

破碎性地盤の支持力評価に関する基礎的研究

九州大学大学院 学○狩屋 敏行

九州大学大学院 フェロー 落合 英俊 正 安福 規之

九州大学大学院 正 小林 泰三 正 中島 通夫

1. はじめに

基礎の支持力理論は、地盤工学の大きなテーマとして古い歴史を持ち、これまでに剛塑性理論や空洞膨張理論、弾塑性理論など種々の解析手法が開発されてきた。近年、実験観察などの研究成果を踏まえ、地盤の圧縮性を考慮する必要性が問われるようになり、特に古典的な剛塑性理論などでは適用限界のあることが指摘されている。しかしながら、これらの理論は、理論体系が比較的明快であることや計算に入力するパラメータが少なくすむため、実用面では現在でも多用されている。そこで、本研究では、地盤の圧縮性を生む原因のひとつである粒子破碎に注目し、剛塑性理論を用いた破碎性地盤の支持力評価方法の検討を行う。

2. すべり線解析

本論文では、剛塑性理論のひとつであるすべり線解析に着目し、粒子破碎の影響を考慮できる支持力解析方法の提案を試みる。ここでは、基礎的研究として、境界条件のシンプルな帯状浅基礎を想定する。

すべり線解析は、地盤内の任意点における力の釣り合い条件と Mohr-Coulomb の破壊規準の二つの条件を満たす偏微分方程式系を特性曲線の性質を利用して常微分方程式系へと帰着させて問題を解くものである。式(1)は、このとき得られる常微分方程式であり、Kötter 式と呼ばれるものである。

$$\pm \cos(\alpha + \zeta) \frac{d\sigma_m}{dx} + 2(\sigma_m \tan \phi + c) \cos(\alpha \pm \zeta) \frac{d\alpha}{dx} = \gamma \frac{\cos(\alpha \mp \zeta)}{\cos \phi} \quad (1)$$

ここに、 $\zeta = \pi/4 - \phi/2$ 、 σ_m は平均主応力、 α は最大主応力の方向と x 軸のなす角である。

Kötter 式に地盤の土質パラメータとして c 、 ϕ 、 γ を代入し、与えられた境界条件のもとでこれを数値積分すると、図-1 に示すようなすべり線網とその領域内の応力分布が求められる。このとき、基礎底面での応力分布も算出されるので、それを積分することによって支持力が求められることになる。図-1 の場合の支持力は、約 190(kPa)となる。

3. 粒子破碎のモデル化

破碎性土の変形・強度特性に関しては、要素レベルでこれまでに多くの研究が行われてきた。その結果、粒子破碎によって内部摩擦角 ϕ が低下すること、また、その低下の度合いは、材料固有の性質と拘束応力に依存することが定説化されている。このことは、例えば三軸圧縮試験の結果として、Mohr-Coulomb の破壊規準線が拘束応力の増大に伴って湾曲することからも明らかとなる。図-2 は、破碎性材料としてチービス砂と人工砂（珪藻土を焼成して生成した人工材料）、堅固な材料として豊浦砂を用いて行った三軸試験結果である。ただし、この図は、気乾燥

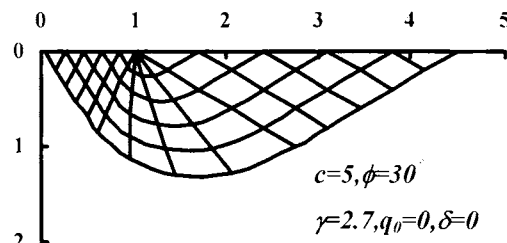


図-1 すべり線解析結果の一例

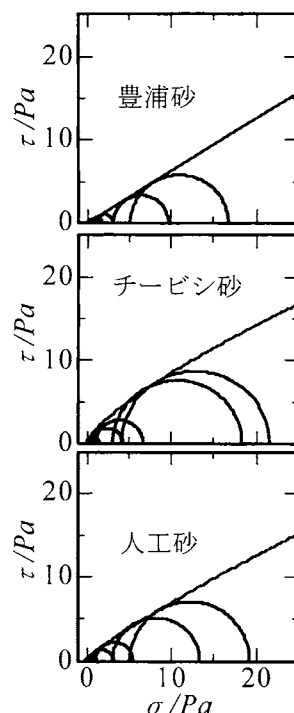


図-2 各試料の三軸試験結果

表-1 三軸圧縮試験より
 同定した A 、 n 、 T

試料	A	n	T
豊浦砂	0.6	1	0.0009
チービス砂	1.3	0.72	0.07
人工砂	0.7	0.8	0.3

状態の試料を圧密排気条件下で圧縮し、軸ひずみ 15%時の応力状態を示したものである。また、図中の湾曲した破壊規準線は、次式に示した R. Baker¹⁾の方法を用いて描いたものである。

$$\tau/P_a = A(\sigma/P_a + T)^n \quad (2)$$

ここに、 P_a は、大気圧である。本試験で用いた試料について、上式のフィッティングによって同定された A , n , T の値を表-1 に示す。

破壊規準線の勾配が材料の内部摩擦角 ϕ を意味するものであることを考えると、式(2)を応力 σ で微分して得られる導関数は、その応力レベルでの ϕ を意味することに他ならない。すなわち、破碎による ϕ の応力依存性として、任意の応力レベルに応じて ϕ が定まるモデル式として次のように表すことができる。

