

膜土联合防渗系统对高土石坝心墙拱效应的影响

邢玉玲¹ 束一鸣¹ 花加凤² 李永红³ 周维垣⁴

(1.河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098 2.盐城市水利勘测设计院,江苏 盐城 224001;
3.成都勘测设计研究院,四川 成都 610072 4.清华大学水力发电工程系,北京 100084)

摘要:以四川瀑布沟心墙土石坝为例,应用 FLAC^{3D} 软件建立高土石坝的三维模型并对高土石坝的应力应变和渗流进行了数值模拟,同时将此数值模拟结果与其他文献中的计算结果进行了对比.结果表明,高土石坝中心墙处会出现拱效应现象,土工膜与土心墙组成的联合防渗系统可大大降低心墙浸润面,有效削弱心墙拱效应,完全消除心墙大主应力小于同高程渗透水压力的现象,从而提高防渗心墙的安全性.

关键词:高土石坝 膜土联合防渗系统 拱效应 心墙安全性 数值模拟

中图分类号:TV641.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-198X(2007)04-0456-04

高土石坝心墙拱效应现象是由于心墙两侧不同材料间沉降量和沉降时间存在差异所引起的.例如,某心墙砂壳坝中部高程处实测心墙两边缘处土压力仅是土柱自重压力的 30%~50%,而坝壳处的实测压力是自重压力的 1.9 倍^[1].这说明该坝心墙拱效应现象明显.拱效应的大小与心墙和坝壳的变形模量差、心墙坡度、坝高、填料强度以及施工速率等因素有关.拱效应作用的结果将导致心墙内竖向应力降低,从而使心墙内产生裂缝.当心墙内承受的竖向应力只有相邻坝壳承受的竖向应力的 20%~50% 时,坝体内部就可能产生水平裂缝^[2].要消除坝体裂缝对土石坝稳定造成的不利影响,必须有效地削弱心墙拱效应.为了研究膜土联合防渗系统对高土石坝心墙拱效应的影响,本文以四川瀑布沟心墙土石坝为例,应用 FLAC^{3D} 软件建立高土石坝的三维模型并对高心墙土石坝的应力应变和渗流进行了数值模拟.

1 联合防渗系统设计依据

对高水头心墙土石坝来说,仅采用土料心墙或土工膜防渗措施,则防渗效果不太理想,而将防渗土料心墙与土工膜组成联合防渗系统,则可有效地回避坝体防渗效率降低或局部失效的风险^[3-4].因为膜土联合防渗系统中的土工膜可以将土心墙与反滤层隔开,土工膜与土心墙之间、土工膜与反滤层之间的摩擦角都比土心墙与反滤层之间的摩擦角小,心墙产生的拱效应程度降低,所以在土心墙上游面采用膜土联合防渗系统,不仅可以提高防渗效果,而且可以改善拱效应.

2 联合防渗系统对拱效应的影响

本文以四川瀑布沟心墙土石坝为例,首先假设该坝采用膜土联合防渗设计方案,然后应用 FLAC^{3D} 软件对该坝进行应力应变和渗流的数值模拟,最后根据模拟结果来分析联合防渗系统对拱效应的影响.

2.1 工程结构与网格剖分

a. 四川瀑布沟大坝为土质心墙土石坝,坝高 184 m,地基厚 72 m,坝体建在厚达 75.14 m 的砂砾石覆盖层上.

b. 利用 FLAC^{3D} 软件建立了高土石坝的三维模型,坝体及地基单元剖分计算网格如图 1 所示.土工膜采用仅能承受拉力的膜单元来模拟,不同材料用界面单元连接.考虑到施工等因素可能会对土工膜造成破坏,每 4000 m² 设置一个 10 mm×10 mm 大小的孔洞^[5],如图 2 所示.



图 1 模型最大剖面的计算网格(有膜)

Fig.1 Computation mesh for the largest profile of the model

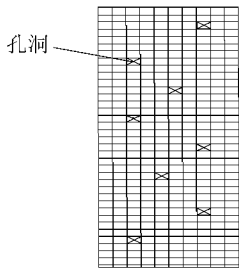


图 2 土工膜计算网格及其孔洞布置

Fig.2 Computation mesh of geomembrane and layout of holes

2.2 本构模型与参数

本构模型采用的是邓肯-张双曲线本构模型,模型计算参数如表 1 所示.考虑到试验得到的渗透系数要小于实际工程的渗透系数,将文献[4]中试验得到的渗透系数适当加大后作为本文的渗流计算参数.

