

基礎の耐震補強のための回転貫入鋼管杭を用いた斜杭工法の開発

崎浜 博史* 根本 恒* 神永 敏幸* 森 清隆**

Development of the Inclined Piles Method using Helical Screw Piles for Seismic Retrofitting to the Building Foundations

by Hirofumi SAKIHAMA, Hisashi NEMOTO, Toshiyuki KAMINAGA and Kiyotaka MORI

Abstract

Presently a number of inadequate buildings exist, which are not adapted to current building codes, seismic retrofitting works have been in progress mainly for public buildings. Although considerable seismic strengthening methods for the superstructure are suggested and have been applied, very few are applied to the substructure. The inclined piles method using helical screw piles is therefore proposed as a means of seismic strengthening for the substructure. This method can increase the lateral resistance of the existing pile foundations of buildings. To confirm the lateral resistance performance of the inclined piles, lateral loading tests for piles are executed, the results of which are presented in this paper.

要 旨

現行基準の耐震性を満足しない既存不適格建物が数多く存在するなか、公共性の高い建物を中心に耐震補強が進められている。上部構造に対する耐震補強工法は様々なものが提案されており、適用事例も多い。しかし、基礎構造については、その破損が建物全体の安全性に及ぼす影響は小さいと考えられているためか、耐震補強の取り組みはあまりなされていない。回転貫入鋼管杭を用いた斜杭工法は、既存杭基礎の水平抵抗力を増加させる耐震補強工法として提案されたものである。ここでは、その性能を確認するために実施した水平載荷試験の結果を示す。

キーワード：杭基礎／耐震補強／斜杭／水平載荷試験／水平地盤反力係数

1. はじめに

現状、新耐震設計法以前に建設された建物に代表されるように、現行基準の耐震性が確保されていない既存不適格建物が数多く存在している。平成7年の阪神淡路大震災以後、特に学校建築など公共性の高い建物に対しては耐震補強が進められてきたが、民間の建物は取り残されている感が強い。しかし平成23年3月に発生した東日本大震災によって建物の耐震性への関心が以前にも増して高まっており、今後耐震補強に対する需要が増えることも予想される。

建物の上部構造を対象とする耐震補強工法は様々なものが提案されており、適用事例も多いが、

基礎構造に対する耐震補強工法は少ない。大地震時の基礎構造の耐震性について法的な規定がない上に、基礎の破損は建物全体の安全性（人命確保）に影響しないと考えられていることが背景にあると思われる。しかし、最近では日本建築学会等で大地震時の設計法の検討が進められているほか、建物の長寿命化に対する要求も高まってきている。そこで、既存の杭基礎を主な対象として、その耐震性を向上させるために、回転貫入鋼管杭斜杭を増し杭（補強杭）として用いる、基礎の耐震補強工法を開発した。

本報では、工法開発において斜杭の性能確認のために実施した水平載荷試験[1]～[10]の結果を示す。

* 技術研究所振動基礎研究室

** 建築本部構造設計部

2. 工法概要

図1に示すように、本工法では、回転貫入鋼管杭を斜杭として打設することで効率的な補強が可能となる。また、施工機械が比較的コンパクトなため、既存建物敷地の限られたスペースでの杭打設が可能である。斜杭は、水平力に対し杭軸直交方向の杭材あるいは地盤の抵抗力に加え、杭軸方向（押し込みあるいは引抜き）の抵抗にも期待できるように、先端翼を設けた上で斜め方向に打設する。斜杭の施工状況の一例を写真1に示す。

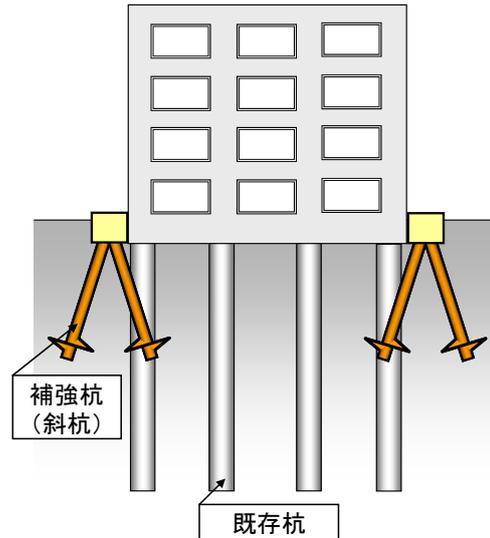


図1 工法イメージ

3. 斜杭の性能確認実験

斜杭を増し杭とする耐震補強の設計において、水平力が作用したときの杭に発生する応力と変形を予測する必要がある。斜杭の場合、特に杭軸方向の抵抗が加わることで大きな水平抵抗力を得ることができる特徴を有することから、その軸方向抵抗力を把握することが重要となる。図2に示すように、本工法では杭を梁要素、地盤をばね要素に置換した梁-ばねモデルによって応力解析を行うこととしているが、水平力作用時の斜杭の解析においては水平地盤ばねに加えて鉛直地盤ばねを設けることになる。その応力解析で必要となる斜杭の場合の水平地盤反力係数 k_h および、杭先端の鉛直地盤ばね K_v を実験から逆算し、既往の評価方法と比較する。これにより斜杭の性能を確認するとともに、設計に必要なばね値の基本データを得ることができる。



写真1 斜杭の施工状況

このような目的で、室内の模型地盤を用いた斜杭の水平載荷試験および、屋外の実地盤における実大の水平載荷試験を実施した。以下にそれぞれの試験結果を示す。なお、実験はすべて独立行政法人 建築研究所の屋外実験場および地盤・基礎実験棟にて行った。

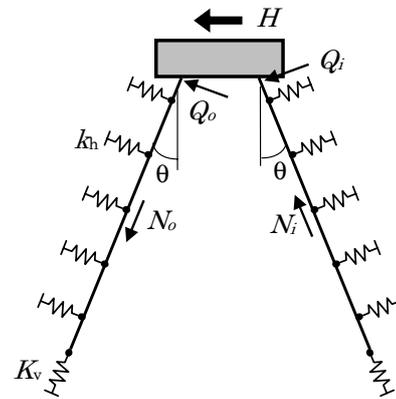


図2 梁-ばねモデル

3.1 室内水平載荷試験

a. 試験概要

斜杭の基本的な性能を確認するため、室内の大型せん断土槽(W3.6m x L10m x H5m)を用いた模型実験を行った。試験体一覧を表1に、試験体の配置を図3に示す。試験体S1は直杭の単杭、S2は斜杭の単杭で、S3は斜杭2本を組み合わせた組杭としている。杭はいずれも直径 =76.3 mmの鋼管杭で、斜杭の先端には直径 =200 mmの先端翼を設けている。また、直杭の先端は開端、斜杭の先端は閉塞としている。斜杭の傾斜角はいずれも15°としている。組杭

表1 室内水平載荷試験の試験体一覧

No.	杭の構成	ラフト・杭の仕様
S1	直杭単杭	直杭: φ 76.3 (t=2.8), L=2500 先端翼なし
S2	斜杭単杭	斜杭: φ 76.3 (t=2.8), L=2900 先端翼 φ 200 (t=9)
S3	組杭 (斜杭2本)	パイルキャップ: 500×850×450 斜杭: φ 76.3 (t=2.8), L=2900 先端翼 φ 200 (t=9)

(単位: mm)

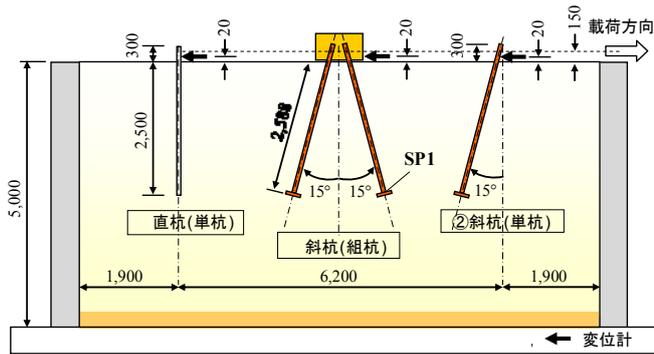


図3 試験体の配置 (断面)

