

開断面リブ鋼床版の疲労損傷対策に関する補強手法検討

阪神高速道路（株）大阪管理部 保全技術課 崎谷 淨
阪神高速道路（株）技術部 技術開発課 杉山 裕樹
阪神高速道路（株）建設事業本部建設技術課 田畑 晶子
（財）阪神高速道路管理技術センター 迫田 治行

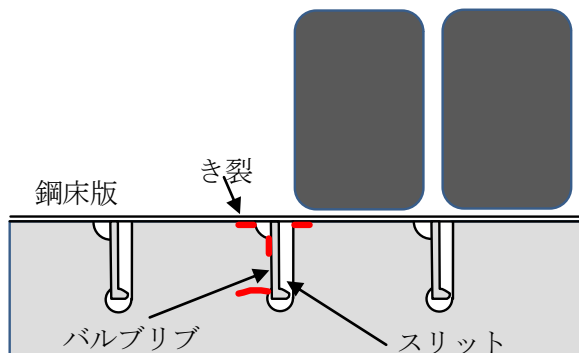
要 旨

阪神高速道路では開断面リブ（以下バルブリブという）を縦リブに用いた鋼床版において、縦リブと横リブの交差部に疲労損傷が多数発生している。その対策として、バルブリブと横リブとの交差部のスリットと呼ばれる開口部を L 型鋼で閉じる（以下、アングル補強という）こととし、その補強効果を確認するため、実物大試験体を用いた静的载荷試験と疲労試験を行うとともに、実橋応力計測を行った。その結果、補強前後においてスリット上側と下側のまわし溶接近傍に発生する応力が 1/2 以上低減することを確認し、アングル補強の疲労き裂の進展防止対策および予防保全対策としての有効性を実証した。

キーワード: 鋼床版, バルブリブ, 疲労き裂, L 型鋼あて板補強

はじめに

阪神高速道路ではバルブリブを縦リブに用いた鋼床版において、縦リブと横リブとの交差部に大型車輪荷重が原因と思われる疲労損傷が多数発生している（図-1）。その原因は、輪荷重により、スリットと呼ばれる開口部がせん断変形し、スリ



横リブもしくは横桁

図-1 バルブリブ鋼床版の疲労き裂

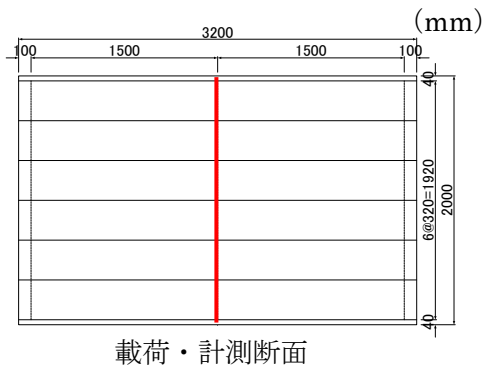
ットの上部と下部に応力が集中して、疲労き裂が発生すると考えられている。き裂の約 9 割はスリット下部のバルブリブと横リブの間のすみ肉溶接下端からのき裂であり、残り約 1 割がスリット上部のデッキプレートと横リブの間のすみ肉溶接部に発生している。また、き裂はスリット下側の半径が小さい場合（概ね $R \leq 35\text{mm}$ 以下）に発生している¹⁾。

このような損傷の対策としては、開口部のせん断変形が生じないように、スリットを閉じることが考えられる。そこで、スリット下部から横リブにき裂が発生している縦リブに対してアングル補強を行うこととし、その補強効果確認のため、実物大試験体を用いた静的载荷試験と疲労試験を行うとともに、実橋応力計測を行った。本論文ではその結果について報告する。

1. 静的載荷試験

1-1 試験概要

図-2 に実物大試験体と載荷位置を示す。試験体は、3.2m×2.0m×0.6m で縦リブを5本、横リブを3本配置している。載荷・計測断面は支間中央である。図-3 にひずみゲージ位置を示す。また、図-4 に、補強構造を示す。無補強と No.1~5 の全リブをスリット開口部側からアングルで補強したもの（以下片側補強と表記）、同じく全リブを隅肉溶接側からもアングルで補強したもの（以下両側補強と表記）の計3段階の載荷を行った。



