

開断面リブを有する鋼床版の疲労損傷対策に関する実験的検討

Experimental Study on Measures for Fatigue Crack of Orthotropic Steel Deck with Bulb Plate Longitudinal Stiffener

兒玉崇*¹, 山村清*¹, 田畑晶子*²
Takashi Kodama, Kiyoshi Yamamura, Akiko Tabata

*¹ 阪神高速道路株式会社 大阪管理部 調査設計グループ (〒552-0006, 大阪市港区石田 3-1-25)
*² 阪神高速道路株式会社 技術部 技術開発グループ (〒541-0056, 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

In Hanshin Expressway, a lot of fatigue cracks are found at fillet weld between transverse and longitudinal stiffeners of orthotropic steel deck. Besides, those cracks are supposed to be caused by repeated alternating stress due to heavy vehicles. Therefore, in this study, experiments to confirm effects of reinforcement to reduce the stress, that is using angle steels and high-strength bolts, are conducted with static loads. As a result, the stress is reduced to less than half and it leads to extend fatigue life nearly ten times.

Key words: Fatigue crack, Bulb plate longitudinal stiffeners, Orthotropic steel deck

1. はじめに

阪神高速道路では開断面リブ（以降バルブリブ）を有する鋼床版の横リブとバルブリブとの交差部に、大型車輪重が原因と思われる疲労損傷が数多く発生しており、その対策が課題となっている。

今回その応力低減対策としてアングルによる当て板補強を提案し、その効果を静的載荷実験により確認を行った。なお、本実験は、アングルを片側に添える方法と、両側から添える方法との2案について実施した。

2. 疲労損傷の概要

まずはじめに、阪神高速道路（大阪・兵庫地区）で概ね5年おきに実施されている定期点検の中で平成20年2月現在までに発見されているバルブリブを有する鋼床版の疲労損傷状況について以下に簡単に整理する。

- ① 亀裂の存在する径間数：34 径間
- ② 亀裂数：1,200 箇所

なお、今後、点検を継続していく中でこれらは増大するものと予想される。

また、竣工してから亀裂が発見されるまでの経過年数と亀裂数との関係をプロットしたものを図-1に示す。亀裂発生時期と発見年度には若干のずれがあると思われるが、これらの亀裂はおおむね竣工後20年以降に発生したものと考えられる。

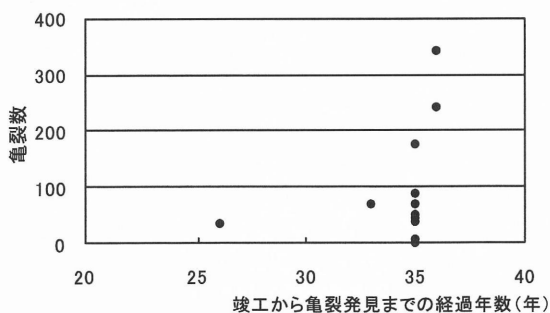


図-1 亀裂発見時の経過年数

続いて、亀裂発生部位の違いによる発生割合について整理した結果を図-2に示す。

これによると、阪神高速道路ではバルブリブを有する鋼床版の疲労損傷は、すべてバルブリブと横リブとの交差部に発生しており、その89%は下側スカラップ付近の隅肉溶接止端部から横リブに延びる亀裂パターン(f)であり、11%がデッキプレートと横リブとの隅肉溶接止端部から隅肉溶接線に沿う亀裂パターン(a)となっており、これら以外の部位での亀裂発生は非常に稀である。参考として代表的な亀裂写真を図-3に示す。

