

平成 22 年 5 月 28 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007 ～ 2009

課題番号：19360208

研究課題名（和文） 鋼桁橋主桁・横桁交差部の疲労安全性照査法の構築

研究課題名（英文） Fatigue Strength Evaluation Formula for Welded Connections between Main Girder Web and Lateral Girder Flange

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

研究成果の概要（和文）：I断面桁式橋梁の主桁・横桁交差部の疲労損傷を防止することを目的とした疲労強度評価法について検討し、提案したものである。具体的には、純粋な2軸応力場を再現できる疲労試験システムを利用した交差部モデルの疲労試験を行い、多軸応力と方向が変化する応力を受ける溶接継手の疲労強度を明らかとしている。さらに、交差部構造の応力解析と疲労き裂進展解析を行うことにより、交差部の疲労安全性を精度よく評価するための照査方法を提案している。

研究成果の概要（英文）：This study aims at constructing fatigue strength evaluation formula for connections between main girder webs and lateral girder flanges in I-section girder. For this purpose, fatigue tests have been performed on the connection models using the fatigue test system which can reproduce the pure 2 axial stress field, and fatigue tests have been also carried out where main stress direction is varying. Furthermore, FEM stress analyses and fatigue crack propagation analyses have been performed on the models with various size and shape.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
年度			
年度			
総計	11,000,000	3,300,000	14,300,000

研究分野：鋼構造

科研費の分科・細目：維持管理工学

キーワード：主桁・横桁交差部、疲労損傷、疲労き裂進展解析、2軸荷重、ルート破壊、有効切欠き応力、疲労強度評価、主応力

1. 研究開始当初の背景

我国における橋長 15m 以上の道路橋の数は約 14 万であり、その約 4 割を鋼橋が占めている。さらにその内の 9 割が桁形式の橋梁である。I 断面の桁橋で報告されている疲労

損傷の中でも、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）には数多くの疲労損傷事例が報告されている。特に、主桁ウェブ溶接部に生じた亀裂は、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も高い非常に危険な損傷である。また、現在のところ、疲労損傷の報告はないものの、横桁フランジ端あるいは横桁をすみ肉溶接で接合した場合には、ルート起点とした疲労亀裂の発生も懸念されている。

交差部の疲労強度は、主桁ウェブ溶接部を面外ガセット溶接継手、横桁フランジ溶接部を荷重伝達型もしくは荷重非伝達型の十字溶接継手にモデル化した試験体に直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、主桁・横桁交差部は、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軸応力場となることが多い。また、横桁フランジには板曲げ応力が生じる恐れもある。

このような応力性状の特徴に加えて、主桁ウェブ溶接部においては、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方向が変化するという特徴もある。このような場合の疲労強度評価方法については検討された例がほとんどなく、未だ明らかにされていない問題である。

2. 研究の目的

ここで対象とするような部材交差部の疲労強度は、前述のように交差する部材に生じる応力の影響を無視して1軸状態の疲労試験から求められることが多い。しかし、先述のように鋼橋梁の疲労損傷が生じた部分は多軸応力状態、面外応力状態、また主応力の方向が変化する応力状態にある場合が多く、今後数多くの鋼橋の疲労に対する安全性を確保するためには、このような応力場での部材接合部の疲労強度を明らかにするとともに、その評価方法を確立する必要がある。

このような研究の妨げとなっていた問題の一つに実用に供することができる多軸応力試験システムを構築することが難しかったことが挙げられる。本研究では、既に開発している純粋な2軸応力場と任意の多軸応力場を再現できる疲労試験システムを利用して、鋼橋部材交差部をモデル化した試験体の疲労試験を行い、多軸応力と方向が変化する応力を受ける溶接継手の疲労強度を明らかとする。さらに、代表的な交差部構造を有するいくつかの形式の鋼橋を対象として応力解析を行うことにより、部材交差部の応力性状を明らかにする。以上の検討結果に基づき、部材交差部の疲労照査に用いるべき応力の算定式を示すとともに、それと比較すべき橋梁構造と交差部構造に応じた疲労強度を明らかにすることにより、交差部の疲労設計法あるいは疲労安全性照査方法を提示する。

