



土／水／空気連成有限要素法を用いた締固め土の力学挙動の解析

金澤, 伸一
豊嶋, 拓馬
河井, 克之
橘, 伸也
飯塚, 敦

(Citation)

土木学会論文集A2 (応用力学) , 68(2):I_291-I_298

(Issue Date)

2012

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2012 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003361>



土／水／空気連成有限要素法を用いた締固め土の力学挙動の解析

Analysis of the mechanical behavior of compacted soil with F.E. method

金澤伸一*・豊嶋拓馬**・河井克之***・橘伸也****・飯塚敦*****

Shin-ichi KANAZAWA, Takuma TOYOSHIMA, Katsuyuki KAWAI,

Shinya TACHIBANA and Atsushi IIZUKA

*工博 中央大学助教 理工学部都市環境学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

**工学士 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1)

***工博 神戸大学准教授 都市安全研究センター (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

****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)

*****工博 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1)

Compacted soil is widely used to build earth structure. Although construction management of the soil progresses day by day, it is said that mechanism of compaction effect isn't fully made clear. This is due to the complication of compaction mechanism of unsaturated soil. Recently, some constitutive models for unsaturated soil and SWCC models were proposed and advanced the study on unsaturated soil. In this study we regarded compaction as the consecutive cycle of compression and expansion of unsaturated soil under undrained condition, and simulated it with unsaturated soil/water/air coupled finite element analysis. In this study, we expressed the characteristics of the mechanical behavior of compacted soil, which has not been explained for a long period of geotechnical engineering. And we considered the difference of compaction procedure affected the quality of earth structures. The achievement can be managed reasonably the compaction of earth structure.

Key Words: compacted soil, unsaturated soil, finite element analysis

1. はじめに

近年、構造物の品質に対しアセスメントを求められることは社会的趨勢となっており、それと同時に要求性能を満足することが必須の性能照査型設計法に移行している。また、盛土構造物においても同様に、性能設計導入について議論され続けている。盛土構造物のほとんどは締固め土で構成されており、港湾施設、高速道路、河川堤防といった主要構造物において幅広く利用され、その重要性も認められてきた。締固め土を利用した土構造物の施工管理手法は、使用する土の種類や施工方法などによって適切なものを選択できるように様々なものが存在している。さらに施工技術の発展や、管理における測定技術の進歩なども相まって、現在では維持管理の体制がより安全なものへとなりつつある。しかしながら、その一方で締固め土に対する力学的説明は十分とは言えず、締固め土を使用する際に求められる強度を得るための施工方法などは示されているものの、実際に使用する材料の特性が考慮されていない。さらにはその強度発現のメカニズムに関しても完全に解明

されていない。その理由として、締固め土を構成している大部分が不飽和土で構成されており、その不飽和土の力学体系の確立が不十分であったことが挙げられる。しかし近年では、不飽和土に関する研究が進み、その力学的な理解や解釈が深まってきたと言える。また、不飽和土の力学挙動を表現できる、不飽和土の弾塑性構成モデル^{1), 2), 3), 4)}、不飽和土特有の水分特性曲線モデル^{5), 6)}も数多く提案されている。そういったモデルと同様に、不飽和土の挙動をより精緻に表現するためには、土を三相混合体^{7), 8), 9)}として捉える必要がある。

本論文では、土／水／空気連成有限要素解析プログラム(DACSAR-MP と称する)の開発を行い、締固めによる不飽和土の力学挙動を三相連成問題として解くことで、完全に解明されていない、締固めの強度発現機構について考察を行う。また、解析時の条件として、締固めにおける載荷速度の違いによる影響(間隙内に発生する空気圧の影響)を調べることで、締固めに対する機構や載荷速度の影響を検討する。さらに締固めを盛土の要素として捉え、浸透過程における力学挙動を知ること、今後の締固め管理に対する提案を数値解析から検討する。

2. 解析に用いる不飽和土構成モデル

近年、数々の不飽和土構成モデルや水分特性曲線モデルが提案され不飽和土構造物に対する力学挙動が解明されつつある。本論文で用いる構成モデルは、不飽和土の弾塑性構成モデルとして大野ら⁴⁾によって提案されている S_e -Hardeningモデルである。このモデルは、有効飽和度が剛性を表す状態量とした、いわゆる構成モデル自身がコープスを表現できるモデルとなっている。さらに、数値計算上、微分不可能な特異点に移行することを回避するために、特異点を持たない大野ら¹⁰⁾のECモデルを組み込んだ。ここでECモデルとは、土のコントラクタンシー特性を指数関数で表現した弾塑性構成モデルのことである。

大野らは、有効応力を以下のように表した。

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

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

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

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}'$:不飽和土の有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^{net}$:ネット応力テンソル、 $\mathbf{1}$:2 階の単位テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$: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} :吸着水が占める飽和度である。

