

プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する研究

池田 尚治*1・森 拓也*2・吉岡 民夫*3

1. はじめに

1995年に神戸・淡路島を襲った兵庫県南部地震では、多くのコンクリート橋脚が、倒壊したり、変形が大きくなり構造物の機能を失うなどの被害を受けた。従来、橋脚は上部工からの重量を支持することが主な目的であったが、兵庫県南部地震のような巨大地震では、想定を上回る水平荷重が橋脚に作用するため、橋脚も梁部材と同様に大きな曲げモーメントとせん断力に抵抗する曲げ部材として認識する必要がある。曲げ部材であれば、プレストレストコンクリート(PC)が最も合理的であることはよく知られている。

PC構造では、適当な量のPC鋼材を適正に配置することにより、高い曲げおよびせん断耐力を得ることができる。また、PC構造は、導入されたプレストレスの効果により、一般に鉄筋コンクリート(RC)構造と比較して、高い復元力を有していると言われている。よって、コンクリート橋脚の軸方向にプレストレスを導入することにより、上述のようなPC構造の特徴が得られ、地震後に構造物の耐力が低下せず、残留変位が許容限度内にある状態とする性能を確保することができる。

一方、RC構造が典型的な紡錘形の履歴特性を示し、自らが徐々に破壊することにより、高いエネルギー吸収能を示すのに対し、PC構造は、プレストレスによる復元力が高い

うえに、ひび割れが少なかったり、場合によってはPC鋼材が弾性域に留まることにより、RC構造とは異なった履歴特性を示し、エネルギー吸収能が低く、耐震的ではないと言われることもある。

以上述べたように、橋脚の軸方向にプレストレスを導入した場合の橋脚の耐震性については、いまだ不明の点が多く、設計に供することができるデータが得られているとは言い難い。そこで、軸方向にプレストレスを導入した縮小供試体を用い、静的正負交番曲げ載荷実験を行い、PC橋脚の耐震特性を明らかにすることを本研究の目的とした。

2. 実験の概要

2.1 供試体

供試体は、柱部の断面寸法を40cm×40cmの正方形断面とし、載荷スパンを柱基部から1.5mとした。これらの寸法は、載荷実験を実施する機関の載荷装置や載荷能力を考慮して決定した。

検討項目は、①断面形状(中実もしくは中空)、②上部工重量による軸応力度(1もしくは4MPa)、③コンクリート強度(35もしくは60MPa)、④プレストレスのレベル(0, 2, 4もしくは8MPa)および⑤PC鋼材の付着の有無とし、合計17体の供試体を用いて実験を行った。供試体諸元を表-1に、供試体の主要寸法を図-1に示す。なお、中空断面供試

表-1 供試体諸元

供試体名	断面形状	軸応力度 (MPa)	コンクリート強度 (MPa)	プレストレス (MPa)	付着の有無	帯筋	PC鋼材	軸方向鉄筋	曲げ耐力 (kN)
S-1	中実	1.0	35.0	-	-	D6@30	-	32×D13	194.7
S-2	中実	1.0	35.0	2.0	あり	D6@30	4×SWPR7B φ12.7	16×D13	175.3
S-3	中実	1.0	35.0	4.0	あり	D6@30	8×SWPR7B φ12.7	16×D10	193.9
S-4	中実	1.0	35.0	4.0	なし	D6@30	8×SWPR7B φ12.7	16×D10	188.9
S-5	中実	1.0	35.0	8.0	あり	D10@40	8×SWPR19 φ17.8	8×D10	277.3
S-6	中実	1.0	60.0	8.0	あり	D10@40	8×SWPR19 φ17.8	8×D10	311.6
S-7	中実	4.0	35.0	-	-	D6@30	-	32×D13	233.9
S-8	中実	4.0	35.0	4.0	あり	D6@30	8×SWPR7B φ12.7	16×D13	222.5
S-9	中実	4.0	35.0	4.0	なし	D6@30	8×SWPR7B φ12.7	16×D10	224.3
S-10	中実	4.0	60.0	4.0	あり	D10@40	8×SWPR7B φ12.7	16×D10	249.8
S-11	中実	4.0	60.0	8.0	あり	D10@40	8×SWPR19 φ17.8	8×D10	335.4
S-12	中空	1.0	35.0	-	-	D6@30	-	32×D13	185.6
S-13	中空	1.0	35.0	4.0	あり	D6@30	4×SWPR7B φ12.7	16×D10	125.6
S-14	中空	1.0	35.0	8.0	あり	D6@30	4×SWPR19 φ17.8	8×D10	152.5
S-15	中空	4.0	60.0	-	-	D6@30	-	32×D13	209.4
S-16	中空	4.0	60.0	4.0	あり	D6@30	4×SWPR7B φ12.7	16×D10	160.6
S-17	中空	4.0	60.0	8.0	あり	D6@30	4×SWPR19 φ17.8	8×D10	188.4