3. 研究の方法

主桁・横桁交差部の主桁側溶接止端あるいは横桁側溶接止端が疲労き裂の起点となる場合の疲労強度評価法を確立することを目的に、交差部モデル試験体を作成し、2軸応力場で疲労試験を行うとともに、それを対象とした応力解析を行った。

主応力の方向が変化する応力場での疲労き裂進展挙動を明らかにする目的で、2本のアクチュエータを用いて、面外ガセットを有する桁試験の疲労試験を行った。

横桁フランジの溶接ルートから疲労き裂が生じる場合の疲労強度評価方法を明らかにする目的で、交差部モデルの2軸荷重疲労試験と板曲げ疲労試験を行うとともに、疲労強度に影響すると考えられる諸因子を考慮した疲労き裂進展解析を行った。

4. 研究成果

(1) 2軸応力の影響を考慮した主桁・横桁交差部の疲労寿命評価法の提案

鋼多主I桁橋の中桁ウェブと横桁フランジの交差部は、主桁作用による主桁ウェブ応力と荷重分配作用による横桁フランジ応力が作用する2軸応力状態となることが多い。研究代表者は疲労強度に対する2軸応力の影響を評価するために応力増加係数を提案している。すなわち、公称応力範囲に応力増加係数を乗じ、これを1軸荷重下で得られている疲労強度と比較する方法である。しかし、これまでの研究で対象とした交差部は限られており、実際の交差部の疲労寿命評価を行うためには、さらに検討が必要である。ここでは、板厚と溶接形状が応力増加係数に及ぼす影響を明らかにするためにFEM解析と疲労試験を行った。

主桁ウェブ側止端部の応力増加係数 α と横桁・主桁応力比 β を図-1に示す。 α と β は線形関係にある。横桁・主桁応力比1.0の時の応力は1軸応力状態（横桁・主桁応力比0）に比べて5~20%増加している。この応力の変化を疲労強度の変化として考えると、主桁ウェブ側止端部では、2軸応力状態となっても、疲労強度の低下は20%程度以下にすぎない。そのため、1軸応力状態と同じ方法で疲労強度評価を行うのが適当と考えられる。

図-2は、横桁フランジ側溶接止端の応力増加係数 α' と主桁・横桁応力比 γ の関係を示したものである。 α' と γ も線形関係にあり、その傾きは $\alpha-\beta$ 関係に比べて急である。疲労強度等級は、1~3ランク変化している。したがって、各因子による疲労強度の変化を明らかにして、それらを考慮した疲労強度評価法を構築する必要がある。

