

落球探査試験における締固め土の応力伝播特性について (その2:解析的検討)

変形係数 有限要素法 ブジネスク解

愛知工業大学 国際会員
 (株)アイコ 正会員
 鹿島建設(株) 正会員
 (株)セントラル技研 正会員

中村 吉男
 ○小島 淳一
 小澤 一喜・藤崎 勝利
 池尻 健

1. はじめに

路床、橋台、カルバートボックスの裏込め等のような盛土構造物の品質管理では、力学定数を直接的に求めることが必要とされ、平板載荷試験や現場 CBR 試験等の支持力試験を用いた管理を行うことが一般的である。この場合、試験の準備と測定に時間を要し測定頻度においても限界が生じることから、代替あるいは補間的な手段として敏速で機動性の高い試験の適用が検討されている。また、廃棄物の埋め立て地盤や災害廃棄物由来の分別土砂を用いた盛土の材料物性については、十分な知見が得られておらず、これらの盛土工事においては路床等の管理と同様な観点から強度や変形特性を検査する手法により管理を行う必要がある。そこで、本研究では、力学特性を直接管理する方法の一つとして開発された落球探査試験法の工学的意義を究明することを目的として、落球探査試験の特徴である衝撃荷重の応力伝播特性に着目して行われた室内実験結果¹⁾の適用性について、ブジネスク解および有限要素法による弾塑性解析により考察するものである。

2. 解析概要

2-1 解析方法 前報¹⁾では、室内試験において落球探査を行った場合の荷重の伝播状況を、土層規模(モールド径と層厚の関係)と変形係数の変化に着目して議論した。本報では、試験土層をモデル化し、有限要素法による2次弾塑性解析(解析コード:2D-σ(地層科学研究所))を行い、試験結果の適用性について考察した。解析は、落球探査試験の条件を加味し軸対称モデルとして扱い、土層は完全弾塑性体を仮定し、降伏基準に(1)式に示すモルクーロン則を、塑性ポテンシャルは(2)式に示すドラッガー・プラッガーの基準を適用した。土層の材料定数は三軸圧縮試験により求め、鋼製モールドは弾性体を仮定し鋼材の物性値を与えた。それぞれの物性値は表-1に示すとおりである。また、外力は、落球探査試験で計測した球体中心軸の鉛直変位量と球体形状から載荷面の変形量を算出し、この変形量を16~19のステップに分割して強制変位として与えた。

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (\sigma_1 - \sigma_3) 2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad (\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3) \quad (1)$$

$$-a \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - \kappa = 0 \quad (2)$$

ここに、 c :粘着力、 ϕ :内部摩擦角、 σ_1 :最大主応力、
 σ_2 :中間主応力、 σ_3 :最小主応力、 a :材料定数、
 κ :せん断降伏応力、 I_1, J_2 :応力不変量

2-2 解析モデルおよび解析ケース 前報で行った落球探査試験を参照とし、解析はモールド径φ500mm、土層厚さz:50、100、150、200mmの4ケースについて行った。図-1にz=200mmの解析モデルを示す。

表-1 物性値

項目	土層	鋼製モールド
φ _u (°)	32.4	-
c _u (MPa)	0.06	-
E (MPa)	30	205,000
ν	0.3	0.3

3. 解析結果及び考察

3.1 土層表面の変位 土層表面の鉛直変位について、z=200mmの解析値と実測値を比較して図-2に示す。図は横軸に球体載荷の中心軸からの距離をとり、縦軸は土層の鉛直変位をとり整理した。実測値による変形では、球体貫入部の端部において受動破壊によるヒービング現象が生じていることがわかるが、解析ではこの現象は反映されていない。これは、連続体として取り扱う有限要素法に見られる特性と考えられる。しかし、その他の部分ではほぼ一致していることがわかる。

3.2 鉛直応力の伝播

(1) ブジネスク解との比較 半無限弾性地盤の応力分布は、ブジネスクにより理論的に求められている。ブジネスクの解は集中荷重であるので、これをそれぞれの荷重領域で積分すれば均等な帯荷重、円荷重の鉛直応力解²⁾としてそれぞれ(3)(4)式のよ

