

飽和砂層の振動性状

港湾技術研究所 正員 荒井香夫

正員・梅原靖文

1. まえがき

振動台を用いて港湾構造物の耐震性を研究するための基礎的資料を得ることを目的として、砂層の加速度応答特性を求める実験を実施している。乾燥砂層の場合については、昨年発表した。⁽¹⁾今回は水で飽和した砂層の加速度応答特性を測定し、横波の速度 v および減衰常数を求めた。砂の横波の速度は小試料の実験によって詳細に研究されており、拘束圧と間隙き比によって変化することが知られている。⁽²⁾本実験は小試料の実験に比して弾性領域では精度が低いが大変形の実験も可能であり、流動化現象にもある程度の目安を与えることができると思われる。

2. 実験

振動箱(幅1.5m, 長さ5m)の中に2種類の砂の層厚60cm, 40cmの飽和砂層に対し、加速度段階毎に振動数を1~70 CPSまで変える実験を実施し、砂層内に埋めこまれた深さ方向に4個、振動直角方向に3個の加速度計により砂層内各点の加速度と台加速度を測定した。

実験に使用した2種類の砂の性質は次のようなものである。

	透水係数(%)	有効歪(mm)	均等係数	安息角(度)	e_{max}	e_{min}
高萩砂	$1.362 \times 10^{-1} (e=0.712)$	0.91	1.65	35.0	0.850	0.565
小名浜砂	$2.840 \times 10^{-2} (e=0.866)$	0.13	1.31	32.5	1.035	0.690

3. 実験結果とその考察

i) 深さ方向の分布

図-1は高萩飽和砂の加速度応答特性の深さ方向の分布を示すものであり、層厚60cmで台加速度0.01Gおよび0.01Gに対するものを示した。

前に報告した小名浜乾燥砂に対する場合と同様、与えた台加速度が大きくなるにともなって共振振動数が低下し、加速度比のピークが小さくなる傾向がある。ただし、層厚が同じならば飽和砂に対する共振振動数は乾燥砂の場合よりもかなり小さくなる。

実験の結果を前と同様、 α すみ速度に比例する抵抗を考えたセン断振動の理論を用いて整理してみた。図中の曲線は理論式より計算した値であって実験値より共振振動数および減衰常数を定め、その減衰常数に対応する共振曲線および位相差の変化を示す曲線を実験値の上に描いたものである。ここに、共振振動数 f_r および減衰常数 η は次式で表わされる。

$$f_r = \frac{1}{4H} \sqrt{\mu/\rho} = \frac{V_s}{4H}, \quad \eta = \frac{\pi \gamma}{4H/\rho \mu} \quad \text{----- (1)}$$

