論文 接合部アスペクト比を考慮した RC 造 L 字型柱梁接合部の終局強度 と破壊モード解析

辛 勇雨^{*1}・塩原 等^{*2}・楠原 文雄^{*3}

要旨:著者らの RC 造 L 字型柱梁接合部の終局強度と破壊モードの解析モデルを,接合部 アスペクト比とスパンアスペクト比を変数として考慮できるように拡張し,その影響を調 べた。その結果,接合部アスペクト比を変化させる場合,主筋未降伏時のJモード破壊の 接合部強度は,アスペクト比1.0を中心にアスペクト比が小さくても,大きくても減少し, また,主筋の引張降伏による接合部破壊の場合は,接合部強度への影響は少ない。最後に 実験報告と比較してモデルの適用性を検討する。

キーワード:L字型柱梁接合部,接合部アスペクト比,スパンアスペクト比

1. はじめに

柱梁接合部の性能にはコンクリート強度,主 筋量,部材寸法などの様々な因子が影響してい ることがよく知られている。現行の指針⁶⁾では それらの因子を実験結果から収集したデータを 利用し,影響の大きな因子ごとに整理した経験 式を用いている。しかし,現行の指針のような 経験式は簡便ではあるものの,評価範囲以外の ものの評価は不適切な場合など危険側に評価す ることが予想される。それを防ぐためには,破 壊メカニズムに基づく力学モデルの開発が必要 不可欠である。

そこで,筆者等は柱梁接合部の統一的な理論 の確立及びL字型柱梁接合部の設計法の合理化 を図るため,十字型柱梁接合部の理論をL字型 柱梁接合部に拡張し,既往の実験結果と比較し て理論の妥当性について論じた^{1,2),3)}。

その理論は四重曲げ抵抗機構に基づいており, 柱梁接合部の性能に及ぼす殆どの因子の影響を 定量的に説明するものである。しかし,理論の 説明を単純にするため,対称性を用いていたた め梁せいと柱せいの比(接合部アスペクト比)が 1.0 でかつ,柱と梁の反曲点距離の比(スパンア スペクト比)が1.0のもののみを適用範囲として

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

いた。実際の建物ではアスペクト比が 1.0 では なく,しかも,アスペクト比による影響が無視 できない可能性もある。各国の基準においても 接合部強度に関するアスペクト比の影響は今後 の検討課題とされている。そこで,本研究はア スペクト比の影響を考慮できるように理論の拡 張を図り,既往の実験結果と比較・検討してそ の妥当性を検討した。

2. L字型柱梁接合部の解析モデル 2.1 L字型柱梁接合部の変形機構



本報告は,既報^{1,2}と同様な破壊モードを考 えるが,接合部における変形・破壊モードとし

て梁端部の曲げ変形(B モード(梁)),柱端部の曲 げ変形(B モード(柱)),接合部対角線斜めせん断 ひび割れの拡大による変形(J モード)の3つの変 形機構を想定する(図 - 1)。

2.2 解析対象の部分架構

検討の対象は,図-2 に示す反曲点から切り 出したL字型架構である。L字型接合部では柱 及び梁の区別が必ずしも明確ではないが,ここ では便宜上,図-2 のように区別している。図 -2において,形状に関する条件(*L*_b,*L*_c,*D*_b,*D*_c, *b*_b,*b*_c,*j*_b,*j*_c)は,与えられる既知数である。

2.3 Jモードの力の釣り合い

図 - 1 の変形機構に適合するJモードの危険 断面と危険断面を横切る主筋及びコンクリート の応力を図 - 3 に示す。ここで,コンクリート ブロックの作用方向は接合部対角線ひび割れ面 に平行としているものと仮定する。分割された 個々のJモードの危険断面において力の釣り合 いを考慮すれば閉じる側で9個の独立な釣り合 い式が,開く側でも別の9個の独立な釣り合い 方程式が導かれる。

水平方向の力の釣り合いより,

(閉じる力を受ける場合)

