

傾斜荷重に対する基礎の支持力式に関する研究

環境防災研究室
指導教員

HUYNH ANH DUNG
大塚 悟

1. はじめに

地盤上における基礎は上部構造物からの重力による鉛直荷重のみならず、風力などの水平荷重から生ずるモーメントが原因で傾斜荷重を受ける可能性が高いと考えられる。本報告では鉛直・傾斜荷重を受けた直接基礎の中心に関する研究を実施した。建築学会基礎構造設計指針^[1]では直接基礎の支持力として、水平力・鉛直力による鉛直・傾斜荷重による低減と基礎の寸法効果による低減を考慮している。しかし、支持力式は半実験式とも云えるものであり、その精度は明確ではない。Nguyen et al. (2016) は豊浦砂のせん断特性の拘束圧依存性 (Tatsuoka et al., 1987)^[2] を支持力解析に取り入れると、AIJ の支持力式と同様の極限支持力が得られることを明らかにしたが、地盤のせん断強度がせん断抵抗角のほか粘着力があると、その効果は非線形的に顕在化するために、粘着力のある場合に支持力式の適用性は不明である。本研究は Nguyen et al. の提案する高次降伏関数に基づく剛塑性構成式を用いて、基礎幅と地盤の材質による極限支持力への影響について検討するほか、線形強度を用いて傾斜荷重に対する支持力式の粘着力項について定式化を試みた。

2. 解析結果と考察

2.1 基礎の寸法効果を考慮した鉛直支持力式の粘着力項の検討

強度の非線形性を安定性評価に取り入れると、低圧および高圧の拘束圧において線形強度との差異が大きくなり、安定性評価(極限支持力)に大きな影響が生じる。本報告では日本建築学会(AIJ)の支持力式との比較を目的に、豊浦砂の拘束圧によるせん断抵抗角の低減特性を用いて、初期せん断抵抗角が30度、40度となる仮想地盤を作成した。ここでは粘着力を変化して、比較対象となる仮想地盤のせん断強度特性を幅広く変化させる試行解析を実施した。図-1 に水平地盤モデルを示す。図-2 は基礎幅を1, 5, 10, 30, 50m と変化させた際の支持力の変化を示している。Drucker-Prager 基準に基づく剛塑性構成式(以下、DP と表記)と非線形降伏関数に基づく剛塑性構成式を用いた解析結果(以下、H0 と表記)並びに Meyerhof と AIJ の支持力式に基づく結果を比較している。Meyerhof と DP の極限支持力はほぼ一致する結果が得られたが、AIJ による極限支持力とは大きく異なる結果が得られた。一方、拘束圧依存性による影響を評価する H0 による極限支持力^{*}は粘着力の大きさによらず、AIJ で得られた極限支持力に比較的良く一致する結果が得られた。以上のことから、AIJ により支持力式は強度の拘束圧による非線形性の影響をよく表現することが分かる。ここでは、粘着力の大きさによる影響を調べたが、多少のばらつきはあるが、ほぼ極限支持力を適正に表現することが分かる。

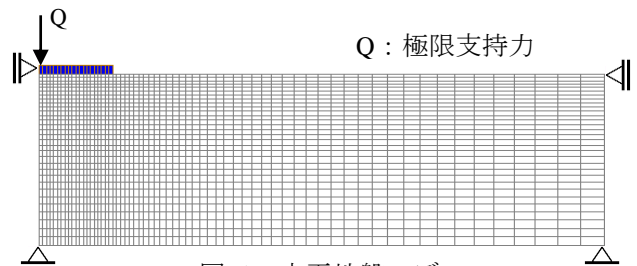


図-1 水平地盤モデル

* 新支持力式の提案 : AIJ の支持力式において自重項における寸法効果を表す修正係数に加えて、粘着力についても修正係数を提案した。新支持力式(1)の妥当性を確認するために、図-2 を見ると、新しい支持力式の結果と H0 により結果を比較すると良く一致することがわかる。

$$q = \left(\frac{B}{B_0} \right)^{-0.05} c N_c + \frac{\gamma B}{2} \left(\frac{B}{B_0} \right)^{-1/3} N_\gamma \quad (1) \quad \text{【寸法効果を考慮した支持力式の提案】}$$

