論文 鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成されたブレース付混合構造骨 組の弾塑性性状

小川 一貴*1・堺 純一*2・田中 照久*3

要旨:薄肉鋼管で横補強された鉄骨コンクリート柱材の弾塑性変形性状を調べるために実験変数にブレー ス付き骨組とラーメン骨組の2つの試験体を製作し載荷実験を行った。ブレース付き骨組は柱の軸方向剛 性が高いため、ブレースが大変形しても繰り返し載荷に対して高いエネルギー吸収能力を発揮できた。本 実験の結果、ブレース付き骨組、ラーメン骨組は共に優れた耐震性能を示すことから薄肉鋼管で横補強し た鉄骨コンクリート柱材は高軸力下に置かれても優れた耐震性能を発揮できることがわかった。 キーワード:ラーメン、薄肉鋼管、鉄骨コンクリート柱、ブレース

1. 序

著者らは、図-1に示す断面の薄肉鋼管で横補強され た鉄骨コンクリート(以下SCと略)柱材の弾塑性変形性 状を実験的及び解析的に調べ,高軸力下で優れた耐震性 能を保持していることを明らかにしている^{1,2,3)}。本合成 柱材は優れた構造性能(以下,構造性能は,耐力,塑性変 形能力,エネルギー吸収能力をさす)を保持しているた め,断面を小さくすることが容易であるが,断面の縮小 化は,骨組全体の水平剛性の低下に繋がるため,ブレー スや耐震壁などの耐水平力要素が必要となる。そこで, 本研究ではこの合成柱と耐水平力要素を組み合わせたと きの骨組の挙動を明らかにすることを目的としている。 特に,耐水平力要素に偏心ブレースを用いることによる 骨組の耐震性能について,ラーメン骨組の挙動と比較す ることにより明らかにする。

2. 実験計画

2.1 試験体

本研究では骨組の弾塑性変形性状を明らかにするため に、実際の建物の3分の1程度のスケールの試験体である ブレース付き骨組とラーメン骨組の2つの試験体を製作 し、載荷実験を行った。図-2に試験体を、図-3に鉄 骨骨組詳細を示す。試験体は、柱鉄骨と梁鉄骨の間の応 力伝達が明快となるように梁鉄骨を通し材とし、柱のフ ランジとウェブを梁フランジにそれぞれ完全溶込溶接と 隅肉溶接しており、SRC造の柱梁接合部と同様に接合して いる。さらに接合部を鋼管で囲むディティールとしてい る。ラーメン骨組の崩壊型としては、柱脚と梁端に塑性 ヒンジを形成させる設計としている。ブレース付き骨組 はこのラーメン骨組に鉄骨ブレースを取り付けた骨組と した。試験体の柱材は鋼・コンクリート合成断面で内蔵

*1	福岡大学	大学院工学研究科(正会員)	
*2	福岡大学	工学部建築学科教授	博士(工)	(正会員)
*3	福岡大学	工学部建築学科助手	(正会員)	

鉄骨には2H-150x60x4.5x6を使用した。柱の薄肉鋼 管は2.3mm厚の鋼板を用いた鋼管(幅厚比87)で 4隅を溶接することにより製管している。なお,鋼 管に軸方向力や曲げに抵抗させないように柱材の 柱頭及び柱脚の上下鋼管の端部に10mmの隙間を 開けている。梁材は鉄骨断面としてBH-200x80x4.5x6を使用した。仕口部は4.5mm厚の鋼板





図-1 横補強鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱



図-5 ブレース接合部詳細

を用いて接合部を囲んでいるが,図-4にその鋼板の溶 接前後の柱梁接合部を示す。ブレースは試験機の加力能 力を考慮してBH-70x70x4.5x4.5のH形鋼を用いた。材端 2.2 載荷方法

