

地震作用下复合土工膜心墙堆石坝应力变形分析

姚天宝¹, 丁冬彦², 任建民¹

(1. 兰州交通大学, 兰州 730070; 2. 兰州有色冶金设计研究院有限公司, 兰州 730000)

摘要: 复合土工膜心墙堆石坝是为了防止堆石坝渗流和应力变形问题而设计的一种新型坝体。以白龙江某复合土工膜心墙堆石坝为例, 建立三维有限元模型, 并利用 MIDAS/GTS 大型岩土分析软件, 对正常蓄水区、正常蓄水区加 8 度地震烈度和无膜情况三种工况下坝体和复合土工膜心墙的应力变形进行了模拟, 分析了地震作用下复合土工膜对坝体应力变形的影响。比较发现, 复合土工膜在很大程度上抑制了坝体的应力变形。

关键词: 复合土工膜; 堆石坝; MIDAS/GTS; 有限元; 非线性; 应力应变

中图分类号: TV 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672 1683(2015) 01-0127-05

Stress deformation analysis of composite geomembrane wall rock fill dam under earthquake

YAO Tiar bao¹, DING Dong yan², REN Jian min¹

(1. Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Lanzhou Engineering & Research Institute Metallurgy Co. Ltd, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Geomembrane wall rock fill dam is a new rock fill dam to prevent the seepage and stress deformation. A three dimensional finite element model was developed for a composite geomembrane wall rock fill dam in Bailongjiang. The large geotechnical analysis software MIDAS/GTS was used to simulate the stress deformation of the composite geomembrane wall rock fill dam under three working conditions, including the normal storage period, normal storage period with 8 degree earthquake, and normal storage period with 8 degree earthquake but without membrane. The effects of composite geomembrane on the stress deformation of the rock fill dam were analyzed under earthquake. The results showed that the composite geomembrane restrains the stress deformation of the rock fill dam.

Key words: composite geomembrane; rock fill dam; MIDAS/GTS; finite element; nonlinear; stress deformation

20 世纪以来, 世界各地发生过很多次大规模的地震, 每一次地震都有土石坝发生不同程度地破坏, 甚至有溃坝事故发生^[1-5]。因此, 对于地震区土石坝, 应当采用合理的分析方法, 进行必要的抗震安全验算和抗震设计^[6], 以预防或抵抗发生地震时可能发生的损害或破坏。近年来, 复合土工膜因其具有更高的力学强度和变形模量, 适应变形能力强等优点^[7], 在低坝中有一定的应用, 但是关于复合土工膜对大坝应力变形的影响问题, 研究并不是很多。本文以甘肃白龙江某水电站为例, 揭示复合土工膜心墙在地震力作用下的应力变形规律。

上水梯级开发规划的第 15 级电站, 工程规模为三等中型工程, 地震设防烈度为 8 度, 设计时取对应的峰值加速度平均值为 0.7g。水库正常蓄水位 891.50 m, 坝顶高程 895.00 m, 最大坝高 18.5 m, 坝顶宽 6 m。土石坝坝体防渗墙为复合土工膜与过渡料组成防渗心墙, 基础为 30 m 混凝土防渗墙结构。坝体典型断面见图 1。

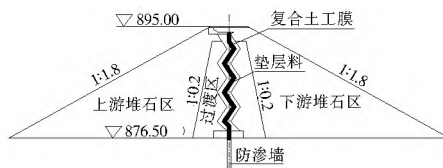


图 1 坝体典型断面

Fig. 1 The typical dam section

1 材料参数及有限元计算模型

1.1 基本资料

白龙江某水电站位于甘肃省陇南市境内, 是白龙江干流

收稿日期: 2014-06-06 修回日期: 2014-11-11 网络出版时间: 2014-12-03
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1343.016.html>
基金项目: 长江学者和创新团队发展计划(IRT 1139)
作者简介: 姚天宝(1988-), 男, 甘肃秦安人, 主要从事水工结构方面研究。E-mail: 1042380817@qq.com

