温室用基礎としての斜杭の水平載荷特性に関する研究

温室用基礎としての斜杭の水平載荷特性に関する研究

桑原孝雄・木全 卓・工藤庸介・山形俊彦*・北島弘伸*

（大阪府立大学大学院農学生命科学研究科環境開発工学研究室，*グリンテック株式会社）

要　　旨

一般に，園芸用などに用いられる温室は比較的軽量な構造物であり，基礎部分には自重による押し込み荷重よりも風などによる引き抜きや水平方向への荷重が卓越する。このような場合，斜杭を用いた基礎方式に大きな効果が期待できる。そのため，著者らは室内模型実験を行って斜杭を用いた基礎の力学特性を検討してきたが，これまでの研究で，斜杭は直杭よりも遙かに大きな引き抜き抵抗を有し，温室用の基礎として非常に有用であることが確認できている。従って，本研究では，斜杭のもう一つの抵抗要因である水平抵抗について模型実験を行うことにより検討した。実験では，斜杭の打ち込み角度が異なる杭模型を複数設定し，水平荷重が載荷される方向の違いによる影響を中心に，斜杭が２本の場合と４本の場合についてそれぞれ検討した。その結果，水平抵抗は杭の先端がより深くまで達している傾斜角が小さいものの方が大きくなるが，その影響は引き抜きの場合ほど顕著ではないことがわかった。また，特に２本の斜杭を用いる場合，荷重の載荷方向は杭の並びと同じ場合の方が少ない変形量での抵抗力の発現が早くなることもわかった。さらに，斜杭の打ち込み角度が小さいと斜杭の本数を増やしても水平抵抗力の増加率は小さくなることもわかった。

キーワード：温室，基礎構造物，斜杭，水平載荷，模型実験

Abstract

Takao Kuwabara, Takashi Kimata, Yosuke Kudo, Toshihiko Yamagata* and Hironobu Kitajima* (Laboratory of Environmental development engineering, Graduate school of Agriculture and biological sciences, Osaka Prefecture University; *Green-tec Co. Ltd.): A Study on Horizontal Loading Characteristics of Batter Piles as a Greenhouse Foundation. Sci. Rep. Grad. Sch. Agric. & Biol. Sci., Osaka Pref. Univ. **56**: 23-28 (2004).

Generally, a greenhouse is a relatively lightweight structure, and the foundations are subjected to a much larger wind-force load uprooting it, than the load of it's own structural weight pushing it in. In such a case, a foundation method using batter pile is expected more effective resistance. Authors are investigating the mechanical properties of batter pile foundation by executing laboratory model tests, and it is found that the batter piles resist much more against the pulling load than the ordinary vertical piles, and the usefulness of the batter piles are confirmed as a greenhouse foundation. In this study, horizontal loading resistance, which is another important resistance for structural foundation, are investigated by executing model tests. In the model tests, some kind of batter piles that is driven in different angles is set up and two and four piles models are adopted, considering the effect of angle between arrangement of piles and horizontal loading direction. As a result, it is found that the piles driven in at a smaller angle, which reaches deeper foundation, show more horizontal loading resistance, though the difference is not so much significant than that of pulling test. As for two piles foundation, it is clarified that the horizontal resistance in small displacement become larger when the direction of loading angle coincide with the pile-arrangement compare with they meet at right angle. And furthermore, it is found that the horizontal resistance dose not increase in proportion to the number of piles, when the obliquely driven angle of batter pile is small.

Key Words: batter piles, foundation structure, greenhouse, horizontal loading, model test.

