

地盤工学会誌

特集 ▶ 不飽和土の地盤特性

Vol.67 No.9
Ser.No.740

9

The Japanese
Geotechnical Society
2019



公益社団法人
地盤工学会

<https://www.jiban.or.jp/>

特集テーマ：不飽和土の地盤特性

| | |
|-------------------|---|
| 総説 | 不飽和地盤工学の体系化 1 ●向後 雄二 |
| 論説 | 不飽和土の浸透特性値の測定方法—現状と課題— 4 ●竹下 祐二 |
| 報告 (公募) | カンボジアアンコール遺跡基壇盛土材料締固め曲線の不飽和土特性としての解釈 8 ●福田 光治/岩崎 好規/本郷 隆夫/下田 一太 |
| (公募) | 水分特性曲線を用いた砂の間隙構造の評価 12 ●杉井 俊夫/川部 らら |
| (公募) | 保水性試験における間隙水圧測定の有効性 16 ●畠山 正則/京野 修/安福 規之/石蔵 良平/アデル アロウシィ |
| (公募) | サクションを考慮した不飽和土のクリープ試験とその結果 20 ●西村 友良 |
| (公募) | 被災斜面で原位置サンプリングした乱れの少ない試料の水分特性曲線 24 ●安福 規之/アデル アロウシィ/石蔵 良平/畠山 正則/京野 修 |
| (公募) | 不飽和土の圧縮特性と締固め曲線との関連性 28 ●本田 道誠/飯塚 敦 |
| 技術紹介 | 大径補強材を用いた地山補強土工法の積雪寒冷地における性能把握に向けた取り組み 32 ●岸田 久徳/菊谷 雅輝/川尻 峻三/川口 貴之 |
| | 自然由来重金属等含有土への対応について 34 ●下田 宏治/石川 雅洋/西岡 国夫/宮脇健太郎 |
| 寄稿 (投稿) | 令和と地盤工学, そしてその設計思想について 36 ●末岡 徹 |
| 資料 | 室内試験地盤工学会基準 (物理特性関係) の改正について 38 ●地盤工学会基準部 |
| | 室内試験地盤工学会基準 (岩の力学特性関係) の改正について 39 ●地盤工学会基準部 |
| 学会の動き (国際活動から) | 第7回地盤材料の変形特性に関する国際シンポジウム及び第5回 Bishop Lecture の 開催報告 40 ●西村 聡 |

複写をされる方へ

地盤工学会は下記協会に複写に関する権利委託をしていますので、本誌に掲載された著作物の複写をご希望の方は、同協会より許諾を受けて下さい。但し（公社）日本複製権センター（同協会より権利を再委託）と包括複写許諾契約を締結されている企業等法人による社内利用目的の複写はその必要はありません（社外頒布用の複写は許諾が必要です）。

権利委託先：一般社団法人 学術著作権協会

〒107-0052 東京都港区赤坂 9-6-41 乃木坂ビル 2F

FAX：(03)3475-5619 E-mail：info@jaacc.jp

なお、複写以外の許諾（著作権の引用、転載、翻訳等）に関しては、（一社）学術著作権協会に委託しておりません。直接、地盤工学会（連絡先は本文最終ページに記載）へご連絡下さい。

アメリカ合衆国において本書を複写したい場合は、次の団体に連絡して下さい。

Copyright Clearance Center, Inc.

222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA

Phone: 1-978-750-8400 FAX: 1-978-646-8600

| | |
|------|-------------------------------|
| 技術手帳 | 月探査と地盤工学41 |
| | ●若林 幸子/金森 洋史/星野 健 |
| 講座 | 平野が抱える地盤工学的課題とその対策 |
| | 7. 大阪平野における地盤工学的課題と対策43 |
| | ●大島 昭彦 |
| | 8. 講座を終えるにあたって51 |
| | ●三村 衛 |
| | 地盤工学に関する科学哲学と技術者倫理 |
| | 7. 科学哲学と研究公正52 |
| | ●大西勇喜謙 |
| | 8. 講座を終えるにあたって60 |
| | ●戸邊 勇人/野家 啓一 |
| | 新入会員・お詫びと訂正62 |
| | 書籍紹介63 |
| | 編集後記64 |

