

交通規制を必要としない鋼床版の疲労損傷対策工法の検討

(財) 阪神高速道路管理技術センター調査研究部調査研究課 高田 佳彦
阪神高速道路(株)技術部技術開発グループ 青木 康素
阪神高速技術(株)維持事業部調査点検課 酒井 優二

要 旨

近年、鋼床版の疲労損傷が深刻な問題となっているが、Uリブ形式においてデッキプレートとUリブ溶接線を起点に発生するき裂は、デッキプレートに進展した場合、交通荷重の支持機能の低下や舗装の損傷を誘発する恐れがある。都市高速の厳しい制約を踏まえて、今回、デッキプレートとUリブ溶接線の疲労対策として、交通規制を必要としない、補強、予防保全対策を検討した。本検討では、FEM解析、および、実橋をモデル化した供試体による静的試験により、応力低減効果を評価した。その結果、Uリブ間当て板は70%程度の応力低減効果があった。さらにUリブ内にモルタル充填を併用すると、ピーク応力が1/5程度に低下し最も効果的な対策工法であると認められた。また充填用の軽量膨張モルタル材料を開発し、品質管理や施工性の向上を検討した。

キーワード: 鋼床版, 疲労き裂, Uリブ内モルタル充填工法, FEM解析, 静的載荷試験

はじめに

鋼床版は軽量で、架設が容易かつその施工が速いため、阪神高速道路では、湾岸線など死荷重を軽減する必要のある軟弱地盤区間の橋梁、長大橋、神戸線の震災復旧区間に多数採用されている。

鋼床版は、自動車輪荷重が直接載荷し、その繰返し数が極めて多い。また、溶接による薄板集成構造であるため全体的に剛性が小さく、鋼床版を構成する板要素が複雑な挙動をし、応力変動が大きい¹⁾。大型車交通量特に重量違反車の累積、溶接部の局所的な応力集中の繰返し、および、片側すみ肉溶接による継手疲労強度の不足により、疲労損傷に繋がると考えられる。阪神高速道路においても、多数の疲労き裂が発見されている。

鋼床版の縦リブ構造は、阪神高速道路ではバルブリブとUリブにわけられる。バルブリブの鋼床

版の疲労損傷は、特定の構造ディテールを有する縦リブと横リブの交差部で発生し、対策工法も提案されている²⁾。

一方、Uリブ構造では、き裂のタイプが多岐にわたっている。その内、デッキプレートとUリブ溶接線を起点に発生するき裂は、進展性が高く、床組構造への影響が懸念される。また、デッキプレートに進展した場合、交通荷重の支持機能の低下や舗装の損傷を誘発する恐れがある。

Uリブ構造の鋼床版は、そのほとんどの橋梁が、標準図に倣い部材配置や構造ディテールを決めており、交通状況次第では、今後どの橋梁にも疲労損傷が発生する恐れがある。

阪神高速道路では、これまで現場溶接やUリブ取替え工法等の応急措置や補修を行ってきた。また、舗装の一部をコンクリート系の材料に置換え、デッキプレートとの一体化による合成化を図る対策が実施されている。この工法は、高い応力低減

効果が期待できるが、周期的な打替えが必要と考えられ、その場合は交通規制が不可避である。

都市高速の厳しい制約を踏まえて、今回、既設鋼床版を対象に、デッキプレートとUリブ溶接線の疲労対策として、交通規制を必要としない補修、予防保全の対策工法を検討した。本検討では、応力低減効果に着目してFEM解析および実橋をモデル化した供試体による静的載荷試験を実施し、その結果から最適な工法を提案するものである。

1. 対策工法の構造検討

1-1 対策工法の要求性能

鋼床版などの溶接構造に対して、疲労設計に用いるS-N曲線は、直応力に対する繰返し回数と直応力範囲の関係を定義しており、継手の強度等級も直応力が作用する際の疲労強度を基に規定されている¹⁾。一方、鋼床版のデッキプレートとUリブとの溶接を起点とするき裂は、局所的な面外曲げ応力によるもので、それに対する継手の強度等級の設定、S-N曲線の構築は、研究途上といつてよい。したがって、疲労設計が困難である以上、疲労損傷が発生している現在の状況に対して相対的に、溶接部の発生応力の低減、継手強度の向上、繰返し回数の回避、を効果的に図る対策法を目指すこととなる。繰返し回数の回避は、わだち位置(車線位置)を替えることが必要となり、都市高速では不可能である。それ以外の対策法についてどのように効果を高めるかが対策工開発の重要な要素である。

そこで、対策工法に求める要求性能を次のとおり設定した。

- ・面外曲げ剛性の向上が高い。
- ・Uリブの局所変形が軽減され、応力低減効果が高い。
- ・現状の片側すみ肉溶接に対して、継手強度向上効果が高い。

1-2 対策工法の構造

複数の対策案の予備検討を踏まえて、次の

Case-1～Case-5の5工法を検討した。

(1) Uリブ間縦桁設置工法 (Case-1)

