

論文 立体破壊面を考慮した鉄筋コンクリート立体十字形柱梁接合部の 45 度方向耐力

堀田 久人*1・小沼 賢太*2

要旨：筆者らは既報において立体十字形柱梁接合部 45 度方向耐力に関し、接合部内で柱梁間の曲げ破壊と梁間のねじりによるすべり破壊が生じる破壊機構及び耐力算定法を示した。ただし、ねじりについては仮定が多いため、本研究では円形コンクリート断面のねじり耐力とせん断性状を実験的に検討すると共に、既報の破壊機構を呈するように計画された立体接合部の水平 45 度方向加力実験を行い、履歴性状を検討した。実験の結果、圧縮軸力下又は鉄筋を有する場合、比較的延性的なねじり性状を示すこと、及び立体接合部では梁曲げ耐力を発揮するものの、梁と接合部の塑性変形が同程度に進行する破壊性状を示すことを明らかにした。

キーワード：鉄筋コンクリート、ねじり耐力、十字形柱梁接合部、終局耐力、二方向加力、直交梁

1. はじめに

鉄筋コンクリート造平面十字形柱梁接合部において柱梁曲げ耐力比が 1 に近い場合、接合部が梁に先行して曲げ降伏する可能性がある指摘されている¹⁾²⁾。直交二方向から梁が取り付く立体接合部が水平 45 度方向加力を受ける際にも同様の懸念がある。筆者らは既報³⁾において柱・梁が同径の正方形断面を有する立体接合部の水平 45 度方向加力時の破壊機構を示すと共に耐力を検討した。以下に筆者らが提案した破壊機構の概要を述べる。

図-1 に示すような立体接合部が水平 45 度方向加力を受けて終局状態を迎えるときの破壊面は、上下の柱と 4 本の梁の対称性から図-2 に示すように立方体の接合部を接合部の中心を頂点とする四角錐で分割したときの断面に定まる。尚、図-2 では柱と梁の対称性を考慮して梁 A-1・梁 B-1・柱 C-2 のみ示している。接合部内部において柱梁間の断面では $T_1 \sim T_9$ で示す柱主筋応力、 $T_{b1} \cdot T_{b2}$ で示す梁主筋応力、 $C_1 \cdot C_2$ で示すコンクリート応力等が釣り合い、かつ曲げ降伏する楠原ら¹⁾²⁾が指摘したものと同様な曲げ破壊が生じる。また、せん断力 Q_0 の向きが異なる梁間、例えば図-2 中に M_{jt} と q を記した梁 A-1・梁 B-1 間の断面ではねじりによるすべり破壊が生じる。 M_{jt} 及び q は破壊面に作用するねじりモーメント及びせん断力を示し、図-3 のように破壊面上の接合部中心からある距離を離れた位置を回転中心として回転中心回りに一様なコンクリートせん断応力度 τ_u が生じると仮定し算出している。本研究では平面接合部の接合部曲げ降伏に対し、同様の曲げ破壊に加えてねじり破壊を併発する立体接合部の破壊形式を接合部降伏と呼ぶ。接合部終局耐力は、曲げ破壊による耐力とねじり破壊による耐力の和として求められる。尚、具体的な耐力の算定過程については文献³⁾に示されているので

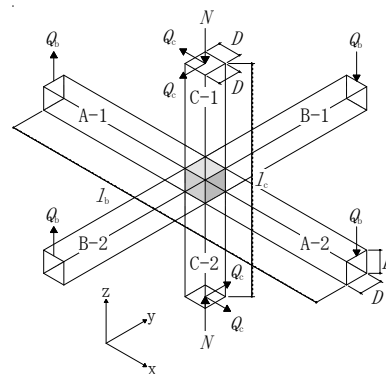


図-1 柱梁接合部全体図

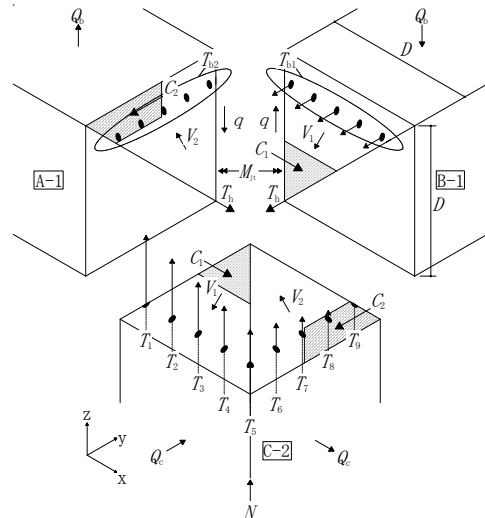


図-2 立体接合部分割図

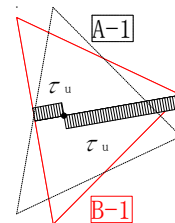


図-3 梁 B-1 上で回転中心回りに一様に作用するせん断応力度 τ_u

*1 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院建築学系建築学コース准教授 工博 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 環境・社会理工学院建築学系建築学コース

