

# 渗流影响下尾矿库动力反应的数值模拟研究

杨 坤, 韩 浩, 马智超

(山东科技大学 矿山灾害预防控制教育部重点实验室, 山东 青岛 266590)

**摘 要:**以金堆城栗西尾矿库为工程实例,采用数值模拟手段,研究了不同渗透系数下尾矿库加速度、应力、位移及液化区域的动力反应。结果表明:随着渗透系数的增大,加速度反应减小;耦合渗流后较耦合前的垂向有效应力明显减小,而耦合后两种渗透系数下的差别较小;剪应力在耦合渗流后增大,但耦合后渗透系数的变化对剪应力的影响很小;耦合前后坝体的垂向位移场发生了一定变化,耦合前坝体内的垂向位移以正位移为主,而耦合后很多地方变为负位移,且耦合后随着渗透系数的增大,位移也有所增大;液化区在耦合渗流后明显增大,而且随着渗透系数的增加,液化区域有所扩大。

**关键词:**渗流;尾矿库;地震;动力反应;数值模拟

中图分类号:TD315

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2012)06-0046-06

## Numerical Simulation of Dynamic Response of Tailings Dams under Seepage Influence

YANG Kun, HAN Hao, MA Zhichao

(Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Ministry of Education,  
Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** With Lixi tailings dam of Jinduicheng mine taken as engineering example, numerical simulation method was used to study the dynamic response of acceleration, stress, deformation and liquefied zone under different permeability coefficients. The results show that with the increased permeability coefficient, the acceleration response decreases. The vertical effective stress significantly decreases after coupling seepage, but there's only a marginal difference between the two permeability coefficients. The shear stress increases after coupling seepage, but it is affected very weakly by the change of permeability coefficients. Before and after coupling seepage, there is a change in the vertical displacement fields, most of which are positive before coupling, but after coupling, they turn negative. In addition, with the increase of permeability coefficient, the displacement shows an improvement, liquefied zone increases significantly after coupling, and liquefied zone has somewhat expanded.

**Key words:** seepage; tailings dams; earthquake; dynamic response; numerical simulation

中国是一个矿产大国,每年由选矿所产生的尾矿数以亿吨,而这些尾矿又大多以尾矿库的形式储存,目前具有一定规模的尾矿库已经达到 1500 余座<sup>[1]</sup>。尾矿库是一个高势能的人造泥石流危险源,在其运营期间,各种自然以及人为因素都会对其安全性产生一定影响。很多事故已经表明,尾矿库一旦失控,将会给人民生活及生产带来巨大损失。本文运用数值模拟方法<sup>[2]</sup>,分别对考虑渗流前后的尾矿库地震情况下的加速度、应力、位移及液化区域的反应进行了分析,为保证尾矿库的安全运营提供参考。

## 1 计算模型及参数

计算实例为金堆城栗西尾矿坝,该尾矿坝位于秦岭山脉东段,金堆城矿南东约 7.5 km 的栗西沟内。选

收稿日期:2012-08-25

基金项目:国家自然科学基金项目(51109124, 51274135);国家重点基础研究发展计划(“973 计划”)前期研究专项(2011CB411906);山东科技大学科研创新团队支持计划项目(2010kytd106)

作者简介:杨 坤(1978—),女,河南新乡人,讲师,博士,主要从事岩土工程方面的研究. E-mail:kunyang11@163.com

取的断面为中心最大断面<sup>[3]</sup>。选取的剖面顶部高程为 120 m,计算区域水平距离为 1200 m,尾矿库滩面选取长度为坝顶后 550 m。有限元剖分结果如图 1 所示。

