

# エネルギー吸収型半剛接合鋼重層骨組の耐震設計に関する研究 (その1 静的構造解析から導かれる設計要件)

正会員 ○ 隋偉寧<sup>\*1</sup>, 同 山成實<sup>\*2</sup>

## 2. 構造 - 10. 鉄骨構造 構造 鋼骨組, 柱梁接合部, 半剛接合

### 1. はじめに

本報告は, 円形鋼管柱・H形鋼梁を用いた外ダイアフラム柱梁接合部を重層骨組のエネルギー吸収要素と捉え, その設計要件について静的骨組解析から得た結果から導いた知見を報告する.

### 2. 外ダイアフラム接合部の特質

著者等は円形鋼管柱・H形鋼梁をもつ外ダイアフラム形式の柱梁接合部に関する研究を行ってきた. この接合部は柱梁仕口部(柱部材と梁部材の境界部)にいわゆる局部変形が生じることが知られている. 局部変形が骨組の剛性を低下させることや, 仕口部の変形特性が明快に説明できないこともあり, できるだけ局部変形を生じさせないよう設計に適用される現状にある.

一方, 海外では半剛接合骨組の研究や設計への適用は数多く見られる<sup>1)</sup>. しかしながら, 地震国である日本では, 海外で見られる柔らかい半剛接合は耐震設計には適用し難いと考えられる. 逆に, 剛接合に近い半剛接合は初期剛性も高く, 降伏後の耐力上昇でエネルギー吸収要素として期待ができる. また, この形式の接合部は通し柱が実現できるので, 応力が最も高くなる部分で柱部材の切断を避けることができる. すなわち, 兵庫県南部地震被害で見られた接合部における溶接部での破断を防ぐことも期待できる.

以上のことから本研究は, 半剛接合部をエネルギー吸収要素と捉え, 外ダイアフラム接合部の設計要件を数値実験をとおして調査するものである.

### 3. 柱梁仕口に関する設計パラメータ

柱梁仕口の設計には以下の4つのパラメータを用意した. これらは, 柱梁仕口と梁部材の耐力

と剛性に関する相対的関係から, 仕口挙動が骨組挙動へおよぼす影響を調べるのに有用である

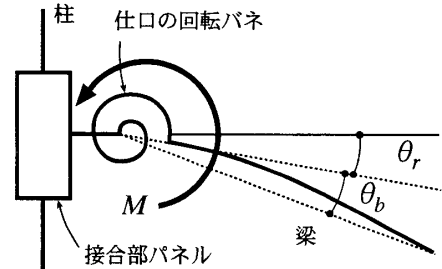


図1 仕口のモデル化

と考える. パラメータの値は文献[2]で示した円形鋼管柱・H形鋼外ダイアフラム接合部の耐力および剛性に関する推定式により求められる. 以下に各パラメータの定義を示す.

#### 3.1 接合部係数

鋼構造の耐震規定<sup>2)</sup>で記されている接合部係数 $\alpha$ は, 柱梁仕口の最大耐力 $M_{r, \max}$ と梁部材の全塑性耐力 $M_{p, b}$ の比で与えられている. 本研究では, 柱梁仕口の最大耐力を変化させた式(1)で表す $r$ を用いる.

$$r = \frac{M_{r, \max}}{M_{p, b}} \quad \dots \dots \quad (1)$$

#### 3.2 仕口梁降伏耐力比

半剛接合部の荷重-変形関係は, 早期に降伏が起るなだらかな曲線を描くのが一般的である. 仕口の降伏耐力 $M_{r, y}$ を無次元化した式(2)で表す $r_y$ を用いる.

$$r_y = \frac{M_{r, y}}{M_{p, b}} \quad \dots \dots \quad (2)$$

#### 3.3 仕口梁初期剛性比

仕口の初期剛性は骨組剛性に影響をおよぼすので, 式(3)で表す $k_0$ を定義する.

$$k_0 = \frac{K_{r, 0}}{K_b} \quad \dots \dots \quad (3)$$

Study on Semirigid Steel Connections as Energy Absorbers in Frames

Part 1 Design Requirements of External Diaphragm Connections through Static Analysis

