

基于 ABAQUS 的土石坝稳定渗流期应力应变分析

欧阳君, 林飞, 刘秋英, 钟翔熹

(湖南省水利水电勘测设计研究总院, 湖南 长沙 410007)

摘要: 利用有限元分析软件 ABAQUS 的用户子程序接口, 实现了 Duncan-Chang 本构模型在 ABAQUS 中开发, 对土石坝应力应变进行分析。考虑渗流作用时, 首先采用有限元法计算坝体渗流场, 通过迭代法算出稳定渗流的逸出点和浸润线位置, 并根据水力梯度得到坝体所受的渗透力。然后将渗流分析所确定的渗流力与土体浮力等荷载共同施加在施工期的坝体上, 分析计算土石坝在稳定渗流期的应力应变值。分析结果表明: 采用此方法进行土石坝稳定渗流期的应力应变分析是合理的, 且大大提高了计算效率。

关键词: ABAQUS 软件; Duncan - Chang 模型; 土石坝; 稳定渗流期; 应力应变分析

中图分类号: TV641. 25

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2012)02-0104-05

Stress and strain analysis for earth rock-fill dam during stable seepage period based on ABAQUS

OUYANG Jun, LIN Fei, LIU Qiuying, ZHONG Xiangxi

(Water Conservancy and Hydropower Survey and Design Institute of Hunan Province, Changsha 410007, China)

Abstract: The stress and strain analysis for earth rock-fill Dam has been carried out by the Duncan-Chang constitutive model using the subroutine in the finite element analysis software ABAQUS. When considering the effect of seepage, the position of the exit point and the phreatic surface, as well as the total head are calculated through iteration at first, the seepage forces are then determined according to the hydraulic gradient. In the consequent stability analysis, seepage forces, and buoyancy are loaded on the construction period dam. The stress and strain in stable seepage period for earth rock-fill dam were analyzed. The analysis results demonstrated that this method is reasonable and efficient for dam stress-strain during stable seepage period.

Key words: ABAQUS software; Duncan-Chang model; earth rock-fill dam; stable seepage period; stress-strain analysis

0 引言

土石坝是世界上最古老的坝型之一, 有着悠久的建造历史, 具有众多优点^[1]。在土石坝设计中, 除了稳定问题之外, 还必须分析其的应力和变形以控制土石坝裂缝的发展。但是由于土石料性质极其复杂^[2], 使计算中的应力、位移和实际中的应力、位移相符合尚有一定的难度。随着计算机技术的发展和广泛应用, 各种数值分析方法开始应用到岩土工程中来, 特别是有限单元法因为其边界条件的适应性以及能很好的模拟各种土的本构关系, 使其在岩土工程计算中得到广泛的应用。

ABAQUS 是由美国 HKS 公司开发的非线性有限元分析软件^[3-4], 具有强健的计算功能和广泛模

拟性能, 拥有大量的单元库和求解模型, 但尚无国内岩土工程领域中广泛采用的 Duncan - Chang 本构模型^[5]。这一缺憾使其在土工问题的有限元分析中的应用范围和适用性受到了限制。

本文针对以上不足, 利用 ABAQUS 提供的二次开发平台, 将 Duncan - Chang 模型^[5] 编入 ABAQUS 中, 完成某土石坝在施工期的应力与变形计算。同时利用 ABAQUS 有限元软件进行渗流有限元分析, 计算出坝体在稳定渗流期的各单元结点水头、迭代计算出下游逸出点和浸润线、并根据水力梯度矢量计算出渗透力, 得到坝体在稳定渗流期的应力与变形规律。计算结果表明: 利用 ABAQUS 提供的二次开发用户子程序和其本身具有的强大计算功能可以较方便的实现土石坝的应力和变形计算; 此外, 计算

收稿日期: 2011-11-15; 修回日期: 2011-12-28

作者简介: 欧阳君 (1984-), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要从事土石坝静动力数值分析方面的研究工作。

