杨玉生,刘小生,赵剑明,等.高土石坝振动台模型试验理论、技术与应用[J].地震工程学报,2020,42(3):721-731.doi:10.3969/ j.issn.1000-0844.2020.03.721

YANG Yusheng,LIU Xiaosheng,ZHAO Jianming,et al.Theory, Technology, and Application of Shaking Table Model Tests of High Earth-Rockfill Dams[J].China Earthquake Engineering Journal,2020,42(3):721-731.doi:10.3969/j.issn.1000-0844. 2020.03.721

高土石坝振动台模型试验理论、技术与应用

杨玉生^{1,2},刘小生^{1,2},赵剑明^{1,2},刘启旺^{1,2},杨正权^{1,2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室(中国水利水电科学研究院),北京 100048;

2. 水利部水工程抗震与应急支持工程技术研究中心,北京 100048)

摘要:对土石坝振动台模型试验理论和技术进行系统阐述,提出基于原型和模型坝料静、动力特性 试验的模型相似设计方法和不同强度地震动递进输入(白噪声微振-设计地震-校核地震-破坏试验) 的振动试验方法。基于 1g 大型振动台和 ng 超重力离心机振动台设备性能现状,结合高土石坝的 结构特点和动力试验相似模拟要求,对土石坝振动台模型试验的优势及局限进行深入讨论。结合 已有的工程实践,对土石坝振动台模型试验在工程中的应用进行总结,并以某实际高面板堆石坝为 例研究面板坝生命周期内经历多次地震情况下结构动力特性的演化规律。

关键词:高土石坝;振动台模型试验;试验理论;试验技术;工程应用

中图分类号: TV641 **文献标志码:**A **文章编号:** 1000-0844(2020)03-0721-11 DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2020.03.721

Theory, Technology, and Application of Shaking Table Model Tests of High Earth-Rockfill Dams

YANG Yusheng^{1,2}, LIU Xiaosheng^{1,2}, ZHAO Jianming^{1,2}, LIU Qiwang^{1,2}, YANG Zhengquan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

2. Research Center of Earthquake Resistance and Emergency Support for Water Conservancy Projects, Beijing 100048, China)

Abstract: The theory and technology of shaking table model tests on earth-rockfill dams are systematically described and discussed. A model similarity design method based on static and dynamic characteristics tests of a prototypical model dam, and a vibration test method using input from ground motions of different intensities are proposed. Based on the performance parameters of a 1g large-scale shaking table and ng super-gravity centrifuge-shaking table equipment, advantages and disadvantages of shaking table model tests of earth-rockfill dams were analyzed. Combined with existing projects, the application of shaking table tests in earth-rock dam engineering was summarized. The evolution law of structural dynamic characteristics of a high concrete-faced rockfill dam under many strong earthquakes was studied.

收稿日期:2018-06-07

基金项目:国家重点研发计划课题(2017YFC0404905);国家自然科学基金项目(51679264)

第一作者简介:杨玉生(1980-),男,河南南阳人,博士,教高,主要从事土工抗震研究工作。E-mail:yangysh@iwhr.com。

Keywords: high earth-rockfill dam; shaking table model test; experimental theory; test technique; engineering application

0 引言

在科学研究中,通过对原型主要特征抽象的模型试验,可获得模型在试验条件下的反应特征和性能,进而在对模型试验结果判释的基础上,推测原型 结构的反应和性能。模型试验对工程科技的推动作 用已在近代诸多领域的科学研究中得到证实,其意 义也为国内外众多科研工作者所认可^[1-2]。

在坝工领域,土石坝设计至今仍然依赖于工程 类比,在实际经验案例基础上的工程判断在设计中 占有十分重要甚至是决定性的地位。但实际土石坝 震害资料很少,更缺乏以现代碾压施工方式填筑的 高土石坝强震震害资料和强震记录。这使得高土石 坝强震破坏机理研究、地震动力反应分析方法和本 构模式以及原型坝的抗震性能评价均无法得到有效 的验证。在高土石坝抗震设计和抗震安全评价上, 振动台模型试验的意义集中体现在地震破坏机理研 究、地震动力反应分析方法和本构模式改进和验证, 以及原型抗震性能评价和指导抗震设计等几个方 面,可以弥补由于高土石坝强震破坏实例和强震记 录的缺乏带来的相关研究制约。因此,历来受国内 外抗震研究工作者的重视。汪闻韶院士曾指出:"模 型实验和理论分析相互结合,相互检验和相互促进, 是促使土石坝抗震研究深入发展的必由之路"。自 1956 年 Clough 等^[3]首先开展土石坝振动台模型试 验以来,美国、日本和中国等都开展了相关研究。汪 闻韶等[4]、汤书明[5]先后对 20 世纪 80 年代末之前 国内外相关研究成果做过系统的介绍。"九五"期 间,刘小生等[6-7]结合黑泉水利枢纽混凝土面板堆石 坝对模型试验理论和技术做过深入的研究。2008 年汶川特大地震之后,部分学者[8-12]采用振动台模 型试验对高面板坝抗震性能和抗震加固措施,以及 地震堰塞坝动力特性、坝体破坏及溃决过程进行了 研究,取得了一些有价值的认识。经历半个多世纪 的发展,土石坝振动台模型试验理论和技术已取得 了显著进步:在试验设备上,从1g 振动台发展到ng 离心机振动台:在试验方法上,从小构件定性模型试 验发展到考虑相似律的相似模型试验方法和技术。

在规范层面上,《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047-2015)规定,设计烈度为 Ш度及以

上且高度超过 150 m 的甲类工程大坝,宜进行动力 模型试验。目前,在已有研究成果基础上,1g 下土 石坝振动台相似模型试验方法和技术已被纳入了 《水工建筑物抗震试验规程》(SL 539-2011)中。

在应用上,土石坝振动台模型试验已被较广泛 地应用于强震区高土石坝的抗震安全评价和抗震措 施比选,在高土石坝抗震设计中发挥了重要作用。 如国内的紫坪铺水利枢纽混凝土面板堆石坝^[8-9]震 后抗震安全复核和加固设计措施验证,双江口 (314 m)^[13-18]和两河口(295 m)^[19-22]心墙堆石坝抗 震安全评价、猴子岩(223.5 m)^[23-25]和玛尔挡 (211 m)^①面板堆石坝抗震安全评价等。

