

論文 柱 RC 梁 S 造ト形柱梁接合部における RC 部材の断面形状が内部要素の支圧耐力に与える影響

北野 敦則^{*1}・馬場 望^{*2}

要旨 : S 部材の埋込み長さが小さい場合の柱 RC 梁 S 構造ト形柱梁接合部において、内部要素の耐力に RC 部材の断面形状が及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、S 部材の埋込み長さが RC 部材せいの半分程度以下になると、S 部材埋込始点の引張側コンクリートが掻出し破壊に至ることが明らかにされた。また、接合部の内部要素の耐力は、RC 部材せいの相違が及ぼす影響は見られず、鉄骨部材の埋込み長さの絶対値を用いて評価できる。また、これらの実験的知見に基づいたコンクリートの支圧耐力式および掻き出し破壊耐力式による内部要素の耐力評価法によって、計算値は精度よく実験値を評価できることが示された。

キーワード : 柱 RC 梁 S 造, ト形柱梁接合部, 支圧破壊, 掻出し破壊

1. はじめに

近年、建築様式の多種多様なニーズに応えるために、適材適所に鉄筋コンクリート（以下、RC という）と鉄骨（以下、S という）を用いた合成構造が開発、研究されている。中でも、S 部材が RC 部材に直交して埋め込まれるものの例として、柱 RC 梁 S 構造や鋼材を用いたダンパー等がある。これらは、性能実験や FEM 解析等で得られた結果をもとに様々な補強等が施され、安全性を保証されているものも存在する。特に、十字形柱梁接合部については研究成果が挙げられており、接合部の応力伝達機構のモデル化やそれに基づく設計法について提案されている¹⁾。しかしながら、ト形接合部のように、柱梁接合部内で鉄骨梁を定着しなければならない場合に関する研究例は少なく、中でも、鉄骨梁が RC 部材せいの半分程度埋め込まれる場合の研究は見られない。このように、本接合部における応力伝達機構は未だに不明な部分も多く、本構造の設計指針が確立されていない一因となっている。

本研究は、S 部材が RC 部材に直交して埋め込まれるト形接合部において、S 部材の埋込み長さが RC 部材せいの 7 割以下となる場合の応力伝達機構を解明すること

を目的し、接合部の終局耐力評価の一つである支圧耐力に及ぼす RC 部材せいと S 部材の埋込み長さの比および RC 部材幅の S 部材幅の比の影響について実験的に検討するものである。

2. 柱梁接合部の抵抗機構

現在、S 部材と RC 部材が直交して埋め込まれる接合部の抵抗機構および評価法は、文献¹⁾による S 部材が RC 部材を貫通する接合部についてのみ提案されている。RC 部材せいに対して S 部材の埋込み長さが小さいト形接合部においても、基本的には S 部材が RC 部材を貫通する接合部の抵抗機構および評価法を適用できると考えられる。図-1 に S 部材の埋込み長さが小さいト形接合部の支圧抵抗機構を示す。接合部は S フランジ幅内の内部要素とそれより外側の外部要素で構成されるものとし、接合部の終局耐力は、S 部材が RC 部材を貫通する十字形接合部と同様に¹⁾、内部要素の耐力と外部要素の耐力との累加で評価することが出来る。S 部材の埋込み長さが小さい場合、S 部材埋込始点側の鉄骨フランジ面に作用する支圧力の反力によって、十字形接合部の場合同様にコンクリートが圧壊に至ると考えられる。一方、S

