

混凝土面板堆石混合坝性状的预测

郦能惠^{1, 2}, 孙大伟^{2, 3}, 王年香^{1, 2}, 黄悦照⁴, 肖贡元⁵

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029;
3. 三峡大学, 湖北 宜昌 443002; 4. 华东宜兴抽水蓄能有限公司, 江苏 宜兴 214205; 5. 上海勘测设计研究院, 上海 200434)

摘要: 对宜兴抽水蓄能电站上水库主坝施工期性状进行了监测, 基于原型观测资料采用反分析对本构模型及其参数进行了验证, 在此基础上, 采用数值分析、土工离心模型试验和原型观测相结合的方法预测了带有坝趾挡墙的混凝土面板堆石混合坝的应力变形性状和抗滑稳定性。结果表明: 混凝土面板堆石混合坝是一种适合于复杂地形条件的、特别是适合于抽水蓄能电站上水库条件的理想坝型。

关键词: 混凝土面板堆石坝; 坝趾挡墙; 应力变形; 性状; 预测; 反分析; 土工离心模型试验; 原型观测

中图分类号: TV64 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2009)08-1149-07

作者简介: 郦能惠(1940-), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事水利水电工程、电力建设工程的岩土力学和水工结构等方面的研究工作。E-mail: nhli@nhri.cn。

Prediction of performance of concrete face rockfill dam combined with toe retaining wall

LI Neng-hui^{1, 2}, SUN Da-wei^{2, 3}, WANG Nian-xiang^{1, 2}, HUANG Yue-zhao⁴, XIAO Gong-yuan⁵

(1. Department of Geotechnical Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China; 3. China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. East China Yixing Pumped Storage Power Co., Ltd., Yixing 214205, China; 5. Shanghai Investigation, Design & Research Institute, Shanghai 200434, China)

Abstract: The performance of the main dam of the head reservoir at construction stage is observed for Yixing Pumped Storage Power Station. The constitutive model and calculating parameters are verified using the back analysis based on the prototype observation data. Its stress-deformation behaviors and stability against sliding are predicted using a combined method with numerical calculation, geotechnical centrifugal model tests and prototype observation. It is concluded that the concrete face rockfill dam combined with toe retaining walls is a good dam type suitable for complex topographical conditions, especially for head reservoir conditions of pumped storage power stations.

Key words: concrete face rockfill dam; toe retaining wall; stress deformation; performance; prediction; back analysis; geotechnical centrifugal model test; prototype observation

0 引言

随着国民经济快速发展, 电力负荷水平迅速提高, 峰谷差逐渐加大, 为解决电网调峰问题, 一批大型抽水蓄能电站相继开工建设。抽水蓄能电站一般由上水库、下水库、引水系统和电厂组成, 上水库往往选在山顶坳地, 上水库主坝要横跨沟梁, 坝基通常座落在向下游倾斜的斜坡上, 若在这种地形条件下采用堆石坝, 下游坝体会呈长贴坡型。例如宜兴抽水蓄能电站上水库主坝可行性研究阶段采用沥青混凝土面板堆石坝, 坝顶高程 474.20 m, 马道之间下游坝坡 1:1.5, 下游坝脚至坝顶最大高差 285.0 m, 下游坝脚距坝轴线 470 m, 形成下游长达 553.8 m 贴坡体的堆石坝, 见图

1, 工程量大, 且坝体抗滑稳定问题突出, 若改用混凝土面板堆石混合坝坝型、即在下适当位置(坝轴线下游 135.5 m 处)设置挡墙, 拦截下游坝体, 下游堆石坝体缩短了 2/3, 代之以平均墙高 24 m、最大墙高 45.9 m 的衡重式挡墙, 节省工程投资, 并省去了数百万方的石料场, 保护了环境, 经济效益显著。这种带有坝趾挡墙的混合坝型在国内外尚属首次, 加之此坝型在抽水蓄能电站建设中具有普遍应用价值, 为此从数值分析、离心模型试验和原型观测相结合的途径对其应力变形性状与抗滑稳定性进行了研究和论证^[1]。

