

# 論文 柱RC梁S造ト形柱梁接合部の鉄骨埋込み長さが終局強度に及ぼす影響に関する解析的研究

金井 喜一\*1・北野 敦則\*2・狩野 昇真\*3

**要旨:** 柱RC梁S造ト形柱梁接合部において、鉄骨の埋込み長さがRC柱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な点が多く、脆性的な破壊を起こす可能性が大きい。そこで、本研究では柱RC梁S造ト形柱梁接合部に関し、鉄骨の埋込み長さが応力伝達機構及び耐力評価に及ぼす影響について、3次元非線形有限要素法解析を行った。その結果、終局耐力は、支圧応力域を考慮し既往の評価式の支圧係数を修正することにより評価できること、RC部材せいに関わらず鉄骨の埋込み長さの絶対値で評価できることを明らかにした。

**キーワード:** RCS構造, 外部柱梁接合部, 3次元有限要素解析, 応力伝達, 終局耐力

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁構造（以下、RCS構造）は圧縮に強い鉄筋コンクリート（以下、RC）部材を柱に、曲げやせん断に強い鉄骨部材を梁に使用することで力学的に適材適所に部材を配置した構造であり、大スパン建築に適した構造である。近年、大規模倉庫などにこの工法を使用する要望が高まっているが、柱梁接合部の設計法が指針化されていないため、普及を妨げているのが現状である。また、RCS構造の柱梁接合部における応力伝達機構も未解明な点が多く、設計法も複数提案されている<sup>1)</sup>。そこで、本研究では鉄骨梁がRC柱に埋め込まれるト形柱梁接合部を対象に、その応力伝達機構の解明を目的に鉄骨の埋込み長さが柱梁接合部の終局強度および応力伝達機構に及ぼす影響について3次元有限要素法解析（以下、FEM解析）を用いて検討を行った。

本研究では、まず既往の研究で用いられた鉄骨部材の埋込み長さが短いRCS造ト形接合部<sup>2)3)</sup>を対象に、FEM解析を行い、実験結果をFEM解析での再現検証をおこなった。その後、実験結果を再現したモデルを用いて、鉄骨の埋込み長さが応力伝達に及ぼす影響について検討を行った。

## 2. 解析対象実験の概要

図-1および図-2に解析対象とした既往の実験<sup>2)3)</sup>の試験体柱梁接合部詳細断面と試験体概要を、図-3に解析モデルを示す。また、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

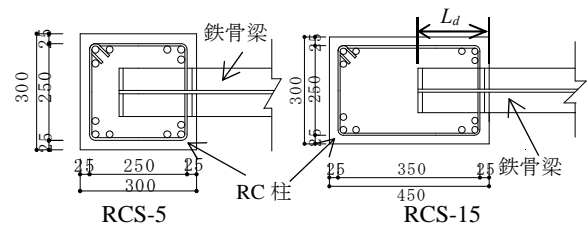


図-1 柱梁接合部断面詳細

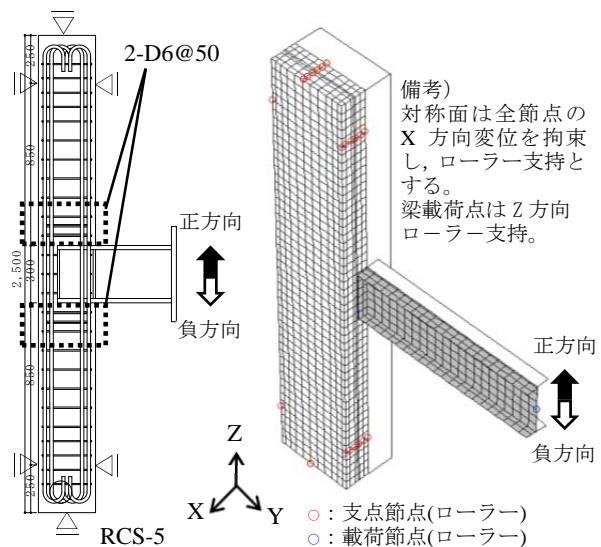


図-2 試験体概要 図-3 解析モデル(RCS-15)

