

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。貫入前後で砂地盤で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。

Key Words : 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。現在では、多くの企業および研究機関が新設ならびに既設の戸建住宅に対する液状化対策工法の開発に取り組んでいる(例えば、²⁾。土木学会では液状化発生抑制のための対策工法を締固め工法、固化工法、置換工法、地下水位低下工法、間隙水圧消散工法、せん断変形抑制工法に分類されており、住宅に対する工法としては密度増大効果が期待されている締固め工法が多く用いられている。近年では、小規模な構造物にも適応可能な丸太を用いた液状化対策が開発され適用事例も増えている。その原理は地盤に丸太を打設し、地盤の密度を増大させることであり、地球温暖化緩和にも効果があることが明らかとなっている³⁾。

株式会社エムエルティースoil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、砕石の杭を地中に造成することによる過剰間隙水圧消散効果の2つの効果が見込まれる。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。

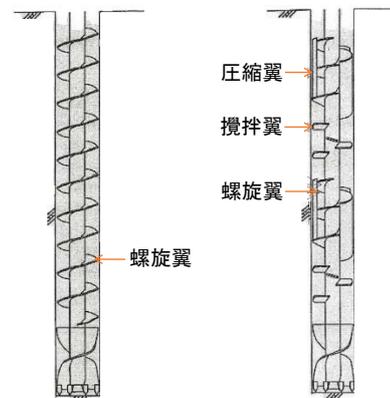


図-1 従来のオーガスクリー (左) と不連続オーガスクリー (右)

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⁴⁾。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に従来のオーガスクリーと本工法で用いる不連続オーガスクリーを示す。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、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。孔壁周辺部の地盤を密実化し

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。

2. MLT工法の概要

本研究で検討する工法は、前頁の図-1に示す圧縮翼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圧縮翼で孔壁に押しつけられていく。圧縮翼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、次に控える圧縮翼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ことになる。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本工法を宅地における液状化対策として活用することを目的としており、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範囲についての検討を行う。さらには、空洞に碎石等を充填し液状化抵抗の増加を見込む工法を考えており、これら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 $e_0 - \Delta e$

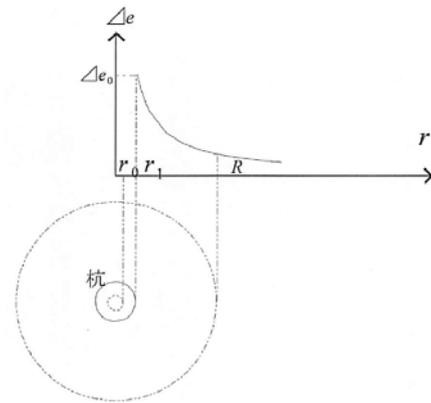


図-2 間隙比の減少の度合い

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Meyerhof⁹⁾による N 値と D_r の関係式である式(2)より算出される。Meyerhofの式は経験式であるが、相対密度から簡易的に N 値を求めることができるため本論文ではこの式を用いて検討を行う。

$$D_r' = \frac{e_{\max} - (e_0 - \Delta e)}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad (1)$$

$$N' = (0.7 + \sigma_v' / 98.1) \cdot (D_r' / 21)^2 \quad (2)$$

ここに、 e_0 ：間隙比

e_{\max} ：最大間隙比

e_{\min} ：最小間隙比

σ_v' ：鉛直有効応力(kN/m²)

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孔壁からの距離との関係を示し、これは r 方向のみを考察する1次元問題である。半径 r に比例して受圧面積が増加することと、間隙比の減少に伴い半径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。

$$\Delta e_m = (1 + e_0) \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \quad (3)$$

$$\Delta e_0 = \frac{R}{r_1} \cdot \Delta e_m \quad (4)$$

$$\Delta e = \left[\frac{r_1}{r} \right]^2 \cdot \Delta e_0 \quad (5)$$

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。塑性領域とは非可逆的な変形をする領域、弾性領域とは可逆的な変形をする領域である。まず、塑性領域内における間隙比の計算を行う。孔壁において、改良後の相対密度 D_r' は100%となる。ここで、

$$e_0 - \Delta e_0 = e_{\min} \quad (6)$$

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. しかし, 地表面付近では鉛直上向きに体積変化することが考えられるため, 地表面付近への適応については別途検討が必要である.

