

## 論文 スラブ付き鉄骨梁と RC 柱よりなる骨組の力学性状

太田 秀彦<sup>\*1</sup>・木村 秀樹<sup>\*2</sup>・毛井 崇博<sup>\*3</sup>・佐々木 幸男<sup>\*4</sup>

**要旨:** RC柱と鉄骨梁よりなる骨組で、接合部を簡略化した場合の力学性状に付いてRC柱内に鉄骨梁を貫通させたタイプと、梁端部のピン接合を意図したタイプのスラブ付きの十字骨組に水平力を作用させ、骨組の水平力負担、損傷状況、加力後の梁端部における鉛直力の支持能力について実験的に検討を行った。その結果、梁貫通タイプの接合部の耐力は梁フランジによるコンクリートパネルに対する支圧抵抗モーメントで評価できること、ピン接合タイプでは意図した通り負担水平力は小さく、損傷も少なく、大変形後も梁端部で想定した鉛直力を支持出来ることが確認された。

**キーワード:** 混合構造, 柱RC梁S構造, 柱梁接合部, 変形能力, 荷重支持能力

## 1. はじめに

圧縮力に強く廉価なRC柱と、軽量で曲げに強く短工期で施工できる鉄骨梁とを組合せた混合構造は、コスト・工期の両面で非常に合理的な架構形式であるといわれている。この様な架構形式においては柱梁接合部で鉄骨とRCという異種構造材料間でスムーズな応力伝達をさせる必要があり、そのため様々な接合部のディテールが提案され多くの研究が行われている<sup>1)~4)</sup>。筆者らもこの様な架構形式において柱梁接合部の破壊メカニズムに着目した研究により、複雑な破壊を呈する柱梁接合部の耐力算定方法を提案するとともに、梁崩壊を満足するような接合部のディテールを提案している<sup>2)</sup>。しかしながら、これらのディテールはいずれも、鉄骨に特殊な加工、鉄筋による補強、特殊な金物の使用などが要求される。

一般の建物においては、地震時に作用する水平力を100%骨組で分担させる場合は少なく、骨組のほかに耐震壁やブレース等の耐震要素と組合せて用いられる場合が多い。水平力の大部

分が耐震壁やブレース等で負担されると考えれば、骨組に要求される性能は、地震時の変形追従能力と鉛直荷重の支持能力のみで良いことになる。

本研究は、上記のような観点から、RC柱と鉄骨梁よりなる混合構造において、柱梁接合部を簡略化した場合の骨組についてスラブ付きの十字骨組3体について水平加力実験を行いその力学性状の把握を行っている。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体

試験体は、低層のショッピングセンターもしくは倉庫を想定して設計した建物の約1/2の縮尺模型で、柱と梁の接合形式をパラメータとして3体を設定した。

試験体の形状および寸法を図-1に、接合部の詳細を表-1にそれぞれ示す。No.1は梁貫通形式の接合部であるが、梁下端までコンクリートを打設した柱に梁を載せるだけのディテールとしている。梁鉄骨には既製のH形鋼をその

\*1(株)竹中工務店技術研究所研究開発部 研究員 工修(正会員)

\*2(株)竹中工務店技術研究所技術開発部 主任研究員 工博(正会員)

\*3(株)竹中工務店技術研究所研究開発部 主任研究員 工修(正会員)

\*4(株)竹中工務店東京本店設計部 課長

まま用い、特別な加工は施していない。また接合部に関しても通常の配筋（帯筋：2-D6@65、 $p_w=0.28\%$ ）としている。

No.2, No.3 では梁端部をピン接合を意図したディテールとして設計している。No.2 は No.1 と同様に柱の上に梁端部のみを飲込ませて載せ掛けその後に接合部のコンクリートを打設する形式である。No.3 はあらかじめ柱に埋め込んでおいた鉄骨ブラケット（カット T）に梁鉄骨を載せ掛ける形式としている。梁から作用するせん断力に関しては、No.2 では柱に飲込ませた梁のフランジ部で、No.3 では柱に埋め込んだブラケット部で支圧力として柱に伝達できるように設計している。

