

平成 30 年 5 月 29 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18139

研究課題名（和文）土木鋼構造部材に対する低サイクル疲労設計曲線の提案

研究課題名（英文）Proposal of low cycle fatigue design curves for steel members in civil structures

研究代表者

判治 剛 (Hanji, Takeshi)

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：80452209

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：鋼構造部材の低サイクル疲労は地震時の破壊モードの一つであり、それを防止するための設計法の確立は急務である。本研究では、兵庫県南部地震において損傷が報告された鋼製橋脚の基部を対象に、継手形式ごとに低サイクル疲労強度曲線を提案した。これは、簡易な骨組解析のひずみ（公称ひずみ）に基づくものであり、フランジ幅によらず適用できる比較的簡易な式である。さらに、提案式の妥当性を検証するために、鋼製橋脚基部を模擬した試験体を製作し、繰返し載荷試験を行った。その結果、提案した疲労強度曲線により、本研究および過去の実験によって得られた疲労寿命の下限を評価できることが示された。

研究成果の概要（英文）：This study newly proposed a low cycle assessment method for steel members, where fatigue life of the member can be predicted by nominal strains calculated with a beam element analysis. To establish the assessment method, the local strain amplitude at a weld toe that is a potential cracking point was firstly correlated with the nominal strain amplitude that is not affected by strain concentration due to weld and joint configurations. The former strain can be obtained by an analysis with solid elements and the latter strain can be obtained with a beam element analysis conventionally used in seismic design. Then, based on the correlation, the nominal strain based fatigue strength curves for base joints in steel piers were derived from the local strain based fatigue strength curves previously proposed for steel materials. Besides, the obtained fatigue strength curves were verified with several low cycle fatigue tests in this study and also in the previous research.

研究分野：鋼構造，疲労，破壊，維持管理

キーワード：低サイクル疲労 鋼製橋脚基部 局部座屈 疲労強度曲線 疲労強度等級分類

1. 研究開始当初の背景

低サイクル疲労とは、数回から多くても数百回程度のひずみの繰返しで疲労損傷が生じる現象であり、兵庫県南部地震において、鋼製橋脚の基部や隅角部に損傷事例が報告された。また、東北地方太平洋沖地震においても、鋼トラス橋の格点において低サイクル疲労によると推察されるき裂が発生し、問題となっている。

東北地方太平洋沖地震では、加えて、継続時間が4分以上と非常に長い地震波が観測された。これを受けて改訂された道路橋示方書では、改訂前に比べて継続時間が4倍以上も長い地震動が追加された。このような長時間継続地震動下では構造物が揺れる回数が増加し、低サイクル疲労の危険性がより高くなると考えられる。

以上の背景から、低サイクル疲労を取り入れた耐震設計法の確立は急務の課題であるといえる。

2. 研究の目的

本研究では、鋼構造部材に対する低サイクル疲労設計曲線を継手等級分類とともに呈示することを目的とする。具体的には、鋼素材と溶接部に対して過去に提案した局部ひずみ基準の疲労強度曲線を基に、低サイクル疲労が問題となる構造部材ごとに公称ひずみ基準の疲労設計曲線を構築する。さらに、高サイクル疲労で示されているような継手等級分類の形で整理し、実務に取り入れられるような簡易な設計手法を開発する。

3. 研究の方法

(1) 公称ひずみに基づく低サイクル疲労強度曲線の提案までの流れ

検討の流れを図-1に示す。鋼部材の低サイクル疲労強度はき裂発生点の局部ひずみに支配されるため[1]、それと骨組解析のひずみを関連付ける。ここでは、溶接止端形状を忠実に再現したモデル（以下、詳細モデルと呼ぶ）の局部ひずみ範囲、止端形状を再現せずにその周辺に1mmの要素を配置したモデル（以下、簡易モデルと呼ぶ）の参照要素のひずみ範囲、梁要素によるモデル（以下、梁モデルと呼ぶ）の公称ひずみ範囲の関係を求め、局部ひずみを公称ひずみに置き換えた疲労強度曲線を提案する。これにより、設計段階で用いるような骨組解析のひずみを用いた低サイクル疲労照査が可能になる。

(2) 詳細モデルと簡易ひずみのひずみ範囲の関連付け

詳細モデルと簡易モデルの関連付けは過去にも試みられている[2]が、本研究では検討パラメータを増やし、関係式の再構築を図った。実橋で代表的な十字継手、T字継手、面外ガセット継手を対象とした。解析方法は文献[2]を参考にした。各継手に対して詳細モデルと簡易モデルを作成し、主板や付加板

