

拡底杭引抜き時における低拘束圧地盤の変形挙動 —実験および数値解析—

桐山 貴俊¹・大竹 浩太²・赤木 寛一³

¹正会員 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)
E-mail: kiriyama@shimz.co.jp (Corresponding Author)

²学生会員 早稲田大学理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58-205)
E-mail: shakou-take@toki.waseda.jp

³フェロー会員 早稲田大学理工学術院 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 58-205)
E-mail: akagi@waseda.jp

拡底杭の引抜き時における低拘束圧地盤の変形挙動を把握する目的で計測・観察実験を実施した。アルミ棒積層体を模型地盤とした 2 次元実験装置を用いた拡底杭の引抜き実験を実施し、杭頭における荷重～変位を計測した。同時に、各引抜き変位において実験装置側方より写真撮影し PIV 処理により地盤変位・ひずみを観察した。実験より低拘束圧地盤は杭周辺に円錐台型の抵抗領域を形成し引抜き外力に抵抗していることが明らかとなった。

観察された円錐台型の抵抗領域は地盤のダイレイタンシー特性に起因するものと考えられることから、大変形まで追跡可能な再現解析を行い、ダイレイタンシー特性と引抜き抵抗の関係を調べた。ダイレイタンシー特性を考慮した解析結果は、杭引抜き時の荷重～変位関係の上・下限値を示し、引抜き抵抗が、ダイレイタンシー特性の観点から説明可能であること、低拘束圧下において正のダイレイタンシー特性が、円錐台型の地盤変状を誘引すること、引抜き支持力を増加させること、が明らかとなった。

Key Words: belled pile, uplift bearing capacity, particle-element coupled method

1. はじめに

杭基礎の引抜き抵抗は、地震・暴風時に生じる建物のロッキング、地下および海洋構造物に作用する浮力、膨張土による押し上げ力、など鉛直上向きに作用する外力に対する抵抗力として期待される。杭基礎の引抜き抵抗は杭体に着目すれば、周面摩擦と先端抵抗に分類できる。設計および建屋挙動評価においては周面摩擦および先端抵抗ともに載荷試験により実測値を得ることで原位置の情報に基づく評価が可能となる。一方で、大口径化の傾向にある場所打ち杭においては載荷荷重が超大になることから載荷設備、場所、工程面から試験自体の実施に困難が伴う。推定値を用いる場合も、既往の経験式、指針式から外挿して求めることとなる。求まる外挿値を安全側に評価し直すため合理的な評価は困難である。

杭基礎単体に着目すれば引抜き時の作用外力は前述の通り、周面摩擦および先端抵抗となるが、これらは周辺地盤から作用する力である。杭引抜き時、杭基礎周辺地盤は特定の領域が抵抗土塊を形成し引抜き外力に抵抗す

る。この領域を地盤抵抗領域と呼ぶ。杭基礎引抜き時の地盤抵抗領域は地盤物性と関連していると考えられるため、地盤物性と抵抗領域の関係を明らかにすることは実務上有用である。直杭に比べて拡底杭は同じ軸径の場合、先端径がより大きくなるため、より広範な地盤抵抗領域（引抜き抵抗）が期待できる。拡底杭引抜き時の地盤抵抗領域は、垂直型¹⁾、円錐台型^{2)~6)}と深部から浅部に向かい抵抗領域が拡大する曲線型^{7)~9)}に大別される⁹⁾。杭基礎引抜き時の代表的な地盤抵抗領域を図-1に示す。本論文で著者らが着目する、抵抗領域を形成する際に発揮されるダイレイタンシー特性を図-1に赤い矢印で示した。

本論文では、拡底杭引抜き時の地盤抵抗領域を推定するために模型実験および数値解析を実施し、地盤物性と地盤抵抗領域の関係を明らかにすることを目的とする。著者らは特に、杭基礎の引抜き抵抗力と地盤のダイレイタンシー特性に着目した。模型実験では、アルミ棒積層体内に模型拡底杭を設置し、杭を引抜く際の荷重～変位関係を計測し、また、側方から模型地盤を撮影し Particle Image Velocimetry (以下、PIV) 解析を通して地盤変形状

況を観察した。数値解析では、地盤物性と拡底杭の引抜き抵抗の関係を明らかにするために、ダイレイタンスー特性に着目したパラメータスタディを実施した。

本報告で示す実験および数値解析は2次元場で実施している。図-1に示す3次元場における地盤抵抗領域の呼称の内、“円錐台型”は2次元場では“台型型”と呼称すべきである。しかしながら、本研究においては、いずれの空間においても拡底つま先部より地表面に向け直線的に地盤抵抗領域が拡大する場合に次元の区別をせず“円錐台型”の呼称を用いる分類する。

2. 低拘束圧下における拡底杭の引抜き実験

本研究では、模型地盤としてアルミ棒積層体を用いた、実地盤に比べて極めて低拘束圧下における実験である。そのため、地盤特性として次の仮定を置く。1) 密な地盤条件で正のダイレイタンスーが顕著に発現する。2) 拘束圧により地盤剛性は変化しない。実験装置、実験手順、PIV画像解析について以下に示す。

(1) 実験装置および実験手順

図-2に本研究で用いたアルミ棒積層体を用いた模型地盤および载荷装置の概要を示す。地盤寸法は水平520mm、鉛直200mm、奥行き50mmである。模型地盤は、長さ50mm、直径1.6mmと3.0mmのアルミ棒を質量比で2:1の割合で混合した材料を用いた。模型地盤は底面において装置外枠、側面において木製枠で支持されている。模型地盤は層厚20mmを10層積み上げる手順で作成し、各層で密度管理（目標密度20.5kN/m³）することで地盤物性の再現性の確保に努めた。写真-1、図-3に拡底杭（軸径20mm、拡底径60mm、拡径角度： $\alpha=0, 15, 30, 90$ 度）を示す。拡底杭においては拡底比（軸径:拡底径=1:3）を一定とした。場所打ち杭を想定するため、杭側

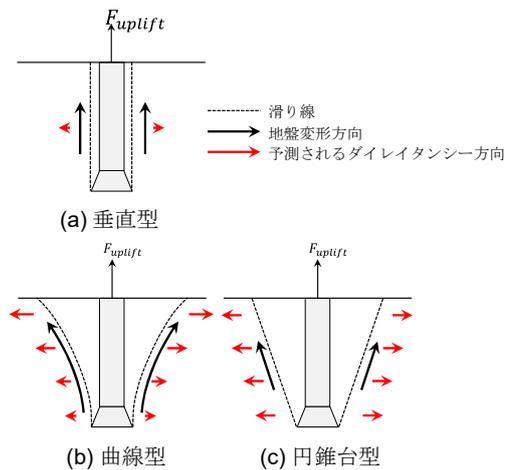


図-1 杭基礎引抜き時の地盤抵抗領域⁹⁾

面にアルミ棒を模型地盤と同じ比率で接着させた（写真-1）。

载荷装置には、制御ハンドル、力計、変位計が取り付けられ、変位制御の引抜き抵抗力～引抜き変位関係を計測する。载荷と同時に装置側方よりデジタルカメラを用いて静止画を撮影する。撮影距離1350mmと近景で、レンズのゆがみが懸念される。この点に関しては、杭近傍を撮影中心に設定し着目箇所のゆがみを回避すること、機器による内部補正を実施することで対策とした。アルミ棒側面への外部光の写り込みを防止する目的で、载荷装置の背面および上部にそれぞれ、暗幕およびアクリル

