

バルブリーブ鋼床版横リブスリット下部の疲労き裂の発生進展挙動

Fatigue cracking behaviour at the lower part of transverse rib slit in orthotropic steel deck with bulb ribs

山岡大輔*, 坂野昌弘**, 夏秋義広***, 中村香澄****, 水野洋幸****

Daisuke Yamaoka, Masahiro Sakano, Yoshihiro Natsuaki, Kasumi Nakamura, Hiroyuki Mizuno

*研究当時 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)

In this study, we investigated the fatigue cracking behaviour at the lower part of the transverse rib slit of the intersection of the bulb rib and the transverse rib, through fatigue tests using an orthotropic steel deck specimen whose dimensions and configurations are identical to the actual bridge. Also, we verified the effect of the reinforcing method using angle steels. As a result, the fatigue crack occurred at the lower part of the transverse rib slit under the condition that wheels loaded just on bulb ribs, and propagated in various directions which depend on the loading position of wheels. By applying the angle steel reinforcement, the fatigue life of the welded joint between the bulb rib and the transverse rib was improved more than five times as that without the reinforcement.

Key Words: orthotropic steel deck, bulb rib, fatigue crack, fatigue test

キーワード: 鋼床版, バルブリーブ, 疲労き裂, 疲労試験

1. はじめに

バルブリーブを有する鋼床版では, バルブリーブと横リブの交差部の横リブスリット下部に発生する疲労き裂が圧倒的に多く, そのき裂は横リブウェブを斜め上方, 水平, 斜め下方と様々な方向に進展している¹⁾. 文献 2), 3) ではバルブリーブと横リブの交差部を対象として, 実物大試験体を用いた疲労実験が行われているが, 実橋で最も発生数の多い横リブスリット下部に生じる疲労き裂の発生進展挙動は再現されていない.

文献 4) では, S 橋¹⁾と同じ構造ディテールの実物大バルブリーブ鋼床版試験体を用いて静的載荷試験を行い, 横リブスリット下部の応力性状に及ぼす載荷位置の影響について検討した. 文献 5), 6) では, 文献 4) と同様の試験体を用いて疲労試験を行い, 横リブスリット下部に生じる疲労き裂の発生進展挙動と, そのき裂に対する片側アングル補強の予防保全および事後保全効果について検討した.

本稿は, 以上の文献 4) ~6) をとり纏め, 再整理したものである.

2. 静的載荷試験⁴⁾

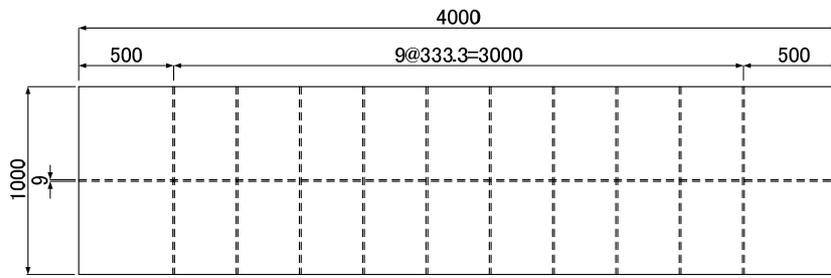
2.1 静的載荷試験方法

図-1 に試験体の形状と寸法を示す. S 橋のバルブリーブと横リブの交差部と同じ構造の実物大試験体を製作した. 試験体には実橋と同様に横リブ 1 本に対してバルブリーブを 8 本設けている. 横リブスリット下部のスカーラップ半径は 25mm である.

図-1 に静的載荷試験の載荷位置を示す. 実橋での応力計測結果では, 横リブウェブの面外曲げの影響がほとんど認められなかったことから¹⁾, 載荷位置は横リブ直上とし, 橋軸直角方向に移動させた D-1~15 の計 15 パターンで静的載荷試験を行った. 載荷範囲はダブルタイヤ 1 組を想定し, 厚さ 40mm, 大きさ 200mm×200mm のクロロプレンゴム板を 2 枚用いて載荷した. 荷重は P=100kN (ゴム板 1 枚あたり 50kN) とした.

