

論文 むり込み機構に基づく R C 造柱梁十字形接合部の強度評価法に関する研究

西田 朋美^{*1}・上原修一^{*2}

要旨：柱梁接合部の破壊を、新たに梁の接合部へのめり込みととらえて解析する手法を提案した。この解析法を検証するため、既往試験体 84 体のデータを収集し、破壊性状別に解析をした。その結果、本解析法では実験値をやや過小評価するが、付着強度を適正に評価することによってさらに精度よく評価することができる見込みがあることが分かった。

キーワード：めり込み、ストラット、極限解析、有効係数、せん断

1. はじめに

今日、鉄筋コンクリート構造物においては、靱性に基づく設計法の採用や高強度材料の使用から、柱梁接合部の耐震設計の重要性が高くなっている。これまで、柱梁接合部の破壊は、接合部ストラットコンクリートの圧縮破壊によるせん断破壊と捉えられてきた¹⁾。一方、塩原は、層せん断力低下後も接合部の入力せん断力が低下しないことから、接合部の曲げ破壊ととらえるべきであると主張している²⁾。

一般の接合部の破壊では、すべり面のような破壊面は認められない(文献3)のS4試験体のように特別に鋼板で補強したものでは水平のせん断すべり面があらわれる)。多くは、面外に膨らんで破壊するなど、圧縮ストラットの面外へのはらみだしにより破壊しているように見受けられる(例えば文献4)のマイクロデータその2)。したがって、この破壊を断面の破壊として評価しようとする場合は、曲げ破壊的なものとしてとらえるのが適当と考えられる。

以上のように、接合部の破壊は柱のせん断破壊とは異なる現象であるため、柱のせん断破壊に対応するような帯筋の配筋などは、接合部の直接的な補強に結びつかないと考えられる。

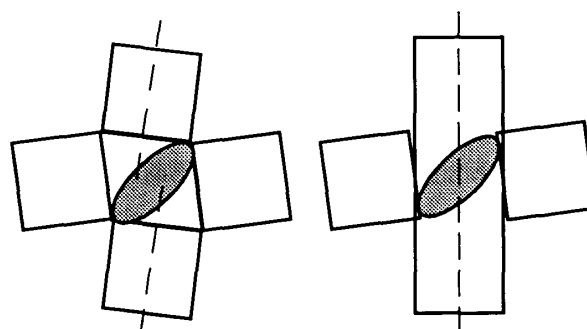
このような観点から本論文では、接合部の破壊を新たに「梁部材の接合部へのめり込み」と捉え解析する。つまり、接合部ストラット部分のコンクリートがひび割れにより強度低下し、より健全な

梁部材のコンクリートがめり込むために接合部が破壊すると考える。この破壊機構の妥当性を調べることが本論文の目的である。なお、ここで解析対象とする接合部は柱幅が梁幅より大きい一般的な接合部とする。

2. むり込み機構に基づく解析法

2.1 既往の実験結果によるめり込み現象の裏づけ

図-1 に接合部せん断変形機構と梁端部のめり込みによる接合部変形機構を対比して示す。ここでグレーの部分はストラットの圧縮破壊部分を示す。通常想定されている接合部変形機構は、(a) の接合部せん断変形機構であると考えられる。この機構では柱材軸も水平方向にずれることになる。ここで提案している (b) の梁端部のめり込みによる接合部変形機構においては、梁のめり込みによりストラット部分が破壊するが、梁幅より外側の



(a) 接合部せん断変形機構 (b) 梁端部のめり込みによる接合部変形機構

図-1 十字形接合部せん断変形機構と梁端部のめり込みによる接合部変形機構

*1有明工業高等専門学校 専攻科生 (正会員)

*2有明工業高等専門学校教授 建築学科 博士(工学) (正会員)

