

地盤の材料パラメーターに着目した支持力特性

桑嶋 啓治^{*1} 上 俊二^{*1} 福田 靖^{*2}

Bearing properties considering ground material parameters

Keiji KUWAJIMA ^{*1}, Shunji UE^{*1} and Yasusi FUKUDA ^{*2}

Abstract

The ground is made of some materials such as sands, clay, gravel and silt. Because of that there are many material parameters and different shapes and hardness, so it is difficult to calculate bearing capacity of the foundation exactly. In this study, parameter was considered, and the model using three kinds of sand were analyzed to clarify stress and deformation in the ground. Consequently analysis of the ground by finite element method using its mechanical properties is corresponded the model foundation test.

Key Words : finite element method, bearing properties, material parameter

1. はじめに

地盤を構成している材料は粘土、シルト、砂、礫など様々であり、また同じ砂に分類される材料においても、その形状や硬度も異なっているため、支持力を精度良く求めることは困難である。

現在、地盤の支持力を算定するために、標準貫入試験より求めた値により換算する方法や土の内部摩擦角を用いて計算式によって求める手法などが使われている。最も精度良く求める手法は、原位置による支持力載荷試験である。しかしながら、実地盤での載荷試験は多額の費用や時間が必要になるため容易に行うことが出来ない。そこで模型実験やコンピューターを用いた計算が、支持力特性を把握する有効な手段となる。コンピューターによる計算は、近年の急速な演算処理能力の向上により、様々な力学モデルに対応した複雑な計算も可能となってきており、今後はこれまで以上に有効な手段になると思われる。また、模型実験も古くから行われてきており、今後も様々な研究において使われることが予想される。

地盤の応力状態は、弾性状態と塑性状態が複雑に混

在しており、この弾塑性状態を表現するための手法として、弾塑性モデルを用いた有限要素法による解析手法が挙げられる。地盤は均質な連続体ではなく、その応力とひずみの関係は弾性体の法則には従わないため、これらを正確に計算することは困難である。しかし、一般に地盤を理想化して、地盤内に新たな垂直応力が加わる時、土粒子の骨格の圧縮変形が主に粒子自体の変形によって生ずるような応力範囲を弾性的と考え、応力がある程度より大きくなり、粒子同士が互いにずれて移動し、力を除いても元の位置関係に決して戻らない応力範囲を、塑性領域として扱う。

本研究では、弾塑性モデルを用いた有限要素法による解析を行い、地盤材料の力学特性を反映させた解析結果と模型杭載荷実験より得られた結果に対して比較検討を行い、支持力値や地盤内の変形の様子や応力状態を示すことにより杭基礎における地盤の支持力特性の把握を目的としている。

*1 土木建築工学科

*2 教育支援センター

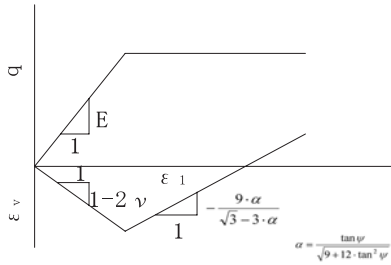


図 1 弾塑性モデル

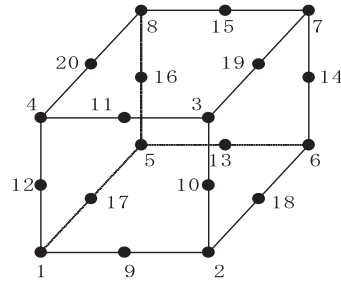
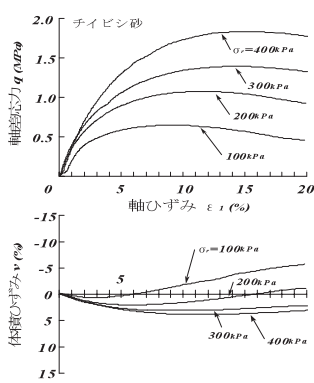