図-1は、Case-1のUリブ間縦桁設置工法の概要である。横リブを支点とする縦桁をUリブ間に配置して輪荷重を縦桁から横リブに伝達させることにより、デッキプレートに作用する輪荷重を軽減して溶接部の応力低減を図るものである。

縦桁は、H294×200×8×12 mmとし、横リブのウェブで高力ボルトにより接合する。縦桁とデッキ面とは、スタッドボルトおよび接着剤により、肌隙や分離を解消する。

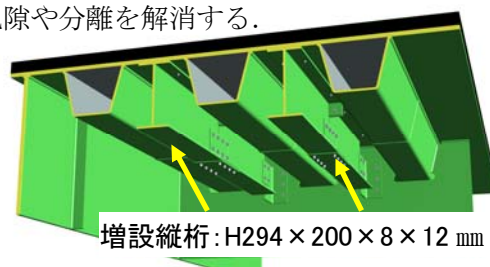


図-1 Uリブ間縦桁設置工法 (Case-1)

(2) Uリブ間当て板設置工法 (Case-2)

図-2は、Case-2のUリブ間当て板設置工法である。当て板により、面外曲げ剛性を高め、溶接部の応力を低減し、疲労き裂の防止を図る。また、いったん発生したき裂の進展を抑制する効果も期待できる。板厚 $t=9$ mmの逆U型の鋼板をUリブ側面およびデッキプレート下面に設置する。当て板とデッキプレートとは2液硬化型高強度エポキシ系接着剤とスタッドボルト(M12)で一体化する。Uリブウェブ面とはワンサイドボルトで摩擦接合として一体化する。

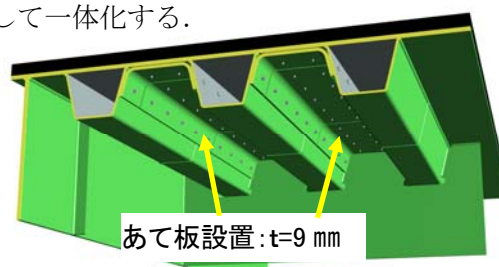


図-2 Uリブ間当て板設置工法 (Case-2)

(3) Uリブ内モルタル充填工法 (Case-3およびCase-4)

Case-3はCase-1の、Case-4はCase-2の、それぞれの工法に対し、Uリブ内に軽量モルタルを充填する工法である。モルタル充填のみでは応力低減効果に限界があることが報告されており³⁾、

あて板などと併用するものである。モルタル充填により、デッキプレートたわみ変形を抑制し、溶接部に発生する応力を低減させる効果がある。また、デッキプレートに貫通き裂が発生しても、輪荷重の支持が可能で、車輪がはまり込むような被害を防止できる。モルタルは、比重：1.39、圧縮強度（4週）：22N/mm²、静弾性係数：5.5kN/mm²の材料を使用した。この工法は、死荷重増加の影響により、鋼床版全面に施工することは不可能である。死荷重増に対して、鋼床版桁の応力を許容値内に収めるには、施工できるUリブは、1車線あたり2～4本程度である。車輪位置を的確におさえて、施工対象Uリブを決定する必要がある。

(4) 開断面化+内面すみ肉溶接工法(Case-5)

図-3は、Case-5の開断面化+内面すみ肉溶接工法である。Uリブの下フランジを切断撤去し、Uリブ内面側からすみ肉溶接(のど厚 $t=5\text{ mm}$)を行う。併せて、Uリブ断面の欠損を補うため、アンクル材をUリブ腹板に高力ボルトにて接合する。バルブリブにおいてバルブリブの縦溶接線はこれまで疲労き裂が報告されていない。これを背景に、内面に現場溶接を施すことで両面すみ肉溶接とし、継手強度の改善を図るものである。併せて、開断面化により、Uリブは面外曲げ荷重を負担しなくなるため、Uリブの変形に起因して溶接部に加わる面外曲げ応力が低減される。

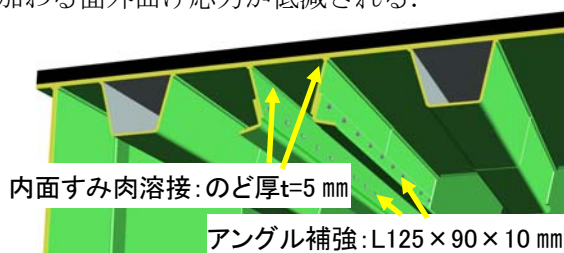


図-3 開断面化+内面すみ肉溶接工法(Case-5)