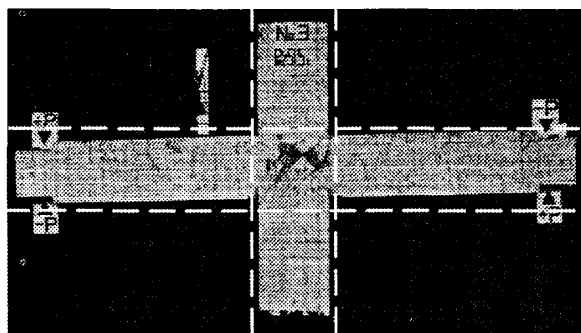


図-2 接合部破壊の例 (JCI 選定試験体, ミクロデータその3)⁴⁾

柱部分が破壊していないため、柱全体としてはまっすぐのままであると想定することになる。

図-2は、JCI 選定試験体で、接合部が破壊した試験体⁴⁾である。この試験体では、梁の曲げ降伏と接合部の破壊がほぼ同時に起きたが、最大耐力後は接合部の変形が増大したと記されている。したがって、図に示す残留変形も主に接合部の変形によるものであると考えられる。図中に示す直線と試験体の関係から、変形は主に梁の回転によるものと観察され、めり込み機構で想定しているように、柱はほぼまっすぐのままであることが認められる。なお、柱の回転か梁の回転かの判断は、図-1(b)に示すように、いずれの部材の材軸がずれているかによって判断されるが、この写真では変形が小さく判別できない。しかし、梁主筋が降伏していることなどから梁の回転であると判断した。

2.2 梁主筋降伏前の接合部破壊の解析法

(1) 解析法の概要と特長

想定しているめり込み破壊機構では、図-1に示すように、梁端部断面の圧縮側コンクリートが接合部にめり込むことから、梁端部断面の応力を使って接合部破壊時の層せん断力を算定することとする。

図-3に接合部における各応力に対する抵抗部分の仮定を示す。通常、接合部が破壊し層せん断力が低下した後も柱軸力は保持されることから、めり込みに抵抗しない梁幅の外側の柱部分が柱軸力に抵抗すると考える。よって、接合部中央部は、終局時に曲げモーメントとせん断力を負担す

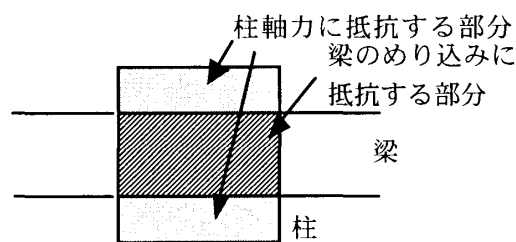


図-3 接合部断面における各部の抵抗部分の想定

ることになる。

さて、著者の一人は、これまでに、応力の相関を考慮した降伏線理論に基づく柱部材の解析法を提案している^{5), 6)}。その概要を示すと以下になる。

曲げモーメント M 、軸力 N およびせん断力 Q を受ける柱が曲げ破壊あるいはせん断破壊するときの破壊断面を材端圧縮縁を通り、柱材軸と斜めに交わる平面と仮定する。その仮定した破壊断面の降伏条件を、コンクリートの降伏条件、鉄筋の降伏条件を累加して求める。そのとき、 M 、 N 、 Q の組み合わせ応力の相関を考慮している。次に、釣り合い条件により、一定軸力下での水平強度を算出する。仮定破壊断面の勾配を変動させたとき、最小の水平強度を与えるものを柱部材の水平強度とする。

この解析法を梁端断面の強度評価に応用する場合、想定破壊断面は梁端断面と定まる。また、柱の解析では、主筋が降伏する場合(要素が回転する場合)と主筋が弾性のまま(要素が回転しない場合)の解に分けて解析するように提案を修正した⁶⁾が、接合部破壊の解析に用いる場合では、梁の回転を伴っていることから、主筋が降伏する場合(要素が回転する場合)のみを適用すればよいと考えられる。

通常曲げ強度略算解と比較したときのこの解析法の特徴は、1) 強度評価にコンクリートの圧縮強度有効係数 ν が含まれていること、2) せん断力の影響が考慮されていること、3) 必要に応じ軸力の影響も考慮できることである。

