

DOI:CNKI:61-1390/S.20120223.1726.021

网络出版时间:2012-02-23 17:26

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20120223.1726.021.html>

混凝土面板开裂情况下堆石坝应力场与 渗流场的耦合分析

李守义¹, 马成成^{1,2}, 李炎隆¹, 宋志强¹

(1 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2 中国水电建设集团十五工程局有限公司, 陕西 西安 710065)

【摘要】【目的】研究混凝土面板开裂情况下堆石坝在应力场与渗流场耦合作用下的工作性态,为混凝土面板堆石坝的设计与施工提供参考。【方法】以多孔岩土介质渗透系数与体积应变之间的数学表达式为基础,研究建立了混凝土面板堆石坝应力场与渗流场耦合分析的数学模型,并基于等宽缝隙稳定流的运动规律,推导建立了混凝土面板裂缝的等效渗透系数计算模型。【结果】当混凝土面板发生开裂时,对于堆石体而言,应力场与渗流场的耦合效应是客观存在的。与不考虑耦合效应相比,考虑耦合效应时坝体的垂直位移最大值出现的位置相对偏向坝体下部,且数值增大了5.5%;坝体的水平位移最大值增大了8.9%,其分布规律也发生了较明显的变化;坝体内渗流自由面明显上升,渗流水头有所增大,同时坝体的单宽渗透流量增加了15.1%。【结论】在混凝土面板开裂情况下,堆石体内应力场与渗流场的耦合效应是客观存在的,因此,考虑耦合效应的计算结果更为合理、可靠。

【关键词】 混凝土面板;堆石坝;裂缝;等效渗透系数;耦合分析

【中图分类号】 O357.3

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)03-0206-07

Coupling analysis of stress field and seepage field for concrete face rockfill dam with slabs cracking

LI Shou-yi¹, MA Cheng-cheng^{1,2}, LI Yan-long¹, SONG Zhi-qiang¹

(1 College of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology,

Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Sinohydro Corporation Engineering Bureau 15 Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China)

Abstract: 【Objective】 Study was done on the concrete rockfill dam working behavior under the coupling action of Stress Field-Seepage Field in the case of concrete face fracture situation, to provide reference for concrete face rockfill dam design and construction. 【Method】 This research established mathematics mode of coupling action of Stress Field-Seepage Field based on the mathematical expression of permeability coefficient and volumetric strain of porous rock media; And based on the motion law of the same width slit steady flow, the concrete panel cracks equivalent permeability coefficient model was put forward. 【Result】 For the rockfill, the coupling effect of stress field and seepage field is a kind of objective existence when the concrete slab cracking occurs. Compared with the differences between considering the coupling effect and not considering the coupling effect, the location of the maximum dam vertical displacement was slightly close to the lower part of dam, and its value increased by 5.5%; the dam horizontal displacement increased by 8.9%, and its distribution also had obvious variations; the dam seepage free surface rose obviously, and the seepage hydraulic head increased, and at the same time the dam's single-wide traffic increased by 15.1%. 【Conclusion】 The coupling effect of stress field and seepage field is a kind of objective existence

* [收稿日期] 2011-10-08

[基金项目] 国家自然科学基金项目(51009116); 陕西省重点学科建设专项(106-00X9030)

[作者简介] 李守义(1955—), 男, 甘肃庄浪人, 教授, 博士生导师, 主要从事水工结构数值仿真研究。

when the concrete slab cracking occurs. Therefore, considering the coupling effect of the calculation is more reasonable and reliable.

Key words: concrete face; rockfill dam; crack; equivalent coefficient of permeability; coupling analysis

由于混凝土面板裂缝成因的复杂性及某些因素的不可预见性,面板裂缝一般很难避免,因此,合理预测混凝土面板开裂情况下堆石坝在应力场与渗流场耦合作用下的工作性态,对混凝土面板堆石坝的设计、施工及运行管理均具有重要意义。