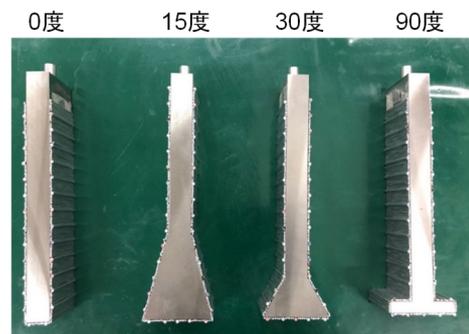


写真-1 杭周へのアルミ棒接着状況

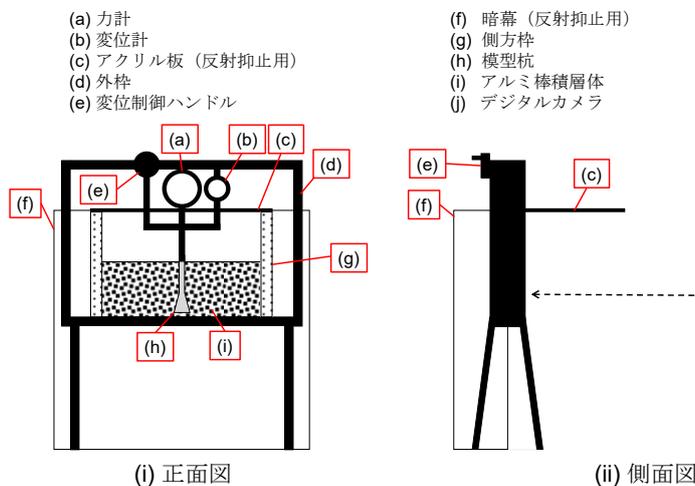


図-2 積層アルミ棒を用いた拡底杭引抜き実験装置

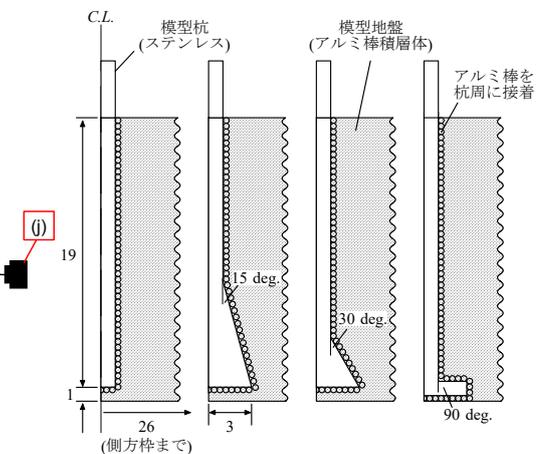


図-3 実験に用いた杭基礎（単位：cm）

表-1 PIV 画像解析における解析条件

項目	値
手法	格子間探索法
画像寸法	3400 x 1600 (ピクセル)
格子寸法	8 x 8 (ピクセル)
探査階層	3
変位差分	初期画像からの相対変位

板を設置した。アルミ棒断面はマーカーによりランダム配色した。

模型実験は次の手順で実施した。

- 手順 e1 : 底盤にアルミ棒を層厚 10mm で敷き詰める。
- 手順 e2 : 载荷装置に拵底杭を取り付け、杭底を底部地盤と接地させる。
- 手順 e3 : 杭側方にアルミ棒を左右均等に敷き詰める。
- 手順 e4 : 力計をゼロ調整する。
- 手順 e5 : 装置側方にデジタルカメラを設置する。
- 手順 e6 : 制御ハンドルで変位制御により杭を引き抜く。
- 手順 e7 : 所定の引抜き量まで模型杭を引抜き、変位計・力計を計測およびデジタルカメラによる撮影を行う。
- 手順 e8 : 手順 7 を繰り返し、12mm まで引抜き終了。

(2) PIV 解析

本研究で用いる PIV 解析の解析条件を表-1 に示す。探査窓は 8 x 8 (pixel) でおよそ 1mm 格子に相当する。3 段階の探査階層を用い解析負荷を軽減した。解析手順は次の通りである。

- 手順 p1 : 対象画像をグレースケールに変換する。
 - 手順 p2 : 画像間で不動点を用いて位置補正する。
 - 手順 p3 : 杭を黒塗りし探査範囲から除く。
 - 手順 p4 : PIV 解析を実行する
- 算出する変位は初期値からの相対値とした。変形経路を精緻に追跡する場合、所定引抜き量に至るまでの複数の

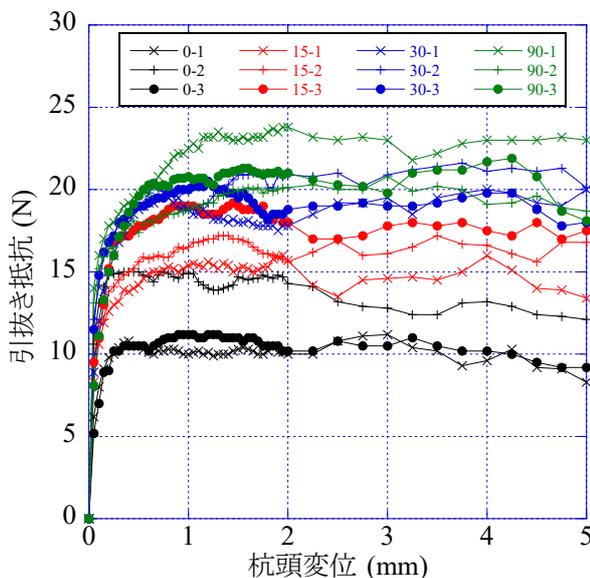


図-4 実験から求まる荷重～変位関係

画像間の増分値を累積する手法を採用する。しかしながら、変位を累積する手法は解析ノイズも累積されること、杭の引抜きが一方方向であり経路が直進的であること、から初期値からの相対値とした。

図-4、図-5 に模型実験より求まる荷重～変位関係、PIV 画像解析より求まる地盤変位を示す。手順 e4 より地盤作成後に力計をゼロクリアするため、荷重計測値に杭基礎の自重成分は含まない。

