

阪神高速道路の鋼床版疲労損傷の現状と取組み

Examination and review of fatigue damage in orthotropic steel decks in Hanshin Expressway

堀江 佳平*・高田 佳彦**

Yoshihei HORIE and Yoshihiko TAKADA

ABSTRACT This paper describes overview of the fatigue cracks detected in orthotropic steel decks in Hanshin Expressway. From the result of inspection, fatigue cracks are detected by 142 spans among 1347 spans of the stock of orthotropic steel decks as of March, 2007. Such the fatigue cracks are classified according to the structure of the longitudinal rib of the orthotropic steel deck, and the type of the cracks. The feature is described briefly. Next, the paper focuses on the bulb rib and describes the attribution analysis of fatigue cracks, and the retrofit.

KEYWORDS :鋼床版, 疲労き裂, バルブリブ, Uリブ, L型アングル補強
Orthotropic steel deck, fatigue crack, bulb rib, trough rib, L-shape reinforcement angle

1. まえがき

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若齢地盤区間の橋梁や長大橋および神戸線の震災復旧区間に多数採用されている。

1980年以前は、主に開断面構造のバルブリブが採用されてきたが、1982年に閉断面のUリブが、鋼床版箱桁において標準化¹⁾され、それ以降は鋼床版の縦リブの標準構造となっている²⁾。特に1985年頃から、関西国際空港へのアクセスとして湾岸線の整備が本格化し、Uリブ形式の鋼床版箱桁橋が多数建設されている。これは、Uリブ形式はバルブリブ形式に対して溶接量が少なくコスト削減が図れることやねじり剛性が高く橋軸方向への荷重分配作用が大きいことから縦リブ支間を長くとれ、鋼重量が軽減できるからである。加えて、密閉断面であるため塗装面積が少なく維持管理上も利点がある。

阪神高速道路では、1990年6月に神戸線の5径間静定ゲルバー鋼床版箱桁のデッキプレートとUリブとの溶接線に、最初の疲労き裂が発見され、1992年5月に応急処置が採られている³⁾。本橋は1969年度に建設・供用されており、鋼床版の床組に閉断面を用いた最初の橋梁であったが、1995年1月の兵庫県南部地震において甚大な被害を受けたため撤去されている。

近年、鋼床版の疲労損傷が国内外で報告されているが⁴⁾、阪神高速道路においてもき裂損傷が次々と見つかり、2007年3月現在でその総数は、142径間、1825箇所に及んでおり、その対応は重要な課題となっている。

本文では、最初に阪神高速道路の構造と交通状況および鋼床版の疲労損傷の現状を報告する。次に、バルブリブを対象に損傷状況と要因分析および対策工の検討状況を述べる。最後にデッキプレートと垂直補剛材との溶接部における疲労き裂の状況と対策検討について紹介する。

*阪神高速道路(株)技術部技術開発グループ長 (〒541-0056 大阪府中央区久太郎町4-1-3)

** (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課長補佐 (〒541-0056 大阪府中央区南本町4-5-7)

2. 鋼床版の設備数量と損傷傾向

2. 1 阪神高速道路の概要

阪神高速道路は、1964年に開通した2.3kmを皮切りに、現在、供用延長233.8kmとなり、1日100万台近くの車両が通行する関西の大動脈として機能している。図-1のように道路網の特徴としては、大阪市内に位置する環状線を中心に放射状に路線が伸びている。また、阪神高速道路はその大半が都市内を通過していることから、路線の85%が高架構造でその内の約80%が鋼橋である。さらに、供用年数でみると供用後20年以上を経過した路線延長が約53%で、30年以上を経過した路線延長が約39%を占める。

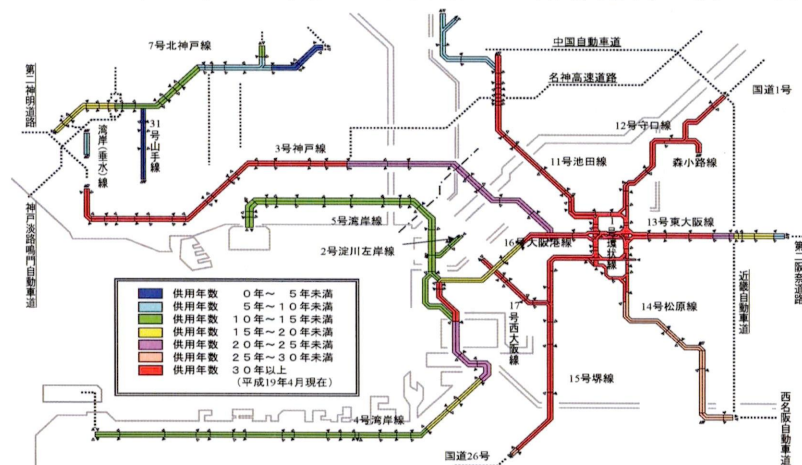


図-1 阪神高速道路ネットワークとその供用年次

2. 2 阪神高速道路の交通特性

阪神高速道路は、図-2に示すとおり、供用延長の増加に伴い交通量も増加し、平成7年の兵庫県南部地震で一時落ち込んだ後は回復し、平成15年以降は再び上昇傾向である。大型車混入率は、平均で約20%であり、1日あたりの平均交通量は大阪市内や神戸線で5万台/2レーン、大阪湾臨海部に位置する湾岸線では4万台/2レーンで大型車混入率が平均30%と高くなっている。

次に、鋼床版の疲労環境を評価するために、起終点調査データや交通管理データから求めた各路線、各区間、各車線別の車種別交通量と料金所の軸重測定記録から求めた車種別軸重頻度分布から、マイナー則（三乗則）に従い、様々な軸重別の累積軸数を法定軸重10tfに換算し、重ね合わせた等価換算軸数を求めた。最新の1年間のものを図-3に、供用以降の累積分を図-4に示す。図-3では交通量と大型車混入率の大きい湾岸線や神戸線で大きくなっている。この等価軸数は、疲労損傷の蓄積と考えられ、これらの路線・区間では鋼床版の各部位の疲労損傷発生環境が厳しいといえる。なお、図示しているのは2車線区間では走行車線を、3車線区間では走行と中央車線の大型車交通量が多いレーンの状況である。