本文在近年来研究成果基础上,对土石坝振动 台模型试验理论和技术进行了系统阐述,在研究基 础上提出了基于原型和模型坝料静、动力特性试验 的模型相似设计方法和不同强度地震动递进输入 (白噪声微振-设计地震-校核地震-破坏试验)的振动 试验方法。基于1g大型振动台和ng超重力离心 机振动台设备性能现状,结合高土石坝的结构特点 和动力试验相似模拟要求,对土石坝振动台模型试 验的优势及局限及应用中存在的问题进行了探讨。 结合已有的工程实践,对土石坝振动台模型试验在 工程中的应用进行了总结,并以某实际高面板堆石 坝为例研究了面板坝生命周期内经历多次地震情况 下结构动力特性的演化规律。

1 高土石坝振动台模型试验相似律

相似律是高土石坝振动台模型试验理论的核 心。图1给出了通过相似律联系的模型与原型之间 的关系。相似律既规定了模型与原型之间相似必须 满足的条件,也规定了将模型试验数据和结果推算 到原型上的法则,它既是进行模型设计的基础,也是 模型能否较好地表征原型性能,进而指导实际工程 抗震设计的核心问题。

1.1 1g 高土石坝振动台模型试验相似律

根据相似理论第三定律^[1-2,26],原型坝和模型坝 动力相似的充分必要条件是这两个动力学物理过程

① 杨玉生,刘小生,刘启旺.玛尔挡水电站混凝土面板堆石坝 振动台模型试验研究.中国水利水电科学研究院,2013.

的单值性条件相似,使单值量组成的相似准则相等。 刘小生等^[4]从地震动力作用下原型土石坝与模型之 间满足包括几何条件、运动条件、物理条件、动力平 衡条件及边界条件等基本单值条件相似出发,推导 了土石坝振动台模型试验的相似律。



图 1 模型与原型之间的联系 Fig.1 Relationship between model and prototype

由于土石料的动、静模量和动、静强度不仅与其 本身颗粒矿物成分、颗粒级配、密度等有关,还与固 结应力状态、应力水平及应变水平等密切相关。模 型坝土体的应力状态、应力水平主要由自重及埋深 位置决定。在整个坝体的不同埋深和位置,土体有 不同的模量和强度。显然,在土石坝中,传统的忽略 重力影响的相似律不适用于土石坝振动台模型试 验。由于难以找到模量满足理想相似要求的材料, 理想模型相似律也不适用。

土石料的性质复杂,在重力场下,为了满足原型 坝与模型坝之间的相似条件,采用土石料进行振动 台模型试验时还需考虑土石料自身性质^{[7] ②③}。

(1) 摩尔-库仑定律。为使坝体破坏现象相似, 要求原型坝和模型坝土石料之间满足抗剪强度相似 条件。土石料抗剪强度 τ₁ 遵循摩尔 - 库仑定律:

$$\tau_{\rm f} = \sigma_0' \tan \varphi' + c' \tag{1}$$

式中: σ'_{0} 为平均有效应力; j'_{c} 分别为有效内摩擦 角和凝聚力。

(2) 土石坝的地震动力变形主要是地面垂直向 上传播的剪切波引起的。试验结果表明,在应变较 小时(如破坏之前),高、低应力状态下土石料的应力 应变关系存在相似性。在只考虑土石坝剪切变形 时,土石料的动剪应力应变关系可大致用对土体密 度和应力状态归一化曲线表示为^{②③}:

$$\frac{G}{G_{\max}} = f_1\left(\frac{\gamma}{\gamma_r}\right) \tag{2}$$

$$\boldsymbol{\xi} = f_2 \left(\frac{\boldsymbol{\gamma}}{\boldsymbol{\gamma}_r} \right) \tag{3}$$

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \tag{4}$$

$$G_{\max} = CP_{a} \left(\frac{\sigma'_{0}}{P_{a}}\right)^{n}$$
(5)

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_{\max}} \tag{6}$$

$$\tau_{\max} = \left\{ \left[\frac{1+k_0}{2} \sigma'_v \sin\varphi' + C \cos\varphi' \right] - \left[\frac{(1-k_0)}{2} \sigma'_v \right]^2 \right\} \frac{1}{2}$$
(7)

式中: G_{max} 为土体单元在小应变时的剪切模量,称为 最大剪切模量;C为与土体密度有关的无量纲系数; P_a 为大气压力, $P_a = 98$ kPa;n为无量纲指数;G为 对应剪应力 τ 和剪应变 γ 时的割线剪切模量; ξ 为剪 应变 γ 时的阻尼比; γ_r 参考剪应变; τ_{max} 为极限抗剪 强度。

进一步推导可得如表 1 所示的重力场下 1g 土 石坝振动台模型试验的相似律^[5]。由表 1 可见,应 变比尺 $C_{\epsilon} = C_{\rho}^{1/2} C_{\iota}^{1/2} C_{\epsilon}^{-1}$,而非理想相似律要求的 $C_{\epsilon} = 1$,由此将引起试验相似误差,且其随模型变形 增大而增大。在较小变形条件下, $C_{\epsilon} \neq 1$ 引起的相 似误差可以忽略,这在混凝土结构动力模型试验中 已经得到证明和广泛应用^{[27-28] ④⑤}。

1.2 离心机振动台模型试验相似律

20世纪90年代以来,土工离心机振动台模型 试验技术迅速发展起来,为研究岩土地震工程问题 提供了先进的研究手段和试验技术,一些研究者采 用离心振动模型试验对土石坝的抗震性能进行了研 究^[29-40]。

- ④ 水利水电科学研究院.二滩拱坝抗震性能的动力模型试验研究."七、五"国家科技攻关(17-2-2-3-6)研究报告.1991.
- ⑤ 水利水电科学研究院.清江隔河岩工程第二级垂直升船机 塔柱结构抗震试验研究报告.1992.

② 中国水利水电科学研究院.面板坝模型砂砾料低应力状态下的静、动力特性研究."九、五"国家科技攻关"面板坝大型振动台模型试验研究"(96-221-02-03-01)研究报告之一. 1998.

③ 中国水利水电科学研究院.黑泉水库混凝土面板堆石坝土 石料动力特性试验研究."九、五"国家科技攻关"面板坝大 型振动台模型试验研究"(96-221-02-03-01)研究报告之一. 1998.

