

DOI:10.19431/j.cnki.1673-0062.2019.02.002

基于流固耦合理论土工布对尾矿坝的渗流-应力场影响分析

彭 成,王 曼

(南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001)

摘 要:基于非饱和流固耦合理论,分析土工布对尾矿坝渗流-应力场的影响,以湖南某尾矿坝为背景,运用 FLAC 3D(fast Lagrangian analysis of continua)软件,建立三维尾矿坝数值模型,模拟不同工况下尾矿坝的渗流-应力场影响。通过考虑耦合作用应力场和位移场对比分析,分析流固耦合作用下不同层数土工布对尾矿坝的渗流-应力影响。研究结果表明:非饱和流固耦合理论可以更为客观的分析尾矿坝的实际情况;耦合作用下尾矿坝的沉降明显比不考虑耦合作用的沉降大;铺设土工布对于减少坝体沉降量有明显的积极作用;土工布在耦合作用下的孔隙水压力明显比不考虑耦合时大,而且孔隙水压力分布较为均匀;这可以对尾矿坝的渗流-应力场的分析以及尾矿坝的设计运行提出合理建议和参考依据。

关键词:尾矿坝;流固耦合;土工布;渗流分析

中图分类号:TV649 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-0062(2019)02-0008-08

The Analysis on Influence of Geotextile on Seepage-stress Field of Tailings Dam Based on Fluid-structure Interaction Theory

PENG Cheng, WANG Man

(School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China)

Abstract: Based on the unsaturated fluid-structure interaction theory, the paper analyzes the effects between the geotextile on the seepage and the stress field of tailings dam. According to a tailings dam in Hunan as the background, the FLAC^{3D} software is used to establish a three-dimensional tailings dam numerical model to simulate the seepage-stress effects of the tailings dam under different working conditions. By considering the coupled stress and displacement fields, the effect of geotextiles with different layers on seepage stability of tailings dam under fluid-structure interaction is analyzed. The results show that the theory of unsaturated fluid-structure interaction can be more objective to analyze the actual

收稿日期:2018-10-29

基金项目:湖南省教育厅项目(16C1380);南华大学博士科研启动基金项目(2012XQD01)

作者简介:彭 成(1983-),男,讲师,博士,主要从事岩土工程方面的工作。E-mail:125215386@qq.com

situation of the tailings dam; the sedimentation of the tailings dam under the coupling effect is obviously larger than that without consideration of the coupling effect; the laying of geotextiles has an obvious positive effect on reducing the sedimentation of the dam; the pore water pressure of the geotextile under the coupling action is obviously higher than that of the coupling. The distribution of pore water pressure is more well-distributed; this can be a reasonable advice and reference for the analysis of the seepage-stress field of the tailings dam. And it can also give some referable basis to the design and operation of the tailings dam.

key words: the tailings dam; the fluid-structure interaction; the geotextile; the seepage stability

0 引言

金属或非金属矿山开采出的矿石,经选矿厂选出有价值的精矿后排放的废渣统称为尾矿。尾矿库是指筑坝拦截谷口或围地构成的,用以堆存金属或非金属矿山进行矿石选别后排出尾矿或其他工业废渣的场所^[1]。它是矿山的重要生产设施,同时它具有高势能,也是重大的人造泥石流危险源^[2]。尾矿坝的危险事故一旦发生不仅会对国家带来巨大的经济损失,同时也会对下游人民的生命财产造成严重的威胁。因此对坝体的稳定性分析具有重要意义。

就尾矿坝的稳定性分析来讲,纵观历来学者的研究发现,渗流的影响无论是从理论分析还是工程实践而言,都是一个至关重要的因素。国内传统渗流力学观念认为土体骨架存在不可压缩性,而且多数情况下只能考虑单一因素的影响,以此计算分析渗流等问题;国外学者持不同意见,例如比奥的经典假定土体骨架的线弹性理论。文献[3]利用 MIDAS GTS 软件模拟三维尾矿坝的稳定饱和-非饱和状态下渗流场的浸润线,研究表明,尾矿坝饱和-非饱和渗流场模拟渗流线基本符合实测结果。邓翌^[4]通过建立溃坝模型,探索水砂耦合作用下尾砂浓度对尾矿坝溃坝的影响。文献[5]对佛罗里达州棕榈滩县水库进行完全耦合的稳态和瞬态渗流与边坡稳定性模拟,分析水位下降过程中的快速下降稳定性。文献[6]利用梯形含水层流模型实验模拟,发现当渗流点处的水力坡降小于渗流坡面时,渗流面上会形成下降流。文献[7]运用 FLAC 3D 软件模拟了在洪水工况下某尾矿坝渗流的稳定性,对边坡的应力和位移等进行了探讨。文献[8]就尾矿库初期尾矿坝射、流渗漏等现象,探讨了不同工况下筑坝复合材料对尾矿坝的坝体稳定性影响,这为尾矿坝的防灾

