

DOI: 10.11779/CJGE2017S1042

面板堆石坝新型结构离心模型试验研究

李从安, 文松霖, 李波, 胡波

(长江科学院水利部岩土力学与工程重点实验室, 湖北 武汉 430010)

摘要: 采用离心模型试验技术探讨在覆盖层上增加盖板后坝体的变形特征。共进行三组离心模型试验, 分别研究增加盖板及不同覆盖层类型对坝体变形的影响, 以及防渗墙在坝体蓄水前后的变形规律。研究表明: 在覆盖层上设置盖板可以减小坝体沉降, 同时减小坝体不均匀沉降; 不同覆盖层类型增加盖板后盖板弯矩分布规律一致, 但软弱覆盖层上盖板弯矩变化幅度较大; 增加盖板后优化了防渗墙的弯矩, 离心模型试验揭示了面板堆石坝新型结构的变形和应力分布规律, 为深厚覆盖层上面板堆石坝新型结构的研究与设计提供依据。

关键词: 离心模型试验; 深厚覆盖层; 面板坝; 新型结构

中图分类号: TV641.43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0214-05

作者简介: 李从安(1990-), 男, 安徽六安人, 硕士, 主要从事离心模型试验研究。E-mail: 925859419@qq.com。

Centrifugal model tests on new type structure of CFRD

LI Cong-an, WEN Song-lin, LI Bo, HU Bo

(Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering of Water Resources Ministry, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: The deformation properties of CFRD (concrete face rockfill dam) are studied through centrifuge tests by building concrete cover plate on the alluvium foundation. Three centrifugal model tests are conducted for the purpose of exploring the influences of dam after building concrete cover plate on the alluvium foundation with different materials. The relationship between construction period and storage period of diaphragm wall is conducted. The test results show that the cover plate can reduce the settlement of the dam and reduce the uneven settlement of the dam. The distribution laws of bending moment of the cover plate is consistent after adding cover plate on different alluviums. But the bending moment of the cover plate on the soft cover is larger. The bending moment of cutoff wall is optimized after adding cover plate. The centrifugal model tests reveal the deformation and stress distribution of the new structure of the concrete face rockfill dam, and it may provide the basis for the research and design of CFRD on deep overburden layer of new structure.

Key words: centrifugal model test; deep alluvium foundation; CFRD; new type structure

0 引言

改革开放后, 特别是近些年来, 国家大力投入基础设施建设, 我国水力及水能资源建设投入加大, 水力资源的开发利用是基础设施建设中的重要组成部分。我国水能资源丰富, 水能资源的开发利用便显得颇为重要。我国西南地区, 伴随着丰厚的水能资源开发利用的同时, 河床多存在堆积厚度达几十米乃至上百米的深厚覆盖层^[1], 由于深厚覆盖层的存在, 制约着相应流域水能资源的开发与利用。

针对以上问题提出一种新型面板坝盖板结构。即通过在深厚覆盖层上建“混凝土盖板”, 在混凝土盖板施工中预留大型廊道, 在大型廊道内施工, 修建防渗墙。由坝体、混凝土盖板和覆盖层中的防渗墙组成完整的防渗体系^[2]。针对上述问题, 制定试验方案, 利

用离心模型可操作性、重复性的优势^[3-4], 采用离心模型试验方法, 重点研究在 25 m 深覆盖层中, 混凝土盖板、防渗墙及坝体的变形特性, 并为在深厚覆盖层上建高面板坝提供可行性依据。

试验模型模拟混凝土面板堆石坝, 坝高 76.8 m, 上下游边坡坡比为 1:1.5, 覆盖层厚度 24 m。面板厚度 0.4 m, 混凝土防渗墙厚度 1.0 m, 盖板厚度 2.5 m。离心模型试验采用长江科学院 CKY-200 大型土工离心机, 其最大加速度 200g, 有效转动半径 3.7 m, 模型箱的尺寸为 L (长) \times W (宽) \times H (高) = 100 cm \times 40 cm \times 80 cm。试验分三组, 每组分别模拟了竣工期和蓄水期两种工况。