カンボジアアンコール遺跡

基壇盛土材料締固め曲線の不飽和土特性としての解釈

Interpretation on Unsaturated Character of Foundation Fills of Angkor Complexes

福田 光 治 (ふくだ みつはる)
大成ジオテック(株) 研究員

岩 崎 好 規 (いわさき よしのり)
(一財)地域地盤環境研究所 代表理事

本 郷 隆 夫 (ほんごう たかお)
(一財)地域地盤環境研究所 研究員

下 田 一 太 (しもだ いちた)
筑波大学芸術系世界遺産専攻 助教

1. はじめに

土の締固め特性は乾燥密度と含水比を直交軸とし、飽和状態のゼロ空積曲線で囲まれる不飽和土領域で説明される。したがって締固め特性はまさに不飽和土の力学として体系化されなければならない研究分野になる。

締固め特性として締固め曲線が基本フレームになるが、これまでの締固め曲線力学は地盤力学の体系から乖離した飽和度比と締固め密度比による経験的な知見として示され、地盤力学の教科書^{1),2)}では含水比と締固め密度の関係が説明されるにとどまっている。

アンコール遺跡基壇盛土の解体・再構築に当たっては基壇盛土の強度や透水性の安定性を追及した。このため締固め曲線を地盤力学の概念で把握する必要性がでてきた。

本稿では締固め曲線の形態に着目してサクシオンとB値を用いた基本フレームによる解釈を試み、含水比と強度の関係を不飽和土特性として把握した。本稿では締固め曲線を不飽和土として把握する基本フレームを示す。

2. 地盤力学の教科書と土の締固め

教科書には地盤技術者が知っておかねばならない地盤力学の体系が記載されている。土の締固めについて、山口¹⁾は「不飽和土の性質」の章で、赤井²⁾は「土の動的性質と締固め」の章で取り扱う。土粒子に付着する水膜モデルを基礎に、最適含水比を基準にして水和-催滑-(最適含水比)-膨潤-飽和のように4段階に区分され、サクシオンなどで締固め曲線と工学的性質の状態変化が説明される。代表例として針貫入試験等による強度変化、透水性の変化が示されるが、定性的な説明にとどまっている。

3. 不飽和土力学による締固め曲線把握の基本フレーム

ここでは締固め曲線と強度の関係を研究対象とし、赤井地盤力学²⁾に準拠して図-1のように、締固め曲線の乾燥側の土粒子配列抵抗力はサクシオンによる拘束力、湿潤側のランマー落下エネルギーの消散は間隙水圧の発

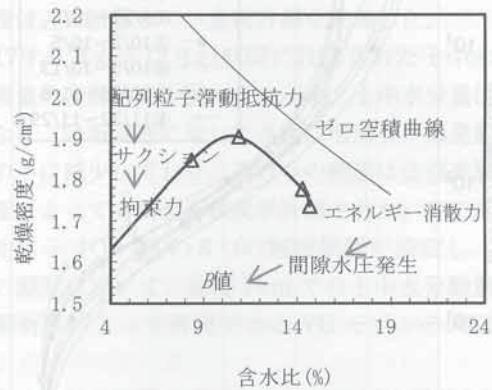


図-1 締固め抵抗因子

生に求め、土粒子間のサクシオンとB値による解釈を試みた。そのフレームを以下に示す。

- (1) サクシオンは Van Genuchten (ファンゲニヒテン) の関係で表現する。
- (2) 動的締固めエネルギーはB値を介した静的締め固め等価圧力として把握する。
- (3) 締固め土の強度は山中式硬度指数で表現し、支持力係数で評価する

3.1 圧密モデルの準用

締固めにおけるサクシオンとB値による拘束効果は圧密現象に適用した双曲線による式³⁾の形態を準用した。基本式から体積圧縮係数を求め、その逆数に乾燥密度が対応すると考えた。圧密現象の体積圧縮係数は圧縮性が表現されている。このため体積圧縮係数が増大すればゆる詰めになり、乾燥密度は減少する。圧密現象の圧密応力として、動的締固め形態に対置した等価な静的圧力で評価する。さらに圧密降伏応力はサクシオンに関係させた。したがって準用圧密モデルではB値とサクシオンを仮定しなければならない。