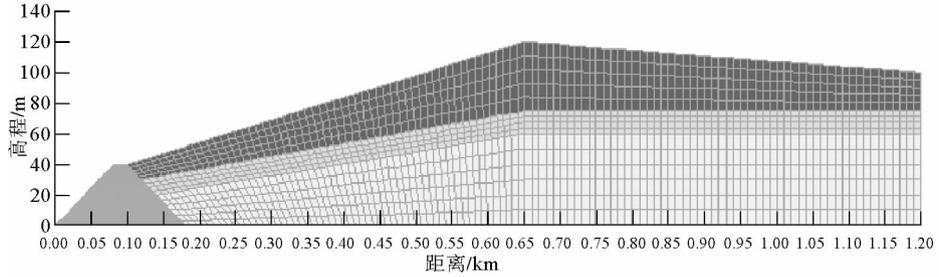


图 1 计算区域网格剖分图

Fig. 1 The gridding split chart of computing region

本研究将尾矿库土层简化为三层,分别为尾中砂、尾粉砂和尾细砂,各层材料参数如表 1 所示。

表 1 尾矿坝土层计算参数表

Tab. 1 Computing parameters of tailings dam soil layers

参数 \ 材料	粗尾矿	中尾矿	细尾矿	初期坝
弹性模量/MPa	52	48	35	80
重度/(kN/m <sup>3</sup> )	19.2	21.4	19.8	24.0
模量参数 $K$	556	656	833	550
最大阻尼比 $\lambda$	0.21	0.19	0.16	0.21
泊松比	0.36	0.38	0.40	0.35
动泊松比	0.46	0.47	0.48	0.45
粘聚力 $c$ /kN	30	23	20	45
内摩擦角 $\phi$ /(°)	26	28	22	30

在计算中,没有考虑地震引起的竖直运动,只考虑地震的水平运动<sup>[4]</sup>。采用的地震加速度时程曲线如图 2 所示,峰值为 0.55 g( $g$ 为重力加速度,下同)。

## 2 计算结果分析

通过软件 Geostudio 模拟计算地震作用下的尾矿坝动力反应<sup>[5]</sup>。分别对耦合渗流前后的尾矿坝节点加速度、应力、位移、液化区域的反应进行了数值分析<sup>[6]</sup>。本研究对材料的渗透系数做了改变,设计了两种方案对渗流影响下的动力反应进行对比分析,如表 2 所示。

### 2.1 加速度反应分析

图 3 为计算出的节点 22 加速度反应时程曲线。当输入地震曲线时,从图 3(a)可以看出,不考虑渗流时最大加速度为 0.588 177 g,放大倍数为 1.0694;图 3(b)

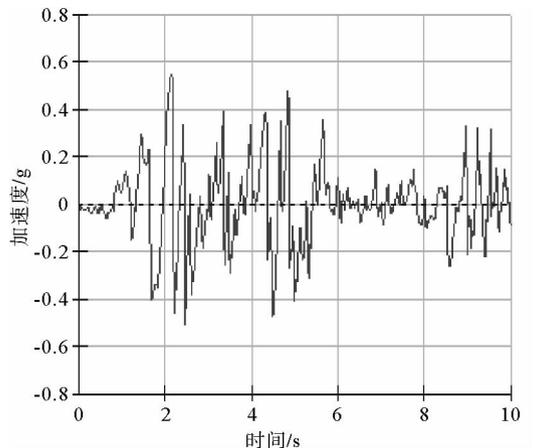


图 2 地震加速度时程曲线图

Fig. 2 Relation curve of the earthquake acceleration and time

显示采用渗流方案一时最大加速度为 0.619 133 g,放大倍数为 1.126;图 3(c) 显示采用渗流方案二时最大加速度为 0.5622 g,放大倍数为 1.013。由此可知,渗流对节点加速度存在一定的影响,而且随着渗透系数的增大,加速度反应减小。

表 2 两种方案下材料的渗透系数表

Tab. 2 Permeability coefficient of the material two methods m/s

方案	粗尾矿	中尾矿	细尾矿	初期坝
方案一(较小渗透系数)	$7 \times 10^{-6}$	$5 \times 10^{-7}$	$4 \times 10^{-8}$	$3 \times 10^{-4}$
方案二(较大渗透系数)	$7 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-5}$	$4 \times 10^{-6}$	$3 \times 10^{-2}$