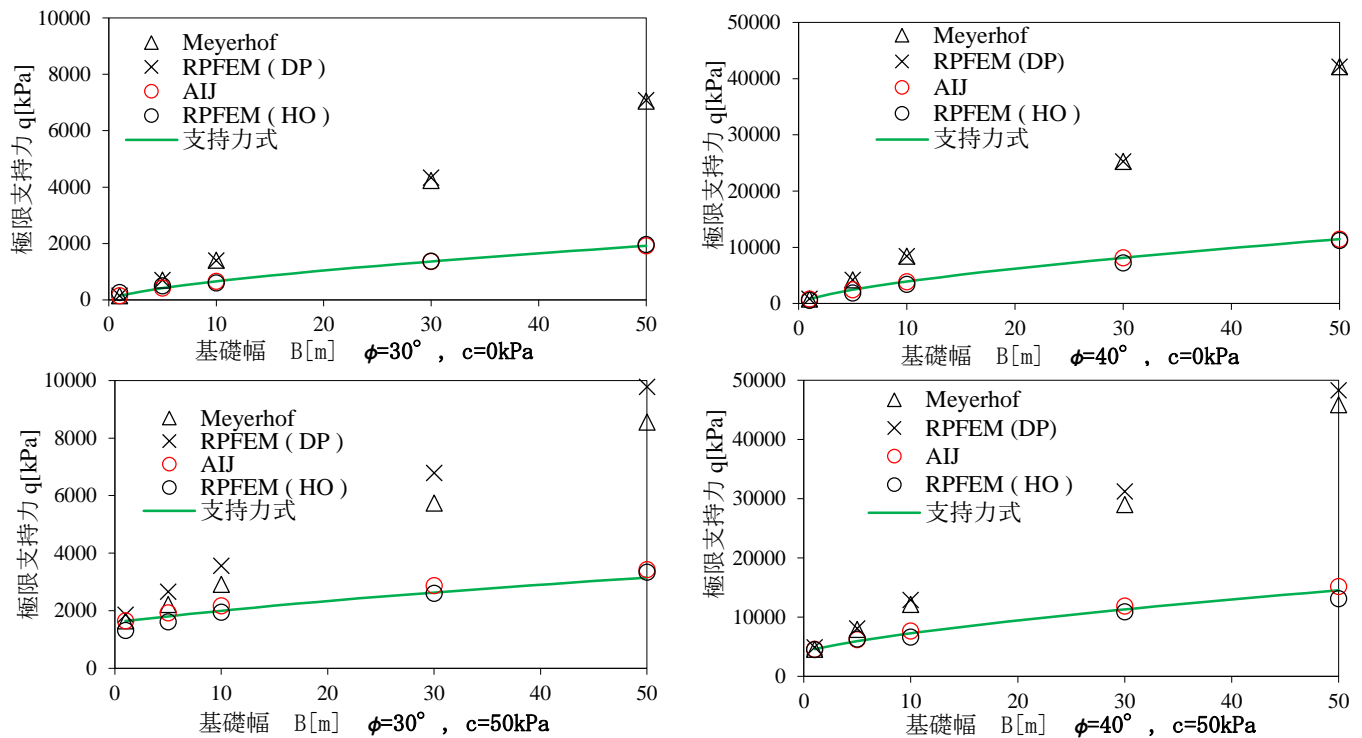


図-2 極限支持力と基礎幅の

2.2 傾斜荷重に対する支持力式に及ぼす粘着力の影響の検討

剛塑性有限要素法で基礎の中心に傾斜荷重を想定した極限支持力解析を行う。図-3 に水平地盤モデルを示す。解析で拘束圧の影響を考慮しない Drucker-Prager 型の降伏関数での結果を「線形」とする。傾斜荷重の場合、結果は鉛直支持力 (V) と水平支持力 (H) の空間における支持力曲面として整理した。比 H/V は比較的に小さな範囲で設定される。この報告ではさらに詳細な議論は行われない。設定した地盤定数を表-1 に示す。