図-4 によれば、杭毎に 3 回実施した結果はいずれも、杭基礎の引抜き開始と共に引抜き抵抗が急増し、1～2mm でピーク荷重を示し、その後漸減する。密度管理したもの高い再現性とは言いがたい。材料の不均質性（アルミ棒の積層状態の違い）が原因と考えられる。一方で、バラツキがあるものの各拵底杭の示す引抜き抵抗は、より大きな拵底角度を有するほどより大きな引抜き抵抗を示している。この要因として、拵底部に載る模型地盤が拵底角度と共に増加し、抵抗土塊の自重もまた増加することが指摘できる。ピーク値に至るまでの荷重～変位関係は緩やかな曲線を描くのに対し、ピーク以降は引抜きと共に引抜き抵抗が変動している。これは粒状体の荷重～変位関係は粒子の乗り上がり・下がりという幾何学変化により説明できる^{例えば 10)}。引抜き抵抗のピーク値以後は、粒子同士の乗り上がり・下がりに伴う幾何学的変化が顕著であり、粒子乗り上がり時に荷重増加、乗り下がり時に荷重低下が生じることで引抜き抵抗に変動が生じる。引抜き抵抗のピーク値以前は粒子の乗り上がり・下がりが顕著に生じず、計測値に変動は見られない。引抜き荷重がピーク値以後に漸減する理由は、引抜きに伴う側面摩擦の減少、地盤抵抗領域の変化、杭底部下の空洞への模型地盤の周り込み、破壊の進行性、せん断帯の分岐、が指摘できる。

図-5 に示す引抜き抵抗のピーク値近傍（引抜き変位

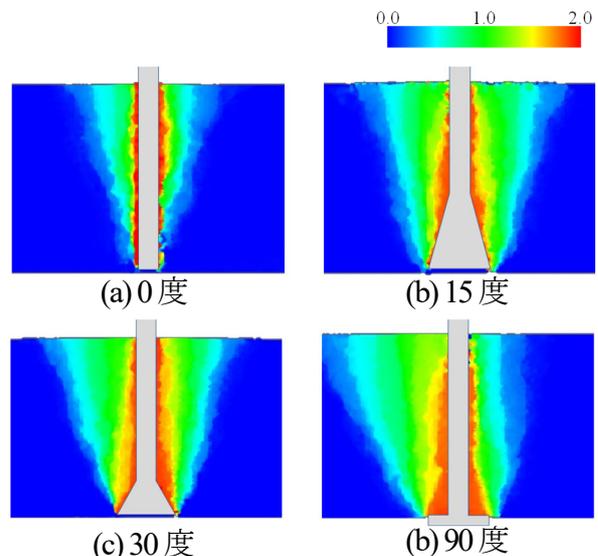


図-5 PIV 解析結果
(2mm 引抜き時鉛直変位分布, 単位: mm)

2mm) 時の地盤変位を見ると、直杭は杭先端から地表に向けて斜め上方向を含む地盤、拡底杭は拡底部つま先から地表に向けて斜め上方向を含む地盤が変位していることが分かる。このことから直杭および拡底杭は円錐台型の地盤抵抗領域を形成することが分かる。拡底角度 90 度の拡底杭は、3 回実施したいずれの実験においても地盤変形の片ぶれが生じた。これは、拡底部つま先が凸形状であり、かつ、杭体に接着したアルミ棒が左右対称でないため、せん断帯が分岐するためと考えている。

実験による計測結果および PIV 画像解析結果は、第 4 章で数値解析結果と比較することで、引抜き時の地盤抵抗メカニズムについて考察する。

3. ダイレイタンスー特性のひずみ依存性を考慮した大変数数値計算法

杭基礎引抜き時に、周辺地盤には垂直型、円錐台型、曲線型の破壊形状を示すことが報告されている⁹⁾。著者らはこれら破壊形態が地盤のダイレイタンスー特性に依存していると推測し、解析的な感度解析を通し、ダイレイタンスー特性と破壊形態の関係を調べた。用いた数値計算法は、杭基礎引抜き時の極限状態を再現しうる粒子・要素混合法¹¹⁾で、ダイレイタンスー特性は塑性せん断ひずみ依存性を考慮した。以下に手法の概要を示す。

(1) 粒子・要素混合法

粒子・要素混合法は、計算格子に基づく粒子法で用いる物理空間と計算空間を関連付ける補関関数を、領域毎に使い分けることで、特定の領域毎に異なる空間解像度の離散化を実現する数値計算法である。補関関数を使い分けるためには、対象領域を複数の副領域へ分割する必要がある。連続体理論に基づけば、対象領域の支配方程式(弱形式)は次式で表される。

$$\int_{\Omega} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{a} d\Omega = - \int_{\Omega} \rho \sigma^s : \nabla \mathbf{w} d\Omega + \int_{\partial\Omega} \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\tau} dS + \int_{\Omega} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{b} d\Omega \quad (1)$$

ここに、微小体積および表面要素をそれぞれ $d\Omega$ 、 dS で表す。上式に対して領域 Ω を 2 つの副領域 Ω_1, Ω_2 に分割することを考える。この時、上式は次式で表される。

$$\begin{aligned} & \left(\int_{\Omega_1} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{a} d\Omega_1 + \int_{\Omega_2} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{a} d\Omega_2 \right) \\ & = - \left(\int_{\Omega_1} \rho \sigma^s : \nabla \mathbf{w} d\Omega_1 + \int_{\Omega_2} \rho \sigma^s : \nabla \mathbf{w} d\Omega_2 \right) \\ & \quad + \left(\int_{\partial\Omega_1} \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\tau} dS_1 + \int_{\partial\Omega_2} \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\tau} dS_2 \right) \\ & \quad + \left(\int_{\Omega_1} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{b} d\Omega_1 + \int_{\Omega_2} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{b} d\Omega_2 \right) \\ & \quad \text{on } \Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \text{ and } \Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、下添え字は各副領域を表す。分割された副領域をそれぞれ離散化するために、連成項を導入し上式を次式に示す独立した二式に分離する。

$$\int_{\Omega_1} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{a} d\Omega_1 = - \int_{\Omega_1} \rho \sigma^s : \nabla \mathbf{w} d\Omega_1 + \int_{\partial\Omega_1} \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\tau} dS_1 + \int_{\Omega_1} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{b} d\Omega_1 + \int_{\partial\Omega_{1\Omega_2}} \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\tau}_{1\Omega_2} dS_{1\Omega_2} \quad (3a)$$

$$\int_{\Omega_2} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{a} d\Omega_2 = - \int_{\Omega_2} \rho \sigma^s : \nabla \mathbf{w} d\Omega_2 + \int_{\partial\Omega_2} \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\tau} dS_2 + \int_{\Omega_2} \rho \mathbf{w} \cdot \mathbf{b} d\Omega_2 + \int_{\partial\Omega_{1\Omega_2}} \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\tau}_{2\Omega_1} dS_{2\Omega_1} \quad (3b)$$

ここに、 $\partial\Omega_{1\Omega_2}$ は副領域 Ω_1, Ω_2 が共有する境界であり、 $\boldsymbol{\tau}_{1\Omega_2}$ および $\boldsymbol{\tau}_{2\Omega_1}$ は分割境界における各領域の表面力を示す。 $dS_{1\Omega_2}$ および $dS_{2\Omega_1}$ は分割境界における表面要素を示す。各式の末尾に記載する連成項は次の条件を満たす。

$$\int_{\partial\Omega_{1\Omega_2}} \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\tau}_{1\Omega_2} dS_{1\Omega_2} + \int_{\partial\Omega_{1\Omega_2}} \mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\tau}_{2\Omega_1} dS_{2\Omega_1} = 0 \quad (4)$$

