

# 論文 非対称鉄骨を内蔵した SRC 長柱の 2 軸曲げ耐力評価

林 和宏<sup>\*1</sup>・柳沢 学<sup>\*2</sup>・柴田 道生<sup>\*3</sup>

**要旨：**本論は 1 軸非対称の T 形鉄骨を内蔵した SRC 長柱の 2 軸曲げに関する耐力評価法の誘導を主眼とし、偏心圧縮実験および数値解析を用いてその精度を検証した。非対称断面 SRC 長柱の 2 軸曲げ耐力評価では、部材の 2 軸曲げ全塑性モーメントの値をいかに明示的に求めるかが鍵となるが、現行の設計法では示されていない。そこで、既往の 2 軸対称断面用の 2 軸曲げ全塑性モーメント近似法を拡張し、非対称断面材に適用する手法を導き、精解と良好な対応を示すことを確認した。また、これを基に導かれた長柱部材の 2 軸曲げ耐力評価法は、実験および解析と良好な対応を示した。

**キーワード：**鉄骨鉄筋コンクリート構造, 長柱, 非対称断面, 2 軸曲げ, 耐力評価

## 1. 序

鉄骨鉄筋コンクリート構造（以後 SRC 構造と呼ぶ）では、骨組みの内柱の内蔵鉄骨として 2 軸対称断面である十字形鉄骨が主として用いられる。一方、建物側柱では、図-1(a)に示すような T 字形鋼に 3 枚のフランジを付した 1 軸非対称断面鉄骨が内蔵される場合が多い。このような 1 軸非対称断面材は弱軸曲げに対しては対称性を、強軸曲げに対しては非対称性を示す。

鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説<sup>1)</sup>(以後、SRC 規準と呼ぶ)では、図-1(a)のような非対称断面 SRC 柱部材の設計にあたり、非対称性を考慮する厳密な設計法と、非対称成分を無視して図-1(b)や(c)のような 2 軸対称断面に置換する簡易設計法が示されている。このうち、厳密設計法は部材が強軸曲げを受ける場合のみが示され、弱軸曲げや 2 軸曲げ（側柱の設計では特に必要な場合も多い）を受ける場合は対象としていない。従って、現実に図-1(a)の非対称断面を設計する場合は簡易設計法を用いることになるが、この設計手法は鉄骨の耐力を無視するため経済設計の面では不合理的場合も多い<sup>2)</sup>。

図-1(a)に示す非対称断面 SRC 柱部材の耐力に関する既往の研究は、西村・斉藤・松田らによって行われた短柱部材が強軸曲げを受ける場合の実験報告<sup>3)~6)</sup>以外見受けられなかった。これを受け著者らは、文献 7)で 1 軸非対称鉄骨内蔵 SRC 長柱（以後、非対称断面 SRC 長柱と

呼ぶ）が強軸曲げを受ける場合の、文献 8)で弱軸曲げを受ける場合の厳密な耐力評価法に関する研究を行った。

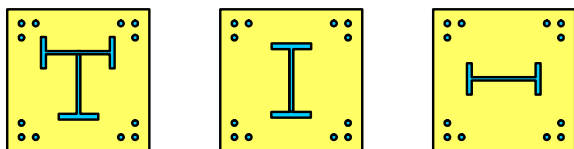
本論は文献 7), 8)に続いて、非対称断面 SRC 長柱が 2 軸曲げを受ける場合の厳密な耐力評価法確立を目的とし、先の 2 編と合わせて当該部材の設計法の完結を目指す。SRC 柱部材の終局 2 軸曲げ耐力評価法は、2 軸対称断面に関するものすら SRC 規準にはなく、文献 9)等が示されているのみである。本論は、非対称断面 SRC 長柱の部材変形性状に関する実験的検証と、当該部材の 2 軸曲げ累加強度の近似法導出を中核とする。実験的検証では、柱の両端に等しい偏心を与えた 2 軸曲げ対称偏心圧縮実験を行う。また、非対称断面 SRC 柱の 2 軸曲げ累加強度の近似法は、文献 9)で示された 2 軸対称断面の理論を拡張する形で導く。

## 2. 仮定

- 1) 平面保持の仮定が成立する。
- 2) 垂直応力と軸力の符号は圧縮を正、軸ひずみは縮みを正とする。
- 3) 断面の曲げの向き  $\phi$  は、正側の強軸曲げを  $0^\circ$ 、弱軸曲げを  $90^\circ$ 、負側の強軸曲げを  $180^\circ$  とする。
- 4) 断面の中立軸の傾き  $\psi$  は、断面強軸と平行な場合を  $0^\circ$  とする。

