

2. 無排土掘削機を用いた宅地地盤の液状化対策工法に関する基礎的研究

金沢大学理工研究域地球社会基盤学系 ○ 宮島 昌克
福井工業高等専門学校環境都市工学科 吉田 雅穂
金沢大学大学院環境デザイン学専攻 芹川由布子

1. はじめに

2011年東日本大震災においては関東地域の埋立地盤で広範囲に大規模な液状化が発生し、住宅の沈下、傾斜などの深刻な被害が多数発生した。地中連続壁や地下水位低下工法など、広範囲にわたる液状化対策が地震後実施されたが、個別の住宅に対する安価で簡易な地盤への液状化対策は皆無といってよい状況にあり、来るべき巨大地震に対して開発が急務である。

近年、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め、孔壁を自立させる、無振動・低騒音・無粉塵の小型の杭孔掘削機が実績を上げている。不連続オーガスクリー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ので残土処理の必要がない。本研究では、この杭孔掘削機が小型で無振動、低騒音であることに着目し、液状化を引き起こすゆるぎの砂地盤の相対密度増加効果による液状化対策に用いることを検討するものである。

2. 無排土掘削機の概要

本研究で検討する無排土掘削機は、図-1¹⁾に示す圧縮翼付き不連続オーガスクリ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ものである。従来のオーガスクリーは、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んだ状態のままである。本掘削機では、掘削時にオーガ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。

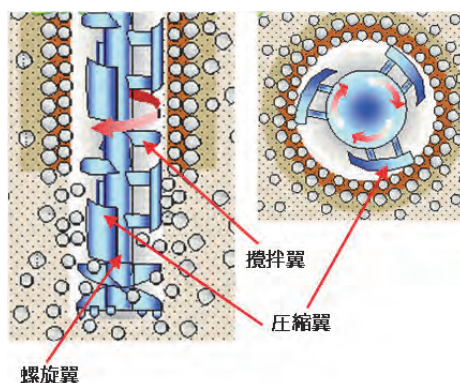


図-1 不連続オーガスクリー¹⁾

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つけられるため、残土処理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機械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実機を用いた現場試験と相対密度の増加効果を検証するための理論式の構築、理論式の妥当性を確認するための模型実験を行う。

3. 実機を用いた現場実験

3.1 現場実験の概要

新潟県北蒲原郡聖籠町において、不連続オーガスクリー貫入による周辺地盤の改良効果について検討を行う。特に、液状化しやすい軟弱な砂地盤で孔壁が自立するか否かに注目した。実験を行う現場から約200m離れた位置でのボーリングデータは図-2に示すとおりである。地盤は細砂・粗砂で構成されており、地下水位は4.0m前後である。

