

DOI: 10.11779/CJGE201705019

# 深覆盖层上土石坝心墙与防渗墙连接型式研究

沈振中, 田振宇, 徐力群, 甘磊

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 深厚覆盖层上建造的土石坝常采用封闭式防渗系统。当心墙坝防渗系统坝体采用沥青混凝土心墙、坝基采用封闭式防渗墙时, 心墙混凝土基座、防渗墙与相邻土体之间将产生不均匀沉降, 易引起基座混凝土断裂和坝壳及覆盖层土体剪切破坏。针对心墙坝坝体心墙与坝基防渗墙合理的连接型式问题, 结合某水库工程, 采用非线性有限元法, 建立三维有限元模型, 分析研究了心墙基座与防渗墙不同连接型式下坝体与坝基的变形和应力。通过坝体和坝基的变形协调分析以及心墙基座和防渗墙的应力分析, 推荐了合理的连接型式, 即深厚覆盖层上沥青混凝土心墙坝坝基采用封闭式防渗墙时, 宜采用心墙基座与防渗墙间预留空隙的连接型式, 其空隙大小与坝基覆盖层厚度及其力学特性以及防渗墙弹性模量有关, 需经计算分析确定。

**关键词:** 深厚覆盖层; 沥青混凝土心墙坝; 封闭式防渗墙; 连接型式; 非线性有限元法

中图分类号: TV641

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)05-0939-07

**作者简介:** 沈振中(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构工程科学研究、人才培养和工程实践。E-mail: zhzhshen@hhu.edu.cn。

## Reasonable connection type for cutoff wall and core wall of earth-rock dams on deep overburden layers

SHEN Zhen-zhong, TIAN Zhen-yu, XU Li-qun, GAN Lei

(College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** The earth-rock dams built on deep overburden layers often use a closed seepage control system which is composed of core wall of dam body and impervious wall of dam foundation. Uneven settlement will occur between concrete core wall base, impervious wall and the adjacent soil, which leads to the fracture of concrete base and the shear failure of dam body and its foundation when the asphalt concrete core wall is used in dam body and a closed impervious wall is used in dam foundation. Taking an earth-rock dam on a deep overburden layer as a study object, a three-dimensional finite element model is established, and the deformations and stresses of the dam body and its foundation are analyzed by use of the nonlinear finite element method. By comparing the analyses of deformation compatibility of dam body and its foundation and the stresses of core wall with its base and impervious wall, a reasonable connection type is recommended for the core wall dams, which should reserve a gap between the base and the impervious wall for an earth-rock dam built on deep overburden layer which uses a closed seepage control system. The size of the reserved gap is related to the thickness of the overburden layer and its mechanical properties as well as the elastic modulus of the impervious wall, and it requires computational analysis for determination.

**Key words:** deep overburden layer; asphalt concrete core wall dam; closed cutoff wall; connection type; nonlinear finite element method

## 0 引言

在深厚覆盖层上修建土石坝, 防渗系统通常由心墙与混凝土防渗墙组成。由于混凝土防渗墙的弹性模量与覆盖层相差较大且覆盖层深度大, 因此在坝体自重作用下, 覆盖层与防渗墙之间的变位不协调, 两者之间产生较大的沉降差, 易引起防渗墙裂缝及覆盖层土体破坏等问题, 尤其是对于封闭式防渗系统, 混凝土防渗墙直接插入到下卧基岩中, 相当于覆盖层而言,

防渗墙与基岩系统是刚性的, 在坝体自重作用下, 其变形很小, 而覆盖层变形较大, 且坝越高, 变形越大。因此心墙与混凝土防渗墙间合理的连接型式是该类坝体结构的关键问题。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51179062); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK2012410); 中央高校基本业务费项目(2014B11914); 江西省水利科技项目(KT201545)

**收稿日期:** 2016-02-22

目前,针对覆盖层土体与防渗墙之间的变形不协调、应力集中等问题,许多学者开展了深入的研究。马晓华等对于以常规混凝土防渗墙作为防渗体的大坝,针对因防渗墙与上下游两侧覆盖层的弹性模量数值相差较大,而引起防渗墙承受相当大的拉应力和变形不协调问题,提出了降低防渗墙应力的弹性模量合理区间<sup>[1]</sup>。王晓东针对由不协调变形导致的心墙与防渗墙连接基座的应力集中问题,提出新的混凝土基座设计方案<sup>[2]</sup>。陈红等通过对坝体使用非线性应力应变计算,分析了瀑布沟工程地基防渗墙与坝体心墙的不同接头型式下防渗墙与坝体应力应变的变化规律,提出了砾石土心墙与坝基防渗墙间可靠、合理的接头型式<sup>[3]</sup>。田景元等通过计算分析确定了毛尔盖砾石土心墙堆石坝与坝基防渗墙的连接型式<sup>[4]</sup>。

