高土石坝极限抗震能力评价量化指标研究

邹德高^{1,2}, 孔宪京^{1,2}, 刘京茂^{1,2*}, 屈永倩^{1,2}, 姜秋婷^{1,2}, 邵伟峰^{1,2}

1. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024;

2. 大连理工大学水利工程学院, 大连 116024

* E-mail: liujm@dlut.edu.cn

收稿日期: 2021-07-30; 接受日期: 2021-11-26; 网络版发表日期: 2022-08-09

国家自然科学基金(批准号: U1965206, 52192674, 52079023)资助项目

摘要 土石坝极限抗震能力是评估土石坝抗震安全性的重要内容. 然而目前国内尚无规范明确规定土石坝极限抗震能力的评价标准, 且已有的关于土石坝地震破坏评价要素及其指标的研究成果尚不统一, 此外还存在不同要素的指标得到的安全裕度不协调的问题. 本文基于系统的高土石坝(坝高大于200 m)地震整体弹塑性变形和坝坡局部滑移量数值分析、全面的实测工程资料调研对比研究, 提出了确定高土石坝极限抗震能力评价标准的4项基本原则: 严格依据实测土石坝震陷率和震害程度映射关系; 保证极端地震时不溃坝; 震陷率是关键控制指标; 确保震陷率、坝坡滑移量、接缝止水等评价要素的协调性. 据此最终建议了地震条件下高面板坝和心墙坝的极限抗震能力的评价量化指标. 研究成果可为高土石坝极限抗震能力分析提供重要的标准依据.

关键词 高土石坝, 地震, 极限抗震能力, 震陷率, 滑移量

1 引言

我国西部强震区建设有一批坝高世界级的土石坝工程, 这些重大工程在运行期间可能会遭遇难以预计的极端地震, 其到底能抵抗多大的地震强度(即极限抗震能力)及大坝抗震设计的安全裕度是多少(能抵抗的最大地震强度与校核地震的差值)一直都是人们关注的问题. 但我国目前对土石坝极限抗震能力和抗震安全裕度评估必需的评价量化指标还没有规范明文规定.

已有国内外大量的实测震害和计算分析结果均表明, 地震引起的坝顶震陷率与坝体的破坏等级有着密

切的关系. 美国工程师兵团(1984)^[1]经验性地认为地震滑移量达到1 m是大坝能承受的上限, 此时虽然大坝会遭受到严重的破坏但仍能保持蓄水能力(除极个别预留超高很小的大坝). 美国加州地质调查局(SP 117)同样认为地震滑移量大于1 m时边坡失稳. 瑞士大坝抗震指南(2004)规定^[2]: 浅层滑动的容许变形量为0.2 m, 深层滑动的容许变形量为0.5 m. 美国联邦应急管理署(FEMA)^[3]于2005年5月颁布了大坝安全导则, 其中大坝地震分析与设计部分规定: 当震后抗滑安全系数大于1.0, 则可推测整体失稳不会发生; 同时在变形控制标准方面, 可将临界滑动面的容许变形2 ft(0.61 m)作为严重破坏的衡量标准. 美国垦务局设计标准(2015,

引用格式: 邹德高, 孔宪京, 刘京茂, 等. 高土石坝极限抗震能力评价量化指标研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1831–1838

Zou D G, Kong X J, Liu J M, et al. Criteria for ultimate aseismic capacity of high rockfill dam (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1831–1838, doi: 10.1360/SST-2021-0335

No.13)规定^[4]:震后稳定分析应采用残余强度,计算安全系数若小于1,则溃坝可能性很高;对于土石坝,滑移量大于3 ft(0.91 m)时应关注开裂和超高损失.从以上国外有关土石坝相关规范关于严重破坏等级的规定来看,其主要关注震后的静力稳定和地震引起滑移量的大小,大都认为震后静力稳定不满足会引起严重破坏(实际此时的滑动变形会很大),震后滑移量允许值小于0.2~1.0 m范围. Swaisgood^[5]统计了大量的土石坝实际震害案例,研究表明:随着水平地震加速度峰值的增大,沉降越来越大,但增量是逐级减小的;除了水力冲填坝,土石坝的沉降很少超过坝高与地基冲积层厚度之和的1%,其根据实际破坏程度,将震陷率大于0.5%时认为发生严重破坏. Fell^[6]基于实际土石坝震害提出:震陷率1.5%~5%时为严重破坏;当大于5%时发生溃坝.

