

論文 鉄筋コンクリートL字型柱梁接合部のせん断終局強度と破壊モードの解析

辛 勇雨*1・楠原 文雄*2・塩原 等*3

要旨：本研究では、筆者らが既に提案した鉄筋コンクリートL字型柱梁接合部の解析方法を用いて既往の研究の実験データとの終局強度及び破壊モードとの比較・検討を行う。解析は、主筋量、せん断補強量、配筋詳細、主筋の定着位置などを変動因子とした51体の試験体を対象とした。定着破壊を除いた実験と解析の耐力比は正側で1.01及び負側で1.03となった。本モデルでの破壊モードの判定基準やJモードとBモードの強度の比の値(M_J/M_B)は、設計時に接合部への損傷の集中を制御するための目安として有効である。

キーワード：L字型柱梁接合部、Bモード、Jモード、危険断面、釣り合い式

1. はじめに

鉄筋コンクリート骨組のL字形柱梁接合部の補強方法には多様な配筋方法があり、その配筋方法が接合部せん断強度に影響を与えること、また、開く場合（以下 opening）と閉じる場合（以下 closing）に強度が異なることは古くから知られている¹⁾。しかし日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証形耐震設計指針・同解説²⁾」では、L字形柱梁接合部のせん断強度を一律に十字形柱梁接合部の40%と規定しており、現行の設計法には合理化の余地が大きい。

そこで筆者らは、十字形柱梁接合部に対して4重曲げ機構による強度と破壊モードの推定のための理論を提案し³⁾、さらにこれをL字型柱梁接合部に適用して、(1)接合部のコンクリートの圧壊、(2)主筋の引張り降伏、および、(3)主筋の定着破壊を考慮するせん断破壊の理論を提案した^{4,5)}。本報告では、主筋量、せん断補強量、配筋詳細、主筋の定着位置などを変動因子とした既往の研究による51体の試験体を対象として、その理論を適用する。また、終局強度や破壊モードを比較検討し、その妥当性を検討する。

2. L字型柱・梁接合部のせん断抵抗機構

著者らはL字形柱・梁接合部においても十字形柱・梁接合部と同様に、柱（もしくは梁）の端部の危険断面の曲げ抵抗機構を表すBモードと、接合部対角線における4組の危険断面が重なった曲げ抵抗機構（四重曲げ抵抗機構）を表すJモードがあることを指摘した^{4,5)}（図-1）。

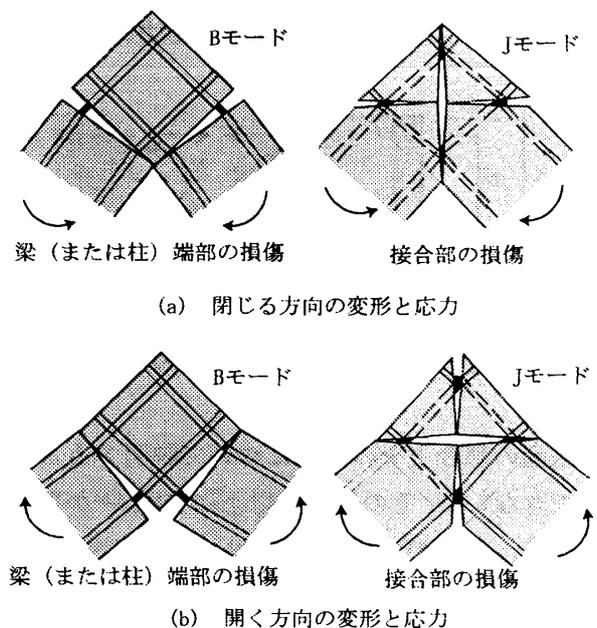


図-1 L字形接合部の二つの変形機構

*1 東京大学大学院工学系研究科 博士課程 (正会員)
 *2 東京大学大学院工学系研究科 助手 修士 (正会員)
 *3 東京大学大学院工学系研究科 助教授 博士(正会員)

