

离心机振动台模型试验原理和应用

王年香 章为民

(南京水利科学研究院 江苏 南京 210024)

摘要 介绍离心机振动台的发展, 阐述离心机振动台模型相似理论。运用离心机振动台模型试验技术, 研究混凝土面板堆石坝和砂性地基在地震作用下的加速度反应、坝体和面板变形、振动超静孔压的产生、消散过程, 真实地再现地震时土层和建筑物的主要反应特性。研究结果表明, 离心机振动台模型试验是研究岩土工程地震问题的有效手段。

关键词 离心机振动台 模型试验 相似理论 面板堆石坝 砂性地基 地震反应

中图分类号 :TU435 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)S1-0048-04

地震是一种自然灾害, 会给人类造成巨大的破坏和损失, 因此, 地震灾害研究得到普遍重视。以往研究地震破坏的方法大致可分为 3 类: ①震灾调查。通过对地震破坏现象的调查, 研究分析地震的破坏机理及防震、抗震措施。由于地震难以预测、更无法控制, 这类研究比较表面, 而且不能重复, 普遍性差。②数值模拟与理论分析。根据室内单元土体的试验结果, 找出规律、提出假定, 再依据某一条件来预测结构的整体行为。由于土的复杂性及土的本构模型、计算参数的不确定性, 目前仍难达到定量的水平, 预测值与实际往往相差很大。③振动台试验方法。此方法主要用于研究结构问题, 而在研究土工问题时, 由于不能满足模型与原型应力水平相同的要求, 使得该法得出的结果与实际相差甚远, 难以在岩土工程领域内应用。目前离心机振动台模型试验技术已在岩土工程地震问题的研究中得到应用^[1-2], 特别是在地震破坏机理、抗震设计计算、数值模型验证等方面显示出巨大的优越性。

1 离心机振动台

早在 1940 年, 前苏联就把离心机应用于研究有关成坑和爆炸荷载的问题, 以了解武器作用效果。1970 年美国 and 英国也做了类似的试验研究。在过去的 20 多年里, 土工离心机振动台已经作为强大的技术手段用于地震问题的模拟研究。英国、美国、日本、法国等许多国家都相继建立了模拟动荷载的模

型试验设备^[3]。早期的离心机振动台有英国剑桥大学的 Bumpy Road 系统^[4], 美国加州大学戴维斯分校的压电激振系统^[5], 日本东京工业大学的 Cam shaft 动力系统^[6], 法国阿基坦科学中心的爆炸激振系统^[7], 美国加州理工学院的电液激振系统^[8]等。目前, 国际上最为流行也最为先进的离心机振动台是电液伺服控制振动系统, 它已经从水平单向振动和水平双向振动发展到能在水平方向和垂直方向同时振动的水平-垂直 2D 振动台^[9-10]。

在国内, 南京水利科学研究院于 2002 年研制出电液式土工离心机振动台^[11], 清华大学也于 2004 年研制出电液伺服激振系统^[12]。南京水利科学研究院自行研制的国内第一台 NS-I 型离心机振动台^[11]由振动台面、作动器、伺服阀、压力源等部分组成, 其主要性能指标及几何尺寸如下: 离心加速度 100g, 水平振动加速度 15g, 振动频率 100 Hz, 最大振幅 0.5 mm, 振动质量 200 kg, 振动时间 2 s, 外形尺寸 1 345 mm × 990 mm × 520 mm, 整机质量 675 kg, 工作台面尺寸 700 mm × 500 mm, 工作台面质量 80 kg, 蓄能器容积 25 L, 回油油箱容积 8 L。台体结构采用新型的高精密线性滑条, 它具有较高的支承能力, 摩擦系数极小(设计值为 0.01)。电液伺服阀是振动台的核心部件, 其型号为 FF106 喷水挡板式两级伺服阀, 流量为 80 L/min。用高压蓄能器作为动力源。由计算机、控制柜和安装在伺服油缸上的电液伺服阀、加速度传感器、位移传感器组成信号控制回路。

基金项目: 国家自然科学基金(50679042)

作者简介: 王年香(1963—), 男, 江西信丰人, 教授级高级工程师, 博士, 从事岩土工程科学研究和技术咨询工作。E-mail: nxwang@nhri.cn