国外土石坝的地震破坏标准并未指定坝高的适用范围,但土石坝实际能容忍的破坏变形量与坝体的类型、尺寸、几何形状等密切相关,国外标准能否适用于200~300 m高土石坝有待商榷.国内土石坝的地震破坏标准研究起步相对较晚,“八五”攻关期间,国内多家单位^[7]提出了高200 m级土石坝的破坏标准:稳定方面,安全系数小于1的滑动体占坝体的比重大于10%;沉降变形方面,100 m以上大于1.5%,100 m以下大于2.0%;液化方面,当液化度大于90%区域占坝体和坝基总体的比重大于10%;防渗体方面,拉裂或压裂区占防渗面的面积比大于5%.汶川地震后国内多家单位结合紫坪铺大坝震害情况继续针对高200~300 m的高土石坝极限抗震能力进行了进一步的研究.赵剑明等人^[8,9]针对心墙坝和面板坝从稳定、变形、防渗墙应力等角度提出了评价其极限抗震能力的控制指标,其中在稳定方面,采用安全系数和时间进行评判;在变形方面,心墙坝震陷率为0.7%~0.8%、面板坝震陷率为0.6%~0.8%;在周边缝方面,周边缝位移的安全控制标准为50~80 mm,其中剪切变形取50 mm;在防渗墙应力方面,不应超过混凝土的抗拉强度和抗压强度.迟世春等人^[10]提出地震滑移变形超过滑动体长度的2%、震陷率超过1.2%、不均匀变形倾度超过3%作为高心墙坝极限抗震能力判别标准.陈生水等人^[11]针对高心墙坝和面板坝提出了极限抗震能力指标,在稳定方面与赵剑明等人^[8,9]提出的相似;在变形方面,心墙坝震陷率为1%、面板坝震陷率为0.6%;在周边缝方

面,沉陷60~80 mm、张拉40~50 mm、剪切变形40~50 mm.田景元等人^[12]认为累积滑移量超过1 m或超过滑动体长度的1%,300,250,200 m大坝震陷率超过0.75%,0.85%,1%,防渗墙压应力大于抗压强度标准值的1.95倍(或按围压状态根据图表确定倍数关系)或防渗墙拉应力大于强度标准值1.3倍.

综上,国外对于高土石坝的破坏标准相对简单,主要依据地震滑移量(但未指明滑弧深度)和震陷率进行评判.国内对于高土石坝破坏或极限抗震能力的判别更详细,涉及稳定、滑动变形、震陷率、防渗体应力、周边缝等,并且判别方法和指标与坝高、坝型(面板坝、心墙坝)密切相关.然而已有研究关于土石坝地震破坏的评价要素及其指标尚不统一,主观性较大.本文基于大量系统的高土石坝整体弹塑性变形和局部滑移量数值分析及全面的实测工程资料调研对比,建议了地震条件下高面板坝和心墙坝的极限抗震能力指标,研究成果可为高土石坝抗震安全评价提供重要的标准依据.

2 土石坝地震变形模式及规律

2.1 土石坝地震变形模式

国内外土石坝震害案例很多,其中在汶川地震中紫坪铺面板堆石坝遭受到了基岩加速度峰值大于0.5g的地震作用(远超过了原设计标准,约为设计值的2倍),是目前唯一遭遇强震的坝高超过150 m的面板坝,其为研究高土石坝的抗震性能提供了重要的案例支撑^[13].震后调查发现^[14],紫坪铺大坝坝体出现了明显的整体震陷,下游坡面砌石松动、翻起,并伴有向下滑移乃至滚落(图1)^[15].室内面板坝的三维振动台模型试验也表明^[16],在地震作用下面板坝坝顶发生震陷,下游坡的中上部浅层块石发生明显的指向下游侧的滑移,同时下游坡发生了块石滚落,坝体的变形模式与实际震害一致(图2).

土石坝的实际震害、振动台模型试验结果均表明,在地震作用下土石坝的变形模式为坝顶震陷及坝坡堆石料的浅层松动、滑移及表层块石滚落,坝坡表层渐进滑动、无明显滑裂面.这与黏性土坡的深层整体瞬间滑动存在明显的差异.同时目前尚未发现现代碾压土石坝在地震后发生坝坡失稳的案例.因此坝体地震变形是评价现代碾压土石坝地震安全的核心问

图 1 (网络版彩图)汶川地震中紫坪铺面板坝震害^[15]

Figure 1 (Color online) Damage of Zipingpu concrete face rockfill dam in the Wenchuan earthquake [15].

