

## 地盤環境に配慮した歴史的建造物の基礎補強対策工に関する提案

Proposal for the reinforcement of foundation ground under a historical structure considering the geological environment

原田紹臣<sup>1</sup>・藤本将光<sup>2</sup>・里深好文<sup>3</sup>・小西成治<sup>4</sup>・疋田信晴<sup>4</sup>

Norio Harada, Masamitsu Fujimoto, Yoshifumi Satofuka, Seiji Konishi and Nobuharu Hikita

<sup>1</sup>立命館大学 客員教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Visiting professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

<sup>2</sup>立命館大学 准教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Associate professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

<sup>3</sup>立命館大学 教授 理工学部環境都市工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

<sup>4</sup>ヒロセ補強土株式会社 (〒135-0016 東京都江東区東陽4丁目1番13号)

Hirose & Co.,ltd.

In general, it is important to preserve historical buildings and pagodas that have become inclined due to changing geological conditions. As a countermeasure to inclination, we proposed a soil-nailing technique that fixes a root pile in place via a steel rebar on a net, and considers the underground water conditions. An experiment was conducted to elucidate the reinforcement mechanisms of the root pile. We found that reinforcement efficacy was affected by the pile angle, pile density, and soil type.

**Keywords :** *experiment, foundation, reinforcement, root pile, soil nailing*

### 1. はじめに

現在、洪水・地震による自然災害や地盤環境の変化などの影響を受け、世界遺産等に指定されている歴史的建造物や仏塔の沈下・傾斜などが懸念されており（例えば、図1）、一般的にこれらの適正な保全に向けた対策が望まれる。なお、これまでの地盤改良（例えば、薬液注入工やセメント固化工法）では、地盤内の地下水環境への影響等が懸念される。そこで、これらの代替案としての鉄筋や杭による地盤補強（基礎補強）が考えられる。なお、鉄筋を用いた地山や盛土の安定化（補強）についてはこれまで多くの報告<sup>1)</sup>（例えば、2)）や施工実績が存在し、特に、網状的に掘削した地盤内に鉄筋を挿入させてモルタル等を加圧注入させる網状鉄筋挿入工法<sup>3)</sup>については、施工性や作業サイクルの短縮化より、更なる現場への活用が期待される<sup>4)</sup>。

網状鉄筋挿入工法は欧州（イタリア）で提案<sup>5)</sup>（図2）されて国内に導入されて以降、本工法の機能や効果について実験等により議論され、多くの実績が存在する。また、近年に発生した地震（例えば、2016年熊本地震）において、筆者らは本工法により施工された構造物らの耐震性について確認している（例えば、図3）。一方、圧縮補強として用いる網状的に配置された群杭として効果が期待される一般的な網状鉄筋挿入工法は、これまでの斜面安定化における鉄筋挿入工と比べて、更なる機能の理解（例えば、土質条件を考慮した杭間隔や杭設置角度など）が望まれる。また、現在の設計手法<sup>6)</sup>においては、地盤強度（内部摩擦角や粘着力）以外の土質条件（例えば、粒度特性）については考慮されていないとともに、鉄筋を網状的に配置された群杭における効果<sup>6)</sup>に関して、更なる機能の高度化が期待される。

本研究では、設計時における網状鉄筋挿入工<sup>3)</sup>の補強効果について更なる理解を深めるため、基礎的な実験により杭間隔や杭設置角度、土質条件の違いが補強機構に与える影響について把握することを目的とする。



