

論文

[2121] RC 内部柱梁接合部の剪断抵抗機構に関する実験的検討

後藤 康明\*1・ 城 攻\*2・ 柴田 拓二\*3

0. はじめに

鉄筋コンクリート内部柱梁接合部の応力伝達機構についての研究が近年精力的に行われ、剪断抵抗機構とこれに基づく剪断強度式がいくつか提案されている。接合部の応力伝達機構における梁主筋の接合部内での付着性状の把握が重要であることは過去の研究で指摘されているが、実験においてはその詳細な検討例は数少ない。また、内部接合部では接合部補強筋による耐力の増大が得られないことが知られているがその明確な理由は明らかにされていない。本研究では、過去に著者らが行った破壊性状の異なる3つのシリーズの実験結果を再検討して、接合部の入力量（剪断余裕度）、主筋の付着性状、接合部及び接合部材の破壊過程等が剪断抵抗機構に与える影響を検討し、接合部の破壊機構について考察を行うことを目的としている。

表-1 試験体の諸元

シリーズ	B 8	B 1 4	C 3
柱 30x30 h=175	14-D13( $p_g=1.84\%$ ) (内6本中段筋)	8-D19 ( $p_g=3.11\%$ ) 4-D13 (内D13は中段筋)	12-D19( $p_g=3.82\%$ )
梁 20x35 l=300	3-D13 ( $p_t=0.51\%$ ) 梁端部剪断補強筋 H:2-6φ @100 L:3-6φ @50	正加力(引張筋) 5-D13 ( $p_t=0.99\%$ ) 負加力(引張筋) 7-D13 ( $p_t=1.39\%$ )	3-D25 ( $p_t=2.41\%$ )
接合部	水平補強筋 H:8-5φx6(1.16%) M:2-6φx7(0.41%) L:2-6φx3(0.21%) 5φは高強度鉄筋	水平補強筋 L:2-6φx5(0.37%) H:4-6φx6(0.93%)	水平補強筋 H:8-6φx6(1.60%) M:4-6φx6(0.80%) L:2-3φx2(0.03%) 鉛直補強筋 M:20-6φ(0.78%) H:40-6φ(1.56%)
材料 強度	$\sigma_B=265\sim 287$ D13: $\sigma_y=3850$ 6φ: $\sigma_y=3800$ 5φ: $\sigma_y=10800$	$\sigma_B=303\sim 311$ D19: $\sigma_y=6350$ D13: $\sigma_y=4030$ 6φ: $\sigma_y=3320$	$\sigma_B=320\sim 334$ D25: $\sigma_y=4340$ D19: $\sigma_y=5890$ 6φ: $\sigma_y=3890$
降伏時 入力量	$b_y \tau_j: 32.2$ / $\sigma_B: 0.116$	正 $b_y \tau_j: 56.0$ / $\sigma_B: 0.182$ 負 $b_y \tau_j: 79.0$ / $\sigma_B: 0.257$	$b_y \tau_j: 144.7$ / $\sigma_B: 0.442$
梁主筋 付着	平均 $u_b: 81.5$ $u_b/\sqrt{\sigma_B}: 4.90$	平均 $u_b: 85.3$ $u_b/\sqrt{\sigma_B}: 4.87$	平均 $u_b: 183.4$ $u_b/\sqrt{\sigma_B}: 10.1$
柱軸力	$\sigma_B=F_c/6(F_c=240)$	$\sigma_B=\sigma_B/6$	$\sigma_B=0.3\sigma_B$
備考	試験体名 H 接合部補強筋水 L 梁端部剪断筋量平	試験体名 P L 接合部補強筋水 量平	試験体名 H 接合部補強筋水 O 接合部補強筋鉛直 量直

単位: cm (長さ)、kgf/cm<sup>2</sup> (強度、応力度)

$u_b$ : 梁筋が接合部の両側で引張/圧縮降伏する時の平均付着応力度

1. 実験概要 本研究に用いた実験は文献 [1,2,3] に既に発表を行ったもので、表-1に各実験シリーズの主要な諸元を示し、規準化接合部剪断応力度一部材角関係を図-1に示す。全試験体の断面寸法、部材寸法は共通である。シリーズ毎に梁が降伏する時の接合部剪断入力量が異なり、それによって破壊形式も異なっている。試験体の実験時のコンクリート強度は 265~334kgf/cm<sup>2</sup>であった。各結果を以下に概説する。