載荷は福岡大学の2方向載荷装置(鉛直方向2000kN, 水平方向500kN)を用いた。試験体の載荷装置を図-6

に示す。 柱脚を固定端とし, 両柱の柱頭に軸力を載荷し

ている。水平力はジャッキで載荷しており, ジャッキが

圧縮力の場合には,ロードセル先端に取り付けたピンを

介して試験体の加圧板に圧縮力を作用させ,ジャッキが

試験体名	TypeN	ТуреВ	σ::シリンダー圧縮強厚
$\sigma_{c}(N/mm^{2})$	35.0	36.1	

表-3 鋼材の機械的性質

	規格	降伏点	引張強さ	伸び	降伏ひずみ	ヤング係数		
		(N/mm^2)	(N/mm ²)	(%)	(%)	(N/mm^2)	降伏比	
PL-4.5	as 400	350.5	455.6	41.6	0.16	2.15x10 ⁵	0.77	
PL-6	33400	313.8	460.8	37.9	0.16	2.02x10 ⁵	0.68	



引張力の場合には,鉄骨梁の材長方向に平行に配したPC 鋼棒に引張力を作用させ,左側加力部に取り付けたピン を介して試験体に水平力を作用させている。柱の軸力は ローラー支持された鉛直方向のジャッキにより1000kN の圧縮力を加え,一定に保持した状態で水平力を載荷し ている。この力は柱1本の断面の圧縮耐力の24%の軸力 となっている。加力は鉛直荷重を載荷し,一定に保持し た状態で水平力を正負交番で2回の繰り返し載荷とした。 なお,断面の圧縮耐力計算には,鉄骨は材料引張試験の 降伏点とコンクリートのシリンダー圧縮強度を用いて計 算している。

2.3 測定方法

変位は,柱頭部の水平変形及び柱の軸縮みを測定した。 測定フレームは基礎梁に固定している。軸力及び水平力 は,各ジャッキの先端に取り付けたロードセルにより測 定した。水平力は,左右の柱の柱頭部に取り付けた変位 計の水平変位の平均値を用いた層間変形角で制御した。

2.4 素材試験

表-2にコンクリート圧縮強度,**表-3**に使用鋼材の 機械的性質を示す。

コンクリートは設計基準強度27N/mm²,最大骨材粒径 13mmを用いた。スランプは18cmであった。

2.5 ひずみゲージ

図-7に塑性ひずみゲージの取り付け位置を示す。鉄 骨梁は上フランジ面中央部と下フランジ面中央部に9枚 ずつ、ウェブに3枚の計21枚。更にTypeBはブレースの 上フランジ面と下フランジ面に12枚ずつ、ウェブに6枚 の計30枚を取り付けている。



3. 実験結果

3.1 計算耐力

柱脚と梁端に塑性ヒンジが形成されるとして求めた骨







図-8 水平荷重Qと部材角R関係

組の計算水平耐力を表-4に示す。計算式は下式で求め た。(1)式はラーメン骨組に対する計算耐力で, 塑性ヒン ジが柱頭と柱脚部に生じるものとして計算している。(2) 式,(3)式はブレースによる耐力を(1)式に加えたもので あるが,(2)式はブレースの引張耐力と座屈耐力を用いて 計算した耐力であり、(3)式は2本とも座屈耐力で計算し た耐力を示す。

試験体 TypeN の計算耐力

$$Q_{u1} = 2\frac{cM_{pc} + bM_p}{h} - N \cdot R \tag{1}$$

試験体 TypeB の計算耐力

$$Q_{l2} = Q_{l1} + ({}_{br}N_{tu} + {}_{br}N_{cr})\cos\theta - N \cdot R$$
⁽²⁾

 $Q_{\mu} = Q_{\mu} + 2_{br} N_{cr} \cdot \cos\theta - N \cdot R$ (3)

$${}_{br}N_{tu} = {}_{br}A \cdot {}_{br}\sigma_y \tag{4}$$

$$_{br}N_{cr} = \left| 1 - 0.4 \left(\lambda/\Lambda \right)^2 \right|_{br} \sigma_y \tag{5}$$

