

報告 正負交番载荷を受ける高強度プレストレストコンクリート杭の変形性能

岩本 勲*¹・浅野真一朗*²・山田淳*³・中野富雄*⁴

要旨：高強度プレストレストコンクリート杭（PHC 杭）の耐震性能を評価するために、地震時の軸力変動を考慮した 3 水準の軸力下における正負交番繰返し载荷曲げ実験を実施した。その結果、PHC 杭は降伏点以上の繰返し载荷を受けても、剛性や靱性の低下は見られず、単調载荷による変形特性と良く一致した。繰返し载荷による荷重履歴曲線は原点指向型で、除荷時の残留たわみは小さい。軸力の増大に伴って、ひびわれ発生荷重や終局耐力は大きくなるが、終局時の変形能力が減少して靱性率は小さくなる。杭の終局は何れの軸力においても、コンクリートの曲げ圧縮破壊であった。

キーワード：PHC 杭，正負交番载荷，靱性率，荷重履歴曲線

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、目に見える橋梁や建物等の上部構造の被害だけでなく、地中にある杭基礎等の基礎構造物にも被害が発生し、その復旧には上部構造物とはまた違った技術的な困難さを伴い、多額の費用を要している。地震時においても上部構造を健全に保つためには、基礎構造も耐震性能を保持する必要がある。そのためには、基礎杭の地震時における変形性能と耐力とを確認しておく必要がある。ここでは、既製杭（高強度プレストレストコンクリート杭）の耐震性能を評価するために、①常時の上乗荷重程度の軸力、と地震時の上部構造による軸力変動を考慮して、②軸力が消失する場合、③軸力が倍加する場合の 3 水準について、正負交番载荷実験を実施したものである。

2. 実験概要

「JIS A 5337 プレテンション方式遠心力高強度プレストレストコンクリートくい」の正負交番軸力曲げ強さ試験では、径 600mm の杭の場

合、JIS 取得時の試験軸力として 1,275, 2,551, 3,826kN の 3 水準が規定されている。JIS 取得後は、杭の製造メーカーにて 1 年に 1 回最大軸力について正負交番軸力曲げ試験を実施し、その品質を保証している。このようにどちらかという、JIS では高軸力下における脆性破壊を懸念した試験を重視しており、高軸力下における曲げ変形性状については、既製杭メーカーが多数保有していると考えられる。本研究では先に述べたように、地震時の変形挙動を把握するためと従来のデータ不足を補うために、杭に軸力が作用しない場合と軸力が 981kN, 1,962kN の JIS の規定よりも小さな軸力の 3 水準について正負交番载荷曲げ実験を実施した。

2.1 実験方法

供試体は外径 600mm で有効プレストレスが 7.85N/mm² の B 種 PHC 杭である。試験杭の断面諸元を表-1 に示す。杭は軸方向には ϕ 9mmPC 鋼線の緊張材だけが配筋され、非緊張材（鉄筋等）は配筋されていない。横方向筋は、 ϕ 4mm

*1 近畿コンクリート工業(株) 開発部課長 工博 (正会員)

*2 関西電力(株) 土木建築室課長 工修

*3 関西電力(株) 土木建築室 工修

*4 (株)ニュージェック 建築構造部課長代理 工修

表-1 試験杭の断面諸元

外径 (mm)	壁厚 (mm)	PC鋼線		換算 断面面積 (cm ²)	換算断 面係数 (cm ³)	有効プレ ストレス (N/mm ²)	設計曲げモーメント			載荷実験	
		径 (mm)	本数 (本)				軸力 (kN)	ひびわれ (kN・m)	破壊 (kN・m)	正負 繰返	一方 単調
600	90	9	26	1,525	17,050	7.85	0	260.6	511.2	1	—
							981	369.8	687.9	1	1
							1,962	480.8	817.7	1	—

