

# 論文 圧着接合されたプレストレスト・コンクリート柱梁接合部の損傷過程におけるせん断ひび割れ挙動に関する研究

岸田 慎司<sup>\*1</sup>・北山 和宏<sup>\*2</sup>・永井 寛<sup>\*3</sup>

**要旨：**プレキャスト・コンクリート柱梁部材を圧着接合して組み立てた骨組み内の柱梁接合部の実験結果に基づき、接合部の損傷過程におけるせん断ひび割れの挙動について検討した。接合部せん断変形角とひび割れ幅の関係は線形性を有し、損傷を表す指標となること、また、鉄筋コンクリート造柱梁接合部に比べて損傷低減効果が期待できることがわかった。

**キーワード：**PCaPC 柱梁接合部、性能評価型耐震設計、ひび割れ幅、損傷評価

## 1. はじめに

PC 構造の柱梁接合部については、過去に地震による被災例がなかったことからほとんど議論されてこなかった。しかし、柱梁接合部パネルは破壊することが実験<sup>1)</sup>で明らかになってきており徐々に実験データも揃ってきている。また、現在、耐震設計において建物の性能を明確にした設計法への移行がなされつつあり、これを実現するためには各部材の復元力特性、変形性能と並んでひび割れ状態や圧壊などの損傷状況と耐力や変形特性などの部材性能との関係を明示することが必要である。鉄筋コンクリート構造の柱・梁接合部の損傷評価としては耐震性能評価指針・(案)<sup>2)</sup>に反映されており、各種限界状態を定義し、具体的な損傷状態の状況を示している。しかし、接合部の損傷過程と保有性能の関係について十分な実験資料が揃っているとはいえないのが現状である。さらに、今回対象としたプレキャスト・コンクリート柱・梁部材を

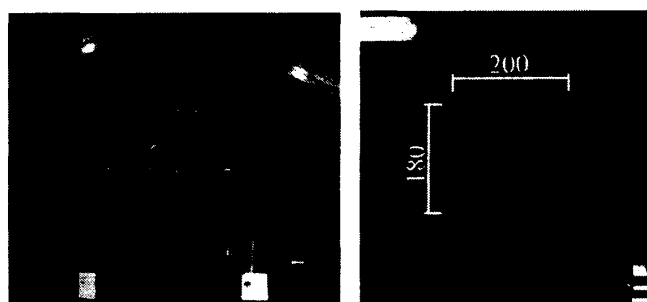


写真-1 接合部内変形の測定状況

写真-2 接合部ひび割れ幅測定状況

圧着接合して組み立てた(PCaPC)骨組み内の柱・梁接合部に関して言及すれば皆無である。そこで、PCaPC 柱梁接合部について RC 造と同様な性能評価を試み、接合部の損傷過程と保有性能の関係を明らかにすることを目的とした。

## 2. 検討対象試験体

対象とした試験体は筆者らが行った実験結果<sup>1)</sup>を使用した。試験体はPCaPC 圧着接合形式の平面骨組に水平力を加えた時の柱・梁の反曲点位置で切り出したものと考え、十字形・ト形骨組

