

論文 鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部の接合部アスペクト比の変化に伴う接合部せん断挙動

田中 信也^{*1}・林 静雄^{*2}・上村 智彦^{*3}

要旨：接合部アスペクト比（梁せい／柱せい）を変数とした内部梁・柱接合部実験における接合部のせん断挙動について検討を行った。接合部水平せん断入力量が等しい段階で比較した場合、アスペクト比が大きい試験体は通常の試験体よりも梁せん断力が大きくなり、結果として、柱接合部端危険断面における曲げモーメントが増加し、接合部圧縮ストラットの鉛直成分が大きくなり、接合部圧縮ストラットの合力及び圧縮応力度が増加する。従って、接合部の終局強度の算定には、アスペクト比の変化に伴う接合部圧縮ストラットに入力される鉛直成分を考慮する必要があることを指摘した。

キーワード：梁・柱接合部，接合部のアスペクト比，ストラット機構，接合部せん断入力量

1. はじめに

現行の接合部終局強度式は、接合部の破壊時の抵抗機構を接合部圧縮ストラット機構と考えて導かれたものであるが、そのストラットの形状については考慮されていない。筆者等は、接合部アスペクト比（梁せい／柱せい）を変数とした実験を行い、接合部終局強度がアスペクト比に影響されることを前報¹⁾で指摘した。

しかしながら、アスペクト比が増加することによって接合部終局強度が低下した原因については明確に示していない。そこで、本稿では接合部の主たる抵抗機構をストラット機構と仮定し、実験時におけるデータを用いて、アスペクト比の変化に伴う接合部のせん断挙動及び接合部周辺の応力状態の変化について検討を行う。また、3次元弾塑性有限要素法解析を行い、アスペクト比が接合部せん断挙動に及ぼす定性的な影響の把握を試みた。

2. 接合部圧縮ストラットの検討

2.1 検討対象とした試験体

検討対象は、アスペクト比のみを変数とした

十字型試験体 BCJ-1.0 及び BCJ-2.0 であり、試験体名の数字がアスペクト比を表している。表-1 に試験体形状、配筋及び材料特性を示す。梁主筋量は同一であるため、梁主筋降伏時における接合部のせん断入力量 ($V_j = 2 \cdot b \cdot T_s - Q$, $b \cdot T_s$: 梁接合部端危険断面位置の梁主筋の引張合力, Q : 柱せん断力) は、アスペクト比の増加に伴い減少する。これは、梁主筋降伏時の梁せん断力が、梁せいが大きくなることによって増加し、結果、接合部せん断入力量の構成成分である柱せん断力が増加するからである。しかし、実験では BCJ-1.0 が梁曲げ降伏後の接合部破壊型であったのに対して、BCJ-2.0 は接合部破壊が先行した。

2.2 検討方法

図-1 のように接合部への作用外力がストラット機構によって伝達されると考え、実験により測定した梁と柱の主筋の歪みから、接合部圧縮ストラットの応力状態について検討を行う。尚、ここでは、図-1 のように梁及び柱危険断面のコンクリート圧縮ストレスブロックが矩形であるとし、それらで囲まれた部分を接合部圧縮ストラットと考える。

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学 建築物理研究センター 教授 工博 (正会員)

*3 芝浦工業大学 工学部建築学科 教授 工博 (正会員)

表-2 接合部圧縮ストラット成分の各値

試験体名 (比較荷重)	V_j [kN]	P [kN]	C_H [kN]	C_V [kN]	C_S [kN]	a_s [mm]	σ_s [MPa] (σ_s/σ_B)	θ_s [rad]	θ_{sr} [rad]
BCJ-1.0 ※1 (1)	299.8	47.1	250.0	394.7	462.1	103.6	20.8(0.62)	0.90	1.02
BCJ-1.0 最大耐力時 (2)	451.7	58.7	415.9	594.8	725.8	146.1	23.1(0.70)	0.90	0.96
BCJ-2.0 最大耐力時 (3)	292.3	125.5	234.2	530.3	579.7	110.7	24.4(0.73)	1.19	1.16

