

# 砂れき層に中掘り工法で打設された長尺 PHC 杭の スタナミック試験

## A STATNAMIC TEST ON A LONG PHC PILE IN A GRAVEL LAYER CONSTRUCTED BY INNER EXCAVATION INSTALLATION

林 隆浩\*, 松本樹典\*\*, 山田和夫\*\*\*

*Takahiro HAYASHI, Tatsunori MATSUMOTO and Kazuo YAMADA*

Comparable tests of a static load test (SLT) and a rapid load test called Statnamic (STN) on a PHC pile constructed in a gravel layer were carried out in 1993. A gas explosion pressure is applied to the pile head in the STN test without the use of reaction piles. The duration of the Statnamic loading event is approximately 100ms. The applied force and displacement are recorded at the pile head during the STN test. The velocity and acceleration of the pile head are derived from the measured displacement. Relatively large velocity and acceleration were observed in this particular STN test. The load-displacement curve directly measured in the STN test was deviated from that obtained from the SLT. Dynamic effects due to inertial force of the pile body and penetration dependent force were adjusted by means of an interpretation method, unloading point method, of the STN test. Thus derived load-displacement curve was comparable with the SLT curve. Axial force distributions in the SLT and the STN test were also very similar.

*Keywords : concrete pile, load test, Statnamic test, gravel, bearing capacity, shaft friction*

コンクリート杭、載荷試験、スタナミック試験、砂れき、支持力、周面摩擦

### 1. はじめに

上部構造物に限界状態設計法が導入され既に10数年が経とうとしている。これに伴い杭基礎設計にも限界状態設計法を導入しようという動きが近年盛んになり始めている<sup>1),2),3)</sup>。当設計法の導入には、多くの課題が残されているが、その課題の中に杭の施工管理及び打設された杭の品質保証・性能管理が挙げられる<sup>4),5)</sup>。

埋め込み杭が導入され始めた創世期には、その支持力性能と品質の保証を目的に多くの静的載荷試験 (SLT) が実施されてきた。しかし、現在多くの載荷試験が実施された結果、あたかも当工法によって施工された杭は、全てが同じ支持力性能を持つとの間違っただ判断がなされている。杭の支持力性能は、本来1本ごとの試験を実施し、これを保証すべきであるが、従来の静的載荷試験は、多額の費用と時間を要するためその実施例は年々減少している。

わが国においても、課題の解決の為に波動理論に基づいた施工管理手法や動的載荷試験手法が実際の杭に適用されている。両手法とも多くの試験工事が、実施されており研究の推移に期待が寄せられている。

さらに静的載荷と動的載荷の両者の長所を組み合わせた新しい載荷試験方法がオランダ国立応用科学研究所とカナダのバーミングハンマー社によって共同開発され<sup>6)</sup>、わが国でも数十例の杭に適用されている<sup>7),8),9)</sup>。この載荷試験法は、静 (スタティック) と動 (ダイナミック) を組み合わせてスタナミック (Statnamic) と呼ばれている。載荷方法は動的であるが、載荷時間が動的載荷に比べて約10倍と長く、杭の挙動は準静的となるよう工夫がされている。この載荷試験は、従来の静的載荷試験のように反力杭を利用しないため準備を含めた試験期間が半日程度であり、費用も静的載荷試験に比べて低いなどの多くの利点を有し

\* ヨーコン株式会社技術部 次長・工修

\*\* 金沢大学工学部土木建設工学科 助教授・工博

\*\*\* 愛知工業大学建築学科 助教授・工博

Sub Manager, Technical Department, YOCON Inc., M. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Civil Eng., Faculty of Eng., Kanazawa Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Aichi Institute of Technology, Dr. Eng.

