

杭の先端支持機構における地盤内影響領域の実験的評価

Experimental Evaluation of Influence Zone for End Bearing Capacity of Piles

鈴木大夢 Hiromu SUZUKI (広島大学大学院工学研究科)  
一井康二 Koji ICHII (関西大学社会安全学部)

矢板式岸壁の控え杭などでは、杭の先端が支持層に達していない場合があり、有限要素解析における先端支持力のモデル化が難しい。そこで、載荷荷重によって変形する杭の先端付近の地盤領域(影響領域)を考慮したモデル化手法が提案されたが、このモデル化では影響領域の範囲を正しく把握する必要がある。本研究では、異なる土質条件に対して、実際の影響領域の範囲を模型実験によって実験的に検討し、既往の解析的検討結果と比較した。実験結果では、相対密度や内部摩擦角を変化させても影響領域の変化はほとんどなく、解析とは異なる結果を示した。

キーワード：相対密度、内部摩擦角、影響領域 (IGC : E04)

1. はじめに

杭基礎は、主に地表面から軟弱な地盤が厚く堆積しており、地盤に構造物を直接支持させることが困難な場合に採用される。また、直接支持が必要な構造物以外にも係留施設である矢板式岸壁などの控え杭としても用いられている。ここで、控え杭には通常大きな鉛直荷重が作用することがない。そのため杭の先端が支持層に達していない場合が多い。近年、これらの杭に対しても適切に先端支持力をモデル化することの必要性が指摘され、有限要素解析による支持力の検討が提案されている。

杭の先端支持機構については、これまでに様々なアプローチから研究がなされている。脇田<sup>1)</sup>は、杭の荷重と沈下量の関係は双曲線近似との適合性が高いことを報告している。Hirayama<sup>2)</sup>は、砂地盤中の場所打ち杭の周面摩擦力や先端支持力の荷重変位関係を双曲線で近似することを提案している。安福ら<sup>3)</sup>は、種々の砂が持つ圧縮性の違いに着目した先端支持力の発現特性を検討している。桑島ら<sup>4)</sup>は、破砕性土地盤においては杭先端付近の地盤に密度の高い領域が形成されることを確認している。大谷ら<sup>5)</sup>は、産業用X線CTスキャナを用いて鉛直荷重作用時の杭先端地盤の支持力メカニズムを3次元的に評価している。

上記の杭の先端支持機構に基づき現在までに有限要素解析法における様々な先端支持力の2次元解析モデルが提案されている。しかしながら、これらの解析モデルにはそれぞれ問題点がある<sup>6)</sup>。これまでの提案モデルをまとめると図-1のようになる。モデル①は、杭をばねを介して地面に接続しており、地盤への影響が考慮されていない。モデル②は、杭先端の接点と地盤の接点を直接接続したモデルであるが、解析結果が地盤要素のメッシュサイズに依存し不安定となる。モデル③は、モデル②に先端支持力として非線形ばね要素を加えたモデルであり、先端支持力を表現する非線形ばね要素と地盤要素が直接つなが

った構造となる。この時、載荷荷重による非線形ばね要素の変形に加えて、非線形ばね要素によって伝えられた応力による地盤要素に変形が生じ、杭の沈下量を変形量のダブルカウントによって過大評価してしまう恐れがある。

これらの問題点を踏まえて新たに載荷荷重によって変形する杭の先端付近の地盤領域を影響領域と定義し、影響領域の境界面に非線形ばねの地盤側接点と複数の従属点を設置した多点拘束によって地盤変形量のダブルカウントを最小限にする手法が提案されている。しかし、この手法では影響領域の適切な評価が不可欠である。