※1: BCJ-2.0の最大耐力時と等しい接合部せん断入力量に相当するBCJ-1.0の荷重段階

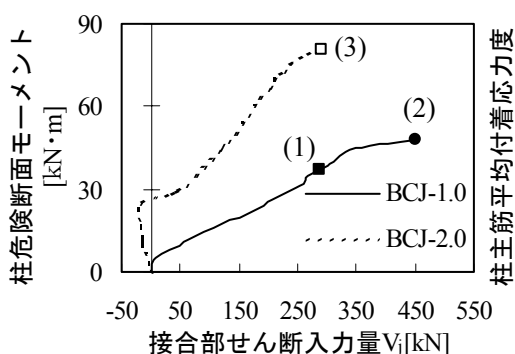


図-2 接合部せん断入力量の変化に伴う柱危険断面のモーメント

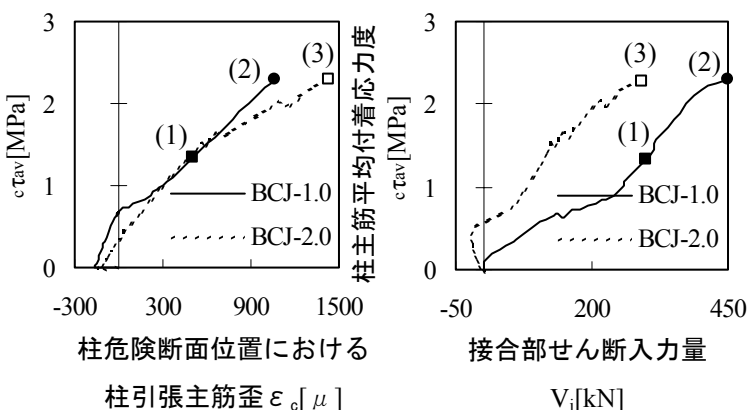


図-3 接合部域柱主筋平均付着応力度

された梁主筋の歪みを用いて算出している。

ストラット形状の角度 (θ_s) とストラット圧縮合力 (θ_{sr}) の角度は、各荷重で概ね一致し、アスペクト比が増加するに伴い柱軸方向に傾く。

最大耐力時で比較した場合、BCJ-1.0の方が水平、鉛直成分共に大きくなる。しかし、ストラット幅については、BCJ-2.0の方が小さい為、ストラット圧縮応力度について顕著な違いは見られない。尚、両試験体共に有効圧縮強度 ($v\sigma_B=21.9$ [MPa]) に達しており、最大耐力時に接合部は圧潰したと考えられる。

次に、接合部せん断入力量が等しい荷重で比較すると、水平成分にアスペクト比の影響は見られないが、鉛直成分についてはBCJ-2.0の方が大きくなる。結果、ストラット圧縮合力は大きくなる。一方、ストラット幅には違いが見られない為、接合部せん断入力量が等しい段階であるにも拘わらず、BCJ-1.0よりもBCJ-2.0のストラット圧縮応力度が大きくなる。

2.4 ストラット鉛直成分

前項の検討結果は、アスペクト比が大きい試験体では、通常の接合部と同一の接合部せん断

入力量でも、ストラット鉛直成分が増加し、接合部圧縮ストラットに入力される力と応力度が大きくなることを意味する。ここでは、ストラット鉛直成分が増大した原因について検討する。

図-2は、接合部せん断入力量の増加に伴う柱危険断面位置の曲げモーメントである。図中には、前項の検討荷重((1)~(3))を示しており、接合部せん断入力量が等しい荷重で比較すれば、BCJ-2.0の方が大きくなる。これは、接合部せん断入力量は、主に梁主筋の引張合力で表現されるが、梁せい及び梁主筋間距離が増加することにより、梁主筋の引張合力が同じ荷重でも梁せん断力が大きくなり、結果、接合部せん断入力量が等しい荷重でも、BCJ-2.0の柱せん断力が大きくなるためである。

図-3に、ストラット鉛直成分の構成力である柱主筋の接合部域における平均付着応力度の実験値を最大耐力時まで示す。接合部せん断入力量が等しい荷重で比較すれば、BCJ-2.0の方が柱危険断面のモーメントが大きいので、柱断面は中子筋の有無を除いて共通であることを考慮すれば、柱危険断面位置における柱引張側主筋

の歪みが大きくなる。本実験では、接合部せん断入力量が等しい荷重では、BCJ-2.0の平均付着応力度が大きくなったが、柱付け根のコンクリート圧縮合力は、BCJ-2.0の方が大きくなる。

従って、同一の接合部せん断入力量でも、アスペクト比の増加に伴い鉛直成分が増加する原因は、柱危険断面のモーメントの増大とそれに伴うストラット鉛直成分の構成力の増加であると考えられる。

