

## 2方向から水平力を受ける立体部分骨組の弾塑性性状に関する研究

著者	隋 偉寧, 山成 實
雑誌名	鋼構造年次論文報告集
巻	12
ページ	261-268
発行年	2004-11
その他の言語のタイトル	A Study on Elasto-plastic Characteristics of 3D Space Steel Subassembly with CHS Column and Wide Flange Beam under Biaxial Loadings
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2298/10590">http://hdl.handle.net/2298/10590</a>

## 2 方向から水平力を受ける立体部分骨組の弾塑性性状に関する研究

### A Study on Elasto-plastic Characteristics of 3D Space Steel Subassembly with CHS Column and Wide Flange Beam under Biaxial Loadings

隋偉寧 \*

山成實 \*\*

SUI Wei Ning

YAMANARI Minoru

ABSTRACT This paper describes about elastic-plastic characteristics of steel frames, which are made of circular columns and wide flange beams, connected with external diaphragms. It is known that local deformation occurs at the end of beam in this type of the connection. The local deformation is generated by a couple of forces at both heights of the beam flange. In this study, a finite element analysis package program is used to study the property of the three-dimensional frame under biaxial lateral force. The number of researches that made the planar frame to be an object is abounding, and it of researches that handled three-dimensional frame is slight. It is difficult to execute the researches of the three-dimensional frame because it needs a lot of time and labor.

Keywords: 鋼管柱, 接合部, 有限要素解析

*Circular Steel Column, Beam-to-column connection, Finite element analysis*

#### 1. はじめに

実在する建築構造物は三次元構造物である。地震力や風力はあらゆる方向からこれに作用する。特に水平面内に作用する2方向力は多くの建物構造設計への外力として捉え、通常は直交2方向それぞれの外力として構造計算に用いられる。このように実現を簡略化した手法で設計に適用する場合、その方法が理にかなったものであることと、任意方向からの外力に対して構造物が健全な力学特性を持つことを保証しなければ、上記の手法は成立し得ない。

本研究では鋼骨組の柱梁接合部に注目した部分骨組を対象として、任意方向水平力(2軸水平力)を作用させた力学特性を調べ、接合部設計のあり方の検討を加える。具体的には図1に示すように、水平外力を任意方向から受ける円形鋼管柱・H形鋼梁をもつ外ダイアフラム接合部部分骨組の弾塑性性状を調べるために、有限要素法に基づく汎用構造解析プログラムを用いて計算機内の数値実験を行った。接合部の力学的

性状が水平力の方向に大きく依存するならば、これまで行われてきた平面骨組を用いた研究は、構造物全体としての実体を説明する部分的考察の基礎的知見は得られるものの、包括的知見を得たことにはならない。また、これらの研究から導き出された設計法は危険性を包含する可能性があるという危惧から本研究は行われた。

既往の研究では、直交梁をもつ部分骨組の研究<sup>1)</sup>や部材として扱う柱梁接合部パネルについて作用力方向に注目した研究<sup>2), 3)</sup>が見ら

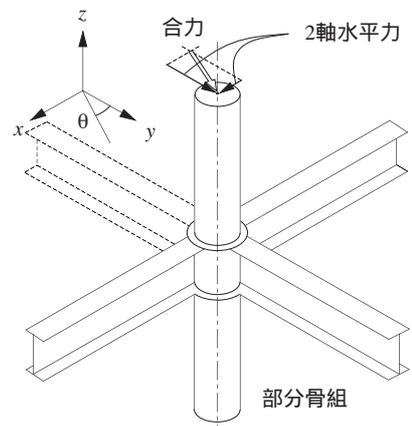


図1 2軸水平力を受ける骨組

\* 熊本大学自然科学研究科 大学院生 ( 860-8555 熊本市黒髪 2-39-1 )  
\*\* 工博 熊本大学工学部環境システム工学科 助教授 ( 同上 )

本論文の一部は日本建築学会建築学会大会学術講演梗概集(構造), 2004 に発表

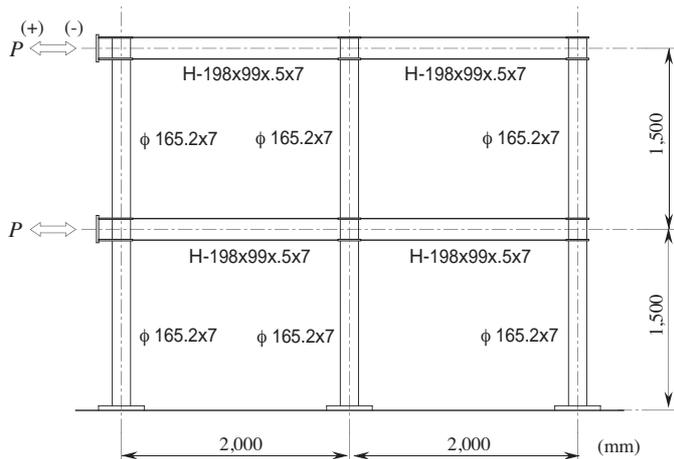


図2 2層2スパン骨組

れる。しかしながら、まだ包括的知見を得るには至っていない。

## 2. 既往の実験結果を用いた解析検証

### 2.1 荷重 - 変形関係

著者の一人は2層2スパンの鋼管柱・H形鋼梁骨組の繰返し水平加力実験を行い、平面骨組における接合部の力学性状が全体挙動に及ぶ影響を調べた<sup>4)</sup>。本研究で用いる有限要素法に基づく汎用構造解析プログラム Marc による解析手法の確立とその性能検討のために、この実験結果を用いた。