スラブはキーストプレート（AKD08）を使用した合成スラブとし、幅はRC標準<sup>6)</sup>による有効幅程度としている。

図-2 に各試験体の施工手順の一覧を示す。柱のコンクリートは粗骨材に 10mm の碎石を使用した設計基準強度  $21\text{N/mm}^2$  の普通コンクリートを用いて、実際の施工と同様の手順で下層部柱、接合部およびスラブ、上層部柱と 3 回に分けて打設を行った。ただし No.3 については下層部柱と接合部を同時に打設している。

梁鉄骨には SS400 を、柱鉄筋には SD295 を用いている。表-2 に試験体に使用した鋼材の性質を、表-3 に各部位のコンクリート強度を示す。

## 2.2 載荷試験の概要

加力は地震時を模擬した水平加力試験と端部

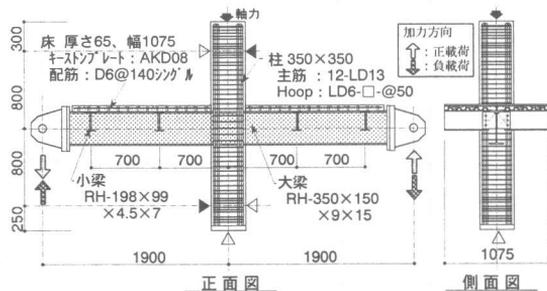


図-1 試験体形状・寸法 (No.1)

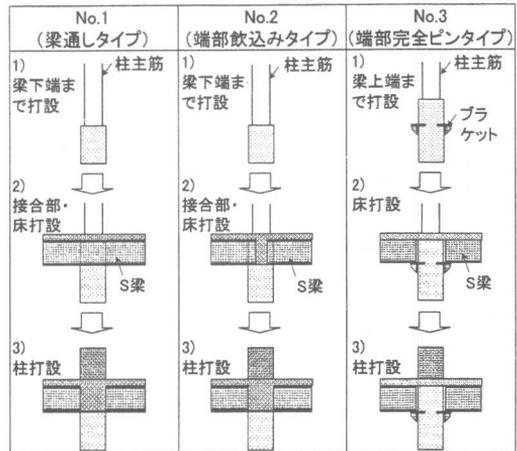


図-2 試験体の施工手順

表-1 試験体接合部詳細

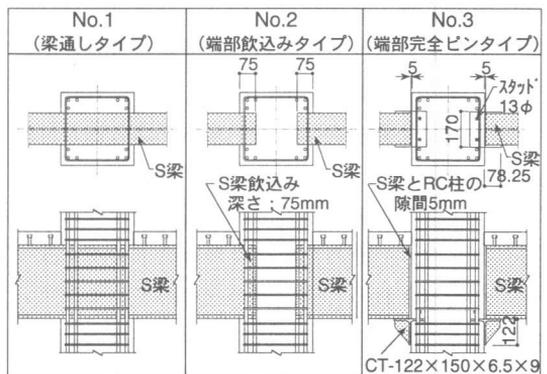


表-2 鋼材の性質

部位	寸法	$\sigma_y$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$\sigma_u$ ( $\text{N/mm}^2$ )	Elong. (%)
フランジ	PL-15	275	437	47.0
ウェブ	PL-9	316	448	42.1
帯筋	D6	404	579	22.2
主筋	D13	332	478	21.4

表-3 コンクリート強度

試験体	上部柱	スラブ	接合部	下部柱
No.1	24.9	23.2	23.2	21.1
No.2	25.0	22.6	22.6	21.6
No.3	26.0	22.5	21.8	21.8

単位： $\text{N/mm}^2$

ピンタイプでは荷重支持能力を確認するために積載荷重を模擬した鉛直加力試験を行った。

水平加力試験は、柱に一定軸力 ( $0.25 \cdot B \cdot D \cdot F_c \approx 670 \text{kN}$ ) を導入した状態で、左右の梁端部に逆対称正負交番漸増繰返しせん断力を作用させた。加力の制御は層間変形角により行った。また、層間変形角で  $5/1000 \text{rad}$ .以上の領域では同一振幅で2回の繰返しを行った。