増繰り返し静的荷重を行い、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検討するために埋め込まれている鉄骨の支圧応力の発生する部分とコンクリートとの間に20mmのスリットを設け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埋め込まれている鉄骨のねじりモーメントの発生する部分とコンクリートとの間に10mmのスリットを設け、

\*1 前橋工科大学 研究協力員 工修 (正会員)

\*2 前橋工科大学 工学部建築学科准教授 工博 (正会員)

\*3 (株)大林組 工修 (前 前橋工科大学大学院工学研究科建築工学専攻修士課程)

表-1 解析対象試験体諸元

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

表-2 コンクリートの力学特性

試験体名	圧縮強度 $\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (N/mm <sup>2</sup> )
RCS-5	27.6	2.94	$2.22 \times 10^4$
RCS-6	31.7	2.74	$2.17 \times 10^4$
RCS-15	29.2	2.40	$2.05 \times 10^4$
RCS-16			
RCS-17			
RCS-18			
RCS-19			

表-3 鉄筋の力学特性

試験体名	D6(SD295)		D16(SD295)	
	降伏応力度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (KN/mm <sup>2</sup> )	降伏応力度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (KN/mm <sup>2</sup> )
RCS-5	372	210	359	190
RCS-6				
RCS-15				
RCS-16	399	188	348	176
RCS-17				
RCS-18				
RCS-19				

表-4 鋼板の力学特性

試験体名	PL-9(梁ウェブ)		PL-12(梁スチフナ)		PL-22(梁フランジ)	
	降伏応力度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (KN/mm <sup>2</sup> )	降伏応力度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (KN/mm <sup>2</sup> )	降伏応力度 $\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 $E_s$ (KN/mm <sup>2</sup> )
RCS-5	285	192	272	179	264	176
RCS-6						
RCS-15						
RCS-16						
RCS-17						
RCS-18						
RCS-19						

ねじり耐力を絶縁してある。試験体の柱幅は 300mm を共通とし、柱せいを 300mm および 450mm とした。鉄骨の埋込み長さは RCS-6 のみ 150mm とし、それ以外の試験体は 200mm とした。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。ただし、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 はせん断補強筋を接合部近傍のみ 2-D6@50 で配筋した。コンクリート設計基準強度は  $F_c=27$ (N/mm<sup>2</sup>)、実験変数は RC 部材のせい ( $c$ ) に対する鉄骨埋込み長さ ( $L_d$ ) 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、柱上下部は両側面 2ヶ所、頂部 1ヶ所をローラー支持とし、梁先端部 (反曲点位置) は Z 方向ローラー支持とした。載荷は実験と同様に梁先端部 Z 方向に正負繰り返し漸増強制変位を与えた (図-2, 図-3 参照)。

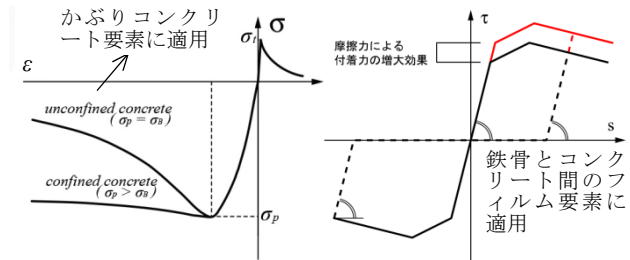


図-4 コンクリートの応力-歪関係

図-5 鋼板の付着応力-すべり関係と履歴特性

解析ソフト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、鉄骨および鉄筋の構成則はバイリニア型とした。図-4 にコンクリートの応力( $\sigma$ )-歪( $\epsilon$ )関係、図-5 に鋼板の付着応力( $\tau$ )-すべり( $s$ )関係モデルを示す。本解析では摩擦力による付着力の増大効果を考慮した構成則を使用し、最大付着強度は堀田らの実験式<sup>5)</sup>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-すべり関係を Elmorsi らのモデル<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>。なお、繰り返し載荷側には長沼モデル<sup>8)</sup>を使用した。