図2は階高1500 mm、スパン長2000 mmの2層2スパン骨組の各階の梁位置に等水平荷重を与える実験概要である。実験骨組は外ダイアフラム接合部骨組である。この接合部をもつ骨組は、図3に見られるような柱梁仕口部において局部変形で知られる回転変形が生じ、骨組の剛性低下の影響が及ぶ。

文献5) で示した解析手法に従い、解析骨組を構成する要素は1次の4辺形シェル要素<sup>6)</sup>とし、シェル要素のレイヤー数は11とした。実験結果と解析結果を比較すると、図4が得られる。実験結果は交番繰返し実験であるため、履歴曲線から正負それぞれについて骨格曲線として求めた。これらは繰返し硬化によって単調載荷実験結果よりも若干耐力が高くなることから、解析結果はこの実験結果より低めの耐力を与えることになった。このことを勘案して解析は概ね実験結果を良く追跡できていると判断する。

### 2.2 柱梁仕口の局部変形剛性と骨組の水平剛性

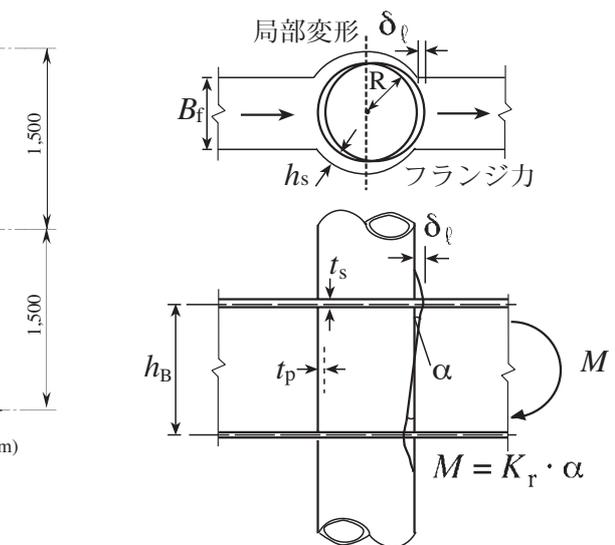


表1は、

図3に示されるように、骨組の柱梁仕口の回転剛性( $K_r$ )と骨組の水平剛性( $K$ )についてまとめたもので

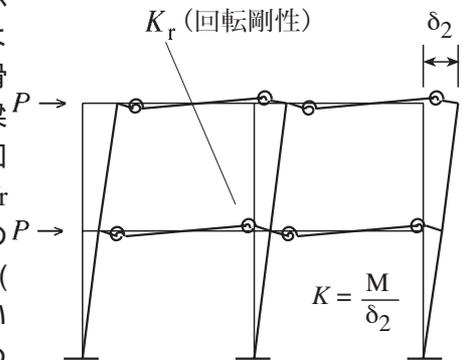


図3 骨組と柱梁仕口の変形

ある。図5は、図3に示した梁両端に回転バネをもつ線材骨組に回転バネ剛性( $K_r$ )を変化させて骨組の水平剛性を求めて描いた曲線に、種々の評価で得た結果をプロットした図である。回転バネの剛性が無限大になれば、曲線は剛接合骨組の水平剛性に漸近する。柱梁仕口の回転剛性を評価する研究は上場<sup>7)</sup>によるものがある。有限要素解析による数値実験から誘導した局部変形剛性推定式(1)およびそれを修正した推定式

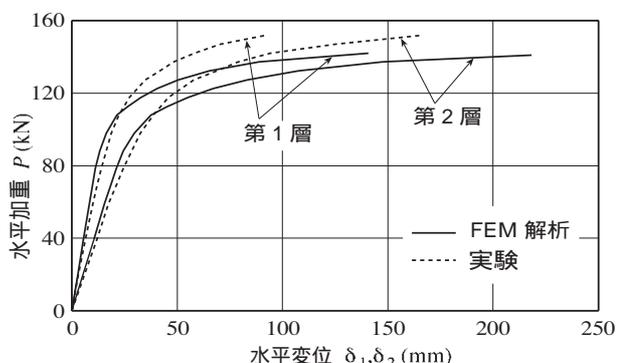


図4 2層2スパン骨組の実験結果と解析結果

表1 骨組の水平変位と柱梁仕口の接合条件

	実験	Wire Frame		上場式	上場式 (修正値)	2層2スパン 骨組	平面十字形 骨組
		ピン接合	剛接合				
δ2 (mm)	2.65	17.2	2.18	3.10	8.66	2.57	2.37
$K_r (x 10^7)$ (kN mm / rad)	1.48	1.0	∞	0.65	0.050	1.83	4.10
$K$ (kN / mm)	3.70	0.569	4.49	3.17	1.13	3.81	4.13

$$\frac{K_{\ell} R^3}{EI} = 1.02 \left( 11.8 \frac{B_f}{D} \pm 1.94 \right) \left( \frac{t_p}{R} \right)^{2.36} \cdot \left( \frac{t_s}{R} \right)^{0.495} \left( \frac{R + 0.5 h_s}{R} \right)^{8.29} + 115 \dots (2)$$

