リブのコバ面を面取りする工夫がなされている。



写真-28 縦リブ横リブ交差部のスリット構造

そのほか、鉄道橋ならではの特徴として、鋼床版の上面に横圧金具と呼ばれる孔明きリブが橋軸方向に配置されており、軌道に生じる水平力に抵抗できるようになっている(写真-29 参照)。

(7) 名古屋高速 3 号大高線 (床版拡幅の事例)³²⁾

名古屋高速 3 号大高線の上り線堀田入口と下り線高辻入口付近では、加速車線内の車両が合流する際に、



写真-29 鋼床版上面の横圧金具

本線の追越車線側を走行する後続車両に影響を及ぼすため、慢性的な渋滞に見舞われていた(写真-30 参照)。これを緩和するため、両オンランプ間を一体化し、加速車線長を延伸することで円滑に車両が合流できるように構造改良を行った(写真-31、図-29 参照)。



写真-30 拡幅前



写真-31 拡幅後

上部構造では、死荷重の増加を極力抑え、下部構造に負担を与えないようにするため、鋼床版を採用し、既存のRC床版を一体化する構造とした。新設鋼床版のデッキ厚は12mm、Uリブ厚は6mmおよび8mmである。また、追い越し車線側のコンクリート壁高欄を撤去し、一体化後は鋼製の中央分離帯とした。このような軽量化を図った結果、一体化後も、すべての橋脚において所要の耐震性能を保有することを確認した。

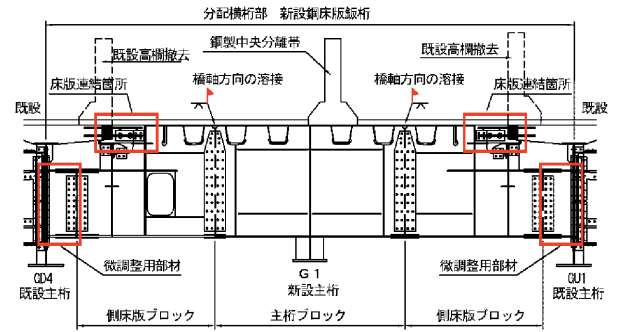


図-29 標準断面

6. おわりに

鋼床版の疲労損傷の発生原因と進展メカニズム、そして疲労寿命は未解明の部分が多い。現在、日本橋梁建設協会鋼床版小委員会では、鋼床版橋梁を有する道路管理機関、大学や民間の研究機関と連携して検討を行っているところであり、その成果は論文や雑誌等に報告している。

地震が多く、軟弱な地盤上に橋梁を建設することが多い我が国では、鋼床版は無くてはならない床版形式の一つである。鋼床版の疲労損傷の解決に向けて、今後も精力的に取り組んで行く所存である。

[参考文献]

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所, (独法) 土木研究所, (社) 日本橋梁建設協会: 損傷状況を考慮した鋼床版の構造形式見直しに関する研究, 国総研資料 No. 608, 2010. 9.
- 2) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書, 2012. 3.
- 3) (社) 土木学会: 鋼床版の疲労 2010 年改訂版, 土木学会鋼構造シリーズ 19, 丸善, 2010. 12.
- 4) (社) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針, 2002. 3.
- 5) FHWA: MANUAL FOR DESIGN, CONSTRUCTION, AND MAINTENANCE OF ORTHOTROPIC STEEL DECK BRIDGES, 2012. 2., <http://www.fhwa.dot.gov/bridge/pubs/if12027/if12027.pdf>
- 6) 大橋治一, 三木千壽, 梁取直樹, 小野秀一: 厚肉デッキと大型トラフリップで構成された鋼床版の実大モデル載荷試験による構造特性, 土木学会論文集 No. 647/ I-51, pp. 295-303, 2000. 4.
- 7) 日本道路公団名古屋建設局: 合理化鋼床版設計施工指針(案), 2000. 5.

