

大口径鋼管杭の鉛直支持力について

Vertical bearing capacity of large diameter steel pipe piles for Tokyo port seaside road

菊池 喜昭*, 佐々木 宏**, 下司 弘之***, 才村 幸生****, 山下 久男*****
 Yoshiaki KIKUCHI, Hiroshi SASAKI, Hiroyuki GESHI, Yukio SAIMURA, Hisao YAMASHITA

*博 (工), 独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 基礎工研究室 室長 (〒239-0826 横須賀市長瀬 3-1-1)

**工修, 国土交通省 関東地方整備局 東京港湾事務所 所長 (〒135-0064 東京都江東区青海 2-43)

***工修, 国土交通省 関東地方整備局 横浜港湾空港技術調査事務所 所長 (〒221-0053 横浜市神奈川区橋本町 2-1-4)

****工修, 鋼管杭協会 (〒103-0025 東京都中央区茅場町 3-2-10)

*****鋼管杭協会 (〒103-0025 東京都中央区茅場町 3-2-10)

Field load tests for prototype steel pipe piles penetrated into sandy gravel and sandy layers were conducted to get to know the mechanism of the bearing capacity of the large diameter steel pipe pile base. The piles, 1,500mm in diameter and more than 70m in length, were embedded by three times of diameter into the estimated bearing layer. Static axial compressive load test, rapid load test and dynamic load test were carried out in the test series. From the test results, the coefficient α of hypothetical plugging effect (unit base bearing capacity of open end pile $=\alpha 300N/kN/m^2$, N is SPT- N value; here, unit bearing capacity of closed end pile is considered to be $300N/kN/m^2$) was 50 - 80 %. But, in accordance with the axial compressive stress distribution results, the base bearing capacity is composed of the soil-pile friction of the inner side of the pile near the pile base and the bearing capacity of the pile plate itself.

KeyWords : large diameter steel pipe pile, bearing capacity, load test,

static axial compressive load test, rapid load test, dynamic load test

キーワード: 大口径鋼管杭, 支持力, 載荷試験, 押込み, 急速載荷, 衝撃載荷

1. はじめに

近年構造物の大型化に伴い基礎に用いられる鋼管杭も大口径のもの(通常開端杭)が検討対象となることが多い。しかしながら、打込み工法による大口径開端鋼管杭の支持力のメカニズムは、東京湾横断道路で載荷試験が行われているもののその実施例は少なく、明らかになっていない現状にある。

開端鋼管杭についての既往の研究における課題としては、以下に示す点があげられる。

- 1) 道路橋示方書²⁾では、支持層への根入れ比(根入れ長 L /杭径 D)が5以下の範囲では、それが大きくなると打込み杭の先端支持力度は増加し、5以上の範囲では一定となるよう与えられている。しかし、この設定方法が大口径鋼管杭にそのまま適合するかについては言及されていない。
- 2) 東京湾横断道路で行われた載荷試験¹⁾では、径1,600mm(支持層への根入れ比5.2)と2,000mm(同

根入れ比12.0)の鋼管杭の閉塞率がそれぞれ27%、40%と報告されており、根入れ比が5以上あっても十分な先端閉塞効果は発現していない。

- 3) 鋼管杭の支持力は、大口径鋼管杭を用いた上記の試験¹⁾では、山肩の提案³⁾に準拠して、杭先端の実肉厚部の支持力、支持層での杭内周面摩擦力、および杭外周面摩擦力の総和で算定するとよく説明できるとしている。しかし、他の実大杭の事例で検討した報告はなされていない。
- 4) 大口径鋼管杭の先端支持メカニズムは、建築基礎構造設計指針⁴⁾にも示されるように、杭の実肉厚断面の支持力、杭内部に詰まった土による周面摩擦力で構成されるとするのが適当と考えられる。特に、内周面摩擦の考え方の一例としてランドルフら⁵⁾が提案しているように、内周面側の土圧係数が外周面側の土圧係数よりもはるかに大きくなることが考えられるので、比較的大きな先端支持力が期待できる可能性がある。

東京都品川区城南島から中央防波堤外側埋立地を經由

し江東区若洲に至る東京港臨海道路の計画においては、第3航路を東京臨海大橋（仮称）で横断することとなっており、主径間の橋脚基礎には、大口径の鋼管杭を用いた鋼管矢板基礎が検討対象となった。しかし、支持力性能が十分明らかでなかったので本橋の建設地点でそれを確認し、支持力メカニズムを解明し設計に活用することを目的に、載荷試験（押込み、急速載荷、ならびに衝撃載荷）を実施した。本報告は、実際と同様に施工した実大の大口径開端鋼管杭に係わる現場試験から得られた鉛直支持力特性について検討したものである。