対象領域が分割されることには、2 つの意味がある。1 つは対象領域が物理的に分割されること、もう 1 つは数値解析的に分割されることである。上式において対象領域は物理的に 2 つの副領域に分割された。一方で、数値解析法の過程において、両者は共通する計算格子を用いて運動方程式を解くことから、これら副領域は数値解析的には連続性を保っている。従って、共有する境界における連続性を満たせば、すなわち、式(4)を満足する空間離散化であれば、物理空間から計算空間へ物理量を輸送する過程で、連成項は打ち消し合うことになる。以上より、式(3)は連成項を除いた形式で次式として再定義される。

$$\int_{\Omega_1} \rho \mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{a} d\Omega_1 = - \int_{\Omega_1} \rho \sigma^s : \nabla \mathbf{w}_1 d\Omega_1 + \int_{\partial\Omega_1} \mathbf{w}_1 \cdot \boldsymbol{\tau} dS_1 + \int_{\Omega_1} \rho \mathbf{w}_1 \cdot \mathbf{b} d\Omega_1 \quad (5a)$$

$$\int_{\Omega_2} \rho \mathbf{w}_2 \cdot \mathbf{a} d\Omega_2 = - \int_{\Omega_2} \rho \sigma^s : \nabla \mathbf{w}_2 d\Omega_2 + \int_{\partial\Omega_2} \mathbf{w}_2 \cdot \boldsymbol{\tau} dS_2 + \int_{\Omega_2} \rho \mathbf{w}_2 \cdot \mathbf{b} d\Omega_2 \quad (5b)$$

ここに、 \mathbf{w}_1 、 \mathbf{w}_2 は領域毎に独立な重み関数である。上式は互いの境界において連続条件を要することから次式が付帯条件として付与される。

$$\partial\Omega_1 = \partial\Omega_2 \quad \text{on} \quad \partial\Omega_1 \cap \partial\Omega_2 \quad (6)$$

分割された副領域の支配方程式は、既存の定式化に従い補関関数を用いて離散化する。

以上は、1 つの対象領域に対し異なる補関関数を適用する定式化を示しており、手順に従い処理を実装することで空間解像度の異なる離散化が実現できる。本論文では、粒子性の高い補関関数である Generalized Interpolated Material Point (GIMP) 法¹²⁾、連続性の高い補関関数である Arbitrary Particle Domain Interpolation (APDI) 法¹³⁾を組み合わせ、粒子・要素混合法と呼称する。採用する補関関

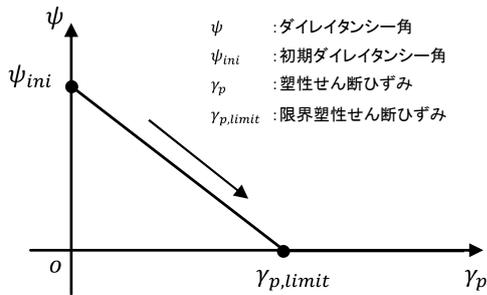


図-6 ダイレイタンシー角のひずみ依存性

数は任意に組み合わせられるが、共有する境界では同じ空間解像度による離散化が要求される。

(2) ダイレイタンシー特性にひずみ依存性を考慮した地盤非線形構成則

後述する再現解析において模型地盤（アルミ棒積層体）に適用する構成則は、降伏関数・ポテンシャル関数にいずれも Mohr-Coulomb 則を採用し、ポテンシャル関数に用いるダイレイタンシー角に塑性せん断ひずみ依存性を考慮した。構成則の定式化を以下に示す。

降伏関数(f^s)、ポテンシャル関数(g^s)を次式に示す。

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c \sqrt{N_\phi} \quad (7)$$

$$g^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (8)$$

$$N_\phi = (1 + \sin(\phi)) / (1 - \sin(\phi)) \quad (9)$$

$$N_\psi = (1 + \sin(\psi)) / (1 - \sin(\psi)) \quad (10)$$

ここに、 σ_1 、 σ_3 は最大、最小主応力（引張：正、圧縮：負）、 ϕ 、 ψ 、 c はそれぞれ内部摩擦角、ダイレイタンシー角、粘着力を表す。

地盤材料のダイレイタンシーはせん断変形の進行と共に限界状態に到達し、体積変化がなくなることが知られている。この性質を表すために、ダイレイタンシー角は塑性せん断ひずみの1次関数として次式で定義する。

$$\psi = \begin{cases} \psi_{ini}(1 - \gamma_p / \gamma_{p,limit}) & \gamma_p \leq \gamma_{p,limit} \\ 0 & \gamma_p > \gamma_{p,limit} \end{cases} \quad (11)$$

ここに、 $\psi_{ini}(= \phi)$ 、 γ_p 、 $\gamma_{p,limit}$ はそれぞれ、初期ダイレイタンシー角、塑性せん断ひずみ、限界塑性せん断ひずみを表す。限界塑性せん断ひずみは体積変化が終息する時点の塑性せん断ひずみである。上式の模式図を図-6に示す。なお、塑性せん断ひずみとは、全ひずみを弾性成分、塑性成分で加算分解後の、塑性成分から算出する最大せん断ひずみで次式で算出する。

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (12)$$

$$\gamma_p = \varepsilon_{p,1} - \varepsilon_{p,3} \quad (13)$$

ここに、 ε 、 ε_e 、 ε_p はそれぞれ、全ひずみ、弾性ひずみ、塑性ひずみ、 $\varepsilon_{p,1}$ 、 $\varepsilon_{p,3}$ は塑性ひずみから算出する最大および最小主ひずみ（引張：正、圧縮：負）である。

以後の数値解析では、式(11)において、初期ダイレイタンシー角を内部摩擦角と等しくした ($\psi_{ini} = \phi$)。この時、限界塑性せん断ひずみをゼロとした場合

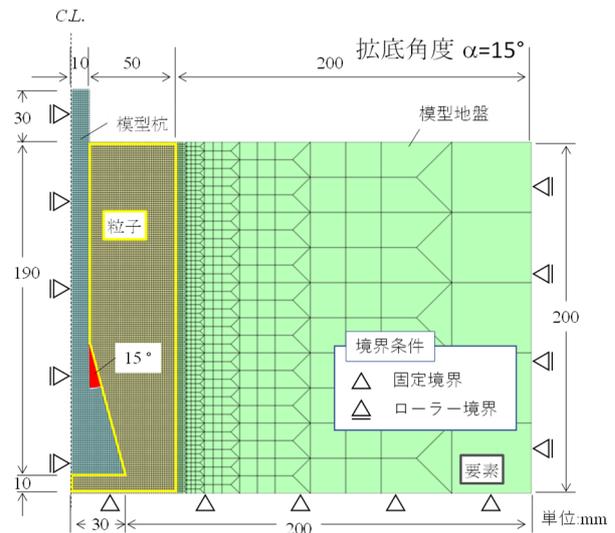


図-7 模型実験の解析モデル（拡底角度 15 度）

($\gamma_{p,limit} = 0$)、体積変化の無い非関連流れ則、限界塑性せん断ひずみを無限大とした場合 ($\gamma_{p,limit} = \infty$)、関連流れ則と同条件となる。