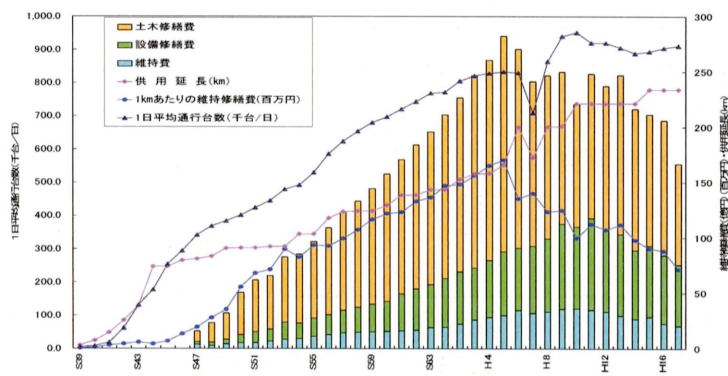


図-2 年度別維持修繕費・通行台数の推移

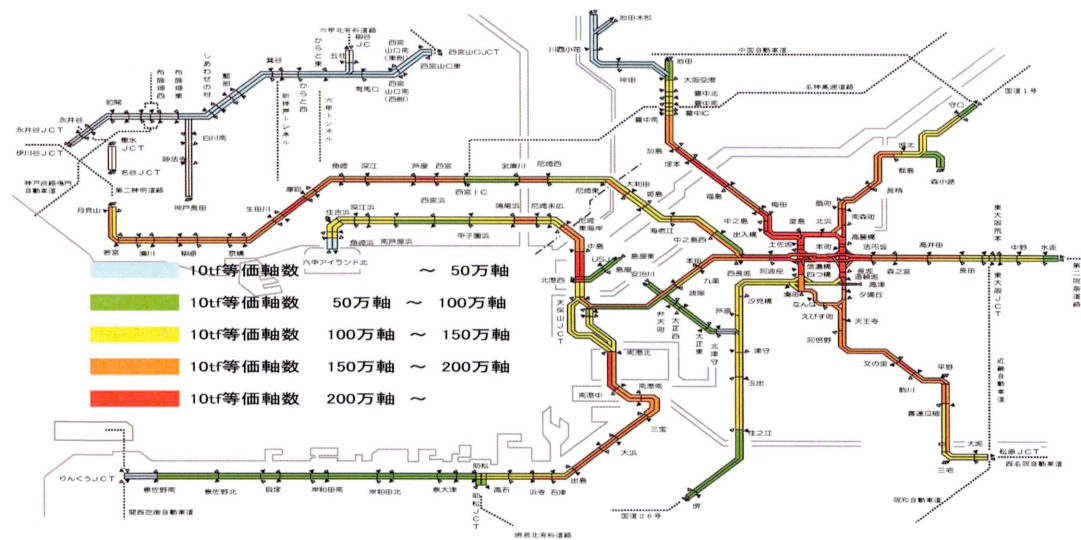


図-3 平成18年の1年間の等価な10t軸重換算軸数

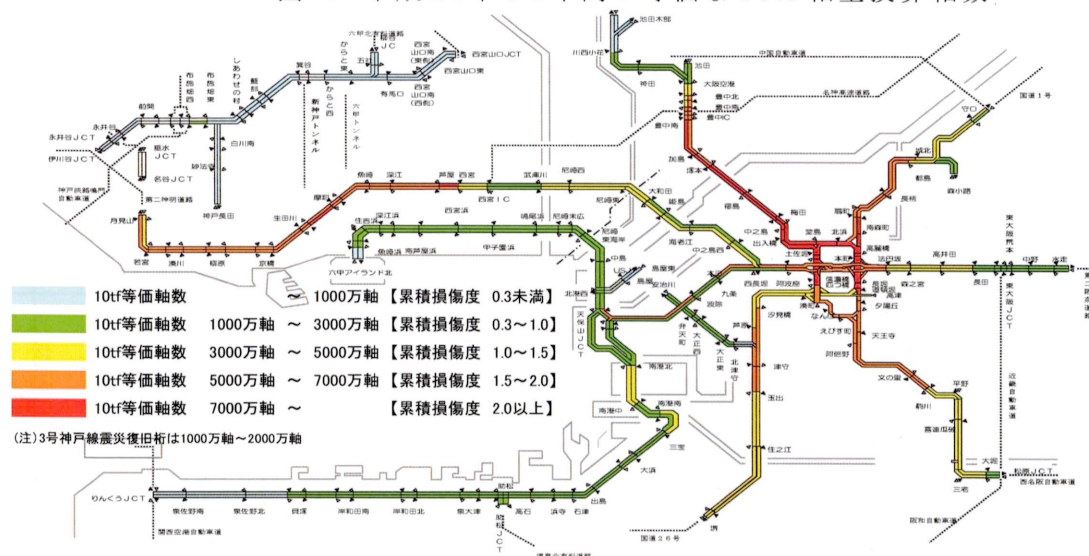


図-4 平成18年度末までの等価な10t軸重換算軸数

2. 3 鋼床版の設備数量

2006年末現在で鋼桁6,497径間の約2割(1347径間)が鋼床版である。縦リブ構造で分類すると径間数ではバルブリブがUリブよりやや多く、延長では逆にUリブが長くなっている。

表-1 鋼床版の設備数量

	径間数	延長(km)
バルブリブ	718	40.99
Uリブ	629	43.35
計	1347	84.34

2. 4 鋼床版の点検と損傷の概要

(1) 点検状況

鋼床版などの上部構造は全路線を供用年次に応じて4年~8年周期で接近目視による定期点検を行っている。接近目視で塗膜割れが発見された場合は、渦流探傷試験もしくは塗膜を除去して磁粉探傷試験を行い、き裂の存在を確認している。これまで全鋼床版の点検ローテーションを巡回してきているが、近年の鋼床版の疲労損傷の顕在化を鑑み点検頻度を増やしたり、また、臨時点検の追加施行などにより、全Uリブの629径間(橋面積680km²)を平成16年度から平成19年度の4年間で接近点検を一巡させる方針で取組んでいる。

(2) Uリブ鋼床版の損傷概要

Uリブの主要な損傷パターンと点検結果に基づく鋼床版き裂損傷数量表を図-5 と表-2 にそれぞれ示す。

- ・縦リブとデッキプレートの溶接部デッキ貫通き裂は、阪神高速4号湾岸線の新浜寺大橋で2005年に発見され、鋼板のあて板による補修が行われている。このタイプのき裂はデッキ下面からの目視点検で発見することが困難であり、本ケースは舗装損傷の補修時に表基層を撤去した際に発見された。
- ・①縦リブとデッキプレートの溶接部き裂の損傷径間は22径間、損傷数は127箇所にとんでおり、全般にき裂の進展性が高く、最終的には床組機能を低下させる恐れがある。き裂が開口しているなど進展性が高いき裂やUリブウェブへの進展しているき裂に対しては、Uリブ部分取替えなどの応急処置を実施している。
- ・③垂直補剛材とデッキプレート溶接部のき裂は、30径間、157箇所である。デッキプレートへの進展や貫通も確認されており、き裂に誘発される舗装の損傷が懸念される。
- ・④縦リブと横リブ交差部のき裂は、35径間、302箇所とUリブの損傷タイプの内、最もき裂数が多いパターンである。
- ・⑤その他は、Uリブと端横桁ウェブとの突合せ溶接部などに発生するき裂である。

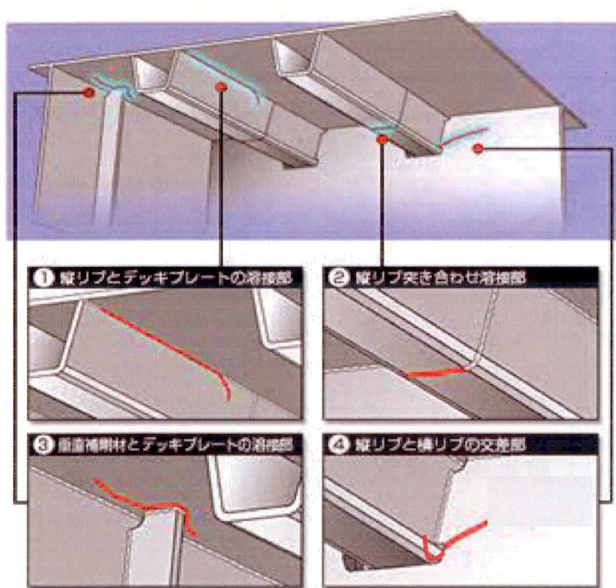


図-5 鋼床版Uリブの主要な損傷パターン

表-2 鋼床版き裂損傷数量

損傷タイプ	縦リブ形式				合計	
	バルブリブ		Uリブ		径間数	損傷数
	径間数	損傷数	径間数	損傷数		
S 縦リブとデッキプレートの溶接部デッキ貫通	0	0	1	1	1	1
① 縦リブとデッキプレートの溶接部ピードき裂	0	0	22	127	22	127
② 縦リブ突合せ溶接部	0	0	14	43	14	43
③ 垂直補剛材とデッキプレート溶接部	0	0	30	157	30	157
④ 縦リブと横リブ交差部	34	1170	35	302	69	1472
⑤ その他	1	2	5	23	6	25
合計	35	1172	107	653	142	1825
設備数量に対する損傷割合	4.9	-	17.0	-	10.5	-

径間数は最も多い損傷タイプに計上

複数の損傷タイプが同一径間で存在する場合は、番号が小さいタイプに計上

(3) バルブリブ鋼床版の損傷概要

バルブリブの損傷タイプは、表-2 に示すように、縦リブと横リブ交差部が34径間、1170箇所と突出して多く、き裂総数の64%に及んでいる。このタイプの損傷要因と対策は3章で詳述する。

2. 5 点検と損傷発生数の相関

図-6 は、鋼床版の接近点検による年次毎の損傷発見径間数を示す。過去10年の点検径間数は80～460径間とばらつきがあるが、特に最近3年間は損傷発見数が増加しており点検数1077径間中128径間の12%に損傷が発見されている。これは損傷の顕在化に対応して点検数自体を増やしていることもあるが、点検の精度（習熟度）が向上してきていることも考えられる。

