

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0137

马福恒,叶伟,建剑波.某高面板堆石坝地震反应特性分析[J].南水北调与水利科技,2018,16(5):152-158. MA F H, YE W, JIAN J B. Analysis of earthquake response characteristics of a high face rockfill dam[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 152-158. (in Chinese)

## 某高面板堆石坝地震反应特性分析

马福恒<sup>1,2</sup>, 叶伟<sup>2</sup>, 建剑波<sup>3</sup>

(1. 水文水资源及水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029; 2. 南京水利科学研究院, 南京 210029;  
3. 河南省河口村水库管理局, 河南 济源 454661)

**摘要:** 针对高面板堆石坝的结构特性, 采用三维非线性有限元技术, 对大坝的地震反应特性及抗震安全性进行计算分析。动力计算中坝体材料及覆盖层按照等效线性黏弹性模型考虑围压效应进行模拟, 混凝土面板动力计算分析采用线性弹性模型, 并依据考虑围压效应的残余体应变及残余轴应变的动应力残余应变模型对某高面板堆石坝进行坝体地震工况下永久变形计算。计算结果显示: 顺河向最大永久变形为 15 cm, 竖向向最大永久变形为 49 cm, 均发生坝顶位置, 地震引起的竖向变形为坝高的 0.4%; 三维动力参数敏感性分析表明, 堆石体的水平绝对加速度反应极值为  $9 \text{ m/s}^2$ , 最大放大系数为 4.2, 堆石体、面板最大地震反应位于坝顶局部位置, 存在明显的鞭梢效应, 但坝体地震反应的分布规律一致, 坝体及面板抗震安全性较好。

**关键词:** 高面板堆石坝; 地震反应; 敏感性分析; 有限元法

**中图分类号:** TV 641    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0152-07

### Analysis of earthquake response characteristics of a high face rockfill dam

MA Fuheng<sup>1,2</sup>, YE Wei<sup>2</sup>, JIAN Jianbo<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China;  
2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;  
3. Management Bureau of Hekoucun Reservoir, Jiyuan 454661, China)

**Abstract:** In view of the structural characteristics of the high face rockfill dam, we calculated and analyzed the dynamic response characteristics and the seismic safety of the dam by the three dimensional nonlinear finite element method. In the dynamic calculation, the dam material and overburden layer were simulated according to the equivalent linear viscoelastic model with consideration to the confining pressure effect. A linear elastic model was used for the calculation of concrete dynamics. The permanent deformation of the dam was calculated based on the dynamic stress residual strain model, which could be used to calculate the residual body strain and residual axial strain. The results showed that the maximum permanent deformation along the river was 15cm and the maximum permanent deformation in the vertical direction was 49 cm; both at the dam crest. In the three dimensional analysis, the horizontal absolute acceleration response of the rockfill was  $9 \text{ m/s}^2$ , and the maximum amplification factor was 4.2. The maximum earthquake response of the rockfill and the panel occurred at the top of the dam, showing an obvious whiplash effect.

**Key words:** high face rockfill dam; earthquake response; sensitivity analysis; finite element method

收稿日期: 2018-04-26    修回日期: 2018-07-29    网络出版时间: 2018-08-02

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180802.1111.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51779155); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y717006; Y717012; Y718002)

Funds: National Natural Science Foundation of China (51779155); Fundamental Research Funds for Central Level Public Welfare Research Institutes(Y717006; Y717012; Y718002)

作者简介: 马福恒(1969-), 男, 河南项城人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水利工程安全评价与安全监控研究工作。E-mail: fhma@nhri.cn

近年来,随着土体理论的发展以及筑坝技术的不断提高,涌现出一批 200 m 级甚至 300 m 的高土石坝<sup>[14]</sup>,这类高土石坝大多建于高地震烈度带,这样的高坝一旦失事后果将造成巨大的生命财产损失,地震中的大坝表现出的动力反应是大坝抗震安全研究的关键问题,因此对高地震烈度区的高土石坝进行动力反应分析研究十分重要<sup>[5,7]</sup>。

