

沥青混凝土心墙坝三维有限元静动力分析

孔宪京^{*1,2}, 余翔², 邹德高^{1,2}, 周扬²

(1. 大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对沥青混凝土心墙均质坝, 运用非线性三维有限元法进行静动力分析. 对大坝填筑与蓄水阶段分别进行模拟, 并计算了沥青混凝土心墙坝动力响应, 分析了坝高、动剪切模量、地震峰值加速度及地震波对心墙最大动剪应变的影响, 总结了心墙应力与变形、动剪应变分布规律. 结果表明: 静力状态下, 尤其是满蓄期, 应重点关注心墙坝肩处、顶部和底部区域, 且高心墙处于更不利的应力与变形状态. 地震作用下, 动剪应变最大值发生在河谷中央心墙顶部区域, 但动剪应变幅值较小, 一般不超过 0.5%.

关键词: 沥青混凝土心墙坝; 三维有限元; 静动力分析; 动剪应变

中图分类号: TV31

文献标识码: A

doi: 10.7511/dlglxb201402007

0 引言

土石坝是目前最常用的坝型, 而以水工沥青混凝土作为心墙防渗材料的土石坝优势越来越明显, 已成为一种非常有竞争力的坝型^[1]. 水工沥青混凝土用于土石坝内部防渗已近 50 年^[2], 国际大坝委员会(ICOLD)分别在第 42 号公报^[3]与第 84 号公报^[4]中总结了这种坝型的设计与施工经验. 在 1988 年第 16 届国际大坝会议上, 与会专家一致认为以沥青作为防渗体的土石坝和混凝土面板堆石坝是未来高坝的适宜坝型. 与混凝土面板坝^[5]相比, 沥青混凝土心墙坝仍处于发展阶段, 相对滞后, 尤其在沥青混凝土心墙坝的建设方面缺乏实践经验.

随着沥青混凝土心墙坝在土石坝中逐步得到广泛应用, 国内外学者开展了沥青混凝土心墙坝的数值计算分析. 但目前有关沥青混凝土心墙坝的数值计算以二维^[6-8]居多, 不能反映三维河谷效应; 数值分析均依托实际工程^[9-10]开展, 主要用于评价具体工程, 无法把握沥青混凝土心墙的响应规律; 动力分析主要针对坝体加速度和心墙应力反应^[11-12], 而有关心墙的动剪应变反应规律鲜有

涉及. 等效线性法^[13]是目前土石坝工程中广泛采用的动力分析方法, 动剪应变是该法的重要参数, 但目前有关水工沥青混凝土的动力试验只有少数学者涉及^[14-15], 不能很好地把握动剪应变的基本范围. 若根据已有试验成果, 通过数值敏感性计算分析, 确定心墙的最大动剪应变的分布范围和规律, 对室内试验有一定的指导意义. 同时, 心墙的动剪应变较大区域也是心墙地震反应强烈区, 熟悉其分布规律也有助于工程实践. 鉴于此, 本文开展不同坝高的沥青混凝土心墙坝三维有限元静动力数值计算, 针对沥青混凝土心墙, 分析并总结其应力与变形和动剪应变规律, 以期水工沥青混凝土试验与沥青混凝土心墙坝建设提供依据.

1 计算模型及参数

本文采用大连理工大学工程抗震研究所开发的非线性有限元计算程序——GEODYNA^[16]进行计算, 分析了静力状态下(竣工和满蓄期)沥青混凝土心墙的应力与变形以及遭遇地震时的动剪应变分布特性及其规律. 非线性分析中采用的本构模型、计算参数等介绍如下.

1.1 本构模型

采用邓肯 E-B 模型^[17]进行静力计算,主要计算公式及参数如下:

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - \frac{R_f (\sigma_1 - \sigma_3) (1 - \sin \varphi)}{2c \cdot \cos \varphi + 2\sigma_3 \cdot \sin \varphi} \right]^2$$
 (1)

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n; B = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m$$
 (2)

式中: E_t 为切线变形模量,需 K 、 n 、 φ 、 c 和 R_f 5 个试验常数; E_{ur} 为卸载及再加载的弹性模量,需 K_{ur} 和 n 两个试验常数; B 为体积模量,需 K_b 和 m 两个试验常数; p_a 为大气压,量纲与 σ_3 相同.

