

文章编号:1671-6833(2005)04-0034-05

小粒径风化石料填筑堆石坝地震反应分析

张展<sup>1</sup>, 张胜利<sup>2</sup>, 党发宁<sup>3</sup>, 谢永利<sup>1</sup>, 康 佐<sup>1</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省水电工程局, 陕西 西安 710068; 3. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

**摘 要:** 国家规范对混凝土面板堆石坝筑坝材料有较为严格的要求, 为了验证库区滑坡体开挖区颗粒级配不良的小粒径微风化石料能否作为大水沟水库混凝土面板堆石坝坝体主堆石区填料, 对该种石料进行了现场压实试验. 对应于现场试验所能达到的最大密实度, 通过室内试验, 取得了此类石料在该种状态下的变性模量  $E_s$ 、泊松比  $\nu$ 、渗透系数  $K$  及三轴快剪力学参数  $c$ 、 $\varphi$ . 并依据室内外试验参数, 采用一维剪切层法, 对该坝进行了在 7 级地震烈度情况下的动力反应分析, 求得了该坝的最大动剪应变和剪应力反应分布, 坝体内绝对最大动剪应变为  $4.41 \times 10^{-3}$ , 绝对最大动剪应力为 40 kPa, 远小于坝体本身的强度, 验证了该种石料可以作为面板堆石坝的填料, 拓宽了混凝土面板堆石坝填筑材料的选择范围.

**关键词:** 小粒径风化石料; 混凝土面板堆石坝; 现场试验; 室内试验; 地震反应分析

**中图分类号:** TU 448.27      **文献标识码:** A

1 工程概述

大水沟水库位于云南省镇雄县伍德镇大水沟, 该水库枢纽工程由砼面板堆石坝、输水隧洞、溢洪道、泄洪隧洞、坝后电站组成. 大坝坝高 75.6 m, 坝顶长 176.52 m, 顶宽 7 m, 上游坝坡 1:1.4, 下游平均坝坡 1:1.403. 坝体由砼面板、垫层、过渡层、主次堆石体组成, 总填筑量 75 万  $m^3$ . 原设计中坝体堆石料主要采用大坝左岸下游 2~3 km 处大湾子料场的坚硬灰岩. 该料场储量丰富, 各种技术指标均满足大坝填料的要求, 但是由于大湾子料场地形陡峻, 并在 2001 年 9 月发生大面积山体滑坡, 致使该料场无法开采. 为保证工程按期截流确保度汛, 我们对左岸滑坡体开挖料进行了现场和室内试验分析及大坝动力稳定分析, 以确定该种石料能否作为堆石体主要填料.

2 小粒径风化石料室内及现场试验

大水沟水库坝体左岸滑坡体岩性为玄武岩, 岩体风化严重, 完整性很差, 节理和裂隙发育, 爆破后岩石绝大部分沿裂隙碎开, 块度很均匀, 最大粒径一般小于 100 mm, 鲜有少量 100~200 mm 粒径, 5 mm 以下含量一般在 3%~8%, 其中 20~80 mm 含量达 60% 左右, 缺少国家规范中主堆石区级配要求的粒径在 5 mm 以下及 200~600 mm 之间的石料, 不能满足规范 [1] 对设计主堆石级配的要求, 其颗粒级配试验结果如表 1 所示. 该种石料饱和抗压强度约为 90 MPa, 弹性模量一般在  $7.0 \times 10^4$  MPa 左右, 比重一般在 2.94~2.97  $g/cm^3$  之间. 因此, 改种石料能否做为主堆石用料, 需进一步的试验分析, 论证其是否满足主堆石料低压、高抗剪、强透水的要求.