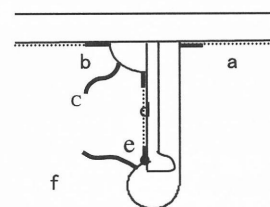
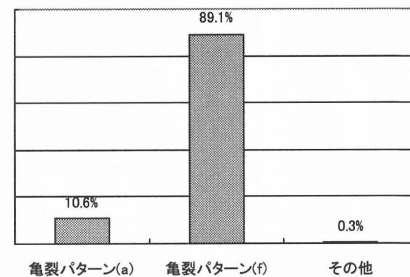
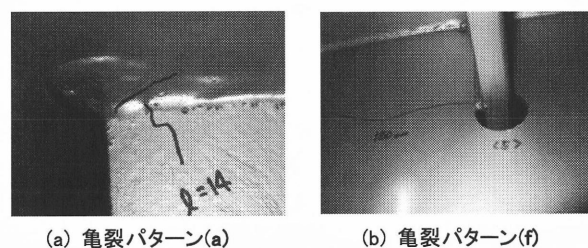


図-2 亀裂発生位置とその割合



(a) 亀裂パターン(a) (b) 亀裂パターン(f)

図-3 代表的な亀裂

また、亀裂は1960年～1970年代に建設された古い橋梁に多く、その特徴は下側スカラップ半径が25mmと極端に小さいという点にある。参考として大阪地区内のバルブリップを有する鋼床版の設備数量および損傷数量と、バルブリップのスカラップ半径との関係を整理したものを表-1に示す。

スカラップ半径が25mm以下の設備数量は全610径間に対して94径間(15%)であるが、損傷径間は損傷全18径間に対して14径間(78%)と圧倒的に多くなっている。

ただし、以上の比率は平成20年2月現在までに発見された亀裂に対する比率であるため、今後新しく亀裂が発見されれば比率が変わる可能性もある。

表-1 スカラップ半径と損傷径間数(大阪地区)

半径(mm)	25以下	30	35	40以上	不明	合計
設備数量(径間)	94	102	42	336	36	610
損傷径間	14	0	4	0	0	18

つぎに、バルブリップの横断方向位置と亀裂数との関係を整理したものを図-4に示す。

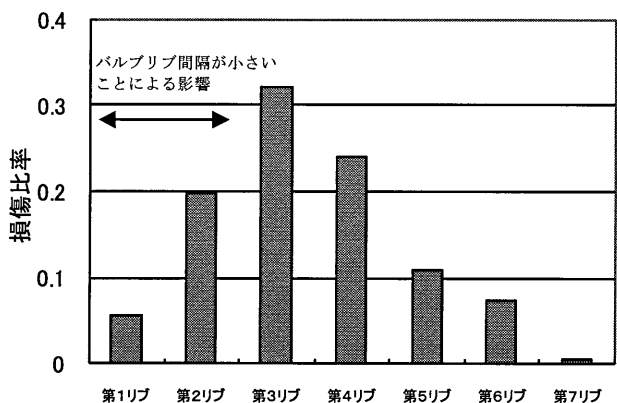


図-4 亀裂発生リブごとの亀裂発生数

各リブ番号は、横リブの支点(主桁ウェブ位置)から何番目のバルブリップかを意味しており、各リブ付近の亀裂発生比率を縦軸に整理したものが上図である。

上図の分布と車輪位置の分布とは必ずしも関連しておらず、これより、亀裂の発生しているリブは車輪直下位置に限定されず広範囲に渡っており、後述するが各リブに発生する応力は車輪直下以外でも高い応力を示すことなどからも、この種の亀裂が主に横リブのせん断力・変形によって生じるということを示唆する結果となっている。なお、横リブ支点に近い第1リブおよび第2リブで亀裂数が少ないのは、主桁箱内部の場合は垂直補剛材等が存在し、バルブリップ間隔を100mm程度小さく製作しているため、せん断変形が生じにくいことなどが原因と考えられる。

3. 補強実験

前章よりバルブリップを有する鋼床版の疲労損傷は、横リブのせん断変形によるスカラップ周辺溶接止端部の応力集中が原因と推定されることから、当て板等によって横リブのせん断剛性の改善を図ることが有効であると考え、バルブリップと横リブとの交差部にアングル(L型鋼)を用いた当て板補強構造を提案することにした。

