



兵庫県南部地震で被災したPC杭の被害と構造性能

藤永, 隆
三谷, 勲
大谷, 恭弘
中山, 学

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 5:341-349

(Issue Date)

2001-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00069961>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00069961>



兵庫県南部地震で被災したPC杭の被害と構造性能

Damage to Prestressed Concrete Pile and its Mechanical Characteristics in the Hyogoken-nanbu Earthquake 1995

藤永 隆 ¹⁾	三谷 勲 ²⁾
Takashi Fujinaga	Isao Mitani
大谷 恭弘 ³⁾	中山 学 ⁴⁾
Yasuhiro Ohtani	Manabu Nakayama

概要: 本報告は, 兵庫県南部地震において被災した建物について, PC杭を掘り出し, 材料・構造試験を行い, その被害と構造性能について調査した結果である。

対象建物は激震地帯に隣接した埋め立て地に位置しており, 地震後の調査で多く報告されている被害と同様, 基礎杭頭部破壊等の被害が見られた。被害と経年変化後の材料・構造性能を調べるために, 曲げ実験およびせん断実験を行った。

キーワード: 兵庫県南部地震, PC杭, 構造性能, プレストレス, 曲げ耐力, せん断耐力, 杭基礎

1. 序

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震で被災した建物において, それを支持する杭にひびわれが確認されたという事例が多数報告されている。地震による杭基礎の被害は, 人命への危険性に直接的原因となることは少ないと考えられる。しかし, 基礎構造の被害を放置した場合, 長期間のうちに不同沈下や傾斜転倒に至る可能性がある。

これまで, 震災を受けた杭についての被災状況調査(破損状況, 傾斜状況)は散見されるが, 被災杭を使っての材料・構造実験はまれであり, 被災杭がどの程度強度を有しているかはあまり明らかにされていない^{2),3)}。

今回, 兵庫県南部地震で被災した神戸市東灘処理場の旧管理本館の杭を調査する機会を得た。東灘処理場は最終沈殿池, エアレーションタンクの基礎杭の被災状況に関する調査結果が報告されている。旧管理本館の基礎杭(既製PC杭φ350mm)を掘り出し, 材料実験・構造実験を行い, その被害と構造特性について調査した。今回調査した杭と同一の杭種と打撃工法は今後採用されることはないが, 地震被害後また経年変化後の力学的特性を検討することは, 今後の杭基礎の耐震性を考える際の資料として役立つものと考えられる。

2. 被害の概要

(1) 建物および地盤

対象建物は図-1に示すように, 神戸市東灘区の埋め立て地に位置している。震度7の激震地帯に隣接していたため, 地盤の液状化による護岸の滑動, 基礎杭頭部の破壊等の被害が見られた。

今回の調査杭は旧管理本館の基礎杭である。図-2に杭配置を示す。図中Aは地盤調査位置を示している。地盤柱状図を図-3に示す。

GL-15mまでは礫混り砂質土, 砂礫による埋土及び砂質シルト層であり, N値の範囲は3~17(平均N値8.5)であり, 軟らかい土である。GL-15~-22mはシルト及び砂混じりシルト層でN値の範囲は0~30(平均N値6.2)を示し, ばらつきが大きく強度的に不均一な地層である。GL-22~は砂, 砂質シルト, 砂礫による。N値

