論文　実験データベース分析に基づく鉄筋コンクリート造外部柱梁接合部の終局強度に関する検討

藤原　圭佑[*1]・楠原　文雄[*2]・塩原　等[*3]

要旨：鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の既往の実験よりデータベースを作成し，収集データの特性および終局強度に関する分析を行った。収集データのうち柱と梁の曲げ終局強度の比が 2.0 以下でかつ梁曲げ破壊となった試験体は全体の 4%で，残りの試験体は接合部に損傷の集中する破壊または柱の曲げ破壊である。また収集データには，梁主筋が降伏しているにも関わらず梁曲げ終局強度に達しない試験体が含まれていること，この要因には柱と梁の曲げ終局強度の比の影響が最も支配的であること，また柱と梁の曲げ終局強度の比が 1.0 に近い値の場合には接合部横補強筋比，定着長さが終局強度に影響を与えることを明らかにする。

キーワード：鉄筋コンクリート，外部柱梁接合部，データベース，終局強度

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）造の耐震設計では，柱梁接合部の破壊は許容されるべきではないとされ，設計法 [1)]などの多くでは柱梁接合部に生じるせん断力をせん断強度以下とすることで間接的に柱梁接合部の損傷を制御している。接合部パネルのせん断抵抗機構のモデル化については様々な提案がされているが，柱梁接合部に関わる多くの設計因子の影響すべてを考慮できる精度良いモデルは未だに得られていない。そのため，日本建築学会（AIJ）の設計指針 [1)]における柱梁接合部の強度式は実験資料に基づきコンクリート強度と接合部の形状のみから決まる実験式で定めている。

また近年，実験において梁降伏型に設計された外部柱梁接合部（ト形柱梁接合部）で接合部せん断力が小さい場合であっても柱と梁の曲げ終局強度の比（柱梁曲げ強度比）が 1.0 に近い場合には，柱梁接合部内部で柱，梁主筋がともに降伏して柱梁接合部に損傷が集中し，架構の最大耐力が梁の曲げ終局強度時耐力に達しないことが確認されている [2)]。しかし，多くの既往の実験において柱梁曲げ強度比の影響は検討されておらず，梁の曲げ破壊または接合部破壊を目的とする試験体では柱の破壊を防ぐため柱主筋が過補強されていることが予想される。よって実験資料から導かれた影響因子の効果や最終的に得られた設計式は，検討に用いた試験体の母集団の特性に大きく影響を受けることが考えられる。

そこで，本研究では国内外の学術報告書等から収集した RC 造ト形柱梁接合部の実験の試験体を対象に作成したデータベースを基に，ト形柱梁接合部の各因子の終局強度に与える影響についての検討を行う。なお，本研究では文献 2)の実験データは検討に含んでいない。

2. 収集データ

2.1 収集データの範囲

収集したデータは 1967 年から 2009 年までに国内外の学術報告書等に発表された RC 造ト形柱梁接合部試験体で，軽量コンクリート，プレストレストコンクリート，直交梁・スラブ・ハンチを有する，柱と梁が偏心している，柱主筋が接合部内を通し配筋されていない，接合部内で特殊な補強がなされている，変動軸力が作用する（梁のせん断力による変動軸力は除く）ものを除いた国内 251 体，国外 68 体の計 319 体である。引用文献はまとめて**付表－1** に示す。便宜的に試験体の破壊形式は梁（柱）主筋降伏前の接合部破壊型（J 型），梁（柱）主筋降伏後の接合部破壊型（BJ 型），梁（柱）降伏型（B 型），定着破壊型（A 型）に分類し，破壊形式の判別は J 型の試験体で梁または柱主筋の降伏が論文中に明記されているものに関しては BJ 型に訂正し，他のものについては論文中の記述と同様にした。また，破壊モードについての記述がない試験体については，接合部に損傷が集中

表－1　破壊モード別の試験体数

破壊モード	日本	USA･カナダ	NZ	その他の国	計
J 型	51	8	1	1	61
BJ 型	102	19	2	7	130
B 型	67	8	3	19	97
A 型	31	0	0	0	31
計	251	35	6	27	319

USA はアメリカ，NZ はニュージーランド

*1 東京大学　大学院工学系研究科建築学専攻　修士課程　(正会員)
*2 東京大学　大学院工学系研究科建築学専攻　助教　修（工）　(正会員)
*3 東京大学　大学院工学系研究科建築学専攻　准教授　工博　(正会員)