2. FEM解析

2-1 解析モデル

载荷試験に先立ち、鋼床版の応力性状の把握、および、補強による応力低減効果の把握を目的に、FEM解析を実施した。

解析モデルは、3章の静的载荷試験の供試体を

モデル化したもので、図-4にその構造を示す。デッキプレート厚 $t=12\text{ mm}$ 、Uリブ厚 $t=6\text{ mm}$ とし、Uリブとの溶け込み量はゼロとした。着目箇所近傍を溶接ビードも含めてソリッド要素（最小要素サイズ $1.5\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ 程度）で、それ以外はシェル要素で構成されている。解析ソフトは、MSC Nastranを用いた。荷重は100kNとし、同図に示すUリブ支間中央断面（Sec-C）に载荷した。载荷方法は、発生応力が最も高くなる⁴⁾、大型車の中・後輪（ダブルタイヤ）を模した载荷モデルL200 mm×W200 mm×2箇所（間隔100 mm）とし、Uリブウェブを挟みこむような形で载荷した。

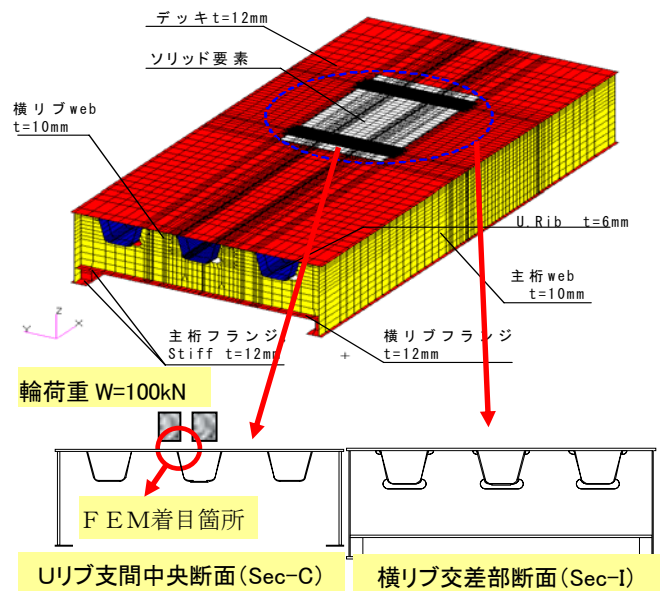


図-4 FEM解析モデル

2-2 FEM解析結果

図-4のFEM着目箇所である、デッキプレートとUリブ溶接部の周辺をアウトプットし、応力分布を評価する。溶接ビードは疲労き裂の起点であり、その応力性状は疲労き裂の発生の有無に大きく影響する。ただ、溶接ビードの発生応力は実測できず解析で求めるしか方法がないことから、FEM解析で対策によりこの応力がどのレベルまで低下したかが、工法選定の重要な要素である。

(1) 対策前 (Case-0)

図-5(b)に示すように、デッキ側ルート部(P01)で-341MPa、Uリブ側ルート部(P02)で-328MPaと、高い圧縮応力が見られる。止端部では、デッキ側

(P03)で-244MPa, Uリブ側(P04点)は-139MPaである。ルート部, 止端部ともデッキ側の圧縮応力が高い。なお, 最大主応力でも, 溶接部周辺は圧縮応力が分布していた。

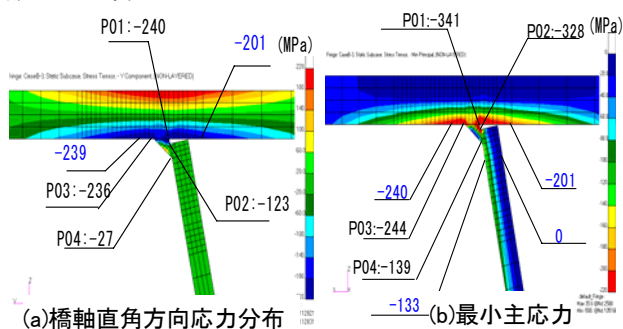


図-5 対策前の応力分布図

(2) Uリブ間縦桁設置工法 (Case-1)

縦桁補強により, 図-6(a)のようにデッキプレート上の応力は低減し, デッキ側ルート部(P01)で-185MPa, デッキ側止端(P03)で-135MPaと図-5(a)の0.6~0.8に減少している。一方, 最小主応力における圧縮応力はP01で-310MPa, P02で-382MPaと, 補強前より増大している。縦桁とデッキプレート下面とは剛結でモデル化しており, 輪荷重により縦桁を支点としてUリブ内のデッキプレートが局所的な面外曲げ変形を受け, ルート部の鉛直応力が増大したと考えられる。

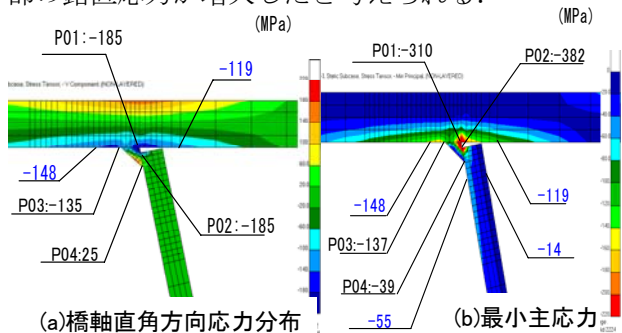


図-6 Case-1の応力分布図

(3) Uリブ間当て板設置工法 (Case-2)