运用等效线性模型^[18]进行动力分析.其最大动剪切模量表示为

$$G_{max} = K p_a \left(\frac{\sigma'_m}{p_a} \right)^n$$
 (3)

式中: K 、 n 由试验参数确定, $\sigma'_m = (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)/3$, σ'_1 、 σ'_2 、 σ'_3 为试验时试样所受的有效主应力.可根据试验确定动剪应变 γ 与 G/G_{max} 及阻尼比 λ 的关系.

1.2 计算模型

假设大坝坐落于基岩上,计算模型采用的沥青混凝土心墙均质坝的坝高分别为 100、150 和 200 m,上下游坝坡均为 1:2.0,河谷对称,坡度为 1:1.5,河谷宽 80 m,心墙厚度沿坝高线性变化,其中心墙顶部厚度取 0.5 m,底部厚度取坝高的 1/100,筑坝材料采用堆石料.图 1 为标准计算模型网格图.

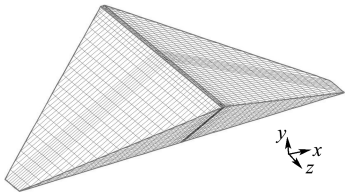


图 1 沥青混凝土心墙坝三维有限元网格
Fig. 1 3D-FE mesh of asphalt concrete core dam

目前,有关堆石料与沥青混凝土之间的接触性质的研究非常少见.因此,本文计算中并未在堆石体与沥青混凝土心墙之间设置接触面,且当不设置接触面时,心墙的“悬挂”效应更明显,心墙的应力结果是偏于安全的.

1.3 计算参数

堆石料^[19]与沥青混凝土静力分析参数如表 1

所示,表 2 为其动力分析参数,沥青混凝土静动力计算参数取自西安理工大学试验成果^[20].动力计算时,堆石料采用如图 2 与 3 中孔亮京等^[18]建议的动剪切模量和阻尼比与动剪应变的归一化关系的平均值.沥青混凝土试验结果表明,不同固结比和不同围压条件下的阻尼比 λ 呈带状分布,且围

表 1 静力分析参数

Tab. 1 Parameters of static analysis					
材料	$\rho_d / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi_0 / (^\circ)$	$\Delta\varphi / (^\circ)$	c / kPa	K
沥青混凝土	2 422	25.4	0	370	429
堆石料	2 150	52.0	8.5	0	1 100
材料	n	R_f	K_b	m	
沥青混凝土	0.60	0.88	944	0.5	
堆石料	0.35	0.82	600	0.1	

表 2 动力分析参数

Tab. 2 Parameters of dynamic analysis			
材料	K	n	μ
沥青混凝土	1 979.4	0.40	0.345
堆石料	2 339.0	0.50	0.350

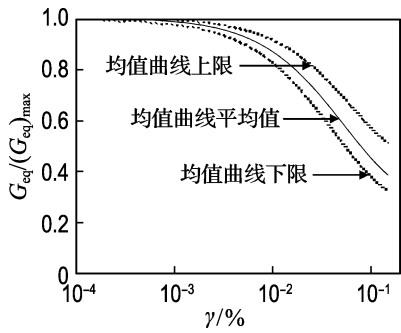


图 2 堆石料动剪切模量比与动剪应变关系
Fig. 2 Relationship between dynamic shear modulus ratio and dynamic shear strain of rockfill materials

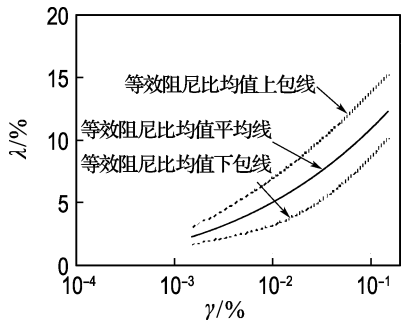


图 3 堆石料阻尼比与动剪应变关系
Fig. 3 Relationship between damping ratio and dynamic shear strain of rockfill materials

压对阻尼比影响不大, 沥青混凝土的阻尼比 λ 在 $0.10 \sim 0.15$. 本文根据实验结果^[20], 将沥青混凝土的阻尼比 λ 取为 0.121 . 图 4 为温度 $(10.5 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 下沥青混凝土的动剪切模量比与动剪应变归一化关系曲线.