注) 曲げ耐力は水平力(終局曲げモーメント/載荷スパン)を示す。

*1 Shoji IKEDA: 横浜国立大学 工学部 建設工学科 教授

*2 Takuya MORI: (株)ビー・エス 土木技術部 主任研究員

*3 Tamio YOSHIOKA: オリエンタル建設(株) 技術研究所長

中実断面の場合 中空断面の場合

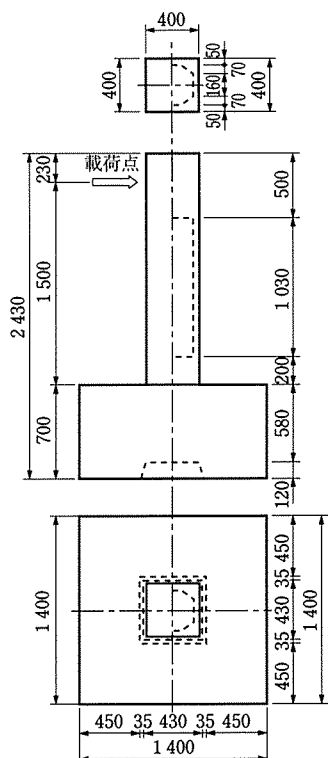


図-1 供試体主要寸法図

体 (S-12~S-17) のプレストレス量は中空部における値を示す。

供試体は、表-1に示したように、断面形状により中実断面 (S-1~S11) と中空断面 (S-12~S17) に分類される。S-1, S-7, S-12, S-15は鉄筋コンクリート供試体 (以下、RC供試体という) であり、その他はプレレストコンクリート供試体 (以下、PC供試体という) である。

供試体の詳細については以下のとおりである。

(1) 中実断面

S-1~S-3は中実断面であり、軸応力度 1MPa、コンクリート強度 35MPaとし、プレストレスのレベルをそれぞれ、0, 2, 4MPaと変化させ、プレストレス導入量の相違による影響を検討した。S-4はアンボンドPC鋼材を使用し、他の条件はS-3と同様とし、PC鋼材の付着の有無による影響を検討した。S-5, S-6は中実断面であり、軸応力度 1MPa、プレストレスのレベル 8MPaとし、コンクリート強度をそれぞれ35, 60MPaと変化させ、高軸力下でのコンクリート強度の相違による影響を検討した。S-7, S-8は中実断面であり、軸応力度4MPa、コンクリート強度35MPaとし、プレストレスのレベルをそれぞれ 0, 4MPaと変化させ、高軸応力度下でのプレストレス導入量の相違による影響を検討した。S-9はアンボンドPC鋼材を使用し、他の条件はS-8と同様とし、高軸応力度下でのPC鋼材の付着の有無による影響を検討した。なお、S-7, S-8, S-9は、それぞれS-1, S-3, S-4と軸応力度が異なるだけで、他の条件が同様であるため、軸応力度の相違による影響を知ることができる。S-10, S-11は中実断面であり、軸応力度4MPa、コンクリート強度 60MPaとし、プレストレスのレベルをそ

れぞれ4, 8MPaと変化させ、高強度下でのプレストレス導入量の影響を検討した。なお、S-11はS-6と軸応力度が異なるだけで、他の条件が同様であるため、軸応力度の相違による影響を知ることができる。

(2) 中空断面

S-12~S-14は中空断面であり、軸応力度 1MPa、コンクリート強度 35MPaとし、プレストレスのレベルをそれぞれ、0, 4, 8MPaと変化させ、中空断面でのプレストレス導入量の相違による影響を検討した。なお、S-12, S-13, S-14は、それぞれS-1, S-3, S-5と断面形状が異なるだけで、他の条件が同様であるため、断面形状の相違による影響を知ることができる。S-15~S-17は中空断面であり、軸応力度 4MPa、コンクリート強度 60MPaとし、プレストレスのレベルをそれぞれ、0, 4, 8MPaと変化させ、高強度下でのプレストレス導入量の相違による影響を検討した。なお、S-16, S-17は、それぞれS-10, S-11と断面形状が異なるだけで、他の条件が同様であるため、断面形状の相違による影響を知ることができる。

(3) 鋼材の配置および性質

いずれの供試体も軸方向の鉄筋量およびPC鋼材量は、RC供試体S-1, S-7, S-12, S-15の軸方向配筋を基本配筋 (32×D13) とし、プレストレス導入量に応じて、鉄筋の一部をPC鋼材に置き換えて定めた。また、いずれの供試体も曲げ破壊が生じるように、曲げせん断耐力比 (せん断耐力/曲げ耐力) が1.0を上回るように設計した。代表的な供試体の配筋およびPC鋼材配置を図-2に示す。

PC鋼材としてはPC鋼より線を使用した。柱部のプレストレスは、柱頂部をデッドアンカーとし、フーチング底部で片側緊張して与えた。緊張力はPC鋼材の降伏強度の1/2とした。帯鉄筋は材質SD345の異形棒鋼を使用した。帯鉄筋はフレア溶接 (D6の場合：ラップ長=100mm, 溶接長=60mm, D10の場合：ラップ長=140mm, 溶接長=100mm) により接続した。鋼材の機械的性質を表-2に示す。

コンクリートには、早強ボルトランドセメントを使用し、呼び強度は35MPa, 60MPa, またスランプはそれぞれ 11cm, 8cmとした。粗骨材には最大寸法 8.5mmの豆砂利を使用した。