1.2 材料参数

复合土工膜心墙结构包括垫层和复合土工膜,复合土工膜由“二布一膜”组成,即两层土工织物和一层土工膜,位于上、下

垫层之间。复合土工膜的性能指标应达到表 1 要求^[11]。

根据断面设计,坝体的具体分区材料的模型参数见表 2-表 4 所示^[6,10]。

表 1 复合土工膜性能指标

Tab. 1 Geomembrane performance indexes

参数名称	单位质量 / (g · m ⁻²)	垂直渗透系数 / (cm · s ⁻¹)	厚度 / mm	断裂强力 / (kN · m ⁻¹)	CBR 顶破强力 / kN	撕破强力 / kN	耐静水压 / MPa	断裂伸长率 (%)	剥离强度 / (N · cm ⁻¹)
参数值	800	≤8 × 10 ⁻¹¹	0.5	≥14	≥2.5	≥0.48	≥1.0	> 50	> 6

表 2 非线性材料参数

Tab. 2 Nonlinear material parameters

参数	$\gamma_d / (g \cdot cm^{-3})$	ν	c	$\varphi(^{\circ})$	R_f	K	n	K_b	m	K_{cr}	F_i
基岩	2.2	0.17	2000	48	0.79	29700	0.4	15000	0.2	29700	36
山体	2.15	0.3	16	40	0.75	8000	0.3	4000	0.25	6500	38
堆石区	2.1	0.3	14	50	0.78	1500	0.25	600	0.2	2450	39.4
过渡区	2.0	0.3	11	51	0.76	1000	0.2	400	0.15	2100	36.5
垫层区	1.9	0.3	17	56	0.76	1000	0.4	500	0.15	2200	36
反滤层	1.8	0.3	18	51	0.72	1000	0.2	400	0.2	2700	34.6

注: γ_d 为材料的容重; c 、 φ 为土的黏聚力与内摩擦角; $\Delta\varphi$ 为土的内摩擦角变化值; K_b 为体积模量系数; K 为弹性模量系数; R_f 为破坏比; n 为弹性模量指数; m 为体积模量指数。

表 3 弹性材料参数

Tab. 3 Elastic material parameters

参数	E	ν	γ
防渗墙	2.25e7	0.167	24.5
土工膜	1.25e7	0.25	20

表 4 接触材料参数

Tab. 4 Contact material parameters

参数	K_n	K_t	C	φ	R_f	n
土工膜-防渗墙	99 900 000	2 400	/	36	0.86	0.34
土工膜-垫层	99 900 000	3 200	/	27	0.7	0.42

模型假定如下。

(1) 假定山体、地基、河道等对心墙的影响不是很大,仅取坝体模型进行有限元分析,总单元数为 192 282 个,其中土工膜单元数为 7 076 个,三维坝体有限元计算模型见图 3。边界条件中沿坝轴线方向的两侧限制 X 和 Y 方向的位移^[4],模型最底端限制三个方向的位移,其余均为自由面。

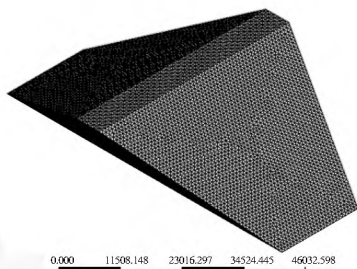


图 3 三维坝体有限元计算模型

Fig. 3 Three-dimensional finite element model of the dam

(2) 本文用空间实体单元模拟堆石坝的筑坝材料;用土工栅格单元模拟复合土工膜心墙;用接触单元模拟复合土工膜与垫层及混凝土垫座之间的接触关系^[4+15]。

1.3 有限元计算模型

计算模型中,将地基按刚性考虑,同时考虑到坝基变形对坝体应力及变形的影响^[12]。模型范围为:坝体上游延伸 100 m,下游延伸 150 m,坝肩向左、向右各延伸 50 m,地基向下延伸为覆盖层的平均厚度 40 m。计算坐标采用笛卡尔坐标系,原点为地基与坝中线的交点; X 轴方向为水流方向,顺流为正向; Y 轴方向为垂直方向,朝上为正向; Z 轴顺着坝轴线,正向为沿坝轴方向从右到左。建立的三维几何模型见图 2。

