

## 軸圧縮力と2軸水平力を受ける立体部分骨組の弾塑性性状

A Study on Elasto-plastic Characteristics of 3D Space Steel Subassembly  
under Biaxial Lateral Load and Compressive Axial Load

隋 偉寧\*

SUI Wei Ning

山成 實\*\*

YAMANARI Minoru

ABSTRACT This research concerns steel frames, which are made of circular columns and wide flange beams, connected with external diaphragms under both axial force in column and lateral force from arbitral direction. Numerical study was conducted to examine the behaviour of partial frame under constant axial force in columns and arbitral direction the affection force in horizontal plane at the top of column. In the frames handled here, it is shown that not only whole P- $\delta$  effect but also local P- $\delta$  effect caused by local deformation in the column-beam connections are exist. Finally, it was deduced that the result of effect to be yield load and maximum loading capacity of the frame could not be recognized, when the horizontal force in which direction of action changed.

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

立体骨組の弾塑性性状を論ずる上で, 地震力などのような水平力があらゆる方向から作用することに対する検討を加えることは, 重要な点の一つである. 特に, モーメント抵抗骨組の柱梁接合部については, これに関する十分な研究蓄積がまだ無く, 接合部設計法に組み入れられるまでに至っていない. 水平力が骨組の軸線から外れた方向から作用する場合, その力を  $x$  および  $y$  軸方向の分力に分けて, それぞれの方向に対する設計のための検討を行えば良いとこれまで考えられてきた. 著者らは, 実際に任意方向からの水平力を作用させた部分骨組の弾塑性挙動を調べている<sup>[1,2]</sup>.

本研究では, 既報<sup>[1]</sup>に続き, 柱に一定軸圧縮力を受けながら任意方向から水平外力を受ける円形鋼管柱・H形鋼梁をもつ外ダイアフラム接合部分骨組の弾塑性性状を調べた. また, 柱軸力の存在によって, 外ダイアフラム接合部特有の局部変形が骨組の全体挙動に及ぼす影響を調べた.

## 2. 解析骨組

## 2.1 解析モデル

立体骨組から取出した側柱部分骨組に注目して, 有限要素法に基づく汎用構造解析ソフトウェアを用いた数値実験を行った. 側柱は中柱

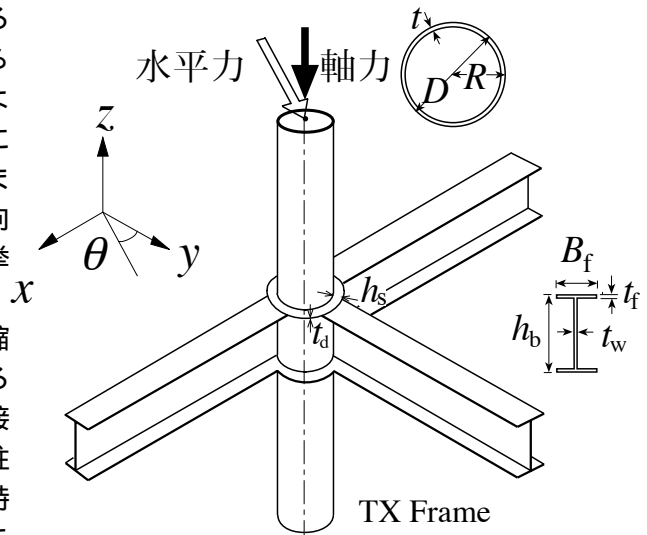


図1 定軸力と水平力を受ける部分骨組

\* 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 )