结果还表明,采用本文方法进行考虑渗流作用下的土石坝应力-应变分析是合理地。

1 渗流分析与等效荷载

1.1 土石坝的渗流作用力

土石坝蓄水后,由于上下游存在较大的水头差,此时,水会在土骨架之间的孔隙中发生流动,产生渗流。渗流不仅对某一接触面作用有压力或浮托力,而且土颗粒本身也受到孔隙水流动的浮力和拖曳力作用,这一对作用力与反作用力,对土体能产生一定的破坏作用。

1.2 渗流有限元计算

针对平面应变问题,在土骨架不可压缩的稳定渗流条件下,由水流的连续条件和达西定律可以得到土石坝的二维渗流方程

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_x \frac{\partial h}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(k_z \frac{\partial h}{\partial z}\right) = 0 \quad (1)$$

式中: k_x 、 k_z 分别为水平向与竖向的渗透系数; h 为总水头。当 $k_x = k_z = k$ 时,上式就简化为 Laplace 方程

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (2)$$

渗流分析是土石坝设计的重要组成部分,在用有限元法求解土石坝的稳定渗流时,渗流自由面的确定一直都是一个难题。由于浸润线的位置事先是未知的,渗流自由面属于混合边界问题,必须同时满足水头边界条件和流量边界条件。较为合理地确定渗流自由面,对正确计算坝体渗流场、分析稳定渗流期的坝体应力应变,具有重要的意义^[7]。

目前为止求解此类问题主要分变动网格法和固定网格法两种^[2]。变网格法是将自由面作为可动边界处理,通过在计算过程中变动网格去适应在迭代过程中变动的自由面,直到计算的自由面稳定为止。固定网格法的核心就是在计算中保持网格不变,采用了扩大的渗流区域和固定边界(通常是全部区域和边界)来求解各种各样的渗流问题。变动网格法在进行渗流分析中,要不断地改变计算网格、工作复杂、计算量大。而目前的大多数固定网格方法中,确定自由面的计算较为复杂,依赖性强。

本文结合以上两种方法的优点,在土石坝的渗流有限元计算中,先划分网格,假设一个下游逸出点,计算出此时的零孔压线,然后再根据零孔压线与下游坝坡交点位置对逸出点进行修正。多次修正之后,直到修正的逸出点和计算出的逸出点位置相同,

计算结束。此时,零孔压线就是浸润线。

2 土石坝静力有限元计算

2.1 Duncan - Chang 双曲线模型

Duncan - Chang 双曲线模型能反映土石料的主要非线性应力-应变关系,物理意义明确、应用方便、参数测定简单且计算精度亦能满足工程需要。虽然它不能反映岩土类材料的剪胀性、压硬性以及变形发展的各项异性,造成计算所得的应力和变形与实际情况存在差异,但仍然在岩土工程中得到较为广泛的应用。本文计算中采用 Duncan - Chang E - B 双曲线模型来描述土的应力-应变关系。

Duncan - Chang E - B 模型中的切线弹性模量和切线体积模量可由下式得出:

$$E_t = \frac{\Delta \sigma_a}{\Delta \varepsilon_a} = E_i (1 - R_f D_s)^2 \quad (3)$$

$$B_t = K_b p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^m \quad (4)$$

式中: $E_t = K p_a (\sigma_3/p_a)^n$, $D_s = \sigma_1 - \sigma_3 / (\sigma_1 - \sigma_3)_f$; E_i 为切线模量; E_i 为初始切线模量; R_f 为破坏比; D_s 为应力水平; p_a 为大气压。 K 为模量数; n 为模量指数; K_b 为体积模量数; m 为材料常数。

坝体填筑料的破坏强度由下式决定:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (5)$$

式中: c 为凝聚力; ϕ 为内摩擦角。考虑到坝料有明显的剪胀特性,当发生卸载时,卸载弹性模量 E_{ur} 大于 E_t 。一般地采用以下公式计算 E_{ur} :

$$E_{ur} = K_{ur} p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a}\right)^n \quad (6)$$

