

# 基于流-固耦合理论的病险土石坝渗流规律

栾艳<sup>1</sup>, 赵明阶<sup>2</sup>, 汪魁<sup>2</sup>

(1. 中铁工程设计院有限公司 沈阳分公司, 辽宁 沈阳 110023; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

**摘要:** 土石坝病险问题主要是各种原因引起的渗漏。因此, 研究病险土石坝加固技术首先必须分析土石坝渗流规律和渗透机理。基于多孔介质流-固耦合理论, 在不考虑土体和水的压缩性以及孔隙率不变的假定下, 利用 FLAC3D 数值分析软件, 建立了土石坝二维模型, 对 2 种病险土石坝模型的应力场、渗流场以及孔压进行了分析, 总结得出了土石坝的渗流规律和土石坝渗漏机理, 为土石坝加固技术提供了理论依据。

**关键词:** 病险土石坝; 流-固耦合理论; 渗流规律; 加固技术

中图分类号: TV6

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)05-0741-04

## Analysis of Diseased Earth-rock fill Dam Seepage Based on Coupled Fluid-solid Theorem

LUAN Yan<sup>1</sup>, ZHAO Ming-jie<sup>2</sup>, WANG Kui<sup>2</sup>

(1. Shenyang Department of China Railway Engineering Design Institute, Shenyang 110023, Liaoning, China

2. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract** The main problem of earth-rock-filled dam's danger is the seepage caused by a variety of reasons. Therefore, the seepage and percolation mechanism law of the dam should be firstly studied for its reinforcement technology. Based on porous media coupled fluid-solid theorem, the two-dimensional model of dam is established using FLAC 3D numerical analysis software without the consideration of soil and water compressibility and constant porosity. The stress and seepage and pore pressure of two types of dangerous dams are analyzed. Finally, the permeability law and the seepage mechanism of the earth-rock-filled dam are summed up, which provide theoretic guidance to the strengthening technology of earth-rock-filled dam.

**Key words** diseased earth-rock-filled dam; coupled fluid-solid theorem; the law of seepage; reinforcement technology

土石坝是最普遍采用的一种坝型, 历史久远。与其他坝型相比较, 不论是在全世界, 还是在中国, 土石坝都占绝对的优势, 占大坝总数的 82.9%。在我国已建大坝中 90% 以上为土石坝, 且多建成于 20 世纪 50-60 年代。土石坝病险问题主要是各种原因引起的渗漏<sup>[1]</sup>。这些病险土石坝, 不仅造成水库不能正常运行, 无法充分发挥其效益, 而且还严重威胁到下游人民生命财产的安全。

目前对土石坝渗流规律研究都是在达西定律的基础上进行分析研究。一般情况下, 土石坝的渗流规律仍满足线性达西定律, 按达西渗流规律研究分析土石坝土石料的渗透性是合理和可靠的。在恒定水头作用下, 土的渗透性确实具有时效自密性, 渗流量随持续时间呈递减趋势, 但在变水头、高水力梯度作用下, 土的渗流规律会存在偏离达西渗流的现

象<sup>[2]</sup>。而在渗漏机理方面, 现有研究方法很多都是没有充分考虑层状坝基岩体特殊的渗流规律, 从而使得其分析和计算的模式就渗流的对待与处理而言具有相当大的随意性及近似性, 进而直接影响到其结果的准确性和可信性<sup>[3]</sup>。

笔者利用 FLAC3D 数值模拟方法, 建立土石坝二维渗透模型, 研究土石坝的渗流规律和渗漏机理, 为土石坝的加固提供依据。

## 1 多孔介质流-固耦合基本方程

在岩土体介质中存在水头差的情况下, 会引起其中地下水的渗流运动, 产生渗流的动水力以渗流体积力的形式作用于岩土体介质, 从而使岩土体介质的应力场发生变化; 反之, 应力场的变化使得岩土体介质的孔隙比、孔隙率发生改变, 进而影响岩土体介质的渗透性质。因此, 渗流场是通过渗透力对应