垫层区水平宽 2 m, 采用机轧砂岩夹泥岩骨料掺配而成; 过渡区水平宽 4 m; 主堆石坝体的 426.5 m 以上为主堆石区, 以下为增模区; 主堆石区和增模区的填筑要求不同, 增模区采用填筑层厚 60 cm, 18 t 振动碾压实 10 遍; 主堆石区采用填筑层厚 80 cm, 18 t 振动碾压实 8 遍。基础过渡区位于基岩与坝体之间, 厚度为 4 m; 排水区位于主坝左、右岸两沟中部, 取代该部位的基础过渡区, 排水区填料粒径小于 25 mm 的颗粒含量低于 10%, 最大粒径 600 mm。过渡区、主堆石区、增模区、基础过渡区和排水区均采用库盆开挖的砂岩夹泥岩料, 基础过渡区和排水区的泥岩含量 < 5%。过渡区、主堆石区、增模区的泥岩含量 < 10%。过渡区、主堆石区、增模区、基础过渡区和排水区设计干密度分别要求不小于 2.17, 2.09, 2.14, 2.15, 2.04 g/cm³ 和孔隙率分别要求不大于 20%, 22%, 20%, 20%, 25%。在趾板与垫层接触区域设置了特殊垫层区, 该区料采用机轧的砂岩夹泥岩砂石料掺配而成, 最大粒径 40 mm。垫层和特殊垫层的设计干密度要求不小于 2.19 和 2.17 g/cm³, 孔隙率要求小于 19%。

混凝土衡重式挡墙墙顶高程 381.90 m, 最大墙高 45.9 m, 挡墙墙趾至坝顶最大高差达 143.9 m。挡墙基础座落在弱风化砂岩上, 为了保证挡墙稳定, 墙后基岩留有不小于 10 m 的平台; 墙基布置了 17 根抗剪桩, 抗剪桩断面 3.5 m × 3.5 m, 桩长 25 ~ 35 m, 挡墙廊道内布置了 84 根 1200 kN 预应力锚索, 间距 1.5 m。

2 原型观测

该工程主坝左右两冲沟的两组断面 (0+127.33 m 和 0+381.02 m) 上设置了 37 支土体变形计以观测坝体内部水平位移, 设置了两套共 11 支水管式沉降计以观测坝体内部沉降, 0+381.02 m 断面坝体内部变形监测布置见图 2。典型的监测结果—填筑到坝顶时 452 m 高程坝体沉降实测值见图 3。

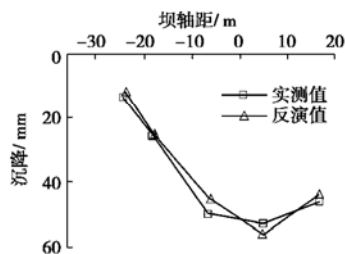


图 3 0+381.02 m 断面坝体沉降反分析计算值与实测值的比较
Fig. 3 Comparison between calculated values from back analysis and measured values of dam settlement in 0+381.02 m section

衡重式挡墙的第 3, 4, 13, 14 和 15 墙段共设置了 20 支土压力计观测挡墙上游面土 (堆石) 压力, 并

用外部表面变形观测仪器和正垂、倒垂装置观测挡墙的位移, 典型的第 15 墙段土压力计布置及土压力实测过程线见图 4, 5。

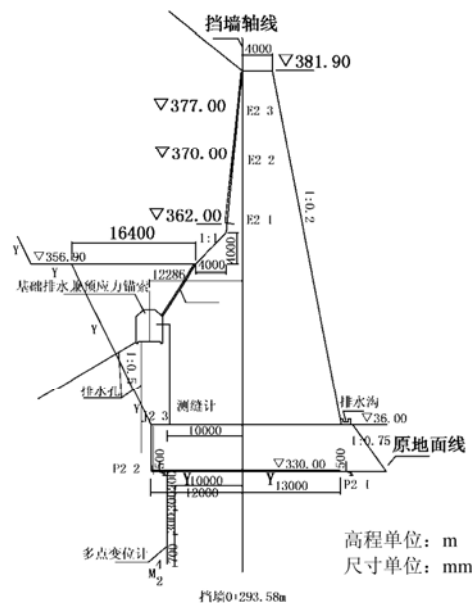


图 4 第 15 墙段 0+293.58 m 断面挡墙土压力监测布置
Fig. 4 Layout of earth pressure monitoring for No.15 retaining wall in 0+293.58 m section

