

過圧密地盤の排水支持力解析

Drained Bearing Capacity Analysis of an Overconsolidated Soil

山田正太郎*・野田利弘**・浅岡 顕**

Shotaro YAMADA, Toshihiro NODA and Akira ASAOKA

*正会員 工博 福岡大学助教 工学部社会デザイン工学科 (〒814-0133 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1)

**正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-6803 愛知県名古屋市千種区不老町)

Drained bearing capacity analysis of an overconsolidated soil was conducted by means of a soil-water coupled finite deformation analysis. The constitutive equation of the soil skeleton was expressed using the modified Cam-clay model with subloading surface, which belongs to the unconventional plasticity, or the modified Cam-clay model without subloading surface, which belongs to the conventional plasticity. As a result, in a heavily overconsolidated soil, a peak appears in the load-settlement relation, accompanied by a considerable localization of strain and a clearly visible slip line. Also, such a phenomenon arises not from the effect of the subloading surface concept but from softening behaviors with plastic volumetric expansion, which the Cam-clay model has by nature.

Key Words: *drained bearing capacity, overconsolidation, cam-clay model, subloading surface*

1. はじめに

著者らはこれまでに、骨格構造（構造・過圧密・異方性）の変化を記述可能な上下負荷面修正 Cam-clay model (SYS Cam-clay model)¹⁾を搭載した水～土連成有限変形解析プログラム (GEOASIA)^{2), 3)}を用いて、自然堆積粘土地盤の支持力問題の諸特徴について調べている⁴⁾。この研究では、構造・過圧密・異方性が非排水支持力に与える効果や、水～土連成効果、初期不整合がもたらす効果、メッシュサイズや解析領域の取り方が与える影響など種々の要因を取り上げる中で、結論の一つとして構造が発達した地盤では、ひずみの局所化が生じて、いわゆる「すべり線」が明瞭に発現すると共に荷重が低下しやすいことを述べている。実験結果に基づかない塑性履歴パラメータの導入による構成式の操作的な軟化、不連続な変形を許容する要素の導入、勾配論の利用などひずみの局所化や荷重低下を再現するための特殊な専用の道具を用いずに、このような解析結果を得たことはこの論文の一つの成果である。

しかし、ややもすると勘違いされがちであるが、著者らは支持力問題において荷重低下や「すべり線」が現れるためにはいつでも構造概念が必要であると主張しているわけではない。本来、Cam-clay model⁵⁾は塑性圧縮を伴う硬化と塑性膨張を伴う軟化しか示さないが³⁾、上負荷面を用いて構造の変化を考慮した結果、塑性圧縮領域においても軟化挙動を示すようになる^{1), 6), 7)} (付録 A1 参照)。非排水せん断時に、構造の発達した土ではこの特徴が現

れて軟化挙動を示す。このような要素レベルでの挙動を念頭に、著者らは“非排水支持力問題”において、構造の発達した地盤では明瞭な「すべり線」や荷重低下現象が現れやすいと主張しているのである。

さて、密な砂や過圧密粘土は、排水せん断条件下で膨張しながら軟化することがよく知られている⁸⁾。上述した非排水支持力問題での結論を踏まえると、このことは、排水支持力問題では過圧密概念が鍵となって明確な「すべり線」が現れたり、荷重低下が生じたりすることを示唆している。本論文では、“排水支持力問題”においては上負荷面を用いずとも「すべり線」や荷重低下現象が得られることを示す。

なお、上負荷面を用いる効果は先にも述べた通り塑性圧縮を伴う軟化挙動を可能にすることである。これに対し下負荷面^{9), 10), 11)}を用いる効果は、降伏面内部での塑性変形を可能にすると同時に塑性膨張を伴う硬化挙動を可能にすることである^{1), 6), 7), 11)} (付録 A1 参照)。下負荷面を導入することで生まれる塑性膨張を伴う硬化挙動を通じて、Cam-clay model 自身が有する塑性圧縮を伴う硬化挙動と塑性膨張を伴う軟化挙動は滑らかに接続される。巧みに Cam-clay model の特徴を引き出しているという点において、著者らは下負荷面が果たす役割は非常に重要でかつ合理的なものであると考えている。下負荷面概念を全面的に支持するため、以下のほとんどの解析は下負荷面を有する修正 Cam-clay model を用いて行う。しかし一方で、排水支持力問題での「すべり線」の発現や荷重低下にとって重要となる塑性膨張を伴う軟化挙動はあく

までも Cam-clay model そのものが有する機能である．このため，初期に過圧密状態にあれば，降伏面内部を弾性域とする古典的塑性論に従う修正 Cam-clay model であっても，下負荷面を用いた場合と同じ特徴を持った結果が得られることも本論文では示す．