表 1 解析骨組の諸情報

名称	$D$	$t$	$h_b$	$B_f$	$t_f$	$t_w$	$t_d$	$h_s$	$R/t$	$R/(t+h_s)$	$D/B_f$	$h_b/B_f$	$R/t_d$	$K_e$	$P_y$	$P_{max}$									
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm						kN/mm	kN	kN									
1-1	216.3	4.5	150	300	9	6	9	15	23.53	5.43	1.44	2	11.77	2.33	42.71	61.20									
1-2		6							17.53	5.01			11.68	2.76	52.13	76.10									
1-3		8							13.02	4.53			11.57	3.24	66.27	97.10									
1-4		10							10.32	4.13			11.46	3.63	78.52	117.67									
1-5		12							8.51	3.78			11.35	3.97	91.62	133.68									
2-1		4.5							23.53	3.07			11.77	2.45	54.46	74.36									
2-2		6							17.53	2.92			11.68	2.92	65.63	92.09									
2-3		8							13.02	2.74			11.57	3.42	78.77	112.70									
2-4		10							10.32	2.57			11.46	3.81	89.30	131.80									
2-5		12							8.51	2.43			11.35	4.15	104.74	145.36									
3-1		4.5							23.53	2.14			11.77	2.57	58.80	85.08									
3-2		6							17.53	2.06			11.68	3.03	75.97	102.84									
3-3		8							13.02	1.97			11.57	3.52	86.73	122.53									
3-4		10							10.32	1.88			11.46	3.94	102.33	143.01									
3-5		12							8.51	1.79			11.35	4.27	113.42	157.92									
2-3A1		8						12	100	9			9	12	30	13.02	2.74	2.16	3	11.57	8.68	3.76	88.41	132.99	
2-3A2								8													13.02	2.74	13.02	3.28	74.50
2-3B1		16						8	100	9			9	12	30	6.26	2.18	1.44	2.4	11.13	2.97	69.89	102.96		
2-3B2									125												1.73	2.4	3.20	73.95	107.27
2-3B3									175												1.24	1.7	3.58	79.95	114.44
4-1		16						8	100	9			9	12	30	6.26	2.18	1.44	2.4	11.13	3.98	90.57	117.46		
4-2									125												2.16	2	4.34	104.50	130.58
4-3									150												1.73	1.7	4.69	118.96	142.42
4-4									175												1.44	2	4.95	128.88	160.87
4-3A		16						8	150	9			9	12	30	6.26	2.18	1.44	2	11.13	8.35	5.25	144.63	191.16	
4-3B									8					1.24							2	12.52	4.46	109.88	130.00
2-3B11		8						200	100	9			9	12	30	13.02	2.74	2.16	2.5	11.57	1.54	45.01	69.96		
2-3B12								250													2.23	60.19	86.53		
2-3C1		8						350	150	9			9	12	30	13.02	2.74	1.44	2.7	11.57	4.23	92.59	131.60		
2-3C2								400													5.06	108.47	149.09		
2-3B31	8	350	175	9	9	12	30	13.02	2.74	1.24	2	11.57	4.41	96.69	134.93										
2-3B32		400											5.23	110.39	151.82										

に比べて接合部に応力が集中し易く、骨組の異方性があり水平力の方向が骨組挙動の変化に及ぼす影響が現れやすいと考えられ、図1のような、柱に円形鋼管、梁にH形鋼をもつ外ダイアフラム接合された部分骨組を解析に用いた。数値実験に際して同図に示す記号の諸量を変化させた。

2.2 解析条件

図2は、これまで行ってきた側柱部分骨組の解析条件と同様に、全体骨組から柱および梁の半曲点で取出し、3本の梁の切断点では水平面に対してローラー支持かつピン支持とし、下柱の切断点でピン支持、また上柱の切断点は自由端とした。柱上

端に一定圧縮軸力を作用させ、同位置に任意方向の水平力を作用させる。実際には、骨組内の板要素局部座屈等による不安定挙動が起きた後も解析が継続できるように柱上端部の強制変位