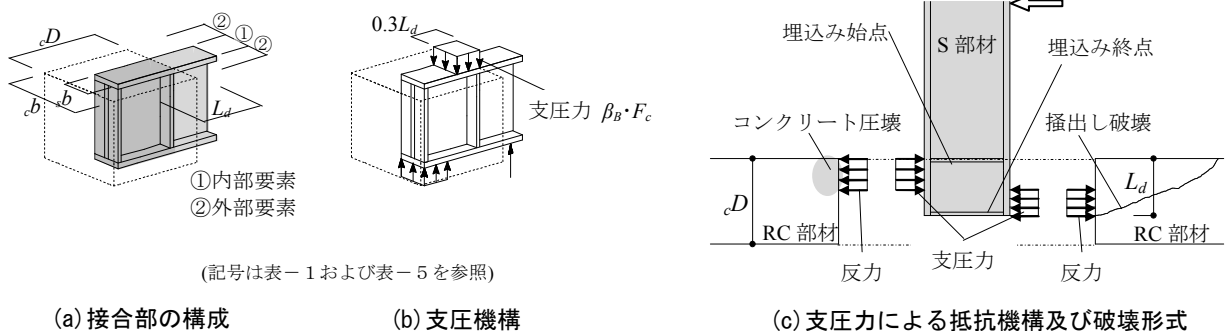


図-1 S 部材の埋込み長さが小さいト形接合部の支圧抵抗機構

*1 前橋工科大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

*2 大阪工業大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

部材の埋込み終点側の鉄骨フランジ面に作用する支圧力の反力は、コンクリートを押し広げるように作用するため、RC造外部接合部における梁主筋の挿出し定着破壊と同様の破壊が生じる場合も考えられる。したがって、本研究ではこの破壊モードを鉄骨の支圧力による挿出し破壊（以下、挿出し破壊）と定義し、内部要素の破壊モードは支圧破壊と挿出し破壊の2つが存在するとした。図-2に外部要素のせん断抵抗機構を示す。外部要素のせん断耐力は内部要素と外部要素との間のねじりモーメント σM_T によって評価されることが、文献²⁾によって明らかにされている。このような観点から、本研究は、外部要素とのねじりモーメントを除去した試験体も製作し、RC部材せいよりS部材の埋込み長さが小さいト形接合部の内部要素の耐力評価に着目する。

3. 実験概要

3.1 試験体概要

図-3に試験体詳細、表-1に試験体諸元および表-2、

表-3に使用材料の力学特性を示す。なお、図-3の試験体詳細図は加力装置に設置時の状態を示している。

計画された試験体数は5体である。全試験体とも、その形状は平面ト形部分骨組であり、実大の約1/2スケールでS部材断面はBH-300×125×9×22とする。実験変数は、RC断面形状およびRC部材に対するS部材の埋込み長さである。RC部材の断面 $b \times cD$ は300×300、300×450および500×300の3種類、S部材の埋込み長さ L_d は150mmおよび200mmの2種類である。S部材埋込み深さを200mm、RC部材せいを300mmおよび450mmとしたRCS-8およびRCS-9試験体を標準試験体とす

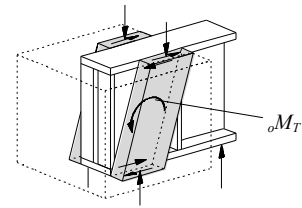


図-2 外部要素のせん断抵抗機構

表-1 試験体諸元

| 試験体 | c_b | c_D | L_d | σ_B | ξ | η | 備考 |
|--------|-------|-------|-------|------------|-------|--------|---------------------|
| | (mm) | (mm) | | | | | |
| RCS-5 | 300 | 300 | 200 | 29.3 | 0.67 | 0.42 | 標準試験体 ²⁾ |
| RCS-6 | 500 | | 150 | 31.7 | 0.50 | | |
| RCS-7 | | | | | | | |
| RCS-8 | 300 | 300 | 200 | 27.6 | 0.67 | 0.42 | 標準試験体 |
| RCS-9 | | 450 | | | 0.44 | | |
| RCS-10 | | 300 | | | 0.67 | | |
| RCS-11 | | 450 | | | 0.44 | | |
| RCS-12 | | 500 | | | 300 | | |