对于地震高烈度区的高土石坝的动力反应特性通常采用试验模型和计算分析方法研究。最早在 1936 年,Mononobe<sup>[8]</sup>就提出采用剪切梁法分析地震反应。随后 Gazetas<sup>[9]</sup>依据此方法进行了地震中竖向震动的影响分析。Oner<sup>[10]</sup>分析了坝肩约束以及剪切模型的不均匀性对地震反应的影响程度。Dakoulas 等<sup>[11,12]</sup>在传统剪切梁法的基础上考虑剪切模量与坝高关系,进一步推导出表现大坝动力反应特性的剪切梁公式。后来,随着有限元法的推广,土石坝动力反应分析取得较大发展。在强度较低的地震荷载下,土体的动应变相对较小,此时有限元法能科学地反应静动力应力应变关系。对于修建在深厚覆盖层地基上的高土石坝,沈慧<sup>[13]</sup>等依据有限元方法分析了材料的动强度及坝体动力反应强烈部位。在

三维非线性地震反应分析的基础上,赵剑明等<sup>[14,15]</sup>以某心墙堆石坝为背景,获悉地震中大坝的动反应特性,继而提出了用于研究高土石坝极限抗震能力的分析方法。采用有限元法分析地震中高土石坝动力反应特性时,可根据筑坝材料本构模型的选用类型不同而分为两类:一类方法采用基于等价黏弹性模型的本构模型;另一类为基于(黏)弹塑性本构模型分析方法<sup>[16,20]</sup>。本文采用有限元方法,依据等效线性法建立大坝动力计算方程,结合具体高面板堆石坝进行地震反应特性分析。

## 1 模型构建及计算参数

### 1.1 某工程概况

某水库大坝为面板堆石坝,最大坝高 122.5 m (河床段趾板修建在深覆盖层上)。大坝典型剖面见图 1。坝址场地地震动反应谱特征周期为 0.40 s,地震动峰值加速度 0.1 g,相应地震烈度为 VII 度。由于最大坝高超过 100 m,按规定抗震等级提高一级设计,确定大坝按 VIII 度地震进行抗震设防,地震动峰值加速度 0.2 g。

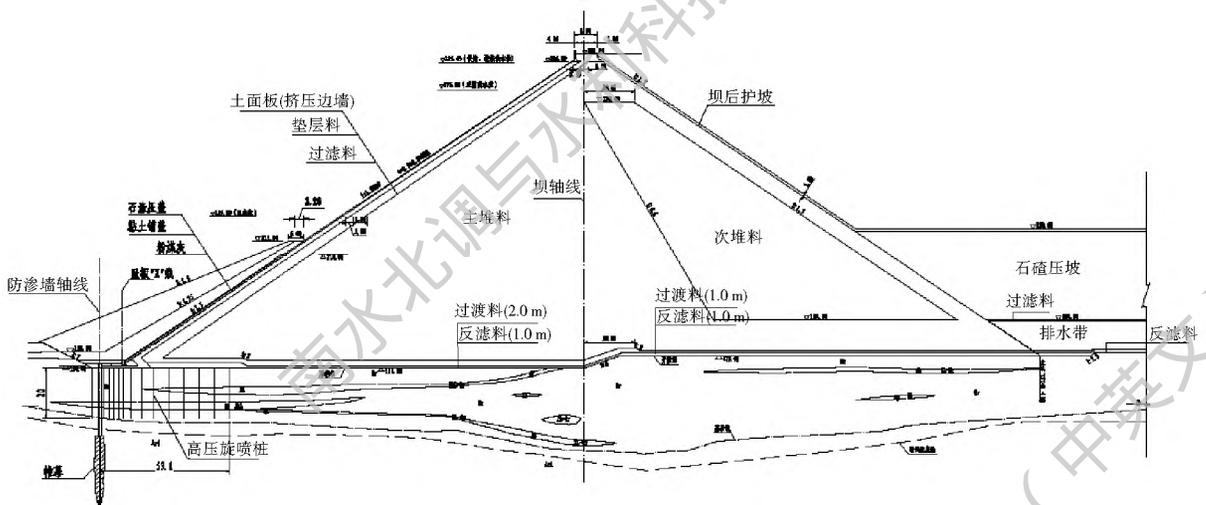


图 1 大坝典型剖面

Fig. 1 Typical section map of the dam

### 1.2 计算方法

本文计算采用等效线性法,该方法的基本假定为将筑坝土石料与地基土层视为黏弹性体。通过等效剪切模量  $G_d$  和等效阻尼比  $\lambda$  来反映地震中土的动应力应变关系的非线性和滞后性,将其表示为剪切模量和阻尼比与动剪应变幅的关系。引入地震中土体动剪应变  $\gamma = 10^{-6}$  左右时的最大动剪切模量  $G_{max}$ ,以  $G/G_{max} - \gamma$  和  $\lambda - \gamma$  曲线来描述动应力应变关系。

