

(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4:正負繰返し载荷における塑性ヒンジ領域の回転変形分布、各補強筋のひずみ分布およびひび割れ性状について)

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

1. まえがき

本報告は、(その3)に引き続き、PC梁の塑性ヒンジモデルに必要な諸特性について述べるものである。すなわち、(その3)に示した片持PC梁の正負繰返し载荷試験から得られた、塑性ヒンジ領域の回転角分布やPC鋼材のひずみ分布、横補強筋のひずみ分布、ひび割れ性状、塑性ヒンジ長さなどの諸特性におよぼす接合形式(圧着型、一体型)、PC鋼材種、横補強筋量などの諸要因の影響を調べたものである。

2. 実験結果および考察

図1は、代表的な試験体について、塑性ヒンジ領域の回転角(θ_i)分布および回転角比(θ_i/θ_{total})分布、PC鋼材のひずみ(ϵ_p)分布、横補強筋のひずみ(ϵ_w)分布ならびにひび性状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(a)は接合形式およびPC鋼材種の異なる試験体3体の結果を示し、図1(b)は横補強筋比の異なる試験体3体の結果を示す。

2.1 ひび割れ性状

丸鋼棒を用いて圧着した試験体(図1(a)・左)では曲げひび割れが圧着面およびその近傍に集中したのに対し、異形鋼棒で圧着した場合(同図・中)は良好なひび割れ分散性を示し、せん断・曲げせん断ひび割れがヒンジ領域に発生した。また、一体型(同図・右)では圧着型に比べひび割れ本数が多く、ひび割れ間隔は小さい。そのひび割れはスタブと梁の境界部の曲げひび割れが生じた後、スタブから約10~20cmピッチで梁下端に生じ、梁とスタブの境界部の圧縮縁に向かって伸びる。しかし、ある程度スタブから離れた位置のひび割れは、隣接するひび割れと平行になる。

2.2 回転角(θ_i)分布と回転角比(θ_i/θ_{total})分布

回転角(θ_i)の分布は、第1区間に集中する。第1区間から第4区間までの合計曲げ回転角(θ_{total})との比は一体型では変形角の大きさにかかわらず60%程度であるのに対し、圧着型では概ね65~90%程度で、変形角の増大に伴って集中度が高くなる傾向にある。なお、この第1区間の回転角にはPC鋼棒の抜け出しによる回転角も含んでいる。

2.3 PC鋼棒のひずみ(ϵ_p)分布

異形PC鋼棒を用いて圧着した場合、スタブ面から500mm(1.0D)程度の梁部分においてPC鋼棒ひずみが集中して生じる傾向が見られ、部材角R=1/50ではスタブから300mm(0.6D)程度の位置からスタブ側のPC鋼棒は降伏に達している。また異形PC鋼棒の場合、付着が良好なため、部材角R=1/50でも梁先端およびスタブ

側定着端のPC鋼棒の応力変化は殆ど零なのに対し、丸鋼棒で圧着したときでは部材角 $R=1/200$ で、スタブ内の付着切れが生じている。

2. 4 せん断補強筋のひずみ(ϵ_w)分布

図1(b)によれば、せん断補強筋比が0.2%と小さい試験体(図1(b)・左)では部材角 $R=1/20$ において、せん断補強筋が降伏(図中、一点鎖線により降伏ひずみを示す)するほど大きなひずみを示しているが、他の試験体は部材角が大きくなっても ϵ_w は0.1%程度で降伏していない。図1(a)によると、圧着接合した試験体2体(同図・左・中)はスタブ近傍でせん断補強筋ひずみ(ϵ_w)が大きくなるのに対し、一体型(同図・右)ではスタブ近傍の ϵ_w は小さくなっている。この原因として後者では普通鉄筋のダボ作用によりそのスタブ近傍の上下方向のずれの拘束が考えられる。なお、丸鋼棒で圧着した場合は、スタブから250mm(0.5D)程度の位置から、 ϵ_w が小さくなるのに対し、異形鋼棒で圧着した場合は、スタブから700mm(1.2D)あたりまでは ϵ_w は大きな値を示す。