Case-1と同様, 図-7(a)のようにデッキプレートの応力はP01で-193MPa, P03で-164MPaと0.7~0.8に減少している。図-7(b)の最小主応力では, P01で-299MPa, P02で-331MPaと, 補強前とほぼ同レベルである。本解析からもUリブ間だけの補強では応力低減に限界があり, Uリブ内においても対策工が必要であることが明らかである。

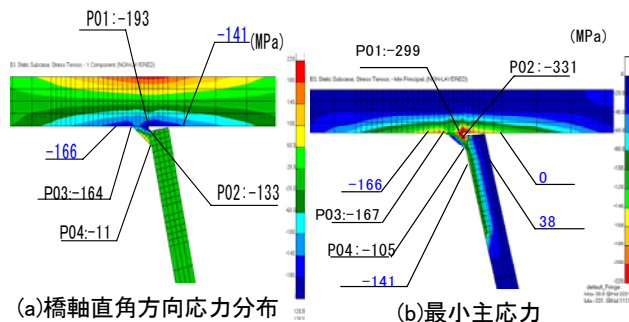


図-7 Case-2の応力分布図

(4) Uリブ内モルタル充填工法 (Case-3およびCase-4)

図-8にCase-3の, 図-9にCase-4の, 応力分布図をそれぞれ示す。モルタル充填効果により, 発生応力が1/5~1/10と大幅に減少している。この応力レベルでは, どの継手等級を適用しても, 疲労限(打ち切り限界)を下回っていると考えられ, 本対策工法を施せば疲労損傷が回避できると期待できる。

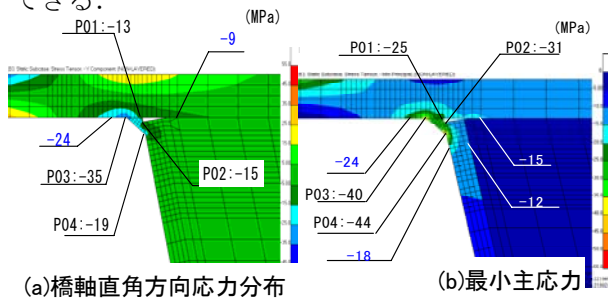


図-8 Case-3の応力分布図

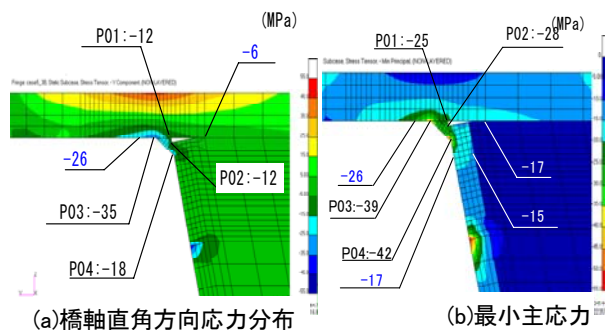


図-9 Case-4の応力分布図

(5) 開断面化+内面すみ肉溶接工法 (Case-5)

内面すみ肉溶接の効果により, 図-10(b)に示すとおりルート部の応力は, P01で-102MPa, P02で-158MPaと, 対策前の0.3~0.5と大きく低減している。また, 継手強度の改善が期待できる。

一方, 止端部では, デッキ側(P03)で-309MPaと1.3倍に増加し, Uリブ内面のデッキ側で-233MPaと高い圧縮応力が発生している。ただ,

止端部は、グラインダーによる仕上げやピーニング処理により応力集中の緩和が可能である。

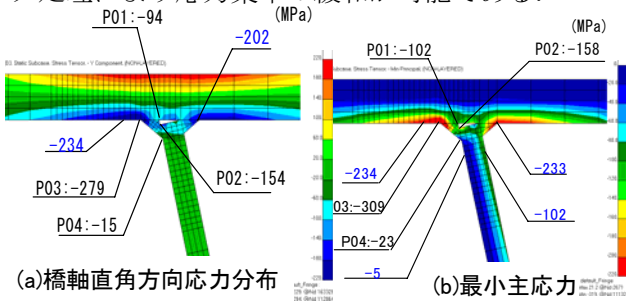
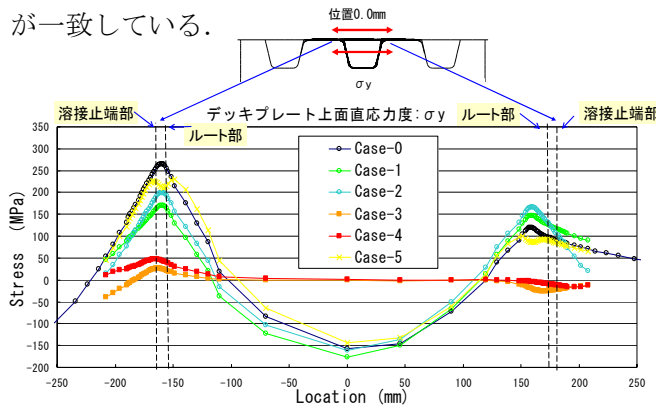