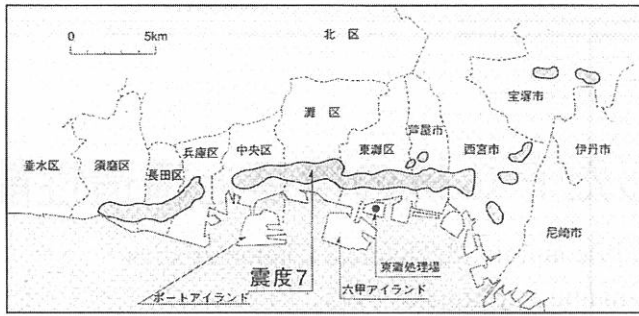


図-1 位置図

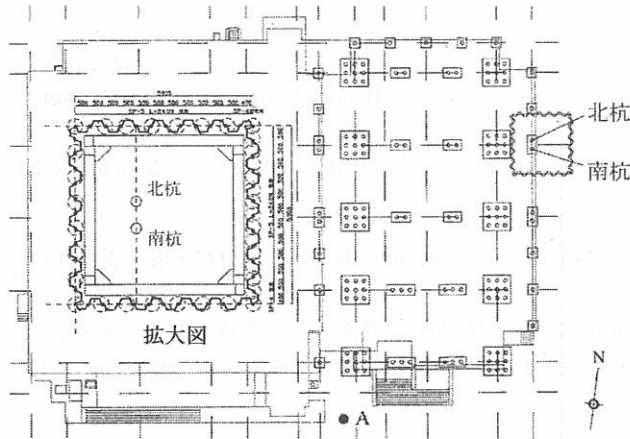


図-2 杭配置・調査杭

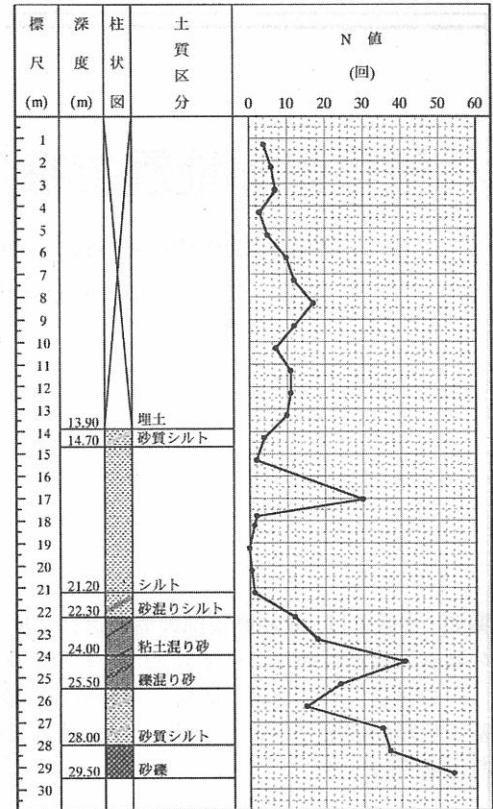


図-3 地盤柱状図

の範囲15～54（平均N値32）の固い土である。

(2) 杭体の被害

護岸からの距離が50m以内の基礎杭を対象に、鋼矢板を打設して囲い、約13m程度掘削し、基礎杭（杭長27m）2本を掘り出した（図-2、写真-1参照）。南杭には20～30cmの間隔で亀裂が観察された。地盤面から約6.5mの深さで北杭、南杭の2本とも杭体が圧縮せん断破壊しているのが確認された（写真-2参照）。

3. 材料試験および構造実験

(1) 材料試験

杭より5本のコアコンクリート（北杭より2本、南杭より3本）および4本のPC鋼線（北杭・南杭それぞれ2本づつ）を採取し、材料試験を行った。

a) コンクリートコア試験

圧縮試験に用いたコアの寸法および試験結果を表-1に示し、応力-ひずみ関係を図-4に示す。表中の設計基準値は「杭基礎設計便覧」⁵⁾に示される既製PC杭を設計する際の値である。また、既製PC杭については引張強度（ $\sigma_{ck}=40\text{kg/cm}^2$ ）、曲げ引張強度（ $\sigma_{bu}=60\text{kg/cm}^2$ ）についても基準値が示されている。圧縮試験では、コア上

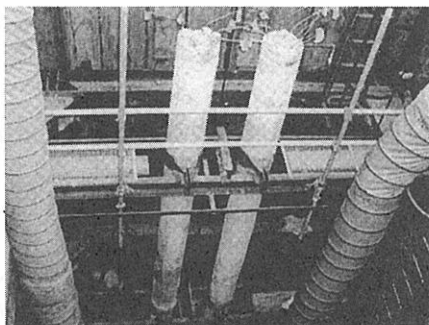


写真-1 被災杭の掘り出し

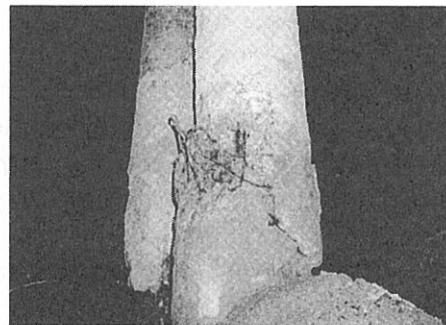


写真-2 杭体の圧縮せん断破壊

表-1 コンクリートコア圧縮試験結果

供試体 番号	直径 (mm)	高さ (mm)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	圧縮強度時 ひずみ(%)
北杭 No1	58.1	67.1	72.7	-	-
北杭 No2	58.3	67.0	82.2	-	-
平均	58.2	67.0	77.5	-	-
南杭 No1	58.5	68.8	73.4	48.7	0.169
南杭 No2	58.2	69.1	83.7	40.1	-
南杭 No3	58.5	69.6	82.0	34.0	0.267
平均	58.4	69.1	79.7	40.9	0.218
設計基準値	-	-	49.0 500(kgf/cm ²)	39.2 400(tf/cm ²)	0.25

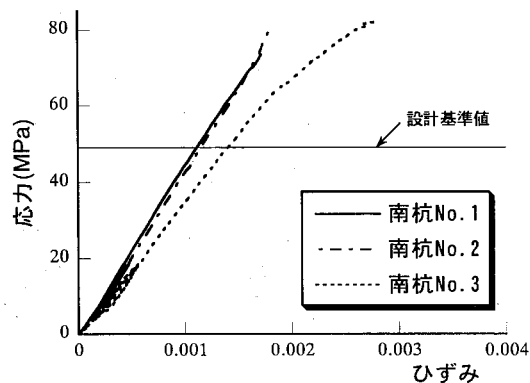


図-4 コンクリートコア応力-ひずみ関係

下面に硫黄でキャッピングを施し、ヤング係数を求めるために南杭 No.1, No.2, No.3 にはゲージを貼付した。採取したコアの h/d (h : 高さ, d : 直径) は約 1.17 であるので、標準シリンダー ($h/d=2$) に比べると見かけ上の強度は 1.1 ~ 1.3 倍となる⁶⁾が、形状・寸法効果の補正は行っていない。

b) PC 鋼線の引張試験及びプレストレスの測定

引張試験片は南杭、北杭から全長約 400mm のものを各 2 本採取した。線径は約 7mm で表面はインデント加工されていた。試験片は JIS Z2201, 2 号試験片相当で標点間距離は 56mm (径の 8 倍) とした。引張試験の結果を表-2 に、応力-ひずみ関係を図-5 に示す。