表 1 心墙土石坝应力应变及渗流计算参数

Table 1 Stress-strain and seepage parameters for core-wall earth-rock dam

材料(部位)	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	黏聚力 c/kPa	破坏比 R_f	双对数的截距 K	双对数的斜率 n	半对数的截距 G	半对数的斜率 F	某直线的斜率 D	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
覆盖层(坝基)	147	38	0	0.64	780	0.42	0.32	0.08	7.0	2.5×10^{-2}
堆石(坝体)	230	43	0	0.68	1000	0.52	0.32	0.06	5.0	3×10^{-2}
过渡料(过渡层)	220	42	0	0.68	800	0.52	0.33	0.08	7.0	2×10^{-2}
反滤料(反滤层)	220	40	0	0.65	700	0.54	0.35	0.08	7.0	1×10^{-2}
深启底心墙料(心墙上部)	200	22	1	0.74	390	0.64	0.41	0.23	3.3	5×10^{-5}
黑马 I 区心墙料(心墙下部)	230	35	0.6	0.69	488	0.80	0.30	0.07	4.7	4×10^{-5}
高塑性黏土	200	16	5	0.86	125	0.70	0.38	0.04	1.1	4×10^{-5}
混凝土防渗墙	240	48	500	0.00	2300000	0.00	0.17	0.00	0.0	1×10^{-6}
土工膜		40	0							1×10^{-10}

注:双对数坐标为 $\left(\lg\left(\frac{E_i}{p_a}\right),\lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)\right)$,半对数坐标为 $\left(\nu_i,\lg\left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)\right)$,某直线坐标为 $\left(\frac{-\varepsilon_r}{\varepsilon_a},-\varepsilon_r\right)$,其中: E_i 为初始切线模量; p_a 为大气压力; σ_3 为最小主应力; ν_i 为初始切线泊松比; $\varepsilon_a,\varepsilon_r$ 分别为常规三轴试验中的轴向应变和侧向膨胀应变.

2.3 模拟结果

本文模拟计算了竣工期和稳定渗流期 2 种工况下土料心墙方案和膜土心墙联合防渗方案的应力应变和渗透水压力等,结果如图 3~5 所示.

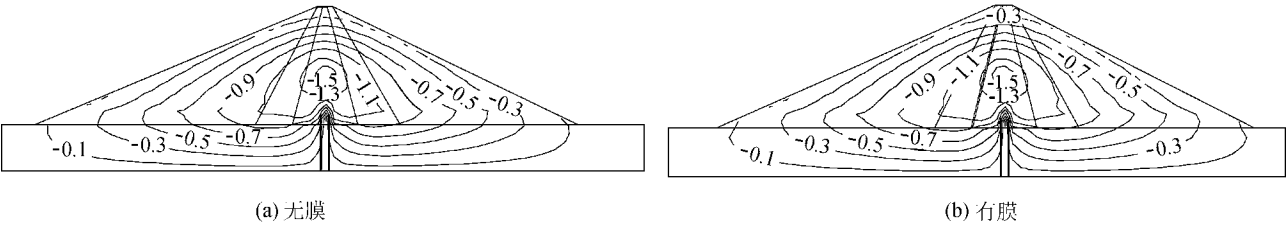


图 3 竣工期沉降等值线(单位:m)

Fig.3 Settlement contour for completion period(unit:m)

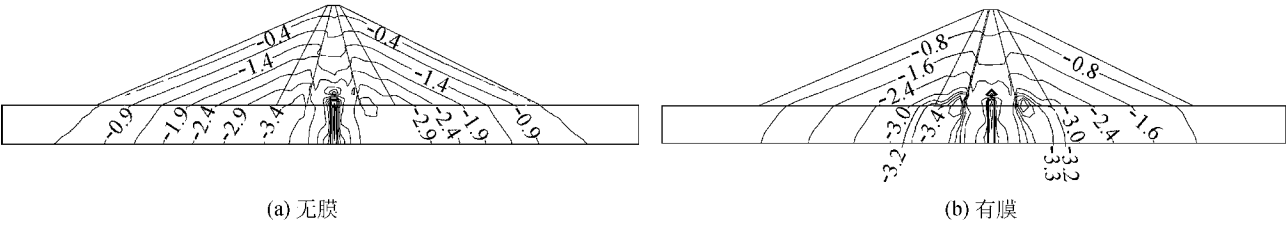


图 4 竣工期大主应力等值线(单位:MPa)

Fig.4 Contour of major principal stress for completion period(unit:MPa)