【B8シリーズ】梁降伏先行型に設計した骨組で、降伏時の入力量が小さく(梁主筋3-D13:SD35)接合部の剪断亀裂発生耐力と梁の降伏耐力がほぼ同じである。試験体は4体でパラメータは接合部横補強筋量、梁端部剪断補強筋量及び接合部における梁主筋の付着の有無である。いずれの試験体も梁の

- \*1 北海道大学助手 工学部建築工学科、工修 (正会員)
- \*2 北海道大学教授 工学部建築工学科、工博 (正会員)
- \*3 北海道工業大学教授 建築工学科、工博 (正会員)

曲げ破壊で耐力が決定し、接合部の破壊はパネル対角線上に軽微な剪断亀裂が発生した程度であった。梁主筋の付着を無くした試験体 (MHUB) ではパネルの亀裂発生はなかった。また、接合部補強筋の多い試験体ほど梁主筋の降伏域の接合部内への伸展が少なかった。

【B14シリーズ】梁降伏先行型に設計した骨組で、降伏時の入力量はB8よりも大きく、また試験体は加力の方向で入力量が変わるようになっている (梁主筋5-D13/7-D13:SD35)。試験体は2体でパラメータは接合部水平補強筋量である。いずれの試験体も剪断入力量の小さい加力時には梁の曲げ降伏

で耐力が決定したが、剪断入力量が大きくなる加力時には梁主筋の一部が降伏したが梁の曲げ耐力に至らなかった。また、接合部補強筋量が少ない試験体では剪断入力量の大きい加力時に最大耐力以降に接合部コンクリートの劣化が顕著になり耐力低下が大きかった。

【C3シリーズ】梁の降伏以前に接合部が剪断破壊するように設計した骨組で、梁降伏時の接合部設計入力量は $\tau_j = 0.4 F_c$  (接合部有効断面=平均幅×柱成) である (梁主筋 3-D25:SD40)。接合部内で梁主筋の付着劣化が予備計算で予想されたが、劣化が生じても反対側の梁で定着されることを期待して梁端部を鋼板で補強した。試験体は6体でパラメータは接合部内の縦・横補強筋量である。いずれの試験体も梁が降伏する以前に接合部剪断亀裂の発生・伸展・拡幅によって接合部コンクリートが劣化し耐力が決定した。耐力値は接合部縦横補強筋の量に関係なく  $\tau_{ij} = 0.3 \sigma_B$  であった。

それぞれの実験に関する詳細の説明は既発表文献に委ねる。

## 2. 梁主筋の接合部内での付着性状

図-2に各シリーズの代表的な試験体の梁上端中央に配された梁主筋の接合部内部における区間付着応力度の推移をその鉄筋の引張側柱面での歪との関係で示した。区間付着応力度は接合部内で4分点 (B8シリーズでは3分点) の位置で計測した歪度から求めた (B8、B14シリーズの梁主筋[D13]は塑性域まで達したので Ramberg-Osgoodモデルを用いて応力度を計算し、C3シリーズの主筋[D25]は降伏しなかったためバイリニアモデルによった)。試験体は繰り返し荷重されているが図では包絡線を表示している。また、図中に細実線で示した計算値は平面保持を仮定した断面の曲げ解析で求めた接合部内での作用平均付着応力度である。梁主筋が降伏した試験体では降伏歪度近くまでの結果を示している。

いずれの試験体においても初期の段階では接合部内の平均付着力 (太実線) は計算値と良好な対応を示す。また、引張側区間の付着応力度は曲げ亀裂の発生以降他の区間よりも低い値で推移する。梁主筋が降伏する前に接合部に剪断亀裂が生じたB14、C3シリーズ試験体では、鉄筋が弾性域内にある場合には接合部剪断亀裂の発生に伴って付着力の増大が鈍化し、剪断亀裂の影響に

