

DOI: 10.11779/CJGE201501001

土石坝试验新技术研究与应用

陈生水^{1, 2}

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024)

摘要: 研制的多功能静动力大型三轴试验系统是中国首台能够测量堆石料动态体变过程的大型三轴试验设备, 构建了国内外 70 多座重要高土石坝筑坝堆石料静动力学性质试验数据库, 揭示了静动荷载作用下堆石料的颗粒破碎规律及其影响因素、强度与剪胀(缩)非线性变化规律、地震残余变形发展规律、流变规律和饱和砂砾石料地震液化规律等。创建了高土石坝离心机振动台模型试验技术与试验结果分析方法, 成功应用于高面板堆石坝与心墙堆石坝地震破坏机理和抗震加固方案有效性验证, 得出的高土石坝地震加速度反应和地震残余变形定性与定量分布规律、高土石坝地震破坏机理结果得到了汶川地震后紫坪铺面板堆石坝和碧口心墙坝震害资料的证实。较好解决了目前高土石坝地面振动台模型试验与原型应力水平相差过大, 常规离心机振动台模型试验因模型箱尺寸和振动台功率限制无法进行与原型应力水平一致的模型试验的难题。创建了土石坝溃坝离心模型试验技术与试验结果分析方法; 研发了离心机大流量水流控制系统, 实现了水流在地面普通重力场和超重力场之间的平稳过渡; 研发了将模型布置和模型测量两部分有机融合为一的专用溃坝模型箱, 有效解决了管道流量计在坝体溃口流量变幅大和泥石流下无法正常工作的难题, 实现了土石坝溃坝全过程溃口洪水流量的测量。上述研究成果为进一步提升高土石坝灾害预测与防控水平提供了重要技术支撑。



关键词: 高土石坝; 破坏与溃决机理; 试验技术; 分析方法; 工程应用

中图分类号: TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)01-0001-28

作者简介: 陈生水(1962-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事土石坝试验技术、安全评价、灾害预测与防控方法的研究。E-mail: sschen@nhri.cn。

Experimental techniques for earth and rockfill dams and their applications

CHEN Sheng-shui^{1, 2}

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Key Laboratory of Earth-Rock Dam Failure Mechanism and Safety

Control Techniques, Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China)

Abstract: The multifunctional large-scale triaxial experimental system invented by the author and his research team in Nanjing Hydraulic Research Institute (NHRI) is the earliest one in China. It can dynamically capture the volumetric strain during cyclic loadings. Using this system, rockfill materials in more than 70 worldwide earth-rock dams are tested, and a fruitful database is established. On this basis, the particle breakage during static and dynamic loadings as well as the influencing factors, the nonlinear variation of the strength and dilatancy indexes, the evolution of residual strains during dynamic loadings, the creep behaviors of rockfill materials and the liquefaction properties of sand-gravel materials are extensively explored. For the investigation of dynamic responses of high earth-rock dams, experimental techniques for centrifugal shaking table tests and the corresponding method for result interpretation are proposed and successfully applied in studying the failure mechanism of earth-core rockfill dams (ECRD) and concrete face rockfill dams (CFRD), and in verifying the effectiveness of reinforcement measures. The acceleration response and the residual deformation as well as the earthquake failure mechanism of earth-rock dams obtained by centrifugal shaking table tests are found in good agreement with the in-situ observations from Zipingpu CFRD and Bikou ECRD after great Wenchuan Earthquake. The use of a centrifuge effectively solves the problem that the stress within a conventional (ground) shaking table differs too much from that within the prototype, and the proposed experimental and analytical method makes the conditions that the stresses within the model and the prototype are approximately the same

收稿日期: 2014-12-04

unnecessary. Therefore, the centrifugal shaking table can be used to investigate the behaviors of vast masses like high earth-rock dams in spite of the limitation of capacities of the involved equipments. For the breaching mechanism of earth-rock dams, experimental techniques and corresponding analysis method are established. A flow discharge control equipment is devised for the centrifugal model test system so as to maintain a stable transition between the normal and high gravity fields for water flows. Meanwhile, a specific model container for dam breaching experiments that integrates the measurement system with the model arrangement system organically is fabricated, and such an arrangement effectively eliminates the deficiency of using pipeline flowmeters outside the model container under large variation of debris flow discharge. Therefore, an accurate measurement of flood discharge in the whole breaching process is attained by utilizing this measurement system. The above achievements and their engineering applications provide a technological support for improving the level of both the disaster consequence assessment and the safety control of earth-rock dams.

Key words: high earth-rock dam; failure and breach mechanism; experimental techniques; analytical method; engineering application

0 引言

中国已建成水库大坝 9.8 万多座^[1], 这些工程在发挥巨大经济社会效益的同时, 也存在着出险甚至溃决的风险。据统计^[2-3], 自 1954 年以来, 中国已有 3500 多座水库大坝发生溃决, 造成了重大生命财产损失和生态环境灾难。随着西部大开发等国家战略的推进, 中国仍将建设一批土石坝工程, 这些高坝大库建设大多位于高地震烈度区, 覆盖层深厚, 筑坝材料物理力学性质复杂, 气候条件恶劣^[4-5], 对大坝安全相关的试验技术、基础理论和模拟方法等提出了更高要求^[6]。

在工程技术领域, 试验是感性认识向理性认识升华的桥梁。从试验尺度和试验目的来看, 土石坝试验技术可分为单元试验、模型试验以及现场试验等。其中, 单元试验是为研究筑坝土石材料的强度、变形或渗流等特性开展的室内研究, 为大坝静动力变形、稳定以及渗流特性预测提供参数, 并为静动力本构模型和土水特征曲线等理论研究提供基础数据。由于碾压机械和碾压工艺发展进步, 现代土石坝坝壳料最大粒径已达到甚至超过 1 m, 室内试验必须按照某种规则将原型材料中的超径颗粒剔除, 从而带来缩尺效应的问题^[7-10]。为尽量克服缩尺效应带来的试验结果不确定性问题, 有关科研院所和高等院校发展了大型三轴试验系统^[11-14]。20 世纪 90 年代中期, 中国水利水电科学研究院和黄河水利科学研究院研制了当时国内仅有的 2 台大型振动三轴仪, 试样直径为 300 mm, 试样最大颗粒粒径提高至 60 mm。由于加压系统稳定性较差, 影响了试验成果的可靠性, 且能够施加的最大围压仅 1.0 MPa 左右, 难以适应高土石坝建设的需求。更为重要的是, 试验系统无法量测循环荷载作用下试样的动态体变, 难以为土石坝地震残余变形发展规律及防渗体损伤过程预测提供可靠依据, 限制了试验成果的工程实用价值。

与单元试验不同, 坝体模型试验一般以整个坝体或者坝体的某一部分为研究对象, 直接通过试验研究大坝工作性态。以土石坝地震响应和破坏机理研究为例, 国内外最常开展的模型试验有振动台模型试验^[15-17]和离心机振动台模型试验^[18-20]。20 世纪 80 年代初, 贺义明等采用花岗岩碎石料填筑了坝高 100 cm 的二维模型面板堆石坝, 振动台台面输入单向固定频率并逐级增大的正弦波, 研究了面板、库水等因素对模型坝加速度反应和坝体破坏机理的影响规律^[21]。韩国城等采用不同级配的石灰岩碎石料填筑了 100 cm 坝高二维模型坝和 60 cm 坝高三维模型坝, 台面输入采用单向微幅正弦波扫频及微幅不规则波激振方法, 研究了模型坝顺河向微振时的坝体自振频率、加速度反应及其受面板、库水等因素的影响规律; 采用单向固定频率逐级增大的正弦波激振, 研究了模型坝坝体加速度反应、破坏原因、过程和形式, 以及受面板、面板分缝、库水等因素的影响^[22]。近年来, 孔宪京等还利用改造后的双向模拟地震振动台研究并比较了多种抗震加固措施(包括坝坡加筋, 如筋网、格栅、锚杆等、坝坡面加盖护面板、减缓坝坡或变坡等)对减轻或避免高土石坝地震灾害的作用^[15, 23]。刘小生等利用大型三向模拟地震振动台进行了大量的二维、三维面板堆石坝振动模型试验^[24-25], 得到模型坝的自振频率、阻尼比和振型等动力特性, 测定了坝体加速度放大倍数的分布、面板的应变和应力、坝体残余变形等地震反应性状。上述振动台试验资料对验证和改进计算方法具有重要的参考价值。

值得重视的是, 土石材料的应力应变关系具有显著的压力相关性, 利用地面振动台研究土石坝地震反应问题时, 因模型与原型应力水平相差过大, 从而使该方法得出的高土石坝地震灾变机理和破坏型式可能与实际情况存在差别^[26-27]。土工离心模型试验因能使

模型和原型相应点的应力相等、变形相似、破坏机理相同，故能较好地再现原型的变形和破坏特性，近年来正愈来愈受到岩土工程界的关注^[28-31]。2008年，Iwashira T 利用离心机振动台模型试验再现了地震过程中心墙堆石坝上下游坝坡堆石体的松动滚落以及地震结束后坝体残余变形的分布规律，但未能给出具体的变形数值^[32]。南京水利科学研究院和中国水利水电科学研究院结合中国重大高土石坝工程开展了离心机振动台模型试验，研究了高土石坝的加速度反应、坝体震陷、面板脱空、防渗体特性等一系列问题^[20, 27, 30]，为高土石坝工程抗震设计以及动力数值模拟方法验证奠定了基础。上述离心机振动台模型试验揭示的土石坝破坏机理与现场调研观察到的震害现象极为接近，表明离心机振动台模型试验结果可以较好再现土石坝结构的破坏机理。目前，中国土石坝建设高度已向300 m 级迈进，即使按照一定比尺将坝体原型缩制，仍将超出现有离心机振动台的工作能力限制。为克服这一困难，部分科研院所正在研制容量更大、更为先进的离心机振动台试验系统。另一方面，在现有离心机振动台容量限制条件下，研究新的试验分析方法，使其能够用于高土石坝等大体积土石构筑物，亦具有重要意义。

土石坝在遭遇地震坝顶沉降、岸坡滑坡涌浪以及超标准洪水时都有可能导致漫顶溃坝；大坝防渗体系缺陷及其与岸坡的接触部位亦有可能成为渗流通道导致坝体溃决。近年来，中国土石坝溃决的案例仍在不断增加，研究土石坝的溃决过程与溃坝机理对于提升溃坝洪水演进过程预测精度和溃坝应急避险抢险预案编制的科学性至关重要。在离心模型试验推广运用之前，国内外普遍采用室内小比尺水工模型试验研究土石堤坝溃决过程与溃坝机理，其中最具代表性的是欧盟在IMPACT项目资助下开展的20多组小比尺溃坝水工模型试验^[33]，该项目揭示了堤坝坝坡“陡坎式”溯源冲刷的机理和坝轴线方向的溃口形状以及黏粒含量、密实度、含水率等对溃坝过程的影响。美国农业部针对砂质黏土和粉细砂土开展了50多组水槽模型试验，研究了土体抗剪强度、冲蚀率和容重等对“陡坎”移动速度的影响以及均质土坝漫顶溃决时溃口的横向扩展规律^[34-36]。由于室内小比尺试验与原型之间应力水平相差过大，且模型比尺关系不清楚，故目前仍难以定量研究土石堤坝的溃决过程，一般仅用作溃坝机理的定性研究。

鉴于单元试验和常规小比尺模型试验因试样缩尺、应力水平相差过大以及模型比尺不确定等问题，从而给土石坝静动力学特性以及结构响应特点与破坏

机理研究带来不确定性，土石坝工程中亦常开展现场试验弥补上述缺陷。开展现场试验的目的般有两类，即确定设计参数和研究破坏机理。如为确定筑坝材料级配曲线和碾压参数而开展的现场碾压试验^[37]，以及为确定土石坝坝址覆盖层静动力学参数，开展的载荷试验、旁压试验和跨孔波速试验等原位测试^[38-41]。在确定设计参数方面，现场试验往往具有采用原型级配和对材料组构扰动较小等室内试验所不具有的优势，因此可以得到更接近实际的坝体结构响应特点或破坏机理，如近年来南京水利科学研究院在其滁州试验基地开展的5组坝高9.7 m 的均质土坝漫顶溃决试验，发现了均质土坝“陡坎式”后退、坝顶“双螺旋流”淘刷与溃口边坡失稳坍塌的溃决机理，并提出了黏粒含量对溃口发展规律的影响机制^[42]，为中国土石坝溃坝研究提供了宝贵的数据，并促进了中国与欧美国家在该领域的合作。但现场试验准备周期长、成本高，可重复性远不及室内试验，且随着溃坝高度的增加，风险控制难度加大^[43]。可见，在小比尺模型试验和现场试验之间研发一种既能反映原型应力水平，又较为方便快捷的可重复性试验方法具有重要意义。

本文介绍了笔者研究团队近10年来在高土石坝筑坝材料力学性质试验、高土石坝地震响应与破坏机理试验以及土石坝溃决机理与溃坝过程等试验技术和分析方法等方面的研究成果及其工程应用情况。

1 高土石坝筑坝材料力学性质试验系统与应用

2003年，笔者研究团队研制成功了国内首台可测量堆石料动态应变过程的液压式高压静动力大型三轴试验系统（以下简称NHRI大型三轴试验系统），有效减小了缩尺效应对试验结果的影响，解决了宽围压、长稳压以及动态加载和试样动态体积应变测量等问题^[44-45]，特别适用于高土石坝筑坝材料在地震等循环荷载作用下的强度和变形特性及其变化规律研究。

1.1 NHRI 大型三轴试验系统研制

图1为NHRI大型三轴试验系统实物图，该试验系统主要由机架、压力室、油压控制系统、围压加压系统、轴向激振器以及荷载和位移传感器等部件组成，其主要性能指标如表1所列。该试验系统采用了围压稳定技术、动态应力应变量测技术、长期保载技术和外体变量测技术等核心技术，使得该设备的循环加载试验成果更加稳定，且能够适用于堆石料的流变和湿化试验研究。下面分别阐述以上关键技术的基本原理。



图 1 NHRI 大型三轴试验系统

Fig. 1 NHRI triaxial experimental system

表 1 NHRI 大型三轴试验系统的主要性能指标^[43]

Table 1 Main performance indexes of NHRI triaxial experimental system for dam materials

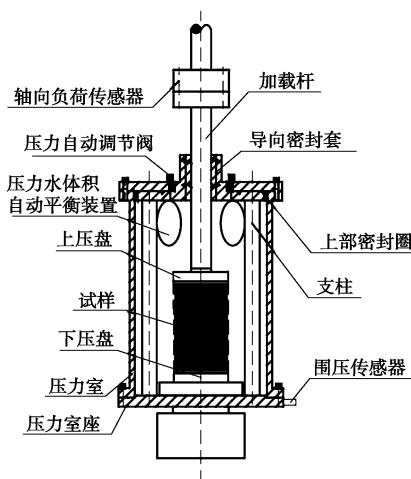
项目	性能指标
试样尺寸	直径 300 mm; 高度 700 mm
最大轴向出力	静力 1500 kN; 动力 ±500 kN
最大轴向行程	210 mm
围压范围	0.05~4.0 MPa
反压力要求	0.5 MPa, 可分级施加, 精度 1%
振动频率	0.01~5.0 Hz
量测精度	力值和位移值为 1%, 分辨率 0.1%

(1) 围压稳定技术

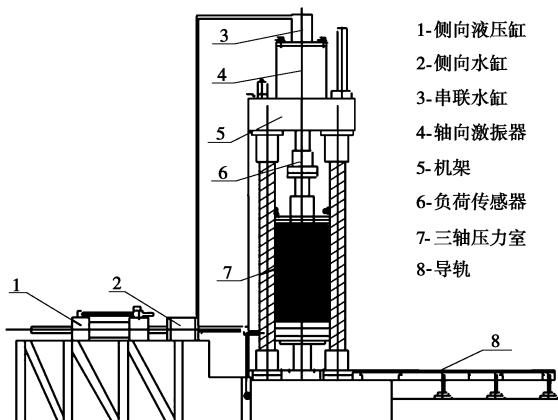
目前, 中国土石坝高度已达 300 m 级, 坝体中最大压应力达到数兆帕斯卡; 另一方面, 高土石坝震害调查表明, 地震最易导致破坏的部位多位于坝顶和坝坡等浅层低应力区, 故静动力三轴试验系统必须能同时适应高围压和低围压应力状态下的试验要求。围压稳定技术主要解决轴向加压系统活塞动作时的围压波

动问题, 特别是在低围压试验以及动力试验时。NHRI 大型三轴试验系统主要采用压力水体积自平衡技术和压力水动态补偿技术, 其技术原理如图 2 所示。

压力水体积自平衡技术系在压力室中设置气囊, 气囊内压力与所设定的围压保持一致, 由于气体的压缩性远大于水体, 故试验时活塞运动产生的水体压缩效应被气囊吸收, 有效降低了活塞运动过程中的围压波动。压力水动态补偿技术原理如图 2 (b) 所示, 机架中设有三轴压力室 7, 其上方为荷重传感器 6, 荷重传感器上端设有轴向激振器 4, 三轴压力室侧面设有围压加压系统, 该系统中设有侧向水缸 2, 通过液压系统推动侧向水缸向压力室补水来控制试验过程中围压的恒定。在试验过程中, 由于动荷载需要保持一定的频率振动, 传力轴在压力室往返运动必将导致围压波动, 由于振动频率高、传力轴行程大, 围压液压系统调级赶不上轴向振动引起的围压波动, 常使波动范围达到围压值的 10% 左右, 远超过试验精度范围。为解决这一问题, 在设备顶部设置与轴向油缸活塞同轴相连的串联水缸 3, 水缸活塞直径与进入压力室的连杆直径相等, 通过传力轴与进入压力室的连杆相连, 在串联水缸上部用空心钢管与侧向水缸连接, 这样通过压力室—侧向水缸—空心钢管—串联水缸—传力轴—压力室几部分相连接, 形成内部循环自平衡装置, 当循环动荷载使试样受压时, 传力轴向下运动并带动串联水缸活塞向下运动, 压力室内的水通过侧向水缸及钢管流向串联水缸上部正好填充串联水缸活塞向下运动而腾出的相同的体积空间, 使得围压保持不变。当循环动荷载使试样受拉时, 活塞向上运动, 此时水流方向相反, 同样可以保证围压水压力保持不变。通过上述措施, 控制围压在动力试验过程中波动幅度不超过围压值的 1%, 保证了动力试验成果的稳定性。



