

基于挤压边墙技术水布垭面板堆石坝 应力-应变研究

罗先启¹, 吴晓铭², 童富果¹, 李昌彩²

(1. 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北省清江水电开发有限责任公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 混凝土挤压边墙技术是混凝土面板堆石坝上游坡面施工的新方法。挤压边墙技术与传统方法相比, 在施工方面有明显的先进性, 新工艺对工程质量的提高、进度的加快以及增加导流度汛的安全性等方面产生的效果是显而易见的, 且比传统工艺简化了施工工序, 降低了施工费用。但是, 在结构性能方面, 挤压边墙对面板堆石坝特别是对面板的应力-应变的影响, 目前还很不清楚。以水布垭面板堆石坝工程为对象, 采用先进的网格离散技术和大型方程求解方法, 研究了基于挤压边墙技术水布垭面板堆石坝的应力-应变。计算结果表明, 挤压边墙不仅可以替代传统工艺中垫层料的超填、削坡、修整、碾压以及坡面防护等工序, 加快了施工进度, 使得施工质量得到了保证和提高, 而且还对改善面板的受力状态是有利的, 对面板的变形也起着改善作用。

关键词: 水工结构; 挤压边墙; 水布垭面板堆石坝; 应力-应变

中图分类号: TV 641.4⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)13-2342-08

RESEARCH ON THE STRESS-STRAIN OF SHUIBUYA CONCRETE FACE ROCKFILL DAM BASED ON THE CONCRETE CRUSHING-TYPE SIDE WALL TECHNOLOGY

LUO Xian-qi¹, WU Xiao-ming², TONG Fu-guo¹, LI Chang-cai²

(1. College of Civil and Hydroelectric Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Qingjiang River Hydropower Development Co., Ltd., Yichang 443000, China)

Abstract: The concrete crushing-type side wall technology is a new method for constructing the upstream side-slope of concrete face rockfill dam(CFRD). Compared with the traditional method, this technology is obviously more advanced such as enhancing the project quality, quickening the pace, increasing the safety of river diversion and etc.. Further more, the technology has simplified the construction procedure and cut down the construction cost. However, It's still uncertain about the effect of the concrete crushing-type side wall on CFRD, particularly on its stress-strain. This paper, applying the advanced grid discreteness technique and the method to solve large scales of equations, researches the stress-strain of Shuibuya CFRD based on the concrete crushing-type side wall technology. Through calculating, it indicates that the concrete crushing-type side wall can not only replace the procedure of bedding material extra-filling, scaling, dressing, roller compacting and slope face protection, so as to quicken the schedule and enhance and guarantee the construction, but also improve the stress situation of the face and its deformation.

Key words: hydraulic structure; concrete crushing-type side wall; Shuibuya concrete face rockfill dam; stress-strain

收稿日期: 2004-03-12; **修回日期:** 2004-04-30

基金项目: 湖北省教育厅重点项目(2001Z67007)

作者简介: 罗先启(1965-), 男, 博士, 1986年毕业于天津大学水利水电工程系水利水电工程建筑专业, 现任教授, 主要从事岩土工程和水工结构方面的教学与研究工作。E-mail: luoxianqi_65@hotmail.com.

1 引言

钢筋混凝土面板堆石坝是我国目前的重要坝型之一。面板堆石坝上游面传统的施工方法是将垫层料铺填超出设计垫层区上游面 30 cm 左右后进行水平碾压,一般层厚约 40 cm,待垫层料铺填至一定高度后,进行人工削坡整理,并反复进行斜坡碾压,然后再进行削坡整理、喷砂浆固坡等工序,直至符合设计坡面要求。从客观上讲,采取上述施工方法垫层料斜坡面密实度难以保证,由于上游坡面施工工序复杂、垫层料超填和整理量大,以及坡面长期无防护容易受雨水冲刷,加上传统边墙填压工艺的缺陷,因而上游坡面的施工始终是一个控制进度和影响质量的关键环节。

混凝土挤压边墙技术是混凝土面板堆石坝上游坡面施工的新方法。1999 年巴西埃塔面板堆石坝建设中首先使用该技术,因其替代传统工艺中垫层料的超填、削坡、修整、碾压以及坡面防护等工序,加快了施工进度,使得施工质量得到了保证和提高。2001 年 10 月黄河上游水电开发有限责任公司建设分公司委托陕西省水电工程局(集团)有限责任公司进行挤压边墙的实验研制工作,将这一施工新技术应用于公伯峡水电站面板堆石坝中,现已在国内开始推广应用^[1-4]。如在湖北省恩施市自治州芭蕉河水电站面板堆石坝工程中亦采用了混凝土挤压式边墙技术。