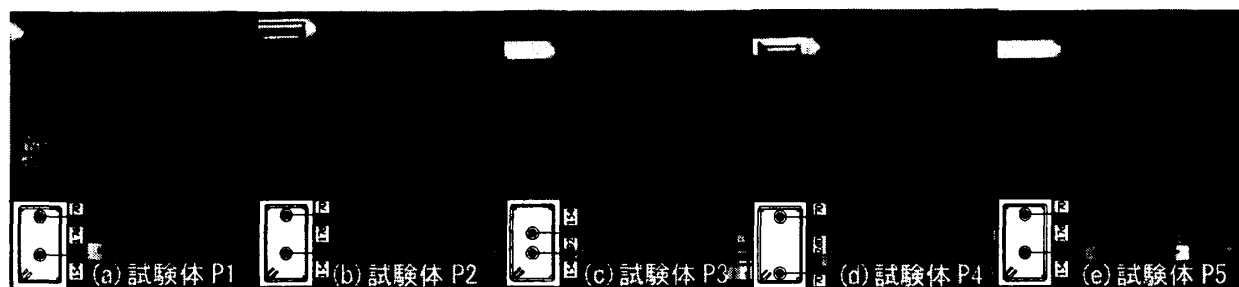


写真-3 ひび割れ状況（最大耐力時 R=2.0%時）注）点線は主筋の位置を示す。

\*1 芝浦工業大学助教授 工学部 建築学科 博士（工学）（正会員）  
 \*2 首都大学東京大学院助教授 工学研究科 建築学専攻 工博（正会員）  
 \*3 鹿島技術研究所建築技術研究部構造・耐震グループ主任研究員 修士（工学）（正会員）

を対象とした。梁 PC 鋼棒の配置位置と径，グラウト材の有無をパラメータにしている。試験体 P2 はト形，試験体 P4 はグラウトの無いアンボン試験体である。試験体断面は，柱断面 350mm×350mm，梁断面 250mm×400mm である。軸力は一定として，水平力は層間変形角により変位制御して正負交番繰返し载荷を行った。全試験体において接合部せん断破壊となった。破壊状況を写真-3 に示す。

図-1 に本実験における層間変形角 ( $R_p$ ) と接合部せん断変形角関係 ( $\gamma_p$ ) を示す。 $\gamma_p$  が 1.0% 時には  $R_p$  は 1.0% から 3.0% となり， $\gamma_p$  が 2.0% 時には  $R_p$  は 2.0% から 4.0% となった。試験体によって全体変形に占める梁や柱の変形の割合が異なるために  $R_p$  にばらつきが見られる。

接合部に生じたひび割れ幅は，写真-1 のように接合部の変形を測定する為に埋め込まれたボルトと同じ位置を写真-2 のように対角線に結んだ線上を通過するひび割れ幅をクラックスケールで測定した。なお，クラックスケールの最小は 0.04mm である。測定はそれぞれの载荷サイクルのピーク時と除荷時（荷重 0 時）に行った。今回の試験体は PC 鋼棒の配置が 3 種類あるが接合部パネルとしては写真-2 に示す範囲とした。

