## 砂の弾性波伝播特性に及ぼす粒径と粒度の影響

東京大学生産研究所	正会員	○大坪 正英
東京大学生産研究所	学生会員	Yang Li
Monash University ∮	丰会員	Troyee Tanu Dutta
東京大学生産研究所	フェロー会員	桑野 玲子

1.はじめに: 砂質地盤材料の動的測定は共振法、ベンダーエレメン ト法の普及に伴い広く行われるようになり、弾性波速度や微小剛性 に及ぼす応力状態や間隙比の影響については多くの先行研究が存在 する.一方、地盤材料内を伝播する弾性波の周波数特性に関する研 究は少ない.そこで、著者らは弾性波速度のみならず周波数特性に 着目し、計測データ解釈の高度化を目指した研究を実施している.

2.実験材料: 室内要素試験および模型試験で広く使用される硅砂の うち、平均粒径の異なる4種類の硅砂(SS3・SS5・SS7・SS8)を用 いた.これらの平均粒径(D<sub>50</sub>)は1.8 mm・0.53 mm・0.28 mm・0.15 mmであり、均等係数(Cu=D<sub>60</sub>/D<sub>10</sub>)は1.8以下と粒径が揃っている (図1).上記に加え、均等係数が6になるように調合した硅砂(Cu6) も用いた.これらは同じ場所で採掘された硅砂を分級させているた め、土粒子密度や粒子形状はおおよそ同じであると見なせる.

3.実験手法: 乾燥材料をモールド内に気中落下させることで供試体 を作製し、モールド側面に振動を与えることで間隙比(e)を変化さ せた.50 kPaの負圧で供試体を自立させた状態で試験を行った.図 2 のように供試体両端のキャップ内に取付けた円盤型圧電素子(DT) <sup>1)</sup>を用いることでせん断波を送受信した.±70 V に増幅させた電圧に より送信側 DT をせん断変形モードで駆動させ、供試体を通過した せん断波を受信側 DT で電圧に変換した.せん断波速度(*V<sub>s</sub>*)の同定 には7 kHz の正弦波、周波数分析には材料に応じて 20~100 kHz の 正弦波のパルス波を用いた(詳細の手順は Dutta ら<sup>1)</sup>を参照).

4.動的応答: 粒径の揃った4種類の硅砂に対する時刻歴応答を図3 に示す.材料毎に最小・最大間隙比が異なるため,間隙比と相対密 度を同時に合わせることはできない.図3にはV<sub>s</sub>=180±3 m/sの供試 体における結果を示しており、下向き矢印で示した受信波の到着時 刻はほぼ同じであることが確認できる.送信側と受信側の最初のピ ークの時間遅れを伝播時間と見なし、供試体高さから除すことでV<sub>s</sub> を算出した.図3のケースに対し、受信波と送信波をフーリエ変換 した際の振幅比を図4に示す.土粒子径が小さくなるほど、高周波 数成分まで伝播する結果を得た.このことはガラスビーズや個別要 素法数値解析を用いた Dutta ら<sup>1)</sup>の結果と整合する.



図 1. 実験に用いた材料の粒度分布と SEM 画像



図2. 三軸試験装置を用いた動的計測の模式図



キーワード せん断波速度,周波数応答,動的計測,砂質土,粒径,粒度 連絡先 〒153-8505 東京都目黒区駒場 4-6-1 東京大学生産技術研究所 TEL03-5452-6843

5.考察: Dutta ら<sup>1)</sup>の手法に従い、図4において振幅が2×10<sup>-6</sup>を超える 最大の通過周波数を最大通過周波数(*f<sub>lp</sub>*) と定義する. 先行研究<sup>2)</sup>によ ると、拘束圧および密度の増加に伴い*f<sub>lp</sub>*は増大することが報告されて いる.以下では均等係数6の硅砂(Cu6)を含む5種類の材料につい て、e、*V<sub>s</sub>、f<sub>lp</sub>*の相関を議論する.

