

論文 柱 RC・梁 S 混合構造柱梁接合部の終局強度および破壊モードの曲げ抵抗機構モデルによる解析

楠原 文雄^{*1}・塩原 等^{*2}

要旨：柱 RC・梁 S 混合構造の内部柱梁接合部について、RC 造柱梁接合部についての四重曲げ抵抗機構のモデルを拡張して適用し、既往の実験における試験体について終局強度および破壊モードの解析を行う。梁が S 造の場合についても同モデルを用いることが可能であり、解析結果は実験結果ともよく適合している。また、同方法は直交梁、エンドプレート、ふさぎ板といった補強要素の補強効果を数値的に求めることが可能である。

キーワード：RCS 造，柱梁接合部，曲げ抵抗機構モデル，終局強度，破壊モード

1. はじめに

近年、異種の構造部材を組み合わせ、材料の力学的長所や施工上の利点をうまく活用する混合構造の開発がすすんできている。軸力に強い鉄筋コンクリート (RC) 柱と、曲げやせん断に対して優れた抵抗性状を有する鉄骨 (S) 梁を組み合わせる RCS 造もそのひとつである。

RCS 造の柱梁接合部の設計では、支圧破壊の防止など異種部材間の応力伝達を保證する設計を行うとともに、接合パネルに生じるせん断力に対して接合部のせん断強度が上回ることを確認する設計が行われている。

外力に対する接合部内の抵抗機構については複雑なディテールに応じた力学モデルも考案されているが、設計にあたっては設計接合部の終局強度は SRC 造にならぬ RC 部と S 部の強度を累加する方式がとられている¹⁾。また、支圧板、バンドプレートといった補強要素の有意性は実験により明らかにされているものの、定量的に評価する方法は確立されていない。

本論文では RC 造における柱梁接合部の曲げ抵抗機構モデル^{2), 3)}を拡張することにより、力の釣り合いと、終局時の応力についてのいくつかの仮定に基づき RCS 造柱梁接合部の終局強度と破壊モードを推定する方法を検討し、また、

補強要素の補強効果についての検討を行う。

2. 解析モデル

2.1 接合部まわりの変形

接合部における変形・破壊モードとして、鉄骨梁端部の曲げ変形 (S モード)、鉄骨梁端のエンドプレートとコンクリートの間が開くことによる変形 (B モード)、接合部パネルのコンクリートに生じる対角方向斜めせん断ひび割れの拡大による変形 (J モード) の 3 つを想定する (図-1)。鉄骨梁の曲げ降伏、梁貫通型とした場合のフランジ上面、下面における支圧破壊および柱主筋の降伏、付着破壊については本論文では検討の対象外とする。

J モードでは、斜めひび割れによって分割された 4 つの部分が接続する柱や梁から曲げモーメントを受け回転しようとする、これらの境界面において、コンクリートには圧縮の、鉄筋には引張りの内部応力が生じて、接合部パネルがモーメントとせん断力に抵抗している (四重曲げ機構²⁾)。この変形モードでは、接合部内でのコンクリートの圧壊や斜めひび割れの拡大が生じ、実験の観察からは接合部破壊として区分される (図-2)。接合部のコンクリートのせん断応力度がある上限値に達すると接合部破壊が生

*1 東京大学 大学院工学系研究科 助手 修(工) (正会員)

*2 東京大学 大学院工学系研究科 助教授 工博 (正会員)

$$-T_1 - T_2 + C_1 + C_2 - T_5 - N_b = 0 \quad (5)$$

$$T_1 - T_2 - C_1 + C_2 - V_c - V_w = 0 \quad (6)$$

$$T_3 - T_4 - R \cdot C_1 + R \cdot C_2 - V_b - R \cdot V_w = 0 \quad (7)$$

$$-T_3 - T_4 + R \cdot C_1 + R \cdot C_2 - N_c = 0 \quad (8)$$

以上を用いて、コンクリートの応力は引張力にならない、鋼材・鉄筋の応力は降伏強度以下、鋼材・鉄筋とコンクリートの付着力の上限値などの材料特性からくる制約を満足する中で、この式(4)~(8)を連立方程式として解き、梁のモーメント M_j を求める。この際、変形の適合条件は考慮せず、未知数に対して条件式が不足する場合は適当な仮定を設けることとする。