(a) 試験体平面図

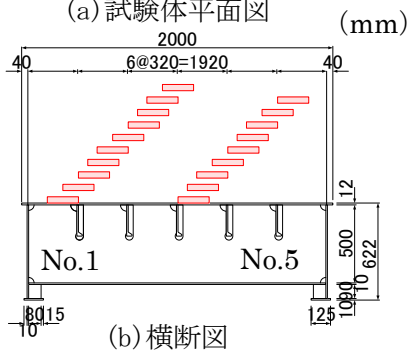


図-2 試験体および載荷位置

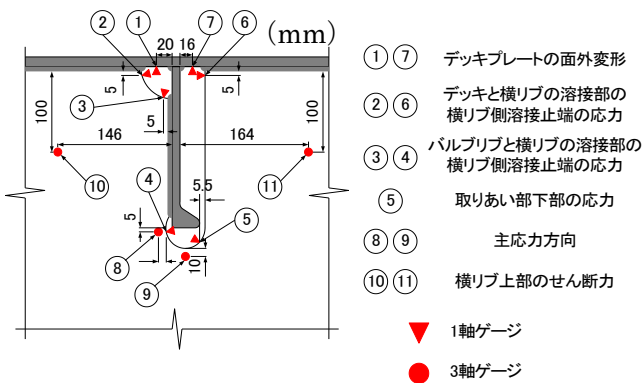


図-3 測定位置（ひずみゲージ位置）

載荷にはシングルタイヤ相当のゴム板（厚さ40 mm×幅20 cm×長さ20 cm）を用い、荷重強度100kNで、横断方向に小刻みに移動させた。

1-2 試験結果

図-5, 6 には、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、ゲージ④（下側スカロップの横リブこば）およびゲージ⑥（上側開口部の横リブこば）の応力値を、無補強、片側補強、および両側補強と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、本損傷が主に横リブのせん断変形に起因しているという推論を裏付ける結果となった。つぎに、アングル補強によって、補強前の発生応力は1/2以下に低減し、片側補

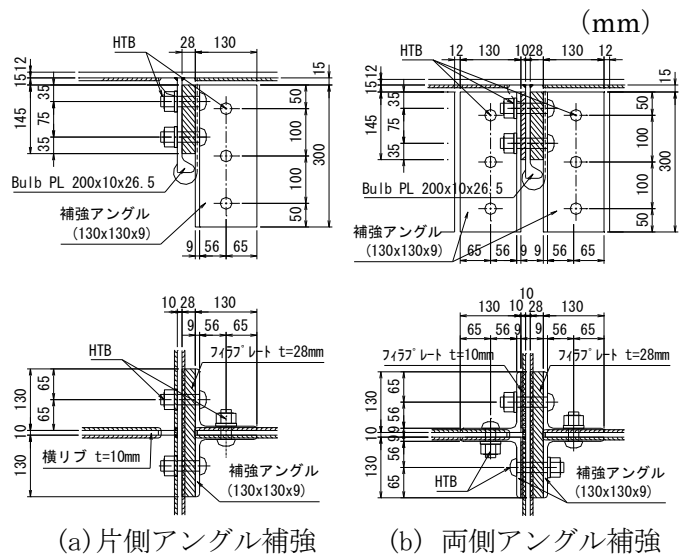


図-4 補強構造

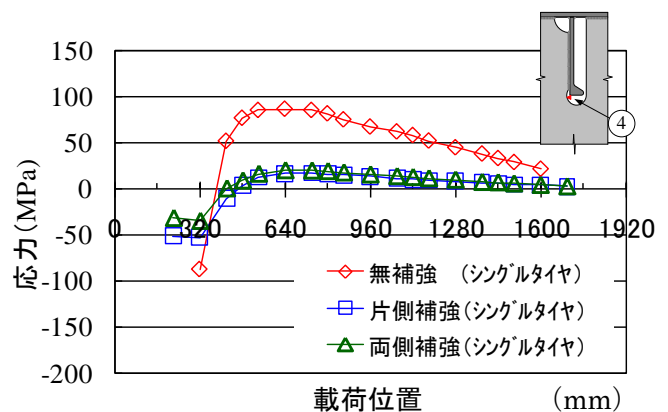


図-5 試験結果（ゲージ④応力）

強と両側補強との応力低減効果に大きな差がないことがわかった。なお、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。さらに、ダブルタイヤ相当のゴム板（厚さ 40 mm×幅 20 cm×長さ 20 cm×2）を用い、荷重強度 50kN×2 で載荷した結果も同様であった。