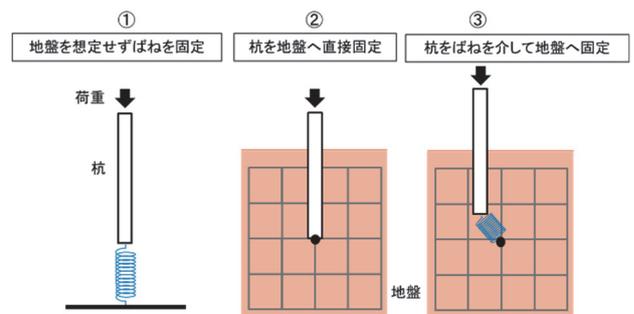


図-1 既往の解析モデル

影響領域に関しては、Yang<sup>7)</sup>によって空洞拡張理論を用いた解析的研究がなされており、影響領域の鉛直方向の範囲(杭先端から影響領域の最下端までの長さ) $I_{FD}$ は、以下の式(1)で示されている。

$$\frac{I_{FD}}{D} = \frac{1}{2} \left( \tan \phi' + \sqrt[3]{\frac{G}{G\Delta + P_0'} \frac{1}{\cos \phi'}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $D$ は杭径、 $\phi'$ は内部摩擦角、 $G$ は剛性率、 $\Delta$ は体積ひずみ、 $P_0'$ は拘束圧である。また、体積ひずみは式(2)によ

って決定される。

$$\Delta = 50 \left( \frac{G}{P_0 \tan \phi} \right)^{-1.8} \quad (2)$$

したがって、影響領域の鉛直範囲は拘束圧、内部摩擦角や剛性率といった土質特性、相対密度によって変化するといえる。ただし、本研究では、この影響領域は塑性領域および弾性領域の変形が生じる部分も含んでいる。そのため、Yangによる影響領域と全く同じではない。

Yangの研究は解析的な検討のみであり、実現象との対応は確認されていない。本研究では模型杭の貫入試験を行い、実験的に影響領域を評価して、Yangの解析で示された各種の影響因子が実際に影響領域の範囲に影響を及ぼすかどうかを明らかにする。

## 2. 実験概要と土質条件

### 2.1 実験の概要

模型地盤を木製土槽内に締固めによって作成した。模型地盤内にアルミ製の模型杭を46.5cmの初期根入れ深さで設置した。杭と地盤間にグリス等の摩擦低減の工夫は行っていない。図-2に示す荷重試験装置を用いて荷重試験を行い、模型杭を供試体内に貫入させた。この荷重試験装置では、荷重制御による荷重が可能で、荷重対象物に図中の円形荷重板を用いて荷重を行う。荷重板の自重は0.175kNである。また、荷重板上部におもりを載せることで追加の荷重を与えることができる。

模型地盤は鉛直断面が1辺24.5cmの正方形で、高さは

表-1 荷重試験ケースおよび土試料の物理的性質

	Case番号	土粒子密度	拘束圧	初期剛性率	内部摩擦角	相対密度	間隙比	使用土槽
まさ土	Case1	2.646g/cm <sup>3</sup>	0.89KPa	11.2MPa	37.0° ~ 43.0°	50%	1.12	(a)
	Case2		1.01KPa	13.6MPa		70%	1.02	(a)
	Case3		0.89KPa	11.2MPa		50%	1.12	(b)
山砂	Case4	2.696g/cm <sup>3</sup>	0.93KPa	11.4MPa	32.2°	50%	0.89	(a)

