

論文 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

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SC柱と鉄骨梁で構成された骨組の弾塑性変形状を調べるために、実験変数に骨組の崩壊モードを選び、柱崩壊型、梁崩壊型、仕口パネル崩壊型の十字骨組を製作し載荷実験を行った。柱崩壊型の試験体は柱頭、柱脚部で計算通り塑性ヒンジを形成したものと考えられ大変形までエネルギーを吸収でき、優れた耐震性能を示した。本実験の結果、柱崩壊型とした骨組でも梁崩壊型と同等の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性能を発揮できることがわかった。

キーワード: 十字形骨組, 薄肉鋼管, 鉄骨コンクリート柱, 崩壊モード

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柱の弾塑性変形状を実験的に調べ、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。本研究の目的は、薄肉鋼管で横補強された鉄骨コンクリート(以下SCと略)柱と鉄骨梁で構成された合成構造骨組の弾塑性挙動を明らかにすることである。建築構造物の強度、剛性、変形能力などの構造性能は、骨組を構成する部材の力学的性能に依存するが、部材がその性能を発揮するかどうかは部材間の接合部の性能に依存する。本研究で、検討した試験体は、柱鉄骨と梁鉄骨の間の応力伝達が明快となるように、SRC造の柱梁接合部と同様に溶接接合としており、さらに接合部を鋼管で囲むディテールとしている。骨組として柱崩壊型、梁崩壊型、仕口パネル崩壊型の3つの破壊モードとなる試験体の挙動を調べることで、崩壊モードと骨組の構造性能を明らかにするとともに高軸力下におかれた合成柱に塑性ヒンジが生じても優れた耐震性能(以下、耐震性能は、耐力、塑性変形能力、エネルギー吸収能力をさす)を示すことを明らかにする。一般的に建築構造物の設計では、骨組に層崩壊を生じさせず梁崩壊型の骨組になるように柱梁耐力比として、通常1.5倍程度以上確保できるように設計されているが、塑性変形能力が優れている部材を柱材に用いる場合にはその耐力比を小さく設計することも可能であり、内柱については部材断面の縮小化が可能になると考えられる。

2. 実験計画

2.1 試験体

図-2に示す薄肉鋼管で横補強されたSC柱と鉄骨梁で

構成された合成構造骨組の弾塑性挙動を明らかにするために十字形骨組を製作し、載荷実験を行なった。柱断面は同一として梁断面及び柱梁接合部パネルの鋼板の板厚を調整して柱崩壊型、梁崩壊型、仕口パネル崩壊型の3つ

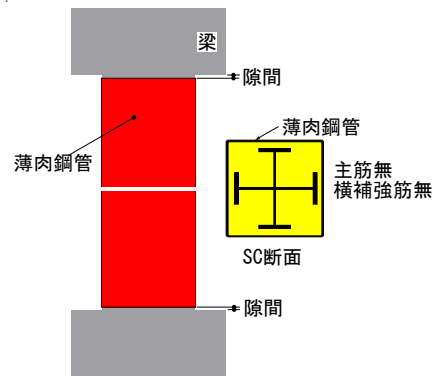


図-1 横補強鋼管を用いた鉄骨コンクリート柱材

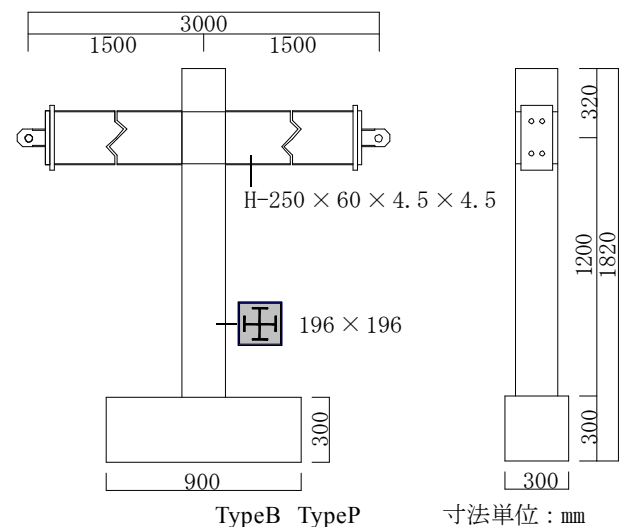


図-2 試験体

*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)

