

乾燥過程における地盤のサクシオンとせん断波速度の関係の検討

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○河野 真弓
 元広島大学工学部 小西 真実
 広島大学大学院工学研究院 正会員 一井 康二

1. 背景・目的

盛土斜面の耐震性は、先行降雨に伴う盛土内の含水状態に依存していると考えられる。しかし、盛土内の含水状態を容易に把握する方法はなく、また、含水状態に応じた強度評価も困難である。そのため、降雨や乾燥による地盤の含水比の変化の把握とそれに基づく地盤強度の変化の評価方法が求められている。

そこで本研究では、せん断波速度の計測による含水比や強度の評価を試みる。本報告では、含水比の変化によるサクシオンの変化がせん断波速度に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、乾燥過程に着目した実験結果を示す。

2. 実験方法

本研究では、含水比が低下する過程でのせん断波速度およびサクシオンの変化を調べるために、ベンダーエレメントを用いた模型実験を行った。実験に用いた土槽の概略図を図-1に示す。試料は、粒径を0.85mm以下に揃えたまさ土を使用した。表-1にまさ土の物理特性、図-2に粒径加積曲線を示す。間隙比については、盛土の締固め規定の締固め度をもとに締固め規定内の間隙比のもの($e=0.55$)、締固め規定外の間隙比のもの($e=0.75$)の2つのケースで実験を行った。土槽の深度10cmの位置に、テンシオメータ、ベンダーエレメント、土壤水分計を設置し、土槽上部から飽和度が75%になるまで散霧器を用いて加水を行った後、乾燥過程でのサクシオン、せん断波速度、含水比をそれぞれ計測した。

また、含水比は、土壤水分計での計測結果が不安定であったため、テストピースを用いた予備実験により推定した。土槽を乾燥させると、水分が蒸発する分だけ重量が減る。その重量変化から、土槽の平均含水比を算出する(図-3)。次に、土槽とまったく同じ条件でテストピースを複数個作成する。作成したテストピースの1つを図-4に示す。土槽と同様に上部から加水した

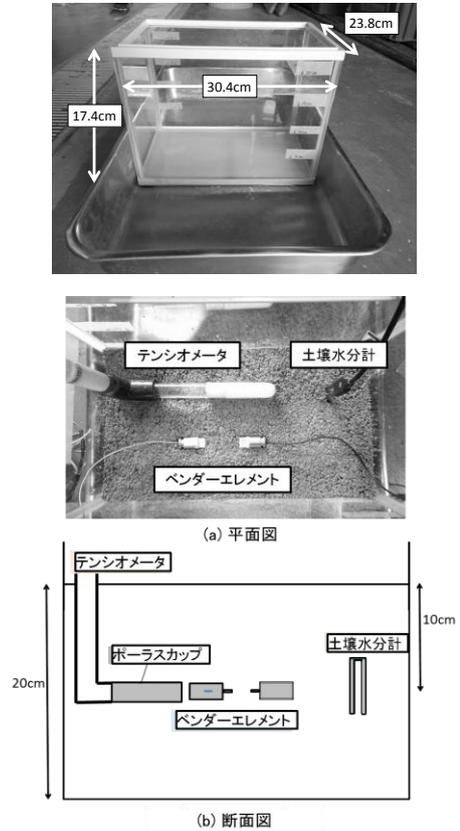


図-1 土槽の概略図

表-1 まさ土の物理特性

土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.65
最大密度 $\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	1.19
最小密度 $\rho_{dmin}(\text{g/cm}^3)$	1.58
最大間隙比 $e_{max}(-)$	0.66
最小間隙比 $e_{min}(-)$	1.21

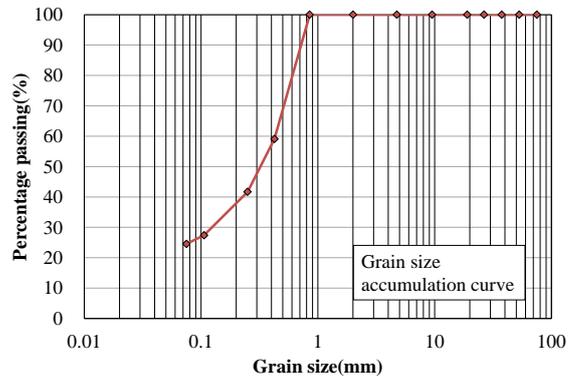


図-2 まさ土の粒径加積曲線

後、乾燥過程で土槽全体の重量変化を計測し、平均含水比の変化を算出する。また、複数の時点でテストピースを一体ずつ壊して深度 10cm の含水比を計測し、平均含水比と比較した。その結果を図-5、図-6 に示す。図-5、図-6 より、土槽を崩すことなく、土槽の重量変化から深度 10cm の含水比を推定することが可能であることがわかる。なお、土槽全体をはかりにのせた状態で実験を実施したが、乾燥過程中にはかりのゼロ点がシフトして平均含水比の精度が十分に担保できていない可能性がある。