はじめに

一般に，園芸などに用いられる温室は比較的軽量な構造物である。よって，その基礎部分に要求される抵抗力としては，構造物の自重による押し込み荷重よりも，風などによる引き抜きや水平方向への荷重に対する抵抗力が重要になる。従来から，温室用の基礎としてコンクリート製のフーチング基礎がよく用いられているが，この場合，引き抜き方向や水平方向への荷重に抵抗するのはフーチングコンクリートの寸法・重量やフランジ部分にかかる土被り荷重などである。それ故，大きな引き抜きや水平方向への抵抗力を確保するためには大きなフーチングコンクリートが必要となり，建設にかかる手間やコストも増大することになる。また，フーチングコンクリートの施工には床堀り，敷き均し，型枠の設置，コンクリート打設などの行程があるが，これらの作業は天候や地盤状態に左右される上に，規模によっては重機などを農地に乗り入れる必要も出てくる。従って，必要な引き抜き抵抗や水平抵抗を有しながら，より簡易に設置でき，コストの面でも有利な基礎方式があれば非常に有用である。よって著者らは，コンクリート製のフーチングに代わるものとして，安価な足場パイプを利用した斜杭による基礎方式を提案した。

杭基礎は主に鉛直方向の荷重を支持するために用いられるものであり，根入りの深い基礎方式の一種に分類される。従って，ほとんどの場合，杭は地盤に対して鉛直に打ち込まれ，杭頭に載荷された荷重は杭の先端部分での反力あるいは周面部分での摩擦力によって支持される。一方，本研究で扱う斜杭基礎は，このような鉛直荷重を支持する鉛直杭基礎とはその方式やメカニズムが大きく異なっている。すなわち，図1に示すように，杭を地盤に対して斜めに打ち込んでその頭部を剛結する基礎方式であるため，杭頭部に載荷された荷重は杭周面に作用する摩擦力に加え，杭自体が地盤に貫入する際の抵抗によっても強く支持されることになる。従って，通常の鉛直杭よりも作用する抵抗要因が多くなり，大きな抵抗力が期待できる。

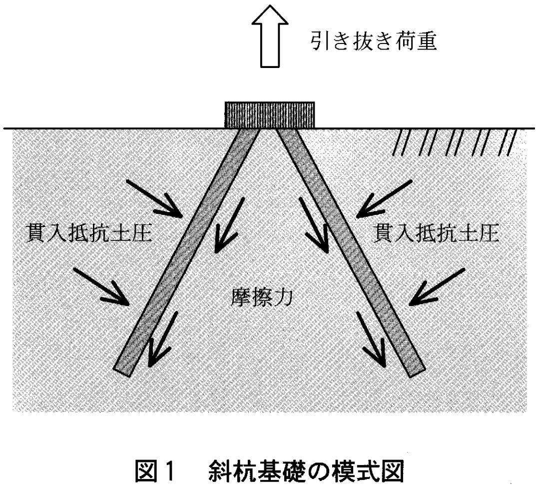

図1　斜杭基礎の模式図

以上のような観点から，著者らは，模型実験を行うことにより斜杭の基本的な力学特性を検討してきた。これまでの研究で，斜杭の引き抜き特性については，1）斜杭は直杭に比べてはるかに大きな引き抜き抵抗力を発揮し，温室用の基礎方式として非常に有効であること，2）杭間の挟角については60°程度のものが最も大きな引き抜き抵抗力を発揮し，比較的少ない引き抜き量で抵抗力がピークに達すること，などが明らかになっている（桑原ら，2003)。従って本研究では，斜杭の水平載荷特性について，模型実験を行ってその力学特性を検討する。上述のように，斜杭には様々な抵抗要因が複雑に作用すると考えられるが，本研究では，杭の打ち込み角や本数および荷重の載荷方向などが斜杭基礎の水平抵抗力に及ぼす影響について実験的に明らかにすることを目的とする。

試料の物理特性

地盤材料として用いた試料は従来の研究（桑原ら，2003）と同じものであり，その物理特性を表1に示す。土粒子の密度は「JIS A 1202 土粒子の密度試験」（地盤工学会，2000a），液性限界・塑性限界は「JIS A 1205 土の液性限界•塑性限界試験」（地盤工学会，2000b）に従ってそれぞれ求めた。

表1　試料の物理特性

土粒子密度 (Mg/m^3)	2.645
自然含水比 (%)	72.9
塑性限界 (%)	50.5
液性限界 (%)	60.8

締固め試験は「JIS A 1210 突固めによる土の締固め試験」（地盤工学会，2000c）に従い，呼び名A-a法と呼ばれる方法で行った。ただし，締固めエネルギーについては対象としている地盤が農地であることから標準エネルギー（道路や盛土などの土構造物を対象としたもの）の1/10