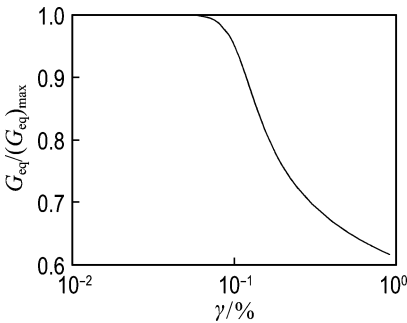


图 4 沥青混凝土动剪切模量比与动剪应变关系
Fig. 4 Relationship between dynamic shear modulus ratio and dynamic shear strain of asphalt concrete

1.4 地震输入与计算工况

本文分别采用水工抗震设计规范谱生成的人工波、两河口和糯扎渡土石坝工程的场地谱地震波为动力输入, 研究心墙在不同地震波下的动力反应. 图 5~7 为 3 种地震波的时程曲线. 图 8 为不同地震波的反应谱.

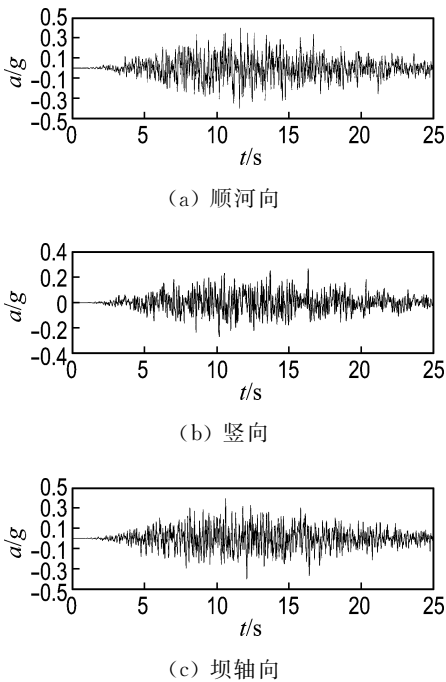


图 5 规范谱人工波地震时程曲线
Fig. 5 Seismic time history curves of artificial waves of standard spectrum

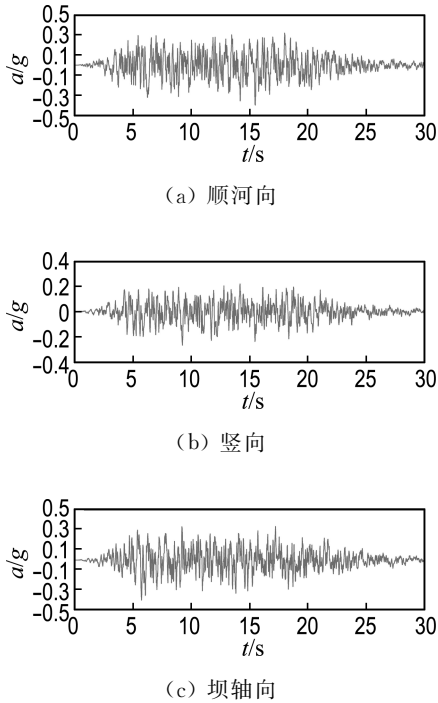


图 6 两河口地震时程曲线
Fig. 6 Seismic time history curves of Lianghekou

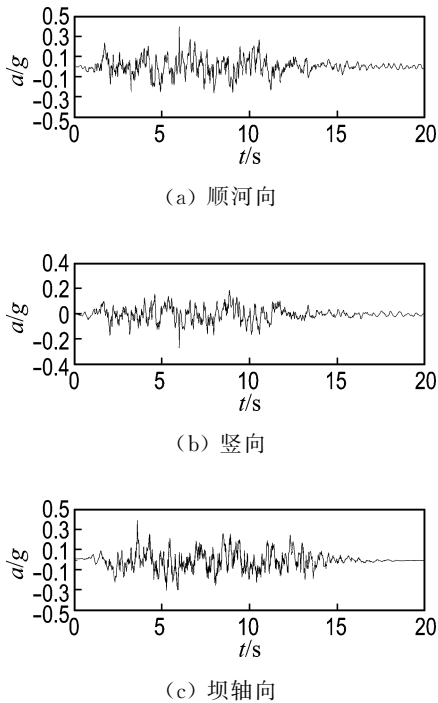


图 7 糯扎渡地震时程曲线
Fig. 7 Seismic time history curves of Nuozhadu

本文有关计算工况列于表 3. 其中考虑了沥青混凝土的动剪切模量、坝高、地震波, 以及加速度峰值的变化.