采用位移、速度和加速度三参数闭环控制方式 ,通过计算机发出指定的振动信号 ,伺服阀动作 ,同时依据安装在振动台上的位移和加速度传感器所测得的信号反馈 ,对振动状态进行调整 ,从而实现设定的振动。振动的方式可以是规则波亦可以是不规则随机波。配备有 16 通道、采样率为 40 万次/s 的高速数据采集系统。

2 模型相似理论

根据相似理论第三定律 ,原型和模型力学相似的充分必要条件是它们的力学物理过程的单值性条件相似 ,并使单值量组成的相似准则相等。具体应满足以下条件 :

- a. 几何条件 :要求原型和模型的几何尺寸及空间上相应位置保持相似。
- b. 运动条件 :要求原型和模型的位移、速度、加速度在对应空间和时间上方向一致 ,大小成比例。
- c. 物理条件 :要求原型和模型的物理力学特性以及受荷后引起的变化反应必须相似。该条件一般包括土体有效应力原理、变形几何方程、本构关系、摩尔-库仑定律等。
- d. 动力平衡条件 :这是模型试验的主要控制条件 ,使原型和模型有相同的力学表现。该条件一般包括土体动力平衡方程、孔隙水运动方程、质量平衡方程等。
- e. 边界条件 :对边界条件进行相似变换 ,可得到满足边界相似的条件。

定义模型试验的 3 个控制量——尺寸 L 、密度 ρ 和加速度 g 的原型值与模型值之比分别为

$$\eta_l = \frac{L_p}{L_m} \quad \eta_\rho = \frac{\rho_p}{\rho_m} \quad \eta_g = \frac{g_p}{g_m} \quad (1)$$

式中下标 p 表示原型、 m 表示模型。

根据力学平衡条件可得

$$\eta_\sigma = \eta_l \eta_\rho \eta_g \quad (2)$$

在离心模型试验中可以这样选择试验条件 :选用原状土制模 ,即实现 $\eta_\rho = 1$,再选取 $\eta_l = n$, $\eta_g = 1/n$, n 为模型比尺 ,即把模型的几何尺寸缩小到原型的 $1/n$,把模型的场加速度(离心加速度)增大到重力加速度($1g = 9.81 \text{ m/s}^2$)的 n 倍 ,就可得到 $\eta_\sigma = 1$,也就确保了模型的每一点应力与原型相同 ,从而实现用模型表现原型的目的。

由于受当前的发展水平限制 ,离心机振动台在模拟大型工程时要做到 $\eta_g = 1/\eta_l$ 几乎不可能 ,因而模型的应力水平就达不到原型的应力水平。因此 ,对上述条件进行原型和模型之间的相似变换 ,就可得到原型和离心机振动台模型之间的相似律 ,见表

1。从表 1 可以看出 ,如果在离心机振动台模型能使 $\eta_g = 1/\eta_l$,其模型相似律就与离心模型试验一致。

表 1 模型相似律

变量	量纲	原型与模型比值		
		离心模型	离心机振动台	常规振动台
长度 L	L	n	η_l	η_l
密度 ρ	$M \cdot L^{-3}$	1	$\eta_\rho = 1$	$\eta_\rho = 1$
加速度 g	$L \cdot T^{-2}$	$1/n$	η_g	$\eta_g = 1$
含水率 w		1	1	1
不排水强度 S_u	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	1	$\eta_l \eta_g$	η_l
内摩擦角 φ		1	1	1
弹性模量 E	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	1	$\eta_l^{1/2} \eta_g^{1/2}$	$\eta_l^{1/2}$
抗弯刚度 EI	$M \cdot L^3 \cdot T^{-2}$	n^4	$\eta_l^{9/2} \eta_g^{1/2}$	$\eta_l^{9/2}$
抗拉(压)刚度 EA	$M \cdot L \cdot T^{-2}$	n^2	$\eta_l^{5/2} \eta_g^{1/2}$	$\eta_l^{5/2}$
速度 v	$L \cdot T^{-1}$	1	$\eta_l^{3/4} \eta_g^{3/4}$	$\eta_l^{3/4}$
集中力 F	$M \cdot L \cdot T^{-2}$	n^2	$\eta_l^3 \eta_g$	η_l^3
均布荷载 p	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	1	$\eta_l \eta_g$	η_l
应力、孔压 σ	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	1	$\eta_l \eta_g$	η_l
应变 ϵ		1	$\eta_l^{1/2} \eta_g^{1/2}$	$\eta_l^{1/2}$
位移 u	L	n	$\eta_l^{3/2} \eta_g^{1/2}$	$\eta_l^{3/2}$
时间 t	T	$n(\text{动力})$	$\eta_l^{3/4} \eta_g^{-1/4}$	$\eta_l^{3/4}$
频率 f	T^{-1}	$1/n$	$\eta_l^{-3/4} \eta_g^{1/4}$	$\eta_l^{-3/4}$
阻尼比 ξ		1	1	1