$$\Lambda = \sqrt{\left(\pi^2 E / 0.6_{br} \,\sigma_y\right)} \tag{6}$$

$${}_{br}Q_{u2} = \left({}_{br}N_{tu} + {}_{br}N_{cr}\right)\cos\theta \tag{7}$$

$${}_{br}Q_{u3} = 2_{br}N_{cr} \cdot \cos\theta \tag{8}$$

_{br}N_w, _{br}N_{cr}: それぞれブレースの引張耐力と座屈耐力 "A, μσ: それぞれブレースの断面積と鋼板の降伏点 λ: 両端ピンと考えたブレース材の弱軸方向の細長比 M_n:柱の曲げ耐力。は材料強度を用いて計算した一般化 累加強度 "M":梁の曲げ耐力は鋼材の降伏点を用いて計 算した全塑性モーメント

Λ:限界細長比 N:柱一本が負担する軸力 h:柱高さ E:ヤング係数 R:部材角 0.ブレースの傾き=55°

3.2 履歴性状

図-8a), b) に水平荷重Qと部材角Rの関係を示す。柱 梁接合部中心点での水平変位 δを柱高さhで除したものを 部材角Rとした。各部材角ごとのTypeBの水平耐力から TypeNの水平耐力を引いた耐力をブレースの負担水平力 と考え,そのブレースの負担水平力と部材角関係を図ー 9に示す。また,試験体崩壊後の写真を写真-1に示す。 a) TypeN の挙動

図-8a)よりTypeNは計算耐力以上の耐力を発揮して いることが分かる。また、部材角+3.0%の2回目に鉄骨 梁が横座屈を起こしたために耐力が50kN程度低下して いる。柱脚、柱頭ともに目視したところ薄肉鋼管に局部 座屈などの不安定現象は表れず,大きな損傷は確認出来 なかった。部材角+0.5%で計算耐力を発揮しており、骨 組としての剛性は大きいと考えられる。最大耐力 178.9kNを発揮した部材角は+1.47%である。最終的に は,鉄骨梁の横座屈が生じ,左右の柱の部材角が異なる ようになったが,設計どおり柱脚と梁端に塑性ヒンジを 形成する崩壊挙動を示した。最大耐力を発揮してから部 材角-3.0%までは最大耐力の9割程度の安定した高い耐 力を維持している。計算耐力を大きく上回る耐力を発揮 しているが,これは柱脚の鋼コンクリート断面のコンク リートが鋼管及び内蔵鉄骨による横拘束により圧縮強度 が高くなるために断面の終局強度が向上したためだと思



TypeN

柱梁接合部



TypeB

ブレース

写真-1

試験体写真

試験体全体



柱梁接合部

われる。

b) TypeB の挙動

図-8b)よりTypeBはブレースの耐力として1本を引 張耐力,他方を座屈耐力を発揮するとして求めた計算耐 力Q_{u2}で評価すると計算耐力に対する実験耐力の余力は 小さいが,ブレース材の耐力として2本とも座屈耐力を 用いて計算した計算耐力Q_{u3}で評価すると,実験耐力は 計算耐力以上の耐力を発揮し,安全側の評価となってい る。部材角+0.5%あたりでブレースが曲がり始め,部材 角+1.0%で曲げ座屈を起こし最大耐力に達した。骨組と しての水平剛性は大きいと考えられる。最大耐力 444.6kNを発揮した部材角は+0.95%である。設計どおり 柱脚と梁端に塑性ヒンジを形成する崩壊挙動を示した。 TypeNより比較的早い段階で最大耐力を発揮している。



部材角-4.0%の2回目に西側のブレース中央部が破断し たために耐力が120kN程度低下している。図-9からブ レースは0.5%まで耐力を発揮している。1.5%までなら _bQ_{u3}の式で評価できると考えられる。TypeBもTypeN同 様,優れた耐震性能を発揮しているが,これは柱脚の鋼 コンクリート断面のコンクリートが鋼管及び内蔵鉄骨に よる横拘束により圧縮強度が高くなるために断面の終局 強度が向上したためだと思われる。