アングル補強は、片側からアングルを添える方法と、両側からアングルを添える方法の2通り実施し、静的載荷実験によりそれぞれの応力低減効果の確認を行うこととした。

以下にその結果を示す。

3.1 実験供試体および実験方法

試験体は、幅2,000mm、長さ3,200mmの実物大モデルで、バルブリップ5本、横リブ3本を有する試験体である(図-5参照)。補強構造は、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、開口部と隅肉溶接側の両側からアングルで補強したもの(以下、両側補強)との2通り(図-6、図-7参照)とし、実験については、比較のための無補強のケース(以下、無補強)を加えた3体について実施した。なお、片側・両側補強ともアングルは横リブの腹板面を挟んで両側に配置している。

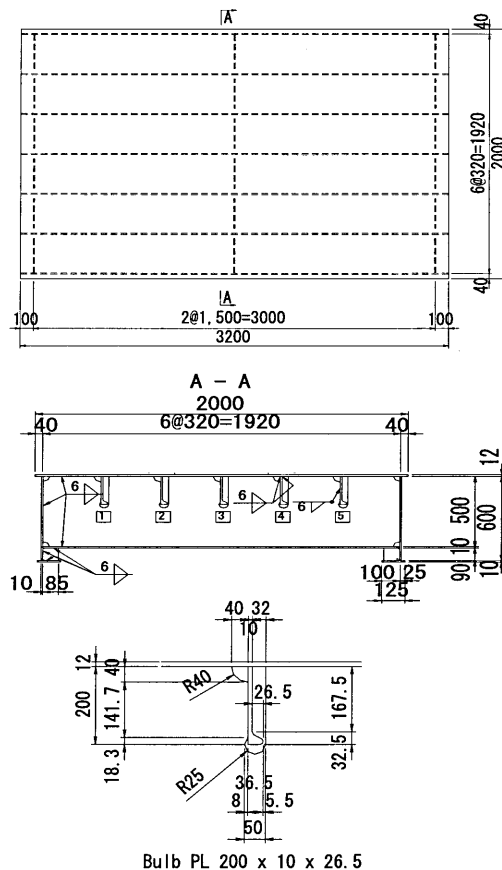


図-5 供試体概要(単位:mm)

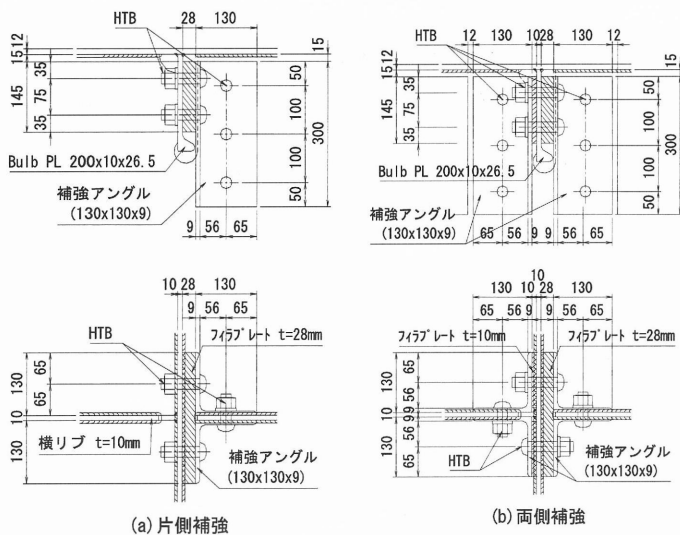
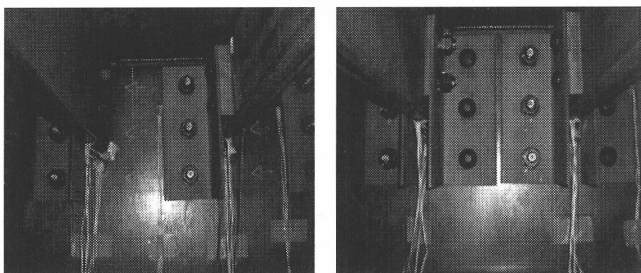