上述成果针对混凝土防渗墙与覆盖层之间因两者弹性模量差异导致的应力集中和变形不协调问题进行了深入的分析研究,并提出相应的工程措施。但是以上研究大多是针对砾石土心墙与坝基防渗墙的连接开展的。由于沥青混凝土心墙薄,厚度远小于砾石土心墙,心墙底部基座的宽度比心墙厚度大,基座上方的土体与基座外围相邻土体产生不均匀沉降,不均匀沉降过大,易导致土体剪切破坏和心墙混凝土基座断裂。

本文结合某水库工程,采用非线性有限元法,建立三维有限元模型,研究坝基混凝土防渗墙与沥青混凝土心墙之间采用不同连接型式时坝体与心墙基座的应力和变形,推荐了一种可以减小心墙基座与其周围土体沉降差的合理化布置型式。该连接型式可以较好地适应沥青混凝土心墙及其基座和混凝土防渗墙与周围土体的不均匀沉降,减少混凝土防渗墙与坝体土和坝基覆盖层的沉降差,适用于深厚覆盖层且以封闭式防渗墙为防渗系统的心墙坝。

## 1 减小防渗墙与覆盖层沉降差的方法

由于混凝土材料的弹性模量与覆盖层土体的变形模量差别达数十至数百倍,因此,在坝体自重等荷载作用下,防渗墙和覆盖层的变形不协调,两者之间存在沉降差。对于悬挂式防渗墙,下部土体的约束作用较弱,防渗墙可以随覆盖层一起沉降,这种沉降差可显著减小。但是对于封闭式防渗墙,其下部直接插入下卧基岩中,防渗墙受到基岩的约束作用很强。在坝体自重等荷载作用下,防渗墙沉降几乎可以忽略,覆盖层的沉降较大,两者变形不协调,对于高坝和深覆盖层地基,两者的沉降差将十分显著。因此,减小这种防渗墙与覆盖层之间的沉降差尤为关键。

### 1.1 降低防渗墙弹性模量

许多工程的防渗墙采用低弹性模量混凝土来减小

防渗墙与覆盖层土体间的沉降差,其弹性模量的范围是2~3 GPa,能较好地兼顾应力和强度两方面的要求<sup>[5]</sup>。一般防渗墙的弹性模量约为10~30 GPa,覆盖层的变形模量为0.1~0.2 GPa,坝体的变形模量约为0.1 GPa。如能大大降低防渗墙的弹性模量,使其接近覆盖层的变形模量,则防渗墙和覆盖层之间的沉降差亦将趋近于零,也就消除了不均匀沉降<sup>[6]</sup>。但是在目前常用的建筑材料中,很难找到一种既具有与覆盖层变形模量接近,同时又具有良好防渗性能的防渗墙材料,通常只能采用现有的低弹模混凝土,以尽可能减小沉降差,但这种方法仍难以完全消除沉降差。

### 1.2 调整防渗墙与心墙的接头型式

工程实践中常采用两种接头型式来协调防渗墙和周围土体的不均匀变形,即硬接头和软接头<sup>[5]</sup>。改变结合部位的连接形式对心墙底部应力状态的影响很小,有利于改善心墙底部应力状态。硬接头型式,混凝土防渗墙顶部设基座与沥青混凝土心墙直接连接,示意图见图1。由于防渗墙直接承受上方混凝土基座荷载以及心墙和过渡料等荷载,因此防渗墙内压应力较大。同时当坝体高度和覆盖层深度较大时,如采用沥青混凝土心墙+封闭式防渗墙作为防渗系统,则由于覆盖层和防渗墙两者的沉降差大,导致混凝土基座断裂以及坝体不协调变形引起的剪切破坏的可能性显著加大。此外,硬接头中沥青混凝土心墙与基础、岸坡连接的混凝土基座需经浇注完成,由于下部防渗体受基础约束,底部接头处一般存在较大的剪应力,对岸坡部位将因坝体的不均匀沉降而产生纵向剪切变形,易形成贯穿上下游方向的裂缝<sup>[7]</sup>。

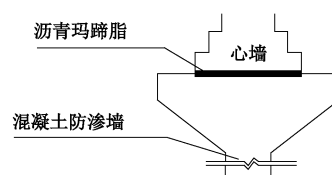


图1 硬接头

Fig. 1 Rigid connection

软接头型式,混凝土防渗墙与沥青混凝土心墙通过连接体连接,连接体与防渗墙之间留有空隙,空隙中填充塑胶材料,以适应变形和防止渗漏。在软接头连接型式中,连接体常用内部设置廊道的混凝土基座、混凝土帽两种型号,如图2所示。

混凝土基座内设置廊道的连接型式,虽然对施工和大坝内部应力应变观测有利<sup>[5]</sup>,但是连接结构复杂,大体积混凝土底座适应土体变形的能力差,止水等接头的结构复杂,且止水易破坏,不易补修,防渗可靠性低。同时廊道与两岸基岩的连接处均出现较大的拉应力,超过混凝土的抗拉强度<sup>[6]</sup>,因此,本文不对混

