



土／水／空気連成有限要素解析プログラムを用いた 締固め土の強度発現メカニズムの検討

柴田, 昌輝
大槻, 剛瑠
河井, 克之
飯塚, 敦

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 15:51-58

(Issue Date)

2011-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011340>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011340>



土/水/空気連成有限要素解析プログラムを用いた 締固め土の強度発現メカニズムの検討

Study of the compaction effect with soil/water/air coupled F.E. analysis

柴田 昌輝¹⁾

Masaki Shibata

大槻 剛瑠²⁾

Takeru Otsuki

河井 克之³⁾

Katsuyuki Kawai

飯塚 敦⁴⁾

Atsushi Iizuka

概要：大半の陸上人工土構造物は締固め土を材料として施工される。締固め土は、土粒子が作る間隙に空気相と液相を含む不飽和土であり、せん断強度が大きく、圧縮性・透水性が低い。現場の締固め施工はこうした性質を考慮した規定によって管理されているが、経験的なものに留まっており、締固めの力学的な意義は示されていない。そのため、構造物の内部状態を把握することが難しく、自然災害などの不測の事態に備えることができないと言える。本研究では、土の締固めを不飽和土の排気非排水圧縮現象と捉え、間隙空気圧の影響を考慮した土/水/空気連成有限要素解析プログラム(DACSAR-MP)を用いて、静的締固めシミュレーション及び等体積せん断シミュレーションを行い、締固めによる強度発現メカニズムの力学的説明を試みた。

キーワード：締固め特性, 不飽和土, 水分特性曲線

1. はじめに

空港や河川堤防・高速道路などに代表される盛土構造物の建設には、締固め土がその材料として多く用いられている。盛土構造物はRC等他の構造物に比べて経済的であること、修繕が容易であること、材料劣化が少ないといった長所がある。しかしながら、その一方で、安全性の評価の難しさが課題点として挙げられ、自然災害などによる盛土崩壊の被害も数多く報告されている。本研究では、土の締固めを不飽和土の排気非排水圧縮現象と捉え、間隙空気圧の影響を考慮した土/水/空気連成有限要素解析プログラム(DACSAR-MP)を用いて、静的締固めシミュレーション及び等体積せん断シミュレーションを行い、締固めによる強度発現メカニズムの力学的説明を試みた。

