

3号神戸線鋼床版箱桁橋におけるバルブ型式縦リブと 横リブ交差部亀裂損傷の原因調査および補修

神戸管理部 調査設計課 川上 順子
神戸管理部 調査設計課 今田 勝昭

要 旨

阪神高速 3 号神戸線は、昭和 56 年に全線供用し平成 7 年の阪神大震災で一部分補修を行い現在に至っている。平成 14 年度の定期点検において、神戸線の鋼床版箱桁内の縦リブと横リブの交差部に疲労と思われる亀裂が発見された。その亀裂損傷の補修のために FEM 解析、実橋載荷試験及び応力頻度計測を実施し亀裂損傷メカニズム・対策構造の検討、対策構造の効果確認、疲労寿命予測等を行った。そこで、亀裂の原因を究明し、亀裂損傷の対策構造としてアングル付添接板が有効であると判断し、補修工事を実施した。

キーワード: 疲労亀裂, 鋼床版箱桁, アングル付添接板

はじめに

平成 14 年度の定期点検において、阪神高速 3 号神戸線の鋼床版箱桁内に疲労と思われる亀裂が発見された。亀裂は、写真-1 のようにバルブプレートと横リブスカーラップ交差部の廻し溶接部の溶接止端を起点としていた。また、平成 15 年度の詳細調査においても、さらに多数の新たな亀裂が発見された。平成 14 年度の前回の定期点検である平成 10 年度では、この亀裂は発見されていなかった。これにより、亀裂は大量かつ急激な発生であり、これは非常に重大な事象ととらえ、今回の原因究明、対策検討及び補修工事を実施することとした。

亀裂損傷原因調査及び補修のために FEM 解析、実橋載荷試験及び応力頻度計測を実施した。FEM 解析は、損傷原因把握、亀裂発生・進展の検討及び対策構造検討のために行った。実橋載荷試験は、



写真-1 亀裂損傷状況

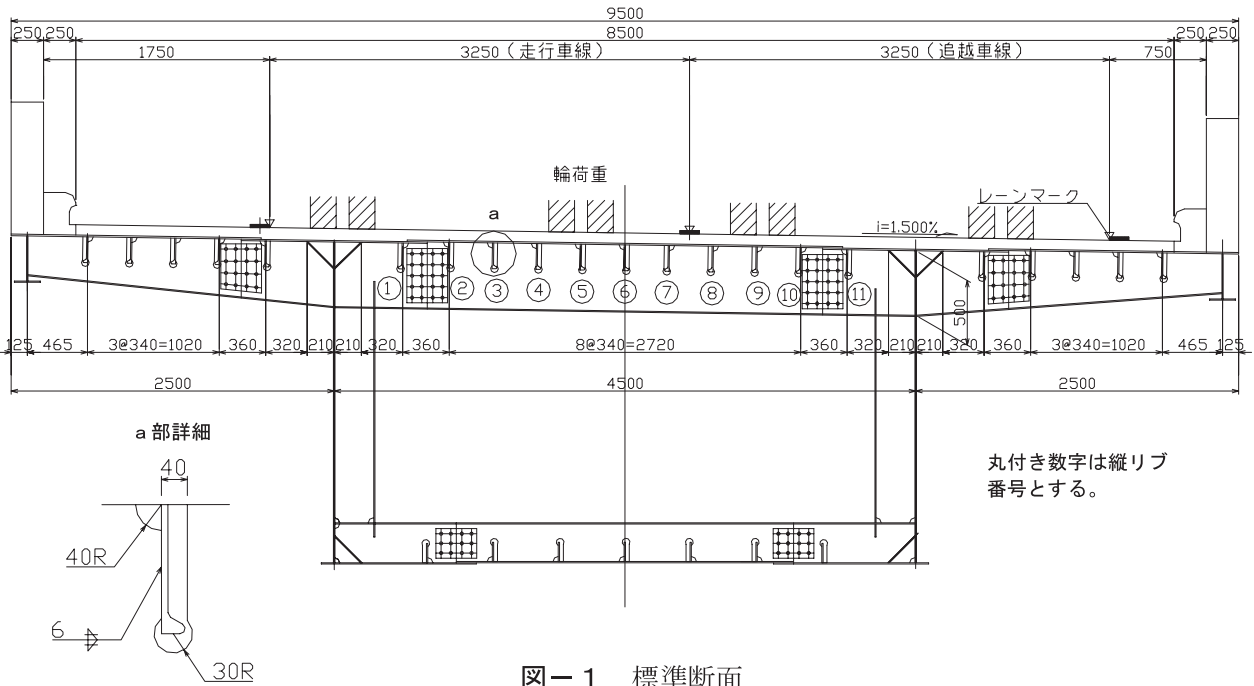


図-1 標準断面

亀裂発生原因として想定される力学的要因について検証するとともに、亀裂に対する補強構造の効果を確認することを目的とした。応力頻度測定は、亀裂箇所に対する補強前後の応力振幅頻度を把握することを目的に実施した。また、検討により効果的とされた対策構造により補強を実施した。