1 模型设计和试验模拟方法

根据模型箱的体积, 为模拟原型坝高及覆盖层, 选用模型率 $N=120$, 离心机运转加速度为 $120g$ 。试验方案如表 1 所示。此时模型坝高为 440 mm (对应原型坝体 52.8 m), 模型覆盖层厚度为 200 mm (对应原型覆盖层 24 m), 模型尺寸及监测布置如图 1。

表 1 离心模型试验方案

Table 1 Schemes of centrifugal model tests

试验编号	是否设置盖板	覆盖层土料	测试内容
T-1	否	坚硬	施工期与蓄水期坝体、防渗墙和面板的变形
T-2	是	坚硬	施工期和蓄水期坝体、防渗墙和盖板及面板的变形
T-3	是	软弱	施工期和蓄水期坝体、防渗墙和盖板及面板的变形

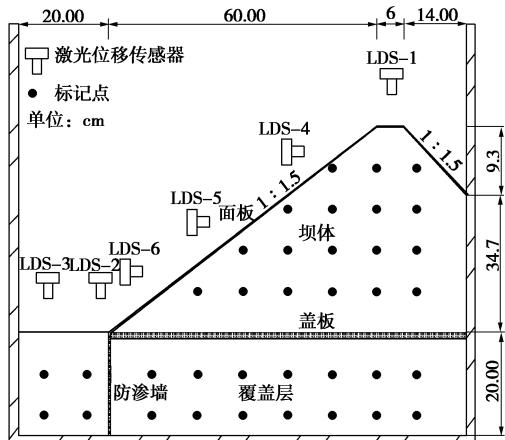


图 1 模型尺寸及监测布置图

Fig. 1 Model sizes and monitoring layout

由于模型箱尺寸的限制, 在模型的制作过程中对粗粒料采取超径颗粒的处理方法, 本次试验采用等量替代法^[5]对超粒径进行缩尺, 保证缩尺后材料粒径小于 5 mm 的含量与原型相同。试验最大允许粒径为 20 mm (主堆石区), 为模型箱最小尺寸的 $1/10\sim 1/20$, 可基本满足消除模型箱边界效应的影响。覆盖层材料分为两种, 坚硬覆盖层与软弱覆盖层。缩尺后坝基、坝体颗粒级配曲线如图 2 所示。

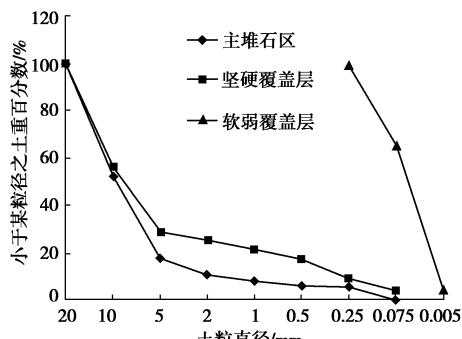


图 2 主堆石、坚硬覆盖层和软弱覆盖层颗粒级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of main rockfill, hard and soft alluvia

混凝土防渗墙 (弹性模量 $E=28.0\sim 31.5\text{ GPa}$) 的原型厚度为 1.0 m , 混凝土面板的厚度为 $0.3\sim 0.6\text{ mm}$ 。混凝土盖板厚度为 2.5 m , 泊松比 0.2 , 为了模拟材料的几何尺寸, 采取对原型材料进行缩尺^[6], 同时根据抗弯刚度相同的原则^[7], 采用铝合金板对试验中的混凝土防渗墙、面板以及盖板进行模拟。试验中模型材料铝板 (弹性模量 $E_a=70\text{ GPa}$, 泊松比 $\nu=0.33$) 用于模拟混凝土面板、防渗墙及混凝土盖板。根据原型材料和模型材料抗弯刚度相同的原则, 有 $E_m I_m = E_p I_p$, 其中 I_m , I_p 分别为模型铝板和混凝土沿危险截面中轴转动惯性矩, 与板厚 t 的三次方成正比, 确定模型材料后, 模型材料铝板厚度 t_m 与模型弹模 E_m 、原型混凝土板弹模 E_p 、原型材料厚度 t_p 和模型率 N 之间的关系如下:

$$t_m = \sqrt[3]{\frac{E_p}{E_m} \cdot \frac{t_p}{N}} \quad (1)$$

根据原型材料与模型材料抗弯刚度相同, 计算得出模型防渗墙厚度 $t_m=5\text{ mm}$, 盖板厚度 12 mm , 面板厚度 2 mm , 试验中采用该厚度的铝板, 达到与原型混凝土板抗弯刚度相同, 进而在试验中模拟防渗墙、盖板以及面板的变形。

模型试验分竣工期和蓄水期两个施工阶段, 为方便模型施工, 将制作好的模型吊入离心机中运行至 $120g$ 模拟坝体竣工期, 在 $120g$ 稳定运行至沉降变化低于 0.05 mm/min 停机, 然后在坝体上游侧蓄水。模型主要控制部位的变形由激光位移传感器和逐层放置的内部标记点进行量测, 其中激光位移传感器 (LDS) 可以在施工时直接量测坝顶和坡脚的竖向位移。模型防渗墙上游面中轴线从上到下贴有应变片 (量测精度为 0.01 mm)。应变片尺寸为长 (3 mm) \times 宽 (2 mm), 应变片沿防渗墙高度方向等距离布置。面板分五块, 应变片沿中间一块面板中轴线上从上到下等距离布置, 盖板应变片沿长度轴线方向等距离布置。每组应变片采用半桥线路测量。根据试验结果分析盖板、面板和防渗墙的应变值。

2 试验成果与分析

2.1 坝体变形

离心模型试验中, 通过设置在坝顶部的激光位移传感器测得坝体在试验过程中的沉降, 坝体内部变形则主要通过模型内部所埋设的标点。试验结果 (图 3) 如下: 试验 T-1 未加设盖板, 竣工期坝体沉降为 5.51 mm , 蓄水后沉降为 2.40 mm ; 试验 T-2 在试验 T-1 基础上加设盖板后竣工期坝体沉降为 4.48 mm , 蓄水期沉降为 1.60 mm ; 试验 T-3 建基软弱覆盖层上, 加设

盖板, 竣工期坝体沉降为 5.83 mm, 蓄水期沉降为 2.29 mm。对比试验 T-1 与试验 T-2 得出, 通过在覆盖层上加设盖板, 使得坝体竣工期沉降减小 1.03 mm (相当于原型 0.124 m), 蓄水期沉降减小了 0.8 mm (相当于原型 0.096 m); 对比试验 T-2 和试验 T-3 得出, 软弱覆盖层坝体沉降大于坚硬覆盖层坝体沉降。