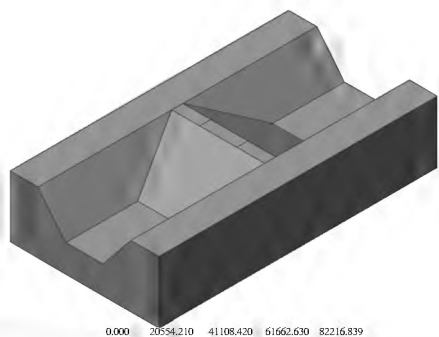


图 2 三维几何模型

Fig. 2 Three-dimensional geometric model

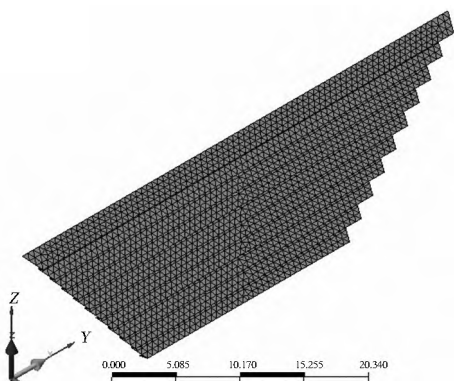


图 4 复合土工膜土工栅格单元

Fig. 4 Geotextile grid element of the composite geomembrane

(3) 选用非线性弹性模型邓肯-张 E-B 模型模拟筑坝材料的本构关系^[11,15];采用线弹性材料模型模拟复合土工膜心墙、混凝土垫座及混凝土防渗墙。复合土工膜心墙有限元模型见图 4。

2 几种工况的有限元计算结果与分析

2.1 正常蓄水期坝体的应力变形分析

正常蓄水期只在上游坝坡施加水压力荷载,不考虑初期

自重的影响。正常蓄水期坝体的应力分布和位移的模拟结果见图 5、图 6。由图可以看出:蓄水后,坝体大主应力既有拉又有压应力,正常蓄水位以下表现为受压,而水位以上表现为受拉;小主应力表现为压应力,最大值在上游坝坡底部;坝体的变形从沉降变形转化为水平移动,水位以下,坝体向下游移动,最大值在水位以下距离坝底 1/3 的大范围区;而水位以上坝体向上游移动,最大值在上游坝顶部位,竖向最大位移在上游坝面水压力作用面上。

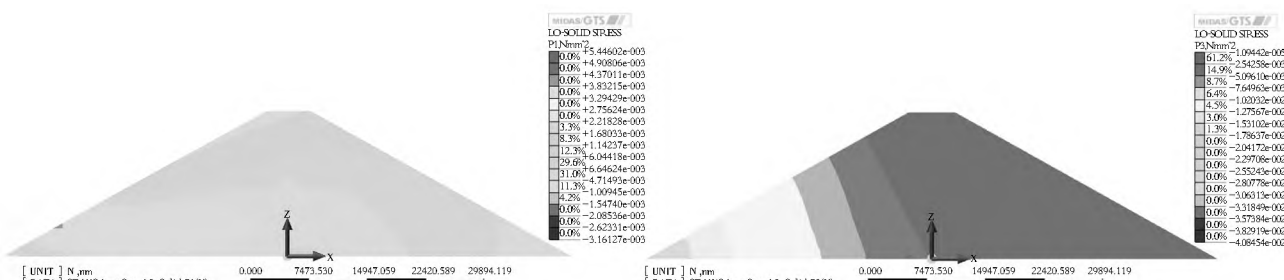


图 5 正常蓄水期坝体大、小主应力云图

Fig. 5 Major and minor principal stresses of the dam under normal storage conditions

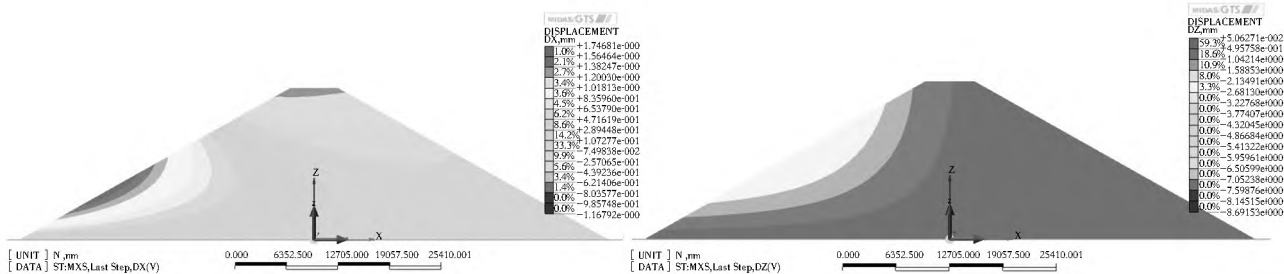


图 6 正常蓄水期坝体水平、竖直位移云图

Fig. 6 Horizontal and vertical displacements of the dam under normal storage conditions