### 1.3 模型构建

坝体材料(除混凝土及基岩外)均按非线性弹性材料考虑,计算模型采用邓肯 E-B 模型。面板与垫层间采用 Goodman 接触单元模拟,周边缝、面板间垂直缝等接缝采用接缝单元模拟。有限元模型见图 2 和图 3,模型为 8 节点等参单元,单元数量 = 6 004,节点数量 = 7 503,黄色为 Goodman 接触面单元,蓝色为横缝单元,绿色为周边缝、趾板-连接板,连接板-防渗墙接缝单元。

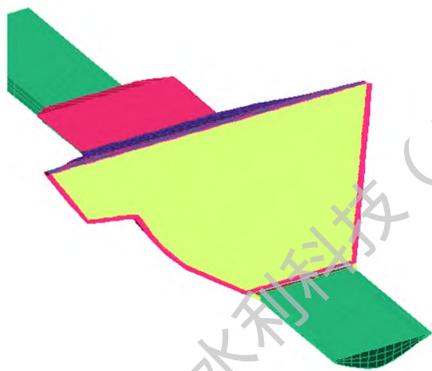


图 2 三维有限元模型

Fig. 2 Three dimensional finite element model

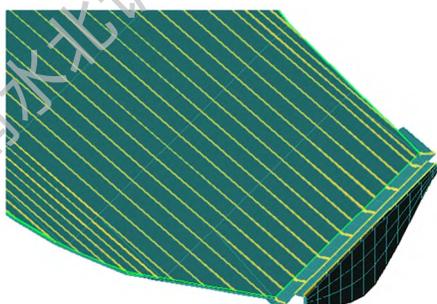


图 3 接触面和接缝单元

Fig. 3 Contact surface and joint unit

计算中需要处理的接触面和接缝共有 9 种, 见表 1。

面板- 垫层( 挤压墙) 接触面采用非线性接触面材料模型和无厚度 Goodman 单元, 接触面参数对面板应力数值有较大影响, 巴贡面板坝工程专门进行了面板与挤压边墙间接缝材料力学性能试验, 研究了无接缝材料、不同厚度乳化沥青( 1 mm、2 mm、3

mm)、两层乳化沥青中间夹沙、沥青油毡、土工膜等 7 种情况。考虑到挤压边墙技术的普遍采用, 此次计算参照了巴贡面板坝的试验成果, 按照面板+ 1 mm 乳化沥青+ 挤压墙对应的接触面参数进行取值( 见表 2)。横缝和周边缝按 1 层金属止水+ 1 cm 厚度橡胶填充物考虑。

表 1 接触面和接缝

Tab. 1 Contact surface and joint

序号	A 面	B 面	单元类型
1	覆盖层	趾板	Good 单元
2	覆盖层	防渗墙	Good 单元
3	覆盖层	连接板	Good 单元
4	垫层料	面板	Good 单元
5	特殊垫层料	趾板	Good 单元
6	面板	面板	接缝单元
7	面板	趾板	接缝单元
8	趾板	连接板	接缝单元
9	连接板	防渗墙	接缝单元

表 2 工程接触面计算参数

Tab. 2 Calculation parameters of engineering contact surface

单元类型	$K_s$	$\varphi$	$c/kPa$	$n$	$R_f$	$K_n$
Goodman 单元	21 000	32	2	1.25	0.8	1E8
接缝单元	1 层金属止水+ 1 cm 橡胶接缝, 橡胶弹模取 7.8 MPa					

