論文　ふさぎ板形式の鉄筋コンクリート柱･鉄骨梁構造柱梁接合部の有効幅に関する3次元有限要素法解析

北野　敦則[*1]・徐　旭[*2]・石田　圭[*3]

要旨：ふさぎ板形式の鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁構造の柱梁接合部の有効幅に着目し，3次元有限要素法解析を用いて柱梁接合部の挙動を解析的に評価することを試みた。筆者らが実施した十字形柱梁接合部試験体を用いて，荷重変形関係と破壊性状の比較から実験変数が柱幅と梁幅である試験体の挙動を解析的に再現できることを示した。さらに，柱梁幅比を変数とした解析を行い，柱梁幅比が大きくなるにつれて終局せん断耐力は大きくなるが，柱梁幅比が0.6を超えると終局せん断耐力は小さくなることを示し，柱梁幅比が0.6を超えるまでは有効幅にSRC規準の（柱幅+梁幅）/2の方を用いることで評価できることを示した。

キーワード：RCS構造，柱梁接合部，ふさぎ板形式，有効幅，FEM解析，終局せん断耐力

1. はじめに

材料の力学的特徴を生かした鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁構造（以下RCS構造）は，建築の高層化や大スパン化などへの対応が期待できる構造であり，経済性と施工性にも優れている。2021年には日本建築学会より「鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造設計指針」[1)]（以下RCS指針）が刊行されRCS構造の建設数は増加傾向になると思われる。しかしながら，その柱梁接合部については応力伝達機構などの未解明な点が多いのが現状である。

ふさぎ板形式の RCS 構造柱梁接合部のコンクリート部分の有効幅は，RCS指針によればSRC規準[2)]の梁が鉄骨の場合の有効幅を準用し，柱幅の半分としているが，ふさぎ板があることにより，コンクリートが拘束され，コンクリートの有効幅も大きくなることが考えられる。

そこで，本研究では，ふさぎ板形式の十字形RCS構造について，3 次元有限要素法解析により精度の高い解析モデルの作成と梁幅を変数とした解析を行うことで有効幅の検討を行った。

2. 解析対象実験概要

2.1 試験体諸元

解析対象試験体は著者らが加力実験を実施した，実験変数を柱幅と梁幅の比としたふさぎ板形式の十字形試験体3体（RCS1，RCS2，RCS3）を対象とする。試験体諸元を**表－1** に，試験体に用いた材料の物性値を**表－２**に示す。ふさぎ板の厚さはいずれの試験体も4.5㎜とし，想定する破壊モードは3体とも接合部せん断破壊である。

2.2 解析対象試験体

解析対象の試験体概要を**図－１**に示す。試験体の柱端部と梁端部はピン治具と接続されており，それぞれの支点間距離は梁3000㎜，柱2250㎜である。

2.3 加力方法および加力制御

図－2に加力装置概要を，**図－3**に加力制御を示す。実験時の加力は柱上部および梁反曲点位置をピンローラー支持，柱下部をピン支持とし，柱上部のピン位置に軸力（軸力比0.2）を導入後，水平ジャッキにより正負交番載荷による強制変位を与えた。なお，柱軸力導入時には

表－1　試験体諸元

試験体名	架構形状	柱断面（せい×幅）	梁	柱主筋	軸力比	ふさぎ板厚	崩壊形
RCS1	十字形	350×350	320×110×4.5×22	12－D16	0.2	4.5	パネル
RCS2		350×600	320×110×4.5×22	12－D16	0.2	4.5	パネル
RCS3		350×600	320×220×4.5×22	12－D16	0.2	4.5	パネル