Similitude of chalving table test for earth model of CEDD

⊼ I	囬伮坝恢初台工有科侯型诋驱怕似佯衣	

Tuble 1 Similation of Similaring tuble test for cardin model of CIRD					
符号	项目	1g 振动台	[非正式结果,仅供参考]		
L	尺寸	C_l	C_l		
ρ	密度	$C_{ ho}$	$C_{ ho}$		
g	加速度	$C_g = 1$	C_g		
C	模量系数	C_{c}	C_{c}		
σ	应力	$C_{\sigma} = C_{\rho}C_{l}$	$C = C_g C_\rho C_l$		
G	剪切模量	$C_G = C_1^{1/2} C_c C_{\rho}^{1/2}$	$C_{G} = C_{g}^{1/2} C_{1}^{1/2} C_{c} C_{\rho}^{1/2}$		
E	弹性模量	$C_E = C_1^{1/2} C_c C_{\rho}^{1/2}$	$C_E = C_g^{1/2} C_1^{1/2} C_c C_{\rho}^{1/2}$		
ε	应变	$C_{\varepsilon} = C_{\rho}^{1/2} C_{1}^{1/2} / C_{c}$	$C_{\varepsilon} = C_{g}^{1/2} C_{\rho}^{1/2} C_{1}^{1/2} / C_{c}$		
и	位移	$C_{u} = C_{\rho}^{1/2} C_{l}^{3/2} / C_{c}$	$C_u = C_g^{1/2} C_\rho^{1/2} C_l^{3/2} / C_c$		
ù	速度	$C_{\dot{u}} = C_{\rho}^{1/4} C_{l}^{3/4} / C_{c}^{1/2}$	$C_{\dot{u}} = C_g^{3/4} C_{\rho}^{1/4} C_l^{3/4} / C_c^{1/2}$		
Т	时间	$C_t = C_{\rho}^{1/4} C_l^{3/4} / C_c^{1/2}$	$C_{l} = C_{g}^{-1/4} C_{\rho}^{1/4} C_{l}^{3/4} / C_{c}^{1/2}$		
f	频率	$C_f = C_{\rho}^{-1/4} C_l^{-3/4} C_c^{1/2}$	$C_f = C_g^{1/4} C_{\rho}^{-1/4} C_l^{-3/4} C_c^{1/2}$		
Ę	土体阻尼比	$C_{\xi} = 1$	$C_{\xi} = 1$		
C'	土体有效凝聚力	$C_{c'} = C_{\rho}C_{l}$	$C_{c'} = C_g C_\rho C_l$		
ϕ'	土体有效摩擦系数	$C_{\phi'} = 1$	$C_{\phi'} = 1$		

离心机模型试验最重要的功能是通过向模型施 加离心惯性力,保证模型与原型中各对应点的应力 相同,从而达到用模型模拟原型,用模型试验性状预 测原型性状的目的。与大型振动台模型试验相似律 一样,定义离心机振动台模型试验中尺寸、密度和加 速度为控制量,其相似常数分别为 C_l、C_g、C_g。根 据力学平衡条件可知:

Table 1

$$C_s = C_l C_r C_g \tag{8}$$

理论上离心模型试验模型与原型的应力条件相 等,则在离心模型试验中,试验条件可选择如下:用 原型土料按照原型填筑密度制作模型,即*C_ρ*=1,再 根据模型尺寸和原型尺寸,确定模型几何比尺,即 把模型的几何尺寸缩小到原型的 1/*n*,把离心加速 度增大到重力加速度的*n*倍,以保证模型各点与原 型对应点应力相同。王年香等^[41]在对离心机振动 台模型试验相似律进行研究时,借鉴了刘小生等^[7] 建立大型振动台模型试验相似律的思路,引入式(2) 和(3)表示土石料模量和阻尼比与应力水平的关系, 进行相似变换,得到了原型和离心机振动台模型之 间的相似律(表 1)。

1g 大型振动台模型的加速度相似常数为 1.0, 在几何比尺相同的情况下,离心机振动台模型由于 离心惯性力的作用,模型的应力水平是常规振动台 应力水平的 C_g 倍。从理论上来说,离心机振动台 模型试验相似理论无疑是完备的,只要设备性能许 可,C_g 足够大,能够满足真正的相似模拟。

2 高土石坝振动台模型试验技术

在试验技术层面上,如何实现模型相似设计及

如何采用一个模型实现多重试验目的是模型试验的 关键问题。本节重点提出了基于原型和模型坝料 静、动力特性试验的模型相似设计方法和不同强度 地震动递进输入(白噪声微振-设计地震-校核地震-破坏试验)的振动试验方法。

2.1 模型相似设计

模型相似设计需要在原型坝料和模型坝料的静、动力特性试验基础上,结合振动台性能参数进行。首先确定几何相似常数 C_i 、密度相似常数 C_ρ 和加速度相似常数 C_g 三个控制量,以及模量系数相似常数 C_c ,具体可以按照以下步骤进行。

(1)根据振动台的性能参数,确定模型坝高,结合原型坝设计尺寸,按式(9)确定模型的几何相似常数 C₁。

$$C_l = H_p / H_m \tag{9}$$

式中:H_p为原型坝高度,m;H_m为模型设计高度, m。

(2) 由摩擦角相似常数 $C_{\phi'} = 1$,确定密度相似常数 C_{ρ} 。

 ① 对原型筑坝土石料进行原型应力状态、设计 干密度条件下的三轴压缩试验,确定原型筑坝土石 料在设计干密度条件下的摩擦角 φ'_p;

② 对缩尺后的模型坝筑坝材料进行低应力状态、不同干密度下的三轴压缩试验,确定不同填筑干密度下模型筑坝材料的摩擦角。/"。

③ 摩擦角相似常数按照下式确定

C

$$_{\phi'} = \phi'_{\rm p} / \phi'_{\rm m} \tag{10}$$

式中:¢'_为原型坝料有效内摩擦角;¢'_~模型坝料有 效内摩擦角。根据原型坝料和模型坝料三轴剪切试 验结果,按照摩擦角相似常数 $C_{s'} = 1$ 的要求,选定 估计的模型坝围压范围内能够满足摩擦角相似常数 $C_{s'} = 1$ 的模型坝填筑密度 ρ_{m}

④ 按照下式确定密度相似常数 C_ρ;

$$C_{\rho} = \rho_{\rm p} / \rho_{\rm m} \tag{11}$$

式中: ρ_p和 ρ_m分别为原型和模型设计干密度。

(3)确定加速度相似常数,按照表1相似关系 确定加速度相似常数 C_g 。对于1g振动模型试验, $C_g = 1.0;$ 对于ng离心机振动模型试验,按照式(12) 确定 C_g 。

$$C_{\rho} = g_{\rm p} / g_{\rm m} \tag{12}$$

式中:g,为原型加速度;g,为模型加速度。

(4) 在原型土石料和模型土石料动力变形特性 试验的基础上,确定模量系数相似常数 C_c。

 ① 对原型筑坝土石料,进行原型应力状态、设 计干密度条件下的动力变形特性试验,确定如式
 (13) 所示的最大动剪模量的压力效应关系。

$$G_{\max} = C_{p} p_{a} \left(\frac{\sigma'_{0}}{p_{a}} \right)^{n_{p}}$$
(13)

