



土／水／空気連成解析手法による異なる含水比の締 固め地盤の品質評価

佐藤, 武斗
ポムマチャン ヴィラデス
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, 17:31-38

(Issue Date)

2013-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011406>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011406>



土／水／空気連成解析手法による 異なる含水比の締固め地盤の品質評価

Quality evaluation of an earth structure compacted

under various water contents with soil/water/air coupled F.E. analysis

佐藤 武斗¹⁾

Taketo SATO

ポムマチャン ヴィラデス²⁾

Viradeth PHOMMACHANH

河井 克之³⁾

Katsuyuki KAWAI

飯塚 敦⁴⁾

Atsushi IIZUKA

概要：盛土構造物の多くが締固め土を用いて建設されている。締固め土の特徴としては、他の材料に比べて安価で、修繕が容易であるといった長所がある一方で、安定性の評価が難しいといった課題もある。

現在、締固め施工の品質管理値は室内締固め試験による最大乾燥密度に対する土構造物の乾燥密度の比率（締固め度 Dc 値）によって規定されているが、これまでの経験及び実績に基づいた一律の締固め度を適用する 경우가多くある。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、盛土材料の初期含水比の違いが及ぼす土構造物内部の影響について検討を行う。数値計算には、土/水/空気連成有限解析コード DACSAR-MP¹⁾を用いた。締固め効果を定量的に評価することにより、今後の設計・施工での取り扱いや施工後の品質管理が向上することを期待する。

キーワード：不飽和土、締固め、土構造物

1. はじめに

現在、締固め施工の品質管理値は室内締固め試験による最大乾燥密度に対する土構造物の乾燥密度の比率（締固め度 Dc 値）によって規定されていることが多い。締固め度を品質管理値として用いる際には、室内土質試験及び安定計算等を行わず、さらには、土構造物に求める性能及び土質材料を考慮せず、これまでの経験及び実績に基づいた一律の締固め度を適用する 경우가多くある²⁾。締固め管理基準値は、設計で盛土に要求する性能に対応した力学特性（せん断強さ、変形係数等）を確保するように設定するのが原則ではあるが、盛土に求める性能及び土質材料により異なる管理基準値を定めるだけの判断材料がそろっていないのが現状だ。その原因の一つとして、設計・施工で取り扱われる指標と力学挙動との関係が十分に解明されていないことが挙げられる。このようなこ

とから、締固め施工の設計・施工での取り扱いや施工後の品質管理には力学的な観点により改善の余地があると考えられる。本研究では、土の締固めを不飽和度の排気・非排水圧縮現象と捉えて、盛土材料の初期含水比の違いが及ぼす土構造物内部の影響について検討を行う。数値計算には、土/水/空気連成有限解析コード DACSAR-MP を用いた。

1.1 不飽和土の構成モデル

近年、不飽和土の力学の発展により、その力学特性を表現できる多数の不飽和構成モデルが提案されている。Karube and Kawai³⁾は、土骨格に作用するバルク応力とメニスカス応力を分離し、定量的に表現することで、サクシジョン履歴の影響を応力状態の違いとして表現できるようにした。彼らのモデルは、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状態を求めるため、設定する残留飽和度にモデルの挙動が大きく依存する。それゆえ、数値計算が不安定になりやすいという問題点を抱えている。そこで、大野ら⁴⁾によって提案されているモデル(S_e -Hardening モデルと呼ぶ)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選択し、複雑な計算過程を要しない柔軟なモデルとなっている。本研究では、 S_e -Hardening モデルを使用する。さらに、数値計算上の特異点に移行することを回避するために、特異点をもたない大野⁵⁾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。

大野らのモデルでは、不飽和土の有効応力を以下のように表される。

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

ただし、

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

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

であり、 $\boldsymbol{\sigma}'$ ：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 ：サクシジョン、 p_s ：サクシジョン応力、 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、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できる。ここで e_0 ：初期間隙比である。

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

となり、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 ：飽和度の圧密降伏応力に対して飽和度の剛性が最も高い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

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

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 ：ダイレタンシー係数であり

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

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。

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

ここで,

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

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とする。

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に導かれる。

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

式(11)は $n_E=1.0$ を代入すると,

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

となる。さらに, 式(12)は飽和状態($S_e=1.0$)では, $\xi=1.0$ 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, 図-2 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。

