



不飽和土／水／空気連成解析を用いた締固めシミュレーション

河井, 克之
山田, 竜太郎
金澤, 伸一

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 14:45-59

(Issue Date)

2010-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.24546/81011310>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011310>



不飽和土/水/空気連成解析を用いた 締固めシミュレーション

Simulations of compaction with unsaturated soil/water/air coupling analysis

河井 克之¹⁾
Katsuyuki Kawai
山田 竜太郎²⁾
Ryotaro Yamada
金澤 伸一³⁾
Shinichi Kanazawa

概要: 現在、重要な土構造物において締固め土が広く使用されている。その管理規定は様々な物があるが、それらは経験的な観点から定められたものである。また、締固めについて力学的な説明が未だ十分になされていないと言える。その理由として主に挙げられるのが、締固め土を構成しているのが不飽和土であり、その不飽和土の力学自体が解明されていなかったことである。しかし現在、不飽和土の力学体系が整備され、締固めについても以前より研究がなされるようになった。その不飽和土は土、水、空気の三相より成り立っている。しかし、既往の研究においては土/水連成解析が主流であり、空気の影響は考慮されていなかった。そこで本論文において、既存の土/水連成有限要素解析プログラム DACSAR-UA¹⁾を、空気の影響を考慮した連続条件式を組み込むことで、土/水/空気連成有限要素解析プログラム DACSAR-MP へと改良した。その DACSAR-MP を用い、土の締固めを「不飽和土の非排水排気圧縮現象」と捉えて解析を行い、締固めのメカニズムについて考察を行った。さらに、締固めにおける載荷速度の影響を調べることで、間隙空気の影響を検討した。

キーワード: 締固め, 不飽和土, 数値解析

1. はじめに

現代の土構造物の多くは締固め土で構成されている。空港や高速道路などの重要な構造物においても幅広く使用され、その重要性は広く認められてきた。締固め土を利用した土構造物の施工管理の方法は、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によって、現在では維持管理の体制がより安全なものとなりつつある。しかし、その一方で締固め土の力学的説明は不十分だとされている。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ても、その強度発生のメカニズムなどは解明されているとは言い難い。その理由として、締固め土を構成するものの大部分が不飽和土であり、その不飽和土への理解が不十分であったことが挙げられる。

近年、不飽和土に関する研究が進み、その力学的な理解が深まってきたと言える。不飽和土の剛性を表すモデルや、不飽和土特有の水分特性のモデルなども数多く提案されてきている。不飽和土は土と水と空気の三相から成り立っている。より不飽和土の挙動を正確に表現するためには間隙空気の影響を考慮する必要がある。そこで、

本研究では不飽和土の解析手法の一つとして用いられている既存の土/水連成有限要素解析プログラム DACSAR-UA に間隙空気を考慮した連続条件式を導入し、土/水/空気連成の有限要素解析プログラム DACSAR-MP へ改良を行った。そのプログラムを用いて締固めシミュレーションを行い、締固めのメカニズムについて検討していく。

2. 解析に用いる不飽和土弾塑性構成モデル

本研究に用いる不飽和土の構成モデルとして、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²⁾) を用いた。不飽和土の有効応力は、次のように与える。

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

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。

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

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。

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

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、

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

で表されるせん断応力である。式(10)に式(9)を適用すると、

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

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

しかし、前述までの不飽和土構成モデルでは、降伏の際に微分不可能な特異点に至る場合がある。そこで、本論文ではさらに、降伏曲面の形状を変化させ数値計算上特異点に移行することを回避できる EC モデル³⁾を適用した。

柴田ら⁴⁾(1963)はダイレンタンシーによる土の間隙比変化は、応力比に対して直線的であると仮定し、関口・太田モデル⁵⁾ではこの過程を用いている。しかし、平均主応力一定排水せん断試験の結果、間隙比変化と応力比の関係が直線的になるとは限らない。そこで、大野らは実験値を忠実に再現するため、土のダイレンタンシー応答を表現する関数を指数関数によって表すことを提案している。

EC モデルの降伏関数は以下のように示される。

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

ここで、 n_E は EC モデルにおいてダイレンタンシー応答を実験結果にフィッティングさせるためのパラメータである。ここで、 $n_E=1.0$ のときオリジナル Cam-Clay モデルに帰着する。

さらに式(10)と同様に、不飽和土の降伏応力を導入すると以下ようになる。

$$f(p', q, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + \frac{MD}{n_E} \left(\frac{q}{Mp'} \right)^{n_E} - \varepsilon_v^p \quad (14)$$

本論文では不飽和土構成モデルとして式(14)を用いた。

3. 土/水/空気連成解析

これまで、飽和土の有限要素解析において土/水連成解析が主に用いられ、不飽和土においても同様に土/水連成解析が使用されてきた。土/水連成解析は排気条件を考慮せずに常に空気が排気される条件(完全排気条件)での解析である。しかし、実際に不飽和土を扱うとなると間隙空気の影響を考慮する必要がある。それは、豪雨などで急激に降雨が地盤内に進入すると、間隙空気が地盤内に封入され、浸透水の水道が制限されてしまうことや、間隙空気圧が上昇することなどがあるためである。それらが土構造物の強度や浸水性を低下させてしまう恐れがあるからである。

本論文において締固めを不飽和土の圧縮・せん断変形と考えており、その挙動やメカニズムをより正確に把握するためには間隙空気の影響を考慮する必要がある。本章では Borja⁶⁾にならい、間隙空気圧を考慮した連続条件式を導き、有限要素法に組み込んだ。

3. 1 連続条件式の導出

固相、液相、気相の運動を個別に考え、連続条件式を導出するため、図 2 から、質量 m 、体積 V を用い、各相の体積比・実密度・質量保存則を求める。各相の体積比を、全体積 V と、各体積を用いて表し、その後、間隙率と飽和度を用いて表すと。

$$1) \text{ 固相: } f_{sd} = \frac{V_{sd}}{V} = 1 - n \quad (15)$$

$$2) \text{ 液相: } f_w = \frac{V_w}{V} = n S_r \quad (16)$$

$$3) \text{ 気相: } f_a = \frac{V_a}{V} = n(1 - S_r) \quad (17)$$

と、それぞれ導かれる。ここで、 f : 体積比、 n : 間隙率、 S_r : 飽和度である。

続いて、各相の実質密度を、全体積 V と、各相の質量を用いて算出する。

$$1) \text{ 固相: } \hat{\rho}_{sd} = \frac{m_{sd}}{V} = \frac{V_{sd} m_{sd}}{V} = f_{sd} \rho_{sd}, \quad (\text{ここで、} \frac{V_{sd}}{V} = f_{sd} \text{ とおく}) \quad (18)$$

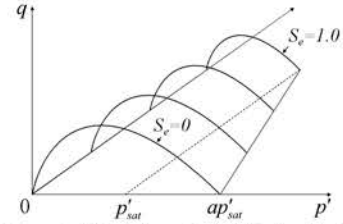


図 1 不飽和土の降伏曲面の概念図



図 2 土の三相図

$$2) \text{ 液相: } \hat{\rho}_w = \frac{m_w}{V} = \frac{V_w m_w}{V V_w} = f_w \rho_w, \quad (\text{ここで, } \frac{V_w}{V} = f_w \text{ とおく}) \quad (19)$$

$$3) \text{ 気相: } \hat{\rho}_a = \frac{m_a}{V} = \frac{V_a m_a}{V V_a} = f_a \rho_a, \quad (\text{ここで, } \frac{V_a}{V} = f_a \text{ とおく}) \quad (20)$$

と, それぞれ導かれる. ここで, $\hat{\rho}$: 実密度である.