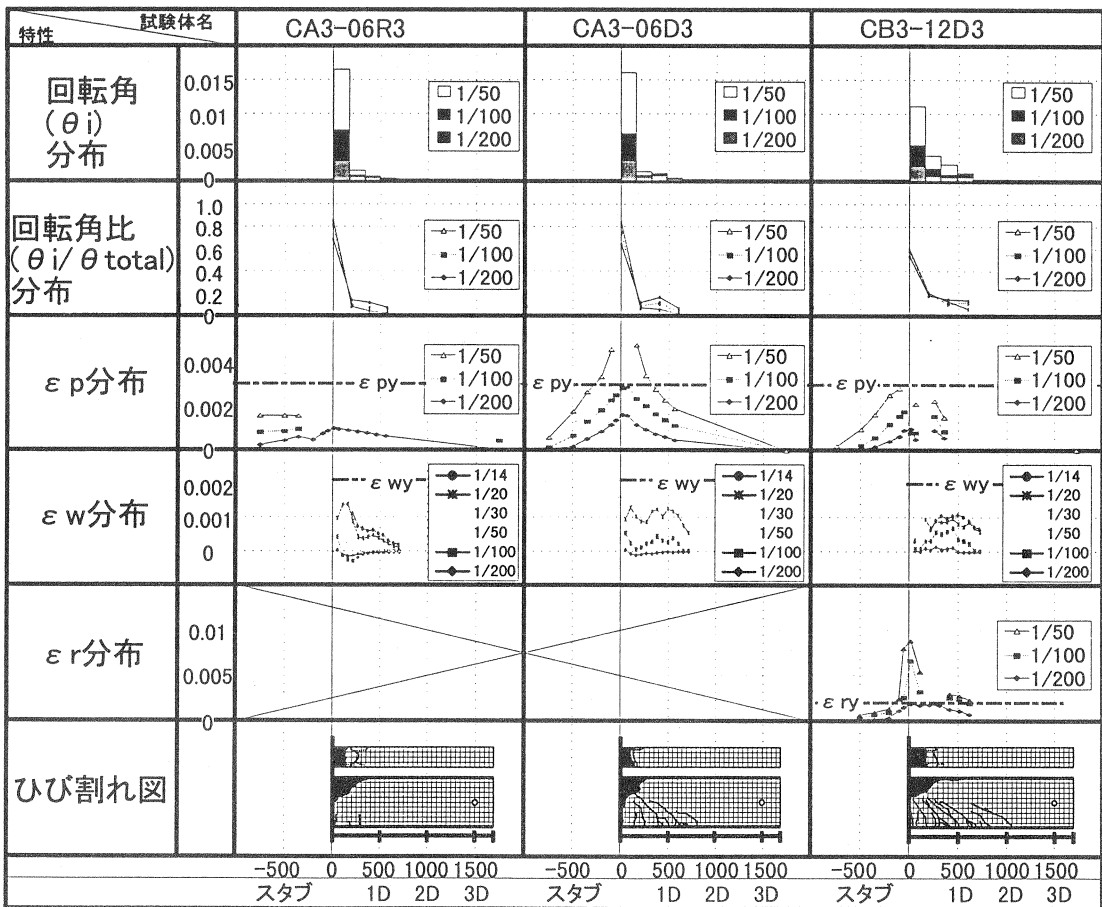


図1(a) 各試験体のひび割れおよび変形分布図

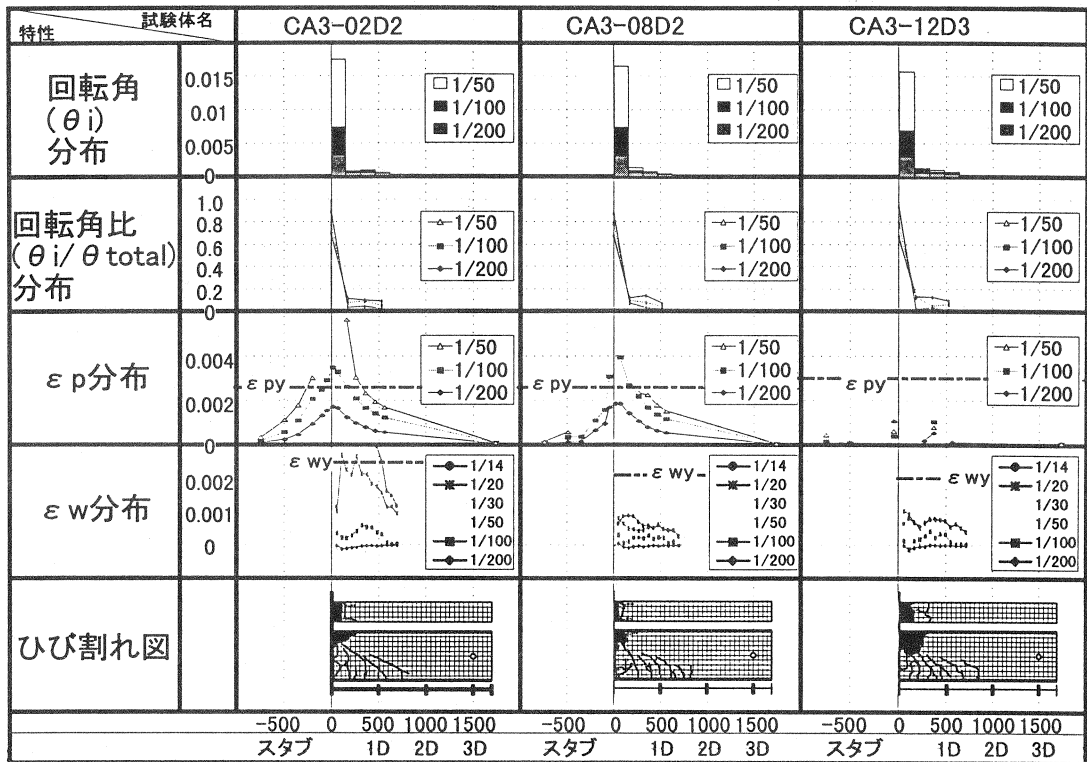


図1(b) 各試験体のひび割れおよび変形分布図

2. 5 塑性ヒンジ領域の引張側および圧縮側長さ

試験体の観察から、塑性ヒンジ領域の引張側および圧縮側の長さを以下のように定義した。引張側ヒンジ長さは斜めひび割れ(せん断および曲げせん断ひび割れ)が平行なものになる限界のひび割れ位置までの引張側の長さを示す。また、圧縮側ヒンジ長さは、実験終了後に調べた、曲げ圧縮域の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である。表1にヒンジ領域長さの結果を示す。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。表1によると、 $a/D=3$ のとき引張ヒンジ長さは梁成 D の 1.00~1.36 倍、平均 1.22 倍となり、 $a/D=5$ のときは 1.38 倍および 1.52 倍、平均 1.45 倍となっている。また、圧壊ゾーンの長さは中立軸の計算値に対して $a/D=3$ で平均 0.67 倍、 $a/D=5$ で平均 0.92 倍となっている。

表1 l_t, l_c および中立軸深さ

試験体名	実測値 $l_t(\text{mm})$	l_t/D	実測値 $l_c(\text{mm})$	計算値 $X_n(\text{mm})$	l_c/X_n
CA3-02D2	600	1.20	110	139.44	0.79
CA3-06D3	650	1.30	100	172.03	0.58
CA3-11D4	500	1.00	100	229.45	0.44
