

# 軸方向力が卓越して作用する箱形断面鋼部材の耐荷力特性に関する研究

橋梁工学分野 吉浦 健太

## Abstract

鋼トラス橋のような、軸方向力が卓越して作用する部材で構成される鋼部材において、繰返し荷重に対する部材の挙動がほとんど明らかにされていない。既往の研究で、圧縮部材の中心軸および偏心圧縮実験を行い、圧縮部材の設計公式の提案も行われている。しかし、圧縮部材の最大耐力のみに着目し、変形性能に関しては考慮されてなく、繰返し載荷実験は行われていない。そこで、本研究では、繰返し荷重を受け、局部座屈と全体座屈が連成する軸方向力が卓越して作用する箱形断面鋼柱の耐荷力特性および変形性能の解明を載荷実験および FEM 解析により明確にする。FEM 解析では、弾塑性有限変位解析プログラム EPASS/USSP を用いて解析を行い、実験の再現できることを確認する。

## 1. 本研究の背景・目的

今日、多くのトラス構造物はガセットプレートを紹介して部材を剛結したいわゆる剛節トラスとして製作されている。橋梁は、構造形式によって桁橋、鋼トラス橋、斜張橋、アーチ橋、ラーメン橋、つり橋などに分類される。中でも鋼トラス橋は構造が簡単で、設計・製作も容易であり、強度も剛度も大であり比較的長いスパンに対して適した橋梁形式である。しかし、格点構造がヒンジであるという仮定と違うことや、架設のときに多くの高力ボルト締めを必要とすることが欠点である。とくに、格点部分が剛に連結されているために、部材の回転が格点で拘束され、部材端部で曲げモーメントが発生する。鋼トラス橋のような、軸方向力が卓越して作用する部材で構成される鋼部材において、繰返し荷重に対する部材の挙動がほとんど明らかにされていない。既往の研究で、圧縮部材の中心軸および偏心圧縮実験を行い、圧縮部材の設計公式の提案も行われている。しかし、圧縮部材の耐荷力のみに着目し、変形性能に関しては考慮されてなく、繰返し載荷実験は行われていない。そこで、本研究では、繰返し荷重を受け、局部座屈と全体座屈が連成する箱形断面鋼柱の耐荷力特性の解明を載荷実験および FEM 解析により明確にする。FEM 解析では、弾塑性有限変位解析プログラム EPASS/USSP を用いて解析を行い、実験の再現できることを確認する。

## 2. 実験供試体の設計

### 2.1 供試体諸量

断面形状は幅と高さの比が 1:0.9 となる長方形断面とし、すみ肉溶接脚長を考慮してフランジ突出部の長

さを 6mm とする。式(2.1)と式(2.2)で示される幅厚比パラメータ  $R$  と細長比パラメータ  $\bar{\lambda}$  を、実績調査により得られた  $R=0.5, 0.8$  と  $\bar{\lambda}=0.5$  に設定することで供試体寸法を算出する。

$$R = \frac{b}{t} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \quad (2.1)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E} \cdot \frac{L}{r}} \quad (2.2)$$

ここに  $\sigma_y$ : 降伏点,  $E$ : 弾性係数,  $\nu$ : ポアソン比,  $k$ : 座屈係数(=4),  $t$ : 板厚,  $b$ : フランジ幅,  $L$ : ピン中心間距離,  $r$ : 弱軸周りの断面二次半径

以上の制約に基づいて決定した供試体の寸法および供試体名を表-2.1 に示し、供試体の断面図を図-2.1 に示す。

表-2.1 供試体の断面諸量

供試体名	SSR5	SSR8
細長比パラメータ $\bar{\lambda}$	0.5	0.5
幅厚比パラメータ $R$	0.5	0.8
弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	200000	200000
降伏点(SM490A) $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	325	325
ポアソン比 $\nu$	0.3	0.3
板厚 $t$ (mm)	3.2	2.6
座屈係数 $k$	4	4
フランジ突出長 (mm)	6	6
辺長比	0.9	0.9
$b$ (mm)	75.5	98.1
$B$ (mm)	90.7	112.7
$D$ (mm)	65.0	86.0
$d$ (mm)	68.2	88.6
断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )	996.5	1033.1
断面二次モーメント $I$ (mm <sup>4</sup> )	822800.4	1424618.9
ピン中心間隔 $L$ (mm)	1119.7	1447.0
偏心距離 $e$ (mm)	7.70	10.09