表 1 小粒径石料颗粒级配结果  
Tab. 1 The grade of withered small sized stone materials

材料名称	石料粒径/mm											
	100	80	60	40	20	10	5	2	1	0.5	0.2	0.1
过渡料/%	100.0	96.3	85.1	71.8	52.5	34.8	18.2	11.1	8.3	5.4	3.6	2.1
主堆石/%	92.8	77.7	62.5	51.1	19.3	10.9	5.9	2.7	1.2	0.8	0.4	0.1

### 2.1 现场碾压试验

根据石料的粒径和压实机械的性能,堆石体碾压试验铺料厚度先后采用 100 cm、80 cm、60 cm,碾压设备采用 18t 拖式光面振动碾碾压. 80 cm 铺料厚度碾压 6,8,10 遍,60 cm 铺料厚度碾压 6,8 遍.不同铺料厚度和碾压遍数的道德现场测试结果见表 2.从试验结果可以看出,所能达到的干密度偏低、孔隙率较大,仅在铺料厚度 60 cm 碾压 8 遍时,孔隙率刚刚小于规范要求的 25%,为 24.6%,堆石体的干密度达到  $2.187\text{ g/cm}^3$ .

### 2.2 室内试验结果

室内试验除对料源做了岩石的比重、吸水率、抗压强度、弹性模量、级配外,还根据现场铺料厚度 60 cm 碾压 8 遍时所能达到的密实度做了堆石体压缩模量、渗透试验和三轴快剪试验,试验结果见表 3.从试验结果来看,该小粒径半风化石料具有高抗剪强度、低压缩性及较好的渗透性能,能够满足主、次堆石料的力学性能要求,但是不能满足规范对主堆石级配曲线的要求.

表 2 现场碾压试验结果汇总表

Tab.2 The result of the in site filling experiments							
序号	铺料厚度/cm	碾压遍数	测坑编号	湿密度/( $\text{g cm}^{-3}$ )	含水量/%	干密度/( $\text{g cm}^{-3}$ )	孔隙率/%
1	80	8	8-2	2.139	5.12	2.235	29.8
2	80	10	10-2	2.141	5.20	2.035	29.8
3	60	6	6-2	2.218	5.41	2.104	27.4
4	60	8	8-1	2.276	4.05	2.187	24.6
5	60	8	8-2	2.296	4.20	2.203	24.0

表 4 施工过程中检测结果

Tab.4 The date of detection in construction					
填筑区	检测次数	最大干密度/( $\text{g cm}^{-3}$ )	最大孔隙率/%	最小孔隙率/%	平均隙率/%
主堆石料	82	2.31	24.21	20.2	22.76
次堆石料	13	2.28	27.93	21.38	22.58

## 3 坝体动力反应分析

### 3.1 分析工况

水库大坝的工作状况可分为空库(施工期)和满库(运行期)两种状态.根据文献[2]的研究:坝体自振周期对库水位变化的反应是比较迟钝的,这是由于在库水荷载作用使上游坝壳有效应力增加,剪切模量亦随之增大,“刚度”的提高将挤消库水附加质量的影响,使坝体自振周期基本保持不变;研究还表明,动水压力对坝体加速度反应有一定的影响,有水情况的计算加速度一般都小于无水情况,最多降低达 19%<sup>[3,4]</sup>,因此在分析时以空库状态作为计算工况,这样的考虑更偏安全.由于

表 3 小粒径石料基本物理力学试验结果

Tab.3 The result of physical and mechanic experiments					
材料名称	压缩模量 /MPa	泊松比	三轴快剪		渗透系数 K /( $\text{cm s}^{-1}$ )
			c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	
主次堆石料	172.9	0.35	56.6	44.8	0.036 6

### 2.3 坝体施工现场检测结果

根据批准的堆石体填筑技术标准及碾压试验结果,2002 年 1 月 15 日开始坝体填筑.施工时主、次堆石料铺料厚度均为 60 cm,主堆石采用 18t 拖式震动碾碾压 8 遍,次堆石采用 18t 拖式震动碾碾压 6 遍.由于该种类型材料在国内是首次作为面板堆石坝填筑材料,在施工过程中加大了检测频率,平均  $3\ 000\text{ m}^3$  取样检测一次.在坝体填筑到 35 m 高时,堆石体干密度取样检测共 211 组,检测结果见表 4.从表中看出,最大干密度和孔隙率二个指标均优于碾压试验结果,堆石体经多次现场渗透试验渗透系数均大于  $10^{-1}\text{ cm/s}$ ,具有良好的排水性能,达到了预期目的.