表2　締固め試験結果

最適含水比 (%)	69.8
乾燥密度 (Mg/m^3)	0.85
湿潤密度 (Mg/m^3)	1.56

$(E_c=55(kJ/m^3))$ とし，含水比の調整は乾燥法（湿潤状態の試料を徐々に乾燥させていく方法）で行った。締固め試験の結果を表2に示したが，最適含水比や湿潤密度は自然状態とほぼ一致しており，この条件で模型地盤を締め固めることとした。

斜杭の水平載荷試験の種類と方法

ここでは，実施した水平載荷試験の種類と方法を説明する。いずれの試験も従来の引き抜き試験と同様の方法で行い，用いる試験装置に加え，模型の縮尺（=1/5）や模型地盤の材料・作製方法，載荷速度などの条件はすべて同一にした。用いた装置の概略を図2に示したが，装置の寸法・諸元などの詳細や縮尺の選定理由などについては既報（桑原ら，2003）を参照されたい。なお，用いた斜杭の模型も従来と同じ4種類であるが，今回から呼び方を杭間挟角ではなく鉛直方向に対する斜杭の打ち込み角度（0°, 15°, 30°, 45°）で統一した。その理由は，斜杭が4本になると単純には杭間挟角として表せないためである。

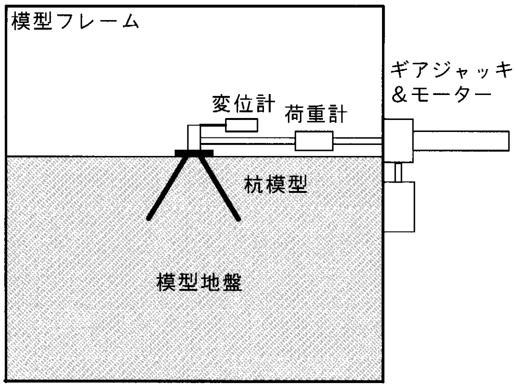

図2　水平載荷試験装置の概略

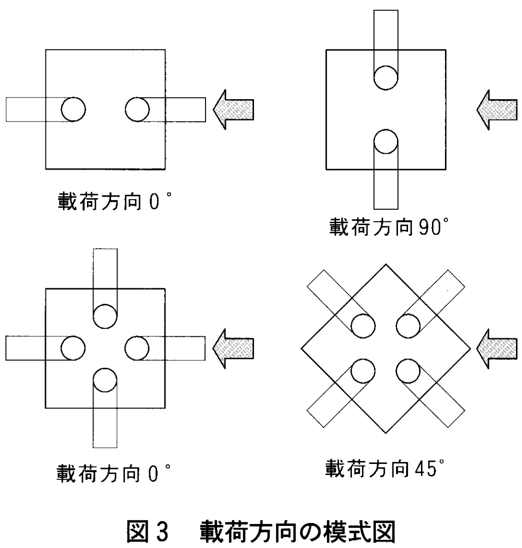

図3　載荷方向の模式図

1．試験の種類

1）2本の斜杭を用いた試験

2本の斜杭を用いた模型実験については，載荷方向が0°（杭の並び方向）のものと載荷方向90°（杭の並びと直交する方向）のものの2種類を行った（図3の模式図を参照)。これは，実際に2本の斜杭を用いて基礎を設置する場合，どちらの方向に打ち込むのがより好ましいかを検討するためである。

2）4本の斜杭を用いた試験

4本の斜杭を用いた模型実験においても，載荷方向を0°（杭の並びと直交する方向）と45°（杭の並びに対して45°傾斜した方向）の2種類を行った（図3の模式図を参照)。この試験には2つの目的があり，1つはより好ましい斜杭の打ち込み角度・方向の検討で，もう1つは上述の2本の場合と比較して杭の本数を増やした時にどの程度強度が増加するかの検討である。

2．実験方法

1）模型地盤の作製

従来と同じ土槽（深さ600mm×幅1000mm×奥行き1000mm）を用い，最適含水比$w_{opt}=70$(%)に調整した試料を締固めエネルギー$E_c=55(kJ/m^3)$で締め固めて模型地盤を作製した。その際，地盤を深さ方向に5等分し，1層ずつ撒き出しながらランマーを用いて均等に締め固めた。

