支持力特性に与える土の骨格構造の影響

九州大学　（正）○山田正太郎　（学）幸　聖二（ﾌｪﾛｰ）落合英俊
名古屋大学　（正）浅岡　顕　（正）野田利弘

１　はじめに

極限支持力解析に代表される地盤の終局状態に着目した慣用的な支持力解析が多く用いられる一方で、破壊に至る過程を考慮した弾塑性有限変形解析の重要性についての報告がなされている [1]。本報告では、土の骨格構造（構造・過圧密）の働きを記述する弾塑性構成式 [2]と、これを用いた水～土連成計算により、初期に有する骨格構造の違いが支持力特性に与える影響について考察した。

２　土の骨格構造の働きを記述する弾塑性構成式（上負荷面カムクレイモデル）の概要

上負荷面カムクレイモデル（図 1）の主な特徴を次に示す。自然堆積地盤など､｢構造｣を有する土は完全に構造をなくした土から見て｢Impossible State｣にあることが多い。この状態を表現するためにカムクレイ降伏面の上側に上負荷面をとり、「構造の程度」を表す指標として R^*（カムクレイ降伏面に対する上負荷面の相似率、相似中心は原点）を用いる。塑性変形が生じると構造は低位化して R^* は増加し、最終的に R^* が 1 になって練り返し粘土になる（｢構造劣化｣または｢練り返し粘土化｣)。また、上負荷面上にある土を「正規圧密土」と呼び、この土が除荷されると「過圧密土」と呼ぶ。この過圧密状態を表すために、橋口 [3]に従って上負荷面に対して現応力点を通る下負荷面をとり、「過圧密比の逆数」を表す指標として R（上負荷面に対する下負荷面の相似率、相似中心は原点）を用いる。塑性変形が生じると、この R も増加して 1 に近づき、正規圧密土になる（｢正規圧密土化｣)。このモデルによって、構造が卓越した土の限界状態線下側での「塑性圧縮を伴う硬化・軟化」が、過圧密が卓越した土の「塑性膨張を伴う軟化・硬化」が表現可能となる。

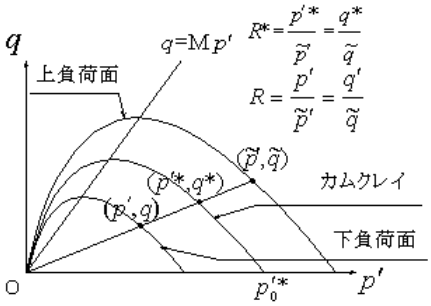

図１　上・下負荷面とカムクレイ降伏面

また、詳細は文献 [2]に譲るが、構造劣化のしやすさは材料パラメータ m^*（構造劣化指数と呼ぶ）で表され、この値が大きいほど、構造劣化が生じやすい。一方、正規圧密土化のしやすさは m（正規圧密土化指数と呼ぶ）で表され、この値が大きいほど、正規圧密土化が生じやすい。これらは発展則パラメータとも呼ぶ。

３　解析条件

図 2 に、解析に用いた有限要素メッシュと境界条件を示す。剛で摩擦のあるべた基礎を想定して、節点間に線形制約条件（長さ不変条件、角度不変条件）[4]を課し、基礎中心部に鉛直下向きに 1mm/sec の速い速度（間隙水の移動がほとんど生じない程度）で強制変位を与えた。また、基礎端部には、同一点状で五つの可容速度場を持つよう特異点処理を施した。水理境界については、上端面のみを排水境界とした。