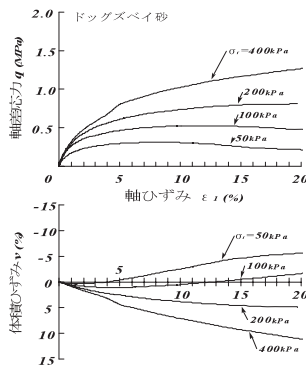
図 2 要素

表 1 解析パラメーター

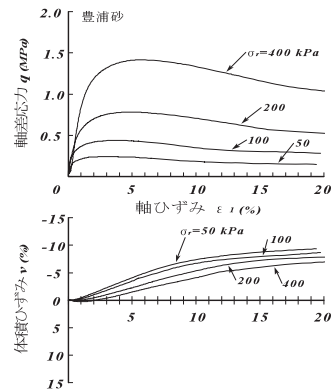
物性	モデル1 (チイビシ砂)	モデル2 (ドッグズベイ砂)	モデル3 (豊浦砂)
弾性係数 E (kN/m ²)	34,300	18,600	167,000
粘着力 c (kN/m ²)	0	0	0
内部摩擦角 φ (°)	44.1	38.3	39.7
ダイレイタンスー角 ψ (°)	2	2	10
ポアソン比 ν	0.25	0.2	0.3



(a)チイビシ砂



(b)ドッグズベイ砂



(c)豊浦砂

図 3 排水三軸試験結果¹⁾

2. 解析概要

杭の先端支持力特性を把握するため、地盤内の応力状態や変形の様子を有限要素法を用いた解析により求めた。解析に用いたプログラムは三次元弾塑性性 FEM プログラム (Ga3D.f) である結果²⁾。このプログラムは、全体安全率を求める安定解析と応力変形解析に対して解析を行うことが可能であり、本研究では応力変形解析を用いて解析を行った。

2.1 土の力学モデル

本研究の解析で用いた力学モデルは、弾完全塑性体であり力学モデルの概念図を図-1 に示す。

この図は軸差応力と軸ひずみの関係及び軸ひずみと体積ひずみの関係を示している。弾性領域における軸差応力と軸ひずみの直線の勾配は、フックの法則より応力値が材料により定まる一定値を超えないとき、それにより生じるひずみとの間には比例関係が成り立ち、弾性係数となる。軸ひずみと体積ひずみにおける圧縮時の直線の傾きには、ポアソン比が関係し、膨張時の

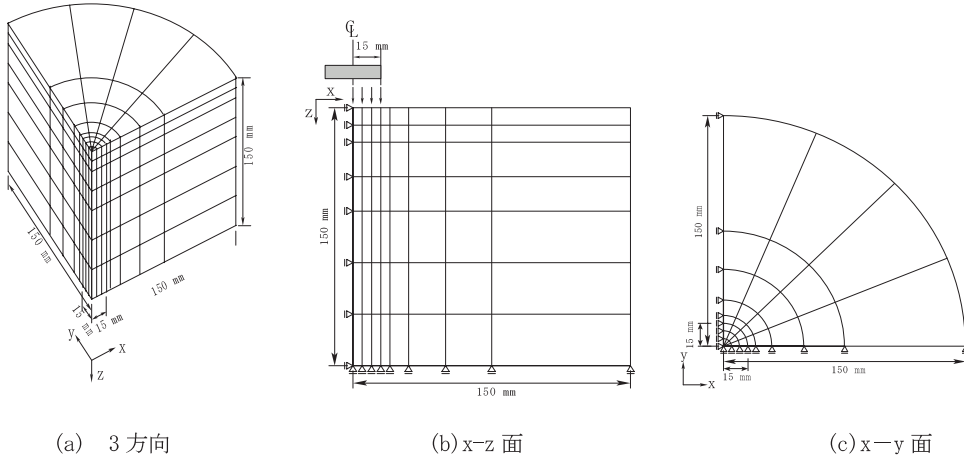


図4 モデル地盤

直線の傾きはダイレイタンシー角がそれぞれ関係している。

このモデルに必要なパラメーターを図-3に示す排水三軸圧縮試験より求め、表-1に示す数値を用いて、チイビシ砂を想定したモデル1、ドッグズベイ砂を想定したモデル2、豊浦砂を想定したモデル3の計3種類のモデルを対象に解析を行った。モデルの特徴としては、モデル1とモデル2がモデル3と比較して、せん断による体積収縮がかなり大きいこと、強度の発現までに大きな軸ひずみや体積収縮を伴うことが挙げられる。