図1 地盤沈下等の影響を受けて傾斜しているタイ国アユタヤ遺跡ストゥーパ<sup>1)</sup>

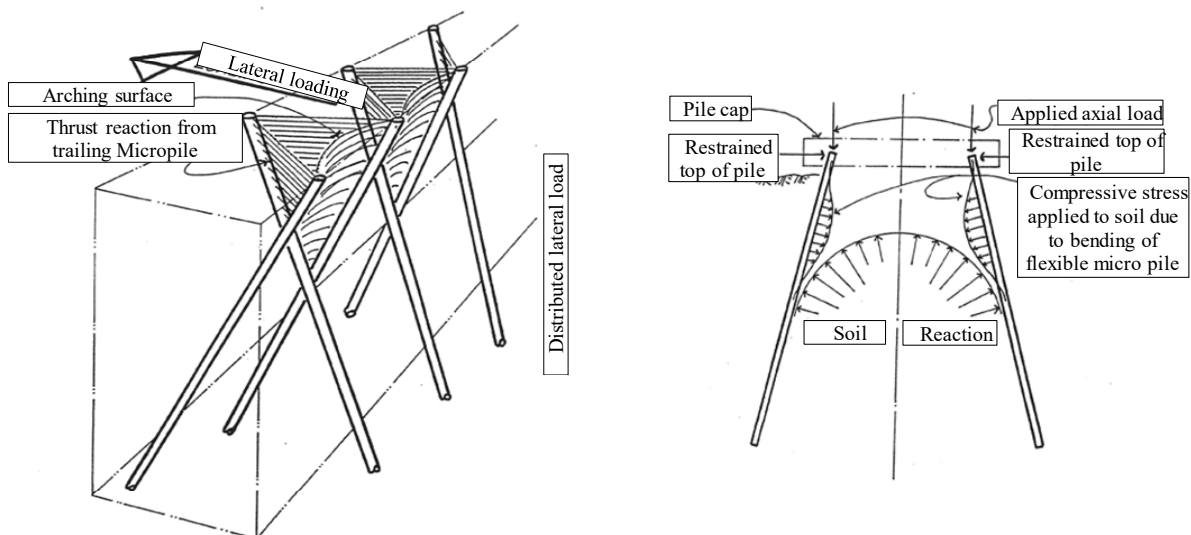


図2 海外で提案された当時における網状鉄筋挿入工法の補強効果に関する概念図<sup>5)</sup>に一部加筆



図3 熊本地震（2016年）の震源隣接区域における地震直後の網状鉄筋挿入工による構造物の追跡状況調査例

## 2. 水平力に対する網状鉄筋挿入工の補強効果

杭間隔や杭の設置角度の違い等が、網状鉄筋挿入工としての基礎補強効果（例えば、群杭効果）に与える影響に関して、水平外力に対する基礎の補強機構について更なる理解を得るため、今回実施する室内荷重載荷実験の概要を以降に示す。

### (1) 実験条件

本実験で用いた実験装置の概要を図4および図5に示す。図4および図5に示されるとおり、水槽内に土砂（ $W=250\text{mm}$ 、 $L=370\text{mm}$ 、 $H=220\text{mm}$ ：図6）を敷き詰めて、その土層内に鉄製で作成された供試体（杭および杭頭：フェーシング）を配置している。なお、予備実験により、水槽の大きさの違いによる実験結果への影響について確認している。地盤内の杭（鉄棒）の径および長さは $\phi=6\text{mm}$ 、 $l_4=100\text{mm}$ とし、杭の設置角 $\theta_1$ はそれぞれ変化させている（ $\theta_1=70、90、110$ 度）。また、杭の配置については、単杭と群杭の違いや杭間隔の違いが補強効果に与える影響について把握するため、図7に示す平面配置（ $l_1=20$ 、 $l_2=40\text{mm}$ ）でそれぞれ比較している。そして、図4および図7に示されるとおり、配置された供試体の側部から一定の力で水平荷重 $P$ を載荷し、限界状態（最大抵抗力 $f$ ）までにおける荷重の変化について、荷重計により連続的に計測している。使用する土砂については、一般的な信楽産真砂土および標準豊浦砂の2種とし、予備実験等により得られた表1に示される条件で水槽内に締め固めている（図6）。

