

文章编号:1671-6833(2009)03-0044-04

# 基于流固耦合理论的土石坝稳定性分析

李宗坤, 王鹏飞, 赵凤遥

(郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 基于多孔介质的渗流特性和土的非线性本构关系, 研究了渗流场与应力场的耦合效应; 根据弹性力学和渗流理论建立流固耦合数学模型及有限元格式; 利用大型有限元分析软件 ABAQUS 对燕山水库土石坝建立非线性耦合模型, 并对其进行流固耦合分析, 计算结果表明: 坝体中渗流与应力的相互作用是不可忽视的, 考虑耦合作用将对土石坝的稳定性产生不利影响。

**关键词:** 流固耦合; ABAQUS; 土石坝; 非线性; 燕山水库

**中图分类号:** TU 411 **文献标识码:** A

## 0 引言

根据国内外大坝失事实例的报道, 大坝破坏多是由于岩土介质中的渗流场和应力场的相互作用引起的; 而通常在大坝设计时没有考虑岩土介质渗流与变形的相互作用。由此可见, 进行大坝工程设计时, 必须动态地考虑大坝及其周围岩土中渗流与变形、应力的相互作用, 而对渗流场与应力场进行耦合分析则是对其相互作用进行定量研究的必由之路。

## 1 耦合原理及基本方程

### 1.1 耦合原理

目前, 对大坝进行渗流场的分析与稳定应力场的分析大多是分开各自进行的, 即在进行渗流场的分析时不考虑坝体以及坝基岩土体的应力-应变关系和应力状态及其改变对渗流场的影响<sup>[1-2]</sup>; 在进行渗流场的计算时, 根据渗流计算结果, 赋予堤身不同区域岩土体不同容重来进行稳定及应力分析。尽管这种方法简单易行且已积累了一定的工程实践经验, 但是没有真实客观地反映渗流场与应力场之间的相互作用、相互影响。

事实上, 渗流场与应力场是相互影响的: 一方面, 渗流场的改变会导致渗流体积力和渗透压力的改变, 使作用在坝体上的外荷载发生变化, 从而引起坝体应力场的重新分布; 另一方面, 应力场的

改变, 会引起坝体体积应变的改变, 使坝体内各部分的孔隙率发生改变, 渗透系数也随之变化, 从而改变坝体渗流场的分布; 两者的这种相互作用结果, 会使坝体达到一种双场的耦合平衡状态, 形成渗流场影响下的稳定应力场和应力场影响下的稳定渗流场。

### 1.2 耦合模型的基本微分方程<sup>[3]</sup>

固相材料的应力平衡可以由虚功原理表示, 某体积域在  $t$  时刻当前构形的虚功方程为:

$$\int_V \sigma \cdot \delta \varepsilon dV = \int_S f_s \cdot \delta v dS + \int_V f \cdot \delta v dV + \int_V s n \rho_f g \cdot \delta v dV \quad (1)$$

式中:  $\delta \varepsilon$  为虚应变;  $\sigma$  为柯西有效应力;  $\delta v$  称为虚位移;  $f_s$  为单位面积上的面力;  $f$  为单位体积上的体积力;  $s$  为土体饱和度;  $n$  为土体孔隙率;  $\rho_f$  为流体的参照密度。

采用位移有限元法, 用拉格朗日公式将虚功方程离散化得到固相材料有限元网格, 同时流体可以流经这些网格。

流体的连续性方程可以由质量守恒原理表示, 在某时间增量内流入的流体流量等于流体的增加速率:

$$\frac{d}{dt} \left( \int_V \frac{\rho_f}{\rho_f^0} s n dv \right) = - \int_S \frac{\rho_f}{\rho_f^0} s n \cdot \nu_r dS \quad (2)$$

式中:  $\nu_r$  为流体的平均流速;  $n$  为边界  $S$  的外法线;  $\rho_f^0$  为流体的参照密度。

收稿日期: 2009-02-04; 修订日期: 2009-04-20

作者简介: 李宗坤(1961-), 男, 河南郑州人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事大坝安全性评价和土工结构计算分析工作。E-mail: lizongkun@zzu.edu.cn

