

主応力方向が変化する桁形式橋梁主桁横桁交差部の疲労き裂進展挙動と疲労強度評価

森, 猛 / MORI, Takeshi

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

科学研究費助成事業 研究成果報告書

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

5

(発行年 / Year)

2017-06-01

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 1 日現在

機関番号：32675

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289147

研究課題名(和文)主応力方向が変化する桁形式橋梁主桁横桁交差部の疲労き裂進展挙動と疲労強度評価

研究課題名(英文) Fatigue Strength and Crack Initiation-Propagation Behavior of Web-Gusset Welded Joints on I-shaped Girder under Variation of Principal Stress Direction

研究代表者

森 猛 (MORI, Takeshi)

法政大学・デザイン工学部・教授

研究者番号：10157860

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,800,000円

研究成果の概要(和文)：荷重の移動に伴い主応力方向が変化する主桁・横桁交差部の主桁ウェブ側溶接止端部の応力性状、止端からの疲労き裂の発生・進展性状と疲労強度を明らかにする目的で、ウェブに面外ガセットを有するI断面桁試験体の定点荷重(4点曲げ)疲労試験と移動荷重疲労試験(輪荷重走行試験)を行っている。そして、最も大きい主応力が生じる溶接止端内の位置は荷重移動に伴って徐々に変化する、移動荷重下の疲労強度は、定点荷重下よりも25%程度低い、移動荷重下での疲労き裂は溶接止端に沿って進展する領域が長い、主応力直角方向ではなくさらに傾いた方向に進展する、などの結果を示している。

研究成果の概要(英文)： Fixed point load fatigue tests (four points bending tests) and the moving load fatigue tests (wheel load driving tests) on I-section girder specimens with web-gusset welded joints have been performed in order to make clear the stress properties, fatigue crack initiation and propagation behavior from the weld toe of the joint, and the fatigue strength under variation in principal stress direction. The test results suggested that the positions along weld toe in which the largest major principal stress occurs gradually changes by the load position, the fatigue strength under moving loads is lower around 20 to 30% than the strength under the fixed point loads, fatigue crack extending along the weld toe is long compared with that in fixed point loads, and the fatigue crack after leaving from the weld toe propagates in more inclined direction compared with the direction perpendicular to the principal stress one.

研究分野：橋梁を中心とした鋼構造とその接合部の強度、補修・補強と維持管理

キーワード：疲労強度 主応力方向 圧縮繰返し応力 移動荷重 面外ガセット

1. 研究開始当初の背景

国土交通省の資料によれば、我国における橋長 15m 以上の道路橋の数は約 16 万であり、その約 4 割を鋼橋が占める。さらにその内の 9 割以上が桁形式の橋梁である。鋼 I 断面桁橋梁には多くの種類の疲労損傷が報告されているが、それらの中でも主桁ウェブと横桁下フランジが交差する溶接部（以下、交差部と呼ぶ。）の主桁ウェブ溶接部に生じるき裂は、主桁応力と直角方向に進展するため、放置すれば落橋に至る可能性の高い危険な損傷である。

交差部の主桁ウェブの疲労強度は、面外ガセット溶接継手にモデル化した試験体に軸方向応力を繰返し作用させた 1 軸疲労試験により求められるのが通常である。しかし、当該箇所は、①主桁の面内曲げに起因する主桁ウェブ応力と荷重分配作用による横桁下フランジ応力が作用する 2 軸応力場となる、また②荷重の位置によってせん断応力の方向が反転することから主応力の大きさに変化はないもののその方向が瞬時に変化するという特徴がある。②のような応力場において、疲労き裂がどのように発生・進展するか、またその場合の疲労強度評価方法については、現象が複雑なためか、検討された例はほとんどなく、未だ明らかにされていない問題である。また、当該箇所には、圧縮の繰返し応力による疲労損傷も生じることが考えられるが、純粋な圧縮繰返し応力下の疲労き裂の発生・進展性状や疲労強度は明らかとなっていない。

2. 研究の目的

本研究では桁形式橋梁の横桁が交差する主桁ウェブの応力測定およびその部分を対象とした応力解析を行い、その応力性状を明らかにした上で、それを再現するための疲労試験を行い、主応力方向が瞬時に変化する交差部主桁ウェブにおける疲労き裂の発生・進展性状を明らかにするとともに、その疲労強度を明らかにすることにより、桁形式鋼梁の疲労安全性の向上に寄与する。

