

[92] プレストレストコンクリートくいの靱性向上に関する研究

正会員 池田 尚 治 (横浜国立大学工学部)
 正会員 榎 龍 哉 (横浜国立大学工学部)
 正会員 山口 隆 裕 (横浜国立大学工学部)

1. 緒 言

高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート杭(以下PC杭と記す)は施工性、耐久性等に優れた特性を持つ反面、工事中の折損事故や地震時のPC杭基礎の破壊に見られるように破壊時の靱性に大きな問題があるものと思われる。PC杭の破壊時の挙動については、既にいくつかの報告^{1), 2)}があるが、それらの結果はPC杭の破壊時の靱性や安全性の問題に十分反映されておらず、またPC杭の靱性の定量的な把握やその改良についてはほとんど研究が報告されていないと思われる。本研究はPC杭の安全性の改善を図ることを目的として、現在広く用いられている市販のPC杭の靱性の把握と、その靱性向上に対する方策とを実験的に検討したものである。ここでは、靱性の向上の方策として、異形鉄筋や無緊張PC鋼棒を付加することを試みた。

2. 実験方法

(1) 供試体

使用した材料の力学的性質は表-1に示す。供試体の二次養生として、市販のAC杭と同様のオートクレーブ養生を用いた。プレストレスはプレテンション方式で、市販のA種またはB種(有効プレストレス σ_{ce} は各々40%・80%)と同じとした。供試体の諸元は図-1に示される。水平外力を受ける杭の曲げの状態を表わすため、せん断支間を杭径の2.5倍とした。供試体の種類は、市販されているA種およびB種の杭、それらのPC鋼材の間にPC鋼材と同本数で約2倍の断面積の異形鉄筋または同本数で同径の無緊張PC鋼材を軸方向に付加した杭、異形鉄筋または無緊張PC鋼棒のみを配筋した杭の3種類に大別される。また、らせん筋としては、直径3.2mmの鉄線を軸鋼材に電気抵抗溶接したもの、または直径6.0mmの鉄線を軸鋼材に結線により接合したものをを用いた。各供試体の種別は表-2に示されるとおりである。

(2) 載荷方法および計測方法

図-1に示すような2点載荷を行い、荷重は各々別々の油圧ジャッキにより載荷した。荷重P、スパン中央の変位 δ 、およびコンクリートの各所におけるひずみは、実験中常時モニターできるようにした。荷重のかけ方はひびわれ荷重 P_{cr} を1サイクル、地震時許容荷重 P_e 、降伏荷重 P_y を各々5サイクルずつ載荷した後、変位が降伏荷重時5サイクル目における変位(以下降伏変位 δ_y と記す)の整数倍になるように、順次5サイクルずつ終局状態に至るまで繰返すこととした。ここに、地震時許容荷重および降伏荷重は、降伏点 σ_y の小さい方の引張側軸鋼材のうち、最も外側の鋼材の応力が各々 $\sigma_y/1.15$ および σ_y に達したときの荷重とする³⁾。前述した各供試体の主要なものについては、同一のものを2体製作し、各々について一方向載荷または正負繰返し載荷を試み、その相違点を明らかにできるようにした。

3. 実験結果および考察

実験結果の主要なものは表-2に示されるとおりである。靱性率降伏変位 δ_y に対する終局変位 δ_u の割合を求

表-1 使用材料

名 称	種 類	寸 法 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強度 (kg/mm ²)	伸び (%)	ヤング係数 (kg/cm ²)
異形PC鋼棒	SPPT ₃₀ 145	φ 9.2	14.4	15.2	9	2.08×10 ⁶
鉄 筋	SD 30	D 13	3.9	5.3	25	2.1×10 ⁶
鉄 線 (らせん筋用)	普通鉄線	φ 6.0	—	5.8	—	—
		φ 3.17	—	5.9	3	—
コンクリート	圧縮強度: 891 kg/cm ² , ヤング係数: 3.7×10 ⁶ kg/cm ² 引張強度: 55 kg/cm ²					

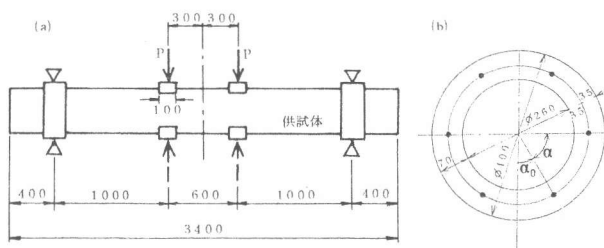


図-1 供試体諸元および載荷方法

めるにあたり、各供試体に対し、共通に使用できる基準として終局変位を次のように定義した。すなわち、耐力が降伏耐力を超えて最大値に達した後、供試体の劣化の進行等により、降伏耐力以下に低下する前までにおける最大変位を終局変位とする。この定義にしたがい、図-2~4に示す荷重・変位曲線から靱性率を求めた。