(2) 境界 R の算出

前述した $\Delta e_m, \Delta e_0$ の式より,

$$\Delta e_0 = \frac{R}{r_1} \cdot (1 + e_0) \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \quad (7)$$

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, 塑性領域の範囲が求まる.

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.

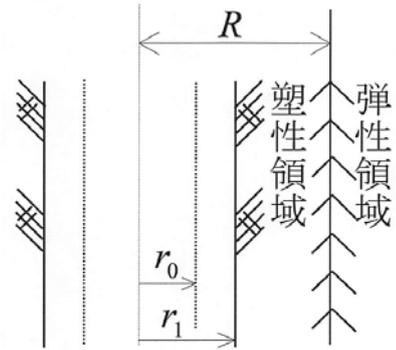


図-3 塑性領域と弾性領域の境界 R

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. この押さえ蓋を用いることで鉛直上向き方向への地盤の変形を抑制しようと考えたが, 必ずしも十分な効果が得られなかった. 地盤の作製方法としては, 振動コンパクターを用いて砂に繰り返し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ースクリューは長さ 100cm, 直径 10cm, 1/5 スケールの模型を用い, 掘削後の径の大きさは約 10cm である.

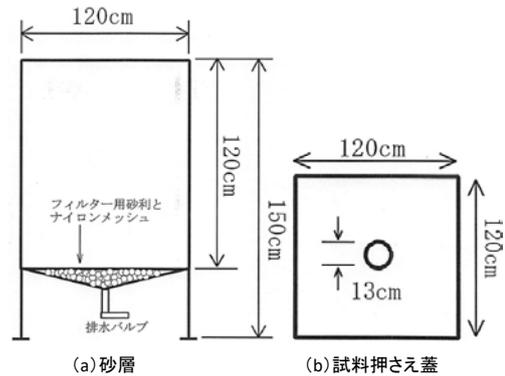


図-4 砂層と試料押さえ蓋の概要図

本実験では, 土研式円すい貫入試験⁹⁾によりスクリューの貫入前後の地盤の固さの測定を行った. 図-5にコーン貫入試験機を示す. この試験は, 直径 30mm, 底面積 710mm², 先端角 60° のコーンを先端につけた外形 25mm のロッドを, 質量 5kg のハンマーを 500mm の高さから落下させ, 繰り返し打撃して地盤中にコーンを連続的に貫入させる動的貫入試験である. この時, 貫入 100mm ごとにその間の貫入に要した打撃回数 N_a を求める. 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, 実験には相馬珪砂 5号を用いており, 珪砂の諸元を表-1に示す.

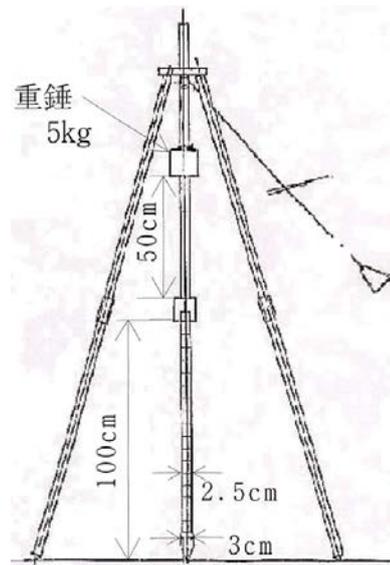


図-5 土研式円すい貫入試験機⁹⁾

表-1 珪砂 5号の諸元

珪砂 5号		
比重	G_s	2.65
均等係数	U_c	1.7
最大間隙比	e_{max}	1.02
最小間隙比	e_{min}	0.65
平均粒径	D_{50}	0.4(mm)
透水係数	k_s	$1.38 \times 10^{-1}(\text{cm/s})$

(2) 実験結果および考察

実験結果を 図-6~8 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。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。

