不飽和土の締固め特性と残留飽和度・擬似飽和度について

鹿児島大学工学部　学生会員　○越石　暁
鹿児島大学工学部　学生会員　小田川　隼祐
鹿児島大学大学院理工学研究科　正会員　北村　良介
九州大学大学院工学研究院　正会員　荒木　功平

1. はじめに

自然な状態にある地表面付近の土の飽和度は 0%，100%となることはなく，不飽和の状態で存在する．そこで，本稿では実際の土のとる最小の飽和度を残留飽和度と定義し，最大の飽和度を擬似飽和度と定義する．これらの飽和度は，降雨に伴う斜面崩壊の予知を目的とした不飽和浸透解析等の入力パラメータとして用いられており，簡易な土質試験等から精度よく求めることが望まれている．荒木・北村 [1]は，締固め曲線から残留飽和度と擬似飽和度を推定する手法を提案した．本稿では，荒木・北村の考え方を踏襲し，不飽和土の体積―質量関係（$e \cdot S_r = w \cdot G_s$）を介した残留飽和度・擬似飽和度の導出を新たに提案する．

2. 不飽和土の体積―質量関係（$e \cdot S_r = w \cdot G_s$）

土の相構成図より飽和度 Sr は式(1)のような関係にある．

$$Sr = \frac{V_w}{V_v} = \frac{\rho_s \cdot w}{\rho_w \cdot e} = \frac{1}{e} G_s \cdot w \qquad (1)$$

ここに e；間隙比，w；含水比，ρs；土粒子の密度，ρw；間隙水の密度，Gs；土粒子の比重

式（1）は不飽和土の体積 - 質量関係式といわれる．図-1 は，間隙比一定条件のもとでの Sr - w 関係を赤線で示している．最大・最小間隙比はある与えられた土に固有な値である．従って，不飽和土の状態は式（1）で規定されており，図-2 の e_{max}～e_{min} で示すように斜線部範囲にしかなく，図-1 に示したねじれた曲面（以下，状態曲面と称する）上にしかないことがわかる．

3. 状態曲面上での締固め曲線

豊浦砂を試料として用い，表-1 に示す締固めエネルギーで締固め試験を行った．締固めエネルギーEc は 1 層当たりの突固め回数(N_L)で式(2)より導かれる．1 層当たり 15 回で突固めた締固めエネルギー（以下，

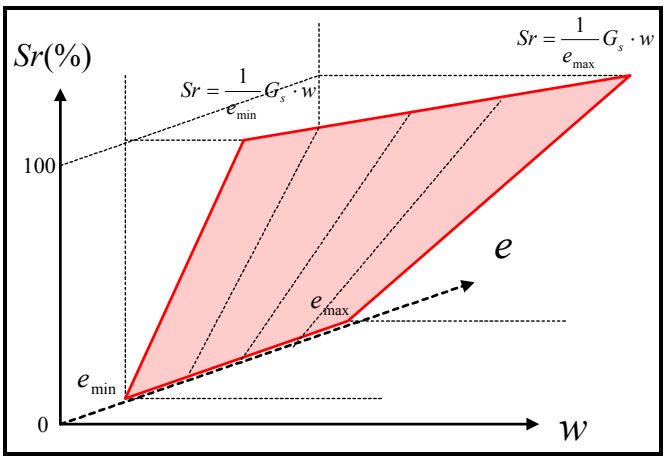

図-1　Sr - w - e 関係（3 次元表示）

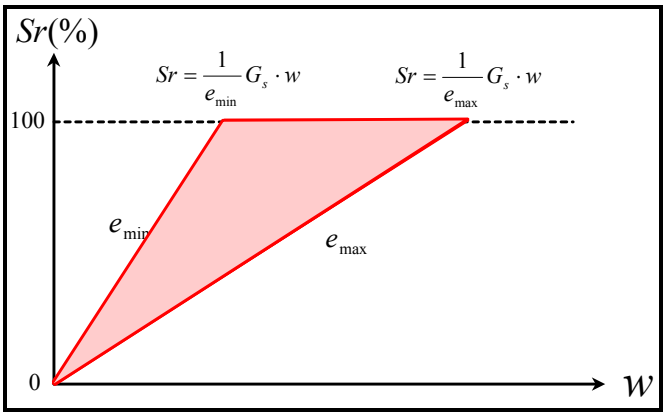

図-2　状態曲面と最小・最大間隙比関係（2 次元表示）

表-1　落下回数と締固めエネルギー

突固め回数；N_L	締固めエネルギー；Ec[kJ/m^3]
15	Ec15= 330.75
25	Ec25= 551.25
40	Ec40= 882.00
55	Ec50=1212.75