表-1 解析条件

基礎幅 (m)	1	10	30
せん断抵抗角(度)	30	35	40
粘着力(kPa)	10	50	100

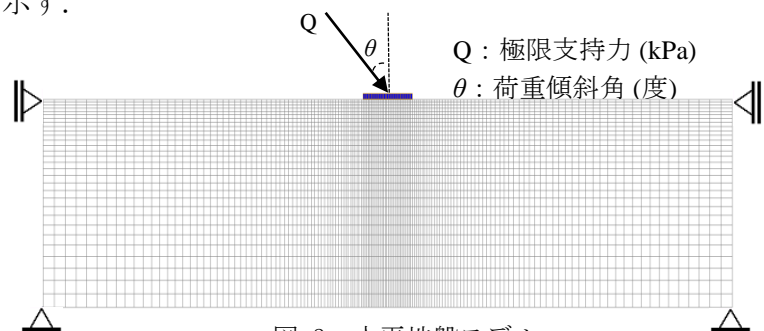


図-3 水平地盤モデル

2.2.1 基礎幅による極限支持力への影響

まず、基礎幅の影響について検討する。図-4a には地盤の粘着力 $c=50\text{kPa}$ とせん断抵抗角 $\phi=30$ 度を固定して、基礎幅を 1, 10, 30m と変化させた際の極限支持力面を示している。図-4a には、例えば、 $B=1\text{m}$ の場合、鉛直荷重が 0MPa から 28MPa まで増加すると水平荷重も増加するが、 28MPa から V_{max} (最大の鉛直荷重) まで水平荷重が減少することが分かる。基礎幅が大きいほど極限支持力面が小さくなる事が分かる。

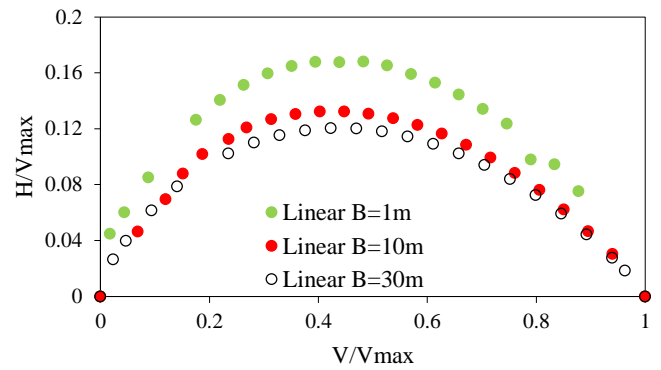
2.2.2 せん断抵抗角による極限支持力への影響

次に、せん断抵抗角の影響について検討する。図-4bには基礎幅 $B=10\text{m}$ と地盤の粘着力 $c=100\text{kPa}$ を固定して、せん断抵抗角を 30, 35, 40 度と変化させた際の極限支持力面を示している。図-4bには、例えば、 $\phi=40$ 度の場合、鉛直荷重が 0MPa から 270MPa まで増加すると水平荷重も増加するが、 270MPa から V_{max} まで水平荷重が減少することが分かる。せん断抵抗角が大きいほど極限支持力面が小さくなる事が分かる。