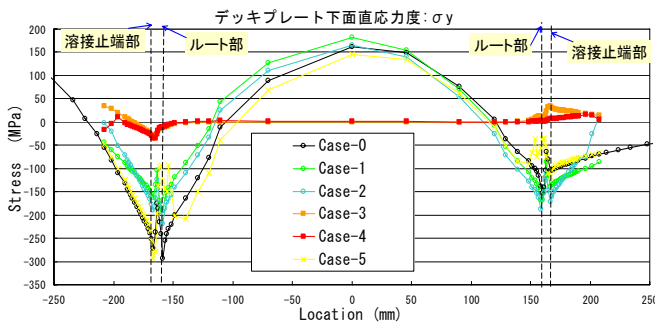
図-10 Case-5の応力分布図

2-3 対策工法における応力分布の比較

各対策工法の比較評価を目的に、デッキプレートの上および下の応力分布を算出した。その結果を、図-11に示す。Uリブウェブ上では極めて高い応力集中状態であり、Case-0(補強前)においてデッキプレートの上では270MPa程度の引張応力が、下では-300MPa程度の圧縮応力が発生している。モルタル充填工法であるCase-3, Case-4は、溶接部近傍に加えて、Uリブ内側においても応力が低く、デッキプレートの変形が減少していると推定される。この応力低減メカニズムは、デッキの曲げ剛性を増大させた場合と傾向が一致している。



(a) デッキプレート上面の橋軸直角方向の直応力度(σ_y)



(b) デッキプレート下面の橋軸直角方向の直応力度(σ_y)

図-11 デッキプレートの応力度分布

3. 静的荷重試験

3-1 静的荷重試験方法

(1) 供試体および計測位置

FEM解析に加えて、静的荷重試験を行った。供試体の構造は、FEM解析モデルと同様とし、図-4のとおりである。供試体は5体作成し、対策前およびCase-1~Case-5のそれぞれの対策後の発生応力を計測した。デッキプレートとUリブとの溶け込み量は、損傷事例を参考に、1mm(Uリブの板厚の15%程度)に設定し、 Co^2 ガスマタルアーク溶接による1パスで溶接した。ひずみゲージは、Uリブ支間中央断面(Sec-C)および横リブ交差部断面(Sec-I)の2断面に設置し、その代表的な位置を図-12に示す。溶接部近傍のひずみゲージは、溶接止端から5mmの位置に設置し、3軸ゲージ以外はすべて橋軸直角方向に設置している。

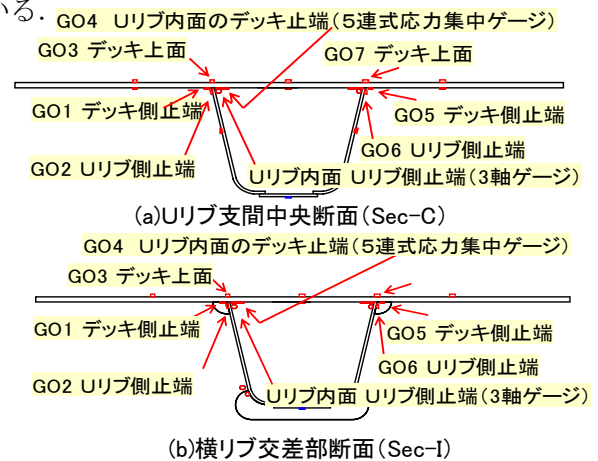


図-12 代表的なひずみゲージの設置位置

(2) 荷重方法

荷重荷重は、FEM解析と同様、100kNとした。鋼床版の応力は、輪荷重位置によって大きく変動するため、橋軸方向および橋軸直角方向に移動させた。橋軸直角方向の荷重位置は、次のとおりとし、図-13の各荷重パターン図に対応している。

- 荷重パターンA：Uリブ図心に荷重板が位置。
- 荷重パターンB：荷重板の片輪の端部が、溶接ビード上に位置
- 荷重パターンC：リブウェブを挟みこむような形で位置し、FEMと同じ荷重位置。

3-2 静的荷重試験結果

ここでは、対策前、Case-1、Case-4 および Case-5 について、詳述する。

(1) 対策前の荷重試験結果

図-13 は、Uリブ支間中央断面における各荷重パターンの発生応力図である。3軸ゲージは、最大主応力を σ_1 、最小主応力を σ_2 と表示する。

FEM解析との検証は、図-5(a)と図-13(c)との比較により、デッキプレート止端部(G01)において、共に-239MPaと、良好に一致している。

荷重パターンCは、各荷重パターンの中で最も応力レベルが高い。同一箇所(G01)で対比すると荷重パターンA(-92MPa)ではパターンCの0.38である。つまり、タイヤの荷重位置が僅かに変わるだけで、発生応力に大きく影響を及ぼす。実橋では、わだち位置とUリブ配置との関係が疲労損傷の重要な要因であることは明らかである⁴⁾。