2. 解析条件

すべての計算を水～土連成有限変形解析^{2),3)}により行った．構成式は，SYS Cam-clay model¹⁾を用いるが，上負荷面や異方性の影響を考えずに，下負荷面のみを有する修正 Cam-clay model として働く条件下 ($R^*_0=1$, $\beta_0=0$, $b_r=0$ ；これらの記号を含め論文の中に明記されていない記号の定義は文献¹⁾を参照) で用いた．敢えて上負荷面を用いない理由は，上述した通りである．併せて，異方性の発展を記述する回転硬化概念を用いないのは，よりシンプルな条件で解析することで，過圧密の効果を正確に把握するためである．解析に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を図-1に示す．解析は平面ひずみ条件下において，左右の対称性を仮定して半断面で行った．初期不整を加味した全断面の解析では，非対称な変形モードが現われて，対称に変形する場合よりも顕著な荷重低下が生じうるが^{4),12)}，このような原因で荷重低下が生じているわけではないことを明確にすることが，半断面で解析した一つの理由になっている．力学的境界条件については，左右両端の節点は鉛直変位だけを許容し，下端の節点は変位を完全に拘束した．水理境界条件は，下端面は排水境界，左右両端面は非排水境界，上端面は基礎に相当する部分を除き排水境界（大気圧に開放）とした．典型的な支持力問題を対象に，剛で摩擦のある基礎に鉛直変位を与える問題を設定し，基礎に相当する節点部分の水平変位を固定すると共に，鉛直方向に同じ速度で強制変位を与えた．また，基礎に相当する面は非排水境界とした．載荷速度は 1.0×10^{-5} cm/sec である．表-1に示す地盤の透水係数 $k=1.0 \times 10^{-2}$ cm/sec に対し，この載荷速度は十分に遅く，解析は完全排水条件と見做してよい条件下で行われる．弾塑性パラメータ，発展則パラメータ，土粒子の密度はそれぞれ表-1に示す通りである．これらのパラメータの選択に当たっては，過圧密の効果が比較的確認しやすい値を選んだ．表-1において，正規圧密土化指数 m は下負荷面が正規降伏面に漸近する速さ，すなわち過圧密土が正規圧密土に近づく速さを規定する材料定数であり，この値が大きいほど速く正規圧密土化する．3.2節では，この値が解析結果に与える影響について述べる．

次に，初期条件について述べる．初期比体積 v_0 および初期側圧係数 $K_0 = \sigma'_{h0}/\sigma'_{v0}$ が一定の地盤を想定した．地表面にごく僅かな荷重 (9.81×10^{-2} kPa) を作用させた状態で，自重を考慮して初期の深さ方向に対する有効応力および過圧密比分布を計算した．地表面に与えた荷重は，値を1オーダー小さくしても初期分布がほぼ変わらない

ような小さな値である．初期比体積 v_0 および側圧係数 K_0 を表-2に示すように与えたときの初期過圧密比 ($1/R_0$) の分布を図-2に示す．ここに，過圧密比は正規降伏面の大きさに対する下負荷面の大きさの比 R によって表わされる（本来 R は上負荷面に対する下負荷面の比であるが，上負荷面と正規降伏面が一致している状態では前記のように定義しても構わない）．このようにして得られる地盤は地表面ほど過圧密比の大きな状態になっていることが分かる．3.3節では初期の比体積を変化させ，過圧密

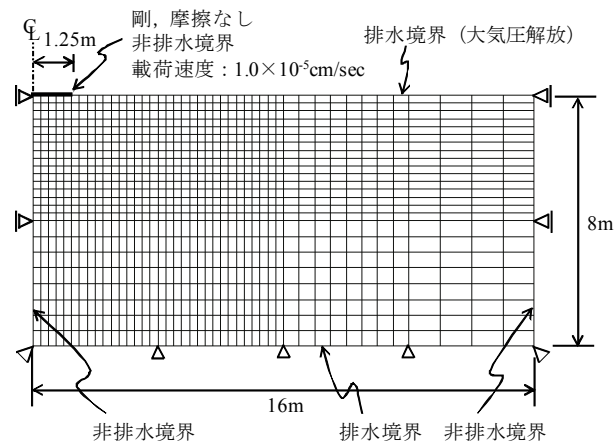


図-1 有限要素メッシュおよび境界条件

表-1 材料定数

〈弾塑性パラメータ〉	
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.0150
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.0002
限界状態定数 M	1.0
NCLの切片* N	1.7
ボアソン比 ν	0.3
〈発展則パラメータ〉	
正規圧密土化指数 m	2.0
透水係数 k (cm/sec)	1.0×10^{-2}
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 初期条件

比体積 v_0	1.66
側圧係数 $K_0 = \sigma'_{h0}/\sigma'_{v0}$	0.50

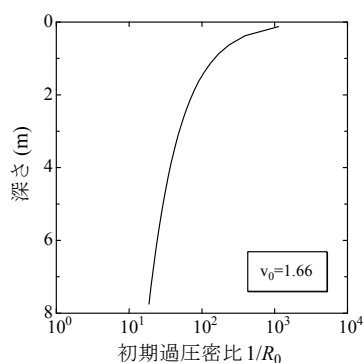


図-2 初期過圧密比分布

比の違いが解析結果に及ぼす影響について示す。なお、下負荷面を有するモデルは一旦大きな荷重を掛けずとも、振幅の小さな排水繰返しせん断によって過圧密を蓄積させていくことが可能である¹⁾。解析の中心となる地盤は比較的過圧密比の大きな地盤であるが、よく締固まった密な砂地盤ではこのように過圧密比の高い状態になっていることも珍しくない。

3. 解析結果

上述した条件の下、計算した結果について示す。図-3に荷重－沈下関係を、図-4にせん断ひずみ分布の推移を示す（図-3, 6, 9および13縦軸の鉛直荷重は、基礎に作

用する地盤からの全反力を基礎の面積で除した値である）。冒頭で述べた通り、排水条件下では上負荷面概念を用いなくても、明瞭な「すべり線」が発現すると共に、荷重が低下することが分かる。著者らによる自然堆積粘土地盤を対象にした非排水支持力解析の結果⁴⁾と同様に、もちろんひずみの局所化や荷重低下を得るための特殊な操作は行っていない。なお、この条件で得られた基礎幅に対する破壊領域の幅は自然堆積粘土地盤を対象にした非排水支持力解析の結果⁴⁾に比べて明らかに広く、支持荷重も本解析で得られた値の方が遥かに大きい。