3 反分析

3.1 计算模型、计算参数和网格剖分

用数值分析方法预测堆石坝的应力变形性状的关键在于选取筑坝材料的本构模型和计算参数以及计算模拟的仿真程度。本项研究采用了 4 种本构模型: 混凝土面板、趾板和挡墙采用线弹性模型, 坝体填筑料采用邓肯 - 张 (Duncan-Chang) E - B 模型, 堆石坝体与面板或与挡墙之间采用有厚度的接触面单元与非线性弹性模型, 面板垂直缝、周边缝和挡墙垂直缝采用连接单元和非线性弹性模型。

用大型三轴压缩试验测定了筑坝材料的抗剪强度和与本构模型参数, 试验结果见表 1。

为使数值分析的预测符合真实, 本项研究利用上述的原型观测资料进行反分析, 验证本构模型并确定计算参数。

为使反分析和预测更加符合实际, 本项研究开发了三维有限元网格生成程序 GEODAM-CAD, 三维网格剖分真实地模拟了下列情况: 原型观测仪器位置、坝体分层碾压施工过程、主坝建基面的台阶状、挡墙墙基抗剪桩与地形变化和主坝两坝肩圆弧状面板等。生成较为精细的三维有限元网格, 单元总数 63875 个, 结点总数 65286 个。计算分 45 级主增量、每级又分 2 ~ 3 节分增量仿真模拟坝体填筑、挡墙建造和原型观测

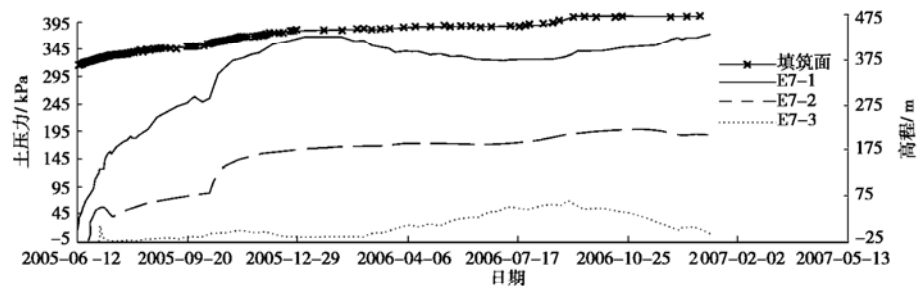


图 5 第 15 墙段 0+294.58 m 断面土压力过程线

Fig. 5 Earth pressure graph at 0+294.58 m section of No.15 retaining wall

表 1 筑坝材料试验结果

Table 1 Results of rockfill tests

试料 编号	干密度 $\rho(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	孔隙 率/%	试样 状态	c/kPa	$\phi/(\text{^\circ})$	$\phi_v/(\text{^\circ})$	$\Delta \phi/(\text{^\circ})$	K	n	R_f	G	F	D	K_b	m
主堆 石区	2.17	19.9	风干	107	43.40	52.7	7.69	908	0.35	0.80					
			饱和	55	43.90	49.61	4.98	660	0.42	0.83	0.41	0.15	2.70	327	0.28
主堆 石区	2.14	19.9	风干	112	41.60	53.40	9.90	1070	0.53	0.81					
			饱和	112	39.80	51.60	9.40	960	0.51	0.77	0.35	0.13	7.60	383	0.31
过渡 区	2.15	19.5	风干	133	43.70	52.20	6.50	1093	0.45	0.70					
			饱和	120	40.20	51.50	8.70	780	0.47	0.73	0.49	0.34	7.64	251	0.37