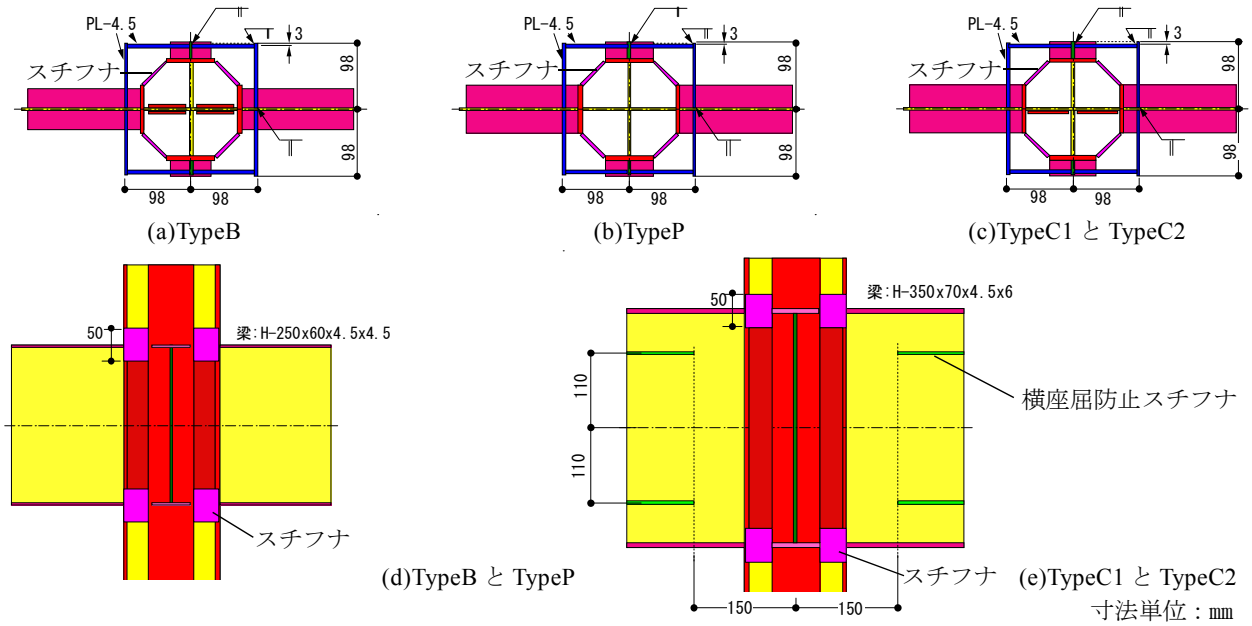


図-3 柱梁接合部詳細図

表-1 試験体一覧

| 試験体名 | 崩壊形式 | 軸力比 | 柱寸法 | 梁寸法 | ダブルプレート | 載荷軸力 (kN) |
|-------|--------|-------|-----------------|------------------|---------|-----------|
| 十字型骨組 | TypeB | 梁崩壊型 | 2H-150×70×4.5×6 | H-250×60×4.5×4.5 | 2PL-4.5 | 585.6 |
| | TypeP | 仕口崩壊型 | | | なし | 584.1 |
| | TypeC1 | 柱崩壊型 | | H-350×70×6×6 | PL-4.5 | 598.0 |
| | TypeC2 | | | | | 1192 |

の破壊モードとなる試験体を設計した。なお柱および梁崩壊型の試験体には鉄骨仕口部に4.5mm厚のダブルプレートを溶接し、仕口パネル崩壊型では補強を行っていない。柱は図1に示すような鋼コンクリート合成断面であり、文献^{1,2)}で明らかにしているように柱材としての性能は非常に優れた部材である。柱梁接合部は4.5mm厚の鋼管で囲んでいるが、この鋼管を梁に溶接する前の柱梁接合部を図-3 (d)~(e)に示す。鉄骨部の接合部では、構面内の鉄骨フランジと直交フランジを50mm高さの鉛直スチフナで溶接し、応力伝達が容易にできるようにしている。表-1に試験体一覧を示す。特に柱崩壊型の骨組では、柱の優れた塑性変形能力を発揮させることによる骨組の挙動を明らかにするため、断面の圧縮耐力に対する作用軸力の比を0.3と0.6の2つの条件下で行った。柱のコンクリートを囲む薄肉鋼管は、幅厚比が100を超えるような薄肉鋼管で十分であることは既往の研究結果^{1,2)}でわかっているが、極薄の鋼管の製作が困難であったために本試験体では、薄肉鋼管に2.3mm厚の鋼板を用い幅厚比87とした。なお鋼管は4隅を溶接することにより製管している。また鋼管に軸方向力や曲げ応力に抵抗させないように、柱材の上下鋼管の端部に10mmの隙間をあけている。

