

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.035

# 深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝应力 变形敏感性分析

黄华新, 秦强, 王振宇

(湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南长沙 410007)

**摘要:**以大河沿枢纽工程为依托,采用非线性有限元方法分析深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝在典型工况下的应力变形特性,针对不同覆盖层及防渗墙物理力学参数,进行了沥青混凝土心墙坝应力变形的敏感性分析。结果表明:两种工况下坝体的应力及竖向沉降分布规律基本相同;覆盖层模量的提高可以有效降低坝体及沥青心墙的水平位移及竖向沉降,降低防渗墙及基座的主应力值,但对坝体及沥青心墙的应力影响较小;防渗墙弹性模量减小能有效降低防渗墙及基座的主应力值,改善防渗墙自身的应力状态。

**关键词:** 沥青混凝土心墙坝;深厚覆盖层;非线性有限元;敏感性分析

中图分类号: TV641.4<sup>+</sup>1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2018)04-0181-05

## Sensitivity Analysis of Stress and Deformation of Asphalt Concrete Core Dam on Deep Overburden

HUANG Huaxin, QIN Qiang, WANG Zhenyu

(Hunan Hydro & Power Design Institute, Changsha, Hunan 410007, China)

**Abstract:** By taking the Daheyan project as an example, nonlinear finite element method is adopted to analyze the stress and deformation characteristics of asphalt core wall dam on deep overburden under the typical working conditions in this paper. The sensitivity analysis of stress and deformation of asphalt concrete core dam is carried out by setting different physical and mechanical parameters of overburden layers and cutoff wall. The results show that: The distributions of stress and vertical settlement of the dam under the two conditions are basically the same; The increase of overburden modulus can effectively reduce the horizontal displacements and vertical settlements of the dam and asphalt core wall, which also can reduce the principle stress value of the cutoff wall and the base, but it has little influence on the stresses of the dam and the asphalt core wall; The decrease of elastic modulus of cutoff wall can reduce the principal stress value of the cutoff wall and base effectively and improve the stress state of the cutoff wall itself.

**Keywords:** asphalt concrete core dam; deep overburden; nonlinear finite element method; sensitivity analysis

深厚覆盖层上修建的沥青混凝土心墙坝一般由坝体及防渗体系组成,其防渗体系一般由沥青混凝土心墙及覆盖层中的混凝土防渗墙组成,两者之间通过混凝土基座进行连接<sup>[1-2]</sup>。其应力变形问题非常复杂,除了坝体自身的应力变形问题,覆盖层的应力变形问题外,还有坝体与沥青心墙的相互作用、覆盖层与防渗墙的相互作用,沥青心墙与防渗心墙相互作用等,这些问题均需在结构应力应变分析中进

行研究<sup>[3-5]</sup>。因此,通过非线性有限元分析研究深厚覆盖层上修建的沥青混凝土心墙坝的坝体与覆盖层、坝体与防渗体系及覆盖层与防渗体系之间的相互作用,是目前研究的主要方向<sup>[6-8]</sup>。本文以大河沿枢纽工程为依托,采用二维非线性有限元方法,对深厚覆盖层地基上沥青心墙坝在典型工况下的应力变形特性进行了分析,并针对不同的覆盖层和防渗墙物理力学参数进行了坝体及防渗墙应力变形的敏

感性分析,以期为深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝的设计与施工提供技术指导与参考依据。

## 1 工程概况

大河沿水利枢纽工程挡水建筑物为沥青混凝土心墙砂砾坝,最大坝高为 75 m,坝体分为砂砾坝壳料区、过渡料区、沥青混凝土心墙和排水棱体。沥青混凝土心墙为垂直式心墙,坝体填筑材料主要为砂砾石,心墙与上下游砂砾坝壳之间设 2.0 m 厚的过渡层。坝址区河床覆盖层厚度最大达 184.2 m,且以散粒体为主,为分层结构,上部为砂砾石夹粉质壤土及碎块石,下部为碎屑砂砾石。根据渗流控制要求,河床中设置刚性混凝土防渗墙,墙底直接深入基岩内 1 m~2 m,最大深度为 186.2 m,防渗墙通过基座与沥青心墙连接组成整个工程防渗体系。坝体典型剖面如图 1 所示。

