

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.05.008

新型混凝土-堆石混合坝的基本力学特性

刘汉龙^{1,2},刘彦辰^{1,2},杨 贵^{1,2},陈育民^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏 南京 210098; 2. 河海大学安全与防灾工程研究所,江苏 南京 210098)

摘要: 吸收堆石坝和混凝土重力坝的优点并克服其缺点,提出了一种新型的混凝土-堆石混合坝技术,该坝型的特点是:坝体由上游带支墩的混凝土墙和下游堆石体组合而成,支墩设在混凝土墙后并以一定距离分布,混凝土墙和堆石体之间设置垫层和过渡层。以某心墙堆石坝工程为对象建立了混合坝数值模型,分析混合坝在竣工和蓄水工况下的坝体应力和变形特征,并与原心墙堆石坝工程性状进行对比分析。研究表明:混凝土墙后土压力呈非线性分布;混凝土墙受力以压弯为主,最大拉应力出现在墙踵处;支墩受力以弯剪为主,最大拉应力出现在支墩与混凝土墙连接处;堆石体整体应力水平比心墙堆石坝降低,安全性有较大幅度提高。技术经济分析比较表明,与心墙堆石坝相比,混合坝具有安全稳定、保护环境、节约材料等优点。

关键词: 混凝土-堆石混合坝;技术开发;数值分析;土压力;经济分析

中图分类号: TU435 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2013)05-0417-07

Basic features of a new dam type: Concrete-rockfill combination dam

LIU Hanlong^{1,2}, LIU Yanchen^{1,2}, YANG Gui^{1,2}, CHEN Yumin^{1,2}

(1. *Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;*

2. *Institute of Engineering Safety and Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: A new type of dam, a concrete-rockfill combination dam, is proposed. It has the advantages of a concrete gravity dam and a rockfill dam, and overcomes their disadvantages. The basic features of this dam are as follows: the dam body consists of an upstream concrete wall with counterforts and downstream rockfill, counterforts are installed behind the concrete wall at some intervals, and a cushion layer and a transition layer are installed between the concrete wall and rockfill monolith. A combination dam numerical model was built based on a core rockfill dam, and the basic characteristics of the stress and deformation of the combination dam at completion time and during the water storage period were studied and compared with an asphalt concrete core dam. The results show that the distribution of earth pressure against the concrete wall was nonlinear; the concrete wall was mainly subjected to a bending moment and compression, and the maximum tensile stress appeared in the wall heel; the counterforts were mainly subjected to the bending moment and shear force, and the maximum tensile stress appeared in the joint with the concrete wall; the stress level of rockfill was less than that of the core rockfill dam; and the safety of this type of dam was greatly improved. Technological and economic analysis show that the combination dam is more secure, more environmentally friendly, and needs less material compared with the core rockfill dam.

Key words: concrete-rockfill combination dam; technology development; numerical analysis; earth pressure; economic analysis

在水库坝型发展的过程中,堆石坝和混凝土坝一直沿着两条不同的路线发展^[1-3]。堆石坝的优点是可以充分利用当地天然材料,避免运输大量的建筑材料,施工简单,抗震性能好,对不同的地形和地质条件适应性强等。但是心墙堆石坝容易产生拱效应,从而产生心墙裂缝及水力劈裂^[4-5]等问题,导致坝体渗透破坏,并且心墙堆石坝体积很大,因而土石方开挖量和筑坝方量都很大。面板堆石坝抵抗不均匀沉降的能力差,对坝体变形要求较高,因此对筑坝材料的要求也比较高。

混凝土坝的优点是质量安全可靠,但是混凝土重力坝对地形和地质条件适应性差,一般要建在完整的基岩上,而混凝土拱坝需要有坚固的坝肩作为支撑。混凝土坝由于庞大的体积,浇筑时需要有严格的温度控制措施,并消耗大量的水泥、钢筋等建筑材料,会对自然环境造成较大破坏,而且混凝土坝一般修建在偏僻的山区,大量的水泥、砂石材料运输会比较困难。

