

(76) セン断土槽による砂地盤の振動台実験

飛島建設 滝本幸夫 森伸一郎

武藤正人 戸早孝幸

池田隆明

1. はじめに

近年、ウォーターフロント域の開発計画などで大規模構造物の建設が増えつつある。海岸埋立地のような比較的軟弱な地盤に構造物を建設する際、地震時における地盤の非線形挙動や液状化現象、およびそれらが構造物に及ぼす影響などは重要な検討課題である。我々はこれらの問題を実験的に調べるとともに、数値解析手法の有用性を検証することを目的として、セン断土槽による砂地盤の振動台実験を実施している。

このような実験は高い精度が要求されると考えられるが、実験によって得られるデータの総合的な精度は、振動台の加振精度、セン断土槽の性能、模型地盤の作成精度、計測機器系の精度によって決定される。

ここでは、セン断土槽による実験方法の有用性と問題点について考察を行なった。

なお、実験に用いた振動台は水平方向2軸（X, Y）と上下方向（Z）の3軸方向の並進と各軸まわりの回転の6自由度振動を制御できる振動台である。なお、本論文では加速度の単位をgal（=cm/s²）と表記する。

2. セン断土槽に要求される性質

地震時における地盤の挙動を考える際、水平方向に無限に広がる水平成層地盤に水平面内せん断波（SH波）が鉛直下方から入射したときの地盤のせん断挙動として理想化されることが多い。現在までに、セン断土槽¹⁾は、その中に作成された模型地盤がそのような理想的なせん断挙動をすることを意図して製作されている。このため、セン断土槽には次のような性質が要求される。①セン断土槽自体が、加振方向にのみせん断挙動すること（加振直交方向、ロッキング動、ねじれ動が十分小さいこと）②セン断土槽の見かけのせん断剛性が十分小さいこと③セン断土槽の重量が模型地盤の重量に比べ十分小さいこと（相互作用系を構成することにより模型地盤が土槽の動特性の影響を受けないこと）④地盤の非線形性や液状化に起因する大きな変位やひずみに追従すること⑤セン断土槽の水平面内の断面変形がないこと

3. セン断土槽の概要

前述のような考えの下に新たに小型と大型の2つのセン断土槽を製作した。本論文では大型セン断土槽について報告する。図-1に大型セン断土槽を示す。大型セン断土槽は、縦50mm、横100mm、厚さ3.2mmの軽量鋼製有孔角パイプで作られた正方形枠を18段積み重ねたものであり、正方形枠の間にはボールベアリングが取り付けられ、枠と枠が相対的に±25mmまで移動できるようになっている。大きさは、内寸法でおよそ幅150cm、奥行き150cm、高さ100cmである。せん断変形は、局所的には約40%まで、単純せん断状態では5%まで追従できる。また、土槽側壁の内側には止水の目的で、外側には防塵防水の目的で、ゴム膜を取り付けてある。ゴム膜の厚さは内側3mm、外側1mmであり、ゴム膜の継目は側壁最上部にあるのみである。土槽の底板は鋼鉄性で、底板には給気・給排水用の開口・パイプ・バルブがある。