1. 亀裂発生状況

亀裂の発生した橋梁は、昭和43年に竣工された3径間連続鋼床版1箱桁2車線桁の4橋である。標準断面図を図-1に示す。亀裂は、鋼床版箱桁内の縦リブバルブプレートと横リブスカーラップ

交差部の廻し溶接部の溶接止端を起点に発生していた。平成15年度の詳細調査において磁粉探傷検査を実施し、合計348箇所の亀裂を確認した。表-1に代表的な1橋の亀裂発生箇所数を示すが、亀裂は箱桁内部のみに発生し、縦リブ③～⑥及び縦リブ⑧、⑨の車輪の通過が多いと考えられる位置に発生しており、特に大型車の走行が多い走行車線側の車輪直下にある縦リブ④、⑤に多くの損傷が発生している。

表-1 代表橋梁の損傷傾向

縦リブ番号	損傷箇所数
①	0
②	0
③	21
④	56
⑤	53
⑥	27
⑦	0
⑧	1
⑨	19
⑩	0
⑪	0

箱桁外面部は亀裂無し
縦リブ番号は図-1参照

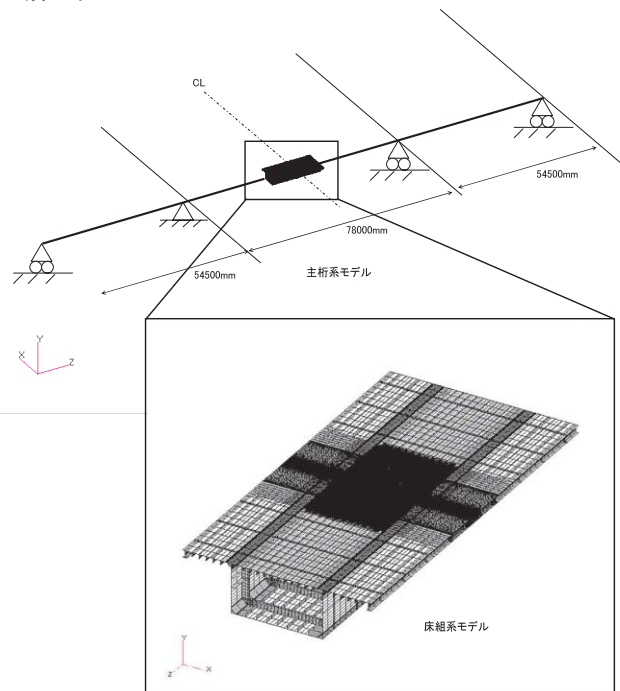


図-2 解析モデル

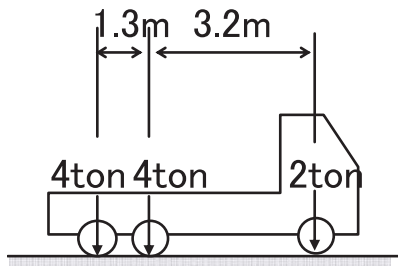


図-3 FEM解析で用いた
 荷重モデル

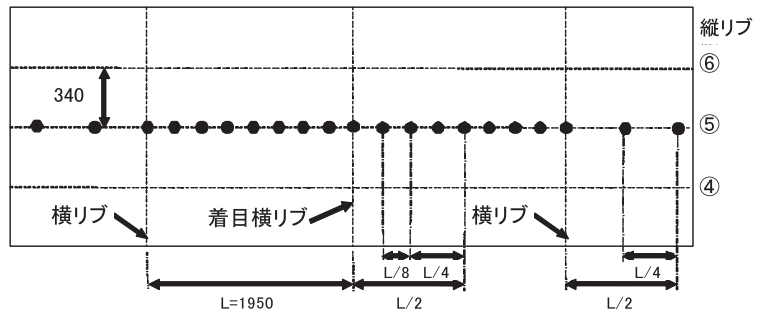


図-5 後輪前側の輪荷重載荷位置

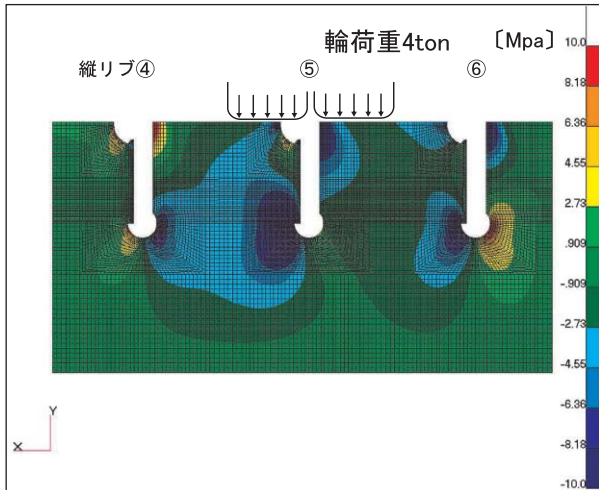


図-4 横リブ鉛直方向応力

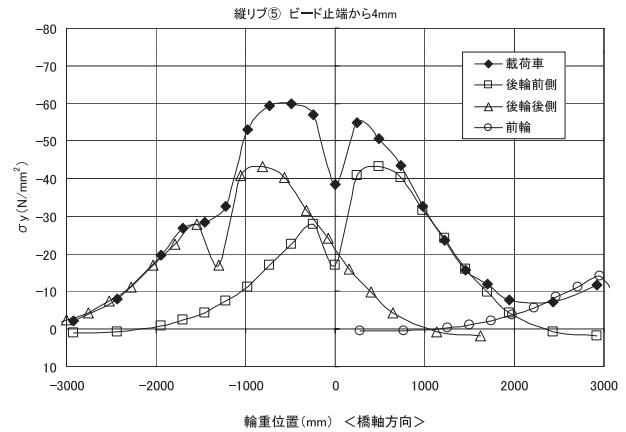


図-6 各輪荷重載荷時の鉛直方向応力

2. 亀裂発生原因及び対策構造の検討