目前,关于渗流场与应力场耦合分析的研究主要集中在土体、裂隙岩体渗流场与应力场的耦合问题方面。Sandhu 等^[1]将土体与孔隙水视作不可压缩固体,推导建立了 Biot 方程;柴军瑞等^[2]从土体的渗透性出发,研究建立了均质土坝渗流场与应力场耦合分析的连续介质计算模型;王媛^[3]基于固结理论,将结点位移和孔隙水压力作为未知量,实现了渗流场与应力场的耦合分析。而关于面板堆石坝渗流场与应力场耦合问题的研究则鲜见报道。事实上,对人工填筑的堆石体而言,应力场与渗流场的耦合效应是客观存在的^[4]。为此,本研究针对混凝土面板的开裂情况,研究分析了面板堆石坝在应力场和渗流场耦合作用下的工作性态,以期对混凝土面板堆石坝的设计、施工及养护提供参考。

1 混凝土面板堆石坝应力场与渗流场的耦合模型

1.1 耦合原理

混凝土面板堆石坝蓄水后,堆石体在上下游水位差的作用下,引起其中水体的渗流运动,产生渗流的动水力以渗透体积力的形式作用于堆石体,因而,其大小和分布规律将直接影响面板堆石坝的应力场^[5]。渗透体积力的大小与渗流场的分布情况密切相关,在其他条件不变的情况下,渗流场的分布和渗流体积力的分布一一对应,渗流场的变化必将引起渗流体积力分布的变化。同时,堆石体应力状态的变化将改变其渗流性质,即应力场、位移场的改变使得堆石体的孔隙比、孔隙率发生变化,导致堆石体渗透系数的改变,其渗流场也会因此发生改变^[6]。

综上所述,混凝土面板堆石坝渗流力的存在改变了原有的应力场,而应力场的变化又通过体积应变的改变而改变土体渗透系数,应力场和渗流场的相互影响体现了两场之间的耦合关系,在混凝土面板出现裂缝的情况下,这种耦合关系表现得尤为突出。

1.2 耦合方程

采用有限元法分析混凝土面板堆石坝应力场时,一般按位移法进行求解,即将单元节点位移作为基本的未知量。其基本原理是将研究域用有限个单元进行离散,单元与单元之间通过结点相互联结,从而构成了由多个离散单元组成的整体结构^[7-9]。通过对单元的几何方程、本构关系以及平衡方程进行分析,建立用结点位移表示的静力平衡方程,考虑渗流体积力的作用,可以得到如下有限元公式:

$$[\mathbf{K}]\{\boldsymbol{\delta}\} = \{\mathbf{F}\} + \{\mathbf{F}_s\}. \quad (1)$$

式中: $[\mathbf{K}]$ 为土体的整体刚度矩阵, $\{\boldsymbol{\delta}\}$ 为位移列阵, $\{\mathbf{F}\}$ 为外部荷载列阵, $\{\mathbf{F}_s\}$ 为渗流体积力产生的等效载荷列阵。

其中

$$[\mathbf{K}] = \sum \int [\mathbf{B}]^T [\mathbf{D}] [\mathbf{B}] dV. \quad (2)$$

式中: $[\mathbf{B}]$ 为几何矩阵, $[\mathbf{D}]$ 为弹性矩阵, V 为体积。

几何方程:

$$\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\mathbf{B}]\{\boldsymbol{\delta}\}. \quad (3)$$

式中: $\{\boldsymbol{\varepsilon}\}$ 为应变列阵。

物理方程:

$$\{\boldsymbol{\sigma}\} = [\mathbf{D}]\{\boldsymbol{\varepsilon}\} = [\mathbf{D}][\mathbf{B}]\{\boldsymbol{\delta}\}. \quad (4)$$

式中: $\{\boldsymbol{\sigma}\}$ 为应力列阵。

边界条件,包括位移边界条件和应力边界条件。

其中,位移边界条件为:

$$\{\boldsymbol{\delta}\} = \{\boldsymbol{\delta}_0\}. \quad (5)$$

应力边界条件为:

$$\boldsymbol{\sigma}_{ij} n_j = T_i. \quad (6)$$

式中: $\{\boldsymbol{\delta}_0\}$ 为初始位移列阵, $\boldsymbol{\sigma}_{ij}$ 为应力张量, n_j 为边界外法线方向的余弦, T_i 为应力分量。

渗流有限元计算由下式描述^[10-11]:

$$[\mathbf{K}']\{h\} = [\mathbf{A}]. \quad (7)$$

式中: $[\mathbf{K}']$ 为总渗透矩阵,由单元渗透矩阵集合而成; $\{h\}$ 为渗流场未知水头向量; $[\mathbf{A}]$ 为已知常数项,由已知水头结点得出。