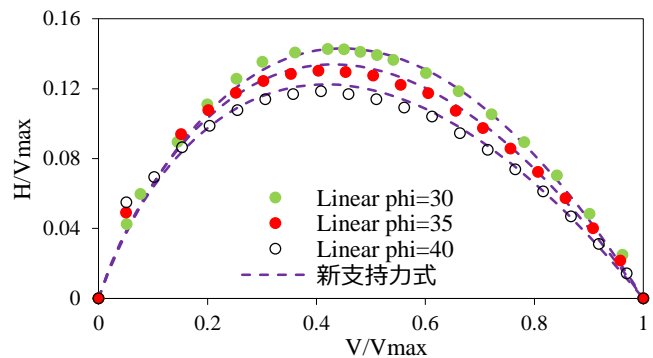
2.2.3 粘着力による極限支持力への影響

最後に、粘着力の影響について検討する。図-4cには基礎幅 $B=10\text{m}$ とせん断抵抗角 30 度を固定して、粘着力を 10, 50, 100kPa と変化させた際の極限支持力面を示している。図-4cには、例えば、 $c=50\text{kPa}$ の場合、鉛直荷重が 0MPa から 45MPa まで増加すると水平荷重も増加するが、 45MPa から V_{max} まで水平荷重が減少することが分かる。粘着力が大きいほど極限支持力面が大きくなる事が分かる。

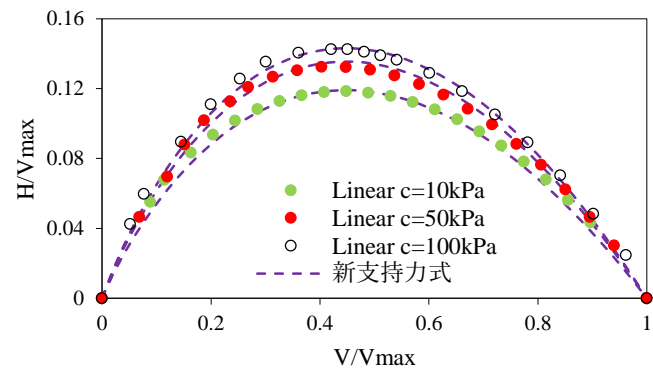
※ 新支持力式の提案：解析結果を計算して、中間土地盤に対して水平荷重と鉛直荷重の関係を示すように新支持力式(2)を提案した。提案した式は基礎幅 $B=10\text{m}$ の条件で誘導している。誘導に当たり、砂質地盤を対象とした Pham et al. (2019)^[3]の研究を基にして粘着力成分を有する中間土地盤で新しい補正係数 $(c^{0.07} - 0.27 \times \tan \phi)$ を提案した。新支持力式(2)の妥当性を確認するために、図-4を見ると、新しい支持力式の結果は解析結果と比較的良く一致することが分かる。



a- 基礎幅の影響



b- せん断抵抗角の影響 (B=10m)



c- 粘着力の影響 (B=10m)

図-4 水平荷重と鉛直荷重の関係

$$H = \left[\left(\frac{\tan \phi}{0.76} \right) V \left(1 - \left(\frac{V}{V_{\text{max}}} \right)^{\frac{1}{(1.7 \tan \phi + 0.4)^2}} \right) \right] (c^{0.07} - 0.27 \times \tan \phi) \quad (2)$$

3. 結論

本研究では得られた結論を以下に示す。

- 鉛直支持力に対して Drucker-Prager 型の降伏関数でと高次降伏関数に基づく剛塑性構成式を用いた極限支持力解析を実施した。寸法効果を考慮した AIJ による極限支持力と本解析手法で得られた極限支持力が一致することから、解析手法の適用性は確認されている。剛塑性支持力解析の結果に基づいて、基礎の寸法効果を考慮した中間土に対する支持力式を提案した。

・傾斜荷重に対する支持力に対して線形強度を用いて地盤の材質による極限支持力への影響を検討した。基礎幅とせん断抵抗角が大きいほど極限支持力面が小さくなることが分かるが、地盤の粘着力が大きいほど極限支持力面が大きくなる。線形強度（DP）を用いるために基礎の寸法効果を表現できないが、土木分野で用いられる寸法の基礎に対して中間土に適用できる支持力式を提案した。

参考文献

- [1] 建築学会基礎構造設計指針， 建築学会， pp. 105-111. 2001.
- [2] Tatsuoka, F. Sakamoto, M. Kawamura, T. and Fukushima, S. :Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures, Soil and Foundations, vol.26, No.1, pp.65-84, 1986
- [3] Pham, N. Quang, Ohtsuka, S. , Isobe, K and Fukumoto, Y. Limit load space of rigid footing under eccentrically inclined load, Soils and Foundation, 2019