(a) 压力水体积自平衡技术



(b) 压力水动态补偿技术

图 2 围压稳定技术示意图

Fig. 2 Schematic illustration of pressure stabilization techniques

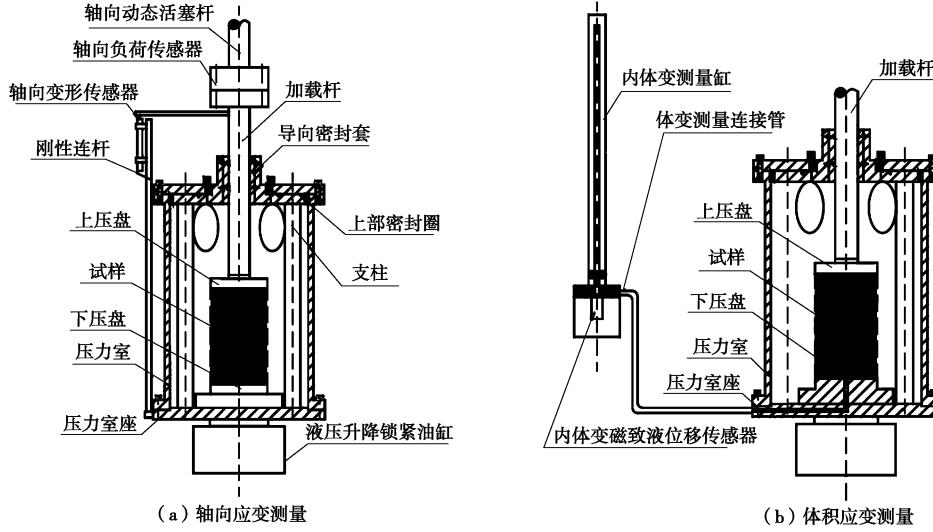


图 3 动态应变测量示意图

Fig. 3 Schematic illustration of measuring techniques for dynamic strains

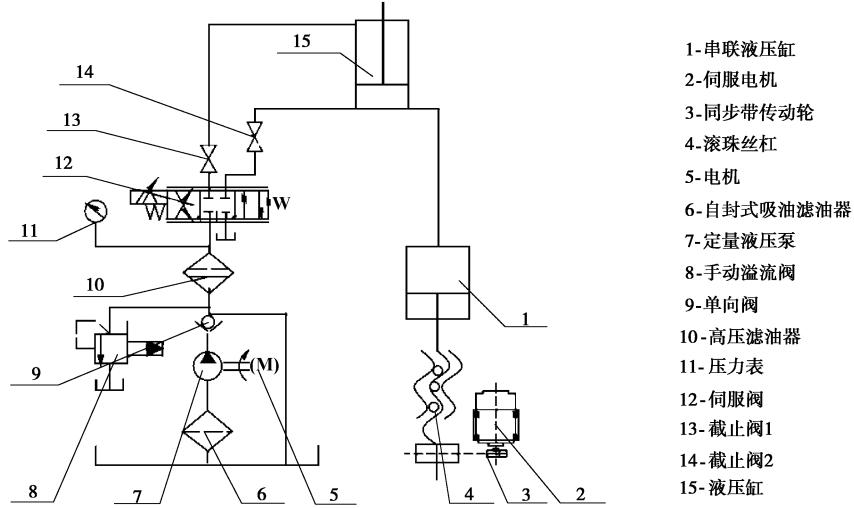


图 4 长期保载技术示意图

Fig. 4 Schematic illustration of long-term load sustaining techniques

(2) 动态应力应变测量技术

三轴试验设备所量测的试样变形常包含因系统刚度不足、密封胶条和机械转动机构间隙等引起的系统变形，特别是当围压和轴向压力较大时，显著的系统变形将严重影响试验结果的可靠性^[46]。为解决该问题，在压力室底座上设置刚性连杆；在体变压缸中引入磁致液位移传感器，如图 3 所示。通过量测活塞相对于连杆的动位移，基本消除了因系统刚度不足、密封胶条和机械转动机构间隙等引起的系统变形，显著提升了试验仪器在高频循环荷载作用下堆石料试样轴向变形和体积变形动态变化过程的测量精度。

由于 NHRI 大型三轴试验系统围压范围大，故试验时将轴压及围压分为低、中、高三档分别测控，进一步提升了低应力状态试验的测控精度，使该系统具备了不更换加载设备，就能适应 200~300 m 级高土

石坝不同部位堆石料围压变化的功能。

(3) 长期保载技术

面板堆石坝蓄水后大多表现出工后变形，一般历经数年才能稳定^[47-48]；心墙堆石坝遇水后上游侧坝壳料大多产生一定量值的湿化变形，且随着干湿循环次数增加而不断累积^[49]，上述堆石料的流变和湿化变形都将对防渗体系的应力变形性状，进而对大坝安全产生不良影响。因此，恒定应力状态下堆石料的流变与湿化特性是坝工界极为关注的课题，并对三轴试验系统的长期保载性能提出了要求。为提升 NHRI 大型三轴试验设备的长期保载性能，在液压系统中增设了高精度伺服电机、同步带传动轮、滚珠丝杠及串联液压缸保载系统，如图 4 所示。当系统需要长期保载时，图中 13、14 项两截止阀关闭，伺服电机通过同步带轮使得滚珠丝杠推动串联液压缸活塞，将串联液压缸内

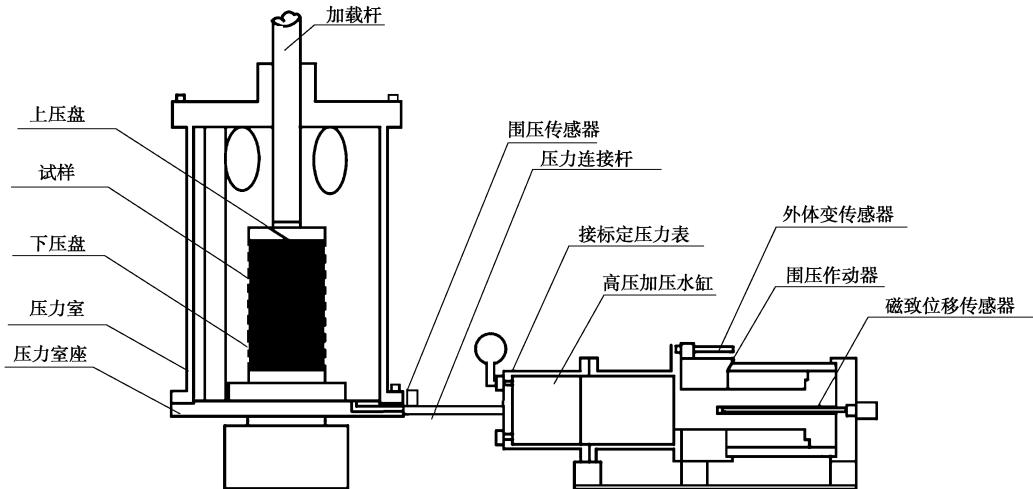


图 5 试样外体变测量技术示意图

Fig. 5 Schematic illustration of measuring techniques for external volumetric strain

液压油直接供给液压缸，保持液压缸荷载稳定，此时可停止油泵电机组供油。通过伺服电机控制液压缸荷载的加载、保持及卸载，可保证液压源压力以维持系统长期运行，从而确保堆石料试样压力的长期稳定性，同时解决系统长时间工作发热量过大的问题，实现了在恒压时间内，间歇停泵、节省电力及延长系统寿命的目的。

(4) 外体变测量技术

开展堆石料湿化变形试验的关键在于试验过程中试样内、外体积变形的测量。其中，试样内体变的测量可采用图 3 所述技术；试样外体变的测量是非饱和土三轴试验的关键技术^[50-52]，NHRI 大型三轴试验系统中通过连接压力室与加压水缸，利用小量程高精度外体变传感器量测得到，如图 5 所示。

1.2 筑坝材料的静动力学特性

10 多年来，NHRI 大型三轴试验系统已成功运用于国内外 70 余座重要土石坝工程坝料试验中，为众多土石坝工程设计方案论证和坝料优化利用提供了技术支持，并取得了一系列重要发现。

(1) 堆石料的强度与剪胀特性

大量试验资料表明，堆石料的峰值摩擦角 φ_f 随着围压 σ_3 的增加而降低，且在半对数图中符合良好的线性关系，

$$\varphi_f = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right) , \quad (1)$$

式中， p_a 是大气压力（均为 101.325kPa）， φ_0 和 $\Delta\varphi$ 是两个参数，分别表示 $\sigma_3 = p_a$ 时的峰值摩擦角以及 σ_3 增加一个数量级时峰值摩擦角降低的幅度。

峰值摩擦角随围压增加而降低的特性不仅在粗颗粒

粒堆石材料中存在，对于颗粒较细的砂土同样存在^[53]。Lade 等认为，这一特性主要与高围压下粒状体材料的颗粒破碎有关。经典土力学中，粒状体材料的强度主要由摩擦分量和剪胀分量组成^[54]。其中，摩擦分量即由颗粒的滑动和滚动摩擦提供的剪阻力；剪胀分量则是由颗粒间咬合作用引起的剪阻力。高围压下显著的颗粒破碎削弱了剪胀分量，从而导致峰值强度降低。

在三轴压缩试验中，若按图 6 所示，定义体变曲线由缩转胀时对应的摩擦角为临胀摩擦角，并将其绘制于半对数图中可以发现，临胀摩擦角与峰值摩擦角类似，均随着围压的增加而降低，且可用与式 (1) 相似的关系式描述，

$$\psi_c = \psi_0 - \Delta\psi \lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right) , \quad (2)$$

式中， ψ_0 和 $\Delta\psi$ 是两个参数，分别表示 $\sigma_3 = p_a$ 时的临胀摩擦角和 σ_3 增加一个数量级时临胀摩擦角降低的幅度。

从图 6 中还可以看出，低围压时，临胀摩擦角始终低于峰值摩擦角，故低围压时剪胀分量对强度的贡献较为显著。随着围压增加，峰值摩擦角与临胀摩擦角之间的差值减小，可见剪胀分量对强度的贡献减小。此外，低围压时堆石料呈现强剪胀性和应变软化特性；高围压时颗粒破碎使剪胀性受到抑制，应力应变曲线呈现硬化特点。

(2) 堆石料的颗粒破碎特性

堆石料强度和剪胀（缩）特性与其棱角分明，颗粒破碎显著有关，故颗粒破碎一度成为学术研究的前沿与热点^[55-58]。汶川地震后，紫坪铺面板堆石坝显著

的震陷使得人们开始重视动态荷载作用下堆石料的颗粒破碎行为^[14, 59]。

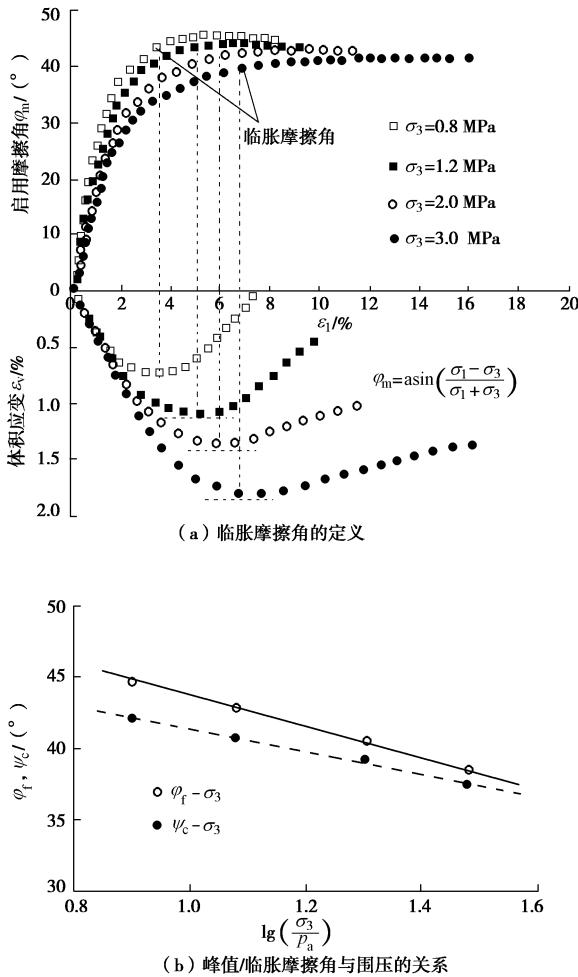


图 6 堆石料的强度与剪胀特性

Fig. 6 Strength and shear dilatancy behaviors of rockfill materials

图 7 是某面板坝花岗岩坝料在固结过程（固结应力比 1.5）和振动过程（动应力比 0.3）中各粒组百分含量的变化及其 Marsal 颗粒破碎指标 B_g 。其中 Marsal 破碎指标系由试验前后各粒组百分含量差值中的正值部分累加所得^[60]，从图中可以看出堆石料在固结和振动三轴试验过程中均产生了明显的颗粒破碎，且平均应力越大，固结（静力加载）过程中产生的颗粒破碎率越大，0~5 mm 的细颗粒含量显著增加，而 40~60 mm 粗颗粒含量显著降低，这说明颗粒破碎即有边角部位的应力集中压碎，又有颗粒的整体断裂。图 7 中还证实了振动过程中存在显著的颗粒破碎，但与围压之间的关系无固结过程明显。实际上，颗粒破碎既与外荷载有关，又与材料自身的内部组构有关，高围压固结过程中显著的颗粒破碎使得堆石料更加密实，颗粒之间的接触点明显增加，故在动应力过程中反而不易破碎^[61-63]。

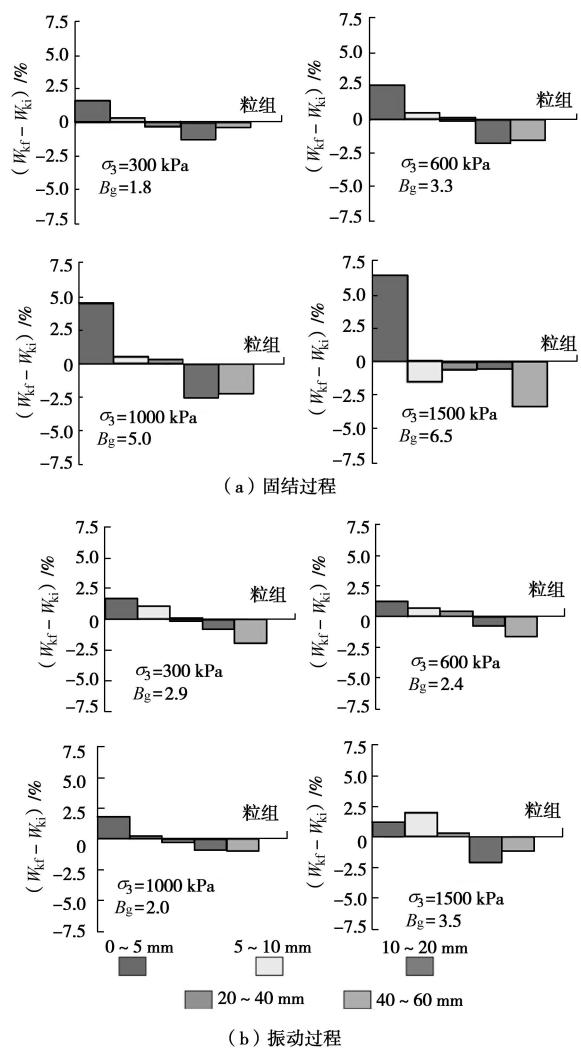


图 7 振动三轴试验中堆石料各粒组百分含量变化及 Marsal 破碎指标

Fig. 7 Variation of percentage of different particle groups of rockfill materials and Marsal breakage index during dynamic triaxial loadings

颗粒破碎除对堆石料的强度和剪胀特性产生显著影响外，亦对其压缩性产生明显影响，图 8 中绘制了同种堆石料不同初始孔隙比时的压缩试验结果，当平均应力 p 低于屈服应力时，材料处于弹性变形阶段；超过屈服应力后，颗粒开始破碎，压缩曲线显著下弯，塑性体积变形不断累积^[62]。陈生水等采用了下述指数函数模拟压缩特性^[64-65]：

$$e = e_0 \exp \left[- \left(\frac{p}{h_s} \right)^n \right], \quad (3)$$

式中， e_0 是材料 $p \rightarrow 0$ 的初始孔隙比， h_s 为固相硬度，具有应力的量纲，是堆石料抵抗破碎能力的一种综合度量， n 是无量纲参数，由材料级配决定， h_s 和 n 可以通过对试验资料的回归分析确定。图 8 中虚线是运用式 (3) 模拟的不同密实度材料的压缩曲线，从中