SUI Weining and YAMANARI Minoru

表1 外ダイアフラム柱梁接合形式の骨組

骨組	層	柱	断面寸法(mm)	梁	断面寸法(mm)	骨組	層	柱	断面寸法(mm)	梁	断面寸法(mm)
A	3	C1	□□318.5x7.9	B1	H-248x124x5x8	I	6	C1	○-406.4x12.7	B1	H-350x250x9x14
	2	C1	□□318.5x7.9	B2	H-298x149x5.5x8		C2	○-457.2x14			
	1	C2	□□318.5x10.3	B2	H-298x149x5.5x8		C3	○-457.2x19			
B	3	C1	□□267.4x7	B1	H-248x124x5x8		5	C2	○-457.2x14	B2	H-500x200x10x16
	2	C2	□□355.6x12.7	B2	H-446x199x8x12		C4	○-457.2x16			
	1	C2	□□355.6x12.7	B3	H-496x199x9x14		C5	○-508x16			
C	3	C1	□□508x7.9	B1	H-244x175x7x11		4	C3	○-457.2x19	B4	H-488x300x11x18
	2	C2	□□609.6x9.5	B2	H-496x199x9x14		C5	○-508x16			
	1	C3	□□609.6x12	B3	H-596x199x10x15		C6	○-508x19			
D	3	C1	□□355.6x12.7	B1	H-446x199x8x12	3	C5	○-508x16	B4	H-488x300x11x18	
	2	C2	□□400x12	B2	H-496x199x9x14	C6	○-508x19				
	1	C3	□□406.4x12.7	B3	H-500x200x10x16	C7	○-609.6x16				
F	4	C1	□□400x19	B1	H-294x302x12x12	2	C8	○-550x19	B5	H-582x300x12x17	
		C2	□□318.5x19			C7	○-609.6x16				
	3	C1	□□400x19	B2	H-340x250x9x14	1	C8	○-550x19	B5	H-582x300x12x17	
		C2	□□318.5x19			C7	○-609.6x16				
	2	C3	□□457.2x19	B3	H-500x250x9x22	1	C9	○-609.6x19	B7	H-692x300x13x20	
		C1	□□400x19								
1	C4	□□508x16	B4	H-482x300x11x15	9	C1	□□355.6x12.7	B1	H-200x204x12x12		
	C5	□□406.4x21.4			8	C2	○-406.4x12.7				
	C6	□□558.8x16			C9	○-500x12					
G	4	C1	□□406.4x21.4	B1	H-500x250x9x19	7	C3	○-457.2x12.7	B3	H-298x201x9x14	
	3	C2	□□298.5x22	B1	H-500x250x9x19	C9	○-500x12				
		C1	□□406.4x21.4	B2	H-588x300x12x20	6	C3	○-457.2x12.7			
	2	C1	□□406.4x21.4	B1	H-500x250x9x19	6	C4	○-558.8x12.7	B4	H-336x249x8x12	
		C2	□□298.5x22	B3	H-582x300x12x17	C4	○-558.8x12.7				
	1	C1	□□406.4x21.4	B3	H-582x300x12x17	5	C4	○-558.8x12.7	B5	H-340x250x9x14	
	C3	□□355.6x20	B4	H-482x300x11x15	C5	○-550x16					
H	4	C1	□□216.3x8	B1	H-248x124x5x8	4	C5	○-550x16	B6	H-386x299x9x14	
	3	C2	□□216.3x12	B2	H-298x149x5.5x8	C10	○-558.8x16				
	2	C3	□□267.4x12.7	B3	H-346x174x6x9	3	C6	○-558.8x16	B7	H-386x299x9x14	
	1	C4	□□318.5x10.3	B3	H-346x174x6x9	C7	○-600x16				
J	7	C1	□□457.2x12.7	B1	H-298x201x9x14	2	C7	○-600x16	B8	H-344x348x10x16	
		C2	□□406.4x12	B2	H-400x200x8x13	C11	○-600x19				
	6	C1	□□457.2x12.7	B2	H-400x200x8x13	1	C8	○-660.4x19	B9	H-344x348x10x16	
		C2	□□406.4x12								
	5	C1	□□457.2x12.7	B3	H-450x200x9x14	9	C1	○-400x12	B1	H-340x250x9x14	
	4	C1	□□457.2x12.7	B3	H-450x200x9x14	8	C2	○-400x16			
				B4	H-434x299x10x15	7	C3	○-400x19	B3	H-440x300x11x18	
	3	C3	□□457.2x19	B4	H-434x299x10x15	6	C4	○-400x19			
				B5	H-488x300x11x18	5	C5	○-500x19	B5	H-482x300x11x15	
	2	C4	□□457.2x22	B4	H-434x299x10x15	4	C6	○-500x22			
1	C4	□□457.2x22	B5	H-488x300x11x18	3	C7	○-550x19	B7	H-500x300x12x15		
			B6	H-588x300x12x20	2	C8	○-600x19				
			B6	H-588x300x12x20	1	C9	○-700x19	B9	H-582x300x12x17		