さらに、従来明らかとされていない、圧縮繰返し応力を受ける場合の疲労き裂の発生・進展性状と疲労強度を明らかとする。

3. 研究の方法

(1) 移動荷重を受ける鋼 I 桁ウェブガセット溶接部の応力性状

荷重の移動に伴い主応力方向が変化する応力場にある面外ガセット溶接継手の疲労強度評価法を確立するために必要と考えられる、移動荷重による鋼 I 断面桁ウェブガセット溶接部の応力性状について、移動輪荷重を用いた応力測定とそれを対象とした有限要素応力解析を行うことにより検討した。

試験体の形状・寸法を図-1 に示す。また、試験状況を図-2 に示す。図-3 は、有限要素解

析に用いた解析モデルの要素分割図である。

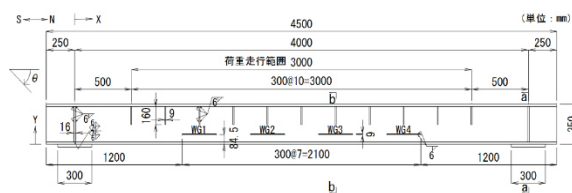


図-1 試験体の形状と寸法



図-2 移動輪荷重試験の状況

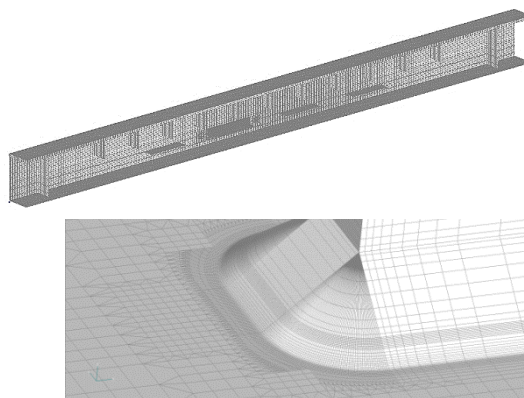


図-3 試験体モデルの要素分割図

(2) 移動荷重を受ける鋼 I 桁面外ガセット溶接部の疲労強度

荷重の移動に伴い主応力方向が変化する応力場にある面外ガセット溶接継手の疲労強度と疲労き裂の発生・進展挙動を明らかとする目的で定点荷重（4 点曲げ）疲労試験と移動荷重（輪荷重走行）疲労試験を行った。

試験体は、図-1 に示したものと同様である。図-4 に定点荷重疲労試験の状況を示す。



図-4 定点荷重疲労試験の状況

(3) 圧縮繰返し応力を受ける面外ガセット溶接継手の疲労き裂発生・進展挙動と疲労強度

圧縮繰返し応力を受ける面外ガセット溶接継手の疲労き裂発生・進展性状と疲労強度を明らかにする目的で、応力比を $R=-\infty$ (圧縮繰返し応力), -1 (両振り応力), 0 (引張繰返し応力) とした条件で軸方向荷重疲労試験を行った。また、き裂の発生・進展性状を明らかにする目的でビーチマーク試験も行った。

図-5 に試験体の形状と寸法を示す。図-6 は、ビーチマーク試験を行った試験体の破面の例を示している。

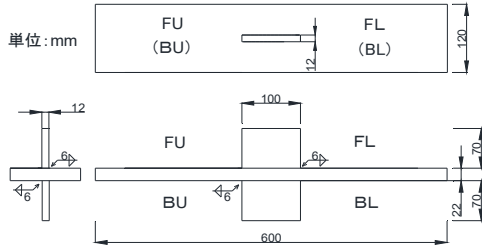


図-5 試験体の形状と寸法

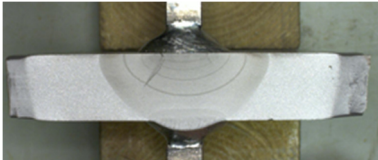


図-6 疲労破面の例

4. 研究成果

(1) 移動荷重を受ける鋼 I 桁ウェブガセット溶接部の応力性状

主な成果は以下のとおりである。

- ・ 梁理論ではせん断応力と主応力の角度は着目点において瞬時に変化・反転することになるが、実際には鉛直方向応力の影響で、なだらかに変化する。
- ・ せん断応力がなだらかに変化することにより、最大主応力の角度もなだらかに変化し、主応力が最大となる点も着目位置直上ではなく、そこから多少離れた荷重位置で生じる。

