

基于 FLAC3D 混凝土本构模型二次开发及 边坡加固工程应用

蔡慧娟, 蒋喆琦, 张 胤

(南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210006)

摘要: 为了更好地模拟加固工程中置换洞的作用效果, 本文基于 FLAC3D 软件的二次开发技术, 推导 HTC 四参数本构模型的弹塑性矩阵表达公式, 开发其软件计算模型, 并结合边坡加固工程实例, 建立其潜在滑体三维有限元模型, 分别采用二次开发的 HTC 模型及软件自带 DP 模型, 对边坡加固中的混凝土置换洞进行弹塑性破坏分析, 通过监测点位移变化规律及塑性破坏区域扩展规律确定边坡加固后安全系数。研究发现, 基于 FLAC3D 软件二次开发的 HTC 模型可成功应用于边坡加固分析的工程实例中, 并且 HTC 模型在分析混凝土破坏方面比原有 DP 模型精确度要高一些, 为置换洞加固的数值模拟研究提供参考依据。

关键词: FLAC3D 软件; HTC 模型; 二次开发; 边坡加固

中图分类号: TV5

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839 (2018) 08-0042-00

Secondary development of concrete constitutive model based on FLAC3D and application of slope reinforcement engineering

CAI Huijuan, JIANG Zheqi, ZHANG Yin

(Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd, Nanjing 210006, Jiangsu)

Abstract: In order to better simulate the effect of the replacement hole in the reinforcement project, on the basis of secondary development technology of FLAC3D software, the expression formula of elastoplastic matrix of HTC four-parameter constitutive model was derived, and its software calculation model was developed. The three-dimensional finite element model of the potential slide was established by combining with the example of the slope reinforcement engineering. The secondary HTC model and the software DP model were respectively used to analyze the elastic and plastic failure of the concrete replacement hole in the slope reinforcement. The safety factor of the slope was determined by the variation of the displacement and the expansion law of the plastic failure region. It was found that the HTC model based on the secondary development of FLAC3D software could be successfully applied to the engineering example of the slope reinforcement analysis, and the HTC model was more accurate than the original DP model in the analysis of concrete damage, which could provide a reference basis for the numerical simulation study of the replacement hole reinforcement.

Key words: FLAC3D software; HTC model; secondary development; slope reinforcement

收稿日期: 2018-02-13

作者简介: 蔡慧娟 (1987—), 女, 工程师, 硕士, 主要从事水利工程设计研究工作。

1 概述

边坡加固工程中出现置换洞、锚杆、锚索等多种加固措施,其中以置换洞的应用最为普遍^[1]。混凝土置换洞是对较大山体加固常用的一种加固手段,该加固形式通常用于已探明山体断层及结构面情况,并可判断某潜在滑块会沿某一底滑面发生滑动,重点加固底滑面处。但目前针对置换洞的研究多为加固后的稳定性研究^[2],对于置换洞自身破坏机理研究很少,对于边坡在临界稳定状态下,置换洞混凝土的变形和应力分布规律及混凝土拉裂和压碎破坏的部位和方向等有待进一步研究^[3]。在实际应用或科研工作中,还是需要做一些本构模型的二次开发及改进^[4]。其中DP准则以其简单实用的特点被广为应用,但其在处理三轴压缩情况仍存在缺陷^[5]。故本文提出HTC四参数准则,该准则是考虑了混凝土多种强度破坏规定后,以4个经验参数的形式存在于屈服函数中,其理论与实际较为接近。采用FLAC3D软件结合C++语言二次开发出HTC四参数本构模型,将模型编译成DLL文件,实现FLAC3D软件的调用功能。同时采用FLAC3D软件自带DP模型与HTC模型,分别模拟某一工程实例中混凝土置换洞的加固效果,比较两者的计算精度。

2 FLAC3D 混凝土本构模型开发

2.1 FLAC3D 本构模型开发技术

二次开发的模型通常分为两类:一类是开发FLAC并未提供模型,比如本文提到的HTC四参数本构模型;一类是对已有模型进行改进得到。相对于自行编程而言,在成熟软件上进行本构模型的二次开发,具有花费时间少,工作效率高,可以利用原有软件成熟而强大的计算功能等优势。

