

# 复合土工膜库盆防渗上水库应力变形性状分析

周奕琦<sup>1</sup>, 沈振中<sup>1</sup>, 王伟<sup>2</sup>, 马秀伟<sup>2</sup>, 彭迪<sup>3</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

2. 中国水电顾问集团 西北勘测设计研究院, 西安 710065; 3. 扬州市城市防洪工程管理处, 江苏 扬州 225000)

**摘要:** 抽水蓄能电站上水库坝体和库盆的变形会影响其防渗结构和效果。某抽水蓄能电站上水库大坝为混凝土面板堆石坝, 库底平台利用复合土工膜防渗。针对该坝体和库盆, 建立三维非线性有限元模型, 模拟坝体和库底回填料的施工填筑过程及水库蓄水过程, 分析了蓄水期坝体、库底回填料和土工膜的变形应力情况, 论证了该库结构设计的合理性。计算结果表明, 蓄水期坝体的位移分布规律性较好, 应力分布合理; 土工膜的安全系数满足规范要求, 选型合理; 土工膜能较好地适应回填料的变形, 不会出现脱空现象; 在库盆中回填料与基岩的分界区, 土工膜的法向位移等值线梯度较大, 拉应力也较大, 需要重点关注。

**关键词:** 抽水蓄能电站; 上水库; 面板堆石坝; 复合土工膜; 应力变形; 非线性有限元法

**中图分类号:** TV314    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2014)02-0160-04

## Deformation and Stress Behavior Analysis of Upper Reservoir with Composite Geomembrane as Impermeable Material

ZHOU Yiqi<sup>1</sup>, SHEN Zhenzhong<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>2</sup>, MA Xiurui<sup>2</sup>, PENG Di<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Hydrochina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China; 3. Management of Yangzhou City Flood Control Project, Yangzhou 225000, China)

**Abstract:** The deformation of dams and reservoir basin of upper reservoir at the pumped storage power station can affect the anti-seepage structure and effects. The dam of upper reservoir at a pumped storage power station is a concrete faced rockfill dam and the impermeable material of reservoir bottom is composite geomembrane. Aiming at the dam and the reservoir basin, the 3D nonlinear finite element model was developed to simulate the filling process of the dam and backfill and the storage process of the reservoir. The deformation and stress of the dam, backfill, and composite geomembrane were analyzed, and the rationality of the structural design was demonstrated. The results showed that the displacement distribution and stress distribution of the dam were reasonable. The option on composite geomembrane was reasonable as the safety factors met standard requirements. The composite geomembrane can adapt to the deformation of the backfill very well without the occurrence of disengaging phenomenon. Emphasis should be put in the dividing area of backfill and bedrock as the gradient of the normal displacement equipotential line of composite geomembrane was large and tensile stress was high.

**Key words:** pumped storage power station; upper reservoir; CFRD; composite geomembrane; stress and deformation; Nonlinear FEM

近几十年来复合土工膜作为一种新型防渗材料在水利水电工程中得到了广泛应用。对于抽水蓄能电站工程而言, 水库防渗问题非常关键, 其上水库常常需要进行全库盆防渗, 由于复合土工膜的防渗效果好, 能适应地基的不均匀沉降, 且施工方便, 节省投资, 因而被应用于抽水蓄能电站上水

库的库盆防渗工程中。如日本 Imaichi 抽水蓄能电站的上水库, 采用土工膜进行库底防渗, 防渗水头达 40 m; 我国的泰安抽水蓄能电站是国内第一个应用土工膜作为库底回填区水平防渗的大型抽水蓄能电站工程, 目前运行状况良好<sup>[1]</sup>。由于这些成功的工程范例, 国内已有更多的抽水蓄能电站工

收稿日期: 2013-09-10    修回日期: 2014-02-14    网络出版时间: 2014-03-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.02.001.html>

基金项目: 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室专项基金(2009586012)

作者简介: 周奕琦(1989), 女, 江苏丹阳人, 硕士研究生, 主要从事水工结构工程方面研究。E-mail: zhyqluckybear@foxmail.com

通讯作者: 沈振中(1968), 男, 江苏吴江人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构工程和岩土工程方面研究。E-mail: zhzhshen@hhu.edu.cn

