

論文 鉄筋コンクリート造柱梁接合部架構のためのマクロエレメントによる接合部補強量の影響の解析

朴 哲敏^{*1}・塩原 等^{*2}・田尻 清太郎^{*3}

要旨：筆者らの提案している柱梁接合部の変形を考慮するためのマクロエレメントを用いて，鉄筋コンクリート造柱梁接合部部分架構の静的弾塑性骨組解析を行った。梁の主筋量，主筋径，接合部内の横補強筋量，主筋の降伏点などを変数とするパラメトリック解析を行った。これらの設計因子は，架構の初期剛性やひび割れ剛性に影響を与えないが，降伏強度や降伏後剛性低下率に大きな影響を与える。梁の主筋量や主筋強度を大きくすると，早期に接合部内の主筋の付着耐力に到達するため，接合部内の横補強筋の拘束効果が低減する。

キーワード：十字型接合部，マクロエレメント，梁主筋強度，梁主筋量，横補強筋量

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の耐震設計において，建物の全体降伏機構を設定する設計方法¹⁾を用いる場合が多い。しかし，建物の高層化に伴う使用材料の高強度化によって柱梁接合部に損傷が集中しやすくなる。そのため，建物としては柱梁接合部に塑性ヒンジが形成され，耐震設計における建物の全体降伏機構が保証されなくなる。したがって，柱梁接合部における各設計因子が接合部や架構の性能に与える影響を調べなければならない。

本論では筆者らの提案している柱梁接合部の変形を考慮するためのマクロエレメント²⁾³⁾を用いて，鉄筋コンクリート造十字型柱梁接合部部分架構の静的弾塑性骨組解析を行う。梁の主筋の降伏強度，主筋径，主筋量，接合部内の横補強筋量などを変数とするパラメトリック解析を行い，これらの設計の諸因子が，架構の剛性，強度，柱梁接合部の強度，変形の分担割合などに及ぼす影響を定量化にして，より合理的な柱梁接合部の設計法の確立のための資料を提示する。

2. マクロエレメント

2.1 マクロエレメントの構成

小谷は，接合部における応力伝達機構と変形機構は一對一の対応関係ではなく，付着すべりと接合部のせん断変形を分離することができないので，モデル化に問題点⁴⁾があると指摘している。マクロエレメントは，接合部パネルを4つの接合部剛板と対角方向にそれらと接続したコンクリートを表す一軸ばねおよび主筋と連結させる付着ばねを設けることで，モデル化の問題点を克服している。このマクロエレメントは接合部フェース，柱断面，梁断面におけるコンクリートの平面保持仮定を表す剛板と，コンクリート，鉄筋，付着，柱・梁のせん断を表す1軸ばねのみから構成されている。

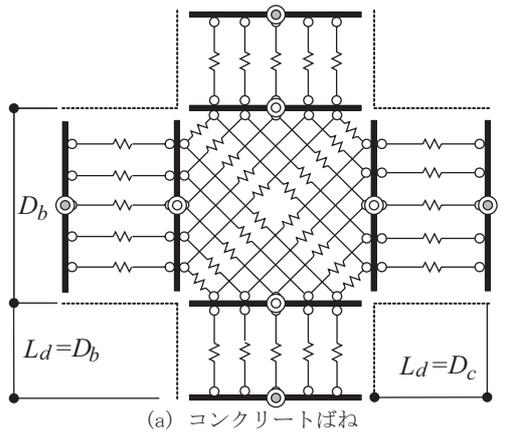
図1に本論で使用するマクロエレメントを示す。このマクロエレメントは塑性変形が集中する柱梁接合部周辺のみに着目している。また，柱と梁からの主筋の抜け出しは無視して，接合部内の鉄筋のみに3つのマクロな付着ばねを介して接合部剛板と連結させる。

柱と梁部材に弾性部分と塑性ヒンジ部分を設

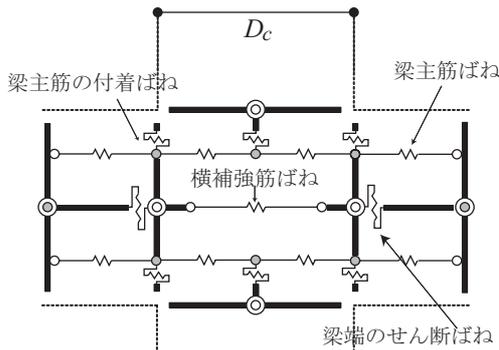
*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 博士課程 (正会員)