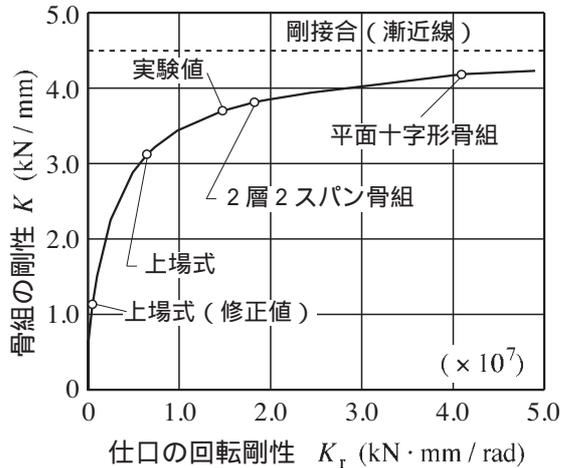


図5 柱梁仕口の剛性と骨組の水平剛性

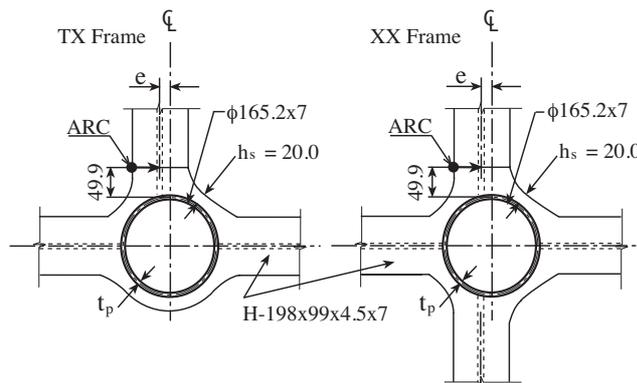


図6 立体骨組中の接合部(平面図)(mm)

(2)を用いて骨組の水平剛性を求めると、かなり柔らかくなる結果を与えており、仕口の回転剛性を過小評価していることがわかる。

一方、全体モデルと柱および梁の中心(反曲点付近)で取り出した十字形骨組について有限要素解析結果から直接に仕口の局部変形剛性を求めると実験値より過大な結果を得た。

$$\frac{K_{\ell} R^3}{EI} = \left( 11.8 \frac{B_f}{D} \pm 1.94 \right) \left( \frac{t_p}{R} \right)^{2.36} \cdot \left( \frac{t_s}{R} \right)^{0.495} \left( \frac{R + 0.5 h_s}{R} \right)^{8.29} + 1.5 \times 10^3 \dots (1)$$

### 3. 立体部分骨組に2軸水平力を作用させた有限要素解析

平面骨組の解析性能を確認したことを踏まえて、ここでは立体部分骨組の有限要素解析モデルを作成する条件を述べる。

#### 3.1 解析モデル

立体骨組は図6に示すように2種類のモデルとし、それぞれ TX Frame および XX Frame とする。これらは側柱および中柱を代表するものである。TおよびXは骨組の構造軸の方向から見える形から命名した。

後述するよ

うに、対称性をもつ骨組を検討するばかりでなく、梁の偏心配置した異方性を持たせた接合を用意した。偏心量ををeで表す(図6)。

骨組を構成する要素の材料非線形性は文献4)の素材試験結果から得られたものを用い、図7に示す多直線置換したデータを用いた。これらは鋼管柱、梁フランジおよびダイアラムの情報である。解析の不安定を避けるた

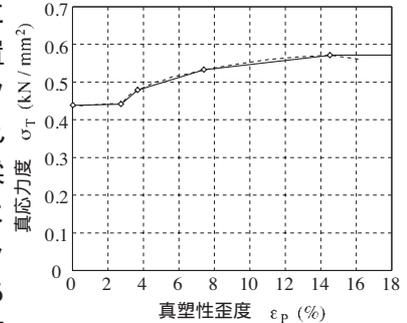
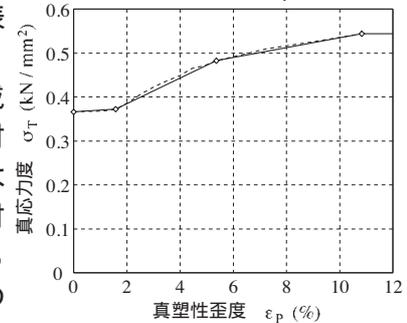
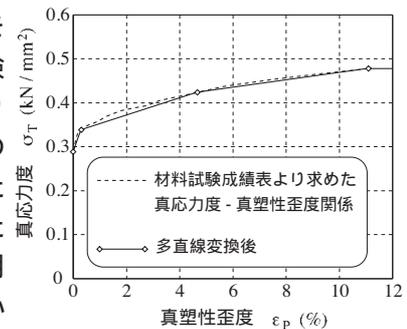


