

砂中の節杭・コルゲート杭のモデル実験

武智工務所 (正) 藪内 貞男 (正) 山下 啓明 (正) ○ 上紺屋 好行
大阪土質試験所 (正) 平山 英喜

1. まえがき

杭軸に突出部を設けた杭、例えば、複数の拡大部を設けた節杭や、杭周を波状にしたコルゲート杭が、通常の直杭よりも大きな最大周面摩擦抵抗応力 f_{max} を発揮しうることは、既往の多くの実験データにより指摘されてきた¹⁾²⁾。

「杭形状が鉛直支持特性に及ぼす影響に関する研究」の一環として、加圧モデル実験槽中の同条件の砂に埋込んだ節杭・コルゲート杭・直杭の鉛直載荷試験を行った。本報告は、それらの結果と考察について述べるものである。

2. 実験方法

2.1 モデル杭

実験に用いたモデル杭は、ステンレススチール製で長さ100cm、最大径10cmのものである。節杭およびコルゲート杭の形状を図-1に示す。

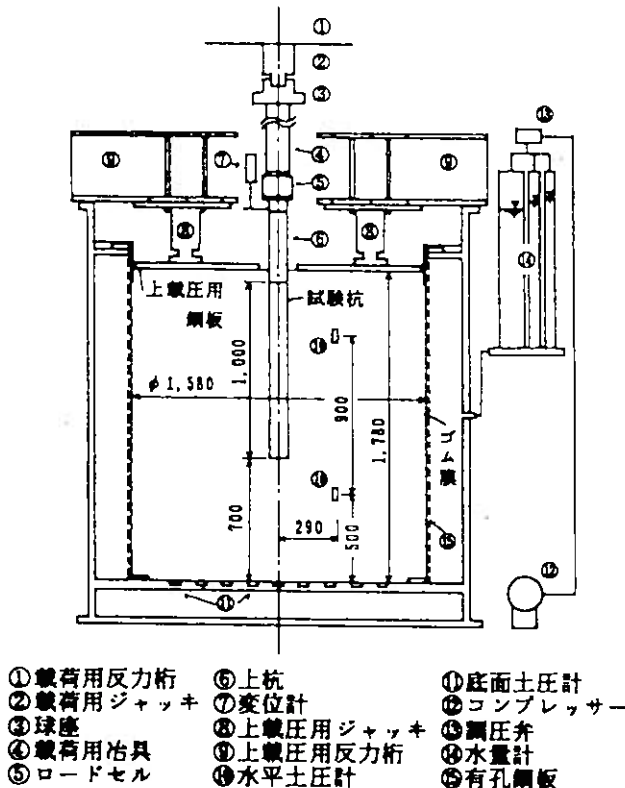
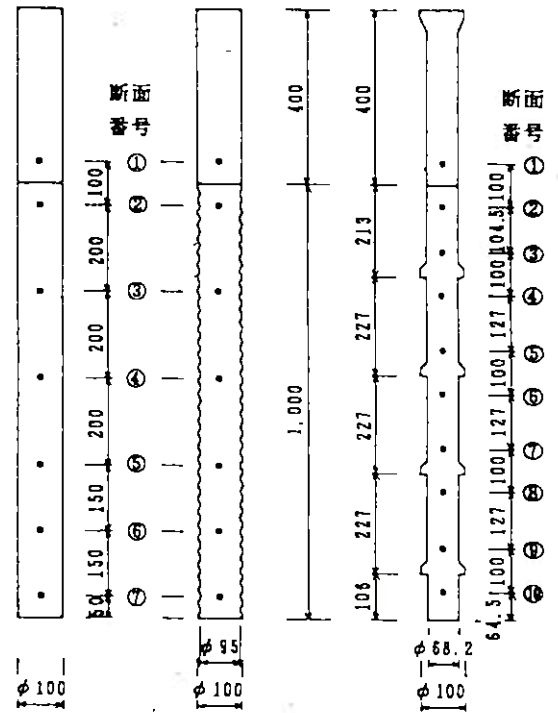