次に, 各相での質量保存則を求めると,

$$1) \text{ 固相: } \dot{\hat{\rho}}_{sd} + \hat{\rho}_{sd} \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \quad (21)$$

$$2) \text{ 液相: } \dot{\hat{\rho}}_w + \hat{\rho}_w \operatorname{div} \mathbf{v}_w = 0 \quad (22)$$

$$3) \text{ 気相: } \dot{\hat{\rho}}_a + \hat{\rho}_a \operatorname{div} \mathbf{v}_a = 0 \quad (23)$$

と表される. ここで変形は固相によるものであるので, 3相混合体の運動は固相の運動とみなすことができるので, $\mathbf{v} = \mathbf{v}_s$ と考えることができる.

ここで, 各相に等方的に作用する圧力 p_a, p_w, p_{sd} に応じて, 実質密度 $\rho_a, \rho_w, \rho_{sd}$ が変化するとし, ある構成関係を仮定する. ($p = K\rho$ を用いる)

$$1) \text{ 固相: } \dot{\rho}_{sd} = \frac{K_{sd}}{\rho_{sd}} \dot{\rho}_{sd} \quad (24)$$

$$2) \text{ 液相: } \dot{\rho}_w = \frac{K_w}{\rho_w} \dot{\rho}_w \quad (25)$$

$$3) \text{ 気相: } \dot{\rho}_a = \frac{K_a}{\rho_a} \dot{\rho}_a \quad (26)$$

となり, 式(24), (25), (26)から, それぞれの密度増分を求めると,

$$1) \text{ 固相: } \dot{\rho}_{sd} = \frac{\rho_{sd}}{K_{sd}} \dot{\rho}_{sd} \quad (27)$$

$$2) \text{ 液相: } \dot{\rho}_w = \frac{\rho_w}{K_w} \dot{\rho}_w \quad (28)$$

$$3) \text{ 気相: } \dot{\rho}_a = \frac{\rho_a}{K_a} \dot{\rho}_a \quad (29)$$

となり, 式(21), (22), (23)を微分し, それぞれ式(27), (28), (29)を代入すると,

$$1) \text{ 固相: } \dot{\hat{\rho}}_{sd} = (\hat{\rho}_{sd} \rho_{sd})' = \dot{\rho}_{sd} \rho_{sd} + \rho_{sd} \dot{\rho}_{sd} = \dot{\rho}_{sd} \rho_{sd} + \frac{\rho_{sd}}{K_{sd}} \dot{\rho}_{sd} \rho_{sd} \quad (30)$$

$$2) \text{ 液相: } \dot{\hat{\rho}}_w = (\hat{\rho}_w \rho_w)' = \dot{\rho}_w \rho_w + \rho_w \dot{\rho}_w = \dot{\rho}_w \rho_w + \frac{\rho_w}{K_w} \dot{\rho}_w \rho_w \quad (31)$$

$$3) \text{ 気相: } \dot{\hat{\rho}}_a = (\hat{\rho}_a \rho_a)' = \dot{\rho}_a \rho_a + \rho_a \dot{\rho}_a = \dot{\rho}_a \rho_a + \frac{\rho_a}{K_a} \dot{\rho}_a \rho_a \quad (32)$$

と記述することができる.

ここで各質量保存則である式(21), (22), (23)に, 式(30), (31), (32)を代入すると,

$$1) \text{ 固相: } \rho_{sd} \dot{\rho}_{sd} + \frac{\rho_{sd}}{K_{sd}} \rho_{sd} \dot{\rho}_{sd} + \rho_{sd} f_{sd} \operatorname{div} \mathbf{v} = 0$$

$$\dot{\rho}_{sd} + \frac{f_{sd}}{K_{sd}} \dot{\rho}_{sd} + f_{sd} \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \quad (33)$$

2) 液相: Eulerian 相対速度 \mathbf{w}_{ew} を考慮すると,

$$\mathbf{w}_{ew} = \hat{\rho}_w (\mathbf{v}_w - \mathbf{v}) \text{ より, } \mathbf{v}_w = \frac{\mathbf{w}_{ew}}{\hat{\rho}_w} + \mathbf{v} \quad (34)$$

よって, 液相の質量保存則は,

$$\dot{\hat{\rho}}_w + \hat{\rho}_w \operatorname{div} \left(\frac{\mathbf{w}_{ew}}{\hat{\rho}_w} + \mathbf{v} \right) = 0 \text{ となる.}$$

$\dot{\hat{\rho}}_w + \hat{\rho}_w \operatorname{div} \mathbf{v} + \hat{\rho}_w \operatorname{div} \mathbf{w}_{ew} = 0$ に圧縮性を考慮し, 式(17)を代入すると,

$$\rho_w \dot{\rho}_w + \frac{\rho_w}{K_w} \dot{\rho}_w \rho_w + \rho_w f_w \operatorname{div} \mathbf{v} + \operatorname{div} \mathbf{w}_{ew} = 0$$

よって,

$$\dot{\rho}_w + \frac{f_w}{K_w} \dot{\rho}_w \rho_w + f_w \operatorname{div} \mathbf{v} + \frac{1}{\rho_w} \operatorname{div} \mathbf{w}_{ew} = 0 \quad (35)$$



図3 土の三相図

3) 気相：液相と同様に Eulerian 相対速度 \mathbf{w}_{ea} を考慮すると、

$$\dot{f}_a + \frac{f_a}{K_a} \dot{p}_a + f_a \operatorname{div} \mathbf{v} + \frac{1}{\rho_a} \operatorname{div} \mathbf{v}_{ea} = 0 \quad (36)$$

と記述することができる。ここで、図 3 のように気相、液相の体積をそれぞれ関数 ψ_a , ψ_w とおき、飽和度 S_r を用いて表すと、

$$\begin{aligned} \psi_w = S_r &= \frac{V_w}{V_v} = \frac{V_w}{V_w + V_a} = \frac{V_w}{V} \frac{V}{V_w + V_a} \\ &= \frac{V_w}{V} \frac{V}{V - V_{sd}} = \frac{f_w}{1 - f_{sd}} \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} \psi_a = 1 - S_r &= \frac{V_a}{V_v} = \frac{V_a}{V_w + V_a} = \frac{V_a}{V} \frac{V}{V_w + V_a} \\ &= \frac{V_a}{V} \frac{V}{V - V_{sd}} = \frac{f_a}{1 - f_{sd}} \end{aligned} \quad (38)$$

よって、式(37), (38)より、体積比は、 $f_w = (1 - f_{sd})\psi_w$, $\dot{f}_a = (1 - f_{sd})\dot{\psi}_a - \dot{f}_{sd}\psi_a$ と表すことができる。液相、気相の体積比の微分は、

$$\dot{f}_w = (1 - f_{sd})\dot{\psi}_w - \dot{f}_{sd}\psi_w \quad (39)$$

$$\dot{f}_a = (1 - f_{sd})\dot{\psi}_a - \dot{f}_{sd}\psi_a \quad (40)$$

となる。ここに式(33)を代入すると、それぞれ、

$$\dot{f}_w = (1 - f_{sd})\dot{\psi}_w + \psi_w \left(\frac{f_{sd}}{K_{sd}} \dot{p}_{sd} - f_{sd} \operatorname{div} \mathbf{v} \right) \quad (41)$$

$$\dot{f}_a = (1 - f_{sd})\dot{\psi}_a + \psi_a \left(\frac{f_{sd}}{K_{sd}} \dot{p}_{sd} - f_{sd} \operatorname{div} \mathbf{v} \right) \quad (42)$$