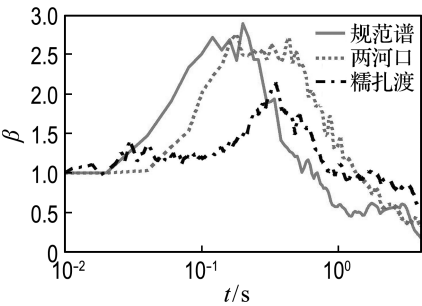


图 8 地震波加速度反应谱

Fig. 8 Acceleration amplification spectra of seismic waves

表 3 计算工况

Tab. 3 Cases for calculation

工况	心墙动剪切模量系数	坝高/m	地震波	地震动峰值/g
1	1 979.4	100	规范谱	0.4
2	1 979.4	150	规范谱	0.4
3	1 979.4	200	规范谱	0.4
4	979.4	200	规范谱	0.4
5	2 979.4	200	规范谱	0.4
6	1 979.4	200	规范谱	0.2
7	1 979.4	200	规范谱	0.3
8	1 979.4	200	规范谱	0.5
9	1 979.4	200	两河口	0.4
10	1 979.4	200	糯扎渡	0.4

2 计算结果及分析

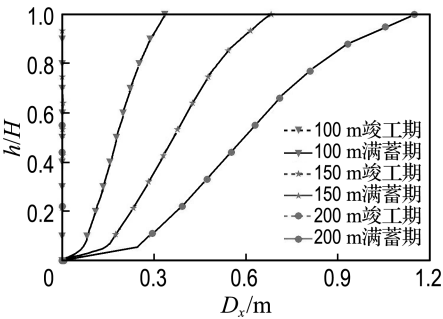
由于三维计算内容较多,为便于对比,主要对河谷心墙中央断面与心墙坝轴线剖面的应力、变形和动剪应变进行分析。图中应力以压为正,顺河向位移以向下游为正,竖向位移以向上为正。

2.1 静力计算结果与分析

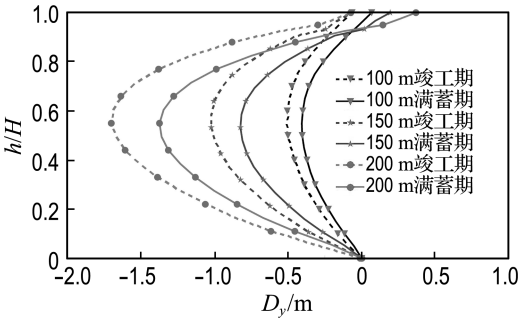
图 9 为不同坝高的河谷中央断面心墙静位移沿坝高的分布曲线图。可以看出,由于心墙位于大坝中部,心墙竣工期顺河向位移基本为零,心墙满蓄期顺河向位移最大值位于心墙顶部。心墙竖向沉降最大值基本位于心墙中部。心墙位移最大值与坝高并非简单地呈比例关系。满蓄期,上游堆石受浮托力作用,而堆石控制心墙的整体变形,心墙将随上游堆石一起向坝顶方向移动,心墙竖向沉降减小。

图 10 是不同坝高的河谷中央断面心墙竖向应力沿坝高的分布曲线图。由于心墙较薄,心墙的变形受堆石控制,且心墙变形模量小于堆石,因此心墙的变形能力不能充分发挥,造成心墙竖向应力小于自重应力。竣工期,竖向应力沿坝高递增分

布,在坝基处达到最大。满蓄期,受浮托力影响,心墙竖向应力降低,心墙高度 1/5 以下区域,竖向应力逐步降低。总的来说,满蓄期,河谷中部的心墙下部区域竖向应力较低,且高心墙将处于相对更不利的应力状态。



(a) 顺河向位移



(b) 竖向位移

图 9 河谷中央断面心墙静位移沿坝高的分布

Fig. 9 The distribution of static displacement of the core in the valley central section along the dam height

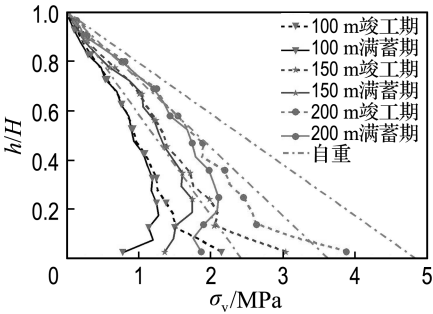


图 10 河谷中央断面心墙竖向应力沿坝高的分布

Fig. 10 The distribution of vertical stress of the core in the valley central section along the dam height