の寸法、溶接止端半径、載荷方法（引張載荷と曲げ載荷）を変化させて解析を行った。

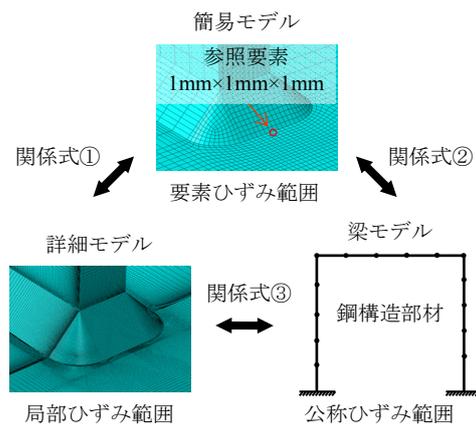


図-1 鋼部材の低サイクル疲労強度曲線の提案のための検討

(3) 簡易モデルと梁モデルのひずみ範囲の関連付け

図-2に示す矩形断面を有する鋼製橋脚基部の柱とベースプレートの角溶接部[3]および三角リブのまわし溶接部[4]を対象とした。今回はフランジ幅が1mを超える補剛断面の橋脚も考慮し、適用範囲の拡大を図った。三角リブの設置位置は過去の研究[5]を参考にした。柱高さ、フランジおよびウェブの板厚と板厚、補剛材厚、溶接脚長、三角リブ厚を変化させた橋脚に対して簡易モデルと梁モデルを作成し、同じ変位振幅を与えたときの参照要素のひずみ範囲と公称ひずみ範囲の関係を求めた。軸力比は0.1で一定とした。図-2に示すように、簡易モデルではき裂発生が予想される止端部周辺に1mmの参照要素を配置した。梁モデルの公称ひずみ範囲は柱下端に配置した要素のひずみとし、その要素寸法は柱高さの1.5%とした。なお、三角リブ溶接タイプではリブ上端からの高さを柱高さとしてモデル化している。また、補剛断面の場合は無補剛断面に置き換えて計算した[6]。解析の詳細は文献[4]を参照されたい。

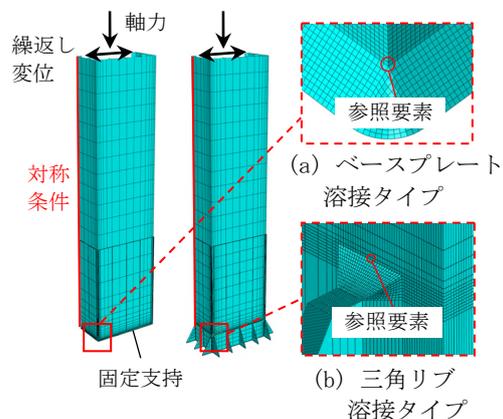


図-2 簡易モデルの例

(4) 低サイクル疲労実験による検証

一定振幅や変動振幅の過去の実験結果 [7-9] および今回行った実験の結果を用いて後述する低サイクル疲労強度曲線の妥当性を検証した。三角リブ溶接部を対象とした試験体を図-3 に例示する。フランジ、ウェブおよび三角リブの板厚は 9 mm であり、鋼種は SM490YA (降伏点: 481 N/mm², 引張強さ 548 N/mm²) である。各継手形式ともにフランジ幅 120 mm, 200 mm の 2 種類 (幅厚比パラメータ 0.3, 0.5) とした。いずれも細長比パラメータが 0.3 となるように柱高さを変えている。

試験状況を図-4 に示す。試験方法は文献 [8] と同様であり、試験体下端を固定し、頂部に一定振幅もしくは漸増振幅の繰返し変位を与えた。軸力比は 0.1 とした。溶接部にき裂を発見するまでの繰返し数を疲労寿命とした。

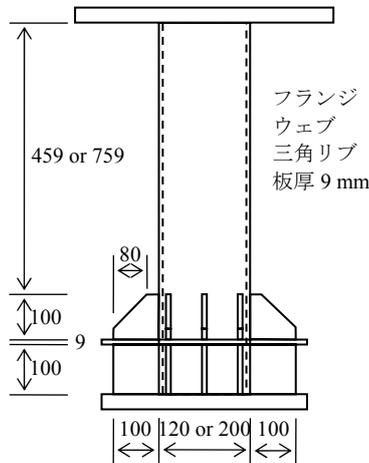


図-3 試験体 (三角リブ) (単位: mm)