混凝土挤压边墙技术借鉴了道路工程中混凝土路沿拉模施工技术,即在每填筑一层垫层料之前,沿着设计断面用挤压边墙机制做出一个半透水的连续的混凝土小墙,待混凝土凝固后在其内侧按设计要求铺填大坝垫层料,接着用振动碾平面碾压垫层料,待本层料碾压合格后再重复以上工序。挤压边墙施工分 3 个阶段,即边墙施工、垫层料摊铺和垫层料碾压^[1-4]。

混凝土挤压边墙技术与传统方法相比,在施工方面有明显的先进性,新工艺对工程质量的提高、进度的加快以及增加导流度汛的安全性等方面产生的效果是显而易见的,且比传统工艺简化了施工工序,降低了施工费用。但是,在结构性能方面,混凝土挤压边墙对面板堆石坝,特别是对面板的应力-应变的影响,目前还很不清楚。由中国水利水电科学研究院完成了公伯峡水电站面板坝^[5](坝高 127 m)、芭蕉河面板堆石坝^[6](坝高 115.3 m)全荷载

作用下大坝应力-应变研究,其中芭蕉河面板堆石坝采用了 23 195 节点,4 895 个单元。计算结果表明,芭蕉河面板堆石坝工程挤压边墙使堆石体沉降减少了 5 cm。上述研究重点在于揭示堆石坝整体力学性能,无法准确模拟混凝土挤压边墙的作用。在埃塔坝(坝高 125 m)的施工中,坝体下部的位移导致了边墙沿上游坡面方向的位移,其位移为 6~8 cm,这既不影响保护面的完整性,也不影响面板的施工。

公伯峡水电站面板堆石坝和芭蕉河水电站面板堆石坝等工程虽然已采用挤压边墙技术,但在挤压边墙施工工艺、挤压边墙材料性能、挤压边墙结构性能及其对面板堆石坝力学性能的影响程度等方面还有待进一步研究。水布垭面板堆石坝坝高 233 m,是世界上此类坝型中最高坝。水布垭面板堆石坝采用挤压边墙技术,对面板堆石坝应力-应变的影响更应深入研究。

2 基于挤压边墙技术面板堆石坝应力-应变计算原理与方法

2.1 计算原理

目前,国内外对于面板堆石坝应力-应变计算^[7-12],对于混凝土材料的面板、趾板均采用线弹性本构关系计算。而基于土石体材料本构关系的非线性特性,计算采用三维非线性有限单元法。结构的整体平衡方程为

$$\{w\} = [K(\delta)]\{\delta\} - \{P\} = 0$$

求解非线性问题的方法可分为 3 类,即增量法、迭代法和混合法。计算中采用的是增量法。

增量法是用一系列线性问题去近似非线性问题,实质是用分段线性的折线去代替非线性曲线。其作法是把荷载分为 m 个增量,并假定在某一具体的荷载增量中,刚度矩阵是常数,进而总荷载 $\{P\}$ 为

$$\{P\} = \sum_{j=1}^m \{\Delta P_j\}$$

在施加第 i 个荷载增量后,荷载 $\{P_i\}$ 为

$$\{P_i\} = \sum_{j=1}^i \{\Delta P_j\}$$

每一个荷载增量产生一个位移增量 $\{\Delta \delta_j\}$ 和应力增量 $\{\Delta \sigma_j\}$,因此,在施加第 i 个荷载增量后,位移和应力分别为

$$\{\delta_i\} = \sum_{j=1}^i \{\Delta \delta_j\}$$

$$\{\sigma_i\} = \sum_{j=1}^i \{\Delta\sigma_j\}$$

至于如何由荷载增量 $\{\Delta P_i\}$ 计算位移增量 $\{\Delta\delta_i\}$ 和应力增量 $\{\Delta\sigma_i\}$ ，主要采用始点刚度法和中点刚度法。

始点刚度法是以第 i 级增量起始点时的刚度矩阵 $[K]$ 近似作为第 i 级增量的刚度矩阵 $[K]$ 。故始点刚度法相当于微分方程数值积分的欧拉法，虽然计算简单，但比较粗糙，计算精度较低。为了提高精度，可在每步计算中采用平均刚度，即中点刚度法。首先用施加荷载增量的一半即 $\frac{1}{2}\{\Delta P_i\}$ ，用第 $i-1$ 步末的刚度矩阵 $[K_{i-1}]$ ，由下式计算临时的位移增量 $\{\Delta\delta_{(i-1)/2}^*\}$ ：

$$[K_{i-1}]\{\Delta\delta_{(i-1)/2}^*\} = \frac{1}{2}\{\Delta P_i\}$$

由此可得中点位移为

$$\{\delta_{(i-1)/2}\} = \{\delta_{i-1}\} + \{\Delta\delta_{(i-1)/2}^*\}$$

根据 $\{\delta_{(i-1)/2}\}$ 及应力-应变关系求得中点刚度矩阵 $[K_{(i-1)/2}]$ ，以此作为第 i 级荷载的刚度矩阵。中点刚度法相当于求微分方程数值解的龙格-库塔法，计算精度较始点刚度法高。

