

A 橋タイプの鋼床版バルブリブと横リブ交差部の疲労挙動と損傷対策

Fatigue behaviour and countermeasure of intersection between bulb ribs and lateral rib
of A bridge type orthotropic steel deck

山岡大輔*, 坂野昌弘**, 夏秋義広***, 野中砂男****, 中川圭正****, 中村香澄****

Daisuke Yamaoka, Masahiro Sakano, Yoshihiro Natsuaki, Sunao Nonaka,
Yoshimasa Nakagawa, Kasumi Nakamura

*関西大学大学院理工学研究科, (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

**工博, 関西大学教授, 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

***工博, 日本橋梁建設協会 (〒550-0005 大阪市西区西本町 1-8-2)

****国土交通省近畿地方整備局 (〒540-8586 大阪市中央区大手前 1-5-44)

Recently, thousands of fatigue cracks have been detected in orthotropic steel decks in Japan. Among them, fatigue cracking in welded joints between bulb ribs and lateral ribs is the most frequent type. In this study, we tried to grasp fatigue behaviour in the welded joints between the bulb rib and the lateral rib through fatigue tests of the orthotropic steel deck specimen which is same structural detail as A-type bridge. Fatigue cracks were initiated at the weld toe of the upper part of the slit and propagated through the weldment into the deck plate. We confirmed that the fatigue crack detection life of the welded joint between the bulb rib and the lateral rib was improved more than eight times by applying angle steel reinforcement.

Key Words: orthotropic steel deck, bulb rib, fatigue behavior, countermeasure

キーワード: 鋼床版, バルブリブ, 疲労挙動, 損傷対策

1. はじめに

近年, 鋼床版橋梁の疲労損傷が多数報告されており¹⁾, 首都高速道路と阪神高速道路では, 開断面と閉断面それぞれの縦リブと横リブの交差部の疲労損傷が最も多く発見されている. 特に阪神高速道路ではバルブリブと横リブの交差部の疲労損傷が全体の 2/3 を占めている¹⁾.

バルブリブと横リブの交差部の疲労損傷事例²⁾では, 疲労亀裂の内, 78%は交差部スリット下部のスカーラップ半径 R が 25mm 以下の橋梁で発生し, 残りの 22%は R が 35mm の橋梁で発生していることから, 疲労亀裂の発生には R の大きさが影響すると思われる. また, 発見された疲労亀裂を発生位置別にみると, 横リブウェブのスリット下部の溶接部から発生し, 横リブウェブへ進展するタイプが 89.1%, 横リブウェブのスリット上部の横リブ側の溶接止端から発生し, 溶接部およびデッキプレートへと進展するタイプが 10.6%で両者合わせて

99.7%とほとんどを占めている.

これらの疲労亀裂が横リブウェブおよびデッキプレートに進展した場合には, 横リブの破断やデッキプレート表面に段差が生じる可能性があり, 走行面の陥没などを引き起こして車両の走行に危険を及ぼす懸念がある. したがって, バルブリブと横リブの交差部の疲労挙動を解明し, 適切な疲労損傷対策を講じる必要がある.

三木ら³⁾は, バルブリブおよびUリブと横リブの交差部を対象として実働応力計測を実施し, 横リブウェブの面外曲げの影響について検討している.

岩崎ら⁴⁾は, バルブリブと横リブの交差部の疲労試験と FEM 解析を行い, スリット形状の影響について検討している.

一方, 田畑ら²⁾は, バルブリブと横リブの交差部の疲労損傷対策として, アンクル材を用いた補強方法を提案している. この補強方法にはアンクル材をバルブリブの片側(横リブのスリット部)に取り付ける片側アンクル補強(図-2 参照)と, バルブリ

ブの両側に取り付ける両側アングル補強がある。

実物大の試験体を用いた静的載荷試験²⁾や実働応力計測^{5),6)}により、片側アングル補強は両側アングル補強と同等以上の効果があり、疲労亀裂発生位置の応力を補強前の1/2以下に低減できることが確認されている。また、疲労試験^{6),7)}により、スリット下部溶接部の人工亀裂から発生した疲労亀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、進展を防止できることが確認されている。また、スリット上部の横リブ側溶接止端部の人工亀裂から発生し、デッキプレートに進展していない比較的小さな疲労亀裂に対して、片側アングル補強のみで進展を防止できることが確認されている。

しかし、片側アングル補強により、疲労亀裂の発生防止効果があるかどうか、およびスリット下部に生じた小さな疲労亀裂(点検時の見逃しも想定される)やスリット上部のデッキプレートに進展した大きな疲労亀裂に対して、進展防止効果があるかどうかは確認されていない。

夏秋ら⁸⁾は、1976年竣工のバルブリブと横リブの交差部の横リブスリット下部のスカーラップ半径Rが35mmの鋼床版橋梁(A橋)を対象として、疲労亀裂調査および実働応力計測を実施した。その結果、バルブリブと横リブの交差部で疲労亀裂は確認されていないが、スリット上下部の溶接部近傍では大きな応力が発生しており、マイナー則により推定した疲労寿命は最短で数年程度となっている。また、横リブウェブの表裏で応力状態にほとんど違いがなく、面外曲げの影響は小さいことを確認している。

そこで本研究では、A橋と同様な交差部のディテ

ールを有するバルブリブ鋼床版を対象として、疲労試験によりバルブリブと横リブの交差部の疲労挙動の解明、および疲労亀裂の発生を防止する予防保全対策、発生した疲労亀裂の進展を防止する事後保全対策の両面から、片側アングル補強効果の検討を行った。

予防保全対策については、疲労亀裂発生前の横リブ交差部に対して片側アングル補強を施し、無補強部と比較した。事後保全対策については、疲労亀裂が発生した横リブ交差部に対して片側アングル補強を施し、疲労亀裂進展防止効果を検討した。

なお、疲労試験に先立ち、静的載荷試験により、バルブリブと横リブの交差部の応力分布の把握および片側アングル補強による応力低減効果の確認を行った。

2. 実験方法

2.1 試験体の概要

(1) 対象橋梁 (A 橋)⁸⁾

対象橋梁は1976年竣工、橋長59.1m(28.8m+30.3m)で、幅員31.0m、斜角85度、桁高1.2mの11主桁を有する2連の鋼床版単純合成I桁橋である。国道1号と交差する1級河川を越えており、日交通量83,000台、大型車(バスと普通貨物車)混入率25%の重交通量を支えている。

構造は、デッキプレート厚さ12mm、主桁間隔2.9m、横桁間隔4.8m、中間横リブ間隔1.6mである。バルブリブの間隔は0.33mで主桁間に8本通っており、バルブリブの向きは横リブスパン中央に対して