図-9 に貫入前後における貫入点からの距離と打設回数との関係を示す。深さ約 20cm までは貫入前とほとんど同じ打撃回数となっている。これより、ボーリングマシンによる不連続オーガスクリーモデルの貫入に伴い、浅い地盤では乱れが生じ地盤を攪乱させている可能性がある。鉛直上方向への体積変化を押さえ蓋を用いて抑制しようとしたが、この効果が不十分であり地表面付近では空洞拡張による効果が得られなかったと考えられる。また、深さ 60cm 地点における打設回数の増加量が上下の増加量に比べて小さくなっていることがわかる。この地点は貫入前の打撃回数が多いことから、模型地盤作製の際に地盤の硬軟にばらつきがあったと考えられる。深さ約 30cm 以深については、3 地点全ての打撃回数が増加しており、本工法により地盤が締めめられていることがわかる。本実験では不連続オーガスクリーが砂地盤において効果を発揮することが明らかとなった。

(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 N 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、次式に示す岡田らの式⁷⁾より標準貫入試験の N 値に換算することができる。

$$N = 1.1 + 0.30 N_d \quad (8)$$

ここに、 N : 標準貫入試験の N 値

N_d : 土研式コーン貫入試験における打撃回数

式(8)より算出した空洞拡張後の換算 N 値と式(2)から得られた理論式による N' 値との関係を 図-10 に示す。貫入点からの距離は 20, 40, 60cm であり、それぞれの決定係数 R^2 は 0.77, 0.86, 0.91 であった。この結果より、削孔前の N 値から空洞拡張後の N 値をおおよそ推定できたと考えられる。上載荷重が小さい表層付近ではオーガスクリー貫入による地盤の乱れが生じ、実験値が理論値を下回る結果となった。比較的 N 値の大きな 50cm 以深については実験値が理論値を上回っており、底面の影響により効果が大きくなったと考えられる。表層と深部の影響が小さい中央付近の N 値はいずれも一致しており、理論式を用いることで本工法の空洞拡張による周辺地盤の密度増大効果を定量的に評価することが可能となる。

