

(26) 圧着型および一体型片持PC梁の塑性ヒンジ機構に関する実験研究
(その2:塑性ヒンジ領域における各補強筋の諸性状について)

(株)日建設	大阪本社	構造設計室	○阿波野昌幸
(株)ピー・エス	大阪支店	建築部	正会員 石井 孝幸
大阪大学	工学部	建築工学科	正会員 中塚 侖
	同上		上田 真也

1. まえがき

本報告は、(その1)に引き続き、PC梁部材の塑性ヒンジ領域における耐荷・変形機構を解明するための知見、すなわち、ヒンジ領域のひび割れ性状、引張側のPC鋼材および普通鉄筋のひずみ分布、曲率分布、せん断補強筋ひずみ・および同鉄筋の作用軸力分布などについて考察したものである。なお、実験概要については(その1)に示している。

2. 実験結果および考察

図1～図5は、各試験体のひび割れ図、引張側のPC鋼棒のひずみ(ϵ_p)分布、普通鉄筋のひずみ(ϵ_r)分布、せん断補強筋のひずみ(ϵ_w)分布ならびに曲率分布を示したものである。(各図において、横軸の正方向は梁付け根から梁先端への距離を、負方向は柱面から柱スタブ内の距離を表している。)図1に、せん断スパン比 a/D の異なる一体型の試験体3体の結果を、図2に、同様に a/D の異なる圧着型の試験体3体の結果を示す。また図3には、異形鋼棒を用いた試験体3体の結果を示し、図4、図5には、 $a/D=3$ および $a/D=5$ の場合のせん断補強筋量の異なる試験体各々2体の結果を示す。

2.1 ひび割れ性状

丸鋼棒を用いた圧着型の試験体(図2に3例を示す)以外のすべての試験体に、せん断ひび割れ、曲げせん断ひび割れが生じた。それらのひび割れ性状には共通して次のような特徴が見られた。スタブと梁の境界部に曲げひび割れが生じ、そこから梁下端位置で、スタブから約15cm前後のピッチで生じたひび割れが、梁・スタブ境界部の圧縮縁に向かって斜め上に伸展した。しかし、ほぼ45度程度の角度となったひび割れより梁先端側に生じたひび割れは、角度が約45度程度のままで、圧壊ゾーンに向かわない傾向が見られた。この圧壊ゾーンに向かう最外斜めひび割れの梁下端位置におけるスタブからの距離は、はりせいの1.0～1.2倍程度であった。

2.2 PC鋼棒のひずみ(ϵ_p)分布

図2に、丸鋼棒を用いた圧着型試験体の結果を示す。同図によれば、PC鋼棒のひずみ分布は、部材角が小さいときにはひずみが零となる梁先端まで直線分布である。部材角が少し大きくなるとPC鋼棒の付着劣化のためにひずみの平均化が生じ、スタブから梁先端までほぼ一様分布となる。この付着劣化によるひずみの平均化が生じる部材角は、 a/D が2(図2-1)では $1/200$ 、 a/D が3(図2-2)では $1/150$ 、 a/D が5(図2-3)では $1/100$ あたりであり、これらの部材角は(その1)の図4で示した荷重一部材角関係のPC鋼棒降伏前の耐力上昇域の直線部分(領域③)の開始点とほぼ一致する。すなわち、③を越えた領域のPC梁の耐荷機構は、付着劣化によって材長方向に張力が一様化したPC鋼材がタイバーとなる、タイドアーチ的なものであると推測される。この形式の塑性ヒンジ部の変形性能を評価するには従来のトラス機構モデルではなく別のモデル化が必要と思われる。さらに、部材角がより一層大きくなると、スタブ近傍でひずみが集中する。

次に図1および図4に、丸鋼棒を用いた一体型試験体についての結果を示す。それら試験体のPC鋼棒の

ひずみ分布を、図2の圧着型の結果と比べると、部材角に対するひずみ分布の変化に上記と同様の傾向が見られるが、付着劣化によりPC鋼棒のひずみが材軸方向に平均化する部材角は一体型の方が大きくなっている。また、図1-1、図1-2、および図4-1、図4-2において、部材角が1/50のときのPC鋼棒のひずみ分布を見ると、スタブから500mm(1D)付近からスタブ面まで、そのひずみが集中して大きくなる傾向が認められた。