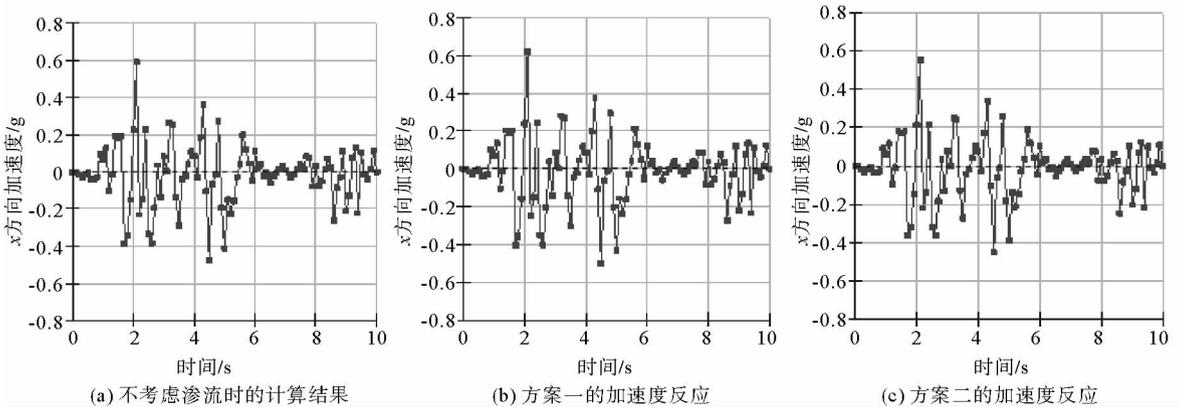


图 3 节点 22 的加速度反应曲线图

Fig. 3 Relation curve of the earthquake acceleration and time of node 22

## 2.2 应力结果对比分析

图 4 表示的是最大加速度时刻尾矿坝的垂直有效应力场。可以看出,耦合渗流前后的应力场等值线图有较大不同,耦合后较耦合前的垂向有效应力明显减小,这是由孔压的作用造成的。而耦合后两种渗透系数下的差别较小,但渗透系数增大时在坝坡面上也有部分区域的垂向有效应力有所增大,这是因为随着渗透系数增大,孔隙水压力短时间内急剧减小造成垂向有效应力增大的现象。

图 5 为节点 22 的剪应力时程曲线。从图看出,剪应力时程曲线在耦合渗流前后发生了很大变化,耦合后较耦合前的剪应力增大。但耦合后渗透系数的变化对剪应力的影响很小。

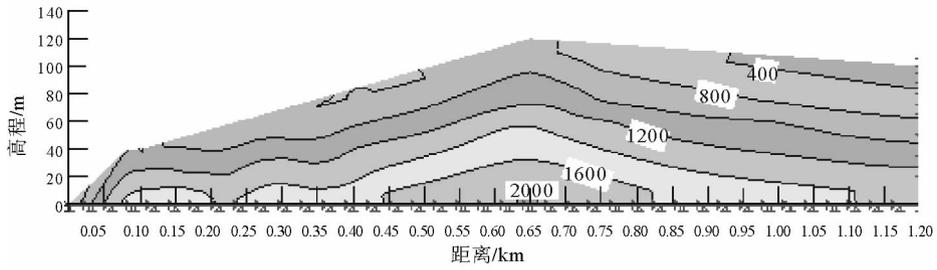
## 2.3 位移结果对比分析

图 6 为最大加速度时刻尾矿坝的垂向位移场,从图中看出耦合前后坝体的垂向位移场发生了一定变化,耦合前坝体内的垂向位移以正位移为主,而耦合后很多地方变为负位移;且耦合后随着渗透系数的增大,位移也有所增大。

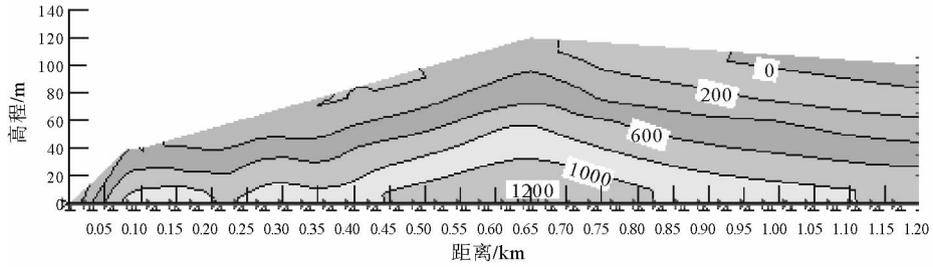
图 7 为节点 22 的位移时间曲线,由图看出垂直位移时程曲线在耦合渗流前后有很大不同,但耦合后,位移时程曲线受渗透系数影响较小。

