



不飽和土 / 水連成解析による築堤シミュレーション

河井, 克之 ; 田中, 麻穂 ; 金澤, 伸一 ; 橘, 伸也 ; 大野, 進太郎 ; 飯塚, 敦 ; 竹山, 智英

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 13:1-9

(Issue Date)

2009-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.24546/81001945>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81001945>



不飽和土／水連成解析による 築堤シミュレーション

Banking simulation with the constitutive model for unsaturated soil

河井 克之¹⁾
Katsuyuki Kawai
田中 麻穂²⁾
Maho Tanaka
金澤 伸一³⁾
Shinichi Kanazawa
橘 伸也⁴⁾
Shinya Tachibana
大野 進太郎⁵⁾
Shintaro Ohno
飯塚 敦⁶⁾
Atsushi Iizuka
竹山 智英⁷⁾
Tomohide Takeyama

概要：多くの盛土構造物は法面を有し、既存の盛土内で発揮されている応力状態を推定することは困難である。そのため、このような斜面を有する地形において、変形解析を行う場合、予め弾性解析を行い、得られた応力を初期条件として入力することがほとんどである。しかしながら、地盤材料は弾塑性体である以上、応力履歴の影響を受けることは明らかである。本研究では、盛土材料として使われる締固め土を不飽和土として扱い、不飽和土の弾塑性構成モデルを用いて盛土の築堤過程をシミュレーションした。解析条件として、盛り立て速度、材料が初期に有するサクシジョンの影響を検討した。その結果、特に初期サクシジョンの与え方が、築堤後定常状態での応力に大きく影響を及ぼすことが分かった。

キーワード：盛土, 不飽和土, 斜面安定, 数値解析

1. はじめに

アースダムや堰堤など機能的に高度な盛土構造物は、設計段階だけでなく、維持管理が問題となる。近年になり、土/水連成解析の発展、普及とともに既存の構造物の長期的な変形挙動を予測できるようになってきた。しかしながら、地盤材料は弾塑性体であるため、解析を行う際の入力初期条件によって大きく解が異なることが予想される。盛土の場合、法面の存在により内部の応力状態、含水状態などの推定が困難である。地盤工学の現場では、このように傾斜地を含むような解析を行う場合、予め弾性解析を行い、出力された応力を現在の応力状態として入力することが多い。Clough and Woodward¹⁾は盛土の弾性解析を行う場合、盛土自重を一度にすべて作用させた場合と、築堤過程を模擬し、段階的に土材料を積み重ねて自重を作用させた

場合の、応力、変位を比較し、解が異なることを示している。つまり、例え弾性解析であっても、得られる応力解は単なる幾何条件によって決まるものではないことが明らかである。また、盛土に用いる材料は締固め土であり、間隙に空気相を含む不飽和土である。

本研究では、盛土内で発揮されている応力状態を推定するために、不飽和土弾塑性構成モデルを適用した土/水連成解析コード DACSAR-UA²⁾を用いて築堤シミュレーションを行う。

2. 解析に用いる不飽和土弾塑性構成モデル

近年、不飽和土構成モデルがいくつか提案されており、土/水連成解析にも用いられるようになってきた (Alonso ら^{3),4)}, Kohgo ら^{5),6)}, 軽部ら⁷⁾, 飯塚ら⁸⁾). 本研究では、盛土構築時の水分変化についても精査するため、水分特性曲線が示すヒステリシスの影響を考慮する必要がある。軽部らの構成モデルは唯一、水分特性曲線ヒステリシスを考慮しているが、最乾燥水分線の導入により数値計算が不安定になりやすいという問題を抱えている。そこで、本研究では軽部らのモデルを踏襲し、なおかつ数値計算に対する優位性を持った大野ら⁹⁾の不飽和土構成モデルを用いる。

大野らは、既往の不飽和土構成モデルでは、有効応力と剛性に寄与する状態量から成る空間に降伏曲面が描けることを示し、有効飽和度を状態量として採用することで水分特性曲線ヒステリシスを考慮したモデル (S_e -Hardening モデル) を提案している。不飽和土の有効応力は、次のように与えた。

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}^{net} + p_s \mathbf{1} \quad (1)$$