T_3	$-T_7 +$	$C_1 -$	$-C_2 = 0$	(1)	

$$-T_3 - T_4 + C_2 + C_3 - T_{10} - V_c = 0$$
 (2)

$$T_4 - T_8 - C_3 + C_4 + V_c = 0 \tag{3}$$

(開く力を受ける場合)

$$T_3 - T_7 + C_1 - C_2 = 0 \tag{4}$$

$$-T_3 - T_4 + C_2 + C_3 - T_{10} + V_c = 0$$
⁽⁵⁾

$$T_4 - T_8 - C_3 + C_4 - V_c = 0 \tag{6}$$

鉛直方向の力の釣り合いより,

(閉じる力を受ける場合)

$$-T_1 - T_5 + C_1 \tan \theta + C_2 \tan \theta - T_9 = 0$$
 (7)

$$T_1 - T_2 - C_2 \tan \theta + C_3 \tan \theta - V_b = 0 \tag{8}$$

$$T_2 + T_6 - C_3 \tan \theta - C_4 \tan \theta + T_9 + V_b = 0$$
 (9)



図-2 解析対象の部分架構及び形状



(a) Forces in reinforcement at critical section



(b) Forces in concrete at critical section (Closing loading)



(c) Forces in concrete at critical section (Opening loading)

図 - 3 Jモード危険断面の応力の定義

(開く力を受ける場合)

$$-T_1 - T_5 + C_1 \tan \theta + C_2 \tan \theta - T_9 = 0$$
 (10)

$$T_1 - T_2 - C_2 \tan \theta + C_3 \tan \theta + V_b = 0 \tag{11}$$

$$T_2 + T_6 - C_3 \tan \theta - C_4 \tan \theta + T_9 - V_b = 0$$
(12)
モーメントの釣り合いより,

(閉じる力を受ける場合)

$$(-T_{3} + T_{7})\frac{j_{b}D_{b}}{2} + (-T_{1} + T_{5})\frac{j_{c}D_{c}}{2} + \frac{C_{2}^{2}}{\sigma_{c}b_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2}$$

$$-C_{1}(\tan\theta - \frac{C_{1}}{\sigma_{c}b_{c}D_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2})D_{c} = 0$$
(13)

$$(T_{3} - T_{4})\frac{j_{b}D_{b}}{2} + (T_{1} - T_{2})\frac{j_{c}D_{c}}{2} - \frac{C_{2}^{2}}{\sigma_{c}b_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2} + C_{3}(\tan\theta - \frac{C_{3}}{\sigma_{c}b_{c}D_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2})D_{c} - L_{v}V_{d} = 0$$
(14)

$$(T_{4} - T_{8})\frac{j_{b}D_{b}}{2} + (T_{2} - T_{6})\frac{j_{c}D_{c}}{2} + \frac{C_{4}^{2}}{\sigma_{c}b_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2}$$

$$-C_{3}(\tan\theta - \frac{C_{3}}{\sigma_{c}b_{c}D_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2})D_{c} + L_{v}V_{d} = 0$$
 (15)

(開く力を受ける場合)

$$(-T_{3} + T_{7})\frac{j_{b}D_{b}}{2} + (-T_{1} + T_{5})\frac{j_{c}D_{c}}{2} - \frac{C_{1}^{2}}{\sigma_{c}b_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2} + C_{2}(\tan\theta - \frac{C_{2}}{\sigma_{c}b_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2})D_{c} = 0$$
(16)

$$(T_{3} - T_{4})\frac{j_{b}D_{b}}{2} + (T_{1} - T_{2})\frac{j_{c}D_{c}}{2} + \frac{C_{3}^{2}}{\sigma_{c}b_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2}$$

$$-C_{2}(\tan\theta - \frac{C_{2}}{\sigma_{c}b_{c}D_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2})D_{c} + L_{v}V_{d} = 0$$
 (17)

$$(T_{4} - T_{8})\frac{j_{b}D_{b}}{2} + (T_{2} - T_{6})\frac{j_{c}D_{c}}{2} - \frac{C_{3}^{2}}{\sigma_{c}b_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2} + C_{4}(\tan\theta - \frac{C_{4}}{\sigma_{c}b_{c}D_{c}}\frac{1 + \tan^{2}\theta}{2})D_{c} - L_{v}V_{d} = 0$$
(18)

