

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 22 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560598

研究課題名(和文) 不同沈下した小規模建築物への発泡ウレタン杭による急速沈下修正工法の実用化

研究課題名(英文) Practical applications of the building sinking correction method using urethane foam pile.

研究代表者

田中 剛 (TANAKA, TSUYOSHI)

東京都市大学・工学部・技士

研究者番号：80468818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円、(間接経費) 810,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、発泡ウレタン杭の実用化である。発泡ウレタン杭を実用化させるためには、支持力特性および発泡圧力による地盤内の影響を把握しなければならない。そこで、支持力特性は発泡ウレタン杭を模擬した剛性の低い模型杭を用いて載荷実験を実施した、また、発泡圧力による地盤の影響は、発泡ウレタン杭を模擬した孔内水平載荷実験と発泡圧力の伝達を把握するために発泡ウレタンの注入実験を実施した。結果として、模型実験により、支持力特性および発泡圧力の伝達範囲について確かめた。

研究成果の概要(英文)：In order to put urethane foam piles in practical use, it is necessary to understand the bearing capacity of the urethane foam piles. When urethane foam is mixed with two types of drug solution, it foams and uplifts the ground due to the pressure. Hence, in order to ascertain the bearing capacity, we performed loading model experiments using a model pile that simulates a urethane foam pile. We also investigated the range of the ground uplifting due to the foaming pressure based on the following methods: a lateral loading experiment in the borehole simulating a urethane foam pile, and a urethane foam injection experiment. As a result, we could verify the bearing capacity and the transmission range of the foam pressure of urethane foam piles.

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 地盤改良 模型実験

### 1. 研究開始当初の背景

現在、不同沈下により被害を受けた小規模建築物の沈下修正工法は、建築物の浅層部(基礎と地盤の隙間)に充填材を注入して修正する工法と建築物直下に鋼管杭を支持層まで施工する工法に大別される。前者の工法は、施工期間が短く、沈下を修正する際に反力に地盤を用いることで浅層部の地盤の密度増加が期待できるが、不同沈下の原因となる軟弱地盤の層が厚いと二次沈下する恐れがある。また、後者の工法では、支持層まで鋼管杭を施工するため二次沈下の危険性は少ないが施工費が高額であることや施工期間が長期間に亘るといった欠点を併せ持つ。研究者らは、これまで小規模建築物の沈下修正工法の一つとして、硬質発泡ウレタン杭を用いた沈下修正工法を提案してきた。この工法は、建築物の基礎部近傍の地盤に直径50mm程度の穴を開け、その穴に注入袋と一体化した注入管を挿入し、その注入管を介して二種類の薬液を注入することで硬質発泡ウレタン杭を作製するものである。この時、薬液が化学反応で発泡し、この発泡圧力で、地盤の「密度増加」や「拘束圧増加」等の改良効果が得られ他、硬質発泡ウレタン杭と建築物の基礎の隙間に硬質発泡ウレタンを注入することで建築物の沈下を修正する。しかし、硬質発泡ウレタン杭の問題点として、硬質発泡ウレタン杭のような比較的剛性が低い杭は、構造物荷重が硬質発泡ウレタン杭に作用すると変形し構造物の荷重が硬質発泡ウレタン杭に先端まで十分に伝達されない可能性がある。また、硬質発泡ウレタンは、発泡後の体積と薬液の体積との比に応じて発泡時の圧力が決まるため、地盤の水平方向の圧力-変位特性を評価する手法が必要である。

### 2. 研究の目的

主な研究の目的は以下の通りである。

(1) 硬質発泡ウレタン杭の支持力特性の把

握

(2) 硬質発泡ウレタン杭の施工時に生じる周辺地盤の押し広げに伴う応力状態の測定および推定

### 3. 研究の方法

(1)の研究目的について、鉛直載荷実験装置を図1に示す。土槽は円形で直径205mm、高さ250mmの亚克力製の土槽を使用した。模型地盤には、関東ロームを用い、ペロフラムシリンダーを用いて締め固めて作製した。地盤の締め固め強さは20kPaと50kPaに設定した。鉛直載荷には、ジャッキを用いて、載荷速度0.018mm/secで、15mmまで載荷した