式中: K_{ur} 为卸载模量数。

2.2 ABAQUS 的二次开发技术

ABAQUS 非线性有限元分析软件在材料、几何与接触非线性方面的分析能力方面有较好的适用性,并以高求解效率和高计算精度在工程界和学术界赢得了声誉和信赖,其最新版本将有限元分析与计算机图形学等技术相结合,是一个强大的非线性有限元计算分析工具,广泛的应用在科学研究与工程计算中。

ABAQUS 为广大的用户提供了大量的单元库和求解模型,用户可以利用这些模型处理大多数的问题。并同时提供了 FORTRAN 语言接口方式,使得用户可以利用用户子程序增加单元类型、材料本构关系等,在其所提供的通用分析平台上实现特定问

题的有限元数值仿真计算,以满足用户的个性化分析计算的需求。

ABAQUS 提供的用户子程序中与土的本构模型有关的是子程序是 UMAT。有关在 ABAQUS 中实现 Duncan - Chang 模型子程序的开发过程可以参考文献[8]。

3 算例分析

3.1 计算模型

以某水库大坝为例进行数值计算。大坝为砂砾石坝壳粘土心墙坝,坝顶高程 1 154.60 m,坝顶宽 10.0 m,坝顶长 920.6 m,最大坝高 44.0 m;上游坝坡坡比为 1:2.25,在 高程 1 136.00 m 处设有宽 2.0 m 的马道;下游坝坡坡比为 1:2.75,在 高程 1 135.00 m 处设有宽为 2.0 m 的马道。粘土心墙为不对称心墙,其轴线位于坝轴线上游 1 m 处;心墙顶高程 1 153.40 m,顶宽 6.66 m,最大底宽 38.0 m,最大高度 42.4 m,心墙上、下游侧坡比分别为 1:0.6 和 1:0.2 心墙两侧设反滤层及反滤过渡层。水库正常蓄水位 1 149.6 m,下游为 1 115.0 m,渗流计算考虑坝体为正常运行期稳定渗流情况。

取河床部位最大横断面为计算的典型剖面,进行有限元分析。渗流计算时假定基底为不透水边界,上游水位以下的上游坝坡和下游水位以下的下游坝坡为给定水头边界条件,逸出点(其最终位置靠迭代计算确定)到下游水位之间的下游坝坡为零孔压边界条件。应力—应变计算时基底采用刚性边界,两侧为水平约束,上部自由。大坝典型断面、材料分区见图 1 所示,材料特性见表 1。在计算过程中,为了各个结点和单元能够相互匹配,故在所有的计算中都采用同一套的网格单元,为四节点四边形单元。将大坝划分为 2 560 个节点,2 347 个单元,单元类型为 CPE4,有限元网格见图 2。

3.2 计算工况

计算横断面坝高 44.6 m(图 1),为了反映坝体

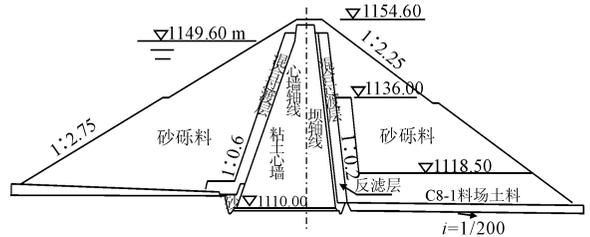


图 1 某粘土心墙坝典型断面示意图(单位:m)