减灾提供理论依据。本文根据湖南某尾矿坝,建立三维数值模型,基于流固耦合理论客观分析土工布对尾矿坝渗流稳定的影响,这对以后的尾矿坝设计,安全运行以及稳定性计算都有一定的参考意义。

1 渗流分析及理论方法

1.1 渗流基本理论

通过达西定律和质量守恒方程可以得到稳定渗流的微分方程^[9-12]。

三维渗流基本微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0, \quad (1)$$

在渗流区域 Ω 内;

第一类边界条件及水头边界条件:

$H(x, y, z) |_{\Gamma_1} = f(x, y, z)$, 在水头边界条件 Γ_1 上, 考虑稳定渗流场, 在浸润面为等势面 H 为常数, 可得 $H = Z$ 。

第二类边界条件即为流量边界条件:

$$k_n \frac{\partial H}{\partial n} |_{\Gamma_2} = -q, \text{ 考虑土体的各向异性, 即为:}$$

$$k_x \frac{\partial H}{\partial x} \cos(n, x) + k_y \frac{\partial H}{\partial y} \cos(n, y) + k_z \frac{\partial H}{\partial z} \cos(n, z) + q |_{\Gamma_2} = 0, \quad (2)$$

在流量边界条件 Γ_2 上, 考虑稳定渗流时, 流量 q 为常数, 可得 $\frac{\partial H}{\partial n} = \text{常数}$, 对于不透水层则 $\frac{\partial H}{\partial n} = 0$ 。

渗流场 Ω 由 Γ_1 和 Γ_2 围成, 三维流场的全部的边界条件由 Γ_1 和 Γ_2 构成。

对渗流场进行研究, 可根据变积分原理, 从而将上述方程及边界条件转变为一个求极值的泛函问题 $I(H)$ 的问题, 由此离散渗流场, 对各单元综合,

形成关于水头的矩阵进行求解。

1.2 流固耦合分析

流固耦合理论是尾矿坝的稳定分析中联系渗流场和应力场的基础。土体是由固、液、气三相组成,而尾矿坝的大部分坝体都处于浸润面以下,所以应采用非饱和流固耦合理论对尾矿坝的应力场与渗流场进行分析计算。

对尾矿坝进行完全耦合分析时,运用 Richards 方程^[13]求得尾矿坝非饱和渗流场的孔隙水压力,然后与有效应力组成总应力,建立平衡微分方程:

$$[\sigma]^T [\sigma] = [\sigma]^T [\{\sigma'\} + \{M\}u] = \{f\} \quad (3)$$

式中: $\{f\}$ 为三个方向的体力, $\{\sigma'\}$ 为有效应力, u 为孔隙水压力,

$$[\sigma]^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{pmatrix}$$

$$\{f\} = \begin{pmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{pmatrix}, \{\sigma'\} = \begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \\ \tau_{xy} \end{pmatrix}$$

$$\{M\} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

由上式带入本构关系的物理方程得:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} - u_w \\ \sigma_{yy} - u_w \\ \sigma_{zz} - u_w \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{pmatrix} \quad (4)$$

再结合几何方程以及连续方程,可得三维比奥固结方程^[14-15]:

$$\begin{cases} -G \nabla^2 w_x - \frac{G}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ -G \nabla^2 w_y - \frac{G}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ -G \nabla^2 w_z - \frac{G}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right] + \frac{\partial u}{\partial z} = -\gamma \end{cases} \quad (5)$$

$$- \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right] + \frac{K}{r_w} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right] = 0 \quad (6)$$

式中: G 为剪切模量; ∇^2 为拉普拉斯算子; μ 为泊松比; γ 为土的重度; w_x, w_y, w_z 为各方向位移分量; u 为孔隙水压力; K 为渗透系数。