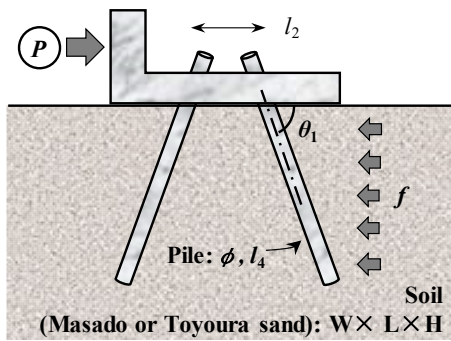


図4 実験に用いた実験装置の断面図

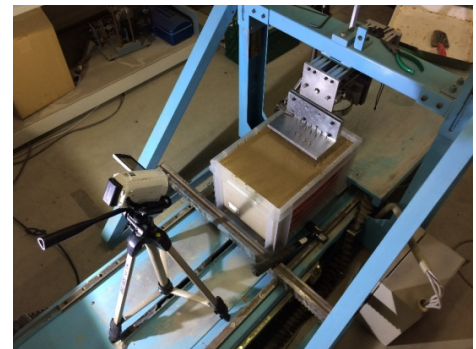


図5 実験装置の概要

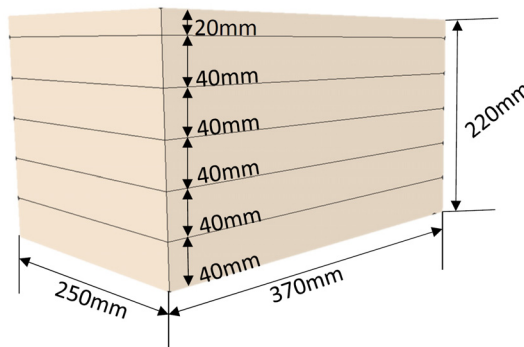


図6 土層における締め固めの概要

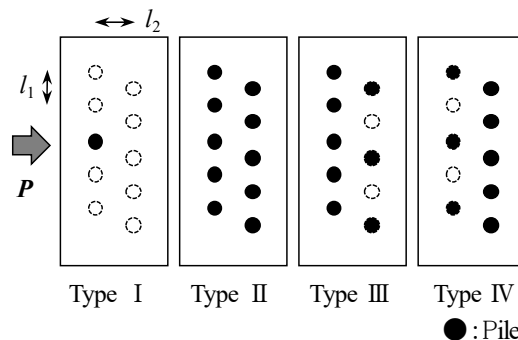


図7 杭頭（フェーシング部）における各杭平面配置の概要

表1 土質条件

	Masado	Toyoura sand
Water content (%)	10	15
Dry density (g/cm <sup>3</sup> )	1.60	1.54
Wet density (g/cm <sup>3</sup> )	1.72	1.77