*2 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 准教授 工博(正会員)

*3 独立行政法人 建築研究所 構造研究グループ研究員 工博 (正会員)



(a) コンクリートばね



(b) 梁の鉄筋ばね (柱は同様)

- ◎ 外部節点(3自由度) ● 内部節点(1自由度)
- ⊙ 内部節点(3自由度) ○ 内部節点(従属)

図 1 マクロエレメント

ける。塑性ヒンジ長さは接合部と柱・梁部材の初期剛性の分布を考慮して、柱では 1.0 倍の梁のせい、梁では 1.0 倍の柱のせいとする。

2.2 材料の構成則

(1) コンクリートの応力とひずみ関係

コンクリートの応力とひずみ関係を図 2 に示す。単調載荷時、引張側の包絡線は引張強度に至るまで線形弾性で表し、引張軟化領域においては応力を 2 段階低減させる 1/4 モデルを採用する。圧縮側の包絡線は圧縮強度に至るまで修正 Kent-Park モデル⁵⁾で表し、圧縮軟化領域においては圧縮破壊エネルギーを考慮して下り勾配を定めた。繰り返し時、圧縮側から引張側では最大引張ひずみを目指して直線で載荷し、引張側から圧縮側では負の引張強度まで載荷し、その後は経験した最大圧縮ひずみを目指して直線で載荷する。