したなどの記述のある試験体はJ，BJ型，そのうち主筋の降伏が明記されているものをBJ型とし，接合部に損傷は見られず梁に損傷が集中したなどの記述のある試験体はB型とした。このようにして分類した各破壊形式の試験体数を**表－1**に示す。

2.2 収集データの特性

接合部の耐震性能に影響を与えるとされる主要な因子について収集したデータの度数分布表を**図－1**に示す。

収集したデータベースでは，各因子ともに現在の設計指針を基に設計されている試験体が多く，コンクリート強度は普通強度，梁主筋の定着長さは設計指針の制限を満たす範囲，接合部横補強筋比は設計指針における下限となる値の度数が最も多くなる結果となった。

3. 破壊モードの検討

前節で示した**図－1**の度数分布表からは，各因子が破壊モードに与える影響を読み取ることは難しい。

次に，現在の設計指針において破壊モードを制御している接合部せん断余裕度の度数分布表を**図－2**に，また，現在の設計指針において考慮されていないが前節で述べたように破壊モードに影響を与えると考えられる柱梁曲げ強度比の度数分布表を**図－3**に示す。**図－2**の接合部せん断余裕度の度数分布表についてはAIJの指針（**図－2 a)**）とACIの規準[3]（**図－2 b)**）の2つの指針を用いて求めた結果をそれぞれ示す。

柱梁曲げ強度比は，危険断面を柱，梁フェースとした梁，柱の曲げ終局モーメントをACIのストレスブロック置換による方法を用いて求めた後，節点モーメントに換算して計算を行った。また，接合部せん断余裕度は梁曲げ終局強度時の接合部せん断力と各指針の接合部せん断強度より求めた。直交梁をもたないト形柱梁接合部の場合，AIJ指針における接合部せん断強度は，

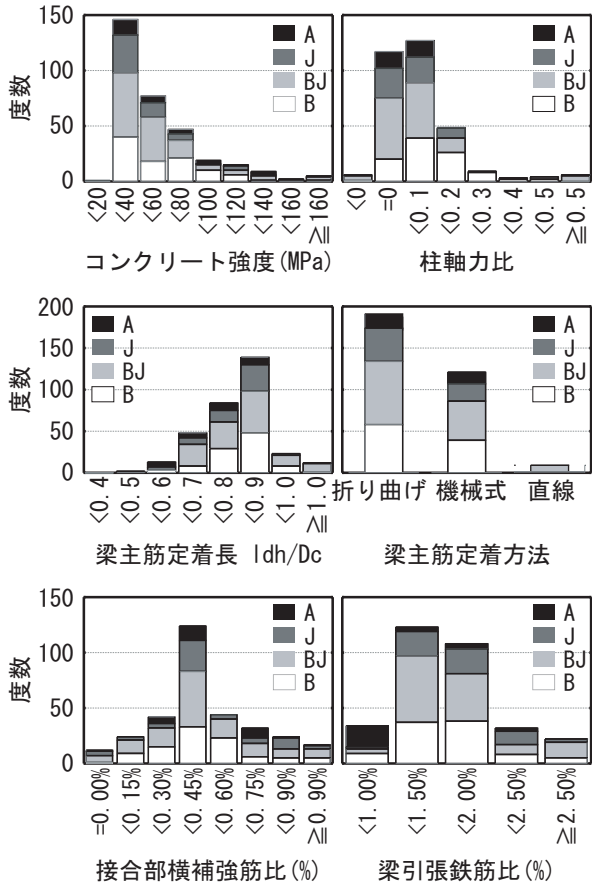
$$V_{ju} = 0.7 \times 0.85 \times 0.8 f_c^{0.7} b_j D_j \quad (N \cdot mm) \qquad (1)$$