目前FLAC3D 3.0版本的自定义本构模型需要Visual Studio 2005的版本来创建。Visual Studio工具是以生成解决方案的形式使得用户改编的多个工程文件(*.vcproj)集合在一起,FLAC3D软件自身为用户提供的本构模型是以头文件(*.h)和C++源文件(*.cpp)形式给出,当重新生成项目文件后,工作目录中会自动生成一个Debug子目录,并创建一个动态链接库文件,这个文件就是用户用来加载的自定义本构模型的关键文件。

2.2 HTC 本构模型

四参数模型能比较全面地考虑混凝土破坏曲面的特征,其中比较著名的四参数公式之一为Hsieh-Ting-Chen提出,具体表达式为:

$$f(I_1, J_2, \sigma_1) = A \frac{J_2}{f_c} + B \sqrt{J_2} + C \sigma_1 + D I_1 - f_c = 0 \quad (1)$$

HTC准则中的4个参数A、B、C、D可由4个强度试验数据确定。取抗压强度 f'_c , 抗拉强度 $f'_t=0.08f'_c$, $0.10f'_c$, $0.12f'_c$, 双轴压力强度 $f'_{bc}=1.15f'_c$ 和一组三轴压力试验 $(\sigma_m/f'_c, \tau_{oct}/f'_c) = (-1.95, 1.6)$,这4个参数可确定如表1所示:

表1 HTC模型的4个参数值变化关系

f'_t/f'_c	A	B	C	D
0.08	2.8367	0.5659	11.8254	0.2723
0.10	2.0107	0.9713	9.1413	0.2310
0.12	1.4608	1.2411	7.3549	0.2035

2.3 HTC 四参数矩阵表达式推导

根据增量弹塑性本构关系,可导出HTC本构模型的弹塑性矩阵式为:

$$d[\sigma] = [D]_{ep} d[\epsilon] \quad (2)$$

其中增量理论的弹塑性矩阵表达式为:

$$[D]_{ep} = [D] - \frac{[D] \left[\frac{\partial F}{\partial [\sigma]} \right] \left[\frac{\partial F}{\partial [\sigma]} \right]^T [D]}{A + \left[\frac{\partial F}{\partial [\sigma]} \right]^T [D] \left[\frac{\partial F}{\partial [\sigma]} \right]} = [D] - [D]_p \quad (3)$$

式中:

$[D]$ —弹性矩阵,可由材料的弹性常数 E , ν 或 K , G 表示;

$[D]_{ep}$ —弹塑性本构矩阵;

A —塑性强化参数,可由材料实验的应力与塑性变形的关系曲线来确定,对于理想塑性材料,可取 $A=0$;

F —屈服面函数表达式;

$\partial F / \partial [\sigma]$ —屈服面的梯度矢量或称为流动矢量,可由屈服面函数求导而得。

为了计算弹塑性矩阵 $[D]_{ep}$,需要用一种适合于数值运算的形式来表示矢量 $[a] = \partial F / \partial [\sigma]$ 。由式(3)可知, σ 是 I_1 、 $\sqrt{J_2}$ 和 θ 的函数,因而有:

$$[a] = \frac{\partial F}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial [\sigma]} + \frac{\partial F}{\partial \sqrt{J_2}} \frac{\partial \sqrt{J_2}}{\partial [\sigma]} + \frac{\partial F}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial [\sigma]} \quad (4)$$

可简化为:

$$[a] = C_1[a_1] + C_2[a_2] + C_3[a_3] \quad (5)$$

式中:

$$[a_1]^T = \frac{\partial I_1}{\partial [\sigma]} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (6)$$

$$[a_2]^T = \frac{\partial \sqrt{J_2}}{\partial [\sigma]} = \frac{1}{2J_2^{1/2}} [S_x \quad S_y \quad S_z \quad 2S_{xy} \quad 2S_{yz} \quad 2S_{zx}] \quad (7)$$