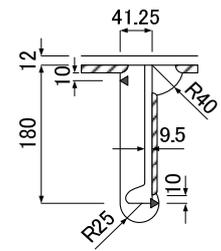
2.2 静的載荷試験結果

図-2 に載荷位置と横リブスリット上下部の応力の関係を示す. リブ 1 は常に圧縮応力が発生し (スリット下

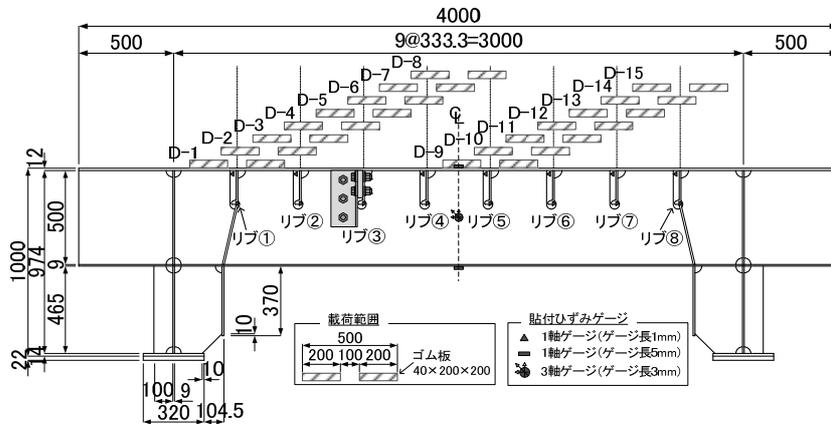


(1) 平面図

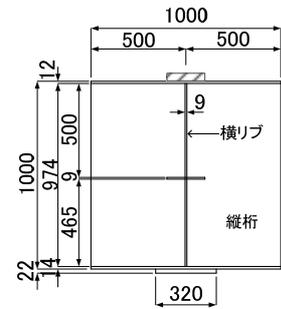
寸法単位: mm



(3) バルブリップと横リップの交差部詳細

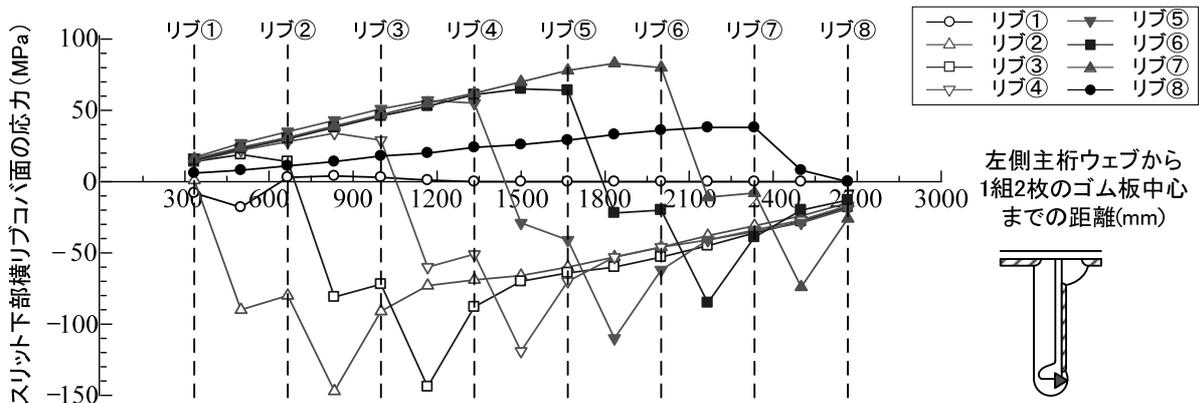


(2) 側面図

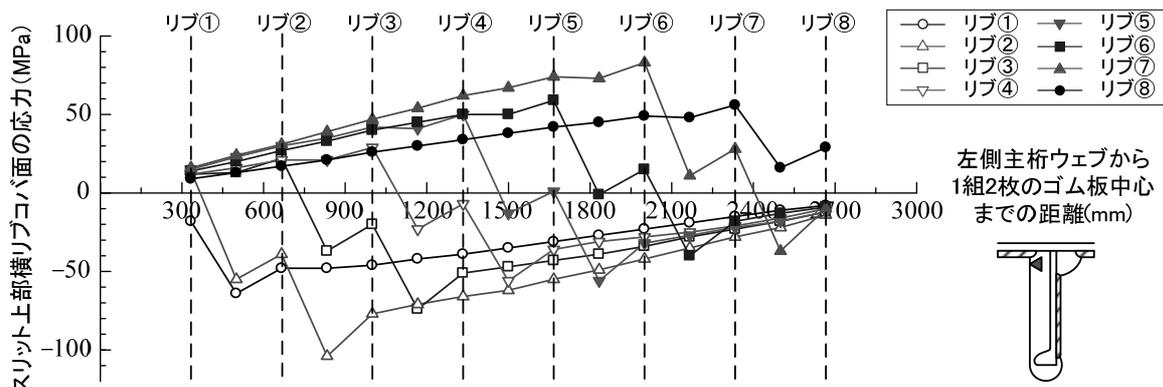


(4) 側面図

図-1 試験体の形状と寸法, 静的荷重試験荷重位置およびひずみゲージ貼付位置



(1) スリット下部コバ面



(2) スリット上部コバ面

図-2 荷重位置 (2枚のゴム板の中心) と横リップスリット上下部コバ面の応力の関係

