

杭の 3 次元水平抵抗メカニズムの可視化

Visualization of 3-D lateral bearing capacity mechanism of piles

江副 哲*・大谷 順**・ファン ダン ホア***

Akira EZOE, Jun OTANI, Khoa Dang PHAM

*正会員 工修 不動産株式会社ジオエンジニアリング事業本部 (〒110-0016 東京都台東区台東 1 丁目 2 番 1 号) (元熊本大学大学院生)

**正会員 Ph. D. 熊本大学工学部環境システム工学科教授 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

***熊本大学大学院自然科学研究科 博士後期課程 (同上)

The objective of this paper is to visualize 3-D lateral bearing capacity mechanism using X-ray CT method. Here, the apparatus of model loading test was developed and a series of model loading test were conducted using this apparatus in the system of X-ray CT scanner. First of all, lateral soil cutting test with flat blades in sand was examined for the purpose of fundamental study on the lateral bearing capacity. Then, model pile loading test was conducted with same sandy ground. CT scanning was done for the model ground during the process of lateral loading. Not only 2-D cross sectional images for the ground but also 3-D ones were obtained from CT scanning and precise failure patterns of the ground in 3-D due to lateral loading was discussed. Finally, the effectiveness of X-ray CT scanner was confirmed based on all the results in this study.

Key Words: pile foundation, bearing capacity, lateral loadings, model test, X-ray CT scanner, sand

1. 序 論

一般に、海洋構造物、港湾施設、橋梁、および水門など多くの構造物は杭基礎によって支持されている。また、その傾向は年々、構造物の発展と地盤内部状況の複雑化に伴い増加傾向にあると言える。また、近年の相次ぐ大地震により、基礎構造物に対する水平抵抗メカニズムの見直しが急務となっている。杭の横抵抗に関する今日までの設計ではたとえば Broms^{1), 2)} らによる方法がある。これは、水平抵抗を受ける杭-地盤系の破壊形態を考察した上で、杭基礎の曲げ剛性と根入れ長、および地盤の剛性によって杭を分類し、粘性土と砂質土に分けて杭の極限水平抵抗を求める方法である。しかし、これは支持力計算の簡便性を目的としたものであると考えられ、実際現象を反映させて提案されているとは必ずしも言えない。加えて、今日までの研究成果において、杭基礎の水平抵抗メカニズムに関し、非破壊かつ 3 次元的に可視化した例は皆無であると言える。

一方、地盤工学の分野においても、医学の分野で発展してきた人体内部を可視化する X 線 CT スキャナが適用されつつある^{3), 4), 5), 6), 7)}。これは、X 線 CT スキャナを

用いることにより、非破壊状態で供試体や模型地盤の内部状況の可視化を可能とするものである。

本研究では、まず横抵抗の基礎的実験として、短い剛な掘削刃を用いた模型実験を実施し、産業用 X 線 CT スキャナ³⁾を用いて、その破壊現象を 3 次元的に可視化することで掘削による地盤の横抵抗メカニズムについて検討する。続いて、杭基礎の水平載荷模型実験を実施し水平載荷に伴う杭周辺の地盤内部挙動について、前と同様に X 線 CT スキャナを用いて、非破壊検査することにより、地盤内変状を可視化すると共に密度変化を定量的に評価することで杭の水平抵抗メカニズムについて考察するものである。なお、X 線 CT 法の詳細については参考文献 3)~7)を参照されたい。

2. 水平抵抗に関する基礎的実験

2.1 模型実験の概要

水平抵抗に関する基礎的実験として、剛な掘削刃を用いた掘削模型実験を実施した。

(1) 試料および掘削刃の物性

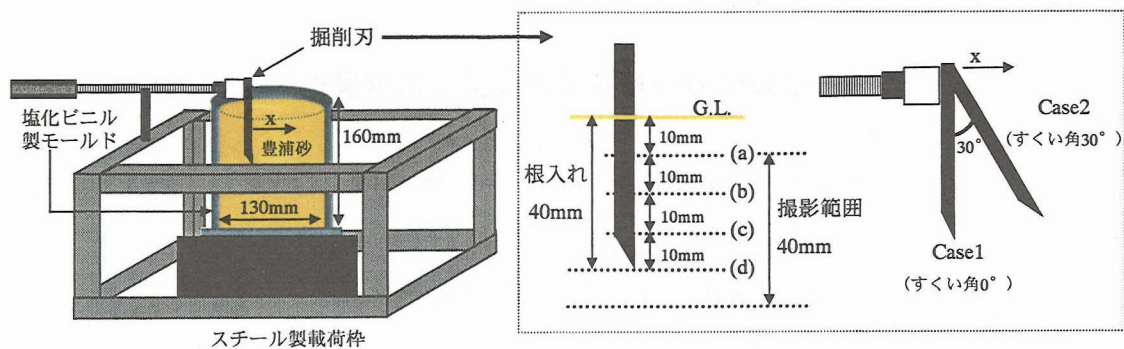


図-1 掘削模型実験概要図

本実験では、地盤材料として豊浦砂（比重 2.64、最小乾燥密度 1.33t/m^3 、最大乾燥密度 1.64t/m^3 ）を使用した。掘削刃については、刃幅 40mm、刃の厚さ 6mm、逃げ角 40° の平刃を用い、X 線の透過能力を考慮して材質をアクリルとした。