收稿日期: 2010-05-10 修订日期: 2010-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779081)

作者简介: 栾艳(1984-), 女, 吉林柳河人, 硕士, 主要从事水工建筑物健康诊断与加固技术方面的研究和工程。E-mail: winking@126.com

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

力场产生直接影响的,而坝体外的水位差则是产生渗流的外在原因<sup>[4]</sup>。根据土体的变形和渗透特性,当在渗透力的作用下应力场发生改变时,土体的体积应变和孔隙比将相应地产生变化,从而使土体的渗透系数发生变化。因此,应力场是通过体积应变对渗流场产生间接影响的,其大小与土的应力—应变关系有关。总之,在大坝的实际运行中,由于渗透力的存在,使原有的应力场发生改变,而体积应变的改变使土体的渗透系数发生变化,从而影响土体的渗流场。因此,只有考虑渗流场和应力场的耦合,才能真实地反映大坝的稳定状态<sup>[5-7]</sup>。

1 1 渗流场基本方程

在土颗粒及水不可压缩的条件下,平面问题多介质的渗流支配方程如式(1)<sup>[2]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left[k_x(\sigma_{ij})\frac{\partial h}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[k_y(\sigma_{ij})\frac{\partial h}{\partial y}\right]=S_i\frac{\partial h}{\partial t}\quad(1)$$

式中:  $k_x(\sigma_{ij})$ 、 $k_y(\sigma_{ij})$  分别表示土体水平和铅直方向的渗透系数,是应力场的函数。根据试验结果,渗透系数和孔隙率之间存在一定的经验关系,  $h$  为土体中任一点的水头;  $S_i$  为贮水率。

1 2 应力场基本方程

在渗流场的作用下,将渗透作用考虑为体积力形式的作用,以张量形式表示的土体平衡微分方程为<sup>[5]</sup>:

$$\sigma_{ij,j}+f_i(h)+X_i=0\quad(2)$$

式中:  $\sigma_{ij}$  为有效应力张量场;  $f_i(h)$  为体积力,是渗流场水力梯度的函数;  $X_i$  为荷载张量。

1 3 双场耦合基本方程

将渗流场数值模型、应力场数值模型及渗流与应变的经验关系组合在一起,并以矩阵的形式表示,可得双场耦合的数值模型为<sup>[6]</sup>:

$$k\{h\}+S\left\{\frac{\partial h}{\partial t}\right\}=\{f\}\quad(3)$$

$$d\sigma=D\{d\varepsilon\}=DB\{dw\}\quad(4)$$

$$K\{w\}=F+X\quad(5)$$

式中:  $k$  为与渗透系数有关的矩阵;  $S$  为与贮水率  $S_i$  有关的贮水助阵;  $\{f\}$  为已知常数项,由已知水头结点得出;  $d\sigma$  为与土体自重有关的应力增量矩阵;  $D$  为弹(塑)性矩阵;  $B$  为应变矩阵;  $K$  为刚度矩阵;  $\{w\}$  为结点位移;  $F$  为与渗透坡降有关的渗透力矩阵;  $X$  为荷载矩阵。

上述式中:式(3)描述的是应力场影响下的渗流场;式(4)描述的是土体的应力—应变关系,可以选择不同的土体本构模型代入;式(5)描述的是渗

流场影响下的力的平衡方程。  
2 基于 FLAC3D 方法的土石坝渗流规律的数值模拟分析

2 1 基本假定及模型参数

为了从理论上更好的分析土石坝渗透规律,笔者参考了浙江省象山县上张水库心墙沙砾石坝<sup>[8]</sup>(主要用于供水、防洪、农田灌溉),坝基土体和坝体材料的特性参数见表 1。

