

土石坝坝顶加固的永久变形机理及其离心模型试验验证

章为民¹, 王年香¹, 顾行文¹, 曾友金¹, 伍小玉², 杜三林³

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072; 3. 中国大唐集团公司, 北京 100140)

摘要: 首先介绍了汶川特大地震中紫坪铺大坝永久变形原型观测的研究结果, 根据紫坪铺大坝汶川地震实测结果, 发现地震永久变形主要产生于大坝的上部, 从地震永久变形的发生机理论证了坝顶加固技术的合理性与科学性. 然后介绍了土石坝离心模型动力试验的研究成果, 通过离心模型试验验证了坝顶加固的有效性与合理性. 通过比较, 表明离心模型试验得到的大坝变形分布形态、大坝外形轮廓变化、变形矢量等关键技术特性与墨西哥 El Infiernillo 土石坝及紫坪铺汶川地震实测结果吻合很好, 证实了离心模型试验的技术优势.

关键词: 坝顶加固; 永久变形; 离心机振动台; 土石坝; 紫坪铺面板堆石坝; 地震

中图分类号: TV641

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)01-0022-06

1 土石坝及其地震沉降

水能资源是可再生的清洁能源, 为解决未来发展中的能源问题, 我国将建设多座大型高土石坝工程, 如长河坝、双江口、两河口、糯扎渡等工程都是具有世界级水平与技术难度的高坝大库工程. 土石坝使用当地材料筑坝, 具有结构简单、造价低、抗震能力强的特点, 成为高坝建设的主要坝型之一. 由于我国水能资源多集中在西部高地震烈度地区, 研究解决高土石坝抗震问题就变得非常重要和迫切. 土石坝的抗震措施主要有: 预留坝顶超高、提高压实标准、放缓和加固坝坡、加固坝顶等, 目前由于问题的复杂性以及技术手段的限制, 有些方法尚缺乏机理的深入研究, 经验定性成分居多, 说服力不强. 例如坝顶加固方法的依据主要有两个方面: 坝顶永久沉降最大和坝顶地震加速度反应最大, 这虽然有一定的道理但仍令人担心, 其原因之一是源于图1的沉降模型.

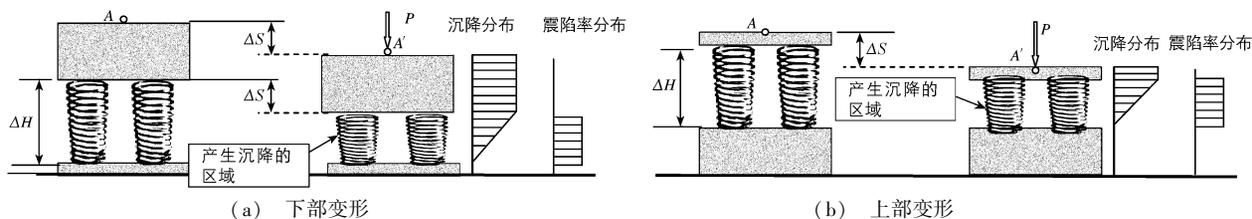


图1 顶部沉降与沉降机理模型

Fig. 1 Top settlement and settlement model

收稿日期: 2010-05-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90815024, 50679042); 国家自然科学基金委员会、二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金资助项目(50639050)

作者简介: 章为民(1959-), 男, 江苏连云港人, 教授级高级工程师, 主要从事土石坝及岩土力学研究.

E-mail: wmzhang@nhri.cn

图 1 表明,在连续无间断的前提下,不论沉降是由坝体哪个部分产生的,顶部(A'点)的地震沉降增量理论上永远最大.显然,如果沉降产生在下部(图 1(a)),坝顶永久沉降也是最大的,此时加固坝顶就不会有效.因此,坝顶地震永久沉降最大并不能成为坝顶加固的理由,虽然坝顶加速度大,但其机理尚不清楚,加上没有实际的地震资料,这一问题并未解决.