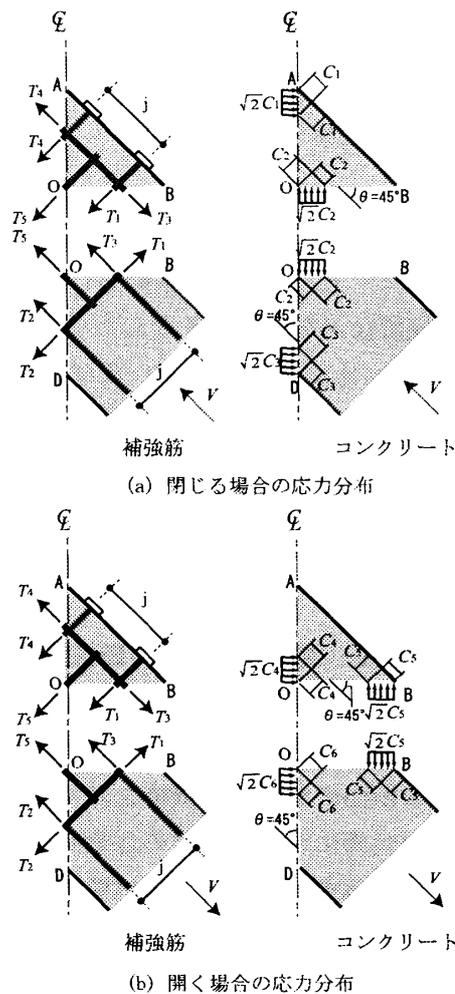


図-2 Jモード危険断面の応力の定義⁴⁾

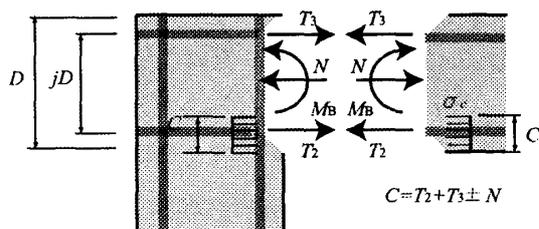


図-3 Bモードの力の釣り合い⁴⁾

紙面の都合上その詳細について説明することはできないが、その概略を以下に文献^{4,5)}から紹介する。解析の対象は、柱せいと梁せいが等しいL字型柱梁接合部である。図-2のような柱梁接合部内のJモードの危険断面を横切る主筋及びコンクリートの圧縮応力の大きさを変数とおいて、危険断面で分割されたそれぞれのフリーボディで成立する力の釣り合いを考慮すれば、

opening 側では5つの独立な釣り合い式が、closing 側でも別の5つの独立な釣り合い方程式が導かれる。図-3のような梁もしくは柱端部にあるBモードの危険断面を横切る主筋およびコンクリートの大きさを変数と置けば、危険断面での軸力の釣り合い式が導かれる。Jモードの強度は、釣り合い条件に加えて、コンクリートのストレスブロックの圧縮応力が、コンクリートの圧縮強度から定まる上限値 σ_c （ここでは圧縮強度の85%とする）に達しており、主筋の応力が降伏強度以下であり、主筋定着端の応力が定着強度内であるという制約条件の下での極大値として求められる。Bモードの強度は、Jモードの強度に達した時の主筋の応力と梁端部のコンクリートのストレスブロックのコンクリートの圧縮応力が一定値（ここでは、圧縮強度の85%）となる条件から求められる。釣り合い方程式は、二次の連立方程式となるので数値解として算出しなければならない。算出方法については文献^{4,5)}に詳しく示している。

