

液状化対策としての空洞拡張による 相対密度増加効果に関する基礎的研究

芹川 由布子¹・宮島 昌克²

¹学生会員 金沢大学大学院自然科学研究科 博士前期課程（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail:bunka.h22@gmail.com

²正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail:miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

2011年東日本大震災では埋立地等の戸建住宅に液状化被害が多発し、その数は計2万7千棟を数える。これらの被害を受け、地震による液状化被害は深刻な問題となり、今後の安全な宅地供給を期待するとともに、液状化対策コストの低廉化を進めることが求められている。著者らは、液状化対策にMLT工法を活用することを提案しており、より実用的な工法の考案に繋げるため、砂質地盤における室内模型実験と実物実験（貫入試験）を行い、実験結果と理論値を比較した。貫入前後で地盤の相対密度が増加しており、液状化地盤への対策として有効であることが明らかとなった。

Keywords : countermeasure against liquefaction, space dilatation, MLT method, residential land

1. はじめに

2011年東日本大震災では、東京湾沿岸部や利根川流域において甚大な液状化被害が発生した。戸建住宅の沈下や傾斜の被害は甚大であり、今まで液状化対策が十分に行われていなかった戸建住宅に対する液状化対策技術が求められるようになった。（株）エムエルティーソイルが開発したMLT工法を液状化対策に活用した場合、杭打設による杭周辺地盤の密度増大効果と過剰間隙水圧消散効果が見込まれる。MLT工法とは、圧縮翼をもつ特殊スクリーにより掘削土砂を孔壁に押し込み、孔壁を自立させる工法である。無振動・低騒音・無粉塵であり、住宅地での施工が可能である。

現在我が国の杭打ち工法には様々なものがあるが、削孔時に孔壁をゆるめがちであり、残土処理、セメントやベントナイトの産業廃棄物処理に多大な費用を有するのが現状である。図-1に従来のオーガースクリューと本工法で用いる不連続オーガースクリューを示す。これにより土砂を孔壁に押し付け地上に排出する土砂を抑えとともに、孔壁を強固な状態に改良しながら杭孔を造成していく工法である。周辺地盤を改良しながら施工を行うため、従来工法に比べ杭の許容支持力の増加につながり、杭の本数を減らすことができ、かつ、産廃処理を不要と

するので環境にも配慮した工法であるといえる。

本研究では、液状化対策工法として本工法を応用することを提案しており、周辺地盤の締固め効果を評価するために砂地盤での模型実験、実地盤での実物大実験を行い、実験結果と理論値を比較することで本工法の液状化対策としての有用性を検証する。

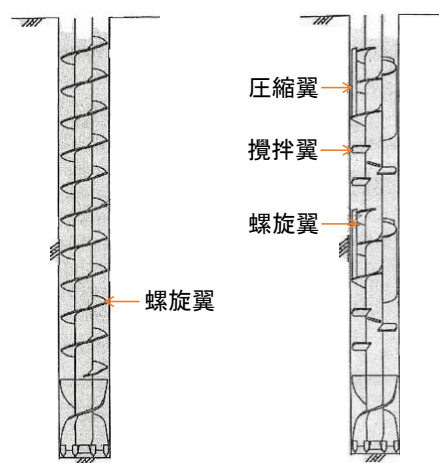


図-1 従来のオーガースクリュー（左）と
不連続オーガースクリュー（右）

2. MLT工法の概要

本研究で検討する工法は、前頁の図-1 に示す押圧板付き不連続オーガースクリューを用いて地上に排出する土砂をわずかに押さえ孔壁を強固な状態に改良しながら削孔を行う工法である。従来のオーガースクリューは、シャフトの全長にわたって螺旋翼を設けているため回転削孔時に土砂は螺旋翼に沿って地上に排出される。そのため孔壁はゆるめられた状態のままである。本工法では、掘削時にオーガーヘッドにより乱された土砂は螺旋翼によって上昇するものの、螺旋翼が不連続となるため土砂は上昇しきれずに押圧板で孔壁に押しつけられていく。押圧板と螺旋翼との間に入り込んで上昇し続ける一部の土砂も攪拌翼により乱され、次に控える押圧板により孔壁に押しつけられていく。更に、削孔時にオーガーの正回転、逆回転、上げ下ろしを随時行うことにより、ゆるめられた土砂のほとんどが孔壁に押しつけられることとなる。空洞を拡張するという事は間隙の少ない地盤を形成するという事になる。その結果、空洞周辺の地盤の摩擦抵抗は改善され、従来工法に比べ杭の支持力は大きく向上することが期待される。従来工法では削孔により地上に排出される土が、本工法では孔壁に押し付けられるため、残土処理の込要が大きく軽減されることが期待される。