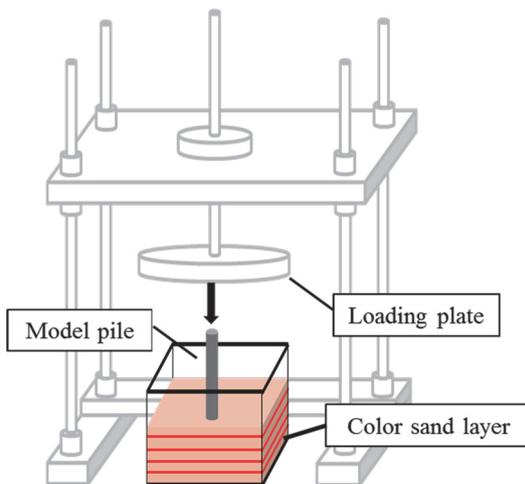


図-2 荷重試験装置および荷重試験の概要

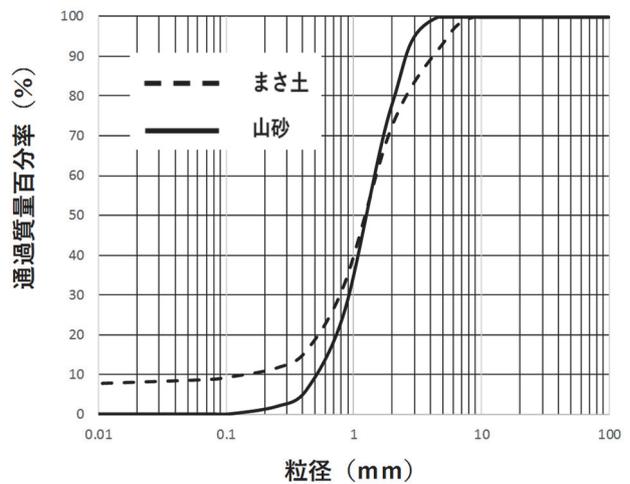


図-3 各土試料の粒径加積曲線

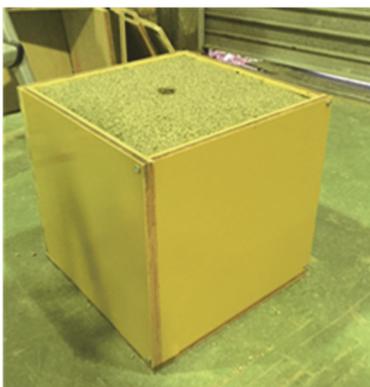


図-4 通常土槽 (土槽(a))

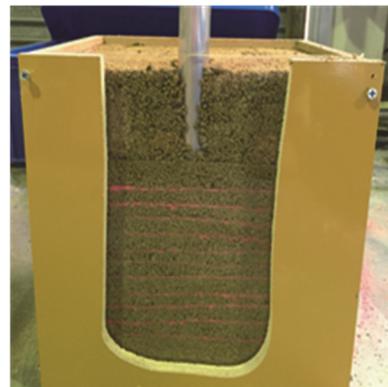


図-5 アクリル板付土槽 (土槽(b))

25.0cm である。また、模型杭は直径が 2.5cm で、長さが 20cm である。地盤変形を可視化するため、カラーサンドを模型地盤底面から約 3cm, 4.5cm, 6cm の高さ、更に 6cm より高い所は 1.25cm の間隔で模型地盤底面から 16cm の高さまで薄く敷き詰める。地盤の変形はカラーサンド層の変形から考察した。カラーサンドは、粒径が 0.2mm, 0.5mm, 1mm のものをそれぞれ等重量で混ぜ合わせたものを使用した。

荷重時には模型杭の貫入量を測定し、模型杭を初期根入れ深さである供試体表面から 6.5cm の位置からさらに 10.5cm 下まで貫入させた。荷重途中で沈下が終了した場合は、十分な時間をおいて沈下が終了していることを確認した後、荷重板上部に追加の荷重を設置し、模型杭をさらに貫入させる作業を繰り返した。そして、模型杭が 10.5cm 貫入した時点で荷重試験を終了とした。なお、貫入量を 10.5cm にしたのは、地盤を大きく変形させることで杭貫入による杭先端部の地盤変形を明確に観察するためである。荷重終了後は、土槽をそのまま（杭を貫入した

状態で)大型冷凍庫に約 24 時間保管し、凍結処理した。凍結終了後に土槽側面の木材を取り外し、ノコギリで凍結地盤を切断した。これによって、荷重試験によって変形した地盤試料の断面を観察することが可能である。なお、本模型実験は非遠心場で行った。

## 2.2 荷重試験ケース

荷重試験ケースおよび土試料の物理的性質を表-1 に示す。表中のまさ土の内部摩擦角は Tsuchida ら<sup>8)</sup>による一面せん断試験の結果から得た。初期剛性率は相対密度の増大と共に大きくなるが、内部摩擦角の変化及び試料の違いによる変化はほとんどない。したがって、拘束圧が全試験ケースで同程度である本模型実験では剛性率の変化は相対密度の変化とほぼ同義であるといえる。Yang<sup>7)</sup>によると、影響領域は土の拘束圧、内部摩擦角、相対密度の影響を受ける。そこで、Case1 と Case2 を比較することで相対密度による影響領域の変化、Case1 と Case4 を比較することで内部摩擦角の違いによる影響領域の変化をそれぞれ

