

高土石坝粘土心墙和复合土工膜防渗性能研究

姜海波

(石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000)

摘要: 高土石坝在静力情况下的应力、变形特性和防渗性能一直是高土石坝设计和施工的关键问题。以一座高为 127.5 m 的高土石坝为例,通过室内试验和三轴试验测得坝体材料的物理性质指标和邓肯张 E-B 模型参数,采用有限元计算方法,计算竣工期和渗流稳定期复合土工膜高土石坝坝体应力、应变和变形以及大坝渗流量,并和粘土心墙防渗计算结构进行对比,并对复合土工膜心墙是否发生水力劈裂进行判断。结果表明:由于堆石体材料的流变性,引起了坝体的竖向位移和水平位移。复合土工膜心墙与粘土心墙相比,复合土工膜对降低坝体浸润线、减小坝体孔隙水压力均有显著作用,减小幅度在 50% 左右,且复合土工膜不会发生水力劈裂等不利问题。

关键词: 复合土工膜; 高土石坝; 应力应变; 孔隙水压力

中图分类号: TV641.1; TV441

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)04-0090-04

Study on impermeability clay core wall and composite geo-membrane for high earth-rock dam

JIANG Haibo

(College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China)

Abstract: Stress and deformation properties and hydraulic fracture under the state of static force are the key problem of design and construction for high earth-rock dam. Taking a 127.5 m high earth-rock dam for example, the paper got the index of physical properties and Duncan-Chang E-B model parameters of dam material through the laboratory experiments and triaxial tests, and computed the stress and deformation and seepage quantity of high rock-fill dam with composite geo-membrane during the period of completion and seepage stabilization by use of finite element method. It also judged whether the hydraulic fracturing of the core wall took place. The calculation results show that because of the rheology of rockfill material, vertical and horizontal displacements of dam are taken place. The composite geo-membrane has an evident effect on reducing embankment seepage, decrease pore water pressures and saturation line of embankment dam, and prevent the hydraulic fracturing produced in dam body compared with clay core wall.

Key words: composite geo-membrane; high earth-rock dam; stress-strain; pore water pressure

1 概述

我国将复合土工膜作为防渗体在低土石坝中的应用已较为普遍,有一些 100 m 级的高土石坝也在尝试采用复合土工膜进行坝体防渗(复合土工膜防渗心墙或防渗斜墙),采用复合土工膜防渗的土石坝已经呈现由低坝向高坝发展的趋势。文献[1]中详细论述了我国土石坝采用土工膜成功防渗的工程实例。对于防渗土料不能完全符合防渗要求的高水头土石坝,采用复合土工膜、粘土心墙或联合抗渗满

足了其防渗要求,并且复合土工膜与心墙的联合抗渗能有效降低下游坝坡的浸润线高度,减小坝体底部所承受的孔隙水压力,有效削弱心墙拱效应,大大降低下游坝坡失稳的可能性,有效防止粘土心墙水平裂缝的产生^[2]。

目前对复合土工膜土石坝防渗问题的研究多集中在中低土石坝,多采用专业软件进行渗流场数值模拟^[3-6],比较成熟的是应用饱和渗流理论与饱和-非饱和渗流理论以及 Galerkin 理论,对(复合)土工膜防渗土石坝进行渗流场仿真分析,研究土工膜等效处理时不同厚度放大倍数下大坝渗流场的变化

收稿日期:2013-03-07; 修回日期:2013-04-22

基金项目:石河子大学科学技术研究发展计划项目-自然科学一般项目(ZRKXYB-LH16)