さらに一般的な含水状態にある土の体積変化を、

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

とした。ここで e_0 :初期間隙比である。

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 ζ 倍という形で表現した。 ζ は有効飽和度の関数となっており、次のように表すことが出来る。

$$\zeta = \exp[(1 - S_e)^b \ln a] \quad (5)$$

となり、ここで b : $e - \ln p'$ 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。特に、 a はフィッティングパラメータとして取り扱うことが多い。

さらに、間隙比を体積ひずみに変換し、塑性体積ひずみを表すと、

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (6)$$

となり、ここから不飽和土の圧密降伏応力の変化を表す式は、

$$p'_c = \zeta p'_{sat} \exp\left(\frac{\varepsilon_v^p}{MD}\right) \quad (7)$$

と書ける。ここで、 p'_c : 平均有効主応力で表された先行圧密応力、 $M = q/p'$ で表された限界応力比、 D : ダイレーンシー係数であり、

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (8)$$

の関係にある。

降伏関数の導出に用いる EC モデルの降伏関数は次式のように表した。

$$f(\boldsymbol{\sigma}', p'_c) = MD \ln \frac{p'}{p'_c} + \frac{MD}{n_E} \left(\frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} = 0 \quad (9)$$

ここで、

$$p' = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma}' : \mathbf{1}, \quad q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}}, \quad \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{1} = \mathbf{A} : \boldsymbol{\sigma}', \quad \mathbf{A} = \mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$$

となり、 \mathbf{I} : 4 階の単位テンソルである。また、 n_E は EC モデルのフィッティングパラメータである。

EC モデルの降伏関数式(9)に式(7)を代入し、不飽和土の降伏関数を次式のように導いた。

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

また、式(10)に $n_E = 1.0$ を代入すると、

$$f(\boldsymbol{\sigma}', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (11)$$

となる。式(11)は、飽和状態 ($S_e = 1$) では、 $\zeta = 1$ となり一般的な飽和土の弾塑性構成モデル (オリジナル Cam-Clay モデル) に帰着する。

図-1 に S_e -Hardening モデルが示す不飽和土の降伏曲面の概念図を示す。図-2 に EC モデルの降伏曲面を示しており、 $n_E = 1.0$ ($\zeta = 1.0$) の場合オリジナル Cam-Clay モデルに帰着し、 n_E が大きくなるほど尖り点が解消され微分可能となる。また、本論文では等方性モデルとして用いることとする。

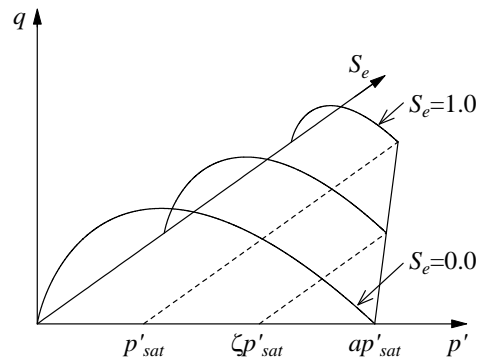


図-1 不飽和土の降伏曲面の概念図

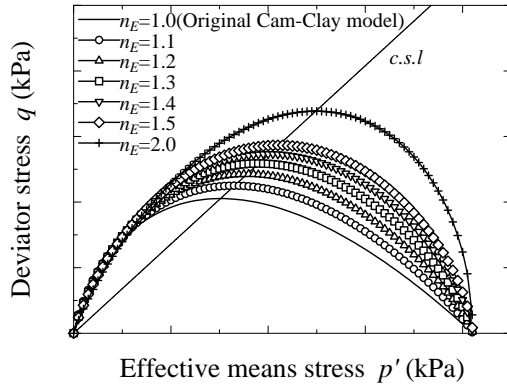
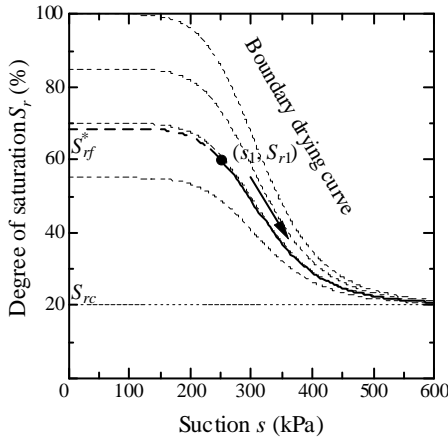


