

深覆盖层上高堆石坝振动台试验与动力数值分析验证研究

窦兴旺¹, 林义兴², 夏颂佑², 许百立³

(1. 中国水利电力对外公司, 北京 100011; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098;

3. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100011)

摘要: 通过深覆盖层上高堆石坝振动台试验与动力数值分析相互验证研究, 表明考虑坝体-地基相互作用的数学、力学模型是合理、正确的。数值计算能非常方便地调整各种物理力学参数, 从而又能指导模型试验。通过振动台试验与数值分析相互验证的成果, 针对深覆盖层上高堆石坝的动力特性得出系统自振频率随地震历时的变化规律, 加速度放大系数与地震量级大小的关系, 以及对《水工建筑物抗震设计规范》中仅要求进行两向地震输入和针对不同的地震烈度采用相同的加速度分布系数提出建议。

关键词: 深覆盖层; 高堆石坝; 振动台试验; 动力数值分析; 有限元法

中图分类号: TV32+3

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2000)06-0019-04

在深覆盖层上修建高堆石坝, 国内外的经验都很少, 特别是在高烈度地震区, 更无比较成熟合理的分析方法, 这给修建在深覆盖层地基上的高堆石坝的设计与科研带来了很大的困难。近年来随着计算机技术和计算技术的迅猛发展, 人们已对堆石材料的静动力特性(主要在静动力本构关系方面)有了较为深入的认识和研究, 而且, 应用有限元法对坝体-地基-库水系统进行整体三维静动力数值分析已完全能实现。

但是, 目前对堆石坝-地基相互作用研究的思路和方法大多直接由混凝土坝-地基及土-结构相互作用问题研究的成果移植而来。对于堆石坝与地基这种结构和地基都呈强烈非线性的系统, 沿用通行的研究方法的可行性是应作进一步深入探讨的。

由于目前堆石坝的实际强震观测资料十分缺乏, 因此通过进行“小结构”动力模型试验, 将所获得的小型坝的动力参数、工作性态和破坏机理等, 作为评价为描述深覆盖层上高堆石坝的工作性态而建立的各种数学、力学模型的合理性和正确性的依据, 并借此对原型坝体进行动力分析, 从而为深覆盖层上高堆石坝的抗震分析提供强有力的支持依据, 基于此, 作者以大型地震模拟振动台结构试验与数值分析相结合、相互验证的方法进行研究。

1 工程概况

拟建的冶勒水电站位于四川南桷河上游, 电站

装机容量为 220 MW, 拦河坝为沥青混凝土心墙堆石坝, 最大坝高为 125 m, 水库正常蓄水位、设计洪水位以及校核洪水位均为 2650 m, 死水位为 2600 m, 坝顶高程 2654.5 m, 上游坝坡 1:2.0, 下游坝坡 1:1.8。

冶勒沥青混凝土心墙堆石坝主要由地基混凝土防渗墙、沥青混凝土心墙及坝壳堆石组成, 沥青混凝土心墙为折线型, 上部为斜心墙, 坡度为 1:0.3, 折坡点高程为 2620 m, 下部垂直。心墙顶部厚度为 0.6 m, 向下逐渐加厚, 底部最大厚度为 2 m。

虽然冶勒堆石坝的坝高并不太高, 但其地基覆盖层相当厚(最大厚度达 400 m 以上), 而且分布不均, 加之坝址位于高烈度地震区(基本烈度为 8 度), 在如此深厚复杂的覆盖层上修筑沥青混凝土心墙堆石坝, 首先应充分认识复杂地质条件将对坝体的应力及变形产生的影响及大坝的安全性等问题。因此对冶勒堆石坝进行整体三维有限元静动力数值分析和振动台地震模拟试验就显得十分必要, 同时, 对该坝静动力工作性态的深入研究将为同类工程提供有价值的参考。

2 试验设备及模型设计

2.1 试验设备

本试验是在从美国 MTS 公司引进的大型地震模拟振动台上进行的, 振动台主要性能指标如下:

台面尺寸: 2.0 m × 2.8 m, 最大承载量 60 kN, 工

基金项目: 高等学校博士点基金资助课题(编号: 9529401)

作者简介: 窦兴旺(1971—), 男, 江苏姜堰人, 博士, 从事坝与地基相互作用研究。

作频率范围:0.5~100 Hz,水平向最大激振力为 15×10^4 kN,竖直向最大激振力为 $6 \times 4 \times 10^4$ kN。在满载时,台面水平向最大加速度为 $1.5g$,最大速度为 50 cm/s,最大位移为 ± 50 mm;竖直向最大加速度为 $0.8g$,最大速度为 34 cm/s,最大位移为 ± 34 mm。

试验模型槽为倒梯形状,其顺河向和横河向的基频分别为 63 Hz和 45 Hz,高于“小结构”坝的第一阶自振频率且处于“小结构”坝共振频带之外,故对“小结构”坝的振动响应影响不大。

2.2 模型设计

对于线弹性结构体的模型试验,可根据模型试验相似理论进行模型设计,且试验所得的结果可按原型与模型之间的相似常数直接换算为原型的成果来描述原型的实际情况;而对于堆石坝这类材料具有强非线性特征的散粒体结构物,在进行模型试验时,尚无完整的相似理论可循,因此,只能采用按原结构体的构造模拟“小结构”模型,即按几何比尺相似,且使“小结构”模型的组成与原型相似的原则来设计。

选用石膏块($E = 1000$ MPa)模拟左岸基岩,而河床部位和右岸山体的覆盖层及堆石坝体均采用砂土来模拟,坝体的沥青混凝土心墙用厚度为 5 mm的橡胶板($E = 8$ MPa),混凝土防渗墙用厚度为 3 mm的有机玻璃板($E = 3000$ MPa)来模拟,基岩中的相对隔水层通过铺设一层防雨布来实现。

本试验采用 EL-centro 波作为振动输入波,由于实际结构的自振频率较低,实际地震波的卓越频率应能覆盖原型结构的自振频率,所以在进行振动试验时,台面输入振动波形的卓越频率应至少覆盖结构的一阶自振频率。实际地震波的卓越频率一般较低,将实际地震波用以试验时,应考虑原型与模型的相似关系,通常要将实际地震波进行压缩后方可作为台面输入波。若将实际记录的 EL-centro 地震波按相似关系进行压缩,使得该波卓越频率覆盖模型坝体的自振频率,那么该波的振动持续时间需要压缩得很短(约 2 s),在本试验中,将该地震波进行延时处理,使得其历时为 3.5 s,并分别以原南北向、东西向和竖直向压缩后的地震波作为顺河向、横河向和垂直向的台面输入波。试验时,将它们的量值分别按比例放大或缩小到期望数值。

3 数值分析与振动台试验结果

3.1 数值分析理论

地震作用下,堆石坝动力反应方程统一表示为如下格式:

$$\bar{M}\ddot{\delta} + \bar{C}\dot{\delta} + \bar{K}\delta = -\bar{M}\ddot{u}_g \quad (1)$$

式中; $\bar{M}$, $\bar{C}$, $\bar{K}$ 分别为堆石坝结构质量、阻尼和刚度

矩阵; δ , $\dot{\delta}$, $\ddot{\delta}$ 分别为位移、速度和加速度向量; $\ddot{u}_g$ 是输入地震谱; $\bar{G}$ 为地震加速度各个分量在坝体-地基系统总体自由度的转换矩阵,可根据地震输入是一维、二维或三维情况进行调整。

应用增量的 Wilson- θ 法,则式(1)可改写为

$$\left(\bar{M} \frac{6}{(\theta\Delta t)^2} + \bar{C} \frac{3}{\theta\Delta t} + \bar{K} \right) \Delta\delta = \Delta P + \left(\frac{6}{\theta\Delta t} \bar{M} + 3\bar{C} \right) \dot{\delta}(t) + \left(3\bar{M} + \frac{\theta\Delta t}{2} \bar{C} \right) \ddot{\delta}(t) \quad (2)$$