大坝所在地区位于我国地震区划图 7 级烈度区,为了验证该种材料填筑堆石坝的坝体安全性,故对其进行 7 级地震烈度情况下的坝体动力反应分析.

### 3.2 自振频率和振型分析

剪切层理论的基本原理是把土石坝看成静止在刚性地基上无限长的梯形或三角形断面的梁,由于土石坝的底宽尺寸大于坝高,因此只考虑由地震的水平运动分量所引起的剪切变形,忽略弯曲变形,水平截面上假定为剪应力平均分布.这样,土坝即可视为一个由一系列无限薄层组成并由线弹性剪切弹簧和粘滞性阻尼器所联成的一个振动体系<sup>[3]</sup>.为更符合实际,剪切模量随深度成方根次增进.剪切层理论可以给出坝的自振特性和

反应加速度沿坝高的分布,为抗震设计提供依据.目前国内重要项目中已经采用有限元技术进行地震反应分析,有的还发展到用边界元法作细部分析<sup>[9]</sup>.但是剪切层法因其计算简单,能够计算坝体自振频率和反应加速度分布以估算坝体的地震惯性力.特别是在方案论证分析阶段,由于缺少详细的土料动力试验资料时,加之由于碎石体颗粒较大,很难采用常规仪器对其动力参数进行试验,给有限元法计算参数的准确取值带来了困难,所以剪切层理论常常是最佳选择<sup>[7]</sup>.规范<sup>[8]</sup>也规定坝高小于100m可以不进行有限元计算.

本文将坝的横剖面简化成为三角形剖面(如图1所示),三角形的顶点位于坝顶,使其面积等于把剖面的面积.由于所分析的坝体顶宽与坝底宽之比约为0.03:1,故对自振频率可不进行校正.因为坝基坐落于坚硬的岩石上,可以将坝基视为刚性地基.在坝体内任取一薄层 $dz$ ,如图1所示.计算时考虑剪切模量随坝体不同高程呈非线性变化<sup>[9]</sup>,即

$$G=G_0(z/H)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

式中: $G_0$ 为坝体材料的剪切模量, $G_0=E_s/2(1-\nu)$ ;  $E_s$ 为填筑料的压缩模量.

地震强迫振动时的坝体运动微分方程为

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + 2\lambda\omega' \frac{\partial v}{\partial t} - \frac{G_0}{\rho H^{1/2}} \left[ z^{\frac{1}{2}} \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{3}{2} z^{-\frac{1}{2}} \frac{\partial v}{\partial z} \right] = -\ddot{v}_g(t) \tag{2}$$

式中: $z, H$ 为坝体几何参数,见图1; $\lambda$ 为阻尼比,土石坝的阻尼比可取0.2; $\omega'$ 为有阻尼体系的自振频率, $\omega'=\sqrt{1-\lambda^2}$ , $\omega$ 为自振频率,取值在后面叙述; $\rho$ 为材料的密度; $\ddot{v}_g(t)$ 为某时刻的自振加速度; $v$ 为自振速度.

该微分方程的边界条件和初始条件为: $z=0, \partial v/\partial z=0; z=H, v=0; t=0, v=1, \partial v/\partial t=0$ .

