

混凝土面板堆石坝动态离心模型试验研究

Dynamic centrifuge model test for concrete face rock fill dam

王年香, 章为民

(南京水利科学研究院 土工研究所, 江苏 南京 210024)

中图分类号: TV 312

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2003)04-0504-04

作者简介: 王年香(1963-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事软土工程性质和土工离心模型试验研究。

0 前言*

地震是一种频繁发生的自然灾害, 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三类: 一是震害调查, 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抗震措施。由于地震无法预测、更无法控制, 这类研究比较表面, 而且不能重复, 普遍性差。二是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。三是振动台试验方法, 此方法主要应用在研究结构问题方面, 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。

动态离心模型试验技术是近年来迅速发展起来的一项高新技术, 由于其能真实地模拟原型的应力条件, 反映原型在实际应力条件下的真实动力反应, 因此, 被公认为研究岩土工程地震问题最为有效、最为先进的研究方法和试验技术。目前这项试验技术已在岩土工程地震问题的研究中得到应用, 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。目前的试验研究表明, 动态离心模型试验结果很好地再现了工程结构状况与破坏机理, 取得了良好的效果^[1~3]。

目前, 混凝土面板堆石坝得到普遍采用, 其地震反应通常采用数值模拟与理论分析方法进行计算, 常规振动台试验研究也不多见^[4]。由于这两种方法的局限性, 其结果与实际相差甚远。

1 模型相似理论

离心模型试验的重要目标之一, 是将原型在荷载作用下的力学表现, 在模型上进行相似模拟, 测量模型的物理量通过一定的相似关系推算到原型, 这种相似

关系就是模型相似律^[5]。相似律一方面规定了将模型试验结果推算到原型上的法则, 另一方面又规定了原型和模型之间相似必须满足的条件。

由相似理论第三定律, 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。

(1) 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。

(2) 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。

(3) 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。

(4) 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。

(5) 边界条件: 由边界条件, 并对其进行相似变换, 可得到满足边界相似的条件。

现定义模型试验的三个控制量——尺寸、密度和加速度的原型值与模型值之比:

$$C_L = \frac{L^p}{L^m}, C_\rho = \frac{\rho^p}{\rho^m}, C_g = \frac{g^p}{g^m} \quad (1)$$

试验研究表明, 土石料的动剪应力应变关系可归一化为^[4]

$$\frac{G}{G_{\max}} = f_1 \left| \frac{\gamma}{\gamma_r} \right|, \zeta = f_2 \left| \frac{\gamma}{\gamma_r} \right| \quad (2)$$

式中: 割线剪切模量 $G = \tau/\gamma$; 最大剪切模量 $G_{\max} = C_p a_0'/p_a|^{0.5}$, C 为与土体密度有关的无量纲系数, p_a 为大气压力, ζ 为阻尼比, γ_r 为参考剪应变, a_0' 为平均有效应力。对上述的条件进行原型和模型之间的相似变换, 就可得到原型和模型间的相似律, 见表 1。

表 1 模型相似律

Table 1 Similarity law of the model				
项目	量纲	符号	普通模型	离心模型
尺寸	L	C_L	C_L	n
密度	ML^{-3}	C_ρ	C_ρ	1
加速度	LT^{-2}	C_g	C_g	$1/n$
模量系数		C_C	C_C	1
含水率		C_ω	1	1
不排水强度	$ML^{-1}T^{-2}$	C_c	$C_L C_\rho C_g$	1
内摩擦角		C_φ	1	1
弹性模量	$ML^{-1}T^{-2}$	C_E	$C_L^{1/2} C_\rho^{1/2} C_g^{1/2} C_C$	1
抗弯刚度	ML^3T^{-2}	C_{EI}	$C_L^{9/2} C_\rho^{1/2} C_g^{1/2} C_C$	n^4
抗拉(压)刚度	MLT^{-2}	C_{EA}	$C_L^{5/2} C_\rho^{1/2} C_g^{1/2} C_C$	n^2
速度	LT^{-1}	C_v	$C_L^{3/4} C_\rho^{1/4} C_g^{3/4} C_C^{-1/2}$	1
集中力	MLT^{-2}	C_F	$C_L^3 C_\rho C_g$	n^2
均布荷载	$ML^{-1}T^{-2}$	C_p	$C_L C_\rho C_g$	1
应力、孔压	$ML^{-1}T^{-2}$	C_p	$C_L C_\rho C_g$	1
应变		C_ε	$C_L^{1/2} C_\rho^{1/2} C_g^{1/2} C_C^{-1}$	1
位移	L	C_u	$C_L^{3/2} C_\rho^{1/2} C_g^{1/2} C_C^{-1}$	n
频率	T^{-1}	C_f	$C_L^{-3/4} C_\rho^{-1/4} C_g^{1/4} C_C^{1/2}$	$1/n$
阻尼比		C_ζ	1	1