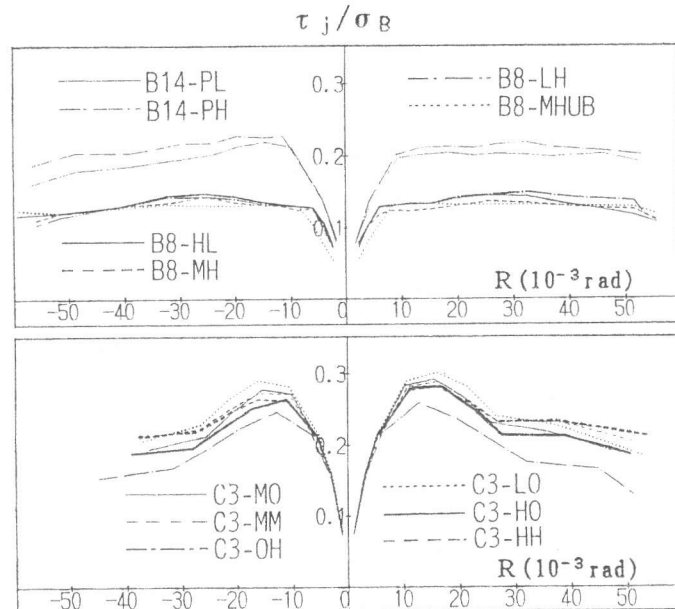


図-1 規準化接合部水平剪断応力度-部材角関係

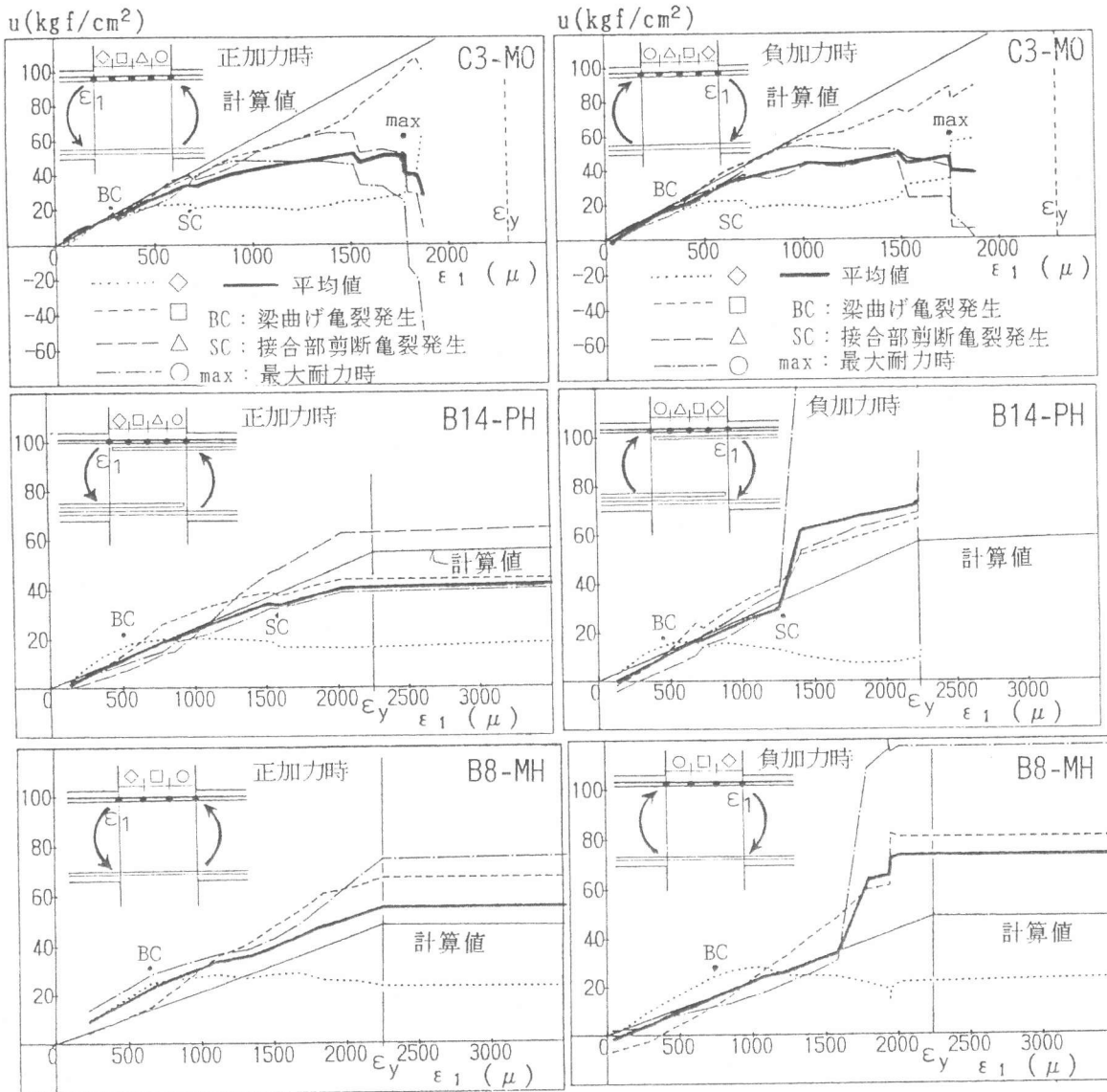


図-2 梁主筋の接合部内における付着応力度の推移

よる接合部域の梁主筋引張力の増大に伴う付着力の減少と接合部コンクリートの劣化による定着能力の減少を予測できる。

C3シリーズでは最大耐力時に接合部内平均付着応力度が最大になってその後は低下する。区間付着応力度は初期には平均値と変わらない(接合部内で付着力が均一)が、その後最大値の発生位置が中央引張側に移動する。これは、接合部に発生した剪断亀裂がパネルの圧縮域に伸展して大きく拡幅するので後述する梁降伏先行型試験体に比べ圧縮位置での付着能力が失われるためと思われる。