堆石坝和混凝土坝的结合始于碾压混凝土这种材料的出现。碾压混凝土坝具有节约水泥、施工简便、工期短和造价低等优点,在技术经济上具有显著的优势。然而,在碾压混凝土坝得到迅猛发展的同时,它在渗流控制^[6]、层面稳定性^[7]及温控措施^[8]等方面的问题仍然引起了工程技术人员的担忧。既然在施工方法上堆石坝可以和混凝土坝结合,那么在剖面选择与设计思想上是否也可以同时吸收堆石坝和混凝土坝的优点?以前曾有类似的想法,但用于大坝加固,比如美国加利福尼亚州的直布罗陀拱坝曾考虑采用下游接堆石的方法来加固。基于这种想法,笔者开发了混凝土-堆石混合坝这一新坝型,并提出相应的施工方法(专利号: ZL200910185327. X)^[9],使其达到结构简单稳定、施工方便、经济环保等目的。

本文以某大坝为参考对象,从力学性能、经济和环保等方面对混合坝进行初步探讨。

1 混凝土-堆石混合坝技术

混凝土-堆石混合坝(以下简称混合坝)技术的典型断面见图1。

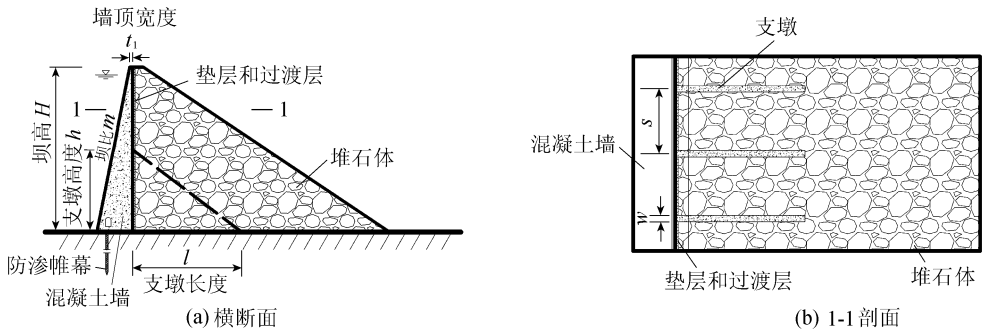


图1 典型混合坝示意图
Fig. 1 Sketch map of typical combination dam

混合坝的技术特征如下:

- a. 混合坝是由混凝土墙和堆石体组合形成的一种新型坝体结构形式,其坝体包括混凝土墙、堆石体、支墩连接段、垫层和过渡层。支墩连接段设置在堆石体中,与混凝土墙整体浇筑,并深入堆石体一定深度,用于两种不同材料之间的交接,以增加坝体整体性;垫层和过渡层设置在混凝土墙和堆石体之间,垫层主要起平整上游混凝土墙、保证墙体有稳定受力状态的作用,过渡层起保护垫层和协调变形的作用;在坝体的上游坝脚和下游坝脚处分别设置上游堆石和下游堆石,起到压重和增强坝体整体稳定性的作用。
- b. 混合坝上游为混凝土墙,下游为堆石体。混凝土墙是一个较薄的挡水体,因此与普通的堆石坝相比体积大幅度减小,减少了原普通堆石坝上游坝体的堆石体开挖量,节省了堆石料用量,从而降低了成本。下游坝体采用堆石体坝身,可充分利用当地的天然材料,与普通的混凝土重力坝相比,减少了下游坝体混凝土的用量,节省了大量混凝土,且坝体适应覆盖层地基变形的能力强。同时该坝型是堆石坝和混凝土坝两种坝型的结合,具有较好的技术基础,没有增加施工的技术难度。
- c. 支墩连接段为一组呈梳齿状排列的三角形混凝土支墩,与混凝土墙整体浇筑,自混凝土墙向堆石体内延伸并深入堆石体中。根据混合坝的坝体长度,支墩之间的距离为20~50 m,深入堆石体坝身的长度(支墩底部长度)为坝高的1/3~1/2。

d. 垫层紧贴混凝土墙,厚度为 2~6 m,采用连续级配细石料,比如石料最大粒径一般小于 80 mm,粒径小于 5 mm 的颗粒含量(质量分数,下同)为 35%~55%,小于 0.1 mm 的颗粒含量(质量分数)为 4%~8%,有较高的变形模量和良好的压实性能,压实达到设计要求。垫层的主要作用是混凝土坝身提供良好的支撑,使作用在混凝土墙上的荷载经过垫层均匀地传递到整个堆石体和坝基上,同时缓和下游堆石体变形对墙体的影响,改善墙体应力状态。