可以看出两试样的压缩曲线均可以用式(3)描述,且两者具有相同的参数 h_s 和 n ;此外,当围压趋于无限时,材料的孔隙比渐趋于零,不同初始孔隙比试样的压缩曲线趋于重合,散粒体材料破碎压密成连续介质。

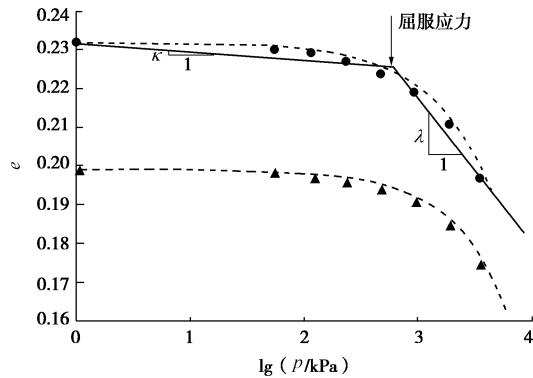


图8 堆石料的压缩特性

Fig. 8 Compression behaviors of rockfill materials

式(3)实际上给出了一个依赖于密实度与平均应力的等向压缩参数 λ ,

$$\lambda(e, p) = ne \left(\frac{p}{h_s} \right)^n \quad (4)$$

结合式(3)、(4)还可得 λ 对 p 的导数,

$$\frac{\partial \lambda}{\partial p} = \frac{n^2 e}{p} \left(\frac{p}{h_s} \right)^n \left[1 - \left(\frac{p}{h_s} \right)^n \right] \quad (5)$$

当 $p < h_s$ 时, $\partial \lambda / \partial p > 0$, 即随着平均应力的增加, 颗粒破碎趋于显著, 材料压缩性不断提高; 当 $p > h_s$ 时, $\partial \lambda / \partial p < 0$, 颗粒破碎使材料达到了更稳定的级配, 材料压缩性逐渐降低; 当 $p = h_s$ 时, $\partial \lambda / \partial p = 0$, 故 $p = h_s$ 是 $e - \ln p$ 压缩曲线上斜率最大的点, 在这一点处, 颗粒破碎的速率达到最大值。

(3) 堆石料循环加载特性

图9是一典型堆石料静力三轴循环加载试验结果,从中可以看出堆石料循环加载变形的3个基本特点:①加载、卸载和再加载过程中均出现体变,特别是卸载过程中体缩明显。由于偏应力 q 减小时,平均应力 p 亦按比例减小,弹性体积应变方向应为膨胀,故图9中卸载体积收缩行为只能归因于塑性变形;②相同围压下,加载到不同偏应力后卸载至等向压缩应力状态的平均卸载线(AULs)几乎平行,与卸载时的偏应力状态无关;③平均卸载线的斜率 E_{au} 随着围压增大而增大,两者在双对数图中近似呈线性关系,这一点与邓肯-张模型中的初始模量 E_{is} 类似,如图10所示。

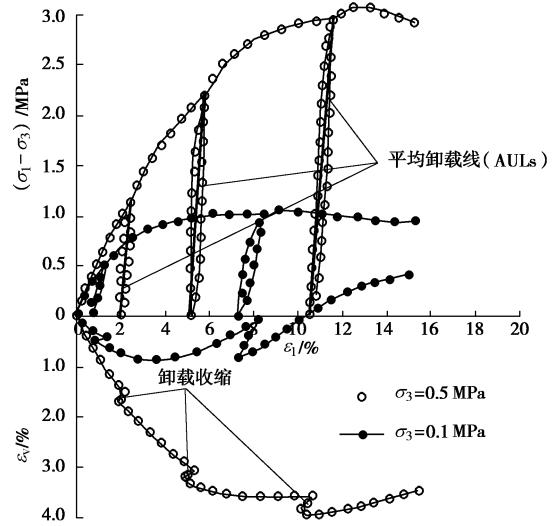


图9 堆石料的静力三轴循环加载试验结果

Fig. 9 Results obtained from static cyclic triaxial compression experiments on rockfill materials

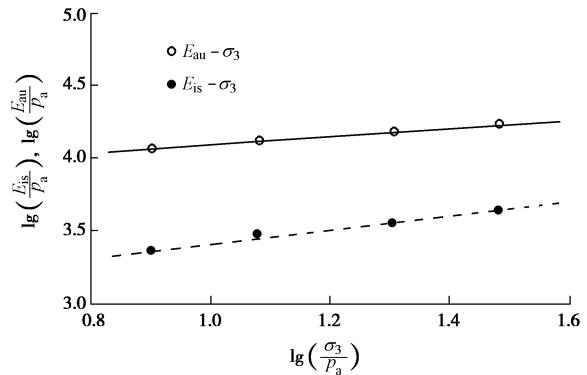
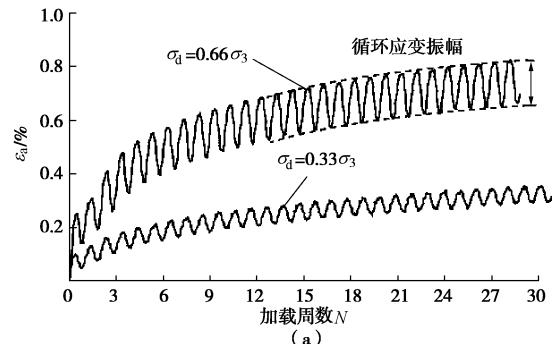


图10 初始模量和平均卸载模量与围压的关系

Fig. 10 Variation of initial loading modulus and average unloading modulus with confining pressure

图11中绘制了典型堆石料在振动三轴试验过程中轴向应变与体积应变随振动次数增加而积累的过程, 相同围压下, 轴向应变和体积应变的积累速度和最终量值均随着动应力增大而增大, 且永久应变积累的速率随着振动次数的增加而降低, 这意味着循环加载过程中堆石料振密硬化。汶川地震后笔者曾担任紫坪铺面板堆石坝现场专家组副组长, 抗震救灾过程中历经多次余震, 但历次余震产生的坝体震陷与主震相比很小, 表明先期振动对堆石料确有振密效应, 堆石料在循环加载过程中的塑性硬化不可忽视。



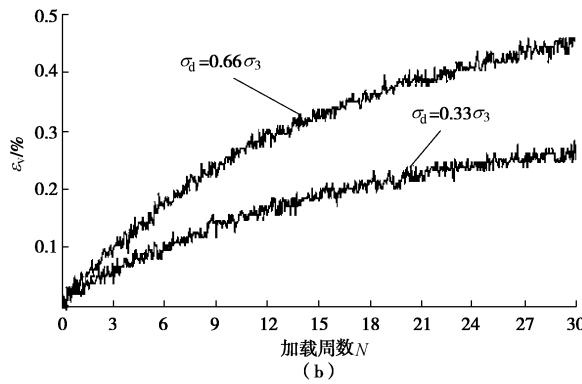
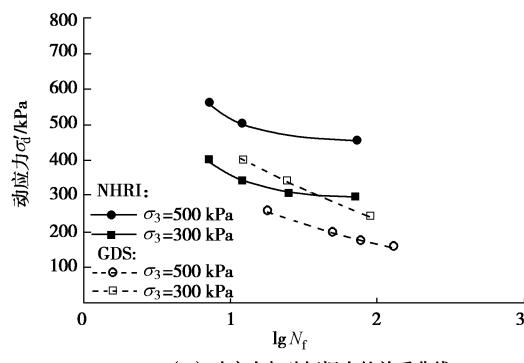


图 11 振动三轴试验中堆石料的应变积累特性

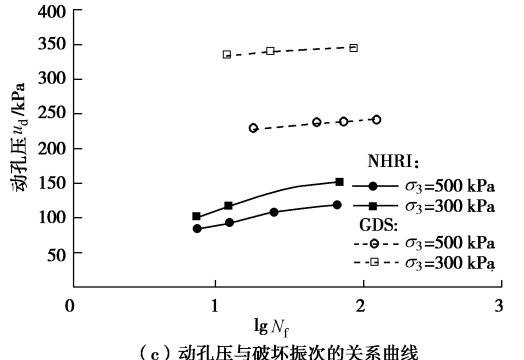
Fig. 11 Behaviors of strain accumulation in dynamic triaxial experiments on rockfill materials

(4) 砂砾石料地震液化特性

中国 20%以上的陆地被第四系砂砾层覆盖, 砂砾石层广泛分布在华北平原、东北平原、河西走廊、塔里木盆地等地区。由于压实后具有较高的变形模量, 故在料源丰富的地区, 砂砾石料常被用作土石坝筑坝材料。一般认为砂砾石颗粒粗, 透水性强, 地震孔隙水压力不至于上升到使其液化的程度, 故多将其视为非液化土料。但唐山地震和海城地震后的震害调查资料表明含细颗粒较多的砂砾石层同样存在地震液化可能性, 典型的案例是密云水库白河主坝库水位以下砂砾石料(防渗斜墙的保护料)在唐山地震中发生液化, 并导致砂砾料保护层发生了大面积的滑坡^[66]。



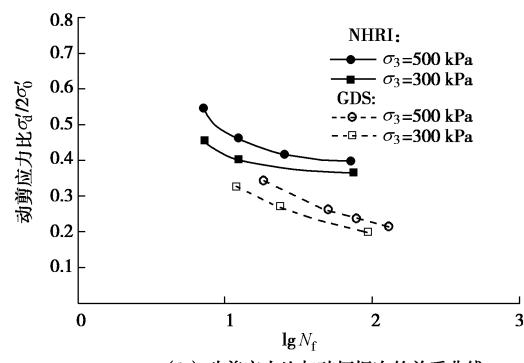
(a) 动应力与破坏振次的关系曲线



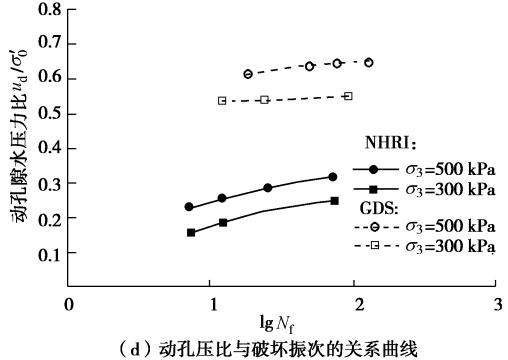
(c) 动孔压与破坏振次的关系曲线

与砂土液化问题相比, 目前砂砾石料的地震液化判别方法尚不成熟, 其根本原因是砂砾石料地震液化资料的严重匮乏, 故实际工程中多参考砂土液化判别方法^[67-68]。由于常规砂砾石料液化试验中, 因设备条件限制通常需将大颗粒剔除, 故人为降低了砂砾石料的含砾量, 从而对试验结果的可靠性产生难以评估的影响。笔者采用 NHRI 大型三轴试验系统和 GDS 动三轴试验系统 ($\Phi \cdot H = 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$) 开展砂砾石料液化试验工作。其中, 大三轴试样级配为现场筛分级配, GDS 试样级配由大三轴试样级配采用相似级配法缩制。试验固结比取 1.5, 围压分别为 300 kPa 和 500 kPa, 振动频率为 0.33 Hz, 输入波形均采用正弦波。

图 12 中给出了 NHRI 大型动三轴及 GDS 试验得出的动应力 σ'_d 、动剪应力比 $\sigma'_d/2\sigma'_0$ 和动孔隙水压力比 u_d/σ'_0 与破坏振次 N_f 的关系曲线。可以看出, 粒径变化对砂砾石料动强度的影响极为明显, 在达到预定破坏应变 (5%) 时, 大三轴试样动孔隙水压力相对 GDS 试样有大幅度降低, 不同围压下, 采用 NHRI 大三轴试验得出的动孔压相对于 GDS 试验得出的动孔压降低幅度达到 50%~60%。另一方面, 随着破坏振次降低, 采用大型振动三轴试验得出的动剪应力比相对 GDS 得出的动剪应力比有趋向一致的趋势; 但随破坏振次增加, 粒径变化的影响显著增强, 颗粒越细的



(b) 动剪应力比与破坏振次的关系曲线



(d) 动孔压比与破坏振次的关系曲线

图 12 NHRI 大型振动三轴和 GDS 振动三轴液化试验结果对比

Fig. 12 Comparison of experimental results of liquefaction conducted by NHRI large-scale triaxial system and GDS dynamic triaxial experimental apparatus

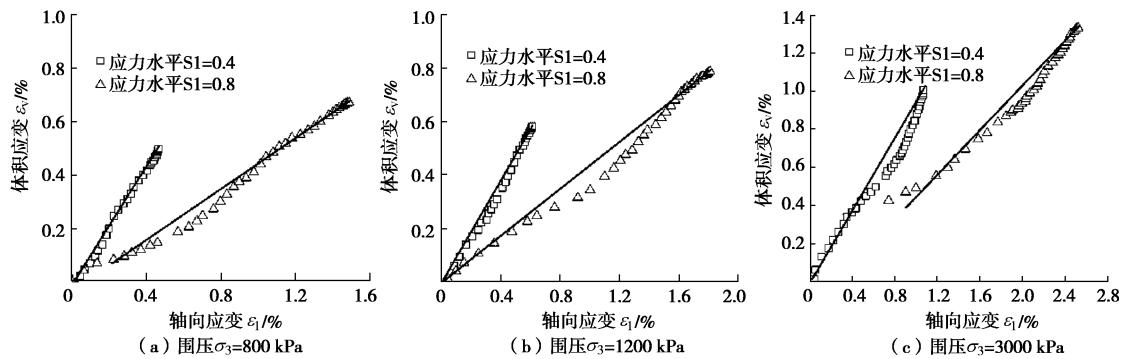


图 13 典型堆石料流变试验的应变曲线

Fig. 13 Curves of strain of creeping tests on a typical rockfill material

材料累积动应变越容易达到破坏动应变,这说明随着地震烈度提高,颗粒越细的材料越易液化,粗颗粒材料则不易液化。因此,研究砂砾石料液化问题时,应考虑到缩尺效应对试验结果的影响,宜采用全级配砂砾石料开展液化试验,否则将低估其抗地震液化能力,得出偏于保守的结果,造成不必要的浪费。

(5) 堆石料的流变特性

堆石料流变试验多在恒定应力状态下开展,故所产生的变形全部为塑性变形,并与时间相关。图 13 是某面板堆石坝弱风化开挖料(70%砂岩+30%板岩, $\rho=2.23 \text{ g/cm}^3$)的三轴流变试验结果,从图中可看出,相同围压下,应力水平越大,即偏应力越大,体积流变和轴向流变越大。此外,试验过程中流变曲线近似为一直线,说明流变阶段 $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$ 为可假定为与应力状态相关的常量。图 14 中整理了上述堆石料不同围压下的应变增量比 $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$ 和应力比 σ_1/σ_3 的关系,发现可采用下述双曲线拟合图中的试验数据。

$$3 - d\varepsilon_v/d\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1/\sigma_3 - 1}{b_1 + b_2(\sigma_1/\sigma_3 - 1)} , \quad (6)$$

式中, b_1 , b_2 为参数。

在上述试验认识基础上,笔者研究团队提出了堆石料的系列本构模型,包括考虑颗粒破碎的堆石料弹性本构模型^[64, 69]、堆石料的循环加载弹性本构模型^[70-71]和堆石料的湿化与流变本构模型^[72-73],以及砂砾石料液化判别的实用方法^[74],由于篇幅所限,本文中不再详述。

2 土石坝离心机振动台模型试验技术研究与应用

中国土工离心机的早期应用要明显落后于欧洲、美国与日本,直至 20 世纪 80 年代初期,才由南京水利科学研究院和长江科学院研制成功中国首批土工离心机^[75]。90 年代前后,中国水利水电科学研究院

和南京水利科学研究院相继建成新的大型土工离心机^[75-77]。进入 21 世纪以来,中国已新建土工离心机 10 余台,标志着中国土工离心机技术研发与应用已达到一个新的阶段^[75]。

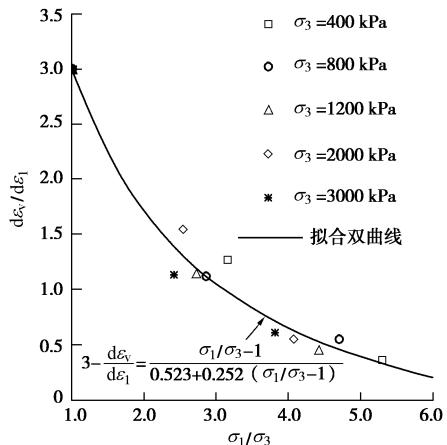


图 14 流变方向与应力状态的关系

Fig. 14 Relationship between direction of creep strains and stress state

2.1 离心机振动台模型试验系统与试验方法

2001 年,南京水利科学研究院章为民等研制成功了中国首台大型离心机振动台模型试验系统(以下简称 NHRI 离心机振动台),并提出了应力逼近的小比尺离心机振动台模型试验分析方法^[78],使离心机振动台能够应用于高土石坝等大体积土石料构筑物的震害机理研究及抗震措施有效性验证。