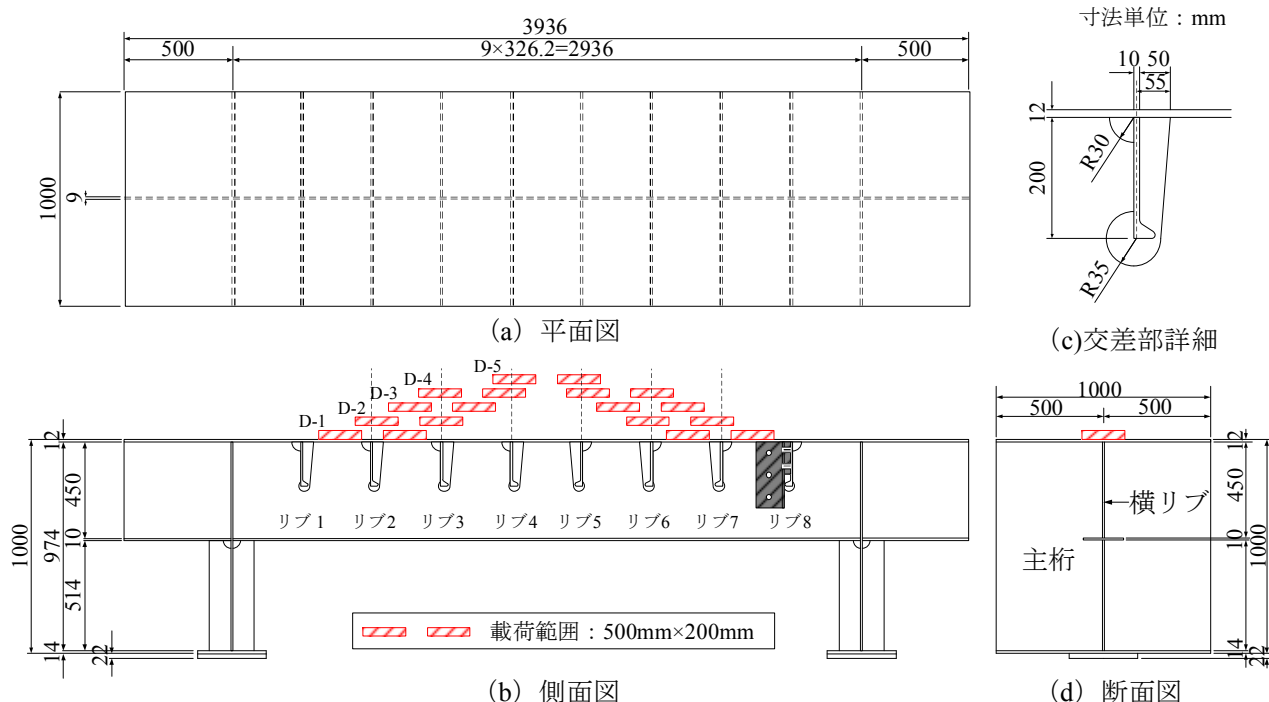


図-1 試験体の形状と寸法および載荷位置

表-1 試験体の材料の機械的性質と化学成分（ミルシート値）

部材名	板厚 (mm)	降伏点 (MPa)	引張 強さ (MPa)	伸び (%)	化学成分(%)										
					C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Ceq
デッキプレート	12	313	448	30	0.15	0.15	0.79	0.011	0.005	0.02	0.02	0.02	0.00	0.000	0.20
横リブウェブ	9	286	430	30	0.14	0.15	0.80	0.014	0.005	0.02	0.02	0.04	0.00	0.000	0.19
主桁ウェブ															
横リブ下フランジ	10	320	438	30	0.11	0.21	0.98	0.016	0.006	0.01	0.01	0.04	0.01	0.001	0.29
主桁下フランジ	14	312	441	31	0.14	0.15	0.79	0.014	0.006	0.02	0.02	0.03	0.00	0.000	0.19
バルブリブ	10	350	418	34	0.09	0.20	0.67	0.010	0.003	-	-	-	-	-	-
ソールプレート	22	260	421	33	0.15	0.15	0.81	0.010	0.007	0.02	0.03	0.03	0.01	0.000	0.20

注) 鋼材は全てSM400Aである。

左右対称で、交差部の横リブスリットはバルブリブの主桁側（外側）に設けられている。スリット下部のスカールアップ半径 R は 35mm である。

2008 年 1 月にバルブリブと横リブの交差部の疲労亀裂調査が磁粉探傷試験により実施されているが、疲労亀裂は確認されていない。

(2) 試験体

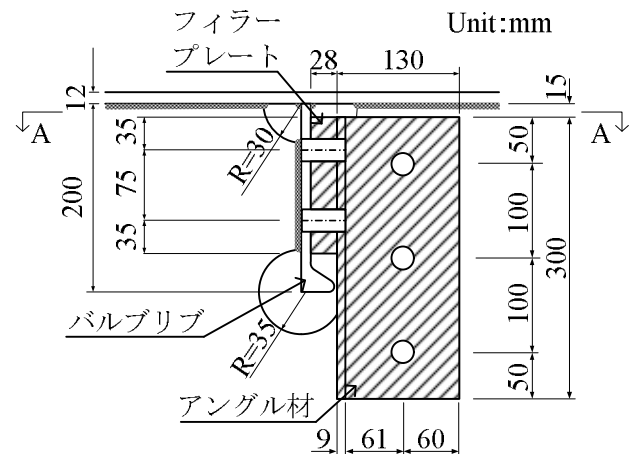
図-1 に試験体の形状と寸法を示す。A 橋のバルブリブと横リブの交差部と同様の構造で実物大の試験体（長さ 1,000mm、幅 4,000mm、高さ 1,000mm）を製作した。試験体には横リブを中央に 1 本のみ、バルブリブを実物と同様に左右対称に 8 本設けている。A 橋では横リブのスリット上下部に圧縮応力が生じ、疲労亀裂が確認されていない⁸⁾ので、横リブのスリット上下部に引張応力が生じ、疲労上不利となるように、バルブリブと横リブスリットの向きを A 橋とは逆に、横リブスパン中央側に設けた。なお、実橋でもスリット上下部に引張応力が生じるように設けられる場合も考えられる。

鋼材は全て SM400A を用いた。表-1 に試験体の材料の機械的性質および化学成分（ミルシート値）を示す。バルブリブと横リブの交差部のバルブリブと横リブ、バルブリブとデッキプレート、および横リブとデッキプレート溶接部の溶接材料は JIS-Z2311 E4316Z（低水素系）相当である。溶接方法は被覆アーク溶接（手棒）で、溶接条件は電流約 180A、電圧約 25V、溶接速度約 15cm/分で、入熱量は約 18kJ/cm である。横リブとデッキプレート、およびバルブリブとデッキプレート溶接部は下向きで、バルブリブと横リブ溶接部は立向下進で、すみ肉溶接されている。

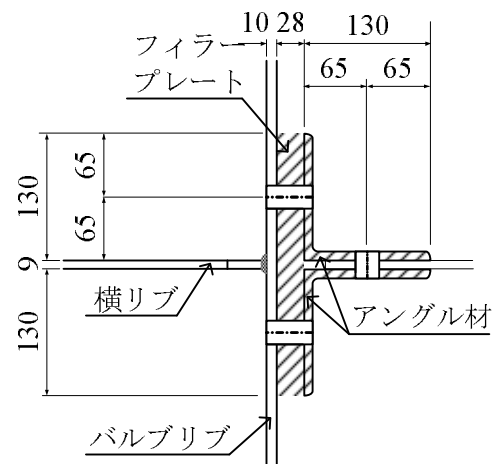
(3) 補強方法

文献 2), 5), 6)により、片側アングル補強によって両側アングル補強と同等以上の応力低減効果が確認されているので、本研究では片側アングル補強を採用し、疲労亀裂の発生を防ぐ予防保全対策と、発生した疲労亀裂の進展を防ぐ事後保全対策の両面から、補強効果を検討した。図-2 に片側アングル補強を施したバルブリブと横リブの交差部詳細を

示す。130mm×130mm×9mm のアングル材 2 本を横リブを挟んで、横リブのスリット部に取り付ける。アングル材は高力ボルトによって横リブウェブとバルブリブに接合されている。



(a) 側面図



(b) A-A 平面図

図-2 片側アングル補強を施したバルブリブと横リブの交差部詳細

2. 2 静的载荷試験方法

(1) 载荷方法

図-1 に静的载荷試験の载荷位置を示す。バルブリブの向きが横リブスパン中央に対して左右対称なので、静的载荷試験の载荷位置も横リブスパン中央に対して左右対称の横リブ直上とし、橋軸直角方向に移動させた D-1～5 の計 5 パターンで静的载荷試験を行った。ダブルタイヤ 2 組を想定し、厚さ 40mm、大きさ 200mm×200mm のゴム板を 4 枚用いた（ただし、D-5 のみゴム板 2 枚）。写真-1 に载荷状況を示す。動的能力±320kN の電気油圧式疲労試験機用いて、ゴム板とアクチュエータ間に载荷梁を介して荷重 $P=200\text{kN}$ （D-1～4 はゴム板 1 枚あたり 50kN、D-5 はゴム板 1 枚あたり 100kN）を負荷させた。