さらに図3-2、図3-3に異形鋼棒を用いた一体型の結果を示す。それらの図では、図1、図2、図4の丸鋼棒の場合に見られたPC鋼棒の付着劣化によるひずみ分布の平均化は認められない。これは後述の $\tau-s$ 関係に示すように、異形鋼棒の付着性状が丸鋼棒に比べて極めて良いためである。一方、部材角が大きいときにスタブ近傍でPC鋼棒ひずみが集中する傾向はより顕著に認められ、部材角1/50におけるひずみ分布では、スタブから約500mm(1D)付近でひずみが降伏ひずみとなり、同位置よりスタブに向かってひずみが急激に大きくなっている。

2.3 引張側普通鉄筋のひずみ(ϵ_r)分布

図1、図3～図5で、部材角が1/50における鉄筋ひずみ分布を比較すると、PC丸鋼棒を用いた場合(図1、図4、図5)、スタブから200mm(0.4D)から300mm(0.6D)程度離れた位置から、鉄筋ひずみがスタブ面に向かって大きくなることが認められる。一方、PC異形鋼棒を用いた場合(図3)、スタブから400mm(0.8D)程度の位置から鉄筋ひずみは急増する。このようにPC異形鋼棒を用いた場合の方が普通鉄筋ひずみの集中する範囲が広がる原因の1つとして、異形鋼棒の良好な付着性能によるひび割れ分散性が考えられる。

2.4 曲率分布

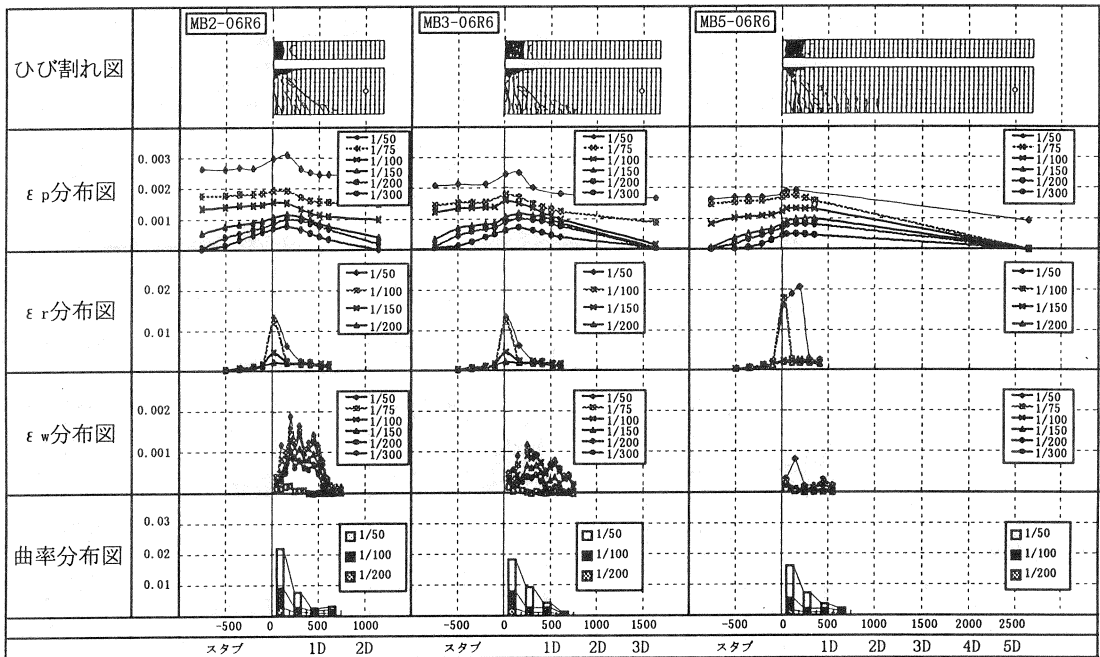
図2および図3-1に示される圧着型試験体の曲率分布によれば、PC鋼棒が異形および丸鋼のいずれの場合でも、スタブ面に隣接する第1区間に回転変形は集中している。しかし、丸鋼棒を用いた場合、同変形は付着劣化による鋼棒伸びの圧着部への集中により生ずるのに対し、異形鋼棒では圧着部近傍における鋼棒の局部ひずみに起因している。一方、一体型の結果を示した図1、図3-2、図3-3、図4、および図5の曲率分布によれば、一体型では梁端における極端な集中はなく、回転変形は材軸方向に分布している。