凝土基座内设置廊道的连接型式进行方案设计分析。

**混凝土帽子连接型式：**在混凝土防渗墙与混凝土帽子之间留有空隙，空隙中设置 3 道止水，并充填防渗性能好的塑胶材料。伴随坝体的填筑上升，坝体的自重作用逐渐压缩空隙致密，空隙内的塑胶材料可被挤出，直到基座和防渗墙之间接触贴合。

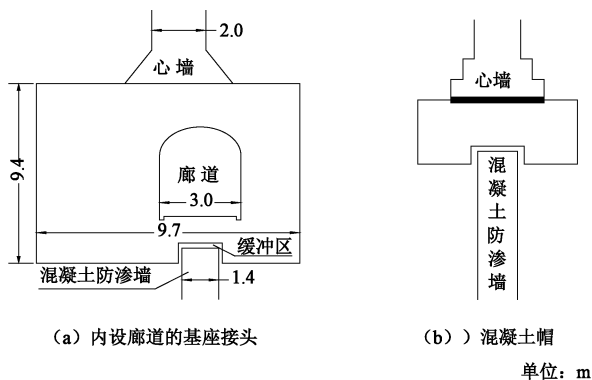


图 2 软接头

Fig. 2 Flexible connection

## 2 某水库心墙坝及其有限元模型

### 2.1 沥青混凝土心墙与防渗墙连接

某水库工程位于新疆维吾尔自治区。大坝采用直沥青混凝土心墙堆石坝, 坝顶高程为 1619.3 m, 最大坝高为 74.7 m。心墙顶高程 1617.3 m, 最低心墙厚 1.0 m, 下部在坝基面以上 5.0 m 高度范围内采用渐变式加厚至 2.8 m, 与混凝土基座相连。心墙底部最低高程 1544.6 m, 坝址区覆盖层厚度最大可达 150 m, 由冲洪积的漂卵砾石层和砂卵砾石层组成, 坝轴线地质剖面如图 3。

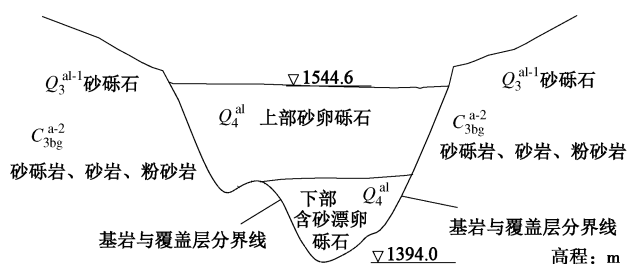


图3 某水库心墙坝坝轴线地质剖面

Fig. 3 Geological section of an asphalt concrete core dam in dam axis

根据渗流控制要<sup>[8-9]</sup>,拟采用坝体沥青混凝土心墙+坝基封闭式混凝土防渗墙的防渗方案,坝体典型剖面如图4所示。

根据工程实际情况,参照类似工程经验,拟定以下3种坝体沥青混凝土心墙与坝基混凝土防渗墙的连接方案进行比较分析:①硬接头常规混凝土方案,心墙底部设基座直接与防渗墙连接,防渗墙材料为常规

混凝土，其弹性模量为 25 GPa，如图 5。②软接头混凝土帽方案，在方案 A 的基础上进行改进，基座底部和防渗墙顶之间预留 30 cm 空隙，空隙中充填渗透系数小的塑胶材料，防渗墙材料为常规混凝土，其弹性模量为 25 GPa，如图 6。③硬接头低弹模混凝土方案，沥青混凝土心墙底部设基座直接与防渗墙连接，防渗墙材料为低弹模混凝土，其弹性模量为 2.0 GPa，结构同图 5。