2）斜杭の設置

斜杭の設置も従来と同様に，杭頭固定金具（ステンレス製，縦60mm×横60mm×厚さ10mm）に設けられたガイド穴に沿って杭（肉厚1mmのステンレスパイプ，外径10mm×長さ200mm）を木槌で静かに打ち込んで設置した。斜杭の打ち込み角度や方向は上述のとおりである。なお，繰り返しになるが，今回より斜杭の呼び方を杭間挟角ではなく鉛直軸からの傾斜角度で呼ぶことにする（例：杭間挟角60°→傾斜角30°)。

3）水平載荷

水平載荷についても，基本的な条件は従来と同様である。すなわち，斜杭を設置した後はその頭部（杭頭固定金具部）にギアジャッキを接続し，水平方向にゆっくりと引っ張りながら変位量と抵抗力を測定した。載荷は毎分0.1mmの変位制御とし，変位量が20mmになるまで計測を続けた。

4）載荷終了後の処理

載荷が終了した後には地盤の破壊状況を記録（写真撮影）するとともに，深さ方向への貫入抵抗や湿潤密度を測定して地盤の特性が一様であることを確認した。貫入抵抗の測定には山中式土壌硬度計を用い，湿潤密度は100ccサンプラーによ

る地盤採取によって測定した。

斜杭の水平載荷試験の結果と考察

1．２本の斜杭を用いた試験

図４と図５には２本の斜杭基礎に対する水平載荷試験で，載荷方向０°と90°についての代表的な試験結果をそれぞれ示した（凡例の数値は斜杭の傾斜角）。

これらの図より，水平抵抗は斜杭の傾斜角が小さいほど大きくなっているが，その影響は引き抜きの場合に比べると小さいことがわかる。これは，杭に作用する抵抗要因が水平載荷では斜杭の傾斜角によらずほぼ同じであること，すなわち，杭頭に水平力を受けた斜杭は先端部分（最深部）を中心に地盤内で回転するように動くため，傾斜角が異なっても杭体が地盤に貫入する体積にそれほど大きな差が生じない（特に載荷方向90°の場合）ことに起因すると考えられる。従って，水平抵抗力は杭が存在する部分の地盤強度に左右され，杭の先端がより深くまで達している傾斜角０°のものが最も大きな水平抵抗を発揮したと考えられる。なお，図４で傾斜角45°の水平抵抗の発現が一旦停滞しているが，杭の侵入位置が浅く載荷中に地盤が杭と一緒に抜け上がったためと思われる。