(1) NHRI 离心机振动台试验系统研制

NHRI 离心机振动台试验系统(NHRI-400gt)如图 15 所示,该系统及其主要性能指标:离心加速度=100g,振动质量=200 kg,振动频率=100 Hz,最大振幅=0.5 mm,水平震动加速度=15g,振动时间=2 s,外形尺寸=1345 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。

a) 400gt 离心机

该机的最大半径(吊蓝平台至旋转中心)5.5 m, 最大加速度200g, 最大负荷2000 kg, 吊蓝平台1100×1100 mm。该机装有100通道的银质信号环, 其中10路电力环, 一路气压环(20 MPa), 两路液压环(20 MPa, 供水速率30 L/min), 以及64路高精度数据采集系统, 另外还装配了两套摄像系统, 以监控模型和离心机室的变化情况。转臂采用了先进的双铰支跷跷板结构, 有一定自调平衡能力, 另外该机还配有一套动态调平系统。试验用模型箱的有效尺寸为1000 mm×1000 mm×400 mm(长×高×宽), 其一侧面为有机玻璃窗口, 在模型上做好标志后可监控模型的变形。

b) 离心机振动台

该振动台由振动台面、作动器、伺服阀、压力源等部分组成。台体结构采用新型的高精密线性滑条, 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100 L/min。用25l的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。振动方式可以是规则波亦可以是不规则随机波。

c) 数据采集系统

普通数据采集系统: 该系统由前置调理放大器、前级机及微机组成, 其中, 前置调理放大器安装在离心机转臂端部靠近挂斗处, 便于微弱信号的就近放大, 前级机安装在离心机靠近中轴的地方, 主要是减小该设备承受的离心力, 以便于其在高重力场中能正常工作。而微机则放在控制室中, 便于试验过程中随时得到试验数据。试验时, 模型中埋设的传感器输出的信号由前置调理放大器放大后送入前级机, 由前级机进行A/D转换及实时采集, 采集的信号经集流环上传至主机, 由主机显示、存储测量结果并进行处理。

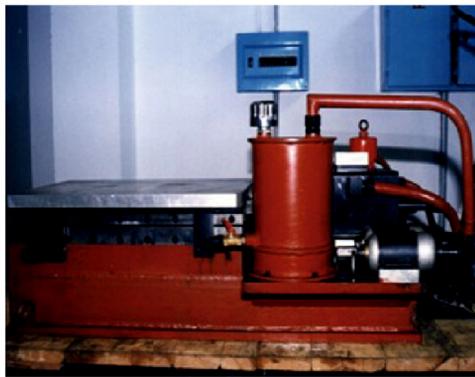
高速数据采集系统: 一般地震常常持续几秒至几十秒, 用离心模型模拟该过程所需的时间大为压缩(离心机的时空压缩效应), 要在极短的时间内把大量的试验数据记录下来, 要求数据采集系统有较高的数据采集速度。数据采集系统包括信号调理放大系统、AD转换与采集系统、上下位计算机的数据交换、控制系统、试验数据处理显示系统。信号调理放大系统选用了美国Qtech公司的5B系列模块技术, 该模块的技术特点是抗干扰能力强、稳定性好, 适合复杂恶劣的试验条件, 有较强的抗冲击能力, 耐高温。而且每通道单独放大调理, 避免了各通道之间的相互干扰。



(a) NHRI-400gt大型土工离心机



(b) 离心试验系统控制台



(c) 振动台



(d) 模型箱

图15 NHRI离心机振动台主要组成部分

Fig. 15 Main components of NHRI centrifuge shaking table system

AD 转换与数据采集系统也选用了美国 Qtech 公司的 daq-1201 高速数据采集卡, 该数据采集卡是性价比较高的产品, 采样率为 40 万次/s, 16 个采集通道, 可以扩充。用网络方式把上位机与下位机连接起来, 通过上位机对下位机的所有控制进行操作。

d) 闭路电视系统

该系统由高分辨率 CCD 摄像机、监视器、录相机组组成。试验时将高分辨率 CCD 摄像机安装在离心机转臂端部挂斗上, 其镜头对模型箱有机玻璃面, 该面为模型侧断面, 制模时在模型表面做好测量标志, 其标志网格点的座标由摄像机摄入后经集流环上传至监视器中显示, 这样在试验过程中可监视模型在任一时期的变形情况, 必要时可用录相机录制整个试验过程, 以便于试验后处理。

(2) 土石坝离心机振动台模型试验分析方法

尽管离心机振动台模型试验与常规振动台模型试验相比, 可大幅提升模型的应力水平, 理论基础科学合理, 但目前世界上投入使用的离心机振动台工作加速度一般在 $50g \sim 100g$, 对于高土石坝等大型工程, 由于其体积巨大, 即使根据模型相似律进行 $1/50 \sim 1/100$ 的缩尺, 模型尺寸、体积、质量仍然远远超出现有离心机振动台工作能力的限制, 导致在现有的模型设计方法下, 离心机振动台仍然无法直接用于高土石坝等大型工程地震破坏机理与防治技术有效性验证的试验研究。因此, 目前国内外针对土石坝开展的离心机振动台模型试验研究推算到原型坝高都仅为数米或数十米^[18, 79-81], 所得到的大坝动力反应特性是否可以推广到百米级高坝仍然是有疑问的。在大量试验研究、数值模拟和高土石坝地震灾害原型观测资料比较分析的基础上, 创建了一套通过模型应力逐渐逼近原型应力, 获得原型真实动力反应的高土石坝小尺度动力离心模型试验方法^[78], 突破了上述研究困境。该方法的基本思路为:

a) 设计模型的几何相似比尺

根据土石坝的几何尺寸与振动台台面尺寸的大小确定模型的几何相似比尺 η_l 。

b) 设计重力相似比尺

根据离心机振动台的最大工作加速度和最大激振能力, 确定最大的重力相似比尺 η_g , 将 η_g 平均分为 n ($n \geq 4$) 等份, 得到 $\eta_{1g}, \eta_{2g}, \eta_{3g}, \eta_{4g}, \dots, \eta_{ng}$ 共 n 个模型试验的重力加速度相似比尺。

c) 进行 n 组离心机振动台模型试验

按照几何相似比尺为 η_l , 重力相似比尺分别为 $\eta_{1g}, \eta_{2g}, \eta_{3g}, \eta_{4g}, \dots, \eta_{ng}$, 进行 n 组振动台离心模型试验, 可得到 n 组重力相似比尺下的试验结果, 如 $v_1, v_2, v_3, v_4, \dots, v_n$ 共 n 组水平位移, 以及 n 组沉

降、 n 组孔隙水压力、 n 组应力、 n 组地震加速度反应等。

d) 原型真值的推演分析

在完成试验后, 对应同一原型物理量可以得到 n 个在不同重力加速度相似比尺条件下的试验结果, 如坝体地震残余沉降 S , 就有 $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ 个试验值, 显然这 n 个试验结果是逐渐逼近真值的, 当重力加速度相似比尺为 1 时 (相当于 $1g$ 的普通地面振动台), 试验值距离原型真值最远, 试验值与原型真值的差值随重力加速度相似比尺的增加而减小, 当重力加速度相似比尺达到 N 时, 试验值等于原型真值。按照这一思路, 基于不同的重力加速度相似比尺条件下的离心机振动台模型试验结果, 应用逐渐逼近理论, 通过分析外延的方法可分别导出原型的位移、沉降、地震加速度、孔隙水压力、应力等物理量, 如图 16 所示。

如进行某土石坝离心机振动台模型试验, 可首先根据大坝尺寸与振动台几何尺寸确定模型几何相似比尺 $\eta_l=1/N=1/200$, 然后根据离心机振动台的工作能力, 确定重力相似常数 η_g , 假定该离心机振动台的最大工作加速度为 $100g$, 则 $\eta_g=N=100$ 。如进行 4 组试验, 则可将 η_g 进行 4 等份, 得到 4 个重力相似常数 $\eta_{1g}=25, \eta_{2g}=50, \eta_{3g}=75, \eta_{4g}=100$ 。根据相似理论, 在 4 组试验中, $\eta_{4g}=100$ 的试验结果最接近原型真值, 而当 $\eta_g=200$ 时, 试验结果将逼近原型真值。

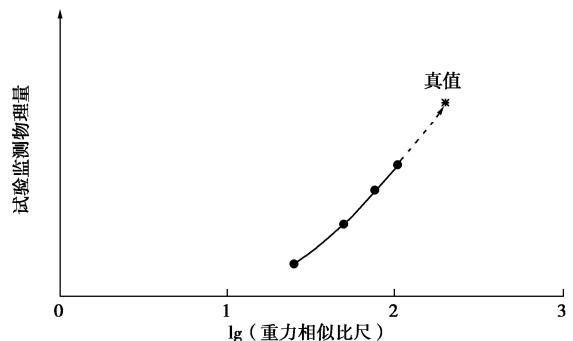


图 16 应力逼近的离心模型试验方法示意图

Fig. 16 Schematic illustration of stress approximating method in centrifugal model tests

需要指出的是, 由于土石料的应力变形特性具有明显的非线性, 不同物理量与加速度比尺的变化关系, 并不是唯一的函数关系, 外延精度的关键在于函数的选择和试验组数的确定。通过对不同函数的比对优选发现, 位移、沉降型变量适用双对数方法外延; 应力、加速度类物理量适用单对数外延。为提高外延函数的可靠性, 试验组数 n 应大于等于 4^[78]。

(3) 离心模型试验相似准则

相似准则是离心模型试验的理论基础, 它既规定

了给定离心加速度下模型的制作要求，也确定了由离心模型试验成果推算原型相应物理量的方法。通常可以通过对所研究问题的控制方程推导出各相关物理量的比尺关系^[77]，表2、3中分别给出了静力学固结问题和动力学问题中各物理量之间的相似常数。从中可以看出固结问题中，离心模型孔隙水压力的消散时间仅为原型的 $1/N^2$ ，故可以利用短时间的离心模型试验预测原型土体长时间的固结与孔压消散过程。如实际工程需要一年完成的固结，在离心机中采用 100g 的离心加速度，只需要 52 min 就可以完成。对于动力学问题（忽略孔隙水压力），若用原型材料按比尺 1:N 制作模型，则当离心机加速度达到 Ng 时，只要施加于模型地面的加速度峰值和频率为原型的 N 倍，振动时间是原型的 $1/N$ ，则模型就可以显示出与原型相似的动力反应。例如，欲将一个持续时间 20 s，峰值加速度 0.2g，频率为 1 Hz 的地震加到模型比尺为 100 的离心模型上，则该模型应受到一个持续时间 0.2 s，加速度峰值 20g，频率 100 Hz 的激振。可见，无论是静力学问题还是动力学问题，离心模型试验均具有显著的“时空压缩”效应。

对比表2、3可以看出，固结问题和振动问题的时间比尺是不同的，为使动力模型的孔隙水压力消散时间与振动问题协调，一般可以采用缩小土料粒径或提高孔隙流体粘滞性的方法降低土体的渗透性^[28, 76]。为避免减小土颗粒粒径引起土体物理力学性质变化，多在水中添加少量化学增黏剂的办法提高孔隙流体黏滞性^[76-77]。

土石坝离心模型试验中常遇到薄板结构物的模拟问题，如覆盖层地基上建坝多用混凝土防渗墙截断坝基渗流；面板堆石坝中混凝土面板和趾板通过止水相

连形成封闭的防渗系统。混凝土防渗墙厚度通常仅为 1.0 m 左右；混凝土面板的厚度一般为 $0.3+0.003H$ (H 为自坝顶算起的深度)。若采用原型材料，这类薄板在离心模型中的厚度仅为几毫米，模型制作将相当困难。因此，往往需要按照变形等效的原则代换为铝板或者有机纤维板模拟。

土石坝离心模型试验大多仅研究平面应变问题，故假定所研究的薄板亦处于平面应变状态，在此条件下，薄板的挠曲方程与梁的挠曲方程一致^[82]，即

$$[\omega''(x)]_m = -\left[\frac{M(x)}{EI} \right]_m \quad (7)$$

式中 ω 为板的挠度； x 是板长度方向的坐标； $M(x)$ 是薄板上任意点处的弯矩； EI 为薄板抗弯刚度，其中 E 为弹性模量； I 为板的横截面对中性轴的惯性矩；下标 m 表明该方程对模型成立。

由表2、3可知，只要薄板挠度的相似常数为 η_l ，则离心模型中薄板周围土体的应变将与原型保持一致，且周围土体施加于薄板的反力（应力）亦与原型一致。以图17面板堆石坝中面板为例，记面板所受水压力和堆石体抗力分别为 $p(x)$ 和 $q(x)$ （注：在防渗墙问题中，这两个分布荷载可以分别理解为防渗墙上游和下游侧土压力），则任意点处的弯矩为

$$M(x) = \int_0^x [p(\xi) - q(\xi)](x - \xi) d\xi \quad (8)$$

可见，单位宽度薄板上弯矩的相似常数应为 η_l^2 （应力的相似常数为 1），因此，若设抗弯刚度的相似比为 η_{EI} ，则原型薄板的挠曲方程为

$$\frac{\eta_l}{\eta_l^2} [\omega''(x)]_m = -\frac{\eta_l^2}{\eta_{EI}} \left[\frac{M(x)}{EI} \right]_m \quad (9)$$

表2 静力学问题离心模型试验的相似常数（原型值/模型值）

Table 2 Similar constants for static problems in centrifuge modeling (prototype/model)

物理量	密度 ρ	应力 σ	加速度 g	孔压 p	位移 u	水头 H	应变 ε	静本构 张量 D	渗透 系数 k	渗透 流速 v	固结 时间 t
量纲	M/L ³	ML ⁻¹ /T ²	L/T ²	ML ⁻¹ /T ²	L	L	1	ML ⁻¹ /T ²	L/T	L/T	T
相似常数	1	1	1/N	1	N	N	1	1	1/N	1/N	N^2

注：①静力学问题的平衡方程为 $\sigma'_{ij,j} + p_{,j} - \rho g_i = 0$ ；②材料本构方程为 $\dot{\sigma}'_{ij} = D_{ijkl}\dot{\varepsilon}_{kl}$ 。

表3 动力学问题离心模型试验的相似常数（原型值/模型值）

Table 3 Similar constants for dynamic problems in centrifuge modeling (prototype/model)

物理量	密度 ρ	动应力 σ	动应变 ε	动位移 u	速度 \dot{u}	加速度 \ddot{u}	动本构 张量 D	阻尼 系数 β	阻尼 系数 α	时间 t	频率 f
量纲	M/L ³	ML ⁻¹ /T ²	1	L	L/T	L/T ²	ML ⁻¹ /T ²	1	1/T	T	1/T
相似常数	1	1	1	N	1	1/N	1	1	1/N	N	1/N

注：①动力学问题平衡方程为 $\sigma'_{ij,j} + \rho \ddot{u}_i + \alpha \rho \dot{u}_i = -\rho \ddot{u}_g$ ；②材料本构方程为 $\sigma'_{ij} = D_{ijkl}\varepsilon_{kl} + \beta D_{ijkl}\dot{\varepsilon}_{kl}$ 。

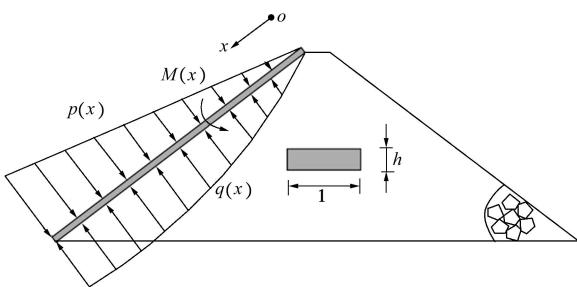


图 17 薄板结构弯矩计算

Fig. 17 Calculation of bending moment for thin plate

故抗弯刚度的相似比不可任选，需满足以下关系式

$$\eta_{EI} = \eta_l^3 \quad (10)$$

对于厚度为 h 的矩形截面而言，单位宽度薄板的截面惯性矩为 $I = \frac{1}{12} \times 1 \times h^3$ ，故式 (10) 可改写为

$$\frac{E_p h_p^3}{E_m h_m^3} = \eta_l^3 \quad (11)$$

式中， E_p 、 h_p 为原型薄板的弹性模量和厚度， E_m 、 h_m 为离心模型中薄板材料的弹性模量和厚度。

式 (11) 给出了离心模型中薄板结构厚度的确定方法，

$$h_m = \frac{h_p}{n_l} \cdot \left(\frac{E_p}{E_m} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

如某堆石坝面板混凝土厚度为 0.3 m，混凝土弹性模量为 30 GPa，则在 100g 的离心模型中采用弹性模量为 69 GPa 的铝板模拟时，铝板厚度应为 2.3 mm。

2.2 高面板坝地震响应与破坏机理

2001 年，NHRI 离心机振动台试验系统研制成功后即将其用于研究当时国内最高面板砂砾石坝——吉林台一级电站面板坝地震响应与残余变形规律研究^[27, 83]。该工程拦河坝为混凝土面板砂砾堆石坝，最大坝高 157 m，坝顶长度 445 m，宽 12 m。坝体填筑料为：坝轴线上游部分为天然砂砾石料，下游部分为爆破石料和石渣。上游坝坡为 1:1.7，下游平均坝坡 1:1.9，马道间坝坡 1:1.5。垫层料和过渡料水平宽度为 4 m，均为天然砂砾石料，坝体内设有烟囱式排水体。

工程区地处北天山纬向构造带西部的喀什河凹陷中部，枢纽所在的吉林台峡谷是一个相对稳定的地块，工程场地属基本稳定地区。据新疆地震局分析鉴定并经国家地震局复核，坝址区地震基本烈度为 VIII 度，大坝按 IX 度设计，100 年基准期超越概率 2% 基岩峰值加速度为 461.97 gal ($1\text{gal}=10^{-2}\text{m/s}^2=10^{-2}\text{g}$)。