e. 垫层和堆石体之间为过渡层,厚度为 2~6 m,通常所用石料最大粒径为 300 mm,粒径小于 5 mm 的颗粒含量少于 17%,粒径小于 0.1 mm 的颗粒含量少于 7%。

f. 坝体防渗由上游混凝土墙承担,坝基防渗可根据情况采用帷幕灌浆或混凝土防渗墙,坝体和坝基之间可通过连接板和趾板连接。这样,墙体-连接板-趾板-防渗墙(帷幕灌浆)形成完整的防渗系统。与普通心墙堆石坝以心墙作为防渗体相比,混合坝坝身具有更高的强度和防渗性能,坝体安全性能更高;与普通面板堆石坝以面板作为防渗体相比,混合坝适应坝体变形的能力提高,且不会产生因为面板裂缝导致渗流破坏现象。

g. 混合坝的施工步骤如下:(a)整体浇筑混凝土墙和支墩连接段到第一级高程;(b)第一级高程混凝土墙和支墩连接段混凝土养护后,填筑垫层和过渡层到第一级高程;(c)填筑堆石体到第一级高程;(d)如果施工高程未达到坝顶高度则重复步骤(a)~(c),达到的话就进行下一级高程坝体浇筑,直到完成整个坝体的施工;(e)填筑堆石压重。

2 计算模型及参数

2.1 计算模型

本文以某工程为原型,坝顶高程为 960.00 m,最大坝高为 60 m。混合坝计算以其为参考对象,并在此基础上进行优化计算,进一步与该坝的计算结果进行比较。拟定混合坝的截面尺寸如下:坝高 $H=60$ m,墙顶宽度 $t_1=1$ m,坡比 $m=0.2$,支墩宽度 $w=2$ m,支墩间距 $s=20$ m,支墩长度 $l=40$ m,支墩高度 $h=30$ m。

根据坝体的材料分区并考虑到大坝的施工顺序,对选定的计算断面进行单元剖分。混凝土墙是整个大坝的核心,也是研究的重点,因而此部分的单元划分较密,沿厚度方向共划分了 5 层单元,如图 2 所示。坝体共计 7338 个单元、9361 个节点,单元类型为 8 节点六面体线性完全积分单元,即 C3D8。该心墙坝网格图略。本文将对建在基岩上的相同坝高的两个坝型进行比较。

2.2 计算参数

堆石、垫层和过渡层采用邓肯-张 $E-\nu$ 非线性弹性模型,计算模型参数与该心墙堆石坝计算参数一致,见表 1。混凝土墙采用线弹性模型,弹性模量 $E=25.5$ GPa,泊松比 $\nu=0.17$,密度 $\rho=2.4$ g/cm³。坝基也采用线弹性模型,弹性模量 $E=30$ GPa,泊松比 $\nu=0.2$,密度 $\rho=2.4$ g/cm³。

计算中按照大坝实际的填筑及运行过程进行模拟,即首先连续填筑坝体至坝顶,然后蓄水,总共 14 个加载级。第 1~10 步模拟大坝连续填筑过程,其中,混凝土先于堆石填筑,从坝基面逐步上升至坝顶;第 11~14 步模拟水库水位逐渐上升至正常蓄水位的过程。

3 计算结果分析

3.1 应力分析

3.1.1 混凝土墙

混凝土墙在混合坝体系中起着坝身防渗等主要作用,它的受力特性极为重要。在竣工期混凝土墙主要受重力和墙后土压力的作用,蓄水后受到重力、上游水压力、坝底扬压力和墙后土压力的共同作用。混凝土墙的抗滑稳定和应力稳定安全控制标准暂时按重力坝设计规范执行,暂不考虑温度荷载的影响。

混凝土墙受到的土压力分布如图 3 所示,可以看出,由于模型的底部边界及侧边边界的约束作用,在混凝土墙的底部,土压力计算值与库伦土压力计算值之间存在一定的偏差。这种位移模式也就是通常所说的