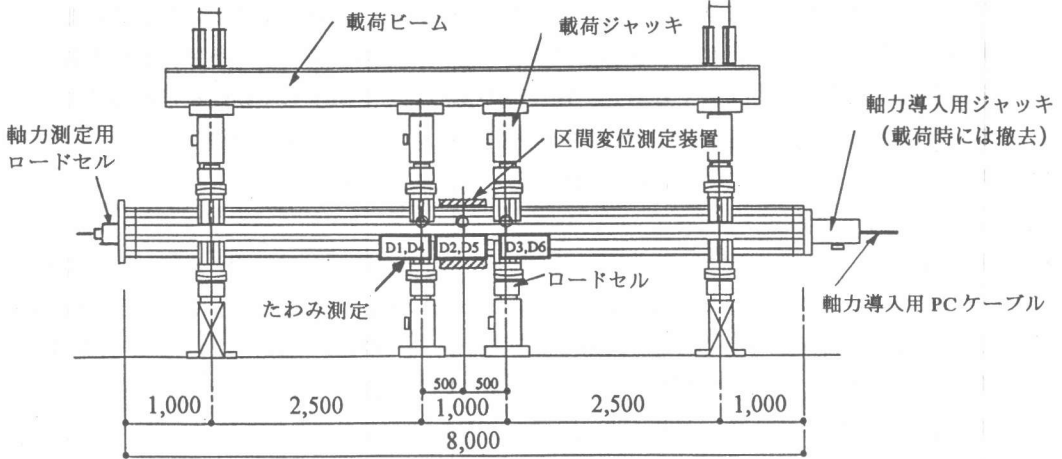


図-1 載荷方法

のスパイラル筋が杭の両端部 1.4m は 50mm ピッチで、中央部は 100mm ピッチで配筋されている。これは従来の配筋であり、横方向筋によるコンクリートの拘束を目的とはしていない。表-1 に示したそれぞれの軸力について、各 1 体は正負交番繰返し載荷曲げ実験を、常時軸力を想定した $N=981\text{kN}$ では正方向の単調載荷曲げ実験を加えた計 4 体の実験を実施した。軸力は、杭体中空部に配置したストランドケーブルに、杭体を反力として緊張を与えることにより導入した。

試験杭長は 8 m で、図-1 に示すように支持スパンを 6 m、せん断スパンが 2.5 m、曲げスパンが 1 m の 2 点支持中央 2 点載荷とした。載荷中は、杭中央と載荷点のたわみ、PC 鋼材とコンクリートのひずみ、ひびわれ幅そして曲率を求めるために圧縮縁と引張縁の区間変位を測定した。

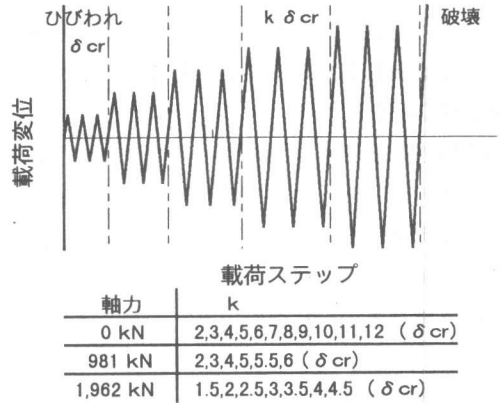


図-2 載荷パターン

載荷パターンの模式図を図-2 に示す。載荷はまず、ひびわれ発生荷重時のたわみ (δ_{cr}) で正負交番載荷を 3 回繰り返した。次に、各軸力ごとに δ_{cr} を基準として図-2 に示した載荷ステップで、変位制御により正負交番載荷を各 3 回繰り返した。

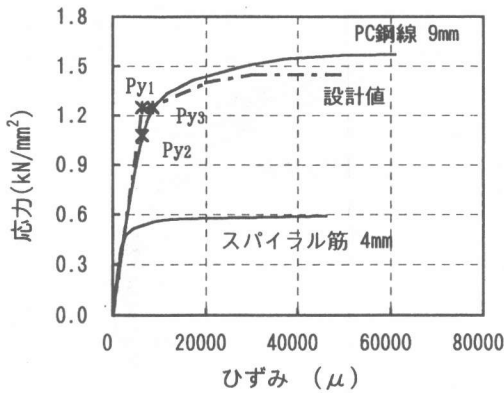


図-3 補強筋の応力-ひずみ曲線

2.2 杭体材料

緊張材は、JIS G3536 に規定された異形 PC 鋼線 (SWPD1) ϕ 9mm で、スパイラル筋は、JIS G3505 に規定された軟鋼線材 (SWRM) ϕ 4mm である。両鋼材の引張試験結果と設計に用いる応力-ひずみ曲線を図-3 に示す。PC 鋼線の引張強度は、 1.56 kN/mm^2 、弾性係数は 201 kN/mm^2 、0.2%永久伸びで定義した降伏強度は 1.25 kN/mm^2 であった。図中 Py_1 は設計に用いる PC 鋼線の降伏点、 Py_2 はそれと同一ひずみで定義した実測降伏点、 Py_3 は 0.2%永久伸びで定義した降伏点である。