図-2 実験土槽

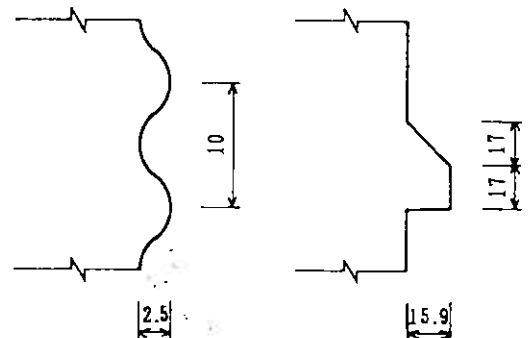
2.2 実験土槽

実験土槽(内径158cm、高さ178cm)の概略図を図-2に示す。側圧 σ_h はゴム膜を介して水圧で、鉛直圧 σ_v は鋼板を介して6個の油圧ジャッキで与えるようになっている。



・ひずみゲージの位置(1断面各4点)

(a) 直杭 (b) コルゲート杭 (c) 節杭



(b') コルゲート部の拡大 (c') 節部の拡大
(b')図の縮尺は(c')図の5倍

図-1 モデル杭の形状 (単位 mm)

"Model Tests for Nodal Pile and Corrugated Pile",
by Sadao YABUCHI, Hiroaki YAMASHITA, Yoshiyuki KAMIKONYA (Takechi Eng. Co.), &
Hideki HIRAYAMA (Osaka Soil Test Lab.)

2. 3 実験に用いた砂と作成地盤

実験に用いた砂は気乾状態（含水比 $w \approx 0.1\%$ ）の珪砂6号（愛知県瀬戸産）で、粒径加積曲線を図-3に示す。土粒子の比重 $G_s = 2.671$ 、最大密度 $\rho_{max} = 1.597 \text{ g/cm}^3$ 、最小密度 $\rho_{min} = 1.264 \text{ g/cm}^3$ である。

地盤作成法に関しては、①パイプレーターによる締固め法、②足踏みによる締固め法、③多重ふるいによるサンドレイナー（sand rainer）法、を実験に先立ち検討した³⁾。地盤の均質度、作成できる地盤の相対密度 D_r の範囲、作成に要する時間等を考慮してサンドレイナー法を採用した。

地盤は、土槽底面より70cmの高さまで作成した後に、杭を頭部で固定して設置し、引続き土槽上部まで作成した。ただし、杭周辺、特に節部の下側は、回りの地盤より緩く D_r のばらつきも大きくなるので、シングルホース型サンドレイナーを併用し、周辺

地盤との D_r の差を地盤作成時で10%以内に収まるようにした。したがって、モデル杭は完全ではないが、non-displacement pile 型のものと思わせる。

今回の実験では、地盤作成時に $D_r \approx 77\%$ の地盤を用いた。 $\sigma_v = 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\sigma_h = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の圧力により圧縮を終了した後は $D_r \approx 80\%$ となった。参考までに σ_v 、 $\sigma_h \cdot D_r$ による N 値の推定実験式⁴⁾ によると、 N 値は約10となる。各実験の地盤条件をまとめて表-1に示す。

2. 4 載荷および計測方法

displacement pile 型の押し込み杭としての挙動も調べるために、再載荷を含めて、大きな沈下量まで載荷した。変位計のストローク等の関係で杭頭沈下量5cmごとに除荷を行い、4サイクルで沈下量20cm（最大径の2倍）まで載荷した。各サイクルとも、荷重勾配の急な立ち上がり時および除荷時は荷重制御型で、それ以外は1mm/minの速度の沈下制御型で載荷した。

計測は、表-2に示した項目について、1分ごとに行った。

杭のひずみ測定は、載荷試験開始時の初期残留応力を明確にするために、杭のセット時から継続して行った⁵⁾。しかし、地盤を土槽上部まで作成した後、上載圧載荷用装置セットの際には、コードの取り外しのために中断が生じるのは避けえなかった。それ以前の杭のひずみは、極めて小さいので、コード再結線時の値を初期値とした。したがって、載荷試験開始までに $\sigma_v \cdot \sigma_h$ による圧縮等により生じた杭のひずみは実験結果の整理に含まれている。