(1) 试验方案

离心机振动台模型试验共进行了 4 组，其中，整体模型试验 1 组，模型比尺为 1400；局部模型试验 3

组，即将整体分成上中下 3 块，模型比尺为 700。每组试验进行了 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，模型比尺为 1400 和 700 时，分别相当于原型的振动频率为 0.164 Hz 和 0.276 Hz，振动持续时间为 121.72 s 和 72.38 s，最大振动加速度为 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 0.65 倍的不规则波峰值加速度，故 0.3g 的正弦波峰值加速度相当于 0.46g 的不规则波峰值加速度。因此，模型试验较好模拟了吉林台大坝的 IX 度地震。

模型试验中选择对影响坝体变形和稳定起决定作用的砂砾料和爆破料进行模拟。根据粒径效应研究成果，模型土料的限制粒径应小于土作用构件最小边长的 1/15~1/30，原型砂砾料和爆破料的最大粒径均为 600 mm，模型试验中砂砾料和爆破料的限制粒径均取为 5 mm。根据设计级配曲线，用相似级配法与等量替代法确定砂砾料和爆破料的试验级配。采用分层击实法填筑模型坝体，按模型料的最大干密度进行控制。模型试验的分层厚度为 3 cm，最大干密度为 22 kN/m³。

模型中选用与混凝土重度相近的铝材模拟面板，并采用式 (12) 抗弯刚度相似条件确定其厚度，保证施加于坝体的荷载与现场实际情况大体一致。

(2) 面板堆石坝加速度反应

图 18 中给出了坝体加速度放大系数沿坝高和水平方向的变化，可以看出，在 $0.45H$ (H 为坝高) 以下，坝体加速度与底部输入加速度基本一致，或略有减小，但在 $0.45H$ 以上，坝体加速度比底部输入加速度有明显增加，且越往坝顶加速度放大系数越大，首次振动时在 $0.82H$ 处达 1.8 倍，以此推算坝顶加速度放大系数可达 2.5 以上 (图 18 (a))。水平方向上，坝体加速度反应在坝轴线处最小，在上、下游有所增加 (图 18 (b))。

此外，随着振动次数增加，加速度放大系数沿坝高以及上下游方向的分布特点没有发生显著变化，输入加速度迅速放大的区域仍然集中在 $1/2$ 坎高以上部位。但在后续振动过程中坝体加速度放大系数逐渐提高，如 $0.82H$ 处首次地震时加速度放大系数仅 1.8，但第 3 次振动时加速度放大系数增加至 2.5 左右，这表明坝顶部堆石料的局部稳定性将随着振动次数的增加而降低。

(3) 面板的动态应变反应

图 19 (a)、19 (b) 分别给出了空库和满库时高程 1390 m ($0.76H$) 处面板下游面的应变反应过程线，可以看出，面板应变反应与输入加速度在相位上相差很大，面板应变反应不是一个正弦过程，而是向单个

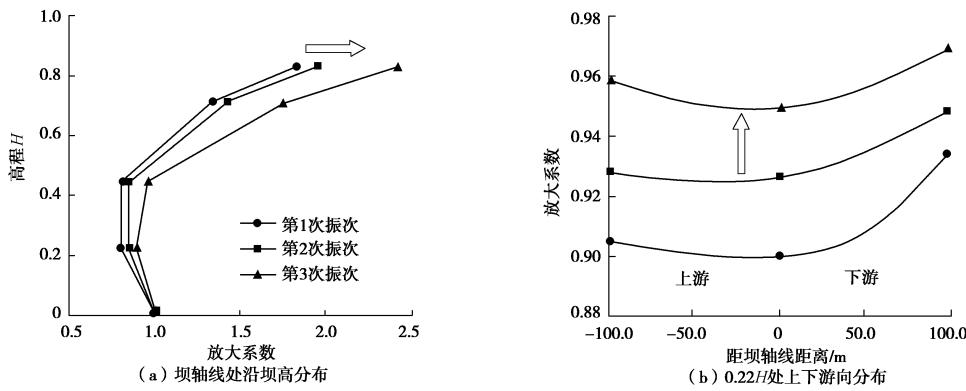


图 18 混凝土面板堆石坝加速度放大系数分布规律

Fig. 18 Amplification factor of input base acceleration within CFRD model

方向振动的不规则波动，且振幅变化范围很大。无论是空库还是满库，地震中面板的最大应变高达-7%（拉应变）左右，震后残余应变也达-0.1%左右，如此大的面板动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。

当，且试验采用的峰值加速度与地震历时也和汶川大地震主震地震动参数接近，汶川地震后紫坪铺大坝坝顶瞬间沉降为 68.4 cm^[59]，与此处试验得到的震陷量接近，这表明离心机振动台不仅可以准确地定性，且可以较为准确地定量研究高土石坝的地震响应。

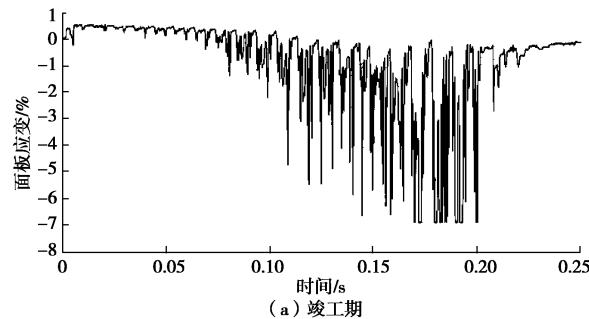


图 19 混凝土面板的动态应变过程

Fig. 19 Histories of dynamic strain of concrete slab

(4) 面板坝地震残余变形规律

根据位移计监测结果，空库时地震引起的坝顶沉降增量达 70.7 cm，下游坝坡上两个监测点（图 20）的沉降增量分别为 47.4 cm 和 20.8 cm，且位置越高沉降增量越大。坝体震陷使坝体初始轮廓产生明显的收缩，但随着振动次数增加，每次振动引起的震陷和坝壳收缩量均逐步减小，如图 20 所示，这与紫坪铺面板堆石坝在汶川地震中的残余变形分布与发展规律基本一致。吉林台面板堆石坝坝高与紫坪铺面板坝坝高相

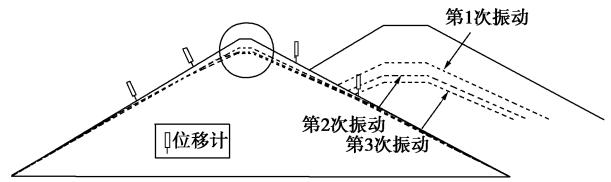


图 20 振动前后坝体轮廓图

Fig. 20 Profile of dam before and after shaking

2.3 高心墙坝地震响应与破坏机理

2009 年，运用 NHRI 离心机振动台模型试验系统以及相应的试验分析方法研究了大渡河长河坝心墙堆石坝地震响应与破坏机理^[84]。

该工程拦河大坝采用砾石土心墙堆石坝，心墙与上、下游坝壳堆石之间均设有反滤层、过渡层，防渗墙下游心墙底部及下游坝壳与覆盖层坝基之间设有水平反滤层。坝顶高程 1697.00 m，坝体建基面最低高程为 1457.00 m，最大坝高 240 m，坝顶长度 497.94 m，坝顶宽度 16.00 m，上、下游坝坡均为 1:2.0；上游坝坡在 1645.00 m 高程处设一条 5 m 宽的马道，下游坝坡分别在 1645.00, 1595.00, 1545.00 m 高程处各设一条 5 m 宽的马道。砾石土直心墙顶高程为 1696.4 m，顶宽 6 m，上、下游坡均为 1:0.25，心墙底高程为 1457.00 m，最大底宽 125.75 m，由于坝线两岸岸坡陡峻，心墙与岸坡接触部位填筑高塑性黏土以协调二者之间的变形，高塑性黏土水平厚度 3 m。心墙上、下游反滤层水平厚度分别为 8 m 和 12 m，上、下游过渡层水平厚度均为 20 m。

工程场址地震基本烈度为 VIII 度，大坝按 IX 度抗震

设防。场地安全性评价成果：基岩水平峰值加速度 50 a 超越概率 10% 为 172 gal, 50 a 超越概率 5% 为 222 gal, 100 a 超越概率 2% 为 359 gal, 100 a 超越概率 1% 为 430 gal。

(1) 试验方案

选择对影响坝体变形和稳定起决定作用的堆石料、覆盖层料和心墙料进行模拟。原型堆石料的最大粒径为 800 mm, 试验中堆石料的限制粒径取 10 mm。根据设计级配曲线, 采用相似级配法与等量替代法确定堆石料的试验级配。模型试验中, 心墙料最大粒径取 2 mm, 填筑含水率为 8%, 干密度为 2.2 g/cm^3 , 采用分层击实法进行填筑, 层厚 3 cm。覆盖层料的最大粒径亦取 2 mm, 制样含水率为 3%, 干密度为 2.1 g/cm^3 , 采用分层击实法进行制样, 层厚 3 cm。基岩采用混凝土进行模拟。

高程 1645 m 以上坝体堆石料采用土工格栅进行加固, 垂直间距 2 m; 上下游坝坡采用 1 m 厚的大块石进行护坡。模型试验中采用钢纱窗模拟土工格栅, 采用脆性胶将上下游坝坡面粘结, 使坡面堆石料不是散粒状, 具有一定的粘结力以模拟大块堆石的咬合力。两道混凝土防渗墙均采用铝板模拟, 由于混凝土和铝板弹性模量分别为 28.5 GPa 和 70 GPa, 故根据薄板结构相似准则, 主防渗墙铝板厚度为 3.8 mm; 副防渗墙铝板厚度为 3.3 mm。

模拟范围竖向从坝顶 1697 m 高程至坝基覆盖层底 1410 m 高程, 水平向从上游坝脚外 5.5 m 至下游坝脚外 5.5 m。模型比尺 $\eta=1400$, 试验布置如图 21 所示。进行了坝体不同加固方案的对比试验, 试验方案有 3 种: ①不加固方案, 不进行坝顶土工格栅和干砌石护坡及大块石护坡加固; ②坝顶加固方案, 只进行坝顶土工格栅和干砌石护坡加固; ③全加固方案, 既进行坝顶土工格栅和干砌石护坡, 又进行大块石护坡加固。上述各方案中均进行了若干组试验, 以研究输入加速度对大坝地震反应的影响。

土工格栅和干砌石护坡加固; ③全加固方案, 既进行坝顶土工格栅和干砌石护坡, 又进行大块石护坡加固。上述各方案中均进行了若干组试验, 以研究输入加速度对大坝地震反应的影响。

(2) 心墙堆石坝加速度反应

图 22 给出了不同试验方案时的坝体加速度分布(输入 100 a 超越概率 2% 地震波), 从中可以看出, 坝体加速度反应随坝高的变化大体可以分成两个线性变化段, 0.4 倍坝高以下坝体内的加速度反应较小, 但在 0.4 倍坝高之上, 坝体加速度迅速放大, 且高程越大, 加速度放大系数越大。此外, 在相同坝高平面上, 坝轴线上游侧 140 m 处的坝体加速度反应要比坝轴线处的坝体加速度反应略大。从图中还可发现, 坝顶进行加固方案的加速度放大系数小于不加固方案时加速度放大系数, 而全加固方案时的加速度放大系数又略小于坝顶加固方案的加速度放大系数。从试验结果来看, 坝顶及坝坡顶部区域的加速度放大倍数较大, 故在上述区域采用土工格栅的抗震加固措施是适当的。Kim 等开展了原型坝高为 6.4 m 的面板坝离心机振动台模型试验, 发现坝顶堆石振松后加速度放大系数显著增大^[79], 故坝顶区域土工格栅限制堆石料振松从而起到降低加速度放大系数的作用。

(3) 心墙坝残余变形规律

表 4 中分别列出了不加固、坝顶加固以及全加固 3 种方案在遭遇 100 a 超越概率 2% 地震时的坝顶震陷值和坝坡水平位移值。不加固方案时, 坝顶震陷 161 cm, 约占坝高的 0.56%; 相比而言, 水平位移远低于沉降, 指向上游和下游的水平位移分别为 17 cm 和 27 cm。采用加固方案后, 坝顶震陷和坝体水平位移均有所减小, 特别是全加固方案时, 坝顶沉陷减小

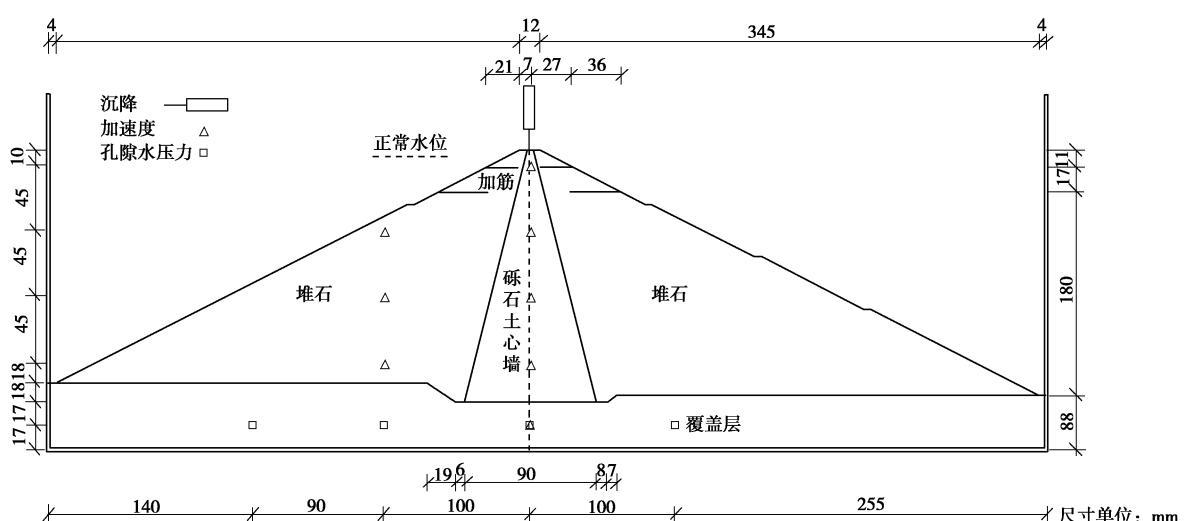


图 21 长河坝心墙堆石坝的离心模型试验布置

Fig. 21 Configuration of centrifuge model for Changheba Earth-core Rockfill Dam

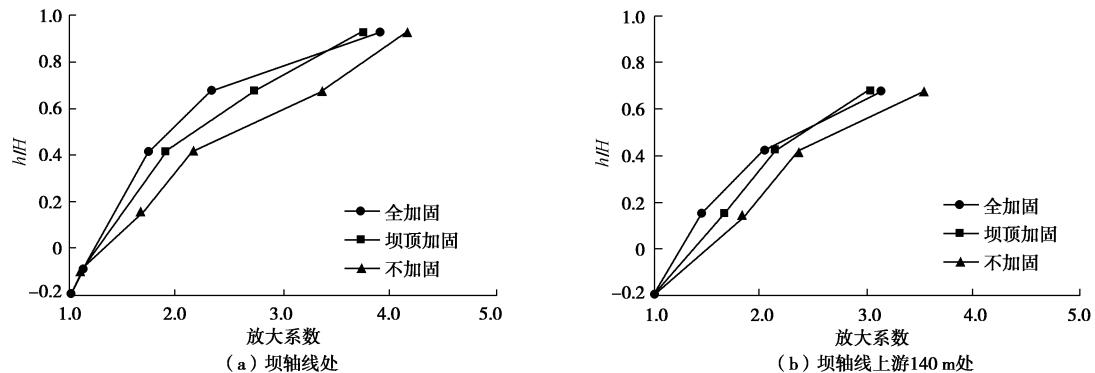


图 22 不同加固方案时加速度放大系数分布

Fig. 22 Distribution of acceleration amplification factor under different reinforcement schemes

15.5%; 上游水平位移减小 17.6%; 下游水平位移减小 22.2%，可见上述加固方案对减小坝顶沉降、保持坝坡稳定效果显著。

表 4 不同试验方案时的坝顶沉降和坝体水平位移

Table 4 Crest settlements and horizontal displacements under different settings

试验 方案	坝顶沉降 /cm	沉陷率 /%	坝体水平位移/cm	
			上游	下游
不加固	161	0.561	-17	27
坝顶加固	146	0.509	-15	23
全加固	136	0.474	-14	21

注：表中负值位移指向上游；正值位移指向下游。

图 23 中进一步绘制了坝顶沉陷率以及坝体水平位移随基岩输入加速度的变化，坝顶沉降和坝体水平位移均随着基岩输入加速度的增加而增大。陈生水等在分析大量震害调研资料和数值计算结果后建议，高心墙坝可以承受的最大震陷率为 1%^[85]，按此标准，该坝极限抗震能力在 0.55g 左右，此时坝体水平位移在 40~60 cm 之间。采用全加固方案后，该坝极限抗震能力可达到 0.65g 左右。