程在进行全库盆防渗设计时采用复合土工膜。本文针对这种以复合土工膜进行库底防渗的抽水蓄能电站上水库,拟研究其蓄水后坝体及库区结构的应力变形性状的特点。文中采用三维非线性有限元法,建立某抽水蓄能电站工程的上水库三维有限元模型,模拟其混凝土面板堆石坝坝体和库底回填料的分级施工填筑以及水库的蓄水过程,分析坝体和库区的结构以及复合土工膜在蓄水期的变形应力特点,以论证该上水库结构设计的合理性。

## 1 工程概况

某抽水蓄能电站上水库大坝坝型选定为混凝土面板堆石坝,坝顶处的高程是 1 396.00 m,坝顶长 363.00 m,坝轴线处坝高的最大值为 125.90 m;正常蓄水位 1 392 m,死水位为 1 367 m,有效库容 856 万 m<sup>3</sup>;坝顶宽 10.00 m,坝顶上游设 4.20 m 高的“L”型防浪墙,墙顶高程 1 397.20 m,墙底高程 1 393.00 m,高出正常蓄水位 1 m。上游坝坡 1:1.4,下游坝坡 1:1.4,设宽 10.00 m 的“之”字形上坝路和宽 2.0 m 的马道 2 条,综合坡比 1:1.61。坝体材料分区设计共分为 6 个区,分别为垫层区 2A、垫层小区 2B、过渡料区 3A、主堆石料区 3B、下游堆石料区 3C 和下游护坡区 3D。库盆防渗采用混凝土面板+土工膜+垂直帷幕组合防渗,西面及南面的地下水位高于正常蓄水位,不考虑库岸防渗措施,通过沿库底排水廊道设置帷幕灌浆防渗措施,截断此处库水渗向下游的通道。左坝头及东面库岸面板防渗材料均采用钢筋混凝土面板,板厚 0.30 m,面板分缝宽约 16.00 m,库岸板下设置 0.5 m 厚无砂混凝土作为排水层。库底 1 364.00 m 平台采用复合土工膜防渗,通过排水廊道和连接板分别与库岸面板和挡水坝面板相连,土工膜以下库盆采用开挖渣料回填。上水库混凝土面板堆石坝典型剖面图及上水库枢纽平面布置图见图 1 和图 2。

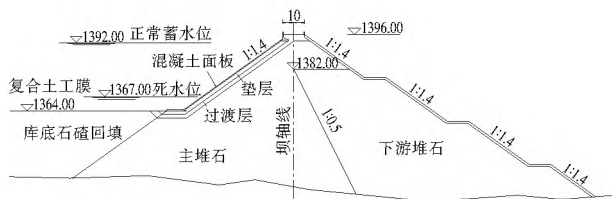


图 1 上水库混凝土面板堆石坝典型剖面示意图

Fig. 1 Typical profile of CFRD of upper reservoir

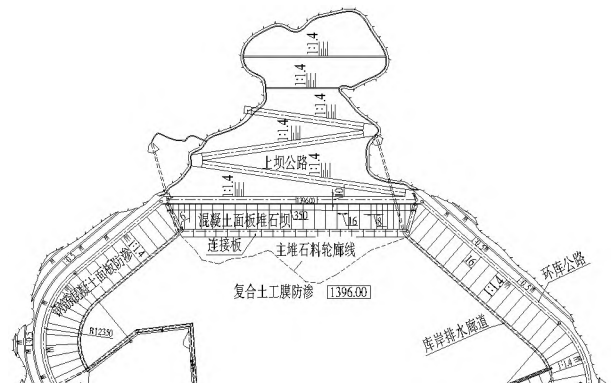


图 2 上水库枢纽平面布置图

Fig. 2 The layout plane of upper reservoir pivot

## 2 材料本构模型及参数

### 2.1 坝体和坝基材料本构模型

坝体堆石料、坝基覆盖层以及库底回填料是非线性材料,应力应变关系呈明显的非线性特性,计算中采用邓肯-张(E-B)模型<sup>[2]</sup>。

混凝土和坝基岩体按线弹性材料考虑,采用 Goodman 模型模拟面板与垫层之间的相互作用<sup>[3-4]</sup>,选取接缝模型模拟周边缝和面板缝<sup>[5-6]</sup>,设计参数见表 1,其他未列出材料的参数按照工程经验参考取值。

