

充淤模袋筑堤现场试验袋体变形监测及分析

吴月龙¹, 周治刚², 龚丽飞¹, 张红¹, 朱方方¹

(1. 南京水利科学研究所 南京瑞迪建设科技有限公司, 南京 210029; 2. 江苏省水利工程科技咨询有限公司, 南京 210029)

摘要: 堤身变形监测及变形规律的研究, 对于充淤模袋筑堤来说极其重要。现场试验设计了自然排水、真空预压排水、掺固化剂三种工法进行施工, 通过监测堤身高度及宽度变化, 对三种施工方法的优缺点进行了总结。结果显示, 袋体高度的变化规律与袋体中淤泥固结排水的规律相一致, 并且与所充填的淤泥的性质、掺入固化剂的种类和掺量以及排水的方式密切相关。研究发现, 体积减少固结法可用于预测竣工后堤身高度。

关键词: 充淤模袋; 袋体高度监测; 袋体宽度监测; 体积减少固结法

中图分类号: TV41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)01-0140-05

Deformation monitoring and analysis of slurry filled geotextile tubes used for building embankment

WU Yue long¹, ZHOU Zhi gang², GONG Li fei¹, ZHANG Hong¹, ZHU Fang fang¹

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing R&D Tech Group Co. Ltd, Nanjing 210029, China;

2. Jiangsu Province Water Resources Engineering Consulted Co. Ltd, Nanjing 210029, China)

Abstract: Monitoring the embankment deformation and its variation law is very important for the building embankment with the slurry filled geotextile tubes. Three types of construction methods were designed for the building embankment, including natural drainage, vacuum preloading drainage, and adding curing agent. The advantages and disadvantages of the three methods were summarized through the monitoring the variations of tube height and width. Results showed that the variation of tube height is consistent with the consolidation law of the slurry in the tube, and it is also related to the properties of filling slurry, the type and dosage of curing agent, and drainage way. Moreover, the volume reduction consolidation method can be used to predict the height of embankment after its completion.

Key words: slurry filled geotextile tubes; height monitoring of tubes; width monitoring of tubes; volume reduction consolidation method

随着沿海经济的发展, 土地资源的不足使得吹填围垦工程得到了长足发展^[1-3]。在传统围垦工程中, 围堤建设采用所消耗的自然资源越来越多, 但部分地区传统砂石料比较缺乏, 因此促使了一些新的围堤修筑技术的产生, 比如在进行吹填分仓隔堤的修筑中采用土工模袋充填淤泥作为堤身, 即利用土工编织布形成管袋, 充填疏浚淤泥或吹填淤泥, 待排水固结形成围堤^[4-7]。

在此情形下, 对充淤模袋围堤堤身的变形进行监测、研究并掌握其变化规律, 对控制施工质量和安全, 为设计提供反馈信息等都有着很重要的作用。周辉等人^[8]对珠三角某河滩软土地基中采用大型土工织物充填袋筑堤时沉降及侧向位移的监测和分析; 孙丽^[9]等人对上海某圈围工程中充泥管袋筑堤的监测及变形进行了分析, 均是对堤身荷载作用下软土地基的沉降及侧向位移进行监测, 反映的是滩涂淤泥地

基的承载能力, 而没有对模袋堤身变形方面进行实测分析。

在堤身管袋形状、充填参数的设计及固结计算方面, 国内外已有不少研究: Liu 等^[10]在 20 世纪 70 年代在西澳大利亚大学最早通过研究水头压力、砂肠的周长、高度、宽度以及砂肠与土的接触长度之间的关系, 应用椭圆积分的方法来分析砂肠的形状; Shin 等^[11]针对一种充填高含水疏浚泥的土工织物充填管状袋, 由于固结而导致形状变化, 提出了新的计算方法“沉积和自重固结法”(Settling and Self weight Consolidation Method); 张文斌^[12]也对土工织物充填管袋的制作和堆积的若干问题进行了研究; 闫玥等^[13]等通过编制新的计算程序, 用以计算扁平充灌袋的形状、尺寸、泵送压力、泥浆重度和拉应力的关系, 并对土工织物袋的保土特性作了一定的研究; 付海峰^[14]结合海上围垦的工程特点, 通过有限元分析、离心模型试验等方法对模袋固化土围垦的工作

收稿日期: 2014-05-09 修回日期: 2014-11-20 网络出版时间: 2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1350.021.html>