$$[a_3]^T = \frac{\partial J_3}{\partial [\sigma]} = \begin{bmatrix} S_y S_z - \tau_{yz}^2 + J_2/3 \\ S_z S_x - \tau_{zx}^2 + J_2/3 \\ S_x S_y - \tau_{xy}^2 + J_2/3 \\ 2(\tau_{xz} \tau_{xy} - S_x \tau_{yz}) \\ 2(\tau_{xy} \tau_{yz} - S_y \tau_{xz}) \\ 2(\tau_{yz} \tau_{xz} - S_z \tau_{xy}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C_1 = \frac{\partial F}{\partial I_1} = \frac{C}{3} + D \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{\partial F}{\partial \sqrt{J_2}} - \frac{\text{tg}(3\theta)}{\sqrt{J_2}} \frac{\partial F}{\partial \theta} = B + \frac{2C}{\sqrt{3}} \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) - \frac{2C}{\sqrt{3}} \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \text{tg}(3\theta) \quad (10)$$

$$C_3 = \frac{-\sqrt{3}}{2\cos(3\theta)} \frac{1}{J_2^{3/2}} \frac{\partial F}{\partial \theta} = \frac{-C}{J_2 \cos(3\theta)} \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \quad (11)$$

该模型是根据 FLAC3D 自带的 Mohr-Coulomb 准则的头文件和源文件重新编写而成,并且在编写过程中考虑其屈服面上存在的奇点,采用将 $\theta=+60^\circ$ 直接代入的方法确定式(9)~式(11)的系数,在物理上相当于将屈服面交点“圆化”了。

3 边坡加固研究

3.1 工程概况和加固措施

某边坡工程中左岸边坡岩体含缓倾角的层内和层间错动带、近于竖直的断层和卸荷裂隙,层内和层间错动带缓倾上游偏右岸,判断为潜在的底滑面,在断层和卸荷裂隙的切割下,可能形成若干个潜在滑动体。其中块体的底滑面为层内错动带,前缘以卸荷裂隙为临空面,左岸边界为断层,后缘为下游侧断层,其潜在滑块形状和加固位置见图1和图2。

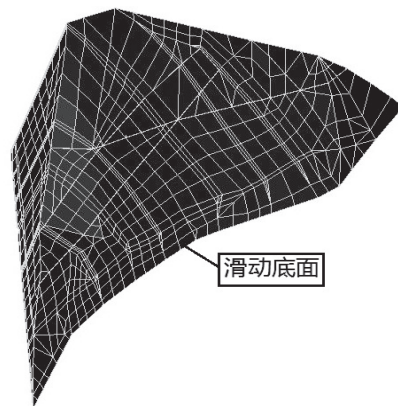


图1 潜在滑动块体示意图

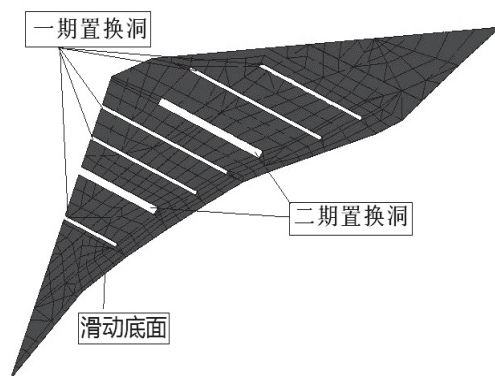


图2 置换洞加固位置分布图

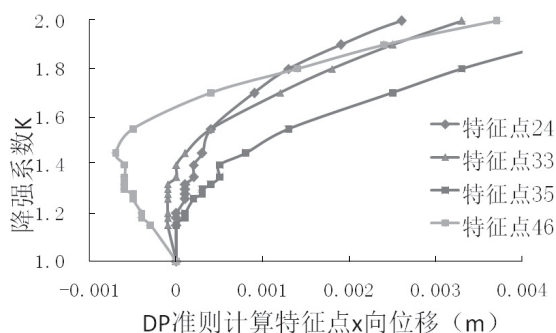
鉴于滑块加固施工存在一定难度,故决定分两期进行加固,加固措施采用混凝土置换洞加固,一期为5根高350 cm×宽300 cm的混凝土置换洞,加固之后待置换洞强度达到开挖要求时,在表面进行削坡开挖,最后进行二期2根高400 cm×宽600 cm的置换洞加固。