作者简介:姜海波(1982-),男,湖南人,博士,副教授,从事水工抗冻及数值模拟研究。

规律,计算大坝渗流量和浸润线与土工膜厚度放大倍数之间的关系^[7-8]。对于复合土工膜产生缺陷或者孔洞以后渗流问题的研究,Brown等人通过实验证明,当土工膜上下介质为无限透水时,如孔洞尺寸大于土工膜厚度,可把这种情况下的渗流看成孔口自由出流,可用 Bernoulli 公式^[9]计算。Giroud J P 和 Bonaparte B 等对强透水支持层和弱透水支持层作了土工膜渗漏量的试验比较^[10]。但试验防渗水头较小,只有 0.3m,结果显示,对于微小防渗水头,弱透水支持层对于渗漏量减少作用很大。文献[11]通过试验对中低水头下不同支持层土工膜渗漏量作了比较,同样的在低水头作用下弱透水支持层对渗漏量的限制作用较大。但当水头在 30m 时,不同支持层下的渗漏量接近相等。这也证明了弱透水支持层土工膜防渗结构对只存在低水头的环境工程中的污水防渗和危险性废物堆场的封闭是非常合适的。对于大面积土工膜(复合土工膜)渗透系数的研究,文献[12]通过一座真实平原水库的原型观测,从水量平衡角度,采用达西定律对库盘大面积土工膜防渗体的渗透特性进行研究,分析库盘大面积土工膜防渗体产生的破损孔洞对土工膜渗透特性的影响,计算大面积土工膜防渗体的渗透量和渗透系数,从整体上得出大面积土工膜防渗体渗透特性的分析方法。

通过以上分析,对复合土工膜防渗性能的研究多集中在中低土石坝或低水头的水库、环境工程中,而对高土石坝采用复合土工膜进行防渗研究较少,缺乏工程实践。为了研究高土石坝采用复合土工膜防渗以后坝体的应力应变特性以及防渗效果,以一座高为 127.5 m 的高土石坝为例,通过室内试验和三轴试验测得坝体材料的物理性质指标和邓肯张 E-B 模型参数,采用有限元计算方法,计算竣工期和渗流稳定期复合土工膜高土石坝坝体应力、应变和变形以及大坝渗流量,并和粘土心墙防渗计算结构进行对比,并对复合土工膜心墙是否发生水力劈裂进行判断^[13]。可以为复合土工膜高土石坝的设计和施工提供有益的参考。

2 坝体邓肯张 E-B 模型及相关参数

为了更好地模拟复合土工膜高土石坝的应力应变场,采用邓肯张 E-B 模型进行计算。邓肯张本构模型虽然不能反映堆石体的剪胀剪缩性、软化特性以及各向异性^[14],但它能很好地反映堆石体的变形特点。坝体材料物理性质指标见表 1。坝体各分

区的材料性质不一,在有限元计算中应按不同的属性进行赋值。表 2 为坝体邓肯张 E-B 模型参数,通过三轴试验的数据推求邓肯张 E-B 模型的几个参数。表 3 为坝体各分区的渗透系数,复合土工膜的渗透系数按文献[12]取值,复合土工膜的物理力学性质指标见表 4。

表 1 坝体材料物理性质指标 $\text{v/m}^3, \%$

坝料名称	干容重	湿容重	饱和容重	浮容重	比重	孔隙率	含水量	相对密度
坝壳砂	2.24	2.31	2.42	1.42	2.73	17.8	3.74	0.8
砾石料								
反滤料	1.76	1.97	2.00	1.12	2.65	33.5	12.0	0.8
粘土心墙料	1.75	2.00	2.11	1.11	2.72	35.6		

表 2 坝体邓肯张 E-B 模型参数 $\text{kPa}, (^\circ), \text{g/cm}^3$

材料类型	K	n	R_f	c	φ_0	$\Delta\varphi$	K_{ur}	K_b	m	ρ
坝壳料	500	0.35	0.80	50	30	0	800	470	0.15	2.40
排水棱体	550	0.33	0.78	45	32	0	820	480	0.15	2.33

表 3 坝体各分区渗透系数 m/s

材料分区	渗透系数
坝壳料	3.91×10^{-6}
排水棱体	1.80×10^{-5}
复合土工膜	1.20×10^{-10}

表 4 复合土工膜物理力学性质指标 $\text{g/m}^2, \text{kN/m}, \%$

复合土工膜规格	质量	纵向抗拉强度	横向抗拉强度	刺破强度	极限伸长率
200g/m ² /PE0.5/ 200g/m ²	980	51.6	53.2	1.1	134