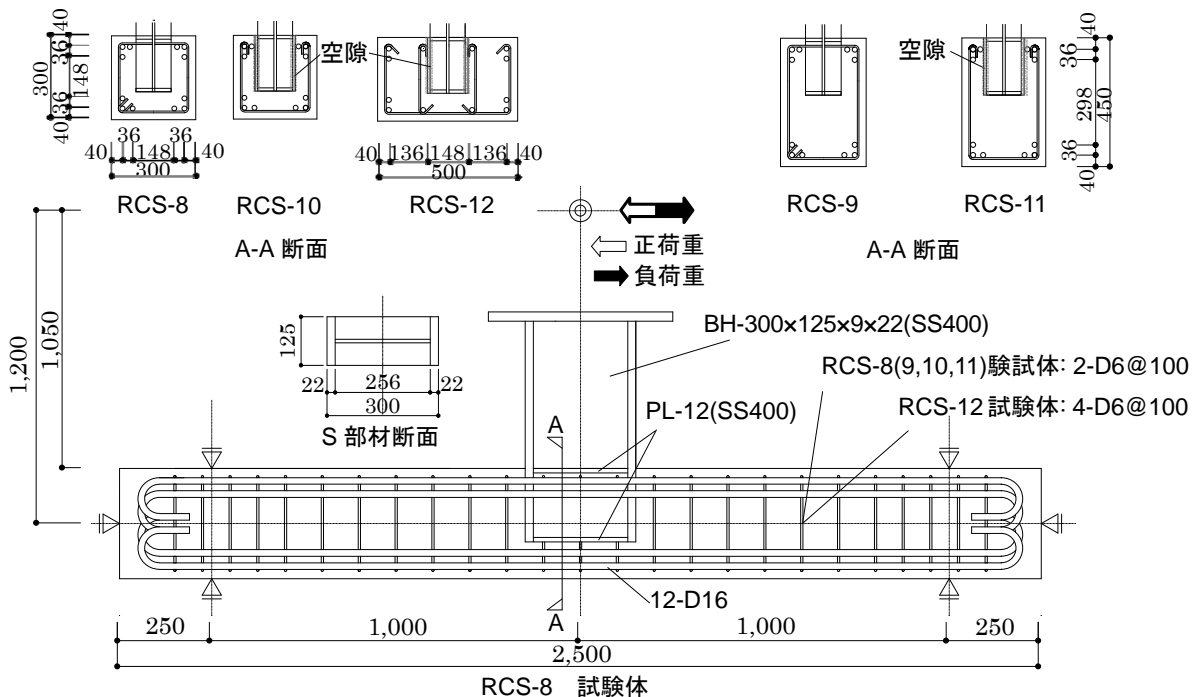
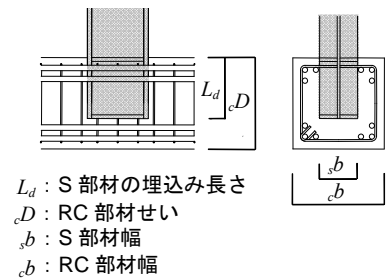


図-3 試験体詳細図

表-2 鋼材の力学的特性

| 使用部位 | 種類 | 降伏点 | 引張強さ | ヤング係数 | |
|------|------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----|
| | | σ_y | σ_u | E_s | |
| | | (N/mm ²) | (N/mm ²) | (kN/mm ²) | |
| RC部材 | 主筋 | D16 (SD295A) | 345 | 500 | 183 |
| | 横補強筋 | D6 (SD296A) | 360 | 539 | 209 |
| S部材 | ウェブ | PL9 (SS400) | 285 | 435 | 192 |
| | スチフナ | PL12 (SS400) | 272 | 466 | 179 |
| | フランジ | PL22 (SS400) | 264 | 428 | 176 |

表-3 コンクリートの力学的特性

| 圧縮強度 | 割裂引張強度 F_t | ヤング係数 |
|----------------------|----------------------|-----------------------|
| σ_B | (N/mm ²) | E_c |
| (N/mm ²) | (N/mm ²) | (kN/mm ²) |
| 27.6 | 1.98 | 20.0 |

る。RCS-10, RCS-11 および RCS-12 試験体は、内部要素の耐力を評価するための試験体である。これらの試験体は、外部要素の間のねじりによる応力伝達の効果を除去するために、柱梁接合部における S 部材埋込み部と RC 部の間に 1 mm 厚の発泡スチロールを設置し、コンクリート打設後に除去した。なお、表-1 には 3 体の既往の試験体 (RCS-5~7 試験体)³⁾ をあわせて示している。これは、後述する終局耐力の評価において、本試験体との比較検討を行うためである。なお、RC 柱 S 梁接合部において、接合部内に定着される S 部材には頭付きスタッドなどの補強が設けられることが一般的である。しかしながら、本研究では最も基本的な観点から、S 部材埋込み終点端部および S 部材と RC 部材の境界部分 (S 部材埋込み始点) に PL12 の支圧板 (スチフナ) の補強のみが施されている。全試験体とも、柱梁接合部破壊が先行するように S 部材は剛なものとし、文献¹⁾ による方法によって決定される支圧耐力がせん断耐力より小さくなるように設計した。使用材料は、柱主筋は 12-D16 (SD295A)、横補強筋は □-D6@100 (SD295A) を基本とし、RC 部材幅 b が 500 mm の RCS-12 試験体には D6 の中子筋を配

している。なお、接合部内のフープ筋は、RCS-8 と RCS-9 試験体については鉄骨ウェブに孔をあけて通してあり、それ以外の試験体は内部要素と外部要素との境界付近に配置されている二段目筋の主筋に定着させ、鉄骨ウェブを貫通していない。鉄骨は全て SS400 材とし、コンクリートの呼び強度は $F_c 27$ である。