図-7 は、鋼床版の竣工年度別の発見されたき裂箇所数を示す。特定の年次（1967年

と 1969 年) の桁に損傷が多いが、これはバルブリブの横リブ交差部に発生しているき裂損傷で径間あたりの損傷数が多いのが特徴である。1984 年以降に竣工した鋼床版桁は前述のとおり全てUリブであるが、Uリブでは経過年数が多ければ、き裂数が多くなるわけではない。特に神戸線の震災復旧時の再構築(新設)橋梁である 1996 年および 1997 年の竣工桁で 380 箇所のき裂が見つかっており、年数が経過していない橋梁においても疲労損傷が発生している。

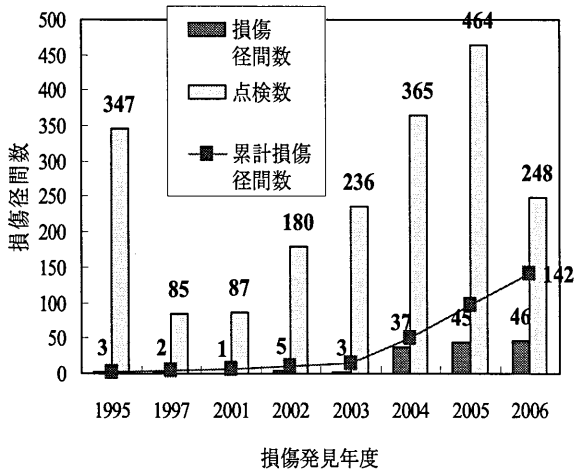


図-6 年度別損傷橋梁発見数

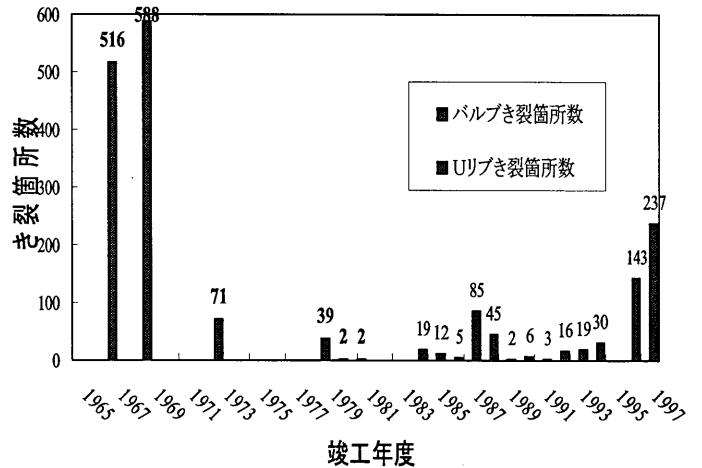


図-7 竣工年度別損傷径間数およびき裂数

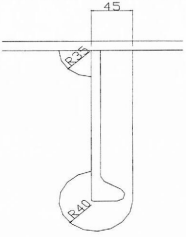
2. 6 設計基準と構造ディテールの履歴

阪神高速道路の鋼床版の縦リブ形式は、バルブリブが昭和 53 年(1978 年)に標準化された。昭和 60 年(1980 年)にUリブが標準化された以降はバルブリブに代わって採用されている。Uリブは疲労損傷対策として構造ディテールが改良されてきている。Uリブおよびバルブリブの構造ディテールの標準構造を表-3 および表-4 に示す。

表-3 Uリブ形式の設計基準と構造ディテールの履歴概要

	①鋼構造物標準図集(昭和 60 年 3 月版) ²⁾	②設計基準(平成 12 年 4 月) ⁶⁾
Uリブを有する鋼床版の構造ディテール	<ul style="list-style-type: none"> ・ Uリブの寸法は 320×240×6-R40 mmを標準 ・ 縦リブとデッキプレートとの溶接はすみ肉溶接とし、サイズは 5 mm ・ 横リブ交差部では、縦リブを連続させる ・ 交差部の形状は、下図を標準 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 縦リブとデッキプレートとの溶接は、板厚 6mm の縦リブは 6mm 以上のすみ肉溶接 ・ 板厚 8mm 以上の縦リブには適当な大きさの部分開先をとる ・ 横リブ交差部では、縦リブを連続させる ・ 交差部の形状は、下図を標準 ・ コーナー部に始終端を設けない ・ スカラップは設けない

表-4 バルブリップ形式の鋼床版の構造

鋼構造物標準図集（昭和53年3月版） ⁵⁾	
バルブリップを有する鋼床版の構造ディテール	<ul style="list-style-type: none"> ・バルブリップの寸法はh 200× t 10 mmを標準 ・縦リップ間隔 330 mm ・横リップ寸法：h 700× t 9 mmを標準 ・横リップ交差部では、縦リップを連続させる ・交差部の形状は、左図を標準とし、 下側スカーラップの径は 40 mm 上側スカーラップの径は 35 mm 

3. バルブリップにおける疲労き裂の損傷要因分析と対策

3. 1 バルブリップのき裂発生状況

バルブリップに発生しているき裂は、表-2 に示したようにそのほとんどが縦リップと横リップ交差部に集中している。そのき裂タイプは図-8 のように分類できる。写真-1 のように横リップの下側スカーラップ部のまわし溶接止端部（以下、下側スカーラップという）を起点に横リップ母材に伝播するき裂タイプ（以下、タイプ B④-D という）と写真-2 のように、上側スカーラップ部の横リップまわし溶接止端部（以下、上側スカーラップという）を起点にデッキプレート側に伝播するタイプ（以下、タイプ B④-U という）である。その数は図-9 のように下側のタイプ B④-U が圧倒的に多くなっている。損傷の発見されている橋梁は、いずれも 1970 年以前に竣工しており、供用後 35 年以上経過している。

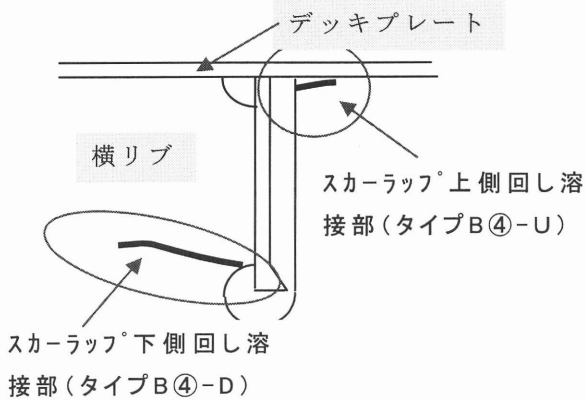


図-8 バルブリップと横リップ交差部のき裂タイプ

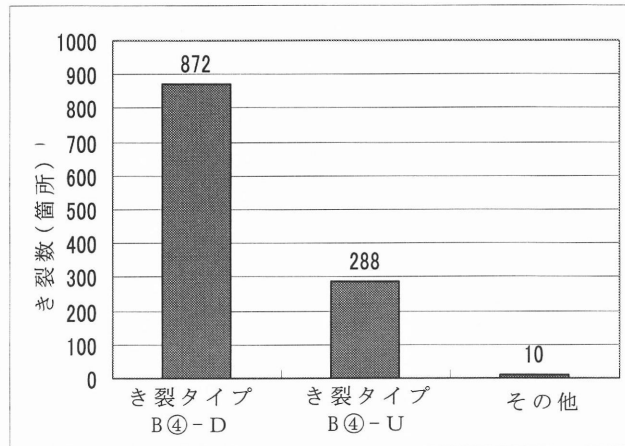


図-9 交差部のき裂タイプの分類

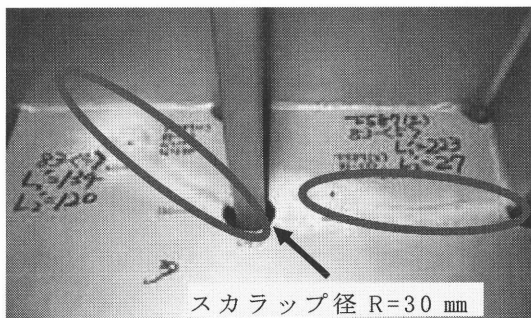


写真-1 横リップの下側スカーラップ部のまわし溶接止端部を起点に横リップに伝播するタイプ（タイプ B④-D）

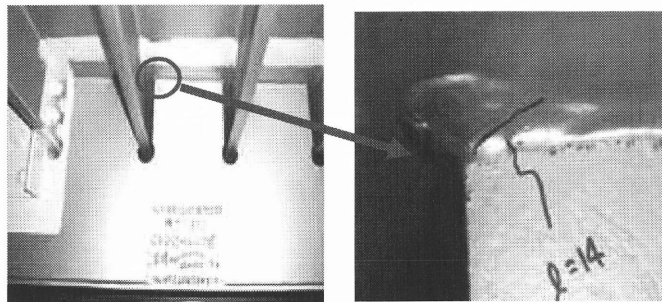


写真-2 上側スカーラップ部のまわし溶接止端部を起点にデッキに伝播するタイプ（タイプ B④-U）

3. 2 下側スカーラップ部のき裂（タイプB④-D）の損傷要因の検討

(1) 損傷状況

バルブリブと横リブ下側スカーラップ部の疲労き裂（タイプB④-D）は、阪神高速道路では2002年に神戸市兵庫区に位置する神戸線明治工区（以下、「明治橋」という）で発見された。この橋梁は、3径間連続鋼床版1箱桁の4連で構成され、1969年に供用を開始している。その構造概要を表-5に示す。