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-4に示す。柱脚を固定端とし、柱頭に軸力と水平力を載荷している。梁は、平行保持装置を取り付け左右の梁端の鉛直変位の差が生じないようにしている。載荷は、まず柱に所定の圧縮軸力を載荷し、これを一定に保持した状態で、正負交番繰返し水平力を柱頭に載荷した。載荷圧縮軸力は、断面の圧縮耐力の30%の軸力で、TypeC2のみ60%の軸力としている。なお、断面の圧縮耐力計算には鉄骨のミルシートの降伏点の値を用いて計算している。

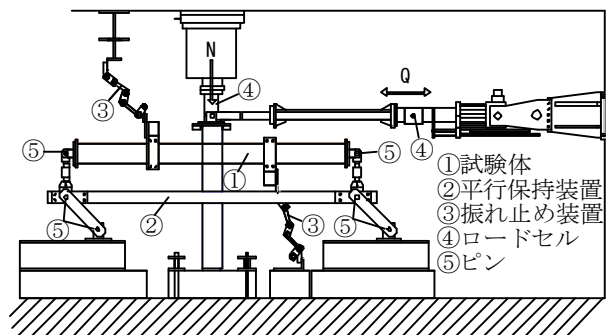


図-4 載荷装置

2.3 測定方法

図-5に測定フレームおよび変位計の取り付け位置を示す。軸力及び水平力は、2方向载荷装置で測定し、変位は柱梁接合部に溶接された寸切ボルトに水平変位計を2本、鉛直変位計を1本を北面及び南面にそれぞれ設置し、柱の部材角及び柱の軸縮みを測定した。

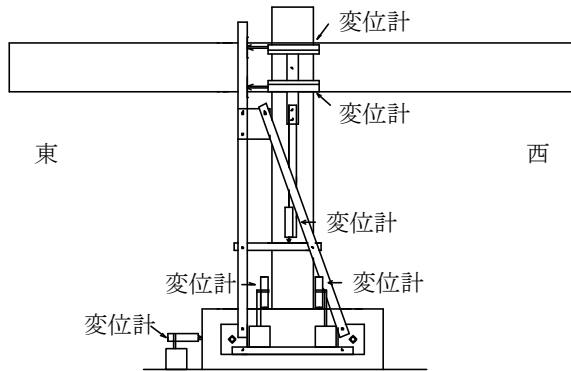


図-5 変位計フレームおよび変位計位置

2.4 素材試験

表-2に使用鋼材の機械的性質、表-3にコンクリート圧縮強度を示す。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。スランブは18cmであった。

3. 実験結果

3.1 履歴性状

図-6(a)~(d)に水平荷重 Q と部材角 R 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 (図-6の変形、模式図参照)とした。また試験体崩壊後の写真を写真-1(a)~(d)に示す。材料強度を用いて計算した骨組の計算耐力を表-4に示す。図中に示した計算耐力は、柱脚部と梁端あるいは柱頭に塑性ヒンジが生じるものとした塑性崩壊メカニズムを形成するときの計算水平耐力である。柱断面の曲げ耐力および接合部パネルのせん断耐力はSRC規準³⁾に基づいて

算定している。ただし、曲げ耐力は一般化累加強度を用いており、コンクリートの圧縮強度の低減は行っていない。

(a) TypeB

図-6(a)からTypeBは部材角1%で骨組の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。部材角+2%の一回目に西側の梁端部の下フランジが局部座屈をしたため、耐力の低下がみられる。柱脚・柱頭ともに柱の損傷は生じていない。最大耐力を発揮した部材角は+2%である。骨組の計算耐力以上の耐力を発揮しており、紡錘形の履歴ループを描いていることより梁崩壊の挙動を示していることがいえる。