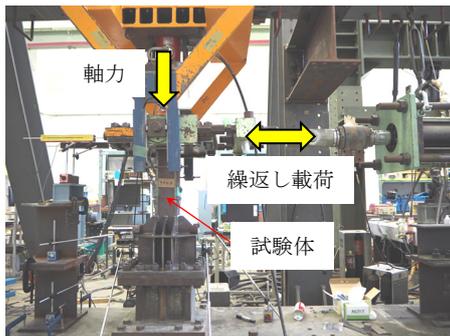


図-4 試験状況

4. 研究成果

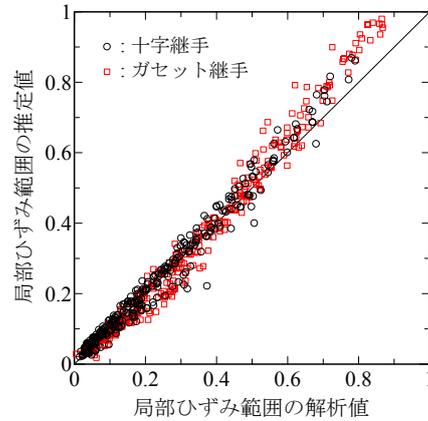
(1) 局部ひずみと要素ひずみの関係

パラメトリック解析の結果、局部ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_l$ と参照要素のひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{el}$ の関係は溶接止端半径 r のみに影響を受けることが示され、以下の関係式①を得た。

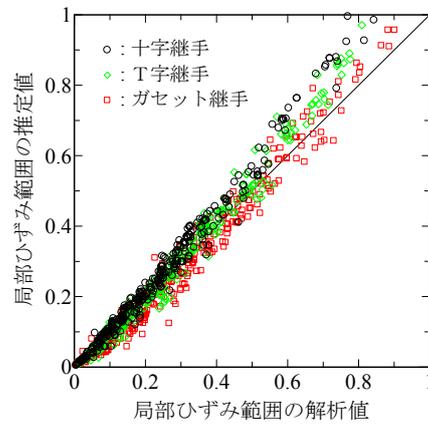
$$\Delta \epsilon_l = 2.14r^{-0.37} \cdot \Delta \epsilon_{el} \quad (1)$$

これにより推定した局部ひずみ範囲と解析

値の比較を図-5 に示す。図中には主板や付加板寸法の異なる結果が含まれているが、継手形式や载荷方法によらず、局部ひずみを精度よく推定できている。



(a) 引張载荷



(b) 曲げ载荷

図-5 関係式①の精度検討

(2) 要素ひずみと公称ひずみの関係

解析結果の一例を図-6 に示す。これはベースプレート溶接タイプでフランジ幅を変化させたときの結果である。図-6 および他の検討結果より、参照要素のひずみ範囲 $\Delta \epsilon_{el}$ と公称ひずみ範囲 $\Delta \epsilon_n$ の関係は、フランジ幅 b が一定の場合にはフランジ厚などの他のパラメータの影響をほとんど受けないが、フランジ幅 b や三角リブ厚 t_r とフランジ厚 t_f の比 (t_r/t_f) の変化に伴って上下することが示された。そこで、それらの影響を考慮して関係式②の構築を行った。ベースプレート溶接タイプおよび三角リブ溶接タイプのそれぞれに対して以下の関係式②を構築した。

$$\Delta \epsilon_{el} = \alpha \cdot \Delta \epsilon_n^\beta \quad (2a)$$

ベースプレート溶接タイプ:

$$\alpha = 1.3 \cdot \ln b + 4.7 \quad (2b)$$

$$\beta = -0.04 \cdot \ln b + 0.85 \quad (2c)$$

三角リブ溶接タイプ：

$$\alpha = \left(\frac{t_r}{t_f} - 0.03 \right) \cdot \ln b + \left(1.7 \cdot \frac{t_r}{t_f} + 1.2 \right) \quad (2d)$$

