

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 8 月 25 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010 年度～2012 年度

課題番号：22360191

研究課題名（和文）開端杭の支持力メカニズムの解明と支持力推定手法の高度化

研究課題名（英文）Bearing mechanism and estimation of bearing capacity of open-ended piles

研究代表者

菊池喜昭（KIKUCHI YOSHIAKI）

東京理科大学・理工学部土木工学科・教授

研究者番号：40371760

研究成果の概要（和文）：開端杭の先端支持力発現メカニズムを検討するため、杭の貫入方法、支持層の層厚、杭の肉厚、地盤の種類などを変えた室内実験と数値解析を実施した。いくつかの実験は X 線 CT 装置内で実験することにより、杭周辺地盤の変形状況の観察も実施した。杭の支持力の問題は現地での載荷試験結果の評価が重要であるので、室内実験とともに、現地載荷試験データについても検討を行った。この結果、杭の先端支持力を杭径に依存する形で求める方法を示した。

研究成果の概要（英文）：Laboratory experiments and numerical analyses of pile penetration with varying pile penetration methods, pile dimensions, ground conditions were conducted to investigate the bearing mechanism of a pile. Field loading tests on single piles were collected and investigated to evaluate the bearing capacity of actual piles, because it is important to know the bearing capacities of actual piles. Finally we proposed an evaluation method for pile bearing capacity as a function of pile diameter.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	2,300,000	690,000	2,990,000
2012年度	1,500,000	450,000	1,950,000
年度			
年度			
総計	8,300,000	2,490,000	10,790,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：杭の支持力、開端杭、閉塞効果、X 線 CT 装置

1. 研究開始当初の背景

従来から、先端が解放している杭(開端杭)の先端支持力は、内周面抵抗と杭の先端の実質部の抵抗の和で表すことができるとされている。しかし、内周面抵抗の発現の程度を定量的に評価するのは難しい。これまで、サイロ理論の拡張によって内周面抵抗を評価する方法が提案されている。この手法に基づいて内周面抵抗を評価しようとする、内周

面に作用する土圧係数として、非常識なほどに大きな値を仮定する必要がある。また、その考えられているメカニズムから支持地盤への杭の根入れを非常に大きくすることが有効であるとされてきた。ただし、内周面摩擦を発現するのに必要な杭の貫入量については十分な知見がなかった。

現実の問題では、砂質地盤ばかりでなく、粘性土地盤の場合の内周面抵抗も問題とな

る。粘性土地盤については従来の考え方では大きな内周面抵抗が期待できないことになるが、現実的には、非常に大きな支持力を発現するケースがあることが分かっている。また、支持層厚が薄い場合の支持力メカニズムについても十分な議論は尽くされていない。

これらの問題を議論するには、抵抗力そのものの議論のみならず、周辺地盤、管内土の変形の問題についても議論することが必要となる。

2. 研究の目的

ここでは、支持層として十分な層厚を有する乾燥砂地盤、飽和砂地盤、硬質な粘性土地盤のほかに、層厚が十分でないと考えられる支持地盤(礫地盤)における開端杭の先端支持力の推定手法の高度化を目指し、以下の4項目について検討する。

- (1) 杭の貫入に伴う開端杭周辺地盤の変形挙動を把握する。
- (2) 杭の貫入に伴う開端杭の支持力発現状況を把握する。
- (3) 開端杭のこれまでの施工事例、載荷試験結果を収集し、実際の杭で発現している支持力の現状を把握する。
- (4) 開端杭の先端支持力推定手法を提案する。

3. 研究の方法

- (1) 杭の貫入に伴う開端杭周辺地盤の変形挙動の把握

X線CT装置を用いて、杭の貫入試験を行い、杭周辺地盤の変形挙動について把握する。X線CT装置は、その撮像能力の限界から、大口径の杭の実験ができない。そこで、この実験では、外径3cm程度までの小口径の杭を用いた実験を行う。