通常应用固结连续单元包含变形和孔隙水压力的单元自由度对尾矿坝的三位渗流进行由有限元分析,此时尾矿坝的非饱和渗流场即为稳态渗流场和暂态渗流场^[16]:

$$u_w^e = u_{wst}^e + N_s u_{wtr}^e \quad (7)$$

式中, u_w^e 为单元总孔隙水压力; u_{wst}^e 为单元稳态孔隙水压力; N_s 为单元形函数; u_{wtr}^e 为单元暂态孔隙水压力。

2 尾矿坝有限元数值模拟

建立尾矿坝的数值模型时,不可避免会造成模型坝体与实际环境存在缺陷^[17],为了尽量使模型参数与实际参数一致,需要对尾矿坝坝体进行详细的实地勘察以及做好相关的记录。本文通过 FLAC^{3D} 软件建立尾矿坝的三维数值模型,进行数值计算分析。

2.1 工程概况

某尾矿坝位于湖南省境内,坝型为上游式山谷型尾矿坝,初期坝采用当地材料,为透水性堆积石坝,坝顶标高 115 m,坝高 20 m,坝顶宽 4 m,坝顶轴线长 100 m,上游及下游坡比均为 1:1.7,尾矿堆积坝的材料是尾矿砂,子坝每 2 m 一级,其堆积坝坡比为 1:3。堆积坝下面的基岩为中风化岩石,设计库容为 $1.100 \times 10^7 \text{ m}^3$,最终尾矿堆积坝设计标高为 185 m,坝高 90 m。根据《选矿厂尾矿设施设计规范》(ZBJ1—90)规定,属于 III 级尾矿坝。目前为止该尾矿坝的堆积坝坝顶标高为 135 m,坝高 40 m。随着在尾矿坝的后期加高扩容的堆积过程中,坝体下游会出现浸润面从坡面逸出现象,考虑排渗设施的布置,在尾矿坝的堆积坝上每隔 2 m 布置幅宽 6 m 厚度为 0.12 m 的土工布垫层。本文基于等效相似原理简化模型,建立三维尾矿坝渗流数值模型,利用 FLAC 3D 软件对不同层数的土工布垫层工况,进行该尾矿坝模拟渗流-应力场影响。

2.2 模型的建立及参数选取

模型坐标原点位于下游坡脚最低处,以下游向上游方向为 Z 轴正向,以左至右为 X 轴正向,

依原点沿坝体轴线延伸为 Y 轴正向。土工布作为排水等效处理,根据土工布的规格以及相关工程经验,结合现场和室内试验,确定土工布的渗透系数为 $5\times 10^{-3}\text{ m/s}$,建立尾矿坝数值模型时,单元格采用三维实体单元,共有 56 908 个计算单元,75 577 个节点。根据等效相似原理,土工布的等效渗透系数为 $1.62\times 10^{-3}\text{ m/s}$ 。其他材料参数的选取根据初步设计参数以及室内实验,同时参照相关技术规程和实验规程确定。物理力学参数如表 1 所示,渗透系数如表 2 所示,尾矿坝数值模型如图 1 所示。

表 1 模型材料物理力学参数
Table 1 Physical and mechanical parameters
of model materials

岩石类型	天然密度 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	有效密度 $/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	内聚力 $/(\text{kPa})$	内摩擦角 $/(^{\circ})$
尾砂 1	1 920	1 850	21	12
尾砂 2	1 960	1 900	23	16
尾砂 3	2 120	2 050	26	21
初期坝	2 350	2 260	0	45
基岩	2 350	2 350	500	45

2.3 边界条件

计算分析尾矿坝的渗流-应力场耦合作用

时,为更加真实反映尾矿坝的周边环境,需要准确的把握和定义尾矿坝的边界条件。因此根据实际情况确定尾矿坝模型的边界至关重要。沿着 Z 轴固定模型底部的位移,沿平行坝体 Y 轴方向固定位移,在垂直坝体 X 轴方向固定位移;在水土交界处孔隙水压力固定,在排渗设施及土工布的边界处孔隙水压力固定;基岩设为不透水边界。通过改变土工布的垫层层数,分为三种情况 0 层、5 层、10 层,来模拟耦合作用下土工布的渗流影响;通过改变水位面的位置以及施加孔隙水压力的快慢和调节相应位置的孔隙水压力,来模拟不同工况下尾矿坝的渗流-应力场变化。

表 2 尾矿坝坝体渗透系数
Table 2 Permeability coefficient of tailing dam materials
 $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$

材料 名称	渗透系数		
	水平方向 k_x	水平方向 k_y	竖直方向 k_z
尾砂 1	1.1×10^{-6}	1.1×10^{-6}	1.5×10^{-7}
尾砂 2	1.7×10^{-5}	1.7×10^{-5}	1.4×10^{-5}
尾砂 3	2.0×10^{-8}	2.0×10^{-8}	1.8×10^{-9}
初期坝	3.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}	3.0×10^{-3}
土工布	1.62×10^{-3}	1.62×10^{-3}	1.62×10^{-3}