結局、正負加力の剪断亀裂の発生に伴い接合部中央部のコンクリートが単独の塊として梁主筋の主要定着部分となっている。剪断亀裂の発生によって接合部コンクリートが劣化した梁主筋の付着力が頭打ちになって伝達機構が変化していると考えられる。

B8、B14シリーズ試験体では梁主筋が柱面で降伏するまでは各区間付着応力度はおおよそ計算値に近い値であるが、反対側で梁主筋が引張降伏し塑性化した後に逆載荷が生じると亀裂の閉合時に圧縮力を梁主筋だけで負担するためにそこに大きな圧縮力が作用し、その結果圧縮端近傍の接合部内に大きな付着力が作用する。

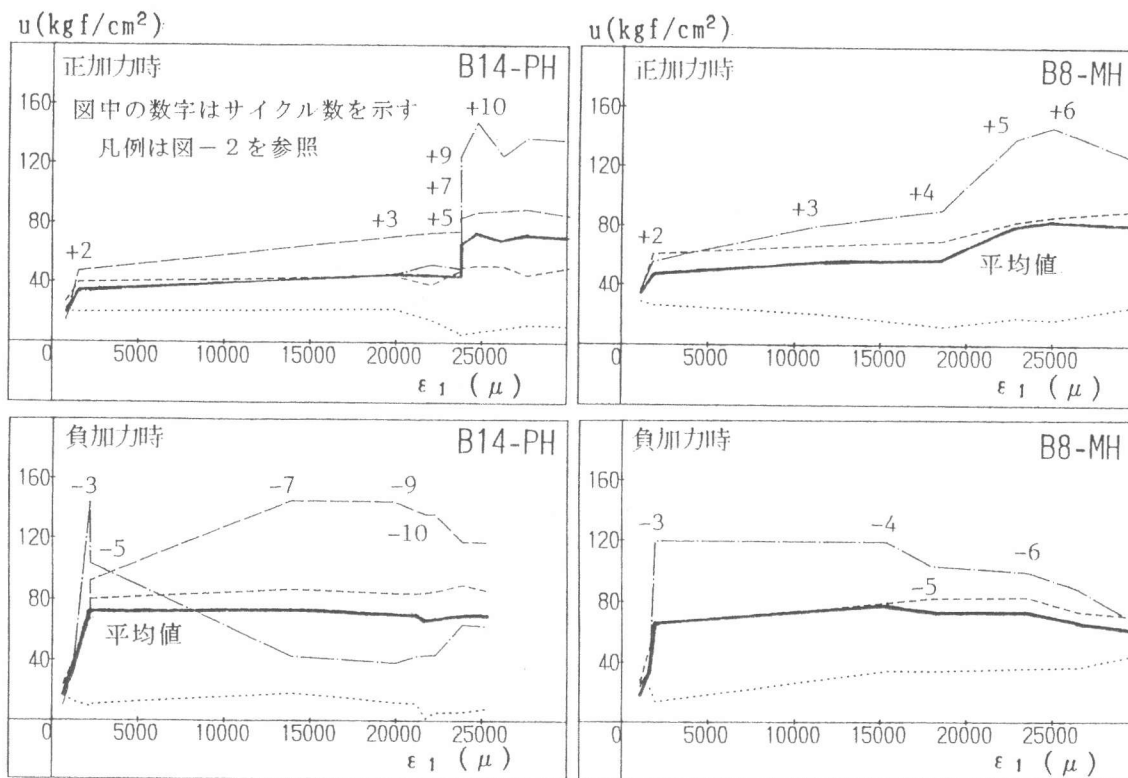


図-3 梁主筋の接合部内における付着応力度の推移  
(梁主筋が柱面で塑性域に達している場合)