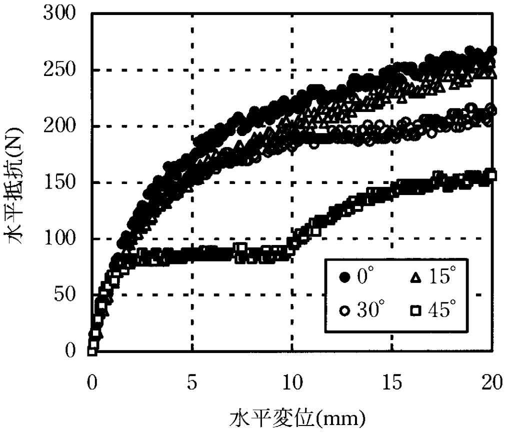

図４　水平載荷試験(載荷方向０°)の結果

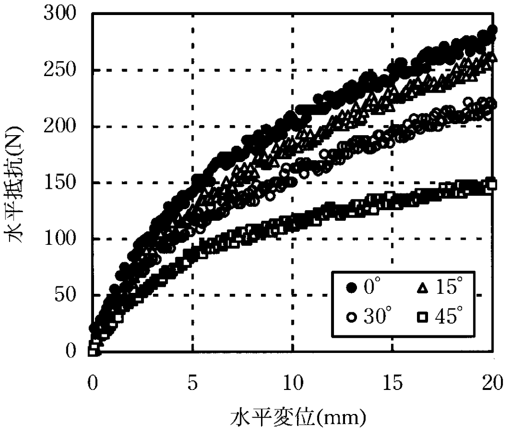

図５　水平載荷試験(載荷方向90°)の結果

次に，杭の並びに対する載荷方向の違いによる影響であるが，最大の抵抗力など両者に大きな違いは見受けられない。しかしながら，載荷の初期段階での抵抗力の立ち上がりをよく見ると，載荷方向０°の方がやや大きくなっていることがわかる。これは，杭頭に水平荷重を加えた場合に，載荷方向90°の時には杭が純粋に回転するようなモードを示すのに対して，載荷方向０°の時には単なる回転だけではなく，斜杭基礎が全体として一種のラーメン構造のような効果も発揮するためと考えられる。この違いはそれほど大きいものではないが，基礎構造物の挙動として考えた場合，少ない変形量でより大きな抵抗力を発揮する方が望ましい。従って，今回の実験結果から判断すると，載荷方向０°が基礎としてより好ましいとの結論が導かれる。

2．４本の斜杭を用いた場合

図６と図７には４本の斜杭基礎に対する水平載荷試験で，載荷方向０°と45°についての代表的な試験結果をそれぞれ示した（凡例の数値は斜杭の傾斜角）。

これらの図より，水平抵抗は２本の斜杭を用いた場合よりも明らかに大きくなっており，杭の本数を増やした効果が確認できる。また，斜杭の傾斜角の違いによる水平抵抗の差は引き抜きの場合ほど顕著には表れていないが，前項でも指摘したように，水平載荷と引き抜きでは杭体の変位が地盤に及ぼすメカニズムが異なるためである。これらの点は，２本の斜杭を用いた結果から容易に推定できる特徴である。

しかしながら，発揮される水平抵抗の大きさを見てみると30°＞45°＞15°＞０°の順となっており，２本の場合とは明らかに異なった傾向を示している。この原因を調べるため，図８には２本の斜杭を用いた水平抵抗を斜杭の傾斜角ごとに足し合わせたグラフ（図４と図５を足し合わせたもの）を示した。これは，2本の斜杭を用いた場合の載荷方向０°のものと90°のものを組み合わせると，ちょうど４本の斜杭を用いた載荷方向０°のものにメカニズムが一致するからである。図８と図６を比較すると，斜杭の傾斜角の大きい45°のものはほぼ同じ水平抵抗を示しているが，傾斜角が小さくなるにつれてその差は大きくなっている。この

原因としては，隣り合う杭同士が相互に影響を及ぼしていることが考えられる。すなわち，個々の杭は周辺部分の地盤を乱しながら反力を受けて抵抗するが，水平載荷では載荷の方向と同じ並びに打ち込まれた杭も存在するため，載荷の後方にある杭はその前方にある杭によって既に乱された地盤から反力を受けることになる。従って，傾斜角が小さい斜杭基礎の場合，隣り合う杭同士の距離が近いために地盤の乱れの影響を大きく受けることになり，杭の本数を増やしてもそれに応じた水平抵抗を発揮できなかったものと考えられる。この結果は，むやみに杭の本数を増やしても水平抵抗が大きくならない可能性を示唆するものであり，斜杭基礎の設計において注意すべき事項となろう。

なお，杭の並びに対する載荷方向の違いによる影響であるが，ここでの実験結果（図６及び図７）を見る限り発揮される水平抵抗にほとんど違いは見受けられず，設計時にその影響を考える必要はないものと思われる。

