

論文 プレキャスト PC 造柱・梁接合部内における PC 鋼材の付着性状

是永健好^{*1}・渡辺 英義^{*1}・小林 淳^{*1}

要旨：プレキャスト PC 造柱・梁接合部の実験で得られた PC 鋼材のひずみデータを使って、接合部内の $\tau - S$ 関係等を推定し、別途実施した付着実験結果との比較等により PC 鋼材の付着性状について検討した。接合部内では PC 鋼材の位置によって $\tau - S$ 特性が大きく異なり、付着実験と異なる性状を示した。しかし、接合部内の平均的な $\tau - S$ 特性の最大 τ までの性状は付着実験と概ね同様の傾向が見られた。接合部内の τ 分布はピーク点を 2 つ有し、接合部内 τ の平均値で無次元化した τ 分布曲線の形状は、PC 鋼材の表面形状やひずみレベルにあまり影響を受けないことが把握できた。

キーワード：プレキャスト PC、PC 鋼材、グラウト材、付着、柱・梁接合部

1. はじめに

文献 [1] の検討で、プレキャストプレストレスコンクリート造（以下、プレキャスト PC 造）梁端部では、PC 鋼材が接合部内と梁部材内の両方から抜け出し、それに伴って塑性回転変形が生じることを実験的に把握し、更に塑性回転中心および回転量の算定方法を提案した。

梁端部における抜け出し量は、プレキャスト PC 梁では、PC 鋼材とシース内に充填されたグラウト材の付着性能によって決まる。しかし、PC 鋼材とグラウト材の付着性状に関する研究は少なく、付着性状に及ぼすグラウト材強度や鋼材径等の影響については未だ解明されていない。さらに、PC 造で一般的によく用いられる PC 鋼より線については、ひずみ測定の難しさ等により、部材実験で PC 鋼より線の付着性状を検討した例はない。

本報告では、文献 [1] で報告した部材実験で得られた PC 鋼材の実測ひずみを基に、PC 鋼材の付着応力-すべり関係（以下、 $\tau - S$ 関係）等を推定し、より線の付着実験結果 [2] と比較・検討するとともに、柱接合部内での PC 鋼材とグラウト材の付着性状について検討する。

2. 検討方法

2. 1 検討対象試験体

検討対象の試験体は、文献 [1] で扱った試験体のうち、PC 鋼より線を用いた R-1 および異形 PC 鋼棒を用いた R-3 である。図-1 に試験体の形状と寸法を示す。両試験体とも断面の平均プレストレスは 5.5 MPa である。グラウト材強度は R-1 で 35.0 MPa、R-3 で 36.6 MPa である。図-2 に PC 鋼材

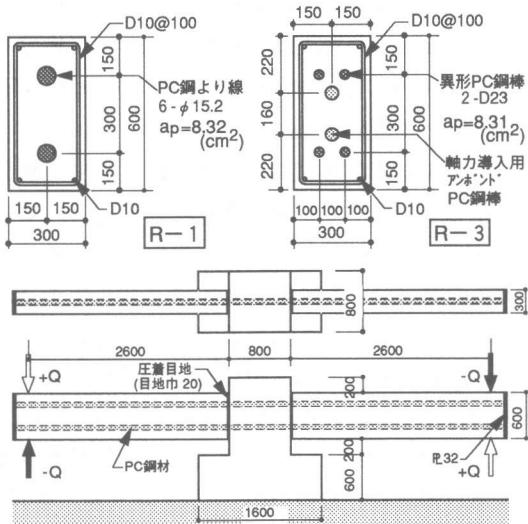


図-1 試験体の形状と寸法

*1 大成建設(株)技術研究所 構造研究グループ (正会員)

