

# 築堤シミュレーションにおける設定条件が盛土内応力分布に及ぼす影響

Influences of initial and boundary conditions in banking simulation on stress distribution within an embankment

田中麻穂<sup>1</sup>・河井克之<sup>2</sup>・金澤伸一<sup>3</sup>・橘伸也<sup>4</sup>・大野進太郎<sup>5</sup>・飯塚敦<sup>6</sup>・竹山智英<sup>7</sup>

Maho TANAKA, Katsuyuki KAWAI, Shin-ichi KANAZAWA,

Shinya TACHIBANA, Shintaro OHNO, Atsushi IIZUKA and Tomohide TAKEYAMA

<sup>1</sup>工学士, 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

<sup>2</sup>工博, 神戸大学准教授, 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

<sup>3</sup>工博, 中央大学助教, 研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

<sup>4</sup>工博, 埼玉大学助教, 地圏科学研究センター (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

<sup>5</sup>工博, 鹿島建設㈱, 土木設計本部 (〒107-0052 東京都港区赤坂 6-5-30)

<sup>6</sup>工博, 神戸大学教授, 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

<sup>7</sup>工博, 東京工業大学助教, 工学部 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

It is difficult to estimate the current stress state of existing embankments because of their inherent sloping geometric shapes. Therefore an elastic analysis is always carried out in advance and the calculated stress state, assumed as the current stress, is used as an input parameter in the deformation analysis of an embankment. However, the stress state of a banking material can be quite complicated since banking materials are elasto-plastic and unsaturated in most cases, and, their behavior strongly depends on the stress history. In this study, the banking process is simulated with an elasto-plastic constitutive model for unsaturated soil. Specifically, the effects of banking speed and initial suction within the banking material are considered. It is found that the post-banking stress state depends on the distribution of the initial suction due to soil-water retention characteristics.

**Key Words :** Embankment, Unsaturated soils, Banking simulation

キーワード：盛土，不飽和土，築堤シミュレーション

## 1. はじめに

フィルダムや河川堤防などの土構造物は、供用段階における長期的な安定性が重要であり、設計のみならず維持管理時の挙動予測が問題となる。近年、土/水連成解析の普及・発展に伴い、土構造物の長期的な変形挙動を予測できるようになりつつある。しかしながら、既存構造物の挙動予測を行うためには初期条件として、現在の応力状態が必要である。その際、盛土のように幾何学的に斜面を有するような地形条件では、内部応力状態を同定することが難しく、予め盛土を弾性体と仮定し、弾性解析を行い、得られた応力値を初期入力条件とするのが一般的である。Clough and Woodward<sup>1)</sup>は、築堤過程を弾性解析することの意義を示している。しかしながら、土は弾塑性体であるため単なる幾何学的条件によって応力分布が定まらないのは明らかである。また、盛土など陸上土構造物は、構成関係のみならず水分特性にもより強い非線形性を有する不飽和土であ

る。そこで、本研究では不飽和土/水連成有限要素解析により築堤シミュレーションを行い、得られる応力分布に及ぼす解析条件の影響について検討する。

## 2. 解析に用いる不飽和土構成モデル

近年、不飽和土の構成モデルがいくつか提案されており、土/水連成解析に用いられるようになってきた。不飽和土は、水収支により飽和土とは異なる挙動を呈することから、特に水分特性曲線上に現れるヒステリシスを考慮することが重要である。軽部ら<sup>2)</sup>のモデルは、サクションだけでなく含水状態を考慮したモデルであり、用いる水分特性曲線形状を問わないため、水分特性によって生じるヒステリシスを考慮できるが、最乾燥水分線から応力成分を求めるため、設定する最乾燥水分線にモデルの挙動が大きく依存すること、またその感度が高いため、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。本研究では、大野ら<sup>3)</sup>によって提案されたモデル(S<sub>e</sub>-Hardening モデル)を使用する。大野らのモデルでは、不飽和土の剛性に寄与する状態量として有効飽和度を設定しているため、複雑な計算過程を要せず、水分特性曲線ヒステリシスの影響も考慮し得る。さらに、降伏曲面状に特異点を持たないEC モデル<sup>4)</sup>を適用し、数値計算上の問題点を回避する。

有効応力は、以下のように表される。また、太字はテンソル、細字はスカラーである。

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

$$\text{ただし, } \sigma^{net} = \sigma - p_a \mathbf{1}, \quad p_s = S_e s \quad (2)$$