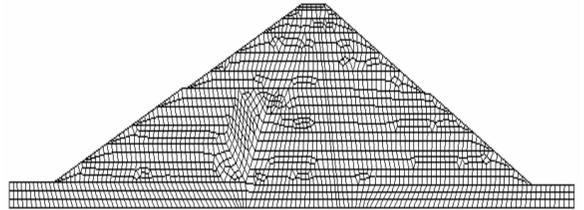


图 2 某粘土心墙坝的有限元及网格剖分

施工填筑时分层逐级加载的特点和土的非线性,采用逐级加载的方式将坝体分 11 层。共施加 13 级填筑荷载和 3 级蓄水荷载,填筑表面按实际施工填筑高程的变化过程来模拟。计算分施工期(坝体自重)和运行期两个工况进行。

采用 Duncan - Chang E - B 模型进行土石坝的静力应力应变计算,相关参数见表 1。另外,利用 ABAQUS 提供的“模型改变”(MODEL CHANGE)功能[3]以实现土石坝施工过程中的分层填筑和蓄水过程中的分级蓄水的模拟。在进行稳定渗流期的应力 - 应变计算时候,渗流的作用通过对浸润线以下的土体施加浮力和渗透力[6]来实现。在这种方法中,渗透力作为结点力施加在施工期坝体单元质心上,浮托力作为体力施加在单元表面,两者共同作用计算出坝体在稳定渗流期的应力和变形。

3.3 成果及分析

3.3.1 浸润线的计算 在稳定渗流期时,计算坝体的应力与变形离不开考虑坝体的渗流作用力,大坝典型断面逸出点计算的迭代过程如表 2 所示,孔隙水压的最终计算结果如图 3。图 3 中,零孔压线即

表 1 某水库大坝 Duncan - Chang E - B 模型参数表(该表应放在“成果及分析”之前介绍) g/cm³, kPa, (°)

材料类型	ρ_d	C	φ	$\Delta\varphi$	R_r	K	n	K_{ur}	K_b	m
心墙土料 C7	1.83	10	18	0	0.75	281	0.97	337	45	0.58
坝壳砂砾料	2.17	0	49.6	4.8	0.67	1000	0.3	1200	460	0.24
过渡料	2.19	0	47.4	3.2	0.61	610	0.54	732	680	0.12
坝基洪积土	1.80	0	20	0	0.97	320	0.74	384	267	0.74
细砂	1.47	59	18	0	0.79	465	0.48	558	388	0.48
坝基砂砾石	2.26	0	52.8	6.5	0.76	1230	0.51	1476	1190	0.11

为浸润线,零孔压线与下游坝坡的交点即为逸出点。
 3.3.2 应力-应变计算结果 各个工况对应的坝体位移、主应力分布见图 3 至图 11,坝体位移、应力最大值见表 3。图中应力压应力为正,垂直位移向上为正,水平位移向下为正。

表 2 浸润线计算过程

迭代步	假定逸出点高程	计算逸出点高程	相对误差
1	1115.0	1118.44	200
2	1116.72	1117.64	43.4
3	1117.12	1117.12	0.0

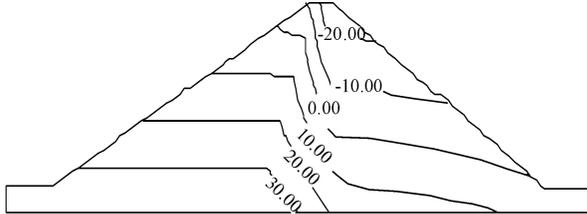


图 3 坝体孔隙水压力分布图(单位:m)

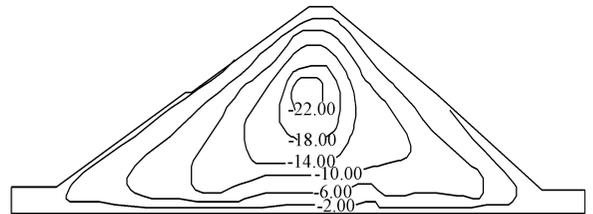


图 4 坝体施工期垂直位移分布图(单位:cm)