### 1.4 材料计算参数

对大坝实际填筑料场的灰岩料进行三轴试验, 其静力计算参数见表 3。

表 3 大坝三维有限元分析材料设计参数

Tab. 3 Material design parameters for 3D finite element analysis of the dam

料种	参数									
	容重/( $kN \cdot m^{-3}$ )	$K$	$n$	$K_b$	$m$	$R_f$	$K_{ur}$	$\Phi_0(^{\circ})$	$\Delta\Phi(^{\circ})$	$c/kPa$
主堆石料	22	1 428	0.425	381	0.369	0.825	2 200	50.7	7	0
次堆料上部( 料场石料)	21.2	913	0.326	225	0.291	0.845	1 826	43.5	1.2	0
次堆料下部( 渣场石料)	21.2	477	0.483	124	0.544	0.712	1 000	42	2.5	0
垫层料	22.9	786	0.451	371	0.399	0.667	1 650	48	4	0
过渡石料	22.1	598	0.431	280	0.215	0.789	1 196	51	3.6	0
河床砂卵石料( 天然)	21.2	913	0.326	225	0.291	0.845	1 826	44	0.7	0
河床砂卵石层( 旋喷桩区- 密孔)	21.5	1 150	0.42	550	0.28	0.85	2 300	44	1	
砂卵石层( 旋喷桩区- 疏孔)	21.5	1 100	0.42	500	0.28	0.85	2 200	44	1	
黏土夹层	16.5	76.1	0.818	52.9	0.329	0.589	152.2	25	0	5
夹砂层	16.3	100	0.5	150	0.25	0.85	200	28	0	0
石渣支座	20.5	1 000	0.3	550	0.28	0.75	2 000	45	0	0
混凝土面板 C30										弹性模量 $E=3.0 \times 10^4$ MPa 泊松比 $\mu=0.167$ $\gamma=25$ kN/m <sup>3</sup>
趾板、连接板、混凝土防渗墙 C25										弹性模量 $E=2.8 \times 10^4$ MPa 泊松比 $\mu=0.167$ $\gamma=25$ kN/m <sup>3</sup>

## 2 地震反应特性分析

曲线试验结果见表 4, 坝料  $K', n'$  值见表 5。

### 2.1 三维动力计算参数及加速度的输入

#### (1) 动力计算参数。

常用的考虑围压的 Hardir Drnevich 双曲线模型假定主干线为一条双曲线, 见图 4。

通过试验测得动剪切模量比  $G_d/G_{dmax}$  和动阻尼比  $\lambda_d$  与动剪应变  $\gamma_d$  的关系曲线。动力计算时输入相应关系曲线的控制数据, 根据应力应变值进行内插和外延取值, 用于计算。本工程坝料的动剪切模量比  $G_d/G_{dmax}$  和动阻尼比  $\lambda_d$  与动剪应变  $\gamma_d$  的关系

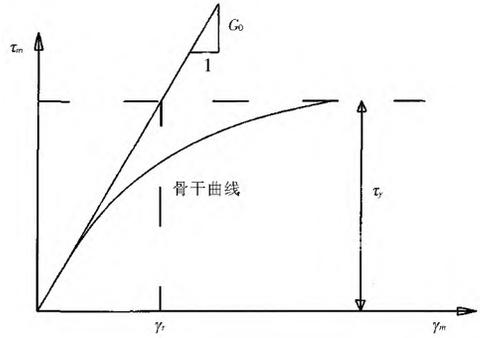


图 4 Hardir Drnevich 双曲线模型

Fig. 4 Hardir Drnevich hyperbolic model

表 4 四种坝料在不同剪应变下的剪切模量比和阻尼比值

Tab. 4 Shear modulus ratio and damping ratio under different shear strains

土样名称	固结比 $K_c$	参数	动剪应变 $\gamma_d$							
			$5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$	$5 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$5 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-2}$
主堆石料	1.5	$G_d/G_{dmax}$	0.995	0.990	0.952	0.909	0.666	0.499	0.166	0.091
		$\lambda_d$	0.003	0.005	0.022	0.039	0.096	0.116	0.143	0.147
过渡石料	1.5	$G_d/G_{dmax}$	0.993	0.987	0.936	0.880	0.595	0.423	0.128	0.068
		$\lambda_d$	0.003	0.006	0.026	0.044	0.109	0.133	0.162	0.167
河床砂卵石料	1.5	$G_d/G_{dmax}$	0.991	0.982	0.915	0.843	0.517	0.349	0.097	0.051
		$\lambda_d$	0.019	0.032	0.080	0.098	0.120	0.124	0.126	0.127
黏土夹层	1.5	$G_d/G_{dmax}$	0.998	0.997	0.984	0.969	0.863	0.760	0.387	0.240
		$\lambda_d$	0.001	0.002	0.008	0.016	0.057	0.085	0.140	0.153
次堆石料 (料场石料)	1.5	$G_d/G_{dmax}$	0.994	0.988	0.942	0.890	0.618	0.447	0.139	0.075
		$\lambda_d$	0.006	0.012	0.044	0.069	0.122	0.136	0.149	0.150
次堆石料 (渣场石料)	1.5	$G_d/G_{dmax}$	0.995	0.989	0.948	0.900	0.644	0.475	0.153	0.083
		$\lambda_d$	0.021	0.036	0.090	0.111	0.136	0.140	0.143	0.144
垫层石料	1.5	$G_d/G_{dmax}$	0.993	0.987	0.940	0.887	0.611	0.440	0.136	0.073
		$\lambda_d$	0.049	0.075	0.128	0.141	0.153	0.156	0.156	0.156