2.5 せん断補強筋のひずみ(ϵ_w)分布と軸力分布

せん断ひび割れが全く発生しなかった丸鋼・圧着型の図2の結果によれば、せん断補強筋にはほとんどひずみが認められなかった。丸鋼・一体型の結果を示す図1によれば、 a/D による変化を示しているが、 a/D が大きくなると荷重(せん断力)そのものが小さくなるため、せん断補強筋のひずみ分布も小さくなる。 $a/D=3$ で p_w のみが異なる図1-2と図4の結果を比較すると、せん断補強筋比 p_w が0.2%(図4-1)のときの方が0.6%(図1-2)および1.0%(図4-2)のときに比べ大きなひずみが生じている。これをせん断補強筋の作用軸力分布として比較したのが図6である。同図より、 p_w が大きいほど作用軸力も大きくなることがわかる。また同様に、 $a/D=5$ の場合についてせん断補強筋の作用軸力分布を示したものが図7である。 $a/D=3$ の場合に比べ作用軸力はかなり小さくはなるが、 p_w の大なる方が作用軸力は大きくなる傾向は認められる。作用軸力の分布形状には、スタブより100～300mm程度の位置で最大軸力を、スタブ面およびスタブより750mm(1.5D)程度離れた位置では小さな軸力を示す傾向が見られた。

2.6 せん断力(Q)－せん断補強筋負担せん断力(Q_R)関係

図8は、梁部材に作用するせん断力(Q)と塑性ヒンジ領域でのせん断補強筋の負担せん断力(Q_R)との関係を示したものである。図8-1の実線で示される $a/D=2$ の結果においてより明確であるが、 $Q-Q_R$ 関係の曲線は概ね3つの領域に分けられると考えられる。すなわち、荷重が零からせん断ひび割れが生じる点(Q_{cr} 点)までのせん断補強筋の軸力がほとんど零である第一の領域、それ以後、せん断力の増加に比例して補強筋の負担せん断力が上昇する第二の領域、そして、鉄筋・PC鋼材ともに降伏した後、荷重(せん断力)がほとんど上昇しないにもかかわらず、 Q_R は $Q=Q_R$ 直線に漸近していく第三の領域の3つの領域で

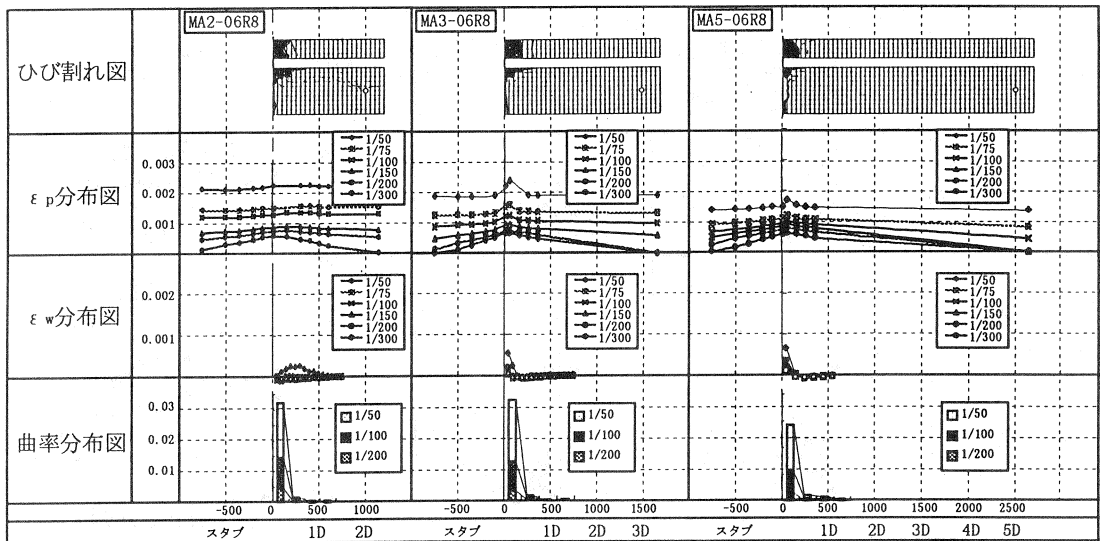


(図1-1 a/D=2)