其中,

$$\Delta P = -\bar{M}\ddot{u}_g - (\bar{M}\ddot{\delta}_t + \bar{C}\dot{\delta}_t + \bar{K}\delta_t) \quad (3)$$

应用增量法求解式(2),则结构系统任意 $t + \Delta t$ 时刻的加速度、速度和位移的表达式分别为

$$\ddot{\delta}(t + \Delta t) = \frac{6}{\theta^3\Delta t^2} \Delta\delta - \frac{6}{\theta^2\Delta t} \dot{\delta}(t) + \left(1 - \frac{3}{\theta} \right) \ddot{\delta}(t) \quad (4)$$

$$\dot{\delta}(t + \Delta t) = \frac{3}{\theta^2\Delta t} \Delta\delta + \left(1 - \frac{3}{\theta^2} \right) \dot{\delta}(t) + \frac{\Delta t}{2} \left(2 - \frac{3}{\theta} \right) \ddot{\delta}(t) \quad (5)$$

$$\delta(t + \Delta t) = \frac{1}{\theta^3} \Delta\delta + \delta(t) + \left(1 - \frac{1}{\theta^2} \right) \dot{\delta}(t) + \frac{\Delta t^2}{2} \left(1 - \frac{1}{\theta} \right) \ddot{\delta}(t) \quad (6)$$

数值分析分静力和动力两种情况进行,计算范围完全按振动台试验所模拟结构范围。其中堆石的静力本构模型采用 Duncan- $E \sim \mu$ 模型,动力模型采用 Hardin-Drmovich 模型。整体三维有限元将结构系统共剖分为 1581 个单元, 1717 个结点。模型整体及典型剖面有限元剖分网格分别见图1和图2。

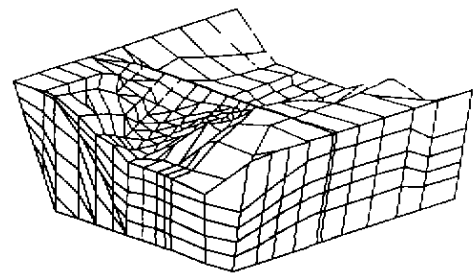


图1 模型整体有限元网格剖分

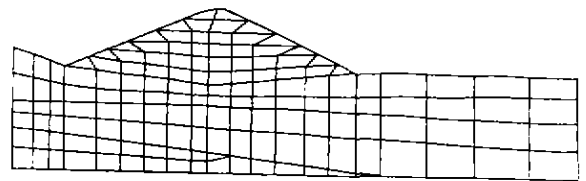


图2 0+234剖面有限元网格剖分

3.2 成果分析

3.2.1 坝体一阶自振频率

动力数值计算中,“小结构”坝体的一阶自振频率随地震历时的变化见表 1。振动台试验中,由白噪声扫频坝体的基频约为 30 Hz,可见两者相差不大。

表 1 “小结构”坝体的一阶自振频率(库空)

时间/s	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5
一阶自振频率/Hz	32.735	32.685	32.614	32.573	32.579	32.616	32.677

3.2.2 典型剖面的最大加速度及最大动位移

顺河向(即在顺河向及竖向输入地震波)库空情况下的心墙与防渗墙接头处某点(测点 A)和坝顶某点(测点 B)随输入地震动量级增大其加速度响应成果见表 2 和表 3。

因计算工作耗时较长(机型 P166,32M RAM 计算一次约需 12 h),故在进行计算和试验相互验证研究时,计算工作只进行了几个量级,见表 3。

计算结果,除个别点外,大多数测点的加速度响应比试验测得的值大(水平向最大相差 17%,垂直向最大相差 15%)。这样的结果可能与数值计算所取用的堆石体动力参数有关,也可能与试验误差有关。

因试验设备通道的限制,只能布设非常有限个测点(模型中共埋设了 16 个加速度传感器,30 个位移计和 9 个应变计等),故无法全面精确地进行坝体整体动力响应的比较。当然也可粗略地通过插值方法进行,本文未作这方面的工作。横河向(即在横河向及竖向输入地震波)库空情况的部分加速度响应和位移成果见表 4。