図-5にひずみの局所化領域における要素の挙動を示す。ひずみの局所化領域において、排水を伴う軟化挙動を示す要素の存在を確認することができる。

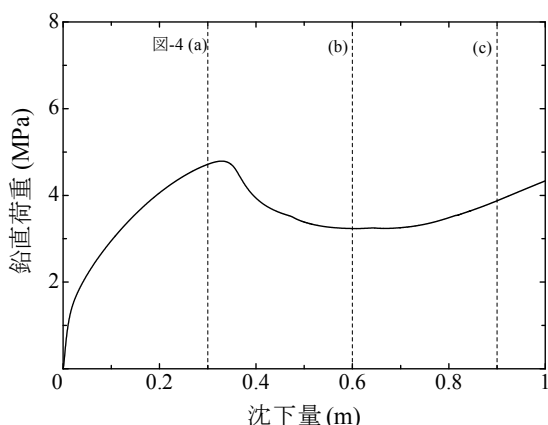


図-3 荷重－沈下関係

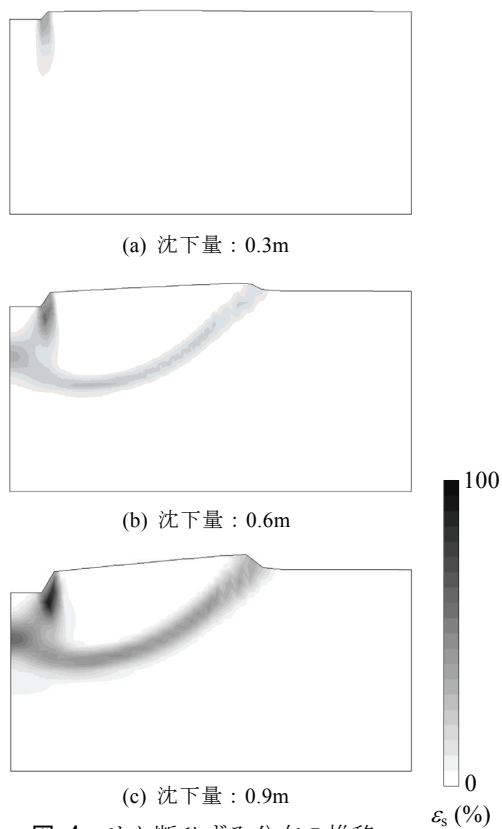
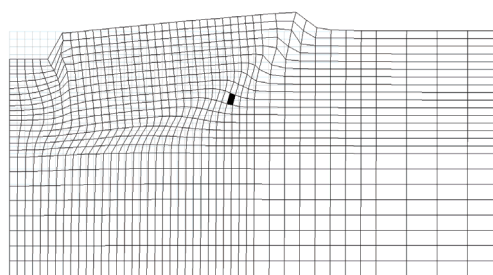
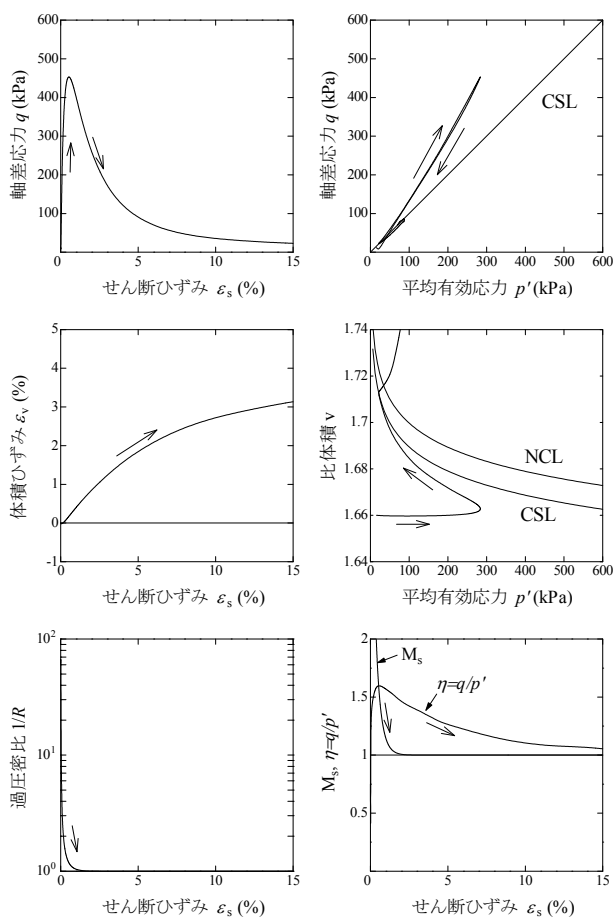


図-4 せん断ひずみ分布の推移



地盤の変形図と着目する要素



要素の挙動（膨張軟化）

図-5 ひずみの局所化領域における要素の挙動

以下では、この結果を基本として、有限変形の効果、過圧密比の違いが及ぼす影響、過圧密解消速度の違いが及ぼす影響について順次述べてゆく。なお、一般に、軟化や局所化を扱った有限要素解析では、解がメッシュサイズの影響を受けやすい。著者らの既往の支持力解析の結果⁴⁾によれば、細かなメッシュを用いるほど、せん断ひずみの局所化領域は狭まり、より明確なすべり線が描かれると同時に、より顕著な荷重低下が生じる。このような傾向は本解析にも現れると思われるが、以下に述べる結果の定性的な特徴はメッシュサイズの影響を受けるものではない。