表 1 上库混凝土面板堆石坝土石料有限元计算参数 (邓肯-张 E-B 模型)

Table 1 Parameters of material property of CFRD of upper reservoir (Duncan Zhang E-B model)

材料	$\rho$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	$\varphi_0$ (°)	$\Delta\varphi$ (°)	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$
垫层(2A/2B)	2.33	54.7	10.5	1 000	0.27	0.52	400	0.37
过渡料(3A)	2.30	52.0	8.9	1 100	0.28	0.60	300	0.27
主堆石料(3B)	2.24	51.0	9.2	950	0.30	0.67	270	0.24
下游堆石料(3C)	2.19	51.0	9.9	750	0.38	0.60	240	0.15
库底回填料	2.19	51.0	9.9	750	0.38	0.60	240	0.15

### 2.2 复合土工膜受力变形模拟方法

由于复合土工膜厚度远小于土石坝坝体的尺寸,用实体单元进行模拟较困难,故采用有厚度的面单元来模拟<sup>[7]</sup>。复合土工膜不具备抗压和抗弯性能,属于柔性抗拉材料,采用线弹性本构模型<sup>[8]</sup>。考虑到复合土工膜与库底回填料特性相差较大,在土工膜与库底回填料之间加入接触单元。复合土工膜与库岸面板和挡水坝面板相连处处理置在连接板底部,与连接板紧密结合,并预留足够的结合长度,见图 3。

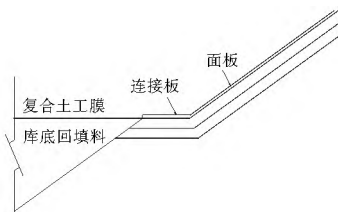


图 3 复合土工膜与连接板锚固

Fig. 3 Anchorage pattern between composite geomembrane and connection slab

## 3 计算模型网格和荷载分级

计算模型的边界范围如下:垂直方向基础取至基岩建基面以下 150 m;包括库底回填料,向其外侧延伸 100 m。计算坐标系规定为:取右坝肩 R 点为坐标原点;X 轴为顺沟谷向,指向下游为正方向;Y 轴为坝轴线向(横沟谷向),由右坝肩指向左坝肩为正方向;Z 轴为垂直向,与实际高程一致。

本工程混凝土面板堆石坝面板的宽度为 16 m,在两岸附近为 8 m。断面根据面板缝的位置和坝体施工填筑分级的需要选定,将整个坝体沿着面板缝平面和水平面进行剖分。由设计方提供的坝体断面图、地质剖面图等资料,可以确定各种材料的分区。坝基和两岸坝肩岩体采用超单元建

立, 再将这些超单元进行剖分。离散后形成有限元网格, 计算模型共有 85 043 个结点, 83 984 个单元。整体计算模型和坝体及库底回填料区的有限元网格见图 4。

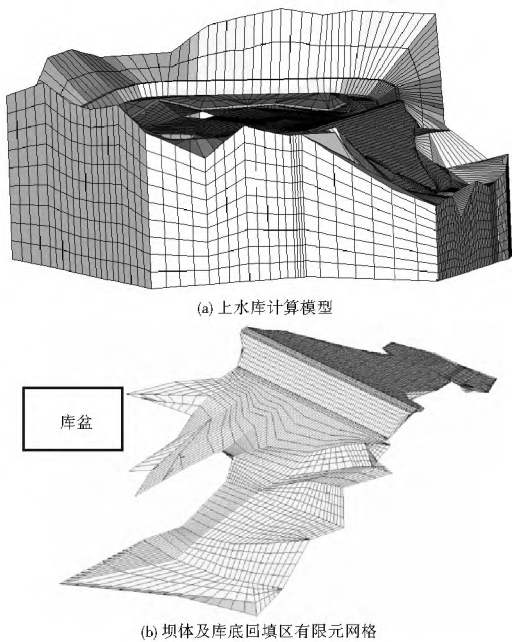


图 4 计算模型有限元网格

Fig. 4 Finite element meshes of calculation model

全部坝体和库区的施工过程分为 35 级, 蓄水过程分为 4 级, 各级填筑荷载和蓄水荷载均一次性加载, 并采用中点增量法, 以模拟加载路径<sup>[9]</sup>。坝体填筑至坝顶后, 再进行混凝土面板的浇筑及在库底回填料上铺设土工膜的工作, 蓄水过程则模拟抽水蓄能电站水库从死水位蓄至正常蓄水位的过程。