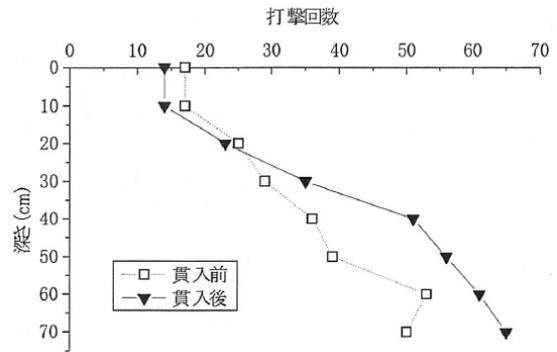


図-6 貫入点から 20cm 離れた位置でのコーン貫入打設回数

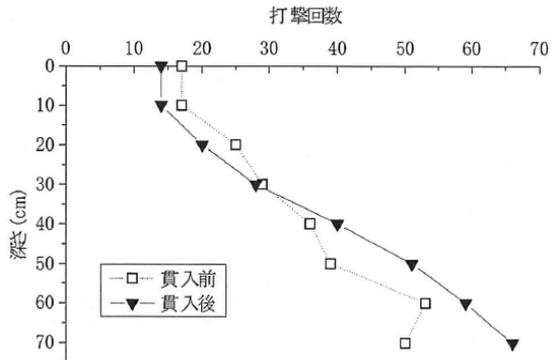


図-7 貫入点から 40cm 離れた位置でのコーン貫入打設回数

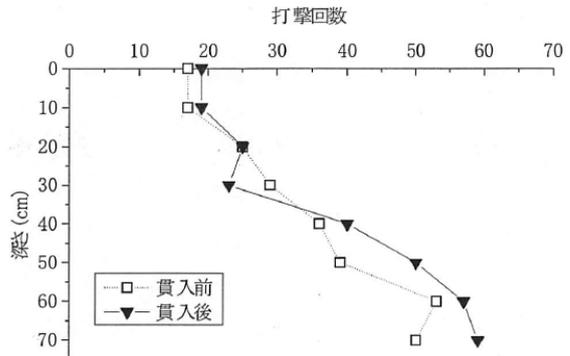


図-8 貫入点から 60cm 離れた位置でのコーン貫入打設回数

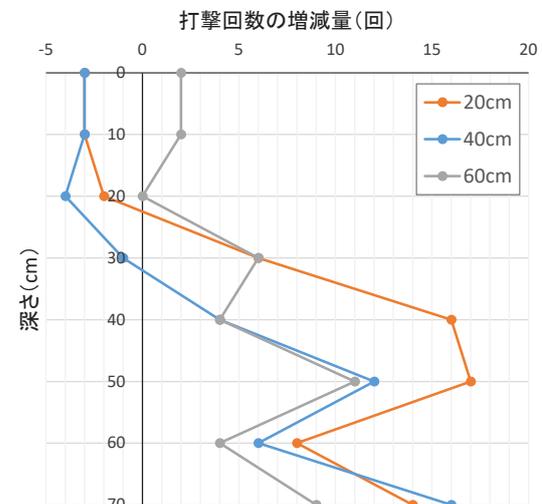


図-9 貫入前後における貫入点からの距離と打設回数との関係

5. 空洞拡張による地盤N値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、φ66mm 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-11 に示す。ここでは土質区分を砂と粘土にのみ区分して検討を行う。同図によれば、現地は砂と粘土の互層からなっており、ほとんどの層が N 値 10 以下の軟弱な地盤であることがわかる。

(2) 実験結果および考察

掘削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-12 に貫入前後の N 値を比較した。青の着色部分が砂層、オレンジの着色部分が粘土層となっており、同じ土質で N 値の増加を比較すると、深さ 6m, 9~12m 付近の砂層では N 値が 2~5 増加していることがわかる。しかし、深さ 4m までの粘土層では N 値の増加がほとんど見られず、深さ 7~8m, 12~14m 付近では減少していることがわかる。表層付近の地盤に関しては、模型実験と同様にオーガースクリューによる掘削の際に地盤が乱され、効果が十分に発揮されなかったためと考えられる。これより、砂地盤については N 値の増加が見られ対策効果が得られたが、表層付近や粘土層については本工法の効果があまり発揮されないことも考えられる。以上の結果より、本工法は液状化の可能性が高い砂質土地盤を対象とすることが望ましい。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. 熊本市南区における対策効果の検討

2016年熊本地震の際に液状化被害が発生した熊本県熊本市南区近見について、本工法を施工した場合の地盤の改良度を評価し対策効果の検討を行った。今回は削孔 1 本における周辺地盤の密実化を評価することとし、国土交通省が提供しているボーリングデータ(図-13)⁸⁾から得られた N 値と土質区分による間隙比($e_{\min}=1.17$, $e_{\max}=0.67$)を用いて、式(2)より空洞拡張後の理論値 N' を算出し、拡張前の N 値と比較する。また、液状化可能性指数 P_L の算出結果をもとに液状化の危険性についても評価する。

