

鋼床版デッキプレート貫通亀裂に対する補修調査報告

大阪管理部 調査設計グループ 田畑晶子
神戸管理部 調査設計グループ 木代 穰
大阪管理部 調査設計グループ 西岡 勉

要 旨

近年、重交通路線を中心に鋼床版の疲労損傷が発生しているが、阪神高速湾岸線で鋼床版デッキプレート貫通亀裂が発見された。この損傷は、割れが進展した場合、路面が陥没する危険性を含むことから、亀裂先端のストップホール施工、およびデッキプレート上下面からのあて板補修を実施した。また、損傷要因分析を目的として、先のストップホールコアを用いた溶接部の溶け込み状況の把握、あて板補修前のFEM解析による輪荷重載荷状況に応じた応力発生状態の確認、現地応力測定（動的・頻度）による応力レベルの把握を行った。

キーワード: 鋼床版、疲労、デッキプレート貫通亀裂、あて板、損傷要因分析、FEM解析、応力頻度測定

はじめに

近年、重交通路線を中心に鋼床版の疲労損傷が報告されている^{1)~6)}が、阪神高速湾岸線においても、U型の縦リブ（以下Uリブ）とデッキプレートとのすみ肉溶接のルート部からデッキプレート上面に達する疲労損傷（以下デッキプレート貫通亀裂）が発生した。デッキプレート貫通亀裂は、**図-1**に示すとおりルート部を起点として溶接部の内側を進展するため、桁下外面からの目視調査では発見できず、また、割れが進展した場合、舗装の損傷や路面の陥没等が懸念されることから、補修の緊急性が高い。当社では、デッキプレート貫通亀裂に対する応急対策として、亀裂先端のストップホール施工、およびデッキプレート上下面からのあて板補修を実施した。また、損傷要因分析として、溶接部の溶け込み状況の調査、あて板補修前のFEM解析、応力頻度測定等を行った。ここに、一連の検討成果を報告する。

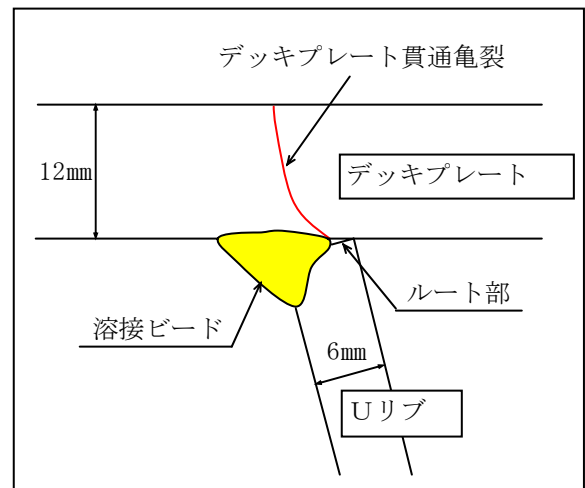


図-1 デッキプレート貫通亀裂のイメージ

1. 損傷桁の概要

平成 17 年 7 月、舗装のポットホール補修工事の際に、**写真-1**に示すデッキプレート貫通亀裂をデッキプレート上面より発見した。当該損傷は

片側二車のうちの走行車線の右タイヤ付近で、橋軸方向に沿ったものであり、亀裂からは水がわき出し、Uリブ内は満水状態であることが推定された。当該位置の舗装は繰り返し損傷が発生していた。損傷桁の橋梁諸元等を表-1 に、橋梁一般図と損傷位置を図-2 に、タイヤ位置と損傷リブを図-3 に示す。対象橋梁は平成 5 年に供用し、12 年を経過したニールセンローゼ橋で、床組（鋼床版）は下弦材との合成床版として設計され、中央に一条縦桁を有するUリブ構造である。横リブ間隔は 3 m，Uリブ 320×6×240 mmである。ヤード溶接が採用され当該床版は添接部を有さず、現場での舗装厚は 65 mmである。当該区間の交通量データより、走行車線の大型車混入率が 41%と高く、走行・追越車線別の大型車占拠率からも走行車線における大型車の通行割合が高いことがわかる。亀裂の調査結果については文献 7)，8) に詳細を記した。なお、デッキプレート貫通亀裂に対する桁下面からの非破壊検査手法としては、表面波（クリーニング波）および斜角探傷（70°）の併用による超音波探傷試験が有効であった（図-4）。

