

骨格構造の発達した自然堆積粘土地盤の支持力に関する水～土連成有限変形解析

福岡大学 正会員 ○山田正太郎

名古屋大学 正会員 野田 利弘, 浅岡 顕

1. はじめに

通常、自然堆積粘土は、骨格構造¹⁾が発達した状態にあると言われ、室内再構成粘土が持ち得ない自然堆積粘土独自の力学的性質を有する。本稿では支持力問題を対象に、この骨格構造概念の働きを考慮した弾塑性構成式²⁾を用いて水～土連成有限変形解析を実施し、骨格構造概念の重要性について示す。変形が著しく局所化しすべり線を描くとともに荷重が低下するような結果など、構成式の中で骨格構造の働きを考慮するという自然な操作によって得られることを示す。

2. 解析条件

分かり易い典型的な支持力問題を考えるため、剛で摩擦のある基礎を介して等速度で鉛直変位を与える問題を設定した。解析は平面ひずみ条件で行った。図-1 に有限要素メッシュと境界条件を示す。基礎が傾き得る非対称な変形モードも許すように、解析領域を全断面にとり、節点間に線形制約条件³⁾（長さ不変・角度不変条件）を課した。鉛直強制変位は、基礎中心節点に、地盤内部で間隙水の移動がほとんど生じることのないように 10^{-3} cm/sec の速い速度で与えた。

表-1 地盤の材料定数

弾塑性パラメータ	
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.23
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.01
限界状態定数 M	1.15
NCLの切片* N	2.75
ポアソン比 ν	0.1
発展則パラメータ	
構造低位化指数 a ($b=c=1.0$)	0.2
正規圧密土化指数 m	5.0
回転硬化指数 b_r	0.001
回転硬化限界定数 m_b	1.0
透水係数 k (cm/sec)	2.8×10^{-8}
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.65

* $q=0$, $p'=98.1$ kPaにおける繰返し粘土の正規圧密線上の比体積

表-2 地盤の材料定数

	地盤 1	地盤 2	地盤 3
構造の程度 $1/R_0^*$	4.0	1.0	4.0
過圧密比 $1/R_0$	1.0	1.0	1.0
異方性の程度 $\zeta_0 = \sqrt{3/2} \beta_0 \cdot \beta_0$	0.75	0.75	0.00
側圧係数 $\sigma_{h0}' / \sigma_{v0}'$	0.50	0.50	0.50

表-1 に材料定数を示す。粘土の典型的な弾塑性挙動を示すように、過圧密解消が構造劣化に比べて速く、異方性の発展が遅くなるように決めた²⁾。また、地盤内の間隙比・構造の程度などの初期分布は自重を考慮して、(1)余盛荷重

98.1kPaと重力が作用した一次元条件下で水平方向に均質な正規圧密状態の地盤を構成式に沿って理論的に求め、(2)その地盤地表面から余盛荷重を除荷して定常状態に落ち着くまで圧密計算を行って決めた。支持力計算はこの余盛のない若干過圧密な地盤に対し行う。表-1 に余盛除荷前の初期状態を、図-2 に余盛除荷・圧密後で载荷の直前の地盤の深度分布を示す。構造と異方性が発達した地盤 1 を基本に、初期構造の有無、初期異方性の有無が支持力特性に及ぼす影響について比較する。なお、力のつり合いで自重を考慮する点と、自重考慮に伴う深さ方向に沿う強度増加（不均質性）を取り入れる点は、金属塑性論の支持力問題の取り扱いと大いに異なる。

