

神戸大学工学部 正 軽部大蔵
兵 庫 県 正 芦田 渉

神戸大学大学院 学 ○嘉戸善胤
神戸大学大学院 学 西田博文

はじめに：サクシオンと不飽和土中の含水量（飽和度・含水比 etc.）の関係を表す曲線を水分特性曲線と呼ぶ。筆者らは、不飽和土の力学的挙動はサクシオンのみならず土中の間隙水分布にも影響されることを水分特性曲線を拠り所にして明らかにした。しかし、水分特性曲線を支配するのは何であるかについては明らかにされていなかった。そこで、本研究では、その影響因子を明らかにし、軽部の提案した不飽和土の構成方程式¹⁾の確立を目指した。さらに、得られた水分特性曲線をロジスティック曲線と Brooks&Corey 法によって定量化を行い、実測値に対する考察を深めた。

実験方法：試料は市販の No.5 クレー ($w_L = 43\%$, $w_p = 29.6\%$, $G_s = 2.7$) を用い、静的に締固めて供試体を作成した。また、締固め供試体の水分特性曲線との比較を行うためにスラリーから圧密して作成した供試体 ($\phi = 35_{\text{mm}} \times H80_{\text{mm}}$) も用いた。締固め供試体には一次元載荷試験装置を、スラリー供試体には三軸試験装置を用い、サクシオン s を最大 490(kPa)まで加圧法で載荷することで水分特性曲線を求めた。なお、各供試体の初期条件を表-1 に示す。

表-1 供試体の初期値

供試体	含水比 w (%)	間隙比 e	飽和度 S_r (%)	論文での記号
a	23.2	2.11	29.7	○
b	30.2	1.62	50.5	△
c	17.5	1.60	29.7	×
d	23.1	1.20	52.0	●
e	30.4	0.99	82.9	■
*A	36.5	0.98	100.0	□

*ただし A はスラリー供試体

試験結果：全供試体の飽和度 S_r , 含水比 w , 間隙比 e とサクシオンとの関係をそれぞれ図-1 から図-3 に示した。まず、初期飽和度が同じである供試体 a と供試体 c を比較検討を行った。図-1 より、間隙比の小さい c の方が飽和度が大きい値で変化する。これは、間隙比が小さい分土粒子接点数が多いため土中の保水量が多くなるためと考えられる。続いて、初期間隙比が同じ供試体 b と供試体 c との比較検討を行った。図-1, 図-2 より、両者は $s=490(\text{kPa})$ でほとんど合流し、吸水過程においても途中の過程を除けば同じ曲線を描いている。従って、間隙比が同じであれば初期飽和度・初期含水比によらず同じ間隙水状態に収束すると考えられる。以上 2 つの比較検討より、不飽和土の間隙水状態を把握するには飽和度・含水比だけでなく間隙比も考慮に入れるべきであると考えられる。次に全供試体について比較検討してみると、図-1, 図-2 より、飽和度に関する水分特性曲線は間隙比の条件によってばらつき、間隙比が大きい供試体ほど飽和度が低い領域に位置するのに対し、含水比に関する水分特性曲線はばらつきが少なく、サクシオンを載荷するにつれ同じ値に収束する傾向を示した。このことにより、土の残留水量を定義できる指標は含水比であることが推定できる。また吸水過程では、図-1 より、間隙比が小さい供試体ほど吸水曲線の立ち上がり早い傾向を示した。これは、間隙比が小さい供試体ほどメニスカスの合同が起こりやすいからだと考えられる。従って、間隙比が小さいほど水侵入値が大きくなることがいえる。

水分特性曲線の解析結果：今回の実験で得られた水分特性曲線を Brooks&Corey 法²⁾とロジスティック曲線³⁾を用いて定量化を行った。以下、その概要を示す。

$$\bullet \text{ Brooks\&Corey 法} \quad S_e = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} = \left(\frac{s_b}{s} \right)^\lambda \quad (S_e: \text{有効飽和度}, S_{r0}: \text{残留飽和度}, \lambda: \text{曲線形状パラメータ})$$

ここで、 s_b は排水側では空気侵入値 s_a を、吸水側では水侵入値 s_w を表す。パラメータ S_{r0} , s_b , λ の

値は $S_e \sim s$ 関係を両対数紙上で線形回帰を行うことで求められる。

・ロジスティック曲線モデル
$$S_e = \frac{S_r - S_{r0}}{100 - S_{r0}} = \frac{1}{1 + \exp(A + B \log_e s)} \quad (A, B: \text{曲線形状パラメータ})$$