2.1 含水比の変化と地盤のせん断波速度の変化

図-7 に、間隙比 $e=0.55$ の場合の含水比（推定値）とせん断波速度とサクシジョンの関係を示す。図-7 から、含水比が低下するにつれ、せん断波速度とサクシジョンが増加したことがわかる。また、せん断波速度が急上昇し始める含水比と、サクシジョンが急上昇し始める含水比は微小ながら異なっており、サクシジョンが上昇した後にせん断波速度が上昇している。なお、計測機器の性能によりサクシジョンの測定可能範囲は 50kPa までのため、サクシジョンが 50kPa 以上の時は線形に上昇すると仮定した場合の推定値を破線で示している。また、図-8 に間隙比 $e=0.75$ の場合の結果を示す。こちらも間隙比 $e=0.55$ の場合と同様の結果となった。また、平均

含水比から推定した深度 10cm の含水比と計測したサクシジョンより、フィッティングにより水分特性曲線を求めた。求めた結果を図-9、図-10 に示す。本研究では、不飽和浸透特性を表現する関数モデルとして、最も頻繁に用いられている van Genuchten の提案したモデル¹⁾（以下 VG モデル）を採用して実験結果の検討を行った。VG モデルの式を式(2.1)、式(2.2)に示す。

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (0 \leq S_e \leq 1) \quad (2.1)$$

$$S_e = \left\{ 1 + |\alpha \psi|^n \right\}^{-m} \quad (\alpha \geq 0) \quad (2.2)$$

ここで、 S_e : 有効飽和度、 θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 残留体積含水率、 ψ : サクシジョン、 α : 定数、 n : 定数、 $m = 1 - 1/n$ ($0 < m < 1, 1 < n$) である。今回の実験では給水後、乾燥過程で計測を行ったため、排水走査曲線の水分特性曲線となる。また、ヒステリシスを表現する走査曲線のモデルとして、Scott²⁾らのモデルを採用した。このモデルでは、給水走査曲線(DSC)と給水走査曲線(WSC)が、主排水曲線(MDC)および主給水曲線(MWC)に囲まれた領域に存在し、給水過程では $\theta = \theta_s$ で $\psi_m = 0$ に、排水過程では $\theta = \theta_r$ で $\psi_m \rightarrow \infty$ になると仮定している。また、主曲線と走査曲線で α 、 n のパラメータは同じである。

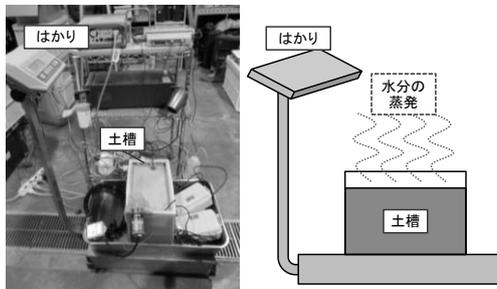


図-3 実験の様子

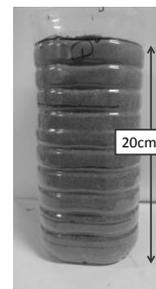


図-4 テストピース

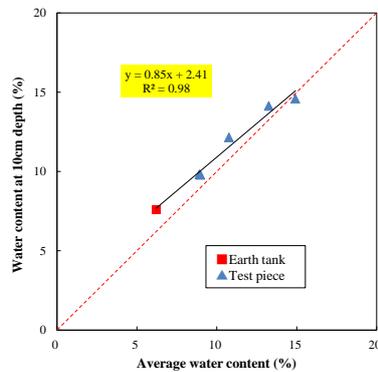


図-5 平均含水比と深度 10cm の含水比 (e=0.55)

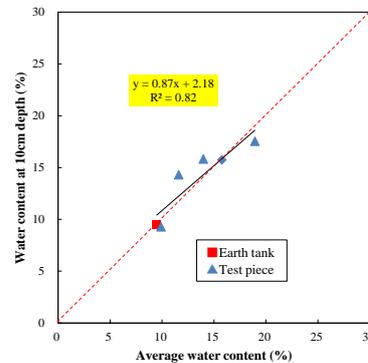


図-6 平均含水比と深度 10cm の含水比 (e=0.75)