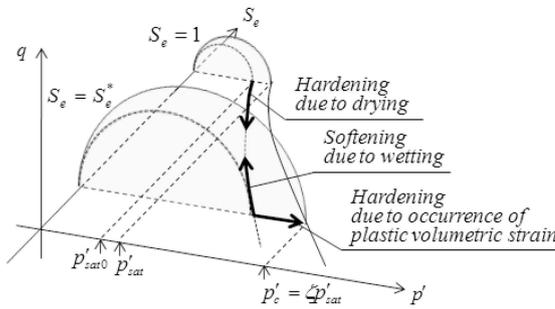


図-1 不飽和土の降伏曲面の概念図

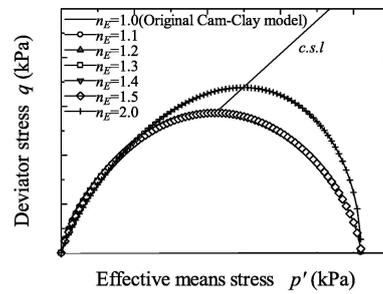
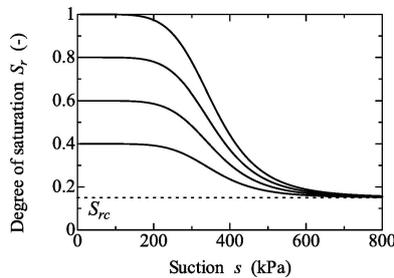
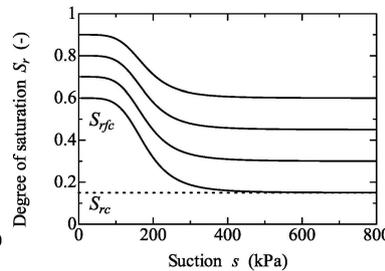


図-2 EC モデルの降伏曲面



(a) 脱水曲線



(b) 吸水曲線

図-3 河井らの水分特性曲線モデル

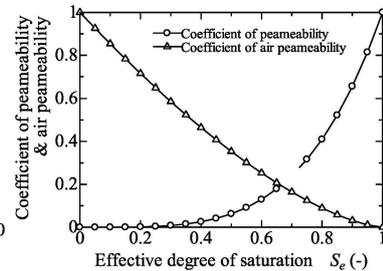


図-4 不飽和透水係数と不飽和透気係数の相関

1.2 ヒステリシスの表現が可能な水分特性曲線モデル

水分特性曲線は古くからさまざまな経験式で表されてきた。その中で、解析を行う際は実用上特異点を持たない連続関数であることが望まれる。河井ら⁶⁾は、水分特性曲線のS字形状を連続関数として表現できるモデルの中で、唯一実測値に対して線形近似が可能な杉井・宇野⁷⁾らによって提案されているロジスティック曲線式を用いてヒステリシスを表現する方法を提案している。

ロジスティック曲線は次式で表される。

$$\frac{S_r - S_{ra}}{S_{rf} - S_{ra}} = \frac{1}{1 + \exp(A + B \log_e s)} \quad (13)$$

S_{ra} : $s \rightarrow \infty$ のときの漸近飽和度

S_{rf} : $s=0$ での飽和度

A, B : 水分特性曲線のパラメータ

飽和状態から始まる脱水曲線(主脱水曲線と呼ぶ)に関しては、 $S_{rf}=100$ とし、吸水曲線に関しては $s=0$ のときの飽和度を S_{rf} として、種々の S_{ra} を設定、次式を用いて線形近似することができるため、もっとも相関関係の高くなるときの S_{rc} を求めればよい。

$$\log_e \left(\frac{S_{rf} - S_r}{S_{rf} - S_{ra}} \right) = A + B \log_e s \quad (14)$$

ここで、水分特性曲線の形状を決める空気侵入値および水侵入値は、ロジスティック曲線式では変曲点と考えることができる。その変曲点は、パラメータ A, B 両方の影響を受けるため、間隙比の依存性を無視すればこの2つのパラメータを脱水曲線および吸水曲線における土質定数として用いる。この脱水曲線、吸水曲線でのパラメータをそれぞれ $A^{(D)}$, $B^{(D)}$ および $A^{(W)}$, $B^{(W)}$ とし、上添え字で区別する。

任意の(サクシオン、飽和度)の供試体状態を表す点(s_1, S_{r1})を通過する脱水曲線は以下のようにして求める。脱水曲線は $s \rightarrow \infty$ で必ず残留含水比 w_c に収束し、間隙比の状態を無視すれば $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度は唯一の値

$$S_{rc} = \frac{G_s w_c}{e} \quad (15)$$

G_s : 土粒子比重

となり、次式を満足する S_{rf}^* を求めればよいことになる。

$$\frac{S_{r1} - S_{rc}}{S_{rf}^* - S_{rc}} = \frac{1}{1 + \exp(A^{(D)} + B^{(D)} \log_e s_1)} \quad (16)$$