(図1-2 a/D=3)

(図1-3 a/D=5)

図1. 一体型で $a/D=2, 3, 5$ ($P_w=0.6\%$, $\sigma_0=6\text{N/mm}^2$, 丸鋼棒)の実験結果

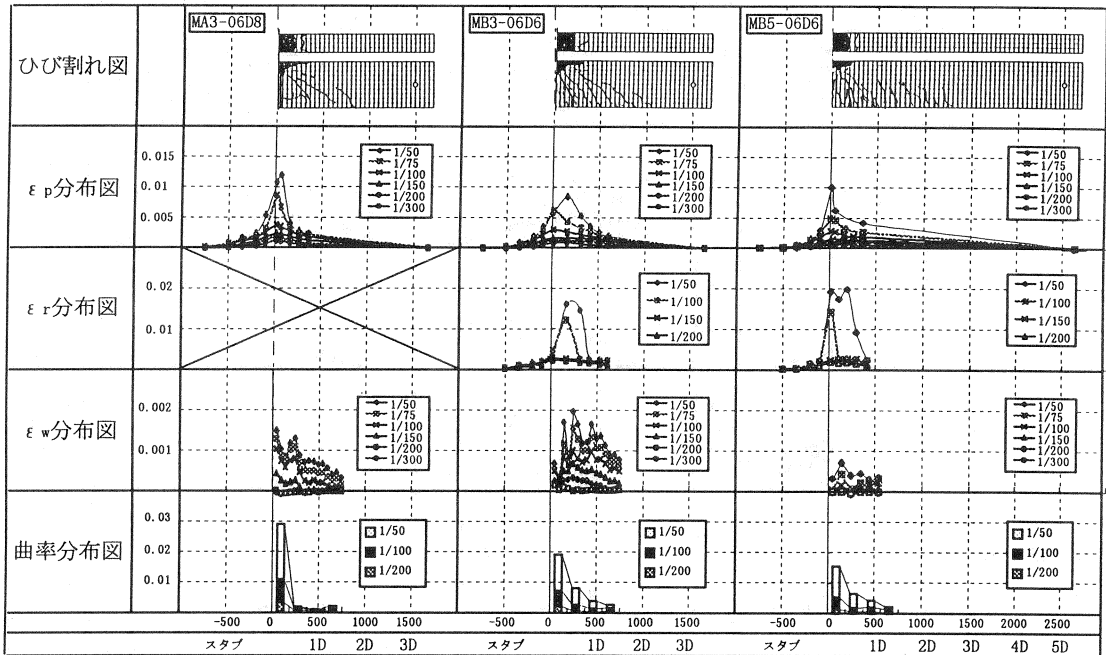


(図2-1 a/D=2)

(図2-2 a/D=3)

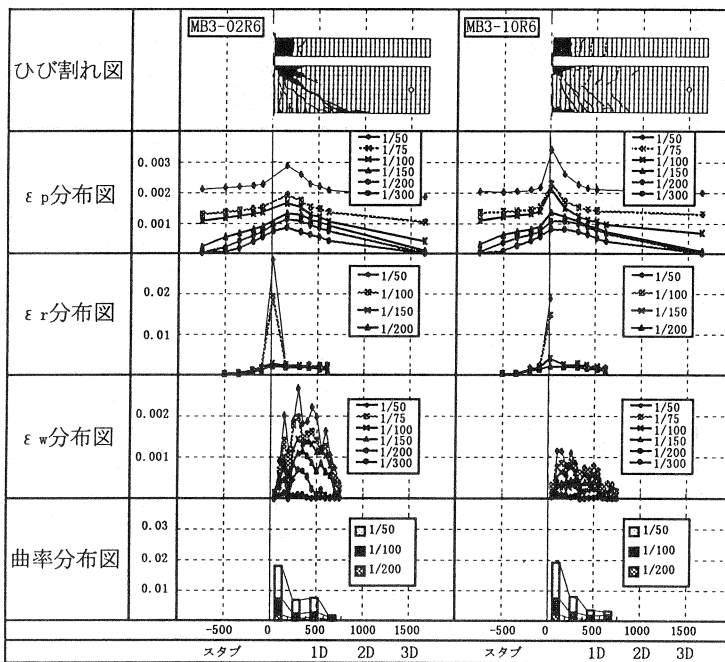
(図2-3 a/D=5)