2. 試験内容

2.1 試験位置および地盤条件

載荷試験を行った位置は、図-1に示すとおり東京港第3航路近傍の海上部である。

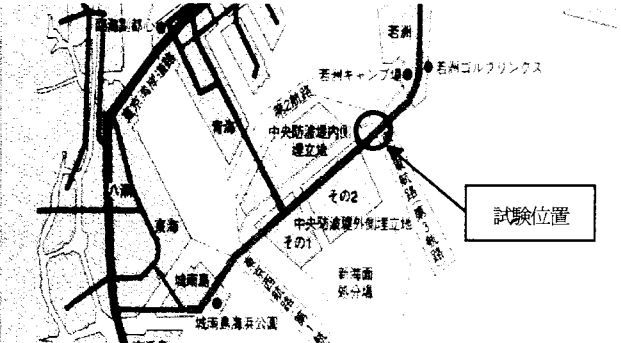


図-1 試験実施位置

試験地盤は、上方に30m以上の厚い軟弱層が存在し、下方には締った礫層、砂層が分布している。土質柱状図を図-2に示す。図-2には、試験杭の設置概要も示した。

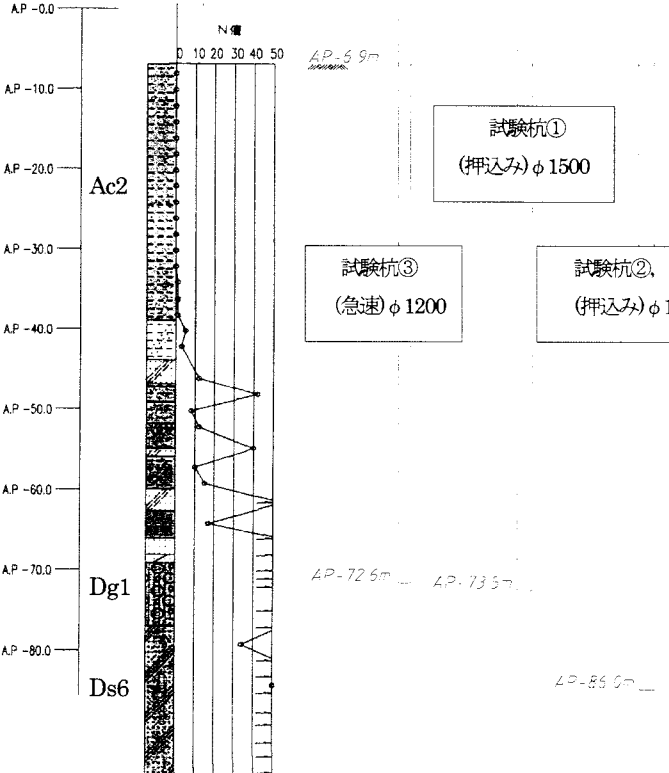


図-2 土質柱状図および試験杭設置概要

2.2 試験種類

載荷試験に用いた試験杭と試験種類を表-1に、試験杭の配置を図-3に示す。

押込み試験は、それぞれ支持層となり得る礫層 Dg1（いわゆる東京礫層）と砂層 Ds6（いわゆる江戸川層）に先端支持させた径φ1,500の鋼管杭2本（試験杭①と②）で行った。また、急速載荷試験としてスタナミック試験を、礫層 Dg1

表-1 試験杭と試験種類

試験杭*				試験種類**
杭No.	杭径(mm)	杭先端深さ (APm)	杭長(m)	
①	φ1,500	-73.5	79.5	SLT, DLT
②	φ1,500	-86.0	92.0	SLT, DLT
③	φ1,200	-72.6	80.1	STN, DLT
④	φ1,500	-86.0	93.5	DLT
⑤	φ1,500 (十字リブ)	-86.0	93.5	DLT

*板厚：杭①～③は載荷重対応の特殊板厚28mm、杭④～⑤は22mm

**SLT：押込み試験 STN：急速載荷(スタナミック)試験

DLT：衝撃載荷試験

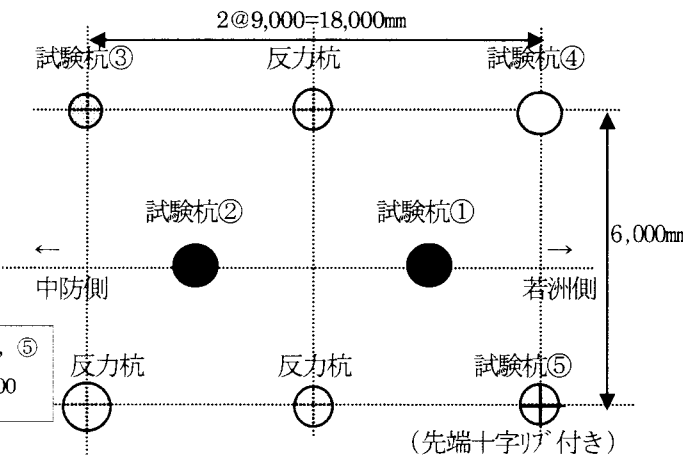


図-3 試験杭配置

に根入れさせたφ1,200の鋼管杭（試験杭③）で行った。衝撃載荷試験は、すべての試験杭について打設時に行った。試験杭⑤では先端に十字リブを付与しその効果を調べた。