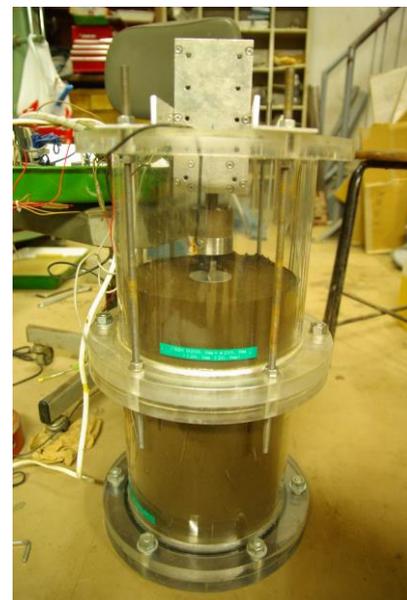


図1 鉛直載荷実験装置

表1 実験ケース

実験Case	締め固め圧力	杭の種類	模型形状
Case1	20kPa	檜	杭のみ
Case2		-	フーチングのみ
Case3		檜	杭1本+フーチング
Case4		檜	杭2本+フーチング
Case5	50kPa	檜	杭のみ
Case6		-	フーチングのみ
Case7		檜	杭1本+フーチング
Case8		檜	杭2本+フーチング
Case9	20kPa	ポリエチレン	杭のみ
Case10		ポリエチレン	杭1本+フーチング
Case11		ポリエチレン	杭2本+フーチング
Case12	50kPa	ポリエチレン	杭のみ
Case13		ポリエチレン	杭1本+フーチング
Case14		ポリエチレン	杭2本+フーチング

時点で実験を終了した。模型杭の寸法は直径 10mm, 長さ 200mm で, 素材には檜(剛性  $9.0 \times 10^6$  (kN/m<sup>2</sup>))と硬質発泡ウレタンを模擬したポリエチレン製(剛性  $1.1 \times 10^4$  (kN/m<sup>2</sup>))を用いた。また, 模型杭の杭周面には, 珪砂を塗した。模型杭の設置方法としては, 直径 10mm のドリルで事前に削孔し, その孔に模型杭を貫入した。表 1 に実験ケースを示す。模型フーチングと模型杭の間にロードセルを設置し, 模型杭の載荷荷重も独立して計測することが出来る。フーチングはアルミ製の円形型で, 直径 100mm, 厚さ 10mm である。杭 1 本の載荷の際は杭をフーチングの真ん中に設置し, 杭 2 本の載荷の際は 33mm の杭間で設置した。

(2) の研究目的について, 図 2 に土圧計の配置図を示す。硬質発泡ウレタン杭の施工時に生じる周辺地盤の押し広げに伴う応力状態の測定実験では, 直径 280mm, 高さ 500 mm のアクリル製の円柱土層に関東ロームを使用し模型地盤を作製した。模型地盤の中心部を削孔した後, その孔を利用して硬質発泡ウレタン杭を作製し, 地盤内に設置した土圧計により, 発泡圧力の伝達を計測した。土圧計は, 孔内の側面 (P1) および孔の中心から模型杭の半径の 1.5 倍 (P2), 3.0 倍 (P3) 離れた位置で模型杭の中心となる深度に設置した。模型杭の作製に使用した発泡ウレタンは, 大気中で混合前の薬液の体積の 14 倍発泡するものを使用した。模型杭は, 薬液の注入量に関わらず発泡後の直径が約 80mm, 杭長が 300mm になるように作製した。また, 実験ケースとして, 削孔径と注入量変化させ押し広げ範囲の違いに用圧力の違いについて検討した。図 3 に硬質発泡ウレタン杭を模擬した孔内水平載荷装置を示す。この装置は, 圧入ポンプ, 二重管ビューレット, 測定セル, ロッド (直径 20 mm) で構成されている。測定セルは鋼製で膨張部にはゴムメンブレンを採用している。測定器の直径は 20mm で長さ

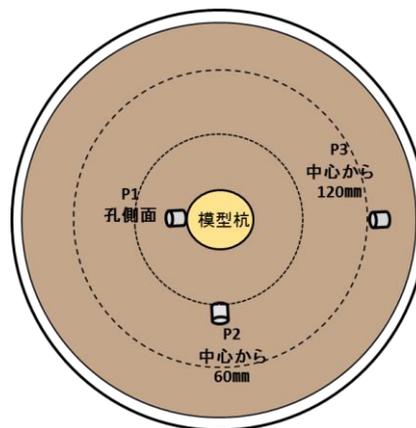


図 2 土圧計の配置図



図 3 孔内水平載荷装置

は 170mm であり, 引張部は 120mm である。孔内水平載荷実験は, 事前に掘削した孔に, ロッドの先端に取り付けたセルを所定の深度まで挿入し, 圧入ポンプを介して水を測定セル内に注入する。注入は, 水を 10ml ずつ 150ml まで段階的に圧入し, 注入圧力が安定後に 1 分間体積を一定に保ち注入量と圧力を記録した。