図7 解析に用いた多直線真応力度 - 真塑性歪度関係

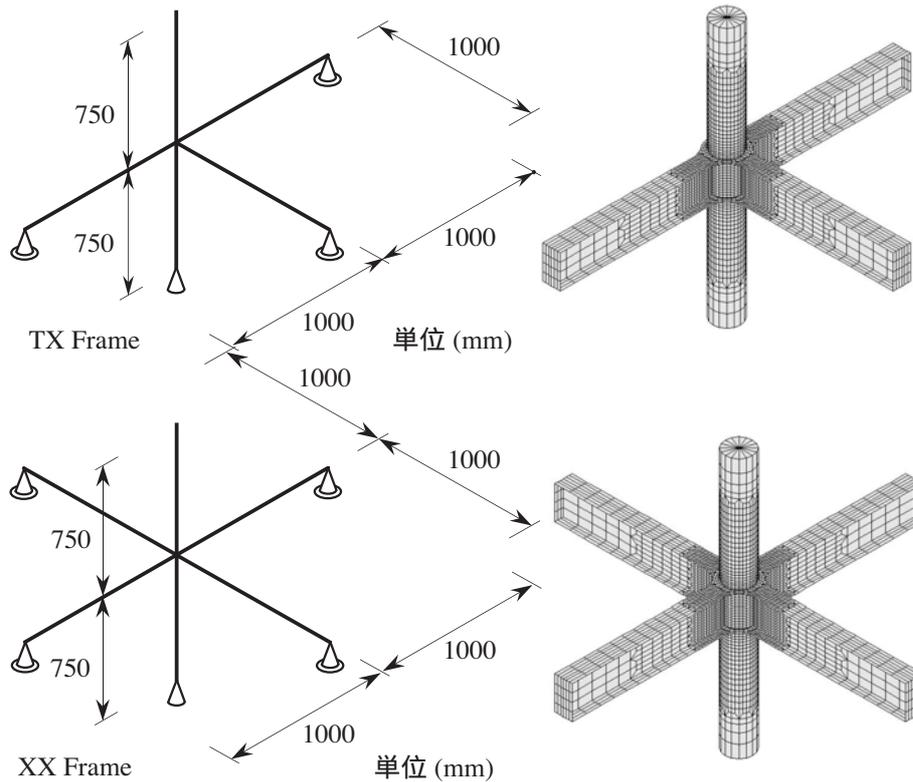


図8 境界条件と有限要素解析モデル

めに最終分支線は水平線としている。

図8にそれぞれの解析モデルの境界条件とメッシュを示す。梁の支持点部の境界条件は、変形の連続条件を考慮して材軸回りにねじり拘束与え、曲げについてピン、移動に関してローラー支持とした。柱も同様であるが、骨組の剛体移動を防ぐために移動を拘束した。外力条件は、図1で定義した2軸水平力を柱頂部に方向を変化させた強制変位問題として与えた。

解析モデルの規模は、TX Frame が総要素

数 4628、総節点数 4650、XX Frame が総要素数 5424、総節点数 5458 である。偏心量  $e$  は、無偏心 ( $e = 0$ )、梁幅の概ね 15% および 30% の 3 種類とする。

図6中のARCは、梁の引張り側フランジ縁端から測った横断距離である。

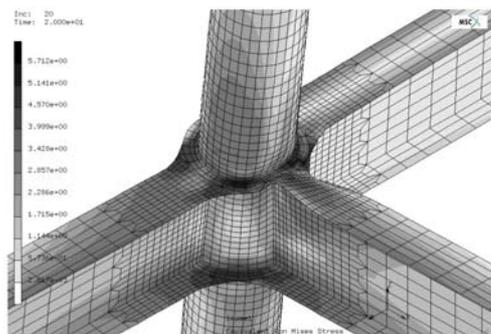


図10 変形図(局部座)

#### 4. 解析結果と考察

##### 4.1 無偏心モデルの解析結果と考察

側柱部分骨組 (TX Frame) の解析結果を図9

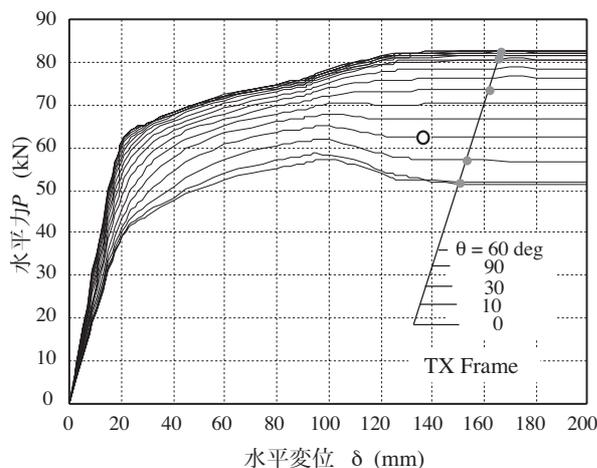


図9 解析結果 (TX Frame)