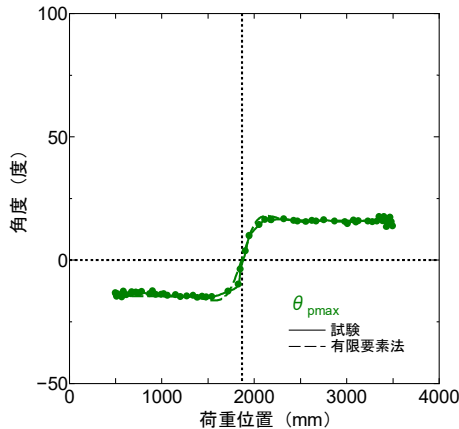


図-7 主応力方向の変化

- ・ 溶接止端での応力は、応力集中を受けない位置に比べて大きくなるものの、主応力方向の変化は小さくなる。
- ・ 最も大きい最大主応力が生じる溶接止端部内の位置は、主応力方向からみて最も近い位置である。溶接止端に沿う最大主応力発生位置と方向は、荷重の移動とともに変化する。

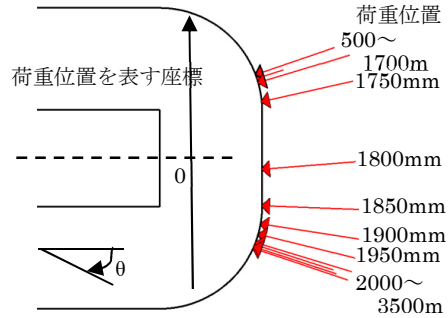


図-8 最大主応力発生位置と方向

- ・ 荷重位置に近いウェブ上部に位置するガセット溶接継手では、ウェブ下部に比べて鉛直方向応力が大きくなるため、主応力方向の変化が大きくなる。また、桁軸方向応力と鉛直方向応力の符号が同じとなるため、最小主応力の大きさが、ウェブ下部の最大主応力に比べて大きくなる。

(2) 移動荷重を受ける鋼 I 桁面外ガセット溶接部の疲労強度

主な成果は以下のとおりである。

- ・ 定点荷重では、従来から知られているように、引張繰返し応力場では最大主応力方向に対して直角方向、圧縮繰返し応力場では最小主応力方向に対して直角方向に疲労き裂が進展する。
- ・ 移動荷重を受ける場合、定点荷重に比べて、溶接止端において疲労き裂の発生数が多く、き裂が止端に沿って進展する領域が長い。
- ・ 移動荷重下では、回し溶接を巻き込むように疲労き裂が進展する。また、主応力直角方向よりもさらに傾いた方向に進展する。これは、溶接止端に沿う疲労き裂が長いために止端を離れる前からき裂が傾いているためと考えられる。

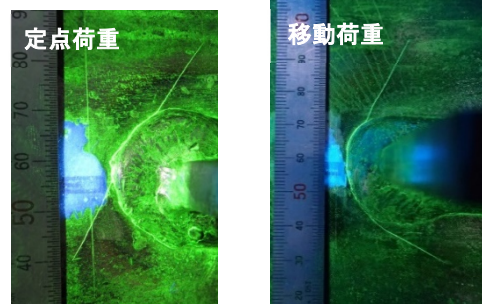


図-9 疲労き裂の進展

- ・移動荷重下では、回し溶接の端部から発生した疲労き裂が止端中央に対して潜り込むように進展し、溶接部にオーバーラップが生じているような疲労破面となることがある。
- ・従来から知られているように、軸方向応力とせん断応力の組み合わせ応力場での疲労試験結果は、軸方向応力範囲よりも主応力範囲で整理するのがよい。
- ・最大主応力範囲で整理した場合、主応力方向が変化する応力場にある面外ガセット継手の疲労強度は、主応力方向が変化しない応力場よりも、20~30%程度低い。その下限は JSSC 指針の疲労強度等級 G の疲労強度曲線よりも下に位置している。