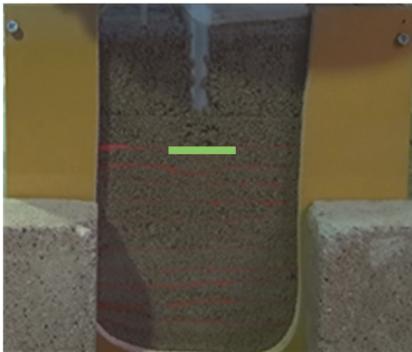


写真-1 貫入量 1.93cm 時の  
カラーサンド変形写真(Case3)

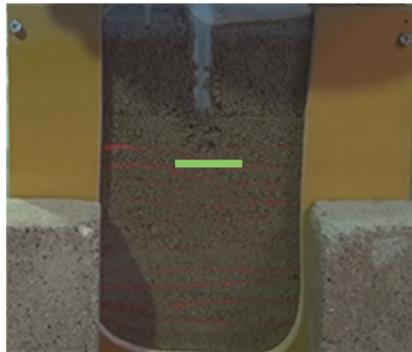


写真-2 貫入量 2.60cm 時の  
カラーサンド変形写真(Case3)

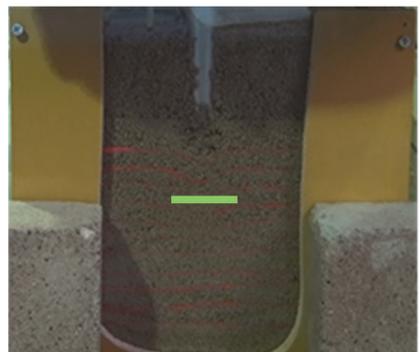


写真-3 貫入量 4.48cm 時の  
カラーサンド変形写真(Case3)

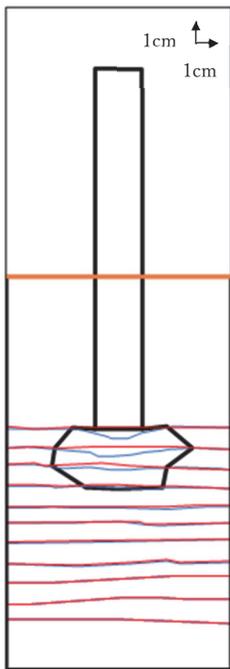


図-6 貫入量 1.93cm 時の影響領域  
(Case3)

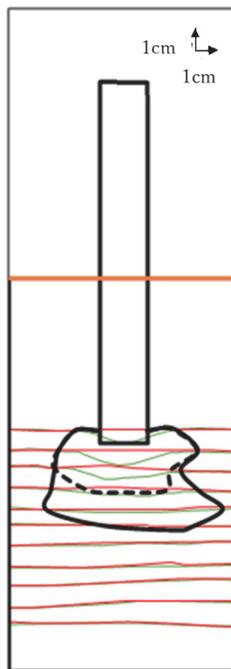


図-7 貫入量 2.60cm 時の影響領域  
(Case3)

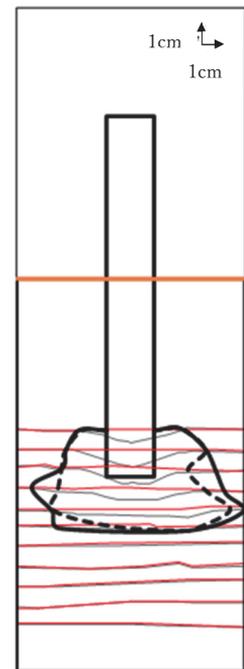


図-8 貫入量 4.48cm 時の影響領域  
(Case3)

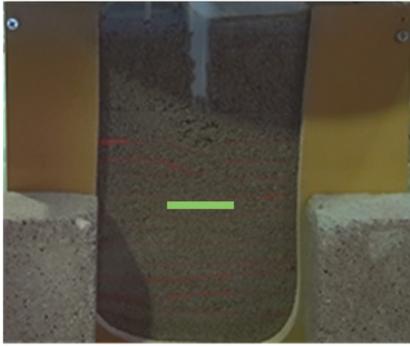


写真-4 貫入量 5.42cm 時の  
カラーサンド変形写真(Case3)

