

砂のサクシオンと締固めエネルギーの関係

中部大学工学部 正会員 杉井 俊夫
中部大学工学部 正会員 山田 公夫
中部大学工学部 学生員○近藤 宏幸

1.まえがき

土に締固めエネルギーを加えることにより、土中間隙内の空気が排気（透気）され密度が増加する。この時、間隙水圧と土中内の水分量が平衡することに著者は着目し、豊浦標準砂を用いてサクシオンと締固めエネルギーの関係性を求め、また締固めエネルギーの違う6本の締固め曲線から水分特性曲線を推定してきた¹⁾。本報告では野間砂を用いて試験を行い標準砂の試験結果との比較から、砂のサクシオンと締固めエネルギーの関係性についての考察を行った。さらに野間砂の水分特性曲線の推定も試みている。

2.試験方法

図-1のような CBR 用モールドで、試料は野間砂を使用し突固めによる締固め試験を自動突固め装置を用いて行った。ここでは、突固めによる締固めエネルギー²⁾の1層あたりの突固め回数を変化させることにより、締固めエネルギーの違う供試体（非繰返し）を作成した。なおすべての締固めエネルギーについて、1層あたりの突固め回数以外は、ランマーの質量は4.5kg、突固め層数5層、落下高さ45cmで一定である。その供試体にテンシオメーターの埋設部分を、テンシオオーガーで取り除いて、テンシオメーターを差し込む。突固め表面は、水分が蒸発しないようにラップでおおい24時間程度放置する。その後テンシオメーターに圧力センサーを取り付け、サクシオンを測定した。

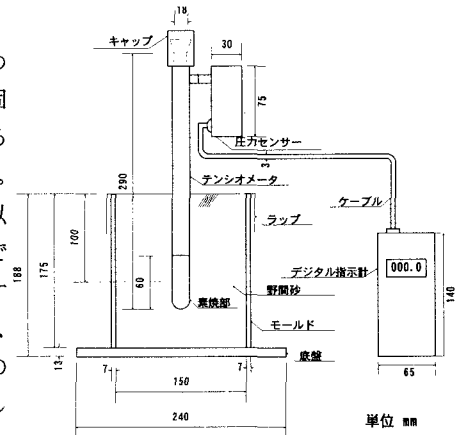


図-1 実験図

3.締固め曲線と水分特性曲線

図-2は凡例の3つの締固めエネルギーを与え試験を行った結果で、これらの試験結果をもとに久野の推定式³⁾を用いて曲線を描いた。なお乾燥側で密度が増加する傾向は、細粒分の少ない砂や礫の特徴である³⁾。実線で示されている曲線は、凡例にある3つの締固めエネルギーについての曲線を描いたが、プロットされている試験結果と比較すると良い精度が得られていることがわかる。また締固めエネルギー32、20、10、3 kgf・cm/cm³についても推定式を用い破線で示した。図-3は締固め試験時に排水を起こした供試体の試験結果を除き、残りの試験結果より求めた van-Genuchten-Mualem のモデル⁴⁾(V-G 曲線)である。初期含水比が最適含水比付近(約30%)になると試験中排水が生じ密度の増加が高くなる。図-3において V-G 曲線より高い値が得られているのは、図-2の乾燥密度 1.5g/cm³以上の点で、排水が生じなかった乾燥密度 1.4~1.5g/cm³で求めた V-G 曲線よりサクシオンが高くなっている。

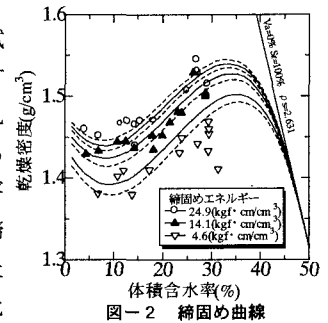


図-2 締固め曲線

4.サクシオンと水分量を考慮した締固めエネルギーの関係

いま、加えられる締固めエネルギーが土中水(式(1)右辺第1項)と土粒子骨格部に伝わるもの(式(1)右辺第2項)として、式(1)のように仮定する。

$$E_i = \alpha_i S_i \theta_i + \beta_i \rho_d \quad (1)$$

ここに、 E_i :締固めエネルギー、 S_i :サクシオン、 θ_i :体積含水率、 ρ_d :乾燥密度、 α_i :散逸エネルギーを

考慮した間隙水に伝わる際の換算係数、 β_i :散逸エネルギーを考慮した土粒子骨格部に伝わる際の換算係数、 i :供試体の番号

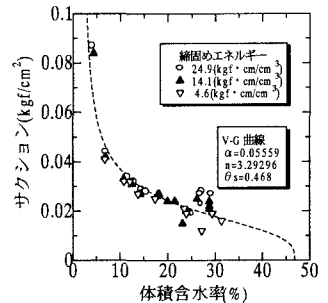


図-3 水分特性曲線

次に土中内の単位水分量に対するエネルギーを考えるために、同じ乾燥密度において2つの異なる締固めエネルギー(水分量)について式(2),(3)のように両辺を除する。

$$\frac{E_i}{\theta_i} = \alpha_i S_i + \beta_i \frac{\rho_d}{\theta_i} \quad (2)$$

$$\frac{E_j}{\theta_j} = \alpha_j S_j + \beta_j \frac{\rho_d}{\theta_j} \quad (3)$$