ている。したがって、実施工現場において本杭施工に先立ち試験施工を実施し、これにスタナミック試験を行い支持力を確認した上で本杭の設計支持力を設定することが容易になる。また、施工済みの任意の杭にスタナミック試験を実施することも可能であり、支持力性能・品質の保証に好都合とすることができる。

スタナミック試験方法は、静的載荷試験に近いとは考えられるが、載荷時間は100msと静的載荷試験のそれに比べて短く、載荷速度は静的載荷試験に比べて速くなる。そのため、この載荷速度に依存する地盤抵抗力が発生すると考えられる。本研究では、既製コンクリート杭で杭長の約80%について杭周辺の摩擦抵抗をカットした杭に対する載荷速度の影響等について検討することを目的として、弥富れき層に中掘り拡大根固め工法で打設された高強度プレストレストコンクリート（PHC）杭に対して、静的載荷試験およびスタナミック試験を実施した。両試験結果を比較検討することにより、本PHC杭の支持力特性を調べることに加え、スタナミック試験の適用性を検討した。

## 2. 試験概要

本試験工事では、中掘り拡大根固め工法によって施工されたPHC杭に静的載荷試験とスタナミック試験の2つの載荷試験を実施した。試験実施は、先に静的載荷試験を実施し、2週間後にスタナミック試験を実施した。以下に地盤概要、杭仕様、試験方法等について示す。

### (1) 試験地盤および試験杭の仕様

試験は、愛知県南部の海部郡弥富町大字稲地内で1993年6月に実施した。

図1に地盤状況と杭設置状況を示す。試験地盤は、1951年以降に埋め立てられた干拓地で現在年間10mm程度の地盤沈下が進行している地帯で、その地盤構成は地表面から40m付近まで砂および軟弱なシルトで形成され、これ以深52m付近までN値10~15程度の砂とシルトの互層状態となっている。試験杭先端は、52m以深からの砂れき層に根入れされている。なお、地質調査実施時の地下水位は、G.L.-0.5mであった。

表1に試験杭の仕様を示す。試験杭は、外径600mm、長さ54mのPHC杭を使用している。杭体内には、各深度の到達荷重を測定するために5断面各断面4点の計20点の鉄筋計を設置した。また、杭先端に大きな荷重が到達するように、杭表面に杭長の約80%にあたる40mにわたり杭周面摩擦低減剤（パイルロック）を塗布している（図1）。

### (2) 静的載荷試験方法

載荷試験は、土質工学会「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」に準じて実施した。載荷試験は、反力杭8本を用いた反力式で載荷試験方法Aに準じて多サイクル（6サイクル）にて実施した。載荷最大荷重は720tfとし、荷重段階12段階の60tfピッチとした。各荷重段階の処女荷重保持時

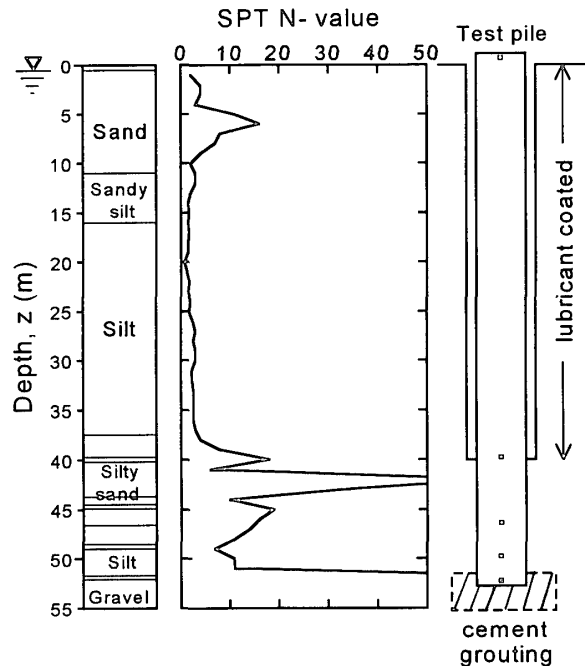


図1 試験地盤と杭設置状況

表1 試験杭の力学的および幾何学的条件.