(3) 杭基礎引抜き解析に適用する粒子・要素混合法

図-3、図-4に示す杭基礎の引抜き実験の再現解析を粒子・要素混合法を用いて実施する。解析モデルを図-7に示す。解析モデルでは、杭周地盤を粒子（GIMP 粒子、以下、粒子）、杭基礎および外周地盤を要素（APDI 粒子、以下、要素）、で離散化した。対称性を利用し、杭芯を対称軸においた半断面 2次元モデルである。空間解像度として背面格子は正方格子で幅 2.5mm、粒子（直径 1.25mm）は 1 格子あたり 2×2 の正方配置した。要素でモデル化する杭および外周地盤は、粒子との境界において連続条件を満たすために（式(6)）地盤粒子と同じ寸法で離散化した。対称軸および側方は鉛直ローラー、底面固定の境界条件を付与した。

数値解析は初期応力解析、引抜き解析の2段階で実施した。初期応力を算出後、自重による変形をゼロクリアし、後続の引抜き解析を実施する。杭基礎引抜き荷重は、杭頭粒子へ点荷重を付与した。粒子位置への点荷重は補間関数により参照格子点へ振り分けられ、大変形下において、常に杭頭へ荷重が付与されるよう処理した。荷重は直杭は 1(N)、拡底杭は 2(N)毎に漸増载荷し、各载荷段回において動的緩和法を用いて引抜き変位を算出した。荷重は、数値解析では杭頭载荷という荷重制御であるが、実験では変位制御であり、数値解析と実験で载荷方法に相違がある。計算格子に基づく粒子法における変位制御として、粒子速度、加速度を一定値とする方法があるが、応力が振動し荷重計測が困難となる。そのため数値解析においては杭頭荷重を参照可能な荷重制御を採用した。数値解析による釣り合いは自重成分を含むため、自重成

表-2 解析モデルに付与する材料物性

	単位体積重量 γ kN/m ³	せん断弾性係数 G kPa	ポアソン比 ν -	内部摩擦角 ϕ 度	初期ダイレイタンシー角 ϕ_{ini} 度
模型杭	76.0	200000	0.3	-	-
模型地盤	20.5	200	0.3	20	20

分を除した荷重～変位関係を実験結果と比較する。数値解析の単位系は (kN・m・s) であり、実験と解析モデルの奥行きはそれぞれ 5cm, 1m と異なる。解析から求まる荷重～変位関係は奥行き 5cm 辺りの値に換算して実験結果と比較する。

表-2に模型杭および模型地盤の物性値を示す。地盤物性の内、強度定数は文献 14)の値を採用した。変形係数は同じく文献 14)を参考にしたが、図-4 に示す荷重～変位関係の初期勾配が合うよう数ケースのパラメータスタディを実施し決定した。杭物性は弾性体であり地盤材料に対して相対的に剛な材料であることを仮定した。地盤の非線形性は前述の Mohr-Coulomb 則に従う弾塑性モデルである。ダイレイタンシー特性を表現する方法として、ダイレイタンシー角を塑性せん断ひずみ (γ_p) の1次関数と定義し、限界塑性せん断ひずみ ($\gamma_{p,lim}$) まで漸減させる。限界塑性せん断ひずみは 0%, 2%, 5%, 無限% を、それぞれ設定し各杭 4 ケースの数値解析を実施した。

4. 拡底杭引抜き特性に与えるダイレイタンシー特性の影響

(1) 杭基礎引抜きに適用する粒子・要素混合法の検証

図-8に実験および数値解析よりそれぞれ求めた杭頭における引抜き荷重～引抜き変位関係を拡底角度毎に比較

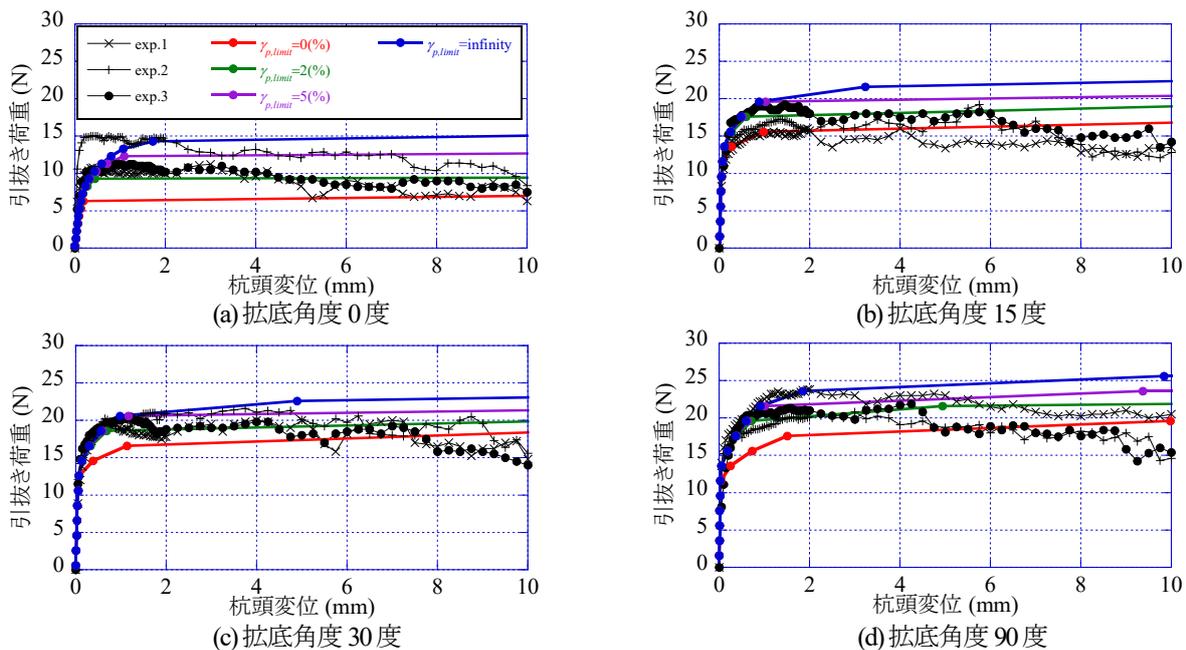


図-8 実験および数値解析 ($\gamma_{p,lim}=0\%$, 2%, 5%, 無限%) から求めた荷重～変位関係の比較。

して示す。図-8によれば、実験結果 (凡例: exp-1~3) の全体的な傾向として、拡底角度が大きい程、大きな引抜き抵抗を示すことが分かる。一方、いずれの拡底角度であっても引抜き量 1~2mm で引抜き荷重のピーク値を示し、その後、漸減する傾向を示す。