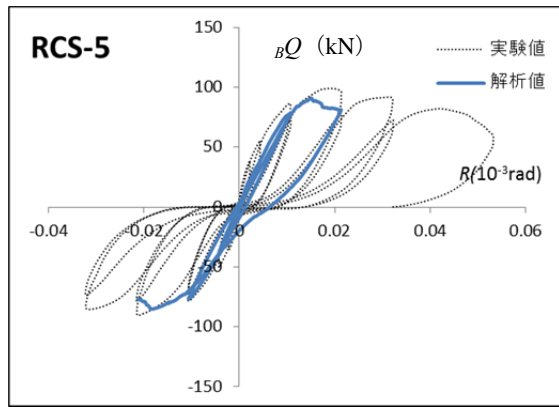
## 4. 解析結果と実験結果の比較

### 4.1 荷重変形関係

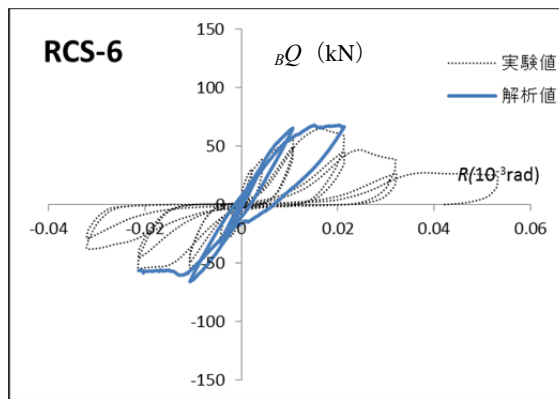
図-6(a) ~ (d) に各試験体の履歴曲線を示す。実線を解析結果、点線を実験結果で示す。いずれのグラフも縦軸は梁せん断力( $BQ$ )、横軸は層間変形角( $R$ )としている。解析結果、実験結果の荷重変形関係を比較すると、全ての試験体の解析結果及び実験結果の荷重変形関係のループ形状はどちらも初期段階から逆 S 字形となっており、徐荷時の剛性については一致していない部分も見受けられるが、最大耐力の値もほぼ一致しており、最大耐力までの履歴曲線において解析結果は精度よく実験結果を再現できているといえる。

### 4.2 破壊性状

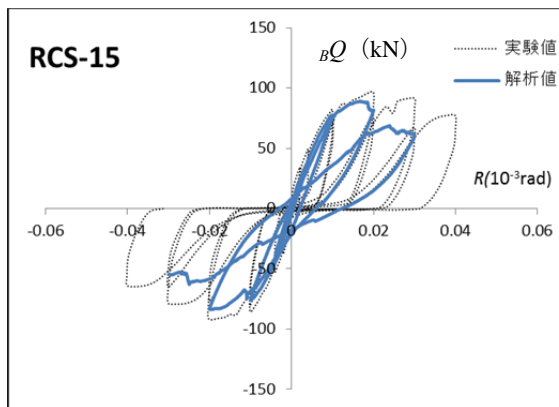
ここでは、柱せい 450mm、鉄骨埋込み長さ 200mm の標準試験体 RCS-15 について破壊性状を述べる。図-7 に梁接合面における解析結果と実験結果のひび割れ図を、図-8 に柱側面における解析結果と実験結果のひび割れ図を示す。まず、解析結果における破壊性状について、 $R=1/500$  の正加力時において、曲げひび割れが生じ始める。 $R=1/250$  の正加力時において、曲げひび割れが伸展する。また接合部内で 45 度方向に斜めひび割れが生じる。 $R=1/100$  の正加力時において、 $R=1/250$  時に生じた 45 度