となる。よって、液相+固相(連続条件式)は、式(41)を式(42)に代入すると、

$$\begin{aligned} (1 - f_{sd})\dot{\psi}_w + \psi_w \frac{f_{sd}}{K_{sd}} \dot{p}_{sd} - \psi_w f_{sd} \operatorname{div} \mathbf{v} + \psi_w (1 - f_{sd}) \operatorname{div} \mathbf{v} + \frac{1}{\rho_w} \operatorname{div} \mathbf{v}_{ew} + \frac{f_w}{K_w} \dot{p}_w &= 0 \\ (1 - f_{sd})\dot{\psi}_w + \psi_w \frac{f_{sd}}{K_{sd}} \dot{p}_{sd} + \frac{f_w}{K_w} \dot{p}_w + \psi_w \operatorname{div} \mathbf{v} + \frac{1}{\rho_w} \operatorname{div} \mathbf{v}_{ew} &= 0 \end{aligned} \quad (43)$$

ここで、 $f_w = nS_r$, $f_s = 1 - n$, $\psi_w = S_r$ を代入すると、

$$\dot{\hat{p}}_w + \hat{\rho}_w \operatorname{div} \left(\frac{\mathbf{v}_{ew}}{\hat{\rho}_w} + \mathbf{v} \right) = 0 \quad (44)$$

固相と液相の非圧縮性($K_s = \infty, K_w = \infty$)、不飽和($S_r \neq 1.0$)とし、

$$\mathbf{v}_{ew} = \hat{\rho}(\mathbf{v}_w - \mathbf{v}), \quad \hat{\rho}_w = nS_r \rho_w \text{ より,}$$

不飽和土(固相と液相)の連続条件式は、

$$n\dot{S}_r + S_r \operatorname{div} \mathbf{v} + \operatorname{div} [nS_r(\mathbf{v}_w - \mathbf{v})] = 0 \quad (45)$$

よって、最終的な連続条件式は

$$n\dot{S}_r - S_r \dot{\epsilon}_v + \operatorname{div} \bar{\mathbf{v}} = 0 \quad (46)$$

と記述できる。同様に、気相を考慮する連続条件式(気相+固相)は、式(42)を式(36)に代入すると

$$(1 - f_{sd})\dot{\psi}_a + \psi_a \frac{f_{sd}}{K_{sd}} \dot{p}_{sd} + \frac{f_a}{K_a} \dot{p}_a + \psi_a \operatorname{div} \mathbf{v} + \frac{1}{\rho_a} \operatorname{div} \mathbf{v}_{ea} = 0 \quad (47)$$

ここで、新たに理想気体の状態方程式は、

$$(p_a + p_{a0})V_a = NRT \quad (48)$$

である。ここで、 N :気体の物質質量,モル数 p_{a0} :ゲージ圧による初期空気圧。

理想気体の温度一定を仮定し、式(48)を微分すると、

$$\dot{p}_a = -\frac{\dot{V}_a}{V_a}(p_a + p_{a0}) \quad (49)$$

となる。

ここで、 $\rho_a = \frac{NM}{V_a}$ より、(M :気体の分子量)

$$\dot{\rho}_a = -\frac{\dot{V}_a}{V_a^2}NM \quad (50)$$

となり、 K_a を求めるために、

$$\frac{\dot{\rho}_a}{\rho_a} = -\frac{\dot{V}_a}{V_a} \quad (51)$$

とし、式(49)、式(51)を式(27)に代入すると、 $K_a = p_a + p_{a0}$ となり、 $f_a = n(1-S_r)$ 、 $f_{sd} = 1-n$ 、 $\psi_a = 1-S_r$ を、式(47)に代入すると、

$$-n\dot{S}_r + \frac{n(1-S_r)}{K_a}\dot{p}_a + \frac{(1-n)(1-S_r)}{K_{sd}}\dot{p}_{sd} + (1-S_r)\text{div}\mathbf{v} + \frac{1}{\rho_a}\text{div}\mathbf{v}_{ca} = 0 \quad (52)$$

ここで、固相の非圧縮性($K_s = \infty$)、不飽和($S_r \neq 1.0$)とし、 $\mathbf{v}_{ca} = \hat{\rho}_a(\mathbf{v}_a - \mathbf{v})$ で、 $\hat{\rho}_a = n(1-S_r)\rho_a$ より、

$$-n\dot{S}_r + \frac{nV_a(1-S_r)}{NRT}\dot{p}_a + (1-S_r)\text{div}\mathbf{v} + \text{div}[n(1-S_r)(\mathbf{v}_a - \mathbf{v})] = 0 \quad (53)$$

よって、

$$-n\dot{S}_r + n(1-S_r)\frac{\dot{p}_a}{K_a} + (1-S_r)\text{div}\mathbf{v} + \text{div}[n(1-S_r)(\mathbf{v}_a - \mathbf{v})] = 0 \quad (54)$$

以上より、

$$(1-S_r)\dot{\epsilon}_v + n\dot{S}_r - n(1-S_r)\frac{\dot{p}_a}{K_a} - \text{div}\bar{\mathbf{v}}_a = 0 \quad (55)$$

ここで、空気に関してダルシーの法則が成り立つとすると、

$$\bar{\mathbf{v}}_a = -k_{ra}\mathbf{k}_a \cdot \text{grad}p_a \quad (56)$$

ここに、 k_{ra} : 相対透過係数、 \mathbf{k}_a : 透気係数、 p_a : 空気圧力である。

以上から、新たに気相を考慮できる連続条件式を導きだした。

4. 締固めシミュレーション

本研究では前述の不飽和土構成モデルを組み込んだ土/水/空気連成解析プログラム DACSAR-MP を用い、締固めシミュレーションを行う。締固めを「土の締固め=不飽和土の排気非排水圧縮変形」と捉え、実験結果との比較や解析結果の考察から、土の締固めのメカニズムについて検討する。

4. 1 既往の実験

河井ら⁷⁾は、シルト質試料を用いてサクシオン測定を伴う静的締固め試験を行っている。試料には市販のカタルポクレーを用いている。試験方法は、圧密リング内で所定の含水比に調整された試料を、供試体高さが 2cm になるまで載荷台を一定速度(1.06mm/min)で上昇させることで締固め目標の乾燥密度まで締固め、その後に除荷を行うというものである。図 4、図 5 に試験結果を示す。締固め初期では、試料内の間隙水の不連続性や、供試体底部でサクシオンを計測しているため、局所的なサクシオンを計測している可能性がある。結果的にサクシオンが締固めと共に増加している。締固めが進むと、載荷時は間隙水圧が増加するためサクシオンが減少する。逆に、除荷時は供試体が膨張するため間隙水圧が減少し、サクシオン増加が生じる。このとき、低含水比試料に比べ高含水比試料ではサクシオン変化が大きい。また、低含水比試料の方が同じ乾燥密度になるまでにかかる載荷重が大きくなる。このような挙動は締固め特有のものではなく、不飽和土の力学挙動の表れである。このように河井らは実験結果より締固めが不飽和土の力学に基づいていることを示唆した。

