

DOI: 10.11779/CJGE2016S1005

# 蒸发塘岸坡土工膜防渗层力学响应分析

李维朝<sup>1</sup>, 武富强<sup>2</sup>, 唐斌<sup>3</sup>, 蔡红<sup>1</sup>, 谢定松<sup>1</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 河南省航空物探遥感中心, 河南 郑州 450053;

3. 中国水务投资有限公司, 北京 100053)

**摘要:** 含防渗层的蒸发塘不仅可储存废液减免污染, 还可通过蒸发结晶提取废液中的盐类, 获取经济效益。在缺少黏土等天然防渗层的地区, 土工膜等人工合成材料防渗层是控制蒸发塘所蓄废液外渗的关键, 其物理力学性能与防渗效果紧密相关。在施工和运行过程中, 柔性土工膜会与其赋存的岩土体等相对刚性的环境产生相互作用, 从而影响土工膜的力学性能。鉴于此, 以一位于寒区的蒸发塘为例, 基于过程模拟的方法, 研究了蒸发塘土工膜防渗层这一赋存于相对刚性环境中的柔性结构在施工、蓄水和塘水结冰条件下的力学响应。研究表明柔性土工膜与其赋存的相对刚性的地基层和保护层之间存在界面相对摩擦和同向变形协调两种作用, 塘内蓄水、结冰等外界环境的作用可通过保护层间接作用于土工膜防渗层。锚固沟处土工膜易应力集中, 锚固沟设计和施工时建议遵循“可拉动不拉断”。数值模拟中当土工膜防渗层的最大变形受到模拟方法的限制时, 可利用应力判别运行状态。

**关键词:** 蒸发塘; 土工膜; 数值模拟; 废液

**中图分类号:** TU43

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2016)S1-0025-05

**作者简介:** 李维朝(1979-), 男, 河北灵寿人, 高级工程师, 博士, 主要从事岩土工程科研与咨询工作。E-mail: liwc@iwhr.com。

## Mechanical response of geomembrane seepage barrier in side slope of an evaporation pond

LI Wei-chao<sup>1</sup>, WU Fu-qiang<sup>2</sup>, TANG Bin<sup>3</sup>, CAI Hong<sup>1</sup>, XIE Ding-song<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower

Research, Beijing 100038, China; 2. Henan Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center, Zhengzhou 450053, China; 3. China

Water Investment Co., Ltd., Beijing 100053, China)

**Abstract:** The evaporation pond with seepage barrier can store waste liquid, limit pollution and extract solution through evaporation by sunlight. In the areas without natural barrier, such as clay, geomembrane is usually applied. So the physical and mechanical properties of geomembrane are essential to the seepage controlling. During construction and operation of evaporation ponds, soft geomembrane will interact with the surrounding relative rigid foundation and protection cover, and its performance is affected. Taken an evaporation pond sited in cold region as an example, the mechanical response of geomembrane to construction, impounding and expansion of ice is investigated. It is shown that two interactions exist between the geomembrane and the surrounding materials. One is interface friction and the other is coordinate deformation along the same direction. The effect of impounding and expansion can be applied to the geomembrane through protection cover. Stress concentration appears at anchor trench, thus the geomembrane should be able to move in the anchor trench before breaking. If the simulated deformation is limited by the ways of modelling, stresses should be taken to determine the state of geomembrane.

**Key words:** evaporation pond; geomembrane; numerical modelling; waste liquid

## 0 引言

在工业生产过程中常会产生一些废液, 将废液排入含防渗层的蒸发塘中, 不仅可以避免废液直接排放造成环境污染, 还可以通过蒸发结晶提取废液中的盐类, 带来经济效益<sup>[1]</sup>。在缺少黏土等天然防渗层的地区, 往往采用土工膜等人工合成材料作为蒸发塘的防渗层。土工膜防渗层的力学性能与防渗效果的可靠性

紧密相关。在防渗结构中, 土工膜防渗层为柔性, 在施工和运行过程中其力学性能会与周围相对刚性的结构相互作用, 外界环境的变化也会通过此相对刚性的结构间接作用于土工膜防渗层上。数值模拟是分析土

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51309259); 国家重点基础研究发展计划(“973计划”)项目(2013CB036404)