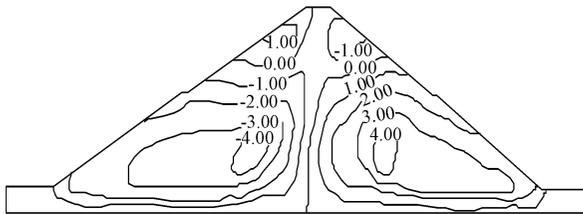


图 5 坝体施工期水平位移分布图(单位:cm)

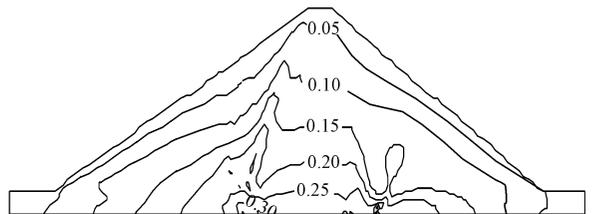


图 6 坝体施工期最小主应力分布图(单位:MPa)

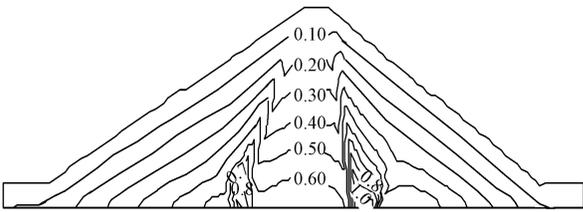


图 7 坝体施工期最大主应力分布图(单位:MPa)

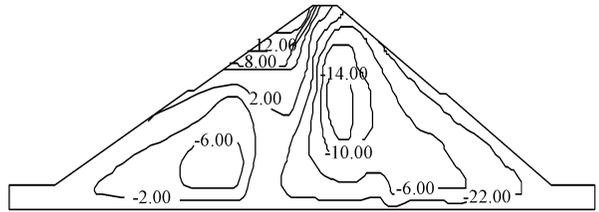


图 8 坝体运行期垂直位移分布图(单位:cm)

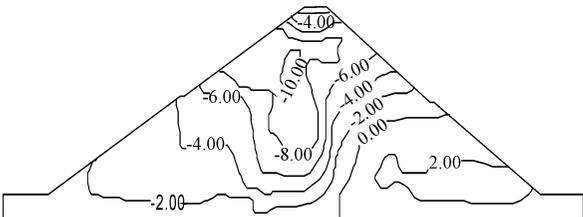


图 9 坝体运行期水平位移分布图(单位:cm)

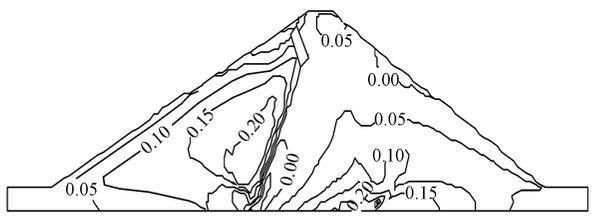


图 10 坝体运行期最小主应力分布图(单位:MPa)

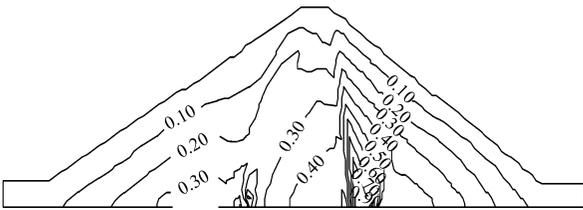


图 11 坝体运行期最大主应力分布图(单位:MPa)

表 3 各工况下应力、应变计算成果 cm, MPa

	最大水平位移		最大垂直位移	坝体小主应力最大值	坝体大主应力最大值
	上游	下游			
竣工期	-4.6	4.5	-22.7	0.352	1.383
运行期	-10.6	2.7	-20.4	0.299	1.091