ただし、

$$\boldsymbol{\sigma}^{net} = \boldsymbol{\sigma} - p_a \mathbf{1} \quad (2)$$

$$p_s = S_e s, \quad s = p_a - p_w, \quad S_e = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \quad (3)$$

であり、 $\boldsymbol{\sigma}'$ は有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^{net}$ は基底応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$ は全応力テンソル、 $\mathbf{1}$ は二階の単位テンソル、 p_s はサクシオン応力、 s はサクシオン、 p_w は間隙水圧、 S_e は有効飽和度、 S_r は飽和度、 S_{rc} は $s \rightarrow \infty$ での飽和度である。

ここで、不飽和土の体積変化を $e - \ln p'$ 関係から

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (4)$$

ただし、 e は間隙比、 e_0 は降伏時の間隙比、 λ は圧縮指数、 p' は平均有効主応力、 ζ は飽和土の圧密降伏応力 p'_{sat} に対する不飽和土の圧密降伏応力の割合を与える関数である。間隙比を体積ひずみ ε_v で書き換えると、

$$\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (5)$$

となる。また、弾性体積ひずみは、

$$\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}}, \quad \kappa \text{ 膨潤指数} \quad (6)$$

となり、 $\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^p$ より、塑性体積ひずみ ε_v^p は、

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (7)$$

と表される。大野らは、不飽和土の剛性に関する状態量を有効飽和度にとり、以下の条件を満たすように、

$$\begin{aligned} \zeta &= \zeta(S_e) \\ \zeta &= 1 \quad \text{when } S_e = 1 \\ \zeta &= a \quad \text{when } S_e = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

ζ の具体式を以下のように与えた。

$$\zeta = \exp\left[(1 - S_{re})^n \ln a\right] \quad (9)$$

ここで、 a は飽和土の圧密降伏応力に対して最も不飽和化の影響が最大になる場合の ζ 、 n はフィッティングパラメータである。また、オリジナル Cam-Clay モデルの降伏関数に適用し、次式で表す降伏関数を定義した。

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (10)$$

ここで、 M は限界状態での応力比 p'/q 、 D は柴田のダイレタンシー係数、 q は、

$$q = \sqrt{\frac{3}{2} s : s}, s = \sigma' - p' \mathbf{1} \quad (11)$$

で表されるせん断応力である。式(10)に式(9)を適用すると、

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{p'_{sat} \exp\left[(1 - S_{re})^n \ln a\right]} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (12)$$

不飽和土の降伏関数が得られる。ここで、 $\zeta = 1$ のとき、式(12)はオリジナル Cam-Clay モデルの降伏関数に帰着する。図-1 は不飽和土の降伏曲面の概念図である

3. 弾性解析による盛土の築堤シミュレーション

本研究で行う不飽和土弾塑性モデルによる解析との比較のため Clough and Woodward に倣い、線形弾性モデルによる盛土の築堤解析を行う。

3. 1 解析条件

高さ 30m、幅 150m の盛土を設定し、図-2 のような平面ひずみ条件での解析領域を設定した。解析領域下端では変位を水平、鉛直方向とも拘束、左端では水平方向のみ固定とした。解析に用いた材料定数を表-1 にまとめる。盛土には自重のみが作用するものとして、解析領域発生とともに全要素に対して自重が同時に作用する場合と、鉛直方向に一要素ずつ積み上げていく場合を比較した。以降、前者を一段階載荷、後者を段階載荷と呼ぶ。

3. 2 解析結果

図-3 に線形弾性解析の結果をまとめる。左側は一段階載荷の、右側が段階載荷の結果である。水平応力、鉛直応力ともよく似た結果ではあるものの、一段階載荷が斜面方向に平行なコンターが現れているのに比べて、段階載荷の場合は解析領域左下端から同心円状にコンターが出ている。特に鉛直変位に大きな違いが現れているが、これは一段階載荷では同時に全要素を発生させるため、鉛直方向に要素のひずみが加算されて鉛直変位として現れるため、上に行くほど大きな変位となるが、段階載荷では要素を積み上げていく過程で要素を発生させるため、要素発生からの変位となるため天端では、変位がゼロという結果となった。