の上部は鉄筋コンクリートのパイルキャップによって接合されている。組杭において、荷重面の後方に傾斜している杭をIN杭，前方に傾斜している杭をOUT杭と称する。荷重は反力壁に固定した油圧ジャッキによって行い、段階荷重方式による1方向単サイクル荷重とした[11]。

地盤は気乾状態の珪砂を土槽中に投入し、高さ500mmずつ10層に分けてタンパーで締固めて作成した。スウェーデン式サウンディング試験およびオートマチックラムサウンディング試験による N_{sw} 値、 N_d 値は2~4で、深さ方向に漸増している。

杭には150~600 mmピッチでひずみゲージを貼付し、土槽中に設置した状態で地盤を作成した。

b. 試験結果

i) 斜杭の負担水平力

図4に斜杭単杭(S2)および組杭(S3)の水平荷重—水平変位関係を示す。水平変位は杭突出部の測定変位を基に地表面変位に換算したものである。組杭(S3)は杭頭部をパイルキャップで接合していることで杭頭固定に近い条件となっている。その荷重は杭頭自由の斜杭単杭(S2)の3倍以上で推移している。

図5はひずみ測定値から算定した組杭(S3)の軸力(圧縮がマイナス)と変位の深度分布であるが、軸力は杭先端にまで到達していることがわかる。

斜杭単杭(S2)は水平荷重により引抜力が生じており、水平抵抗の一部を負担している。そこで、せん断力 Q 、軸力 N (杭長分の平均値)の実験結果から斜杭の負担水平力 H を式(1)によって求め、水平荷重 P と比較した(図6参照)。

$$H = Q \cos \theta + N \sin \theta \quad (1)$$

実験結果の Q 、 N および式(1)で算定した H 、軸力負担率($N \sin \theta / H$)と杭頭変位の推移を図7に示すが、 H

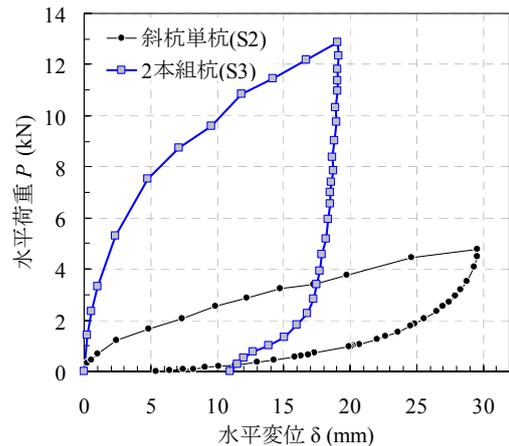


図4 水平荷重—水平変位関係

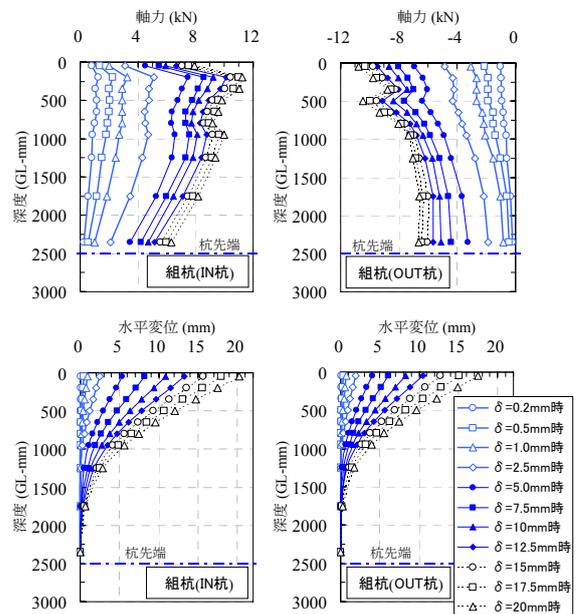


図5 組杭 S3 の軸力，変位の深度分布

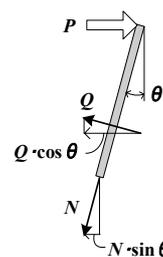


図6 斜杭の水平力の釣合

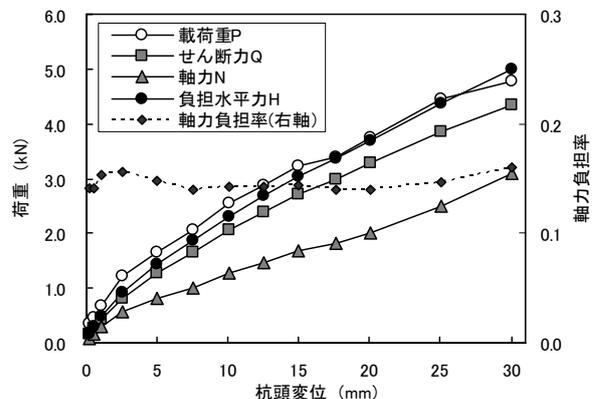


図7 斜杭 S2 の負担水平力および軸力負担率

は荷重 P とほぼ一致し、軸力負担率は14-16%で一定となった。ここから、斜杭工法では水平抵抗の一定量を軸方向の抵抗で負担していることがわかる。

組杭(S3)についても同様に、負担水平力 H を式(2)によって求めた(図8参照)。

$$H = (Q_i + Q_o) \cos \theta + (N_i + N_o) \sin \theta \quad (2)$$

ここで添字の*i*はIN杭, *o*はOUT杭を表し, θ は杭の傾斜角(=15°)を表す。図9に示すように, H は荷重 P とほぼ同様の値で推移している。斜杭単杭の場合は軸力よりもせん断力が大きかったが, 組杭では逆に軸力が大きい傾向を示した。IN杭, OUT杭それぞれの水平力負担率を図10に示す。当初はIN杭の負担率が大きい, 水平変位10mm程度を境にOUT杭の負担率が逆転している。軸力負担率は水平変位とともに漸減する傾向が見られるが, 概ね40%前後の一定割合を負担していることがわかる。

ii) 水平地盤反力係数 k_h

図4に示した $P-\delta$ 関係から, 弾性支承梁の理論で地盤を一様とした場合の水平地盤反力係数 k_h を逆算した結果を図11に示す。ここで, 組杭は杭頭固定と仮定した。表2に杭径の3%相当, および10mmの変位量に対応した k_h を示す。計算値としての基準水平地盤反力係数 k_{h0} は以下の式にて算定した。

$$k_{h0} = \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4} \quad (3)$$

ここに, α : 調査方法と土質から決まる係数=80, E_0 : 地盤の変形係数=1,400 kN/m² (地盤調査結果から $N=2$ とした推定値), D : 無次元化杭径=7.63, である。 k_{h0} に比べ斜杭の k_{h10} は小さいが, 小口径の杭の場合, 杭径の3%相当あるいは5%相当の水平変位時の k_h が k_{h0} に対応するといわれている[12]。ここでの結果は $k_{h3\%}$ が k_{h0} にほぼ対応するようである。

iii) 鉛直地盤反力係数 k_v

組杭(S3)は, パイルキャップの鉛直変位および水平変位の測定結果より, 系全体の沈下および回転によるOUT杭の沈下が生じていたことがわかる。これらの沈下量を測定変位から推定するとともに, 杭先端地盤の鉛直地盤反力係数の算定を試みる。

系全体の沈下量 s_1 は, パイルキャップ上面にて測定された鉛直変位より推定する。図12に示す $D_7 \sim D_9$ が鉛直変位の測定値で, D_{10} はパイルキャップ前方端から60mmの位置における鉛直変位の計算