在离心模型试验中我们可以这样选择试验条件: 选用原状土制模, 即实现 $C_\rho=1$ 和 $C_C=1$, 再选取 $C_L=n$, $C_g=1/n$, 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 $C_\omega=1$, 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。表 1 列出了主要物理量的离心模型相似律。

2 模型试验方法

某混凝土堆石坝最大坝高 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 4.62 m/s。我们针对大坝的这些特点, 采用国内唯一一台离心机振动台^[6]进行模型试验, 研究坝体的地震加速度反应特性, 面板应变反应特性, 坝体的变形特性等。

试验在南京水利科学研究院 400gt 土工离心机和自行研制的 NS-I 型离心机振动台^[6]上进行。该振动台由振动台面、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见表 2。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。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。振动台模型箱的有效尺寸为 420 mm×324 mm×200 mm(长×高×宽)。

试验土石料取自现场。根据我们以往粒径效应研究成果^[7], 模型料的限制粒径应小于土作用构件最小边长的 1/15~1/30, 原型料最大粒径为 600 mm, 模型料限制粒径取 5 mm。由设计级配曲线, 用相似级配法与等量替代法确定模型料级配。采用分层击实法填筑模型坝体, 按 2.24 g/cm³ 的最大干密度进行控制。面板选用与混凝土容重相近的铝板, 厚度为 0.5 mm。试验主要测量面板应变、坝体加速度和沉降等, 模型布置见图 1。

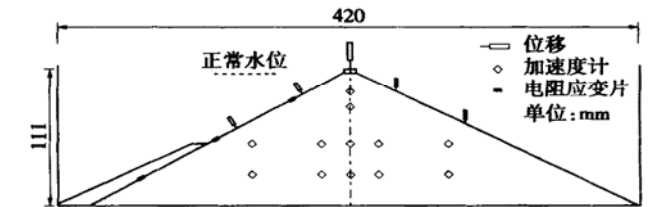


图 1 模型布置示意图

Fig. 1 Layout of the model

每个模型进行了 3~4 次振动, 输入振动频率为 100 Hz, 振动波形为正弦波, 振动持续时间 0.2 s, 最大振动加速度为 15g, 最大离心加速度为 50g, 根据模型相似律, 相当于原型最大地震加速度为 0.3g。研究表明, 用规则波模拟不规则波时, 规则波的峰值加速度应取 0.6 倍的不规则波峰值加速度, 因此, 0.3g 的正弦波峰值加速度相当于 0.5g 的不规则波峰值加速度。因此, 模型试验可模拟 9 度地震。

3 大坝的地震反应特性

3.1 坝体地震加速度反应

图 2 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 3 给出了坝体加速度放大系数沿坝高 H 的变化, 图 4 为坝体加速度放大系数沿水平方向的变化。从这些图表可以看出, 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的增加, 越往坝顶加速度放大系数就越大, 在 $0.82H$ 处达 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。坝体加速度反应在坝轴线处最小, 在上、下游有所增加。振动次数越多, 坝体加速度放大系数增加就越显著。

表 2 离心机振动台性能指标

Table 2 Technical indexes of the shake table

离心 加速度	振动质 量/kg	振动频 率/Hz	最大振 幅/mm	水平振动 加速度	振动时 间/s	外形尺寸 /mm	整机质量 /kg	工作台面 尺寸/mm	工作台面 质量/kg	蓄能器 容积/L	回油油箱 容积/L
100g	200	100	0.5	15g	2	1345×990×520	675	700×500	80	25	8