図-3にB8、B14シリーズ試験体の梁主筋が柱面で塑性域に至った時の区間付着応力度の推移を図-2と同様に示した。但し、この図は繰り返しサイクルのピーク点での値を結んだ図である。B14(PH)試験体では正加力時に柱面歪度が24000 $\mu$ で反対側の柱面で鉄筋が塑性化したことによって付着応力度が急増している。負加力時では圧縮域での区間付着力は剪断亀裂の伸展によって付着劣化が生じ付着応力度のピークが内側に移動する。

接合部での剪断応力の伝達を考えると、接合部に形成される主対角ストラットに伝達される応力は梁端面の圧縮域のコンクリート力と接合部圧縮域の梁主筋の付着力が考えられるが(鉛直方向の応力として柱コンクリート圧縮力、柱筋付着力が考えられる)、C3シリーズでは接合部内の付着力(特に、圧縮域における)の停滞によって梁端コンクリートからの圧縮力が増加すると共に、対角圧縮ストラットの角度が緩くなると予想される。梁降伏先行型試験体では接合部圧縮域での梁主筋付着力が確保できるため主対角ストラット力が梁主筋付着力によって良好に伝達されたと考えられる。しかし、剪断入力が多い場合には剪断亀裂の発生に伴い圧縮域の付着劣化が生じ梁端コンクリートからの圧縮力が増加すると考えられる。

B8、B14シリーズ試験体の付着応力度の実験値から、接合部内の平均付着応力度と最大区間付着応力度を求めた結果を下に示す。

B8シリーズ (20データ)	柱成 300mm	平均: $4.46\sqrt{\sigma_B}$	(標準偏差 0.394)
	区間長100mm	最大: $7.02\sqrt{\sigma_B}$	(同上 0.818)
B14シリーズ (10データ)	柱成 300mm	平均: $3.78\sqrt{\sigma_B}$	(同上 0.398)
	区間長 75mm	最大: $7.48\sqrt{\sigma_B}$	(同上 0.870)

### 3. 接合部内での水平応力の伝達

Paulayは接合部内の応力の伝達機構として接合部パネルの剪断亀裂発生後の状態に対して応力の再配分による伝達を考え、図-4に示すように接合部中央断面での力の釣合から接合部内の応力伝達機構を提案した[4]。

$$D = V_j h / \cos \alpha$$

$$\Sigma T_c' + P = V_j h \cdot \tan \alpha = V_j v + P$$

$$\Sigma T_b' = (V_j v + P) \cdot \cot \alpha = V_j h$$

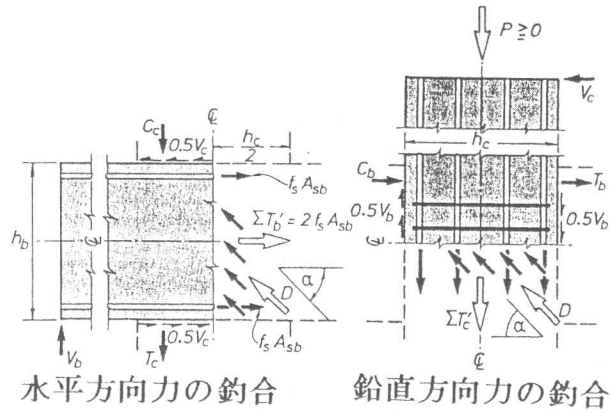


図-4 接合部内における力の釣合

この論文に従って接合部中央位置における鉄筋力から応力の再配分による伝達力を計算した。この論文では接合部内全域に均一な剪断亀裂が発生し、応力の再配分が完全に行われている状態を想定しているため、初期の亀裂未発生の場合には計算された力は必ずしも接合部の内力の全てを表さない。ここでは、主に鉄筋力の推移から応力分担の変化と破壊の事象との関係について考察を行う。