部の応力は補剛材の影響でほとんど0)、逆にリブ8は常に引張応力が発生している。ただし、ともにそれほど大きくはない。リブ2~7はバルブリブのスリット側(図-2中の左側)の荷重で引張応力が発生し、その値はバルブリブ直上荷重に近づくにつれて大きくなっている。直上荷重を含めてバルブリブのスリット反対側(図-2中の右側)の荷重では圧縮応力が発生し、直上荷重時に大きな圧縮応力が発生し、直上荷重からスリット反対側(図-2中の右側)に離れるにつれて小さくなっている。

また、直上荷重時の圧縮応力はスリット下部の方がスリット上部に比べて1.5~2倍程度大きくなっている。

図-3に実橋のスリット部の疲労き裂発生箇所数と、荷重位置がD-4~7の場合のスリット下部コバ面の応力範囲を示す。実橋のスリット下部の疲労き裂発生箇所数は、リブ3(26箇所)、リブ2(14箇所)、リブ4(4箇所)の順で多く、リブ3と2がほとんどである。また、荷重位置D-4~7と比較すると、D-6(リブ3と4の直上荷重)の場合に応力範囲の大きさの順番と疲労き裂発生箇所数の多い順番がよく一致している。したがって、実橋では、実験のD-6にあたる荷重位置が、き裂の発生に最も影響していると考えられる。D-7(リブ4を挟んだ荷重)の場合にはき裂発生箇所が多い上位の2つのリブまで同じ傾向である。