試験杭①、③は礫層 Dg1 上面 AP-69m から3D (D; 杭径) 貫入した深さで打ち止め、試験杭②、④、⑤はその下方の砂層 Ds6 に3D貫入した AP-86m で打ち止めた。

表-1に示す試験杭は、550ト吊り杭打ち船によるハンマー（ハンマー種類：IHC-S280）打撃で施工した。

2.3 試験方法

(1) 押込み試験

試験杭①、②に対して、地盤工学会の「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」⁶⁾に準拠して静的押込み試験を実施した。押込み試験状況を写真-1に示す。

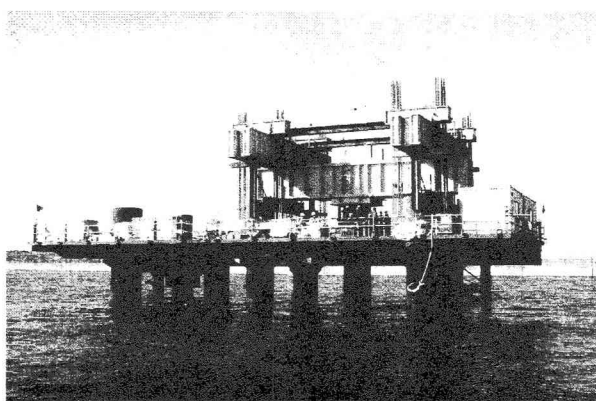


写真-1 押込み試験状況

(2) スタナミック試験

試験杭③についてスタナミック試験を行った。この試験は杭頭に載せた反力マスを特殊な推進剤の燃焼ガス圧力で打ち上げ、その反力を杭頭に鉛直に載荷するもので、大きな加速度の付与により反力マスを小さくできる（今回、質量は180,000kg）、反力杭が不要、という利点がある。本試験は径が小さくなったときの支持力特性を調べるために実施した。