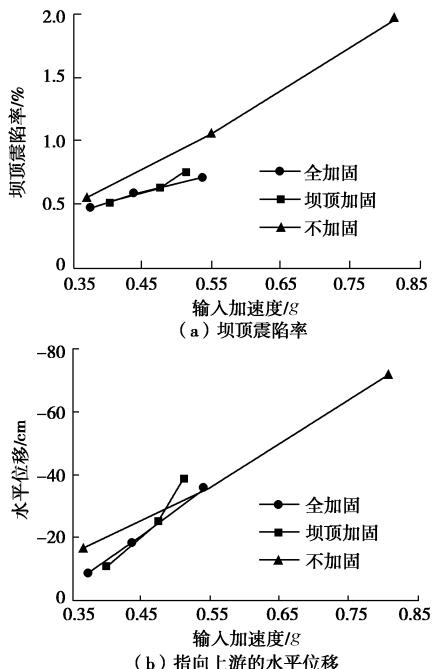


图 23 坝体残余变形随基岩加速度的变化

Fig. 23 Variation of permanent displacements with magnitude of exciting accelerations

图 24 为设计地震无抗震加固措施时坝体位移矢量图和变形前后轮廓图，可以看出大坝地震永久变形以沉降为主，水平位移相对较小。大坝沉降随着高程的增加而增大，但在水平方向分布较为均匀。地震后，大坝整体朝坝内收缩，与面板堆石坝的永久变形分布规律类似。

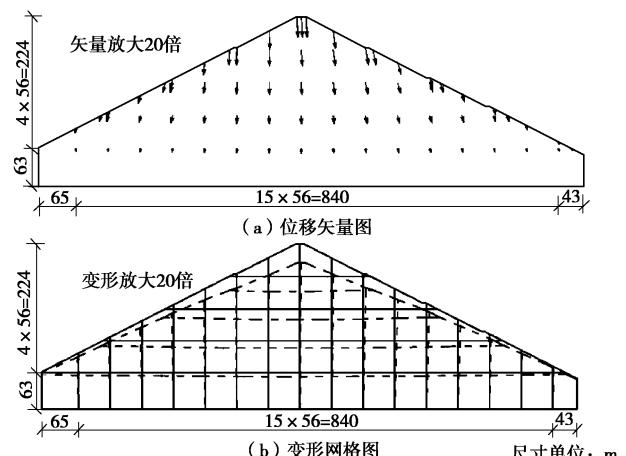


图 24 大坝位移矢量与变形前后轮廓图

Fig. 24 Displacement vectors of dam and profile before and after dynamic tests

(4) 心墙坝地震破坏机理

摄像资料表明，不加固方案在 100 a 超越概率 2%

地震条件下, 4/5 坝高以上坝体出现明显坍塌现象, 该部分堆石产生明显沉陷, 并向上下游两侧滑落, 发生局部滑动, 使堆石体与心墙出现分离趋势, 故与心墙之间产生裂缝。坝顶加固后地震破坏主要发生在加固区以下坝坡表面, 破坏模式以表面局部堆石料朝下滚落为主, 且随着地震加速度增加, 堆石料朝下滚落现象愈加明显。当采用全加固方案时, 大坝即使经受最大可信地震, 震后坝坡表面仍然完好无损, 并无明显的堆石料滚落现象。可见, 缺乏抗震加固措施的心墙堆石坝在遭受地震时难以避免出现坝坡堆石体的松动滚落, 随着堆石体松动滚落区扩大, 坝高逐渐降低, 坝坡越来越缓, 但始终未出现坝坡深层滑动的破坏现象, 故堆石坝的地震破坏模式应为坝顶附近堆石体振松后的持续滚落。堆石体滚落后对大坝产生的最致命威胁是使心墙处于临空状态, 缺乏有效的下游支撑与保护, 若此时水库在高水位运行, 极易发生心墙剪断乃至溃坝的重大安全事故^[85]。

3 土石坝溃坝离心模型试验技术研究与应用

由于水库大坝安全的极端重要性和溃坝灾害后果的严重性, 近年来, 国内外针对土石坝溃坝机理与溃坝过程开展了大量的试验研究工作, 以揭示土石坝溃坝机理, 构建能合理模拟其溃坝过程、科学预测溃坝灾害损失的数学模型。土石坝溃坝模型试验一般分为室内小尺度溃坝模型试验和野外大尺度溃坝模型试验, 前者由于模型几何尺寸小, 模型的应力水平与原型的应力水平相差过大, 试验结果常与实际不符。后者则很难寻找到合适的试验场地, 试验需占用大量土地和水资源, 费用高、准备周期长, 且随着坝高增加, 试验风险难以控制^[3, 43]。目前, 欧美等发达国家野外大尺度溃坝模型试验的最大坝高为 5.9 m^[33]; 南京水利科学研究院野外大尺度溃坝模型试验(2008 年)最大坝高达 9.7 m^[42], 但这些大尺度溃坝模型试验主要针对均质土坝进行。因此, 研发能在较短时间内真实重现各类土石坝溃坝过程, 且安全可控的土石坝溃坝模型试验技术十分必要。

3.1 溃坝离心模型试验系统与试验方法

2009 年, 笔者研究团队利用离心机高速旋转形成的超重力场具有的显著“时空压缩”效应, 突破了小比尺室内试验和现场试验的研究困境, 研制了一套土石坝溃坝离心模型试验系统(以下简称 NHRI 离心机溃坝试验系统), 并提出了试验方法^[86-88], 在较短时间内真实重现了各类土石坝的溃坝过程。

(1) NHRI 离心机溃坝试验系统研制

NHRI 离心机溃坝试验系统主要由自动水流控制

系统、溃坝试验专用模型箱以及数据采集与视频监控系统组成。

a) 大流量水流控制系统

水流控制系统主要由水源控制系统、地面水流控制系统、试验水流控制系统等三部分组成, 如图 25 所示。

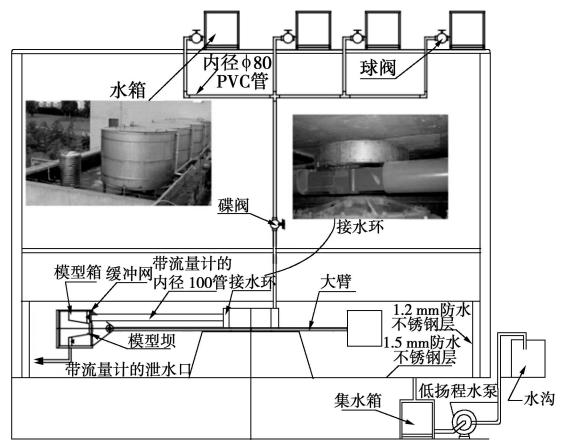


图 25 自动水流控制系统示意图

Fig. 25 Schematic illustration of automatic flow discharge control system

水源控制系统包括恒定水位水箱、阀门、管道和安全监控系统组成, 作用是为溃坝试验提供足量和稳定的水流。恒定水位水箱为 4 个内径 1.5 m、高 1.5 m 的高强度不锈钢圆柱水箱, 安装在实验室屋顶, 水箱最大储水量约 10.6 t, 其中 2 个作为直接供水箱, 用于提供试验水流, 另 2 个作为补偿水箱, 用于保证直接供水箱内水位恒定。补偿水箱高于直接供水箱, 利用浮球式自动阀门控制两者之间约 0.5 m 的水头差。显然, 将试验水源设置在离心机机室外, 可避免因在离心机大臂上设置贮水箱而影响离心机的平衡, 保障了离心机的安全运行。

地面水流控制系统由阀门、流量计、管道以及自动控制模块组成, 向上与水源控制系统相连, 向下将经过流量控制的水流输入离心机。该系统的功能是: 充分利用其不承受离心加速度作用的有利工作条件, 在地面普通重力场环境下对输入离心机的水流量进行控制, 确保在这一环节将向离心机内输送的水流调控好, 减轻后续环节的调控压力。

试验水流控制系统安装在离心机上, 由接水环、喇叭口、管道、流量计、调节阀以及自动化控制和安全监控模块组成。接水环(环形水槽, 图 25)是本试验系统设计的重要创新, 水流经地面水流控制系统进入接水环内, 固定在地面上水管与高速旋转的接水环之间为无硬件接触, 有效解决了固定件与旋转件之间的接触磨损和渗漏问题。同时, 接水环和离心机大轴同轴, 试验过程中接水环与离心机大轴同轴进行匀速

圆周运动，保证了在离心机超重力场下，接水环结构以及其内的水流均匀受力，不仅提高了接水环结构安全性，而且环内水流能顺畅地从喇叭口进入管道后注入模型箱，实现了水流在地面普通重力场和超重力场之间的平稳过渡^[87]。该系统能在100倍重力场下持续、稳定提供原型为100~500 m³/s流量的试验水流。

b) 溃坝试验专用模型箱

模型箱内部尺寸为1.2 m×0.4 m×0.8 m，与普通模型箱相比，加大了长度方向尺寸，箱体为厚度5 cm的铝合金材料制成，其一侧面为有机玻璃材料，便于试验过程中图像采集，顶部、有机玻璃面和下游面通过相机固定架分置三台高清摄像机，并布置灯源，以清晰记录溃坝全过程，如图26所示。这一专用模型箱设计思想的创新之处为^[88]：①将模型布置和模型测量两部分有机融合为一体，量水堰内嵌于模型箱内，量水堰前部就是模型的一部分，有效解决了土石坝溃坝模型布置和模型测量难以协调的难题。②内嵌于模型箱端板的量水堰测量方法，有效解决了管道流量计在坝体溃口流量变幅大、泥石与水混流情况下无法正常工作的难题，实现了土石坝溃坝全过程溃口洪水流量的精确测量。

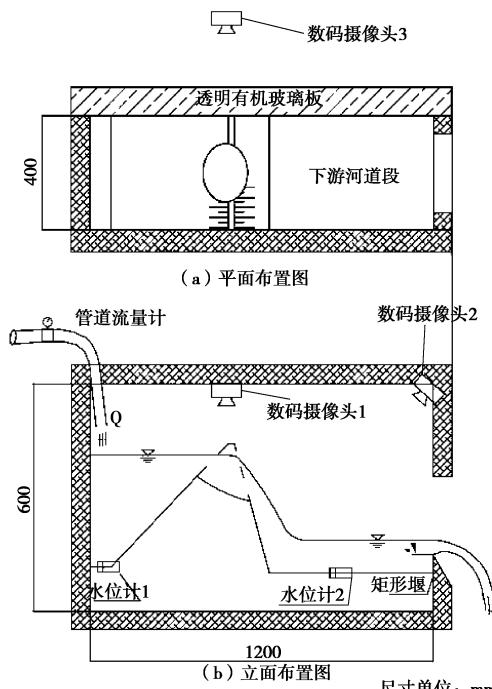


图26 溃坝试验的专用模型箱

Fig. 26 Specific model container for dam breaching experiments in NHRI centrifuge

c) 数据采集与视频监控系统

土石坝溃坝离心模型试验测量系统不仅需要常规的传感器来采集试验数据，更大程度上依赖于图像监测系统来捕捉溃坝过程。为此，研制了由常规传感器数据采集系统（图27）和图像监测系统（图28）构

成的土石坝溃坝离心模型试验数据采集与视频监控系统。数据采集系统可提供90路传感器测量通道，其中70路测量应变信号，20路测量电压信号。每通道采样频率可达1 Hz。图像监测系统分为8路视频实时监测系统和PIV（粒子成像测速技术）图像测量系统，前者用于多角度监测和摄录土石坝的溃决全过程；后者用于测量大坝溃决时坝体位移发展变化，以揭示土石坝溃决机理。该图像测量系统能有效拍摄模型侧面区域大于：500 mm×500 mm；图片像素1100万、分辨率4000×2672点阵；最快采集速率5fps（5桢/秒）。



图27 传感器数据采集系统

Fig. 27 Data acquisition system for monitoring sensors

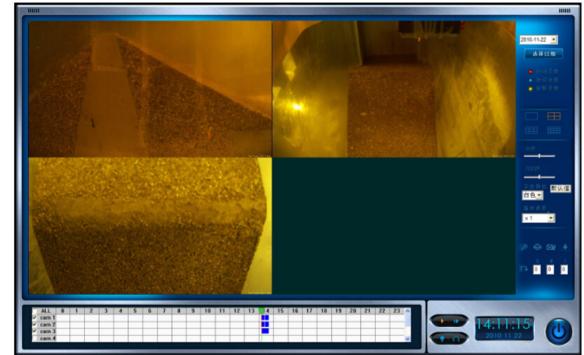


图28 视频实时监控系统

Fig. 28 Real-time video monitoring system

(2) 溃坝试验的相似准则

土石坝溃决过程是复杂的水土耦合作用过程，涉及到土力学、水力学以及材料力学相似，为根据模型试验结果推求原型值，需建立相应的相似准则。

a) 重力相似准则

牛顿重力与惯性力是等效的，溃坝离心模型试验过程中，原型所承受的重力与模型在离心机上所承受的离心力的物理效应一致。因此，土石坝溃坝离心模型试验应力相似准则与常规土工离心模型应力相似准则相同。

b) 渗流相似准则

根据Darcy定律，土体中平均水流速度可表示为

$$v = ki, \quad (13)$$

其中，

$$k = K \frac{\gamma_w}{\mu} = K \frac{\rho_w g}{\mu}, \quad (14)$$

$$i = -\frac{\Delta \bar{h}}{\Delta L}, \quad (15)$$

式中, k 为渗透系数, i 为水力梯度, K 为固有渗透率, ρ_w 为水的密度, μ 为水的动力黏滞系数。其中总水头差满足

$$\Delta \bar{h} = \left[\frac{\Delta P}{\rho_w g} \right] + \left[\frac{\Delta (v^2)}{2g} \right] + \Delta z, \quad (16)$$

其中, $\Delta P / \rho_w g$ 为压力水头差, $\Delta v^2 / 2g$ 为速度水头差, Δz 为高度水头差。由于渗透流速较小, 速度水头可忽略^[89], 联立式 (13) ~ (16) 可得渗透流速的表达式:

$$v = \frac{K}{\mu} \cdot \frac{\Delta (P + z \rho_w g)}{\Delta L}. \quad (17)$$

在溃坝离心模型试验中, $\Delta (P + z \rho_w g)_p = \Delta (P + z \rho_w g)_m; (\Delta L)_p = N(\Delta L)_m$, (其中下标“p”表示原型值, “m”表示模型值), 故由式 (17) 可以看出, 当土的固有渗透率和液体动力黏滞系数不变时, 模型中的渗流速度比原型大 N 倍, 即模型土的渗透系数是原型土渗透系数的 N 倍。

c) 剪应力相似准则

水土交界面的剪应力是影响土石坝溃口发展的主要因素^[90]。假设溃口水流为明渠流 (如图 29), 则有:

$$G \sin \theta + F_1 - F_2 - F_\tau = ma. \quad (18)$$

式中 G 为流体重量, 在 Ng 离心加速度下, $G = \rho_w Ng V$; V 为流体体积, 假设 A 为断面面积, 则 $V = AL$; F_1 和 F_2 分别表示上、下游面的作用力; F_τ 为水流所受的摩擦阻力; a 为加速度; θ 为坡角。

对于均匀流, 有 $a=0$, $F_1=F_2$, 因此:

$$F_\tau = G \sin \theta = GJ, \quad (19)$$

式中, J 为水力梯度。若设 χ 为湿周, R 为水力半径, 则水流对渠槽的平均剪应力为

$$\tau = \frac{GJ}{\chi l} = \rho_w Ng R J, \quad (20)$$

由于 $R_m=R_p/N$, $J_m=J_p$, 则在模型和原型中水流对溃口侧壁的剪应力相等, 即

$$\tau_m = \tau_p. \quad (21)$$

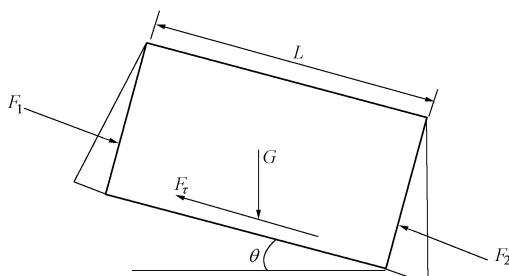


图 29 明渠流受力分析

Fig. 29 Force analysis of open channel flow

无黏性土在冲刷过程中主要有颗粒滑移和颗粒滚动两种受力模式^[91], 其中, 颗粒滑移情况可以用图 30

(a) 所示模式进行分析, 临界剪应力满足:

$$\tau_c = \frac{W \tan \varphi}{A_e}, \quad (22)$$

式中, φ 为内摩擦角, A_e 为两颗粒间的有效接触面积。对于圆形颗粒,

$$\tau_c = 2 \frac{(\rho_s - \rho_w) Ng \tan \varphi}{3\alpha} d_{50}, \quad (23)$$

式中, α 为土颗粒间有效接触面积和最大横截面积的比值, d_{50} 为平均粒径。

无黏性土颗粒滚动情况可以用图 30 (b) 所示模式进行分析, 临界剪应力满足:

$$\tau_c = \frac{W b}{A_e a}, \quad (24)$$

对于圆形颗粒,

$$\tau_c = \frac{2(\rho_s - \rho_w) Ng \sin \beta}{3a(1 + \cos \beta)} d_{50}, \quad (25)$$

式中, 参数 a , b , β 的含义如图 30 (b) 所示。

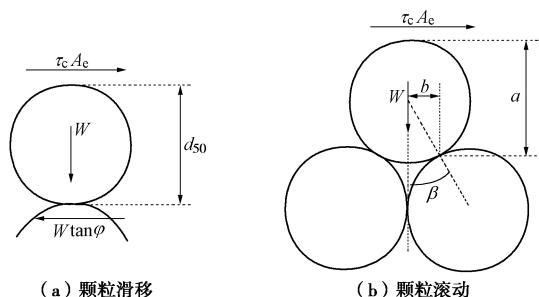


图 30 无黏性土冲刷过程中颗粒受力示意图

Fig. 30 Schematic illustration of forces exerting upon particles during erosion of cohesionless soils