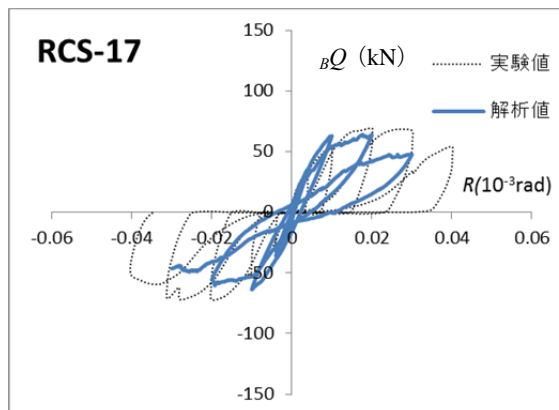
(a) RCS-5



(b) RCS-6



(c) RCS-15



(d) RCS-17

図-6 履歴曲線の比較

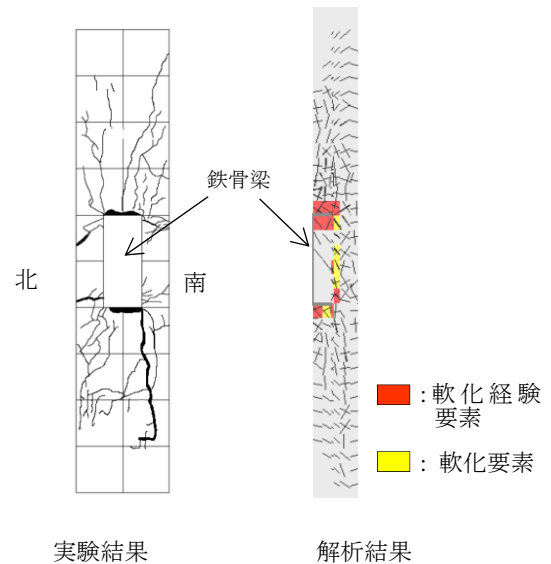


図-7 梁接続面ひび割れ図 (RCS-15)

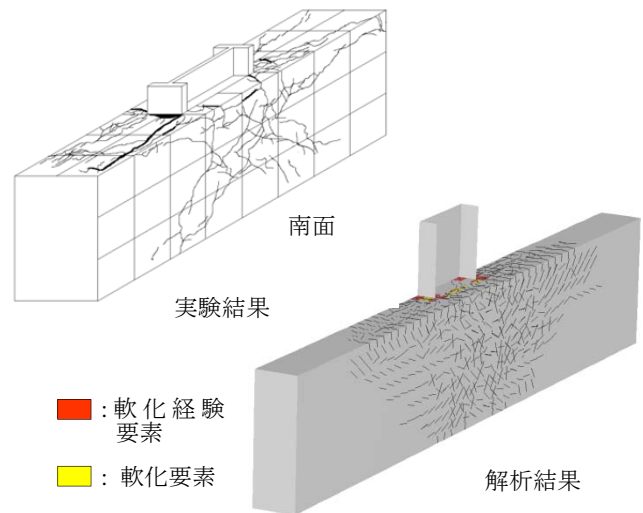


図-8 柱側面ひび割れ図 (RCS-15)

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。

次に実験結果における破壊性状について述べる。なお図-8に示したひび割れ図は南側から見た図である。 $R=1/500 \sim 1/250$  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。以上のことから解析時と実験時の破壊性状はほぼ同じことから解析は実験を再現しているといえる。

## 5. 最小主応力度分布

図-9 (a)～(c)に正加力最大耐力時の主な試験体の最小主応力度分布図を示す。図は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示した。また、鉄骨埋込み位置を実線で示す。何れの試験体も鉄骨埋込み始端と終端に、鉄骨のてこ作用による圧縮領域がみられる。特に RCS-5( $L_d/cD=0.67$ )では、柱の圧縮応力と釣り合うように RC 部材に圧縮ストラットが形成されていることが分かる。しかしながら、柱せいが大きい RCS-15 ( $L_d/cD=0.44$ )では鉄骨の埋込み長さが柱せいの半分以下であるため、鉄骨埋込み終端において柱の圧縮力と鉄骨のてこ作用による支圧力との応力伝達の関係は見られず、鉄骨埋込み周辺の支圧力による応力集中が目立っている。また、ねじりを絶縁した RCS-17( $L_d/cD=0.44$ )でも同様に鉄骨埋込み周辺に応力が集中しており、接合部中央部分では RCS-15 よりも圧縮領域が広がっている。鉄骨のてこ作用による支圧力の圧縮領域に着目すると、鉄骨部材の圧縮側では柱せいが 300 mm の RCS-5 では鉄骨埋込み深さの 5 割程度まで圧縮領域があるのに対し、柱せいが 450 mm の RCS-15 は鉄骨埋込み深さの 8 割程度まで圧縮領域がみられる。したがって鉄骨埋込み長さが同じでも RC 部材せいとこの比により、支圧力による圧縮領域が異なることが分かる。