本研究は、これまで杭孔の掘削に用いられてきたこの工法の宅地における液状化対策としての活用を検討するものであり、その有用性の確認のために空洞の拡張による相対密度の増加についてまず検討する。さらには、空洞に碎石を充填することにより液状化抵抗の増加を見込む子尾を考えており、これについては今後の検討課題とする。

3. 空洞拡張理論

(1) 空洞拡張後の地盤の改良度

半径 r_0 の削孔を r_1 まで拡張したときについて考える。空洞拡張後の体積変化に伴い、間隙比が e_0 から $e_0 - \Delta e$ に変化したとすると、変化後の相対密度 D_r' 、および N 値(N')は以下のとおりとなる。

$$D_r' = \frac{e_{max} - (e_0 - \Delta e)}{e_{max} - e_{min}} \times 100$$

$$N' = (0.7 + \sigma_v) \cdot (D_r'/21)^2$$

空洞拡張により地盤の間隙比は減少するが、その度合いは孔壁に近いほど大きく、孔壁より遠くなるほど小さくなると考えられる。

図-2 に間隙比の減少の度合いと杭からの距離との関

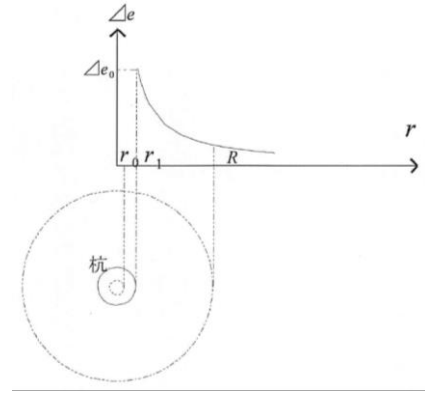


図-2 間隙比の減少の度合い

係を示す。半径に比例して受圧面積が増加すること、間隙比の減少に伴い半径 r に比例して拡張に伴う力が小さくなることを考慮すると、間隙比の減少は半径の2乗に比例すると仮定できる。孔壁での間隙比の減少を Δe_0 、間隙比の減少の平均値を Δe_m とおくと、半径 r における間隙比の減少 Δe は次のようになる。

$$\Delta e_m = (1 + e_0) \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \times 100$$

$$\Delta e_0 = \frac{R}{r_1} \cdot \Delta e_m$$

$$\Delta e = \left[\frac{r_1}{r} \right]^2 \cdot \Delta e_0$$

空洞拡張による塑性領域と弾性領域の境界 R を図-3のように設定する。まず、塑性領域と弾性領域の境界 R を間隙比の減少割合が孔壁周辺の10%にまで減少した所と考え、計算を行う。孔壁において、改良後の相対密度 D_r' は100%となる。ここで、

$$e_0 - \Delta e_0 = e_{min}$$

が成立し、上式を解くことで孔壁での間隙比の減少を求めることが可能となる。

(2) 境界 R の算出

前述した Δe_m 、 Δe_0 の式より、

$$\Delta e_0 = \frac{R}{r_1} \cdot (1 + e_0) \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2}$$

上式の R の2次方程式を解くことによって、境界 R を求めることができる。この境界 R を算出することによって、塑性領域の範囲についても求まる。

また、任意の位置での間隙比の減少は、 Δe を算出することで求めることができる。

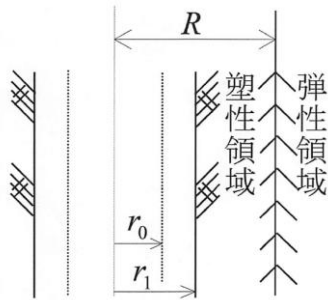


図-3 塑性領域と弾性領域の境界 R

4. 砂質地盤における相対密度増加に関する模型実験

(1) 室内模型実験概要

室内にて砂質土槽を作成し、コーン貫入試験を行った。実験装置の概要図を図-4に示す。実験に用いた砂槽は横 120cm、縦 120cm、高さ 150cm の大きさである。砂層底部には水抜きのためのバルブを設けてあり、砂を締固める際に砂利とナイロンメッシュからなるフィルター材を通して水のみを排出することが出来るようになっている。試料押さえ蓋は、縦横 120cm の大きさで、中央部分には直径 13cm の穴が開いている。地盤の作製方法としては、振動コンパクタを用いて砂に繰り返して均一な振動を与え作製した。砂槽を砂で充填した後、試料押さえ蓋をし、その上にボーリングマシンを固定し 90cm の位置までの貫入を行った。模型実験に用いた不連続オーガスクリューは 1/5 の模型を用い、掘削後の径の大きさは約 10cm である。