式中: G_{max} 为最大剪切模量,即土体单元在小应变时 的剪切模量; C_p 为与原型坝土石料设计干密度有关 的动剪模量系数; p_a 为大气压力,为98 kPa; σ_0 为平 均有效应力; n_b 为无量纲指数;

② 对缩尺后的模型坝筑坝材料,进行低应力状态、模型填筑干密度下的动力变形特性试验,确定如式(14)所示的最大动剪模量的压力效应关系。

$$G_{\max} = C_{\max} p_{a} \left(\frac{\sigma'_{0}}{p_{a}} \right)^{n_{\max}}$$
(14)

式中:C_m为与原型坝土石料设计干密度有关的动剪 模量系数;n_m为无量纲指数。

③ 按照式(15) 确定模量系数相似常数 Cc;

$$C_c = C_p / C_m \tag{15}$$

(5) 按照相似律确定时间相似常数*C*_{*i*}, ,对设计 地震波进行压缩,获得满足试验相似要求的具有特 定频谱特性的输入地震波。

(6) 根据相似常数的基本控制量 $C_l \, \langle C_{s'} \, \langle C_{g} \rangle$, 以及模量相似常数 C_c ,确定其余相似常数。

2.2 测试项目

土石坝振动台模型试验中,基本测试项目包括 以下几个方面:(1)确定坝体和地基系统结构动力特 性(包括自振频率、阻尼比和振型等动力特性)的测 试;(2)坝体加速度反应测试;(3)坝体沉陷和滑坡深 度的测试;(4)坝体地震反应和破坏过程观察。对于 混凝土面板堆石坝,除基本测试项目外,还需进行面 板的应变和应力测试,以及面板位移量测。对于沥 青混凝土心墙坝,还需进行混凝土心墙的应变和应 力测试,以及混凝土心墙的位移测试。

2.3 测试仪器布置

根据测试的项目,布置的测试仪器包括加速度 传感器、应变片(花)、位移测点(或光纤光栅位移传 感器)等,还可布置摄像仪以观察坝体反应和破坏过 程。测试仪器的布置可视具体情况而定,通常以河 谷最大坝高断面作为测试控制断面,还可沿坝轴线 在各控制断面处布置相应的测试仪器。如可在最大 坝高断面布置加速度传感器,其指向以顺河水平向 为主,少量指向坝轴线水平方向或垂直方向。

2.4 试验方法

根据试验关注重点的差异,土石坝振动台模型 试验包括以下几种:① 测定土石坝动力特性的微振 试验;② 测定土石坝动力反应性状的试验;③ 土石 坝地震破坏试验。土石坝振动台模型试验费用较 高,在一次试验中应尽可能充分的测得全面的信息。 在试验时,由于这几种试验输入地震波峰值处于不 同的水准,可从微震测定动力特性开始,再输入不同 幅值的地震波测量土石坝地震动力反应性状,最后 进行地震破坏试验。此外,可以考虑多种因素对大 坝地震响应的影响,如蓄水、地震波频谱特性、输入 方向(单向或多向输入)、振动历史等。

(1)对模型首先进行白噪声微震试验,测定模型坝的加速度反应频响函数,确定坝体和地基系统的自振频率、阻尼比和振型等结构动力特性参数。

(2)逐级进行预定的地震动输入振动试验,视情况对施加地震波振动后的模型进行白噪声微振试验,以测定经过地震后的模型动力特性变化情况。测定土石坝动力反应性状的试验包括:① 按场地设计反应谱构造地震波进行试验,或输入天然地震波进行试验;② 输入压缩场地地震波或压缩天然地震波进行试验。可获得土石坝的加速度反应和地震残余变形信息。

(3)进行地震破坏试验。土石坝地震破坏试验 通常采用压缩场地地震波或压缩天然地震波进行, 可获得土石坝地震破坏模式和残余变形信息。

在试验时,建议采用不同强度地震动递进输入 (白噪声微振-设计地震-校核地震-破坏试验)的振动 试验方法。测定动力特性的微振试验和测定地震动 力反应性状的试验通常是交替进行的,以测定经过 地震后的模型动力特性的变化情况,进而判断地震 对模型的损伤程度。为了消除先期振动对模型的影 响,各种地震波的输入可相互穿插进行;土石坝的地 震破坏试验通常放在最后进行。试验采用的压缩地 震波是通过对地震波原波按照时间相似常数进行压 缩得到的;输入地震波的方向可根据具体情况选择 单向、双向或多向输入。

3 高土石坝振动台模型试验优势及局限

高土石坝有其自身的结构特点,动力模型试验 也有相似模拟等方面的要求,而 1g 大型振动台和 ng 离心机振动台设备在台面尺寸、载重能力、频率 范围、最大加速度等性能方面各有特定的范围限制。 在试验测试时,高土石坝的结构特点、动力试验对相 似模拟的要求以及振动台设备性能参数三个方面综 合决定了 1g 大型振动台和 ng 离心机振动台模型 试验各有其优势和局限。

3.1 1g 振动台模型试验

目前,国内的 1g 振动台台面尺寸为 3 m×3 m ~6 m×6 m,载重量为 10~80 t。工作频率范围大 多在 0.1~50 Hz。以中国水利水电科学研究院 (IWHR)振动台为例进行说明。

从台面尺寸来看,IWHR 振动台台面尺寸为 5 m×5 m。对于 100 m 级至 300 m 级的高土石坝, 考虑原型坝高和上下游方向的尺寸,按照几何比尺 缩尺之后的模型坝坝高大致为 1.0~1.5 m,坝轴线 和上下游方向的长度可接近 5 m,这使得 1g 振动台 模型尺寸较大,模型材料经过缩尺依然能大体保持 原型材料的基本土性和力学特征,且能够大体模拟 土石坝结构分区。

从载重量来看,IWHR 振动台载重 20 t。模型 坝重量大致为 6~16 t,其载重量满足要求。

从工作频率来看,IWHR 振动台工作频率为0.1 ~120 Hz。高土石坝自振频率为1.0~2.0 Hz,按照 相似比尺制作模型坝,其自振频率约20~60 Hz。 振动台频率测试频段满足模型坝自振频率测试的要 求。实际地震波卓越频段范围大多为3~5 Hz(更 宽可为2~10 Hz),按相似比 C,压缩后,其卓越频 率大多也处于 IWHR 振动台工作频率(0.1~120 Hz)范围以内,因此基本能满足对地震波压缩的要 求,能够对100 m 以上高坝开展研究。

从加速度来看,IWHR 振动台加速度两个水平 方向的最大加速度达 1.0g,竖直向最大加速度为 0.7g,高土石坝的极限抗震能力大多为 0.5g~ 0.6g^[41-42],可满足开展土石坝地震破坏试验的要求。