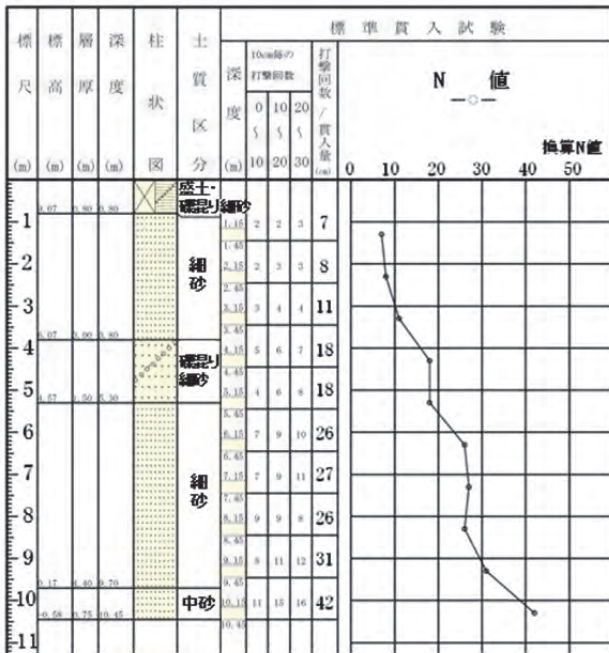


図-2 ボーリング柱状図

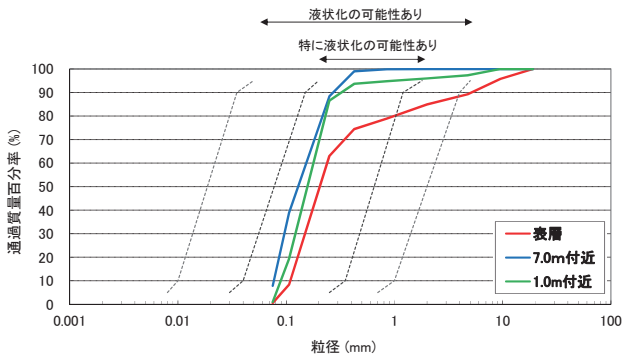


図-3 採取試料の粒径加積曲線

調査地点の表層、深さ約 1m、約 7m 付近の土を採取し粒径加積曲線を描いた(図-3)。表層付近では玉石や礫が混じっていたが、約 1m 掘削すると、粒径の揃った細砂が堆積していることがわかった。1m、7m 地点は、ともに均等係数が小さく、特に液状化しやすい地盤であることが明らかとなった。

写真-1 に不連続オーガスクリーの施工機を示す。オーガスクリーの全長は 5.0m であり、直径が 55cm (中心直径は 26.7cm) である。不連続オーガスクリー貫入による周辺地盤の相対密度の増加効果を確認するために、スウェーデンサンディング試験 (以下、SWS 試験とする) を施工前後で行い、得られた結果より換算 N 値を求める。測定は、掘削後の孔壁から 50cm、75cm、100cm の地点で行った。測定時に孔壁が崩れることを避けるため、SWS 試験はオーガスクリーを貫入させた状態で行った (写真-2)。削孔による周辺地盤の締めめ効果の評価するために、SWS 試験結果より稲田によ



写真-1 現場実験施工機

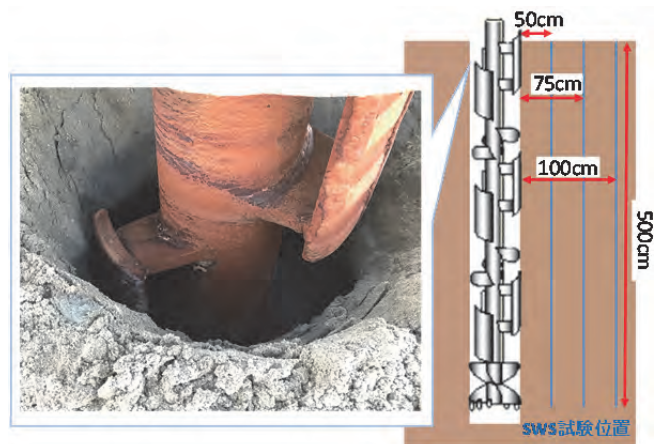


写真-2 オーガスクリー削孔と SWS 試験位置

って提案される以下の式²⁾を用いて削孔前後の換算 N 値を求める

$$\text{砂質土, 砂礫土 } N = 0.002W_{sw} + 0.067N_{sw} \quad (1)$$

$$\text{粘性土 } N = 0.003W_{sw} + 0.050N_{sw} \quad (2)$$

ここで、 W_{sw} は載荷荷重 (N)、 N_{sw} は SWS 試験における 1.0m あたりの半回転数 (回) である。これらの結果をもとに、相対密度増加効果を検討する。

3.2 現場実験結果および考察

SWS 試験の結果より算出した換算 N 値を図-4 に示す。この図に示す掘削前の換算 N 値は、掘削地点で SWS 試験を行い得られた値である。掘削前後の換算 N 値を比較すると、深さ約 3m 程度の地盤では換算 N 値が減少していることがわかる。削孔位置に近い孔壁から 50cm 地点での換算 N 値が最も減少していることから、表層地盤の孔壁付近ではオーガスクリー貫入時の攪拌により地盤が乱され、換算 N 値が減少したと考えられる。深さ約 4m では、50cm と 75cm 地点での換算 N 値が増加しているこ

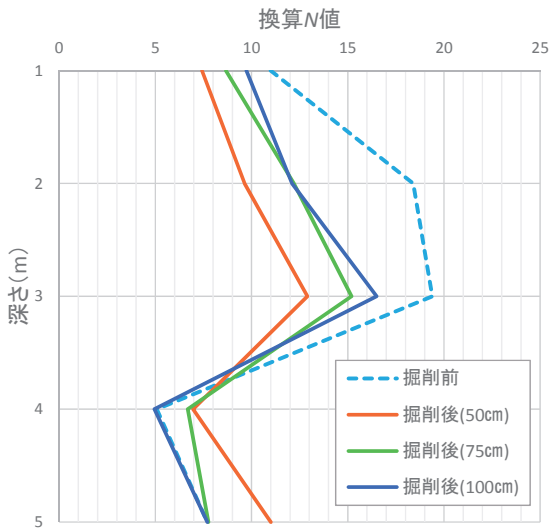


図-4 掘削前後の N 値の変化

とがわかる。深さ約 5m では 50cm 地点での換算 N 値が大きく増加しており、空洞拡張による地盤の密度増加効果が得られたと考えられる。また、写真-2 に示すように、掘削時に孔壁が崩れることなく自立することが確かめられた。