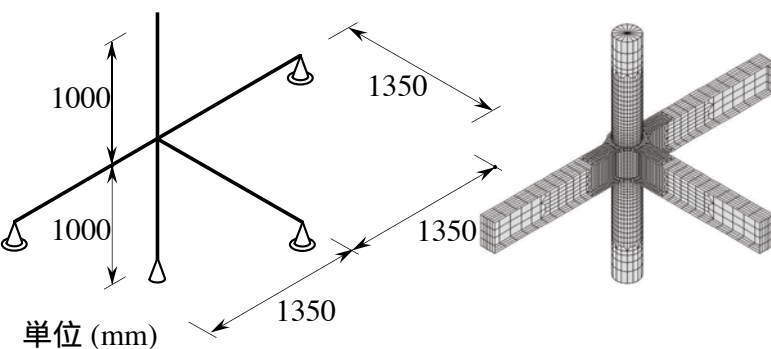


図2 数値実験モデル

解析として数値実験を行った。

有限要素は厚肉線形シェル要素（タイプ75）を用いた。この要素は内部にレイヤー設けることができ、せん断応力の分布が理論と整合性を保つよう考慮されている。

要素の降伏条件は von Mises の条件を採用し、Radial return 法を用いた。解析は文献[2] に習い漸増強制変位問題として行った。

### 3. パラメータ

#### 3.1 パラメータの検討

骨組の力学的性状を述べる場合、骨組の初期剛性、降伏耐力および最大耐力の3つの情報が重要である。これらの諸情報に影響を与える因子として、骨組を構成する部材と接合部補剛などの寸法パラメータが考えられる。

#### 3.2 パラメータの独立性

図3は、図1に記された寸法記号を用いた無次元量  $R/t$  をはじめとする5つのパラメータを考慮したものの一部で、お互いの相関性がないこと、すなわち互いに独立であることを示している。4章で述べるように、これらは骨組の3つの力学特性に強く影響を及ぼす。

### 4. パラメータの影響

#### 4.1 初期剛性への影響

骨組の初期剛性に影響するものとして、第一に考えられるのは、鋼管半径厚比 ( $R/t$ ) や鋼管径と梁フランジ幅の比 ( $D/B_f$ ) など互いの寸法差が大きく取られるものである。

図4の左列すべてが、骨組の初期剛性に及ぼす効果を調べた結果である。同図から分かるように、ここで挙げた5つのパラメータすべては初期剛性の変化に影響を与える。

#### 4.2 降伏耐力への影響

本研究では、骨組の降伏耐力は「荷重-変形関

係において接線剛性が初期剛性の3分の1に達した時の耐力」(3分の1剛性耐力)と定義する。

骨組の降伏耐力に影響を及ぼす効果を上記の5つのパラメータについて調べた結果を図4の中央列に示す。降伏耐力への各々のパラメータの影響は初期剛性のもと同様であることが特徴的である。

#### 4.3 最大耐力への影響

最大耐力について調べてみた結果が図4の右列の図である。これも4.1および4.2節と同じく、5つのパラメータが最大耐力の変化に影響を及ぼすことが分かる。この研究では、骨組の最大耐力を支配するものは、破断などの材料不安定ではなく局部座屈やP-効果で引き起される構造不安定である。従って、最大耐力を支配するパラメータとして、これらの寸法パラメータが用いられることは理にかなっている。

### 5. 柱軸力が骨組挙動に及ぼす影響

#### 5.1 解析結果

表1中の骨組のうち、最も柱梁仕口が弱い5つの骨組について有限要素解析を行った結果を図5に示す。それぞれの骨組に柱頂部に一定圧縮力を柱軸力比  $n = 0, 0.1, 0.2, 0.3$  で与えた。ただし、軸力比  $n (= N/N_y)$ 、 $N_y$  は柱断面の降伏軸力である。同図から  $n$  が増加するにつれて荷重-変形関係は低下しているのが窺われる。一方、初期剛性の変化は見られない。

解析結果について降伏耐力の柱軸力の変化に伴う変動を調べると、図6が得られる。文献[4]における単純モデルでの結果では降伏耐力は大きな変動が見られなかったが、骨組解析では軸力の増加と共に降伏耐力が減少することが示される。