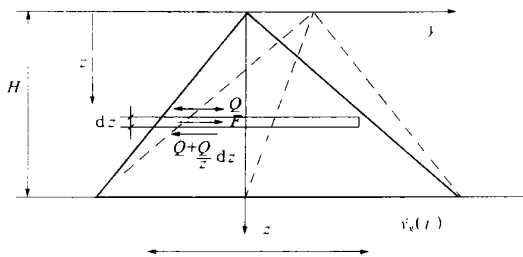


图1 剪切层示意图

Fig.1 The picture of one dimension shear layer method

采用分离变量法求解,最终得到位移反应:

$$v = \sum_1^n \beta_{\frac{1}{3}}^{-\frac{1}{3}} \left( \frac{z}{H} \right)^{-\frac{1}{4}} J_{\frac{1}{3}} \left[ \beta_{\frac{1}{3}} \left( \frac{z}{H} \right)^{3/4} \right] \cdot \frac{-\eta}{\omega'} \int_0^t \ddot{v}_g(\tau) e^{-\lambda\omega'(t-\tau)} \sin \omega'(t-\tau) d\tau \tag{3}$$

式中: $J$ 为贝塞尔函数; $\beta$ 为贝塞尔函数的根,对每个振型, $\beta$ 是定值; $\eta$ 为振型参与系数.

速度反应:

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \sum_1^n \phi \frac{\partial Y}{\partial t} \tag{4}$$

$$\text{式中: } \frac{\partial Y}{\partial t} = -\eta \int_0^t \ddot{v}_g(\tau) e^{-\lambda\omega'(t-\tau)} \cos \omega'(t-\tau) d\tau + \frac{\lambda\omega'}{\omega'} \int_0^t \ddot{v}_g(\tau) e^{-\lambda\omega'(t-\tau)} \sin \omega'(t-\tau) d\tau$$

加速度反应:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \sum_1^n \phi \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} \tag{5}$$

$$\text{式中: } \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = -\ddot{v}_g(t) - 2\lambda\omega' \frac{\partial Y}{\partial t} - \omega'^2 Y \tag{6}$$

$\phi$ 为振型:

$$\phi = \beta_{\frac{1}{3}}^{-\frac{1}{3}} \left( \frac{z}{H} \right)^{-1/4} J_{\frac{1}{3}} \left[ \beta_{\frac{1}{3}} \left( \frac{z}{H} \right)^{3/4} \right] \tag{7}$$

动剪应变反应:

$$\gamma = \frac{3}{4H} \sum_1^n \left( \frac{z}{H} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{\beta_{\frac{1}{3}}^{-\frac{1}{2}} \eta}{\omega'} J_{\frac{1}{3}} \left[ \beta_{\frac{1}{3}} \left( \frac{z}{H} \right)^{3/4} \right] \int_0^t \ddot{v}_g(\tau) e^{-\lambda\omega'(t-\tau)} \sin \omega'(t-\tau) d\tau \tag{8}$$

动剪应力反应为

$$\tau = G(z/H)^{\frac{1}{2}} \gamma \tag{9}$$

### 3.3 计算过程及结果

#### 3.3.1 振型计算

计算时首先按照坝体几何参数 $z/H$ 查计算表格求出振型,取坝底剪切波速为420m/s,对土石坝一般取前三个振型计算即可<sup>[9]</sup>,本文取前四个振型计算,四阶振型的自振频率分别为: $\omega_1=12.125\text{rad/s}; \omega_2=25.125\text{rad/s}; \omega_3=38.209\text{rad/s}; \omega_4=51.292\text{rad/s}$ . $z/H$ 分别取0,0.1,0.2,0.3,...,1.0,计算得到四个振型见图2.

#### 3.3.2 加速度反应计算

根据水工建筑物抗震设计规范<sup>[9]</sup>,取最大地震加速度反应谱值 $\beta_{\text{max}}=1.6$ ,地震卓越周期按照一般非岩性地基取 $T_p=0.3\text{s}$ .地震设防烈度按照7级烈度设防,取地震最大加速度为 $\ddot{v}_{g,\text{max}}=0.1g$ .绝对加速度反应谱系 $\beta$ 数按下式计算.

$$\beta = \beta_{\text{max}} \cdot (T_p/T) \tag{9}$$

振型参与系数 $\eta$ 按式(10)计算:

$$\eta = \frac{-2}{\beta_{\frac{1}{3}}^{2/3} J_{\frac{2}{3}} \left[ \beta_{\frac{1}{3}} \right]} \tag{10}$$

