

DOI: 10.11779/CJGE201511017

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

杨正权^{1, 2}, 赵剑明^{1, 2}, 刘小生^{1, 2}, 周国斌³, 刘启旺^{1, 2}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048;
3. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510635)

摘 要: 紫坪铺水库面板堆石坝坝顶区下游干砌石护坡在汶川地震中遭到了较严重的震损破坏, 是大坝震后抗震加固处理的重点环节。综合考虑已有高土石坝坝坡抗震加固措施在大坝震后加固中的适用性, 并参考浆砌石护坡在强震中表现出的良好抗震性能, 浆砌石护坡成为了紫坪铺大坝下游坝坡震后抗震加固的重要选择。针对紫坪铺大坝坝坡震后抗震加固工程, 进行堆石坝坝顶区坝坡抗震加固措施(干砌石护坡和浆砌石护坡)大型振动台模型试验, 研究砌石护坡的抗震加固机理并验证其抗震加固效果; 同时, 结合大坝地震动力反应计算和大坝振动台模型试验的研究成果, 确定了大坝坝顶区浆砌石护坡的加固范围。研究表明: 浆砌石护坡在强震中具有良好的整体性, 干砌石护坡在强震中的局部碎、块石滑移导致护坡整体渐进破坏, 浆砌石护坡对堆石坝坡的保护作用明显优于干砌石护坡; 紫坪铺大坝下游坝坡震后浆砌石护坡加固范围取为 3/4 坝高以上坝顶区坝坡较为合理。

关键词: 紫坪铺大坝; 抗震加固措施; 干砌石护坡; 浆砌石护坡; 加固机理; 加固效果

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)11-2058-09

作者简介: 杨正权(1980-), 男, 吉林集安人, 博士, 高级工程师, 主要从事土动力学与土工结构抗震研究。E-mail: yangzhq@iwhr.com。

Large-scale shaking model tests on anti-seismic and reinforcing measures for slope of Zipingpu earth-rock fill dam after “5.12” Wenchuan Earthquake

YANG Zheng-quan^{1, 2}, ZHAO Jian-ming^{1, 2}, LIU Xiao-sheng^{1, 2}, ZHOU Guo-bin³, LIU Qi-wang^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China; 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 3. Guangdong Hydropower Planning & Design Institute, Guangzhou 510635, China)

Abstract: The dry masonry facing of the downstream slope of Zipingpu earth-rock fill dam was seriously destroyed during “5.12” Wenchuan Earthquake. Accordingly, the anti-seismic reinforcement for the damaged dam slope is an important task after the earthquake. The mortar masonry facing is regarded as the best choices comprehensively considering the applicability of anti-seismic and reinforcing measures for slopes of high earth-rock fill dams after earthquake proposed by worldwide engineers and its excellent anti-seismic performance in real strong earthquakes. Large-scale shaking table model tests on anti-seismic and reinforcing measures for earth-rock fill dam slope (dry masonry and mortar masonry facings) of Zipingpu earth-rock fill dam after “5.12” Wenchuan Earthquake are performed. The anti-seismic and reinforcing effect of the masonry facings is verified by the shaking model tests, and their anti-seismic and reinforcing mechanism is analyzed. Furthermore, the reinforcement area of the dam slope using the mortar masonry facing is determined based on the test results combining with the calculated results of the dam's earthquake response. The results show that the mortar masonry facing can keep its integrity wonderfully in strong earthquake, but the dry masonry facing may fail gradually because of the loosening and sliding of local stones in strong earthquakes. The protective effects of the mortar masonry facing on the dynamic stability of rock-fill dam slope in earthquake is better than the dry masonry facing obviously.

The reinforcement area of the downstream slope of Zipingpu earth-rock fill dam using the mortar masonry facing after “5.12” Wenchuan Earthquake is determined to be in the dam

基金项目: 国家自然科学基金项目(51509272); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)课题(2013CB036404); “十二五”国家科技支撑计划课题(2013BAB06B02); 中国水利水电科学研究院科研专项项目(岩集 1467)
收稿日期: 2014-09-08

slope area above 3/4 dam height.

Key words: Zipingpu earth-rock fill dam; anti-seismic and reinforcing measure; dry masonry facing; mortar masonry facing; reinforcement mechanism; reinforcement effect

0 引 言

紫坪铺水利枢纽位于岷江上游, 是整个岷江流域水利建设和水电开发的龙头工程。工程建成投产后, 发挥了重要的供水、防洪、发电和航运等社会效益。水库拦河大坝为钢筋混凝土面板堆石坝, 最大坝高 156 m。大坝初始抗震设计烈度为 VIII 度, 相应 100 a 超越概率 2% 的基岩水平向峰值加速度 $0.265g^{[1]}$ 。

紫坪铺高面板堆石坝在“5.12”汶川地震中经受了远超其设计地震动水准的地震作用(坝址区实际地震烈度超过 IX 度, 基岩水平向峰值加速度超过 $0.510g^{[2]}$), 大坝在震中和震后整体稳定、安全, 经受住了强震的考验^[3-4]。但是, 强震使得大坝结构遭受到了不同程度的震损破坏, 对大坝结构进行及时的震后修复加固, 使其正常、安全运行, 对保障下游人民生命财产安全十分必要。地震对大坝结构造成的破坏主要包括, 坝顶的地震沉陷、面板的错台和挤压破坏、坝顶结构的局部损坏及下游坝坡坝顶区干砌石护坡的局部松动滑移等^[5-6]。针对坝顶区干砌石护坡的震损情况, 综合考虑已有高土石坝坝坡抗震加固措施在大坝震后加固中的适用性, 并参考坝顶区浆砌石护坡在强震中表现出的良好抗震性能, 采用浆砌石护坡对震损干砌石护坡进行加固成为了紫坪铺大坝坝坡震后抗震加固的重要选择。