一度に盛り立てる要素を薄くすることである応力状態に漸近していくことが分かっており、地盤工学の現場で弾性解析を行うことの意味は、このように得られる解にそれほどの差異がないことに意義を見出せる。しかしながら、土材料の場合、弾性係数は拘束圧に依存するため少なくとも深度方向の弾性係数は一様ではない。また、盛土は不飽和状態で安定していることを考慮すると、不飽和土の構成モデルを用いるこ

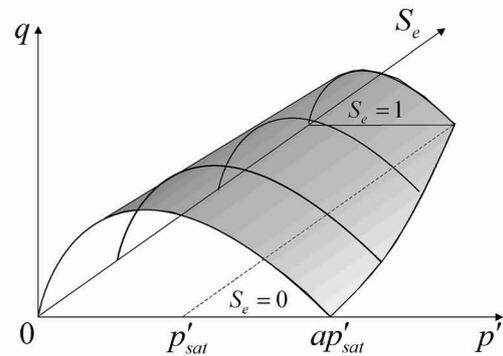


図-1 不飽和土の降伏曲面の概念図

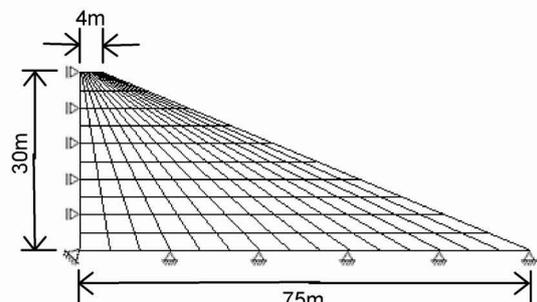


図-2 解析領域

表-1 弾性解析に用いた材料定数

ヤング係数 E (kN/m ²)	ポアソン比 ν'	盛土材の単位体積重量 γ'_{sat} (kN/m ³)
9.58×10^3	0.40	21.2

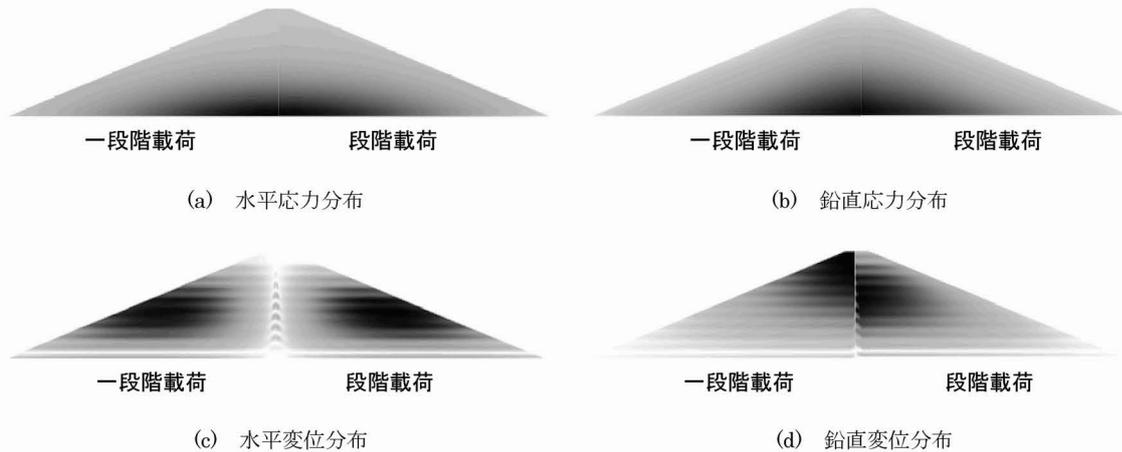


図-3 線形弾性モデルを用いた場合の解析結果

表-2 不飽和土/水連成解析の用いた材料定数

λ	κ	M	ν'	p'_{sat} (kN/m ²)	a	n
0.180	0.037	1.333	0.33	196	150	1.0
e_0	γ_t (kN/m ³)	k (m/day)	m			
1.20	14.7	0.01	1.2			

