

节理岩体复合型多弱面软化模型的研究及实现

朱道建^{1, 2, 3}, 杨林德^{1, 2}, 蔡永昌^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 上海市市政工程设计研究总院, 上海 200092)

摘要: 岩土工程中经常遇到受多组密集定向节理面切割的破碎岩体, 对该类岩体的力学行为展开研究则需建立合理的本构模型。针对含有不超过三组节理弱面斜交切割的节理岩体, 将其考虑为一种广义宏观复合材料, 建立了复合型多弱面软化模型。设定不同的屈服因子可使岩体材料满足 Mohr-Coulomb 和受拉破坏的复合屈服准则或 Hoek-Brown 强度屈服准则。节理面服从 Mohr-Coulomb 和受拉破坏的复合屈服准则, 并且具有双线性特性。软化参数描述为与塑性应变和拉应变相关的变量, 通过软化参数可描述节理岩体各种软化特性曲线。基于 FLAC^{3D} 本构模型的二次开发平台, 成功实现并嵌入该复合型软化模型, 并通过双节理面斜交岩体的单轴压缩试验进行验证, 计算结果与试验比较吻合, 符合岩石的宏观破坏机理, 表明了该模型的正确性。

关键词: 节理岩体; 本构模型; 软化; 二次开发; FLAC^{3D}

中图分类号: TU452 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)02-0185-07

作者简介: 朱道建(1981-), 男, 江苏镇江人, 博士, 从事地下结构与隧道工程方面的研究工作。E-mail: zdj38@126.com。

Mixed multi-weakness plane softening model for jointed rock mass

ZHU Dao-jian^{1, 2, 3}, YANG Lin-de^{1, 2}, CAI Yong-chang^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Under-ground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Municipal Engineering Design General Institute, Shanghai 200092, China)

Abstract: Fractured rock mass with densely distributed joints is often encountered in geotechnical engineering field. So it is necessary to develop a reasonable constitutive model to conduct studies on mechanical behavior of such kind of rock mass. A mixed multi-weakness planes softening constitutive model is established for the rock mass with less than three sets of joint weakness planes, which is considered as a macroscopic composite material in a broader sense. The rock mass satisfies composite the Mohr-Coulomb criterion with tension cutoff or the Hoek-Brown failure criterion by setting yield factor. Joint plane with bilinear characteristics follows the composite Mohr-Coulomb criterion with tension cutoff. Softening parameters, which are variables correlated to plastic strain and tensile strain, are used to describe the softening characteristics of materials. Based on the secondary development platform of constitutive model in FLAC^{3D}, this mixed softening model has been successfully developed and embedded. It is verified by simulating the uniaxial compression test on rock mass that is obliquely cut by double joint planes. The calculated results agree with the related tests fairly well, and satisfy the macro-destruction mechanism of rock. Thus, it is shown that this model is correct and can be applied in practical projects.

Key words: jointed rock mass; constitutive model; softening; secondary development; FLAC^{3D}

0 前 言

岩土工程中经常遇到层状或具有密集定向节理切割的破碎岩体。节理的存在大大影响着整个岩体结构的力学行为。可将节理和岩体作为独立的材料组分, 建立二者的力与变形等的协调关系, 如采用 Goodman 等^[1]的独立节理单元技术、离散元技术等^[2], 对节理岩体结构进行整体分析。但当节理大量密集存在时, 这类方法往往较难应用, 有时甚至不可行。一种变通

的方法是将节理岩体结构整体上作为一种广义宏观复合材料, 建立恰当的本构关系, 从而进行整体受力变形分析。预测节理岩体的宏观复合本构特性, 是岩石力学的重要研究内容之一, 已取得了不少研究成果。斜交节理是节理岩体结构组成中的一种常见形式, 其宏观复合本构关系的研究具有重要的工程实用意

义。在以往的工作中，关于单向和双向正交的节理岩体的相关研究较多，而关于多组斜交节理岩体的复合本构关系研究似乎很少，一个可能的原因是由于斜交情形下，各种等效关系建立比较困难^[3]。如何克服这种困难，深入开展这方面的研究，具有重要的价值。

本文将三组节理面斜交密集切割的岩体结构考虑为一种广义宏观复合材料，整体为弹塑性本构模型，但对岩体材料和节理材料各自服从相应的强度屈服准则，对岩体材料嵌入了双强度屈服准则，可通过屈服因子进行选择。同时，该模型考虑了材料的软化，可根据需要设定软化特征曲线。采用 VC++ 语言在 FLAC^{3D} 中成功完成开发，并通过单轴压缩试验的模拟，对开发实现的模型进行了验证，计算结果较为合理。因此，本模型对存在多组大量节理面切割的类似工程有较好的适用性。