一方、骨組の最大耐力についても同様の考察

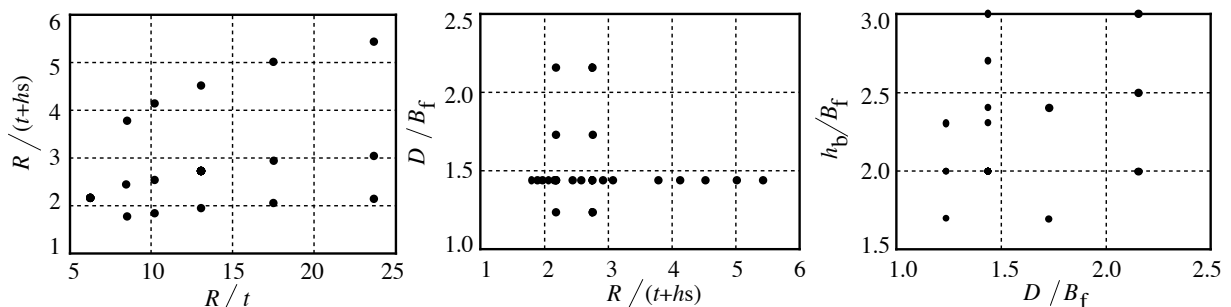


図3 パラメータ間の独立性

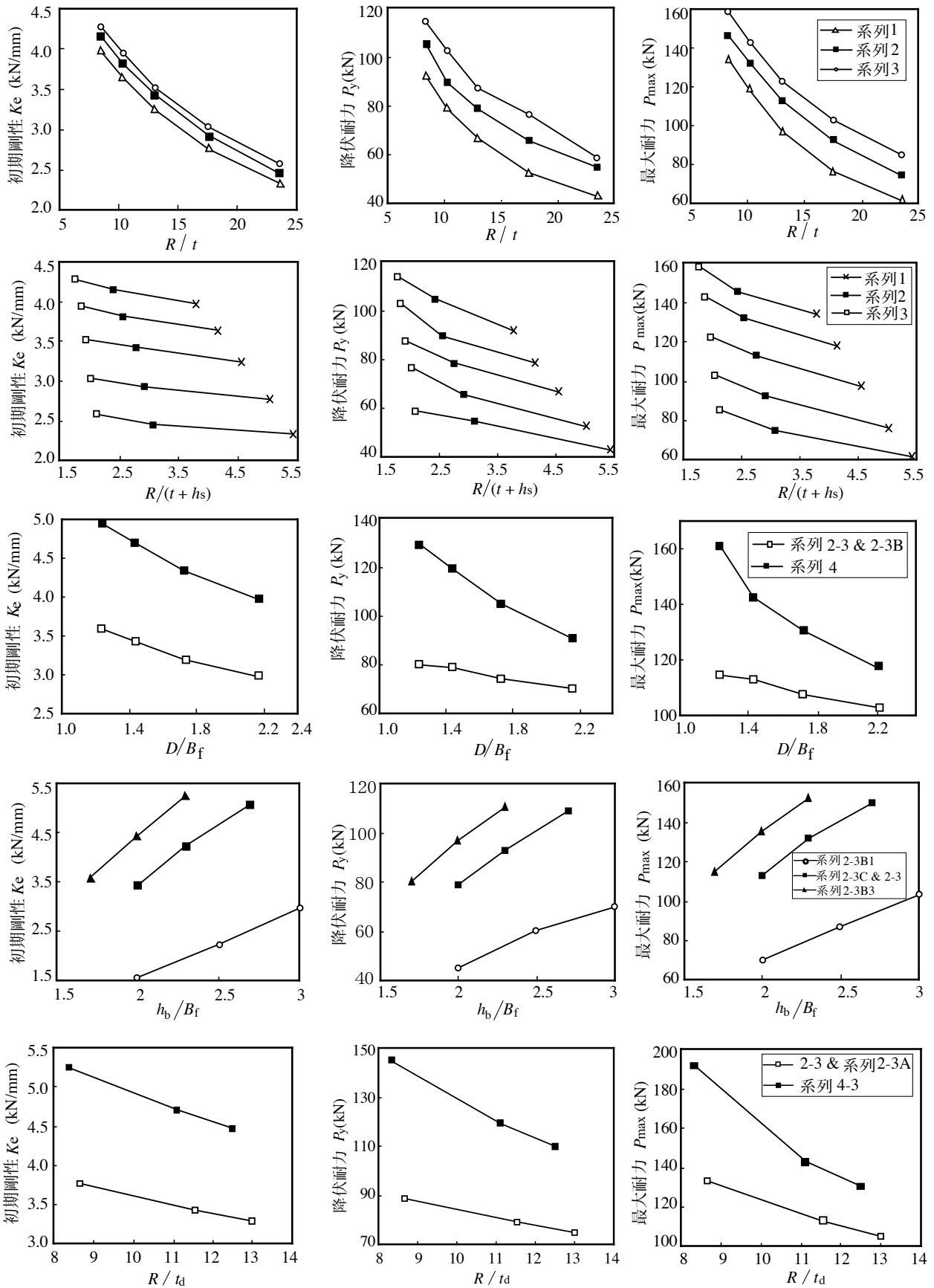


図4 各パラメータが部分骨組の初期剛性，降伏耐力および最大耐力に及ぼす影響

を行うと、図7が得られた。

### 5.2 全体的 $P$ - 効果と局所的 $P$ - 効果

文献[4]でも同様の結果を導いているが、ここでは柱の水平変位を伴わない問題であり、接合部仕口の降伏後に顕著となる剛性低下も骨組自体の剛性低下に影響を及ぼすことを示した。

軸力を受ける骨組では、骨組全体としての  $P$ -効果によって耐力低下が起ることが知られている。図8(1-1骨組,  $n=0$  および  $0.3$ ) では、全体的な  $P$ -効果によって低減される耐力を  $P_A$  として求めた曲線を実線で示す。なお  $P_A$  は次式で表すことができる。