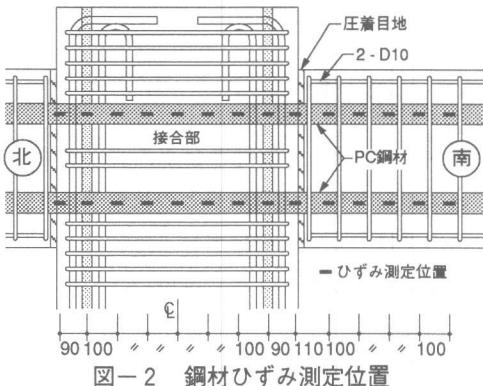


図-2 鋼材ひずみ測定位置

のひずみ測定位置を示す。図-3には、第3章で部材実験との比較に供する付着実験[2]の加力方法とひずみ測定位置を示す。

2.2 ひずみ分布のスムージング化

PC部材の実験におけるPC鋼材のひずみ測定は、試験体製作時にシース内にひずみゲージのリード線を配線し、更に緊張力導入およびグラウト注入を行うため、鉄筋コンクリート部材等のひずみ測定に比べて難しい条件下のものとなる。したがって、実測されたPC鋼材全長に亘るひずみ分布に乱れが生じる場合がある。著者らは、このひずみ分布の乱れを少なくする目的で、回帰計算による実測ひずみの補正方法を採用し、PC鋼より線の付着実験データから乱れの少ない $\tau-S$ 関係を得ることができた[2]。本検討においても、基本的には同様の考え方によりひずみ分布のスムージング化を行う。

図-4に実測ひずみの補正方法を示す。補正計算で基準となる梁危険断面のひずみ($\Delta \epsilon_{cr}$)は、図の(a)と(b)に示すように、北側梁危険断面では4つの測定値に関する回帰曲線(2次曲線)により $\Delta \epsilon_{cr}$ を補正した。南側梁危険断面では、接合部と梁部それぞれについて4つの測定値に関する回帰曲線を求め、その曲線から求まる各々の危険断面位置ひずみ($\Delta \epsilon_p$ 、 $\Delta \epsilon_b$)の平均値を $\Delta \epsilon_{cr}$ とした。危険断面以外のひずみ値の補正是、図の(c)に示すように、隣接する4点を対象として、危険断面に最も近い*i*点(最初のステップでは危険断面でのひずみを用いる)を通る2次曲線に回帰し、(i+1)点の実測ひずみを補正し、その回

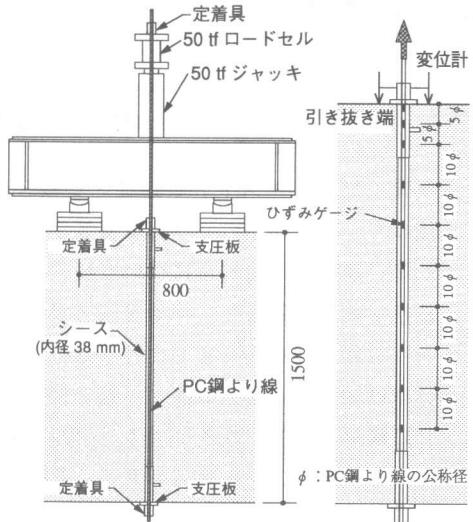


図-3 付着実験の加力方法とひずみ測定位置

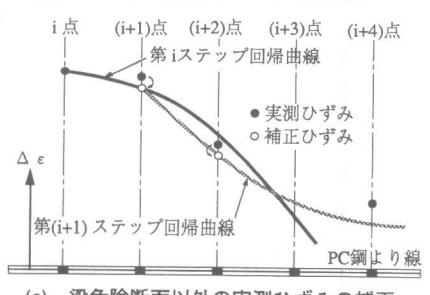
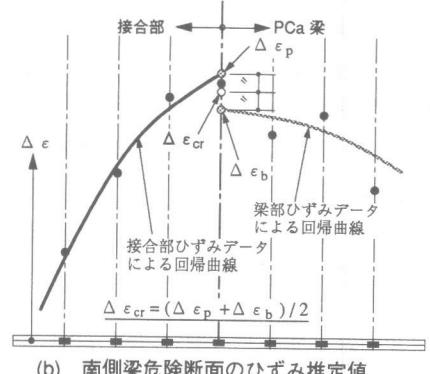
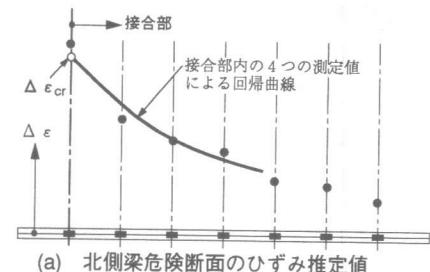


図-4 実測ひずみの補正方法

帰曲線を $i \sim (i+1)$ 点間のひずみ分布曲線とした。次のステップでは、補正された $(i+1)$ 点を固定点として同様の計算を行い、順次実測ひずみを補正していく。この補正計算は、梁危険断面から最も離れた3箇所の測点には適用できず、それらの測点については実測ひずみを用いることとした。