3. 既往の実験の終局強度及び破壊モードの比較・検討

3.1 破壊モードの推定

本論文ではL字型柱梁接合部の破壊モードを(1)梁もしくは柱の曲げ降伏形破壊(以下B破壊モード)、(2)梁もしくは柱の曲げ降伏後接合部せん断破壊(以下BJ破壊モード)、(3)コンクリート圧縮及び引張りによる接合部せん断破壊(以下J破壊モード)、(4)主筋の抜け出しによる定着破壊(以下T破壊モード)に4つに分類する。これに対して2節で紹介した文献⁴⁾の方法を用いて、実験で観察された破壊モードと解析による破壊モードを推定する。理論では、接合部が強度に達する時に支配的となる変形モードを、JモードとBモードの強度の大小関係から求めるものとしている。これがどのように求められるかを示すために既往の文献(5, 6, 7, 8)に報告されている4体の試験体についてJモードとB

モードの強度を計算し、図-4に示した。図-4の縦軸は、接合部せん断応力度 τ をコンクリート圧縮強度 σ_B に対する割合で示している。横軸は $Dt\sigma_c$ (D :接合部せい, t :接合部幅, σ_c :コンクリート圧縮強度)で基準化した無次元数で表した引張り鉄筋の応力を示している。JモードとBモードの強度は、部材端部における引張り主筋の応力の関数として表すことができる。ここに、接合部せん断応力度は、closing側では式(1)で、opening側では式(2)でそれぞれ定義される値である。ここで、 L は接合部の反曲点までの距離である。

$$\frac{\tau}{\sigma_B} = V \frac{\sigma_c}{\sigma_B} \left(\frac{L-j/2}{j} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\tau}{\sigma_B} = V \frac{\sigma_c}{\sigma_B} \left(\frac{L-j/2}{j} - 1 \right) \quad (2)$$

図-4(a)は、Bモードで破壊したと報告されている試験体 L345-30-3(文献6)を示している。この試験体の場合、引張り主筋の降伏によって決まる T_3 の上限値は(0.064)であり、この時Bモードの強度はJモードの強度より小さく(0.104)と計算される。一方接合部の強度の実験値は、(0.109)である。図-4(b)は、BJモード破壊したと報告されている試験体 L-8(文献7)を示している。この試験体では、引張り主筋の降伏によって決まる T_3 の上限値は(0.108)であり、Bモードの強度とJモードの強度はほぼ等しい。計算される強度は(0.143)であり、実験値は(0.140)である。Bモードの強度とJモードの強度の差は小さいので梁が曲げ強度に達して降伏すると同時に接合部せん断変形も増大するものと考えられる。図-4(c)は、Jモード破壊したと報告されている試験体 L-BH2(文献8)を示している。この試験体の場合の引張り主筋の降伏によって決まる T_3 の上限値は(0.153)であり、引張り主筋が降伏する時には既に、JモードとBモードの強度は逆転して