 $V_{s-e}$  関係 (図 5): 均等係数が 1.8 以下である 4 種類の材料に対する  $V_{s-e}$  関係は、粒径の大きさに依らずに同様である. 多少のばらつきは あるが、間隙比の減少に伴い  $V_{s}$ は線形的に増加する. 一方、Cu6 の材 料の場合、間隙比が小さく密であるにも関わらず、得られた  $V_{s}$ 値の範 囲は他 4 種類の結果と同等である. ある間隙比 (例えば e=0.8) に対す る  $V_{s}$ は、Cu6 硅砂の場合は粒径の揃った材料よりも 20%程度低いこと が確認される. 均等係数 ( $Cu=D_{60}/D_{10}$ )の増加に伴う  $V_{s}$ およびせん断 剛性率 ( $G_{0}$ )の低減については先行研究でも報告されている<sup>3</sup>).

 $f_{lp}-e$  関係 (図 6):間隙比が小さくなると $f_{lp}$ が線形的に増加する結果を 得た.この傾向は $V_{s-e}$  関係に似ているが、砂の粒径が小さいほど $f_{lp}$ 値 が大きくなる結果を得た.例えばe=0.8相当の $f_{lp}$ 値は、SS3 (1.8mm) では約 20 kHz、SS8 (0.15mm) では約 150 kHz と顕著な差が確認され た.Cu6 硅砂に着目すると、間隙比の取り得る幅は異なるが、SS3 の  $f_{lp}-e$  関係の傾向と一致した.調合した Cu6 硅砂の 20%は SS3 で構成さ れるため (図 1)、 $f_{lp}-e$  関係は粒度内の大きな粒径に強く影響を受ける と推察できる.

 $V_s$ - $f_{lp}$ 関係: (図 7):上述のように  $V_s$ -e 関係、 $f_{lp}$ -e 関係はどちらも線形 的であるため、 $f_{lp}$ - $V_s$  関係も図 7 のように線形性が確認された. 間隙比 のデータがない条件においても、計測したせん断波の信号を分析する ことで  $f_{lp}$  と  $V_s$  を定量化することができる.  $V_s$  値が同等であっても  $f_{lp}$ が顕著に大きい場合は細砂で構成される地盤であると予測できる. -方、Cu6 硅砂は SS3 と SS5 の中間の傾向を示した.

6.**おわりに**: 粒径や粒度の異なる5種類の砂質土を用いて動的計測を 実施したところ、密度増加に伴い *f*<sub>*l*</sub>, *V*<sub>*s*</sub> 共に増大する結果を得た. *f*<sub>*l*</sub> についてはこれまであまり着目されてこなかったが、*f*<sub>*l*</sub>-*V*<sub>*s*</sub>関係に基づ き、非破壊手法による粒度推定の可能性を示唆する結果を得た.

なお、本研究は砂の粒径幅に対する検討であるため、細粒土や礫材 に適用できるかは別途検討の余地がある.今回は均質な地盤材料を用 いたが、多層地盤を対象とする場合、V<sub>s</sub>は平均値、f<sub>lp</sub>は各層における 最小値となることが予測されるため、今後確認する予定である.

参考文献: [1] Dutta, T.T., Otsubo, M., Kuwano, R., O'Sullivan, C. (2019) Stress wave velocity in soils: apparent grain size effect and optimum input-frequencies. Geotech. Lett. 9 (4), 340–347. [2] Otsubo, M., O'Sullivan C, Hanley, K.J., Sim, W. (2017) Influence of packing density and stress on the dynamic response of granular materials. Granular Matter 19(3), 50. [3] Wichtmann T., Triantafyllidis. T. (2013) Effect of uniformity coefficient on G/Gmax and damping ratio of uniform to well-graded quartz sands. J. Geotech. Geoenviron. Eng. 139(1), 59–72.



図4.動的計測における周波数応答.図3に対応.





凶 6. 取入 通 迥 同 仮 级 と 间 原 比 の 渕 係



図 7. 最大通過周波数とせん断波速度の関係