(2) 梁端断面コンクリートの圧縮応力度評価法

接合部が破壊するとき、梁主筋の付着応力が低下していることが報告されている²⁾。そこで、梁

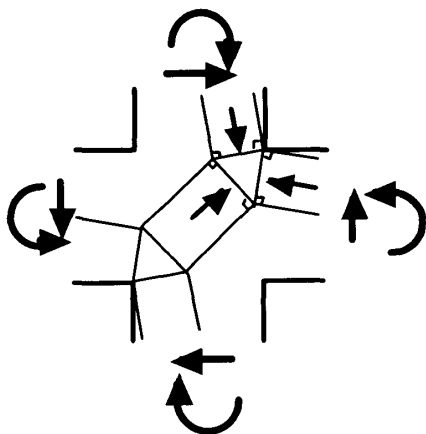
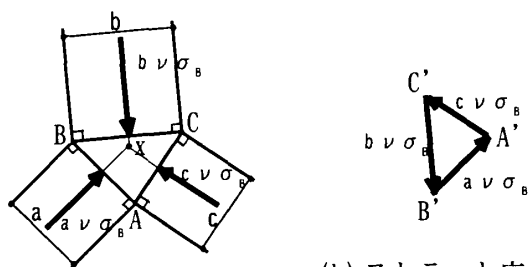


図-4 接合部と梁・柱部材の圧縮ストラットの関係



(a) 各ストラットの応力 示力図
(b) ストラット応力の関係図

図-5 各ストラットの応力の関係図

主筋の付着応力の影響を無視したときの柱、梁部材の圧縮ストラットと接合部の圧縮ストラットの間をを図-4に示す。厚さの等しい3本のストラットが交わる三角形の接合要素にそれらのストラットが直交する場合、各ストラットの応力度は等しい。これは、図-5に示すように、三角形の接合要素ABCのx点に集まる各ストラット応力の示力図A'B'C'が接合要素ABCと相似になることから明らかである。したがって、梁部材の圧縮ストラットの応力度は、接合部ストラット部分の応力度に等しいと考えることができる。

以上のことから、接合部ストラットが $v\sigma_B$ で破壊し梁端部断面が接合部にめり込むときの梁端断面のコンクリート圧縮応力度を $v\sigma_B$ として算定することができる。ここで、 σ_B :コンクリートの圧縮強度である。

有効係数 v の評価は次のようにする。文献1)には接合部のせん断強度を示してある。これを圧縮ストラットが破壊するときのせん断応力と考え、さらにストラットが45度傾いているものと

仮定して、主圧縮方向の強度を求めた。つまり、せん断応力度を2倍して主圧縮応力度を求めることになる。その強度をコンクリート強度で除したものが式(1)である。なお、ここで、文献1)に示す安全率1/0.85は除いている。

$$v = 2 \times 1.0 \times 0.8 \times \sigma_B^{-0.3} \quad (1)$$

以上のことから、この式を有効係数評価式として扱い、梁端断面コンクリートの圧縮応力度評価に用いることとした。

(3) 梁主筋の付着強度評価法

梁主筋降伏前の接合部破壊（以降J破壊と記す）では主筋の付着破壊を伴うことから、主筋の降伏条件として付着強度に基づく値を用いる。つまり、梁は梁主筋が付着破壊により抜け出すことにより回転する。その結果、梁端部圧縮側コンクリートが接合部を押すことにより接合部ストラットが破壊する。このような想定から、梁主筋が塑性化することによって梁が回転する場合と同じ方法で、付着破壊の影響を取り入れることができると考えた。

まず、鉄筋の付着強度 τ_u を文献1)を参考にし、式(2)で定めた。

$$\tau_u = 0.7 \sigma_B^{\frac{2}{3}} \times 1.25 \quad (2)$$

なお、式(2)では、1.25倍することにより安全率を除いているほか、梁主筋部分では柱軸力を負担していないとの仮定から、柱軸力の項を除いている。この式から得られる付着強度を使って、梁主筋の付着破壊時の降伏条件を定める。