的过程。三维有限元网格的二维图见图 6。

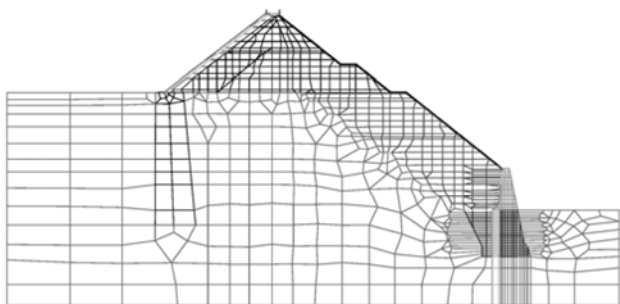


图 6 宜兴面板堆石混合坝体、挡墙和坝基的材料分区及施工分级加载网格图

Fig. 6 Mesh of material zoning and step loading for concrete face rockfill dam with toe retaining wall and its foundation

3.2 主坝反分析

反分析基于最优化原理，即使代表平均偏差的目标函数达到最小值，本工程有 6 个监测断面、8 条测线、48 个测点，随着坝体填筑，各测点监测坝体变形，采用关联度法来比较 8 条测线的计算值连线与实测值连线间的差值来检验目标函数的收敛。以本构模型参数对坝体变形的贡献大小编写数组和循环结构，改进方程组的迭代计算，开发了巨型网格加速计算技术，大大缩短了计算时间。

典型的反分析结果主坝 0+381.02 m 断面 452 m 高程各测点坝体沉降的反分析计算值和实测值比较结果见表 2 和图 3 所示。

主坝反分析验证采用邓肯 - 张 E - B 模型是合理的，反分析得到的计算参数见表 3。

表 2 主坝 0+381.02 m 断面 452 m 高程坝体沉降反分析计算值和实测值的比较

Table 2 Comparison between calculated values from back analysis and measured values of dam settlement at El. 452 m at 0+381.02 m section

测点	对应结 点号	坝轴 距/m	实测值 /mm	反分析计算 值/mm
TC2-3-1	49797	-24.60	13.8	11.2
TC2-3-2	49819	-18.96	25.8	24.8
TC2-3-3	49851	-6.96	49.8	45.1
TC2-3-4	49835	5.04	52.8	56.1
TC2-3-5	49469	17.04	45.8	43.4

3.3 挡墙反分析

挡墙顶部位移原型观测结果表明：在主坝填筑过程中挡墙有不同程度的沉降，绝大多数测点墙顶水平位移朝向下游，这说明挡墙处于主动土压力与静止土压力之间中间状态，所以挡墙土压力反分析可基于库伦土压力理论。从观测结果分析可以看出，挡墙背后堆石体填筑到 440.0 m 高程时土压力达到最大值，即墙后堆石体很可能存在一个库伦土压力理论中的滑裂面。

墙后堆石体的基础过渡区层厚仅 4 m，主堆石区、增模区和基础过渡区的坝料相近，抗剪强度相近，可视为一体。基于上述观点利用挡墙土压力实测资料进行反分析得到的墙后主堆石体的抗剪强度见表 4。将表 1、表 3 和表 4 相比较可以看出：筑坝材料的室内试验结果、主坝与挡墙的反分析结果所得到的主堆石体抗剪强度是相近的。

表 3 筑坝材料邓肯模型(E-B)计算参数反分析结果

Table 3 Results of back analysis for parameters of Duncan-Chang model

坝料	干密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta \varphi/(^{\circ})$	K	n	R_f	K_b	m
垫层区	2.17	198	40.2	56.9	13.5	1080	0.48	0.75	250	0.35
过渡区	2.19	133	43.7	52.2	6.5	1090	0.47	0.73	250	0.37
增模区	2.17	154	42.1	55.1	8.9	800	0.44	0.86	450	0.42
主堆石区	2.17	156	40.2	53.1	7.8	715	0.34	0.86	270	0.28