Property		Value
Length	$L$ (m)	54
Wall thickness	$t_w$ (mm)	90
Outer diameter	$r_o$ (mm)	600
Inner diameter	$r_i$ (mm)	420
Cross-sectional area	$A$ (cm <sup>2</sup> )	1441
Young's modulus	$E$ (tf/m <sup>2</sup> )	$4.0 \times 10^6$
Weight	$W$ (tf)	18.7

間は、60分とした。杭施工後の養生期間は、13日である。載荷試験では、各段階荷重時に杭頭沈下量、杭先端沈下量および杭体の歪み量を測定記録した。

### (3) スタナミック試験方法

スタナミック載荷方法の基本原理は、杭頭で反力マスを打ち上げることである（図2）。反力マスの打ち上げには、シリンダー内の推進剤の燃焼によって発生するガス圧を利用する。このガス圧は、同時に杭を地盤に押し込む力として作用する。杭頭に作用する力 $F_{sm}$ を杭頭部に設置したロードセル(B)で測定し、同時に杭頭の変位 $u$ をレーザー変位計(J)で測定する。

図2(a)は、スタナミック載荷装置の概略を示している。装置は主に、燃焼ピストン、シリンダー、サイレンサー、反力マスから構成される。スタナミック載荷装置では、反力マスに最大約20Gの加速度が発生するように設計されている。そのため、計画載荷最大荷重の約5%の反力マスが必要となる。

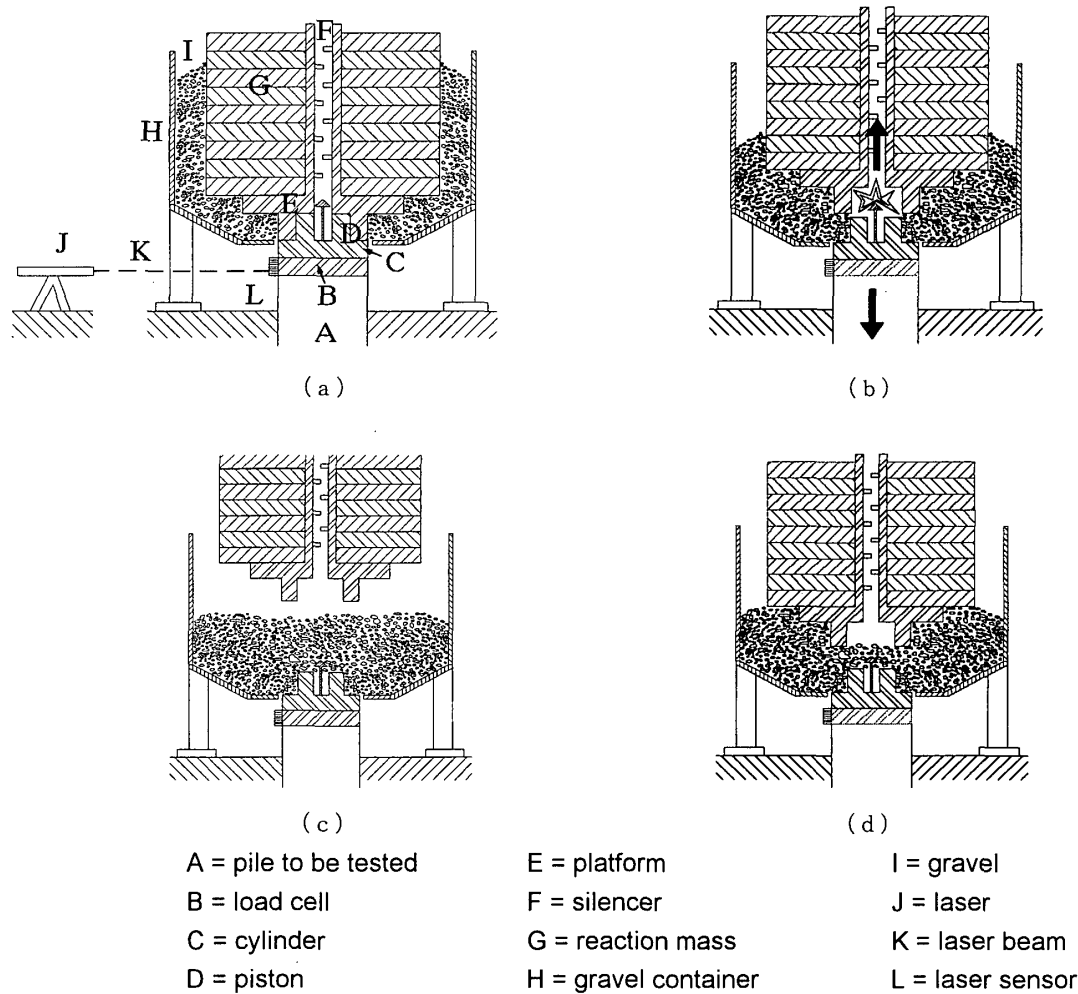


図2 スタナミック試験装置と載荷手順

- |                       |                      |                  |
|-----------------------|----------------------|------------------|
| A = pile to be tested | E = platform         | I = gravel       |
| B = load cell         | F = silencer         | J = laser        |
| C = cylinder          | G = reaction mass    | K = laser beam   |
| D = piston            | H = gravel container | L = laser sensor |