虽然浆砌石护坡在地震中表现出了较好的抗震防护性能, 但是其加固堆石坝坡的抗震加固机理仍有待深入探讨, 是工程技术人员十分关注的问题。考察砌石护坡(包括干砌石护坡和浆砌石护坡)在地震中的实际反应状态, 深入探究其对堆石坝坡的抗震加固机理和加固效果, 也可为类似工程的抗震设计提供理论支撑。此外, 结合大坝结构的动力反应计算和振动台模型试验等分析手段, 综合确定大坝坝顶区浆砌石护坡的加固范围, 也是紫坪铺大坝坝坡抗震加固工作的重要内容。本文针对紫坪铺大坝下游坝坡震后抗震加固拟采用的浆砌石护坡加固措施, 进行堆石坝坡抗震加固措施的振动台模型试验, 研究砌石护坡(包括干砌石护坡和浆砌石护坡)的抗震加固机理, 并对比它们的抗震加固效果。同时, 结合震害调查分析、大坝结构振动台模型试验和大坝动力反应计算的研究成果, 探讨大坝下游坝坡浆砌石护坡的合理加固范围,

为工程设计提供参考。

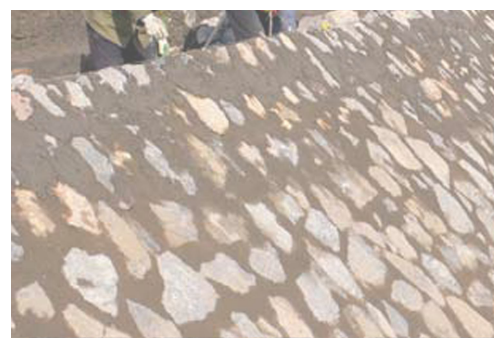
1 紫坪铺大坝下游坝坡震害与抗震加固措施

1.1 紫坪铺大坝下游坝坡震害

堆石大坝下游坡表面铺设砌石护坡的目的是提高散粒体堆石坝坡的整体性, 防止坝坡表面堆石颗粒局部滑移滚落降低坝坡整体性而引起的大规模坝体滑坡, 是弱化了了的廉价“护面板”。直接在坝坡表面将块石码放整齐, 并用小碎石颗粒填充大块石间的缝隙, 只利用石块重力和石块间的挤压摩擦力来保证护坡整体稳定的是干砌石护坡, 如图 1(a); 为了提高砌石块体间的黏结力, 用水泥砂浆黏结大块石并填充块石间孔洞的是浆砌石护坡, 如图 1(b)。汶川地震前, 紫坪铺面板堆石坝下游坝坡表面采用的抗震措施主要就是全坡面范围的干砌石护坡和河床中央坝段靠近坝顶局部区域的小范围浆砌石护坡。



(a) 干砌石护坡



(b) 浆砌石护坡

图 1 堆石坝坡的砌石护坡加固

Fig. 1 Masonry facings of rock fill dam

汶川地震中, 紫坪铺大坝坝体的地震加速度反应强烈, 造成了堆石坝下游干砌石护坡的局部震损破坏; 破坏的主要区域是河床中央坝段、0.8 倍坝高以上靠近

坝顶的坝坡区域；震损形式主要表现为局部干砌块石发生松动、翻起，并有少数块石从原位置脱离沿坝坡滚落，砌石护坡整体沿堆石坝坡表面向坝脚发生滑移，原本相对平整结实的坡面变得松散，失去整体性。与之相对应，紧临其上的浆砌石护坡在同等水平或更高水平的地震加速度作用下，护坡保持了很好的整体性，没有局部块石脱离，也没有发生护坡整体顺坡滑移。图 2 给出了地震后靠近坝顶处坝坡两种护坡的震损情况对比（远处为坝脚方向）。



图 2 两种砌石护坡的震后状态对比

Fig. 2 Comparison of state of two types of masonry facings after strong earthquake

如前文所述，砌石护坡对堆石坝坡的保护作用和混凝土面板对上游坝坡的保护作用类似——在坝坡表面加设一层整体性较好的砌石护坡，可以有效防止坝坡表面局部堆石颗粒的松动滑移，防止局部块石滚落滑移而引起堆石坝坡整体失稳。所以，初步的认识是，砌石护坡自身在地震作用下的整体性是其对堆石坝坡抗震加固作用发挥的决定性影响因素。显而易见，浆砌石护坡中水泥砂浆的黏结作用可以有效提高砌石块体间的整体性。纵然其黏结强度和混凝土或者块石本身的强度无法比拟，但是却能够保证局部块石在地震中不会从砌石护坡整体中脱离出来，从而保证浆砌石护坡的整体性，进而有效保护其下的堆石坝坡。干砌石护坡虽然可以通过块石间的挤压摩擦、咬合作用保持其整体性，但是在强烈地震的作用下，局部块石更容易发生松动而逐渐从护坡整体中脱离、滚落，进而造成护坡整体松动、滑移，其对堆石坝坡的保护作用也会大打折扣。

1.2 高土石坝坝坡抗震加固措施

通过对历次强震中土石坝实际震害的调查研究，并基于大量模型试验和计算分析的研究结果，研究人员提出了多种可以有效提高堆石坝坝坡动力稳定性的抗震加固措施^[7-8]。例如：提高坝顶区堆石的碾压控制标准，采用胶结碎石土替代散粒碎石填筑等提高坝顶区坝坡土体抗剪强度的材料或施工工艺措施；加大坝