まず、鉄筋の塑性化によって定まる降伏条件は、引張鉄筋断面積 a_t と圧縮鉄筋断面積 a_c が等しいとき、図-6中の太線で示す形状で示される。ここで、 $m = M_f / \sigma_B b_b D_b^2$, $n = N_f / \sigma_B b_b D_b$, $q = Q_f / \sigma_B b_b D_b$, M_f , N_f , Q_f :それぞれ曲げモーメント、軸力、せん断力、 b_b :梁幅、 D_b :梁せいである。ここで、 m 軸の頂点 m_{pmax} は次の式(3)で示される。

$$m_{pmax} = \frac{a_t \sigma_y}{b_b D_b^2 \sigma_B} D_{bl} \quad (3)$$

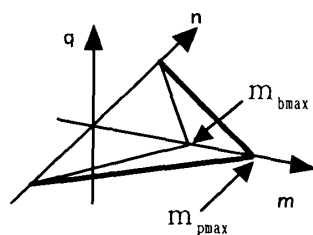


図-6 梁主筋降伏条件における定着強度の考慮の方法

ここで、 σ_y :鉄筋降伏点、 $D_{b1}' = D_b' / D_b$ 、 D_b' :主筋間距離である。

一方、鉄筋の付着破壊によって定まる降伏条件は、同様に図-6中の細線で示す形状で示される。ここで、 m 軸の頂点 m_{bmax} は次の式(3)で計算するものとする。

$$m_{bmax} = \frac{\sum \psi_{pr} \tau_u}{b_b D_b^2 \sigma_B} \frac{D_c}{2} D_{b1}' \quad (4)$$

ここで、 $\sum \psi_{pr}$:引張鉄筋の周長の和、 D_c :柱せいである。

(4) 接合部破壊時の層せん断力評価法

接合部が破壊するときの無次元化した層せん断力解析値 q_{cal} は、梁の無次元化せん断力 q_{bcal} を使って次のようにして計算される。

$$q_{cal} = q_{bcal} \frac{L}{H} \frac{b_b D_b}{b_c D_c} \quad (5)$$

ここで、 L :スパン長、 H :階高、 b_c :柱幅である。さらに、

$$q_{bcal} = \frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (6)$$

ここで、

$$A = \frac{1}{2v} \frac{1}{\alpha_q^2}, \quad B = \frac{1}{\alpha_m} \left(\frac{h_b}{D_b} \right) \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{2v} \left\{ \frac{1}{\alpha_n^2} \left(n_b - \frac{v}{2} \right)^2 - \left(\frac{v}{2} \right)^2 \right\}$$

h_b :梁材端から反曲点までの距離、 $n_b = N_b / \sigma_b b_b D_b$ 、 N_b :梁に作用する軸力でありここではすべて0であった。

$$\alpha_n = \frac{\psi_l + \frac{v}{2}}{\left(\frac{v}{2} \right)}, \quad \alpha_q = \frac{\left(\psi_l + \frac{v}{2} \right)}{\sqrt{\left(\psi_l + \frac{v}{2} \right)^2 - \psi_l^2}}$$

$$\alpha_m = \frac{\frac{v}{8} + m_{bmax}}{\frac{v}{8}} \quad (8)$$

ここで、 $\psi_l = a_g / (b_b D_b \sigma_B)$ 、 a_g :梁主筋断面積である。なお、 α_n 、 α_q 、 α_m は、RC断面降伏条件のコンクリート降伏条件に対する拡大係数である。詳細は文献5)を参照されたい。

2.3 梁主筋降伏後の接合部破壊の解析法

梁主筋降伏後の接合部破壊(以後BJ破壊と記す)においても、J破壊と同様に解析する。但し、梁主筋が塑性化により降伏することから、式(8)において m_{bmax} のかわりに m_{pmax} を用いることになる。

3. 解析結果

3.1 解析用試験体の収集

本解析では、1991年から10年間の間にコンクリート工学年次論文報告集に発表された柱梁十字形接合部試験体84体について破壊性状別に解析を行った。梁端曲げ破壊型(B型)試験体については、別に解析することとし、ここでは扱わない。表-1に全試験体の一覧を示す。また、試験体の収集にあたっては、プレキャスト、特殊な金物を用いているものは除いた。