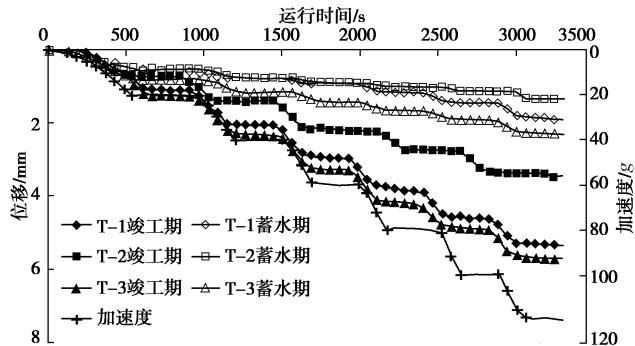


图 3 坝顶竣工期和蓄水期沉降 - 时间关系曲线

Fig. 3 Variation of dam crest displacement with time

通过在坝体内部放置标记点, 观测坝体在竣工期和蓄水期坝体内部沉降, 分析蓄水对坝体的影响。通过三组试验坝体内部标点试验前后位移, 得出坝体内部沉降等值线, 同一高程, 坝体中轴线处沉降大于两侧沉降, 最大位移位于坝顶位置; 竣工期坝体由于自重作用, 整体向下游移动; 通过蓄水对坝体影响等值线可以得出, 在水压力作用下坝体向下游移动; 对比试验 T-1 和试验 T-2, 通过在覆盖层上增加盖板, 减小坝体在竣工期和蓄水期位移。以试验 T-2 为例见图 4, 5。得到竣工期坝体的最大位移, 竣工期坝体在自重应力作用下向上游移动的最大水平位移, 以及蓄水期蓄水引起坝体的向下游的最大水平位移, 试验结果见表 2。

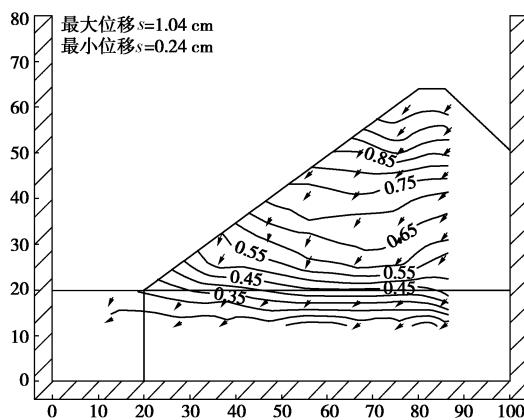


图 4 T-2 模拟竣工期分层位移场 (模型尺寸)

Fig. 4 Settlements of T-2 dam after completion

2.2 防渗墙弯矩

在试验 T-1 竣工期随着离心加速度的增大, 坝体发生沉降变形, 覆盖层在上部坝体的作用下向两侧发

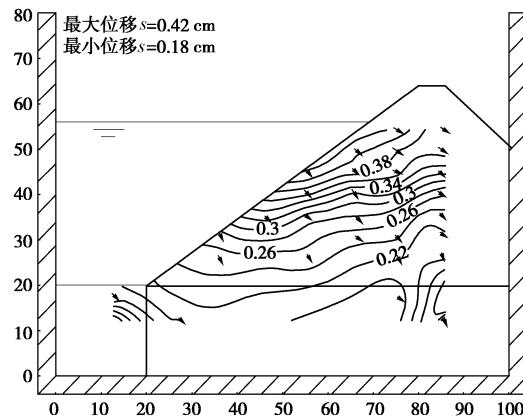


图 5 T-2 蓄水对坝体影响分层矢量图 (模型尺寸)

Fig. 5 Settlements of T-2 dam after impoundment

生挤压, 引起防渗墙上游面上部受拉, 随着离心加速度增大防渗墙所承受的弯矩也随之增大, 防渗墙上游面下部受压, 最大弯矩发生于防渗墙中上位置, 最大弯矩为 $-443 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ (换算成原型) (见图 6)。蓄水后由于水压力的作用防渗墙的变形也将发生改变, 在水压力的作用下防渗墙下游面上部受拉, 下部受压, 最大弯矩发生在上部, 对应弯矩为 $213 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$, 下部受压弯矩为 $-187 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ (见图 7)。

表 2 不同工况下坝体最大位移(向上游为正)

Table 2 Maximum displacements of dam under different conditions

组号	竣工期最大	竣工期坝体水	蓄水坝体水
	s/m	平 s_{max}/m	平 s_{max}/m
试验 T-1	1.49	1.14	-0.49
试验 T-2	1.25	0.88	-0.43
试验 T-3	1.43	1.09	-0.40

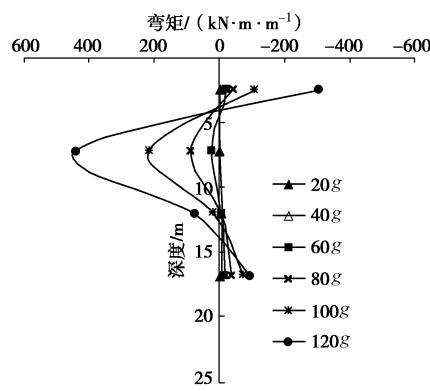


图 6 T-1 竣工期防渗墙弯矩图 (左侧拉为正)