### 3. 接合部の損傷とせん断変形角の関係

#### 3.1 ひび割れ性状

図-2 に各試験体の接合部せん断変形角とひび

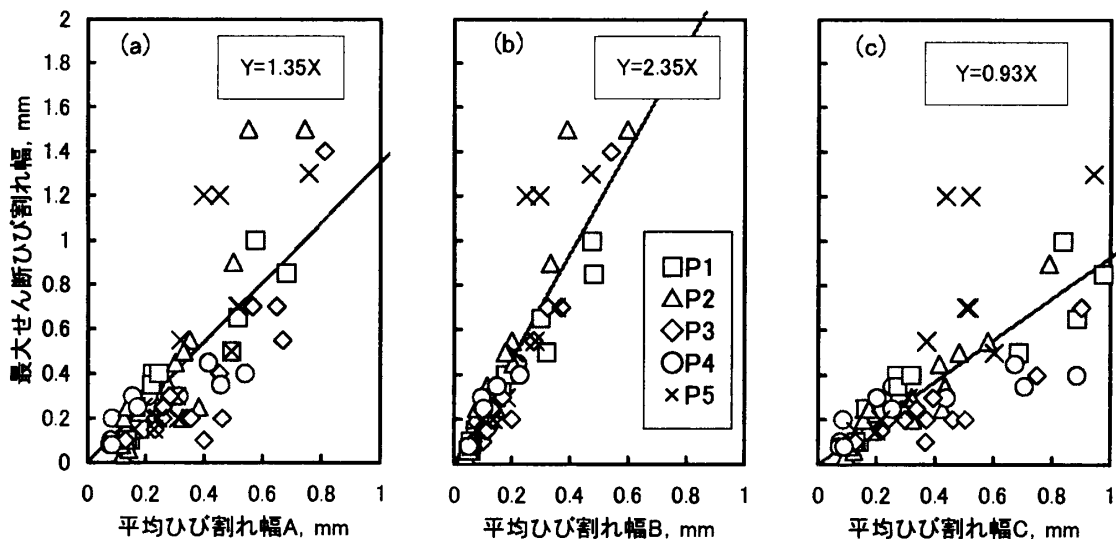


図-3 载荷ピーク時最大せん断ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の関係

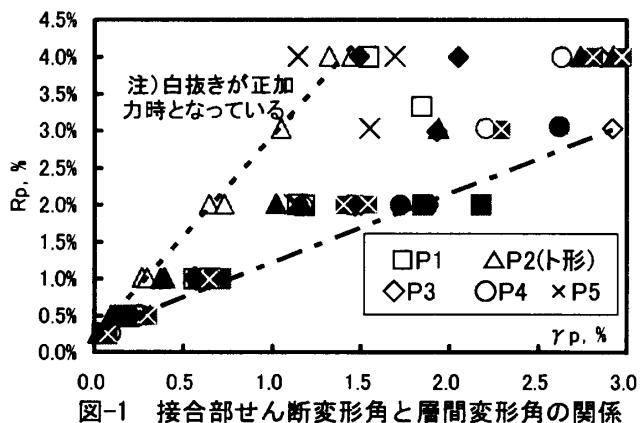


図-1 接合部せん断変形角と層間変形角の関係

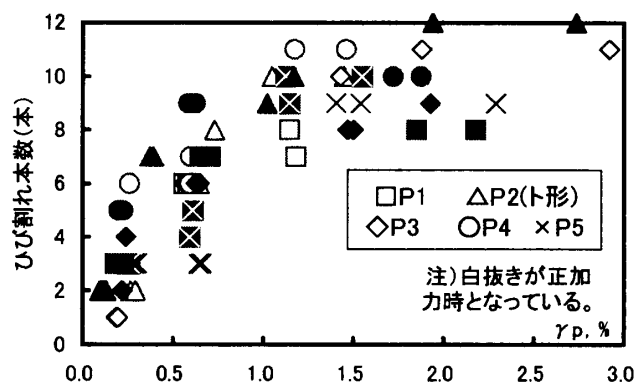


図-2 接合部せん断変形角とひび割れ本数の関係

割れ本数の関係を示す。なお，ひび割れ本数は写真-2 の対角線を横切ったひび割れを計測した。すべての試験体において，ひび割れ本数は  $\gamma_p=1.0\%$  まで急激に増加し，それ以降ほとんど変化していない。

#### 3.2 接合部せん断変形角とひび割れ幅の関係

##### (1) 最大ひび割れ幅と平均ひび割れ幅の関係

図-3 に载荷ピーク時最大ひび割れ幅 ( $W_p$ ) と平均ひび割れ幅 ( $aveW_p$ ) の関係を示す。ここで，

図-3(a)の平均ひび割れ幅  $A$  は接合部に設置した斜め変位計の出力をひび割れ本数で除した値とし、(b)の平均ひび割れ幅  $B$  は測定したひび割れ幅の合計をひび割れ本数で除した値であり、(c)の平均ひび割れ幅  $C$  は主引張ひずみ（接合部パネル測定方法は後述）に接合部の対角の長さ（写真-1）を乗じ、ひび割れ本数で除した値である。最大ひび割れ幅は平均ひび割れ幅  $A$  の1.35倍、ひび割れ幅  $B$  の2.35倍、ひび割れ幅  $C$  の0.93となっている。平均ひび割れ幅  $B$  は一番相関性が良いが  $0.4\text{mm}$  以降にはばらつきが出てくる。平均ひび割れ幅  $0.4\text{mm}$  までであれば、変位計を使用した平均ひび割れ幅の評価法も相関があることがわかったが、今後の検討課題である。

## (2) 接合部せん断変形角とひび割れ幅の関係

図-4 に载荷ピーク時の接合部せん断変形角 ( $\gamma_p$ ) と最大ひび割れ幅 ( $W_p$ ) の関係を示す。すべての試験体において線形性を有しているが、今回の実験結果においては  $\gamma_p=0.5\%$  から  $0.6\%$  を境に傾きが変わっているのがわかる。ピーク時の最大せん断ひび割れ幅は十字形、ト形接合部ともに概ね RC 接合部の半分程度である。図-2 よりひび割れ本数が多く、一本のひび割れ幅が大きくなり、ピーク時の最大ひび割れ幅は概ね RC 接合部の半分程度に低減する傾向にある。