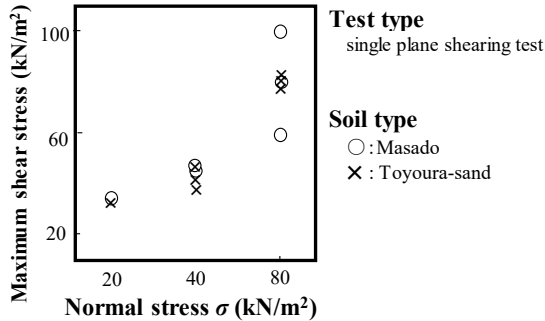


図8 使用した各土砂の一面せん断試験結果

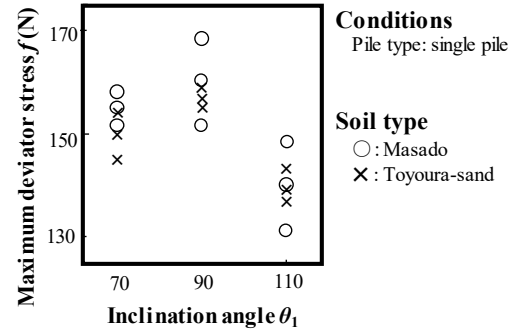


図9 単杭配置における杭設置角の違いが最大抵抗力に与える影響

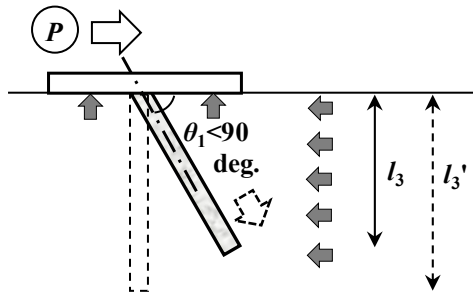


図10 単杭配置における荷重方向 ( $\theta_1 < 90$  度) に傾斜させた杭の補強効果

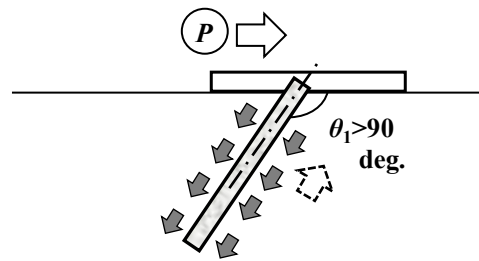


図11 単杭配置における荷重反対方向 ( $\theta_1 > 90$  度) に傾斜させた杭の補強効果

## (2) 実験結果

実施した一面せん断試験の結果を図8に示す。図8に示されるとおり、それぞれの土砂（表1）における最大せん断応力の平均値については殆ど差が確認されなかったが、垂直応力 $\sigma$ が大きくなるに伴って真砂土の結果の一部において分散傾向が示され、一部では顕著に高いせん断応力が確認された。

単杭における杭の設置角度や土質の違いと、水平外力に対する最大抵抗力との関係を図9に示す。図9に示されるとおり、荷重方向に杭を傾斜 ( $\theta_1=70$ 度：図4) させた場合、垂直 ( $\theta_1=90$ 度) に杭を設置した場合と比較して、補強効果が低減した（約5~7%）。この要因として、実験中の観察結果によると、単杭の傾斜に伴って変化する前面からの抵抗範囲・延長 ( $l_3$ ：図10) の違いに影響を受けたものと考えられる。また、荷重と同方向に杭を傾斜 ( $\theta_1=110$ 度：図4) させた場合、垂直 ( $\theta_1=90$ 度) に杭を設置した場合と比較して、補強効果が低減した（約15%：図9）。この要因として、実験中の観察結果によると、荷重方向に杭を傾斜 ( $\theta_1 < 90$ 度) させた場合、フェーシング部は鉛直下面方向に沈みながら前面からの地盤反力等の影響を受けて抵抗（図10）する一方で、荷重反対方向に杭を傾斜 ( $\theta_1 > 90$ 度) させた場合においては、フェーシング部が鉛直上方向に浮きながら杭の引き抜き摩擦等の影響（図11）を受けて抵抗するのが確認された。これらの実験結果より、設置角度の違いに伴う杭における補強効果の変化に影響を受けたものと考えられる。なお、土質の違いに関して、荷重と同方向に杭を傾斜 ( $\theta_1=110$ 度) させた場合には殆ど変化が確認されなかったが、荷重方向に杭を傾斜 ( $\theta_1=70$ 度) させた場合においては、真砂土は豊浦砂と比較して補強効果が向上した（3%程度）。

次に、群杭における杭の設置角度や土質の違いと、水平方向における最大抵抗力との関係を図12に示す。図12に示されるとおり、単杭で確認された傾向（図9）と同様に、真砂土が豊浦砂と比較して高い補強効果（最大抵抗力）の傾向が確認された。特に、傾斜 ( $\theta_1=70-110$ 度：図4) させた場合において顕著な傾向が確認された（約25%程度）。この要因として、実験結果の観察によると、群杭でそれぞれ傾斜 ( $\theta_1=70-110$

度)させた場合には後列側の杭前面部において面的な仮想壁が形成され、明瞭な地盤破壊(例えば、掻き上げ現象:図13)が地表面において確認された。特に、真砂土の場合には、せん断応力の分散傾向に伴う高いせん断抵抗力(例えば、図8)や地盤破壊機構の違いに影響を受けて顕著な差が見られたものと考えられる。

最後に、杭の配置や傾斜(図4および図7)の違いと、最大抵抗力との関係を図14に示す。図14に示されるとおり、後列側における杭の本数を減じて傾斜させた群杭(Type III:図7)は、密に杭を配置して傾斜させた群杭(Type II)と比較して、補強効果が顕著に低減した(約30%程度)。この要因として、実験中の観察結果によると、杭の本数が不足したことに伴う群杭効果(仮想壁による面的な補強効果:図13)の低下によるものと考えられる。なお、前列側における杭の本数を減じて傾斜させた群杭(Type IV)は、密に杭を配置して傾斜させた群杭(Type II)と比較して、同様に補強効果が顕著に低減した。この要因として、杭本数の減に伴う抵抗力の低減による影響を受けたものと考えられる。一方、垂直に配置した群杭については顕著な差が確認されなかった。今後、杭表面の摩擦の違いや斜め方向方の荷重に対する群杭効果の更なる理解が望まれる。

