

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：73905

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04588

研究課題名(和文) プレース材の座屈と低サイクル疲労を考慮した鋼橋の耐震性能照査法の開発

研究課題名(英文) Development of a seismic performance verification method for steel bridges with local and global buckling as well as low-cycle fatigue of bracing members

研究代表者

宇佐美 勉 (Usami, Tsutomu)

公益財団法人名古屋産業科学研究所・研究部・上席研究員

研究者番号：50021796

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：CT形鋼断面の両端ピン支持単一ブレース材を用いて、繰り返し中心軸および偏心軸載荷実験ならびに解析を行った。検証項目は、(1)初期横荷重法の適用性、(2)部材座屈と局部座屈の連成座屈に対するひずみ照査法の適用性である。(1)に関する実験は、クレビスの回転摩擦の影響が大きく、履歴曲線は、回転摩擦が切れるまでは両端固定の解析、回転摩擦が切れた後は両端回転自由の解析結果に概ね一致した。(2)に関して、ひずみ照査法によって概ね予測可能であることが分かった。部材座屈後の履歴曲線を得るために、一部材が座屈しても健全な部材が残る実験システムでの実験が必要であることを指摘し、実験システムの提案を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

鋼複弦アーチリブ構造などでは、橋軸直角方向に作用する地震/風荷重に抵抗できるように弦材はブレース材で連結されている。しかしながら、細長比が大きいブレース材に対しては、(1)繰り返し荷重下での応答の解析手法、および(2)設計のための安全性照査法は必ずしも明確ではない。研究代表者らはこれまで、(1)初期横荷重法、(2)ひずみ照査法を提案してきた。本研究は、これらの手法をブレース材の設計に適用する基礎データを得るために行った実験および解析について述べたものである。結果は概ね満足できるものであったが、さらに、ブレース材の大変形に対する実験データを得るための実験手法についての提案を行っている。

研究成果の概要(英文)：A series of cyclic loading tests and numerical analyses using pin-ended isolated steel bracing members are presented. The purpose of the study is to verify the accuracy of both the initial lateral load method (ILLM) and the strain-based seismic verification method (SBSVM) proposed by the authors for the design of bracing members. The results are expected to be used for expanding the applicability of SBSVM including the low-cycle fatigue strength of bracing members. The test results were however such that, although the accuracy of both ILLM and SBSVM are verified, the complete axis load-axial displacement (N-u) relationships up to low-cycle fatigue events were unable to obtain due to sudden decrease in the axial loads caused by overall or local buckling. To obtain the complete N-u curves, providing an un-buckled member is indispensable in the testing system such as a rigid frame braced by both compression and tension members. Then such a testing devise is proposed for the future study.

研究分野：構造工学

キーワード：繰り返し載荷 耐荷性能 ブレース材 初期横荷重法 ひずみ照査法

1. 研究目的

複合非線形解析に基づく構造設計は、複雑な鋼橋の耐荷性能の詳細な検討に用いられてきている。この設計法を複弦アーチリブ構造等に適用するためには、ブレース材に対する 1) 正負交番の繰り返し軸荷重下での弾塑性応答を精確に解析できる手法、および 2) 適切な限界状態の設定ならびに性能照査法が必要である。研究代表者らは、1) に関して初期横荷重法(ILLM)、2) に関してひずみ照査法(SVSVM)を提案している。本研究では2種類のCT形鋼断面の両端ピン支持単一ブレース材を用いて、ブレース材に対する「初期横荷重法」および「ひずみ照査法」の適用性を検討する。

