

## 繰り返し荷重を受ける複合ブレース材システムの実験と解析

名城大学大学院 学生会員 ○浅野拳斗 横河ブリッジ 宮崎凌介 NIPPO 山田凌大  
 名城大学 名誉会員 宇佐美勉 名城大学 フェロー 葛漢彬 名城大学 正会員 渡辺孝一

## 1. まえがき

正負交番の繰り返し軸荷重を受ける単一ブレース材の載荷実験では、部材座屈および局部座屈後に急激な荷重低下が生じ、荷重低下部を連続的に捉えることが困難な場合がある。本研究では、2本のブレース材を対になるように配置した「複合ブレース材システム」による繰り返し載荷実験および数値解析を実施し、構造システムとしての変形挙動ならびに累積塑性変形 CID<sup>1)</sup>に基づく部材座屈後の低サイクル疲労照査の検討を行う。

## 2. 実験および解析概要

## (1) 実験

実験には、図-1の複合ブレース構造を用いる。構成部材寸法は、現有載荷装置内に設置できる複合ブレース構造として、ブレース材傾き  $\theta=45^\circ$ 、幅  $l=1,100\text{mm}$ 、高さ  $h=1,100\text{mm}$ 、ブレース材全長  $L=1,492\text{mm}$ 、接合部長  $L_c=460\text{mm}$ 、変形部長  $L_b=572\text{mm}$ 、中間柱幅  $c=250\text{mm}$  を決定した。ブレース材変形部には、供試体長および材質は同一 ( $L_b=572\text{mm}$ , SS400) で幅厚比が異なる2種類のリブ付き矩形断面 (CR1, CR2) を用いた (図-2(a))。諸元を表-1 および表-2 に示す。供試体名の番号 1, 2 は各載荷の折り返し点変位での繰り返し回数 ( $n=1, 2$ ) を示す。各供試体両端部の接合部断面には、補強のため  $36 \times 12\text{mm}$  (SM490 材) の端部リブが溶接してある (図-2(b))。

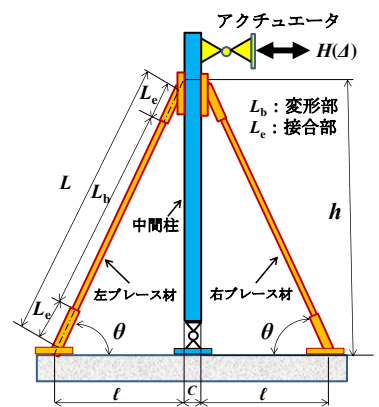
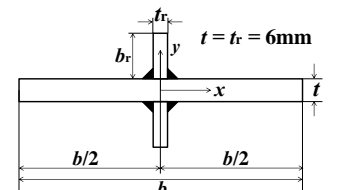


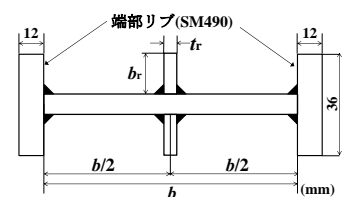
図-1 複合ブレース構造

## (2) 解析

解析は、梁要素を用いた初期横荷重法<sup>2)</sup>によった。初期横荷重  $q$  の大きさは、文献 2) の算定式から、No.6 供試体では  $q=3.76\text{N/mm}$ 、No.7 供試体では  $q=4.16\text{N/mm}$  となり、ブレース材変形部に軸線に直角方向内向きの等分布荷重として作用させる。解析には Abaqus の Timoshenko はり要素 (B31) を用い、ブレース材の変形部および接合部の要素分割はそれぞれ、10 および 8 等分割、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-3 に示す実測値を用いた。



(a) 変形部



(b) 接合部

図-2 供試体断面図

## 3. 実験および解析結果

## (1) 材料定数および計測

実験供試体変形部および接合部のリブ付き矩形断面の材料定数は JIS 1 号引張試験片を用いて測定した。結果を表-3 に示す。供試体変形部の軸線直角方向変位は図-3 の位置で最小目盛り  $0.01\text{mm}$  のダイヤルゲージ (DG) で測定した。  $u_7, u_8$  は接合プレート上の滑りを測定する DG で、水平変位  $u_1, u_2$  の補正に用いる。また、軸方向ひずみは供試体変形部中

表-1 供試体断面とパラメータ値

断面名称	$\frac{b}{t}$	$\frac{b_r}{t_r}$	$b$ mm	$b_r$ mm	$A$ mm <sup>2</sup>	$r_x$ mm	$N_y$ kN
CR1	15	2.5	90	15	720	5.87	240
CR2	20		120		900	5.31	300