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材種類	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (MPa)	
鉄筋	SD345D6	387	566	2.06×10 ⁵
	SD345D10	401	565	2.06×10 ⁵
	SD345D13	391	567	2.06×10 ⁵
PC鋼材	SWPR7B φ 12.7	1 753	1 935	1.94×10 ⁵
	SWPR19 φ 17.8	1 790	1 967	1.90×10 ⁵

2.2 載荷荷重

軸方向には、各供試体において、表-1に示した所定の軸応力度に相当する軸力を油圧ジャッキにより載荷した。この軸力は横方向載荷中も一定とした。

横方向は押し引き用の油圧ジャッキを用いて、正負交番曲げ載荷を行った。載荷は回転角 (水平変位/載荷スパン) で制

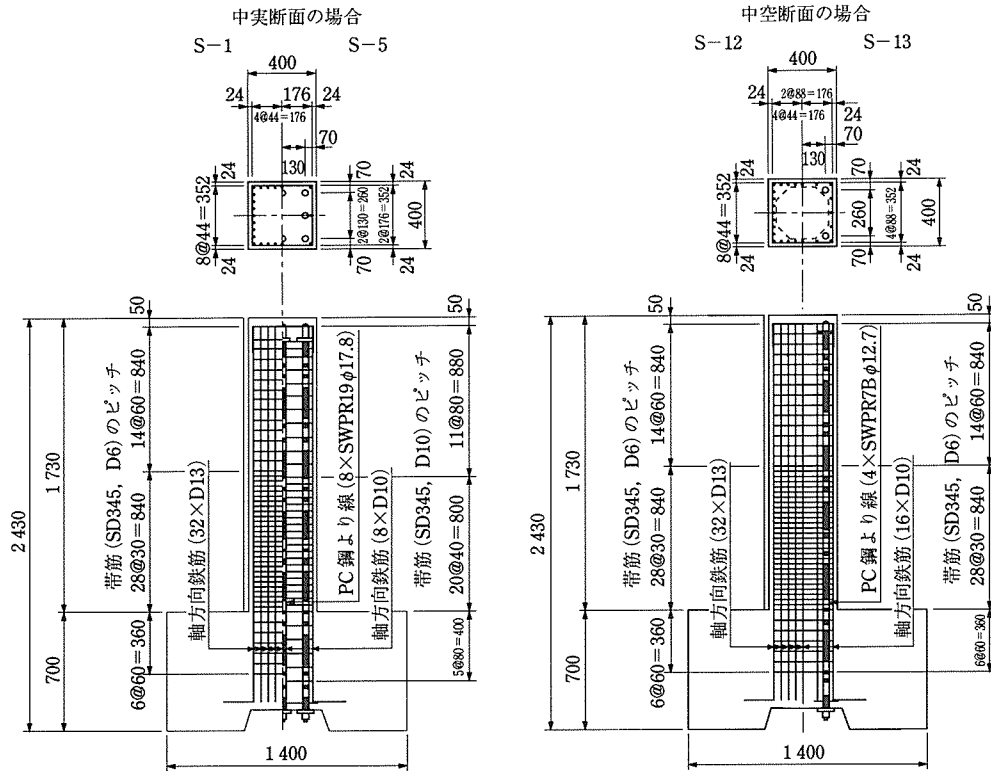


図-2 代表的供試体の配筋およびPC鋼材配置図

御した。載荷サイクルは、計算上のひび割れ荷重時、鉄筋降伏荷重時、これ以降は1/200radの整数倍とし、同じ回転角での繰返し載荷は行わなかった。また、最大荷重の80%を下回った場合を部材としての終局とした。載荷ステップと回転角の関係を図-3に示す。

2.3 載荷装置

載荷装置は、載荷実験を実施する機関で多少異なるが、おおむね次のとおりである。載荷は、供試体を鉛直に設置し、反力フレームを用いて一定軸力載荷を、反力壁を用いて正負交番水平載荷を行った。軸力の載荷は、偏心が生じたり、水平力が作用したりしないように、スライド装置を用いた。載荷装置の一例を図-4に示す。

2.4 測定項目

鉛直および水平方向荷重は、ロードセルを用いて測定した。変位は載荷点、中間点、柱基部の水平変位および柱基部の鉛直変位(軸方向筋の拔出量)を測定した。鋼材のひずみは、軸方向筋およびPC鋼材に貼付したひずみゲージを用いて測定した。ひずみゲージは原則として柱中央に位置する鋼材に貼付することとしたが、PC鋼材をを4本用いた供試体では、PC鋼材が隅部に配置されるため、隅部のPC鋼材に貼付することとした。

3. 実験結果

3.1 履歴特性

全供試体の載荷荷重と載荷点変位の履歴を図-5に示す。図中には、目視により軸方向鉄筋の座屈(●)および破断(▲)が確認された時点とPC鋼材が降伏点(○)に達した時点を示している。PC鋼材の降伏は、実験で計測した増加ひずみと初期導入ひずみの和が、ミルシートによる降伏ひずみ