表-2　豊浦砂の最大・最小間隙比

最大間隙比（e_{max}）	0.60
最小間隙比（e_{min}）	0.93

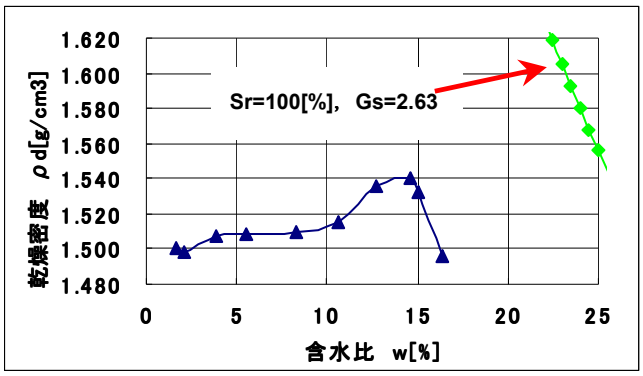

図-3　Ec15 の豊浦砂の締固め曲線

$$Ec = \frac{W_R \cdot H \cdot N_L \cdot N_B}{V} \left[kJ / m^3\right] \quad (2)$$

$$\rho_d = \frac{V_s}{V} = \frac{\rho_s}{1+e} \quad (3)$$

Ec15 と称する）で得られた締固め曲線を図-3 に示す．乾燥密度と間隙比には式(3)の関係があり，締固め曲線は状態曲面上にプロットすることができる．図-1 に示された状態曲面上の締固め曲線（プロット）を Sr - w 面に投影すると図-4 が得られる．図-4 のプロットから得られる曲線を正規分布の累積分布関数とみなした回帰曲線を示している．図-5 は他の締固めエネルギーによる回帰曲線と，砂の最小密度・最大密度試験(JIS A 1224:2009)より得られた豊浦砂の最小・最大間隙比（表-2）と式(1)より得られた e_{max}= 一定と e_{min}= 一定での Sr - w の関係を直線で示している．回帰曲線と $e=e_{min}$, $e=e_{max}$ の直線との交点に対応する飽和度をそれぞれ残留飽和度 Sr_{min}, 擬似飽和度 Sr_{max} とし，それぞれの値を表-3 に示す．表-3 より締固めエネルギーが増大すると，残留飽和度が増加する傾向にあり，一方，擬似飽和度は 99%程度（一定）であることがわかる．このことについては，他の分布（例えば，ロジスティック分布，グンベル分布）によって近似した回帰曲線から残留飽和度・擬似飽和度を求めることを考えている．最適な回帰曲線を求める為には，土の保水試験結果等との比較検討が必要である．また，砂の最小密度・最大密度試験(JIS A 1224:2000)で求められる e_{min}，e_{max} が不飽和土の体積 - 質量関係で必要な e_{min}，e_{max} と同等な物理量であるのかどうかの検討が必要である．

4. まとめ

不飽和土の残留飽和度と擬似飽和度を締固め曲線から求める手法を提案した．残留飽和度と擬似飽和度，

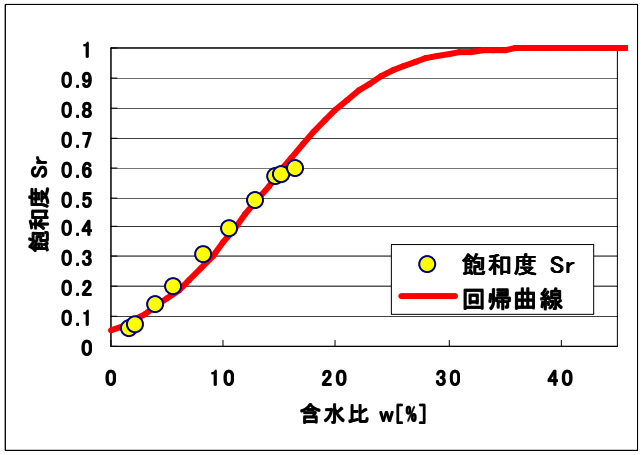

図-4　プロットを近似した回帰曲線

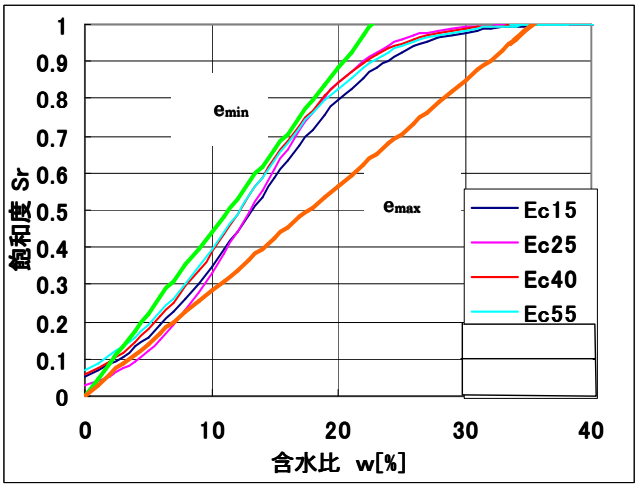

図-5　飽和度 - 含水比関係

表-3　残留飽和度・擬似飽和度

締固めエネルギー	Sr_{min} [%]	Sr_{max} [%]
Ec15	8.49	99.63
Ec25	3.95	99.91
Ec40	10.27	99.84
Ec55	13.12	99.75

特に擬似飽和度は降雨に伴う斜面の安定性の変化を予知する際の水分特性曲線，不飽和透水係数の評価に大きく影響する物理量であり，このようなキーとなる物理量を比較的に実施が容易であること，同時に試験者によるバラツキの少ない締固め試験結果から求めることができる提案手法は有用であると考えられる．

[参考文献]　1）荒木功平，北村良介：不飽和土の締固め曲線と水分特性曲線の関係，第 50 回地盤工学シンポジウム発表論文集，pp. 83-90，200