3 工程概况

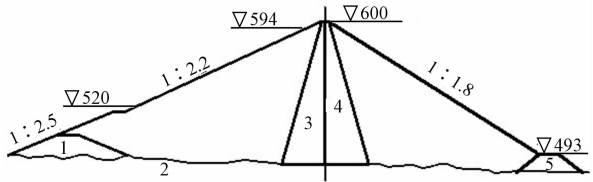
某引水工程水利枢纽属大(2)型 II 等工程,拦河大坝拟采用复合土工膜心墙高土石坝或粘土心墙高土石坝。坝体属 2 级建筑物,大坝最大坝高 127.5 m,坝顶宽 11 m,坝顶长 440 m,正常高水位为 594.0 m。上游坝坡为 1: 2.2,下游平均坝坡为 1: 1.8。复合土工膜心墙顶部高程为 598 m。心墙两侧设反滤层,复合土工膜心墙及反滤层均置于基础混凝土板上,上下游坝壳置于河床砂卵石上。若采用粘土心墙进行坝体防渗,粘土心墙坡率为 1: 0.3,粘土要符合防渗要求,坝体最大剖面如图 1。

4 粘土心墙高土石坝有限元计算

4.1 粘土心墙坝体有限元计算模型

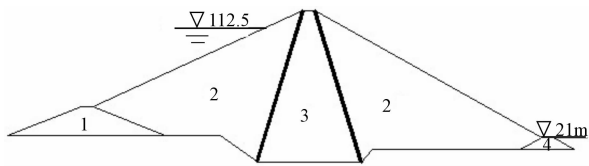
有限元计算采用大型有限元软件 ABAQUS 进

行,坝体本构模型采用邓肯张 E-B 模型,计算参数见表 2,坝体各分区的渗透系数见表 3,复合土工膜的计算参数见表 4。计算模型中的荷载按照坝体施工填筑的先后次序分 12 级来模拟,顺序如下:第 1~2 级:上游围堰分两层逐级加载;第 3~11 级:坝体分九层逐级加载,包括粘土心墙及下游排水棱体;第 12 级:水库蓄水至 112.5 m 相对高程。应力应变计算有限元网格共划分 897 个节点,823 个单元,类型为 CPE4 单元,即四节点四边形平面应变单元。粘土心墙坝体有限元计算模型见图 2,坝体各部分的渗透参数见表 3。图 3 为粘土心墙坝体有限元网格划分示意图。



1. 上游围堰; 2. 开挖线; 3. 粘土心墙; 4. 复合土工膜; 5. 排水棱体

图 1 坝体最大剖面



1. 上游围堰; 2. 坝壳料; 3. 粘土心墙; 4. 排水棱体

图 2 坝体粘土心墙计算模型

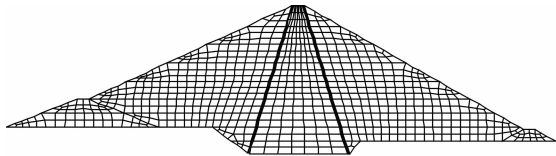


图 3 坝体粘土心墙防渗体有限元网格划分

4.2 计算成果与分析

粘土心墙及堆石体竣工期和渗流稳定期的应力应变、位移极值见表 4。粘土心墙在竣工期、稳定渗流期的水平位移极值为 7.8 cm、12.3 cm。堆石体在竣工期、稳定渗流期的水平位移极值为 8.5 cm、12.3 cm,均向下游。坝体水平位移是由堆石体材料的“泊松”效应所引起的,这是堆石体的流变性^[14]所致。堆石体和粘土心墙的小主应变值均为负值,说明坝体和粘土心墙在局部产生了拉应变。堆石体和粘土心墙的主应力最大值分别为 2 497、2 346 kPa。坝体渗流量为 $4.21 \times 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$ 。