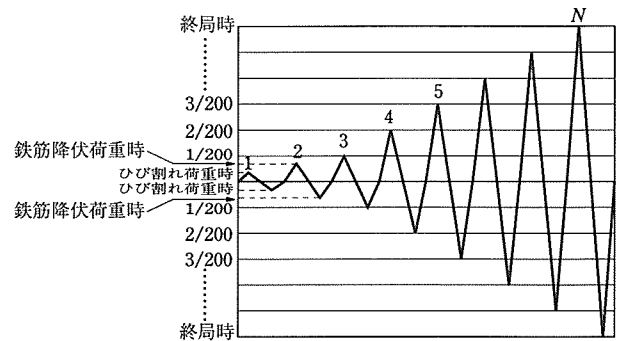


図-3 載荷ステップ

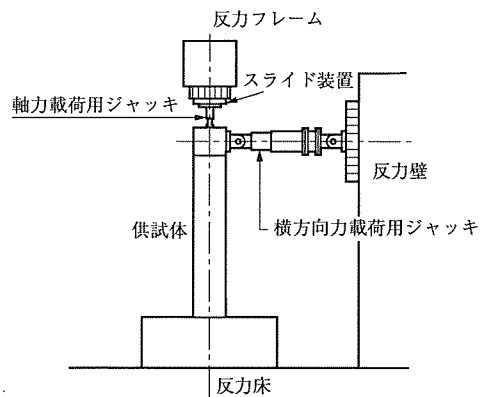


図-4 載荷装置の一例

に達した時点とした。

図-5によると、RC供試体では典型的な紡錘形の履歴を示している。それに対しPC供試体では、残留変位が小さく、プレストレス導入レベルが上がるにつれて除荷時の履歴は原点指向性が強くなる傾向にある。また、アンボンド供試