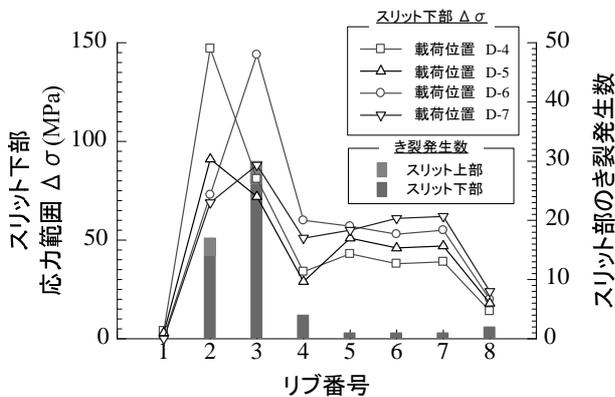


図-3 実橋のスリット部の疲労き裂発生箇所数と荷重位置がD-4~7の場合のスリット下部コバ面の応力範囲

3. 疲労試験^{5), 6)}

3.1 疲労試験方法

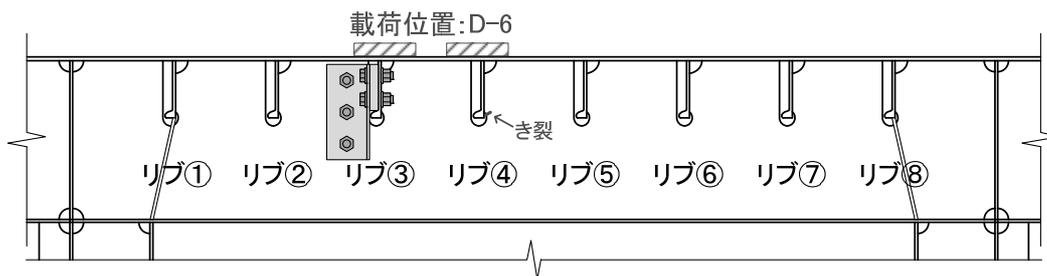
疲労試験は、2.2より横リブスリット下部の応力分布と実橋の疲労き裂発生箇所数の分布が最も一致している荷重位置D-6(リブ3と4の直上)から行い、その後、実橋で2番目にき裂が多いリブ2でき裂を再現させるため、D-4(リブ2と3の直上)に変更した。次に、引張応力が生じる状態でのき裂発生の有無を確認するために、D-9(リブ5を跨ぐ位置)に変更した。さらに、引張応力下でのき裂進展方向を確認するために、D-12(リブ6と7の直上)、D-9(リブ5を跨ぐ位置)の順で荷重した。荷重範囲は、T荷重の200kNの1/2に衝撃を考慮して1.4を掛け、ダブルタイヤ1組(1輪)で $\Delta P=140\text{kN}$ (20~160kN)とした。荷重位置D-6では、最初にスリット部の応力範囲が最も大きいリブ3に片側アングル補強(図-1)を施し、その予防保全(き裂発生防止)効果を検討した。また、無補強で発生した疲労き裂がある程度進展する度に、その状態に対する事後保全効果を検証するため、片側アングル補強を施した。

3.2 疲労試験結果

(1) 疲労き裂の発生進展挙動

図-4に荷重位置ごとの疲労き裂の発生進展状況を示す。荷重位置D-6では200万回繰返し荷重後、予防保全として片側アングル補強を施していたリブ3のスリット部に疲労き裂は発生せず、荷重直下のリブ4の横リブスリット下部に疲労き裂が発生した(図-4(1))。リブ3のアングル材除去後40万回の繰返し荷重後に、荷重直下のリブ3のスリット下部からも疲労き裂が発生した(図-4(2))。なお、リブ4のき裂は斜め上に(写真-1)、リブ3のき裂は水平に進展した後、停留した。次に、荷重位置をリブ2と3の直上に荷重するD-4に変更したところ、荷重直下のリブ2の横リブスリット下部に疲労き裂が発生し、水平に進展した(図-4(3)、写真-2)。リブ3のき裂は、斜め上に向きを変えて再び進展したが(写真-3)、リブ4のき裂は停留した。

今度は、荷重位置をD-9に変更して200万回繰返し荷重したが、リブ5~7の横リブスリット部に疲労き裂は



(1) 荷重位置 D-6 で 200 万回荷重後

図-4 荷重位置と疲労き裂の発生進展状況

発生しなかった (図-4 (4)). リブ2のき裂は停留していたが, リブ3と4のき裂は上方に向きを変えて進展した.

次に, リブ6にき裂を発生させるために荷重位置をD-12に変更したところ, 60万回の繰返し荷重で荷重直

下のリブ6の横リブスリット下部に疲労き裂が発生した (図-4 (5)). リブ2と3のき裂は停留していたが, リブ4のき裂は微小に進展した. 荷重位置D-12で170万回の繰返し荷重後, リブ6のき裂の表面長さが北側で7mm, 南側で3mm程度まで進展したところで, 引張応