3.3.3 计算结果分析 竣工期坝体的垂直位移及水平位移基本沿坝轴线对称分布。坝体在自重作用下产生最大垂直位移为 22.7 cm,位于坝体心墙中心部位(约 1/2 ~ 2/3 坝高处)(图 4),为坝高的 0.5%。上游坡面向上游最大水平位移为 4.6 cm、下游坡面向下游最大水平位移为 4.5 cm(图 5)。坝体小主应力最大值为 0.352 MPa,出现在心墙与上游坝壳相交的基岩部位(图 6);大主应力最大值为 1.383 MPa,出现在心墙与下游坝壳相交的基岩部位(图 7)。从图中可以看出主应力值随坝体断面高程增加而减小,自重效应明显;心墙存在明显的拱效应,但是最大主应力在同一高程上,心墙上的应力值

比两侧反滤料上的大,心墙抗水力劈裂较安全运行期和竣工期相比,坝体的垂直位移出现了向下游倾斜分布,最大值也减小为 20.4 cm(图 8),比竣工期减少了 10.1%,减少幅度合理,产生最大沉降的水平位置明显偏向下游,垂直位移变化不大,仍然在坝高 1/2 ~ 2/3 处,说明坝体受浮力作用对垂直位移的影响颇为明显。

运行期的水平位移相比于竣工期,位移分布变化显著(图 9),坝体上游坡面向上游最大位移为 10.6 cm,下游坡面向下游最大位移为 2.7 cm,均出现在坝体内部。渗流对坝体水平位移有一定影响,上、下游最大水平位移的发生部位都有变化,上游面最大水平位移出现位置抬高到坝高 2/3 左右处,下游面最大水平位移则下移到坝高 1/5 左右处。坝体 1/3 以上部位的位移明显,坝顶部的水平位移为 3 ~ 4 cm。

上、下游水平位移,分别比竣工期增加 5.0 cm 和减少 1.8 cm,均出现在坝体内部,范围与量级比施工期小,变形规律合理。运行期坝体内的最大主应力和最小主应力分布分别示于图 10 和图 11,相比于竣工期,变化很明显,且应力值都有所减少。坝体沿浸润线下游部分土体的小主应力受浮托力和渗透力作用明显,在下游坝面约 1/3 坝高处有上抬趋势。坝体内小主应力值普遍减少,断面上小主应力最大值为 0.299 MPa,比竣工期小主应力减少约 0.051 MPa,大主应力最大值为 1.091 MPa,随坝体断面高程增加而减小,渗透力和浮托力的影响对大主应力的影响不大。计算结果符合一般应力和变形规律,为具体工程的设计和优化提供参考。

4 结 语

本文计算分析结果表明:

(1)经过二次开发,利用 ABAQUS 进行土石坝的应力-应变计算是合理可靠地。(2)采用本文方法在求解土石坝稳定渗流时,只需要通过几次迭代就能得到较好结果。原理可靠,实现方便,同时简化了计算工作量,可用于考虑复杂土工边值问题的渗流稳定评价分析。(3)采用本文方法计算得到的坝体应力与变形分布规律处于合理范围内,计算成果可信,可以为土石坝的断面优化分区设计等提供参考。

参考文献:

- [1] 张光斗,王光纶. 水工建筑物[M]. 北京:北京水利电力出版社,1994.
- [2] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [3] 庄苗,张帆,岑松,等. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [4] ABAQUS. 2002 ABAQUS User's Conference Papers (US) [C]//. Hibbitte Karlsson & Sorenson INC,2002;115-126.
- [5] Duncan J M, Zhang CY. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1970,96 (SM5):1629-1653.
- [6] 钱家欢,殷宗泽,土工计算原理[M]. 北京:中国水利水电出版社,1980.
- [7] 徐千军,张建红. 确定稳定渗流自由面位置的一种简便方法[J]. 水动力学研究与进展,1999,17(12):418-423.
- [8] 徐远杰,王光琪. 在 ABAQUS 中开发实现 Duncan-Chang 本构模型[J]. 岩土力学,2004,25(7):1032-1036.