式(1)から(18)が導かれる。ここで,すべての記 号は図 - 2 及び図 - 3 にある。

2.4 B モードの力の釣り合い

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,部材端部のコンクリート応力 (C_b,C_c)及び外力の力の釣り合いより柱フェイ スの梁断面では式(19)が,梁フェイスの柱断面 では式(20)が導かれ,梁端部におけるモーメン ト(M_b)及び柱端部におけるモーメント(M_c)はそ れぞれ式(21),式(22)により求められる。ここで, ±の-は閉じる側を,+は開く側を表している。 さらに,得られた梁端部のモーメント及び柱端 部のモーメントから梁せん断力(V_b)及び柱せん 断力(V_c)を求めれば式(23),式(24)になる。

$$-T_3 - T_4 + C_b \pm V_c = 0 \tag{19}$$

$$-T_2 - T_6 + C_c \pm V_b = 0 \tag{20}$$

$$M_b = \pm (T_4 - T_3) \frac{j_b D_b}{2} + C_b (1 - \frac{C_b}{b_b D_b \sigma_c}) \frac{D_b}{2}$$
(21)

$$M_{c} = \pm (T_{2} - T_{6}) \frac{j_{c} D_{c}}{2} + C_{c} (1 - \frac{C_{c}}{b_{c} D_{c} \sigma_{c}}) \frac{D_{c}}{2}$$
(22)

$$V_b = M_b / (L_b - j_c D_c / 2)$$
(23)

$$V_{c} = M_{c} / (L_{c} - j_{b} D_{b} / 2)$$
(24)

2.5 接合部モーメント M_j, M_{j(beam)}, M_{j(column)}

接合部モーメント *M*_j, *M*_{j(column)}は, J モード及び B モードから得られたせん断力 *V*_d, *V*_b, *V*_cに接合部接点までの距離を乗じて式 (25), 式(26), 式(27)からそれぞれ求められる。

$$M_j = V_d \times L_v \tag{25}$$

$$M_{j(beam)} = V_b \times L_b \tag{26}$$

$$M_{j_{(column)}} = V_c \times L_c \tag{27}$$

2.6 解析上の仮定

ここでは,定着・付着破壊が起こらないこと を前提する。Jモードの強度及び B モードの強 度を算出する時,満たすべき制約条件は文献[1] による。また,定着位置による接合部の分類も 文献[1]による。既往の研究¹⁾と同様に不足する 釣り合い条件式の数を補うため,次のような仮 定を置くことにする。

・閉じる力を受ける場合

はり端危険断面での引っ張り鉄筋応力 T_3 (も しくは T_6)をパラメータとして V_d を得るために, 圧縮鉄筋応力 T_{1,T_2,T_4} を定数ゼロと仮定する。 また,接合部の縦・横せん断補強筋 $T_{9,T_{10}}$ は既 報¹⁾と同様に降伏していると仮定する。以上の 仮定を使って2.3節の閉じる側の9個の方程式 を解くことにより未知数の解が得られる。

・開く力を受ける場合

はり端危険断面での引っ張り鉄筋応力 T_4 (も しくは T_2)をパラメータとして V_4 を得るために, 圧縮コンクリート応力 C_1, C_2, C_4 を定数ゼロと 仮定する。また,閉じる側と同様に接合部の縦・ 横せん断補強筋 T_9, T_{10} は降伏していると仮定す る。以上の仮定を使って 2.3 節の開く側の 9 個 の方程式を解くことにより未知数の解が得られ る。

2.7 終局強度及び変形モード

2.3 節から 2.6 節の理論を使って閉じる側で は T_3 (もしくは T_6)を,開く側では T_4 (もしくは T_2)を主変数とする関数としてJモード及びBモ ード(梁及び柱)のモーメント M_j が求められる。 真の終局強度及び変形モードは三つ(M_j , $M_{j(beam)}$, $M_{j(column)}$)の内,一番小さい方で与えられる。終 局強度及び変形モードの区別の方法については 文献[1]に詳しく示している。