亀裂損傷の発生した箱桁について、FEMによる応力解析を行った。図-2のように、中央径間スパン中央の床組をシェル要素でモデル化し、亀裂損傷の発生した局所の着目部については、溶接ビード止端等の形状を詳細にモデル化した。橋軸方向の箱桁については、ビーム要素でモデル化し、舗装についても同様にシェル要素でモデル化した(約30万節点)。解析結果より亀裂発生メカニズム及び効果的な対策構造について検討した。なお、輪荷重については、図-3に示す20ton 載荷車(後軸タンデム)を用いた。ただし、解析では、片側輪荷重のみの4ton, 4ton, 2tonを用いている。

2-1 亀裂発生時の検討

亀裂無しモデルで縦リブ⑤直上に輪重4tonを作用させたときの横リブ鉛直方向応力を図-4に示す。これによれば、縦リブ⑤の溶接ビード止端部には局部応力が作用している。後輪前側の輪荷

重を橋軸方向に移動させ図-5のようにそれぞれ載荷した。また、図-5のそれぞれの後輪前側の位置に、図-3のように前後にずらした輪荷重(前輪及び後輪後側)を載荷し、図-6のような着目リブの鉛直方向応力を算出した。図では、3つの輪荷重を重ね合わせ、載荷車としても算出している。縦リブ⑤のビード止端から4mmの位置の鉛直方向応力は、後輪前側の輪荷重載荷位置が着目横リブからL/4(L:横リブ間隔)のところまで最大となり、その最大応力範囲が60.8MPaとなった。

この載荷車の結果を用い、等価応力範囲を用いた疲労照査¹⁾を行った。その結果を表-2に示す。疲労強度等級は、縦方向溶接継手のスカラップを含む溶接継手としてG等級とした。その結果、縦リブ④、⑤ともに鉛直方向応力によって、溶接ビード止端に亀裂発生の可能性があると示された。なお、応力範囲が最大となる車輪直下の縦リブ⑤の方が、疲労損傷に与える影響が大きかった。ただし、局部応力は圧縮応力であるため残留応力によって降伏強度程度の引張が作用すると想定する。