（単位：㎜）

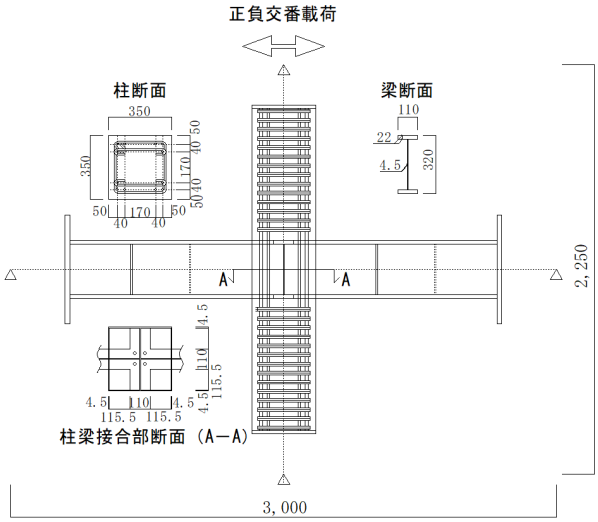
表－2　材料物性値

部材／試験体名	コンクリート			鋼材											
	圧縮強度	割裂強度	ヤング係数	主筋		せん断補強筋		梁フランジ		梁ウェブ		直交ウェブ		ふさぎ板	
	σ_B	σ_t	E_c	σ_y	E_s	σ_y	E_s	σ_y	E_s	σ_y	E_s	σ_y	E_s	σ_y	E_s
RCS1	37.4	2.59	2.31×10^4	404	1.86×10^5	395	1.89×10^5	355	1.67×10^5	348	1.81×10^5	348	1.81×10^5	348	1.81×10^5
RCS2	36.6	2.91	2.37×10^4	404	1.86×10^5	395	1.89×10^5	355	1.67×10^5	348	1.81×10^5	348	1.81×10^5	348	1.81×10^5
RCS3	36.3	2.91	2.37×10^4	404	1.86×10^5	395	1.89×10^5	355	1.67×10^5	348	1.81×10^5	348	1.81×10^5	348	1.81×10^5

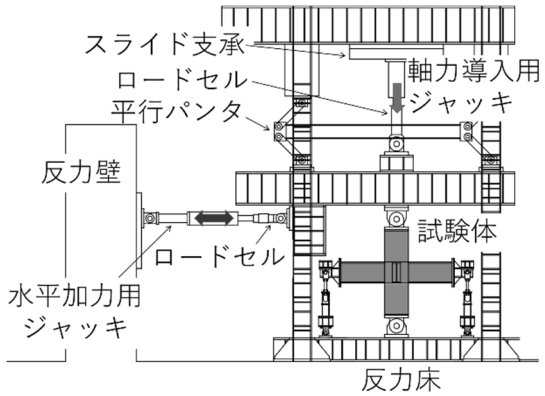
（単位：N/mm^2）

*1 前橋工科大学　工学部環境・デザイン領域　教授　博士（工学）　(正会員)
*2 前橋工科大学大学院　工学研究科環境・生命工学専攻　博士後期課程　修士（工学）　(正会員)
*3 前橋工科大学大学院　工学研究科建築学専攻　博士前期課程

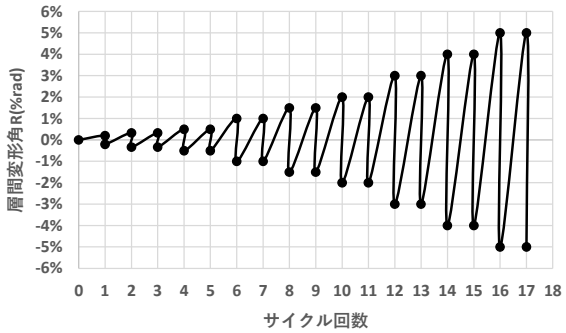
梁反曲点位置の支持点を柱軸変形の影響を受けないよう上下方向はフリーにしてある。加力制御は層間変形角 R による制御とし，各サイクル 2 回の繰り返し載荷とした。