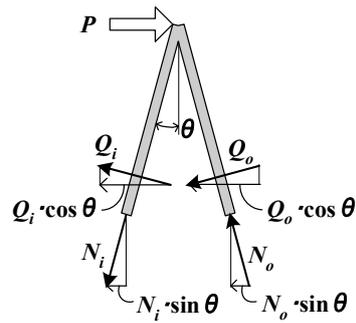


図8 組杭の水平力の釣合

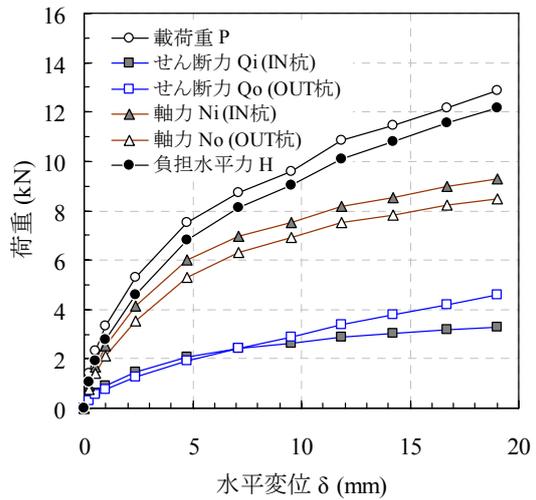


図9 組杭の杭応力の推移

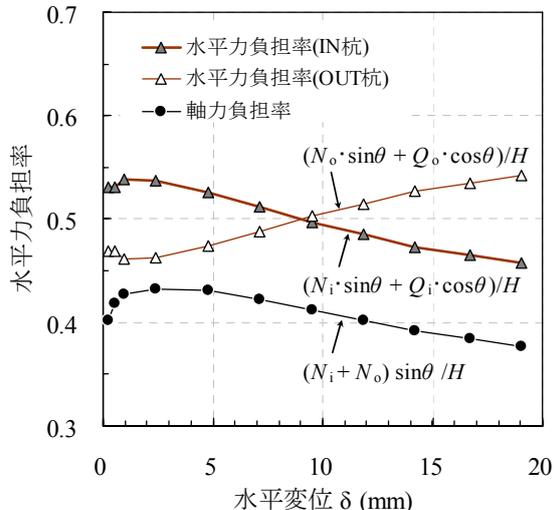


図10 組杭の水平力負担率

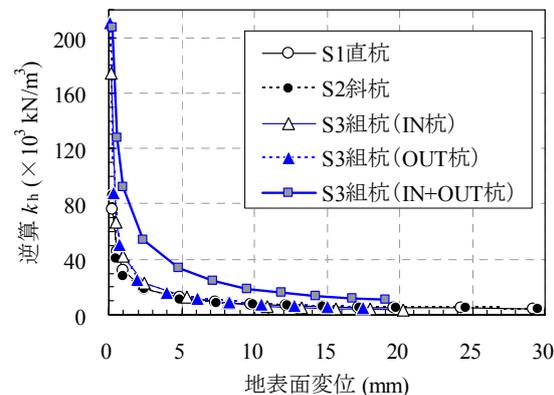


図11 逆算 k_h 値

値である。

$$D_{10} = (D_{78} + D_9) \cdot 730/780 - D_9 \quad (4)$$

$$D_{78} = (D_7 + D_8) / 2 \quad (5)$$

これより、系全体の沈下量 s_1 は次のように求められる。

$$s_1 = (D_{10} + D_9) / 2 - D_9$$

$$= 0.468 D_{78} - 0.532 D_9 \quad [\text{mm}] \quad (6)$$

(但し、変位計 $D_7 \sim D_9$ の出力を絶対値とした場合)

図 13 は、パイルキャップが回転することによって OUT 杭先端に生じる沈下を模式的に示したものである。その回転量 θ_r および回転中心位置までの距離 l_0 は、パイルキャップ側面の水平変位測定値 D_0 、 D_1 より以下のように算定される。

$$\theta_r = \tan^{-1}(D_0 / l_0) \quad [\text{rad.}] \quad (7)$$

$$l_0 = 400 / (D_1 / D_0 - 1) \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

これより、回転による OUT 杭先端の沈下量 s_2 は次のように求められる。

$$s_2 = d \cos \gamma \quad [\text{mm}] \quad (9)$$

ここに、

$$d = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin \theta_r \quad [\text{mm}] \quad (10)$$

$$\gamma = \tan^{-1}(a/b) + \theta_r / 2 \quad [\text{rad.}] \quad (11)$$

$$a = 2570 - l_0 \quad [\text{mm}] \quad (12)$$

$$b = 2729 \tan 15^\circ \quad [\text{mm}] \quad (13)$$

結局、OUT 杭先端における鉛直方向の沈下量 s は、以下のように求められる。

$$s = s_1 + s_2 - \Delta l \quad [\text{mm}] \quad (14)$$

ここに、

$$\Delta l : \text{杭の縮み量} = \varepsilon_{ai} \cdot l_i \quad [\text{mm}]$$

ε_{ai} : 測定区間毎の軸ひずみ

l_i : 測定区間長

OUT 杭先端の鉛直地盤ばね K_v および、鉛直地盤反力係数 k_v は以下のように求められる。

$$K_v = N_l / s \quad [\text{kN/m}] \quad (15)$$

$$k_v = K_v / A_0 \quad [\text{kN/m}^3] \quad (16)$$

表 2 逆算 k_h 値

試験体		実測値		計算値
		$k_{h3\%}$	k_{h10}	
S1	直杭	19.4	7.9	24.4
S2	斜杭	18.2	7.6	
S3	組杭(IN杭)	20.8	6.6	
	組杭(OUT杭)	22.9	7.6	
	組杭(IN+OUT杭)	49.1	18.3	

(単位: $\times 10^3 \text{ kN/m}^3$)

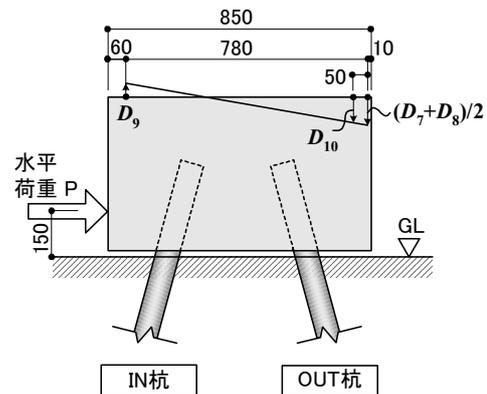


図 12 組杭の鉛直変位

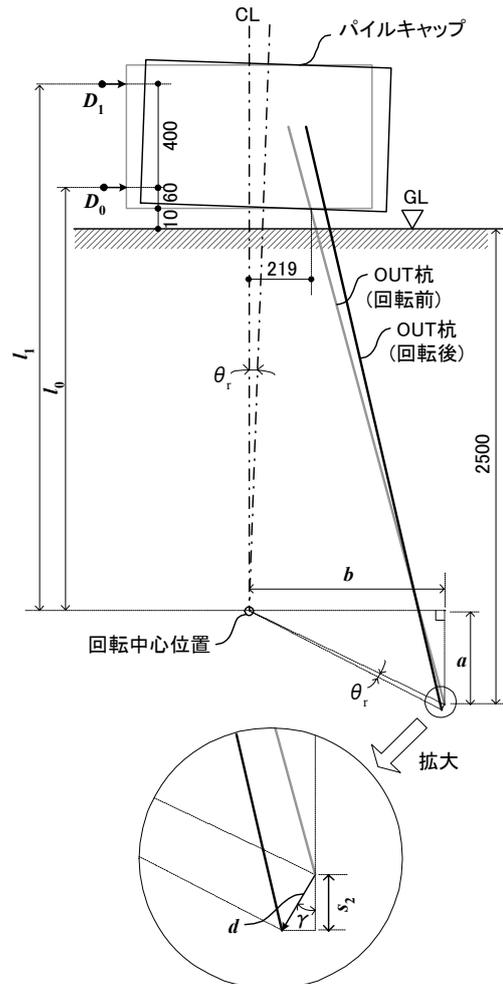


図 13 パイルキャップの回転による OUT 杭先端の沈下量

ここに、

N_i : 杭先端到達軸力 [kN]

A_o : OUT 杭先端の面積 (= 0.0314 m²)