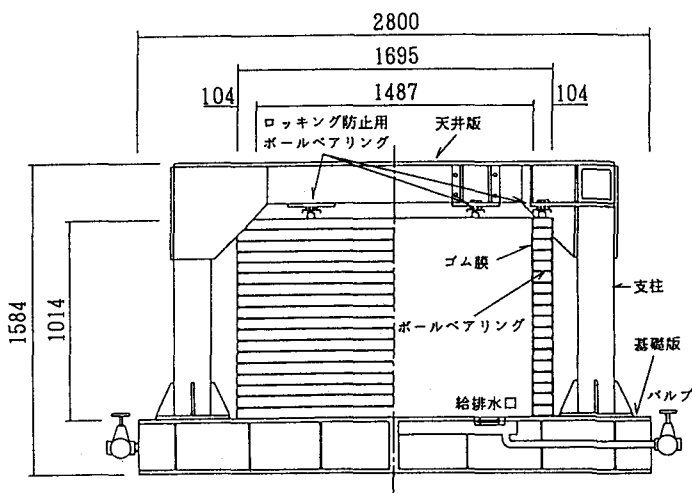


図-1 大型せん断土槽

この大型せん断土槽には2つの大きな特徴がある。特徴の1つは、模型地盤の曲げ変形（ロッキング）を抑制するように設計されていることである。図-1に示したようにせん断土槽の基礎版から立ち上がった4本の剛な柱の上に補剛された天井版が剛結されて、剛なフレームが構成されている。そして、天井版と土槽最上部の正方形枠の上面との間にはボールベアリングが取り付けられている。もう1つの特徴は、2方向のせん断変形が可能なように設計されていることである。1方向のみのせん断変形をさせるときには、変形と直交方向の変形を拘束し、振動方向の動特性を調整するためのバネ板を壁外面に取り付けて対処できるよう設計されている。

4. せん断土槽単体の動特性

せん断土槽自体が加振方向にのみ加振すること、ロッキング動やねじれ動が十分小さいことを確認するために、せん断土槽単体の共振実験を行なった。加振は、水平1方向(Y方向)で、1Hzから10Hzまで0.5Hzきざみで、10Hzから50Hzまで1Hzきざみで行なった(ケース:LS00)。なお、このシリーズの実験では、大型せん断土槽には、幅40cm、厚さ1mmのバネ板を用いた。図-2に計器配置図を示す。用いた計器は加速度計(ASW-1A, ASW-2A)23成分と変位計(LVDT:1000HR)6成分である。

図-3に、振動台加速度100galのサイン波で加振したときの土槽の最上部の水平方向加速度とロッキング動に相当する鉛直方向加速度の共振曲線を示す。共振曲線からは、水平動の固有振動数が明瞭に読みとることができる。また、図-4に共振曲線より得られる30、100gal加振時の1～3次の振動モードを示す。横軸は応答倍率である。振動理論的には、均質なせん断体の1次、2次、3次の振動数の比は1:3:5となるのに対し、土槽では1:3.6:6.2となり、土槽はほぼ均質なせん断体であることがわかる。また、ロッキング端部の最上枠の鉛直方向の加速度をロッキングの指標とすると、その加振加速度に対する応答倍率は、40Hzで最大応答倍率(0.37倍程度)を示すものの、1～35Hzではほとんど0であることから、ロッキングは無視し得る。また、加振直交方向振動とねじれ動はほとんど見られなかった。

以上のことから、せん断土槽自体は、加振方向にのみせん断挙動し、直交方向、ねじれ方向の挙動はほとんどないこと、ロッキング防止策を施した大型土槽ではロッキングはほとんど生じないことがわかった。