これによって、求められた S_{rf}^* を用いて脱水曲線が次式で与えられる。

$$S_r = \frac{S_{rf}^* - S_{rc}}{1 + \exp(A^{(D)} + B^{(D)} \log_e s)} + S_{rc} \quad (17)$$

一方、任意のサクシオン、飽和度(s_1, S_{r1})を通過する吸水曲線は以下のように求める。吸水曲線に関しては、ロジスティック曲線式が示す $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度 S_{ra} が唯一とはならず、 S_{rf} , S_{ra} の2つのパラメータを決めなければならない。そこで S_{rf} , S_{ra} の関係を次式で与える。

$$\frac{S_{ra} - S_{rc}}{100 - S_{rc}} = \frac{S_{rc} - S_{rfc}}{100 - S_{rfc}} \quad (18)$$

$$S_{rf}(S_{ra}) = \frac{(100 - S_{rfc})(S_{ra} - S_{rc})}{100 - S_{rc}} + S_{rfc} \quad (19)$$

S_{rfc} : $s \rightarrow \infty$ での収束飽和度が限界飽和度に一致する

吸水曲線(主給水曲線と呼ぶ)が、 $s=0$ で示す飽和度

実際に、このときの吸水曲線はもっとも乾燥側の吸水曲線であり、この吸水曲線より下の飽和度は存在しない。この吸水曲線を求めることはできないが、実測の吸水曲線から得られた S_{rf1} , S_{ra1} を式(2.6)に代入することで次式により求めることができる。

$$S_{rfc} = \frac{100S_{rf1} - 100S_{a1} + 100S_{rc} - S_{rf1}S_{rc}}{100 - S_{ra1}} \quad (20)$$

つまり、次式を満足する S_{ra}^* を求めればよい。

$$\frac{S_{rf1} - S_{ra}^*}{S_{rf}(S_{ra}^*) - S_{ra}^*} = \frac{1}{1 + \exp(A^{(W)} + B^{(W)} \log_e s_1)} \quad (21)$$

以上のようにして、図-3 のような脱水曲線、吸水曲線が得られる。

1.3 比透水係数モデル・比透気係数モデル

まず、水に関してのダルシー則は

$$\tilde{\mathbf{v}}_w = -\mathbf{K}_w \cdot \text{grad}h = -k_{rw} \mathbf{k}_w \cdot \text{grad}h_w \quad (22)$$

また、ダルシー則が空気にも適用できると仮定すると、

$$\tilde{\mathbf{v}}_a = -\mathbf{K}_a \cdot \text{grad}\left(\frac{P_a}{\rho_w g}\right) = -k_{ra} \mathbf{k}_a \cdot \text{grad}\left(\frac{P_a}{\rho_w g}\right) \quad (23)$$

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、Mualem⁸⁾の不飽和透水係数推定モデルと Van Genuchten 式⁹⁾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、

$$k_{rw} = S_e^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (24)$$

$$k_{ra} = (1 - S_e)^\gamma \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^{2m} \quad (25)$$

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

透気係数と不飽和透水係数の相関性について、図-2.4 のように飽和度が上昇すると、透気係数が下がり、透水係数が上昇する。逆に飽和度が下がると、透気係数が上がり、透水係数が下がる関係になる。

2. 含水比を変えた多層締固めシミュレーション

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、土/水/空気連成有限要素解析コード (DACSAR-MP) によって含水比の異なる材料を用いて土構造物の多層締固めシミュレーションを行い、施工後の土の内部状況を知ること、含水比の違いが締固め土の品質に及ぼす影響について検討する。

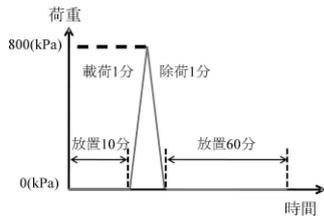


図-6 締固め条件

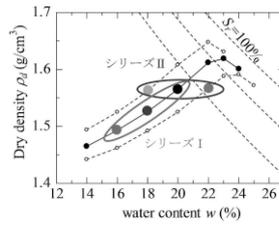


図-7 締固め曲線

表-1 材料定数

λ	κ	M	ν'	m	p'_{ur} [kPa]
0.10	0.01	1.34	0.33	0.8	75.00
a	n	e_0	S_{rc}	G_s	$k_s = k_y$ [cm/s]
10.00	1.00	0.85	0.15	2.7	1.67×10^{-5}

