

砂質地盤の複合荷重に対する V-H-M 荷重曲面の検討

環境防災研究室 安藤 康介
指導教員 大塚 悟 福元 豊

1. 研究背景・目的

砂質地盤上基礎の鉛直荷重に対する支持力の検討は Meyerhof(1953) による実験的研究に始まり、数値解析および模型試験により多くの研究が実施されている。その研究成果は鉛直(V)および水平荷重(H)に対する限界荷重曲面の定式化に結実して、基礎の設計式に適用されている。道路橋示方書などの設計式は式(1)のように先進的に基礎の寸法効果を表す修正係数が導入されている。しかし、寸法効果を考慮した基礎の限界荷重曲面の検討は十分に実施されていないという問題がある。

$$q = \frac{1}{2} \gamma B \eta N_{\gamma}, \eta = \left(\frac{B}{B_0}\right)^{-\frac{1}{3}}, B_0 = 1m \quad (1)$$

本研究では、地盤強度に拘束圧に対する非線形な強度式を導入した剛塑性有限要素法(RPFEM)を用いると、寸法効果を効果的に表現できる研究に基づいて、示方書の支持力式と RPFEM による複合荷重に対する限界荷重曲面の検討を実施する。検討結果に基づき、新たな極限支持力式および限界荷重曲面をモデル化した式を提案する。

2. 非線形強度式を用いた剛塑性有限要素法

2.1. 解析条件

数値解析で用いる非線形降伏関数を式(2)に示す。

$$f(\sigma) = aI_1 + (J_2)^n = b \quad (2)$$

a および b は土材料の粘着力、拘束圧に対する摩擦度に関わるパラメータ、n は降伏関数の第1応力不変量 I_1 に対するせん断強度の非線形性を表すパラメータである。本研究では砂質地盤の支持力式を対象に傾斜荷重に対する限界荷重曲面を求める目的で、豊浦砂の平均せん断強度特性を用いた検討を行う。

図1は砂質地盤の締固め度に応じて初期せん断抵抗角を試験結果の外挿により求め、基準化したせん断抵抗角の拘束圧依存性を表す。図で正規化したせん断抵抗角が I_1 の増大とともに減少するのは(割線)せん断抵抗角の応力依存特性を示している。図中の黒線は応力依存特性の平均特性を示すが、概ね締固め度 $Dr=60\%$ に相当する。Iqbal ら(2023)は平均特性を用いると、基礎幅による支持力の寸法効果は道路橋などの示方書とよく一致することを報告している。地盤定数の設定では、図1に示す Tatsuoka ら(1986)による試験結果に基づいて、表1のように設定した。

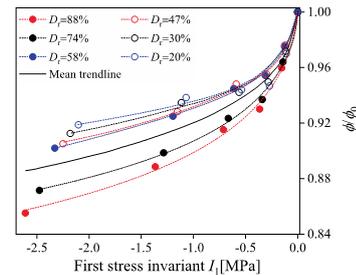


図1 豊浦砂のせん断抵抗角の拘束圧非線形性

表1 解析に用いた地盤定数
(豊浦砂, $Dr=60\%$ に相当)

| ϕ (°) | a | b | n |
|------------|-------|---|-------|
| 30 | 0.175 | 1 | 0.526 |
| 35 | 0.216 | | |
| 40 | 0.257 | | |

2.2. 模型試験と剛塑性有限要素法の比較

基礎の寸法効果の原因は ϕ の応力依存性、基礎幅の増加によって地盤の相対的な圧縮性が増すことによる地盤の進行性破壊など土の力学特性が応力状態に依存することに起因するものとされている。砂質地盤の支持力に関する主な解析的研究は、塑性論に基づくが、進行性破壊の現象を厳密に入れることは極め

て困難である。しかし、 ϕ の応力依存性や異方性については剛塑性論に基づく方法に取り入れることは可能である。

この関係に則り、実際に遠心模型試験の結果と剛塑性有限要素解析の結果を比較検討した事例から ϕ の応力依存性による寸法効果を確認する。図 2 に砂質地盤上基礎の中心鉛直荷重の支持力に関する遠心模型試験と剛塑性有限要素解析の比較を示す。地盤の締固め度に応じて地盤定数を設定すると、数値解析による支持力は 10% 以内の誤差で試験結果を適正に評価することが分かる。遠心模型試験は支持力に及ぼす基礎の寸法効果を示すことから、拘束圧に対するせん断強度の非線形モデルを用いた剛塑性解析は支持力評価への適用性が確認された。