図2. 圧着型で $a/D=2, 3, 5$ ($P_w=0.6\%$, $\sigma_0=8\text{N/mm}^2$, 丸鋼棒)の実験結果



(図3-1 圧着型、 $a/D=3$) (図3-2 一体型、 $a/D=3$) (図3-3 一体型、 $a/D=5$)

図3. 異形鋼棒を用いた場合の実験結果 ($P_w=0.6\%$)



(図4-1 $P_w=0.2\%$)

(図4-2 $P_w=1.0\%$)

図4. せん断補強筋量が異なる場合の実験結果 (一体型、 $a/D=3$, $\sigma_0=6\text{N/mm}^2$, 丸鋼棒)

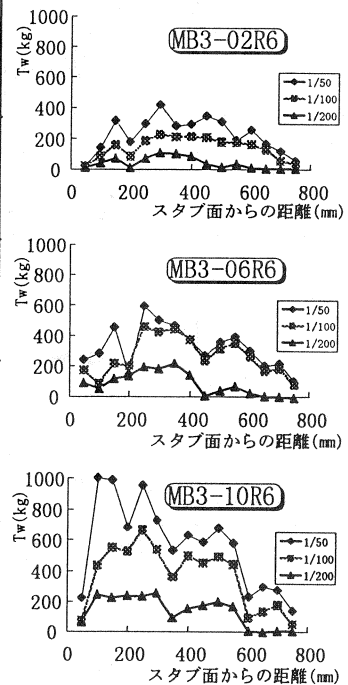
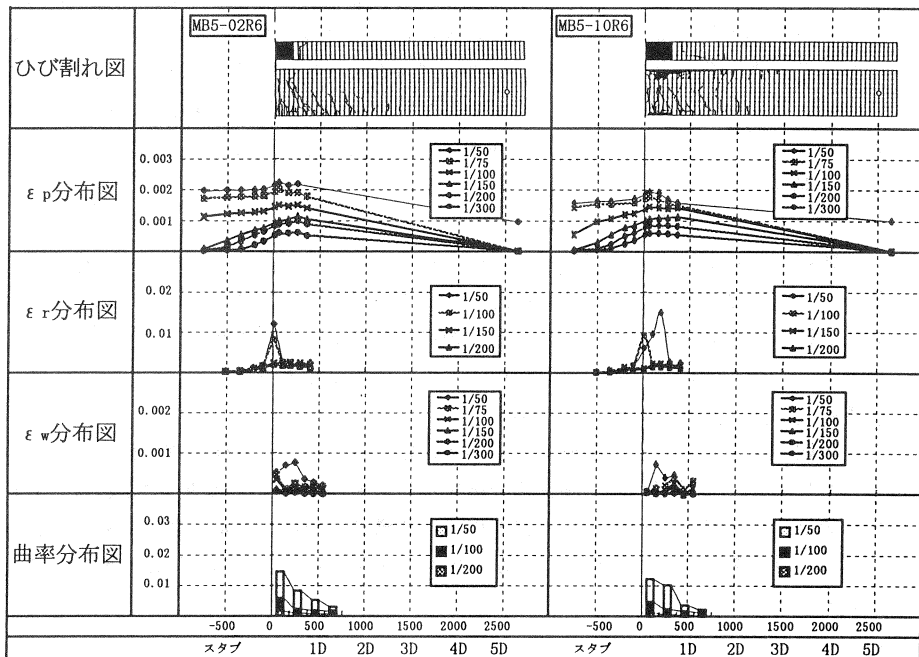