$$\beta = -0.03 \cdot \ln b + 0.88 \quad (2e)$$

これにより推定した要素ひずみ範囲と解析値の比較を図-7に示す。溶接タイプによらず、精度よく要素ひずみを推定できている。

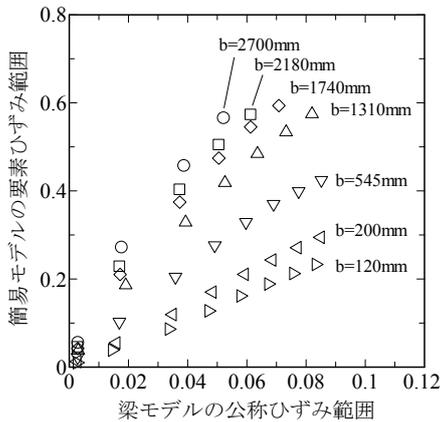


図-6 解析結果の例（フランジ幅の影響）

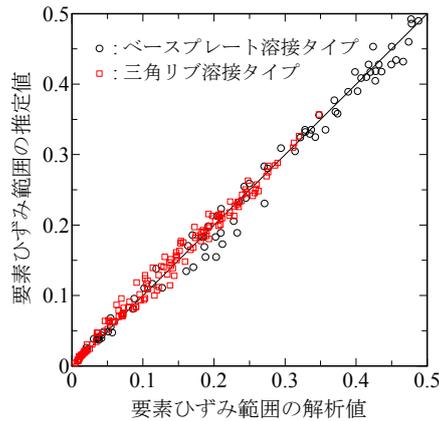


図-7 関係式②の精度検討

(3) 低サイクル疲労強度曲線の提案

関係式①、②から求めた関係式③を溶接金属に対する局部ひずみ基準の疲労強度曲線[1]に代入することにより、継手形式ごとに公称ひずみ基準の疲労強度曲線を導出した。ただし、その過程で実設計に適用することを想定し、次のように疲労強度曲線を簡易化した。具体的には、安全側の設定となるように、溶接止端半径 r は 0.5 mm 、三角リブとフランジは同厚 ($t_r/t_f = 1$) とした。またフランジ幅に関しては、上記の条件下で得られるフランジ幅 1 m のときの疲労強度を基準強度とし、それとの比率を補正係数 C_w として考慮することにより、板幅の影響による疲労強度曲線の変化を考慮した。求めた曲線を次式に示す。なお、適用範囲は $b \leq 2.7 \text{ m}$ である。

$$\Delta \varepsilon_n \cdot N^{0.68} = C \cdot C_w \quad (3)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_n$ は公称ひずみ範囲、 N は疲労寿命であり、き裂長 0.5 mm のときの繰返し数である。 C は継手形式によって異なり、角溶接部の場合は 0.024 、三角リブ溶接部の場合は 0.043 である。 $C_w (= b^{-0.58})$ は板幅補正係数である。

(4) 実験による妥当性の検証

き裂の例を図-8に示す。発見時のき裂長は $1 \sim 8 \text{ mm}$ 程度であった。梁モデルの解析により求めた各試験体の公称ひずみ波形からひずみ範囲の頻度分布を求め、等価ひずみ範囲を算出し、それと疲労寿命の関係を整理した。その結果を図-9に示す。図中には式(3)の強度曲線も併記しており、色付きのプロットが本研究の結果である。各継手形式ともに、フランジ幅の異なる種々の試験結果の下限を強度曲線によって表現できているといえる。



(a) 角溶接部 (b) 三角リブ部

図-8 低サイクル疲労き裂の例

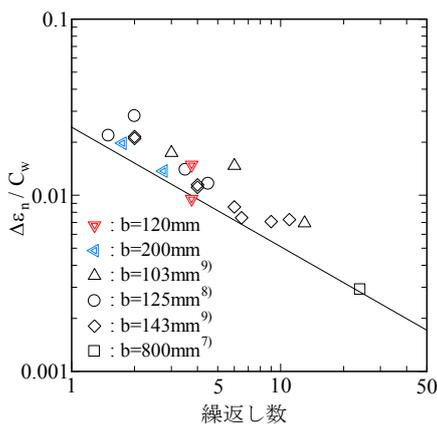
(5) 疲労強度等級分類の呈示

式(3)を用いて疲労寿命が 10 回となるときの公称ひずみ範囲（以下、 10 回疲労強度と呼ぶ）を求めた。その結果を表-1に示す。ここでは、溶接部に止端処理を施して疲労強度の向上を図った場合も併記している。なお、フランジ幅は 1 m としている。対象とした継手形式によって 10 回疲労強度が異なっていること、また止端半径を 4 mm に仕上げた場合には大幅に疲労強度が向上することがわかる。

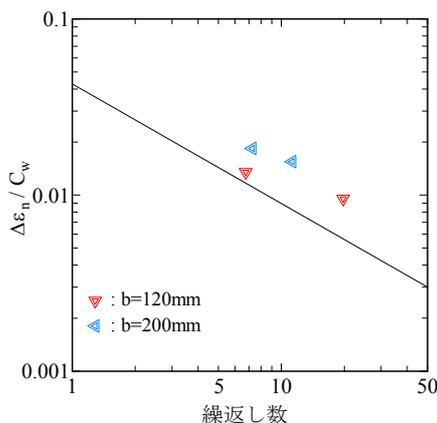
このように、疲労寿命の要求値を設定し、それに対する公称ひずみ範囲を求め、それ以下になるよう応答値を抑えることにより、簡易な低サイクル疲労照査が可能になる。

