

# PC 柱梁接合部の構造性能評価

北山 和宏\*1・永井 寛\*2

## 1. はじめに

建築構造物における鉄筋コンクリート構造（以下 RC と略記）の耐震設計では、じん性に依存した終局強度設計法が採用され、柱梁接合部の地震時挙動も積極的に研究されてきた。兵庫県南部地震では、柱梁接合部のせん断破壊が多数観察され、接合部破壊が建物全体の耐震性能に与える影響も議論された。一方、プレストレスト（鉄筋）コンクリート（以下 P(R)C と略記）構造の柱梁接合部については、過去に地震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、P(R)C 柱梁接合部の応力伝達機構は RC 構造と同様に考えることができることから、ここ数年は PC 柱梁接合部実験が数例実施され、接合部のせん断破壊が報告されている。そこで、建築構造物における PC 柱梁接合部の耐震設計手法確立のため、性能評価型設計手法に基づいた PC 柱梁接合部の構造性能評価を進めている。ここでは、その概略を紹介する。

## 2. 柱梁接合部の各種限界状態の定義

ここ数年の PC 接合部に関する研究では、PC 柱梁接合部のせん断破壊性状は、RC 柱梁接合部のそれとほぼ同様であることが報告されている。そこで、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説」<sup>2)</sup>（以下、RC 性能指針と略記）に準じて、PC 柱梁接合部の性能を評価するレベルとして、限界状態を表 - 1 に示すように設定した。PC 構造から RC 構造までを連続して考慮できるように、終局プレストレス率  $\lambda_1$  ( $T_{py} / (T_{py} + T_{ry})$ 、 $T_{py}$  : PC 鋼材降伏時の引張力、 $T_{ry}$  : 主筋降伏時の引

表 - 1 PC 柱梁接合部の限界状態の定義

限界状態	具体的な損傷の状況					
	$\lambda_1$	普通鉄筋	PC 鋼材	コンクリート	接合部残留せん断変形角	残留ひび割れ幅
使用限界	1.00 ~ 0.75	弾性	弾性	かぶりコンクリート健全	ひび割れは生じるが、ほとんど残留せず	~ 0.2 mm
	0.75 ~ 0.50					
	0.50 ~ 0					
修復限界 1	1.00 ~ 0.75	(わずかに)降伏	弾性	かぶりコンクリート剥落直前 コア・コンクリートほぼ健全	0.2 %	0.2 mm ~ 0.5 mm
	0.75 ~ 0.50					
	0.50 ~ 0					
修復限界 2	1.00 ~ 0.75	(かなり)降伏 主筋座屈せず	弾性	かぶりコンクリート剥落 コア・コンクリート健全	0.5 %	0.5 mm ~ 1.0 mm
	0.75 ~ 0.50					
	0.50 ~ 0					
安全限界	1.00 ~ 0	主筋座屈・破断、主筋の端部定着破壊	降伏、定着部の破壊	せん断力と軸力とを保持できる限界		

張力)を三段階に設定し、各限界状態について、鉄筋、PC 鋼材、コンクリートの損傷状況、接合部の残留せん断変形角、および、残留せん断ひび割れ幅などの応力状態や損傷状態を定義している。また、 $\lambda_1 = 0.75 \sim 1.0$  の場合の復元力特性と限界状態（損傷度）との関係の概念を図 - 1 に示すように、復元力特性に代表される構造性能と損傷度の関係が関連づけられている。