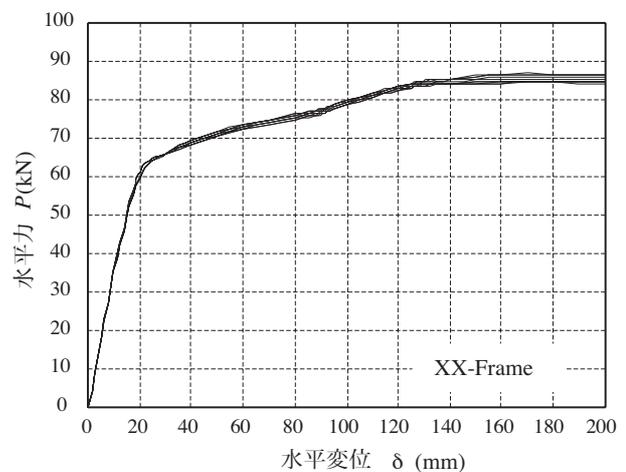


図11 解析結果 (XX Frame)

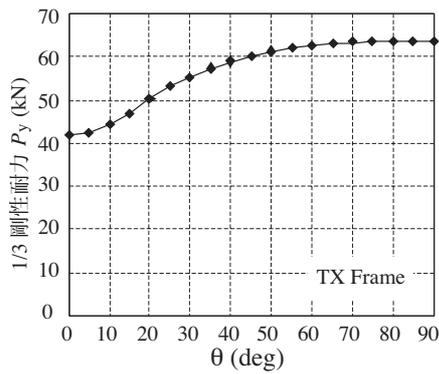


図 12 降伏耐力の変化(TX Frame)

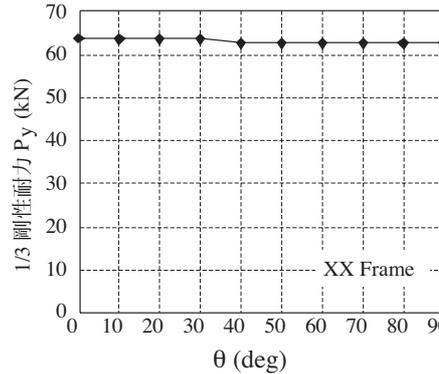


図 13 降伏耐力の変化(XX Frame)

下が確かめられている。一方、 $\theta$ が大きくなるとX形骨組に近づき局部座屈発生は起こりにくくなった。図11に中柱部分骨組(XX Frame)について同様の解析を行った結果を示す。文献8)で述べているように構造物として異方性が無いため、広い弾塑性域にわたって荷

重 - 変形関係は同じように描かれている。TX Frame, XX Frame共に降伏後の階段状の剛性上昇は素材の加工硬化が直接反映されている。骨組の一般化降伏耐力の一つである1/3剛性耐力をそれぞれの骨組について求めた結果を図12および図13に示す。TX Frameについては構造の非対称性から降伏耐力は外力作用方向角の増加に伴った単調増加している。 $\theta = 0 \text{ deg}$ に比べて概ね40%上昇する。これはT形骨組に対する十字形骨組の降伏耐力であり、骨組の方向性がないことが分かる。

一方, XX Frameでは、骨組が対称性を持っているため、降伏耐力はほぼ一定を保つ。

に示す。水平外力作用方向角( $\theta$ )が増加するにつれて荷重 - 変形関係は上昇している。これは $\theta$ が増すにつれて骨組の形がT形からX形へと移行する過程において、水平力作用方向に関して骨組全体の剛性および耐力が上昇することを裏付けている。

図10は、図9中の印に対応する接合部付近の変形図である。この場合、 $\theta = 15 \text{ deg}$ 時の荷重 - 変形関係において耐力が低下した後の様子であり、梁フランジで局部座屈発生の様子が窺える。図中の濃淡は von Mises の相当応力度の大きさを示している。 $\theta$ が小さい間は梁フランジや外ダイアフラムの局部座屈発生による耐力低

下は確かめられている。一方、 $\theta$ が大きくなるとX形骨組に近づき局部座屈発生は起こりにくくなった。図11に中柱部分骨組(XX Frame)について同様の解析を行った結果を示す。文献8)で述べているように構造物として異方性が無いため、広い弾塑性域にわたって荷