表-1 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を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が顕著であることがわかった。なお、実橋でのき裂発生が稀な上側R部スカーラップ廻りの応力（ゲージ①，②付近）は、せん断変形よりも直接輪重による影響が大きく、補強による応力低減効果は小さいが、元々補強前の発生応力が小さく、補強後の応力値も他の箇所比べて特に高いということはない。

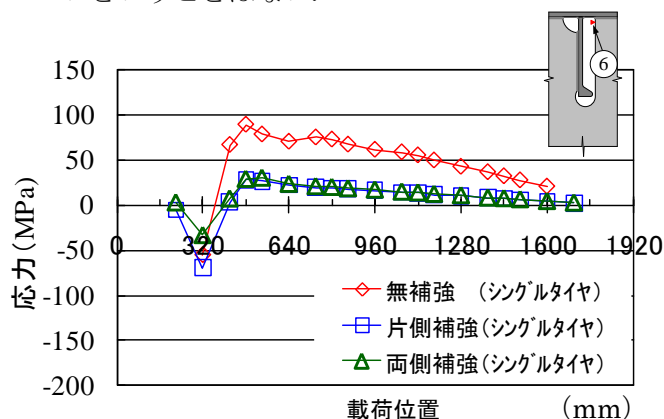


図-6 試験結果（ゲージ⑥応力）

表-1 発生応力の比較（縦リブ No.3 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

2. 実橋応力測定

2-1 計測概要

実橋での補強効果の確認のため、補強前後の応力計測を行った。図-7 に示すように計測対象橋梁は、阪神高速 13 号東大阪線にある単純鋼床版箱桁（2 箱桁 支間長 37.3m 片側 2 車線）であり、供用後約 35 年経過している。測定した横リブはダイヤフラム構造となっており、7 本の縦リブが交差している（バルブプレートは 200×10×26.5mm，スリット下側半径は 25mm）。

箱桁の縦リブのうち、No.2 と No.3 には、ほぼすべての横リブ交差部のスリット下側から横リブウェブにき裂が発生していた。測定箇所は箱桁 G2-⑥横リブである。縦リブ No.2 と No.3 において長さ 46mm, 47mm のき裂が確認され、先端には $\phi 25$ mm のストップホールを設けた。

図-8 にひずみゲージ位置を示す。横リブのスリットの上側と下側のこぼ面に鉛直方向に、また、縦リブ No.2 と No.3 のストップホールのき裂と反対側のこぼ面に一軸ひずみゲージを貼り付けた。

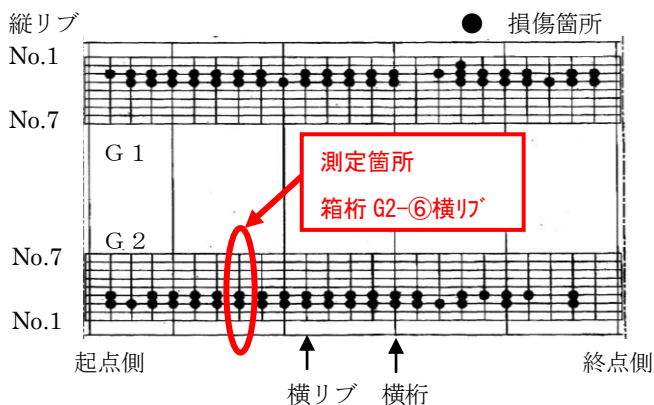
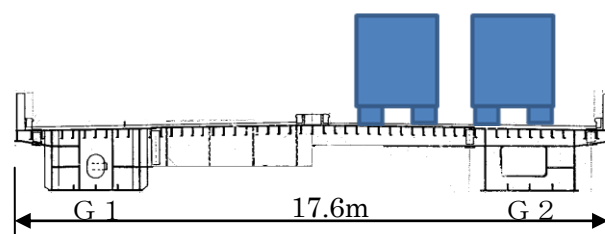