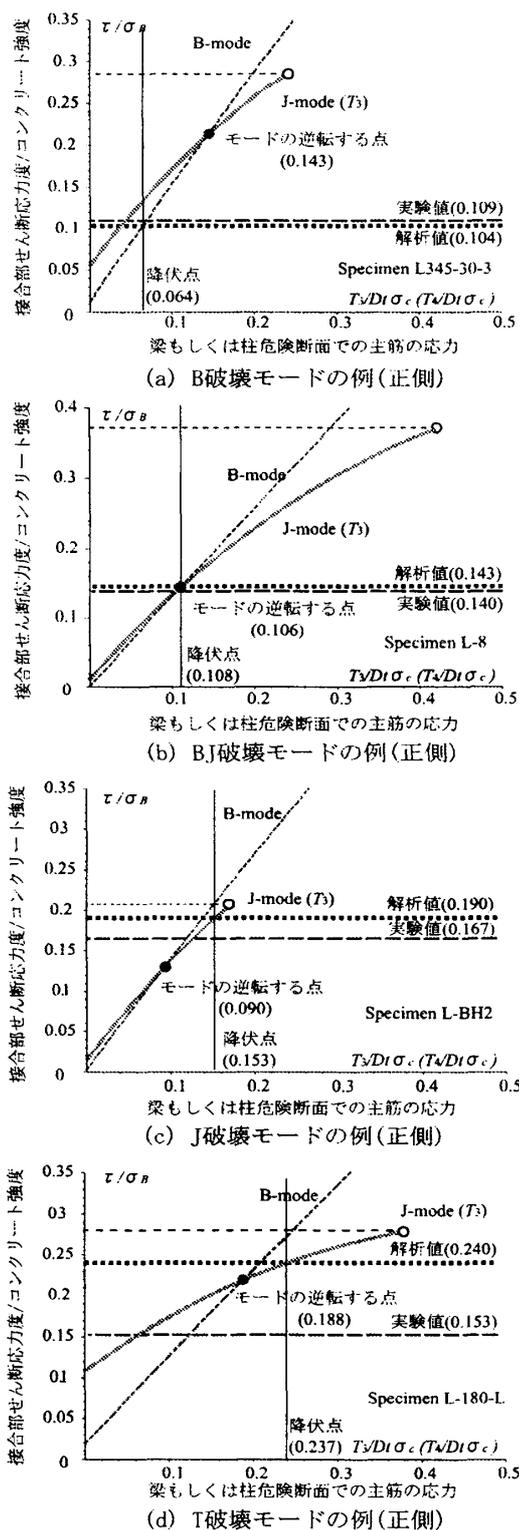


図-4 実験及び解析破壊モードとの関係

いる。このことから、この場合には、主筋は引張り降伏するものの、接合部の発揮する強度は部材の曲げ降伏で決まる強度を下回り、しかも接合部せん断変形が増大して接合部せん断破壊

になるものと考えられる。実験値は (0.167) であり、計算値 (0.190) と対応している。図-4(d) は、定着破壊したと報告されている試験体 L-180-L (文献 9) を示している。鉄筋が引張り降伏する点での接合部強度の予測値は (0.240) となるが、実験値は (0.153) と小さく、対応が悪い。よって引張鉄筋の降伏前に、定着破壊による鉄筋抜け出しが進行して、J モードの変形が加速され、接合部せん断変形の増大も起こったものと考えられる。よって、定着破壊時の接合部強度を推定するには、鉄筋の定着部分の存在応力 T_4 と定着強度を比較すればよい。ただし、定着強度を推定する良い評価式がないので、実際に適用することは現状では難しい。

3.2 終局強度及び破壊モードの比較・検討

3.1 節に述べた B モードと J モードの強度を比較する方法を表-1 に示した 51 体の試験体 (文献 6 から 14 まで) に適用して、強度と破壊モードの推定精度について検討する。選定試験体の接合部形状は正方形 (梁せい/柱せい=1) に限定する。また、対称性により理論を導いたので、接合部内の横補強筋は柱中段筋を含め、縦横の平均値を採用する。表-1 に示されている観察された破壊モードは、文献の記述に基づいて次のように定めた。主筋に主筋の降伏に関する情報が記述されないで接合部破壊したものは J 破壊、梁 (または柱) が曲げ降伏したとするものは B 破壊、梁 (または柱) 主筋が降伏したが接合部破壊したとされるものは BJ 破壊、主筋の抜け出しによる耐力低下及び定着破壊と報告されているものは T 破壊と判断した。記述がない場合には、破壊状況と荷重変形関係から総合的に判断し定めた。

表-1 に計算値とモデルから推定した破壊モードを記した。表中のせん断強度は、靱性保証型指針²⁾の接合部のせん断強度 V_{ju} から求めたもので、L 字型柱梁接合部では V_{ju} が T_3 と等しいことを利用して求めた接合部せん断強度時の節点モーメントである。また、表中の曲げ強度

は、柱と梁について曲げ耐力略算式(3),(4)を利用して節点モーメントを求め、その低い方をとったものである。

$$M_u = 0.8a_t\sigma_y D + 0.5ND(1 - N/bd\sigma_c) \quad (N > 0) \quad (3)$$

$$M_u = 0.8a_t\sigma_y D + 0.4ND \quad (N < 0) \quad (4)$$

ここに、 a_t : 引張鉄筋断面積、 σ_y : 引張鉄筋の降伏点、 D : 柱のせい、 b : 柱の幅、 σ_c : コンクリートの設計基準強度、 N : 実験で得られた柱また梁のせん断力である。