表 4 粘土心墙坝体变形和应力极值

		cm, %, kPa		
名称	竣工期	稳定渗流期		
堆石体变形	竖向位移 铅直向下	48.2	48.0	
	水平位移	向上游	-4.0	-3.3
		向下游	8.5	12.3
粘土心墙变形	竖向位移 铅直向下	52.0	51.4	
	水平位移	向上游	1.7	
		向下游	7.8	12.3
堆石体应变	大主应变	1.47	1.53	
	小主应变	-0.29	-0.35	
粘土心墙应力	大主应力	1.22	1.27	
	小主应力	-0.20	-0.19	
堆石体应力	大主应力	2414	2497	
	小主应力	705	711	
粘土心墙应力	大主应力	2279	2346	
	小主应力	1006	1001	
大坝渗流量		4.21×10^{-6}		

注:竖向位移向下为正;水平位移向上游为负,向下游为正;应力和应变受压为正,受拉为负。

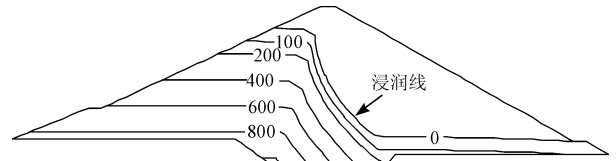


图 4 稳定渗流期坝体粘土心墙孔隙水压力等值线图(单位:kPa)

图 4 为粘土心墙坝体孔隙水压力等值线图,从图中可以看出,粘土心墙两侧的孔隙水压力相差很大,这说明粘土大大降低了坝后浸润性,减小坝体底部的孔隙水压力,大大增强了坝体的渗透稳定性。水力劈裂是高压水流或其他液体将岩体内已有的裂纹、孔隙驱动扩张、扩展、相互贯通的现象^[15]。由于心墙受到两侧堆石体或两岸山体的支撑作用,心墙产生拱效应,使心墙内部的实际应力远小于心墙的重力,才会产生水力劈裂。从图 5 可以看出,坝体心墙任一高程处的竖向应力和总应力值都大于水压力,因此心墙不会发生水力劈裂。

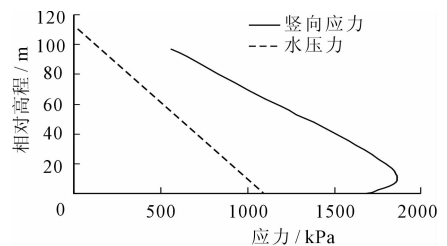
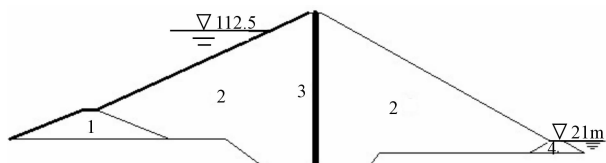


图 5 粘土心墙上游面总的中主应力沿高程分布

5 复合土工膜心墙高土石坝有限元计算

5.1 复合土工膜心墙坝体有限元计算模型

根据坝体施工分层填筑的实际情况和坝体材料的非线性特性,采用逐级施加荷载的方法填筑上升。计算模型中的荷载按照坝体施工填筑的先后次序进行,加载顺序与粘土心墙有限元计算相同。应力应变计算有限元网格共划分 943 个节点,860 个单元,类型为 CPE4 单元,即四节点四边形平面应变单元。图 6 为坝体复合土工膜防渗斜墙计算模型,图 7 为坝体复合土工膜防渗斜墙有限元计算网格。