参照されたい。

ただし、上述のねじり耐力に関する仮定はまさに仮定であり、コンクリートがねじりを受ける際の局所的な断面でのねじり性状や耐力は実験的にも十分に把握されていない。

本研究では局所的な断面での基本的なねじり性状や耐力を把握することを目的として薄い円筒形コンクリートを対象としたねじり実験を行うと共に、立体十字形柱梁接合部を対象とした水平 45 度方向加力実験を行い接合部の履歴性状及び終局耐力について検討した。

2. 円筒形コンクリートのねじり実験

2.1 実験概要

(1) 試験体概要

表—1 に試験体諸元を示す。本実験では、円筒部高さ、軸力及び鉄筋の有無を実験変数としてねじり実験を行った。円筒部高さは 1 mm, 4 mm, 12mm の 3 種類を設定した。試験体の作製は 2 回に分けて行い、1 回目は鉄筋無しで 1 mm のものを 3 体、4 mm のものを 2 体、12mm のものを 2 体、2 回目は鉄筋無しで 1 mm のものを 3 体、鉄筋有りで 1 mm のものを 3 体の総計 13 体作製した。軸力はコンクリートのみの断面を考慮し、軸力比で 0%, 10%, 20% の 3 種類を設定した。尚、軸力比は 28 日強度に基づいて算定している。図—4 に試験部である円筒部及びブロック部の形状と配筋を示す。試験体は一体で打設した中央の円筒部と上下 2 つのブロックから成る。円筒部の断面寸法は外径 80mm で全試験体共通とし、中央に軸力導入のための PC 鋼棒を通す穴 (19φ) が貫通している。ブロックの断面寸法は上下で等しく 200mm×200mm とし、試験体全長は 500mm で全試験体共通とし

表—1 試験体諸元

試験体名	円筒部高さ	軸力比(軸力)	鉄筋の有無
C0T1	1[mm]	0%(0[kN], 0[kN])	無
C10T1		10%(15.6, 14.9[kN])	
C20T1		20%(31.2, 29.8[kN])	
C10T4	4[mm]	10%(15.6[kN])	
C20T4		20%(31.2[kN])	
C0T12	12[mm]	0%(0[kN])	
C20T12		20%(31.2[kN])	
RC0T1	1[mm]	0%(0[kN])	有
RC10T1		10%(14.9[kN])	
RC20T1		20%(29.8[kN])	

表—2 コンクリート性状

	材齢	養生	圧縮強度	割裂強度	ヤング率
			[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN/mm ²]
1回目	28日	気中	33	3.2	29.7
	34日		34.3	2.8	-
2回目	28日	気中	31.5	2.9	27.8
	31日		34.8	2.6	-

表—3 鉄筋性状

	降伏応力	引張強さ	ヤング率
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[kN/mm ²]
D6	386	509	187

た。鉄筋の配筋については、円筒部に長さ 250mm の D6 を 4 本通し、上下のブロックで直線定着させた。表—2 にコンクリートの、表—3 に鉄筋の材料特性を示す。

(2) 載荷方法及び変位測定方法

図—5 に試験体及び周辺装置外形を示す。試験体は下ブロックを加力装置に固定し、上ブロック対面に取り付けた 2 本のピンをオイルジャッキによって互いに水平逆方向に引っ張ることで円筒部にトルクを加えた。また、上ブロック上面のセンターホールジャッキにより試験体軸部の穴に通した PC 鋼棒を介して下ブロックを引っ張ることで軸力を加えた。円筒部の回転方向の変形は、ブロック 4 面に埋め込んだ変位測定用端子に変位計を取り付けることで計測した。