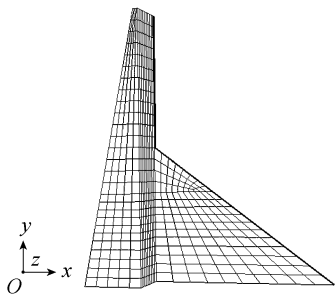


图 2 混凝土墙三维有限元网格
Fig. 2 Three-dimensional finite element mesh of concrete wall

挡墙绕墙底端转动,即RB模式^[10]。在这种位移模式下,水平土压力分布呈明显的非线性,大致为底部压力不为零的抛物线分布,与王仕传等^[11]计算结果的刚性挡土墙背后主动土压力趋势类似,数值略小。蓄水后,由于支墩存在,承担了大部分的水压力,对土压力分布没有太大的影响。进一步计算可以得到,合力作用点位于墙底以上0.34*H*处,按库伦主动土压力理论,合力作用点应位于墙底以上0.33*H*处,有限元计算结果之所以大于库伦土压力的理论值,主要是因为边界条件造成混凝土墙底部土压力小于直线分布土压力值。该结果与陈页开^[10]的研究结果相符。

表1 邓肯-张 *E-v* 模型参数
Table 1 Parameters of Duncan-Chang *E-v* model

坝料	<i>R_f</i>	<i>K</i>	<i>n</i>	<i>G</i>	<i>F</i>	<i>D</i>	<i>K_{ur}</i>	$\varphi_0/(^{\circ})$	$\Delta\varphi/(^{\circ})$	<i>c/kPa</i>	$\rho/(g\cdot m^{-3})$
垫层和过渡层	0.807	760	0.35	0.38	0.21	4.95	2 280	47.4	6.7	0	2.18
堆石区	0.843	680	0.30	0.37	0.20	4.83	1 440	48.6	8.4	0	2.20

混凝土墙受到的弯矩如图4所示(以上游面受拉为正)。在竣工时,墙体的弯矩从上到下逐渐增大,顶部增长较缓慢。墙体以受压弯为主,墙后土压力产生的弯矩使墙体上游面受压、下游面受拉,自身重力使墙体受压。计算结果显示,墙体受重力作用产生的压应力大于由土压力产生的拉应力,所以竣工期墙体不会出现拉应力。相应地,在蓄水期水压力起主要作用,使混凝土墙上游面受拉,最大拉应力为2 MPa,出现在墙踵位置,略高于混凝土的抗拉强度,与重力坝类似。但有限元计算结果通常在墙踵处最大拉应力会略高于实测值^[12],主要是由于墙踵角缘区的奇异性使有限元解答在此部位失真,但此范围很小。杨清平等^[13]用主拉应力相对宽度 $b_n=b/B\times 100\%$ 来表示坝踵处主拉应力的分布(其中 *b* 为混凝土墙底主压应力宽度;*B* 为混凝土墙底宽度),利用此公式算得 $b_n=12.5\%$,该结果与重力坝结果相近,说明混凝土墙的应力是在可接受范围内的。同时,为了提高安全性,可以在混凝土墙内部布置适当的受拉钢筋,限制裂缝的发展。

对于混合坝沿坝底地基面的抗滑稳定,可参考重力坝相关规范^[14],本文采用抗剪强度公式 $K=f\sum W/\sum P$,得到竣工期 $K_e=1.7$,蓄水期 $K_w=1.2$,2个结果都大于容许抗滑稳定安全系数[*K*]([*K*] 取1.1),所以混凝土墙满足抗滑稳定要求。