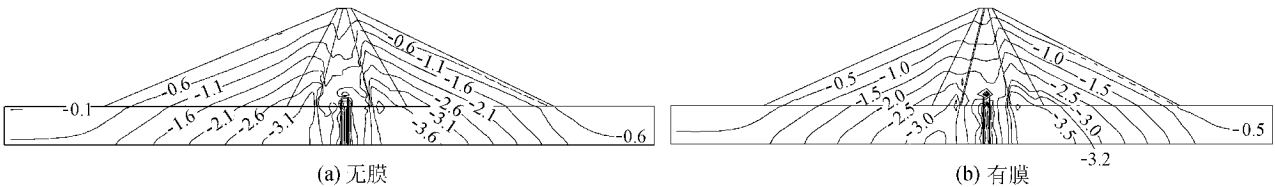


图 5 稳定渗流期大主应力等值线(单位 MPa)

Fig.5 Contour of major principal stress for period of steady seepage(unit MPa)

2.4 结果分析

a. 竣工期坝体的最大沉降出现在心墙内坝高 75 m(坝高 2/5)左右处,最大沉降值不到坝高的 1%. 稳定渗流期与竣工期的沉降等值线变化趋势一致,但渗流期的沉降比竣工期大一些. 竣工期坝体的大主应力等值线基本对称于心墙,呈双拱形,即靠近心墙坝壳处的曲线类似于“驼峰”,心墙处曲线呈明显下陷趋势,大主应力最大值位于心墙底部. 稳定渗流期大主应力等值线的双拱形状更加明显. 这说明黏土心墙土石坝产生了拱效应. 为了验证本文结果的合理性,对本文和文献[6-7]计算得到的无膜时坝体沉降和大主应力最大值进行了对比,如表 2 所示.

表 2 本文和文献[6-7]计算得到的无膜时坝体沉降最大值和大主应力最大值的对比

Table 2 Comparison of the maximal settlement and maximal major principle stress of the dam calculated by the present method and obtained from ref[6,7]with no geomembrane covered

工况	最大沉降值/cm						大主应力最大值/MPa					
	量值/cm			出现位置			量值/MPa			出现位置		
	本文	文献[6]	文献[7]	本文	文献[6]	文献[7]	本文	文献[6]	文献[7]	本文	文献[6]	文献[7]
竣工期	175	254	175	$\frac{2}{5}H$ 处	$\frac{2}{5}H$ 处	$\frac{2}{5}H$ 处	3.45	3.54	3.79	心墙底部	地基底部	地基中部
蓄水期	225	255	164	$\frac{2}{5}H$ 处	$\frac{2}{5}H$ 处	$\frac{2}{5}H$ 处	4.15	3.85	3.40	地基中部	地基底部	地基中部

注:H表示坝高.

b. 稳定渗流期有膜时心墙内的水位比无膜时低得多. 由图 6 可知,采用在心墙前铺设土工膜形成的膜土联合防渗系统可取得较好的防渗效果. 渗透水压力为 0 的等值线为坝体的浸润线,加膜后心墙内的浸润面大约降低了 50%,心墙底的最大渗透水压力约为无膜时的 55%,这极大地降低了防渗指标存在缺陷的黏土心墙渗透破坏的风险率.

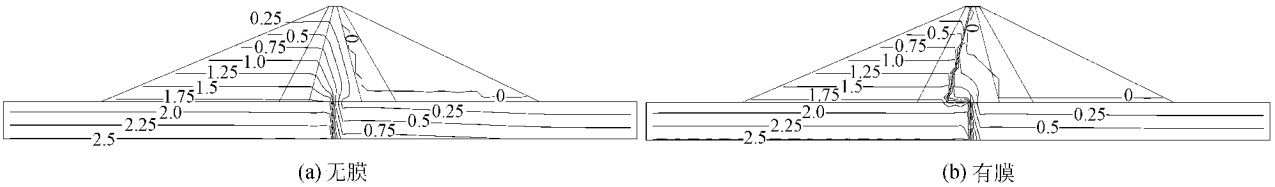


图 6 稳定渗流期渗透水压力等值线(单位 MPa)

Fig.6 Contour of seepage water pressure for period of steady seepage(unit MPa)

c. 稳定渗流期有膜与无膜时的坝体大主应力基本相同(图 5),但心墙上游面沿坝高的大应力值较无膜时有所增加. 坝高 55 m 左右处大主应力增加得最多,达到 2.10 MPa. 加膜后稳定渗流期心墙上游侧的应力跌落有所减缓,拱效应得到改善.

d. 当拱效应的作用可以使心墙竖向应力小于该处渗透水压力时,水力劈裂会导致水平裂缝的产生[8]. 由图 7 可知,黏土心墙前加膜后,心墙内的应力增加,而膜的防渗性使得心墙内的渗透水压力降低,水力劈裂危险性减小.