4. 2 解析条件

解析領域は図 6 のように 2.4cm×5cm の供試体を想定し、平面ひずみ条件で解析を行う。解析領域下面では変位

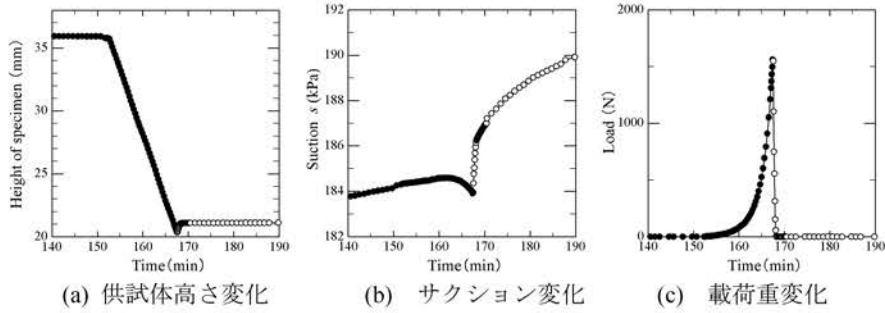


図4 低含水比試料($w = 9.85(\%)$)の締固め試験

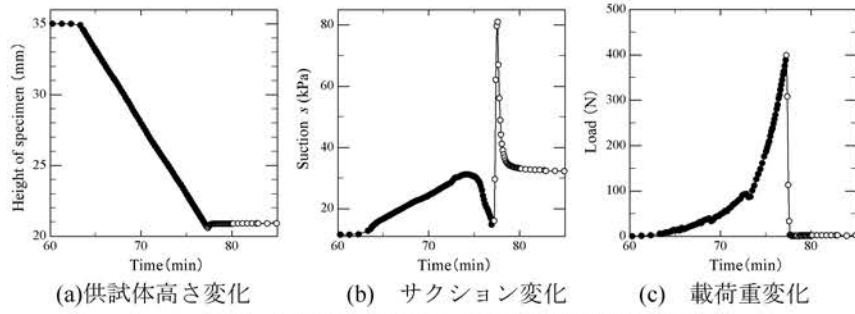


図5 高含水比試料($w = 23.53(\%)$)の締固め試験

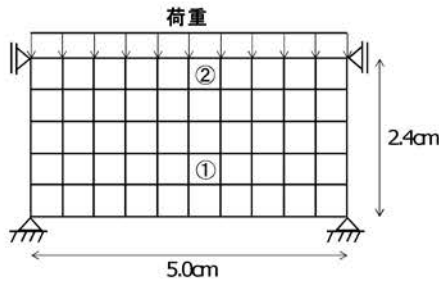


図6 解析メッシュ図

表1 材料定数および初期値

| λ | κ | M | ν | m | k (cm/sec) |
|-----------|----------|--------|-------|----------|----------------------|
| 0.1074 | 0.0107 | 1.344 | 0.33 | 0.8 | 1.0×10^{-7} |
| G_s | e_0 | a | n | n_E | k_s (cm/sec) |
| 2.70 | 1.00 | 5.00 | 1.00 | 1.30 | 1.0×10^{-5} |
| A^D | B^D | A^W | B^W | S_{rc} | |
| -34.70 | 5.90 | -23.95 | 4.62 | 0.15 | |

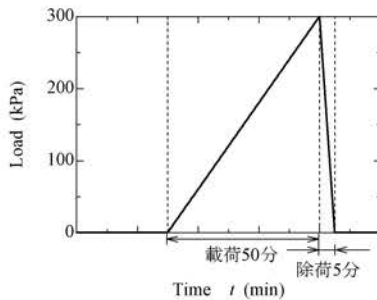


図7 荷重・除荷条件

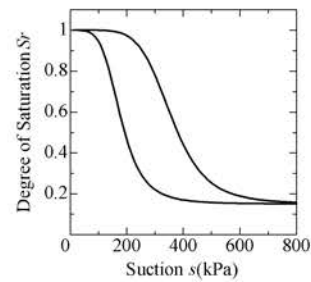


図8 水分特性曲線

を水平、鉛直方向とも拘束、左右面では水平方向のみ固定とした。水理境界として、全面を非排水境界とする。さらに、左右面と下面を非排気境界とし、上面のみに排気境界を設定した。また図7のように上端に等分布荷重を300kPaまで荷重し、その後に除荷を行う。荷重に要する時間を50分、除荷に要する時間を5分と設定する。初期含水比を $w=6\sim 28(2\% \text{間隔})$ 、 $w=29\sim 34(1\% \text{間隔})$ の計17ケースに分ける。初期飽和度は含水比と間隙比から求め、さらにその飽和度での主吸水曲線上のサクシオンを初期サクシオンとした。解析結果は解析メッシュ図に示すように供試体内部の要素①と上端に接する要素②の二通りを示す。材料定数は表1のように与え、水分特性曲線は図8のものを使用する。

4.3 解析結果

図9, 10はそれぞれ含水比 $w=12\%$ 、 20% 、 24% 、 28% 、 31% 、 34% での間隙比変化を示している。 $w=12\%$ の低含水比の試料では300kPa荷重しても、間隙比の変化がほとんど起こっていないことが分かる。これは、低含水比では初期の飽和度が低いために、不飽和化による降伏応力の増大が大きくなるからである。そのため、最大荷重を

かけても降伏に至らなかったと考えられる。そして、 $w=20\%$ 以降では弾塑性状態が長く続いており間隙比変化が大きくなっている。これは低含水比とは逆に、高含水比域では飽和化が進み、降伏応力の増大量が小さくなるために早く降伏するためである。

図 11, 12 はサクシヨンの変化を表している。どの含水比においても載荷時に供試体の体積が減少することでサクシオンが減少、除荷時には逆に体積が膨張することでサクシオンが上昇するのが分かる。また低含水比に比べて、高含水比の供試体ではサクシオン変化が大きく出ていることもわかる。これは、図 4, 5 の実験結果と同じ傾向を示している。

また、図 13, 14 は飽和度変化を表している。サクシオンと同じように低含水比では飽和度変化が小さく、高含水比では飽和度変化が大きい。これは、応力状態が弾塑性状態に入ることによって供試体の体積圧縮量が増加し、飽和度が急激に増加したと考えられる。また、除荷時には体積が膨張して飽和度が減少する。

また、図 13, 14 は飽和度変化を表している。サクシオンと同じように低含水比では飽和度変化が小さく、高含水比では飽和度変化が大きい。これは、応力状態が弾塑性状態に入ることによって供試体の体積圧縮量が増加し、飽和度が急激に増加したと考えられる。また、除荷時には体積が膨張して飽和度が減少する。

図 15, 16 は飽和度とサクシヨンの関係を示している。初期のサクシオンを主吸水曲線上に設定しているため、載荷時に主吸水曲線に沿って飽和度が増加、サクシオンが減少していく。また、除荷時には供試体が膨張し脱水