図-6 補強方法 (単位: mm)



(a) 片側補強 (b) 両側補強

図-7 片側および両側アングル補強状況

本実験で用いた荷重はシングルタイヤを想定したもの(幅 200mm, 長さ 200mm)およびダブルタイヤを想定したもの(幅 2×200mm, 長さ 200mm)の 2 通りとし(図-8 参照), 各々横リブ上, および横リブから橋軸方向に約 250mm 離れた位置を横断方向に, 荷重中心がリブ位置に一致する場合, リブ間中心位置に一致する場合, 荷重板端部がリブ位置の左右に一致する場合など種々の荷重パターンを考えながら横断方向に移動させた(図-9, 図-10 参照).

なお, 荷重強度は, シングルタイヤ, ダブルタイヤとも 100kN とし, 載荷荷重が載荷面に均一となるよう厚さ 40mm のゴム板を介して載荷を行い, 図-11 に示す部位での応力計測を行った.

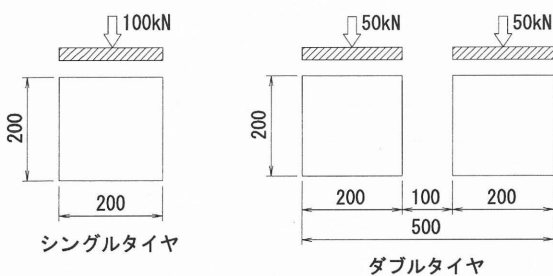


図-8 載荷荷重と載荷面形状 (単位: mm)

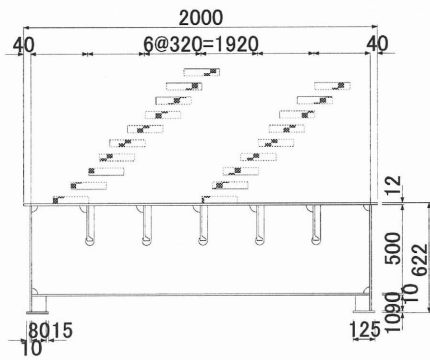


図-9 載荷位置 (シングルタイヤ)

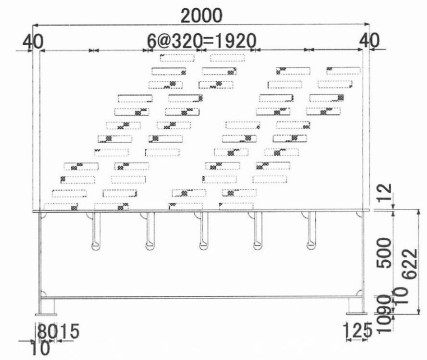


図-10 載荷位置 (ダブルタイヤ)

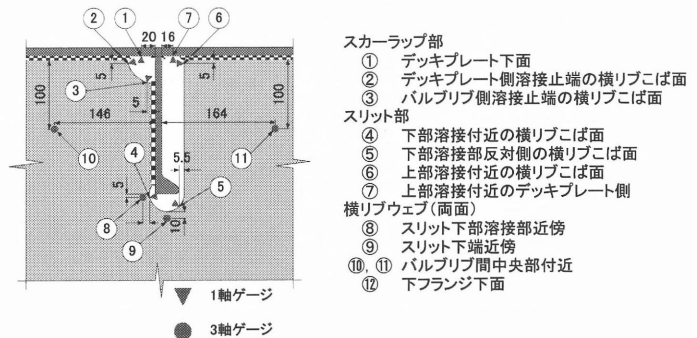


図-11 ゲージ貼付位置 (単位: mm)

3. 2 実験結果

実験では, まず実橋梁において多くの亀裂が発見された部位 2 箇所に着目し, 現況(無補強時)の応力発生傾向を把握することとした. ここで言う 2 箇所とは, 第 1 章に示すバルブリブと横リブの交差部のスリット下側の溶接付近(亀裂パターン(f))と, スリット上側の溶接付近(亀裂パターン(a))を指す.