1.1 締固め土の工学的性質

締固め土は、土粒子が作る間隙に空気相と液相を含む不飽和土であり、間隙が水で満たされた飽和土よりもせ

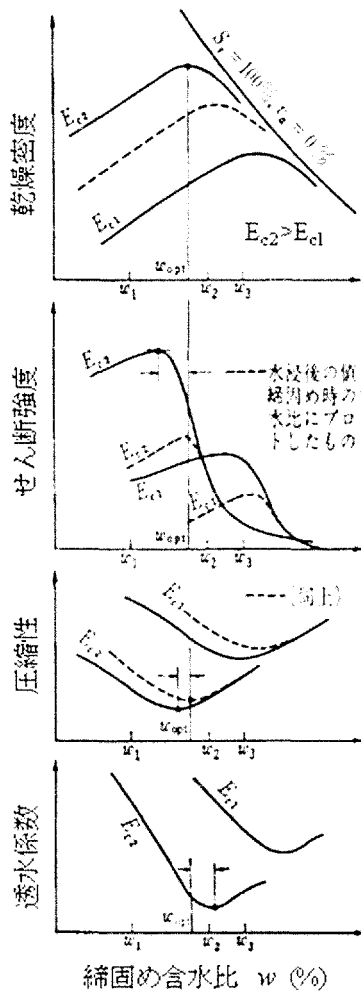


図-1 締固めによる土の性質の変化の傾向¹⁾

ん断強度・変形抵抗が大きく、圧縮性・透水性が低い。図-1に締固め上の工学的特性と含水比との関係の模式図を示す。通常、締固め上の乾燥密度を含水比に対してプロットすると、このように上に凸となる締固め曲線が得られる。これは最も効率的に土を締固めることのできる含水比が存在することを意味し、その含水比を最適含水比、そのとき得られる密度を最大乾燥密度と言う。締固めた土の強度は最適含水比より低い含水比で最大となり、透水係数は逆に最適含水比より少し高い含水比で最小となる。締固めた土を水浸させると、その強度の最大値は、最適含水比付近に移動する傾向がある。最適含水比付近の含水比で締固めた土は、浸水しても本来の強度をほとんど失わず安定であると言える。また、一般に締固めエネルギーが大きいほど締固め曲線は左上方に位置し、最適含水比は低く、乾燥密度は高くなり、さらに強度も増加する。現場の締固め施工はこうした性質を考慮した規定によって管理されているが、経験的なものに留まっており、締固めの力学的な意義は示されていない。そのため、構造物の内部状態を把握することが難しく、自然災害などの不測の事態に備えることができないと言える。これは Terzaghi²⁾の有効応力原理以降、飽和土の力学が急速に整備された一方で、不飽和土の力学の体系化が遅れたことが要因の一つに挙げられる。盛土構造物を今後も有効に活用し、かつ安全性を長期的に確保するためには、締固めを力学的な観点からも評価していくことが必要であると考えらる。

2. 解析に用いる数理モデル

締固めを不飽和土の非排水条件下での圧縮挙動として表現するには、不飽和土の構成モデルと水理モデルが必要となる。ここでは、解析に用いた不飽和土構成モデルと、水分特性曲線モデル、さらに不飽和土の透水係数・透気係数の推定モデルを紹介する。

2.1 有効飽和度で剛性を表現する不飽和土構成モデル

Bishop³⁾が不飽和土の有効応力式を提言して以来、様々な不飽和土の構成モデルが提案されてきた。水分特性曲線のヒステリシスを考慮した代表的なモデルとして、Karube and Kawai⁴⁾のモデルを挙げることができる。Karube and Kawai は、不飽和土の乾湿過程における剛性の変化を表すパラメータとしてメニスカス応力を用い、サクション履歴の影響を応力状態の違いとして記述している。非常に合理的なモデルといえるが、応力成分を記述するパラメータを設定する上で、最乾燥水分線等を用いた複雑な計算を要する。一方、大野ら⁵⁾は剛性の変化を表すパラメータに有効飽和度を用い、より簡便に不飽和土の力学特性を表現できる弾塑性構成モデルを構築した。そこで本研究では、大野らによって提案されたモデル(S_e -Hardening モデルと呼ぶ)を使用する。さらに、数値計算上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⁶⁾の EC モデルを組み込むこととする。EC モデルとは、本来、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である。

大野らは、不飽和土の有効応力を以下のように表した。

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

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

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

であり、 σ' ：不飽和土の有効応力テンソル、 σ^{net} ：ネット応力テンソル、 $\mathbf{1}$ ：2階の単位テンソル、 σ ：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_{re} :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

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

とし, 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 ξ 倍という形で表現した. ξ は有効飽和度を用い, 次のように表すことが出来る. ここで e_0 :初期間隙比である.

$$\xi = \exp[(1 - S_e)^n \log_e a] \quad (5)$$

となり, ここで n : $e - \log_e p'$ 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.

ここで間隙比を体積ひずみに変換し, 塑性体積ひずみを表すと

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

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,

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

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主応力, M : q'/p で表された限界応力, D : ダイラテンシー係数であり,

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

で表される.

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示される.

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

ここで,
$$p' = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma}' : \mathbf{1}, q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{s} : \mathbf{s}}, \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{1} = \mathbf{A} : \boldsymbol{\sigma}', \mathbf{A} = \mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} \quad (10)$$

となり, $\mathbf{1}$: 4 階の単位テンソルである. また, n_F 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)を代入すると, 不飽和土の降伏関数は次式のように導かれる.

$$f(\boldsymbol{\sigma}', \xi, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} + \frac{MD}{n_F} \left(\frac{q}{Mp'} \right)^{n_F} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (11)$$

式(11)は $n_F = 1.0$ を代入すると,

$$f(\boldsymbol{\sigma}', \xi, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (12)$$

となる. さらに式(12)は, 飽和状態 ($S_e = 1$) では, $\xi = 1$ 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-2 に S_e -Hardening モデルが示す不飽和土の降伏曲面の概念図を, 図-3 に EC モデルの降伏曲面を示す. EC モデルに関しては, 降伏面の回転により異方性の表現が可能であるが, 本研究では等方性モデルとして用いることとする.