パラメータ S_{r0}, A, B の値は $\log_e(S_e^{-1} - 1) \sim s$ 関係を対数線形回帰を行うことによって求められる。

そこで、この2つの経験式から得られた残留飽和度 S_{r0} 、残留含水比 w_0 、水侵入値 s_w と間隙比 e との関係をそれぞれ図-4 から図-6 に示した。但し、 S_{r0} と w_0 は排水過程におけるロジスティック曲線から得られた値を、 s_w は飽和度についての Brooks&Corey 法によって得られた値を適用した。図-4、図-5 より、残留飽和度では値がばらついてのに対し、残留含水比では 5~10(%) あたりに集中していることがわかる。従って、土の残留水量を定義できる指標は含水比であることの裏付けができた。さらに、図-6 より、間隙比が大きいほど水侵入値が小さくなる傾向を示したため、間隙比が小さいほど吸水曲線の立ち上がり早いという考察の裏付けができた。

結論：1.水分特性曲線は間隙比に大きく影響されるため、土中の間隙水状態を把握するためには飽和度・含水比だけではなく間隙比を考慮に入れる必要がある。

2.含水比についての水分特性曲線は飽和度とは違い、サクシオンを載荷するにつれ、同じ値に収束する。従って、残留水量を定義できる指標は含水比である。

3.間隙比が小さいほどメニスカスの合同が起こりやすく、吸水曲線の立ち上がり早い。

4.Brooks&Corey 法とロジスティック曲線による経験式の解析結果より、1~3 に関する定性的結論の裏付けができた。

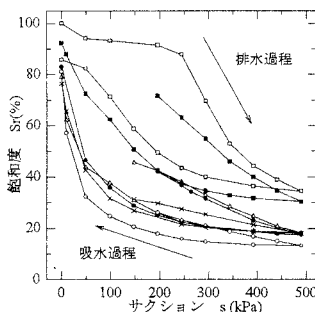


図-1 飽和度～サクシオン関係

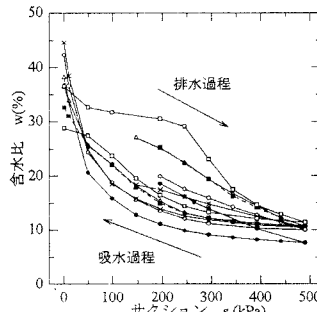


図-2 含水比～サクシオン関係

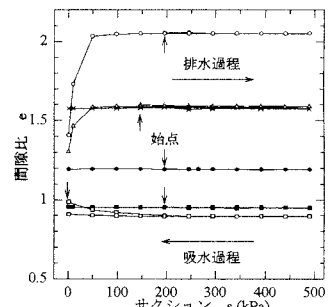


図-3 間隙比～サクシオン関係

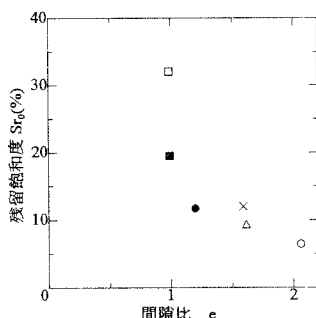


図-4 残留飽和度～間隙比関係

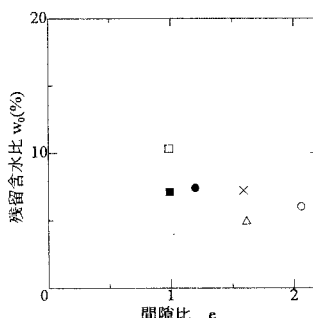


図-5 残留含水比～間隙比関係

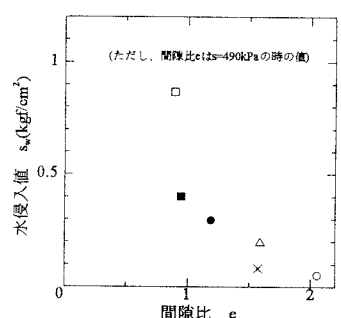


図-6 水侵入値～サクシオン関係

参考文献 1) 軽部他 ”不飽和土の間隙水の状態と土塊の力学的挙動の関係について” 土木学会論文集 No.535, pp.83-92, 1996 2) 赤井浩一：河川堤防護岸の破壊条件の研究, 文部省科学研究費自然災害特別研究成果, No. A-51-1, pp. 19-54, 1977 3) 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, 土木工学会第 50 回年次学術講演会, pp. 130-131, 1995