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

であり、 $\sigma'$ :不飽和土の有効応力テンソル、 $\sigma^{net}$ :ネット応力テンソル、 $\mathbf{1}$ :2階の単位テンソル、 $\sigma$ :全応力テンソル、 $s$ :サクション、 $p_s$ :サクション応力、 $p_a$ :間隙空気圧、 $p_w$ :間隙水圧、 $S_r$ :飽和度、 $S_e$ :有効飽和度、 $S_{rc}$ :水分特性曲線上に現れる残留飽和度である。さらに、圧密による土の体積変化を $e - \ln p'$ 関係から、

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

のように与える。ただし、 $e$ :間隙比、 $e_0$ :降伏時の間隙比、 $\lambda$ :圧縮指数、 $p'$ :平均有効主応力、そして、不飽和化による圧密降伏応力の増大を飽和状態における圧密降伏応力 $p'_{sat}$ の $\zeta$ 倍という形で表現した。ここで、間隙比を体積ひずみ $\varepsilon_v$ 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、

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

となるため、 $\varepsilon_v = \varepsilon_v^e + \varepsilon_v^p$ より、塑性体積ひずみは以下の様に表される。

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

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、

$$\zeta = \zeta(S_e)$$

$$\zeta = 1 \text{ when } S_e = 1$$

$$\zeta = a > 1 \text{ when } S_e = 0$$

$\zeta$ の具体式を以下の様に与えた。

$$\zeta = \exp[(1 - S_e)^n \ln a] \quad (8)$$

ここで $n$ : $e - \ln p'$ 面上の等飽和度線の間隔を調整するパラメータ、 $a$ :不飽和化による剛性の増大が最大時の圧密降伏応力の倍率を決定するパラメータである。さらに、降伏関数にEC モデル(図-1)を用いると、土のコントラクタンシー挙動は、

$$\varepsilon_v^p = \frac{MD}{n_E} \left( \frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} \quad (9)$$

と表すことができる。ただし、 $n_E$ :フィッティングパラメータ、 $M$ : $q/p'$ で表された限界応力比、 $D$ :ダイレイタンシー係数であり、

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (10)$$

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

であり、 $\mathbf{s}$ :偏差応力テンソルである。塑性体積変化が圧密とコントラクタンシーの影響のみで考えられると仮定すると、

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + \frac{MD}{n_E} \left( \frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} \quad (12)$$

よって、塑性体積ひずみを硬化パラメータとする降伏関数を次式で定義した。

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + \frac{MD}{n_E} \left( \frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (13)$$

式(13)に式(8)を適用すると、

$$f(\sigma', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{p'_{sat} \exp[(1 - S_e)^n \ln a]} + \frac{MD}{n_E} \left( \frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (14)$$

となり、不飽和土の降伏関数が得られる。飽和状態( $S_e = 1$ )及び $n_E = 1$ のときには、式(14)は Cam-Clay モデルに帰着する。図-2 に不飽和土の降伏曲面の概念図を示す。本研究では、不飽和土／水連成有限要素解析コード“DACSAR-UA”<sup>5)</sup>を用いる。

### 3. 不飽和土構成モデルを用いた築堤シミュレーション

既述の通り、盛土解析には弾性解析が一般的に用いられているが、盛土材料として用いられるのは、間隙に空気を含んだ不飽和土である。実際の施工で

は、含水比調整された材料を撒き出すため、撒き出された時点ではある程度のサクションを有していると考えられる。用いている材料が不飽和土である以上、サクション等の影響を考慮する必要がある。本章では、不飽和構成モデルを用いて築堤シミュレーションを行うことによって、得られる初期応力状態、また、解析手法の違いによって、どのような違いが生じるのかについて検討を行う。

### 3.1 解析条件

解析対象となる盛土を図-3に示す。天端幅3.75m、下端75m、高さ30mを想定する。解析領域の下端は水平・鉛直方向ともに固定、左端は水平方向のみ固定とし、平面ひずみ解析を行う。また、上下左右端ともに非排水境界とする。まず、要素盛り立てに際しては、要素の初期条件として、所定の水頭を与える。このとき、待機と接する節点では非排水条件が課される。与えられた水頭によって水収支が生じ、新たな水頭が計算される。さらに、その上に要素を盛り立てる際にも同様の操作を行うが、盛り立て層とその下部層の間では、非排水条件がキャンセルされ、要素間の水収支を可能にする。解析に用いる材料定数を表-1、水分特性曲線を図-4のように与える。図中の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。用いている水分特性曲線のモデル化