- (2) 杭の貫入に伴う開端杭の支持力発現状況の把握

様々な条件で開端杭の支持力発現メカニズムを検討する実験を実施する。

- (3) 開端杭のこれまでの施工事例、載荷試験結果を収集し、実際の杭で発現している支持力の現状を把握する。

これまでに実施された信頼のおける載荷試験結果を整理することにより、原位置における杭の支持力発現状況を把握する。

- (4) 開端杭の先端支持力推定手法を提案する。

これまでの実験結果を総合し、過去に提案されている内周面摩擦力発現メカニズム理論や原位置での載荷試験結果を考慮して、新たな支持力推定手法を提案する。

4. 研究成果

- (1) 杭の貫入に伴う開端杭周辺地盤の変形挙動の把握

1-1)砂地盤に貫入する開端杭の先端抵抗に及ぼす、湿潤状態、貫入方法の違いの影響

室内模型実験では、実験方法の簡便さの理由から、乾燥砂地盤において静的貫入によって杭の支持力を調べる事が多い。ここでは、砂地盤の湿潤状態(気乾、飽和)と貫入方法(静的、打撃)を変えて、杭の貫入挙動に及ぼすこれらの条件の違いを検討した。

実験に用いたのは、豊浦砂($\rho_s=2.641\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.650\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.340\text{g/cm}^3$, $D_{50}=0.165\text{mm}$)である。相対密度は $Dr=80\%$ とした。用いた土槽は縦横30cmで、層厚は40cmとした。用いた杭は、外径2cmのアルミニウム製で、閉端杭と開端杭(肉厚2mm)である。

図-1に貫入量と貫入抵抗の関係を示す。この結果を見ると、飽和地盤の貫入抵抗が乾燥地盤の貫入抵抗より小さい。これは、水の存在による有効拘束圧の違いに起因するものであると考えられる。また、乾燥地盤のほうが閉端杭と開端杭の抵抗の違いが大きくなる傾向にあることがわかる。また、赤い線で示した実験は、150mmまで動的に貫入した杭を、その後静的貫入した時の貫入量と抵抗の関係を示している。打撃貫入した後に静的貫入したものは、貫入の初期から静的貫入したものよりもやや大きな貫入抵抗を示すが、全体的にみると抵抗力の差は比較的小さなものであり、貫入方法の違いが支持力発現挙動に及ぼす影響は少ない。別途調べた、杭内の地盤高さの変化を見ても、初期貫入方法の違いによる杭内地盤高さの違いはあまり大きくない。

このように、打設方法の違いによる杭の支持力の違いは杭内に貫入してくる土の量だけからは評価できず、杭の周辺の地盤の挙動についてさらに詳しく検討することが必要であることが分かった。

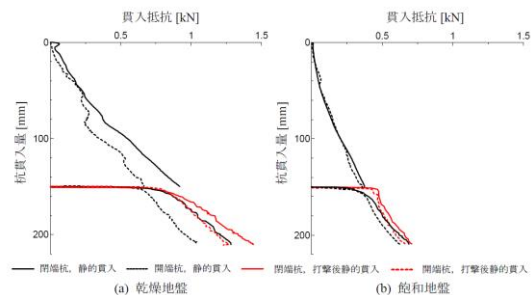


図-1飽和砂と乾燥砂地盤での杭の貫入抵抗の違い

図-2には、打撃貫入と静的貫入で杭周辺地盤の挙動がどのように異なるかX線CT装置の中で実験した結果を示す。実験に用いたのは、珪砂4号($\rho_s=2.644\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.618\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.342\text{g/cm}^3$, $D_{50}=0.77\text{mm}$)である。相対密度は $Dr=35\%$ とした。用いた土槽は内径10cmの亚克力円筒で、層厚は44cmとした。用いた杭は、外径1.5cmのアルミニウム製の開端杭で、肉厚1mmである。これらの結果を見る限り、貫入方法の違いによる周辺地盤の挙