作者简介: 吴月龙(1982-), 男, 江苏高淳人, 工程师, 主要从事软土地基处理工作。E-mail: ylwu@nhri.cn

机理和建造方法进行了研究。

本文拟通过现场筑堤试验,利用获得的第一手监测资料分析充淤模袋筑堤的堤身高度及宽度的变化规律,以及不同施工方法的优缺点,并提出在施工前对竣工后坝体高度进行预估的方法。

1 试验概况

充淤模袋筑堤试验现场位于苍南县东海岸某围垦吹填工程软基处理一期(A1区)工程。该工程项目总吹填面积约为212.3万m²,1号隔堤西段175m为本次现场试验场地。

1.1 试验堤形式

沿1号隔堤西段纵向依次设置A、B、C、D、E、F、O共7个试验堤段,采用充淤模袋作为围堰子棱体,试验堤段断面情况见图1。每个堤段长25m,堤高1.5m,充淤模袋填筑层数:A至F段6层、O段3层。其中,A、B段为模袋自然排水;C、D段为掺固化剂;E、F、O段为真空预压强制排水(真空预压式模袋充淤筑堤为编织布模袋充淤上覆密封膜进行抽真空的新型筑堤方式)。本文选取A、D、O三个典型段进行分析,试验段的施工以试验研究为目的,D、O段堤身未按原设计高度要求。

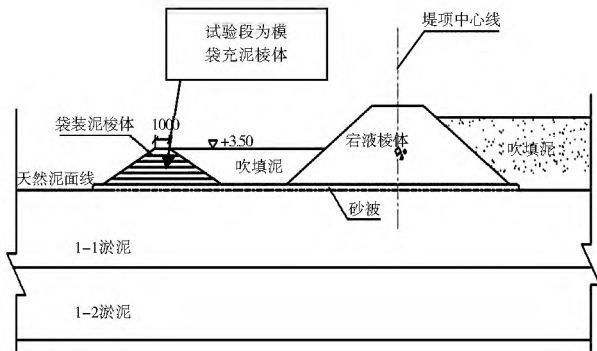


图1 试验隔堤断面

Fig. 1 Cross section of test embankment

1.2 充淤模袋

模袋采用联体式管袋(图2),由数个独立的单体袋组成,单个袋子宽约1.8m,长25m。袋体材料选取200g/m²编织土工布,具体参数见表1。



图2 充淤模袋

Fig. 2 Slurry filled geotextile tubes

表1 袋体材料参数

Tab.1 Material parameters of tubes

项目	检测值	项目	检测值
经向断裂强力 / (kN·m ⁻¹)	34.4	CBR 顶破强力/ N	3178
经向断裂伸长率 (%)	13.8	垂直向渗透系数 K ₂₀ / (cm·s ⁻¹)	2.16×10 ⁻³
纬向断裂强力 / (kN·m ⁻¹)	22.3	等效孔径 O ₉₅ / mm	0.133
纬向断裂伸长率 (%)	11.7		

1.3 冲填材料

充填泥浆采用原始滩涂面淤泥高压水枪冲制,现场土以粉粒为主,其物理性质见表2,粒径组成见表3。施工初期,模袋内泥浆经反复充填泌水稳定后,袋体内充填泥浆密度约为1.4g/cm³,下文中模袋内初始泥浆密度为反复充填稳定后袋内泥浆密度。

表2 充填泥浆的物理性质指标

Tab.2 Physical properties of filling slurry

指标名称	含水率 W (%)	密度 ρ ₀ / (g·cm ⁻³)	土粒比重 G _s	液限 W _L (%)	塑限 W _P (%)	塑性指数 I _P	液性指数 I _L
指标值	280.9	1.19	2.64	40.2	22.9	17.3	1.45

表3 充填泥浆土粒粒径级配

Tab.3 Grain size distribution of filling slurry

土粒种类	砂粒 (%)		粉粒 (%)		黏粒 (%)	胶粒 (%)
粒径级配	0.25~0.075 mm	0.075~0.05 mm	0.05~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm
	3.6	11.7	59.5	10.6	5.3	9.3

2 监测方法

2.1 监测内容

(1) 堤身高度监测。为了动态掌握堤身袋体高度变化规律,在每层充填完毕以后对堤基及堤身每一层高度进行水准测量。

(2) 堤身宽度监测。了解模袋袋体充填淤泥以后宽度变

化率,可以更好地为堤身宽度的设计提供依据。在施工过程中,采用皮尺测量施工前后模袋宽度。

2.2 仪器埋设

常规堤坝的沉降板的埋设常布置于堤中心处,而充淤模袋筑堤在堤中心设置沉降板必然会破坏袋体。为了既不破坏袋体又能测出堤身高度的变化,基于以下两种假设,将沉降板埋设于每一层堤身的两侧,堤顶位于堤中心(图3)。