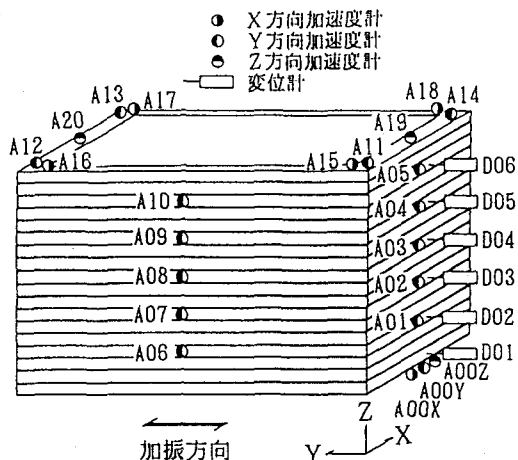


図-2 大型せん断土槽単体加振時の計器配置

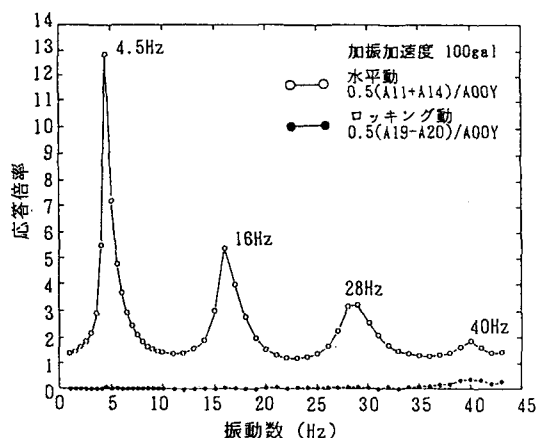


図-3 加速度共振曲線(土槽最上部)

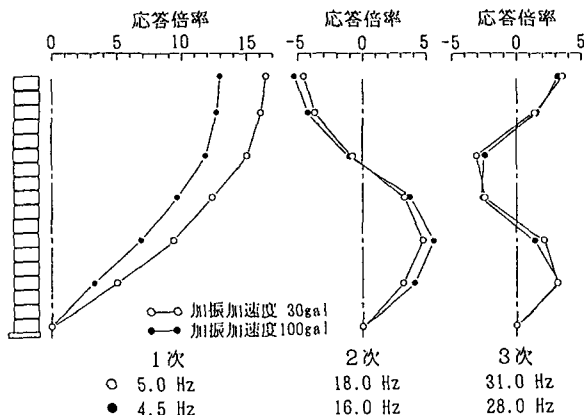


図-4 大型せん断土槽の振動モード

5. 乾燥砂模型地盤の動特性

次に、実際にせん断土槽内に作成された模型地盤について土槽の影響を確認するために相対密度 (D_r) 80% (ケース: LS01) と50% (ケース: LS02) の乾燥地盤の共振実験を行なった。ここでは $D_r=80\%$ のケースで考察する。使用した砂は、豊浦標準砂でありその物理的性質を表-1に示す。模型地盤は、天井版の上を走行する電動走行ホッパーを用いて空中落下法 (落下高さ一定) により作成した。あらかじめ実施した検定試験によれば、空間的な相対密度のばらつきは $\pm 8\%$ 程度であり、模型地盤全体の相対密度の作成誤差 (再現性) は $\pm 3\%$ 以内である。計器配置図を図-5に示す。加速度計、変位計に加え、せん断ひずみ計 (S10-001) を用いた。加振は、加速度一定のサイン波とし、加速度レベルごとに1Hzから10Hzまで0.5Hzきざみで、10Hzから50Hzまで1Hzきざみで30, 50, 100, 200, 400galの順に行なった。

地表から深さ8cmに設置した水平加速度計(A08)の加速度共振曲線を図-6に示す。この図より加振加速度が大きくなるにつれてピーク振動数が低下し、応答倍率が低下するのがわかる。加振加速度の増大につれて地盤のせん断ひずみが増加し、それとともに剛性が低下し減衰が増大するという砂のひずみ依存特性の現われたものである。この特性を明らかにするために、この共振曲線および常時微動の伝達関数 (地表/基礎版: サーボ加速度計VR-400) から得られる固有振動数 f_1 、およびそれから $V_s = 4 f_1 \cdot H$ (H : 地盤厚) なる式によって得られるせん断波速度 V_s とS波検層の走時より得られる V_s ならびに $G = \rho V_s^2$ なる式によって得られるせん断剛性 G を表-2に示す。せん断土槽の見かけのせん断剛性が13.4 (t/m^2) であることを考えると、せん断振動における土槽の影響は十分小さいものと考えられる。

次に、深度15cmで土槽中心より60cm加振方向の+と-に離れた位置の2つの加速度計より得られる地盤の曲げ変形による鉛直方向加速度の共振曲線を同じ深さにある土槽中心の水

