

異方性砂地盤支持力の有限要素解析

北海道大学工学部 正会員 三浦 均也

正会員 土岐 祥介

Univ. of B. C.

W.D.Liam Finn

1. まえがき Oda and Koishikawa¹⁾ および木村ら²⁾ は異方構造を有する砂のせん断変形・強度特性を要素試験によって調べるとともに、異方性地盤の支持力特性を模型実験によって明かにし、土質工学の諸問題における地盤の構造異方性が重要であることを示唆した。Oda and Koishikawa¹⁾ と成田ら³⁾ はそれぞれ剛塑性解析法とすべり面分割法により地盤の強度異方性を考慮して極限支持力を求めるのに成功したが、極限状態以前の荷重-沈下挙動を検討するには至っていない。本研究では、有限要素法により地表面帯状基礎の荷重-沈下関係を解析している。適用した構成モデルは、砂要素の変形・強度特性に及ぼす初期構造の異方性や拘束圧の影響を評価できる砂の三次元構成モデル（多方向すべりモデル）^{4, 5, 6, 7)} である。本報告では、提案している解析手法を適用することによって、基礎の荷重-沈下挙動と地盤の堆積構造との関係を適切に評価できることが示されている。また、荷重-沈下挙動に及ぼす基礎の寸法効果についても説明できることが示されている。

2. 有限要素法解析と構成モデル 水平地盤とその表面の無限帯状基礎を、平面ひずみ条件の下で図1が示すようにモデル化しており、基礎が沈下する時には回転を許していない。Oda and Koishikawa¹⁾ の模型実験に合わせて、モデル地盤の力学的性質は落下・堆積させた豊浦標準砂(Dr=90%)の性質に等しいとして、構成モデルのパラメータを決定した^{5, 6)}。なお、模型地盤の初期応力条件は一律に $K_0=0.5$ とした。

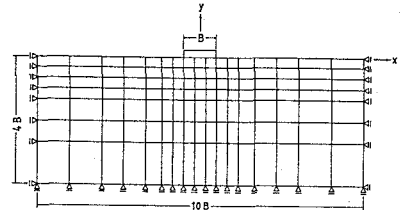


Fig. 1

3. 荷重-沈下挙動の解析結果と考察 3.1. 内部摩擦角 ϕ との関係

最初に、有限要素解析手法の妥当性を検討するために、地盤材料の力学特性が理想的に等方的であり、拘束圧に依存しないと仮定して解析を行った。モデルパラメータを変化させて種々の内部摩擦角 ϕ について、基礎底面が荒い場合と滑らかな場合について計算を行い、得られた極限支持力係数 $N\gamma$ と ϕ との関係を図2に示している。図中にプロットしたすべり面法によるTerzaghi⁸⁾の解と剛塑性論によるPope⁹⁾の解との比較から、有限要素法解析は他の解析手法に近い解を与え、また、基礎底面の粗さの影響を適切に評価できるようである。ただし、 $\tan \phi > 0.8$ 範囲では、他の解析解が示すような $N\gamma$ の急激な増加傾向を示していない¹⁰⁾。

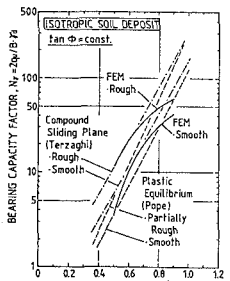


Fig. 2

3.2. 地盤堆積構造の影響 Oda and Koishikawa¹⁾ と木村ら²⁾ は砂試料を落下・堆積させて異方的な構造が発達している模型砂地盤を作成し、支持力実験を行なった。その結果、荷重-沈下曲線は地盤の堆積構造の著しい影響を受けることを示した。有限要素法によって計算された荷重-沈下曲線と極限支持力係数 $N\gamma$ は図3, 4に示す通りであり、堆積面方向 θ の相違による荷重-沈下挙動の変化を読みとることができる。まず、図4において Oda and Koishikawa¹⁾ による実験値と成田ら³⁾ がすべり面分割法によって求めた支持力に対して $N\gamma$ - θ 関係を定性的に比較してみる。有限要素法とすべり面法により解析的に得られた $N\gamma$ - θ 関係の傾向は一致しており、 $N\gamma$ は $\theta=0^\circ$ で最大、 $\theta=60^\circ$ 付近で最小値となっている。また、実測値のバラツキは大きい、類似した傾向を示している。図5(a)~(c)には堆積面方向 θ が異なる3種類の模型地盤の変形状を示している。