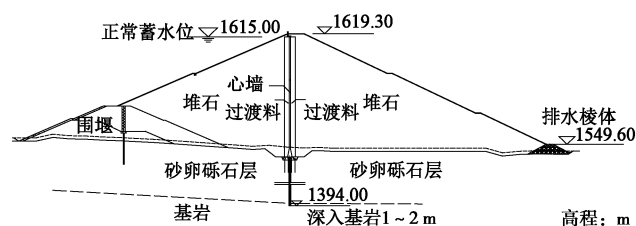


图 4 沥青混凝土心墙坝典型剖面

Fig. 4 Cross-section of asphalt concrete core dam of a reservoir

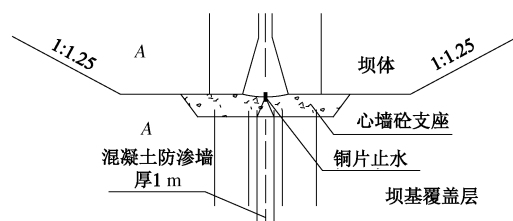


图 5 硬接头

Fig.5 Rigid connection

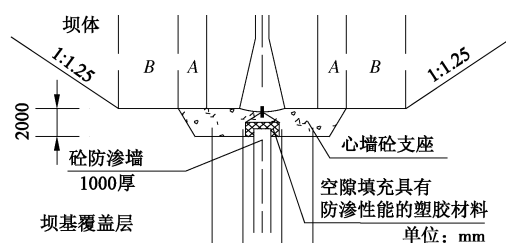


图 6 软接头混凝土帽

Fig. 6 Concrete cap of flexible connection

## 2.2 有限元模型

根据工程实际,建立三维有限元模型。计算坐标系规定为:  $X$  轴沿着河流方向,正方向指向下游;  $Y$  轴沿着坝轴线,正方向指向左岸,  $Y$  轴零点设在右岸坝轴线端;  $Z$  轴为垂直向,正方向指向上方。计算模型的边界范围如下: ①地基取至河床中央最深处基岩面以下约 200 m, 高程 1300 m; ②上游边界取至坝轴线上游约 350 m, 下游边界取至坝轴线下游约 350 m, 上下游边界距离坝踵和坝趾为 2 倍坝高; ③两坝肩方向, 左岸边界从左坝端向外延伸 350 m, 约为 5 倍坝高, 右岸边界从右坝端向外延伸 250 m, 约为 3.5 倍坝高;

有限元模型边界条件如下：上游边界  $X=-363.00$

m 和下游边界  $X=366.00\text{ m}$  取为  $X$  向约束; 右岸边界  $Y=-250.00\text{ m}$  和左岸边界  $Y=890\text{ m}$  取为  $Y$  向约束, 底部边界  $Z=1300.00\text{ m}$  取为  $X, Y, Z$  三向约束。

2.3 本构模型及计算参数

坝体砂砾石料、沥青混凝土心墙、过渡料和地基深厚覆盖层采用邓肯-张 ( $E-B$ ) 模型<sup>[10-12]</sup>, 混凝土底座及基岩采用线弹性模型<sup>[13]</sup>。依据提供的勘察资料和坝料试验资料, 且参考有关相似工程经验, 各材料参数取值如表 1, 2 所示。

表 1 材料线性本构关系的计算参数

Table 1 Parameters of linear constitutive relation of materials			
材料	重度 /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量 /GPa	泊松比
混凝土底座	24.0	25.0	0.167
常规混凝土防渗墙	24.0	25.0	0.167
低弹模混凝土防渗墙	23.0	2.0	0.167
防渗帷幕	26.0	5.0	0.230
基岩	26.0	8.0	0.250

3 沥青混凝土心墙坝的变形和应力

采用分级加载方法模拟坝体填筑和蓄水过程, 进行三维非线性有限元法计算, 分析坝体和坝基的变形和应力。全部荷载分 21 级施加, 基岩和覆盖层各 1 级 (含混凝土防渗墙), 坝体填筑施工共分 14 级, 蓄水共分 5 级。基岩和覆盖层自重施工完成后, 将计算的位移场归零, 仅保留应力场, 因此以下给出的位移均是坝体填筑施工和蓄水引起的。位移符号规定: 顺坐标轴方向为正, 逆坐标轴方向为负; 应力符号规定:

压应力为正, 拉应力为负。计算的结果汇总如表 3 所示。

3 种连接方案下, 坝体沥青混凝土心墙应力和变形分布规律一致, 仅数值存在差异。方案 A 坝体的位移和应力值是 3 种方案中最大的, 因此下面只对方案 A 坝体的位移和应力分布规律进行分析。

3.1 坝体变形分布规律

竣工期和蓄水期, 坝体最大沉降量都出现在最大横剖面, 靠近坝轴线的上游坝壳内、约 1/2 坝高偏下处, 坝体的最大沉降分别为  $-704.89, -710.36\text{ mm}$ , 分别占最大坝高的 0.94%, 0.95%。由于深厚覆盖层发生变形的量值较大, 因此坝体沉降量较大, 但仍然小于坝高的 1%, 符合一般规律<sup>[14-15]</sup>。

坝体最大横剖面 ( $Y=260\text{ m}$ ) 的顺河向水平位移和垂直位移分布如图 7 所示。由于上、下游坝壳几何尺寸及填筑料相同, 其力学参数也相近, 因此上、下游坝壳的顺河向水平位移基本上是关于坝轴线对称分布。

蓄水期坝体沥青混凝土心墙的位移分布如图 8。竣工期和蓄水期, 沥青混凝土心墙的垂直位移与坝壳砂砾石料相比稍大; 心墙顺河向水平位移分布均匀且变化连续, 未出现突变现象, 不会发生破坏。而原型观测资料表明, 蓄水期心墙和上游坝壳则明显下沉。究其原因, 一是计算时未考虑坝壳料的湿化变形; 二是模型的加卸荷准则存在不足, 故此处给出的位移分布图均为蓄水期时的工况<sup>[16-17]</sup>。