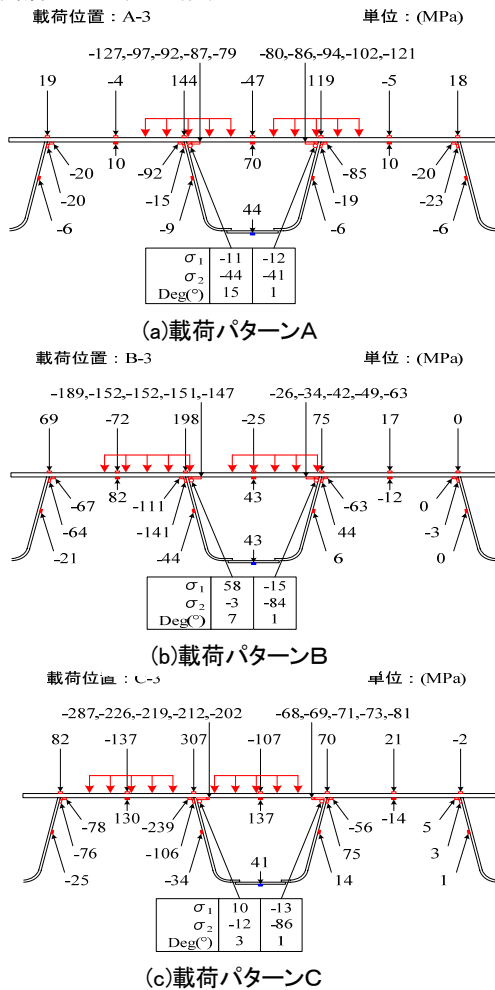


図-13 Uリブ支間中央断面の発生応力比較

(2) Uリブ間縦桁設置工法 (Case-1)

図-14 は Case-1 の静的荷重試験結果として、各荷重パターンを図-12 に示すひずみゲージについて発生応力を比較したものである。荷重パターンCにおいては、デッキ側止端(G01)で-239MPa、Uリブ内面のデッキ止端(G04: 止端から2番目の素子)で-226MPaが-145MPaと、縦桁設置の効果により60%程度にまで低減しており、FEM解析結果と同様の傾向である。

一方、荷重パターンAでは、デッキ側止端においてG01点で-166MPa、G05点で-153MPaと対策前より増加している。これは、Uリブウェブと縦桁とを支点とする、デッキプレートの板曲げが発生し、それに起因して応力が増加したと考えられる。このように、荷重位置や荷重幅(タイヤ幅)の影響を敏感に受け、対策効果が損われたり、逆に応力が上がることに留意する必要がある。

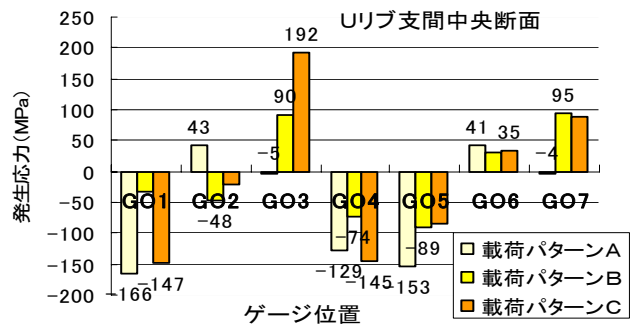


図-14 Case-1 の荷重パターンによる応力比較

(3) モルタル充填工法 (Case-4)

Case-4 の静的荷重試験結果を、図-15 に示す。

本対策により、応力レベルが大幅に低下し、ピーク応力がデッキ上面(G03)で63MPaに収まっている。Uリブ内モルタル充填による補強効果により、Uリブの変形が抑えられるとともに、デッキプレートの板曲げが抑制されることで、発生応力

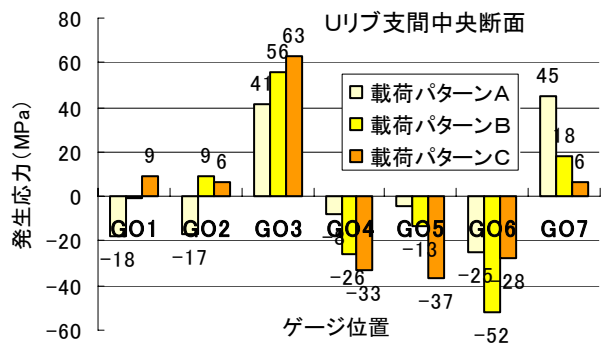


図-15 Case-4 の荷重パターンによる応力比較

が低下したと考えられる。 荷重パターンに差は小さく、 全体的に発生応力が大幅に下がっており、 打ち切り限界を下回っていると推定できる。

(4) 開断面化+内面すみ肉溶接工法 (Case-5)