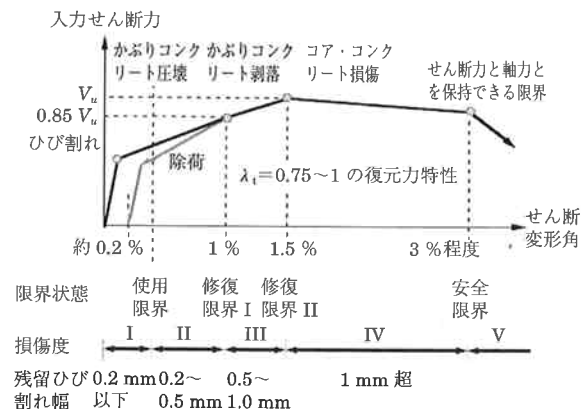


図 - 1 PC 柱梁接合部の復元力特性と限界状態



\*1 Kazuhiro KITAYAMA

東京都立大学大学院 工学研究科  
建築学専攻 助教授



\*2 Satoru NAGAI

鹿島技術研究所 建築構造  
グループ 主任研究員

## 3. 接合部せん断入力算定法

PC 柱梁接合部は、PC 鋼材の応力、配置位置、付着作用などにより、RC 接合部に比べてより複雑な応力状態となるため、作用する応力の評価方法を以下に紹介する。

### 3.1 柱梁接合部の応力伝達機構を確保する設計の考え方

建築構造物の柱梁接合部では、柱梁部材からモーメント

やせん断力が入力されて圧縮ストラットが形成されるとされている (図 - 2)。日本建築学会では、接合部に入力される水平または鉛直方向の入力せん断力  $V_{jh}$  または  $V_{jv}$  を制限することにより、柱梁接合部の応力伝達機構を確保している。

### 3.2 入力せん断力の最大値と平均値

PC 柱梁接合部の入力せん断力は、PC 鋼材の位置や導入プレストレス力により影響を受ける。柱梁接合部の柱軸に沿った曲げモーメント分布 (図 - 3 中の黒実線) は、梁コンクリートの曲げ圧縮応力分布が非線形であるため、非線形分布となる。また、PC 鋼材は通常断面中央付近に配置されるため、この部分でモーメント勾配が急になり、せん断力が最大となる (黒実線の勾配)。これまでの PC 柱梁接合部に関する研究では、入力せん断力として、①最大入力せん断力、②平均入力せん断力 (接合部上下端間に生じる曲げモーメントのピーク間の平均せん断力 (図 - 3 の白実線の勾配)) の方法が検討されてきた。以下に、二つの接合部

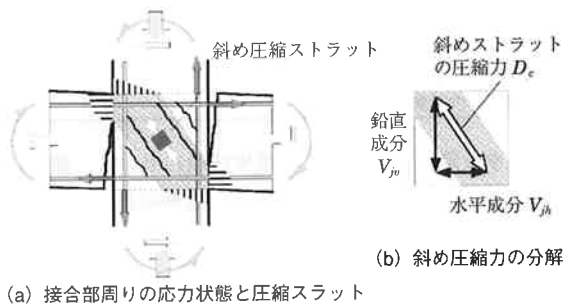


図 - 2 柱梁接合部のパネルの応力伝達機構

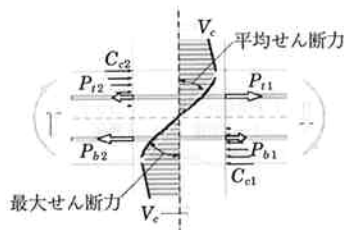


図 - 3 柱梁接合部内のモーメント分布とせん断力

入力せん断力の方法を紹介する。

#### 3.2.1 最大入力せん断力

##### (1) 内柱梁接合部の場合

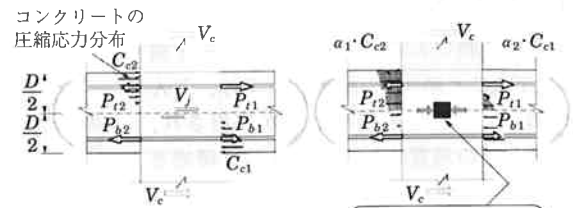
PC 鋼材降伏時の最大入力せん断力  $V_j$  は次式で表される (図 - 4 (a))。

$$V_j = P_{t1} + P_{b2} - V_c \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $P_{t1}$ ：右危険断面において引張側となる PC 鋼材の引張力、 $P_{b2}$ ：左危険断面において引張側となる PC 鋼材の引張力、 $V_c$ ：柱せん断力、である。