3.2 加力方法

試験体は、図-1 に示すように、RC 部材を水平、S 部材が垂直になるように設置し、S 部材の端部にジャッキにより正負漸増水平方向強制変位を与えた。RC 部材の各支点はピンローラー支持とした。なお、RC 部材に軸力は導入していない。本載荷装置では S 部材のせん断力が圧縮側の RC 部材に圧縮軸力として入力されるが、RC 断面の軸圧縮耐力に比べて S 部材のせん断力は非常に小さく、圧縮軸力が実験結果に及ぼす影響は極めて小さい。加力制御は、層間変形角 R を [S 部材加力点変位 / RC 部材軸心から S 部材加力点までの距離] とし、 $R = \pm 2, 4, 10, 20, 30, 40 \times 10^{-3} \text{rad}$ と増加させながら加力を行った。なお、 $R = 10 \times 10^{-3} \text{rad}$ 以降は同一ピーク変位の繰り返しを 2 回ずつ行った。

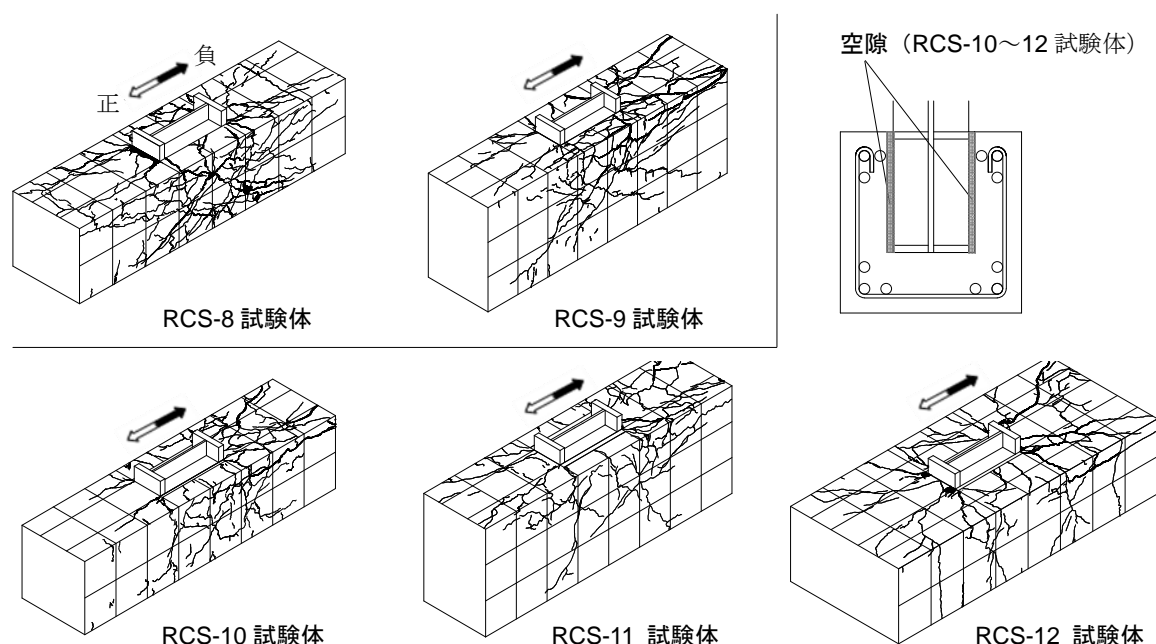


図-4 最終破壊状況

4. 実験結果および考察

4.1 破壊状況

図-4 に最終破壊状況を示す。各試験体とも、 $R = 2 \sim 4 \times 10^{-3}$ rad にかけて、RC 部材に曲げひび割れおよび接合部コンクリートパネルに斜めひび割れが生じた。RCS-8 試験体は、接合部パネルに多数の斜めひび割れが RC 部材全せいにわたって生じ、S 部材埋込み始点の圧縮側コンクリートに圧壊の兆しがみられ、 $R = 10 \times 10^{-3}$ rad に至る前に最大耐力に達した。その後、 $R = 30 \times 10^{-3}$ rad で S 部材埋込み始点圧縮側のコンクリートが圧壊し、最終的に支圧破壊に至ったと考えられる。一方、RCS-9 試験体は、接合部パネルに斜めひび割れが生じるものの、S 部材の埋込み部に集中している。また、S 部材埋込み始点の圧縮側のコンクリートの圧壊は観察されず、S 部材埋込み始点の引張側のフランジ端部から RC 部材の材軸方向に斜めひび割れが進展し、それに伴う亀甲状のひび割れが生じたのちに最大耐力に達した。