靱性保証型指針²⁾で求められる接合部せん断強度時の強度は、全般に実験値に対してバラツキが大きい。T 破壊したものを除いたとしても、BJ 破壊や J 破壊の試験体の実験値を大きく下回っているものが多い。一方、柱もしくは梁の曲げ耐力から求められる強度は、概ね計算結果と近くなった。実験と計算の耐力比の平均値は closing 側・opening 側でそれぞれ 1.07, 1.04 となった。

本報告による理論^{4,5)}で得られた計算値は、定着破壊を除いた試験体の計算値と実験値の比の平均値は、closing 側, opening 側でそれぞれ 1.01 及び 1.03 となりより良い対応を示した。次に表-1 に示した J モードの強度と B モードの強度の比 (M_j/M_b) と本理論による解析値との関係を図-5 に示し、 M_j/M_b 比により破壊モードが判別できるかどうかを検討する。

closing 側では、全ての B 破壊の実験体は (M_j/M_b) > 1.07 を満足しており、(M_j/M_b) が 1.07 以上あれば接合部せん断破壊を防止することができると考えられる。opening 側では、2 体を除いた全ての B 破壊の実験体が (M_j/M_b) > 1.0 を満足しており、(M_j/M_b) が 1.0 以上程度あれば接合部せん断破壊を防止することができると考えられる。closing 側では (M_j/M_b) < 1.0 の場合に 1 体を除き、すべて J 破壊となっているが、opening は (M_j/M_b) < 1.0 の試験体の中に B 破壊が多数含まれており、opening 側の破壊モードの