その後、同タイプのき裂が他の橋でも発見され、現在、き裂数が872箇所にとんでいる。（図-9）スカーラップ半径の違いによる損傷発生（径間）数を整理すると表-6に示すとおり損傷は標準図制定前のスカーラップ半径が30mm以下の橋梁で発生している。

(2) 構造ディテールに着目したFEM解析

明治橋を対象に構造ディテールの違いが、き裂発生に与える影響を調べるためにFEM解析により発生応力を求めた⁷⁾。明治橋は、標準構造に対してスカーラップが小さく（R=30mm）また横リブ高さも低くなっており（H=500mm）これらの影響を調べるために、表-7に示す3ケースの比較検討をおこなった。解析は橋全体をシェル要素・ビーム要素でモデル化し、着目部の縦リブと横リブ交差部をソリッド要素でズームングした。図-10に解析モデルを示す。荷重は、総重量20t車の後軸タンデムを想定し、後軸1輪の荷重3.92kNを500mm×200mm幅で等分布载荷した。荷重载荷位置は、き裂損傷が輪荷重直下の交差部で発生していることからバルブリブ交差部の横リブ直上に载荷した。

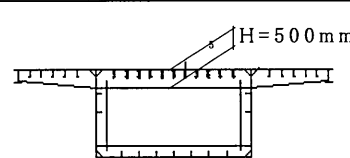
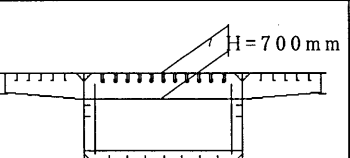
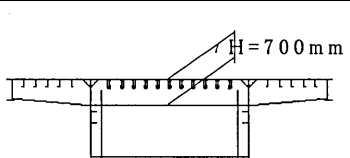
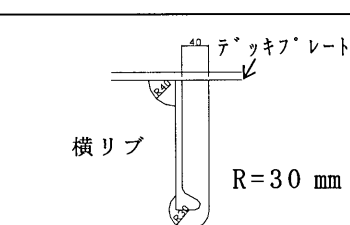
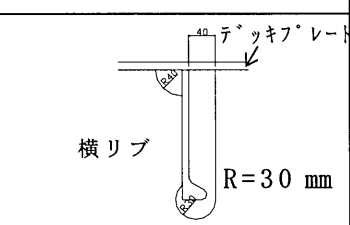
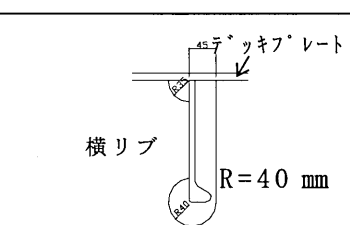
表-5 明治橋の構造概要

形式	3径間連続鋼床版1箱桁橋
規模	支間：54.7+78+54.7m×2橋， 70+85.5+70m×2橋 幅員：9.5m，2車線
時期	竣工：1967年，供用：1968年
諸元	デッキプレート厚 t=12mm，バルブリブ h=200mm×t=10mm，横リブ h=500mm ×t=9mm
交通量	25000台/日・レーン（大型車混入率 23%）
舗装厚	t=80mm（表層 t=35mm，基層 t=45mm）

表-6 下側スカーラップ半径に対する損傷径間数

半径 (mm)	25 以下	30	35	40 以上	合計
①設備径間数	108	114	57	439	718
②①の内， 損傷径間数	13	12	0	0	29
損傷発生率	12%	11%	-	-	4%

表-7 比較検討モデル一覧

	Model-1	Model-2	Model-3
	明治橋	-	標準構造
横リブ高さ	500mm	700mm	700mm
横リブ概略構造			
スカーラップ径とその形状	 R=30mm	 R=30mm	 R=40mm

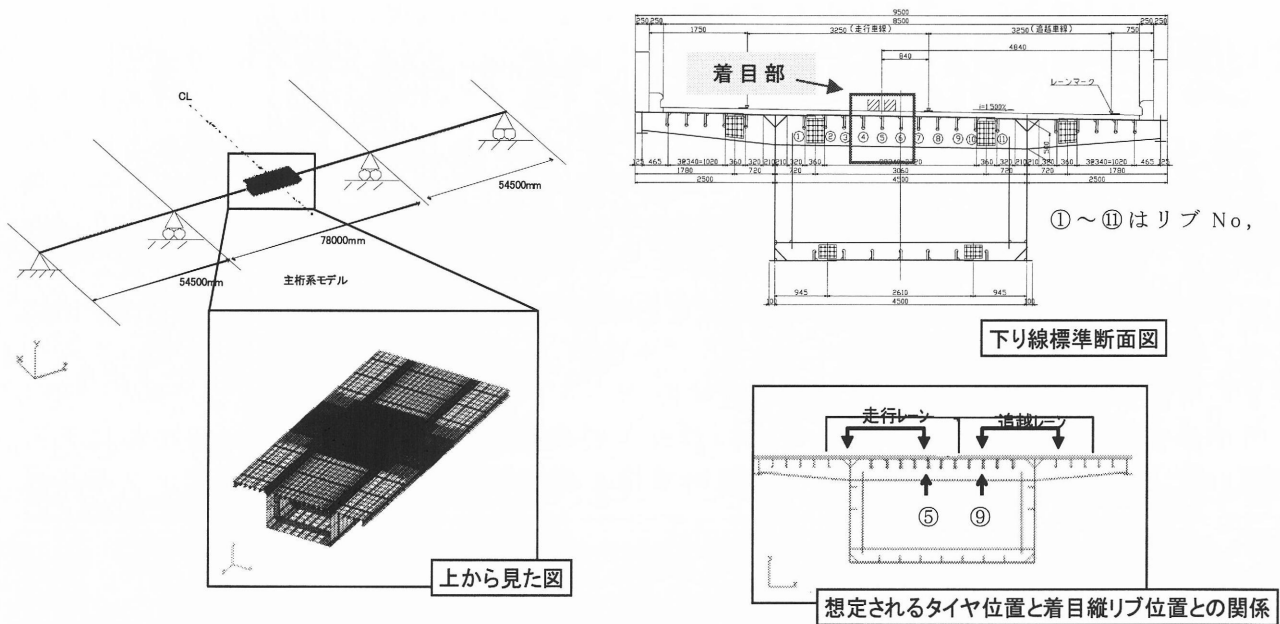


図-10 FEM解析モデル

(3) FEM解析結果

Model-1~3 の応力分布図を図-11 に示す。Model-1, Model-2 とまわし溶接止端部に 60MPa 程度の応力集中が確認される。なお、この応力値は溶接止端から 4mm の位置で評価している。Model-1 に対して横リブを高くした Model-2 は、応力低減効果は認められない。下側スカーラップの径を大きくした Model-3 では、まわし溶接止端部は 13.6MPa と大幅に低減したが、一方でスカーラップ円弧部に最大 66.7MPa の応力が発生している。JSSC 疲労強度等級⁸⁾では溶接止端部とスカーラップ円弧部の強度等級は、それぞれ F 等級と B 等級であり、200 万回基本応力許容範囲が 65MPa と 155MPa である。したがって、スカーラップ径：R=30mm では、まわし溶接止端部が応力集中箇所となり、標準構造であるスカーラップ径：R=40mm に対して大幅に疲労耐久性が低下する。つまり、交差部の疲労に対して、横リブの高さの影響は小さく、スカーラップ径の大きさが疲労き裂損傷に影響を及ぼすことがわかった。なお、き裂発生箇所に対して図-12 に示すとおり、2003 年に L 型アングルを縦リブおよび横リブに高力ボルトで接合するあて板補強を行っている。