## (3) 接合部補強筋ひずみとひび割れ幅の関係

図-5 に接合部内の補強筋ひずみと最大ひび割れ幅の関係を示す。なお、補強筋は接合部内に3本配筋されており、ひずみの値は3本の平均としている。最大ひび割れ幅の位置はすべてほぼ接合部中央位置であった。本実験においては、補強筋ひずみ  $1000\mu$  時に最大ひび割れ幅が  $0.3\text{mm}$  となり補強筋ひずみとひび割れ幅に線形性がみられるが、補強筋降伏時の最大ひび割れ幅は  $0.2\text{mm}$  から  $1.5\text{mm}$  と幅がある。

## 3.3 接合部の変形状

### (1) 主ひずみ解析

モールのひずみ円を用いて、接合部の主ひずみの検討を行った。図-6(a)に主引張ひずみ ( $\varepsilon_1$ ) とせん断変形角 ( $\gamma_p$ ) の関係を示す。主ひ

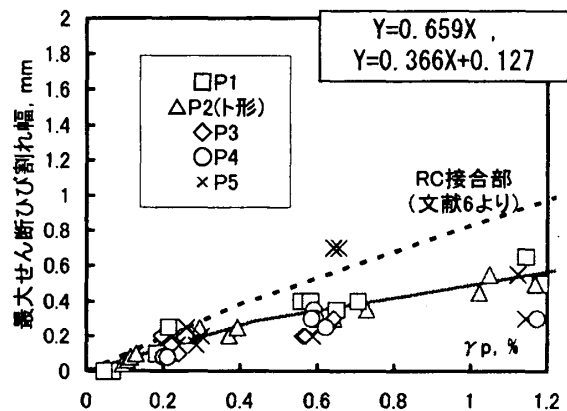


図-4 最大せん断ひび割れ幅とせん断変形角の関係

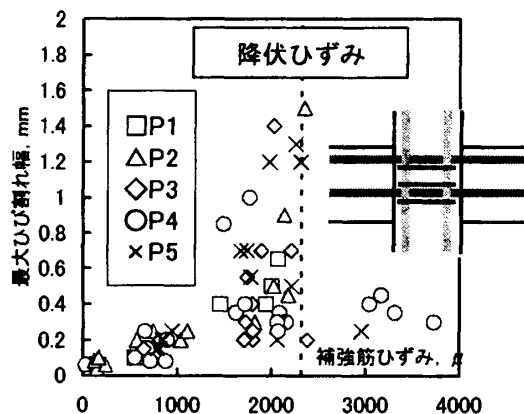


図-5 補強筋ひずみとひび割れ幅の関係

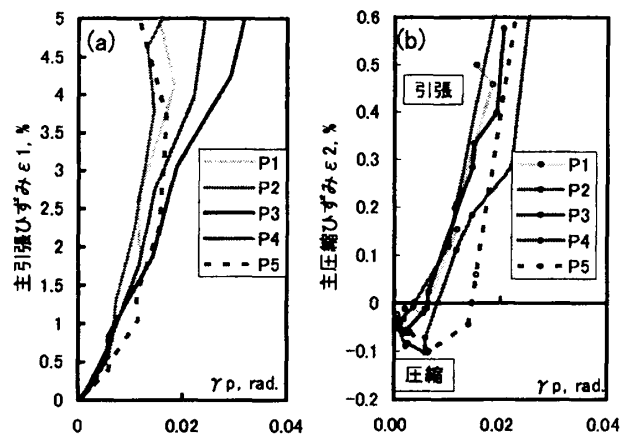


図-6 主ひずみとせん断変形角の関係

ずみは写真-1 に示すように接合部パネルの水平、鉛直及び斜め方向に各2個ずつ設置した変位計の各方向平均ひずみを用いて求めた。P1からP4の4体の試験体においては  $\gamma_p=0.6\%$  時の  $\varepsilon_1$  の値が  $0.6\%$  となり、それ以降  $\varepsilon_1$  が増加している。(b)に接合部表面のコンクリート剥離（層間変形角  $2.0\%$ ）までのせん断変形角 ( $\gamma_p$ ) と主圧縮ひずみ ( $\varepsilon_2$ ) の関係を示す。実験結果よりせん断

