# 論文 偏心ブレース付き柱 RC・梁 S 混合構造の構造性能に関する 実験的研究

近藤 祐輔\*1 濱田 真\*1 増子 寛\*2 岩渕 一徳\*3

要旨:本論文は,柱 RC 梁 S 混合構造の柱梁接合部の構造性能を確認する目的で行った静的載荷実験を報告 するものである。筆者は,柱梁接合部にブレースの偏心量を実験因子としたブレース付き十字形試験体 4 体 と十字形試験体 1 体の計 5 体の検討を行った。ブレース付き十字形試験体は,偏心量の大きさは最大耐力に 影響しないことがわかった。また,柱梁接合部に作用するパネルモーメントは,十字形試験体と比べて無偏 心の場合は小さいことを確認した。また,ブレースが偏心している場合は,ブレースによる付加曲げモーメ ントに起因して梁端部にせん断力が付加され,ウェブがせん断降伏することがわかった。 キーワード:柱 RC 梁 S,偏心ブレース,柱梁接合部,鉄骨ブレース

# 1. はじめに

柱が鉄筋コンクリート造(以下, RC 造),梁が鉄骨造 (以下, S 造)の混合構造は,構造の特長や施工の合理 化の利点から,数多く研究開発が進められてきた。柱 RC 梁 S 混合構造は,ラーメン架構以外に耐震要素を適宜配 置し,耐力・剛性を付与し合理的な架構形式とすること が一般的に行われる。有力な手段の耐震要素であるブレ ースを取り付けた実験的および解析的検討は多く行われ てきているが,ブレースが偏心して取り付けた場合の検 討は少ない状況にある。

本研究では、梁貫通形式でふさぎ板を用いた柱梁接合 部形状にブレースを有する混合構造について、その構造 特性を把握することを目的として静的載荷実験を行った。 耐震要素であるブレースは接合部の仕口の形状・納まり によっては柱梁接合部の芯に一致させることが難しいこ とがある。本論文では鉄骨ブレースを偏心させることで 接合部周辺に及ぼす影響と純ラーメン架構との応力伝達 の違いについて述べる。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 試験体概要

試験体一覧を表-1に,試験体断面詳細を図-1に, 試験体寸法を図-2にそれぞれ示す。

試験体は5体で,実大の約1/2の縮尺とした。ブレースの有無の比較のための十字形試験体が1体と,ブレース付き十字形試験体の4体である。

柱は RC 造, コンクリートの設計基準強度は 55N/mm<sup>2</sup> である。柱の断面は, B×D=440×440, 柱高さは, H=2,920mm である。柱部材の主筋は, すべて D19(SD390) を使用し、せん断補強筋は、4-D6@75(785級)である。 梁部材は、S造で、断面は、BH-400×160×9×12、梁フ ランジおよびウェブは、すべてSN490Bである。また、 梁スパンは、L=4,500mmである。柱梁接合部は、すべて ふさぎ板形式(SS400, t=4.5)である。ブレース部材は、 S造で断面は、BH-100×100×6×6(BR4のみBH-100× 100×12×12)、フランジおよびウェブは、すべてSS400 である。BR1の試験体は、ブレースの取り付け位置が柱 芯と梁芯が一致した無偏心(偏心量 e=0mm)で接合した 試験体である。BR2 と BR3 は、それぞれ偏心量が e=100mm、e=200mmで接合した試験体である。BR4の試 験体は、偏心量が e=100mm としてブレースの座屈耐力 がBR2の2倍に設定した試験体である。ブレースの偏心 量の詳細を図-3に示す。

表-1 試験体一覧



\*1 (株) 熊谷組 技術研究所 建築構造研究グループ 工修 (正会員) \*2 (株) 熊谷組 設計本部 構造設計部 構造第1グループ \*3 (株) 熊谷組 設計本部 構造設計部 プロジェクトグループ 工修 (正会員)