柱梁接合部におけるコンクリートは 2 方向の

応力状態ではあるが、均一なせん断応力状態ではないので、修正圧縮応力度理論のようなひび割れによるコンクリート圧縮強度の低減はしない。

(2) 鉄筋の応力とひずみ関係

鉄筋の応力とひずみ関係を図 3 に示す。鉄筋の応力とひずみ関係の包絡線は引張側、圧縮側

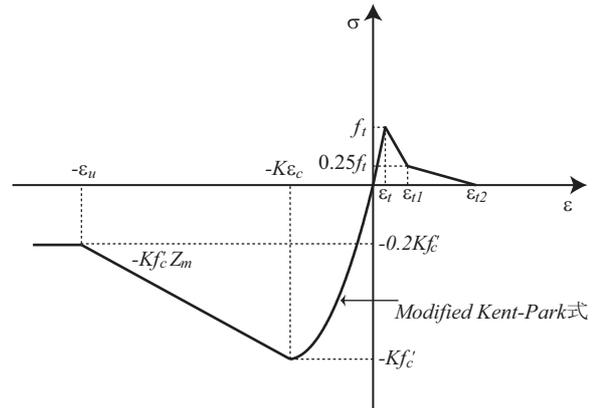


図 2 コンクリートの応力ひずみ関係

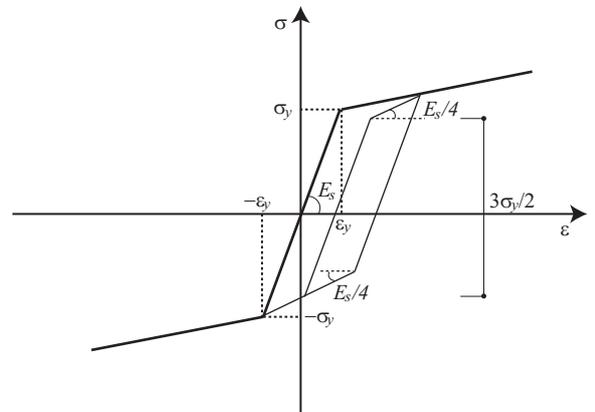


図 3 鉄筋の応力ひずみ関係

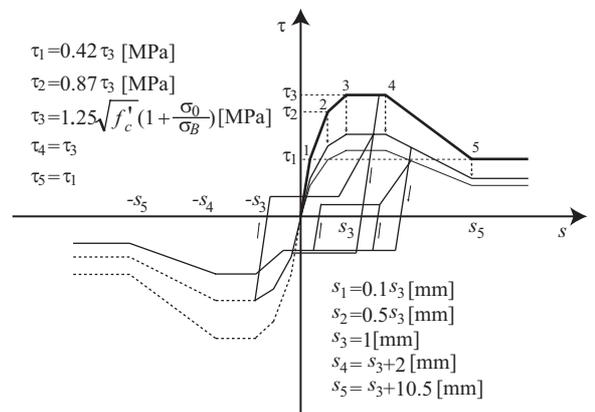


図 4 付着の応力すべり関係

とも原点，降伏点および最大強度の点を結ぶ 2 折れ線で表す。降伏後に包絡線から除荷する場合は，降伏応力の 1.5 倍に相当する応力だけ初期剛性で除荷した後，初期剛性の 1/4 の剛性で逆側の包絡線の降伏後の直線と交わるまで載荷され，骨格曲線に復帰する。除荷時からの再載荷の場合も包絡線からの除荷と同様である。

(3) 付着の応力とすべり関係

付着の応力とすべり関係を図 4 に示す。単調載荷時，包絡線と減力曲線は Eligehausen ら⁶⁾を参考に設定する。繰り返し経路には森田ら⁷⁾が提案した付着すべりモデルにおける除荷，再載荷経路を用いる。なお，再載荷時は除荷時のひずみにおける耐力低下点を目指して直線で載荷する。

2.3 主筋の付着強度と定着長さ

接合部内で梁主筋の付着抵抗メカニズム⁸⁾は接合部内と柱・梁の境界面で異なる。本論では，梁主筋を梁剛板および柱剛板に連結させる付着ばねの強度を 1:2 とする。また，柱剛板に連結させる付着ばねの定着長さを式(1)で定め，柱せいの残りを両端の付着ばねに均等に分配する。

$$l_d = (1 + \alpha) \sigma_y d_b / 4 \tau_b \quad (1)$$

ここで， l_d ：梁主筋の付着ばねの定着長， $\alpha = 0.1$ ：梁端主筋の引張側と圧縮側の応力比， σ_y ：梁主筋強度， d_b ：鉄筋径， τ_b ：付着強度