CA3-08D2	650	1.30	50	138.95	0.36
CA3-12D3	680	1.36	150	169.44	0.89
CB3-12D3	650	1.30	170	164.31	1.03
CA3-06R3	-	-	130	171.06	0.76
CA3N06D3	600	1.20	90	168.76	0.53
CA3T06D3	650	1.30	90	177.06	0.51
MA3-06D3	500	1.00	170	197.96	0.86
($a/D=3$)平均	609	1.22	116	172.85	0.67
CA5-06D3	760	1.52	110	162.25	0.68
CB5-06D3	690	1.38	190	163.35	1.16
($a/D=5$)平均	725	1.45	150	162.80	0.92

2.6 等価塑性ヒンジ長さ(l_{eq})

図2は、塑性ヒンジ領域の第1区間から第4区間までの曲げ回転角(θ_{total})を検長113mm(0.226D)の第1区間の回転角(θ_1)で除すことにより求めた塑性ヒンジの等価長さ(l_{eq})と部材角(R)との関係を調べたものである。なお第1区間の回転角にはPC鋼棒の抜け出しによる回転角が含まれている。同図より、部材角 $R=1/200$ 程度では、 $a/D=5$ の圧着型試験体を除いて、圧着型と一体型のいずれの試験体でも l_{eq} は梁成Dの0.21~0.25倍程度の長さとなる。 R が増加すると、一体型では、 l_{eq} は増加し、その傾向はシアスパン a/D が大きい方がより顕著で、部材角 $R=1/50$ においては $a/D=5$ で0.43D、 $a/D=3$ では0.33D程度となる。これに対し、圧着型の l_{eq} は、いずれの試験体についても部材角 R にかかわらずほぼ一定となり、梁せいDの0.21~0.25倍程度の長さとなる。