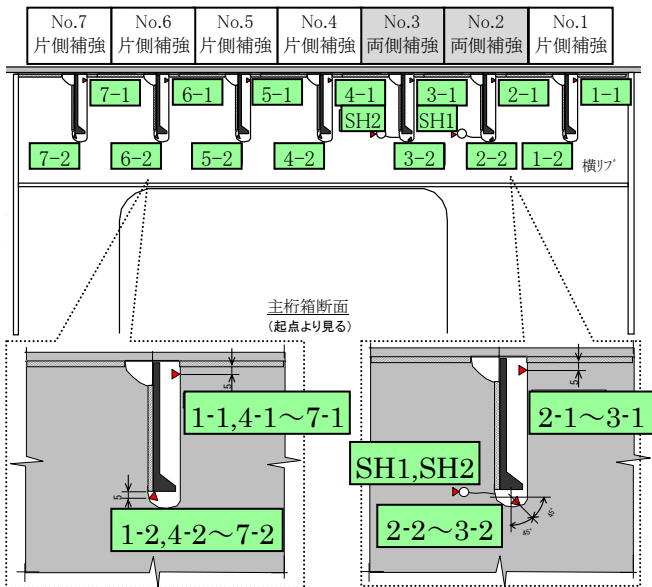
図-7 対象橋梁・測定箇所

2-2 計測と载荷方法

計測は補強状態に応じて以下の4段階（写真-1）に対して行った。試験車（3軸トラック総重量196kN）を用いて、①走行車線中央、②走行車線路肩寄り、③走行車線追越寄りの3ケースを時速60kmで走行させ、応力を測定した。図-9に車両走行位置を示す。

I 補強前 : 縦リブ No.2 と No.3 のスリット下側から横リブウェブに発生しているき裂先端にストップホールを施工済の状態

II 片側補強 : 縦リブ No.2 と No.3 に片側アングル補強を施した状態。



き裂無し No. 1, 4~7 き裂あり No. 2, 3

図-8 測定位置（ひずみゲージ位置）



写真-1 計測段階と補強状況

III 両側補強 : 縦リブ No.2 と No.3 に両側アングル補強を施した状態。

IV 全補強 : III 両側補強に加え、縦リブ No.1, No.4~7 に片側アングル補強を施した状態。

2-3 測定結果

表-2 に応力値の大きかった中央走行時の試験結果を、図-10~12 にスリット上側、スリット下側の応力およびストップホール内の応力を示す。

き裂が発生している縦リブ No.2 と No.3 のみに片側アングル補強を施すと、この縦リブ周りの応力が大きく低減する。

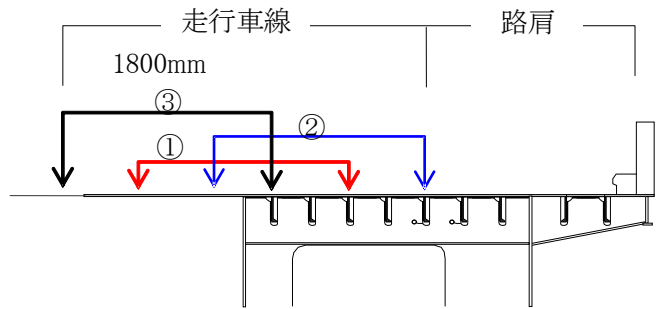


図-9 車両走行位置

表-2 中央走行時における最大・最小応力

測定点	I 補強前	II 片側補強	III 両側補強	IV 全補強	比率	比率	比率	
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(II/I)	(III/I)	(IV/I)	
中央走行	1-1	-8	-5	-6	-3	0.61	0.67	0.30
	2-1	-51	-13	-11	-15	0.25	0.22	0.30
	3-1	-49	-16	-14	-12	0.33	0.28	0.24
	4-1	-8	-7	-5	1	0.94	0.66	-0.13
	5-1	7	7	7	2	1.14	1.06	0.36
	6-1	6	8	7	2	1.45	1.20	0.29
	7-1	-5	-6	-6	-2	1.12	1.19	0.41
	1-2	-36	-20	-21	-14	0.55	0.60	0.39
	2-2	15	2	2	-1	0.11	0.17	-0.08
	3-2	18	8	9	6	0.46	0.49	0.33
	4-2	-12	-17	-13	-3	1.42	1.10	0.24
	5-2	10	10	9	2	1.02	0.90	0.23
	6-2	6	11	8	-2	1.67	1.29	-0.31
	7-2	-12	-10	-11	-9	0.84	0.90	0.73
SH1	-37	-14	-	-	0.39	-	-	
SH2	-28	-13	-	-	0.45	-	-	

応力低減率で見ると、縦リブ No. 2, No. 3 のスリット上部で 25%~33%程度、スリット下部で 11%~46%程度まで応力が低下している。

き裂が発生している縦リブ No. 2 と No. 3 周りの応力低減効果は片側アングル補強と両側アングル補強とも同程度であり、他のリブに全補強を施してもその効果は変わらない。

き裂未発生の縦リブ No. 1, No. 4~6 周りにおける応力は、片側アングル補強により、スリット上部と下部の応力は 13%~39%に減少しており、静的載荷試験結果とほぼ同程度の低減効果 (1/2 以下) が確認された。

