

DOI: 10.11779/CJGE201502008

# 先期振动对筑坝材料变形特性的影响

韩华强<sup>1,2</sup>, 陈生水<sup>1,2</sup>, 傅 华<sup>1,2</sup>, 凌 华<sup>1,2</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210024)

**摘 要:** 通过大型振动三轴试验研究了先期振动荷载对高土石坝筑坝材料抵抗地震变形能力的影响, 研究表明: 经受过先期动应力作用的土石料, 再次经受过动应力作用时, 其抵抗变形的能力明显提高, 这是由于在初始动应力作用下, 土石料颗粒破碎及试样内部重定向排列大部分已经完成, 再次经受过动应力作用时, 土石料颗粒破碎的程度将降低, 试样内部重定向排列的难度将加大, 从而使得其变形量减小, 抵抗变形的能力提高。抵抗变形的能力提高的幅值与土石料本身的性质、再次经过的动应力与先期动应力的比值, 即先期动应力和再次经过的动应力大小有关。根据试验结果建立了先期振动对粗粒料变形能力影响的一般表达式, 该表达式表明: 先期振动对粗粒料抵抗变形能力的影响仅与  $k$  值有关,  $k$  反映了粗粒料对先期振动作用的敏感度, 表示粗粒料经先期动应力作用后, 在再次经受过动应力作用时, 粗粒料内部重定向排列和颗粒破碎的难易度,  $k$  值越小, 粗粒料对先期振动的敏感性越大, 反之则越小,  $k$  值大小与粗粒料本身的矿物组成有关, 而与其自身的岩性、颗粒形状、级配、密度等没有关系。

**关键词:** 先期振动; 筑坝材料; 变形; 大型振动三轴试验

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)02-0263-06

**作者简介:** 韩华强(1978-), 男, 河南鄆城人, 博士, 高级工程师, 主要从事岩土工程的基本理论及工程应用等方面研究。E-mail: hqhan@nhri.cn。

## Effect of previous cyclic loading on deformation characteristics of dam materials

HAN Hua-qiang<sup>1,2</sup>, CHEN Sheng-shui<sup>1,2</sup>, FU Hua<sup>1,2</sup>, LING Hua<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210024, China; 2. Nanjing Hydraulic

Research Institute, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** Using dynamic triaxial tests, the effect of previous cyclic loading on capability of anti-deformation dam materials is studied. The results show that the anti-deformation capability is enhanced obviously when the dam materials are stabilized under the previous cyclic loading. It is considered that the further appropriate cyclic loading can not cause more particle breakage and internal redirection as are basically completed under the initial dynamic stress, leading to enhancing of anti-deformation capability and reduction of deformation. A general expression is proposed to describe the effect of the previous cyclic loading on the deformation of coarse materials. The anti-deformation capability of coarse materials only relates with  $k$ , which shows the sensitivity of the coarse materials to the previous cyclic loading, and it represents the degree of difficulty of particle breakage and internal redirection under later cyclic loading when they are stabilized under the previous cyclic loading. The value of  $k$  just relates with the absorption force and has nothing to do with parent rock, shape, gradation and density and so on. With the decrease of  $k$ , the sensitivity of the coarse materials to the previous cyclic loading is larger accordingly, and vice versa.

**Key words:** previous cyclic loading; dam material; deformation; large dynamic triaxial test

## 0 引 言

地震灾害作为一种严重的自然灾害, 能在瞬间成灾。中国已建和在建的百米以上高土石坝大多位于高地震烈度区, 确保这些高坝大库的地震安全性显得格外重要。地震区的土石坝有可能会经历多次地震的影响, 如智利的 Cogoti 坝在 1938 年建成, 曾经历过 4 次地震, 其中以 1943 年地震(8.3 级地震)影响最大。

日本的皆濑坝在 1963 年建成, 至 1983 年共经历过 6 次地震, 在 1964 年男鹿地震中坝体沉降为 0.7 cm, 新泻地震使面板接缝轻微损伤, 坝顶路面开裂, 坝体沉降为 6.1 cm, 水平变位为 4 cm, 而在此之后的几次地

