

高心墙堆石坝掺砾心墙料振动孔隙水压力 计算模型研究

曹学兴^{1,2}, 何蕴龙², 熊堃³, 迟福东¹, 余记远¹, 谭彬¹, 郭丽娜⁴

(1. 华能澜沧江水电股份有限公司, 云南 昆明 650214;

2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 长江勘测规划设计研究有限公司, 湖北 武汉 430010; 4. 云南工商学院, 云南 昆明 651701)

摘 要:天然防渗土料一般无法满足 200 m 级以上超高心墙堆石坝强度和变形的要求,在超高心墙堆石坝建设时通常采用掺砾对天然防渗土料进行改性,以提高心墙料的强度和变形特性。在高地震烈度区,高心墙堆石坝的抗震安全性是重要问题,有效应力法是全面评价高坝抗震安全性的一种重要方法,而目前尚没有振动孔压模型可直接用于高坝掺砾心墙料的计算。根据研究揭示的掺砾土料振动孔压增长的增长规律和材料动力试验,提出一个超高心墙堆石坝掺砾心墙料振动孔压模型,模型能真实反映材料动力特性,而且参数确定方便,计算效率高。将模型应用于长河坝心墙堆石坝,得到了大坝地震过程中振动孔隙水压力和超孔压比的分布规律,为类似高土石坝工程建设提供了参考。

关键词:高土石坝;振动孔隙水压力;模型;砾石土心墙

中图分类号:TV641.1

文献标识码:A

文章编号:1672—1144(2019)06—0123—04

Vibration Pore Pressure Calculation Model of Gravel Soil of High Rockfill Dam with Gravel Soil Core

CAO Xuexing^{1,2}, HE Yunlong², XIONG Kun³, CHI Fudong¹, YU Jiyuan¹, TAN Bin¹, GUO Lina⁴

(1. Huaneng Lancang River Hydropower Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650214 China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China;

3. Chang Jiang Survey Planning Design and Research LLC, Wuhan, Hubei 430010, China;

4. Yunnan Technology and Business University, Kunming, Yunnan 651701, China;)

Abstract: The natural impervious earth material cannot meet the strength and deformation requirements of over 200 m high core rockfill dam, therefore, in the construction of ultra-high core rockfill dam, the mixed gravel is always used to improve the strength and deformation properties of natural impervious earth material. In the area of high seismic intensity, the seismic safety of high core rockfill dam is a very important issue. Effective stress method is an important method to evaluate the seismic safety of high core rockfill dam. At present, there is no vibration pore pressure model which can be directly adopted in the calculation of high dam with gravel soil core. According to the increasing law of the vibration pore pressure of the gravel soil and the dynamic test of the material, a model of the vibration pore pressure of the gravel soil core of the ultra-high rockfill dam is proposed in this paper. The model can truly reflect the dynamic characteristics of materials, and the parameters are easy to determine with high calculation efficiency. With its application in Changhe dam, the distribution law of vibration pore water pressure and excess pore pressure ratio is obtained by calculation, which could provide a reference for similar high earth rock dam engineering construction.

Keywords: high earth-rockfill dam; vibration pore pressure; model; gravel soil core

水利工程中多座土石坝工程在地震过程中都出现了严重破坏,造成了当地人民生命和财产的巨大损失,如唐山大地震中的北京密云白河土坝^[1]、唐山陡河水库土坝^[2]、汶川地震中紫坪铺大坝^[3],1971 年美国 San Fernando 地震中 Lower San Fernando Dam^[4]和 Upper San Fernando Dam^[5]等。随着我国水电事业的发展,拟建和在建一批 200 m 级以上高土石坝,这些坝大多建在我国西南高地震烈度区,抗震安全问题十分重要^[6]。

根据记录,石门水库土坝^[7]、San Fernando Dam^[8]出现的滑坡、坍塌和变形等破坏都发生在地震停止后,原因是地震引起的超孔隙水压力在地震停止后的重分布引起局部土料出现液化,因此有效应力法才能对土石坝的抗震安全性,尤其是震后的抗震安全性做出准确全面的评价,而地震引起超孔隙水压力的准确计算和评估是最为关键的^[9]。本文对经典 Seed 动孔压模型在高土石坝工程中的适用性进行了研究和分析,并根据高土石坝工程中采用的掺砾土料的动三轴试验结果和其超孔隙水压力增长规律,提出了一个可以准确计算掺砾心墙料的动孔压计算模型,并应用于长河坝工程中。

1 超孔隙水压力计算模型

20 世纪六七十年代,国内外对地震引起的沙土液化破坏问题进行了广泛的研究,提出了多个振动孔隙水压力增长的计算模型,其中主要有 Seed 模型、Finn 模型等应力模型和 Martin - Finn - Seed 模型、汪闻昭模型等应变模型。