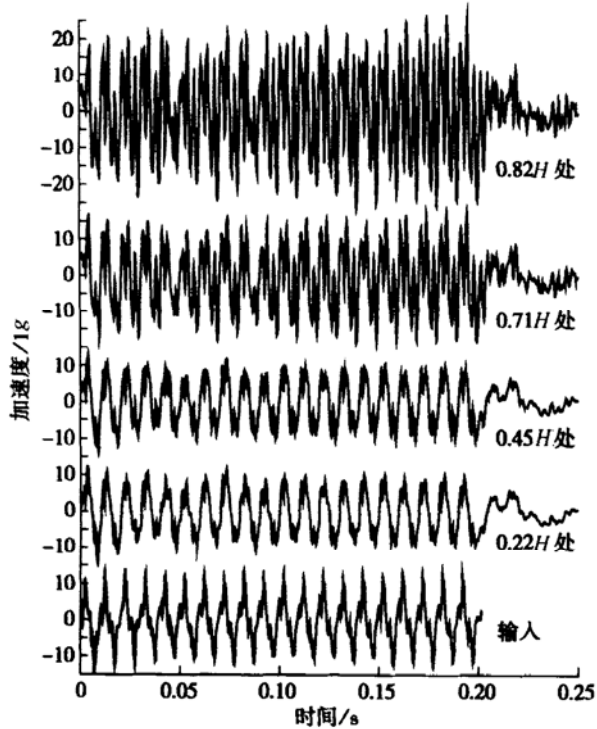


图 2 坝轴线处加速度反应过程

Fig. 2 Acceleration response along the axis of dam

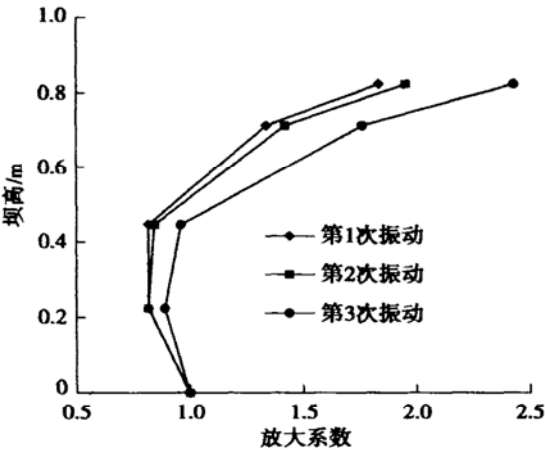


图 3 加速度放大系数没坝高分布

Fig. 3 Distribution of amplification coefficient of acceleration along dam height

3.2 地震引起的坝体和面板变形

表 3 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 70 cm, 0.83H 下游坝坡沉降增量高达 47 cm,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,但在数量上也还是较大,随着振动次数的增加,坝顶沉降增量就越小。

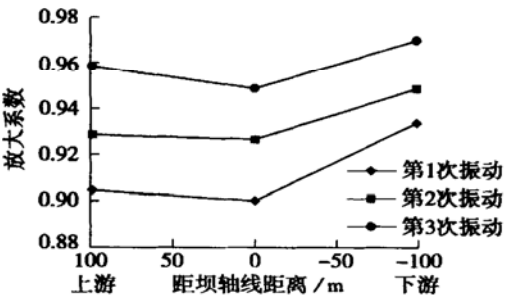


图 4 0.22H 处加速度放大系数水平向分布

Fig. 4 Horizontal distribution of amplification coefficient of acceleration at height of 0.22H

表 3 竣工期振动引起的坝体沉降增量

Table 3 Settlement increment of the dam induced by

振动次序	vibration at the end of construction			mm
	坝顶	0.83H 处下游坝坡	0.59H 处下游坝坡	
第 1 次	707.0	474.4	208.4	
第 2 次	231.2	155.7	98.8	
第 3 次	133.8	70.7	50.8	

表 4 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达 25 cm,位置越高,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。

表 4 振动引起的面板挠度增量

Table 4 Deflection increment of the concrete face induced by vibration

振动次序	竣工期		蓄水期		mm
	0.80H 处	0.55H 处	0.80H 处	0.55H 处	
第 1 次	251.6	160.7	94.9	63.1	
第 2 次	63.2	29.4	33.3	13.1	
第 3 次	43.8	20.4	29.4	10.3	

3.3 面板地震反应

图 5 蓄水期 0.76H 处面板下游面的应变反应过程线。从这些图可以看出,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。竣工期的地震中面板最大应变要大于蓄水期。表 5 给出了蓄水期地震中面板最大应变及震后残余应变,可以发现,地震中面板的最大应变高达- 7% 以上,震后残余应变也达- 0.1% 左右,随着振动次数的增加,面板最大应变和残余应变将稍有减小。地震时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。