ここでは、横桁フランジの公称応力範囲に次式で与えられる応力増加係数を乗じて公称応力範囲を修正する。修正した応力範囲を

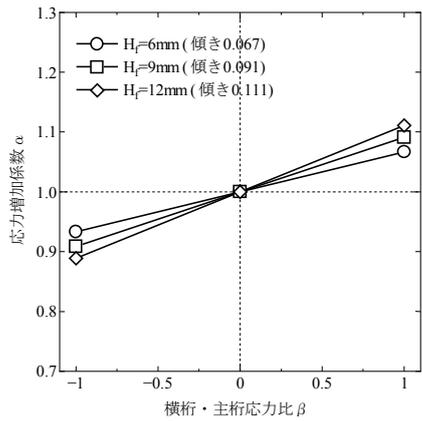


図-1

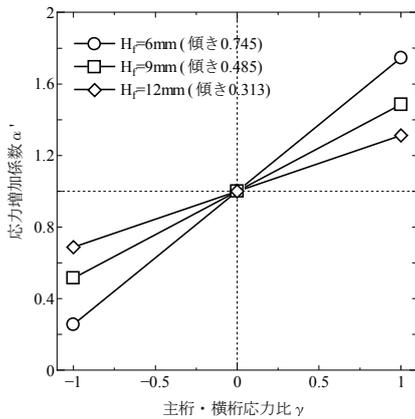


図-2

用い、疲労強度等級を JSSC 指針で定められている E 等級として疲労強度評価を行うことを提案する。

$$\alpha' = a \cdot \gamma + 1$$

$$a = k1 \cdot k2 \cdot k3 \cdot k4 \cdot k5 \cdot a0$$

$a0$: 基準モデルの傾き (0.608)

$$k1 = -0.160(tw/12) + 1.160 \quad 12 \leq tw \leq 21$$

(tw : 主桁ウェブの板厚)

$$k2 = -0.205(tf/tw) + 1.274 \quad 1 \leq tf/tw \leq 2$$

(tf : 横桁フランジの板厚)

$$k3 = -0.309(Hw/6) + 1.309 \quad 6 \leq Hw \leq 12$$

(Hw : 主桁ウェブ側の脚長)

$$k4 = -0.563(Hf/Hw) + 2.904 \quad 0.5 \leq Hf/Hw \leq 2.0$$

(Hf : 横桁フランジ側の脚長)

$$k5 = -0.064R + 1.064 \quad 1 \leq R \leq 6$$

(R : 溶接止端の曲率半径)

この評価式から求めた疲労強度と γ の関係を図-3 に示す。

(2) 主応力方向が変化する主桁・横桁交差部の疲労き裂進展性状

疲労試験には支間長 6.5m, ウェブ高 400mm の桁試験体を用いた (図-4)。ウェブには両面

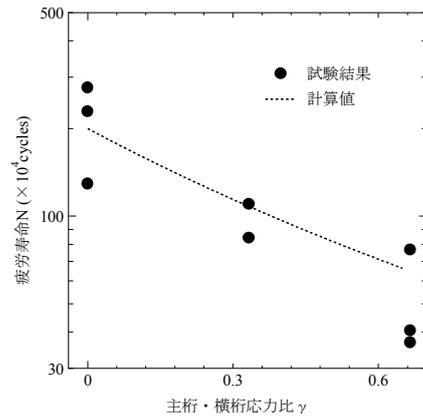


図-3

に 7 個のガセットを取り付けており、W 側から WG1~WG7 と呼ぶ。供試鋼材は、板厚 9mm の SM490YA (ウェブ材) と板厚 12mm の SM490YB (フランジ材) である。試験体はできる限り主応力方向の変化幅が大きくなるように設計した。

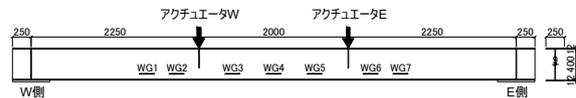


図-4

試験体の設置状況を図-5 に示す。疲労試験開始前に、アクチュエータ W あるいはアクチュエータ E 载荷時に、まわし溶接部中央の主応力方向の大きさと方向を計測した。計測には 3 軸のひずみゲージ (ゲージ長 3mm) を使用し、まわし溶接止端から 5mm 離れた位置に貼り付けた。図-6(a)は主応力方向が変化しない WG1, 図-6(b)は主応力方向が変化する WG4 での主応力図を示している。WG1 では主応力の大きさは異なるものの、主応力方向は一致している。一方、WG4 の W 側では、アクチュエータ W 载荷時に試験体長手方向に対して -6.9 度、アクチュエータ E 载荷時に 8.8 度傾いており、主応力方向の変動幅は 15.7 度である。