连续方程采用反向欧拉近似法进行时间积分,用有限单元离散时,基本未知量为孔隙水压力。

### 1.3 耦合模型的有限元格式

采用 Galerkin 有限元格式,将节点位移和孔隙水压力作为节点自由度进行空间离散,则力学平衡方程及渗流方程可写成如下矩阵形式。

平衡方程:

$$[K]\{\Delta\bar{\delta}\} - [L]\{\Delta\bar{p}\} = \{F\} - \{I\} \quad (3)$$

式中:  $[K]$  为通常的刚度矩阵;  $\{\Delta\bar{\delta}\}$  为位移增量;  $[L]$  为单元节点孔隙压力所对应的节点力;  $\{\Delta\bar{p}\}$  为孔隙水压力增量;  $\{F\}$  为节点外荷载;  $\{I\}$  为增量迭代过程中上一增量步中的不平衡力。

渗流方程:

$$[\hat{B}]^T\{\bar{v}\} + [\hat{H}]\{\bar{p}\} = \{Q\} \quad (4)$$

式中:  $[\hat{B}]$  为节点位移所对应的体积改变量;  $\{\bar{v}\}$  为  $\{\hat{\delta}\}$  对时间的导数;  $[\hat{H}]$  为渗透矩阵;  $\{\bar{p}\}$  为孔隙水压力;  $\{Q\}$  为节点流量。

为直接求解耦合方程,引入时间积分对渗流方程变形,可得到流固耦合方程组为

$$\begin{cases} [K]\{\Delta\bar{\delta}\} - [L]\{\Delta\bar{p}\} = \{F\} - \{I\} \\ -[B]^T\{\Delta\bar{\delta}\} - \Delta t[H]\{\Delta\bar{p}\} = \{R\} \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\{R\} = \Delta t\{\{Q\}_{i+\Delta t} + [\hat{B}]^T\{\bar{v}\}_{i+\Delta t} + [\hat{H}]^T\{\bar{p}\}_{i+\Delta t}\} \quad (6)$$

在渗流—应力场耦合求解过程中,在一个时间步长  $\Delta t$  内,方程形成了迭代求解基础,它还需满足位移边界条件和渗流边界条件。

## 2 渗透系数随应力场的改变

根据土体的变形和渗透特性,当应力场在渗透力的作用下发生改变时,土体将产生相应的体积应变和孔隙比的变化,从而使土体的渗透系数发生变化。

根据试验结果,渗透系数与孔隙率之间存在下述经验关系<sup>[4]</sup>

$$k = k_0 \exp(\alpha e) = k_0 \exp\left(\alpha \frac{n}{1-n}\right) \quad (7)$$

式中:  $k_0$  为初始渗透系数;  $\alpha$  为经验常数;  $e$  为孔隙比;  $n$  为孔隙率。

## 3 ABAQUS 中流固耦合计算的实现

ABAQUS 是国际上最先进的有限元软件之

一,它具有丰富的适合岩土工程分析的本构模型,多达数百种的单元类型,非凡的非线性分析和耦合场分析能力,使它成为岩土工程分析领域的有力武器<sup>[3]</sup>。

在耦合计算中,ABAQUS 以位移和孔隙水压力作为节点自由度直接求解耦合方程,在一般的非线性计算中,ABAQUS 采用 Newton 迭代法来求解方程。利用 ABAQUS 有限元软件实现流固耦合非线性计算时几个关键点:

(1)分析类型及单元选择。在 ABAQUS 中利用 \* SOILS (step→create→soils) 程序求解流固耦合问题,此时必须采用特殊的位移/孔压耦合单元 (Pore Fluid/Stress) 进行分析,这些单元的孔压可取为线性分布,位移可取为一阶或二阶分布函数。

(2)应力场对渗流场影响的实现。耦合计算中,应力场将通过对孔隙率的改变,进而影响渗透系数,对渗流场产生影响。在 ABAQUS 中通过 \* PERMEABILITY (material→create→other→pore fluid→permeability) 选项设置介质的渗透系数,该渗透系数可以为孔隙率的函数。