# 2.2 載荷方法

載荷装置を図-4に、載荷履歴を図-5に示す。加力 は、試験体を加力梁と反力床に接続し、加力梁に取り付 けてある2台の水平アクチュエータを用いて試験体に正 負漸増繰返し水平力で載荷した。加力梁は、鉛直方向の アクチュエータで支持されており、載荷中は、鉛直変位 を一定に制御し、水平を保持している。RC 造柱への軸 力はゼロとした。層せん断力(以下,*Q*)の測定は、ア クチュエータ内の荷重計を用いた。層間変形角(以下, R)は変位計より測定した。接合部せん断変形角(以下, ッ)は、柱梁接合部のコンクリートに埋め込んだ全ネジ の突き出た部分に変位計を設置し、測定・算出した。部 材のひずみは、柱主筋、梁、ブレースおよび接合部内の 鉄骨をひずみゲージにより測定した。また、両脇の PC 鋼棒に貼り付けたひずみゲージから梁の載荷点における 反力(せん断力)を算出した。





図-5 載荷履歴

#### 2.3 材料試験結果

実験で使用したコンクリートの材料試験結果を表-2 に示し、鉄筋および鋼材の材料試験結果を、表-3およ び表-4にそれぞれ示す。

表-2 コンクリートの材料試験結果

試驗休夕	圧縮強度	ヤング率	割裂強度	材齢		
武贵座石	$N/mm^2$	$N/mm^2$	$N/mm^2$	day		
CR1	72.6	35, 800	4.86	22		
BR1	72.0	35,000	4.65	41		
BR2	71.5	35, 100	4.79	48		
BR3	71.4	34,700	4.28	35		
BR4	71.5	35, 200	4.63	54		
V/107-78/2 FF	50 10U					

※呼び名:55-50-13H

表-3 鉄筋の材料試験結果

呼び名	規格	降伏強度 N/mm <sup>2</sup> N/mm <sup>2</sup>		ヤング率 N/mm <sup>2</sup>	使用箇所				
D19	SD390	456	641	187,000	主筋				
D6 <sup>*</sup>	785級	995	1, 182	187,000	せん断補強筋				
× 0.00/1-1-2-1.14									

※:0.2%オフセット法

表-4 鋼材の材料試験絵結果

規格	厚さ	降伏強度	引張強度	ヤング率	使用箇所	
///14	mm	$N/mm^2$	$N/mm^2$	$N/mm^2$		
	t=4.5	267	406	201,000	ふさぎ板	
SS400	t=6	281	434	196,000	ブレース	
	t=12	246	411	194,000	ブレース	
SN400P	t=9	359	518	200,000	梁ウェブ	
514490D	t=12	366	534	203,000	梁フランジ	

# 3. 実験結果と検討

# 3.1 実験経過

各試験体の実験経過一覧を表-5に示す。表中の値は、 イベント発生時の層間変形角(R)を示している。

各イベントは、ブレースの座屈を除きひずみゲージの 値から算出した。ブレースの座屈は、目視でブレースの 面外方向の変形を観測した時点を座屈と定義した。ブレ ースの引張降伏は、4本のブレースのうち、いずれか1 本のブレースに貼り付けたひずみゲージがすべて降伏ひ ずみに到達した時点を引張降伏と定義した。梁ウェブの せん断降伏はウェブに貼り付けた3軸ゲージの値から算 出した。代表的な試験体の経過を以下に記述する。

CR1 は、R=1.80%で接合部内の梁フランジが部分的に 降伏し、R=1.89%で梁フランジの降伏と接合部内梁ウェ ブのせん断降伏が同時に発生した。R=-2.55%でふさぎ板 の部分的なせん断降伏および主筋(1 段筋)の危険断面 位置で降伏ひずみに達した。

BR2は、R=-0.17%でブレースが座屈し、R=0.50%でブレースが引張降伏した。R=-0.49%で部分的に梁ウェブがせん断降伏に達した。R=1.27%で接合部内梁フランジが降伏ひず降伏ひずみに達した。R=1.71%で梁フランジが降伏ひずみに達し、R=1.98%で接合部内の梁ウェブが部分的にせん断降伏に達した。