4 结语

由深覆盖层上高堆石坝振动台试验与动力数值分析相互验证研究,可以得出以下结论:

a. 对于单一的地震波,随着地震历时的变化,结构的自振频率呈先降低后升高的变化规律;对于相同波形的不同量级的地震波,随着地震量级的增大,结构自振频率呈现如上相同的变化规律,表明在地震过程中,坝体未破坏前,组成坝体的散粒体材料之间将不断调整位置,呈先松散后密实的变化规律,这与试验中所测得的容重变化规律吻合。

b. 最大加速度一般发生在坝顶或坝面,因此坝体的地震破坏也是先从坝顶或坝面开始,这由模型试验看得很明显,首先是坝顶较大颗粒的滚动,而后是一部分结构的滑动,同时所布置的加速度和位移测点的数据记录也说明了这一点。

c. 随着地震量级的增大,结构的动力响应加大,加速度放大系数则呈先减小后增大的变化规律。正如频率的变化规律一样,在振动过程中,组成坝体的散粒体材料呈先松散后密实的状态,从而导致坝体的刚度先降低后升高,这实际上反应了堆石材料的非线性特性。

d. 在数值计算中,当只输入两个水平向地震波,而忽略竖向振动影响时,结构整体的动力响应和考虑三向输入时差别不大;当忽略横河向振动影响时,结构整体的动力响应明显低于考虑三向输入时的响应,这可能与本课题工程实际有关。由计算知,库空情况下,地震初始时坝体的前三阶自振频率分别为 32.735 Hz(顺河向)、33.717 Hz(横河向)、36.718 Hz

表 2 顺河向库空不同地震量级的加速度响应(振动台试验)

输入 加速度		测点 A				测点 B			
		最大加速度		放大系数		最大加速度		放大系数	
		水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
0.15 g	—	0.19 g	0.08 g	1.27	—	0.45 g	0.10 g	3.00	—
0.20 g	0.05 g	0.25 g	0.13 g	1.25	2.60	0.55 g	0.15 g	2.75	3.00
0.29 g	0.18 g	0.33 g	0.31 g	1.14	1.72	0.70 g	0.44 g	2.41	2.44
0.40 g	0.28 g	0.45 g	0.46 g	1.13	1.64	0.80 g	0.65 g	2.00	2.32
0.50 g	0.34 g	0.50 g	0.53 g	1.00	1.56	0.89 g	0.75 g	1.78	2.21
0.62 g	0.41 g	0.58 g	0.68 g	0.94	1.66	1.03 g	0.90 g	1.66	2.20
0.75 g	0.48 g	0.78 g	0.85 g	1.04	1.77	1.30 g	1.11 g	1.73	2.33
0.89 g	0.55 g	1.04 g	0.97 g	1.17	1.76	1.61 g	1.34 g	1.81	2.44

表 3 顺河向库空不同地震量级的加速度响应(数值计算)

输入 加速度		测点 A				测点 B			
		最大加速度		放大系数		最大加速度		放大系数	
		水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直	水平	垂直
0.20 g	0.05 g	0.28 g	0.15 g	1.40	3.00	0.56 g	0.17 g	2.80	3.40
0.40 g	0.28 g	0.53 g	0.47 g	1.33	1.68	0.87 g	0.68 g	2.18	2.43
0.75 g	0.48 g	0.88 g	0.85 g	1.17	1.77	1.38 g	1.15 g	1.84	2.40

表4 横河向库空振动台试验和数值计算的部分成果比较($A_L = 0.21 g$, $A_V = 0.14 g$)