表-2 亀裂発生時の疲労照査

		縦リブ⑤溶接ビード止端から		縦リブ④溶接ビード止端から	
		4mm	10mm	4mm	10mm
疲労強度等級		G	G	G	G
2×10^6 回基本許容応力範囲	$\Delta \sigma_f$ (MPa)	50	50	50	50
	$\Delta \tau_f$ (MPa)	80	80	80	80
設計繰返し数	nt	7.28E+07	7.28E+07	7.28E+07	7.28E+07
設計応力範囲	$\Delta \sigma_d$ (MPa)	60.8	36.0	18.2	13.9
	$\Delta \tau_d$ (MPa)	17.9	8.3	11.3	11.5
平均応力補正係数	C_R	1.3	1.3	1.0	1.0
板厚補正係数	C_t	1.0	1.0	1.0	1.0
許容応力範囲	$\Delta \sigma_R$ (MPa)	19.6	19.6	15.1	15.1
	$\Delta \tau_R$ (MPa)	39.0	39.0	39.0	39.0
安全係数	$\gamma = \gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i$	1.0	1.0	1.0	1.0
疲労照査	$\gamma \Delta \sigma_d \leq \Delta \sigma_R$	N.G.	N.G.	N.G.	O.K.
	$\gamma \Delta \tau_d \leq \Delta \tau_R$	O.K.	O.K.	O.K.	O.K.

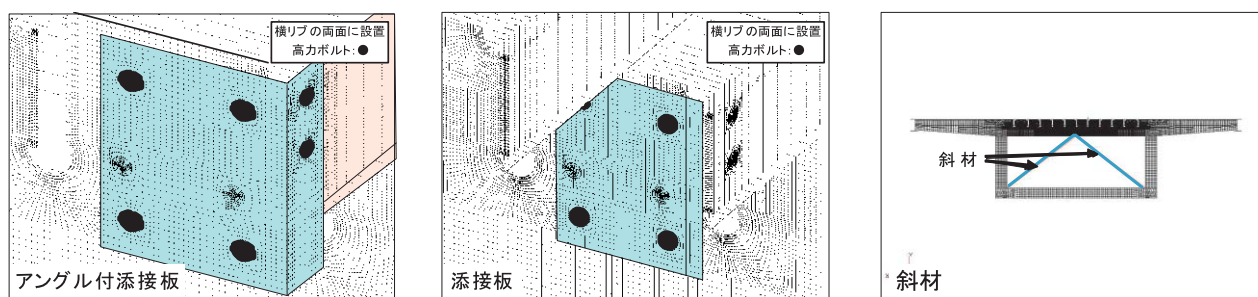


図-7 対策構造案

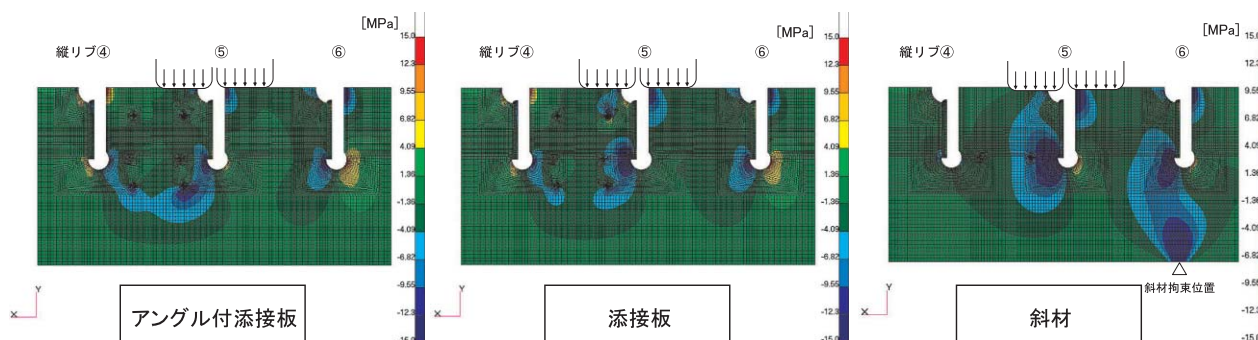


図-8 亀裂無しモデルにおける各対策構造案の鉛直方向応力

2-2 対策構造の検討

対策構造として、図-7のようなアングル付添接板、添接板及び斜材を検討した。この対策構造を用い亀裂無し部をモデル化し輪重 4ton を載荷した。図-8の鉛直方向応力によれば、アングル付添接板については縦リブからアングル部を通じて荷重が横リブに伝達されるバイパス効果によって、溶接止端部の局部応力が大幅に減少している。添接板については、局部応力があまり低減されず、また、斜材については縦リブ⑥に新たな局部応力が発生している。表-3に応力低減効果を示すが、