因此,1g 大型振动台模型试验台面尺寸和载重

量较大,频段范围较宽,考虑筑坝土石料性质建立的 相似律,能使土石坝振动台模型试验基本满足相似 设计的要求。模型坝坝高可达 1.0~1.5 m,能模拟 坝体结构,筑坝材料缩尺后也能基本保持其土性特 征。对测试技术要求较低,各项测试要求和手段便 于实现。试验结果在结构动力特性测试和加速度反 应上的定量结果与以往地震观测和数值模拟结果有 较好的可比性^[16],破坏特征也能较好地反映实际震 害特点^[17,19-20]。但毋庸讳言,1g 下土石坝振动台模 型试验不能完全满足相似律要求,已有相似律精度 和适用范围尚待继续深入研究和探讨。

3.2 ng 离心机振动台模型试验

土工离心机振动台模型试验技术能提供超重力 环境,使模型与原型的应力应变相等、变形相似、破 坏机理相同,较好地克服了普通振动台模型试验无 法合理模拟原型土体的静动应力应变场的缺陷。因 此,在再现土质构筑物、土质边坡及地基的动力响 应、观测物理机制、揭示客观规律、验证理论模型、检 验评价方法、甚至在对比设计方案等方面有突出的 优越性^[43]。

近年来,世界上拥有离心机振动台的研究机构 迅速增多,日本有15台,欧美国家有近10台,国内 部分高校和研究院所也建置了离心机振动台[44]。 从离心机振动台设备性能上来说,国内外大部分离 心机振动台都是单向水平振动,少数是双向水平振 动或水平和垂直双向振动。离心机运转加速度大多 在 50g~100g,真正能达到的安全运转加速度大多 在 50g~80g,最大振动频率为 100~500 Hz,最大 负载大多为 35~400 kg,国内最大已达 1 200 kg,国 外个别能达到 2 700~3 000 kg。IWHR 土工离心 机振动台能实现水平和垂直双向振动,动力试验离 心机运转加速度 120g,水平、垂直最大振动加速度 分别为 30g 和 20g,最大振动频率为 400 Hz,最大 负载 400 kg。从动力试验离心机运转加速度、模型 箱容纳能力和负载能力等设备性能来看,离心机振 动台难以进行原型高土石坝的地震响应模拟,仅能 对一般的土工结构,比如堤防或者 20~30 m 以内 的低坝进行原型地震响应模拟。

从目前已开展的土石坝离心机振动台模型试验 来看,土石坝模型或地基模型的尺寸大多仅为17~ 40 cm,宽度一般仅为20 cm 左右,模拟的最大坝高 (或地基厚度)不超过20~30 m,模型材料多是细粒 土或砂。

在土石坝离心模拟试验技术上也存在一系列需

要解决的疑难问题。如原型高土石坝体积庞大,缩 尺后模型坝通常不超过40 cm,难以进行细部结构 模拟,且模型边界效应的影响也不容忽视。此外,筑 坝堆石料最大粒径达到几十厘米甚至更大,由于模 型的尺寸小,模型级配缩尺最大控制粒径很小,可能 导致土性发生变化,这种缩尺对土石料性质的影响 的评估也是需要研究的难题。

由于土石坝工程问题依然是一个半经验的、实 践导向很强的学科,在研究中,理论的完备性无疑是 应重视的,但是由于坝工目前的发展水平,设备自身 承载性能和容纳能力的限制,在解决工程问题上依 然有很多问题需要在研究中进一步解决。在采用土 石坝振动台模型试验研究土石坝的抗震性能时,应 辩证地看待离心机振动台模型试验和 1g 下的土石 坝振动台模型试验的作用,对其优缺点应有明确的 认识,既不能对设备抱有不切实际的期望,也不能顾 此失彼,在认识上只计其一点不计其余,在方法论上 做到一叶知秋而避免管中窥豹。惟其如此,才能更 好地利用振动台模型试验为开展国内外高土石坝工 程抗震研究和评价提供基础研究平台支持,推进高 土石坝抗震科研工作。

4 高土石坝振动台模型试验的应用

振动台模型试验已广泛应用于高土石坝地震破 坏机理和抗震措施作用机理研究、地震动力反应分 析方法和本构模式验证以及抗震措施有效性验证等 方面。尤其是在对模型坝地震动力响应性状和特征 判释的基础上,可推算在实际地震作用下原型坝的 地震动力响应性状,揭示原型高土石坝的抗震薄弱 部位和破坏模式,为抗震安全评价提供依据,进而指 导高土石坝的抗震设计。

强震区的重要高土石坝在对其进行抗震安全评价和抗震措施有效性验证时,土石坝振动台模型试验是不可或缺的一环。建议在基于原型筑坝材料动力特性试验基础上的地震动力反应分析、考虑相似律的土石坝振动台模型试验、国内外高土石坝震害经验等基础上,参考采用图2所示的模型与原型相结合,震害经验、物理模拟、数值模拟相结合的综合评价方法。

近年来,高土石坝振动台模型试验已在大西沟、 猴子岩、双江口、两河口、猴子岩、紫坪铺、乌拉泊、玛 尔挡、黑泉、MSHS等西部强震区和国外高土石坝 抗震性能的研究、评价和抗震措施有效性验证等方 面得到应用。西部正在建设的 200 m 级高面板堆 石坝,包括玉龙喀什、卡拉贝利、大石峡、阿尔塔什等 面板堆石坝等也已开展了振动台模型试验工作。下 文结合某实际面板坝工程,给出高土石坝振动台模 型试验的应用实例。



图 2 原型-模型-数值分析相结合的高土石坝 抗震安全评价示意图

Fig.2 Seismic safety assessment of high earth rockfill dams based on prototype-mode-numerical analysis

某高面板堆石坝坝高 211 m,坝址地震基本烈 度为WI度,设防烈度为WI度。由于坝址区位于地震 活动频繁的地区,在其生命周期内可能多次遭遇强 震。经历过强烈地震影响的大坝,在未来再次遭遇 强震时的地震响应和抗震安全性是需要关注的问 题。面板堆石坝的地震响应和破坏程度主要取决于 地震波幅值、频率和振动持续时间等频谱特征与堆 石坝自身的固有频率和阻尼比等结构动力特性。但 以往的研究对此涉及较少,本文通过大型振动台模 型试验,研究振动历史对面板堆石坝结构动力特性 的影响规律,阐明面板坝生命周期内经历多次强烈 地震作用时其结构动力特性的演化规律,为强震区 高面板坝抗震设计和安全评价提供参考。