補強リブに隣接する無補強の縦リブ周りの応力も若干低減するが低減率は小さく、さらに離れた縦リブ周りの応力はほとんど変わらない。つまり、補強したリブのみ応力低減効果が期待できる。

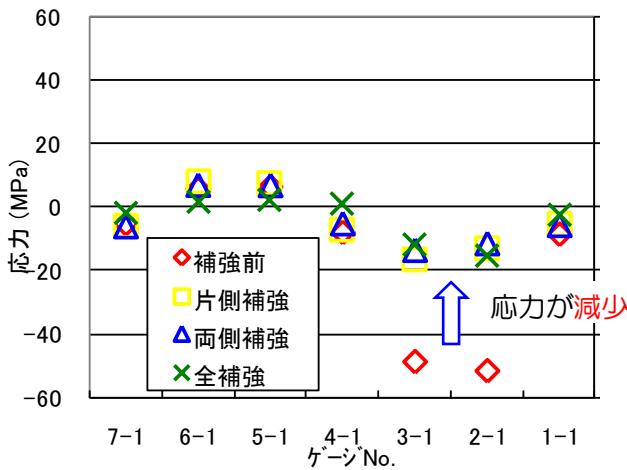


図-10 スリット上側応力

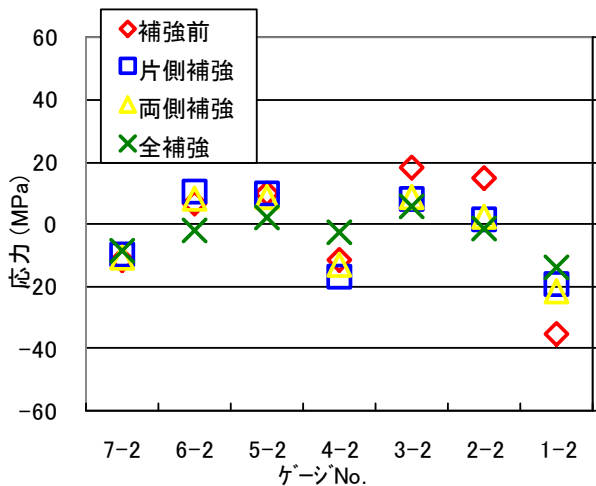


図-11 スリット下側応力

3. 疲労試験

3-1 目的

前述の 1. 静的載荷試験と 2. 実橋応力計測により、き裂未発生部に対しては片側アングル補強、両側アングル補強とも同程度の応力低減効果があり、またストップホールを施したき裂発生部に対しても片側アングル補強によって十分な応力低減効果があることが確認された。そこで、今まではき裂がある縦リブに対して両側アングル補強を行ってきたが、き裂が発生している縦リブと横リブ交差部に対しても、①ストップホール+片側アングル補強、あるいは、②ストップホールのみで対処が可能か検証するため、疲労試験を行った。

3-2 試験体と試験方法

試験体は、1. 静的載荷試験で使用したものと同一 (図-2) であり、載荷・計測断面は支間中央の鋼床版中心である。

試験は、以下の3ステップで実施した。①無補強状態で疲労き裂を発生させ、ある程度 (30mm 以上) き裂が進展したところで、②き裂先端にストップホールと縦リブに片側アングル補強を施して、疲労き裂進展防止効果を検証する。③ ②で効果があった場合には、その後、片側アングル補強を取り外して、ストップホールのみでの疲労き裂進展防止効果を検証する。

疲労き裂を発生させるため、事前に無補強状態

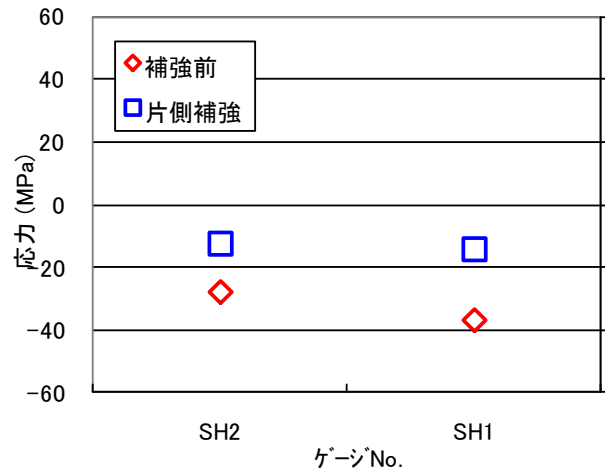


図-12 ストップホール内こば面応力

で 600 万回の繰り返し載荷（荷重範囲 140～320kN, 3Hz）を行った。そのときの載荷荷重範囲を図-13 に示す。

しかし、疲労き裂が発生しなかったため、写真-2,3 に示すように、縦リブ No.1 および No.2 のスリット上下部に金ヤスリ（最大厚さ 2.3mm）で長さ約 2mm の人工き裂を設けて疲労試験を続けた。