OUT 杭先端の沈下量および縮み量の算定結果を図14に示す。系全体の沈下量 s_1 は、荷重段階で $\delta=10$ mm程度までは増加する傾向にあるが、以降は引き抜き方向に変位していることがわかる。また、OUT 杭先端の沈下量 s は最大約6.6 mm生じている。OUT 杭先端の鉛直地盤反力係数 k_v の算定結果を図15に示す。OUT 杭の k_v は47,000~31,000 kN/m³で、 k_h と同様に強い非線形性を示している。

iv) 杭周辺地盤の摩擦ばね K_f

組杭の OUT 杭は、剛体回転の影響もあって明らかな沈下が生じていることから、この杭を対象として杭周辺地盤における摩擦ばね K_f の評価を試みる。図 16 に示すように、杭の沈下量は回転によって生じる沈下 s_r と系全体の沈下 s_a の和とした。回転による各測点の沈下量は、前項と同様の方法で算定した。杭周辺地盤の摩擦抵抗力 R_f は、各測点で得られた軸力 N の差分とし、これを各測定区間における沈下量で除すことによって摩擦ばねが得られる。なお、パイルキャップ下端から最初の測点まで (図

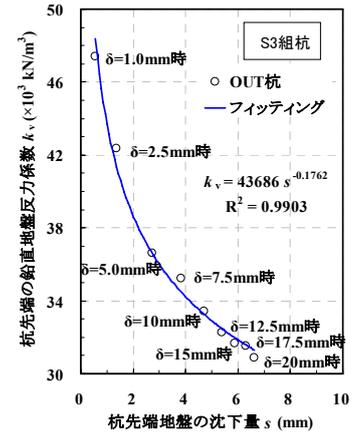
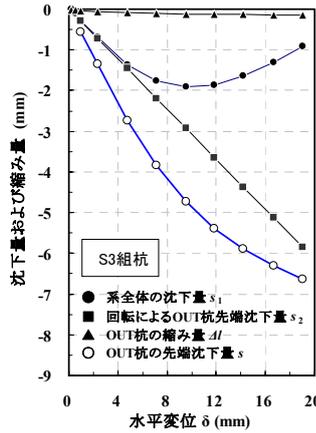


図 14 組杭の沈下量および 図 15 組杭の $k_v - s$ 関係
縮み量の推移

中の l_1 の区間) の軸力は一樣と仮定した。

図17に測定区間毎の摩擦ばねの算定結果を示すが、非常にばらつきが大きい。GL-350~500 mmの区間を除いた平均値に対してフィッティングした結果を図18に示す。今回の実験の範囲において、杭周辺地盤の摩擦ばねは概ね120 kN/mに収束する傾向を示した。図19は前項で求めた杭先端地盤の鉛直ばねと、ここで求めた摩擦ばねとの関係を示したものである。摩擦ばね値は鉛直ばね値の1/3~1/9程度で推移していることがわかる。

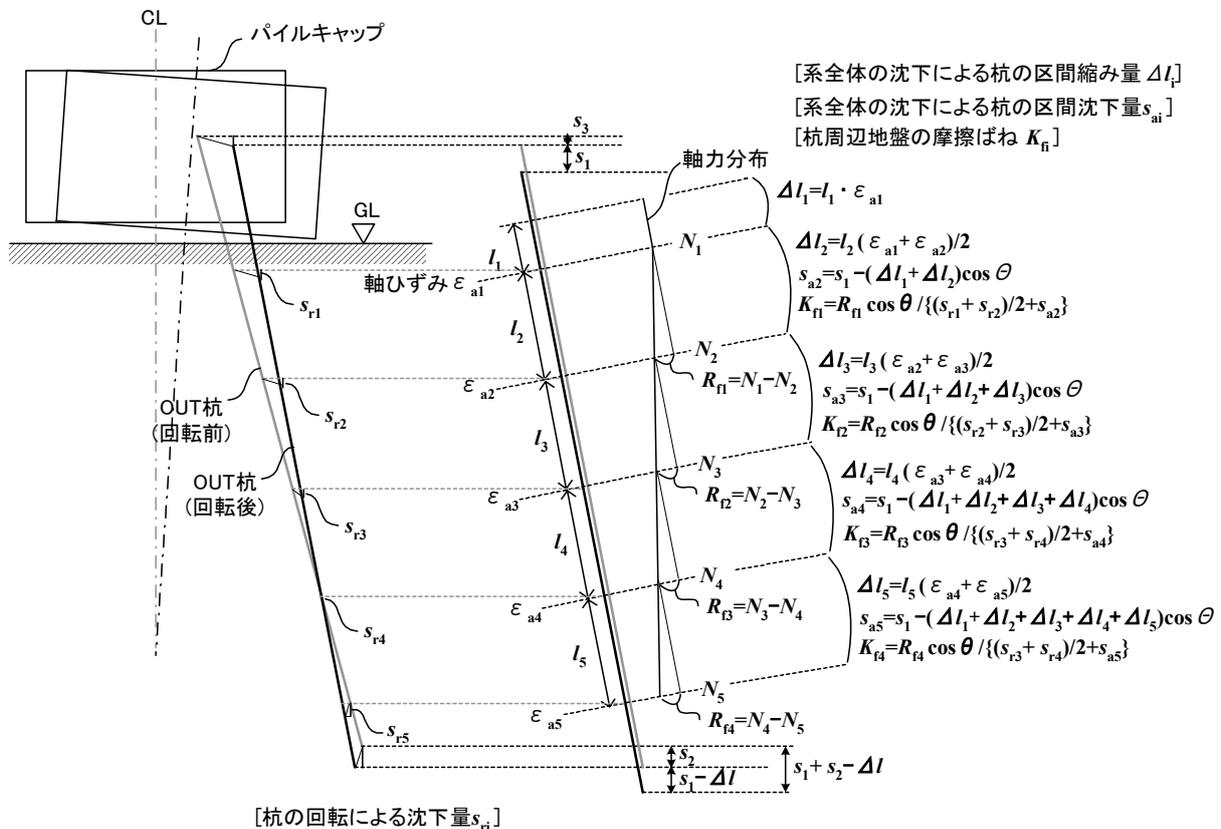


図 16 組杭(OUT 杭)の摩擦ばね算定方法

v) 地盤の鉛直ばね、摩擦ばねの推定値

組杭の OUT 杭の実験結果から算出された地盤ばね K_v 、 K_f と比較する目的で、先端翼付きの直杭を想定して杭支持力を算定し、先端支持力、周面摩擦力それぞれの荷重-変位関係を仮定した上で、実験結果を勘案して 5 mm の沈下量に相当する地盤ばねを推定する。なお、ここでは杭体の縮み量は考慮しない。

杭の先端支持力 R_p は、先端閉塞翼付き杭の経験式によって以下のように求められる。

$$R_p = \alpha \times N \times A_p = 150 \times 3 \times (0.2^2 \pi / 4) = 14.1 \text{ kN} \quad (17)$$

ここに、

α : 先端支持力係数 = 150

N : 杭先端地盤の N 値 = 3

A_p : 杭先端の断面積

杭周面の摩擦力 R_f は、クーロンの摩擦則に基づく推定式によって以下のように求められる。

$$R_f = \tau \times D \times \pi \times L \quad (18)$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \delta \quad (19)$$

ここに、

c : 粘着力 = 0

σ_n : 杭周面に作用する水平応力

$$= K \cdot \sigma'_v = 0.5 \times 18.75 = 9.4 \text{ kN/m}^2$$

$$K = \text{静止土圧係数} = 1 - \sin \phi' = 0.5$$

σ'_v = 砂地盤の平均有効鉛直応力度

$$= \gamma \cdot z = 15.0 \times (2.5/2) = 18.75 \text{ kN/m}^2$$

ϕ' : 砂の内部摩擦角 = 30°

δ : 砂・杭周面間の壁面摩擦角 = 2 ϕ' / 3 = 20°

$$\therefore \tau = 9.4 \times 0.364 = 3.4 \text{ kN/m}^2$$

$$R_f = 3.4 \times 0.0762 \times \pi \times 2.5 = 2.0 \text{ kN} \quad (20)$$

杭の極限支持力 R_u は、先端支持力 R_p と杭周面摩擦力 R_f の和として以下のように求められる。

$$R_u = R_p + R_f = 14.1 + 2.0 = 16.1 \text{ kN} \quad (21)$$

上記の支持力より、地盤ばねを以下の方法で推定する。

・杭先端地盤ばね:

杭が 5 mm 沈下した時の先端支持力を「建築基礎構造設計指針」[13]に示された場所打ち杭の先端荷重-沈下関係を参考に $0.4 R_p$ と仮定して、その時の地盤ばね K_v を算定する (図 20)。

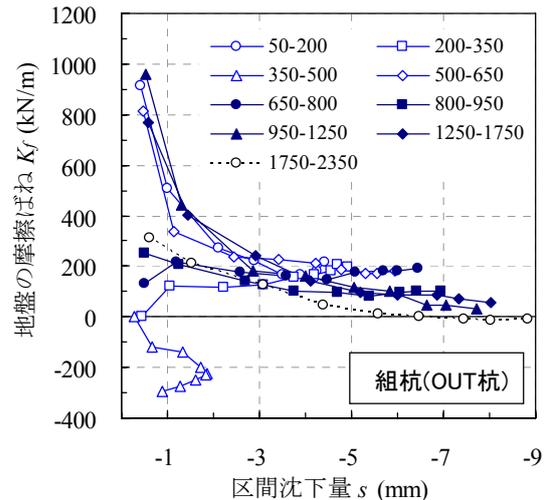


図 17 組杭 (OUT 杭) の K_f - s 関係

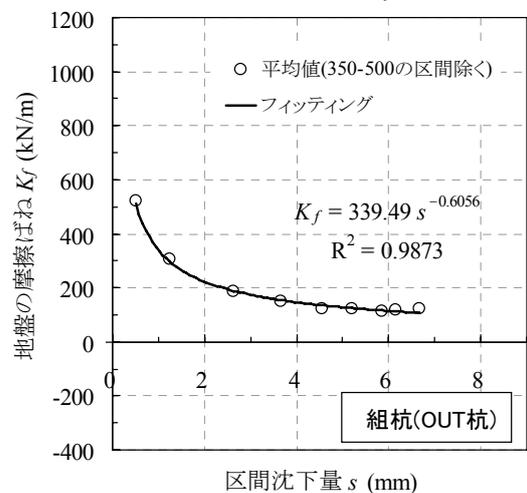


図 18 組杭 (OUT 杭) の K_f 平均値

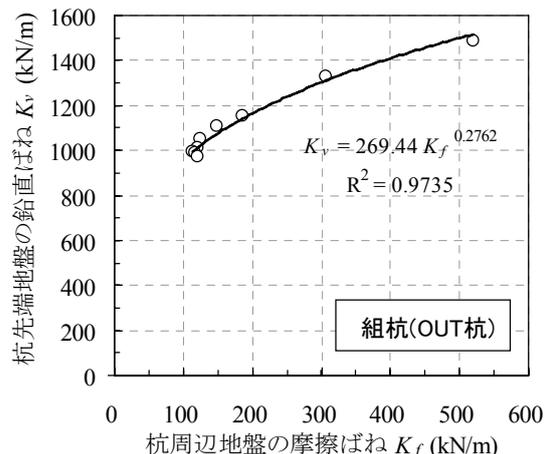


図 19 組杭 (OUT 杭) の K_v と K_f の関係

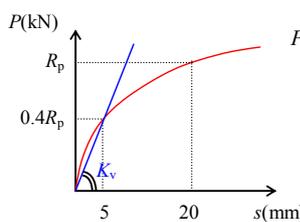


図 20 先端地盤ばね

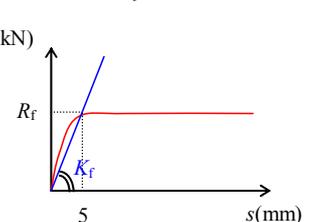


図 21 周面摩擦ばね

表 3 地盤ばねの比較

ばね	杭先端ばね K_v (kN/m)	杭周面ばね K_f (kN/m)
推定値	1,120	400
実測値	1,005	120

$$K_v = 5.6/0.005 = 1,120 \text{ kN/m} \quad (22)$$

・杭周面摩擦ばね：

杭が 5 mm 沈下した時、極限の周面摩擦抵抗が発揮されると考え、その時の地盤ばね K_f を算定する(図 21)。

$$K_f = 2.0/0.005 = 400 \text{ kN/m} \quad (23)$$

実験による地盤ばね(実測値)は以下で求め、沈下量 5 mm に相当する計算上の地盤ばねと比較する。

・杭先端地盤ばね：

図 15 より、沈下量 5 mm に相当する先端地盤の鉛直地盤反力度 k_v を $32,000 \text{ kN/m}^3$ とし、翼径 200 mm の有効面積を考えると、

$$K_v = 32,000 \times (0.2^2 \pi/4) = 1,005 \text{ kN/m} \quad (24)$$

・杭周面摩擦ばね：

図 18 より、沈下量 5 mm に相当する概略 K_f は、

$$K_f = 120 \text{ kN/m} \quad (25)$$

表 3 に示すように、推定値を実験結果と比較すると、杭体の縮み量は無視しているものの先端ばね K_v についてはほぼ同等である。一方、 K_f については、実験結果は小さめの値を与えているといえる。

実測による杭周面の摩擦ばねが小さくなった理由として、実測値そのもののばらつきの他に、傾斜の影響や推定値の精度などが考えられる。一般に、杭の支持力において、先端支持力に比べて周面摩擦力はばらつきが大きい。また、ここで試験に供した杭は、あらかじめ土槽中に固定された杭の周囲に砂を投入してタンパーで締め固める方法で設置されたものである。特に OUT 杭のような斜杭の場合、杭周辺の砂は均一に締め固めにくいことが予想され、杭周面摩擦力が小さくなる原因となりうる。さらに、OUT 杭の実測値は、剛なパイルキャップの回転に伴って地盤中に押し込まれた状況から算出された値である。この場合、杭は軸方向の杭周面-地盤間で単純にせん断される場合とは異なった形で押し込ま

表 4 実大水平載荷試験の試験体一覧

No.	杭の構成	ラフト・杭の仕様
O1	直杭単杭	ラフト: 600×600×600
		直杭: ϕ 216.3 (t=8.2), L=6200 先端翼 ϕ 550 (t=22)
O2	組杭 (直杭1本 +斜杭2本)	ラフト: 1800×600×600
		直杭: O1と同じ 斜杭: ϕ 216.3 (t=8.2), L=6440 先端翼 ϕ 550 (t=22)
O3	組杭 (O2と同じ)	ラフト: 600×1800×600 杭: O2と同じ

(単位: mm)

