

締固め曲線と水分特性曲線のモデル化に関する一考察

鹿児島大学大学院 学生会員 荒木功平
 中央テクノ 黒木喬介
 鹿児島大学工学部 正会員 北村良介

1. はじめに

施工計画の立案あるいは施工能率の向上において締固め特性を把握しておくことは重要であるとされる。JIS A 1210¹⁾に定められた突固めによる土の締固め試験方法は、現場における締固めの指標として広く利用されている。土の締固め曲線は締固めエネルギーが一定のもとで含水比と乾燥密度の関係を表すものである。このとき、土中水のポテンシャルは締固めエネルギー分だけ低下し、サクシオンが発生している。したがって、土の締固め曲線はサクシオンの変化に伴う変形過程のモデル化^{2),3)}に新たな知見を与えるとおもわれる。

本論文は、鹿児島市(旧日置郡松元町)で採取したしらす(以下、松元しらす)を用い、締固め試験を行っている。また、締固め曲線における飽和度~含水比関係に着目し、締固め曲線のモデル化を行っている。

2. モデルの概要

乾燥密度 ρ_d は含水比 w および飽和度 S_r を用いると、式(1)により表される。式(1)において $w=0$ を代入すると、乾燥密度 ρ_d は土粒子密度 ρ_s に等しい。したがって、理論的な締固め曲線における最大の乾燥密度 ρ_d は土粒子密度 ρ_s に等しい。一般に締固め曲線の最適含水比 w_{opt} における乾燥密度を最大乾燥密度 ρ_{dmax} とよぶが、 $0 < w < w_{opt}$ において、締固め曲線は極小値をとる。このことから上記の ρ_{dmax} を極大乾燥密度と称することにする。これら極値では $d\rho_d=0$ (もしくは $de=0$,ここに e :間隙比)を満たす。飽和度は式(2)により表される。間隙比 e が一定のとき($de=0$ のとき)、飽和度 S_r を含水比 w で微分すると式(3)が導かれる(以下、この飽和度~含水比関係の傾きを増分比 $C(e)$ と称する)。また、飽和度 S_r の含水比 w 、間隙比 e による全微分は式(4)で与えられる。

$$\rho_d = \frac{\rho_w \rho_s S_r}{\rho_w S_r + \rho_s w} \quad (1), \quad S_r = \frac{w \rho_s}{e \rho_w} \quad (2), \quad \left(\frac{dS_r}{dw} \right)_e = \frac{\rho_s}{e \rho_w} = C(e) \quad (3), \quad dS_r = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(\frac{1}{e} dw - \frac{w}{e^2} de \right) \quad (4)$$

ここに、 ρ_w :水の密度、 ρ_s :土粒子密度

増分比 $C(e)$ が一定(C_1)のもとで、式(4)を積分すると式(5)が導け、飽和度については式(2)より式(6)となる。ここで、 C_1 に意味を持たせるために、式(6)で表される直線が飽和度~含水比上における締固め曲線の極大値と極小値(つまり $de=0$ の点)を通るように想定する。 w_{min} なるパラメータを式(7)で定義すると $S_r=0$ より、 $w > w_{min}$ である(したがって、 w の取りうる最小値を w_{min} は意味している)。 C_1 に対応する間隙比 e_1 を式(3)より求めると、式(2)から e_1 、 w_{min} に対応する飽和度 S_r は C_3 に等しくなる。 C_3 が w_{min} に対応する飽和度を表すことから、 $C_3 = S_{rmin}$ とする。ここで式(8)のように正規化された飽和度 S_e を用いる。

$$e = \frac{\rho_s}{(C_1 w - C_3) \rho_w} w \quad (5), \quad S_r = C_1 w - C_3 \quad (6), \quad w_{min} = \frac{C_3}{C_1} \quad (7), \quad S_e = \frac{S_r - S_{rmin}}{S_{rmax} - S_{rmin}} \quad (8)$$

ここに、 $C_3 = C_3 = \exp(C_2)$, C_2 :積分定数, $C_3 > 0$, S_{rmax} , S_{rmin} :締固め曲線における最大、最小の飽和度

ここで、本論文では次の仮定を設けることにする。

- ・ 仮定: dS_e/dw が含水比に対して正規分布(平均を w_m 、標準偏差を σ とおく)する。

平均 w_m のとき dS_r/dw が最大となり、そのとき式(3)により算出される e を e_{cmin} とすると、標準偏差 σ は式(9)により与えられる。締固め曲線の極大値(最適含水比 w_{opt} における飽和度を S_{ropt} 、間隙比を e_{opt} とする)では式(6)と式(2)の両式を満たす必要があることから式(10)が導かれる。

キーワード: 締固め, しらす, 保水性

〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元1丁目21-40 工学部 北村研究室 Tel.099-285-8473

$$\sigma = \frac{S_{r \max} - S_{r \min}}{\sqrt{2\pi}} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_s} e_{c \min} \quad (9), \quad S_{r \min} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(\frac{1}{e_1} - \frac{1}{e_{opt}} \right) w_{opt} \quad (10)$$