应力水平是判别材料极限平衡区的一项重要指标。计算结果表明,不同坝高的心墙应力分布规律相同。本文仅给出坝高为 200 m 的坝轴向剖面

心墙应力水平等值线图,见图 11. 竣工期,最大应力水平位于河谷处心墙中下部. 满蓄期,受浮托力影响,心墙竖向应力降低,而心墙顺河向应力变化较小,使河谷处心墙中部应力水平大幅降低. 坝肩处、顶部及底部心墙应力状态复杂,满蓄期时,这些部位单元的主应力方向会发生偏转,造成应力水平增大. 表 4 为不同坝高的心墙应力水平极值表. 可以看出,随着坝高的增加,心墙的应力水平极值增大,且满蓄期相对竣工期增幅变大.

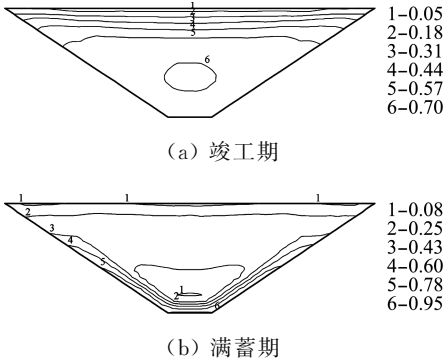


图 11 坝轴向剖面心墙应力水平分布图(坝高:200 m)

Fig. 11 The distribution of stress level of the core along the cross section of the dam axis (dam height:200 m)

表 4 不同坝高的心墙应力水平极值

Tab. 4 Maximum stress level of the core with different dam heights

坝高/m	应力水平极值		
	竣工期	满蓄期	增幅/%
100	0.58	0.70	20.7
150	0.65	0.85	30.8
200	0.70	0.95	35.7

2.2 动剪应变计算结果与分析

不同工况下的心墙最大动剪应变分布规律基本一致,河谷处心墙顶部区域的最大动剪应变极值均较大. 图 12 为典型工况下的坝轴向剖面心墙最大动剪应变分布图.

当最大坝高增大(相应的工况为 1、2 和 3)时,心墙的最大动剪应变极值变化不大,但最大动剪应变极值位置更靠近坝顶,这是因为坝越高坝顶部甩动越明显.

试验条件对沥青混凝土的动力参数影响较大. 为分析沥青混凝土动力参数对心墙动力反应

的影响,沥青混凝土的动剪切模量系数分别取 979.4、1 979.4 和 2 979.4(相应的工况为 4、3 和 5). 随着沥青混凝土动剪切模量系数的增大,心墙动刚度增大,心墙的最大动剪应变极值减小,同时岸坡处心墙动力反应增强,动剪应变增大.

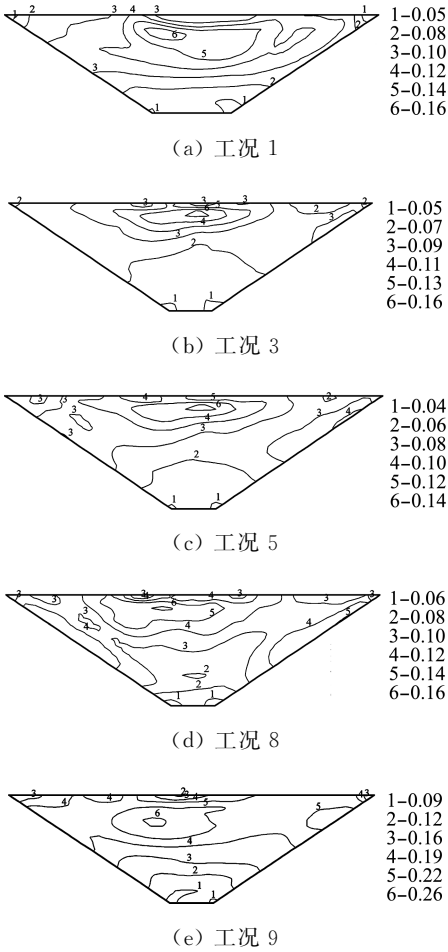


图 12 坝轴向剖面心墙最大动剪应变分布(单位:%)

Fig. 12 The distribution of maximum dynamic shear strain of the core along the cross section of the dam axis (unit: %)

为了分析加速度峰值的影响,采用规范谱地震波,地震加速度峰值分别为 0.2g、0.3g、0.4g 和 0.5g(相应的工况为 6、7、3 和 8). 随着地震动峰值加速度增大,心墙动力反应增强,心墙顶部的最大动剪应变极值增大;当地震动峰值为 0.5g 时,最大动剪应变极值与 0.4g 时相差较小,但心墙岸坡处动剪应变较大.

