

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.01.013

基于 ABAQUS 平台的邓肯-张 $E-B$ 和 $E-\nu$ 模型程序开发

江守燕¹, 谢庆明², 杜成斌¹

(1. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098; 2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021)

摘要: 基于 ABAQUS 平台并利用 UMAT 子程序接口开发了邓肯-张 $E-B$ 和 $E-\nu$ 模型程序, 开发的程序可在一个模型中包含邓肯-张 $E-B$ 和 $E-\nu$ 2 种不同的本构模型. 应用该程序对一已建混凝土心墙堆石坝进行了变形及稳定的数值计算, 并与现场实测结果进行了比较. 结果表明, 数值计算与现场实测的变形变化趋势较为一致. 该结果验证了所研制程序的正确性, 说明该程序可以用于分析实际工程问题.

关键词: 堆石坝; 心墙; 邓肯-张模型程序; ABAQUS 平台

中图分类号: TU43; TP319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)01-0061-05

ABAQUS 是国际上最先进的大型通用有限元软件之一, 特别适用于非线性问题的求解^[1-2], 其分析功能具有世界先进水平, 在水利、土木、机械、化工、材料、航空、船舶、汽车、电气工业设计中得到了广泛的应用. ABAQUS 具有丰富的单元库和材料库, 能够模拟各种材料的受力和变形行为, 特别提供了 UMAT 子程序接口, 通过该子程序用户可以自定义适合研究需要的材料本构, 而不局限于 ABAQUS 内部提供的材料库, 这为研究者提供了广阔的开发平台^[3-5]. ABAQUS 软件内部材料库包含了众多的岩土工程材料本构, 但尚缺少国内外土工数值分析中广泛采用的邓肯-张本构模型^[6]. 对于邓肯-张模型在 ABAQUS 中的二次开发, 徐远杰等^[3, 7-9]进行了一些研究, 但其开发的 UMAT 子程序仅能适用于邓肯-张 $E-B$ 或 $E-\nu$ 模型, 却不能在一个程序中同时包含这 2 种本构模型. 笔者根据实际工程需要, 编写了邓肯-张 $E-B$ 和 $E-\nu$ 模型的子程序, 开发的程序可以在一个模型中同时包含邓肯-张 $E-B$ 和 $E-\nu$ 2 种不同的本构模型.

1 邓肯-张本构模型

关于邓肯-张 $E-B$ 和 $E-\nu$ 本构模型以及各物理量的意义, 文献[10-12]已有详细介绍, 这里仅介绍与 UMAT 用户子程序密切相关的材料模型的雅可比矩阵, 即 $\partial \Delta \sigma / \partial \Delta \epsilon$. UMAT 中用到材料模型的雅可比矩阵, 即为弹性矩阵 D . 对于二维问题, 有

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & 0 \\ d_{21} & d_{22} & 0 \\ 0 & 0 & d_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

对于三维问题, 有

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & 0 & 0 & 0 \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

收稿日期: 2009-11-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB714104); 中国水利水电科学研究院开放研究资金(2008538613)

作者简介: 江守燕(1986—), 女, 安徽舒城人, 博士研究生, 主要从事数值计算与仿真研究. E-mail: syjiang@hhu.edu.cn

其中

$$\begin{cases} d_{11} = d_{22} = d_{33} = \frac{E_t(1 - \nu_t)}{(1 + \nu_t)(1 - 2\nu_t)} \\ d_{21} = d_{31} = d_{32} = \frac{E_t\nu_t}{(1 + \nu_t)(1 - 2\nu_t)} \\ d_{44} = d_{55} = d_{66} = \frac{E_t}{2(1 + \nu_t)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: E_t ——切线弹性模量; ν_t ——切线泊松比. E_t 和 ν_t 均是与应力状态有关的函数. 对于 E - B 模型, 需引入体变模量 B 代替切线泊松比 ν_t 进行计算.