図-1 に示すような，高さが 10%通過粒径 D_{10} からなる要素(以下，素体積と称する)において，透水，不透水部分を管径 D ，傾き β の円管とそれ以外の部分に分け，それらの分布関数を導入する。ここで，管径 D の分布関数には対数正規分布確率密度関数 $f_{dia}(D)$ (対数標準偏差 ζ は式(11)より，対数平均は間隙比 e と式(12)を式(13)に代入して求める) を用いている。傾き β の分布 $f_{cont}(\beta)$ は式(12)のように小田^{4),5)}の実験的研究より五角形分布 ($-\pi/2 < \beta < \pi/2$) とし，さらに最大と最小の高さの比を 3:1 としている。

$$\zeta = \ln \sqrt{D_{84}/D_{16}} \quad (11), \quad f_{cont}(\beta) = -\frac{2}{\pi^2} |\beta| + \frac{3}{2\pi} \quad (12), \quad e = \int_0^\infty \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e_e(D, \beta) f_{cont}(\beta) f_{dia}(D) d\beta dD \quad (13),$$

ここに， D_{16} ， D_{84} ：16，84%通過粒径， $e_e(D, \beta)$ ：素体積における間隙比

また，管径 D が水分を保持する最大管径 $d(s_u)$ は式(14)のようにサクシヨンの関数として与えられ，それより小さい領域における間隙比 $e_s(s_u)$ は式(13)と対比させて式(15)のように表される。このとき，飽和度 S_r は式(16)で与えられる。したがって，サクシヨンと飽和度の関係が描かれる。

$$d(s_u) = \frac{4T_s}{s_u} \quad (14), \quad e_s(s_u) = \int_0^{d(s_u)} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} e_e(D, \beta) f_{cont}(\beta) f_{dia}(D) d\beta dD \quad (14), \quad S_r = \frac{e_s(s_u)}{e} (S_{r \max} - S_{r \min}) + S_{r \min} \quad (16),$$

3. 松元しらすにおける実験結果と計算結果の比較

表-1 には締固め試験結果から得られる最適含水比と極大乾燥密度，土粒子密度を示している。表-2 には計算に用いたパラメータ，図-2 には突固め試験の結果と上記のモデルによる計算結果を示している。図-2 より本モデルは概ね実験結果をよく表現できるものとおもわれる。

表-3 には保水性のモデルに必要なパラメータを，図-3 には保水性試験の結果⁶⁾とモデルにより表現される水分特性曲線を示している。図-3 より上記手法により保水性を精度良く表現することができるといえる。

このことは，締固め試験，土粒子密度試験および粒度試験を行うと，土の保水性試験を行わずに水分特性曲線を精度よく求めることができることを意味している。

4. おわりに

本論文では土の締固め試験の結果を用いて水分特性曲線を表す手法を述べた。その結果，精度良く水分特性曲線が求まることがわかった。

【参考文献】

- 1) (社) 地盤工学会：土質試験の方法と解説，pp.252-263，2000.
- 2) 荒木ら：不飽和土の変形挙動のモデル化，(社)土木学会，応用力学論文集，Vol.6，pp.585-592，2003.
- 3) 荒木ら：不飽和土の粒子間力に関する一考察，(社)地盤工学会，第 38 回地盤工学研究発表会平成 15 年度発表講演集，pp.907-908，2003.
- 4) Masanobu ODA: Initial fabric and their relations to mechanical properties of granular material, Soils and Foundations, Vol.12, No.1, pp.17-36, 1972.
- 5) Masanobu ODA: The mechanism of fabric changes during compressional deformation of sand, Soils and Foundations, Vol.12, No.2, pp.1-17, 1972.
- 6) 荒木ら：火山灰質砂質土と火山灰質粘性土の保水特性，(社) 地盤工学会 北海道支部 火山灰地盤の工学的性質の評価法に関する研究委員会，pp.153-156，2002.

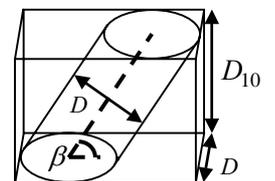


図-1 素体積

表-1 試験結果

	w_{opt} (%)	$\rho_{d \max}$ (g/cm ³)	ρ_s (g/cm ³)
松元しらす	31	1.23	2.41

表-3 入力パラメータ(保水性)

D_{10}	D_{16}	D_{84}
(mm)	(mm)	(mm)
0.015	0.030	2.0

表-2 入力パラメータ(締固め)

	e_1	$e_{c \min}$	$S_{r \max}$ (%)	w_m (%)
松元しらす	0.77	0.78	98	24

e_0	$S_{r \min}$ (%)
1.47	17.9

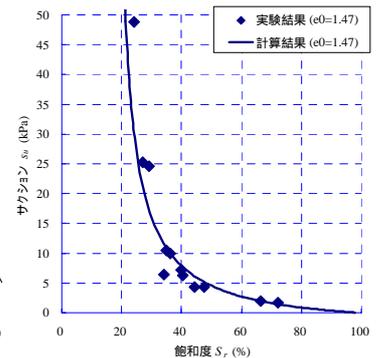
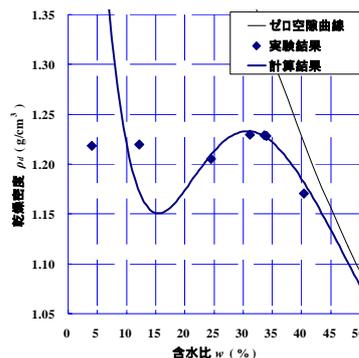


図-2 締固め曲線(松元しらす)

図-3 水分特性曲線(松元しらす)⁸⁾