

## H形鋼組柱を外殻に使用した超高層架構システムの開発 その1 柱の逆対称曲げ加力実験

田原 健一 佐々木 聡  
桐山 尚大 森 貴久<sup>\*1</sup>  
平松 剛<sup>\*1</sup> 永雄 健一<sup>\*1</sup>

### 概 要

主として超高層建物に用いることを主眼に置いた、従来のラーメン構造とは異なる架構形式を考案した。この架構システムは外周構面のせん断剛性を増大させ外殻の構造体に水平力を集中させることを意図し、2本のH形鋼を短い梁状の部材で接合し組柱を外周部の柱として配置している。基本的な構造性能を検証する一連の実験を行ったので、本報その1及びその2で実験結果や考察について報告する。

その1では、この架構システムの柱としての性能について検証することを目的とした実験について報告する。1層の柱をモデル化した試験体に対して逆対称曲げ加力実験を行った。階高中央付近で2本の柱を接合する梁状の部材(つづり材と称している)や、軸力比を実験パラメータとして、これらが全塑性耐力や最大耐力、軸変形などに対する影響について考察し、全塑性耐力、最大耐力の評価を行った。

### Study on structural system for high-rise buildings using coupled H-shaped columns on exterior frames Part 1 Summary and results of shear loading tests on coupled columns

#### Abstract

A structural system for high-rise buildings that is different from the conventional moment frame is proposed in this paper. This system aimed to concentrate the lateral force into the exterior frame by using a coupled H-shaped column on the exterior frame joined with some short beams. This paper (part 1) and part 2 report the results and evaluation of experiments to investigate the basic structural performance of this system.

In this paper, an experiment to examine the performance of the columns of this system is reported. Shear loading tests on the coupled columns of one story were carried out. The plastic strength, ultimate strength, and axial deformation were evaluated under the influence of the axial loading, steel material, and the joiner which is a short beam connecting two columns.

キーワード: 超高層建物, H形鋼組立柱  
軸心ずみ, 骨格曲線, 局部座屈  
多軸応力状態

<sup>\*1</sup>大和ハウス工業 総合技術研究所

§1. はじめに

チューブ構造や Diagrid 構造<sup>1)</sup>、外周柱を RC 壁柱とした構造<sup>2)</sup>など耐震要素を建物の外周部に集中配置した外殻構造は、転倒モーメントへの抵抗性能、コア部の架構計画の自由度、捩れ剛性の高さなどの利点から、超高層建物の構造として用いられる場合がある。

本報およびその 2 では、図 1 に示すような H 形鋼柱 2 本を短梁で剛接して 1 組とした組立柱を外周部に配置した構造(以下、本構法)について、基本的な耐震性能を明らかにすることを目的としている。本構法では、柱を組立柱とすることで、外周柱の増加に伴う直交梁の増加や施工の煩雑性を避けながら、外周部に耐震要素を集中配置した外殻構造となっている。ラーメン構造との親和性も良く、コア部はラーメン構造と併用することができる。直交梁はつなぎ梁と称する短梁とピン接合することを原則とし、外周の構面へのせん断力の集中効果を高めている。

本報では、組立柱の基礎的な力学性状を明らかにするため、一定軸力およびつづり材の断面性能を主因子とした逆対称曲げ実験により、柱の耐力や軸力保持性能、中間つなぎの短梁(つづり材)の影響などについて分析する。

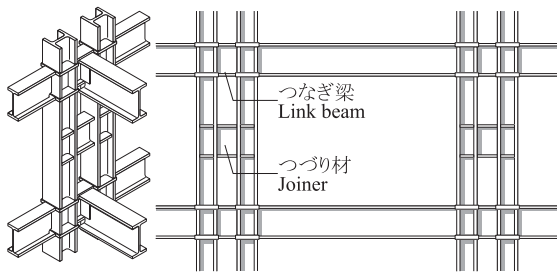


図 1 外周構面に配置する H 形鋼組立柱概念図

§2. 実験概要

図 2 に示す加力装置により、組立柱に一定の軸力を加力しつつ、逆対称曲げが作用するようにせん断力を加える形式の正負交番漸増繰返加力を行った。試験体は実大の約 40% の縮小試験体とし、図 3 に示すような寸法とした。柱長さについてはダイアフラムの内法を 1250mm としている。油圧ジャッキの荷重、各部の変形、ひずみ等を計測した。表 1 に素材試験の結果、図 4 に加力履歴を示す。