表 2 坝料和地基的邓肯-张模型 ( $E-B$ ) 参数

Table 2 Duncan - Chang model ( $E-B$ ) parameters of materials for dam and its foundation									
材料类型	$\gamma$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$c/\text{kPa}$	$\varphi_0$ /( $^\circ$ )	$K$	$n$	$R_f$	$K_b$	$m$	$\Delta\varphi$ /( $^\circ$ )
沥青混凝土心墙	23.0	200	25.0	360	0.3	0.71	150	0.15	0
坝壳砂砾石料	21.0	20	36.0	800	0.56	0.63	620	0.37	5
过渡料	21.0	10	32.0	1000	0.45	0.68	950	0.20	4
覆盖层砂卵砾石 (上部)	19.5	5	28.0	1300	0.44	0.62	1100	0.50	3
覆盖层砂卵砾石 (下部)	20.0	5	30.0	1500	0.44	0.62	1200	0.50	3

表 3 三维计算分析结果汇总

Table 3 Results of three-dimensional computational analysis							
方案	工程期	基座周围土体 (见图 1 B 区域)			沥青混凝土心墙		
		最大垂直位移 /mm	最大第一主应力 /kPa	最大第三主应力 /kPa	墙底最大垂直位移 /mm	最大第一主应力 /kPa	最大第三主应力 /kPa
A	竣工期	-459.89	1974.99	919.02	-126.43	825.62	383.80
	蓄水期	-465.36	2001.22	1010.32	-114.46	1112.92	564.04
B	竣工期	-467.34	1889.65	876.38	-421.33	713.43	331.00
	蓄水期	-475.41	1922.06	971.48	-407.12	1021.66	529.74
C	竣工期	-466.52	1901.13	886.56	-245.73	704.25	353.20
	蓄水期	-473.68	1932.30	992.69	-236.48	1024.35	536.89

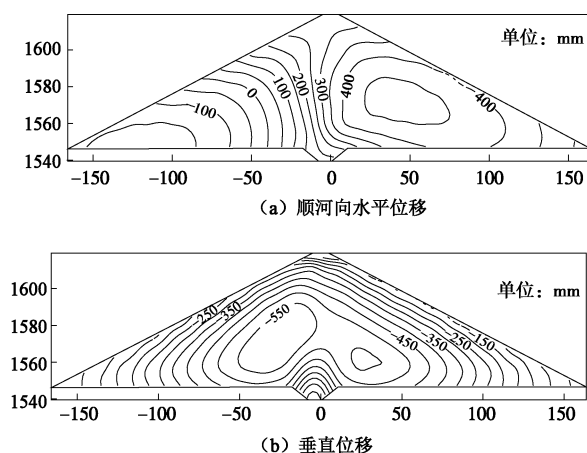


图7 正常蓄水期坝体最大横剖面 ( $Y=260$  m) 位移分布  
Fig. 7 Displacement distribution of maximum cross-section of dam ( $Y=260$  m) under normal water level

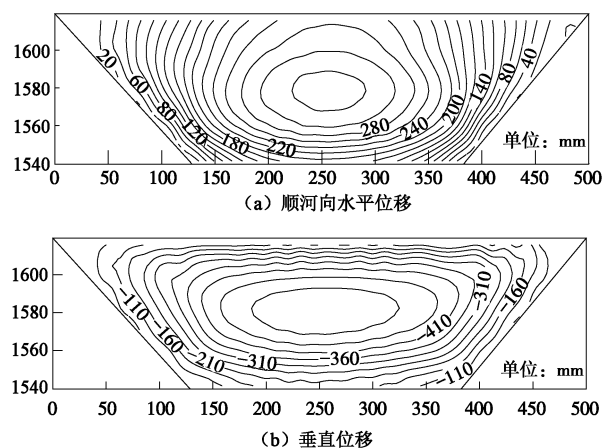


图8 正常蓄水期沥青混凝土心墙 (坝轴线剖面  $X=-3.5$  m) 位移分布

Fig. 8 Displacement distribution of asphalt core wall under normal water level (cross-section along dam axis  $X=-3.5$  m)

### 3.2 坝体应力分布规律

竣工期, 坝体最大第一主应力为 1974.99 kPa, 最大第二主应力为 1183.93 kPa, 最大第三主应力为 919.02 kPa。正常蓄水位期, 最大第一主应力为 2001.22 kPa, 最大第二主应力为 1156.49 kPa, 最大第三主应力为 1010.32 kPa。在竣工期和蓄水期坝体最大主应力都出现在坝体底部、坝轴线附近。在心墙底部, 河床中心位置, 心墙应力值最大, 压应力向左右两岸逐渐变小。心墙基本处于压应力状态, 拉应力仅出现在左、右岸顶部小范围内, 其最大值为 73.32 kPa。一般沥青混凝土的极限拉伸强度约为 1.0~1.5 MPa, 弯曲拉伸强度多为 2.0~3.0 MPa。因此, 本工程沥青混凝土心墙的拉应力不会影响其防渗性能, 具有较大安全储备。