鉛直加力試験では、梁の自由端を単純支持した状態で梁の中間部に荷重を単調増加で加力し、柱梁接合部における梁端部での鉛直荷重の支持能力を確認している。

### 3. 実験結果

#### 3.1 骨組の復元力特性

図-3に各試験体の柱に作用するせん断力  $Q_c$  と層間変形角  $R$  との関係を示す。

No.1 に関しては  $R=20/1000 \text{rad}$ .まではほぼ安定した紡錘形の復元力を示しているが、 $30/1000 \text{rad}$ .のサイクルにおいて接合部のコンクリートの損傷が顕著となり軸力を保持できなくなったため実験を終了した。本試験体では、正側に比べて負側の荷重が低めになっているが、これは梁にスラブが付いているため正曲げ時と負曲げ時で梁の耐力および剛性にかなり差があり、左右の荷重がアンバランスになっていたことも一因と思われる。

No.2 に関しては、正側の処女載荷時にはある程度の剛性を保持しているが、負側および2度目のサイクルに於いて、剛性の低下が顕著であり、全体としてエネルギー吸収の少ないスリップ型のループを示す。

No.3 に関しては No.2 と同様に梁端部をピン接合としているが、処女載荷時から剛性は小さく、完全な逆S字形のループを呈している。特に層間変形角で  $5/1000 \text{rad}$ .以下では、骨組の負担する層せん断力小さく、梁端部では、ほぼ完全なピン状態になっていると考えられる。ただし、 $5/1000 \text{rad}$ .を越えた領域では、梁鉄骨の端部と柱のコンクリートとの間に設けた5

mmの隙間が接触することにより、徐々にせん断力を負担している。

#### 3.2 試験体の損傷状況

図-4に層間変形角  $R=\pm 10/1000 \text{rad}$ .時の各試験体のコンクリート部分の損傷状況を示す。図中の実線は正載荷時に生じたひびわれを、破線は負載荷時に生じたひびわれをそれぞれ表している。