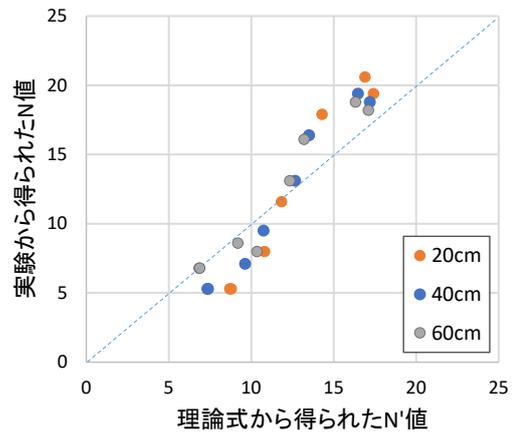


図-10 実験値と理論値の N 値の比較

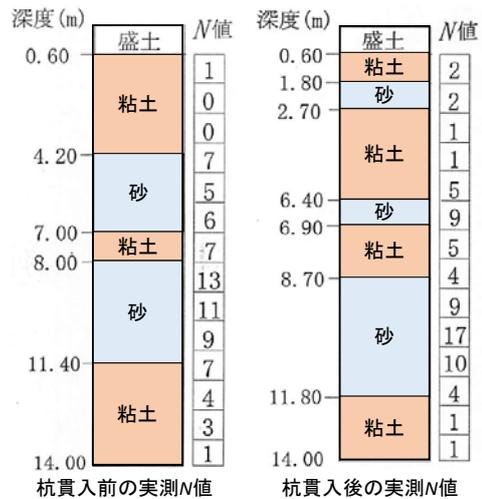


図-11 貫入点からの距離と N 値の変化の関係

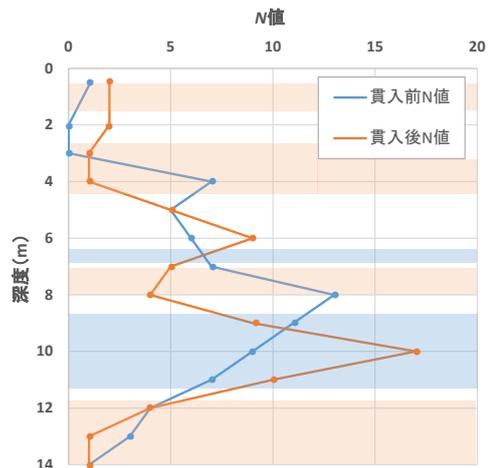


図-12 貫入前後の深さと N 値の変化の関係

掘削には前章のオーガースクリューを用いることとし、貫入後の口径を 55cm, したがって半径 r は 27.5cm となる。塑性領域と弾性領域の境界 R については様々な要因により決まるものと考えられるため、詳細については今後明らかにしていくこととし、ここでは間隙比の減少割合が孔壁周辺の約 3% にまで減少した所を境界 R と考え、

改良の影響範囲 R を $6r_1$ と仮定した。 $r=2r_1(55.0\text{cm})$, $r=3r_1(82.5\text{cm})$, $r=4r_1(90.0\text{cm})$ の3地点における検討をそれぞれ20mの深度まで行い、空洞拡張後の孔壁からの距離による N 値の増分 ΔN を求める。

図-14 に各深度における N 値の増加量の算出結果を示す。約6m以深からは特に N 値の増加が大きくなっている。孔壁から $2r_1(55.0\text{cm})$ の地点については深度10mで N 値の値が約2倍になっている。孔壁から $3r_1(82.5\text{cm})$, $4r_1(90.0\text{cm})$ の地点については、 N 値の増加が見られるものの増加量は小さく、孔壁からの距離が離れるほど改良の効果は小さくなること明らかとなった。

次に、対象地点のボーリングデータから得られている実測 N 値より液状化可能指数 P_L 値を算出したところ、15.0 であり液状化の可能性が高い地盤であったが、改良後の N 値(N')を用いて同様に P_L 値を算出したところ、55.0cm地点で3.3, 82.5cm地点で8.7, 90.0cmの地点で11.4 という結果となった。これより、本工法を用いて改良を行うことにより P_L 値が小さくなり、液状化の可能性が低くなることを理論的に表せることが明らかとなった。

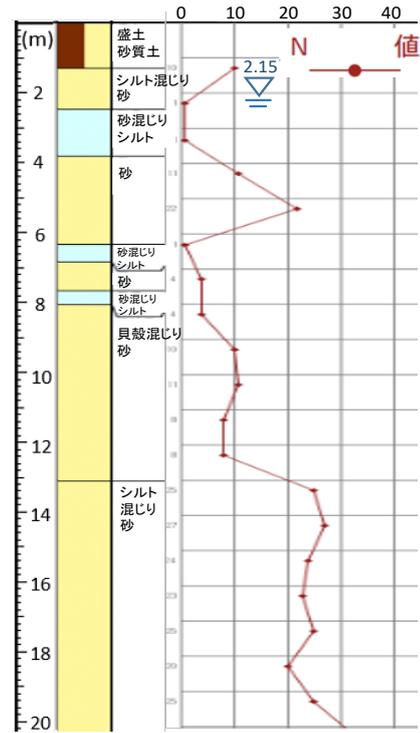


図-13 ボーリング柱状図⁸⁾

7. まとめ

本研究では、空洞拡張理論を用いた理論式をもとに改良度を評価し、模型実験と実物実験を行った。理論式を用いた効果の検討については、液状化の危険性が高い地盤における N 値の増加量を算出した結果、孔壁から約55.0cm離れた地点の地盤では N 値の値が2倍に増加していたが、孔壁から離れるにしたがって改良効果は小さくなること明らかとなった。今後は間隙比の減少の傾向や、改良の影響範囲 R についての定量的な検討が必要である。

