

基于 ANSYS 的土石坝应力变形有限元分析

吴业飞¹, 马海霞²

(国电迪庆香格里拉发电有限责任公司, 云南 迪庆 674402)

摘要: 因自身无邓肯-张模型,使得应用广泛的有限元软件 ANSYS 在土工有限元分析中的应用范围和适用性受到限制。本文利用 ANSYS 提供的 APDL 参数化设计语言进行二次开发,编制相应的程序建立土体的邓肯-张模型,以模拟土体的实际特性,并对一均质坝算例进行验证。计算结果表明所编制的程序满足土石坝有限元计算的数值要求,较好的反映了土石坝的应力、变形规律。

关键词: 土石坝; ANSYS; APDL 语言; 邓肯-张模型; 有限元分析

中图分类号: TV641.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2010)04-0209-04

Finite Element Analysis on Stress Deformation of Earth-rock Dam Based on ANSYS

WU Ye-fei, MA Hai-xia

(Guodian Diqing Xianggelila Power Generation Co., Ltd., Diqing, Yunnan 674402, China)

Abstract: In geotechnical finite element analysis, there are many restrictions in the application scope and applicability of the finite element software ANSYS which is without Duncan-Chang model. In order to simulate the practical characteristic of earth mass, Duncan-Chang model is formed on the basis of second development of APDL parameter design language which is provided by ANSYS, and the calculation example on an isotropic dam is verified here. The results indicate that the compiled program could fulfill the requirements of the numerical calculation and the laws of stress and displacement of the earth-rock dam.

Keywords: earth-rock dam; ANSYS; APDL language; Duncan-Chang model; finite element analysis

土石坝是历史最悠久的坝型。由于它施工简单、造价便宜且能适应复杂地质条件等优点,被广泛应用于各种水利工程中。然而随着土石坝高度的不断增加,仅限于渗流和稳定计算已经不能满足现代土石坝设计的要求,应力应变分析也成为土石坝设计的必要步骤。对土石坝应力和变形分析最有效、最准确的方法是有限元法。

ANSYS 软件是一个功能强大的大型通用有限元分析软件,融结构、热、流体、电磁、声学于一体,广泛应用于核工业、航空航天、机械制造、能源、土木工程地矿、水利等多个领域^[1]。它包括金属、混凝土等多种材料的本构模型,但尚无土工数值分析中广泛应用的 Duncan-Chang 模型,这一遗憾无疑使 ANSYS 软件在土工有限元分析中的应用范围和适用性受到限制。本文通过 APDL 参数化设计语言对 ANSYS 进行二次开发,在 ANSYS 中加入了目前广泛应用于土体、堆石体的广义邓肯-张 E-B 模型作为土石坝有限元分析的本构模型^[2],以模拟土体的实际特性,并采用中点增量法^[3]进行分析计算,取得了较为满意的结果。

1 广义邓肯-张 E-B 模型

试验表明土石坝的应力-应变曲线形状都受中主应力 σ_2 的影响。但由于邓肯 E-B 模型是针对二维问题提出的,没有考虑中主应力 σ_2 ,所算得的变形值偏大。为了推广到三维问题,河海大学顾颀臣教授对邓肯-张 E-B 模型进行了修正,提出用广义应力 p 代替 σ_3 ,以 q 代替 $(\sigma_1 - \sigma_3)$,以 q_f 代

替 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$,从而推广到三维问题,计算成果较好^[4,5]。主要公式如下:

$$p = \frac{(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)}{3} \quad (1)$$

$$q = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

用三维问题的摩尔-库仑准则的抗剪强度 q_f 代替 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$,即:

$$q_f = \frac{3p \sin \alpha + 3c \cos \alpha}{\sqrt{3} \cos \alpha + \sin \alpha} \quad (3)$$

式中 α 为洛德(Lode)应力角,按下式计算:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(-\frac{1}{\sqrt{3}} \mu \right) \quad (4)$$

其中, $\mu = 1 - \frac{2(\sigma_2 - \sigma_3)}{\sigma_1 - \sigma_3}$ 。

通过以上修正,邓肯-张 E-B 模型可改写为:

$$E_t = K P_a \left(\frac{p}{P_a} \right)^n (1 - R_f \times \frac{q}{q_f})^2 \quad (5)$$

式中: K 、 n 、 R_f 为试验参数; P_a 为大气压; p 和 q 为广义应力。

$$B_t = K_b P_a \left(\frac{p}{P_a} \right)^m \quad (6)$$

$$= 1 - \lg \left(\frac{p}{P_a} \right) \quad (7)$$

卸载与再加载的条件为:

(1) $S_i < 0.95 S_{i-1}$, $S_i = q/q_f$ 为应力水平;

(2) $q_i < 0.95 q_{i-1}$

回弹模量为: $E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{p}{P_a} \right)^{n_{ur}}$ (8)

2 基于 ANSYS - APDL 语言的二次开发

APDL 即 ANSYS 参数化设计语言 (ANSYS Parametric Design Language) 是一种类似 FORTRAN 的解释性语言, 可用于自动完成一些通用性强的任务, 也可以用于根据参数建立模型^[6]。APDL 还包括其他许多特性, 诸如宏、do 循环、if - then - else 分支、向量、矩阵操作等。APDL 不仅是设计优化和自适应网格划分等经典特性的实现基础, 而且它也为日常分析提供了很多便利。

本文根据土石坝有限的计算原理和分析方法, 在 ANSYS 中利用 APDL 技术成功的实现了土石坝非线性有限元分析。具体步骤:

(1) 根据加载级数分层建模, 从而模拟逐级加载的工程, 并对不同材料的单元的 EX, NUXY, DENS 分别赋值^[7]。

(2) 编写自动提取计算结果的宏命令, 得到每次计算的位移和应力结果, 并保存输出到文本文件, 然后根据邓肯 E - B 模型, 编写相应的宏命令, 计算每一个单元的弹性常数 E_t 、 ν_t 、 B_t , 并动态修改单元弹性常数。

程序计算框架图见图 1。

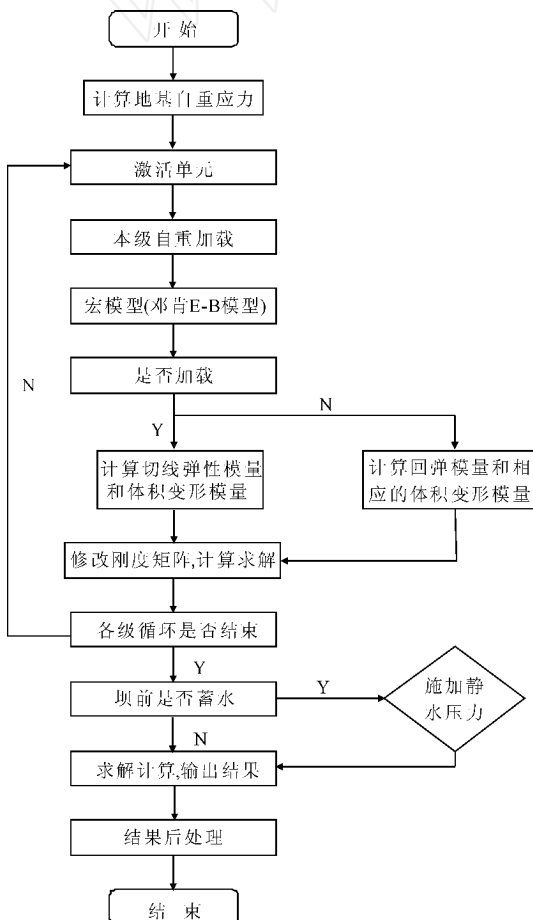


图1 程序流程图

采用 APDL 语言编写广义邓肯 - 张 E - B 模型的命令流

如下:

! Duncan - Chang E - B Model

! Symbols: P_a 为大气压力; c 为材料凝聚力; $Fail$ 为内摩擦角; Fai 为洛德 (Lode) 应力角; Q_f 为破坏强度; S 为应力水平; p 为球应力; q 为广义剪应力。

* create ,Duncan - Chang ! Creat Macro file

* afun ,deg ! Unit of angle

* set ,Pa ,1e5 ! set $P_a = 1e5$

* set ,P1 , - ArrS3 (num) ! 注意: 岩土工程中为拉负

压正

* set ,P2 , - ArrS2 (num)

* set ,P3 , - ArrS1 (num)

$p = (p1 + p2 + p3) / 3$

$q = \sqrt{((P1 - P2) * * 2 + (P2 - P3) * * 2 + (P3 - P1) * * 2) / 3}$

* IF ,P3 ,LT,0.1 * P_a , then

$P3 = 0.1 * P_a$

* end if

$Fai = ATAN(((- 1) / \sqrt{3})) * (1 - (2 * (P2 - P3) / (P1 - P3))))$

$Fail = Fail0 - FFail * \log_{10}(p / P_a)$

$Q_f = (3 * c * \cos(Fail) + 3 * p * \sin(Fail)) / (\sqrt{3} * \cos(Fail) + \sin(Fail) * \sin(Fail))$