## 4 蓄水期计算结果和分析

位移正负号规定为: 顺坐标轴方向为正, 逆坐标轴方向为负。应力正负号规定为: 压应力为正, 拉应力为负。

### 4.1 坝体变形与应力分析

运行期在水压力作用下, 坝体顺沟谷向水平位移整体倾向下游; 蓄水过程中, 坝体位移随蓄水水位的增高而逐渐增加。运行期正常蓄水位下, 坝体顺沟谷向最大水平位移为 217.2 mm, 指向下游, 指向上游的水平位移较小; 坝体坝轴线向位移指向左岸最大值为 62.1 mm, 指向右岸最大值为 -66.5 mm; 坝体的最大垂直位移(沉降)为 -892.3 mm, 约占最大坝高的 0.71%, 发生在坝轴线及 1/2 坝高附近。

运行期正常蓄水位下坝体的最大第一主应力为 1 921.6 kPa, 最大第二主应力为 660.3 kPa, 最大第三主应力为 553.9 kPa。坝体各断面的应力水平均小于 0.80, 坝体内没有出现显著的剪切破坏区, 因此坝体是安全的。

### 4.2 库底回填料沉降分析

在蓄水过程中, 库底回填料沉降随蓄水水位的增高而逐渐增加。沿着沟谷最深处垂直坝轴线的  $y = 96$  m 断面, 以及回填料最深处顺坝轴线的  $x = -150$  断面, 库底回填料的沉降增量分布见图 5。图中,  $X$  轴为顺沟谷向,  $Y$  轴为坝轴线向(横沟谷向),  $Z$  轴为垂直向。

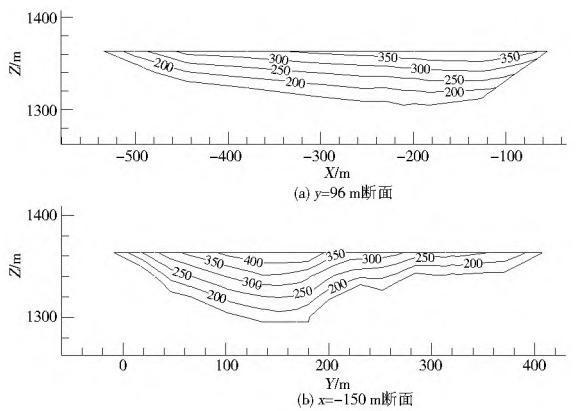


图 5 正常蓄水位库底回填料的沉降增量 (mm)

Fig. 5 Settlement increment of back fill under normal storage water level (mm)

### 4.3 复合土工膜选型及变形应力分析

复合土工膜是在坝体填筑完成后铺设的, 故本文主要考察运行期复合土工膜的变形与应力情况。

土工膜的抗拉能力安全系数计算公式为:

$$K_s = T_{\max} / T_g \quad (6)$$

式中:  $T_{\max}$  为复合土工膜的最大拉力;  $T_g$  为工作拉力。

应变能力的的安全系数计算公式为:

$$K_\epsilon = \epsilon_{\max} / \epsilon_g \quad (7)$$

式中:  $\epsilon_{\max}$  为复合土工膜的最大拉应变;  $\epsilon_g$  为工作应变。

为了保证安全,  $K_s$  和  $K_\epsilon$  应远大于 1.0。根据《水利水电工程土工合成材料应用技术规范》(SL/T 225 98)<sup>[10]</sup>, 土工合成材料的容许抗拉强度为:

$$T_g = \frac{1}{F_{iD} F_{cR} F_{cD} F_{iD}} T_{\max} \quad (8)$$

对于堤坝工程, 一般  $F_{iD} = 1.1 \sim 2.0$ ,  $F_{cR} = 2.0 \sim 3.0$ ,  $F_{cD} = 1.0 \sim 1.5$ ,  $F_{iD} = 1.0 \sim 1.3$ , 则  $K = 2.2 \sim 11.7$ 。研究表明<sup>[11-12]</sup>, 土工膜使用的耐久性与受力情况有关, 降低土工膜的应力水平, 可以延长土工膜的使用寿命; 若控制土工膜的应力水平在 20% 以下时, 使用年限可达 100 年, 而如果  $K < 5$ , 则复合土工膜应重新选择。