**基金项目:** 国家自然科学基金重大研究计划项目(91215301); 国家自然科学基金青年基金项目(51309161)

**收稿日期:** 2014-05-26

震均未对坝体产生明显的影响。秘鲁的 Malpasse 坝在 1938 年遭遇地震,估计坝址处最大地面加速度为  $0.1g$ ,地震使坝体沉降  $7.6\text{ cm}$ ,向下游水平位移  $5.1\text{ cm}$ 。1958 年又一次受到地震的影响,坝体产生  $3.2\text{ cm}$  的沉降和  $5.8\text{ cm}$  的向下游变形。墨西哥坝高  $59.7\text{ m}+70\text{ m}$  厚砂砾石覆盖层的 La Villita 和坝高  $148\text{ m}$  的 Infierno 黏土心墙堆石坝建成后也经历 1975 年—1981 年多次地震作用,大坝出现了明显的变形和裂缝。中国新疆喀什西克尔水库均质土坝在经历多次地震后于 2002 年的一次地震中发生溃决。坝高  $156\text{ m}$  的紫坪铺面板堆石坝,2008 年“5.12”汶川特大地震导致其坝顶瞬间发生了最大为  $68.4\text{ cm}$  的震陷,5 月 12—17 日,该坝又经历了几次余震,坝顶最大震陷发展为  $74.3\text{ cm}$ <sup>[1]</sup>。从以上案例可以发现,先期地震对土石坝工程的变形特性具有明显的影响。

国内外诸多学者<sup>[2-12]</sup>均开展了先期振动对土石料变形特性影响的研究工作。王年香等<sup>[11]</sup>对混凝土面板堆石坝地震反应的离心模型试验表明随着振动次数的增加,坝顶和下游坝坡的沉降增量逐渐减小。赵剑明等<sup>[6]</sup>的研究结果则表明从变形控制的角度,对于已遭受强震作用的面板堆石坝而言,再次遭受强震作用时,地震残余变形减小,面板的变形和受力会得到改善。陈生水等<sup>[12]</sup>的研究表明堆石料筑坝材料经先期循环荷载作用后,再次经受循环荷载作用时,其抵抗变形的能力明显提高。

研究先期振动对土石坝筑坝材料强度变形特性的影响,深入了解其机理与影响因素,对于土石坝抗震抢险救灾、震后坝体的加固修复,提高土石坝的抗震设计和地震安全控制水平具有重要的现实意义。然而,目前定量研究先期振动对土石料变形特性的影响尚不多见,为此,本文采用大型振动三轴仪对经历先期循环荷载作用的砂砾石料及花岗岩料再次经受循环荷载作用的变形特性进行了一系列的试验研究,分析了先期振动对堆石料变形特性的影响机理与影响因素,建立了先期振动对堆石料抵抗变形能力影响表达式,以为土石坝的震后加固修复及地震安全评价提供技术支持。

## 1 粗粒料在先期振动特性的试验研究

文献[12]分别研究了砂砾石料与花岗岩爆破料在 0.5 倍围压和 1.0 倍围压先期动应力作用下的先期振动特性。分析文献[12]中的试验结果可以进一步得出如下主要结论:①经受过先期动应力作用的土石料,再次经受动应力作用时,其抵抗变形的能力明显提高,抵抗变形的能力提高的幅值与土石料本身的性质、再