その後、接合部の斜めひび割れおよび S 部材埋込み始点の引張側フランジ端部から生じた斜めひび割れの拡幅が顕著となるが、S 部材埋込み始点の圧縮側コンクリートの圧壊は観察されなかった。したがって、これらのひび割れは、S 部材埋込み終点部の鉄骨フランジ面に作用する支圧力の反力が RC 部材を押し広げるように作用したために S 部材引張側の RC 部材が S 部材方向に掻き出されたことによると考えられる。これらのひび割れ性状から、内部要素の破壊モードは、RC 部材せいが 300 mm の RCS-8 試験体ではコンクリートの支圧破壊に支配されたと考えられるが、RC 部材せいが 450 mm の RCS-9 試験体の内部要素は、

掻出し破壊に至ったと考えられる。また、内部要素と外部要素との間を絶縁した RCS-10~12 試験体は、実験変数にかかわらず、全体的にはほぼ RCS-9 試験体と同様のひびわれ状況を呈しており、いずれの試験体も内部要素の破壊モードは掻出し破壊に支配されたと考えられる。

4.2 荷重変形関係

図-5 に各試験体の履歴曲線、図-6 に履歴曲線の包絡線の比較を示す。

RCS-8 試験体 ($\xi = L_d / cD = 0.67$) と RCS-9 試験体 ($\xi = 0.44$) の履歴曲線のループ形状は、いずれも変形初期から逆 S 字形となっているが、RC 部材せいの大きい RCS-9 試験体の方が、その後のピンチング挙動は顕著である。このことから、RC 部材せいに対する鉄骨 S 部材の埋込み長さが小さくなると、エネルギー吸収能力が劣ることがわかる。また、初期剛性は RCS-9 試験体の方が大きい。これは、RCS-8 試験体と比較して RC 部材断面が大きいことから、RC 部材の剛性が影響していると考えられる。しかしながら、最大荷重は、RCS-9 試験体よりも RCS-8 試験体の方が大きく、最大荷重発揮時の変位も大きい。これは、前述したように、RCS-8 試験体は支圧破壊、RCS-9 試験体は掻出し破壊に支配されていると考えられることから、破壊モードの違いが最大荷重発揮時の変位の相違に影響していると推察される。また、最大荷重発揮以降の荷重低下についても、RCS-8 試験体に比べて RCS-9 試験体の方がその負勾配は大きいことから、両試験体の破壊モードの相違が示唆される。