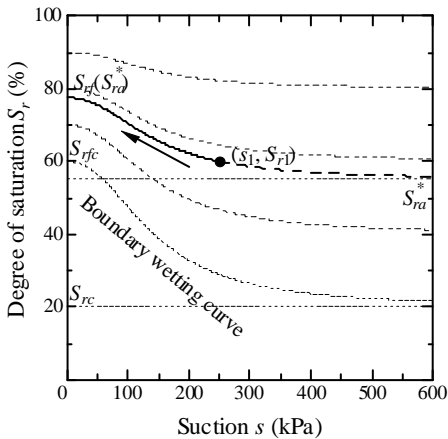
図-2 ECモデルの降伏曲面

3. 解析に用いた水分特性曲線モデル

不飽和土の力学挙動を左右する水分特性曲線(サクシオン～飽和度関係)は、脱水時と吸水時で異なることは広く知られている。つまり、サクシオン～飽和度関係を表した水分特性曲線は唯一ではなく、脱水時もしくは吸水時の保水状態に依存して、無数の走査曲線が存在する。そこで、河井ら⁶⁾は、それらの走査曲線が脱水時と吸水時ではそれぞれ相似な形であることを利用することで、ヒステリシス



(a) 脱水曲線



(b) 吸水曲線

図-3 水分特性曲線モデル

表現が可能な水分特性曲線モデルを提案している。また、任意のサクシオン、飽和度状態から描く脱水、吸水曲線は、杉井、宇野⁵⁾のロジスティック曲式(図-3)を用いる。

4. 初期値・境界値問題への定式化

本論文では、Borja⁹⁾の提案する三相混合体理論をもとに、以下に示す支配方程式を有限要素法によって組み込み、土／水／空気連成有限解析コード(DACSAR-MP)を開発した¹¹⁾。

4.1 支配方程式

土／水／空気連成問題における場の支配方程式を増分型でまとめると以下ようになる。ただし、圧縮側を正とし、微小変形を仮定する。

$$\bullet \text{ 釣合式: } \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma}^T + \rho \mathbf{g} = 0, \quad (\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^T) \quad (12)$$

$$\bullet \text{ 有効応力の式: } \dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \dot{\boldsymbol{\sigma}}^N + \dot{p}_s \mathbf{1}, \quad \dot{\boldsymbol{\sigma}}^N = \dot{\boldsymbol{\sigma}} - \dot{p}_a \mathbf{1} \quad (13)$$

$$\bullet \text{ 不飽和弾塑性構成式: } \dot{\boldsymbol{\sigma}}' = \mathbf{D} : \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} - \mathbf{C}^s : \dot{S}_e \quad (14)$$

$$\bullet \text{ 適合条件式: } \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = -\frac{1}{2}(\nabla \dot{\mathbf{u}})^s = -\frac{1}{2}(\nabla \dot{\mathbf{u}} + \nabla \dot{\mathbf{u}}^T) \quad (15)$$

・ダルシー則(水) :

$$\tilde{\mathbf{v}} = -\mathbf{k}_w \cdot \operatorname{grad} h = -k_{rw} \frac{\mathbf{K}_{ij}}{\eta_w} \cdot \operatorname{grad} h \quad (16)$$

・ダルシー則(空気) :

$$\tilde{\mathbf{v}}_a = -\mathbf{k}_a \cdot \operatorname{grad} h_a = -k_{ra} \frac{\mathbf{K}_{ij}}{\eta_a} \cdot \operatorname{grad} h_a \quad (17)$$

・液相に関する連続式 :

$$n \dot{S}_r - S_r \dot{\varepsilon}_v + \operatorname{div} \tilde{\mathbf{v}} = 0 \quad (18)$$

・気相に関する連続式 :

$$(1 - S_r) \dot{\varepsilon}_v + n \dot{S}_r - n(1 - S_r) \frac{\dot{p}_a}{p_a} - \operatorname{div} \tilde{\mathbf{v}}_a = 0 \quad (19)$$

ここで、 $\boldsymbol{\sigma}'$: 有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^N$: ネット応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$: 全応力テンソル、 p_s : サクシオン応力、 p_a : 間隙空気圧、 \mathbf{D} : 弾性剛性テンソル、 $\boldsymbol{\varepsilon}$: ひずみテンソル、 \mathbf{C}^s : 係数テンソル、 S_e : 有効飽和度、 \mathbf{u} : 変位ベクトル、 $\tilde{\mathbf{v}}$: 間隙水の流速ベクトル、 $\tilde{\mathbf{v}}_a$: 間隙空気の流速ベクトル、 h : 間隙水の全水頭、 h_a : 間隙空気の全水頭、 \mathbf{k}_w : 不飽和透水係数、 k_{rw} : 比透水係数、 \mathbf{K}_{ij} : 固有透過係数、 η_w : 水の粘性係数、 \mathbf{k}_a : 透気係数、 k_{ra} : 比透水係数、 η_a : 空気の粘性係数、 S_r : 飽和度、 ε_v : 体積ひずみ、 n : 間隙率を示す。なお、上付きの s は () 内のテンソルの対称部分を示す。