アングル付添接板は亀裂無しでは局部応力が 41% に低減しており、対策構造として効果的であることが分かる。

2-3 亀裂進展の検討

亀裂有りモデル(亀裂長さ 77mm, 222mm)の輪荷重 4ton による応力解析を行い、亀裂進展に寄与するモードを推定した。また、対策構造における亀裂の進展性についての検討も行った。なお、ここでは、亀裂の先端に 24.5mm のストップホールを併用したアングル付添接板による対策ケースを加え

表-3 応力低減効果(亀裂無し輪荷重4ton載荷)

対策ケース	鉛直方向応力 σ_y (Mpa)		
	縦リブ⑤ 溶接ビード止端から		溶接ビード 止端から 4mmにお ける効果
	4mm	10mm	
現状	-43.2	-27.0	1.00
アングル付添接板	-17.5	-10.9	0.41
添接板	-39.7	-24.5	0.92
斜材	-52.0	-33.6	1.20

表-4 亀裂進展検討(輪荷重4ton)

対策ケース	亀裂 長さ	$\Delta K I$	$\Delta K II$
		($MPa\sqrt{m}$)	($MPa\sqrt{m}$)
現状	77mm	2.6	2.7
	222mm	1.9	5.0
アングル付添接板	77mm	1.4	1.7
添接板	77mm	1.7	2.1
斜材	77mm	0.8	1.0
アングル付添接板 (ストップホール併用)	77mm	1.2	1.2
	222mm	0.2	1.0

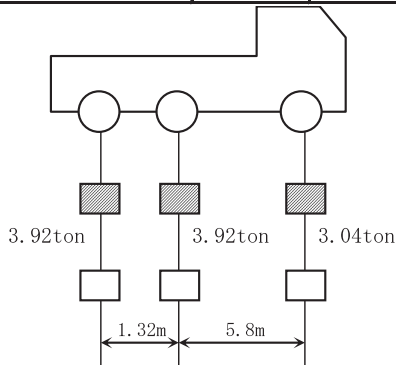


図-9 載荷試験車

ている。表-4のように、亀裂先端からの面内開口変位、面内せん断変位からそれぞれ応力拡大係数 $\Delta K I$ 、 $\Delta K II$ を算定した¹⁾。対策を実施しない現状を見ると、亀裂の進展に伴い面内開口変形から面内せん断変形へモードが移行している特徴がある。また、亀裂進展に対してもアングル付添接板は、ストップホール併用により亀裂進展抑制効果があることが分かる。また、斜材は、亀裂進展について、効果があることが分かる。

3. 対策効果の確認

図-9のような試験車を用い実橋載荷試験を行った。

3-1 FEM 解析結果の妥当性の検討

代表的な計測位置について、試験車による載荷試験結果とFEM解析結果を対比した。なお、載荷試験結果と対比できるようにFEM解析の輪荷重を試験車に一致させている。図-10の双方の結果の対比では、応力波形及び応力値がほぼ一致している。これにより、解析結果に対する妥当性を確認できた。

3-2 対策構造の効果確認

対策構造の効果確認を行うために、対策の前後において実橋載荷試験を実施した。対策構造としてアングル付添接板及び斜材を選定した。効果確認は、亀裂有り及び亀裂無しについて行った。ま