スタナミック試験の概要を図-4に、スタナミック試験状況を写真-2に示す。

(3) 衝撃載荷試験

計測には、オランダ応用科学研究所建設工学研究所(TNO)製の試験システムを用いた。衝撃載荷試験概要を図-5に示す。

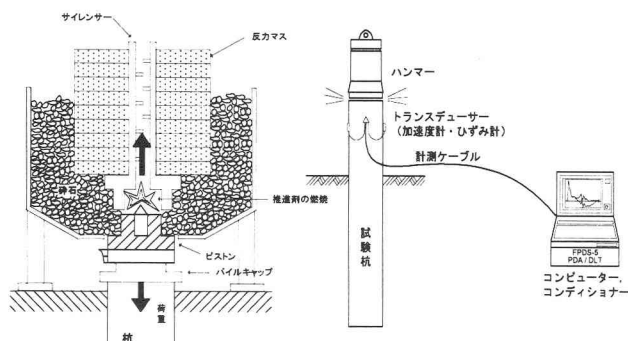


図-4 スタナミック試験の概要

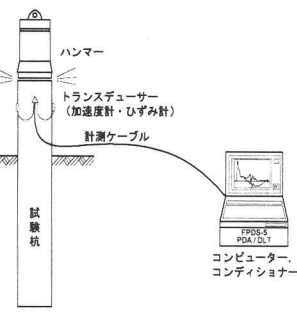


図-5 衝撃載荷試験概要

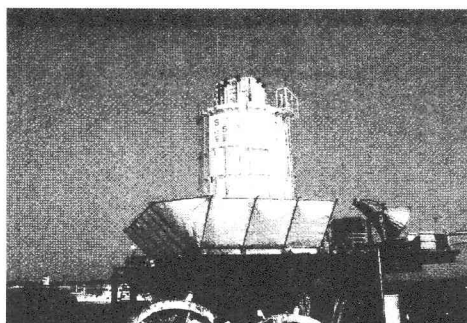


写真-2 スタナミック試験状況

3. 試験結果

3.1 押込み試験結果

(1) 概要

押込み試験での杭頭荷重～変位量等の関係の一例を図-6に、荷重～変位量等の関係の一例を図-7に示す。

押込み試験結果から総合的に判定した、第一および第二限界抵抗力を表-2に示す。

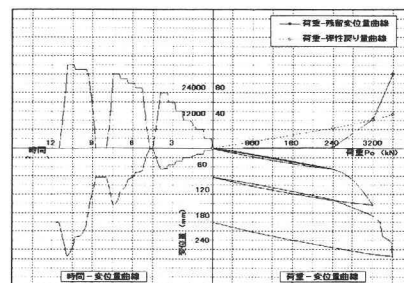


図-6 試験結果総合図（試験杭②）

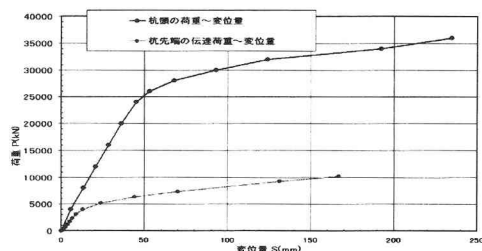


図-7 荷重～変位量の関係（試験杭②）

表-2 限界抵抗力（押込み試験）(kN)

	試験杭①	試験杭②
第一限界抵抗力	20,000	26,000
第二限界抵抗力	32,000	36,000

(2) 先端支持力

第二限界抵抗時の試験杭の軸力（図-8 参照）は、試験杭下端近傍のひずみゲージ最下端位置（下端から 0.75m 上がり）で上方より急激に小さくなっており、その軸力急変点は杭先端よりおよそ 1D（D：杭径）上方の位置であった。杭は想定している支持層に 4.5m 貫入しており、杭先端付近だけ外周面摩擦が急速に大きくなったとは考えにくいこと、また、図-9に模式的に示すように、試験杭②の軸力の減少傾向（試験杭①の根入れ部分に相当する深度範囲）は試験杭①の根入れ部上方のその傾向に近似していたことから、杭先端付近での軸力変化の傾向の急変を杭内周面摩擦の影響と考え、想定支持層内の複数の測定された軸力を杭下端レベルまで外挿し先端支持力とした。図-9において、この先端支持力を点 C に示し、最下端で測定された軸力を点 A に示す。軸力 C は、杭最先端実断面部分の抵抗と内周面摩

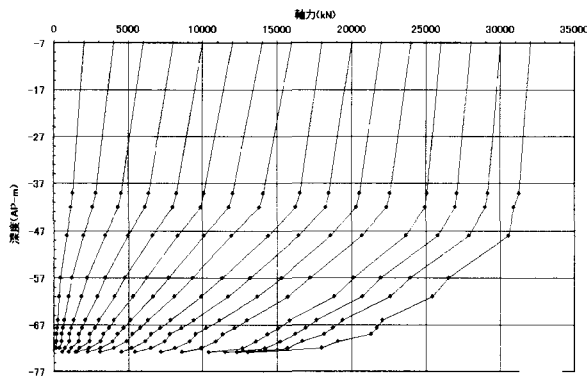


図-8 軸力分布 (試験杭①)

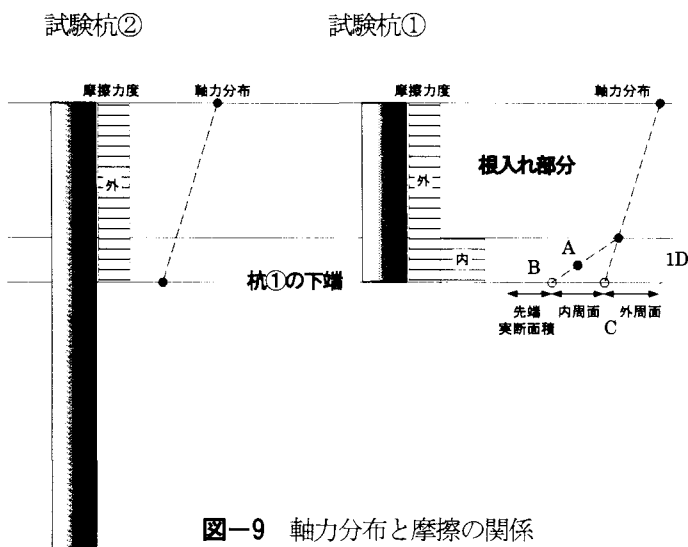


図-9 軸力分布と摩擦の関係

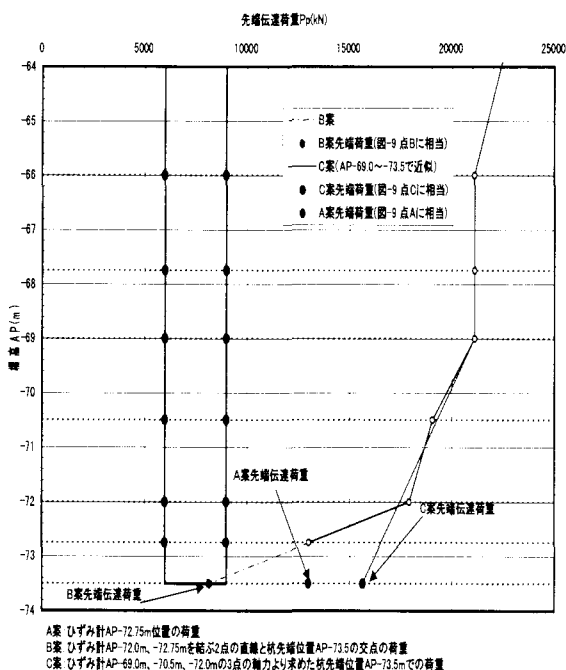


図-10 先端伝達荷重概念図(試験杭①)