4.2. 比透水係数・比透気係数

不飽和透水係数・透気係数についても、いくつかの関数モデルが提案されている。本論文では、Mualem¹²⁾の不飽和透水係数推定モデルと Van Genuchten¹³⁾の透気係数式を用いることとする。これらの関数モデルから導かれる比透水係数と比透気係数は、

$$k_{rw} = S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (20)$$

$$k_{ra} = (1 - S_e)^{\gamma} \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (21)$$

で表される。

ここで、 m ：不飽和透水係数式の形状パラメータ、 γ ：間隙の連続性に関わるパラメータを表し、一般的に $\gamma = 1/3 \sim 1/2$ である。

図-4に、有効飽和度に対する不飽和透水係数と不飽和透気係数の相関性を示す。ここでは、 $\gamma = 0.5$ 、 $m = 0.8$ とした。飽和度が上昇すると、それに伴い透水係数は上昇、透気係数は低下する。逆に、飽和度が下がると、透水係数は低下、透気係数は上昇するという関係を持つ。

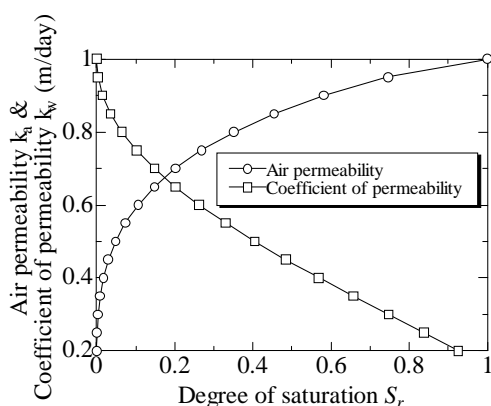


図-4 不飽和透水係数と不飽和透気係数の相関性 (例)

4.3 空間離散化・時間離散化

ここでは、先にあげた支配方程式である、釣合式、液相に関する連続式、気相に関する連続式を弱形式化したのち、空間離散化・時間離散化する。

離散化を行うにあたって以下の仮定を与える。

- (1) 9 節点アイソパラメトリック要素を用いるので、変位 (9 点)、全水頭 (4 点)、空気圧 (4 点) は各節点でもたせる。
- (2) ガラーキン法を適用する。
- (3) 増分量の評価に対して Euler 近似を適用する。

以上より、有限要素法を用いて、空間離散化・時間離散化を行い、釣合式、連続条件式、気相連続条件式を連立させ、それを解くことで離散点の変位増分 $\{\Delta u\}$ 、間隙水圧 $\{p_w\}$ 、間隙空気圧 $\{p_a\}$ の解を得る。

5. 载荷速度の違いによる締固めシミュレーション

本章では、新たに構築した、土/水/空気連成有限要素解析プログラム (DACSAR-MP) を用い、締固めにおける载荷速度の違いによる影響を調べることで、要素内に封入される間隙空気による影響を解析的に検討する。

5.1 解析条件

図-5 に解析に用いたメッシュ図を示す。解析領域のサイズは、高さ 20mm・幅 10mm の要素を想定する。解析領域の下端は水平・鉛直方向ともに固定、左右端は水平方向のみを固定し、一次元圧縮・除荷条件とする。また、解析領域上下端・左右端は非排水境界とし、上端のみを排気境界とし、土粒子と水は非圧縮性、空気は圧縮性とする。図-6 に締固めの荷重条件を示す。荷重条件を载荷と除荷にそれぞれ、0.25 分・0.5 分・1 分・2 分・4 分の計 5 パターンとした。最終荷重は 500kPa とした。この値は一般的な盛土施工で使われている 20t 程度のタイヤローラによる締固めを参考にしている。また、全てのパターンにおいて载荷前に 10 分、除荷後に 60 分放置し、境界値問題の最終結果に至るまでの過程を十分に考察できる条件として設定した。つまり、全要素で同じ初期サクションを与えると、深度方向に初期の水分状態が非定常状態となるため、解析領域内の流れが定常になるまで時間をおいた。解析に用いる材料パラメータを表-1、水分特性曲線を図-7 のように与える。材料パラメータ等は河井ら¹⁴⁾の締固めシミュレーションを参考にした。

ここで、 $b : e - \ln p'$ 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、 v ：ポアソン比、 A 、 B ：水分特性曲線のフィッティングパラメータで、添え字の D は脱水曲線、 W は吸水曲線を示す。

