(15) 鉄骨梁の埋込みが短い柱RC造梁S造外部柱 梁接合部における有限要素法解析

狩野 昇真1・北野 敦則2・金井 喜一3

¹正会員 前橋工科大学大学院生 工学研究科建築学専攻(〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町460-1) E-mail: m1626006@maebashi-it.ac.jp

²正会員 前橋工科大学准教授 工学部建築学科 (〒371-0816群馬県前橋市上佐鳥町460-1) E-mail:kitano@maebashi-it.ac.jp

³正会員 前橋工科大学 研究協力員 (〒371-0816群馬県前橋市上佐鳥町460-1) E-mail:alp-kanai@almond.ocn.ne.jp

近年、建築様式に対する様々なニーズに対応ができるRC部材とS部材を力学的適材適所用いた合成構造 が開発、研究されている。その中で現在、最も需要が高い構造が柱RC梁S造である。しかし、柱RC梁S造 外部柱梁接合部において、S部材の埋込みがRC部材せいの半分程度以下の場合の応力伝達機構については 未解明であり、脆性的な破壊を起こす可能性が大きい。そこで、本研究では既往の実験的研究で用いられ たS部材の埋込み深さの短い柱RC梁S造外部柱梁接合部について、3次元非線形有限要素法解析を行い、実 験では計測できない応力状態などの詳細な挙動に着目し、応力伝達及び耐力評価式などの検討を行った。 その結果、解析結果における応力分布より、既往の支圧耐力評価式の係数を0.35に修正することにより実 験地を精度よく評価できることが分かった。

Key Words : RCS structure, beam-column joint, stress transfer mechanism, bearing stress, torsional streugth

1. はじめに

本研究では既往の研究で用いられたS部材の埋め込み 深さの短い柱RC梁S造ト形柱梁接合部¹⁾において、3次 元非線形有限要素法解析(以下、FEM解析)によって、 実験結果を解析的に評価を行い、実験では計測できない 応力度などの詳細な挙動に着目し、構造性能評価法の開 発に向けて、その応力伝達機構を解明することを目的と している。

2. 解析対象実験の概要

表-1 に解析対象とした各実験試験体諸元を、表-2~ 表-4 に各実験試験体の使用材料の力学的特性表を、図-1、図-2 に実験試験体概要、図-3 に解析モデルを示す。 対象実験試験体数は7体とし、試験体形状はRC柱部材 に鉄骨梁部材を直交して埋め込むト形柱梁接合部(架構 外部端)である。実験は正負漸増繰り返し静的載荷を行 い、各部位の変形とひずみの計測を行った。RCS-5、 RCS-6、RCS-15を標準試験体とし、RCS-16はねじり耐力 のみを見るために支圧耐力絶縁の処置を施し、RCS-17、 RCS-18、RCS-19は支圧耐力のみを見るためにねじり耐



表-1 試験体諸元

試験体名	柱幅 (mm)	柱せい (mm)	埋め込み深さ (mm)	Ld/cD	備考	
RCS-5		300	200	0.67	標準	
RCS-6			150	0.5		
RCS-15		450				
RCS-16	300			0.44	支圧耐力絶縁	
RCS-17			200			
RCS-18		300		0.67	ねじり耐力絶縁	
RCS-19		300		0.07		

表-2 コンクリートの力学特性表

試驗休夕	圧縮強度	割裂引張強度	ヤング係数
山永平石	σв (N/mm²)	$\sigma t(N/mm^2)$	Es(N/mm²)
RCS-5	27.6	2.94	2.22 × 10⁴
RCS-6	31.7	2.74	2.17 × 10⁴
RCS-15			
RCS-16			
RCS-17	29.2	2.40	2.05 × 10⁴
RCS-18			
RCS-19			