図-8 に示す解析結果は、限界塑性せん断ひずみ ($\gamma_{p,lim}$) を 0%, 2%, 5%, 無限%とした結果である。例えば図-8(b)によれば、解析的に求まる荷重～変位関係は、実験から求まる引抜き抵抗のピーク値に向けて緩やかな曲線を描き、ピーク値付近で急激に引抜き変位が増大する。これは数値解析を荷重制御で実施するため、引抜き荷重が地盤の降伏耐力に到達すると、力の釣り合いが取れず杭基礎が引き抜けることによる。ダイレイタンシーを考慮しない非関連流れ則の場合 ($\gamma_{p,lim}=0\%$)、解析的に求めた荷重～変位関係は実験結果ピーク値の下限を示している。一方で、ダイレイタンシーを考慮する関連流れ則 ($\gamma_{p,lim}=\infty\%$) の場合、解析的に求めた荷重～変位関係は実験結果ピーク値の上限を示している。限界塑性せん断ひずみを上記の中間の値に設定した場合 ($\gamma_{p,lim}=2\%$ および 5%) は、非関連流れ則および関連流れ則から得られた荷重～変位関係の中間的な値を示す。

図-8(a), (c), (d)によれば、他の拡底杭の実験値、解析値も同じ関係にある。以上より実験結果に関して解析結果との比較から、拡底杭の引抜き荷重～引抜き量は、地盤のダイレイタンシー角をその内部摩擦角を初期値としたひずみ依存性を考慮することで再現可能であり、正のダイレイタンシーが拡底杭の引抜き抵抗増加に寄与することが分かる。この時、非関連流れ則による数値解析結果は引抜き抵抗ピーク値の下限値を、関連流れ則による結果は上限値を示す。

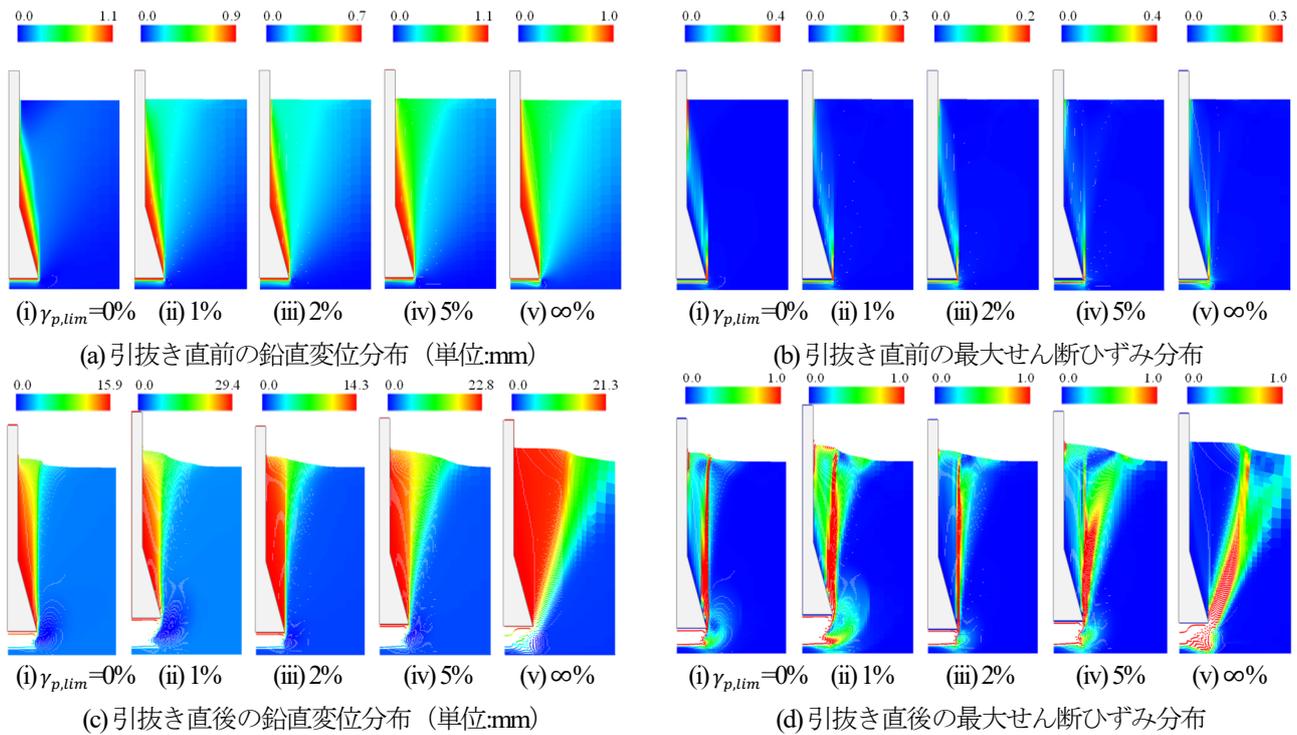


図-9 限界塑性最大せん断ひずみと地盤抵抗領域の関係

(2) 限界塑性せん断ひずみと杭基礎引抜き時の地盤抵抗領域の関係

拡底角度 15 度の拡底杭を例に、限界塑性せん断ひずみと地盤抵抗領域について感度解析を実施した。図-9に限界塑性せん断ひずみを 0%から無限%まで変更した場合の杭引抜き直前(図 9(a), 図-9(b)), 直後(図-9(c), 図-9(d))における鉛直変位, 及び最大せん断ひずみ分布を示す。図-9に示す変形図, ひずみ分布図より明らかな通り、限界塑性せん断ひずみを大きく設定するに連れて(各図左側から右側に向けて)杭からより遠方の地盤を含んだ引抜き抵抗領域を形成することが分かる。式(11)からダイレイタンシー角を限界塑性せん断ひずみの関数としており、すなわちダイレイタンシーの有無が引抜き時の地盤抵抗領域の形成に寄与していることが分かる。

以下で図-9を詳述する。図-9各図(i)にはダイレイタンシーを考慮しない非関連流れ則($\gamma_{p,lim} = 0\%$, i.e. $\psi = 0\text{ deg.}$), 図-9各図(v)にはダイレイタンシーを考慮する関連流れ則($\gamma_{p,lim} = \infty\%$, i.e. $\psi = \phi\text{ deg.}$)の解析結果である。

はじめにダイレイタンシーを考慮しない結果について示す。図-9(a)-(i)によれば、引抜き直前の変形分布を見ると拡底部直上に、受動土圧を受ける斜面に似た変形を示す。図-9(b)-(i)を見るとこの変形領域外縁にひずみが集中することから、拡底部直上の受動変形領域が引抜き力に対する地盤の抵抗領域となる。図-9(c)-(i)によれば、引抜き時の変形分布を見ると、拡底部直上の地盤全体が変形する。この時、図-9(d)-(i)によれば、拡底部つま先から直

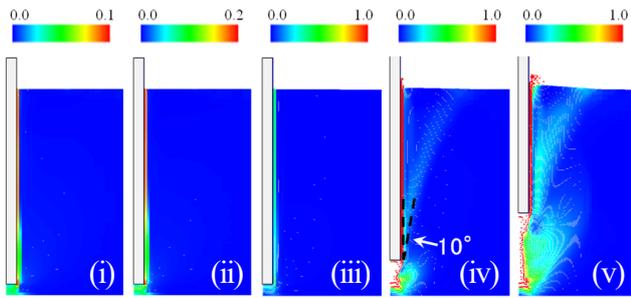
上に向かって変形が集中し、垂直型の引抜き抵抗領域を形成する。同図より、垂直型に形成された抵抗領域は杭の引抜きと共に持ち上がり、持ち上がった土塊の自重および周面摩擦が引抜き抵抗力の構成要素となる。引き抜け後、拡底部下に生じた空間に側方地盤が回り込む様子が分かる。