式(1)が基礎とした圧密現象の双曲線式、式(2)が体積圧縮係数であり、これらの式を基礎に、式(3)を介して圧密モデルとしての式(4)を考えた。

$$\varepsilon_v = \frac{p_y}{E} + \frac{p-p_y}{a+b(p-p_y)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$m_v = \frac{a}{\{a+b(p-p_y)\}^2} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$\rho_d = \frac{c}{m_v} = c \frac{\{a+b(p-p_y)\}^2}{a} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\rho_d = c \frac{[a+b\{(1-B)\sigma - S_u\}]^2}{a} \quad \dots\dots\dots(4)$$

3.2 B値

図-2に示す三相土をモデル化する。土骨格、土粒子、水、空気の圧縮係数を C_s, C_p, C_w, C_a 、締固め土の間隙率を n 、飽和度を S_r として体積変化の保存則から B 値が誘導される。動的締固め過程で得られる最終的な締固め状態を静的で、かつポテンシャル的な概念で式を展開する。 B 値の静的な展開には種々な概念が提案されている⁴⁾。本稿では土の骨格の体積変化 ΔV_s に対して、土粒子の体積変化 ΔV_p 、水分と空気の体積変化 $\Delta V_w, \Delta V_a$ をポテンシャル的に表現した。基礎的な概念が式(5)である。また動的締固め過程を象徴的な換算有効応力で表現し、土骨格と土粒子には有効応力が作用し、空気圧と間隙水圧は単純化して図-2に示すように間隙水圧 $\Delta\sigma_w$ が作用するとモデル化して応力を機能化して展開した。

$$\Delta V_s = \Delta V_p + \Delta V_w + \Delta V_a \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$B = \frac{1 - \frac{C_p}{C_s}(1-n)}{1 \frac{C_p}{C_s}(1-n) + \frac{C_w}{C_s} S_r n + \frac{C_a}{C_s}(1-S_r)n} \quad \dots\dots\dots(6)$$

3.3 サクシオン

ファンゲニヒテンによるサクシオン評価式に準拠した。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left(\frac{1}{1 + |\alpha h|^n} \right)^m$$

$$= \left(1 + |\alpha h| \frac{1}{1-m} \right)^{-m} = [1 + (-\alpha h)^n]^{-m} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$h = -\frac{1}{\alpha} (S_e^{1/m} - 1)^{1/n} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$S_u = \rho_w g |h| \quad \dots\dots\dots(9)$$

3.4 サクシオンと強度

強度は支持力係数を用いて推定する。内部摩擦角は最上の地盤力学⁵⁾に依拠して推定し、粘着力はサクシオンを介して推定する。

$$\sigma_{1f}' = q_0 N_q + c' N_c \quad \dots\dots\dots(10)$$



図-2 土粒子と三相

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \exp(\pi \tan \phi') \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$N_c = \frac{\cos \phi'}{\sin \phi'} \left[\frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \exp(\pi \tan \phi') - 1 \right]$$

$$= \frac{\cos \phi'}{\sin \phi'} (N_q - 1) \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\sin \phi = \frac{3}{2(1+e) + 1} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$c' = \rho_w g h \tan \phi_b \quad \dots\dots\dots(14)$$

本稿では $\phi_b = 30^\circ$ を用いている。締固め試験における山中式硬度計による支持力調査は表面の強度である。このため土かぶり圧 q_0 は無視されるとすれば、支持力は粘着力と支持力係数が影響することになる。

$$\sigma_{1f}' = c' N_c = \frac{\cos \phi'}{\sin \phi'} (N_q - 1) c' \quad \dots\dots\dots(15)$$

4. 不飽和土力学モデルによる締固め曲線の近似

アンコール遺跡調査プロジェクトで行った図-3の突固め試験結果⁶⁾を不飽和土力学モデルで近似する。ランマー重量2.5 kg、モールド内径10 cm、突き固め層数3、各層あたり突き固め回数25として、滞在期間が制約されているので、乾燥状態から加水する試料調整による締固め試験を行った。最適含水比は約11%であるが湿潤側のデータ数が少ない。