ただし、 $K_b = 6EI / \ell$  ,  $E$  は鋼材のヤング係数,  $I$  および  $\ell$  はそれぞれ梁部材の断面2次モーメントおよび実長である。

### 3.4 仕口の硬化係数

仕口の降伏後の耐力上昇によって、梁部材の降伏が期待できるので、硬化係数に相当する  $e_t$  を式(4)で定義する。

$$e_t = \frac{K_{r2}}{K_{r0}} \dots \dots \dots (4)$$

### 4. 実在骨組への外ダイアフラム接合部の組込

川島等は実施設計された12個の実在の鋼重層骨組について柱部材と梁部材の耐力比および剛性比について調査研究<sup>[4,5]</sup>を行っており、それら

は梁降伏型骨組であると報告している。骨組は柱に角形鋼管を用いた剛接合骨組であるので、ここでは柱部材を円形鋼管に置換え、接合部を外ダイアフラム形式に設計し直した新たな11個の骨組を用意した。骨組の概要を表1に示す。

### 5. 骨組解析

外ダイアフラム柱梁仕口は梁端モーメントに対して回転変形を起こすので、図1に示す回転バネ要素にモデル化した。この復元力特性は文献[1]に示したトリリニア型である。鋼材は全てSS400クラスである。解析には小川が開発した構造解析プログラム club.f<sup>[6]</sup>を用いた。解析は一般化ヒンジ法による。数値実験に先立ち、文献[7]の平面骨組の加力実験結果と有限要素解析

結果との比較により、同プログラムによる結果の妥当性を確認した。

### 6. 層間変位角の制限の検討

剛接合された骨組に梁端部に回転バネ要素を付加することで骨組水平剛性は低下する。例としてA骨組について解析結果を図2に示す。接合部係数  $r$  を0.9から1.6まで変化させて骨組に設計用地震力を作用させた層間変位角をプロットした結果、骨組の1次設計に課せられる層間変位角の制限値(1/200 rad)を上回るケースが数多く見られたが、緩和規定の1/120 radを超えるのは限られた骨組であった。このように、柱梁仕口の剛性が過度に低下しない限り、骨組設計は可能である。

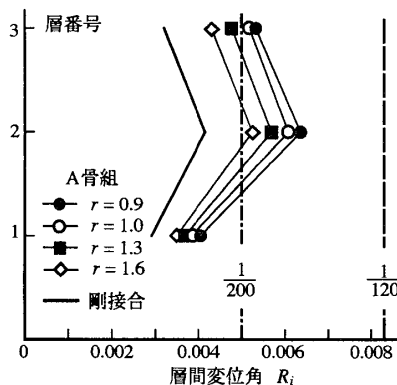


図2 層間変位角

### 7. 柱梁仕口と梁部材の両方が降伏する条件

柱梁仕口と梁部材はそれぞれの降伏耐力や最大耐力を有しており、外力の上昇に伴ってどちらかが先に降伏する。弾塑性挙動の中で双方とも降伏することでバランス良くエネルギー吸収が実現できれば、効率良い設計であると考えよう。ここでは、骨組の頂部水平変位が骨組高さの1/50に達するまでに仕口・梁部材共に降伏するための条件を以下に示す。