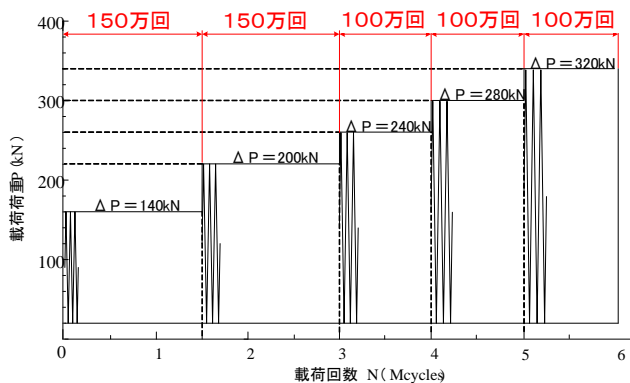


図-13 疲労き裂導入のための事前載荷荷重

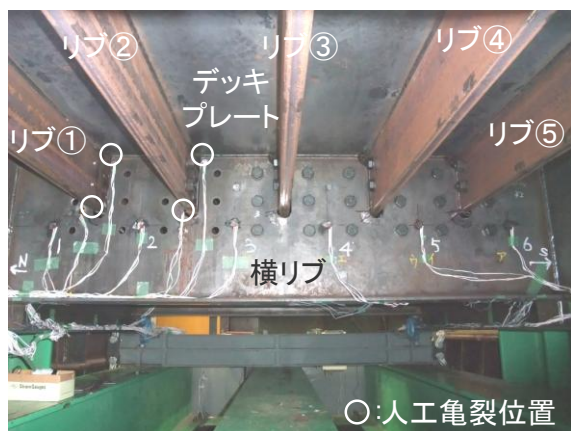
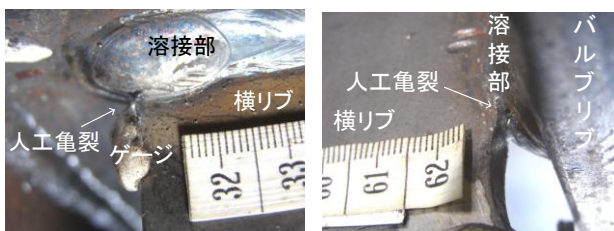


写真-2 人工き裂位置 表側（事前準備）



(a) スリット上側 (b) スリット下側

写真-3 人工き裂

3-3 試験結果

人工き裂導入後の疲労試験における載荷荷重と載荷回数との関係を図-14, き裂表面長さと載荷回数との関係を図-15 に示す（最低荷重 20kN, 荷重範囲 140kN～280kN, 3Hz, 法定軸重 98kN の片輪と比較し 2.9 倍～5.7 倍に相当）。人工き裂導入後、荷重範囲 140kN で 10 万回載荷後に縦リブ No.1 のスリット下部に表側 8.4mm（裏側 10.2mm）のき裂が発生した。荷重範囲を順次最大 280kN まで増加させ、180 万回載荷した結果、き裂は表側 31.4mm（裏側 34.7mm）まで進展した。写真-4 に 180 万回載荷時の縦リブ No.1 のスリット下側き裂の写真を示す。