表-1 実験と解析結果の比較

文献	実験体	せん断強度*	閉じる方向(closing)					破壊モード 実(解)**	開く方向(opening)					破壊モード 実(解)**
			Mj/Mb	曲げ強度*	解析*	実験*	実/解*		Mj/Mb	曲げ強度*	解析*	実験*	実/解*	
[8]	L-BH1	119	0.91	248	248	202	0.81	J(J)O	0.84	189	154	145	0.94	J(J)O
	L-BH2	119	0.91	251	248	218	0.88	J(J)O	0.84	189	154	144	0.93	J(J)O
	L-BU	119	0.98	262	272	285	1.04	J(J)O	0.96	185	172	171	0.99	J(J)O
	L-BP	119	0.98	262	272	221	0.81	T(J)O	0.96	184	172	181	1.05	J(J)O
	L-PP	139	0.98	262	272	279	1.03	J(J)O	0.96	179	172	214	1.24	J(J)O
[10]	Mazzoni 1	54	0.95	116	122	105	0.86	J(J)Δ	0.86	92	85	55	0.64	T(J)Δ
	Mazzoni 2	54	1.00	116	130	106	0.82	J(B)Δ	0.96	91	94	61	0.65	T(J)Δ
	Mazzoni r	61	1.05	120	131	132	1.01	B(B)Δ	0.96	128a	111a	114a	1.02	B(J)Δ
[11]	LP15-1	71	0.99	135	145	125	0.86	J(J)Δ	0.89	105	98	89	0.90	B(J)O
	LP15-2	71	0.99	134	145	115	0.80	J(J)Δ	0.89	105	98	89	0.91	B(J)O
	LP15-3	71	0.99	134	145	118	0.82	J(J)Δ	0.89	105	98	88	0.90	B(J)O
	LP18-1	85	0.99	137	145	136	0.94	J(J)Δ	0.89	104	98	100	1.02	B(J)O
	LP18-2	85	1.02	114	122	117	0.96	J(B)Δ	0.91	86	84	83	0.98	B(J)O
	LP18-3	85	1.02	108	122	75	0.61	T(B)O	0.91	86	84	90	1.07	B(J)O
	LP16-4	75	0.96	178	180	185	1.03	J(J)O	0.85	135	123	126	1.03	B(J)O
	LP20-5	77	1.12	109	116	122	1.05	B(B)O	1.08	80	83	79	0.95	B(B)O
[12]	Knee J1	30	1.02	38	42	41	0.97	B(B)Δ	0.90	33	33	33	1.02	J(J)Δ
	Knee J2	30	1.02	38	42	40	0.96	B(B)Δ	0.90	33	33	34	1.04	J(J)Δ
	Knee J3	35	1.12	46	51	49	0.96	B(B)Δ	1.04	40	43	41	0.95	BJ(B)Δ
	Knee J4	35	1.10	46	51	48	0.94	B(B)Δ	1.17	26	29	31	1.07	B(B)Δ
	Knee J6	35	1.12	45	50	51	1.01	B(B)Δ	1.07	37a	40a	34a	0.85	B(B)Δ
	Knee J7	46	1.05	73	81	73	0.89	B(B)Δ	0.94	64	66	60	0.92	J(J)Δ
	Knee J9	39	1.05	46	52	47	0.92	B(B)Δ	0.94	38a	39a	34a	0.87	J(J)Δ
	Knee J10	39	1.04	46	52	50	0.98	B(B)Δ	0.94	38a	39a	35a	0.91	B(J)Δ
	Knee J14	34	1.13	46	51	55	1.09	B(B)Δ	1.08	38a	40a	37a	0.92	J(B)Δ
[7]	L-1	172	1.16	162	159	213	1.34	B(B)O	1.08	92	102	128	1.26	B(B)O
	L-2	207	1.25	188	190	234	1.23	B(B)O	1.22	110	117	146	1.25	B(B)O
	L-3	101	1.17	106	109	125	1.15	B(B)O	1.11	65	69	78	1.13	B(B)O
	L-4	172	1.30	162	162	213	1.31	B(B)O	1.31	93	98	127	1.30	B(B)O
	L-5	178	1.16	158	159	195	1.23	B(B)O	1.08	92	102	128	1.26	B(B)O
	L-6	178	1.16	161	159	209	1.32	B(B)O	1.08	93	102	125	1.23	B(B)O
	L-7	172	1.16	161	159	209	1.32	B(B)O	1.08	92	102	130	1.28	B(B)O
	L-8	207	1.00	379	394	388	0.98	BJ(B)O	0.85	254	232	233	1.00	BJ(J)O
	L-9	207	1.07	387	400	422	1.05	BJ(B)O	0.95	248	254	266	1.05	BJ(J)O
	L-10	172	1.04	383	399	408	1.02	BJ(B)O	0.93	251	249	253	1.01	BJ(J)O
	L-11	172	1.04	383	399	407	1.02	BJ(B)O	0.93	250	249	256	1.03	BJ(J)O
[13]	L-1	42	0.99	75	82	68	0.84	BJ(J)Δ	0.88	59	55	48	0.86	BJ(J)Δ
	L-2	42	0.99	73	82	53	0.65	T(J)O	0.88	60	55	44	0.79	BJ(J)Δ
	L-3	42	0.99	76	82	77	0.95	BJ(J)O	0.88	58	55	57	1.03	BJ(J)Δ
	L-4	42	1.02	73	85	49	0.58	T(B)O	0.88	58	55	57	1.02	BJ(J)Δ
	L-5	42	1.02	73	85	52	0.61	T(B)O	0.79	79a	70a	70a	0.92	BJ(J)Δ
	L-6	42	1.02	78	85	87	1.03	BJ(B)O	0.72	101a	93a	78a	0.85	BJ(J)Δ
[6]	L345-30-3	122	1.29	157	171	180	1.05	B(B)O	1.53	97	92	117	1.27	B(B)O
	L345-30-3w	122	1.24	157	168	180	1.07	B(B)O	1.38	96	95	120	1.26	B(B)O
	L345-60-4	164	1.24	209	224	247	1.10	B(B)O	1.36	127	126	164	1.30	B(B)O
	L490-60-3	164	1.24	211	228	233	1.02	B(B)O	1.34	132	129	156	1.21	B(B)O
[9]	L-180-S	30	0.89	70	71	33	0.46	T(J)O	0.86	62	51	30	0.58	T(J)O
	L-180-L	30	0.89	72	71	46	0.64	T(J)O	0.86	62	51	29	0.58	T(J)O
	LP-180-S	30	0.89	70	71	33	0.46	T(J)O	0.86	62	51	26	0.50	T(J)O
	L-90-S	30	0.89	70	71	31	0.43	T(J)O	0.86	62	51	22	0.43	T(J)O
[14]	OT36B-T	151	1.03	242	264	194	0.73	B(B)O	0.85	179	158	145	0.92	B(J)O