## 6. 耐力評価

鉄骨部材が埋込まれた RCS 造柱梁接合部の耐力算定式は既往の文献<sup>4)</sup>より鉄骨梁幅で囲まれた内部要素の耐力とそれ以外の外部要素の耐力の累加で表現できる(以下、RCS 式と呼ぶ) RCS 式において内部要素の支圧耐力は既往の文献<sup>4)</sup>より(1a)式で表現できる。

$${}_iM_B = 0.21 c D^2 \cdot s b \cdot \beta_B \cdot F_c \quad (1a)$$

ここで(1a)式は十字形接合部を対象に提案された式であり、 $s b$ は鉄骨フランジ幅、 $\beta_B$ は支圧効果係数で 1.5 とし、本研究におけるト形接合部に適用するため、ここでは RC 部材せい  $cD$  を鉄骨埋込み長さ  $L_d$  に置き換えて計算した。また外部要素の耐力は、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られており、既往の文献<sup>4)</sup>より(1b)式で求められる

$${}_oM_T = \left( 0.26 + 3.22 \cdot j_w p \cdot \sigma_{wy} \frac{c b}{L_d} \cdot \frac{1}{\sigma_B} \right) \cdot \left\{ \frac{s D^2 (3L_d - s D) \cdot \sigma_B}{6} \right\} + \frac{\mu_{fr} \cdot 0.3 L_d \cdot s b \cdot \lambda \cdot \sigma_B \cdot s D^2}{r l} \quad (1b)$$

ここに、 $j_w p$  は接合部パネルの横補強筋比  $\sigma_{wy}$ 、 $\lambda$  は横補強筋の降伏強度、 $c b$  は RC 部材の幅、 $s D$  は S 部材のせい、