从本工程计算结果(表 2)可以看出, 正常蓄水位土工膜的经向和纬向的抗拉能力安全系数及应变安全系数均大于 5.0, 满足规范要求, 复合土工膜的选型是合理的。

表 2 正常蓄水位复合土工膜安全系数计算

Table 2 Safety factors of composite geomembrane under normal storage water level

参数	$T_{\max} / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$T_g / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_s$	$\epsilon_{\max} (\%)$	$\epsilon_g (\%)$	$K_\epsilon$
经向	48.15	3.71	13.0	76.4	12.1	6.3
纬向	47.25	3.43	13.8	77.2	11.9	6.5

由于土工膜水平铺设在库底平台上, 故在水压力作用下顺沟谷向和坝轴线向的位移较小, 法向位移较大。运行期正常蓄水位土工膜的法向位移分布见图 6。可以看出, 土工膜在库区内部周边地区法向位移值几乎为零, 这些位置处没有填筑回填料, 土工膜下仅为基岩。土工膜的法向位移最大沉降为 -436 mm, 发生在主坝深切沟谷断面库底回填区较靠近坝体部分, 此处为库盆最深处, 填筑的土石料最厚, 在水压作

用下沉最大。由此看出土工膜的变形主要是由蓄水后坝体及库区堆石料变形引起的从属变形。

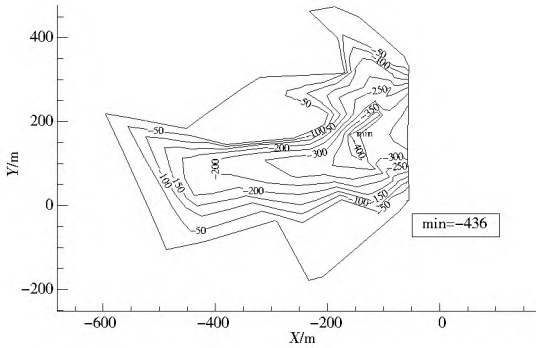


图6 正常蓄水位复合土工膜的法向位移分布 (mm)

Fig. 6 Normal displacement distribution of composite geomembrane under normal storage water level (mm)

沿着沟谷最深处垂直坝轴线的  $y = 96$  m 断面, 以及回填料最深处顺坝轴线的  $x = -150$  断面, 土工膜的法向位移曲线见图 7。结合库底回填料蓄水期的沉降增量图可以看出, 铺设在库底回填料部分的土工膜与回填料的沉降一致, 能较好地适应回填料的变形, 不会出现脱空现象。

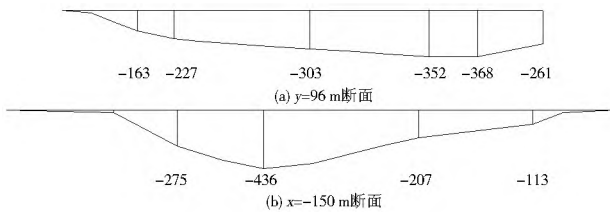


图7 正常蓄水位复合土工膜的法向位移曲线 (mm)

Fig. 7 Normal displacement curves of composite geomembrane under normal storage water level (mm)

第三主应力为引起土工膜屈服的主要因素, 因此需要重点关注。正常蓄水位下土工膜第三主应力分布见图 8。正常蓄水位下土工膜第三主应力的最小值为  $-257$  kPa, 分布在主坝深切沟谷断面库底回填料中部。该部位地形较陡, 是库盆中回填料与基岩的分界区, 由于两者性质相差较大而容易发生不均匀沉降。从土工膜法向位移分布图上也可看出, 此处法向位移等势线梯度较大, 因此土工膜拉应力较大。

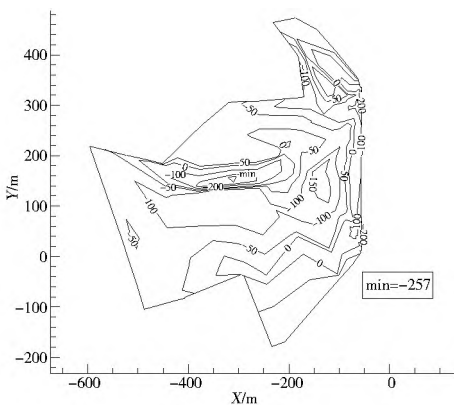


图8 正常蓄水位复合土工膜的第三主应力分布 (kPa)