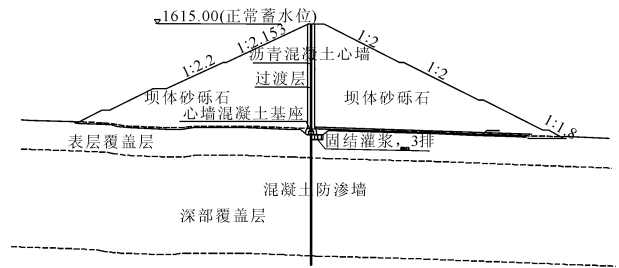


图 1 沥青混凝土心墙坝最大横剖面

## 2 模型的建立

基于设计过程中遇到的实际问题,结合地质勘察资料及类似工程的经验<sup>[6]</sup>,本文采用非线性有限元方法,对大河沿沥青混凝土心墙坝坝体、心墙及混凝土防渗墙在竣工期及蓄水期的应力变形特征进行仿真模拟。计算参数与本构模型的选取见表 1 和表 2。

表 1 坝料模型计算参数

材料类别	$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\varphi$ /( $^\circ$ )	$c$ /kPa	$R_f$	$k$	$n$	$K_b$	$m$	$K_{ur}$	选用模型
覆盖层(表层)	19.5	28.0	5.0	0.75	1500	0.440	1200	0.500	2250	邓肯 E-B 模型
覆盖层	20.0	30.0	5.0	0.75	1500	0.440	1200	0.500	2250	
过渡料	21.0	32.0	10.0	0.75	1000	0.450	950	0.200	1500	
沥青混凝土心墙	23.0	25.0	200.0	0.71	360	0.300	150	0.150	—	
坝壳砂砾料	21.0	36.0	20.0	0.75	900	0.560	620	0.370	1200	
灌浆加固	24.0	32.0	200.0	0.85	3200	0.088	2210	-0.486	—	

表 2 线弹性本构模型计算参数

材料类别	重度 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 /GPa	泊松比	选用模型
C25 混凝土防渗墙	24.0	25.0	0.167	线弹性
混凝土基座	24.0	10.0	0.167	
基岩	26.0	8.0	0.250	

计算区域共划分为 7 069 个四边形单元、7 112 个节点。混凝土防渗墙与覆盖层、基座与覆盖层、基座与周围坝体之间,均采用修正 Goodman 单元模拟接触情况<sup>[13-15]</sup>。参照已有的一些资料,为了模拟混凝土防渗墙周围的泥皮,接触单元厚度取为 0.1 m,摩擦系数取为 0.2。在防渗墙底部设置修正 Goodman 单元、接触单元厚度取为 0.2 m 模拟混凝土土防渗墙底部的沉渣,摩擦系数取为 0.2,有限元网格模型如图 2 所示。

## 3 沥青心墙坝应力变形结果分析

采用分级加载方法对坝体填筑和蓄水过程进行

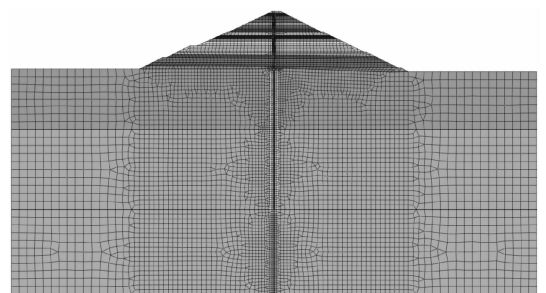


图 2 计算模型网格剖分图

仿真模拟。荷载分 21 级逐级施加,基岩和覆盖层各 1 级(含混凝土防渗墙),坝体填筑施工分为 17 级,蓄水共分 3 级。基岩和覆盖层自重施工完成后,将计算的位移场清零,仅保留应力场,因此,下述位移均为坝体填筑施工和蓄水引起的。从具体计算结果分析:

竣工期间,上游坝体和覆盖层的水平位移为负,最大值为 14.6 cm,下游部分水平位移为正,最大值为 16.8 cm。蓄水后,坝体和覆盖层的水平位移有向正方向移动的趋势,且坝体在正方向的水平位移明

显增大,最大值达到 59.3 cm。

无论竣工期还是蓄水期,坝体和覆盖层的累积竖向沉降量最大值均发生在距坝顶约 2/3 坝高处,竣工期的沉降量最大值发生在心墙内,最大沉降值为 65.2 cm,蓄水期沉降量最大值稍微偏离心墙向下游,最大沉降值为 52.6 cm。蓄水过程采用全应力-渗流耦合方法进行模拟,蓄水后坝体未考虑坝体材料的湿化效应,导致坝体蓄水后计算沉降偏小。