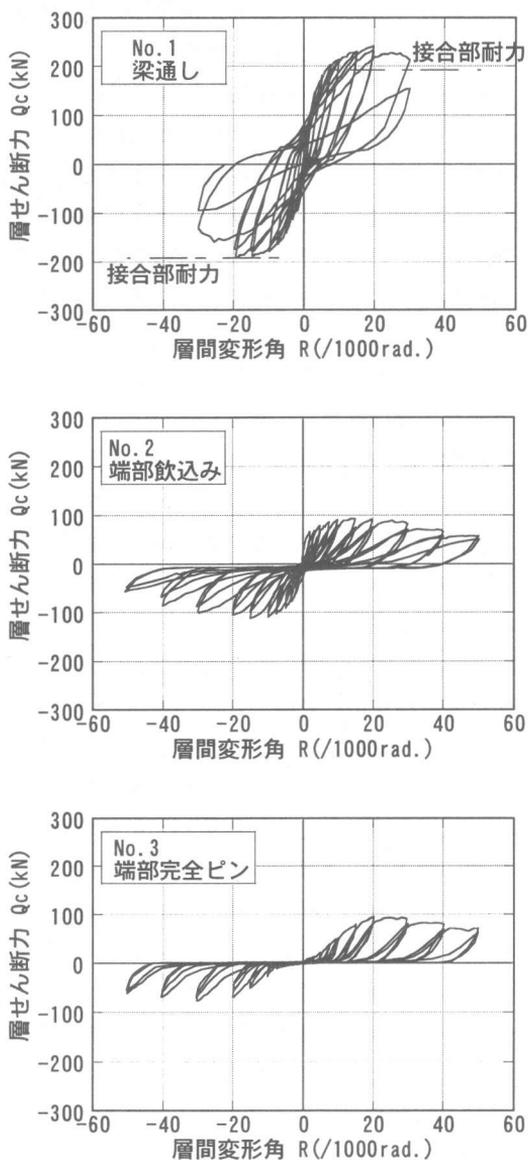


図-3 荷重-変形関係

No.1 では、 $R=5/1000\text{rad}$ .時に柱側面の鉄骨梁の下フランジ端部を起点として生じた斜めひびわれが進展するとともに、接合部では柱主筋に沿った縦ひび割れおよび斜めのせん断ひびわれが生じている。またスラブに関しては、柱際で大梁と直交する曲げひびわれと、大梁のスタッドに沿ったひびわれが生じている。最終的には接合部の側面における梁フランジ端を起点としたハの字形のひびわれ部分からコンクリートが脱落しており、このような破壊性状は既往の試験結果<sup>2)</sup>と類似しており、接合部の支圧破壊が支配的であったと考えられる。

No.2 では No.1 同様に柱側面では鉄骨梁の下フランジを起点とする斜めひびわれが、接合部では主筋に沿った縦ひび割れおよび斜めのせん断ひび割れが生じている。スラブに関しては大梁と直交する曲げひびわれだけでなく、広範囲にわたって大梁を起点としたハの字形のひびわれが生じている。

No.3 では、スラブに大梁と直交したひびわれが柱近傍に集中して発生しているのみで、柱筒体部および接合部にはほとんどひびわれは生じていない。

いずれも層間変形角が  $10/1000\text{rad}$ .レベルでは、ひびわれ幅は  $0.2\text{mm}$  以下で、部材としての損傷は軽微であると考えられる。

### 3.3 鉛直荷重載荷試験

No.3 試験体について、水平加力の前後で、鉛直荷重支持能力確認のための載荷実験を行った。図-5に加力点の荷重とたわみの関係を示す。図中の一点鎖線は想定した長期荷重(スパン： $L=9.6\text{m}$ ，分布荷重： $w=11.8\text{kN/m}^2$ )に相当する荷重を、破線はスラブを考慮した単純梁としての弾性剛性を示している。

水平載荷前は、安全率を考慮して、想定した長期荷重の1.5倍まで加力し、水平載荷後は載荷前と同荷重まで加力した後一旦除荷したのち破壊もしくはジャッキの能力限界まで加力を行った。

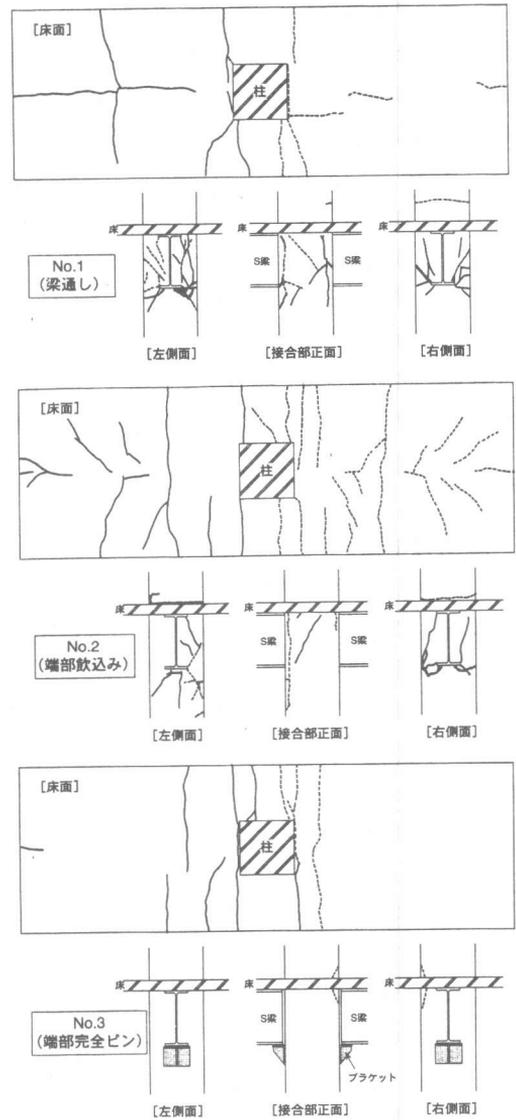


図-4 試験体の損傷状況 ( $R=10/1000\text{rad}.$ )