3.3 軸縮み

図-10(a)~(d)に軸縮み-部材角関係を示す。ただ し、軸力載荷時の軸方向縮みは含まれていない。軸縮み は、試験体北側と南側(図-2の方位を参照)の鉛直変 位の平均を用いた。薄肉鋼管で横補強されているので TypeBおよびTypeNは縮み量が少なく薄肉鋼管に変化が ないことがわかる。本合成柱材は、柱材の抵抗力が低下 するようなコンクリートの圧壊は見られなかったものの 柱脚の変形状態から,柱の柱脚部に塑性ヒンジが生じて いると思われる。

3.4 吸収エネルギーー部材角関係

図-11に骨組の吸収エネルギーEと部材角Rの関係 を示す。ただし、吸収エネルギーはQ-R図の履歴ループ の面積から算出している。同図より早期から、両試験体 に吸収エネルギーの差が生じていて変形が小さい時か ら、TypeNよりもTypeBのほうが吸収エネルギーが大き くなっていることが分かる。TypeNが鉄骨梁の横座屈及 び局部座屈の影響で予想よりも早く耐力が低下してし







まった。また、TypeBはTypeNの2倍以上吸収エネルギー を発揮している。これはブレースを組み込んだことが一 番の要因だと考えられる。本合成柱は軸方向剛性が大き いため,ブレースが大変形しても繰返し載荷に対して高 いエネルギー吸収能力を発揮出来たことになるものと考 えられる。既往の研究^{1,3)}により柱の軸方向剛性と水平力 を受ける柱材の変形能力が優れていることが明らかにさ れている。この骨組にブレースを付けても柱材が縮むこ とによる圧縮側ブレースの材軸方向変形が抑えられ,ブ レースの座屈変形及び耐力の低下が抑えられているもの と考えられる。特に、本ブレースは細長比が大きく引張 軸力材として抵抗させることを考えており,本試験体に 用いた程度のブレースを用いても,骨組全体に不安定な 現象を起こすことがないことと考えられる。このことに より,高い耐震性能を必要とする場面で本合成骨組を使 用できる可能性があると考えられる。



4. 結論

SC柱と鉄骨梁で構成された骨組の載荷実験を行った 結果,本実験の条件下で以下のことが明らかになった。

- 1)TypeNとTypeBはどちらも計算耐力を早期に発揮している。TypeBは載荷初期段階より大きなエネルギー吸収能力を発揮しているが、TypeNも鉄骨梁の横座屈を防ぐような補強法を提案することが出来れば十分なエネルギー吸収能力を発揮できるのではないかと考えられる。
- 2)本試験体に用いた程度の細長比を持つブレースを本骨 組に組込むことにより優れた耐震性能を持つ骨組とす ることが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 堺純一, 河本裕行, 松原佳毅: 横補強鋼管を用いた鋼コ ンクリート合成柱材の弾塑性変形性状に関する実験的 研究, 構造工学論文集, pp. 383-388, 2007.3
- 2)河本裕行, 堺純一, 松原佳毅: 横補強鋼管を用いた鉄骨 コンクリート柱材の中心圧縮実験, コンクリート工学 年次論文集, pp. 97-102, 2007
- 3)小川一貴, 堺純一, 田中照久,:薄肉鋼管で横補強され た鉄骨コンクリート柱と鉄骨梁で構成された骨組の弾 塑性性状, 日本コンクリート工学年次論文集, pp. 1207-1212, 2009

謝辞

2.3mm厚の鋼管は九州共立大学技師の永岡忠光氏によ り製作していただいた。試験体の製作及び載荷実験にあ たり、福岡大学工学部建築学科技師の平國久雄氏及び 佐々木亮氏をはじめとする平成21年度福岡大学堺研究 室の大学院生及び卒研生ならびに、材料実験室の本田悟 助教に御世話になった。ここに記して,感謝の意を表し ます。