对同一个心墙坝而言,其自振频率一定,而地震波具有随机性,即使峰值加速度一定,频谱特性

也不尽相同,因此心墙的反应是不同的.为研究地震波变化对心墙动力反应的影响,分别采用规范谱人工波、两河口,以及糯扎渡场地谱地震波(相应的工况为3、9和10)进行动力分析.从图中可以看出,不同地震波对最大动剪应变的分布规律影响不大,但最大动剪应变极值差别较大.

3 结 论

(1)沥青混凝土心墙的变形主要受堆石控制,满蓄期,坝肩处心墙应力水平较高,应给予重点关注.坝增高,心墙顶部向上的竖向位移增大,心墙底部的竖向应力降幅增大,坝肩处心墙应力水平峰值增大,心墙将处于更不利的应力与变形状态.

(2)地震时最大动剪应变发生在河谷中部的心墙顶部区域,但其极值不大.在加速度峰值为0.5g的规范谱人工波激励下,最大动剪应变极值约为0.2%;当采用加速度峰值为0.4g的两河口地震波激励时,最大动剪应变极值约为0.3%.因此可以认为,对水工沥青混凝土进行室内试验时,最大动剪应变达到0.5%即可满足工程要求.

(3)沥青混凝土心墙在静力和动力状态下,顶部区域的变形和动剪应变均处于相对不利状态.因此,设计时应引起注意.

本文研究中,假设模型均坐落在基岩上,深厚覆盖层上的沥青混凝土心墙坝有待于进一步研究.

参考文献:

- [1] WANG Wei-biao, Hoeg K. The asphalt core embankment dam: a very competitive alternative [C] // **Modern Rockfill Dams — 2009**. Beijing: China Water Power Press, 2009.
- [2] Hoeg K. **Asphaltic Concrete Cores for Embankment Dams** [M]. Norway:Stikka Press, 1993.
- [3] ICOLD. Bituminous cores for earth and rockfill dam [Z]. Germany: International Commission on Large Dam, 1982.
- [4] ICOLD. Bituminous cores for fill dams-state of art [Z]. Paris: International Commission on Large Dams, 1992.
- [5] 杨泽艳,周建平,蒋国澄,等. 中国混凝土面板堆石坝的发展[J]. 水力发电, 2011, **37**(2):18-23.
YANG Ze-yan, ZHOU Jian-ping, JIANG Guo-cheng, *et al.* Development of CFRD in China [J]. **Water Power**, 2011, **37**(2):18-23. (in Chinese)
- [6] 张丙印,李全明,熊 焰,等. 三峡茅坪溪沥青混凝土心墙堆石坝应力变形分析[J]. 长江科学院院报, 2004, **21**(2):18-21.
ZHANG Bing-yin, LI Quan-ming, XIONG Yan, *et al.* Numerical study on Maopingxi rockfill dam with asphalt concrete core in the Three Gorges Project [J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2004, **21**(2): 18-21. (in Chinese)
- [7] 李同春,刘晓青,夏颂佑,等. 冶勒堆石坝沥青混凝土心墙型式及尺寸研究[J]. 河海大学学报, 2000, **28**(2):109-112.
LI Tong-chun, LIU Xiao-qing, XIA Song-you, *et al.* Study on asphalt concrete core type and size of Yele rockfill dam [J]. **Journal of Hohai University**, 2000, **28**(2):109-112. (in Chinese)
- [8] Feizi-Khankandi S, Fhalandarzadeh A, Mirghasemi A A, *et al.* Seismic analysis of the Garmrood embankment dam with asphalt concrete core [J]. **Soils and Foundations**, 2009, **49**(2):153-166.
- [9] 邓传贵,沈振中,凌春海. 高沥青混凝土心墙坝动力反应特性[J]. 南水北调与水利科技, 2012, **10**(5): 147-152.
DENG Chuan-gui, SHEN Zhen-zhong, LING Chun-hai. Analysis of dynamic response characteristics for core rockfill dam with high asphalt concrete [J]. **South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology**, 2012, **10**(5):147-152. (in Chinese)
- [10] 刘武军,陈尧隆,司 政,等. 沥青混凝土心墙坝三维有限元动力分析[J]. 水资源与水工程学报, 2009, **20**(6):152-156.
LIU Wu-jun, CHEN Yao-long, SI Zheng, *et al.* 3-D finite element dynamic analysis of asphalt concrete core dam [J]. **Journal of Water Resources & Engineering**, 2009, **20**(6):152-156. (in Chinese)
- [11] 朱 晟. 沥青混凝土心墙堆石坝三维地震反应分析[J]. 岩土力学, 2008, **29**(11):2933-2938.
ZHU Sheng. 3-D seismic response analysis of rockfill dam with asphalt concrete core [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, **29**(11):2933-2938. (in Chinese)
- [12] Baziari M H, Salemi S, Heidari T. Analysis of earthquake response of an asphalt concrete core embankment dam [J]. **International Journal of Civil**