以上の考え方により補正したひずみ分布の一例を図-5に示す。ひずみは加力開始（有効緊張力導入時）から変化したひずみ変化量 ($\Delta \varepsilon$) で示してある。図中の●印は実測値であり、○印は補正值を示す。図に見られるように、補正前と補正後でひずみ分布の大きな相違はなく、補正計算を行うことにより、ひずみ分布に乱れが少なくなっている。

2.3 付着応力の推定方法

前節で補正したPC鋼材のひずみを用いて付着応力 τ を計算する際のPC鋼材の応力は、図-6 (PC鋼より線の例) に示す材料試験結果を近似させたRichardの式 [3] により計算した。

$$\frac{\sigma}{\sigma_0} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \left\{ 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^n \right\}^{\frac{1}{n}} \quad (1)$$

ここに、 σ_0 および ε_0 : Richard式における骨格折れ線（完全弾塑性型）の折点位置の応力とひずみ、 n : $\sigma - \varepsilon$ 曲線の曲がり度合を決定する係数 ($n > 1$)

PC鋼材の断面が公称径を直径 (ϕ) とする円形断面と仮定すると、 τ は (2) 式から求められる。

$$\tau = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{d\sigma}{dx} = \frac{\phi}{4} \cdot \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \cdot \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (2)$$

ここに、 σ : PC鋼材引張応力、 ε : PC鋼材のひずみ、 x : 梁危険断面からの距離

(2) 式の $(d\sigma/d\varepsilon)$ は、(1) 式により得られ（文献 [2] 参照）、 $(d\varepsilon/dx)$ は、 $i \sim (i+1)$ 点間のひずみ分布曲線を (3) 式とすると、(4) 式で表わせる。

$$\varepsilon(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 \quad (3)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dx} = b_i + 2c_i x \quad (4)$$

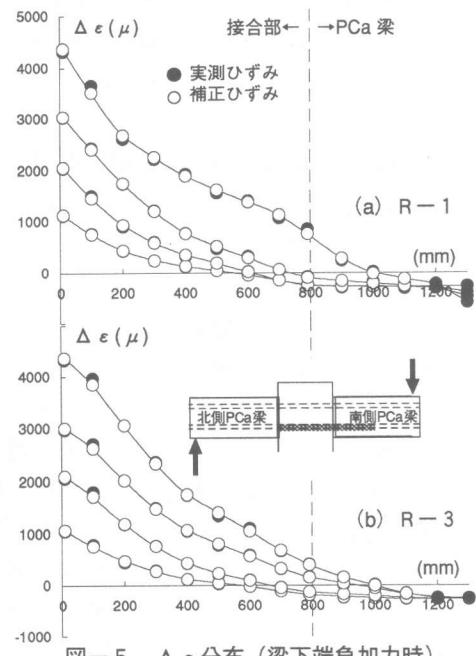


図-5 $\Delta \varepsilon$ 分布（梁下端負加力時）

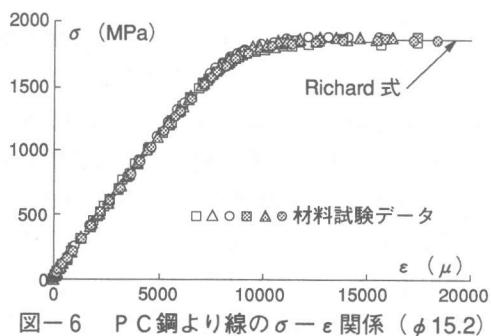


図-6 PC鋼より線の $\sigma - \varepsilon$ 関係 ($\phi 15.2$)

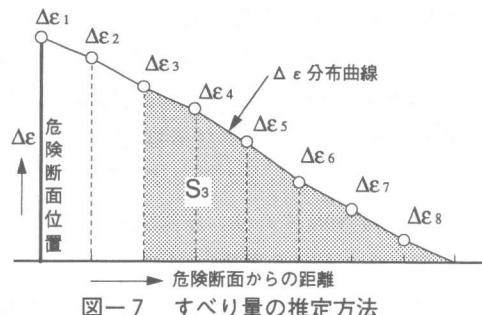


図-7 すべり量の推定方法

2.4 すべり量の推定方法

梁部材実験の接合部内の各測点におけるPC鋼材のすべり量Sは、鋼材の応力伝達域先端からその点までのPC鋼材のひずみ分布から求まる鋼材の伸び量と、PC鋼材位置コンクリートの伸び量の差となる。しかし、以下の理由により、コンクリートのひずみは無視して、図-7に示すようにひずみ分布曲線を積分することによりSを計算した。