表-1 橋梁諸元等

形式	バスケットハンドル型ニールセンローゼ桁橋
規模	支間:254m, 幅員 20.25m, 4 車線
時期	供用;平成 5 年 11 月, 竣工;平成 3 年 9 月
構造特性	床組は下弦材との合成床版として設計
鋼床版諸元	デッキプレート厚 t=12mm, Uリブ厚 t=6mm, 横リブ間隔 L=3.0m
舗装厚	T=65mm (表層 t=35mm, 基層 t=30mm)
交通量	1) 日平均交通量 (平成 18 年 7 月 10~14 日) 走行車線 16,800 台/日 (大型車混入率 41%) 追越車線 20,200 台/日 (大型車混入率 15%) 2) 車線別大型車占拠率 走行車線 69%, 追越車線 31%

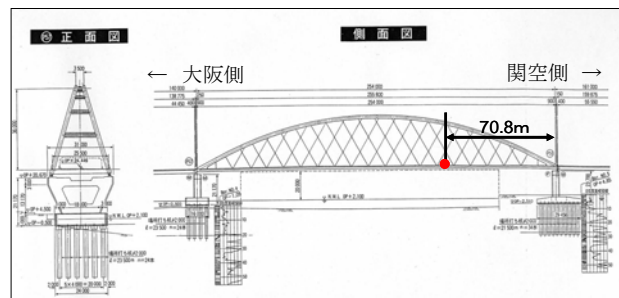


図-2 橋梁一般図と損傷位置

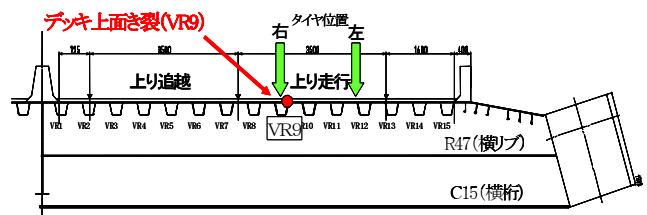


図-3 タイヤ位置と損傷リブ



写真-1 損傷写真（デッキ表面）

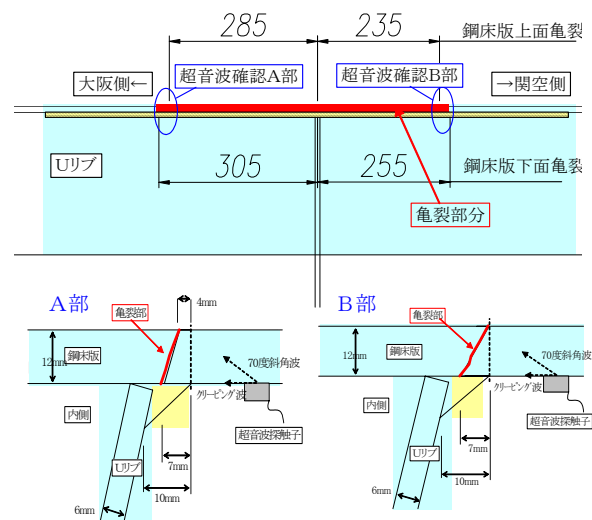


図-4 超音波探傷試験結果

また、Uリブ内で滞水している場合は赤外線カメラを用いた撮影を行えば健全なUリブより温度が低いことが視認できる（写真-2）。さらに、滞

水箇所はたたき点検でも音の違いで異変を察知可能であった。

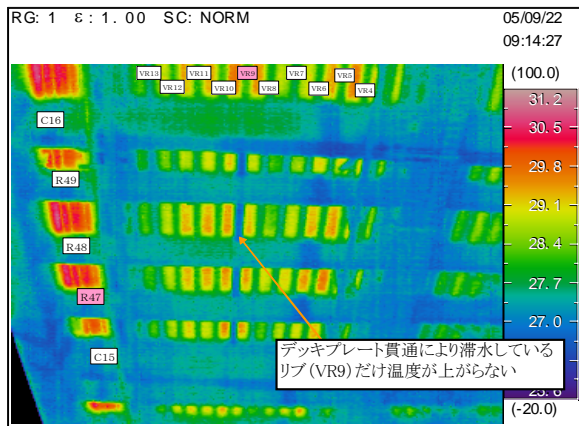


写真-2 赤外線カメラでの撮影結果

2. 応急対策

補修構造の選定にあたっては、デッキプレート貫通であること、また、横リブとの交差部であることに鑑み、デッキプレート上面と下面（Uリブ内外面）から、鋼板によるあて板で閉じ合わせる方法を選択した。図-5 に対策構造を示す。施工は平成 17 年 10 月に完了した。部材の製作等に一月近く要したが、実作業としては半日のみ交通規制を要し、亀裂先端ストップホール工、デッキプレート孔明け、あて板設置および舗装復旧を実施した。デッキプレート上面にあて板（12 mm）を敷設する範囲は、基層厚が薄くなることに配慮して、MMA樹脂を基層に用いて表基層の2層打ちで復旧した。構造詳細や対策範囲等の考え方は、文献7）に記した。写真-3 にはデッキプレートの上面・下面あて板の施工完了状況を示す。

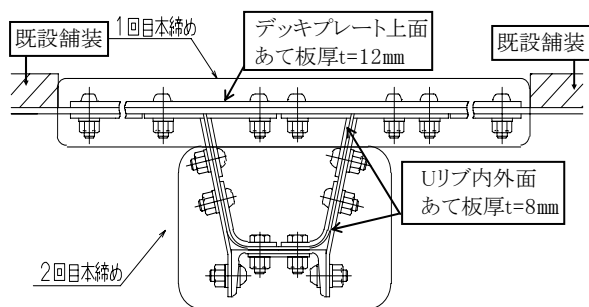


図-5 対策構造（デッキプレート貫通亀裂）



(a) デッキプレート上面あて板



(b) デッキプレート下面の側面板