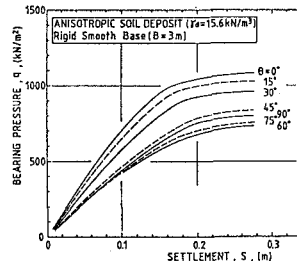


Fig. 3

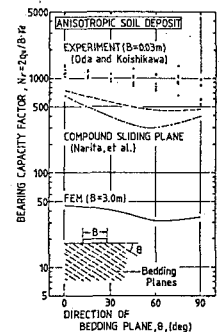


Fig. 4

まず、 $\theta=90^\circ$ の場合には $\theta=0^\circ$ の場合に比べて地盤の変形が比較的浅い範囲で生じていることが分かり、木村ら²⁾ が模型実験で示した傾向と一致している。また、 $\theta=45^\circ$ の場合には堆積面と平行な帯状の領域で変形が卓越していることが分かる。堆積面ではすべりに対する抵抗が他の傾いた面に比べて最も小さいという性質に着目すると、堆積異方構造を有する砂の変形・強度特性を統一的に説明できることから¹¹⁾、堆積面に沿って著しいすべり変形が発生すると言え、 $\theta=60^\circ$ 付近では最も効率よく堆積面上ですべりが生じるので、極限支持力が最小になったと説明できる。本研究で用いた多方向すべりモデルはこのような異方性砂の変形機構を直接に取り入れている^{4,6)}。

さて、有限要素法によって求めた $N\gamma$ は Oda and Koishikawa¹⁾ による実験値よりも20倍以上も小さいが、その原因は次のように説明できる。まず、実験と解析では基礎の幅が100 倍異なることによる寸法効果が挙げられる。これは次節で詳しく述べるように、一般的に地盤内の応力レベルの相違によって基礎幅が小さいほど $N\gamma$ は大きいとの報告がある(例えば、谷ら¹²⁾)。また、実験上の原因として模型地盤槽の側壁摩擦の影響が考えられる¹³⁾。谷¹⁴⁾ は側面摩擦の影響について検討し、摩擦の影響を十分に低減した模型実験を実施した。その結果、本研究と類似した力学特性の模型地盤($\theta=0^\circ$) の底面の荒い基礎($B=3.0\text{m}$) に対して $N\gamma=140$ と報告している¹²⁾。したがって、前節で述べたように基礎底面の粗滑を考慮すると、有限要素法による $N\gamma=45$ ($\theta=0^\circ$) は Oda and Koishikawa¹⁾ による実験値と較べて極端に小さいが、妥当な値であると判断できよう。

3.3. 寸法効果 一般に基礎幅が大きいほど支持力を正規化して得られる極限支持力係数 $N\gamma$ は減少するという基礎の寸法効果が認められており、その主要因は基礎幅が大きくなると基礎周辺の地盤内における応力レベル(拘束圧)が増大することと考えられている。多方向モデルは砂の変形挙動に及ぼす拘束圧の影響を取り入れており^{5,6)}、模型地盤を構成している砂の種々の拘束圧の下におけるせん断変形挙動を図6に示すようにモデル化している。そこで、異なる幅を有する基礎に対して荷重-沈下挙動を計算した結果、図7に示すように、基礎幅が小さいほど地盤は脆性的に応答し $N\gamma$ は増大する傾向が得られた。谷ら¹²⁾ は遠心力载荷装置を用いた模型支持力試験により、同様な傾向を報告しているが、 $B=0.03 \sim 3.0\text{m}$ の変化に対して $N\gamma$ は応力レベルの増大により、2.5倍ほど増加すると言有殿要素法よりも大きな $N\gamma$ の変化を報告している。

図6は、異なる幅を有する基礎に対して荷重-沈下挙動を計算した結果、図7に示すように、基礎幅が小さいほど地盤は脆性的に応答し $N\gamma$ は増大する傾向が得られた。谷ら¹²⁾ は遠心力载荷装置を用いた模型支持力試験により、同様な傾向を報告しているが、 $B=0.03 \sim 3.0\text{m}$ の変化に対して $N\gamma$ は応力レベルの増大により、2.5倍ほど増加すると言有殿要素法よりも大きな $N\gamma$ の変化を報告している。