### 3. 鉛直力に対する網状鉄筋挿入工の補強効果

杭間隔や杭の設置角度の違い等が、網状鉄筋挿入工としての基礎補強効果に与える影響に関して、鉛直外力に対する補強効果について更なる理解を得るため、今回実施する室内荷重載荷実験の概要を以降に示す。

#### (1) 実験条件

実験で用いた実験装置の概要を図15に示す。図15に示されるとおり、前述と同様に、水槽内( $W=250\text{mm}$ 、 $L=370\text{mm}$ 、 $H=200\text{mm}$ :図6)に土砂を敷き詰めて、その土層内に供試体(アルミ製で作成された杭および鉄製で作成された杭頭:フェーシング)を配置している(図16)。なお、予備実験により、水槽の大きさの違いによる実験結果の影響について確認している。地盤内の杭(供試体)の径および長さは $\phi=6\text{mm}$ 、 $l=100\text{mm}$ とし、同様に杭の設置角 $\theta_1$ はそれぞれ変化させている(TYPE I、II、III:図16)。杭の配置については、群杭密度の違い等が補強効果に与える影響について把握するため、図17に示す平面配置( $n=5$ 、10

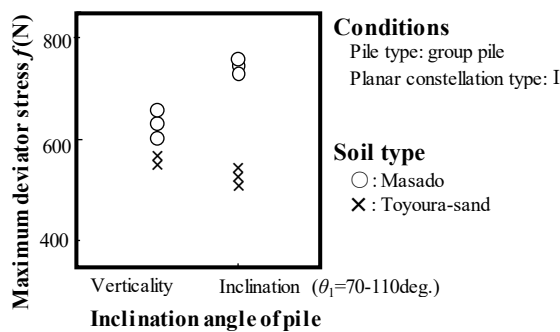


図 12 群杭配置における杭設置角の違いが最大抵抗力に与える影響

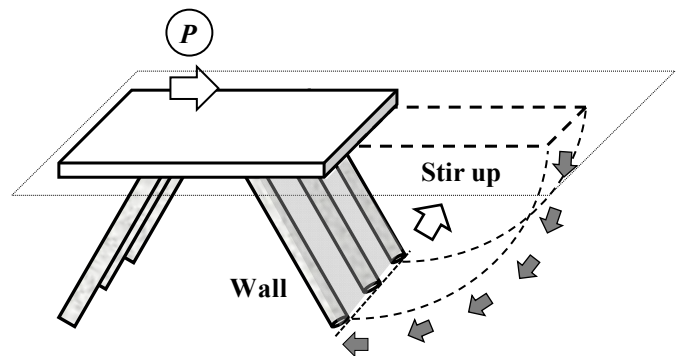


図 13 群杭配置における後列杭前面での抵抗機構(例えば、掻き上げ現象による地盤反力)

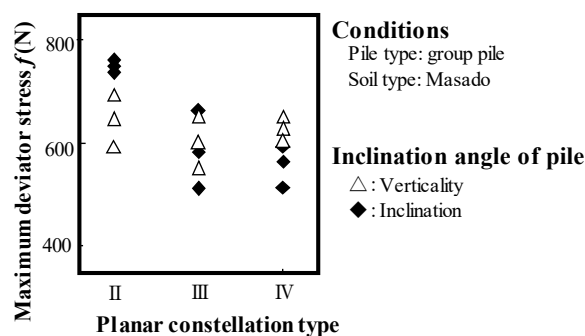


図 14 群杭配置における杭間隔の違いが最大抵抗力に与える影響

及び杭無)を変化させている。そして、図15に示されるとおり、配置された供試体の上部からほぼ一定の力で鉛直荷重 $P$ を载荷し、予備実験での荷重と変位との傾向より得られた一定の変位値(30mm)までにおける鉛直荷重の変化について、荷重計を用いて連続的に計測している。使用する土砂については一般的な信楽産真砂土とし、前述と同様に最も地盤強度が期待できると考えられる条件(含水比10%、乾燥密度 $1.60\text{ g/cm}^3$ 、湿潤密度 $1.72\text{ g/cm}^3$ :表1)で締め固めている。