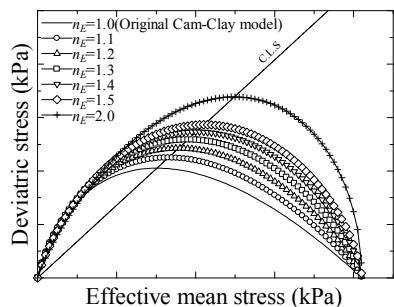


図-1 EC モデルの降伏曲面

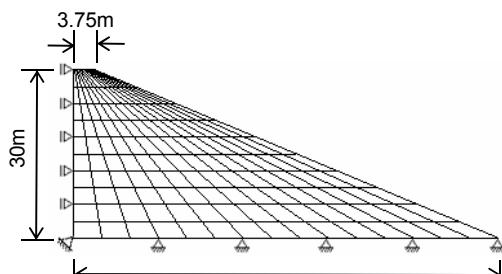


図-3 解析対象

表-1 解析で用いる材料パラメータ

$\lambda$	$\kappa$	$M$	$\nu$	$a$	$n$	$k$ (m/day)	$m$	$\gamma_t$ (tf/m <sup>3</sup> )
0.18	0.037	1.333	0.33	10	1.0	0.01	0.8	1.5

には、杉井・宇野<sup>6)</sup>の提案するロジスティック曲線式を用い、河井らのモデル<sup>7)</sup>を用いてヒステリシスを表現した。

築堤は、下部から段階的に1層毎に盛り立てていく過程を模擬した。解析内では、要素発生とともに下部要素上部に発生要素の自重を与え、盛り立て要素に関しては自重分を等価節点力として現応力を与えている。また、一層の盛り立てを20日間かけて徐々に行うものとした。発生要素の初期サクション、飽和度には2通りの方法を仮定した。一つ目は、要素高さに応じた初期サクションを設定する方法であり、静水圧分布となるように初期サクションを与える。この場合、解析初期では鉛直方向の全水頭差がない定常状態を示す。二つ目は、要素高さに関係なく初期サクション、飽和度(図-4中の黒丸プロット)を一定とする方法である。実際の盛土では、撒き出された盛土材料は等しい含水状態であることから、一定のサクションを持つと想定される。解析上では、要素発生時に鉛直方向の圧力水頭が等しいため、全水頭に差が生じ、解析初期から鉛直下向きの流れが生じることとなる。前者を全水頭一定解析、後者を圧力水頭一定解析と呼ぶ。本研究では、全水頭一定解析と圧力水頭一定解析を比較するために、まず圧力水頭一定解析を行い、定常状態におけるサクション～飽和度関係(図-4中、白三角プロット)を初期条件として入力し、全水頭一定解析を

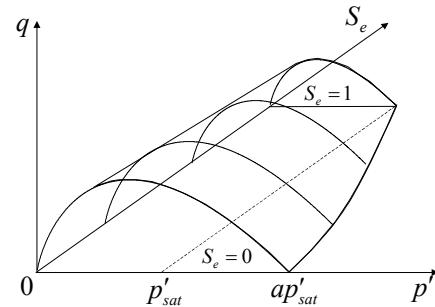


図-2  $S_e$ -Hardening モデルの降伏曲の概念図

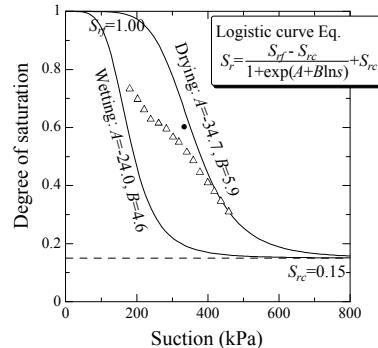


図-4 水分特性曲線

$m$ : Mualem<sup>8)</sup>の不飽和透水係数式のパラメータ

行う。また本研究では、実際の盛土の材料パラメータを用いて定量的な結果を求めていっているのではなく、解析手法による定性的な違いを求めるために重点をおいた。

### 3.2 解析結果

圧力水頭一定解析の結果を図-5に、全水頭一定解析の結果を図-6に示す。これらの図は、築堤終了後も十分に放置を行った後の様子である。サクション分布から、定常状態になっていることが確認できる。圧力水頭一定解析から得られるサクション、飽和度を初期条件として与えたにも拘らず、応力、変形の発現分布が異なることが確認できる。図-5、