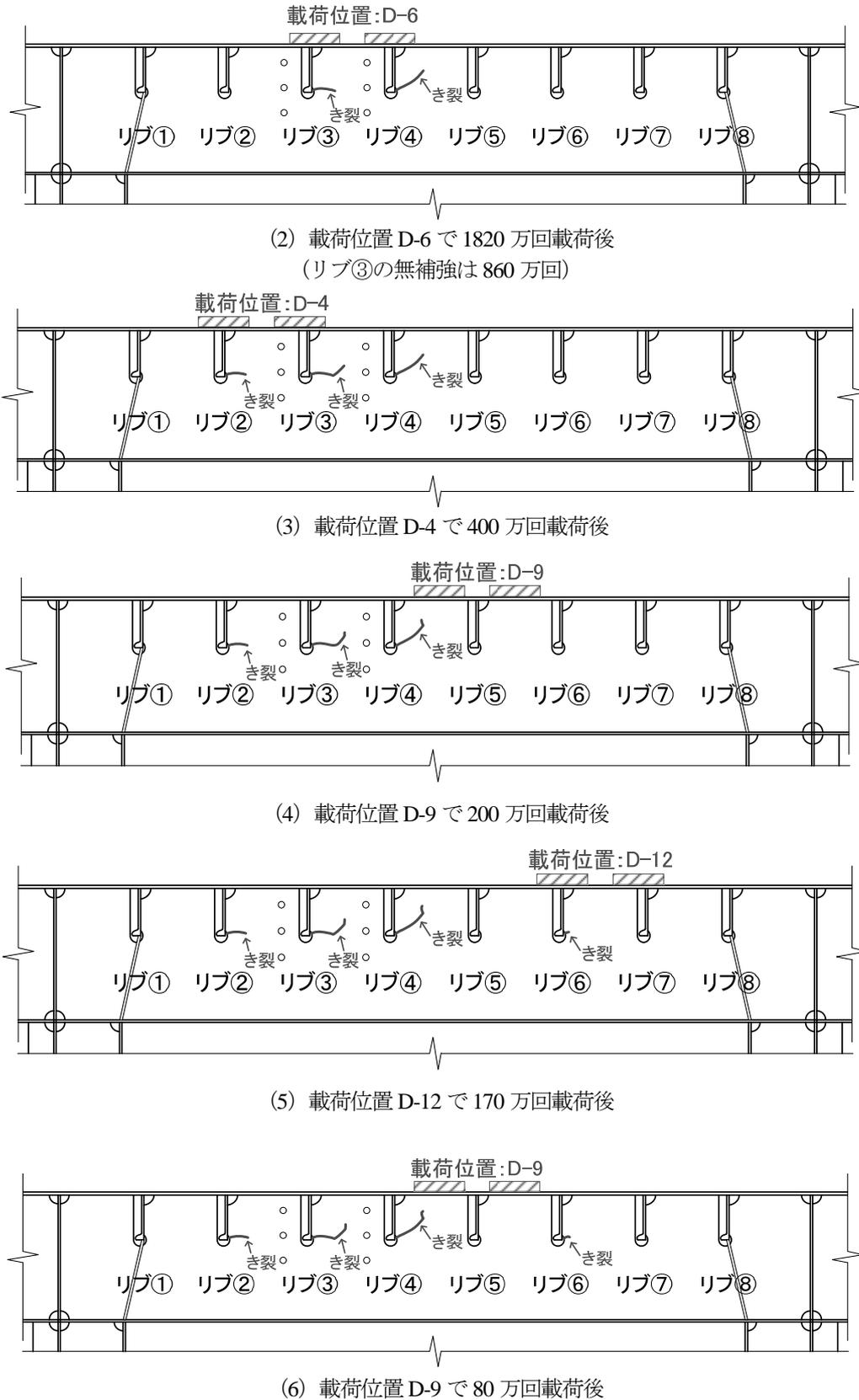


図-4 (続き) 荷重位置と疲労き裂の発生進展状況

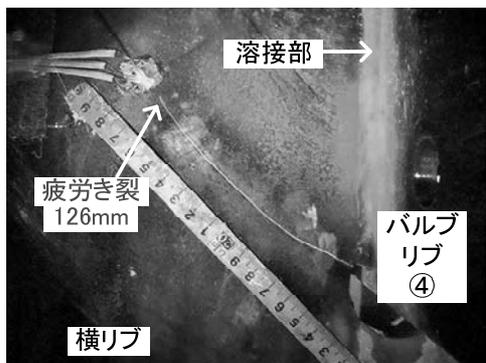


写真-1 リブ4スリット下部のき裂進展状況 (1990万回載荷後)

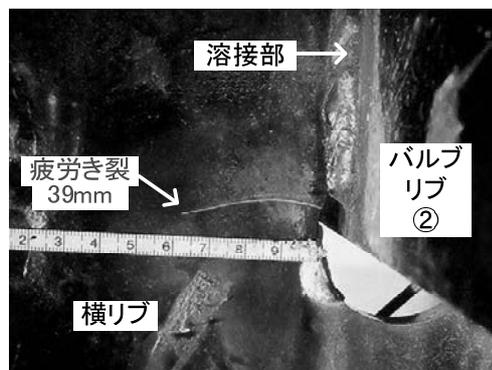


写真-2 リブ2スリット下部のき裂進展状況 (1990万回載荷後)