写真-3 施工完了状況

3. 損傷要因分析

ニールセンローゼ橋の損傷例ではオランダ・ロッテルダム運河に架かる Van Brienenoord 橋（供用年 1990 年）において本件と同様のデッキプレート貫通亀裂が横リブ交差部に発生したという事例が報告されている^{9), 10)}。今回、本橋部にデッキプレート貫通亀裂が発生した要因を溶接部の観察や FEM 解析、応力測定等から分析する。

3-1 溶接部の溶け込み量の調査

Uリブ溶接部に生じる損傷要因として、輪荷重の繰り返し载荷に伴うデッキプレートの板曲げによるルート部の応力集中や、片面すみ肉溶接の溶け込み量の不足が考えられる。写真-4 には当該箇所の亀裂先端のストップホールを兼ねたサンプルリングコアを示す。ルート部から発生した亀裂が、デッキ側に進展し、デッキ厚の 1/3 程度から角度を変えて表面に向かっている。すみ肉溶接部の溶け込み量は Uリブ板厚 6 mm に対して 2 mm 程度である。参考に、写真-5 には他工区で採取した溶

接部のサンプリングコアを示す。この工区では同時期に溶接ビード割れが発見されており、採取コアは健全部のものである。両者の比較より、若干溶け込み量が多い程度で、ルート部を起点とした亀裂がビード表面へ進まずデッキプレート板厚方向へ進む原因として特定するには微細な差である。

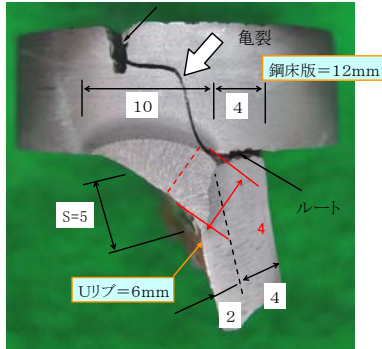


写真-4 溶接状況（デッキプレート貫通）

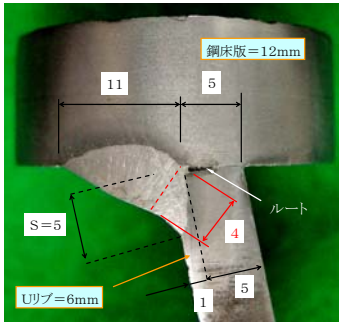


写真-5 溶接状況（他工区の健全部）

3-2 FEM解析

荷重状態による応力の発生状況を把握する目的であって板補強前のFEM解析を実施した。

(1) 解析モデル

図-6 に解析モデルを示す。亀裂発生付近を含む横リブ R47 を挟んだ U リブ VR9 (800 mm) 間をソリッドモデルとし、横桁 C15 から横リブ R48 間をシェル要素、橋梁全体系を梁要素でモデル化した。解析プログラムは COSMOS/M Ver2.85 を使用した。材料特性として鋼材の弾性係数は $2.0 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比は 0.3 とした。図-7 には橋軸直角方向におけるダブルタイヤの荷重位置を、表-2 には橋軸方向のタンデム後輪の荷重位置を示す。溶接部のモデル化においては実橋のサンプリング結果を参考に、25%の溶け込み量（溶着量 2 mm程度）と想定した。図-8 に