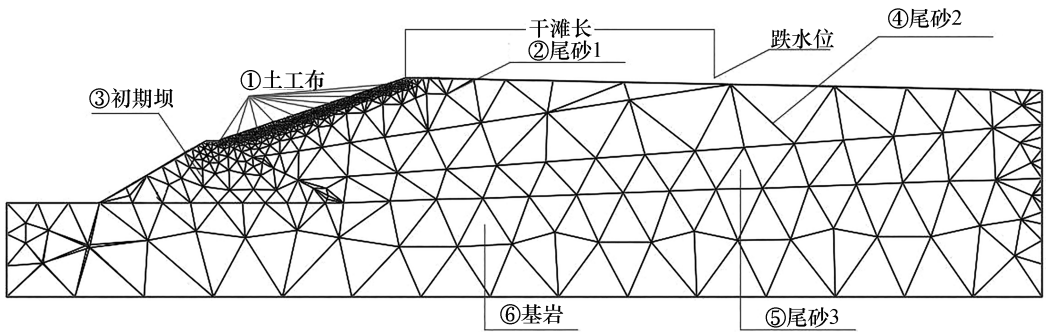


图 1 三维渗流典型剖面有限元网格
Fig.1 Finite element mesh for three-dimensional seepage typical section

3 计算结果分析

3.1 位移分析

通过计算不铺设土工布的简单工况下,研究的结果表明:考虑流固耦合理论时,尾矿坝的沉降位移明显比未考虑流固耦合理论作用下的位移大;同时发现尾矿坝的最大竖向位移出现在尾矿库内,最大位移约为 0.5 m,并且距离前缘坝体较远,因此对

尾矿坝整体稳定性的影响较小;而且还发现在水土交界以及堆积坝体处坝体位移明显变大。

铺设 10 层土工布垫层尾矿坝坝体位移结果如图 2、图 3 所示。

铺设 5 层土工布垫层尾矿坝坝体位移结果如图 4、图 5 所示。

未铺设土工布垫层尾矿坝坝体位移结果如图 6、图 7 所示。

通过比较分析 10 层、5 层、0 层三种不同工况下尾矿坝的沉降位移, 研究结果显示在考虑流固耦合作用时比不考虑流固耦合作用时坝体位移增大了约 0.05 m, 大约占总位移的 15%; 纵向比较流固耦合作用下位移(图 2、图 4、图 6 所示)和未考虑流固耦合作用下位移(图 3、图 5 及图 7 所

示), 发现在流固耦合作用影响下土工布在降低尾矿坝的沉降方面比未考虑耦合作用的效果更加显著, 尤其是在未铺设土工布垫层时, 尾矿坝在浸润面处位移较大, 可能发生浸润面由堆积坝坡面逸出的危险, 说明耦合作用下土工布对尾矿坝的渗流稳定产生了有利的影响。

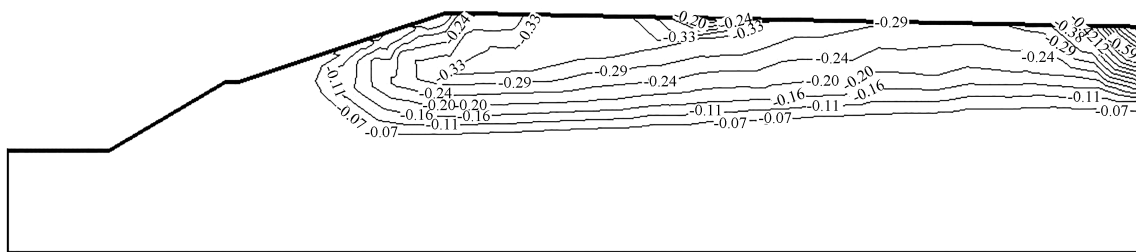


图 2 10 层工况未耦合下 Z 轴位移等值线 (m)

Fig. 2 Z-axis displacement contour of uncoupling effect under 10-story condition (m)