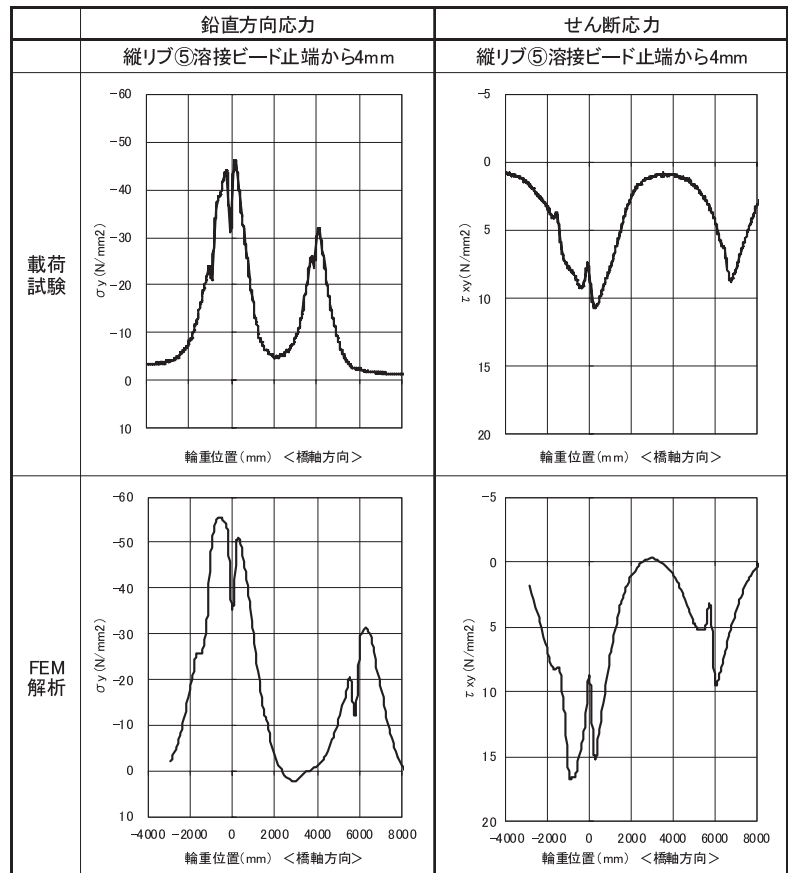


図-10 載荷試験結果と解析結果の対比

	亀裂有り	亀裂無し
	鉛直方向応力	鉛直方向応力
	縦リブ⑤ストップホール端部から4mm	縦リブ⑥溶接ビード止端から4mm
	荷重位置:縦リブ⑤	荷重位置:縦リブ⑥
荷重試験		
	効果	対策後応力/対策前応力=2.9/25.7=0.11

亀裂無しは 64%に応力が低減した。さらに、表-5に荷重試験結果とFEM解析結果の対策効果の対比を示す。アングル付添接板の対策効果は、荷重試験とFEM解析でほぼ同等の結果が得られた。

また、斜材について表-6に荷重試験結果とFEM解析結果の対策効果の対比を示す。斜材は荷重試験においてFEM解析と同様に応力を増大させることがわかる。

4. 応力頻度測定

た、亀裂が有る箇所については、先端にストップホールを施工している。図-11にアングル付添接板の結果を示す。対策の前後で亀裂有りは11%、

実橋により亀裂無し部の応力頻度計測を3日間実施し、その計測結果からJSSC疲労設計指針¹⁾に基づく疲労照査を行った。表-7にその疲労照

表-5 荷重試験結果とFEM解析結果の対策効果の対比(アングル付添接板)

単位: Mpa

アングル付添接板	鉛直応力	荷重位置:縦リブ⑤						荷重位置:縦リブ⑥					
		荷重試験			FEM解析			荷重試験			FEM解析		
評価位置:縦リブ⑤		前	後	効果	前	後	効果	前	後	効果	前	後	効果
ストップホール端部から	コバ面	-44.6	-4.4	0.10	-83.1	-12.9	0.16	16.7	2.7	0.16	24.6	9.9	0.40
	4mm	-25.7	-2.9	0.11	-55.8	-8.9	0.16	10.5	1.5	0.14	15.6	6.6	0.42
	10mm	-15.3	-2.1	0.14	-33.2	-5.2	0.16	5.8	0.8	0.14	9.4	4.2	0.45
アングル付添接板	鉛直応力	荷重位置:縦リブ⑤						荷重位置:縦リブ⑥					
		荷重試験			FEM解析			荷重試験			FEM解析		
評価位置:縦リブ⑥		前	後	効果	前	後	効果	前	後	効果	前	後	効果
溶接ビード止端から	4mm	-16.2	-12.6	0.78	-30.4	-27.2	0.89	-24.2	-15.6	0.64	-55.5	-33.4	0.60
	10mm	-11.5	-8.7	0.76	-20.5	-17.6	0.86	-15.7	-9.2	0.59	-33.1	-20.2	0.61

※効果=対策後応力/対策前応力

表-6 荷重試験結果とFEM解析結果の対策効果の対比(斜材)

単位: Mpa

斜材	鉛直応力	荷重位置:縦リブ⑤						荷重位置:縦リブ⑥					
		荷重試験			FEM解析			荷重試験			FEM解析		
評価位置:縦リブ⑤		前	後	比	前	後	比	前	後	比	前	後	比
ストップホール端部から	コバ面	-39.6	-57.4	1.45	-53.1	-69.4	1.31	15.8	27.4	1.73	8.9	27.1	3.04
	4mm	-21.1	-27.4	1.30	-32.0	-41.1	1.28	9.0	13.5	1.50	4.6	15.1	3.28
	10mm	-13.0	-15.2	1.17	-23.2	-29.1	1.25	5.4	8.1	1.50	3.0	9.8	3.27

※効果=対策後応力/対策前応力

表-7 溶接ビード止端から4mmにおける応力頻度計測結果と疲労照査

対策ケース	計測縦リブ	継手等級	2×10 ⁶ 回基本許容応力範囲 Δσ _f	計測位置 (溶接ビード止端から4mm)			疲労損傷度		判定
				Δσ _{max}	Δσ _e	N(回)	計測期間 (3日)	30年間	
現状	⑥	G	50	103.5	25.9	26,304	1.83E-03	6.66	N.G.
アングル付添接板	⑥	G	50	55.5	20.2	6,401	2.10E-04	0.77	O.K.
斜材	⑥	G	50	100.5	26.7	36,476	2.79E-03	10.17	N.G.