图 2 (网络版彩图)面板坝三维振动台模型试验结果

Figure 2 (Color online) Three-dimensional shaking table model test results of a concrete face rockfill dam.

题, 并且依附于堆石体的防渗体在地震条件下的破坏损伤程度都与坝体变形密切相关。

2.2 土石坝震陷率与滑移量相关性

国内外坝体地震变形评估方法可分为2类: 一类是通过有限元等数值分析方法计算坝体变形; 另一类是基于稳定的滑移变形分析对坝体变形间接预测。两类方法得到的变形指标仅是描述变形的方式不同。在以上方法中, 目前国内外常用坝顶震陷率(δ , 表示坝顶沉降与坝高的比值)和坝坡滑移量(D , 表示坝坡刚塑性体的滑动变形)两个参量来表征坝体变形, 但由于两个指标确定的方法和理论不同, 可能会导致在制定坝体变形破坏指标时两个变形指标存在严重不统一的问题。

本文分别以面板堆石坝和土质心墙坝为分析模型, 开展不同坝高、坝坡坡度、坝顶宽度、地震动峰值强度及地震动特性下的地震变形分析研究。根据我国已建及拟建高面板坝的设计情况^[17], 本文面板坝模

型尺寸设定为坝高 H 为200和250 m, 坝顶宽度为12和15 m, 下游坝坡为1:1.5和1:1.6, 上游坝坡为1:1.4。根据我国已建及拟建高心墙坝的设计情况^[18], 本文心墙坝模型尺寸设定为坝高200, 250和300 m, 坝顶宽度16 m, 上游坝坡1:1.9, 下游坝坡1:1.8, 上下游坝坡坡度属于已有200 m以上高心墙坝的不利坡度。典型面板坝工况的有限元分析模型如图3, 典型心墙坝工况的有限元分析模型如图4, 两种坝型地基截断边界范围依据孔宪京等人^[19]确定。动力分析时地震动输入采用拉哇(239 m)、大石峡(247 m)、猴子岩(223.5 m)工程的场地谱人工波, 计算中同时输入P波和SV波分别激发竖向和水平向振动, 输入方法采用波动法^[19], 在底边界和侧边界均设置了黏弹性界面单元, 其参数采用基岩的力学特性确定; 坝体地震变形分析采用动力弹塑性分析方法, 坝体堆石料采用大连理工大学发展的广义塑性本构模型^[20,21]; 坝坡滑移量分析采用基于有限元动力分析的滑移变形分析方法^[22]; 面板堆石坝计算参数采用了拉哇(高239 m)、猴子岩(高223.5 m)面板坝筑坝料的试验成果, 心墙堆石坝采用了如美(高315 m)、两河口(高295 m)心墙坝筑坝料的试验成果; 计算软件采用大连理工大学自主研发的岩土工程高性能有限元分析软件GEODYNA(7.0)^[23,24]。

图 3 典型250 m面板坝有限元分析模型

Figure 3 The finite element model of a typical 250 m concrete face rockfill dam.

图 4 典型300 m心墙坝有限元分析模型

Figure 4 The finite element model of a typical 300 m core wall rockfill dam.

在探讨震陷率与滑动量之间的相关性时, 弹塑性动力分析计算的面板坝和心墙坝震陷率均是坝顶竖向沉降与坝高的比值, 面板坝采用滑弧位置穿过坝顶中点的滑动面计算滑移量, 心墙坝采用滑弧位置穿过过渡与心墙之间区域的滑动面计算滑移量。

面板坝和心墙坝的坝顶震陷率和坝坡滑移量的关系如图5和6所示。可以看出无论是面板坝还是心墙坝, 其坝顶震陷与坝坡滑移均表现为明显的正相关。值得注意的是, 坝坡滑移量并非地震时坝坡发生的真实滑移量, 其仅是表征坝坡变形的一个参考变量。坝顶震陷是大坝整体变形的真实体现, 采用坝顶震陷描述坝体地震变形更接近实际。