①実験では接合部にひび割れが生じておらず、接合部コンクリートのひずみは小さい。

②終局時にPC鋼材の応力伝達域となる対向側梁圧縮部では、中立軸高さがPC鋼材位置に近く、その付近のPC鋼材位置コンクリートのひずみ値も小さい[1]。

なお、Sの計算に用いるひずみ分布曲線は、2.2節の補正計算から得られた各測点間の回帰曲線を連結したものである。

3.検討結果

3.1 S- $\Delta\epsilon$ 関係

図-8にPC鋼より線を用いたR-1のS- $\Delta\epsilon$ 関係を示す。図中には、同じ径($\phi 15.2$)でグラウト材強度がほぼ同じ(38.6MPa)PC鋼より線の付着実験結果[2]も示してある。図より、付着実験結果と部材実験結果とではS- $\Delta\epsilon$ 性状が異なる。すなわち、 $\Delta\epsilon$ が1000 μ 程度までは両者はほぼ一致しているが、それ以上 $\Delta\epsilon$ が大きくなると付着実験の方がSが増加する割合が大きくなる。因みに、両者に差が生じはじめる $\Delta\epsilon = 1000 \mu$ 時のPC鋼より線の引張応力伝達域は、図-5(a)のひずみ分布に見られるように接合部中央位置を僅

かに越え、梁危険断面から約0.6D_c(D_c:柱せい=800mm)の位置である。したがって、応力伝達域が接合部中央付近までの場合には、PC鋼より線の抜け出し性状に関して付着実験と部材実験の差はないと思われる。

図-9に異形PC鋼棒を用いたR-3のS- $\Delta\epsilon$ 関係を示す。図中には、異形鉄筋に関する島等のモデル[4]も参考として示してある。図に見られるように、R-3のS- $\Delta\epsilon$ 関係は、島等のモデルに比べて $\Delta\epsilon$ の増加に伴うSの増加の割合が大きい。島等のモデルは、コンクリート中に埋め込まれた異形鉄筋を対象とした付着実験結果を基に提案されたものである。異形PC鋼棒と異形鉄筋の機械的付着抵抗能力に差がないと考えると、両者に差が生じた原因としてグラウト材とコンクリートのヤング係数の違いが挙げられる。因みに、グラウト材のヤング係数は、1.4~ 1.5×10^4 MPaであり、圧縮強度が同程度のコンクリートのヤング係数の約1/2である。

3.2 τ -S関係

図-10にR-1における接合部内PC鋼より線各位置の τ -S関係を示す。なお、各測点の

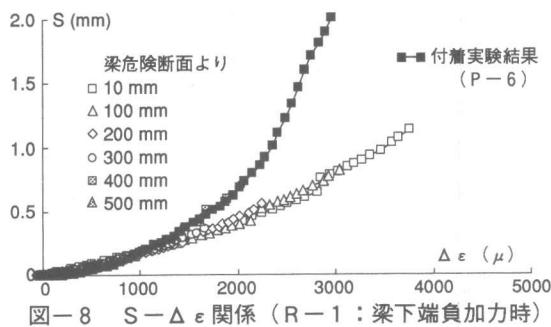


図-8 S- $\Delta\epsilon$ 関係 (R-1:梁下端負加力時)

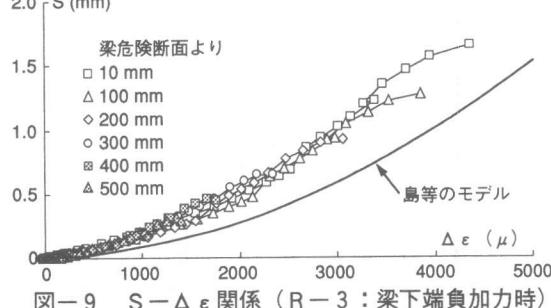


図-9 S- $\Delta\epsilon$ 関係 (R-3:梁下端負加力時)

τ - S 関係は最大 τ 時まで示してある。付着実験では PC 鋼より線の位置に関係なく τ - S 特性はほぼ同じ性状を示したが、部材実験では接合部 PC 鋼より線の各位置で τ - S 関係は大きく異なる。図中には付着実験結果 (P-6 : 載荷端から 30ϕ の位置) も示してあるが、どの測点における τ - S 関係とも異なった性状を示している。