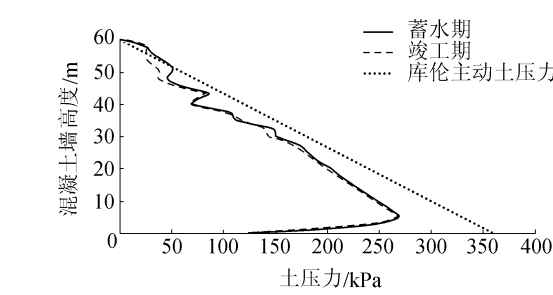


图3 土压力分布
Fig. 3 Distribution of earth pressure

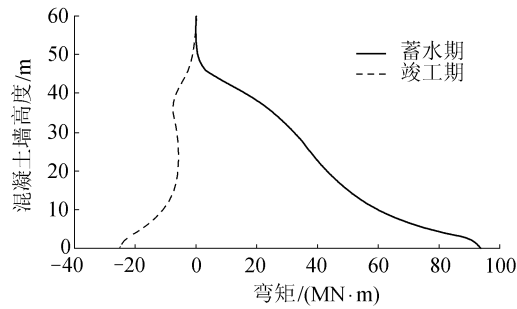


图4 典型弯矩分布
Fig. 4 Distribution of typical bending moment

3.1.2 支墩

支墩受到的竖向应力等值线见图5。在竣工期,支墩受到墙背后主动土压力水平分力(即承受两相邻支墩的跨中至跨中长度与支墩高度*h*范围内及上部的土压力)、支墩和墙体自重以及土压力竖向分力的作用,支墩最大的竖向压力为2.3 MPa。蓄水后增加的水压力也主要由支墩承担,竖向压力增加至5.4 MPa。支墩可视为锚固在坝基上的“T”形变截面悬臂梁^[15],墙面作为该“T”形梁的翼缘板,以受弯剪为主。

土压力除了对支墩产生弯矩外,还会产生剪力。支墩受到的最大主拉应力(约3 MPa)出现在蓄水期支墩与混凝土墙连接处很小的范围内,可以通过布置适当的受拉、剪钢筋解决。由于拉应力出现在下游部分,对渗流无较大影响。

3.1.3 堆石体

计算得到堆石在蓄水期的应力水平等值线如图6所示,堆石体大部分区域的应力水平为0.3~0.5,最大值出现在堆石中上部,约为0.8。该心墙堆石坝应力水平计算结果如图7所示。可以看出:坝体内除心墙的部分区域应力水平达到0.8,大部分区域为0.4~0.6。对比可以看出,混合坝堆石体的应力水平略低于心

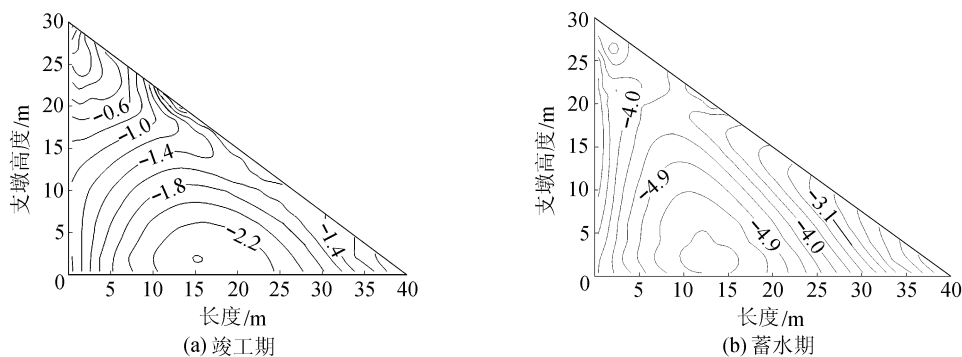


图 5 支墩竖向应力等值线(单位:MPa)
Fig. 5 Vertical stress isoline of counterfort (units: MPa)

墙坝。主要原因如下:(a)混凝土墙的影响,对于混合坝,墙体承担了部分的土压力,使最大主应力向下游移动,最大值位于堆石下游 38 m 左右,而心墙堆石坝则位于坝轴线处。(b)下游坡比不同,混合坝下游坡比和面板坝相似(为 1 : 1.5 左右),而心墙堆石坝的坡比往往取值较小,为 1 : 2 左右。坝坡越缓,会导致坝体内部产生的应力越大。所以混合坝的应力水平更低,稳定性更好。(c)心墙堆石坝由于坝体上游堆石、过渡层浸水减载作用,主应力减小,该区域应力水平较高;混合坝类似现象不明显。

3.2 变形分析

3.2.1 混凝土墙

根据受力状态分析,表明混凝土墙在竣工和蓄水工况所受弯矩不同,导致墙体水平位移存在差异。计算得到的水平位移分布见图 8。竣工时,混凝土墙承受背后主动土压力,使混凝土坝段有向上游倾斜的趋势;蓄水后,水压力使混凝土坝段有向下游倾斜的趋势。水平位移的最大值出现在蓄水期两支墩中间的坝顶,大约为 37 mm,占坝高的 0.06%。另外,在坝高 30 m 以下部分,由于支墩对混凝土墙的作用,使水平位移变化不大;在坝高 30 m 以上部分,水平位移明显增加。由于混凝土墙的刚度很大,加之支墩的限制,所以水平位移沿着墙轴线几乎没有变化。