一方、内部要素の耐力を明確にするために、内部要素と外部要素との間を絶縁した RCS10~12 試験体の包絡

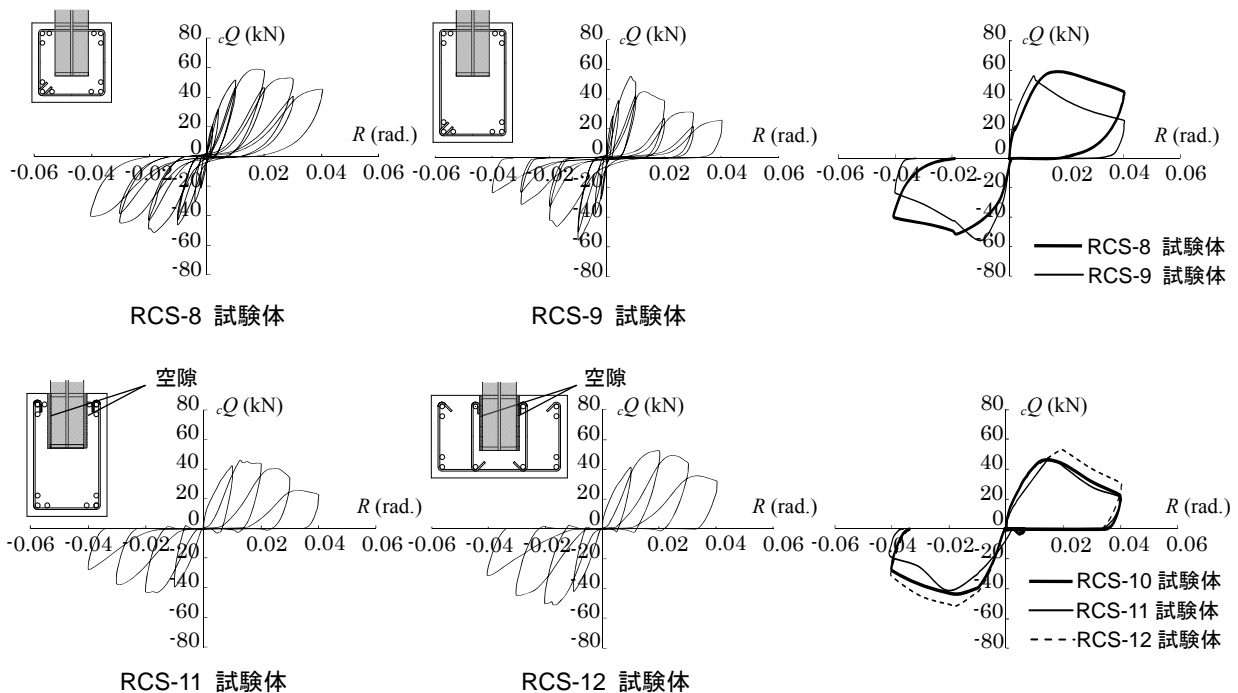


図-5 履歴曲線 (RCS-8~11 試験体)

図-6 履歴曲線の包絡線

線を比較すると、RC 部材せいを変数とした RCS-10 および RCS-11 試験体は、RC 部材せいの大きい RCS-11 試験体の方が初期剛性は大きくなっている。しかしながら、両試験体の最大荷重に差異は見られず、最大荷重発揮後の荷重低下の度合いもほぼ同じである。また、RC 部材幅の大きい RCS-12 試験体の最大荷重は、RCS-10 および RCS-11 試験体の結果よりも 1 割ほど大きくなっている。一方、最大荷重発揮後の荷重低下の度合いはほぼ同じであり、RC 部材幅が変形能に及ぼす影響は見られない。これらのことから、RC 部材せい d に対する S 部材の埋込長さ L_d が小さく、内部要素の最大抵抗力が掻出し破壊に支配される場合、その最大抵抗力に及ぼす $\xi = L_d / c_d$ の効果は小さく、 L_d の絶対値が支配的になると考えられる。また、RC 部材幅が大きくなると掻出し破壊耐力が向上するのは、掻出し部コンクリートの有効水平投影面積が RC 部材幅の増大に伴って大きくなるためと推察される。

4.3 横補強筋の軸ひずみ度分布

図-7 は RCS-10~12 試験体について、最大荷重発揮時の横補強筋の軸ひずみ度分布を示したものである。縦軸は横補強筋に貼付されたひずみゲージから得られた軸ひずみ度 ε 、横軸はひずみゲージ貼付位置である。

S 部材引張側フランジ近傍の位置 (H7M) の軸ひずみ度を見ると、RCS-10、RCS-11 の横補強筋および RCS-12 の中子筋は、接合部パネル内に配置された横補強筋に比べて、その軸ひずみ度が卓越していることがわかる。これは、S 部材引張側の引き抜き力による掻き出し破壊に伴い横補強筋あるいは中子筋が引張抵抗しているためである。

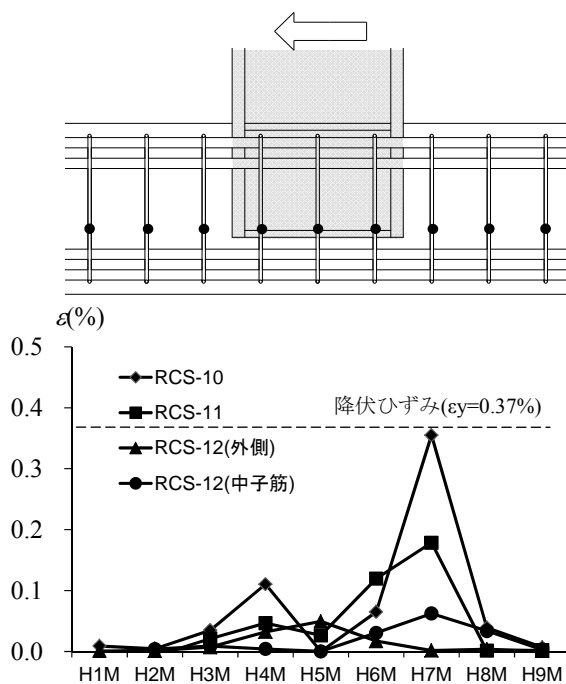


図-7 横補強筋の軸ひずみ度分布 (最大荷重時)