ただし、 H : 層厚, ρ : 砂の密度, μ : 砂の剛性率, γ : 砂の内相抵抗係数, V_s : 横波の速度である。

図-2および図-3は高萩飽和砂および小名浜飽和砂の場合の同一深さ $H=45/60$ の点における与えた

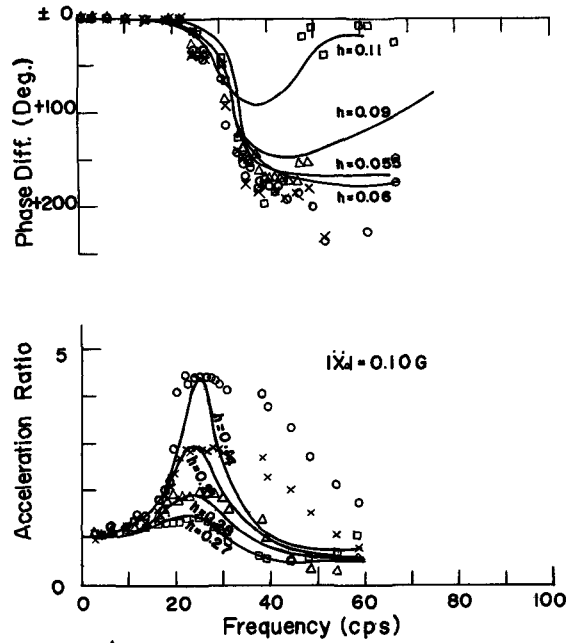
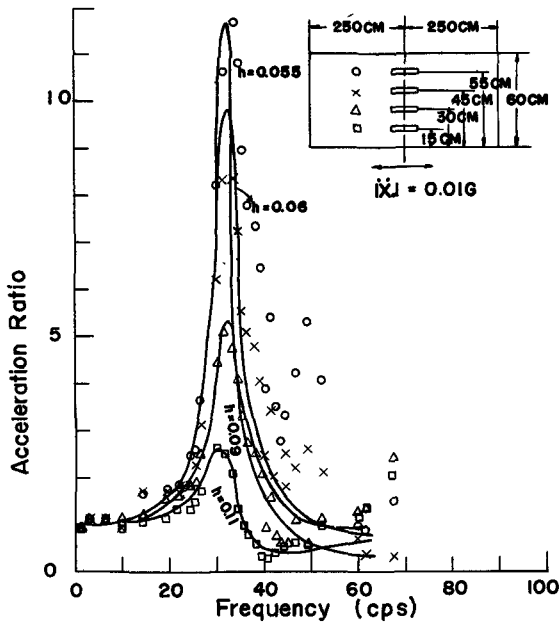


図-1 共振曲線と位相差 ($H=60^{\text{cm}}$ 高液飽和砂)

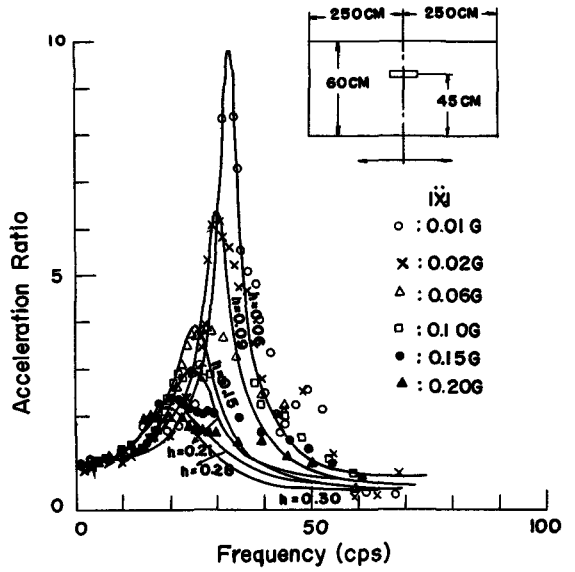


図-2 共振曲線の台加速度による影響 ($H=60$ 高液飽和砂)

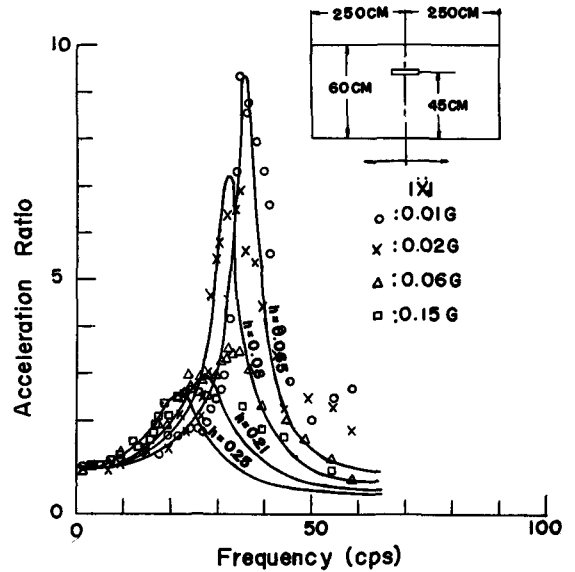


図-3 共振曲線の台加速度による影響 ($H=60^{\text{cm}}$ 小名液飽和砂)