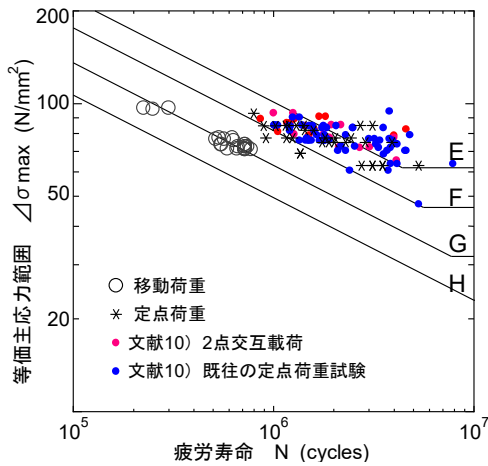


図-10 移動荷重疲労試験結果と他の試験結果の比較

- ・主応力方向が変化する応力場で疲労強度が低くなる原因は、最大主応力位置が溶接止端の広い範囲を移動するため定点荷重疲労試験に比べて疲労き裂が発生しうる領域が広くなることにあると考えられる。

(3) 圧縮繰返し応力を受ける面外ガセット溶接継手の疲労き裂発生・進展挙動と疲労強度

主な成果は以下のとおりである。

- ・圧縮繰返し応力下（応力比 $R=-\infty$ ）では、主板を貫通してある程度進展した後（試験体幅 120mm に対してき裂長さ 60~100mm）、疲労き裂は停留した。このような疲労き裂の停留を、残留応力を考慮した疲労き裂進展解析により定性的に再現した。



図-11 停留した疲労き裂

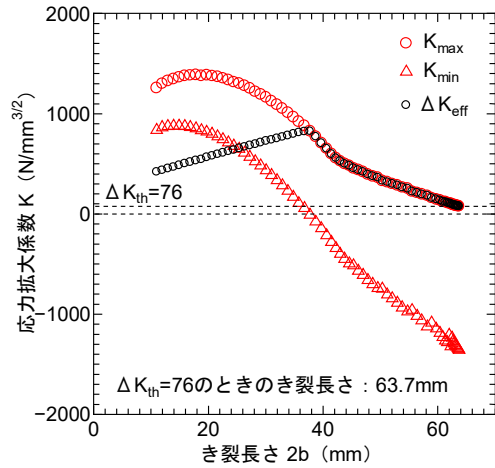


図-12 き裂停留の原因解析の結果

- ・疲労き裂が主板を貫通するまでの領域では、疲労き裂の進展形状・進展速度に対する応力比 ($R=-\infty, -1, 0$) の影響は認められなかった。

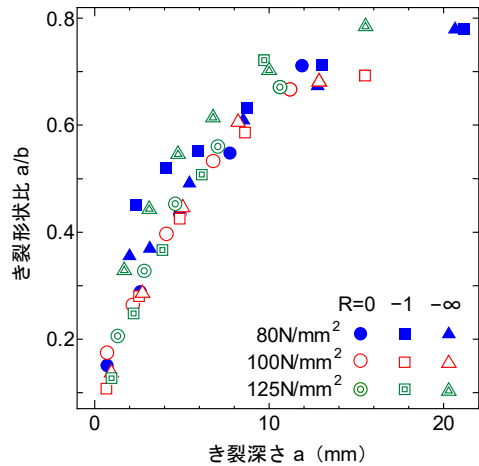


図-13 き裂形状比とき裂深さの関係

- ・応力比 ($R=-\infty, -1, 0$) によらず、主板を貫通するまでの疲労き裂進展速度 da/dN は、高い引張残留応力場で得られている JSSC 指針の平均設計曲線 ($da/dN-\Delta K$ 関係) とほぼ一致した。