ただし、梁危険断面のコンクリート圧縮域深さが梁せいの 1/2 を超える場合 (図 - 4 (b))、接合部左右の梁のコンクリート圧縮応力が釣り合うため、せん断伝達に寄与しない。そのため入力せん断力を算定する場合にはこの圧縮力を差し引くが必要になる。そこで、北山・岸田らの実

験研究<sup>3), 4)</sup>では、梁コンクリート圧縮応力分布範囲が大きくなる PC 接合部実験で応力分布を計測して検討を行った。しかし、図 - 4 (b) の応力状態は、接合部破壊が先行する試験体で生じたが、梁降伏後接合部破壊した試験体では終局時に生じなかったと報告している。したがって、実設計時には柱梁接合部を破壊させないために図 - 4 (b) のような応力状態にはならないと思われるので、(1) 式を用いてよいと考えられる。



(a) コンクリート圧縮域深さが梁せいの 1/2 未満 (b) コンクリート圧縮域深さが梁せいの 1/2 以上

図 - 4 コンクリート圧縮域と接合部入力せん断力

##### (2) 外柱梁接合部の場合

外柱梁接合部の場合、図 - 5 (a) の一点鎖線位置の接合部入力せん断力  $V_j$  は式 (2) で求められる。

$$V_j = P_t - V_c \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $P_t$ ：引張り側となる PC 鋼材の引張力、である。なお、梁危険断面でのコンクリート圧縮域深さが大きくなって上端 PC 鋼材の定着版位置と高さ方向で重なる場合に内柱梁接合部と同様に上部定着版圧縮力と釣り合う。この場合には、式 (2) による入力せん断力は過大評価になる。

一方、図 - 5 (b) のように梁危険断面のコンクリート圧縮域深さが圧縮側 PC 鋼材よりも下側になる場合、中立軸位置 (図の一点鎖線) で接合部を水平に切断したときの接

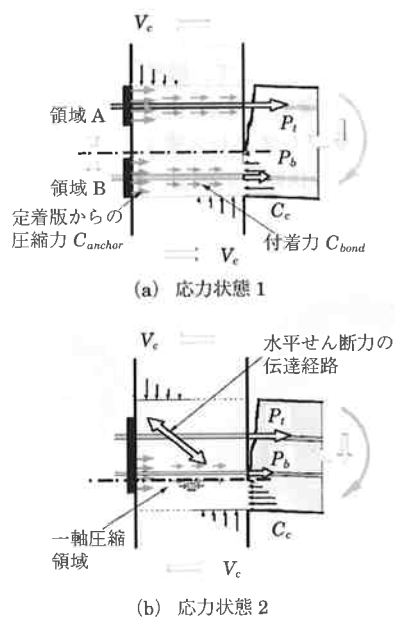


図 - 5 外・柱梁接合部の応力状態

合部入力せん断力は力の釣り合いより以下となる。

$$V_j = P_t + P_b - V_c \dots\dots\dots(3)$$

式(3)で得られる入力せん断力は式(2)より得られるそれよりも明らかに大きい。ただし、この場合も、圧縮側PC定着版圧縮力と梁付根コンクリート圧縮力との間の応力が釣り合う領域が発生して、水平せん断力に寄与しないため、実入力せん断力は式(3)から計算される値よりも小さくなる。

以上のように外柱梁接合部の入力せん断力を求める際には、梁危険断面におけるコンクリート圧縮域深さとPC鋼材定着版との位置関係に注意することが必要である。

(3) 柱梁接合部のせん断強度

北山・岸田らは、PCaPC圧着工法柱梁接合部実験を実施し、接合部周辺のコンクリート圧縮域深さを考慮して正確に求めた接合部入力せん断力は、接合部せん断破壊試験体の場合、日本建築学会の「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」<sup>5)</sup>(以降、RC靱性指針と略記)で規定された下記の平均強度式により評価できると報告している(図-6)。