図－1　試験体概要（RCS1）



図－2　加力装置概要

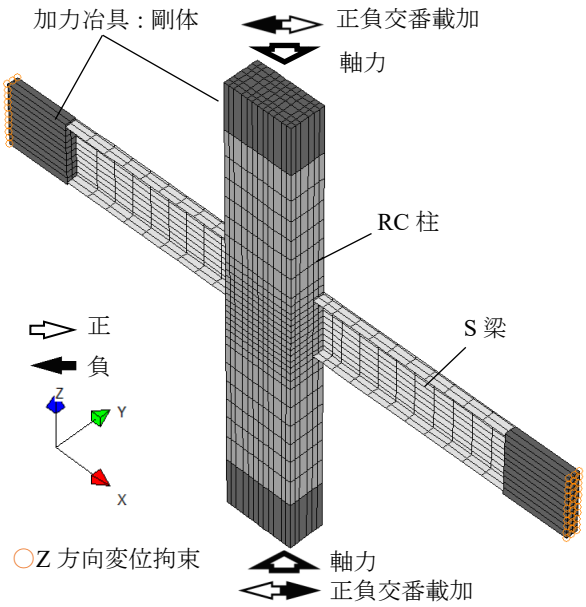


図－3　加力制御

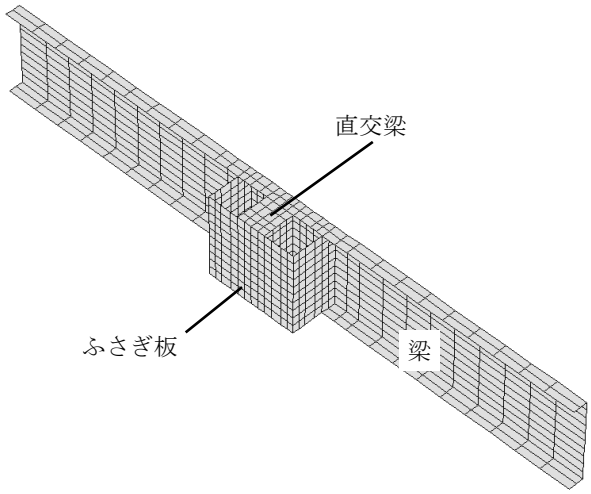
3. 解析概要

3.1 解析手法とモデル化

本解析では有限要素解析プログラムとして FINAL を使用した。要素分割図を**図－4** および**図－5** に示す。解析試験体は対称性を考慮し，加力軸を対称軸とした 1/2 モデルとした。コンクリート要素には六面体要素，鋼板要素は鉄骨を含めたフランジ，ウェブ，ふさぎ板すべてを面外曲げ特性を考慮した積層シェル要素，柱の主筋は線材要素，せん断補強筋は埋め込み鉄筋要素で柱全体に一様に分散させてモデル化した。鋼材-コンクリート間の付着は，接合要素として鉄筋-コンクリートおよび鋼板-コンクリート間でそれぞれ LINE 要素と FILM 要素を用いてモデル化を行った。節点の拘束条件は対称軸に位置する節点は全て Y 方向変位拘束し，それ以外は梁の端部面のみ Z 方向変位拘束とした。また，解析に使用した材料物性値は**表－2** に示した各種材料実験により得られた数値を用いて解析を行った。解析における加力は，実験時と同様の加力状態となるよう，柱上下面の柱中心節点に軸力を導入後，それぞれの節点が上下面で逆対称方向になるよう変位増分をした。



図－4　要素分割図



図－5　接合部鉄骨詳細凡例

3.2 構成則

図－6 に解析に用いた各種構成則を示す。コンクリー

トの圧縮側の応力上昇域は修正 Ahmad モデル[3]によりモデル化し，引張域は出雲らのテンションスティフィニング特性[4] 係数 0.2 によりモデル化した。コンクリートのひび割れ面のせん断剛性低減はひび割れ後の剛性低下が緩やかな山田・青柳のモデル[5] を用い，コンクリートの 3 軸圧縮状態における破壊条件は，Willam-Warnke の 5 パラメータモデル[3] に大沼らの実験係数を適用したものとし，鋼材の応力-ひずみ関係はバイリニアモデルを使用した。除荷・再載荷剛性は弾性剛性とした。また，ひずみ硬化則は等方硬化則とし降伏後の剛性は 1/100 とした。