Fig. 8 The third main stress distribution of composite geomembrane under normal storage water level (kPa)

## 5 结语

通过模拟该工程上水库坝体和库底回填料施工填筑过程及库区蓄水过程, 采用邓肯-张 (E-B) 模型进行了坝体和库区应力变形的三维非线性静力有限元计算。计算结果表明, 蓄水期, 坝体的位移分布规律性较好, 应力分布也合理, 未发现特殊不利的性状, 因此上水库面板堆石坝及库区回填的设计方案是合理的; 土工膜的抗拉能力安全系数及应变安全系数均大于 5.0, 满足规范要求, 选型合理; 蓄水期土工膜与库底回填料沉降一致, 能较好地适应回填料的变形, 不会出现脱空现象。另外, 在库盆中回填料与基岩的分界区, 土工膜的法向位移等值线梯度较大, 拉应力也较大, 需要重点关注。

### 参考文献 (References):

- [1] 李岳军, 周建平, 何世海, 等. 抽水蓄能电站水库土工膜防渗技术的研究和应用 [A]. 中国水力发电工程学会, 2008 中国水力发电论文集 [C]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 350-354. (LI Yue jun, ZHOU Jian ping, HE Shi hai, et al. Study on and Application of Geotextile Membrane in the Leakage Prevention Works of Reservoirs of the Pumped Storage Power Station [A]. China Society for Hydropower Engineering, 2008 Theses Compilation of China's Water Power [C]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 350-354. (in Chinese))
- [2] 丁遥, 沈振中, 李琛亮, 等. 复杂地形对面板坝面应力和变形的影响分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(1): 33-35. (DING Yao, SHEN Zhen zhong, LI Chen liang, et al. Effect of Complex Topography on Deformation and Stress of Face Slab for a CFRD [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(1): 33-35. (in Chinese))
- [3] Goodman R E, Taylor R L, Brekke T L. A Model for the Mechanics of Jointed Rock [J]. J. Soil Mech. and Found., Engrg. Div., ASCE, 1968, 99(5): 637-660.
- [4] Desai C S, Zaman M M, Lightner J G, et al. Thin Layer Element for Interfaces and Joints [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1984, 8(1): 19-43.
- [5] 刘浩吾. 混凝土面板堆石坝接缝止水的实验和分析 [J]. 岩土工程学报, 1995, 17(5): 65-70. (LIU Haowu. Tests and Analysis of Joint Waterstops of Concrete Face Rockfill Dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(5): 65-70. (in Chinese))
- [6] 董坤明, 沈振中, 荆玉翔, 等. 挤压边墙对面板堆石坝结构性状的影响分析 [J]. 水电能源科学, 2012, 30(7): 73-75. (DONG Kun ming, SHEN Zhen zhong, JING Yu xiang, et al. Effect of Extrusion Side Wall on Structural Behavior of Concrete Facing Rockfill Dam [J]. Water Resources and Power, 2012, 30(7): 73-75. (in Chinese))
- [7] 李佳明. 复合土工膜面板堆石坝应力应变计算 [D]. 西安: 西安理工大学, 2010. (LI Jia ming. Composite Geomembrane Stress strain Calculation of CFRD [D]. Xi'an: Master's Degree Thesis of Xi'an University of Technology, 2010. (in Chinese))

(下转第 174 页)