2.2 计算所采用的材料模型

针对不同的材料特性，采用了 4 种材料模型：线弹性模型、非线性弹性模型、接触面模型和连接单元。

混凝土面板和趾板采用的是线弹性模型。参照长江科学院 2003 年 9 月关于挤压边墙材料性能实验初步成果(湖北省清江水电开发有限责任公司水布垭公司提供)，其实验曲线表明，挤压边墙在低应力时表现出线弹性(类似混凝土材料)，在高应力时表现非线性性质(类似散粒材料)。挤压边墙介于混凝土与散体材料之间，计算中挤压边墙与堆石体材料采用的是 Duncan-Chang($E - B$)模型。其切线模量 E_t 为

$$E_t = K p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \left[1 - R_f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2 \quad (1a)$$

根据 Mohr-Coulomb 准则，可得

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (1b)$$

切线体积变形模量 B_t 为

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^m \quad (1c)$$

坡体的内摩擦角 φ 的修正如下：

$$\varphi = \varphi_0 - \Delta\varphi \lg \frac{\sigma_3}{p_a} \quad (1d)$$

在计算中，单元应力同时满足如下条件：单元处于卸荷或再加荷状态，用弹性模量表示如下：

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^{n_{ur}} \quad (1e)$$

式(1a)~(1e)中： p_a 为大气压力； $K, n, R_f, c, \varphi_0, K_b, K_{ur}$ 和 n_{ur} 均可由材料三轴实验得到。

混凝土面板与挤压边墙以及挤压边墙与堆石体的相互作用直接影响到混凝土面板的应力和位移，计算中采用了有厚度的接触面单元。其基本假设为：

(1) 单元内剪应力 τ_s 与单元两边的水平位移差 Δu 成正比，即

$$\tau_s = \lambda_s \Delta u \quad (2)$$

式中： λ_s 为接触面单元的切向劲度系数。

(2) 正应力 σ_n 与单元两边的垂直位移差 Δv 成正比，即

$$\sigma_n = \lambda_n \Delta v \quad (3)$$

式中： λ_n 为接触面单元的法向劲度系数。

当正应力 σ_n 是拉应力时，接触面被拉开，取 $\lambda_s = \lambda_n = 0$ 。当正应力 σ_n 是压应力时， λ_s 和 λ_n 分别为

$$\left. \begin{aligned} \lambda_s &= k_s \gamma_w \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^n \left(1 - \frac{R \tau_s}{\sigma_n \tan \delta} \right)^2 \\ \lambda_n &= \frac{E}{e} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中： γ_w 为水的密度； δ 为堆石体与混凝土面板接触面上的摩擦角； e 为接触面单元厚度； k_s, n 为参数，由实验得到。

此外，为了更好地模拟面板间的分缝和周边缝，计算采用了连接单元。连接单元的材料可为铜片，或者为铜片和聚氯乙烯。

2.3 巨型三维网格的生成

对于坝高 233 m，挤压边墙高 0.40 m 的水布垭面板堆石坝来说，计算中要详细模拟挤压边墙结构、面板分缝和堆石体填筑过程，三维数据网格无疑是

巨大而且复杂的。三维网格的生成主要解决以下问题：

(1) 计算的可行性问题：为较准确地模拟堆石坝挤压边墙的工作状况，要求每层单元的高度不得超过挤压边墙每层高度，即不得超过 40 cm；为较准确地模拟面板及其缝的应力和变形情况，要求单元沿坝轴方向分别不得超过面板及缝的宽度，故而单元和节点数目十分巨大。考虑到计算的可行性，必须在空间上进行过渡，以求尽可能地减少不必要的单元和节点数量。

(2) 考虑到河槽形状的不规则性，而周边缝、面板间竖缝以及面板与挤压边墙间的接触面单元形状必须规则，故而必须解决以上类型单元的空间过渡问题。

(3) 为模拟分层碾压的施工过程，网格沿高度方向的分布及其单元和节点编号需与施工过程相吻合。

鉴于目前尚无软件可以解决以上问题，本文采用了自行开发的新方法，成功解决了以上难题，并通过自编程序直接生成了很好的三维数据网格。

2.4 巨型方程的求解

采用上述网格离散方法，三维数据网格仍然很多(10~20 万个节点和单元)，故而需求解的方程组十分巨大。如按传统方法，在微机上是难以实现的。下面介绍本文采用的求解方法的基本思想。