k : 飽和透水係数, m : Mualem¹⁰⁾の不飽和透水係数式のパラメータ

とが、より忠実な現場の再現を示すことと考える。

4. 不飽和土弾塑性解析による盛土の築堤シミュレーション

盛土の材料となるのは、締めめ土、つまり間隙に空気相を含んだ不飽和土である。不飽和土の挙動は、サクションおよびサクション履歴によって規定される含水状態である。式(3)で示されるように不飽和土の有効応力がサクションと含水状態の積として表されている以上、盛土内の応力分布もサクション、含水状態に大きく依存する。盛土構築の際には、含水比調整された土試料を一定の層厚で巻き出し、所定の乾燥密度まで締めめる。このとき発揮されるサクションは一定であると仮定すると、盛土内部で高さ方向に全水頭が大きくなり、盛り立て時に下向きの水の流れが生じることになる。ここでは、このような初期サクション分布が及ぼす影響についても検討する。なお、前節で行った弾性解析とは、土の単位体積重量に関して統一的に記述できないので、解析出力値の絶対値ではなく、応力分布の様子を比較することにする。

4. 1 解析条件

弾性解析と同じ盛土を想定し、図-2 に示す解析領域を設定する。水理境界条件に関しては、土要素間での水収支を許容し、全体の含水量の変化はないものとする。つまり、一段階載荷では、境界全てを非排水境界とし、段階載荷では、盛り立てる層は下部層との境界以外は非排水境界とし、下部層との境界は水理境界をキャンセルすることで要素間での水収支を可能とする。表-2 に解析に用いる材料定数をまとめる。また、材料の水分特性を図-4 で与える。図中実線で示されているのは、主脱水曲線と主吸水曲線であり、サクション～飽和度関係はこの間に存在することになる。水分特性曲線のモデル化には杉井・宇野¹¹⁾の提案するロジスティック曲線式を用い、河井ら¹²⁾のモデルを用いてヒステリシスを表現した。材料の初期サクション、飽和度に関しては、2通りの与え方をした。ひとつは、全要素の全水頭が等しくなるように、つまり位置水頭に応じたサクション(負の圧力水頭)を要素に与える方法である。この場合、盛土高さに応じて図-4 中のプロットで表されるサクション、飽和度を初期状態として要素に与えた。もうひとつは、盛り立てる層のサクション、飽和度は常に等しいとする方法であり、この場合、高さに応じて位置水頭の増分だけ全水頭を大きくなるため、盛り立て直後から鉛直下向きに水の流れが生

