

# 網状鉄筋挿入工における杭設置条件の違いが 堰堤基礎補強機能に与える影響

EXPERIMENTS ON THE EFFECTS OF PILE ANGLE, SPACING, AND FRICTION  
FOR REINFORCEMENT OF THE FOUNDATION OF THE CHECK DAM

原田 紹臣<sup>1</sup>・藤本 将光<sup>2</sup>・小西 成治<sup>3</sup>・疋田 信晴<sup>4</sup>

Norio HARADA, Masamitsu FUJIMOTO, Seiji KONISHI and Nobuharu HIKITA

<sup>1</sup>京都大学大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

E-mail: harada3@kais.kyoto-u.ac.jp

<sup>2</sup>立命館大学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)

E-mail: m-fuji@fe.ritsumeai.ac.jp

<sup>3</sup>ヒロセ補強土株式会社 (〒135-0016 東京都江東区東陽 2-1-13)

E-mail: s-konishi@hirose-net.co.jp

<sup>4</sup>ヒロセ補強土株式会社 (〒541-0046 大阪府中央区平野町 2-6-6)

E-mail: n-hikita@hirose-net.co.jp

*Key Words: experiment, foundation, reinforcement, root pile, soil nailing*

## 1. はじめに

近年、老朽化した砂防堰堤の改築等において、設計当時と比較した設計条件の変化(例えば、土石流による水平外力の付加)や、堰堤基礎地盤の経年的な風化等による地耐力の不足などが懸念されており、これらの砂防設備に対する長寿命化<sup>1)</sup>に向けた対策が望まれる。

堰堤新設における堰堤の基礎補強対策として、これまで地盤改良(例えば、薬液注入工やソイル・セメント工)等が一般的に提案されている。しかしながら、既設堰堤の改築に際しては、施工の確実性(例えば、薬液注入工における充填精度)や実現性(例えば、堰堤構造物の直下における攪拌工事の実現性)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>例えば、2)</sup>や施工実績が存在し、特に、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>。

この網状鉄筋挿入工法は欧州(イタリア)で提案<sup>5)</sup>(図-1)されて国内に導入されて以降、そ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の耐震性を確認している(例えば、図-

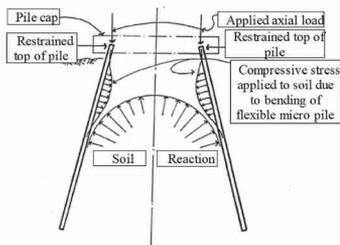


図-1 海外で提案された当時における網状鉄筋挿入工法の補強効果に関する概念図<sup>5)</sup>に一部加筆



図-2 熊本地震(2016)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

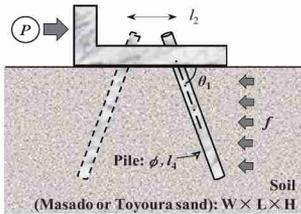


図-3 実験に用いた実験装置の断面図



図-4 実験装置の概要

2). 一方、圧縮補強として用いる群杭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、更なる機能の検討(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>3)</sup>においては、土質条件(例えば、粒度特性、含水比等の条件)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した群杭効果<sup>4)</sup>の向上等が期待される。

本研究では、砂防堰堤改築時の基礎補強に対する網状鉄筋挿入工<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機構に与える影響を求めた。

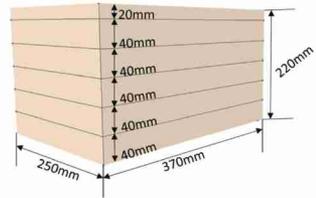


図-5 水槽の形状及び締め固め形状

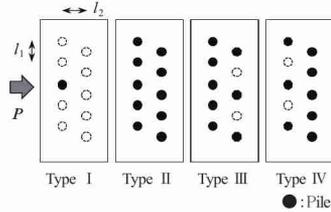


図-6 杭頭(フェーシング)部における各杭平面配置の概要

## 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)に与える影響を検討するため室内荷重載荷実験を行った。

### (1) 実験条件

本実験で用いた実験装置の概要を図-3 および図-4 に示す。これらの図に示すように、水槽内に土砂( $W=250\text{mm}$ ,  $L=370\text{mm}$ ,  $H=220\text{mm}$ : 図-5)を敷き詰めて、その土層内に鉄製で作成された模型(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、実験結果に影響を与えない程度の水槽の大きさを確認している。

地盤内の杭(鉄棒)の径および長さは  $\phi=6\text{mm}$ ,  $l_1=100\text{mm}$  とし、図-3 に示す杭の設置角  $\theta_1$  はそれぞれ変化させている( $\theta_1=70, 90, 110$ 度)。

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-3 に示す断面形状にて図-6 に示す平面配置( $l_1=20$ ,  $l_2=40\text{mm}$ , ●: 杭配置位置)でそれぞれ比較している。

