

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

Characteristic on fatigue cracks and experimental study on fatigue analysis of existing the orthotropic steel bridge deck in Hanshin Expressway

高田 佳彦*, 平野 敏彦*, 坂野 昌弘**, 松井 繁之***
Yoshihiko TAKADA*, Kazutoshi HIRANO**, Masahiro SAKANO***

- * 阪神高速道路株式会社 技術管理室 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町3-1-3)
- ** 関西大学工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
- *** 大阪大学大学院工学研究科 (大阪府吹田市山田丘2-1)

The paper deals with outline of fatigue cracks detected by the orthotropic steel bridge deck in Hanshin Expressway. Among 6,500 spans of bridges, 1,347 are the type with orthotropic steel bridge deck in Hanshin Expressway. At present, fatigue cracks have been identified on 71 spans. The damaged members with orthotropic steel bridge deck are exposed to extreme stress iteration and intricate mode of stress amplitude. For those fatigue cracks, the structural detail and the cause of fatigue cracks detected trough rib are described briefly. Next, the stress state is investigated in FEM analysis. Last, the wheel running fatigue test has been carried out to investigate fatigue durability of existing orthotropic bridge decks.

Keywords: Orthotropic bridge decks, fatigue crack, FEM analysis, trough rib, Wheel running fatigue test

1. はじめに

鋼床版は、自動車輪荷重が直接載荷するために応力の変動が大きく、またその繰返し数が極めて多い構造部材である。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。部材交差部などで局所的に大きい応力が繰返し発生することにより、疲労損傷に繋がると考えられる。

道路橋の疲労照査は主に、応力度による疲労照査、および、構造ディテールによる疲労照査に分けられる¹⁾。応力度による疲労照査は、鋼製部材の継手に対して公称応力の範囲に基づいて定められた疲労設計曲線を用いて疲労耐久性の評価を行うものである。鋼床版においては、自動車荷重によって生じる応力に対する舗装の剛性、輪荷重のばらつき、輪荷重走行位置の分布などの影響が大きく、設計計算で得られる応力範囲を基にした疲労安全性の照査で適切な評価を行うことは一般に困難であると考えられている。そこで、疲労に対する耐久性の高い構造ディテールを採用することで疲労設計が行われている。

道路橋示方書²⁾では、昭和55年2月の改訂以降、鋼床版の疲労対策が盛込まれている。これは、活荷重に対する疲労照査の目的でT荷重1組による応力を、縦リブの許容応力度で照査する方法である。現在の知見では、この方法では、十分な疲労耐久性を保証できることが明らかになっており、この方法で照査した鋼床版においても疲労損傷が発生している。

これまで建設時から疲労に対する検討結果を反映した構造詳細を採用してきたが、平成2年に鋼床版において最初の疲労によるき裂が発見された。その後の点検により疲労き裂が次々と見つかり、それらに対する対応は重要な課題となっている。

本文では、阪神高速道路における鋼床版の疲労損傷の現状を紹介し、代表的な事例とその特徴を述べる。次に、Uリブと横リブの交差部に発生した亀裂に対してFEM解析により発生要因を検討した。最後に、実橋を再現し現場添接部を考慮した鋼床版試験体を用いて、移動輪荷重試験を実施したので、その報告を行うものである。

2. 鋼床版の設備数量と損傷傾向

阪神高速道路の鋼床版の設備数量は、平成16年度末現在で鋼桁6,497径間の内、表-1に示すとおり、その20%の1,347径間である。縦リブ形式内訳は、Uリブとバルブリブがほぼ半々である。1980年以前の竣工は、すべてがバルブリブで建設されており、それ以降は、Uリブが採用されている。

鋼床版などの上部構造は、全路線を4年～8年周期で接近目視により定期点検を行っている。定期点検(臨時点検含む)結果より、表-2に示すとおり、平成17年12月現在で、71径間と鋼床版全体の約6%に損傷が発生し、特にここ最近(2年程度)の点検結果においては543径間中42径間の8%に損傷が発生しており、増加傾向にある。図-1に、Uリブの主要な損傷パターンを示す。

バルブリブは、損傷径間数は26径間とUリブと比べて損傷数が少ない。損傷タイプは、④縦リブと横リブ交差部に集中している。この損傷パターンは、旧阪神高速道路公団の標準図と異なる特定の構造ディテールに発生することが明らかにされており、その設備数量の把握が急がれる。

Uリブの損傷タイプは、以下の3パターンに集中している。①縦リブとデッキプレートの溶接部は、損傷径間は7径間と少ないものの、損傷数は50箇所と比較的多い。③垂直補剛材とデッキプレート溶接部は、損傷径間数が最も多い。一