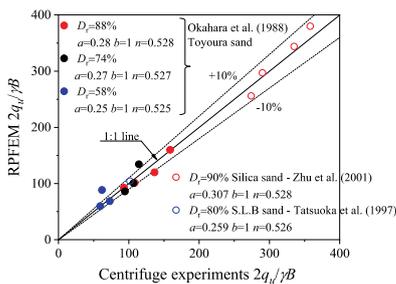


図 2 遠心模型試験と剛塑性有限要素解析の比較 (中心鉛直荷重) ³⁾

3. 剛塑性有限要素法と示方書による比較

3.1. 中心傾斜荷重の極限支持力の比較

図 3 に示方書の計算結果による極限支持力と同一条件で RPFEM から求めた極限支持力の比較結果を示す。示方書による $\phi=30^\circ$ と $\phi=35^\circ$ の極限支持力は RPFEM の解析結果と 1:1 ライン上に位置しており、 $\phi=40^\circ$ の極限支持力は、やや過小に支持力を評価しているが、10% 程度の範囲で一致した。比較結果から、示方書の設計式は、極限支持力の計算に概ね適していると考えられる。

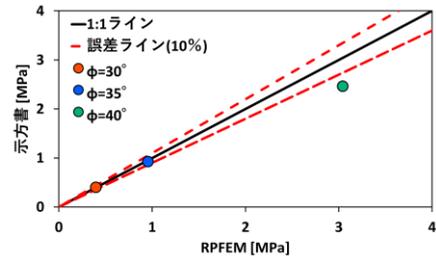


図 3 極限支持力の比較

3.2. 複合荷重の支持力の比較

図 4 に示方書式で求めた偏心鉛直荷重の支持力と中心傾斜荷重の支持力、同一条件で RPFEM から求めた支持力の比較結果を示す。偏心鉛直荷重の比較では、 $\phi=30^\circ$ と $\phi=35^\circ$ では概ね一致したが、 $\phi=40^\circ$ では過小な支持力が求められており、誤差が顕著に表れることが分かった。中心傾斜荷重は、 $\phi=30^\circ$ の $\alpha=5^\circ$ のときを除いて誤差が 10% 以上生じることが分かった。比較結果から、示方書式では複合荷重に対して過小な支持力を示しており、精度を欠いていると考えられる。

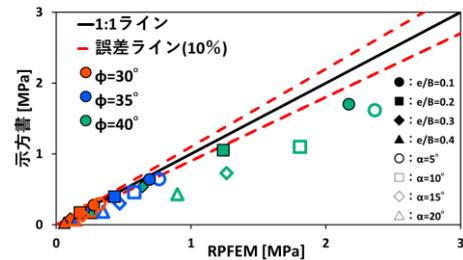


図 4 複合荷重の支持力の比較

3.3 限界荷重曲面 (V-M 曲面, V-H 曲面) の比較

本節では、複合荷重の支持力を極限支持力 V_{ult} で正規化することで形成される限界荷重曲面を用いて、示方書の計算結果と RPFEM の解析結果の比較を行う。

図 5 に示方書と RPFEM における偏心鉛直荷重の限界荷重曲面 (V-M 曲面)、図 6 に示方書と RPFEM における偏心鉛直荷重の限界荷重曲面 (V-H 曲面) をそれぞれ比較した結果を示す。偏心鉛直荷重は既往研究より、正規化曲げモーメント M/BV_{ult} と正規化鉛直荷重 V/V_{ult} による限界荷重曲面は、どの内部摩擦

角 ϕ に対しても同様であることが確認されている。図5より、示方書によるV-M曲面は一樣の曲面で表されており、各内部摩擦角の非線形強度モデルの平均値と10%程度の差異が見られるが、形状はほぼ一致することが分かった。図6より、示方書によるV-H曲面は各内部摩擦角による非線形強度モデルと比較した結果、正規化水平荷重 H/V_{ult} のピークは示方書の計算結果が非線形強度モデルを大きく下回っており、過小な支持力を求めていることが分かった。しかし、内部摩擦角ごとの形状は概ね一致することが分かった。