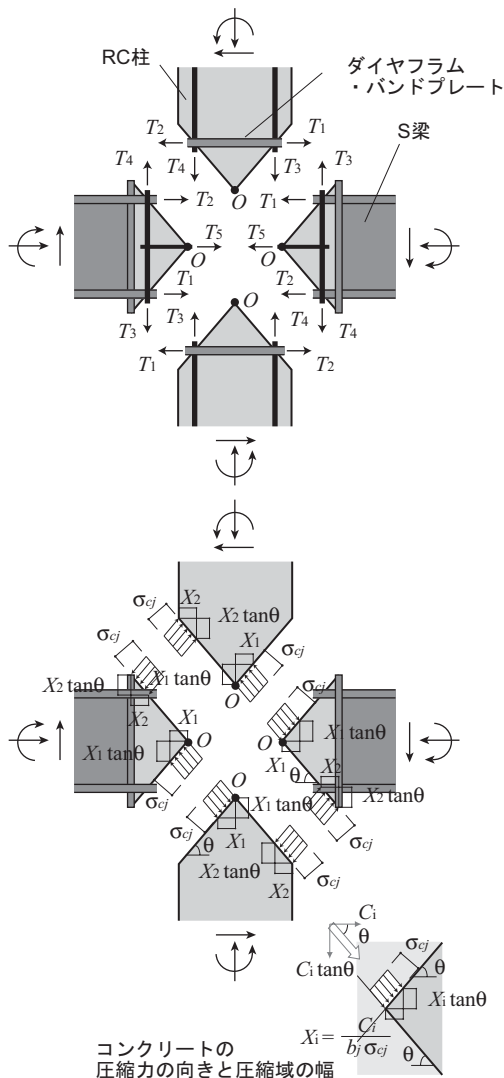


図-5 接合部の斜めひび割れ断面の応力

3 終局強度算定および破壊モードの判別

3.1 解析上の仮定

式(1)~(2)では、梁のモーメントと3つの断面応

力の関係を、式(4)~(8)では柱、梁のせん断力とモーメントと8個の断面応力の関係を規定している。それぞれを連立方程式として解を求め抵抗モーメントを求めようとする、未知数の数に対し、条件式の数不足しているため解を一意に求めることができない。そこで、不足する条件式を補うために解析の対象を終局時とすることで以下の仮定を導入する。

コンクリートストレスブロックの大きさは J モードにおいては RC 部材の曲げ強度算定時と同様にコンクリートの圧縮強度の 0.85 倍とする。B モードにおいては、コンクリートの支圧強度とし、コンクリートの圧縮強度の 2 倍とした。

$$\sigma_{cb} = \alpha \sigma_B \quad (9)$$

$$\sigma_{cj} = \beta \sigma_B \quad (10)$$

σ_{cj} : コンクリートの圧縮強度

$$\alpha = 2.0$$

$$\beta = 0.85$$

接合部破壊が生じるときには、接合部のせん断補強筋は降伏しており、また、鉄骨ウェブについては、柱主筋間の範囲において降伏しているものと仮定する。

$$T_5 = p_j \sigma_{wy} b_c (j_b D_b) \quad (11)$$

p_j : 接合部のせん断補強筋比

σ_{wy} : 接合部せん断補強筋の降伏強度

$$V_w = \frac{F_{yw}}{\sqrt{3}} t_w j_c D_c + \frac{F_{yf}}{\sqrt{3}} t_f j_c D_c \quad (12)$$

t_w : 接合部内のウェブの厚さ

F_w : 接合部内のウェブの降伏強度

t_f : 加力面内方向のふさぎ板の厚さ

F_f : 加力面内方向のふさぎ板の降伏強度

3.2 終局強度の算定

以上の仮定を用いることで、Bモード、Jモードについてそれぞれの抵抗モーメント M_b , M_j を接合部の上下に配された鋼材（梁鋼材を通した場合のフランジ、ダイヤフラム、バンドプレート等）の軸方向応力 T_1 , T_2 の関数として得られる。

表-1 に示す諸元をもつ梁貫通型の接合部についての計算例を図-6 に示す。 T_1 , T_2 は柱断面積とコンクリート強度の積で、得られたモーメントは接合部の体積とコンクリート強度の積で除して基準化して示した。 T_1 , T_2 は独立な変数ではないので T_1-T_2 平面状の任意の点をとれるわけではないが、両者の関係の制約下での最大値がそれぞれのモードの強度となる。