$$P_A = \frac{N}{2h} \delta \quad (1)$$

ただし  $2h$  はモデルの柱全長。

一方、柱梁仕口部では外ダイアフラム接合部特有の局部変形が生じることが知られている。柱軸力が大きい場合や梁端モーメントが大きく局部変形量( $\delta_L$ )が無視できない場合は、それは柱軸力によって付加的に増大する。このことについてみれば、図9で示されるように、鋼管壁の面外変形が鋼管軸力によって誘発される局所的な  $P$ -効果が現れると考えられる。この耐力低減を  $P_L$  とすると、これは図8で示される有限要素解析結果 ( $n=0.3$ ) と実線との差であるといえる。

## 6. 水平力作用方向角の影響

### 6.1 降伏耐力への影響

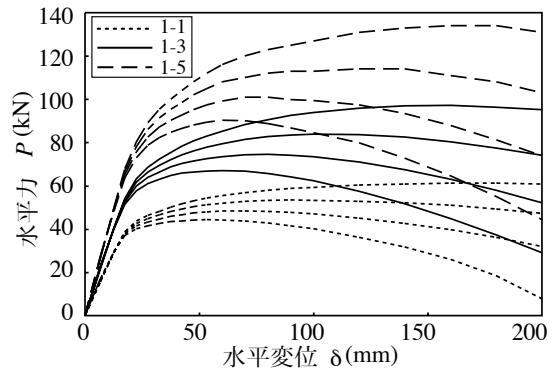
図10は、表1中の1-1骨組の柱軸力の有無 ( $n=0$  または  $0.3$ ) によって水平力作用方向角の変化に伴う降伏耐力の変化を求めたものである。