疲労試験では下限荷重 0kN, 上限荷重 220kN の正弦波を W と G で交互に载荷した。2 つのアクチュエータの载荷を 4 秒で 1 サイ



図-5

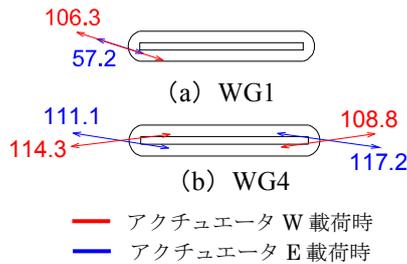


図-6

クルとしているため、それぞれのアクチュエータの繰返し速度は 0.5Hz となる。荷重は、支間中央のガセット (WG4) において、公称応力範囲が 90N/mm^2 程度となるように設定した。試験は、WG3~WG5 の全てのまわし溶接部においてガセットからき裂先端までの長さが 50mm に達するまで行った。

疲労き裂の観察結果を図-7 と図-8 に示す。これらの写真は磁粉探傷試験を行った際の状況を示している。図-7 は主応力方向が変化する箇所、図-8 は主応力方向が変化しない箇所の疲労き裂である。いずれの場合にも、疲労き裂はガセットのまわし溶接部止端から発生している。図中の点線は、主応力直角方向に進展する場合のき裂進展予想方向を示している。なお、白の点線は主応力が大きい方の荷重時の予想進展方向、赤の点線は主応力が小さい方の荷重時の予想進展方向を示している。主応力方向が変化しない箇所での疲労き裂は主応力方向と直交して進展している。しかし、主応力方向が変化する箇所では、疲労き裂はジグザグに進展しており、またその方向も主応力方向と直角ではない。

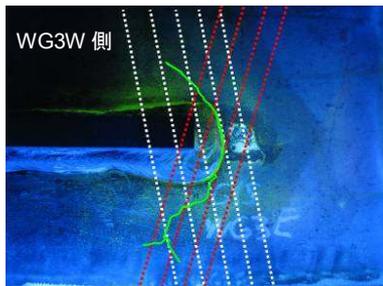


図-7

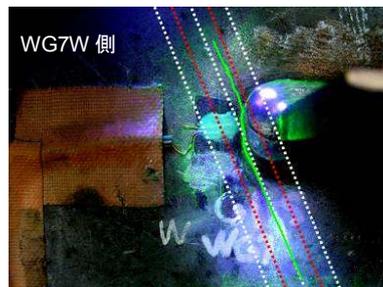


図-8

(3) 横桁フランジルートから疲労き裂が生じる場合の疲労強度評価方法

試験体の形状・寸法を図-9 に示す。図-9(a) に示す試験体は 2 軸荷重下と 1 軸荷重下の疲労強度の相違、図-9(b) に示す試験体は板曲げ荷重下と一軸荷重下の疲労強度の相違を調べるためのものである。

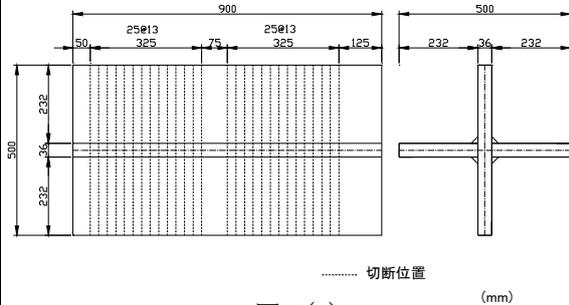


図-9(a)

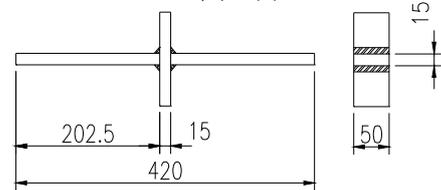


図-9(b)

図-10 に 2 軸荷重下で行った疲労試験の結果を示す。これは各試験体の破断に至るまでの荷重繰返し数 (疲労寿命) と 2 軸応力比の関係を示したものである。いずれの試験体、いずれの応力範囲においても、1 軸状態 (2 軸応力比 0) の疲労寿命に比べて、2 軸応力比 1 では長く、-1 では短くなっている。

