

不飽和土の弾塑性構成モデルの高度化と締固めシミュレーション技術への応用

Refinement of the elasto-plastic model for unsaturated soils and its application to simulation technology of compaction phenomena

埼玉大学 助教 橘 伸也

（研究計画ないし研究手法の概略）

【研究背景と目的】

「土を締め固める」という行為は古来より、人間が営む社会生活を支える重要な土木技術である。河川堤防やアースダム、宅地造成など、締固め技術を活用し建造される地盤構造物は枚挙に暇がない。これら地盤構造物の品質を評価し、将来の外的作用（応力載荷や乾湿の繰返しなど）に対し構造物がどのような挙動を示すかを予測するためには、不飽和状態にある土の挙動を適切に表現する力学モデルが必須である。近年、不飽和土の力学に立脚して、土の締固め挙動をシミュレートし、締固め曲線や最適含水比について力学的解釈を与える研究が幾つか進められている。これらの研究では、1サイクルの載荷／除荷履歴による締固め挙動の表現に成功しているものの、複数サイクルによる密度増加の蓄積は検討されていない。実際の締固め施工では、重機による複数回の転圧により密度増加が図られており、その表現は解析において重要な役割を占める。そこで本研究では、室内試験を通して繰返し載荷／除荷履歴に伴う土の締固め挙動を把握し、その表現を可能とする不飽和土の弾塑性構成モデルを開発することを目的とする。

【研究計画と手法】

本研究は、以下に示す通り3つのステップで構成される。

（Ⅰ）繰返し載荷／除荷履歴を与えた静的締固め試験

比較的透水性・透気性が高いシルト質試料を対象に、サクシオン測定を伴う締固め試験を行う。試験は、不飽和土用一次元圧密試験器を用いて行い、含水比一定条件の下で所定の上載圧までの載荷／除荷履歴を繰返し与え、その間の体積変化、サクシオン変化を計測する。このような実験を、含水比を変化させて複数回実施し、種々の含水比レベルでの繰返し載荷／除荷履歴に伴う土の締固め挙動を把握する。

（Ⅱ）不飽和土の弾塑性構成モデルの高度化

実験結果を整理し、塑性負荷時にある間隙比-有効応力平面上での圧縮線から等飽和度圧縮線群を規定し、不飽和弾塑性構成モデルにおける不飽和化に起因する剛性変化を表すパラメータを具体的に定式化する。この定式化により、不飽和状態での載荷、または再載荷過程における降伏後の挙動をより精緻に表現できることが期待できる。次に、再載荷過程における体積変化を表現するために、モデルに下負荷面の概念を導入する。古典的な飽和土の力学では、応力振幅一定の繰返し載荷は、単なる弾性域内での挙動に留まり、再載荷過程の変形の蓄積は表現できない。不飽和土の力学においても、水分特性のヒステリシスの影響を受け多少の変形の蓄積が生じるが、それほどドラスティックなものではなく、特に低含水比（乾

燥側) 試料の繰返しに伴う密度増加をうまく表現できないことが懸案事項であった。このような問題をクリアするために、モデルに下負荷面の概念を導入し、精度の向上を図る。

(Ⅲ) 実測値との比較による提案モデルの検証

提案モデルを用いて、繰返し載荷/除荷静的締固め試験シミュレーションを行い、提案モデルの再現性の検証を行う。

(実験調査によって得られた新しい知見)