#### 4. 研究成果

(1) の研究目的について, 図 4 に Case1~Case8 の実験結果を, 図 5 に Case9~Case14 の実験結果をそれぞれ示す。

模型杭に檜を用いた荷重実験では、フーチングの有無に関わらず杭の極限支持力の値は、ほぼ一定値であった。それに対し、硬質発泡ウレタンを模擬したポリエチレン製の模型杭を用いたケースにおいては、模型杭を単独で荷重した際の極限支持力は、フーチングと模型杭を組み合わせて荷重した際の模型杭の極限支持力よりも大きな値が得られた。また、ポリエチレン製の模型杭を使用したケースでは、フーチングと模型杭を組み合わせて荷重した際の杭の極限支持力は、模型杭の本数に関係なくほぼ同等の値を示した。荷重—沈下量関係に直目すると同一沈下量において、フーチングと模型杭を組み合わせて荷重した際の鉛直荷重は、模型杭の種類に関わらずフーチングおよび模型杭を単独で荷重し足し合わせた鉛直荷重よりも高い値を示している。これは、地盤が軟弱であるとフーチング下部に杭が存在することで杭に応力集中が生じ、地盤が締め固まったことが考えられる。また、フーチングと模型杭を組み合わせたケースの初期勾配に着目すると初期勾配がフーチングのみ見比べ大きいことから、軟弱地盤の場合には杭の鉛直剛性は支持力にそれほど影響が出ないと考えられる。しかしながら、剛性が低い杭を用いた場合には、鉛直荷重により杭が変形し、杭に荷重が伝達し難いことが予測されるため、模型鉛直荷重実験のデータをもとに荷重伝達法を用いて支持力の数値解析を実施した。図6に模型杭に檜を用いた深度—荷重分布曲線を、図7に模型杭にポリエチレン製の杭を用いた深度—荷重分布曲線をそれぞれ示す。檜を用いた解析結果では杭の深度による荷重の伝達に大きな違いは生じなかったが、ポリエチレンを用いた場合には、大きな荷重が荷重された際には、先端部に近づくにつれて小さな荷重に収束していることが分かる。杭頭部が変形し杭先端に荷重が伝わりにくいと言える。一連の実験結果から、鉛直剛性が