砂のせん断に対する抵抗の大小は砂粒子間に働く摩擦抵抗の大小に支配される。モデル1に示したチイビシ砂は、砂の形状が球に近い豊浦砂よりも角張っており、細長い土粒子も多く存在するためかみ合わせがよく、インターロッキングの程度が高なる。そのため、砂のせん断抵抗角の大きさは、他の試料よりも大きいと考えられる。また、応力がある程度より大きくなると、粒子同士は互いに相対移動や、土粒子の破碎を生じ、粒子間の距離が短縮されることが考えられる。

2.2 解析地盤

解析に用いた要素を図-2に示す。この要素は6面体20節点のアイソパラメトリック3次元要素であり、頂点とその中間点には節点を設けることによって、滑らかな応力分布やひずみ分布が得られるという特徴がある。モデル地盤は、図-4(a)に示すように3次元の地盤である。そして図-4(b)はx-z方向、図-4(c)はx-y方向から見た図である。これは、模型杭載荷実験装置の供試体、模型杭ともに円柱形であり、その形状を模し

ている。また、要素分割は、問題の対称性からその1/4の部分のみを対称として行った。その結果、モデル地盤の要素数は224個で、接点数は1283個となった。

境界条件は、図-4(a)~(c)に示すように対称面を考慮して、 $x=0$ 面、 $y=0$ 面、 $z=0$ の面をそれぞれ固定している。初期応力は、 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = 400$ kPa、主応力比 $K = 1.0$ と全ての応力が等しい状態とした。これらの条件も、先ほどと同様に模型杭載荷実験での実験条件と等しくするためである。なおモデル地盤は、先に述べたように模型杭載荷実験を考慮して作成したが、本来、杭の周面部も含めて解析する場合には、ジョイント要素を用いることが望ましい。しかしながら、本研究では、杭先端支持力のみに着目しており、また、杭頭の変化は鉛直方向のみであるため、簡素化のために図-4に示すモデルを用いて解析を行い、杭先端部の節点の反力の合計値を杭の先端支持力として求めている。そして、解析により得られた荷重と沈下量の関係は、それぞれ先端支持力 q_p は応力で、沈下量 S は杭直径 D で正規化した正規化沈下量 S/D で整理を行った。そして解析結果より得られた応力を、平均有効主応力 p と軸差応力 q で示す。計算式は、それぞれ以下の通りである。

平均主応力

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}) = \frac{1}{3}I_1 \quad (1)$$