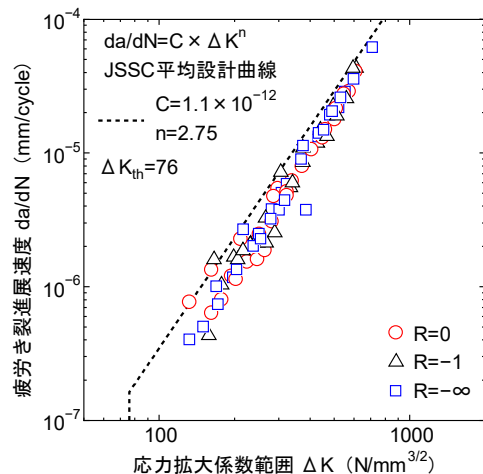


図-14 深さ方向の疲労き裂進展速度

・疲労き裂が主板を貫通するまでを疲労寿命とみなすと、応力範囲-疲労寿命関係に対する応力比 R ($-\infty, -1, 0$) の影響は認められなかった。

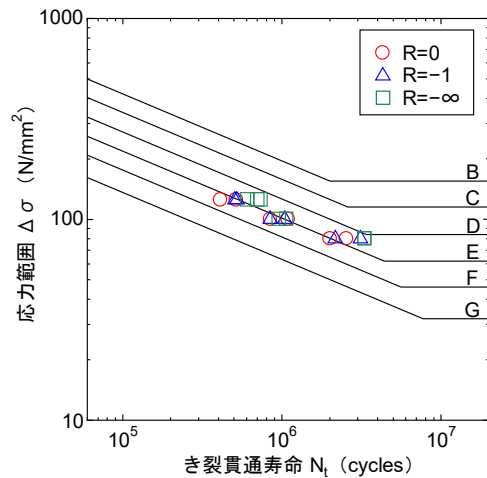


図-15 疲労試験結果 (き裂貫通寿命)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- ① 森 猛, 木村 直登: 圧縮繰返し応力を受ける面外ガセット溶接継手の疲労き裂発生・進展挙動と疲労強度, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, Vol.73, No.1, pp.278-287, 2017. ONLINE ISSN: 2185-4653
- ② 森 猛, 松井 喜昭, 佐藤 歩, 原田 英明, 村越 潤: 移動荷重を受ける鋼 I 桁面外ガセット溶接部の疲労強度, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, Vol.73, No.1, pp.294-312, 2017. ONLINE ISSN: 2185-4653
- ③ 森 猛, 松井喜昭, 平野秀一, 原田英明, 村越 潤: 移動荷重を受ける鋼 I 桁ウェブガセット溶接部の応力性状, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 査読有, Vol.72, No.2, pp.350-363, 2016. ONLINE ISSN: 2185-4653

〔学会発表〕 (計 5 件)

- ① 木村直登, 森 猛, 中山大輝: 軸方向圧縮応力を受ける面外ガセット溶接継手の疲労き裂の発生・進展挙動と疲労強度, 平成 28 年度土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会, 2016 年 9 月 7 日~9 日 (東北大学, 宮城県仙台市)
- ② 松井喜昭, 森 猛, 佐藤歩, 原田英明, 村越潤: 移動荷重を受ける鋼 I 桁ウェブガセット溶接部の疲労強度, 平成 28 年度土木学会全国大会第 71 回年次学術講演会,

2016 年 9 月 7 日~9 日 (東北大学, 宮城県仙台市)

- ③ 松井喜昭, 森 猛, 平野秀一, 原田英明, 村越潤: セン断力が反転する応力場にある面外ガセット溶接継手の疲労強度, 平成 27 年度土木学会全国大会 第 70 回年次学術講演会, 2015 年 9 月 16 日~18 (岡山大学, 岡山県岡山市)
- ④ Hirayama. S. and Mori, T : Fatigue Crack Propagation and Strength of Web – Gusset Welded Joints under Varied Principal Stress Direction, The 68th Annual Assembly of International Institute of Technology, XIII-2601-15 (17 pages), 2015 年 6 月 28 日~7 月 5 日 (フィンランド, ヘルシンキ)
- ⑤ 松井喜昭, 森 猛, 村越 潤, 平野 秀一: 面外ガセットを有する鋼桁ウェブの移動荷重による応力変動, 平成 26 年度土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会, 2014 年 9 月 10 日~12 日 (大阪大学, 大阪府豊中市)

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
法政大学デザイン工学部教授
森 猛 (MORI, Takeshi)
研究者番号: 1 0 1 5 7 8 6 0
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
なし
- (4) 研究協力者
松井 喜昭 (MATUI, Yoshiaki)
木村 直登 (KIMURA, Naoto)
原田 英明 (HARADA, Hideaki)
平野 秀一 (HIRANO, Shuichi)
佐藤 歩 (SATO, Ayumu)
村越 潤 (MURAKOSHI, Jun)