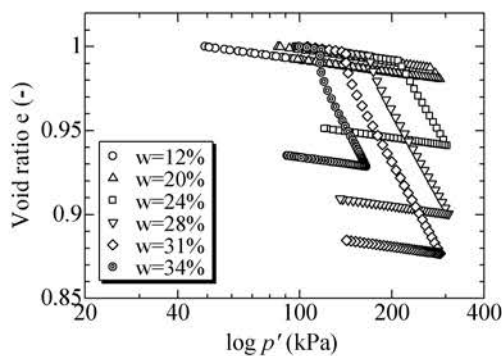


図-9 平均有効主応力～間隙比 要素①

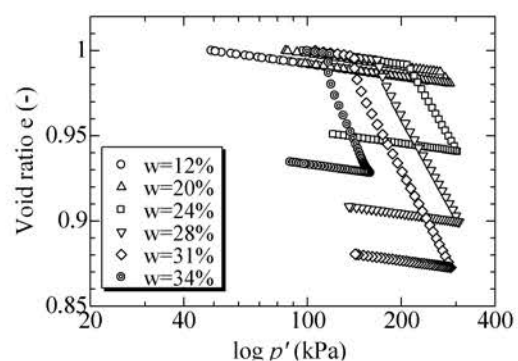


図-10 平均有効主応力～間隙比 要素②

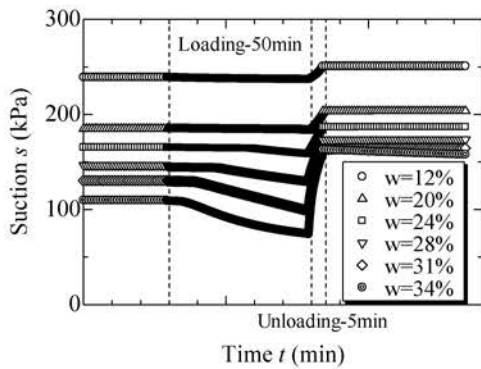


図 11 時間～サクシオン 要素①

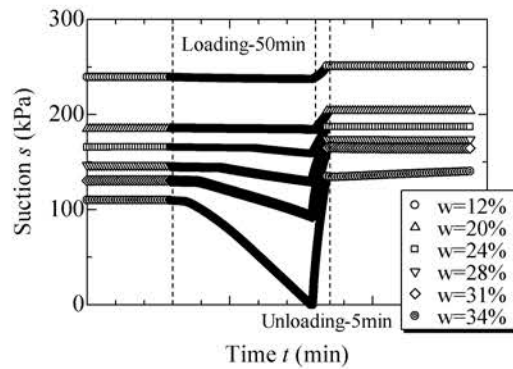


図 12 時間～サクシオン 要素②

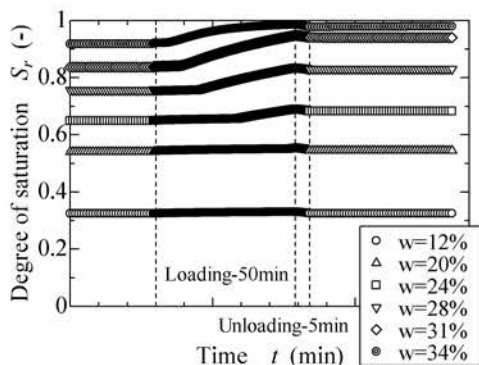


図 13 時間～飽和度 要素①

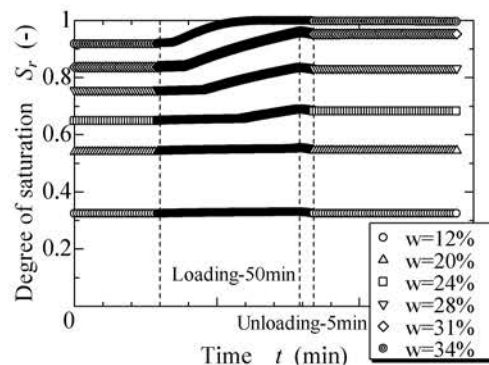


図 14 時間～飽和度 要素②

曲線上に沿って飽和度が減少、サクシジョンが増加していく。そして締固め終了後はどの含水比でも、締固め前より高いサクシジョンを示していることがわかる。これも実験結果と合致している。

ここで、 $w=34\%$ の供試体の結果に注目する。载荷時にサクシジョンが減少し、飽和度が増加する。除荷時にはサクシジョンが増加し、飽和度が減少する。これは他の含水比と同じ傾向を示している。しかし、他の含水比とは違い、供試体内部の要素①と供試体上段の要素②でサクシジョンの変化量に大きく差が出ている。これは供試体内部の間隙空気の影響が関係していると考えられる。供試体上段では排気境界に接しているために間隙空気が排気されやすく、载荷中の飽和度変化が大きく、最終的には飽和に達していることが分かる。そのために、サクシジョンも大きく変化し、载荷途中でサクシジョンは 0 にまで達している。しかし、内部の要素では逆にサクシジョン変化、飽和度変化が抑えられている。これは内部の要素は排気境界に接しておらず、内部に間隙空気が封入されるためであると考えられる。

次に図 17, 18 は間隙空気圧の変化を示している。 $w=10\%$ から $w=31\%$ までの供試体では要素①, ②のどちらでも間隙空気圧に大きな変化が見られない。しかし、 $w=34\%$ では要素①, ②のどちらでも载荷中で間隙空気圧が増加し始め、除荷時に減少する。これは飽和度-透気係数の関係が、飽和度が低くなると透気係数は高くなり、飽和度が高くなると、透気係数は低くなる相関関係のためである。そのため、低含水比の供試体では透気係数が高くなり排気が十分行われるのに対し、高含水比の供試体では透気係数が低くなり排気が十分に行われず間隙空気が封入される。その結果、 $w=34\%$ では間隙空気圧の上昇が見られるようになったと考えられる。また、供試体内部要素①の方が間隙空気圧の最大値が大きくなっているが、これもサクシジョン、飽和度変化と同じく、上部要素②が排気境界に接しているのに対して、内部要素①は排気境界からの距離があるために要素②よりも排気が行われにくいためである。高含水比では载荷時に体積が圧縮すると飽和度が上昇し、外部応力に対する間隙水の受け持ち分が多くなる。そのために間隙水圧が上昇し、サクシジョンが減少する。しかし、間隙空気が封入して排気がスムーズに行われなため、間隙空気圧が上昇し飽和度が上がらず、サクシジョンの減少が抑えられる。図 11 において $w=34\%$ でサクシジョンの減少が抑えられているのはそのためであると言える。

図 19, 20 は間隙水圧の変化である。こちらは間隙空気圧と違って、要素での違いがほとんど見られない。これは供試体の大きさが 2.4cm と小さいために、縦方向での差が生じなかったと考えられる。だが、含水比が高くなると、間隙水圧も増加していき、これは間隙空気圧と同じ傾向を示している。図 21, 22 は間隙比の変化である。図 9, 10 で示す通り、含水比が高くなるにつれて降伏応力が低くなり、早く弾塑性状態になるために間隙比の変化が大きくなっている。さらに、 $w=34\%$ では要素①と②の両方で、载荷の途中から間隙比変化が抑えられていることが分かる。これは図 9, 10 で述べたように高い飽和度を有する高含水比の試料では間隙空気が封入され