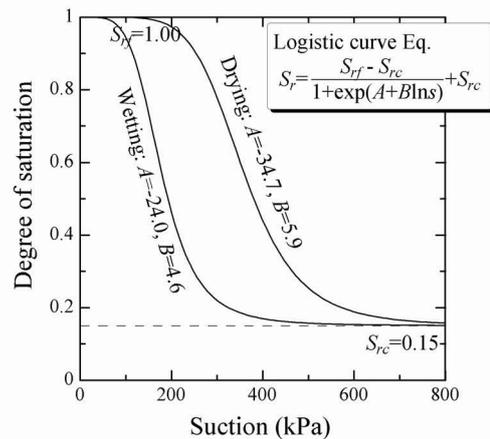


図-4 水分特性曲線

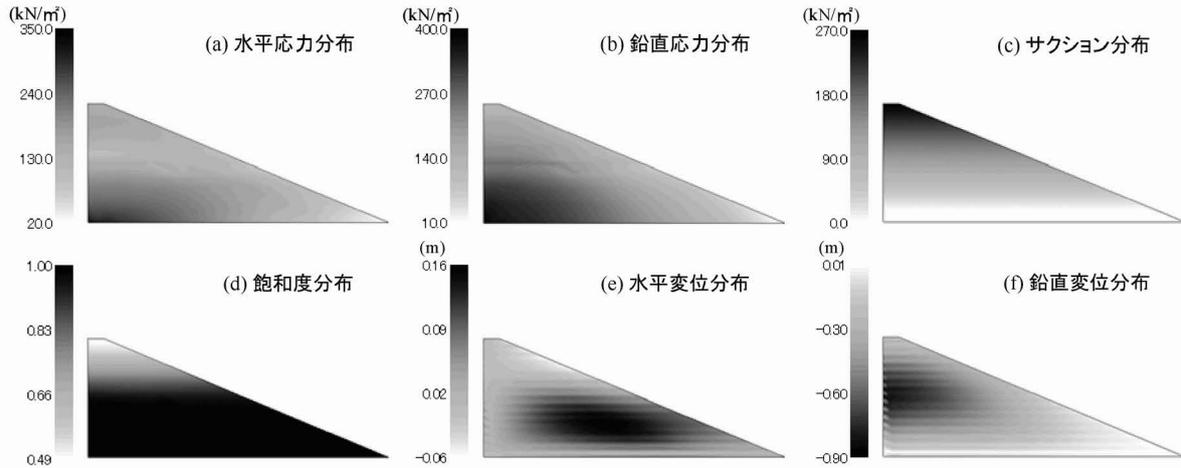


図-5 全水頭一定解析(段階載荷)の結果

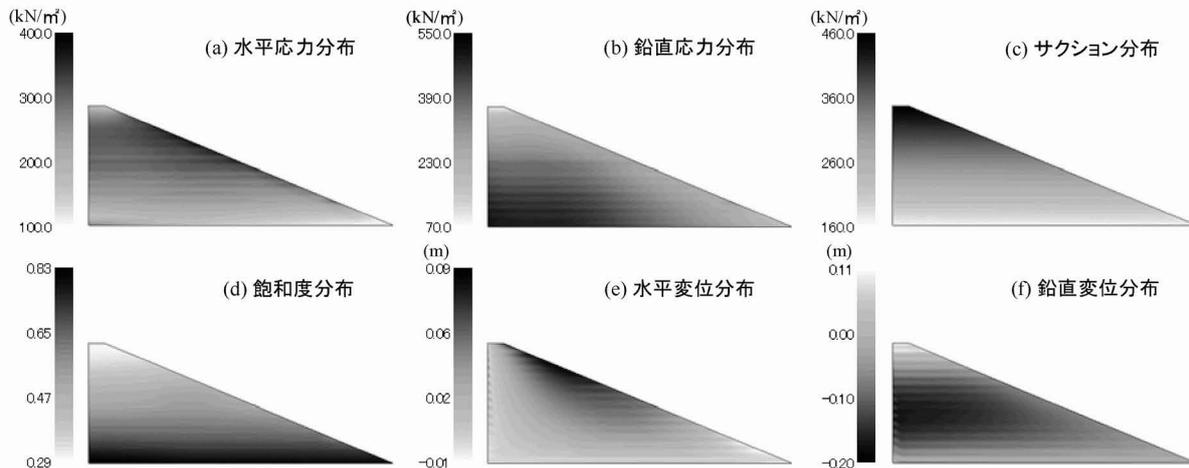


図-6 圧力水頭一定解析(段階載荷)の結果

じることになる。前者を全水頭一定解析，後者を圧力水頭一定解析と呼ぶ。圧力水頭一定解析では，盛り立て層の初期サクシオンを 333.2kPa，初期飽和度を 0.6 とした。

4. 2 解析結果

図-5 に，全水頭一定解析の段階載荷時の結果を示す。この結果は，盛土構築後，十分に時間が経過した状態である。初期に流れが定常状態になるように高さに応じたサクシオンを与えたため，変形の影響を少し受けているものの，サクシオン分布，飽和度分布は入力値とほぼ等しい値となっている。このサクシオンの効果が有効応力として含まれるため，盛土の高い位置においても有効応力としては上載荷重以上の応力が発揮されるため，弾性解析に比べると盛土鉛直方向の鉛直応力分布の差は小さい。また，サクシオンによる有効応力への寄与は等方的であるため，斜面近傍でもある程度の水平応力が発現しているのが確認できる。

図-6 に，圧力水頭一定解析の段階載荷時の結果を示す。全水頭一定解析と同様に，図は盛土構築後十分に時間が経過し定常状態になってからの結果のため，高さに応じたサクシオン分布で落ち着いているのが分かる。しかしながら，初期にサクシオンを有する材料で盛り立てているため，全水理境界が非排水条件の本解析では，盛土最下部においてもサクシオンが残留している状態であり，盛土全体が負飽和状態にある。その影響で鉛直，水平応力とも全水頭一定解析よりも大きな結果となった。絶対値が異なるものの，鉛直応力分布の様子が全水頭一定解析に似ている一方で，水平応力分布が異なる結果となった。これは，サクシオンの有効応力寄与分，サクシオン応力が式(3)のとおり飽和度に依存することになっており，水分特性曲線ヒステリシスの影響で必ずしも，大きなサクシオン=大きな有効応力寄与とならないためである。図-6(c),(d)の結果，斜面の中間上部でサクシオンの有