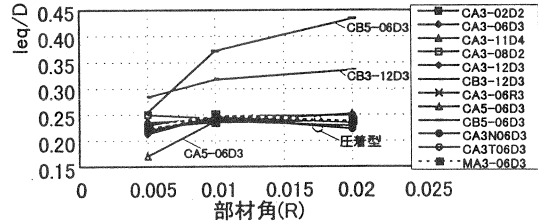


図2 等価塑性ヒンジ長さ(l_{eq})—部材角(R)関係

2.7 せん断力(Q)とせん断補強筋負担せん断力(Q_R)の関係

図3は、梁部材のせん断力(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、せん断ひび割れ耐力(Q_{Scr})で無次元化して示している。図中、一点鎖線はせん断補強筋の降伏耐力レベルを、また、破線は各サイクルの最大荷重点の包絡線を示している。なお、 Q_{Scr} は $Q-Q_R$ 関係で Q_R が急激に増大する点としている。図3によれば、各試験体ともせん断ひび割れ発生後、部材角の増加とともにせん断力(Q)が零時でのせん断筋負担せん断力(Q_R)は増大する。また、各サイクルでの Q の増加に伴う Q_R の増加率は、部材角が増大するにつれてより大きくなる。また図4は、部材角 $R=1/30$ のときの1サイクル目の履歴を抽出して示したものである。同図より、同じ Q/Q_{Scr} に対する Q_R/Q_{Scr} の値は、せん断補強筋比 P_w が大なるほど、また圧着型より一体型の方が、また丸鋼棒による圧着より異形鋼棒による圧着の方が大となる傾向がある。

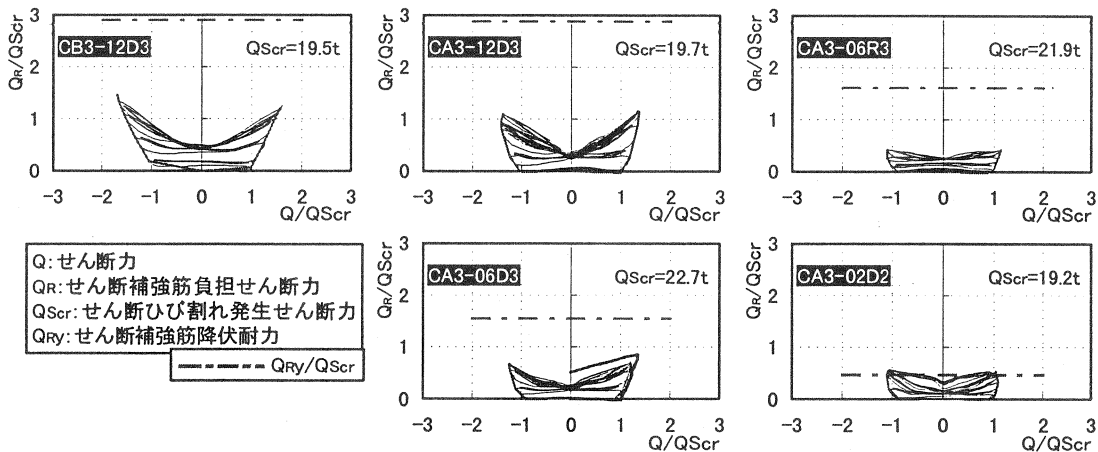


図3 代表的試験体の $Q/Q_{Scr}-Q_R/Q_{Scr}$ 関係

図5は、 $a/D=3$ の異形PC鋼棒を用いた場合について、繰り返し载荷の試験体の $Q/Q_{Scr}-Q_R/Q_{Scr}$ 関係の正荷重時の包絡線と単調载荷の同関係を示したものである。同図によると、同一部材のとき、せん断ひび割れ発生後の $Q/Q_{Scr}-Q_R/Q_{Scr}$ の傾きは、繰り返し载荷の場合の包絡線と単調载荷の結果とほぼ重なる。また、圧着型のとき、その傾きは、 $Q_R/Q_{Scr}=0.8$ あたりで大きくなり Q がほとんど増加しないのに Q_R が増大する傾向が見られるが、一体型のときは、 Q が大きくなっても初期の傾きのまま Q_R は増大する。