3.2 J型破壊試験体の解析結果について

図-7は実験においてJ型破壊であった試験体の層せん断力実験値 q_{ex} と解析値 q_{cal} の比較である。解析値は実験値をやや過大評価しているが、ばらつきは小さい。特に梁が1段配筋になっている試験体(○印)に比べて、2段配筋になっている試験体(□印)については、実験値のほうが小さくなっている。この原因は、2段配筋にすることによって付着強度が低下したことによ

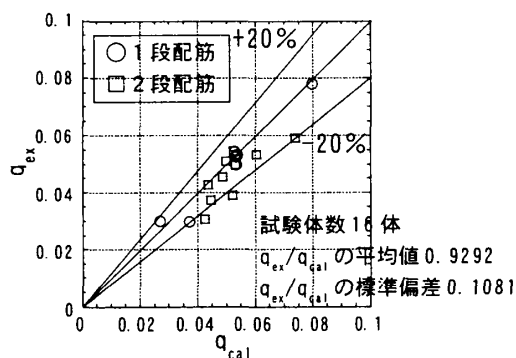


図-7 J型破壊試験体の層せん断力計算値 q_{cal} と実験値 q_{ex} の比較

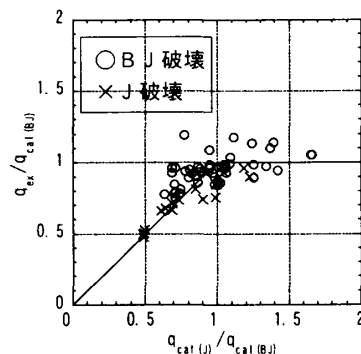


図-9 層せん断力算定値と実験値の比較

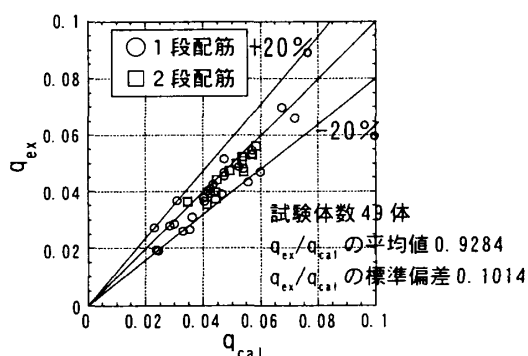


図-8 BJ型破壊試験体層せん断力 q_{cal} と実験値 q_{ex} の比較

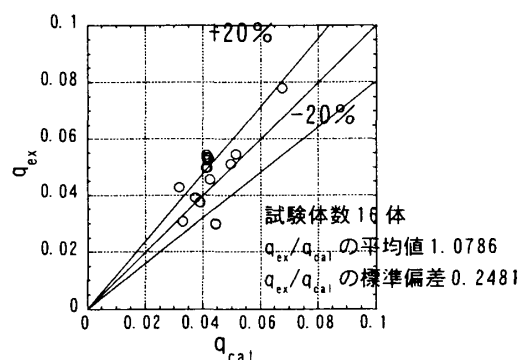


図-10 既往式による層せん断力解析値と実験値の比較

ると考えられる。このことから、付着強度への影響要因を考慮することによって評価の精度が向上する可能性がある。

3.3 BJ破壊試験体の解析結果について

図-8は、実験でBJ型破壊であった試験体の実験値と解析値の比較である。全体的に実験値が小さくなっているが、ほぼ良好に予測できていることが分かる。BJ型は鉄筋の降伏点が、強度算定に大きな影響を与える変数となるため、1段配筋と2段配筋による解析の偏りは見られない。

3.4 解析値による破壊モードの判別

解析による破壊モードの判別を図-9に示す。ここでは縦軸にBJ破壊解 $q_{cal(BJ)}$ に対する最大荷重実験値の比 $q_{ex}/q_{cal(BJ)}$ 、横軸にBJ破壊解に対するJ破壊解の比 $q_{cal(J)}/q_{cal(BJ)}$ をとったものである。今回の解析ではJ、BJ型が混在しており十分には判別できない結果となった。

3.5 既往の算定式との比較

3.2で解析したJ型の試験体について、文献1)