はじめに, 無補強試験体において, 亀裂パターン(f)と亀裂パターン(a)に対応するゲージ④(下側スカラップのこぼ面応力)およびゲージ⑥(上側開口部の横リブこぼ面応力)に着目した応力測定結果を図-12 および図-13 に示す. 図中の横軸はシングルタイヤおよびダブルタイヤの場合とも, 荷重の中心位置を示しており, 主桁から第 1 リブ~第 5 リブの各リブ間の距離はそれぞれ 320, 640, 960, 1280, 1600mm である.

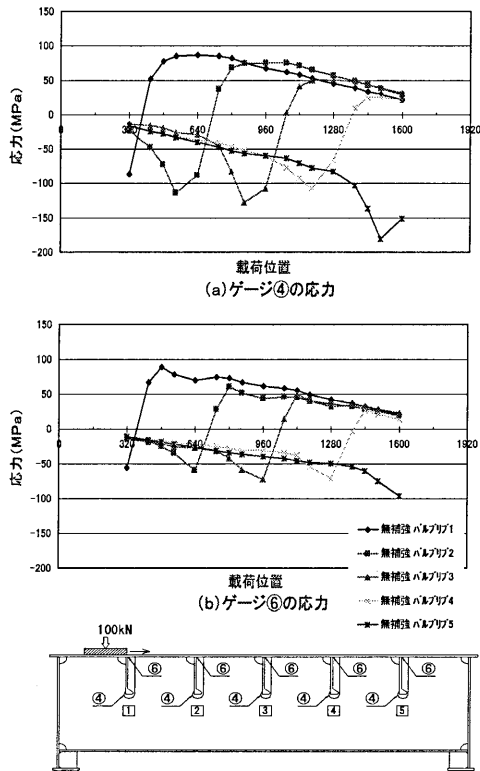


図-12 無補強時のひずみゲージ④⑥の応力分布 (シングルタイヤの場合)

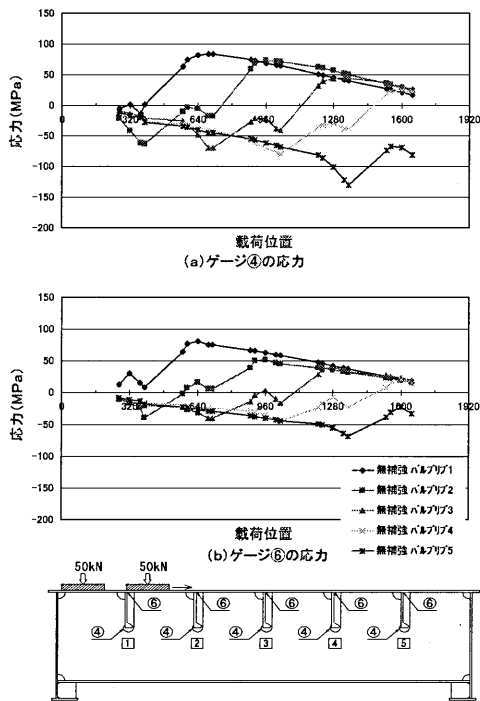


図-13 無補強時のひずみゲージ④⑥の応力分布 (ダブルタイヤの場合)

これより、特に下側スカラップ④のシングルタイヤの応力について着目した場合、荷重が当該バルブのすぐ左側（隅肉溶接側）にある時は圧縮応力が局所的に大きくなっているが、右側（スリット開口部側）にあ

る時の引張側の応力は、せん断力に比例的な応力影響線となっていることがわかる。

これらの結果は、ゲージ④⑥の応力は直接輪重が載荷する影響と横リブのせん断力に因る影響との両方の影響によって生じていることを示唆しており、この傾向はシングルタイヤの場合に強く現れ、ダブルタイヤの場合は前者の影響は薄れ、主にせん断力に比例的な応力分布となっている。