次经受的动应力与先期动应力的比值,即先期动应力和再次经受的动应力大小有关,而与其受的围压、固结应力比以及堆石料母岩的性质几乎无关。②经先期动应力作用后,砂砾石料和花岗岩料再次承受 2 倍于先期动应力的更大动应力作用,其抵抗变形的能力的提高量均超过 30%,经先期动应力作用后,砂砾石料和花岗岩料如再次承受与先期动应力同样大小的动应力作用,其抵抗变形的能力的提高量则超过 70%。③土石料经受过先期振动后抵抗变形的能力提高的主要原因是,在初始动应力作用下,土石料颗粒破碎及试样内部重定向排列大部分已经完成,再次经受动应力作用时,土石料颗粒破碎的程度将降低,试样内部重定向排列得难度将加大,从而使得其变形量减小,抵抗变形的能力提高。后期动应力与先期动应力越接近,后期动应力再次导致土石料颗粒破碎和使得试样内部重定向排列的能力越低。

## 2 粗粒料在先期振动作用下的变形规律

文献[12]分别得出了后期振动为 1 倍及 2 倍前期振动的试验结果,为进一步研究后期振动小于先期振动条件下粗粒料的变形特性,针对砂砾石料进行了后期振动荷载是 0.5 倍先期振动荷载的动力试验,以对应研究粗粒料在先期地震主震作用下变形稳定后,粗粒料在较大余震作用下的变形特性。为与文献[12]中砂砾料区别,本文砂砾料编为#2 砂砾料。

试验设备仍然采用南京水利科学研究院 2003 年研制成的 1500 kN 大型动静三轴仪。试样密度为  $2.22\text{ g/cm}^3$ ,级配曲线见图 1。

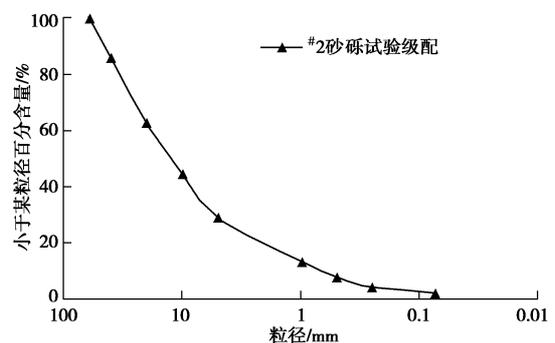


图 1 #2 砂砾料试验级配曲线

Fig. 1 Grading curve of sandy gravel No. 2

### 2.1 试验过程

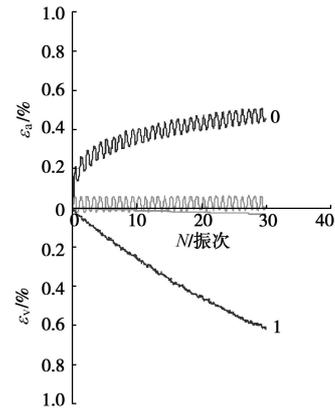
试样固结比  $k$  分别取为 1.5 和 2.0,  $k=1.5$  试样动应力取 0.8 倍围压动应力为初级动应力,0.4 倍围压为降低一级动应力;  $k=2.0$  试样动应力取 1.0 倍围压动应力为初级动应力,0.5 倍围压为降低一级动应力。试验

围压分别采用 300, 600, 1000, 1500 kPa; 试验振动频率 0.1 Hz, 输入波形均采用正弦波。

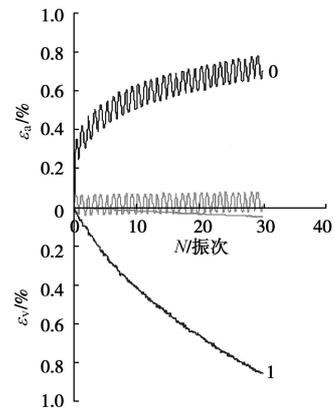
试样固结稳定后, 试样在排水条件下分别对试样施加动应力, 直至预定振次 (30 次) 停止振动, 以模拟坝体经受的先期地震作用。为模拟地震作用后的土石坝所对应的应力状态, 控制试样围压、初始应力水平不变, 使经受一次动力作用后的试样进一步固结, 待固结稳定后再在排水条件下对试样施加动应力, 以模拟坝体材料在经历一次地震后再经受下一次地震作用的状态。