柱主筋の周りの拘束条件は良好と仮定し，柱主筋の付着強度と定着長さを変化させない。

3. 解析対象と変数および解析方法

解析対象の試験体は，同一形状同一寸法の十字型柱梁接合部とする。表 1 に解析対象の諸元を示し，表 2 に，解析の変数を示す。A シリーズでは梁主筋の降伏強度，B シリーズでは梁主筋の径を変化させる。なお，解析変数が変わっても，梁主筋の定着長を変化させない。そして，柱における主筋は 3 段にモデル化するが，中段筋は接合部の補強筋としてモデル化する。梁における主筋は上下 2 段にモデル化する。マクロエレメントにおけるコンクリートと主筋の

表 1 解析対象の諸元

項目	内容
内法スパン $L_b \times L_c$	2600 × 1470 [mm]
梁断面 $B_b \times D_b$	240 × 300 [mm]
柱断面 $B_c \times D_c$	300 × 300 [mm]
主筋間距離比 j_b, j_c	0.73, 0.73
コンクリート強度 σ_B	27 [MPa]
柱主筋/接合部補強筋の強度 σ_y	390 / 290 [MPa]
柱主筋の付着強度 τ_b と定着長 l_d	12.99 [MPa] / 220 [mm]
柱断面の配筋	16-D13
接合部の横補強筋量 P_w	0.6 [%]
軸力比 $N_c / (B_c D_c \sigma_B)$	0.1

表 2 解析の変数

試験体	梁の主筋強度/配筋	付着耐力/定着長(梁剛板)
A1	390 [MPa] / 6-D13	1.71 [kN/mm] / 100 [mm]
A2	450 [MPa] / 6-D13	1.71 [kN/mm] / 100 [mm]
A3	510 [MPa] / 6-D13	1.71 [kN/mm] / 100 [mm]
B1	390 [MPa] / 4-D16	1.43 [kN/mm] / 100 [mm]
B2	390 [MPa] / 3-D19	1.29 [kN/mm] / 100 [mm]