(2) 実験装置および実験ケース

本実験で使用した実験装置について、図-1 にその概要を示す。載荷装置としては、スチール製載荷枠上のネジにアクリル製の掘削刃を取り付けることで、水平方向のみの移動による掘削を可能とした。模型地盤は X 線による非破壊検査を実施するための照射範囲を考慮し、高さ 160mm、内径 130mm の塩化ビニル製のモールド内に多重ふるい（ $425\mu\text{m}+2\text{mm}\times 4$ ）を用いて空中落下法により豊浦砂をセットした。相対密度は密な地盤条件として $\text{Dr}=91.0\sim 94.0\%$ とした。実験ケースは、図-1 に示すように、掘削刃のすくい角 0° と 30° の 2 ケースとした。ここですくい角とは鉛直方向と掘削刃のなす角である。なお、すくい角 0° のケースでは掘削刃の根入れ深さは 40mm であり、すくい角 30° のケースではそれを傾けているため 40mm より若干短い根入れ深さとなっている。また、CT 撮影範囲については共に鉛直距離で下端 30mm の範囲と先端より 10mm の合計 40mm の範囲とした。

(3) 実験手順

各ケースの模型地盤を作成後、Case1 については、まず初期状態について産業用 X 線 CT スキャナを用いた非破壊検査を実施した。その後水平変位 $x=10\text{mm}$ を与え、その時の模型地盤の非破壊検査を行い、同様のステップを $x=25\text{mm}$ についても実施した。CT 撮影範囲は、地表面より下方 10mm の位置から深さ方向に 40mm 下部の位置までとした。撮影断面数については、初期状態を 10mm 間隔で 5 断面、また $x=10\text{mm}$ および 25mm については 3 次元的に可視化するため、X 線照射厚 1mm 間隔の 40 枚連続撮影とした。また、Case2 では初期状態と $x=10\text{mm}$ について非破壊検査を行い、Case1 と同様の撮影範囲で初期状態では深さ 10mm 間隔で 5 断面撮影し、 $x=10\text{mm}$ については 1mm 間隔 40 枚連続撮影とした。CT 撮影に際しては、スチール製載荷枠を取り外してモールドのみを CT 装置上に残すことで載荷枠の材料による X 線画像の乱れを取り除くこととした。

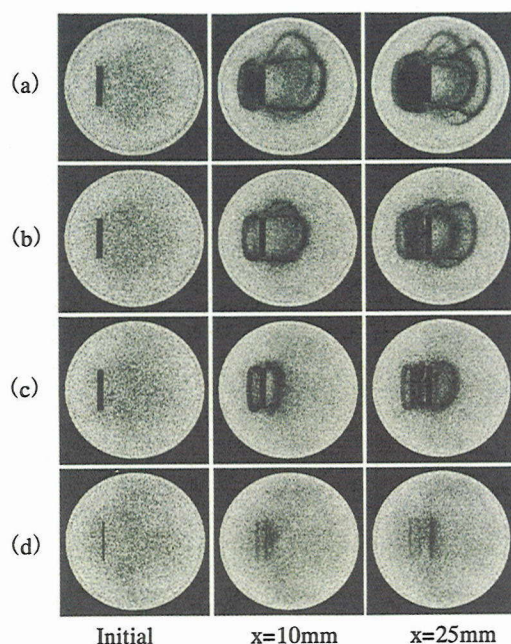
2.2 CT 断面画像

図-2 に、Case1 の初期状態、水平変位 $x=10\text{mm}$ 、および $x=25\text{mm}$ におけるそれぞれの断面 CT 画像を示す。図中の (a) は、地表面より深さ 10mm での断面画像であり、それより 10mm 間隔で (b) 深さ 20mm、(c) 深さ 30mm、および (d) 深さ 40mm でのそれぞれの断面画像を示しており、図中 (d) の位置がちょうど掘削刃先端部分とした。CT 画像は 256 階調白黒濃淡レベルで表示されており、CT 値が低い領域（低密度領域）ほど黒く、CT 値が高い領域（高密度領域）ほど白く表示される。これを見ると、掘削刃先端部 (d) から地表面に近づくにつれて、掘削刃の側方から進行方向に扇形のひずみの局所化領域（すべり面）が大きくなり、水平変位が進むにつれて、その領域が拡張している。ここで、進行方向より反れたいくつかの扇形のすべり面が観察されるが、これは、ネジの回転を利用して掘削刃を変位させるときの実験精度の問題であると考えられる。一方で、掘削刃の裏側では掘削に伴い砂が落ち込んでいくため低密度領域となり黒く見えている。