つぎに、主桁に最も近い第1リブについて、ゲージ④および⑥の応力値を、無補強、片側補強、および両側補強とで比較したものを図-14および図-15に示す。

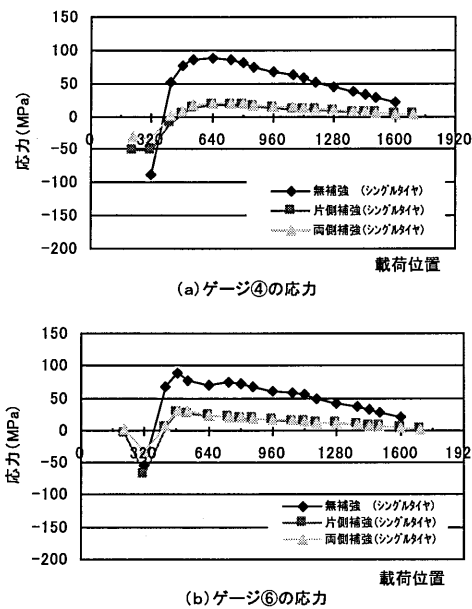


図-14 各補強時（第1リブ）のひずみゲージ④⑥の応力（シングルタイヤの場合）

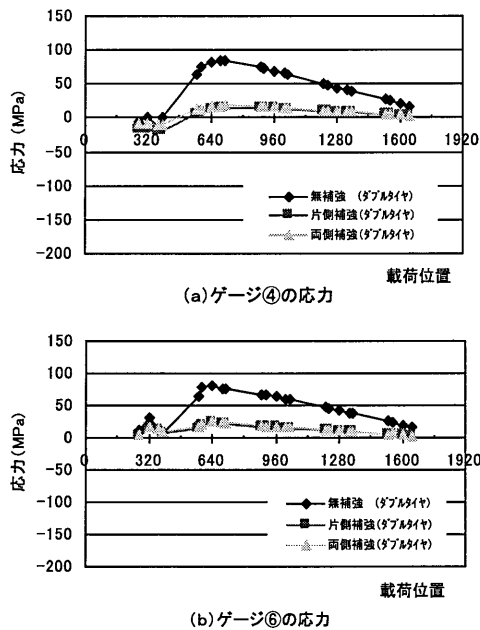


図-15 各補強時（第1リブ）のひずみゲージ④⑥の応力（ダブルタイヤの場合）

これらの結果から、片側補強と両側補強とでは補強効果に大差はなく、応力はいずれも無補強時の半分以下となっていることがわかる。なお、この補強による応力低減効果はどのバルブリップに着目しても同様の傾向であった。

続いて、過去の点検結果から最も疲労損傷発生数の多い第3リップ付近の応力に着目して、シングルタイヤ載荷、ダブルタイヤ載荷ごとに、補強前後での各測定位置における最も絶対値の大きい最大または最小応力を比較したものを表-2 および表-3 に示す。

表-2 最大または最小発生応力度の比較
(シングルタイヤ, 横リブ直上載荷)

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

※ σ_1 , σ_2 はゲージ⑧, ⑨位置での最大 or 最小主応力

表-3 最大または最小発生応力度の比較
(ダブルタイヤ, 横リブ直上載荷)

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	-22	-8	-9	0.36	0.41
②	-52	-39	-37	0.75	0.71
③	14	-9	-5	0.64	0.36
④	-80	-32	-27	0.40	0.34
⑤	-79	-36	-29	0.46	0.37
⑥	52	未測定	未測定		
⑦	-37	-24	-22	0.65	0.59
⑧ σ_1	1	5	4	—	—
⑧ σ_2	-52	-23	-18	0.44	0.35
⑨ σ_1	28	13	12	0.46	0.43
⑨ σ_2	-28	-14	-10	0.50	0.36