- Uncertainty Analysis during Fire Risk Assessment of Sealed Gasoline Tank Leakage Pool[J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2009, 38(5): 448-452. (in Chinese)
- [3] 国家安全生产监督管理总局国家环境保护总局关于督促化工企业切实做好几项安全环保重点工作的紧急通知[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2006, (3): 3-4. (The State Production Safety Supervision Administration The State Environmental Protection Administration an Emergency Notice about Urging the Petrochemical Enterprise to Carry Out Several Security and Environmental Protection Key Work[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2006, (3): 3-4. (in Chinese))
- [4] 赵波. 化工灾害事故处置中废水污染的防范措施及环境保护[J]. 消防技术与产品信息, 2008, (3): 51-54. (ZHAO Bo. Wastewater Pollution Prevention Measures and Environmental Protection During Chemical Accident Disposal[J]. Fire Technology and Products Information, 2008, (3): 51-54. (in Chinese))
- [5] 李景红, 全纪龙, 袁九毅. 化工与石化企业地表水环境风险应急设施建设[J]. 水资源保护, 2008, 24(4): 74-77. (LI Jing hong, TONG Ji long, YUAN Ji yi. Construction of Emergency Facilities for Reducing Surface Water Environmental Risk from Chemical and Petrochemical Enterprises[J]. Water Resources Protection, 2008, 24(4): 74-77. (in Chinese))
- [6] 崔文江, 雷廷菊, 崔利群. 石化企业水体污染防控工程措施和管理措施[J]. 给水排水, 2010, 36(S1): 240-242. (CUI Wen jiang, LEI Ting ju, CUI Li qun. Engineering and Management Measures of Petrochemical Enterprises Water Pollution Prevention and Control[J]. Water & Wastewater, 2010, 36(Suppl. 1): 240-242. (in Chinese))
- [7] 徐敏, 王克伟, 江奇志. 石油化工企业水污染防控设计[J]. 工业用水与废水, 2007, 38(2): 48-50. (XU Min, WANG Ke wei, JIANG Qi zhi. Water Pollution Prevention and Control Design for Petrochemical Enterprises[J]. Industrial Water & Wastewater, 2007, 38(2): 48-50. (in Chinese))
- [8] 张永良, 陆棋. 关于石化企业事故排水的探讨[J]. 浙江化工, 2010, 41(5): 27-28. (ZHANG Yong liang, LU Qi. Discussion about Petrochemical Enterprises Accident Drainage[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2010, 41(5): 27-28. (in Chinese))
- [9] 柯尊义. 化工企业清净水事故池设计的常见问题探讨[J]. 浙江化工, 2012, 43(4): 26-28. (KE Zun yi. Discussion of Common Problems During the Design of Accident Pool for Chemical Enterprise Lustration Launching[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2012, 43(4): 26-28. (in Chinese))
- [10] 俞科成, 孟琪莉. 事故排水系统的探讨[J]. 科技资讯, 2007, (21): 77. (YU Ke cheng, MENG Qi li. Discussion of Accident Drainage System [J]. Science & Technology Information, 2007, (21): 77. (in Chinese))
- [11] GB 50183-2004, 石油天然气工程设计防火规范[S]. (GB50183-2004, Oil and Natural Gas Engineering Code for fire Protection Design[S]. (in Chinese))
- [12] GB 50483-2009, 化工建设项目环境保护设计规范[S]. (GB50483-2009, Code for Design of Environmental Protection of Chemical Industry Projects[S]. (in Chinese))
- [13] 水体污染防控紧急措施设计导则[Z]. (中国石化安环[2006]10号). (Design Guideline for Water Pollution Prevention and Control Emergency Measures[Z]. (SINOPEC Safety and Environment Protection Bureau File[2006]No. 10). (in Chinese))

(上接第163页)

- [8] 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 Yu jian, XU Qian jun, et al. Different Anchorage Types of Composite Geomembrane Effect on Stress Deformation of Geomembrane[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012, (10): 72-75. (in Chinese))
- [9] 李静琪. 深覆盖层上面板堆石坝静动力特性及坝基地震液化研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (LI Jing qi. Research on Static and Dynamic Behaviors of Concrete Face Rockfill Dam on Deep Overburden Layer and Earthquake Liquefaction of Dam Foundation [D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [10] SL/T 225-98, 水利水电工程土工合成材料应用技术规范[S]. (SL/T225-98, Standard for Applications of Geosynthetics in Hydraulic and Hydropower Engineering[S]. (in Chinese))
- [11] 岑威钧, 沈长松, 童建文. 深厚覆盖层上复合土工膜防渗堆石坝筑坝特性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 175-180. (CEN Wei jun, SHEN Chang song, TONG Jian wen. Study of Construction Behavior of Composite Geomembrane Rockfill Dam on Thick Alluvium Deposit [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 175-180. (in Chinese))
- [12] 沈长松, 顾淦臣. 复合土工膜厚度计算方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 395-398. (SHEN Chang song, GU Gan chen. Calculation Method for Thickness of Composite Geomembrane [J]. Journal of Hohai University (Nature Science), 2004, 32(4): 395-398. (in Chinese))