2.2 ヒステリシスの表現が可能な水分特性曲線モデル

不飽和土の挙動に大きく影響を及ぼす水分特性(サクション～飽和度関係)は, 乾燥時と湿潤時で異なる. つまり, サクション～飽和度関係を表した水分特性曲線は唯一ではなく, 乾燥時もしくは湿潤時の保水状態に依存して, 無数の走査曲線が存在する. 河井ら⁷⁾は, それらの走査曲線が乾燥時と吸水時ではそれぞれ相似な形であることを利用して, ヒステリシス表現が可能な水分特性曲線モデルを提案している. 任意のサクション, 飽和度状態から描く脱水, 吸水曲線は, 杉井, 宇野⁸⁾のロジスティック曲線式を用い, 図-4 のように表される.

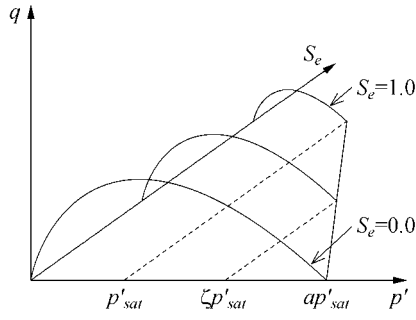


図-2 不飽和土の降伏曲面の概念図

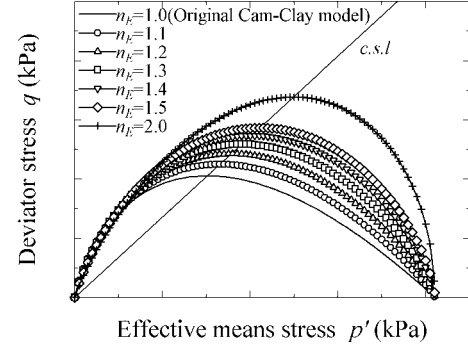
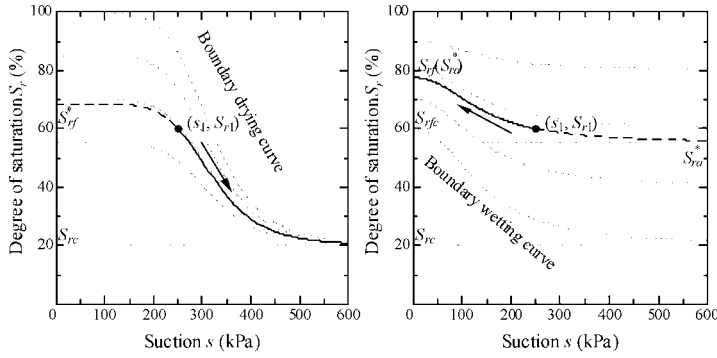


図-3 ECモデルの降伏曲面



(a) 脱水曲線

(b) 吸水曲線

図-4 河井らの水分特性曲線モデル

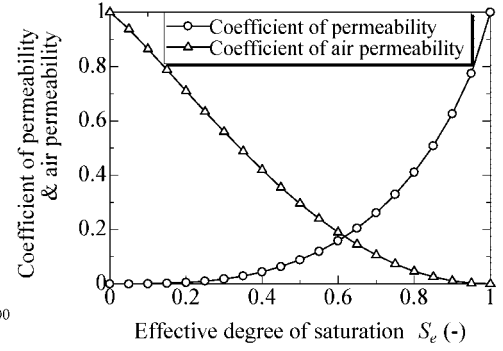


図-5 不飽和透水係数と不飽和透気係数の相関性

2.3 比透水係数モデル・比透気係数モデル

本研究では、締固め過程に生じる供試体内の間隙空気圧の封入が、主な検討要因の一つとなる。水と空気に関するダルシー則は次式で示される。

$$\text{ダルシー則(水)} \quad \mathbf{v}_w = -\mathbf{K}_w \cdot \text{grad}h = -k_{rw} \mathbf{k}_w \cdot \text{grad}h \quad (13)$$

$$\text{ダルシー則(空気)} \quad \mathbf{v}_a = -\mathbf{K}_a \cdot \text{grad}p_a = -k_{ra} \mathbf{k}_a \cdot \text{grad}p_a \quad (14)$$