また、有効プレストレスを測定するため、杭の PC 鋼線部分を長さ約 50mm はつり、PC 鋼線の一部を露出させ WSG を貼付した後、約 400mm の長さで切断しプレストレスを開放することにより測定した。測定結果を表-3 に示す。表中 PC 鋼線張力は、開放されたひずみにヤング係数と鋼線の面積を乗じて求めた。

c) 短柱試験

曲げおよびせん断実験に使用する杭より、約 350mm の長さのセグメント (断面が原型のままの短柱) を切り出し、弾性軸剛性および圧縮強さを求めた。試験体の寸法を表-4 に、試験体の形状を図-6 に示す。なお、杭内には工作用のスパイラル筋 ($3\phi @ 100$) が巻かれている。

短柱圧縮試験は北杭・南杭それぞれ 2 体について行った。載荷に際し両端面に設けた鋼製の耐圧板と試験体の間には、端面の凹凸に起因する応力集中を極力減ずる目的で粉石膏、横ひずみに対する拘束を極力小さくする目的でテフロンシートを挿入した。載荷は 100tf (980kN) で載荷除荷を 3 回繰り返す、その後最大耐力に達するまで載荷した。北杭 No.1 については、100tf 載荷時に割裂によるひびわれが発生したため、繰り返し載荷を行わず最大耐力まで載荷を行った。

試験結果を表-5 に示し、WSG による試験結果の一例を図-7 に示す。同表中の剛性及び耐力は次式により求めた。

$$\text{実験剛性} = \frac{\Delta P / \Delta \epsilon}{A_c + (n-1)A_s} \quad (1)$$

$$\text{計算剛性} = \frac{E_c(A_c - A_s) + E_s \cdot A_s}{A_c + (n-1)A_s} \quad (2)$$

表-3 プレストレス測定結果

	本数 (本)	ひずみ (%)	PC 鋼線張力 (kN/本)	有効プレストレス (MPa)
北杭	12	0.370	30.1	6.16
南杭	8	0.352	28.7	3.64

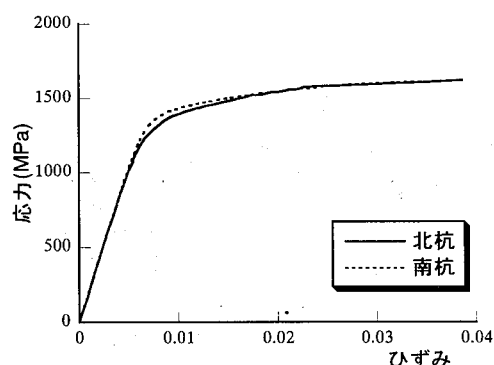


図-5 PC 鋼線の応力-ひずみ関係

表-2 PC 鋼線引張試験結果

	径 (mm)	断面積 (mm ²)	ヤング係数 (GPa)	降伏耐力相当 荷重(kN)	降伏応力 (MPa)	最大引張力 (kN)	引張強さ (MPa)	伸び (%)
北杭No.1	7.19	40.60	-	49.5	1219.2	62.0	1527.0	10.0
北杭No.2	7.00	38.48	205.8	51.6	1340.0	63.0	1635.9	6.7
南杭No.1	7.19	40.60	-	50.0	1231.5	62.2	1531.9	10.0
南杭No.2	7.00	38.48	206.0	53.9	1400.6	62.3	1618.1	8.9
平均	7.10	39.54	205.9	51.2	1297.8	62.4	1578.3	9.5

表-4 セグメント試験体寸法

セグメント 番号	外径 D (mm)	内径 d (mm)	高さ H (mm)	断面積 (mm ²)	鉄筋断面積 (mm ²)	主筋間距離の 平均 L (mm)
北杭No.1	350.6	219.6	357.13	58648.5	-	288.1
北杭No.2	350.6	220.0	349.25	58504.6	-	288.0
平均	350.6	219.8	353.19	58576.5	481.1	288.1
南杭No.1	350.9	206.3	343.25	63282.8	-	290.6
南杭No.2	351.1	207.8	345.38	62912.5	-	290.8
平均	351.0	207.0	344.31	63097.7	320.8	290.7