3.1 有限変形の効果

まず、著者らの既往の論文では直接取り上げていない有限変形の効果について確認しておくために、有限変形解析と微小変形解析の結果を比較する。図-6 に荷重－沈下関係

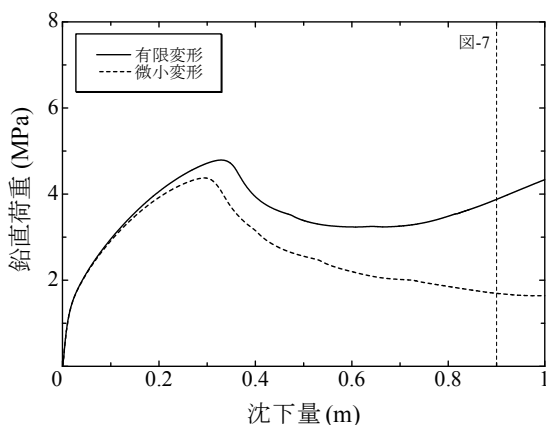


図-6 荷重－沈下関係（有限変形の効果）

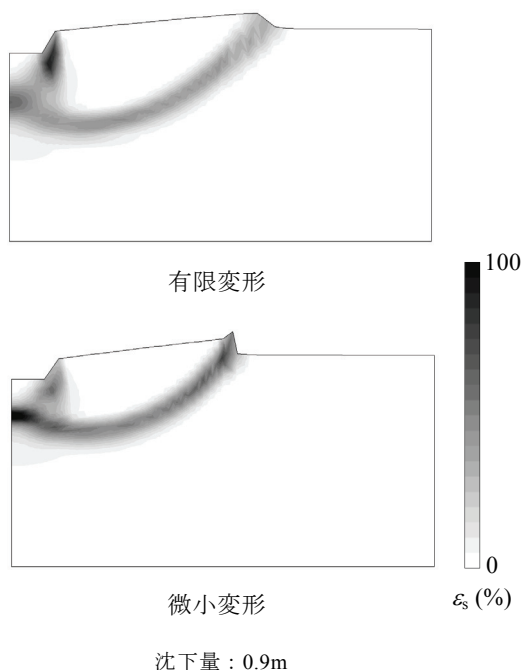


図-7 せん断ひずみ分布（有限変形の効果）

下関係、図-7 に沈下量 0.9m におけるせん断ひずみ分布を示す。まず、微小変形解析でも、明瞭な「すべり線」や荷重低下が得られており、これらの現象が有限変形の効果として得られているわけではないことが分かる。また、微小変形解析に比べ有限変形解析では、大きめの破壊領域とピーク荷重が得られることも分かる。加えて、微小変形解析では、ピーク後、荷重が低下し続けるのに対し、有限変形解析では、荷重が低下した後、再上昇することが分かる。幾何形状の変化を取り扱う有限変形解析では、基礎周辺地盤の盛り上がりが「押さえ盛土」の役割を果たすために荷重が再上昇すると考えられる。

3.2 過圧密比の違いが及ぼす影響

次に、過圧密比の違いが解析結果に及ぼす影響について示す。図-8 に初期比体積を変化させた場合の初期過圧密比分布を示す。初期比体積が大きいほど、同じ深度における過圧密比が小さくなっていることが確認できる。なお、ここで用いた初期比体積のそれぞれの値の差が小さいことの一つの理由として、本解析に用いた圧縮指数 ϵ_s の値が比較的小さいことが挙げられるが、もう一つの理由として嵩張った状態を表現する構造概念を用いていないことが挙げられる。過圧密比の異なるこれらの地盤に対し行った排水支持力解析の結果を以下に示す。図-9

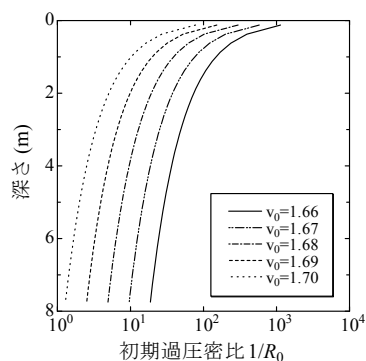


図-8 初期過圧密比分布

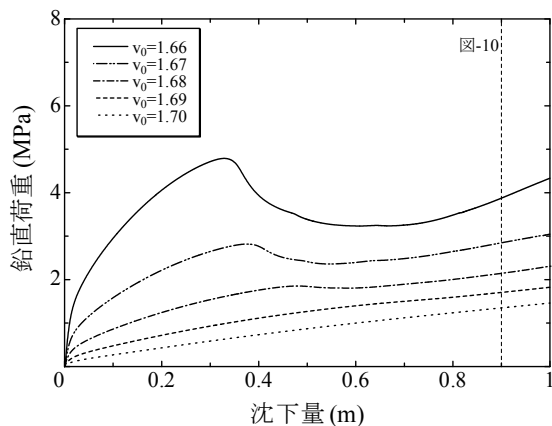


図-9 荷重－沈下関係
（過圧密比の違いが及ぼす影響）

に荷重－沈下関係を、図-10 に沈下量 0.9m におけるせん断ひずみ分布を示す。初期地盤の過圧密比が小さくなるに従い、明確なひずみの局所化領域が形成されなくなると同時に、荷重低下の程度も小さくなってゆくことが分かる。過圧密比が小さくなるほど、ひずみの局所化や荷重低下が生じなくなるのは、要素レベルで著しい軟化挙動が示されなくなるためであると考えられる。また、過圧密比の小さい地盤、すなわち比体積の小さい地盤では