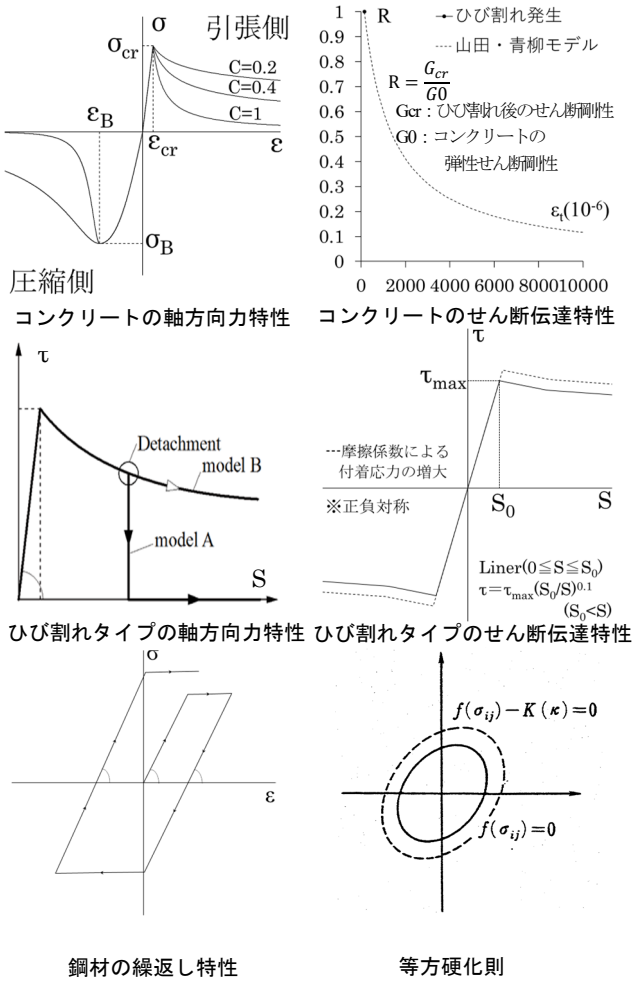
付着モデルについては，主筋においては試験体の性質上十分大きな剛性を持つことから剛接とし，鋼板とコンクリートに関しては接合要素の垂直方向の特性は，面外圧縮方向に十分大きな剛性を持ち，引張方向は設定した剥離強度に達しても応力が解放されない（modelB）のではなく剥離強度に達すると応力が解放され，剥離以降は垂直変位が正の場合は剛性零，垂直変位が零以下になると十分大きな剛性が復活するひび割れタイプ（modelA）とするが，直交梁のウェブとコンクリートの付着に関しては他と比べふさぎ板等による拘束効果が大きくすべりが生じないと考えひび割れタイプとせず剥離などしないものとした。

接合要素のせん断伝達特性は，最大付着応力点までは線形とし，以降はすべり量の増大に伴い応力が徐々に減衰するモデル[6]とした。最大付着応力は既往の研究[7]の実験試験体の状況と本研究の実験試験体の状況を照らし合わせて見積もり $0.09\sigma_B$ とした。また，摩擦係数を 0.65[8] とし摩擦による付着応力の増大も考慮している。鋼材の降伏条件にはミーゼスの降伏条件を適用した。