上述模型中以 Seed 模型^[10]应用最为广泛,如式(1)所示,该模型主要反映了饱和砂土在振动条件下孔隙水压力增长规律:

$$\frac{u_g}{\sigma'_0} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \left[2 \left(\frac{N}{N_L} \right)^{\frac{1}{\theta}} - 1 \right] \quad (1)$$

其中: θ 为与土性有关的试验常数,Seed 等认为,一般可取为 0.7(图 1 中间线)。其孔隙水压增长曲线如图 1 所示。

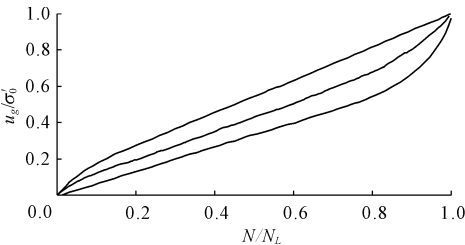


图 1 Seed 动孔压模型曲线

目前,饱和砂土在振动作用下动孔压增长的规律已有较多的研究成果,但针对超高心墙堆石坝掺砾石心墙料的振动孔压的变化发展规律开展的研究较少。图 2 给出了某试验条件下砂砾石料动孔压增长规律曲线。图 3^[11]给出了云南肖家坟尾矿库坝料坝基黏土动孔压增长曲线。图 4^[12]为长河坝大坝筑坝材料动孔压增长曲线。可以看出掺砾土料、砂砾石料在振动初始阶段,由于材料渗透性差,孔压不易消散和转移,出现急剧上升,后期由于黏性土的结构强度和黏聚力作用,孔隙水压增长缓慢并趋于稳定,不会出现急剧上升情况,明显与砂土在振动作用下动孔压增长规律有所不同。

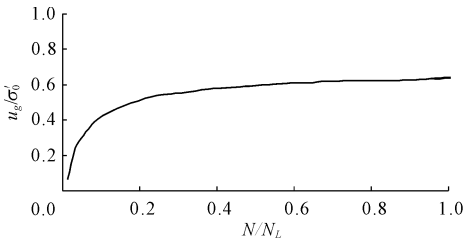


图 2 砂砾石料动孔压增长曲线

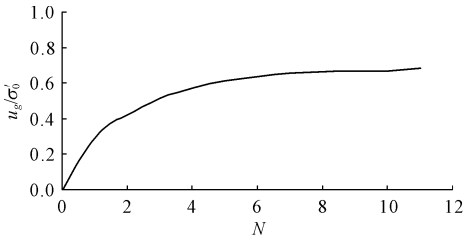


图 3 肖家坟尾矿坝坝基黏土动孔压增长曲线

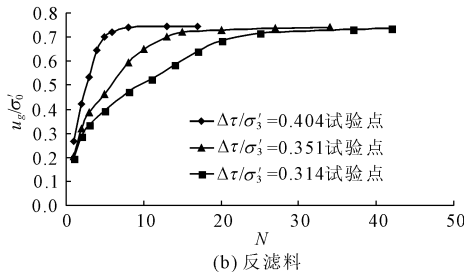
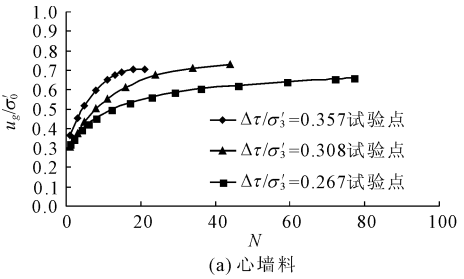


图 4 长河坝筑坝材料动孔压增长曲线

随着西部水能资源开发的深入,在我国西南地区拟建和在建一批 200 m 级甚至 300 m 级的超高心

墙堆石坝,由于天然防渗土料不能满足超高心墙堆石坝强度和变形的要求,一般采用掺砾措施提高天然防渗土料的强度和变形特性。根据前面分析,超高心墙堆石坝不宜直接采用根据砂土试验得出的 Seed 模型等动孔压计算模型,有必要建立一种符合材料动强度特性的动孔压计算模型。