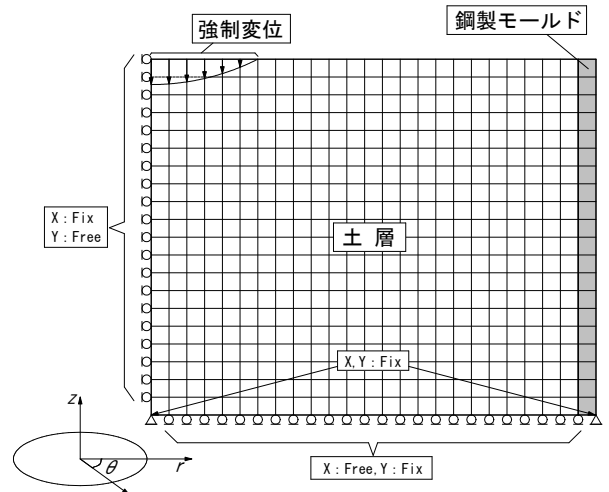


図-1 解析モデル (軸対称: φ500mm, z200mm)

うに求められる。

$$\frac{\sigma_v}{p_0} = \frac{1}{\pi} (\alpha + \sin \alpha) \quad \alpha = 2 \tan^{-1} \left(\frac{B}{2z} \right) \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_v}{p_0} = 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{B}{2z} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (4)$$

ここに、 B ：基礎幅、 σ_v ：荷重中心軸上の鉛直応力、 p_0 ：等分布荷重、 z ：載荷面からの鉛直深度

中心軸直下の応力分布について、ブジネスク解と FEM 解の比較を行うことで、解析の精度の検証および半無限の弾性地盤と弾塑性特性を持つ有限地盤での応力の伝播特性の相違について考察する。ブジネスク解の適用では、 $z=200\text{mm}$ の実験で得られた球体の貫入痕から中心軸の鉛直変位量を計測して球体形状から貫入幅を求め、これを載荷幅 $B \approx 90\text{mm}$ として(3)(4)式から中心軸の応力比 (σ_v/p_0) を算出した。また、解析解では、中心軸に沿う要素の鉛直応力 (σ_{zi}) を地表面に最も近い要素の鉛直応力 (σ_{z0}) で除して応力比 (σ_{zi}/σ_{z0}) を算出した。図-3 は縦軸に土層厚さを、横軸にブジネスク解と FEM 解による応力比をとって整理したものである。同図には、軸対称モデル解析と円荷重、平面ひずみ解析と帯荷重を併記し示している。図に示すように軸対称解析と円形荷重の比較では $z \approx 100\text{mm}$ 以深において両者の応力比はほぼ一致した結果となっているが、それ以浅の範囲においては、ブジネスク解による応力比は FEM 解による応力比に比べ大きな値が得られている。両者の相違は特段大きなものではないが、深部では弾性域に近い状態にあるが載荷面に近い表層部では塑性域が拡大していることや、載荷幅の換算方法や載荷荷重分布形状（等分布と球形分布）の違いなどが少なからず影響しているものと考えられる。この傾向は平面ひずみ解析と帯荷重の関係にも認められ、円形荷重に比べて応力比の差はさらに顕著となっている。また、円荷重（軸対称）では $z=200\text{mm}$ での応力比は約 0.03 であるのに対し、帯荷重での応力比は 0.16 程度となっており円荷重の分散は帯荷重の分散に比べかなり大きいことがわかる。基礎の設計においては応力比 0.1 を応力の伝播影響圏と考えていることを考慮すると、 $z=200\text{mm}$ での実験は半無限地盤での実験をシミュレートしているものと思われる。