$$B = \frac{E_t}{3(1 - 2\nu_t)} \quad (4)$$

2 用户子程序结构

在 UMAT 子程序中仅仅需要传递材料模型的雅可比矩阵, ABAQUS 即会自动调用用户自定义材料本构. 与自己编写一个完整的有限元程序相比, 采用 ABAQUS 用户子程序接口, 免去了前后处理程序的编写工作, 且可使用 ABAQUS 内部的求解器, 提高求解效率, 其优点是显然的. 但是, ABAQUS 每次只能调用一个 UMAT 子程序, 要自定义多个材料本构时, 需要在 UMAT 子程序中使用变量 CMNAME 来定义不同的材料名, 可通过下列方法实现:

```
IF(CMNAME(1,2).EQ. 'EB') THEN
  CALL UMAT_EB(参数列表)
ELSE IF(CMNAME(1,2).EQ. 'EU') THEN
  CALL UMAT_EU(参数列表)
END IF
```

其中 UMAT_EB, UMAT_EU 是需要定义的用户材料子程序, 这样就满足了 ABAQUS 每次只调用 1 个 UMAT 子程序的要求, 同时又可实现自定义任意多个材料本构的目的. 只要在 INP 文件中进行正确的设置即可在模型中同时采用这 2 种不同的自定义材料本构, 见下面的语句段:

```
*Material ,name = EB_YN
*Density
1990. ,
*Depvar
3 ,
*User Material ,constants = 9

*Material ,name = EU_QJS
*Density
2260. ,
*Depvar
3 ,
*User Material ,constants = 10
```

550 0.5 0.8 50000 ,15 ,101 300 ,310 0.35 2.1 1545 0.367 0.903 ,85 000 ,43 ,101 300 0.355 0.2 0.112 2.1

这里需注意 INP 文件中材料名的前 2 个字符必须为 EB 或 EU, 即是标识调用的不同的材料本构.

文中邓肯-张 E - B 和 E - ν 模型子程序的编程结构主要包括以下几个部分: (a) 由应力分量计算材料积分点的主应力. 根据土力学符号约定对主应力排序, 并进行拉应力修正. (b) 计算当前应力水平. (c) 判别材料本构: 邓肯-张 E - B 模型还是 E - ν 模型. (d) 若是 E - B 模型, 根据加卸载准则计算切线弹性模量和体变模量; 若是 E - ν 模型, 根据加卸载准则计算切线弹性模量和切线泊松比. (e) 计算材料本构模型的雅可比矩阵, 即 $\partial \Delta \sigma / \partial \Delta \epsilon$. (f) 根据应变增量和材料本构模型的雅可比矩阵计算应力增量. (g) 根据增量求解技术, 由应力增量和原应力分量计算新的应力分量, 返回 (a) 循环求解计算直至调用结束.

3 程序验证

己衣水库位于云南省武定县以北己衣乡, 地处金沙江南岸一级支流——法宝峡谷, 距县城约 140 km, 距己衣乡 18 km, 是一座以灌溉为主的中型水利枢纽工程. 己衣水库大坝最大坝高 85.20 m, 坝顶高程 2 020.00 m, 坝顶宽 8 m, 设计心墙厚 80 cm, 水库总库容 1 260.2 万 m^3 , 兴利库容 489.2 万 m^3 , 灌溉面积 1 387 hm^2 , 正常蓄

水位 2010.92 m,设计洪水位 2017.06 m,校核洪水位 2019.37 m.为了监测水库运行状况,该心墙堆石坝防渗墙共埋设了 28 支 VWS-10 型振弦式应变计,上、下游面各 14 支.大量的实测数据为验证所研制的 UMAT 子程序的正确性提供了很好的依据.

选取的二维计算断面为顺河向最大断面.图 1 给出了该断面的材料分区图,其中碾压堆石体等的试验参数为 $E-B$ 模型参数,爆破堆石体、淤泥等的试验参数为 $E-\nu$ 参数.表 1 给出了坝体材料的计算参数,分别为弹性模量系数 k 、弹性模量指数 n 、破坏比 R_f 、材料黏聚力 c 、材料内摩擦角 φ 、体积模量系数 k_b 、体积模量指数 m 以及侧向变形系数 G 、 F 和 D .碾压堆石体材料参数为该坝石料室内三轴试验结果^[13],其他土体材料参数参照类似工程拟定.防渗墙材料本构为线弹性,参数由现场混凝土取样试验结果得到,现浇防渗墙弹性模量为 15.3 GPa,造孔防渗墙弹性模量取值为 17.6 GPa,泊松比均取为 0.167.图 2 为该断面的有限元计算网格,坝体和地基系统共有 3 891 个结点,3 801 个单元.新建坝体单元尺寸为 1~4 m.数值分析建模按设计加载顺序分 27 级加载,第 1 级为原坝体部分,第 2 级至第 24 级为新坝体碾压填筑过程模拟,每级加载厚 1.0~3.0 m,第 25 级至第 27 级为蓄水期,第 25 级蓄水至正常蓄水位 2010.92 m 高程,第 26 级蓄水至设计洪水位 2017.03 m,第 27 级蓄水至校核洪水位 2019.37 m.