- 8) 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、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol. 67, No. 2, pp. 421-429, 2011.
- 9) 穴見健吾: Ultrasonic Impact Treatment (UIT), 鋼構造物の疲労損傷は防止できるのか? (各種鋼構造物の疲労設計の現状と将来像) シンポジウムテキスト, (社)日本溶接協会鉄鋼部会技術委員会発行, pp. 101-104, 2005.
- 10) 野瀬哲朗: 疲労強度向上向け超音波ピーニング, 溶接学会誌, 第 77 巻第 3 号, pp. 6-9, 2008.
- 11) 富永知徳, 松岡和己, 佐藤嘉昭: 補修溶接を施した既設クレーンランウェイガダーの超音波衝撃処理による寿命向上, 鋼構造論文集, 第 14 巻, 第 55 号, pp. 47-58, 2007. 9
- 12) 富永知徳, 高田佳彦, 中島隆, 松岡和己: 超音波衝撃処理された鋼床版鉛直スチフナーに関する局部応力を考慮した疲労性能評価, 土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 2, pp. 273-285, 2010. 6
- 13) 柿市拓巳, 石川敏之, 山田健太郎: 鋼床版箱桁橋の垂直補剛材直上き裂への ICR 処理の施工試験, 鋼構造年次論文報告集, 第 17 巻, pp. 351-358, 2009.
- 14) 山田健太郎, 石川敏之, 柿市拓巳: 疲労き裂を閉口させて寿命を向上させる試み, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No. 4, pp. 961-965, 2009. 11.
- 15) 杉山裕樹, 閑上直浩, 田畑晶子, 奥村学, 大久保宣人, 夏秋義広: Uリブ鋼床版縦溶接部における内面すみ肉溶接による応力性状, 第 7 回道路橋床版シンポジウム論文集, pp. 73-78, 2012. 6.
- 16) 西田尚人, 楠元崇志, 坂野昌弘, 田畑晶子, 杉山裕樹, 奥村学, 夏秋義広: Uリブをデッキに両面溶接した鋼床版の疲労試験, 土木学会第 67 回年次学術講演会, I-282, pp. 563-564, 2012. 9.
- 17) 栗原康行, 輛一: GFRP 製密閉ダイヤフラムを用いた縦桁-横リブ交差部の疲労強度向上検討, 土木学会第 64 回年次学術講演概要集 pp. 311-312, 2009. 9.
- 18) 例えば, 湯田誠, 藤田敏明: 鋼床版トラフリブ縦方向溶接部の溶込み評価技術-「トラフチェッカー」の開発-, 溶接技術, pp. 82-89, 2011. 9.
- 19) 大西弘志, 小笠原照夫, 平山繁幸, 内田大介, 井口進, 川畑篤敬: マクロ試験による鋼床版ビード貫通き裂の発生起点に関する検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, I-295, pp. 589-590, 2012. 9.
- 20) 川崎靖子, 原田英明, 森猛, 内田大介, 川畑篤敬, 井口進, 宮下敏: デッキプレート貫通型疲労き裂の発生・進展性状に対するスカーラップと板厚の影響, 土木学会第 65 回年次学術講演概要集 pp. 183-184, 2010. 9.
- 21) 川崎靖子, 原田英明, 森猛, 内田大介, 川畑篤敬: デッキプレート貫通型疲労き裂の発生・進展性状, 土木学会第 66 回年次学術講演会講演概要集, pp. 345-346, 2011. 9.
- 22) 判治剛, 加藤啓都, 館石和雄, 崔誠珉, 平山繁幸: 閉断面リブを有する鋼床版の横リブスリット部の局部応力特性, 構造工学論文集 Vol. 59A, 2013. 3.
- 23) 藤井基史, 山内誉史, 内田大介, 平井大雅, 貝沼重信: 鋼床版上面の架設用吊金具残し部の疲労強度に関する解析的検討, 鋼構造年次論文報告集, 第 20 巻, pp. 557-564, 2012. 11.
- 24) 井口進, 山田健太郎, 川畑篤敬: オランダにおける鋼床版疲労損傷の補修・補強事例の調査, 橋梁と基礎, pp. 43-48, 2006. 6.
- 25) 井口進, 内田大介, 平山繁幸, ヤサモル, 西岡勉, 山田健太郎: 英国における鋼床版の疲労損傷とその補修事例の調査報告, 橋梁と基礎, pp. 20-25, 2012. 10.
- 26) 吉永宙司, 山之内哲也, 後藤嘉雄, 板橋啓治, 平山博, 吉澤努: 新湊大橋(仮称)の計画と設計, 橋梁と基礎, pp. 31-38, 2007. 4.
- 27) 宜保勝, 我謝将人, 原田雅彦, 梅崎秀明: 塩害環境下にある伊良部大橋主航路部の計画と設計, 橋梁と基礎, pp. 15-20, 2011. 7.
- 28) 我謝将人: 伊良部大橋主航路部鋼橋の新防食技術への挑戦, 「橋梁長寿命化技術に関する技術研究交流会」資料, 2012. 12. 18
- 29) 国土交通省関東地方整備局東京港湾事務所: 東京港臨海道路 II 期事業の概要-2 1 世紀を拓く、夢の架け橋-, <http://www.pa.ktr.mlit.go.jp/tokyo/work/pdf/all.pdf>
- 30) 横浜環状北線の完成予想模型写真: <http://www.yokokan-kita.com/yokokan/seibi/mokei.html>
- 31) 佐々木昭悟, 吉田聖浩, 吉川正治, 工藤伸司, 楠田広和, 梅本喜久: 長大鋼鉄道トラス橋の設計・製作-常磐線利根川橋りょう-, 橋梁と基礎, pp. 15-20, 2012. 3.
- 32) 鈴木信勝, 前野裕文, 横井龍也, 山田哲也, 堂免慎哉, 多留彰男: 上下線が分離した橋梁の一体化, 橋梁と基礎, pp. 22-27, 2013. 3.