2.4.1 带宽优化

为减少数据的存储量和求解方程的计算工作量，此处按施工步骤逐级计算，每级均进行带宽优化。

2.4.2 数据的存储

将大量数据以二进制文件格式存储在硬盘上，根据求解需要分数次读入内存。其优点为：可基本不受内存大小的限制，不必虚拟内存，大大节省了数组的寻址时间。

2.4.3 方程的求解

在系数矩阵的分解过程中，同时完成前代过程。克服由硬盘存储数据带来的困难，节省寻址时间。

3 基于挤压边墙技术水布垭面板堆石坝应力-应变计算模型

3.1 有限元模型

水布垭面板堆石坝三维网格如图 1 所示。计算网格节点总数为 145 501 个，其中约束节点 5 455 个，计算自由度数为 420 138 个。单元总数为 175 779 个，其中挤压边墙单元 33 621 个，缝单元 16 518 个，面板单元 15 992 个，趾板单元 3 468 个；接触面单元 31 326 个，垫层及小区单元 65 279 个，过度层单元 3 285 个，主堆石区单元 3 336 个，次堆石区单元 1 438 个，下游堆石区单元 1 012 个，坝顶部分单元 504 个。

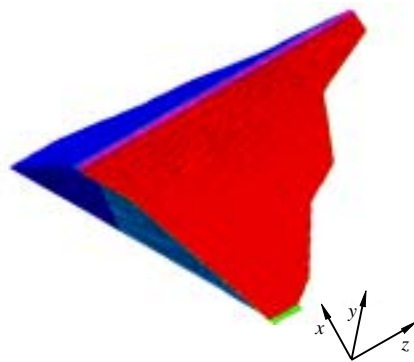


图 1 水布垭面板堆石坝三维网格图

Fig.1 3D grid graph of Shuibuya concrete face rockfill dam

水布垭面板堆石坝材料分区如图 2 所示。沿高度方向面板、接触面、挤压边墙及过渡层单元高度均为 40 cm；而堆石体部分各层平均厚度为 6 m 左右。主要单元类型为八节点六面体等参单元。为使网格的空间过渡成为可能，也有一定数量的六节点三棱柱等参单元和四节点四面体单元。与边界接触节点采用理想连杆和铰支座。

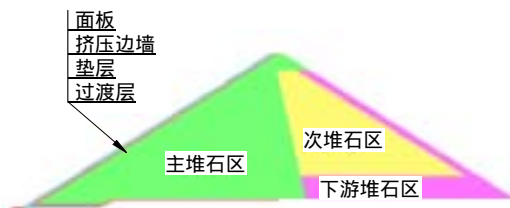


图 2 水布垭面板堆石坝材料分区图

Fig.2 Material distribution of Shuibuya concrete face rockfill dam

3.2 荷载及其施加方式

荷载为自重荷载和水荷载。考虑到材料的非线性性质，荷载施加采用逐级施加的方式，共计 49 级主增量。水布垭面板堆石坝典型剖面施工过程如图 3 所示。小区网格局部放大图如图 4 所示。

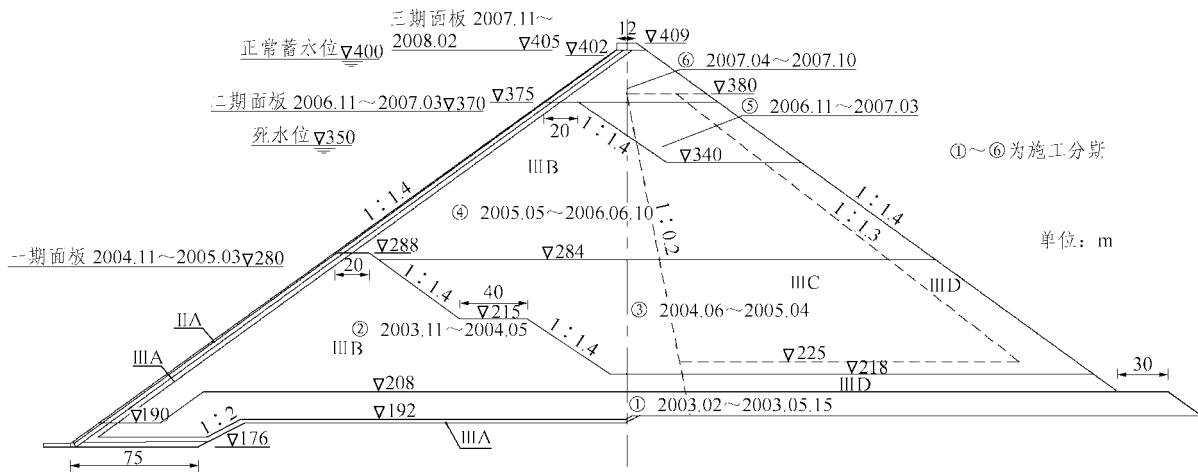


图 3 水布垭面板堆石坝典型剖面施工过程

Fig.3 Construction process of typical section of Shuibuya concrete face rockfill dam