表 2 に試験体の一覧を示す。従来鋼(SN490B)を用いた試験体 No.6 を基本試験体とした。No.1~No.3 には、下層階の柱を想定して高強度鋼(HBL385B)を用い、3種類の一定軸力(軸力比 0、0.3、0.6)を作用させた。No.4 には従来鋼の幅厚比が小さい H 形鋼を用い高軸力(軸力比 0.6)を作用させた。No.5 はつづり材なし、No.7 は断面形状が大きなたづり材とした試験体である。No.8 は柱の細長比が大きく柱間隔が大きい。No.9 には比較対象として柱の構成材に冷間成形角形鋼管を用い、つづり材と取り合う柱の鋼管内のダイアフラムを省略した。

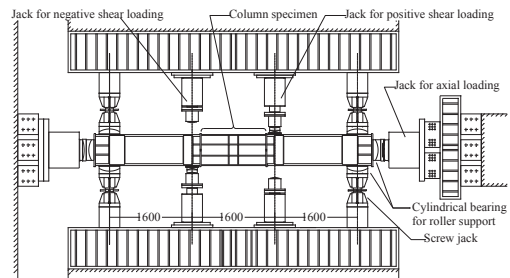


図 2 試験装置

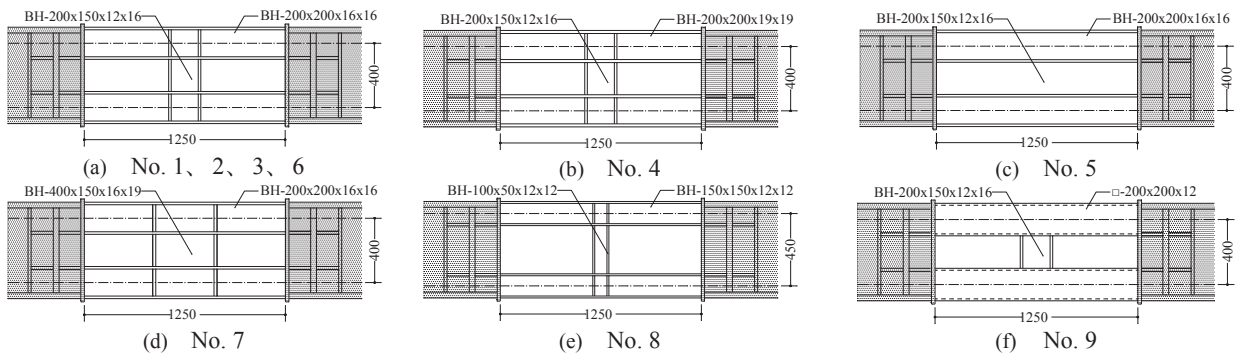


図 3 試験体形状

表1 素材試験結果

板厚	鋼種	使用部位		降伏耐力 [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強さ [N/mm <sup>2</sup> ]
		柱	つづり材		
12	SN490B		○	348.9	584.9
16		○	○	361.2	538.8
19		○	○	343.3	543.8
12	HBL385B		○	443.4	584.8
16		○	○	424.4	577.4
12	UBCR365	○		513.2	571.6