3.3 次元有限要素法による解析

3.1 解析概要

ここでは3次元有限要素法による解析を行い、前項までに示したような、アスペクト比の変化に伴う接合部への影響が見られるか検討を行う。

コンクリートは、非適合要素を有する8節点アイソパラメトリック要素³⁾で、応力-歪み関係は、かぶり、コア共に、圧縮域は非線形、最大耐力域以降の軟化域及び引張域は線形である。鉄筋は1次元の線材要素で、応力-歪み関係はbi-linear型である。鉄筋の材料特性は表-1に示す通りで、2次剛性については、1次剛性の1/100とした。コンクリートの材料定数については表-3に示す。柱主筋及び梁主筋とコンクリートの付着はボンドリンクを用い、付着応力-すべり関係をbi-linear型、直交方向の剛性を剛とした。

図-4には要素分割及び座標軸を示しており、以降の座標軸はこれに従う。部材寸法は実験と同様である。柱頭・柱脚の中央1列の節点のZ方向及びX方向を拘束した。数値計算上の問題からY方向についても1点拘束した。加力は柱頭に荷重制御で軸力294[kN]を加え、次に変位制御で梁端に強制変位を与えた。

3.2 梁せん断力-層間部材角関係

図-5に、実験及び解析における梁せん断力(P)-層間部材角(R)曲線と、諸現象発生位置を示す。初期性状は解析と実験結果が概ね対応したが、ひび割れ発生以降については、解析値の剛性が高くなる。これは、梁主筋に高強度鉄筋を使用したために、層間変形に占める梁

主筋の接合部域からの抜け出しによる変形の割合が大きいことが原因と考えられ、解析での付着-滑り関係が適切でなかったと考えられる。解析におけるBCJ-1.0の破壊形式は、梁主筋が降伏歪みに達すると同時に梁付け根が圧潰したが、その後接合部内要素に圧潰は生じなかった。一方、BCJ-2.0は、接合部内の要素は圧潰せず、柱及び梁付け根の要素が圧潰した。

そこで、検討範囲を荷重-層間部材角関係や鉄筋の歪みが実験と概ね対応し、要素が圧潰し

表-3 コンクリートの材料特性

コンクリート	圧縮強度	終局強度	引張強度
	σ_B [MPa]	σ_u [MPa]	σ_t [MPa]
	-33.2	-3.32	2.67
ヤング係数	圧縮強度	終局強度	ポアソン
E_c [MPa]	時歪 ϵ_c	時歪 ϵ_u	比 ν
2.55×10^4	-0.0023	-0.213	0.183

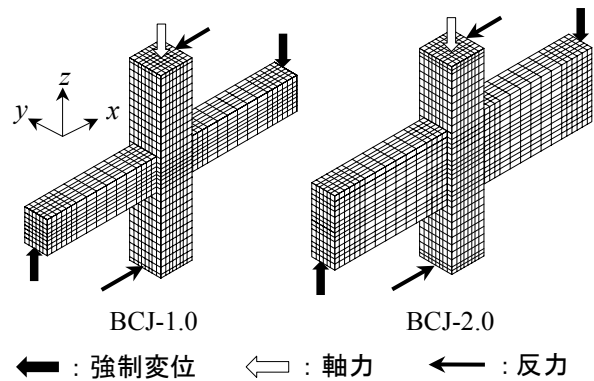


図-4 要素分割図

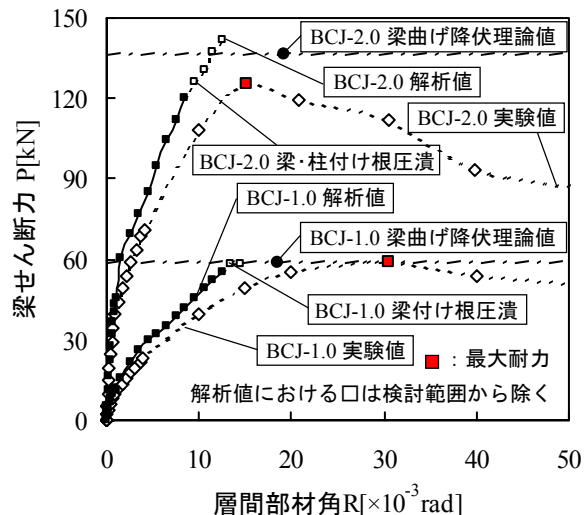


図-5 梁せん断力-層間部材角曲線

ていない図-5に示す範囲に限定し、接合部の力学的挙動に関する定性的性質の把握を試みる。

3.3 接合部内の応力状態

図-6は、接合部内(Y=125[mm])のXZ断面においてX方向1列の要素(Z=700[mm])を取り出し、要素の最小主応力(σ_3)分布を示したものである。比較に関しては、両試験体の接合部せん断入力量が概ね等しい段階で行っている。ここでの接合部せん断入力量は、接合部内のXY断面(Z=700[mm])のせん断応力を積分し算出している。アスペクト比の大きいBCJ-2.0の方が、中央の要素における最小主応力度が小さい。従って、BCJ-2.0に接合部内の要素に圧潰は生じなかったが、接合部圧縮ストラットの応力度は、BCJ-2.0の方が大きくなると考えられる。