コンクリートは、設計基準強度が 83.3 N/mm^2 で、試験時の圧縮強度は約 97.0 N/mm^2 、弾性係数は 47.3 kN/mm^2 であった。コンクリートの応力-ひずみ曲線を図-4 に示す。図には、横方向筋の無いコンクリートの圧縮強度試験結果と、杭体と同量の横方向筋を配した遠心力供試体の試験結果を示した。横方向筋は $\rho_s=0.094\%$ と少ないので、拘束効果は殆ど認められないが、解析には横方向筋を配したコンクリートの応力-ひずみ曲線を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 PHC 杭の変形特性におよぼす繰返し 荷重の影響

軸力が 981 kN の時の一方向単調荷重と、正負交番繰返し荷重による荷重-たわみ曲線 (包

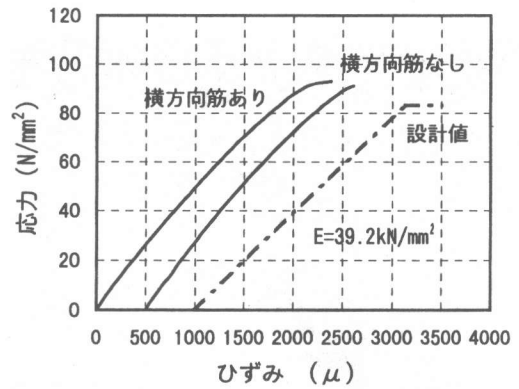


図-4 コンクリートの応力-ひずみ曲線

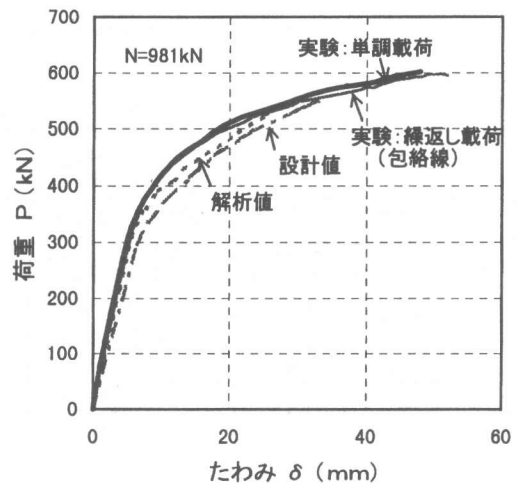


図-5 荷重-たわみ曲線 (N=981kN)

絡線) を図-5 に示す。図には、単調荷重を想定した、内部応力の釣り合い条件から求めた解析値と設計値も併せて示した。単調荷重および繰返し荷重による実験値と解析値とは良く一致し、設計値を上回った。ここで設計値とは、杭体材料の応力-ひずみ曲線に設計 (基準) 強度を用いて求めたものであり、解析値は材料試験から得られた応力-ひずみ曲線を用いて求めたものである。

供試体は、単調荷重においても繰返し荷重においても、PC 鋼線降伏後にコンクリートが圧縮破壊し、終局に至った。終局時には、軸力の影響により圧縮部コンクリートが爆裂し、PC 鋼材は座屈、スパイラル筋は破断した。供試体破壊時の様子を図-6 に示す。

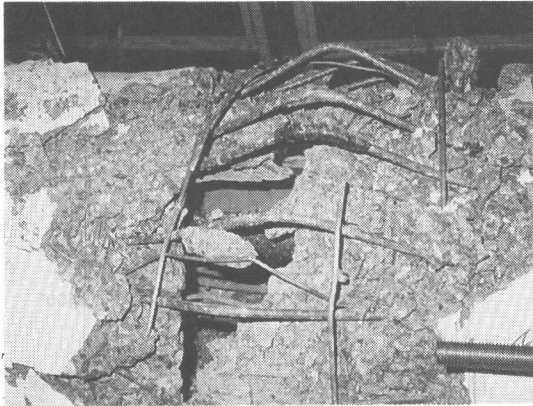


図-6 供試体の破壊状況 (N=981kN)