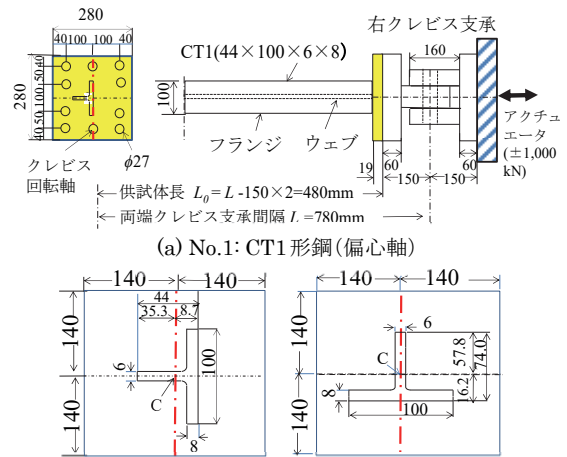
2. 研究方法

(1) 実験

図-1、表-1 に示すクレビス支承で両端をピン支持された部材の繰り返し引張-圧縮荷重実験を行った。写真-1 は右クレビス支承で、二山クレビス(固定)と一山クレビス(鉛直軸周りの回転自由)をシリンダピンで接合したピン支承を示し、実験供試体端部は鉛直軸周りに回転変位する構造である。供試体は、H形鋼(SS400材)のウェブを切削してCT1形鋼、およびCT2形鋼を製作し、表-1のNo.1~No.3供試体12体を製作した。No.1, 2供試体は課題1)用で、No.1は偏心軸荷重(偏心量 $e=8.7\text{mm}$)、No.2は中心軸荷重である。また、No.3は課題2)用の中心軸荷重供試体で、ウェブ(幅 b の片持板)の幅厚比パラメータは $R_f=0.705$ 、限界ひずみ¹⁾(局部座屈が生ずるひずみ)は $\varepsilon_u=2.72\varepsilon_y$ 、有効破壊長(局部座屈の半波長)は $L_c=2.0b$ である。

(2) 解析

解析は、梁要素を用いた初期横荷重法によった。解析モデルを図-2に示す。クレビスは長さ150mm



(b) No.2: CT1形鋼(中心軸) (c) No.3: CT2形鋼(中心軸)

図-1 荷重レイアウト

表-1 供試体緒言

No.	種類 (荷重軸)	N_y kN	r mm	L (mm)			e mm	本 数	課 題
				$L/r=75$	100	125			
1	CT1 (偏心)	314	10.4	780	1,040	1,300	8.7	5	1)
2	CT1 (中心)			-	-	-	0.0	4	
3	CT2 (中心)	376	23.6	1,770	-	-	0.0	3	2)

N_y =全断面降伏軸力, r =断面2次半径, L =クレビス間隔, e =偏心量

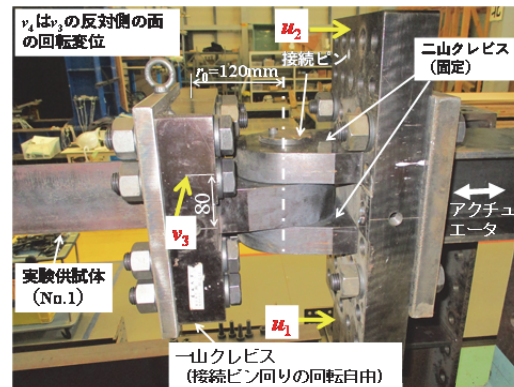


写真-1 右クレビス支承

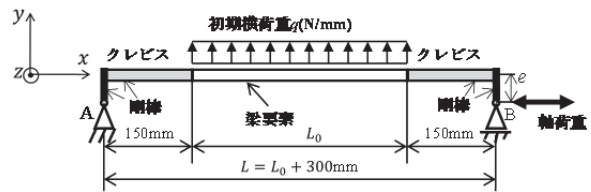


図-2 解析モデル (side view)

表-2 材料定数

形鋼	E (GPa)	σ_y (MPa)	ε_y (%)	E_{st} (GPa)	ε_{st} (%)
CT-1	202	307	0.152	1.20	2.43
CT-2	202	314	0.155	1.14	2.33

E =弾性係数, σ_y =降伏応力, ε_y =降伏ひずみ, E_{st} =ひずみ硬化係数, ε_{st} =ひずみ硬化開始点ひずみ

の水平剛棒，軸荷重の偏心は長さ $e = 8.7\text{mm}$ の鉛直剛棒でモデル化した．中心軸載荷供試体では $e = 0.0$ となる．初期横荷重 q の大きさは，文献²⁾の算定式から No.3 供試体では $q = 3.66\text{N/mm}$ となる．解析には Timoshenko はり要素，ブレース材の要素分割は 10 分割，構成則はバイリニア移動硬化則（2 次勾配 $= E/100$ ），材料定数は表-2 に示す値を用いた．

3. 研究成果

(1) 材料定数および計測

実験供試体の材料定数は JIS 1 号（ウェブ）および 5 号（フランジ）引張試験片を用いて測定した（表-2）．右クレビス支承での変位計測位置を写真-1 に示す．左クレビス支承も同様である．供試体の軸変位 u は，二山クレビス底板の軸変位 u_1, u_2 （右クレビス）および u_5, u_6 （左クレビス）を精度 0.01 のダイヤルゲージで測定し， $u = \{(u_1 + u_2) - (u_5 + u_6)\} / 2$ から求めた．供試体中央の軸方向ひずみはウェブ両面 2 カ所（端部から 11mm 内側）およびフランジ表面 3 カ所（端部から 11mm 内側と中央）を塑性ひずみゲージ（ゲージ長 5mm）で計測した．