変形角が 0.57% から 0.67% までに接合部中央位置の圧壊の兆候が始まっていた。(b)を見ると  $\varepsilon_2$  が圧縮から引張りに変化するときと一致している試験体も見られる。

## (2) 主引張ひずみとひび割れ幅の関係

図-7 に主引張ひずみ ( $\varepsilon_1$ ) と最大ひび割れ幅 ( $W_p$ ) の関係を示す。両者には主引張ひずみ 0.6% までは線形の関係がみられるが、0.6% 時を境にひび割れ幅が発散している。主引張ひずみ 0.6% までならば、最大ひび割れ幅と直接的な関係にあることを示している。

## 3.4 残留ひび割れ幅と接合部の損傷

### (1) 載荷ピーク時最大ひび割れ幅と除荷時最大ひび割れ幅の関係

図-8 に載荷ピーク時最大ひび割れ幅 ( $W_p$ ) と除荷時最大ひび割れ幅 ( $W_{pr}$ ) の関係を示す。十字形、ト形接合部どちらの場合においても RC 接合部とほぼ同様の関係を示しているが、同じせん断変形角であれば、PC 接合部では最大せん断ひび割れ幅が RC 接合部の半分程度であることを勘案すると、RC 接合部の半分程度の除荷時せん断ひび割れ幅となることを示している。

### (2) 接合部の残留せん断変形角の評価

図-9 に載荷ピーク時の変形 ( $\gamma_p$ ) とその除荷時の変形 ( $\gamma_{pr}$ ) の関係を示す。ここでは、過去に行った実験結果<sup>3)</sup>を合わせて載せている。各載荷ピーク時せん断変形角  $\gamma_p$  を 4.0% 以下の全体と 1.2% 以下の 2 通り示しているが、1.2% は概ね接合部せん断破壊前に相当する。残留せん断変形角  $\gamma_{pr}$  においては、十字形接合部の場合、RC 接合部に比べて小さい傾向にあり、ほぼ半分程度である。従って、接合部がせん断破壊を生じなければ、プレストレスの効果により除荷時のせん断変形角が抑制されることとなる。一方、ト形接合部の場合は、RC 接合部とほぼ同様の傾向にあり、十字形とは異なっている。これは、梁による拘束が小さいこと、また、PC 鋼材の定着などによる影響が考えられるが、今後の検討課題である。