①~④碾压堆石体;⑤爆破堆石体;⑥浆砌石;⑦砂石;⑧砂卵石砾石夹块石;⑨淤泥冲击层;⑩造孔防渗墙;⑪现浇防渗墙

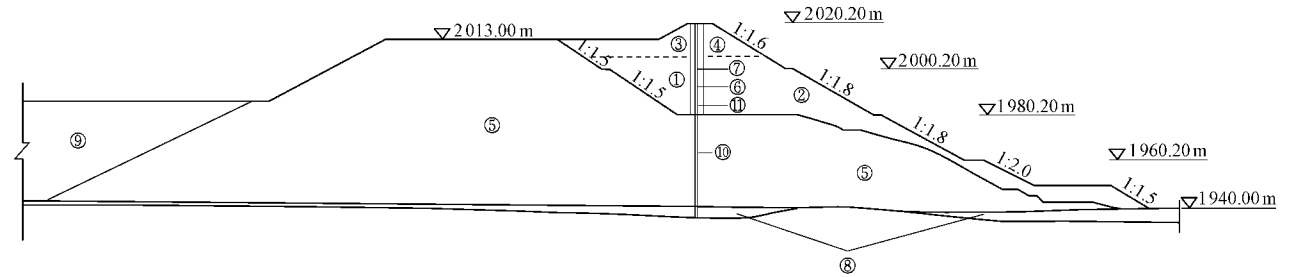


图 1 坝体材料分区
Fig. 1 Zoning of dam materials

表 1 坝体材料计算参数
Table 1 Parameters of dam materials

材料 编号	材料名称	密度 $\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	k	n	R_f	c/MPa	$\varphi/(^{\circ})$	k_b	m	G	F	D
①	碾压堆石体	1900	926.4	0.290	0.7700	0.0960	40.2			0.540	0.28	2.700
②	碾压堆石体	1890	1 106.4	0.200	0.8344	0.1283	38.5			0.450	0.21	0.020
③	碾压堆石体	1970	398.3	0.840	0.7800	0.1006	39.1			0.406	0.12	3.740
④	碾压堆石体	1915	293.2	1.110	0.7700	0.1046	39.6			0.380	0.07	3.106
⑤	爆破堆石体	2160	848.0	0.220	0.8300	0	33.4	826	-0.81			
⑥	浆砌石	2260	1545.0	0.367	0.9030	0.0850	43.0			0.355	0.20	0.112
⑦	砂石	2260	1545.0	0.367	0.9030	0.0500	43.0			0.355	0.20	0.112
⑧	砂卵石砾石夹块石	2180	1 328.0	0.330	0.8500	0.0300	40.0	602	0.09			
⑨	淤泥冲击层	1990	550.0	0.500	0.8000	0.0500	15.0	310	0.35			