方、④縦リブと横リブ交差部は、き裂発生数が最も多くなっている。

表-1 鋼床版設備ストック

	径間数	延長(km)
バルブリップ	633	43.26
Uリブ	714	51.08
計	1347	84.34

表-2 鋼床版き裂損傷数量

損傷タイプ	縦リブ形式				合計	
	バルブリップ		Uリブ		径間数	損傷数
	径間数	損傷数	径間数	損傷数		
①a 縦リブとデッキプレートの溶接部デッキ貫通	0 (0)	0	1 (1)	1	1 (1)	1
①b 縦リブとデッキプレートの溶接部ピンき裂	0 (0)	0	6 (4)	49	6 (4)	49
② 縦リブ突き合わせ溶接部	0 (0)	0	2 (2)	2	2 (2)	2
③ 垂直補材とデッキプレートの溶接部	0 (0)	0	21 (3)	121	21 (3)	121
④ 縦リブと横リブ交差部	26 (10)	1139	12 (9)	216	38 (19)	1355
⑤ その他	2 (2)	2	1 (1)	5	3 (3)	7
合計	28 (12)	1141	43 (20)	394	71 (32)	1535

()内は径間数 径間数欄は最大 損傷タイプは比

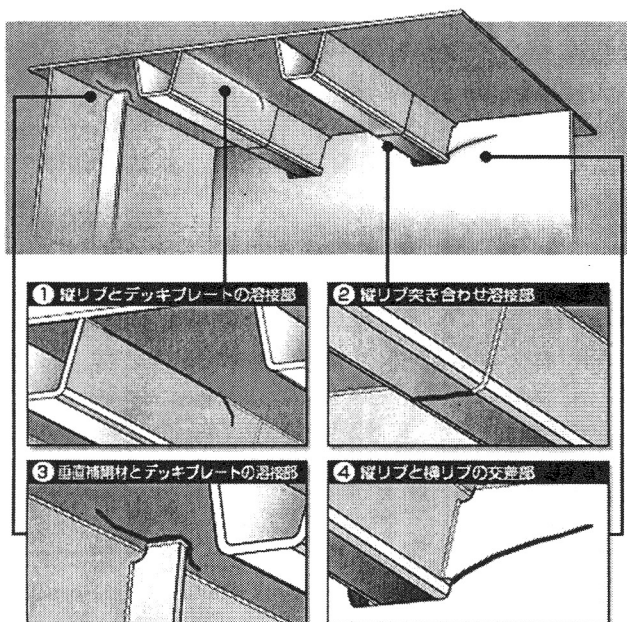


図-1 鋼床版Uリブの主要な損傷パターン

3. Uリブのき裂パターンと損傷事例

(1)Uリブとデッキプレートとの溶接部のき裂

Uリブとデッキプレートとの溶接部のき裂損傷は、デッキプレート貫通き裂と溶接部ピン貫通部き裂に分けることができる。

損傷はいずれも車両タイヤ載荷位置の直下で発生し、そのほとんどが走行車線の右タイヤ直下である。

このようなき裂は、輪荷重直上載荷に伴うデッキプレートの変形が、Uリブに拘束されることに起因し、縦溶接線のピン部もしくは不溶着部、および、デッキプレートに局部的な応力変動が繰り返して作用することにより、発生すると考えられる。

その際、き裂モードが、デッキプレート貫通および溶接部ピン貫通のどちらになるかは、溶接部の止端部およびルート部の微視的な形状、溶け込み量などの影響を受け、剛性が低いなど相対的に疲労強度の低い方にき裂が発生すると考えられるが、定量的な評価は今後の解明にゆだねられる。

き裂発生位置の直上の舗装には、わだちやポットホールなどの損傷が発生していることが多く、舗装の損傷と鋼床版の疲労損傷との関係があると考えられる。

a)Uリブとデッキプレートとの溶接部デッキ貫通き裂

デッキプレート貫通き裂は、鋼床版の床組機能を損ね、通行車両に影響を及ぼす重要な損傷である。阪神高速道路では、これまで平成 17 年7月に湾岸線新浜寺大橋の1箇所で見えられ、同年 10 月補修が行われている。写真-1 にき裂発生状況を示す。