初期状態として、間隙比 0.85、初期含水比を $w=10\% \sim 28\%$ で与えた。また、土粒子密度 ρ_s から得られる飽和度をもとに、与えた水分特性曲線の主吸水曲線上 (最も飽和度が低い状態) のサクションを算定し試料の初期サクションとした。非常に緩い状態からの締固め (荷重载荷時) は、土粒子接点を増加する過程であると考え、土粒子接点増加によって発現するサクションは、その飽和度状態で最も小さい状態であると考えられる。そこで、主吸水曲線上に初期状態を設定した。

5.2 解析結果

図-8 は、締固め終了時の変位から算出した乾燥密度を含水比ごとに整理した締固め曲線を示している。弾性から弾塑性に転じる含水比 (16%) や、ピークが現れる含水比は载荷速度に依存しない結果となった。しかし、最もゆっくりと締固めた载荷速度 4.0 分の結果に比べ、その他のものは高含水比で乾燥密度が減少しているのがわかる。そして、载荷速度を徐々に上げていくと、さらに乾燥密度が低下してゆく傾向となった。以下、締固め曲線のピークであ

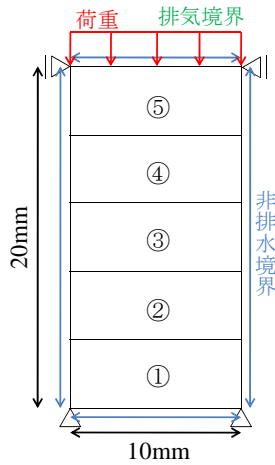


図-5 メッシュ図

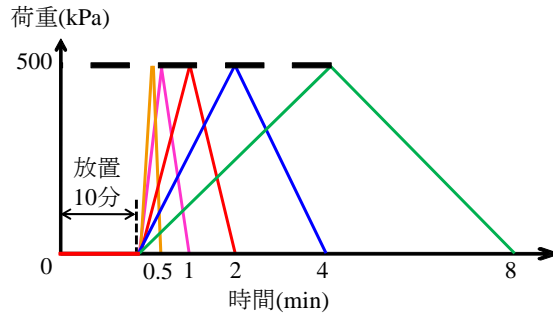


図-6 荷重条件

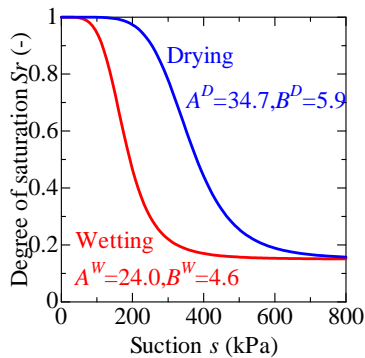


図-7 水分特性曲線

表-1 解析で用いた材料パラメータ

λ	κ	M	m	S_{r0}	k_a (m/day)	p_{sat} (kPa)
0.107	0.011	1.344	0.8	0.15	1.00	73.5
b	n_e	a	v	e_0	k_w (m/day)	ρ_s (g/cm ³)
1.0	1.3	30	0.33	0.85	0.01	2.7

m : Mualem¹²⁾の不飽和透水係数

$$(K_{rw} = S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^2 \right]) \text{ のパラメータ}$$

る $w=24\%$ での比較を行う。また、比較する要素は解析メッシュ図で示す要素③である。

図-9 は解析から得られた締固め過程における、平均有効主応力～間隙比関係を示している。締固め中は、飽和度上昇により飽和土の正規圧密線にシフトするような急な傾きをとる。また、荷重速度にかかわらず、先行圧密圧力が等しいことが分かる。しかし、降伏後、除荷に転じるまでの間に有効応力の増加量に差が生じている。その結果、最終的に締固め度に違いが生じることとなった。

次に、図-10、図-11 は締固め過程における荷重速度ごとの間隙空気圧、サクシオン応力、さらに、図-12 はその時の要素内における飽和度～サクシオン関係を示している。非排水条件であるため、どの荷重速度でも締固め中の荷重圧縮時には排気が進み、飽和度増加・サクシオン減少の吸水曲線上を、除荷膨張時には、逆に飽和度減少・サクシオン増加の脱水曲線上を移動している。その結果、図-12 に示すようなサクシオン、飽和度の経時変化が得られ、また荷重速度によって放置終了時で飽和度に差が生じており、荷重速度が大きいほど飽和度は低く、荷重速度が小さいほど飽和度が高くなった。図-10 から、荷重速度が大きいほど間隙空気圧の上昇も早く、間隙空気圧も高いがすぐに消散する。しかし、荷重速度が小さいほど、飽和度が上昇することで透気係数も低下し、間隙空気圧の消散に時間がかかることがわかる。また、図-11 から、締固め終了時点において、飽和度の違いによりサクシオン応