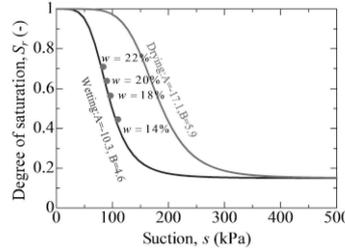


図-9 水分特性曲線

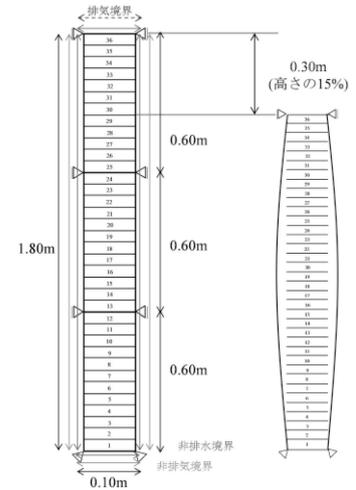


図-8 解析対象

2.1 解析条件

本研究は柴田ら¹⁰⁾を倣い、図-6の締固め条件で室内静的締固め試験を模擬した数値解析により図-7に実線で示す締固め曲線を得た。この締固め曲線を基にしてシリーズ I では同一締固め曲線上における初期含水比が異なる 3 点、シリーズ II では同一乾燥密度における初期含水比が異なる 3 点について比較検討を行った。なお、シリーズ II については締固め荷重を変えており、初期含水比 18% の場合は締固め荷重を 1000kPa とし、20% の場合 800kPa、22% の場合 600kPa と設定した。解析領域は図-8 に示すまき出し厚さ 0.60m の締固め層を 1 層とし、この締固め層を 3 層積み上げた締固め土構造物を想定する。奥行きは 1.00m とし平面ひずみ条件を仮定している。境界条件は、全面非排水境界・上面排気境界とし、変位境界は下端のみ水平・鉛直固定、左右端では鉛直ローラーとしている。材料は河井ら¹¹⁾の静的締固め試験に用いたカタルポクレの物性値を参考に表-1 のとおりを設定した。また、材料は同一飽和度・同一サクションを仮定しており、初期含水比はシリーズ I では 14、18、20%、シリーズ II において 18、20、22% と設定している。初期間隙比はどのケースでも 0.85 と一定としており、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。用いる水分特性曲線を図-9 に示す。さらに締固め後の土構造物の変位境界を変更し、一軸圧縮条件で変位制御を行い圧縮・せん断特性の評価を行った。一軸圧縮時の各土構造物については、シリーズ I、II とともに降雨強度 1mm/hr の雨を 90 時間与えたケースと比較を行っている。

2.2 解析結果及び考察

図-10 にシリーズ I の締固め施工終了後 3 日間の放置期間を設けた土構造物の高さによる間隙比、飽和度関係を示す。初期含水比が高くなるほど土構造物内部で非一様な分布が生じる様子を表す。同一締固め荷重にも関わらず締固まり具合に差が生じるのは、有効飽和度で表される剛性が異なるためで、高い含水比の土構造物では段階施工を考慮することにより土構造物内部の間隙比、飽和度の不均一性は広がりを見せている。図-11 にシリーズ I の一次元圧縮時の変位制御による反力関係を示す。反力は初期含水比が低いほど強くなっており、降雨を考慮すると大きく強度が低下している。このことは初期含水比 14% では透水性が悪いため、降雨を与えた際に上部のみ大きく飽和度が増加したことが一因となっており、上部の要素は変位制御により大きく変形している。また、図-12 に示すシリーズ II においては、初期含水比を変えても締固め荷重を変えて乾燥密度を同程度にすることにより、圧縮・せん断変形に対する反力は初期含水比が低いほど高く、降雨後においても同様の結果となった。降雨を考慮したケースの変位制御に伴う反力の大きさがシリーズ I の結果と異なる序列を示すのは、低含水比では締固め荷重が大きいために、先行圧縮応力が高いことが一因である。初期含水比を変えても締固め荷重を変えて乾燥密度を同程度にすることにより、圧縮・せん断変形に対する反力は同程度となり、降雨等の水浸を考慮しても問題ないことが分かった。