3.3 破壊モードの判別

3.2 節では、式(9)および式(10)により、Bモード、Jモードいずれにおいてもコンクリートがその強度に達していると仮定して2つの強度を算定した。しかし、実際にはある層せん断力に対してBモード、Jモードの2つの抵抗機構は等しいモーメントに抵抗しており、破壊が進行するほうの変形モードにおいてコンクリートの応力が強度に達しており、他方ではコンクリートの応力が式(9)あるいは式(10)の値まで達していないと考えられる。

そこで、破壊モードについては、3.2 節のようにして2つの強度を算定し、ある T_1 と T_2 の組み合わせに対して小さいほうの強度で破壊が生じるとする。破壊が生じないほうのモードの抵抗機構では、コンクリートの応力が小さく損傷が小さいものとする。

但し、この終局強度時に柱主筋の引張力が降伏強度以下、柱主筋の付着力は付着強度以下、支圧破壊はおきないか等の確認が必要である。

4. 既往の実験結果の解析

特殊な補強要素は有さない図-7 に示すような柱梁接合部について解析を行い、既往の実験結果との比較を行う。

4.1 梁端部の支圧板がない梁貫通型

梁貫通型の接合部で梁端部の支圧板がない場合(図-7(a))、梁の下フランジの応力は梁端においてコンクリートに伝達されることがないため、 T_2 は梁端における下フランジの応力そのものとなる。スラブ等がなく鉄骨梁の中立軸位置がせい方向中央であれば式(13)が成り立つ。

表-1 検討用試験体の諸元

スパン	$L_b \times L_c = 2,400 \times 1,500$ (mm)
梁断面	H-250 \times 125 \times 6 \times 9 (mm) $\sigma_y = 330$ (N/mm ²)
梁端支圧板	$B_c \times D_c = 125 \times 250$ (mm)
柱断面	$B_c \times D_c = 300 \times 300$ (mm) $j_c = 0.73$
コンクリート強度	$\sigma_B = 36$ (N/mm ²)
接合部せん断補強筋	$p_w = 0.6\%$ $\sigma_{wy} = 345$ (N/mm ²)
柱軸力	$N_c / (b_c D_c \sigma_B) = 0.2$

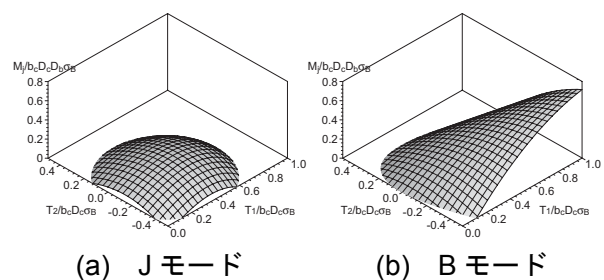


図-6 終局強度解析結果の例

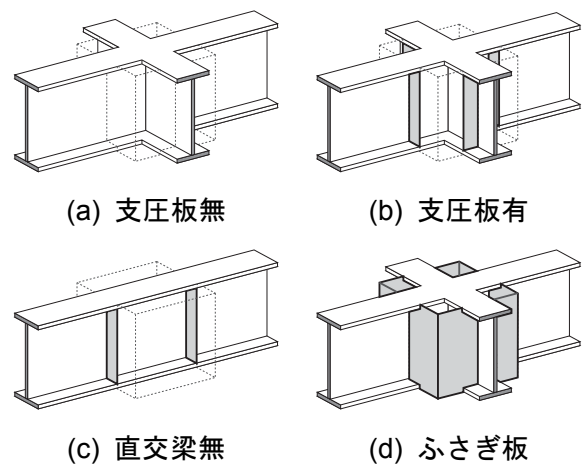


図-7 接合部のディテール

$$T_2 = -T_1 \quad (13)$$

T_1 と T_2 の差 $T_1 - T_2$ が柱梁接合部内に定着されなければならないが、接合部内のウェブのせん断力、フランジとコンクリートの付着力には上限がある。しかし、直交梁がある場合は直交梁側面の支圧によりコンクリートへの伝達が可能となるため常に式(13)が成り立つものとする。