3 高土石坝极限抗震能力评价量化指标

3.1 坝顶震陷率指标

强震作用下大坝会发生明显的坝顶震陷, 如果地震变形导致坝顶低于库水位, 则坝顶溢流造成的侵蚀会使大坝存在漫顶溃坝的危险。为了防止库水漫顶, 坝顶地震沉降所允许的最大变形应小于坝前水位超高, 因此坝顶震陷是评估高土石坝极限抗震能力的关键指标。

在大坝设计时, 其正常蓄水位与坝顶高程会存在一定的高度差(本文简称高差, 其与坝高的比值称为“高差率”, ζ)。本文总结了国内外100 m以上的35个土石坝工程的高差率, 坝高范围126~315 m, 包括24个面板坝和11个心墙坝(图7)。从统计结果来看, 国内外已建土石坝的高差率均大于2%(国内大于2.35%), 即正常蓄水时坝体震陷率小于2%时不会发生库水漫顶问题。高差率最大的坝为高187 m的阿瓜米尔帕坝, 高差率为8%, 这可能与该坝坝址区存在有6条NE-SW走向断层、坝址以上流域面积为73834 km², 年内流量变化大等因素有关^[25]。国内外高差率最小的坝分别为高139 m的瓦屋山面板坝和高151 m的Xingo坝, 高差率为2.35%和2%, 高差率相对较小与瓦屋山面板坝坝址以上集水面积较小为776 km²^[26]以及Xingo坝主要用于灌溉和发电有一定的关系。

此外, 根据Swaigood^[5]土石坝实际震害统计资料, 并结合紫坪铺大坝震害, 可以看到, 随着峰值加速度(PGA)的增加, 土石坝震陷率是逐级增大的, 但震陷率与地震加速度峰值关系是收敛的且不存在突变的趋势

(图8)。从目前已有的面板坝和心墙坝震害结果可以看到, 面板堆石坝震陷率小于0.7%、心墙堆石坝小于

图5 (网络版彩图)面板坝的坝坡滑移量指标

Figure 5 (Color online) Slope slip index of concrete face rockfill dam.

图6 (网络版彩图)心墙坝的坝坡滑移量指标

Figure 6 (Color online) Slope slip index of core wall rockfill dam.

图7 (网络版彩图)国内外已建高土石坝高差率

Figure 7 (Color online) The ratios of the distance between the dam crest and normal water level to dam height.

图 8 (网络版彩图)土石坝震陷率统计. (a) 心墙坝和面板坝; (b) 土坝和冲填坝

Figure 8 (Color online) The relative seismic settlement ratios of the dam crest. (a) Core wall rockfill dam and concrete face rockfill dam; (b) earthfill and hydraulic fill.

1.1%时都没有发生震后大坝无法修复而不满足后续运行功能的问题; 此外有多个土坝和水力充填坝发生了大于1.5%的震陷率也未发生灾难性破坏(土石坝因施工和控制标准优于土坝和水力充填坝, 其在相同震陷率条件下应更安全).

综合考虑现在碾压土石坝的施工质量和控制标准远优于土坝和水力充填坝, 并且结合现有碾压土石坝震害案例情况, 基于极端地震时大坝不溃坝或经最大努力后仍基本可修的原则^[27], 建议高面板震陷率极限抗震能力评价指标为1.1%、高心墙坝震陷率极限抗震能力评价指标为1.3%.

3.2 坝坡滑移量指标

由于土石坝坝顶震陷率和坝坡滑移量存在明显的正相关性. 如图5和6所示, 对于面板坝, 当坝顶震陷率

为1.1%时, 坝坡滑移量的最大值约为1.2 m; 对于心墙坝, 当震陷率为1.3%时, 坝坡滑移量的最大值约为1.4 m. 综合考虑震陷率和坝坡滑移量指标的协调性及震陷率的主导控制性, 据此建议高面板坝坝坡滑移量极限抗震能力评价指标为1.2 m(滑弧穿过坝顶中点)、高心墙坝坝坡滑移量极限抗震能力评价指标为1.4 m(滑弧穿过过渡与心墙之间区域).

3.3 接缝指标

接缝位置是混凝土面板堆石坝防渗体系中的薄弱环节. 地震时坝体的不均匀变形会进一步加剧面板接缝发生沉降、剪切和张开等问题, 影响大坝地震安全. 周边缝由于接缝位移最大而成为止水研究的重点^[28,29].