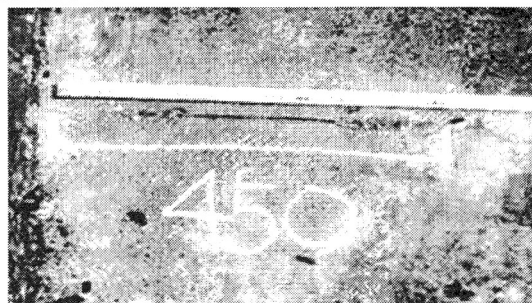


写真-1 デッキプレート貫通き裂発生状況

b)Uリブとデッキプレートとの溶接部ピン貫通

Uリブとデッキプレートとの溶接部ピン貫通部き裂発生状況を写真-2 に示す。現在までに発見されている損傷は全てが溶接部ピン部に発生している。車両走行によるき裂の開閉口挙動が目で確認できる損傷例やき裂長が2m を越す事例があり、き裂損傷が鋼床版の耐力に与える影響が危惧される。

溶接部ピン部の厚が薄く、また溶け込みが浅いと、溶接部ピン部の応力集中に起因して、疲労き裂が発生しやすくなると推定される。

き裂の発生位置は、縦リブ支間部、および、横リブ交差部近傍に分類され、その状況を表-3 に示す。縦リブ支間部に発生するき裂数が圧倒的に多い傾向となっている。

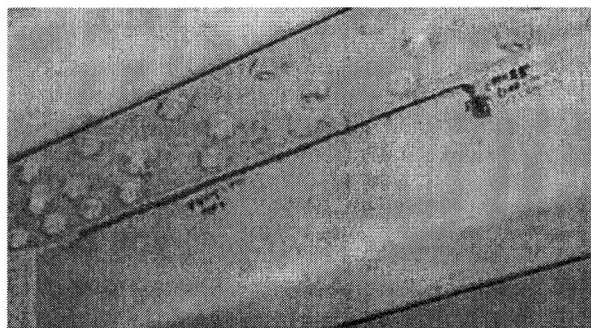


写真-2 Uリブとデッキプレートとの溶接部ピン貫通き裂発生状況

表-3 Uリブとデッキプレートとのピン部き裂発生位置

	横リブ交差部	縦リブ支間部	計
径間数	1	6	7
き裂数	1	48	49

(2) 垂直補剛材とデッキプレート溶接部

垂直補剛材とデッキプレート溶接部のき裂は、き裂のモードに応じて以下の2パターンに分類できる。

モード③-a: 溶接ビードのデッキ側止端を起点と

して、デッキプレートに進展するき裂(写真-3)

モード③-b: 溶接ビードの垂直補剛材側止端を起点として、溶接ビードからデッキプレートに進展するき裂(写真-4)

損傷割合は、モード③-aのパターンが多い。神戸線神S-148~150では、き裂数の33箇所内、その8割がa)のパターンである。

損傷要因は、垂直補剛材周辺のデッキプレート上に輪荷重が載荷された場合、デッキプレートのたわみ変形が垂直補剛材に拘束され、それにより、垂直補剛材の廻し溶接部に局部的な応力集中が発生し、疲労き裂が発生すると考えられる。

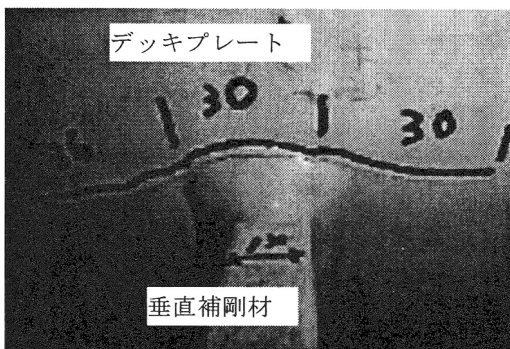


写真-3 モード③-a: 溶接ビードのデッキ側止端を起点としてデッキプレートに進展するき裂



写真-4 モード③-b: 溶接ビードの垂直補剛材側止端を起点として、溶接ビードとデッキプレートに進展するき裂

(3) Uリブと横リブ交差部

縦リブと横リブ交差部の損傷は、阪神高速道路では以下のき裂モードが発生している。

モード④-a: Uリブ下側のスカーラップ廻し溶接部のUリブ側止端を起点とし、Uリブ母材に進展するき裂(写真-5)

モード④-b: Uリブ下側のスカーラップ廻し溶接部横リブ側止端を起点とし、横リブ母材に進展するき裂(写真-6)

それぞれのき裂モードの損傷数を表-4に示す。損傷数は、モード④-aが多い。現在モード④-bの発生している箇所は、主桁からの張出し部の非常駐車帯の直下であり、車両がほ