(1) 假设堤身高度的变化由袋体排水固结产生, 不考虑堤基沉降。由于堤基位于 50 cm 厚砂被上, 排水条件良好, 堤身荷载不大, 地基产生沉降较小, 相较而言, 充淤模袋袋体排水固结产生的变化较大。

(2) 假设第一层堤身高度在堤身中间及两侧沉降相同。由于堤身中间及两侧沉降的不同, 每一层堤身中间和两侧的高度不相等, 尤其是第二层至第六层层底均是在下一层的软弱面上, 且各层固结程度不同, 故该情况更甚。第一层相对而言模袋内充填泥浆固结时间最长, 模袋底部砂垫层基本处于一个水平面, 监测数据较为详细准确, 下文对充填泥浆固结后袋体高度分析采用堤身第一层的高度(与第一层模袋厚度含义一致)。

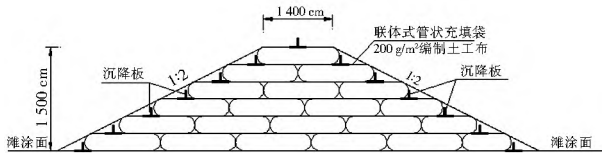


图 3 隔堤监测断面

Fig. 3 Monitoring section of embankment

3 模袋高度变形分析

3.1 高度变化量监测结果分析

通过对 A、D、O 三段各层进行水准测量, 统计各层高度数据, 绘制成高度随时间变化的关系曲线见图 4-图 6。结合实际工况, 可以发现以下现象。

(1) 堤身高度变化曲线呈双曲线型, 与沉降固结曲线类似。前期变化幅度较大, 随着时间的发展, 土体不断固结, 高度变化幅度渐趋于平缓。

(2) 模袋自然排水情况下, A 段堤身高度最高为 1 819 mm, 最终为 1 495 mm。其中, 堤身第一层(A1)反复充填完毕后, 泥浆密度约为 1.4 g/cm^3 , 高度为 436 mm。经过固结排水, 袋中土体密度约为 1.7 g/cm^3 , 高度降低至 235 mm, 降低 46.1%。

(3) 参加固化剂(水泥)情况下, D 段堤身高度最高为 1 803 mm, 最终为 1 359 mm。其中, 堤身第一层(D1)由于复充一次, 高度为 158 mm, 混合泥浆密度约为 1.4 g/cm^3 。经过固化作用后, 袋中固化土体密度约为 1.8 g/cm^3 , 高度降低至 117 mm, 降低 25.9%。