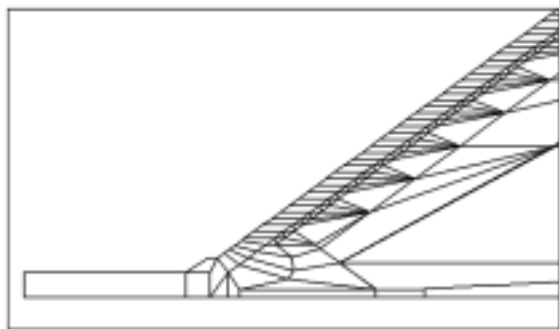


图 4 小区网格局部放大图

Fig.4 Part magnified graph of special zone

3.3 材料的物理力学参数

根据水布垭堆石料大量的室内外实验成果，并考虑今后大规模的现场施工情况，本计算采用了设计单位提出的 1 组建议参数，如表 1 所示。

表 1 材料的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of material

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\phi_0/(^\circ)$	$\Delta\phi/(^\circ)$	K	n	R_f	K_b	m
主堆石	2.15	52	8.5	1 100	0.35	0.82	600	0.10
次堆石	2.15	50	8.4	850	0.25	0.80	400	0.05
下游堆石	2.15	52	8.5	1 100	0.35	0.82	600	0.10
过渡料	2.18	54	8.6	1 000	0.40	0.85	450	0.15
垫层料	2.20	56	10.5	1 200	0.45	0.78	750	0.20

面板与垫层之间的接触面单元材料参数分别为： $K = 4\ 800$ ， $n = 0.56$ ， $R_f = 0.74$ ， $\delta = 36^\circ$ 。

面板和趾板混凝土参数为：密度为 $2.40\ g/cm^3$ ，弹性模量为 $20\ 000\ MPa$ ，泊松比为 0.17。

缝按铜片和聚氯乙烯材料考虑。

挤压边墙作为散粒材料的物理力学参数见表 2。

表 2 挤压边墙作为散粒材料的物理力学参数

Table 2 Physical mechanic parameters of scatter material of crushing side wall

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\phi_0/(^\circ)$	$\Delta\phi/(^\circ)$	K	n	R_f	K_b	m
挤压边墙 (14 d)	2.00	57.7	15.6	1 880.9	0.391	0.697	835.5	0.090
挤压边墙 (28 d)	2.00	58.2	15.4	2 195.8	0.410	0.742	939.0	0.137

3.4 计算工况

为便于比较，采用有挤压边墙和无挤压边墙 2 种工况。

4 挤压边墙对水布垭面板堆石坝应力 - 应变的影响

为了研究挤压边墙对水布垭面板堆石坝应力 - 应变的影响，分别给出有挤压边墙方案与无挤压边墙 2 种工况其面板和堆石体应力、位移差值等值线图。

4.1 面板应力及变形

4.1.1 面板应力比较

(1) 有挤压边墙后，其垂直向面板正应力变化为：在周边处的拉应力分布区，拉应力差值为 $-0.04 \sim 0.20\ MPa$ ，由于拉应力为负，因此采用挤压边墙技术后周边处面板垂直向拉应力减小了；在面板中部的压应力区，压应力差值为 $-0.04 \sim 0.30\ MPa$ ，由于压应力为正，因此，采用挤压边墙技术后面板中部垂直向压应力有所增大(见图 5)。