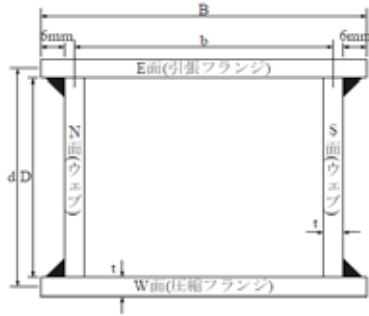


図-2.1 供試体の断面図

## 2.2 偏心距離の設定

実績調査により軸力による応力  $\sigma_N$  と材端曲げモーメントによる最大曲げ応力  $\sigma_M$  の比を 3:1 にすることから、式(2.3)が成立する。

$$\sigma_N = 3\sigma_M \quad (2.3)$$

軸力による応力  $\sigma_N$  と材端曲げモーメントによる最大曲げ応力  $\sigma_M$  は、弱軸まわりに曲げ座屈することを考慮すると、それぞれ次式で表される。

$$\sigma_N = N/A \quad (2.4)$$

$$\sigma_M = Ne/W \quad (2.5)$$

式(2.4),式(2.5)を式(2.3)に代入すると、 $e$  についての式(2.6)を得ることができる。

$$e = \frac{1}{3} \cdot \frac{W}{A} \quad (2.6)$$

式(2.6)から偏心量  $e$  は S5R5 で  $e=7.7\text{mm}$ , S5R8 で  $e=10.09\text{mm}$  となる。

## 2.3 鋼材の引張試験

薄肉鋼板を実験で用いるため、切断前の 9mm と実験供試体の 3.2mm と 2.6mm に対して引張試験を実施した。引張試験結果を表-2.2 に示す。表より、各板厚の間にはほとんど差はみられなかった。

表-2.2 引張試験結果

板厚	降伏点	引張強度	弾性係数
	$\sigma_Y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\sigma_U$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )
9mm-A	396.0	537.1	194613.6
9mm-B	397.0	542.5	208439.8
9mm-C	391.1	538.2	208870.1
平均	394.7	539.3	203974.5
3.2mm-A	403.7	558.7	208569.0
3.2mm-B	382.2	530.3	205006.6
3.2mm-C	388.6	539.1	205597.5
平均	391.5	542.7	206391.0
2.6mm-A	386.3	546.0	204858.6
2.6mm-B	387.8	536.1	210723.8
2.6mm-C	-	543.3	196891.0
平均	387.1	541.1	207791.2

## 2.4 残留応力測定

座屈に大きな影響を及ぼす残留応力を測定するため、表-2.2 で示す実験供試体と同じ断面で長さが 400mm の矩形断面柱を用いる。図-2.2 と図-2.3 はそれぞれ S5R5 と S5R8 の断面の残留応力分布を示している。