表 4 重力挡墙反演分析结果

Table 4 Results of back analysis for retaining walls

墙段	挡墙高度/m	用修正后土压力得出 的总推力/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$	反演分析得到主堆石体抗剪强度		采用反演分析结果计算得 出的总推力/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$
			咬合力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	
3	35.9	4369	52	40	4188
4	35.9	3737	60	40	3556
13	38.9	4209	80	40	3971
15	45.9	5118	76	40	5099

表 5 主坝应力变形性状预测结果

Table 5 Predicted results of stress and deformation behaviors of main dam

所在断面 桩号	竣工时坝体最大 大沉降/cm	竣工时坝体最大水 平位移/cm		蓄水时坝体最大 大沉降/cm	蓄水时坝体最大水 平位移/cm		竣工时坝体应力 /MPa		蓄水时坝体应力 /MPa	
		向上游	向下游		向上游	向下游	σ_1	σ_3	σ_1	σ_3
0+137.18 m	20	2	9.2	22.0	0	10.3	0.80	0.30	0.85	0.35
0+354.50 m	16	2	8.2	16.5	0	8.9	0.80	0.30	0.85	0.35

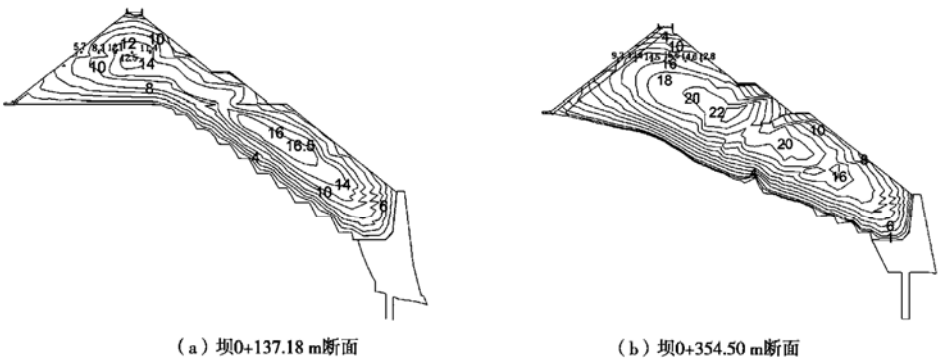


图 7 坝体运行时沉降

Fig. 7 Settlement of dam during operation

4 性状预测

4.1 主坝应力变形性状预测

在反分析的基础上,采用表 3 所示的反分析得到的计算参数、对主坝的应力变形性状进行了预测,预测结果见表 5。

将蓄水至正常蓄水位 471.5 m 时 0+127.33 m 和 0+381.02 m 两断面坝体沉降原型观测值(各测点水管式沉降计实测值+仪器埋设时各测点已发生沉降值)标识在相近两断面 0+137.18 m 和 0+354.5 m 的主坝应力变形性状预测沉降等值线图上,见图 7,可以看出预测与实测结果相当吻合,竣工时和蓄水运行时主坝应力变形性状良好,混凝土面板堆石混合坝是一种成功的新坝型。

4.2 挡墙稳定性预测

以墙高较大的第 13 墙段和第 15 墙段为例阐述采

用修正的实测土压力值和采用反分析得出的土压力值计算得到稳定安全系数,稳定性预测计算分为沿建基面抗滑稳定和抗倾覆稳定,其抗滑稳定又分为抗剪强度公式和抗剪断强度公式,挡墙稳定性预测结果见表 6,从表 6 可知挡墙的稳定是足够安全的。

4.3 混合坝沿建基面和深层抗滑稳定性预测

根据工程地质条件和混合坝的体型选取 3 个最危险的断面进行混凝土面板堆石混合坝沿建基面和深层抗滑稳定性的预测,根据筑坝材料室内试验、筑坝材料与基岩面之间现场抗剪强度试验和工程地质勘测试验结果选取的抗滑稳定分析计算参数见表 7。

混凝土面板堆石混合坝沿建基面和深层抗滑稳定性预测结果见表 8。

其中两个抗滑稳定安全系数较小的断面的抗滑稳定性预测结果见图 8。从上述图表可知混凝土面板堆石混合坝沿建基面和深层抗滑稳定是安全的。

表 6 沿建基面抗滑稳定安全系数和抗倾覆稳定安全系数
Table 6 Safety factors against slide and overturning along dam base