对比式 (23)、(25) 可以看出, 在离心加速度一定的条件下, 无黏性土的临界剪应力与平均粒径呈正比关系, 引入参数 ξ , 无黏性土的临界剪应力可以表示为

$$\tau_c = \xi \rho_w Ng (G_s - 1) d_{50}, \quad (26)$$

当 $\tau > \tau_c$ 时, 土颗粒启动, 水流对土体的冲刷开始, 引入判别参数 F_s ,

$$F_s = \frac{\tau}{\tau_c} = \frac{\rho_w Ng R J}{\xi \rho_w Ng (G_s - 1) d_{50}} = \frac{R J}{\xi (G_s - 1) d_{50}}, \quad (27)$$

由此可见, 对于无黏性土, 当 $F_s \geq 1$ 时, 土颗粒开始被冲刷, 在离心模型试验中, 要保证模型和原型相似, 需有 $(F_s)_m = (F_s)_p$, 由于 $R_m = R_p/N$, 为了保证离心模型试验模拟无黏性土石坝溃坝过程的准确性, 需将模型无黏性土石料的颗粒粒径较原型缩小 N 倍, 即

$$(d_{50})_m = \frac{(d_{50})_p}{N}. \quad (28)$$

在黏性土坝溃坝问题中，黏土冲刷往往不是单粒启动，而是一种粒团启动的形式被冲蚀，随着水流速度的增大，粒团大小也会不断变化，最后表现为块体冲刷的形式，因此颗粒粒径并不是主要因素。

d) 水流相似准则

土石坝溃坝致灾后果与溃坝洪水流量过程及溃坝洪水流量峰值密切相关，应用离心模型试验研究溃坝问题，需要建立模型水流和原型水流的相似准则。设土石坝溃坝过程中漫顶水流为稳定流，根据谢才公式，水流流速可以表示为

$$v = \left(\frac{8g}{f} \right)^{\frac{1}{2}} R^{\frac{1}{2}} J^{\frac{1}{2}}, \quad (29)$$

式中， f 为糙度系数，与离心加速度无关，因此模型和原型的水流速度相等。

假设溃口过水断面的面积为 A ，则溃口流量 $Q=vA$ ，因 $A_m=A_p/N^2$ ，故

$$Q_m = \frac{Q_p}{N^2}. \quad (30)$$

通过以上分析，土石坝溃坝离心模型试验中常用物理量的相似准则可由表 5 给出。

3.2 土石堤坝的溃决机理与溃坝过程

强降雨导致的超标准洪水是土石堤坝溃决的主要原因，运用上述试验系统和试验方法研究了均质土

坝、心墙堆石坝和面板堆石坝的漫顶溃决过程。

(1) 均质土坝溃坝机理

模拟了一座坝高 9.7 m 实体坝的溃坝过程，离心模型试验结果显示，漫坝水流首先对下游坝坡进行冲刷，在下游坝坡形成一条下宽上窄的“葫芦”形冲槽，然后冲槽在水流作用下持续下切变深，冲槽侧壁附近的螺旋流也持续对侧壁进行淘刷，使其不断变宽。随着溃口流量加大和流速加快，冲槽逐渐向坝体上游推进，冲槽（溃口）边坡发生间歇性失稳坍塌，溃口出现横向大扩展，形成如图 31 所示的最终溃口，溃口尺寸为：顶部宽度 15.0 m（实体坝 15.5 m）、底部宽度 11.0 m（实体坝 12.1 m）、深度 5.0 m（实体坝 4.4 m）；溃口峰值流量为 $46.0 \text{ m}^3/\text{s}$ （实体坝 $47.02 \text{ m}^3/\text{s}$ ），峰值流量出现在溃坝发生后的 14 min（实体坝 12 min）^[86]。可以看出，离心模型试验结果与实体坝溃坝试验结果基本一致，从而验证了溃坝离心模型试验系统与试验分析方法的可靠性。

(2) 心墙堆石坝溃坝机理

心墙坝的溃坝机理和溃坝过程与均质土坝明显不同，当心墙坝发生水流漫顶时，漫坝水流首先对下游坝壳进行冲刷，随着下游坝壳冲蚀程度的增加，心墙下游侧面逐渐暴露临空^[92-93]。在上游水压力和土压力的共同作用下，心墙发生剪断破坏，溃口洪水流量

表 5 溃坝离心模型试验的相似常数（原型值/模型值）

Table 5 Similar constants for dam breach modeling in centrifuges (prototype/model)

物理量	密度 ρ	应力 σ	加速度 g	压强 p	长度 l	颗粒 粒径 d	力 F	渗透 系数 k	流速 v	时间 t	流量 Q
量纲	M/L^3	ML^{-1}/T^2	L/T^2	ML^{-1}/T^2	L	L	ML/T^2	L/T	L/T	T	L^3/T
相似常数	1	1	$1/N$	1	N	N	N^2	$1/N$	1	N	N^2



图 31 均质土坝漫顶溃决过程

Fig. 31 Breaching processes of a homogeneous earth dam during overtopping



图 32 心墙堆石坝漫顶溃决过程

Fig. 32 Breaching processes of an earth-core rockfill dam during overtopping



图 33 面板堆石坝漫顶溃决过程

Fig. 33 Breaching processes of a slab face rockfill dam during overtopping

突然增大到最大值。随着库水位下降，溃口流量很快降低为零，最终形成如图 32 所示的溃口和残留坝体。

(3) 面板堆石坝溃坝机理

混凝土面板堆石坝形成初始溃口后，随着库水的冲蚀，下游坝体高程虽然在不断降低，但面板在尚未冲毁的下游坝体支撑下，仍起着挡水作用，此时水头并未因下游坝体高程降低而增加。但随着水流对面板下游坝体的持续冲蚀，面板悬空长度不断增加，当面板无法承受自重和水荷载共同作用时，面板折断，水头突然增大，从而引起溃口洪水流量迅速增大^[86, 94]。面板坝的溃坝过程实际上就是上述过程的多次重复，最终形成如图 33 所示的溃口和残留坝体。

基于上述试验研究，笔者研究团队近年来改进了均质土石坝溃坝数学模型；创建了能正确反映黏土心墙坝、混凝土面板坝和堰塞坝的溃决机理，合理模拟其溃坝过程的数学模型，为提高溃坝洪水过程预测精度奠定了重要基础^[92-99]，限于篇幅，文中不加详述。

4 总结与展望

科学实验是科学理论的泉源，是自然科学的根本，是工程技术的基础。本文介绍了笔者研究团队近年来在高土石坝试验技术、分析方法以及工程应用等方面的研究成果，总结如下：

(1) 研制的多功能静动力大型三轴试验系统是中国首台能够测量堆石料动态变形过程的大型三轴试验系统，该系统的围压变化范围为 0.05~4.0 MPa，满足 300 m 级高土石坝不同部位堆石料力学特性试验的应力水平需求。通过在压力室底座上设置刚性连杆，基本消除了其系统变形，提高了循环荷载下堆石料试样体积变形和轴向变形动态变化过程的测量精度。该系统已成功应用于国内外 70 余座高土石坝筑坝堆石料静动力强度变形特性及其变化规律的试验研究，几乎包括了中国近年来所建的所有重要土石坝工程，构建了内容丰富且具有重要使用价值的高土石坝筑坝堆石料静动力学性质试验数据库，揭示了在静动荷载作用

下堆石料的颗粒破碎规律及其影响因素、强度与剪胀（缩）非线性变化规律、地震残余变形发展规律、流变规律等，为解决土石坝变形“高坝算不大、低坝算不小”这一难题奠定了试验基础。

(2) 创建的高土石坝离心机振动台模型试验技术和试验结果分析方法，成功应用于高面板堆石坝与心墙堆石坝地震破坏机理和抗震加固方案有效性验证，得出的高土石坝地震加速度反应和地震残余变形定性与定量分布规律、高土石坝地震破坏机理结果得到了汶川地震后紫坪铺面板堆石坝和碧口心墙堆石坝震害资料的证实。较好解决了目前高土石坝地面振动台模型试验与原型应力水平相差过大，常规离心机振动台模型试验因模型箱尺寸和振动台功率限制无法进行与原型应力水平一致的模型试验的难题。

(3) 土石坝溃坝离心模型试验系统中的大流量水流控制装置实现了水流在地面普通重力场和超重力场之间的平稳过渡；专用溃坝模型箱将模型布置和模型测量两部分有机融合为一体，有效解决了土石坝溃坝模型布置和模型测量难以协调的难题，内嵌于模型箱端板的量水堰测量方法，有效解决了管道流量计在坝体溃口流量变幅大、泥石流情况下无法正常工作的难题，实现了土石坝溃坝全过程溃口洪水流量的测量。为揭示土石坝溃坝机理与溃坝过程，进一步提升溃坝洪水灾害预测水平提供了先进手段。

目前，中国土石坝工程试验技术仍在快速发展，部分超大型的三轴试验系统和离心模型试验系统正在新建，笔者认为进一步提升高土石坝工程试验技术仍需在下述方面取得突破：

(1) 缩尺效应对筑坝材料静动力试验结果的影响以及合适的缩尺方法

多年来，国内外在粗颗粒料缩尺效应方面已开展大量的研究工作，但仍未形成普遍认可的缩尺方法，有时同一种筑坝材料，不同单位试验结果存在可观的差异，给设计人员带来不小困惑。困难在于未经缩尺的原型坝料的力学参数目前还没有有效的手段去获

取, 导致缩尺试样的试验结果没有可信的比较标准。因此, 建设少量超大型三轴试验系统是有必要的。但在目前的技术经济水平下, 大范围推广超大型三轴试验系统是不现实的, 笔者认为, 研究的重点仍应落实于缩尺方法上。近年来, 不少已运行多年高土石坝的原型观测资料以及离散介质的计算机模拟技术快速发展, 为缩尺效应的深入研究提供了新的资料和技术手段, 有望通过反馈分析与数值试验研究相结合, 在该领域取得新突破。

(2) 超高土石坝破坏与溃决机理的离心模型试验方法

离心机高速旋转产生的超重力场具有显著的“时空压缩”效应, 这是采用缩尺模型研究原型大坝破坏和溃决机理的物理基础。但中国土石坝高度已达300 m量级, 在现有的离心机及其相关设备工作能力限制下, 仍远不具有直接模拟该类高坝静动力响应的能力。为解决该问题, 本文提出了应力逼近的小比尺离心模型试验分析方法, 但该方法获取原型大坝的反应是通过外延分析得到的, 其可靠性仍有待更多案例验证。目前, 中国部分科研院所正在建设更大规模的离心模型试验系统, 不仅投资巨大, 建成后使用和维护成本也非常高。笔者认为, 仍应将研究的重点放在试验分析方法上, 以期利用现有的离心模型试验设备研究更高土石坝的地震破坏与溃决机理。近年来, 数值模拟方法和离心模型试验相互验证的案例不断涌现, 数值模拟可望成为研究离心模型试验方法的有力辅助工具。

(3) 现场试验及本构模型参数获取方法

近年来, 中国覆盖层上的土石坝数量不断增加, 许多工程覆盖层深度深达百米, 部分工程甚至达到数百米。对于这类工程问题, 现场试验因对原始土层扰动较小, 真实反映原位应力状态等特点, 在获取参数方面往往比室内试验更具优势。特别是对于河床深部覆盖层, 难以取样, 现场试验或许是确定其参数的唯一途径。但目前载荷试验、旁压试验以及波速试验等常规现场试验测试的变量较为单一, 将其运用于确定复杂本构模型参数时难度很大。提出适合覆盖层的实用本构模型, 研发与其参数确定相匹配的现场测试系统将具有重大的学术意义和工程实用价值。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部, 中华人民共和国国家统计局. 第一次全国水利普查公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013. (The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, National Bureau of Statistics of the

People's Republic of China. Bulletin of first national census for water[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013. (in Chinese))

- [2] 水利部大坝安全管理中心. 全国水库垮坝登记册[R]. 南京: 水利部大坝安全管理中心, 2008. (Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources. National liber of dam breaching events[R]. Nanjing: Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, 2008. (in Chinese))
- [3] 陈生水. 土石坝溃决机理与溃坝过程模拟[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012. (CHEN Sheng-shui. Breach mechanism and simulation of breach process for earth-rock dams[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2012. (in Chinese))
- [4] 汪小刚, 邢义川, 赵剑明. 西部水工程中的岩土工程问题[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1129 - 1134. (WANG Xiao-gang, XING Yi-chuan, ZHAO Jian-ming. Geotechnical engineering problems associated with construction of water resource projects in western China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1129 - 1134. (in Chinese))
- [5] 陈生水, 方绪顺, 钱亚俊. 高土石坝地震安全评价及抗震设计思考[J]. 水利水运工程学报, 2011, 1: 17 - 21. (CHEN Sheng-shui, FANG Xu-shun, QIAN Ya-jun. Thoughts on safety assessment and earthquake-resistance for high earth-rock dams[J]. Hydro-Science and Engineering, 2011, 1: 17 - 21. (in Chinese))
- [6] 马洪琪. 300 m级面板堆石坝适应性及对策研究[J]. 中国工程科学, 2011, 13(12): 4 - 8. (MA Hong-qi. 300 m grade concrete faced rockfill dam adaptability and countermeasures[J]. Chinese Engineering Sciences, 2011, 13(12): 4 - 8. (in Chinese))
- [7] MARACHI N D, CHAN C K, SEED H B. Evaluation of properties of rockfill materials[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundations Diversion, ASCE, 1972, 98(SM1): 95 - 114.
- [8] 马刚, 周伟, 常晓林. 堆石料缩尺效应的细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(12): 2473 - 2482. (MA Gang, ZHOU Wei, CHANG Xiao-lin. Mesoscopic mechanism study of scale effects of rockfill[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(12): 2473 - 2482. (in Chinese))
- [9] VARADARAJAN A, SHARMA K G, VENKATACHALAM K. Testing and modeling two rockfill materials[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,

- 2003, **129**(3): 206 – 218.
- [10] 刘萌成, 高玉峰, 刘汉龙. 粗粒料大三轴试验研究进展[J]. 岩土力学, 2002, **23**(2): 217 – 221. (LIU Meng-cheng, GAO Yu-feng, LIU Han-long. Development of study on a large scale triaxial test of coarse-grained materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(2): 217 – 221. (in Chinese))
- [11] 于 浩, 李海芳, 温彦峰. 九甸峡堆石料三轴蠕变试验初探[J]. 岩土力学, 2007, **28**(增刊 1): 103 – 106. (YU Hao, LI Hai-fang, WEN Yan-feng. Study on triaxial creep test for Jiudianxia rockfill materials[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(S1): 103 – 106. (in Chinese))
- [12] 沈珠江, 徐 刚. 堆石料的动力变形特性[J]. 水利水运科学研究, 1996(2): 143 – 150. (SHEN Zhu-jiang, XU Gang. Deformation behavior of rock materials under cyclic loading[J]. Hydro-Science and Engineering, 1996(2): 143 – 150. (in Chinese))
- [13] 程展林, 丁红顺, 吴良平. 粗粒土试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(8): 1151 – 1158. (CHENG Zhan-lin, DING Hong-shun, WU Liang-ping. Experimental study on mechanical behaviour of granular material[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(8): 1151 – 1158. (in Chinese))
- [14] 陈生水, 韩华强, 傅 华. 循环荷载下堆石料应力变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(8): 1151 – 1157. (CHEN Sheng-shui, HAN Hua-qiang, FU Hua. Stress and deformation behaviors of rockfill under cyclic loadings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(8): 1151 – 1157. (in Chinese))
- [15] ZHU Y L, KONG X J, ZOU D G. Shaking table test and numerical simulation on the effect of reinforcement on the seismic safety of dam slopes[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, **18**(4): 132 – 138.
- [16] WARTMAN J, SEED R B, BRAY J D. Shaking table modeling of seismically induced deformations in slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(5): 610 – 622.
- [17] UENG T S, WANG M H, CHEN M H. A large biaxial shear box for shaking table test on saturated sand[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, **29**(1): 1 – 8.
- [18] KUTTER B L, JAMES R G. Dynamic centrifuge model tests on clay embankments[J]. Géotechnique, 1989, **39**(1): 91 – 106.
- [19] ROVA R L, SITAR N. Centrifuge model studies of the seismic response of reinforced soil slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(3): 388 – 400.
- [20] 王年香, 章为民, 顾行文. 高心墙堆石坝地震反应复合模型研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(5): 798 – 804. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen. Combined model for seismic responses of high core rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(5): 798 – 804. (in Chinese))
- [21] 韩国城, 孔宪京. 面板堆石坝体永久变形、面板应力及抗震措施研究[R]. 大连: 大连理工大学, 1995. (HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing. Permanent deformation, slab stress and anti-earthquake measures of concrete face rockfill dam[R]. Dalian: Dalian University of Technology, 1995. (in Chinese))
- [22] 韩国城, 孔宪京, 王承伦. 天生桥面板堆石坝三维整体模型动力试验研究[C]// 第三届全国地震工程会议论文集. 大连, 1990: 1373 – 1378. (HAN Guo-cheng, KONG Xian-jing, WANG Cheng-lun. Three dimensional integral dynamic experiments on Tianshengqiao concrete face rockfill dam[C]// Proceedings of 3rd National Conference on Earthquake Engineering. Dalian, 1990: 1373 – 1378. (in Chinese))
- [23] 孔宪京, 刘 君, 韩国城. 面板堆石坝动力破坏模型试验与数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(1): 26 – 30. (KONG Xian-jing, LIU Jun, HAN Guo-cheng. Dynamic failure test and numerical simulation of model concrete-faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(1): 26 – 30. (in Chinese))
- [24] 刘小生, 王钟宁, 汪小刚. 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 Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, WANG Xiao-gang. Large scale shaking table tests and dynamical response analysis of concrete face rockfill dams[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2005. (in Chinese))
- [25] 刘小生, 王钟宁, 赵剑明. 面板堆石坝振动模型试验及动力分析研究[J]. 水力学报, 2002, **33**(2): 29 – 35. (LIU Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, ZHAO Jian-ming. Advancement of technology on shaking table model test and dynamic analysis of CFRD[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, **33**(2): 29 – 35. (in Chinese))
- [26] PRASAD S K, TOWHATA I, CHANDRADHARA G P. Shaking table tests in earthquake geotechnical engineering[J]. Current Science Special Section: Geotechnics and Earthquake Hazards, 2004, **87**(10): 1398 – 1404.