本実験では、スクリューの貫入前後の地盤の固さの測定を行った。測定には建設省土木研究所において考案された土建型自動的円すい貫入試験器を用いた。これは 5kgf のハンマーを 50cm の高さから自由落下させ、10cm 貫入するのに様子得る打撃回数を測定するものである。スクリュー貫入前と貫入後に貫入位置から水平方向に 20, 40, 60cm の地点でコーン貫入試験を行った。なお、用いた砂の単位体積重量は 1.8tf/m^3 である。

(2) 実験結果および考察

実験結果を図-5~7に示す。各図は、貫入点から水平方向に 20, 40, 60cm 離れた位置でのコーン貫入打撃回数と深さの関係を示している。これらの結果から、掘削位置から等間隔に離れた3地点のいずれも、40cm から深い位置での打撃回数が増加していることがわかる。しかし、深さ 30cm までは貫入前とほとんど同じ打撃回数となっている。これは、地盤が浅いとボーリングマシンによる不連続オーガスクリュー模型の貫入に伴い大きな振動が地盤中に伝わるため、浅い地盤では乱れが生じ

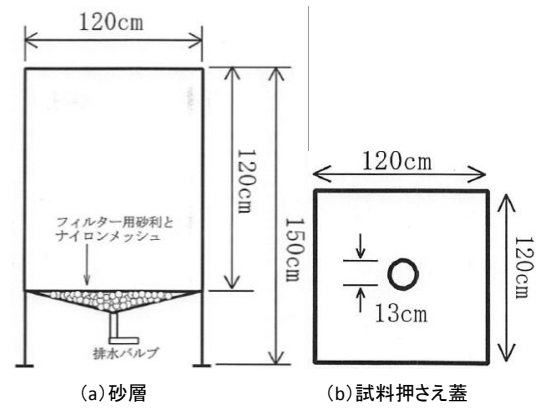


図-4 貫入点から 20cm 離れた位置でのコーン貫入打撃回数

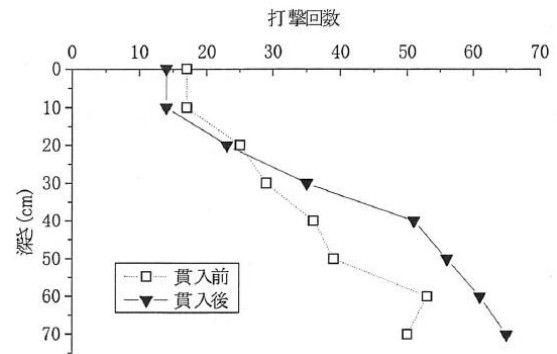


図-5 貫入点から 20cm 離れた位置でのコーン貫入打撃回数

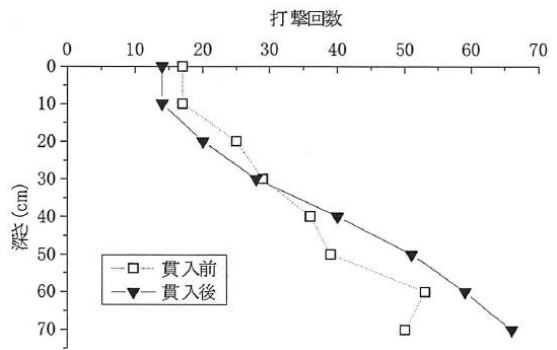


図-6 貫入点から 40cm 離れた位置でのコーン貫入打撃回数

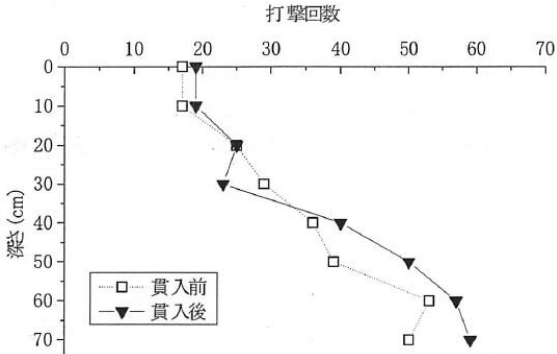


図-7 貫入点から 60cm 離れた位置でのコーン貫入打撃回数

地盤を攪乱させている可能性がある。そのため、打撃回数があまり変わらなかったのではないかと考えられる。

また、図-8に深さ 50cm における貫入点からの距離と打撃回数の関係を示す。これより 20cm 離れた位置では打撃回数が最大で約 1.5 倍増加していることがわかる。