(b) TypeP

図-6(b)からTypePは部材角-1.5%の2回目に梁西側梁端の下フランジの溶接部(梁フランジと柱フランジの完全溶け込み溶接部)が破断したことにより急激な耐力低下が生じた。柱脚・柱頭ともに損傷は生じていない。最大耐力を発揮した部材角は+1.5%である。骨組の計算耐力以上の耐力を発揮していることがわかるが、柱梁接合部の溶接部が溶接不良により骨組としての所要の耐力を発揮できなかった。

(c) TypeC1

図-6(c)からTypeC1は部材角1%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。最大耐力を発揮した部材角は+1.5%である。部材角+2.5%付近から、正確な変位が測れなくなったので部材角-3%1回目で終了した。柱脚・柱頭ともに損傷が生じ、柱脚の鋼管がコンクリートに接触し局部座屈を起こし、柱頭部は梁フランジに鋼管が接触し鋼管に局部座屈が生じた。部材角-2%までは水平変位を測定できていたがその後、大変形時の変形が測定装置の関係で正確に測定できなかった。実験終了後の変形を測定した結果、実際には部材角+10%程度変形しており、この大変形でも軸力を保持できており、安定した挙動をしていることが示された。骨組の計算耐力以上の耐力を発揮しており、設計

表-2 使用した鋼材の機械的性質

| 鋼材 | 降伏応力度 | 伸び | 引張強さ | 降伏比 |
|--------|----------------------|-------|------|------|
| | (N/mm ²) | | | |
| PL-4.5 | 340 | 32 | 478 | 0.71 |
| PL-6 | 316 | 35.10 | 440 | 0.72 |
| PL-2.3 | 322 | 39 | 435 | 0.74 |

表-3 コンクリート圧縮強度

| 試験体名 | TypeB | TypeP | TypeC1 | TypeC2 |
|---------------------------------|-------|-------|--------|--------|
| σ_c (N/mm ²) | 27.2 | 27.3 | 28.5 | 28.8 |

σ_c : シリンダー圧縮強度

表-4 骨組の計算応力

| 試験体 | 断面曲げ耐力 | | | 骨組の計算水平耐力 | | | 実験耐力 |
|---------|--------|-------|-------|-----------|------|------|------|
| | cMpc | bMp | pMp | cQu | bQu | pQu | |
| | (kNm) | (kNm) | (kNm) | (kN) | (kN) | (kN) | |
| Type-B | 55.3 | 50.0 | 112 | 103 | 106 | 184 | 95.9 |
| Type-P | 55.3 | 50.0 | 44.4 | 103 | 106 | 94.8 | 102 |
| Type-C1 | 56.4 | 100 | 121 | 110 | 177 | 196 | 129 |
| Type-C2 | 56.7 | 100 | 121 | 110 | 177 | 197 | 117 |