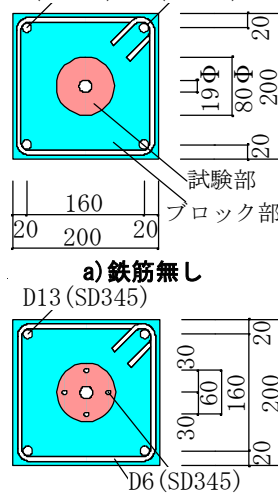
2.2 実験結果及び考察

図—6 に各試験体のトルク—回転角関係を示す。縦軸には円の中心回りに一様なせん断応力度が生じるとして算定したせん断応力度 τ を併記している。鉄筋無しの試験体のトルクは、最大トルクに至りコンクリートがせん断破壊した後徐々に低下した。各試験体の最大トルクを比較すると、円筒部の高さが低いほど、また軸力比が大きいほど値が大きくなった。鉄筋有りの試験体のトルクは回転が進みコンクリートがせん断破壊した後も耐力を維持し続けるという安定した履歴性状を示した。

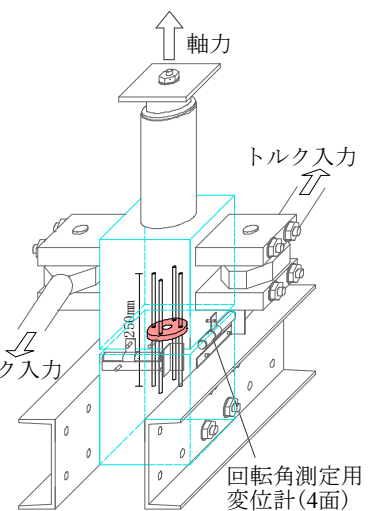
円筒部高さ 1mm で鉄筋無しの試験体は 2 回同様の実験を行っており、試験時のコンクリート強度に若干の差があるものの、両ねじり挙動は図—6 に示すように極めて近くばらつきが小さい結果になった。

各試験体の最大トルク時における τ とコンクリート強度 σ_B の比 τ/σ_B は、円筒部高さが 1mm、軸力比が 20% の試験体で鉄筋を有しない場合で 0.35、鉄筋を有する場合で 0.51 程度である。