1 复合型多弱面软化模型的建立

本文所建立的复合型多弱面软化模型属于弹塑性本构模型，该模型从两方面对节理岩体进行了复合：
①将节理岩体材料视为由岩体和节理组成的一种广义宏观复合材料，岩体和节理材料分别服从自身的应力—应变本构关系并设置了反映自身属性的评价指标，可分别进行相关属性的赋值；
②岩体材料采用弹塑性本构关系，其屈服准则是将 Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 强度屈服准则复合嵌入本构模型中，通过设定引入的屈服因子，可根据工程情况合理方便地选择相应的屈服准则。而硬化/软化阶段则根据不同的强度屈服准则，对相关的塑性参数指标进行软化曲线设置。以下详细介绍采用 VC++ 语言在 FLAC^{3D} 程序中进行二次开发的强度屈服准则及相关的算法^[4]。

1.1 岩体强度屈服准则

本模型为弹塑性模型，其弹性阶段应力增量和应变增量均服从Hooke定律，即

$$\Delta \mathbf{s}_1 = \mathbf{a}_1 \Delta \mathbf{e}_1^e + \mathbf{a}_2 (\Delta \mathbf{e}_2^e + \Delta \mathbf{e}_3^e) \quad (1)$$

$$\Delta \mathbf{s}_2 = \mathbf{a}_1 \Delta \mathbf{e}_2^e + \mathbf{a}_2 (\Delta \mathbf{e}_1^e + \Delta \mathbf{e}_3^e) \quad (2)$$

$$\Delta \mathbf{s}_3 = \mathbf{a}_1 \Delta \mathbf{e}_3^e + \mathbf{a}_2 (\Delta \mathbf{e}_1^e + \Delta \mathbf{e}_2^e) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{a}_1 = K + 4G/3$ ，为岩体材料常数； $\mathbf{a}_2 = K - 2G/3$ ，为岩体材料常数，其中， K 为岩体体积模量， G 为岩体剪切模量。

(1) Mohr-Coulomb 复合型强度屈服准则

由于岩体的抗拉强度远不及其抗压强度，因此应用 Mohr-Coulomb 强度屈服准则的同时，引入了抗拉强度屈服准则，即当岩体所承受的拉力超过其抗拉强度时，岩体材料即发生拉破坏。

该准则可在 $\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3$ 平面内进行描述，如图 1 所

示。模型中考虑了双线性特性，即图中的 AB 段和 BC 段，两阶段均满足 Mohr-Coulomb 强度屈服准则，

$$f^s = \mathbf{s}_1 - \mathbf{s}_3 N_f + 2c \sqrt{N_f} = 0 \quad (4)$$

式中， \mathbf{s}_1 为最大主应力， \mathbf{s}_3 为最小主应力， c 为岩体的黏聚力， $N_f = \frac{1 + \sin f}{1 - \sin f}$ 。

CD 段为考虑抗拉屈服阶段，其屈服准则表达式为

$$f^t = \mathbf{s}_3 - \mathbf{s}_t = 0 \quad (5)$$

式中， \mathbf{s}_t 为岩体抗拉强度。

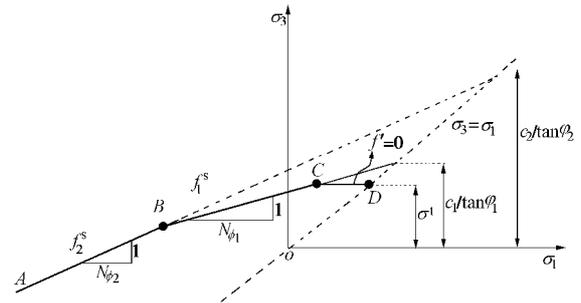


图 1 岩体 Mohr-Coulomb 强度屈服准则

Fig. 1 Mohr-Coulomb strength yield criteria for rock mass

与 Mohr-Coulomb 和抗拉屈服准则相关联的流动法则为

$$h = \mathbf{s}_3 - \mathbf{s}^t + a^p (\mathbf{s}_1 - \mathbf{s}^p) \quad (6)$$

式中， $a^p = \sqrt{1 + N_f^2} + N_f$ ， $\mathbf{s}^p = \mathbf{s}^t N_f - 2c \sqrt{N_f}$ 。

(2) Hoek-Brown 强度屈服准则

1992 年，在狭义 Hoek-Brown 强度屈服准则的基础上，Hoek 提出了广义的 Hoek-Brown 强度屈服准则，

$$\mathbf{s}_1 = \mathbf{s}_3 + \mathbf{s}_{ci} \left(m_b \frac{\mathbf{s}_3}{\mathbf{s}_{ci}} + s \right)^a \quad (7)$$

式中， \mathbf{s}_1 为最大主应力， \mathbf{s}_3 为最小主应力， \mathbf{s}_{ci} 为岩石单轴抗压强度， m_b ， a 和 s 为材料常数。