## 3. 非対称断面 SRC 長柱の 2 軸曲げ偏心圧縮実験

1 軸非対称鉄骨内蔵の SRC 長柱の両端に、等しい偏心量を与えた、2 軸曲げ対称偏心圧縮実験を行った。図-1(a)に示すような 1 軸非対称断面の、2 軸曲げ  $N-M$  降伏曲線は、正曲げ側と負曲げ側が対称形にならない特徴を有している。そこで、偏心の方向（曲げ向き）は、 $45^\circ$  と  $135^\circ$  の 2 種類とした。



(a) 非対称鉄骨 (b) 強軸置換断面 (c) 弱軸置換断面  
図-1 1 軸非対称鉄骨内蔵 SRC 柱断面

\*1 京都大学防災研究所 JSPS 特別研究員 博士（工学）（正会員）

\*2 摂南大学 理工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

\*3 摂南大学 理工学部建築学科教授 工博（正会員）

表-1 試験体一覧

試験体名	材長	材齢	$F_c$	$e_x$	$e_y$	$N_o$	$M_{ox}$	$M_{oy}$	$n$	$m$
	mm	日								
A1L	1200	111	23.0	2.07	2.07	544	10.98	8.94	0.382	0.554
A1s	1200	116	25.4	0.69	0.69	569	11.28	9.26	0.787	0.387
A2L	1200	111	23.0	2.07	-2.07	541	10.88	8.87	0.435	0.633
A2s	1200	120	26.5	0.69	-0.69	593	11.71	9.67	0.760	0.376
B1L	2400	111	24.6	2.07	2.07	568	11.31	9.35	0.239	0.351
B1s	2400	111	24.9	0.69	0.69	565	11.27	9.19	0.519	0.254
B2L	2400	108	25.2	2.07	-2.07	569	11.30	9.27	0.310	0.457
B2s	2400	111	23.7	0.69	-0.69	551	11.08	8.97	0.516	0.250

$F_c$ : コンクリート強度  $e_x$ : x 方向の偏心量  $e_y$ : y 方向の偏心量

### 3.1 試験体

試験体概要を図-2に、試験体名・载荷条件・基本諸量および無次元化した最大耐力を表-1に示す。試験体は1辺12cm角のコンクリート中に板厚6mmの鋼板を溶接組立したT型断面鉄骨(T-56×50×6×6)を挿入し、主筋およびフープは9mm, 3mm丸鋼を用い、材端に厚さ20mmのエンドプレートを溶接した。試験体名は、1文字目は材長を(A: 1200mm, B: 2400mm)、2文字目は曲げの種類を(1: 45°曲げ, 2: 135°曲げ)、3文字目は偏心量を(L: 偏心大, s: 偏心小)、を表す。表中の $N_o$ は試験体の降伏軸力、 $M_{ox}$ と $M_{oy}$ はそれぞれ強軸正曲げ(曲げの向き $\phi=0^\circ$ )と弱軸曲げの基準強度(中立軸が図心を通過するときの各全塑性モーメントの値。ただし、図心の詳細は次節参照)である。試験体両端のx方向とy方向の偏心量 $e_x$ と $e_y$ は、降伏軸力と2軸曲げ基準強度で無次元化した $N-M$ 相関曲線上で、30°(偏心大)と60°(偏心小)の方向に対応する。

次に、鋼材の引張試験結果を表-2に、コンクリートの調合設計を表-3に示す。なお、コンクリートの調合では細骨材の含水率に応じて水及び細骨材量の補正を行った。

### 3.2 図心の定義と偏心量

SRC 規準では、図-1(a)のような非対称断面に関して、断面中心を仮の図心に定めて耐力を算定している。図-3は断面中心を仮の図心と見なした場合の、1軸非対称断面の $N-M$ 降伏曲線の例を示す。縦軸は作用荷重と降伏軸力の比 $n$ を、横軸は曲げモーメントと強軸曲げの基準強度 $M_{ox}$ の比 $m$ を表す。図のように、断面中心に関する強軸曲げおよび2軸曲げ( $\phi=45^\circ$ ) $N-M$ 相関関係上の降伏曲線の頂点は、図縦軸(軸力 $N$ の軸)とは異なった位置に存在する<sup>2),7)</sup>。また、弱軸曲げと2軸曲げでは、降伏曲線の頂点が部材降伏軸力( $n=1$ )以下の値をとる。

構造力学の定義では、1点を通る任意の直交軸に関して、等価断面1次モーメントがそれぞれ0となる点を「図心」と定めている(以後、弾性図心と呼ぶ)。2軸対称断面では、弾性図心と断面中心は常に一致する。しかし、