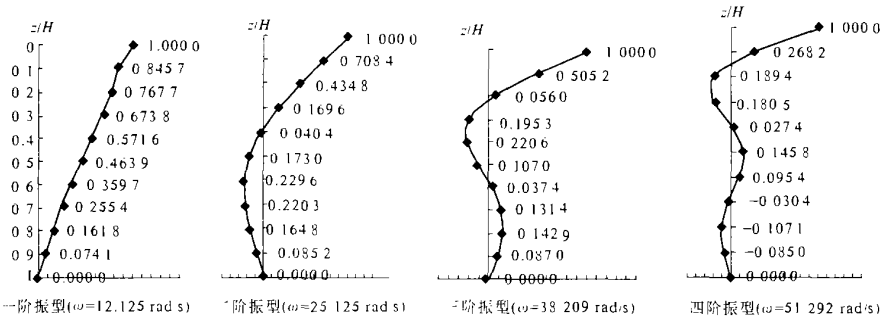


图 2 前四个振型计算结果示意图  
Fig. 2 The former 4 modal shape

式中： $J_{-\frac{2}{3}}$ 为第一类 $-2/3$ 阶贝塞尔函数。  
坝体某位置在某振型的最大绝对加速度反应为

$$\ddot{v}_{a,n,max} = |\phi_n \eta_n| \beta_n \ddot{v}_{g,max} \tag{11}$$

最后,用式(12)计算出坝体的最大绝对加速度:

$$\ddot{v}_{a,max} = \sqrt{(1 - \sum \phi_n \eta_n)^2 + \sum (\phi_n \eta_n \beta_n)^2} \ddot{v}_{g,max} \tag{12}$$

求得坝体内轴线点的最大绝对加速度后,依次求出相应各点的最大绝对速度和位移反应,最后计算出坝体各位置的剪应力和剪应变,见表5。

表 5 坝体各位置的剪应力和剪应变反应

Tab. 5 The shear stress and shear strain in the dam

$z/H$	最大剪应力/kPa	最大剪应变	$z/H$	最大剪应力/kPa	最大剪应变
0.0	0.000	0.004 41	0.6	28.351	0.000 61
0.1	39.936	0.002 10	0.7	28.536	0.000 57
0.2	32.494	0.001 21	0.8	31.267	0.000 58
0.3	33.477	0.001 02	0.9	21.368	0.000 38
0.4	29.605	0.000 78	1.0	0.000	0.000 00
0.5	31.606	0.000 74			

4 结果与分析

(1) 从室内试验和现场碾压试验和施工中的观测及检测结果来看,该种风化石料在作为混凝土面板堆石坝的填筑材料时,除了颗粒级配不满足规范要求外,其他条件都能够满足。从粘性材料的压实特性分析,良好的颗粒级配更容易获得较大的干密度,进而可以得到较大的变性模量和较小的泊松比,由此可以提高坝体抵抗变性的能力并减小施工期和运行期的沉降量。规范中对筑坝材料颗粒级配的要求是为了保证施工时能够获得较高的密实度而使大坝安全稳定,它是一种预防手段和措施之一,但是从现场碾压试验的数据来看,孔隙率指标(它反映了材料经过压实后的密实度)已经满足,因此作者认为,施工工艺

水平和施工机械性能的提高,能够弥补由于材料自身的物理力学性质上的不足所造成的坝体抵抗变形能力的降低,如果填料的强度较低,颗粒级配比较均匀,只要通过先进的施工设备,合理的施工工艺,获得较高的整体强度指标(压缩模量、压实度、泊松比、内摩擦角等),就可以减小坝体在地震作用下的动剪应力和剪应变,由此达到减小面板的应力和变形的目的。有些过去不能用来筑坝的材料现在则可以作为坝体填筑材料。这是该种材料能够应用于筑坝的最根本的原因。