分割数，分割長さ，配置は図 1 のとおりにする。解析では，水平方向の変位履歴を与えて正負交番の弾塑性骨組解析を行う。変位履歴は層間変形角が $R = \pm 1/400, \pm 1/200, \pm 1/100, \pm 1/50, \pm 1/33, \pm 1/25$ [rad] で各 2 回ずつ繰り返すものとする。

4. 解析結果と考察

4.1 層せん断力と層間変形角

解析で得られた層せん断力と層間変形角の関係を図 5 に示す。解析では接合部内の横補強筋が先行して降伏し，梁主筋が降伏する。梁主筋の降伏強度が大きいほど，梁剛板と接合部剛板間の主筋が降伏せず，接合部剛板間の主筋が降伏する傾向が見られる。全ての試験体は変形が大きいほど，逆 S 字のスリップ形状が見られ，試験体 A1 は層間変形角が負の 1/50 からスリップするが，他の試験体は層間変形角が正の 1/50 からスリップする。また，梁主筋の降伏強度と主筋径が大きいほど，同じ層間変形角での繰り返しステップで耐力が低下せず，層間変形角を更新する繰り返しステップで耐力が低下する傾

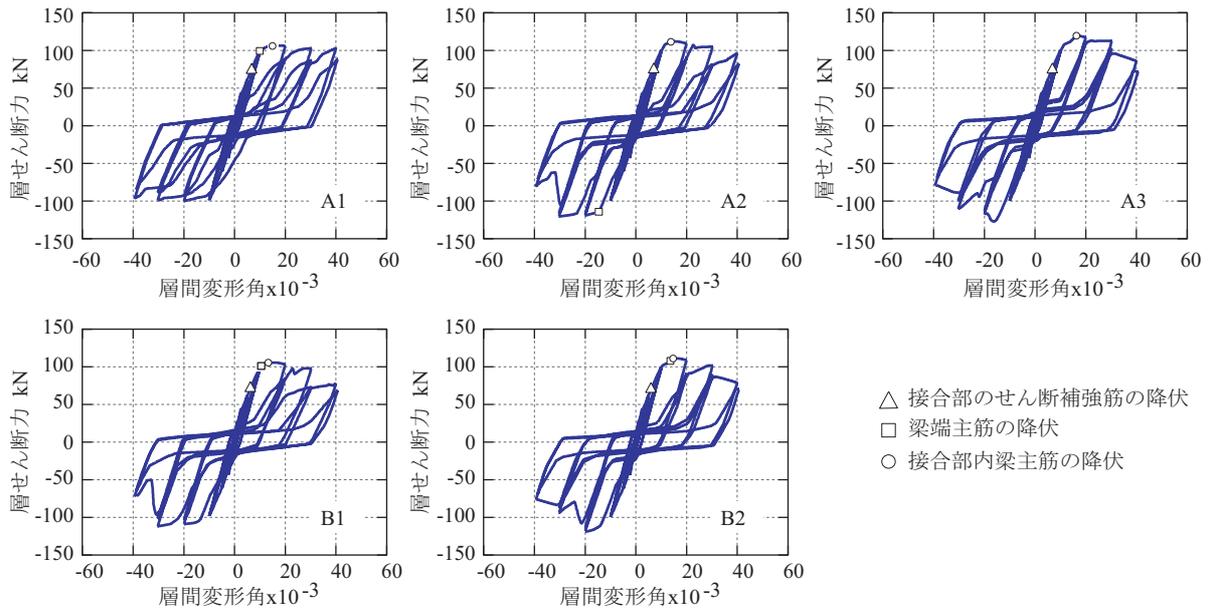


図 5 層せん断力と層間変形角の関係

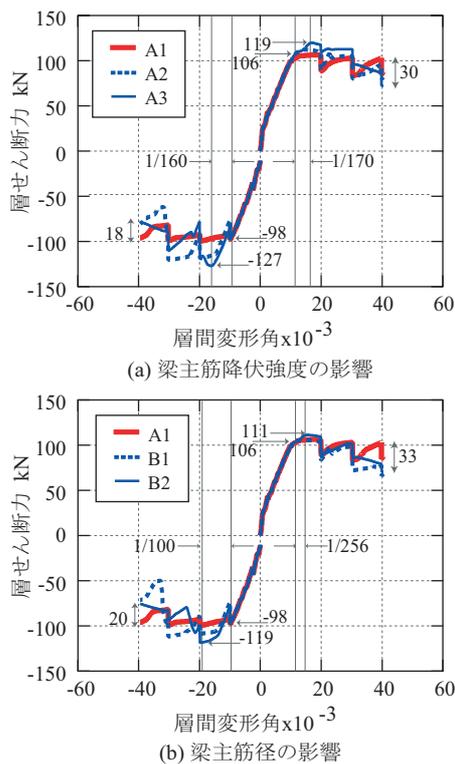


図 6 部分架構の剛性への影響

向が見られる。これらの現象に基づき、梁主筋の降伏強度の上昇や主筋径の増大は荷重変形関係における履歴を早期にピンチ化させることが分かる。

4.2 部分架構の剛性への影響

図 6 では層せん断力と層間変形角の包絡線

を示し、梁主筋の降伏強度と主筋径が部分架構の剛性に与える影響を検討する。これらの変数は部分架構の初期剛性やひび割れ剛性に影響を与えない。しかし、降伏時の強度と変形角に大きな影響を与える。梁主筋の降伏強度が 1.3 倍大きくなると、部分架構の降伏強度を 10% ~ 30% 上昇させ、降伏変形を 1/170 遅延させる。そして、梁主筋の径が 1.5 倍大きくなると、部分架構の降伏強度を 5% ~ 20% 上昇させ、降伏変形を 1/256 遅延させる。また、これらの変数は部分架構の降伏後剛性を低下させる。

4.3 梁主筋の応力度

図 7 では柱梁接合部の下段における梁主筋の応力度を示す。ここでは、同じ変形荷重ステップでの平均値を示す。全ての試験体において、梁主筋の降伏強度が大きいほど、梁主筋の降伏後の応力が低下し、梁主筋の圧縮応力度も低下する傾向が見られる。しかし、接合部内における梁主筋の最大応力差は上昇するが、接合部内の主筋と梁端の主筋の最大応力差は減少する。これは接合部内、柱剛板と梁主筋を連結させる付着ばねへの入力を増大し、梁剛板と梁主筋を連結させる付着ばねへの入力が増大することを意味する。したがって、梁主筋の降伏強度の上昇は付着耐力に早期に到達するので、梁主筋の