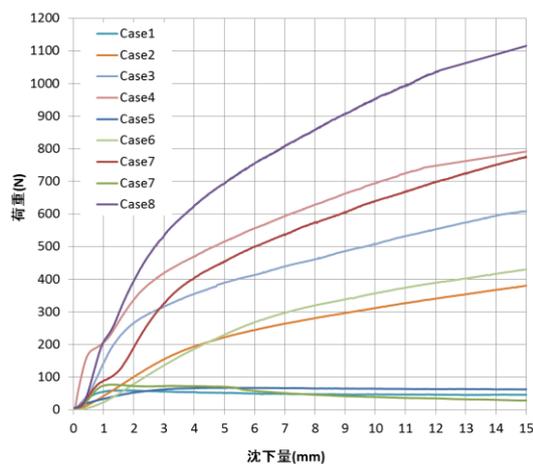


図4 Case 1 から Case8 の実験結果

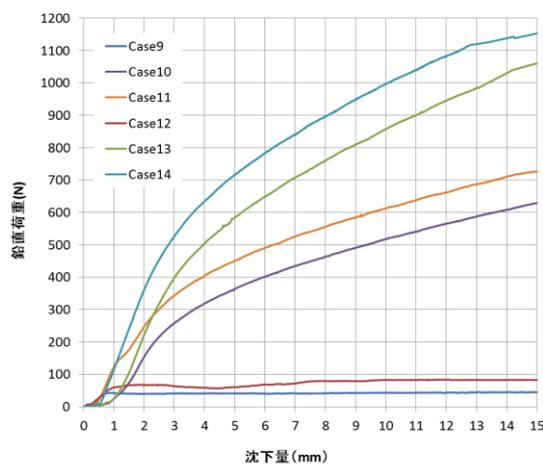


図5 Case9 から Case14 の実験結果

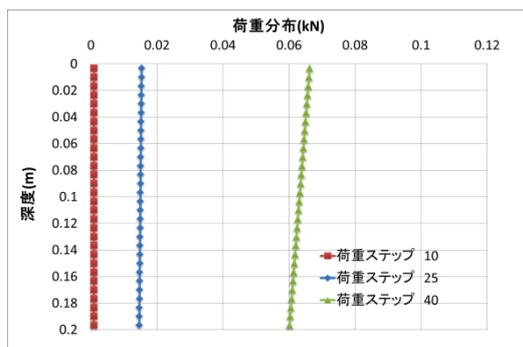


図6 深度—荷重分布曲線

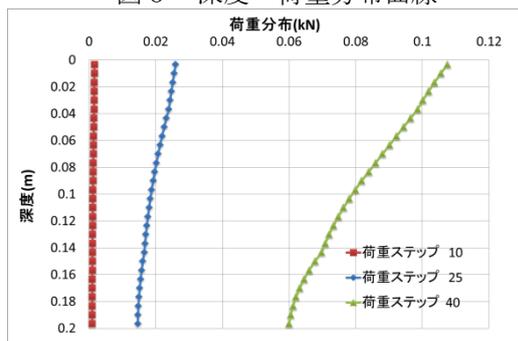


図7 深度—荷重分布曲線

比較的に小さい杭を用いた際にも、軟弱地盤であれば十分な支持力を発揮する事が示唆された。

(2) の研究目的について、図8に発泡圧力と伝達時間の関係の一例を示す。削孔径は、40 mm (Case1), 79mm (Case2) とし、どちらのCaseにおいても模型杭の体積の7倍に発泡する薬液量を注入した。孔側面に設置した土圧計 (P1) に着目すると、地盤を押し広げる範囲が広い Case1 は、Case2 に比べ 1.5 倍の圧力値を示した。それに対して、P2 および P3 の土圧に関しては、どちらの Case においてもほぼ同等の値を示した。しかし、押し広げ範囲の狭い Case2 においては、経過時間が 280 秒を過ぎた時点から、圧力が減少した。これは、発泡ウレタンの性質である薬液の反応温度低下に伴うウレタンの収縮による圧力の除荷が押し広げ範囲が狭いと顕著に表れているものと考えられる。一連の実験結果から、模型杭の半径の約 3 倍程度までの範囲を締め固めることが可能であり、同一の注入量であれば押し広げ範囲に関わらず模型杭の半径の約 3 倍程度まで離れると地盤に伝わる圧力は、概ね一定である。

図9 東京都市大学の敷地にて実施した孔内水平載荷実験結果である体積変化量と注入圧力の関係を示す。孔内水平載荷実験は、地表面から 2.0m, 2.5m, 3.0m の 3 深度で実施した。体積変化量と注入圧力の関係は同一体積変化量と比較すると深度 2m 地点の注入圧力が一番高く、深度 3m 地点の注入圧力が一番低く測定された。グラフにおける直線部の勾配より変形係数  $E(kN/m^2)$  を算定した結果、深度順にそれぞれ  $E=1179, 859, 429(kN/m^2)$  となった。同箇所でも実施した。スウェーデン式サウンディング試験結果より導いた換算 N 値は深度順にそれぞれ 2, 1.5, 1 であり、それを変形係数 E と標準貫入試験の N 値の関係である  $E=700N(kN/m^2)$  に代入した結果、変形係数 E は深度順に 2100, 1575,