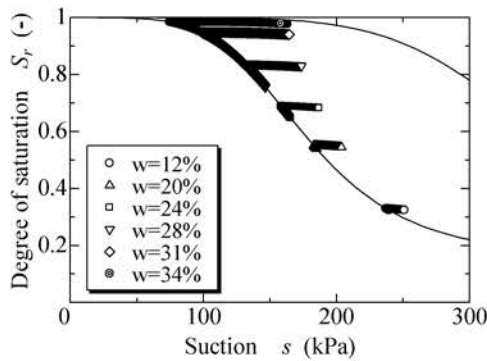


図 15 サクシジョン～飽和度 要素①

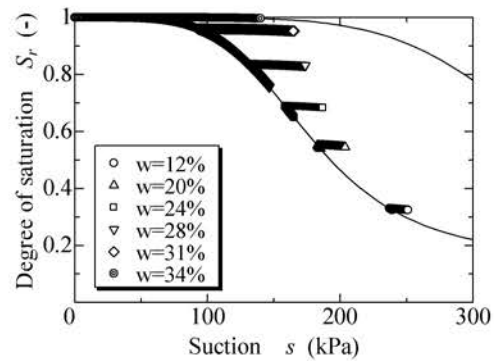


図 16 サクシジョン～飽和度 要素②

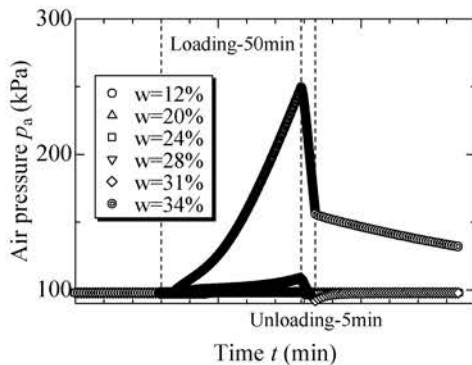


図 17 時間～間隙空気圧 要素①

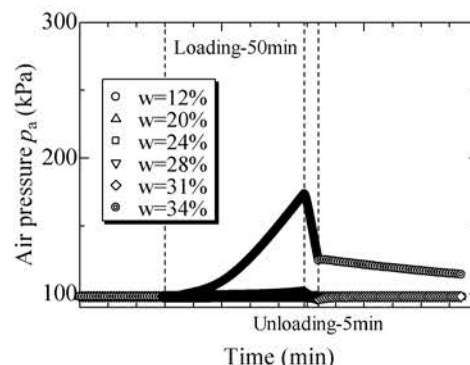


図 18 時間～間隙空気圧 要素②

て、外部応力に対して間隙空気が分応力として働くからである。しかし、2つの要素で最終的な間隙比に違いはあまり見られない。

図 23, 24 は $w=34\%$ での各応力の変化を示す。要素①と要素②で大きく違うのは σ^{net} の変化である。 σ^{net} は載荷応力から間隙空気圧を引いたものである。図 17 からも分かるように、要素①では間隙空気圧が高くなっているため要素②に比べて σ^{net} の最大値が低くなっていると考えられる。しかし、有効応力を見ると二つの要素で差がないことが分かる。要素①では σ^{net} の最大値は低くなるが、間隙空気圧が高いためにサクシオンが下がらずサクシオン応力の変化が小さい。一方、要素②では σ^{net} の最大値は高いが、上面の排気境界に接しているために間隙空気が排気されることで飽和度が上がりサクシオン応力の変化が大きくなる。そのため、供試体内部の要素と、供試体上部の要素では有効応力の変化に差はなく、そのため最終的な間隙比が図 21 と図 22 で分かるように大きな差が生まれないと考えられる。

図 25 は供試体全体の変位から求めた乾燥密度を含水比ごとに整理したものである。変位から乾燥密度を求めるには、土粒子密度と初期間隙比を用いて

$$\rho_d = \frac{G_s u_0}{(u_0 - \Delta u)(1 + e_0)}$$

と求められる。ここで、 u_0 : 初期の供試体の高さ、 Δu : 供試体の高さ変化、 e_0 : 初期間隙比、である。

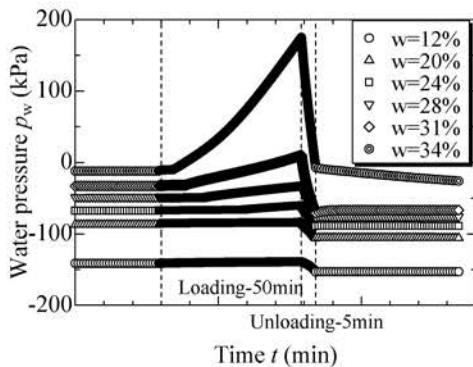


図 19 時間～間隙水圧 要素①

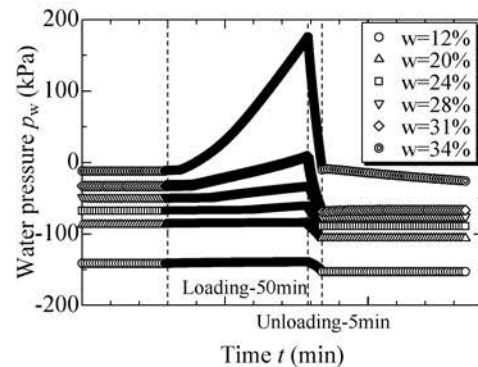


図 20 時間～間隙水圧 要素②

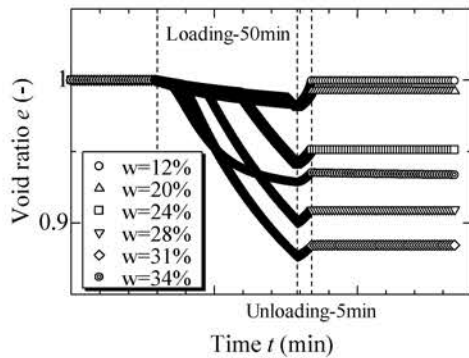


図 21 時間～間隙比 要素①

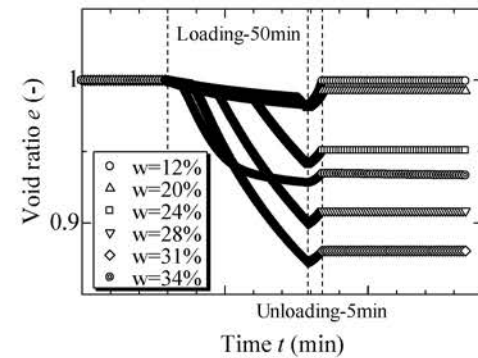


図 22 時間～間隙比 要素②

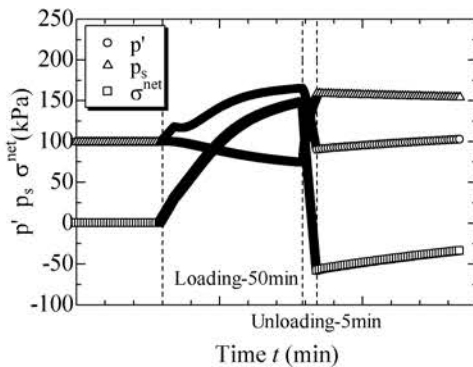


図 23 時間～応力成分 要素①

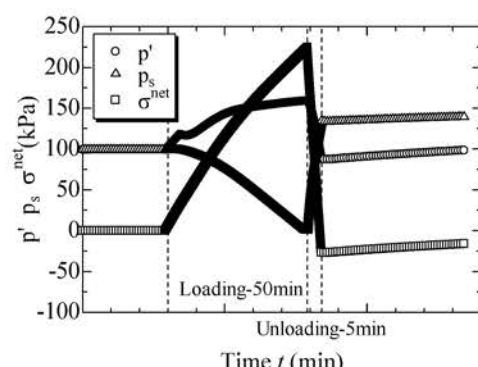


図 24 時間～応力成分 要素②

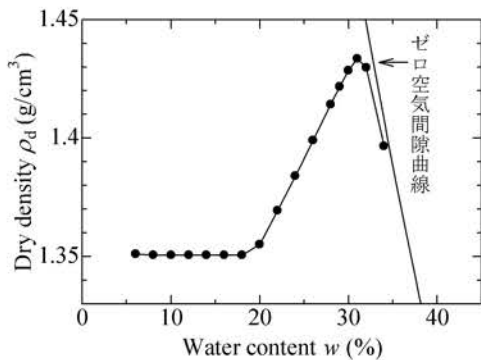


図 25 締固め曲線

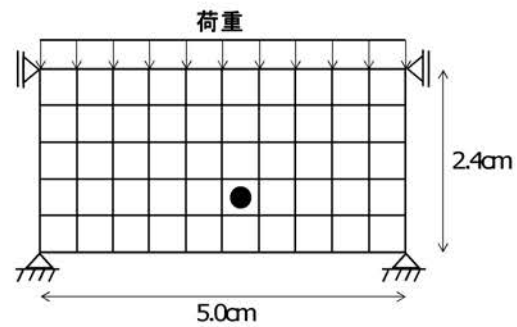


図 26 解析メッシュ図

一般的な締固め曲線と同様に、ある含水比でピークを迎え、その後はゼロ空気間隙曲線に沿って密度が低下している。これまで示した通り、低含水比では不飽和化によって降伏応力が高くなるために弾性状態を抜け出せず間隙比変化が起きない。だが、含水比が高くなると徐々に弾塑性状態へと遷移し始めて間隙比変化が起きるため、乾燥密度も増加し始める。そして、荷重によって飽和度が高くなると間隙空気の影響が表れ始める。ピーク付近の含水比になると、載荷荷重に対して間隙水圧に加えて、間隙空気圧が分応力として作用し始める。そのため、 $w=32\%$ を超えると荷重による沈下量が抑えられて締固まりにくくなり、乾燥密度が低下する。