ある。また、H7M の位置において、RCS-12 試験体の横補強筋の軸ひずみ度は、同断面位置に配置された中子筋のそれよりも小さい。このことから、S 部材幅に対して RC 部材幅が拡張された場合、S 部材引張力による RC 部材の外部要素へ伝達される有効な範囲は、RC 部材全幅より小さくなると推察される。これらの試験体は内部要素と外部要素が絶縁されているが、外部要素の横補強筋 (H4M~H6M) にもひずみ度が生じている。これは、S 部材フランジ上面の摩擦力による応力伝達に対して外部要素の横補強筋が抵抗しているものと推察される。

4.4 接合部の終局耐力の評価

表-4 に接合部の終局耐力の実験値と計算値、表-5 に各種耐力算定式一覧を示す。ここでは、既往の RCS-5~7 試験体の結果をあわせて考察する。実験値および計算値は、RC 部材支点位置におけるせん断力 Q で表現されている。計算値は、文献¹⁾による方法 (以下、RCS 式という)、および、鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針⁴⁾に示される RC 造外部柱梁接合部の梁主筋における掻出し破壊耐力計算値 (以下、靱性式という) を用いた。なお、破壊性状より、柱梁接合部における S 部材埋込み領域外の RC 部に大きな損傷が見られないことから、RCS 式における計算値は、RC 部材せい d を S 部材の埋込み長さ L_d に置き換えて計算した。また、接合部の内部要素と外部要素との間が絶縁されている RCS-10~12 試験体については、RCS 式における内部要素と外部要素との間のねじり耐力負担分および靱性式における接合部パネル内の横補強筋の効果を無視した。実験値と計算値を比較すると、RCS 式は S 部材の埋込み長さが RC 部材せいの半分である RCS-6 および RCS-7 試験体の計算値は、実験値を 1 割ほど過小評価しているが、S 部材の埋込み長さが RC 部材せいの半分未満である RCS-9 試験体の計算値は、実験値を過大評価している。また、内部要素のみ取り出した RCS-10~12 試験体の計算値は、実験値を全て過小評価していることがわかる。一方、靱性式は、通常、RC 造外部柱梁接合部における梁主筋の定着長さが RC 部材せいの半分程度の場合に適

表-4 実験値と計算値の比較

| 試験体 | 実験値 cQ (kN) | 計算値 (kN) | | | |
|--------|------------------|----------|------|------|------|
| | | RCS式 | 実/計 | 靱性式 | 実/計 |
| RCS-5 | 63.1 | 63.6 | 0.99 | 51.5 | 1.23 |
| RCS-6 | 41.3 | 38.9 | 1.06 | 40.5 | 1.02 |
| RCS-7 | 50.7 | 46.2 | 1.10 | 54.2 | 0.94 |
| RCS-8 | 59.2 | 61.2 | 0.97 | 48.6 | 1.22 |
| RCS-9 | 55.6 | 66.2 | 0.84 | 52.3 | 1.06 |
| RCS-10 | 46.6 | 39.9 | 1.17 | 43.6 | 1.07 |
| RCS-11 | 46.1 | 30.2 | 1.52 | 46.9 | 0.98 |
| RCS-12 | 52.6 | 28.0 | 1.88 | 52.6 | 1.00 |
| | | ave. | 1.19 | ave. | 1.06 |