重 - 変形関係は同じように描かれている。

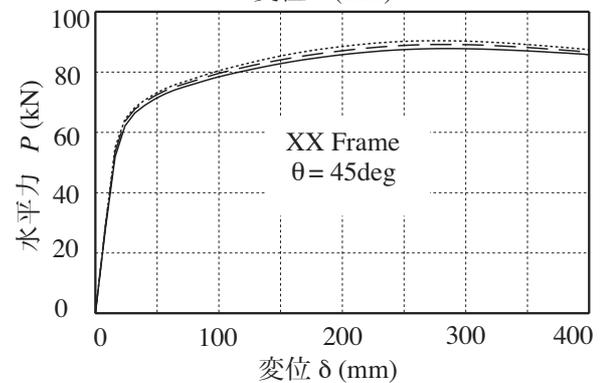
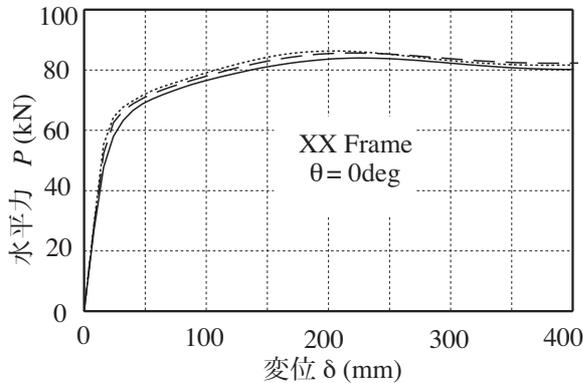
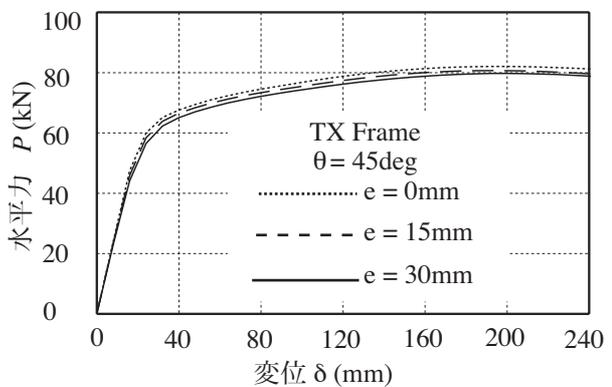
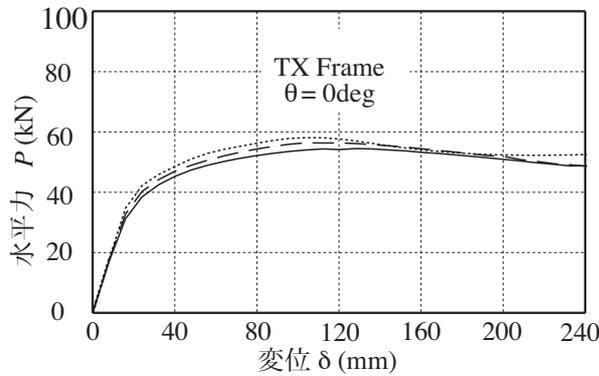


図 14 偏心量と水平力作用方向の変化に伴う荷重 - 変形関係の変化

表 2 解析結果(TX Frame,XX Frame)

	$\theta$ (deg)	e(mm)	Ke(kN/mm)	$P_y$ (kN)	$P_{max}$ (kN)	$Ke/Ke,0$	$P_y/P_y,0$	$P_{max}/P_{max,0}$
TX Frame	0	0	2.22	40.73	58.1	1.00	1.00	1.00
		15	2.18	38.84	56.4	0.98	0.95	0.97
		30	2.13	37.15	54.4	0.96	0.91	0.94
	45	0	2.99	59.45	82.0	1.00	1.00	1.00
		15	2.93	58.33	80.7	0.98	0.98	0.98
		30	2.87	58.34	79.7	0.96	0.98	0.96
XX Frame	0	0	3.60	61.70	86.3	1.00	1.00	1.00
		15	3.51	59.79	85.6	0.98	0.97	0.99
		30	3.34	55.38	84.0	0.93	0.90	0.97
	45	0	3.60	61.64	90.4	1.00	1.00	1.00
		15	3.55	60.87	89.1	0.99	0.99	0.99
		30	3.46	59.47	87.8	0.96	0.96	0.97

4.2 梁を偏心配置させたモデルの解析結果

4.2.1 荷重 - 変形関係

図 14 は、TX Frame および XX Frame について偏心量と水平力作用方向を変化させた解析から得られた荷重 - 変形関係をまとめたものである。同図中の点線、破線及び実線は、それぞれ梁部材の偏心無し、15mm、30mmを表しており、梁部材が偏心配置されると若干の剛性とや耐力の低下が窺える。その結果をまとめて表 2 に示す。柱幅の 18% (e = 30mm)の梁の偏心配置でも、偏心は骨組の初期剛性、降伏耐力および最大耐力に高々 5% の影響しか及さないことが分る。

4.2.2 梁フランジの垂直歪度および垂直応力度

梁部材の偏心配置の局所的な影響について検討を加えるために、鋼管板厚中心から 49.9mm の位置における引張り梁フランジ断面の垂直歪度分布および垂直応力度分布に焦点を合わせて調べた。図 15 は上記の梁フランジの横断面に存在する (A) 弾性状態、(B) 降伏時および (C) 降伏後の 3 状態について、骨組の種類及び梁部材の偏心配置の有無やその大きさの変化に対する垂直歪度分布および垂直応力度分布をプロットしたものである。

状態(A)から状態(C)へと降伏が進展するにつれて諸量は増加し、梁フランジ縁端部から降伏領域が広がっている。

4.2.3 仕口の歪度および応力度集中度

仕口部近傍の引張り側の梁フランジの歪度分布や応力度分布の乱れを見るための指標として歪度集中度 $\eta_\epsilon$ と応力度集中度 $\eta_\sigma$ を用いて検討する。

$$\eta_\epsilon = \frac{\epsilon_{max}}{\epsilon_{mean}} \dots \dots (3)$$

$$\eta_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{mean}} \dots \dots (4)$$