2 紫坪铺面板坝地震永久变形与坝顶加固机理

紫坪铺面板堆石坝是国内外第 1 座遭受 8 级特大地震(大坝实际遭遇影响烈度 IX 度)仍然安全运行的超百米混凝土面板堆石坝,在世界堆石坝抗震史上具有里程碑意义,获得了“国际堆石坝里程碑特别工程奖”,也反映了我国近 30 年来在水利水电建设中的巨大成就与科技进步.紫坪铺大坝布设了较为完整的监测系统,虽然部分设备仪器在超强大地震中遭受损坏,但仍然得到了大量珍贵的数据资料^[1-7].

2.1 汶川地震后紫坪铺面板坝永久沉降分布特征

紫坪铺大坝地震永久沉降分布见图 2.可见,紫坪铺大坝地震永久沉降沿坝高分布不均匀.表 1 列出了 0+251 和 0+371 断面坝体不同部位产生的永久沉降.震陷率(最大永久沉降 S 与坝高 H 之比)一般用来判断地震对大坝的总体影响与危害,但不能说明地震永久沉降的变化规律,采用分区震陷率^[7](压缩应变 = $\Delta S / \Delta H$)则可清楚地看出沉降的分布规律.由表 1 和图 3 可见,紫坪铺大坝上部坝体震陷率最大,达到 1.57% ~ 1.63%,大坝上部的震陷率是底部坝体的 6 倍以上,说明大坝的上部区域地震沉降最为剧烈、破坏亦必然严重;也说明紫坪铺大坝上部坝体产生的永久沉降是大坝地震总沉降的主要部分,对大坝永久沉降的影响亦最大.

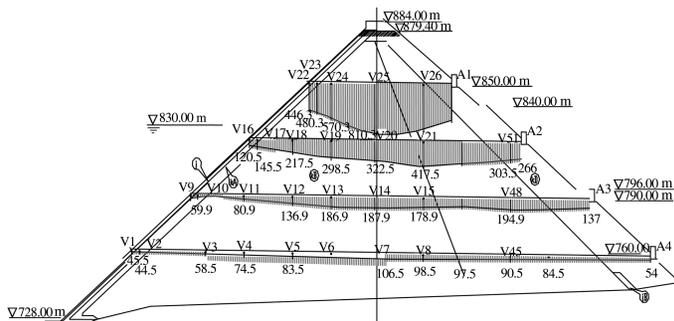


图 2 紫坪铺大坝地震永久沉降分布(单位: mm)

Fig. 2 Distribution of permanent settlement of Zipingpu dam after earthquake (unit: mm)

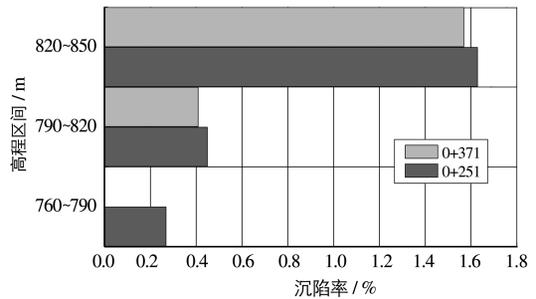


图 3 紫坪铺大坝实测震陷率沿坝高分布

Fig. 3 Distribution of shock settlement ratio along elevation of Zipingpu dam

表 1 汶川地震紫坪铺大坝实测永久沉降分布
Tab. 1 Permanent settlement distribution of Zipingpu dam

高程范围/ m	区间沉降/mm		所占比例/%		震陷率/%	
	0+251	0+371	0+251	0+371	0+251	0+371
760 ~ 790	81.4	/	11.6	/	0.27	/
790 ~ 820	134.6	124.2	19.1	20.9	0.45	0.41
820 ~ 850	487.8	470.5	69.3	79.1	1.63	1.57
合计	703.8	594.7	100	100	/	/

2.2 大坝外形轮廓地震前后的变化与永久变形矢量特征

国内外大量的土石坝研究表明,在一定的周围压力条件下,堆石体在地震动剪应力的作用下会发生颗粒尖角破碎、小颗粒充填、颗粒重排列的挤密效应,从而使堆石体的体积收缩,称为堆石体的剪缩性,即剪应力产生了体积应变,这是普通虎克定律类的本构模型难以描述的.剪缩性是堆石体的主要特性之一,而大坝外