飽和度で整理したのが図-4である。最適含水比の飽和度にばらつきがあり、かつ飽和度が小さい。加水を急いだ影響が出ている。

締固め土の含水比、間隙率は締固め試験結果のデータ

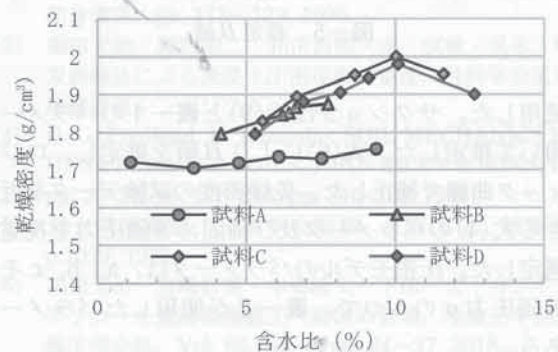


図-3 含水比と乾燥密度

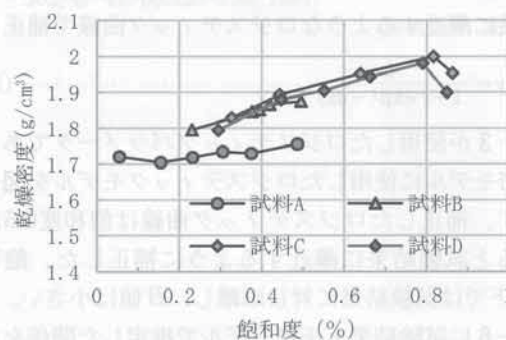


図-4 飽和度と乾燥密度

表一 不飽和パラメータ

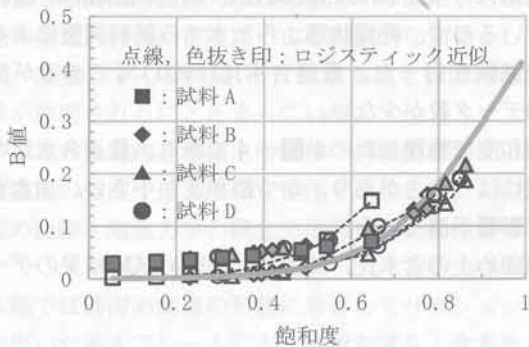
| Van Genuchten | |
|---------------|-------|
| α | 0.015 |
| n | 3 |
| m | 0.667 |
| 内部摩擦角 | |
| 度 | 30 |

表二 圧密モデルパラメータ

| 圧密モデル | | | | |
|-------|----------------|-----|-----|------|
| 試料 | σ (kPa) | a | b | c |
| A | 10 | 1 | 0.1 | 0.94 |
| B | 10 | 1 | 0.1 | 0.99 |
| C | 10 | 1 | 0.1 | 0.96 |
| D | 10 | 1 | 0.1 | 0.98 |

表三 ロジスティックモデルパラメータ

| 試料 | a | b | c |
|----|-----|------|------|
| 共有 | 8 | 0.65 | 1600 |
| A | 8 | 0.65 | 600 |
| B | 8 | 0.65 | 1500 |
| C | 7 | 0.9 | 1600 |
| D | 7 | 0.95 | 1500 |



図一五 推定B値

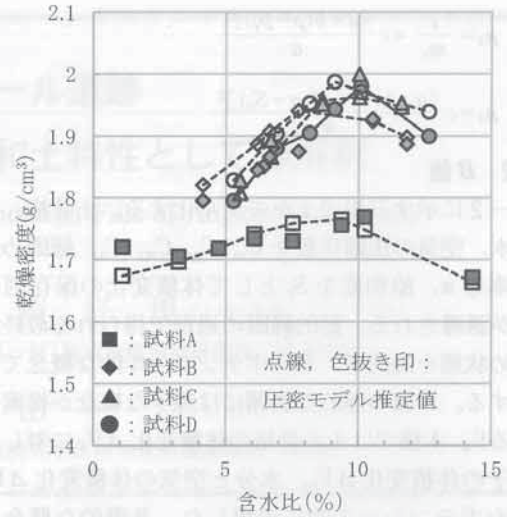
を使用した。サクシオンは式(9)と表一のパラメータを用いて推定した。式(6)によりB値を推定し、ロジスティック曲線で補正した。乾燥密度の試験データを近似できる式(4)のパラメータ及び締固め等価圧力を視覚的に選定した。圧密モデルのパラメータは、 a , b , c そして等価圧力 σ の4つで、表二が使用したパラメータである。