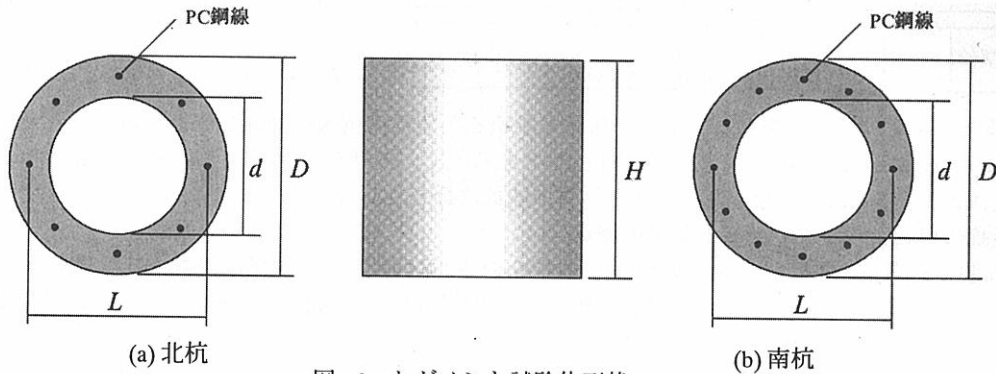


図-6 セグメント試験体形状

$$\text{計算耐力} : (A_c - A_s) \cdot (F_c - \sigma_p)$$

(3)

ここに、 $\Delta P / \Delta \varepsilon$: 試験除荷剛性、 E_c : コア試験から求めたコンクリートの初期弾性剛性、 A_c : セグメント断面の面積、 E_s : PC鋼線のヤング係数 (206GPa)、 A_s : セグメントの断面におけるPC鋼線 ($\phi 7$) の総面積、 n : ヤング係数比 (=5 を用いた)、 F_c : コンクリート強度、 σ_y : PC鋼線の降伏応力、 σ_p : 有効プレストレス

最大耐力の計算値はコア試験によるコンクリート強度 (補正せず) を用い、プレストレスも考慮している。また、最大耐力時の軸方向ひずみは0.1%程度でPC鋼線の負担軸力は小さいので無視する。実験値は計算値の28~43%程度である。この原因として以下のことが考えられる。コンクリートコアの形状・寸法効果は無視している。遠心成形により骨材が外縁に偏っており、外側にはがれ落ちるような破壊性状を示した (写真-3)。また、材料試

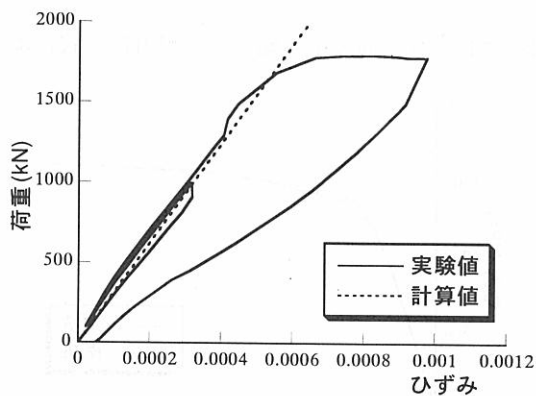


図-7 北杭 No.2 荷重 - 軸変位関係

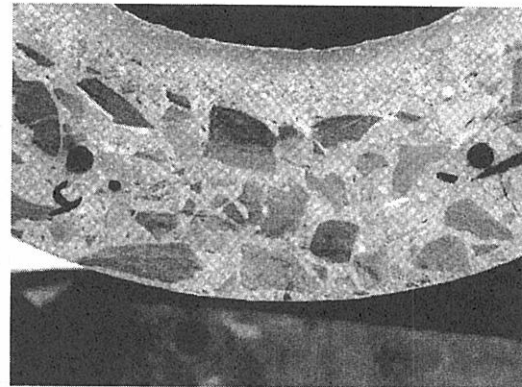


写真-3 遠心成形による骨材の偏り

表-5 セグメント試験結果および計算値との比較

セグメント 番号	計算剛性 (N/mm ²)	実験剛性 (N/mm ²)	実験剛性/ 計算剛性	実験最大耐力 (kN)	計算耐力 (kN)	実験耐力/ 計算耐力
北杭No.1	40948.6	-	-	1466.1	4148.2	0.353
北杭No.2	40948.6	51194.9	1.250	1782.8	4137.9	0.431
平均	40948.6	51194.9	1.250	1624.5	4143.0	0.392
南杭No.1	40946.4	48484.8	1.184	1335.7	4788.7	0.279
南杭No.2	40946.4	-	-	1935.8	4760.6	0.407
平均	40946.4	48484.8	1.184	1635.7	4774.7	0.343