现在比较一下常规振动台模型与离心机振动台模型的区别。从表 1 可以看出 ,常规振动台模型的场加速度为 $1g$ (重力加速度) ,即 $\eta_g = 1$,在 η_l 相同的条件下 ,离心机振动台由于离心惯性力场的作用 ,模型的应力水平要比常规振动台的大得多(根据目前的技术水平可达 $50g \sim 100g$) ,而土的动力特性在很大程度上取决于它受到的应力条件 ,因而离心机振动台模型试验比常规振动台模型试验能更真实地反映原型在实际应力条件下的动力反应。

3 面板堆石坝地震反应特性

某混凝土面板堆石坝最大坝高 157 m ,上游坝坡 1:1.7 ,下游平均坝坡 1:1.9 ,最大坝宽 591 m ,地震基本烈度为 8 度 ,按 9 度设计 ,100 年基准期超越概率 2% 基岩峰值加速度为 $0.471g$ 。

3.1 坝体地震加速度反应

图 1 给出了底部输入加速度和不同坝高处坝体加速度反应过程线 ,图 2 给出了坝体加速度放大系数沿坝高 H ($H = 157 \text{ m}$)的变化。从图 1、图 2 可以看出 :在 $0.45H$ 以下 ,坝体加速度与底部输入加速度基本一致 ,或稍有减小 ,在 $0.45H$ 以上 ,坝体加速度比底部输入加速度有明显增加 ,越往坝顶加速度放大系数就越大 ,在 $0.82H$ 处加速度放大系数达 1.8 ,以此推算在坝顶可达 2.5 以上 ,且振动频率也发生了较大变化。振动次数越多 ,坝体加速度放大系数增加就越显著。

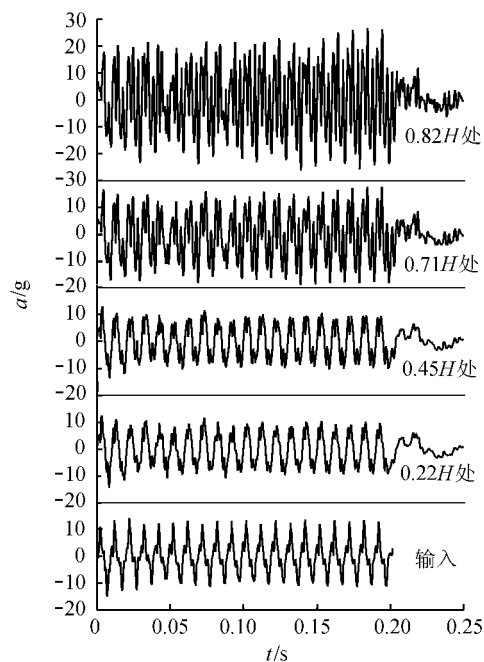


图1 坝轴线处加速度反应过程

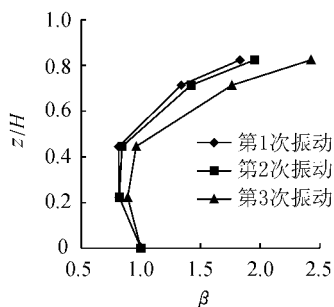


图2 加速度放大系数沿坝高分布

3.2 地震引起的坝体和面板变形

表2给出了竣工期地震引起的坝顶和下游坝坡沉降增量,可以发现,初次地震引起的坝顶沉降增量达70cm,0.83H下游坝坡沉降增量高达47cm,位置越高沉降增量越大,而再次振动所引起的沉降增量虽有明显减小,但数量上还是较大。随着振动次数的增加,坝顶沉降增量逐渐减小。表3给出了竣工期和蓄水期地震引起的上游面板挠度增量,可以看出,初次地震引起的面板挠度增量高达25cm,位置