さらに、杭と土との摩擦抵抗(粗度)の違いが補強効果に与える影響を把握するため、図18に示すとおり、アルミ杭(TYPE A)の表面において溝切り加工した杭(TYPE B、C)を用意している。なお、溝切り加工の有無や粗度の異なる杭における土との摩擦抵抗の違いを把握するため、図15に示す実験装置により、単杭(TYPE I、 $n=1$ )が土層内に鉛直方向へ貫入するのに必要な最大鉛直荷重を事前に把握している。なお、TYPE A、BおよびCの土層内への貫入に際して得られた最大鉛直荷重 $p_n$ は、それぞれ57.8N、97.8Nおよび102.2N(ただし、杭貫入長100mmあたり)であった。

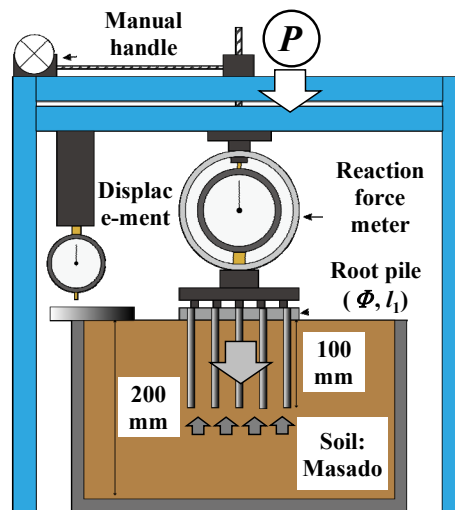


図15 実験装置の概要

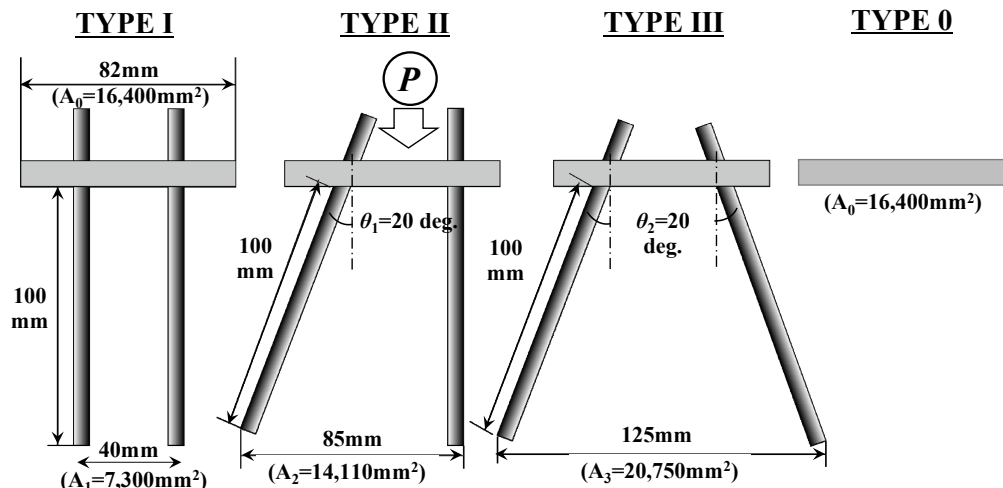


図16 杭の断面配置型式

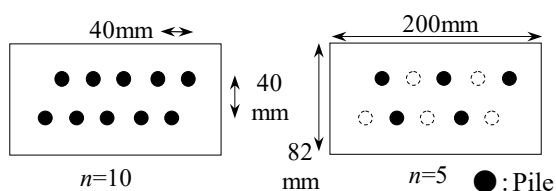


図17 杭の平面配置型式



図18 杭表面における摩擦粗度(溝切り)状況

## (2) 実験結果

表面摩擦抵抗 (図18) が異なる杭をそれぞれ配置させた群杭 (図16および図17) と杭無し (TYPE 0: フェーシングのみ) における鉛直方向の最大荷重に関して、群杭先端部で形成されると考えられる仮想改良底面積 ( $A_{1\sim3}$ : 図16) に着眼して整理した結果を図19に示す。図19に示されるとおり、最大荷重と仮想改良底面積とはほぼ比例することが確認された。また、杭無し (TYPE 0) のフェーシング部の面積 ( $A_0$ : 図16) と最大荷重との関係は、仮想改良底面積と最大荷重との関係に内挿されることが確認された。