軸差応力

$$q = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (2)$$

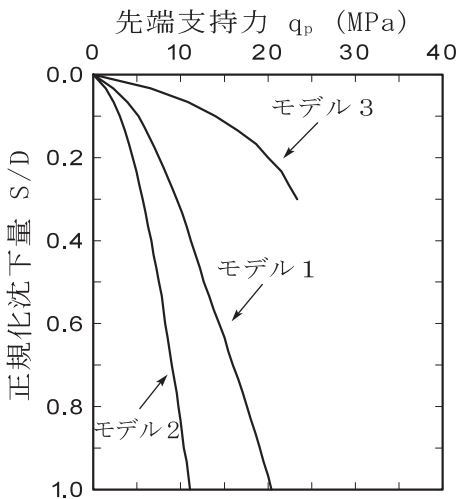


図5 解析結果

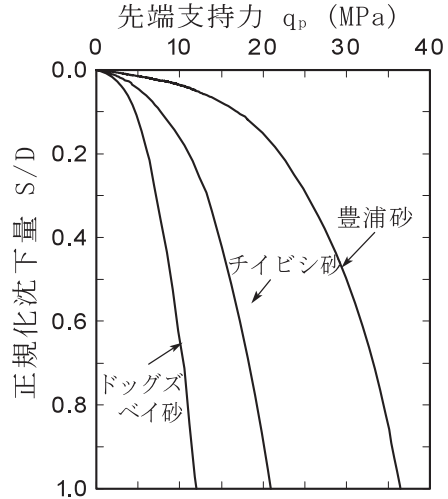


図6 模型杭載荷実験結果¹⁾

3 解析結果

3.1 先端支持力特性

計算結果より得られた先端支持力 q_p と正規化沈下量 S/D の関係を図-5 に、模型杭載荷実験結果を図-6 にそれぞれ示す。両図を比較すると解析結果は実験結果と同程度の値が得られたことが分かる。なお、計算に際しては、杭基礎底面に対応する節点の鉛直変位を徐々に増加させており、各計算ステップは、 $S/D=0.033$ である。また、モデル3においては、正規化沈下量 0.3 の地点で計算が終了したため、以下に示すモデル 3 の解析結果は全て正規化沈下量 $S/D=0.3$ の地点での結果を示しており、それ以外は $S/D=1.0$ である。

図-5に示されるように、いずれのモデルも正規化沈下量の増加とともに先端支持力も増加している様子が見られる。しかしながら、先端支持力 q_p の増加量は、モデル3が最も大きく、順にモデル1、モデル2となった。モデル3の特徴として、弾性係数 E が大きいことが挙げられる。式(8)よりモデル 3 の弾性係数 E は大きい。そのため比例関係に従い、ひずみの増加に対してより大きな応力が必要であると考えられる。

3.2 地盤の変形

写真-1(a)~(c)はそれぞれの試料に対して模型杭載荷実験より得られた地盤の挙動を示したものでありこれらの観察結果より、地盤の変形の様子を詳細に示す

$$\begin{aligned} \left| \sigma_{ji} - \sigma \delta_{ji} \right| &= \begin{bmatrix} \sigma_{xx} - \sigma & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} - \sigma & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} - \sigma \end{bmatrix} \quad (3) \\ &= -\sigma^3 + I_1 \sigma^2 - I_2 \sigma + I_3 = 0 \end{aligned}$$

ここで、

$$I_1 = \sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz} \quad (4)$$

$$I_2 = \sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx} - (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2) \quad (5)$$

$$I_3 = \sigma_{xx}\sigma_{yy}\sigma_{zz} + 2\sigma_{xy}\sigma_{yz}\sigma_{zx} - (\sigma_{xx}\sigma_{yz}^2 + \sigma_{yy}\sigma_{zx}^2 + \sigma_{zz}\sigma_{xy}^2) \quad (6)$$