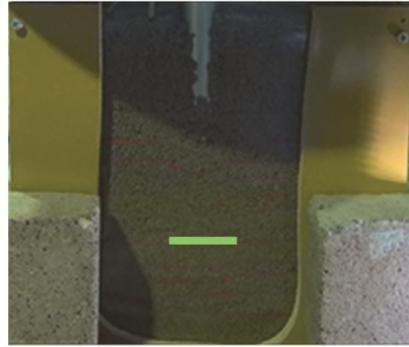


写真-5 貫入量 8.00cm 時の  
カラーサンド変形写真(Case3)

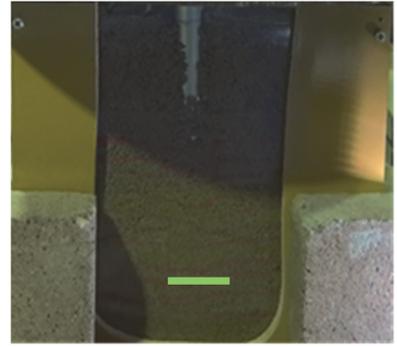


写真-6 貫入量 10.50cm 時の  
カラーサンド変形写真(Case3)



図-9 貫入量 5.42cm 時の影響領域  
(Case3)



図-10 貫入量 8.00cm 時の影響領域  
(Case3)

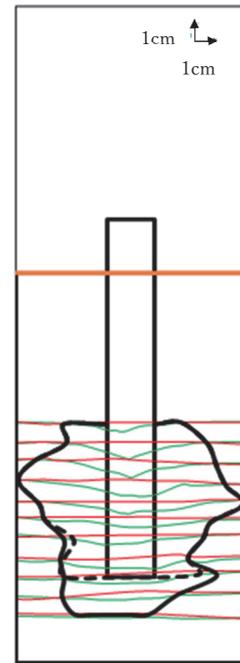


図-11 貫入量 10.50cm 時の影響領域  
(Case3)

評価する。なお、Case1 の実験のみカラーサンド層の位置が模型地盤底面から 3cm, 6cm, 11cm, 16cm の 4 箇所であり、他の Case と異なっている。

載荷試験に用いた土試料はまさ土および福岡県産山砂である。各土試料の粒径加積曲線は図-3 の通りである。土槽は、図-4 および図-5 に示す 2 種類の木製土槽(a), (b) を用いた。土槽は厚さ 1.2mm の合板を長さ 30mm の木工用半ねじで固定することで作成した。図-4 に示した土槽(a)を用いた Case1, 2, 4 の実験では、模型杭を供試体中心部に設置し、無変形箇所である土槽壁面の影響をほとんど受けない地盤変形を観察した。一方、図-5 に示す土槽(b)を用いた Case3 の実験では、4 つの土槽壁面のうち 1 つをジグソーによって切り抜き、その部分に透過性の高い厚さ 0.5cm のアクリル板をはめ込んでいる。このため、模型杭をアクリル板近傍に設置することで、模型杭貫入による地盤の変形メカニズムをリアルタイムで視覚することが可能である。ただし、土槽(b)の場合は、アクリル板の境

界面の摩擦などが模型杭貫入時の杭周辺の地盤変形に対して影響を及ぼす可能性がある。なお、土槽(b)の実験では、冷凍および解体の工程は行わなかった。

相対密度は供試体作成時に締固めによって調整し、まさ土の場合は 50%および 70%、山砂の場合は 50%とした。また、まさ土は相対密度 50%でアクリル板土槽(b)を用いた載荷試験も行い、地盤の変形過程を観察した。なお、非遠心場での模型実験であり上載荷重もないため、非常に小さな拘束圧となる。

### 3. 影響領域の実験的評価

#### 3.1 杭貫入時の地盤の変形過程

写真1~6に Case3 におけるアクリル板面の様子を示す。写真中の緑線は模型杭の先端位置である。また、図-6~11は Case3 のアクリル土層について模型杭先端位置ごとの