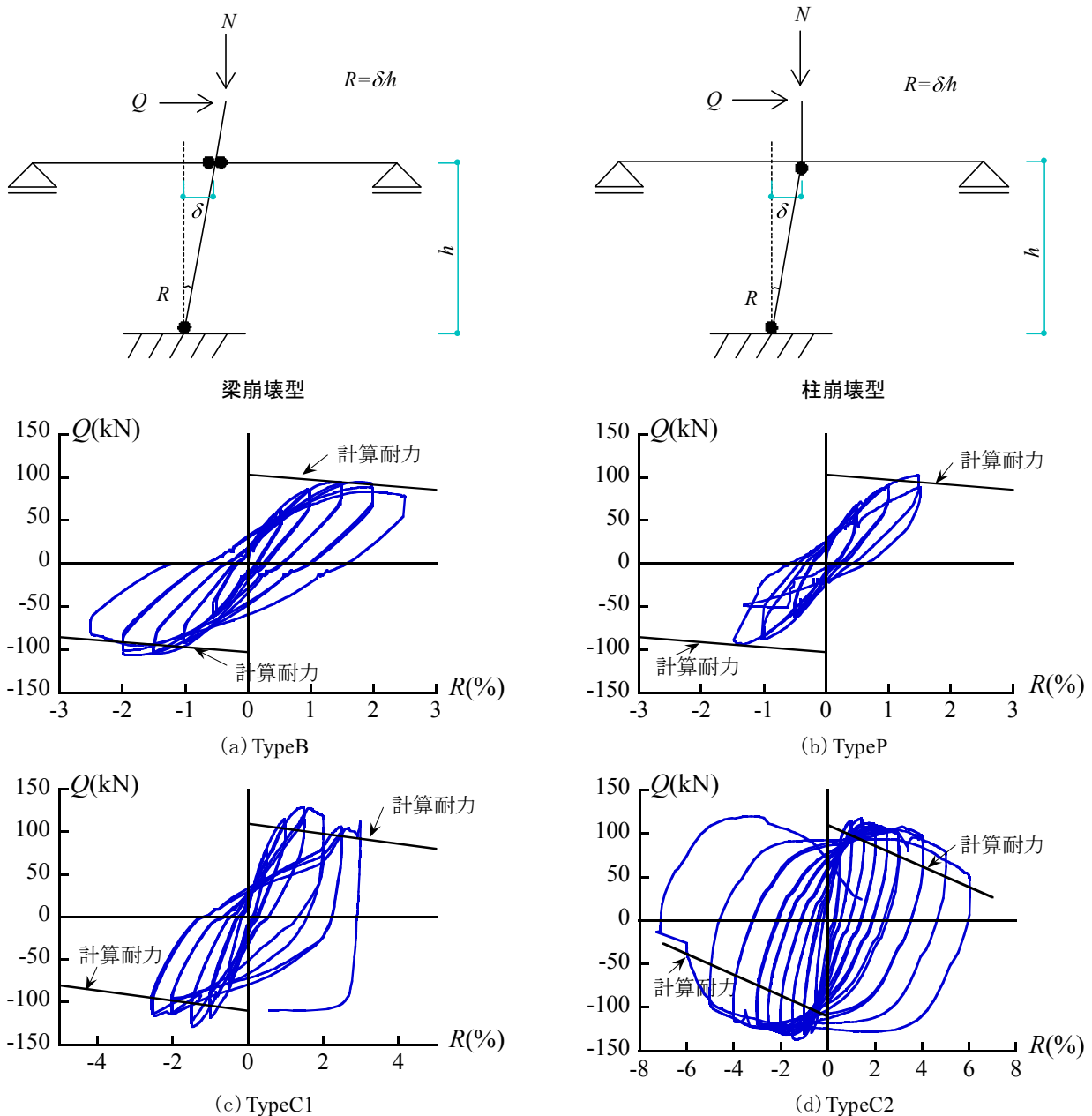


図-6 水平荷重Qと部材角Rの関係

どおり柱崩壊の挙動を示した。

(d) TypeC2

図-6 (d) から TypeC2 は部材角1%で計算耐力を發揮しており、骨組としての剛性は大きいと考えられる。最大耐力を發揮した部材角は+1.5%である。柱に断面圧縮耐力の60%の軸力を載荷した場合、部材角5%時に

いても低下することなく、安定した挙動を示しており、本合成柱材の優れた耐震性能を發揮できている。部材角-6%の1回目に柱が崩壊したために耐力が急激に低下した。柱脚・柱頭ともに損傷があり、柱頭・柱脚に鋼管の隙間を設けていたが、柱脚で鋼管がスタブに接触し鋼管が局部座屈を起し、柱頭部は鋼管が梁フランジに接