ACI規準における接合部せん断強度は，

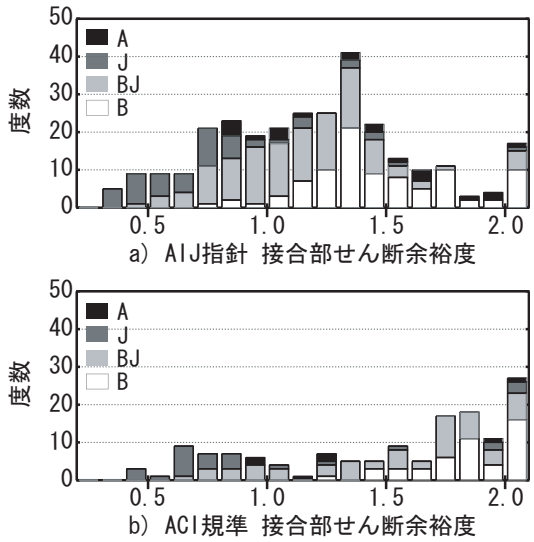
$$V_{ju} = 12\sqrt{f_c} A_j \quad (lbf \cdot in) \qquad (2)$$

ただし，梁主筋の定着端から接合部横補強筋までの距離が2in.以内（**図－4**）

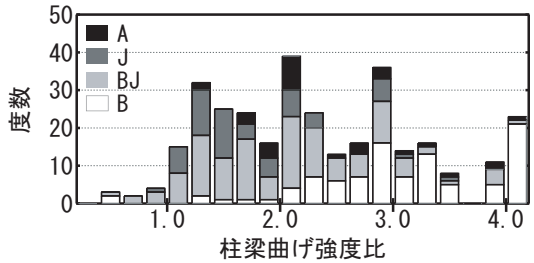
となる。f_cはコンクリート強度，b_jは接合部の有効幅，D_jは梁主筋の水平投影長さ，A_jは有効接合部面積をそれぞれ示す。また，ACIの規準では梁主筋の定着長さが制限されているが，階高の度数分布表である**図－5**に示すように大半の試験体は1/2スケール以上であることから，梁主筋の定着端から接合部横補強筋までの距離が1in.以



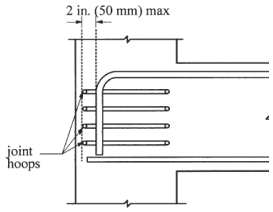
図－1　収集データの主要な因子の度数



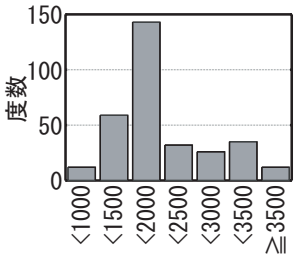
図－2　接合部せん断余裕度の度数



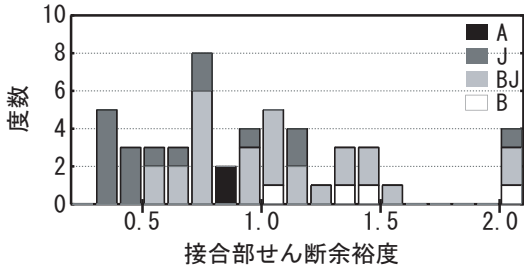
図－3　柱梁曲げ強度比の度数



図－4　梁主筋定着端と横補強筋の位置関係 [4)]



図－5　階高の度数



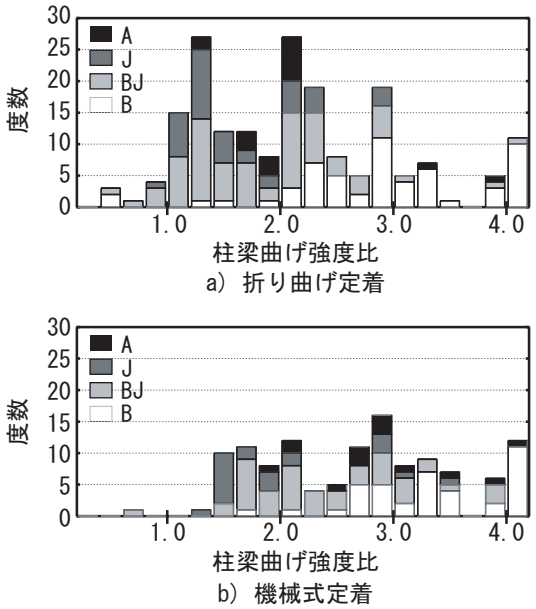
図－6　柱梁曲げ強度比が 1.0～1.5 の試験体の AIJ 指針の接合部せん断余裕度の度数

内でない試験体は除外して図示した。

現行の設計では接合部せん断余裕度により接合部の損傷を制御しており，接合部せん断余裕度が 1.0 以上の場合接合部に損傷は集中せずB型破壊となることが予想される。たしかに，B 型破壊の試験体の 92%以上は接合部せん断余裕度が 1.0 以上であるが，接合部せん断余裕度が 1.0 以上の試験体の中にも接合部に破壊が集中する J，BJ 型破壊の試験体も見られる。