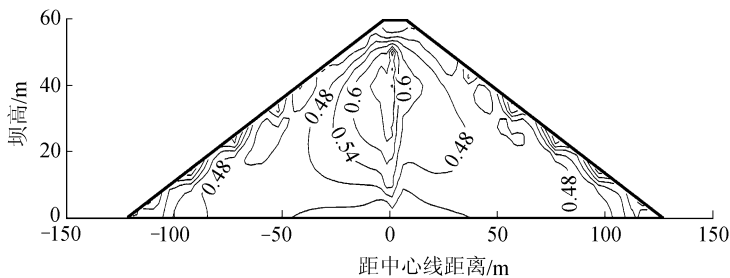


图 7 蓄水期心墙堆石坝应力水平等值线
Fig. 7 Stress level isoline of core rockfill dam during water storage period

3.2.2 支墩

计算得到支墩在竣工期和蓄水期的水平位移分布见图 9。分析支墩在不同工况下的位移分布可以看出:不同工况下位移比较接近,随着坝体高程增加,位移非线性增大,增大的速率也越来越大。由于支墩在连接处的位移与混凝土墙协调,所以支墩整体在竣工期有向上游位移、蓄水期向下游位移的状况,最大位移不超过 1 cm。

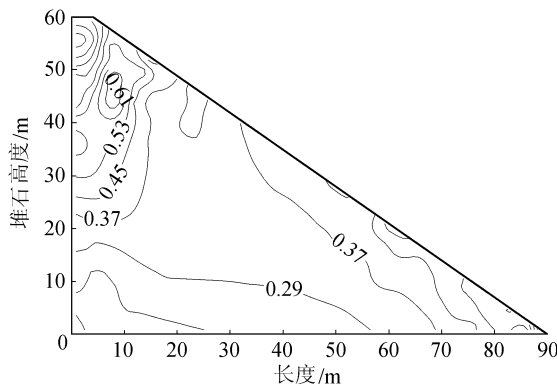


图 6 蓄水期堆石坝应力水平等值线
Fig. 6 Stress level isoline of rockfill dam during water storage period

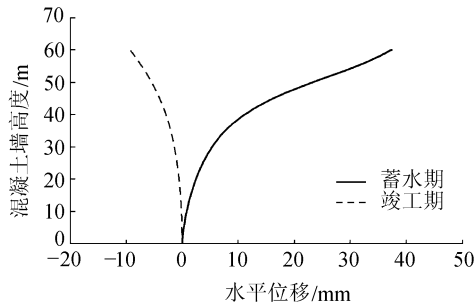


图 8 混凝土墙水平位移(顺河向为正)
Fig. 8 Horizontal displacement of concrete wall

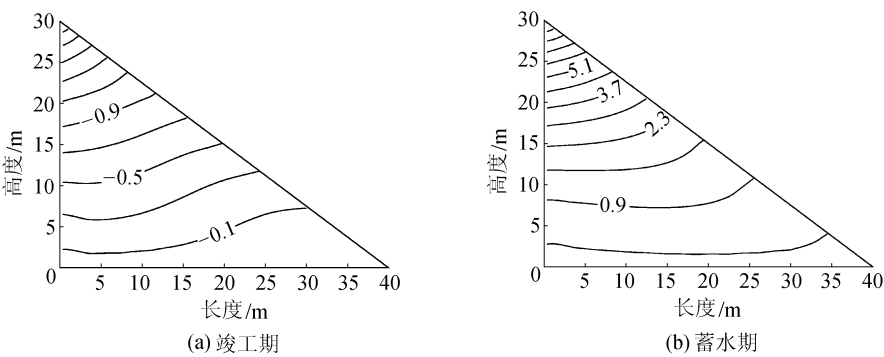


图9 支墩水平位移等值线(单位:mm)

Fig. 9 Horizontal displacement isoline of counterfort (units: mm)

3.2.3 堆石体

计算得到混合坝堆石体在竣工期的水平位移分布见图10。该心墙堆石坝竣工期的水平位移分布见图11。竣工期,堆石主要受到自身重力作用,因为混凝土墙的水平位移很小,可将堆石体近似看作是心墙堆石坝的下游堆石,其水平位移分布与心墙堆石坝很接近。水平位移最大值出现在下游中部坝坡处,为11 cm。同样地,混合坝中堆石和心墙堆石坝最大竖向位移皆出现在堆石中间位置,最大值为21 cm左右。