(1) 一方向荷重に対する挙動について

一方向荷重の場合の荷重・変位曲線は図-2に示される市販のA種PC杭に相当する供試体 $\#1$ は、曲げ区間に生じたひびわれは1本であり、 $4\delta_y$ 載荷途上で圧縮側コンクリートが健全な状態のままPC鋼棒が破断し、急激な破壊に至った。なお、 $3\delta_y$ 載荷時のコンクリートの最大圧縮ひずみは0.2%であった。ひびわれ以外の場所では、コンクリートの劣化が見られないことから、コンクリートとPC鋼材の付着は大きく変化していないものとする。PC鋼材の伸びはひびわれの位置で集中的に起こり、破断に至ったと思われる。さらに、コンクリートの強度に比べ鋼材量が少ないこと、鋼材そのものの伸びが小さいこと等が、破壊を極めて脆性的にしたと思われる。供試体 $\#3$ は、 $\#1$ に対して鉄筋を付加したものであり、 $6\delta_y$ 載荷途上でコンクリートが圧壊（圧縮ひずみは約0.32%）した後、 $8\delta_y$ 載荷途上でPC鋼棒が破断し、破壊に至っている。このことから、鉄筋を付加することにより靱性率が約2倍に増加することがわかる。靱性率が増加した原因としては、引張鋼材量の増加と異形鉄筋の付着の効果によって曲げ区間に4本のひびわれが生じたことから、PC鋼棒の伸びの集中を分散できたことがあげられる。また、異形鉄筋の伸びが大きいことがPC鋼棒破断後も脆性的な破壊を防いだものと思われる。供試体 $\#7$ は、市販のB種PC杭に相当し、鋼材量は $\#1$ の2倍である。これは、 $3\delta_y$ 載荷途上でコンクリートが圧壊し、耐力が降伏耐力付近まで減少し、 $5\delta_y$ 載荷途上で断面図心の下側のPC鋼棒が5本破断した後破壊した。この場合、鋼材量の増加が終局時の粘りを増加させたものと思われる。供試体 $\#10$ は、 $\#7$ に鉄筋を付加したもので、コンクリートの圧壊は $\#7$ と同様 $3\delta_y$ 載荷時付近で生じたが、PC鋼棒の破断は $6\delta_y$ 載荷途上に起こっている。A種の場合程ではないが、鉄筋の付加により靱性率が増加している。供試体 $\#13$ は、降伏荷重が $\#7$ と同程度になるように設計された高強度RC杭である。RC部材特有の荷重・変位曲線を示し靱性が非常に大きいことがわかる。これらの結果を比べると、供試体 $\#10$ はB種PC杭の $\#7$ と、RC杭の $\#13$ との中間的な挙動を示していると言えよう。

(2) 正負繰返し荷重に対する挙動について

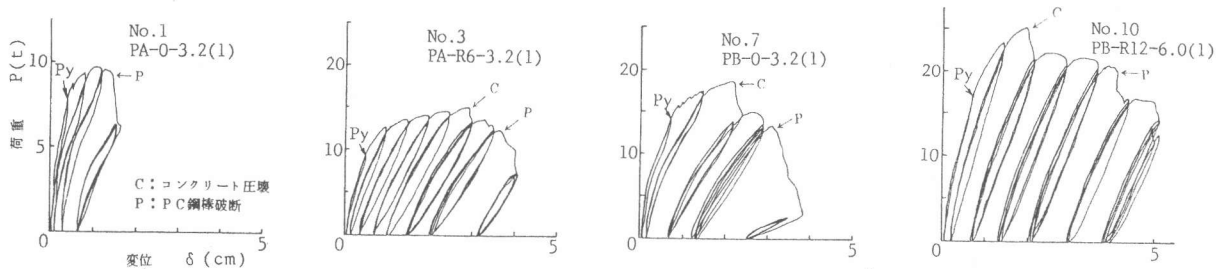
一方向荷重した供試体 $\#1, 3, 7, 10$ 、および $\#13$ に対応する正負繰返し荷重した供試体は、各々 $\#2, 4, 8, 11$ 、および $\#14$ である。それらの荷重・変位曲線は図-3~4に示される。性質の異なる供試体の間の関係は一方向荷重した場合と基本的に同じである。正負繰返し荷重による特徴としては、一般的にコンクリートの圧壊が起こりにく