2.2 正常蓄水期复合土工膜心墙的应力变形分析

经模拟计算,正常蓄水期复合土工膜的应力分布和位移云图的模拟结果见图 7、图 8,由图看出:正常蓄水后,复合土工膜只受水压力作用的影响;大主应力在正常蓄水位以下受压,而在水位以上受拉,小主应力仍然全部表现为受压状态;在水压力作用下复合土工膜向下游移动,而水位以上复合土工膜反而向上游移动;最大竖向位移出现在复合土工膜顶端与两岸山体接触的位置。

2.3 正常蓄水期加 8 度地震烈度下坝体的应力变形分析

该工况考虑了地震作用、自重和正常蓄水情况下上游水压力的作用。在正常蓄水期加 8 度地震烈度的条件下,

坝体的应力分布与位移的模拟结果见图 9、图 10。由图看出:在总地震效应作用下,坝体的大、小主应力都很小;大主应力主要发生在坝体的主、次堆石区范围内,整个坝体只受拉应力,其最大值出现在坝底坝轴线位置附近;小主应力既受拉又受压,受拉区范围很小,仅在坝体上、下游坝坡处出现拉应力状态,其余范围都是受压区,最大压应力出现在坝体底部心墙位置附近;坝体位移云图中不再有向上游移动的区域,即坝体整体移向下游,且受自重作用的影响非常明显,最大水平位移出现在坝顶;竖向位移最大值沿坝轴线对称出现在上、下游坝坡的接近坝顶区域内,而且坝体发生整体上抬现象。

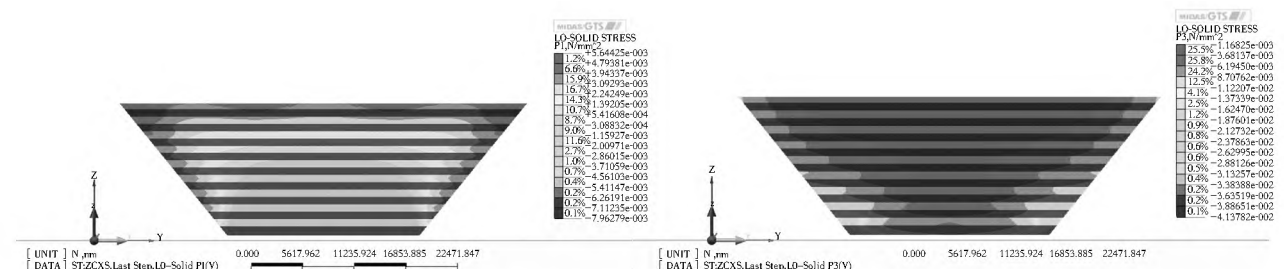


图 7 正常蓄水期复合土工膜大、小主应力云图

Fig. 7 Major and minor principal stresses of the composite geomembrane under normal storage conditions

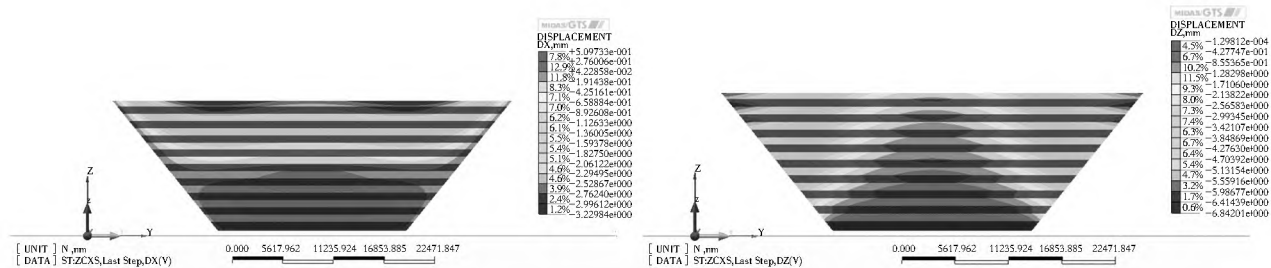


图 8 正常蓄水期复合土工膜水平、竖直位移云图

Fig. 8 Horizontal and vertical displacements of the composite geomembrane under normal storage conditions