このようなタイプの柱梁接合部の試験体⁴⁾について解析を行った結果を図-8 に示す。式(13)を仮定しているのでJモード、Bモードの強度は

引張側のダイアフラムの応力 T_1 の関数として表わされる。

実験において梁曲げ降伏前に接合部破壊した最大耐力に対して、計算された J モードの最大値はよい対応をしており、その領域では J モードの強度は B モードの強度を下回っており、破壊モードも再現されている。ただ、計算上接合部の強度が最大になる前にダイアフラムが降伏する計算結果となっている。

4.2 支圧板を設けた場合

梁端部に支圧板を設けた場合 (図-7(b))、圧縮側フランジの応力は支圧板を介してコンクリートに伝えることが可能である。そのため 4.1 節の式(13)の制限は不要となる。この場合、圧縮側のフランジの応力のほとんどがコンクリートに伝達された $T_2=0$ の場合から、コンクリートにほとんど応力が生じない $T_2=-T_1$ の間となる。

図-9 は支圧板の有無のみが異なる接合部破壊した試験体⁵⁾についての解析結果である。支圧板を設け、梁の圧縮フランジの応力がコンクリートに伝達されることにより接合部の J モードの強度は大きくなる。但し、その応力のすべてがコンクリートに伝達される ($T_2=0$) とすると、支圧板を設けたことによる強度上昇は実験で確認されたものより大きく、過大評価となる。

4.3 直交梁がない場合

直交梁やバンドプレートの直交方向の中板がない場合 (図-7(c)) には、ダイアフラムの両端の応力の差分は、一部は接合部内のウェブにせん断力として伝達され、残りはダイアフラム・バンドプレートとコンクリートの付着を介してコンクリートに伝達される。ウェブのせん断力と付着力には上限があり、 T_1-T_2 は付着強度を超えることはできない。

$$T_1 - T_2 \leq \tau_{bu} \cdot (2b_D j_c D_c) + V_w \quad (14)$$

図-10 にこのような試験体⁶⁾の、式(14)の等号がなりたつとした場合の解析結果を示す。付着強度 τ_{bu} は、本来終局強度を用いるべきであるが、ここでは仮に SRC 規準の鋼材とコンクリー

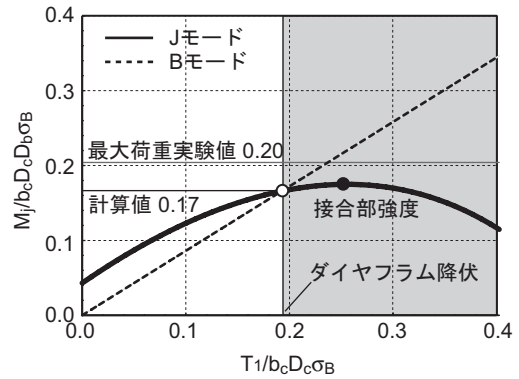


図-8 支圧板のない接合部の強度

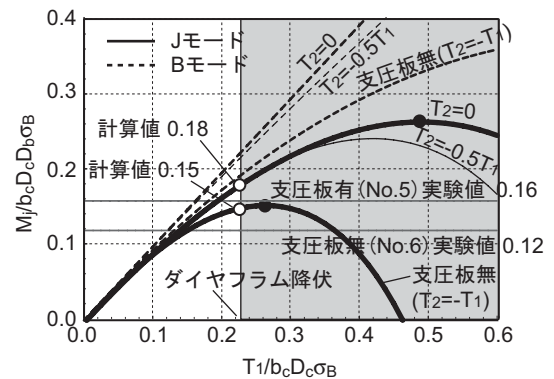


図-9 支圧板の補強効果

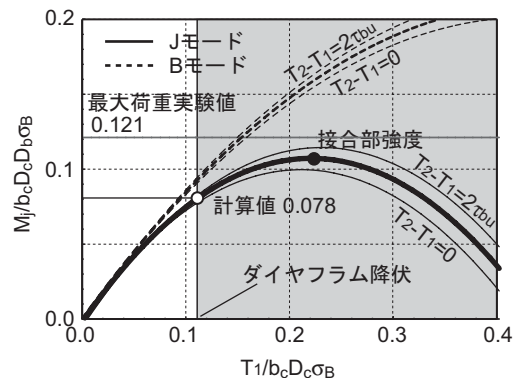


図-10 直交梁のない場合の強度

トの短期許容応力度とした。この試験体は実験では接合部破壊したもので、計算結果でも J モードの強度が B モードの強度を下回り破壊モードは接合部破壊型と判断される。ダイアフラムが無限に強いとした場合の接合部の終局強度 (J モードの強度曲線の極大値：図中の黒丸) は実験値に対してやや小さいが近い値となったが、計算値はダイアフラムの降伏により強度が決定されており実験結果とは適合しないものとなった。終局時にはこの短期許容応力度より付着応力は大きいと考えられ、図-10 には付着力の影響を