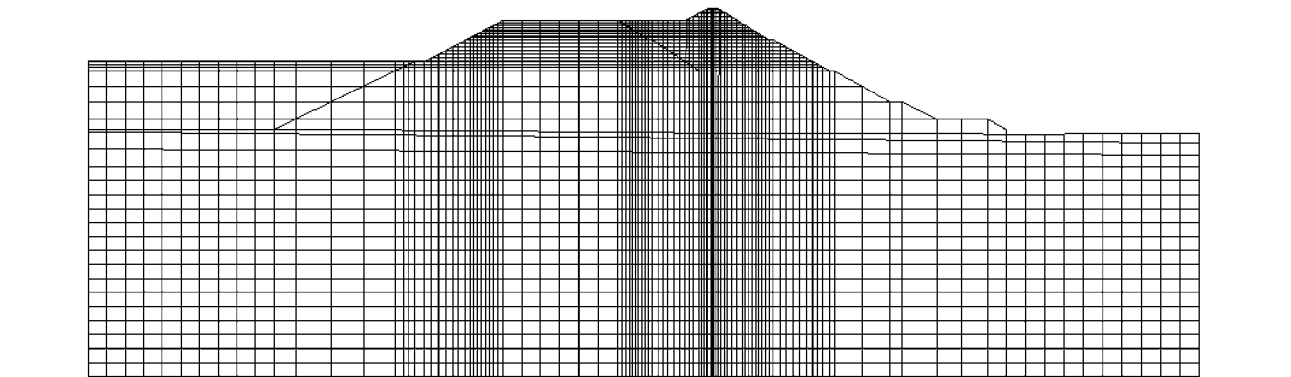


图 2 有限元计算网格
Fig. 2 Finite element mesh

该坝于 2009 年 7 月完成了新加坝体的填筑工作,在 2009 年 8 月 26 日、2009 年 9 月 2 日、2009 年 9 月 9 日、2009 年 9 月 16 日和 2009 年 9 月 24 日进行了 5 次有关数据的实测.图 3 给出了 2009 年 8 月 26 日防渗墙上、下游面的不同高程处竖向应变量实测值与数值结果的比较.图 4 给出了 2009 年 9 月 24 日防渗墙上、下游面的不同高程处竖向应变量实测值与数值计算结果的比较.

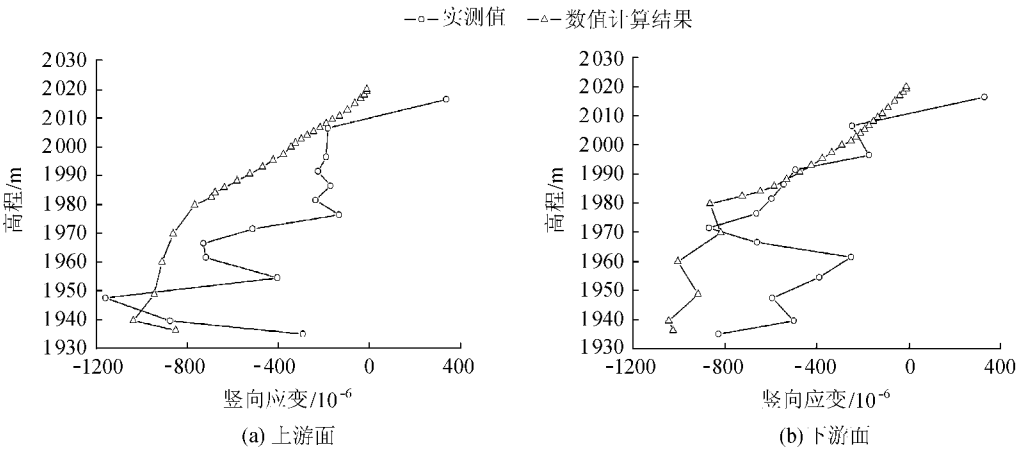


图 3 2009 年 8 月 26 日防渗墙竖向应变实测值与数值计算结果的比较
Fig. 3 Comparison between measured and calculated longitudinal strains of cutoff wall (August 26 , 2009)

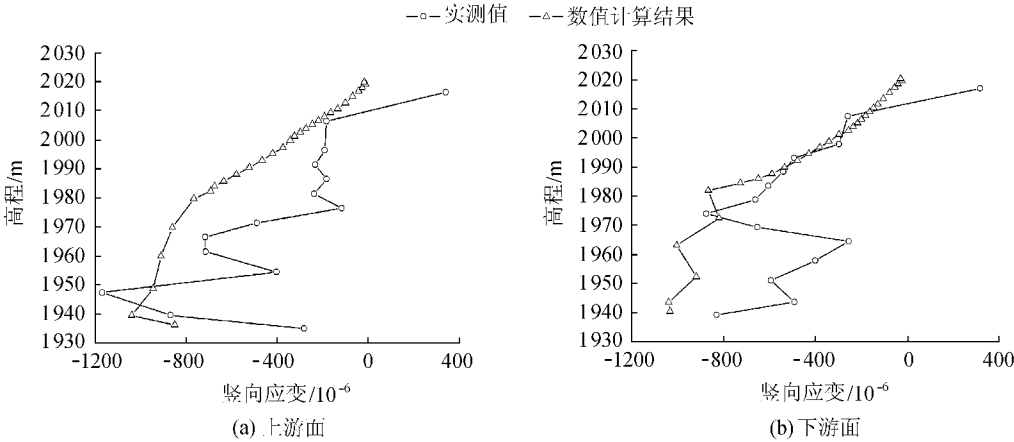


图 4 2009 年 9 月 24 日防渗墙竖向应变实测值与数值计算结果的比较
Fig. 4 Comparison between measured and calculated longitudinal strains of cutoff wall (September 24 , 2009)

从图 3 和图 4 可以看出,实测数据与数值模拟结果相比,在数值和变化趋势上均较为一致.这验证了所研制程序的正确性.实际 5 次实测的数据在数值及变化趋势上很接近,数值模拟结果也显示这 5 次的结果很接近.