なお、群杭密度 (群杭先端の仮想改良底面積  $A_{1\sim3}$  と杭断面積  $A_\phi$  の合計  $\Sigma A_\phi$  との比) の違いが仮想改良底面の地盤応力 (仮想改良底面積  $A_{1\sim3}$  あたりの最大荷重  $P_n$ ) に与える影響を図20に示す。図20に示されるとおり、群杭の密度と仮想改良底面付近における地盤応力に関して、強い線形の関係性が確認された。また、図19にも示されるとおり、杭表面における摩擦抵抗 (図18) の違いが地盤における最大荷重  $P_n$  (鉛直支持力) に影響を与えていることが確認された。ここで、単杭における最大荷重  $p_n$  の違いが群杭の最大荷重  $P_n$  に与える影響に関して、群杭の最大荷重  $P_n$  を杭断面配置形式毎 (TYPE I、II、III) にそれぞれ無次元化した値 (最小荷重であるTYPE Aの群杭における最大荷重  $P_{min}$  との比) と、単杭の最大荷重  $p_n$  をそれぞれ無次元化した値 (最小荷重であるTYPE Aの単杭における最大荷重  $p_{min}$  との比) との関係を図21に示す。図21に示されるとおり、杭表面摩擦抵抗が大きくなるに伴って、加速度的に群杭の補強効果に影響を与えることが確認された。今後、杭表面における摩擦の違いが補強効果に与える機構の解明が必要である。

## 4. おわりに

現在、地盤環境の変化などの影響を受けて傾斜している歴史的建造物や仏塔等に対して、地盤環境 (例えば、地下水環境) の保全等にも配慮した対策として、設計時における網状鉄筋挿入工の基礎補強効果 (水平、鉛直外力に対する補強) について更なる理解を深めるため、室内実験により杭間隔や杭設置角度、土質条件の違いが補強効果に与える影響について把握した。

本研究により得られた成果を以下に要約する。

- 1) 水平外力に対して荷重方向に傾斜させた単杭は、垂直に設置した単杭と比較して補強効果が低減した。この要因として、単杭の傾斜に伴って変化する前面からの抵抗延長の違いに影響を受けたものと考えら