墙段	沿建基面抗滑稳定安全系数				抗倾覆稳定安全系数	
	抗剪强度公式		抗剪断强度公式		采用实测土压力	采用反分析得到的土压力
	采用实测土压力	采用反分析得到的土压力	采用实测土压力	采用反分析得到的土压力		
13	3.624	3.822	8.704	10.352	3.976	4.215
15	4.378	4.372	9.180	10.524	3.637	3.650

表 7 混凝土面板堆石混合坝建基面和深层抗滑稳定分析计算参数
Table 7 Parameters of stability analysis against slide along dam base and deep slide for main dam

滑动面		c'/kPa	$\phi/(^{\circ})$
主坝堆石体	主堆石增殖区	154	42.10
	主堆石区	156	40.20
主坝堆石体与基岩接触面	与五通组 D_3W^1	25	33.00
	与茅山组 $D_{1-2}ms^3$	21	34.50
挡墙混凝土与砂岩	坝纵 2	200	26.60
	坝纵 4	600	38.66
软弱岩层层面	st20 等	98	22.29
断层面	F51、F3 等	25	16.70

表 8 混凝土面板堆石混合坝沿建基面和深层抗滑稳定安全系数
Table 8 Safety factors of stability against slide along dam base and deep slide for main dam

工况	滑弧位置	断面		
		第 5 墙段坝纵 3	第 8 墙段坝纵 4	第 13 墙段坝纵 6
1	主坝坝体内部滑弧	2.335	2.090	2.292
2	一级（上）马道以下沿主坝堆石与基岩界面和墙基面	2.454	2.875	2.453
3	二级（下）马道以下沿主坝堆石与基岩界面和墙基面	3.031	3.805	2.662
4	沿整个主坝堆石与基岩界面和墙基面	2.520	2.438	2.274
5	主坝沿软弱层 st20 和断层 F51 面滑动	2.130	2.103	2.496
6	一级马道向下斜面，沿软弱岩层 st20 和断层 F51 面滑动	2.284	2.134	2.562
7	二级马道向下斜面，沿软弱岩层 st20 和断层 F51 面滑动	2.151	2.221	2.065

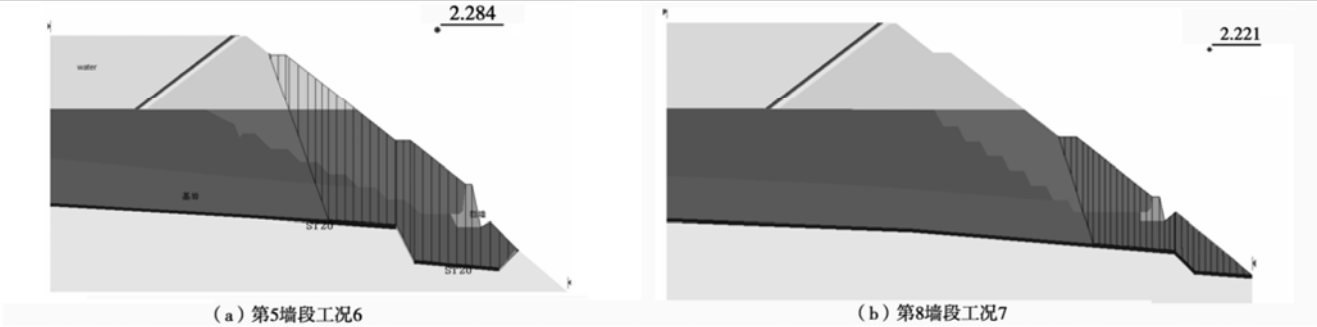


图 8 抗滑稳定性预测结果

Fig. 8 Prediction of stability against deep slide

4.4 土工离心模型试验预测

宜兴混凝土面板堆石坝混合坝离心模型试验模型比尺取 220，最大离心加速度 220g，土工离心模型试验进行了 13 个方案的试验，比较了筑坝材料与建基面的抗剪强度、基岩地下水位和软弱夹层、建基面倾角以及挡墙有无位移对混合坝应力变形性状和挡墙土压力的影响^[2-3]。