装置の組立て手順と測定手順は、以下の通りである。

- ①荷重測定用のロードセル内蔵のピストンを杭頭に設置する。
- ②ピストン内部に燃料（推進剤）を装填する。
- ③ピストンにシリンダーとサイレンサーをかぶせる。
- ④シリンダーに反力マスを載せる。
- ⑤装置全体を筒状のコンテナで囲い、その中に砕石を投入する。
- ⑥燃料に着火し、反力マスを推進する。これと同時に杭頭の荷重 $F_{sm}$ と変位 $u$ を測定する。杭頭にはミラーが設置されており、この変位を杭から数10m離れた地表に設置したレーザー変位計によって測定する。

図2(a)は、スタナミック試験開始直前に相当する。この時点では、反力マスやシリンダーなどの重量によって杭は静的な状態で載荷されている。図2(b)では、推進剤が着火される。ガス圧が増加し、反力マスが加速される。ガス圧は、同時に杭を下方に押し込む力として作用するため、この段階で杭の載荷が行われる。反力マスの上昇によって生

じた隙間には、砂利が流れ込む（図2(c)）、打ち上げられた反力マスはこの砂利層の上に再落下する。この時の衝撃力は、杭頭には伝達されずに砂利容器を通して杭周辺地盤表面に伝達される（図2(d)）。

今回のスタナミック試験では、杭頭における荷重および変位の時間的変化を計測した。さらに静的載荷試験時に利用した計20点の鉄筋計で各断面の歪み量の計測も併せて実施した。

### 3. スタナミック試験結果

#### (1) 測定シグナル

図3は、スタナミック試験シグナルである。(a)図は時刻 $t$ とスタナミック荷重（杭頭荷重） $F_{sm}$ の関係である。(b)図は時刻 $t$ と杭頭変位 $u$ の関係である。(c)および(d)図は、 $u$ を時刻 $t$ に関して1階および2階微分して求めた杭頭の変位速度 $v$ と加速度 $\alpha$ の時間的変化である。

今回のスタナミック試験で用いた反力マスの重量は40tfであり、反力マス設置後の杭頭変位は $u_0=2.0\text{mm}$ であった。この時点からスタナミック試験を開始した。載荷開始から