(2) 经过对该坝进行动力反应分析计算,用该种材料在填筑的大水沟水库大坝在遭遇到7级地震烈度时,在坝顶位置所产生的最大加速度反应为 $0.799\ 8g$ ,位移反应为 $1.3\text{cm}$ ,动剪应变反应 $4.41\times 10^{-3}$ ,最大动剪应力约 $40\text{kPa}$ 。沿坝顶位置往坝基方向各反应的量值逐渐减小,各位置的动力反应值均较小,远小于坝体本身所达到的强度,故认为该坝在遭遇到7级地震烈度时是能够满足安全运行的需要的。

5 结束语

通过上述试验、分析及工程实践证明:该种小粒径风化石料是可以用作作为混凝土面板堆石坝主堆石区的填筑材料的。该项成果拓宽了堆石坝填筑材料的选择范围,为今后面板堆石坝的设计施工提供了借鉴经验,有良好的推广应用价值。采用该种石料填筑的云南省昭通地区大水沟水库大坝已经竣工并投入运营,监测结果也证明该大坝运行正常。

参考文献:

[ 1 ] SL228—98,混凝土面板堆石坝设计规范[S]。  
[ 2 ] 付志安,凤家骥.混凝土面板堆石坝[M].武汉:华中理工大学出版社,1993。  
[ 3 ] 顾淦臣,董爱农.混凝土面板堆石坝有限元动力分

[ 4 ] 布里奥·G·混凝土面板堆石坝的地震反应分析[ A ] ·水利电力部科技司, 水利水电科学研究院·国外混凝土面板堆石坝[ C ] ·北京: 水利电力出版社, 1988.

[ 5 ] 谢定义·土动力学[ M ] ·西安: 西安交通大学出版社, 1988.

[ 6 ] 胡良明, 李宗坤, 周鸿钧·重力坝坝踵界面裂缝的地震断裂分析[ J ] ·郑州大学学报( 工学版) , 2002, 23 ( 3 ) : 101~103.

[ 7 ] 倪汉根, 金崇磐·大坝抗震特性与抗震计算[ M ] ·大连: 大连理工大学出版社, 1994.

[ 8 ] 顾淦臣·土石坝地震工程[ M ] ·南京: 河海大学出版社, 1990.

[ 9 ] SDJ 10—78, 水工建筑物抗震设计规范[ S ] ·

The Earthquake Response of Concrete -faced Dam Filled with Withered Small -size Stone Materials

ZHANG Zhan -tao<sup>1</sup>, ZHANG Sheng -li<sup>2</sup>, DANG Fa -ning<sup>3</sup>, XIE Yong -li<sup>1</sup>, KANG Zuo<sup>1</sup>

( 1.Highway college , Chang 'an University , Xi 'an 710064,China ;2.Shanxi Provincial Bureau of Water & Electric Engineering Co . Ltd , Xi 'an 710068,China ;3.The Institue of Geotechnical Engineering ,Xi 'an University of Technology ,Xi 'an 710048,China)

**Abstract** :In order to verify whether the withered small -sized stone materials are suit for filling concrete -faced dam ,this paper analyzes the applicability of this kind of materials depending on the field experi ment results ;the maxi mal dry density  $\gamma_d$ and the indoor test result ;  $E_s$  ,  $\nu$ ,permeability coefficient  $K$  ,triaxial quick shear test param - eters ;  $c$  ,  $\varphi$ .Based on the test data ,this paper also analyzes the dynamic stability of Dashuigou concrete -faced dam filled with the withered small -sized stone materials in Yunnan province under seismic intensity scale 7, and achieves the maxi mal dynamic shear strain and shear stress in the damas well as their absolute maximum value ,dy - namic shear strain is  $4.41\times 10^3$  and dynamic shear stress is 40kPa .Finally this kind of materials are certificated suitable to fill concrete -faced dam , and in addition ,the range of materials to fill dams is expanded .

**Key words** :withered small -sized stone materials ;concrete -faced dam ;site experi ment ;indoor test ;earthquake response