3.2 混凝土置换加固效果研究

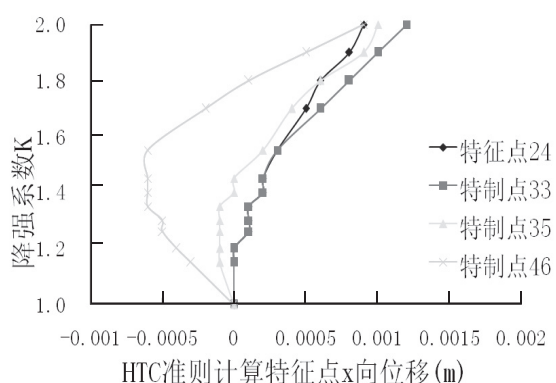
采用软件二次开发的 HTC 本构模型及软件自带 DP 模型,分别作为混凝土置换洞的弹塑性本构计算模型,分析置换洞开挖和回填后的变形及屈服状态。采用强度折减法计算潜在滑块安全系数,主要分析滑动底面破坏区域范围及特征点位移随降强倍数的变化规律,评价置换洞的加固效果。

为全面了解所研究滑块在加固前后的变化规律,共设置了61个特征点,用于记录强度折减时块体及结构面处的位移变化,具体在不同破坏准则模拟下,选择特征点24、33、35、46处位移变化结果见图3。可见,采用 DP 模型与 HTC 模型计算监测点位移变化规律基本一致,其中 DP 模型计算的位移值略大一些,分析位移变化拐点处

折减系数值,可认定安全系数为 1.50。综合考虑混凝土破坏情况后,发现 HTC 模型计算的特征点位移变化趋势虽然没有以上 DP 模型明显,但可观察到安全系数有所降低,可认定为 1.45,说明在该潜在滑体计算中存在部分双轴压坏和少量三轴压坏情况,再次证明 HTC 模型能够比 DP 模型更好地综合考虑混凝土破坏情况。



(a)



(b)

图3 特征点处 X 向位移与降强倍数关系曲线

由滑动底面破坏百分比对比曲线(图4)可知, HTC 模型的剪切破坏百分比明显大于 DP 模型,工程经验认为当剪切破坏百分比大于 90% 时为块体屈服破坏临界点,即安全系数最大点,DP 模型计算的安全系数可近似定为 1.50, HTC 模型的略小一些为 1.45。总的来说,特征点位移变化规律图

与剪切破坏百分比图分析结果保持一致,故自定义本构模型和 FLAC3D 自带模型都能较好地体现置换洞的屈服状况。

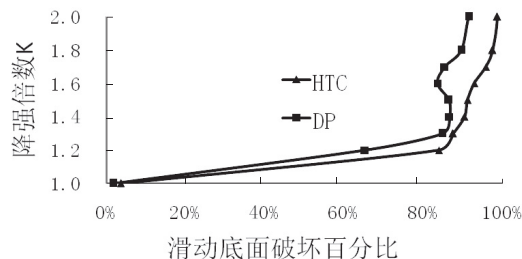


图4 滑动底面破坏百分比对比曲线

4 结论

在研究混凝土破坏的理论中, DP 准则以其简单实用的特点被广为应用,但其在处理三轴压缩情况时仍存在缺陷,于是本文提出 HTC 四参数准则,该准则是考虑了混凝土多种强度破坏规定后,以 4 个经验参数的形式存在于屈服函数中,其理论与实际较为接近。并将 HTC 破坏准则在 FLAC3D 软件的二次开发中得以实现,成功应用于边坡加固分析的工程实例中。研究发现, HTC 模型在分析混凝土破坏方面比原有 DP 模型精确度要高。

参考文献:

- [1] 戴妙林,鞠智敏.岩质边坡混凝土置换洞变形特点及加固效果分析[J].水电能源科学.2012,30(7):123-126.
- [2] 余志武,吴玲玉,单智.混凝土确定性及随机性损伤本构模型研究进展[J].工程力学.2017,34(9):1-12.
- [3] 林皋,刘军,胡志强.混凝土损伤类本构关系研究现状与进展[J].大连理工大学学报.2010,50(6):1055-1064.
- [4] 李杰,吴建营.混凝土弹塑性损伤本构模型研究 I:基本公式[J].土木工程学报,2005,38(9):14-20.
- [5] 赵尚毅,郑颖人,邓卫东.用有限元强度折减法进行节理岩质边坡稳定分析[J].岩石力学与工程学报.2003,22(2):254-260.