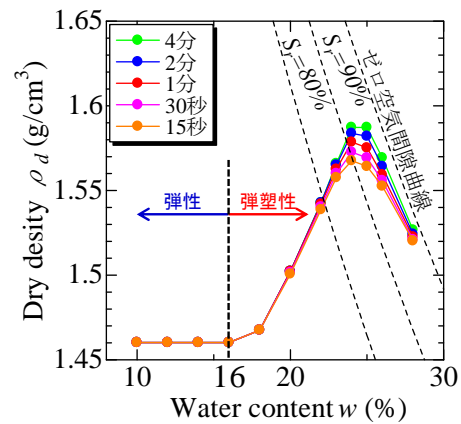


図-8 締固め曲線

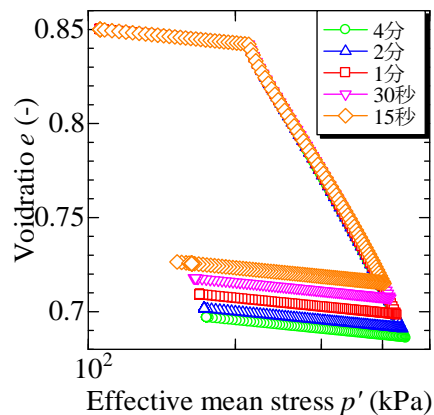


図-9 $e-\ln p'$ 曲線

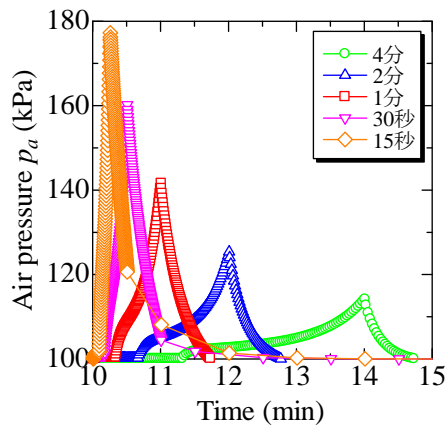


図-10 間隙空気圧の経時変化

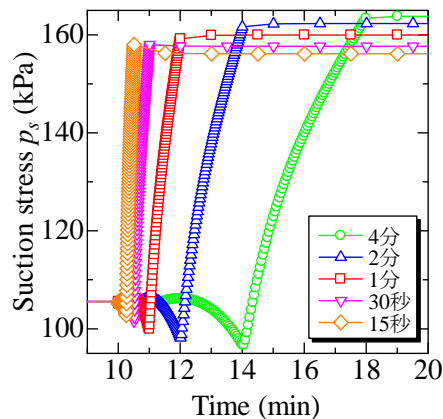


図-11 サクション応力の経時変化

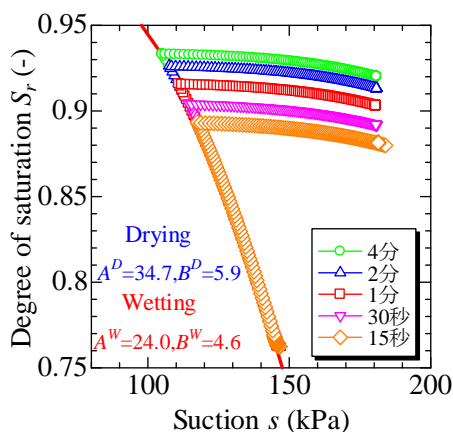


図-12 水分特性曲線

力に差が生じることで、結果的に締固め速度の違いによって有効応力にも差が生じることがわかる (図-9)。

以上、静的締固めの解析では載荷速度が締固め度に影響を与える結果となった。

6. 浸透による締固め土の強度変化

6.1 浸透シミュレーション

本節では、5章で得られた締固め土に対し浸透シミュレーションを行い、締固め土の浸透過程について解析する。

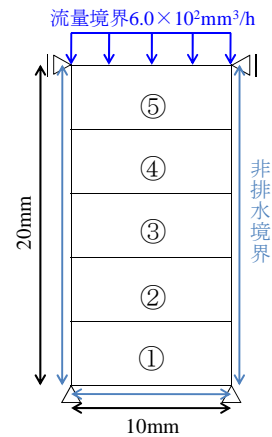


図-13 流量条件

(1) 解析条件

5章で行った、締固め土 (載荷速度 1 分) に対し、最上部の要素上面に降雨を与え浸透シミュレーションを行う。なお、境界条件は前節で行った解析条件の荷重境界を流量境界に置き換えたものとなっており、図-13 に示す。流量条件は $6.0 \times 10^2 \text{ mm}^3/\text{h}$ (時間雨量: 60 mm/h) とし、各供試体に対して飽和度がほぼ 100% になるまで流量を与え続けたのち、5.0 分の放置時間を設けた。

なお、対象とする含水比は、最適含水比 (24%) を中心に、DRY 側 (18%) と最適含水比付近 (22%), WET 側 (26%) の計 4 パターンである。