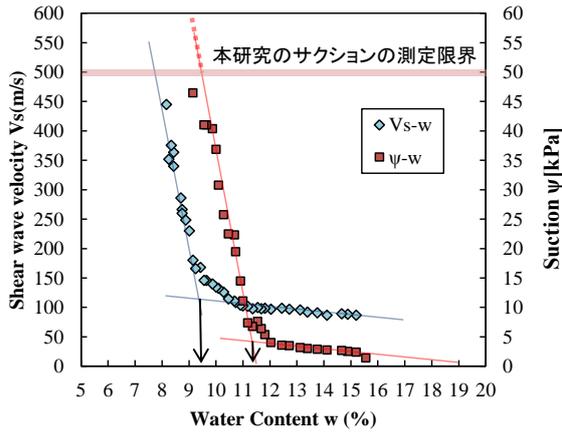


図-7 含水比とせん断波速度および含水比とサクシヨンの関係 (e=0.55)

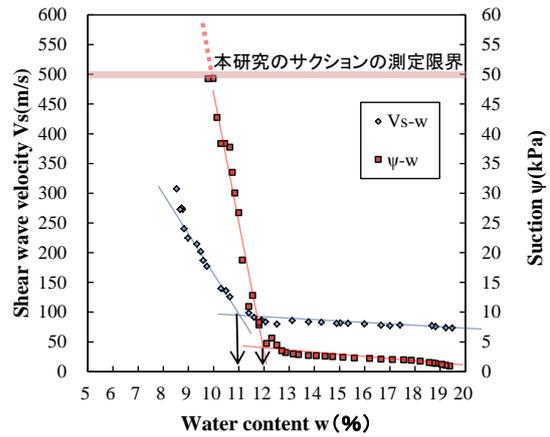


図-8 含水比とせん断波速度および含水比とサクシヨンの関係 (e=0.75)

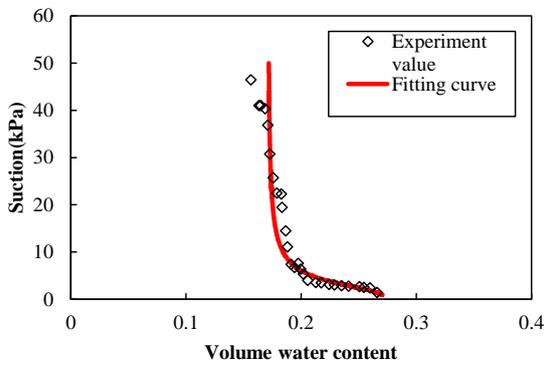


図-9 水分特性曲線 (e=0.55)

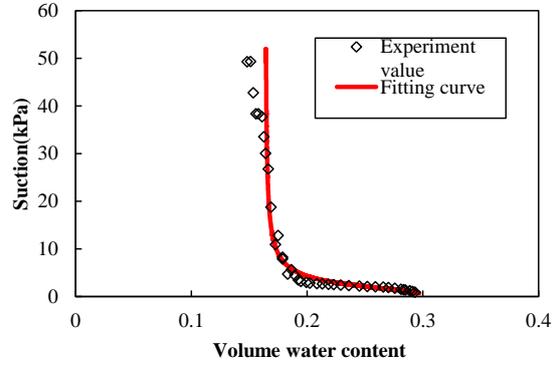


図-10 水分特性曲線 (e=0.75)

表-2 フィッティングで求めた水分特性曲線のパラメータ

	e	α	n	θ_r	θ_s	θ_s^*
e=0.55	0.55	0.325	2.714	0.171	0.266	0.273
e=0.75	0.75	0.690	2.213	0.159	0.309	0.316

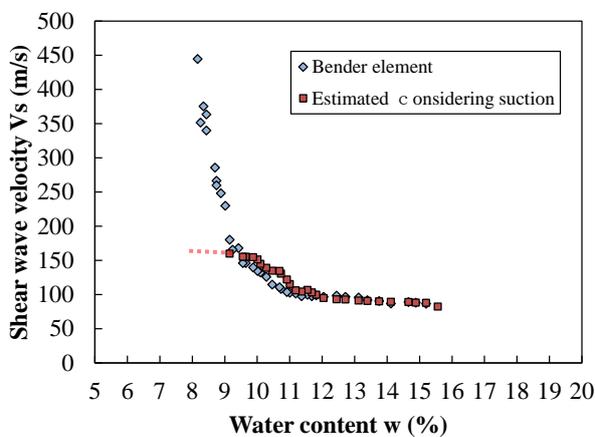


図-11 せん断波速度 Vs の比較 (e=0.55)