表-2 鋼材の引張試験結果

	降伏応力	引張強度	伸び率
鉄骨	279 MPa	419 MPa	26.1 %
鉄筋	292 MPa	424 MPa	32.1 %

表-3 コンクリートの調合

水セメント比	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 剤
W/C(%)	W(kg)	C(kg)	S(kg)	G(kg)	Ad(kg)
65	210	323	867	830	3.46

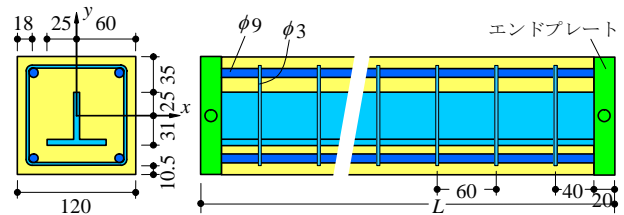


図-2 非対称断面 SRC 長柱試験体概要 (単位: mm)

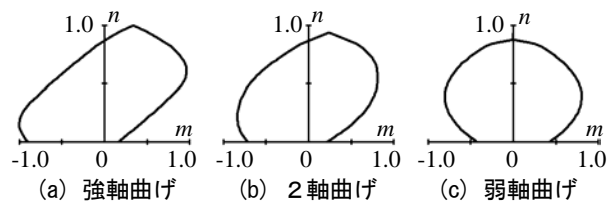


図-3 断面中心を基準に取った場合の  $N-M$  降伏曲線

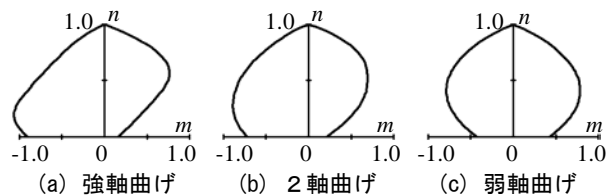


図-4 塑性図心を基準に取った場合の  $N-M$  降伏曲線

複数の非線形材料で構成され、しかもそれらの図心が一致しない部材(本論で取り扱う非対称断面 SRC 柱などが該当し、以後 非対称 Hybrid 部材と呼ぶ)では、弾性図心が断面中心とは異なった位置に存在する。また、断面に一樣なひずみを生じさせる軸力の作用位置(以後、一樣ひずみ圧縮位置)が、存在軸力のレベルによって変化

する。従って、軸力 0 の場合は一様ひずみ圧縮位置が弾性図心と一致するが、軸力の増大とともに両者の位置は離れていく。よって、弾性図心に基づいたとしても、 $N-M$  相関関係上の降伏曲線の頂点は、図-3と同じように縦軸とは異なった位置に存在する<sup>8)</sup>。

文献 8)では、非対称 Hybrid 部材に関する「図心」を新たに定義することで、上記の問題解決を図った。弾性図心が軸力 0 の時の「一様ひずみ圧縮位置」であるのに対し、新たに定義した「図心」は降伏軸力の際の「一様ひずみ圧縮位置」に一致する。この新たに定義した図心を「塑性図心」と呼び、この「塑性図心」に基づけば、曲げの向き、部材の断面形状および材料特性に関わらず、 $N-M$  相関関係上の降伏曲線の頂点は常に図縦軸（軸力  $N$  の軸）と一致し、その値は部材の降伏軸力に等しくなる。図-4は、「塑性図心」に基づいた 1 軸非対称断面の  $N-M$  降伏曲線である。検討の断面は図-3と同じであり、図中の縦軸と横軸の定義も図-3に従う。

図-2に示した試験体の断面中心と塑性図心の距離  $e_c$  は

$$e_c = A_f (s \sigma_y - F_c) j / N_o \quad (1)$$

で与えられる。ここに、 $A_f$  は鉄骨フランジの断面積、 $j$  はフランジ中心と試験体断面中心の距離、 $s \sigma_y$  は鉄骨の降伏応力、 $F_c$  はコンクリート強度である。本論で取り扱う試験体では、 $e_c$  の値が約 3.1mm となる（試験体によって  $F_c$  の値が異なるため、厳密には各試験体で  $e_c$  の値が異なる）。表-1に示した偏心量  $e_x$  と  $e_y$  は、上記の塑性図心位置に対して与えるものとした。

### 3.3 荷重・測定システム

偏心圧縮実験では、全方向回転自由な支承として、図-5(a)に示す交差かまぼこ支承を用いた。また、試験体の材端に所定の偏心量を与えるための材端移動装置を図-5(b)に示す。この材端移動装置は、図-5(b)に示す調整用ボルト A を動かすことで A' の枠が左右 ( $x$  方向) に移動し、試験体に  $x$  方向の偏心を与える。また、ボルト B を動かすことで B' のプレートが上下 ( $y$  方向) に移動し、 $y$  方向の偏心を与える。