形轮廓变化及其坝坡变形矢量方向则是剪缩性重要的外在表现. 图4是紫坪铺大坝地震前后的外形轮廓与坝坡永久变形矢量实测结果, 由图可见: (1) 紫坪铺大坝地震后外形轮廓全部落在地震前的外形轮廓之内, 表明大坝地震后整体是收缩的, 没有出现震松震散的情况. 由于断面收缩, 大坝的整体密度趋于更紧密, 这也是堆石坝具有较强抗震能力的重要依据之一; (2) 坝坡的地震永久变形矢量均指向坝内, 大部分变形矢量的垂直分量远大于水平分量, 表明大坝的地震变形以沉降为主; (3) 面板下部的永久变形矢量与面板垂直, 下游坝坡底部(760 m 高程)永久变形矢量方向为1:1.22, 在震前坝坡1:1.4之内, 坝坡底部未出现膨出现象. 紫坪铺大坝外形轮廓地震后向内收缩、坝坡永久变形矢量指向坝内、永久变形矢量垂直分量远大于水平分量、下游坝坡底部无膨出, 均表明紫坪铺大坝震后整体是稳定的.

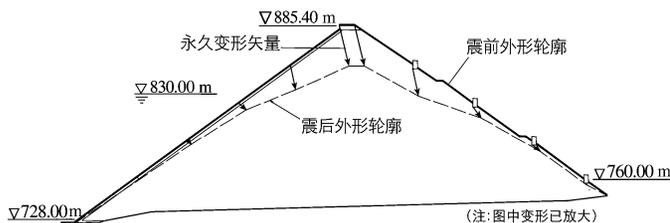


图4 汶川地震前后紫坪铺大坝外形轮廓与永久变形矢量图
Fig. 4 Deformation vectors and slope permanent deformation of Zipingpu dam before & after earthquake

3 土石坝坝顶加固离心模型试验验证

离心模型试验可模拟原型的应力水平, 因而在表现岩土的摩擦性、非线性、弹塑性、剪胀(剪缩)性、多相性等各种动静力学特性方面具有独特优势, 是工程力学物理模型中相似性最好的模型. 近年来离心模型地震动力试验技术研究水平不断提高, 应用范围不断扩大, 已成为解决岩土工程关键技术难题的有力武器^[8-10].

四川大渡河长河坝水电站工程为一等大(1)型工程, 拦河大坝采用砾石土心墙堆石坝, 最大坝高240 m, 坝址河床覆盖层深达76.5 m. 汶川地震后, 南京水利科学研究院结合长河坝大坝的地震安全复核研究, 采用不等应力和多应力水平的离心模型技术方法, 开展了土石坝地震动力离心模型试验研究, 主要内容为: 土石坝的地震反应, 地震加速度放大及其变化规律; 地震动孔隙水压力特性; 土石坝地震永久变形和动力稳定性; 坝基防渗墙地震动力反应; 心墙与岸坡连接部位错动变形与地震动力反应; 土石坝的极限抗震能力与抗震措施等^[11-12]. 下面主要介绍土石坝坝顶加固方面的离心模型试验成果.

长河坝大坝离心模型试验布置见图5. 为了获得大坝内部的永久变形分布, 试验中采用数字图像处理技术对试验结果进行分析. 图6为设计地震条件下坝体变形矢量图和变形网格图. 可见, 在地震的作用下, 大坝变形以沉降为主, 水平位移较小, 坝坡呈朝里收缩的变形形态. 图7是墨西哥El Infiernillo土石坝1985年地震前后永久变形的实测结果^[13]. 对比图6, 图7和图4, 从大坝的变形分布形态、大坝外形轮廓变化、变形矢量等方面来看, 离心模型试验的结果与墨西哥El Infiernillo土石坝、紫坪铺汶川大地震实测结果吻合, 这一结果很好地表现了离心模型试验技术表现堆石体剪缩特性、模拟土石坝工程特性的能力.