3.4 接合部に入力される力

接合部の主たるせん断抵抗機構をストラット機構と考え、接合部内要素の最小主応力分布は、梁、柱危険断面の圧縮域から接合部に入力されるコンクリート合力の影響を受けると考えられる。ここでは、梁と柱から入力されるコンクリート合力を接合部圧縮ストラット機構の水平、鉛直成分と考え、以下の方法で算出した。水平成分(C_H): 図-7に示す梁危険断面位置の

要素のX軸方向応力(σ_x)を積分し左右の梁で平均化。

鉛直成分(C_V): 図-7に示す柱危険断面位置の要素のZ軸方向応力(σ_z)を積分し上下の柱で平均化。

ストラット合力(C_S): $\sqrt{C_H^2 + C_V^2}$
尚、ここでは水平成分については柱せん断力、鉛直成分については梁せん断力を減じていない。

ストラット成分の算出結果を図-8に示す。水平、鉛直成分とも接合部せん断入力量が小さい段階では違いが見られない。しかし、接合部

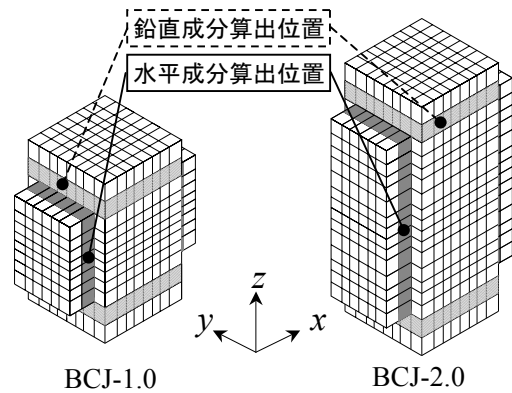
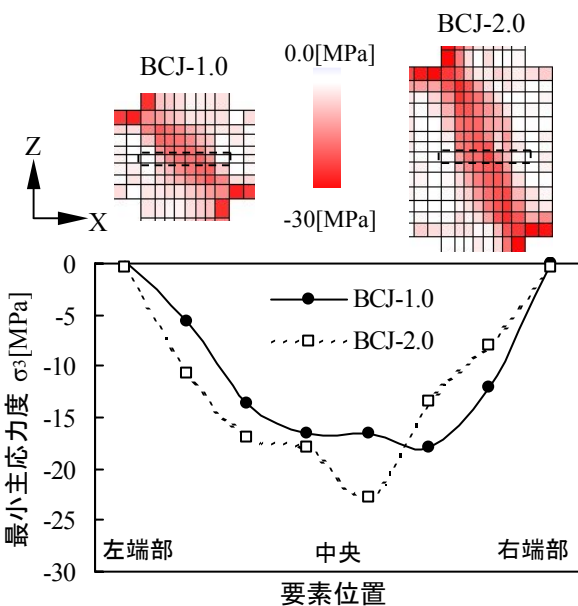


図-7 ストラット成分算出位置



BCJ-1.0($V_j=294.5$ [kN], $P=42.2$ [kN])
BCJ-2.0($V_j=282.5$ [kN], $P=120.3$ [kN])

図-6 接合部内最小主応力 σ_3 分布

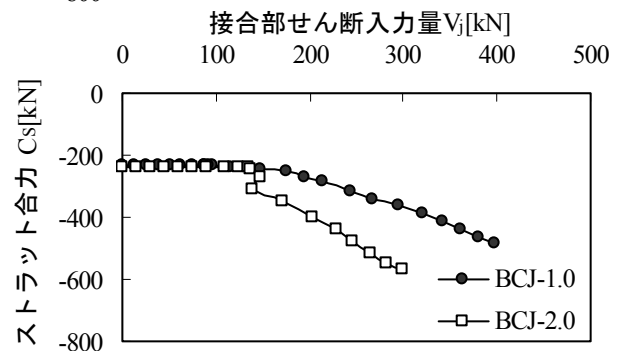
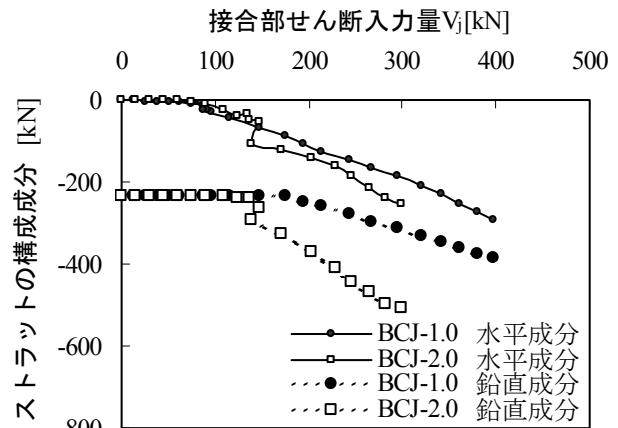