(2) 解析結果

図-14、図-15 に、浸透過程における平均有効主応力～間隙比関係、浸透過程における間隙空気圧の経時変化、さらに図-16 に飽和度～サクション関係を示している。

その結果、すべてのケースで吸水挙動を示し、サクションが大きく減少している。また、浸透によって飽和度は増加する一方、図-15 に示すように、高含水比ほど、飽和度の上昇によって透気係数が低下し、内部の間隙空気圧の消散に時間がかかっている。また図-14 より、浸水によってすべてのケースで平均有効応力が減少するとともに、

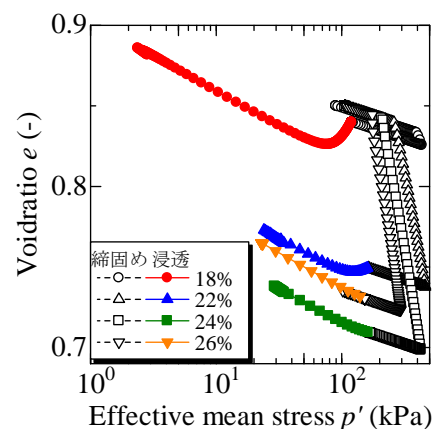


図-14 $e-\ln p'$ 曲線

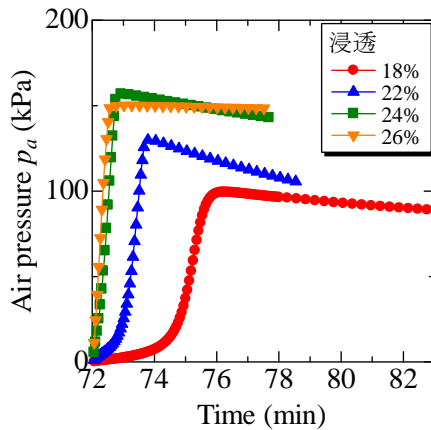


図-15 間隙空気圧の経時変化

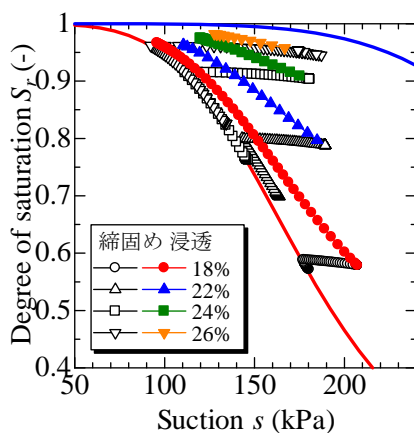


図-16 水分特性曲線

浸透終了後に膨張しているのがわかる。しかし、低含水比においては、浸透初期にコラプス現象がみとれる。

6.2 浸透による強度変化

久野¹⁵⁾は、締固めた土の性質として、締固め後の強度は、締固め曲線のピークよりも低い含水比で締固め土の強度のピークが現れるが、浸透を受けた後の強度は最適含水比付近となると実験的に説明している。

そこで、本節では浸透前後における強度特性について解析的に説明する。

(1) 解析条件

等体積せん断の解析条件を図-17に示す。前節の締固め～浸透シミュレーションによって得られた締固め土に対し、浸透前後で変位境界を変更した後、水平方向に強制変位を与えることで等体積せん断を表現する。せん断時の変位境界は、解析領域下端を水平・鉛直方向共に固定、左端・右端を鉛直方向のみの固定とする。水理・排気境界は非排水・上面排気境界とする。また、与えるひずみは、供試体高さ20mmに対して、せん断ひずみが最終的に15%になるように設定する。