接缝的止水效果取决于止水措施对水头和接缝变位的适应能力. 早期国内沟后面板坝(高71 m)防浪墙与面板的水平接缝仅设立一道橡胶止水带, 蓄水后因坝体变形较大导致水平接缝止水破坏, 库水从坝体上部灌入, 导致溃坝^[30]. 株树桥面板坝(高78 m)因坝体不均匀变形及止水缺陷(采用的EP-88填料伸长率小于同类产品, 且缺乏胶结性与混凝土黏结不紧密; 表层PVC盖片没有形成封闭, 表面止水失效)导致两岸周边缝及垂直缝止水失效而出现渗漏, 又由于垫层料、过渡料设计不合格, 最终导致严重渗漏, 但在修复后渗流量得到了很好的控制, 目前运行状态良好^[31].

1971年澳大利亚塞沙那(高110 m)采用了两道止水(中部止水带和底部铜止水), 1980年巴西阿里亚面板坝(高160 m)周边缝设置了底部铜止水、中部PVC止水带、顶部用PVC薄膜覆盖的IGAS玛蹄脂塑性填料三道止水, 均取得了良好的防渗效果^[32]. 然而, 试验研究和工程实践表明, PVC止水带在接缝张开25 mm时会破坏漏水; 当裂缝漏水时, IGAS玛蹄脂也起不到自愈作用^[33]. 国内200 m级高面板堆石坝采用的是GB和SR塑性填料, 模型试验证明了填量充裕的GB或SR塑性填料可以满足接缝张开50 mm、深1100 mm的接缝止水要求; 尺寸适宜的铜止水, 即使带有焊缝, 也可以适应50 mm的剪切位移, 不漏水^[28,32]. “九五”期间我国的面板堆石坝接缝止水技术可以满足接缝张开位移100 mm、沉陷位移100 mm、接缝剪切位移50 mm、作用水头250 m的要求, 并在水布垭面板坝(高233 m)、洪家渡(高179.5 m)、三板溪(高185.5 m)、紫

坪铺(高156 m)和吉林台一级(高157 m)等多座高面板坝中应用^[28,32]。

2011年,华能澜沧江水电有限公司等^[29]单位依托古水、茨哈峡等水电站工程进行了300 m级高面板堆石坝适应性及对策的课题研究。试验表明:填量充裕的塑性填料可以满足3.5 MPa水压力下100 mm接缝张开位移和1.3 m接缝深度的要求;3根直径80 mm PVC棒组合成的支撑体和适宜断面的波形止水带(6波、长503 mm)可以承受3.5 MPa水压力下100 mm接缝张开位移;在翼板上单面复合85 mm宽、3 mm厚的GB止水板的M态软铜带材和适宜断面(鼻子高150 mm、宽30 mm)的铜止水可承受3.5 MPa水压力下80 mm接缝剪切位移。

综上,从统计结果可以看到,随着止水材料研发技术的进步,高面板坝止水材料的抗变形能力得到了显著提升,止水可承受张开和沉陷100 mm,剪切80 mm的接缝变形。当地震时止水达到最大变形量失效时,大坝的渗流量会急剧增加,但由于垫层、过渡的存在,大坝也难以在短时间内发生溃坝,此外止水破坏的区域和面积也同样显著影响大坝的防渗安全,有关止水的极限抗震能力指标还需要结合面板损伤/开裂以及渗流稳定综合研究。为了减弱止水破坏引起的危险,建议在震后尽快降低大坝的水位。

4 结论

本文基于系统的高土石坝(坝高大于200 m)地震整体弹塑性变形和坝坡局部滑移变形分析(考虑坝

型、坝高、坝坡、坝顶宽度、地震动等因素)及全面的工程资料调研(包括遭遇地震大坝的震陷率、振动台模型试验、坝顶高程与正常蓄水位高差、止水材料及其性能等)对比研究,得到如下主要结论。

(1) 基于综合考虑实测震陷率和震害程度对应关系、极端地震时大坝不溃坝或经最大努力后仍基本可修的原则,建议了地震条件下高面板坝和心墙坝震陷率的极限抗震能力指标:面板坝震陷率为1.1%、心墙坝震陷率为1.3%。此外,极震或强震时高土石坝地震安全分析已经超出了弱耦合、弱非线性方法(如等价线性和应变势方法)的适用范围,震陷率的评估需采用理论更严密的高土石坝全体系相互作用和破坏模拟方法^[24,34]。