動の変化もあまり大きくはない。

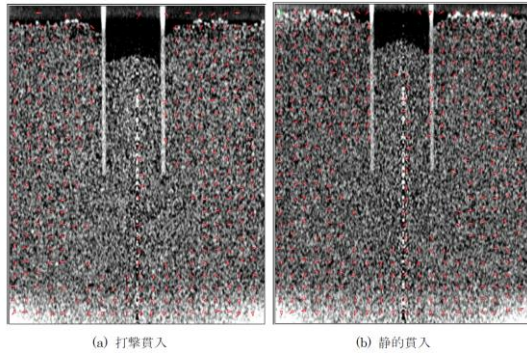


図-2 地盤に41.5mm貫入した時の地盤の様子と、37mm~41.5mmまで貫入した間の杭周辺地盤の移動の様子

さらに、 $D_r=70\%$ の地盤で、杭貫入方法の違い(打撃及び静的)によるその後の静的載荷時の杭の周辺地盤の挙動の違いについて再度調べ、せん断ひずみ分布としてあらわしたのが図-3である。この図の(b)に顕著に表れているように、打撃貫入した場合の方が、静的貫入初期に杭下端付近の地盤のせん断ひずみが大きくなる傾向にあるが、その差は引き続き貫入によって小さなものになってしまう。

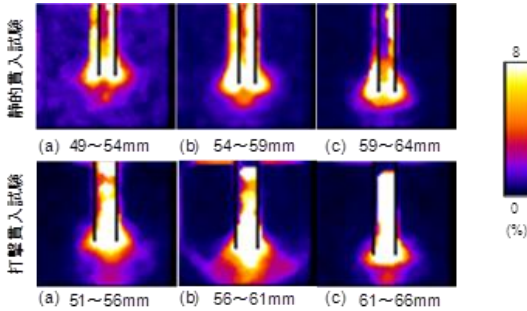


図-3 せん断ひずみ分布

実際の現場では、杭設置後の杭径に対して数%以下の沈下時の杭の支持力挙動が重要である。そのことを考えると、図-3に示した違いと図-1に示した違いは小さな違いとは言えない可能性がある。

(2) 杭の貫入に伴う開端杭の支持力発現状況の把握

2-1) 薄層に支持された開端杭の支持力

この検討では、初めに杭周辺地盤の変形挙動を見るために、X線CT装置を用いた観察をした。次に、三重管を用いて内周面摩擦、先端支持力、外周面摩擦を分離して計測する実験を行った。さらに、数値解析により、薄層の支持地盤を通過する際の杭の支持力変化について考察を加えた。

X線CT装置を用いた実験では、砂は珪砂を用いた。支持層と支持層以外を区別するために、珪砂の号数を変えて用いた。具体的には、支持層以外の層には珪砂4号($\rho_s=2.644\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=0.970$, $e_{\min}=0.634$, $D_{50}=0.77\text{mm}$)を、

支持層には珪砂2号($\rho_s=2.632\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=0.791$, $e_{\min}=0.579$, $D_{50}=2.14\text{mm}$)か、珪砂3号($\rho_s=2.646\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=0.798$, $e_{\min}=0.563$, $D_{50}=1.30\text{mm}$)を用いた。いずれの試料も気乾状態で用いた。土槽は内径10cmの亚克力円筒で、層厚は44cmとした。杭は、外径1.5cmのアルミニウム製の開端杭で、肉厚1mmである。

図-4に行った実験ケースの概要を示す。図-4に示すように、支持層となる薄層の層厚、支持層の上下の地盤の密度を変化させて実験を行った。この実験ケースのうち特徴的な地盤の変形挙動が観察された結果を図-5に示す。

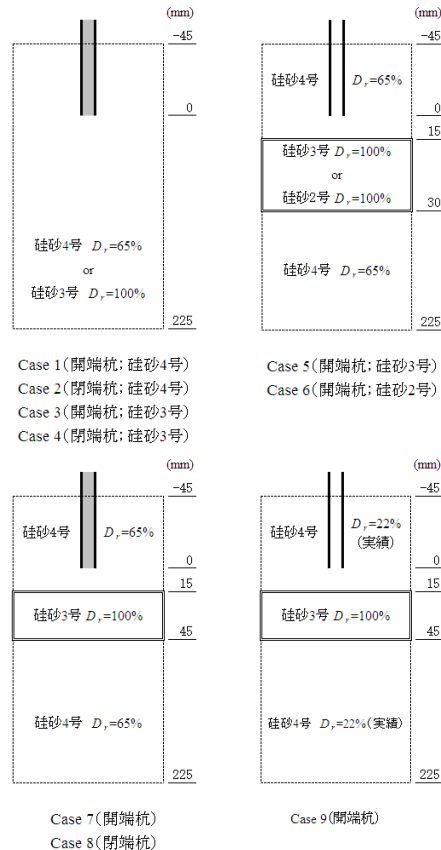


図-4 実験ケース

図-5の結果を見ると、開端杭であっても、支持層があまりにも薄い場合には、貫入に伴う変形が生じる可能性があることを示唆しており、支持層として適さない可能性があることを示している。さらに、礫層より下の地盤密度が低い場合には、杭先端が礫層内にある場合でも下の地盤に変形が生じ、杭の貫入量に対し十分な抵抗が見られない傾向にあった。