軸力を受ける骨組の結果は、軸力が無いときの結果と同様に作用方向角が増加し始めると直ちに降伏耐力は上昇する。

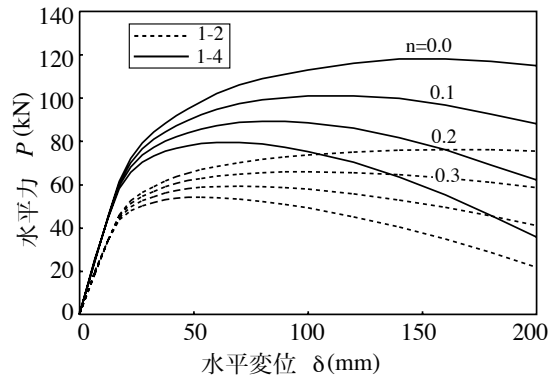
同図を基に無軸力の結果に対する軸力存在の結果の比を求めると、図11が得られた。この図は他の骨組を代表するものであるが、柱軸力を受ける骨組で、降伏耐力低減率は作用方向角によらず一定となる。

### 6.2 最大耐力への影響

図12は、前節と同様に水平力作用方向角の変化に伴う同一骨組の最大耐力の変化を求めたものである。降伏耐力の結果と同じように、作用方向角が増加し始めると直ちに最大耐力は上



(a) 1-1, 1-3, 1-5 骨組



(b) 1-2, 1-4 骨組

図5 解析結果 ( $\theta=0$ )

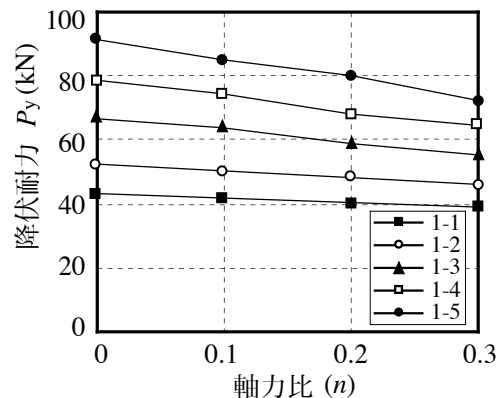


図6 降伏耐力への柱軸力の影響

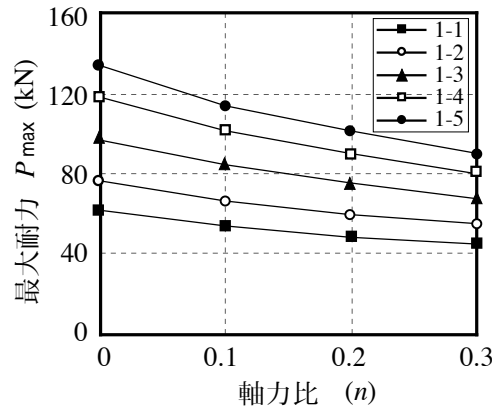


図7 最大耐力への柱軸力の影響

昇する。しかしながら、 $\theta = 50$  deg 付近をピークにそれより  $90$  deg まで増加する間、無軸力の骨組では最大耐力は低下した。

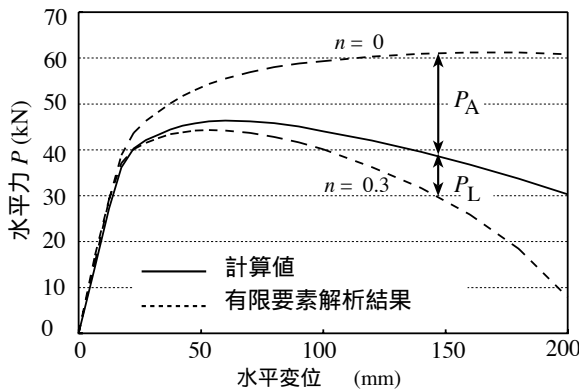


図8 2つのP-効果

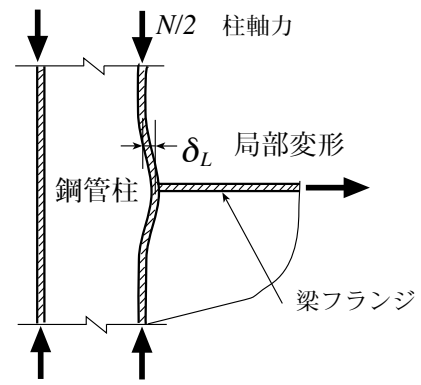


図9 柱軸力によるP-効果

この結果は、梁フランジの座

屈生起の有無の相違であり、斜め方向から水平力が作用する場合がむしろ最大耐力は確保できることが分った。

また、同図を基に無軸力の結果に対する軸力存在の結果の比を求めると、図13が得られた。柱軸力を受ける骨組でも、既往の結果<sup>[1]</sup>と同様に方向角は最大耐力に影響を及ぼさない。