3 结 论

a. 竣工期坝体的沉降最大值位于心墙高 2/5 处,稳定渗流期的坝体沉降比竣工期略有增加. 竣工期坝体的大主应力等值线基本对称于心墙,呈双拱形,说明黏土心墙产生了拱效应. 稳定渗流期黏土心墙的拱效应更加明显. 本文计算得到的沉降和大主应力的分布规律与文献[6-7]的研究结果相吻合,表明本文计算模

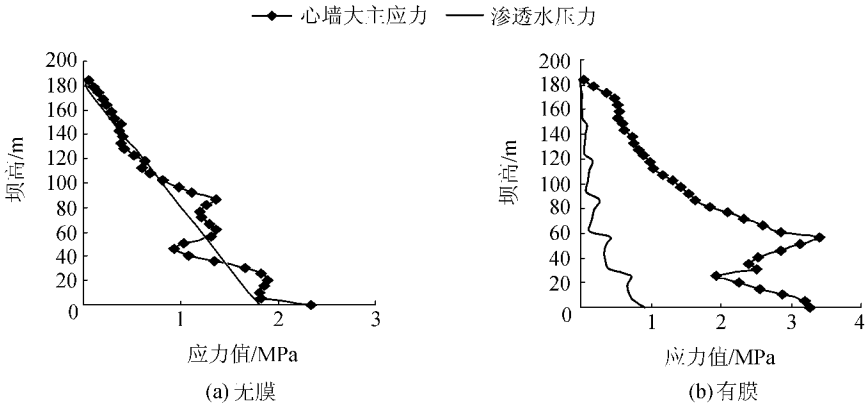


图 7 心墙上游大主应力与渗透水压力变化曲线

Fig.7 Relationship between upstream major principal stress and seepage water pressure of core-wall
型可用于应力应变和渗流分析.

b. 在心墙前加膜,可有效削减渗透水头,降低浸润面.这说明,即使土工膜存在缺陷,心墙砾质土不完全满足防渗指标,只要采用膜土联合防渗系统,就可以在宏观上满足安全防渗的要求.

c. 心墙前加膜后,不仅提高了心墙渗透稳定性,而且在心墙上游面底部附近,大主应力的拱效应有所减弱.另外,膜的防渗作用又使得心墙内渗透水压力大于大主应力的部分得到消除,并且心墙内渗透水压力值远小于大主应力值,水力劈裂的危险性消除,在力学与水力学 2 个方面保证了防渗心墙的安全.

参考文献：

[1] 吴子树,张利民,胡定.土拱的形成机理及存在条件的探讨[J].成都科技大学学报,1995(2):15-19.
[2] 宫必宁,童蕾.土石坝工程的拱效应分析[J].东北水利水电,2004,22(12):14-15.
[3] 束一鸣,李永红.较高土石坝防渗结构设计方法探讨[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(1):60-64.
[4] 林淀翔.土工膜心墙土石坝设计与施工中若干问题的研究[D].大连:大连理工大学,2004.
[5] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会.土工合成材料工程应用手册[K].2版.北京:中国建筑工业出版社,2000.
[6] 许国安,魏泽光,武桂生.瀑布沟水电站三维非稳定渗流有限元计算[J].西北水电,1997(2):16-19.
[7] 杨荣.瀑布沟高土石坝三维非线性分析[J].应用基础与工程科学学报,1995,3(3):260-267.
[8] WHITFIELD B L. Geomembrane application for an RCC dam[J]. Geotexts and Geomenbranes,1996,24(14):253-264.

Effect of geomembrane and core-wall united impervious system
on arch effect of core-wall in high earth-rock dams

XING Yu-ling¹, SHU Yi-ming¹, HUA Jia-feng², LI Yong-hong³, ZHOU Wei-yuan⁴

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Yancheng Hydraulic Investigation and Design Institute, Yancheng 224001, China;
3. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute of SPC, Chengdu 610072, China;
4. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract :With Pubugou core-wall earth-rock dam in Sichuan Province as an example, a 3D model for the high earth-rock dam was developed by using FLAC^{3D} software, and the stress, strain, and seepage of the earth-rock dam were simulated. The comparison of the simulated result with those from other references shows that arch effect might occur in the core-wall of the high earth-rock dam. The united impervious system of geomembrane and core-wall can greatly lower the phreatic surface in the core-wall, weaken its arch effect, and completely eliminate the phenomenon that the major principal stress of the core-wall is smaller than the seepage water pressure at the same elevation, so that the safety of the impervious core-wall could be improved.

Key words :high earth-rock dam; geomembrane and core-wall united impervious system; arch effect; safety of core-wall, numerical simulation