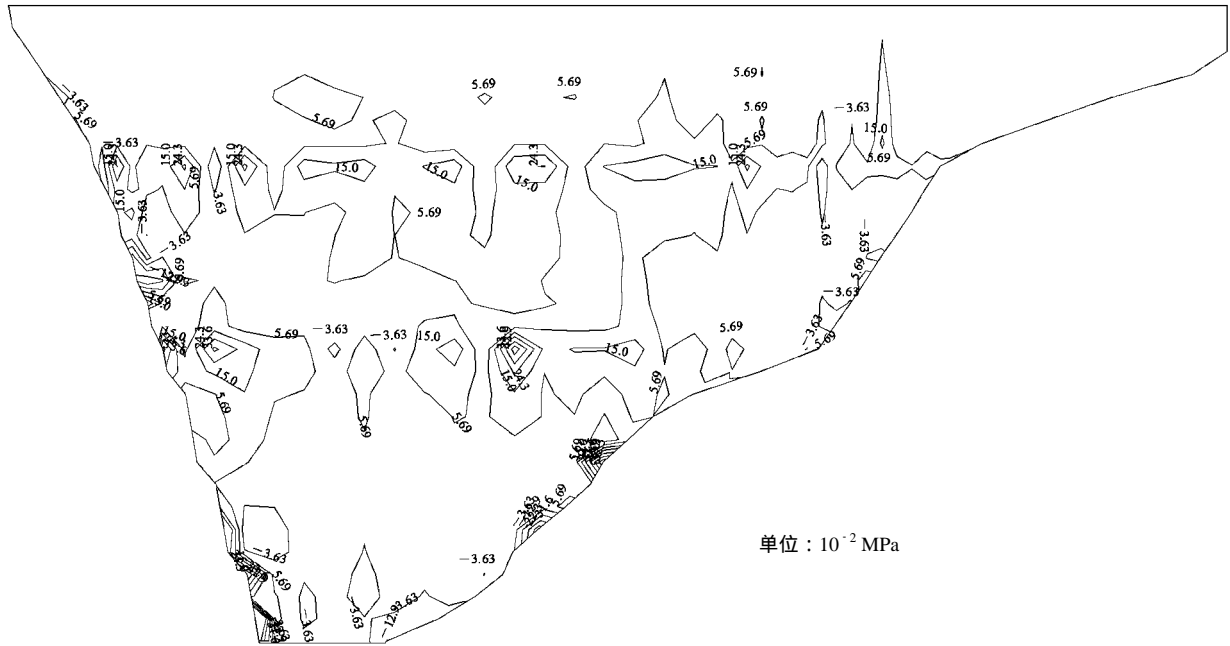


图 5 垂直面板向正应力差值等值线

Fig.5 Contour graph of normal stress interpolation in the direction of vertical to the concrete face

(2) 沿坝轴向面板正应力变化为：拉应力差值为 -0.50 ~ 0.01 MPa，主要分布在左岸周边区域，由于拉应力为负，局部拉应力略有增大；在面板中部的局部区域，压应力差值为 -0.05 ~ -0.20 MPa，由于压应力为正，故压应力有所减小(见图 6)。

位的拉应力区，拉应力差值为 -0.014 ~ 0.021 MPa，局部拉应力略有减小；在河槽其他周边部位的压应力区，压应力差值为 -0.08 ~ 0.05 MPa，故压应力也略有减小；在面板中部的局部区域(分别位于▽280 m,▽370 m 处)，压应力差值为 0.021 MPa，由于压应力为正，故压应力略有增加(见图 7)。

(3) 顺坡向面板正应力变化为：右侧河槽部

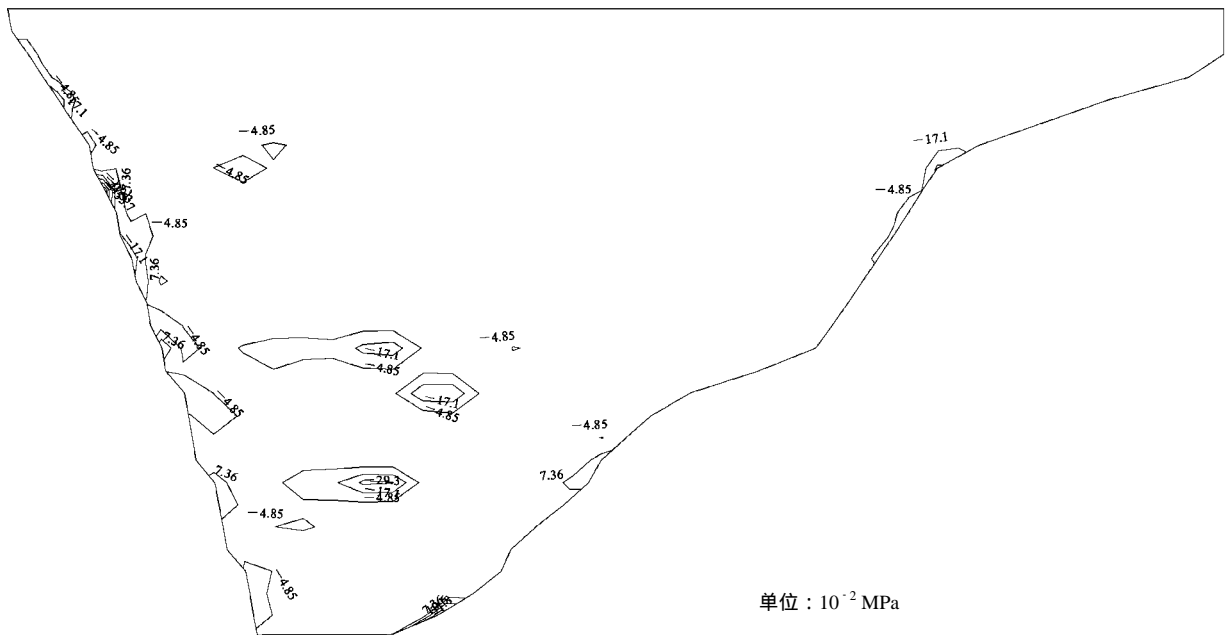


图 6 沿坝轴向正应力差值等值线

Fig.6 Contour graph of normal stress interpolation in the direction of the axis of the dam