	接合部		梁		ふさぎ板	柱主筋			
	フランジ 降伏	ウェブ せん断 降伏	フランジ 降伏	ウェブ せん断 降伏	せん断 降伏	降伏	最大 耐力	最終破壊 モード	
CR1	1.80	1.89	1.89	-	-2.55	-2.55	5.00	梁曲げ破壊	
	接合	部	梁		ブレース				
	フランジ 降伏	ウェブ せん断 降伏	フランジ 降伏	ウェブ せん断 降伏	座屈	引張降 伏	最大 耐力	最終破壊 モード	
BR1	1.76	-1.26	1.56	-	-0.16	0.46	3.00	ブレーフ引張	
BR2	1.27	1.98	1.71	-0.49	-0.17	0.50	0.50	ノレース引張	
BR3	-0.83	-	1.70	0.20 ※1	-0.25	0.51	0.56	梁ウェブ せん断降伏	
BR4	-0.45	0.15	-0.23	0.22 ※1	-0.23	0.78	0.75 -0.50 **2	ブレース引張	
$\gg 1$	: A区間の	梁ウェコ	ブ ※2:貨	自加力時				単位:%	

表-5 実験経過一覧

#### 3.2 荷重変形関係

+字形試験体およびブレース付き試験体のQ-R関係を 図-6に示す。ブレース付き試験体の梁端部の区間定義 を図-7に示す。

図表中の計算値は、柱の曲げ耐力を技術基準<sup>1)</sup>、柱梁 接合部せん断耐力を SRC 規準の式<sup>2)</sup>で算出し、層せん断 力に換算した値である。ブレース座屈と梁ウェブせん断 降伏の計算値は、弾性解析結果から求めた層せん断力で ある。ブレース引張降伏計算値は、ブレース部材の引張 降伏荷重と座屈荷重の比をブレース座屈の計算値との積 から算出した値である。

CR1 は, R=5.00%で最大耐力に達した。実験時の破壊 モードは,想定した破壊モードである梁曲げ破壊となり, 梁全塑性曲げ耐力以上の耐力を示した。また,急激な耐 力低下は起こさず安定した履歴性状を示した。

BR1は、R=3.00%で、その他のブレース付き試験体は、 R=0.50%で最大耐力を示した。BR2の図中の破線で示した たQ-R関係は、R=2.00%の載荷後の正加力時に圧縮方向 に効果があるブレースを切断し、載荷を継続したときの 履歴である。BR1~BR3の試験体は計算値からブレース座



屈を想定した破壊モードであったが、Q-R 関係の履歴からわかるようにブレース座屈後も急激な耐力低下は観測されなかった。一般的に、圧縮ブレースが座屈後、引張ブレースが降伏する。ブレースは、引張力を受ける場合、素材の応カーひずみ関係に依存し、抵抗力として降伏軸力まで期待できる。十字形架構はブレース降伏時には弾性状態で、その後、十字形架構による耐力の上昇があるといわれている<sup>30</sup>。BR1 および BR2 はブレースが引張降伏してから最大耐力に到達し、BR3 は梁ウェブがせん断降伏してから最大耐力に到達した。BR4 は A 区間に貼り付けたひずみゲージの値がせん断降伏に達したが、この区間おけるせん断降伏では耐力は決定せず、Q-R 関係の履歴から、ブレースが引張降伏後に最大耐力に到達した。

次に、最大耐力を比較、検討した。ブレース付き試験 体の最大耐力は図-8に示すように、実験の範囲内では、 偏心量の違いによる最大耐力の差異はないことがわかった。





		是十副力宝险店			計算値					
			取入順刀夫駛旭			河口油井	やまれ	柱梁接合	実験値/計算値	
		Ī	É	1	負		11日の	部せん断	正	負
		Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R (%)	cQb (kN)	cQc (kN)	cQp(kN)	-	I
	CR1	372	5.01	01 -367 -5.00		294	424	391	1.27	1.25
			最大耐	力実験値	直	梁ウェブ	ブレース	ブレース	字聆は/乳質は	
		Ī	É	負		せん断	座屈	引張	天映10/可昇10	
		Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R (%)	cQw(kN)	cQbr(kN)	TQbr(kN)	正	負
	BR1	855	3.00	-749	-2.98	1081	606	765	1.12	0.98
	BR2	844	0.50	-790	-0.45	833	647	817	1.03	0.97
	BR3	866	0.56	-791	-0.48	847	690	871	1.02	0.93
1	BR4	1440	0.78	-1408	-0.50	794	1033	1304	1.10	1.08