表 5 四种坝料的  $K', n'$  值

Tab. 5  $K'$  and  $n'$  values of four kinds of dam materials

土样名称	$K'$	$n'$
主堆石料	2 953.0	0.54
过渡石料	2 714.4	0.550
河床砂卵石料	2 532.9	0.540
黏土夹层	318.24	0.550
次堆石料(料场石料)	2 830.0	0.54
次堆石料(渣场石料)	2 294.8	0.54
垫层石料	2 977.0	0.59

由于该面板堆石坝工程缺乏坝料地震残余变形试验参数, 本次计算中坝料的残余变形计算参数参考公伯峡的资料并根据该面板堆石坝工程的特点进行选取。主堆石和次堆石的地震残余变形计算的相关参数见表 6 和 7, 其它材料的参数根据坝料相似的原则进行选取。

表 6 残余轴应变公式的系数和指数

Tab. 6 The coefficient and index of the residual axial strain formula

土料名称	$K_c$	围压 / k Pa	$N = 12$ 次		$N = 20$ 次	
			$K_a$	$n_a$	$K_a$	$n_a$
主堆石	1.5	200	0.2127	0.6999	0.2176	0.6275
	2.5	200	0.7091	0.9065	0.6843	0.781
	1.5	1000	1.1958	0.6571	1.2769	0.5841
	2.5	1000	3.501	0.9531	3.8578	0.9317
次堆石	1.5	200	1.5841	2.2455	1.7397	2.2132
	2.5	200	3.1009	2.2498	2.5437	1.8877
	1.5	1000	5.4275	1.514	4.9699	1.3334
	2.5	1000	9.7293	1.395	9.4804	1.3054

#### (2) 地震加速度的输入。

地震工况下基岩输入加速度取超越概率 100 年 2% 的峰值强度为 201 gal, 地震动的持续时间取 24 s。x 方向沿原河流方向水平加速度输入; y 方向沿

表 7 残余体应变公式的系数和指数

Tab.7 The coefficient and index of the residual body strain formula

土料名称	$K_c$	围压 /kPa	N = 12 次		N = 20 次	
			$K_v$	$n_v$	$K_v$	$n_v$
主堆石	1.5	200	0.3584	0.8295	0.4777	0.865
	2.5	200	0.4344	0.8018	0.5623	0.8356
	1.5	1000	3.6726	1.3886	4.0262	1.272
	2.5	1000	5.3376	1.431	5.6316	1.3591
次堆石	1.5	200	0.3184	0.8822	0.3794	0.9062
	2.5	200	0.8445	1.3671	1.2523	1.5277
	1.5	1000	8.6736	1.9621	11.213	2.0291
	2.5	1000	5.7201	1.3486	6.8274	1.3445

表 9 桩号 0+ 170 断面三维动力有限元计算成果汇总

Tab.9 Summary of three dimensional dynamic finite element calculation results for 0+ 170 section

项目	数值
最大位移反应/ cm	上下游方向 11
	垂直方向 6.5
堆石体最大应力反应/ MPa	第一主应力 0.53
	第三主应力 0.51
面板最大应力和位移反应	最大剪应力 0.35
	顺坡向应力/ MPa 7.5
面板与趾板距离/ mm	面板挠度/ cm 9.5
	最大拉伸量 29
裂缝/ mm	最大压缩量 25
	最大剪切位移 36
永久变形/ cm	上下游方向 15
	垂直方向 49

高程方向竖直加速度输入, 依据水工建筑物抗震设计规范, 将其峰值折减 2/3 (由规范反应谱人工生成输入的地震波, 顺河向加速度峰值为力竖向加速度峰值为水平向峰值的 2/3); z 方向为沿坝轴方向横向加速度输入。图 5 为 100 年超越概率 2% 的地震加速度曲线。计算中将整个地震历程划分为 24 个大时段, 每个大时段又划分为 50 个小时段, 因此, 积分计算的时间步长为 0.02 s。