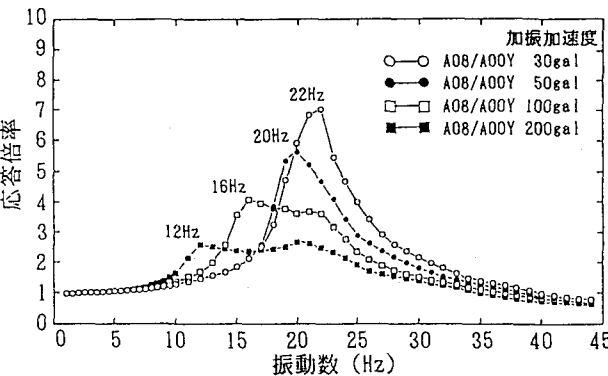


図-6 乾燥砂地盤の加速度共振曲線: $D_r=80\%$
(加振レベルの比較)

表-1 試料砂の物理的性質

豊浦標準砂: 1988.8~11購入 (5回の平均: 1回/40袋)	
比重 G_s	2.64
最大間隙比 e_{max}	0.975
最小間隙比 e_{min}	0.599
均等係数 U_c	1.33
平均粒径 D_{50}	0.205

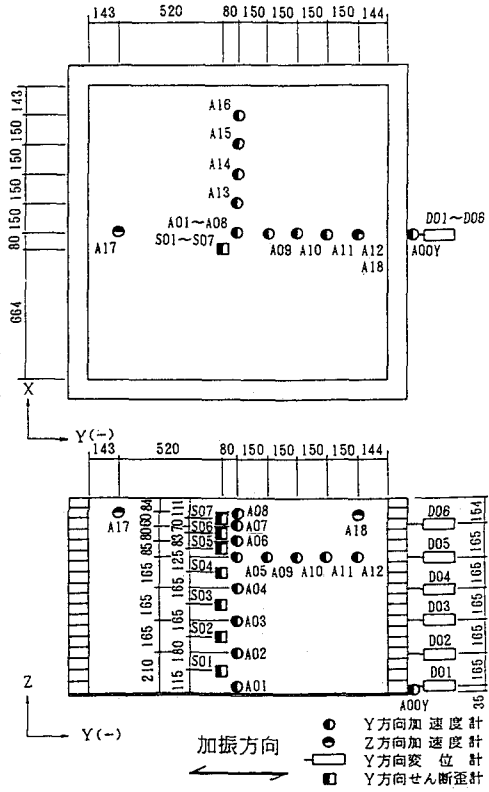


図-5 乾燥砂模型地盤の計器配置

表-2 模型乾燥砂地盤の剛性のひずみ依存性

レベル	f_1 (Hz)	V_s (m/s)	G (t/m^2)	G/G_0	γ (10^{-4})
常時微動	27.35	109.5	1929	1	
S波検層	27.25	109.4	1926	.998	0.1
サイン波加振	30gal	22	88	.646	4.0
	50gal	20	80	.534	7.4
	100gal	18	64	.342	11.0
	200gal	16	48	.192	

$V_s = 4 \cdot f_1 \cdot H$ $G = (\gamma_d / g) \cdot V_s^2$
 $H = 1.000$ (m), $g = 9.8$ (m/s^2), $\gamma_d = 1.999$ (t/m^2)
 γ : 深部せん断ひずみ計 (S02) による。

平加速度のものと併せて図-7示す。土槽にはみられないロッキングが模型地盤の中では、水平1次振動数より高い振動数領域で現われていることがわかる。そこで、その影響を見るために、同一水平平面内の加振軸線上に配置したA09～A12、加振直交軸線上に配置したA13～A16の加振方向水平加速度計の30gal 加振時の共振曲線を同じ深度の土槽中心にあるA05 とともに図-8、図-9に示す。水平1次振動数までの低振動数領域では平面内の水平加速度は同じであり、また、2つの加速度の時間軸上の波形もほぼ完全に一致していた。すなわち、模型地盤は均質であり、ほぼ完全なせん断挙動をしていると言える。