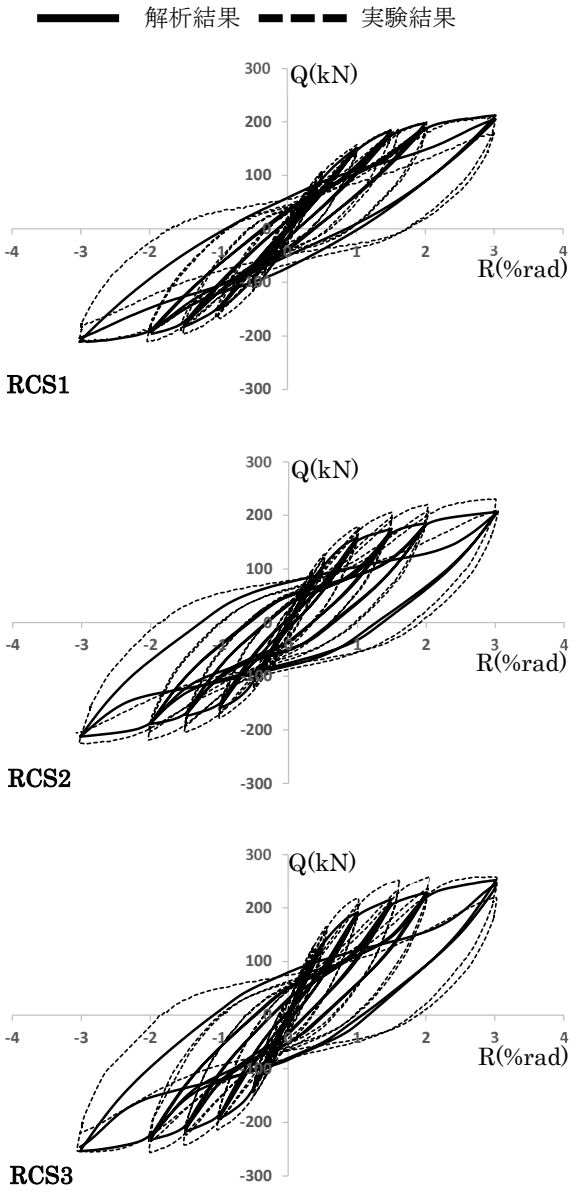
4. 解析結果

4.1 荷重変形関係

これらの物性値と構成則で行った解析結果（荷重変形関係）を図－7 に示す。縦軸に柱せん断力（kN），横軸に



図－6 構成則



図－7 荷重変形関係

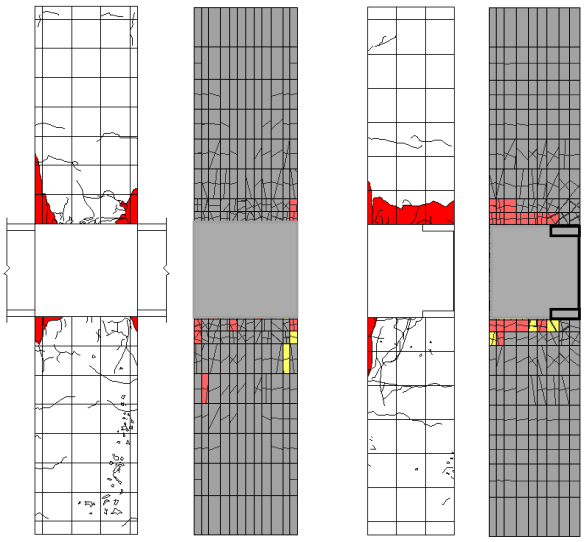
層間変形角（%rad）を示す。実験では層間変形角 5%rad まで加力を行っているが，解析では最大耐力に至った層間変形角 3%rad までとした。