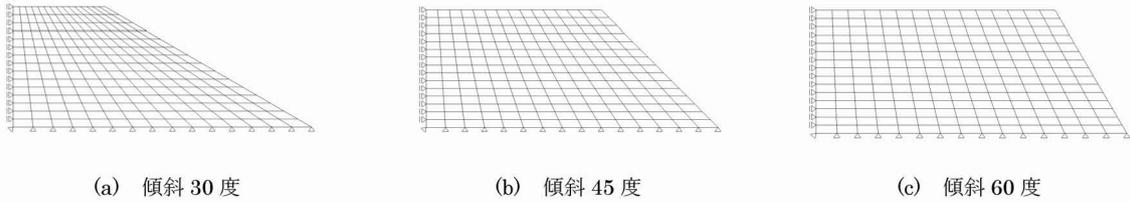


図-7 斜面形状の異なる解析メッシュ

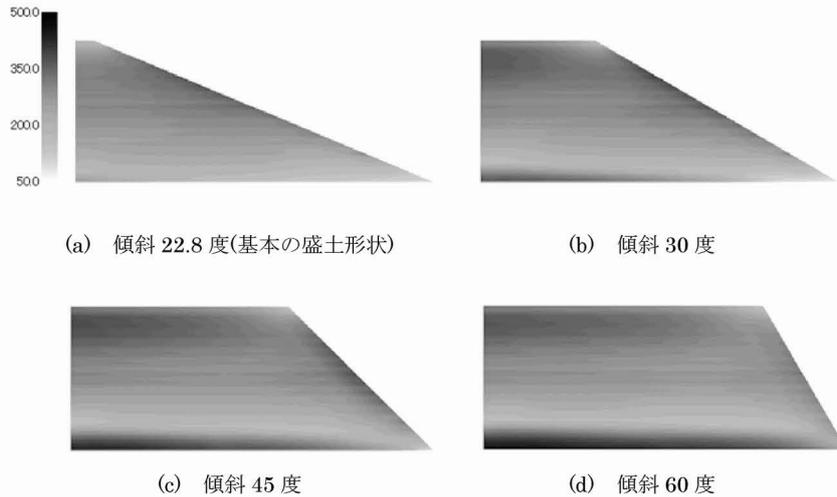


図-8 水平応力分布

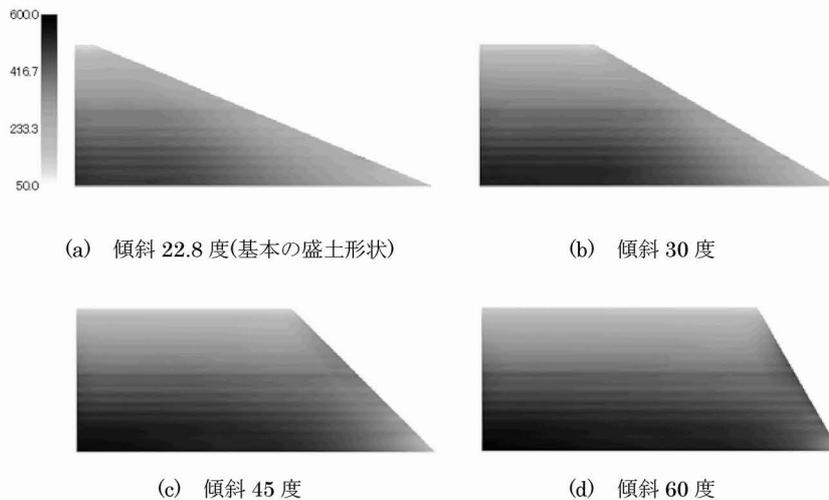


図-9 鉛直応力分布

効応力寄与分が卓越したものと考える。この影響は、変位にも大きく現れている。特に水平変位が、弾性解析、全水頭一定解析と全く異なる結果となっているのは、そのためである。しかしながら、サクシオンが全体的に大きいため、全水頭解析よりも変異量は小さくなっている。このように、初期サクシオンの与え方によって、内部に非定常な流れが生じ、その結果、複雑な応力分布、変位分布を呈することが分かる。少なくとも、既存の盛土構造物を見て、上載荷重や静水圧分布から応力を推定することが不可能であると言える。