(2) N - u 履歴曲線の補正

クレビス支承は軸荷重の下で，(a)クレビスとシリンダピンのあそび，および(b)クレビス構成部品の弾性変形などによる軸変位が生じ，これらが供試体の軸変形に伴って生ずる剛体変位相当量となる．剛体変位は左右のクレビスの剛体変位相当量が同一のとき，先に示した u の算定式を用いれば相殺されて理論的には剛体変位は計測されない．しかし，(b)に起因する剛体変位は，クレビスの設置条件が同一でないため必ずしも同一ではなく， u の算定式を用いても補正することは出来なかった．この補正できない剛体変位の影響は引張荷重で顕著であったために，次の方法によって剛体変位を除去した荷重-軸変位履歴曲線を算定した．荷重は，部材中央のフランジ表面中央またはウェブ先端の軸ひずみの絶対値の大きい方を制御量として行ったが，剛体変位の影響を受けない軸ひずみは，初期弾性域（ $\pm 200\text{kN}$ 以内）において理論値とほぼ一致し，荷重は正しく行われていた．そこで，剛体変位は軸荷重 N のみに依存する，即ち供試体の材料特性（弾性，弾塑性）に無関係と見なし，計測軸変形 $u_{\text{exp}}(N)$ から補正量 $u_{\text{cor}}(N) = u_e(N) - u_{e0}(N)$ を差し引くことによって剛体変位を除去した軸変位 $u(N) = u_{\text{exp}}(N) - u_{\text{cor}}(N)$ を求めた．ここで， $u_e(N)$ = 実験履歴曲線の初期弾性軸変位（ $|N| \leq 200\text{kN}$ を直線近似した実験値）， $u_{e0}(N)$ = 初期弾性軸変位の理論値である．解析では，このようにして求められた N - $u(N)$ 履歴曲線の折り返し点の $u(N)$ から荷重プログラムを定め，図-2 のモデルを用いて軸変位増分の複合非線形解析を実施した．

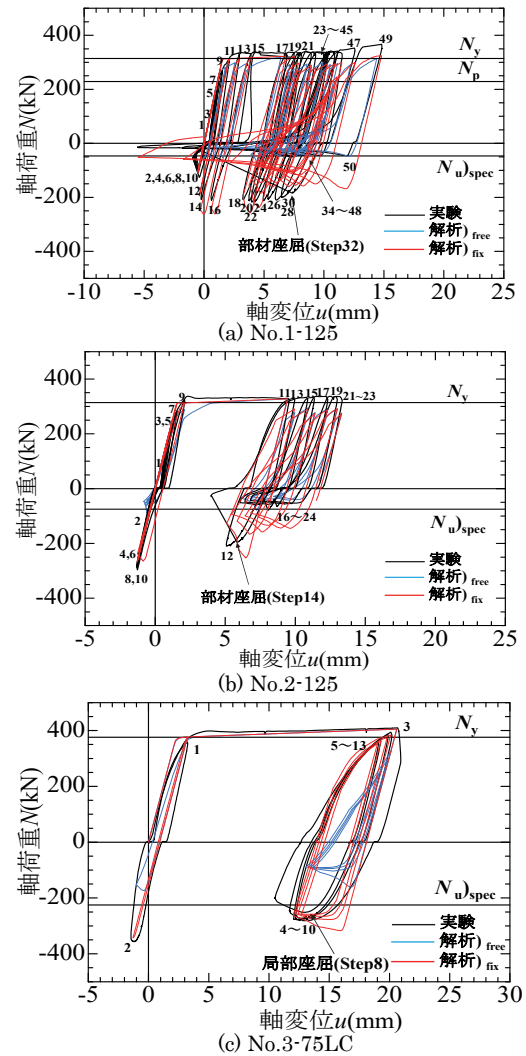


図-3 実験，解析_{free}および解析_{fix}の履歴曲線

(3) 初期横荷重法の精度検証

供試体 No.1~No.3 の実験および解析の $N-u$ 履歴曲線を図-3 に示す。供試体番号の最後の数値は L/r の値である。解析は、クレビスの回転が自由の場合を解析)free, 完全拘束の場合を解析)fix で示されている。また, $N_u)_{spec}$ は道路橋示方書の中心軸圧縮柱の座屈強度である。これらの図から, 実験値は解析)fix に非常に近いことが分かる。この例では, 最終ステップに至るまでクレビスの回転は生じなかったと考えられるが, No.1 および No.2 供試体では, 途中から回転が生じ, 実験値が解析)free に近づく場合もみられた。