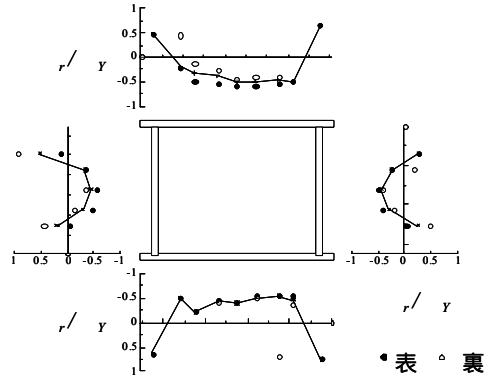


図-2.2 S5R5 の残留応力分布

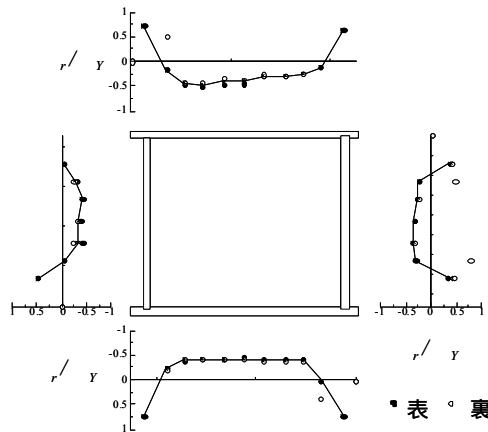


図-2.3 S5R8 の残留応力分布

図より、引張側が  $0.75\sigma_Y$ , 圧縮側が  $-0.45\sigma_Y$  となり文献<sup>2)</sup>で記載されている引張側が  $1.0\sigma_Y$ , 圧縮側が  $-0.3\sigma_Y$  の残留応力分布よりも 30%程度引張が小さく圧縮が大きい結果となった。

## 3. 箱形断面鋼柱の偏心載荷実験結果

### 3.1 予備載荷結果

図-3.1 に予備載荷の荷重-軸方向変位関係を示す。予備載荷は、載荷のバランスを見て、圧縮と引張の傾きを確認するために実施した。MS5R5 では  $\pm 50\text{kN}$  で折り返して載荷し、それ以外は  $\pm 30\text{kN}$  で折り返し載荷する。図-3.1 より MS5R5 以外の荷重-軸方向変位関係はほぼ一致している。MS5R5 の傾きについて偏心量の観点から考察する。

表-3.1 に中央断面における圧縮フランジ(E面)と引張フランジ(W面)で貼り付けたひずみゲージの  $-30\text{kN}$  と  $-50\text{kN}$  における値を示す。各荷重において、 $\sigma_N$  と  $\sigma_M$

を 3:1 となるように載荷すると引張フランジのひずみ  $\varepsilon_W$  と圧縮フランジのひずみ  $\varepsilon_E$  の比が  $\varepsilon_E/\varepsilon_W=2$  になる。MS5R5 以外は、多少のばらつきはあるものの  $\varepsilon_E/\varepsilon_W=1.9\sim 2.1$  の範囲になっているのに対し、MS5R5 では  $\varepsilon_E/\varepsilon_W=2.6$  程度であった。このことから、MS5R5 の実験では  $\sigma_N:\sigma_M=2.33:1$  であり実際の偏心量が  $e=9.91\text{mm}$  であったことが予想される。

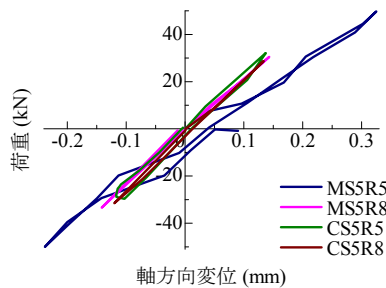


図-3.1 予備載荷結果

表-3.1 ひずみの値の比較

供試体名	荷重	圧縮	引張	圧縮/引張
MS5R5	-30kN	-0.128	-0.049	2.589
	-50kN	-0.215	-0.079	2.716
CS5R5	-30kN	-0.105	-0.049	2.154
	-50kN	-0.179	-0.085	2.117
MS5R8	-30kN	-0.104	-0.053	1.964
	-50kN	-0.189	-0.098	1.918
CS5R8	-30kN	-0.102	-0.050	2.060
	-50kN	-0.174	-0.093	1.880

### 3.2 単調載荷の荷重-変位関係

本論文における軸方向変位、面外変位は引張力作用時の変位を正、圧縮力作用時を負とし、ゼロ点の位置を実験開始位置とする。MS5R5 と MS5R8 の単調圧縮載荷実験の荷重-軸方向変位関係と荷重-面外変位関係について図-3.2 に示す。