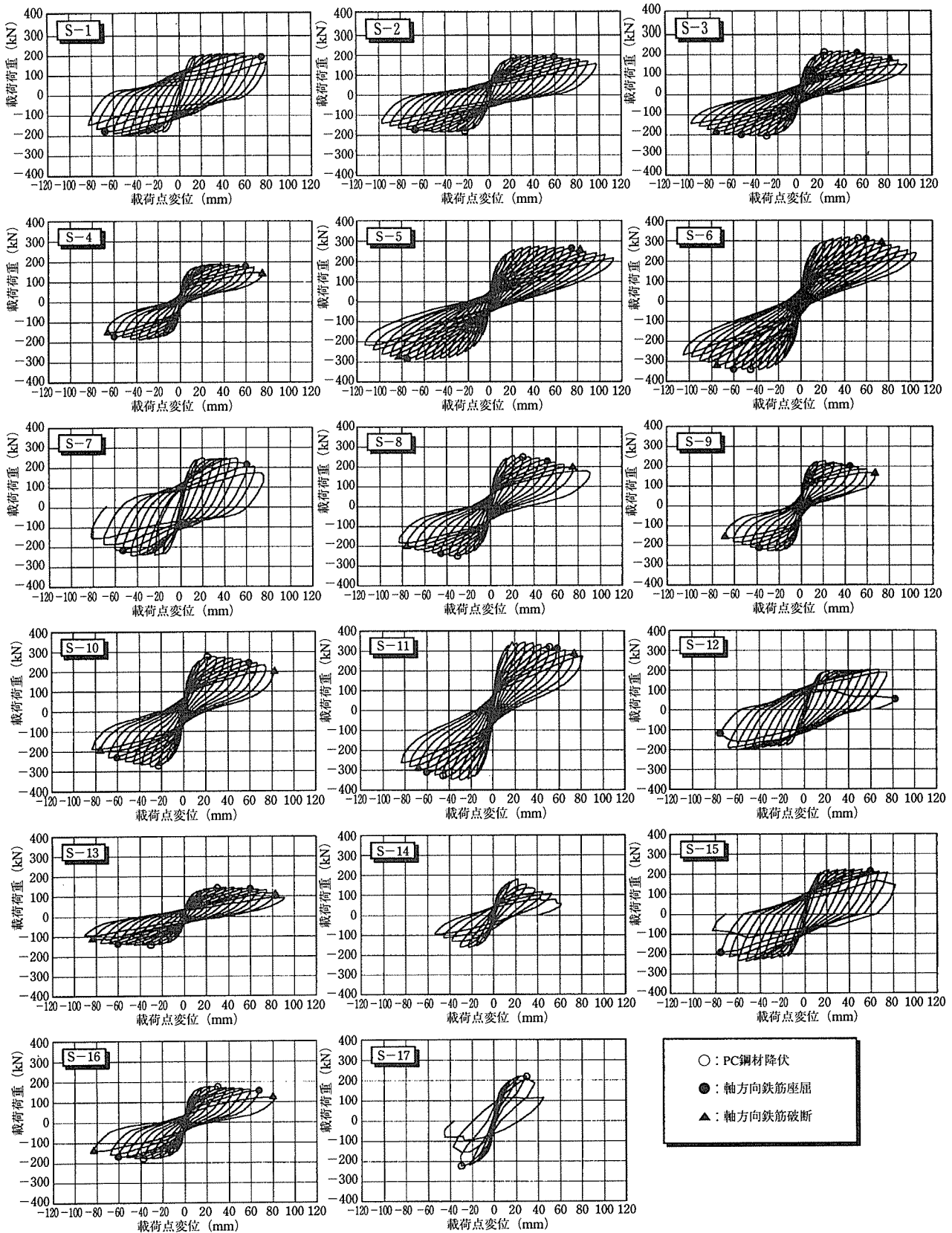


図-5 荷重一変位関係

体 (S-4, S-9) では、ボンド供試体に比べ除荷時の荷重0付近での原点指向性が顕著となる。

RC供試体では、軸方向鉄筋が座屈すると載荷荷重の低下が顕著となるのに対し、PC供試体では軸方向鉄筋が座屈し

た後も載荷荷重が急激に低下することはなく、粘りのある挙動を示した。また、PC鋼材の降伏は、配置したPC鋼材量が多いほど遅れる傾向にあり、アンボンド供試体では増加ひずみが小さく降伏に達しなかった。

3.2 破壊状況

各供試体とも、曲げひび割れが発生した後せん断ひび割れに進展し、橋脚基部付近のかぶりコンクリートが剥離し、軸方向鉄筋の座屈を経て曲げ破壊に至った。ただし、中空断面に高プレストレスを与えたS-14, S-17供試体は、中空部分のコンクリートが圧壊して急激に載荷荷重が低下し、脆性的な破壊となった。これは、実験供試体では壁厚が5cmと薄く、帯鉄筋が一段配置であり、また軸方向鉄筋量も少ないことから、かぶりコンクリートの剥離が始まると圧縮応力を受ける部分が極端に小さくなってしまいうためであると考えられる。

図-6にプレストレスの導入量をパラメーターとしたS-1, S-3, S-5供試体の軸方向鉄筋座屈時および載荷終了時の損傷状況を示す。PC供試体はRC供試体に比べひび割れの本数が減少し、発生範囲も小さくなる傾向を示した。また、せん断ひび割れも少なくなっていた。

また、橋脚に作用する軸圧縮応力度(軸力による圧縮応力度+プレストレス)と載荷終了時の目視による軸方向鉄筋座屈長との関係を図-7に示す。図より、圧縮応力度が大きくなると座屈長が小さくなる傾向が確認できる。

4. 考察

2章2.1に示したように5項目を実験の検討項目としたが、ここではその性状に明らかな差が見られた①プレストレス導入量、②PC鋼材の付着の有無および③上部工重量(軸力)による軸応力度の3項目について考察を行う。

4.1 プレストレス導入量による影響

(1) エネルギー吸収能

プレストレス導入量を変化させたS-1, S-2, S-3およびS-5の各供試体の累積吸収エネルギーの比較を図-8に示す。図では、各供試体の曲げ破壊耐力が異なっているため、累積吸収エネルギーを最大水平荷重 P_u で除して正規化している。図から明らかなように、プレストレス導入量が大きくなるほど累積吸収エネルギーが小さくなる。載荷点変位が60mmの時点では、S-1供試体の累積吸収エネルギーに対して、S-2, S-3, S-5はそれぞれ73%, 53%, 42%であり、この比率は異なる載荷点変位においても大きくは変化しない。

(2) 残留変位

地震後の供用性能を確認するために、S-1, S-2, S-3およびS-5の除荷時の残留変位と載荷点変位の関係を図-9に示す。RC供試体(S-1)の残留変位は載荷点変位の60%~75%程度であり、2MPaのプレストレスを導入したS-2供試体では若干小さくなり50%~65%となる。これらの比率は載荷点変位が大きくなるほど高くなる傾向にある。一方、さらに高レベルのプレストレスを導入したS-3, S-5供試体の残留変位は著しく小さくなり、それぞれ載荷点変位の25%~30%, 20%~25%である。しかも、これらは載荷点変位が大きくなってもほぼ一定であり、RC供試体や低レベルのプレストレスを導入した供試体に比べ、優れた地震後の供用性能を有していると言える。

(3) 変形性能

図-5に示したS-1, S-2, S-3およびS-5供試体の荷重-

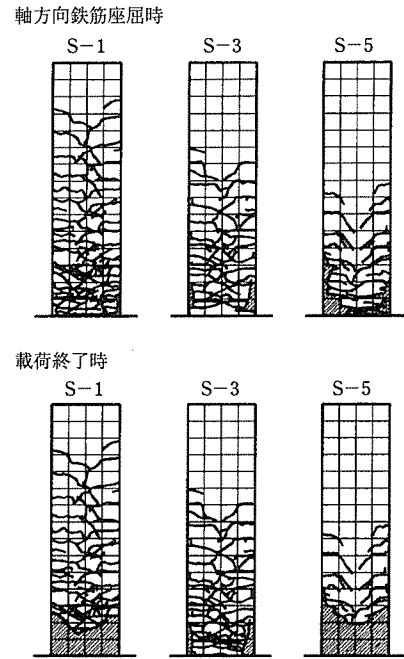


図-6 損傷状況(側面)