采用渗透系数与土体体积应变的关系作为耦合桥梁,根据文献[12-13]渗透系数随孔隙率变化的经验公式,推求得出土的渗透系数随土体体积应变变化的函数关系为:

$$k = k' \left\{ \frac{(n_0 + \varepsilon_V)(1 - n_0)}{n_0(1 - n_0 - \varepsilon_V)} \right\}^3. \quad (8)$$

式中: k 为土体的渗透系数, n_0 为土体的初始孔隙率, k' 为初始孔隙率 n_0 对应的渗透系数, ϵ_v 为土体单元的体积应变。

对于混凝土面板堆石坝的堆石体而言, 渗流水头经过垫层和过渡层后只剩下 10% 左右, 相应的流速比较小, 并且堆石体在施工机械的振动碾压作用下处于密实状态, 所以堆石体的渗透系数与体积应变的关系可以近似用式(8)描述。

1.3 混凝土面板堆石坝应力场与渗流场的耦合步骤

根据上述耦合方程, 混凝土面板堆石坝稳定渗流场和应力场耦合分析的主要步骤如下:

- 1) 求初始应力场 $\{\sigma_{ij}\}^0$ 和位移场 $\{\delta_i\}^0$ 。
- 2) 将堆石体的初始渗透系数代入渗流场的有限元方程, 求出渗流场的水头分布 h^0 。
- 3) 求出渗流作用引起的渗流体积力。
- 4) 将渗流体积力节点荷载增量 $\{\Delta F_s\}$ 代入式(1), 求解增量形式的平衡方程, 得到位移增量 $\{\Delta \delta_i\}$; 由几何方程和物理方程得到应力增量 $\{\Delta \sigma_{ij}\}$ 和体积应变场的分布, 相应地可以得到 $\{\sigma_{ij}\}$ 和 $\{\delta_i\}$ 。
- 5) 由式(8)关系表达式得到新的渗透系数。
- 6) 判断迭代过程是否收敛, 收敛则输出结果; 若不收敛则返回第 2) 步继续计算。收敛判据为: 前后两次迭代得到的各结点水头(或位移)保持不变或非常接近。

2 混凝土面板裂缝等效渗透系数的计算模型

研究发现, 混凝土面板开裂时, 面板裂缝尤其是贯穿性裂缝主要发生在面板的中下部, 且横穿整个板块, 其方向基本是沿水平方向^[14-16]。混凝土面板裂缝的宽度往往较大, 对面板渗流的影响不容忽视。宏观而言, 贯穿性裂缝的渗流形态为缝隙渗流, 缝隙沿渗流方向的宽度一般是变化的, 且缝面粗糙、有起伏。

根据等宽缝隙稳定流立方定律, 缝隙宽度为 b 的等宽缝隙层流状态的水流运动规律为^[13]:

$$v_x(y) = \frac{1}{8\mu} \frac{\partial p}{\partial x} (4y^2 - b^2), \quad (9)$$

$$q = 2 \int_0^{b/2} v_x(y) dy = \frac{\gamma J}{4\mu} \int_0^{b/2} (b^2 - 4y^2) dy = \frac{b^3 \gamma}{12\mu} J. \quad (10)$$

式中: x 为水流方向, y 为水流垂直方向, v_x 为沿水流方向的流速, p 为流体压力, μ 为流体动力粘滞系数, q 为单宽渗流量, γ 为水的容重, J 为水力坡降。

对于进口缝宽为 b_0 、出口缝宽为 b_l 的变缝宽单面板裂缝, 在渗流量相等原则下, 其等效缝宽 b_e 按下式确定^[16]:

$$b_e = \left(\frac{2b_0^2 b_l^2}{b_0 + b_l} \right)^{1/3}. \quad (11)$$

对于裂缝缝面粗糙度对其渗流的影响, 可按下式所给出的粗糙度修正系数 C 来考虑^[17], 即:

$$C = \frac{1}{1 + 8.8 \left(\frac{\Delta}{2b_e} \right)^{1.5}}. \quad (12)$$

式中: Δ 为裂缝缝面的绝对粗糙度(即粗糙高度), b_e 为缝宽, $\Delta/2b_e$ 为裂缝缝面的相对粗糙度。

则变缝宽、缝面粗糙度的面板裂缝的等效单宽渗流量 q 、等效平均渗流速度 V_e 及等效渗透系数 K_{fe} 分别为^[18-19]:

$$q = \frac{Cb_e^3 \gamma}{12\mu} J, \quad (13)$$

$$V_e = q/b_e = \frac{Cb_e^2 \gamma}{12\mu} J, \quad (14)$$

$$K_{fe} = \frac{Cb_e^2 \gamma}{12\mu}. \quad (15)$$

因此, 只要测得面板裂缝的缝面绝对粗糙度 Δ 、进口缝宽 b_0 及出口缝宽 b_l , 即可按式(13)–(15)计算确定单面板裂缝的等效单宽渗流量 q 、等效平均流速 V_e 及等效渗透系数 K_{fe} 。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

已建的某混凝土面板堆石坝, 最大坝高 139 m, 坝顶高程 2 010 m, 坝顶全长 429 m, 坝顶宽 10 m, 上游坝坡坡比 1 : 1.4, 钢筋混凝土面板顶端厚 0.3 m, 底部最大计算厚度 0.76 m。混凝土面板设置垂直缝, 受拉区垂直缝间距 6 m, 受压区垂直缝间距 12 m; 沿高程方向不设水平缝, 最大单块长度约 219 m。下游坝坡设有 10 m 宽的“之”字形上坝公路, 下游局部坝坡坡比 1 : 1.5 ~ 1 : 1.4, 综合坝坡坡比 1 : 1.81。

3.2 计算模型

耦合计算渗流场与应力场的计算模型采用同一模型, 如图 1 所示。计算模型范围为: 坝踵向上游、坝趾向下游以及河床向下分别取 1 倍坝高, 在坝体最大断面处沿坝轴线方向取长 24.02 m 的坝段。计算中模拟了面板与面板之间的接缝及面板与趾板之间的接缝。计算模型单元形式主要采用空间六面体 8 结点等参单元。靠近面板附近区域网格逐渐加

密,混凝土面板厚度方向设置一层单元。面板及其附近区域单元长厚比较大,在进行单元剖分时,尽可能保持良好的单元形态,即保证单元 6 个表面正交。计算模型共划分单元 6 320 个,节点 7 590 个。

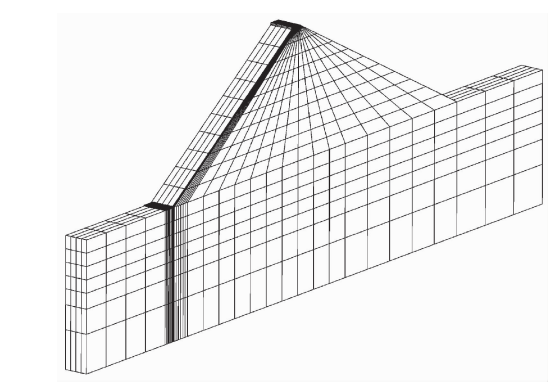


图 1 面板堆石坝三维有限元网格图
Fig. 1 3D finite element mesh of concrete face rockfill dam

3.3 计算参数

本实例重点研究面板出现裂缝情况下,混凝土面板堆石坝应力场与渗流场的耦合效应。假定混凝土面板出现了 20 条贯穿性裂缝,表 1 列出了面板的 20 条裂缝相对于坝底的分布高度(z_i)、等效缝宽(b_{ei})(按等宽缝处理)、相对粗糙度($\Delta/2b_{ei}$)及由公式(15)计算所得的等效渗透系数(K_{fei})($i=1,2,\cdots,20$)。

耦合分析应力变形计算的材料参数采用该工程的试验结果,垫层、过渡层以及主次堆石采用邓肯-张(E-B)材料本构模型,其参数如表 2 所示。

混凝土材料和基岩采用线弹性材料本构模型。混凝土面板的弹性模量为 2×10^{10} Pa,泊松比为 0.167,密度为 $2\,450\text{ kg/m}^3$;混凝土帷幕的弹性模量为 1.1×10^{10} Pa,泊松比为 0.2,密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$;基岩的弹性模量为 2×10^9 Pa,泊松比为 0.22,密度为 $2\,630\text{ kg/m}^3$ 。