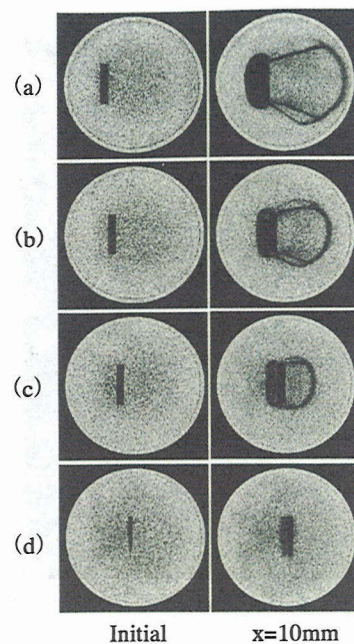
Case2 については、初期状態と水平変位 $x=10\text{mm}$ の断面 CT 画像を図-3 に示す。撮影断面は Case1 と全く同じである。Case2 においても Case1 と同様の挙動を示しているが、Case2 の場合は、 30° のすくい角を持っているため、地表面距離としてすべり面が進行方向により広範囲に広がりを見せていることがわかる。

2.3 3次元水平抵抗メカニズムの可視化

図-4 は、図-2、3 に示した各ケースの断面画像に局所単純平滑化手法を施し、それらを重ね合わせて作成した 3 次元 CT 画像である（載荷方向が左右反対）。いずれも掘削刃の刃先から地表面に向かってすべり面が発生していることがわかる。Case1 について見ると、水平変位 $x=25\text{mm}$ において、 $x=10\text{mm}$ 時のすべり面の中にもう一つのすべり面が発生していることが観察できる。Case1 と Case2 の比較については、水平変位 $x=10\text{mm}$ で比較するとすべり面と鉛直方向とのなす角に違いが見られる。図-5 は、図-2、3 の断面画像を用いて地表面より深さ 10mm の位置から掘削刃先端部までを 10mm 間隔ですべ



Initial x=10mm x=25mm
図-2 Case1 における断面 CT 画像



Initial x=10mm
図-3 Case2 における断面 CT 画像

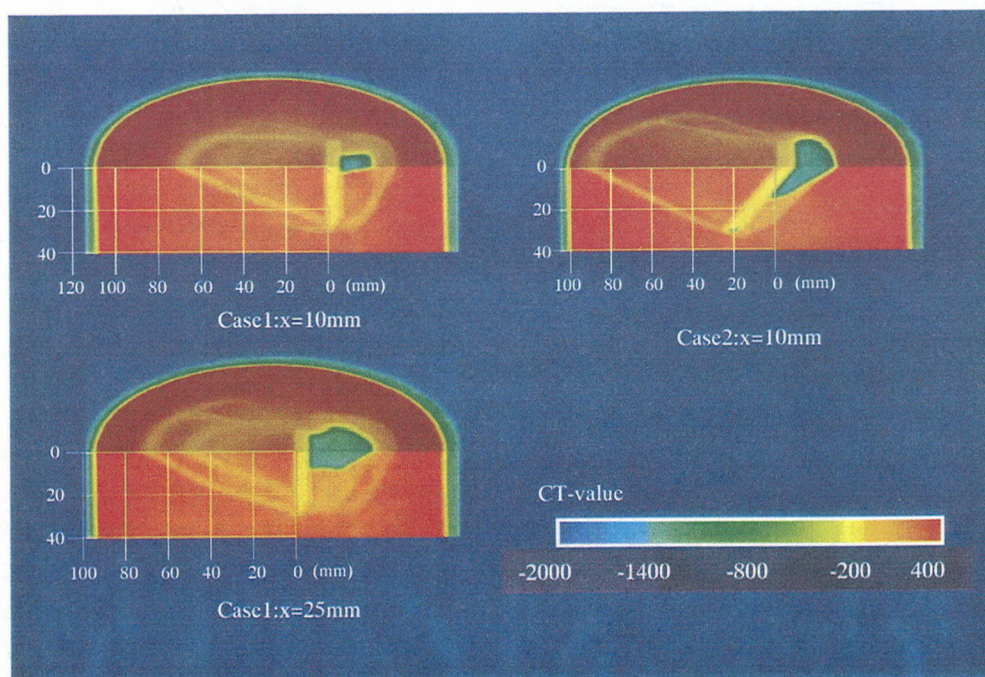


図-4 3次元 CT 画像

り面の形状のみを抽出し、これについて画像処理解析手法としてしばしば用いられる細線化処理を施した後3次元的に構成したすべり面領域モデルである。各ケースとも進行方向に広がりを見せながら3次元的な楔状のすべり面が発生している。

実施した掘削模型実験より、計測および観察結果とCT撮影結果としての地盤内密度変化を基に、掘削による地盤の横抵抗メカニズムについて以下にまとめる。図-6はすべり面発達パターンについての模式図を示したものである。まず掘削刃先からすべり面が発生し(Step1)、すくい角に依存する任意の角度を持って地表面に到達す

る(Step2)。その後、掘削が進む間、掘削刃周辺地盤では、掘削刃周辺の比較的密度の高い領域を小さくするような挙動を示し、その領域が縮小した量に相当する砂が地表面に押し上げられると考えられる(Step3)。そして、その領域がある程度まで縮小されると、再び、新たなすべり面が発生する(Step4)。掘削現象においては、掘削刃のすくい角の違いによりすべり面の角度、および影響範囲は異なるが、発達パターンに違いは見られないと考えられる。図-7は、簡単な理論的考察としてすべり面の角度 θ についてRankine受働土圧理論との比較について示したものである。図-4のCase1における画像より