混凝土防渗墙最大第一主应力发生在防渗墙底部, 数值为 2.6 MPa, 远小于混凝土的抗压强度, 状态稳定, 如图 9 所示。

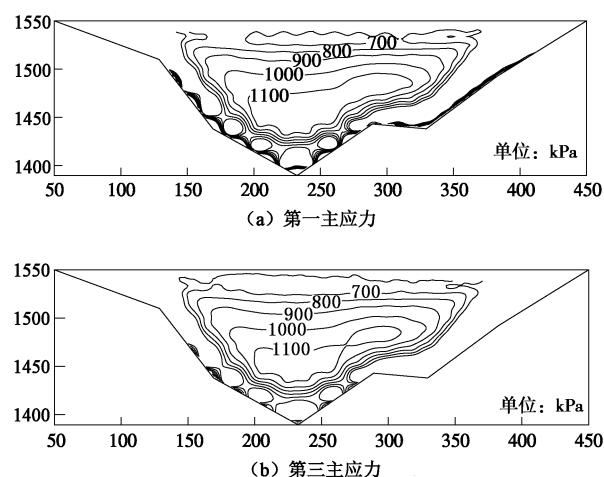


图9 正常蓄水期防渗墙断面应力分布图

Fig. 9 Stress distribution of cutoff wall under normal water

## 4 合理的防渗体连接型式

由于 3 种方案下坝体的应力和变形分布规律一致, 因此确定合理的防渗体连接型式主要从三种方案下心墙基座与覆盖层之间的沉降差、基座应力及连接部位坝体和覆盖层土体应力进行对比分析。

### 4.1 心墙基座与覆盖层之间的沉降差对比

3 种连接方案心墙基座与覆盖层之间的沉降差沿坝轴线的分布见图 10。

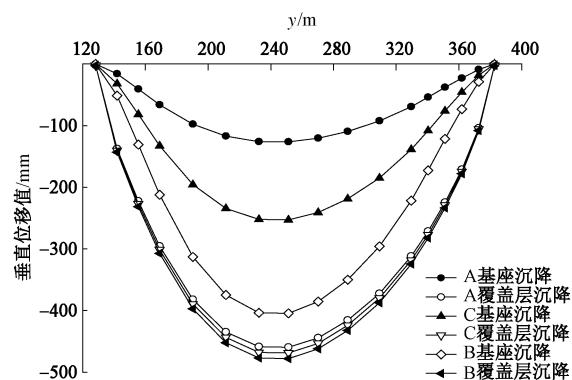


图10 心墙基座与周围覆盖层沉降沿坝轴线分布

Fig. 10 Settlement distribution core wall base and surrounding cover layer along dam axis

由于方案 C 采用了低弹模防渗墙, 因此与常规弹模的方案 A 相比, 竣工期心墙基座与覆盖层土体之间的最大沉降差从 330.46 mm 降为 165.79 mm, 蓄水期心墙基座与覆盖层土体之间的最大沉降差从 347.90 mm 降为 182.2 mm, 沉降差虽然大幅减小, 但仍有较大的沉降差存在。

方案 B 采用软接头混凝土帽连接型式, 心墙基座与防渗墙之间预留 30 cm 空隙。与方案 A 相比, 心墙垂直向位移有所增大, 竣工期心墙基座与覆盖层土体

之间的最大沉降差从 330.46 mm 降为 44.01 mm, 蓄水期心墙基座与覆盖层土体之间的最大沉降差从 347.90 mm 降为 65.29 mm。该方案心墙基座与覆盖层土体之间的最大沉降差在 3 种方案中最小, 心墙的变形规律也与砂砾石坝体的变形规律一致, 可以保证心墙及其基座随着坝体砂砾石一起协调变形。

方案 B 与方案 C 相比, 心墙基座与周围土体之间的最大沉降差更小, 且采用方案 B 时可在设计阶段根据数值模拟计算预测的沉降差来预设心墙基座和防渗墙之间的空隙值, 以最大程度地消除不均匀沉降的影响, 因而该方案具有巨大的优势。

4.2 基座应力对比

3 种方案混凝土基座最大拉应力见表 4。可见, 方案 A 和方案 C 基座的拉应力分别为 3.2, 2.5 MPa, 超过了混凝土的抗拉强度 1.3~2.5 MPa。该应力是将混凝土视为弹性材料计算得到的, 混凝土基座会发生断裂。