図-6の(b)、(c)より、水平、鉛直応力とも盛土内部で大きくなっているものの、鉛直応力に関しては、圧力水頭一定解析では、応力の高い領域がより水平方向に広く分布しているのが分かる。全水頭一定解析では、鉛直応力の分布は斜面と平行に等価線が現れており、Clough and Woodward が行った弾性解析の分布に似ている。また、(f)の体積ひずみ分布から、圧力水頭一定解析では盛土の上部で、わずかながら膨張が起こっていることがわかる。水分移動により、上部ではサクションが増加するとともに飽和度が減少する。このとき、サクション増加に比べて飽和度の低下が大きいため、式(2)から算出されるサク

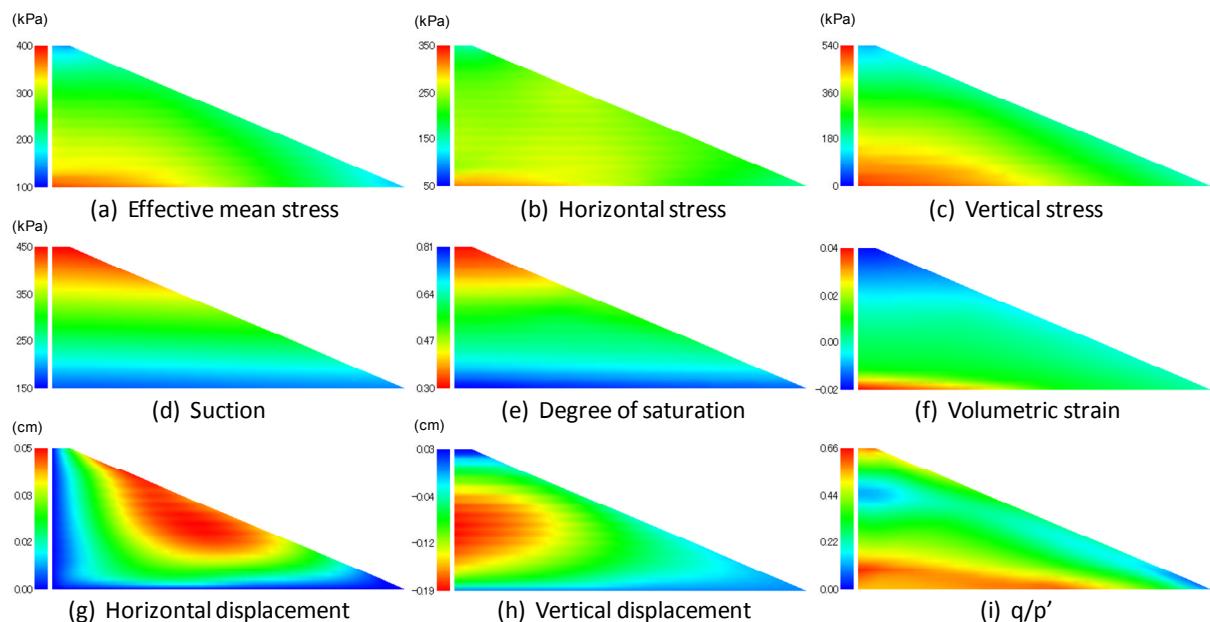


図-5 圧力水頭一定解析

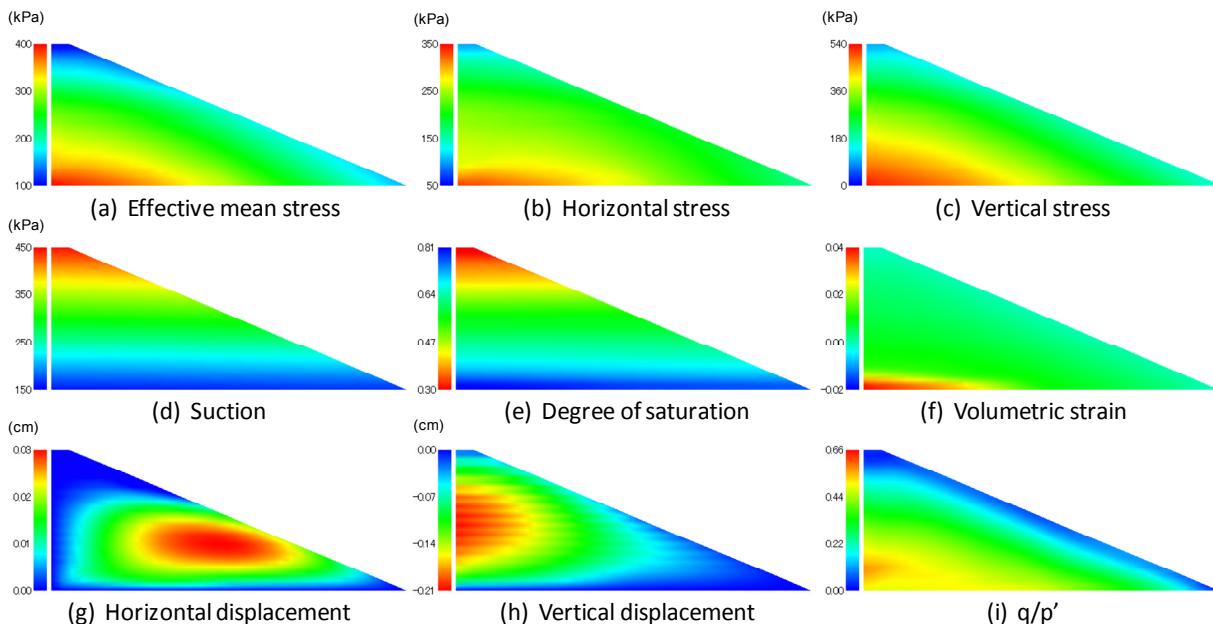


図-6 全水頭一定解析