(2) 土層厚さの影響 前節で示した整理方法で $z=50, 100, 150, 200\text{mm}$ の FEM 解より応力比 (σ_{zi}/σ_{z0}) を求め、図-4 に示した。応力の伝播は土層の厚さに影響を受け、載荷幅に比べて層厚が薄いと底面の拘束効果が生じて応力比は大きくなり変形係数などの物性値は高くなるものと考えられる。土層厚さが大きくなるにしたがって荷重分散は助長され、 $z=150\text{mm}$ と 200mm の応力比が近似してくるから、室内実験¹⁾において $z=150 \sim 200\text{mm}$ で E 値が収束することに対応し、 $z=200\text{mm}$ 程度の深さを確保することで半無限地盤の試験条件を満足するものと推察される。

4. まとめ

前報¹⁾での室内試験結果から得られた知見（半無限地盤を想定した原地盤での探査試験を室内試験で再現するためには、 $\phi=30\text{cm}$ 、 $z=20\text{cm}$ の土層を使用すればよい）は、ここで行った一連の解析結果から落球載荷による応力の伝播特性を反映されていることがわかった。また、応力の伝播の状況がブジネスク解と FEM 解で特段の差が認められないことから、落球探査試験で得られる変形係数は比較的弾性変形に近い領域での物性値を与えているものと思われる。これについては、材料の硬軟や球体の載荷幅等の影響を吟味し、実験と解析の両面から検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 中村吉男, 小澤一喜, 藤崎勝利, 小島淳一, 池尻健: 落球探査試験における締固め土の応力伝播特性について (その 1: 実験的検討)、第 53 回地盤工学研究発表会, 2018 (投稿中)
- 2) 日下部治: 土質力学, コロナ社, pp.133-134, 2004

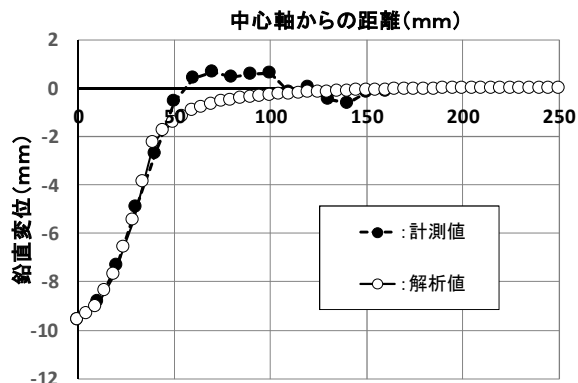


図-2 解析モデル（軸対称： $\phi 500\text{mm}$, $z 200\text{mm}$ ）

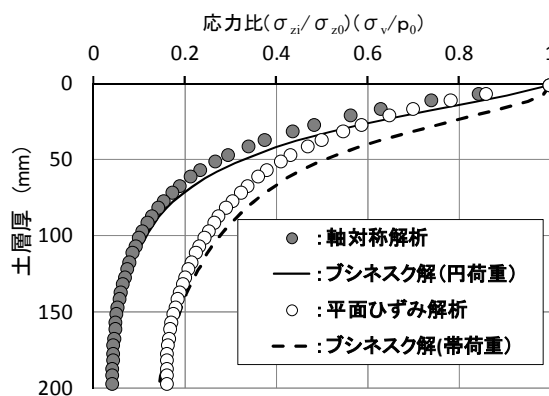


図-3 ブジネスク解と FEM 解の比較

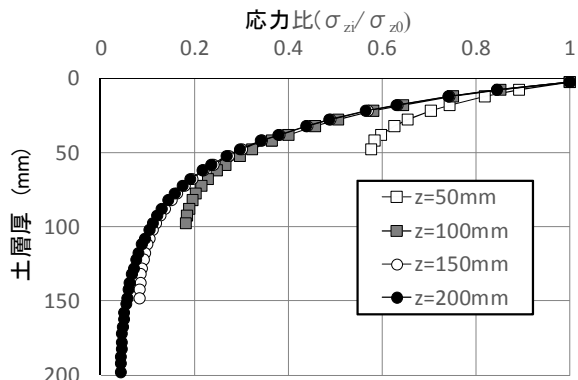


図-4 土層厚による応力の伝播