表 1 堤坝和地基土体的特性参数

Tab 1 Characteristic parameters of soil dam and foundation		
参数	地基	坝体
排水杨氏模量 /kPa	12 757	6 838
排水泊松比	0.3	0.3
排水黏结力 /kN	83.5	120
排水摩擦角 /( $^{\circ}$ )	40	35
剪胀角 /( $^{\circ}$ )	0	0
孔隙率 /%	0.5	0.5
渗透系数	$1.0\times10^{-10}$	$1.0\times10^{-10}$
体积模量 /kPa	$3.3\times10^{-7}$	$3.3\times10^{-7}$
剪切模量 /kPa	$1.0\times10^{-7}$	$1.0\times10^{-7}$
初始密度 /( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2 000	2 000

基于孔隙介质流—固耦合模型理论,做如下假设:①渗流服从达西定律;②不考虑土体和水的压缩性,渗透时土体的孔隙大小和孔隙率不变;③土体内水的饱和度不变。

基于以上假定,模型简单描述为:土石坝土体为低渗透性的黏质砂土和具有碎石外壳的黏质砂土填筑而成。土石坝中存在一道黏土心墙,心墙的渗透系数远远低于周围土体的渗透系数,因此认为是不透水材料。建造在由砂岩和页岩构成的层状地基上面,坝顶海拔高度为 204 m。

2 2 含缺陷土石坝的计算分析

FLAC3D 通过具有渗流性的实体(比如土)来模拟流体的流动。流动模型的建立可以独立于力学计算而自动完成,或者说可以与力学模型同时建立,这样就可以考虑流体与土体之间的相互作用。流固耦合的一种类型是“固结”<sup>[9]</sup>,即:孔隙水压力逐渐消散而导致土体的沉降。这个过程包括 2 种力学反映:①孔隙水压的改变导致有效应力的变化,这将影响到土体的力学反映(如:有效应力的减小可能导致塑性区的产生);②力学实体中某一区域的流动会随着孔隙水压的改变而改变。

下面按照 2 种土石坝病害类型建立有缺陷的土石坝模型。两者进行比较,进而推出结论。土石坝 A 设为坝体(心墙)渗漏,土石坝 B 设为坝体与坝基和涵管的接触部位渗漏。土石坝 A、B 基本模型如图 1。

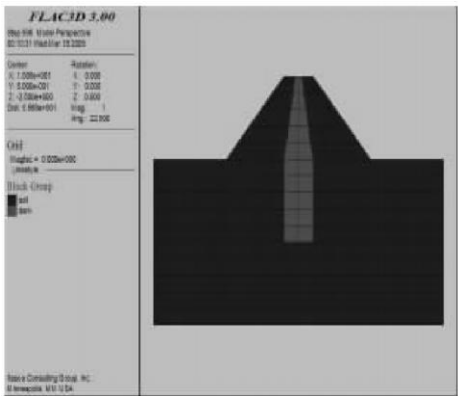


图 1 心墙土石坝 A、B 模型

Fig 1 A, B model of core wall of earth rock dam

由于没有蓄水, 不会发生破坏, 所以孔压力与理想状态的土石坝的孔压力一致。当水库蓄水, 并且随着水位的上升, 水慢慢渗透进入坝体与坝基, 这时由于土石坝 A 心墙有渗流管道, 则在坝体发生渗透破坏; 而由于土石坝 B 坝体与坝基接触部位存在渗漏问题, 所以在接触部位发生渗流。