※ σ_1 , σ_2 はゲージ⑧, ⑨位置での最大 or 最小主応力

これらの結果から、シングルタイヤのゲージ②を除いて補強により全体的に応力が低減しており、特にゲージ③④⑤⑥での応力低減率が大きくなっていることがわかった。一方、上側スカラップ廻りのゲージ①②の応力については輪重の影響が大きいいため、アングル補強による応力低減効果は若干少ない。ただし、同部位付近には、実橋梁で亀裂がほとんど発生していない

ことから、現実的な問題は少ないと考えられた。

なお、本実験では、100kNを載荷荷重としているが、実際の車両の法定輪重はこの半分程度であり、応力は表-2, 表-3の半分程度と考えられる。

また、現況(無補強時)では横リブの面外変形がほとんど生じないことが表-2, 表-3のゲージ⑨(下側スカラップ下端の横リブ腹板面に貼付した3軸ゲージ)の応力値からも確認できるが、今回の補強によって面外変形が増大することも憂慮されるため、補強後に横リブ直上、および橋軸方向に25cm偏心した位置で載荷した結果、ゲージ⑨から得られた応力値(主応力)を比較整理したものを図-16 および図-17 に示す。

なお、既往の研究¹⁾によると、この部位での応力は、荷重が横リブ直上にあるときよりも横リブから橋軸方向に少し離れた位置に載荷した方が大きくなることが報告されており、今回の実験でも横リブ直上と横リブ位置から25cm偏心した位置で比較を行い、同様に同位置の方が横リブ直上より応力が大きくなる傾向が確認できた。

下図より、この部位の応力は、補強によってむしろ応力値が低減されており、今回の補強により横リブの面外変形を抑制する効果があることが認められた。

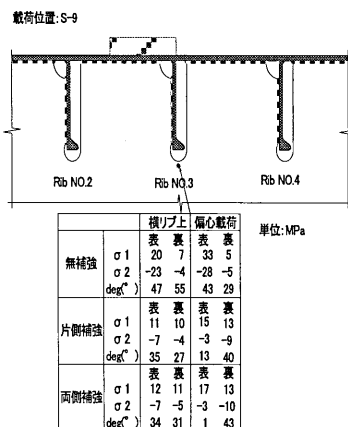


図-16 各補強時のひずみゲージ⑨の主応力
(シングルタイヤの場合)

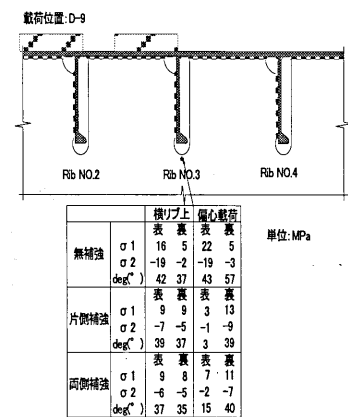
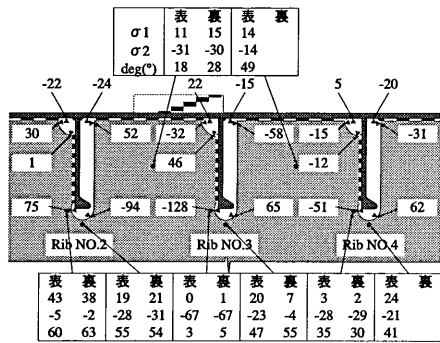
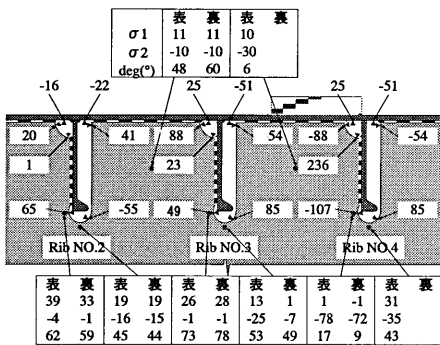


図-17 各補強時のひずみゲージ⑨の主応力
(ダブルタイヤの場合)