査結果を示す。これより、ビード止端から4mmの局部応力による疲労損傷度は供用期間を30年とした場合1.0以上で、亀裂発生の可能性が示された。また、アングル付添接板については、疲労損傷度が1.0以下となり、亀裂発生を抑制することがFEM解析及び载荷試験と同様に判明した。

5. 補修工事

前章までの検討により対策構造としてアングル付添接板が有効であると判断し、それによる損傷部の補修工事を行った。アングル付添接板の補修概要は次の通りである。

- 1) 横リブと縦リブの応力を伝達させるため、あて板はL型形鋼を使用し、横リブと縦リブに高力ボルトで取付ける構造とする。
- 2) 亀裂箇所には基本的に24.5mmのストップホールを削孔する。
- 3) ストップホールには亀裂の先端の表か裏かの

いずれかを到達させる。

- 4) 亀裂が短くて施工上の制約でストップホールに到達しない場合には、カッター等で亀裂をストップホールまで導く。
- 5) ストップホール近傍には亀裂進展を監視可能なように、あて板に観察孔30.0mmを設ける。
- 6) ストップホール上の観察孔で、ボルトの締め付け可能な箇所は高力ボルトで締め付ける。
- 7) ストップホールの近傍に亀裂進展防止用追加ボルトを配置し、その締め付け効果及び万一の亀裂進展に対する誘導効果を期待する。

図-12にアングル付添接板の詳細図を示す。この図のように亀裂の長さ及び方向等を考慮し、亀裂のタイプ毎にボルト配置を変える工夫を行った。高力ボルト配置タイプ1-1~1-3は、亀裂進展防止用追加ボルトを添接板中央に設け、縦リブが高力ボルトの締め付けに干渉しないタイプ1-2, 1-3については、亀裂先端にストップホール及び高力ボルトを設けている。高力ボルト配置タイプ2及