表 1 混凝土面板裂缝参数

Table 1 Parameters of concrete face slab cracks

序号 Number	z_i/m	b_{ei}/mm	$\Delta/2b_{ei}$	$K_{fei}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	序号 Number	z_i/m	b_{ei}/mm	$\Delta/2b_{ei}$	$K_{fei}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	4	0.3	0.2	3.20	11	42.3	0.9	0.1	40.32
2	9.5	0.6	0.3	7.87	12	44.5	0.3	0.15	3.75
3	12.7	0.5	0.1	10.11	13	46.8	0.5	0.4	4.00
4	14.9	0.9	0.15	34.07	14	51.5	0.6	0.35	6.79
5	16.7	0.3	0.4	1.75	15	52.4	1.4	0.42	36.74
6	18.5	0.5	0.45	3.51	16	53.2	0.7	0.2	17.41
7	22.7	1.1	0.45	19.20	17	58.4	0.8	0.25	19.38
8	24.8	0.7	0.15	20.50	18	66.7	0.3	0.2	2.82
9	31.6	0.2	0.32	0.96	19	75.9	0.5	0.35	4.53
10	41.5	0.2	0.42	0.64	20	92.6	0.1	0.2	0.37

表 2 面板堆石坝坝料邓肯-张模型(E-B)参数

Table 2 Material for concrete faced rockfill dam of Duncan Chang model (E-B) parameters table

材料 Material	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) Density	粘聚力 (C)/Pa Cohesive force	孔隙率/% Porosity	内摩擦角 (φ)/($^\circ$) Internal friction angle	切线模量 (K) Tangent modulus	切线模量 指数(n) Tangent modulus index	破坏比 (R_f) Damage ratio	体积模量 (K_b) Bulk modulus	体积模量 指数(m) Bulk modulus index	卸载模量 (K_w) Unloading modulus	卸载模量 指数(n_w) Unloading modulus index
垫层 Cushion	2 180	0	16.5	48	565	0.55	0.75	325	0.42	1 700	0.55
过渡层 Transition layer	2 150	0	17.7	51	600	0.62	0.75	231	0.47	1 700	0.62
主堆石区 Main rockfill zone	2 110	0	18.9	50	985	0.35	0.74	175	0.58	1 500	0.35
次堆石区 Secondary rockfill zone	2 150	0	17.8	45	700	0.40	0.80	251	0.43	1 500	0.40

根据设计资料,并类比其他工程资料,选取的坝体材料及基岩渗透系数见表 3。混凝土面板裂缝采用表 1 的等效渗透系数。

3.4 计算结果分析

3.4.1 应力变形计算结果 不考虑耦合效应时坝体的垂直位移等值线、水平位移等值线见图 2 和图

3,考虑耦合效应时的垂直位移等值线、水平位移等值线分别见图 4 和图 5。考虑与不考虑耦合效应的

应力场与渗流场计算结果见表 4。考虑和不考虑耦合效应时坝体前后水头等值线分布见图 6。

表 3 面板堆石坝坝体材料及坝基渗透系数

Table 3 Permeability coefficients of concrete faced rockfill dam body material and foundation						cm/s
材料 Material	面板混凝土 Concrete face slab	垫层 Cushion	过渡层 Transition layer	主、次堆石 The main, secondary rockfill	防渗帷幕 Impervious curtam	基岩 Bedrock
渗透系数 Permeability	1×10^{-7}	1×10^{-3}	1×10^{-2}	1×10^{-1}	5.5×10^{-5}	4×10^{-4}

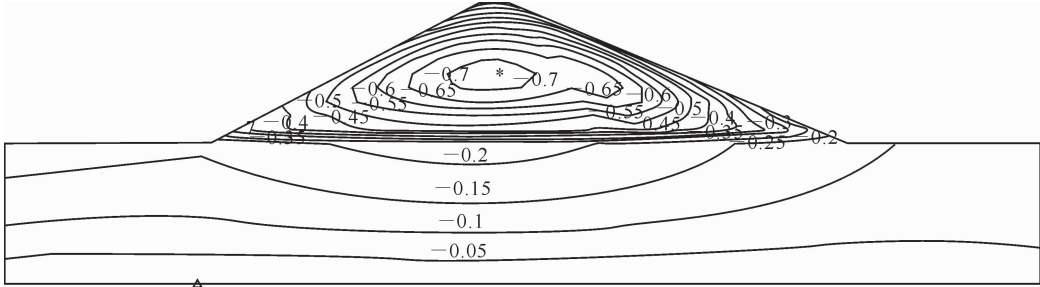


图 2 不考虑耦合效应时坝体的垂直位移等值线(单位:m)