なお、今回対象とする含水比は、久野が指摘している範

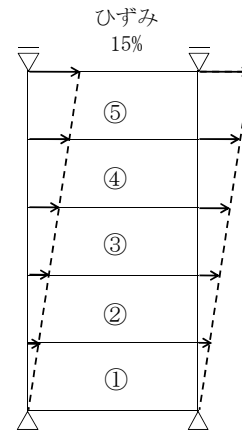


図-17 変位条件

囲である、最適含水比（24%）を中心に、最適含水比付近（22%）、WET側（26%）の計3パターンである。また、ここでは要素⑤の解析結果を示す。

(2) 解析結果

図-18 は浸透前のせん断過程における応力経路を示している。その結果、浸透前の締固め土は最適含水比よりも乾燥側の含水比（22%）でせん断強度がピークとなる結果

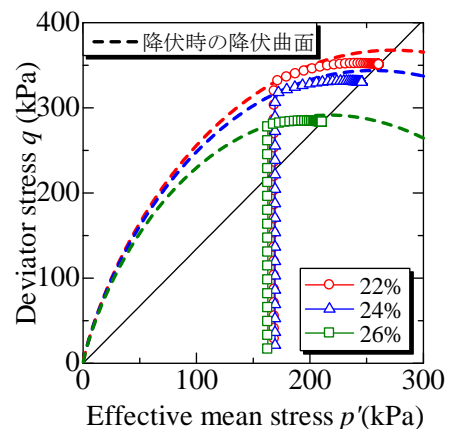


図-18 浸透前の応力経路

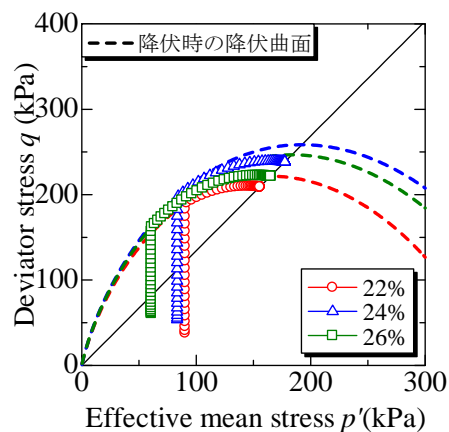


図-19 浸透後の応力経路

となった。また、図-19 は浸透後の応力経路を示している。これより、全ての含水比において、せん断強度の低下が見受けられた。ここでも、久野の指摘するように、最適含水比で強度がピークを示し、浸透前と強度の序列が変化する結果となった。これは、図-16 でも示したように、浸透に伴うサクシオン低下と最適含水比付近 (22%) では、図-14 で示したように、浸透によるサクシオン低下に伴う剛性低下によってコラプスが起こり、結果的にせん断強度に顕著に影響が表れたものと考えられる。

7. まとめ

本論文では、土/水/空気連成有限要素解析プログラム (DACSAR-MP) の開発を行い、締固めによる不飽和土の力学挙動を三相連成問題として解いた。また、締固めにおける載荷速度の違いによる影響 (間隙内に発生する空気圧の影響) を調べることで、締固めに対する機構や浸透シミュレーションによる強度変化について考察した。

その結果、載荷速度が小さいほど飽和度が上昇し、透気係数が低下することで、内部の間隙空気圧の消散に時間がかかる。また、締固め速度の違いによって、有効応力の変化に影響を与えることで、変形量にも差が生じる結果となった。

また、締固めを盛土内の要素として捉え、浸透シミュレーションによる強度変化を比較した。その結果、浸透前の締固め土は最適含水比よりも若干乾燥側の含水比でせん断強度がピークとなるが、浸透後は、最適含水比で強度がピークを示す結果となった。この要因として、浸透によるサクシオン低下に伴い剛性が低下した結果、コラプスが起こったためであると考えられる。

以上のように、締固めを三相連成問題として解くことで、間隙空気が締固め土、さらには浸透過程での変形・強度特性に与える影響を明らかにした。

今後は、実地盤における土質材料の物性値を用い、施工過程を模擬することで、締固めに対してより精緻な品質評価が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) Alonso, E. E., A. Gens and A. Josa: A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique*, Vol.40, No.3, pp. 405-430, 1990.
- 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) Kohgo, Y., M. Nakano and T. Miyazaki: Theoretical aspects of constitutive modeling for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp. 49-63, 1993.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 山崎順弘, 岡二三生, 小高猛司, 木元小百合, 金榮錫: 空気-水-土連成有限要素法による不飽和土の変形シミュレーション, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp.943-944, 2005.
- 8) 渦岡良介, 東海林達弘, 仙頭紀明, 風間基樹, 海野寿康: 間隙空気圧を考慮した不飽和地盤の液状化解析, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.779-780, 2008.
- 9) Ronaldo I. Borja, Cam-Clay plasticity. Part V: A mathematical framework for three-phase deformation and strain localization analyses of partially saturated porous media. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. Vol.193, pp.5301-5338, 2004.
- 10) 大野進太郎, 飯塚敦, 太田秀樹: 非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル, 応用力学論文集, 土木学会, pp. 407-414, 2006.
- 11) 金澤伸一: 不飽和土の数値モデルに基づく締固め土構造物の力学挙動評価, 神戸大学大学院博士論文, 2010.
- 12) 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.
- 13) Van Genuchten: A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol.44, pp. 892-898, 1980 .
- 14) 河井克之, 柴田昌輝, 金澤伸一, 橘伸也, 大野進太郎, 飯塚敦, 本田道識: 土/水連成有限要素解析プログラムを用いた静的締固めシミュレーション, 応用力学論文集, 土木学会, Vol.12, pp.429-436, 2009.
- 15) 久野吾郎: 土の締固め～主として道路土工に関連して～, 技報堂全書, pp. 65-77, 1963.

(2012 年 3 月 8 日 受付)