不連続オーガスクリーモデルを用いた室内模型実験では、深さ約30cm以深については、3地点全ての打撃回数が増加しており、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た。砂地盤において掘削孔の周辺地盤が密実化されていることから、複数本削孔することで液状化の可能性が高い軟弱な砂地盤への対策として有効であると考えられる。

本研究においては杭孔1本における検討のみのため、今後は複数杭の施工に加え、空洞への碎石投入を行うと想定し、削孔間隔や影響範囲 R の設定など定量的な検討を行う必要があると考えられる。

参考文献

1) 橋本隆雄, 清水敏孝, 森口剛: 推進工法による液状化対策地下水位低下工法の実験検証, 第35回地震工学研究発表会講演論文集, 論文番号 863, 2015.

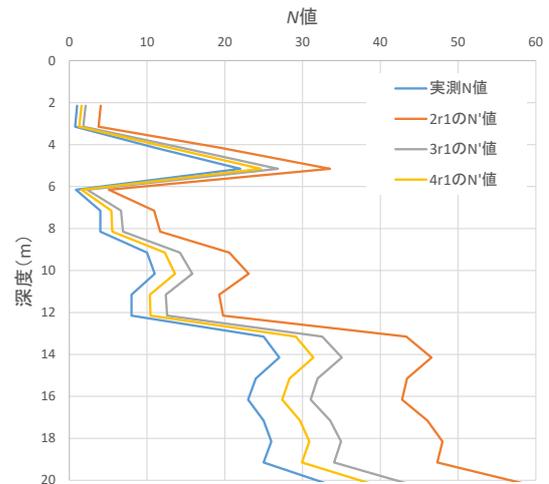


図-14 各深度における N 値の増加量

2) 尾上篤生, 蔡飛, 北村謙吉, 広井恵二: 格子状中壁工法と個々の既設住宅直下地盤の液状化対策について, 第50回地盤工学研究発表会, pp. 1711-1712, 2015.

3) 三輪滋, 吉田雅穂, 村田拓海, 沼田淳紀: 丸太打設による既設戸建て住宅の液状化対策の液状化が生じた地盤での数値解析による検討, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 72, No. 4(地震工学論文集第35巻), pp. I_117-I_128, 2016.

4) 株式会社エムエルティーツイル: MLT 工法, <http://www.mlt.ecnet.jp/> (2017年6月1日閲覧)

5) Meyerhof, G. G.: Discussion of Session 1, *Fvc of 4th ICSMFE*, London, Vol. 3, p. 110, 1957.

- 6) 社団法人日本道路協会：道路土工 土質調査指針, pp. 154-156, 丸善, 1988.
- 7) 岡田勝也, 杉山友康, 野口達雄, 村石尚：盛土表層部の土質強度に関する異種のサウンディング試験結果の相関性, 土と基礎, Vol. 40, No. 411, pp. 11-16, 1992.
- 8) 全国地質調査業協会連合会：平成 28 年（2016 年）熊本地震復興支援 ボーリング柱状図 緊急公開サイト, <http://geonews.zenchiren.or.jp/2016KumamotoEQ/webgis/index.html> (2016 年 5 月 25 日閲覧)
- (2017.11.10 受付, 2018.3.8 修正, 2018.3.9 受理)

APPLICABILITY OF MLT METHOD FOR LIQUEFACTION SUPPRESSION:
PRELIMINARY STUDY ON RELATIVE DENSITY INCREASE
CAUSED BY BOREHOLE EXPANSION

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.