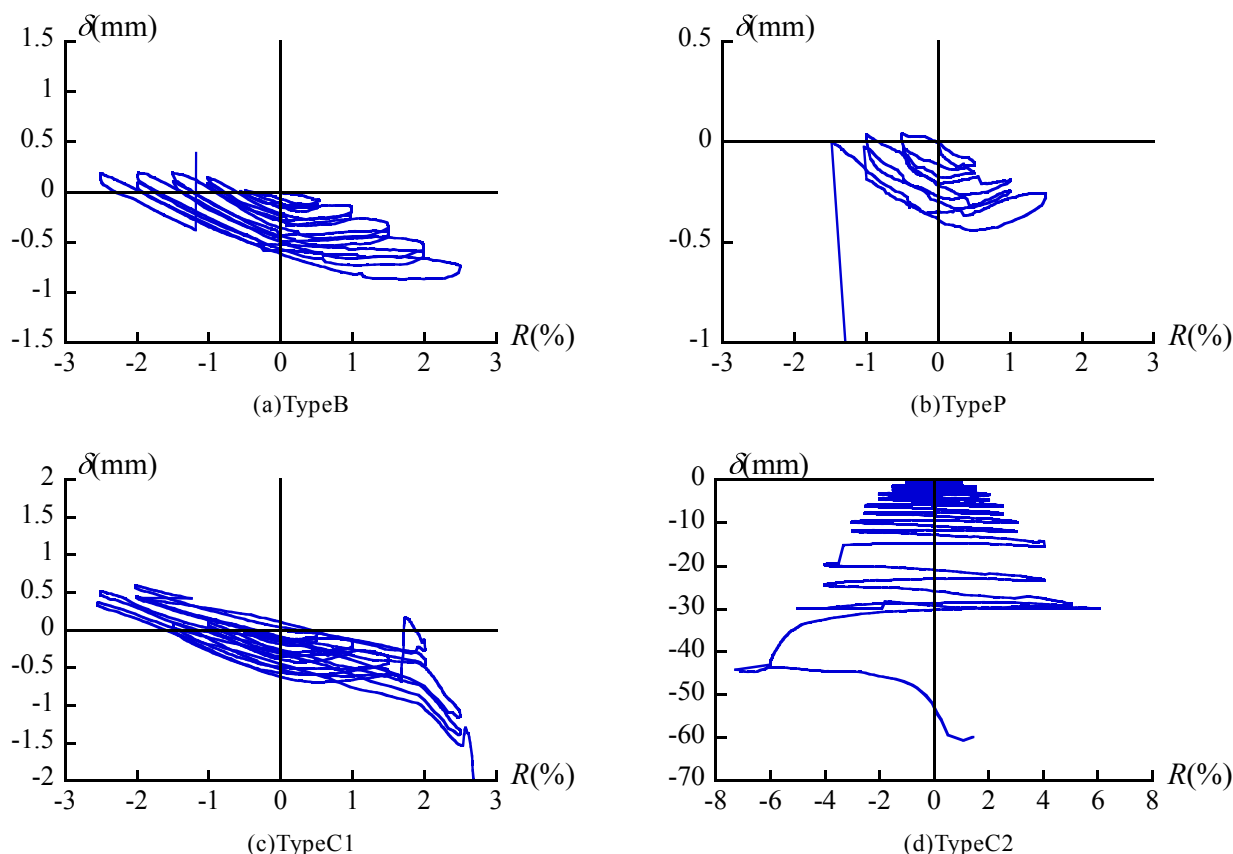


図-7 軸縮み δ と部材角 R 関係

触し柱脚同様の局部座屈を起こした。最終的に柱頭部鋼管の局部座屈が大きくなり、隅角部の溶接部が破断しコンクリートの拘束ができなくなり、最終的に柱鉄骨が面外座屈し柱崩壊した。骨組の計算耐力以上の耐力を発揮しており、紡錘形の履歴ループを描いていることより柱崩壊の挙動を示しているといえる。また、優れた耐震性能を発揮していることがわかる。

3.2 軸縮み

図-7 (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、試験体北側と南側の鉛直変位の平均を用いた。TypeBおよびTypePは縮み量が少なく薄肉鋼管に変化がないことから本合成柱材には損傷がなかったと思われる。TypeC1は3%を超えた時点で薄肉鋼管の端部が局部座屈を生じたために、その部分のコンクリートの拘束ができなくなり軸縮みしたと思われる。部材角3%の時点で薄肉鋼管が局部座屈を生じ、最終的には薄肉鋼管の溶接部の亀裂によりコンクリートが拘束ができなくなったために大きな軸縮みが生じた。