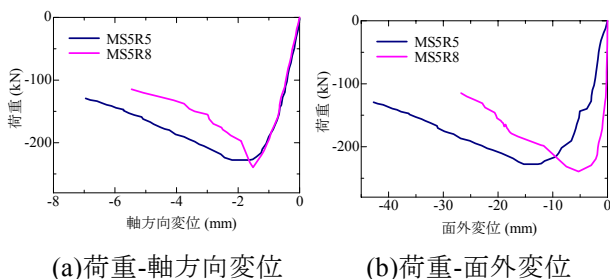


図-3.2 単調載荷の実験結果

図-3.2 から最圧縮荷重以降の荷重低下の程度が MS5R8 の方が MS5R5 に比べ大きいことがわかる。これは、MS5R8 が最大圧縮荷重をむかえた直後に局部座屈が発生してしまったためである。

### 3.3 繰返し載荷の荷重-変位関係

CS5R5 の繰返し載荷実験の荷重-軸方向変位関係と荷重-面外変位関係について図-3.3 に示し、CS5R8 の繰返し載荷実験の荷重-軸方向変位関係と荷重-面外変位関係をそれぞれ図-3.4 に示す。

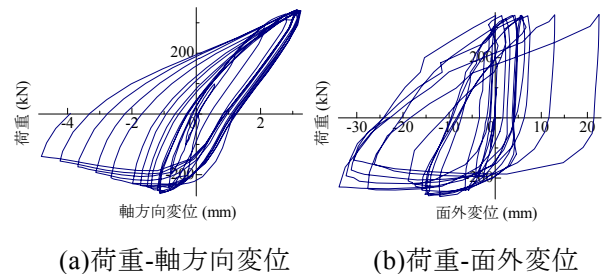


図-3.3 CS5R5 の実験結果

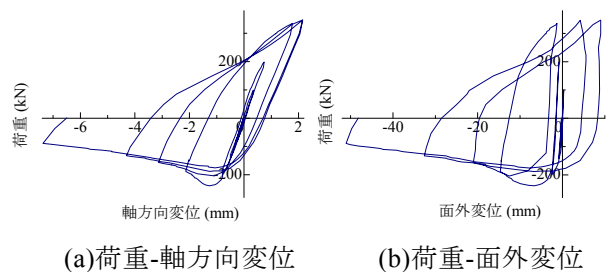


図-3.4 CS5R8 の実験結果

### 3.4 単調載荷と繰返し載荷の比較

単調圧縮載荷と繰返し載荷の実験結果を比較したものを図-3.5 と図-3.6 に示し、最大圧縮荷重や最大圧縮時における変位で比較した表を表-3.2 に示す。

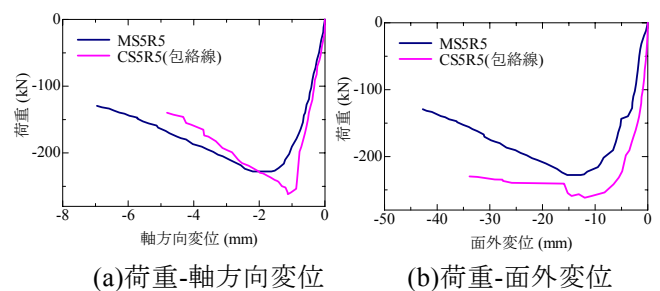


図-3.5 S5R5 の比較

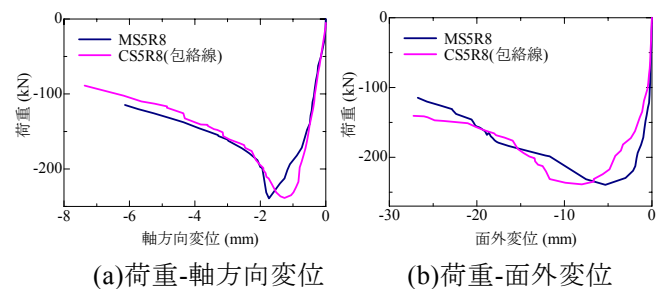


図-3.6 S5R8 の比較

表-3.2 単調と繰返しの比較

	最大圧縮荷重 (kN)	最大圧縮荷重時の軸方向変位 (mm)	最大圧縮荷重時の面外変位 (mm)
MS5R5	-228 (-239)	-2.20	-15.3
CS5R5	-262 (-239)	-1.13	-12.0
MS5R8	-239 (-246)	-1.52	-5.32
CS5R8	-239 (-246)	-1.26	-6.65