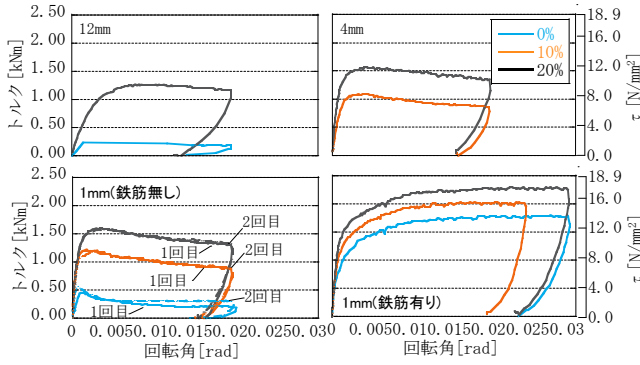
図—4 試験部(円筒部)及びブロック部の形状と配筋



図—4 試験部(円筒部)及びブロック部の形状と配筋



図—5 試験体及び周辺装置外形



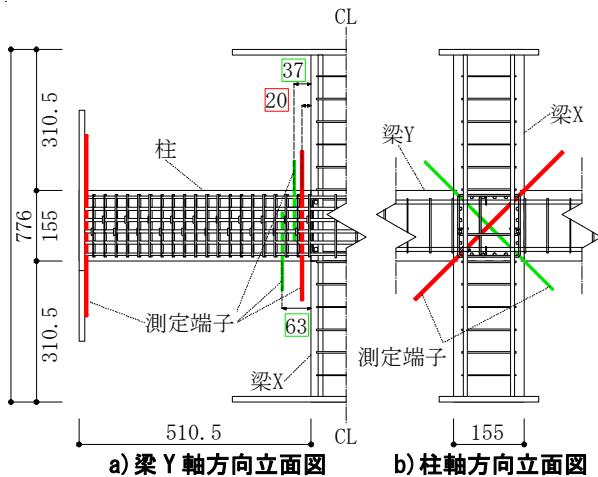
図—6 トルク—回転角関係

3. 立体十字形柱梁接合部の水平 45 度方向加力実験

3.1 実験概要

(1) 試験体概要

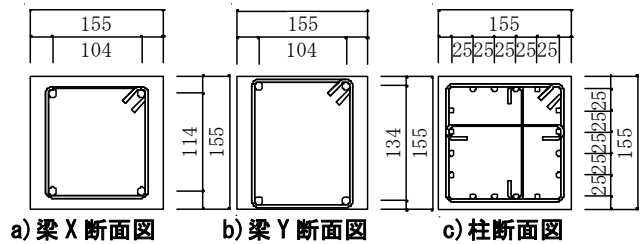
表—4 に試験体諸元を、図—7 に試験体配筋及び寸法を、図—8 に試験体断面詳細を示す。試験体数は 2 体で、試験体寸法と配筋は 2 体で共通とし、コンクリート強度のみが異なっている。梁と柱の断面寸法は共に 155mm×155mm とした。梁の配筋は、主筋には D10 を 4 本配し、せん断補強筋には 3φ を 50mm 間隔で配した。尚、梁主筋は柱梁接合部内での干渉を避けるために二方向で主筋間距離を変え、狭い方を梁 X、広い方を梁 Y とした。柱の配筋は、主筋には D6 を 16 本配し、せん断補強筋には 3φ を 25mm 間隔で配した。梁と柱の主筋は共に接合部



図—7 試験体配筋及び寸法

内で通し配筋とし、端部のエンドプレートに溶接することで定着させた。接合部せん断補強筋には 3φ を配した。また、図中赤あるいは緑で示す変位測定用端子を、柱危険断面から 20mm, 37mm, 63mm それぞれ離れた位置と、柱コンクリート端部に埋め込んだ。赤で示した端子は本節(3)で後述する紫、橙、青の治具を渡すための、緑の端子は緑の治具を固定するためのものである。表—4 の接合部せん断余裕度を示すように、両試験体で接合部せん断破壊を許容せず、また、柱導入軸力を変えることで両試験体の柱梁耐力比が同等となるようにした。表—5 に使用した鉄筋の材料特性を示す。

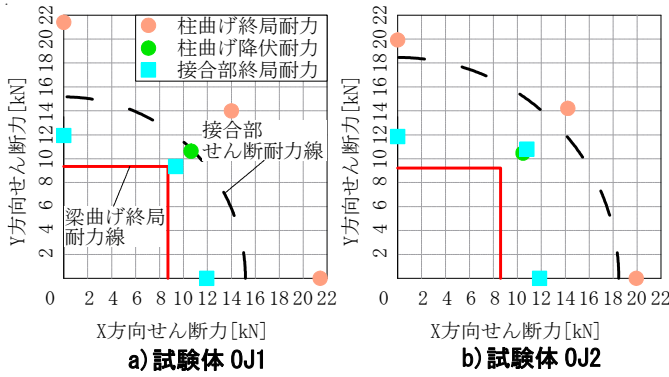
図—9 に表—4、表—5 に示した材料強度及び導入軸力より算定した各試験体の二軸耐力関係を示す。黒破線が接合部せん断耐力、赤線が梁曲げ終局耐力、橙点が柱曲げ終局耐力、緑点が柱曲げ降伏耐力、青点が接合部終局耐力を示している。0 度方向加力時の接合部せん断耐力は X、Y 両方向の梁の主筋間距離の平均値を用いて靱性指針⁴⁾の設計式より算出し、45 度方向加力時の接合部せん断耐力は 0 度方向加力時の耐力と同等とした。梁曲げ終局耐力と 0 度方向加力時の柱曲げ終局耐力は靱性指針⁴⁾の略算式を基に算出した。45 度方向加力時の柱曲げ終局耐力は累加強度理論により、降伏耐力は平面保持を仮定とした断面解析により算出した。尚、降伏耐力は 1 段目主筋が降伏したときの値とした。コンクリートの応力度-ひずみ関係は降伏ひずみ 0.2% の放物線とし、鉄筋の応力度-ひずみ関係は降伏後完全塑性型のバイリニアモデルとした。0 度方向加力時の接合部曲げ降伏耐力は文献 2) に基づき算出した。45 度方向加力時の接合部降伏耐力は文献 3) に基づき算出した。その際、接合部内



図—8 試験体断面詳細

表—4 試験体諸元

試験体名		OJ1	OJ2
コンクリート強度		29.79[N/mm ²]	39.46[N/mm ²]
梁	幅×せい	155×155[mm]	
	梁主筋X/Y	2-D10(SD390), $p_t=0.68\%/0.64\%$	
	せん断補強筋	2-3φ@50, $p_w=0.18\%$	
柱	幅×せい	155×155[mm]	
	柱主筋	16-D6(SD390), $p_g=2.11\%$	
	せん断補強筋	3-3φ@25, $p_w=0.36\%$	
接合部	せん断補強筋	2-3φ, 2組	
柱圧縮軸力(軸力比)		71.6[kN](0.10)	52.4[kN](0.055)
接合部せん断余裕度(45度方向加力時・X, Y方向)		1.23, 1.15	1.52, 1.41
柱梁耐力比(45度方向加力時・X, Y方向)		1.61, 1.50	1.65, 1.54