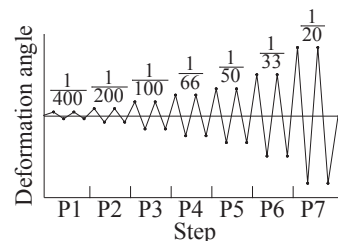


図 4 加力履歴

表2 試験体一覧

No.	試験体諸元				軸力比	剛性 計算値 $cK_E$	全塑性耐力[kN]			最大耐力[kN]		
	柱断面	つづり材断面	柱芯間隔	柱の鋼種			実験(正/負) $EQ_{D+}$ $EQ_{D-}$	計算*2 $cQ_D$	実験*3 $EQ_U$	計算*2 $cQ_U$		
1	BH-200x200x16x16	BH-200x150x12x16	$2D_c$	HBL385	0.6	137	859	893	722	1616↑	893	
2					0.3	132	1141	1316	1032	1767↑	1316	
3					0	118	1214	1530	1190	1651↑	1530	
4	BH-200x200x19x19	なし	$2D_c$	SN490	0.6	153	836	912	648	1959↑	912	
5	H-200x200x16x16				BH-200x150x12x16	0.3	98.8	878	1060	711	1422↑	1060
6					BH-400x150x16x19	130	997	1245	900	1693↑	1245	
7	BH-150x150x12x12	BH-100x50x12x12	$3D_c$	UBCR365	0.3	183	1038	1489	1088	1849↑	1489	
8	□-200x200x12	BH-200x150x12x16	$2D_c$		111	450	502	341	743↑	502		
9					107	1214	1172	1073	1395	1172		