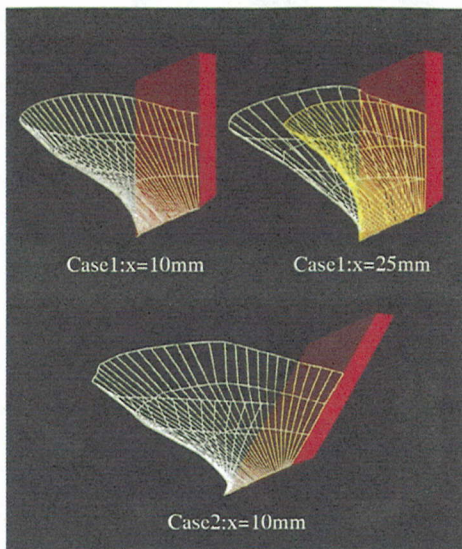


図-5 すべり面領域モデル

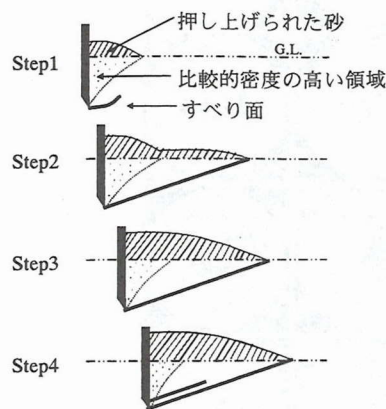


図-6 すべり面発達パターン(模式図)

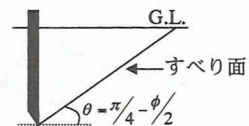


図-7 理論的考察

すべり面の角度 θ を実測すると、 $\theta \approx 25^\circ$ であった。実験条件（豊浦砂で $Dr=90\%$ ）としての地盤密度を考えると内部摩擦角は $\phi=40^\circ$ 程度となる。このことから、一例ではあるが、鉛直の掘削刃では掘削による地盤の水平抵抗メカニズムは Rankine 理論でほぼ説明できると考えられる。

3. 杭基礎の水平抵抗載荷実験

3.1 模型実験の概要

(1) 試料および模型杭の物性

本実験においても、上記基礎の実験と同様に豊浦砂（比重 2.64、最小乾燥密度 1.33t/m^3 、最大乾燥密度 1.64t/m^3 ）を使用した。杭基礎は、杭幅 30mm、杭の厚さ 3mm、および杭長 375mm の模型杭（板状）を用いた。また、杭材は X 線の透過能力を考慮してアルミ材とした。

(2) 実験装置および実験手順

図-8 に実験装置の概要を示す。載荷装置としては、杭頭に取り付けたワイヤーをスチール製載荷枠上の滑車に通し、錘によって載荷することで、杭頭に水平荷重を与えた。模型地盤は、後述する CT 可視化実験時に、X 線による非破壊検査を実施するための照射範囲を考慮し、高さ 350mm、内径 125mm の塩化ビニル製のモールド内に多重ふるい（ $425\mu\text{m}+2\text{mm} \times 2$ ）を用いる空中落下法により豊浦砂をセットした。相対密度は $Dr=87.0 \sim 91.0\%$ とした。また、曲げモーメントを求めるために、模型杭両面にひずみゲージを地表面より 25mm 下部の位置から深さ方向へ 25mm 間隔で 7 枚、その後 50mm 間隔で 2 枚の計 18 枚を貼り付けた。ここでは、ゲージの配線をデータロガーに接続し、RS232C インターフェイスでデータロガーに接続した PC によって曲げひずみを測定した。

また、杭の根入れを 320mm とし、杭下端部分を固定して水平載荷試験を実施した。

実験手順については、スチール製載荷枠内に模型地盤を作成後、9.81N ステップで 88.3N まで段階的に水平荷重を加え、そのときの曲げひずみを測定した。CT 撮影は、初期状態と荷重ステップ $f=29.4\text{N}$ 、 $f=58.9\text{N}$ 、および $f=88.3\text{N}$ について実施した。杭基礎は、図-9 に示すように載荷点から 30mm が空中となりそれ以下が地盤中に位置している。CT 撮影は、地表面より 15mm の深さから 70mm の範囲で実施した。実験は、まず模型地盤を作成後に CT 撮影室に移動させ、初期状態を地表面から 15mm 下部の位置から 10mm 間隔で 8 枚撮影した。図-9 に示すように、CT 撮影時にはスチール製載荷枠と錘を取り外すことによる杭頭および杭周辺地盤のリバウンド現象を防ぐために、スチール製の板と杭頭の間をネジ止めしている。この方法によって、撮影時における地盤内部の応力状態を維持できると考える。その固定方法の概要を図-10 に示す。 $f=58.9\text{N}$ 時も同様に 8 枚撮影し、 $f=88.3\text{N}$ については精度の高い 3 次元再構成を行うために 1mm 間隔の 70 枚連続撮影を実施した。

3.2 載荷実験結果

一般に杭基礎の設計においては、水平方向地盤反力係数を用いた弾性床上の梁として設計が行われる。ここでは実験によって計測されたひずみデータをもとに、曲げモーメントを計算し、杭周辺地盤の挙動を定量的に評価するため Tchebycheff の多項式⁸⁾を用いた地盤反力解析を行い、曲げモーメント、地盤反力、および変位のそれぞれの分布を順次求めた。