顶宽度、放缓坝顶处坝坡、变坡处加设马道等改善大坝断面几何形态的结构设计措施；采用在靠近坝顶的坝体中布设土工格栅、钢筋（或混凝土包裹钢筋）等土工加筋技术，并结合坝坡表面增设混凝土护面板、砌石护坡、混凝土框格等的土工加强结构措施。

以上堆石大坝坝坡的抗震加固措施多是在大坝初始填筑时的抗震设计中提出的。考虑到本次紫坪铺大坝抗震加固工程是在汶川地震后对坝体的加固补强，和坝体填筑相关联的抗震措施已经不可能采用或者难度很大，例如大坝几何断面改善措施、坝体材料改善及施工技术措施和坝体内部加筋措施等。由此，在堆石坝坡表面增设混凝土护面板，或在堆石坝坡表面加设混凝土框格和浆砌石护坡等，成为了紫坪铺大坝震后抗震加固可选的工程措施。综合考虑工程造价、施工难度等因素，并参考浆砌石护坡在强震中表现出的良好抗震性能，采用扩大原有浆砌石护坡范围的坝顶区下游坝坡抗震加固方案是合理可行的。

2 砌石护坡抗震加固机理与效果验证 振动台模型试验

浆砌石护坡自身抗震性能优越且对堆石坝坡的保护作用突出，其抗震加固效果优于干砌石护坡也是不争的事实。但是，由于缺乏地震中砌石护坡动力反应的直接观察经历和影像资料，研究者难以通过坝坡的实际地震反应过程考察两种砌石护坡的动力反应特性，对比它们的抗震加固效果，揭示其抗震加固机理，为堆石坝坡的砌石护坡设计提供理论支撑。通过进行堆石坝坝顶区砌石护坡单元的大型地震模拟振动台模型试验，可以再现坝顶区砌石护坡的地震反应过程，研究其抗震加固机理，并对比两种护坡形式（干砌石护坡和浆砌石护坡）的抗震加固效果。

2.1 砌石护坡单元振动台模型试验设计

(1) 试验设备和模型设计

坝顶砌石护坡单元大型振动台模型试验在中国建筑科学研究院三向六自由度大型高性能地震模拟振动台上进行。该振动台不仅尺寸大（台面尺寸为 $6\text{ m} \times 6\text{ m}$ ），且性能优良，先后承担了众多大型或复杂结构的振动台模型试验任务，振动台的具体性能参数参见文献[9]。

考虑到本次模型试验的目的是验证两种砌石护坡的加固效果，探讨其对坝坡的加固机理，故无必要进行整个大坝结构的振动试验。而且，进行大坝结构整体模型试验会导致模型比尺过大，模型太小，难以针对性地进行坝坡的加固措施研究。因此，选择在大坝下游坝坡顶端截取规则形状的单位块，进行地震模拟

振动试验, 观察和量测块体单元的地震反应, 用以定性考察整个坝坡范围内砌石护坡的抗震加固性能。

坝顶区护坡单元块横断面为梯形, 断面高 150 cm, 顶、底面长度分别为 80 cm 和 305 cm(坡比为 1 : 1.5), 在坝坡表面铺设厚度为 20 cm 的砌石护坡。沿坝轴线方向上, 取单元块的宽度为 220 cm, 其中左半部分铺设浆砌石护坡(右岸侧), 右半部分铺设干砌石护坡(左岸侧)。护坡单元模型置于尺寸为 500 cm×220 cm×160 cm 的模型箱中, 模型箱采用厚度为 2 cm 的钢板加肋拼接而成。受模型尺寸限制, 对原型坝堆石料和护坡块石进行了缩尺, 坝体填筑堆石级配按相似级配法和等量替代法确定, 最大颗粒粒径 2 cm, 护坡块石粒径 10~20 cm。堆石坝体分 10 层填筑, 每一层分别进行击实、整平, 砌石护坡在坝坡整平后一次性铺设完成。图 3 给出了单元模型结构和材料分区示意, 图 4 给出了模型箱中填筑完成的砌石护坡单元模型。