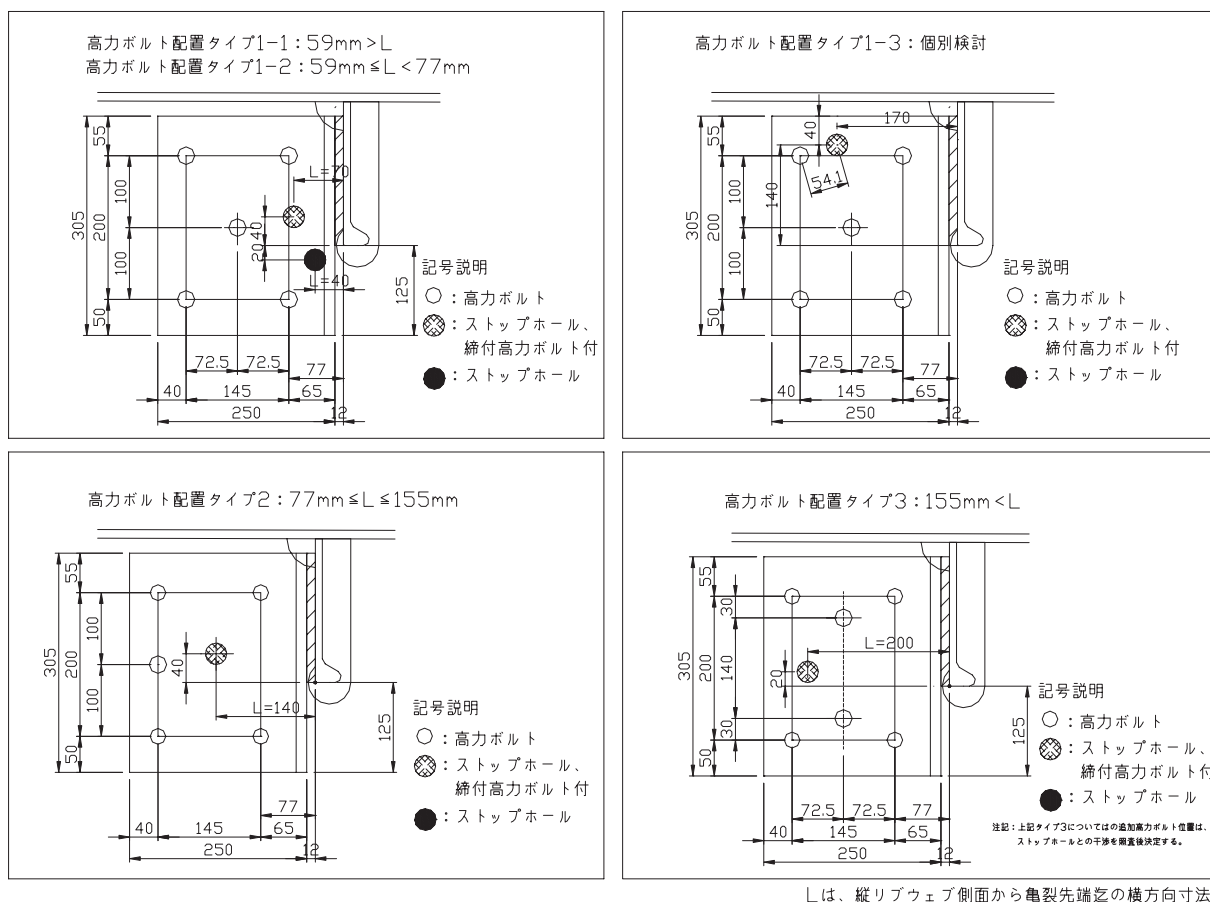


図-12 アングル付添接板詳細図

び3は、亀裂先端が添接板中央付近にあるためストップホール及び高力ボルトを設け、さらに、添接板中央からずらした位置に亀裂進展防止用追加ボルトを設けている。補修後の状況を写真-2に示す。

6. 今後の課題

今回の補修工事では、亀裂損傷のある部分のみにアングル付添接板による補修を行った。しかし、今回のFEM解析(表-2)及び応力頻度計測(表-7)により、本橋のバルブプレートと横リブスカーラップ交差部の未損傷部は、将来損傷が発生する可能性があることが分かった。今後は、頻繁に新たな亀裂発生の有無を確認する必要がある。また、今回のアングル付添接板による補修効果を確認するために、補修部及びその周辺の新たな異常の有無を確認する必要がある。

7. まとめ

本検討により、当該箇所の横リブは30年程度で

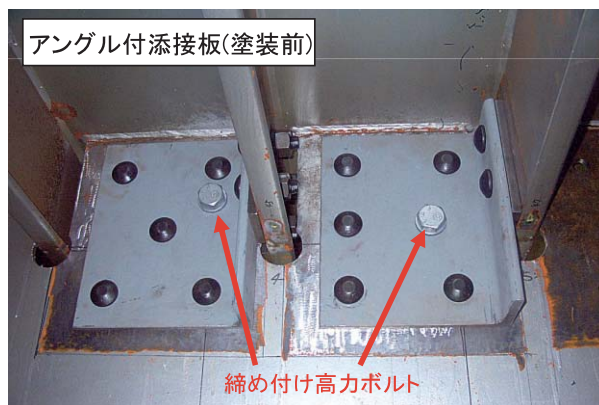


写真-2 補修状況

亀裂損傷が発生する可能性があることがわかった。また、亀裂進展は変形モードの移行を伴うことが分かった。今回の損傷の最も効果的な対策構造は、応力のバイパス効果があるアングル付添接板であり、それはFEM解析、実橋載荷試験及び応力頻度測定により確認できた。また、アングル付添接板による補修方法を用い補修工事を行った。今後、補修効果及び新たな亀裂の確認のため、追跡点検を行う必要がある。

参考文献

- 1) (社)日本鋼構造協会:鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 技報堂出版, 1999. 3.

FATIGUE EVALUATION AND REINFORCEMENT OF STEEL DECK BOX GIRDER BRIDGES IN HANSHIN EXPRESSWAY KOBE ROUTE

Yoriko Kawakami and Katsuaki Imada

The severe cracks on the transverse beams of three continuous steel deck box girder bridge were found in Hanshin Expressway Kobe route. Some inspection and analysis were carried out, that is, the vehicle load test, the FEM analysis, and stress frequency measurement. According to these results, the cracks were estimated as a fatigue due to the frequent vertical stress on the transverse beam. Finally, adding the L-type angle splice to the cracked transverse beam with bolts and connecting it to the longitudinal rib is found out to be the most effective repairing and reinforcing method.