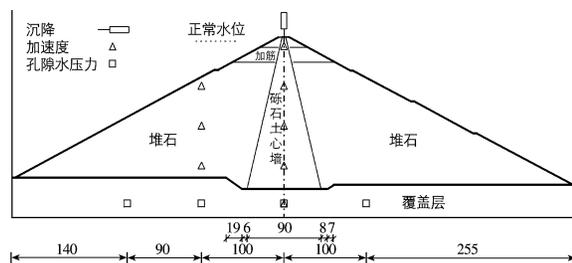


图5 坝体离心模型试验布置(单位: mm)

Fig. 5 Layout of centrifuge model (unit: mm)

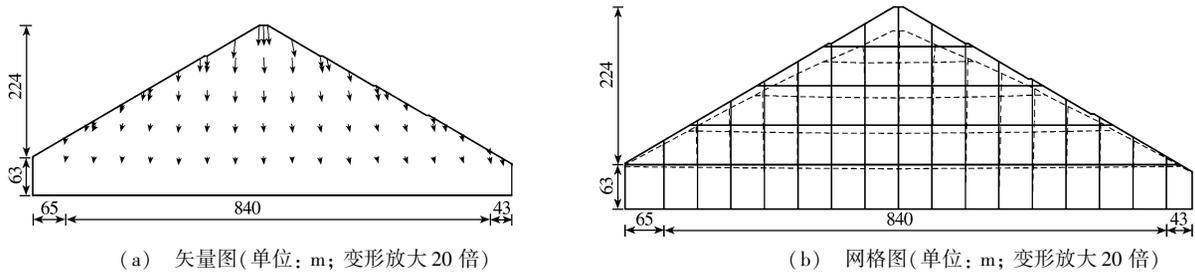


图 6 未加固大坝的地震变形矢量图和网格图

Fig. 6 Model deformation vectors and permanent deformation grids of the dam (before reinforcement)

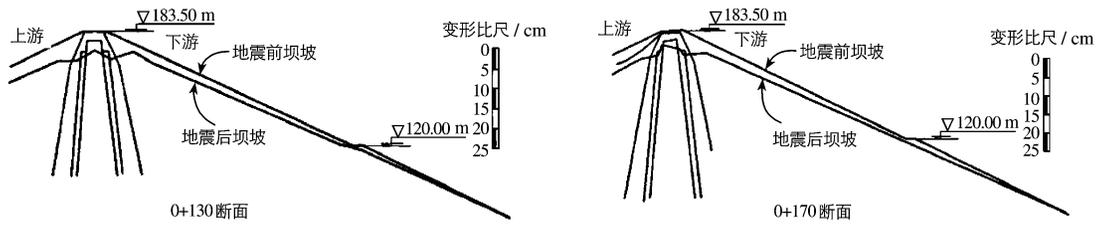


图 7 墨西哥 El Infiernillo Dam 1985 年地震前后永久变形实测结果

Fig. 7 Permanent deformation of El Infiernillo dam in Mexico after 1985 earthquake

为了比较检验坝顶加固的效果,进行了坝顶加固的对比试验研究. 图 8 为设计地震条件下坝顶加固方案的坝体变形矢量图和变形网格图. 比较坝顶加固方案和不加固方案可见,在相同地震作用下,坝顶加固方案有效减小了大坝的地震永久沉降变形,坝顶最大沉降从 161 cm 减小到 146 cm. 离心模型的坝体分区沉降率与加固的效果对比见图 9. 说明离心模型试验结果与实测结果吻合,也验证了坝顶加固的效果明显,加固后大坝顶层的震陷率减小了约 50%.

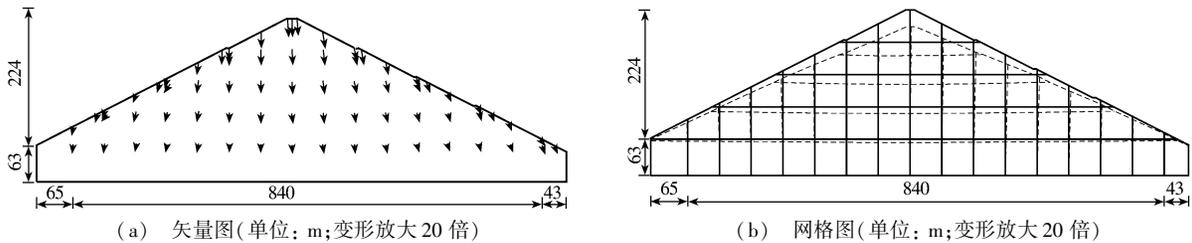


图 8 坝顶加固后的大坝变形矢量图和网格图

Fig. 8 Model deformation vectors and permanent deformation grids of the dam after top reinforcement