【等飽和度圧縮線群の規定と定式化】

比較的透水性・透気性が高い不飽和シルト質試料を対象に、含水比一定条件下でのサクション測定を伴う一次元静的締固め試験を実施した。ここではまず、実験から得られる塑性負荷時の圧縮挙動から等飽和度圧縮線群を規定する。試料はDLクレイ(土粒子比重 $G_s = 2.635$) であり、含水比を $w = 15, 20, 25, 30\%$ の4通りに調整し、実験を行った。図1(a)は、各含水比に対して得られた鉛直有効応力と間隙比の関係である。鉛直有効応力は、上載圧に計測したサクション応力(=サクションと飽和度の積)を付加することで定義している。含水比が低いほど、同じ鉛直有効応力に対し大きな間隙比を有し、高位な状態にあることがわかる。圧縮経路がほぼ直線的であることから、各含水比について図に破線で示す“等含水比圧縮線”を規定した。これら等含水比圧縮線から間隙比が $e = 1.1, 1.2, 1.3$ にあるときの鉛直有効応力と飽和度の関係を求めたものが図1(b)である。各間隙比についてこれらの関係は図に破線で示すように直線で近似できるが、平行にはなっていない。すなわち、密になるほど、飽和度の変化によって有効応力の対数値が取り得る範囲が狭くなることがわかる。この図を元に間隙比-有効応力平面上に規定した“等飽和度圧縮線群”を図1(c)に示す。実験における飽和度の範囲は0.3~0.6であり、この範囲外における等飽和度線は外挿して求められたものであるが、飽和度が低くなるにつれ等飽和度圧縮線は勾配を急にしながら右にシフトすることがわかった。

実験結果より規定された等飽和度圧縮線群を基に、不飽和土に対して提案されている弾塑性構成モデル

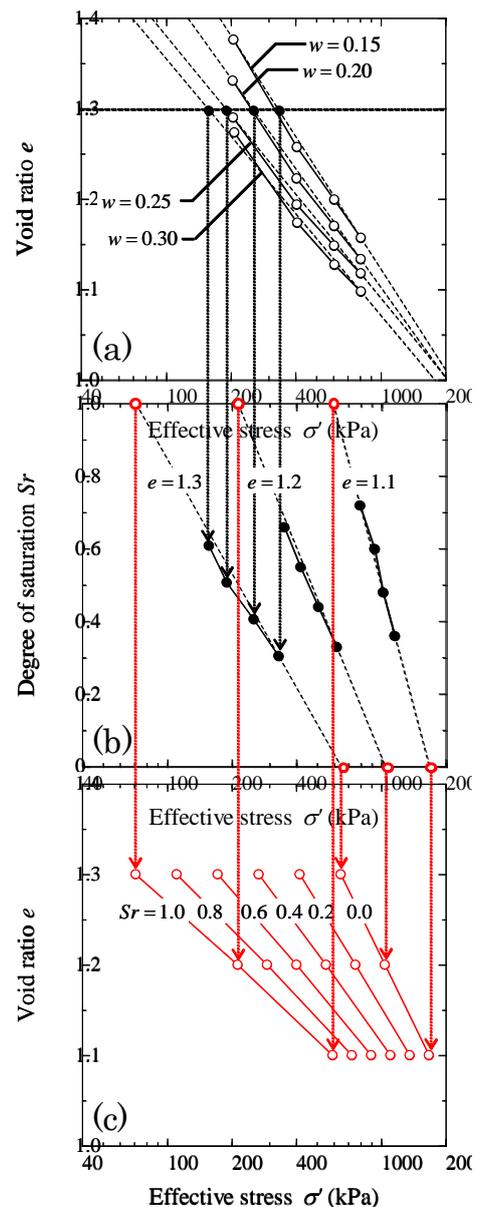


図1 等飽和度圧縮線群の規定

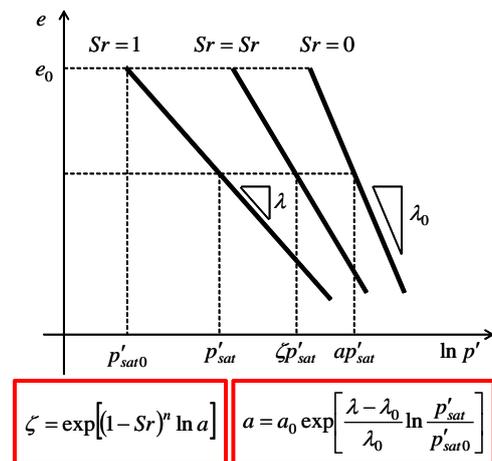


図2 等飽和度圧縮線群のモデル化

=Se-hardeningモデルの高度化を試みた。Se-hardeningモデルは、等飽和度圧縮線群が平行をなすという仮定の下に定式化されたモデルであるが、このモデルのパラメータ a について、図2のように降伏応力の依存性を考慮することにより、等飽和度圧縮線群の拡張モデルを提案した。