$A$ =断面積,  $r_x$ =断面2次半径,  $N_y = A\sigma_y$

表-3 材料定数 (変形部)

鋼種	$E$ (GPa)	$\sigma_y$ (MPa)	$\epsilon_y$ (%)	$E_{st}$ (GPa)	$\epsilon_{st}$ (%)
SS400	205	333	0.162	1.20	3.00

Note:  $E$ =弾性係数,  $\sigma_y$ =降伏応力,  $\epsilon_y$ =降伏ひずみ,  $E_{st}$ =ひずみ硬化係数,  $\epsilon_{st}$ =ひずみ硬化開始点ひずみ

表-2 供試体諸元

供試体名	$n$	断面	$\frac{L_b}{r_x}$	$L_b$ mm	$L$ mm	曲げ座屈		局部座屈	
						$\bar{\lambda}_x$	$\frac{\sigma_u}{\sigma_y}$	$R$	$\frac{\epsilon_u}{\epsilon_y}$
No. 6-1	1	CR1	97.4	572	1492	0.926	0.605	0.469	6.68
No. 6-2	2	CR1				1.02	0.551	0.625	3.32
No. 7-1	1	CR2	108						
No. 7-2	2	CR2							

Note:  $n$  = 各載荷の折り返し点変位での繰り返し回数,  $\bar{\lambda}_x$  = 細長比パラメータ,  $\sigma_u/\sigma_y$  = 終局強度,  $\epsilon_u/\epsilon_y$  = 終局ひずみ,  $R$  = 突出部幅 ( $b/2$ ) の幅厚比パラメータ

キーワード：鋼構造、耐荷性能、複合ブレース材システム、低サイクル疲労、累積塑性変形

連絡先 〒468-8502 名古屋市中天白区塩釜口 1-501 名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科 TEL 052-838-2342

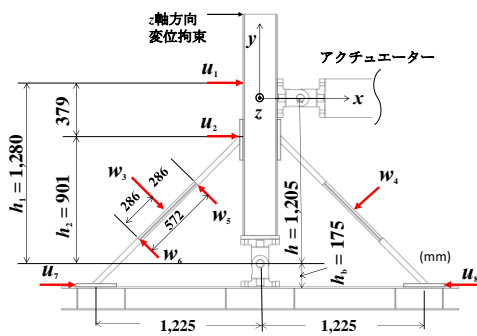


図-3 変位計設置位置

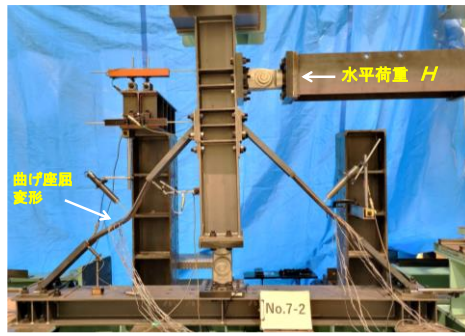


写真-1 载荷中の実験供試体 (No.7-2)

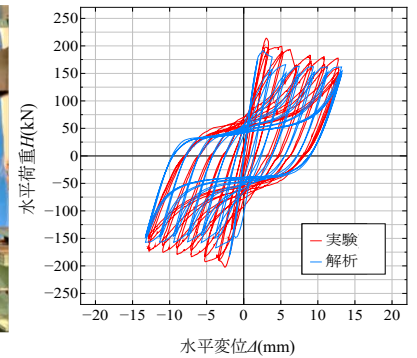


図-4 H-A履歴曲線の比較 (No.6-2)

中央断面ウェブの表裏のそれぞれ2カ所でゲージ長2mmのひずみゲージで測定した。

## (2) 履歴曲線

実験は、水平変位  $u_1$  の変位制御によって行った。水平変位  $u_1$  の測定位置 (図-3の  $h_1=1,280\text{mm}$ ) はアクチュエータの設置位置  $h=1,205\text{mm}$  とは差があることと、供試体底板のスリップ量 ( $u_7+u_8$ ) を含んでいるため、補正水平変位  $\Delta=(h/h_1)u_1-(u_7+u_8)$  を求め実験および解析での水平変位に用いた。図-4は、No.6-2 供試体の H-A 履歴曲線の実験と解析の比較を示す。単一ブレース材の圧縮時の履歴曲線で見られるような急激な荷重低下の現象がなく、原点を中心とする点対称の安定した履歴曲線が得られている。最大荷重の実験値は、解析値に比べ多少大きいものの、履歴形状には概ね良好な一致が見られる。写真-1は、供試体 No.7-2 の実験中の様子を示す。すべての供試体は写真のような曲げ座屈変形 (最大値は  $L_b/10$  程度) が両斜材に交互に現れ、局部座屈は生じなかった。