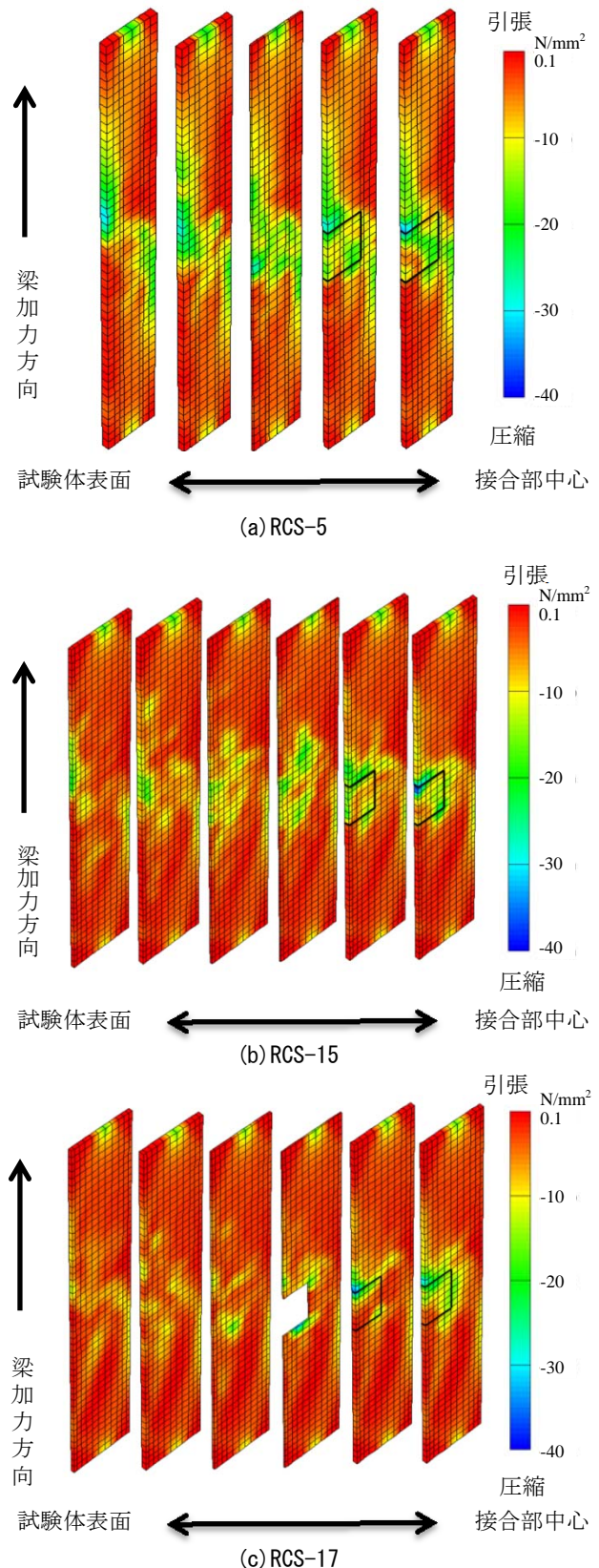


図-9 最小主応力分布図

$\mu_{fr}$  は鉄骨フランジ面の摩擦係数 (0.21<sup>3)</sup> を採用) および  $l$  は RC 部材の反曲点間距離である。

表-5 に実験による最大耐力値、解析結果による最大耐力値 (以下、解析値) および解析結果から求めた支圧

応力域を考慮した RCS 式計算値を示す。ここで(1a)式の支圧応力係数0.21は十字形接合部における支圧領域が柱せいの3割程度であることから求められた係数であり、解析結果から支圧領域が5割程度であることから解析値では支圧応力係数を0.35と修正し計算した。その結果、解析値は実験値を精度よく表しているが、RCS式による計算値は、RC部材せい450mmのRCS-15が過大評価となっている。支圧耐力を絶縁したRCS-16すなわち内部要素と外部要素のねじり耐力((1b)式)のみの試験体についても過大評価となっているが、それを差し引いてもRCS-15の支圧耐力評価は若干過大評価となっている。RC部材せいが支圧耐力に影響を及ぼしていると考えられるので、RC部材せいと鉄骨埋込み長さの関係について解析的に検討を行った。

## 7. RC部材せいと鉄骨埋込み長さの関係

### 7.1 解析試験体緒元

基本解析モデルはRCS-6試験体、RCS-15試験体とし、鉄骨埋込み長さのみ変更し解析を行った。新たに解析を行った試験体の諸元と最大耐力を表-6に示す。

### 7.2 荷重変形関係

図-10に柱せい450mmの包絡線の比較を示す。全て解析結果の荷重変形関係のループ形状は今まで同様に初期段階から逆S字形となっており、最大耐力を迎えた層間変形角 $R$ もすべてほぼ同じである。鉄骨埋込み深さを長くすると最大耐力の値が大きくなるのが分かる。

### 7.3 最小主応力分布

図-11に正加力最大耐力時の柱せい300mmの場合の $L_d/cD=0.25$ および $L_d/cD=0.75$ 、柱せい450mmの場合の、 $L_d/cD=0.78$ 試験体の最小主応力分布図を示す。最小主応力分布図より $L_d/cD$ が1/4程度の場合、支圧力は鉄

骨部材圧縮側フランジのほぼ全面にわたり圧縮力が作用しており、鉄骨周辺のコンクリートに局部応力が生じ、その部分が支圧破壊することにより耐力が決定していると考えられる。逆に $L_d/cD$ が3/4程度の場合にはRC部材