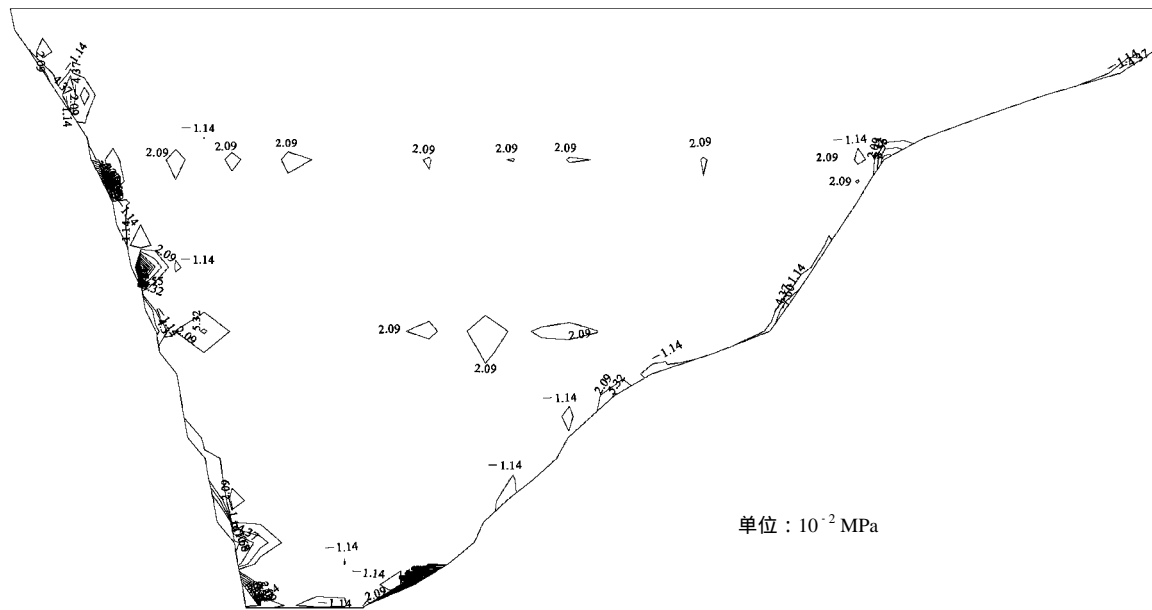


图 7 顺坡面板向正应力差值等值线

Fig.7 Contour graph of normal stress interpolation in the direction parallel to the slab

综上所述，从面板应力变化角度来看，有挤压边墙的工况与无挤压边墙的工况相比，应力变化不大，且这种变化对改善面板周边部位的应力，特别是拉应力是有利的。

4.1.2 面板变形比较

(1) 垂直向面板位移差值为 -0.06 ~ 0.05 cm，由于垂直向位移为负，故位于左岸周边的局部区域，位移有增有减，但这种变化量很小。而在面板其他部位位移略有减小。

(2) 顺坡向面板位移差值为 -0.01 ~ -0.02 cm，由于顺坡向面板位移为正，故位移略有减小。

(3) 坝轴向位移改变为：河床主断面左侧，位移差值为 0.00 ~ -0.06 cm，由于该部位位移为正，故位移略有减小；河床主断面右侧，位移差值为 0.00 ~ 0.05 cm，由于该部位位移为负，故位移也略有减小。

综上所述，从位移变化角度来看，有挤压边墙的工况与无挤压边墙工况相比，位移略有减少，这种改变对减小面板变形是有利的。

4.1.3 缝的变形比较

(1) 顺面板向错动位移差值很小，最大位移差值约为 0.50 mm。在左、右岸河槽周边处，原先有较大错动位移部位的错动位移略有减小。其余部位由于无挤压边墙时错动位移数值相对较小，考虑挤压边墙后差值也很小，故考虑挤压边墙后对其他部

位影响不大。

(2) 垂直面板向错动位移变化的主要规律为：

河槽四周附近错动位移均有一定程度的增加，其中左岸较大，差值的最大值为 1.69 mm，右岸差值的最大值为 0.60 mm；面板中部大部分区域的错动位移均有所减少，但数值不大，为 0.10 mm 左右。

(3) 沿坝轴向错动位移变化规律为：靠左岸周边部位(大约以左侧第 15 块面板为界)的初始值和差值都相对较大，由于无挤压边墙时表现为张开(为正值)，故而缝的张开略有减小，最大减小数值为 -3.26 mm。而位于主河槽附近的右岸河槽周边处，由于无挤压边墙时表现为压缩(为负值)，故而缝的压缩量略有增加，最大增加数值为 0.31 mm。

其余部位由于无挤压边墙时错动位移数值相对较小，且差值也很小，故影响不大。

综上所述，从缝的变形角度来看，有挤压边墙后缝的变形差值相对较小。虽然有的部位增大而有的部位减小，但从总体而言是有利的，因为减小的部位是初始情况变形较大部位，而增加部位却为初始情况变形相对较小部位。

4.2 堆石体应力及变形

计算表明，采用挤压边墙后，堆石体大主应力基本上没有什么变化，小主应力的变化区域基本上集中在垫层和过渡层，且主要表现为压应力增加。由于分布区域较小，且数值不大，可以认为挤压边