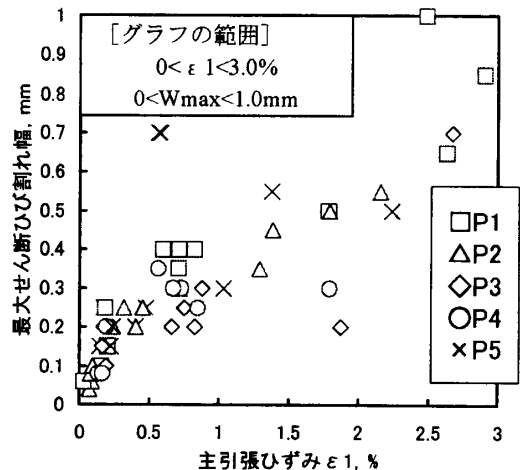


図-7 主引張ひずみとひび割れ幅の関係

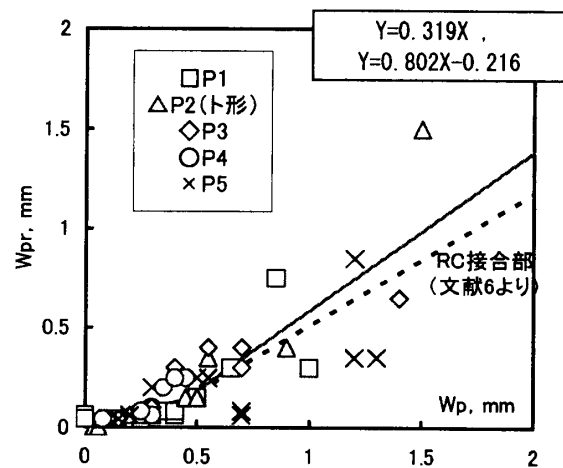


図-8 除荷時ひび割れ幅とピーク時ひび割れ幅の関係

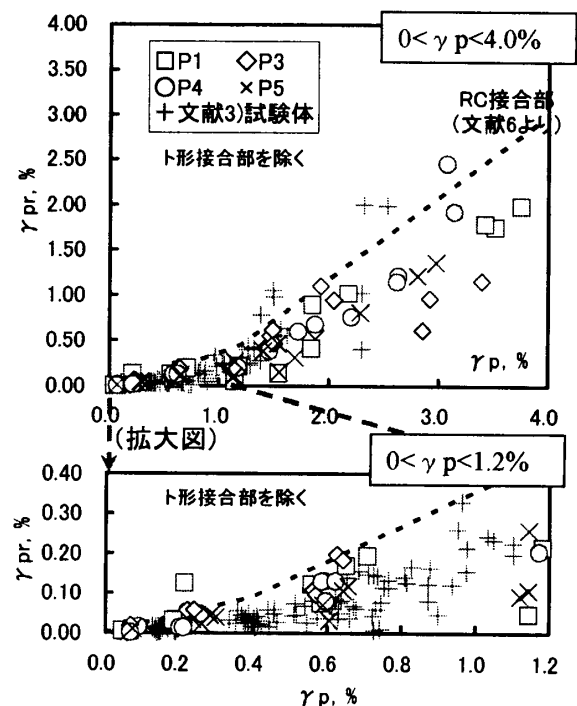


図-9(a) 除荷時せん断変形角とピーク時せん断変形角の関係 (十字形試験体)

#### 4. 斜めひび割れ強度と初期剛性の評価

接合部斜めせん断ひび割れの発生は図-10 の応力状態で主応力がコンクリート引張強度 ( $f_t$ ) に達したときと考え、モールの応力円より求まり、断面内のせん断応力分布において最大せん断応力と平均せん断応力の比が 1.5 であることより、その逆数である 2/3 を係数にした(1)式を示す。

$$\tau_{cr} = \frac{2}{3} \sqrt{f_t^2 - (\sigma_0 + \sigma_p) \cdot f_t + \sigma_0 \cdot \sigma_p} \cdots (1)$$

接合部せん断伝達面積は柱幅と梁幅との平均値と柱せいとの積とした。図-11 に計算値と実験値との関係を示す。実験結果との適合性がよい。

初期剛性は一般的に(2)式により求められる。

$$G_1 = \frac{E_c}{2(1+\nu)} \cdots (2)$$

ここで、 $E_c$ : コンクリートの弾性係数、および  $\nu$ : コンクリートのポアソン比 (=0.2),  $f_c$ : コンクリート圧縮強度である。計算値と実験結果との関係を図-12 に示す。 $E_c$  には材料試験による  $1/4 f_c$  時割線剛性を用いた。計算値が 1.5 倍から 2.5 倍程度実験値より大きくなっている。これは、コンクリートの弾性係数として  $1/4 f_c$  時割線剛性を用いており、図-10 によるとひび割れ発生時の圧縮主応力は  $\sigma_0 + \sigma_p + f_t$  であり、 $1/4 f_c$  より大きくなっているのも一因であり、適切な剛性評価が必要であると考えられる。

#### 5. RC 接合部と PC 接合部の損傷レベルの違い

表-1 に接合部せん断破壊前 ( $\gamma$ =約 1.0%) の損傷レベルを示す。PC 接合部は RC 接合部に比べて損傷レベルを抑制されることとなる。特に、