土石坝 A 与土石坝 B 在水位上升后各自的竖向应力云图分别如图 2 和图 3 最大主应力云图分别如图 4 和图 5。

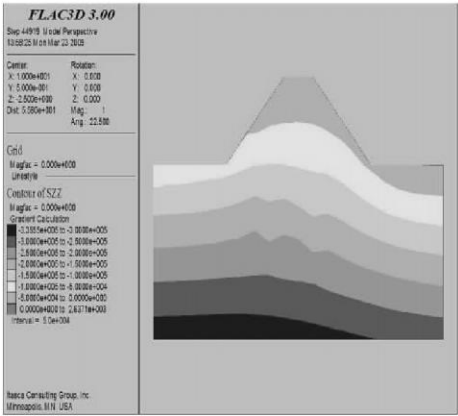


图 2 水位上升后土石坝 A 的竖向应力云图

Fig 2 Vertical stressmap after the water level rise in dam A

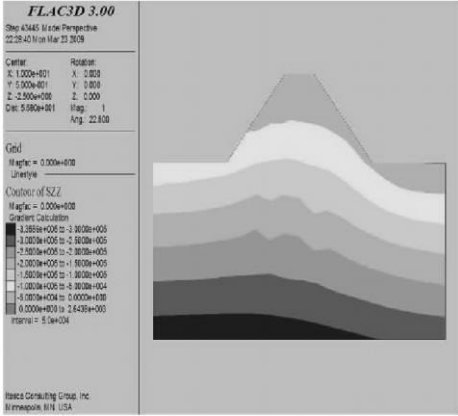


图 3 水位上升后土石坝 B 的竖向应力云图

Fig 3 Vertical stressmap after the water level rise in dam B

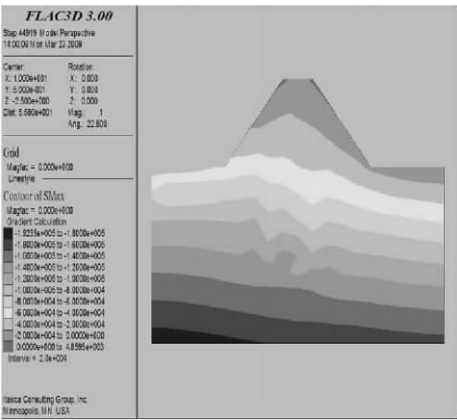


图 4 水位上升后土石坝 A 的最大主应力云图

Fig 4 Maxium principal stress map after the water level rise in dam A

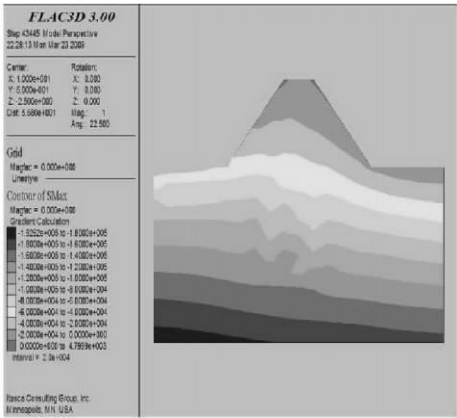


图 5 水位上升后土石坝 B 的最大主应力云图

Fig 5 Maxium principal stress map after the water level rise in dam B

由于坝体内部水力条件的改变, 坝体内应力、应变将会重新进行调整。水位上升后, 基底最大主应力在  $8.0 \times 10^4$  Pa 左右, 基底最大竖向应力为  $1.5 \times 10^5$  Pa。