方案 B 中, 心墙基座的应力状态得到显著改善, 拉应力变小, 其最大拉应力为 0.6 MPa, 小于混凝土的抗拉强度, 应不会发生断裂。

表 4 混凝土基座的应力值

Table 4 Stresses of concrete base

方案	最大拉应力/MPa	C30 抗拉强度/MPa
A	3.2	1.43
B	0.6	1.43
C	2.5	1.43

4.3 坝体和覆盖层土体应力

3 种方案心墙基座周围坝体和覆盖层土体(如图 5 中 A 区域)的大主应力及小主应力值范围见表 5, 表中还列出了估算的该部位土体的抗剪强度。

表 5 沥青混凝土心墙基座周围土体的应力值

Table 5 Stresses of soil surrounding base and asphalt concrete core wall

方案	大主应力 值范围 /kPa	小主应力 值范围 /kPa	内摩 擦角 /(°)	黏聚 力 /kPa	剪切应 力/kPa	抗剪强 度/kPa
A	2000~2200	280~300	36	20	695~770	480~525
B	1400~1600	600~700	36	20	320~370	570~660
C	1800~2050	320~450	36	20	600~650	485~590

本次计算未模拟土体破坏。方案 C 与方案 A 相比, 第一主应力值减小, 第三主应力值增大, 但剪切应力仍大于抗剪强度, 该区域部分土体将发生剪切破坏。方案 B 与方案 A、C 相比, 该区域土体的主应力明显改善, 第一主应力继续减小, 第三主应力增大, 此时剪切应力小于抗剪强度, 土体不会发生剪切破坏。表明该方案采用预留 30 cm 空隙的方式可显著改善心墙基座周围土体的应力状态, 防止坝体和覆盖层土体局部发生剪切破坏。

综合以上结果和因素, 方案 B 心墙基座与覆盖层之间的沉降差最小, 竣工期和蓄水期心墙基座与覆盖层土体之间的最大沉降差分别为 44.01, 65.29 mm, 心墙的变形规律也与砂砾石坝体的变形规律一致, 可以保证心墙及其基座随着坝体砂砾石一起协调变形; 与其他两个方案比较, 方案 B 中心墙基座的应力状态得到显著改善, 拉应力最小, 其最大拉应力为 0.6 MPa, 小于混凝土的抗拉强度, 应不会发生断裂; 3 种方案只有方案 B 心墙基座周围坝体和覆盖层土体的剪切应力小于抗剪强度, 不会发生剪切破坏。因此最终选择推荐方案 B, 并建议在心墙基座和防渗墙之间预留空隙 30 cm, 在空隙内填充塑胶材料。

5 结 语

结合某水库工程心墙坝深厚覆盖层、沥青混凝土心墙+封闭式防渗墙等特点, 采用非线性有限元法, 建立三维有限元模型, 计算了坝体和坝基的变形和应力, 分析研究了心墙基座与防渗墙之间硬接头、软接头两种连接方式心墙基座与周围土体的协调变形。

软接头方案与硬接头方案、采用低弹模防渗墙方案相比, 软接头方案具有以下优势: ①心墙基座与覆盖层土体之间的最大沉降差最小, 心墙的变形规律也与砂砾石坝体的变形规律一致, 可以保证心墙及其基座随着坝体砂砾石一起协调变形。②混凝土基座的拉应力从 3.2 MPa 减到 0.6 MPa, 小于混凝土的抗拉强度, 应不会发生断裂。③心墙基座周围坝体和覆盖层土体的剪切应力范围减小为 320~370 kPa, 小于相应土体的抗剪强度。

通过不均匀沉降比较和变形协调分析, 推荐了合理的连接型式, 即深厚覆盖层上修建沥青混凝土心墙坝、坝基采用封闭式防渗墙时, 宜采用基座与防渗墙之间预留空隙的软接头混凝土帽连接型式, 其空隙大小与坝基覆盖层厚度及其力学特性以及防渗墙弹性模量有关, 需经计算分析确定。对于本工程, 建议心墙基座和防渗墙之间的预留空隙为 30 cm。

参考文献:

[1] 马晓华, 梁国钱, 郑敏生, 等. 坝体土体和防渗墙模量变化对防渗墙应力变形的敏感性分析[J]. 中国农村水利水电, 2011(6): 110 - 116. (MA Xiao-hua, LIANG Guo-qian, ZHENG Min-sheng, et al. Sensitivity analysis of the cutoff wall stress and deformation of the modulus variation on the dams and the cutoff walls[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(6): 110 - 116. (in Chinese))