写真-1 载荷状況

(2) 応力測定位置

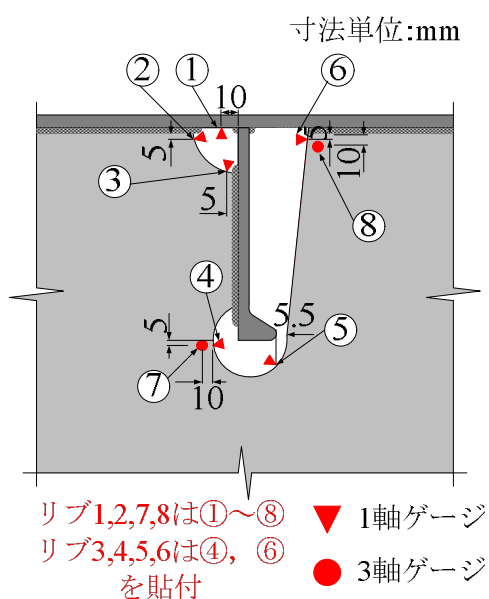


図-3 ひずみゲージ貼付位置

図-3 にひずみゲージ貼付位置を示す。ゲージ長 1mm の 1 軸ひずみゲージをスカーラップ部のデッキプレート下面①と横リブコバ面上部②と下部③、スリット上部の横リブコバ面⑥、スリット下部の溶接部付近④およびその反対側の母材部⑤に貼付し、バルブリブと横リブの交差部の局部応力を測定した。

また、ゲージ長 1mm の 3 軸ゲージを横リブのスリット上部溶接部付近の⑧（表裏）とスリット下部溶接部付近⑦（表裏）に貼付し、主応力の大きさと方向を測定した。なお、リブ 1, 2, 7, 8 については①～⑧の全てに貼付したが、リブ 3～6 については疲労亀裂発生が予想される④と⑥にのみ貼付した。

2. 3 疲労試験方法

無補強部と補強部を比較するためにリブ 1 とリブ 8 の 2 ヶ所に着目し、载荷位置は図-1 に示す D-1（リブ 2 と 7 を挟み込み）とした。

静的载荷試験結果を比較し、リブ 1 と 8 で発生応力の大きい方に片側アングル補強を施した。無補強部と補強部を比較することにより予防保全（疲労亀裂発生防止）効果を検討した。

荷重範囲はダブルタイヤ 2 組（1 軸）を想定し、実際の軸重分布⁹⁾と衝撃を考慮して、法定軸重 100kN の 2 倍（200kN）に 1.4 を掛け、 $\Delta P=280\text{kN}$ （20～300kN）とした。载荷速度は 3Hz で疲労試験を行った。疲労亀裂の検出には目視と磁粉探傷試験を併用した。

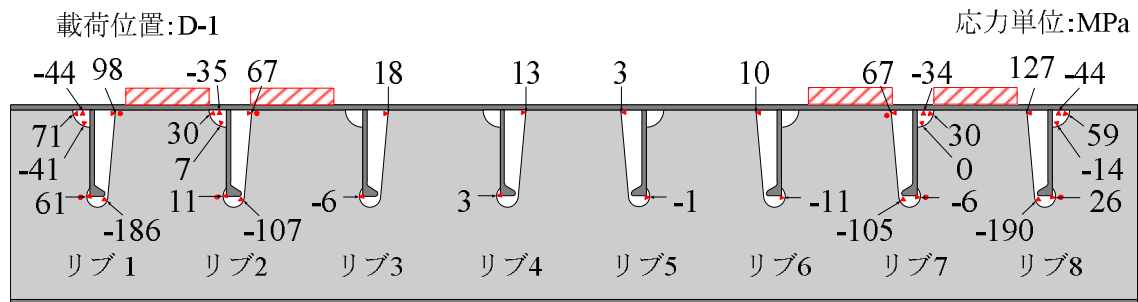
疲労試験中、無補強部で疲労亀裂が発生した場合は、ある程度亀裂が進展したところで補強を施して、その事後保全（疲労亀裂進展防止）効果を検討した。なお、疲労亀裂が発生しない場合は金ヤスリ（長さ 75mm、幅 17mm、厚さ 2.3mm）で人工亀裂を導入し、疲労亀裂進展挙動と進展防止効果の検討を試みた。

3. 静的载荷試験結果

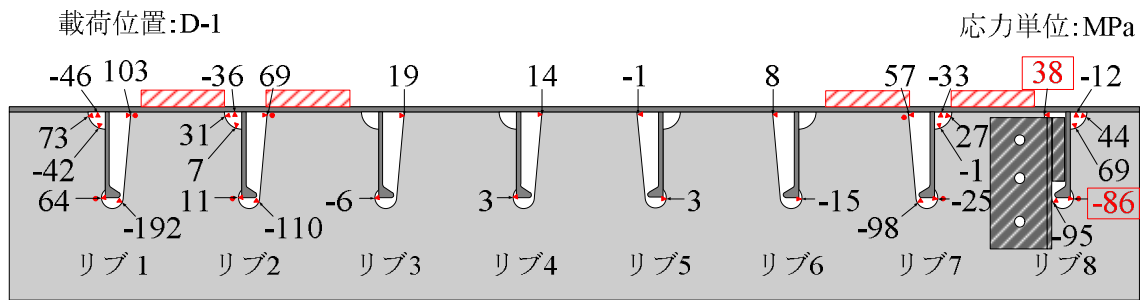
3.1 各バルブリブと横リブの交差部の応力分布

図-4 に各バルブリブと横リブの交差部の応力分布を示す。

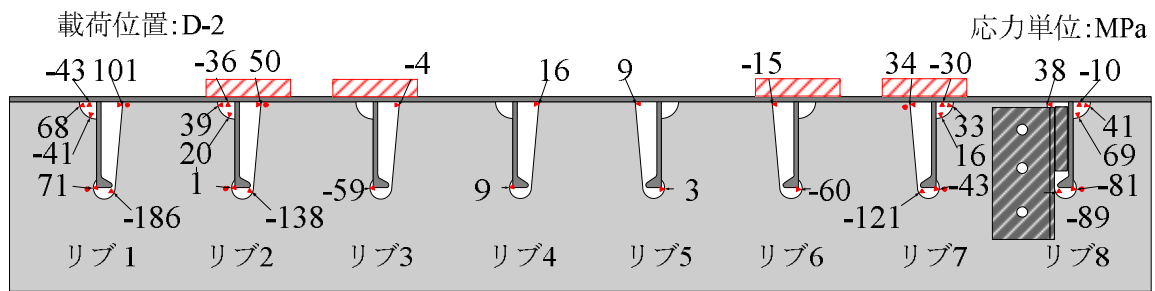
無補強状態の D-1 载荷（図-4 (a)）で、リブ 1 とリブ 8 の応力を比較すると、スリット上部⑥でリブ 1 の 98MPa に対して、リブ 8 は 127MPa であり、スリット下部④では、リブ 1 で 61MPa、リブ 8 で 26MPa であるが、スリット上下部で最も大きい引張応力が生じているリブ 8 に予防保全対策として片側アングル補強を行った。なお、構造ディテールも荷重条件も同様なリブ 1 とリブ 8 の実測応力が異なる理由



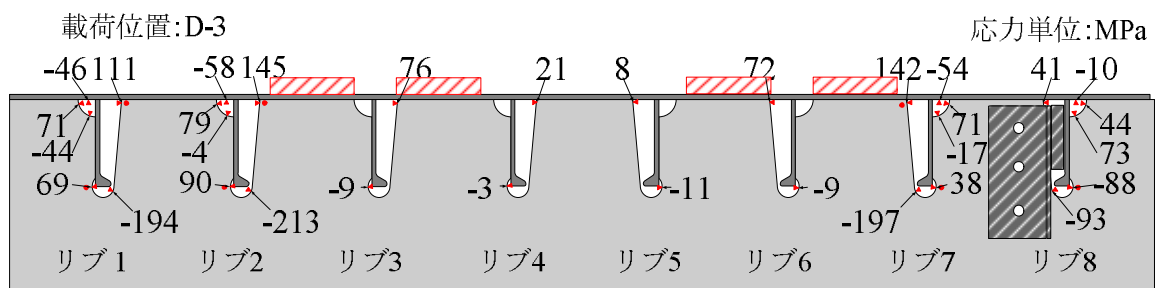
(a) 載荷位置 D-1, 補強前 (荷重 $P=200\text{kN}$)