次に，現在の設計において考慮されていない柱梁曲げ強度比であるが，柱梁曲げ強度比が 1.0 に近い程 J，BJ 型破壊の試験体が多く，B 型破壊の試験体のほとんどが柱梁曲げ強度比 2.0 以上に分布する結果となり，柱梁曲げ強度比が破壊モードに影響を与えることが予想される。また，超高層 RC を除くと一般には柱梁曲げ強度比は 1.0～1.5 程度で設計されるにも関わらず，今回収集したデータベースの中で柱梁曲げ強度比が 1.0～1.5 の試験体は全体の 13%と非常に少ないことがわかる。さらに柱梁曲げ強度比が 1.0～1.5 の試験体を対象とした接合部せん断余裕度の度数分布表を**図－6** に示すが，接合部せん断余裕度が 1.0 以上の試験体は 43%に留まり，現在の実務で設計されている架構と同じ条件の試験体による実験が極めて少ないことがわかる。また，**図－6** における接合部せん断余裕度が 1.0 以上の試験体の 81%が J，BJ 型破壊となっており柱梁曲げ強度比が破壊モードに大きな影響を与えることがわかる。

また，**図－3** の柱梁曲げ強度比の度数分布表を梁主筋の定着方法ごとに分けたものを**図－7** に示す。



図－7　梁主筋の定着ごとの柱梁曲げ強度比の度数

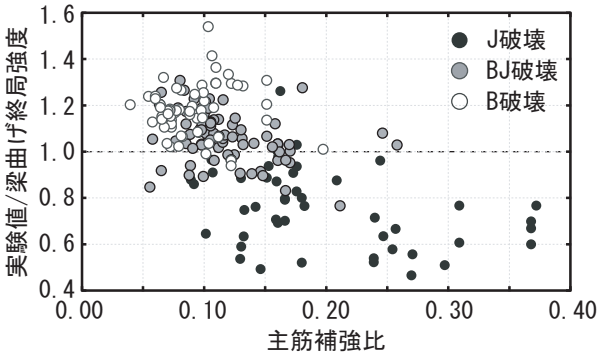
定着方法が破壊モードに与える影響はあまり見られないが，柱梁曲げ強度比の分布に大きな差が見られる。機械式定着の場合，柱梁曲げ強度比 1.5 以下の試験体による実験はほとんど行われていないことがわかる。

現在の接合部せん断強度式は実験式で，基となった実験は接合部せん断余裕度が 1.0 以上かつ柱梁曲げ強度比が 1.0～1.5 の試験体が全体の 7%のみで，定着方法が機械式定着で柱梁曲げ強度比が 1.0～1.5 の範囲の試験体に至ってはほとんど存在しない。以上より，現在の設計式が柱梁曲げ強度比の影響は考慮されておらず，このような試験体群に対する検討に基づいていることを考えると安全性が十分であるとは断定できない。

4. 終局強度の検討

4.1 収集データの特性

図－8 に，縦軸に梁曲げ終局強度と最大耐力の比を，横軸に主筋補強比をとり，柱梁曲げ強度比が 1.0 以下およびA型破壊を除いた試験体を対象に実験値をプロットした結果を示す。なお，主筋補強比は梁，柱のうち先に



図－8　破壊モード別の終局強度

降伏する部材の引張主筋が接合部内にどの程度配筋されているかを表すもので，梁部材が先に降伏する場合には梁主筋降伏時の引張力を接合部の鉛直断面積にコンクリート強度を乗じたもので除し，$(\Sigma a_t f_y)/(b_c D_b f_c)$とする。ここで，$a_t$ は梁の引張主筋の断面積，f_y は梁主筋の降伏強度，b_c は柱幅，D_b は梁せい，f_c はコンクリートの圧縮強度である。また，柱梁曲げ強度比が 1.0 以上の試験体を対象にプロットしているのは，先に降伏する部材を梁とすることで主筋補強比の値を梁主筋から求まる値に統一するためである。