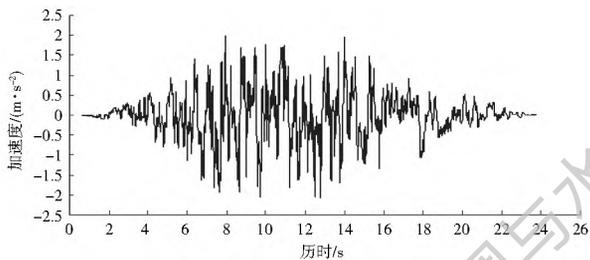


图 5 100 年超越概率 2% 的地震动加速度时程曲线

Fig.5 Time history curve of ground motion acceleration exceeding 2% probability in 100 years

## 2.2 三维非线性地震反应特性

由表 8 可知最大加速度反应位于 0+ 170 断面, 因此计算结果选取基本设计工况坝体最大断面(0+ 170 桩号)的成果进行分析, 动力有限元计算成果特征量汇总表 9。坝体位移反应、面板应力反应及防渗墙地震反应见图 6 至图 8。

顺河向绝对加速度最大为  $9 \text{ m/s}^2$ , 放大系数为 4.5, 竖直向绝对加速度最大为  $10 \text{ m/s}^2$ , 放大系数为 5.0<sup>[21]</sup>。顺河向最大位移反应为 11 cm, 竖直向最大位移反应为 6.5 cm, 均发生在下游坝顶附近。

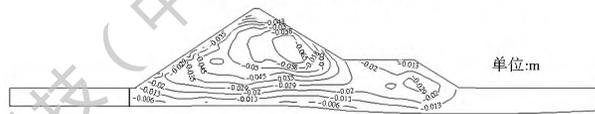
表 8 各断面最大加速度反应

Tab.8 Maximum acceleration response of each section

断面位置	上下游方向/( $\text{m} \cdot \text{s}^2$ )	垂直方向/( $\text{m} \cdot \text{s}^2$ )
桩号 0+ 170 断面	9	10
桩号 0+ 50 断面	8.5	5.5
桩号 0+ 290 断面	8	6.5