表-2 各供試体の形状と実験結果

No.	供試体 記号	1) 軸鋼材比(%)		2) 鋼材位置(度)				計算値(ton-m)		実験値					最終 破壊形態		
		SBPD (無緊張)	鉄筋	腹鋼材 比(%)	SBPD α_0	無緊張 SBPD α	鉄筋 α_0	α	ひびわれ モーメント	終局曲げ モーメント	ひびわれ モーメント (ton-m)	降伏変位 δ_y (mm)	最大曲げ モーメント (ton-m)	終局変位 δ_u (mm)		靱性率 δ_u/δ_y	
1	PA-0-3.2(1)	0.53	0	0.23	0	60	—	—	5.0	7.5	6.0	4.0	9.4	14.5	3.6	P C 鋼棒破断	
2	PA-0-3.2(2)	0.53	0	0.23	0	60	—	—	5.0	7.5	6.0	4.5	9.4	13.5	3.0		
3	PA-R6-3.2(1)	0.53	1.05	0.23	0	60	—	30	60	5.1	12.4	6.0	4.8	14.4	38.0		7.9
4	PA-R6-3.2(2)	0.53	1.05	0.23	0	60	—	30	60	5.1	12.4	5.5	4.5	13.2	25.0		5.6
5	PA-R6-6.0(2)	0.53	1.05	0.81	30	60	—	0	60	5.1	12.4	5.5	4.1	13.9	28.7		7.0
6	PA-N6-6.0(2)	0.53 (0.53)	0	0.81	0	60	30	60	—	5.0	15.6	5.5	6.2	17.2	25.0		4.0
7	PB-0-3.2(1)	1.06	0	0.23	0	30	—	—	7.1	15.2	8.0	7.1	18.4	21.5	3.0	せん断	
8	PB-0-3.2(2)	1.06	0	0.23	0	30	—	—	7.1	15.2	8.0	6.5	18.7	19.5	3.0		
9	PB-R12-3.2(2)	1.06	2.10	0.23	0	30	—	15	30	7.3	23.1	8.0	7.0	23.5	21.0	3.0	P C 鋼棒破断
10	PB-R12-6.0(1)	1.06	2.10	0.81	0	30	—	15	30	7.3	23.1	8.0	7.1	25.2	41.0	5.8	
11	PB-R12-6.0(2)	1.06	2.10	0.81	0	30	—	15	30	7.3	23.1	8.0	6.8	25.4	40.0	5.9	
12	N12-6.0(2)	(1.06)	0	0.81	—	—	0	30	—	3.0	16.9	2.5	21.4	17.4	42.8	2.0	繰返しによる劣化
13	R24-6.0(1)	0	4.19	0.81	—	—	—	0	15	3.4	18.0	4.5	5.8	18.0	>75.4	>13.0	
14	R24-6.0(2)	0	4.19	0.81	—	—	—	0	15	3.4	18.0	4.0	5.2	17.1	46.8	9.0	

注：1)記号は、(PA:A種, PB:B種)-(R:鉄筋, N:無緊張PC鋼棒, 数字:本数)-(らせん筋の径(mm))(1):一方向荷重, (2)正負荷重を表わす。
2)らせん筋のピッチはすべての供試体において50mmである。
3) α_0 と α は図-1(b)供試体断面図に示す。
4)コンクリートの圧縮ひずみが0.3%、またはPC鋼棒の引張ひずみが1%(異形鉄筋等が付加された場合は2%)に達したときの値を示す。

5)X・Yレコーダーより読み取った値で正負荷重のときは、その平均値を示す。
6)変位はスパン中央における5サイクル目の値で、正負荷重のときは、その平均値を示す。
7)正負荷重の場合は、その大きい方の値とした。
8)正負荷重の場合は、最初に降伏荷重時の耐力以下に達した方とする。