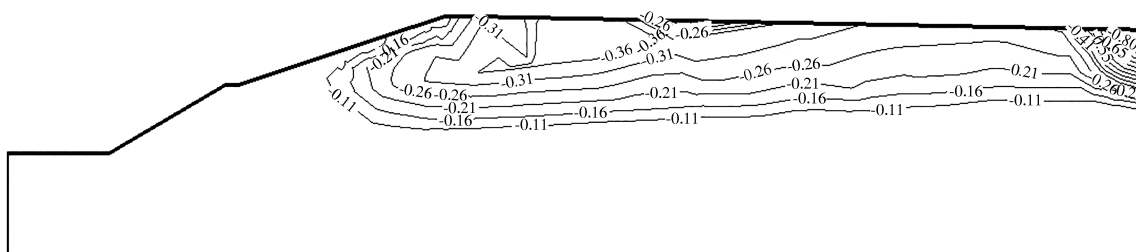


图 3 10 层工况耦合作用下 Z 轴位移等值线 (m)

Fig. 3 Z-axis displacement contour of coupling effect under 10-story condition (m)

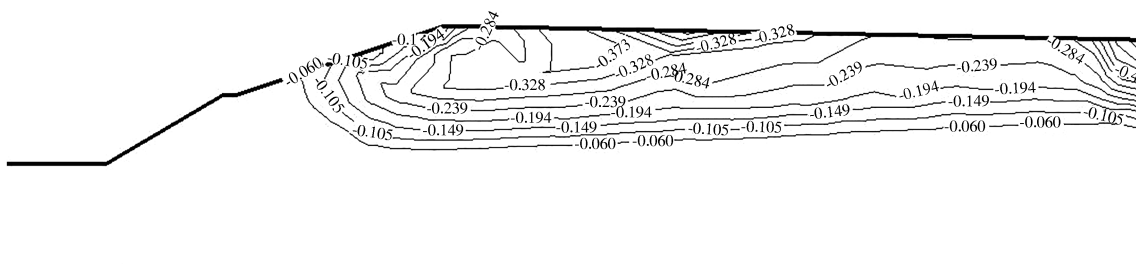


图 4 5 层工况未耦合下 Z 轴位移等值线 (m)

Fig. 4 Z-axis displacement contour of uncoupling effect under 5-story condition (m)

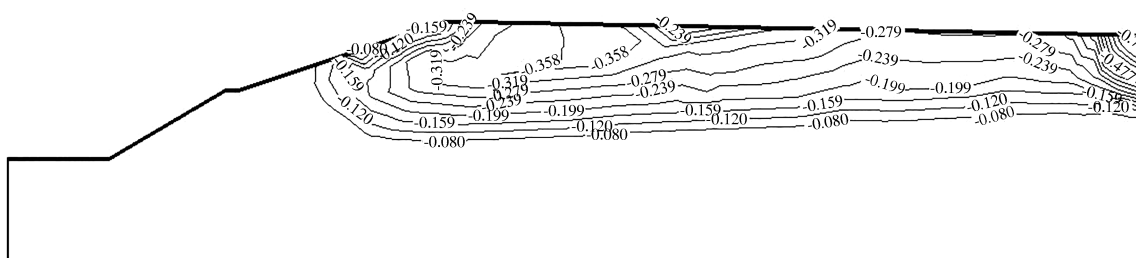


图 5 5 层工况耦合作用下 Z 轴位移等值线 (m)

Fig. 5 Z-axis displacement contour of coupling effect under 5-story condition (m)

3.2 应力分析

3.2.1 主应力分析

为了更加直观的反应土工布在不同工况下对渗流-应力场的影响,本次研究选择通过观察坝

体中具有代表性的5个特征点的渗流-应力场变化,来揭示此作用下渗流-应力场的变化,特征分布点如图8所示。

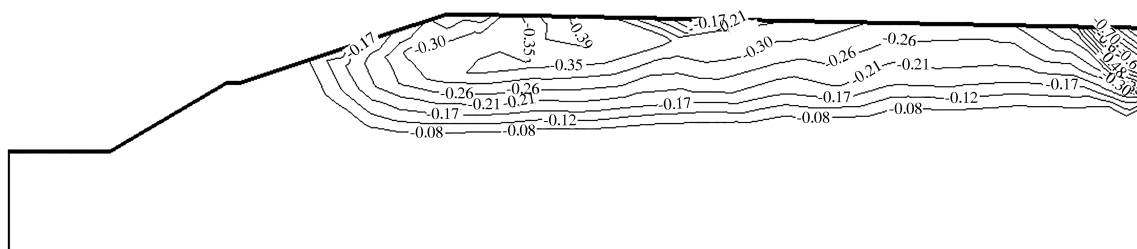


图6 0层工况未耦合下Z轴位移等值线(m)