表-6 最大耐力の計算値と実験値一覧

# 3.3 ブレースが負担する層せん断力

ブレースが負担する層せん断力を図-9に示す。横軸 は,層間変形角(R)を示し,縦軸は,各サイクルピーク時 の1回目の層せん断力から十字形試験体である CR1 の 同変形角における層せん断力(Q)を差し引いた値である。 この値は、各ピーク時におけるブレースが負担する層せ ん断力を示す。本実験では、ブレースは、図-6の履歴 が示すように、偏心量に関わらず、R=0.50%で引張降伏 した。図-9に示すように R=0.50%を頂点として、ブレ ースは引張降伏後、ブレースの残留たわみが増加し、バ ウシンガー効果の影響で、耐力および剛性が低下し、ブ レースの負担する層せん断力が減少していることがわか った。



#### 3.4 柱梁接合部の主ひずみの分布

図-10にR=2.00%時の柱梁接合部まわりのウェブの 主ひずみの分布を示す。主ひずみは、梁端部および柱梁 接合部のウェブに3軸ゲージを貼り付けて計測を行った。 ブレースの部材座屈耐力が同じであるBR1~BR3を比 較する。各試験体ともに、柱梁接合部の中央部分で主ひ ずみが最大となっており、主ひずみの角度は、ほぼブレ ースの角度と対応している。また、接合部内の主ひずみ の大きさは、BR1はCR1と比較して、若干小さいが、 BR2およびBR3はほぼ同値で大きな差異はない。

次に梁端部の主ひずみの検討を行った。偏心量が大き い BR3 は, BR2 と比較して, 柱フェイス位置とブレース の間(A 区間)の梁ウェブの主ひずみが大きい値を示して いる。ブレースが偏心している場合, ブレースからの応 力は, 梁部材を介して伝達されるため, 梁部材に応力集 中が生じている。ブレースの偏心量が大きい分, ブレー スからの応力による曲げモーメントが大きくなったため である。また, 偏心量が同じでブレースの部材耐力が異 なる BR2 と BR4 を比較すると部材耐力が大きい BR4 の 主ひずみの値が大きくなっている。

# 3.5 柱梁接合部のせん断変形角の推移

試験体の柱梁接合部せん断変形角の推移を図-11に 示す。横軸は,層間変形角(R)で,縦軸は,柱梁接合部の せん断変形角(y)を示す。この図は,各サイクルピーク 時の1回目のせん断変形角を示している。十字形試験体 の柱梁接合部の変形は,一般的に図-12(a)に示すよう



になる。一方,ブレース付き試験体は,ブレース軸力が 作用すると図-12(b)に示すように,柱梁接合部の変形 は十字形の変形に比べて抑制されると予想される。以下 に,十字形の標準試験体である CR1 と BR タイプの柱梁

接合部のせん断変形角(γ)について比較,検討を行った。

ブレースの芯が柱梁接合部の芯と一致している BRI の試験体は、ブレース軸力の影響で十字形の柱梁接合部 のせん断変形角よりも抑制されていることがわかる。し かし、ブレース芯が柱梁接合部の芯と一致しない偏心し た試験体は十字形試験体のせん断変形角と変わらない、 もしくは、大きいせん断変形角を示すことがわかった。 これは、ブレースが偏心したことで、ブレースの鉄骨梁 への接続位置が柱梁接合部の範囲外となり直接柱梁接合 部へブレース軸力を伝達せず、鉄骨梁を介して伝達され る影響と考えられる。また、CR1よりも大きい値を示す のは柱フェイス位置にブレースの影響によるせん断力が 付加されているからと考えられる。





# 3.6 パネルモーメントとせん断変形角関係

ブレース付きの柱梁接合部の応力状態は,「鉄筋コン クリート柱・鉄骨梁混合構造の設計と施工」<sup>4)</sup>によれば, 十字形架構の柱梁接合部に働くせん断力と比べて緩和さ せると報告されている。しかしながら,文献<sup>4)</sup>は,部材 軸芯(偏心量=0mm)に対してブレースを取り付け,解析 的に検討したものである。

