

基于 ABAQUS 的土石料本构模型二次开发及其应用

岑威钧, 朱岳明

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 利用 ABAQUS 提供的用户材料子程序 UMAT 的二次开发平台开发土石料的沈珠江双屈服面模型, 并以一面板堆石坝为例, 结合 ABAQUS 的‘单元增加/去除’技术进行了坝体施工和水库蓄水的仿真分析。算例计算结果与用自编程序计算结果的比较表明, 利用 UMAT 子程序开发的土石料沈珠江模型结合‘单元增加/去除’技术进行土石坝施工仿真计算是可行的, 计算结果合理可靠, 且开发周期较自编程序大为缩短。

关键词 ABAQUS 二次开发 UMAT 沈珠江模型 土石坝 施工仿真

中图分类号 TU311.41

文献标识码 B

文章编号 1006-7647(2005)06-0078-04

ABAQUS-based secondary development of constitutive model for earth rockfill materials and its application//CEN Wei-jun, ZHU Yue-ming (College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : The user material subroutine UMAT provided by the general software ABAQUS was used for programming for Shenzhujiang's double-yield surface model of earth rockfill materials. In combination with the element add/remove technique, a numerical simulation was performed for dam construction and reservoir impoundment in a case study of an earth rockfill dam. The result shows that the present method is feasible for numerical simulation of earth rockfill dam construction. The calculated result is reasonable, and the development cycle of the method is greatly reduced as compared with that of the user-compiled program. Therefore, the method is of certain reference value.

Key words : ABAQUS, secondary development; UMAT; Shenzhujiang's model; earth rockfill dam; numerical simulation for construction

ABAQUS^[1~3]是由美国 HKS 公司(Hibbitt, Karlsson & Sorensen, INC.)研制的目前国际上最为先进的大型通用有限元计算分析软件之一,其非线性(材料、几何、接触)力学分析功能处于世界领先水平,在北美、欧洲和亚洲许多国家的机械、土木、水利、材料、航空、冶金等领域得到广泛应用。ABAQUS 可以进行结构的静、动力分析,如应力、变形、振动、冲击、热传导和对流、质量扩散、声波、力电耦合分析等。一个完整的 ABAQUS 分析过程通常有 3 个步骤:前处理、模拟计算和后处理。

ABAQUS 具有较为广泛的材料模拟特性,其自身材料库中包含了金属、橡胶、塑料、混凝土、岩土等各类材料的常见多种本构模型。尽管如此,由于工程问题的复杂性和特殊性,ABAQUS 在实际应用中亦存在一些缺憾。如岩土工程领域中国内应用较为广泛的一些土石料本构模型,现有的 ABAQUS 版本都不具备,这无疑使 ABAQUS 在国内岩土工程有限元分析问题中的推广应用受到了限制。为了弥补这一不足,本文利用 ABAQUS 提供的二次开发用户子程

序接口,尝试开发了土石料的沈珠江椭圆抛物线双屈服面弹塑性模型,通过多个例题的测试,验证了其正确性和可靠性。最后结合一面板堆石坝,利用 ABAQUS 的‘单元增加/去除’技术进行了坝体施工和水库蓄水的仿真计算分析,计算结果合理,较自编程序方便实用。

1 ABAQUS 用户材料子程序的二次开发

1.1 ABAQUS 的二次开发功能

在岩土工程数值分析领域,ABAQUS 作为大型通用有限元分析软件,由于其强大的非线性分析能力在国外已得到较为广泛的应用,近年来,国内许多单位也逐步开始使用。由于岩土问题的特殊性和复杂性,在进行模拟计算分析时,ABAQUS 现有功能常显不足。以土石坝施工仿真分析为例,至少存在以下几个问题:① ABAQUS 材料库中缺少国内常用的一些土石料本构模型,如邓肯双曲线模型、椭圆抛物线双屈服面模型、等效线性黏弹性模型等;②缺少土石坝有限元计算中常用的各种接触面单元和止水连接

单元等特殊单元模式;③土石料是不受拉材料,计算中遇到受拉破坏单元时须进行应力修正,ABAQUS不能对此进行直接操作.