とんど通過しない場所である。

き裂モード④-aについて、き裂数192箇所内、その65%である125箇所は、現場添接部直近の縦リブと横リブ交差部に発生している。現場添接部の構造ディテールを図-2に示す。損傷が発生している現場添接部の特徴として、以下が挙げられる。

- ・Uリブウェブ面に $t=14$ mmの添接板が取り付けられている
- ・添接部は、開断面となるためUリブの板厚が、一般部の $t=6$ mmに対して、8 mmと増厚されている。
- ・Uリブにおいて、添接部の前後に密閉ダイヤフラムが設けられている。

このように、Uリブの添接部は曲げ剛性およびねじり剛性が高い。その影響が、縦リブと横リブ交差部のスカーラップ廻し溶接部に応力集中を誘発していると推定される。

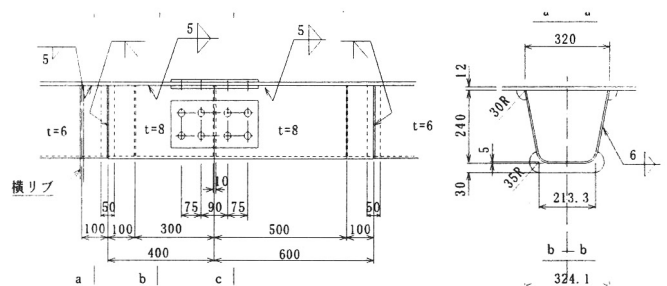


図-2 現場添接部の構造ディテール



写真-5 横リブとの交差部におけるUリブ母材のき裂(モード④-a)

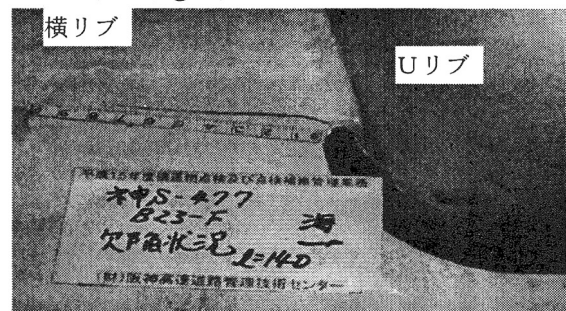


写真-6 横リブとの交差部における横リブ母材のき裂(モード④-b)

表-4 横リブとの交差部のき裂発生位置

き裂モード	モード④-a	モード④-b	計
径間数	9	3	12
き裂数	192	24	216

4. 縦リブと横リブ交差部におけるFEM解析

(1) FEM解析モデル

縦リブと横リブ交差部に発生する損傷は、前述したように、現場添接部直近に位置する交差部に発生する傾向があることから、一般部との構造の差異、および、荷重状態がき裂損傷に与える影響を調べ、損傷要因の解明を目的に FEM 解析を実施した。解析は、神戸線の 3 径間連続鋼床版箱桁の実橋を対象として、対象交差部をソリッド要素でモデル化している。

(2) 荷重位置による発生応力の検討

縦リブと横リブ交差部において、荷重位置に起因する発生応力の影響を把握するため、以下のFEM解析を行った。荷重荷重(ダブルタイヤ1組)を50kNとし、荷重ケースとして、橋軸方向には、横リブ直上、添接部直上に、面内方向には、Uリブウェブ直上、Uリブ軸心の組み合わせを検討した。

図-3 にFEM解析結果を示す。コンター図は、いずれの荷重においても、横リブの下側スカーラップ廻し溶接部のUリブ側止端部に顕著な応力集中が発生しており、同図の応力コンター図は、写真-5 の位置に対応している。同写真のき裂モード④-aが発生している地点に高い応力集中が確認された。以下、この箇所を着目部と呼ぶことにする。

荷重ケースの中では、添接部直上・Uリブウェブ直上荷重が、 71N/mm^2 (ミーゼス応力)と最も高い応力が発生していた。この時、Uリブがねじられる様な変形挙動し、それに対し横リブが拘束することにより、廻し溶接部のUリブ側止端部に応力集中が発生したと考えられる。