依据筑坝材料颗粒级配，先按相似级配法缩制，

再用等量替代法，即用混合法缩制离心模型试验的坝料，试料最大粒径 10 mm，模型坝分层填筑，填筑干密度 2.16 g/cm³，与原型坝一致。

与实际工程情况最为接近的方案 6 的土工离心模型试验预测结果见图 9，竣工时和蓄水时坝体最大沉降为 19.2，24.2 cm，与表 5 所示的数值分析预测结果相当接近；与实际工程情况较为接近的方案 1（挡墙允许位移）的挡墙土压力离心模型试验值与实测土压

力值都表示在图 10 中,可以看出用土工离心模型试验来预测混凝土面板堆石混合坝的性状和挡墙土压力也是合理可信的。

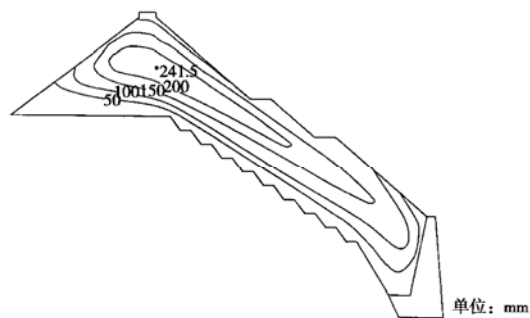


图 9 土工离心模型试验得到的方案 6 蓄水期坝体变形等值线
Fig. 9 Settlement of dam of Scheme 6 during operation from geotechnical centrifuge model tests

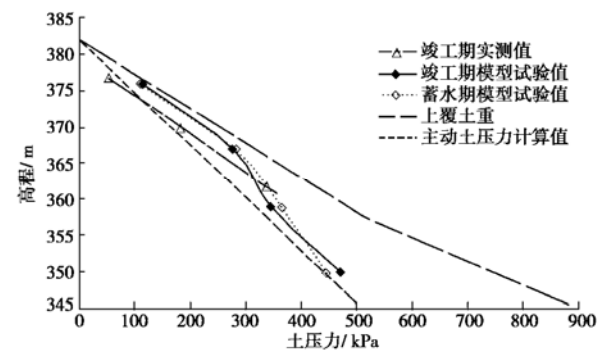


图 10 方案 1 挡墙压力分布
Fig. 10 Earth pressure distribution at retaining wall of Scheme 1

5 结 论

(1)带有坝趾挡墙的混凝土面板堆石混合坝的应力变形性状和抗滑稳定性良好,混凝土面板堆石混合

坝是一种适宜于复杂地形条件特别是抽水蓄能电站上水库地形条件的理想坝型。

(2)宜兴抽水蓄能电站上水库主坝应力变形性状的成功预测表明:数值分析、离心模型试验和原型观测相结合的方法是预测大坝应力变形性状和稳定性的最佳途径。

(3)基于原型观测资料进行反分析来验证本构模型和修正计算参数使采用数值分析方法来预测大坝应力变形性状更加合理可信。

参考文献:

[1] 酈能惠, 孙大伟, 等. 江苏宜兴抽水蓄能电站上水库主坝反演分析及正分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2007. (LI Neng-hui, SUN Da-wei, et al. Back analysis and stress-deformation analysis of main dam of head reservoir of Jiangsu Yixing Pumped Storage Power Station[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2007. (in Chinese))

[2] 酈能惠. 高混凝土面板堆石坝新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 533 - 541. (LI Neng-hui. Recent technology for high concrete face rockfill dams[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007: 533 - 541. (in Chinese))

[3] 王年香, 章为民. 江苏宜兴抽水蓄能电站上库钢筋混凝土面板混合坝离心模型试验报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2003. (WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Centrifugal model test for concrete face rockfill combined dam of Jiangsu Yixing Pumped Storage Power Station head reservoir[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2003. (in Chinese))