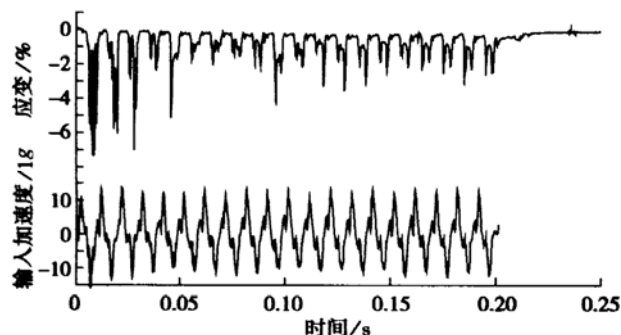


图5 振动引起的面板应变过程

Fig. 5 Strain response of the concrete face induced by vibration

表5 蓄水期振动引起的面板应变(负号“-”表示拉)

Table 5 Strain of the concrete face induced by vibration

振动次序	最大应变/%	残余应变/%
第1次	-7.244	-0.102
第2次	-7.146	-0.097
第3次	-7.055	-0.094

4 结 论

(1) 地震反应在 1/2 坝高以上相当强烈, 4/5 坝高处实测加速度放大系数大于 1.8, 推算到坝顶可达 2.5 以上。

(2) 地震引起的坝顶沉降、面板挠度、面板应变、下游坝坡沉降相当大, 可能引起面板开裂, 应采取适当的工程措施提高面板的抗裂性能。

(3) 试验结果表明, 南京水利科学研究院自行研制的离心机振动台能满足岩土工程地震问题研究的要求, 提供了一个非常有效的研究手段, 可在工程实际中大力推广应用。

参考文献:

- [1] Arulanandan K, Anandrajah A, Abghari A. Centrifuge modeling of soil liquefaction susceptibility[J]. Proc of ASCE, GE, 1983, 109(3): 281-300.
- [2] Ko, H-Y. Modeling seismic problems in centrifuges[A]. Proc of CENTRIFUGE 94[C]. 1994. 3-12.
- [3] 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.
- [4] 刘小生, 王钟宁, 等. 强震区面板坝大型振动台模型试验及动力分析[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000.
- [5] Taylor R N. Centrifuges in modelling: principles and scale effects [A]. Taylor R N Geotechnical Centrifuge Technology. Blackie Academic and Professional, Glasgow, 1995. 19-33.
- [6] 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, 2002, (1): 80-86.
- [7] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 80-86.

欢迎订阅《振动工程学报》

《振动工程学报》是由中国振动工程学会主办, 南京航空航天大学出版的全国性核心期刊, 1987 年创刊。本刊面向工程实际, 理论与实际并重, 主要刊登: 振动理论与应用, 非线性振动, 随机振动, 模态分析与试验, 结构动力学, 转子动力学, 故障诊断, 振动、冲击与噪声控制, 动力稳定性, 流固耦合振动, 动态测试, 动态信号分析, 机械动力学, 土动力学, 包装动力学和结构抗振控制等方面的专题论文、综合评述和研究简报。其读者对象为: 从事振动工程及相关学科教学、研究、设计、开发、应用和管理的科技工作者, 以及理工科大中专院校的师生。

本刊于 1999 年和 2001 年两次获“自然科学基金性高科技学术期刊经费”资助; 荣获 2001 年“百种中国杰出学术期刊”称

号; 本刊被《中国学术期刊文摘》、《中国科学引文数据库》、《中国科技论文统计与分析数据库》、《中国力学文摘》等收录; 本刊被美国《工程索引》(Ei)、美国 Applied Mechanics、美国 The Shock and Vibration Digest、美国 International Aerospace Abstracts、俄罗斯《文摘杂志》等收录。

本刊为季刊, 大 16 开, 120 页左右, 季末月底出版, 每期 20 元, 全年 80 元。本刊在国内外公开发行, 国内邮发代号: 28-249; 国外发行代号: 4819Q。欢迎订阅及投稿。

地址: 南京市御道街 29 号(210016); 电话: (025) 4895885; E-mail: zdxh@nuaa.edu.cn。