\*1 降伏モードの略称は以下の通り C:柱の曲げ降伏先行モード, J:つづり材のせん断降伏先行モード

\*2 計算値は実測断面による。計算法の詳細は3.3 に述べる

\*3 ↑は加力を行った範囲で得られた最大値である

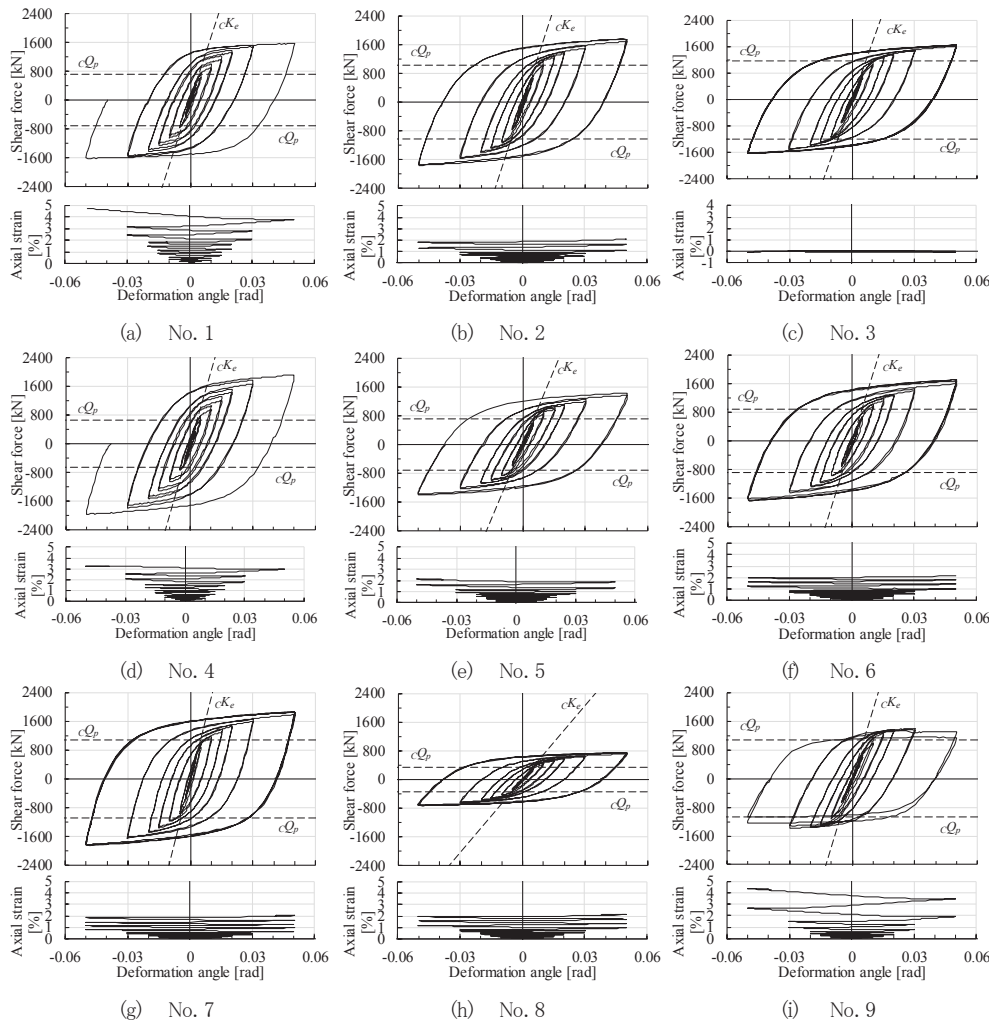


図5 組立柱せん断力・軸平均ひずみと組立柱変形角の関係

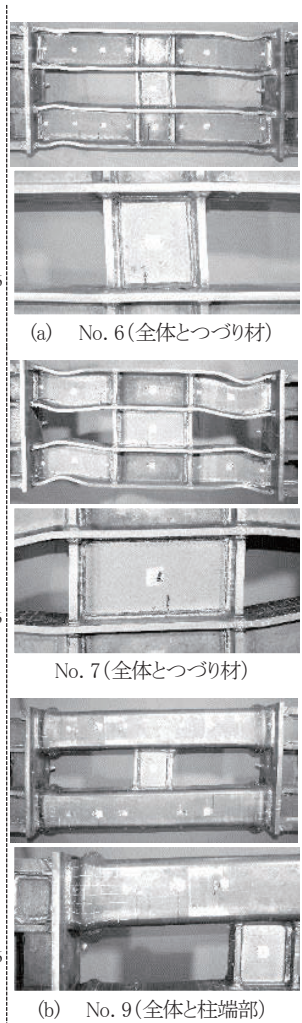


図6 破壊状況

### §3. 実験結果

表 2 中に全塑性耐力、最大耐力の実験値と計算値を示す。実験値については、組立柱せん断力(2本の柱の合計のせん断力)と組立柱変形角(ダイアフラム間の変形角)の関係について骨格曲線を作成し(骨格曲線はその3に示す)接線剛性が初期剛性の1/5となる点でのせん断力を全塑性耐力とした。計算値については試験体の実

測断面を用い計算した。計算法の詳細はその3に示す。

図5に組立柱せん断力-組立柱変形角関係と剛性と全塑性耐力の実験値、軸平均ひずみと組立柱変形角の関係を示す。図6に試験終了時の破壊状況を示す。

基本試験体 No. 6 では、1/200 rad でつづり材のせん断降伏、1/100 rad にかけて柱端の曲げ降伏、柱ウェブせん断降伏が生じて全塑性耐力に達し、1/66 rad から柱端部

フランジの局部座屈が見られた。1/50 rad で軸平均ひずみが0.5%に達し1/20 rad の最初のサイクルで1%を超えた。その後も局部座屈は進展するが耐力低下は生じず、1/20 rad の3.5 サイクル目で最大耐力に達して、軸平均ひずみが2%を超えたところで実験を終了した。

高軸力を加力した No. 1、No. 4 では軸縮みの進展が速く、軸力を0とした No. 3 では殆ど軸縮みが生じなかった。

最も細長比の大きい No. 8 では、1/200 rad でつづり材の端部曲げ降伏とつづり材ウェブのせん断降伏がほぼ同時に生じ、1/50 rad で柱ウェブの降伏が生じた。

H 形鋼柱を用いた試験体では、いずれも柱端のフランジに局部座屈が見られたが荷重が安定して上昇を続けた。柱フランジ、ウェブの幅厚比が最も小さい No. 4 では最大耐力が全塑性耐力の2.34 倍に達した。

角形鋼管柱を用いた試験体 No. 9 では1/50 rad から柱端に局部座屈が生じ、1/20 rad の1 サイクル目から耐力劣化が生じた。

#### §4. 実験結果の考察

##### 4.1 骨格曲線の比較

図7に各試験体の組柱変形角—組柱せん断力関係から作成した骨格曲線<sup>1)</sup>を示す。正負の骨格曲線を重ねた。

図7(a)に示す一定軸力の異なる試験体 No. 1、2、3 について比較すると、最も高軸力の試験体 No. 1 は早く剛性低下するがその後の耐力上昇が大きい。No. 2 と No. 3 を比較すると、スケルトン変形角0.07 程度までは軸力のない No. 3 のせん断力が上回るが、スケルトン変形角が大きい範囲では軸力が0 の No. 3 のせん断力が No. 2 を下回った。