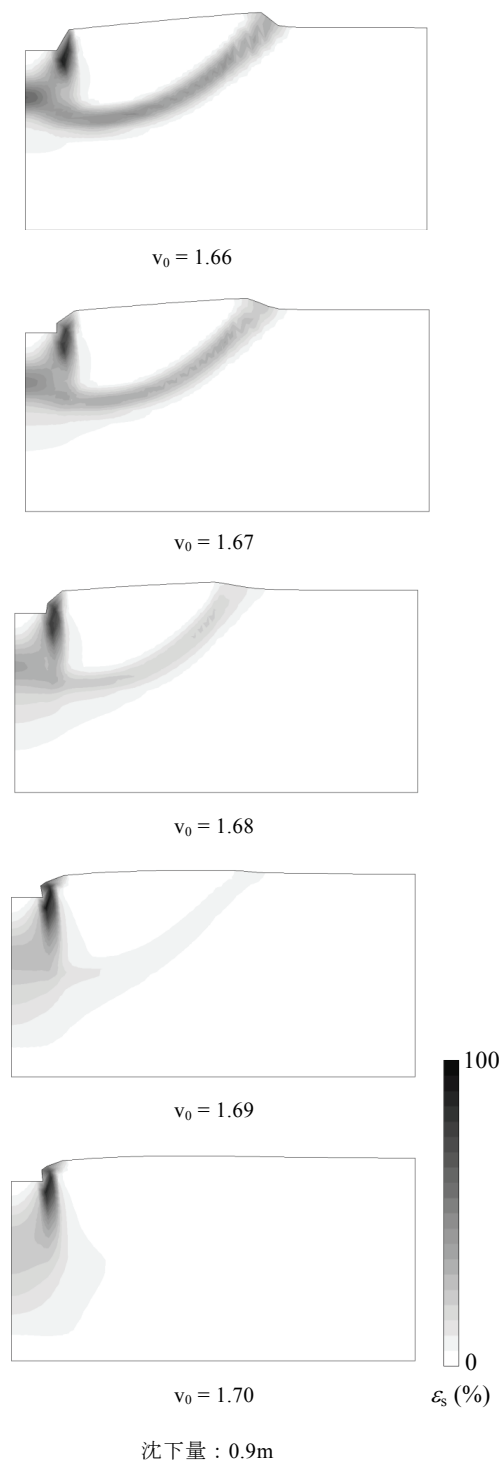


図-10 せん断ひずみ分布
(過圧密比の違いが及ぼす影響)

基礎に隣接する地表面付近の地盤が沈下に引き込まれるような変形を生じていることも分かる。過圧密比が小さくなるほど、塑性膨張すなわち正のダイラテンシーの発生が抑えられることが、結果的にこのような特徴を生んでいると考えられる。以上のように排水支持力問題にとって過圧密比の大きさは、支持荷重の大きさだけでなく、変形/破壊形態をも左右する重要な因子となっている。

3.3 過圧密解消速度の違いが及ぼす影響

最後に、過圧密の解消速度の違いが解析結果に及ぼす影響について示す。ここでは、正規圧密土化指数 m を 0.2, 0.5, 2.0, 5.0 および 20.0 の 5 通りに変化させた。加えて、降伏面内を弾性域とする下負荷面を用いない修正 Cam-clay model でも計算を行った。まずは初期条件として、 $p_0' = 98.1 \text{ kPa}$, $1/R = 10$ としたときの構成式の排水せん断応答（側圧一定の排水三軸試験時の応答）を示す。図-11 は下負荷面を用いない場合（修正 Cam-clay model）の応答を示しており、図-12 は下負荷面を用いる場合の応答を示している。下負荷面を用いない場合は、正規降伏面内で弾性的な挙動を示してから、軸差応力－軸ひずみ関係で尖ったピークを示すと同時に膨張を伴う軟化挙動に移行している。一方の下負荷面を用いる場合は、軸差応力－軸ひずみ関係で滑らかなピークが現れている。 $m = 0.2$ や 0.5 の場合で特に確認しやすいが、圧縮を伴う硬化と膨張を伴う軟化の間で、膨張を伴う硬化挙動が現われている。また、正規圧密土化指数 m が大きいほど、過圧密比 $1/R$ の変化が速く、これに伴って軸差応力のピークが大きくなると共に小さなひずみでピークが現れるようになることが見て取れる。体積ひずみと軸ひずみの関係からは、 m が大きいほど、初期の圧縮量が小さくなると共に圧縮から膨張に転じる点が早く現れることも分かる。いずれの関係を示す図からも、 m を大きくして過圧密の解消速度を上げていくと、下負荷面を用いない場合の挙動に漸近していくことが分かる。理論的にも、 m が無限大の時は修正 Cam-clay model に一致する。

過圧密の解消速度を変化させた場合および下負荷面を用いない場合の排水支持力解析から得られた荷重－沈下関係を図-13 に、沈下量 0.9m におけるせん断ひずみ分布を図-14 に示す。はじめに下負荷面を用いない場合について着目する。まず、下負荷面を用いずとも、解析結果に「すべり線」や荷重低下が現れていることが分かる。このことは、この現象にとっては Cam-clay model 自身が有する塑性膨張を伴う軟化が重要であることを示している。冒頭で強調した通り、著者らは土の構成式にとって下負荷面は合理的で不可欠なものであると考えているが、一方で下負荷面の効果で「すべり線」や荷重低下が現れるわけではないということを正しく理解する必要があるとも考えている。また、下負荷面を用いない場合の結果で興味深いのは、要素の挙動から想像されるのとは裏腹