図-8 解析から算出した接合部圧縮ストラット成分と合力

せん断入力量が 150[kN]程度から、両成分ともに BCJ-2.0 の方が大きくなり、特に鉛直成分では違いが顕著である。従って、実験でアスペクト比が大きい試験体の接合部破壊が先行した原因は、接合部圧縮ストラットの鉛直成分の増加に伴う接合部ストラット圧縮応力度の増加であると考えられる。

4. アスペクト比の変化に伴うストラット機構

前報¹⁾では以下の接合部(式(1))と柱(式(2))の終局強度式を用いて接合部終局強度の評価を試みた。適用結果を表-4に示す。

$$V_{ju}=1.56 \times \sigma_B^{0.712} \cdot b_j \cdot D_j \quad (1)$$

$$V_{ju} = \left\{ \frac{0.092 k_u \cdot k_p \cdot (\sigma_B + 18)}{M/Qd + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot w \sigma_y} + 0.1 \sigma_0 \right\} D_c \cdot b_c \quad (2)$$

ここで、 k_u ：断面形状による補正係数、 D_c, b_c ：柱せいと柱幅、 p_w ：せん断補強筋比、 k_p ：引張鉄筋比(p_t)による補正係数、 M/Qd ：せん断スパン比(= $j_b/2d$)、 j_b ：梁主筋間距離、 d ：柱有効せい、 $w \sigma_y$ ：せん断補強筋降伏強度、 σ_0 ：軸応力度。

アスペクト比が大きい試験体の接合部耐力は式(1)では評価できなかったが、式(2)を適用すると良い対応が見られた。ここで、式(1)は接合部せん断強度式であるが⁴⁾、柱から入力される鉛直方向の力については考慮していない。

一方、式(2)は柱のせん断強度式であるが⁵⁾、第1項のコンクリートが負担するせん断力については、せん断スパン比の増加に伴い低下する式である。これは、せん断スパン比の増加に伴い、同じせん断力でも部材端の曲げモーメント及び圧縮域の応力度が増加することを考慮したものであり、前項までの検討結果を踏まえれば、これがアスペクト比の大きい試験体の接合部耐力を評価できた理由であると考えられる。

表-4 接合部耐力の計算式と実験値との比較

試験体	実験値 V_j [kN]	計算式(1)	計算式(2)
BCJ-1.0	451.7	520.6(1.16)	567.6(1.26)
BCJ-2.0	292.3	520.6(1.78)	308.7(1.06)

5. まとめ

実験時に測定された梁と柱主筋の歪みを用いたマクロモデルと3次元弾塑性有限要素法解析を用いた検討から以下の知見を得た。

- 1) 接合部せん断入力量が等しい段階で比較すると、アスペクト比が大きい試験体の接合部圧縮ストラットの応力度が大きくなる。これは、アスペクト比の増加に伴う接合部圧縮ストラットの鉛直成分の増加が原因であった。
- 2) アスペクト比が変化する場合の接合部終局強度は従来の接合部せん断入力量では評価できないと考えられる。接合部終局強度は、ストラットに作用する水平、鉛直成分を評価できる表現式とされるべきであると考えられる。

謝辞

本研究は、東京工業大学物理研究センターとの共同研究であり、又、本研究の一部として、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究(c)(2)、研究代表者 上村智彦)の援助を得ました。

参考文献

- 1) 田中信也, 上村智彦, ほか: 鉄筋コンクリート造内部梁・柱接合部の破壊性状への接合部アスペクト比の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.433-438, 2004.7.
- 2) 上村智彦, ほか: 鉄筋コンクリート内部梁・柱接合部の終局強度に関する研究(その4)破壊機構の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造II, pp.125~126, 1986.8
- 3) Bathe et al. 「On Three-Dimensional Nonlinear Analysis Of Concrete Structures」 Nuclear Engineering and Design pp.385~409 1979
- 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(案)・同解説, 1997.7
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1999.11