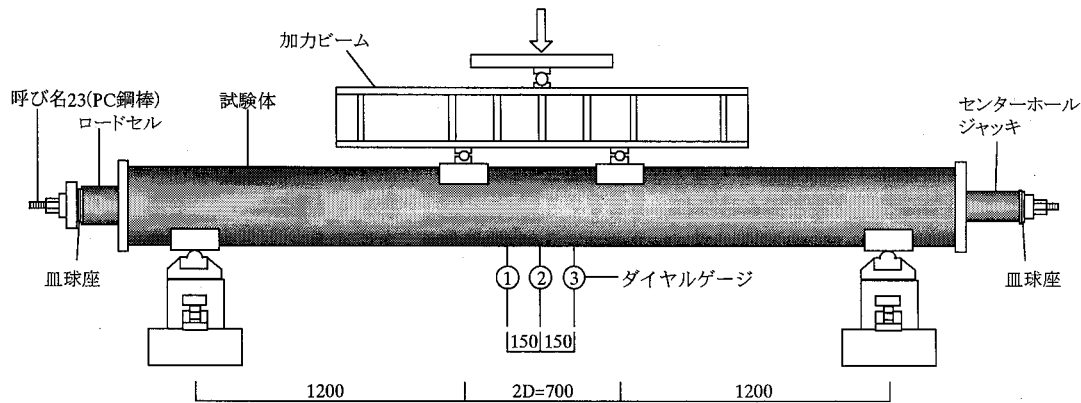


図-8 曲げ加力装置(単位 mm)

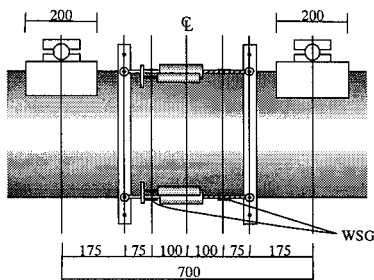


図-9 曲率測定用変位計取付図(単位 mm)

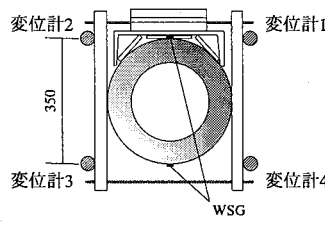


図-10 荷重プログラム

験におけるコンクリートのコアは、コアの採取方向が杭の板厚方向であり、荷重方向が異なる。

(2) 構造実験

被災杭の耐力・剛性を調べるために曲げおよびせん断実験を行った。曲げ実験とせん断実験に用いた杭は同一である。また両実験とも上部構造物の重量および地震時の付加軸力を考慮し、30tf(294kN)の一定軸力下で荷重した。なお、加力装置、加力方法は文献3)の実験と同じである。

a) 曲げ実験

加力装置を図-8に示す。試験体空洞部にPC鋼棒(呼び名23)を通し、センターホールジャッキによって所定の軸力を荷重したのち、200tf試験機で2点荷重による一様曲げを与えた。軸力はセンターホール型のロードセルにより測定し、集中荷重の測定は試験機を用いた。軸力の偏心、両端面での局部応力を出るだけ小さくするために、端部をコンクリートカッターで切断し、軸力荷重鋼板と杭端面の間にはベニヤ板(厚さ12mm)を挿入すると共に、ロードセル(あるいはセンターホールジャッキ)と荷重鋼板の間には皿形の球座を挿入した。はり支点および荷重点はピン支持であるが、応力を分散させる目的で溝形鋼より製作した支圧治具をピンと試験体の間に挿入した。

平均曲率を測定する目的で、図-9に示すように木製測定枠を杭の2カ所に固定し(一様曲げ区間内、相互距離35cm)、2断面間の相対変位が測定できる治具(両端ピンで変位計が軸方向にスライドできる)を介して変位計を取り付けた。曲率の測定、ひずみの進行状況を知るために図-8に示す位置にひずみゲージ(計4枚)を貼付した。また一様曲げ区間で、ダイヤルゲージを3カ所に設置し、たわみを測定した。荷重プログラムを図-10に示

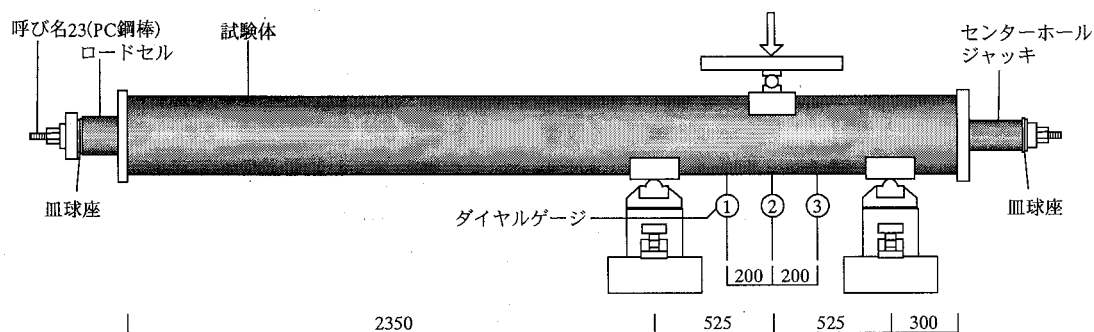


図-11 せん断加力装置(単位 mm)