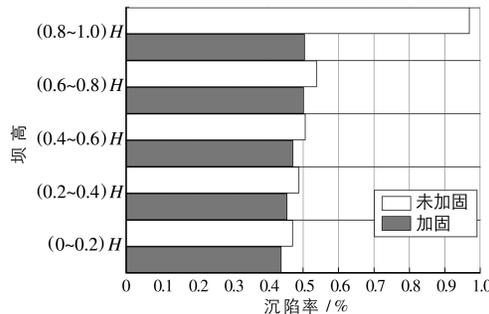


图 9 离心模型坝顶加固效果

Fig. 9 Efficiency of top reinforcement from centrifuge model test

4 一点讨论

由于紫坪铺大坝 760 m 高程以下未设置测点,坝顶有脱空,坝顶实测数据失真,前文只分析了 760 ~ 850 m 高程范围有实测数据区间的沉降情况.下面讨论紫坪铺 850 m 高程以上的坝体沉降.

根据震后对大坝的检查,坝顶脱空约 200 mm,最后估算坝顶沉降约为 1 000 mm^[1-3].然而根据前面的分析和已有的经验,坝顶的震陷是比较大的,如果假定 850 m 高程以上的坝体也按照 820 ~ 850 m 高程的震陷率来估算的话,850 ~ 879 m 高程的坝顶段本应产生的沉降为 480 mm,即大坝的地震总沉降至少应为 1 290 mm 左右,这样坝顶段沉降(采用坝顶脱空值)和大坝地震总沉降都相差了约 280 ~ 290 mm.显然,相差的 290 mm 沉降发生在坝顶段,其原因值得探讨研究.笔者以为,主要原因可能有 2 个方面:一是紫坪铺坝顶的处理质量比较好,坝顶的混凝土厚度达 1.0 m 以上,加上防浪墙基层和半刚性路基基层的作用,在坝顶就形成了一定的加固作用,可初步判断,坝顶处理形成的加固效应对减小的 290 mm 沉降差应有贡献;二是坝顶 1 000 mm 的沉降估算值偏小.笔者以为后者可能更为主要.

反思紫坪铺大坝在汶川地震中的表现,另一个值得关注的问题是坝顶加固的原则应当是由弱到强逐渐过渡,不宜突然变化,紫坪铺坝顶的脱空应当与变化突然及面板的支撑有关.因此,心墙坝的坝顶加固宜适当加大范围,逐渐过渡,以防心墙顶部脱空开裂.

5 结 语

(1) 坝顶加固的土石坝抗震加固技术,瞄准土石坝上部坝体震陷率最大和地震沉降贡献比最大 2 个主要特点,抓住了主要矛盾,加固方法科学合理.

(2) 离心模型地震动力试验结果证实了坝顶加固方法的有效性与科学性.

(3) 从大坝的变形分布形态、大坝外形轮廓变化、变形矢量等方面的对比来看,离心模型试验的结果与墨西哥 El Infiernillo 土石坝、紫坪铺汶川大地震实测结果吻合.这一结果很好地证明了离心模型表现堆石体剪缩特性的能力,也展现了离心模型动力试验在地震工程研究领域的巨大前景.

参 考 文 献:

- [1] 水利部紫坪铺大坝现场专家组. “5.12”地震后紫坪铺混凝土面板堆石坝安全监测与现场检查资料分析报告[R]. 成都:成都勘测设计研究院, 2008. (Site Expert Group of Zipingpu Dam, the Ministry of Water Resources. Report on safety analysis of Zipingpu concrete face rock-fill dam after “5.12” Wenchuan earthquake [R]. Chengdu: HydroChina Chengdu Engineering Corporation, 2008. (in Chinese))
- [2] 宋胜武, 蔡德文. 汶川大地震紫坪铺混凝土面板堆石坝震害现象与变形监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 840-849. (SONG Sheng-wu, CAI De-wen. Earthquake damage phenomena and deformation monitoring analysis for concrete faced rockfill dam at Zipingpu project during Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 840-849. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 关志诚, 宋彦刚, 蔡德文. 紫坪铺高面板坝“5.12”震害调查与安全状态评价[J]. 水利水电技术, 2008, 39(9): 36-39. (GUAN Zhi-cheng, SONG Yan-gang, CAI De-wen. Safety assessment and investigation on damage from disaster of “5.12” Wenchuan earthquake for Zipingpu concrete faced rockfill dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(9): 36-39. (in Chinese))
- [5] 宋彦刚, 邓良胜, 王昆, 等. 紫坪铺水库大坝震损及应急修复综述[J]. 四川水力发电, 2009, 28(2): 8-14. (SONG Yan-