また、X線CT装置では、模型サイズが小さく、貫入抵抗の推定精度に限界があるため、外径25cmの模型杭を用いた中間礫層を有する地盤での貫入実験を行い、薄い支持層の有無による貫入抵抗の変化について検討した。

この実験では、一般の砂層の地盤材料には珪砂4号($\rho_s=2.644\text{g/cm}^3$, $e_{\max}=0.970$, $e_{\min}=0.634$, $D_{50}=0.77\text{mm}$)を用い、礫層には、単粒度碎石

S-20(5号)を用いた。実験に用いた杭は図-6に示すような三重管構造となっており、外径24.6cm、内径20cm、長さ1.65mである。この杭の構造のイメージ図を図-6に示す。なお、図中の杭内盤を杭先端に固定すると閉端杭の実験ができるようになっている。

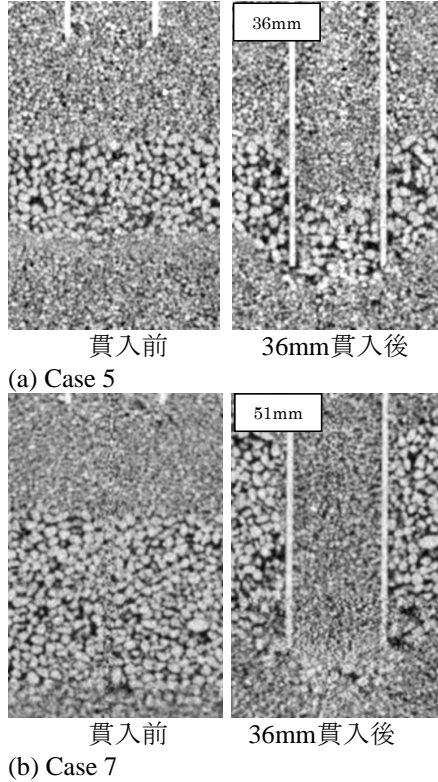


図-5 薄層支持の場合の支持層の変形挙動

実験に用いた土槽は、コンクリート土槽で、幅2m、奥行き2m、深さ1.5mである。地盤は気乾状態で作成し、全層厚は1.5mとし、表面から20cmを砂層とし、実験ケースによってその下の礫層の層厚を5、20、40cmと変化させた。砂層の相対密度は34%とした。これは、緩詰めを狙ったせいではなく、実験の都合上空落下法ではこの密度でしか地盤が作製できなかったためである。

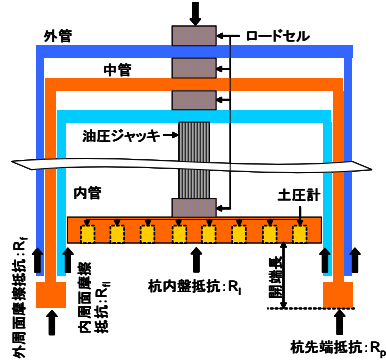


図-6 三重管構造の杭のイメージ図

図-7に礫層の層厚の違いによる杭の支持力の違いを示す。支持層がいずれの層厚の場合でも支持層の上面に杭先端が来ると支持力が上がり始め、支持層の下端を通過してしばらくすると支持力が低下し始める。この図には、閉端杭で支持層の層厚が20cmのケースの結果を重ね書きしているが、閉端杭では、支持層の上面よりもはるかに根入れの浅いところから支持力が増加し始めているのと好対照であり、支持層を通過した後も開端杭のように支持力が低下しておらず、好対照を示している。また、支持層を通過した後の先端抵抗が支持層がない場合より小さくなっている。結果として、礫層があると、内周面摩擦は十分には発現しない傾向があることがわかった。