Fig.2 Without considering the coupling effect of the vertical displacement contour line of dam body (Unit:m)

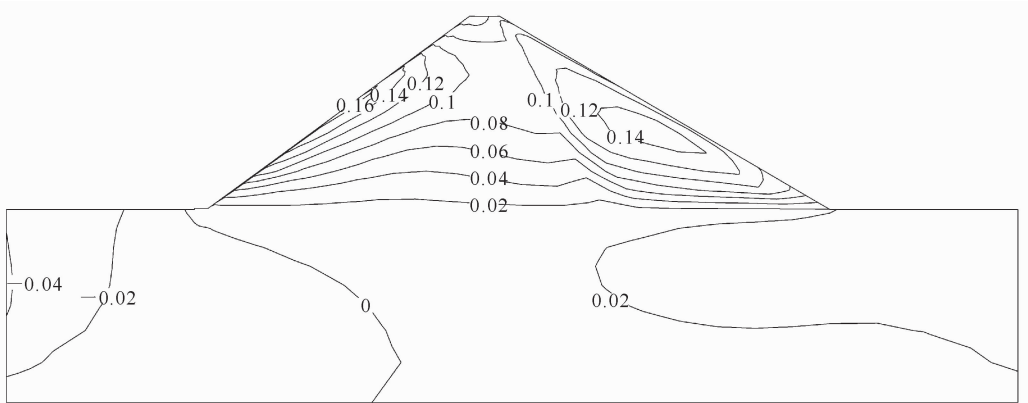


图 3 不考虑耦合效应时坝体的水平位移等值线(单位:m)

Fig.3 Without considering the coupling effect of the horizontal displacement contour of dam body (Unit:m)

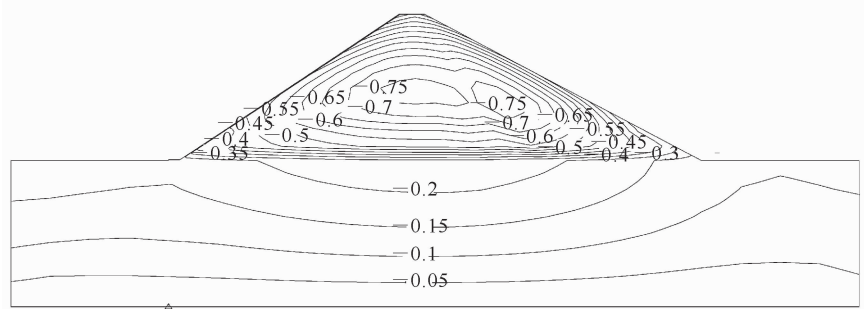


图 4 考虑耦合效应时坝体的垂直位移等值线图(单位:m)

Fig.4 Considering the coupling effect of the vertical displacement contour of dam body (Unit:m)

由图 2—5 可以看出,在不考虑耦合效应的情况

下,坝体的垂直位移最大值为 0.724 2 m,出现在坝

体中部;在考虑耦合效应的情况下,坝体垂直位移最

大值为 0.763 8 m,出现在坝体的中下部。面板出现

裂缝时,坝体内渗流自由面较高,渗流体积力对堆石

体的影响范围较大,渗流体积力作用在坝体中下部的

堆石体。考虑耦合效应时,坝体的垂直位移最大

值增加了 5.5%,且分布规律也发生了相应变化。

在不考虑耦合效应的情况下,坝体水平位移最大值为 0.190 2 m,考虑耦合效应后坝体水平位移最大值为 0.207 2 m,坝体的水平位移最大值增加了 8.9%,其分布规律也发生了变化。