溶接部モデルならびに着目部位を示す。

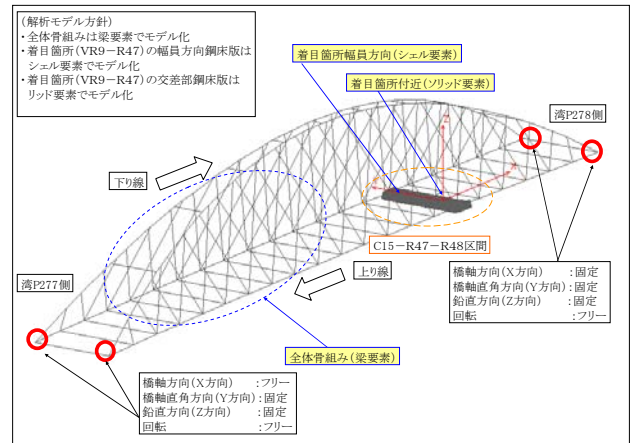


図-6 解析モデル

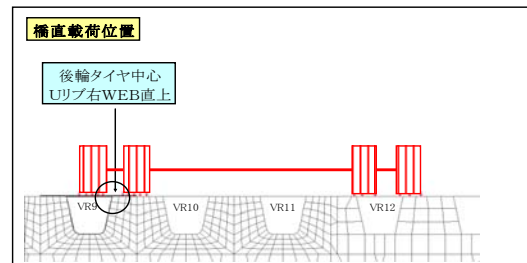


図-7 荷重位置

表-2 解析ケース

解析番号	荷重状態	備考
ケース 1	タンデム中輪・後輪中心軸が U リブ支間中央	
ケース 2	タンデム後輪が横リブ (R47) 直上	
ケース 3	タンデム中輪・後輪が横リブ (R47) を跨いで荷重	

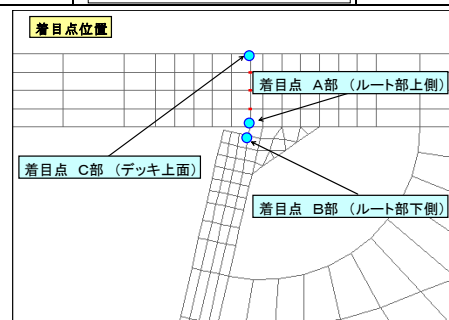


図-8 溶接部モデル形状ならびに着目位置

(2) 解析結果

図-9-1にはFEM解析結果（変形図；側面図）を示す。同図(a)ケース1ではUリブ支間中央付近が変形しているのに対して、同図(c)ケース3では、タンデム中輪・後輪が横リブを跨いで载荷されているため、横リブを節とした前後に板曲げが生じていた。つぎに、図-9-2には、FEM解析結果（変形図；断面図）を示す。同図(a)ケース1ではUリブのウェブを節として、左

右（橋軸直角方向）に板曲げが生じているが、同図(b)ケース2では、横リブ交差部のため横リブ上のデッキは変形せず、中空断面のUリブ内側上面のデッキが局部的に凹に変形している様子がわかる。以上より、Uリブと横リブ交差部では、橋軸・橋軸直角方向の2軸において板曲げが生じるため、ケース1のUリブ支間中央部よりも複雑な変形状態にあることが推定できる。