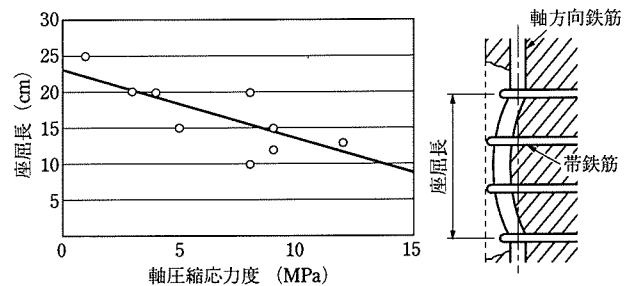


図-7 軸圧縮応力度と座屈長の関係

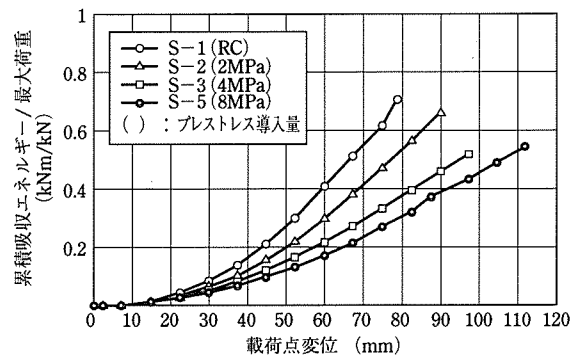


図-8 累積吸収エネルギーと載荷点変位の関係

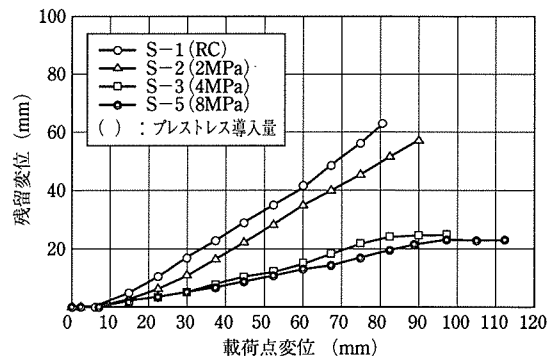


図-9 残留変位と載荷点変位の関係

変位関係によれば、導入プレストレスが大きくなるほど終局時の水平変位は大きくなっている。しかし、これらの供試体では曲げ破壊耐力に差があることから、ここでは変位の絶対量ではなく、じん性率 μ によって各供試体の変形性能の比較を行うものとする。ここでじん性率 μ は終局変位と降伏変位の比であり、下式により算出した。

$$\mu = \delta_u / \delta_y$$

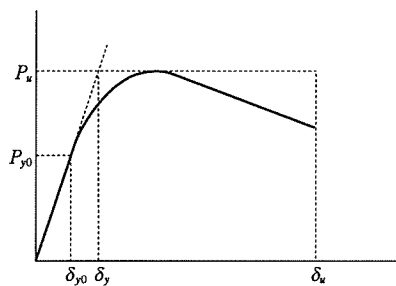
ここに、 δ_u : 終局変位

δ_y : 降伏変位 ($= P_u \times \delta_{y0} / P_{y0}$)

P_u : 実験での最大荷重

P_{y0} : 計算上の初降伏荷重

δ_{y0} : P_{y0} を与えたときの変位



このようにして求めた各供試体のじん性率を図-10に示す。RC供試体S-1ではじん性率が7程度であるのに対し、導入プレストレスが大きくなるほどじん性率が向上し、S-5では約10のじん性率となっている。したがって、本実験のように載荷荷重が最大荷重の80%に低下した時を終局とした場合、終局までの変形性能は導入プレストレスが大きいほど向上すると言ってよいであろう。

4.2 PC鋼材の付着の有無による影響

供試体S-3とS-4を比較することにより、PC鋼材の付着の有無による影響について検討することができる。前項4.1と同様に累積吸収エネルギーおよび残留変位に関する比較を図-11、12に示す。

図-11によればS-3とS-4の累積吸収エネルギーは、各載荷点変位に対してほぼ一致しており、PC鋼材の付着の有無によるエネルギー吸収量の差はごくわずかである。しかし、ここでは曲げ破壊耐力の差を補正するために最大荷重による正規化を行っており、同一鋼材配置で付着のない場合には、曲げ破壊耐力の減少に応じて吸収エネルギーも小さくなると言える。

また、図-12によれば、アンボンド供試体S-4の残留変位は、S-3よりさらに小さく、載荷点変位の5%~10%程度となる。

S-3およびS-4供試体の橋脚基部位置におけるPC鋼材の増加ひずみの履歴を図-13に示す。S-4供試体の増加ひずみは最大でも4000 μ 以下であり、導入プレストレスによる初期ひずみ4200 μ を加えても降伏点に達していないのが分かる。一方、S-3供試体では10000 μ 以上の増加ひずみとなっており、十分に降伏点に達している。このことから、PC鋼材のひずみ量の差が残留変位の差に影響を与えていると考えられる。