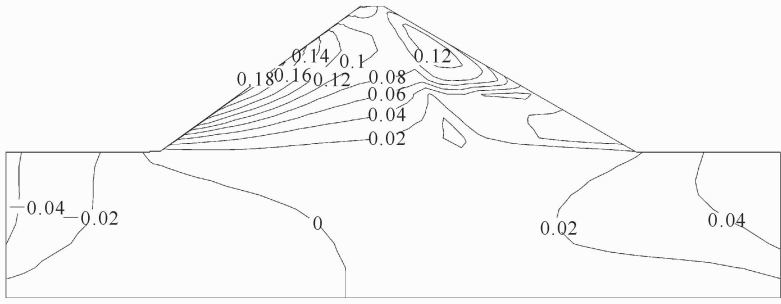


图 5 考虑耦合效应时坝体的水平位移等值线(单位:m)

Fig.5 Considering the coupling effect of the horizontal displacement contour map of dam body (Unit:m)

表 4 堆石坝坝体应力场与渗流场计算结果的对比

Table 4 Stress field and the seepage field calculation results of rockfill dam body comparison table

考虑耦合应力时的最大位移/m Maximum displacement with consideration of coupling stress deformation		不考虑耦合应力时的最大位移/m Maximum displacement without considering the coupling stress deformation		渗流场单宽渗流量/(m ³ ·s ⁻¹ ·m ⁻¹) Single wide seepage flow of seepage field results	
垂直位移 Vertical	水平位移 Horizontal	垂直位移 Vertical	水平位移 Horizontal	不考虑耦合 Without considering the coupling	考虑耦合 Considering the coupling
-0.724 2	0.190 2	-0.763 8	0.207 2	1.26×10 ⁻⁴	1.45×10 ⁻⁴

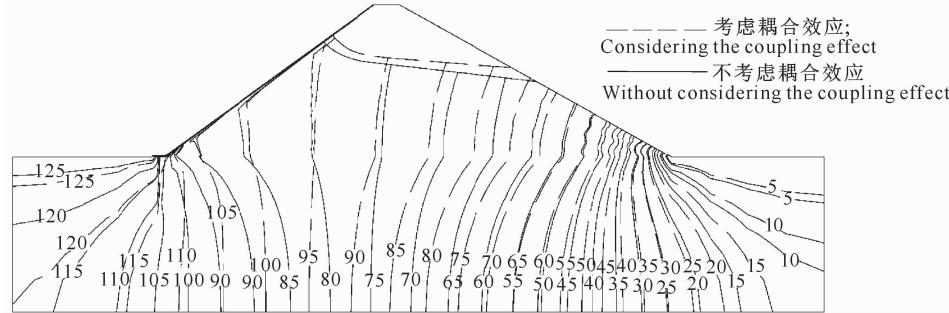


图 6 耦合前后水头等值线的比较(m)

Fig.6 Coupled to the front and rear head contour comparison chart (m)

3.4.2 渗流场计算结果 由表 4 可以看出,不考虑耦合效应时,坝体的单宽渗流量为 $1.26 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,考虑耦合效应时坝体的单宽渗流量为 $1.45 \times 10^{-4} \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{m})$,增加了 15.1%,坝体的单宽渗流量变化较大。由图 6 可以看出,考虑耦合效应后,堆石体内的水头等值线向下游偏移,这说明在同一位置上,考虑耦合效应的水头值稍大;考虑耦合后坝体渗流的自由面有所抬高。

4 结 论

基于混凝土面板堆石坝的应力场与渗流场的耦合分析模型,针对运行期面板开裂的情况,通过应力场和渗流场的相互迭代,对已建的某混凝土面板堆石坝的应力场与渗流场进行了三维有限元计算研究。结果表明:在混凝土面板开裂情况下,考虑堆石

体应力场与渗流场的耦合效应时,对应力场与渗流场的分析计算结果更为合理、准确。考虑耦合效应时,坝体的垂直位移最大值出现的位置相对偏向坝体下部,且数值增大;渗流场对水平位移的影响主要体现在分布规律上;与不考虑应力场与渗流场的耦合效应相比,考虑耦合坝体内的渗流自由面明显上升,渗流水头等值线向下游偏移,即考虑耦合效应时的水头值稍大,渗透流量也相应增大。

[参考文献]

[1] Sandhu R S,Wilson E. Finite element analysis of seepage in e-lastic media [J]. J Mech Div Proc Amer Soc Civil Engineers, 1969(3): 641-652.
[2] 柴军瑞,仵彦卿.均质土坝渗流场与应力场耦合分析的数学模型 [J].陕西水力发电,1997,13(3):4-7.
Chai J R,Wu Y Q. Research on mathematical model for coupled