限于篇幅,本文仅给出坝段模型空库和满库条 件下,经历不同强度地震波作用后一阶自振频率和 阻尼比的变化情况(图 3 和图 4)。

由图 3 可知,空库时,经受输入峰值加速度为 0.311g的地震动作用后,坝段模型自振频率由初始 值明显降低,阻尼比明显增大。之后在工况 5~工 况 12 之间,由于经受的地震动强度未超出之前的地 震动强度,坝段模型自振频率和阻尼比虽有变化但 仅是小幅度波动,体现了坝体填筑料之间结构的重 新调整。在工况 12 之后,坝段模型经受最大输入峰 值加速度为 0.384g 的 x 、z 双向压缩场地地震波的 作用,自振频率明显减小,阻尼比明显增大。之后在 经受最大输入峰值加速度为 0.356g 的 x、y、z 三向 压缩场地地震波作用下,坝段模型的自振频率进-步减小,阻尼比进一步增大。





Fig.3 The variations of the natural frequency and damping ratio during the experiment under empty reservior





Fig.4 The variations of the natural frequency and damping ratio during the experiment under full reservior

由图 4 可知,满库时,在经受输入峰值加速度为 0.294g 的地震动作用后,坝段模型自振频率由初始 值明显降低,阻尼比明显增大。之后在工况 5~工 况 12 之间,由于经受的地震动强度未超出之前的地 震动强度,坝段模型自振频率明显趋于增大,阻尼比 明显趋于减小,这与蓄水前相应工况下坝段模型自 振频率和阻尼比的变化情况有所不同,体现了蓄水 情况下坝体遭受地震动时蓄水对坝体地震反应的影 响。在工况 12 之后,坝段模型经受最大输入峰值加 速度为 0.379g 的 x z 双向压缩场地地震波的作 用,自振频率减小,阻尼比增大。工况14之后,坝段 模型经受了最大输入峰值加速度为 0.345g 的 x 、y 、 z 三向压缩场地地震波的作用,但由于地震动强度 未超出之前经受的地震动强度 0.379g,且由于水压 力通过面板对坝体的作用,大坝自振频率有一定增 大,阻尼比有一定减小。此后,坝段模型经受最大输 入峰值加速度为 0.827g 的压缩场地地震波的较长 时间的振动作用,坝段模型自振频率明显降低,阻尼 比明显增大。

总的来看,试验过程中坝体自振频率和阻尼比 的变化与相应的地震动作用有着较好的对应关系。 当坝体初次经受较强烈的地震动作用后,坝体自振 频率明显降低,阻尼比明显增大;当后期经受的地震 动作用强度不超过前期地震动作用强度时,坝体自 振频率和阻尼比通常只是较小幅度的波动,不再引 起自振频率的明显降低和阻尼比的明显增大;当后 期地震动强度超过前期坝体经受的地震动强度时, 坝体自振频率会进一步降低,阻尼比会进一步增大; 自振频率降低和阻尼比增大的幅度与经受的地震动 强度直接相关,与振动时间也有一定关系,尤其是当 坝体经受较长时间的强烈地震动发生严重破坏时, 坝体自振频率将急剧降低,阻尼比将急剧增大。蓄 水对地震动作用下的坝体自振特性和地震反应有一定的影响,在不超过前期震动的小幅度地震动作用下,模型坝满库时的自振频率会有所增大,阻尼比会有所降低,体现了地震动作用下在水压力通过面板 对坝体作用下坝体结构刚度的调整。

5 结语

已有的研究表明,1g下的大型振动台模型试验 在高土石坝破坏机理研究、结构动力特性研究、地震 加速度反应研究、破坏模式研究方面均有良好的效 果。采用 1g 下的振动台模型试验获得的大坝结构 动力特性、地震加速度反应特性在定性和定量上均 与地震观测和数值模拟结果有较好的一致性。此 外,在极限抗震能力[41-42]研究方面,1g下大型振动 台模型试验结果也较好地反映了大坝从破损到破坏 的整个过程。因此,在现有的设备和技术水平下, 1g 大型振动台模型试验仍将在高土石坝抗震研究 和评价中发挥重要作用。但 1g 下土石坝振动台模 型试验不能完全满足相似律要求,已提出并较为广 泛的应用于土工结构(如地基、边坡和堤防等)振动 台模型试验的相似律精度和适用范围有待进一步继 续深入研究和探讨。此外,在模型模拟和测试技术 上也需要进一步提高其精确度。

从理论的完备性上来看,采用离心机振动台模 型试验研究高土石坝的抗震性能更有优势。目前由 于设备性能的限制,还不能直接模拟高坝的地震响 应,现有试验技术也存在一些未能很好解决的难题。 因此,在现有设备能力和技术水平下,如何采用离心 机振动台更好地服务于高土石坝工程建设是需要科 研工作人员思考的问题。

在未来发展上,土石坝振动台试验设备逐步向 大型化和台震化发展。如中国水科院正在建设的 1g 大型振动台台面尺寸 6.0 m×8.0 m,载重达 150 t,最大振动加速度达 2.0g。正在建设的1 000 g-ton 的离心机振动台,其最大加速度为 350g 时, 对应最大负载为2 500 kg;最大加速度为为 200g 时,对应最大负载为5 000 kg;试验吊篮尺寸为 2.0 m×1.5 m×2.0 m。设备向大型化发展和设备性能 的提升将为高土石坝的抗震研究提供更先进的试验 平台。尤其是由于离心模拟相似理论的完备性、离 心机振动台模型试验在土石坝抗震研究和抗震安全 评价方面必将发挥更大的作用。

参考文献(References)

[1] 左东启.模型试验的理论和方法[M].北京:水利电力出版社, 1984.

ZUO Dongqi.Theory and Method of Model Test[M].Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 1984.

[2] 霍斯多尔夫 H,著.徐正忠,译.结构模型分析[M].北京:中国建 筑工业出版社,1986

HOSDORF H. Structural Model Analysis [M]. Translated by XU Zhengzhong.Beijing:China Architecture & Building Press, 1986.

- [3] CLOUGH R W, PIRTZ D. Earthquake Resistance of Rock-fill Dams[J].Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1956,82(2):1-26.
- [4] 汪闻韶,金崇磐,王克成.土石坝的抗震计算和模型实验及原型 观测[J].水利学报,1987,18(12):1-16.
 WANG Wenshao,JIN Chongpan,WANG Kecheng.Aseismatic Calculation,Model and Prototype Experiments and Field Monitoring of Earth-Rock Dams[J].Journal of Hydraulic Engineering,1987,18(12):1-16.
- [5] 汤书明.土石坝抗震模型试验述评[J].河海科技进展,1992,12(1):47-55.

TANG Shuming. TANG Shuming. Review on Aseismic Model Tests of Rockfill Dam[J]. Advances in Science and Technology of Hohai University, 1992, 12(1):47-55.