次にダイレイタンシーを考慮する関連流れ則の結果について示す。図-9(a)-(v)によれば、引抜き直前の変形は、拡底部つま先から地表に向けて杭から離れる方向へ分布する円錐台型の抵抗領域を示す。図-9(b)-(v)のせん断ひずみ分布が拡底部つま先より直上に集中しており、正のダイレイタンシー特性により水平方向に体積変化が生じるためである。図-9(c)-(v)によれば、引き抜け時の変形は、拡底部直上と外周地盤を伴う領域が引抜き外力に抵抗する円錐台型抵抗領域を形成する。

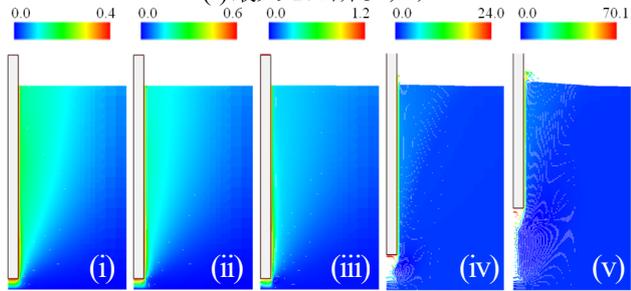
図-9各図(ii),(iii),(iv)に示す、ダイレイタンシー特性が上記の中間の場合、抵抗領域は円錐台型を示す。正のダイレイタンシーが大きい程、より遠方の地盤を伴う引抜き抵抗土塊を形成する。

(3) 拡底角度と引抜き抵抗の関係に関する考察

図-8に示す荷重～変位関係で実験値の中間的な値を示していること、図-9に示す引抜き外力に対する地盤抵抗領域が円錐台型を示すことから、限界塑性せん断ひずみ 5%が模型地盤のダイレイタンシー特性を代表していると仮定し、実験に用いた全ての拡底杭($\alpha = 0, 15, 30, 90$ 度)の数値解析を図-7, 表-2と同じ条件(杭形状は異なる)で実施した。解析結果を図-10～13に示す。

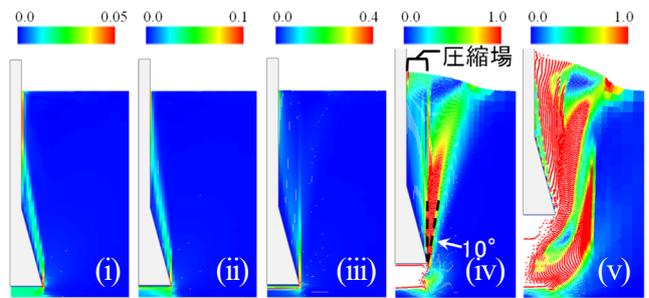


(a) 最大せん断ひずみ

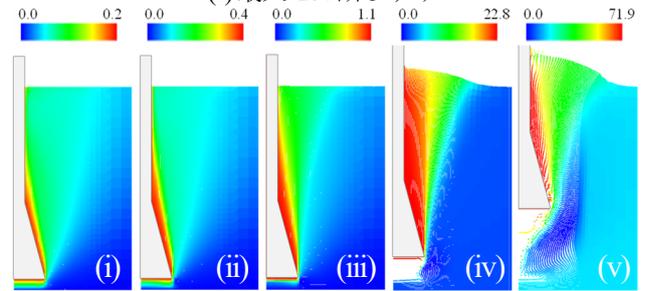


(b) 鉛直変位 (単位:mm)

図-10 直杭 ($\alpha=0$, $\gamma_{p,lim}=5\%$) の解析結果
(引抜荷重(N) : (i) 8.3, (ii) 10.3, (iii) 12.3, (iv) 13.3, (v) 14.3)

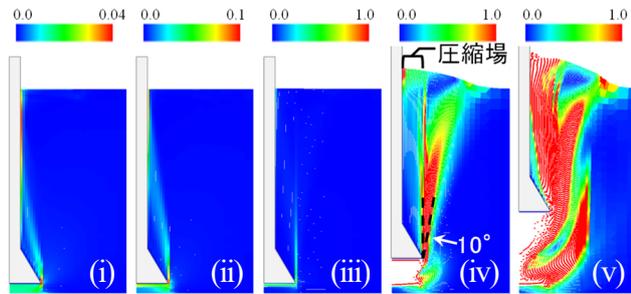


(a) 最大せん断ひずみ

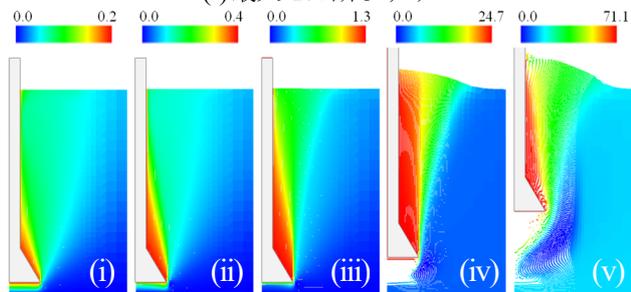


(b) 鉛直変位 (単位:mm)

図-11 拡底杭 ($\alpha=15$, $\gamma_{p,lim}=5\%$) の解析結果
(引抜荷重(N) : (i) 11.6, (ii) 15.6, (iii) 19.6, (iv) 21.6, (v) 23.6)

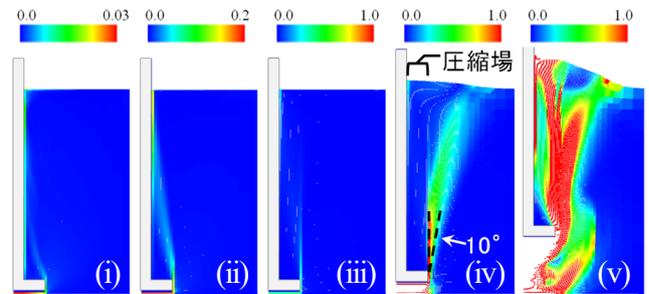


(a) 最大せん断ひずみ

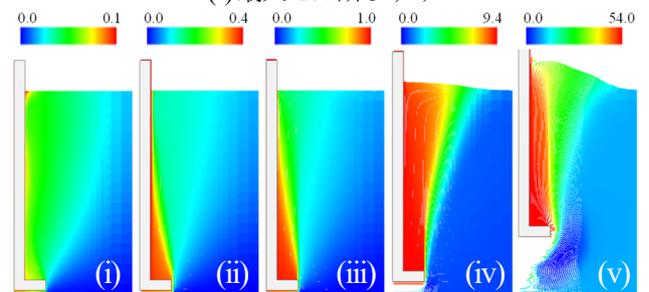


(b) 鉛直変位 (単位:mm)