墙对堆石体应力影响不大。

采用挤压边墙后,堆石体各向位移变化主要集中在坝体上游侧,且在数值上均十分小,小于 0.01 cm,可以认为挤压边墙对堆石体变形影响也不大。

5 结 语

采用挤压边墙技术,可减小面板周边区域的拉应力峰值,面板中部区域的压应力略有增加。对面板变形集中区有减小变形量的作用,对变形较小区域,变形量略有增加,可使缝变形较大部位的变形减小。总体上看,采用挤压边墙技术对改善面板的受力状态是有利的,对面板变形起着改善作用。其改善程度取决于挤压边墙计算参数。

采用挤压边墙技术,对堆石体应力影响主要集中在垫层和过渡层的局部区域,主要表现为小主应力的改变,且数值较小;而大主应力基本没有变化。对堆石体变形的影响主要在坝体的上游侧,由于数值很小,影响不大。

采用挤压边墙技术,不仅可以替代传统工艺中垫层料的超填、削坡、修整、碾压以及坡面防护等工序,加快了施工进度,使得施工质量得到了保证和提高,而且还对改善面板的受力状态是有利的,对面板变形也起着改善作用。建议水布垭面板堆石坝工程采用此项技术。

参考文献(References):

- [1] 孙玉军,洪 颖,武选正. 公伯峡面板堆石坝混凝土挤压式边墙技术的应用[J]. 水力发电,2002,28(2):45-47.(Sun Yujun, Hong Di, Wu Xuanzheng. Application of the concrete crushing type side wall technology in Gongboxia concrete face rockfill dam[J]. Water Power, 2002, 28(2): 45-47.(in Chinese))
- [2] 程养正. 面板坝挤压式边墙护坡技术引进取得新进展[J]. 陕西水利,2002,(4):43.(Cheng Yangzheng. Crushing type side wall technology in concrete face rockfill dam have achieved new development[J]. Shaanxi Water Resources,2002,(4):43.(in Chinese))
- [3] 苗树英,白昭鹏. 挤压式边墙施工法在混凝土面板坝工程中的应用[J]. 陕西水力发电,2001,17(4):42-46.(Miao Shuying, Bai Zhaopeng. Application of side wall extrusion method to concrete face slab dam construction[J]. Journal of Shaanxi Water Power, 2001, 17(4): 42-46.(in Chinese))
- [4] 颌建军. 面板堆石坝垫层施工及坡面防护技术的发展[J]. 水力发电,2003,29(4):44-46.(Xie Jianjun. The development of the cushion construction and the slope protection technology of concrete faced rock dam construction[J]. Water Power, 2003, 29(4): 44-46.(in Chinese))
- [5] 中国水利水电科学研究院. 公伯峡水电站面板坝应力应变研究[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2003.38-44.(China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Research of stress and strain in Gongboxia hydropower station and face slab rock-filled dam[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003. 38-44.(in Chinese))
- [6] 中国水利水电科学研究院. 芭蕉河面板堆石坝全荷载作用下大坝应力应变研究[R]. 北京:中国水利水电科学研究院,2003.57-63.(China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Research of stress and strain under full load in Bajiaohe face slab rock-filled dam[R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2003. 57-63.(in Chinese))
- [7] 蒋国澄,傅志安,凤家骥. 混凝土面板坝工程[M]. 北京:清华大学出版社,1997.(Jiang Guocheng, Fu Zhian, Feng Jiayi. Concrete Face Slap Dam Engineering[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.(in Chinese))
- [8] 章为民,沈珠江. 混凝土面板堆石坝三维弹塑性有限元分析[J]. 水利学报,1992,(4):75-78.(Zhang Weimin, Shen Zhujiang. 3D elastic and plastic finite element analysis of concrete face slab and rock-filled dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1992, (4): 75-78.(in Chinese))
- [9] 徐泽平,邵 宇,梁建辉. 软岩筑面板堆石坝的坝体断面分区研究[J]. 水利学报,2004,(1):62-66.(Xu Zeping, Shao Yu, Liang Jianhui. Dam zoning of CFRD constructed with soft rock[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (1): 62-66.(in Chinese))
- [10] 彭宣茂,李太生. 混凝土面板堆石坝三维仿真分析[J]. 岩土力学,2003,24(5):767-770.(Peng Xuanmao, Li Taisheng. Three-dimensional simulation analysis of concrete face rock-filled dam[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 767-770.(in Chinese))
- [11] 王保田,余湘娟,刘汉龙. 面板堆石坝坝料力学性质实验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):332-336.(Wang Baotian, Yu Xiangjuan, Liu Hanlong. Testing study on mechanical properties of slab rock filled dam materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 332-336.(in Chinese))
- [12] 孙德安,姚仰平. 粒状材料的一个实用弹塑性模型[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(8):1147-1152.(Sun Dean, Yao Yangping. Practical elastoplastic model for granular materials[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1147-1152.(in Chinese))