(2) 论证了坝顶震陷率与滑移量的正相关性,提出了震陷率和坝坡滑移量指标的协调性、震陷率指标的主导控制性,建议了高面板坝和心墙坝坝坡滑移量的极限抗震能力指标:面板坝坝坡滑移量指标为1.2 m(滑弧穿过坝顶中点)、心墙坝坝坡滑移量指标为1.4 m(滑弧穿过过渡与心墙之间区域)。

(3) 止水材料技术一直在发展中,目前止水可承受张开和沉陷100 mm,剪切80 mm的接缝变形。建议止水的极限抗震能力指标需要根据止水材料的性能、失效位置、面积以及面板损伤开裂等因素结合渗流稳定综合考虑。

本文研究成果可为高土石坝极限抗震能力评价提供标准依据,并已经应用于我国2座在建的高300 m级土石坝,在今后的研究中将结合实际工程案例不断完善相关评价方法和指标。

参考文献

- 1 Hynes-Griffin M E, Franklin A G. Rationalizing the seismic coefficient method. US Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg MS Geotech Lab, 1984
- 2 Darbre G R. Swiss guidelines for the earthquake safety of dams. In: 13th World Conference on Earthquake Engineering. Vancouver, B.C., 2004
- 3 Federal Emergency Management Agency (FEMA). Federal guidelines for dam safety: Earthquake analyses and design of dams. FEMA 65, May 2005
- 4 U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation. Design Standards No. 13, Embankment Dams, Chapter 13: Seismic Analysis and Design. 2015
- 5 Swaisgood J R. Embankment dam deformations caused by earthquakes. In: Proceedings of the 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering. Christchurch, 2003
- 6 Fell R. Geotechnical Engineering of Dams. Leiden, New York: A.A. Balkema, 2005
- 7 Chang Y P. Study on key seismic technology of high earth-rockfill dam (in Chinese). Water Power, 1998, 2: 36-42 [常亚屏.高土石坝抗震关键

技术研究. 水力发电, 1998, 2: 36–42]