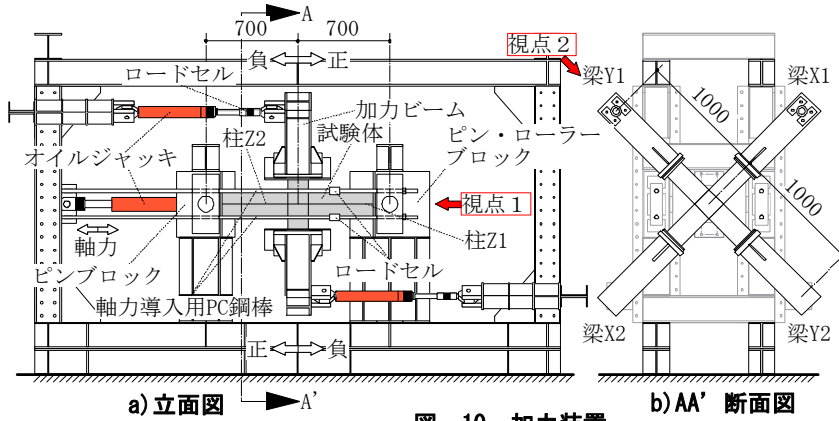
図—9 各試験体の二軸耐力関係

表—5 鉄筋性状

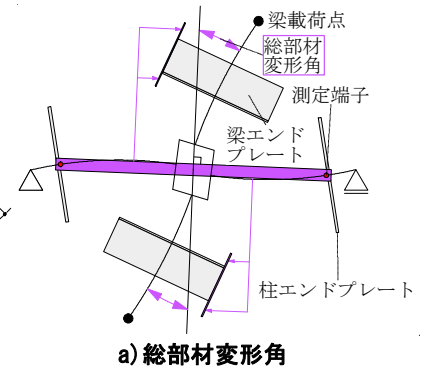
試験体	鉄筋	降伏応力 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	ヤング率 [kN/mm ²]
OJ1	D10(SD390)	465	643	198
	D6(SD390)	447	611	211
	3Φ	584	636	202
OJ2	D10(SD390)	459	635	197
	D6(SD390)	442	612	197
	3Φ	585	618	207

表—6 制御変形角

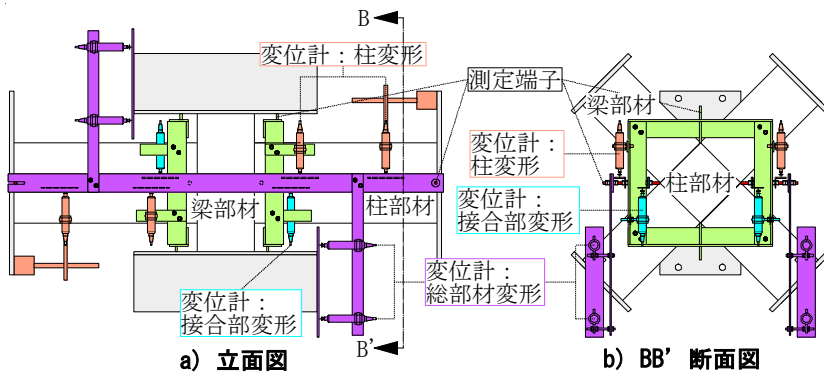
試験体OJ1	±3/400, ±3/200, ±3/100, +3/50
試験体OJ2	±3/400, ±3/200, ±3/100, ±3/50



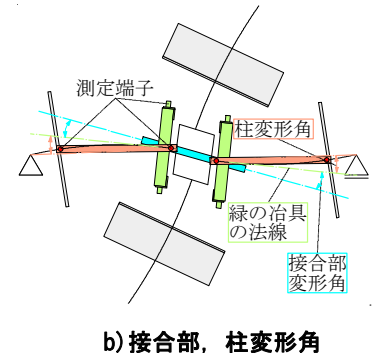
図—10 加力装置



a) 総部材変形角



図—11 変位測定装置



b) 接合部、柱変形角

図—12 変形模式図

の梁間ですべり破壊が生じるときのコンクリートせん断強度は、本報2章のねじり実験の結果に基づきコンクリート圧縮強度の0.5倍になると仮定しているが、実際の倍率が0.5より小さいときは梁曲げ降伏に先行して接合部破壊が生じる可能性のある計画となっている。