大、小主应力基本均为压应力,从坝面向坝内逐渐增大、坝体基座及防渗墙周围应力较为集中,梯度相对较大,最大值发生在坝体与基座交接处,其中,竣工期大主应力最大值为 2.02 MPa、小主应力最大值为 1.04 MPa;蓄水期大主应力最大值为 1.62 MPa,小主应力最大值为 0.83 MPa。同时,在竣工期,坝体的大主应力拱效应明显,心墙区域大主应力比坝壳区的应力明显低,蓄水后这种应力拱效应明显减弱。

## 4 坝体及防渗结构应力变形敏感性分析

### 4.1 覆盖层参数敏感性分析

大河沿水利枢纽工程覆盖层最大深度为 184.2 m,为分层结构,覆盖层物理力学参数的变化,对坝

体及防渗结构应力变形产生很大影响。为进一步探索不同覆盖层对坝体及其防渗墙应力变形的影响,本文分别选取了  $K$ 、 $2K$  和  $3K$  三种材料参数( $K$  为覆盖层模量系数),建立数值仿真模型,进行对比分析。计算结果见表 3~表 5。

由表 3 和表 4 可知:在竣工期和蓄水期,坝体和沥青心墙的水平位移量、竖向沉降量均随覆盖层模量的增加而逐渐降低,但覆盖层模量改变对坝体和沥青心墙的大、小主应力的影响均较小;混凝土基座的水平位移量、竖向沉降量和大、小主应力均随覆盖层模量的增加而逐渐降低,且两个工况下减小的比例基本相同。

由表 5 可知:在竣工期和施工期间,防渗墙竖向沉降量、水平位移量和大、小主应力均随覆盖层模量的增加而降低,减小比例基本一致。

### 4.2 防渗墙混凝土材料参数敏感性分析

混凝土弹性模量是影响其变形性能的主要因素,是混凝土对环境适应能力的一个重要指标,对坝体及防渗墙应力变形的影响较为显著。根据工程类比选用弹性模量为 30 GPa、28 GPa、20 GPa、2 GPa 四个参数,分别进行应力变形计算,计算结果见表 6~表 8。

表 3 不同覆盖层参数对坝体应力和变形的影响

材料参数	水平位移/cm				竖向位移/cm		大主应力/MPa		小主应力/MPa	
	向上游		向下游		竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期						
$K$	14.6	0.0	21.2	59.3	65.2	52.5	2.02	1.62	1.04	0.83
$2K$	10.9	0.0	15.8	47.8	61.6	48.2	2.00	1.56	1.00	0.76
$3K$	10.1	0.0	14.5	45.4	57.5	43.4	1.93	1.40	0.85	0.72

表 4 不同覆盖层参数对基座应力和变形的影响

材料参数	水平位移/cm				竖向位移/cm		大主应力/MPa		小主应力/MPa	
	向上游		向下游		竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期						
$K$	0.0	0.0	1.10	30.7	26.8	18.1	10.3	6.86	1.52	0.95
$2K$	0.0	0.0	0.88	27.4	25.4	16.7	9.8	5.61	1.35	0.76
$3K$	0.0	0.0	0.86	27.0	24.5	15.6	8.2	5.25	1.20	0.67

表 5 不同覆盖层参数对混凝土防渗墙应力和变形的影响

底部宽度/m	水平位移/cm				竖向位移/cm		大主应力/MPa		小主应力/MPa	
	向上游		向下游		竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期						
$K$	$3.43 \times 10^{-3}$	0.0	1.02	30.7	26.8	18.1	25.6	19.1	1.53	1.45
$2K$	$1.67 \times 10^{-3}$	0.0	0.87	27.4	25.4	16.7	24.2	17.8	1.25	1.26
$3K$	$1.23 \times 10^{-3}$	0.0	0.62	25.0	28.2	14.9	22.4	15.7	1.13	1.16

由表 6 和表 7 可知:在竣工期和蓄水期,坝体和沥青心墙的水平位移量、竖向沉降量和大、小主应力均随防渗墙弹性模量的降低而逐渐增大,但变化的幅度较小;基座的水平位移量和竖向沉降量均随防渗墙弹性模量的增大而大幅度增大,大、小主应力则