図-5はC3シリーズの各試験体接合部中央断面での水平筋（梁主筋、接合部水平補強筋）力の推移を示している。また、図-6は各鉄筋力のそれぞれの全降伏力に対する割合の推移を示した。

柱筋の補強形式が他の試験体と違うOHを除くと全試験体とも水平鉄筋力はほぼ同じ値を示す。その結果、接合部水平補強筋が殆ど無いLOでは梁主筋力で水平鉄筋力を負担するため他の試験体よりも大きな鉄筋力が働き、その他の試験体でも接合部水平補強筋の程度に応じて梁主筋負担力が増減していることが判る。全鉄筋力がPaulayの言うように接合部

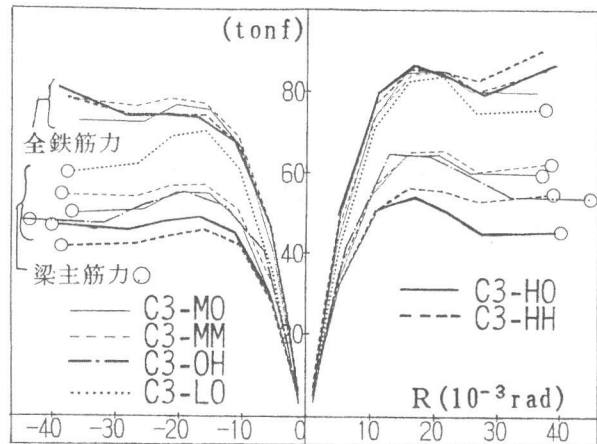


図-5 水平筋力の推移 (C3シリーズ)

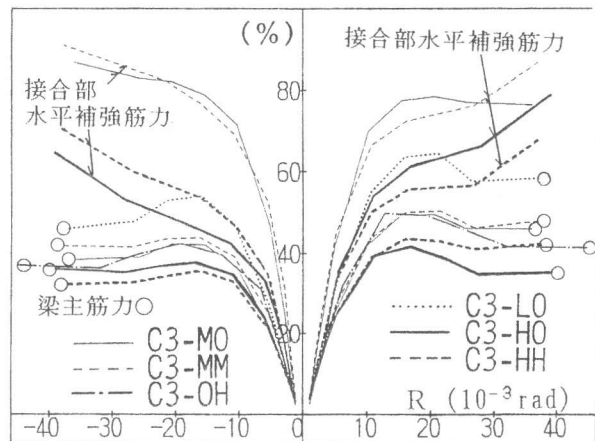


図-6 各鉄筋の降伏力に対する割合

中央断面に作用する対角圧縮力の水平成分の全てを表しているならばいずれの試験体もこの対角圧縮力で耐力が決定したことになり接合部水平補強筋が見かけ上効かないことを示す。

図-7、8に梁降伏先行型試験体についてC3シリーズと同様に求めた水平筋力の推移を示す。【B14シリーズ】正加力時と負加力時では接合部入力量が違うので挙動に差が現れた。入力量の小さい正加力時では水平筋力の合計値はPL、PHで差がなく、そのため接合部水平補強筋量の多いPHでは梁主筋力が小さい値で推移する。接合部入力量の大きい負加力時では最大耐力時では両試験体共に接合部水平補強筋力が全降伏力近くまで増加し、また、梁主筋力も正加力時のP

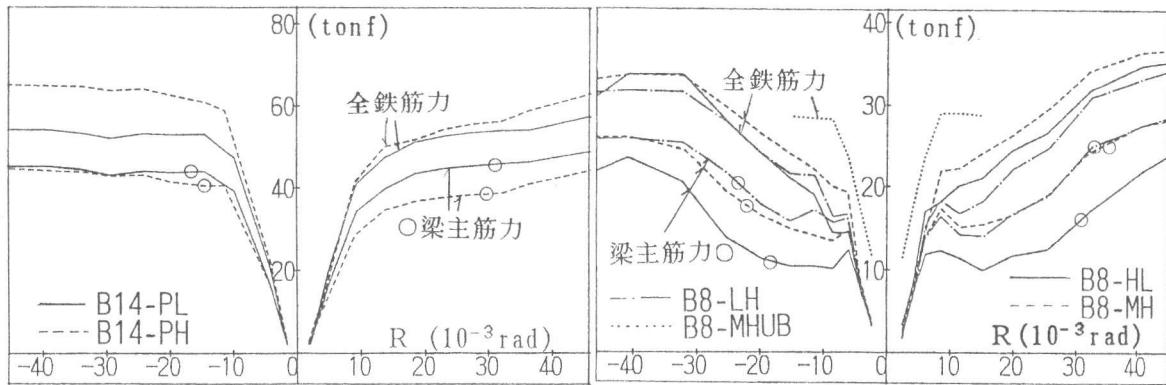


図-7 水平筋力の推移 (B8、B14シリーズ)