$$\tan \phi = An/(\sigma/P_a + T)^{(1-n)} \quad (3)$$

前述したすべり線解析は従来、最初に内部摩擦角を指定した上で、境界条件の与えられた境界（本解析の場合は、地表面が計算の出発点となる）から順次すべり線の交点を求めていくものである。その際、交点における応力値が算出されるので、その値を式(3)に代入することで、その点における ϕ が新たに定められることになる。今度は新たに定められた ϕ を用いて同一点を再計算すると式(1)により応力値が更新されることとなる。この応力値を再び式(3)に代入すると ϕ も新たに更新される。この繰り返しを続け、更新の前後での差が十分小さくなったところで式(1)と式(3)の両者を満足する応力解が求まることになる。この計算を変形領域全域にわたって行うことで、結果として粒子破碎による ϕ の応力依存性を考慮した計算が可能となり、応力レベルを反映した形で ϕ の分布するすべり線場を求めることができると考えられる。

4. 解析結果とその妥当性の検討

図-3 は、 ϕ の分布の有無によるすべり線形状の変化と ϕ の分布具合を示すコンター図を表わすものである。この図から ϕ の分布を考慮すると、塑性域の広がり相対的に縮小されることが理解できる。図-4は、実験と解析で得られた支持力比と正規化沈下量の関係を示している。この図から、1)従来の方と提案法を比較すると、提案法が相対的に実験値をうまく表現していること、2)支持力比は正規化沈下量に依存すること、3)解析値が実験値と良い一致を示すには、1.0以上の大きな正規化沈下量を必要とすることが分かる。

5. まとめ 本研究で得られた主要な成果は以下の通りである。1)実験結果に基づき、 ϕ の拘束圧依存性を指数関数で表現し、その特性を取り入れたすべり線解析法を示した。2)解析値と実験値を正規化沈下量に着目して比較した。その結果、 ϕ の拘束圧依存性を取り入れた解析値は、 ϕ 一定としたそれと比較すると実測値により近い値を与えることが分かった。また、正規化沈下量が 1.0 程度で実験と解析で得られた支持力値は良い一致を示した。

【参考文献】1)R.Baker:Nonlinear Mohr Envelopes Based on Triaxial Data, Jour. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.130, No.5, 2004.

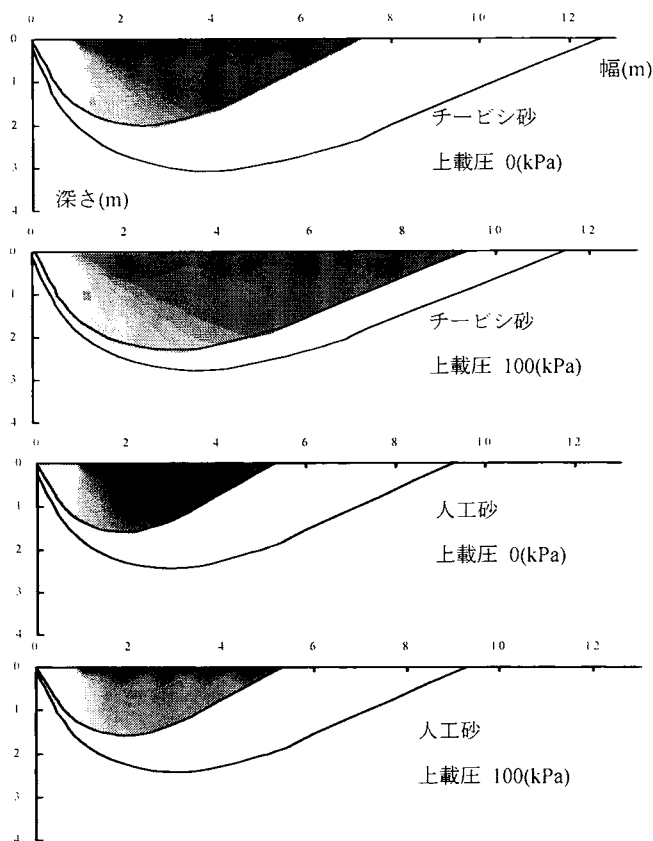


図-3 ϕ の分布がすべり線場を与える影響

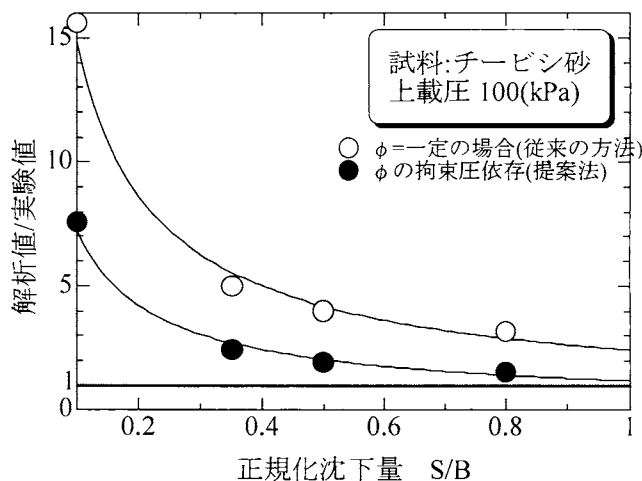


図-4 正規化沈下量に着目した解析値と実験値の関連性