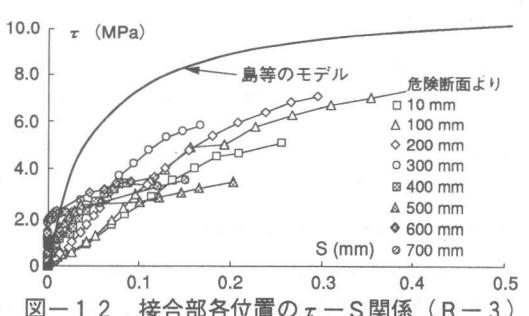
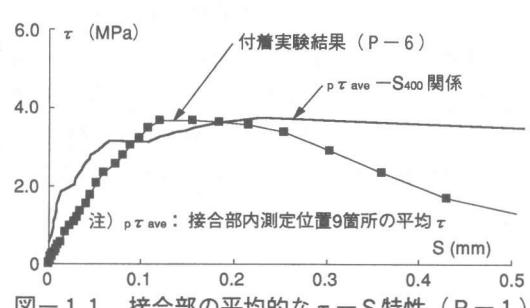
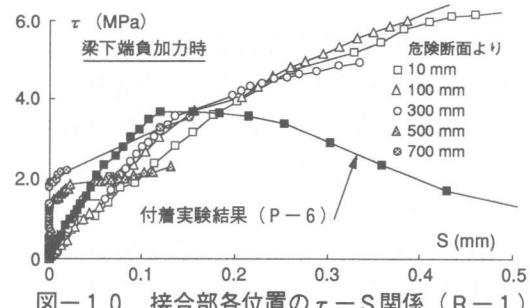
図-11に、接合部内の平均付着応力 ($_{p}\tau_{ave}$) - 接合部中央位置のすべり量 (S_{400}) の関係を付着実験結果と比較して示す。図に見られるように、接合部内の平均的な τ - S 関係 ($_{p}\tau_{ave}$ - S_{400} 関係) については、最大 τ およびその付近までの性状は、付着実験結果と概ね同じと考えられる。最大 τ 以後は、付着実験では τ が低下しているが、 $_{p}\tau_{ave}$ - S_{400} 関係では τ の低下がほとんど見られない。この点は、付着実験における最大 τ 時の $\Delta\epsilon$ が 1000μ 程度であることを考慮すると、S - $\Delta\epsilon$ 関係において $\Delta\epsilon$ が 1000μ を超えると部材実験と付着実験に差が生じはじめることと密接に関連している。

図-12にR-3の接合部内異形PC鋼棒各位置における τ - S 関係を示す。なお、R-1 同様各測点の τ - S 関係は最大 τ 時まで示してある。図から、R-1 同様、接合部内各位置での τ - S 特性は大きく異なることがわかる。また、図中には島等の異形鉄筋とコンクリートを対象とした τ - S モデルも示してあるが、S - $\Delta\epsilon$

関係同様、グラウト材のヤング係数が小さいために付着剛性および最大 τ とも島等のモデルより小さい。

3.3 τ 分布

図-13と図-14に部材実験における τ 分布を2通りの方法で無次元化した結果を示す。両図における(a)は接合部内測点の最大値 ($_{p}\tau_{max}$) で、(b)は平均値 ($_{p}\tau_{ave}$) で無次元化したものである。両試験体とも、危険断面近傍では終局時に τ が低下し、R-1では危険断面からの距離が $0.1 \sim 0.2 D_c$ 付近、R-3では $0.2 D_c$ 付近で最大の τ (以下、第1ピーク点)となる。さらに、両試験体とも、接合部中央までは τ が急激に低下するが、接合部中央を過ぎると徐々に τ が増加し始め、対向側梁危険断面から $0.1 \sim 0.2 D_c$ 付近で τ 分布のピーク点 (以下、第2ピーク点) が再び現われる。また、(b)の図では $\tau / _{p}\tau_{ave}$ 分布を4次関数に回帰した曲線と、その回帰曲線により求まるピーク点を●印で示す。両図における(a)と(b)の比較から、 τ 分布を $_{p}\tau_{ave}$ で無次元化した方がデータのばらつきが少ないことがわかる。さらに、(b)図の $\tau / _{p}\tau_{ave}$ 分布で両試験体を比較すると、両試験体に使用し