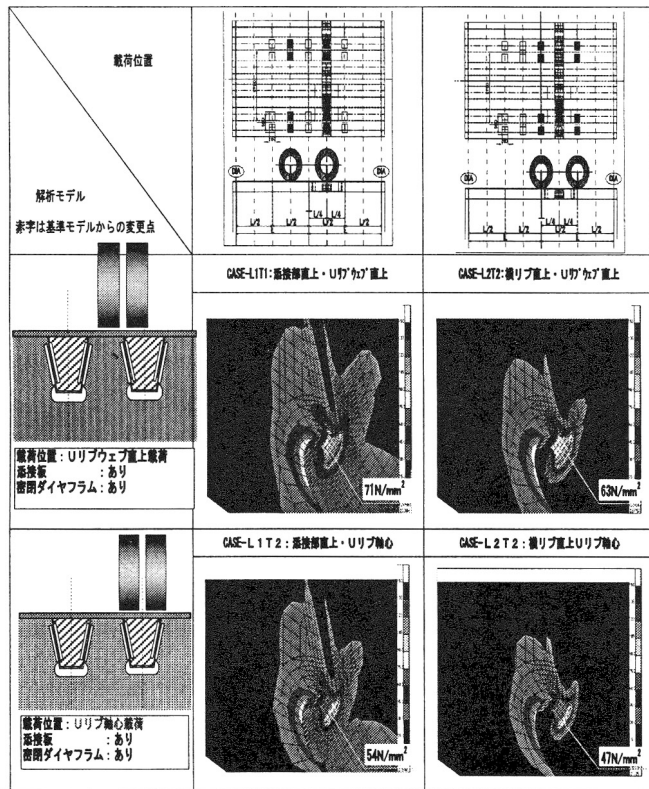


図-3 荷重ケースによる影響検討

5. 移動輪荷重疲労試験方法の検討

(1) 試験供試体の設計

疲労試験は、大阪大学所有の移動輪荷重疲労試験機を用いた。デッキプレートおよびUリブの現場添接部の疲労耐久性の影響を把握するため、図-4 のように実橋の添接部を再現した実寸供試体を作成した。添接部は、図-2 に示す構造ディテールを再現している。

試験装置の制約条件から、供試体の平面寸法は、橋軸方向 3.88m×直角方向 2.81mとした。Uリブは4本、横リブは3本で構成し、添接板を挟んだ横リブ間隔は実橋とほぼ等しい2.4mとした。添接部以外では、デッキプレート厚 $t=12\text{mm}$ 、Uリブ厚 $t=6\text{mm}$ である。

荷重は、鉄輪により行い、荷重位置は、FEM解析結果を考慮し、ダブルタイヤを模した荷重板を、Uリブウェブを挟む形で配置し、Uリブウェブ直上に荷重することとした。

デッキプレートとUリブとの溶接は、実橋に準じて、脚長6mmを確保し、溶接ビードの溶け込み量はUリブ板厚に対する25%~30%溶け込みとした。

荷重荷重は、以下のように検討した。供試体は、鉄輪の荷重延長が2mと短く、横リブと最も離れた荷重端に鉄輪が位置した場合でも、実橋と異なり荷重が抜けきれず、実橋と同様の応力範囲が再現できない恐れがあった。そこで、試験供試体をモデル化したFEM解析を行った。実橋モデルの輪荷重： $T=50\text{kN}$ における着目部の発生応力 78N/mm^2 である。試験供試体モデルの解析結果では、輪荷重： $T=118\text{kN}$ に設定すると、着目部の最大応力が 133N/mm^2 (添接板上荷重)、最小応力が 56N/mm^2 (供試体端部荷重)と、応力範囲 78N/mm^2 となる。これは実橋モデルの応力範囲(=最大発生応力) 78N/mm^2 とほぼ一致している。そこで、荷重荷重は、 $T=118\text{kN}$ とした。

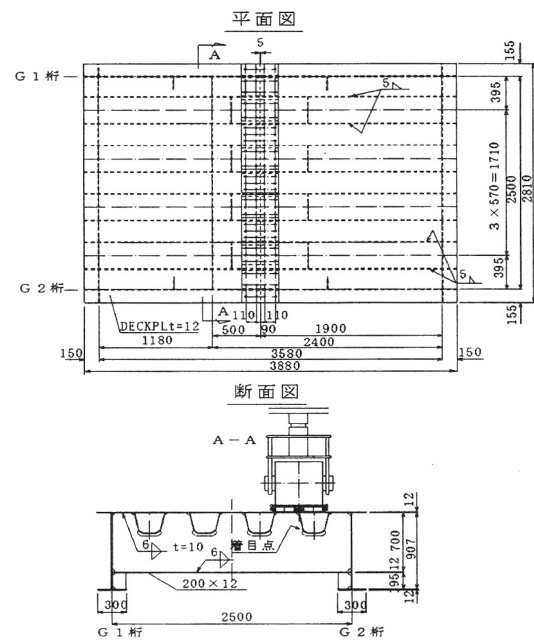


図-4 供試体の構造概要

6. 静的載荷試験

横リブ交差部に着目して、FEM解析結果との比較を目的に、静的載荷試験を実施した。載荷荷重は、前述した118kNとした

着目部には写真-7で示す5連式応力集中ゲージを設置した。図-5のように橋軸方向の載荷位置を変化させた場合の、載荷位置と発生応力の関係を、図-6に示す。折れ線の①～⑤は、応力集中ゲージ中の各素子の値である。FEM解析結果も記載している。折れ線の②に示すゲージ素子が、図-3のFEM解析の算出応力と対応している。