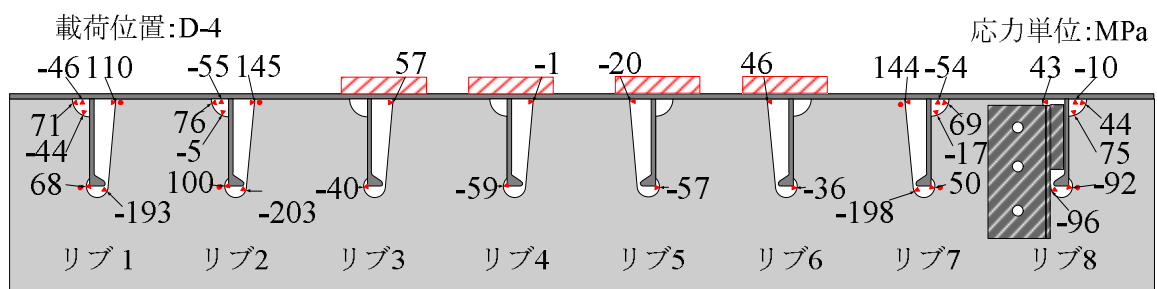
(b) 載荷位置 D-1, リブ 8 に補強後 (荷重 $P=200\text{kN}$)



(c) 載荷位置 D-2, リブ 8 に補強後 (荷重 $P=200\text{kN}$)

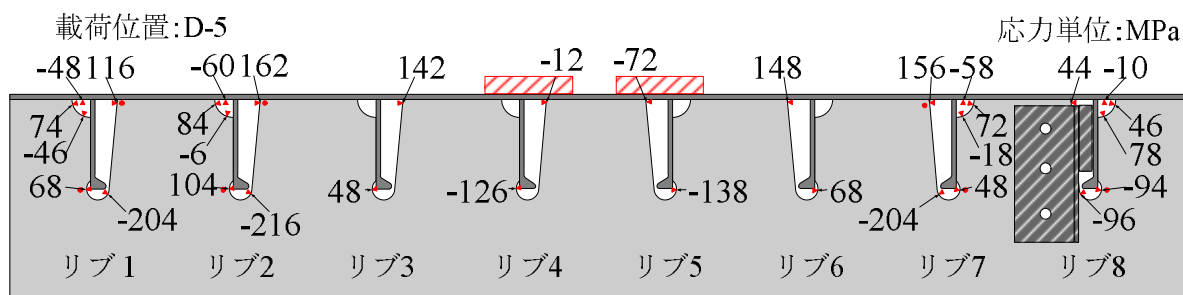


(d) 載荷位置 D-3, リブ 8 に補強後 (荷重 $P=200\text{kN}$)



(e) 載荷位置 D-4, リブ 8 に補強後 (荷重 $P=200\text{kN}$)

図-4 各バルブリブと横リブの交差部の応力分布



(f) 荷重位置 D-5, リブ 8 に補強後 (荷重 $P=200\text{kN}$)
図-4 (続き) 各バルブリブと横リブの交差部の応力分布

は、荷重位置や荷重、溶接形状などの微妙な違いと考えられる。また、スカーラップ部の応力はスリット上部⑥比べて小さく、実橋での疲労亀裂発生状況に対応している。

リブ 2 とリブ 7 のスリット上部⑥でも大きい応力が生じているが、リブ 1 とリブ 8 ほどではない。リブ 3 ～ 6 のスリット上下部では大きな応力は生じていない。

リブ 8 補強後の D-1 荷重 (図-4 (b)) では、補強したリブ 8 のスリット上部⑥の応力は、補強前の 127MPa から 38MPa と $1/3$ 程度に著しく低減された。応力の絶対値が著しく低減された理由は、補強によってスリット開口部のせん断変形が拘束されたためと考えられる。スリット下部④の応力は、補強前の引張応力 (26MPa) から圧縮応力 (-86MPa) に変化した。絶対値は大きくなっているが、それでもリブ 1 の -192MPa の半分以下であり、特に問題となる大きさではないと考えられる。また、圧縮応力に変化した理由は、荷重が直下の横リブウェブからアングル材を通してバルブリブに伝達され、スリット下部の応力状態が直上荷重の場合に近くなったためと考えられる。その他のリブ 1 ～ 7 の応力はほとんど変化していない。

D-2 荷重 (図-4 (c)) でも、スリット上下部の応力はリブ 1 が最も大きく、D-1 荷重とほぼ同程度である。D-3 ～ D-5 荷重 (図-4 (d) ～ (f)) では、リブ 2 とリブ 7 のスリット上下部で、最も大きな引張応力が生じている。

3.2 荷重位置と横リブスリット上下部の応力分布

図-5 に荷重位置と横リブスリット上下部の応力の関係を示す。スリット上部に関しては、リブ 1 と 8 では荷重位置によらずほぼ一定の引張応力が発生し、リブ 8 では片側アングル補強後、応力は大きく低減されている。リブ 2 と 7 でも荷重位置が D-3 ～ 5 ではほぼ一定の引張応力が発生している。リブ 3 と 6 については、荷重位置 D-5 の時に、リブ 1, 2, 7 と同程度の引張応力が発生している。

中央のリブ 4, 5 では直上荷重時に圧縮応力が発生するが、その他のリブ 1 ～ 3, 6, 7 に比べて絶対値は小さい。リブ 1, 2, 7, 8 でリブより中央側に荷重した時に、引張応力がほぼ一定となるのは、スリット開口部のせん断変形の原因であるせん断力が理論上は一定となるためと考えられる。なお、リブによって応力値が異なるのは、3.1 で述べたように、荷重位置や荷重、溶接形状などの微妙な違いによるものと考えられる。

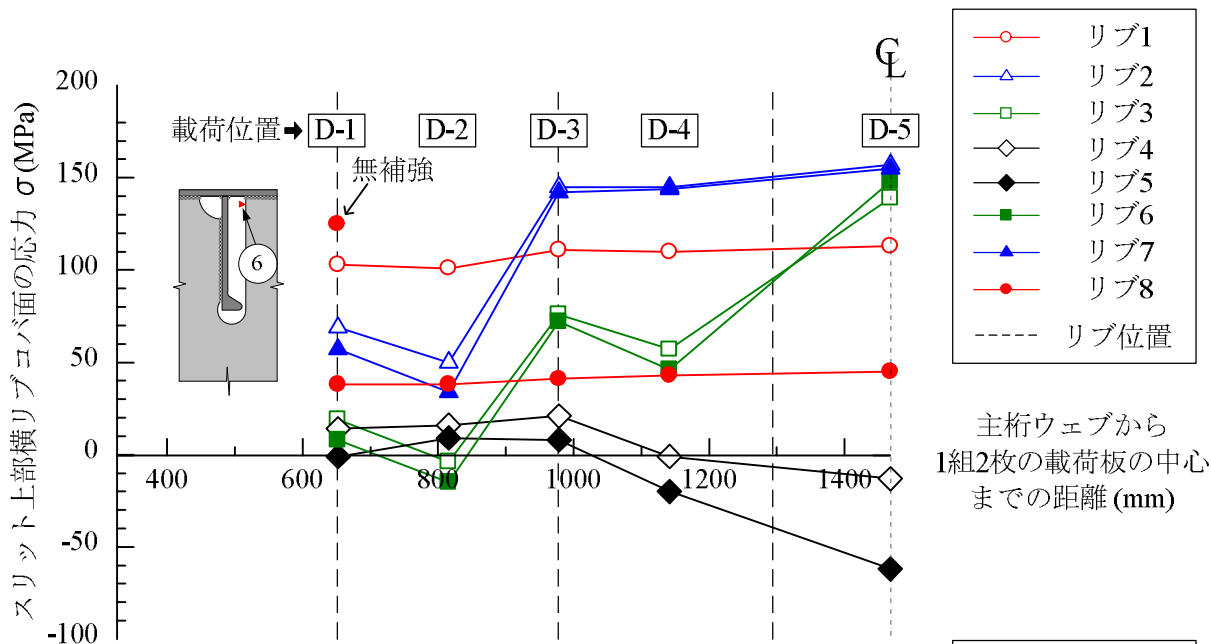
スリット下部に関しても、スリット上部とほぼ同様の傾向がみられるが、引張応力の大きさはスリット上部に比べて小さい。なお、リブ 4 とリブ 5 の直上荷重時には大きな圧縮応力が生じている。