表2 竣工期振动引起的坝体沉降增量 mm

位置	第1次振动	第2次振动	第3次振动
坝顶	707.0	231.2	133.8
下游坝坡0.83H处	474.4	155.7	70.7
下游坝坡0.59H处	208.4	98.8	50.8

表3 振动引起的面板挠度增量 mm

时间	位置	第1次振动	第2次振动	第3次振动
竣工期	0.80H处	251.6	63.2	43.8
竣工期	0.55H处	160.7	29.4	20.4
蓄水期	0.80H处	94.9	33.3	29.4
蓄水期	0.55H处	63.1	13.1	10.3

越高,地震引起的面板挠度越大,且随着振动次数的增加,挠度增量逐渐减小,蓄水期地震引起的上游面板挠度增量明显小于竣工期。

3.3 面板地震反应

图3为蓄水期0.76H处面板下游面的应变反应过程线。从图3可以看出,面板应变反应与坝体加速度反应在相位上相差很大,坝体加速度反应基本上与输入加速度的正弦波一致,面板应变反应则不是正弦波,而是朝一个方向振动,且振幅的变化很大。地震时面板的最大应变高达7%以上,震后残余应变也达0.1%左右,如此大的面板应变和残余应变足以使面板开裂,甚至产生严重破坏,应引起足够的重视。

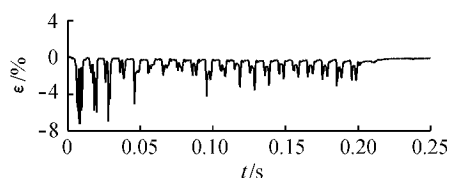


图3 振动引起的面板应变过程

4 砂性地基地震反应特性

试验采用标准砂,用砂雨法制作,模型砂的主要特性如下:比重 $G_s = 2.64$,最大孔隙比 $e_{\max} = 0.973$,最小孔隙比 $e_{\min} = 0.609$,粒径分布曲线上小于某粒径的土粒质量分数分别为10%、30%和60%时所对应的粒径为 $d_{10} = 0.135 \text{ mm}$, $d_{30} = 0.164 \text{ mm}$, $d_{60} = 0.210 \text{ mm}$,不均匀系数 $C_u = 1.56$ 。

4.1 地震加速度反应

图4给出了地层加速度反应过程线。可以看出,底部土层由于未发生液化,加速度反应基本与输入波相同;中间以上土层由于发生液化,只经历了几个波的振动后振幅很快大幅度衰减,形成了很小振幅的振动;顶部土层的加速度较中部土层更早地进

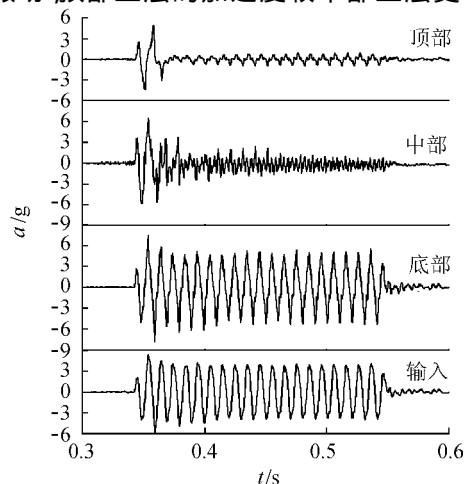


图4 液化土层加速度反应

入了小幅振动状态,液化前,有加速度放大现象,液化发生后,震动很快减小,同时反应波与输入波产生了明显的相位差,振动频率也发生很大变化。

4.2 振动超静孔隙水压力

图 5 和图 6 为振动超静孔隙水压力过程线。图 5 中 h 为模型高度, $0.0h$ $0.25h$ $0.50h$ $0.75h$ 表示孔压测点的相对位置, 越小则位置越深。从图 5 可以看出, 振动产生的超静孔隙水压力的大小与上覆土压力密切相关, 越靠近底部, 上覆土压力越大, 产生的振动孔压亦越大。从图 6 可以看出, 坡前 a 点的上覆土压力比坡下 b 点的上覆土压力要小, 虽然 a 点和 b 点处在同一高度, 振动加速度亦相近, 而它们的振动超静孔隙水压力却不同。