4 结 语

笔者根据实际工程需要,基于大型商业有限元软件提供的开放的接口开发了邓肯-张 $E-B$ 和 $E-\nu$ 模型的程序,开发的程序可在一个模型中同时包含邓肯-张 $E-B$ 和 $E-\nu$ 2 种不同的本构模型;以己衣水库混凝土心墙堆石坝为分析对象,将数值结果与该坝现场实测结果的对比分析验证了所研制程序的正确性.

参考文献:

[1] 庄茁. ABAQUS 有限元软件 6.4 版入门指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
[2] 庄茁, 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.
[3] 徐远杰, 王观琪, 李健, 等. 在 ABAQUS 中开发实现 Duncan-Chang 本构模型[J]. 岩土力学, 2004, 25(7): 1032-1036. (XU Yuan-jie, WANG Guan-qi, LI Jian, et al. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in ABAQUS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(7): 1032-1036. (in Chinese))

[4] 庄海洋,陈国兴,梁艳仙,等.土体动非线性黏弹性模型及其 ABAQUS 软件的实现[J].岩土力学,2007,28(3):436-442.
(ZHUANG Hai-yang ,CHEN Guo-xing ,LIANG Yan-xian ,et al. A developed dynamic viscoelastic constitutive relations of soil and implemented by ABAQUS software[J].Rock and Soil Mechanics,2007,28(3):436-442.(in Chinese))

[5] 滕军,李祚华,王孝锋,等.基于 ABAQUS 的混凝土材料子程序开发与应用[J].建筑结构学报,2009(增刊 1):218-223.
(TENG Jun ,LI Zuo-hua ,WANG Xiao-feng ,et al. Development and application of concrete material model based on VUMAT platform of ABAQUS[J].Journal of Building Structures,2009(Sup 1):218-223.(in Chinese))

[6] DUNCAN J M ,CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soil[J].Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division , ASCE ,1970,96(5):1629-1653.

[7] 费康,张建伟. ABAQUS 在岩土工程中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

[8] 张欣,丁秀丽,李术才. ABAQUS 有限元分析软件中 Duncan-Chang 模型的二次开发[J].长江科学院院报,2005,22(4):45-51.
(ZHANG Xin ,DING Xiu-li ,LI Shu-cai. Secondary development of Duncan-Chang model in ABAQUS software[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2005,22(4):45-51.(in Chinese))

[9] 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.

[10] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].2 版.北京:中国水利水电出版社,1996.

[11] 章根德.土的本构模型及其工程应用[M].北京:科学出版社,1995.

[12] 李广信.高等土力学[M].北京:清华大学出版社,2004.

[13] 云南省水利水电勘测设计研究院.己衣水库心墙堆石坝变形及稳定复核基本资料[R].昆明:云南省水利水电勘测设计研究院,2009.

Development of program of Duncan-Chang $E-B$ and $E-\nu$ models based on ABAQUS

JIANG Shou-yan¹, XIE Qing-ming², DU Cheng-bin¹

(1. College of Mechanics and Materials , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Yunnan Provincial Investigation , Design and Research Institute of Water Conservancy and Electric Power , Kunming 650021 , China)

Abstract : A program of Duncan-Chang $E-B$ and $E-\nu$ constitutive models was developed based on ABAQUS by means of the user subroutine UMAT. The program could simultaneously call two different Duncan-Chang $E-B$ and $E-\nu$ constitutive models in one model. The deformation and stability of an existing concrete core wall rock-fill dam were numerically calculated by use of the program , and they were compared with the measured results. It is shown that the numerical results agree with the measured ones. The validity of the program is verified and can be employed to analyze actual projects.

Key words : rock-fill dam ; core wall ; program of Duncan-Chang model ; ABAQUS