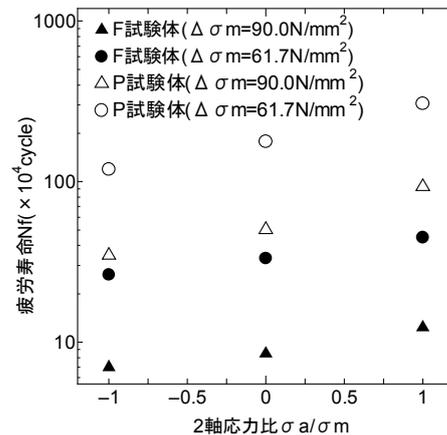


図-10

曲げ荷重下と一軸荷重下で行った疲労試験の結果を、試験体主板表面での公称応力範囲で整理して図-11 に示す。疲労寿命が 100 万回の際の応力範囲 (100 万回疲労強度) は引張の場合で 35N/mm^2 、曲げを受ける場合には 150N/mm^2 程度になっている。すなわち、板曲げを受ける場合の疲労強度は軸力

を受ける場合の約4倍となっている。

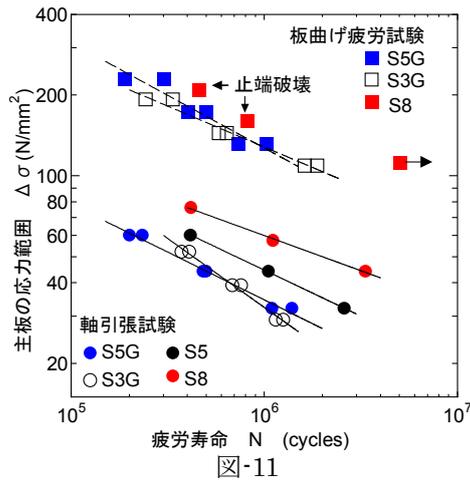


図-11

以上の試験体を対象として行った疲労き裂進展解析より求めた疲労寿命と試験結果を比較した結果を図-12に示す。両者はよく一致している。これは2軸荷重下で行った疲労試験の結果を示したものであるが、板曲げ荷重下の疲労試験結果も、疲労き裂進展解析はよく再現していた。

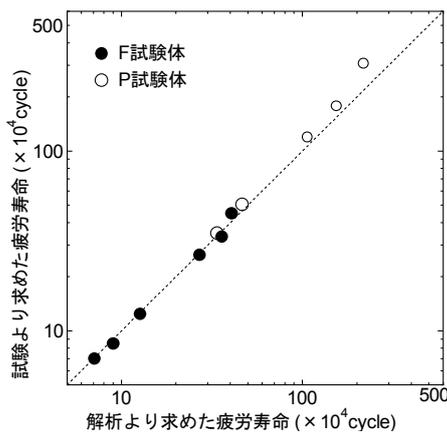


図-12

図-13に定義する主板厚 T_m 、溶接サイズ H_m 、溶接形状(脚長比) H_a/H_m 、溶接の溶け込み深さ P_w 、2軸応力比 σ_a/σ_m 、板曲げ応力と膜応力の比(曲げ応力比 γ)をパラメータとした疲労き裂進展解析を行い、十字継手がルート破壊する場合の疲労強度評価式について検討し、以下のような疲労強度評価式、すなわち任意の寸法を有する継手の200万回疲労強度を求めるための式を構築した。

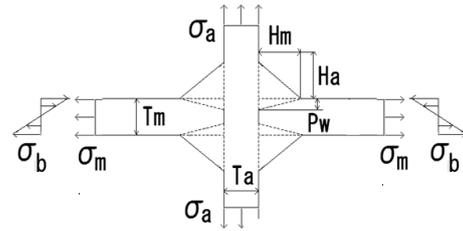


図-13

$$\Delta \sigma_{t200} = \varepsilon_T \times \varepsilon_{Hm} \times \varepsilon_{Pw} \times \varepsilon_u \times \varepsilon_B \times \Delta \sigma_{t200b}$$