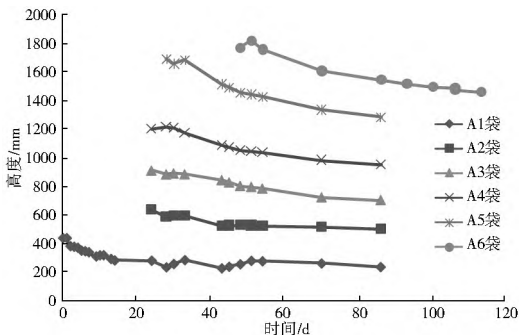


图 4 A 段高度随时间变化曲线

Fig. 4 Variation of height with time at section A

(4) 真空预压强制排水情况下, 高度最高为 1 128 mm, 最终为 835 mm。其中, 堤身第一层(O1)高度为 600 mm, 混

合泥浆密度约为 1.4 g/cm^3 。经过固化作用后, 袋中固化土体密度约为 1.7 g/cm^3 , 高度降低至 279 mm, 降低 53.5%。

(5) D 段堤身第一层高度变化值远小于 A、O 段, 而 A、O 段降低幅度大致相当, 约为 50% 左右。故模袋高度变化幅度与袋体所充材料有关。

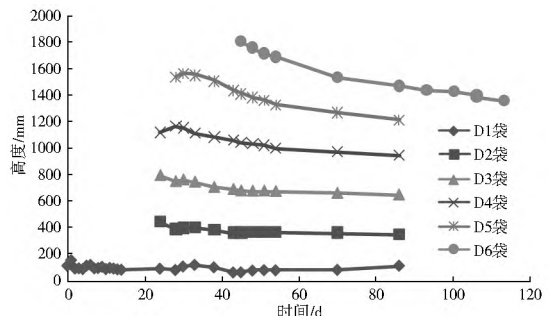


图 5 D 段高度随时间变化曲线

Fig. 5 Variation of height with time at section D

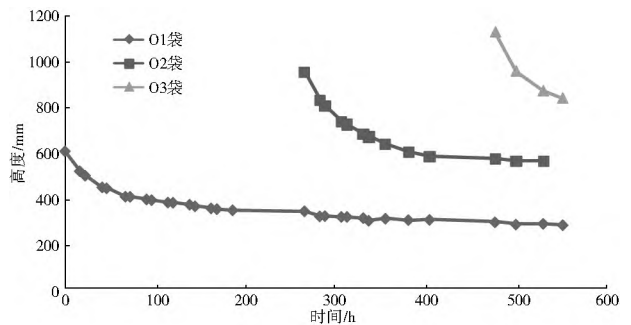


图 6 O 段各层高度随时间变化曲线

Fig. 6 Variation of height with time at section O

3.2 高度变化速率监测结果分析

对三种方案堤身高度变化速率进行统计, 绘制堤身高度变化速率随时间变化关系曲线见图 7。可以看出: O 方案初期沉降速率变化最大, 充填完成后 8 d 平均变化速率为 32.62 mm/d , A 方案次之, 变化速率为 14.06 mm/d , 而 D 方案最小, 变化速率为 2.13 mm/d ; A 方案沉降速率趋于稳定约需要 30 d 左右, D 方案小于 10 d, O 方案约需 20 d。

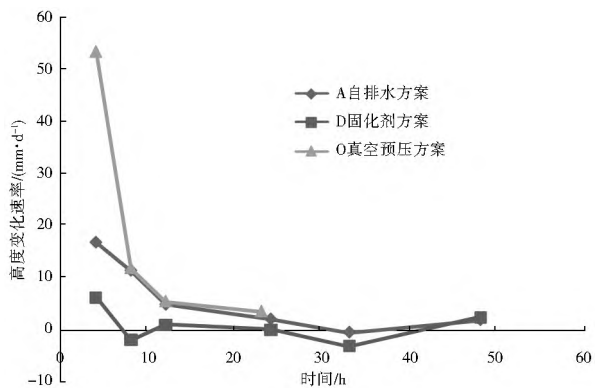


图 7 第一层高度变化速率随时间变化关系曲线

Fig. 7 Variation of the height change rate in the first layer height with time

由此可知, 变化速率受施工方法影响较大。掺固化剂 D 方案施工速度最快, 高度变化幅度小; 而真空预压 O 方案施工

速度次之,而高度变化幅度最大;自然排水 A 方案施工速度最慢,而高度变化居于两者之间。自然排水、真空预压排水、掺固化剂三种充淤泥模袋施工方式的堤身高度变化幅度、高度变化速率(排水速率)及施工工期等参数对比情况见表 4。

表 4 三种施工方式对比

Tab. 4 Comparison of three types of construction methods

项目	自然排水	真空预压	掺固化剂
堤身高度降低幅度(%)	46.1	53.5	25.9
充淤后 8 d 平均高度变化速率/(mm·d ⁻¹)	14.06	32.62	2.13
施工工期/d	30	20	< 10

3.3 关于体积减少的固结方法的讨论

Leshchinsky 等^[5] 提出体积减少的固结计算方法,并给出泥浆固结时袋体高度的降低曲线图(图 8)。可以看出,若现场试验原始充填淤泥的土粒比重为 2.7,则由充填泥浆初始含水率 $w_0 = 120.4\%$ 时 $V_{sail}/V_w = 1.4$ 固结至 $V_{sail}/V_w = 1.7$ 时,图 8 中袋体高度下降大约 55%。这与 A、O 两段模袋中充填天然土体情况下,实测第一层袋体高度变形量是相一致的。在实际工程中可以采用该方法对充填完成后堤身高度进行预估。