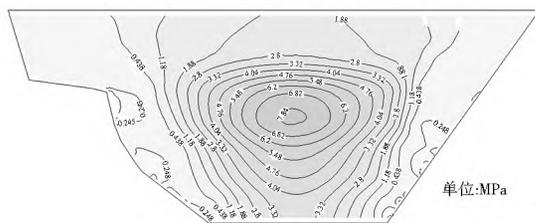
(a) 坝体横断面顺水流向位移



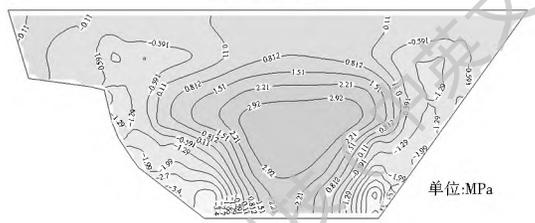
(b) 坝体横断面竖向位移

图 6 坝体位移反应图

Fig.6 Displacement response map of the dam body



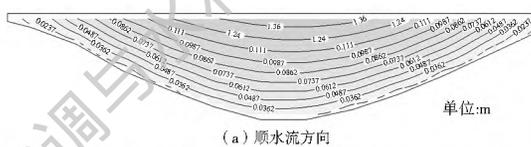
(a) 面板轴向应力



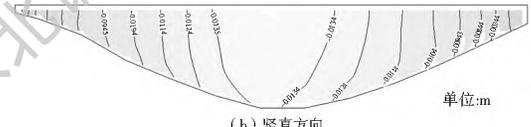
(b) 面板顺坡应力

图 7 面板应力反应图

Fig.7 Panel stress response map



(a) 顺水流方向



(b) 竖直方向

图 8 防渗墙位移反应图

Fig.8 Displacement map of impervious wall

坝体第一主应力最大为 0.53 MPa, 第三主应力最大值为 0.51 MPa, 最大动剪应力为 0.35 MPa, 坝体不会被剪坏。面板顺坡向最大压应力为 7.5 MPa。面板的最大动挠度为 9.5 cm, 由地震引起的面板与趾板之间的最大拉伸量和最大压缩量均小于 29 mm; 垂直缝的最大剪切位移为 36 mm。顺河向最大永久变形为 15 cm, 竖直向最大永久变形为 49 cm, 均发生坝顶位置, 地震沉降量为坝高的 0.4%。因此, 此坝体在地震作用下不会发生大范围剪切破坏。防渗墙第一主应力最大为 2.2 MPa, 发生在防渗墙底部; 第三主应力最大值为 1.9 MPa, 同样发生在防渗墙底部, 由此可见在地震作用下, 防渗墙动应力较小, 不会发生破坏。三维分析中, 堆石体的水平绝对加速度反应极值为  $9 \text{ m/s}^2$ , 最大放大系数为 4.2, 堆石体、面板最大地震反应位于坝顶局部位置, 存在明显的鞭梢效应(即在地震作用下, 大坝顶部突出部分振幅剧烈增大的现象), 需要结合计算成果在坝顶进行抗震加固。

### 2.3 三维动力参数敏感性分析

经进一步计算, 将坝体材料最大动剪切模量的模数减小 10% 和 20% 后, 坝体与面板的动力反应均有较大变化。最大动剪切模量的模数减小 20% 后, 坝体最大加速度反应顺河向由  $9 \text{ m/s}^2$  减小到  $8 \text{ m/s}^2$ , 垂直向由  $10 \text{ m/s}^2$  减小到  $8 \text{ m/s}^2$ ; 最大位移反应变化不大, 只有竖直向稍有减小; 堆石体应力无明显变化; 面板挠度在参数降低 10% 时稍有增大, 但在参数降低到 20% 时又恢复到 9.5 cm, 这也说明了三维状态下, 面板变形的复杂性; 受堆石体及面板变形增大的影响, 接缝变形明显增大, 其中面板和周边缝的张开值都增大 2 mm 左右; 地震永久变形变化较明显, 其中竖向位移由 49 cm 减小到 38 cm。

因此, 动力参数降低后, 速度反应和地震永久变形等均有所减小, 而接缝位移反应等均有所增大。但是, 坝体地震反应的分布规律是一致的, 地震反应数值的变化不大。

## 3 结论

基于等效线性法, 采用有限元方法建立动力运动方程对某高面板堆石坝进行地震动力反映分析, 计算结果如下。

(1) 无论顺河向还是竖直向最大永久变形均发生在坝顶位置, 地震引起的沉降量为 0.4%, 大坝变形总体不大。

(2) 地震期间面板动拉应力反应值较小, 出现拉应力的区域很小, 面板整体呈现压应力为主, 防渗

墙动应力较小, 不会发生破坏, 整体表明设计地震作用下大坝是安全的。

(3) 对于最大地震反应位于坝顶的大坝而言, 需关注地震中的鞭梢效应, 必要时应进行抗震加固处理。

### 参考文献(References):

- [1] 王富强, 刘超, 周建平, 等. 我国高土石坝抗震安全研究进展[J]. 水电与抽水蓄能, 2017, 3(2): 33-37. (WANG F Q, LIU C, ZHOU J P, et al. Review of seismic safety study on High Earth Rockfill Dam in China [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2017, 3(2): 33-37. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.2096-093X.2017.02.004.
- [2] 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. (HE Y L, CAO X Y, FEN R, et al. Study of seismic safety of Changheba high rock fill dam with earth core [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(1): 1-7. (in Chinese))
- [3] 李国英, 沈婷, 赵魁芝. 高心墙堆石坝地震动力特性及抗震极限分析[J]. 水利水运工程学报, 2010(1): 1-8. (LI G Y, SHEN T, ZHAO K Z. Seismic dynamic behavior and limit aseismic analysis on high earth core rock fill dams [J]. Hydro science and Engineering, 2010(1): 1-8. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1009-640X.2010.01.001.
- [4] 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[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(12): 2254-2261. (ZHAO J M, LIU X S, YANG Y S, et al. Criteria for seismic safety evaluation and maximum aseismic capability of high concrete face rock fill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2254-2261. (in Chinese)) DOI: 10.11779/CJGE201512015.
- [5] 卢羽平, 窦向贤. 超高面板堆石坝极限抗震能力与安全性分析[J]. 人民长江, 2014(8): 46-50. (LU Y P, DOU X X. Analysis on ultimate seismic capacity and safety of ultrahigh CFRFD [J]. Yangtze River, 2014(8): 46-50. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1001-4179.2014.08.017.
- [6] 林皋, 庞林. 大坝结构静动力分析的精细化模型[J]. 地震研究, 2016, 39(1): 1-9. (LIN G, PANG L. Model Refinement for Static and Dynamic Analysis for Dam Structures [J]. Journal of Seismological Research, 2016, 39(1): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-0666.2016.01.001.
- [7] 岑威钧, 张自齐, 周涛, 等. 覆盖层上高面板堆石坝的极限抗震能力[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(2): 1-5. (CEN W J, ZHANG Z Q, ZHOU T, et al. Maximum seismic capacity of a high concrete face rock fill dam on alluvium deposit [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(1): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10.3880/j.issn.1006-7647.2016.02.001.
- [8] MONOBE H A. Seismic stability of the earth dam [C]. Proceedings of Seminar on 2nd Congress of Large Dams. Washington D.C. 1936.
- [9] GAZETAS G. Longitudinal vibrations of embankment dams