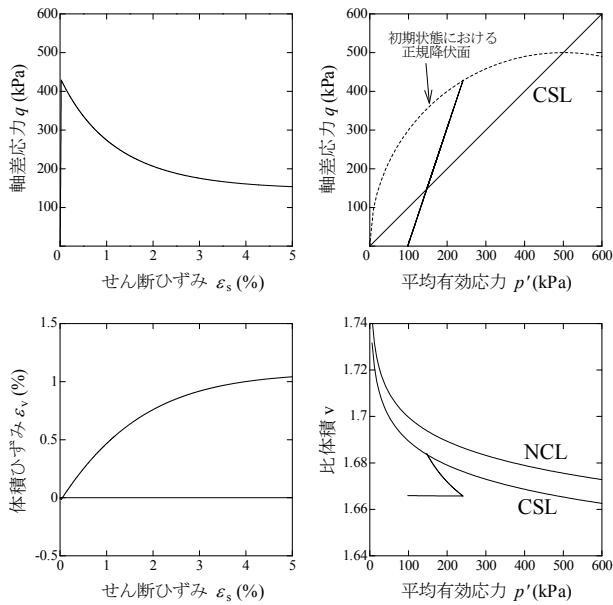


図-11 下負荷面を用いない場合の
構成式の排水せん断応答

に、荷重－沈下関係が滑らかに描かれていることである。例え、要素個々の挙動が滑らかでなくても、境界値問題を解いて得られる支持力問題の荷重－沈下関係は滑らかになり得ることが分かる。

次に、正規圧密土化指数 m の変化に応じた過圧密の解消速度の違いが解析結果に及ぼす影響に着目する。これまた、要素の挙動から想像されるのとは裏腹に、 $m=5.0$ の場合にピーク荷重が最も大きくなる事が分かる。せん断ひずみ分布を見ると分かるように、下負荷面を用いない場合や $m=20.0$ の場合は、他の場合に比べて破壊領域が狭い。 m が大きくなっても必ずしも荷重のピークが大きくなるのは、要素レベルでピーク強度が大きくなる効果に、破壊領域が小さくなる影響が勝るためである。このようにピーク荷重が破壊領域の大きさの影響を受け、要素レベルの挙動と異なる傾向を示し得るのに対し、ピークが現れるまでの沈下量は要素レベルの挙動が示す傾向に素直に従うことが分かる。

以上で示したように、要素の挙動の特徴が解析結果に素直に現れる面もあれば、素直に現れない面もあるが、いずれにしても過圧密の解消速度は解析結果に有意な差を与える。下負荷面の効果で「すべり線」や荷重低下が現れているわけではないことを一つの結論として述べたが、一方で下負荷面の効果で過圧密の解消速度の制御が可能になっていることを忘れてはならない。下負荷面を用いて現実の土の挙動を正しく押さえておくことの重要性を念のため強調しておく。

4. 結論

本論文では、水～土連成有限変形解析により過圧密地盤を対象に排水支持力解析を実施した。主な結論を以下

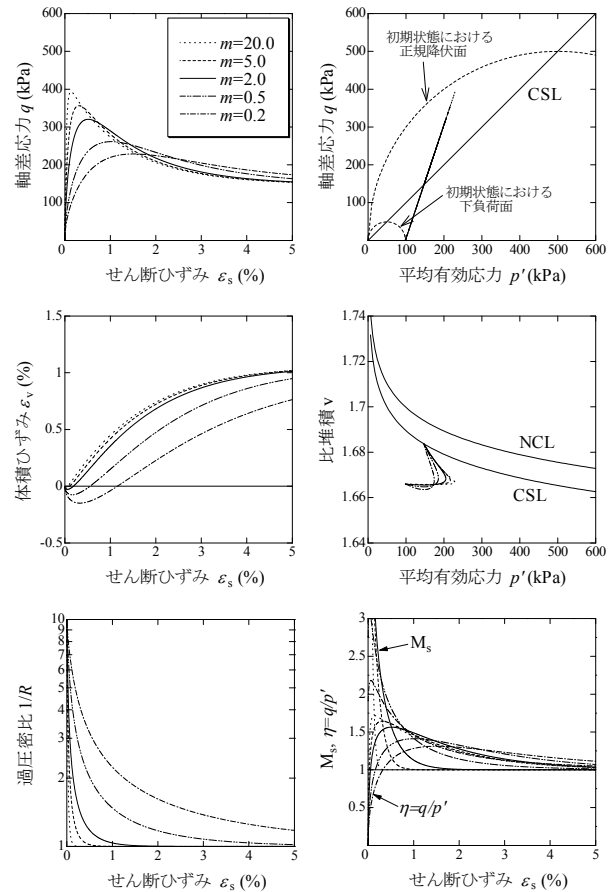


図-12 下負荷面を用いる場合の
構成式の排水せん断応答
(過圧密解消速度 m の違いが及ぼす影響)