## 2.4 液化区对比分析

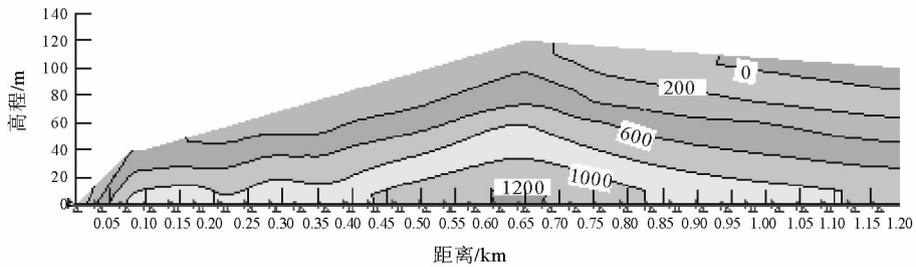
图 8 为地震结束后的液化区分布区域。可以看出,耦合后的液化区域明显比耦合前增大。由图 8(b) 及 8(c) 也可以看出,渗透系数的改变对液化区分布也有一定影响,随着渗透系数的增加,液化区域有所扩大。



(a) 不考虑渗流时的计算结果



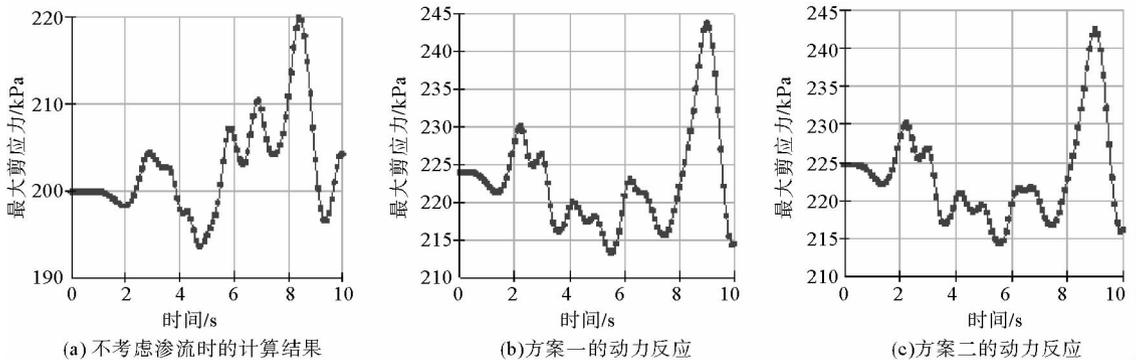
(b) 方案一的计算结果



(c) 方案二的计算结果

图 4 最大加速度时刻主体坝的垂向应力场示意图(单位:kPa)