1. 上游围堰; 2. 坝壳料; 3. 复合土工膜; 4. 排水棱体

图 6 坝体复合土工膜心墙计算模型

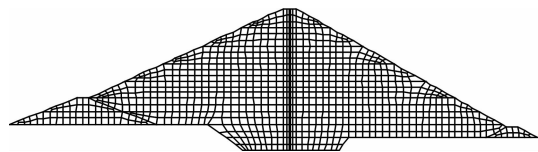


图 7 坝体复合土工膜心墙有限元计算网格

5.2 计算成果与分析

复合土工膜高土石坝竣工期和渗流稳定期坝体、应力应变位移值见表 5。堆石体在竣工期和渗流稳定期的竖向位移分别为 45.8、42.5 cm;向上游的水平位移分别为 3.7、3.0 cm;向下游的水平位移为 7.1、13.1 cm。竣工期的竖向位移是由于堆石体的重力所引起的,基本沿坝轴线对称分布;坝体建成蓄水后,竖向位移继续发展,至渗流稳定期,由于水压力的作用,竖向位移的最大值偏向下游;在堆石体重力作用下,不仅会发生竖向位移,也会发生水平位移。竣工期和渗流稳定期水平位移的最大值都发生在下游。坝体竖向位移和水平位移由堆石体材料的“泊松比”效应所引起的,这是堆石体的流变性所至。

竣工期和渗流稳定期大主应力最大值分别为 2 503、2 361 kPa,均为压应力。竣工期和渗流稳定期堆石体大主应变最大值为 1.42% 和 1.5%,为压应变;堆石体小主应变最大值为 0.51% 和 0.38%,为拉应变。堆石体的渗流量为 $2.33 \times 10^{-7} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,与粘土心墙比较,复合土工膜防渗体可

以大大减小坝体的渗流量。

表 5 坝体复合土工膜心墙变形和应力极值

		cm, %, kPa, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$		
		名称	竣工期	稳定渗流期
坝壳料堆	竖向位移	铅直向下	45.8	42.5
	石体变形	水平位移	向上游	3.7
			向下游	7.1
坝壳料堆石体应变	大主应变		1.42	1.50
	小主应变		-0.51	-0.38
坝壳料堆石体应力	大主应力		2503	2361
	小主应力		756	730
大坝渗流量			2.33×10^{-7}	

注:竖向位移向下为正;水平位移向上游为负,向下游为正;应力和应变受压为正,受拉为负。

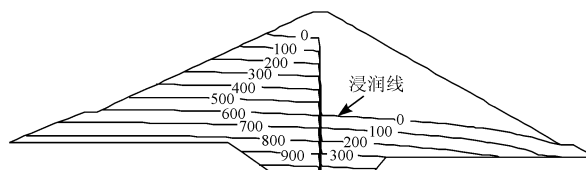


图 8 坝体复合土工膜心墙孔隙水压力等值线图(单位:kPa)

图 8 为坝体孔隙水压力等值线图,从图中可以看出,铺设复合土工膜心墙以后,坝体心墙两侧的孔隙水压力相差很大,这说明复合土工膜可以降低坝后浸润性,减小坝体底部的孔隙水压力,减小幅度在 50% 左右。由于复合土工膜是人工合成的薄膜材料,表面光滑,没有裂隙,因此其自重几乎不会对膜本身产生任何应力,也不会产生拱效应。因此,复合土工膜心墙不需要进行水力劈裂计算。

6 结 语

通过对复合土工膜心墙高土石坝与粘土心墙高土石坝应力应变的有限元仿真计算,可以得到以下结论。

(1) 高土石坝采用复合土工膜心墙防渗体进行防渗,能更好地达到防渗的目的。复合土工膜心墙与粘土心墙相比,复合土工膜对降低坝体浸润线、减小坝体孔隙水压力均有显著作用,减小幅度在 50% 左右,这样就大大增强了坝体的渗透稳定性,且复合土工膜不会发生水力劈裂等不利问题。

(2) 由于堆石体材料的流变性,引起了坝体堆石体的竖向位移和水平位移。而复合土工膜是柔性结构,会随着坝体的位移和应变产生附属变形。但复合土工膜柔性能很好地适应坝体的位移和变形。

(下转第 97 页)

了验证有效位数 dig 对计算结果的影响,经有效位数 dig 增加计算,表明计算结果与前述结果一致,表明有效位数 $dig > 50$,增加有效位数,参数的其它取值积分具有相同的计算精度。限于篇幅,文中不再列出。上述表明,通过权函数求解给定区间对应矩来进行数值积分,具有较高的计算精度。实际上,文中方法是一种通用权函数和积分区间的数值积分算法。