2 掺砾土料孔隙水压力计算模型

2.1 掺砾土料孔隙水压力模型

根据高土石坝掺砾土料,砾石土料的动孔压增长表现出的一般规律,并考虑动剪应力比对孔压的影响,提出一种新的动孔压计算模型:

$$\frac{u_g}{\sigma'_0} = a + b \cdot [1 - \exp(-N/c)] \tag{2}$$

式中: a 、 b 、 c 为试验参数,考虑动剪应力比对材料动力特性影响时, a 、 b 、 c 计算公式如下:

$$a = a_1 \left(\frac{\Delta\tau}{\sigma'_0}\right)^2 + a_2 \left(\frac{\Delta\tau}{\sigma'_0}\right) + a_3 \tag{3}$$

$$b = b_1 \left(\frac{\Delta\tau}{\sigma'_0}\right)^2 + b_2 \left(\frac{\Delta\tau}{\sigma'_0}\right) + b_3 \tag{4}$$

$$c = c_1 \left(\frac{\Delta\tau}{\sigma'_0}\right)^2 + c_2 \left(\frac{\Delta\tau}{\sigma'_0}\right) + c_3 \tag{5}$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c_1 、 c_2 、 c_3 为试验参数。

2.2 掺砾土料动孔压模型的验证

采用长河坝大坝筑坝材料动孔压试验结果对掺砾心墙料动孔压模型的合理性进行验证。从图 5 中可以看出,新动孔压模型可以较好地拟合不同动剪应力比条件下试验数据,真实反应工程材料振动孔压的增长规律。

3 新动孔压模型在长河坝工程中的应用

根据新掺砾心墙料动孔压模型结合改进的 Hardin - Drnevich 模型^[13] 编制计算程序,应用于高地震烈度区高 240 m 长河坝大坝的抗震安全计算。

3.1 计算模型及参数

根据工程布置、坝体结构和实际地质情况建立有限元计算模型,其中坝体部分模型如图 6 所示,整体模型超过 20 000 个单元。

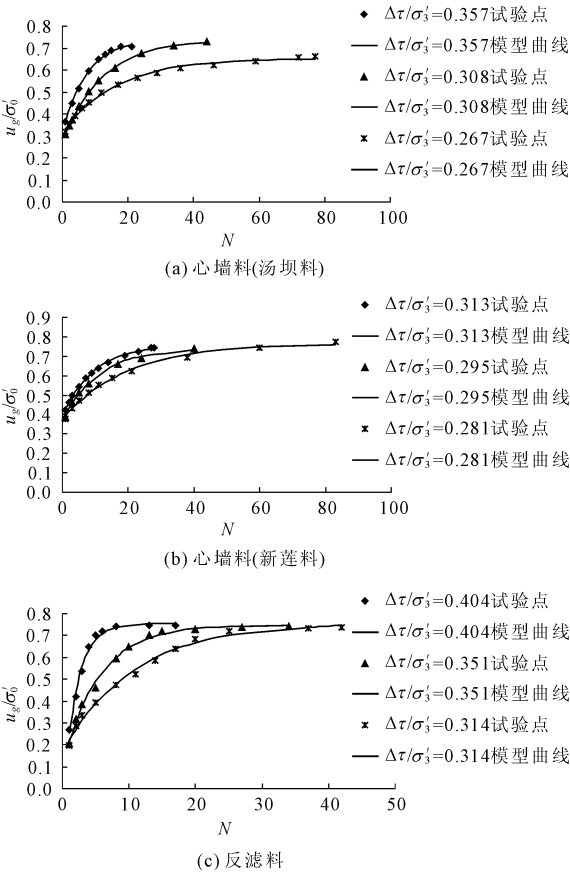


图 5 长河坝筑坝材料动孔压

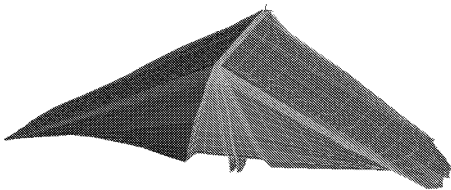


图 6 计算模型(坝体部分)

静力计算坝体与覆盖层材料采用邓肯 $E-\mu$ 双曲线模型,将静力结果作为时程动力计算的初始状态。动力计算参数见文献[13],动孔压计算参数如表 1 所示,其中等效振动次数采用 Martin 等^[14] 的研究成果。

3.2 地震波

根据工程地震安评报告,利用场地谱拟合地震波时程曲线,如图 7 所示,反演后进行地震动输入。

表 1 长河坝大坝材料动孔压参数

项目	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	c_1	c_2	c_3
反滤料(上游)	-12.11	6.32	-0.62	16.80	-9.70	1.98	864.04	-715.20	150.07
心墙料(汤坝)	17.23	-10.83	1.98	-40.20	26.11	-3.76	9.33	-106.67	43.96
心墙料(新莲)	70.66	-41.35	6.42	11.80	-7.77	1.64	16632.80	-10182.50	1567.39