試験結果の含水比から求めたB値では湿潤側でやや乱れる。このためデータの滑らかさを考えて湿潤側で試験結果に漸近するようなロジスティック曲線で補正した。

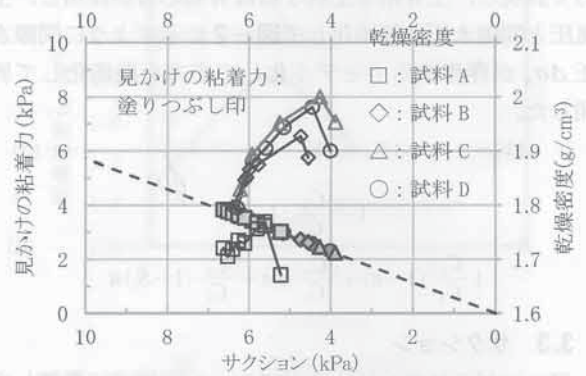
$$y = \frac{b}{1 + c \exp(-ax)} \dots\dots\dots (16)$$

表三が使用したロジスティックパラメータである。圧密モデルに使用したロジスティックモデルを図一五に示す。補正したロジスティック曲線は飽和度0.5以上になると試験結果に漸近するように補正した。飽和度0.5以下では試験結果に対し乖離し、B値は小さい。

図一六に試験結果と圧密モデルで推定した関係を示す。図中の点線と色抜き印で示す関係が圧密モデルで推定し



図一六 推定締固め曲線



図一七 推定サクシオン

た結果であり、試験結果を概略的に近似化している。

5. 不飽和土力学モデルによる支持力の解釈

内部摩擦角は試験結果の乾燥密度から得られた間隙比を用いて式(13)により推定した。見かけの粘着力はファンゲニヒテンモデルのサクシオン式(9)を用いて式(14)により推定した。見かけの粘着力とサクシオンを図一七に示す。白抜き印と実線が乾燥密度である。塗りつぶし印が見かけの粘着力である。

図一八は含水比と推定強度の関係を示している。強度は式(15)により推定した。白抜きの乾燥密度の分布形態に対し、支持力は最適含水比付近で最大となる凸部の形態が推定される。

図一九はアンコール遺跡調査で行った締固め密度と山中式硬度指数の関係である。最適含水比から乾燥側に強度のピークをもつ凸状形態であり、圧密モデルで推定した形態に類似している。

6. 不飽和土力学モデルによる透水係数の解釈

粒度評価径による空隙指数と飽和透水係数の関係⁷⁾を示す。飽和透水係数 k_s , 換算間隙径 h , 粒度評価径 d_c , さらに間隙比 e , 比重 G_s とする。