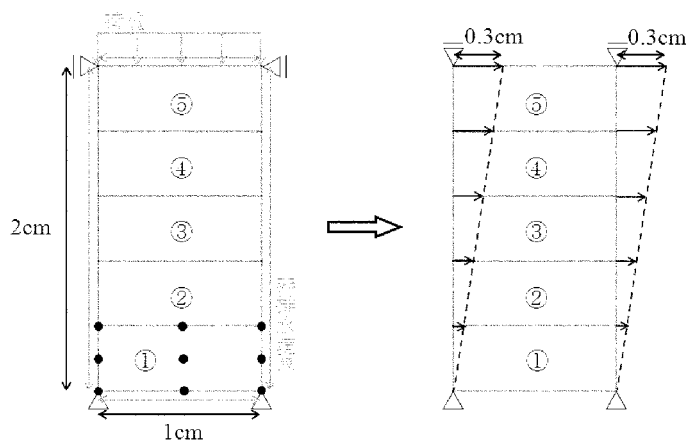
不飽和透水係数・透気係数についても、いくつかの関数モデルが提案されている。本研究では、Mualem⁹⁾の不飽和透水係数推定モデルと Van Genuchten¹⁰⁾の透気係数式を用いることとする。これらの関数モデルから導かれる比透水係数と比透気係数は、

$$k_{rw} = S_e^2 \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (15)$$

$$k_{ra} = (1 - S_e)^\gamma \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (16)$$

で表される。ここで、 m : Mualem 定数、 γ : 形状パラメータである。

図-5 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。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。



・上端のみ排気境界

図-6 解析領域

図-7 せん断条件

表-1 材料定数

λ	κ	M	ν	k_w (m/day)
0.1074	0.0107	1.344	0.33	0.01
m	γ	a	n	k_a (m/day)
0.8	1/2	30	1.0	1.00
p'_{sat} (kPa)	n_{li}	e_0		
73.5	1.3	0.85		

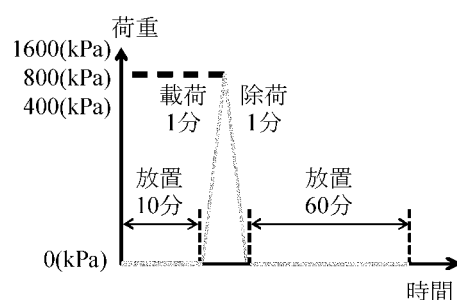


図-8 締固め条件

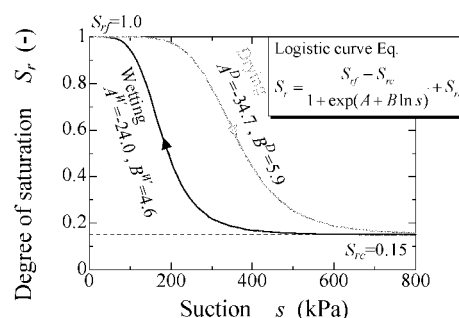


図-9 水分特性曲線

3. 静的締固めシミュレーション及び等体積せん断シミュレーション

本章では、土の締固めを不飽和土の排気・非排水圧縮現象と捉え、第2章で示した構成モデルと水理モデルを適用した土/水/空気連成有限要素解析コード(DACSAR-MP)によって、静的締固めシミュレーション及び等体積せん断シミュレーションを行い、締固めメカニズムを力学的に検討する。

3.1 解析条件

解析領域は図-6に示すような高さ2cm×幅1cmの供試体を想定した。この供試体を鉛直方向に5つに分割する。鉛直一次元圧縮条件を設定し、完全非排水境界・上面排気境界の下で解析領域上面に等分布荷重を段階的に載荷・除荷することによって締固めを行う。載荷荷重は400・800・1600(kPa)、載荷・除荷に要する時間を共に1分とする(図-8)。さらに、締固め後の各供試体に対して、変位境界を変更し、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。締固め前の供試体高さ2cmに対してせん断ひずみが15%になるように、せん断時における上面の最大水平変位量は0.3cmとする(図-7)。また、解析に用いる水分特性曲線、材料定数はそれぞれ図-9、表-1の通りである。材料定数は、河井ら¹¹⁾の静的締固め試験に用いたカタルポクレーの物性値を参考に設定した。初期含水比は $w=10\sim 28\%$ (2%間隔)の計10パターンとし、初期サクションは含水比ごとにロジスティック曲線における主吸水曲線上に設定、高さによらず一定とする。

3.2 解析結果及び考察

(1) 締固め土の乾燥密度

図-10、図-11、図-12は中央部要素である要素3の締固め荷重400(kPa)での締固めにおける、締固め中の平均有効応力・間隙比関係、間隙空気圧の経時変化、さらに水分特性曲線上の締固め時のサクション・飽和度関係を示したものである。含水比 $w=14\sim 24\%$ の範囲では、設定含水比が大きいほど降伏応力が小さくなるために、応力載荷に対して大きく圧縮するのが分かる。この時、載荷応力はほぼ有効応力に変換されており、間隙空気圧の増加はわずかしき見られない。しかしながら、設定含水比 $w=26\%$ での締固めでは、供試体の飽和度が高くなり、載荷応力の有効応力への変換効率が低下するため、間隙空気圧増加が大きく、圧縮量は抑えられているのが分かる。また、