明显减小,减小比例基本一致。

由表 8 可知:在竣工期和蓄水期,防渗墙竖向沉降量随混凝土弹性模量的降低而逐渐增大,大主应力则相反;其对水平位移量及小主应力的影响较小。

表 6 防渗墙弹性模量变化对坝体应力和变形的影响

弹性模量/GPa	水平位移/cm				竖向位移/cm		大主应力/MPa		小主应力/MPa	
	向上游		向下游		竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期						
30	14.6	0.0	21.2	59.3	65.2	52.5	2.03	1.62	1.04	0.83
28	14.6	0.0	21.2	59.3	65.2	52.5	2.02	1.62	1.04	0.83
10	14.2	0.0	20.8	59.4	65.6	52.9	2.00	1.43	0.75	0.64
2	13.7	0.0	20.5	58.1	66.8	53.1	1.70	1.29	0.60	0.62

表 7 防渗墙弹性模量变化对基座应力和变形的影响

弹性模量/GPa	水平位移/cm				竖向位移/cm		大主应力/MPa		小主应力/MPa	
	向上游		向下游		竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期						
30	0.0	0.0	1.05	30.9	26.4	17.8	10.40	6.90	1.48	0.96
28	0.0	0.0	1.10	30.7	26.8	18.1	10.30	6.86	1.52	0.95
10	0.0	0.0	0.89	30.7	35.4	24.9	9.19	6.75	1.34	0.94
2	0.0	0.0	0.82	29.3	48.2	36.8	5.54	4.48	1.05	0.85

表 8 防渗墙弹性模量变化对混凝土防渗墙应力和变形的影响

弹性模量/GPa	水平位移/cm				竖向位移/cm		大主应力/MPa		小主应力/MPa	
	向上游		向下游		竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期
	竣工期	蓄水期	竣工期	蓄水期						
30	$1.15 \times 10^{-3}$	0.0	1.02	30.8	26.4	17.8	26.8	19.8	1.55	1.46
28	$3.43 \times 10^{-3}$	0.0	1.02	30.7	26.8	18.1	25.6	19.1	1.53	1.45
10	$7.75 \times 10^{-4}$	0.0	0.88	30.7	35.4	24.9	19.7	13.5	1.47	1.43
2	$5.75 \times 10^{-4}$	0.0	0.82	29.3	48.2	36.9	7.81	6.12	1.44	1.41

## 5 结 论

以大河沿枢纽工程为依托,研究了深厚覆盖层地基沥青心墙坝在两种典型工况(竣工期和蓄水期)下的应力变形特性,并通过选取不同覆盖层和防渗墙的物理力学参数,进行了坝体和防渗墙的应力变形敏感性分析,得出如下结论:

(1) 竣工期间,坝体及覆盖层的水平位移呈现两种趋势,上游部分水平位移指向上游,下游水平位移指向下游;蓄水后,坝体及覆盖层的水平位移均指向下游,且在水压力作用下,位移值明显增加,竖向沉降分布规律与竣工期基本相同。

(2) 两种工况下主应力分布规律基本相同,大、小主应力分布均为压应力,应力从坝面向坝内逐渐

增大、坝体基座及防渗墙周围应力集中、梯度相对较大,最大值发生在坝体与基座交接处;同时,在竣工期,坝体的大主应力拱效应明显,心墙区域大主应力比坝壳区的应力明显低,蓄水后这种应力拱效应明显减弱。

(3) 沥青心墙坝应力变形敏感性分析可知:覆盖层模量的提高可以有效地降低坝体及沥青心墙的水平位移及竖向沉降,但对坝体及沥青心墙的应力影响较小;同时,覆盖层模量提高能较为有效地约束防渗墙墙体变形、减小防渗墙的主应力,改善墙体应力状态。防渗墙弹性模量的改变对坝体及沥青心墙的变形及应力影响较小,但能有效减小防渗墙及基座与两侧覆盖层之间的沉降差,降低防渗墙及基座的主应力值,改善防渗墙自身的应力状态。

因此,建议在设计中可以通过对基座附近的覆盖层进行灌浆加固处理,减小坝体竖向沉降,改善基座及防渗墙的应力状态,或混凝土结构采用低弹性模量的塑性混凝土,降低基座及防渗墙的应力水平。