**收稿日期:** 2015-11-30

工膜防渗层力学性能响应的有效手段, 当前有关土工膜防渗层的数值模拟分析主要集中于水库大坝和固体废弃物填埋场等<sup>[2-7]</sup>, 如分析坝体上游坡土工膜防渗体的抗滑稳定, 复合土工膜剪切特性对稳定性的影响<sup>[2]</sup>, 膜土联合防渗堆石坝内部应力<sup>[3]</sup>, 不同锚固形式对膜应力变形的影响<sup>[4]</sup>, 坝体和坝基材料参数变化对土工膜受力变形影响的敏感性分析<sup>[5]</sup>, 山谷型扩建垃圾填埋场整体沉降和侧向变形对防渗层的影响<sup>[6]</sup>等。蒸发塘的防渗结构与垃圾填埋场等固体废弃物填埋场相近或相同, 多是由地基、防渗层和保护层组成, 但两者所储物质有本质差别, 蒸发塘内储存物质为液体, 而固体废弃物填埋场以固体为主, 存在少量的液体。水库虽然也是以储存液体为主, 但坝体内的防渗结构与蒸发塘相差较大, 难以对蒸发塘岸坡土工膜防渗层力学性能分析提供直接的借鉴。鉴于此, 本文以一位于寒区的蒸发塘为例, 基以过程分析的数值模拟方法, 研究了蒸发塘土工膜防渗层在施工、蓄水和塘水结冰条件下的力学响应, 从而为评估土工膜防渗层的稳定性和防渗效果的可靠性奠定基础, 并给今后相似条件下的蒸发塘人工防渗的设计与研究提供有益借鉴。

1 工程布置

所研究蒸发塘位于内蒙古克旗, 占地总面积为 45.9 公顷, 共分为 A、B 两区 (图 1 所示), 其中 A 区占地面积为 16.2 公顷, B 区占地面积为 29.7 公顷。岸坡为沙质, 坡比为 1:3, 坡高 7.5 m, 设计蓄水深 5 m。防渗结构由防渗层和保护层组成, 土工膜防渗层铺设于坡面削平后的沙质边坡上, 防渗层顶部铺设保护层, 土工膜防渗层在岸坡顶部利用锚固沟锚固。

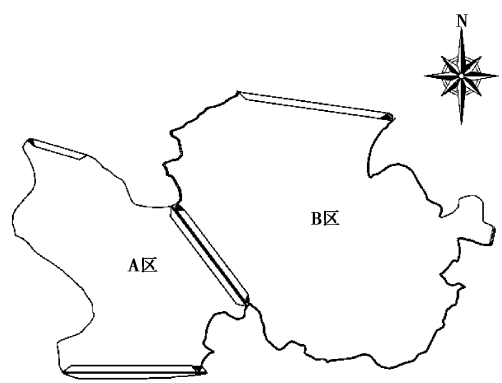


图 1 蒸发塘平面布置  
Fig. 1 Plan view of evaporation pond

2 计算模型与计算步骤

2.1 计算模型

为了合理准确的模拟原位条件下土工膜防渗层与沙质岸坡和保护层的相互作用、土工膜的力学响应等, 本文采用了 FLAC<sup>3D</sup> 进行模拟, 其中土工膜防渗层采

用 FLAC<sup>3D</sup> 中的结构单元 Geogrid 来进行模拟。Geogrid 结构单元是三节点的平面单元, 可以承受平面应力但不能承受抗弯, 能够模拟土工合成材料与相邻结构间的界面摩擦作用及土工合成材料的力学响应等 (图 2)。图 3 为蒸发塘岸坡防渗结构计算所需的计算模型及相应的网格剖分。为了细致的分析土工膜在运行中的表现, 建立的模型以实体的方式考虑了锚固沟、保护层等。

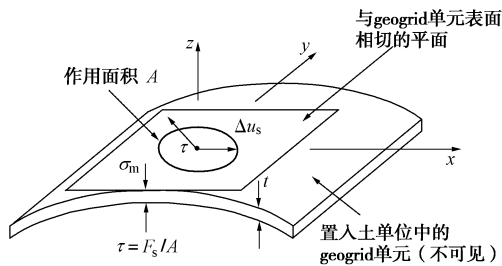


图 2 Geogrid 结构单元界面作用示意图<sup>[8]</sup>  
Fig. 2 Idealization of interface behavior at geogrid node