(4) ひずみ照査法の精度検証

実験で局部座屈が観察されたのは, ウェブ幅厚比が大きい CT2 形鋼断面 ($b/t=11.0$) であったので, No.3-75LC (定ひずみ振幅載荷), および No.3-75Cy (変動ひずみ振幅載荷) 供試体を取り上げて, 局部座屈発生時の挙動と予測値との比較を行う。CT2 形鋼断面のウェブは $R = 0.705$, $b = 66\text{mm}$, $\varepsilon_y = 0.0015$ であるので, $\varepsilon_u = 0.422\%$ (絶対値), $L_e = 132\text{mm}$ が求められる。有効破壊長 L_e は供試体の解析での要素長 134mm とほぼ一致する。有効破壊長の中心は部材中央にあるとする。実験供試体 No.3-75LC は, 部材中央ウェブの軸ひずみ ε_w を制御量として $\pm 0.5\%$ で定ひずみ振幅載荷した。

また, No.3-75Cy は, $-1.0\% \sim 1.5\%$ で変動ひずみ振幅載荷した。

No.3-75LC : 実験より得られた軸荷重 N -ウェブ軸ひずみ ε_w 履歴曲線を図-4(a)に示す。実験は, step8 の -0.410% で局部座屈発生が見られた。局部座屈発生時での実験供試体を写真-2(a)に示す。局部座屈は, 部材中央から 89.7mm アクチュエータ寄りで発生し, 局部座屈長は概略 140mm で,

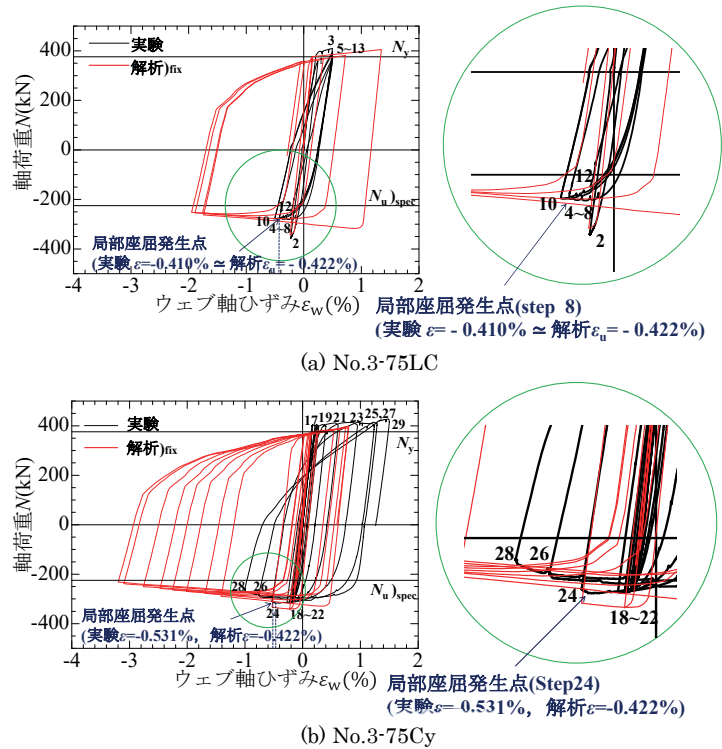
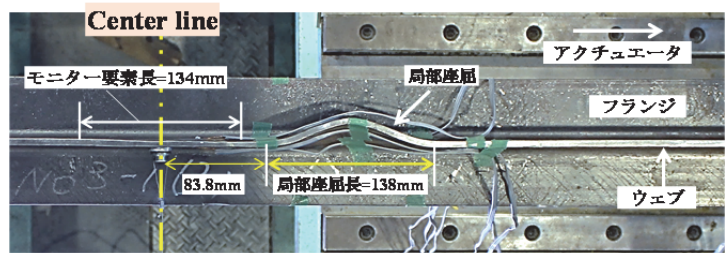
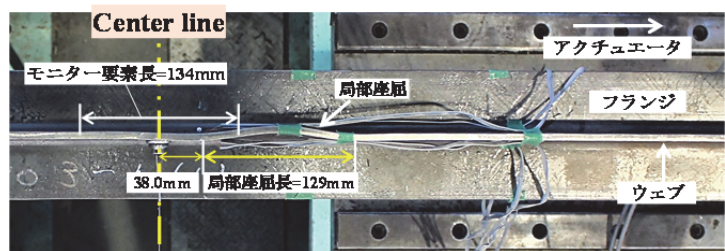