合でも支持層の上面に杭先端が来ると支持力が上がり始め、支持層の下端を通過してしばらくすると支持力が低下し始める。この図には、閉端杭で支持層の層厚が20cmのケースの結果を重ね書きしているが、閉端杭では、支持層の上面よりもはるかに根入れの浅いところから支持力が増加し始めているのと好対照であり、支持層を通過した後も開端杭のように支持力が低下しておらず、好対照を示している。また、支持層を通過した後の先端抵抗が支持層がない場合より小さくなっている。結果として、礫層があると、内周面摩擦は十分には発現しない傾向があることがわかった。

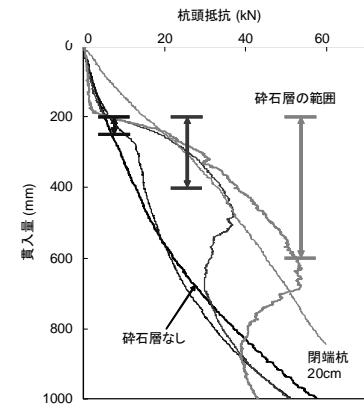


図-7 支持層厚の違いによる杭頭抵抗の違い

薄層支持の問題について有限要素法を用いた数値解析を行った。先の三重管の実験結果から、支持層が薄い場合の杭の先端支持力発現には、杭の先端が解放状態か閉塞状態かによって挙動が異なることがわかったので、その点に着目した数値解析を実施した。数値解析の結果、閉端杭のケースと開端杭のケースを比較すると、開端杭のケースは比較的小さな応力集中範囲を形成するものと考えられるものの、連続体として薄層地盤および上下層を対象に数値解析を実施した場合、両者に劇的な差は確認されなかった。実施した数値解析は、これまで実施した実験を忠実にシミュレーションしようとしたものではないにしても、力学的な傾向からみても類似している結果とは考えにくい。これは、実験が砂や単粒度砕石といった粒状体を対象としているのに対して、解析が連続体として取り扱っていることによる差であるのかもしれない。

以上支持層が薄い場合の杭の支持力について検討した結果を示したが、実験条件には限りがあり、非常に人工的な条件での実験であるため、現段階では一般的な結論が得られるところまで達していないと考えられる。

2-2) 杭の肉厚の違いが内周面摩擦の発現に及ぼす影響

ここでは、肉厚の異なる模型杭の貫入実験

を行い、杭貫入中に杭内に貫入した土の除去をした場合としない場合とで観察される杭挙動の違いから、内周面抵抗の発現の程度を評価しようとした。

用いた模型土槽は、内径 300mm の鋼製の土槽である。地盤材料は、珪砂 5 号 ($\rho_s=2.647\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.618\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.342\text{g/cm}^3$, $D_{50}=0.591\text{mm}$) を使用し、空中落下法にて $D_r=60\%$ 、高さ 250mm の模型地盤を作製した。また、模型杭は外径 D が 30mm、長さ L が 300mm のもので、肉厚の異なる 4 種類の杭を用いた。これらのうち、1 種類は閉端杭であり、それ以外は、肉厚 t は 4.4mm, 6.4mm, 7.5mm の 3 種類である。内空面積比は、それぞれ 0.5, 0.33, 0.25 である。杭の材質はアルミニウムである。

杭内部の土を除去する実験は次の手順で行った。杭の貫入量 30mm ごとに荷重を除荷し、杭の内部にある砂を除去し、杭を 30mm 貫入することを繰り返した。

図-8 に実験結果を示す。内空面積比が小さい場合(肉厚が大きい場合)には、杭径分も貫入しないうちに十分な支持力回復が見られ、内空面積比が大きくなると十分に支持力が回復しない傾向にあることがわかる。この実験結果をもとに、内周面の周長 1m あたりの内周面摩擦力を検討してみると、内空面積比が小さいほど、より大きな内周面摩擦が働いていることがわかった。内空面積比の違いによる内周面摩擦力の発現の程度の差は著しく異なっており、これは、内空面積比の違いによって内部の土圧係数が異なっていることを意味しているものと考えられる。