水位上升后土石坝 A 与土石坝 B 各自的孔压云图分别如图 6 和图 7。

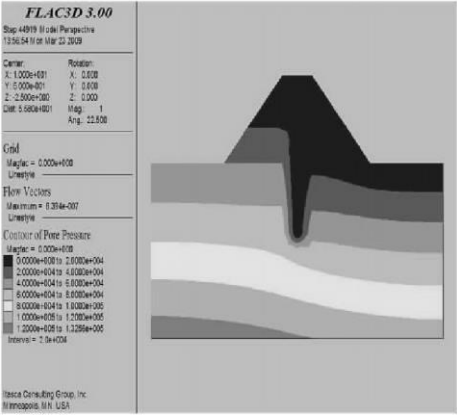


图 6 水位上升后土石坝 A 的孔压云图

Fig 6 Pore pressuremap after the water level rise in dam A

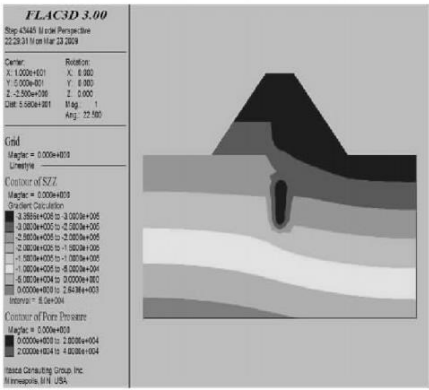


图 7 水位上升后土石坝 B 的孔压云图

Fig 7 Pore pressure map after the water level rise in dam B

从图中可以看出,土石坝 A 的孔压云图与理想状态下的相差不大,但是土石坝 B 的孔压云图就发生了很大变化,在土石坝 B 的坝体与涵管相接触的部位,孔压力很大,这说明水透过了接触部位发生渗流。在蓄水前,心墙上的孔压均为 0 这是由于心墙采用了不透水材料。当水位上升后,土石坝 A 的孔压力最大值为  $4.0 \times 10^4 \text{ Pa}$ ,土石坝 B 产生了较大的负压孔压,孔压力最大值为  $3.0 \times 10^5 \text{ Pa}$  最大孔压发生在管涌处。

土石坝 A 与土石坝 B 各自的渗流矢量图分别如图 8 和图 9

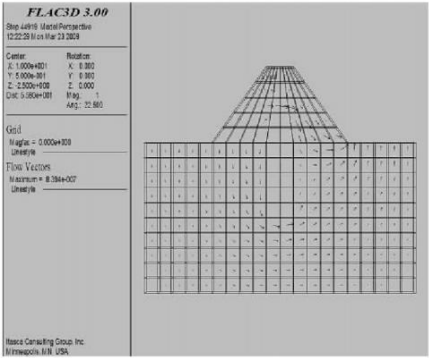


图 8 水位上升后土石坝 A 内的渗流路径

Fig 8 Flow path of earth-rock dam A after the water level rise

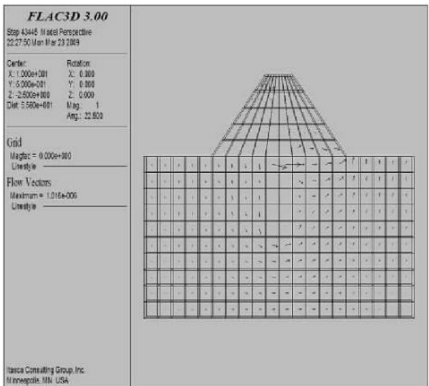


图 9 水位上升后土石坝 B 内的渗流路径

Fig 9 Flow path of earth-rock dam B after the water level rise

从图中可以清晰的看出浸润线通过土石坝的路径,可以近似的确定浸润线的位置。水位上升后,土石坝 A 的渗流路径比没有发生渗流破坏的情况抬高,土石坝 B 中管涌发生在坝体与坝基的接触面处。

2.3 土石坝渗流规律分析

结合土石坝病害数学模型的数值计算分析,土石坝内部地下水渗流基本规律如下:

1)随着水位的升高,坝体孔隙水压力升高,坝体内的渗流面扩大则坝体渗漏量也会扩大。蓄水期引起土石坝变形的主要因素有作用于心墙的水压力、水对上游堆石体的浮托力,堆石体浸水后引起的湿化变形等。

2)由于坝体内部水力条件的改变,坝体内应力、应变将会重新进行调整。当水面升高后,坝体与坝基土石料的孔隙基本被水填满,坝体和坝基的渗流没有如计算假定那样完全进入排水体,而是部分由坝体或接触面渗出,或者部分乃至全部从破裂处排走,使得计算求得的浸润线明显抬高。

3)粗颗粒土层在地表水的长期作用下,在水库库底浅层范围内形成了浅层地下水,其下形成了深层地下水。浅层地下水与水库地表水之间存在密切的水力联系,并主要接受地表水入渗补给,地下水动态与地表水基本一致,地下水的排泄方式主要为垂向渗流,因此在不同的深度范围内存在明显的垂向水头损失。深层地下水主要接受浅层地下水的渗流补给,以侧向径流排泄为主,由渗流路径图 8 图 9 可以看出。