解析値最大耐力と実験値最大耐力の比較を**表－３**に示す。最大耐力に関して，RCS2 以外は実験結果を良好に再現しているが RCS2 は解析結果が実験結果より低く出ている。**図－７**の荷重変形関係を見ると基準試験体である RCS1 は載荷時の履歴は実験値と整合しているが，柱幅の大きい RCS2 と RCS3 については解析値の方が低く推移する傾向にある。また全試験体とも初期剛性は解析結果の方が若干低く，ピーク後除荷時のループ形状が実験値の方が膨らんでいるが，これは加力装置各所（ピンやスライド支承）の摩擦力が若干含まれているためだと考えられ，解析結果は実験結果を概ね評価できていると考えられる。なお，柱幅を広くした試験体の耐力が低く推移する要因については以下のことが考えられる。今回の解析で用いたコンクリートの構成則は柱も柱梁接合部も同じとしたが，柱梁接合部内のコンクリートはふさぎ板や柱梁接合部内を貫通している鉄骨梁で囲まれており，それによる拘束効果の影響も少なからずあると考えられる。しかし，基準試験体 RCS1 の柱断面程度のボリュームだとその影響は少ない可能性があり，柱幅の大きい RCS2 や RCS3 になるとふさぎ板や鉄骨梁で拘束されている柱梁接合部のコンクリート要素数も増えることから，その拘束効果の影響が無視できなくなっているのではないかとも思われ，また，鉄骨とコンクリートの付着（接触）面積も大きくなるため付着の構成則の影響についても同様なこととして挙げられると思われる。なお，これらの構成則については今後の検討課題である。

表－３　耐力比較

	RCS1	RCS2	RCS3
解析値	212ｋN	206ｋN	252ｋN
実験値	209ｋN	231ｋN	258ｋN

■ ■コンクリート圧壊を示す
左が実験結果，右が解析結果



北面　　西面

図－８　破壊性状

4.2　破壊性状の比較

RCS3 の層間変形角 3%時の破壊性状の解析結果と実験結果との比較を**図－８**に示す。

柱端部のコンクリート圧壊状況をみると北面は実験結果と比べて解析結果は圧壊が少ないが発生個所としては実験結果を良好に再現している。西面は圧壊の量や発生箇所ともに実験結果を良好に再現している。東面についても同様に実験結果を良好に再現していた。

これらの荷重変形関係と破壊性状から今回の解析モデルはある程度良好に実験結果を再現することができたと考えられる。

5. 柱梁接合部有効幅の検討

5.1 柱梁接合部の終局せん断耐力式

柱梁接合部の終局せん断耐力は，「鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造設計指針」[1] より以下の式で算出した。

$$ {}_{J}M_{sU} = {}_{c}V_{e} \cdot {}_{J}F_{cs} \cdot {}_{J}\delta + \frac{{}_{s}V \cdot {}_{Js}\sigma_{y}}{\sqrt{3}} $$

$$ + \eta \cdot {}_{c}D \cdot 2 \cdot {}_{h}t \cdot {}_{sB}d \cdot \frac{{}_{h}\sigma_{y}}{\sqrt{3}} \qquad (1) $$

$$ {}_{c}V_{e} = \frac{{}_{c}b}{2} \cdot {}_{mC}d \cdot {}_{sB}d \qquad (2) $$

$$ {}_{s}V = {}_{Jw}t \cdot {}_{sC}d \cdot {}_{sB}d \qquad (3) $$

$$ {}_{J}F_{cs} = min(0.12F_{c},\ 1.8 + \frac{3.6F_{c}}{100}) \qquad (4) $$

ここで，${}_{J}M_{sU}$：接合部終局せん断耐力，${}_{c}V_{e}$：接合部パネルのコンクリートの有効体積，${}_{s}V$：接合部パネルの鉄骨ウェブの有効体積，${}_{J}F_{cs}$：接合部パネルのコンクリートのせん断強度，${}_{c}b$，${}_{c}D$：それぞれ RC 柱断面の幅および断面せい，${}_{mC}d$：柱主筋間距離，${}_{sB}d$：鉄骨梁フランジの重心間距離，${}_{sC}d$：柱梁接合部の有効せいで，柱せいとする，F_{c}：柱梁接合部パネルのコンクリートの設計基準強度，${}_{Jw}t$：柱梁接合部パネルの鉄骨ウェブの板厚，${}_{h}t$：ふさぎ板の厚さ，${}_{J}\delta$：接合部係数で十字形では 3，ト形，T 形では 2，L 形では 1，${}_{Js}\sigma_{y}$：柱梁接合部パネルの鉄骨ウェブの材料強度，${}_{h}\sigma_{y}$：ふさぎ板の材料強度，η：ふさぎ板のせん断耐力の低減係数で 0.5 とする。また，接合部終局せん断耐力は柱せん断力に換算した値とする。