式(2),(3)の差から、式(4)が得られる。

$$\frac{E_i}{\theta_i} - \frac{E_j}{\theta_j} = \alpha_i S_i - \alpha_j S_j + \rho_d \left(\frac{\beta_i}{\theta_i} - \frac{\beta_j}{\theta_j} \right) \quad (4)$$

ここで $\alpha_i = \alpha_j$ として¹⁾式(4)の $(E_i/\theta_i - E_j/\theta_j)$ と $(S_i - S_j)$ の関係を密度ごとに示したのが、

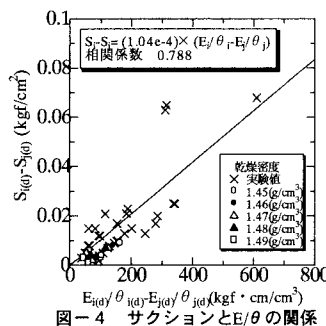


図-4 サクションとE/θの関係

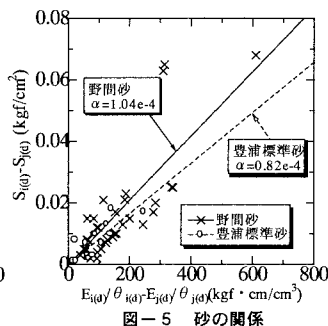


図-5 砂の関係

図-4である。軸タイトルの添字のdは同じ乾燥密度を示す。なお、乾燥密度1.45~1.49 g/cm³までで示されているものは、図-2の実線締固め曲線上、及び図-3の水分特性曲線上より読みとったものである。×印で示されているものは実験値より求めた結果であり、これらより傾きを求めた。図-5は野間砂の実験値より求められた傾きと、豊浦標準砂の実験値より求められた傾き¹⁾とを比較した。これらの傾きは、ほぼ同じオーダーであることがいえ、本締固め試験による砂の散逸エネルギーを考慮した間隙水に伝わる際の換算係数α(傾き)を、 1.0×10^{-4} [-]とみなすことができる。このことから、今回の砂の締固めによるエネルギーの0.01%がサクション増加に寄与していることが推察される。また図-5の関係より、密度が異なっても $\alpha_i = \alpha_j$ と考えることが確認でき、さらに式(4)の右辺第2項が0であることから、細粒分の少ない砂では $\beta_i/\theta_i - \beta_j/\theta_j = 0$ とみなすことができる。このことは土粒子骨格部に伝わる際の換算係数 β_i 、 β_j が、水分量の関数でもあることを示しており、 $\alpha = 1.0 \times 10^{-4}$ [-]とすると、仮定した式(1)を細粒分の少ない砂では次式とおいてもよいことが考えられる。

$$E_i = (1.0 \times 10^{-4}) \cdot S_i \theta_i + \beta' \rho_d \theta_i \quad (5)$$

5. 締固め曲線から水分特性曲線の推定

図-2より同一乾燥密度における、締固めエネルギーと体積含水率の関係を読み、 $E_{(d)}/\theta$ を求める。基準とする締固めエネルギー $4.6 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$ の $E_{(d)}/\theta$ を基準にとり同一乾燥密度上(ここでは $1.46 \text{ g}/\text{cm}^3$)の直線と、交わった締固め曲線上の $E_{(d)}/\theta$ との差を表したものが図-6になる。これを図-5から考察した砂の散逸エネルギーを考慮した間隙水に伝わる際の換算係数 $\alpha = 1.0 \times 10^{-4}$ [-]を図-6の縦軸に乗じて $S_{(d)} - S_{j(d)}$ に換算する。さらに最初に基準とした締固めエネルギー $4.6 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$ の $E_{(d)}/\theta$ のサクションが一つわかることにより図-7のような水分量とサクションの関係を示すことができる。図-7には図-3の水分特性曲線を破線で表し今回推定されたものとの比較もした。これより細粒分の少ない砂では、pF試験などから求められる水分特性曲線が、一点のサクションと今回決定されたα、数本の締固め曲線から推定できることが理解できる。

6. あとがき

今回2種類の砂から砂のサクションと締固めエネルギーの関係を決定し、これを用いて水分特性曲線の推定の可能性を示した。現在、締固めエネルギーの散逸が少ないと考えられる静的締固め試験を用いて、細粒分を多く含む土のサクションと締固めエネルギーの関係について検討中である。

【参考文献】1) 杉井・山田・近藤：締固めエネルギーによる水分特性曲線の推定の試み, pp654~655, 第53回土木学会年次学術講演要集, 1998 2) 久野恒郎：土の締固め, 技報堂, pp60~63, 1967 3) 吉国洋・宇野尚雄・柳澤栄司：新体系土工学 17 土の力学Ⅱ, 技報堂出版, pp143~144, 1984 4) Van Genuchten, M.Th.: A close from Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp892~898, 1980

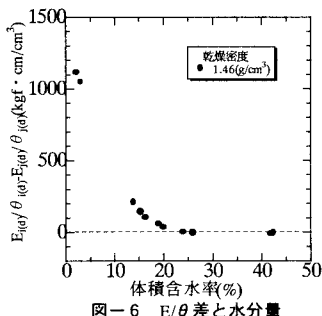


図-6 E/θ差と水分量

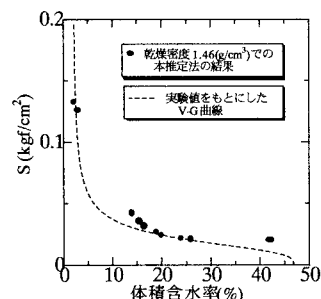


図-7 水分特性曲線