また、試験体の立体的な変形性状を測定することを目的とした測定システムを図-6に示す。この測定システムは軸方向 ( $z$  方向) 変位と、材長を 8 等分する点及び材端位置での  $x, y$  方向変位を測定する。

## 4. 数値解析

偏心圧縮実験結果の検討と、耐力評価法の精度検証を目的とした数値解析手法の概要を示す。解析は、たわみ曲線を差分近似した 1 次元連続体の変位増分解法を用いた。解析モデルは、部材の両端に等しい偏心  $e_x$  と  $e_y$  を与えた偏心圧縮柱を図-7のようにモデル化し、

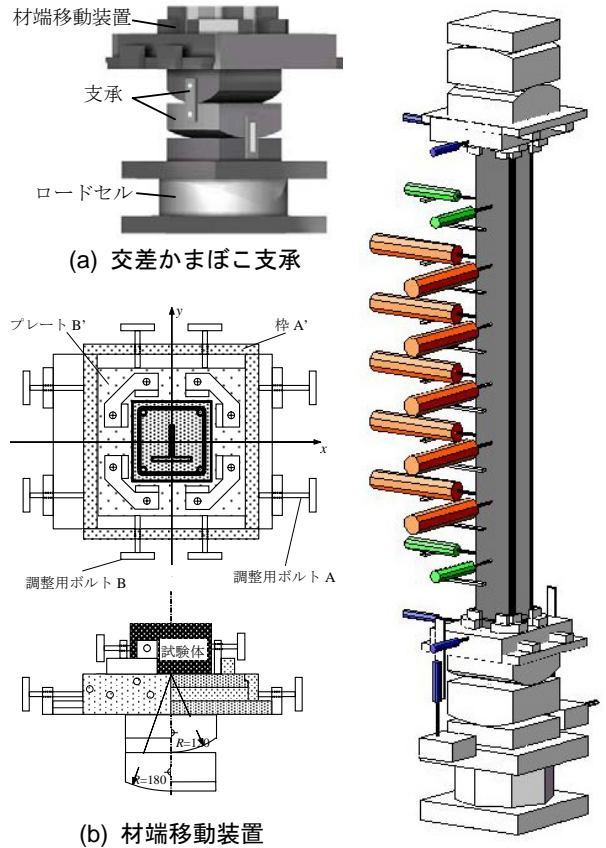


図-5 支承と材端移動装置 図-6 測定システム

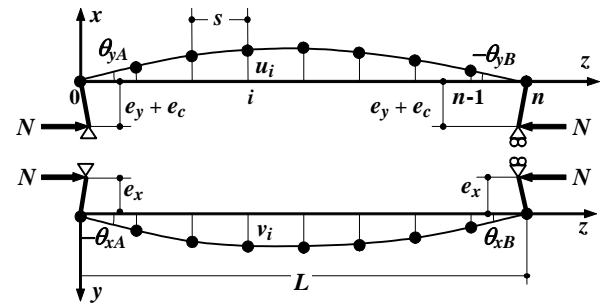


図-7 解析モデル

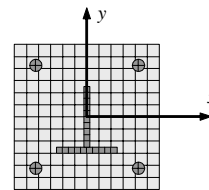


図-8 解析断面

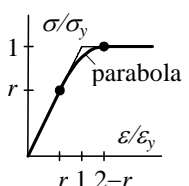


図-9 材料構成法則

各点の曲率をたわみの 2 次差分で近似する。

解析断面は図-8に示すようにコンクリートを縦横とも 12 分割、鉄骨をウェブ・フランジともに板厚方向が 1 分割で幅が 10 分割、鉄筋 1 本を縦横 2 分割計 4 分割とし、軸方向は材長を 8 分割とした（図-7中の  $n=8$ ）。また、材料構成法則は図-9のパラボラ型とし、比例限度  $r$  はコンクリートで  $r=0$ 、鋼材で  $r=0.6$  とし、コンクリートには引張強度およびコンファインド効果を期待しない。