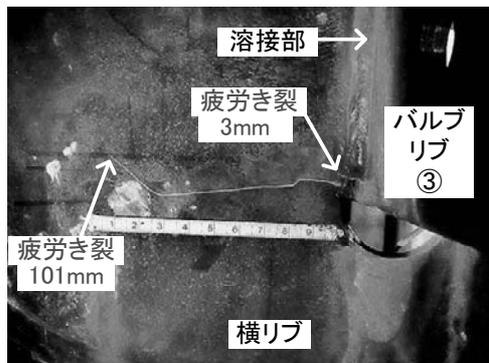


写真-3 リブ3スリット下部のき裂進展状況 (1990万回載荷後)

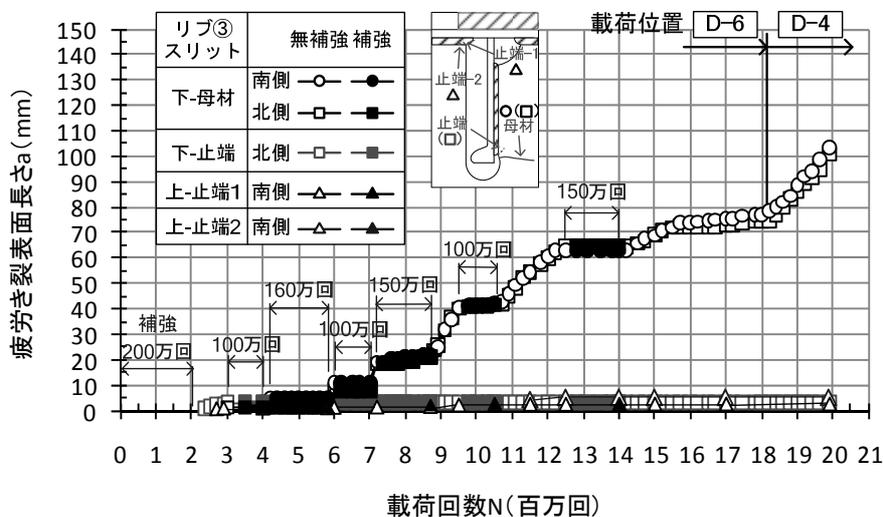
力下でのき裂進展方向を確認するために、荷重位置をD-9に戻した。その後、リブ6のき裂は斜め下に向きを変えて進展した(図-4(6))。

(2) 片側アングル補強効果

図-5に疲労き裂の表面長さと荷重回数との関係を示す。図-5(1)より、予防保全として片側アングル補強を施していたリブ3のスリット部では、200万回繰返し荷重

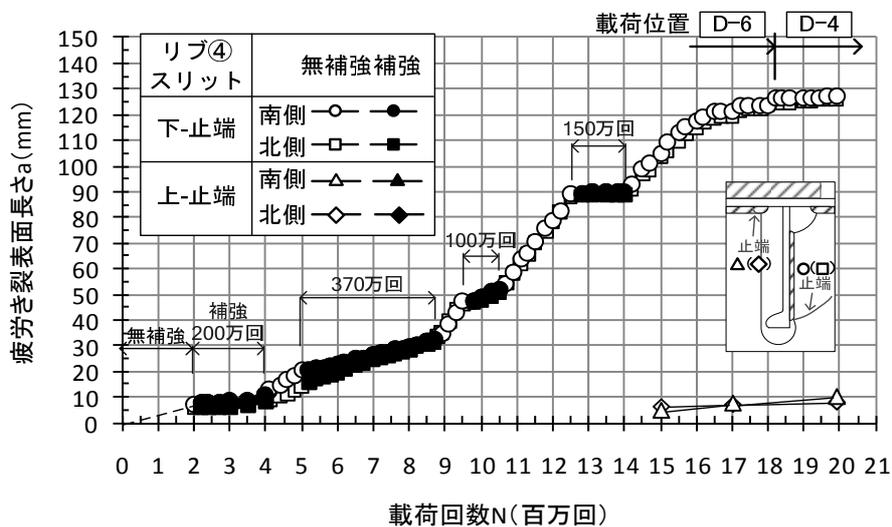
したが疲労き裂は発生せず、片側アングル除去後40万回の繰返し荷重でスリット下部に表面長さ1mmの疲労き裂を発見した。補強時の200万回の繰返し荷重で疲労き裂が発生しなかったことから、疲労被害は無視できると考えられるため、疲労き裂発生寿命が5倍以上延長されたことになり、十分な疲労き裂発生防止(予防保全)効果が確認された。