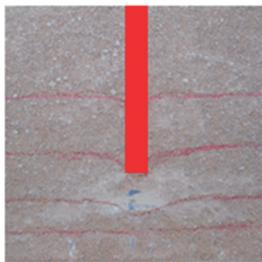
カラーサンド線の変形を初期状態と比較する形で示したものである。カラーサンド線(アクリル板面におけるカラーサンド層が為す線)に変形が生じている部分と変形が生じていない部分の境界点の座標を読み取り、境界点を結ぶことで、杭先端周辺の変形した地盤領域、つまり、影響領域を図示している。図中の実線で囲まれた領域が、図タイトルに記した貫入量時の影響領域であり、破線で囲まれた領域は、一つ前の図に示された影響領域と同じである。なお、ここで影響領域の定義は初期状態カラーサンド線(赤線)から 1mm 以上の鉛直変位が見られる領域としている。これらの図は、ペイントツールのピクセルの位置読み取り機能を用いて**写真-1~6**を基にカラーサンド層位置を図示したものである。ただし、土槽の内壁は図の枠線の外側にある。模型杭の先端深さは初期状態(模型杭貫入量=0cm)で 6.5cm、載荷試験終了時で 17.00cm であり、模型杭の最終貫入量は 10.5cm となる。

**図-6~9**を見ると、杭先端直下 3cm くらいまでのカラーサンド線の変形は大きく 1cm 程度変形している。しかしながら、杭先端から離れた領域でのカラーサンド線の変形量は小さく、最終的には全く変形がみられなくなる(影響領域外)。したがって、影響領域内では、杭先端付近の地盤の変形量が大きく、杭先端から離れるほど地盤の変形

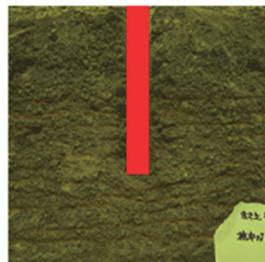
が小さくなるといえる。杭の貫入量が大きい**図-10~11**では、カラーサンド層の変形は、杭先端直下 2.5cm 程度であった。本実験からは、低拘束圧下であるが、沈下量の大小から影響領域の範囲を把握することができることを確認した。なお、本節で検討した影響領域は、アクリル面(杭中心から 1.25cm の断面)で観察されたものであるため、杭中心断面における影響領域はより大きくなると推測される。

### 3.2 地盤条件を変えた載荷試験の結果

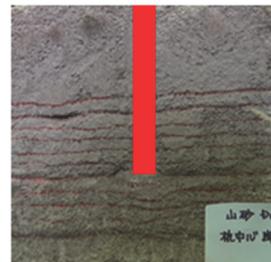
Case1, Case2, Case4 を対象に地盤条件(相対密度、内部摩擦角)を変えた場合の杭先端直下部に形成される影響領域を検討した。**写真-7**に各ケースにおける杭中心断面の状態を示す。写真中の赤色領域は模型杭貫入位置である。なお、照明の加減で同じまき土であっても色合いが大きく異なっている。これらの写真を基に**図-6~11**と同様の方法で影響領域を図示したものを**図-12**に示す。アクリル板のないこれらのケースでは載荷直前のカラーサンド線の位置を確認できない。そこで、土槽両端部付近のカラーサンド層位置の初期高さ(2.1 節参照)を設定し、そこからカラーサンド線に 1mm 以上の変形が見られる領域を影響領域とした。ただし、設定したカラーサンド線の初期高さと同観測されたカラーサンド線に 1mm 以上の差が生じている



(a)まさ土  $D_r=50\%$ (Case1)

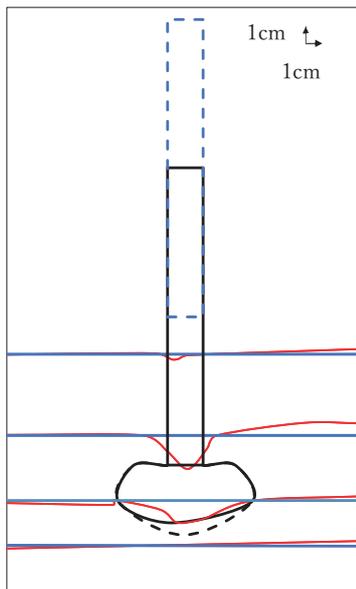


(b)まさ土  $D_r=70\%$ (Case2)