台加速度による応答特性の影響を示したものである。小名液砂の場合台加速度が $0.1G$ 、高液砂の場合 台加速度が $0.15 \sim 0.2G$ で砂層表面が流動化を起し、波形が非常に乱れにものとなるので理論式より応答を計算するのは妥当でなくなる。

ii) 共振振動数、減衰常数

砂層の振動は複雑であるが乾燥砂層の場合と同様、飽和砂層の場合にもセン断振動として整理するとその傾向はかなりよく説明される。ただし、線形理論で説明するためには砂層の固有振動数が変形により変わるものと仮定しなければならない。このような仮定のもとに共振振動数、減衰常数の砂層の変形による変化について調べてみる。以下にのべることは砂層表面で測定したものに對するものである。共振振動数のかわりに一般的な量である横波の速度 $V_s = \sqrt{\mu/\rho}$ を求めた。

図-4は横波の速度、減衰常数のセン断ひすみによる変化を示したものである。ただし、図中のT.D, T.S, O.Sはそれぞれ、高萩乾燥砂、高萩飽和砂、小名浜飽和砂を示すものである。又、O.Dとして前に報告した小名浜乾燥砂に對するものも同時に示した。

図-4によればひすみが大きくなるにともなうて、見掛け上横波の速度は減少し、減衰常数は増加し、一定値に近づく傾向がみられる。又、ひすみが 1×10^{-4} 以内では砂層は弾性的であるがこの値をこえると非弾性的な性質が現われているように見える。

図-4の弾性域における横波の速度には拘束圧の相異による影響が現われている。R.E. Richart 等⁽²⁾によれば、横波の速度と拘束圧の関係は $V_s = a\sigma_b^b$ の型で与えられ、 a は密度の関数、 b は拘束圧の大きい場合、小さい場合、 $\frac{1}{2}$ という値を得ている。

本実験の場合、実験の方法から考えて、拘束圧は明確には定め難いので $\frac{1}{2}\sigma_b$ という量が拘束圧に關係する量であるとみなして繰るづめ砂についてそれと横波の速度との關係を調べ、その結果を図-5に示した。横波の速度は図-4の 1×10^{-4} のひすみ以内にある各場合の実測値を平均したものである。飽和砂の場合には σ として水中重量を用いると横波の速度は

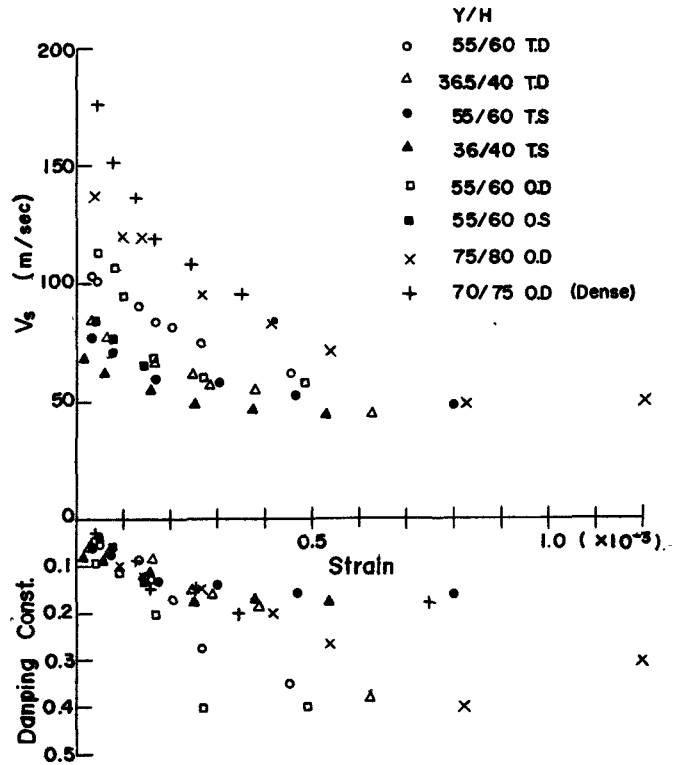


図-4 横波の速度、減衰常数とセン断ひすみ

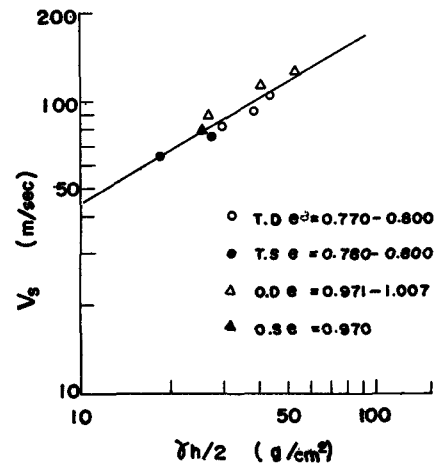


図-5 横波の速度と拘束圧

$$V_s = 45.0 \left(\frac{1}{2} \cdot \sigma_h \right)^{0.59} \dots\dots\dots (2)$$