- 8 Zhao J M, Liu X S, Yang Y S, et al. Criteria for seismic safety evaluation and maximum aseismic capability of high concrete face rockfill dams (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2015, 37: 2254–2261 [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. 岩土工程学报, 2015, 37: 2254–2261]
- 9 Zhao J M, Liu X S, Chen N, et al. Research on the maximum anti-seismic capability of high earth core rock-fill dam (in Chinese). *J Hydroel Eng*, 2009, 28: 97–102 [赵剑明, 刘小生, 陈宁, 等. 高心墙堆石坝的极限抗震能力研究. 水力发电学报, 2009, 28: 97–102]
- 10 Shao L, Chi S C, Li H J, et al. Preliminary studies of ultimate aseismic capacity of high core rockfill dam (in Chinese). *Rock Soil Mech*, 2011, 32: 3827–3832 [邵磊, 迟世春, 李红军, 等. 高心墙堆石坝极限抗震能力初探. 岩土力学, 2011, 32: 3827–3832]
- 11 Chen S S, Li G Y, Fu Z Z. Safety criteria and limit resistance capacity of high earth-rock dams subjected to earthquakes (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2013, 35: 59–65 [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. 岩土工程学报, 2013, 35: 59–65]
- 12 Tian J Y, Liu H L, Wu X Y. Evaluation perspectives and criteria of maximum aseismic capability for high earth-rock dam (in Chinese). *J Disaster Prev Mitigation Eng*, 2013, 33: 128–131 [田景元, 刘汉龙, 伍小玉. 高土石坝极限抗震能力的评判角度及标准述评. 防灾减灾工程学报, 2013, 33: 128–131]
- 13 Kong X J, Zou D G. Seismic Damage Analysis and Numerical Simulation of Zipingpu CFRD (in Chinese). Beijing: Science Press, 2014 [孔宪京, 邹德高. 紫坪铺面板堆石坝震害分析与数值模拟. 北京: 科学出版社, 2014]
- 14 Chen S S, Huo J P, Zhang W M. Analysis of effects of “5.12” Wenchuan earthquake on Zipingpu concrete face rock-fill dam (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2008, 30: 795–801 [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. 岩土工程学报, 2008, 30: 795–801]
- 15 Liu J M. Elasto-plastic constitutive models of rockfill material and soil-structure interface and their application on CFRD (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2015 [刘京茂. 堆石料和接触面弹塑性本构模型及其在面板堆石坝中的应用研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2015]
- 16 Han G C, Kong X J, Li J J. Experimental study on dynamic destructive state and seismic measures of CFRD (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 1990, 5: 61–67 [韩国城, 孔宪京, 李俊杰. 面板堆石坝动力破坏性态及抗震措施试验研究. 水利学报, 1990, 5: 61–67]
- 17 Concrete Face Rockfill Dam Professional Committee of China Hydropower Engineering Society. Appendix of Proceedings on Safety Research of High Concrete Face Rockfill Dam and Progress of Soft Rock Damming Technol (in Chinese). In: Proceedings on Safety Research of High Concrete Face Rockfill Dam and Progress of Soft Rock Damming Technol. Nanjing, 2014 [中国水力发电工程学会混凝土面板堆石坝专业委员会. 高面板堆石坝安全性研究及软岩筑坝技术进展论文集附录. 见: 高面板堆石坝安全性研究及软岩筑坝技术进展研讨会. 南京, 2014]
- 18 Zhou J P, Yang Z Y, Chen G F. The present situation and challenge of high dam construction in China (in Chinese). In: Proceedings of the Sixth Second Council and Symposium of China Society of Hydropower Engineering. Nanning, 2008 [周建平, 杨泽艳, 陈观福. 我国高坝建设的现状和面临的挑战. 见: 中国水力发电工程学会六届二次理事会暨学术研讨会. 南宁, 2008]
- 19 Kong X J, Zhou C G, Zou D G, et al. Study on dynamic interaction between high earth-rockfill dam and foundation (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 2019, 50: 1417–1432 [孔宪京, 周晨光, 邹德高, 等. 高土石坝-地基动力相互作用的影响研究. 水利学报, 2019, 50: 1417–1432]
- 20 Zou D, Xu B, Kong X, et al. Numerical simulation of the seismic response of the Zipingpu concrete face rockfill dam during the Wenchuan earthquake based on a generalized plasticity model. *Comput Geotech*, 2013, 49: 111–122
- 21 Xu B, Zou D, Liu H. Three-dimensional simulation of the construction process of the Zipingpu concrete face rockfill dam based on a generalized plasticity model. *Comput Geotech*, 2012, 43: 143–154
- 22 Xu B, Zou D G, Kong X J, et al. Seismic stability of slopes of high rockfill dams (in Chinese). *Chin J Geotech Eng*, 2012, 34: 139–144 [徐斌, 邹德高, 孔宪京, 等. 高土石坝坝坡地震稳定分析研究. 岩土工程学报, 2012, 34: 139–144]
- 23 Zou D G, Kong X J, Zhou Y, et al. Large software system for finite element dynamic nonlinear analysis of geotechnical engineering—Theory and user manual of GEODYNA (in Chinese). Technical Report. Dalian: Institute Seismic Engineering, School of Hydraul Engineering, Dalian University of Technology, 2019 [邹德高, 孔宪京, 周扬, 等. 大型岩土工程有限元动力非线性分析软件系统——GEODYNA理论和使用说明. 技术报告. 大连: 大连理工大学水利工程学院工程抗震研究所, 2019]
- 24 Kong X J, Zou D G. Seismic Disaster Simulation and Engineering Application of High Earth Rockfill Dam (in Chinese). Beijing: Science Press, 2016 [孔宪京, 邹德高. 高土石坝地震灾变模拟与工程应用. 北京: 科学出版社, 2016]
- 25 Rangel-Peraza J G, de Anda J, González-Farías F A, et al. Assessment of heavy metals in sediment of Aguamilpa Dam, Mexico. *Environ Monit Assess*, 2015, 187: 134