Fig. 4 Vertical stress field at the time of the maximum acceleration



(a) 不考虑渗流时的计算结果

(b) 方案一的动力反应

(c) 方案二的动力反应

图 5 节点 22 的剪应力时程曲线图

Fig. 5 Relation curve of the shear stress and time of node 22

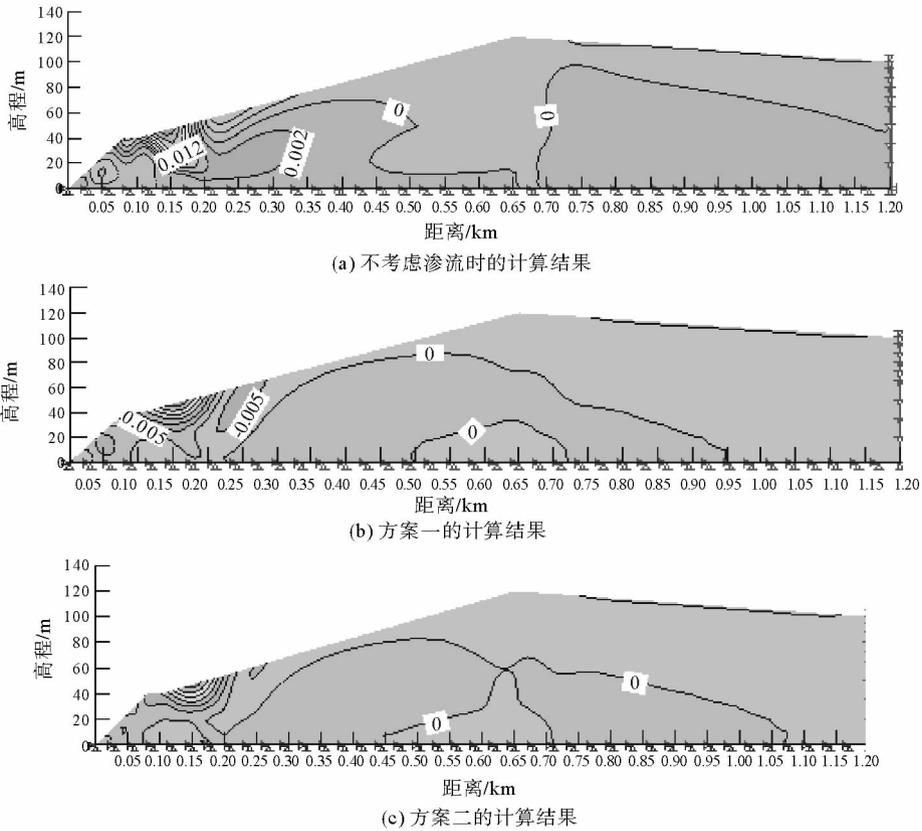


图 6 最大加速度时刻垂向位移场示意图

Fig. 6 Vertical displacement field at the time of the maximum acceleration

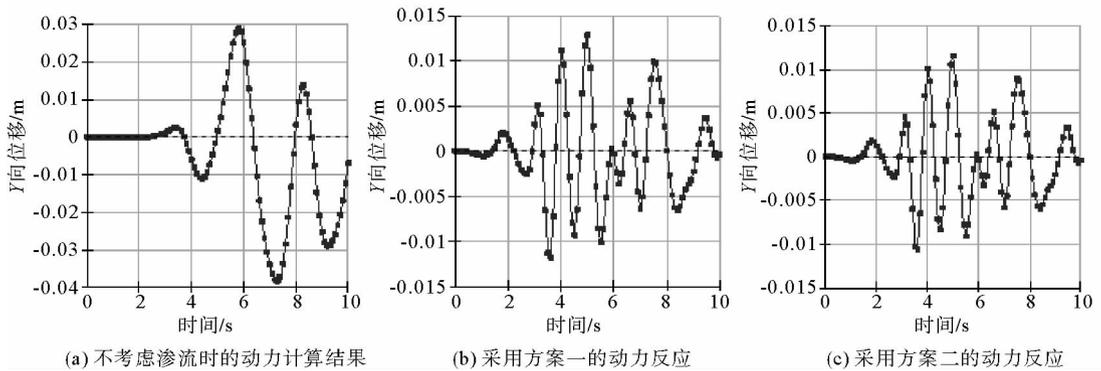


图 7 节点 22 的垂向位移时程曲线图

Fig. 7 Curve of the vertical displacement and time of node 22

### 3 结论

采用数值模拟对渗流影响下的尾矿库进行了动力反应分析,分别计算了不考虑渗流时以及采用不同渗透系数时的三种工况,对保证尾矿库安全运营具有一定的参考价值,主要结论如下:

1) 渗流因素对节点的加速度存在一定影响,而且随着渗透系数的增大,加速度反应减小。

2) 耦合渗流前后的应力场等值线图有较大不同,耦合后较耦合前的垂向有效应力明显减小。而耦合后两种渗透系数下的差别较小,但渗透系数增大时在坝坡面上也有部分区域的垂向有效应力有所增大。剪应力时程曲线在耦合渗流前后也发生了很大变化,耦合后较耦合前的剪应力增大,但耦合后渗透系数的变化对剪应力的影响很小。