4 结 语

本文根据非古典正交多项式权函数积分原理,采用 Mathematica 数值高精度的矩函数积分,选用 Gamma 分布,在非古典正交多项式递推系数计算的基础上,应用矩阵理论,获得了任意积分区间的数值积分节点和积分权值,计算了相应区间的水文概率分布值。结果表明,采用较小的积分节点,文中概率分布数值计算结果与相应概率分布的精确值一致,具有较高的计算精度。文中方法实际上是一种通用的权函数和积分区间数值积分算法,根据文中获得的积分节点和权值,以较少的积分节点数可以获得精度高的概率分布值,可为多变量水文事件概率分布提供积分节点和权值,是水文概率计算的一种有效计算途径。同时,文中方法也可适用于其他的数值积分计算。

(上接第 93 页)

(3) 对于心墙或斜墙粘土料不符合要求的高水头土石坝,采用复合土工膜或者膜土联合防渗能够满足 130 m 以内的高土石坝特殊的防渗要求。

参考文献:

- [1] 王党在. 复合土工膜防渗体在高土石坝中的应用与研究[D]. 西安:西安理工大学,2005.
- [2] 束一鸣,李永红. 较高土石坝膜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.
- [3] 谷宏海,陈群,唐 岷. 高土石坝土工膜与心墙联合抗渗探析[J]. 水利科技与经济,2009,15(2):123-125.
- [4] 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.
- [5] 花加凤. 土石坝膜防渗结构问题探讨[D]. 南京:河海大学,2006.
- [6] 邢玉玲,束一鸣,花加凤,等. 膜土联合防渗系统对高土石坝心墙拱效应的影响[J]. 河海大学学报,2007, 35(4):456-459.
- [7] 岑威钧,王 蒙,杨志祥.(复合)土工膜防渗土石坝饱和-非饱和渗流特性[J]. 水利水电科技进展,2012, 32

参考文献:

- [1] 丁丽娟,程纪元. 数值计算方法[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.
- [2] 张 军. 数值计算[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [3] Skrzipek M R. Orthogonal polynomials for modified weight functions[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics. 1992,41(3):331-346.
- [4] Gautschi W. Algorithm 726: ORTHPOL - a package of routines for generating orthogonal polynomials and Gauss - type quadrature rules[J]. ACM: Transactions on Mathematical Software,1994(20):21-62.
- [5] Steven R Daniewicz. Accurate and efficient numerical integration of weight functions using Gauss - Chebyshev quadrature[J]. Engineering fracture Mechanics,1994,48(4):541-544.
- [6] Ioakimidis N I. The Gauss - Laguerre quadrature rule for finite - part integrals [J]. Communications in numerical methods in engineering,1993,9(5):439-450.
- [7] William H Press, Saul A Teukolsky, William T Vetterling, et al. Numerical recipes in fortran 77: The art of scientific computing (second edition)[M]. Cambridge: Press Syndicate of the University of Cambridge, 1992.
- [8] 吴 剑,胡 波. 掌握和精通 Mathematica 4.0 [M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [9] 沈振中,江 沅,沈长松. 复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟[J]. 水利学报,2009, 40(9):1091-1095.
- [10] Giroud J P, Bonaparte B. Leakage through liners constructed with geomembranes. Part I[J]. Geotextiles and Gomembrances, 1989,18(1):134-142.
- [11] 束一鸣. 土工膜连接和缺陷渗漏量计算与缺陷渗流影响[J]. 人民长江,2002, 33(3):26-28.
- [12] 姜海波,侍克斌,李玉建. 库盘大面积土工膜防渗体的渗漏估算[J]. 水利水运工程学报,2010(4):58-61.
- [13] 吕擎峰,殷宗泽. 高土石坝坝坡稳定非线性分析[J]. 岩土力学,2004, 25(5):793-797.
- [14] 殷宗泽. 高土石坝的应力与变形[J]. 岩土工程学报,2009, 31(1):1-14.
- [15] 董玉文,任青文. 重力坝水力劈裂分析的扩展有限元法[J]. 水利学报,2011, 42(11):1361-1367.