$S = q / Q_f$

* if ,S ,GT,0.95 ,then

$S = 0.95$

* end if

* if , Q_f _ max (num) , GT ,Q ,and , S _ max (num) , GT ,S ,then

$E_t = K_{ur} * P_a * (p / P_a) * * n_{ur}$

* elseif , Q_f _ max (num) , GT ,Q ,and , S _ max (num) , LE ,S , then

$E_t = k * P_a * (p / P_a) * * n$

$E_t = E_t * (1 - R_f * S) * * 2$

S _ max (num) = S

* elseif , Q_f _ max (num) , LE ,P1 - P3 ,and , S _ max (num) , GT ,S ,then

$E_t = k * P_a * (p / P_a) * * n$

$E_t = E_t * (1 - R_f * S) * * 2$

Q_f _ max (num) = q

* elseif , Q_f _ max (num) , LE ,P1 - P3 ,and , S _ max (num) , LE ,S ,then

$E_t = k * P_a * (p / P_a) * * n$

$E_t = E_t * (1 - R_f * S) * * 2$

Q_f _ max (num) = q

S _ max (num) = S

* end if

$B = K_b * P_a * (p / P_a) * * m$

$Mu = (3 * B - E_t) / (6 * B)$

* if ,Mu ,GE,0.49 ,then

```
Mu = 0. 49
* elseif ,Mu ,LT,0. 01 ,then
Mu = 0. 01
* end if
M_ et (num) = Et
M_ u (num) = Mu
mp ,ex ,num ,Et
mp ,nuxy ,num ,Mu
* end
```

3 算 例

所选模型为一均质土坝,如图 2 所示。坝高 100 m,坝坡 1:1.6,坝顶宽度为 20 m,堆石料密度为 2.6 t/m³,材料模型采

用广义邓肯—张 $E-B$ 模型,材料参数列于表 1,其中初始弹性模量取为 200 MPa,初始泊松比取为 0.33。计算过程中只考虑重力,不考虑时间因素及施工工艺的影响。计算时仿真模拟坝体填筑施工,共分为 10 层加载,为等高度增加,全断面填筑,保存每 1 层的计算结果,选择单元绘制应力位移等值线图。算例采用平面应变单元进行分析,单元剖分采用八节点四边形单元,整个断面总共划分 158 个单元,183 个节点,单元剖分如图 2 所示^[6,8]。

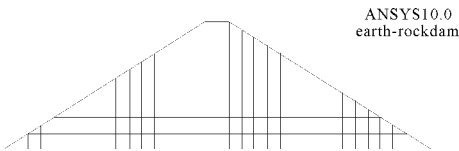


图 2 均质坝网格剖分图

表 1 邓肯张 $E-B$ 模型参数

参数类别	c/kPa	K	K_b	R_f	$\varphi/(\circ)$	$\psi/(\circ)$	m	n	K_{ur}	n_{ur}
参数值	185	1000	891	0.746	48	9.93	0.32	0.3	1900	0.21

注: c 为凝聚力(kPa); φ 为内摩擦角($^\circ$); R_f 为破坏比; m 为体积模量指数; n 为切线模量指数; K_b 为体积模量指数; K_{ur} 为再加载模量数; n_{ur} 为再加载模量指数。

竣工期计算结果见图 3~图 7:在自重荷载作用下,坝体发生垂直沉降和水平位移,由于坝体为对称结构,坝体沉降和水平位移也成对称分布。坝体沉降最大值发生在坝体中部偏上 1/2 坝高处,为 38.5 cm,大约占坝高的 0.38%,方向竖直向下;水平位移则对称发生在坝体的中下部,上下游坝坡面附近,坝体向上下游的最大值均为 13.2 cm,符合模拟施工过程逐层加载的计算规律。

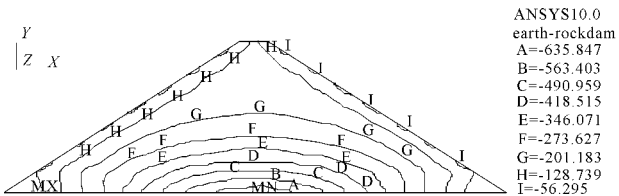


图 6 小主应力 σ_3 等值线图(单位:10 kPa)