ション応力が減少したことが要因として考えられる。Clough and Woodward も示している通り、弾性解析では、段階的に要素を発生させると、変位は要素発生時を初期状態として計算されるため、水平、鉛直変位とも盛土の中央高さ付近で最大値を示す。

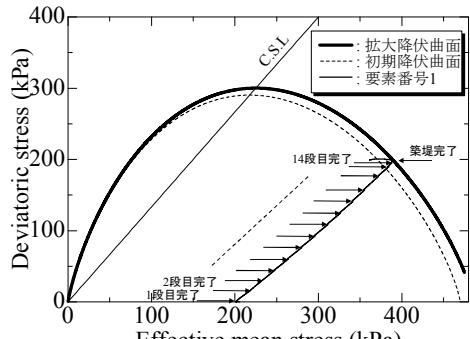


図-7 圧力水頭一定解析

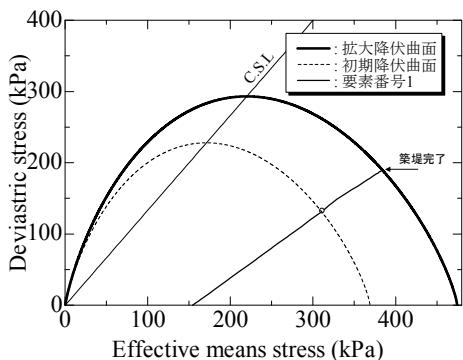


図-9 全水頭一定解析

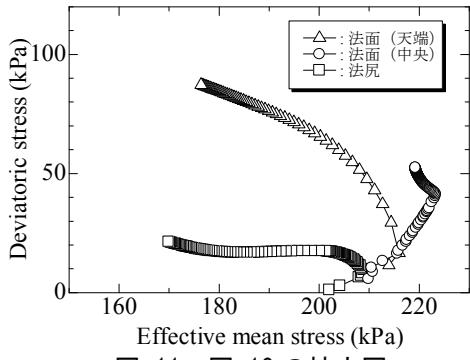


図-11 図-10 の拡大図

全水頭一定解析の結果も、そのようになっている。しかしながら、圧力水頭一定解析における(g)の水平変位は、斜面付近に変位が卓越していることがわかる。本研究では脱水曲線に近い初期の飽和度を選択することで締め固められた築堤材料を模擬して