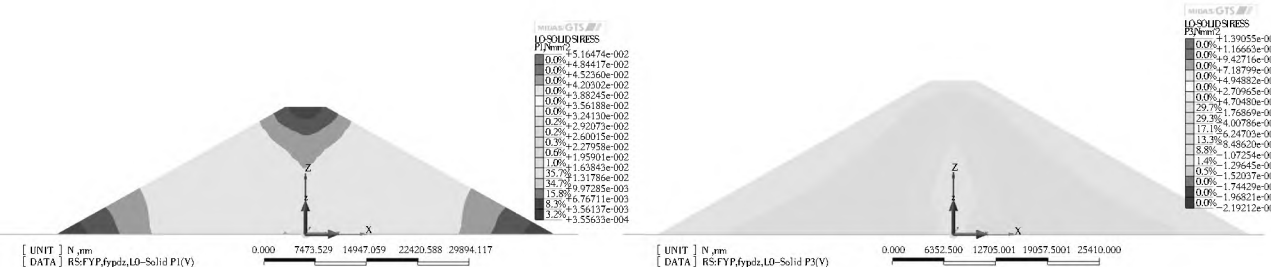


图 9 正常蓄水期加 8 度地震坝体大、小主应力云图

Fig. 9 Major and minor principal stresses of the dam under normal storage conditions with 8 degree earthquake

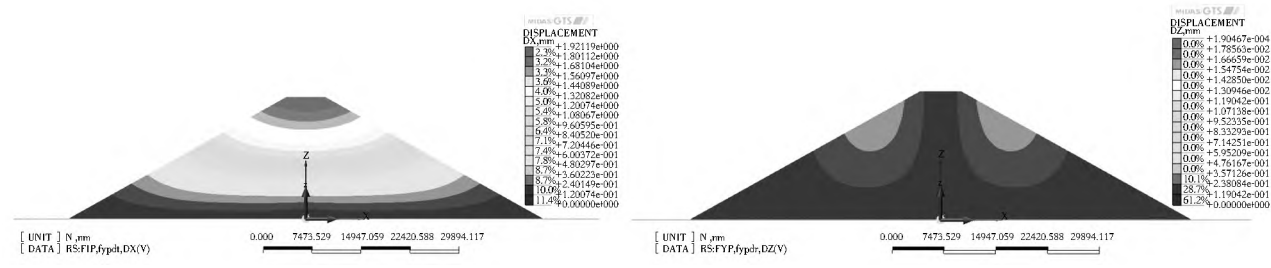


图 10 正常蓄水期加 8 度地震坝体水平和竖直位移云图

Fig. 10 Horizontal and vertical displacements of the dam under normal storage conditions with 8 degree earthquake

2.4 正常蓄水期加 8 度地震复合土工膜应力变形分析

该工况考虑了地震波、自重以及水压力的共同作用,模拟结果见图 11、图 12。由图看出:在总地震效应作用下,复合土工膜的大主应力仍然只受拉应力,且拉应力最大值在复合土工膜顶部与两岸山体连接的位置;小主应力既受拉又受压,受

拉区只出现在复合土工膜底端与两岸山体接触的部位且范围很小,其余范围都是受压区,最大压应力值在复合土工膜顶端与山体接触的位置;复合土工膜依附于坝体及自重作用,也整体向下游移动,最大水平位移出现在复合土工膜的顶部中间位置;受坝体竖向位移的影响,复合土工膜也是整体上移,最大竖向位移出现在复合土工膜顶部接近两岸山体位置。

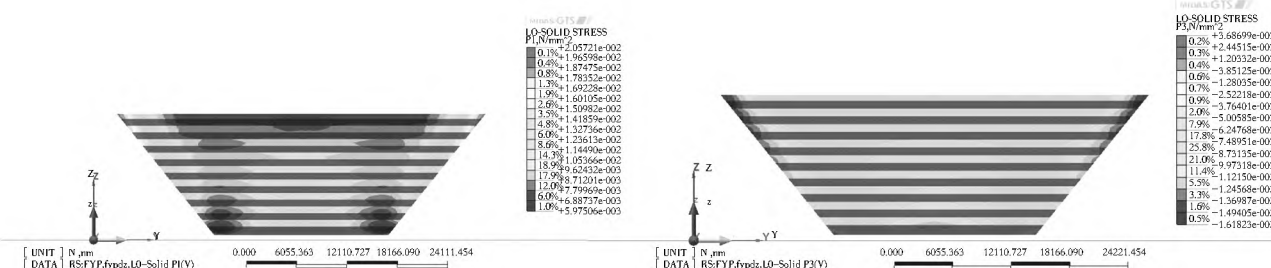


图 11 正常蓄水期加 8 度地震复合土工膜大、小主应力云图

Fig. 11 Major and minor principal stresses of the composite geomembrane under normal storage conditions with 8 degree earthquake