Case-5 の静的荷重試験結果を、 図-16 に示す。 FEM解析と同様、 開断面化によるUリブが面外曲げを分担しなくなったため、 Uリブウェブ応力が低下している。 デッキ側止端(G01)でピーク応力が-239MPa から-165MPa と 0.69 に低下している。

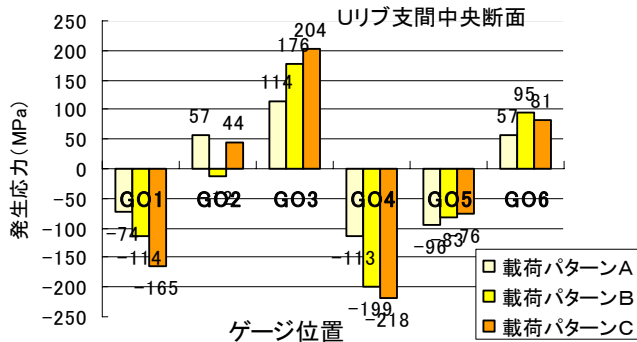
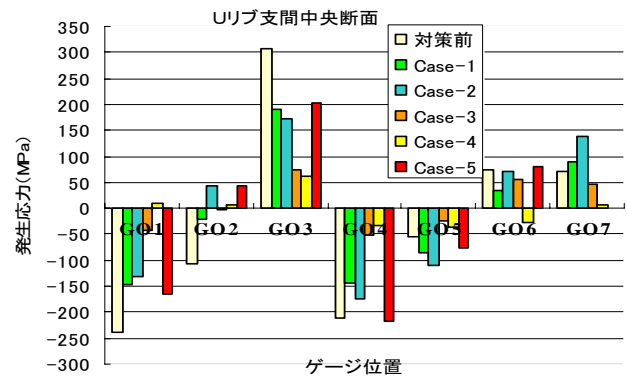
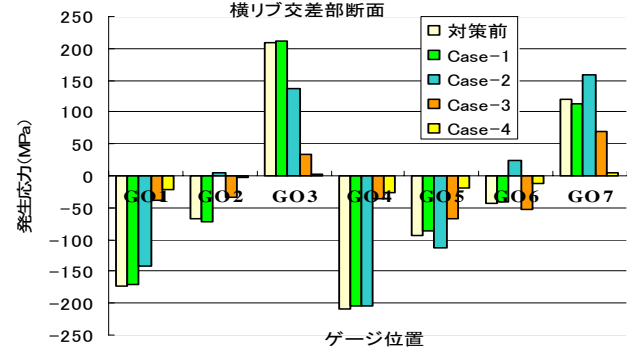


図-16 Case-5 の荷重パターンによる応力比較



(a)Uリブ支間中央断面



(b)横リブ交差部断面

図-17 対策工の発生応力比較

3-3 対策工の比較検討

対策前および各対策工について、 荷重パターン C における発生応力比較を 図-17 に示す。 各工法を対策前と比較した結果、 次のことが言える。

- Case-1 および Case-2 は、 Uリブ支間中央断面では、 デッキ側止端の G01 および G04 で 0.7 程度である。 一方、 横リブ交差部断面では、 応力がほとんど低下していない。 応力低減効果は小さく、 疲労耐久性の向上はあまり期待できない。
- Uリブ内モルタル充填工法の Case-3 と Case-4 は、 応力低減効果が高く、 デッキ側止端の G01 および G04 で 0.2 程度にまで応力が低下する。 デッキ上面(G03)でも 0.2 程度と、 デッキの変形が減少し、 応力レベルが低下している。 Case-4 は、 Case-3 より発生応力がやや低い。
- Case-5 は、 デッキ上面(G03)で 0.7 程度に低下した以外は、 応力はほとんど下がっていない。 上向きの現場溶接に品質確保の難易度を考慮すると、 効果的な対策法とは言えない。
- 従って、 荷重試験の結果から、 Case-4 の Uリブ間当てを併用したモルタル充填工法が最も有効な疲労対策工法と判断した。

4 . Uリブ内モルタル充填工法の詳細検討

4-1 未充填を考慮した FEM解析

モルタル充填工法の課題として、 未充填によるデッキプレートの変形抑制効果が失われ、 応力低減効果の喪失が懸念される。 そこで、 未充填の範囲を変化させた FEM解析結果を行った。 解析モデルおよび荷重は、 図-4 に準じ、 Case-4 を対象にしている。 FEM解析結果を 図-18 に示す。 ここで、 Tは橋軸直角方向、 Lは橋軸方向のそれぞれの空隙範囲を表す。 Uリブ下面全体に空隙を設けた Type-1 では、 応力レベルが対策前 (図-5(a)) とかわらない。 一方、 空隙がUリブ幅の半分の Type-3 やそれより狭い Type-2 では、 Case-4 の図-9(a)に対して、 応力がほとんど増加しておらず、 部分的な未充填では応力低減効果に与える影響は小さい。 また、 Uリブ中心部のモルタルを低強度の材料で構成される軽量コアに置き換えた Type-4 でも応力低減効果はかわらないので、 一層の軽量化を図るには、 薄肉鋼管や EPS などを挿入することも考えられる。