- [6] 刘小生,王钟宁,赵剑明,等.面板堆石坝振动模型试验及动力 分析研究[J].水利学报,2002,33(2):29-35. LIU Xiaosheng,WANG Zhongning,ZHAO Jianming,et al.Advancement of Technology on Shaking Table Model Test Anddynamic Analysis of CFRD[J].Journal of Hydraulic Engineering,2002,33(2):29-35.
- [7] 刘小生,王钟宁,汪小刚,等.面板坝大型振动台模型试验与动力分析[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
 LIU Xiaosheng, WANG Zhongning, WANG Xiaogang, et al.
 Large-scale Model Test on and Dynamic Analysis of Concrete Face Rockfill Dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.
- [8] 周国斌,刘小生,赵剑明,等.紫坪铺面板坝加速度地震反应振动台模型试验研究[J].土木工程学报,2012,45(增刊1):20-24.DOI:10.15951/j.tmgcxb.2012.s1.017. ZHOU Guobin, LIU Xiaosheng, ZHAO Jianming, et al. The Shaking Table Model Test Study on Acceleration Seismic Response of Zipingpu CFRD[J].China Civil Engineering Journal, 2012,45(Supp1):20-24.
- [9] 杨正权,赵剑明,刘小生,等,紫坪铺大坝下游坝坡震后抗震加 固措施大型振动台模型试验研究[J].岩土工程学报,2015,37 (11):2058-2066.

YANG Zhengquan, ZHAO Jianming, LIU Xiaosheng, et al. Large-Scale Shaking Model Tests on Anti-Seismic and Reinforcing Measures for Slope of Zipingpu Earth-Rock Fill Dam after "5.12" Wenchuan Earthquake[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering.2015.37(11):2058-2066.

- [10] LIU J,LIU F H,KONG X J,et al.Large-Scale Shaking Table Model Tests of Aseismic Measures for Concrete Faced Rock-Fill Dams[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2014,61-62;152-163.
- [11] LIU J, LIU F, KONG X, et al. Large-scale Shaking Table Model Tests on Seismically Induced Failure of Concrete-Faced Rockfill Dams[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2016, 82:11-23.
- [12] 孔宪京,刘福海,刘君.地震作用下面板堆石坝面板错台模型 试验研究[J].岩土工程学报,2012,34(2):258-267.
 KONG Xianjing, LIU Fuhai, LIU Jun. Shaking Table Model Tests on Face-slab Dislocation of Concrete Faced Rock-fill Dams under Earthquakes[J].Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2012, 34(2):258-267.
- [13] 刘启旺,刘小生,陈宁,等.双江口心墙堆石坝振动台模型试验 研究[J].水力发电学报,2009,28(5):114-120.
 LIU Qiwang,LIU Xiaosheng,CHEN Ning,et al.Shaking Table Model Tests of Shuangjiangkou Core Rock-Fill Dam[J].
 Journal of Hydroelectric Engineering,2009,28(5):114-120.
- [14] 杨玉生,刘小生,刘启旺,等.双江口心墙堆石坝地震加速度反应的振动台模型试验研究[J].水力发电学报,2011,30(1): 120-125.

YANG Yusheng, LIU Xiaosheng, LIU Qiwang, et al. Shaking Table Model Tests on Seismic Acceleration Response of Shuangjiangkou High Earth-Rockfill Dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1):120-125.

- [15] 杨玉生,刘小生,刘启旺,等.双江口心墙堆石坝动力特性的振动台模型试验研究[J].水力发电学报,2011,30(1):114-119. YANG Yusheng,LIU Xiaosheng,LIU Qiwang,et al.Shaking Table Model Tests on Dynamic Characteristics of Shuangjiangkou High Earth-Rockfill Dam[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2011,30(1):114-119.
- [16] 袁林娟,刘小生,汪小刚,等.双江口心墙堆石坝三维动力分析 及模型试验验证[J].水力发电学报,2012,31(5):198-202. YUAN Linjuan,LIU Xiaosheng, WANG Xiaogang, et al. 3D Dynamic Analysis and Shaking Table Tests Verification of Shuangjiangkou Core Rock-Fill Dam[J].Journal of Hydroelectric Engineering,2012,31(5):198-202.
- [17] 刘启旺,刘小生,陈宁,等.高心墙堆石坝地震残余变形和破坏 模式的试验研究[J].水力发电,2009,35(5):60-62,89.
 LIU Qiwang,LIU Xiaosheng,CHEN Ning,et al.Shaking Table Model Tests on Seismic Residual Deformation and Damage Pattern of Shuangjiangkou High Earth-Rockfill Dam[J].
 Water Power,2009,35(5):60-62,89.
- [18] YUAN L J,LIU X S,WANG X G,et al.Seismic Performance of Earth-Core and Concrete-Faced Rock-Fill Dams by Large-Scale Shaking Table Tests[J].Soil Dynamics and Earthquake

Engineering, 2014, 56:1-12.

- [19] 杨正权,刘小生,刘启旺,等.两河口高土石坝动力特性振动台 模型试验研究[J].水利学报,2011,42(10):1226-1233. YANG Zhengquan,LIU Xiaosheng,LIU Qiwang,et al.Study on Shaking Table Model Tests for Dynamic Characteristic Analysis of the Lianghekou High Rock-Fill Dam[J].Journal of Hydraulic Engineering,2011,42(10):1226-1233.
- [20] 杨正权,刘小生,陈宁,等.地震作用下的两河口高土石坝地震 残余变形和破坏振动台模型试验研究[J].水力发电学报, 2011,30(3):152-157.

YANG Zhengquan, LIU Xiaosheng, CHEN Ning, et al. Study on Shaking Table Model Tests of Seismic Residual Deformation and Failure for Lianghekou High Rock-Fill Dam[J].Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(3);152-157.

[21] 陈宁,杨正权,袁林娟,等.两河口水电站高土石坝地震反应地 震模拟振动台模型试验研究[J].水利水电技术,2010,41 (10):80-86.D

CHEN Ning, YANG Zhengquan, YUAN Linjuan, et al. Model Test Study on Dynamic Response from High Earth-Rock Fill Dam of Lianghekou Hydropower Station with Shaking Table for Seismic Simulation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2010, 41(10): 80-86.

- [22] 杨正权,刘小生,汪小刚,等.高土石坝地震动力反应特性大型 振动台模型试验研究[J].水利学报,2014,45(11):1361-1372.
 YANG Zhengquan,LIU Xiaosheng, WANG Xiaogang, et al. Study on Dynamic Response Characteristics of High Rock-Fill Dam in Earthquake by Large-Scale Shaking Table Model Tests[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(11): 1361-1372.
- [23] 杨正权,刘小生,刘启旺,等.猴子岩高面板堆石坝地震模拟振动台模型试验研究[J].地震工程与工程振动,2010,30(5): 113-119.