*は内側に30度及び45度斜め筋が配置しており、斜め筋の主筋量を加算して計算したものである。

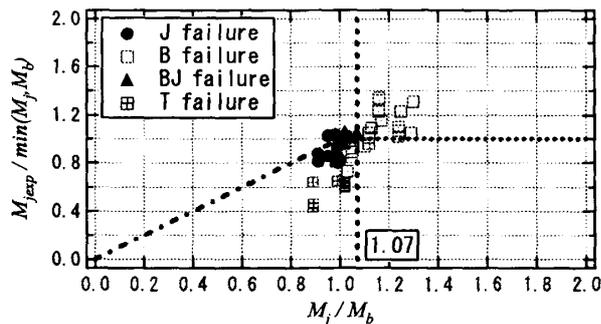
Mj/MbはJモード及びBモードの接合部接点までのモーメントであり、Mj/MbはJモード強度及びBモード強度の比率である。

*せん断強度、曲げ強度、解析、実験は全て接合部接点までのモーメントであり、単位はkN・mである。

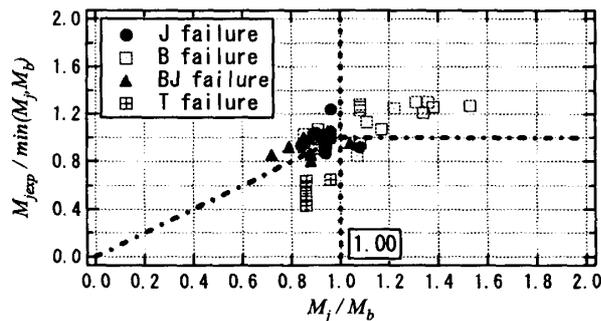
**○は実験者の判断モードに従い、△は論文の表記及び履歴ループに従い筆者が判断したものである。

判別はclosing側より複雑な因子が影響していると予想される。設計では、別途定着破壊が防止されているものとして、安全側を考えれば、

closing側及びopening側を M_j/M_b を1.1程度以上となるようにすれば、接合部破壊は防ぐことができるかと判断できる。図-6に既往の設計

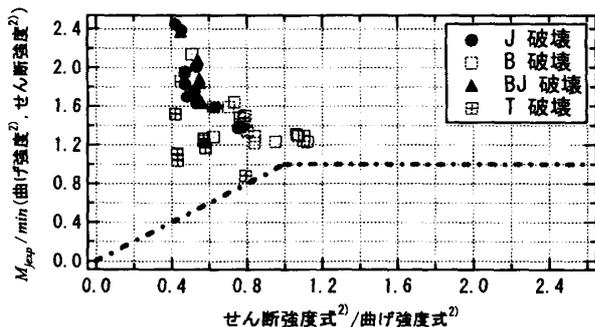


(a) 閉じる方向(正側)