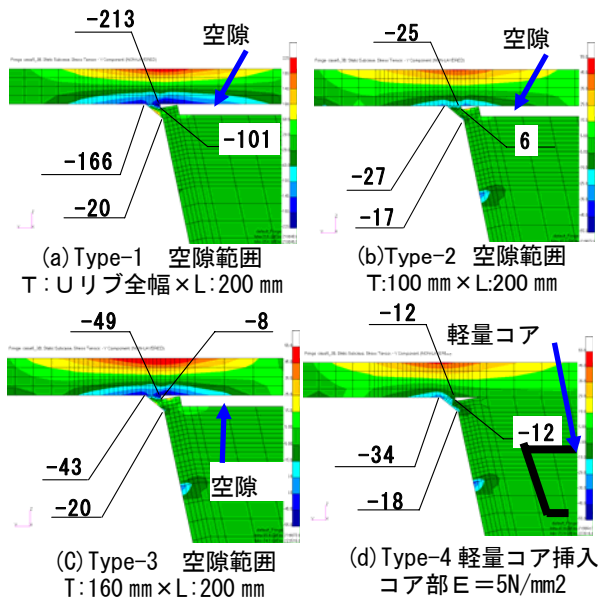
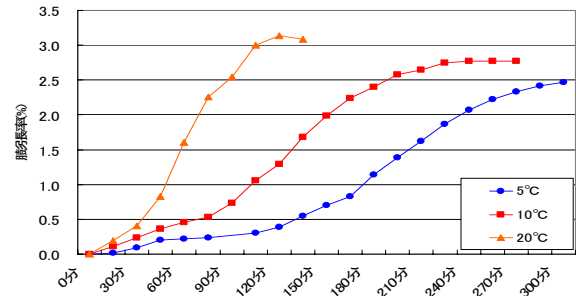


図-18 空隙および軽量コアを考慮したFEM解析

4-2 充填用モルタルの検討

一層の軽量化、充填性の向上を目的に、充填用の膨張軽量モルタルを今回新たに開発した。比重は 1.25 程度、圧縮強度を 10N/mm² である。コンシステンシー（J₁₄ ロート流下値）は、4~10 秒と無収縮モルタルより充填性は優れている。モルタルの膨張特性は、図-19 のとおり、練り混ぜ完了から 30 分以降から膨張が始まり、硬化が完了するまで膨張が継続し、空隙部の空気を排除することで、自己充填作用により未充填が防止する。



モルタルの練り混ぜ完了からの経過時間
図-19 モルタルの膨張特性

おわりに

本検討より、交通規制を必要としない鋼床版疲労対策として、Case-4 のモルタル充填工法が最も有効な対策工法と判断した。今後、個別橋梁の詳細検討を踏まえて実橋に適用し、既設鋼床版の耐久性向上を図る必要がある。

参考文献

- 1) 鋼道路橋の疲労設計指針（社）日本道路協会，平成 14 年 3 月
- 2) 米谷，川上，伊藤：縦リブにバルブプレートを用いた鋼床版横リブの疲労損傷に対する補修補強検討，阪神高速道路株式会社第 38 回技術研究発表会論文集，平成 18 年 2 月
- 3) 小野，下里，増井，町田，三木：既設鋼床版の疲労性向上を目的とした補強検討，土木学会論文集 NO.801/I-73，2005.10
- 4) 高田，平野，坂野，松井：阪神高速道路における鋼床版の疲労損傷と要因分析の検討，第 5 回道路橋床版シンポジウム講演論文集，2006.7

THE EXAMINATION OF A RETROFIT OF THE EXISTING ORTHOTROPIC STEEL DECK WHICH DOES NOT NEED TRAFFIC RESTRICTION

Yoshihiko Takada, Yasumoto Aoki and Yuzi Sakai

Authors are studying retrofit and prevention from fatigue damage which do not need traffic restriction for the fatigue crack origination from weld between the deck plate and in the trough in orthotropic steel decks. FEM analysis and the static load test on five full-scale bridge deck test panels were performed. The paper presents the recommended retrofit method which does not need traffic restriction in existing orthotropic steel decks from those results.



財) 阪神高速道路管理技術センター
調査研究部調査研究課
Yoshihiko Takada



阪神高速道路株式会社
技報部 技術開発グループ
Yasumoto Aoki



阪神高速技術株式会社
維持事業部調査点検課
Yuzi Sakai