図-3.5(a), 図-3.6(a)および表-3.2 から, S5R5 と S5R8 の両方の供試体において, 最大圧縮荷重時での軸方向変位が, 繰返し載荷の結果が単調載荷の結果よりも小さい値となった。これは, 繰返しで供試体に引張力が加わることで, 残留応力が抜けてしまうので, 最大圧縮荷重における変位が単調載荷よりも小さい値を示している。また, S5R8 の単調載荷と繰返し載荷で最大圧縮荷重がほぼ同じ結果であったことから, 繰返しの影響は耐荷力にはないことが言える。最大圧縮荷重が CS5R5 より S5R8 で大きな差があるのは, S5R8 の座屈の発生のタイミングが S5R5 に比べて早かったことが考えられ, 幅厚比パラメータの影響があると言える。このことは強度推定式から実測値により算出した理論値と比較することでも言える。

#### 4. 箱形断面柱の解析

##### 4.1 解析概要

解析によって鋼部材の耐震性能を求める場合, あらかじめ実験結果との比較によりその解析手法の精度が確認されたものでなければならない。弾塑性有限変位解析の妥当性を検証するために, 箱形断面鋼柱の偏心載荷実験に対して解析を実施して, 実験との比較を行う。

##### 4.2 解析方法

柱の座屈を再現するためには, 実務設計での解析で用いられているファイバー要素や梁-柱要素で考慮される全体座屈のみではなく, 板要素により全体座屈と局部座屈が同時に起こる連成座屈を正確に再現する。解析プログラムには, 弾塑性有限変位解析プログラム EPASS/USSP を用いる。

##### 4.3 解析モデル

解析モデル図を図-4.1, モデルの諸量を表-4.1 に示す。表-4.1 の値は, 実測値を用いている。要素分割は, 局部座屈が発生し面外変位が大きくなる柱中央部の分割数を細かく設定する。載荷方法は, 柱の両端部の断面の図心より偏心距離  $e$  だけずらして強制変位を与える。また, モデルの両端部は剛体要素とした。繰返しの折り返し点については, CS5R5 および CS5R8 での実験の折り返し点と等しくなるようにする。

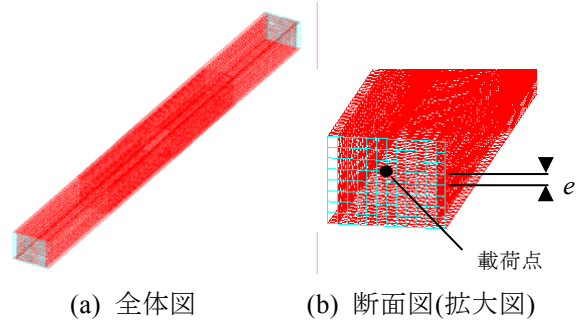


図-4.1 解析モデル

表-4.1 解析モデルの諸量

解析モデル	S5R5	S5R8
要素	板要素	
節点数	6440	
弾性係数 $E$ (N/mm <sup>2</sup> )	206391	207791
降伏点(SM490) $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	391.5	387.1
ポアソン比 $\nu$	0.3	0.3
板厚 $t$ (mm)	3.2	2.6
解析モデル長さ $L$ (mm)	1119.7	1447.0
偏心距離 $e$ (mm)	8.00	10.00