Fig. 6 Bending moments of diaphragm wall in completion period

T-2 竣工期在坝体覆盖层上增加盖板, 随着离心加速度的增大, 坝体发生沉降, 覆盖层挤压防渗墙向上游移动, 防渗墙上游面整体受拉, 最大弯矩位于防渗墙中部为 $-384 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ (见图 8); 蓄水后, 坝体上游面将增加的水荷载传递给盖板, 盖板将整个上部荷载

传递给覆盖层, 相比竣工期, 盖板下方覆盖层增加了水荷载的作用力, 覆盖层进一步推动防渗墙向上游移动, 防渗墙上游面弯矩进一步增大, 最大弯矩发生在防渗墙上游面上部, 最大弯矩增加到 $-569 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ (见图9)。

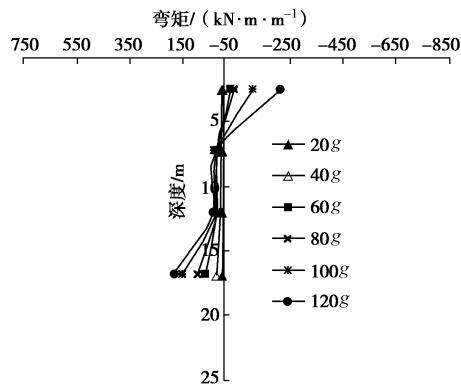


图 7 T-1 蓄水期防渗墙弯矩图 (左侧拉为正)

Fig. 7 Bending moments of diaphragm wall in storage period

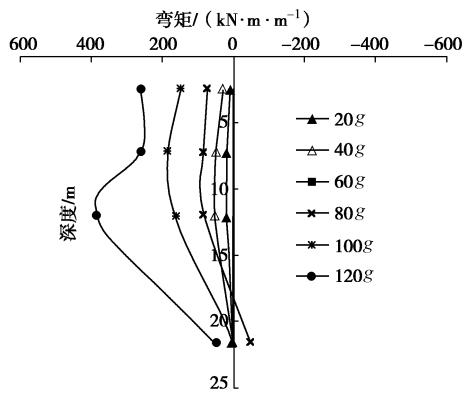


图 8 T-2 竣工期防渗墙弯矩图 (左侧拉为正)

Fig. 8 Bending moments of T-2 of diaphragm wall in completion period

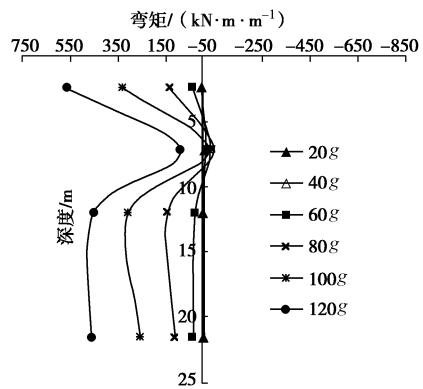


图 9 T-2 蓄水期防渗墙弯矩图 (左侧拉为正)

Fig. 9 Bending moments of T-2 of diaphragm wall in storage period

T-3 竣工期防渗墙受覆盖层的挤压作用, 防渗墙上游面上部受拉, 下部受压, 最大弯矩位于防渗墙上

游面上部, 最大弯矩为 $-280 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ (见图10); 蓄水后, 盖板将上部增加的水荷载作用力传递给覆盖层, 覆盖层挤压防渗墙进一步向上游移动, 防渗墙弯矩进一步增大, 最大弯矩发生在防渗墙上游面上部, 最大弯矩为 $633 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ (见图11)。防渗墙受覆盖层向上游的推力, 继续向上游移动, 防渗墙上游面整体受拉。