(2) 載荷方法

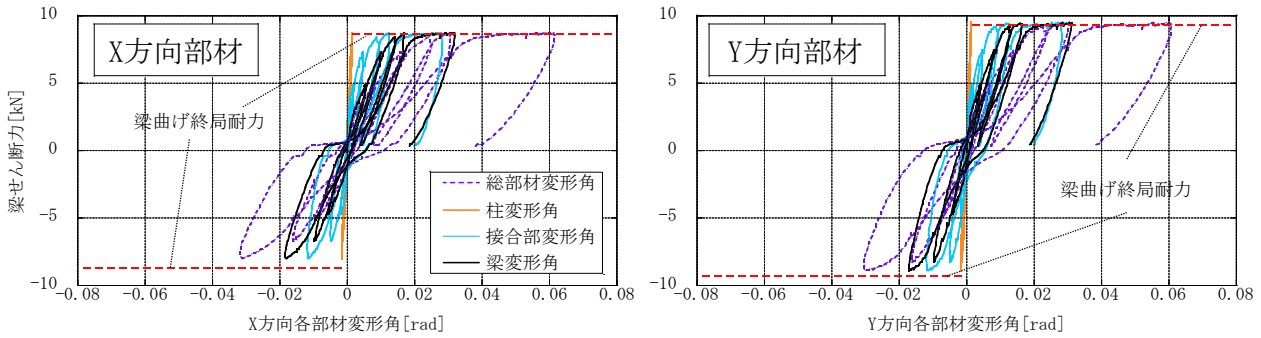
図—10に加力装置を示す。試験体は柱を水平にして、45度方向に傾けて設置した。図に示すように、2本の柱を柱Z1、柱Z2とし4本の梁は梁X1、梁X2、梁Y1、梁Y2とする。柱Z1と柱Z2の端部はそれぞれピンローラーブロックとピンブロックに固定されている。載荷は梁端部に取り付けた4本の加力ビームを介してオイルジャッキにより水平力を加えて行った。梁に取り付けたオイルジャッキの加力方向は、正加力時には押し、負加力時には引きとなるようにし、4箇所ある梁端部での変位が

等しくなるように制御しながら荷重を加えた。また柱部材には、ピンローラーブロック・ピンブロック間にPC鋼棒を通しピンブロックに設置したオイルジャッキによりピンローラーブロックのローラー部を引っ張ることで一定軸力を加えた。反曲点間距離は柱方向が1400mm、梁方向が2000mmである。梁のせん断力は各オイルジャッキに取り付けたロードセルにより、柱の軸力は軸力導入用PC鋼棒に取り付けたロードセルにより測定した。

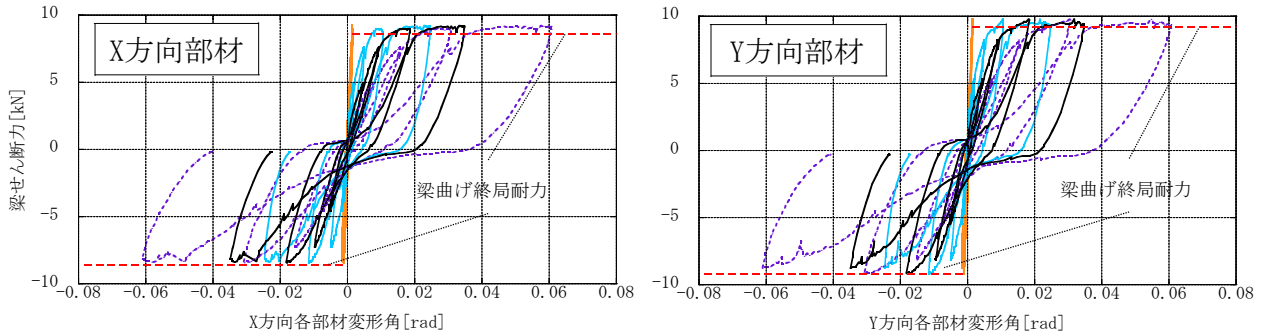
(3) 載加計画及び変位測定方法

表—6に各試験体の制御変形角を示す。加力はX、Y方向の総部材角が常に等しくなるように、二方向静的繰り返し載荷を行った。図—11に変位測定装置を、図—12に変形模式図を示す。