擦を加えたものとなり、打込み鋼管杭の先端支持力についての山肩の提案³⁾と整合する。

ランドルフら⁵⁾も山肩らの提案と同様に開端杭の先端支持力は、式(1)で示される実断面積部の抵抗力度 q_b と内周面摩擦の和で表せるとしている。

$$q_b = \left(\frac{\lambda m (w_b / D)}{(w_b / D) + c} \right) \cdot q_c \quad (1)$$

ここに、

q_c : CPT 試験によるコーン貫入抵抗値(kN/m²)

$m=0.7$, $c=0.015$, w_b/D : 正規化先端沈下(=0.1)

$\lambda = 1.75 - (\sigma'_v / 200)$ ($\sigma'_v < 200 \text{ kPa}$)

= 0.75 ($\sigma'_v \geq 200 \text{ kPa}$)

試験杭の設置条件では、式(1)は $q_b = 0.46 q_c$ で表される。

したがって、杭先端実断面積部の抵抗 R_t は q_b に先端実断面積(先端補強バンドの厚み考慮) A_t を乗じて求められる。今回、杭支持地盤で CPT 試験を行っており、その結果から R_t を概略的に求めると試験杭①で 7,000~8,000kN、試験杭②で 3,600~4,400 kN となった。一方、前述の B 点の荷重は試験杭①で 8,200kN、試験杭②で 4,600kN であり、ランドルフらの方法⁵⁾で求めた R_t と大きな差はない。

また、山肩ら³⁾は、杭先端の極限支持力度を $400N$ (N : 杭先端 N 値) で表しており、杭先端実断面積部の抵抗 $R_t = 400NA_t$ (実測換算 N 値=60) で求めると、4,100 kN となり砂地盤に支持された試験杭②の B 点荷重 4,600 kN に近い。試験杭①は深度 62m 以下の非常に締まった礫地盤に支持されておりこの式の適用範囲外と考えられる。

以上から、B 点荷重は、図-9 に示すとおり杭先端実断面積部の抵抗 R_t に近いものと考えられる。したがって、C 点荷重と B 点荷重の差は内周面摩擦と推測されるが、この値は試験杭①で 7,500 kN、試験杭②で 6,700 kN となっている。締まった礫層に根入れした試験杭①のほうがやや大きい、その差は大きくない。

なお、試験杭の軸力分布において軸力変化開始点は杭先端よりおよそ $1D$ (D : 杭径) 上方の位置であった。今回、試験杭内部の CPT 試験を杭内部土の締固まり状況を調べるため根入れ部分で行ったが、試験杭外部地盤に比べて貫入抵抗が明らかに上昇している範囲は杭下端から $1D$ ないしはせいぜい $1.5D$ であった。これは、矢作らの研究⁷⁾において、対象径は小さいが、管内に大きな壁面摩擦が働く範囲は杭先端から $1.5 \sim 2D$ 以内であったと報告されていることと同様の現象となっている。

以上のことから、先端支持力は C 点で与えられ、これは杭先端実断面積部の抵抗 R_t (B 点荷重) と杭先端から $1D$ 程度範囲の内周面摩擦力の和と考えられる。

得られた先端支持力およびみかけの閉塞率 (先端支持力を $300NA_p/N$: N 値、ただし最大を 40 とした、 A_p : 杭断面積) で除した値) を表-3 に示す。なお、表-3 には模式的な図-9 を実験に即して具体的に描いた図-10 (試験杭①

の場合) の A 案荷重に相当する杭下端の実測軸力も参考までに示した。

表-3 杭先端支持力 (押込み試験)

	試験杭①	試験杭②
杭径 (mm)	φ 1,500	φ 1,500
支持層の種類	礫層	砂層
支持層への根入れ長	3D(4.5m)	3D(4.5m)
杭下端ゲージ位置軸力(kN)	13,000	9,000
先端支持力(kN)	15,700	11,300
みかけの閉塞率(%)※	74	53

※みかけの閉塞率 α =先端支持力値/(300 $N A_p$)