Fig.6 Z-axis displacement contour of uncoupling effect under 0-story condition(m)

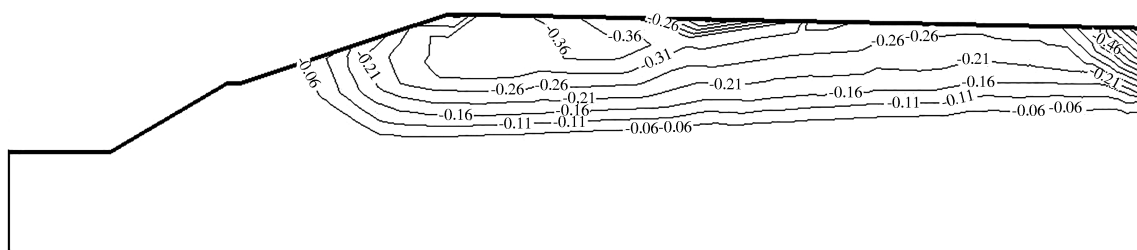


图7 0层工况耦合作用下Z轴位移等值线(m)

Fig.7 Z-axis displacement contour of coupling effect under 0-story condition(m)

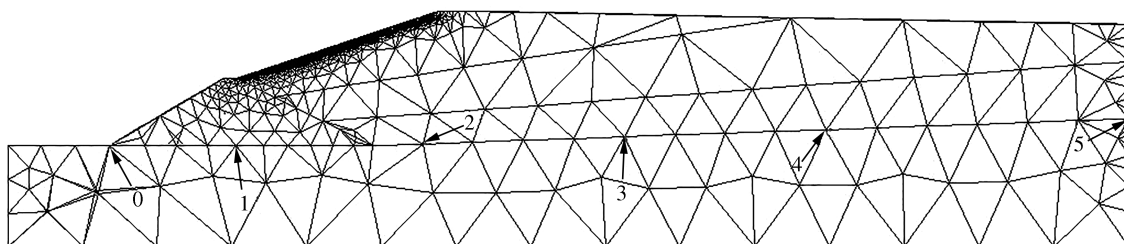


图8 特征点分布图

Fig.8 Feature point distribution

从尾矿坝坝体应力分布发现,尾矿坝的渗流场的应力主要发生垂直坝体的 X 轴方向,而且较之其他两轴即 Y 轴和 Z 轴较为明显,五个特征点 X 轴方向应力变化如图9所示;图中显示流固耦合作用下,尾矿坝的大主应力比未考虑流固耦合作用的大主应力大,而且最大增长幅度约为20%;通过分析比较布置土工布垫层和未铺设土工布垫层两种工况下的坝体应力变化,结果显示前者应力明显较后者小,最大减幅约为50%。虽然考虑流固耦合作用下坝体的渗流量与不考虑流固耦合作用下坝体的渗流量大致相当,但仍然可

以看出渗流场对应力场的影响较大。

3.2.2 孔隙水压力分析

从图10~图13可以看出,初始孔隙水压分布比较均匀,初始孔压最大出现在初期坝附近;考虑流固耦合作用时在库内发生负孔压现象,但对尾矿坝渗流稳定性影响很小,而且考虑流固耦合时孔隙水压变化很小。铺设土工布的工况下较不铺设土工布情况下坝体内孔压分布更均匀,而且孔压相对较小、渗流量较大。

未铺设土工布垫层尾矿坝坝体孔隙水压力分布规律如图10、图11所示。

铺设 10 层土工布垫层尾矿坝坝体孔隙水压 力分布规律如图 12、图 13 所示:

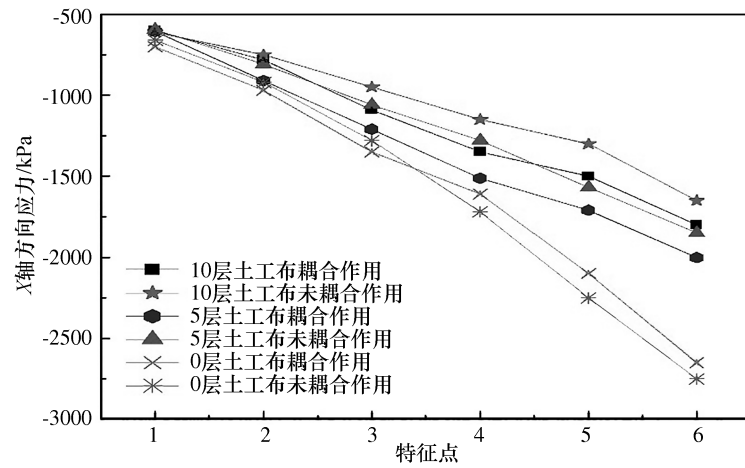


图 9 X 轴方向特征点应力

Fig. 9 Stress in the direction of X axis

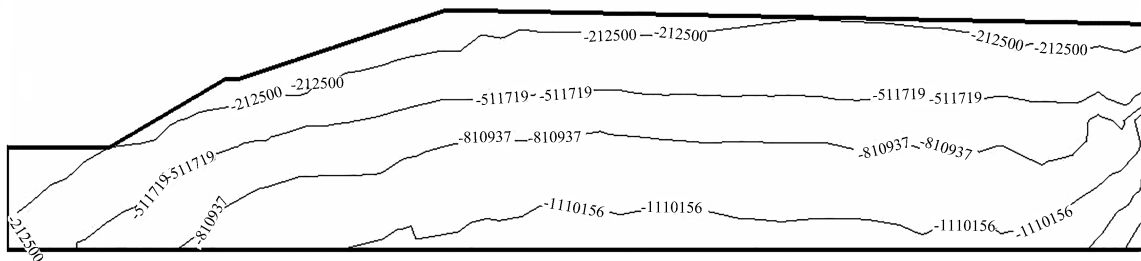


图 10 0 层工况未耦合下孔压等值线 (Pa)

Fig. 10 Pore pressure contour line of uncoupling effect under 0-story condition (Pa)

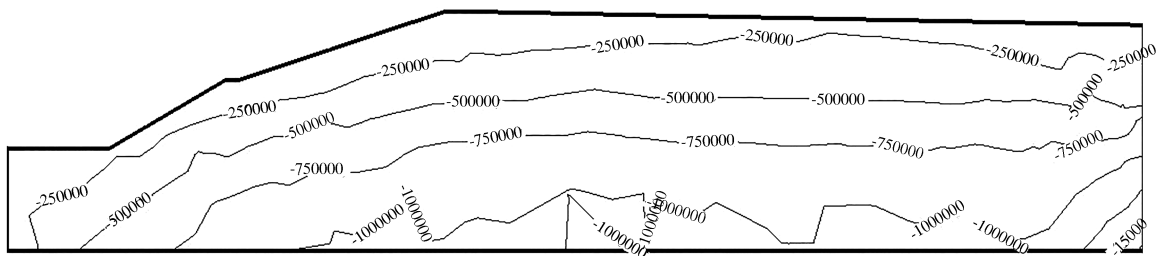


图 11 0 层工况耦合作用下孔压等值线 (Pa)

Fig. 11 Pore pressure contour line of coupling effect under 0-story condition (Pa)

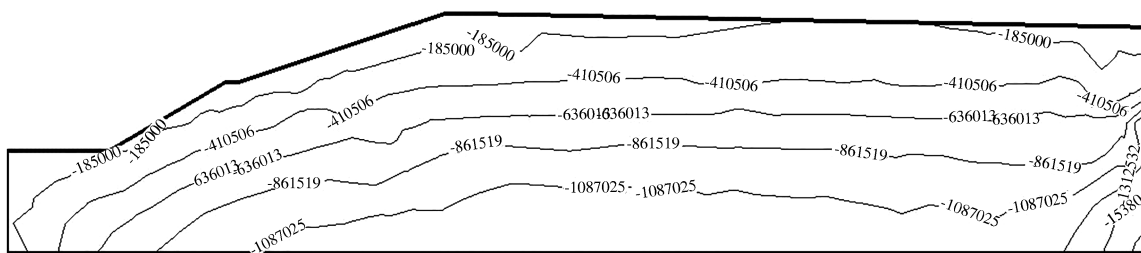


图 12 10 层工况未耦合下孔压等值线 (Pa)

Fig. 12 Pore pressure contour line of uncoupling effect under 10-story condition (Pa)

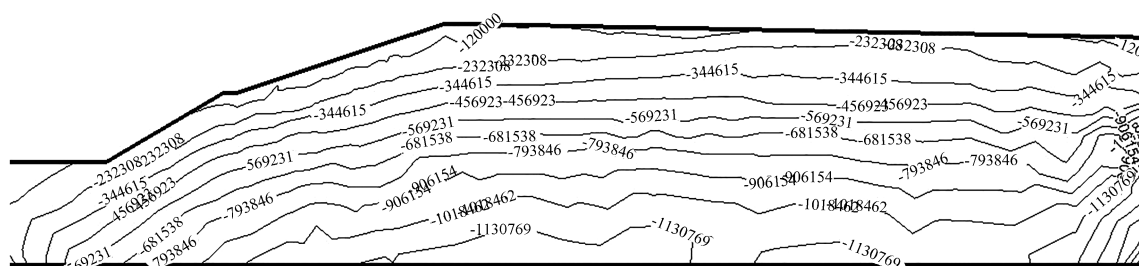


图13 10层工况耦合作用下孔压等值线(Pa)