$$\log k_s = 2.87(1 + \log h) \dots\dots\dots (17)$$

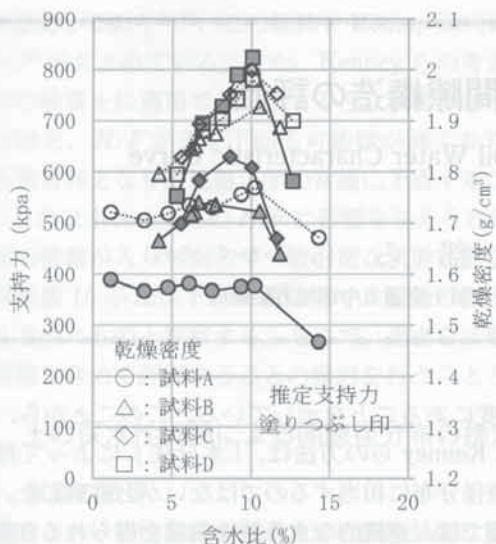


図-8 推定強度

$$h = d_c \times \frac{e}{G_s} \dots (18)$$

飽和透水係数は式(17), (18)に示すように間隙比に応じて変動すると考えた。乾燥側では乾燥密度が増大するので、間隙比は減少し、対応するように飽和透水係数も減少する。逆に、湿潤側では乾燥密度は減少するので、間隙比は増加し、対応する飽和透水係数は上昇する。そして最小飽和透水係数は図-10に示すように最大乾燥密度で発生する。不飽和透水係数は飽和度が高くなるにしたがい、飽和透水係数に近づく。したがって湿潤側では、飽和透水係数と不飽和透水係数は概略的に漸近する傾向が予想できる。経験的には最小透水係数は最適含水比に対し、やや湿潤側で発生する。本モデルで解釈すると、経験的な試験結果には土中内空気が残留している可能性が考えられる。

7. おわりに

本稿では締固め曲線を不飽和土力学として解釈する試案フレームを紹介した。また、サクシヨンとB値を用いた圧密モデルで締固め曲線の形態を近似化できることを示した。しかしサクシヨン、B値はあくまで推定値であり、実験による確認が必要である。また打撃エネルギーを静的な等価圧力で評価することを示したが、これも動的転圧エネルギーを変えた実験等による確認が必要である。

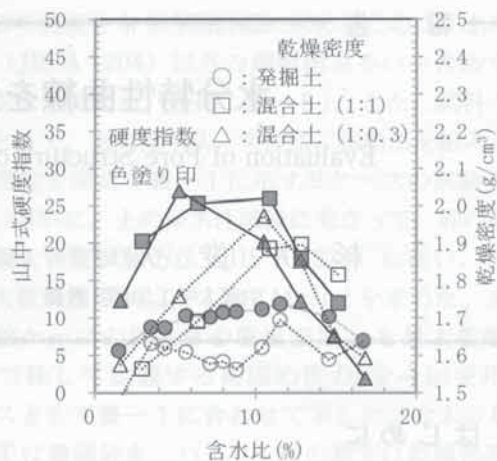


図-9 締固めと支持力試験結果

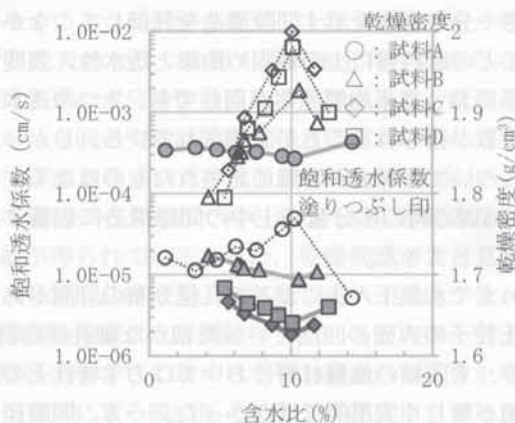


図-10 含水比と推定透水係数

参考文献

- 1) 山口柏樹：土質力学（全改訂），技報堂出版，pp.32～51, 1986.
- 2) 赤井浩一：朝倉土木工学講座 5 土質力学（訂正版），朝倉書店，pp. 113～123, 1996.
- 3) 福田光治・諏訪清二・和田眞郷・安成模・具本 暁：双曲線法による浸透土圧密現象の整理，材料学会第11回地盤改良シンポジウム，2014.
- 4) D. G. Fredlund, H. Rahardjo: SOIL MECHANICS FOR UNSATURATED SOILS, JOHN EILEY & SONS, INC, pp. 29-37, pp. 178-216, pp. 346-372, 1993.
- 5) 最上武雄編著：土木学会監修 土質力学，技報堂，p.1029, 1969.
- 6) 福田光治・岩崎好規・本郷隆夫・下田一太：カンボジアアンコール遺跡基壇盛土の締固め管理，地盤工学会，地盤工学会誌，Vol. 66, No. 6, pp. 24～27, 2018.
- 7) 福田光治・宇野尚雄：「粒度評価径」の提案とそれにもとづく日本統一分類法の分析，土木学会論文集 No. 582/Ⅲ-41, pp.125-136, 1997.

(原稿受理 2019.5.11)