5.2 解析変数

実験結果から梁幅を大きくすると最大耐力は上がることが分かるが計算式では梁幅は柱梁接合部の耐力には影響しないため RCS2 と RCS3 で同じ耐力の計算結果となる。

そこで有効幅の検討を行うために，RCS1 と RCS3 の解析モデルを基本として，梁幅を変数としたパラメトリック解析を行った。梁幅と柱幅の関係を**表－４**に示す。

表－４　梁幅と柱幅の関係

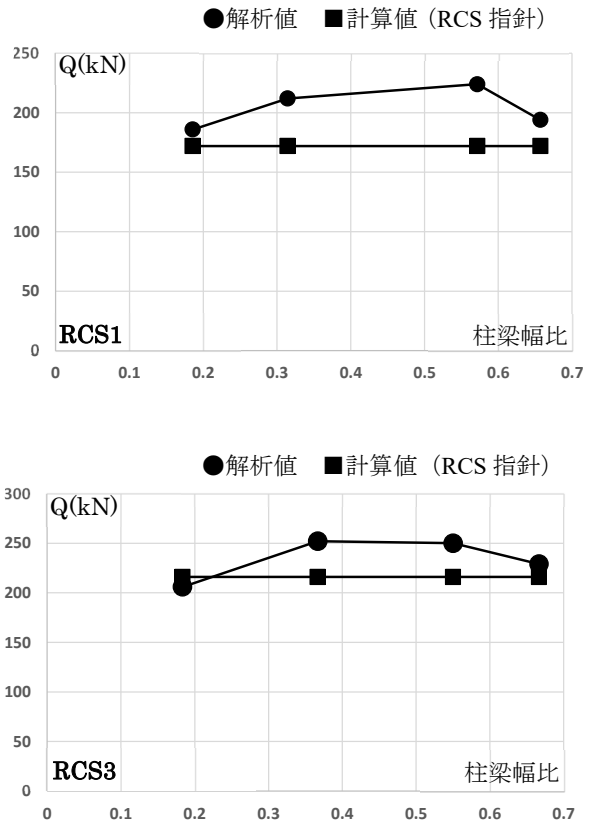
RCS1	柱幅	350mm			
	梁幅	65mm	110mm	200mm	230 mm
	梁幅/柱幅	0.186	0.314	0.571	0.657

RCS3	柱幅	600mm			
	梁幅	110mm	220mm	330mm	400mm
	梁幅/柱幅	0.183	0.367	0.550	0.667

5.3 解析結果

接合部終局せん断耐力計算値（RCS 指針）と解析値最大耐力の比較を**図－９**に示す。なお，接合部終局せん断耐力は解析での柱せん断力と比較する為，柱せん断力換算値とした。縦軸が柱せん断力（kN）で横軸が柱梁幅比（梁幅/柱幅）である。**図—９**の RCS3 のグラフ中の柱梁幅比 0.183（梁幅 110mm）については，RCS2 の結果を載せており，また柱幅比 0.550（梁幅 330mm）の試験体が層間変形角 1.5%で解析が止まってしまったためその試験体のみ 1.5%時の耐力で比較を行った。

図－９をみると RCS 指針による計算値は梁幅が大きくなっても耐力は変わらない。一方，解析値は柱梁幅比が大きくなるにつれて RCS1（柱幅 350mm）の場合，RCS3（柱幅 600mm）の場合，ともに終局せん断耐力は大きくなる傾向がみられたが，柱梁幅比が 0.6 を超えるとどちらの柱幅の場合も終局せん断耐力は低下する結果となった。