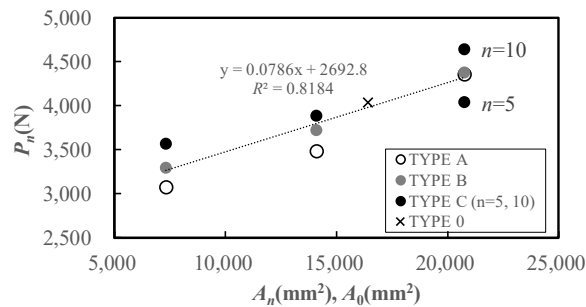


図19 杭配置型式の違いが補強効果に与える影響

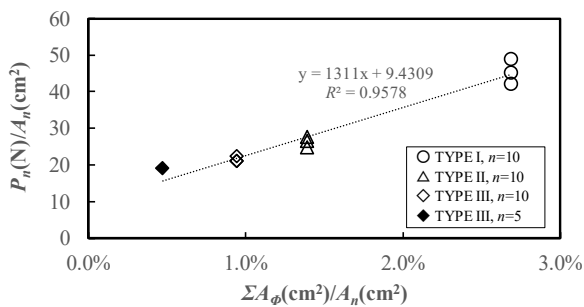


図20 群杭密度の違いが補強効果に与える影響

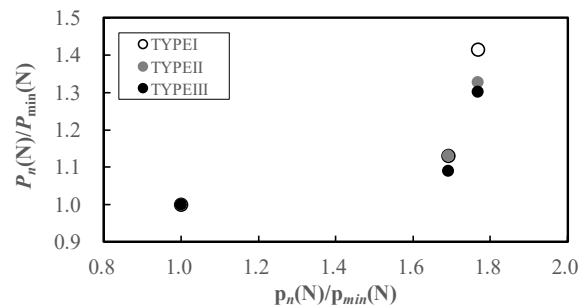


図21 杭表面粗度の違いが補強効果に与える影響

れる。なお、荷重方向に杭を傾斜させた場合、フェーシング部は鉛直下面方向に沈みながら前面からの地盤反力等の影響を受けて抵抗する一方で、荷重反対方向に杭を傾斜させた場合においてはフェーシング部が鉛直上方向に浮きながら杭の引き抜き摩擦等の影響を受けて抵抗するのが確認され、これらの設置角度の違いによる杭における補強機構の変化に影響を受けたものと考えられる。

- 2) 水平外力に対して、群杭でそれぞれ傾斜させた場合には、後列側（外力方向）の杭前面部において面的な仮想壁が形成され、明瞭な地盤破壊（例えば、搔き上げ現象）が確認された。特に、真砂土の場合には、せん断応力の分散傾向に伴う高いせん断抵抗力や地盤破壊機構の違いに顕著に影響を受けたものと考えられる。
- 3) 水平外力に対して、後列側における杭の本数を減じて傾斜させた群杭は、密に杭を配置して傾斜させた群杭と比較して、補強効果が顕著に低減した。この要因として、杭の本数が不足したことに伴う群杭効果（面的な効果）の低下によるものと考えられる。なお、前列側における杭の本数を減じて傾斜させた群杭は、密に杭を配置して傾斜させた群杭と比較して、同様に補強効果が顕著に低減した。この要因として、杭本数の減に伴う抵抗力の低減の影響を受けたものと考えられる。今後、杭表面の摩擦の違いや斜め方向からの外力に対する群杭効果の更なる理解が望まれる。
- 4) 鉛直外力に対して、表面摩擦抵抗が異なる杭をそれぞれ配置させた群杭と杭無しにおける最大荷重に関して、群杭先端部付近で杭相互で形成されると考えられる仮想改良底面積に着眼して整理したところ、最大荷重と仮想改良底面積とはほぼ比例することが確認された。また、杭無しのフェーシング部の面積と最大荷重との関係は、仮想改良底面積と最大荷重との関係に内挿されることが確認された。
- 5) 鉛直外力に対して、群杭密度（群杭先端の仮想改良底面積と杭断面積の合計との比）の違いが仮想改良底面の地盤応力（仮想改良底面積あたりの最大荷重）に与える影響に関して、群杭の密度と仮想改良底面付近における地盤応力について強い線形の関係性が確認された。杭表面における摩擦抵抗の違いが地盤における最大荷重（鉛直支持力）に影響を与えていることが確認された。
- 6) 鉛直外力に対して、杭表面摩擦抵抗が大きくなるに伴って、加速度的に群杭の補強効果に影響を与えることが確認された。今後、杭表面における摩擦の違いが補強効果に与える機構の解明が必要である。

**謝辞：**本実験の遂行に際して、奥田悠太氏および前川裕哉氏の多大な協力を得た。ここに記して感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 渡邊邦夫：人工知能理論を適用した写真測定の精度向上による建設工事及び建設物変形モニタリング技術の開発研究，日本建設情報総合センター研究助成 成果報告書，Vol.2010-01，2012.
- 2) 龍岡文夫・三木五三郎・松尾恵一・児玉秀文：鉄筋により補強された砂地盤の支持力特性 I，東京大学生産研究，Vol. 33, No.10, pp.21-24, 1981.
- 3) 土質工学会：補強土工法，土質基礎工学ライブラリー29，pp.392-426，1986.
- 4) 三木五三郎・坂下五男・児玉秀文：網状ルートパイル工法の日本における実施例，土と基礎，Vol. 31, No.9, pp.35-40, 1983.
- 5) Lizzi, F. : Root Piles as soil reinforcement for foundation problems, *Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, pp.15, 1991.
- 6) 富沢孝一・森康夫・菊池実：群杭効果に関する水平載荷試験結果，寒地土木研究所，Vol. A-11, pp.73-80, 1984.