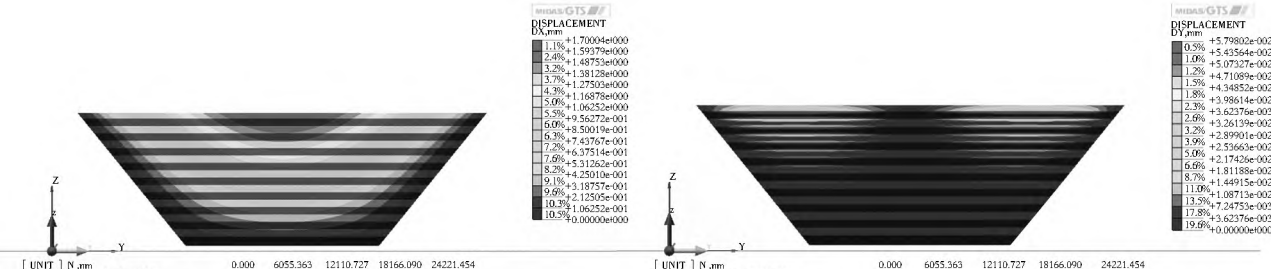


图 12 正常蓄水期加 8 度地震复合土工膜水平、竖直位移云图

Fig. 12 Horizontal and vertical displacements of the composite geomembrane under normal storage conditions with 8 degree earthquake

2.5 无膜加8度地震情况下坝体的应力变形分析

为了分析复合土工膜对坝体应力变形规律的影响,本文对无膜加8度地震情况下坝体在正常蓄水期加的大主应力、小主应力、水平位移、竖向位移进行了分析,并分别得出了对

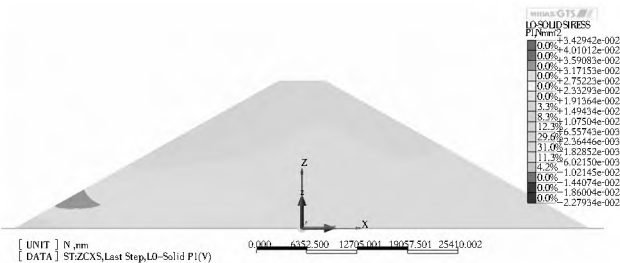


图 13 无膜加8度地震情况下正常蓄水期坝体大、小主应力等云图

Fig. 13 Major and minor principal stresses of the dam under normal storage conditions with 8 degree earthquake but without membrane

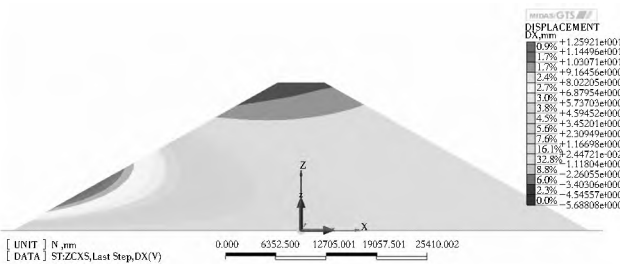
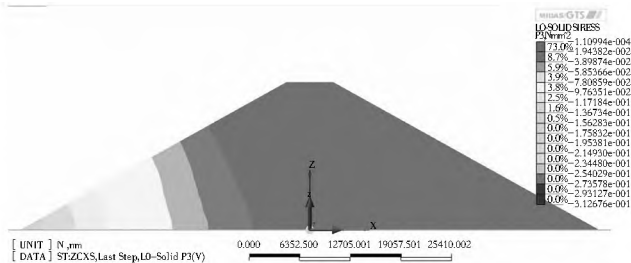


图 14 无膜加8度地震正常蓄水期坝体水平、竖直位移云图

Fig. 14 Horizontal and vertical displacements of the dam under normal storage conditions with 8 degree earthquake but without membrane