図6. せん断補強筋の作用力分布



(図5-1 Pw=0.2%) (図5-2 Pw=1.0%)
 図5. せん断補強筋量が異なる場合の実験結果(一体型, a/D=5, 丸鋼棒, $\sigma_0=6N/mm^2$)

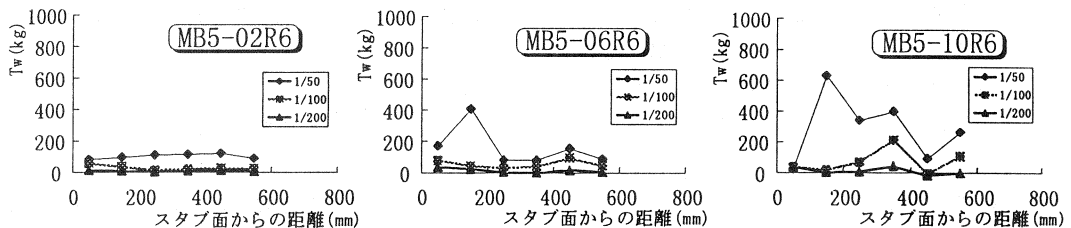


図7. せん断補強筋の作用力分布

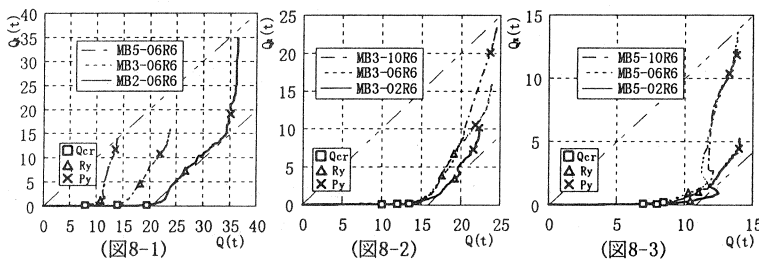


図8. せん断力(Q)-せん断補強筋負担せん断力(Qn)関係

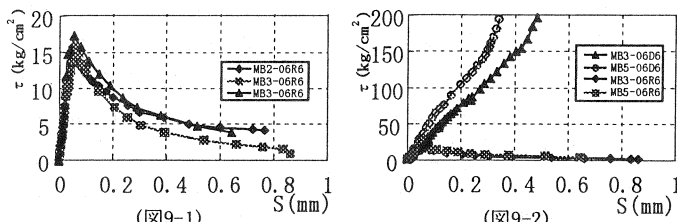


図9. 付着応力(τ)-すべり量(S)関係

表1. 圧壊域長さで中立軸深さ

試験体名	実測値		計算値
	lc(cm)	Xn(cm)	
MA2-06R8	12	17.5	0.7
MA3-02R8	17	17.5	1.0
MA3-06R8	17	17.5	1.0
MA3-06D8	17	17.5	1.0
MA3-06R6	17	14.2	1.2
MA5-06R8	15	17.5	0.9
MB2-06R6	8	14.1	0.6
MB3-02R6	17	14.1	1.2
MB3-06R6	17	14.1	1.2
MB3-06R6	17	14.1	1.2
MB3-10R6	17	17.5	1.0
MB4-06R6	20	14.1	1.4
MB5-02R6	17	14.1	1.2
MB5-06R6	17	14.1	1.2
MB5-06R6	17	14.1	1.2
MB5-10R6	25	17.5	1.4

ある。 $a/D=3, 5$ においても同様の傾向が見られるが、 a/D が大なるほど、第二の領域の勾配が大きくなる傾向がある。図8-2は a/D が3で p_w が異なる試験体の結果を比較したものである。 $p_w=0.2\%$ のものは Q_R が約10tonでせん断破壊が生じたのに対し $p_w=0.6\%, 1.0\%$ となるに従い最終ステップの Q_R が Q に漸近する結果となっている。また、 $Q-Q_R$ 曲線のせん断ひび割れ発生以後の第二の領域の勾配は p_w が大なるほど急勾配となる傾向が見られる。図8-3においても $p_w=0.2\%$ の結果に比べ $p_w=0.6\%, 1.0\%$ の方が第二の領域の勾配は急勾配となる傾向が見られる。