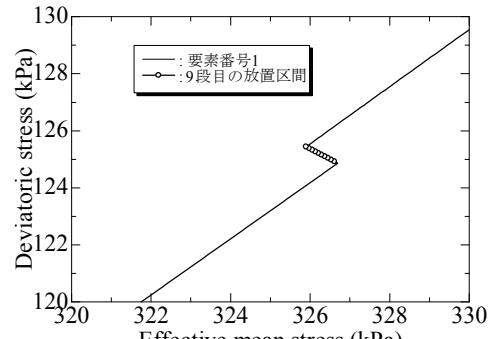


図-8 図-7 の拡大図

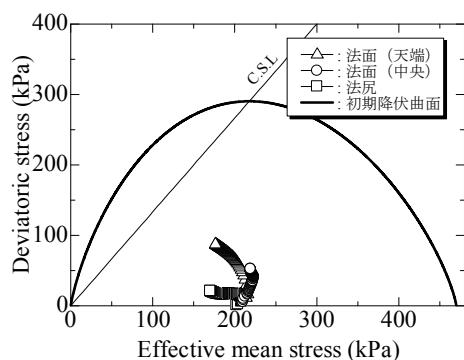


図-10 圧力水頭一定解析

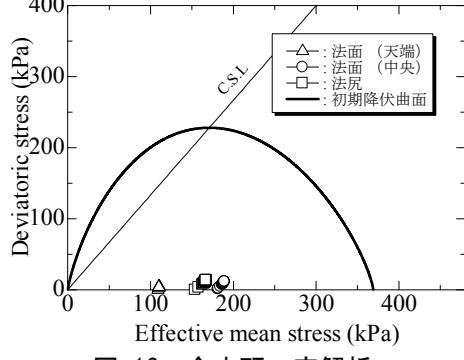


図-12 全水頭一定解析

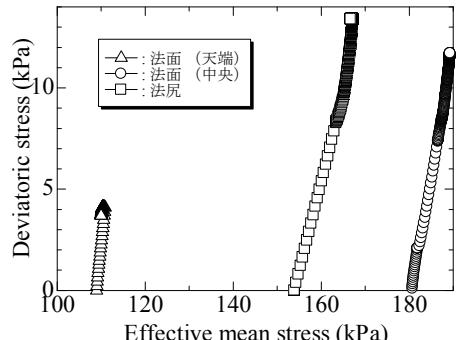


図-13 図-12 の拡大図

圧力水頭一定解析及び全水頭一定解析の応力経路図

おり、採用している初期飽和度と初期サクション及び、用いている水分特性曲線の影響で沈下があまり生じない。また、転圧を想定していないことからも変位は実際のものより小さい。平均有効主応力と偏差応力の比を表している(i)より、2つの解析では応力分布が大きく異なっていることが明らかである。圧力水頭一定解析のほうが、より破壊に近い応力比となっていることが確認できる。

ここで、両解析から得られる応力経路について検討を行う。まず、図-7、図-9は、それぞれ圧力水頭一定解析及び全水頭一定解析における盛土の中心(左下端)要素の応力経路である。どちらも過圧密領域からの $K_0$ 圧密のような経路を描いているのが分かる。しかしながら、圧力水頭一定解析では、築堤終了直後から、 $q$ はほぼ一定で平均有効主応力 $p'$ が減少している様子が見られる。盛り立て時の水収支によって、最下部の当該要素では、常にサクションが低下することになる。サクション低下時には、要素に等方的に作用するサクション応力が低下するため、このような経路になったものと考えられる。図-7中では、各層の盛り立てた時を示しているが、盛り立て時を拡大した図-8より、築堤終了後のみならず、盛り立てによってわずかに $p'$ が減少しているのが分かる。図中、白丸プロットが放置期間を示しているが、定常状態に至る前に次の層の盛り立てが始まっていると予想され、放置期間の長さによっては、異なる結果が得られる可能性もある。次に、盛土の法面(天端)、(中央)、及び法尻の応力経路

を図-10及び図-12に示した。それぞれ拡大した図が、図-11及び図-13である。式(2)で表されるサクション応力の影響で、法面中央部で最も大きな $p'$ が現れている。圧力水頭一定解析では、 $p'$ の減少とともに $q$ が増加しており、より危険側の応力経路を示しており、一方全水頭一定解析では、 $p'$ はほとんど変化せず $q$ が増加しているが、応力比はそれほど大きくなかった。その結果が、図-5、6(i)の分布の違いとなって表れたものと考えられる。さらに、図-11、12に見られる応力経路について、平均有効応力の違いは既述のようにサクション変化が原因と考えられるが、偏差応力 $q$ の値にも大きな差が生じている。これは、圧力水頭一定解析の場合、水収支による飽和度変化があるため拘束圧に依存する弾性係数が変化するからと考えることができる。

以上より、初期の全水頭分布が解析結果に大きく影響を及ぼすことが分かった。全水頭の鉛直分布が一様であると仮定する解析から得られる応力分布は、一般的に行われている弾性解析と定性的に等しい結果を与える。例えば、鉛直応力分布に関して、全水頭一定解析と圧力水頭一定解析では応力分布に違いが見られたが、一般的な弾性解析を行っても全水頭一定解析と同様の鉛直応力分布を示す。しかしながら、盛土材料の撒き出し時のサクションが、盛土高さに応じて高くなるとは考えにくく、全水頭分布が初期に非定常状態であることは明らかであることを考えると、盛り立て速度、放置期間によって、様々な応力分布を呈すると考えられる。