4. 1/5 スケール模型を用いた室内試験

4.1 室内試験の概要

実機試験を数多く行うことは時間、費用の面から不可能であるので、1/5 スケールの不連続オーガスクリーperを作成し、室内模型実験を行い、この実験結果と 5 章で述べる理論値との比較を行い、理論式を用いて詳細な検討を行うことを考えた。室内模型実験で用いる掘削機と土槽を写真-3 に示す。不連続オーガスクリーperは直径 150mm (中心直径は 75mm) である。底部に排水バルブを有した内径 1418mm、高さ 1200mm の鉄製土槽に、液状化の実験でよく使われる珪砂 7 号を用いて地盤を作成し、不連続オーガスクリーperで掘削をする。実機試験においては地表面付近の地盤が乱されて、相対密度の増加効果を確認することができなかったので、外径 1370mm 内径 170mm の上載板と重りを載せ、写真-4 に示すように $0.02 \text{ (N/cm}^2\text{)}$ の上載圧をかけながら掘削する。掘削後、上載板を取り除き測定を行った。

掘削前後の地盤の地盤改良効果の測定方法として、図-5 に示すポータブルコーン貫入試験機を用いる。ポータブルコーン貫入試験はコーン貫入抵抗を求めることを目的とした試験であり、掘削後の孔壁からの距離が 2cm, 17cm, 32cm の 3 箇所それぞれ深さ 50cm まで行う。試験機は単管式と二重管式があるが、本実験における最大掘削深さは 50cm であり比較的浅いため単管式を使用する。試験で得られた結果から、コーン貫入抵抗 $q_c \text{ (kN/m}^2\text{)}$