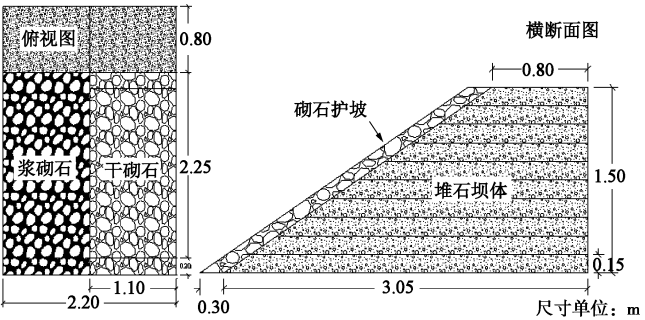


图 3 单元模型结构和材料分区示意图

Fig. 3 Structural diagram of element model for masonry facings

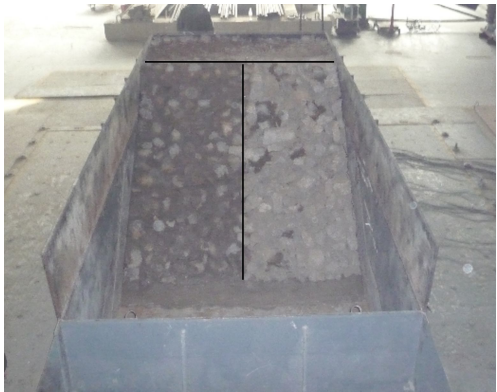


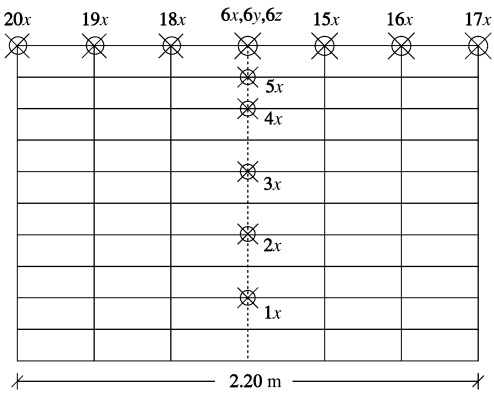
图 4 填筑完成的坝顶砌石护坡单元模型

Fig. 4 Finished element model for masonry facings of dam

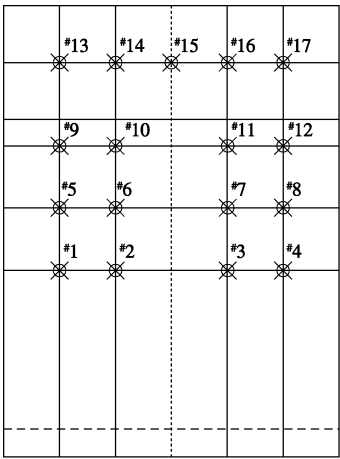
(2) 试验监测内容

主要通过直接观察护坡在振动过程中的反应情况和监测护坡砌石块体的变位情况来考察砌石护坡的地震反应特性和抗震性能。此外, 还在坝坡顶端堆石坝坡表面沿坝轴线方向埋设了若干加速度传感器, 通过考察不同护坡形式下坝坡表面的加速度反应情况来对比不同砌石护坡对其下坝体加速度反应的影响程度。坝坡表面砌石块体的变位情况通过考察固定在石块表

面的位移测点和固定在模型箱上的基准线的相对位移确定。坝顶处坝坡内加速度传感器的布设情况如图 5 (a) 所示 (#6, #15~#20 测点), 砌石护坡表面位移测点的布设情况如图 5 (b) 所示 (#1~#12 测点)。



(a) 加速度测点



(b) 位移测点

图 5 坝坡表面加速度测点和护坡表面位移测点的分布情况
Fig. 5 Layout of acceleration sensors and displacement samples on dam slope surface

(3) 试验工况设置

根据输入地震动的差异(包括地震动类型和输入方式), 将整个试验分为若干方案, 每个方案下, 再根据输入地震动幅值分为若干小工况。输入地震动类型包括不同压缩比尺的压缩场地波和拍波, 地震动输入方式包括单次地震波输入和连续多次地震波输入。

试验工况设置的基本思路是: 首先, 输入不同压缩比的单向场地波, 通过表观震害考察确定对砌石护坡单元破坏力最强的输入地震动压缩比(通过调整输入地震动压缩比, 使其基频和单元模型的一阶自振频率接近, 从而使得单元模型在压缩地震波的作用下产生最强烈振动, 可以更好地再现护坡结构在极端地震作用下的反应, 验证砌石护坡的抗震加固效果); 然后, 采用振动最强烈的压缩场地波连续对单元模型进行激振, 用以考察地震动持时对砌石护坡单元抗震性

能的影响;最后,输入连续拍波进行激振,考察地震动类型对单元模型动力反应特性的影响。模型试验具体的工况设置如表 1 所示,模型试验场地波仍采用原始设计时使用的场地波,只是对输入峰值加速度进行调整,归一化的场地波加速度时程如图 6 所示。

表 1 试验工况设置

Table 1 Working conditions of model tests		
工况 编号	输入地震动情况	台面实测输入地震 动幅值/g
1	顺河单向压缩场地波 1 次激振, 压缩比 $C_t=20.0$	0.226,0.408,0.632
2	顺河单向压缩场地波 1 次激振, 压缩比 $C_t=10.0$	0.230,0.406,0.618
3	顺河单向压缩场地波 1 次激振, 压缩比 $C_t=5.0$	0.166,0.352,0.619
4	顺河单向压缩场地波 1 次激振, 压缩比 $C_t=1.0$	0.223,0.417,0.629
5	压缩比 $C_t=5.0$ 的顺河单向压缩场地波连续 5 次激振	0.633,0.822,1.014
6	顺河单向拍波连续 5 次激振	0.359,0.864,1.182

2.2 砌石护坡的地震反应

(1) 堆石坝坡的加速度反应

由于加速度传感器埋设于砌石护坡下坝坡表面堆石体中,其加速度反应情况和其上护坡的加速度反应并不一致。但是,通过监测堆石坝坡表面的加速度反应情况,一方面可以考察单元模型自身(含表面砌石护坡)的加速度反应程度,另一方面则可以通过考察坝坡的加速度反应情况来对比不同类型砌石护坡对堆石坝坡的保护效果。

图 7 为不同压缩比顺河单向场地波作用下,坝顶轴线方向上顺河水平向加速度放大倍数的对比。从图 7 可以看出:随着输入地震动幅值的增加,测点加速度反应增强,但是加速度放大倍数在减小;场地波作用下,当输入压缩比为 5 时的坝坡表面加速度反应最强烈,说明压缩地震波基频和单元模型结构的自振频率最为接近,后续场地波连续激振输入压缩比取为 5;坝轴线方向上,中间位置加速度反应最大,向两岸方向逐渐变小,左侧略小于右侧。模型中间处的加速度反应最强,应当是由于这里受两侧边界的约束作用最小,左侧的加速度反应略小于右侧是因为浆砌石护坡对坝坡的保护作用优于干砌石,这种作用在单波激励时表现地并不明显,应当是由于两种砌石护坡在短时地震作用下均能保持良好的完整性(详述见后文),对其下堆石坝坡的保护作用都较好。