### 5. 実験結果と解析結果の比較

図-10に試験体 8 体の荷重 - 中央点たわみ関係を示す。縦軸は作用荷重と降伏軸力の比  $n$  を、横軸は強軸曲げに関する  $y$  方向の中央点たわみ量  $v_4$  と、弱軸曲げに関する  $x$  方向の中央点たわみ量  $u_4$  を表す。ただし、135°曲げの試験体では、 $y$  方向の中央点たわみ量  $v_4$  はマイナスの値を取るが、ここでは正負を逆転させてプラスの領域に記す。図中の---●---と---○---は実験で得られた  $v_4$  と  $u_4$  を、実線と破線はこれに対応する数値解析を、1点鎖線と2点鎖線は偏心量  $e_x$  と  $e_y$  に対応する弾性解

$$u_4 = \frac{Ne_x L^2}{8EI_y}, \quad v_4 = \frac{Ne_y L^2}{8EI_x} \quad (2)$$

を示す。ここに、 $I_x$  と  $I_y$  は塑性図心に基づく非対称 SRC 断面の、強軸まわりと弱軸まわりの断面2次モーメントである。

弾性解と実験結果の対応は、原点近傍の弾性立上りの範囲では概ね良好であり、これは所定の偏心量が正しく与えられたことを示している。しかし、図-10(b)と(f)に示す試験体 A2L と B2L の  $x$  方向の中央点たわみ量  $u_4$

や、図-10(c)に示す試験体 A1s の  $y$  方向の中央点たわみ量  $v_4$  は、弾性解よりもやや大きめの値（剛性）を示している。これは、実験における偏心量が所定の値よりも少し大きく与えられた結果と考えられる。

実験結果と数値解析の対応では、材長  $L = 1200\text{mm}$  で偏心量が小さい試験体 A1s と A2s (図-10(c)と(d))において、実験における最大耐力が数値解析をやや上回る結果が見られる。しかし、図-10全体では、前章で示した数値解析が、本論で行った非対称断面 SRC 長柱の2軸曲げ偏心圧縮実験の最大耐力を概ね良好に評価できており、最大耐力以降の劣化領域における対応も比較的良好。

以上の実験結果、数値解析、弾性解の対応に関する検討から、下記の2点を明らかにした。実験結果と弾性解の対応は概ね良好であることから、実験において各試験体材端での偏心量は、ほぼ所定の値を与えることができた。また、実験結果と数値解の対応は良好であり、前章で示した数値解析手法は、本論で導く耐力評価法の精度検証に対して、実験結果を補間しうるものである。