YANG Zhengquan,LIU Xiaosheng,LIU Qiwang,et al.Study on Shaking Table Model Tests for Houziyan High Concrete Faced Rock-Fill Dam[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2010,30(5):113-119.

[24] 刘小生,杨正权,刘启旺,等.猴子岩高面板坝振动台模型试验:大坝结构动力特性研究[J].世界地震工程,2010,26(4): 121-127.

> LIU Xiaosheng, YANG Zhengquan, LIU Qiwang, et al. Study on Shaking Table Model Tests for Dynamic Characteristics of Houziyan High Concrete Face Rock-Fill Dam [J]. World EarthquakeEngineering, 2010, 26(4):121-127.

[25] 杨正权,刘小生,刘启旺,等.高面板堆石坝地震反应和破坏振动台模型试验研究[J].振动工程学报,2015,28(6):937-945.. YANG Zhengquan,LIU Xiaosheng,LIU Qiwang,et al.Study on Shaking Table Model Tests for Dynamic Response and Failure of High Concrete Face Rock-Fill Dam[J].Journal of Vibration Engineering,2015,28(6):937-945.

[26] 李德寅,王邦楣,林亚超.结构模型实验[M].北京:科学出版

社,1996.

LI Deyin, WANG Bangmei, LIN Yachao, Stractural Model Experiment[M]. Beijing: Science Press, 1996.

[27] 周晶、林皋、王承伦.双曲拱坝的地震破坏模型试验[C]//第三 届全国地震工程会议论文集.大连:大连理工大学出版社, 1990:10.

> ZHOU Jing, LIN Gao, WANG Chenglun. Seismic Rupture Model Test of Double Culvature Arch Dam[C]// Proceeding of Third China Symposia on Earthquake Engineering. Dalian. Dalian University of Technology Press, 1990:10.

- [28] 王承伦、周晶,拱坝动力破坏模型的设计研制[C].//第三届全国地震工程会议论文集(Ⅲ),大连,1990.10.
 WANG Chenglun, ZHOU Jing. Design and Development of Dynamic Rupture Model of Arch Dam[C]// Proceeding of Third China Symposia on Earthquake Engineering. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1990; 10.
- [29] GE L, BAO Y, NI C K, et al. Seismic Centrifuge Modelling of Earth Dams[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2010, 5 (4):247-257.
- [30] YANG Z H, ELGAMAL A, ADALIER K, et al. Earth Dam on Liquefiable Foundation and Remediation. Numerical Simulation of Centrifuge Experiments[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(10): 1168-1176.
- [31] ARULANANDAN K, SEED H B, YOGACHANDRAN C, et al.Centrifuge Study on Volume Changes and Dynamic Stability of Earth Dams[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993,119(11):1717-1731.
- [32] KIM M K, LEE S H, CHOO Y W, et al.Seismic Behaviors of Earth-Core and Concrete-Faced Rock-Fill Dams by Dynamic Centrifuge Tests[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, 31(11):1579-1593.
- [33] PEIRIS L M N, MADABHUSHI S P G, SCHOFIELD A N. Centrifuge Modeling of Rock-Fill Embankments on Deep Loose Saturated Sand Deposits Subjected to Earthquakes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008,134(9):1364-1374.
- [34] KIM N R,LIM J Y,IM E S.A Study on Geotechnical Centrifuge Testing Method for Seismic Performance Evaluation of Large Embankment Dams[J].Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea,2016,20(4):201-209.
- [35] WANG L P, ZHANG G, ZHANG J M. Centrifuge Model Tests of Geotextile-Reinforced Soil Embankments during an Earthquake[J].Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(3): 222-232.
- [36] 程嵩,张建民.面板堆石坝的动力离心模型试验研究[J].地震 工程与工程振动,2011,31(2):98-102.

CHENG Song, ZHANG Jianmin. Dynamic Centrifuge Model Test on Concrete-Faced Rockfill Dam[J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(2): 98-102.

- [37] 王年香,章为民.混凝土面板堆石坝动态离心模型试验研究
 [J].岩土工程学报,2003,25(4):504-507.
 WANG Nianxiang, ZHANG Weimin. Dynamic Centrifuge Model Test for Concrete Face Rock Fill Dam [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2003,25(4):504-507.
- [38] 王年香,章为民.新疆吉林台混凝土面板堆石坝离心模型试验 研究[C]//中国水利学会首届青年科技论坛论文集.深圳, 2003:363-367.

WANG Nianxiang, ZHANG Weimin. Centrifugal Model Test on Concrete Faced Rockfill Dam in Jilintai, Xinjiang [C]// Proceeding of the First Youth Science and Technology Forum of Chinese Hydraulic Engineering Society. Shenzhen, 2003: 363-367.

- [39] 王年香,章为民,顾行文,等.长河坝动力离心模型试验研究
 [J].水力发电,2009,35(5):67-70.
 WANG Nianxiang,ZHANG Weimin,GU Xingwen, et al. Dynamic Centrifuge Model Test for Changhe Dam [J]. Water Power,2009,35(5):67-70.
- [40] 王年香,章为民.土工离心模型试验技术与应用[M].北京:中 国建筑工业出版社,2015.
 WANG Nianxiang, ZHANG Weimin. Technology and Application of Geotechnical Centrifugal Model Test[M]. Beijing: China Architecture & Building Press,2015.
- [41] 赵剑明,刘小生,杨玉生,等.高面板堆石坝抗震安全评价标准 与极限抗震能力研究[J].岩土工程学报,2015,37(12):2255-2263.

ZHAO Jianming, LIU Xiaosheng, YANG Yusheng, et al. Criteria for Seismic Safety Evaluation and Maximum Aseismic Capability of High Concrete Face Rockfill Dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37 (12): 2255-2263.

- [42] 赵剑明,刘小生,陈宁,等.高心墙堆石坝的极限抗震能力研究
 [J].水力发电学报,2009,28(5):97-102.
 ZHAO Jianming,LIU Xiaosheng,CHEN Ning,et al.Research on the Maximum Anti-Seismic Capability of High Earth Core Rock-Fill Dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009,28(5):97-102.
- [43] 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.
 ZHANG Jianmin, YU Yuzhen, PU Jialiu, et al. Development of a Shaking Table in Electro-Hydraulic Servo-Control Centrifuge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(6):843-845.
- [44] 侯瑜京,HOU Yu-jing,土工离心机振动台及其试验技术[J].
 中国水利水电科学研究院学报,2006,4(1):15-22.
 HOU Yujing, HOU Yujing. Centrifuge Shakers and Testing Technique[J].Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research,2006,4(1):15-22.