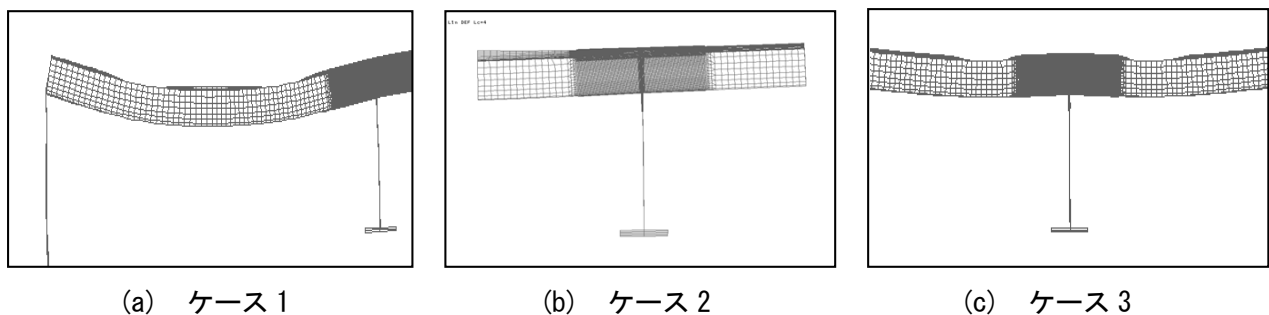


図-9-1 FEM解析結果（変形図；側面図）

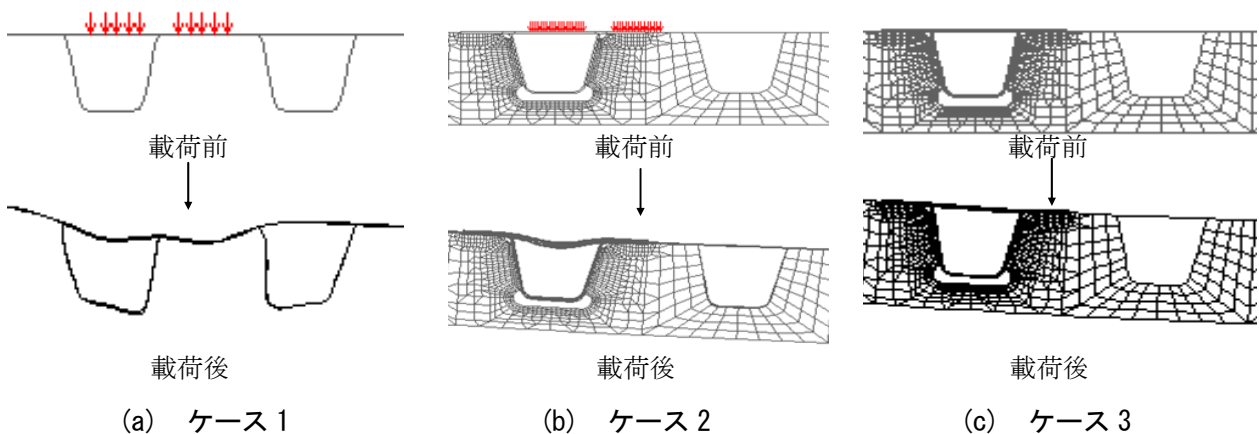
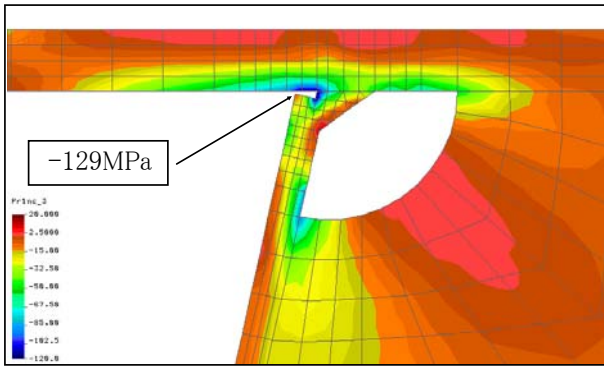


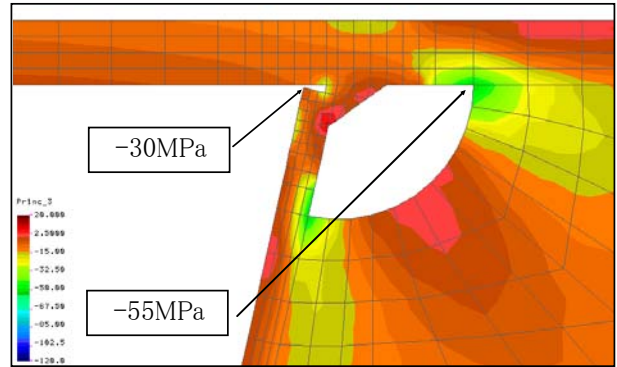
図-9-2 FEM解析結果（変形図；断面図）

つぎに、図-10に横リブ交差部に着目した場合の発生応力コンター図をケース2、3の場合で示す。ケース2のルート部上端の最小応力 -129MPa に対して、ケース3の同位置での発生応力は -30MPa 程度であり、タイヤが直上に载荷される場合のルート部の局所応力の方が横リブを跨ぐ場合よりも卓越して厳しくなった。さらに、図-11には、各着目点(A~C部)のタイヤ直下の発生応力を示す。いずれの着目部でも、ケース2のタンデム後輪直下（横リブ交差部）の発生応