図-12 拡底杭 ($\alpha=30$, $\gamma_{p,lim}=5\%$) の解析結果
(引抜荷重(N) : (i) 12.6, (ii) 16.6, (iii) 20.6, (iv) 22.6, (v) 24.6)



(a) 最大せん断ひずみ



(b) 鉛直変位 (単位:mm)

図-13 拡底杭 ($\alpha=90$, $\gamma_{p,lim}=5\%$) の解析結果
(引抜荷重(N) : (i) 13.6, (ii) 17.6, (iii) 21.6, (iv) 23.6, (v) 25.6)

図-10~13 より、いずれの拡底角度の杭も拡底部（直杭は杭先端）つま先より杭周から離れる方向へ変形が集中し、円錐台型の引抜き抵抗領域を形成する。図-10~13 の各図(iv)より、円錐台型に形成された抵抗領域は杭の引抜きと共に持ち上がり、持ち上がった土塊の自重および土塊を形成するせん断帯におけるせん断抵抗力が引抜き抵抗に寄与する。図-10~13 に示す変形分布から、いずれの杭基礎（直杭、拡底杭）も、地盤抵抗領域に関して次のことが分かる。杭基礎引抜き時、杭の隣接地盤は拡底つま先部より直上にせん断変形し始める。この時、

正のダイレイタンス性が有るため、せん断帯の形成方向は鉛直方向から傾斜する。後続するせん断変形もまた、引抜き外力により鉛直上向きに発達する。この時もまた、正のダイレイタンス特性により水平方向の体積膨張が生じ、せん断帯の形成方向は鉛直方向から傾斜する。以上に示すように、拡底つま先部より発達するせん断帯は、正のダイレイタンス性により常に、杭基礎引抜き方向と一定の角度を持った方向に形成するため、結果的に円錐台型の引抜き抵抗領域を形成する。

実験および解析結果から、異なる形状を有する杭基礎

はいずれも円錐台型の地盤抵抗領域を示す。図-10～13より、杭先端または拡底つま先部より地表へ向け形成するせん断帯の角度はいずれも約 10 度である。拡底部直上地盤は、いずれの拡底角度であっても圧縮場であるため内部でせん断破壊しない。拡底部つま先より直上に向かうせん断面が形成され、正のダイレイタンスー特性により側圧で押し出され、外周地盤側でせん断破壊する。拡底部直上地盤の圧縮場の形成は拡底角度に依存せず、その後の外周地盤側の円錐台型のせん断領域もまた拡底角度に依存しないため、拡底角度が異なる拡底杭を用いても同じ引抜き抵抗領域を形成する結果となった。拡底部直上地盤の圧縮場の形成は、地盤剛性の拘束圧依存性を考慮しない、仮定に基づいている。

5. まとめ

アルミ棒積層体を用いて低拘束圧地盤における拡底杭の引抜き実験を実施し、ダイレイタンスー特性に着目した再現解析を実施した。2次元場における模型実験と数値解析より以下のことが明らかとなった。

- ・低拘束圧条件の地盤は円錐台型の抵抗領域を形成する。
- ・拡底角度の大きい拡底杭がより大きな引抜き抵抗を發揮する。

また、再現解析より以下のことを明らかとした。

- ・体積変化のない地盤物性は垂直型の地盤抵抗領域を発生させる。
- ・地盤の正のダイレイタンスーは円錐台型の抵抗領域を発生させ、地盤の引抜き抵抗（杭の引抜き抵抗力）を増加させる。
- ・拡底部直上に圧縮場を形成することで、異なる拡底角度を有する拡底杭であっても同じ地盤抵抗領域を形成する。

謝辞：本研究は、東急(株)の江崎晃一氏、NTT 東日本(株)の佐藤慶太氏に実験協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Majer, J., Zur Berechnung von Zugfundamenten: *Osterreichische Bauzeitschrift*, Vol.10, No.5, pp.85-90, 1955. (in German)
- 2) Down, D.I., and Chieurzzi, R.: Transmission tower foundations, *ASCE Journal of the Power Division*, Vol.92, No.P02, pp.91-114, 1966.
- 3) Murray, E.J., and Geddes, J.D.: Uplift of anchor plates in

sand, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.113, No.3, 1987.

- 4) Clemence, S.P., and Veesaert, C.J.: Dynamic pullout resistance of anchors in sand, *Proceedings of international symposium on soil structure interaction*, Roorkee, India, pp.389-397, 1977.
- 5) Sutherland, H.B., Finilay, T.W., and Fadl, M.O.: Uplift capacity of embedded anchors in sand, *Proceedings of 3rd international conference on the behaviour of offshore structures*, Cambridge, MA, Vol.2, pp.451-463, 1982.
- 6) Vermeer, P.A., and Sutjiadi, W.: The uplift resistance of shallow embedded anchors, *Proceedings of 11th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, San Francisco, CA, Vol.4, pp.1635-1638, 1985.
- 7) Balla, A.: The resistance of breaking out of mushroom foundations for pylons, *Proceedings of 5th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Paris, Vol.1, pp.569-576, 1961.
- 8) Meyerhof, G. G., and Adams, J.I.: The ultimate uplift capacity of foundations, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.5, No.4, pp.225-244, 1968.
- 9) Dickin, E. A.: Performance of piles with enlarged bases subject to uplift forces, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.27, pp.546-556, 1990.
- 10) Rowe, P.W.: The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact, *Proceedings of the Royal Society, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol.269, pp.500-527, 1962.
- 11) Kiriya, T. and Higo, Y.: Arbitrary Particle Domain Interpolation Method and Application to Problems of Geomaterial Deformation, *Soils and Foundations*, (under review, submitted in 2019)
- 12) Bardenhagen, S.G. and Kober, E.M.: The generalized interpolation material point method, *Computer Modeling in Engineering and Science*, Vol.5, No.6, pp.447-495, 2004.
- 13) 桐山貴俊, 肥後陽介: 計算格子を利用した領域積分値計算法の地盤大変形問題への適用, *土木学会論文集 A2 (応用力学)*, Vol.72, No.2 (応用力学論文集 Vol.19), pp.I_155-I_165, 2016.
- 14) Akagi, H., Sato, K., and Kiriya, T.: Numerical Study on Load-Settlement Relationships of Shallow Foundation under Extremely Low Confining Pressure, *Proceedings of 6th international conference on particle-based methods, fundamentals and application*, Barcelona, Spain, 2019.

(Received June 24, 2020)

(Accepted November 19, 2020)

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON GEOMATERIAL BEHAVIOR OF UPLIFTING BELLED PILE UNDER LOW CONFINING PRESSURE

Takatoshi KIRIYAMA, Kota OTAKE and Hirokazu AKAGI

Experimental testing revealed that the ground created the cone-shaped resisting area against the uplift of the belled pile. Then, the relationship between soil dilatancy characteristics and the uplifting capacity was investigated by using the numerical analysis which can simulate large deformations. The series of numerical simulation resulted in that the positive dilatancy under low confining pressure induced the truncated cone-shaped resisting area in ground which increased the uplifting capacity.