#### 7.1 仕口降伏先行の場合 ( $r_y \leq 1.0$ )

図3(a)は、梁部材より先に仕口が降伏し、降伏後の耐力上昇で梁部材も降伏する様子を示している。上記の条件を満足する式は、式(5)で与えられ

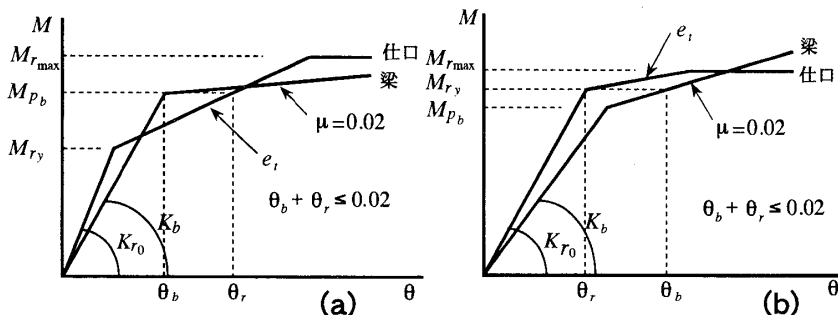


図3 仕口と梁部材の降伏順序のパターン

$$r_y \geq \frac{e_t}{1-e_t} \left( \frac{1}{e_t} + k_0 - 0.02 k_0 \frac{K_b}{M_{pb}} \right) \quad (5)$$

図5(a)は、ある設計された柱梁仕口に対する式(5)の境界面である。

#### 7.2 梁降伏先行の場合 ( $r_y > 1.0$ )

図3(b)は、梁降伏が先行する場合の荷重-変形関係である。本研究では、梁部材のひずみ硬化係数  $\mu$  を0.02と定めた。

$$\dots \quad (6)$$

図4(b)は、ある設計された柱梁仕口に対する式(6)の境界面である。

### 8. 実在骨組から導かれた柱梁仕口の設計要件

全ての骨組の設計された外ダイアフラム接合部について、接合部係数  $r$  を1.3とした場合、仕口と梁部材の両方が1/50 radの変形限界までに降伏するための下限値を調べると、図5が得られた。過度に低い値も見られるが、仕口の硬化係数が高ければ有効であるという結果も含まれている。これらの下限値の平均値は約85%であった。

一方、接合部係数  $r$  を1.3のときの推定式より求めた値で、図4(a), (b)の2つの境界面に挟まれる設計された接合部の  $r$  を調べると、図6が得られた。これには梁降伏先行も含まれているが、平均値として約96%が得られた。このように仕口と梁部材が前後して降伏する調査結果を得ることができた。

### 9. おわりに

実施設計された鋼重層平面骨組に外ダイアフラム柱梁仕口を適用し、仕口の強度と骨組の変形特性の関係を数値実験によって調べた。以下にその知見をまとめる。

- 1) 耐震規定を満たすよう設計された骨組に外ダイアフラム接合部を組入れた場合、静的に設計用地震力を加えたときの層間

変位角の最大値は規定の  $1/200 \text{ rad}$  を満たすことはできなくなるが、適度の剛性をもつ接合部を適用すれば緩和規定の  $1/120 \text{ rad}$   $r_y$  を満足させることができる。

2) 梁部材と柱梁仕口の両者を降伏させる設計を実現する仕口の降伏耐力

の下限値を求めた。その結果、接合部係数  $r$  が 1.3 (保有耐力接合) のときの、11 個の実在骨組の仕口梁降伏耐力比の下限値は平均値として約 85% が得られた。

3) 接合部係数  $r$  が 1.3 のときの実在骨組の設計された仕口の仕口梁降伏耐力比は概ね 96% であった。

**謝辞**

本研究は、(社)日本鋼構造協会より平成 18 年度鋼構造研究助成および平成 19 年度熊本大学未来開拓支援事業より助成を受けた。本研究を進めるにあたり、本学 4 年生の大塚智子女史の協力を得た。ここに謝意を表す。

**参考文献**

[1] J. T. Mottram and Y. Zheng, State-of-the-art review on the design of beam-to-column connections for pultruded frames, *Journal of Composite Structure*, 35, pp. 387-401, 1996

[2] 隋偉寧, 山成實: 軸圧縮力と水平力を受ける外ダイアフラム仕口の力学的特性評価, *鋼構造論文集*, 第 54 号, pp. 17-25, 2007.6

[3] 2007 年度版建築物の構造関係技術基準解説書, 国土交通省他監修, pp. 589-593, 2007.8

[4] 川島敏夫, 友澤悟史, 小川厚治: 鋼構造骨組における柱梁耐力比及び柱梁剛性比の調査 (その 1 調査概要と柱梁剛性比の検討), *日本建築学会九州支部研究報告*, 第 45 号, pp. 485-488, 2007.3