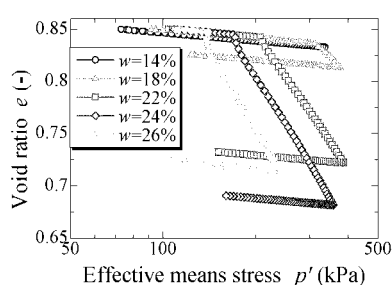


図-10 平均有効応力-間隙比

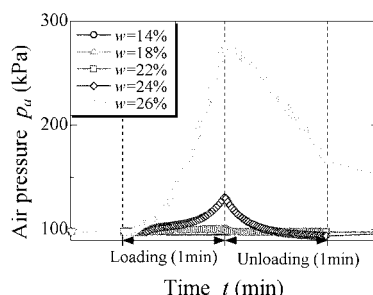


図-11 間隙空気圧の経時変化

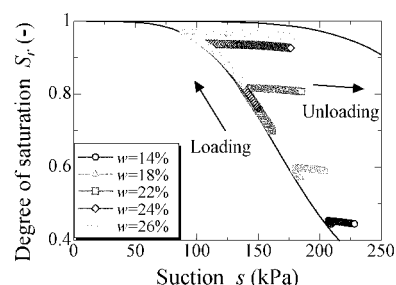


図-12 水分特性曲線

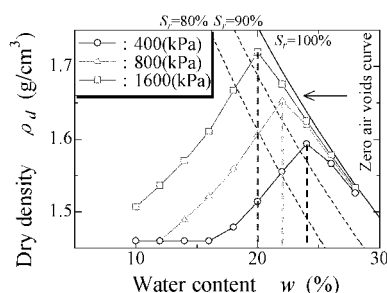


図-13 含水比-乾燥密度

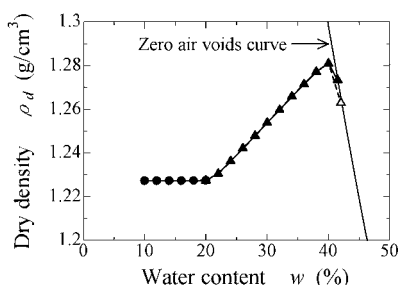


図-14 河井らの締固め曲線

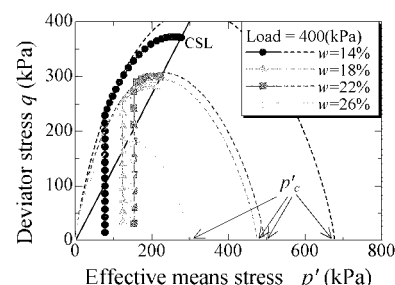


図-15 せん断時の応力経路

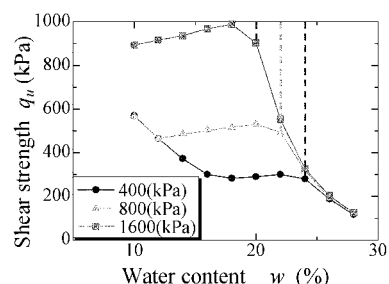


図-16 含水比-せん断強度

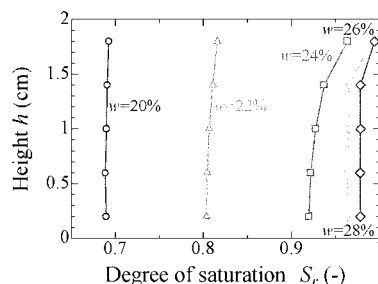


図-17 飽和度の鉛直分布

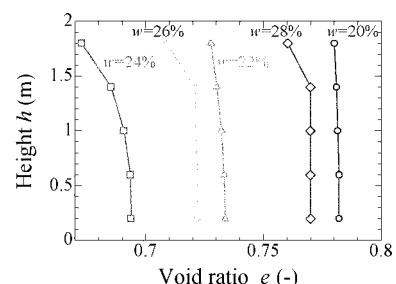


図-18 間隙比の鉛直分布

図-12 より、載荷圧縮時はサクション減少・飽和度増加の吸水挙動が、除荷膨張時はサクション増加・飽和度減少の脱水挙動が生じているのが確認できる。

図-13 は締固め後の乾燥密度を含水比に対して整理したものである。最適含水比と最大乾燥密度を持つ上に凸な締固め曲線が表現できているのが分かる。この形状は、河井ら(2009 年)¹²⁾の静的締固めシミュレーションでも説明されている(図-14)。本研究ではさらに、間隙空気圧の影響を考慮し、実験値に基づく材料定数を設定したことで、ピークの位置がゼロ空気間隙曲線から離れていることや全体的に高い乾燥密度を算出できていることなど実際に得られる締固め曲線をより忠実に表現することができた。

(2) 締固め土のせん断強度

図-15 は、せん断中の応力経路図と各せん断初期の降伏曲面を示しており、この図から、せん断初期における「せん断初期降伏曲面における平均有効主応力で表された先行圧密主応力 p'_c 」が、その後のせん断過程に大きく影響していると考えられる。その結果、せん断によるせん断強度を含水比に対して締固め荷重ごとに整理した図-16 より、締固め荷重が低くかつ初期含水比が低いケースを除くと、一般的に知られているように、締固め曲線の最適含水比に対して乾燥側の含水比でせん断強度のピークを示す結果が得られた。

(3) 締固め土の透水性

また、締固め時の間隙空気圧の影響によって、締固め後の供試体には、鉛直方向に飽和度や間隙比の分布が生

じた(図-17・図-18)。この結果は、高飽和度域にある締固め土では、鉛直分布次第で、全体(見かけ)の飽和度の大小とは序列の異なる飽和度を持つ部分が供試体内部に発生しうる可能性があることを表している。つまり、供試体内に一部でも透水性が低い所があれば、全体の透水性はその一部分に支配されるはずである。本解析結果ではその傾向は見られなかったが、空気間隙の残留がもたらす外観からでは検討しきれない締固め土内部に生じる鉛直方向の分布が、締固め土の透水性に影響を与えていると言えるのではないだろうか。

4. 結論

近年、建設業界では性能設計体系への移行が社会の趨勢となっている。仕様設計に沿う現場締固め管理施工の現状を背景に、本研究の成果は、締固め土構造物の建設・維持において、「品質評価」に基づく新たな締固め管理を可能にするものである。

参考文献

- 1) 久野悟郎: 締固めと力学特性の相関, 土と基礎, No.22-4, pp.5-10, 1974.
- 2) Terzaghi, K. : The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear, *Proc. 1st IC-SMFE*, Vol.1, pp.54-56, 1936.
- 3) Bishop, A. W. : The principle of effective stress, *Norwegian Geotechnical Institute*, No.32, pp.1-5, 1960.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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, pp.407-414, 2006.