### 2.2 试验结果

试验结果见图 2, 3。①排水条件下, 固结比分别为 1.5, 2.0 的砂砾料在围压 300, 600, 1000, 1500 kPa 下, 直接经历 0.4 或 0.5 倍围压动应力的动力变形试验, 图中标记为 0, 模拟大坝蓄水后砂砾料堆石体在地震作用下的动力变形特性; ②排水条件下, 固结比分别为 1.5, 2.0 的砂砾料在围压 300, 600, 1000, 1500 kPa 下经历一次 0.8 或 1.0 倍围压动应力作用变形稳定后, 再经历 0.4 或 0.5 倍围压动应力的动力变形试验, 图中标记为 1, 以模拟砂砾料堆石体在经历一次地震后再次经历地震时的动力变形特性。表 1 为 #2 砂砾石料在不同固结比、不同围压, 不同初始动应力作用下的最大轴向动应变及最大体应变, 并给出了不同先期动应力条件下相应的最大轴向动应变及最大体应变对应直接动应力作用的降幅。



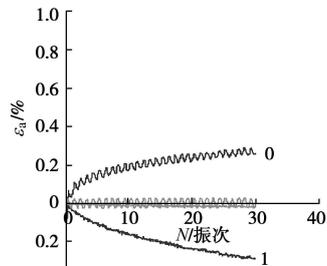
(c)  $\sigma_3=1000$  kPa



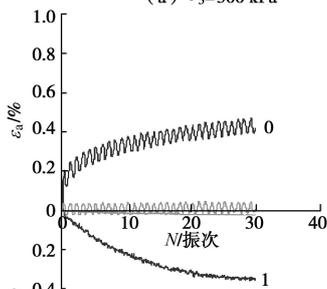
(d)  $\sigma_3=1500$  kPa

图 2  $k=1.5$  花岗岩料轴向动应变、体变与振次关系试验曲线  
Fig. 2 Relationship among axial dynamic strain, volume strain and vibration number of sandy gravel

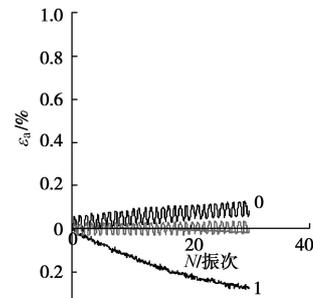
由图 2, 3 和表 1 可以看出, 经先期动应力作用后, 砂砾石料再次承受 0.5 倍于先期动应力的作用时, 其抵抗变形能力的提高量超过 94%, 表明先期动应力作用后, 砂砾石料如再次承受先期动应力一半的动应力作用, 其震动永久变形仅为未经过先期振动作用变形的 5%。根据数据的  $3\sigma$  检验原则<sup>[13]</sup>, 分别对文献[12]表 7 及本文表 1 中试验数据的残差进行分析, 以检验其是否超过规定的标准偏差, 并舍弃其中含有粗大