表-1 各継手形式に対する 10 回疲労強度の例

| 継手形式 | 溶接止端状況 | 10 回疲労強度 |
|--------------|------------------------------|------------|
| ベースプレート溶接タイプ | 溶接まま | 0.005 |
| | 止端仕上げ ($r = 4 \text{ mm}$) | 0.01 |
| 三角リブ溶接タイプ | 溶接まま | 0.01 |
| | 止端仕上げ ($r = 4 \text{ mm}$) | 0.02 |



(a) ベースプレート溶接タイプ



(b) 三角リブ溶接タイプ

図-9 疲労強度曲線の検証

(6) まとめ

鋼製橋脚基部を対象に、継手形式ごとに公称ひずみ基準の低サイクル疲労強度曲線を提案した。これは、フランジ幅によらず適用できる比較的簡易な式である。求めた強度曲線により、種々の疲労試験によって得られた疲労寿命の下限を評価できることを示した。

本研究は、材料レベルの精緻な強度曲線を基に、設計実務で使える形へ段階的に展開していく点に特色がある。局部ひずみには、溶接形状の微視的影響と、継手形状や寸法、部材の板組みなどの巨視的影響が含まれているため、このような手法は有効である。本アプローチにより、これまでにはない土木鋼構造部材の低サイクル疲労強度曲線を提案することができた。

低サイクル疲労はもはや「想定外」の事象とはいえ、それを取り入れた高度な耐震設計法の確立は急務である。低サイクル疲労設計が可能となれば、地震時の鋼構造物の疲労破壊を未然に防止することができ、大地震への備えが格段に向上することは確実である。世界的にみても、土木分野で低サイクル疲労を取り入れた設計体系の例はなく、本成果が我が国の設計指針類に反映されれば、世界初のスペックとなる。本研究により、そのための貴重な知見を提供できたと考えている。

<引用文献>

- [1] 判治ら：土木学会論文集 A, Vol. 62, No. 1, pp.101-109, 2006.
- [2] Tateishi K, et.al. : JSSC Steel Construction Engineering, Vol. 13, No. 52, pp. 73-81, 2006.
- [3] 本田ら：第 72 回年次学術講演概要集，部門 I, pp. 1295-1296.
- [4] 判治ら：鋼構造論文集，Vol. 16, No. 64, pp. 21-30, 2009.
- [5] 坂野ら：構造工学論文集 Vol. 44A, pp. 1281-1288, 1998.
- [6] 土木学会：鋼・合成構造標準示方書，耐震設計編，2008.
- [7] 陵城ら：構造工学論文集，Vol. 48A, pp.649-655, 2002.
- [8] Tateishi K, et.al. : Doboku Gakkai Ronbunshuu A, Vol. 64, No. 2, pp. 288-296, 2008.
- [9] 葛ら：構造工学論文集，Vol. 55A, pp. 605-616, 2009., 構造工学論文集，Vol. 56A, pp. 342-355, 2010.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- ①清水優，館石和雄，判治剛，本田直也：溶接止端部に生じる局部ひずみ範囲の簡易推定法，鋼構造論文集，Vol. 25, No. 97, pp. 61-66, 2018.

〔学会発表〕(計 3 件)

- ①古崎智大，館石和雄，判治剛，清水優：鋼製橋脚基部に対する簡易な低サイクル疲労照査のための疲労強度等級分類の提案，第 73 回土木学会年次学術講演会講演概要集，部門 I, 2018.
- ②Furusaki T., Tateishi K., Hanji T., Shimizu M. and Honda N.: A simple low cycle fatigue assessment method for steel members and its application to bridge piers under earthquake, Proc. of the ISSS 2017, pp. 269-272, 2017.
- ③本田直也，館石和雄，判治剛，清水優：鋼製橋脚基部の簡易な低サイクル疲労照査法と地震時の損傷度評価への適用，第 72 回土木学会年次学術講演会講演概要集，部門 I, pp. 1295-1296, 2017.

〔その他〕

ホームページ

<http://skyarch2.wixsite.com/nagoya-u>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

判治 剛 (HANJI, Takeshi)

名古屋大学大学院工学研究科・准教授

研究者番号：8 0 4 5 2 2 0 9