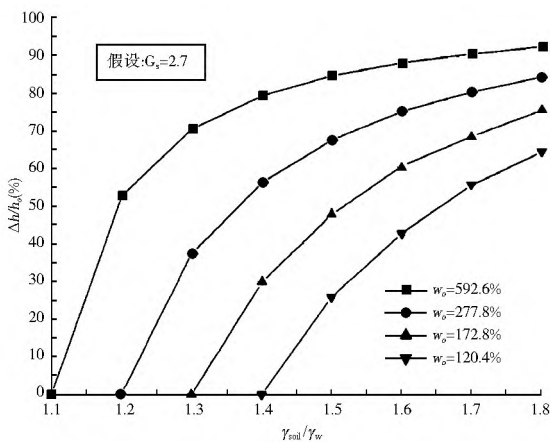


图 8 泥浆密度变化时袋体高度的降低

Fig. 8 Decline in the height of tubes as the function of soil density

4 模袋宽度变形分析

充填模袋筑堤施工过程中,袋体宽度常指施工前模袋扁平状态下的宽度,随着泥浆充填固结后袋体拉伸变形及形状不规则,无法准确预估建成后袋体宽度,导致堤身宽度较难控制。试验中,对 A、D、O 三种充填模袋第一、二层袋体施工前后宽度测量并进行统计,确定施工前后袋体宽度收缩率(表 4),A 方案收缩率为 3.86%,D 方案为 10.6%,O 方案为 14.21%,即真空预压强制排水模袋宽度收缩率最大,自然排水最小。表 4 可为类似工程设计时预估建成后堤身宽度提供参考。当然,模袋宽度收缩率除与袋体材料、充填泥浆及外掺固化剂有关外,还与施工方法有着密切关系。

5 结语

充淤模袋筑堤施工完成后,堤身高度变化过程一定程度

表 5 施工前后模袋宽度变化

Tab. 5 Variation of tube widths before and after construction

区段	层号	充填前平均宽度/m	充填后平均宽度/m	袋体宽度收缩率(%)
A	A1	11	10.4	- 5.45
	A2	8.76	8.56	- 2.28
D	D1	11	10.22	- 7.09
	D2	9.5	8.16	- 14.11
O	O1	9.06	7.89	- 12.91
	O2	7.41	6.26	- 15.52

上可以认为是袋体中淤泥固结排水的过程。堤身高度变化规律与所充填的淤泥的性质、掺入固化剂的种类和掺量以及排水的方式息息相关。实际工程中,自然排水、真空预压排水、掺固化剂三种充淤模袋筑堤施工方式。可根据工程的地质条件、经济(自然排水 A 方案占优)、工期(掺固化剂 D 方案占优)、综合条件(真空预压方式 O 方案较平衡)等因素进行选择,亦可以混合使用。另外,虽然实际上模袋内的固结排水是一个非常复杂的过程,但 Leshchinsky 提出的体积减少固结方法仍可以作为施工前对竣工后堤身高度的一种简便预测方法。

需要说明的是,本次充淤模袋筑堤试验堤基已铺设一层 50 cm 厚砂被,堤身整体不高,对地基的压力不大,堤基产生沉降很小,同时,由于筑堤过程中模袋的不可破坏性,堤基中间无法布设沉降标,故堤基沉降未进行监测。本次试验仪器的埋设只是在假设的堤基不沉降且同一层沉降量相同基础上的一种尝试,仍存在局限,需不断地改进。

参考文献(References):

- [1] 裘江海. 我国近代滩涂开发利用综述[J]. 水利发展研究, 2006(3): 26-28. (QIU Jiang hai. Overview of beach development and utilization in modern China[J]. Water Resources Development Research, 2006(3): 26-28. (in Chinese))
- [2] 张伟. 吹填施工在海洋滩涂围垦工程中的应用[J]. 施工技术, 2009(12): 465-466. (ZHANG Wei. Application of hydraulic fill construction in marine shoal reclamation engineering[J]. Construction Technology, 2009(12): 465-466. (in Chinese))
- [3] 陈君, 张长宽, 林康, 等. 江苏沿海滩涂资源围垦开发利用研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 213-219. (CHEN Jun, ZHANG Chang-kuan, LIN Kang, et al. Reclamation and development of coastal tidal flats in Jiangsu Province[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2011, 39(2): 213-219. (in Chinese))
- [4] 席明军. 大型充填袋施工技术[J]. 水运工程, 2009(11): 189-192. (XIE Ming jun. Construction technology of large filling bags[J]. Port & Waterway Engineering, 2009(11): 189-192. (in Chinese))
- [5] Homepage of Geosynthetic Research Institute[ED/OL]. Http://www.Geosyntheticinstitute.org.
- [6] Lawson C R. Geotextile containment for hydraulic and environmental engineering[J]. Geosynthetics International, 2008, 15(6): 384-427.
- [7] 赵长伟. 大型充填袋在天津港围垦工程施工中的应用[J]. 水道

- 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 hydropower 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))