(a)  $\sigma_3=300$  kPa



(b)  $\sigma_3=600$  kPa



(a)  $\sigma_3=300$  kPa

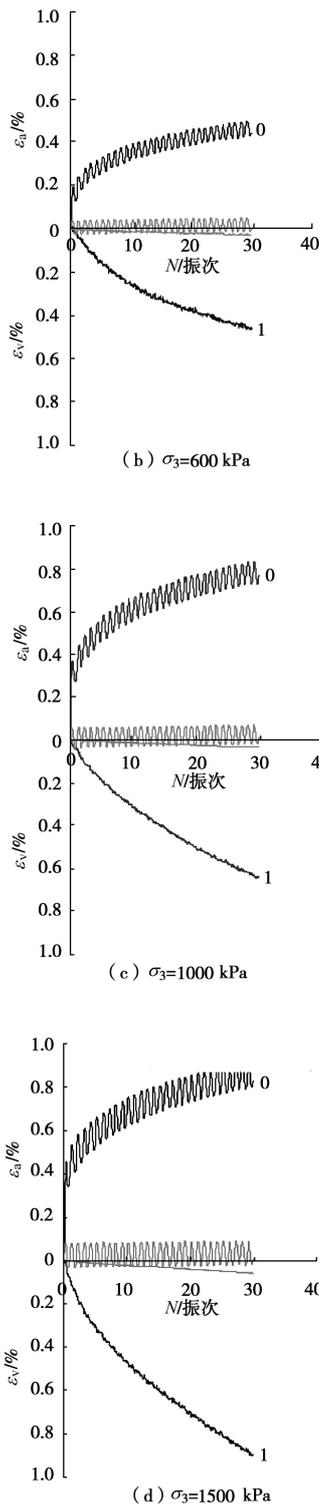


图3  $k=2.0$  花岗岩料轴向动应变、体变与振次关系试验曲线  
Fig. 3 Relationship between axial dynamic strain, volume strain and vibration number of granite under  $k=2.0$

误差的数据, 然后取其它值的平均值作为对应1倍、2倍及0.5倍等不同先期动应力作用下粗粒料变形的降幅, 后期动应力/先期动应力为0, 0.5, 1.0, 2.0时, 后期变形/先期变形为0, 0.5, 0.034, 0.552。绘于图4。可以看出, 随着后期动应力与先期动应力比值的增

大, 先期动应力的作用逐渐降低。

表1 最大动应力作用下#2砂砾料最大轴向动应变与初次动应力关系表

Table 1 Relationship between maximum axial dynamic strain and first dynamic stress of sandy gravel No. 2 under maximum dynamic stress

固结比	围压 /kPa	最大轴向动应变/%			最大动体变/%		
		(0)	(1)	1 降幅	(0)	(1)	1 降幅
1.5	300	0.27	0.01	3.26	0.28	0.01	4.78
	600	0.44	0.02	4.40	0.35	0.02	5.75
	1000	0.48	0.03	5.96	0.61	0.03	4.37
	1500	0.73	0.03	4.47	0.85	0.04	4.95
2.0	300	0.09	0.01	8.78	0.27	0.02	5.83
	600	0.46	0.02	4.06	0.46	0.03	5.53
	1000	0.79	0.03	3.78	0.64	0.03	4.71
	1500	0.86	0.04	4.22	0.89	0.06	6.36

注: (0) 代表无先期动应力作用, 直接在0.4或0.5倍围压作用下的最大应变, (1) 代表先期动应力为0.8或1.0倍围压作用后, 再次在0.4或0.5倍围压后期动应力作用下的最大应变, 分别对应固结比1.5和2.0。1 降幅 = ((0)-(1))/(0)\*100。

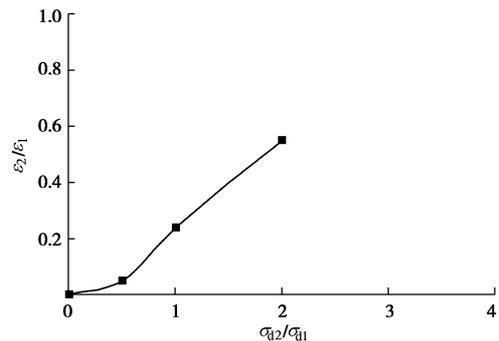


图4 后期变形/先期变形与后期动应力/先期动应力关系  
Fig. 4 Relationship between later strain/ previous strain and later dynamic stress/ previous dynamic stress

### 2.3 粗粒料在先期振动作用下的变形规律

Bertalanffy 曲线  $y = a(1 - be^{-kx})^3$  可较好拟合试验结果, 其中  $y = \frac{\epsilon_{v2}}{\epsilon_{v1}}$ ,  $x = \frac{\sigma_{d2}}{\sigma_{d1}}$ 。显然当  $x=0$  时,  $y=0$ ;  $x \rightarrow \infty$  时,  $y \rightarrow 1$ , 因此得到

$$y = (1 - e^{-kx})^3 \quad (1)$$

$$\frac{\epsilon_{v2}}{\epsilon_{v1}} = (1 - e^{-k \frac{\sigma_{d2}}{\sigma_{d1}}})^3 \quad (2)$$