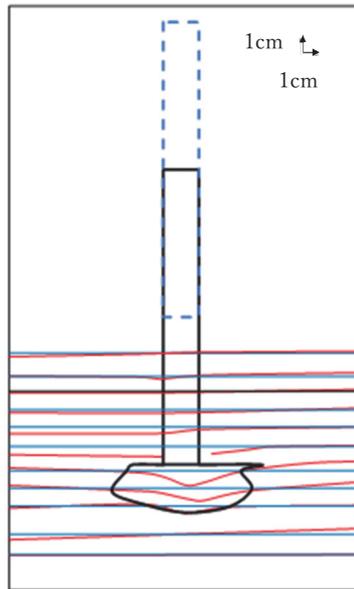


(c)山砂  $D_r=50\%$ (Case4)

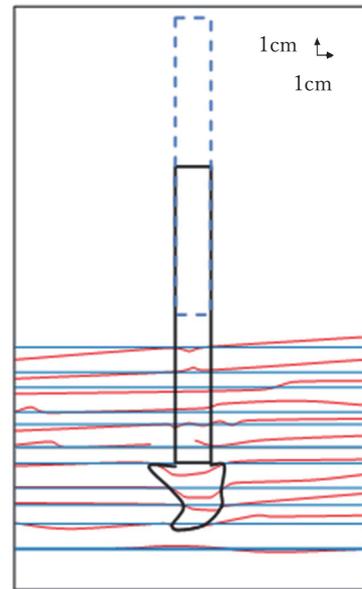
写真-7 各ケースにおける杭中心断面写真



(a)まさ土  $D_r=50\%$ (Case1)



(b)まさ土  $D_r=70\%$ (Case2)



(c)山砂  $D_r=50\%$ (Case4)

図-12 杭下部領域に形成される影響領域

場合でも、杭貫入による変形でないことが明らかな場合は非影響領域とした。図中の青線が設定したカラーサンド線の初期高さ、赤線が貫入試験後のカラーサンド線、黒線で囲まれた部分が推定した影響領域である。なお、図-12(a)と(b)、(c)では、カラーサンド層の数が異なるため、(b)、(c)と同様のカラーサンド層が(a)にもあった場合に推定される影響領域を図-12(a)に限り破線で示した。

図-12(a)と(b)をみると、実線で示された範囲では両者に見られる影響領域は同程度である。ただし、破線領域に着目すると、(a)の方が(b)よりも少し大きいといえる。図-12(a)は  $D_r=50\%$  のまさ土で、図-12(b)は  $D_r=70\%$  のまさ土である。このことから、相対密度の変化によって影響領域の大きさは変わらない。もしくは、相対密度の小さい地盤の方が影響領域がやや大きくなるといえる。

図-12(a)と図-12(c)を深さ方向に着目してみると、実線範囲では図-12(c)で見られる影響領域の方が大きい、破線範囲では同程度となっている。図-12(c)は  $D_r=50\%$  の山砂であり、まさ土より内部摩擦角が小さい。このことから、内部摩擦角が変化しても影響領域の大きさは変わらないといえる。

### 3.3 解析的方法による検討結果との比較

本節では模型杭貫入載荷試験の結果と Yang による解析的方法による検討結果を比較した。Yang の結果では、影響領域の範囲は、拘束圧、相対密度(剛性率)、内部摩擦角の影響を受ける。そこで、第1章で示した解析式(1)を用いて、拘束圧、相対密度、内部摩擦角、剛性率およびせん断ひずみをから影響領域の範囲を考えた。拘束圧は、表-1 から全ケースと同程度である  $P_0' = 1\text{kPa}$  とし、せん断ひずみは影響領域の条件から  $\gamma = 0.0408$  とした。相対密度、内部摩擦角、影響領域の範囲は表-2 に示す。表より Yang の解析では相対密度の増大と共に影響領域が大きくなり、内部摩擦角が大きい地盤の方が大きな影響領域が形成されることがわかる。

表-3 は、本研究で行った模型杭貫入載荷試験の結果と Yang による解析結果を比較したものである。実験では解析結果とは異なり全ケースにおいて影響領域の変化はほとんど見られなかった。ここで生じた違いの原因は未解明だが本研究と Yang による影響領域の定義が異なることが原因の一つとして考えられる。