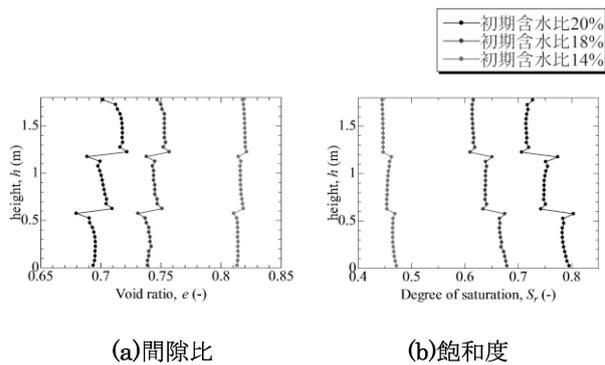


図-10 高さ方向の分布

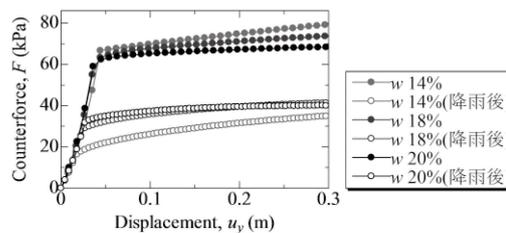


図-11 シリーズ I における変位制御による反力

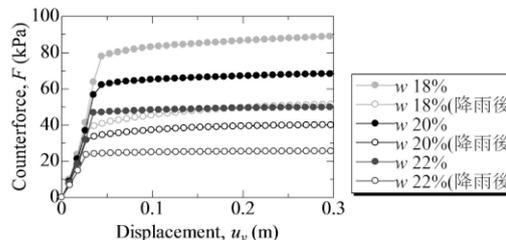


図-12 シリーズ II における変位制御による反力

2.3 結論

本研究では締固めに密接に関係している含水比の役割について数値計算を用いて検討を行った。材料の含水比は土構造物内部に生じる不均一性と関係しており、最適含水比に近づくほど内部の不均一性は広がる結果となった。また、同一乾燥密度の異なる含水比の土構造物では、締固め荷重を変えることにより含水比が低い場合でも先行圧縮応力の増加により高い剛性をもつことが確認された。

参考文献

- 1) 金澤伸一：不飽和土の数理モデルに基づく締固め土構造物の力学挙動評価，博士論文，神戸大学大学院自然科学研究科博士課程市民工学専攻，2010。
- 2) 道路土工 - 盛土工指針(平成 22 年度版)，財団法人日本道路協会，p.211～p.220，2010。
- 3) 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.
- 4) Ohno, S. , Kawai, K. & Tachibana, S. : Elasto-plastic constitutive model for unsaturated soil applied effective degree of saturation as a paramater expressing stiffness, *Journal of JSCE*63(4), pp. 1132-1141(in Japanese)
- 5) 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，平成 18 年度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。
- 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* 5, pp777-784, 2002。
- 7) 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 回年次学術講演概要集*，pp777-784, 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.
- 9) Van Genuchten : A closed-form equation for predicting hydraulic of unsaturated soils , *Soil Science Society American Journal* , Vol.44 , pp.892-898, 1980 .
- 10) 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。
- 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。

著者：1) 佐藤武斗、公益財団法人鉄道総合技術研究所；2) Phommachanh Viradeth、神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻博士後期課程；3) 河井克之、神戸大学大学院都市安全研究センター、准教授；4) 飯塚敦、神戸大学大学院都市安全研究センター、教授。

Quantification of the compaction effect and its application to quality evaluation of embankments with soil/water/air coupled F.E. analysis

Taketo Sato
Viradeth Phommachanh
Katsuyuki Kawai
Atsuki Iizuka

Abstract

Degree of compaction have becomes the most commonly used the value of the quality control of compaction construction. There are many cases which it used without the laboratory tests, stability analysis and considering to the kind of soils and the performance requirements for the earth structure. In a construction site they use across-the-board degree of compaction based on an experimental rule. That's because it is easy to treat and we can't defined degree of compaction with respect to each the earth structure. The cause is we don't know relationship between the value of the quality control of compaction construction used in a construction site and mechanical behavior. Because of this, the quality control of compaction construction will improve in terms of dynamics mechanics. In this study, we regard the compaction as compression and consecutive expansion of unsaturated soil under drained air and un-drained water condition, I have investigated the influence of the earth structure of difference of the initial water content. Then, I evaluate the earth structure influenced water content in the earth material. I expect for improving quality control method and operation procedures of compaction in a construction site.