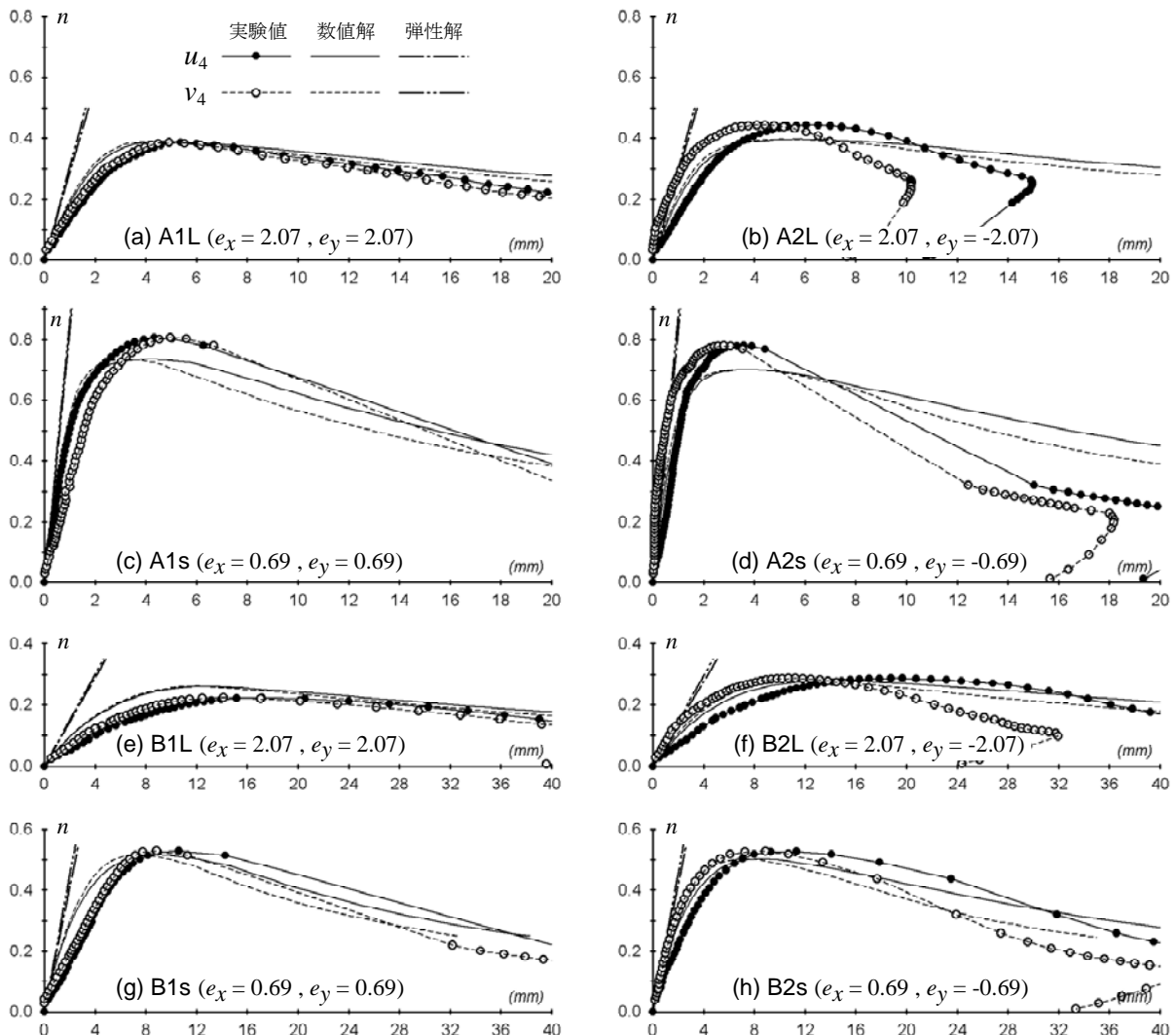


図-10 荷重-中央点たわみ関係

## 6. 非対称断面 SRC 長柱の 2 軸曲げ耐力評価

### 6.1 既往の SRC 長柱耐力評価法

2 軸対称断面 SRC 長柱の耐力評価法は、文献 9)~11)などに示されている。中でも、文献 9)で示された拡大モーメント指標を用いた長柱部材耐力評価法（以後、拡大モーメント指標法）は、非線形弾塑性長柱部材の耐力評価において、良好な精度を有している。本論に先行する文献 7),8)では、この拡大モーメント指標法を拡張することで、1 軸非対称鉄骨内蔵 SRC 長柱が強軸曲げと弱軸曲げを受ける場合の耐力評価法を示した。本論もこれに続き、同法を用いた 2 軸曲げ耐力評価を試みる。

拡大モーメント指標法では部材の曲げ耐力  $M_d$  が、存在軸力  $N$  と曲げの向き  $\phi$ （詳細は 2 章 仮定 3）参照）に対応した 2 軸曲げ全塑性モーメント  $M_o(N, \phi)$  を、拡大モーメント指標  $\mu$  で除した値として求められる。

$$M_d = M_o(N, \phi) / \mu \quad (3)$$

文献 9)では拡大モーメント指標  $\mu$  を、存在軸力、材料特性、断面性能、材長等の陽な関数として示しており、これは図-1(a)に示した非対称断面材でも計算可能である。一方、非対称断面 SRC 柱材に関する 2 軸曲げ全塑性モーメント  $M_o(N, \phi)$  の明示的算出法は現在示されていない。

### 6.2 非対称断面 SRC 柱の 2 軸曲げ全塑性モーメント

2 軸対称断面 SRC 柱部材に関しては、存在軸力  $N$  と曲げの向き  $\phi$  に対応した 2 軸曲げ全塑性モーメント  $M_o(N, \phi)$  を明示的に近似評価する手法が、文献 10)で次式のように示されている。

$$M_o(N, \phi) = \frac{1}{\sqrt{\{\lambda/M_{ox}(N)\}^S + \{\mu/M_{oy}(N)\}^S}} \quad (4)$$