図-3 および図-6 に示される配置された模型の側部から一定の力で水平荷重  $P$  を載荷し、一定の変位(30mm)までにおける最大抵抗力  $f$  の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

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

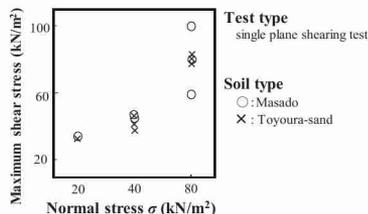


図-7 使用した各土砂の一面せん断試験結果

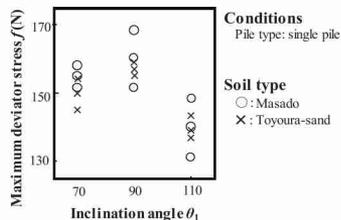


図-8 単杭配置における杭設置角の違いが最大抵抗力に与える影響

準豊浦砂の2種とし、予備実験等により得られた表-1に示される条件で締め固めている(図-5)なお、当該条件による土質の力学特性について把握するため、一面せん断試験を実施している。

## (2) 実験結果

実施した一面せん断試験の結果を図-7に示す。図-7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、与えた荷重の垂直応力 $\sigma$ 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-8に示す。図-8に示されるとおり、荷重方向に杭を傾斜( $\theta_1=70$ 度: 図-3)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、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-9)の違いに影響を受

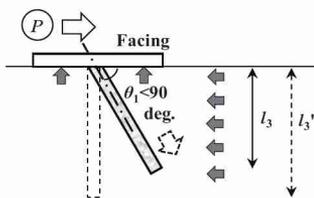


図-9 単杭配置における荷重方向( $\theta_1 < 90$ 度)に傾斜させた杭の補強効果

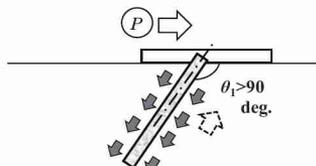


図-10 単杭配置における荷重反対方向( $\theta_1 > 90$ 度)に傾斜させた杭の補強効果

けたものと考えられる。また、荷重と逆方向に杭を傾斜( $\theta_1=110$ 度: 図-3)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-8)。この要因として、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-9)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-10)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、荷重と逆方向に杭を傾斜( $\theta_1=110$ 度)させた場合には殆ど変化が確認されなかった。また、荷重方向に杭を傾斜( $\theta_1=70$ 度)させた場合においても、真砂土は豊浦砂と比較して、補強効果の顕著な違いは確認されなかった。

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-11に示す。図-11に示されるとおり、単杭で確認された傾向(図-8)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-3)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、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懸壁が形成され、明瞭な地盤破壊(例えば、押し上げ現象: 図-12)が

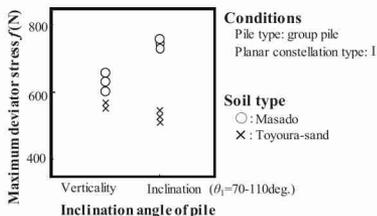


図-11 群杭配置における杭設置角の違いが最大抵抗力に与える影響

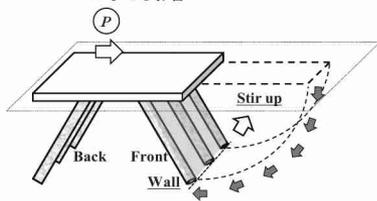


図-12 群杭配置における後列杭前面での抵抗機構（例えば、押し上げ現象による地盤反力）

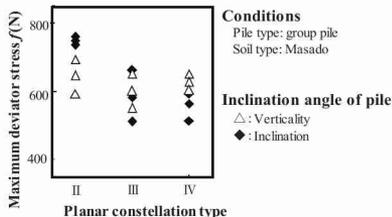


図-13 群杭配置における杭間隔の違いが最大抵抗力に与える影響

地表面において確認された。特に、真砂土の場合には、体積内に部分的に存在する高いせん断抵抗力（例えば、図-7）や地盤特性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-3および図-6）の違いと、最大抵抗力との関係を図-13に示す。図-13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-6）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、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-12）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

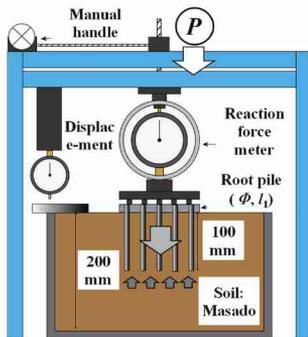


図-14 実験装置の概要

が顕著に低減した。この要因についても、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からの荷重に対する群杭効果の更なる検討が望まれる。

### 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把握するため、室内荷重載荷実験を行った。その概要を以降に示す。

#### (1) 実験条件

実験で用いた装置の概要を図-14に示す。前述と同様に、水槽内（ $W=250\text{mm}$ 、 $L=370\text{mm}$ 、 $H=200\text{mm}$ ：図-5）に土砂を敷き詰めて、その土層内に模型（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-15）。なお、予備実験により、実験結果に影響を与えない程度の水槽の大きさを確認している。