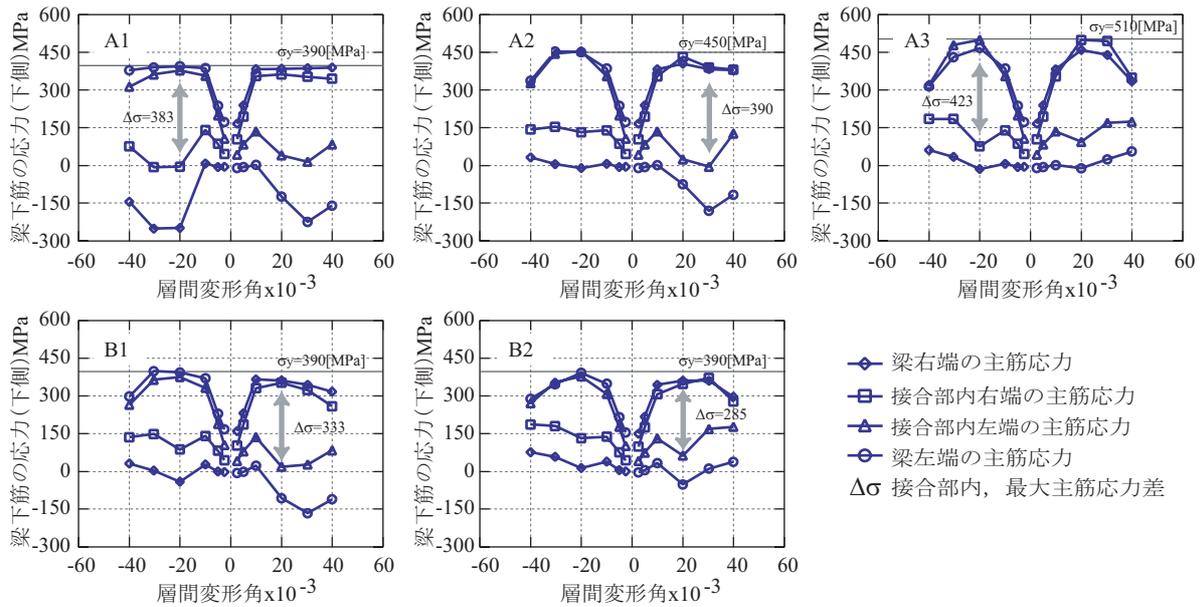


図 7 梁主筋の応力度

接合部からの抜け出し変形が卓越しないことが分かる。また、梁主筋の径が大きい場合と同じような結果となる。つまり、柱梁接合部における梁主筋の降伏強度を大きくすることで架構の降伏強度を上昇させ、降伏変位を遅延させることはできるが、接合部における主筋の付着耐力に早期に到達するため、降伏後の耐力低下が激しくなり、全体の架構に悪影響を与えることが考えられる。

4.4 柱梁接合部の横補強筋量の影響

本論では、梁主筋の降伏強度と梁主筋径が大きい場合に、柱梁接合部の横補強筋の拘束効果を検討するため、横補強筋量が 0.3%、0.6%、0.9% 時の解析結果を比較する。

4.4.1 せん断力応力比

柱梁接合部の最大せん断応力比を図 8 に示す。接合部のせん断応力は文献¹⁾により算定し、コンクリート強度で基準化したものをせん断応力比とする。正側のせん断応力比は接合部の横補強筋により上昇し、負側のせん断応力比は必ずしも上昇しないが、平均せん断応力比は上昇する。したがって、接合部の横補強筋量が増えると、柱梁接合部のせん断強度が大きくなる。

4.4.2 変形割合

接合部変形の割合を図 9 に示す。ここで、接

合部の変形は、層間変形角から梁の変形と柱の変形を引いたものとする。全ての試験体において、繰り返し回数に伴い接合部の変形が増える。また、横補強筋量が多いほど、接合部の変形の割合が小さい。しかし、梁主筋の降伏強度が大きいほど、横補強筋の拘束効果がないことが分かる。これは梁の主筋径を大きくして梁主筋の付着耐力を低減する場合と同様な結果になる。

5. まとめ

柱梁接合部のマクロエレメントにより接合部の補強量の影響に関して検討を行い、以下のような知見が得られた。

(1) 梁の主筋降伏強度と主筋径は柱梁接合部の部分架構の初期剛性やひび割れ後剛性に影響を与えない。梁の主筋降伏強度は部分架構の降伏強度を高く、降伏時の変形を伸ばし、降伏後の耐力を低下させる。梁の主筋径の増大は部分架構の降伏後の耐力を低下させる。

(2) 梁の主筋降伏強度と主筋径は違う設計因子ではあるが、梁の主筋降伏強度が大きくなると早期に梁主筋の付着耐力に達するようになるので、梁主筋の径を大きくする場合と同様な破壊メカニズムを形成させる。