4. あとがき 多方向すべりモデルを組み込んだ有限要素法解析により異方性地盤の支持力解析を行った結果、荷重-沈下挙動に及ぼす 1) 地盤の堆積構造の影響、2) 応力レベルの相違に起因する基礎の寸法効果、等を有限要素法により適切に評価できることが明らかにされた。

小田匡寛先生(埼玉大学)には本研究を始めるに当たって貴重な助言をいただいた。また、橋場克泰君(北海道大学4年)には図表作成等に当たって協力していただいた。ここに記して感謝の意を表します。

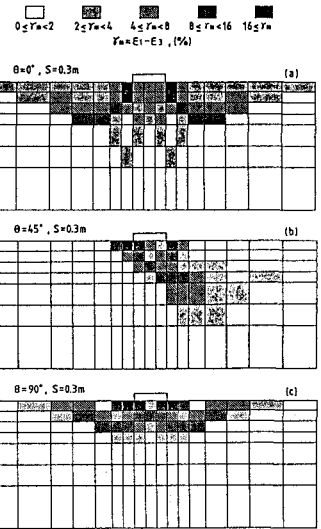


Fig. 5 (a)-(c)

Figure 5 consists of three diagrams (a), (b), and (c) showing the distribution of shear stress ratio ($\sin \alpha$) and volumetric strain (ϵ_v) for different pile angles θ . (a) $\theta = 0^\circ$, $S = 0.3\text{m}$. (b) $\theta = 45^\circ$, $S = 0.3\text{m}$. (c) $\theta = 90^\circ$, $S = 0.3\text{m}$. A legend at the top indicates shear stress ratio ranges: $0 \leq \gamma \leq 2$, $2 \leq \gamma \leq 4$, $4 \leq \gamma \leq 8$, $8 \leq \gamma \leq 16$, $16 \leq \gamma$. The diagrams show a grid of cells with varying shades of gray representing these stress ratios.

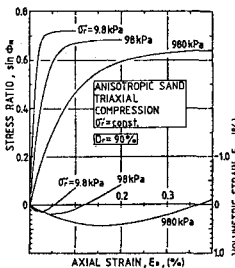


Fig. 6

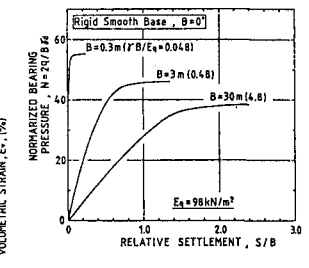


Fig. 7

参考文献 1) Oda, M. and Koishikawa, I.: J. S. & F., Vol. 19 (1979), No. 3, pp. 15-28. 2) 木村猛, 齊藤邦夫, 日下部治, 司代明: 土木学会論文報告集, No. 319 (1982), pp. 105-113. 3) 成田国朝, 奥村哲夫, 山口柏樹: 第22回土質工学研究発表会 (1977), pp. 1121-1124. 4) 三浦均也, 土岐祥介, Finn, W. D. L.: "砂の...", 北大工学部研究報告, 第140号 (1988), 掲載予定. 5) 三浦均也, 土岐祥介, Finn, W. D. L.: "軸対称...", 北大工学部研究報告, 第140号 (1988), 掲載予定. 6) 三浦均也, 土岐祥介, Finn, W. D. L.: 橋場克泰: 第23回土質工学研究発表会 (1988), 掲載予定. 7) 三浦均也, 鳥屋進, 土岐祥介: "...モデル化", 第23回土質工学研究発表会 (1988), 掲載予定. 8) Terzaghi, K.: "Theoretical Soil Mechanics (1943)", John Wiley and Son. 9) Pope, R. G.: Geotechnique, Vol. 25 (1975), No. 3, pp. 593-597. 10) 関口宏二: 第22回土質工学研究発表会 (1977), pp. 1117-1120. 11) 三浦均也, 鳥屋進, 土岐祥介: "...特性", 第23回土質工学研究発表会 (1988), 掲載予定. 12) 谷和夫, 龍岡文夫, 森浩樹: 第22回土質工学研究発表会 (1977), pp. 1091-1094. 13) 小田匡寛: 私信 (1987). 14) 谷和夫 (1987): 東京大学学位論文.