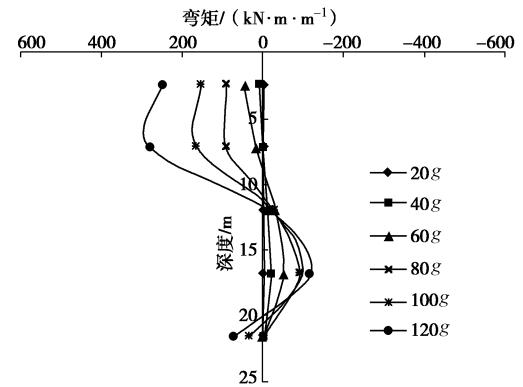


图 10 T-3 竣工期防渗墙弯矩图 (左侧拉为正)

Fig. 10 Bending moments of T-2 of diaphragm wall in completion period

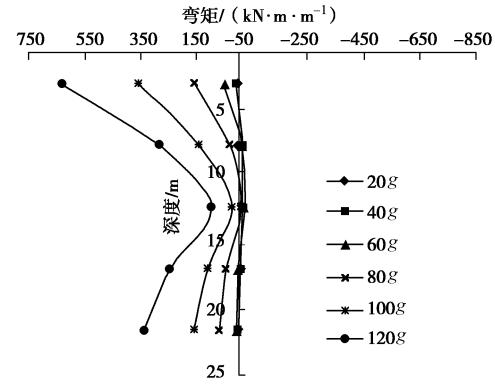


图 11 T-3 蓄水期防渗墙弯矩图 (左侧拉为正)

Fig. 11 Bending moments of T-3 of diaphragm wall in storage period

对比三组试验竣工期和蓄水期防渗墙弯矩图变化可以看出, 在竣工期, 防渗墙均受到覆盖层的侧向挤压, 防渗墙向上游移动, 防渗墙最大弯矩发生在防渗墙的中部或中上部; 蓄水后, 试验T-1防渗墙在水压力作用下向下游移动, 而试验T-2、T-3由于增加盖板, 上游堆石体上方的水荷载经盖板传递到下方的覆盖层, 引起覆盖层承受荷载增大, 防渗墙受覆盖层的侧向挤压力进一步增大, 弯矩均有所增加, 防渗墙上游面整体受拉最大弯矩位于防渗墙中上部位置。

2.3 盖板弯矩

试验T-2和试验T-3在覆盖层上加设盖板, 竣工期盖板承受来自盖板上方坝体的自重应力作用, 随着离心加速度的增大, 盖板所承受的荷载也逐级增大, 到达120g时, 盖板在上部荷载作用下上部受压, 下部受拉, 换算成原型盖板承受最大弯矩为 $7400 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$

(见图 12), 蓄水后, 上游堆石体上部的水荷载经坝体传递给盖板, 盖板将上部荷载均匀地传递给下卧覆盖层, 盖板受力较竣工期更为均匀, 120g 时盖板所承受弯矩整体在 $3000 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}$ 以内 (见图 13)。

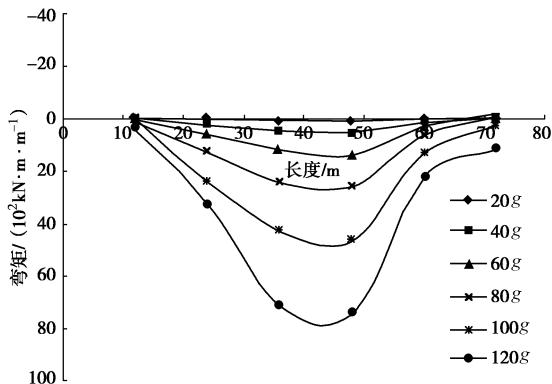


图 12 T-3 竣工期盖板弯矩 (下部拉为正)