3.諸因子に関する終局耐力解析

アスペクト比が接合部性能に及ぼす因子の影響を調べる。閉じる力を受ける時の接合部せん 断破壊の主要因は定着が原因であると考えられ るため³⁾,以下,主に開く力を受ける時の性能 について検討する。

3.1 接合部アスペクト比の影響

接合部のアスペクト比が接合部の終局強度に 及ぼす影響を調べるために,表-1のL字型接 合部を基準として梁部材と柱部材のせいの積が 一定になるようにアスペクト比を変化させて解 析を行なった。ここで,部材のせいに対する主 筋間距離の比率は一定と仮定した。また,接合 部せん断補強筋は解析結果を明確にするためゼ 口とした。

図 - 4 に比較のための標準的な接合部を示す。 梁もしくは柱の主筋量は,梁及び柱の曲げ降伏 モーメントが基準試験体と同じくなるようにし た。よって,部材せいが大きくなるほど,鉄筋 量は少なく,また,逆の場合は多くなる。接合 部に入力する力の大きさを無次元化する方法と してはいくつかの方法が考えられるが,ここで は SRC 造の接合部の例にならって,接合部に入 力する力は,モーメントを接合部の体積で基準 化して表す。

以下, すべての図のモーメントの大きさは *b*_c*D*_c*D*_bσ_c(*b*_c: 柱幅, *D*_c: 柱せい, *D*_b: 梁せい, σ_c:コンクリート曲げ圧縮強度=0.85σ_B)で基準化 した値で表すことにする。

解析諸元						
$L_{\rm b} = 1000 \text{ mm}$	$j_{\rm b} = 0.8$					
$L_{\rm c} = 1000 {\rm mm}$	$j_{\rm c} = 0.8$					
$b_{\rm b} = 300 \ {\rm mm}$	$\sigma_{\rm B}$ = 30 MPa					
$b_{\rm c} = 300 {\rm mm}$	$p_{\rm wh}, p_{\rm wv} = 0.0 \%$					
$D_{\rm b} = 300 \ {\rm mm}$	$f_{\rm v} = 345 {\rm MPa}$					
$D_{\rm c} = 300 {\rm mm}$	$\sigma_{\rm c}$ = 85% of $\sigma_{\rm B}$					
梁柱主筋 : 上下共 4-D13(0.56%)						
$R = D_b/D_c = 0.36$ $R = D_b/I_c$	$D_{c}=1.0$ $R=D_{b}/D_{c}=1.95$					
$D_b=300 \times 180$	$=300x300$ $D_b=300x420$					
$D_{c}=300x300$ $D_{c}=300x300$	$D_{c}=300 \times 215$					

表 - 1 解析例の L 字形柱梁接合部の諸元

図-4 接合部アスペクト比の例

図 - 5 に 3 種類の接合部アスペクト比に対す る解析結果を示す。図 - 5 の横軸は引っ張り鉄 筋応力を,縦軸は接合部の体積で基準化したモ ーメントを示している。ここに,*M*_{ju}は主筋未 降伏時の接合部強度の極大値を,*M*_{jy}は主筋の 降伏により接合部強度が決まる場合をそれぞれ 意味している。

まず,モーメント曲線の変化を調べる。*M*_{ju} はコンクリートの圧壊により強度が定まるもの で接合部アスペクト比が 1.0 の時では梁もしく は柱側共に同じ曲線となっている。また,*M*_{jy}(図 中の)は3種類の接合部アスペクト比に対し て梁側と柱側の曲線が逆転していたが,ほぼ同 様な傾向を示している。

次に接合部のアスペクト比を変化させた場合 のモーメントを図 - 6 に示す。図中の *M*_{jby} は梁 降伏型を, *M*_{jcy} は柱降伏型を意味している。コ ンクリートの応力の上限値により定まれる *M*_{ju} はアスペクト比が 1.0 の場合を基準としてアス ペクト比が大きくても,小さくても 1.0 より小 さい値を示している。一方,主筋の引っ張り降 伏で強度が決まる場合(*M*_{jby}, *M*_{jcy})は,閉じる, 開く側共にほぼ一定値を示している。