4. 疲労試験結果

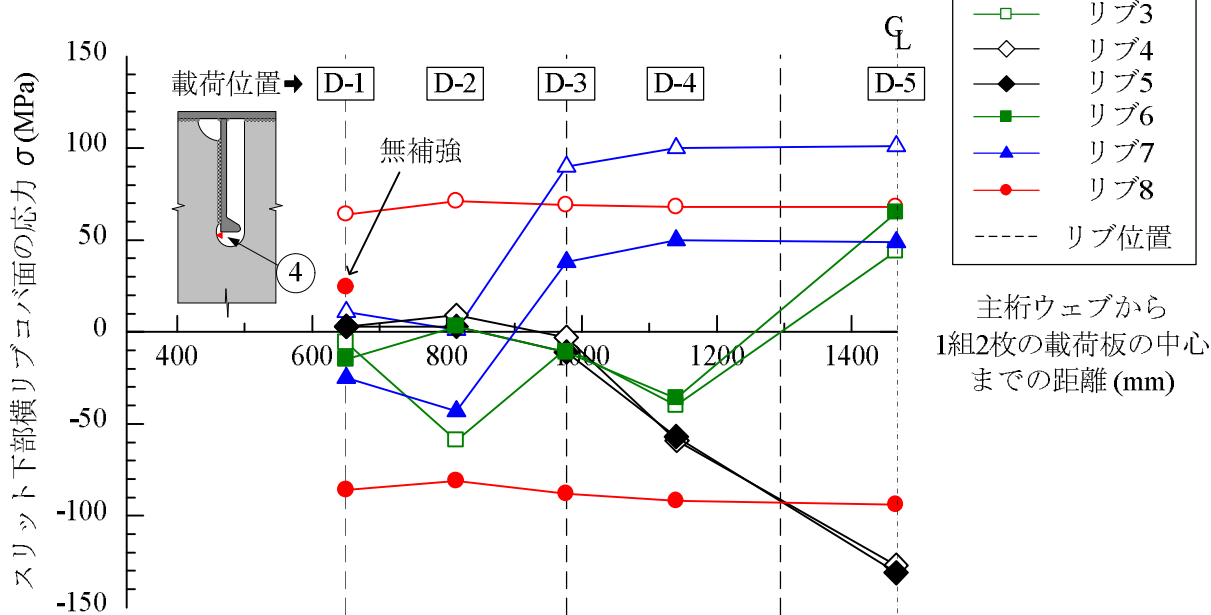
4.1 疲労亀裂の発生・進展挙動

表-2 に疲労亀裂の発生・進展に関する疲労試験結果を示す。リブ 1 とリブ 8 のスリット上部から疲労亀裂が発生し、進展した。図-6 にリブ 1 と 8 の疲労亀裂発生位置を示す。スリット下部については、人工亀裂を導入したが、疲労亀裂は発生しなかった。図-7 にリブ 1 とリブ 8 のスリット上部の疲労亀裂の表面長ささと荷重回数の関係を示す。写真-2 にリブ 1 スリット上部に生じた疲労亀裂の進展状況を示す。荷重範囲 $\Delta P=280\text{kN}$ で 70 万回繰返し荷重時に、リブ 1 のスリット上部溶接部に疲労亀裂を発見した (写真-2 (a), (b))。亀裂の表面長さは、横リブの北側で 9mm 、南側で 14mm であった。亀裂はバルブリブと横リブの交差部のスリット上部溶接部の横リブコバ面止端部から発生しており、溶接ビードを斜め上方に横切る方向に進展し、北側では亀裂はまだビード内であるが、南側ではデッキプレートとの境界に達していた。

110 万回の繰返し荷重時には、亀裂は溶接ビードからデッキプレートへと進展している (写真-2 (c), (d))。350 万回の繰返し荷重時には、デッキプレート下面に進展した亀裂は枝分かれをし、橋軸方向



(a) スリット上部



(b) スリット下部

図-5 荷重位置と横リブスリット上下部コバ面の応力の関係

に向きを変えて進展していった(写真-2 (e), (f)).

1160 万回繰返し荷重時に、デッキプレート下面の亀裂表面長さが北側で 28mm, 南側で 26mm まで進展したところで、リブ 1 に補強を施した(写真-2 (g), (h)). 補強後 200 万回繰返し荷重しても、疲労亀裂が進展していなかったため、リブ 1 に取り付けアングル材を除去した。アングル材除去後、疲労亀裂は再び進展し始めた。したがって、スリット上部溶接部から発生し、デッキプレートに進展して、デッキプレート上面には貫通していない比較的大

きな疲労亀裂(デッキプレート下面長さが 27mm 程度)に対して、片側アングル補強により、疲労亀裂の進展を完全に防止できる事後保全効果が確認された。

最終的に 2180 万回まで荷重した結果、リブ 1 のスリット上部から発生した疲労亀裂は表面長さが北側で 60mm, 南側で 60mm まで進展したが、デッキプレート上面には貫通していない(写真-2 (i), (j)).

予防保全対策として補強を施したリブ 8 では、

540万回の繰返し载荷をうけても、スリット部から疲労亀裂は発見されなかった。したがって、スリット上部の溶接部から発生する疲労亀裂に対して、片側アングル補強により、疲労亀裂発生寿命が約8倍以上に延長され、十分な疲労亀裂発生防止（予防保全）効果が確認された。その後、リブ8に取付けてあったアングル材を除去し、疲労試験を続行した。

写真-3に、アングル材除去後にリブ8スリット上部に生じた疲労亀裂の進展状況を示す。アングル材除去後10万回の繰返し载荷時に、リブ8のスリット上部溶接部に疲労亀裂を発見した（写真-3(a), (b)）。亀裂の表面長さは、横リブの北側で1mm、南側で2mmであった。リブ1のスリット上部溶接部に発生した亀裂と同様に、亀裂はデッキプレートと横リブの溶接部の横リブコバ面側止端部から発生し、溶接ビードを斜め上方に横切り、デッキプレートへと進展した（写真-3(c), (d)）。その後、亀裂は枝分かれし、橋軸方向に向きを変えて進展した（写真-3(e), (f)）。最終的にリブ8のスリット上

部から発生した疲労亀裂は表面長さが北側で53mm、南側で45mmまで進展したが、デッキプレートの上面には貫通していない（写真-3(g), (h)）。

なお、リブ1とリブ8以外のバルブリブと横リブの交差部には疲労亀裂は確認されなかった。

図-7によれば、デッキプレート進展後の疲労亀裂の進展は、溶接部からデッキプレートに進展するまでに比べて遅くなっている。傾き（進展速度）と比較すると、デッキプレート進展後は、進展前の1/4程度に減速している。