内柱梁接合部： $\tau_{ju} = 0.80 \sigma_B^{0.712} \dots\dots\dots(4)$

外柱梁接合部： $\tau_{ju} = 0.59 \sigma_B^{0.718} \dots\dots\dots(5)$

ここで、 $\tau_{ju}$ ：接合部の終局せん断応力度の平均値(N/mm<sup>2</sup>)、 $\sigma_B$ ：コンクリート圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)である。なお同指針では、平面骨組のせん断設計時には上記の平均強度度を0.85倍した下限値に対して行うように規定している。

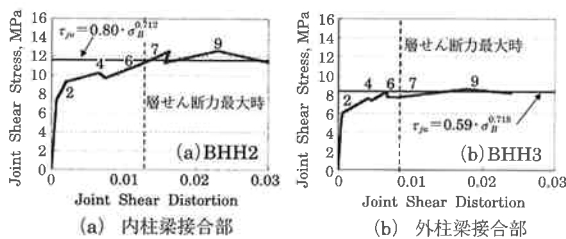


図-6 接合部せん断応力度-せん断変形角関係の一例

3.2.2 平均入力せん断力

平均入力せん断力は、柱軸に沿って生じる接合部上部及び下部の最大曲げモーメント位置間に生じる平均的なせん断力と定義し、以下の方法による。

(1) 最大層せん断力時接合部平均入力せん断力

浜原らは、PCとRC柱梁接合部実験を行い、PC接合部最大入力せん断力はRC試験体の1.2倍から1.7倍にばらつくものの、最大梁せん断力はRCとPC試験体の間に大きな違いは見られないことから、接合部破壊が先行するPC柱梁接合部せん断強度は最大入力せん断力に直接支配されないと指摘し、最大層せん断力 $V_{cu}$ 時の接合部平均せん断入力 $V_{ju}$ を次式のように提案している<sup>6), 7)</sup>など。

$$V_{ju} = V_{cu} \left\{ \frac{H}{j_{be}} - \frac{H}{L} \cdot \frac{D_c}{j_{be}} - 1 \right\} \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 $L$ はスパン、 $H$ は階高、 $j_{be}$ は接合部の上部と下

部に生じるピーク曲げモーメント間の距離で、梁せいの0.8倍である。なお、接合部せん断応力を求める際の接合部有効せい $D_j$ は、十字形柱梁接合部の場合は柱せい $D_c$ 、ト形柱梁接合部の場合は次式による。

$\lambda \leq 0.7$  の場合： $D_j = D_{jr}$

$\lambda > 0.7$  の場合： $D_j = \{ (D_{jp} - D_{jr}) \cdot (\lambda_t - 0.7) / 0.3 \} + D_{jr}$

ここに、 $D_{jr}$ 、 $D_{jp}$ ：主筋の定着長(mm)、PC鋼材定着長(mm)。

(2) 柱梁接合部のせん断強度

浜原らは、図-7に、接合部破壊先行試験体について、(6)式による平均せん断力の実験値 $eV_{ju}$ をRC靱性指針接合部せん断強度平均値式による計算値 $eV_{ju}'$ で除した値とコンクリート強度の関係を示すように、RC靱性指針接合部せん断強度平均値式は、 $eV_{ju} / eV_{ju}'$ の平均値1.004、変動係数8.74%となり、接合部せん断強度を精度良く評価できると報告している。