式中  $\epsilon_{v2}$  为粗粒料在先期振动作用条件下变形稳定后, 再次经受后期振动的应变(体变、轴向应变),  $\epsilon_{v1}$  为粗粒料直接在  $\sigma_{d2}$  作用下的应变(体变、轴向应变),  $\sigma_{d2}$  为后期振动动应力幅值,  $\sigma_{d1}$  为先期振动动应力幅值。式(2)是先期振动对堆石料抵抗变形能力影响的

一般关系式, 仅与  $k$  值有关,  $k$  表示堆石料经先期动应力作用后, 再次经受动应力作用时, 其内部颗粒重定向排列和颗粒破碎的难易度。为确定  $k$  值, 可进一步将式 (1) 变换为

$$1 - y^{\frac{1}{3}} = e^{-kx} \quad (3)$$

对式 (2) 取自然对数可得

$$\ln(1 - y^{\frac{1}{3}}) = -kx \quad (4)$$

令  $y = \ln(1 - y^{\frac{1}{3}})$ , 将式 (4) 转化为  $y = -kx$ , 由此采用最小二乘法可拟合得  $k = 0.8757$ , 因此有

$$y = (1 - e^{-0.8757x})^3 \quad (5)$$

从而可得到先期振动对堆石料抵抗变形能力影响的表达式为

$$\frac{\varepsilon_{v2}}{\varepsilon_{v1}} = (1 - e^{-0.8757 \frac{\sigma_{d2}}{\sigma_{d1}}})^3 \quad (6)$$

拟合结果与试验结果的对比如图 5, 证明了先期振动对堆石料抵抗变形能力影响的表达式是大体合理的。

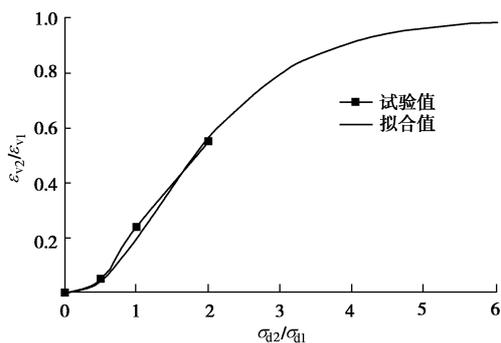


图 5  $\frac{\varepsilon_{v2}}{\varepsilon_{v1}} - \frac{\sigma_{d2}}{\sigma_{d1}}$  试验曲线及拟合曲线

Fig. 5 Test and fitting curves of  $\frac{\varepsilon_{v2}}{\varepsilon_{v1}} - \frac{\sigma_{d2}}{\sigma_{d1}}$

### 3 结 论

(1)堆石料经受过先期动应力作用后再次经受动应力作用时, 其抵抗变形的能力明显提高, 抵抗变形的能力提高的幅值主要与再次经受的动应力与先期动应力的比值有关, 而与其受的围压、固结应力比以及堆石料母岩的性质几乎无关。

(2)经先期动应力作用后, 砂砾石料和花岗岩料再次承受 2 倍于先期动应力的更大动应力作用, 其抵抗变形的能力的提高量均超过 30%, 经先期动应力作用后, 砂砾石料和花岗岩料如再次承受与先期动应力同样大小的动应力作用, 其抵抗变形的能力的提高量则超过 70%, 而经先期动应力作用后, 砂砾石料再次

承受 0.5 倍于先期动应力的作用时, 其抵抗变形能力的提高量则超过 94%。

(3)堆石料经受过先期振动后抵抗变形的能力提高的主要原因是, 在初始动应力作用下, 土石料颗粒破碎及试样内部重定向排列大部分已经完成, 再次经受动应力作用时, 土石料颗粒破碎的程度将降低, 试样内部重定向排列得难度将加大, 从而使得其变形量减小, 抵抗变形的能力提高。后期动应力与先期动应力越接近, 后期动应力再次导致土石料颗粒破碎和使得试样内部重定向排列的能力越低。