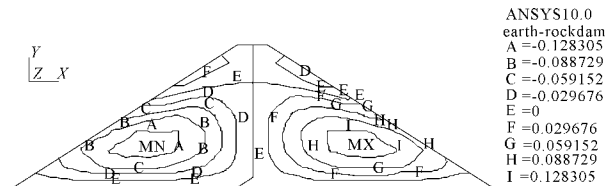


图 3 水平位移等值线图(单位:m)

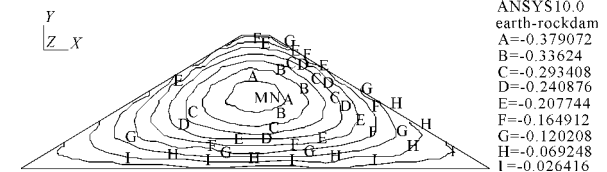


图 4 坝体垂直位移等值线图(单位:m)

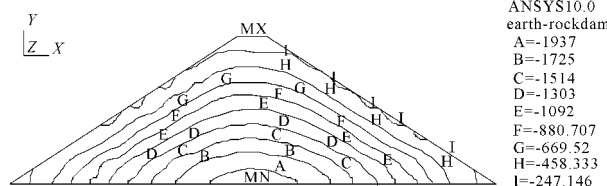


图 5 大主应力 σ_1 等值线图(单位:10 kPa)

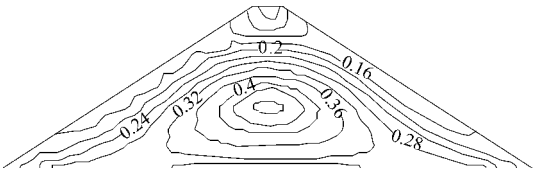


图 7 应力水平分布图

在自重作用下,大主应力和小主应力也呈对称分布,大主应力最大值为 2.04 MPa,发生在坝底底部中央,并且随着高程的增加,大主应力逐渐减小,小主应力也呈现同样的分布规律,其最大值为 0.672 MPa,也发生在坝体底部中央位置。应力水平等值线图见图 7 所示,应力水平最大值为 0.52,发生在坝体中部,并且越靠近坝体表面,应力水平值越小。

综上所述,均质土坝在自重的作用下,应力位移分布规律明显,符合土石坝一般的应力变形规律,位移值的大小占坝高的 0.38%,在土石坝的沉降控制范围之内位移和应力计算结果符合一般规律,计算结果可靠。

4 结 语

本文成功地加入了广义邓肯—张 $E-B$ 模型,实现了对坝体进行分层施工的功能,并对其进行了验证。这说明在

ANSYS 中添加 Duncan - Chang 本构模型是可行的。以此开发工作为基础,采用增量法模拟土石坝的填筑及蓄水过程,利用 ANSYS 所提供的强大非线性有限元分析环境较好的反映坝体位移、应力分布规律,有望完成大型复杂土工数值分析问题。

参考文献:

- [1] 尤红兵,孙建恒,刘聪慧. ANSYS 二次开发及其在土石坝有限元分析中的应用[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25 (增刊): 279-282.
- [2] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1998: 510-514.
- [3] 戴跃华,薛继乐. ANSYS 在土石坝有限元计算中的应用[J]. 水

利与建筑工程学报, 2007, 5 (4): 74-76, 86.

- [4] 朱百里,沈珠江. 计算土力学[M]. 上海:上海科技出版社, 1990: 18-25.
- [5] 钱家欢,殷宗泽主编. 土工原理与计算(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1996: 38-42.
- [6] 龚曙光,谢桂兰. ANSYS 操作命令与参数化编程[M]. 北京:机械工业出版社, 2004: 76-205.
- [7] 朱彬,谷拴成. ANSYS 的二次开发及在土工分析中的应用[J]. 土工基础, 2005, 19 (5): 61-63.
- [8] 郝文华. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2005: 258-272.

(上接第 186 页)

阿尔塔什水利枢纽工程勘测工作中利用钻孔高质量的取芯结合充分的物探工作,对河床深厚覆盖层的研究方面取得了丰富的成果。

(2) 据 18 个河床钻孔揭露和物探测试成果,坝址区河床基岩面总体由左侧向右侧倾斜,覆盖层厚度由左侧向右侧增加,一般厚约 20 m ~ 78 m,河床深槽位于河床右侧,深槽部位覆盖层厚 78 m ~ 100 m,槽底宽 20 m ~ 60 m,目前钻孔揭露的最大厚度为 93.9 m,属深厚覆盖层。深槽形态在横剖面上变化较大,呈左缓右陡不对称的“U”形。