(3)本构模型的二次开发。ABAQUS 提供了强大的二次开发平台,用户可以对自己需要的本构模型进行二次开发,笔者对岩土工程中广泛采用的邓肯张模型实现了二次开发。

(4)分层施工的模拟。土石坝施工是分层碾压施工,因此在有限元模拟中需体现分层施工的特点。在 ABAQUS 中有专门的功能来实现土石坝的分层碾压施工,即通过 \* model change add/remove 实现。

## 4 燕山水库土石坝稳定性分析

### 4.1 工程概况

燕山水库位于叶县境内的澄河支流干江河上,是淮河流域规划的重点大型防洪水库,水库总库容  $9.68 \times 10^9 \text{ m}^3$ ,水电站装机容量 3 000 kW。大坝坝顶高程为 117.8 m,防浪墙顶高程为 119.0 m,坝长 4 070 m,最大坝高 34.7 m。坝体选用黏土斜墙坝作为燕山水库主坝河槽段代表坝型。大坝典型断面如图 1 所示。

### 4.2 模型参数

笔者采用非线性的 Duncan - Chang 本构模型,计算参数采用试验结果,如下表 1 Duncan - Chang 本构模型计算参数表 1 所示。坝体采用分区施工,施工速度较快,施工分区如图 2 所示。

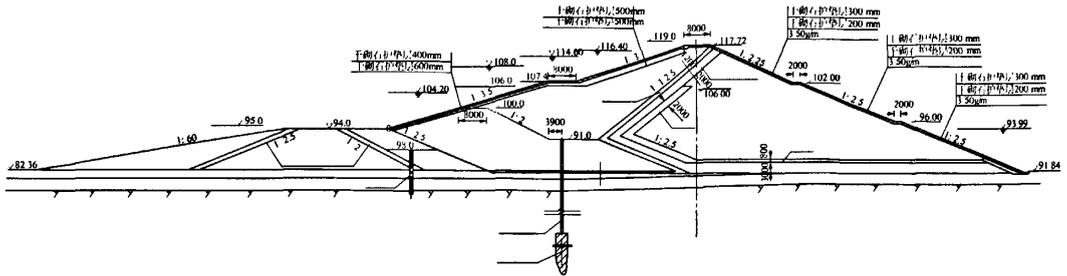


图 1 大坝典型断面图

Fig. 1 The representative section of the dam

表 1 Duncan - Chang 模型参数表

Tab. 1 The parameters of Duncan - Chang model

坝料名称	干密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	渗透系数/ ( $cm \cdot s^{-1}$ )	E-B 模型参数							
			C/ MPa	$\phi$ / ( $^{\circ}$ )	$\Delta\phi$ / ( $^{\circ}$ )	$R_f$	K	n	$K_b$	M
低液限黏土 (防渗体)	1.62	$3.6 \times 10^{-7}$	49.6	25.8	0.0	0.950	169	0.930	47	0.650
全强风化砂 页岩开挖料	2.09	$5.5 \times 10^{-5}$	0.0	42.1	11.1	0.830	250	0.310	55	0.340
黏土质砂 砾岩	1.90	$4.15 \times 10^{-5}$	0.0	30.0	1.5	0.900	180	0.650	120	0.350
14 层弱风化 页岩	2.04	$2.62 \times 10^{-4}$	0.0	29.6	0.8	0.848	330	0.220	32	0.480
Q4 卵石混 合土	1.94	$2.0 \times 10^{-1}$	0.0	45.2	6.5	0.840	320	0.536	120	0.251