5. 斜面形状の違いによる応力・変位分布の比較

ここでは、不飽和土/水連成解析を用いて、新たに3つの形状の盛土を想定し、築堤シミュレーションを行う。

5.1 解析条件

図-2に示す盛土の傾斜は22.8度である。この盛土を基準とし、新たに傾斜30度、45度、60度の盛土について、

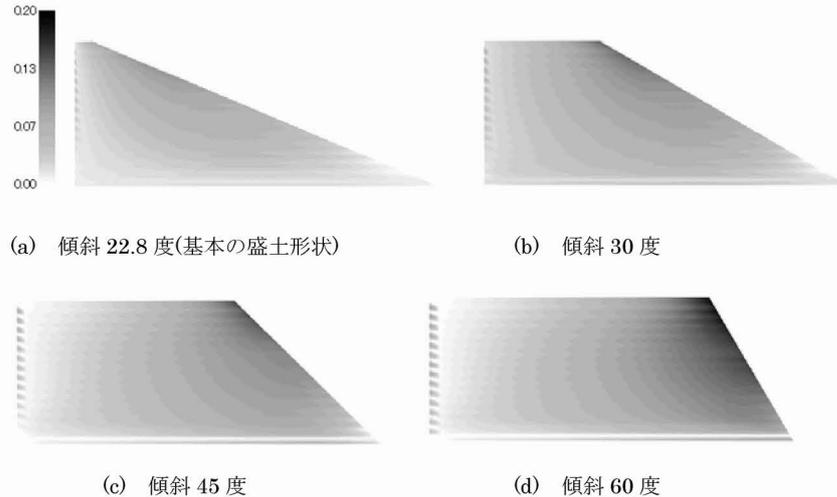


図-10 水平変位分布

築堤シミュレーションを行う。用いる解析メッシュは図-7 に示すとおりである。以降、解析結果は、盛り立て時の圧力水頭一定で段階的荷重を行った場合である。

5. 2 解析結果

解析から得られた水平応力分布を、図-8 に示す。水平応力分布は基本の盛土と同様に、どの形状の盛土でも斜面側に卓越している部分がある。どの傾斜の盛土でも、同程度の大きさの水平応力が斜面上の同じ高さの部分に現れていることから、これはサクシオン応力の影響であるといえる。傾斜が急になるほど斜面近傍から内部に向かって薄く分布するような傾向を示すのは、傾斜が急な盛土ほど、斜面近傍で鉛直応力が増加するため、サクシオン応力の影響が目立たなくなっているためと考えられる。同時に、傾斜が急になるほど盛土内部の水平応力は増加していく。これは弾性解析の結果が示すとおりである。

図-9 に、鉛直応力分布を示す。当然、傾斜が急になるほど斜面側でも大きな鉛直応力が現れるようになっていることがわかる。

図-10 は、水平変位分布である。基本の盛土と同様に斜面側で卓越するが、盛土の形状による傾向が顕著に現れている。傾斜の緩い盛土では、斜面上の比較的浅い表層部分に変位しているが、斜面が急になるにつれて盛土内部にまで大きく変位が生じていることがわかる。図-10 に見られる変位の境界線がすべり面を示しているわけではないが、緩斜面で表層すべり、急斜面で円弧すべりとしている現在の斜面防災の考え方と合致するものであり、興味深い結果である。

6. 結論

本研究では、不飽和土の構成モデルを用いて、種々条件下で築堤シミュレーションを行った。Clough and Woodward の研究からも明らかなように、例え、弾性解析であっても、盛り立て過程による結果の違いが現れることが分かった。現在、地盤工学の現場で既存の解析領域に傾斜地が含まれている場合は、予め弾性解析を行い、その結果を応力状態として入力する場合は、多いが地形生成過程を考慮した場合、その解が現状と異なるものである可能性があると言える。少なくとも、解析上でも実施工に忠実に段階的荷重を考える必要があることがわかった。