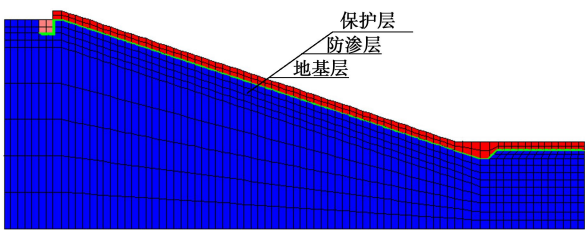


图 3 蒸发塘岸坡计算模型

Fig. 3 Numerical model for side slope in evaporation pond

2.2 计算参数

表 1 和表 2 为计算过程中用到的参数, 土工膜防渗层的厚度为 1 mm, 依据该蒸发塘土工膜技术性能指标, 土工膜的屈服强度为 15 kN/m, 屈服伸长率为 12%, 厚度为 1 mm, 故由此计算出其弹性模量为 15/0.12/0.001=125 MPa。FLAC<sup>3D</sup> 中 Geogrid 结构单元的参数中没有考虑土工膜自身的强度, 而只是考虑了界面的摩擦角度, 因此在结果分析中, 还需将计算出的土工膜的应力分布与其强度进行对比分析, 从而判断土工膜是否发生了拉断破坏。

表 1 砂质岸坡土体计算参数

密度 (/10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup> )	弹性参数		强度参数	
	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
1.60	4.08	0.35		0

表 2 土工膜计算参数

密度 (/10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup> )	厚度/mm	弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度	断裂强度
				(应力) (/kN·m <sup>-1</sup> )	(应力) (/kN·m <sup>-1</sup> )
0.94	1	125	0.33	15	23

## 2.3 过程模拟

在计算过程中, 为了更好的模拟土工膜防渗层在施工及运行过程中的力学响应, 本模拟依据实际的削坡、防渗层铺设、护坡施工、蓄水运行、结冰等施工、运行中所经历的阶段, 进行了过程模拟, 步骤如下:

(1) 初始应力状态模拟。在该状态下建立削坡后的地形, 然后计算其在重力作用的应力分布。

(2) 获取初始应力状态后, 将初始状态的位移清零。这是因为沙质岸坡表层削坡完成后, 还需一定的时间来进行后续防渗层及保护层等的铺施工。可以假设在该时间中, 表层削坡导致的卸荷变形已释放完毕, 所以在后续的计算中不再考虑该部分位移量, 而是仅考虑其应力状态。

(3) 铺设防渗结构及护坡。在本阶段, 防渗结构采用 FLAC<sup>3D</sup> 中的结构单元来完成, 护坡则采用实体单元来完成。该阶段模拟完毕后, 坡体上的外力主要是防渗层及护坡的自重。

(4) 蓄水。防渗结构及护坡施工完毕后, 就要执行蒸发塘的蓄水作用功能。鉴于流固相互作用模拟比较困难, 并且就研究目的而言也不是十分必要, 所以本阶段模拟中, 将蓄水后的静水压力以力学边界条件的形式施加在护坡上, 从而模拟蒸发塘蓄水的影响。

(5) 结冰。本案例蒸发塘地处寒区, 冬季蓄水后水面会形成一定厚度的冰盖层, 并且冰盖层的侧向膨胀会给予岸坡一定的作用力。本阶段主要分析该冻胀力对防渗结构的影响。同样, 该模拟中没有直接建立冰的实体模型, 而是将计算出的冰压力及冰层的厚度以力学边界条件的形式施加在相应位置的坡面上。

## 3 计算结果分析

### 3.1 保护层铺设响应

图 4~7 分别为防渗层及护坡铺设完毕后的岸坡位移、剪应变增量及土工膜位移、应力的分布图, 从中可以发现:

(1) 防渗层及护坡铺设完毕后, 最大的位移主要位于护坡的中上部, 而剪应变增量集中于防渗结构与护坡界面的顶部。这些表明, 护坡铺设完毕后, 受护坡自重的影响, 护坡会沿其与防渗结构的交界面产生向下的滑动趋势, 且受变形累积的影响, 护坡中上部的变形最大。