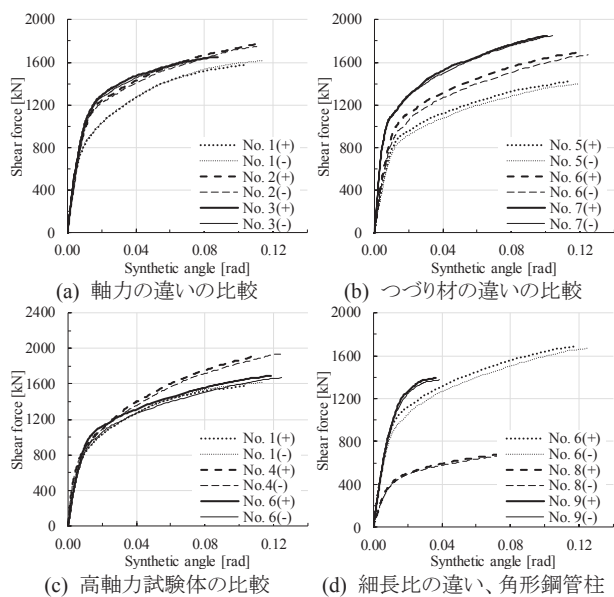


図7 骨格曲線の比較

図7(b)につづり材のない No. 5 およびつづり材断面の異なる No. 6、7 について示す。つづり材の断面が大きいほど初期剛性やせん断力が上回っており、組柱の曲げ耐力につづり材が大きく寄与していることが分かる。

図7(c)に示す従来鋼で幅厚比の小さい試験体 No. 4 と、高強度鋼で幅厚比が大きい No. 1 を比較すると、スケルトン変形角0.02 程度まではほぼ同等の復元力特性を示しているが、その後の変形では No. 1 の耐力上昇が大きい。

図7(d)に示す柱断面が小さい No. 8 はせん断力、スケルトン変形とも標準試験体 No. 6 を大きく下回る。同図に示す角形鋼管柱の No. 9 は局部座屈の影響によりスケルトン変形角がかなり小さく、降伏後の耐力上昇も小さい。

##### 4.2 軸縮みと軸力支持能力

加力のピークにおける柱の軸縮みと、ピークに対応するスケルトン変形角の関係を図8に示す。

図8(a)に示す軸力の異なる No. 1、2、3 について比較すると、高軸力の場合ほど軸縮みの増加が大きく、軸力0 の No. 3 ではほぼ軸縮みが生じていない。

図8(b)に示すつづり材のない No. 5 およびつづり材の異なる No. 6、7 について比較すると、つづり材断面の大きい No. 7 が最も軸縮みが小さくなった。

図8(c)には高軸力の No.1、No.4 について、標準試験体 No. 6 とともに示す。幅厚比の小さい No. 4 の方がスケルトン変形角が大きい範囲での軸縮みの進展が小さい。

図8(d)に示す細長比の大きい試験体 No. 8 は標準試験体 No. 6 と同等の結果となった。同図に示す角形鋼管柱の試験体 No. 9 は大変形時の軸縮みの進展が最も大きかった。

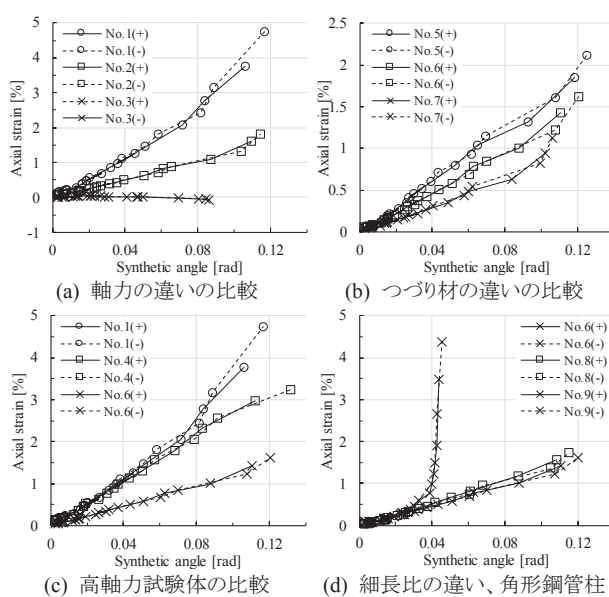


図8 軸縮みとスケルトン変形角の関係

4.3 耐力の計算値と実験値の比較

(1) 耐力の評価

全塑性耐力時の応力状態を図9のように考えるとき、全塑性耐力 $Q_p$ は、

$$Q_p = Q_{pCC} + Q_{pCT} \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_{pCC(pCT)} = \min\left(\frac{M_{pCC(pCT)} + M_{jQy}/2}{H/2}, Q_{pC}\right)$$