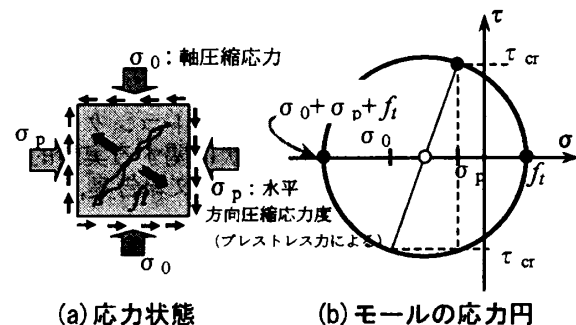


図-10 斜めひび割れ発生時の応力状態

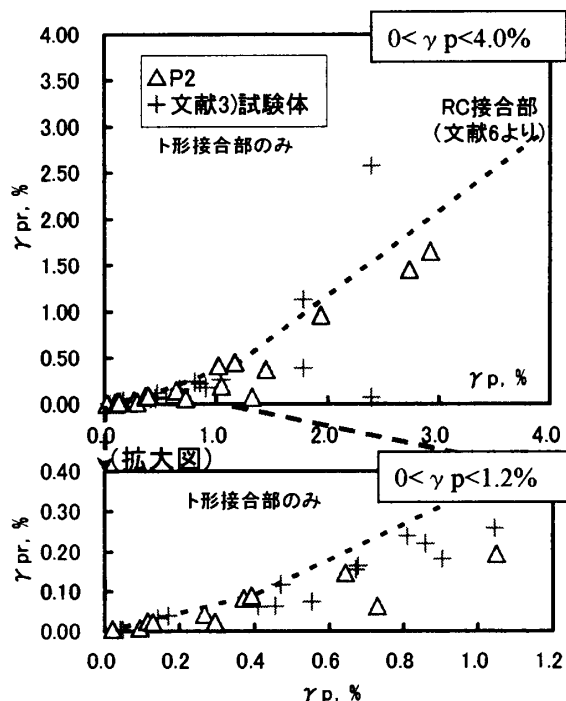


図-9(b) 除荷時せん断変形角とピーク時せん断変形角の関係 (ト形試験体)

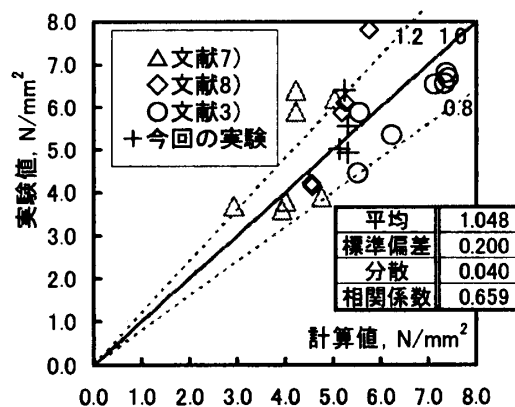


図-11 せん断ひび割れ発生時の実験値と計算値の関係

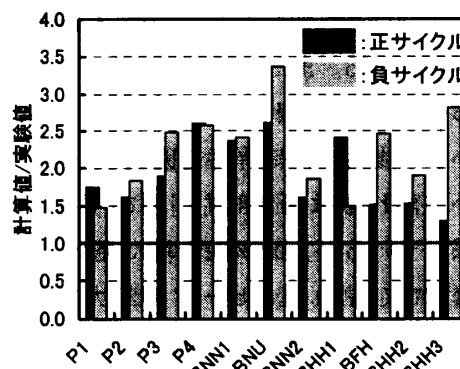


図-12 初期剛性の実験値と計算値の関係

平均的には大地震時に接合部せん断強度程度まで応力が作用しても、地震後には耐久性上問題になるかなら無い程度の残留ひび割れ幅

0.2mm 以下に留まるものであり、プレストレス力による損傷低減効果が期待できる。

以上の結果を踏まえ、最大耐力時までの接合部の損傷過程を図-13に示す。なお、ひび割れ幅は各試験体の最大ひび割れ幅の4体（ト形は除く）の平均とした。実験データが少ないが、経験最大せん断ひび割れ幅は、初せん断ひび割れ発生時には0.06mm、圧壊時には0.4mm、最大耐力時では0.6mmとなり2折れ線で評価でき、残留最大ひび割れ幅は直線で評価できると考える。