- stress and seepage field in single-zone embankment dam [J]. Journal of Shaanxi Water Power, 1997, 13(3): 4-7. (in Chinese)
- [3] 王 媛. 多孔介质渗流与应力的耦合计算方法 [J]. 工程勘察, 1995, 12(2): 33-37.
Wang Y. The calculating method for seepage and stress coupling of porous medium [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 1995, 12(2): 33-37. (in Chinese)
- [4] 孔祥和. 高等渗流力学 [M]. 安徽合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999.
Kong X H. High seepage mechanics [M]. Hefei, Anhui: University of Science & Technology China Press, 1999. (in Chinese)
- [5] 陈晓平, 茜平一, 梁志松, 等. 非均质土坝稳定性的渗流场和应力场耦合分析 [J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 860-864.
Chen X P, Qian P Y, Liang Z S, et al. Heterogeneous earth dam stability of seepage field and stress field coupling analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 860-864. (in Chinese)
- [6] 张 伟. 渗流场及其与应力场的耦合分析和工程应用 [D]. 湖北武汉: 武汉大学, 2004.
Zhang W. The seepage field and stress field coupling analysis and application in engineering [D]. Wuhan, Hubei: Wuhan University, 2004. (in Chinese)
- [7] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
Zhu B F. Theory and application of finite element method [M]. Beijing: China Water Power Press, 1998. (in Chinese)
- [8] 王 勇, 殷宗泽. 面板堆石坝堆石流变对面板应力变形的影响分析 [J]. 河海大学学报, 2000, 28(6): 5-10.
Wang Y, Yin Z Z. The rockfill creep on stress and deformation analysis of the effect of panel [J]. Journal of Hohai University, 2000, 28(6): 5-10. (in Chinese)
- [9] 罗先启, 刘德福, 王炎廷. 混凝土面板堆石坝面板约束问题的探讨 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 19(4): 62-66.
Luo X Q, Liu D F, Wang Y T. Concrete face rockfill dam constraint problems [J]. Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering Journal, 1997, 19(4): 62-66. (in Chinese)
- [10] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制 [M]. 2 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
Mao C X. Seepage computation analysis and control [M]. 2nd Edition. Beijing: China Water Power Press, 2003. (in Chinese)
- [11] 李健中. 水力学 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002.
Li J Z. Hydraulics [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 2002. (in Chinese)
- [12] Akin J E. Application and implementation of finite element methods [M]. New York: Academic Press, 1982.
- [13] Das B M. Principles of geotechnical engineering [M]. Boston: PSW Publishers, 1985.
- [14] 张国新, 厉易生. 堆石坝面板收缩性贯穿裂缝的理论分析及防治措施 [J]. 水力发电学报, 2005, 24(3): 30-33.
Zhang G X, Li Y S. Faced rockfill dam: Theoretical analysis of through shrinkage cracks and prevention measures [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(3): 30-33. (in Chinese)
- [15] 仵彦卿, 张倬元. 岩体水力学导论 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.
Wu Y Q, Zhang Z Y. Introduction to rock hydraulics [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1995. (in Chinese)
- [16] 柴军瑞, 李守义. 三峡库区泄滩滑坡渗流场与应力场耦合分析 [J]. 岩土力学与土工程学报, 2003, 23(8): 1280-1284.
Chai J R, Li S Y. The Xietan landslide in Three Gorges Reservoir area of seepage field and stress field coupling analysis [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 23(8): 1280-1284. (in Chinese)
- [17] 张有天. 岩石水力学与工程 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
Zhang Y T. Rock hydraulics and engineering [M]. Beijing: China Water Power Press, 2005. (in Chinese)
- [18] Li S Y, Li Y L, Si Z, et al. Research on seepage computation model of face slab cracks based on equi-width joint constant flow [J]. Advances in Engineering Software, 2010, 41(7/8): 1000-1004.
- [19] 李炎隆, 王瑞骏, 李守义, 等. 混凝土面板堆石坝面板缝隙渗流计算模型研究 [J]. 应用力学学报, 2010, 27(1): 145-150.
Li Y L, Wang R J, Li S Y, et al. Concrete face rockfill dam crack seepage calculation model [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(1): 145-150. (in Chinese)