图 8 给出了压缩比为 5 的场地波单次激振和连续 5 次激振时,坝顶轴线上顺河水平向加速度放大倍数的对比。从图 8 可以看出:两种砌石护坡下测点在输入地震动峰值水平相当时(0.6g 左右),多次激振下的测点加速度反应水平和单次激振下的反应水平对比关

系有所不同。浆砌石护坡下测点 19 的加速度放大倍数在单次激振和多次激振时基本相同,而干砌石护坡下测点 16 的加速度放大倍数在多次激振时明显高于单次激振。由于连续多次激振对干砌石护坡的破坏相对较严重(详述见后文),伴随着连续激振,护坡整体性变弱,对其下堆石坝坡的保护作用也越来越弱,故坝坡表面的加速度反应水平逐渐增加,明显高于单次激振。

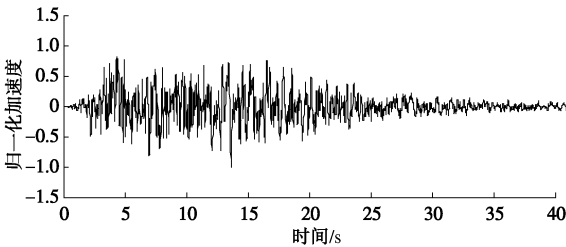


图 6 归一化的场地波时程

Fig. 6 Input earthquake time history in tests

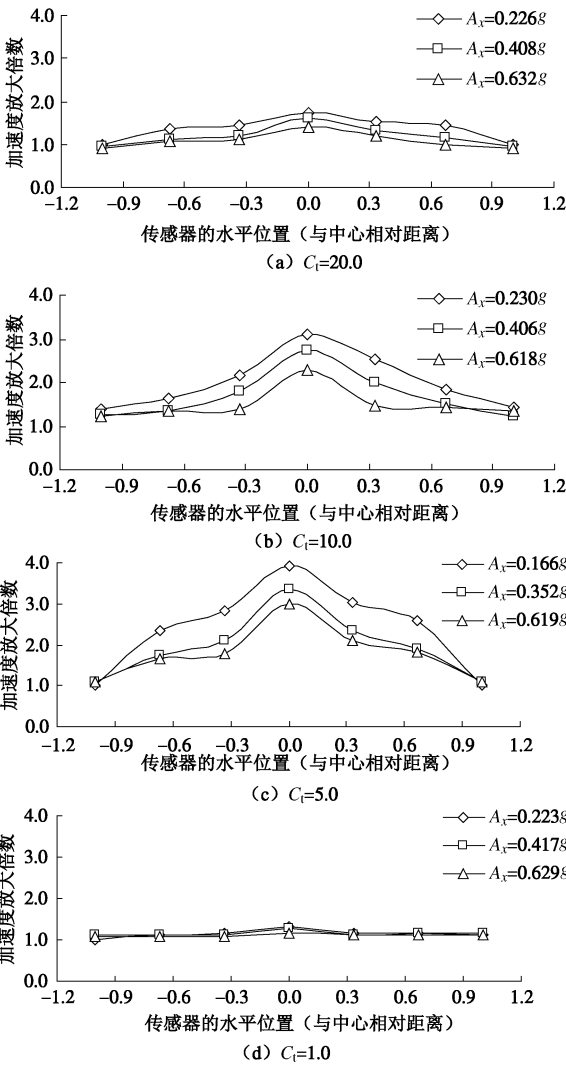


图 7 不同压缩比场地波作用下,坝顶轴线方向上测点顺河水平向加速度放大倍数对比

Fig. 7 Comparison of acceleration magnified factors on direction of dam axis under compressed site earthquakes

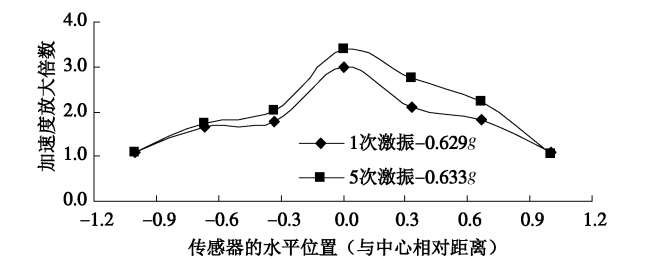


图 8 压缩场地波单次激振和连续激振加速度放大倍数对比

Fig. 8 Comparison of acceleration magnified factors on direction of dam axis under a single compressed site earthquake and successive compressed site earthquakes

对比连续 5 次激振压缩场地波和拍波作用下的加速度放大倍数可知：同等幅值水平拍波作用下，测点的加速度反应水平远低于压缩场地波的作用。拍波为冲击波，其地震动作用持时较短，地震输入能量较低，故其对堆石坝坡和砌石护坡的影响小，相应加速度反应水平也较低。

(2) 砌石护坡的地震反应现象和残余变形

考察不同地震波作用下砌石护坡单元模型的表现地震反应现象，同时对比各级地震作用前后护坡块石上位移测点的地震残余变形情况，研究不同地震动作用时砌石护坡的地震破坏情况。表 2 给出了各级地震作用后，测点地震残余变形值。表中， X 表示顺河水水平向，向下游为正， Z 表示竖直方向，竖直向下为正。