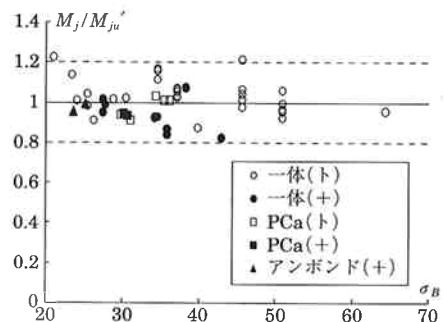
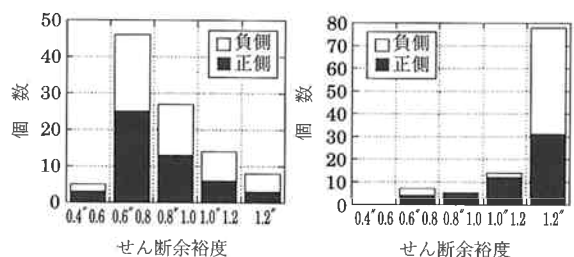


図-7 接合部せん断強度平均値式の計算精度

3.3 既存建物のせん断余裕度

浜原らは、図-8に示すように既存PC建物の2階外側柱梁接合部のせん断余裕度(RC靱性指針接合部せん断強度下限値/梁曲げ強度時接合部入力せん断力)と建物数の関係を報告している。最大入力せん断力を用いた場合には約80%の建物がせん断余裕度1.0を下回り、平均入力せん断力を用いた場合には約90%以上の建物がせん断余裕度1.0を上回っている。これは、通常のPC梁の応力中心間距離がRC梁より小さいため、このような関係となる。この関係は、接合部の終局強度を直接評価するものではないが、PC柱梁接合部のせん断に対する設計法確立が急務である。



(a) 最大入力せん断力の場合 (b) 平均入力せん断力の場合  
図-8 既存PC建物外側柱梁接合部のせん断余裕度

#### 4. 柱梁接合部の復元力特性

RC 性能指針に準じ、ここ数年で蓄積された PC 柱梁接合部の構造実験データを用いて、PC 柱梁接合部の復元力特性、履歴特性、および、損傷レベル等の構造性能について検討を進めている。以下に、現時点までの最新の知見を紹介する。

##### 4.1 骨格曲線

PC 柱梁接合部の入力せん断力と接合部せん断変形角関係の骨格曲線は、PC や PRC 柱梁接合部実験でせん断破壊が先行する試験体の実験結果例を参考に、図 - 1 に示したように、①せん断ひび割れ発生時、②パネルコンクリート圧壊開始時、③最大耐力点、④耐力低下点を結ぶ四つ折れ線でモデル化できると考えられる。

##### 4.2 接合部せん断ひび割れ点

岸田、北山ら<sup>3), 4)</sup>は、PC 圧着柱梁接合部の実験より、接合部せん断ひび割れ強度評価式として、主応力度式を修正した式 (7) を提案している。また、接合部せん断ひび割れ強度時のせん断変形角  $\gamma$  は式 (8) で求められる。

$$p\tau_{sc} = \frac{2}{3} \sqrt{f_t^2 - (\sigma_0 + \sigma_p) \cdot f_t + \sigma_0 \cdot \sigma_p} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$p\gamma_{sc} = p\tau_{sc} / G_c \quad \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 $f_t$ ：コンクリート引張強度、 $\sigma_p$ ：梁プレストレス力より接合部に作用する梁軸応力度、 $\sigma_0$ ：柱軸応力度、 $G_c$ ：コンクリートのせん断弾性剛性、である。

##### 4.3 最大耐力点

最大耐力点のせん断強度は次式による。

$$\tau_{ju} = \frac{V_{ju}}{b_j \cdot D_j} = \kappa \phi F_j \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $\kappa$ ：接合部の形状による係数（十字形：1.0，ト形・T型：0.7，L形：0.4）， $\phi$ ：直交梁の有無による補正係数（両側直交梁付き接合部：1.0，左記以外：0.85）， $F_j$ ：接合部のせん断強度の基準値で  $F_j = 0.8\sigma_B^{0.7}$ ， $\sigma_B$ ：コンクリートの圧縮強度、 $D_j$ ：柱せいまたは90度折り曲げ筋水平定着投影長さ、である。