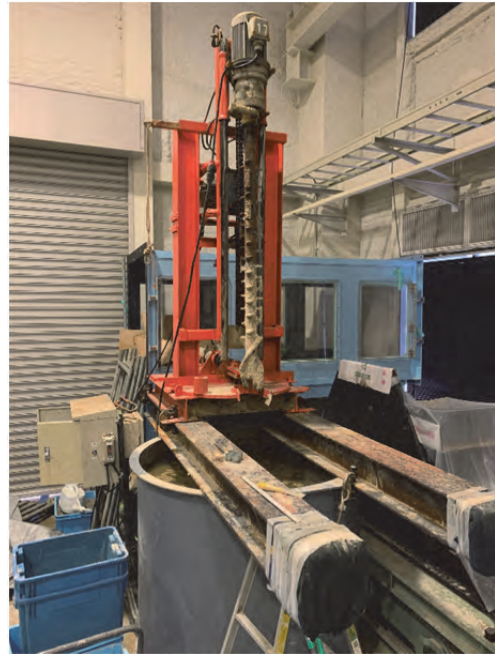


写真-3 室内試験に用いた掘削機と土槽



写真-4 上載圧を加えた室内模型実験

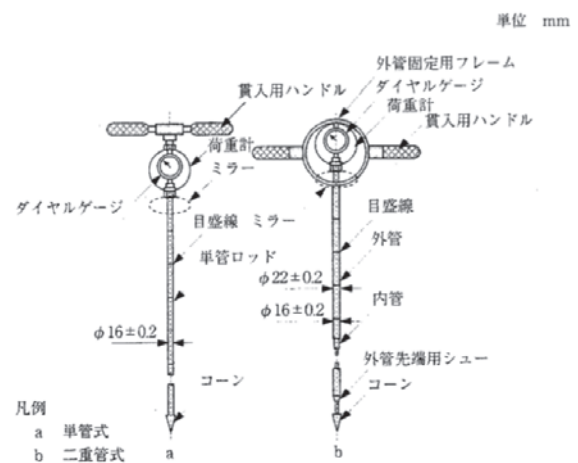


図-5 ポータブルコーン貫入試験機³⁾

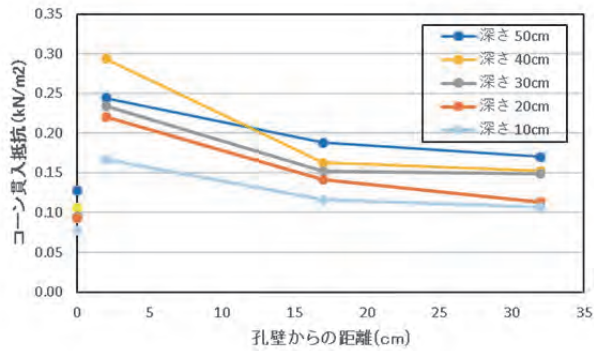


図-6 コーン貫入試験結果

を次の式で算出する。

$$q_c = Q_c/A \quad (3)$$

ここに、

$$Q_c = Q_{cd} + \frac{(m_0 + n \cdot m_1)g}{1000} \quad (4)$$

ここで、

Q_c : コーンの貫入力 (kN)

A : コーンの底面積 (m²)

Q_{cd} : 荷重計測定値 (kN)

荷重計に力計を用いた場合、 Q_{cd} は次の式で算出する。

$$Q_{cd} = KD \quad (5)$$

ここで、

K : 荷重計の校正係数 (kN/目盛)

D : 荷重計の読み値

m_0 : コーンの質量 (kg)

m_1 : ロッド1本の質量 (kg)

g : 標準重力加速度 (m/s²)

n : ロッドの使用本数 (本)

本実験では、 $A=0.00065$ (m²)、 $K=0.00459$ (kN/目盛)、 $m_0=0.12$ (kg)、 $m_1=0.76$ (kg)、 $g=9.8$ (m/s²) のパラメータを用いる。ポータブルコーン貫入試験の結果から、これらの式を用いて q_c 値を算出する³⁾。

さらに、以下に示す式から、コーン貫入抵抗 q_c を N 値に換算する⁴⁾。

$$N = q_c/400 \quad (6)$$

また、試験の際は、オーガスクリーを貫入させた状態で行う。

4.2 実験結果及び考察

実験の結果を図-6 に示す。同図における孔壁か

らの距離が 0cm の点に、掘削前のポータブルコーン貫入試験の結果を示す。深くなるほど有効上載圧が大きくなるため、掘削前のコーン貫入抵抗 q_c も深くなるほど大きくなる。しかし、掘削の際、上載圧を加えていたため地盤の表面が乱されず、深さ方向において掘削後の q_c の増加の割合の差はほとんどみられなかった。半径方向において、孔壁に近いほど q_c の増加が大きく、遠くなるほど小さくなる結果が得られた。不連続オーガスクリーによる地盤改良効果があったと判断できる。

5. 空洞拡張理論を用いた検討

5.1 空洞拡張理論の概要

本研究の対象地盤は液状化が発生しやすい地盤、すなわち、粒径がそろっていて、 N 値が低く緩い砂質地盤である。不連続オーガスクリーを用いた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、相対密度 D_r や N 値が増加するものと考えられる。

本研究では、以下のような仮定を設けて評価式を構築することとする。平面ひずみ条件、すなわち土粒子は半径方向のみに移動する。掘削前は、地盤は等方応力状態にある。完全排水条件、すなわち土の体積変化は生じない。土は弾塑性体とする。

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。

$$D_r' = \frac{e_{max} - (e_0 - \Delta e)}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (7)$$

$$N' = (0.7 + \sigma_v) \cdot (D_r'/21)^2 \quad (8)$$

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ものと考えられる。

図-7 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す。ここでは r 方向のみを考察する 1 次元問題として考える。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_r は次のようになる。

$$\Delta e_m = (1 + e_0) \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \quad (9)$$