- 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) 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.
- 9) 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.
- 10) Van Genuchten: A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils, *Soil Science Society American Journal*, Vol.44, pp.892-898, 1980.
- 11) 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.
- 12) 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, Vol.12, pp.429-436, 2009.

著者: 1) 柴田昌輝、株式会社大林組; 2) 大槻剛瑠、京都府; 3) 河井克之、都市安全研究センター、准教授;
4) 飯塚敦、都市安全研究センター、教

Study of the compaction effect with soil/water/air coupled F.E. analysis

Masaki Shibata
Takeru Otsuki
Katsuyuki Kawai
Atsuki Iizuka

Abstract

Compacted soil is unsaturated soil which includes both air and water among soil skeleton, and it has low compressibility, low permeability and high shear strength. These characteristics are suitable for construction of various earth structures and compaction is widely used on geotechnical engineering sites. However, the compaction has not been explained in the framework of soil mechanics up to today and it is inevitable to apply empirical methods on the compaction to earth structure construction. Therefore, we have had difficulties in presuming the internal state of earth structures and predicting their behaviors under natural disaster such as storm of rain and earthquake.

In this study, we regarded the compaction as compression and consecutive expansion of unsaturated soil under drained air and undrained water condition, and simulated static compaction tests and processes of construction of compacted earth structures with soil/water/air coupled finite element analysis. Consequently, we could express the characteristics of compacted soil, which has not been explained in the long period of geotechnical engineering.

The achievement of this study is useful for the reasonable construction management in the geotechnical engineering site.