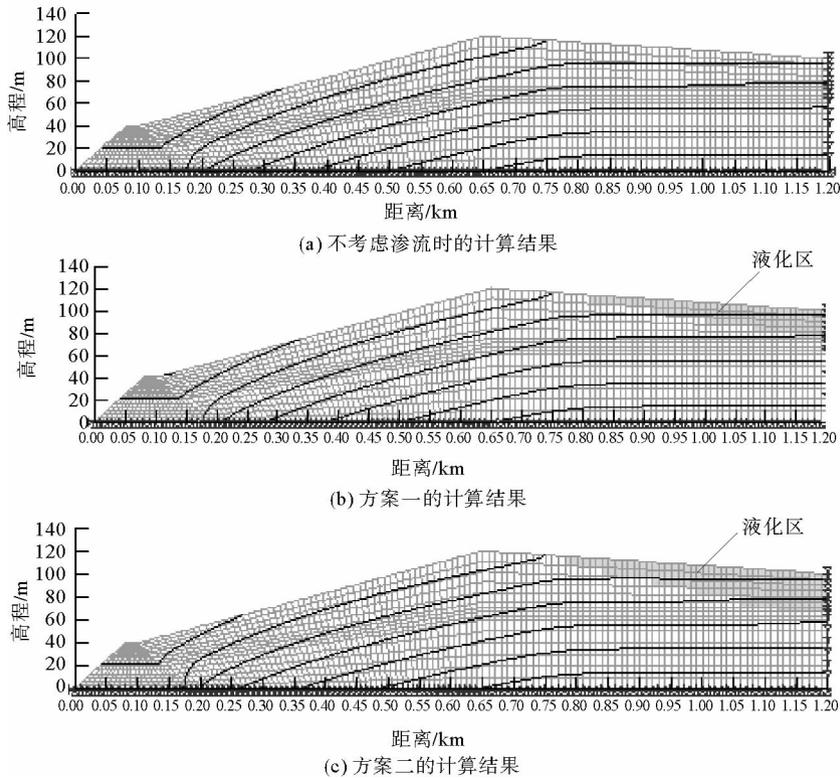


图 8 地震结束时刻坝体内液化区分布图

Fig. 8 Liquefied zone at the end of earthquake

3) 耦合前后坝体的垂向位移场发生了一定变化,耦合前坝体内的垂向位移以正位移为主,而耦合后很多地方变为负位移;且耦合后随着渗透系数的增大,位移也有所增大。

4) 考虑渗流与否对液化区的影响较大,耦合后的液化区域明显比耦合前增大,随着渗透系数的增加,液化区域有所扩大。

参考文献:

[1]滕志国.关于尾矿坝地震稳定性的分析及评价[J].河北冶金,2003(1):16-17.  
TENG Zhiguo. Analysis and evaluation about tailings dam earthquake stability[J]. Hebei Metallurgy,2003(1):16-17.

[2]柳厚祥,李宁,廖雪,等.考虑应力场与渗流场耦合的尾矿坝非稳定渗流分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(17):2870-2875.  
LIU Houxiang,LI Ning,LIAO Xue, et al. Unsteady seepage analysis of tailings dams considering coupling of stress and seepage fields[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(17):2870-2875.

[3]吴远亮.尾矿坝的动力稳定性分析[D].西安:西安理工大学,2006:1-15

[4]徐则民,张倬元,许强,等.九寨黄龙机场填方高边坡动力稳定性分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(11):1883-1890.  
XU Zemin,ZHANG Zhuoyuan,XU Qiang, et al. Dynamic stability analysis of high fill slope of Jiuzhai-Huanglong airfield [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(11):1883-1890.

[5]王平,胡再强,田春亮.陶家沟尾矿坝三维静力和动力稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2010,8(1):53-59.  
WANG Ping,HU Zaiqiang,TIAN Chunliang. 3-D static and dynamic analysis on stability of taojiagou tailing dam[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering,2010,8(1):53-59.

[6]陈士海,张安康,张子华.爆破地震作用下结构的损伤及动力响应分析[J].山东科技大学学报:自然科学版,2011,30(5):36-41.  
CHEN Shihai,ZHANG Ankang,ZHANG Zihua. Damage of structures and dynamic response analysis under the action of blasting seism[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science,2011,30(5):36-41.