#### 4.4 解析に導入した応力-ひずみ曲線

図-4.2 に解析で導入した応力-ひずみ関係を示す。これは, 引張試験結果をもとにマルチリニア則で再現する。硬化則は繰返し載荷を考慮して移動硬化則とする。

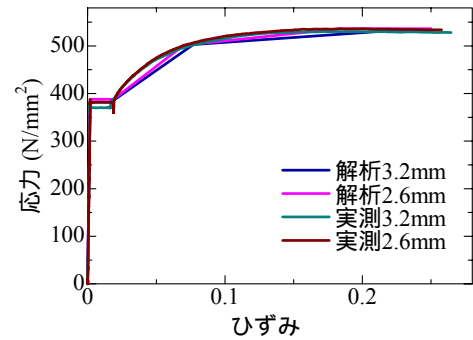


図-4.2 解析での応力-ひずみ曲線

#### 4.5 初期不整

初期たわみは局部座屈を再現するために, 板の圧縮板の初期たわみを採用し, 中央での初期たわみ  $w_0$  は式(4.1)であらわされる。残留応力分布は図-4.3 に示すように, 圧縮側の残留応力が  $-0.45 \sigma_y$  となるように設定する。引張側の残留応力は, 各面において圧縮側と引張側の面積が等しくなるように設定する。

$$w_0 = \frac{b}{150} \times \sin \frac{x}{L} \pi \times \sin \frac{y}{b} \pi \quad (4.1)$$

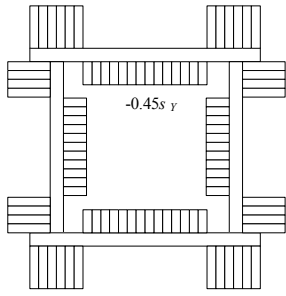
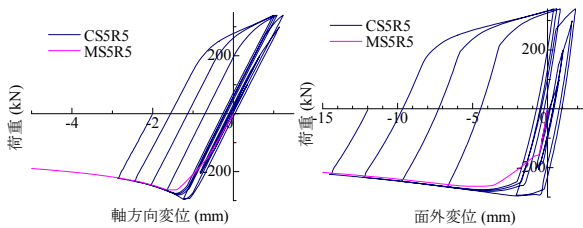


図-4.3 残留応力の分布形状

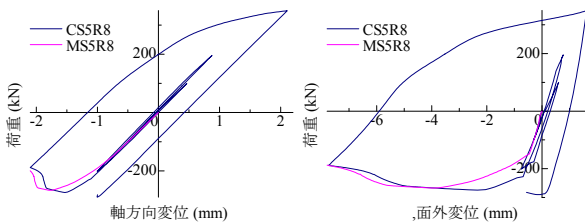
#### 4.6 解析結果

弾塑性有限変位解析で求めたS5R5 とS5R8 の荷重-軸方向変位関係および荷重-面外変位関係を図-4.4 と図-4.5 に示す. なお, 折り返し点は実験と同様に±100kN, ±200kN,  $2\delta_{.100}$ と折り返しをする.  $6\delta_{.100}$ 以降は包絡線に影響がないと考慮し, 省いてある. CS5R8の繰返し载荷の解析では局部座屈が発生した後, 解析がストップしたため, そこまでの解析結果を用いる.



(a)荷重-軸方向変位 (b)荷重-面外変位

図-4.4 S5R5の解析結果



(a)荷重-軸方向変位 (b)荷重-面外変位

図-4.5 S5R8の解析結果

#### 4.7 実験と解析の比較

弾塑性有限変位解析による結果と偏心载荷実験で得られた結果との比較を行う. それぞれ単調圧縮载荷, 繰返し载荷における包絡線の比較で弾塑性有限変位解析の妥当性を検証した. 単調圧縮载荷の結果を図-4.6 と図-4.7 に示す.

図-4.6 からMS5R5については最大圧縮荷重まではほぼ再現できている. 最大圧縮荷重以降の変形性能で解析と実験で少し差が生じている. 図-4.7 より, 荷重-軸方向変位関係, 荷重-面外変位関係の両方とも最大圧縮荷重の手前までは, 実験と解析はほぼ一致してい