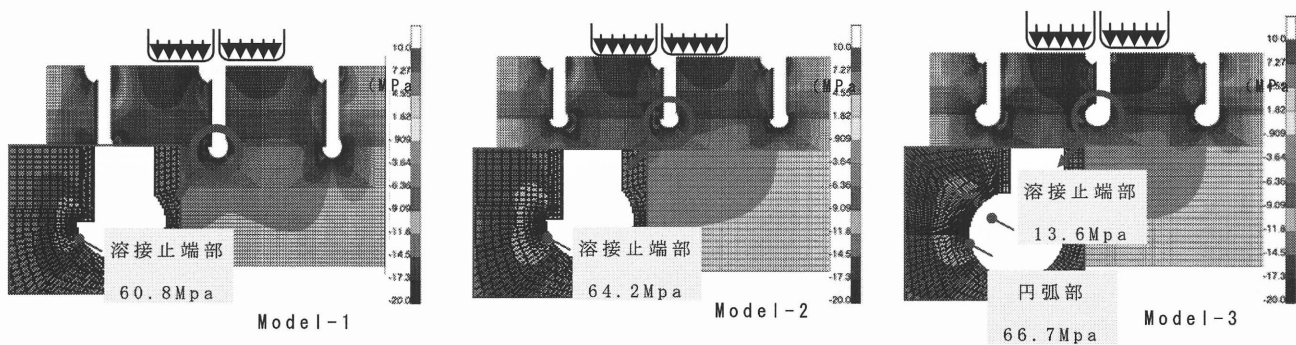


図-11 FEM解析結果

補修状況

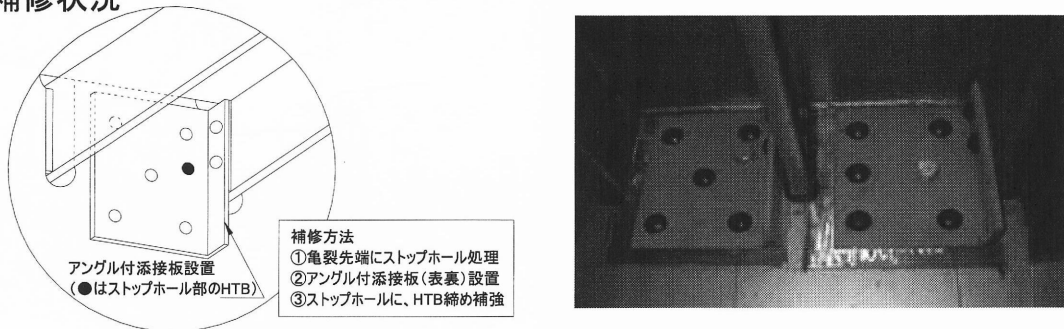


図-12 明治橋におけるあて板補強状況

3. 3 上側スカーラップ部のき裂（タイプ B④-U）の裂損傷要因の検討

（1）損傷橋梁と点検経緯

前述の明治橋であて板補強の1年後（2004年）の接近点検でスカーラップ上側のまわし溶接部において新たなき裂（タイプ B④-U）が発見された。図-12のあて板補強箇所とき裂損傷が無く未補強箇所のどちらにもき裂が発見された。その後、他の橋梁においても発見された。

（2）FEM解析

FEM解析により上側スカーラップのき裂の発生原因と上下スカーラップからのき裂発生順序に関する検討を行った。解析は前項と同じ明治橋モデルと載荷荷重を用いたが、前回に加えて、まず輪荷重直下付近に位置する3本のバルブリーブ④～⑥（図-10の断面図参照）に着目し、橋軸および橋軸直角方向に影響線載荷し、載荷位置による着目バルブリーブの発生応力への影響を検証した。

（3）FEM解析結果

発生応力が最大となる載荷位置は、横リーブから橋軸方向に $L/4$ 離れた（ L ：横リーブ間隔）縦リーブ⑤の直上である。この時の横リーブウェブ主応力分布図を図-13に示す。上側スカーラップのまわし溶接部での発生応力は 59.1MPa と顕著な応力集中が確認された。横リーブ直上載荷時（図-11）ではその現象は見られないことから、縦リーブからの作用（せん断）の影響が現れていると考えられる。一方、下側スカーラップにおいても高い応力域が横リーブ母材に広範囲に広がっており、まわし溶接部近傍では上側スカーラップと同程度の 59.1MPa となっている。

横リーブ母材の高応力の分布範囲は下側スカーラップ付近の方が広いが、両部位とも溶接部近傍の発生応力はほぼ同程度であり、継手強度も等しいと考えられることからほぼ同時期に疲労き裂が発生し得ると推測される。

また、横リーブでは横断方向に輪荷重の載荷位置が変わることにより、図-14に示すような交番する局部せん断変形が生じる。これにより上側スカーラップ付近の応力変動が大きくなり、デッキプレートと横リーブの溶接部は交番応力状態となる。縦リーブのたわみによる影響に加えて、このような輪重による局所的な変形に起因する交番高応力の累積により疲労耐久性上過酷な状況になっている。

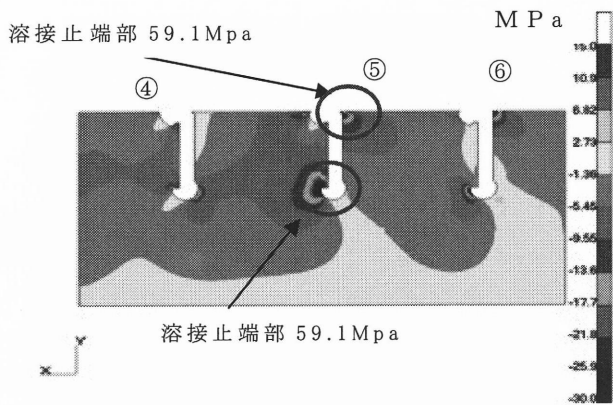


図-13 バルブリブ交差部の横リブウェブ応力分布

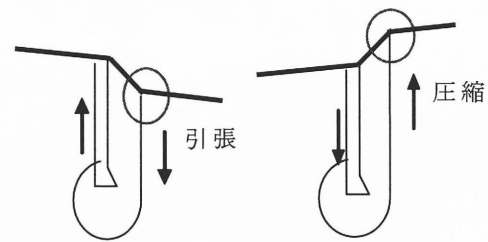


図-14 横リブとバルブリブスカーラップ部変形モード

3. 4 補修構造の検討

(1) 対策工の検討

上側スカーラップからのき裂損傷は、主に横リブの面内変形に起因すると推定された。その変形を低減させるためのせん断および曲げ剛性の向上策として、図-15 に示すスカーラップを閉塞する形で縦リブと横リブとをL型アングルで添接し、横リブをせん断補強する案（以下L型アングル工という）を選定した。

前項のFEM解析モデルと供試体の静的载荷試験により同対策案の応力低減効果の検証を行った。

(2) FEM解析結果

L型アングル補強時の横リブ応力分布を図-16 に示す。荷重値や载荷位置は図-13 と同じである。なお、L型アングル工は同図の縦リブ⑤のみに施工している。

L型アングル補強によりスカーラップまわりの局所せん断変形が抑制され、縦リブ⑤の上側スカーラップの溶接部近傍の応力集中が大幅に緩和した。同部の溶接止端部は16MPaと施工前の27%まで低下している。また、下側スカーラップ部も同19MPaと大幅に低減しており、バルブリブと横リブ交差部における有効な対策工と考えられた。