力が卓越している。また、A部の発生応力とC部のその符合が逆転していることから、デッキ表裏に板曲げが生じていることがわかる。さらに、A部の発生応力のピークがB部のそれよりも大きいことから、ルート側でなくデッキプレート側へ亀裂が進展した可能性が考えられる。以上より、先述の変形図での見解どおり、横リブ交差部の応力状態が厳しいことが推定できた。なお、橋軸直角方向の载荷位置がずれると、交番応力が生じ、応力範囲としてさらに厳しくなると考えられる。

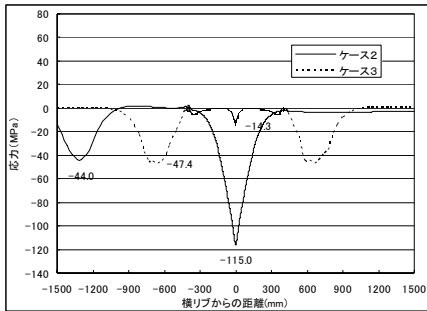


(a) ケース2

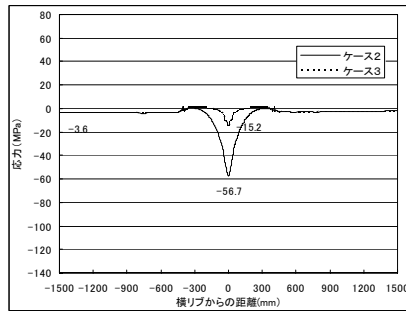


(b) ケース3

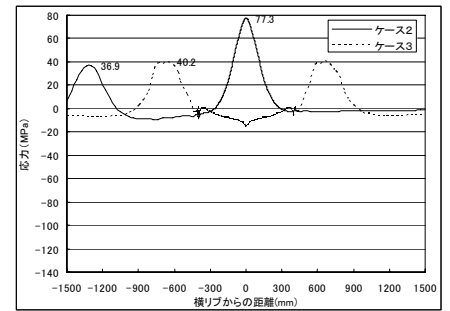
図-10 FEM解析結果（発生応力コンター図）



A部（ルート部上端）



B部（ルート部下端）



C部（デッキ上面）

図-11 FEM解析結果（各着目点の応力分布図）

3-3 応力測定

本橋の鋼床版は、ニールセンローゼ桁を主構として横桁・横リブならびに中央一条の縦桁で支持されており、一般の鋼床版と比較して、床組系としてのたわみ作用が大きいことが推定される。これより、応力レベルの把握を目的とした動的計測および一般車による応力頻度測定を実施した。

(1) 荷重車を用いた载荷試験

計測に使用された荷重車は、総重量が245kN（前輪軸重 60kN，後輪前軸重 90kN，後輪後軸重 90kN）である。図-12は、代表断面としてUリブ支間（a-a断面）と横リブ交差部（c-c断面）の応力測定位置および各断面のひずみゲージの位置を示す。