$$S = 10 \times \left| N/N_o - 0.35 + 0.075 N_{os}/N_{oc} \right|^3 + 1.7$$

$$\lambda = \cos \phi, \quad \mu = \sin \phi$$

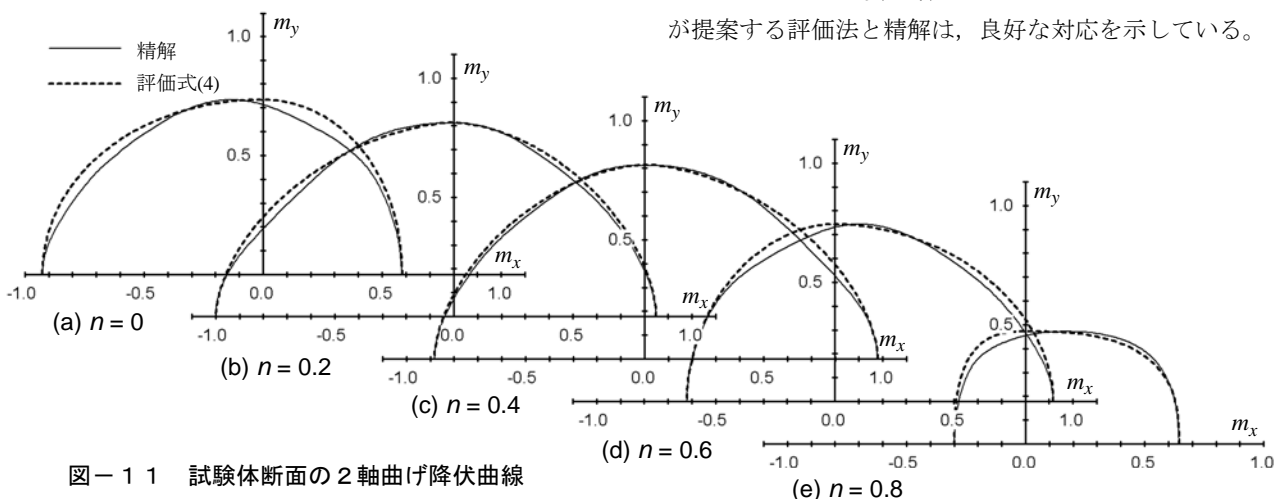


図-1 1 試験体断面の 2 軸曲げ降伏曲線

ここに、 $M_{ox}(N)$  と  $M_{oy}(N)$  は存在軸力  $N$  に対応する強軸曲げ累加耐力と弱軸曲げ累加耐力、 $N_o$  は降伏軸力、 $N_{os}$  と  $N_{oc}$  は鋼材部とコンクリート部の降伏軸力である。

合成構造部材の主軸曲げ累加耐力は、文献 12)に明示的計算法が示されているが、向き  $\phi$  の曲げを断面に生ずる中立軸の傾き  $\psi$ （詳細は 2 章 仮定 4）参照）が既知でなければならない。2 軸対称断面の場合は軸力のレベルに関係なく、中立軸の傾き  $\psi = 0^\circ$  のとき強軸曲げ ( $\phi = 0^\circ$ ) が、 $\psi = 90^\circ$  のとき弱軸曲げ ( $\phi = 90^\circ$ ) が生じる。しかし、本論が対象とする図-1(a)の 1 軸非対称断面では、 $\phi = 90^\circ$  の弱軸曲げが生ずる中立軸の傾き  $\psi$  が、軸力のレベルによって  $90^\circ$  付近を変動する<sup>8)</sup>ため、 $M_{oy}(N)$  の値が明示的に算出できなかった。これに対し文献 8)では、中立軸の傾き  $\psi$  を一義的に  $90^\circ$  と仮定することで、塑性図心に基づく 1 軸非対称断面の弱軸曲げ累加耐力が良好に近似できることを示した。

本論では、文献 8)で示された 1 軸非対称断面 SRC 柱部材の弱軸曲げ累加耐力  $M_{oy}(N)$  の明示的近似法の値を式(4)に代入することで、1 軸非対称断面 SRC 柱部材の塑性図心に基づく 2 軸曲げ全塑性モーメント  $M_o(N, \phi)$  の評価を試みた。

図-11は、図-2に示した試験体断面の 2 軸曲げ降伏曲線に関して、上記の 2 軸曲げ全塑性モーメント  $M_o(N, \phi)$  の評価法と精密解の比較を示す。図は、横軸に強軸曲げモーメント比  $m_x$  を、縦軸に弱軸曲げモーメント比  $m_y$  をとった無次元化  $M_x - M_y$  関係である。ここに、 $m_x$  と  $m_y$  はそれぞれ、2 軸曲げ全塑性モーメント  $M_o(N, \phi)$  の強軸曲げ成分  $M_x$  と弱軸曲げ全塑性モーメント  $M_y$  を、強軸曲げの基準強度  $M_{ox}$  (3.1 節および表-1 参照) で除した値である。検討の軸力レベルは、降伏軸力に対する存在軸力比  $n$  が 0 から 0.8 までの 5 種類とした。また、図中の細実線が精密解を、太破線が今回提案する 2 軸曲げ全塑性モーメント  $M_o(N, \phi)$  の評価法を示す。図から、本論が提案する評価法と精密解は、良好な対応を示している。

### 6.3 非対称断面 SRC 長柱の耐力評価

図-12は、前節で示した2軸曲げ全塑性モーメント  $M_o(N, \phi)$  の値を、式(3)に代入することで求めた非対称断面 SRC 長柱の耐力評価法と、3章の実験結果および4章の数値解析結果の比較を示す。縦軸は作用荷重と降伏軸力の比  $n$  を、横軸は材端の2軸曲げモーメントと強軸曲げの基準強度  $M_{ox}$  の比  $m$  を表す。図中の細実線は2軸曲げ全塑性モーメントの評価法、太実線は今回提案した長柱の耐力評価法を示し、破線はそれらに対応した数値解である。また、●と○は材長1200mmと2400mmの試験体の最大耐力を示す。