表-3 鉄筋の力学特性表

	D6(SI	D295)	D16(SD295)		
試験体名	降伏応力度	ヤング係数	降伏応力度	ヤング係数	
	$\sigma y(N/mm^2)$	Es(KN/mm ²)	$\sigma y(N/mm^2)$	Es(KN/mm ²)	
RCS-5	372	210	350	100	
RCS-6	372	210	333	190	
RCS-15			348	176	
RCS-16					
RCS-17	399	188			
RCS-18					
RCS-19					

表4 鉄骨の力学特性表

	PL-9(梁ウェブ)		PL-12(梁スチフナ)		PL-22(梁フランジ)	
試験体名	降伏応力度 σy(N/mm²)	ヤング係数 Es(KN/mm ²)	降伏応力度 σy(N/mm²)	ヤング係数 Es(KN/mm ²)	降伏応力度 σy(N/mm²)	ヤング係数 Es(KN/mm ²)
RCS-5	296	185	292	187	255	173
RCS-6	280					
RCS-15						
RCS-16						
RCS-17	285	192	272	179	264	176
RCS-18						
RCS-19						



カ絶縁の処置を施している。全ての試験体の柱幅を 300mm、RCS-5、RCS-6、RCS-18、RCS-19の柱せいを 300mm RCS-15、RCS-16、RCS-17の柱せいを 450mm として いる。RCS-6のみS部材の埋込み深さを150mm とし、そ れ以外の試験体はS部材の埋込み深さを200mm としてい る。柱断面形状の違い及び鉄骨埋込み深さの違いによる 支圧耐力を観察するため、掻き出し破壊を防止するよう RCS-6、RCS-15、RCS-16、RCS-17、RCS-19 はせん断補強 筋が接合部近傍のみ 2-D6@50 で配筋した。コンクリー ト強度は Fc=27(N/mm²)、主筋は 12-D16 (SD345)、帯筋は D6@100(SD345)、鉄骨はBH-300×125×9×22(SS400)を使用 した。実験変数は RC部材のせいに対するS部材の埋込 み深さの比とした。

3. 解析方法

解析モデルは試験体の左右の対称性を考慮した1/2モ デルとする。実験における試験体の設置状況と同じにす るため、柱上部および下部ではピン支持とし、梁端部は ピン・ローラー支持とした。載荷方法も実験と同様とし、 鉄骨反曲点位置に、正負繰り返し漸増強制変位を与えた。 解析ソフトには非線形有限要素解析ソフト「FINAL」を 使用した。コンクリートは全て六面体要素、鉄骨は積層 シェル要素、鉄筋は線材要素でモデル化した。図4にコ ンクリートの応力-歪関係、図-5に鋼板の付着応力-すべ り関係モデルを示す。最大付着強度は堀田らの実験式4) を使用しモデル化をしている。コンクリートと鉄筋の付 着特性に関しては鉄筋の付着応力ーすべり関係をElmorsi らのモデル⁵によりモデル化している。また、RCS-17、 RCS-18、RCS-19のねじり耐力を絶縁した試験体につい ては、実験結果からみてスリット周辺のコンクリートの 拘束が弱かったため、その影響を考慮し、コンクリート の構成則の一部を変更した。



図-5 鋼板の付着応カーすべり関係と履歴特性

4. 解析結果と実験結果の比較

(1) 荷重変形関係

図-6~図-10に各試試験体の履歴曲線を示す。実線を 解析結果、点線を実験結果で示し、解析結果は最大耐力 を迎えたループまで示す。いずれのグラフも縦軸は梁せ ん断力cQ 横軸は層間変形角R(以下、Rとする)とし ている。解析結果、実験結果の荷重変形関係を比較する と、全ての試験体の解析結果及び実験結果の荷重変形関 係のループ形状はどちらも初期段階から逆S字形となっ ており、最大耐力までのループもほぼ同じ挙動を示して いる。また、最大耐力の値もほぼ一致している。このこ とから解析結果は精度よく実験結果を再現できていると いえる。