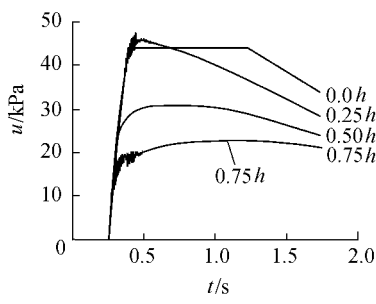


图 5 振动超静孔隙水压力过程

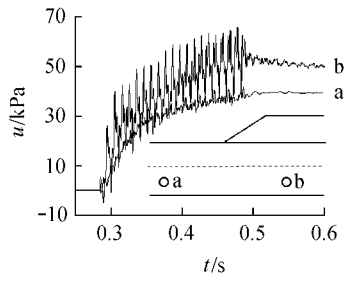


图 6 不同上覆土压力部位的振动孔压水压力过程线

图 7 是模型中部土层的振动超静孔隙水压力过程线, 图中纵轴是振动超静孔隙水压力与上覆土重 W 之比, 可以表示土层发生液化的程度。从图中可见随着土层的振动超静孔隙水压力上升很快, 在接近上覆土重时, 超静孔隙水压力已不能再升高, 上覆土重作为振动超静孔隙水压力界限的约束作用非常明显。

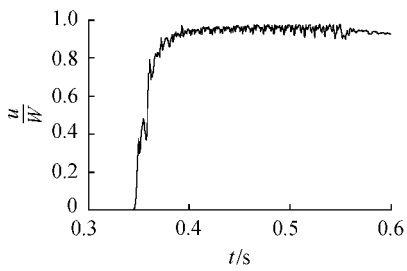


图 7 液化时的超静孔隙水压力过程线

5 结 语

通过试验研究, 得到以下认识: ①离心机振动台模型试验是研究岩土工程地震动力反应问题的有效手段, 应大力推广。②地震动力离心模型试验研究历史还不长, 应进一步加强对边界效应、微型传感器、模拟技术等关键问题的研究。

参考文献:

- [1] 王年香, 章为民. 混凝土面板堆石坝地震反应离心模型试验[J]. 水利水运工程学报, 2003(1): 18-22.
- [2] 章为民, 日下部治. 砂性地基地震反应离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 28-31.
- [3] STEEDMAN R S, ZENG X. Dynamics[C]//TAYLOR R N. Geotechnical Centrifuge Technology. Glasgow, UK: Blackie Academic and Professional, 1995: 168-169.
- [4] KUTTER B L. Deformation of centrifuge models of clay embankments due to 'Bumpy Road' earthquakes[C]//Proceedings of the Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Southampton, 1982, 1: 331-349.
- [5] ARULANANDAN K, CANCLINI J, ANANDARJAH A. Simulation of earthquake motion in the centrifuge[J]. Journal of Geotechnical Division, ASCE, 1982, 108: 730-742.
- [6] KIMURA T, TAKEMURA J, SAITOH K. Development of a simple mechanical shaker using a cam shaft[C]//CORTE J F. Proceedings of Centrifuge 88: the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling. Paris, France: Balkema A A, 1988: 107-110.
- [7] ZELIKSON A, DEVAVRE B, BADEL D. Scale modelling of soil structure interaction during earthquake using a programmed series of explosions during centrifugation[C]//Proc Int Conf on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 1981, 1: 361-366.
- [8] ABOIM C, SCOTT R F, LEE J R, et al. Centrifuge earth dam studies: earthquake tests and analyses[R]. Report to National Science Foundation, Grant No. CEE-7926691, 1983.
- [9] Van LAAK P A, ADALIER K, DOBRY R, et al. Design of RPI's Large Servohydraulic Centrifuge Shaker[C]//KIMURA T, KUSAKABE O, TAKEMURA J. Proceedings of Centrifuge 98: the International Conference on Geotechnical Centrifuge Modelling. Rotterdam: Balkema A A, 1998: 105-110.
- [10] TAKEMURA J, TAKAHASHI A, AOKI Y. Development of horizontal-vertical 2D shaker in a centrifuge[C]//PHILLIPS R, GUO Pei-jun, POPESCU R. Physical Modeling in Geotechnics: ICPMG '02. Newfoundland, Canada: BALKEMA A A, 2002: 163-168.
- [11] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 电液式土工离心机振动台的研制[J]. 水利水运工程学报, 2003(1): 80-86.
- [12] 张建民, 于玉贞, 濮家骝, 等. 电液伺服控制离心机振动台系统研制[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 843-845.

(收稿日期: 2007-12-19 编辑: 高建群)