$\Delta \sigma_{t200b}$: 基準モデル200万回疲労強度 (28.8N/mm²)

ε_T : 板厚に対する補正係数

$$\varepsilon_T = \left(\frac{T_m}{25} \right)^{-\frac{1}{6}}$$

ε_{Hm} : 溶接サイズに対する補正係数

$$\varepsilon_{Hm} = 2.0(H_m/T_m)$$

ε_{Pw} : 溶込み深さに対する補正係数

$$\varepsilon_{Pw} = 1.69(H_m/T_m)^{-0.956}(P_w/T_m) + 1$$

ε_u : 溶接形状(脚長比)に対する補正係数

$$\varepsilon_u = -0.195(H_a/H_m)^2 + 0.7(H_a/H_m) + 0.495$$

ε_B : 曲げ応力比に対する補正係数

$$\varepsilon_B = 1 / \left\{ 1 - \gamma + \frac{\gamma}{5.13 H_m/T_m + 2.71} \right\}$$

ε_2 : 2軸荷重に対する補正係数

$$\varepsilon_2 = 2.34 (P_w/T) + 1 \cdot \sigma_a/\sigma_m + 1$$

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計4件)

①森 猛, 内田大介, 福岡哲二, 明見正雄: 板曲げを受ける十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価法の提案, 土木学会論文集 A(条件付き掲載決定) 査読有

②森 猛, 明見正雄: 十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価に対する有効切欠き応力概念の適用性, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No.1, pp. 188-195, 2009.2, 査読有

③Takeshi Mori: Evaluation Formula for Fatigue Strength of Cruciform Welded Joints Failing from Weld Roots under Bi-Axial Loading, International Journal of steel Structures, No.3, pp. 143-153, 2008.9, 査読有

④森 猛, 明見 正雄: 2軸荷重を受ける十字溶接継手ルート破壊の疲労強度評価法, 土木

学会論文集 A, Vol. 64, pp. 617-626, 2008. 7,
査読有

〔学会発表〕(計6件)

①平山繁幸、森 猛、香川拓也：主桁・横桁
交差部の疲労強度評価応力に関する実験的
検討、土木学会第 64 回年次学術講演会講演
概要集, I-136, 2009 年 9 月 3 日(福岡大学)

② Mori, T. : Assessment of Fatigue
Strength of Cruciform Welded Joints
Failing from Weld Roots, The Tenth
Korea-Japan Joint Symposium on Steel
Bridges, Keynote Lecture, 2009 年 8 月 19
日(長崎大学)

③ Mori, T. : Assessment of Fatigue
Strength of Cruciform Welded Joints
Failing from Weld Roots under Out-of-Plane
Bending, International Institute of
Welding, 2009 年 7 月 14 日(シンガポール)

④ Mori, T. : Fatigue strength of cruciform
welded joints failing from weld roots
under bi-axial loading, Australia-Japan
Joint Workshop on Steel and Composite
Structures, 2009 年 3 月 31 日(シドニー)

⑤香川 拓也、森 猛、平山 繁幸：2 軸荷重
下にある主桁・横桁交差部の応力性状に対す
る溶接部曲率半径と面取りの影響、土木学会
第 63 回年次学術講演会, 2008 年 9 月(東北
大学)

⑥香川 拓也、森 猛、平山 繁幸：主桁ウェ
ブに接合された横桁フランジ溶接止端部の
応力性状に対する板厚と溶接形状・寸法の影
響、土木学会第 62 回年次学術講演会講演概
要集 2007 年 9 月(広島大学)

6. 研究組織

(1) 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

(2) 連携研究者

下里 哲弘 (SHIMOZATO TETSUHIRO)
琉球大学・工学部・助教
研究者番号：90452961

(3) 研究協力者

平山 繁幸 (HIRAYAMA SHIGEYUKI)
㈱東京鉄骨橋梁・技術本部技術開発部