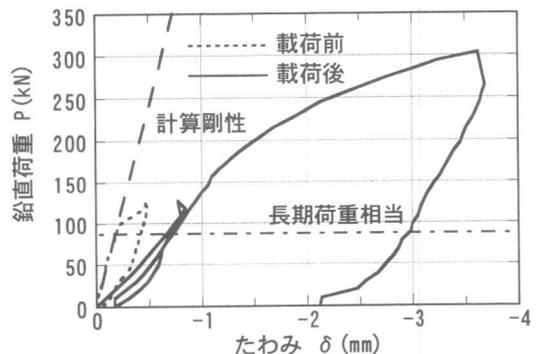


図-5 鉛直荷重-たわみ関係 (No.3)

水平載荷前の試験では、梁の加力点のたわみは、長期荷重付近までは計算剛性に良く対応しているが、その後はスラブにひびわれが生じ、剛性が低下している。

水平加力後の試験では、載荷前に比べ初期段階から剛性は低下しているが、長期荷重の2倍程度までは弾性的な挙動を示している。最終的にはジャッキの能力限界(=長期の3.5倍)まで加力した後除荷したが、残留変形は有るものの外観上は特に損傷は見られず、本実験で用いた接合形式の有効性が確認された。

なお、No.2については水平力載荷試験後のみ鉛直荷重載荷試験を行ったが、埋め込んだ梁鉄骨の影響により、接合部のコンクリートが劣化していたため、コンクリートの圧壊により梁端部の支持点が大きく撓んだ時点で加力を中断したが、想定した長期荷重の2倍程度の支持力を有していることが確認できた。

#### 4. 考察

##### 4.1 骨組の剛性

図-6に全試験体の初期剛性を示す。図中の破線は、接合部のせん断変形を考慮した骨組の弾性剛性の計算値を示している。

No.1に関しては初期の剛性は計算値と良い対応を示しているが、2/1000rad.程度の変形付近から低下を始め、5/1000rad.では弾性剛性の1/2程度となっている。

梁をピン接合とした場合でも、端部を飲込ませたNo.2では、層間変形角が0.5/1000rad.程度のごく初期の段階では、剛接合の場合とほぼ同等の剛性を有しており、変形が5/1000rad.時でも剛接骨組の弾性剛性の1/4程度である。

端部をプラケット形式としたNo.3では梁通し型のNo.1と比較すると、5/1000rad.程度の変形まではほとんど水平力を負担しておらず、ピン接合に近い状態であると考えられる。

##### 4.2 骨組の耐力

図-7に全試験体の正載荷時の包絡線を示す。

No.1では層間変形角が20/1000rad.付近で最大耐力に達しており、その値は、(1)式に示す接合部の支圧抵抗モーメント<sup>2)</sup>によりほぼ評価できる。

$${}_jM_F = \alpha_F \cdot B_F \cdot (D_e/2)^2 \cdot \alpha_c \cdot F_c \quad (1)$$

${}_jM_F$ : 接合部の支圧抵抗モーメント

$\alpha_F$ : フランジの枚数

十字型  $\alpha_F = 2$

$B_F$ : 梁フランジ幅

$D_e$ : 柱のせい

$\alpha_c$ : コンクリートの有効係数 (=1.0)