表-5 各種耐力算定式一覧

| | |
|---|--|
| <p>RCS 式¹⁾</p> ${}_pM_U = \min({}_pM_B, {}_pM_s)$ ${}_pM_B = {}_iM_B + \min({}_oM_{ar}, {}_oM_T)$ ${}_iM_B = 0.21 c D^2 \cdot s b \cdot \beta_B \cdot F_c$ ${}_oM_{ar} = 0.6 c D (c b - s b) F_c \cdot s d \cdot \sin {}_p\theta_1 \cdot \cos {}_p\theta_1$ ${}_oM_T = \left(0.26 + 3.22 j_w p \cdot w \sigma_y \frac{c b}{c D} \cdot \frac{1}{F_c} \right) \left\{ \frac{s D^2 (3 c D - s D) F_c}{6} \right\}$ $+ \frac{\mu_{fr} \cdot 0.3 c D \cdot s b \cdot \beta_B \cdot F_c \cdot s D^2}{r l}$ <p>せん断耐力式 ${}_pM_s$ は文献¹⁾を参照</p> <p>靱性保証式³⁾</p> $T = k_n \cdot (T_c + T_w)$ $T_c = \frac{2 \cdot l_{dh} \cdot b_e \cdot \sqrt{l_{dh}^2 + j^2}}{j} \cdot \sqrt{\sigma_B}$ $T_w = 0.7 \cdot A_w \cdot \sigma_{wy}$ $k_n = 1 + \sqrt{\frac{\sigma_0}{\sigma_B}} \quad (\text{ただし, } k_n \leq 1 + 0.0016 \sigma_B)$ $b_e = b + C_{e1} + C_{e2}$ | <p>記号</p> <p>${}_pM_B$: 支圧耐力 ${}_pM_s$: せん断耐力 $c b$: RC 部材幅 $c D$: RC 部材せい $s D$: 鉄骨せい F_c: コンクリート設計基準強度 $s d$: 鉄骨フランジ重心間距離 $j_w p$: 接合部せん断補強筋比 ${}_p\theta_1$: 接合部パネルのコンクリート圧縮と鉄骨部材軸とのなす角度 β_B: 支圧効果係数で 1.5 とする μ_{fr}: 摩擦係数で 0.211 とする $w \sigma_y$: せん断補強筋の降伏応力度</p> |
| <p>記号</p> <p>T: 定着鉄筋群としての耐力 T_c: コンクリート寄与分 T_w: 横補強筋寄与分 l_{dh}: 定着長さ j: 梁断面応力中心距離 b_e: 柱有効幅 b: 左右最外縁梁主筋幅 C_{e1}, C_{e2}: 梁主筋の柱側面かぶり厚さ (0.8l_{dh} 以下) A_w: 有効範囲内の横補強筋断面積 σ_{wy}: 横補強筋降伏応力度</p> | |

用される。したがって、 $\xi = L_d / cD = 0.50$ 以下である RCS-6, RCS-7, RCS-9 および RCS-11 試験体についてのみ検討する。S 部材埋込始点の引張側コンクリートの掻出し破壊が先行した RCS-6 および RCS-9 試験体については、実験値と計算値の対応が良い結果となった。また、対象としたすべての試験体とも、RCS 式に対して実験値と計算値の対応が良い。したがって、S 部材の埋込み長さが小さい接合部の場合、靱性式の掻出し破壊耐力の適応が妥当であると考えられる。今後、掻出し破壊耐力を考慮した接合部の設計式およびその補強法を確立する必要があると考えられるが、各試験体とも、RCS 式と靱性式による計算値に大きな相違はないことから、本研究の範囲内では内部要素の支圧耐力と掻出し破壊耐力が同程度になることに注意する必要がある。

5. まとめ

柱 RC 梁 S 構造ト形柱梁接合部における S 部材の埋込み長さが小さい場合の内部要素の耐力について、RC 部材の断面形状が及ぼす影響を実験的に検討した結果、下記の知見を得た。

- 1) S 部材の埋込み長さが RC 部材せいの半分程度以下の場合、内部要素の最大抵抗力は、S 部材埋込み始点の引張側コンクリートの掻出し破壊に支配される。
- 2) 内部要素が支圧破壊した試験体よりも掻出し破壊した試験体は最大荷重以降の荷重低下の度合いが大きい。
- 3) 内部要素の最大抵抗力に及ぼす RC 部材せいの影響

は小さく、S 部材の埋込み長さの絶対値を用いて評価できるが、RC 部材幅の影響は無視できない。

- 4) S 部材の埋込み長さが小さいト形接合部の場合、内部要素の支圧耐力と掻出し破壊耐力がほぼ同程度になることに注意する必要があるが、支圧耐力は掻出し破壊を考慮した設計式の構築が必要である。

謝辞

本研究は、JSPS 科学研究費（基盤研究(C)24560675）の助成を受けたものである。また、試験体製作及び加力実験実施において大阪工業大学および前橋工科大学の学生に協力して頂いた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鋼コンクリート構造接合部の応力伝達と抵抗機構，2011.2
- 2) 西村泰志，堀江耕平，岡本宗一郎，永峰頌子：柱 RC・梁 S とする梁貫通形式 L 字形および T 字形柱梁接合部の応力伝達機構と抵抗機構，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 688 号，pp.1167-1174，2013.6
- 3) 北野敦則，馬場望：鉄骨梁の埋込みが浅い柱 RC 梁 S 造ト形柱梁接合部の力学的性状に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），構造 III，pp.1319-1320，2014.9
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999.8