(2) 防渗土工膜最大变形量为 1.3 cm, 位于土工膜的中上部, 而锚固沟侧壁的变形量很小、最大拉应力最大。这表明经锚固沟锚固后, 防渗土工膜被锚固, 从而导致坡面中上部产生拉伸变形, 且土工膜受锚固作用而产生一定的应力集中。

(3) 锚固后防渗土工膜的最大拉应力位于锚固沟侧壁处, 约为 2.34 kPa, 远小于土工膜的屈服强度。

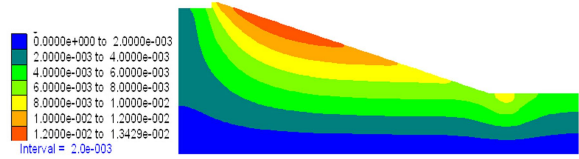


图 4 施工完毕后岸坡的变形

Fig. 4 Deformation of side slope after construction

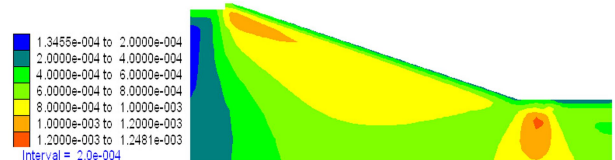


图 5 施工完毕后岸坡的剪应变增量

Fig. 5 Shear strain increment of side slope after construction

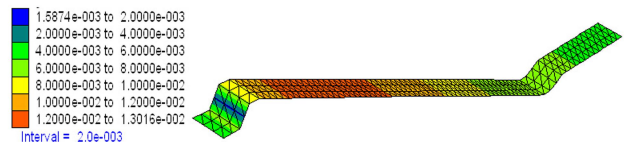


图 6 施工完毕后土工膜的位移分布

Fig. 6 Displacement distribution of geomembrane after construction

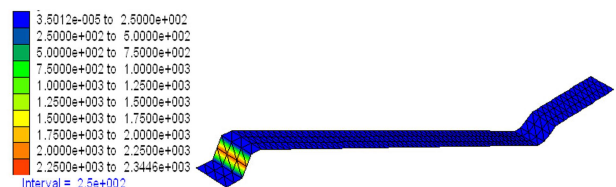


图 7 施工完毕后土工膜的应力分布

Fig. 7 Stress distribution of geomembrane after construction

### 3.2 蓄水响应

图 8~11 分别为蓄水后的岸坡位移、剪应变和土工膜的变形、应力分布情况, 从中可以发现:

(1) 蓄水后岸坡的变形主要位于坡面的中下部。这是因为蓄水后该部位的静水压力最大, 从而导致相应部位的变形最大。

(2) 蓄水后的最大剪应变增量位于坡脚。这是因为该位置坡面由斜转平, 坡面形态变化导致应力状态变化, 从而在该位置产生最大剪应力, 并产生最大的剪应变增量。

(3) 蓄水后土工膜的变形主要位于中下部, 约为 4.0 cm。土工膜最大变形位置与坡面的最大变形位置基本相同。这表明, 蓄水后土工膜的变形, 并不全是土工膜自身产生的拉伸变形, 而是随着下附地基层的沉降而产生的变形, 该变形仅是土工膜的空间位置产

生了变化,而非土工膜的拉伸量产生了大的变化,该变形主要为岸坡、防渗层和护坡三者之间的同向协调变形。

(4) 蓄水后土工膜最大拉应力为 0.58 kPa, 小于蓄水前的 2.34 kPa, 这表明蓄水后静水压力对坡体、防渗结构和护坡的压缩作用, 减少了土工膜各部位的相对位移, 从而使土工膜最大拉应力减弱。