表 2 测点地震残余变形

Table 2 Seismic residual deformation of samples (mm)

测点编号	(5~0.6)g		(5~0.8)g		(5~1.0)g	
	X	Z	X	Z	X	Z
测点 1	0	0	0	0.5	1.5	3.5
测点 2	0	0	2	0.5	2	3.5
测点 3	0	0	1	3	2	3.5
测点 4	5	2	12	7	17	7
测点 5	0	0	1	3	2	5
测点 6	0	0	0	4	0	6
测点 7	4	2	22	3	30	8
测点 8	3	2	9	11	10	13
测点 9	2	0	0	3	0	4
测点 10	3	0	0	3	3	4
测点 11	0	0	25	18	43	28
测点 12	0	6	10	15	35	22

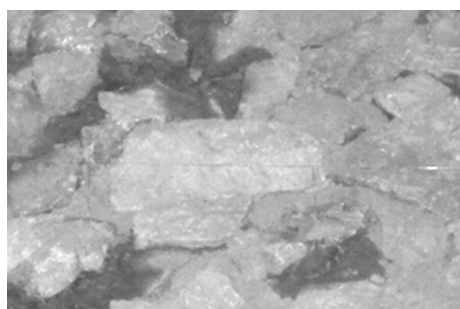
不同压缩比单次压缩场地波作用下(工况 1~4)，除工况 3 外(压缩比 5.0)，护坡表面块石均看不出明显的反应。工况 3 时，在输入地震动峰值达到 0.6g 左右后，干砌石护坡上有少量大块石间的小碎石颗粒从坡面上滚落，靠近坝顶处的部分大块石发生轻微震颤。在压缩比为 5 的压缩场地波连续 5 次激振时(工况 5)，随着输入地震动强度的增加，砌石护坡的反应程度较单次激振时明显强烈，尤其是干砌石护坡。在输入地震动峰值达到 0.8g 左右时，干砌石护坡中的大量填充小碎石颗粒从大块石间脱离并沿坝坡滚落，局部大块

石间接缝变宽并发生局部错动，护坡整体发生晃动，并有和堆石坝坡脱离的趋势；浆砌石护坡虽有一定幅度的震颤，但是由于砂浆的保护作用，没有发生大块石间小颗粒的滚落现象。在输入地震动峰值达到 1.0g 左右时，0.5 倍高程以上干砌石发生剧烈晃动，砌石护坡整体和堆石坝坡间发生瞬时脱离，护坡复位时剧烈拍击堆石坝坡，干砌大块石间有相互脱开、脱离趋势，局部块石间接缝变的很宽，填充碎石颗粒滑出，护坡内部坝体堆石露出外溢，0.8 倍高程上几个较大体积块石和周围接触块石脱开，较坝坡面鼓出，基本呈脱离状态，尤以测点 7 所在块石最明显，图 9 给出了测点 7 所在块石强震前后状态对比；以上过程中，浆砌石护坡块石间并未发生错动和裂缝，虽然整体和堆石坝坡间产生一定程度的脱离、撞击，但幅度很小，浆砌石护坡保持了良好的完整性，也未和坝坡间产生顺坡滑移。

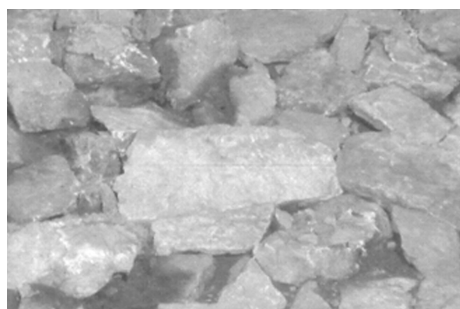
对比上述地震反应过程，从表 2 可以看出：压缩场地波单次激振时，测点未测到明显的变位。压缩场地波连续激振时，随着振动幅度的增加，干砌石护坡中大块石产生了较大的地震变位，尤其是靠近坝顶的测点#7，#8，#11 和#12，与之相对应，浆砌石护坡上测点的地震变位则要小得多。这里需要说明的是，对于干砌块石上测点的地震残余变形值，由于块石反应剧烈，局部发生了翻转、滑移，所以每次测量得到的变形值不仅包含了护坡的整体变位，也包含了块石个体的刚体转动、滑移变形。尽管如此，考察众多测点的整体变形状态，不难看出两种护坡在强震中产生的地震残余变形差异显著。

2.3 砌石护坡抗震加固机理分析及两种护坡的抗震加固效果对比

浆砌石护坡在输入各种地震波激振时，均未出现明显的震害。而干砌石护坡，随着输入地震动强度的增加(包括地震动峰值和持时的双重作用)，地震反应逐渐增强，最后在连续激振高幅值压缩场地波的作用下，几近整体破坏。由护坡单元模型的地震反应现象可知，干砌石护坡的地震破坏是一个渐进过程：先是砌块石间局部小碎石颗粒的滚落，再是砌块石间填充碎石的大量溢出滑落，最后才是大块石间的错动、滑移，几近从坝坡滚落，护坡下堆石坝坡表面堆石颗粒也随之发生溢出、滑移，护坡整体的震动幅度也是随着上述过程的发展而逐渐增强。干砌石护坡的破坏应当是由于局部填充碎石溢出滑移，造成大块石逐渐失去支撑、块石间接触挤压逐步失效而导致的渐进式破坏，大块石的脱离、滚落，将引发整个护坡沿堆石坝坡滑移、坍塌。