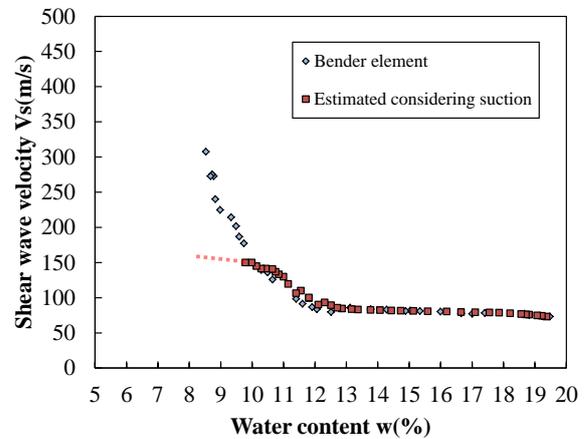


図-12 せん断波速度 Vs の比較 (e=0.75)

排水走査曲線でフィッティングすべきパラメータは、 α , n , θ_r , θ_s である。フィッティングの方法は式(2.3)に示すような目的関数 $\Phi(p)$ を用いて、これが最小となるように各パラメータを設定した³⁾。

$$\Phi(p) = \sum_{j=1}^{J_\theta} \left[w_j \left\{ \theta_j - \hat{\theta}(\psi_{mj}, p) \right\} \right]^2 \quad (2.3)$$

ここで、 p :最適化すべきパラメータから成るベクトル、 J_θ :実測データの数、 θ_j : $\phi_m = \phi_{mj}$ における体積含水率の実測値、 $\hat{\theta}(\psi_{mj}, p)$: ϕ_m と p を用いてモデルより計算される体積含水率、 w_j : j 番目のデータに対する重みである。 w_j については、本研究では $w_j=1$ と仮定して最適化を行った。フィッティングパラメータを表-2に示す。

2.2 せん断波速度に及ぼすサクシヨンの影響

実際に計測したせん断波速度 V_s の変化、計測したサクシヨンから推定したせん断波速度 V_s の変化を比較した。後者については、含水比 15% のときの実験結果に対し、含水比の変化によるサクシヨン変化を拘束圧の変化と考えて、式(2.4)、(2.5)を用いて求めた。

$$G_0 = A \sigma_m'^{0.5} \quad (2.4)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G_0}{\rho_t}} \quad (2.5)$$

ここで、 G_0 :せん断弾性係数、 A :定数、 σ_m' :拘束圧、 ρ_t :湿潤密度である。

図-11 に $e=0.55$ のときのそれぞれのせん断波速度 V_s を併せて示す。なお、図-7 の破線のように、サクシヨンが 50kPa 以上の時は線形に上昇すると仮定した場合の推定値を図-11 でも破線で示す。これを見ると、模型実験で計測したせん断波速度とサクシヨンから推定したせん断波速度には、含水比の大きい領域では整合性が見られる。しかし、含水比 11% 付近において、推定したせん断波速度は一度実測値を上回る。これは、図-7 においてサクシヨンがせん断波速度を上回る位置と整合する。しかし、含水比 9% 付近において、推定したせん断波速度は実測値を下回った。これは、式(2.4)、式(2.5)に示すように、サクシヨンを考慮した拘束圧はせん断波速度の 0.25 乗に比例するため、サクシヨンの上昇がせん断波速度にあまり寄与しないためである。

さらに、サクシヨンが 50kPa 以上の範囲で線形に上昇すると仮定した場合は、せん断波速度の推定値(赤破線)は、実測と大きく乖離する。また、図-12 に $e=0.75$ のときのそれぞれのせん断波速度 V_s を併せて示す。 $e=0.55$ と同様に、含水比の大きい領域では整合性が見られるが、実測のせん断波速度が急上昇した後は、整合しない結果となった。このことから、乾燥に伴う地盤のせん断波速度の増加には、サクシヨン以外の要因が関係している可能性がある。

3. 結論

模型実験の結果より、含水比が低下するとせん断波速度およびサクシヨンは上昇することが確認できた。さらに、乾燥過程ではせん断波速度が急上昇した後にサクシヨンが急上昇することがわかった。そして、模型実験で計測したせん断波速度の変化と実測のサクシヨンから推定したせん断波速度の変化を比較すると、含水比の大きい領域では整合性が見られるが、小さな領域では整合性が見られなかった。このことから、乾燥に伴う地盤のせん断波速度の増加には、サクシヨン以外の要因が関係している可能性があることがわかった。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金若手研究 (B) 課題番号 22760358 の補助を受けて行われた。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) Van Genuchten, M.Th.: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Sci. Soc. Am. J., Vol.44, pp.892-898,1980.
- 2) Scott, P.S., Farquhar, G.J. and Kouwan, N.: Hysteresis Effects on Net Infiltration, pp.163-170, In advances in Infiltration, Am.Soc.Agric.Eng., St.Joseph, MI, 1983.
- 3) 社団法人地盤工学会: 不飽和地盤の挙動と評価, 第2章 保水性及び透水性, p.45, 2004.