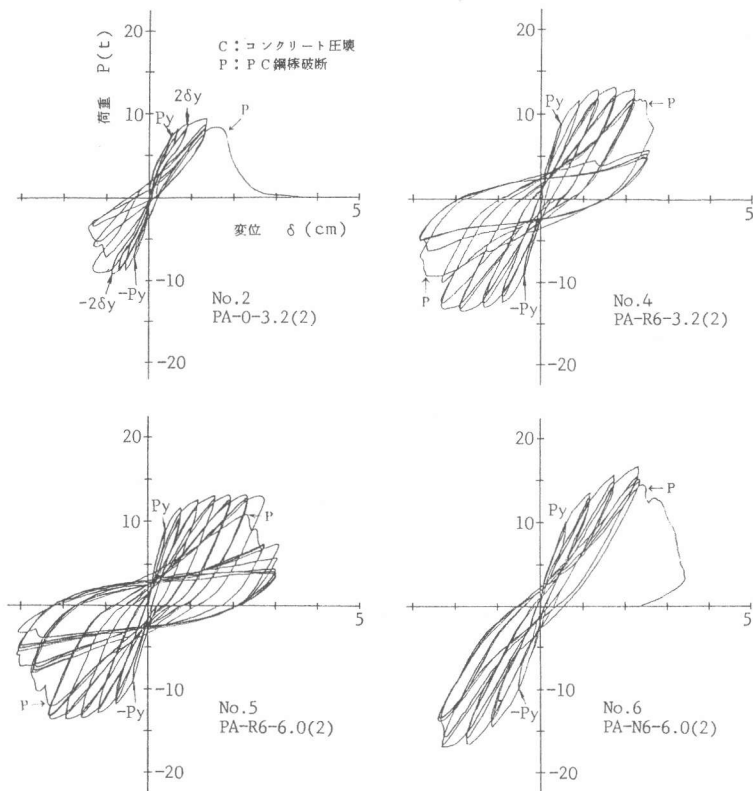
図一 2 一方向荷重による荷重・変位曲線

くなったことである。これは、繰返し荷重によりひびわれがほぼ上下対称に生じ、ひびわれ幅が大きくなると圧縮側でひびわれが閉じる際に変形を吸収してしまうことによると考えられる。供試体 No. 5, 11, 14 に見られるように正負繰返し荷重のもとでは破壊時付近でコンクリートの劣化が進み、圧縮を受けた鉄筋に座屈する現象がみられた。供試体 No. 5 と No. 11 では、座屈が耐力の下がった後に起きたので靱性率に大きな影響がないが、供試体 No. 14 の場合は、せん断区間の荷重点付近のコンクリートの劣化に伴い全鉄筋の 2/3 が座屈したことが破壊に至った原因となり、このため、耐力が一方荷重の場合よりも早く減少し、それが靱性率を小さくしたと考えられる。

(3) らせん筋の量について

供試体 No. 5, 6 および No. 10-14 に対しては、らせん筋の量を他の供試体の約 3.5 倍に増やしている。供試体 No. 9 と 11 を比較すると、このらせん筋の量の差が破壊様式の差となって顕著に現われている。すなわち、 $2\delta_y$ 荷重時までは両者の間に差は見られないが、その後 No. 11 はさらに大きな変形を示すのに対し、No. 9 は $3\delta_y$ 荷重途上に斜めひびわれのところでらせん筋の破断を伴うせん断破壊を起こしている。このことから、PC 杭の曲げ耐力が増加するに伴い、せん断破壊を防止するためには適量のらせん筋を用いることが必要であることが確認されたわけである。杭の耐力が大きくない供試体 No. 4 と 5 の間にはそれほど顕著な差は見られない。

軸方向 PC 鋼材とらせん筋の接続は、直径が 3.2 mm のものについては、電気抵抗溶接により、また直径 6.0 mm のものについては結線により接合している。PC 鋼棒は溶接等で熱を受けた部分で破断しやすい傾向があり、供試体 No. 4 と 5 を比較するとその傾向がある程度示されているようである。しかしながら、今回の実験に使用された供試体全体について PC 鋼棒の破断位置を調べてみると、溶接箇所破断されているとは必ずしも言えないようである。これは、使用する PC 鋼材の材質にも左右されると思われる。



図一 3 正負繰返し荷重による荷重・変位曲線 (1)

(4) 無緊張PC鋼棒を使用した供試体の挙動について

供試体 $\#6$ は $\#5$ で補強用に使用された通常の異形鉄筋のかわりに、同数の無緊張のPC鋼棒を用いたPC杭である。全体の曲げ剛性が小さいため降伏変位が大きく、靱性率は $\#5$ 程大きくないが、終局変位は $\#5$ とほぼ同じで、標準のA種PC杭($\#2$)の約2倍となっている。PC鋼棒が破断した後さらに変位を加えると、無緊張PC鋼棒も破断し、耐力を失った。供試体 $\#12$ は、無緊張PC鋼棒のみを用いたもので、軸力がなく剛性が小さいため降伏変位が、標準のB種PC杭($\#8$)の約3倍となっている。また、無緊張PC鋼棒が破断するため、挙動が脆性的である。曲げ区間内のひびわれ本数は、 $\#8$ の場合とほぼ同数の3本であり、プレストレスの有無がひびわれ本数に影響していないことを示すものである。