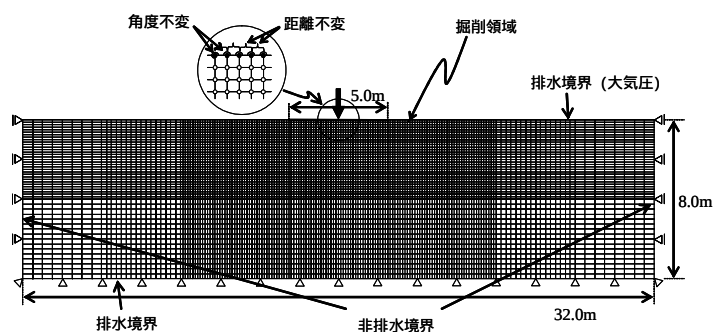


図-1 有限要素メッシュと境界条件

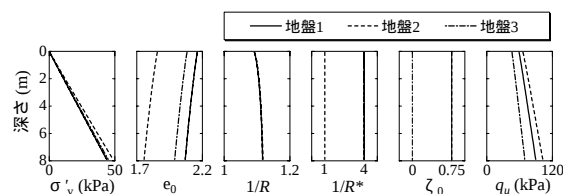
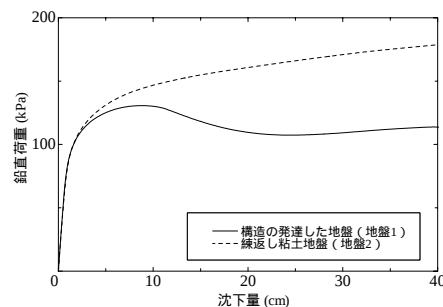
図-2 载荷直前の地盤の深度分布
(q_u : 非排水せん断強度)

図-3 構造の影響

キーワード 支持力、骨格構造、水～土連成解析

連絡先 〒814-0131 福岡市城南区七隈 8-19-1 福岡大学工学部社会デザイン工学科 T E L 092-871-6631

3．構造の発達程度の違いが及ぼす影響

地盤の初期構造の有無が支持力特性に及ぼす影響について示す（地盤1と地盤2を比較）。荷重～沈下関係を図-3に、せん断ひずみ分布を図-4に示す。初期に構造の発達した地盤の方にだけ、地表面まで貫くような明確なすべり線が見られる。初期に構造の発達した地盤では、このような著しい変形の局所化が生じると同時に、荷重はピークとその後再上昇を示す。一方の構造のない練返し粘土地盤では荷重は増加の一途を辿る。非排水せん断を受けると、練返し粘土は硬化の後、完全塑性挙動に至るのに対し、構造の発達した地盤では構造の劣化に起因して塑性圧縮を伴う軟化挙動を生じる。練返し粘土地盤が要素レベルで完全塑性挙動を示すにもかかわらず、荷重が増加し続けるのは、有限変形解析の効果で、幾何形状変化を取り扱わない剛塑性理論に基づく極限解析とは異なる。実際に練返し粘土地盤では、基礎の真横で載荷に伴い地盤が盛り上がり、押さえ盛土の役割を果たしていることが分かる。一方の構造の発達した地盤で荷重が一旦低下するのは、要素レベルで軟化挙動を示す効果が幾何形状変化の効果を相殺するためである。

4．初期異方性が及ぼす影響

初期異方性を有する地盤（地盤1）と初期に等方的な地盤（地盤3）の支持力特性を比較する。両地盤の荷重～沈下関係を図-5に、初期に等方的な地盤（地盤3）のせん断ひずみ分布を図-6に示す。初期異方性を有している地盤の方が、破壊領域も地盤の支持力も明らかに小さい。これは小高ら⁴⁾が剛塑性理論に基づいて導いた結論と等しい。

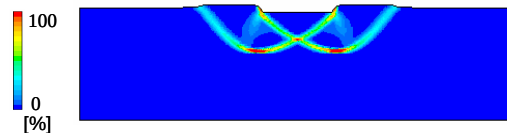
5．初期不整を有する地盤の挙動

初期に構造と異方性が発達した地盤（地盤1）に対し、基礎から1m離れた地点を1要素分（0.125cm×0.125cm）掘削することによって左右非対称な初期不整を与えた（図1参照）。荷重～沈下関係を図-7に、せん断ひずみ分布を図-8に示す。初期不整を有する地盤では、非対称な変形モードが現れ、対称変形を示す場合の経路から「分岐」し、より大きな荷重低下を生じる。幾何的であれ材料的であれ、初期不整は実際の地盤では必ず含まれる。要因が何であっても、僅かな初期不整によって現れる非対称モードの破壊ばかりが実際には生じると考えられる。