针对这些问题,ABAQUS 提供了较为全面的二次开发平台,可以与主求解程序间进行数据交换,实现和弥补各种特殊功能,以满足不同用户的不同要求.常用的接口程序有:用于定义材料力学行为的用户材料子程序 UMAT、用于定义不同单元模式的单元子程序 UEL、用于定义不同物理场的自定义场量子程序 USDFLD、自定义硬化变量子程序 UHARD 和自定义摩擦特性子程序 FRIC 等,涉及到材料、单元、算法等方方面面.本文主要介绍利用用户材料子程序 UMAT(User-defined Material Mechanical Behavior)实现土石料的沈珠江双屈服面模型.在相应的 ABAQUS 输入文件(*.inp)中,使用关键字“*USER MATERIAL”表示采用用户自定义材料属性,计算时会自动调用材料子程序.

1.2 UMAT 的功能及主要变量说明

UMAT 子程序可以定义 ABAQUS 材料库中没有包含的各类材料本构模型,以扩充材料库;其次,UMAT 几乎可以用于力学行为分析的任何分析过程,几乎可以把用户材料属性赋予 ABAQUS 中的任何单元;另外还可以和用户子程序“USDFLD”联合使用,通过“USDFLD”重新定义单元每一积分点上传递到 UMAT 中的场变量的数值.

UMAT 子程序的核心内容就是给出定义材料本构模型的雅可比矩阵,即应力增量对应变增量的变化率 $\frac{\partial \Delta \sigma}{\partial \Delta \epsilon}$. UMAT 子程序采用 FORTRAN 语言编写,包含变量传递列表、数组变量定义、定义材料力学行为的用户程序代码段及子程序结束语句等基本格式.现对其中几个重要的数组变量作简要说明:①DDSDDE(NTENS,NTENS)为 NTENS $\times$ NTENS 维的数组,用于存放雅可比矩阵,其中 NTENS = NDI + NSHR,NDI 为直接分量数,NSHR 为剪切分量数,按直接分量在前,剪切分量在后的规定存储.通常雅可比矩阵是一个对称矩阵,除非在输入文件的“USER MATERIAL”关键字中加入了“UNSYMM”参数.②PROPS(NPROPS)存放材料本构参数矩阵.本构参数的个数由输入文件中的关键字“*USER MATERIAL CONSTANTS = NPROPS”设定,具体参数值按序放置在数据行中.③STRESS(NTENS)存放应力矩阵.增量步开始时,应力矩阵中的数值通过 UMAT 和主程序之间的接口传递到 UMAT 中,增量步结束时 UMAT 将对应力矩阵更新.UMAT 中应力张量的度量为柯西(真实)应力.④STRAN(NTENS)和 DSTRAN(NTENS)分别存放应变矩阵和应变增量矩阵.

⑤STATEV(NSTATEV)存放状态变量矩阵.在增量步开始时将数值传递到 UMAT 中,也可在子程序 USDFLD 中先更新数据,增量步开始时再将更新后的数据传递到 UMAT 中.增量步结束时必须更新状态变量矩阵中的数据.状态变量矩阵的维数 NSTATEV 等于输入文件中关键字“*DEPVAR”定义的数值.

1.3 编程中几个应注意的问题

在实施编程调试的过程中,代码质量的好坏至关重要,直接影响计算效率和计算精度.应注意以下几个问题:①ABAQUS 中定义的应力应变符号与岩土力学中的定义相反,以拉为正,压为负,相应的主应力、主应变的排序也与岩土力学中的定义相反.另外,ABAQUS 中的剪应变采用的是工程剪应变.②UMAT 中定义的雅可比矩阵为各个积分点上的值,积分点的数目由用户采用的单元类型和积分方式(完全积分还是减缩积分)决定.③在各个增量步中,由雅可比矩阵计算得到的是应力增量,须进行累加以得到该步的应力全量.④对于一些材料本构模型中须更新的状态变量,可结合用户子程序 SDVINI 进行联合使用.⑤在程序调试的过程中,建议先进行只有一个单元的常规土工试验的数值模拟,在计算结果准确合理的前提下再使用较大规模的例题或工程实例进行验证.