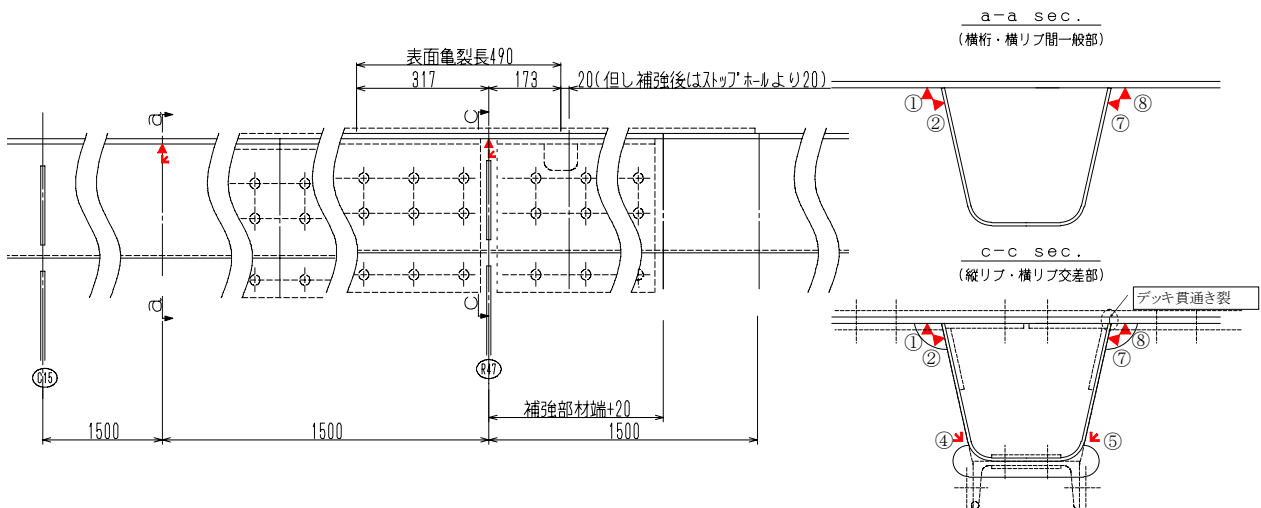


図-12 測定断面と測定位置

図-13 には、a-a 断面の荷重車による時刻歴応力波形を測点⑧（デッキ側）を代表に示す。発生応力のピーク（-75MPa）は、FEM解析結果（ケース1；中輪タイヤ直下での最小主応力値-43MPa）より卓越して大きい。この要因として、デッキが薄板で荷重直下の影響を受けやすく、波形の形状から、衝撃の影響が大きく出たものと考えられる。なお、 $-43\text{MPa} / -75\text{MPa} = 0.57$ で、道路橋示方書で示される衝撃係数 0.4 を大幅に上回ることから、当該箇所については、亀裂や舗装路面の不陸等による影響が考えられる。

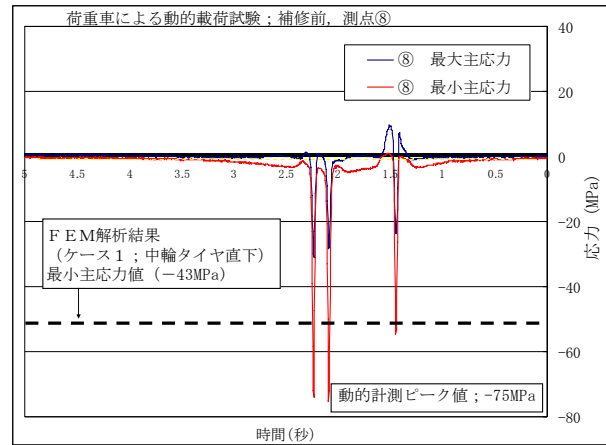


図-13 時刻歴応力波形
(補強前；a-a 断面，測点⑧)

(2) 応力頻度測定

表-3 には、各測定位置での応力頻度測定結果を示す。測定は補修前後ともに 72 時間実施した。推定疲労寿命算出に用いた継手強度等級は、U リブ縦溶接近傍を H 等級（荷重伝達型—中空断面材—止端破壊）、U リブと横リブ溶接部（スカラップ）を F 等級（荷重伝達型—すみ肉溶接止端破壊）とした。同表より、横リブ交差部のデッキと U リブ溶接部近傍の発

生応力は、あて板補修によって一律低減し、最大で 6 割の応力低減効果が得られた。また、補修範囲外の a-a 断面（U リブ支間部）においても、あて板による床版全体の補強効果が現れ、最大で 3 割程度の応力低減が見られた。しかし依然として高い応力レベルを呈しておりデッキが薄板で荷重直下の影響を受けやすく、また、亀裂やあて板、舗装路面の不陸等による衝撃の影響が大きいと考えられる。