図-6 RSC-5 履歴特性



- 解析値

0.06



図-7 RSC-6 履歴特性

図-10 RSC-17 履歴特性

(2) 破壊性状

図-11にRCS-15、RCS-17試験体の梁接続面における、 解析結果、実験結果のひび割れ図を示す。図-12にRCS-15試験体、図-13にRCS-17試験体の柱側面における、解 析結果、実験結果ひび割れ図示す。

(1)RCS-15 解析結果

R=1/500の正加力時において、曲げひび割れが生じ始 める。R=1/250の正加力時において、曲げひび割れ、水 平ひび割れが伸展する。また接合部内で45度方向に斜め ひび割れが生じる。R=1/100の正加力時において、 R=1/250時に生じた45度方向に斜めひび割れが大きく伸 展する。梁接続面ではひび割れが伸びると共に、圧縮側 フランジ位置で圧壊が生じる。R=1/50の正加力時におい て、全体的にひび割れが伸展し、R=1/100の正加力時に おいて生じた圧縮側フランジ位置で圧壊が拡大し、支圧 破壊したと考えられる。

(2)RCS-15 実験結果

R=1/500~1/250にかけて曲げひび割れ、斜めひび割れ が生じた。R=1/100正加力時、接合部内から梁接続面に 向かって新たに斜めひび割れが発生し、圧縮側フランジ 位置でコンクリートの圧壊が起こった。R=1/50正加力時、 北面および南面にて接合部付近で発生したひび割れが水 平方向に大きく伸展した。R=1/50正加力時に最大耐力に 至り最終的に支圧破壊したと考えられる。

(3)RCS-17 解析結果

R=1/500の正加力時において、接合部付近で水平方向 にひび割れが生じる。R=1/250の正加力時において、接 合部付近で入った水平方向のひびわれが伸展し、新たに 45度方向斜めひび割れが生じた。梁接続面では圧縮側フ ランジ位置で圧壊が生じる。R=1/100において斜めひび 割れがさらに大きく伸展した。梁接続面では引張側フラ ンジ位置で圧壊が生じる。R=1/50の正加力時において、 全体的にひび割れが伸展、特に水平ひび割れが大きく伸 展する。R=1/100の負加力時に引張側フランジ位置で圧 壊した部分が鉄骨埋め込み深さ位置まで拡大し掻き出し 破壊したと考えられる

(4)RCS-17 実験結果

全体的なひび割れ発生位置は RCS-15 と同じようになっ たが、ねじり耐力を絶縁しているため RCS-15 よりもひび 割れの本数は少なかった。*R*=1/100 正負両加力時、梁接続面 において引張側フランジからのひび割れが発生した。 *R*=1/50 正加力時、北面および南面にて接合部付近で発生し た斜めひび割れが水平方向に伸展した。*R*=1/50 圧縮側フラ ンジ位置でコンクリートの圧壊が生じ最終的に支圧破壊し たと考えられる。



図-12 RCS-15 柱側面ひび割れ図



図-13 RCS-17 柱側面ひび割れ図

5. 最小主応力分布

図-14~図-17に正加力最大耐力時の各試試験体の主応 力度分布図を一番右を接合部中心側の要素列とし、左へ 向かって表面側へと順に並べて示す。主応力度分布図を 見てみると両試験体ともフランジの支圧力により鉄骨内 部のコンクリートに圧縮領域が見られる。接合部引張フ ランジ位置ではてこ作用の影響から一部圧縮領域が見ら れる。標準試験体、RC部材せい300mmのRCS-5では、圧縮 応力度領域は柱せい方向で見てみると鉄骨埋め込み深さ の4~5割の位置まで見られる。鉄骨引張側での圧縮応力 度領域は柱せい方向で見てみると鉄骨埋め込み深さの4 割の位置まで見られる。次に標準試験体、RC部材せい 450mmのRCS-15では、鉄骨圧縮側での圧縮応力度領域は 柱せい方向で見てみると鉄骨埋め込み深さの5割の位置 まで見られる。鉄骨引張側での圧縮応力度領域は柱せい 方向で見てみると鉄骨埋め込み深さの4割の位置まで見 られる。このことからRC部材せいの違いが多少、鉄骨内 部のコンクリートの圧縮領域に影響すると考えられる。