図-4 $N-\varepsilon_w$ 履歴曲線と局部座屈発生点



(a) No.3-75LC-step8



(b) No.3-75Cy-step24

写真-2 局部座屈長と発生位置 (実験)

ひずみ照査法の有効破壊長 $L_e=132\text{mm}$ に近い。解析)_{fix} で得られた $N-\varepsilon_w$ 履歴曲線は図-4(a)に示されている。解析での横軸の ε_w は、部材中央のモニター要素（要素長=134mm）のウェブの平均ひずみである。負のモニター要素ひずみ ε_w の絶対値が局部座屈限界ひずみ $\varepsilon_u=0.422\%$ に達した点が、解析での局部座屈発生ひずみ点であり、実験値 0.410% に非常に近い。

No.3-75C_v : 実験より得られた軸荷重 N -ウェブ軸ひずみ ε_w 履歴曲線を図-4(b) に示す。局部座屈発生点は step 24 で、発生ひずみは 0.531% である。局部座屈発生時の供試体を写真-2(b) に示す。局部座屈は、部材中央から 37.1mm アクチュエータ寄りで発生し、局部座屈長は概略 130mm で、ひずみ照査法の有効破壊長 $L_e=132\text{mm}$ に近い。以上の実験および解析結果の比較より、ひずみ照査法の精度が検証された。

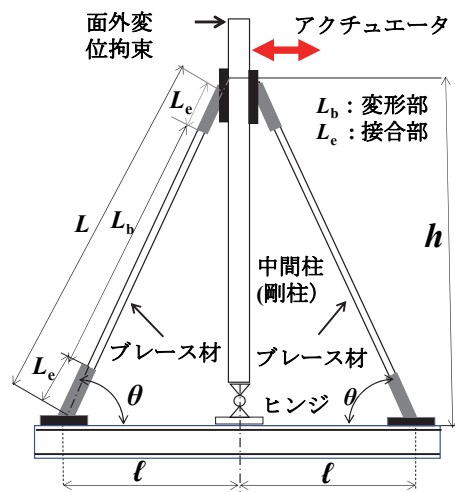


図-5 複合ブレース荷重システム案

4. 今後の研究課題

- (a) 本実験では、クレビスの回転摩擦の影響が大きく、実質両端固定の条件で実験が行われた。摩擦の影響を軽減する一方法として、クレビスの回転面に供試体の自重が作用しない回転方向で実験を行うことが考えられる。この荷重方法は、先述の局部座屈の発生位置の実験と解析の相違の検証実験にも使えると考えられる。
- (b) 両端をピン支持された単一部材の繰り返し引張-圧縮荷重では、部材座屈および局部座屈後に急激な荷重低下が生じ、その後の挙動（例えば、低サイクル疲労発生）まで荷重することができなかった。このような急激な荷重低下を防ぎ、荷重低下部を連続的に捉えるためには、一本のブレース材が座屈しても、もう一方のブレース材が引張部材として働き、構造システムとして安定な複合ブレース材による荷重システム（例えば、図-5 の荷重システム）が考えられる。

参考文献

- 1) 織田博孝, 宇佐美勉: 既設 H 形ブレースの制震ダンパー化に関する基礎的実験, 構造工学論文集, Vol.56A, pp.499-510, 2010.
- 2) 宇佐美勉, 鈴木元哉, 葛漢彬: ブレース材付きフレーム構造物の耐震解析における初期横荷重法 (ILLM) の適用性, 構造工学論文集, Vol.65A, pp. 200-213, 2019.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 宇佐美勉, 吉田聡一郎, 葛漢彬	4. 巻 67A
2. 論文標題 座屈拘束ブレースによる鋼複弦アーチリブ構造の耐荷性能向上効果	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 35-50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 宇佐美勉, 鈴木元哉, 吉田聡一郎, 葛漢彬	4. 巻 66A
2. 論文標題 繰り返し荷重を受ける鋼複弦アーチリブ構造の耐荷性能評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 34-47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 葛漢彬, 宇佐美勉	4. 巻 22
2. 論文標題 鋼橋の耐震・制震設計における「ひずみ照査法」の基本理念	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 第22回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集	6. 最初と最後の頁 281-288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	葛 漢彬 (Ge Harbin) (90262873)	名城大学・理工学部・教授 (33919)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------