$M_{pCC}$ 、 $M_{pCT}$ :軸力を考慮した全塑性モーメント

$$M_{jQy} = \min(Q_{yJ} \cdot W/2, Z_p \cdot \sigma_y)$$

$Q_{pC} = A_{sC} \cdot \tau_y$ :柱のせん断耐力

$Q_{yJ} = A_{sJ} \cdot \tau_y$ :つづり材のせん断降伏耐力

最大耐力についても同様に、

$$Q_u = Q_{uCC} + Q_{uCT} \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_{uCC(uCT)} = \min\left(\frac{M_{uCC(uCT)} + M_{jQy}/2}{H/2}, Q_{pC}\right)$$

$M_{uCC}$ 、 $M_{uCT}$ :軸力を考慮した最大曲げモーメント

柱端の終局曲げ耐力 $M_{uCC}$ 、 $M_{uCT}$ については、柱端の断面において軸力負担領域は降伏応力度、曲げ負担領域は引張強さにあるとして求めた(図10)。

図11(a)に全塑性耐力、(b)に最大耐力の実験値と計算値の比較を示す。全塑性耐力については、No.7を除き実験値が計算値をやや上回った。最大耐力については、全ての試験体で実験値が計算値より高い。

(2) 多軸応力状態の仮定に基づく耐力評価

柱端の断面のうち軸力を負担していない領域が拘束により多軸応力状態にあると考える。平面応力状態を仮定し塑性ポテンシャルをMisesの降伏条件としたとき、

$$\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2 = Y^2 \dots\dots\dots(3)$$

$Y$ :降伏耐力または引張強さ

せん断応力の影響を無視し、 $\sigma_y = \phi \sigma_x$ とすると、

$$\sigma_x^2 - \phi \sigma_x^2 + \phi^2 \sigma_x^2 = Y^2$$

$$\sigma_x = Y / \sqrt{1 - \phi + \phi^2}$$

$\sigma_x$ を最大、即ち $f(\phi) = (1 - \phi + \phi^2)^{1/2}$ を最小とする $\phi$ は、

$$\frac{\partial f(\phi)}{\partial \phi} = \frac{1}{2}(2\phi - 1)(1 - \phi + \phi^2)^{-1/2} = 0$$

$$\phi = 0.5$$

$$\sigma_{x \max} / Y = 1 / f(0.5) \cong 1.155 \dots\dots\dots(4)$$

この $\sigma_{x \max} / Y$ を引張降伏耐力または引張強さに乗じていて柱端モーメントを計算すれば、拘束が最も影響した場合の曲げ耐力を便宜的に計算することができる。

図12に、この全塑性耐力及び最大耐力と実験値の比較を示す。全塑性耐力については実験値と計算値の対応が良くなった。一方、最大耐力については一定軸力の大きい試験体No.1、4で対応関係が悪い。