前節の検討同様、細実線で示した2軸曲げ全塑性モーメントによる降伏曲線は、精解と良好な対応を示している。また、太実線で示した長柱の耐力評価法も、実験値および数値解と概ね良好に対応している。

### 7. 結論

非対称断面鉄骨を内蔵する SRC 長柱の2軸曲げ対称偏心圧縮実験とそれに対応する数値解析を行うとともに、誘導した耐力評価法との比較から以下の結論を得た。

- 1) 偏心圧縮実験において、所定の偏心量は正しく与えられた。
- 2) 実験結果と数値解析の対応は良好であり、数値解析は実験結果を補間、検証し得る。
- 3) 1軸非対称 SRC 柱断面の2軸曲げ全塑性モーメント  $M_o(N, \phi)$  の値を、明示的に評価する手法を提案した。
- 4) 2軸曲げを受ける非対称断面 SRC 長柱の、耐力評価法を提案した。導いた耐力評価法は部材諸係数に対して陽な関数であり、実験結果および数値解析との対応も良好である。

### 謝辞

本研究は2010～2012年度日本学術振興会「科学研究費 基盤研究(C)「非対称鉄骨を内蔵する鉄骨鉄筋コンクリート長柱の耐力評価 研究課題番号:22560577」(研究代表者:柴田道生)の一部として行われた。また、コンクリートの打設に関して便宜を賜ったタイコーKK 藤木英晴氏・入澤享氏・濱田秀敏氏に厚く感謝します。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2001
- 2) 柴田道生: 非対称断面 Hybrid 長柱の力学性状, 日本建築学会構造系論文集, No.656, pp.1935-1940, 2010.10.

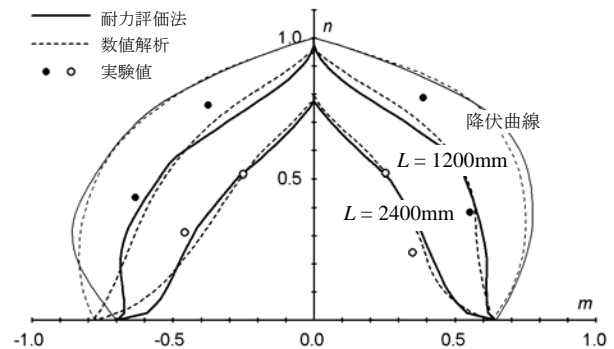


図-12 非対称断面 SRC 長柱耐力評価法の精度

- 3) 斎藤文孝・加藤博之・上原広・西村泰志・南宏一: 非対称断面鉄骨鉄筋コンクリート柱の曲げ破壊性状に関する実験的研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, No.32, pp.101-104, 1992.06.
- 4) 松田聖一・筒井茂行・馬場望・西村泰志: T 字形鉄骨を内蔵する SRC 柱の曲げ破壊性状, コンクリート工学年次論文報告集, vol.25, No.2, pp.1675-1680, 2003.06.
- 5) 松田聖一・筒井茂行・馬場望・西村泰志: 圧縮力を受ける T 字形鉄骨を内蔵する SRC 柱の曲げ破壊性状, コンクリート工学年次論文報告集, vol.26, No.2, pp.1483-1488, 2004.06.
- 6) 松田聖一・筒井茂行・馬場望・西村泰志: 変動軸力を受ける T 字形鉄骨を内蔵する SRC 柱の曲げ破壊性状 その 1, 日本建築学会大会学術講演梗概集, vol.C-1, pp.1043-1044, 2005.09.
- 7) 柴田道生・林 和宏: 非対称鉄骨を内蔵した SRC 長柱の強軸曲げ偏心圧縮実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.3, pp.139-144, 2010.06.
- 8) 林 和宏・柴田道生: 非対称鉄骨を内蔵した SRC 長柱の弱軸曲げ耐力, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.109-114, 2011.06.
- 9) 柴田道生: 2 軸曲げを受ける SRC 長柱の耐力予測, 日本建築学会構造系論文集, No.539, pp.159-165, 2001.01.
- 10) 若林 實・吉田 望: 細長い合成柱の設計式, 日本建築学会論文報告集, No.278, pp.27-36, 1979.04.
- 11) 藤永 隆・津田恵吾・松井千秋: 種々の形状の鉄骨を内蔵する SRC 長柱の累加耐力, 日本建築学会構造系論文集, No.531, pp.173-179, 2000.05.
- 12) 辻 文三・若林 實・菅原まりも: 合成断面柱の終局曲げ強度と累加強度式, 構造工学論文集, Vol.37B, pp.427-435, 1992.03.