一方、水平1次振動数以上の高振動数領域では平面内の水平加速度にばらつきが生じる。この領域でのばらつきは振動数によらず1次振動数での最大応答倍率の±4%程度である。また以上の傾向は、加振加速度レベルが異なっても同様にみられる。したがって、応力履歴や応力状態に敏感な土質材料の非線形性や、ダイレイタンシーに起因する液状化の問題に対しては、模型地盤の曲げ変形にともなう加振方向の直応力や加振方向鉛直面内のせん断応力の影響が考えられる。しかしながら実用的には、その大きさは無視し得る程度のものであると判断できる。

6. 結 論

高精度の要求される砂地盤の振動台実験のために製作したせん断土槽について、要求される性質を整理したのち、せん断土槽単体の動特性と乾燥砂模型地盤の動特性をサイン波による共振実験により明らかにした。その結果、次のことがわかった。

- ①せん断土槽は理論的な均質せん断体とみなすことができる。
- ②せん断土槽の中に作られた乾燥砂地盤は、ばらつきの少ない均質なせん断挙動をする。
- ③せん断土槽の中に作られた乾燥砂地盤には、せん断変形のほか曲げ変形に起因する影響が生じるものの実用的には無視し得る程度である。

参考文献

- 1)国生剛治：土の動的変形特性と地盤の非線形地震応答に関する研究，東京大学学位論文

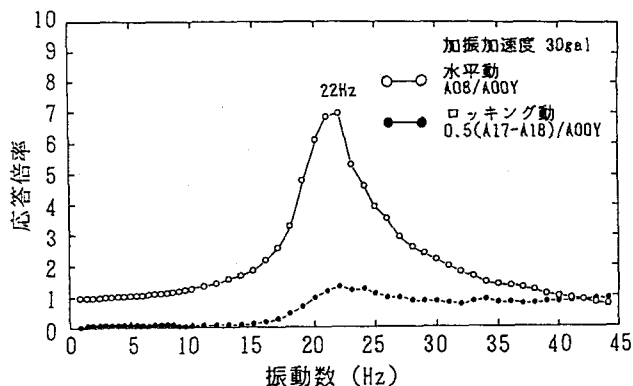


図-7 乾燥砂地盤の加速度共振曲線：Dr=80%
(水平振動と回転振動)

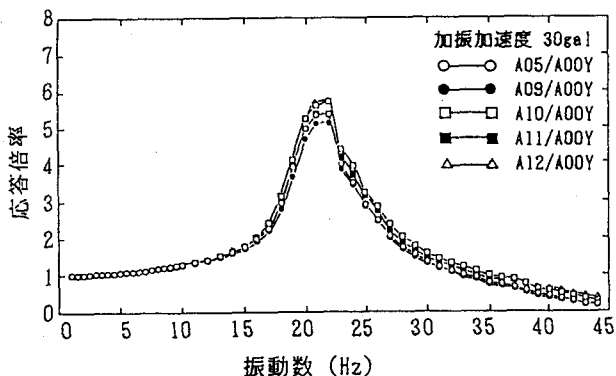


図-8 乾燥砂地盤の加速度共振曲線：Dr=80%
(同一深度、加振方向測線上)

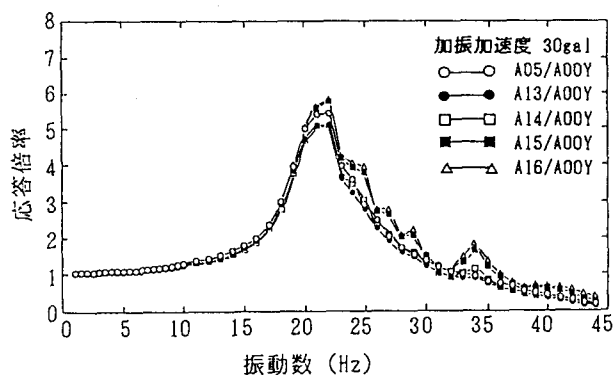


図-9 乾燥砂地盤の加速度共振曲線：Dr=80%
(同一深度、加振直交方向測線上)