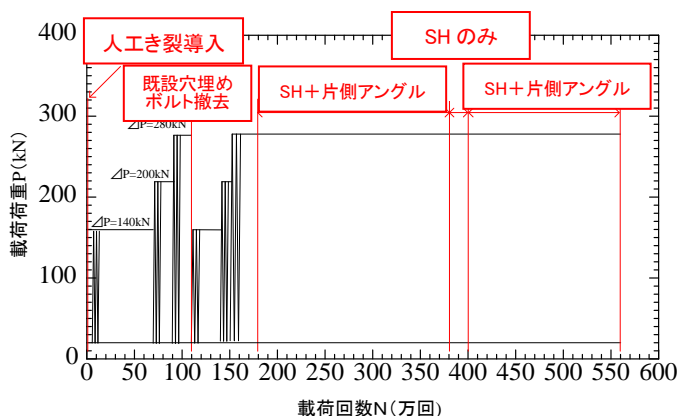


図-14 載荷荷重と載荷回数との関係

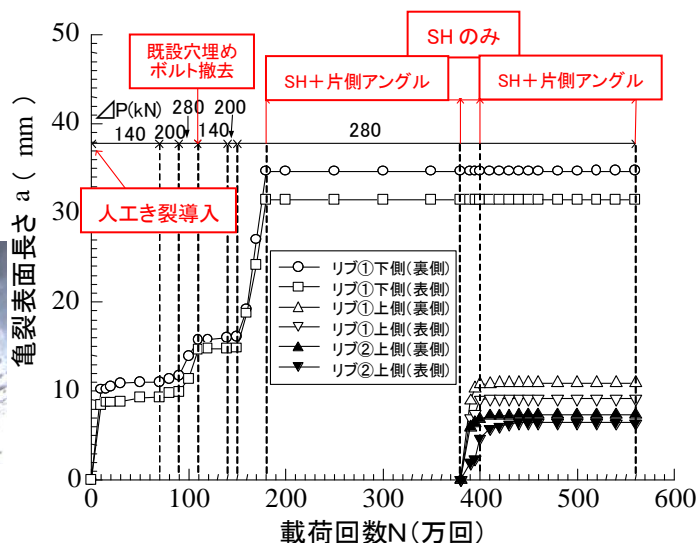


図-15 き裂表面長さと載荷回数との関係

(1) ストップホール+片側アングル補強の効果の検証(1)

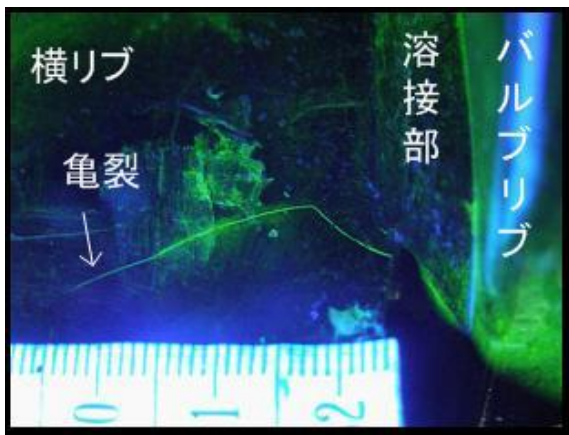
180 万回時に、き裂に対してストップホール施工、縦リブ No.1 に片側アングル補強を行い(写真-5)、荷重範囲 280kN で 380 万回まで 200 万回の繰り返し载荷を行った。その結果、ストップホールからのき裂の再発生は確認されず、また、縦リブ No.1~5 において、その他のき裂の進展及び新たなき裂の発生は認められなかった。

以上より、スリット下側から発生した疲労き裂に対して、ストップホールと片側アングル補強を併用すれば、十分な疲労き裂進展防止効果があることが確認された。

(2) ストップホールのみの効果の検証

380 万回時に片側アングル補強を撤去し、ストップホールのみの効果の検証を行った。400 万回時において、ストップホールからの疲労き裂の再発生は認められなかったが、縦リブ No.1 および No.2 のスリット上部に表側 9.0mm (裏側 10.8mm)、表側 4.6mm (裏側 6.8mm) のき裂がそれぞれ発生した。

以上より、スリット下側から発生した疲労き裂に対しては、ストップホールのみでもき裂進展防止効果はあるが、スリット上側から新たに疲労き裂が発生する可能性があることが明らかとなった。



※31.4mm (180 万回時)

写真-4 スリット下側き裂(縦リブ No.1 表側)

(3) ストップホール+片側アングル補強の効果の検証(2)

400 万回時に片側アングル補強を再び縦リブ No.1 に施した。560 万回時において、縦リブ No.1 および No.2 のスリット上部のき裂の進展やストップホールおよび他のリブのスリット部に新たなき裂の進展が認められなかったため、試験を終了した。

以上より、スリット上部の溶接部から発生し、デッキプレートにまで進展していない比較的短い疲労き裂に対しては、片側アングル補強により、疲労き裂の進展を防止する効果があることが確認された。