に示される接合部せん断力を求める式から安全率を除去し、層せん断力に変換した値を用いて、本解析法と比較した。その結果を図-10に示す。既往式のほうがややばらつきが大きいことが分かる。

4. 結論

めり込み機構に基づくRC造柱梁十字型接合部の強度評価法を提案し、84体の既往試験体の層せん断力の解析によってその能力を検証し、以下の結論を得た。

- (1) 提案した解析法によれば、ばらつきは少ないが実験値をやや過大評価する傾向がある。
- (2) J型については1段配筋試験体については適合性が良好で、2段配筋試験体についてはやや悪いことを示した。これは付着強度の評価に原因があると考えられる。

以上のように、めり込みと考えて評価しても良い結果が得られた。今後は、実験を通じてめり込

表-1 解析に用いた試験体一覧

NO	JCI年次論文掲載 ページ	試験体名	実験値	解析値	比	破壊性状	NO	JCI年次論文掲載 ページ	試験体名	実験値	解析値	比	破壊性状
			qex	qcal	qex/qcal					qex	qcal	qex/qcal	
1	1991,pp.495-500	I5	0.0240	—	—	B	43	1993,pp.583-588	NO47	0.0323	0.0366	0.8814	BJ
2	1991,pp.519-524	J1	0.0500	—	—	B	44		NO48	0.0377	0.0408	0.9244	BJ
3		J2	0.0464	—	—	B	45		NO49	0.0469	0.0610	0.7679	BJ
4		J3	0.0462	—	—	B	46		NO50	0.0368	0.0312	1.1763	BJ
5	1992,pp.379-384	A6	0.0524	—	—	B	47		HN08	0.0266	0.0286	0.9282	BJ
6	1993,pp.583-588	NO43	0.0251	—	—	B	48		HN09	0.0279	0.0288	0.9701	BJ
7		NO44	0.0279	—	—	B	49		HN10	0.0272	0.0233	1.1659	BJ
8		NO45	0.0336	—	—	B	50	1997,pp.987-992	NO1	0.0364	0.0410	0.8873	BJ
9		NO46	0.0251	—	—	B	51		NO3	0.0391	0.0471	0.8308	BJ
10	1995,pp.309-314	J1	0.0570	—	—	B	52	1997,pp.993-998	BN-3	0.0530	0.0582	0.9102	BJ
11		J2	0.0738	—	—	B	53		BN-5	0.0661	0.0732	0.9033	BJ
12	1997,pp.993-998	BN-2	0.0592	—	—	B	54	1997,pp.1011-1016	I8C	0.0500	0.0525	0.9524	BJ
13		BN-4	0.0534	—	—	B	55	1997,pp.505-510	B15-13	0.0402	0.0419	0.9587	BJ
14		BN-1	0.0491	—	—	B	56		B16-16	0.0481	0.0547	0.8791	BJ
15	1997,pp.1011-1016	I6C	0.0376	—	—	B	57		B16-13	0.0469	0.0549	0.8541	BJ
16	1997,pp.505-510	B15-16	0.0339	—	—	B	58		B16-10	0.0441	0.0455	0.9677	BJ
17		B15-10	0.0306	—	—	B	59	1998,pp.517-522	AIJ	0.0486	0.0529	0.9189	BJ
18	1998,pp.535-540	NO5	0.0292	—	—	B	60		HRP	0.0532	0.0577	0.9219	BJ
19		NO6	0.0289	—	—	B	61		CSP	0.0424	0.0438	0.9679	BJ
20	1991,pp.475-478	OKJ-1	0.0375	0.0452	0.8304	BJ	62		JCR	0.0545	0.0577	0.9445	BJ
21		OKJ-4	0.0397	0.0452	0.8786	BJ	63		HBS	0.0562	0.0591	0.9500	BJ
22	1991,pp.495-500	I6	0.0287	0.0303	0.9479	BJ	64	1998,pp.535-540	NO1	0.0431	0.0568	0.7579	BJ
23	1991,pp.507-512	NO.34	0.0455	0.0482	0.9452	BJ	65		NO2	0.0408	0.0433	0.9425	BJ
24		NO.35	0.0467	0.0482	0.9687	BJ	66		NO3	0.0392	0.0433	0.9069	BJ
25		NO.36	0.0522	0.0546	0.9570	BJ	67		J1	0.0393	0.0433	0.9087	BJ
26		NO.37	0.0508	0.0546	0.9298	BJ	68	1999,pp.643-548	B1	0.0309	0.0365	0.8473	BJ
27		NO.38	0.0515	0.0482	1.0699	BJ	69	1991,pp.475-478	OKJ-2	0.0373	0.0445	0.8389	J
28	1991,pp.513-518	HC	0.0362	0.0351	1.0340	BJ	70		OKJ-3	0.0308	0.0424	0.7250	J
29		HLC	0.0365	0.0353	1.0352	BJ	71		OKJ-5	0.0391	0.0522	0.7481	J
30	1991,pp.519-524	I2	0.0474	0.0492	0.9644	BJ	72		OKJ-6	0.0454	0.0486	0.9345	J
31		I4	0.0354	0.0421	0.8406	BJ	73	1991,pp.513-518	LA1	0.0510	0.0499	1.0219	J
32	1992,pp.397-400	MJK-1	0.0191	0.0248	0.7709	BJ	74		A1	0.0545	0.0525	1.0375	J
33		MJK-2	0.0266	0.0359	0.7408	BJ	75	1992,pp.379-384	I1	0.0427	0.0435	0.9814	J
34		MJK-3	0.0192	0.0240	0.8013	BJ	76	1997,pp.987-992	NO2	0.0299	0.0372	0.8023	J
35		MJK-4	0.0261	0.0334	0.7816	BJ	77		NO4	0.0299	0.0269	1.1144	J
36	1992,pp.401-404	PL	0.0398	0.0479	0.8308	BJ	78	1998,pp.517-522	KSC	0.0780	0.0798	0.9776	J
37		PH	0.0395	0.0467	0.8465	BJ	79	1999,pp.679-684	NO1	0.0525	0.0533	0.9845	J
38	1993,pp.553-558	NO1	0.0453	0.0406	1.1148	BJ	80		NO2	0.0497	0.0534	0.9316	J
39	1993,pp.559-564	J11A	0.0613	0.0547	1.1210	BJ	81		NO3	0.0532	0.0538	0.9871	J
40		J12A	0.0741	0.0690	1.0732	BJ	82		NO4	0.0544	0.0529	1.0286	J
41		J31A	0.0698	0.0685	1.0190	BJ	83		NO5	0.0533	0.0533	0.9993	J
42		J32A	0.0775	0.0802	0.9666	BJ	84		NO6	0.0497	0.0532	0.9330	J