検討するため付着強度を式(14)に対して変化させた場合もあわせて示した。Bモードの強度、Jモードの強度とも付着強度の増加に伴い、強度曲線の極大値、すなわち終局強度が増大しており、終局時には図-10中の太線よりも強度が大きいこと、また、フランジ上面に鉄筋を溶接する等の付着力を増大させるディテールとすると接合部の終局強度が増大することが予想される。

4.4 せん断力を負担する板要素による補強効果

図-11は、4.3節で解析を行った試験体にふさぎ板(図-7(d))を設けた試験体⁶⁾についての解析を行ったものである。加力方向に平行なふさぎ板に生じるせん断力は、接合部内のウェブプレートのせん断応力と同様に式(12)により降伏を仮定した。

せん断力を負担する板要素を設けることによりJモードの抵抗モーメントは増大し、計算される補強効果の解析結果は実験結果と同様の傾向を示し、ダイヤフラムが無限に強いとした場合の接合部の終局強度(Jモードの強度曲線の極大値：図中の黒丸)は実験値に対して近い値となった。ただし、計算値はダイヤフラムの降伏により強度が決定されており、その点においては実験結果とは適合しないものとなった。

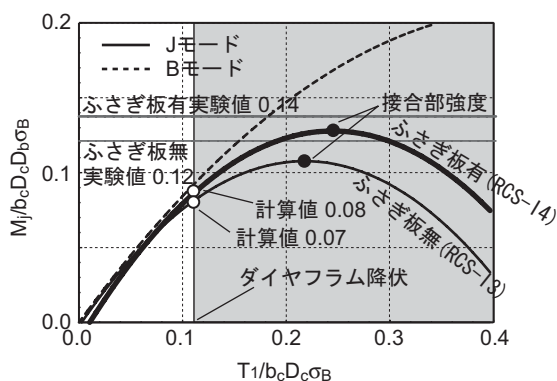


図-11 ふさぎ板の補強効果

5. まとめ

RCS造柱梁接合部においても、接合部内のウェブプレートの応力を仮定することにより、RC造柱梁接合部と同様に曲げ抵抗機構モデルにより接合部の終局強度算定と破壊モードの推定が可能である。これは、梁端部の支圧板、直交梁、

ウェブプレート等の補強効果を数値的に求めることが可能である。

今後、解析にあたって導入した仮定の妥当性の検証とともに、本論文では対象外とした支圧破壊、柱の曲げ降伏、柱主筋の付着破壊等の破壊形式も考慮できるようにする必要がある。

謝辞 本論文における計算の一部は東京大学工学部建築学科4年生 今村真之君が卒業論文として行ったものである。また、多数の研究者の貴重な実験データを引用させていただいた。厚く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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，2001.1
- 2) H. Shiohara：A New Model for Shear Failure of R/C Interior Beam-Column Connections, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 2, pp. 152-160, Feb. 2001.
- 3) 楠原文雄，塩原等：曲げモーメント抵抗機構モデルによるRC造十字型柱梁接合部の終局強度および破壊モードの解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26-2，pp.487-492，2004.7
- 4) 長谷川隆ほか：鉄筋コンクリート柱と鉄骨梁より成る混合構造柱梁接合部の弾塑性挙動，日本建築学会大会学術講演梗概集，C，pp.1325-1326，1987.10
- 5) 本間優子ほか：柱RC梁S接合部の力学性状（その1，2），日本建築学会大会学術講演梗概集，C，pp.1183-1326，1990.10
- 6) 張富明ほか：柱貫通形RC/S接合部のせん断耐力及び変形性状に関する研究（その2 十字型接合部の載荷実験），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，pp.1041-1042，1997.9