また、実際に築堤に用いられる材料が、締固め土である以上、不飽和土としての挙動を考慮する必要がある。特に、その影響は、サクシオンの発現に大きく依存する。土は、含水比調整された瞬間からサクシオンを有し、盛り立てられ高さが高くなるほどに、鉛直方向にサクシオン分布が生じることは明らかである。このサクシオンの分布によって、盛土の応力状態も大きく異なることが分かった。既存の盛土構造物においては、築堤後、降雨や蒸発といった乾湿履歴を受け、なおかつ植生の吸水作用などによって内部のサクシオン、含水状態はより不均一なものとなっていることを考えると、現地の調査計測を詳細に行うことの重要と成ってくると考える。

7. 参考文献

- 1) Clough, R. W. and Woodward R. J.: Analysis of embankment stresses and deformations, *Journal of the SOIL MECHANICS AND FOUNDATIONS DIVISION, Proc. of the ASCE*, pp.529-536, 1967.

- 2) 金澤伸一, 橘伸也, 河井克之, 大野進太郎, 飯塚敦: 不飽和土/水連成有限要素解析における空間離散化手法の検討, 応用力学論文集, Vol.11, pp.331-338, 2008.
- 3) Alonso, E. E., Gens, A. and Hight, D. W. : Special problem soils. General Report., *Proc. 9th European RC-SMFE*, pp.1087-1146, 1987.
- 4) Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A. : A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, Vol.40, No.3, pp.405-430, 1990.
- 5) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T. : Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.49-63, 1993.
- 6) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T. : Verification of the generalized elasto-plastic model for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.64-73, 1993.
- 7) 軽部大蔵, 加藤正司, 浜田耕一, 本田道識 : 不飽和土の間隙水状態と土塊の力学的挙動の関係について, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.83-92, 1996.
- 8) 飯塚敦, 本田道識, 西田博文, 河井克之, 軽部大蔵 : 間隙水分布の違いを考慮した不飽和土の土/水連成解析, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.165-178, 2000.
- 9) 大野進太郎, 河井克之, 橘伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集, Vol.63, No.4, pp.1132-1141, 2007.
- 10) Mualem, Y.: A conceptual model of hysteresis, *Water Resources Research*, Vol.10, No.3, pp.514-520, 1974.
- 11) 杉井俊夫, 宇野尚雄: 新しい水分特性曲線のモデル化について, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, pp.130-131, 1995.
- 12) 河井克之, 汪偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化, 応用力学論文集, Vol.5, pp.777-784, 2002.

著者 : 1) 河井克之、都市安全研究センター、助教 ; 2) 田中麻穂、工学研究科、学生 ; 3) 金澤伸一、工学研究科、学生 ; 4) 橘伸也、埼玉大学地圏科学研究センター ; 5) 大野進太郎、鹿島建設 ; 6) 飯塚敦、都市安全研究センター、教授 ; 7) 竹山智英、国土技術政策総合研究所

Banking simulation with the constitutive model for unsaturated soil

Katsuyuki Kawai
Maho tanaka
Shinichi Kanazawa
Shinya Tachibana
Shintaro Ohno
Atsushi Iizuka
Tomohide Takeyama

Abstract

The soil/water-coupled simulation is effective for prediction of long-term stability of the earth structures. The determination of the initial stress state is very important there. In case of an earth structure that has slope geometrically on itself, there is difficulty in determination of stress state. Therefore, the elasticity analysis is commonly carried out on geotechnical engineering site when we need to know the stress state of such earth structure. Clough & Woodward (1967) performed the elasticity analysis on embankment with two methods to load and showed the differences in stress state between two methods. The material used for construction of embankment is compacted soil, namely unsaturated soil. The application of unsaturated soil mechanics is needed for detailed prediction.

In this study, the banking simulations as Clough & Woodward did are carried out with elasto-plastic constitutive model for unsaturated soil. Moreover, the behavior of pore water is considered with soil/water-coupled analysis applied Darcy's equation and soil-water retention characteristics. Consequently, it is found that the stress state within embankment strongly depends on the initial water content and suction, thickness of one layer to bank up, and so on. The achievements of this study present difficulty in prediction of current stress state within existing embankment.