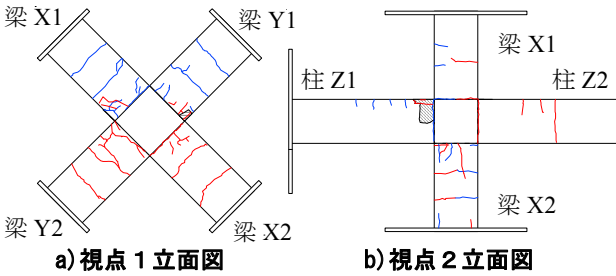
総部材変形角は図中に紫で示した治具に取り付けた変位計を用いて各梁のコンクリート端部の変位と回転角を



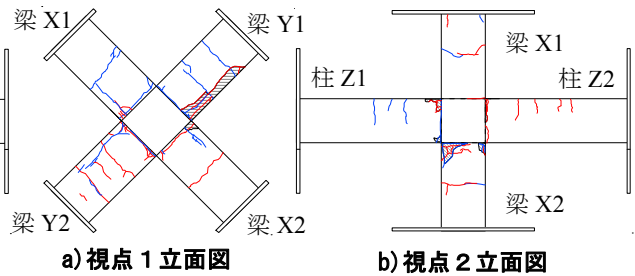
図—13 試験体 OJ1 梁せん断力—各部材変形角関係



図—14 試験体 OJ2 梁せん断力—各部材変形角関係



図—15 試験体 OJ1 ひび割れ図



図—16 試験体 OJ2 ひび割れ図

計測し、梁加力ビームを剛体として X, Y 方向それぞれの梁載荷点の変位を算出することで求めた。ただし、紫の治具は柱 Z1, Z2 のコンクリート端部に埋め込んだ測定端子用間を繋いでおり、柱コンクリート端部からピンブロック軸部の中心（柱の反曲点）までの距離は考慮していない。

柱変形角は図中の橙の治具に対する、緑の治具及び柱エンドプレートの回転角をそれぞれ計測し、ピンブロックを剛体として補正した柱反曲点の変位を算出することで求めた。また、接合部変形角は青の治具に対する緑の治具の回転角を計測して求めた。ただし、緑の治具は接合部近傍の柱に埋め込んだ鉛直の端子で固定されており、橙の治具は柱コンクリート端部の端子と接合部近傍の水平の端子間、青の治具は接合部近傍の水平端子間を繋いでいる。また、接合部近傍の水平向きの端子は、(1) 試験体概要で述べたように柱危険断面から 20mm 離れているため、柱変形角の一部が接合部変形角として計測されている。梁変形角は総部材変形角から柱変形角と接合部変形角を差し引くことで算出した。

3.2 実験結果

(1) 履歴性状及び各部材変形角の割合

図—13 と 図—14 に各試験体の X, Y 方向の梁せん断力—各部材変形角関係を示す。紫破線が総部材変形角、橙実線が柱変形角、青実線が接合部変形角、黒実線が梁変形角を示し、赤破線が梁曲げ終局耐力線を示している。

両試験体の履歴性状は +3/100 のループまで安定した紡錘型だったが、同ループ負加力時からスリップ型となった。梁せん断力は OJ1 で正加力時に、OJ2 で正、負加力時共に梁曲げ終局耐力計算値に達しており、梁曲げ終局耐力を発揮した。また、OJ2 では、-3/100 のループの最大変形時から -3/50 のループの最大変形時にかけて X, Y 方向でそれぞれ 3.9%, 3.3% の耐力低下が生じており、これは後述する梁の接合部近傍におけるコンクリートの圧壊によるものである。

両試験体の総部材変形角に占める各部材変形角の大きさは、OJ1 で +3/100, OJ2 で +3/200 のループから X, Y 方向共に接合部変形角が増大し始め、最終ループでは梁と同程度まで増大した。梁変形角の占める割合を両試

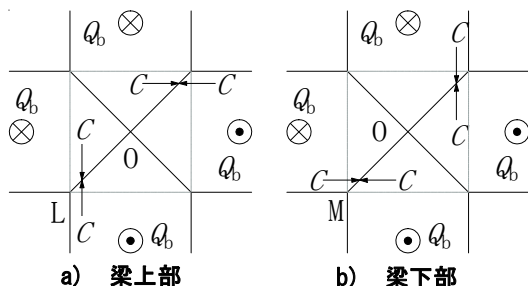
験体と比較すると OJ2 の方が大きいものの、梁の曲げ降伏変位が増大すると共に接合部変形も増大していることから、両試験体において梁の曲げ降伏と同時に、接合部降伏が生じているものと考えられる。