さらに、同じく第3リブに着目して、着目リブに対する荷重位置の違いによる補強前後の応力分布性状を比較したものを図-18および図-19に示す。

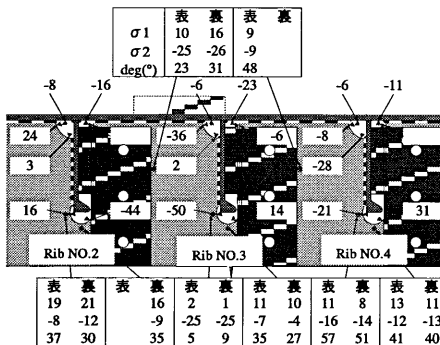


(a) リブの左側（隅肉溶接側）に荷重した場合

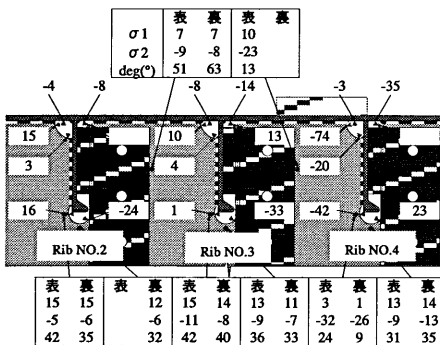


(b) リブの右側（スリット開口部側）に荷重した場合

図-18 無補強時の応力分布



(a) リブの左側（隅肉溶接側）に荷重した場合



(b) リブの右側（スリット開口部側）に荷重した場合

図-19 片側補強時の応力分布

これらは着目リブの左側（隅肉溶接側）と右側（スリット開口部側）とにシングルタイヤが載った場合の結果を示しており、補強は片側補強の場合を示している。特に、ゲージ⑥位置に着目すると、無補強の場合は荷重位置がリブの左側（隅肉溶接側）から右側（スリット開口部側）に移動すると、応力は圧縮（-58MPa）から引張（54MPa）に大きく推移しているが、片側補強を施すと（-6MPa）から（13MPa）と変動幅が大幅に減少している。すなわち開口部での局部せん断変形が補強により抑制される傾向を認めることができ、このことは、アングル補強が横リブのせん断変形に起因する懸案部位の応力低減に寄与することを示すものである。

一方、アングル補強を施した場合、バルブリブ（縦リブ）の剛性がアングル補強部と一般部とで急変することになる。その影響を把握するために、バルブリブ腹板上端の剛性が急変する補強部側の応力についても計測を実施しており、アングル補強を施すことでバルブリブ応力が局所的に増大するというのではなく、懸念していた今回の補強により他の部位での応力が増大するといった応力の転移も確認されなかった。

また、横リブの下フランジ応力についても同様に測定したが、補強前後で大差はなく、今回の補強がバルブリブや横リブ自体に与える影響もないことが確認された。

なお、今回の補強によって、亀裂発生が多く確認されていた懸案部位の応力が半分以下となり、疲労曲線の傾きを3と仮定すると、疲労損傷度は約1/8以下、疲労寿命は約8倍以上となり、疲労余寿命は大きく改善される結果となった。

4. まとめ

以上、今回の静的荷重実験結果を総括すると、以下のとおりである。

- 1) 現在、数多く発生している交差部での亀裂は主に横リブのせん断力・変形に起因している。
- 2) アングル補強は阪神高速道路で多発している亀裂部の応力低減に大きな効果を発揮する。その低減率は今回計測した部位ごとに異なるが、亀裂発生が多い懸案部位では補強後の応力は補強前の応力の約半分以下となる。また、片側補強と両側補強との応力低減効果には大きな差異はない。

今回の実験で、アングル補強は阪神高速道路で多発している亀裂部の応力低減に大きな効果を発揮することが確認されたが、今後疲労余寿命の改善程度の検証として疲労実験等による確認を予定している。

参考文献

坂井 渉, 岩崎 雅紀, 寺尾 圭史, 深沢 誠; 鋼床版横リブ構造の簡略化に伴う疲労挙動の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集第1部 Vol.48 1993 P.610-611