(a) 强震前



(b) 强震后

图9 测点#7所在块石强震前后状态对比

Fig. 9 Comparison of states of stone at measuring point No. 7 before and after earthquake

从护坡下堆石坝坡的加速度反应情况可以看出,和上述两种护坡形式自身不同的地震反应水平相对应:地震水平较低时,两种护坡对堆石坝坡的保护作用相当;但当地震动强度较高时,两者对堆石坝坡的保护作用差异较大,干砌石下坝坡的加速度反应明显高于浆砌石保护的坝坡(参考图8),这应当是和强震时干砌石护坡遭受了严重的破坏是直接相关联的。在砌石护坡能够保持为一个连结紧密的整体时,对其下堆石坝坡能够起到很好的保护作用,一方面是限制坝坡表面的加速度反应水平,另一方面是保证坝坡表面堆石颗粒的稳定性,防止颗粒滚落而引起坝坡渐进破坏。当砌石护坡局部块石发生错动、脱离原位,砌石护坡的整体性降低,不仅导致其自身发生渐进破坏,也会导致其对其下堆石坝坡的保护作用逐渐减弱、丧失,坝坡表面堆石颗粒随着砌石护坡块石一起发生滑移、滚落。

不管是干砌石护坡还是浆砌石护坡,护坡体能否在地震中保持良好的完整性,是发挥其对坝坡保护作用的关键,也是维持其自身稳定性的关键。干砌石护坡块石间的连接是靠块石间的直接挤压、摩擦作用,再结合块石间填充小碎石颗粒来保持其完整性的,而浆砌石护坡块石间的连接不仅有块石间的挤压、摩擦和碎石填充作用,还有接缝水泥砂浆的黏结保护作用。水泥砂浆不仅增强了块石体间的黏结强度,还对填充小碎石颗粒起到了很好的黏结保护作用,保证它们在地震作用下和护坡整体不发生脱离,也就保证了砌石

护坡的完整性和地震稳定性。高幅压缩场地波连续激励时,干砌石护坡破坏严重,就是由于地震动持时增加导致护坡整体性破坏加剧造成——连续激励致使块石体持续错动,难以复位,并脱离原位,最终导致护坡整体发生破坏。

振动台模型试验中,浆砌石护坡保持了较好的整体性,未出现明显震害,较好地保护了其下的堆石坝坡;干砌石护坡由于填充碎石的振动脱离、砌块石间接触强度降低,致使砌块石间错动、脱离原位,逐步诱发了护坡整体的渐进破坏,对其下堆石坝坡的保护作用也逐渐减弱、丧失。图10给出了强震前后,靠近坝顶处两种砌石护坡状态的对比。从图中可以看出,浆砌石护坡整体未发生明显的状态改变,而干砌石护坡震后较震前砌块石间变得松散,基本丧失了护坡结构的整体性。浆砌石护坡不管是自身的抗地震破坏能力,还是对其下堆石坝坡的保护能力,都是明显优于干砌石护坡的。



(a) 强震前



(b) 强震后

图10 坝顶附近浆砌石护坡与干砌石护坡强震前后状态的对比

Fig. 10 Comparison of states of mortar masonry and dry masonry facings near dam crest before and after earthquake

3 紫坪铺大坝下游坝坡震后抗震加固方案探讨

由于高土石坝地震反应的坝顶“鞭梢效应”十分显著^[10-11],紫坪铺高面板堆石坝在汶川地震中的下游坝坡干砌石护坡破坏,表现出了靠近坝顶的区域较严重,而靠近坝脚的区域基本完好的分布特点,干砌石护坡块石松动、翻转的区域都集中在二级马道(大约

3/4 坝高处) 以上。大坝地震加速度反应的“鞭梢效应”, 在三维大坝结构大型振动台模型试验中, 同样得到了较好地验证: 模型坝在不同水平的各类地震动作作用下, 均在 0.7~0.8 倍坝高的高程上出现了加速度反应突然增大的现象^[12]。此外, 紫坪铺大坝震后抗震复核计算分析也表明, 大坝二级马道以上坝坡表面区域是大坝抗震的薄弱区域。震后新核定设计地震作用下 (基岩水平向峰值加速度 0.4g), 该区域的单元抗震安全系数出现有小于 1 的情况, 如图 11 所示。

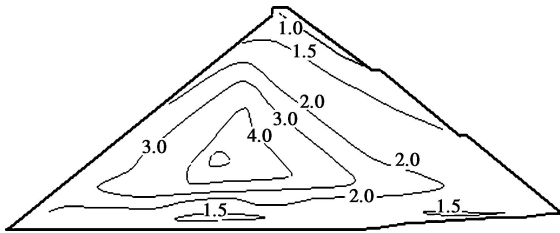


图 11 震后新核定设计地震作用下, 紫坪铺大坝最大横断面内单元抗震安全系数分布

Fig. 11 Layout of element anti-seismic safety factors in largest cross section of Zipingpu earth-rock fill dam under design earthquake

不管是从实际地震中砌石护坡的破坏情况看, 或从坝体加速度反应振动台模型试验结果看, 还是从坝体内部单元体抗震安全性分布规律看, 大坝二级马道以上坝坡区域 (3/4 坝高以上坝坡区域) 都是整个堆石坝坡抗震的薄弱环节, 也是砌石护坡自身稳定性较薄弱的区域。