図6は、塑性ヒンジ領域の Q_R/Q と部材角(R)との関係を調べたものである。同図より、 Q_R/Q はRが増加すると大きくなり、せん断補強比 P_w が大きいほど、丸鋼棒での圧着より異形鋼棒での圧着の方が大となる。また、一体型と圧着型を比べると、正荷重の $R=1/30$ 以外では、一体型のほうが Q_R/Q は大きい。

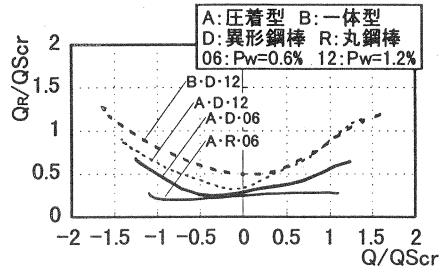


図4 $Q/Q_{scr} - Q_R/Q_{scr}$ 関係, 履歴途中形状 ($q_{sp}=0.3, R=1/30, N=1$)

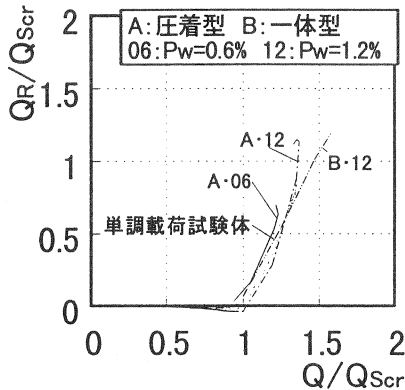


図5 $Q/Q_{scr} - Q_R/Q_{scr}$ 関係包絡線比較

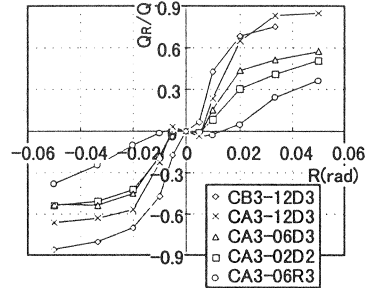


図6 $Q_R/Q - R$ 関係

2. 8 PC 鋼棒の応力-ひずみ履歴とプレストレス力の変化

図7は、PC 鋼棒に貼付した箔ひずみゲージと PC 鋼棒の履歴モデル^{文献7)}により得られた PC 鋼棒の応力-ひずみ履歴を、図8は、PC 鋼棒の応力-ひずみ履歴に基づき、上下の PC 鋼棒の軸力の和として求めた梁断面に作用する総プレストレス力の変化の一例を示している。図7の応力-ひずみ履歴によると、PC 鋼棒が正荷重時に弾性限を超えた後、負荷荷によってひずみが減少すると、導入時応力よりかなり低い応力状態になることがある。従って、図8に示すように各サイクルのピーク時の総プレストレス力は部材角の増加に伴い、1 サイクル目では $R=1/100$ あたりで、3 サイクル目では $R=1/200$ あたりで軸力のピークをもち、それ以後は軸力は低下し、1 サイクル目では $R=1/30$ を越えると、3 サイクル目では $R=1/100$ あたりでも、導入軸力を下廻る結果となる。また、荷重が零の時のプレストレス力は部材角の増加に伴い減少し、 $R=1/50$ では約 1/2 程度まで低下している。