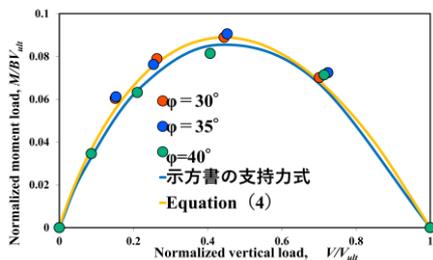


図5 偏心鉛直荷重 (V-M 曲面) の比較

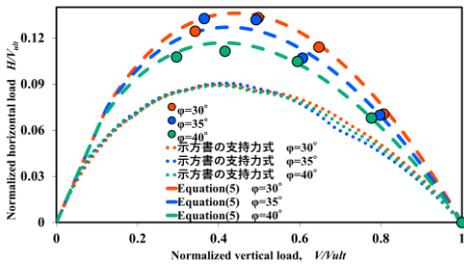


図6 中心傾斜荷重 (V-H 曲面) の比較

4. 新たな極限支持力式及び線形強度式の提案

4.1. 中心鉛直荷重の支持力

既往研究では、単位体積重量 γ と基礎幅 B が土の拘束応力を表現することから、土のせん断強度を γB により表現する方法が提案されている。一方、式 (1) の寸法効果を表す係数は γ の影響を考慮されておらず、寸法効果の応力依存性に及ぼす重量の影響が反映されていない。本研究では、地盤定数のパラメトリックな大規模模型試験解析に基づいて γB と p_a の関係を適応した極限支持力式 (3) を提案する。

$$q = \frac{1}{2} \gamma B \eta_{\gamma} N_{\gamma}, \eta_{\gamma} = 0.65 \left(\frac{\gamma B}{p_a} \right)^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

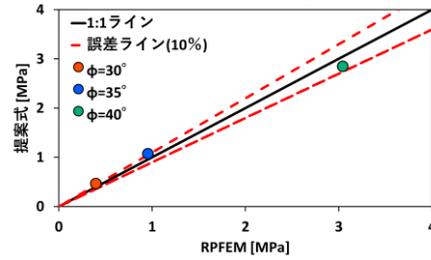


図7 提案式による極限支持力の比較

4.2. 複合荷重に対する限界荷重曲面のモデル化式

非線形解析モデルの解析結果から、偏心鉛直荷重の限界荷重曲面は式 (4) を提案し、モデル化した曲面を図5に示す。中心傾斜荷重の限界荷重曲面は式 (5) を提案し、モデル化した曲面を図6に示す。

$$\frac{V}{V_{ult}} = \left(1 - 1.6 \frac{e}{B} \right)^2, \quad \frac{M}{BV_{ult}} = 0.6 \frac{V}{V_{ult}} \left(1 - \left(\frac{V}{V_{ult}} \right)^{0.5} \right) \quad (4)$$

$$\frac{V}{V_{ult}} = \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi} \right)^{(2 \tan \phi + 0.3)^2}$$

$$\frac{H}{V_{ult}} = \frac{\tan \phi}{0.6} \frac{V}{V_{ult}} \left[1 - \left(\frac{V}{V_{ult}} \right)^{1/(2 \tan \phi + 0.3)^2} \right] \quad (5)$$

5. 結論・課題

本研究の結論及び課題を箇条書きにする。

(1) 中心鉛直荷重に対する支持力について、遠心模型試験との比較より、せん断強度の拘束圧依存性を用いた剛塑性有限要素解析は10%以内の精度を有することを明らかにした。道路橋示方書の支持力式の不備について考察し、新しい支持力式を提案した。

(2) 偏心鉛直荷重に対する支持力は道路橋示方書と数値解析の両方で異なるが、正規化した鉛直荷重 V/V_{ult} とモーメント M/BV_{ult} から成る限界荷重曲面は10%程度の差異があるが、よく一致することを明らかにした。したがって、正規化空間におけるV-M荷重曲面は比較的精度が高いと推測される。

(3) 中心傾斜荷重に対する支持力は、正規化した鉛直荷重 V/V_{ult} と水平荷重 H/V_{ult} から成る限界荷重曲面は形状が概ね一致するものの、50%程度の差異が生じた。傾斜荷重の実験は技術的に難しく、定量的な比較は今後の課題である。

(4) 偏心および傾斜荷重に対する限界荷重曲面を提案したが、本研究の課題は複合荷重のような複雑な荷重条件に関する遠心実験は高度な技術力が必要なために、検証事例のないことが挙げられる。将来的に遠心実験が実施されると、本研究の提案式の検証可能になる。

(参考文献)

1) Quang P., Ohtsuka, S., Isobe, K. and Fukumoto, Y., Limit load space of rigid footing under eccentrically inclined load, Soils Found, 60(4), 811-824, 2020.

2) Iqbal, T., Ohtsuka, S., Isobe, K., Fukumoto, Y. and Kaneda, K., Modified ultimate bearing capacity formula of strip footing on sandy soils considering strength non-linearity depending on stress level, Soils Found, 63(3), 101325, 2023.

3) Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T., and Fukushima, S., Effects of Some Factors on Strength and Deformation Characteristics of Sand at Low Pressures, Soils Found, 26 (1), 65-84, 1986.