ただし、

$$\epsilon_{mean} = \frac{\int_A \epsilon dA}{A} \quad , \quad \sigma_{mean} = \frac{\int_A \sigma dA}{A} \quad , A \text{ は梁フランジ断面面積。}$$

図 16 はそれらをまとめたものである。梁部材の偏心配置によって応力度および歪度の集中度が増すことにより、仕口の性能は低下している。

5. おわりに

ここで扱った円形鋼管柱・H形鋼梁をもつ外ダイアフラム接合部部分骨組に関して言えば、作用水平外力の方向が骨組の弾塑性性状を表す代表の一つである初期剛性および降伏耐力に大きく影響を与えることなく、この限定された範囲の考察で言えば、平面骨組の研究で十分であることが分かった。すなわち接合部の詳細が対称性をもつため、水平外力の方向性の影響が出

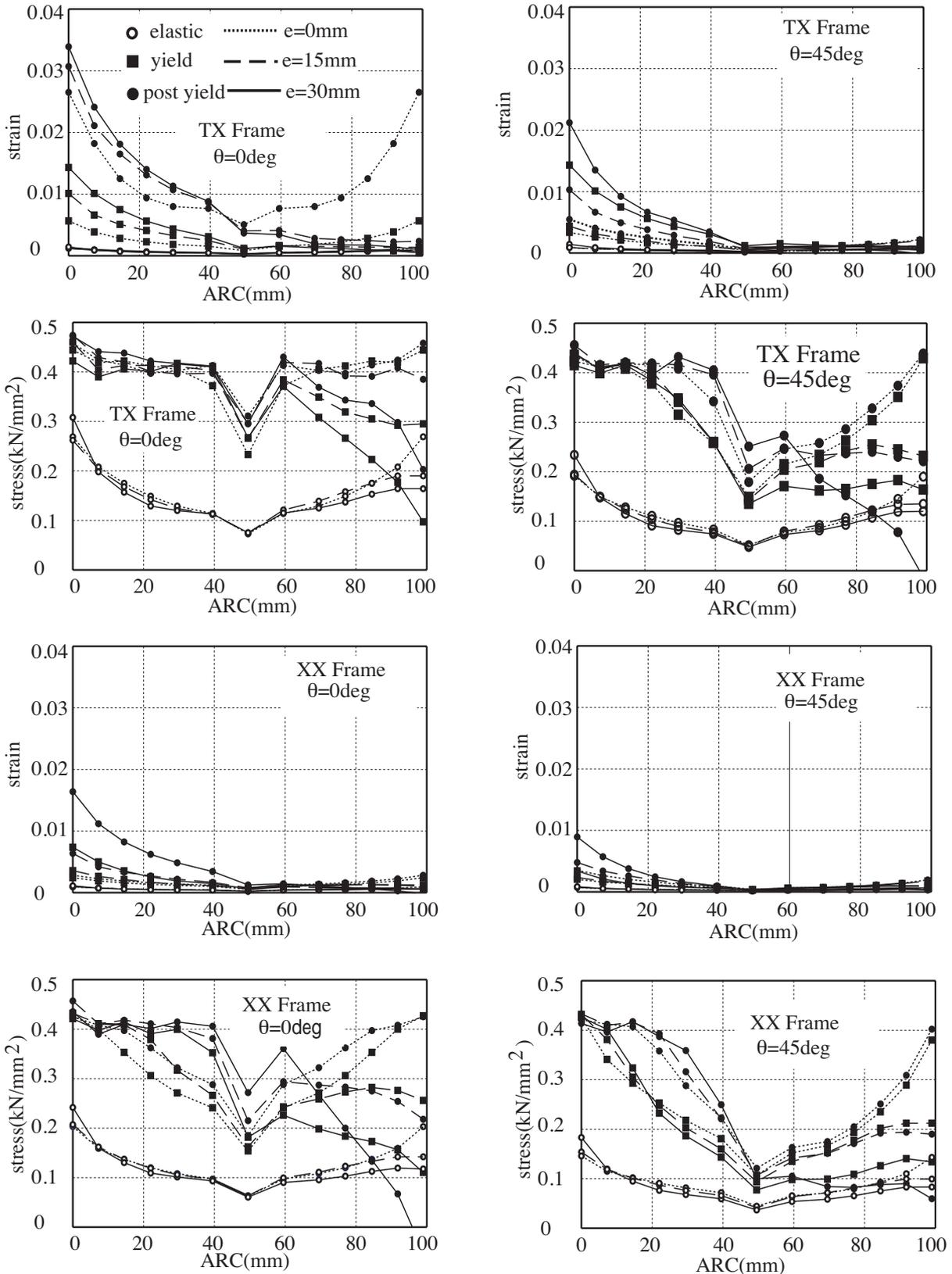


図15 引張り梁フランジの歪度分布および垂直応力度分布

なかったことは結論からも納得できる。  
梁部材の偏心配置ついて立体部分骨組の全体

挙動と梁フランジの局部的挙動について調べた  
結果については、以下のことが分かった。

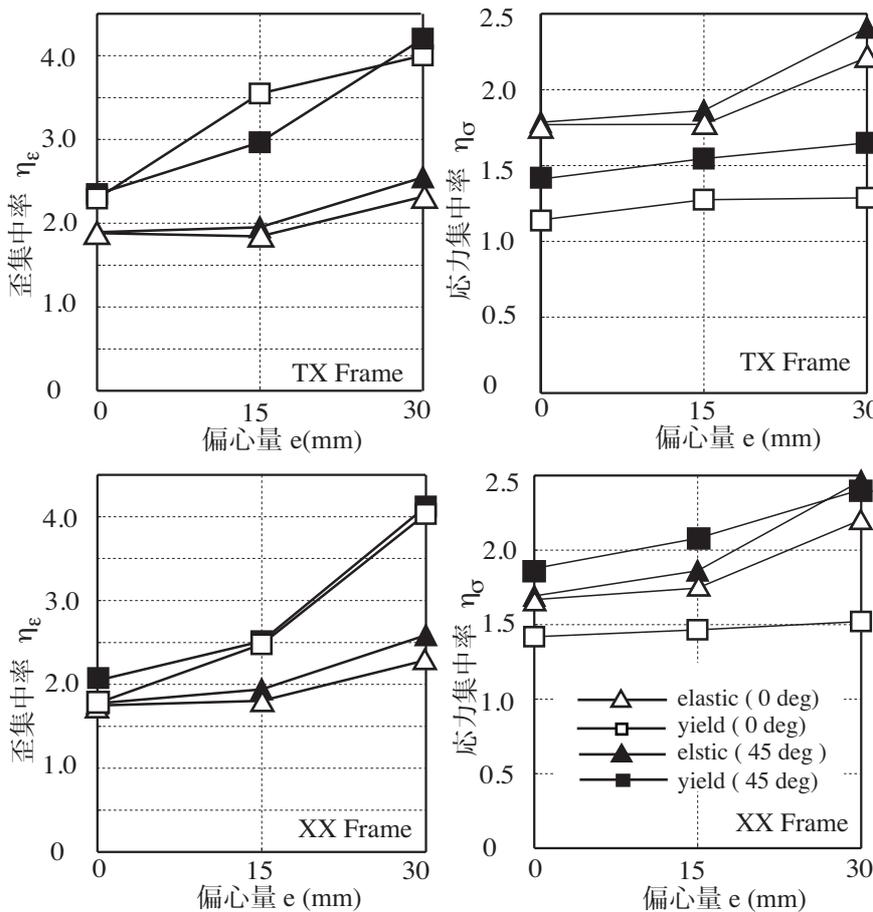


図 16 歪度集中率と応力度集中率

1) 梁部材の偏心配置は、この研究で扱う接合部では荷重 - 変形関係には大きい影響を及ぼさない。

2) 仕口近傍の梁フランジ断面に分布する垂直応力度および垂直歪度は、梁部材の偏心配置の影響が無視できなく、歪度および応力度の集中によって無偏心配置の骨組に比べて早期に損傷が進み破断の危険性を示唆している。

今後の研究課題として、梁せいの異なる接合部など、より多様な修まりをもつ接合部についても検討する必要がある。

【参考文献】

1) 山成實, 小川厚治, 黒羽啓明: 半剛接合された角形鋼管柱・H形鋼梁骨組の弾塑性挙動, 構造工学論文集, Vol.40B, pp.703-710, 1994.4.