ここに、 $N=40$, A_p :杭断面積

表-3 に示されるように、みかけの閉塞率は、道路橋示方書に示される根入れ比 (=支持層への根入れ長 L /杭径 D) 3 の場合の 60% に比べて、礫層に根入れした試験杭①では約 2 割大きく、砂層に根入れした試験杭②では約 1 割小さくなっている。礫層に支持された試験杭①のみかけの閉塞率は、大口径杭であっても道路橋示方書の算定値よりは大きかったが、砂層支持の場合は予想されたようにそれより小さかった。また、砂層に支持された試験杭②では、同じく砂層支持の大口径鋼管杭の既往の载荷試験¹⁾から得られたみかけの閉塞率 27% (径 1,600mm)、40% (径 2,000mm) よりはずっと大きかった。この差についての検討は今後の課題である。なお、本载荷試験実施地点の近くの羽田地区で打撃工法により施工された一般的な径 800mm の鋼管杭の押込み試験が支持層への根入れ比 2~5 に設定され 5 本程行われているが、この結果は道路橋示方書に示される極限支持力度の算定方法²⁾によく一致するものとなっている。

(3) 周面摩擦力度

地盤を砂質土、粘性土、礫の各層に分け、各層ごとに周面摩擦力度を求めた。この値を N 値と関連付け、試験杭①、②において平均した結果を表-4 に示す。

表-4 周面摩擦力度(押込み試験) (kN/m²)

地層種別	試験値	道示式 ²⁾	提案値
砂質土層	3.1 N	2 N	2 N
粘性土層	9.2 N	10 N	10 N
礫層	4.0 N	2 N	3 N

周面摩擦力度の平均値は、礫層では道路橋示方書²⁾に示される値より大きかったが、他の層ではやや大きいと同様の値であった。個々の砂質土層の周面摩擦力度には 2 N に近いものがあること、ならびに後掲するスタナミック試験結果 (表

-6 参照) を考慮し、安全をみてこの地盤条件では、道路橋示方書²⁾に示される値に比べ礫層のみ大きめの値 3 N とし、他の層は同じとする提案値が考えられる。

(4) 極限抵抗力の推定法

式 (2) に示すように、表-3 に示した先端支持力推定法と表-4 に示した周面摩擦力の提案値を組み合わせた場合の杭の軸力分布と実測の軸力分布を比較すると (図-11 参照)、ほぼいずれの深度においても式 (2) による計算値が実測値を上回ることがなく、杭頭部での軸力も安全側に設定できていることがわかった。このことから、式(2)により杭の極限抵抗力が推定できるものと判断した。

$$R_u = \alpha \cdot 300 N A_p + U \sum L_i f_i \quad (2)$$

ここに、

R_u : 杭の極限支持力 (kN)

α : みかけの閉塞率 (表-3 参照)

N : 杭先端地盤の設計 N 値 (≤ 40)

A_p : 杭先端投影断面積 (m²)

U : 杭の周長 (m)

L_i : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)

f_i : 周面摩擦力度の提案値 (表-4 参照)

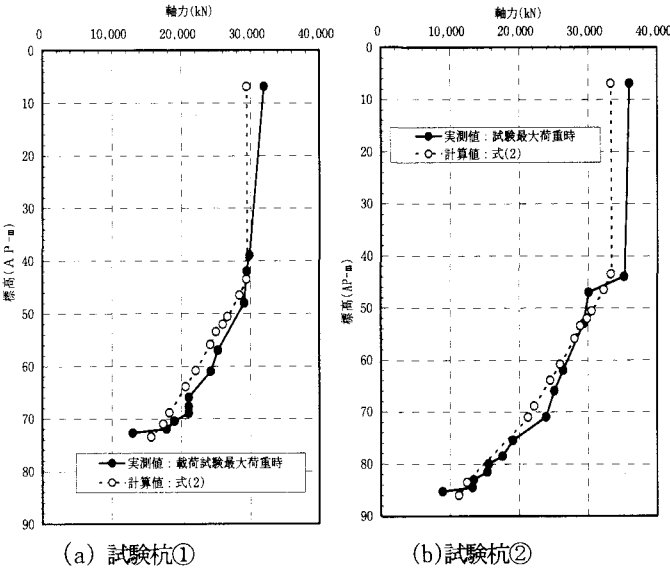


図-11 軸力分布の比較

3.2 スタナミック試験結果

礫層に 3D (3.6m) 根入れした試験杭③を用いて、スタナミック試験を行った。波形マッチング解析の結果から、杭頭での静的極限荷重は図-12 に示すように 26,800kN、先端の極限支持力は 10,800kN という値が得られた。先端付近で軸力の急変点は見られなかったが、押込み試験の場合と同様に先端支持力は C 点で与えられるとしてみかけの閉塞率を求めた結果を表-5 に示す。