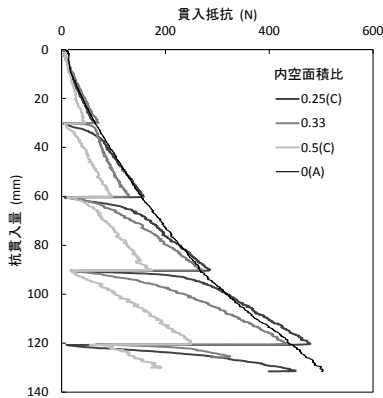


図-8 貫入量 30mm ごとに杭内部の土を取り除いた場合の杭の支持力の変化

2-3)硬質粘性土における杭の支持力発現メカニズム

硬質粘性土地盤における鋼管杭の貫入メカニズムを調べるため、珪砂にセメントミルクを混ぜて作成した模型地盤を用いて杭の静的貫入試験を実施し、その様子をマイクロフォーカス X 線 CT 装置により観察した。地盤材料には山形珪砂 7 号、普通ポルトランド

セメントを使用した。配合条件は、質量比でセメント：砂：水が 2：30：5 とした。この地盤の 28 日養生時の一軸圧縮強さは 879kPa であった。用いた土槽は内径 10cm のアクリル円筒で、層厚は 10cm とした。用いた杭は、外径 1.5cm のアルミニウム製の開端杭で、肉厚 1mm である。

図-9 に、実験で得られた貫入量と貫入抵抗の関係を示す。支持力が一定にならず、極めてガタガタした挙動となる。図-10 には X 線 CT で観察した、8.53mm 貫入した時の地盤の様子を示す。杭の内部に貫入した土が細かく割れていることがわかる。これは、杭の貫入とともに少しずつ剥離したことによるもので、この剥離現象と抵抗力のガタガタとが関係していることがわかった。

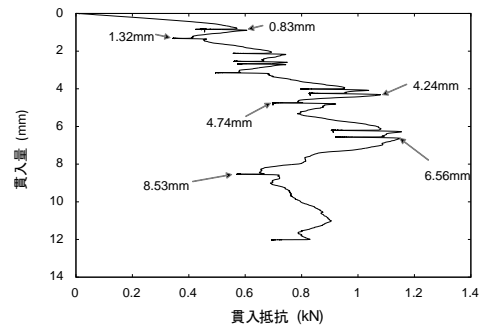


図-9 杭の貫入量と貫入抵抗の関係

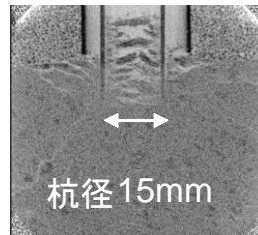


図-10 8.53mm 貫入した時の CT 画像

(3)及び(4) 現地における杭の支持力の現状と支持力評価方法の提案

以上のように、室内実験及び数値解析結果をもとに様々な地盤での杭の支持力発現の様子を調べてみたところ、条件によって考えるべきことが大きく異なっていることが明らかとなった。結果として開端杭の先端支持力を統一的に説明するには現段階では研究が十分に進んでいるとは言い難い。

現地での載荷試験結果をもとに、杭の内周面抵抗の発現程度を調べてみると模型杭に比べてはるかに小さな値しか発現していない。図-11 はその一例である。このデータは杭径 1500mm の杭の現地載荷試験の結果である。実務で対象とする、杭径の 10%以下の先端沈下量では、杭内部の単位面積当たりの抵抗力が杭の実質部の抵抗に比べてはるかに小さいことがわかる。この結果は、室内模型実験の結果とは著しく異なるものである。

この現象を説明する方法として二つのものがある。一つは、杭に貫入した地盤がサイロ効果のように盤として機能しているとしても杭径の違いによって抵抗力が異なることがあるということ、その大きな要因として内部の土圧係数が内空面積比の違いによって異なることがありうるという点である。もう一つは、上記の仮定がそもそも成立せず、杭径が大きくなると内部の土が盤状として仮定できなくなる点である。これは、室内模型実験でもその傾向が認められている。