図-15 RCS-15最小主応力度分布図





図-17 RCS-17 最小主応力度分布図

次に、支圧耐力絶縁試験体、RC部材せい450mmのRCS-16では、鉄骨圧縮側での圧縮応力度領域は柱せい方向で 見てみると鉄骨埋め込み深さの5割の位置まで見られる。 鉄骨引張側での圧縮応力度領域は柱せい方向で見てみる と鉄骨埋め込み深さの4割の位置まで見られる。このこ とから支圧耐力を絶縁したことにより、鉄骨内部のコン クリートの圧縮領域に影響はないと考えられる。次に、 ねじり耐力絶縁試験体、RC部材せい450mmのRCS-17では、 鉄骨圧縮側での圧縮応力度領域は柱せい方向で見てみる と鉄骨埋め込み深さの7~8割の位置まで見られる。鉄骨 引張側での圧縮応力度領域は柱せい方向で見てみると鉄 骨埋め込み深さの5割の位置まで見られる。このことか らねじり耐力を絶縁したことにより、鉄骨内部のコンク リートの圧縮領域に影響すると考えられる。

6. 耐力評価

(1) 耐力評価式

S部材の埋込長さが小さい直交接合部の支圧終局耐力 は、既往の研究¹¹および本実験結果に基づいて、内部要 素の支圧終局耐力および外部要素のせん断終局耐力を 累加することによって評価できると考える。内部要素の 支圧終局耐力は、鋼コンクリート構造接合部の応力伝達 と抵抗機構より(1a)式によって表現できる³。ただし、 ねじり耐力を絶縁した試験体については、解析結果の主 要応力図の圧縮応力度領域が標準試験体より大きくなっ ていたので支圧耐力式の係数0.21を0.35に変更した。

$$_{i}M_{B} = 0.21_{C}D^{2}\cdot_{S}b\cdot\beta_{B}\cdot F_{C}$$
 (1a)

一方,外部要素のせん断終局耐力は,内部要素と外部 要素との間のねじり耐力によって決定されると考える¹⁾。 内部要素と外部要素との間のねじり耐力は,接合部パネ ルモーメント。Macよって表現すれば,(1b)式によって求 められる^{1),2}。

$${}_{3}M_{T} = \left(0.26 + 3.22 \cdot {}_{Jw}p \cdot \sigma_{wy} \frac{cb}{L_{d}} \cdot \frac{1}{\sigma_{B}}\right) \cdot \left\{\frac{{}_{s}D^{2}(3L_{d} - {}_{s}D) \cdot \sigma_{B}}{6}\right\}$$
(1b)
$$+ \frac{\mu_{fr} \cdot 0.3L_{d} \cdot {}_{s}b \cdot \lambda \cdot \sigma_{B} \cdot {}_{s}D^{2}}{r^{l}}$$

ここに, _{*hp*} は接合部パネルの横補強筋比, *G_w* は横補強筋の降伏強度, *b* はRC部材の幅, *D*はS部材のせい*µ*は 鉄骨フランジ面の摩擦係数(0.21⁻³⁾を採用),および,*1* はRC部材の反曲点間距離である。

(2) 実験値と解析計算値及び計算値の比較

弐段はタ	実験値	解析値		RCS式	
武贵(平石)	kN	kN	実/解	計算値kN	実/計
RCS-5	99	91	1.09	84.3	1.17
RCS-6	64.8	67.7	0.96	61	1.06
RCS-15	96.5	89.1	1.08	103.0	0.94
RCS-16	51.3	48.3	1.06	55.2	0.93
RCS-17	69.2	64.1	1.08	63.9	1.08
RCS-18	76.3	62.1	1.23	63.9	1.19
RCS-19	73.5	63	1.17	63.9	1.15