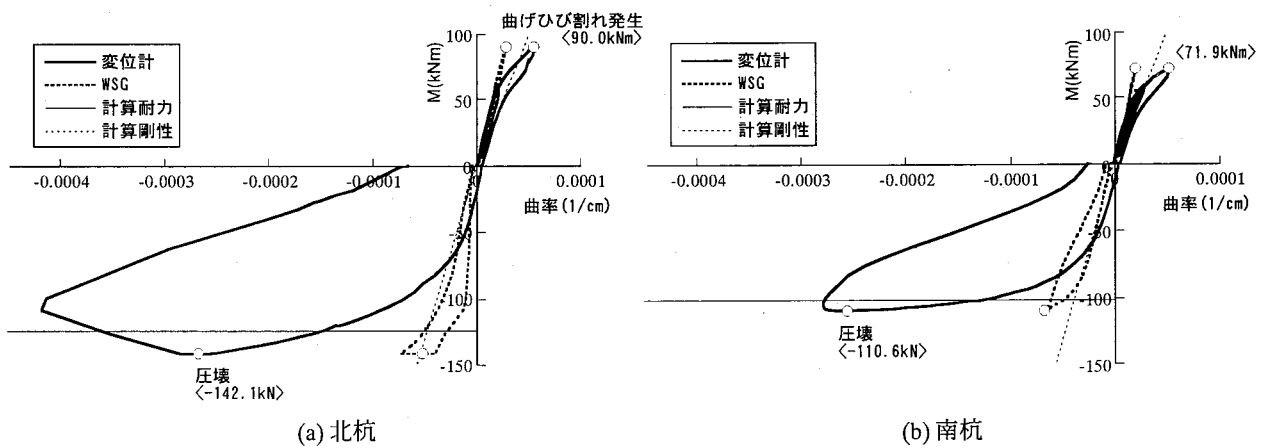


図-12 曲げモーメント-曲率関係

す。所定の軸力を一定に保持した後、正負交番の繰り返し曲げ载荷を行った。正負交番曲げ载荷は、杭を180°回転させることによって行った。载荷方向を変えるとき杭が容易に回転できるように、試験体と支点の間にはテフロンシートを敷いた。

b) せん断実験

せん断実験は曲げ試験体の勾配モーメント部分を試験部とした。加力装置を図-11に示す。曲げ実験の場合と異なる主な点は1点集中载荷としていることで、試験体にPC鋼棒を通し、所定の軸力30tf(294kN)を载荷した後、支点間距離を3D(D:杭径)として支点間中央に1点集中荷重を加えた。载荷は正負1回づつ、杭に新たな亀裂が発生していることを確認した後、荷重を反転させた。

(3) 実験結果および考察

a) 曲げ実験結果

図-12に曲げモーメント(M)-曲率(ϕ)関係を示す。同図中に示す曲げ耐力および初期剛性は下記の仮定で求めたものである。

終局曲げ耐力算定の仮定 (図-13 参照)

- 1) コンクリート、鋼とも剛塑性体である。
- 2) 圧縮強度はコンクリートコア圧縮試験から得られたコンクリートの平均強度 (表-1 参照) より、プレストレスによる有効応力 (表-3 参照) を差し引いて算定する。
- 3) PC鋼線の降伏応力は引張試験から得られた平均値 (表-2 参照) とする。
- 4) スパイラル筋の影響は無視する。
- 5) 断面は実測平均寸法 (表-4 参照) による真円とする。
- 6) 主筋は等間隔に配置されている。

上記仮定の下に3種類に終局曲げ耐力を求めた。(1) 上記の仮

表-6 曲げ実験結果および計算値との比較

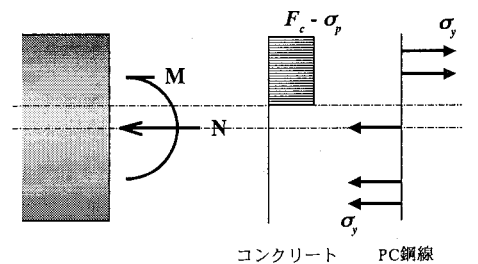
(a) 曲げ剛性

曲げ剛性	実験値(kN・m ²)×10 ³		計算値 (kN・m ²)×10 ³	実験値/計算値	
	変位計	WSG		変位計	WSG
北杭	39.6	34.7	26.5	1.50	1.31
南杭	39.3	33.7	27.3	1.44	1.23

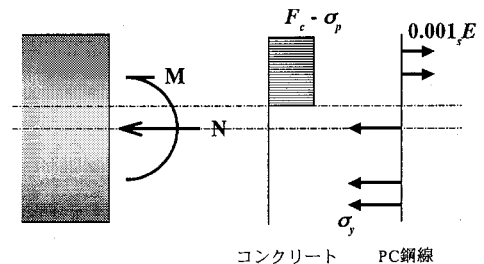
(b) 曲げ耐力

曲げ耐力 (kN・m)	実験値	計算値(kN・m)			実験値/計算値		
	(kN・m)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
北杭	142.1	124.9	123.8	166.1	1.14	1.15	0.86
南杭	110.6	102.7	102.0	130.5	1.08	1.08	0.85