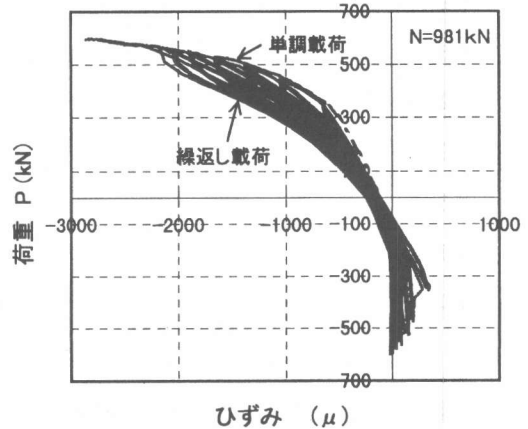


図-7 荷重とコンクリートひずみとの関係

表-2 実験結果一覧

軸力	N = 0 kN		N = 981 kN			N = 1,962 kN	
	設計	実験	設計	単調実験	繰返実験	設計	実験
ひびれモーメント(kN・m)	260.6	273.3	369.8	385.3	395.2	480.0	554.7
たわみ (mm)	4.4	3.7	6.3	5.1	5.6	8.3	7.7
降伏モーメント(kN・m)	407.5	384.7	603.3	568.6	553.0	789.7	778.0
たわみ (mm)	18.0	(20.3)10.2	21.5	(24.1)12.8	(21.0)12.1	23.3	(30.1)17.1
終局モーメント(kN・m)	511.2	596.1	687.9	807.5	804.7	817.7	940.8
たわみ (mm)	41.1	80.9	33.0	47.9	51.9	26.9	37.3
靱性率	2.3	(4.0)7.9	1.5	(2.0)3.7	(2.5)4.3	1.2	(1.2)2.2

()はPC鋼線の降伏を図-3における P_{y3} とした時の値

荷重と圧縮側コンクリートひずみとの関係を図-7に示す。杭体破壊時の圧縮側コンクリートひずみは、単調載荷、繰返し載荷とも約3,000 μ (図-7の値にプレストレスによるひずみ170 μ を加える)で、先に示したコンクリートの一軸圧縮試験結果よりも若干大きな値となった。また、この値は土木学会示方書¹⁾に示された $f_{ck} \geq 60\text{N/mm}^2$ のコンクリートの終局圧縮ひずみ $\epsilon'_{cu} = 2,500\mu$ よりも大きかった。そして、繰返し載荷によってコンクリートのひずみ履歴特性は殆ど変化しなかった。また、荷重-たわみ曲線からもわかるように、繰返し載荷によっても供試体の剛性はそれほど低下せず、破壊モーメントは単調載荷のそれを若干下回ったものの、破壊時のたわみは逆に少し大きくなった。

単調載荷による杭の曲げ靱性率 (δ_u / δ_y ,

δ_y : PC鋼線降伏時のたわみ)は3.7であったが、繰返し載荷によると4.3と少し増大した。ここで、実験におけるPC鋼線降伏時のたわみは、引張側2本のPC鋼線に貼付した5枚のひずみゲージの最大値が、PC鋼線の降伏ひずみ(6,250 $\mu = P_{y2}$)に達した時と定義した。PC鋼線の降伏点が、その定義により設計値と実験値とでは図-3に示したように異なった値となり、どちらを採用するかによって降伏たわみが大きく変化する。実験値としては P_{y2} よりも P_{y3} を用いた方が良いかも知れないが、ここでは設計値と比較するために P_{y2} を用いた。

土木学会示方書による設計靱性率²⁾は、示方書に示された部材係数を用いると約5.4となり、実験値よりも大きな値となった。土木学会式による靱性率は、曲げ降伏後せん断破壊するRC柱部材がその主な対象である³⁾ので、本実