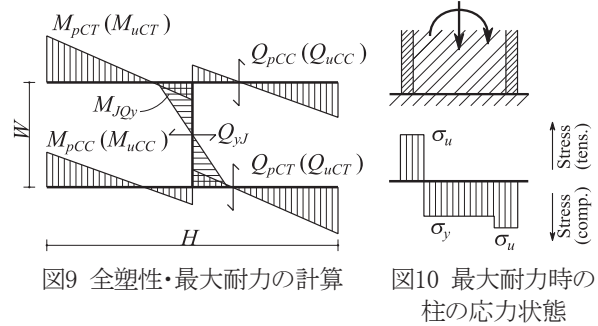


図9 全塑性・最大耐力の計算

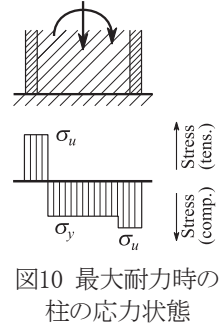
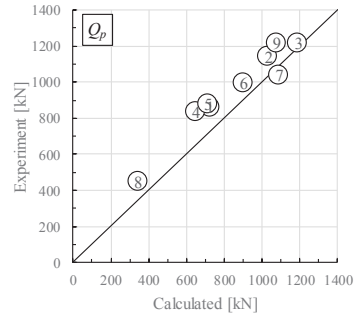
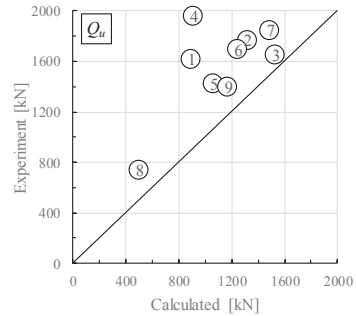


図10 最大耐力時の柱の応力状態

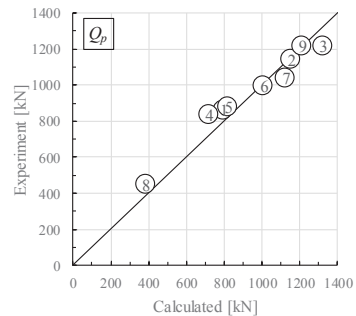


(a) 全塑性耐力

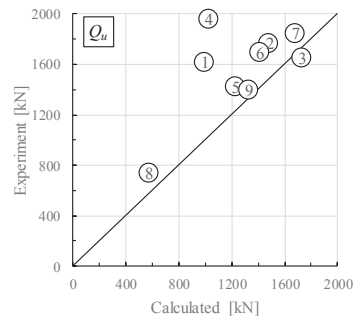


(b) 最大耐力

図11 耐力の計算値と実験値の比較



(a) 全塑性耐力



(b) 最大耐力

図12 拘束効果を考慮した耐力の計算値と実験値の比較

破壊モードが局部座屈の H 形鋼柱の最大耐力に関する幾つかの研究<sup>2)-3)</sup>があるが、本実験の結果はこれらの結果と比べても高く、今後の検討課題とする。

## §5. まとめ

H 形鋼柱 2 本を短梁で剛接した組立柱について、一定軸力およびつづり材の断面性能を主因子とした逆対称曲げ実験を行い以下のような結果を得た。

1. 階高中央付近で H 形鋼柱を接続する短梁(つづり材)の大きさは剛性と耐力に対する影響が大きい。
2. 軸縮みの進展に対して軸力、つづり材の大きさ、柱の幅厚比が影響する。角形鋼管柱に比べて H 形鋼柱は軸縮みの進展が少ない。
3. 全塑性耐力及び最大耐力は拘束による多軸応力状態の仮定の下に評価し、全塑性耐力は概ね良く評価できた。
4. 最大耐力については Mises の降伏条件で取りうる最大の応力を仮定した計算値と比較しても実験値より低く、今後の研究課題である。

## 【参考文献】

- 1) Terri Meyer Boake: Elegant Structures: Diagrids take to the sky, IABSE CONFERENCE NARA 2015、IABSE Report vol. 104、2015. 5
- 2) 山川 慶二、杉山 智昭、西川 泰弘、成原 弘之、勝田 庄二: 梁側面が柱幅よりも外側に偏心したRC造柱梁接合部の構造性能に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 419-424、2010.7
- 3) 加藤勉、秋山宏、山内泰之: 鋼材の応力-ひずみ履歴曲線に関する実験測、日本建築学会学術講演梗概集、pp.937-938、1973. 10
- 4) 五十嵐規矩夫、末国良太、篠原卓馬、王韜: 鋼構造H形断面梁の耐力及び塑性変形能力評価のための新規幅厚比指標と幅厚比区分、日本建築学会構造系論文集、pp. 1865-1872、2011. 11
- 5) 井上祥一、加藤隆之、森健士郎、伊藤拓海: 繰返し載荷を受けるH形鋼柱の耐力と変形能力のデータベース: その1、その2、日本建築学会関東支部研究報告集、pp. 557-564、2014. 2

## ひとこと

高度化、複雑化する超高層建物の構造への要求を満たすべく、新たな構造形式の開発に取り組んでいます。低幅厚比のH形鋼の性能の高さについても今回の研究で示され、冷間成形角形鋼管が主流の昨今の鋼構造研究に一石を投じるものであると思っています。



田原健一