試験杭③では、同じ礫層に同じ根入れ比で根入れした試験

杭①に比較し、みかけの閉塞率が約1割高めになっている。
これは試験杭③の杭径が小さいことの影響が考えられる。

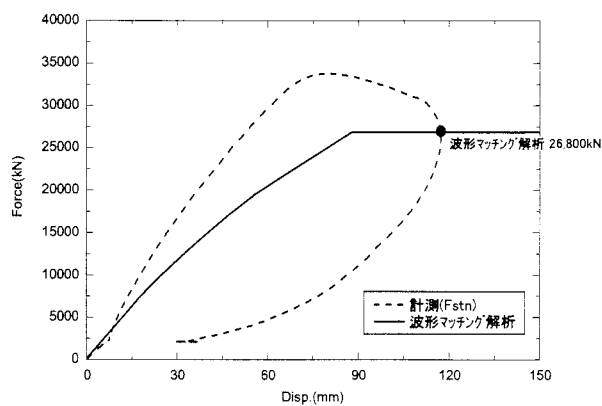


図-12 杭頭の荷重と変位量の関係

表-5 杭先端支持力（スタニク試験）

	試験杭③
杭径（mm）	φ 1,200
支持層の種類	礫層
支持層への根入れ長	3D（3.6m）
先端支持力(kN)	10,800
みかけの閉塞率(%)※	80

※ 表-3 参照

また、押込み試験の場合と同様に、地層種別ごとに N 値との関係で周面摩擦力を表すと、表-6 ようになる。
この表からわかるように、試験値は粘性土層で押込み試験の結果よりやや大きい、概ね同様なものとなっており、摩擦力の提案式の妥当性を裏打ちするものとなっている。
なお、杭打設後より試験実施時までの養生期間は、スタニク試験杭が押込み試験杭より 0.5～1.7 ヶ月長かった。このことが粘性土層のみ摩擦力度がより大きかった原因とも考えられる。

表-6 周面摩擦力度（スタニク試験）（kN/m²）

地層種類	試験値	道示式 ²⁾	提案値
砂質土層	3.3N	2N	2N
粘性土層	12.0N	10N	10N
礫層	4.3N	2N	3N

3.3 衝撃载荷試験結果

衝撃载荷試験結果の概要を表-7 に示す。

表-7 からわかるように、IHC-S280 ハンマーによる打設で打ち止め時の貫入量は 3～7mm 程度であった。従来の油圧ハンマーの打ち止め時の値に比べ大きめの貫入量であった

が、杭の支持力は発揮されており、最近よく使われ始めた、打撃間隔がより短く打撃効率が良好な IHC-S280 ハンマーの特性によるものと考えられる。また、養生後の静的抵抗（押込み試験、スタニク試験における杭頭での実測静的極限荷重）を打ち止め時のそれ（衝撃载荷試験の結果を解析して得られる杭頭での静的極限荷重）で除して得られる概括的なセットアップ率は従来に比べやや大きく約 3～4 強の値であった。セットアップ率が大きくなったのは、今回使用したハンマーの打撃効率が良好であったので施工時の貫入抵抗が小さくなったためと考えられる。

表-7 衝撃载荷試験結果概要

杭 No.		①	②	③
杭径(mm)		φ 1,500	φ 1,500	φ 1,200
杭先端深さ (APm)		-73.5 (礫)	-86.0 (砂)	-72.6 (礫)
ハンマー		IHC-S280		
リバウンド量(mm)		4.5	4.7	2.2
貫入量(mm)		5.6	3.1	6.7
静的抵抗 (MN)	打止時	7.4	12.5	6.1
	養生後	32.0	36.0	26.8
	セットアップ率	4.3	2.9	4.4

3.4 十字リブの効果の検討

大口径鋼管杭の先端閉塞効果を向上させる手法として杭先端部に十字リブを取り付けることがある。十字リブの効果については、富永⁸⁾、赤井⁹⁾らの実大杭を使った研究があり先端閉塞を向上させる効果が認められているが、調査、研究が不足しており不明な点が多い。

本試験では、径 1,500mm の試験杭⑤に、図-13 に示すように板厚 22mm の杭本体下端部分に板厚 22mm の十字リブを長さ 2.5D (=3.75 m、D: 杭径) 区間に取り付けた。

この効果を検討するため、杭打ち止め時 (AP-86m)、施工性調査および衝撃载荷試験から得られる、抵抗に係わる指標 (E_h/s :ハンマーエネルギー/貫入量、全抵抗: CASE 法²⁾ で算出、先端静的抵抗: 波形マッチング解析²⁾ で算出) を、通常の開端杭④と比較した。