3 结 论

本文基于孔隙介质流-固耦合理论,利用 FLAC3D 建立的弹塑性土石坝模型,对病害土石坝进行渗流分析,找寻土石坝渗流规律。结果表明:

1)采用 FLAC3D 有限元法的渗流计算分析模块进行土石坝渗流计算,能够研究了解浸润线位置计算问题;了解土石坝内的渗透路径,通过浸润线的确定可以用于计算分析土石坝的防渗设计和稳定安全情况。

2)随着水位的升高,坝体孔隙水压力升高,坝体内的渗流面扩大则坝体渗漏量也会增大。由于坝体内部水力条件的改变,坝体内应力、应变将会重新进行调整。

3)关于土石坝渗漏机理,无论管涌或流土破坏,渗流都是首先由出口带出颗粒然后逐步向上游发展,直至全部破坏。同时这也说明,渗流出口渗透稳定的控制是渗流安全控制的关键因素。

(下转第 799 页)

ment of Li-ion battery with phase change material for electric scooters: experimental validation [J]. Journal of Power Sources, 2005, 142 (1/2): 345–353

[ 5 ] 楼英莺, 王文. 镍氢电池充放电传热过程模拟 [J]. 上海交通大学学报, 2007, 41 (3): 457–460

[ 6 ] Chen S C, Wan C C, Wang Y Y. Thermal analysis of lithium-ion batteries [J]. Journal of Power Sources, 2005, 140 (1): 111–124

[ 7 ] Noboru Sato, Kazuhiko Yagi. Thermal behavior analysis of nickel metal hydride batteries of electric vehicles [J]. JSAE Review, 2000, 21: 208–209

[ 8 ] Ahmad A P. Battery thermal models for hybrid vehicle simulations [J]. Journal of Power Sources, 2002, 11: 377–382

(上接第 740 页)

[ 2 ] 杨有成, 李群, 陈新泽, 等. 对强度折减法若干问题的讨论 [J]. 岩土力学, 2008, 29 (4): 1103–1106

[ 3 ] 张培文, 陈祖煜. 剪胀角对求解边坡稳定的安全系数的影响 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (11): 1757–1760

[ 4 ] 张培文, 陈祖煜. 弹性模量和泊松比对边坡稳定安全系数的影响 [J]. 岩土力学, 2006, 27 (2): 299–303

[ 5 ] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨 [J]. 岩土力学, 2005, 26 (2): 332–336

[ 6 ] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19 (2): 1–7

[ 7 ] 栾茂田, 武亚军, 年延凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用 [J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23 (3): 1–8

[ 8 ] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008, 1–3

[ 9 ] 杨进良. 土力学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004, 205–208

(上接第 744 页)

4) 目前在理论上, 对有关渗透破坏的失效机理研究还没有很成熟的结论. 因此, 有必要对土石坝渗流机理做进一步研究, 除了数值模拟方法外还要采用其他多种方法进行对比研究。

参考文献:

[ 1 ] 张启岳. 土石坝加固技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999

[ 2 ] 毛旭熙. 渗流计算分析与控制 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003

[ 3 ] 顾慰慈. 渗流计算原理及应用 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2000

[ 4 ] 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

[ 5 ] 褚卫江, 徐卫亚, 苏静波. 变形多孔介质流固耦合模型及数值模拟研究 [J]. 工程力学, 2007, 24 (9): 56–64

[ 6 ] 苗丽, 郭雪莽, 王复明. 基于应力场与渗流场耦合的土坝稳定性分析 [J]. 人民黄河, 2007, 29 (9): 75–78

[ 7 ] 王复明, 苗丽, 郭雪莽. 基于流固耦合的大坝渗流特性反演方法研究 [J]. 水力发电学报, 2008, 27 (2): 44–47

[ 8 ] 郑永明. 上张水库心墙砂砾石坝 [M] // 水利水电土石坝工程信息网, 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院. 土石坝技术, 北京: 中国电力出版社, 2006, 118–124

[ 9 ] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009