接合部最大強度時のせん断変形角は、十字形接合部については、北山ら、浜原らの既往実験結果より、PC 接合部で 1.2% 以上となり、RC 柱梁接合部で示される 1.0% より大きいせん断変形角を示した。そこで次式が示されている。

$$p\gamma_{ju} = \begin{cases} 1.2\% & (\lambda_i = 1 \sim 0.75) \\ 1.1\% & (\lambda_i = 0.75 \sim 0.5) \\ 1.0\% & (\lambda_i = 0.5 \sim 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (10)$$

一方、ト形接合部では 0.4 ~ 0.6% となり、RC 接合部に比べても小さいせん断変形角を示した。ト形接合部の場合には定着具の影響も考えられ、今後の検討が必要である。

##### 4.4 パネルコンクリート圧壊点および耐力低下点

パネルコンクリート圧壊点および耐力低下点は、RC 性能指針に準じ、また、これまでの PC 柱梁接合部の実験結果を鑑みて以下のように定めている。

パネルコンクリート圧壊点

$$p\tau_{fc} = 0.85 p\tau_{ju} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$p\gamma_{fc} = \begin{cases} 0.8\% & (\lambda_i = 1 \sim 0.75) \\ 0.6\% & (\lambda_i = 0.75 \sim 0.5) \\ 0.4\% & (\lambda_i = 0.5 \sim 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (12)$$

耐力低下点

$$p\tau_{jd} = 0.8 p\tau_{ju} \quad \dots\dots\dots (13)$$

$$p\gamma_{jd} = \begin{cases} 3.0\% & (\lambda_i = 1 \sim 0.75) \\ 2.5\% & (\lambda_i = 0.75 \sim 0.5) \\ 2.0\% & (\lambda_i = 0.5 \sim 0) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (14)$$

#### 5. 接合部の損傷評価

接合部の復元力特性に対応する損傷を評価するために、RC 性能指針に準じた検討を行った。

##### 5.1 残留せん断変形角の評価 (図 - 9)

残留せん断変形角  $\gamma_{pr}$  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、平均的には RC 接合部の半分程度である。したがって、接合部せん断破壊が生じなければ、PC の効果により除荷時せん断変形角が抑制される。一方、ト形接合部の場合、RC 接合部とほぼ同様な傾向にあり、十字形接合部の傾向とは異なっている。これは、梁による拘束が小さいこと、また、PC 鋼材や梁主筋の定着体等による影響が考えられるが、今後の検討課題である。

##### 5.2 ピーク時せん断ひび割れ幅とせん断変形角 (図 - 10)

ピーク時の最大せん断ひび割れ幅  $W_p$  は、十字形接合部、ト形接合部のどちらの場合でも、おおむね RC 接合部 (模型) の半分程度であり、プレストレス力の効果によりピーク時の最大ひび割れ幅はおおむね RC 接合部の半分程度に低減する傾向にあると考えられる。