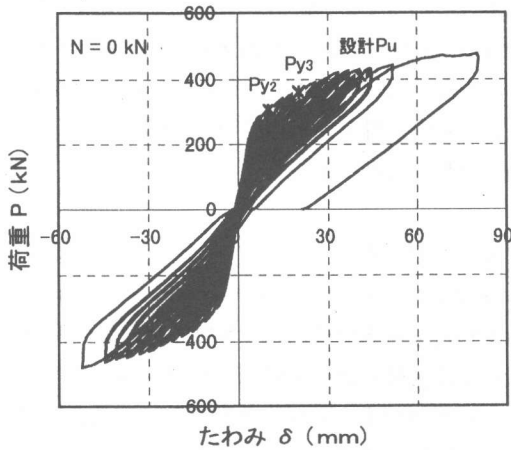


図-8 荷重-たわみ曲線 (N=0kN)

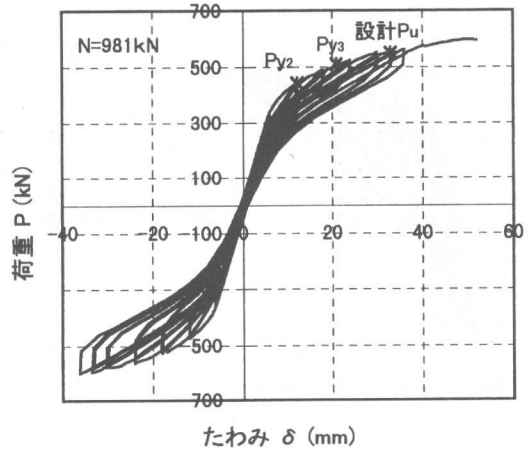


図-9 荷重-たわみ曲線 (N=981kN)

験のように曲げ圧縮破壊する PC 梁部材にはそのままでは適用できない可能性もある。但し靱性率は、降伏たわみの採り方によって大きく変動するので、更なる検討が必要である。また、RC 柱部材が正負交番載荷を受けると、その靱性率は単調載荷における靱性率の 1/2 ~ 1/3 に低下するという報告⁴⁾があるが、本実験では繰返し載荷による靱性率の低下は見られなかった。

3.2 PHC 杭の変形特性におよぼす軸力の影響

ひびわれ、降伏、破壊時のモーメントとたわみを実験値と設計値とを比較して表-2に示す。また、軸力が 0 kN, 981kN, 1,962kN における正負交番繰返し載荷による荷重-たわみ曲線を図-8~10に示す。

軸力が 0kN の場合、終局モーメントは設計値の 1.17 倍であるのに対して、終局たわみは 1.97 倍となった。そのために、靱性率は 7.9 と大きな値が得られた。この軸力における単調載荷による実験を行っていないので、これが繰返し載荷による影響であるとは言えないが、軸力が作用していなくても、プレストレスだけで十分な復元力特性を有するものと考えられる。これは供試体のプレストレスが 7.85N/mm^2 であり、軸力 981kN はプレストレスに換算すると

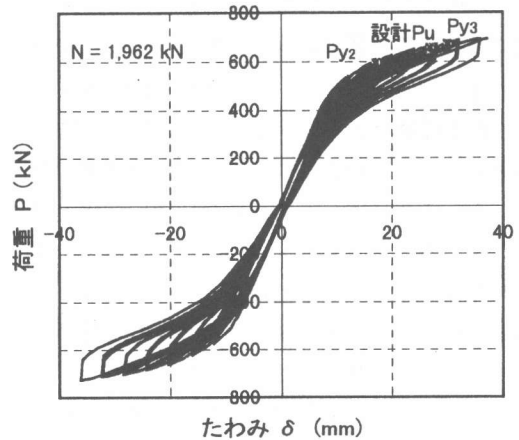


図-10 荷重-たわみ曲線 (N=1,962kN)

約 6.7N/mm^2 となり、プレストレスの影響が比較的大きいためと考えられる。

供試体は、何れの軸力においても PC 鋼線が降伏した後、コンクリートの圧縮破壊により終局状態となった。軸力が大きくなるほど、破壊時のコンクリートの爆裂と PC 鋼線の座屈が突然発生した。損傷の範囲は、軸力が小さい場合は圧縮側だけにとどまるが、軸力が大きくなると引張側の PC 鋼線も供試体の破壊と同時に座屈し、コンクリートも欠損した。しかし、破壊直前まで目立った剛性低下や供試体の損傷もなく、除荷時にはほぼ健全な状態を保っており、破壊直前まで問題なく軸力を保持していた。