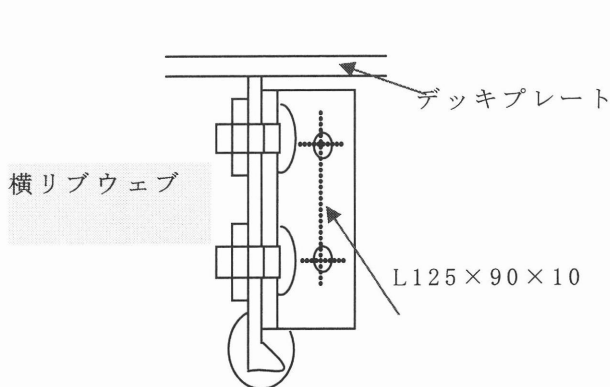


図-15 対策工の構造（L型アングル工）

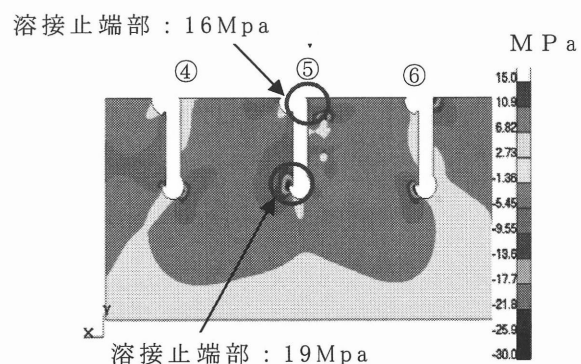


図-16 L型アングル設置時の横リブウェブ応力分布図

(3) 静的载荷試験の供試体と試験方法

L型アングル工について、構造ディテールの検討および応力低減効果の検証を目的に

静的載荷試験を実施した。供試体(図-17)は明治橋の実物大切出しモデルで横リブ3本バルブリブ5本で構成されている。補強案には図-18に示すように、スリット開口部側からアングルで補強したもの(以下片側補強という)と下側スカーラップからのき裂に対して補修するケースを想定し、隅肉溶接側からもアングルで補強したもの(以下、両側補強という)の2案とした。比較用に無補強のケースの試験体も製作した。载荷にはシングルタイヤ相当のゴム板(厚さ40mm×幅200mm×長さ200mm)を用い、荷重強度100kNで横断方向に小刻みに移動させた。

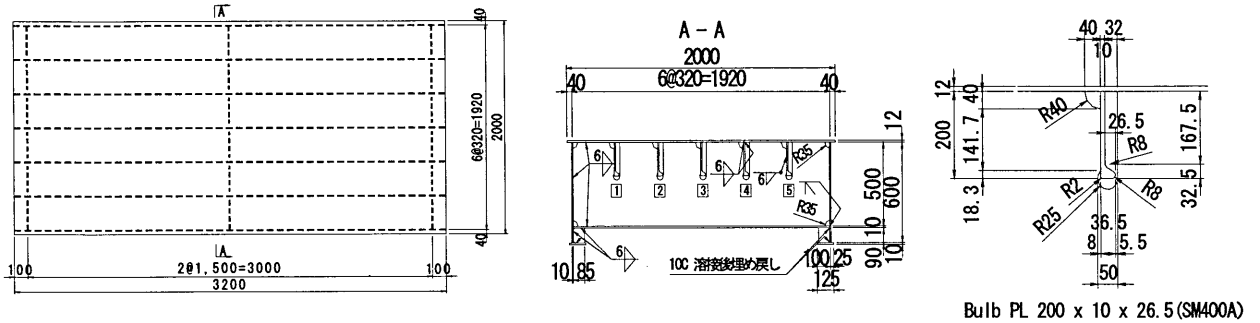


図-17 供試体構造一般図

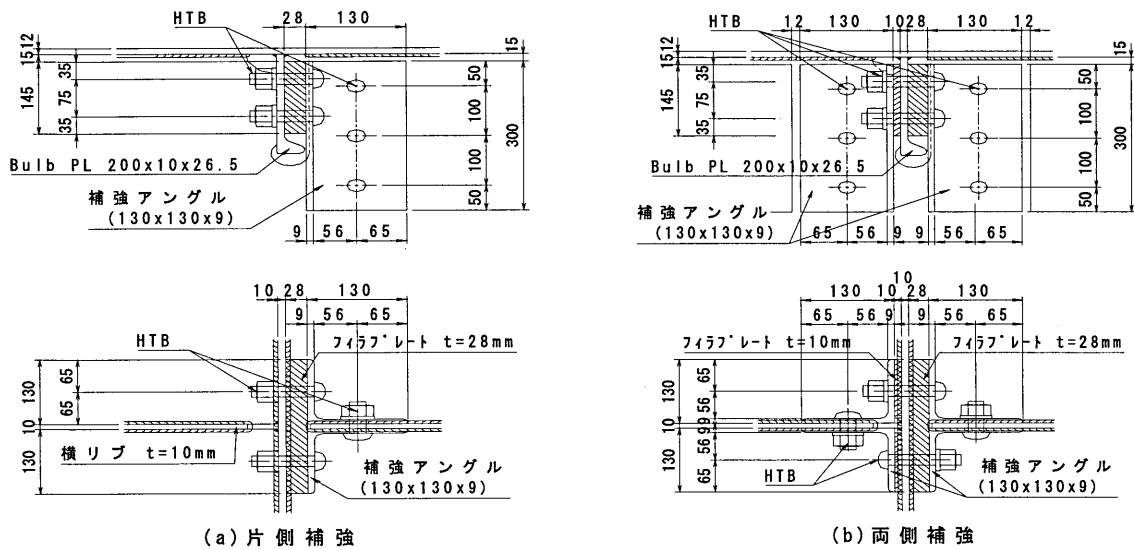


図-18 補強構造

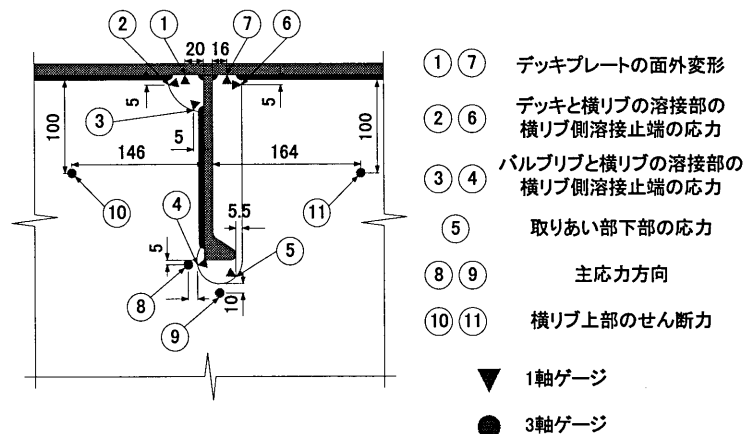


図-19 ひずみゲージ設置位置

(4) 静的載荷試験結果

図-20には、実験試験体のバルブNo.1(縦リブ5本のうち一番左のリブ)について横

リブ上を横断方向に荷重を移動させた場合のゲージ④（下側スカーラップの横リブこば）およびゲージ⑥（上側スカーラップの横リブこば）の応力値を無補強、片側補強および両側補強で比較したものを示す。同図より、まず補強前の応力分布はせん断力に比例した応力影響線となり、この損傷が主に横リブのせん断変形に起因していることを裏付ける結果となった。つぎにアングル補強によって、発生応力は上下スカーラップ近傍共に補強前の 1/2 以下に低減し、両方に効果があることが明らかになった。また片側補強と両側補強の応力低減効果には大きな差が認められなかった。

表-8 には、バルブNo.3（縦リブ 5 本のうち真ん中のリブ）について、補強前後での発生応力の最大値で比較したものを示す。同表より、アングル補強によって全体的に応力が低減し、特にゲージ③～⑥ではその効果が顕著であることがわかった。また、この補強による応力低減効果はどの縦リブに着目しても同様の傾向であった。

なお、実橋でのき裂損傷が少ない開口部と反対側の上側スカーラップ近傍（ゲージ①、②）は、せん断変形より輪重の直接载荷の影響が大きいと考えられ、補強による低減効果が小さいが、元々発生応力が小さい部位である。今後、さらに本供試体を活用し疲労試験により疲労耐久性向上効果を確認する予定である。