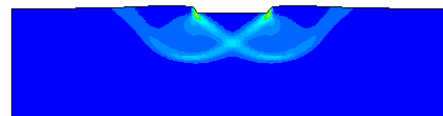
6．おわりに

最後に挙げた解析例では、非対称に変形した場合でも地盤の支持力（最大荷重）こそ対称に変形した場合と変わらないが、場合によってはより低い荷重レベルで「分岐」することも十分に考え得る。このため、種々の破壊モードが取り扱えるような解析条件と理論的枠組みが重要になってくる。また、紙幅の余裕から結果については省略したが、同じような不整を練返し粘土地盤（地盤1）に与えた場合、ほぼ対称な変形を示した。どのような変形モードを示すのかといったことに対し、骨格構造の発達程度の違いが及ぼす影響も大きい。構成式に骨格構造の働きを記述しておくことと、骨格構造に関する地盤情報を把握しておくことの重要性は、「分岐」的観点まで含めると一層増す。

参考文献 1) 三笠正人(1962): 土の力学における構造の概念の定義について, 土木学会年次学術講演会, pp.43-48. 2) Asaoka, A. et al (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, S&F, Vol. 42, No. 5, pp.47-57. 3) Asaoka, A. et al (1998): Displacement/traction boundary conditions represented by constraint conditions on velocity field of soil, S&F, Vol. 38, No. 4, pp.173-181. 4) Asaoka, A. and Kodaka, T. (1992): Bearing capacity of foundations on clays by the rigid plastic finite element model, Proc. 4th Int. Symp. Num. Models Geomech.-NUMOG, 839-849. 5) Noda, T., Asaoka, A., Nakano, M., Yamada, E. and Tashiro, M. (2005): Progressive consolidation settlement of naturally deposited clayey soil under embankment loading, *Soils & Foundations*, under construction.



(a) 構造の発達した地盤（地盤1）



(b) 練返し粘土地盤（地盤2）

図-4 構造の影響（せん断ひずみ分布）

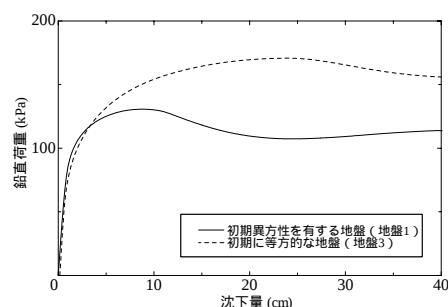


図-5 初期異方性の影響

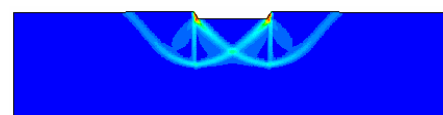


図-6 初期に等方的な地盤（地盤3）
（せん断ひずみ分布）

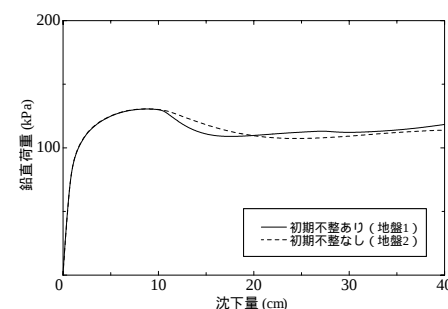


図-7 初期不整の影響

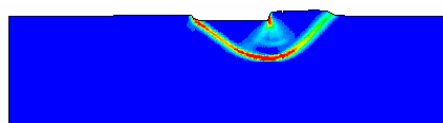


図-8 初期不整を有する地盤(地盤1)
（せん断ひずみ分布）