梁主筋の降伏が見られない J 型破壊の試験体の大半は縦軸が 0.9 以下に分布し，梁曲げ終局強度に達する試験体はほとんど見られなかった。なお，J 型破壊で縦軸が 1.2 を超えている試験体が見られるが，これは梁主筋に高強度鉄筋が釣合鉄筋量以上に配筋されており，断面の圧縮縁のコンクリートひずみを仮定したストレスブロックを用いる計算では終局強度時に梁主筋は未降伏となっている。しかし，複筋比 1 で圧縮鉄筋も多いことから平面保持を仮定した断面解析では引張主筋がすべて降伏するまでは断面のモーメントが増加するような試験体で，このため実験においても梁曲げ終局強度計算値以上の最大耐力となったと考えられる。

次に，BJ，B 型破壊の試験体であるが，大半の試験体は縦軸が 1.0 以上に分布していることがわかる。しかし，中には梁主筋が降伏しているにも関わらず梁曲げ終局強度に達しておらず縦軸が 1.0 を下回る試験体も見られる結果となった。また，主筋補強比は J 型，BJ 型，B 型破壊の試験体の順に大きな値をとる傾向となった。

4.2 梁が降伏した試験体の終局強度

図－8 より，梁主筋が降伏している場合でも梁曲げ終局強度に達しない試験体が収集したデータベースの中にも見られることがわかった。ここからは BJ，B 型の試験体を対象にどのような因子がト形柱梁接合部の終局強度に影響を与えているのかを検討する。また，**図－8** で縦軸が 1.2 以上に分布する試験体の多くは実験で層間変形角 6.0～8.0%程度の大変形まで加力を行っており，鉄筋のひずみ硬化の影響で曲げ終局強度以上の強度が出ていることが予想されるので，これ以降の検討はこれらの試験体は除外して行う。

(1) 柱梁曲げ強度比の影響

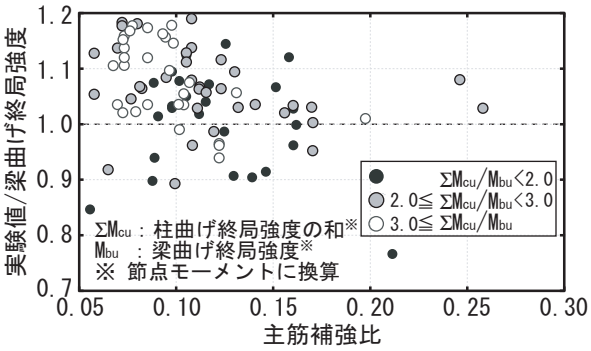
図－9 に柱梁曲げ強度比ごとに実験値をプロットした結果を示す。

柱梁曲げ強度比の値が小さな試験体ほど縦軸が小さな値をとる傾向が見られる。縦軸が 1.0 以下の試験体中の 53%が柱梁曲げ強度比が 2.0 以下であり，柱梁曲げ強度比は梁主筋が降伏しているにも関わらず梁曲げ終局強度に達しない要因の一つであると予想される。

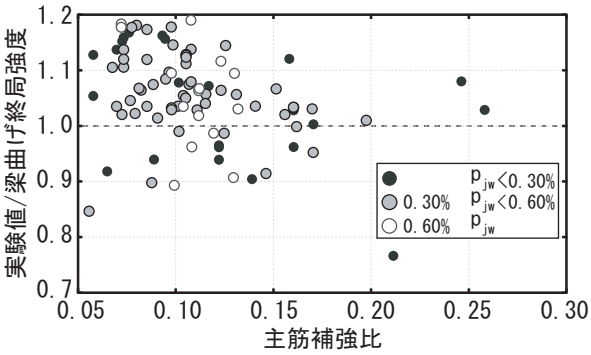
(2) 接合部横補強筋の影響

図－10 に接合部横補強筋比ごとに実験値をプロットした結果を示す。

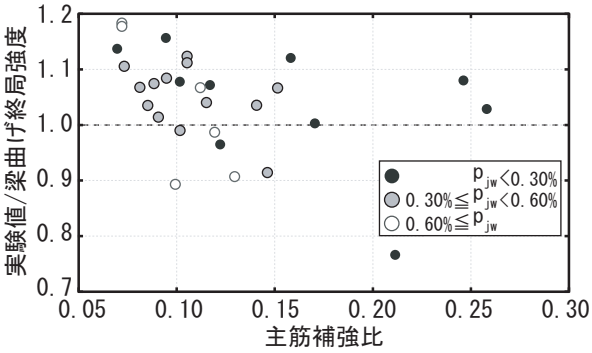
縦軸が 1.0 以下となった試験体の多くは接合部横補強筋比が少ない試験体という結果となった。しかし，接合