たPC鋼材の表面形状が大きく異なっているにもかかわらず、第1ピーク点の値と位置が両試験体で異なることを除けば、それ以外の部分での τ / τ_{ave} 分布はほぼ一致している。更に、第1ピーク点の位置は鋼材径の約4倍となっている。

4.まとめ

今回の検討から、以下の知見が得られた。

(1) $\tau - S$ 関係および $S - \Delta \epsilon$ 関係

部材実験における接合部内の $\tau - S$ 特性はPC鋼材の位置によって大きく異なり、付着実験と異なる性状を示す。ただし、接合部内の平均的な $\tau - S$ 特性は、最大 τ 付近までは付着実験と概ね同じ性状が認められる。また、付着実験における最大 τ 時の $\Delta \epsilon$ は 1000μ 程度であり、そのあたりまでの $S - \Delta \epsilon$ 関係についても両者の結果は一致する。最大 τ 以降の性状は、付着実験では τ が低下するのに対して、部材実験での平均的な $\tau - S$ 特性では τ がほとんど低下せず、それ以降 $S - \Delta \epsilon$ 関係においても部材実験の方が S の増加の割合が小さい。

(2) τ 分布

接合部内の τ 分布は、梁危険断面から $0.1 \sim 0.2 D_c$ 付近で τ が最大となり（第1ピーク点）、それ以降接合部中央付近まで τ が急激に低下する。接合部中央付近からは対向側梁危険断面に近づくにつれて τ が僅かに増加し、再びピークとなる点（第2ピーク点）が生じる。また、接合部内 τ の平均値 τ_{ave} により無次元化した τ / τ_{ave} 分布曲線の形状は、PC鋼材の表面形状やひずみレベルにあまり影響を受けない。

参考文献

- [1] 是永健好, 渡辺英義, 小林 淳: 梁端部における塑性回転評価に関する一考察, コンクリート工学年次論文集 16-2, pp.323~328, 1994年6月,
- [2] 是永健好, 渡辺英義, 小林 淳: PC鋼より線の付着実験, 大成建設技術研究所報 第27号, pp.111~116, 1994年12月,
- [3] Richard, R.M.: A Study of Structrural Systems Having Nonlinear Elements, thesis presented to Purdue University at Lafayette, Ind., in 1961, in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- [4] 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫: マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文報告集 第378号, pp.165~174, 1987年

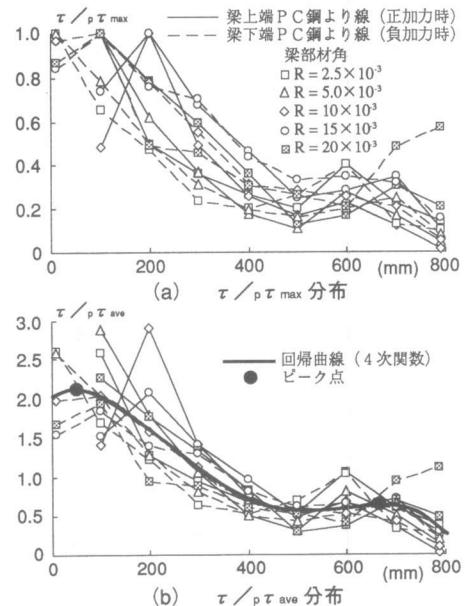


図-13 接合部内の τ 分布 (R-1)

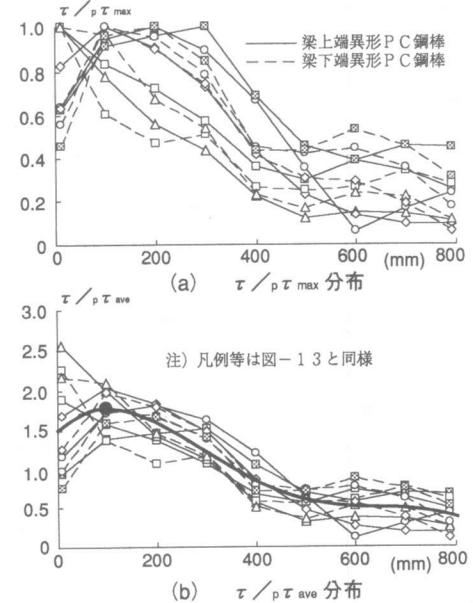


図-14 接合部内の τ 分布 (R-3)