表-5 最大耐力表

試験体名	実験値	解析値		RCS式	
	kN	kN	実/解	計算値kN	実/計
RCS-5	99	91	1.09	107.3	0.92
RCS-6	64.8	67.7	0.96	76.6	0.85
RCS-15	96.5	89.1	1.08	128.5	0.75
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-6 解析試験体緒元および最大耐力

柱せい(mm)	埋込み深さ(mm)	$L_d/cD$	最大耐力(KN)
300	76	0.25	41.9
	100	0.33	55.0
	150	0.50	67.7
	200	0.67	87.2
	224	0.75	107.1
450	100	0.22	45.5
	150	0.33	68.7
	200	0.44	89.1
	250	0.56	109.5
	300	0.67	120.4
	350	0.78	132.5

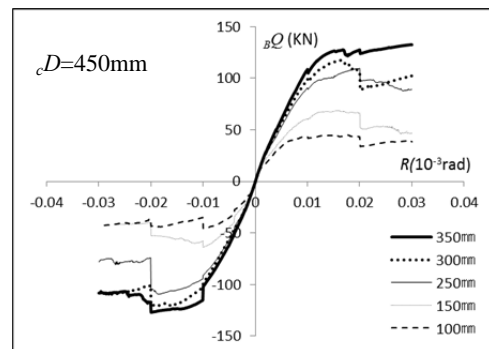


図-10 包絡線の比較 (柱せい450mm)

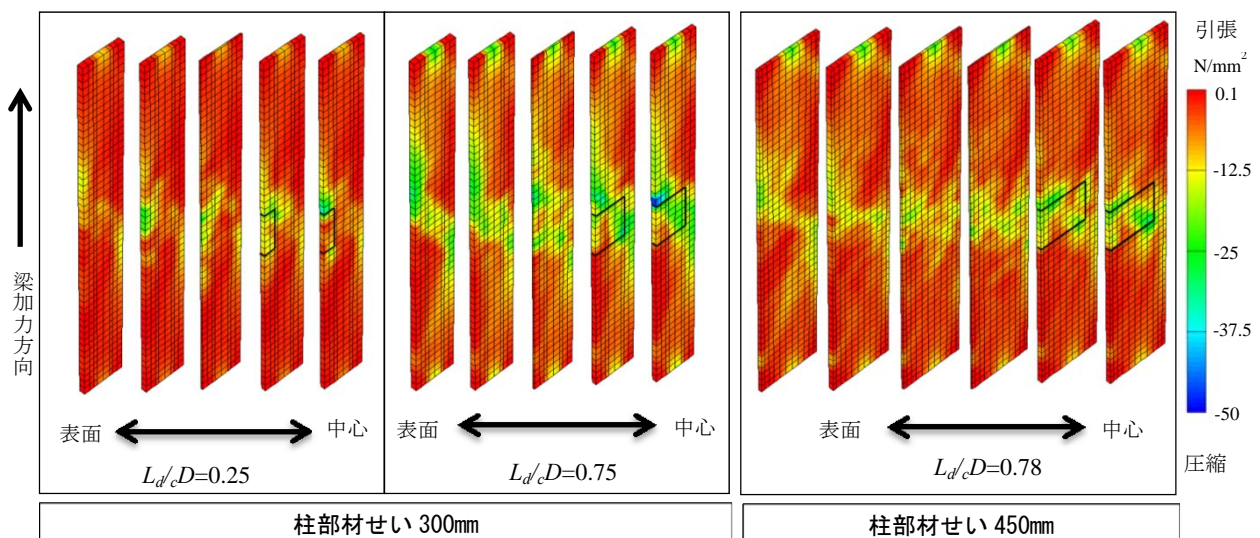


図-11 最小主応力分布図

せいが 300 mm の場合、RC 部材全体に圧縮ストラットが形成され、それによって応力が伝達されていることが分かるが、RC 部材せいが 450 mm の場合は試験体表面（外部要素）では圧縮ストラットが形成されているのに対し、内部要素に近づくにつれ鉄骨周辺に応力が集中しており、コンクリートに局部的に応力が集中しているようにも見受けられる。RC 部材せいが小さい場合は、内部要素においてもコンクリートに圧縮ストラットが形成されるため支圧破壊のみならずコンクリートのせん断破壊にも注意が必要である。