$$\Delta e_r = \frac{R}{r_1} \cdot \Delta e_m \quad (10)$$

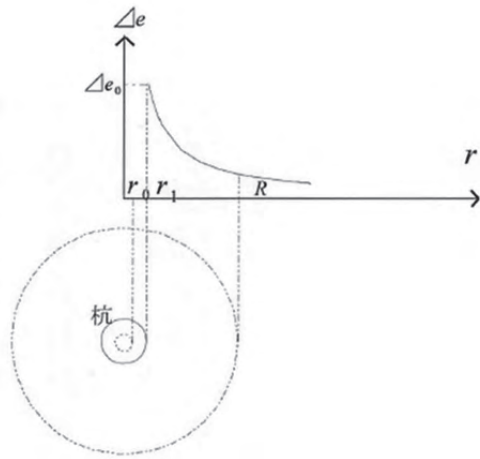


図-7 孔壁からの距離と間隙比の減少の関係

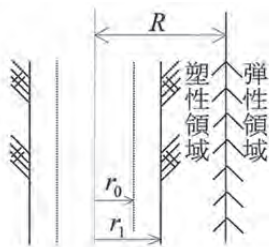


図-8 空洞拡張の影響範囲 R

$$\Delta e = \left[\frac{r_1}{r} \right]^2 \cdot \Delta e_0 \quad (11)$$

空洞拡張による塑性領域と弾性領域の影響範囲 R を図-8 のように設定する。まず、塑性領域と弾性領域の影響範囲 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、

$$e_0 - \Delta e_0 = e_{min} \quad (12)$$

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。

また、前述した Δe_0 , Δe_m の式より、

$$\Delta e_0 = \frac{R}{r_1} \cdot (1 + e_0) \cdot \frac{r_1^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2} \quad (13)$$

上式の R の 2 次方程式を解くことによって、影響範囲 R を求めることができる。この影響範囲 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。

5.2 理論値と実験値の比較

ポータブルコーン貫入試験による N 値の実験値と空洞拡張理論による N 値と影響範囲 R を仮定して算出した理論値とで、「掘削後の N 値/掘削前の N 値」の計算を行い、掘削前後の N 値の変化倍率を比較する。ポータブルコーン貫入試験の結果から算出した N 値を用いた掘削前後の N 値の変化倍率を表-1 に示す。ここで、上載圧が最も大きい深さ 50cm における N 値の変化倍率に着目する。孔壁からの距離が 2cm のとき 1.9 倍、孔壁からの距離が 17cm のとき 1.5 倍、孔壁からの距離が 32cm のとき 1.3 倍の改良が得られたことになる。次に掘削前の地盤の N 値を 1 と仮定し、影響範囲 R を様々な値で仮定して算出した理論値による掘削前後の N 値の変化倍率を比較したものを図-9~11 に示す。

表-2 掘削前後の N 値の変化率

	深さ(cm)				
	10	20	30	40	50
変化倍率, 孔壁から2cm	2.1	2.4	2.5	2.8	1.9
変化倍率, 孔壁から17cm	1.5	1.5	1.6	1.5	1.5
変化倍率, 孔壁から32cm	1.4	1.2	1.6	1.4	1.3