である。

ポアソン比は次式のように定義される。

$$\nu = \frac{\varepsilon_H}{\varepsilon_V} \quad (7)$$

ここで ε_H : 横ひずみ, ε_V : 縦ひずみである。

フックの法則は次式のように定義される。

$$\sigma = E \varepsilon \quad (8)$$

ここで、 σ : 応力, E : 弾性係数, ε : ひずみである。

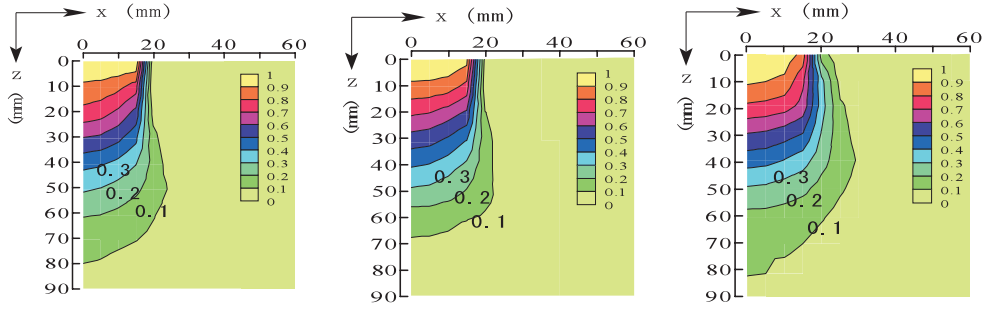


(a) チイビシ砂

(b) ドッグズベイ砂

(c) 豊浦砂

写真1 地盤の変形の様子¹⁾



(a) チイビシ砂

(b) ドッグズベイ砂

(c) 豊浦砂

図7 変位の分布図

ため、鉛直下方向への変位量を等間隔に求めて整理を行った。なお、これらの変位量は、色砂は水平方向にのみ敷いており、横方向 (x 方向) への変位量は考慮されてなく、鉛直方向 (z 方向) のみの評価であるが、地盤の変形挙動を把握することは可能である。図-8(a)～(c)に杭径で除した値の分布図を示している。これらの分布図より、全体的に示す豊浦砂の変位の分布が最も大きく、特に横方向にも広がっている様子が見られる。また、図-8(a)に示すチイビシ砂や図-7(b)に示すドッグズベイ砂は、横方向よりも鉛直下方向へ変形が広がっている様子が示されている。鉛直下方向への変位をさらに分かりやすく示すために、各接点における鉛直方向への変位量を 面において整理し直した図を図-8(a)に示す。他のモデルも同様に解析終了後に整理を行い、それぞれ図-8(b)と図-8(c)に示している。

図-8(a)～(c)において、変位量の分布を見ると、モデル1と2は、3に比較して鉛直下方向で変形が生じており、モデル3は、杭底面から半円状に広い範囲で変形が生じていることがわかる。

また、図-8(a)と図-8(b)を比較すると、変形の領域は、モデル2よりもモデル1の方が、大きいことが分かる。モデル3は途中で計算が終了したために直接比較できないが、先端支持力の大きなモデル3は広い範囲で変形が生じていること、モデル1とモデル2を比較すると、より大きな先端支持力を発現した方が、地盤内の変形も大きいことがわかる。

3.3 応力状態

軸差応力は、式(3)より3方向の主応力を求め、その最大値と最小値の差を計算により求めた。これらの計算式により、得られた軸差応力と平均主応力の分布の様子を、それぞれ図-9(a)～(c)と図-10(a)～(c)に示す。

これらの図に示されるように、いずれのモデルにおいても杭基礎直下部分が最も応力が大きく、杭周辺から順に広がっていることがわかる。その応力分布の様子に着目すると、モデル3における軸差応力と平均主応力は、最も広い範囲で分布していること、その分布の様子は、横方向 (x 方向) に広がっており、その形状は比較的円形に近い形状になっている。これはポアソン比が関係しており、式(7)より、モデル3はポアソン比が大きいため横ひずみの割合が多いためであり、逆に、モデル1やモデル2が下方向に広がっているのもポアソン比が小さく縦ひずみが発達したためである。この様にモデル1と2においては、鉛直下方向への広がりを示しており、応力の伝搬は、杭先端から深さ方向に応力が伝わりやすい結果となった。それぞれのモデルにおける先端支持力の大きさは異なっているが、応力分布の様子から破砕性地盤を想定しているモデル1とモデル2は、杭基礎の沈下量が増大しても、地盤の変形量や応力の分布が小さく支持力が発現しにくい地盤材料であることが伺える。