図－９　終局せん断耐力の比較

表－５(1)　終局せん断耐力の比較（RCS1）

梁幅/柱幅	0.186 (65 mm)	0.314 (110 mm)	0.571 (200 mm)	0.657 (230 mm)
解析値	186ｋN	212ｋN	224ｋN	194ｋN
計算値 (RCS 指針)	172ｋN			
計算値 (SRC 規準)	184ｋN	192ｋN	208ｋN	213ｋN
解析値/計算値 (RCS 指針)	1.08	1.23	1.30	1.13
解析値/計算値 (SRC 規準)	1.01	1.10	1.08	0.911

（　）内の数値は梁幅

表－５(2)　終局せん断耐力の比較（RCS3）

梁幅/柱幅	0.183 (110 mm)	0.367 (220 mm)	0.550 (330 mm)	0.667 (400 mm)
解析値	206ｋN	252ｋN	250ｋN	229ｋN
計算値 (RCS 指針)	216ｋN			
計算値 (SRC 規準)	235ｋN	255ｋN	274ｋN	287ｋN
解析値/計算値 (RCS 指針)	0.954	1.17	1.16	1.06
解析値/計算値 (SRC 規準)	0.877	0.988	0.912	0.798

（　）内の数値は梁幅

下記に SRC 規準における有効幅を示し，梁が SRC，RC の場合の有効幅(5)式と RCS 指針の有効幅(6)式によるそれぞれでの接合部終局せん断耐力計算値と解析値を**表－５(1)，(2)**に示す。

SRC 規準の有効幅

梁が SRC，RC の場合

$$\frac{{}_{C}b+{}_{B}b}{2} \tag{5}$$

梁が S の場合（RCS 指針）

$$\frac{{}_{C}b}{2} \tag{6}$$

ここに，${}_{C}b$ は柱幅，${}_{B}b$ は梁フランジ幅である。

RCS3 の 330mm の解析値は 1.5%時の耐力である。RCS1 をみると梁幅が 65mm から 200mm まではどちらの有効幅でも安全側に評価されるが SRC 規準のほうが精度がよい。しかし柱幅が 230mm になると SRC 規準では危険側に評価する結果となった。RCS3 をみると SRC 規準ではすべて危険側に評価する結果となった。これは**図－7**で示した RCS2，RCS3 のように柱幅を広くした試験体は解析での耐力が実験値より低く推移する傾向にあり，実際はこれより高い耐力を示すと推察され，RCS1 の場合と同様な推移を示す結果になると考えられる。

6. まとめ

ふさぎ板形式の鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁構造柱梁接合部の有効幅に関する 3 次元有限要素法解析を行い以下の知見を得た。

a) 荷重変形関係は柱幅の大きい RCS2 と RCS3 については解析値の方が低く推移する傾向にあり，今後の検討課題もあるが，3 体とも解析結果は実験結果を概ね評価できた。

b) 柱幅を一定とし，梁幅を大きくすると終局せん断耐力は大きくなる傾向がみられたが，柱梁幅比が 0.6 を超えると終局せん断耐力は低下する。

c) 柱梁幅比が 0.6 を超えるまでは有効幅は RCS 指針ではなく SRC 規準の（柱幅+梁幅）/2 の方が適している。

参考文献

1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート柱・鉄骨梁混合構造設計指針，pp.85-87，2021.2

2) 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－許容応力度設計と保有水平耐力－，pp.154，2014．1

3) 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，pp.163-170，1995.8

4) 出雲淳一，島弘，岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学論文，No.87.9-1， pp.107-120，1987.9

5) 山田一宇，青柳征夫：ひび割れ面におけるせん断伝達，第 2 回ＲＣ構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，日本コンクリート工学協会， JCI-C5，pp.19-26，1983.10

6) 天野修，中村光，檜貝勇，田中浩一：鋼管・コンクリート複合構造橋脚のせん断挙動解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol20，No.3，1998

7) 上原修一：RC 造柱梁接合部補強鋼板の付着強度に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，2019.9

8) 金洸演，米澤健次，野口博：鋼とコンクリートからなる合成構造の付着特性に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，1994.9