4. まとめ

今回の静的载荷試験、実橋応力計測ならびに疲労試験で得られた知見は、以下の通りである。

- (1)アングル補強によって、補強前の発生応力は 1/2 以下に低減し、片側補強と両側補強との応力低減効果に大きな差がないことが確認された。
- (2)アングル補強をしたリブに隣接する無補強の縦リブ周りの応力も若干低減するが低減率は小さく、さらに離れた縦リブ周りの応力はほとんど変わらない。つまり、補強したリブのみ応力低減効果が期待できる。

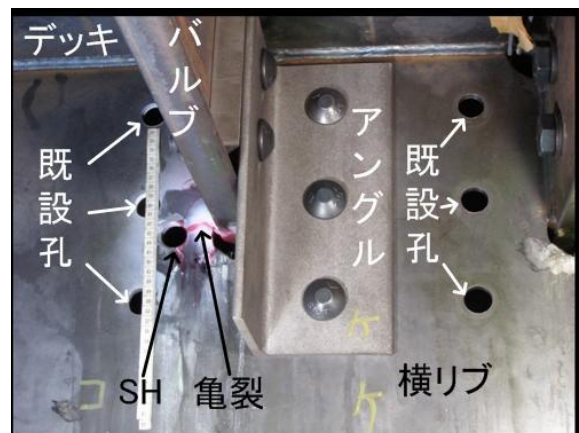


写真-5 ストップホール+片側アングル補強施工

- (3) バルブリブと横リブ交差部のスリット下部の溶接部から発生した疲労き裂に対して、ストップホールと片側アングル補強を併用すれば、十分な疲労き裂進展防止効果があることが確認された。
- (4) スリット下部の溶接部から発生した疲労き裂に対しては、ストップホールのみでも疲労き裂進展防止効果はあるが、スリット部のせん断変形が大きくなるためスリット上部の溶接部から疲労き裂が発生する可能性がある。
- (5) スリット上部の溶接部から発生し、デッキプレートにまで進展していない比較的短い疲労き裂に対しては、片側アングル補強により、疲労き裂の進展を防止する効果があることが確認された。

謝辞：関西大学の坂野昌弘教授，ならびに学生の酒井優二，西垣祐二，別所和哉，山岡大輔の各氏には，本稿文中の静的載荷試験・疲労試験に関して多大なご指導・ご協力をいただきましたので，ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田畑晶子，山村清，濱田信彦，迫田治行，酒井優二，坂野昌弘：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 回年次学術講演会概要集，I-003，2007.9
- 2) 杉山裕樹，崎谷浄，小林寛，迫田治行：開断面リブを有する鋼床版の横リブ疲労損傷対策に関する実働応力計測，土木学会第 64 回年次学術講演会概要集，I-143，2009.9
- 3) 崎谷浄，杉山裕樹，坂野昌弘，迫田治行，山岡大輔：開断面リブを有する鋼床版の横リブ疲労損傷対策に関する室内疲労試験，土木学会第 64 回年次学術講演会概要集，I-144，2009.9
- 4) 崎谷浄，杉山裕樹，田畑晶子，迫田治行，坂野昌弘：バルブリブ鋼床版の疲労損傷対策に関する実働応力計測と疲労試験，鋼構造年次論文報告集，第 17 巻，pp.337～344，2009.11

STUDY ON FOR FATIGUE DAMAGE COUNTERMEASURE FOR CROSS RIBS IN ORTHOTROPIC STEEL DECKS WITH BULB RIBS

Kiyoshi SAKIYA, Hiroki SUGIYAMA, Akiko TABATA and Haruyuki SAKODA

In the Hanshin Expressway, fatigue damages is frequently found in the cross rib in orthotropic steel decks with bulb ribs. The cause seems cyclic loadings of heavy trucks. We proposed closing the slits in the cross ribs made for accommodating the bulb ribs by using L-shaped angle steel and verified the strengthening effect by fatigue and static loading tests specimen and stress measurement on an existing bridge. Stress in the vicinity of the welds at the top or bottom of a slit was found reduced by one half or more, and usefulness of the angle strengthening technique in preventing existing cracks from propagating as well as in preventive maintenance was proven.

崎谷 浄



阪神高速道路株式会社
大阪管理部 保全技術課
Kiyoshi Sakiya

杉山 裕樹



阪神高速道路株式会社
技術部 技術開発課
Hiroki Sugiyama

田畑 晶子



阪神高速道路株式会社
建設事業本部 建設技術課
Akiko Tabata

迫田 治行



(財)阪神高速道路管理技術センター
企画研究部 調査研究課
Haruyuki Sakoda