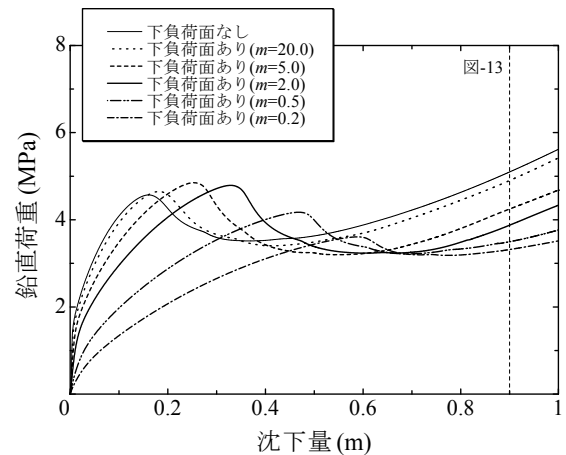


図-13 荷重－沈下関係
(過圧密解消速度 m の違いが及ぼす影響)

に列挙する。

- 1) 過圧密地盤の排水支持力問題では、要素レベルで生じる塑性膨張を伴う軟化挙動に起因して、ひずみの局所化が生じていわゆる「すべり線」が明瞭に発現すると共に荷重が低下し得る。

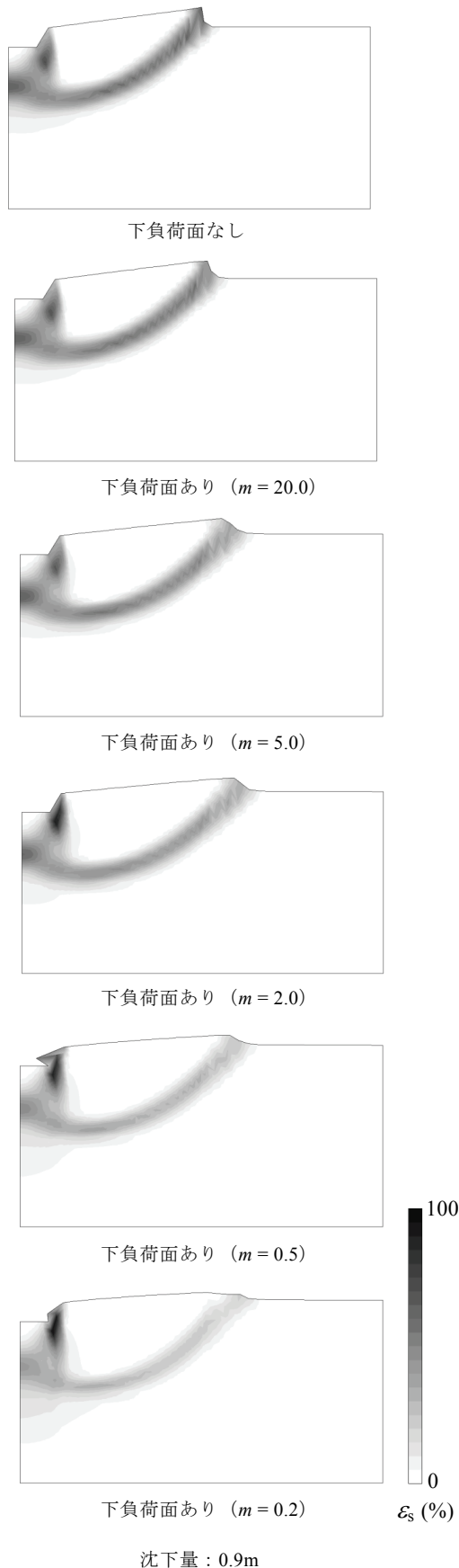


図-14 せん断ひずみ分布
(過圧密解消速度 m の違いが及ぼす影響)

- 2) 微小変形解析に比べ、有限変形解析では破壊領域、支持荷重共に大きくなる。また、微小変形解析では、ピーク後荷重が低下し続けるのに対し、幾何形状の変化を取り扱う有限変形解析では、基礎周辺地盤の盛り上がり「押さえ盛土」の役割を果たすために、荷重は低下した後、再上昇する。
- 3) 初期過圧密比が小さくなると、明確なひずみの局所化領域が形成されなくなると同時に、荷重低下の程度が小さくなる。これは、要素レベルで軟化を示さなくなるためである。排水支持力問題にとって過圧密比の大きさは、支持荷重の大きさだけでなく変形/破壊形態をも左右する重要な因子になっている。
- 4) 過圧密の解消速度が速くなるほど要素レベルでのピーク強度は大きくなる。一方で支持力問題を解いたとき、ピーク荷重は破壊領域の大きさの影響を受けるため、過圧密の解消速度が速くなっても大きくなるとは限らない。これに対し、ピーク荷重が生じるまでの沈下量は、要素レベルでの挙動に素直に従い、過圧密の解消速度が速くなるほど小さくなる。
- 5) 降伏面内部を弾性域とする古典塑性論に従う修正 Cam-clay model であっても、初期に過圧密状態にさえあれば、下負荷面を用いる場合と同様に「すべり線」や荷重低下は現れる。これは、Cam-clay model がそもそも塑性膨張を伴う軟化挙動を示し得るためである。また、要素レベルで滑らかな挙動を示さなくても、境界値問題を解いて得られる荷重-沈下関係は滑らかなものになり得る。

謝辞

本論文で示した計算は、名古屋大学で開発された All-Soils, All-States, All-Round Geo-Analysis Integration (GEOASIA)^{2), 3)}を用いた。

付録

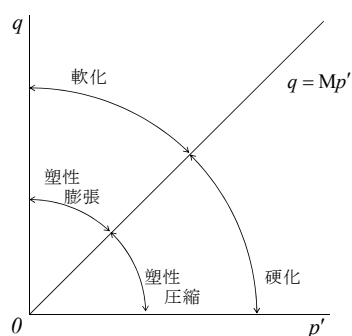
A1. 上負荷面と下負荷面の導入による、塑性体積変化と硬化/軟化の組み合わせの変化