表-2 解析による影響領域の推定結果  
(拘束圧  $P_0' = 1\text{kPa}$ )

相対密度 (%)	50	50	70	70
内部摩擦角 (°)	40	32	40	32
$I_{FD} / D$	4.74	4.62	4.76	4.74

表-3 模型杭貫入載荷試験の結果と Yang による解析結果を比較

	相対密度が 増大	内部摩擦角が 増大
解析による 影響領域	増大	増大
実験から得た 影響領域	同程度もしくは やや減少	同程度

## 4. 結論

影響領域の範囲を実験的に検討することを目的とし、異なる2種類の砂(まさ土、山砂)を用いて土槽内に地盤を作成し、模型杭に載荷荷重を与えることで模型杭を貫入させ、地盤の変形を観察した。さらに、側面にアクリル板を設置した土槽を用いて、同様に模型杭貫入載荷試験を行うことで、地盤の変形過程を観察し、影響領域の範囲を評価した。これらの実験から得られた知見を以下に記す。

- (1) 低拘束圧下の実験であるが、模型杭の貫入にともなう地盤変形をカラーサンドの線の移動により把握することができ、模型実験により影響領域の大小関係を定性的に把握できることを確認した。
- (2) 実験においては、相対密度の大小による影響領域の変化はほとんどなかった。もしくは、相対密度の小さい地盤の方が影響領域がやや大きくなった。また、内部摩擦角の変化による影響領域の変化はみられなかった。
- (3) 模型実験による結果と解析による結果は全ケースにおいて差異が生じており、本研究と Yang による影響領域の定義が異なることが原因の一つとして考えられる。

本研究における模型実験は非遠心場での実験であり、拘束圧が非常に小さいため、実地盤に対して行う解析への適用には課題が残る。今後は、遠心場において遠心模型載荷実験を行うことで、模型杭貫入載荷試験の精度を向上させる必要がある。また、模型杭貫入載荷試験後の地盤を土槽ごと凍結処理して解体する方法による実験では、地盤の正確な初期状態がわからなかったため、杭中心断面における影響領域の範囲を定量的に評価することは困難であった。そのため、CT スキャンによる方法など、杭中心断面において影響領域の範囲を定量的に評価する手法を考えなければならない。

### 参考文献

- 1) 脇田英治：杭の標準沈下特性に関する研究，土木学会論文集，No. 603, III-44, pp. 45-52, 1998.
- 2) Hirayama, H : Load-Settlement Analysis for Bored Piles Using Hyperbolic Transfer Functions, *Soils and Foundations*,

Vol.30, No.1, pp.55-64, 1990.

- 3) 安福規之, 田中邦博, 村田秀一, 兵動正幸 : 圧縮性の卓越した砂中の杭の先端支持力とその評価, 土木学会論文集 No. 505, III-29, pp.191-200, 1994.
- 4) 桑嶋啓治, 兵動正幸, 上俊二 : 杭の先端支持力特性に及ぼす周辺地盤の挙動と粒子破碎の影響, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol. 69, No. 2, pp.259-271, 2013.
- 5) 大谷順, 平井貴雄, 弘中淳市, 椋木俊文 : 鉛直荷重下における杭先端地盤の3次元支持力特性, 土木学会論文集 C, Vol. 42, No.2, pp.311-319, 2006. 大谷順, 尾原祐三, 菅原勝彦, 椋木俊文 : 地盤工学における産業用 X 線 CT スキャナの適用, 土と基礎, Vol. 48, No. 2, pp.17-20, 2000.
- 6) 兵頭順一, 塩崎禎郎, 曾根照人, 小堤治, 一井康二 : 二次元有効応力解析における杭の先端支持力のモデル化手法, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, (地震工学論文集 34 巻), pp.408-423, 2015.
- 7) Yang, J. : Influence Zone for End Bearing of Piles in Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, pp.1229-1238, 2006.
- 8) Tsuchida, T. A.M.R.G.Athapaththu, Kano, S. and Kazuaki, S : Estimation of In-Situ Shear Strength Parameters of Weathered Granitic (Masado) Slopes Using Lightweight Dynamic Cone Penetrometer, *Soils and Foundations*, JGS, Vol.51, No.3, pp.497-512, 2011.

(2017年6月19日 受付)