応力集中ゲージ⑨のグラフでは、発生応力は全て圧縮場である。載荷位置に着目すると、添接部上であるE点上の載荷が、発生応力が最も高くなり、C点(横リブ)上載荷に対して、2倍程度の応力が発生している。

FEM解析結果と静的載荷の発生応力を比較すると、ほぼ一致しており、良好な結果が得られている。また、応力集中ゲージ中の各素子間の距離は、2mmであることから、応力勾配が高く、応力集中状態であることがわかる。

一方、応力集中ゲージ⑩のグラフでは、引張場となっている。載荷によりUリブに対して、曲げよりむしろねじり力が支配的で、それにより疲労き裂が発生すると考えられる。

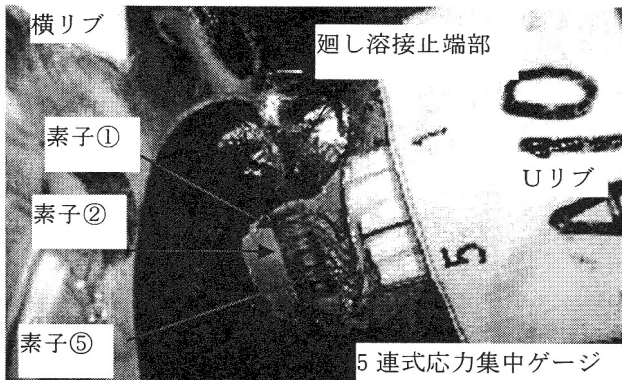


写真-7 応力集中ゲージ設置状況

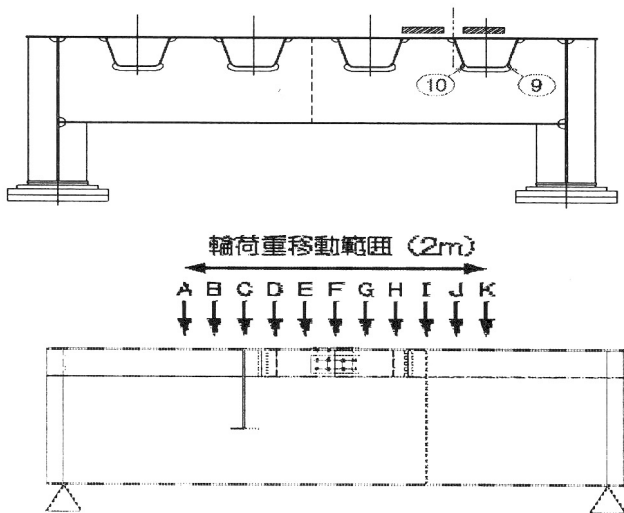


図-5 静的載荷試験における鉄輪載荷位置

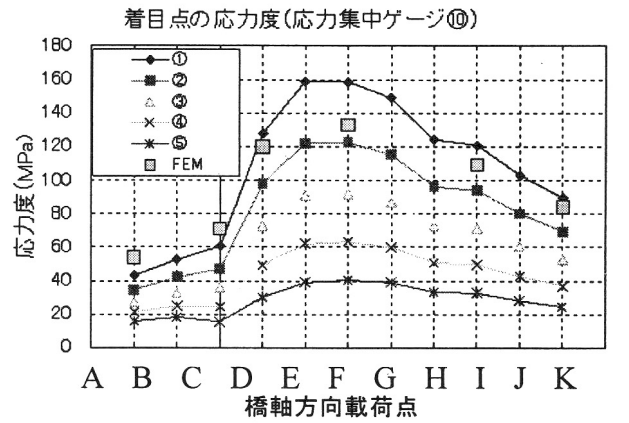
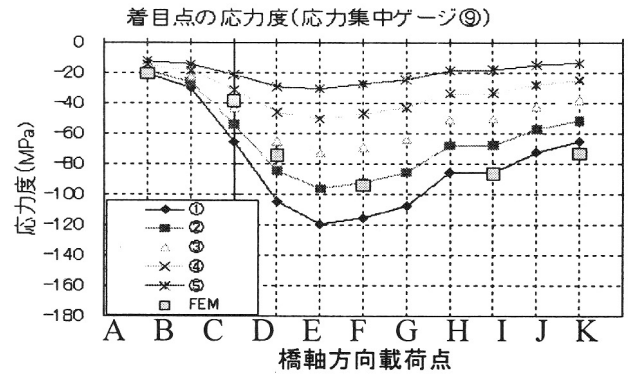