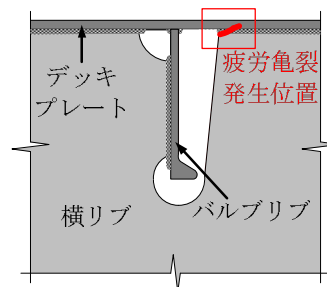


図-6 リブ1と8の疲労亀裂発生位置

表-2 疲労亀裂の発生・進展に関する疲労試験結果

累積繰返し回数 N (万回)	部分繰返し回数 ΔN (万回)	疲労亀裂の確認および補強作業等	疲労亀裂表面長さa (mm)					
			リブ1スリット			リブ8スリット		
			上部		下部	上部		下部
			南側	北側		南側	北側	
0	0	リブ8にアングル材取付け	0	0	0	0	0	0
70	70	リブ1スリット上部に疲労亀裂確認	14	9	0	0	0	0
540	470	リブ8のアングル材除去 リブ8スリット下部に2mm程度の人工亀裂導入	29	31	0	0	0	0
550	10	リブ8スリット上部に疲労亀裂確認	30	31	0	2	1	0
630	80	リブ1スリット下部に2mm程度の人工亀裂導入	31	32	0	14	15	0
1160	610	リブ1にアングル材取付け	42	44	0	24	26	0
1360	200	リブ1のアングル材除去	42	44	0	28	30	0
2180	820	試験終了	60	60	0	45	53	0

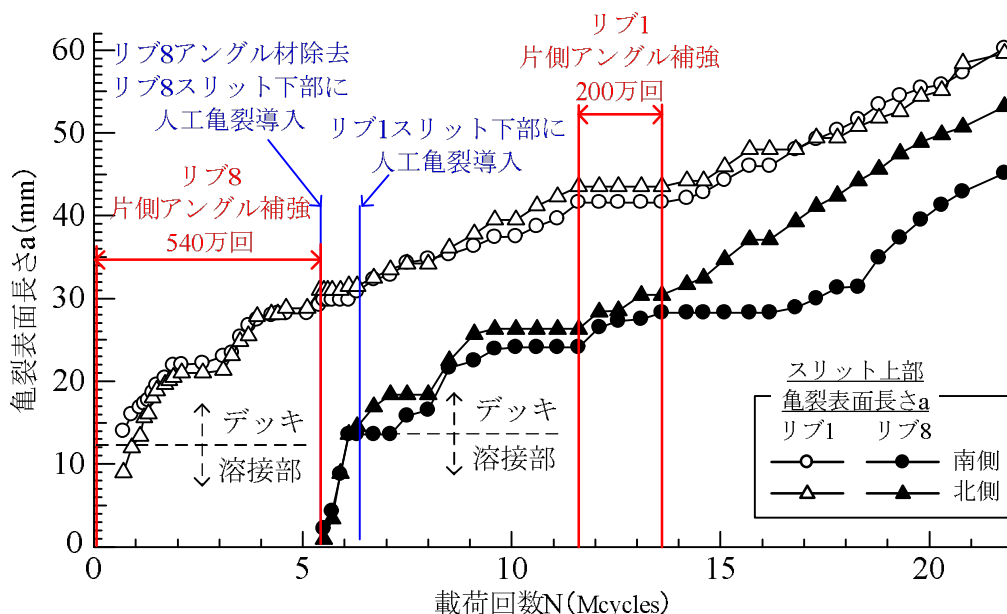
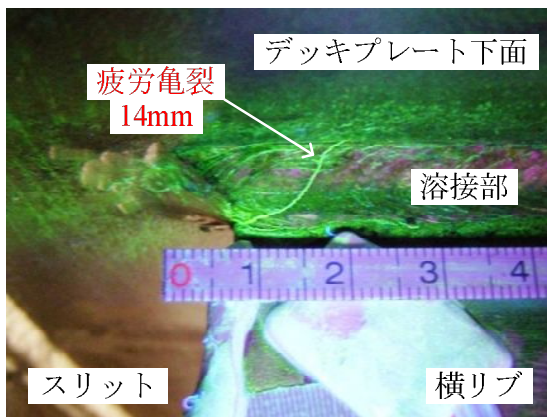
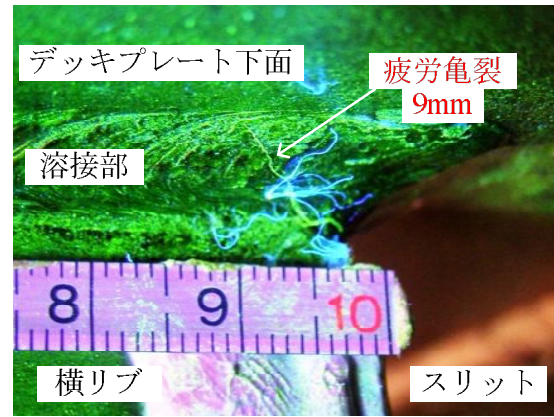