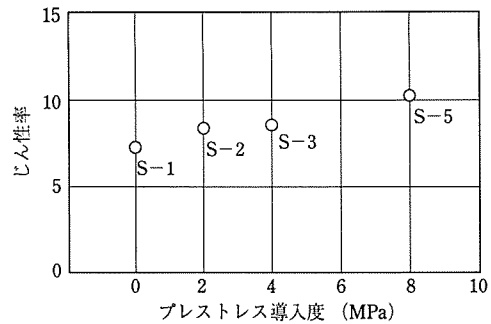


図-10 プレストレス導入度とじん性率の関係

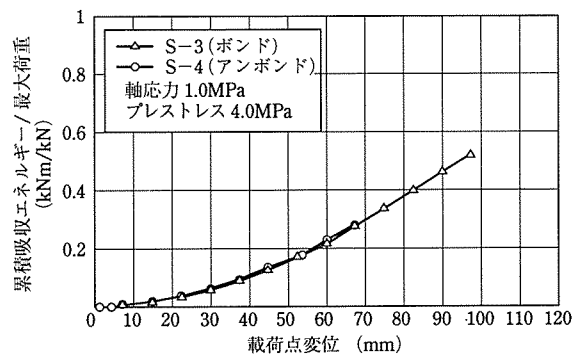


図-11 累積吸収エネルギーと載荷点変位の関係

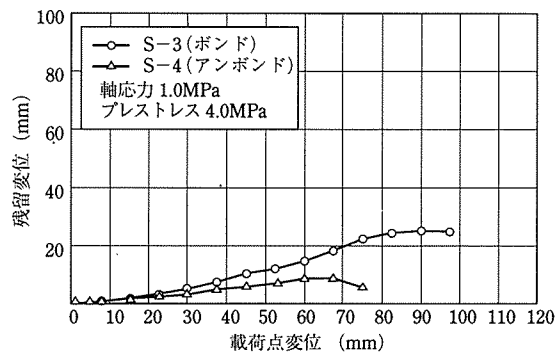


図-12 残留変位と載荷点変位の関係

4.3 軸力による影響

軸力による圧縮応力度を1MPaと4MPaに変化させた供試体S-1とS-7、S-3とS-8およびS-6とS-11を比較することにより、軸力による影響について検討を行う。

図-14は各供試体の累積吸収エネルギーの比較をしたものである。図によれば、軸力による圧縮応力度を1MPaと4MPaに変化させたことによる累積吸収エネルギーは、各載荷点に対して大きな差は生じておらず、エネルギー吸収量に対する軸力の影響は小さいと言える。また、残留変位に関する比較を図-15に示す。図から、高プレストレス状態(8MPa)において若干の差が生じているが、全体的に大きな差は見られない。しかし、軸力による圧縮応力度とじん性率の関係を示した図-16によれば、軸力による圧縮応力度が4MPaのS-7、S-8、S-11供試体は、1MPaのS-1、S-3、S-6供試体の75%程度までじん性率が低下している。したがって、軸力が大きくなると変形性能は低下することが分かる。この点に関して、軸力はプレストレスとは異なった影響を与えられられる。