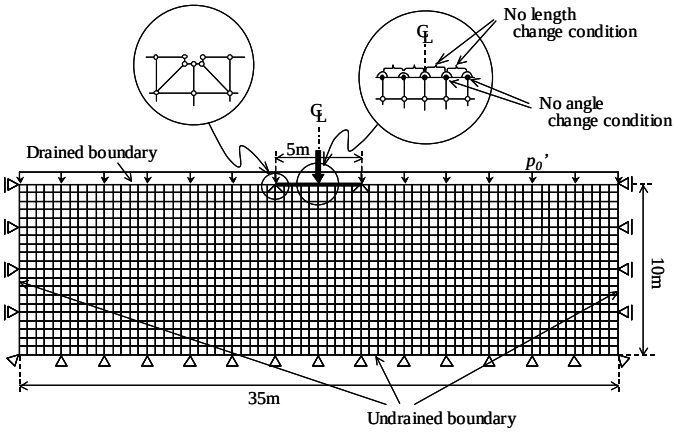

図２　有限要素メッシュおよび境界条件

表 2 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、発展則パラメータ m^*, m は構造劣化よりも正規圧密土化が速く生じるようにした。また、解析パターンとしては、構造の有無、過圧密または正規圧密、の組み合わせからなる 4 ケースの初期値を用意した（表 3)。また、すべてのケースで非排水せん断強度が等しくなるよう初期比体積（または初期平均有効応力）を決めた。なお、ここでは地盤全体にわたって同じ非排水せん断強度を有するよう、自重は考慮せず、地表面に初期平均有効応力と同じだけの上載圧を載荷した。

表１　材料定数

圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.20
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.05
限界状態数 M	1.5
98.1ｋPa での N.C.L 上の比体積 N	2.5
ポアソン比 υ	0.3
構造劣化指数 m^*	0.2
正規圧密化指数 m	1.0

表２　解析パターン（初期値）

	$1/R^*$	$1/R$	v_0
Case1	1	1	2.87
Case2	10	1	3.17
Case3	1	10	2.86
Case4	10	10	3.13

キーワード　支持力、骨格構造、上負荷面カムクレイモデル
連絡先　〒812-0053　福岡県福岡市東区箱崎 6 丁目 10-1　九州大学大学院工学研究院　ＴＥＬ092-642-3285

4　骨格構造の違いが及ぼす支持力特性への影響

はじめに、各初期値に対する、一様な非排水せん断変形場における構成式の応答を図 3 に示す。練り返し正規圧密粘土の非排水せん断挙動をはじめ、構造を有する正規圧密粘土の限界状態線下側での軟化挙動、練り返し過圧密粘土の限界状態線上側での硬化挙動、さらには構造を有する過圧密粘土に特徴的な巻き返し挙動など、典型的な粘土の非排水せん断挙動が示されている。

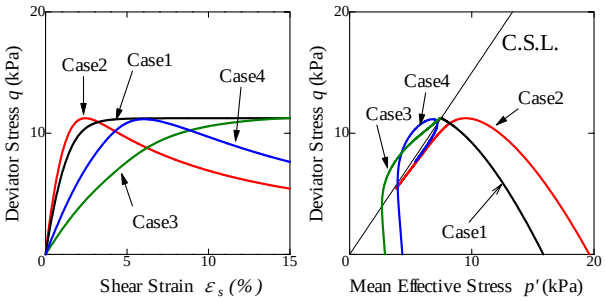

図 3　各初期値に対する非排水せん断挙動の違い

次に、各初期値に対する支持力特性について見る。図 4 は荷重～沈下関係を、図 5 は沈下量が 1m に達した時点でのせん断ひずみ分布を示している。骨格構造の違いに応じて、変形・破壊モード、および荷重～沈下関係に違いが生じていることが分かる。構造を有する地盤は局所的に変形が卓越する部分が見られ、特に構造を有する正規圧密地盤（Case2）ではすべり破壊を生じるとともに、荷重のピークが確認できる。