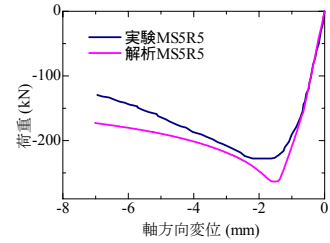
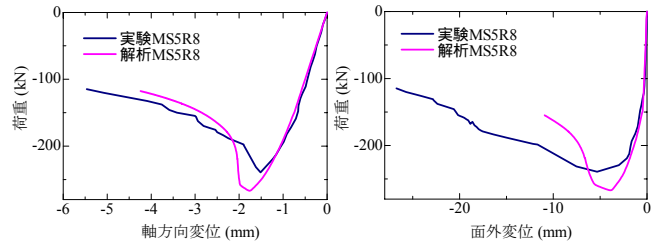


図-4.6 MS5R5の荷重-軸方向変位比較

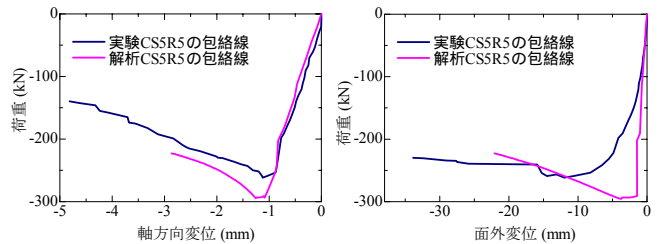


(a)荷重-軸方向変位 (b)荷重-面外変位

図-4.7 MS5R8の比較

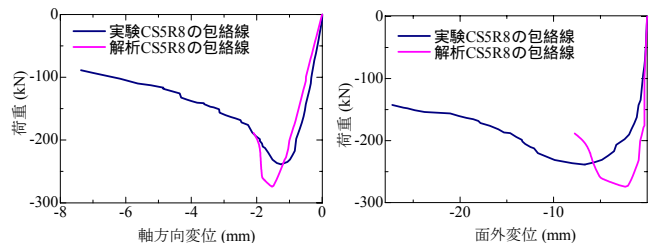
る. 実験の最大圧縮荷重が解析よりの小さい値になったのは, 局部座屈のタイミングが早かったことが考えられる. 実験では, 最大圧縮荷重時に局部座屈が発生した. 荷重-軸方向変位に関しては, 最大圧縮荷重以降の強度低下もほぼ再現できている.

次に, 繰返し载荷の結果を図-4.8 と図-4.9 に示す.



(a)荷重-軸方向変位 (b)荷重-面外変位

図-4.8 CS5R5の比較



(a)荷重-軸方向変位 (b)荷重-面外変位

図-4.9 CS5R8の比較

図-4.8(a)より, CS5R5の荷重-軸方向変位関係は最大圧縮荷重まではほぼ再現できている. 一方, 荷重-面外変位関係は, -100kN以降の差が大きく出てしまっている. 表-4.2 と表-4.3 に最大圧縮荷重載荷時の軸方向変位と面外変位を弾塑性有限変位解析と実験から得られ

た結果の比較を行っている。

表-4.2 実験と解析の比較(単調載荷)

	最大圧縮荷重 (kN)	最大圧縮荷重時の軸方向変位 (mm)	最大圧縮荷重時の面外変位 (mm)
実験MS5R5	-228	-2.20	-15.3
解析MS5R5	-263	-1.53	-4.80
実験MS5R8	-239	-1.52	-5.32
解析MS5R8	-266	-1.76	-3.92

表-4.3 実験と解析の比較(繰返し載荷)

	最大圧縮荷重 (kN)	最大圧縮荷重時の軸方向変位 (mm)	最大圧縮荷重時の面外変位 (mm)
実験CS5R5	-262	-1.13	-12.0
解析CS5R5	-295	-1.25	-2.24
実験CS5R8	-239	-1.26	-6.65
解析CS5R8	-289	-1.53	-2.34

表-4.2と表-4.3より、解析と実験とを比較すると、4つの解析モデルの最大圧縮荷重の解析値は実験よりも10%程度大きくなる結果となった。最大圧縮荷重時の軸方向変位で比較すると、4つのモデルでは、ほぼ再現できているが、面外変位で比較すると大きく異なる結果となった。