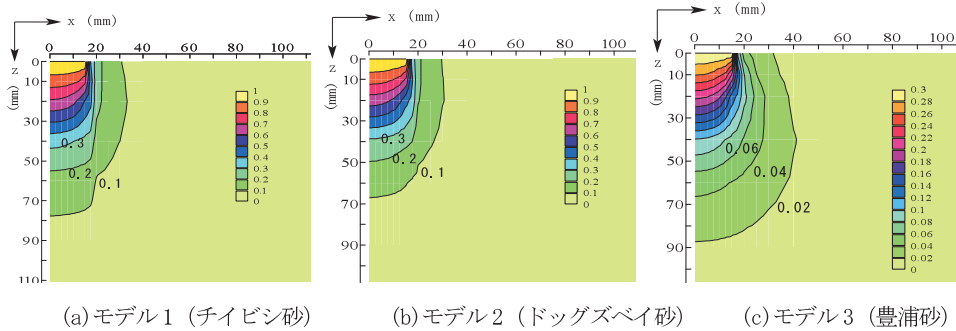


図8 変位量の分布図

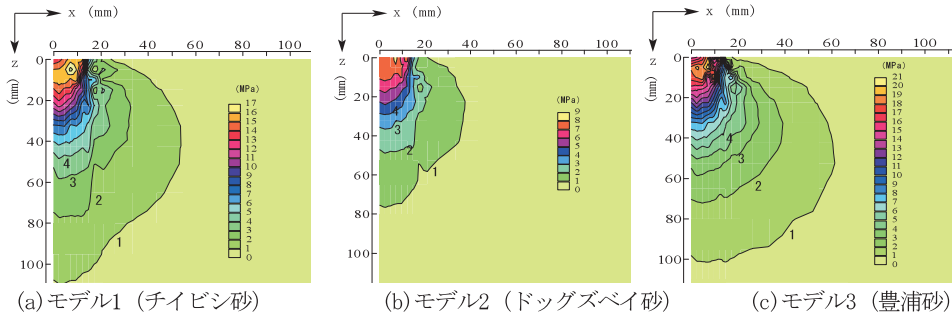


図9 地盤の応力状態 (軸差応力)

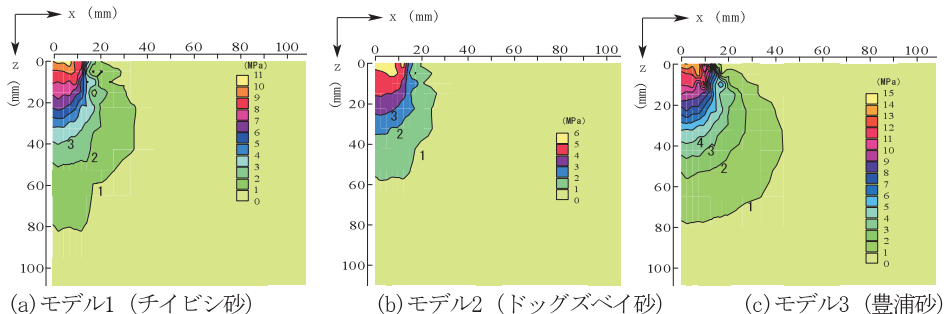


図10 地盤の応力状態 (平均主応力)

4. 結論

本研究では、地盤材料の支持力パラメーターに着目して弾塑性モデルを用いた有限要素法解析を行い支持力発現特性を検討した。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 地盤の力学特性を把握して解析に用いることにより、その結果には、載荷実験結果との対応性が見られた。そして有限要素法による解析は、支持力特性を把握するための有効な手段である。
- (2) 支持力が発現しにくい地盤では、その変形が、横方向よりも鉛直下方向へ広がる分布を示している。また、応力分布も同様に鉛直下方向へ広がりを示している。
- (3) 弾性係数とダイレイタンス角およびポアソン比の小さな地盤は支持力が発現しにくい地盤と

言える。また、所定の支持力を発現するためにはある程度の沈下量が必要である。そのため、設計、施工においては、支持力の評価に沈下量を考慮することが重要である。

文献

- 1) Keiji Kuwajima, Masayuki Hyodo, Adrian F.L. Hyde, Pile bearing capacity in crushable soils Proceedings of the International Symposium on Geomechanics and Geotechnics of Particulate Media (2006) pp369-374
- 2) 川本眺万・林正夫, 地盤工学における有限要素解析, 培風館, 1978.
- 3) 田中忠次・鶴飼恵三・河邑眞・阪上最一・大津宏康, 地盤の三次元弾塑性有限要素解析, 丸善, 1996.

(2008. 9. 17 受理)