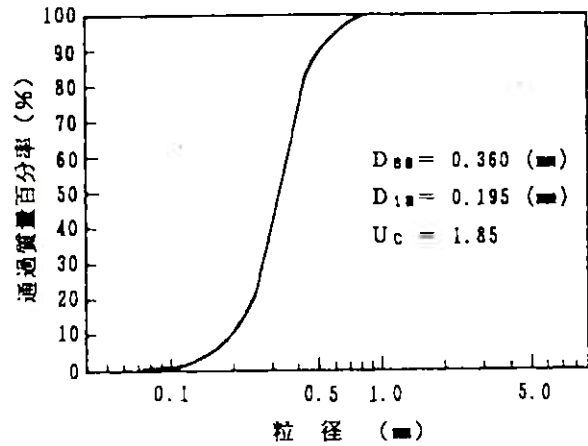


図-3 粒径加積曲線

表-1 実験地盤

杭種		直杭		コルゲート杭		節杭	
実験 No.		S-1	S-2	C-1	C-2	N-1	N-2
圧縮前	γ_d (gf/cm ³)	1.511	1.507	1.506	1.497	1.509	1.496
	D_r (%)	78.4	77.5	77.0	74.8	78.0	74.5
圧縮後	γ_d (gf/cm ³)	1.524	1.517	1.521	1.511	1.521	1.509
	D_r (%)	81.8	80.0	81.1	78.4	81.1	78.0

*1: $\sigma_v = 1.0$ (kgf/cm²)、 $\sigma_h = 0.5$ (kgf/cm²) で圧縮

表-2 載荷試験中の計測概要

測定項目	測定計器	個数	備考
杭頭荷重	ロードセル	1	
杭頭沈下量	変位計	2	
杭体のひずみ	ひずみゲージ	7~10断面	位置は図-1参照
土槽底面土圧	土圧計	9	
地中水平土圧	土圧計	4	底面から50cm、140cm、中心から29cmの所に各2ヶ所、図-2参照
上載圧	圧力計	1	ジャッキ油圧測定
側圧	圧力計	1	水圧測定
上載圧用鋼板変位	変位計	2	
地盤の体積変化	水量計	1	図-2 ④ の水位測定

載荷試験中の杭自体の圧縮量は極めて小さいので、沈下量は杭頭沈下量を用いている。

また、試験終了後の砂の掘出し時には、粒子破碎状況や地盤作成時に設けた着色砂の薄層の観察、改良型ポケットペネトロメーターによる杭周辺地盤の強度分布の測定を行った。

3. 実験および観察結果

各杭の支持特性を、周面摩擦抵抗を中心に検討する。しかし、節杭の場合は支圧抵抗 (bearing resistance) と見なしうる拡大部が複数個あるので、周面摩擦抵抗と先端支持抵抗をどのように分けるかが問題となる。そこで、4個の節部の各々の抵抗を、各節部の上下の位置のひずみゲージから算定した。その結果を、図-4に示す。この図より、最下端の節部のみ、通常先端支持抵抗と同じ機構と見なせることが分かる¹⁾。したがって、ここでは節杭に対して、図-1(c)の⑨のひずみゲージの位置から上部を周面摩擦抵抗、その下部を先端支持抵抗と見なす。

各杭の周面摩擦抵抗応力-沈下量の関係を図-5に示す。なお、節杭・コルゲート杭とも応力算定の際の杭径は、最大外径10cmとしている。また、先端抵抗応力-相対沈下量 (S/D) の関係を図-6に示す。

掘出し時の杭軸周辺の着色砂層の観察では、直杭では杭周外側に接して着色砂層がほぼそのまま残留していたが、節杭では直径約11.0cm、コルゲート杭では直径約10.6cm以内の部分、すなわち杭周から5mm・3mmの部分の着色砂層が下方に移動していた。また、節杭の節部直上にセットした着色砂層の状況から、沈下量33mmから40mmの間に節部上方で直径74mmから80mmの間にすべりゾーンのある円筒状すべりが生じたことが分かった。