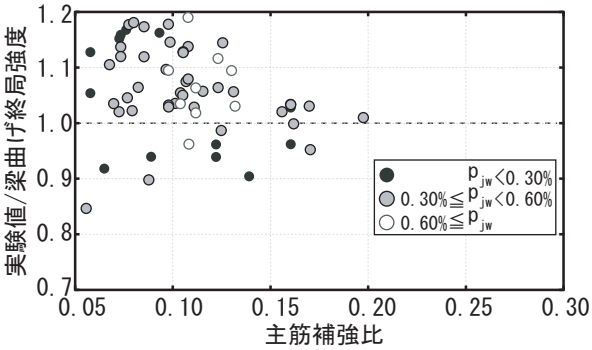
図－9　柱梁曲げ強度比（$\Sigma M_{cu}/M_{bu}$）別の終局強度



図－10　接合部横補強筋比（p_{jw}）別の終局強度



a）折り曲げ定着



b）機械式定着

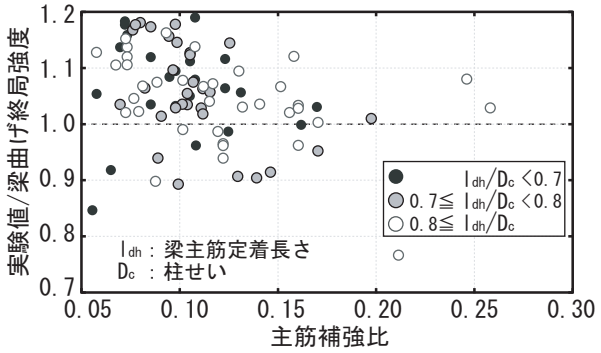
図－11　梁主筋の定着方法ごとの接合部横補強筋比別（p_{jw}）の終局強度

部横補強筋比が 0.30%以下と少ない試験体の中にも縦軸が 1.0 以上となるものも多く見られ，この結果のみをもって接合部横補強筋比が終局強度に影響を与えるとはいいきることはできない。

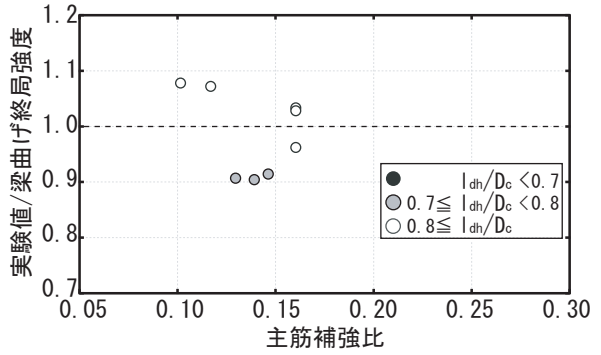
そこで, **図－10** を梁主筋の定着方法別にプロットしなおしたものを**図－11** に示す。

図－10 において接合部横補強筋比が 0.30%以下で縦軸が 1.0 以上の 53%の試験体は折り曲げ定着で，折り曲げ定着の実験値の分布からも接合部横補強筋比が終局強度に与える影響はほとんど見られない。逆に，**図－10** において接合部横補強筋比が 0.30%以下で縦軸が 1.0 以下の 75%の試験体は，定着方法が機械式定着であるという結果となった。

また，定着方法が機械式定着で接合部横補強筋比が 0.30%以下にも関わらず縦軸が 1.1～1.2 付近に分布している試験体も多く見られるが，これらの試験体の多くは柱梁曲げ強度比が 3.0 以上となっている。さらに，定着方法が折り曲げ定着で接合部横補強筋比が 0.60%以上であるにも関わらず縦軸が 1.0 以下に分布する試験体は柱梁曲げ強度比が 2.0 以下となっていることがわかる。これらの結果より，梁主筋が降伏しているにも関わらず実験値が梁曲げ終局強度に達しない要因は柱梁曲げ強度比による影響が支配的で，もし柱梁曲げ強度比が 1.0 に近い値で，梁主筋の定着方法が機械式定着の場合には，接合部横補強筋比が影響を与えると予想できる。