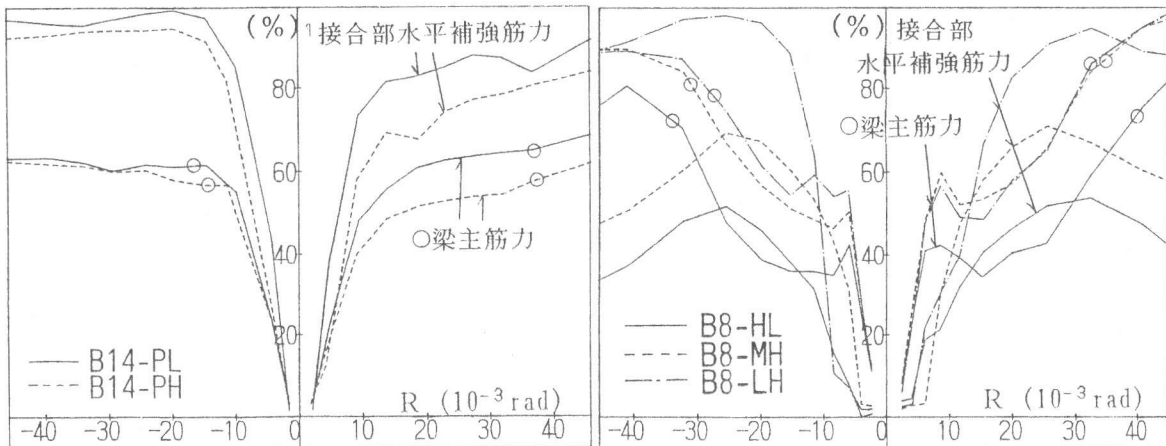


図-8 各鉄筋の降伏力に対する割合 (B8、B14シリーズ)

Lの値に達している。そのため、補強筋力の差だけ耐力値に差が出たと思われる。

【B8シリーズ】梁降伏前後で剪断亀裂の発生に伴い接合部水平補強筋力が急増すると梁主筋力の増大が一時停止するが、補強筋量の多いHLで梁主筋の降伏力に対する比率が小さい。このことは梁主筋の接合部内への降伏域の伸展が接合部補強筋量が多いもの程小さいことに対応する。

#### 4. まとめ

過去に行った梁降伏時の接合部剪断入力量の異なるRC内部柱梁接合部試験体を用いた実験結果について、梁主筋の接合部内での付着性状と接合部中央位置での鉄筋力の推移について考察を行い、1. 梁主筋の付着性状は接合部の剪断亀裂の発生に影響を受けること、2. 付着指標の良い場合の平均付着応力度は約 $3.8 \sim 4.5\sqrt{\sigma_R}$ 、最大付着応力度は $7.0 \sim 7.5\sqrt{\sigma_R}$ となること、3. 接合部に剪断亀裂が発生した後に応力の再配分が行われると対角圧縮力の水平成分は梁主筋と接合部水平補強筋によって負担されるので見かけ上補強筋が効かないことを示した。

【参考文献】1)城 攻・後藤康明・柴田拓二：RC内部柱梁接合部とその周辺の補強効果について、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.9, No.2, pp.187-192, 1987 2)城 攻・後藤康明・柴田拓二：RC十字形柱はり接合部のせん断抵抗性状に対するせん断補強筋の効果について、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.11, No.2, pp.543-548, 1989 3)城 攻・後藤康明・柴田拓二：鉄筋コンクリート造骨組の変形性能に及ぼす接合部補強筋の影響、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.14, No.2, pp.401-404, 1992 4) Paulay, T.: Equilibrium Criteria for Reinforced Concrete Beam-Column Joints, ACI Str. Journal, Vol.86, No.6, PP.635-643, Nov./Dec.1989