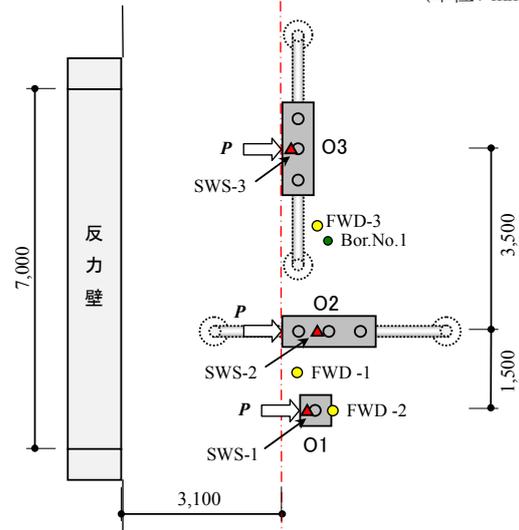


図 22 試験体の平面配置

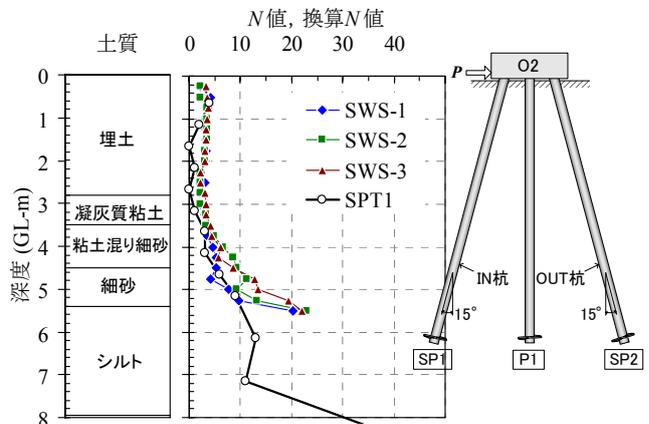


図 23 土質柱状図および O2 断面図

れたと推察される。実験と推定式で杭周面摩擦の発現機構が異なることが、実測値と推定値との差の一因とも考えられる。

3.2 実大水平載荷試験

a. 試験概要

自然地盤となる屋外実験場では、実大サイズの鋼管杭を打設して試験に供した。試験体の一覧を表 4 に、平面配置を図 22 に示す。試験体 O1 は直杭単

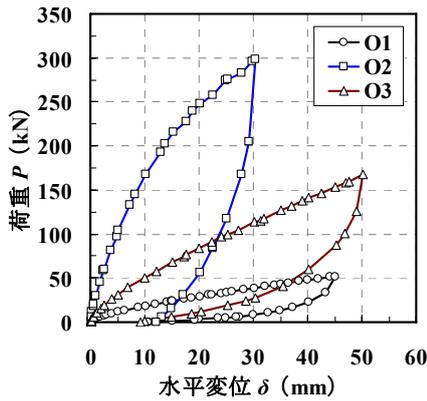


図 24 水平荷重—水平変位関係

杭, O2 は直杭 1 本と傾斜角 15° の斜杭 2 本で構成され, 杭頭部は鉄筋コンクリートのラフトで接合されている。O3 は O2 と同じ諸元で, 荷重方向が 90° 異なるのみである。杭はいずれも直径 =216.3 mm の先端閉塞鋼管杭で, 先端には直径 =550 mm の先端翼を設けている。

図 23 に土質柱状図および N 値の深度分布と O2 の断面図を示す。各試験体位置近傍で実施したスウェーデン式サウンディング試験(SWS)の換算 N 値はほぼ同様の分布を示しており, 地盤条件のばらつきは少ないといえる。小型 FWD 試験の結果から算定された地表面付近の変形係数は 2.4~10.1 MN/m² とやや差が見られた。各試験体の直杭, 斜杭ともに杭先端は GL-6.2 m の洪積シルト層に定着している。荷重面の後方に傾斜している杭を IN 杭, 前方に傾斜している杭を OUT 杭と称する。荷重は反力壁に固定した油圧ジャッキによって行い, 段階荷重方式による 1 方向単サイクル荷重とした。

b. 試験結果

i) 斜杭の負担水平力

図 24 に各試験体の水平荷重(P)—水平変位()関係を示す。直杭 1 本の O1 に対して, 斜杭 2 本を追加した O2 の同変位時の荷重は 7~9 倍で推移している。一方, O2 と同諸元で荷重方向をその直交方向とした O3 の荷重は, O1 の 3 倍で推移している。O1, O3 が杭頭自由の荷重条件であるのに対し, O2 は杭頭固定に近い条件であるため, 斜杭の効果と相まって大きな水平抵抗を示したものと考えられる。

図 25 は杭のひずみ測定値から算定した O2 の軸力 N (圧縮をマイナスで表記)の深度分布を示したものである。斜杭の OUT 杭となる SP2 には圧縮軸力が, IN 杭となる SP1 および直杭(P1)には引張軸力が生じている。

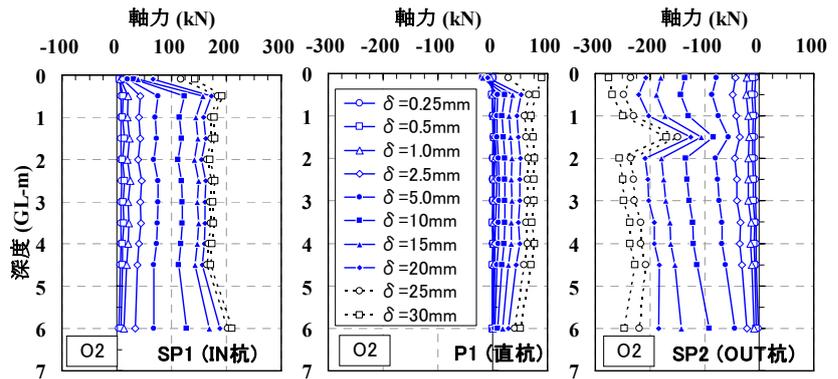


図 25 O2 の軸力分布

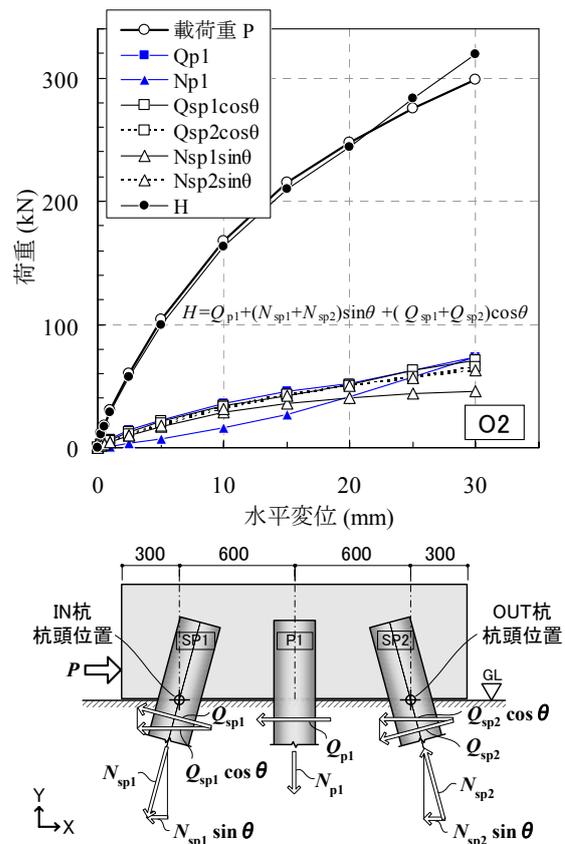


図 26 O2 の杭応力の推移

図 26 は O2 に関して, 杭のせん断力および軸力の水平成分を水平変位との関係で示したものである。式(26)に示すように, O2 の杭 3 本の水平抵抗力の和, すなわち直杭のせん断力 Q_{p1} , 斜杭のせん断力の水平成分 $(Q_{sp1} + Q_{sp2}) \cos \theta$, 同軸力の水平成分 $(N_{sp1} + N_{sp2}) \sin \theta$ の合計 H は, ほぼ荷重と一致している。ここで添字の p1 は直杭, sp1 は IN 杭, sp2 は OUT 杭を表し, θ は杭の傾斜角を表す。

$$H = Q_{p1} + (Q_{sp1} + Q_{sp2}) \cos \theta + (N_{sp1} + N_{sp2}) \sin \theta \quad (26)$$