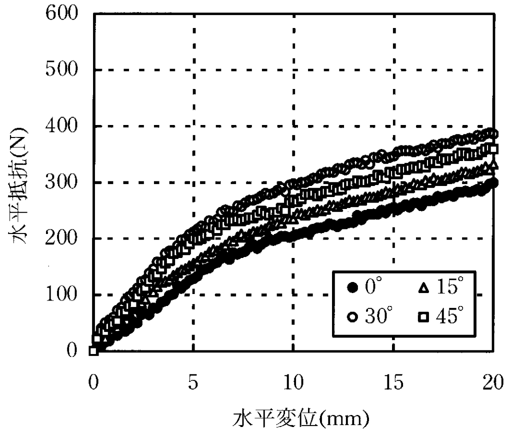

図６　水平載荷試験(載荷方向０°)の結果

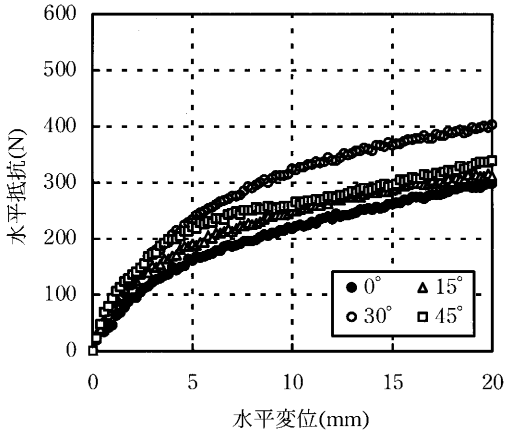

図７　水平載荷試験(載荷方向45°)の結果

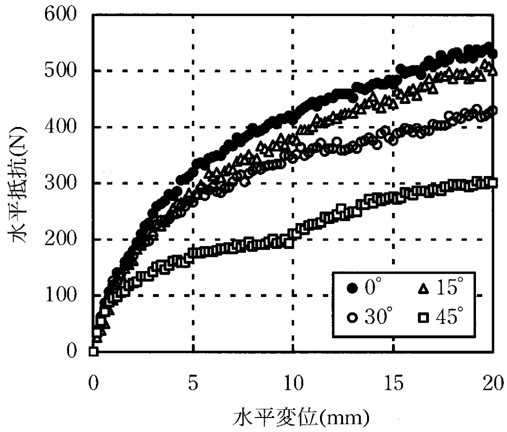

図８　水平載荷試験(２本＋２本)の結果

おわりに

本研究では，模型実験を行うことにより斜杭の水平載荷に関する基本的な力学特性を検討した。その結果，斜杭の水平抵抗力は，１）引き抜きの場合に比較すると杭の傾斜角の違いによる影響は小さいこと，２）２本の斜杭を用いる場合には杭を水平力が載荷される方向に打ち込んだ方が少ない変位時の抵抗力が大きくなること，３）打ち込む斜杭の傾斜角が小さいと杭の本数を増やしても水平抵抗は単純には増加しないこと，などがわかった。

温室用基礎としての役割を考えた場合，できるだけ小さな変形量で大きな抵抗力を発揮するものが望ましい。従って，既に行った引き抜き試験の結果と今回行った水平載荷試験の結果から総合的に判断すると，設定した実験条件の範囲内での結論ではあるが，打ち込み傾斜角30°で４本の斜杭を用いた基礎方式が最も有効であると考えられる。しかしながら，この結果は土質や締固めなどの地盤条件，あるいは用いる斜杭の長さなどによって変わる可能性もある。今後はさらに実験を追加し，これらの点についてさらに検討する予定である。また，実際の温室基礎には静的な引き抜き荷重のみならず，繰り返し荷重や横風による水平方向の荷重なども問題となることが予想されるため，この点についても今後の課題としたい。なお，本研究と並行してフィールドで実スケールの引き抜き試験なども行っているが，実際の自然地盤の条件は複雑であり，均質な地盤を用いる模型実験の結果とは単純には比較できないのが実情である。よって今後は，解析なども行って実際との対応関係についても調べていきたいと考えている。

引用文献

桑原孝雄・木全 卓・工藤庸介・山形俊彦・北島弘伸．2003．温室用基礎としての斜杭の引き抜き特性に関する基礎研究．大阪府立大学大学院農学生命科学研究科学術報告．23-28.

地盤工学会　2000a. 第2編 第3章 土粒子の密度試験．土質試験の方法と解説．地盤工学会，54-60.

地盤工学会　2000b. 第2編 第5章 液性限界・塑性限界試験．土質試験の方法と解説．地盤工学会，93-107.

地盤工学会　2000c. 第5編 第2章 突固めによる土の締固め試験．土質試験の方法と解説．地盤工学会，252-264.

（2004年１月７日受領；2004年１月27日受理）