- [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1981, 107(1): 21-40.
- [10] ONER M. Shear vibration of inhomogeneous earthdams in rectangular canyons[J]. International Journal of Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 1984, 3(1): 19-26.
- [11] DAKOULAS P, GAZETAS G. A class of inhomogeneous shear models for seismic response of dams and embankments[J]. International Journal of Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 1985, 4(4): 166-182.
- [12] GAZETAS, G. Seismic response of earth dams: some recent developments[J]. Soil Dynamic Engineering V6, N1, Jan 1987, 6(1): 2-47.
- [13] 沈慧, 迟世春, 贾宇峰, 等. 覆盖层地基上 250m 级土石坝抗震分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35(3): 271-275. (SHEN H, CHIS C, JIA Y F, et al. Seismic response analysis of 250m high earth rock dam on overburden foundation[J]. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2007, 35(3): 271-275. (in Chinese))
- [14] 赵剑明, 刘小生, 陈宁, 等. 高心墙堆石坝的极限抗震能力研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(5): 97-102. (ZHAO J M, LIU X S, CHEN N, et al. Research on the maximum anti seismic capability of high earth core rock fill dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 35(5): 97-102. (in Chinese))
- [15] 赵剑明, 常亚屏, 陈宁. 高心墙堆石坝地震变形与稳定分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(z2): 423-428. (ZHAO J M, CHANG Y P, CHEN N. Study on earthquake induced permanent deformation and dynamic stability of high core rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(z2): 423-428. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2004.z2.089.
- [16] 邹德高, 徐斌, 孔宪京, 等. 基于广义塑性模型的高面板堆石坝静、动力分析[J]. 水力发电学报, 2011, 30(6): 109-116. (ZOU D G, XU B, KONG X J, et al. Static and dynamic analysis of high concrete faced rockfill dam based on generalized plastic model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2011, 30(6): 109-116. (in Chinese))
- [17] 孔宪京, 邹德高, 徐斌, 等. 紫坪铺面板堆石坝三维有限元弹塑性分析[J]. 水力发电学报, 2013, 32(2): 213-222. (KONG X J, ZOU D G, XU B, et al. Three dimensional finite element elastoplastic analysis of Zipingpu Concrete Faced Rock fill Dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(2): 213-222. (in Chinese))
- [18] 朱亚林. 地震时高土石坝的弹塑性分析和抗震措施研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2011. (ZHU Y L. Elastoplastic analysis and aseismic measures for high earth rock dams during earthquake[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011. (in Chinese))
- [19] 孔宪京, 刘君, 韩国城. 面板堆石坝模型动力破坏试验与数值仿真分析[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 26-30. (KONG X J, LIU J, HAN G C. Dynamic failure test and numerical simulation of model concrete faced rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 26-30. (in Chinese)) DOI: 10.3321/j.issn:1000-4548.2003.01.005.
- [20] 朱亚林, 孔宪京, 朱大勇, 等. 高心墙堆石坝的动力反应及加固极限抗震能力研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(s2): 184-190. (ZHU Y L, KONG X J, ZHU D Y, et al. Study on dynamic response and ultimate aseismic capacity of high core rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 35(s2): 184-190. (in Chinese))
- [21] 周晖, 李俊杰, 康飞. 面板堆石坝最大加速度放大倍数经验公式[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2011, 25(1): 92-96. (ZHOU H, LI J J, KANG F. Empirical formula for calculating maximum acceleration of concrete faced rock fill dam[J]. Journal of Nanhua University(Science & Technology), 2011, 25(1): 92-96. (in Chinese))