図-6 橋軸方向影響線載荷に対する着目部の応力変化

次に、横断方向に載荷位置を変化させた着目部の応力変化を、図-7に示す。橋軸方向の載荷位置は、図-5のF点(添接版上)のラインである。着目しているUリブから横断方向に離れると、応力が低下する傾向にある。隣接Uリブの載荷では、発生応力が1/3程度となる。この結果は、実橋において、タイヤ載荷位置からずれると疲労き裂発生頻度が大幅に低下する傾向と一致している。

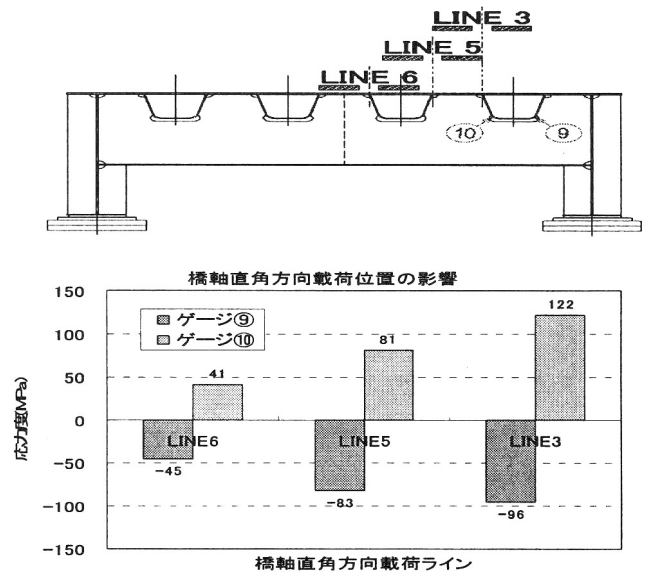


図-7 横断方向影響線載荷に対する着目部の応力変化

7. 移動輪荷重疲労試験

載荷荷重 118kN で、96万回(48 万往復)輪荷重走行させた。載荷時間は、2万回(1万往復)当り、約6時間である。その結果、以下の4モードのき裂が発生した。き裂発生位置を、図-8 に、き裂発生状況を図-9 にそれぞれ示す。

- ①Mode-1、②Mode-2: 着目しているUリブと横リブ交差部スカーラップの廻しの溶接Uリブ側止端を起点として発生し、Uリブウェブに進展したき裂(写真-8)
- ③Mode-3: 載荷直下の、Uリブとデッキプレート溶接の不溶着部を起点として発生し、デッキプレートに進展したき裂
- ④Mode-4: 載荷直下に隣接したUリブのデッキプレート溶接のデッキ側止端に発生したき裂

Mode-1、2とも、69 万回で発見された。目視では確認できなかったが、磁粉探傷試験を実施した結果、き裂が確認された。き裂長は、Mode-1 が $L=12\text{ mm}$ 、Mode-2 が $L=20\text{ mm}$ である。試験終了時までには、進展は確認されなかった。

Mode-3 は、デッキプレートとUリブとの溶接部不溶着部を起点に、デッキプレート板厚方向に進展したき裂である。き裂は、平面位置では、載荷直下のUリブウェブ溶接線の横リブ交差部近傍に位置している。溶接ビードの内面にき裂は位置するため、目視での発見は不可能であり、試験終了時に超音波探傷試験(UT)で発見した。このき裂は、湾岸線新浜寺大橋で発見された、デッキプレート貫通き裂のモードと一致している。削り込み調査の結果、き裂長は $L=140\text{ mm}$ 、き裂深さ(削り込み深さ)は最大 5 mm である。

Mode-4 はデッキプレートとUリブとの溶接止端部を起点に、デッキプレート板厚方向に進展したき裂である。76 万回走行時点UTで発見された。試験終了後の削り込み調査の結果、き裂長は $L=250\text{ mm}$ 、き裂深さ(削り込み深さ)は最大 8 mm である。平面位置では、き裂は隣接したUリブの縦リブ支間中央の密閉ダイヤフラム付近に位置している。これは、Uリブどうしの間隔が 250 mm と実橋に比べてやや短く、載荷板(幅: 200 mm)のエッジが、損傷箇所の溶接線直上に位置し、加えて載荷板のエッジに載荷応力が局部的に集中する傾向にあることから、過大な荷重状態が要因と考えられる。