B：接合部が破壊しなかった試験体（19体）BJ：梁降伏後に接合部が破壊した試験体（49体）

J：梁降伏以前に接合部が破壊した試験体（16体）
み機構を明らかにして行きたいと考えている。

参考文献

- 1) 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・同解説，第8章，p245，p255，1999. 8. 第2版
- 2) SHIOHARA, H.: "A New Model for Shear Failure of R/C Interior Beam-Column Connections," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 127, No. 2, pp. 152-160, Feb. 2001
- 3) ZAID, S., SHIOHARA, H., OTANI, S.: "Test of a New Reinforcing Detail for Reinforced Concrete Interior Beam-Column Joint," 構造工学論文集, Vol. 46B, pp. 561-569, 2000. 3

- 4) 市之瀬敏勝：「はり柱接合部選定試験体」選定理由および実験データの概要，日本コンクリート工学協会，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，解析モデル検証用試験体の実験データ集，pp. 21-40，1983. 10
- 5) 上原修一・崎野健治・江崎文也：組み合わせ応力の相関を考慮した降伏線理論によるRC柱部材の極限解析，コンクリート工学論文集，第10巻第3号，pp. 17-31，1999年9月
- 6) 久保田真次，上原修一：組み合わせ応力の相関を考慮した降伏線理論によるRC柱既往試験体の水平耐力の解析，コンクリート工学年次大会論文集，Vol. 24, No. 2, 2002, pp889-894