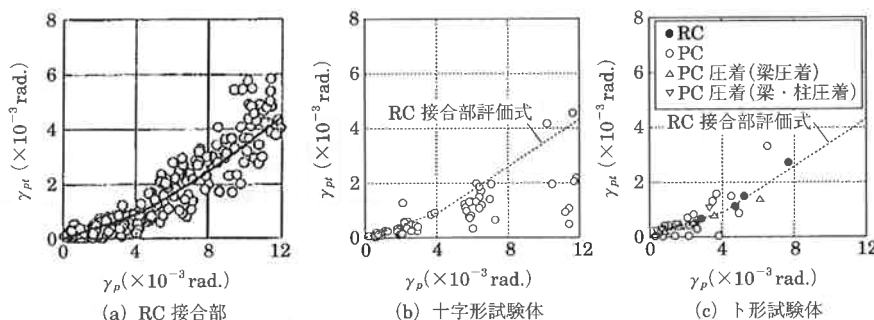


図 - 9 除荷時せん断変形角  $\gamma_{pr}$  と加力サイクルピーク

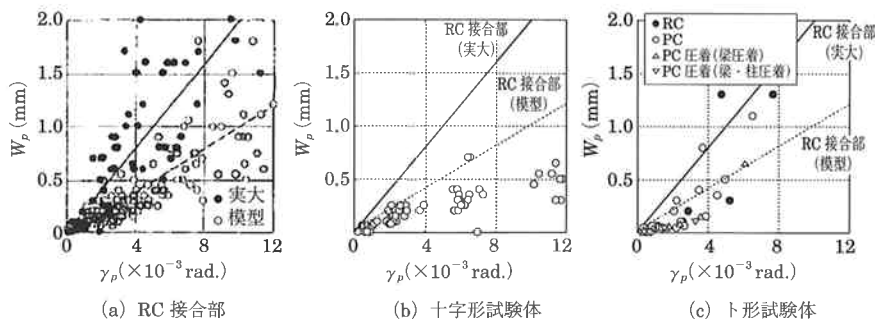


図 - 10 最大せん断ひび割れ幅  $W_p$  とせん断変形角  $\gamma_p$  の関係

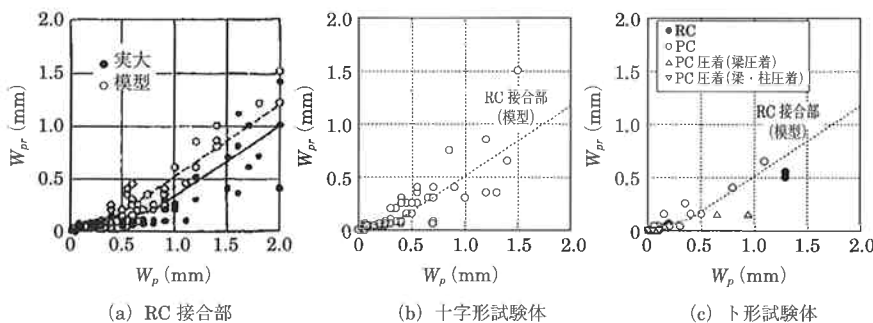


図 - 11 除荷時せん断ひび割れ幅  $W_{pr}$  とピーク時せん断ひび割れ幅  $W_p$  の関係

5.3 ピーク時と除荷時のせん断ひび割れ幅 (図 - 11)

十字形接合部、ト形接合部のどちらの場合でも RC 接合部とほぼ同様な関係を示すが、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。

6. まとめ

P(R)C 柱梁接合部の構造性能評価法の確立を目的に、構造性能 (柱梁接合部の復元力特性など) や損傷レベルの評価法に関する検討を進めている。これまで皆無であった PC 柱梁接合部の各種検討結果が報告され、非常に有益な知見も多いが、一方で、未検討項目も多数あり、今後の継続的な検討が期待される。

参考文献

1) 日本建築学会：プレストレスト (鉄筋) コンクリート部材の終局性能評価手法, 2005 年 1 月

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  
 3) 北山和宏, 岸田慎司, 森山健作, 丸田誠, 木村暁子：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 その 1～3, 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) KISHIDA Shinji, KITAYAMA Kazuhiro, MARUTA Makoto and MORIYAMA Kensaku : Earthquake Resistant Performance and Failure Mechanism of Precast Prestressed Concrete Beam-Column Joints Assembled by Post-Tensioning Steel Bars, Proceedings, 13th World Conference on Earthquake Engineering, 2004, August, CD-Rom No.1763.  
 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) 浜原正行ほか：PC 造柱梁接合部研究委員会報告 第 2 年度までの中間成果—その 2 実験結果と評価—, PC 技術協会第 12 回シンポジウム論文集, pp.133～136, 2003.10  
 7) 内田龍一郎, 浜原正行, 佐藤信夫, 福井剛：PC 造骨組における内側柱・梁接合部の終局強度に及ぼすプレストレスの影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 583 号, pp.107～113, 2004.9

【2005 年 5 月 9 日受付】