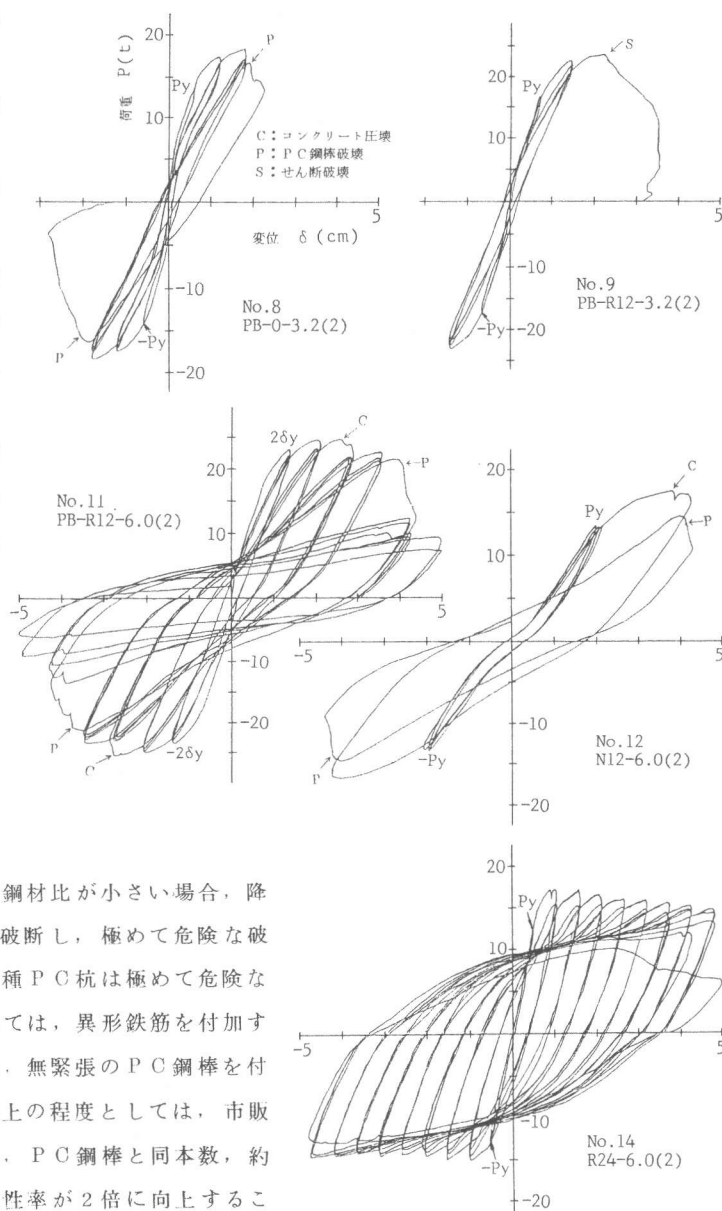
4. 結 論

高強度コンクリートを使用したPC杭は、鋼材比が小さい場合、降伏変位を若干越える変位のもとでPC鋼棒が破断し、極めて危険な破壊性状を示すことが明らかとなった。特にA種PC杭は極めて危険な破壊性状を示した。これを改善する方策としては、異形鉄筋を付加することが有効であることが認められた。また、無緊張のPC鋼棒を付加することもある程度有効であった。靱性向上の程度としては、市販のA種ならびにB種PC杭のそれぞれに対し、PC鋼棒と同本数、約2倍の量の異形鉄筋を付加することにより靱性率が2倍に向上することが示された。また、PC杭に鉄筋を付加することにより、PC鋼棒破断後もある程度の粘りのある挙動を与えることが可能であり、このことは、PC杭の破壊時の安全性を大幅に向上させることになるものと思われる。

なお、本実験は、文部省科学研究費補助金・一般研究(B)を受けて行なわれたものであることを付記するとともに、本研究の遂行に御協力をいただいた関係各氏に感謝の意を表するものである。

参考文献

- 1) 六車：超高強度PC杭の開発研究，プレストレスコンクリート技術協会第18回研究発表会講演概要 1978年11月
- 2) 佐藤：各種杭体の設計耐力，国鉄構造物設計資料 $\#67$ ，1981年9月
- 3) 土木学会編：遠心力大径プレストレスコンクリート杭設計施工指針案，1972年11月



図一4 正負繰返し載荷による荷重・変位曲線(2)