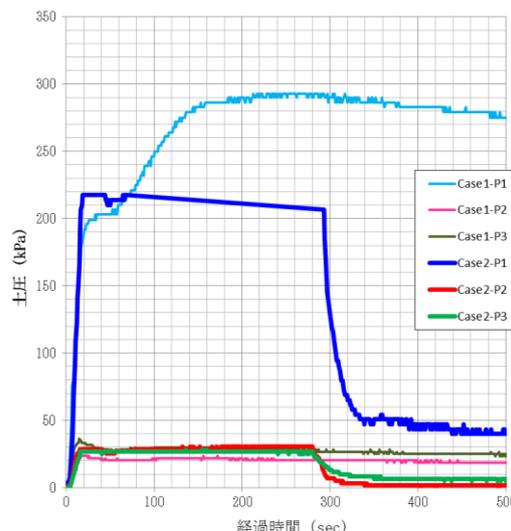


図8 発泡圧力と伝達時間の関係の一例

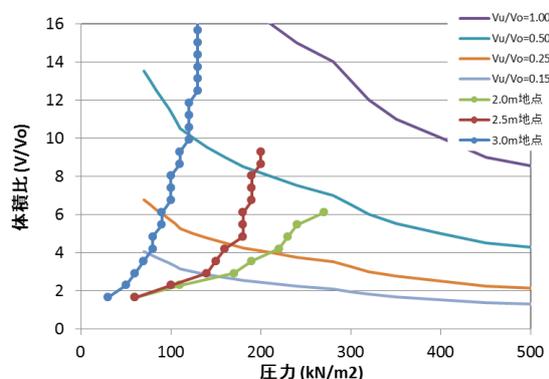


図9 体積変化量と注入圧力の関係

1050( $kN/m^2$ )となった。測定値は推定値と差異が見られたものの注入圧力 - 体積変化量曲線より算出した変形係数 E と換算 N 値より算出した変形係数  $E(kN/m^2)$  には相関が見られたことから、改善の余地はあるが地盤の水平方向の圧力-変位特性を評価する手法として用いることが可能であると考えられる。実地盤で硬質発泡ウレタンを施工する際には、構造物の鉛直応力に応じて極限周面摩擦力を算出し、硬質発泡ウレタンの直径を決める。しかし、地盤の体積変化量と注入圧力の関係は、地盤の特性によって異なるため、地盤によっては、最適な薬液の注入量も異なる。そこで、体積比と注入圧力の関係を明らかにすれば適切な薬液の注入量の設定が可能となる。図に硬質発泡ウレタンの体積比-発泡圧力

関係に上記に記した孔内水平載荷実験結果を重ね合わせたものを示す。ここで、削孔体積  $V_o$  と薬液の注入量  $V_u$  の比を注入率  $V_u/V_o$  と定義する。これは、注入率が小さい方が薬液の注入量  $V_u$  が小さくなることを意味するため、コストの低下につながる。これまでの研究成果として、削孔した穴に布パッカー、塩ビ管を挿入し、塩ビ管を通して布パッカーに薬液を注入することにより杭状地盤改良体を作製することが提案されている。この時の布パッカーの最大押し広げ体積を  $V_f$  とすると、理想の  $V_f$  は削孔体積  $V_o$  に対して4倍程度になることがわかっている ( $V_f/V_o=4$ )。このとき、この地盤に杭状地盤改良体を作製した場合、 $V_u/V_o=0.15$  の注入率では、3m 付近の地層では十分に布パッカーが膨らむがそれより浅い地層では杭状地盤改良体が均一の直径にならないことが示唆される。次に  $V_u/V_o=0.25$  の注入率では、いずれの地層でも交点の体積比が4を上回っているため、十分に膨張した均一な径の杭状地盤改良体を作製されることがわかる。以上のことから、 $V_u/V_o$  に対応した膨張曲線と孔内水平載荷実験結果から適切な注入量の算出が行えることが示唆された。今後は、これらの研究結果を基に実物大の実験および数値解析を実施し実用化する。

#### 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)

[学会発表] (計3件)

- ①伊藤雅俊, 田中剛, 末政直晃, 松藤展和, 硬質発泡ウレタンを用いた杭状地盤改良体の開発における芯材の付着抵抗について, 第10回地盤工学会関東支部発表会, 2013年10月4日, 日本科学未来館(東京)
- ②大山貴広, 田中剛, 末政直晃, 松藤展和, 硬質発泡ウレタンを用いた杭状地盤改良工法の開発, 第9回地盤工学会関東支部発表会, 2012年10月5日, 日本科学未来館(東京)
- ③加藤大地, 田中剛, 末政直晃, 松藤展和, 発泡ウレタンを用いた杭状地盤改良工法の設計のための簡易孔内水平載荷試験, 第39回関東支部技術研究発表会, 2012年3月13日, 関東学院大学(神奈川県)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

田中 剛 (TANAKA TSUYOSHI)  
東京都市大学・都市工学科・技士  
研究者番号: 80468818

##### (2) 研究分担者

末政 直晃 (SUEMASA NAOAKI)  
東京都市大学・都市工学科・教授  
研究者番号: 80206383

##### (3) 連携研究者

なし