図-11 は、載荷重 $f=29.4\text{N}$ 、 $f=58.9\text{N}$ 、および $f=88.3\text{N}$ のステップにおける、模型杭の変位 (a)、曲げモーメント (b)、および地盤反力 (c) 分布である。ここでは、杭

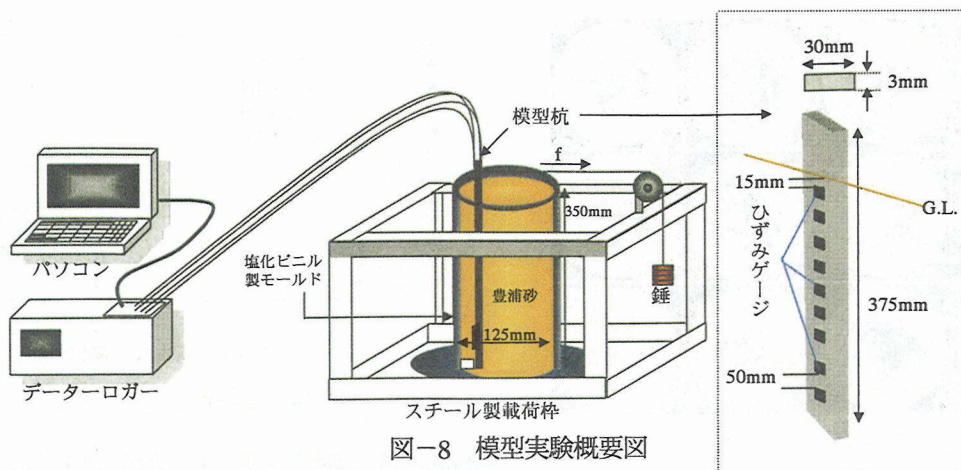


図-8 模型実験概要図

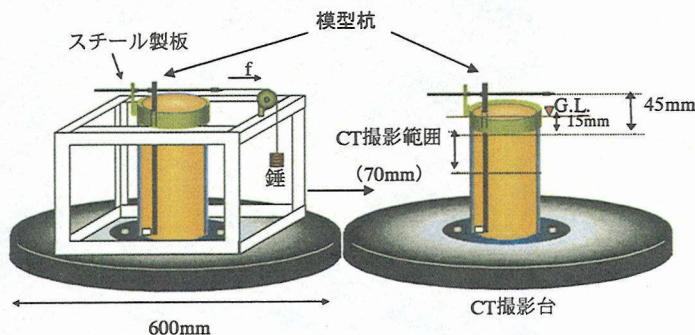


図-9 可視化実験概要図 (CT 室内)

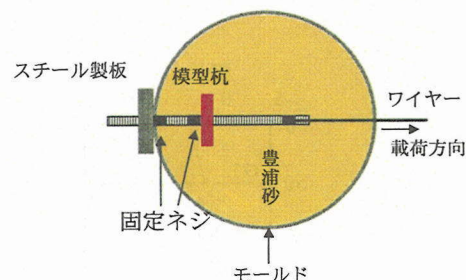


図-10 固定方法概要

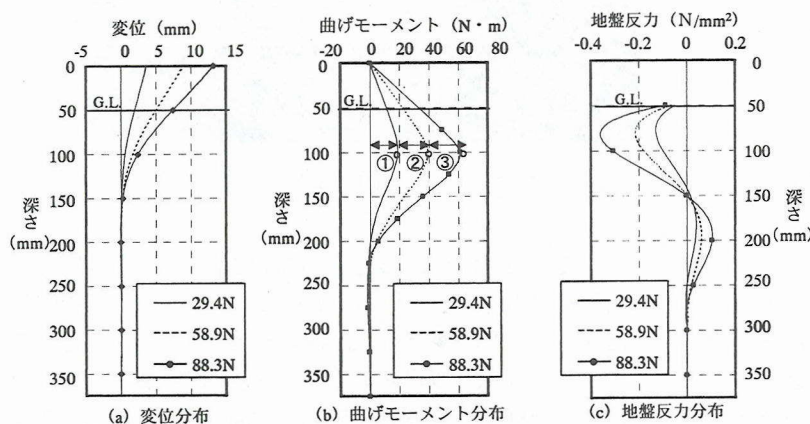


図-11 変位、曲げモーメント、および地盤反力分布図

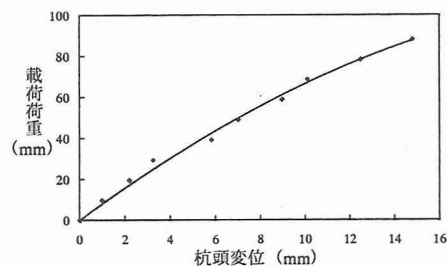


図-12 荷重-杭頭変位曲線

の深さ方向軸に対し、これと直角方向に変位、曲げモーメント、および地盤反力の軸をとっている。曲げモーメント分布については、図中の①、②、③は各ステップの最大曲げモーメント位置における、その増大した割合を矢印で示したものである。これより、載荷重の一定増分に対し、最大曲げモーメント値の増大する割合は微小ではあるが次第に大きくなり、最大曲げモーメントおよび曲げモーメント第一零点の発生する位置は若干より深い位置へと推移している。図-12 は荷重とひずみゲージより求めた杭頭変位量の関係をプロットしその近似曲線を示したものである。図-11 で示した変化量の微量は図