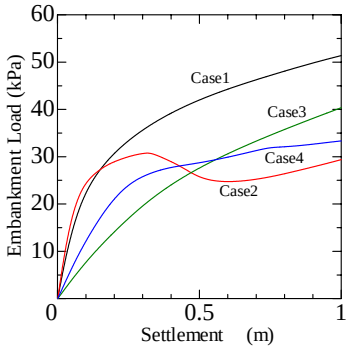

図 4　荷重～沈下関係

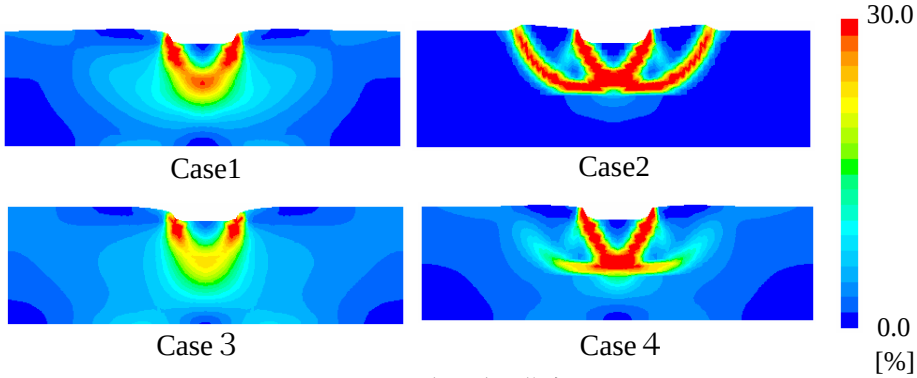

図 5　せん断ひずみ分布

5　僅かに左右非対称な境界条件を与えた場合の変形挙動の違い

Case1 および Case2 に対し、僅かに左右非対称な境界条件を与えた場合（載荷部の節点を 5mm だけ左に移動）のせんだんひずみ分布を図 7 に示す。練り返し正規圧密土（Case1）の場合は、左右対称な境界条件を与えた場合（図 5）と変形モードにほとんど差がないが、構造を有する Case2 の場合は僅かな不整にも敏感に反応して、左右非対称な円弧すべり破壊を生じている。図 7 は、Case2 において対称に変形した場合と非対称に変形した場合の、荷重～沈下関係を比較したものであるが、非対称に変形した場合はより大きな荷重の低下が生じていることが分かる。図 8 は両者の最大荷重点直後の変位速度場を示しているが、荷重～沈下関係における違いは、変形モードの違いに起因するものであることが伺える。

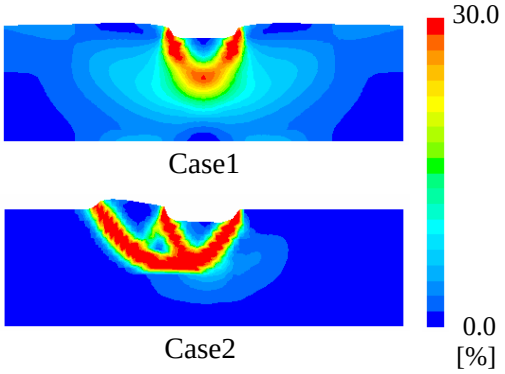

図 6 せん断ひずみ分布

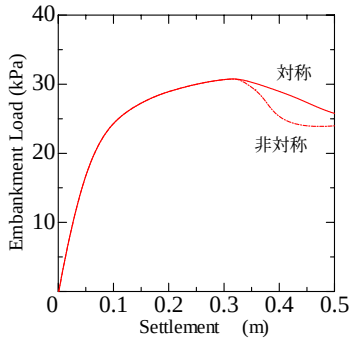

図 6　荷重～変位関係（Case2）

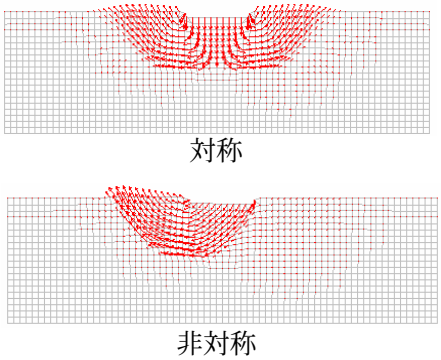

図 7　変位速度場（Case2）

6　おわりに

本報告では、骨格構造が支持力特性に与える影響について解析的に調べた。その結果、特に構造の有無が、変形・破壊モードに与える影響は大きく、構造を有する正規圧密粘土地盤は局所的なすべり破壊を生じるとともに、荷重が低下することが分かった。また、そのような場合は、僅かな不整にも敏感に反応して、左右非対称な円弧すべり破壊を生じることも分かった。

参考文献　1)山川ら(2002):基礎の支持力問題における分岐現象･･･,土木学会第 57 回年次学術講演概要集,pp.1217-1218　2)Asaoka et al(2000):Superloading yield surface concept ･･･,S&F,40(2),pp99-110　3)Hashiguchi(1989):Subloading surface model ･･･, Int.J.Solids Structures, 25(8),917-945　4)沖見ら(1989):剛塑性有限要素方による支持力解析･･･,第 44 回土木学会年次学術講演概要集,pp.966-967