2.7 圧壊ゾーンと中立軸深さ

表1に、実験終了後に調べた、各試験体の曲げ圧縮域においてコンクリートの粉状化が見られた梁中央位置での圧壊ゾーンの長さを示した。同表には終局時の中立軸深さの計算値も併せて示している。圧壊ゾーンは $a/D=2$ のときは8cmおよび12cmで、 $a/D=3, 5$ の17cm前後より若干小さくなっている。全試験体についてみると、圧壊ゾーンの長さは中立軸の計算値の1~1.2倍程度であった。

2.8 付着応力(τ)—すべり量(S)関係

図9は、本実験のスタブ内のPC鋼棒のひずみ測定結果を用いて、梁側端部位置において求めたPC鋼棒の付着応力(τ)とすべり量(S)の関係の一例を示したものである。図9-1によれば、PC丸鋼棒の $\tau-S$ 関係は付着強度が $\tau=18\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度で、同強度以後は急激に付着応力を低下させるものであった。これに対し、図9-2はPC異形鋼棒 $\tau-S$ 関係を示すが、すべりの増大に対し付着応力が増大し極めて良好な付着性能を有するものであった。

3. まとめ

圧着型および一体型の片持PC梁の単調載荷実験から、PC梁の塑性ヒンジ領域の耐荷・変形機構に関する以下のような知見が得られた。

- 1) PC丸鋼により圧着された梁部材では、PC鋼棒の顕著な付着劣化が生じるため、その耐荷機構はトラス機構より、タイドアーチ的な機構となる。
- 2) 一体型およびPC異形鋼棒を使用した圧着型の梁部材では
 - a) 梁端部の圧壊域を指向する最外斜めひび割れの梁下端でのスタブからの距離は、約1.0~1.2D程度であった。
 - b) 梁の終局域ではPC丸鋼棒は、スタブより1D程度の位置からスタブ面にかけてのひずみ上昇が顕著であり、また、PC異形鋼棒では、この1D区間がほぼ降伏領域となっている。
 - c) 引張側の普通鉄筋のひずみは、PC丸鋼棒を用いた場合はスタブ面より約0.4~0.6Dの範囲、PC異形鋼棒の場合は同じく約0.8Dの範囲において集中分布する傾向がある。
 - d) せん断補強筋の作用軸力は、 a/D が同一でも補強筋比が大なるほど大きくなる傾向がある。また、作用軸力の部材軸方向の分布はばらつきがあるものの、スタブ面より0.5Dあたりの位置で最も大きく、スタブ面およびスタブ面より1.5Dあたりで小さくなる分布形状を示す。
 - e) せん断力(Q)とせん断補強筋の負担せん断力(Q_R)関係の曲線は概ね3つの領域に分けられる。せん断ひび割れ点(Q_{cr} 点)以後、 Q の増加に比例して Q_R が上昇する第二の領域の勾配は、 a/D が大なるほど、 p_w が大なるほど急勾配となる傾向が見られた。

[謝辞] 本研究の一部は、(社)建築研究振興協会に設けられた共同研究「PC構造設計・施工指針の作成」^[3]の研究調整委員会(委員長岡本伸)に所属する構造性能評価WG(主査渡邊史夫)で行われたものである。また、横補強筋の製作には、高周波熱錬(株)の多大なる御助力を賜った。以上記して謝意を表する。

[参考文献] [1] 日本建築学会: プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説、1987年、[2] 日本建築学会: プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説、1986年、[3] 岡本伸、他: 「PC構造設計・施工指針の開発(研究概要)」共同研究 PC構造設計・施工指針の作成 平成8年度研究報告書、平成9年3月、[4] 阿波野昌幸、他: 「圧着型および一体型片持PC梁の荷重-変形特性(その1. 実験概要および荷重-変形特性)」日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、1997年9月、[5] 石井孝幸、他: 「圧着型および一体型片持PC梁の荷重-変形特性(その2. ひび割れ状況、PC鋼材のひずみ分布および曲率分布)」日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、1997年9月