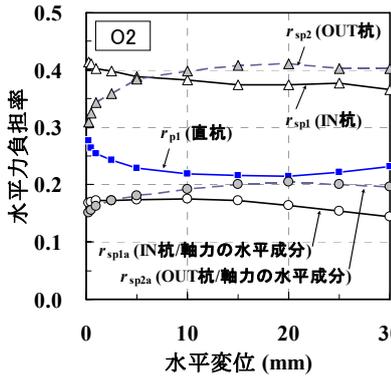


図 27 杭の水平力負担率

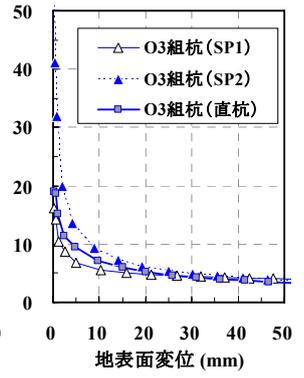
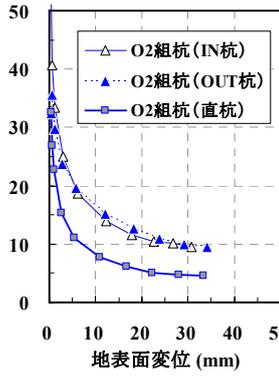
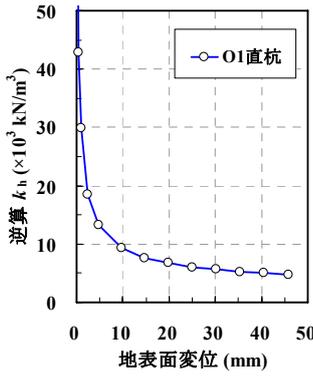


図 28 逆算 k_h 値

直杭の水平力負担率 r_{p1} , 斜杭の水平力負担率 r_{sp1} , r_{sp2} , および斜杭の軸力の水平成分の割合 r_{sp1a} , r_{sp2a} を式(27)~(31)で定義した (図 26 参照)。

$$r_{p1} = Q_{p1} / H \quad (27)$$

$$r_{sp1} = (Q_{sp1} \cos \theta + N_{sp1} \sin \theta) / H \quad (28)$$

$$r_{sp2} = (Q_{sp2} \cos \theta + N_{sp2} \sin \theta) / H \quad (29)$$

$$r_{sp1a} = N_{sp1} \sin \theta / H \quad (30)$$

$$r_{sp2a} = N_{sp2} \sin \theta / H \quad (31)$$

図 27 に示すように、直杭の水平力負担率(r_{p1})は全水平抵抗力の 24 %前後で推移しているのに対し、斜杭は IN 杭(r_{sp1})で平均 39 %, OUT 杭(r_{sp2})で平均 37 %を負担している。斜杭の負担率のうち、軸力の水平成分が IN 杭(r_{sp1a})で平均 17 %, OUT 杭(r_{sp2a})で平均 18 %を占めており、それらを合計すると全水平抵抗力の 3 割強を斜杭の軸力によって負担していたことになる。

ii) 水平地盤反力係数 k_h

図 28 に各試験体、各杭の逆算 k_h と地表面変位 y_0 との関係をもとめた。10 mm 程度の変位における k_h は大きく 2 つのグループに分けられ、試験体に関わらず、直杭と O3 の斜杭は大局的には同程度の値を示すが、全般に O3 の k_h は小さい。一方、O2 の斜杭は明らかに大きな k_h を示すとともに、荷重過程で IN 杭と OUT 杭の k_h は逆転する傾向が見られる。表 5 に杭径の 1 %相当, 3 %相当, および 10 mm の変位に対応する k_h を示す。また、式(3)で求めた変位 10 mm 相当の基準水平地盤反力係数 k_{h0} も併せて示す。このとき、 $\alpha=80$, $E_0=2,000 \text{ kN/m}^2$ (孔内水平荷重試験結果に基づく推定値), $D=21.63$, とした。前述のように、小口径の杭の場合、変位 10 mm 時の k_h は k_{h0} に直接対応しないものと考えら

表 5 逆算 k_h 値

試験体		実測値			計算値
		$k_{h1\%}$	$k_{h3\%}$	$k_{h10\text{mm}}$	
O1	直杭(P1)	23.1	13.6	11.0	16.0
	直杭(P1)	18.7	11.3	9.3	
O2	斜杭IN(SP1)	37.2	25.0	20.7	
	斜杭OUT(SP2)	32.6	25.0	22.2	
O3	直杭(P1)	13.8	9.1	7.7	
	斜杭(SP1)	9.9	7.3	6.4	
	斜杭(SP2)	17.8	10.7	8.8	

(単位: $\times 10^3 \text{ kN/m}^3$)