図－12　梁主筋の定着長さ（l_{dh}/D_c）別の終局強度



図－13　柱梁曲げ強度比が 2.0 以下の試験体の梁主筋の定着長さ（l_{dh}/D_c）別の終局強度

(3) 梁主筋の定着長さの影響

図－12 に柱せいに対する梁主筋の定着長さごとに実験値をプロットした結果を示す。

実験値は定着長さに関わらずに分布する結果となった。柱せいに対して梁主筋の定着長さが 0.7 倍以下と短い試験体の多くは縦軸が 1.0 以上に分布しており，この図からは梁主筋の定着長さが終局強度に与える影響を読み取ることはできない。

そこで，接合部横補強筋比の場合と同様に，梁主筋の定着長さが終局強度に与える影響も柱梁曲げ強度比の影響が支配的で柱梁曲げ強度比が 1.0 に近い値の場合に生じると仮定することとした。よって，柱梁曲げ強度比が 1.5～1.8 の試験体を対象に柱せいに対する梁主筋定着長さごとに実験値をプロットした結果を**図－13** に示す。

梁主筋の定着長さが短い試験体は定着長さが長い試験体より縦軸の値は小さく，1.0 以下に分布する結果となった。この結果より，柱梁曲げ強度比が 1.0 に近い値の場合，梁主筋の定着長さが終局強度に影響を与えると考えられる。

5. まとめ

既往のト形柱梁接合部の実験試験体を対象に作成したデータベースの分析により以下の知見を得た。

(1) 既往の実験データで柱と梁の曲げ強度の比が 1.5 以下と実務の設計に近い条件で設計されている試験体は全体の 13%であった。

(2) 柱と梁の曲げ強度の比が 2.0 以下の試験体で梁の曲げ破壊となった試験体は全体の 4%で，残りの試験体は接合部に損傷が集中する破壊，または柱の曲げ破壊となった。

(3) 梁主筋が降伏しているにも関わらず梁の曲げ終局強度に達しない試験体が見られ，これらの試験体の 53%が柱と梁の曲げ強度の比が 2.0 以下であった。

(4) 柱と梁の曲げ強度の比が 1.0 に近い値の場合，接合部横補強筋比が小さいほど，梁主筋の定着長さが短いほど終局強度は小さくなる。ただし，接合部横補強筋比による影響は梁主筋の定着方法が機械式定着の場合にのみ見られる。

付表－1　実験データベース引用文献一覧

著者	発表年	掲載誌	ページ	試験体数			
				J	BJ	B	A
Hanson 他	1967	ASCE	533-560	1	4	1	
Hanson	1971	ASCE	1685-1700		1	1	
小倉 他	1977	AIJ 大会	1773-1774		3	1	2
小林 他	1977	AIJ 大会	1785-1786		3		
若林 他	1977	AIJ 大会	1801-1802		2		

付表－1　実験データベース引用文献一覧（つづき）

著者	発表年	掲載誌	ページ	試験体数			
				J	BJ	B	A
Uzumeri	1977	ACI SP-53	293-350		3		
L. N. Lee 他	1977	ASCE	2337-2350			6	
戸塚 他	1978	AIJ 大会	1677-1678		1	3	
関根 他	1979	AIJ 大会	1301-1302	2	1		
近藤 他	1984	AIJ 大会	1877-1880	5	5		6
吉野 他	1984	AIJ 大会	1883-1884			2	1
小倉 他	1985	AIJ 大会	297-298				1
Ehsani 他	1985	ACIJ	492-499	3	3		
別所 他	1986	鹿島技報	107-114		1		
小倉 他	1987	AIJ 大会	641-642	2	5		
角 他	1987	AIJ 大会	647-680		1	3	
森田 他	1987	AIJ 大会	651-652		5		
藤井 他	1987	AIJ 大会	653-654	1			
角 他	1988	AIJ 大会	455-458		2	2	
角 他	1989	AIJ 論文集	87-96		11	7	
城 他	1989	AIJ 大会	469-474	7			
林 他	1989	AIJ 大会	479-480			4	
角 他	1990	JCI 年次	685-690		1	1	
藤井 他	1990	JCI 年次	691-696	3	1		
西山 他	1990	AIJ 論文集	31-40				1
角 他	1991	JCI 年次	469-474	1	3		
城 他	1991	AIJ 大会	641-644	3	1		1
Alameddine 他	1991	ASCE	829-850	4	8		
城 他	1992	AIJ 大会	197-200		1		4
冨岡 他	1994	AIJ 大会	495-496		1		
成瀬 他	1995	AIJ 大会	67-70			4	
石田 他	1995	AIJ 大会	91-94	1			
石田 他	1996	JCI 年次	953-958	2			
奥田 他	1996	JCI 年次	971-976				2
山中 他	1996	AIJ 大会	679-682	1		1	2
石井 他	1996	AIJ 大会	701-704			1	
川合 他	1997	JCI 年次	1011-1016			1	
中西 他	1998	AIJ 大会	545-548		1		2
森田 他	1998	AIJ 大会	549-550	1	2		
金 他	1998	AIJ 大会	551-552			4	
溝上 他	1998	AIJ 大会	555-558		1		
濱田 他	1999	JCI 年次	667-672		1	1	
木村	1999	JCI 年次	691-696			4	
Chen 他	1999	ACIJ	443-450		1		
川勝 他	2000	JCI 年次	703-708	5			1
柴田 他	2000	JCI 年次	1231-1236		3	2	
Aizhen Liu 他	2000	WCEE	No.1030		2		
Hakuto 他	2000	ACIJ	11-25	1		1	
田畑 他	2001	JCI 年次	373-378	2			
原 他	2001	AIJ 大会	247-248			1	
Aizhen Liu 他	2001	NZSEE	68-81			2	
小島 他	2002	JCI 年次	445-450	1	1		
中澤 他	2002	JCI 年次	847-852	1		3	
井口 他	2002	AIJ 大会	67-68		1	1	