(2) ひび割れ状況

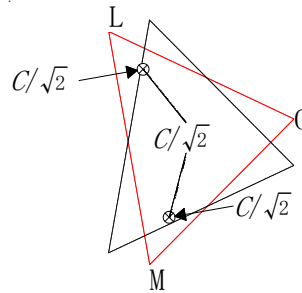
図—15 と図—16 に各試験体の最終ループにおける最大変形時のひび割れ図を示す。ひびの入り方の傾向の類似性を考慮して、代表して図—10 中の視点 1 及び視点 2 から見た立面図を示している。図中の赤線は正加力時、青線は負加力時に入ったひびを示しており、斜線の入った領域はコンクリートが剥離した領域を示している。

両試験体の接合部入隅部において柱と梁の両方でコンクリートの圧壊に伴うひび割れが生じ、特に OJ2 の 2 つの柱ではコンクリートの剥離も生じた。しかし、45 度方向加力時の柱曲げ終局耐力は図—9 に示すように梁曲げ終局耐力に対して十分大きいこと、断面解析によれば柱の塑性化がそれほど進行していないことから、計測される接合部変形角に含まれる柱変形角はそれほど大きくないものと考えられる。

図—16 a) に示すように試験体 OJ2 の各梁危険断面近傍において、赤線あるいは青線で示すような、コンクリートの圧壊に伴う材軸に沿ったひび割れが生じ、梁 Y1 では斜線で示すような広範囲にわたるコンクリートの剥離が生じた。また、図—15 a) に示すように OJ1 の梁 X1、梁 X2、梁 Y1 の危険断面近傍においても、OJ2 と同様のひび割れが生じた。こうしたコンクリートの圧壊が生じた領域は、図—2 中に示した梁 A—1 上の C_2 と反対側の領域であることから、梁 X1—梁 Y2 間、梁 Y1—梁 X2 間といったせん断力の向きが異なる梁間において、図—17 及び図—18 に示すようなコンクリート圧縮応力 C が作用していると推測できる。図—17 には梁上部、梁下部における内力のやりとりと、梁せん断力 Q_b の作用方向が紙面に対し上向き（記号⊙）か下向き（記号⊗）かを示し、図—18 には図—17 で示した内力を断面 OLM に平行な成分と垂直な成分に分解したものを示す。断面内の偶力によるモーメントは図—2 で示した M_{jt} や q による接合部中心回りのモーメントに相当し、断面に垂直な内力は梁間に作用する軸力に相当することから、せん断力の



図—17 接合部内の梁間に作用するコンクリート応力



図—18 断面 OLM に作用する内力

向きが互いに異なる梁間では梁同士の押し合いと、文献 3) や本報 1 章で述べたようなねじりを伴うすべり降伏が生じている可能性があり、両試験体は提案に沿った破壊機構を呈したものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、薄い円筒型コンクリートを対象にねじり実験を行うと共に立体十字形柱梁接合部 2 体を対象に水平 45 度方向加力実験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 円筒型コンクリート部材のねじり性状は無筋でも軸力を導入することで耐力の低下が緩やかになり、鉄筋を入れることで耐力は低下しなくなった。最大耐力から円形断面に作用するせん断応力度を推定した結果、 τ/σ_B の最大値は無筋で円筒部高さ 1 mm、軸力比 20% のときで 0.35 となった。
- 2) 水平 45 度方向加力時の柱梁耐力比が 1.5~1.65 になるよう計画した両試験体において接合部せん断余裕度が 1 より大きいにも関わらず、梁曲げ耐力を發揮した後、耐力を維持したまま接合部変位が梁と同程度まで進行した。また、梁のコンクリートの圧壊は、梁—梁間でねじりが生じていることを示しており、耐力に関してはさらに検討を要するものの、接合部は提案する破壊機構を呈したものと考えられる。

参考文献

- 1) 楠原文雄, 塩原等, 田崎渉, 朴星勇: 柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.656, pp.1873-1882, 2010, 10
- 2) 楠原文雄, 塩原等: 鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の終局モーメント算定法, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.657, pp.2027-2035, 2010, 11
- 3) 小沼賢太, 堀田久人, 村上幸太: 鉄筋コンクリート立体十字形柱梁接合部の 45 度方向耐力(その 1 破壊機構および耐力算定法の概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.2018, pp.671-672, 2018, 07
- 4) 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, 日本建築学会, 1997, 07