繰返し載荷／除荷試験では、鉛直圧800kPaまで載荷し、その後0kPaまで除荷する応力履歴を3サイクル与え、収縮／膨張量とサクシオン変化を調べた。実験から得られた各含水比におけるサクシオンと飽和度の関係を図3に、鉛直有効応力と間隙比の関係を図4に示す。いずれの含水比でも繰返し載荷／除荷履歴を経て塑性ひずみが蓄積し、徐々に密になっていることがわかる。含水比一定条件での実験であるので、繰返し応力履歴による密実化に伴って大

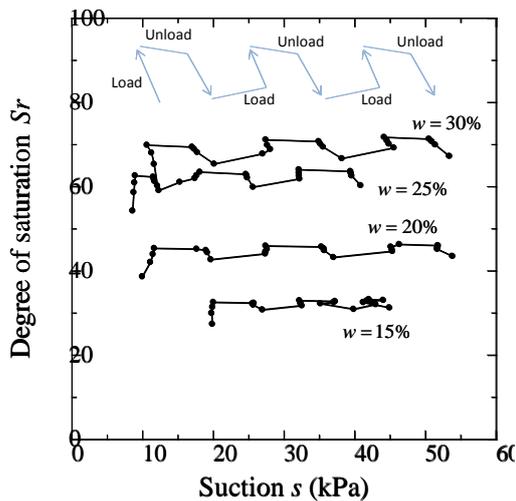


図3 繰返し載荷／除荷試験におけるサクシオンと飽和度の関係

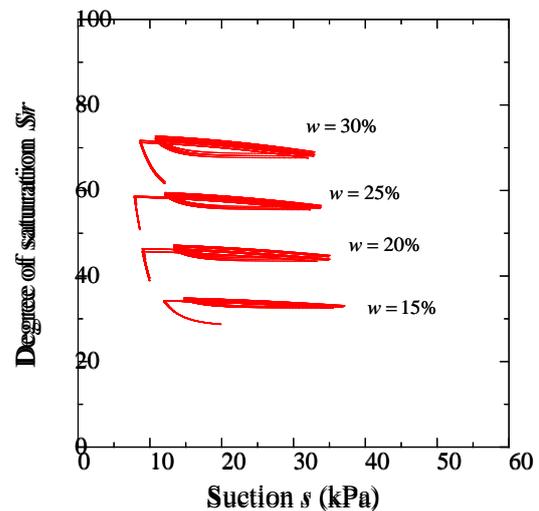


図5 繰返し載荷／除荷シミュレーション結果 (サクシオンと飽和度の関係)