この図からも、本工法により地盤が締固められていることがわかる。

(3) 理論値との比較

砂地盤では削孔による空洞拡張により周辺地盤が締め固められることによって地盤中の間隙比が減少し、 N 値が増加すると考え、3 章で述べた方法で空洞拡張後の値を計算し、実験値との比較を行った。

コーン貫入試験で得られる打撃回数は、次式により標準貫入試験の N 値に換算することができる。

$$N = 0.1 N_r + 1.11 \log N_r$$

ここに、 N : 標準貫入試験の N 値

N_r : 土研式コーン貫入試験における打撃回数

図-9 は空洞拡張後の N 値を計算し、深さ 50cm における貫入点からの距離と N 値の変化の関係を示した図である。この図には、不連続オーガスクリーパー貫入による空洞拡張後のコーン打撃回数から算出した換算 N 値と、貫入前のコーン打撃回数から算出した換算 N 値も示している。この結果より、理論式による N 値と不連続オーガスクリーパー貫入による空洞拡張後の実測 N 値とがほぼ同じ値を示していることがわかる。すなわち、不連続オーガスクリーパーによる貫入が地盤をほぼ水平方向に締固めていると考えられる。

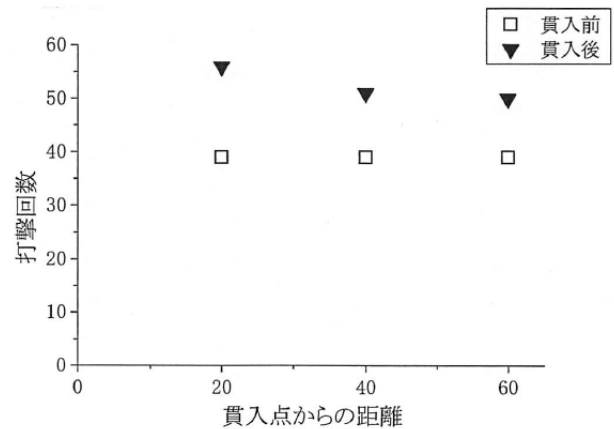


図-8 貫入点からの距離と打撃回数の関係 (深さ 50cm)

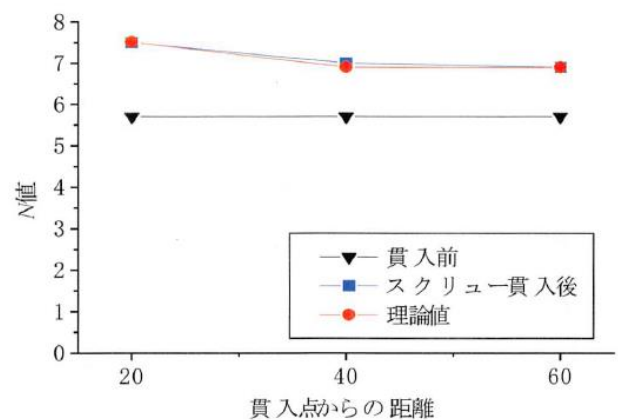


図-9 貫入点からの距離と N 値の変化の関係 (深さ 50cm)

5. 地盤の相対密度増加に関する実物実験

(1) 実験概要

実物実験を石川県金沢市近岡町内で行った。掘削後の径の大きさは約 55cm である。まず、現地の土質分布状況と地盤強度を把握するために、 $\phi 66\text{mm}$ ボーリングと標準貫入試験を 15m の深さまで行った。

ボーリング結果を図-10 に示す。ここでは理論式による計算方法に対応させるために、土質を砂と粘土にのみ区分して表示している。同図によれば、現地は砂と粘土の互層からなっており、ほとんど N 値 10 以下の軟弱な地盤である。