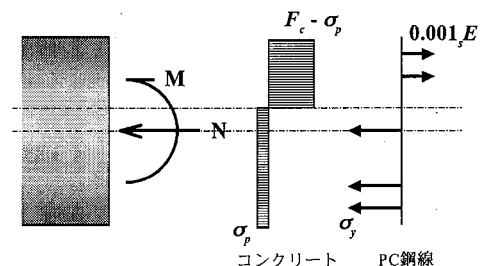
- (1) コンクリートのプレストレス分を考慮。
- (2) 圧縮側のPC鋼線のひずみ変化量をコンクリートのひずみ限界の0.1%とする。
- (3) 圧縮側のPC鋼線のひずみ変化量をコンクリートのひずみ限界の0.1%とし、コンクリートの引張応力 σ_p を考慮。



(1) プレストレス分考慮



(2) 圧縮側PC鋼線ひずみ限界考慮



(3) コンクリートの引張考慮

図-13 終局曲げ耐力の算定

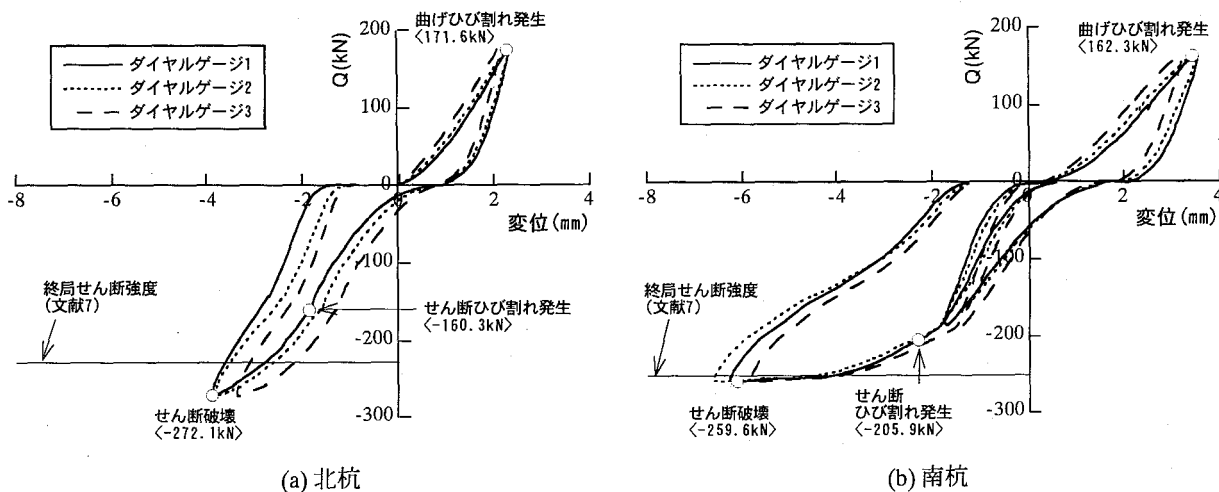


図-14 せん断力-変位関係

定のみ考慮して算定。(2)上記仮定のほか圧縮側のPC鋼線のひずみ変化量をコンクリートのひずみ限界の0.1%として算定。(3)圧縮側のPC鋼線のひずみ変化量をコンクリートのひずみ限界の0.1%,コンクリートの引張応力を考慮($\sigma_{bu} = \sigma_p$ とする)して算定。

弾性剛性算定の仮定

上記4)～6)のほか

- 7) 鋼・コンクリートとも完全弾性である。
- 8) 平面保持
- 9) コンクリートのヤング係数は実測値(表-1参照)を用いる。
- 10) PC鋼線のヤング係数は206 GPaとする。

表-6には立ち上がり曲げ剛性, および終局耐力について実験値と計算値との比較を示す。同表より, 立ち上がり曲げ剛性の実験値は計算値より23～50%大きくなっている。一方実験曲げ耐力と計算値との比は, (1)コンクリートのプレストレスのみ考慮して算定した場合, 北杭で1.14, 南杭で1.08。(2)圧縮側のPC鋼線のひずみ変化量をコンクリートのひずみ限界の0.1%として算定した場合, 北杭で1.15, 南杭で1.08。(3)圧縮側のPC鋼線のひずみ変化量をコンクリートのひずみ限界の0.1%とし, コンクリートの引張応力を考慮($\sigma_{bu} = \sigma_p$ とする)して算定した場合, 北杭で0.86, 南杭で0.85であった。

b) せん断実験結果

図-14にせん断力-変位関係を示す。実験最大せん断力は北杭272.1kN・南杭259.6kNであった。実験では支点間(せん断スパン $1.5D$, D :杭径)の杭側面に杭材軸方向亀裂と 45° の亀裂が複合する亀裂が生じた。また杭が楕円形に変形する傾向が現れた。実験値との対応を見るために, 下記の仮定および式(4)を用いてせん断耐力を求めた。