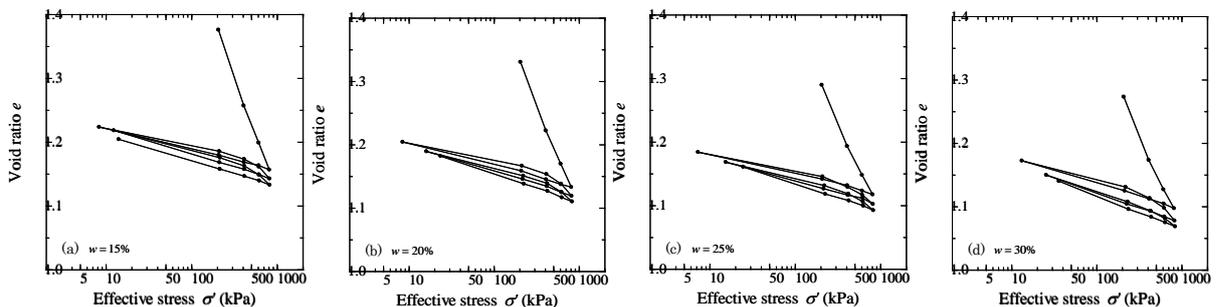


図4 繰返し載荷／除荷試験における有効応力と間隙比の関係

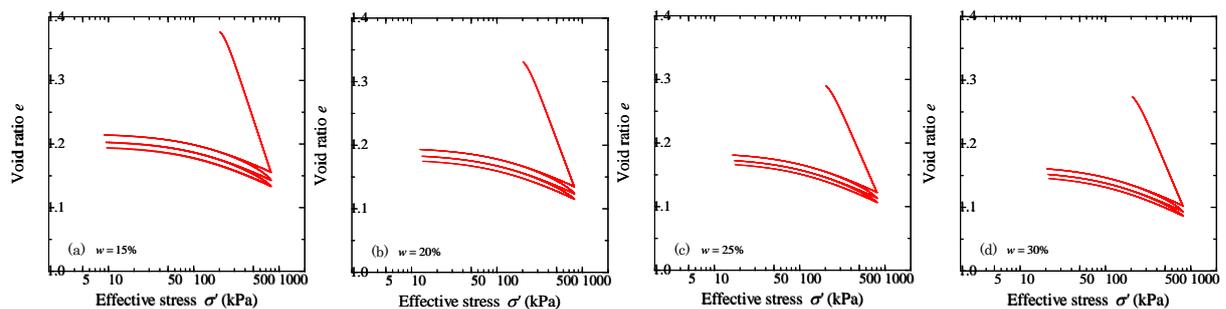


図6 繰返し載荷／除荷シミュレーション結果 (有効応力と間隙比の関係)

域的には飽和度が増加するが、サクションも概ね増加傾向になることがわかった。これらの実験結果が得られたことから、構成モデルには降伏曲面内での塑性ひずみの発現を表現するために下負荷面の概念を導入した。さらに、水分特性にはヒステリシスを考慮することが必須であると判断し、河井らが提案した水分特性曲線モデルを導入し、構成関係を定式化した。

【繰返し载荷／除荷静的締固め試験シミュレーション】

定式化されたモデルを用いて、繰返し载荷／除荷静的締固め試験のシミュレーションを行った。シミュレーションより得られたサクションと飽和度の関係を図5に、有効応力と間隙比の関係を図6に示す。図より、繰返し载荷／除荷に対する間隙比変化を良好に表現できることがわかる。特に再载荷過程における塑性ひずみの発現は下負荷面の効果によるものであり、締固め現象において密度増加に対する締固め回数の影響を表現するにあたっては有用なモデルであることがわかった。これに対し水分特性関係は、各含水比で生じるサクションのオーダーや飽和度の増減範囲は表現できているものの、経路そのものの再現性には議論の余地が残る。今回実験とシミュレーションの対象としたシルト質材料では、与えた応力のオーダーに対して生じるサクションのオーダーが小さかったため、有効応力にサクションがそれほど寄与せず、水分特性曲線の形状が予測する変形に及ぼす影響は小さかったものとするが、材料によってはこれが無視できない場合もあるため、水分特性曲線モデルの高度化を今後の課題としたい。

（ 発 表 論 文 ）

K.H. Syed, S. Tachibana and J. Kuwano: Time dependency of porous media to measure the suction of compacted soil sample,第10回地盤工学会関東支部発表会GeoKanto2013, 材料2-7, 2013.

K.H. Syed, S. Tachibana and J. Kuwano: Static compaction of soil under series of loading-unloading cycles at different moisture contents,平成25年度土木学会全国大会第68回年次学術講演会, CS2-032, 2013.