-12 で示した曲線の非線形性があまり極端でないことと一致していると言える。

3.3 X線CTデータの定量的評価

図-13 は載荷ステップごとの断面 CT 画像である。ここでは、地表面から 15mm 下部の位置 (図中の (a))、35mm の位置 (図中の (b))、および地表面より 55mm の位置 (図中の (c)) における画像を表示している。これらの画像より、荷重が増加するにつれて杭の載荷方向に楕円形のひずみ局所化領域 (図中の黒い線上の領域) が発生していることがはっきり確認でき、これらを深さ方向

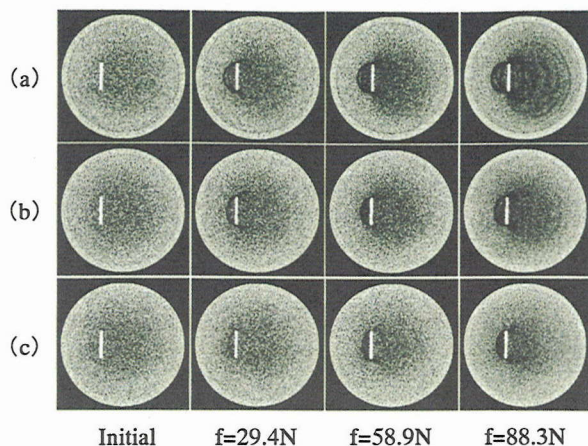


図-13 断面 CT 画像

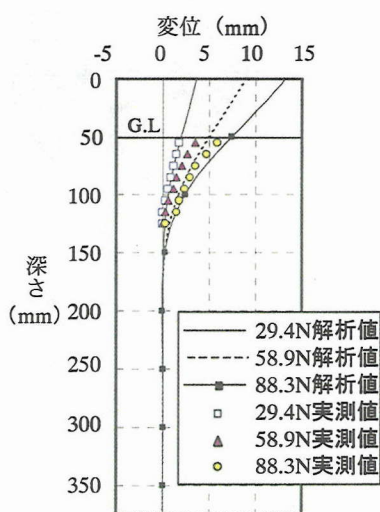


図-15 可視化実験における変位分布

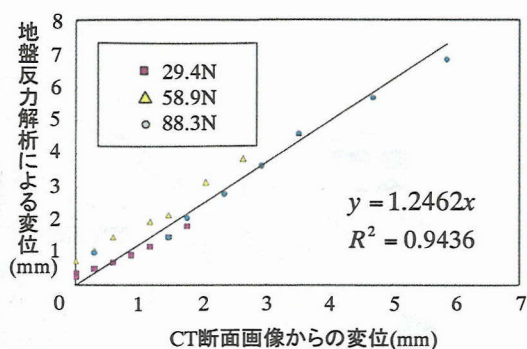


図-14 解析値と実測値の関係

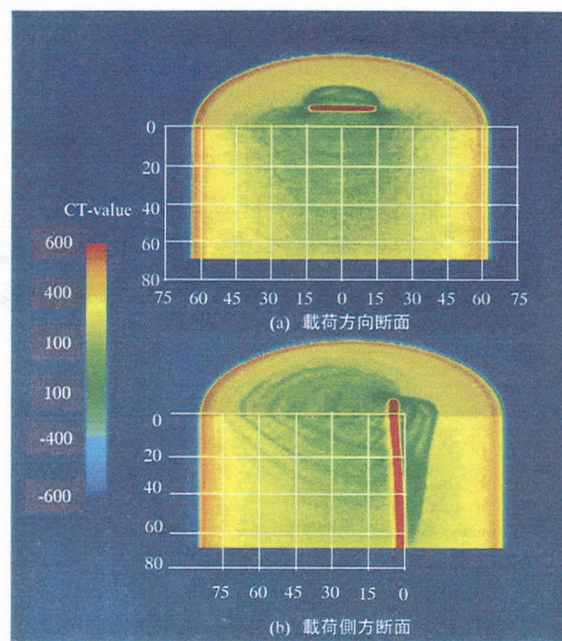


図-16 3次元 CT 画像 (f=88.3N)

で比較すると、地表面から深くなるほどこの局所領域が縮小していることが観察できる。杭裏側（荷重方向とは反対の杭側面）については、荷重に伴い砂が落ち込んでいくため低密度領域となり黒く見えている。図-14 は、模型実験結果から求めた変位量（解析値）と可視化実験結果の断面画像から算出した変位量（実測値）についての相関性を示したものである。回帰曲線は $y=1.2462x$ で表され、決定係数は $R^2=0.9436 \geq 0.8$ である。図-14 において解析値と実測変位は1:1.2程度の関係となっている。この関係を考慮して図-11 で示す変位分布上に実測値をプロットしたものが図-15 である。これを見ると、多少の誤差はみられるが、解析値と実測値はある程度の精度で一致している。以上のことから、CT 画像による現象の定量的評価についての可能性を示唆していると言える。