Fig. 13 Pore pressure contour line of coupling effect under 10-story condition (Pa)

4 结 论

以湖南某尾矿坝为背景,建立三维渗流-应力场分析模型,基于非饱和流固耦合理论利用FLAC 3D软件模拟并分析土工布对尾矿坝渗流-应力场的影响,得出以下结论:

1) 模拟结果表明,尾矿坝渗流-应力场研究采用非饱和流固耦合理论分析时考虑尾矿坝周边地质情况,可以较为真实的反映尾矿坝的实际情况;

2) 考虑流固耦合作用时,尾矿坝的沉降量总体较不考虑流固耦合时大,而且正在水土交界处位移变化明显;铺设土工布对于减少坝体沉降量有明显的积极作用;

3) 流固耦合作用下,渗流场对应力场的影响较大,而且耦合作用孔隙水压力在整个坝体中分布较均匀,所以实际工程中,必须考虑渗流场对应力场的影响,而且需要对渗流和应力场进行耦合计算分析;

4) 考虑流固耦合作用时,土工布对尾矿坝的渗流场的影响更加明显,而且在水位急剧变化时土工布的作用尤为明显,这为尾矿坝的排渗设施的设置提供了参考。

参考文献:

- [1] 于广明,宋传旺,潘永战,等. 尾矿坝安全研究的国外新进展及我国的现状和发展态势[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(增刊1):3238-3248.
- [2] 张晓敏. 浅析尾矿库溃坝形式与预防措施[J]. 世界有色金属,2017(24):94-96.
- [3] XIE J B, FAN J, WAN Z L, et al. Numerical simulation on the three-dimensional seepage field of Zhelamuqing tailings dam[J]. Applied mechanics and materials, 2013, 2156(256):19-25.
- [4] 邓翌,陈生水,钟启明. 尾矿库漫顶溃坝数学模型研究

与应用[J]. 岩土工程学报,2017,39(5):932-938.

- [5] ÖZER A T, BROMWELL L G. Stability assessment of an earth dam on silt/clay tailings foundation: A case study [J]. Engineering geology, 2012, 151:89-99.
- [6] MIZUMURA K, KANEDA T. Boundary condition of groundwater flow through sloping seepage face [J]. Journal of hydrologic engineering, 2010, 15(9):718-724.
- [7] LIUX, SUN Y, MIAO H, et al. Numerical analysis on seepage stability of tailings dam slope under floods infiltration [J]. Journal of water resources & water engineering, 2011, 22(3):13-16.
- [8] WANG G J, KONG X Y, LIANG Q, et al. Study on the grouting reinforcement and stability of a tailings initial dam [J]. Advanced materials research, 2013, 602-604:1570-1573.
- [9] 郑海远,秦忠国. 尾矿库坝体及排渗体三维渗流分析 [J]. 矿冶,2015,24(2):28-31.
- [10] 张力霆,齐清兰,谷芳. 尾矿库渗流场计算的改进有限元法[J]. 金属矿山,2009(10):63-65.
- [11] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.
- [12] 路美丽,崔莉. 复杂地形尾矿坝的三维渗流分析 [J]. 岩土力学,2006,27(7):1176-1180.
- [13] RICHARDS L A. Capillary conduction of liquids through porous medimus [J]. Physics, 1931, 1(5):318-333.
- [14] 李筱艳,王传鹏,柳毅. 渗流场与应力场的完全耦合模型及其在深基坑工程中的应用 [J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(6):86-89.
- [15] 张延军,王恩治,王思敬. 非饱和土中的流-固耦合研究 [J]. 岩土力学, 2004, 25(6):999-1004.
- [16] 汤卓,谢建斌,李丞文,等. 基于非饱和土渗流理论的尾矿库流固耦合分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(6):994-1001.
- [17] 唐菲,葛凯华. 某尾矿坝子坝稳定性及加固效果分析 [J]. 工业安全与环保, 2016, 42(11):16-19.

(责任编辑:扶文静)