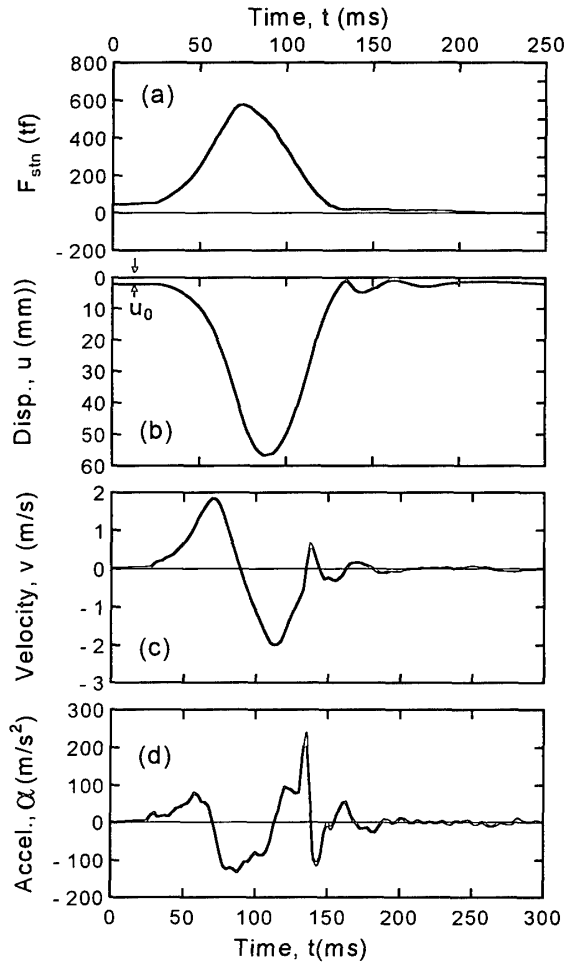


図3 スタナミック試験測定シグナル

75ms後に $F_{stn}$ は最大値582tfに達し、この時の杭頭の変位量は44.5mmであった。 $F_{stn}$ が減少し始めても杭頭変位は増加しており、 $t=90$ msに最大変位55mmに達している。 $t=125$ msで完全に除荷状態となっている。杭の重量が比較的小さい摩擦鋼管杭に対するスタナミック試験<sup>9)</sup>では、このような $F_{stn}$ と $u$ の大きな位相差は測定されておらず、本スタナミック試験では、杭の慣性力の効果を無視できないことを示唆している。

(c)および(d)図からわかるように、スタナミック試験時の最大貫入速度 $v_{max}$ および最大加速度 $\alpha_{max}$ は、それぞれ $v_{max}=1.8$ m/sおよび $\alpha_{max}=-12G$ (上向き)であった。この試験による $\alpha_{max}$ は、これまで他の摩擦鋼管杭に対して実施されたスタナミック試験<sup>9)</sup>における $\alpha_{max}=2\sim 3G$ に比べて、大きな値である。この理由として、本試験においては、杭長の80%にわたり杭周面摩擦の低減を施したため杭周面の摩擦抵抗が非常に小さかったためと推定される。

(2) スタナミック試験シグナルの解釈法

スタナミック試験シグナルの解釈法の一つに、除荷点法と呼ばれる方法がある。図4は、Middendorpらによって提案されている除荷点法で用いられるスタナミック試験時

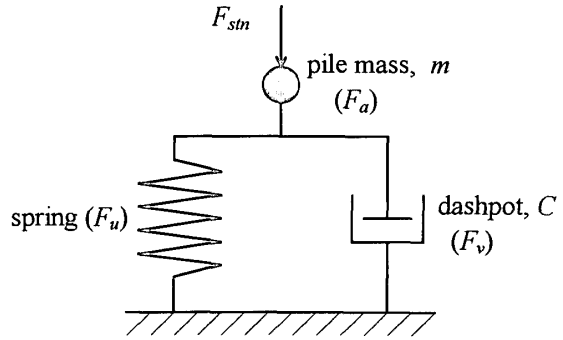


図4 スタナミック試験における杭-地盤系の解析モデル

の杭-地盤モデルである<sup>10)</sup>。杭を質量 $m$ を有する質点で表わし、地盤抵抗力を非線形バネとダッシュポットの両者の抵抗力で表現する。杭自体の弾性変形量は、バネの変形量に含まれている。したがって、バネは杭頭に静的な荷重が作用したときの地盤および杭の変形を表わしており、バネに発生する力が静的抵抗力 $F_u$ である。ダッシュポットは杭の速度 $v$ に比例する抵抗力 $F_v$ を表わしており、 $C$ を減衰定数として、次式を仮定する。

$$F_v = C \cdot v \tag{1}$$

全地盤抵抗力 $F_{soil}$ は、次式で与えられる。

$$F_{soil} = F_u + F_v \tag{2}$$

杭(質点)の慣性力 $F_a$ は、 $\alpha$ を杭の加速度として、次式で与えられる。

$$F_a = m \cdot \alpha \tag{3}$$

図4の杭-地盤モデルに基づけば、 $F_{stn}$ 、 $F_{soil}$ および $F_a$ の三者の力の釣り合いは、次式となる。

$$\begin{aligned} F_{stn}(t) &= F_{soil}(t) + F_a(t) \\ &= F_u(t) + F_v(t) + F_a(t) \\ &= F_u(t) + C \cdot v(t) + m \cdot \alpha(t) \end{aligned} \tag{4}$$

または、

$$\begin{aligned} F_{soil}(t) &= F_{stn}(t) - F_a(t) \\ &= F_{stn}(t) - m \cdot \alpha(t) \end{aligned} \tag{5}$$