- gang, DENG Liang-sheng, WANG Kun, et al. Seismic damages of dam of Zipingpu reservoir and emergency repairs[J]. *Sichuan Water Power*, 2009, 28(2): 8-14. (in Chinese))
- [6] 孔宪京, 邹德高, 周扬, 等. 汶川地震中紫坪铺混凝土面板堆石坝震害分析[J]. *大连理工大学学报*, 2009, 49(5): 667-674. (KONG Xian-jing, ZOU De-gao, ZHOU Yang, et al. Earthquake damage analysis of Zipingpu concrete face rockfill dam during Wenchuan earthquake[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2009, 49(5): 667-674. (in Chinese))
- [7] 章为民, 陈生水. 紫坪铺面板堆石坝汶川地震永久变形实测结果分析[J]. *水力发电*, 2010, 36(8): 51-53. (ZHANG Wei-min, CHEN Sheng-shui. Analysis permanent deformation analysis of the Zipingpu concrete face rockfill dam after the Wenchuan earthquake, 2010, 36(8): 51-53. (in Chinese))
- [8] 章为民, 赖忠中, 徐光明. 电液式土工离心机振动台的研制[J]. *水利水运工程学报*, 2002(1): 80-86. (ZHANG Wei-min, LAI Zhong-zhong, XU Guang-ming. Development of an electrohydraulic shake table for the centrifuge[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2002(1): 80-86. (in Chinese))
- [9] 章为民, 日下部治. 砂性地层地震反应离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2001, 23(1): 28-31. (ZHANG Wei-min, KUSAKABE O. Dynamic centrifuge model test of sandy layer[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2001, 23(1): 28-31. (in Chinese))
- [10] 王年香, 章为民. 混凝土面板堆石坝地震反应动态离心模型试验[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))
- [11] 王年香, 章为民. 长河坝抗震安全性评价与抗震措施离心模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2008. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Safety assessment and anti-earthquake design of the Changheba dam by centrifuge shaking table[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2008. (in Chinese))
- [12] 王年香, 章为民, 顾行文, 等. 长河坝动力离心模型试验研究[J]. *水力发电*, 2009(5): 67-70. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min, GU Xing-wen, et al. Dynamic centrifuge model test for Changheba dam[J]. *Water Power*, 2009(5): 67-70. (in Chinese))
- [13] ROMO M P. Model development from measured seismic behaviour of earth-rockfill dams[R]. Mexico: SID/630, Instituto De Ingenieria UNAM, 2002.

Deformation mechanism study of top reinforcement of the earth-rock-fill dam and its verification by the centrifuge model test

ZHANG Wei-min¹, WANG Nian-xiang¹, GU Xing-wen¹, ZENG You-jin¹, WU Xiao-yu², DU San-lin³
(1. *Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China*; 2. *HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, China*; 3. *China Datang Corporation, Beijing 100140, China*)

Abstract: To deal with the energy crisis, several large earth-rock-fill dams will be constructed in the western area, which is a high risk region of the strong earthquake. The mechanism study on anti-earthquake and disaster reduction is very important. In this paper, based on the monitoring data of Zipingpu concrete face rock-fill dam (CFRD) after Wenchuan earthquake, the permanent deformation mechanism of the top reinforcement of the earth-rock-fill dam is analyzed and the rationality of the top reinforcement technology has been proven by the dynamic centrifugal model test. The permanent deformation of the centrifugal model is also proven through comparison with the monitoring data of El Infiernillo dam in Mexico and Zipingpu CFRD.

Key words: top reinforcement; permanent deformation; centrifuge shaking table; earth-rock-fill dam; Zipingpu CFRD; earthquake