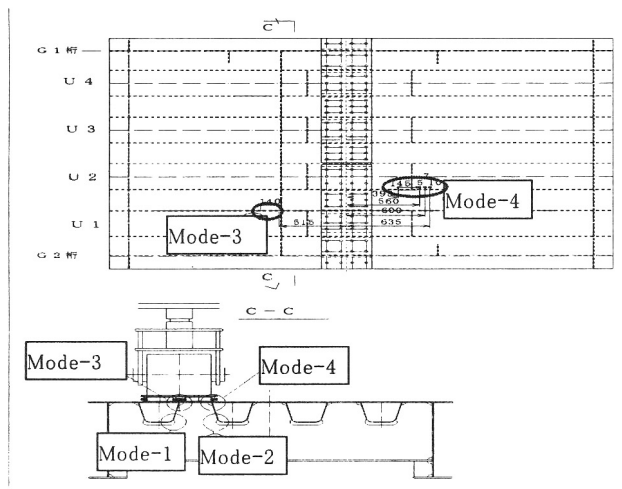


図-8 試験終了時のき裂発生位置

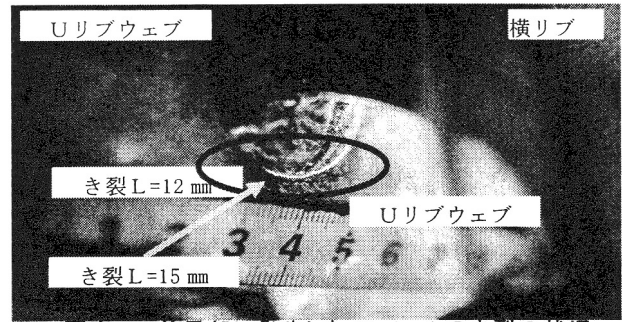


写真-8 着目部に発生した Mode-1 のき裂の状況

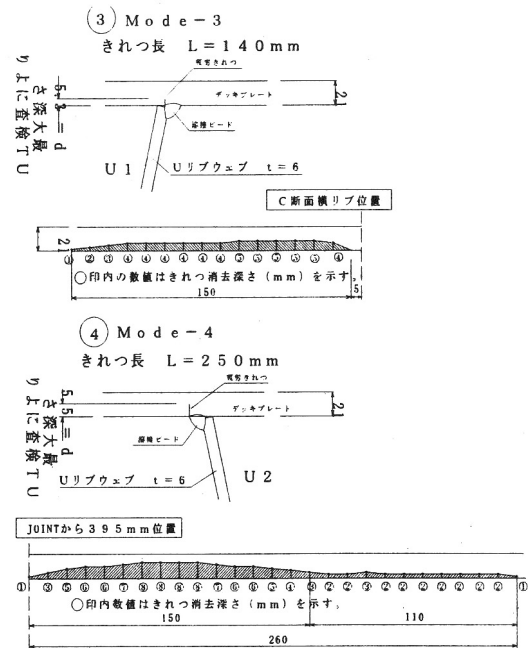


図-9 き裂発生状況およびき裂削り込み調査結果

8. おわりに

- 1) 阪神高速道路の鋼床版の設備数量 1,347 径間のうち、平成 17 年 12 月現在で、71 径間損傷が発生しており、その内Uリブの損傷は 43 径間と高い傾向にある。
- 2) Uリブと横リブの交差部のき裂の発生要因は、Uリブウェブ直上に輪荷重が載荷された場合、Uリブがねじられる様な変形挙動を示し、Uリブと横リブの交差部では、横リブの拘束により、廻し溶接部のUリブ側止端部に応力集中が発生し、疲労き裂が発生すると考えられる。
- 3) 移動輪荷重試験で、96 万回(48 万往復)載荷後、以下の4箇所でき裂が発生した。Uリブと横リブ交差部の着目部のき裂(Mode-1、Mode-2)、デッキプレートとUリブとの溶接部不溶着部を起点に、デッキプレート板厚方向に進展したき裂(Mode-3)、デッキプレートとUリブとの溶接止端部を起点とするき裂(Mode-4)。
- 4) 現在、着目部であるUリブと横リブの交差部き裂に対して、対策工を検討しており、その結果を今後提案していきたい。

<参考文献>

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，平成14年3月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，平成55年2月