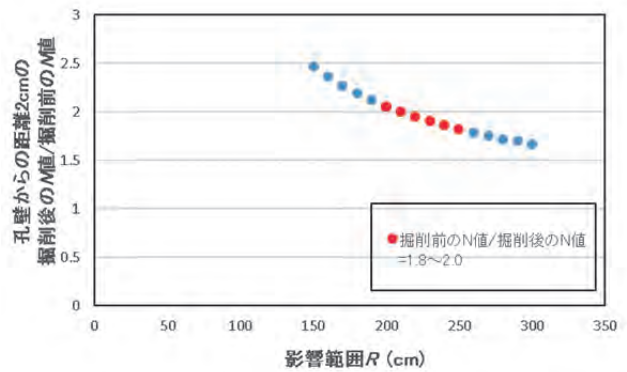


図-9 孔壁から 2 cm における掘削前後の N 値の変化率

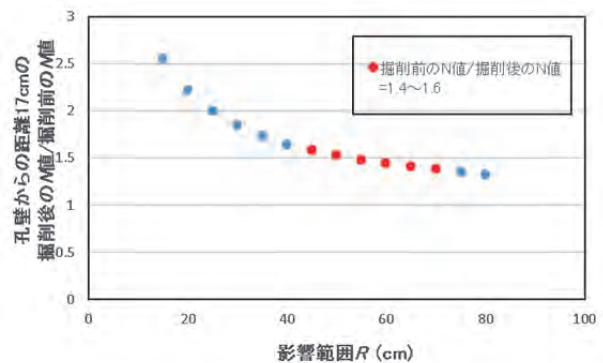


図-10 孔壁から 17 cm における掘削前後の N 値の変化率

表-2 空洞拡張理論による地盤改良効果

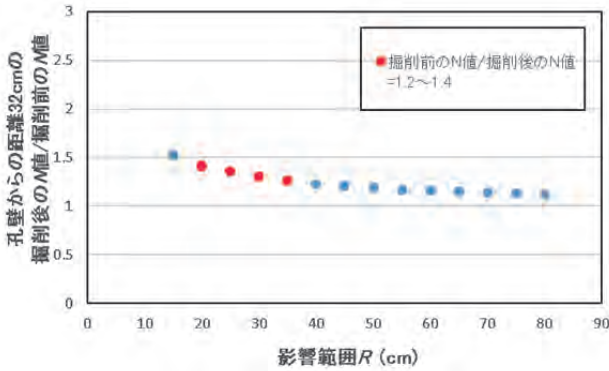


図-11 孔壁から 17 cm における掘削前後の N 値の変化率

ポータブルコーン貫入試験における掘削前後の N 値の変化倍率から、理論値においては、孔壁からの距離が 2cm のとき 1.8~2.0 倍、孔壁からの距離が 17cm のとき 1.4~1.6 倍、孔壁からの距離が 32cm のとき 1.2~1.4 倍の範囲において変化倍率が一致したと考える。図-9 のように孔壁から近い地点においては掘削の際に乱されたため、実験値と理論値の変化倍率を合わせようとすると、影響範囲 R の仮定が 200cm~250cm となりあまりにも大きくなり、結果として適さないと考える。そこで、孔壁からある程度離れた 17cm, 32cm の掘削前後の N 値の変化に着目する。孔壁からの距離 17cm のとき $R=45\sim70$ cm, 孔壁からの距離 32cm のとき $R=20\sim35$ cm と仮定すると変化倍率が理論値と一致する。空洞拡張理論による理論値を用いた掘削前後の N 値の変化倍率は、孔壁からの距離が大きくなるほど実験で得られた影響範囲に近づくことが分かった。今回の実験において、孔壁からの距離が 17cm において空洞拡張理論を用いることができると仮定すると、地盤の N 値と影響範囲 R を仮定し不連続オーガスクリーパーで掘削することで、表-2 に示すような N 値が 10 に近い、または 10 を超える地盤改良効果を得ることが期待できることが明らかとなった。

6. 結論

本研究は、これまで杭孔の掘削に用いられてきた不連続オーガスクリーパー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、その有用性の確認のため、実機を用いた現場試験と、相対密度の増加効果を検証するための理論式の構築、理論式の妥当性を確認するための模型実験を行ったものである。本研究で得られた成果を要約すると以下のようなものである。

- (1) 実機を用いた現場試験により、液状化しやすい軟弱な地盤においても、掘削後の孔壁が自立す

	影響範囲 R (cm)	掘削後の N 値(孔壁からの距離 17cm)
$N=7$ の地盤に掘削	45	11.1
	50	10.7
	55	10.4
	60	10.1
	65	9.9
	70	9.7
$N=9$ の地盤に掘削	45	14.2
	50	13.8
	55	13.3
	60	13.0
	65	12.7
	70	12.4

ることが確認できた。

- (2) 掘削前後の N 値の変化を SWS 試験により確認したところ、表層から 3m までは掘削による地盤の乱れから N 値は減少していたが、5m では N 値が増加しており、相対密度増加効果が確認できた。
- (3) 空洞拡張理論による理論式との対応を検討するための 1/5 スケールの室内模型実験では、上載荷重により掘削時の地表の乱れを防ぐことによって、地表面付近でも相対密度増加効果が確認できた。
- (4) 不連続オーガスクリーパーを用いた掘削による相対密度増加効果を、空洞拡張理論を用いて評価しようとした。効果の影響範囲 R を仮定することにより、模型実験結果と理論との対応が確認できた。

今後は、より深い深さでの効果を確認するための実機試験と影響範囲 R に影響を与える要因を定量的に解明していく必要がある。

謝辞: 本研究は、一般社団法人日本建設機械施工協会第 11 回研究開発助成の補助を受けて実施したものです。また、本研究を実施するにあたり、無排土孔壁工法研究会に多大な協力をして頂きました。ここに記して深謝します。

参考文献

- 1) 株式会社エムエルティールHP：工法紹介，
<http://www.mltsoil.co.jp/kouhou.html>, (2019年8月1日アクセス).
- 2) 稲田倍徳：スウェーデン式サウンディング試験結果の使用について，土と基礎，Vol.18, No.1, pp.15-18, 1960.
- 3) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.337-343, 2013.
- 4) 藤田圭一，大野睦雄，三反畑勇，松本江基：qc/N 値の利用と品質評価，土木学会第 60 回年次学術講演会(平成 17 年 9 月)，pp.963-964, 2005.