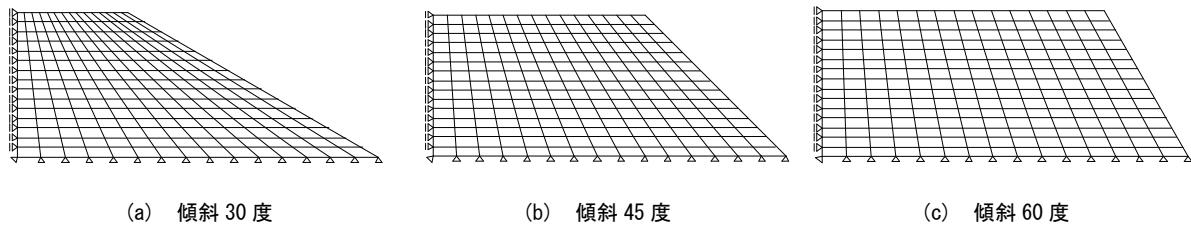


図-14 斜面形状の異なる解析メッシュ

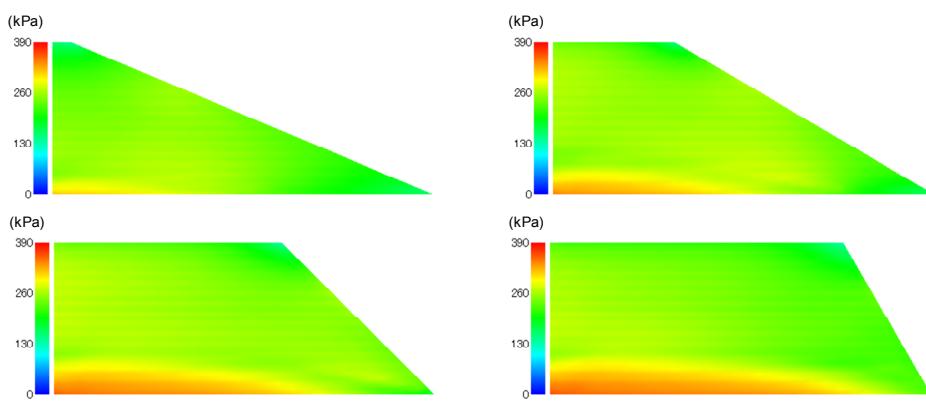


図-15 水平応力分布図

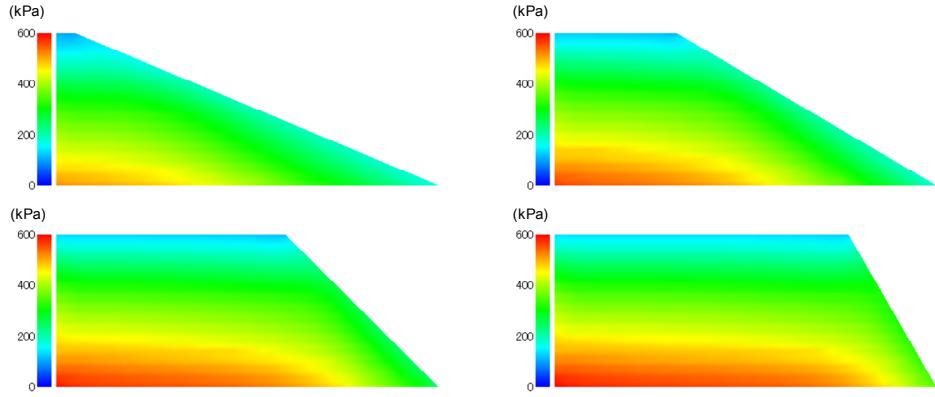


図-16 鉛直応力分布図

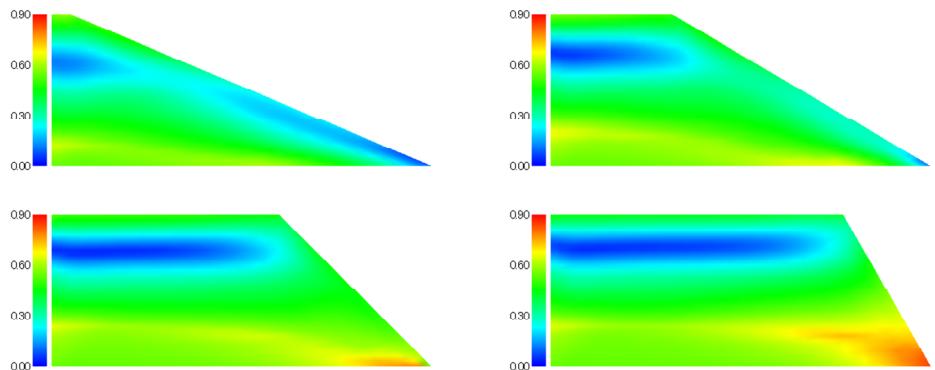


図-17 応力比分布図

#### 4 盛土形状を変更した解析

前章では、初期全水頭分布の違いが出来される応力状態に及ぼす影響について検討を行ったが、本章では、盛土の幾何形状の影響を検討する。前章で示したように、圧力水頭一定解析の方が実際の施工に近いことから、本章では圧力水頭一定解析を行う。

##### 4.1 解析条件

解析条件を以下に述べる。解析対象の盛土として、前章で得た結果との比較のため、以下の3つの盛土を追加する。**図-14(a)**の盛土は、傾斜30度、(b)は45度、(c)は60度の盛土である。また、境界条件や初期条件、盛り立て方法は、前章で用いたものと同様とし、築堤シミュレーションを行う。

##### 4.2 解析結果

**図-15、図-16**は、それぞれ解析から得られた水平応力分布、鉛直応力分布である。**図-15、図-16**より、傾斜が急な盛土ほど、盛土内部の応力の大きな領域が、広く水平方向に発達していることが分かる。法面に近い部分では、盛土内部に比べて、鉛直応力に対する水平応力の比が大きくなっていると

考えられる。斜面が緩いほど、法面と平行な応力センターが盛土内部から法面にかけて発生しており、表層すべりの原因となるような応力分布となっている。一方、急斜面盛土では、法面近傍での深度方向の応力分布が生じており、同時に主応力面方向に関する深さ方向に異なると考えられ、円弧すべりを生じると同様の応力分布となっていると考えられる。これらより、盛土の形状によって応力状態に及ぼす影響が異なることが分かる。**図-17**は、応力比 $q/p'$ の分布を表している。傾斜が急になるほど、法尻に、応力比の大きな領域が卓越するようになることが分かる。盛土の中央よりやや高い位置で、応力比の小さな領域が存在するが、これは前述したようにサクション応力が大きな領域であり、サクション応力が等方的に作用することで応力比を低減しているものと考えられる。

#### 5 結論

本研究では、不飽和構成モデルを用いた土/水連成有限要素解析により、築堤シミュレーションを行った。実際に築堤に用いられる盛土材料は弾塑性体かつ不飽和状態であり、線形弾性体モデルや飽和土