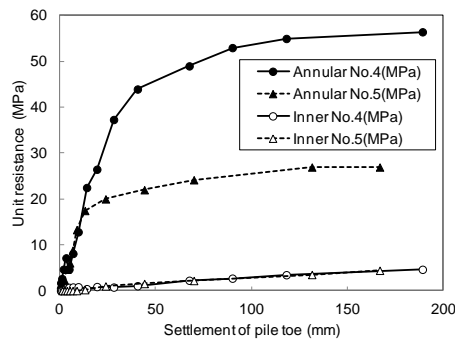


図-11 杭径 1500mm の杭の載荷試験時の各部の単位面積当たりの抵抗

以上の要因を認めると、現段階では、開端杭の支持力は主として杭径依存であるとして評価するのが現実的である。図-12 に現地載荷試験結果をもとに、単位面積当たりの杭の先端支持力の考え方を示した。図の縦軸は閉塞率、横軸は杭の外径である。このように開端杭の閉塞率は杭径に大きく依存する。

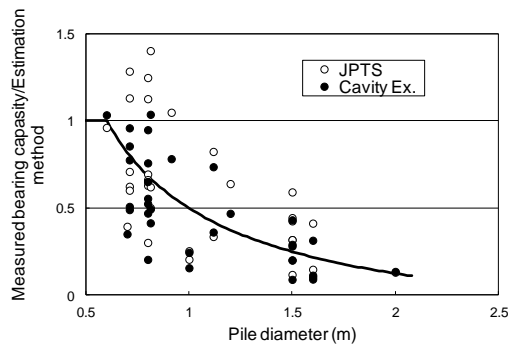


図-12 杭径による杭の先端支持力係数の変化

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① Yoshiaki Kikuchi, MECHANISM OF INNER FRICTION OF AN OPEN-ENDED PILE, Press-inn Engineering, Vol.2, 65-83, 2011, 有
- ② 齊藤泰, 菊池喜昭, 日下部治, 清宮理, 米山治

男, 川上泰司, 東京ゲートブリッジにおける鋼管杭載荷試験結果の鋼管矢板井筒基礎設計への適用, 土木学会論文集 C (地盤工学), Vol.67, 544-557, 2011, 有

[学会発表] (計 7 件)

- ① 杉本貴之, 水谷崇亮, 菊池喜昭, 西川佑樹, 密度の異なる乾燥砂地盤における開端杭の閉塞効果に関する模型実験, (公社)地盤工学会第 46 回研究発表会, 2011.7.5, 神戸市
- ② 菊池喜昭, 水谷崇亮, 佐藤宇紘, 開端杭の先端部周辺地盤の杭貫入時の挙動の観察, 第 55 回日本学術会議材料工学連合講演会, 2011.10.19, 京都市
- ③ 菊池喜昭, 水谷崇亮, 森川嘉之, 港湾工事で用いられた鋼管杭の先端支持力の現状, 第 8 回地盤工学会関東支部発表会, 2011.11.11, 山梨市
- ④ 堤彩人, 水谷崇亮, 菊池喜昭, 高橋英紀, 固結した地盤中における鋼管杭の軸方向抵抗力発現メカニズムに関する実験的検討, (公社)地盤工学会第 47 回研究発表会, 2012.7.14, 八戸市
- ⑤ 菊池喜昭, 堤彩人, 水谷崇亮, 施工方法の違いによる杭周辺地盤の変形状況の観察, (公社)地盤工学会第 47 回研究発表会, 2012.7.14, 八戸市
- ⑥ Y. Kikuchi, Estimating the Bearing Capacity of Steel Pipe Piles, Japanese Geotechnical Society, Proc. of IS Kanazawa, 2012.9.18, 金沢市
- ⑦ 菊池喜昭, 岡本 健, 水野竜太, 川辺翔平, 堤 彩人, 水谷崇亮, 開端杭の内周面抵抗に関する室内模型実験, 地盤工学会第48回地盤工学研究発表会, 2013年07月23日, 富山市

6. 研究組織

(1)研究代表者

菊池 喜昭 (KIKUCHI YOSHIAKI)
東京理科大学・理工学部土木工学科・教授
研究者番号：40371760

(2)研究分担者

水谷 崇亮 (MIZUTANI TAKAAKI)
独立行政法人港湾空港技術研究所・地盤研究領域・基礎工研究チームリーダー
研究者番号：70371763
杉本 貴之 (SUGIMOTO TAKAYUKI)
独立行政法人港湾空港技術研究所・地盤研究領域・基礎工研究チーム・研究官
研究者番号：10549207

(3)連携研究者

大谷 順 (OOTANI JUN)
熊本大学大学院自然科学系研究科・教授
研究者番号：30203821