- [27] 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. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Centrifuge model test for seismic response of concrete face rock fill dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2003(1): 18 - 22. (in Chinese))
- [28] SCHOFIELD A N. Cambridge geotechnical centrifuge operations[J]. Géotechnique, 1980, **30**(3): 227 - 268.
- [29] KAGAWA T, SATO M, MINOWA C. Centrifuge simulations of large-scale shaking table tests: case studies[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, **130**(7): 663 - 672.
- [30] 徐泽平, 侯瑜京, 梁建辉. 深覆盖层上混凝土面板堆石坝的离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(9): 1323 - 1328. (XU Ze-ping, HOU Yu-jing, LIANG Jian-hui. Centrifugal model tests on CFRD on deep alluvium foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(9): 1323 - 1328. (in Chinese))
- [31] WOOD D M. Geotechnical modelling[M]. London: Spon Press, 2004.
- [32] IWASHIRA T. Elasto-plastic effective stress analysis of centrifugal shaking tests of a rockfill dam[C]// Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, 2008.
- [33] MORRIS M W, HASSAN M A A M, VASKINN K A. Conclusions and recommendations from the IMPACT Project WP2: Breach formation[R]. Munich: HR Wallingford Ltd, 2004.
- [34] HANSON G J, COOK K R, HUNT S L. Physical modeling of overtopping erosion and breach formation of cohesive embankments[J]. Transactions of the ASAE, 2005, **48**(5): 1783 - 1794.
- [35] HANSON G J, ROBINSON K M, COOK K R. Prediction of headcut migration using a deterministic approach[J]. Transactions of the ASAE, 2001, **44**(3): 525 - 531.
- [36] HUNT S L, HANSON G J, COOK K R. Breach widening observations from earthen embankment tests[J]. Transactions of the ASAE, 2005, **48**(3): 1115 - 1120.
- [37] XING H F, GONG X N, ZHOU X G. Construction of concrete-faced rockfill dams with weak rocks[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(6): 778 - 785.
- [38] HUANG A B, FANG C K, LIAO J J. Development of a multiple-purpose borehole testing device for soft rock[J]. Geotechnical Testing Journal, 2002, **25**(3): 1 - 7.
- [39] 石祥锋, 汪 稔, 张家铭. 旁压试验在岩土工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(增刊 1): 4442 - 4445. (SHI Xiang-feng, WANG Ren, ZHANG Jia-ming. Application of pressuremeter tests in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(S1): 4442 - 4445. (in Chinese))
- [40] CONSOLI N C, ROSA F D, FONINI A. Plate load tests on cemented soil layers overlaying weaker soil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **135**(12): 1846 - 1857.
- [41] CONSOLI N C, SCHNAID F, MILITITSKY J. Interpretation of plate load tests on residual soil site[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(9): 857 - 867.
- [42] ZHANG J Y, LI Y, XUAN G X. Overtopping breaching of cohesive homogeneous earth dam with different cohesive strength[J]. Science in China (Series E), 2009, **52**(10): 3024 - 3029.
- [43] 陈生水, 章为民, 傅 华. 土石坝工程重大试验技术研究与应用[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014. (CHEN Sheng-shui, ZHANG Wei-min, FU Hua. Permanent deformation, slab stress and anti-earthquake measures of concrete face rockfill dam[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [44] 陈生水, 张建卫, 蔡正银. 高土石坝堆石料抗震特性多功能试验仪: 中国, ZL 2013 1 0699956.0[P]. 2014. (CHEN Sheng-shui, ZHANG Jian-wei, CAI Zheng-yin. A multi-purpose experimental apparatus for dynamical properties of rockfill materials used in high earth-rock dams: China, ZL 2013 1 0699956.0[P]. 2014. (in Chinese))
- [45] 陈生水, 杨德明, 李国英. 堆石料劣化大型三轴剪切试验仪: 中国, ZL 2013 1 0700062.9[P]. 2014. (CHEN Sheng-shui, YANG De-ming, LI Guo-ying. A large triaxial shearing apparatus for degradation behaviour of rockfill materials: China, ZL 2013 1 0700062.9[P]. 2014. (in Chinese))
- [46] GAJO A. The influence of system compliance on collapse of triaxial sand samples[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**: 257 - 273.
- [47] ZHOU W, CHANG X L, ZHOU C B. Creep analysis of high concrete-faced rockfill dam[J]. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 2010, **26**(11): 1477 - 1492.

- [48] CLEMENTS R P. Post-construction deformation of rockfill dams[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, **110**: 821 - 840.
- [49] NOBARI E S, DUNCAN J M. Effect of reservoir filling on stresses and movements in earth and rockfill dams[R]. Berkeley: Department of Civil Engineering, University of California. TE-72-1, 1972.
- [50] WATTS K S. A device for automatic logging of volume change in large scale triaxial tests[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 1980, **3**(1): 41 - 44.
- [51] GACHET P, GEISER F, LALOUI L. Automatic digital image processing for volume change measurement in triaxial cells[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2007, **30**(2): 1 - 6.
- [52] YIN J H. A double cell triaxial system for continuous measurement of volume changes of an unsaturated or saturated soil specimen in triaxial testing[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2003, **26**(3): 1 - 6.
- [53] LADE P V. Assessment of test data for selection of 3-D failure criterion for sand[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2006, **30**: 307 - 333.
- [54] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[M]. New York: John & Wiley, 1948.
- [55] 刘汉龙, 秦红玉, 高玉峰. 堆石粗粒料颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学, 2005, **26**(4): 562 - 566. (LIU Han-long, QIN Hong-yu, GAO Yu-feng. Experimental study on particle breakage of rockfill and coarse aggregates[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, **26**(4): 562 - 566. (in Chinese))
- [56] 孙吉主, 汪 稳. 钙质砂的颗粒破碎和剪胀特性的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(4): 641 - 644. (SUN Ji-zhu, WANG Ren. Influence of confining pressure on particle breakage and shear expansion of calcareous sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, **23**(4): 641 - 644. (in Chinese))
- [57] COOP M R, SORENSEN K K, FREITAS T B. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. *Géotechnique*, 2004, **54**(3): 157 - 163.
- [58] YAO Y P, YAMAMOTO H, WANG N D. Constitutive model considering sand crushing[J]. *Soils and Foundations*, 2008, **48**(4): 603 - 608.
- [59] 陈生水, 霍家平, 章为民. "5.12"汶川地震对紫坪铺混凝土面板坝的影响及原因分析[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(6): 795 - 801. (CHEN Sheng-shui, HUO Jia-ping, ZHANG Wei-min. Analysis of effects of '5.12' Wenchuan Earthquake on Zipingpu concrete face rockfill dam[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, **30**(6): 795 - 801. (in Chinese))
- [60] MARSAL R J. Large-scale testing of rockfill materials[J]. *Journal of Soils Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 1967, **93**(2): 27 - 43.
- [61] NAKATA Y, HYODO M, HYDE A F L. Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression[J]. *Soils and Foundations*, 2001, **41**(1): 69 - 82.
- [62] NAKATA Y, KATO Y, HYODO M. One-dimensional compression behavior of uniformly graded sand related to single particle crushing strength[J]. *Soils and Foundations*, 2001, **41**(2): 39 - 51.
- [63] FU Z Z, LIU S H, GAO J J. On one-dimensional compression of breakable granular materials[C]// Proceedings of the International Symposium on Modern Technologies and Long-term Behaviour of Dams. Zhengzhou, 2011: 63 - 69.
- [64] 陈生水, 傅中志, 韩华强. 一个考虑颗粒破碎的堆石料弹性本构模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(10): 1489 - 1495. (CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi, HAN Hua-qiang. An elastoplastic model for rockfill materials considering particle breakage[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2011, **33**(10): 1489 - 1495. (in Chinese))
- [65] GUDEHUS G. A comprehensive constitutive equation for granular materials[J]. *Soils and Foundations*, 1996, **36**(1): 1 - 12.
- [66] 徐 斌. 饱和砂砾料液化及液化后特性试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007. (XU Bin. Experimental study on liquefaction and behavior of post-liquefaction deformation and strength in saturated sand-gravel composites[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [67] SEED H B, PHILIPPE D, MARTIN J L. Pressure changes during soil liquefaction[J]. *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1976, **102**(GT4): 323 - 346.
- [68] SEED H B, IDRISI I M. Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Divisions, ASCE*, 1971, **97**(9): 1249 - 1273.
- [69] 王占军, 陈生水, 傅中志. 堆石料的剪胀特性与广义塑性本构模型[J]. 岩土力学, 2015. (待刊) (WANG Zhan-jun, CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi. Dilatancy behaviors and a generalized plasticity model of rockfill materials[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015. (Accepted. in Chinese))
- [70] FU Z Z, CHEN S S, PENG C. Modeling cyclic behavior of rockfill materials in a framework of generalized plasticity[J].

- International Journal of Geomechanics, 2014, **14**(2): 191 - 204.
- [71] 陈生水, 彭成, 傅中志. 基于广义塑性理论的堆石料动力本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(11): 1961 - 1968. (CHEN Sheng-shui, PENG Cheng, FU Zhong-zhi. Dynamic constitutive model for rockfill materials based on generalized plasticity theory[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(11): 1961 - 1968. (in Chinese))
- [72] FU Z Z, CHEN S S, LIU S H. Hypoplastic constitutive modeling of the wetting induced creep of rockfill materials[J]. Science China Technological Sciences, 2012, **55**(7): 2066 - 2082.
- [73] 王占军, 陈生水, 傅中志. 堆石料流变的黏弹塑性本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **35**(12): 2188 - 2194. (WANG Zhan-jun, CHEN Sheng-shui, FU Zhong-zhi. Visco-elastic-plastic constitutive model of creep deformation for rockfill materials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **35**(12): 2188 - 2194. (in Chinese))
- [74] 韩华强. 高土石坝坝体及坝基土石料强度变形特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2012. (HAN Hua-qiang. Study on strength and deformation characteristics of materials of high earth-rock dam and its foundation[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2012. (in Chinese))
- [75] 王永志. 大型动力离心机设计理论与关键技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2013. (WANG Yong-zhi. Theories and key technologies in designing a large scale dynamical centrifuge[D]. Haerbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2013. (in Chinese))
- [76] 包承纲, 蔡正银, 陈云敏. 岩土离心模拟技术的原理和工程应用[M]. 武汉: 长江出版社, 2011. (BAO Cheng-gang, CAI Zheng-yin, CHEN Yun-min. Principles of geotechnical centrifuge modeling techniques and engineering application[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2011. (in Chinese))
- [77] 杜延龄, 韩连兵. 土工离心模型试验技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (DU Yan-ling, HAN Lian-bing. Experimental techniques of geotechnical centrifuge modeling[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese))
- [78] 章为民, 王年香, 陈生水. 地震动力离心模型试验外延分析方法: 中国, ZL 2014 1 0017427.2[P]. 2014. (ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, CHEN Sheng-shui. An extrapolation method for dynamic centrifuge experiments simulating earthquakes: China, ZL 2014 1 0017427.2[P]. 2014. (in Chinese))
- [79] KIM M K, LEE S H, CHOO Y W. Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2011, **31**: 1579 - 1593.
- [80] BAZIAR M H, SALEMI S, MERRIFIELD C M. Dynamic centrifuge model tests on asphalt-concrete core dams[J]. Géotechnique, 2009, **59**(9): 763 - 771.
- [81] KANTHASAMY K Muraleetharan, SACHIN Deshpande, KORKAN Adalier. Dynamical deformations in sand embankments: centrifuge modeling and blind, fully coupled analyses[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, **41**: 48 - 69.
- [82] 范钦珊, 殷雅俊. 材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008. (FAN Qin-shan, YIN Ya-jun. Mechanics of materials[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese))
- [83] 王年香, 章为民. 吉林台一级水电站混凝土面板砂砾石坝离心模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2001. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Centrifuge model tests on the concrete face sand-gravel dam in Jilintai hydropower station[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2001. (in Chinese))
- [84] 王年香, 章为民, 顾行文. 长河坝抗震安全性评价与抗震措施离心模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen. Safety evaluation of the Changheba earth-core rockfill dam against earthquakes and the effectiveness of the anti-earthquake measurements based on centrifuge model tests[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [85] 陈生水, 李国英, 傅中志. 高土石坝地震安全控制标准与极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 59 - 65. (CHEN Sheng-shui, LI Guo-ying, FU Zhong-zhi. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 59 - 65. (in Chinese))
- [86] 陈生水, 徐光明, 钟启明. 土石坝溃坝离心模型试验系统研制及应用[J]. 水利学报, 2012, **43**(2): 241 - 245. (CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming, ZHONG Qi-ming. Development and application of centrifugal model test

- system for break of earth-rock dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **43**(2): 241 – 245. (in Chinese))
- [87] 陈生水, 徐光明, 顾行文. 离心机大流量水流控制系统: 中国, ZL 2011 1 0434073.8[P]. 2011. (CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming, GU Xing-wen. Large flow discharge control system of centrifugal machine: China, ZL 2011 1 0434073.8[P]. 2011. (in Chinese))
- [88] 陈生水, 徐光明, 顾行文. 土石堤坝溃坝离心模型试验分析方法: 中国 ZL 2014 1 0018834.5[P]. 2014. (CHEN Sheng-shui, XU Guang-ming, GU Xing-wen. Experimental and analytical methods for centrifuge model tests on breach mechanism of earth and rockfill embankments: China ZL 2014 1 0018834.5[P]. 2014. (in Chinese))
- [89] THUSYANTHAN N I, MADABHUSHI S P G. Scaling of seepage flow velocity in centrifuge models[R]. Berkeley: University of Cambridge (No. CUED/D-SOILS /TR-326), 2003.
- [90] BRIAUD J L. Case histories in soil and rock erosion: Woodrow Wilson Bridge, Brazos River Meander, Normandy Cliffs, and New Orleans Levees[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(10): 1 – 27.
- [91] WHITE C M. The equilibrium of grains on the bed of a stream[J]. Proceedings of Royal Society of London. 1940; **174**(958): 322 – 338.
- [92] 陈生水, 钟启明, 曹伟. 黏土心墙坝漫顶溃坝过程离心模型试验与数值模拟[J]. 水科学进展, 2011, **22**(5): 674 – 679. (CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming, CAO Wei. Centrifugal model test and numerical simulation of the breaching process of clay core dams due to overtopping[J]. Advances in Water Science, 2011, **22**(5): 674 – 679. (in Chinese))
- [93] 任强, 陈生水, 钟启明. 黏土心墙坝漫顶溃决数值模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(4): 562 – 566. (REN Qiang, CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming. Numerical model for clay core dam break due to overtopping failure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(4): 562 – 566. (in Chinese))
- [94] 陈生水, 曹伟, 霍家平. 混凝土面板砂砾石坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1169 – 1175. (CHEN Sheng-shui, CAO Wei, HUO Jia-ping. Numerical simulation for overtopping-induce break process of concrete-faced sandy gravel dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1169 – 1175. (in Chinese))
- [95] 陈生水, 钟启明, 任强. 土石坝漫顶破坏溃口发展数值模型研究[J]. 水利水运工程学报, 2009(4): 53 – 58. (CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming, REN Qiang. Numerical model study on break development due to overtopping failure for earth-rock dam[J]. Hydro-science and Engineering, 2009(4): 53 – 58. (in Chinese))
- [96] 陈生水, 钟启明, 任强. 土石坝管涌破坏溃口发展数值模型研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(5): 653 – 657. (CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming, REN Qiang. Numerical study on break development due to piping failure for earth-rock dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(5): 653 – 657. (in Chinese))
- [97] CHEN S S, ZHONG Q M, CAO W. Breach mechanism and numerical simulation for seepage failure of earth-rock dams[J]. Science China Technological Sciences, 2012, **55**(6): 1757 – 1764.
- [98] 陈生水, 钟启明, 曹伟. 土石坝渗透破坏溃决机理及数值模拟[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, **42**(6): 697 – 703. (CHEN Sheng-shui, ZHONG Qi-ming, CAO Wei. Breach mechanism and numerical simulation for seepage failure of earth-rock dams[J]. Scientia Sinica Technologica, 2012, **42**(6): 697 – 703. (in Chinese))
- [99] 钟启明, 陈生水, 赵联桢. 堰塞坝漫顶溃决过程数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, **40**(4): 405 – 411. (ZHONG Qi-ming, CHEN Sheng-shui, ZHAO Lina-zhen. Numerical simulation of overtopping failure process of a barrier dam[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, **40**(4): 405 – 411. (in Chinese))