Fig. 12 Plate deformations of T-3 in completion period

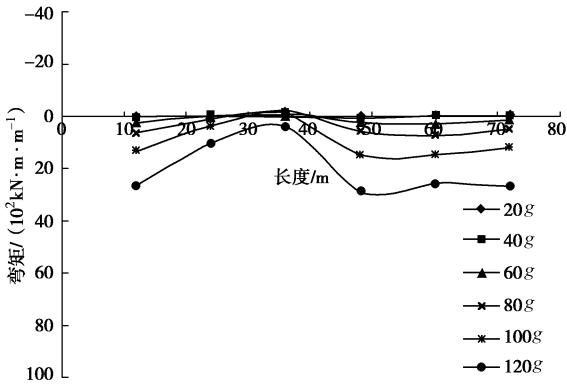


图 13 T-3 蓄水期盖板弯矩 (下部拉为正)

Fig. 13 Plate deformations of T-3 in storage period

3 结 论

试验通过三组离心模型, 模拟坝体在竣工期和蓄水期的施工工况, 借助激光位移传感器、应变等测量坝体、防渗墙在施工期与蓄水期的变形, 同时对面板、盖板和防渗墙的应变进行分析对比, 得到以下结论。

(1) 通过布设在坝体顶部的激光位移传感器分别记录三组试验过程中坝体在竣工期和蓄水期的位移, 得出通过在覆盖层上加设盖板可以减小坝体在竣工期和蓄水期沉降。

(2) 在覆盖层上增加盖板后改变了防渗墙在蓄水期的变形特征, 蓄水期由于增加盖板后盖板将上部承受的水荷载传递给覆盖层, 防渗墙受覆盖层的挤压作用进一步增大, 弯矩较竣工期进一步增大。

(3) 不同覆盖层上增加盖板后盖板弯矩分布规律一致, 在上部荷载作用下上部受压下部受拉, 最大弯矩位于盖板中间位置。软弱覆盖层盖板弯矩变化幅度较大。

(4) 离心模型试验揭示了面板堆石坝新型结构的变形和应力分布规律, 研究成果为深厚覆盖层上面板堆石坝新型结构的研究和设计提供依据。

参 考 文 献:

- [1] 许强, 陈伟, 张倬元. 对我国西南地区河谷深厚覆盖层成因机理的新认识[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 448 - 455. (XU Qiang, CHEN Wei, ZHANG Zhuo-yuan. A new understanding of the formation mechanism of deep overburden layer in the south west of China[J]. Advances in Earth Science, 2008, 23(5): 448 - 455. (in Chinese))
- [2] 徐晗, 饶锡保, 潘家军, 等. 超百米级深厚覆盖层上心墙堆石坝新型廊道结构研究[C]// 土石坝技术. 北京: 中国电力出版社, 2012: 288 - 292. (XU Han, RAO Xi-bao, PAN Jia-jun, et al. Study on new type corridor structure for core rockfill dam on hundred-meter-thick overburden layer[C]// Technology for Earth-Rockfill Dam. Beijing: China Electric Power Press, 2012: 288 - 292. (in Chinese))
- [3] SHARMA J S, BOLTON M D. Centrifugal and numerical modelling of reinforced embankments on soft clay installed with wick drains[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2001, 19(1): 23 - 44.
- [4] SPRINGMAN S M, BOLTON M D, SHARMA J, et al. Modelling and instrumentation of a geotextile in the geotechnical centrifuge[C]// Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement Practice. Fukuoka, 1992: 167 - 172.
- [5] GARNIER J, GAUDIN C, SPRINGMAN S M, et al. Catalogue of scaling laws and similitude questions in geotechnical centrifuge modeling[J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2007, 7(3): 1 - 23.
- [6] 杜延龄. 土工离心模型试验基本原理及其若干基本模拟技术研究[J]. 水利学报, 1993(8): 19 - 28. (DU Yan-ling. Basic principle and some simulation techniques of the geotechnical centrifugal model test[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1993(8): 19 - 28. (in Chinese))
- [7] 徐泽平, 侯瑜京, 梁建辉. 深厚覆盖层上混凝土面板堆石坝的离心模型研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1323 - 1328. (XU Ze-ping, HOU Yu-jing, LIANG Jian-hui. Centrifugal model tests on CFRD on deep alluvium foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1323 - 1328. (in Chinese))