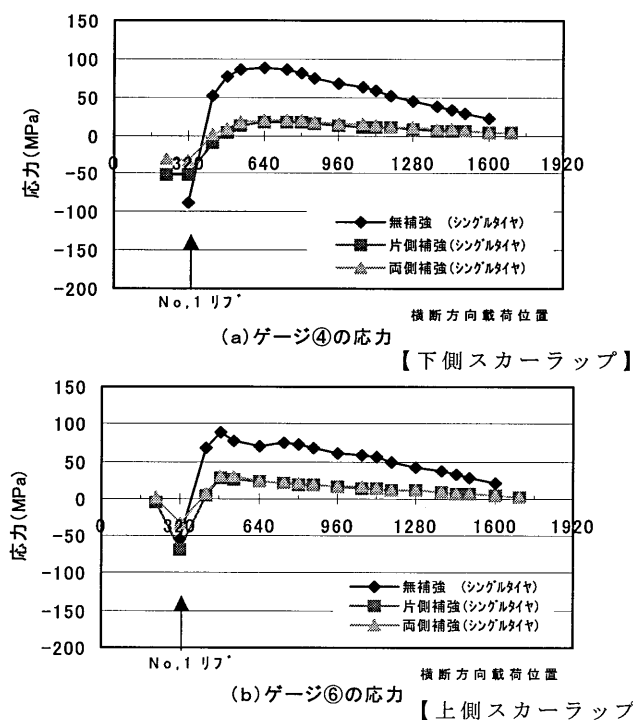


表-8 発生応力度の比較（横リブ直上）

ゲージ位置	A. 無補強 MPa	B. 片側補強 MPa	C. 両側補強 MPa	比率 B/A	比率 C/A
①	-32	-21	-24	0.66	0.75
②	-32	-36	-26	1.13	0.81
③	46	2	0	0.04	0.00
④	-128	-50	-36	0.39	0.28
⑤	-82	-37	-27	0.45	0.33
⑥	-58	-6	-3	0.10	0.05
⑦	-30	-20	-23	0.67	0.77
⑧ σ_1	1	2	2	—	—
⑧ σ_2	-67	-25	-19	0.37	0.28
⑨ σ_1	20	11	12	0.55	0.60
⑨ σ_2	-23	-7	-7	0.30	0.30

図-20 測定No.④, ⑥（シングルタイヤ）

4. 垂直補剛材とデッキプレートとの溶接部き裂の対策検討

デッキプレートと垂直補剛材との溶接部のき裂は、30 径間（157 箇所）で確認されており、その全てがUリブ形式の箱桁ウェブの垂直補剛材で発生している。また、き裂が発生した垂直補剛材は、全て車両（タイヤ）走行の直下に位置している。このタイプのき裂は、デッキプレートに進展、貫通する場合も有り、対策が急がれる損傷の一つである。

き裂は、輪重の直上载荷に伴うデッキプレートのたわみ変形を垂直補剛材が拘束することで補剛材先端の溶接部に局所的な応力集中が発生し、その繰返しにより発生したと推定¹¹⁾される。そこで、垂直補剛材とデッキの溶接部の近傍に半円を設け、垂直補剛材の鉛直方向の剛性を和らげることで、垂直補剛材とデッキプレートとの溶接止端部の応力集中の緩和を図ることを試みた。まず、FEM解析により効果的な半円切欠きの径と位置を検討し、実橋大の部分供

試体による載荷試験および実橋での試験施工・計測を実施した。

4.1 FEM解析

実橋をモデル化したFEM解析により、切欠きの有無と半径および切欠き上端とデッキプレートとの距離を変えた図-21 に示す5ケースを解析対象とした。切欠きの半径 $R=85\text{ mm}$ は、垂直補剛材の幅の半分程度である。載荷荷重は $P=79.4\text{ kN}$ とし、補剛材直上位置に $L=200\text{ mm} \times T=500\text{ mm}$ の部分等分布荷重として載荷した。

図-22 に Case-1(対策前)、図-23 に Case-2 の主応力分布図を、表-9 に解析結果の総括を示す。Case-2 では対策前に比べて、デッキプレート下面の止端部付近の応力が 1/2 程度、垂直補剛材の止端部付近で 1/3 程度と大幅に低下する。半円を小さくした Case-3 や止端からの距離が離れた Case-4 では応力低減効果が鈍化する。長円切欠きの Case-5 は Case-2 より応力レベルが低下するが、その差は小さい。一方、切欠きにより半円の中心部に応力集中が生じるが、Case-2 と Case-3 を比較すると差は小さく、切り欠き半径が半円部に発生する応力に与える影響は小さい。

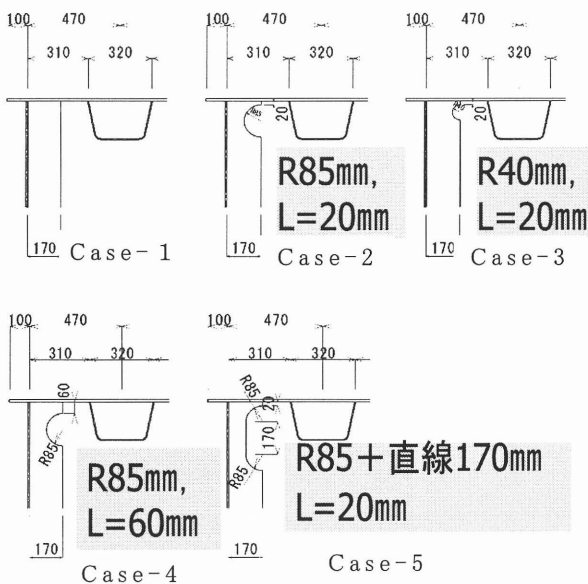


図-21 垂直補剛材端部の切欠きパターン

表-9 FEM解析結果総括表

	止端部からの距離 (mm)	半円の径 (mm)	デッキプレート		垂直補剛材		
			下面		上端部	半円部	
			Mises応力 (N/mm ²)	低減率	鉛直応力 (N/mm ²)	低減率	鉛直応力 (N/mm ²)
Case-1	切り欠き無し		355	—	-340	—	—
Case-2	20	R=85	180	51%	-113	33%	-237
Case-3		R=40	283	80%	-203	60%	-222
Case-4	60	R=85	235	66%	-233	69%	-246
Case-5	20	長円 R=85	131	37%	-92	27%	-198

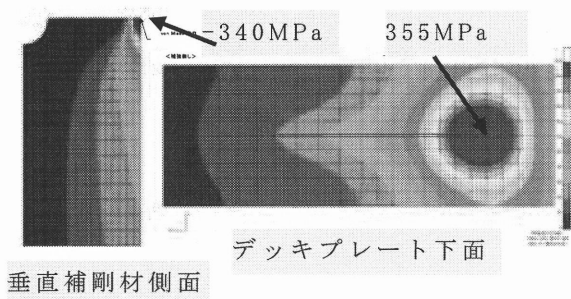


図-22 Case-1(対策前)のFEM解析結果

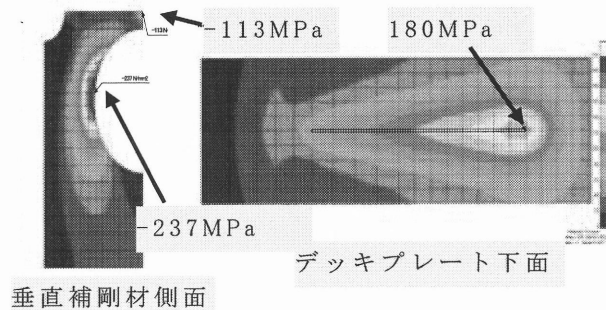


図-23 Case-2(切欠き R=85)のFEM解析結果

4.2 静的載荷試験

実橋を再現した試験体により静的載荷試験を行い、応力低減効果を照査した。供試体の形状、寸法と載荷位置を図-24 に示す¹²⁾。載荷荷重は $P=100\text{ kN}$ とし、 $L=200\text{ mm} \times T=500\text{ mm}$ で厚さ 10 mm のゴム板を介して載荷した。試験体は4か所の載荷部位を有しているが、垂直補剛材を外した位置 (R1-L, R, R2-L) に載荷した方が着目部位に大きな応力が発生した。