2 土石料的沈珠江模型

土石料是非线性材料,其变形不仅随荷载大小变化,而且还与加载的应力路径有关,应力应变关系呈明显的非线性特性.反映这种应力应变特性的模型主要分为两大类:弹性非线性模型和弹塑性模型^[4].弹性非线性模型因物理概念简单、参数确定方便等在工程界应用较为普遍.但这些模型不能反映土石料的剪胀特性及模拟复杂的应力加载路径,因此,在土石坝计算分析时宜采用弹塑性模型.目前国内这类模型以沈珠江模型和殷宗泽模型为代表.本文采用沈珠江椭圆抛物线双屈服面弹塑性模型^[5,6],其屈服函数见式(1):

$$\begin{cases} f_1 = p^2 + r^2 q^2 \\ f_2 = q^s / p \end{cases} \quad (1)$$

式中: p 为八面体正应力, $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$; q 为八面体剪应力, $q = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / 3$; r, s 为屈服面参数,一般均取 2.

弹塑性应力应变关系为

$$\Delta \epsilon = D^{-1} \Delta \sigma + A_1 \Delta f_1 \frac{\partial f_1}{\partial \sigma} + A_2 \Delta f_2 \frac{\partial f_2}{\partial \sigma} \quad (2)$$

或表示为

$$\Delta \sigma = D_{ep} \Delta \epsilon \quad (3)$$

式中: D 为弹性矩阵; D_{ep} 为弹塑性矩阵; A_1, A_2 为塑

性系数,非负数,

$$A_1 = \frac{\eta(9/E_t - 3\mu_t/E_t - 3/G_e) + 2s(3\mu_t/E_t - 1/B_e)}{2(1 + 3r^2\eta)(s + r^2\eta^2)} \quad (4)$$

$$A_2 = \frac{(9/E_t - 3\mu_t/E_t - 3/G_e) - 2r^2\eta(3\mu_t/E_t - 1/B_e)}{2(3s - \eta)(s + r^2\eta^2)} \quad (5)$$

$$D_{ep} = \begin{bmatrix} M_1 - \frac{P(S_x + S_x)}{q} - \frac{QS_x S_x}{q^2} & M_2 - \frac{P(S_x + S_y)}{q} - \frac{QS_x S_y}{q^2} - \frac{PS_{xy}}{q} - \frac{QS_x S_{xy}}{q^2} \\ M_2 - \frac{P(S_y + S_x)}{q} - \frac{QS_y S_x}{q^2} & M_1 - \frac{P(S_y + S_y)}{q} - \frac{QS_y S_y}{q^2} - \frac{PS_{xy}}{q} - \frac{QS_y S_{xy}}{q^2} \\ M_2 - \frac{P(S_z + S_x)}{q} - \frac{QS_z S_x}{q^2} & M_2 - \frac{P(S_z + S_y)}{q} - \frac{QS_z S_y}{q^2} - \frac{PS_{xy}}{q} - \frac{QS_z S_{xy}}{q^2} \\ -\frac{PS_{xy}}{q} - \frac{QS_{xy} S_x}{q^2} & -\frac{PS_{xy}}{q} - \frac{QS_{xy} S_y}{q^2} & G - \frac{QS_{xy} S_{xy}}{q^2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： S_x, S_y, S_z, S_{xy} 为偏应力分量； $P = \frac{B_e G_e \gamma}{1 + B_e \alpha + G_e \beta}$ ； $Q = \frac{G_e^2 \delta}{1 + B_e \alpha + G_e \beta}$ ； $M_1 = B_p + \frac{4G_e}{3}$ ； $M_2 = B_p - \frac{2G_e}{3}$ ； $B_p = \frac{B_e}{1 + B_e \alpha} \left(1 + \frac{B_e G_e \gamma^2}{1 + B_e \alpha + G_e \beta}\right)$ ； $\alpha = A_1/r^2 + \eta^2 A_2$ ； $\beta = r^2 \eta^2 A_1 + A_2$ ； $\gamma = \eta(A_1 - A_2)$ ； $\delta = \beta + B_e(\alpha\beta - \gamma^2)$ 。

假定三轴试验中体积应变 ϵ_v 与轴向应变 ϵ_a 呈抛物线关系,定义如下体积泊松比

$$\mu_t = 2c_d \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^{n_d} \frac{E_i R_s}{\sigma_1 - \sigma_3} \frac{1 - R_d}{R_d} \left(1 - \frac{R_s}{1 - R_s} \frac{1 - R_d}{R_d}\right) \quad (7)$$

式中： $R_s = R_f \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}$, R_f 为破坏比； c_d 为 $\sigma_3 = P_a$ 时的最大体积应变； n_d 为收缩体积应力随 σ_3 增加而增加的幂次； R_d 为发生最大收缩时的 $(\sigma_1 - \sigma_3)_d$ 与偏应力的渐进值 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的比值； E_i 为初始切线模量, $E_i = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n$ 。