3.4 杭基礎水平抵抗メカニズムの3次元可視化

図-16 は、地表面以下 15mm から 70mm の範囲を対象

として、図-13 に示した f=88.3N における断面画像に局所単純平滑化手法を用い、それらを重ね合わせて作成した 3 次元 CT 画像である。荷重方向の杭面を中心として表示した 3 次元画像を 0° 断面 (a) 図とし、(b) 図はそれを 90° 回転させた杭側方断面の 3 次元画像である。いずれも図中のカラースケールのように CT 値の範囲を -600~600 で表示している。これらの画像から、杭側面より多くのすべり面が発生していることが観察でき、荷重方向に向かって楕円形の広がりを見せながら 3 次元的なくさび状のすべり面が発生していることがわかる。図-17 は、CT 値が 200 以下の低密度領域を特徴抽出した 3 次元画像である。荷重荷重 f=88.3N 時に、低密度領域は杭から荷重方向に対し 70mm 程度まで影響しており、今、この低密度領域を杭の横抵抗に対する地盤の破壊領域であると考え、その領域を 3 次元的なくさび状に可視化することができたことにより、このメカニズムを用いた 3 次元極限解析を行うことで水平支持力の算定が可能である。

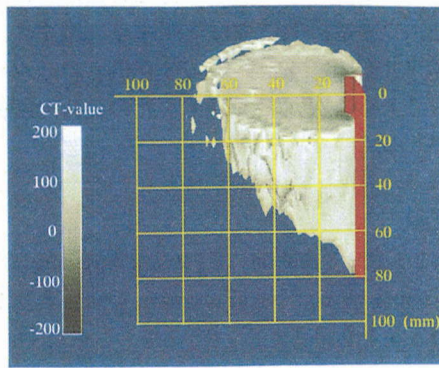
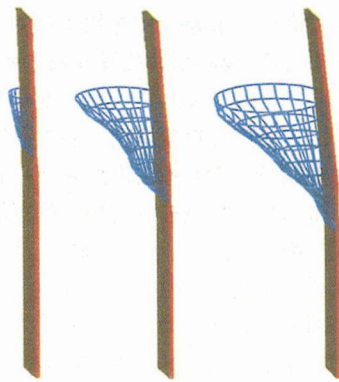


図-17 低密度領域 3 次元 CT 画像 ($f=88.3\text{N}$)



図-19 すべり面領域イメージ



(a) $f=29.4\text{N}$ (b) $f=58.9\text{N}$ (c) $f=88.3\text{N}$

図-18 水平抵抗メカニズム

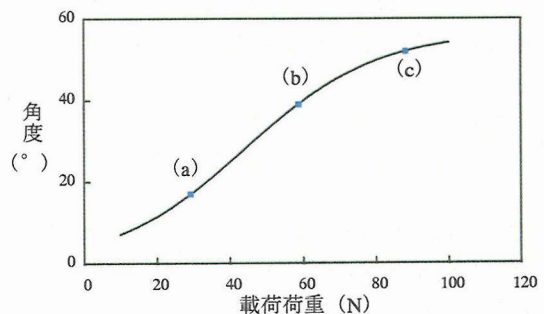


図-20 荷重-破壊角 (θ) の関係

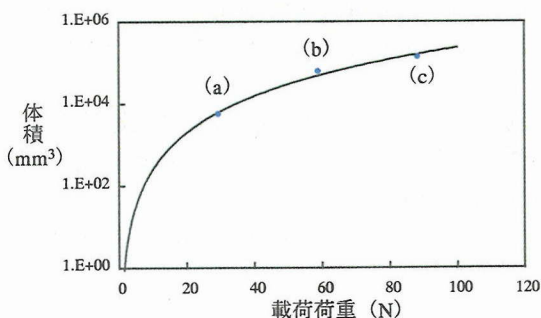


図-21 荷重-すべり面体積 (V) の関係

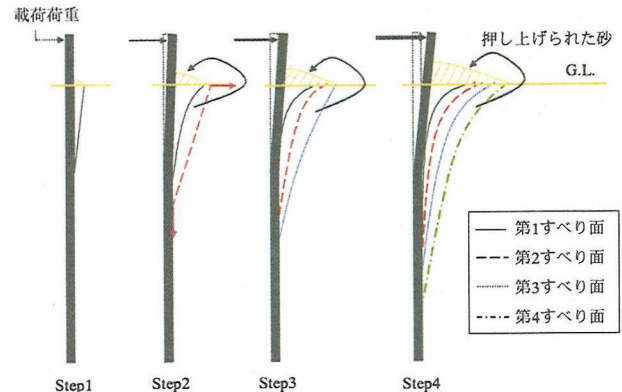


図-22 すべり面発達パターン(模式図)

3.5 杭基礎の 3 次元水平抵抗メカニズムの解明

図-18 は 3 つの載荷ステップに対して、CT 撮影範囲の最上部（地表面から 15mm）から 10mm 間隔で各断面におけるすべり面の座標をプロットし、すべり面の形状を楕円形と仮定して、3 次元的に構成した載荷ステップごとの水平抵抗メカニズムである。図中には、杭の変形性状についても計測結果を基に示している。これらの結果より、載荷が進むにつれて、載荷方向および鉛直方向にすべり面が広がっていると言える。また、載荷が進むにつれてすべり面は曲線状を帯びて行き、その勾配も徐々に大きくなることが確認できる。次に、図-18 の水