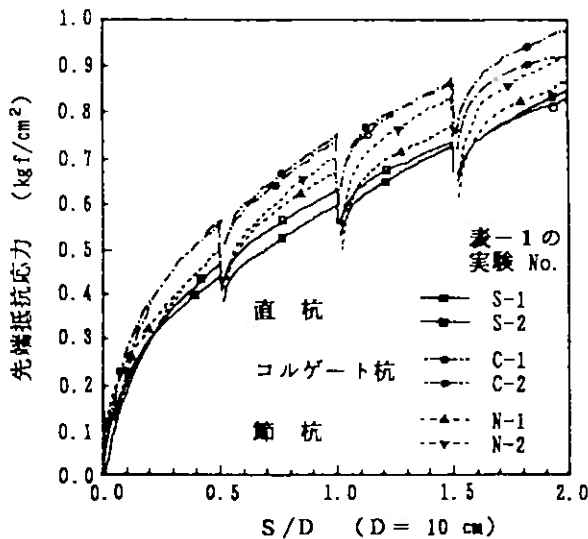


図-6 先端抵抗応力-S/D関係

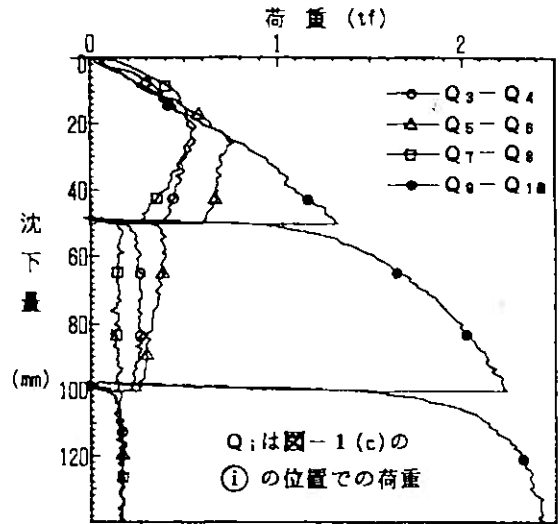
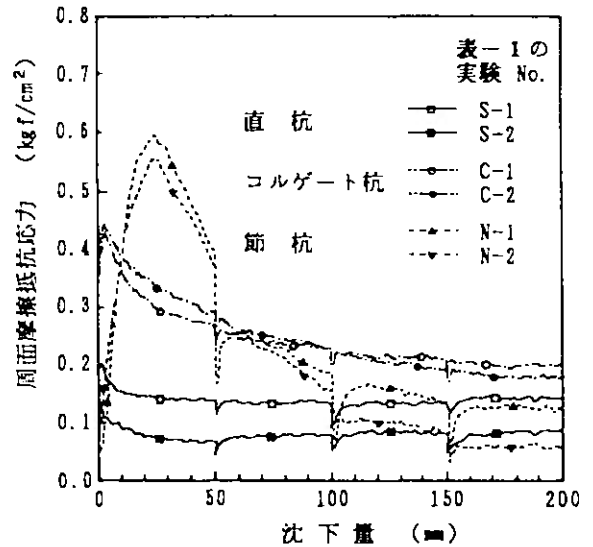
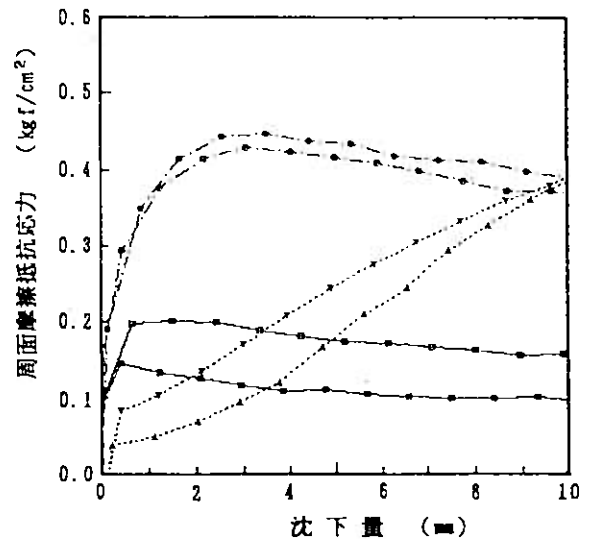


図-4 節杭の4個の節部の各抵抗-沈下量関係



(a) S = 200mmまで



(b) 初期部分の拡大図

図-5 周面摩擦抵抗抵抗応力-沈下量関係

杭先端の粒子破砕領域の直径は、直杭で約 10.8 cm、
コルゲート杭で約 12.2 cmであった。

4. 考察

4.1 周面摩擦抵抗

(1) 直杭

着色砂層の観察状況から、砂と杭周の境界面ですべりが発生したものと判断される。

上杉⁶⁾は、砂の平均粒径 D_{50} と鋼の表面粗さ R_{max} [基準長さ $\approx D_{50}$] による正規化粗さ $R_n = R_{max}/D_{50}$ が、約 0.1 以下では接触面ですべりが生じ、ピーク時摩擦係数が R_n に依存し、十分粗い場合よりも小さいことを示している。すなわち、杭表面の凹凸や砂粒子の形状等も影響するであろうが、平均的に見て杭表面の凹凸高さが粒子径の約 1/10 以下であれば、接触面ですべりが生じると解釈できる。本稿における実験では $D_{50} = 0.33\text{mm}$ 、 R_{max} [基準長さ = 2.5mm] = $12.3\mu\text{m}$ であるので、 R_n は 0.04 以下となり、この結果からもすべりは境界面で生じていると判断できる。したがって、コルゲート杭・節杭と比べてかなり小さい周面摩擦抵抗しか発揮していない原因として、杭形状の影響とともに、表面粗さに起因したすべり面の位置の違いも挙げられる。