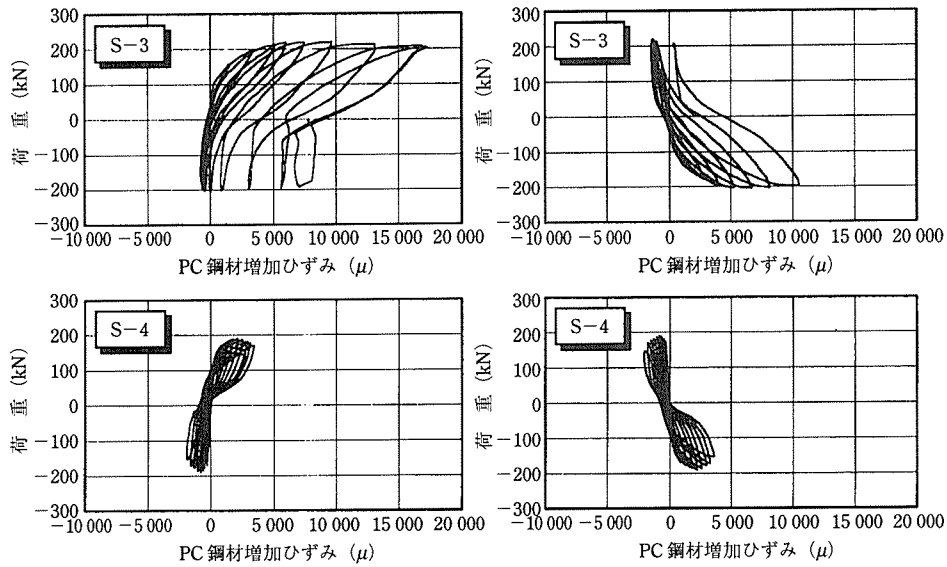


図-13 PC鋼材増加ひずみの履歴

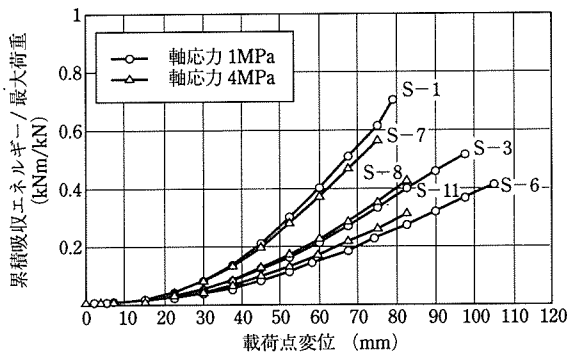


図-14 累積吸収エネルギーと載荷点変位の関係

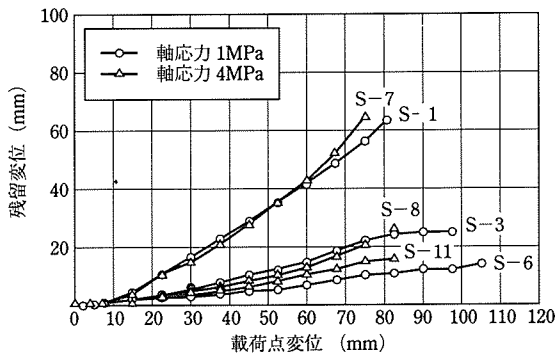


図-15 残留変位と載荷点変位の関係

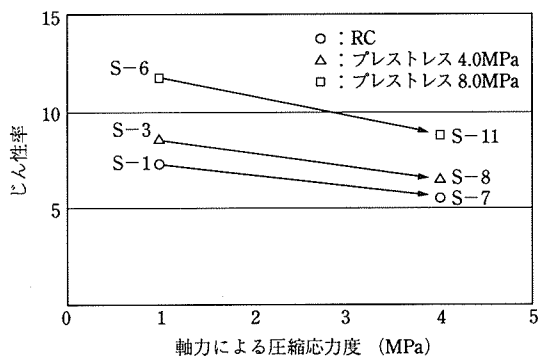


図-16 軸力による圧縮応力度とじん性率の関係

5. 結 論

プレストレストコンクリート橋脚の基本的な耐震性能を把握するために行った今回の正負交番曲げ載荷実験の結果から、以下のような結論を得た。

- ① RC供試体では、軸方向鉄筋の座屈が生じると載荷荷重の低下が著しくなるが、PC供試体ではその後も荷重の顕著な低下がなく、粘りのある挙動を示す。また、PC供試体の履歴曲線は、プレストレス導入レベルが上がるほど、除荷時の原点指向性が強くなる傾向がある。
- ② PC供試体はRC供試体に比べ、曲げひび割れおよびせん断ひび割れの発生は少なくなる。
- ③ プレストレス導入量が大きくなるほどエネルギー吸収能は低下するが、残留変位は小さくなり、地震後の供用性能は向上する。また、本実験のように載荷荷重が最大荷重の80%となった時を終局とした場合、プレストレス量が大きいほど変形性能も向上する。
- ④ PC鋼材に付着がない場合、載荷荷重によるPC鋼材の増加ひずみが小さく、付着のある場合に比べて残留変位をさらに小さくすることができる。また、曲げ破壊耐力を同等にした場合には、付着の有無によるエネルギー吸収能の差はごくわずかである。
- ⑤ 軸力による圧縮応力度を1MPaと4MPaに変化させた場合のエネルギー吸収能および残留変位には大きな差は生じない。ただし、軸力が大きくなると変形性能は小さくなり、プレストレスとは異なった影響を与える。

以上で示したように、PC橋脚は従来のRC橋脚にない耐震性能を有しており、その特性を生かすことによって合理的で新しい橋脚構造になりうるものと考えられる。

6. あとがき

本実験は、(社)プレストレストコンクリート技術協会「橋脚

PC構造研究委員会」(委員長：池田尚治)が行った委託研究の一部である。執筆者数の制限により割愛したが、本研究の計画・実験・解析にあたっての共同研究者を表-3に示す。

表-3 共同研究者一覧

所 属	氏 名
横浜国立大学	池田 尚治
オリエンタル建設(株)	吉岡 民夫
鹿島建設(株)	日紫喜剛啓
住友建設(株)	新井 英雄
大成建設(株)	清水 徹
(株)ピー・エス	森 拓也
(株)富士ピー・エス	太田 豊

謝 辞

本実験の実施にあたり、適切なご指導を賜った橋脚PC構造研究委員会の委員各位および関係各位に深く謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) Shoji Ikeda : Seismic Behavior of Reinforced Concrete Columns and Improvement by Vertical Prestressing, Proceedings of The 13th FIP Congress on Challenges for Concrete in The Next Millennium, Vol. 2, pp.879~884, 1998.5
- 2) 伊藤忠彦, 山口隆裕, 池田尚治: 軸方向プレストレスを有するコンクリート橋脚の曲げ変形挙動, 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, Vol.7, pp.71~76, 1997.10
- 3) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V 耐震設計編, 1996.12

【1998年7月31日受付】

◀ 刊行物案内 ▶

PC橋の耐久性向上のための 設計・施工マニュアル

(平成9年3月)

頒布価格：3 000円 (送料500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会
PC技術規準研究委員会
耐久性向上分科会

◀ 刊行物案内 ▶

PPC構造設計規準(案)

外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工規準(案)

プレレストレストコンクリート橋の耐久性向上 のための設計・施工マニュアル(案)ー抜粋ー

(平成8年3月)

頒布価格：3点セット 5 000円 (送料500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会