因此, 针对紫坪铺大坝下游坝坡震后抗震加固工程: 首先, 基于不同形式砌石护坡在实际地震中表现出的抗震性能及其在振动台试验中表现出的实际地震反应特性, 再结合目前已有各种坝坡抗震加固措施在大坝坝坡震后抗震加固工程中应用的实际可操作性来看, 在大坝下游坝坡抗震薄弱区采用浆砌石护坡代替原干砌石护坡的抗震加固方案是合理的; 其次, 综合实际震害调查、大坝结构大型振动台模型试验和震后复核抗震计算的研究成果, 大坝坝坡及其表面砌石护坡抗震安全薄弱的环节主要是 3/4 坝高以上、靠近坝顶的区域, 可采用浆砌石护坡代替该区域内原有干砌石护坡的方式, 对震损坝坡进行抗震加固, 在远离河谷中央、靠近岸坡的区域, 浆砌石护坡加固的界限高程可以适当提高。

4 结 论

本文利用大型振动台模型试验验证了紫坪铺大坝下游坝坡震后抗震加固措施 (浆砌石护坡) 的抗震加固效果, 并与干砌石护坡进行了对比, 揭示了两种加

固措施的抗震加固机理。同时, 结合震害调查分析、大坝结构振动台模型试验和大坝动力计算分析的研究成果, 探讨了大坝下游坝坡浆砌石护坡加固的合理范围, 得到以下 4 点结论。

(1) 紫坪铺大坝震害调查表明, 堆石坝坡浆砌石护坡的抗震性能优良, 综合各类堆石坝坡抗震加固措施在大坝震后抗震加固中的实际可操作性, 可选择浆砌石护坡作为大坝下游坡震后抗震加固措施。

(2) 砌石护坡对堆石坝坡的抗震加固作用, 主要表现在对坝坡表面加速度反应放大效应的限制作用, 和对坝坡表面堆石颗粒的保护作用, 防止振动导致堆石颗粒沿坝坡表面大规模滑落、滚落, 进而引起大规模堆石体滑坡。

(3) 砌石护坡在地震中整体性的保持, 是发挥其对堆石坝坡抗震加固作用的保障, 浆砌石护坡由于有水泥砂浆的胶结作用, 能够较好地保持护坡的整体性, 其抗震性能明显优于干砌石护坡, 可采用浆砌石护坡代替干砌石护坡的方式对紫坪铺大坝下游坝坡进行震后抗震加固。

(4) 综合震害调查分析、大坝结构振动台模型试验和大坝动力计算分析的研究成果, 再考虑到经济上的合理性和施工的可操作性, 确定浆砌石护坡代替干砌石护坡加固震损坝坡的范围为大坝二级马道 (3/4 坝高) 以上、靠近坝顶的区域。

参考文献:

- [1] 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 Xiao-sheng, WANG Zhong-ning, WANG Xiao-gang, et al. Large-scale shaking model tests and dynamic analysis of concrete face rock-fill dam[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese))
- [2] 陈厚群, 徐泽平, 李 敏. 汶川大地震和大坝抗震安全[J]. 水利学报, 2008, 39(10): 1158 - 1167. (CHEN Hou-qun, XU Ze-ping, LI Min. Wenchuan Earthquake and dam seismic safety[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(10): 1158 - 1167. (in Chinese))
- [3] GUAN Zhi-cheng. Investigation of the 5.12 Wenchuan Earthquake damages to the Zipingpu Water Control Project and an assessment of it's safety state[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(4): 820 - 834.
- [4] 陈厚群. 水工建筑物抗震设计规范修编的若干问题研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 4 - 10. (CHEN Hou-qun. Study on some revision issues of Anti-seismic Design Codes of Hydraulic Structures in China[J]. Journal of Hydroelectric

- Engineering, 2011, **30**(6): 4 - 10. (in Chinese))
- [5] 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 Rock-fill Dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(6): 795 - 801. (in Chinese))
- [6] 赵剑明, 刘小生, 温彦锋, 等. 紫坪铺大坝汶川地震震害分析及高土石坝抗震减灾研究设想[J]. 水力发电, 2009, **35**(5): 11 - 14. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, WEN Yan-feng, et al. Analysis of earthquake damage of the Zipingpu Dam in Wenchuan Earthquake and the study proposal on the anti-earthquake and disaster reduction of high earth-rock dam[J]. Water Power, 2009, **35**(5): 11 - 14. (in Chinese))
- [7] 孔宪京, 邹德高, 邓学晶, 等. 高土石坝综合抗震措施及其效果的验算[J]. 水利学报, 2006, **37**(12): 1489 - 1495. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao, DENG Xue-jing, et al. Comprehensive earthquake resistant measure of high earth-rock fill dams and effectiveness verification[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, **37**(12): 1489 - 1495. (in Chinese))
- [8] 杨正权. 加筋土挡墙稳定性分析研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (YANG Zheng-quan. Study on stability analysis of reinforced soil retaining walls[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [9] 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 Zheng-quan, LIU Xiao-sheng, LIU Qi-wang, 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. (in Chinese))
- [10] 杨正权. 土石坝动力分析方法振动台模型试验验证及地震动输入研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2011. (YANG Zheng-quan. Study on dynamic analysis methods verification using shaking table model test and seismic motion input of earth-rock fill dam[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2011. (in Chinese))
- [11] 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 Zheng-quan, LIU Xiao-sheng, WANG Xiao-gang, 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): 11361 - 1372. (in Chinese))
- [12] 中国水利水电科学研究院岩土工程研究所. 紫坪铺水库面板堆石坝振动台模型试验研究报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2012. (Geotechnical Department of IWHR. Research report of shaking table model test for Zipingpu concrete face rock-fill dam[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012. (in Chinese))