#### 参考文献:

- [1] 沈振中,田振宇,等.深厚覆盖层上土石坝心墙与防渗墙连接形式研究[J].岩土工程学报,2017,39(5):939-944.
- [2] 邱祖林,陈杰.深厚覆盖层上混凝土防渗墙的应力变形特征[J].水文地质工程地质,2006,33(3):72-76.
- [3] 陈红,陈刚,覃朝明,等.大渡河瀑布沟水电站大坝基础混凝土防渗墙与心墙连接形式研究[J].水力发电,2004(A01):307-314.
- [4] 万连兵,深燕明,韩朝军,等.克孜加尔沥青混凝土心墙坝应力变形研究[J].水电能源科学,2011,29(4):66-69.
- [5] 陈松,宁聪,王岩,等.某水库沥青混凝土心墙坝有限元计算分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):152-156.
- [6] 刘大康,刘京茂,孔宪京,等.筑坝堆石料邓肯-张模型参数确定方法的改进[J].水利与建筑工程学报,2016,14(3):91-95.
- [7] 陈文明,朱俊高.单元类型选择对土石坝应力变形计算结果的影响[J].水利与建筑工程学报,2013,11(1):44-46.
- [8] 李守德,俞洪良.Goodman接触单元的修正与探讨[J].岩石力学与工程学报,2004,23(15):2628-2631.
- [9] 董龙根,沈长松,施震余,等.分期蓄水和湿化作用对心墙堆石坝应力变形的影响[J].水资源与水工程学报,2015,26(2):220-225.
- [10] 全卫超,何建新,王怀义.砾石界破碎对心墙沥青混凝土的性能影响分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(1):175-179.
- [11] 杨耀辉,何建新,杨海平.填料级配及浓度对心墙沥青混凝土的性能影响分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):192-195.
- [12] 樊艳欣,王瑞骏,郭兰春,等.深厚覆盖层地基高土石围堰应力变形敏感性分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(5):207-211.
- [13] 潘家军,饶锡保,周欣华,等.深厚覆盖层上面板堆石坝新型结构应力变形性状影响因素研究[J].水利学报,2015,46(S1):163-167.
- [14] 徐晗,汪明元,等.深厚覆盖层300m级超高土质心墙坝应力变形特性[J].岩土力学,2008,29(S1):64-68.
- [15] 马晓华,梁国钱,郑敏生,等.土石坝低弹性模量混凝土防渗墙应力变形数值分析[J].水力发电,2011,37(4):51-54.
- [16] 党发宁,谭江.深覆盖层土石坝三维有限元应力应变分析[J].电网与清洁能源,2007,23(1):70-73.
- [17] 丁树云,毕庆涛.深厚覆盖层上沥青混凝土心墙土石坝的应力变形特征[J].水力发电,2011,37(4):43-45.
- [18] 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.

(上接第88页)

- [9] 冯国栋.姚河坝水电站岩体纵波速度与静变形模量相关关系的探讨[J].水电工程研究,1993(1):49-54.
- [10] Chun B S, Lee Y J, Seo D D, et al. Correlation deformation modulus by PMT with RMR and rock mass condition [J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2006, 21(3/4):231-232.
- [11] 卢书强,许模.基于GSI系统的岩体变形模量取值及应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(A01):2736-2742.
- [12] Barton N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2002, 39(2):185-216.
- [13] Gardner W S. Design of drilled piers in the Atlantic Piedmont [C]//Foundations and Excavations in Decomposed Rock of the Piedmont Province. ASCE, 2015:62-86.
- [14] 周洪福,聂德新,王春山.水电工程坝基玄武岩体波速与变形模量关系[J].地球科学,2015,40(11):1904-1912.
- [15] 宋彦辉,巨广宏,孙苗.岩体波速与坝基岩体变形模量关系[J].岩土力学,2011,32(5):1507-1512.
- [16] 李攀峰,崔长武,陈奎,等.高拱坝浇筑后河床坝基综合变形模量取值研究[J].长江科学院院报,2014,31(11):17-21.
- [17] 彭辉,刘德富,陈和春.锦屏拱坝基础变形模量多目标非线性规划研究[J].中国农村水利水电,2005(11):62-65.
- [18] 李雷,闫思泉.云南石门坎水电站坝基岩体变形模量与波速相关关系研究[J].水利规划与设计,2015(12):49-51.
- [19] 江小兵,张浩博.有限元计算中土的变形模量取值探讨[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):236-240.
- [20] 刘恋嘉,赵其华,韩刚.叶巴滩水电站坝址区深部变形破裂特征[J].岩土工程学报,2017,39(3):501-507.