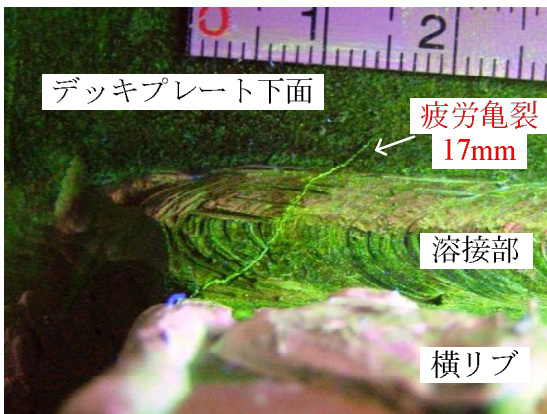
図-7 疲労亀裂の表面長さと载荷回数N(Mcycles)の関係



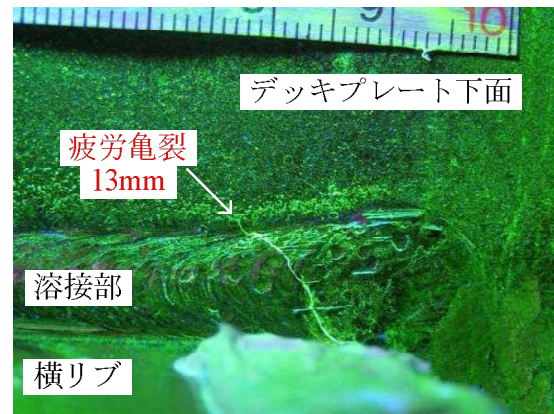
(a) N=70 万回時, 南側



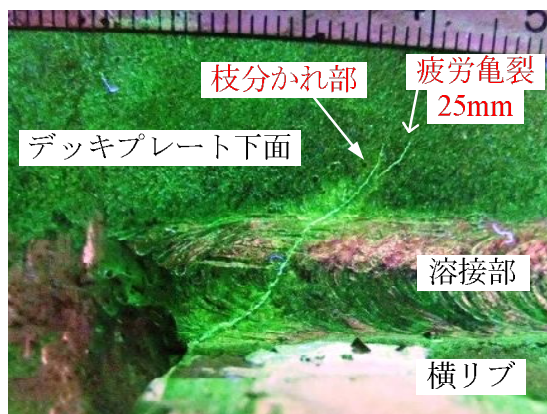
(b) N=70 万回時, 北側



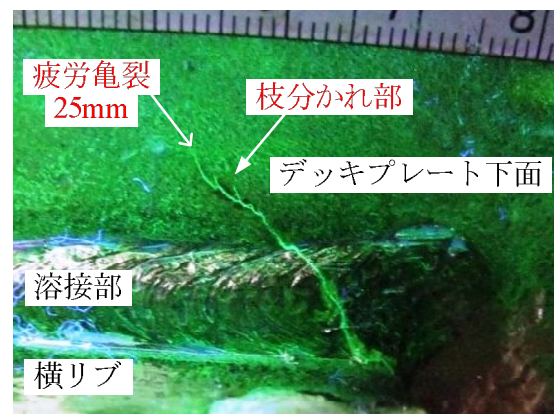
(c) N=110 万回時, 南側



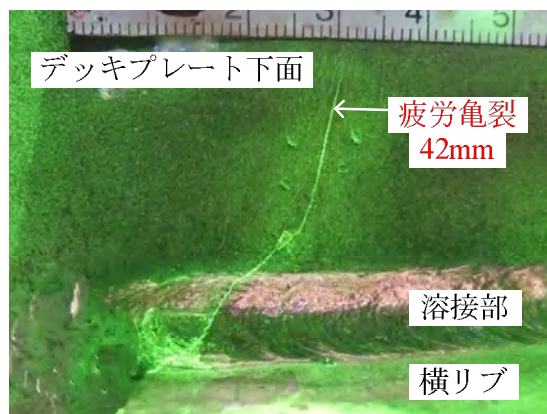
(d) N=110 万回時, 北側



(e) N=350 万回時, 南側



(f) N=350 万回時, 北側

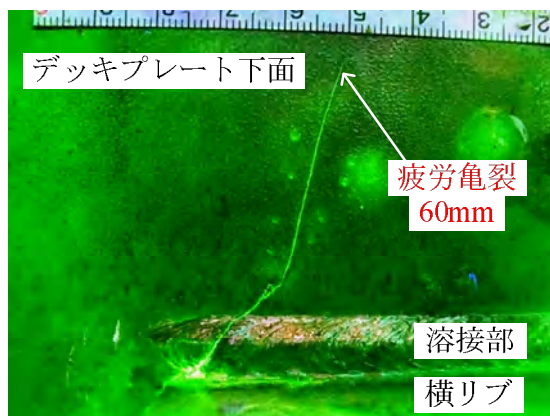


(g) N=1160 万回, 片側アングル補強時, 南側

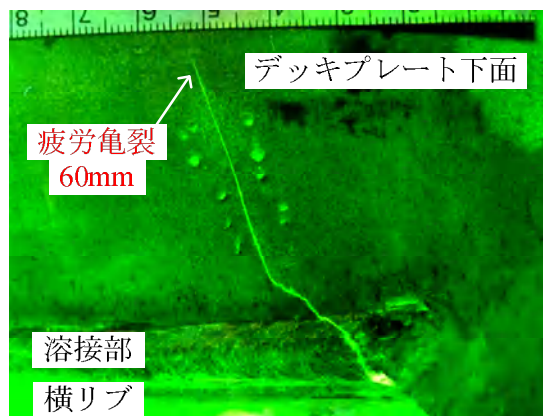


(h) N=1160 万回, 片側アングル補強時, 北側

写真-2 リブ1のスリット上部に生じた疲労亀裂の進展状況

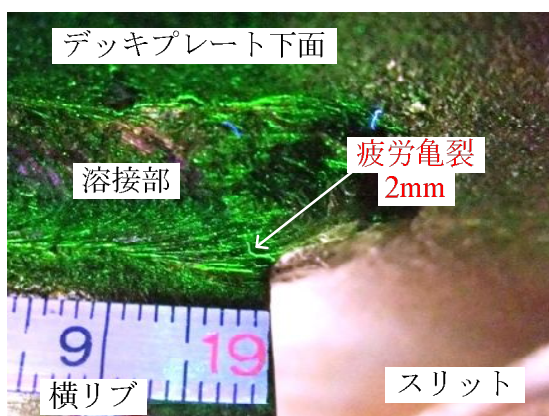


(i) N=2180 万回時, 南側

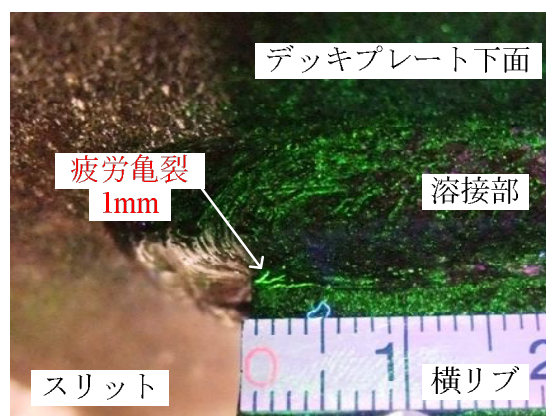


(j) N=2180 万回時, 北側

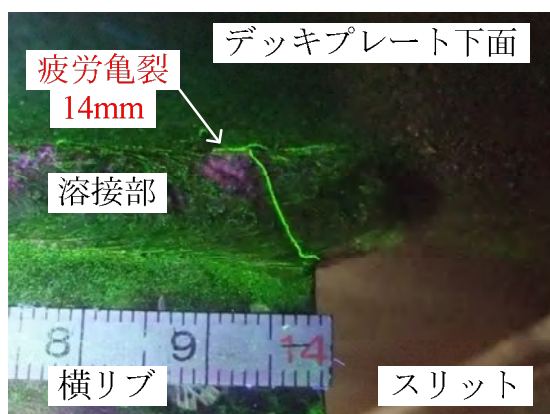
写真-2 (続き) リブ 1 のスリット上部に生じた疲労亀裂の進展状況



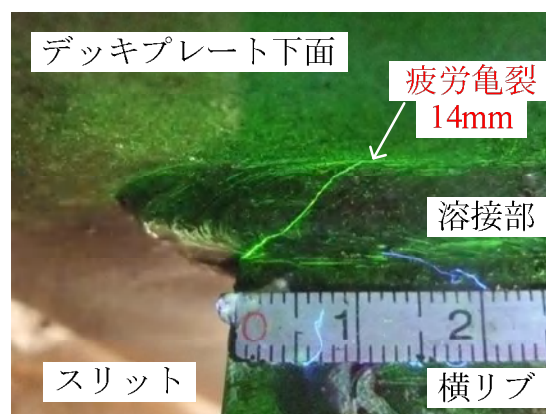
(a)アングル材除去後 10 万回時(N=550 万回)
南側



(b)アングル材除去後 10 万回時(N=550 万回)
北側

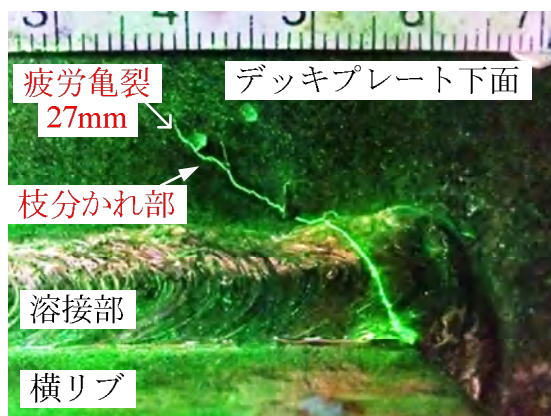


(c)アングル材除去後 70 万回時(N=610 万回)
南側

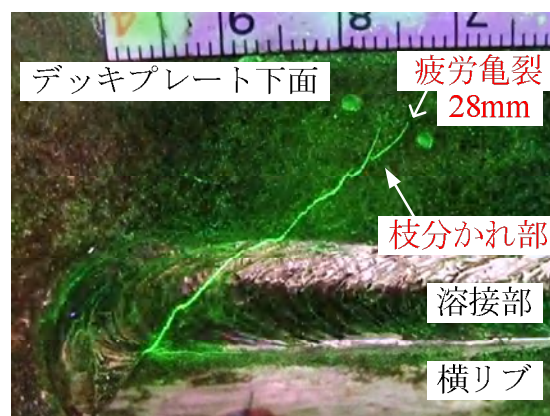


(d)アングル材除去後 70 万回時(N=610 万回)
北側

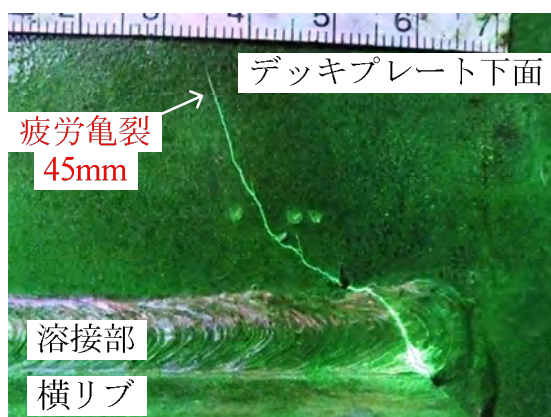
写真-3 アングル材除去後にリブ 8 のスリット上部に生じた疲労亀裂の進展状況



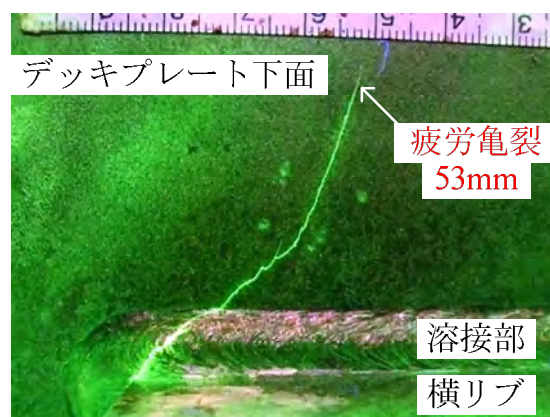
(e)アングル材除去後 670 万回時(N=1210 万回)
南側



(f)アングル材除去後 670 万回時(N=1210 万回)
北側



(g)アングル材除去後 1640 万回時(N=2180 万回)
南側



(h)アングル材除去後 1640 万回時(N=2180 万回)
北側

写真-3 (続き) アングル材除去後にリブ 8 のスリット上部に生じた疲労亀裂の進展状況

4.2 疲労強度

表-3 と図-8 にスリット上下部溶接部④または⑥で実測された応力範囲と疲労寿命 N_d , N_D , N_p を示す. 疲労寿命 N_d は疲労亀裂発見時の応力繰返し数を, N_D は疲労亀裂がデッキプレートへ進展した時の応力繰返し数を, N_p は疲労亀裂がデッキプレートを貫通した時の応力繰返し数を表す. なお, スリット上下部溶接部の④と⑥の応力は公称応力ではないので, ホットスポット応力による疲労寿命評価¹⁰⁾にならって, スリット上下部溶接部の疲労強度等級の評価を試みた. これにより, 実働応力と強度等級による寿命推定が可能となる.

スリット上部溶接部の疲労強度は, 疲労亀裂発見

表-3 スリット上下部溶接部の応力範囲と
疲労寿命 N_d , N_D , N_p

リブ	スリット	溶接部の 応力範囲 $\Delta\sigma$ (MPa)	疲労寿命 (Mcycles)		
			発見 N_d	デッキ進展 N_D	破断 N_p
1	上部	144	0.7	1.1	>19.8
	下部	90	>19.8	—	—
8	上部	178	0.1	0.7	>16.4
	下部	36	>16.4	—	—

寿命 N_d で評価すると F 等級, デッキプレートへの進展寿命 N_D で評価すると, D 等級程度である. さらに, デッキプレート貫通寿命 N_p で評価すると C 等級以上となる. また, スリット下部溶接部は, 疲労亀裂発見寿命 N_d で評価すると D 等級以上となる.

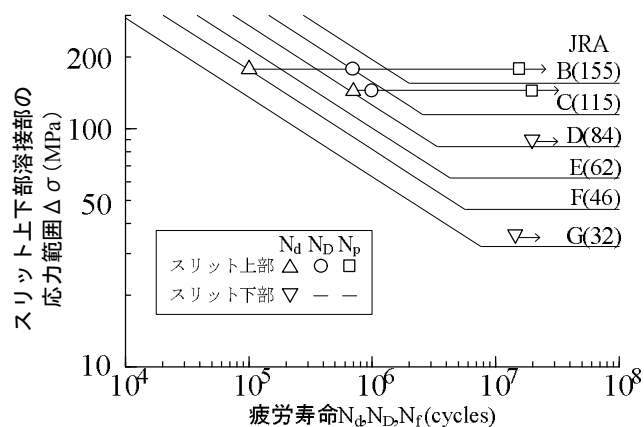


図-8 スリット上下部溶接部の応力範囲と