- Engineering**, 2006, **4**(3):192-211.
- [13] 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.
- GU Gan-chen, SHEN Chang-song, CEN Wei-jun. **Earthquake Engineering for Earthrock Dam** [M]. Beijing: China Water Power Press, 2009. (in Chinese)
- [14] WANG Wei-biao, Hoeg K. Cyclic behavior of asphalt concrete used as impervious core in embankment dams [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2011, **137**(5):536-544.
- [15] Feizi-Khankandi S, Fhalandarzadeh A, Mirghasemi A A, *et al.* Cyclic triaxial tests on asphalt concrete as a water barrier for embankment dams [J]. **Soil and Foundations**, 2008, **48**(3):319-332.
- [16] 邹德高, 孔宪京, 徐斌. GEOtechnical DYnamic Nonlinear Analysis —GEODYNA 使用说明[R]. 大连: 大连理工大学工程抗震研究所, 2008.
- ZOU De-gao, KONG Xian-jing, XU Bin. GEOtechnical DYnamic Nonlinear Analysis —GEODYNA user manual [R]. Dalian: The Earthquake Engineering Research Institute, Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [17] Duncan J M, Chang Chin-yung. Nonlinear analysis of stress and strain in soils [J]. **Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE**, 1970, **96**(5):1629-1653.
- [18] 孔宪京, 娄树莲, 邹德高, 等. 筑坝堆石料的等效剪切模量与等效阻尼比[J]. 水利学报, 2001(8): 20-25.
- KONG Xian-jing, LOU Shu-lian, ZOU De-gao, *et al.* The equivalent dynamic shear modulus and equivalent damping ratio of the rockfill for dam [J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2001(8): 20-25. (in Chinese)
- [19] 郇能惠, 孙大伟, 李登华, 等. 300 m 级超高面板堆石坝变形规律的研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(2):155-160.
- LI Neng-hui, SUN Da-wei, LI Deng-hua, *et al.* Deformation behavior of 300 m high-concrete face rockfill dams [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, **31**(2):155-160. (in Chinese)
- [20] 西安理工大学. 新疆五一水库试验结论[R]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- Xi'an University of Technology. Test conclusion of Xinjiang Wuyi Reservoir [R]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)

3D FE static and dynamic analysis of rockfill dam with asphalt concrete core

KONG Xian-jing^{*1,2}, YU Xiang², ZOU De-gao^{1,2}, ZHOU Yang²

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the static and dynamic characteristics of homogeneous rockfill dams with asphalt concrete core, the nonlinear three-dimensional finite element method was employed. Filling and storing processes of the dam were simulated, and the dynamic response of the dam was also got considering the influences of height of the dam, dynamic shear modulus, peak acceleration and seismic waves on the maximum dynamic shear strain of the core. The distribution of the stress, deformation and dynamic shear strain of the core were summed up. The results show that the top, bottom and abutment regions of the core should be paid more attention to and high core will be under more unfavorable conditions in static state, especially in full storage period. Under the action of earthquake, the dynamic shear strain at the top of core of central valley is the largest, but the value is small, less than 0.5%.

Key words: rockfill dam with asphalt concrete core; 3D FE; static and dynamic analysis; dynamic shear strain