(3) 根据覆盖层颗粒组成、胶结程度、测年资料以及物理力学性质和工程特性的差异,河床覆盖层总体划分为二大层:上层为全新统冲积含漂石砂卵石层(Q_4^{al}),定为 Ⅱ 岩组;下层为中更新统冲积砂卵石层(Q_{2-3}^{al}),定为 Ⅲ 岩组。其分界面以河床普遍分布的一层似砾岩的砂卵石胶结层为标准。

岩组:分布于现代河床覆盖层上部,组成物以漂石、卵石为主,局部夹砂层透镜体。该层骨架颗粒呈交错排列,大部分接触,从开挖断面上取出大颗粒,能保持颗粒凹面形状,开挖坑壁可保持稳定,坍塌现象少见。 > 5 mm 的颗粒含量约 75.2%,砂含量约 22.6%,天然干密度平均值为 2.24 g/cm^3 ,相对密度平均值为 0.85,呈密实状态。

岩组:分布于现代河床覆盖层下部,组成物以砂卵石为主,磨圆度较差,夹多层细粒充填的卵石层(架空层),底部局部夹杂崩坡积块石和孤石,块石(孤石)成份以白云岩、白云质灰岩和灰岩为主,次棱角状,块径一般 $0.3 \text{ m} \sim 1.5 \text{ m}$,个别达 $5 \text{ m} \sim 19 \text{ m}$ (ZK5 钻孔)。该层厚度 $80 \text{ m} \sim 95 \text{ m}$ 。

该层在堆积过程中经历过较长时间的超固结压密作用,剖面上局部形成薄层钙质胶结层,据钻孔揭露及物探测试,该层顶板大部分胶结较好,似砾岩,在平面上连续分布,厚度 $0.4 \text{ m} \sim 0.6 \text{ m}$,其余胶结层以弱~微胶结为主,厚度 $0.2 \text{ m} \sim 0.4 \text{ m}$ 。另外,该层夹有多层细粒充填的卵石层(架空层),组成物主要为砾径 $2 \text{ cm} \sim 5 \text{ cm}$ 的砾石,基本无细粒充

填,钻进中遇该层钻孔出现漏浆或不返浆现象,厚度 $0.15 \text{ m} \sim 2.5 \text{ m}$ 不等。

(4) 表层探坑和个别钻孔揭露河床砂卵石层有砂层分布,从物探、钻孔及探坑揭露的情况分析,河床砂卵石层中砂层厚度不大,一般 $0.3 \text{ m} \sim 0.5 \text{ m}$,个别达 2.0 m ,连续性差,呈透镜体状(鸡窝状)分布,对坝基砂卵石的物理力学性质影响不大。据试验成果,砂层干密度在 $1.5 \text{ g/cm}^3 \sim 1.78 \text{ g/cm}^3$ 之间,相对密度为 $0.68 \sim 0.89$,结构密实。

(5) 鉴于目前已有的地质、钻孔、物探和试验的资料,河床 $4 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$ 以下的覆盖层剪切波速已经大于 500 m/s ,相对密度为 $0.80 \sim 0.85$,为密实的地层,承载力达到 $0.5 \text{ MPa} \sim 0.8 \text{ MPa}$,满足目前土石坝的设计要求。

(6) 河床砂卵石层不存在地震液化问题,渗透破坏为管涌型,允许渗透比降为 0.1,需做好防渗处理。

(7) 与国内和国外已有的大型水利工程相比,阿尔塔什水利枢纽工程在深厚覆盖层上建坝国内外均已有成功的经验可供借鉴,在阿尔塔什水利枢纽工程的深厚覆盖层上修建高坝大库是可行的。

参考文献:

- [1] 牟兴华. 冶勒水电站深厚覆盖层帷幕灌浆试验工艺[J]. 四川水力发电, 1998, 17 (4): 88-90, 93.
- [2] SL237 - 1999. 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
- [3] SL203 - 97. 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1998.
- [4] GB50487 - 2008. 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2009.
- [5] 阮元成,陈宁. 察汗乌苏水电站坝基覆盖层土料残余变形特性[J]. 水力发电, 2003, 29 (6): 19-28.
- [6] 覃新闻,杨智睿,路文波,等. 新疆下坂地水库地基深厚覆盖层防渗形式的讨论分析[J]. 陕西水力发电, 2001, 17 (3): 36-38.
- [7] 葛勇,周益民,梁会圃. 小浪底大坝坝基砂卵石层渗透稳定性研究[J]. 人民黄河, 2006, 28 (12): 64-65, 68.