(2) 実験結果および考察

貫入後に標準貫入試験を行った結果も図-11 に示す。同図は、提案工法の孔壁から水平方向に 100cm 離れた位置でのボーリング柱状図を、砂と粘土で簡易的に表現した図である。地盤が数メートル離れただけで、土質成分が異なるため、貫入前との対応が多少異なっている。図-11 に貫入前後の N 値を比較した。同じ土質で N 値の増加を比較すると、粘土では N 値の増加がほとんど見られ

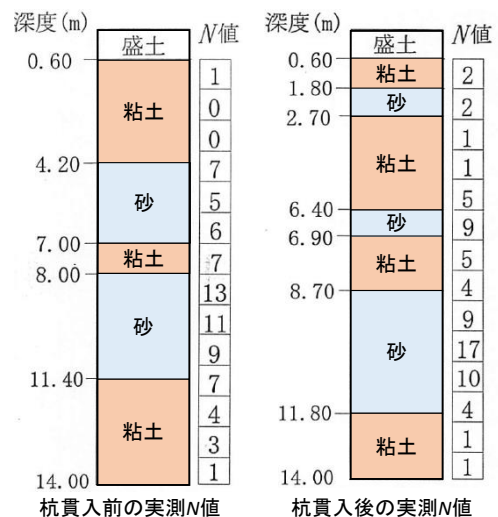


図-10 貫入点からの距離と N 値の変化の関係

ないものの、砂ではほとんどの層について N 値が増加していることがわかる。

今回の実験では 1 本での検討を行っており効果は十分でないが、複数本施工することで面的な改良効果が期待できると考えられる。

6. まとめ

本研究では、不連続オーガスクリュウ模型を用いて室内模型実験を行った結果、不連続オーガスクリュウによる貫入が地盤をほぼ水平方向に締固めていることが明らかとなった。実物実験では、貫入前後で周辺地盤の地盤強度が増加していたことから、提案工法が孔壁を改良しながら掘削していることを確認することができ、液状化地盤への対策として有効であることが明らかとなった。

本研究においては杭孔1本における検討しか行っていないため、今後は複数の杭を施工すると想定し、同様に検討を行う必要があると考えられる。

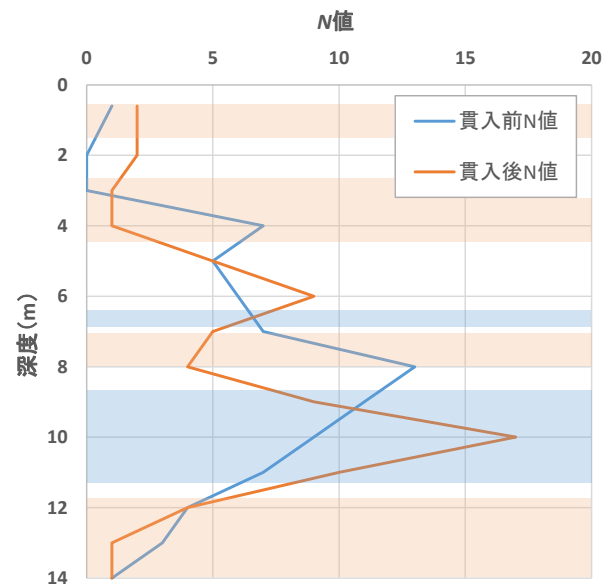


図-11 貫入前後の深さと N 値の変化の関係

(2018.-- 受理)

PRELIMINARY STUDY ON INCREASE OF RELATIVE DENSITY OF SAND LAYER BY SPACE DILATATION AS A COUNTERMEASURE AGAINST LIQUEFACTION

Yuko SERIKAWA and Masakatsu MIYAJIMA

This study focuses on space dilatation by using MLT method as a countermeasure of liquefaction. Relative density of sand layer is increased by space dilatation by using MLT method. First, increase of the relative density of sand layer was theoretically estimated by space dilatation theory. Then laboratory tests were conducted by a model auger screw and sand box. The results of laboratory tests showed good agreement with our estimation and increase of relative density of sand layer was verified. A field test was also conducted. The increase of relative density was not clear in clay layers but clear in sand layers a little. This field test was only one hole but many holes were constructed as a countermeasure against liquefaction. The effect of space dilatation is expected to increase by many holes.