3.3 吸収エネルギー

図-8に吸収エネルギー-部材角関係を示す。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。

グラフより部材角1%の時は、各試験体ともに吸収エネルギーはほとんど変わらないが、部材角2%の時には、梁崩壊型の試験体よりも柱崩壊型の試験体のほうが吸収エネルギーが大きくなっていることがわかる。梁崩壊型の試験体が横座屈あるいは局部座屈の影響で予想より早く耐力が低下してしまった。柱崩壊型の試験体は柱頭、柱脚部で優れた耐震性能を示し、大変形までエネルギーを吸収できている。よって、骨組の柱に非常に大きな軸力が作用して柱崩壊型となっても、この柱を利用すれば不安定な現象を起こすことはないと考えられる。このことより、変動軸力が大きくなるピロティ階の柱に本合成柱材を骨組に使用できる可能性もあると考えられ

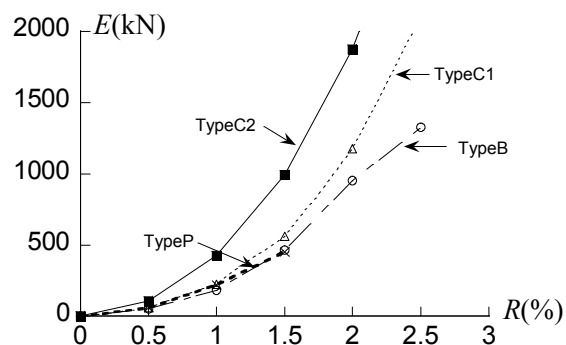
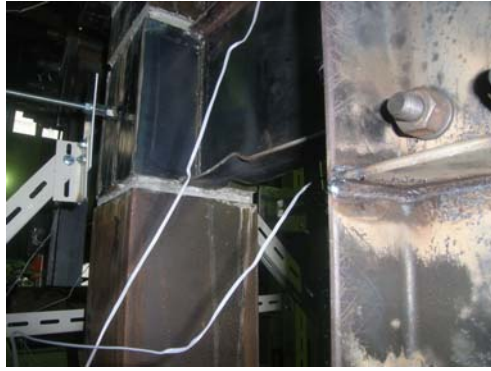
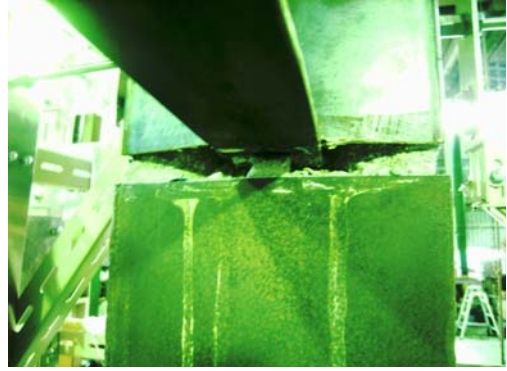


図-8 吸収エネルギー E と部材角 R 関係



(a) TypeB



(b) TypeP



(c) TypeC1



(d) TypeC2

写真-1 試験体崩壊

る。ただし、TypeC1とTypeC2で差が大きくでているのはTypeC2が高軸力のもとで行なった実験となっており、早期に鋼材が降伏すると共にコンクリートが大きな歪に達していることによるものと考えられる。

4. 結論

薄肉鋼管で横補強された鋼コンクリート合成柱材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) 梁崩壊型と柱崩壊型ではほとんど同等な耐震性能を保持していることがわかる。本研究で対象とする合成柱材は耐力低下が少なく、大きな塑性変形能力を保持しているため、柱崩壊型の設計でも実現可能であり、柱梁耐力比を小さくしても問題はないと考えられる。
- 2) 十字鉄骨を内蔵し、薄肉鋼管で横補強した柱材は、断面圧縮耐力の60%の高軸力下においても、計算耐力を早期に発揮でき、大変形時での耐力低下も少なく優れた耐震性能を保有している。
- 3) 柱がSC化することにより柱断面の構造性能が向上し、断面寸法が小さくてよいことになるが、柱崩

壊型の場合軸縮みの変形量が大きく、柱の軸方向剛性に関する検討が必要となると考えられる。

謝辞

本研究は、平成19,20年度科学研究費補助金(基盤研究(c)、研究代表者:堺純一)の援助を受けた。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藤智広氏をはじめとする平成20年度福岡大学堺研究室の卒研生に御世話になった。ここに記して、感謝の意を表します。

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) 日本建築学会: 鉄骨コンクリート構造設計規準・同解説, 2001. 1