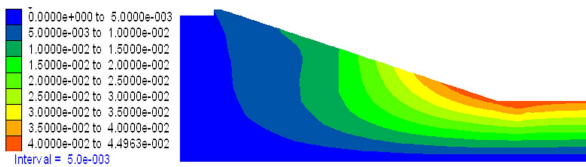


图 8 蓄水后的岸坡变形

Fig. 8 Deformation of side slope after impoundment

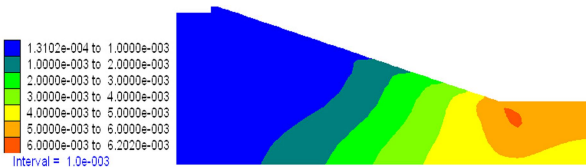


图 9 蓄水后的岸坡剪应变增量

Fig. 9 Shear strain increment of side slope after impoundment

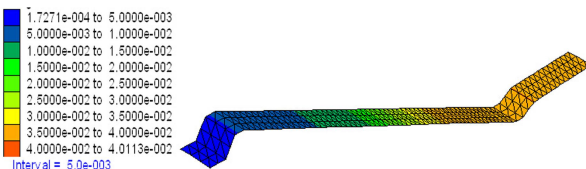


图 10 蓄水后的土工膜位移分布

Fig. 10 Displacement distribution of geomembrane after impoundment

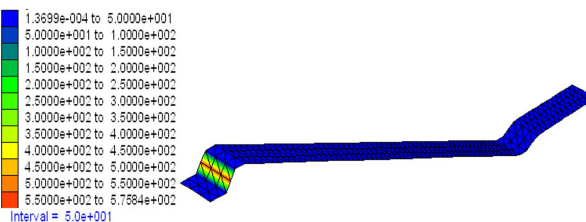


图 11 蓄水后的土工膜应力分布

Fig. 11 Stress distribution of geomembrane after impoundment

### 3.3 结冰响应

图 12~15 分别为塘水结冰后的岸坡位移、剪应变和土工膜的变形、应力分布情况, 从中可以看出:

(1) 坡面的最大位移、最大剪应变和土工膜的最大变形位置均位于相应的结冰位置。这是因为冰压力导致相应区域的应力集中, 从而产生了较大的变形。

(2) 结冰位置土工膜的最大位移为 6.07 cm, 该变形同蓄水后土工膜的变形一样, 都并不全是土工膜自身产生的拉伸变形, 而主要是在冰压力的作用下岸坡、防渗层和护坡三者之间的同向协调变形, 该变形以土工膜空间位置的变化为主, 而对土工膜的拉伸变形为副。

(3) 对比分析土工膜位移和应力分布可知, 在冰压力的作用下, 冰压力作用位置的土工膜会与其相邻位置的土工膜产生相对变形, 从而导致相对变形处产生较大的拉应力, 该拉应力的位置一般位于冰压力位置作用的上、下边界处。

(4) 结冰后土工膜最大拉应力为 0.26 kPa, 小于蓄水后的 0.58 kPa。这表明冰压力虽然使该土工膜最大拉应力的位置发生了变化, 但并没有使最大拉应力的数值增加, 土工膜依然位于安全的范围内。