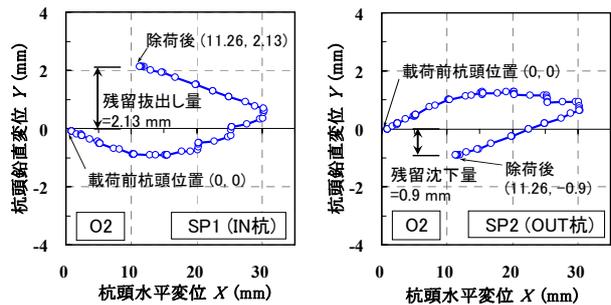


図 29 O2 斜杭の杭頭変位

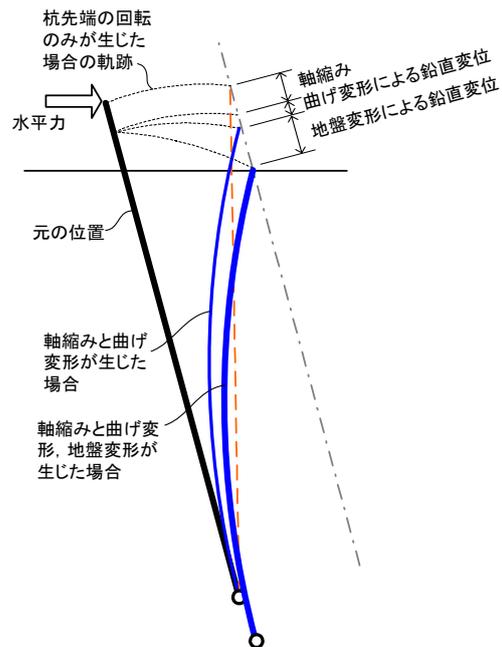


図 30 O2(OUT 杭)の水平荷重時イメージ

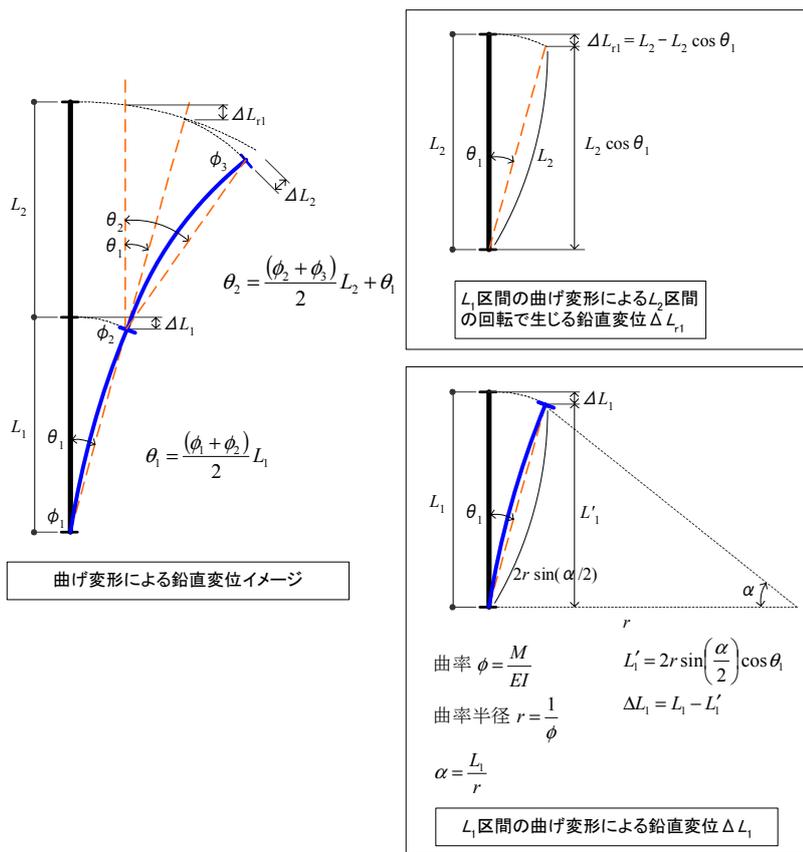


図 31 杭の曲げ変形に伴う杭軸方向の鉛直変位算定

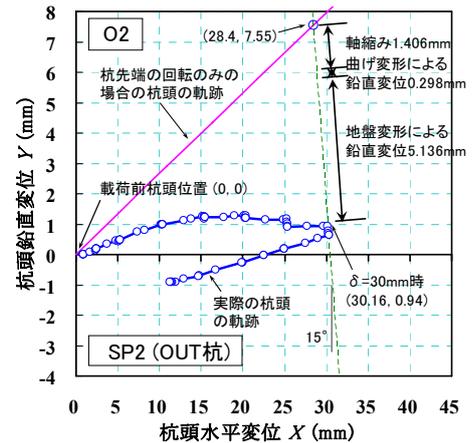


図 32 O2 の OUT 杭先端地盤の鉛直変位

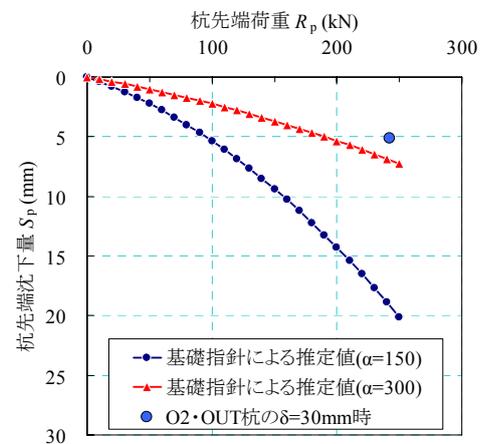


図 33 O2・OUT 杭の荷重-沈下量推定値

れる。ここでは、O1 と O3、O2 の直杭は、 $k_{h1}\%$ が k_{h0} とほぼ対応するようである。一方、O2 の斜杭はそれらより大きな値を示し、軸力による寄与が表れている。

iii) 鉛直地盤ばね K_v

ラフトの水平および鉛直変位の測定値に基づいて、斜杭の杭頭位置（図26参照）の推移を算定した結果を図29に示す。IN杭の杭頭は水平変位15 mm程度までは下方に推移し、その後上方へ変位している。OUT杭はその逆の挙動を示している。除荷後の鉛直変位を見ると、IN杭は拔出し、OUT杭は沈下の残留変位が生じていることがわかる。

O2 の OUT 杭の水平荷重時のイメージを図 30 に示す。OUT 杭には圧縮軸力が作用し、軸方向の縮みが生じる。加えて、杭の曲げ変形による鉛直変位も生じる。杭先端の地盤変形による鉛直変位を、杭先端の回転のみが生じた場合の杭頭位置から、軸縮みと曲げ変形による鉛直変位を差し引いた値で定義する。曲げ変形によって生じる杭軸方向の鉛直変位は、図 31 のように定式化した。ラフトの変位と杭

のひずみの測定値に基づいて、水平変位 30 mm 時における地盤の鉛直変位を求めた結果を図 32 に示す。杭の軸縮みは約 1.4 mm、曲げ変形による鉛直変位は約 0.3 mm、地盤変形による鉛直変位は約 5.1 mm と得られた。このときの杭の軸力を地盤変位で除すことによって、地盤の鉛直ばね K_v は 47.1 MN/m と得られた。

杭先端荷重-沈下量関係を「建築基礎構造設計指針」[13]に準じて算定し、上で求めた値をプロットすると図33のようになる。式(17)に示したように、先端閉塞翼付き杭の先端支持力係数 α は、経験的には $\alpha=150$ といわれているが、ここでは $\alpha=300$ とした場合に近い結果となっている。

4. まとめ

回転貫入鋼管杭を用いた斜杭工法に関して、斜杭の性能を確認するために水平荷重試験を実施し、以下のような結果が得られた。

[室内水平荷重試験]

- 1) 傾斜角15°の斜杭を2本組み合わせさせた組杭において、斜杭に生じた軸力の水平成分は全水平抵抗力の約40%を占めていた。
- 2) 斜杭の水平地盤反力係数 k_h は直杭とほぼ同程度の値を示し、基準水平地盤反力係数 k_{h0} に対しては杭径の3%相当変位時の $k_{h3\%}$ が対応する傾向を示した。
- 3) 組杭のOUT杭を対象に算定した地盤の鉛直ばね、摩擦ばねは、既往の評価方法で得られたばね値と概ね対応する結果となった。

[実大水平載荷試験]

- 1) 直杭1本と傾斜角15°の斜杭2本を組み合わせさせた組杭において、斜杭に生じた軸力の水平成分は全水平抵抗力の約35%を占めていた。
- 2) 斜杭の k_h は直杭より高い値を示した。一方、直杭の k_h は、杭径の1%相当変位時の $k_{h1\%}$ が k_{h0} に対応する傾向を示した。
- 3) 組杭のOUT杭を対象に算定した地盤の鉛直ばねは、既往の評価方法で得られたばね値に比べてやや高い値を示した。

以上のように、斜杭の軸方向抵抗力を把握するとともに、実験結果から逆算した水平地盤反力係数、鉛直地盤反力係数と既往の評価方法を比較し、設計に必要なばね値の基本データを求めることができた。

基礎の耐震補強のための回転貫入鋼管杭を用いた斜杭工法は4社共研（安藤建設、戸田建設、千代田工営、西松建設）によって開発されたものである。

参考文献

- [1] 金子治, 武内義夫, 根本恒, 平出務: 杭基礎の耐震補強のための増し杭工法に関する研究 (その1: 回転貫入杭を用いた斜杭工法の水平抵抗), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.553-554, 2010. 9
- [2] 金井重夫, 佐野大作, 崎浜博史, 新井洋: 杭基礎の耐震補強のための増し杭工法に関する研究 (その2: 斜杭単杭および組杭の静的水平載荷試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.555-556, 2010. 9
- [3] 神永敏幸, 後藤教夫, 金子治, 井上波彦: 増し杭工法による杭基礎の耐震補強効果に関する振

動実験 (その1: 上部構造の応答に対する影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.557-558, 2010. 9

- [4] 田口智也, 森清隆, 深谷利行, 平出務: 増し杭工法による杭基礎の耐震補強効果に関する振動実験 (その2: 既存杭に対する補強効果), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.559-560, 2010. 9
- [5] 新井寿昭, 金井重夫, 成田修英, 新井洋: 増し杭工法による杭基礎の耐震補強効果に関する振動実験 (その3: シミュレーション解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.561-562, 2010. 9
- [6] 佐野大作, 新井寿昭, 根本恒, 金井重夫, 平出務: 回転貫入鋼管杭斜杭工法による既存杭基礎の耐震補強に関する研究 (その1: 実験概要および室内載荷試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.519-520, 2011. 8
- [7] 崎浜博史, 後藤教夫, 深谷利行, 田口智也: 回転貫入鋼管杭斜杭工法による既存杭基礎の耐震補強に関する研究 (その2: 原位置における実大杭の静的水平載荷試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.521-522, 2011. 8
- [8] 金井重夫, 金子治, 根本恒, 新井寿昭: 回転貫入鋼管杭斜杭工法による既存杭基礎の耐震補強に関する研究 (その3: 水平地盤反力係数), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.523-524, 2011. 8
- [9] 新井寿昭, 金子治, 金井重夫, 崎浜博史: 回転貫入鋼管杭斜杭工法による既存杭基礎の耐震補強に関する研究 (その4: シミュレーション解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.525-526, 2011. 8
- [10] 成田修英, 神永敏幸, 後藤教夫, 平出務, 金子治: 回転貫入鋼管杭斜杭工法による既存杭基礎の耐震補強に関する研究 (その5: 室内起振機試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.527-528, 2011. 8
- [11] 地盤工学会: 杭の水平載荷試験方法・同解説, 2010
- [12] 中谷昌一, 白戸真大, 井落久貴, 松井謙二: 水平力を受ける杭の弾性限界状態に関する研究, 土木学会論文集C, Vol.64, No.3, pp.616-628, 2008
- [13] 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001