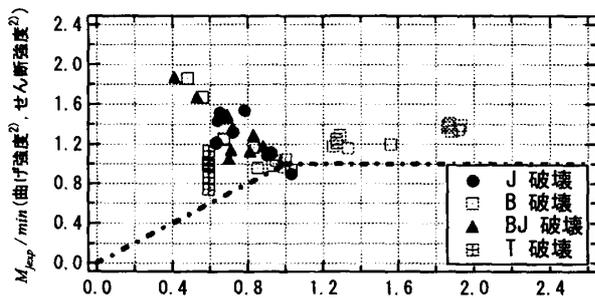


(b) 開く方向(負側)

図-5 終局耐力の実験値と計算値



(a) 閉じる方向(正側)



(b) 開く方向(負側)

図-6 曲げ強度とせん断強度の計算値

式(曲げ強度²、せん断強度²)の計算値と実験値との関係を示すが、強度は安全側に評価できるもののバラツキが大きいため、曲げ強度とせん断強度の比の大きさと破壊モードの対応は明瞭ではない。従って、明らかに本理論は現行の設計法に比べてはるかに合理的である。

5. 結論

既往の十字型柱梁接合部のせん断破壊のために提案された理論をL字形柱梁接合部に適用して、L字形柱梁接合部の終局強度と破壊モードの推定を試みその結果、次の結論が得られた。十字型柱梁接合部に適用された理論は、L字型接合部にも適用が可能であり、普遍性を有する合理的なものである。L字型柱梁接合部では定着破壊が起こらない場合には、提案されたJモードとBモードの比を制限することにより、接合部のせん断破壊を防止することができる。そのためには閉じる方向と開く方向での比(M_j/M_b)を1.1以上とするのが一つの目安となる。

参考文献

- 1) B. Mayfield, Fung-Knew Kong, Alann Bennisson, J.C.D. Wiston Devices :Corner Joint Details in Structural Lightweight Concrete, ACI Journal Proc., May 1971, pp.366-372
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証形耐震設計指針・同解説, 1999
- 3) Hitoshi Shiohara : A New Model for Sear Failure of R/C Interior Beam-Column Connections, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.127, No. 2, Feb. 2001, pp. 152-160
- 4) 辛勇雨外1名：鉄筋コンクリートL字形柱梁接合部のせん断終局強度の解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2003年 pp.465~468
- 5) 辛勇雨外1名：鉄筋コンクリートL字形柱梁接合部のせん断終局強度の解析, 構造工学論文集 Vol.50B(2004年4月), pp.87-96
- 6) 井上寿也外2名：機械式定着工法による曲げ降伏先行型・L形及びT形RC造部分架構の終局耐力と変形性能, コンクリート工学年次論文報告集, 第25巻2号, pp.494~504, 2003
- 7) 中村一彦外3名：円形定着版により機械式定着されたL形接合部に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第25巻2号, pp.925~930, 2003
- 8) 田畑卓外1名：RC造ト・T・L形柱梁接合部のせん断及び定着性状, コンクリート工学年次論文報告集, 第23巻3号, pp.373~378, 2001
- 9) 岡野裕也外2名：RC造L字形柱梁接合部の破壊性状と補強効果に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第25巻2号, pp.475~480, 2003
- 10) Mazzoni, S. et al. (1991), Cyclic response of RC beam-column knee joints test and retrofit, Report No. UCB/EERC-91/14, EERC and Dept. of Civil Engineering, Berkeley, California, 18pp.
- 11) 青田晃治外3名：最上階柱梁接合部におけるプレート定着工法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第23巻3号, pp.391~396, 2001
- 12) Leslie M. Megget : The Seismic Behavior of Small Reinforced Concrete Beam-Column Knee Joints, Bulletin of the Newzealand national society for earthquake engineering, Vol.31, No. 4, December. 1998, pp.215~245
- 13) 崔建宇外3名：建物最上階におけるL字形接合部の耐力機構モデル, 日本建築学会構造系論文集 第567号, 2003年5月, pp.101-109
- 14) 中澤春生外2名：主筋を機械式定着した鉄筋コンクリート造柱梁接合部の構造性能に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, 第24巻2号, pp.847~852, 2002