構成モデルでは表現することができない挙動を示す可能性が大いに考えられる。本研究では、特に初期の全水頭分布に注目し解析を行った。その結果、初期の全水頭が一様で流れが定常状態にあれば、現在一般的に行われている弾性解析により応力状態を推定する手法と同じ、応力分布が得られることが分かった。ただし、不飽和土の構成モデルを用いることによって、各層の不飽和化による剛性の違いが表現されることになるので、より現実的であることを付記する。しかしながら、盛土材料撒き出し時のサクションが等しいとする圧力水頭一定解析では、撒き出し直後から鉛直方向の流れが生じることを意味し、それによって応力分布が大きく異なることが分かった。本研究では、撒き出し後の放置期間に関する検討は行っていないものの、非定常状態のまま盛り立てていくことを考えると、得られる応力状態は様々であると考えられる。また、初期のサクション、飽和度に関しても、一ケースしか考慮していないが、水分特性曲線ヒステリシスの影響、不飽和透水係数の影響によって、異なる応力分布を呈するものと考えられる。つまり、盛土の幾何条件だけでなく、初期条件に築堤シミュレーションから得られる応力分布が大きく依存していることが明らかである。精緻な予測結果を得るために、詳細な土質定数や構成モデルの他に、初期条件の設定方法も重要であることが本研究から示された。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ョン、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が重要と成ってくると考える。

## 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) Karube, D. and K. Kawai: The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, No.3, pp.211-241, 2001.
- 3) 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.
- 4) 大野進太郎、飯塚敦、太田秀樹：実験結果の再現性が高いダイレイタンシー表現式の提案とそれを用いた土の弾塑性構成式の導出、第39回地盤工学研究発表会
- 5) 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
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.514-522, 1976.

(2010年3月9日 受付)