$F_c$ : コンクリートの強度

図-3のNo.1中に、(1)式による計算値を層せん断力に換算した値を示すが、負側の載荷時には、計算耐力を僅かに下回っているが、ほぼ良い対応を示している。

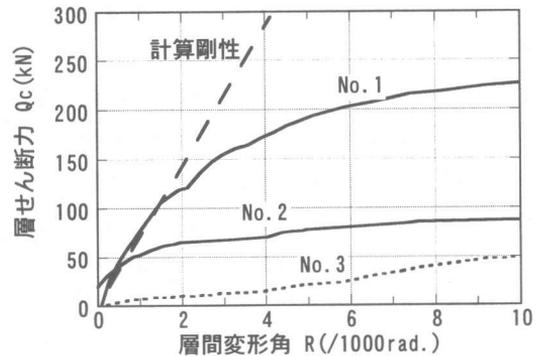


図-6 初期剛性

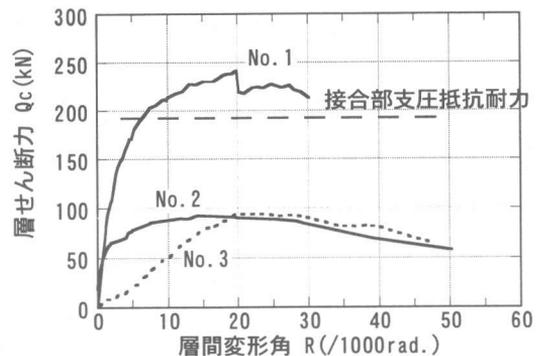


図-7 正載荷時の包絡線

図-8に本実験での No.1 試験体における支圧抵抗モーメントの計算値と実験値の比を、既往の実験<sup>2)</sup>における支圧破壊を生じた試験体の結果と比較して示す。本実験結果は、計算値と良い対応を示しており、既往の実験結果のばらつきの範囲内におさまっているため、支圧抵抗耐力に関してはスラブの影響は少ないと考えられる。

No.2,3 については、梁端部をピン接合として設定しているが、変形が大きくなると、スラブの効果や、柱側面と梁端部の支圧等により、No.1 試験体の40%程度の水平力を負担している。

### 5. 結論

本実験で得られた結論を以下に記す。

- (1) 接合部に特に補強を施さない梁通し型の柱RC梁S架構では、接合部において支圧破壊を生じ、その耐力は上下の大梁フランジによる支圧抵抗モーメントによりほぼ評価できる。
- (2) 大梁端部をピン接合した骨組において、梁端部を柱に飲込ませた場合は層間変形角が2/1000rad.以下では剛接合に近い挙動を示し、端部をブラケット形式とした場合は5/1000rad.以下では完全ピン状態に近い挙動を示した。
- (3) 今回の実験対象とした3通りの接合形式は、いずれも層間変形角で10/1000rad.程度まで、RC部分の損傷は軽微であった。
- (4) 大梁端部のピン接合を意図した骨組において、層間変形角で50/1000rad.の大変形を生じた後も、想定した長期荷重に対して十分な荷重支持能力を有していた。

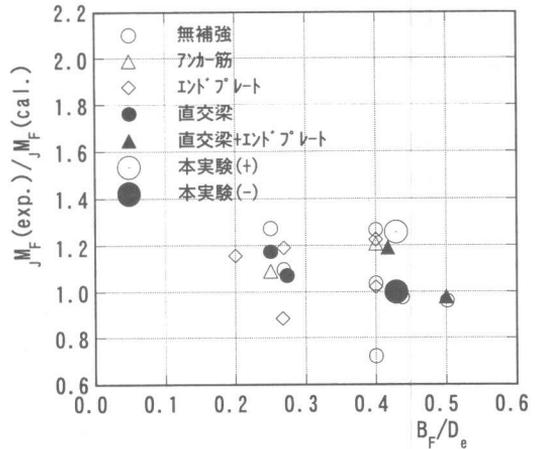


図-8 計算耐力との比較<sup>2)</sup>

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：柱RC梁Sとする混合構造の柱梁接合部の力学的挙動に関するシンポジウム，1994.12
- 2) 毛井崇博ほか：柱RC梁S接合部の力学性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.2，pp.747-752，1992.6
- 3) Deierlein, G. G. et al. : Design of Moment Connections for Composite Framed Structure , PMFSEL REPORT , The University of Texas at Austin, No.88-1, May. 1988
- 4) Marcakis, K. and Mitchell, D. : Precast Concrete Connection with Embedded Steel Members, PCI Journal, pp.88-116, 1986.8
- 5) 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，1987.6
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，1990.2
- 7) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能，1990.10