[5] 友澤悟史, 川島敏夫, 小川厚治: 鋼構造骨組における柱梁耐力比及び柱梁剛性比の調査 (その 2 柱梁

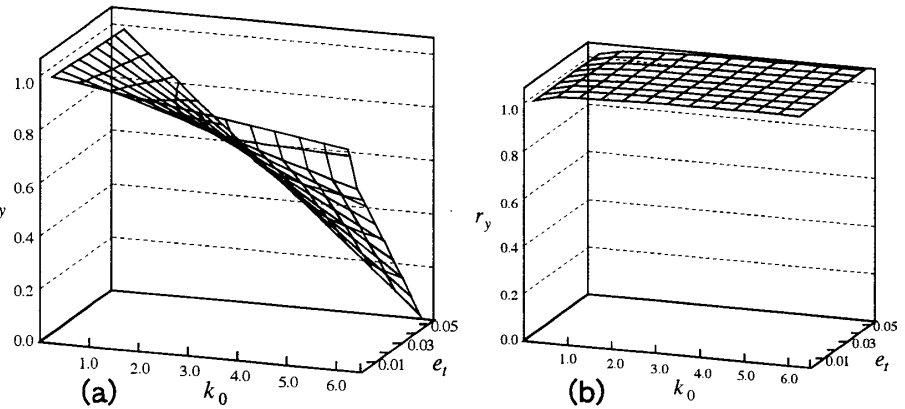


図 4 仕口降伏の限界曲面

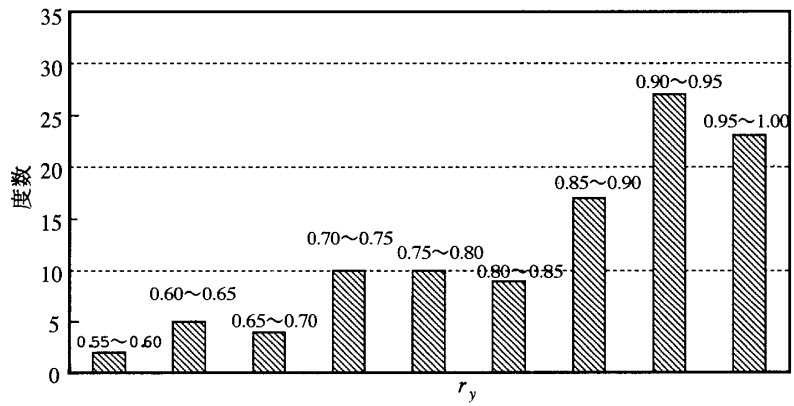


図 5 設計された仕口の限界降伏比の度数分布

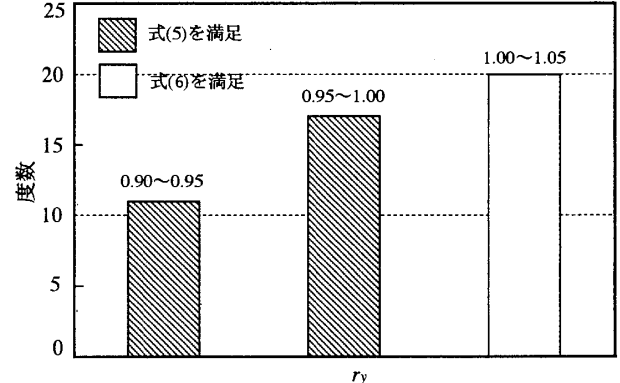


図 6 設計された仕口の適正降伏比の度数分布

耐力比の検討), *日本建築学会九州支部研究報告*, 第 45 号, pp. 485-488, 2007.3

[6] 小川厚治: 梁降伏先行鋼構造ラーメン骨組の地震応答性状の解明に関する基礎的研究, 平成 17 年度~平成 18 年度科学研究費補助金 (基盤研究 (C)) 研究成果報告書, 2007.3

[7] W. Sui, M. Yamanari, Characteristics of 3-D Steel Subassemblies with External Diaphragm under Bi-axial Lateral Force, *Proc. of 3rd International Symposium on Steel Structures*, Vol. 2, pp.983-994, 2005.3

\*1 熊本大学大学院 博士後期課程・工修  
\*2 熊本大学大学院 准教授・工博

Graduate Student, Kumamoto University, M. of Eng.  
Assoc. Prof., Kumamoto University, Dr. Eng.