疲労寿命 N_d , N_D , N_p

5. 結論

A 橋と同様なバルブリブと横リブの交差部のディテールを有するバルブリブ鋼床版試験体を用いて、静的載荷試験と疲労試験を行い、交差部の疲労挙動を解明し、予防保全対策、事後保全対策の両面から片側アングル補強効果について検討した。以下に得られた主な結論を示す。

5.1 静的載荷試験より

- 1) バルブリブの横リブスリット側に載荷すると、横リブウェブスリット開口部のせん断変形により、スリット上下部の溶接部に引張応力が発生する。
- 2) スリット上部溶接部の引張応力の方がスリット下部より大きい。
- 3) 片側アングル補強により、スリット上部溶接部の応力が補強前の 1/3 程度に低減された。スリット下部溶接部の応力は補強前の引張応力から圧縮応力に変化した。

5.2 疲労試験より

(1) 疲労挙動

- 1) 疲労亀裂は横リブスリット上部溶接部の横リブコバ面側止端から発生し、溶接部を斜め上方に横切り、デッキプレートまで進展した。なお、スリット下部からは疲労亀裂は発生していない。
- 2) スリット上部の疲労亀裂はデッキプレートに進展後、橋軸方向に向きを変えて進展した。
- 3) スリット上部の疲労亀裂の進展速度は、デッキプレートに進展後は、進展前の 1/4 程度に減少した。
- 4) スリット上部の疲労亀裂はデッキプレートに下面長さで 44mm まで進展したが、デッキプレートの上面には貫通していない。
- 5) スリット上部溶接部の疲労強度は疲労亀裂発見寿命 N_d で評価すると F 等級、デッキプレートへの進展寿命 N_D で評価すると D 等級、デッキプレート貫通寿命 N_p で評価すると C 等級以上となる。
- 6) スリット下部溶接部の疲労強度は疲労亀裂発見寿命 N_d で評価すると D 等級以上である。

(2) 片側アングル補強効果

- 1) スリット上部の溶接部から発生する疲労亀裂に対して、片側アングル補強により、疲労亀裂発生寿命が約 8 倍以上に延長され、十分な疲労亀裂発生防止（予防保全）効果が確認された。
- 2) スリット上部溶接部から発生し、デッキプレートに進展して、デッキプレート上面には貫通していない比較的大きな疲労亀裂（デッキプレー

ト下面長さが 27mm 程度）に対して、片側アングル補強により、疲労亀裂の進展を完全に防止できる事後保全効果が確認された。

なお、以上の結論は、本研究で用いた A 橋タイプの構造ディテールと、せん断変形によりスリットの上下溶接部に引張応力が生じるような載荷条件の下で得られたものであり、異なる構造ディテールや載荷条件についてはさらに検討が必要と考えられる。

謝辞

最後に関西大学学生の西垣祐二氏、別所和哉氏、村本純一氏には本研究の中の実験に関して多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会鋼構造委員会：厚板溶接継手に関する調査研究小委員会報告書，pp.155-157，2007。
- 2) 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。
- 3) 三木千壽，館石和雄，高木千太郎：鋼床版縦リブ・横リブ交差部の応力実測とその分析，構造工学論文集，Vol.37A，pp.1163-1168，1991。
- 4) 岩崎雅紀，寺尾圭史，深沢誠：開断面縦リブを使用した鋼床版横リブの疲労損傷防止検討，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1021-1029，1992。
- 5) 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。
- 6) 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。
- 7) 崎谷浄，杉山裕樹，川村勝，迫田治行，山岡大輔，坂野昌弘：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。
- 8) 夏秋義広，讃岐康博，中村香澄，宮崎幸雄，坂野昌弘：鋼床版バルブリブと横リブ交差部の実働応力計測，鋼構造年次論文報告集，第 16 巻，pp.479-486，2008。
- 9) 阪神高速道路公団：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策，pp.10，2005。
- 10) (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，pp.16-17，1993。

(2009 年 9 月 24 日受付)