由应力分析可知,蓄水对混凝土墙后土压力的分布影响不大,水压力主要由支墩承担,所以蓄水后混合坝下游的堆石水平位移分布与图9基本一致。同样,蓄水对混合坝的沉降变化影响不明显,仅增加了3 cm左右。而蓄水对心墙堆石坝影响很大,因为心墙堆石坝的上游堆石必须考虑到水的浮力、湿化等影响。

此外,对于心墙堆石坝,由于心墙和周围堆石的模量相差较大,因此容易产生拱效应,进而导致心墙劈裂,破坏防渗体系,产生严重后果。混合坝则不存在类似的情况。

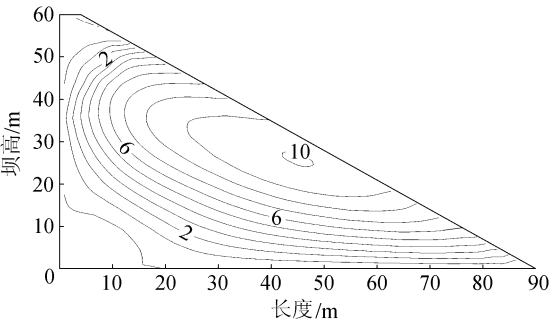


图10 竣工期堆石体水平位移等值线(单位:cm)

Fig. 10 Horizontal displacement isoline of rockfill at completion time (units: cm)

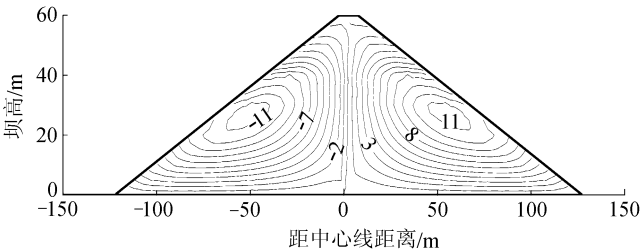


图11 竣工期心墙堆石坝水平位移等值线(单位:cm)

Fig. 11 Horizontal displacement isoline of core rockfill dam at completion time (units: cm)

4 经济环保分析

静力分析表明,混合坝在静力计算方面能取得比堆石坝好的结果,是安全可靠的。经济性方面,心墙堆石坝和混合坝比较的前提条件是基本相同的,即坝址、坝基开挖工程量、施工导流标准、安全检测设备采购及安装工程量等。图12显示的是心墙堆石坝和混合坝的复合断面(地平面以上部分)。虚线表示混合坝比心墙堆石坝减少的部分。易看出,混合坝使用薄型混凝土墙体来代替心墙堆石坝的上游堆石,从而大幅度缩小了坝体的断面。进一步计算表明,与心墙堆石坝相比,对于单位长度的坝体,新型混凝土-堆石混合坝的混凝土用量增加了420 m³,但是土方量却减少了56%。如果考虑到其他因素,比如施工速度、对环境的影响,混合坝的经济前景将更加显著。与心墙堆石坝相比,虽然单位体积混凝土的单价高于填土或堆石的单价,但采用混合坝可以大幅度缩小坝的横剖面,从而减少坝体总的土方量。

环保性方面,由图12可知,混合坝的堆石用量仅占堆石坝的44%左右,这就意味着可以减少开山采石,能够降低危害的发生。

此外,如果单纯采用混凝土坝型,将消耗大量的混凝土材料,不但增加运输成本,而且使用大量的水泥增

加碳排放。

5 结 语

提出了一种混凝土墙-堆石混合坝技术。以某心墙堆石坝为参考对象,建立混合坝模型并开展了数值模拟分析,与该心墙堆石坝计算结果比较,得出如下结论:(a)混合坝受力结构形式合理,混凝土墙和支墩所受最大拉应力和压应力都在合理范围内。(b)与心墙堆石坝相比,混合坝堆石的应力水平和位移明显减小,并且蓄水后其下游堆石应力水平和位移影响显著小于心墙堆石坝。(c)混合坝的单位长度经济性好于心墙堆石坝,经济性很明显。混合坝堆石用量仅占心墙堆石坝的 44% 左右,可以减少开山采石对自然环境的破坏。