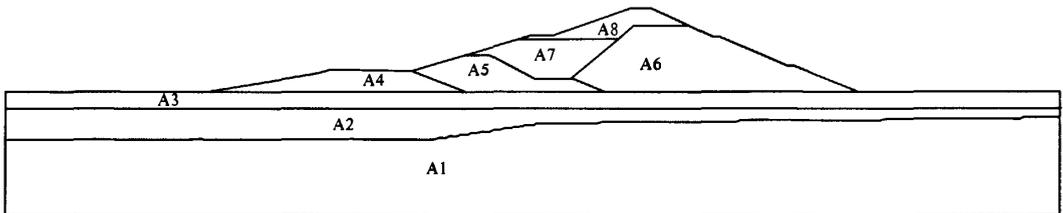


图 2 坝体分区图

Fig. 2 Subarea of the dam body

4.4 计算结果

笔者分别计算了考虑耦合和不考虑耦合作用下土石坝的位移和应力,并进行了比较,结果如下表 2 所示.计算结果表明,考虑耦合后坝体的位移和应力都较耦合前大,故考虑耦合将对大坝的稳定性产生不利影响.

表 2 耦合前后位移应力最大值比较表

Tab. 2 The compare of the maximum of the displacement and stress with and without coupling effect

工况	垂直位移	水平位移	大主应力	小主应力
	/cm	/cm	/MPa	/MPa
耦合前	-30.43	16.51	0.60	0.21
耦合后	-42.37	29.25	0.75	0.31

5 结束语

目前在渗流场和应力场的耦合计算中一般采用渗流场和应力场的相互迭代实现,即所谓的间接耦合,一方面间接耦合不符合土石坝实际的耦合作用,另一方面目前尚没有通用的有限元耦合程序,需自编程序实现,限制了耦合计算的推广.而大型有限元分析软件 ABAQUS 以比奥固结方程为基本方程,以位移和空隙水压力为基本未知量,直接求解方程实现耦合,即直接耦合,既完全符合土石坝实际耦合作用,又能得到推广.

笔者应用大型有限元计算软件 ABAQUS 强大的耦合计算能力,对燕山水库土石坝进行了耦

合计算,计算结果表明:考虑耦合作用将对应力和位移产生较大影响,对土石坝的稳定不利。

### 参考文献:

- [1] 陈晓平,茜平一. 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,2004,54(05):860 - 864.
- [2] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京:水利电力出版社,1991. 306 - 330.
- [3] 王金昌,陈页开. ABAQUS在土木工程中的应用[M]. 杭州:浙江大学出版社,2006:60 - 109.
- [4] 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,(10):4 - 7.
- [5] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007:312 - 366.

## Stability Analysis of Earth - rockfill Dam Based on Fluid - solid Couping

LI Zong - kun, WANG Peng - fei, ZHAO Feng - yao

(School of Water Conservancy and Environment Engineering,Zhengzhou University,Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Based on the seepage characteristics of porous media and nonlinear constitutive relation, the coupling effect of seepage field and stress field is studied. And based on the principle of elasticity and seepage, the fluid - solid coupling mathematic model and finite element format are constructed. According to the earth - rockfill dam of Yanshan reservoir, a mathematical model of nonlinear coupling analysis is established, and the fluid - solid coupling model is analyzed by using general purpose finite element software ABAQUS. The results show that the interaction of seepage and stress in dam can not be ignored. The security of earth - rockfill dam stability will be reduced considering the coupling interaction.

**Key words:** fluid - solid coupling; ABAQUS; earth - rockfill dam; nonlinear; Yanshan reservoir

(上接第21页)

## Experimental Study on Shear Properties of R. C. Beams Strengthened with externally bonded Steel Plate Anchored by Rivets or Screw

XIE Li-li<sup>1</sup>, YU Shu-gang<sup>2</sup>, LIU Li-xin<sup>2</sup>, PENG Chang-ling<sup>2</sup>, WANG Ming-zhi<sup>2</sup>

(1. Multifunctional Design and Research Academy Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Six R. C. beams strengthened with this method and two un-strengthened R. C. beams are tested and analyzed. The shear properties, bearing capacity, development of cracks, rigidity and the strengthened effect of the beams anchored by rivets or screw are discussed and compared with the un-strengthened beam. A design formula is given about R. C. beam which is strengthened with externally bonded steel plate anchored by rivets or screw in this paper, and the results indicate that the formula provides good reliability.

**Key words:** externally bonded steel plate anchored by rivets or screw; shear strength; suggest formula caculated for mular