- 26 Qiu B L. Design and establishment of external deformation monitoring network for Wawushan Hydropower Station (in Chinese). *Sichuan Water Power*, 2008, 27: 120–122 [邱宝良. 瓦屋山水电站外部变形监测网的设计与建立. *四川水力发电*, 2008, 27: 120–122]
- 27 Zhang C H, Jin F, Pan J W. On seismic fortification criteria after Wenchuan Earthquake for high dam in China (in Chinese). *Water Resour Hydropower Eng*, 2009, 40: 74–79 [张楚汉, 金峰, 潘坚文, 等. 汶川地震后我国高坝抗震标准问题. *水利水电技术*, 2009, 40: 74–79]
- 28 Xu Y, Hao J T. Development and prospect of slab joint sealing technology for concrete face rockfill dam (in Chinese). *J China Acad Water Resour Hydropower Sci*, 2018, 16: 457–465 [徐耀, 郝巨涛. 混凝土面板堆石坝面板接缝止水技术的发展与展望. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16: 457–465]
- 29 Huadian Nujiang Hydropower Co., Ltd, China Hydropower Engineering Consulting Group Corporation, Huaneng Lancang River Hydropower Co. LTD. Research report on adaptability and countermeasures of 300 m concrete face rockfill dam (in Chinese). Technical Report. 2010 [华电怒江水电有限公司, 中国水电工程顾问集团公司, 华能澜沧江水电有限公司. 300 m级面板堆石坝适应性及对策研究报告. 技术报告. 2010]
- 30 Liu J, Ding L Q, Miao L J. Model test study on failure mechanism of Gouhou concrete face rockfill dam (in Chinese). *J Hydraul Eng*, 1998, 11: 70–76 [刘杰, 丁留谦, 缪良娟, 等. 沟后面板砂砾石坝溃坝机理模型试验研究. *水利学报*, 1998, 11: 70–76]
- 31 Tan J X, Wang M X, Zhou X M. Practice and experience of strengthening concrete face rockfill dam of Zhushuqiao (in Chinese). *J Yangtze River*, 2011, 42: 85–88 [谭界雄, 王秘学, 周晓明. 株树桥水库面板堆石坝加固实践与体会. *人民长江*, 2011, 42: 85–88]
- 32 Li N H. New Technology of High Concrete Face Rockfill Dam (in Chinese). Beijing: China Waterpower Press, 2007 [郇能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术. 北京: 中国水利水电出版, 2007]
- 33 Pinto N D S, Mori R T. A new concept of a perimetric joint for concrete face rockfill dams. In: *Proceedings of the Sixteenth Congress on Large Dams*. San Francisco, 1988
- 34 Kong X J, Zou D G, Chen K. Application of Proportional Boundary Finite Element Method in Geotechnical Engineering (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021 [孔宪京, 邹德高, 陈楷. 比例边界有限元在岩土工程中的应用. 北京: 科学出版社, 2021]

Criteria for ultimate aseismic capacity of high rockfill dam

ZOU DeGao^{1,2}, KONG XianJing^{1,2}, LIU JingMao^{1,2}, QU YongQian^{1,2}, JIANG QiuTing^{1,2} & SHAO WeiFeng^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Coastal & Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

² School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

The ultimate aseismic capacity is important to evaluate the seismic safety of a rockfill dam. However, no specification in China explicitly stipulates the criteria for the ultimate aseismic capacity of a rockfill dam. Existing evaluation factors and their indices to represent earthquake-induced damage to rockfill dams are not unified, and there is a problem with the safety degrees obtained by the indexes of different evaluation factors not being coordinated. In this study, a large number of systematic analyses of overall elastic-plastic deformation and slip deformation of high rockfill dams (height > 200 m) under earthquake are performed in addition to a comparative study of measured engineering analysis. Based on the above studies, four basic principles for determining the criteria for the ultimate aseismic capacity of a high rockfill dam are proposed: strictly following the mapping relationship between the relative settlement ratio of dam crest and the damage degree of dams under earthquake, ensuring that the dam can not be a collapse in extreme earthquakes, taking the relative settlement ratio of dam crest as the key control evaluation factor, and ensuring the coordination of different evaluation factors such as the relative settlement ratio of dam crest and the slip deformation of dam slope. Finally, the criteria for the ultimate aseismic capacity of a high concrete face rockfill dam and a core-wall rockfill dam under earthquake conditions are proposed. The findings of the study could provide an important standard basis for determining the ultimate aseismic capacity of a high rockfill dam.

high rockfill dam, earthquake, ultimate aseismic capacity, relative seismic settlement ratio of dam crest, slip deformation

doi: [10.1360/SST-2021-0335](https://doi.org/10.1360/SST-2021-0335)