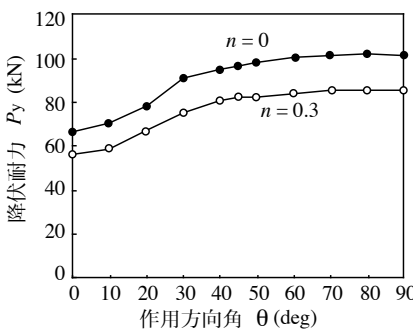


図10 降伏耐力への水平力方向角の影響

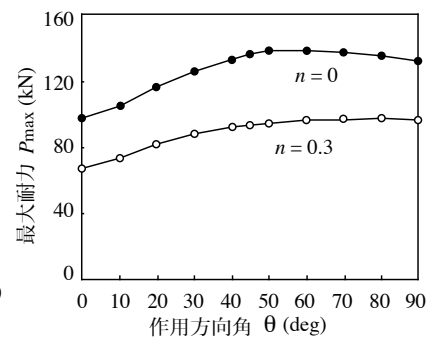


図12 最大耐力への水平力方向角の影響

## 7. おわりに

圧縮軸力を受ける外ダイアフラム接合された円形鋼管柱・H形鋼梁部分骨組に方向角を変化させた水平力を与える弾塑性有限要素解析を行った。ここで得られた知見を以下に記す。

1) 柱軸力を受けるここで扱う骨組では、全体のP-効果のみならず柱梁仕口部で生じる局部変形由来の局部的P-効果が認められる。

2) 柱に圧縮軸力を受ける骨組においても、水平力作用方向の変化に伴い骨組の降伏耐力および最大耐力が危険側になることはないことが分かった。

### 参考文献

- [1] 隋偉寧, 山成實: 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, 鋼構造年次論文報告集, 第12巻, pp. 261-268, 2004.11  
 [2] W. Sui, M. Yamanari, Characteristics of 3-D Steel Subassemblies with External Diaphragm under Biaxial Lateral Force, Proc. of 3rd International Symposium on Steel Structures, Vol. 2, pp.983-994, 2005.3

- [3] 2方向から水平力を受ける立体部分骨組の弾塑性に関する研究 (その3 柱に圧縮軸力が作用する場合の考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-1構造III, pp.759-760, 2005.9  
 [4] 海原広幸, 山成實, 小川厚治, 黒羽啓明: 柱軸力を考慮した角形鋼管柱・H形鋼梁仕口の復元力特性, 日本建築学会九州支部研究報告集, 第33号, pp.301-304, 1992.3

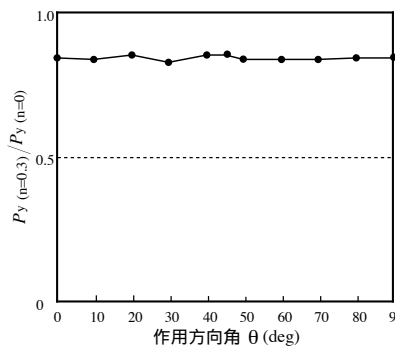


図11 水平力方向角 - 降伏耐力低減率関係

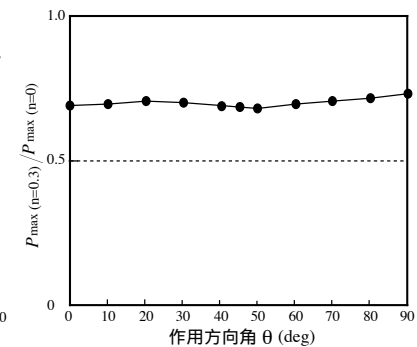


図13 水平力方向角 - 最大耐力低減率関係