#### 7.4 最大耐力

図-12 に RC 部材せいに対する鉄骨埋込み深さの比 ( $L_d/cD$ ) と解析結果による最大耐力を、図-13 に鉄骨埋込み長さ ( $L_d$ ) と解析結果による最大耐力の図を示す。

図-12 をみると  $L_d/cD$  が同じでも RC 部材せいが異なれば最大耐力が異なり、特に  $L_d/cD$  が 0.4~0.6 ではその差が顕著となっている。これは前述した接合部内のストラットの形成状況に影響されていると考えられる。しかしながら、図-13 によると、RC 部材せいに関わらず鉄骨の埋込み長さが同じであれば最大耐力はほぼ同じとなっている。したがって、RCS 造の外部柱梁接合部における終局耐力の評価は、鉄骨の埋込み長さの絶対値で表現できると考えられる。しかし、鉄骨の埋込み長さが同じでも RC 部材せいが異なると応力伝達機構も異なるため、さらに接合部における応力分担等の詳細な検討が必要である。

#### 8. 結語

柱 RC 梁 S 造柱梁外部接合部の 3 次元非線形 FEM 解析を行った結果、以下の知見が得られた。

- (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、ひび割れ性状などについて、最大耐力まで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している。
- (2) 最大耐力において既往の提案式 (RCS 式) の支圧耐力係数を、解析結果から支圧領域を考慮し、0.35 と修正し計算することにより、実験値を精度よく評価できる。
- (3) RCS 造ト形柱梁接合部における最大耐力は RC 部材せいに関わらず鉄骨の埋込み長さの絶対値で評価できるが、RC 部材せいが異なると応力伝達機構も異なるので、今後さらに詳細な検討が必要である。

#### 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
- 2) 北野敦則，馬場望：柱 RC 梁 S 造ト形柱梁接合部にお

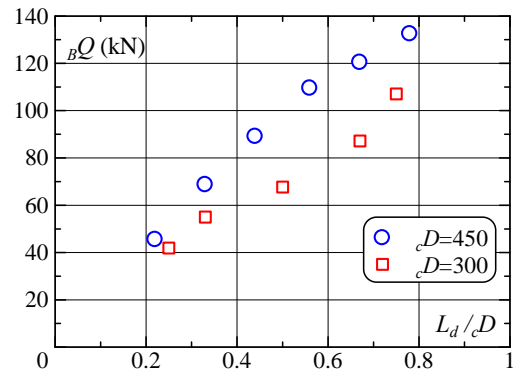


図-12  $L_d/cD$  と最大耐力の関係

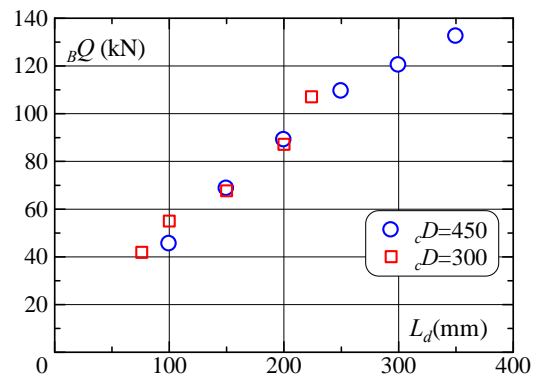


図-13 鉄骨埋込み長さ と最大耐力の関係

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，pp.1063-1068，2015.7

3) 四ツ谷翔平，狩野昇真，北野敦則，馬場望：鉄骨梁の埋め込みが小さい柱 RC 梁 S 造外部柱梁接合部における支圧耐力に関する実験的検討(その 1，その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 III，pp.1371-1374，2016.9

4) 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

5) 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，pp.1137-1138，2000.9

6) 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, pp.490-505, 2000

7) 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，pp.1327-1332，2007

8) 長沼一洋，大久保雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文集，第 536 号，pp.135-142，2000.10