- 1) 断面形状等に関しては曲げ耐力の計算に用いた仮定4), 5)を用いる。
- 2) F_c は形状・寸法効果の補正を行わない。
- 3) コンクリートの終局せん断応力度および引張強度を $F_c/10$ とする。
- 4) 等価断面積 $A_e = A_c + 4A_s$, ここに A_c :セグメント断面積, A_s :PC鋼線断面積
- 5) 式(4)において S_0 として円環の重心を通る軸に関する片側断面積の値を用い, $\phi=0.5$ とする。
- 6) 作用軸力は30tf(294kN)

$$Q_s = \frac{2If}{S_0} \cdot \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_g + 2\phi\sigma_t)^2 - \sigma_g^2} \quad (4)$$

ここに, Q_s :終局せん断強度(N), S_0 :杭の中立軸より片側にある杭断面の中立軸に対する断面1次モーメント(mm^3), t :杭の肉厚(mm), I :中立軸に対する断面2次モーメント(mm^4), ϕ :せん断破壊時の斜張応力度とコンクリートの引張強度の比, σ_t :コンクリートの引張強度(MPa), σ_g :軸方向応力度($\sigma_g = \sigma_c + N/A_c$), σ_c :有効プレストレス(MPa), N :軸力(N), A_c :コンクリートの換算断面積(mm^2)

上記仮定を用いて求めた終局せん断耐力は北杭230.7kN・南杭251.7kNであり, 実験最大せん断力, 北杭272.1kN・南杭259.6kNと対応している。

6. まとめ

兵庫県南部地震で被災した神戸市東灘処理場の旧管理本館の杭を用いて、材料試験、静的曲げ実験、せん断実験を行った。実験により得られた知見を以下に示す。

- 1) セグメント圧縮実験では、遠心成形による骨材の偏りによって、軸圧縮耐力は計算耐力の28～43%程度であった。また、コンクリートコアは採取方向が杭の板厚方向であり、載荷方向が異なる。
- 2) 実験曲げ耐力とコンクリートの圧縮強度 F_c 、有効プレストレス σ_p 、PC鋼線の降伏応力度 σ_y を用いて算定した終局曲げ耐力の比は、(1)コンクリートのプレストレスのみ考慮して算定した場合、北杭で1.14、南杭で1.08、(2)圧縮側のPC鋼線のひずみ変化量をコンクリートのひずみ限界の0.1%として算定した場合、北杭で1.15、南杭で1.08、(3)圧縮側のPC鋼線のひずみ変化量をコンクリートのひずみ限界の0.1%とし、コンクリートの引張応力を考慮($\sigma_{bu}=\sigma_p$ とする)して算定した場合、北杭で0.86、南杭で0.85であった。
- 3) せん断耐力は、文献7)に示された終局せん断耐力で概ね良好な評価をしており、耐力比は北杭で1.18、南杭で1.03である。

謝辞：被災杭の掘削・調査は建設省土木研究所（現独立行政法人土木研究所）により行われたもので、調査結果は文献8)に掲載予定である。同研究所および神戸市のご厚意により、掘削杭および諸資料の提供を受けました。被災杭の材料・構造実験に際しては西野孝仁氏（神戸大学技官）、林原光司郎氏（神戸大学研究生）、中村豪氏（神戸大学大学院生）、伏野耕平氏（神戸大学学生）のご協力を得ました。ここに記して感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 日本建築学会：阪神淡路大震災調査報告建築編4（建築基礎構造），1998年
- 2) 松村孝夫，石坂 功，山路忠男，真島正人：兵庫県南部地震により被災した杭基礎の被害調査と破壊メカニズムの検討，日本建築学会技術報告集，第8号，pp.79-84，1999年6月
- 3) 藤永 隆，三谷 勲，永井興史郎，大谷恭弘，中村儒士，神田直美：兵庫県南部地震で被害を受けた既製RC杭の被災状況と構造性能，構造工学論文集，Vol.47B，2001年3月
- 4) (株)奥村組：神戸市東灘処理場災害復旧関連建設工事に伴う基礎杭被災状況調査報告書，1997年8月
- 5) 日本道路協会：杭基礎設計便覧（第4版），1987年11月
- 6) 日本建築学会：建築材料用教材，1995年4月
- 7) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)，基礎構造，p.142，1990年10月
- 8) 福井次郎ら：護岸近傍に位置する基礎杭の被害に関する一考察，第25回地震工学研究発表会，2001年8月

筆者：1) 藤永 隆，工学部建設学科，助手；2) 三谷 勲，工学部建設学科，教授；3) 大谷恭弘，工学部建設学科，助教授；4) 中山 学，(株)奥村組 土木技術部，次長

Damage to Prestressed Concrete Pile and its Mechanical Characteristics in the Hyogoken-nanbu Earthquake 1995

Takashi Fujinaga
Isao Mitani
Yasuhiro Ohtani
Nakayama Manabu

Abstract

Prestressed concrete piles used in the foundation of the building that had been damaged by the 1995 Hyogoken-nanbu Earthquake were examined. The piles were excavated from the site. And by using a part of the piles, loading test was conducted under bending and/or shear loads to evaluate their structural performance. In this study, structural behavior of damaged piles are experimentally examined.