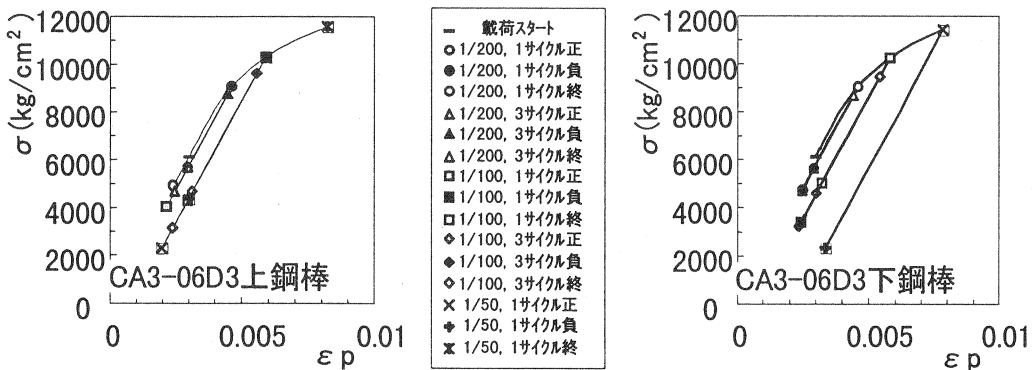


図7 PC 鋼棒の応力-ひずみ履歴

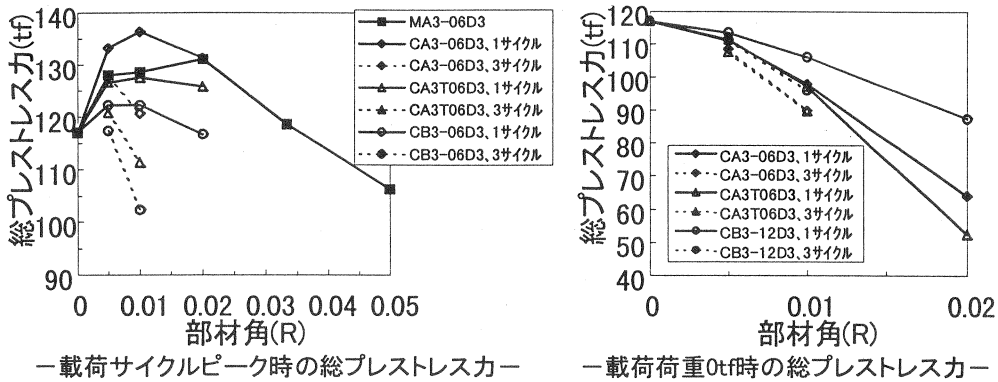


図8 プレストレスの減退

3. まとめ

- 1) 丸鋼棒で圧着した場合は圧着部にひび割れが集中するのに対し、異形鋼棒で圧着するとひび割れの分散性を示す。
- 2) ヒンジ領域では、スタブ近傍の第1区間に回転変形が集中し、そのヒンジ領域全体の曲げ回転角(θ_{total})に対する比は、圧着型では65~90%程度、一体型では60%程度となる。
- 3) 付着が良好な異形PC鋼棒のひずみは、スタブから1.0Dあたりからスタブに向かって集中する傾向があり、部材角 $R=1/50$ のときスタブから0.6D程度の位置からPC鋼棒は降伏する。
- 4) 斜めひび割れが平行なものとなる限界位置を引張側の塑性ヒンジ長さとしたとき、その長さは梁成に対し $a/D=3$ で平均1.22倍、 $a/D=5$ で平均1.45倍となる。圧縮部の圧壊ゾーンの長さは中立軸の計算値に対し $a/D=3$ で平均0.67倍、 $a/D=5$ で平均0.92倍となる。
- 5) 等価塑性ヒンジ長さ(l_{eq})は、圧着型の場合、部材角 R にかかわらず0.21D~0.25D程度で、一体型の場合、部材角 R の増加に伴い大となり、 $R=1/50$ では $a/D=5$ で0.43D、 $a/D=3$ では0.33Dとなる。
- 6) せん断補強筋の負担せん断力(Q_R)は、せん断ひび割れ発生後、部材角の増加とともにせん断力 $Q=0.1t$ 時での Q_R の上昇が生じ、各サイクルでの Q の増加に伴う Q_R の増加率は、部材角が増大するにつれて大きくなる。
- 7) プレストレス力は、PC鋼棒の降伏に起因して、部材角が大きくなると、導入力低下する傾向がある。

[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」の研究調整委員会(委員長 岡本申)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。同WG内に設けられた塑性ヒンジ領域の回転変形能力に関するSWGの委員、加藤博人氏および是永健好氏には貴重な御討議をいただいた。また、横補強筋の製作には、高周波熱練(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)阿波野,中塚,石井:「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),pp.873-874,1997年9月、 2)石井,阿波野,中塚,上田:「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1:荷重-変形特性およびひび割れ性状)」プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集,pp.129-134,1997年10月、 3)鈴木,中塚,岸本:「鉄筋コンクリート柱部材の曲げ靱性と横拘束(コンファインド)補強筋量」材料 Vol.40, No.456, pp.72-78,1991年9月、 4)コンクリート構造(PC,RC)部材の靱性設計手法と耐震架構への応用:日本建築学会・PC構造運営委員会,終局限界変形・変位小委員会シンポジウムテキスト,pp.151-179,1997年9月、 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(案)・同解説,pp.142-159,1997年7月、 6)宮本,大野,森:「鉄筋コンクリート柱部材の靱性と横補強筋量について」日本建築学会近畿支部研究報告集,pp.49-52,1998年7月、 7)岡本申:「プレストレストコンクリート造骨組架構の耐震性に関する基礎的研究」京都大学学位論文,1986年11月