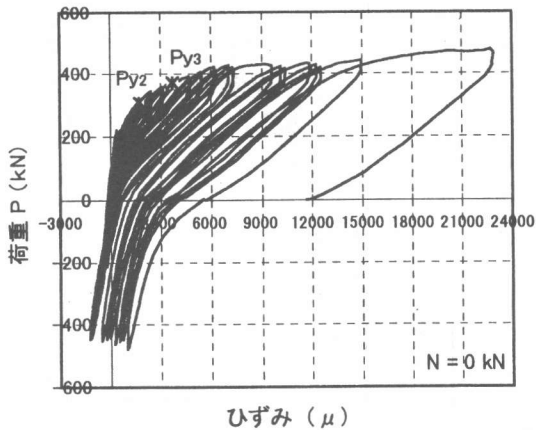


図-11 引張側 PC 鋼線のひずみ

何れの軸力においても、履歴曲線は原点指向型で除荷時の残留たわみはとても小さい。軸力が大きくなるに従って、PC 鋼材降伏荷重が大きくなり破壊たわみが小さくなるので、靱性率が小さくなる。軸力が 0 の場合は、除荷時の曲線が少し下方に膨らんで紡錘型に近い形状となり、軸力が 1,962kN と大きくなると除荷時も載荷時の曲線に近い所を通るようになり、膨らみが殆どなくなる。荷重履歴曲線が囲む面積が小さいので、杭本体のエネルギー吸収能が小さいと判断されるが、実際には地盤との連成作用となるので、杭体単独の本実験結果よりも大きくなるのが期待される。また、地震時に杭が破壊しなければ、杭の残留変形が小さいので、地震終了後の構造物全体の変形を小さく抑えられる可能性がある。その場合、杭自身もひびわれが閉じるので、PC 鋼材腐食の観点からも良好であると考えられる。

六車らによると⁹⁾、PHC 杭のコンクリート拘束力を大きくすると、その効果が発揮される前に引張側 PC 鋼棒が破断した。本実験では、コンクリートを拘束していないことにもよるが、地震時の変動軸力を考慮した、軸力が 0 の場合でも、杭の終局はコンクリートの圧縮破壊となり、引張側 PC 鋼線は供試体破壊時にも破断しなかった。供試体破壊時の PC 鋼線の引張ひずみは、軸力が 0 の場合は約 2.3%、軸力が 981kN

の場合は約 1.2%、軸力が 1,962kN の場合は約 0.5%であった。軸力が 0 の場合の PC 鋼線のひずみを図-11 に示す。除荷時に残留ひずみが見られるが、軸力が大きくなると残留ひずみは殆ど発生しなかった。

4. まとめ

高強度プレストレストコンクリート(PHC)杭の耐震性を評価するために実施した、正負交番載荷曲げ実験の結果、以下の事項が得られた。

- (1) 降伏点以上の繰返し載荷を受けても、PHC 杭の剛性や靱性の低下は見られず、単調載荷による荷重-たわみ曲線と殆ど一致した。
- (2) PHC 杭の破壊は何れの軸力においてもコンクリートの圧縮破壊であり、その時のコンクリートのひずみは約 3,000 μ であった。
- (3) 破壊は急激に発生するが、破壊直前まで耐荷性状(曲げモーメント、軸力)に問題はない。
- (4) PHC 杭の荷重履歴曲線は原点指向型で、除荷時の残留たわみは小さい。軸力が大きくなるほどその傾向は顕著となる。

謝辞：実験計画については、大阪工業大学土木工学科の井上晋助教授に御助言を頂いた。載荷実験は、大成建設技術研究所にて実施した。ここに記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書，平成 8 年制定設計編，pp.23 ~ 24，1996.3
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書，平成 8 年制定耐震設計編，pp.11 ~ 15，1996.7
- 3) 土木学会：阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式，コンクリート技術シリーズ No.12，pp.74 ~ 76，1996.9
- 4) 太田実：繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，第 292 号，pp.65 ~ 74，1979.2
- 5) 六車熙，渡辺，幅，浅井：超高強度 PC くい の曲げ靱性改善，第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.465 ~ 468，1985.5