$v$ と $\alpha$ は、測定した杭頭の変位 $u$ より次式から計算される。

$$v(t) = du(t) / dt \tag{6}$$

$$\alpha(t) = d^2u(t) / dt^2 \tag{7}$$

図5は、除荷点法によって求めた当試験の“静的”荷重～沈下曲線を示している。 $F_{soil}$ から $F_u$ を求める際に $C$ の値を求めることが必要となる。最大変位点(除荷点)では、杭の速度 $v$ は0となる。したがって、除荷点では $F_u = F_{soil}$ であり、除荷点荷重は静的な最大荷重と解釈される。除荷点荷重と $F_{soil}$ の最大値の差が、 $F_v = C \cdot v^*$ である。ここで $v^*$ は、最大 $F_{soil}$ 時の杭速度である。 $F_v$ と $v^*$ が測定値として既知のため $C$ を求めることができる。こうして求められた $C$ を式(2)に用いる事により $F_u$ が求まる。ただし、 $C$ は荷重中一定であると仮定している。

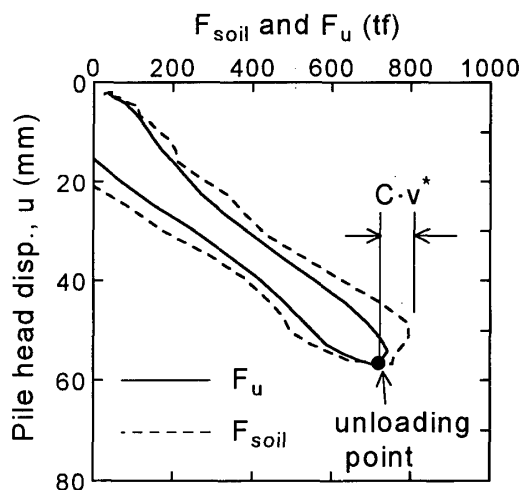


図5 除荷点法によって求めた“静的”荷重～沈下曲線

5. 静的荷重試験結果との比較検討および考察

図6は、除荷点法によって求めた“静的”荷重～沈下曲線( $F_u \sim u$ 曲線)と静的荷重試験で得られた荷重～沈下曲線を比較したものである。先に述べたように、静的荷重試験では計6サイクルの荷重を実施した。スタナミック試験は、6サイクル目の荷重除荷後に実施したため、スタナミック試験で得られた $F_u \sim u$ 曲線を静的荷重試験の6サイクル目の荷重除荷時の変位量(70mm)を始点として比較している。スタナミック試験による $F_u \sim u$ 曲線は、静的荷重試験の6サイクル目の除荷曲線とよく一致しており、 $F_u$ の最大値も静的荷重試験における最大荷重とほぼ同じである。すなわち、除荷点法により求めた荷重～沈下関係は、静的荷重試験の荷重サイクルを1段階さらに実施した状態として捉えることができると判断される。

図7は、静的荷重試験で測定された杭先端到達荷重 $P_b$ と杭先端沈下量 $u_b$ の関係を示している。 $P_b = 260\text{tf}$ までの $P_b \sim u_b$ 関係はほぼ直線的であり、処女荷重保持時間(60分)内における沈下量(クリープ沈下量)増分も比較的小さい。 $P_b$ が $260\text{tf}$ を越えると $P_b$ の増分に対する $u_b$ の増分は増加し、クリープ沈下量も大きくなっている。杭径の10%に相当する60mmの沈下量に対する杭先端荷重は $500\text{tf}$ に達しているが、沈下量が急増するような状態には至っていない。