总之,该新坝型吸取了混凝土坝和心墙坝两种坝型的优点,克服了它们各自的缺点,结构简单,施工方便,降低了造价,是一种较为经济实用的坝型。但混合坝作为一种新型坝体,其温度应力、渗流稳定性和坝基适用条件等还需进一步开展研究。

参考文献:

[1] 孙君森,林鸿镁. 重力坝设计新思路[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 62-67. (SUN Junsen, LIN Hongmei. New design philosophy for gravity dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 62-67. (in Chinese))

[2] 蔡新,施金,郭兴文,等. 胶凝面板堆石坝优化设计[J]. 水利水电科技进展,2008,28(1):43-45. (CAI Xin,SHI Jin,GUO Xingwen,et al. Optimal design of cemented concrete face rockfill dam[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2008,28(1):43-45. (in Chinese))

[3] CAI Xin, WU Yingli, YI Jiangang, et al. Research on shape optimization of CSG dams[J]. Water Science and Engineering, 2011, 4(4):445-454.

[4] 朱俊高,王俊杰,张辉. 土石坝心墙水力劈裂机制研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 487-492. (ZHU Jungao, WANG Junjie, ZHANG Hui. Study on mechanism of hydraulic fracturing in core of earth-rockfill dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3):487-492. (in Chinese))

[5] 朱晟,魏国民,饶锡保. 土石坝沥青混凝土心墙水力劈裂研究[J]. 水力发电学报, 2013, 32(1): 218-222. (ZHU Sheng, WEI Kuangmin, RAO Xibao. Study on hydraulic fracturing of asphalt concrete core in earth-rock dam[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(1):218-222. (in Chinese))

[6] 宋崇能. 高碾压混凝土重力坝的渗流控制方法及其工程应用[D]. 南京:河海大学, 2004.

[7] 寇立夯,王进廷,金峰. 碾压混凝土坝层稳定分析的评价方法研究[J]. 水利水电技术, 2008, 39(7): 35-38. (KOU Lihang, WANG Jinting, JIN Feng. Research on evaluation method of RCC dam layer against sliding[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2008, 39(7): 35-38. (in Chinese))

[8] 朱岳明,张建斌. 碾压混凝土坝高温期连续施工采用冷却水管进行温控的研究[J]. 水利学报, 2002, 33(11): 55-59. (ZHU Yue ming, ZHANG Jianbin. Study on application of water cooling pipe measures to RCCDs' thermal control during continuous construction in high-temperature season[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(11): 55-59. (in Chinese))

[9] 刘汉龙,肖杨,丁选明,等. 一种混凝土-堆石混合坝及其施工方法:中国 101718086A [P]. 2010-06-02.

[10] 陈页开. 挡土墙上土压力的试验研究与数值分析[D]. 杭州:浙江大学, 2001.

[11] 王仕传,凌简明. 刚性挡土墙非线性主动土压力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 242-244. (WANG Shichuan, LING Jianming. Nonlinear analysis of active earth pressure on a rigid retaining wall[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering. 2006, 2(2): 242-244. (in Chinese))

[12] 敖麟. 重力坝坝基附近的应力分布及有限单元法解答[J]. 水利学报, 1984, 15(8): 15-25. (AO Li. Stress distribution in the vicinity of gravity dam foundation and the solution obtained by FEM[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1984, 15(8): 15-25. (in Chinese))

[13] 杨清平,李俊杰. 重力坝坝踵主拉应力区分布规律的探讨[J]. 水利学报, 2000, 31(4): 64-68. (YANG Qingping, LI Junjie. Study on law of diagonal tension stress distribution at gravity dam heel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(4): 64-68. (in Chinese))

[14] SL 319—2005 混凝土重力坝设计规范[S].

[15] 中交第二公路勘察设计院有限公司. 公路挡土墙设计与施工技术细则[M]. 北京:人民交通出版社, 2008.

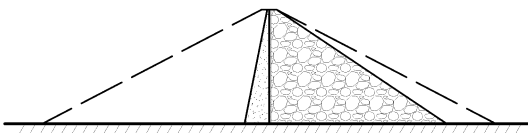


图 12 混合坝和心墙堆石坝的复合断面
Fig. 12 Compound section of combination dam and core rockfill dam