若屈服函数 f_1 和 f_2 历史上的最大值分别为 f_{1max} 和 f_{2max} ,则加卸荷准则按如下定义:①当 $f_1 > f_{1max}$ 且 $f_2 > f_{2max}$ 时, $A_1 > 0$ 和 $A_2 > 0$,为全加载;②当 $f_1 \leq f_{1max}$ 且 $f_2 \leq f_{2max}$ 时, $A_1 = 0$ 和 $A_2 = 0$,为全卸载;③当 $f_1 \leq f_{1max}$ 或 $f_2 \leq f_{2max}$ 时, $A_1 = 0$ 或 $A_2 = 0$,为部分加载。

沈珠江模型有 $c, \varphi, R_f, K, n, c_d, n_d$ 和 R_d 等 8 个模型参数。

3 ABAQUS 中施工仿真的实现

以填方工程为例,用自编程序进行施工仿真模拟时通常采用‘单元生长’技术,即施工到某一荷载级时,参与计算的有限元网格仅包含该级及以前各荷载级的单元,未施工到的坝体单元不参与有限元

其中： E_t 为切线模量,直接借用邓肯模型中的表达式； B_e 和 G_e 分别为弹性体积模量和剪切模量； μ_t 为泊松比； $\eta = q/p$ 。

弹塑性矩阵 D_{ep} 在平面应变条件下的显式表达式为

计算,相应的物理量均赋值为零。而 ABAQUS 中每个荷载级计算的网格均为全部网格,其施工仿真模拟过程通过‘单元增加/去除’技术来实现,即施工前先将网格单元全部‘去除’,施工到某一荷载级时,就动态地‘增加’该级单元。这里的单元‘去除’并非将单元从有限元计算模型中删除,单元的‘增加’也并非在原计算模型中增加新单元。对于这些‘去除’和‘增加’的单元,一些大型通用有限元计算软件,如 Ansys,是按照如下方法实现的:将要‘去除’的单元的刚度(传导、渗透或其他分析特性)矩阵赋予一个小值,使其荷载、质量、阻尼、比热容或其他类似效果都趋于零;当要重新‘增加’这些单元时,将其单元物理特性重新赋予初始值。ABAQUS 对这些单元的处理很简便,直接在输入文件中使用关键字“*MOD-EL CHANGE, ADD/REMOVE”自动实现单元的“增加”和“去除”功能,ADD 表示单元的“增加”,REMOVE 表示单元的“去除”。

4 算 例

某混凝土面板堆石坝,上、下游坝坡均为1:1.4,最大坝高 98.0 m,设计运行水位 180.6 m。混凝土面板采用线弹性模型,坝体堆石料采用沈珠江模型,材料参数见表 1。面板与堆石体间的接触面采用 ABAQUS 中的主从(master-slave)接触算法,面板缝采用分离缝单元模式。整个计算域剖分结点 3 456 个,单元 3 016 个,有限元网格见图 1。

表 1 堆石料沈珠江模型计算参数

材料	$\gamma/$ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c	$\varphi_0/$ ($^\circ$)	$\Delta\varphi/$ ($^\circ$)	K	n	R_f	c_d	n_d	R_d
垫层	23.5	0.0	53.25	10.50	800	0.50	0.80	0.55	0.75	0.68
过渡层	23.5	0.0	52.75	11.00	750	0.50	0.79	0.68	0.50	0.52
上游堆石	22.3	0.0	51.70	10.50	700	0.35	0.77	0.80	0.35	0.66
下游堆石	22.0	0.0	51.10	11.10	650	0.32	0.76	0.72	0.31	0.61