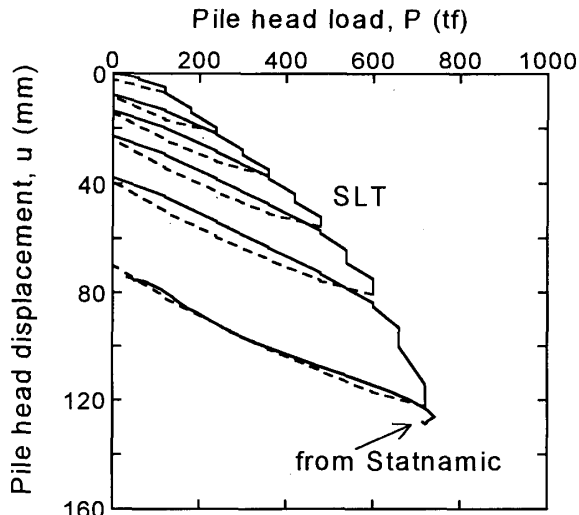


図6 静的荷重試験およびスタナミック試験から求めた荷重～沈下曲線の比較

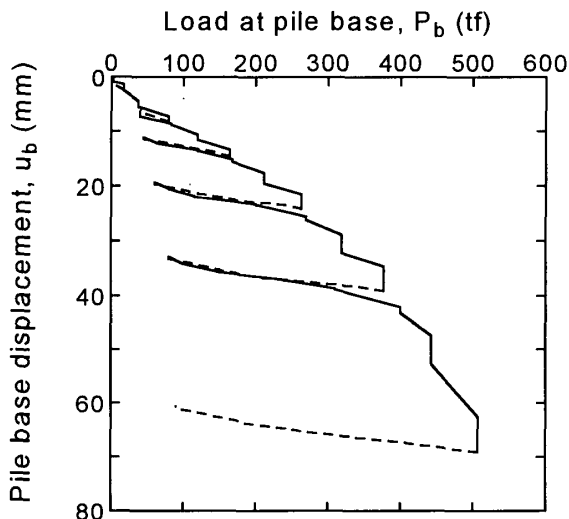


図7 静的荷重試験における杭先端荷重～杭先端沈下量曲線

図8は、両荷重試験時に測定した杭体内に設置した鉄筋計の歪み量より計算した軸力の比較と軸力差から計算した各断面での摩擦応力 $\tau$ の比較である。スタナミック試験時の軸力分布についての補正法は、確立されていない。実際、スタナミック試験時に測定した補正をしていない軸力分布は、特に摩擦低減区間では、静的荷重試験で得られた軸力分布とは異なる形状であった。しかし、スタナミック試験の除荷点時における測定軸力分布は、図8(a)に示すように、静的荷重試験における軸力分布とほぼ同様であった。

図8(b)には、静的荷重試験の最大荷重時の軸力分布およびスタナミック試験の除荷点時の軸力分布から求めた周面摩擦応力 $\tau$ の分布形状は若干異なるが、全周面摩擦力の値は両者でほぼ一致している。

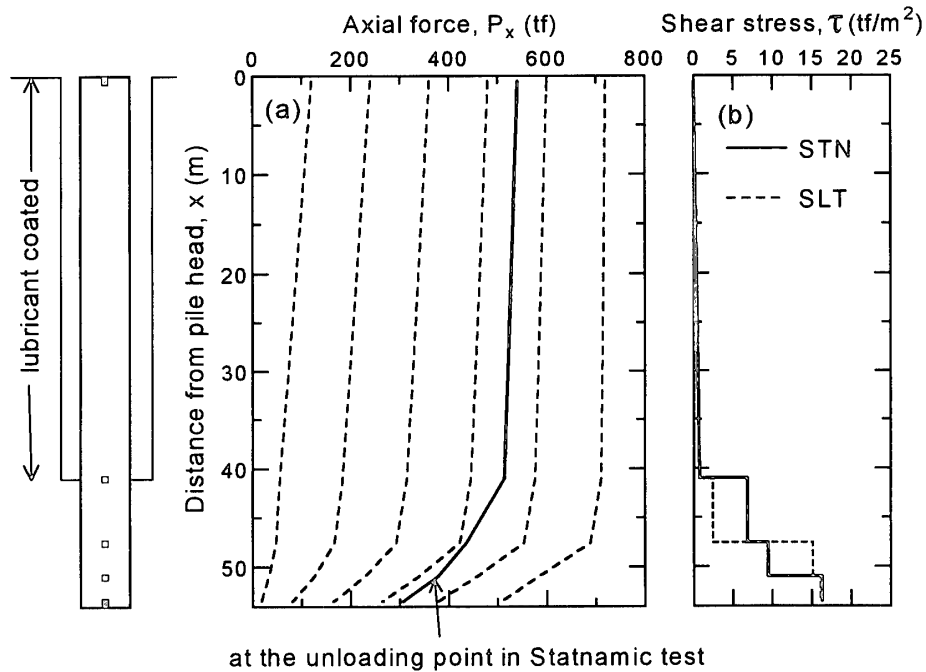


図8 静的載荷試験およびスタナミック試験時に測定した軸力分布の比較、および摩擦応力分布の比較

## 6. 結論

本研究では、埋め込み杭の中掘り拡大根固め工法によって砂れき層に施工されたPHC杭にスタナミック試験を実施し、この結果を静的載荷試験と比較した。本研究で得られた主な結論は、以下の通りである。