また、図-5(1)、(2)より、横リブのスリット下部から発生し、横リブウェブに進展した疲労き裂に対して、片側アングル補強により、リブ3では、き裂表面長さが10mm程度以下であれば進展が停止し、20mm程度で進展速度が $45.5 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ から $1.9 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ に約1/25に低下した。また、40mm程度では進展速度が $23.6 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ から $1.3 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ に約1/18に低下し、60mm程度では進展がほぼ停止した。リブ4では、き裂表面長さが10mm程度で進展速度が $3.3 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ から $1.6 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ に約1/2に低下し、20mm程度で進展速度が $7.8 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ から $4.0 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ に



(1) リブ3スリット部

図-5 疲労き裂の表面長さと荷重回数との関係



(2) リブ4スリット部

図-5 (続き) 疲労き裂の表面長さと載荷回数との関係

約 1/2 に低下した。また、50mm 程度では進展速度が $15.1 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ から $4.1 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ に約 1/4 に低下し、90mm 程度では進展がほぼ停止した。したがって、片側アングル補強のみでも十分な疲労き裂進展抑制（事後保全）効果があることが確認された。

4. おわりに

本研究で得られた主な結論を以下に示す。

静的載荷試験結果より

- (1) バルブリブの直上に載荷すると、横リブスリット上下部ともに大きな圧縮応力が発生する。
- (2) バルブリブ直上載荷時の圧縮応力は、横リブスリット下部の方がスリット上部に比べて 1.5~2 倍程度が大きい。

疲労試験結果より

- (3) 疲労試験でき裂が発生したリブは全て荷重が直上であることから、実橋でき裂が発生するリブは輪荷重直下のみと考えられる。
- (4) ダブルタイヤ直下の横リブスリット下部で発生したき裂の内、ダブルタイヤの間に向かうき裂は横リブウェブを水平に進展し、ダブルタイヤの外側に向かうき裂は横リブウェブを斜め上に進展する。
- (5) ダブルタイヤ直下で発生したき裂は、ダブルタイヤが横リブスリット側に載荷された場合に横リブウェブを斜め下に進展する。
- (6) 片側アングル補強により、横リブスリット下部の溶接部から発生する疲労き裂に対して、発生寿命が約 5 倍以上延長され、十分な疲労き裂発生防止（予防保全）効果があることが確認された。
- (7) 片側アングル補強により、横リブスリット下部から

発生し横リブウェブに進展する疲労き裂に対して、き裂進展速度が 1/2 以下に低下し、片側アングル補強のみでも十分な疲労き裂進展抑制（事後保全）効果があることが確認された。なお、当然、ストップホールを併用すれば、文献 2) で示されたように疲労き裂の進展は完全に防止できると考えられる。

参考文献

- 1) 夏秋義広, 讃岐康博, 中村香澄, 水野洋幸, 坂野昌弘: 鋼床版バルブリブと横リブ交差部の補強効果の確認, 鋼構造年次論文報告集, 第 17 巻, pp.307-314, 2009.
- 2) 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橋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.
- 3) 山岡大輔, 坂野昌弘, 夏秋義広, 野中砂男, 中川圭正, 中村香澄: 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, 構造工学論文集 Vol.56A, pp.838-849, 2010.
- 4) 山岡大輔, 奥村優介, 坂野昌弘, 夏秋義広, 中村香澄, 水野洋幸: S 橋バルブリブ鋼床版試験体の疲労挙動, 土木学会第 64 回年次学術講演会概要集, I-134, 2009.
- 5) 山岡大輔, 平野貴之, 坂野昌弘, 夏秋義広, 中村香澄, 水野洋幸: S 橋バルブリブ鋼床版試験体の疲労挙動と補強効果, 平成 22 年度土木学会関西支部年次学術講演会概要集, I-16, 2010.
- 6) 山岡大輔, 坂野昌弘, 夏秋義広, 中村香澄, 水野洋幸: S 橋バルブリブ鋼床版横リブスリット下部の疲労き裂の再現, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, I-91, 2010.