桩号	高程/m	位置	方向	最大加速度		放大系数		最大位移/mm	
				试验	计算	试验	计算	试验	计算
0+234	2654.5	坝顶	竖向	0.31 g	0.33 g	2.21	2.36	0.14	0.15
			横河向	0.49 g	0.57 g	2.33	2.71	0.21	0.24
	2600.0	下游面	竖向	0.27 g	0.29 g	1.93	2.07	0.11	0.11
			横河向	0.41 g	0.47 g	1.95	2.24	0.21	0.23
	2560.0	下游面	竖向	0.28 g	0.31 g	2.00	2.21	0.15	0.17
			横河向	0.39 g	0.42 g	1.86	2.00	0.20	0.23
	2600.0	上游面	竖向	0.25 g	0.27 g	1.79	1.80	0.12	0.14
			横河向	0.43 g	0.47 g	2.05	2.24	0.20	0.22
	2560.0	上游面	竖向	0.22 g	0.22 g	1.57	1.57	0.16	0.18
			横河向	0.32 g	0.35 g	1.52	1.67	0.18	0.21
0+133	2654.5	坝顶	竖向	0.28 g	0.30 g	2.00	2.14	0.15	0.16
			横河向	0.45 g	0.52 g	2.14	2.48	0.20	0.24
0+323	2654.5	坝顶	竖向	0.29 g	0.32 g	2.07	2.30	0.14	0.16
			横河向	0.48 g	0.55 g	2.29	2.62	0.20	0.24

(竖向),可以看出,对冶勒堆石坝,顺河向与横河向的自振频率比较接近,所以,《水工建筑物抗震设计规范》^[1]中建议只进行顺河向和竖向的地震输入是值得进一步研究的。

e. 文献[1]中采用拟静力法进行土石坝抗震,计算地震惯性力时,对于不同的地震烈度,地震加速度分布系数 α_i 采用相同的图形,这样的假定也是值得深入探讨的。实际上,正如结论c所指出的,坝顶的加速度放大系数在弱震时大,而当地震量级不断增大时,坝顶的加速度放大系数则呈降低的趋势(坝体未破坏前)。

参考文献:

[1] SDJ10—78,水工建筑物抗震设计规范(试行)[S].

- [2] 《水工建筑物抗震设计规范》编制组. SDJ10—78 水工建筑物抗震设计规范(试行)编制说明[S]. 北京:电力工业出版社,1982.
- [3] 冀春楼. 深厚覆盖层上高堆石坝静动力分析方法的研究[D]. 南京:河海大学,1995.
- [4] 窦兴旺. 深覆盖层上高土石坝坝与地基静态相互作用研究[D]. 南京:河海大学,1999.
- [5] 窦兴旺,夏颂佑,许百立. 高土石坝与深覆盖层地基相互作用研究[J]. 河海大学学报,1999(水利水电工程专辑):12~16.
- [6] 左东启. 模型试验的理论和方法[M]. 北京:水利电力出版社,1984.
- [7] 顾淦臣. 土石坝地震工程[M]. 南京:河海大学出版社,1989.

(收稿日期:1999-03-26 编辑:熊水斌)

(上接第10页)

的同时,完善以国家投入为主,以信贷、财政、水费、群众投入为主体,以优惠政策吸引国内外投资相配套的多元化投入体制,使生态建设有大的发展。

c. 转变观念,创新机制,贯彻“谁治理谁受益”的政策,采取拍卖、股份承包、租赁及减征或免缴土地出让金等形式,鼓励整治集体所有林草地或“四荒地”。因地制宜、合理规划,从而,充分调动广大农民群众和生态环境建设的积极性。

d. 运用科学技术开展生态建设,树立科教兴水保的战略思想,调动科技人员的积极性,通过科技推广、培训等形式,提高生态建设效益,引进和推广适宜当地生长的苗木和草籽,推广干旱地区种植技术,加强质量管理,控制规模进度,稳步推进。

e. 加强水保执法队伍和法规体系建设,运用法律巩固水保治理和生态环境建设成果。

f. 坚决贯彻水保监督预防为主和谁造成水土

流失谁治理的原则,对造成新的水土流失的单位和个人限期治理,杜绝人为水土流失发生。

(收稿日期:2000-02-20 编辑:马敏峰)