2) 海原広幸, 山成實, 小川厚治, 黒羽啓明: 任意方向からの曲げ・せん断力を受ける角形鋼管の弾塑性挙動に関する考察(実験および解析結果の比較), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C構造II, pp.1407-1408, 1991.9.

3) 難波尚, 田淵基嗣, 田中剛, 米田直樹: 2方向力を受ける角形鋼管柱接合部パネルの弾塑性挙動に関する研究(その1)(その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C構造II, pp.735-738, 2002.8.

4) M. Yamanari, H. Kanatani, M. Tabuchi, T. Kamba: Participation of beam-to-column connection deformation in hysteretic behavior of steel frames, Proc. of 9WCEE, Vol. 4, pp.175-180, 1988.8.

5) 山成實, 小川厚治, 黒羽啓明, 海原広幸: 外ダイアフラム接合部の有限要素解析による剛性評価式(半剛接鋼骨組柱梁仕口の復元力特性に関する研究) 構造工学論文集, Vol. 38B, pp.475-484, 1992.4.

6) T.J.R.Hudges and T.E.Tezduyar: Finite Elements Based Upon Mindlin Plate Theory With Particular reference To The Four-Node Bilinear Isoparametric Elements, Jr. of Applied Mechanics, Vol.48. pp.587-596, 1981.9.

7) 上場輝康: 鋼管柱・H形はり接合部の実験的研究, 博士論文, 1988.11.

8) 山成實: 外ダイアフラム接合された円形鋼管柱・H形鋼梁立体部分骨組の有限要素解析による初期剛性に関する考察, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1構造III, pp.907-908, 2003.8.