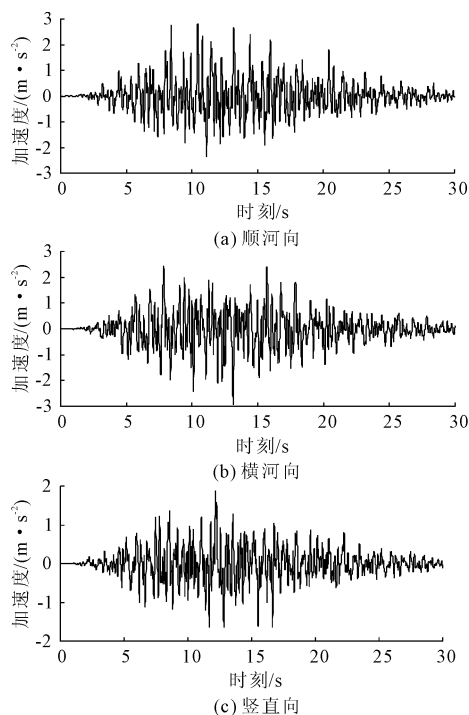


图 7 各方向地震加速度时程

3.3 地震过程中振动孔隙水压力

地震发生 10 s、20 s 和 30 s 时,心墙和上游反滤层的振动孔隙水压力分布规律基本一致,超孔隙水压力值从坝顶到坝基呈增大变化趋势,心墙内振动孔隙水压力较大,由于在地震过程中,没有考虑振动孔隙水压力的消散,孔压值随时间增大。在地震发生 10 s、20 s、30 s 时振动孔隙水压力最大值分别为 1 178.4 kPa、1 405.3 kPa、1 482.5 kPa。

计算结果显示,上游反滤层顶部动孔压比较大,最大值超过了 0.8,为抗震薄弱部位。根据计算分析,尽管反滤层和心墙料在地震过程中不会出现液化,但是在工程设计及建设过程中应采取相应措施,减少抗震薄弱位置上游反滤层发生液化的风险。

4 结 论

结合目前拟建和在建超高心墙堆石坝抗震安全性计算分析需要,根据研究揭示的掺砾土料振动孔压增长的增长规律和材料动力特性,提出一个超高心墙堆石坝掺砾心墙料振动孔压模型,模型能真实反应材料动力特性,而且参数确定方便,计算效率高。根据新提出的掺砾心墙料动孔压模型结合改进的 Hardin - Drnevich 模型编制了计算程序,应用于高地震烈度区 240 m 高长河坝大坝抗震安全计算,得到了地震过程中坝体振动孔压的分布规律及变化趋势,在不考虑地震过程中孔压消散时,振动孔压和

超孔压比不断增大,反滤层顶部超孔压比超过了 0.8,为坝体抗震薄弱的部位,在工程设计和建设中,可采用宽级配角砾料提高该部位抗震安全性。

参考文献:

- [1] 付 磊. 潮河土坝抗震加固设计[J]. 水利学报, 2000 (8): 16-20.
- [2] 沈珠江, 黄锦德, 王钟宁. 陡河水库土坝的地震液化及变形分析[J]. 水利水运科学研究, 1984 (1): 52-61.
- [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.
- [4] Seed H B, Idriss I M, Lee K L, et al. Dynamic analysis of the slide in the lower San Fernando dam during the earthquake of February 9, 1971 [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division. 1975, 101 (9): 889-911.
- [5] Seed H B, Lee K L, Idriss I M, et al. The slides in the San Fernando dams during the earthquake of February 9, 1971 [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 1975, 101 (7): 651-688.
- [6] 杨德玮, 张土辰, 王昭升. 土石坝震损程度快速评估方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14 (1): 107-111, 154.
- [7] 徐志英, 沈珠江. 1975 年辽南地震时石门土坝滑动有效应力动力分析[J]. 水利学报, 1982 (3): 13-21.
- [8] 顾淦臣, 沈长松, 岑威钧. 土石坝地震工程学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [9] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [10] Seed H B, Martin G R, Lysmer J. Pore-water pressure changes during soil liquefaction [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1976, 102 (4): 323-346.
- [11] 云南肖家坟尾矿库坝料动力特性试验及地震稳定性研究[R]. 武汉: 长江科学研究院, 2012.
- [12] 长河坝水电站砾石土心墙堆石坝筑坝材料动力特性试验报告[R]. 北京: 北京水利水电科学研究院, 2007.
- [13] 何蕴龙, 曹学兴, 冯 蕊, 等. 长河坝高土质心墙堆石坝抗震安全性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47 (1): 1-7.
- [14] Martin P P, Seed H B. Simplified procedure for effective stress analysis of ground response [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1979, 105 (6): 739-758.
- [15] 曹学兴, 何蕴龙, 迟福东, 等. 基于子模型法的高堆石坝坝基廊道抗震安全性研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16 (6): 87-93.