(2) コルゲート杭

着色砂層の状況から、すべりは明らかに砂中で生じたことと判断できる。最大摩擦抵抗応力 f_{max} は直杭のその約 3 倍で、沈下量 $S \approx 3\text{mm}$ で生じている。残留状態での f は直杭・節杭の約 2 倍ある。

コルゲート杭は表面の極めて粗い杭とも見なせる。今回の実験では、コルゲートの凹凸高さが 2.5mm なので、前述の上杉⁶⁾の指摘から外挿すれば $D_{50} = 2 \sim 3\text{cm}$ 以上の礫でなければ、接触面ですべることがない可能性がある。したがって、砂から礫に及ぶ広範囲の粗粒土に対して、コルゲート杭は、ピーク時摩擦係数が土のせん断強度特性で決まる十分に粗い杭になりうると推察できる。

また、図-1(b')のコルゲート部の拡大図から、節部に見られるような支圧的效果もあると考えられる。例えば、着色砂層や先端での粒子破砕状況から見かけ上杭径が数mm程度大きくなっていると推察できること、残留時の挙動から周辺地盤内で応力増加が生じていると推察できること、改良型ポケットベネトローメーターの結果によると杭周のごく近傍では少し締まっていると判断できることが挙げられる。しかし、地中の水平土圧増分測定結果で、それを直接確認することはできなかった。 $R_n \gg 0.1$ を満たす十分に粗い直杭との比較実験を行えば、コルゲート部の支圧的效果を分離して評価できると考えられる。

(3) 節杭

節杭の周面抵抗に関して、小椋¹⁾は実験により次のような結果を示している。

- ① 節部抵抗が最大値に達するまでは、節部下面は杭の先端面と同じ抵抗機構と見なしてよい。
- ② 周面抵抗が最大値を示した後に減少する時に、節部径より少し大きな径の円筒状すべりが発生する。
- ③ 節間の杭軸での周面摩擦抵抗は、直杭と同じ機構で沈下量の極めて小さい間に発揮される。

本稿の節部の形状は下部がフラットで、小椋¹⁾のものと異なるが、図-4、図-5から同じ結果が得られている。節部上部にセットした着色砂層の状況から、ピーク後のすべりは、節部上部の地盤のゆるみが大きく影響していると考えられる。このため、残留時の f はかなり小さくなっているが、実際の displacement pile 型 (打込み杭) の施工に際しては、打込み時に砂利を節部間にシーリング(sealing)している。

f がピークに達するのは、杭径に対する相対沈下量 S/D が約 0.25 の時であり、現行の設計基準類で non-displacement pile の基準沈下量とされている $S/D = 0.1$ では、各節部を先端抵抗的に見なすことができる。

4.2 先端抵抗

図-6に示したように、先端抵抗応力 q はコルゲート杭が最も大きくなっている。杭先端の粒子破砕状況から、コルゲート杭先端のコアは直杭のその約 1.13 倍あると判断される。この見かけの杭径の拡大が q の増加に寄与しているものと考えられる。なお、小椋¹⁾の実験で見られた直杭との対比における節杭の q の低下は、本実験では見られていない。

謝辞： 実験設備・装置の設計を担当され、また実験に際してご指導をいただいた榑武智工務所 小椋仁志 博士に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 小椋(1989): "砂地盤における節杭の鉛直支持力機構に関する研究", 関西大学工学博士論文
- 2) Ladanyi, B. and Guichaoua, A. (1985): "Bearing capacity and settlement of shaped piles in permafrost", Proc. 11th ICSMFE, Vol. 3, pp. 1421-1427
- 3) 武智工務所(1990): "実験土槽での均質地盤作成法に関する検討", 社内資料
- 4) 下平・山岡・伊藤・南坂(1986): "砂地盤における標準貫入試験結果に関する考察", 第21回土質工学研究発表会, pp. 27-30
- 5) Hanna, T. H. and Tan, R. H. S. (1973): "The behavior of long piles under compressive loads in sand", Can. Geotech. J., Vol. 10, No. 3, pp. 311-340
- 6) Uesugi, M. (1987): "Friction between dry sand and construction material", D. Eng. Thesis, Tokyo Institute of Technology