以上から、解析で求められた結果は実験結果と同じ傾向を表していると言える。また、締固め曲線も低含水比から高含水比へ移る中で傾きの変化が顕著であることや、特定の含水比でピークを迎えることなど、実際に求められる締固め曲線と合致している部分がある。また、高含水比において締固め曲線がピークを迎えるのは、間隙空気の影響であり、間隙空気圧が体積圧縮を妨げていることを示すことができた。

5. 載荷速度の影響

締固めシミュレーションの中で、高含水比における間隙空気圧の影響が示された。その間隙空気が排気される量を左右するのは透気係数であり、本論文で使用される有限要素解析においては、飽和度によって変化する相対透気係数と、材料定数として与えられる透気係数の積であらわされる。そして、排気される空気量は飽和度と透気係数の値に加え、時間にも影響される。

一般的に、締固めを行うときに載荷速度が速いとうまく締固まらない。近年では、施工速度の高速化が求められているが、十分に締固まらない危険性も含んでいる。そこで、本論文では載荷速度を変化させて締固めシミュレーションを行い、その影響を考察する。

5. 1 解析条件

3の締固めシミュレーションと同じ供試体を想定する。載荷速度以外の条件は、3と同じものを用いる。載荷荷重も300kPaで共通とし、載荷時間を変化させて以下のように与えた。載荷を50分で行うものが前述の締固めシミュレーションと同じ条件の解析であり、これを載荷速度1倍とする。同じように、載荷を25分で行うものを載荷速度2倍、10分で行うものを載荷速度5倍、5分で行うものを載荷速度10倍とする。除荷の時間は共通で5分とする。図26は解析メッシュ図であり、印のついた要素の解析結果を示す。

5. 2 解析結果

図27は含水比ごとに乾燥密度を整理した締固め曲線であり、図28がその拡大図である。弾性から弾塑性に転じる含水比や、ピークが現れる含水比は速度によって差は見られなかった。しかし、乾燥密度の値を見ると、速度1倍のものに比べて高含水比で乾燥密度は減少しているのが分かる。そして、載荷速度を2倍から5倍、10倍に上げていくと、さらに乾燥密度が減少しており、載荷速度10倍になると、図では少し読み取りづらいが含水比22%でも乾燥密度の低下が起きている。

ここからは締固め曲線のピークである $w=31\%$ で比較を行う。図29は有効応力と間隙比の関係を示している。載荷速度にかかわらず、降伏応力を等しいことが分かる。しかし降伏後は除荷に転じるまでの間に有効応力の増加量に差が出来ている。密度の低下はこの有効応力の違いによって生じていると考えられる。

図30はサクシジョンの時間変化、図31は飽和度の時間変化を、図32は飽和度とサクシジョンの関係を表している。載荷速度によって載荷終了時の間隙比に差が生じることが分かったが、飽和度も同じように載荷終了時で差が生じることがわかる。載荷速度が速くなるほど、最終的な飽和度は低くなる。これは載荷速度が速くなるほど、封

入される間隙空気が多いことを示している。その一方でサクシオンはあまり大きな差が見られない。これは、水分特性での吸水曲線では飽和度の変化に比べてサクシオンの変化が少ないことが理由と考えられる。

図 33 は間隙空気圧の時間変化、図 34 は有効応力の時間変化である。載荷速度が速くなるほど、間隙空気圧の最大値が高くなっていることが分かる。これは 3 の締固めシミュレーションでも示したように、高含水比の供試体では間隙空気が封入されるために、封入された分だけ外部応力に対して空気圧が受け持つ量が增大するからである。その間隙空気の流れる速度は時間に依存しており、短時間の載荷では排出される空気の量が少ないために、載荷速度が速いほど封入される空気の量が多くなる。そして、間隙空気が受け持つ応力が高くなると、逆に土骨格が受け持つ応力が少なくなるため図 34 で示すように有効応力が減少する。

図 35 は供試体全体の沈下量である。これまでに示した通り、載荷速度が速くなると間隙空気の封入量が増加し、外部応力に対する分応力として間隙空気圧が増加する。そしてその間隙空気によって変形が妨げられ体積圧縮量が減少する。それが、図 35 の沈下量の差に表れ、同時に乾燥密度の差にも表れる。

以上の結果から、載荷速度の違いによって起きる影響を示すことが出来た。載荷速度が速くなるほど供試体内に空気が封入され、間隙空気圧が分応力として働く。その結果、有効応力が低下し、体積変化が妨げられると言える。

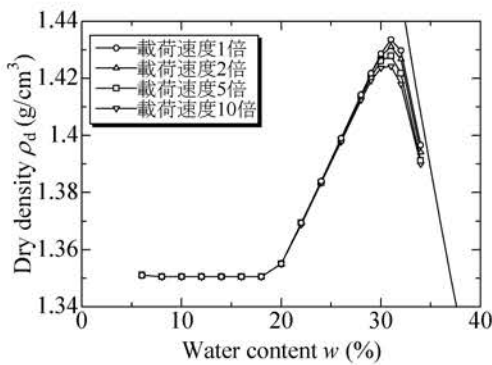


図 27 締固め曲線

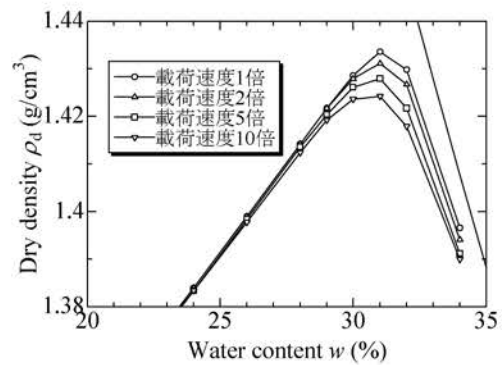


図 28 締固め曲線(拡大)