ブレースが偏心した場合の柱梁接合部の影響につい て柱梁接合部周辺の応力模式図を図-13に示し,パネ ルモーメントについて検討した。

ブレース付きの柱梁接合部に作用するせん断力をパ ネルモーメント(以下, *iM*)に換算した値として,

$$_{i}M = _{i}Q_{h} \times_{b} j \tag{1}$$

に示すように,柱梁接合部に作用する水平方向のせん断 力と柱梁接合部の鉛直方向の大きさの積となる。 式(1)中の柱梁接合部のせん断力は,

$${}_{j}Q_{h} = {}_{j}Q_{h1} + {}_{j}Q_{h2} + {}_{j}Q_{h3}$$
<sup>(2)</sup>

のように3項の和で表現できる。第1項は,

$${}_{j}Q_{h1} = \frac{\sum_{B}M_{i}}{j} - {}_{C}Q \tag{3}$$

十字形架構の場合のパネルせん断力を示す。第2項は,

$${}_{i}\mathcal{Q}_{h2} = -\frac{e}{h} \Big( \sum T_{i} + \sum C_{i} \Big) \qquad (h: \mathbb{K} \bar{\mathbb{R}})$$

$$\tag{4}$$

ブレースの偏心曲げモーメントによるせん断力を示す。 第3項は,

$${}_{j}\mathcal{Q}_{h3} = -\frac{{}_{rb}j}{2\times_{b}j} \left(\sum T_{i} + \sum C_{i}\right) \cos\theta$$
(5)

ブレース軸力の水平成分による柱梁接合部に直接作用するせん断力を示す。以上の関係より求めた $Q_{-j}M$  関係を $\mathbf{2} - \mathbf{1} \mathbf{4}$ に棒グラフで示す。縦軸は算出した $_{j}M$ を示し、横軸は $_{j}M$  が最大時のQを示す。文献<sup>40</sup>に記載しているように、十字形試験体である CR1 とブレース付きの試験体である BR タイプを比較する。BR タイプは CR1 と比較してQは大きいが $_{j}M$ は緩和されていることがわかった。次にブレースが偏心している BR2 および BR3 と無偏心の BR1 の $_{j}M$ を比較する。十字形の $_{j}M$ よりも緩和はされているが、無偏心と比べるその割合は小さいことがわかった。



# 3.7 等価粘性減衰定数

各サイクルの1回目の等価粘性減衰定数(*h<sub>eq</sub>*)の推移を 図-15に示す。

**CR1**の試験体は, R=1.00%終了時まで*h<sub>eq</sub>*は, ほぼ同様 な値を示している。R=2.00%以降は, 変形角の増大に伴 う*h<sub>eq</sub>*が上昇し15%以上に達している。

BR タイプの試験体は、R=0.25%までは、ほぼ同様な傾向を示し、R=0.50%から急減に $h_{eq}$ が上昇し、R=1.00%で $h_{eq}$ が 20%以上に達している。それ以降、BR4 以外は、 $h_{eq}$ が徐々に低下している。これは、図-6の Q-R 関係からもわかるように、R=1.00%以降の載荷履歴がスリップ形となっている。この影響により $h_{eq}$ が低下している。なお、BR2の試験体は、載荷中にブレースを切断した影響でR=3.00%で急激に $h_{eq}$ が低下している。



# 4. まとめ

鉄骨ブレース付きの柱 RC 梁 S 混合構造の構造性能に ついて、ブレースの偏心量の影響を実験的に比較、検討 した結果、以下のことが明らかになった。

- 履歴性状はブレース座屈に起因する急激な耐力低
   下・劣化性状は見られなかった。
- ブレース付き試験体の最大耐力は、偏心量による大 きな差異は見られなかった。
- ブレース偏心量が増加すると、ブレースの付加曲げ
   に起因して梁端部の鉄骨梁ウェブの主ひずみが大
   きくなる。
- ブレースが無偏心の場合は、十字形と比較して接合 部のせん断変形角を抑制するが、偏心した場合は、 せん断変形角が大きくなる。

### 参考文献

- 建築センター他:2007 年度版建築物の構造関係技術 基準解説書
- 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 年
- 3) 日本建築学会:鋼構造座屈設計指針, 2009年
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構 造の設計と施工,2001年