(1) これまでに実施された軽量の摩擦杭では、発生する慣性力は“静的”な荷重～沈下曲線を推定する上で無視できる小さな値であったが、当試験杭のように質量の比較的大きな長尺PHC杭で周面摩擦力が小さい場合には、大きな慣性力が発生するため、この効果は無視できない。

(2) 本試験のようにスタナミック試験時に杭頭に大きな加速度を生ずるような場合においても、慣性力の補正を行った除荷点法により、ほぼ静的載荷試験と同等な荷重～沈下曲線が得られた。

(3) 除荷点法によって得られた“静的”な最大荷重の値は、静的載荷試験における最大荷重とほぼ一致した。

(4) スタナミック試験の除荷点(杭の貫入速度が0となる点)における軸力分布および摩擦応力分布は、静的載荷試験の最大荷重時のそれらとほぼ一致した。

以上のことより、スタナミック試験によって、埋め込み杭工法で施工されたPHC杭においても実用上十分な精度で静的載荷試験の支持力性状を推定できる可能性が大きいものと考えられる。

ただし、このようなタイプの杭に対するスタナミック試験例は、現在のところこの1例しかない。本研究で得られた結論をより普遍的なものにするには、同様な試験データの蓄積、および長尺杭における波動現象効果の検討が必要であろう。

## 謝辞

本試験の実施にあたり、試験方法および解釈法において多くの議論をしていただいた急速載荷試験研究会(委員長: 広島大学・日下部治教授)の技術委員各位に厚く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 社団法人土質工学会編: 土質工学会誌特集「基礎構造の限界状態設計法」、Vol. 42, No.9, pp.1~50, 1994.9
- 2) 社団法人土質工学会編: 基礎構造の限界状態設計法に関するシポジウム発表論文集, 1995.5
- 3) Kuwabara, F., Aoki, H. and Kishida, H.: Towards limit state design standards for pile foundations, Proc. Int. Symp. Limit State Design in Geotech. Eng., pp.523~532, 1993
- 4) 石井清、中谷昌一、松井謙二、鈴木誠: 載荷試験結果を考慮した杭鉛直支持力の確率論的評価法、土木学会論文集、No.439/III-17, pp.45~52, 1991
- 5) Kusakabe, O., Kakurai, M. and Sandanbata, I.: Role of construction control in pile foundation in limit state design, Proc. Int. Symp. Limit State Design in Geotech. Eng., Vol.1/3, pp.513~522, 1993
- 6) Bermingham, P. and Janes, M.: An innovative approach to load testing of high capacity of piles, Proc. Int. Conf. Piling and Deep Foundations, pp.409~413, 1989
- 7) 日下部治、松本樹典: 急速載荷試験(スタナミック試験)方法とその実施例、土と基礎、Vol.43, No.5, pp.19~21, 1995.5
- 8) Yamashita, K., Kakurai, M. and Fukuhara, T.: Kinematic and dynamic loading tests of a cast-in-place concrete pile, Proc. 5th Int. Conf. and Exhibit. on Piling and Deep Foundations, Vol.2, pp.601~615, 1994
- 9) 松本樹典、Middendorp, P., Bermingham, P., 統 誠: 珪藻泥岩に打設された鋼管杭の急速載荷試験、土木学会論文集、No.517/III-31, pp.105~116, 1995.6
- 10) Middendorp, P., Bermingham, P. and Kuiper, B.: Statnamic load testing of foundation pile, Proc. 4th Int. Conf. on Appl. of Stress-Wave Theory to Piles, pp.585~588, 1993

(1995年6月6日原稿受理, 1995年9月13日採用決定)