(3) 梁の主筋降伏強度と主筋径が大きくなる

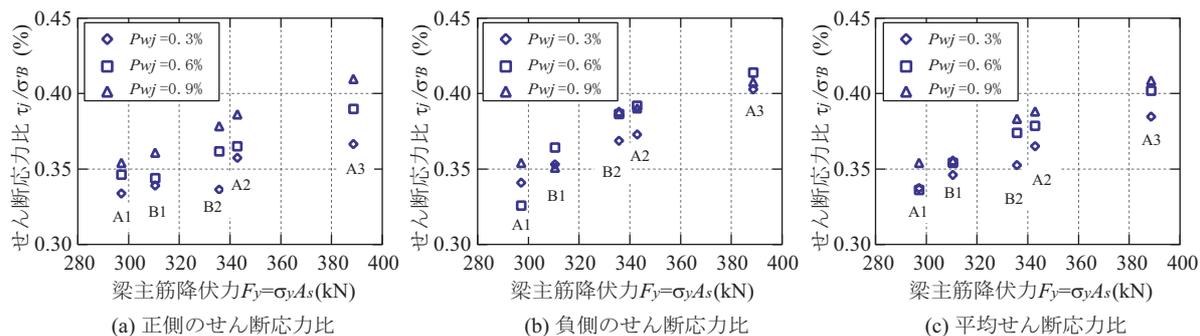


図 8 接合部のせん断応力比

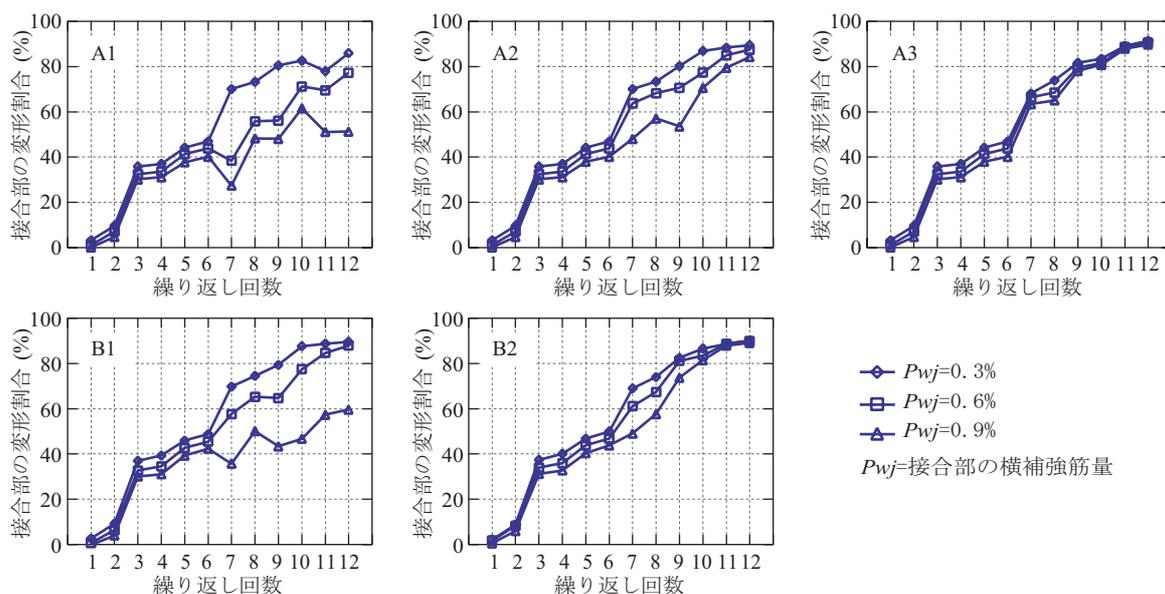


図 9 接合部変形の割合

場合、接合部の横補強筋量を増やしても変形の拘束効果が少ない。

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，1999
- 2) 田尻清太郎，塩原 等，楠原文雄：RC 柱梁接合部マクロエレメントによる十字型柱梁接合部の履歴特性の解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.331-336，2006.1
- 3) 田尻清太郎，鉄筋コンクリート柱梁接合部の弾塑性マクロエレメントに関する研究，東京大学学位請求論文，2006.3
- 4) 小谷俊介：RC 造建築物の地震応答解析の現状と問題点，コンクリート工学，Vol.31，No.8，pp.15-23，1993.8
- 5) Park, R., Priestley, M. J. N., and Gill, W. D.: Ductility of Square-Confined Concrete Columns, Journal of the Structural Division, Proceeding of the American Society of Civil Engineers, Vol.108, No.ST4, pp.929-950, April, 1982
- 6) Eligehausen, R., Popov, E. P. and Bertero, V. V.: Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations, Earthquake Engineering Research Council (EERC) Report No.83/23, University of California, Berkeley, California, 1983
- 7) 森田司郎，角 徹三：繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究，日本建築学会論文報告集，Vol.229，pp.15-24，1975.3
- 8) 市之瀬敏勝：鉄筋コンクリートはり柱接合部における付着すべり，日本建築学会論文報告集，Vol.367，pp.151-159，1986.9