## (3) 累積塑性変形 (CID)

「ひずみ照査法」におけるブレース材の低サイクル疲労照査法として CID 法および D 法がある<sup>1)</sup>。本論文では、適用が簡単な CID 法 (累積塑性変形法) を用いる。CID の算定量として、応答水平変位の塑性成分  $\Delta_p=\Delta-\Delta_y$  ( $\Delta_y$  = 降伏水平変位) を用い、図-5に基づいて H-A 履歴曲線から実験供試体が保有する CID ( $\Delta_p$ ) 即ち  $CID_{cap}$  を算定する。図-6(a)は、H-A 履歴曲線の折り返し点間を直線近似して第一象限に移した  $|H|-|\Delta|$  関係の平均値曲線、図-6(b)は図-6(a)から算定した  $CID(\Delta_p)-|\Delta|$  曲線を示す。図-6(b)から、2 サイクル载荷 (実線) は 1 サイクル载荷 (点線) に比べ、耐力は低下するが、CID はほぼ 2 倍になることが分かる。このことから、 $CID_{cap}$  の算定には、適切な载荷プログラムの設定<sup>3)</sup>が重要であることが分かる。2 サイクル载荷の最終点をシステムの終局点と見なして  $CID_{cap}$  を算定すると、No.6-2 は  $CID_{cap}=255\text{mm}=153\Delta_y$ 、No.7-2 は  $CID_{cap}=420\text{mm}=251\Delta_y$  となる。ここで、 $\Delta_y=1.67\text{mm}$  は全供試体の平均降伏変位である。ちなみに、ANSI/AISC(2016)の BRB 付き鋼フレームの载荷プログラム<sup>4)</sup>では  $CID_{cap}\geq 200\Delta_y$  が規定されている。

## 4. あとがき

複合ブレース材システムにより、座屈後のブレース材の履歴挙動を安定的に求める所期の目的は達成できた。今後の研究課題として、(1)システムの実験結果からブレース材単独の挙動を求める方法、(2)  $CID_{cap}$  を求めるための载荷プログラムの確定、(3)ブレース材が保有する  $CID_{cap}$  と「ひずみ照査法<sup>1)</sup>」における CID の限界値  $CID_{lim}$  の関連性、(4)曲げ座屈と局部座屈の連成が生ずるブレース材の低サイクル疲労照査法の開発などがある。

参考文献：1) 宇佐美勉：橋梁と基礎，pp.25-30, 2016. 2) 宇佐美勉ら：構造工学論文集，Vol.56A，pp.486-498, 2010.

3) 宇佐美勉：土木学会第 74 回年次学術講演会，I-240, 2019. 4) ANSI/AISC 341-16: 2016.

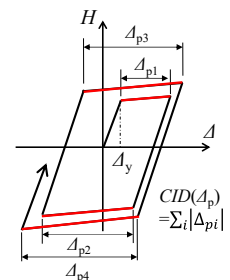
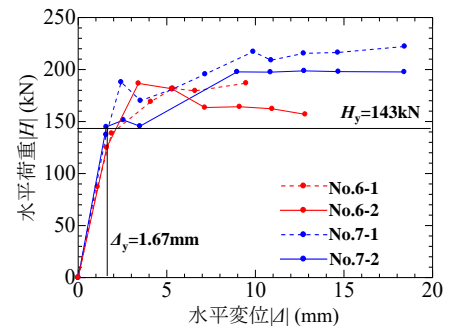
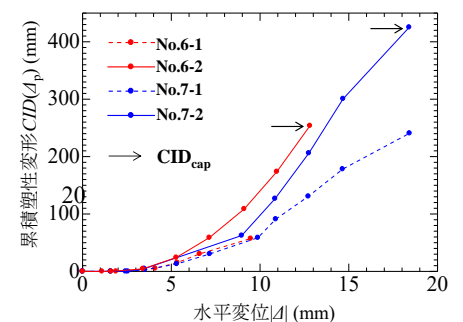


図-5 累積塑性変形(CID)

(a)  $|H|-|\Delta|$ 履歴の平均値曲線(b)  $CID(\Delta_p)-|\Delta|$ 曲線図-6  $CID(\Delta_p)$ の算定