で表わされる。この結果は Richart 等の結果と比して拘束圧の影響が著しいことを示しているが、これは本実験において拘束圧を正確に求めることが困難なことおよび α すみの影響が大きいこと、間げき比の影響が入っていないことのためと考えられる。上記の結果から、横波の速度に対する水の影響は拘束圧としてのみ入ってくることになる。

iii) 応力 $\sim\alpha$ すみ関係

横波の速度から α すみと乾燥単位重量とによってせん断応力を求め、それに対応するせん断 α すみとの関係を図-6に示した。応力 $\sim\alpha$ すみの関係は拘束圧に関係することが著しいように見える。緩るづめされた乾燥砂層について、小名沢砂の場合 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ 、高萩砂の場合 $2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-4}$ 程度の α すみにおいて応力が急激に変化するのが見られる。この突は飽和状態ではほぼ流動化する場合に相当する。つまりこの突において砂粒子の構造が変化し間げき水圧の上昇が生じるため、流動化するのではないかと考えられる。

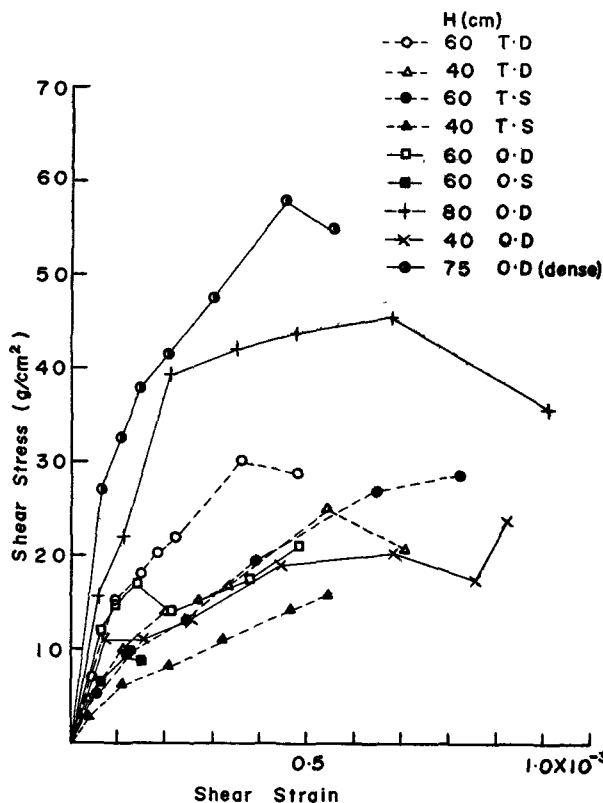


図-6 応力 $\sim\alpha$ すみ関係

4. むすめ

飽和砂層の加速度応答特性から求められた結果を乾燥砂層のそれと比較し、次のことが明らかにされた。

- (1) 飽和砂層の横波の速度は拘束圧の影響を考慮すれば乾燥状態のそれとほぼ同様に取扱える。
- (2) 飽和砂層において生ずる流動化現象は砂粒子の構造が変化するためと考えられ、それは砂層の変形の割合小さい弾性域から塑性域に移行する過程で起るのではないかと考えられる。

参考文献

- (1) 乾燥砂層の振動性状, 荒井秀夫, 梅原靖文, 日本地震工学シンポジウム講演集 1966. 10
- (2) Elastic Wave Velocities in Granular Soils, B.O. Hardin, F.E. Richart
Proc. of A.S.C.E. SM1 1963. 2