3.2 スパンアスペクト比(梁・柱の長さ)の影響

3.1 節で接合部アスペクト比に関して述べた が,梁もしくは柱の長さの変化(スパンのアスペ クト比)も,L字型接合部のモーメントに影響を 及ぼす。そこで,スパンのアスペクト比(*L*_b/*L*_c) を変数とする解析を行った。表 - 1 の諸元を基 準として接合部アスペクト比を 1.0 とし,(梁の スパン *L*_b)と(柱のスパン *L*_c)の積の値が常に 1.0 になるように柱と梁の長さを同時に変化させ, スパンアスペクト比の影響を検討する。

スパンのアスペクト比による接合部モーメン トの変化を図 - 7 に示す。*M*_{ju} は 3.1 節の接合部 アスペクト比によるモーメントの変化と逆の傾 向を示している。これは、長さが変わるに従い、 一方の部材の長さが短くなるのでせん断力が大 きくなるからである。*M*_{jby}、*M*_{jcy}(閉じる側)も同 様な傾向を示している。一方、*M*_{jby}、*M*_{jcy}(開く 側)は若干差が生じている。

図 - 8 は柱・梁のスパンを等しくして,長さ のみを変化させたモーメントを示している。ス パンが短くなるに従って, M_{ju} , M_{jby} (閉じる側) は増加する。一方, M_{jby} (開く側)は曲げ降伏を 想定しているのでほぼ同じ強度を示すが,主筋 量を増やすに従って M_{ju} , M_{jby} (閉じる側)と同様 な傾向が見られる。

4.本モデルの適用例

図 - 9 に既往の実験報告から柱と梁の強度比 がほぼ 1.0 として設計されており,定着・付着



Moment at joint center for opening load(Beam yielding)

図 - 5 接合部アスペクト比による モーメントの変化











図-8 同一スパン長さによるモーメント

破壊が起きなかった 2 体の実験結果を示す。2 体は文献[4]に報告されたもの(梁せい/柱せい =0.96)である。柱・梁部材の区別の仕方は報告 にならう。図 - 10 に解析結果を示す。試験体 A は曲げ降伏型タイプである。試験体 B は接合部 破壊タイプであり,強度の比は閉じる側(実験/ 解析=1.01), 開く側(実験/解析=0.88)となった。

5.結論

既往の RC 造 L 字型柱梁接合部のモデルをア スペクト比の影響を考慮できるように理論の拡 張を試み,次の結論が得られた。

接合部アスペクト比を変化させる場合,鉄筋 の降伏前に強度に達するJモード破壊の接合部 強度はアスペクト比 1.0 を中心にアスペクト比 が小さくても,大きくても減少した。また,柱 と梁の曲げ強度の比が 1.0 で,主筋の引張降伏 で強度に達して接合部破壊する場合は,接合部 強度はほとんど影響を受けなかった。

モデルの妥当性をさらに明確にするためには, より詳細な因子の検討及び幅広い実験結果を通 して検証する必要がある。

参考文献

- 1) 辛勇雨,塩原等:鉄筋コンクリートL字型柱 梁接合部のせん断終局強度の解析,構造工学 論文集 Vol.50B, pp.87-96,2004 年 4 月
- 2) 辛勇雨,楠原文雄,塩原等:鉄筋コンクリートL字型柱梁接合部のせん断終局強度の解析,コンクリート工学年次論文報告集,第 26 券 2 号,pp.493~498,2004
- 3) 辛勇雨,楠原文雄,塩原等:付着・定着破壊 を考慮した鉄筋コンクリート造L字型柱梁 接合部の終局強度解析,コンクリート工学年 次論文報告集,第27巻2号,pp.409~414, 2005
- 4) Leslie M. Megget. :The Seismic Design and Performance of Reinforced Concrete Beam-Column Knee Joints in Buildings, Earthquake Spectra, Vol.19, No.4, pp.863 ~



図 - 9 解析対象の試験体の荷重と履歴の関係 4)



895, November. 2003

- 5) 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
- 6)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,1999