図-25 に静的載荷試験結果を示す。対策前に比べて、デッキ側溶接部の応力は6割程度、垂

直補剛材側溶接部の応力はほぼ測定されないレベルまで低下した。なお、同試験体を用い、疲労試験（定点载荷）を実施している。

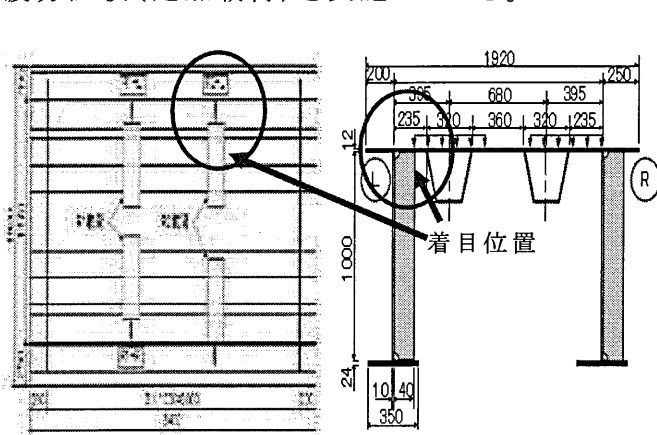


図-24 供試体の形状および寸法

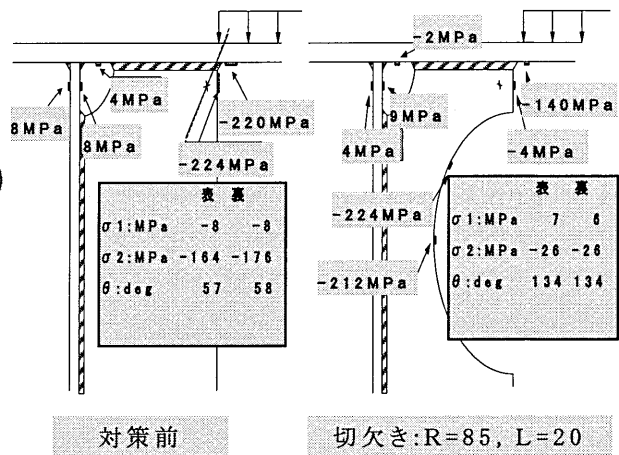
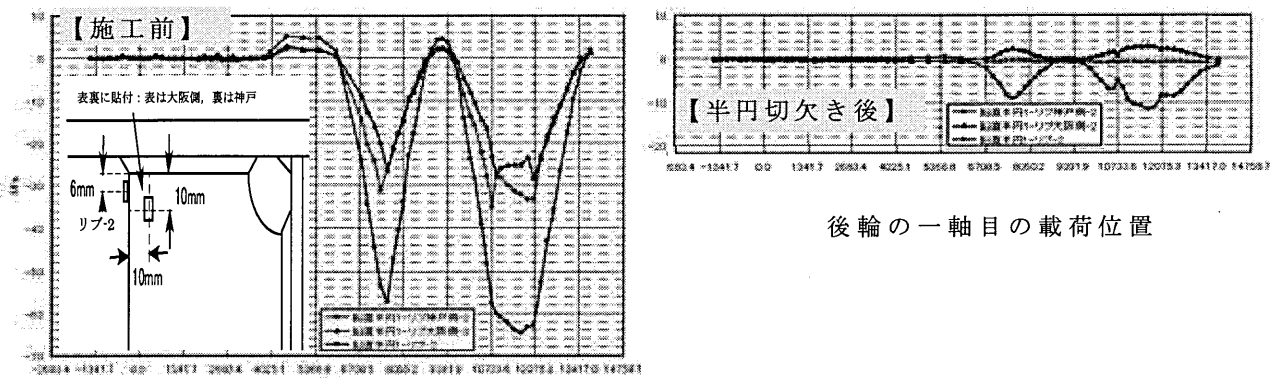


図-25 静的载荷試験による半円切欠きによる応力低減効果

4.3 実橋での効果確認（実働応力の測定）

阪神高速道路神戸線の3径間連続鋼床版2箱桁にひずみゲージを設置し、半円切欠き補強前後の応力値を測定した。重量調整した20t車で垂直補剛材直上を走行させ、実働応力（動的応答）を計測した。図-26に計測位置と測定結果を示す。

2軸後輪の後ろの車軸が鉛直リブ直上を通過するとき-60MPaを超える最大応力が発生する。半円切欠きにより、応力範囲が70MPa程度から10MP程度まで低下するとともにリバウンドにより発生する引張応力も解消されている。また、垂直補剛材の剛性の低下でねじり変形が危惧されたが、それに起因する応力発生は観察されなかった。なお、デッキプレート側止端でも計測しており、半円切欠きにより、応力範囲が1/2以下に低下した。



後輪の一軸目の载荷位置

図-26 実働応力測定結果

5. おわりに

本稿では、阪神高速道路の鋼床版全般の損傷状況とバルブリブと横リブ交差部、デッキプレートと垂直補剛材溶接部の疲労損傷の発生要因と有効な補修補強方法についての当社の検討成果を述べてきた。その内容をまとめると以下の通りである。

- ・ 阪神高速道路の全鋼床版ストック1347径間の内、142径間の1825箇所にかき裂損傷が発見されている。その内、バルブリブでは縦リブと横リブ交差部の損傷が突出して多く、かき裂総数の約6割に及んでいる。Uリブの損傷はデッキプレート貫通き裂が1箇所見つかっている他は、縦リブとデッキプレートの溶接部き裂や垂直補

剛材とデッキプレート溶接部および縦リブと横リブ交差部が主要なき裂タイプである。

- ・ バルブリブと横リブ交差部のき裂は、点検データや応力解析をベースにした検討により、構造ディテール（スカーラップ部の径、横リブのせん断剛性等）上の要因がわかった。
- ・ その対策として、L型アングルあて板によりスカーラップを閉塞することにより、局所せん断変形が抑制され、上下スカラップ回りの応力集中が緩和されることが確認された。今後、定点疲労試験を実施の上、実橋での展開を図っていく方針である。
- ・ デッキプレートと垂直補剛材との溶接部のき裂に対しては、垂直補剛材に半円切欠きを施すことにより溶接部への大幅な応力集中を緩和するとともに、発生したき裂の進展が抑制されることが確認された。

現在のところ、当社の実橋への対応は損傷が発見されたものに対する事後保全が主流であるが、今後はUリブ損傷のさらなる増加が予想されるため、より効率的な維持管理の展開に向けて、点検手法や補修補強方法、順位付け手法等の確立に向けて鋭意取り組んでいきたいと考えている。

なお、鋼床版をはじめ鋼構造物の疲労損傷問題の検討にあたっては「阪神高速道路技術審議会（委員長：渡邊英一京都大学名誉教授）」をはじめ「鋼床版等の疲労に関する検討委員会（委員長：関西大学坂野昌弘教授）」の委員や橋梁関係者各位の多大なご指導を頂きました。厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 阪神高速道路公団：鋼床版箱桁標準設計図面集，1982.9.
- 2) 阪神高速道路公団：鋼構造物標準図集，1985.3.
- 3) 米倉，長沼，丸山，佐藤：鋼床版トラブリブに発生した疲労損傷の補修・補強，日本鋼構造協会第4回鋼構造物の補修・補強技術報告会，1996.
- 4) 例えば，三木，菅沼，富澤，町田：鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集，No.780/I-70，pp57-69，2005.
- 5) 阪神高速道路公団：鋼構造物標準図集，1978.3.
- 6) 阪神高速道路公団：設計基準第Ⅱ部，2000.4.
- 7) 高田，流田，夏秋，松下，坂野：鋼床版の横リブ高さおよびスカーラップ形状が疲労強度に与える影響，土木学会第60回年次学術講演会，2005.9.
- 8) (社)日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993.4.
- 9) 川上，米谷：鋼床版疲労損傷補修補強手法検討，阪神高速道路株式会社技報，2007.1.
- 10) 田畑，山村，濱田，迫田，酒井，坂野：鋼床版バルブリブと横リブ交差部の疲労損傷対策に関する実験的検討土木学会第62回年次学術講演会，2007.9(投稿中)
- 11) 川村，流田，高田，坂野，嘉指：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回年次学術講演会講演概要集，2005.9
- 12) 二村，坂野，酒井，高田，川上，米谷，松下，夏秋：鋼床版デッキプレートと主桁垂直補剛材上端の溶接部の疲労損傷対策，土木学会第61回年次学術講演会講演概要集，2006.9