表-5 実験値と解析計算値と計算値の比較

表-5 に実験値および解析より求めた支圧応力域による計算 値(以下、解析計算値)、既往の実験結果よって算出され た計算値の比較を示す。

全試験体とも解析値は、実験値を精度良く評価してい る。ことがわかる。計算値は、ねじり耐力を絶縁した試 験体の鉄骨フランジ面の係数を解析結果をもとに0.35に 変更したことによりさらに精度良く評価できていること がわかる。しかしRC部材せいが主要応力図の圧縮応力度 領域に影響しているとも考えられるので、RC部材せいと S部材の埋込み深さが耐力評価に関係について、今後再 検討が必要である。

7. 結語

S部材の埋め込み深さの短い柱RC梁S造外部柱梁接合部の3次元非線形FEM解析を行うことにより、接合部の支 圧終局耐力の検討を行なった、本研究により得られた知 見を以下に示す。

1) 3次元非線形FEM解析による解析結果と実験結果の 荷重変形関係、ひび割れ性状などは概ね一致する結果が 得られ、解析結果は実験結果を精度よく再現できた。

2) ねじり耐力を絶縁した試験体の解析結果から係数を 0.35に修正することにより、ねじり耐力絶縁試験体の耐 力評価において実験値を精度よく評価できた。

3) 今後、RC部材せいとS部材の埋め込み深さとの比の 関係について、現在の解析データを基に解析をおこない 検討を進めていく予定である。

参考文献

- 北野敦則,馬場望: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,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, 1063-1068, 2015.7
- 2) 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
- 3) 青山尚樹, 南坂典子, 西村泰志: RC 部材と S 部材で構成さ れる切替え部の耐力評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, 1315-1320, 2007.7
- 4) 堀田久人他: 拘束下のコンクリートと鋼板の付着特性に関する研究(その4) 解析の概要及び結果,日本建築学会大会学術 講演梗概集,2000,pp.1137-1138

- Elmorsi, M., Kianoush, M.R. and Tso, W.K. : Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, 2000,pp.490-505
- 6) 松井智哉、倉本洋: CSE 柱梁接合部の非線形 FEM 解析, コ ンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, 1327-1332, 2007
- 7) 遠山誉、鈴木卓、真田靖士、市之瀬敏勝:枠柱が耐震壁のせん断性状に与える影響に関する有限要素解析による検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, 403-408, 2011
- 8) 尹ロク現、松原聡平、鈴木卓、真田靖士:壁板端部に直交壁 を有する耐力壁の単調載荷実験と有限要素解析, コンクリー ト工学年次論文集, Vol.35, No.2, 409-414, 2013
- 9) 長沼一洋:三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集,第474号,1995.8,pp.163-170
- 10) 長沼一洋,米澤健次,江戸宏彰: RC構造部材の三次元繰返し FEM解析の精度向上 その1 三軸応力下の非直交ひび割れ モデルの開発,その2 梁及びに方向荷重を受ける柱梁接合部 の解析,日本建築学会大会学術講演梗概

FINITE ELEMENT ANALYSIS OM EXTERIOR BEAM-COLUMN JOINT OF RCS STRUCTURE WITH SHORT STEEL BEAM EMBEDDED

Shoma KANOU, Yoshikazu KANAI and Atsunori KITANO

The stress transfer mechanism in the case of the exterior beam-column joint of RCS structures when the embedding length of the steel beam is less than about half of the RS member is not clarification. So, in this study, three-dimensional nonlinear finite element method analysis was carried out on exterior beam-column joints of RCS structure with short steel beam embedded used in the past experimental studies. The following results was obtained. The coefficient of bearing strength formula was corrected from the analytical result of the specimen which insulated torsion stress in 0.35, and the experimental value was able to be evaluated accurately.