付表－1　実験データベース引用文献一覧（つづき）

著者	発表年	掲載誌	ページ	試験体数			
				J	BJ	B	A
新上 他	2002	AIJ 大会	643-648		1	1	
鬼海 他	2003	JCI 年次	907-912	4	6	1	
竹内 他	2003	JCI 年次	913-918	2	5		
岩岡 他	2003	AIJ 大会	489-490	1			
井上 他	2004	JCI 年次	397-402		5	1	1
真田 他	2004	JCI 年次	463-468		2	1	
渡部 他	2004	JCI 年次	481-490		2	1	2
Yue Wei 他	2004	JCI 年次	661-666		1		
堀 他	2004	AIJ 大会	777-778			1	
岸本 他	2004	AIJ 大会	843-846		1	1	
金川 他	2004	AIJ 大会	861-864			2	
Chun 他	2004	WCEE	No.326		2	2	
Hwang 他	2004	WCEE	No.397			6	
Wang 他	2004	WCEE	No.3159	1			
長谷川 他	2005	JCI 年次	373-378	5			
岩岡 他	2005	AIJ 大会	245-246		2		
田才 他	2005	AIJ 大会	33-42		2		
Hwang 他	2005	ACIJ	445-453		3	5	
今西 他	2006	AIJ 大会	23-24		4		
益尾 他	2006	AIJ 大会	25-26				4
足立 他	2006	AIJ 大会	27-28		4		
中岡 他	2006	AIJ 大会	39-42			3	
渡辺 他	2006	AIJ 論文集	123-130			2	
足立 他	2007	AIJ 大会	633-634		2		
益尾 他	2007	AIJ 大会	649-650		6	2	
Chun 他	2007	ACIJ	102-112		1	2	
Lee 他	2007	ACIJ	459-467			2	
諸伏 他	2008	JCI 年次	349-354		1	4	1
高稲 他	2008	JCI 年次	985-990			1	
大久保 他	2009	JCI 年次	271-276	1			
Lee 他	2009	ACIJ	329-339			2	

掲載誌凡例　JCI 年次：コンクリート工学年次大会論文集，AIJ 大会：日本建築学会大会学術講演梗概集，AIJ 論文集：日本建築学会構造系論文集，鹿島技報：鹿島建設技術研究所年報，ACIJ：ACI Structural Journal，ASCE：Journal of the Structural Division (ASCE)，WCEE：Proceedings of WCEE，NZSEE：Bulletin of the NZSEE

参考文献

1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指針・同解説，日本建築学会，1999
2) 塩原等，楠原文雄ほか：鉄筋コンクリート造外部柱梁接合部の耐震性能におよぼす設計因子の影響に関する実験（その 1～その 5），日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp391-400，2010.9
3) ACI Committee 318：Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary，ACI318-08，2008
4) Joint ACI-ASCE Committee 352：Recommendations for Design of Beam-Column Connections in Monolithic Reinforced Concrete Structures，ACI 352R-02，2002