平抵抗メカニズムを基に、図-19 のすべり面領域イメージで定義するように、各ステップにおける鉛直方向とすべり面とのなす角（破壊角）を求めて荷重との関係を示したものが図-20 である。荷重が $f=80\text{N}$ を超えたあたりから、角度の増加割合が少なくなっており、このことから徐々にすべり面の広がりも滞ってくると考えられる。図-21 は、荷重とすべり面領域の体積との関係を示す。本実験においては、 $f=15\text{N}$ 程度の荷重ですべり面が発生し、地表面に近い部分で密度低下と載荷に伴い発生するせん断応力によるダイレイタンスによって地表面の盛り上がりが始まったと考えられる。また、 $f=80\text{N}$ 程度が

ら破壊角の進行が小さくなることから、すべり面領域も今回の最大荷重であった $f=88.3\text{N}$ を超えるくらいから増加が小さくなって行き、極限状態に達すると考えられる。これらのことから、今回実施した実験において $f=88.3\text{N}$ の载荷ステップは、使用した模型杭、および模型地盤の極限状態直前の地盤挙動であることが考えられる。最後に、本実験より得られた知見を基に杭の横抵抗メカニズムについての模式図を図-22 に示す。まず、载荷に伴い、杭側面から第 1 すべり面が発生する (Step1)。その後荷重の増加に伴い図中の第 2、第 3、第 4 と外側に拡大していくことが CT 撮影結果の地盤内密度変化より推測される。ここで重要なのは、掘削と異なる点としてすべり面が拡大していくことである。またその形状が直線的ではなく図-22 で示すように曲線的である点である。これについては杭の変位性状すなわち剛性が大きく関係していると考えられ、杭周面の摩擦も影響すると考えられる。

4. 結論

本論文では、杭基礎の水平支持力問題を対象として、杭基礎の水平载荷模型実験を実施し、X 線 CT スキャナを用いて可視化することで、水平抵抗メカニズムについて考察した。以下に結論を列挙する。

- (1) 掘削実験において、各断面のすべり面形状のみを抽出し、3 次元化することですべり面領域を可視化し、掘削機構を考察した。
- (2) 掘削に伴い発生するすべり面の形状は、掘削刃のすくい角に依存することがわかった。
- (3) 掘削刃すくい角の違いによるすべり面の発達パターンには違いは見られない。
- (4) 杭基礎の水平抵抗メカニズムを 3 次元的に可視化することができた。
- (5) 破壊角とすべり面領域の体積は降伏曲線を描くことがわかった。
- (6) 水平抵抗メカニズムと破壊角、およびすべり面領域の体積との関係からすべり面の発達パターンについて考察した。

その他、現時点の問題点についても以下に列挙する。

- (1) 模型地盤の大きさが本実験結果、特に地盤の破壊性状 (広がり形状) に及ぼす影響について再度確認する必要がある。
- (2) 今回の実験では杭体としてアルミ材を用い、その周面摩擦特性については特に考察していない。よって実際の杭周面摩擦特性を考慮した実験を実施する必要がある。
- (3) 杭体が板状ではなく断面が円形のケースについて本実験結果の確認を行う必要がある。

以上より、水平抵抗下における地盤内部挙動を産業用 X 線 CT スキャナを用いて非破壊検査し、可視化すること

により、杭基礎の水平抵抗メカニズムについて詳細に検討した。今後は、上に挙げた問題点を踏まえ、模型実験の精度向上をめざすと共に、今回得られた水平抵抗メカニズムによる 2 次元および 3 次元の支持力解析を試みる所存である。

参考文献

- 1) Broms, B.B. : Stability of Flexible Structures (Pile and Pile Groups), Proc. 5th European Conf. S.M.F.E., Vol.2, pp.239-269, 1972.
- 2) Broms, B.B. : Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils, Proc. ASCE, Vol.90, No.SM 3, pp27-63, 1964.
- 3) 椋木俊文 : 地盤工学における X 線 CT 法の適用に関する研究、熊本大学大学院自然科学研究科平成 12 年度、博士学位論文。
- 4) 大谷 順、尾原祐三、菅原勝彦、椋木俊文 : 地盤工学における産業用 X 線 CT スキャナーの適用、土と基礎、No.48, Vol.2, pp.17-20, 2000.
- 5) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y.: Application of X-ray CT method for characterization of failure in soils, Soils and Foundations, Vol.40, No.2, pp.111-118, 2000.
- 6) Otani, J., Mukunoki, T. and Obara, Y.: Characterization of Failure in sand under triaxial compression using and industrial X-ray CT scanner, International Journal of Physical Modelling in Geomechanics, Vol.2, No.1, pp.15-22, 2002.
- 7) Otani, J., Mukunoki, T. and Kikuchi, Y.: Visualization for engineering property of in-situ light weight soils with air foams, Soils and Foundations, Vol.42, No.3, pp.93-105, 2002.
- 8) 松本秀應、佐々木康、近藤益央 : 液状化地盤における地盤反力係数、第 22 回土質工学研究発表会、pp.827-828, 1987.

(2003 年 4 月 18 日受付)