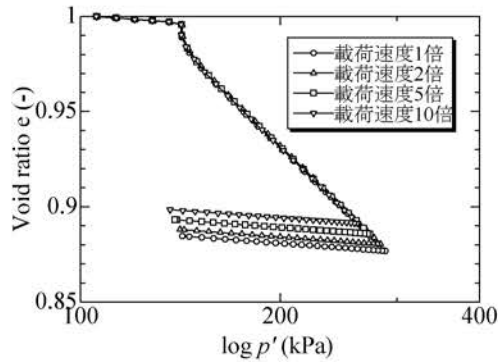


図 29 平均有効主応力～間隙比

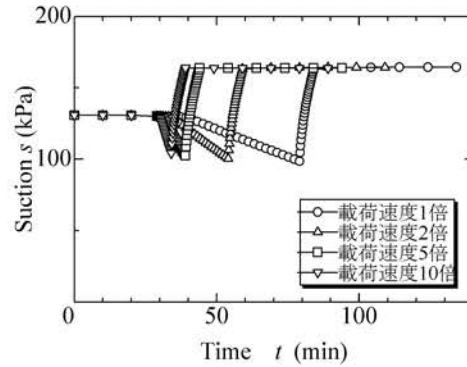


図 30 時間～サクシオン

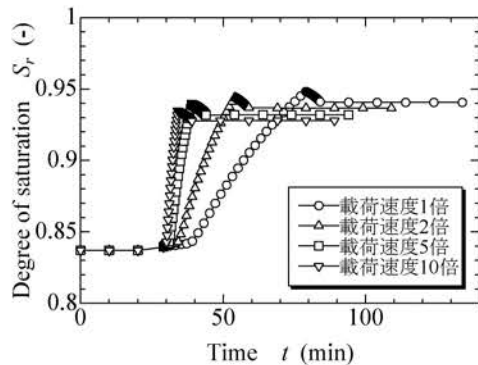


図 31 時間～飽和度

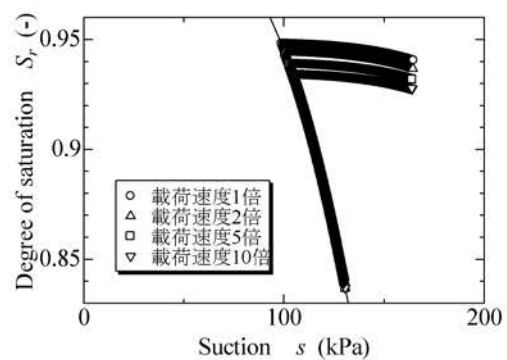


図 32 サクシオン～飽和度

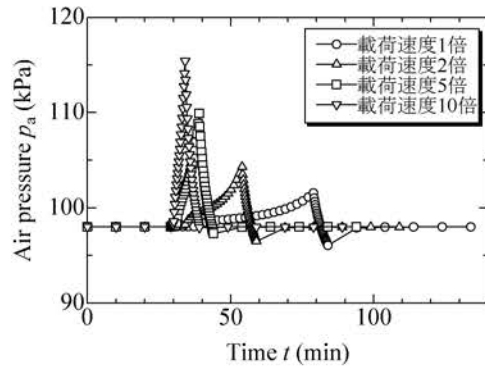


図 33 時間～間隙空気圧

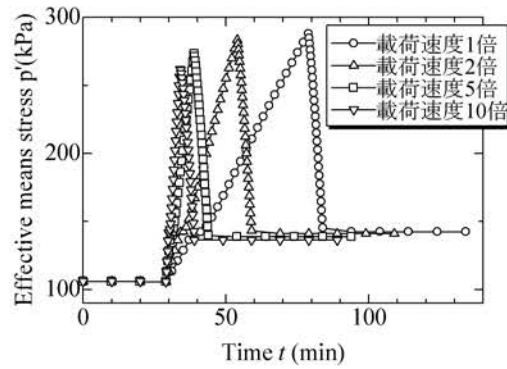


図 34 時間～平均有効主応力

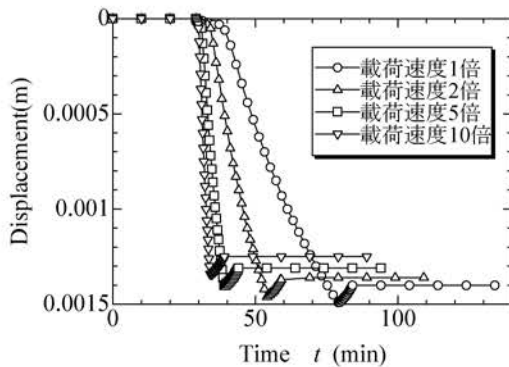


図 35 時間～沈下量

6. 結論

間隙空気の影響を考慮した連続条件式を導入することで、土/水連成解析有限要素解析プログラム DACSAR-UA を、土/水/空気連成有限要素解析プログラム DACSAR-MP へと改良した。

また、締固めを「不飽和土の排気・非排水圧縮変形」と捉えて解析を行った。その結果、荷重除荷時のサクション変化、含水比によるサクションの変動量の差など、実験結果を再現することが出来た。また、含水比ごとに締固め後の乾燥密度を整理することで締固め曲線を表現することが出来た。この曲線は、実際の締固め曲線と同じく、特定の含水比でピークが存在し、ゼロ空気間隙曲線に沿って乾燥密度が減少していく。

さらに締固めにおける間隙空気の影響を示した。高含水比では飽和度が高くなるために透気係数が低くなり、間隙空気が封入されて飽和度、サクションの変化が抑えられる。さらに、間隙空気圧が外部荷重に対する分応力として作用するために変形が妨げられる。締固め曲線で最適含水比を超えた後に乾燥密度が低下するのは、間隙空気圧の増加量が顕著になったためであると考えられる。

最後に荷重速度の違いが締固めに与える影響を示した。荷重速度が速くなると、封入される空気量が増え、飽和度・サクション変化が抑えられる。また、体積変化も抑えられるため、乾燥密度が上がりにくくなる。荷重速度を速くすると、土は締め固まりにくくなることを、間隙空気の影響を考慮することで説明できたと言える。

解析に空気の影響を考慮出来たことで、境界値問題として適用できる範囲が新たに広がったと思われる。また、締固めについても、材料定数や水分特性曲線、解析領域などを検討することで、より正確な締固め曲線を表現することが出来ると考える。

7. 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 大野進太郎: 非線形コントラクタンシー表現関数に基づく地盤材料の弾塑性構成モデル, 東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻博士論文, 2006.

- 4) 柴田徹：ダイラタンシーについて，京都大学防災研究所年報，第6号，pp128-134，1963.
- 5) Ohta,H.andSekiguchi,H.：Constitutive equations considering anisotropy and stress reorientation in clay, Proc. 3rd. Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, Vol. 1, pp.475-484,1979.
- 6) 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
- 7) 河井克之，金銀羅，流田寛之，飯塚敦，本田道識：不飽和土の力学を用いた締固め土における圧密降伏応力の簡易予測手法，土木学会論文集, Vol.5, pp.785-792, 2002.

著者：1) 河井克之、都市安全研究センター、准教授；2) 山田竜太郎、清水建設株式会社；3) 金澤伸一、中央大学研究開発機構、助教

Simulations of compaction with unsaturated soil/water/air coupling analysis

Katsuyuki Kawai
Ryotaro Yamada
Shin-ichi Kanazawa

Abstract

Compacted soil is widely used to build earth structure. The construction management of compacted earth structure depends on empirical methods since compaction mechanism is not fully understood. This is because compacted soil is unsaturated soil, which shows complicated behavior. Recently, some constitutive models for unsaturated soils and soil-water retention characteristic curve models were proposed, and it can advance the study of compacted soil. In this study, we regarded compaction as compression and consecutive expansion of unsaturated soil under undrained condition and simulated with unsaturated soil/water/air coupled finite element analysis. Consequently, we could express the suction changes during the compaction and the shape of compaction curve, where the maximum dry density appears on the optimum water content. Moreover, it is found that pore air pressure prevents soil from compressing due to sustain external force with air pressure increase at high water content. Additionally, we simulated compaction in different loading speed and could express that dry density at high water content after compaction is lower for rapider loading.