上負荷面と下負荷面を用いることの効果について、塑性体積変化と硬化/軟化の組み合わせの観点から概説する。図-A1 (1)に示すように、塑性体積変化を硬化パラメータにとる Cam-clay model では、硬化には必ず塑性体積圧縮が伴い、軟化には必ず塑性体積膨張が伴う。このとき、 $p'-q$ 平面に引かれた不動の限界状態線 $q = Mp'$ は、両挙動が現れる領域を分ける閾線となる。

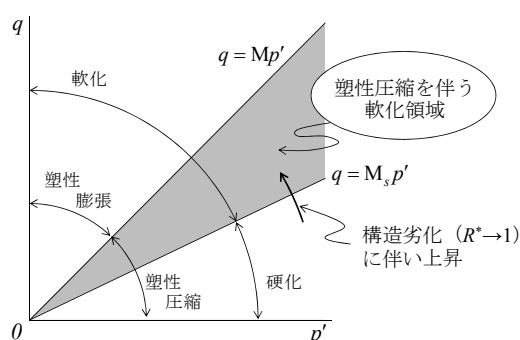
これに対し、構造概念を導入、すなわち正規降伏面の上側に上負荷面を導入すると、塑性圧縮と膨張の閾線は限界状態線 $q = Mp'$ に一致したまま、硬化と軟化の閾線 $q = M_s p'$ は限界状態線の下側に位置することが可能になり、新たに塑性圧縮を伴う軟化挙動が生じる可能性が出てくる (図-A1 (2))。

さらに、過圧密概念を導入、すなわち上負荷面の下側に下負荷面を導入すると、今度は、硬化と軟化の閾線は限界状態線の上側にも位置することが可能になり、新たに塑性膨張を伴う硬化挙動が生じる可能性が出てくる(図-A1 (3))。

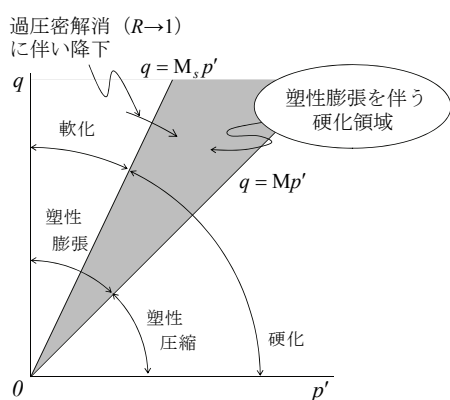
塑性変形に伴う構造の劣化や過圧密の解消は、それぞれ上負荷面に対する正規降伏面の相似比 R^* と上負荷面に対する下負荷面の相似比 R の発展則によって規定される。いずれも塑性変形に伴って1に漸近するが、この間硬化と軟化の閾線は上下に変動し、最終的に限界状態線に漸近する。この硬化と軟化の閾線の変動に伴う、塑性体積変化と硬化／軟化の組み合わせの多様化が土本来の複雑な挙動の再現を可能にする。なお、回転硬化によっ



(1) Cam-clay model における組み合わせ



(2) 上負荷面導入による効果



(3) 下負荷面導入による効果

図-A1 塑性体積変化と硬化／軟化の組み合わせに与える上負荷面および下負荷面導入の効果

て異方性の概念を導入すると、さらに塑性圧縮と塑性膨張の閾線も変動し、より豊かな土の挙動が再現可能になる。式展開を含む詳細な議論は文献^{1), 6), 7)}に譲る。

参考文献

- 1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 5, pp. 47-57, 2002.
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. : Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 1, pp. 91-106, 1994.
- 3) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, *Soils and Foundations*, Vol. 48, No. 6, pp. 771-790, 2008.
- 4) Noda, T., Asaoka, A. and Yamada, S.: Some bearing capacity characteristics of a structured naturally deposited clay soil, *Soils and Foundations*, Vol. 47, No. 2, pp. 285-301, 2007.
- 5) Roscoe, K. H. and Burland, J. B.: On the generalized stress-strain behaviour of 'wet' clay, *Engineering Plasticity (ed. by Heyman, J. and Leckie, F. A.)*, Cambridge University Press, pp. 535-609, 1968.
- 6) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Super loading yield surface concept for the saturated structured soils, *Proc. of the fourth European conference on numerical methods in geotechnical engineering NUMGE98*, pp. 232-242, 1998.
- 7) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, Vol. 40, No.2, pp. 99-110, 2000.
- 8) Atkinson, J. H. and Bransby, P. L.: The mechanics of soils, McGraw-hill, 1978.
- 9) Hashiguchi, K.: Plastic constitutive equations of granular materials, *Proc. of US-Japan Seminar on Continuum Mechanics and Statistical Approaches in the Mechanics of Granular Materials (ed. by Cowin, S.C. and Satake, M.)*, JSSMFE, pp. 321-329, 1978.
- 10) Hashiguchi, K.: Subloading surface model in unconventional plasticity, *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 25, pp. 917-945, 1989.
- 11) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T: Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, Vol. 37, No. 1, pp. 13-28, 1997.
- 12) Asaoka, A. and Noda, T.: Imperfection-sensitive bifurcation of Cam-clay under plane strain compression with undrained boundaries, *Soils and Foundations*, Vol. 35, No. 1, pp. 83-100, 1995.

(2009年4月9日 受付)