应的坝体云图,见图 13、图 14。

由图可以看出:无膜情况下,坝体的应力变形情况与有复合土工膜时的极为相似,但其大、小主应力最大拉、压应力要比有膜时大很多;水平、竖直位移变形也大。



3 结论

(1) 正常蓄水期,由于在水压力作用下,应力和变形都呈不对称分布,基本发生在作用面附近。坝体和复合土工膜在水位以上部位向上游移动表现为拉应力,水位以下依然受压,且向下游移动。坝底大主应力出现了局部受拉,复合土工膜在与坝基或山体连接的部位出现了局部受拉,坝体和复合土工膜小主应力仍然受压。

(2) 加8度地震作用后,在地震作用下拉应力区范围扩大,坝体拉应力主要分布在堆石区主要部位,复合土工膜依然出现在与相邻构件连接的部位,变形在水平方向坝体连同心墙整体移向下游,而垂直方向都出现了上抬现象。

(3) 正常蓄水期及加8度地震作用后,坝体和复合土工膜都从初始的受压状态依次出现了拉应力,受外界荷载的干扰越大,受拉区的范围越大,且拉应力越大。复合土工膜在连接部位出现了明显的应力集中现象;变形由最初的整体沉降变形转化为局部水平和整体水平及上抬现象,且膜的变形主要依附于坝体的变形。与无膜情况相比,复合土工膜在很大程度上抑制了坝体的应力和变形,不仅起到防渗作用,而且对坝体的应力变形有很大的改善。

(4) 复合土工膜端部出现应力集中的现象在工程中经常遇到,固定复合土工膜的端部使其能满足工程的需要,而又使其端部不至于产生过大的集中应力,需要进一步的研究。

由此可见,复合土工膜在坝体中不仅起到防渗作用,还能够抑制对地震力作用下坝体和心墙应力变形,从而保证了堆石坝的安全稳定。

参考文献(References):

- [1] 岑威钧,沈长松,李星,等.堤坝中防渗(复合)土工膜的布置型式及计算理论研究[J]. 2004. (CEN Weijun, SHEN Changsong, LI Xing, et al. Study on layout pattern and computation theory of impervious (composite) geomembrane in dike and Dam [J]. 2004. (in Chinese))
- [2] GIROUD J P, MOREL N, BEECH J F. Stability of geosynthetics on slopes [M]. To published in Geotextiles and Geomembranes, 1991: 165-172.
- [3] 尚层,李玉建,徐千军,等.复合土工膜不同锚固型式对膜应力变形的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(10): 72-75. (SHANG Ceng, LI Yurjian, XU Qiannun, et al. Different anchorage types of composite geomembrane effect on stress deformation of geomembrane [J]. China Rural Water and Hydro-power, 2012(10): 72-75. (in Chinese))
- [4] 杜善义,王彪. 复合材料细观力学[M]. 北京: 科学出版社, 1998. (DU Shan yi, WU Biao. Composite micromechanics [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese))
- [5] 柳青祥,罗碧玉. 复合土工膜在大坝工程应用中的力学计算探究[J]. 水利与建筑工程学报, 2003(3): 43-46. (LIU Qingxiang, LUO Biyu. Study of mechanics calculating of composite geomembrane applying in dam engineering [J]. Water and Architectural Engineering, 2003(3): 43-46. (in Chinese))
- [6] DL 507322000, 水工建筑物抗震设计规范[S]. (DL 507322000, Seismic Design of Hydraulic Structures [S]. (in Chinese))

(下转第 144 页)