## 6. まとめ

PCaPC 接合部の性能評価を試み、損傷過程と保有性能の関係より以下の知見を得た。

- (1) 接合部のせん断ひび割れ幅とせん断変形角との関係の評価式を得ると共に、PC 接合部はRC接合部に比べてプレストレス力によって損傷低減効果が期待できる。
- (2) 接合部せん断変形角とひび割れ幅関係は $\gamma_p=0.5\%$ から0.6%で勾配が変わる2つ折れ線の線形性を有し、接合部の損傷をあらわす指標として利用できる。RC接合部の場合と比較すると同じせん断変形角時のひび割れ幅が半分程度であり、プレストレスにはひび割れ幅を低減する効果があると考えられる。
- (3) 接合部内の補強筋のひずみが1000 $\mu$ までは最大ひび割れは線形性があるが、降伏時には最大ひび割れ幅が0.2mmから1.4mmとばらついている。また、今回のパネルの大きさにおいて、ひび割れ幅の合計値が0.6mmより小さい場合、ほぼ弾性範囲内にある。
- (4) ひび割れ幅は接合部主引張ひずみと直接関係しているが、0.6%時を境に発散している。
- (5) 残留ひび割れ幅とピーク時最大ひび割れ幅には良い相関があり、RC接合部とほぼ同様の関係を示している。
- (6) 残留接合部せん断変形角とピーク時の変形角の関係においては、プレストレスの効果により除荷時の変形角が十字形接合部の場合

表-1 RC 接合部と PC 接合部の損傷レベルの関係

| 除荷時せん断変形角 $PC\gamma_{pr}/RC\gamma_{pr}$ | 十字形<br>1/2 | ト形<br>1 |
|-----------------------------------------|------------|---------|
| 最大せん断ひび割れ幅 $PCW_p/RCW_p$                | 1/2        |         |
| 除荷時せん断ひび割れ幅 $PCW_{pr}/RCW_{pr}$         | 1/2        |         |

ここで、 $RC\gamma$ 、 $RCW$  は鉄筋コンクリート柱梁接合部のせん断変形角と、ひび割れ幅を意味する。（\*注：あるせん断変形角時において）

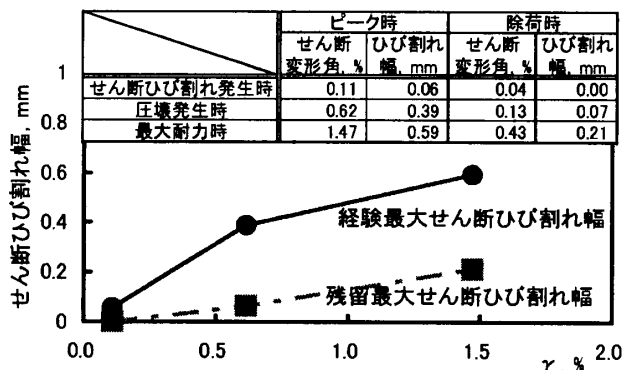


図-13 せん断変形角と損傷状況の関係

は RC 接合部の半分となり、ト形の場合は RC と同じような傾向となった。

- (7) 接合部ひび割れ発生時の強度は計算式と良い相関があったが、初期剛性は計算値が1.5倍から2.5倍程度大きくなった。

## 参考文献

- 1) 舩田尚之ほか：圧着接合された PCaPC 造の立体柱・梁接合部の耐震性能に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 構造 IV，pp.313-318，2005.9
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説，2004.1
- 3) 岸田慎司ほか：圧着接合されたプレストレスト・コンクリート柱・梁接合部の力学性状に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 構造 IV，pp.613-618，2002.8
- 4) 岸田慎司ほか：圧着接合されたプレストレスト・コンクリート柱梁接合部の損傷評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2 構造 IV，pp.759-760，2005.9
- 5) 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
- 6) 寺岡勝ほか：フラタル幾何学を応用した鉄筋コンクリート造柱・梁接合部の損傷評価，コンクリート工学，Vol.42，No.8，pp.14-21，2004.8
- 7) 紅谷信行ほか：プレストレストコンクリート柱・梁接合部のせん断性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1179-1184，1987
- 8) 足立将人ほか：プレキャスト圧着接合柱梁十字型骨組の履歴挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1329-1334，1987