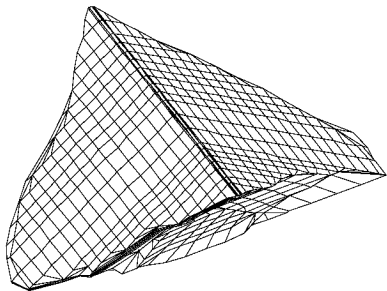


图1 有限元网格

利用 ABAQUS 的 UMAT 子程序开发的土石料沈珠江模型和‘单元增加/去除’技术实现大坝的分级施工和水库蓄水的仿真模拟计算.限于篇幅,本文给出部分结果.图2和图3分别为蓄水期坝体水平位移和竖向位移等值线图.蓄水后坝体向上、下游的水平位移分别为 11.2 cm 和 25.5 cm,竖向位移为 79.5 cm,利用自编程序得到的相应的物理量值分别为 10.9 cm,26.3 cm 和 78.2 cm,两者等值线分布规律基本一致.图4为蓄水期面板挠度等值线图,最大值为 21.5 cm.图5为蓄水期面板坝轴向应力等值线图,面板大部分受压,最大值为 7.6 MPa,岸坡两侧一定范围出现了拉应力.面板应力变位等值线分布规律与利用自编程序得到的结果基本一致,两者仅是在极值上有一定差异,这与两者采用不同的接触面和面板缝算法有关,自编程序采用的是 Goodman 接触单元和止水连接单元.

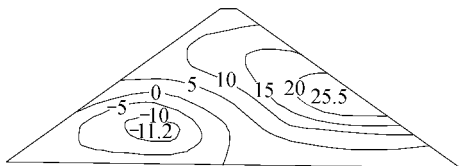


图2 蓄水期最大剖面水平位移等值线(单位:cm)

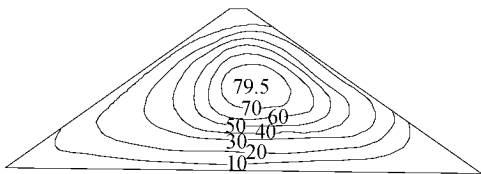


图3 蓄水期最大剖面竖向位移等值线(单位:cm)

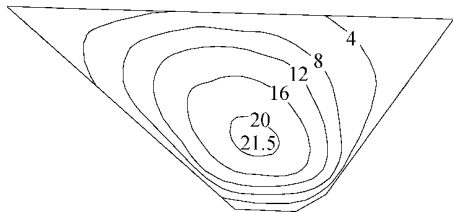


图4 蓄水期面板挠度等值线(单位:cm)

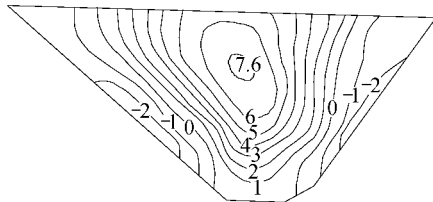


图5 蓄水期面板轴向应力等值线(单位:MPa)

5 结 语

ABAQUS 是国际大型通用有限元分析软件,具有较为广泛的模拟能力,其较为全面的二次开发功能提供了与用户之间进行材料模型、单元模式等数据交换的接口平台.本文给出的算例说明利用其 UMAT 子程序开发的土石料沈珠江模型,结合 ABAQUS 的‘单元增加/去除’技术实现土石坝施工仿真计算是完全可行的,计算结果也是合理可靠的.计算过程较自编程序更为简便省时,其结果具有良好的稳定性,可供用户借鉴推广.

参考文献:

- [1] Hibbitt, Karlsson & Sorenson, INC. ABAQUS user's manual [M]. [s. l.]: Pawtucket, RI, USA, 2000.
- [2] 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. 1—7.
- [3] 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. 460—477.
- [4] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 [M]. 北京:水利水电出版社, 1996. 90—102.
- [5] 沈珠江. 土体应力应变分析中的一种新模型 [A]. 卢肇钧. 第五届土力学及基础工程学术讨论会论文集 [C]. 北京:中国建筑工业出版社, 1990. 101—105.
- [6] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 1990. 57—60.

(收稿日期:2005-04-21 编辑:骆超)

《水利水电科技进展》加入 CEPS 中文电子期刊服务声明

《水利水电科技进展》自 2005 年起加入华艺中文电子期刊服务——思博网 (CEPS). CEPS 是目前台湾地区最大的期刊全文数据库,其访问地址为: <http://www.ceps.com.tw>, 今后读者也可以通过这一网址检索《水利水电科技进展》2005 年起各期全文.

由于《水利水电科技进展》已被 CEPS 收录,故凡向本刊投稿的论文均视为被本刊刊登的同时可供思博网 (CEPS) 收录、转载并上网发行 (特别声明者除外), 作者论文著作使用权已包含在本刊支付的一次性稿酬中, 不再另付.