## 5. 結論および今後の課題

1.  $\lambda=0.5$  で断面の幅と高さの比が 1:0.9,  $R=0.5, 0.8$  の2種類の実験供試体に対して偏心載荷実験を実施した結果、耐荷力には繰返しの影響はほとんどないが、変形性能には繰返しの影響が21%程度あることを明らかにした。
2. 幅厚比パラメータ  $R$  が大きい S5R8 の供試体の方が、局部座屈により最大圧縮荷重以降の強度低下が大きくなる。また、S5R5 に比べて S5R8 の耐荷力が10%程度小さくなるのも、座屈によるもので  $R$  の影響が大きいことを明らかにした。
3. 箱形断面鋼柱の偏心載荷実験の再現解析では、単調圧縮と繰返しの両方で荷重-軸方向変位関係においてほぼ再現できることを明らかにした。また結論 1.で述べた変形性能への繰返しの影響も15~22%であり、実験を再現できている。
4. 繰返しの解析で、単調に比べて最大圧縮荷重が10%程度上昇している。残留応力やひずみ硬化の影響がもちろん考えられるが、実験ではその傾向はあまり見られなかった。CS5R8 の解析で局部座屈した後の繰返しで解析が流れなくなったのも、繰返しの構成則を精確に再現できていなかったことが原因と考えられる。今後は、繰返しの履歴曲線を試験で得た上で、その繰返しの構成則で解析を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 谷上裕明：鋼トラス部材の耐震性能に関する研究，大阪大学卒業論文，2009年2月
- 2) (社)土木学会：座屈設計ガイドライン改訂第2版，丸善，2005年10月
- 3) 宇佐美勉・福本昤士・青木徹彦：溶接箱形断面柱の局部座屈と全体座屈の連成強度に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第308号，pp.37-48，1981年4月

## 討 議 等

### ◆討議 [ 大内 一教授 ]

繰返し載荷における実験と解析でどの程度合致するのか。

◆回答：実験と解析とで、圧縮側の初期勾配はほぼ一致しているが、最大圧縮荷重は1割ほど差があり解析結果の方が大きい値を得ている。材料の繰返し載荷試験結果に基づく繰返し構成則を解析で考慮すればより正確な荷重-変位関係を再現可能であるとかんがえるが、今回の解析では未反映である。

### ◆討議 [ 鬼頭 宏明准教授 ]

実験に対して解析では、圧縮荷重が約1割上昇していたのに対して、引張荷重はどの程度なのか。

◆回答：実験では、引張側は、治具の設計荷重である340kNで除荷している。そのため、解析でも同様に340kNで除荷しており、340kNという制約が無い場合の実験結果を得ていない。

### ◆討議 [ 角掛 久雄助教 ]

実験装置でどのように偏心載荷しているのか。またどのように引張力を与えるのか。

◆回答：実験では、柱供試体の両端に溶接したフランジに長孔加工を施し、所定の偏心量が確保できるよう、このフランジとピンとをずらしてボルトにより連結し、偏心荷重を載荷をしている。また、引張力は、この偏心状態のままに柱供試体に載荷させている。

### ◆討議 [ 山口 隆司教授 ]

耐荷力について分かったことはなにか。

◆回答：単調載荷と繰返し載荷による実験結果を比較することにより、荷重の繰返し作用が薄肉箱形断面柱部材の耐荷力へ及ぼす影響はほとんど認められないことがわかった。これは、軸方向荷重の単調載荷および繰返し載荷を問わず、柱部材の耐荷力が最大荷重到達後、急激に低下するためである。

### ◆討議 [ 山口 隆司教授 ]

トラスの上下弦材に必要な変形性能についてどのように考えているのか。

◆回答：今回設定した細長比パラメータが0.5、幅厚比パラメータが0.5および0.8を有する薄肉箱形断面柱部材では、上述のとおり、軸方向荷重の単調載荷および繰返し載荷を問わず、柱部材の耐荷力は最大荷重到達後、急激に低下した。本研究では実際のトラス構造物を対象とした検討を実施していないが、実際のトラス橋では、より大きい細長比パラメータを有する柱部材が存在するため、トラスの上下弦材では、その部材の最大荷重までの変形性能しか期待することができないと考えられる。