地盤内の杭（模型）の径および長さは  $\phi=6\text{mm}$ 、 $l_1=100\text{mm}$  とし、図-3と同様に杭の設置角  $\theta_1$  はそれぞれ変化させている（TYPE I, II, III：図-15）。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-15に示す断面形状にて、図-16に示す平面配置（ $n=5, 10$ 及び杭無、●：杭配置位置）を変化させている。

図-14に示されるとおり、配置された模型の上部からはば一定の力で鉛直荷重  $P$  を載荷し、予備実験

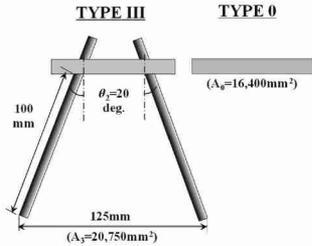
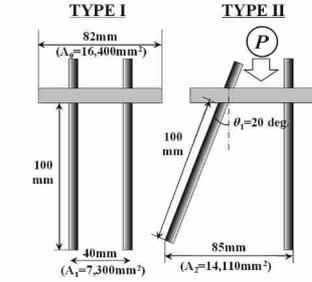


図-15 杭の断面配置型式

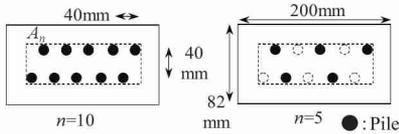


図-16 杭の平面配置型式

での荷重と変位との傾角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 g/cm³, 湿潤密度 1.72 g/cm³ : 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-17 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: 粗, C: 滑) 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-14 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  $p_n$  を調べた結果、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-17 杭表面における摩擦粗度 (溝切り) 状況

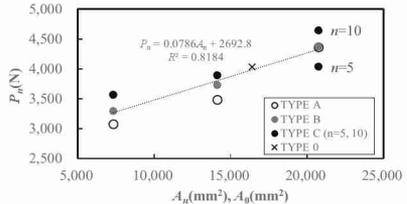


図-18 杭配置型式の違いが補強効果に与える影響

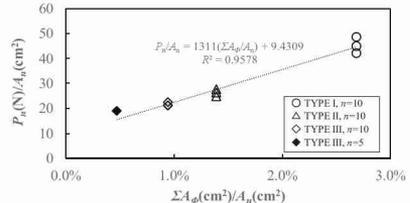


図-19 群杭密度の違いが補強効果に与える影響

## (2) 実験結果

表面摩擦抵抗 (図-17) が異なる杭をそれぞれ配置させた群杭 (図-15 および図-16) 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 ( $A_{1-3}$ : 図-15 および図-16) に着目して整理した結果を図-18 に示す。図-18 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-15) 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  $A_{1-3}$  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  $A_{1-3}$  あたりの最大荷重  $P_n$ ) に与える影響を図-19 に示す。図-19 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-18 にも示されるとおり、杭表面における摩擦抵抗 (図-17) 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

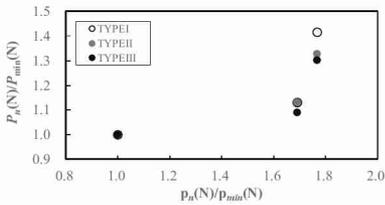


図-20 杭表面粗度の違いが補強効果に与える影響

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と、単杭の最大荷重  $p_n$  をそれぞれ無次元化した値との関係を図-20に示す。なお、それぞれ、最大荷重  $P_n$  を最も小さい荷重であった TYPE A の群杭における荷重  $P_{min}$  で除して無次元化を図るとともに、単杭における最大荷重  $p_n$  を同様に最も小さい荷重であった TYPE A の単杭における荷重  $p_{min}$  で除して無次元を図っている。図-20に示されるとおり、図-17に示す杭表面の粗密の違いによる影響を受け、杭表面摩擦抵抗が大きくなるに伴って、顕著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

砂防堰堤改築時等の基礎補強に対する設計時における網状鉄筋挿入工の補強効果 (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、室内実験により杭における設置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する傾向が確認された。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のが確認された。一方、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た。
- 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、押し上げ現象) が確認された。

- 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、密の状態では杭を荷重方向に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。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。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や、杭無しにおける最大荷重に関して、群杭先端部付近での杭相互で形成されると考えられる仮想改良底面積に着目して整理した。その結果、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、群杭密度の違いが仮想改良底面の地盤応力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。
- 6) 鉛直外力に対して、杭表面の摩擦抵抗が大きくなるに伴って、顕著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) 国土交通省 水管理・国土保全局 砂防部：砂防関係施設の長寿命化計画策定ガイドライン (案)，2014。
- 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。

(2018.5.18 受付)