表-3 応力頻度測定結果

測点位置			測点No.	補強前			疲労寿命 (年)	補強後			継手の 強度等級
				ピークバレー法		レインフロー法 応力範囲 (MPa)		ピークバレー法		レインフロー法 応力範囲 (MPa)	
				最大 (MPa)	最小 (MPa)			最大 (MPa)	最小 (MPa)		
a-a断面 (Uリブ支間部)	デッキPL	左 ①	20	-164	184	0.7	16	-144	156	1.1	F
		右 ⑧	24	-180	200	0.8	16	-120	136	1.6	F
	Uリブ上端	左 ②	76	-108	184	1.1	48	-112	156	2.0	F
		右 ⑦	76	-128	200	0.8	64	-92	152	2.2	F
c-c断面 (横リブ交差部)	デッキPL	左 ①	12	-92	100	1.6	8	-36	40	21.0	H
		右 ⑧	亀裂発生部位								
	Uリブ上端	左 ②	8	-60	64	3.2	20	-32	48	69.0	H
		右 ⑦	8	-20	24	187.0	8	-16	16	3875.0	H
	横リブ下端	左 ④	28	-16	44	670.0	28	-20	40	1611.0	F
		右 ⑤	16	-56	68	216.0	16	-40	48	203.0	F

おわりに

阪神高速湾岸線で発生した鋼床版デッキプレート貫通亀裂に対して、当社では、亀裂先端のストップホール施工およびデッキプレート上下面からのあて板補修を実施した。また、先のストップホールを兼ねたサンプリングコアを用い

た溶接部の調査より、すみ肉溶接部の溶け込み量はUリブ板厚 6 mm に対して 2 mm 程度であり、溶け込み量の不足が考えられた。さらに、あて板補強前の FEM 解析より、輪荷重載荷状態下におけるデッキプレートと U リブ溶接部周辺の

応力発生状況は、Uリブ支間部の発生応力よりも横リブ交差部のそれが橋軸・橋軸直角方向2軸の板曲げの影響を受け、疲労に対して厳しくなることが推定された。そして、あて板補修前後の現地応力測定より、あて板効果によって亀裂部周辺の発生応力は低減出来たことが判明したが、依然高い応力レベルを呈しており、衝撃の影響が大きいと考えられた。

引き続き、輪荷重に起因する溶接部の応力を低減するための根本的な対策が必須であり、その手法について鋭意検討中である。

参考文献

- 1) 鋼床版の疲労：土木学会鋼構造シリーズ 2, 1990. 9
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2002. 3.
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針,

2002. 3.
- 4) 三木, 菅沼, 富澤, 町田：鋼床版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, 2005. 1
- 5) 村越, 有馬：鋼床版における最近の疲労損傷事例と対策に関する検討ーデッキプレート内進展き裂を対象としてー, 第5回道路橋床版シンポジウム講演論文集
- 6) 田畑, 木代, 西岡, 藤林：鋼床版Uリブ溶接部貫通き裂の損傷要因と対策, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2006. 9.
- 7) 藤林, 木代, 田畑：鋼床版デッキ貫通き裂損傷に関する報告, 阪神高速道路株式会社, 第38回技術研究発表会, 2005. 2.
- 8) 藤林, 田畑, 西岡, 木代：鋼床版デッキ貫通き裂損傷に関する報告, 土木学会第61回年次学術講演会講演概要集, 2006. 9.
- 9) 井口, 山田, 川畑：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, 2006. 6.
- 10) 川畑, 井口, 内田, 石川, 甲斐, 貝沼, 斎藤, 佐々木, 高田, 高中, 田谷, 中村, 村山：鋼床版の構造設計と研究動向, 第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集

REPORT OF RETROFIT AND INVESTIGATION ON FATIGUE CRACK PENETRATION IN AN ORTHOTROPIC STEEL DECK BEIDGE

Akiko TABATA, Minoru KISHIRO and Tsutomu NISHIOKA

Rapid increase in traffic volume has caused fatigue cracking in welded parts in orthotropic steel deck bridges. Among those found in an arch bridge with orthotropic steel decks, crack penetration through a deck plate was particularly serious because it could damage the performance of the deck and affect driving safety considerably. The emergency retrofit was carried out using splice plates and high strength bolted connection. The splice plates were applied to the top surfaces of the deck plate as well as to the side and inner surfaces of the trough ribs. Results of stress frequency measurements before and after the retrofit indicated reduced stress ranges and, thus, extended fatigue life of the deck.

田畑 晶子



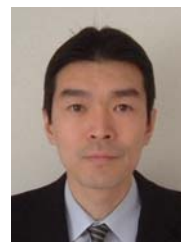
阪神高速道路株式会社
大阪管理部調査設計グループ
Akiko Tabata

木代 穰



阪神高速道路株式会社
神戸管理部調査設計グループ
Minoru Kishiro

西岡 勉



阪神高速道路株式会社
大阪管理部調査設計グループ
Tsutomu Nishioka