(4)表达式  $\frac{\varepsilon_{v2}}{\varepsilon_{v1}} = (1 - e^{-0.8757 \frac{\sigma_{d2}}{\sigma_{d1}}})^3$  可较好描述先期振动对堆石料抵抗变形能力影响。

### 参考文献:

- [1] CHEN Sheng-shui, HAN Hua-qiang. Impact of the '5.12' Wenchuan earthquake on Zipingpu concrete face rock-fill dam and its analysis[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2009, 4(4): 292 - 306.
- [2] 汪闻韶. 土液化特性中的几点发现[J]. 岩土工程学报, 1980, 2(3): 55 - 63. (WANG Wen-shao. Some findings in soil liquefaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1980, 2(3): 55 - 63. (in Chinese))
- [3] 汪闻韶. 饱和砂土振动孔隙水压力试验研究[J]. 水利学报, 1962(2): 37 - 47. (WANG Wen-shao. Study on pore water pressure of saturated sand during cyclic loading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1962(2): 37 - 49. (in Chinese))
- [4] 赵冬. 地震期间饱和砂孔隙水压力增长规律估测方法和先期振动影响[J]. 水利学报, 1988(4): 54 - 57. (ZHAO Dong. Evaluate methods for the increasing law of pore pressure and the affection of previous cycle loading of saturated sands during earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988(4): 54 - 57. (in Chinese))
- [5] 石原研而, 岡田滋. Effects of large preshearing on cyclic behavior of sand[J]. Soils and Foundations, 1982, 22(3): 109 - 125.
- [6] 赵剑明, 刘小生, 刘启旺, 等. 先期震动对土石坝地震永久变形的影响研究[J]. 世界地震工程, 2011, 27(1): 28 - 33. (ZHAO Jian-ming, LIU Xiao-sheng, LIU Qi-wang, et al. Study on the effect of pre-vibration on earthquake-induced permanent deformation of an earth-rock fill dam[J]. World Earthquake Engineering, 2011, 27(1): 28 - 33. (in Chinese))
- [7] 杨玉生, 刘小生, 刘启旺, 等. 双江口心墙堆石坝地震加速

- 度反应的振动台模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 120 - 125. (YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, LIU Qi-wang, et al. Shaking table model tests on seismic acceleration response of Shuangjiangkou high earth-rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 120 - 125. (in Chinese))
- [8] 杨玉生, 刘小生, 刘启旺, 等. 双江口心墙堆石坝动力特性的振动台模型试验研究[J]. 水力发电学报, 2011, 30(1): 114 - 119. (YANG Yu-sheng, LIU Xiao-sheng, LIU Qi-wang, et al. Shaking table model tests on dynamic characteristics of Shuangjiangkou high earth-rockfill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(1): 114 - 119. (in Chinese))
- [9] 王学萍, 桑守莲, 李慧芳, 等. 乌拉泊水库土石坝振动台模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2008, 39(9): 51 - 55, 66. (WANG Xue-ping, SANG Shou-lian, LI Hui-fang, et al. Study on vibration table model test of earth-rockfill dam for Wulabo Reservoir[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(9): 51 - 55, 66. (in Chinese))
- [10] 艾斯卡尔·吾休尔. 浅析新疆水库溃坝模式及溃坝概率[J]. 大坝与安全, 2009(3): 9 - 10. (AISIKAEER Wuxiuer. Analysis on dam-break patterns and probability in Xinjiang[J]. Dam & Safety, 2009(3): 9 - 10. (in Chinese))
- [11] 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(3): 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(3): 18 - 22. (in Chinese))
- [12] 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))
- [13] SL 237—1999 土工试验规程[S]. 1999. (SL 237—1999 Standard for soil test method[S]. 1999. (in Chinese))