[2] 王晓东. 冶勒水电站大坝心墙与防渗墙连接混凝土基座设

- 计[J]. 水电站设计, 2013, **29**(2): 9 - 11. (WANG Xiao-dong. A concrete base design of the connection between Yele dam core wall and impervious wall[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 2013, **29**(2): 9 - 11. (in Chinese))
- [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型式研究[J]. 水力发电, 2004(a01): 307 - 314. (CHEN Hong, CHEN Gang, TAN Chao-ming, et al. Research on connection type between dam foundation's impervious wall and concrete core wall about Dadu Pubugou[J]. Water Power, 2004(a01): 307 - 314. (in Chinese))
- [4] 田景元, 王平, 刘汉龙, 等. 毛尔盖心墙堆石坝防渗墙与坝体防渗体连接形式[J]. 水利水电科技进, 2010, **30**(4): 41 - 45. (TIAN Jing-yuan, WANG Ping, LIU Han-long, et al. Joint types for impervious walls and core mass of Maoergai core wall rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2010, **30**(4): 41 - 45. (in Chinese))
- [5] 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. (MA Xiao-hua, LIANG Guo-qian, ZHENG Min-sheng, et al. Numerical analysis on stress and deformation of the earth-rock dam cutoff wall using lowelastic modulus concrete[J]. Water Power, 2011, **37**(4): 51 - 54. (in Chinese))
- [6] 邱祖林, 陈杰. 深厚覆盖层上混凝土防渗墙的应力变形特性[J]. 水文地质工程地质, 2006, **33**(3): 72 - 76. (QIU Zu-lin, CHEN Jie. On the stress and deformation of cut-off wall in the deep overburden[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, **33**(3): 72 - 76. (in Chinese))
- [7] 万连兵, 冯燕明, 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. (WAN Lian-bing, FENG Yan-ming, HAN Chao-jun, et al. Research on stress and deformation of Kezijaer asphalt concrete core dam[J]. Water Resources and Power, 2011, **29**(4): 66 - 69. (in Chinese))
- [8] 速宝玉, 沈振中, 赵坚. 用变分不等式理论求解渗流问题的截止负压法[J]. 水利学报, 1996(3): 22 - 29. (SU Bao-yu, SHEN Zhen-zhong, ZHAO Jian. The cut-off negative pressure method for solving filtration problems based on the theory of variational inequalities[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996(3): 22 - 29. (in Chinese))
- [9] 沈振中, 速宝玉. 不透水地基上水平排渗体的优化研究[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(1): 86 - 91. (SHEN Zhen-zhong, SU Bao-yu. Optimization of Horizontal row infiltrateby on impervious foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(1): 86 - 91. (in Chinese))
- [10] 沈振中, 蒋磊, 陆希. 老虎嘴水电站左岸深防渗墙变形和应力有限元分析[J]. 水电能源科学, 2006, **24**(6): 46 - 48. (SHEN Zhen-zhong, JIANG Lei, LU Xi. Deformation and stress analysis of impervious wall in left bank of Laohuzui Hydropower Station[J]. Water Resources and Power, 2006, **24**(6): 46 - 48. (in Chinese))
- [11] 党发宁, 胡再强, 谢定义. 深覆盖层上高土石坝的动力稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(12): 2041 - 2042. (DANG Fa-ning, HU Zai-qiang, XIE Ding-yi. Dynamic stability analysis of high earth-rockfill dam on thick moraine cover foundation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(12): 2041 - 2042. (in Chinese))
- [12] 张琰, 张丙印, 李广信, 等. 压实黏土拉压组合三轴试验和扩展邓肯张模型[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(7): 999 - 1004. (ZHANG Yan, ZHANG Bing-yin, LI Guang-xin, et al. Combined tension-compression triaxial tests and extended Duncan-Chang model of compacted clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(7): 999 - 1004. (in Chinese))
- [13] 陈慧远, 周澄. 带混凝土防渗墙土石坝的应力应变分析[J]. 河海大学学报, 1987(6): 99 - 112. (CHEN Hui-yuan, ZHOU Cheng. Stress-strain analysis of earth-rockfill dams with concrete cut-off walls[J]. Journal of Hohai University, 1987(6): 99 - 112. (in Chinese))
- [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. (YIN Zong-ze. Stress and deformation of high earth and rock-fill dams[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(1): 1 - 14. (in Chinese))
- [15] 陈愈炯. 对“沥青混凝土心墙土石坝的应力应变分析”一文的讨论之讨论[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(7): 1150. (CHEN Yu-jiong. Discussion continued on “Stress-strain analysis of earth-rock dams with asphalt concrete core”[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(7): 1150. (in Chinese))
- [16] 钱亚俊, 陈生水. 心墙坝应力变形数值模拟结果验证[J]. 水利水运工程学报, 2005(4): 11 - 18. (QIAN Ya-jun, CHEN Sheng-shui. Verification of numerical simulation results of stress and deformation of core-wall dams[J]. Hydro- Science and Engineering, 2005(4): 11 - 18. (in Chinese))
- [17] 钱亚俊. 高心墙坝应力变形特性研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2005. (QIAN Ya-jun. Research on stress and deformation properties for high clay-core dam[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2005. (in Chinese))