- 港口, 2006, 27(5): 338-340. (ZHAO Changwei. Application of large p acks in enclosure construction of Tianjin Port[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2006, 27(5): 338-340. (in Chinese))
- [8] 周辉, 方大勇, 李川, 等. 大型土工织物充填袋筑堤时软土地基变形速率的控制[J]. 广东水利水电, 2004, 4(2): 20-21. (ZHOU Hui, FANG Dayong, LI Chuan, et al. Control of soft soil foundation deformation rate while the embankment built by large geotextile bags[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2004, 4(2): 20-21. (in Chinese))
- [9] 孙丽, 吴晶. 滩涂圈围工程充泥管袋筑堤监测及变形分析[J]. 上海水务, 2006, 22(4): 40-42. (SUN Li, WU Jing. Monitoring and deformation analysis of the embankment built by slurry filling tube[J]. Shanghai Water, 2006, 22(4): 40-42. (in Chinese))
- [10] Liu G S, Silvester R. Sand sausages for beach defense work [A]. Proceedings of 6th Australian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics[C]. Adelaide, Australia, 1977: 340-343.
- [11] Shin Eun Chul, Young In Oh. Consolidation process of geotextile tube filled with fine grained materials[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2004, 14(2): 150-158.
- [12] 张文斌. 土工织物充填管状袋制作、堆积中的若干问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006. (ZHANG Wenbin. Researches on the geotextile tubes during the stage of manufacturing and stacking[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006. (in Chinese))
- [13] 闫玥, 闫澍旺, 邱长林, 等. 土工织物充灌袋的设计计算方法研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 327-330. (YAN Yue, YAN Shurwan, QIU Changlin, et al. Design and calculation methods of geotextile tubes filled with soil slurry[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(1): 327-330. (in Chinese))
- [14] 付海峰. 模袋固化土海上围埝建造方法及理论研究[D]. 天津: 天津大学, 2006. (in Chinese)
- [15] Leshchinsky Dov, Leshchinsky Ora, Ling H I, et al. Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(8): 682-690.
- (上接第 131 页)
- [7] 顾淦臣. 复合土工膜或土工膜堤坝的实例评述(续)[J]. 水利规划设计, 2011(3): 65-68. (GU Ganchen. Dynamic test and modal parameter identification of fuziling multi arch dam [J]. Water Resources Planning and Design, 2011(3): 65-68. (in Chinese))
- [8] Gross B A, Bonaparte R, Grioud J P. Evaluation of flow from landfill leakage detection layers[C]. Proceeding of the fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, The Hague, The Netherlands, 1990(2): 481-486.
- [9] 吴英杰, 申向东, 张文怡. 哈拉沁水库土石坝静动力分析[J]. 水力发电, 2008(5): 38-40. (WU Yingjing, SHEN Xiangdong, Zhang Wenyi. Static and Dynamic Analysis for the Earth rockfill Dam in Halaqin Reservoir[J]. Journal of hydroelectric power, 2008(5): 38-40. (in Chinese))
- [10] Grossmann, S F Sanger. Experience with thermoplastic waterproofing systems in dam construction in the German Democratic republic[C]. Proceedings of the 16th Congress on Large Dams, San Francisco, USA, 1988, 15(61): 251-261.
- [11] 顾淦臣, 沈长松, 朱展, 等. 塘房庙复合土工膜心墙堆石坝的设计、施工和应力应变有限元分析[J]. 水力发电学报, 2009, 23(1): 21-26. (GU Ganchen, SHEN Changsong, ZHU Zhan, et al. Design & construction and stress strain analysis by FEM for Tangfangmiao Rockfill Dam with composite geomembrane core[J]. Journal of hydroelectric power, 2009, 23(1): 21-26. (in Chinese))
- [12] 岑威钧, 沈长松, 童建文. 复合土工膜防渗堆石坝力学特性有限元分析[J]. 水电能源科学, 2008. (CEN Weijun, SHEN Changsong, TONG Jianwen. Anomaly analysis and treatment of hydro power generator switchgear[J]. Water Power Resources and science, 2008. (in Chinese))
- [13] 陈俊喜, 赵鹏飞, 郝明. 德日苏宝冷水库土工膜心墙堆石坝设计[J]. 东北水利水电, 2012(5). (CHEN Junxi, ZHAO Pengfei, HAO Ming. Teilhard de Su Bao cold reservoir geomembrane rockfill dam design[J]. Northeast Water Resources and Hydropower, 2012(5). (in Chinese))
- [14] 吝江峰. 基于 FLAC^{3D} 的复合土工膜防渗堆石坝三维应力变形研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (LING Jiangfeng. A composite geomembrane rockfill dam based on FLAC^{3D} three dimensional stress and deformation[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [15] 谢红强, 肖明砾, 何江达, 等. 强震区心墙土石坝地震反应三维非线性分析[J]. 水力发电学报, 2009(5): 108-113. (XIE Hongqiang, XIAO Mingli, HE Jiangda, et al. Three dimensional nonlinear analysis of seismic response for core earth rock dam in meizoseismal area[J]. Hydroelectric Engineering Journal, 2009(5): 108-113. (in Chinese))