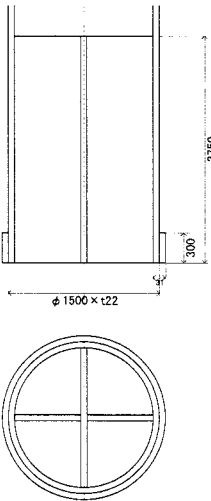


図-13 十字リブ取り付け概要

この結果を示した表-8 から、同じ地盤に打ち込んだ十字リブ付き杭は開端杭に比べ 3～7 割これらの指標が大きくなり、今回の十字リブ取り付け条件（板厚＝杭本体板厚、支持層内

の長さ $2.5D$) では先端支持力の増加効果は3割以上期待できると推測される。

表-8 通常開端杭に対する十字リブ付き杭の比率

指標	増加割合
E_h/s	1.3
全抵抗	1.5
先端静的抵抗	1.7
先端 $2D$ 静的抵抗	1.7

4. まとめ

東京港臨海大橋（仮称）建設予定地点において、大口径鋼管杭の載荷試験を海上で行い、支持力について検討した。これを要約すると以下のとおりである。

1) みかけの閉塞率について

押込み試験の結果から、径 $1,500\text{mm}$ の開端鋼管杭を支持層（礫層）に $3D$ （ D 杭径）根入れした場合、みかけの閉塞率は74%、また同仕様の鋼管杭を支持層（砂層）に $3D$ に根入れした場合、それは53%となり、砂層に根入れした場合のほうが小さくなった。

スタナミック試験の結果から、径 $1,200\text{mm}$ の開端鋼管杭を支持層（礫層）に $3D$ 根入れした場合、みかけの閉塞率は80%となり、径 $1,500\text{mm}$ の場合より大きくなった。

2) 先端支持力のメカニズムについて

試験杭①、②において、先端部の軸力検討、試験杭①、②の軸力比較、ランドルフ³⁾、山肩ら³⁾の考え方の検討、CPT試験結果から、杭先端支持力は杭先端実断面積部の抵抗力と杭内周面摩擦の和で説明されると考えるのが妥当である。

3) スタナミック試験結果について

スタナミック試験結果から得られたみかけの閉塞率は80%であり、周面摩擦は押込み試験の結果と同様であった。スタナミック試験では、載荷時間が短い、これらの結果は押込み試験結果と整合していた。ただし、杭の鉛直方向地盤反力係数の算出等にあたっては、載荷速度の影響に留意する必要があるかもしれない。

4) 周面摩擦力度について

押込み試験、スタナミック試験から、試験杭の設置条件、試験方法にかかわらず周面摩擦力度の特性は同様であっ

た。すなわち、砂質土層、粘性土層では、道路橋示方書に規定された関係式で与えられる値と同様であったが、礫層ではその値より大きなものとなった。

5) 先端十字リブの効果について

径 $1,500\text{mm}$ の鋼管杭について調べた、先端十字リブによる先端支持力の増加効果は、先端に長さ $2.5D$ 区間取り付けた場合、開端杭に比べて3割以上あると推測された。

本文で示した一連の試験結果と考察が大口径鋼管杭の支持力を検討する際の参考となれば幸いである。大口径鋼管杭の研究事例はまだ少なく課題が多い。今後、さらなる大口径鋼管杭の載荷試験データが蓄積され、支持力機構の解明が進むことを期待するものである。

本試験についてご指導いただいた、東京工業大学日下部教授を委員長とする東京港臨海道路構造検討調査 耐震・基礎工分科会の委員の方々、ならびに試験実施にあたってご協力をいただいた関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 横山好幸, 中間政幸, 片山猛, 丸山隆: 東京湾横断道路大口径鋼管杭鉛直載荷試験, 土と基礎, Vol. 40, No. 2, pp. 47~52, 1992.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 平成14年3月.
- 3) 山肩邦男, 永井興史郎: 開端鋼管ぐいの支持力に関する考察(その2), 日本建築学会論文報告集, 第213号, 1973.11.
- 4) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2003.3.
- 5) De Nicola, A., and Randolph, M.F.: Plugging behaviour of driven and jacked piles in sand, Geotechnique, 47(4), pp. 841~856, 1997.
- 6) 地盤工学会: 地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」, 2002.
- 7) 矢作枢, 大志万和也, 島崎一男, 渡辺一郎: くい先端部の閉塞効果について(第2報), 土木研究所資料, 第1139号, 昭和51年12月.
- 8) 富永眞生, 越後勇吉, 鹿毛征二: 大口径鋼管ぐいの支持力について, 第11回土質工学研究発表会, pp. 653~656, 1976.
- 9) 赤井公昭, 辻本有一, 佐久間彰三, 半澤武志: 支笏火山灰層における鋼管杭の支持力機構, 土と基礎, Vol. 32, No. 3, pp. 41~46, 1984.

(2004年9月17日受付)