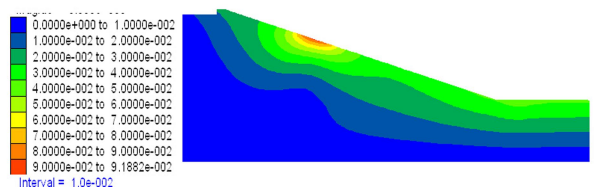


图 12 结冰条件下的位移

Fig. 12 Displacement of side slope under icing conditions

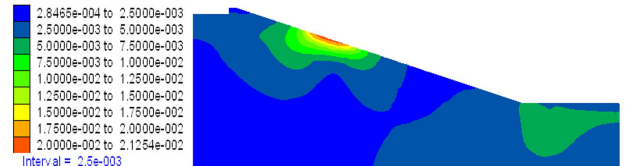


图 13 结冰条件下的应变增量

Fig. 13 Strain increment of side slope under icing conditions

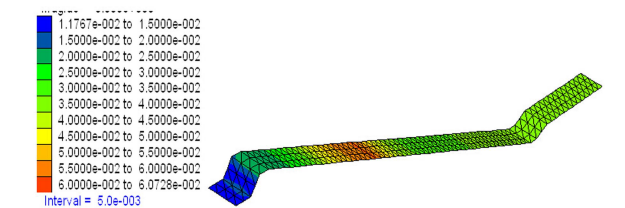


图 14 结冰条件下的土工膜位移

Fig. 14 Displacement distribution of geomembrane under icing conditions

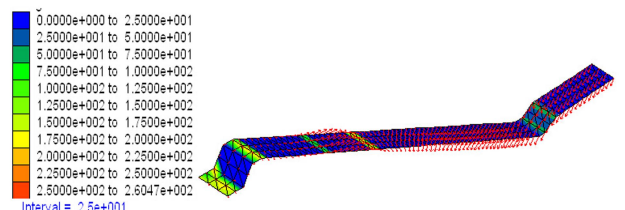


图 15 结冰条件下的土工膜应力分布

Fig. 15 Stress distribution of geomembrane under icing conditions



## 4 结 论

防渗层是控制蒸发塘所蓄废液外渗的关键, 其在蒸发塘运行过程的力学响应与防渗效果的可靠性紧密相关, 鉴于此, 本文以一蒸发塘为实例, 借助过程模拟的方法, 研究了蒸发塘土工膜防渗层这一赋存于相对刚性环境中的柔性结构在施工、蓄水和塘水结冰条件下的力学响应, 并得出如下结论:

(1) 利用 FLAC<sup>3D</sup> 中的 Geogrid 结构单元可以较好的模拟土工膜防渗层在蒸发塘运行过程中的力学响应。

(2) 柔性土工膜防渗层与其赋存的相对刚性的地基层和保护层之间存在相互作用, 该相互作用主要是界面的相对摩擦作用和各结构间同向的变形协调作用, 塘内蓄水和结冰的外界环境作用可通过保护层间接作用于土工膜防渗层。

(3) 锚固沟处土工膜易出现应力集中, 建议在设计 and 施工过程中控制锚固力, 允许土工膜受到较大拉力且未达到断裂时在锚固沟处拉移, 从而避免土工膜断裂, 塘内所蓄废液外渗。

(4) 在数值调研土工膜防渗层的运行状态时, 一般从应力和应变两个角度出发分析, 受限于土工膜防渗层所赋存的相对刚性环境和数值模拟手段的限制, 模拟出的变形多位于土工膜允许的应变范围内, 这时应分析土工膜最大应力是否达到屈服或断裂状态, 从而综合评价土工膜的运行状态。

(5) 本研究为评估土工膜防渗层的稳定性和防渗效果的可靠性奠定了基础, 并给今后相似条件下蒸发塘人工防渗的设计与研究提供有益借鉴。

### 参考文献:

[1] 姜兴涛, 姜成旭. 利用蒸发塘处置煤化工浓盐水技术[J]. 化工进展, 2012(增刊 1): 276 - 278. (JIANG Xing-tao, JIANG Cheng-xu. Use of evaporation ponds disposal of coal chemical industry concentrated brine technology[J]. Chemical Progress, 2012(S1): 276 - 278. (in Chinese))

- [2] 姜海波, 侍克斌. 坝坡复合土工膜防渗体的抗滑稳定分析[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(6): 15 - 18. (JIANG Hai-bo, SHI Ke-bin. Dam slope stability against sliding of the composite geomembrane impervious body analysis[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2010, 21(6): 15 - 18. (in Chinese))
- [3] 邢玉玲. 膜土联合防渗堆石坝内部应力研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (XING Yu-ling. Membrane soil internal stress research joint antiseepage rockfill dam[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [4] 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. Compound geomembrane the influence of different deformation and stress of anchor type on membrane research[J]. China's Rural Water Conservancy and Hydropower, 2012(10): 72 - 75. (in Chinese))
- [5] 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. Composite geomembrane anti-seepage rockfill dam on thick moraine cover foundation characteristic research[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(1): 175 - 180. (in Chinese))
- [6] 高 登. 扩建垃圾填埋场中间衬垫变形与稳定性状及其工程控制措施[D]. 杭州: 浙江大学, 2009. (GAO Deng. The expansion of the landfill sites in the middle pad deformation and stability of stability of traits and its engineering control measures[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009. (in Chinese))
- [7] WU W, WANG X T F. Aschauer. Investigation on failure of a geosynthetic lined reservoir[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2008, 26: 363 - 370.
- [8] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC<sup>3D</sup> - Fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions, Ver. 3.0, User's Manual[M]. Minneapolis: Itasca, 2005.

(本文责编 黄贤沙)