本复合模型中引入 Hoek-Brown 强度屈服准则时，分为两种情况：

$$F = \begin{cases} \mathbf{s}_1^f - \mathbf{s}_3^f - \mathbf{s}_{ci} \left(m_b \frac{\mathbf{s}_3}{\mathbf{s}_{ci}} + s \right)^a = 0 & \left(\mathbf{s}_3 \geq -\frac{\mathbf{s}_{ci}}{m_b} \right) \\ \mathbf{s}_1^f - \mathbf{s}_3^f + \mathbf{s}_{ci} \left(m_b \frac{\mathbf{s}_3}{\mathbf{s}_{ci}} + s \right)^a = 0 & \left(\mathbf{s}_3 < -\frac{\mathbf{s}_{ci}}{m_b} \right) \end{cases} \quad (8)$$

为了反映岩石材料屈服阶段的体积行为，我们引入了流动参数 g 来描述其流动法则，它是一个与应力相关的变量。

当 $0 < \mathbf{s}_3 < \mathbf{s}_3^{cv}$ 时，则满足：

$$g^{-1} = g_{af} + (1/g_{cv} - g_{af}) \mathbf{s}_3 / \mathbf{s}_3^{cv} \quad (9)$$

式中 $g_{af} = 1 + a \mathbf{s}_{ci} (m_b \mathbf{s}_3 / \mathbf{s}_{ci} + s)^{a-1} (m_b / \mathbf{s}_{ci})$ ， $g_{cv} = -1$ ；当 $\mathbf{s}_3 \geq \mathbf{s}_3^{cv}$ 时，则满足 $g = -1$ 。

1.2 材料的硬化/软化

大多数岩体类材料由于自身具有软化特性, 随着塑性变形的产生, 其残余强度也发生相应的改变, 其软化阶段的应变-强度曲线可根据试验结果采用数列的方式进行输入。

(1) Mohr-Coulomb 硬化/软化参数

Mohr-Coulomb 强度准则引入两个硬化/软化参数 k^s 和 k^t 来反映材料的硬化/软化特性, 它是与单元的剪切应变和拉应变相关的变量, 那么塑性剪切硬化/软化参数增量也是与剪切应变相关的量, 其计算公式为

$$\Delta k^s = \sqrt{0.5[(\Delta e_a^{Ps})^2 + (\Delta e_m^{Ps})^2 + (\Delta e_b^{Ps})^2]} \quad (10)$$

式中 $\Delta e_a^{Ps} = \Delta e_1^{Ps} - \Delta e_m^{Ps}$; $\Delta e_b^{Ps} = \Delta e_3^{Ps} - \Delta e_m^{Ps}$; Δe_i^{Ps} 为 3 个主应力方向的塑性剪切应变增量值 ($i=1, 2, 3$); $\Delta e_m^{Ps} = (\Delta e_1^{Ps} + \Delta e_3^{Ps})/3$ 。

k^t 反映的是材料受拉应力作用产生变形后而发生软化效应的变量, 它与拉应力产生的应变值有关, 其增量的数学表达式为

$$\Delta k^t = |\Delta e_3^{Pt}| \quad (11)$$

式中, Δe_3^{Pt} 为单元所产生的拉应变增量。

(2) Hoek-Brown 软化参数

Hoek-Brown 强度准则在反映材料软化阶段的特性也是通过引入一个软化参数来进行的, 该参数是一个与各方向剪切主应变变量相关的变量, 此处定义为 e_3^p , 它是主程序执行过程中每步迭代后所产生应变增量的总和。而应变增量为

$$\Delta e_3^p = \Delta e_2 = \frac{F_1 \Delta e_0 - F_2 \Delta e_1}{F_1 - F_0} \quad (12)$$

式中 Δe_0 为迭代前的应变初值; Δe_1 为迭代后的应变终值; F_0 为应变为 Δe_0 时由式 (12) 所求得的 F 值; F_1 为应变为 Δe_1 时由式 (12) 所求得的 F 值。

主程序每步迭代则对 Δe_0 和 Δe_1 以及相应的 F 值进行重新赋值, Δe_0 的最初值为最终的弹性应变值 (即塑性应变为零的时刻), Δe_1 的初值则是各主方向塑性剪切应变的最大值, 在下一步的迭代前, 主程序则自动设置 $F_0 = F_1$, $F_1 = F_2$, $\Delta e_0 = \Delta e_1$ 和 $\Delta e_1 = \Delta e_2$, 即下一迭代步的应变初值和 F 初值为上一迭代步应变终值和 F 终值。

1.3 节理面强度屈服准则及其软化参数

该模型中将节理岩体材料看成由岩体和节理组成的广义复合材料, 其中考虑了 3 组独立的节理弱面, 每组节理面可以任何正交或斜交。可以按照工程的需要, 设置所需的节理面位置和数目。

各节理面均设置独立的局部坐标系^[5], 节理面的方位以倾角和倾向进行描述, 参考基面为 X-Y 坐标平

面, 节理面与基面形成的夹角为节理面倾角, 节理面法向向量在基面内的投影与 Y 轴正向所形成的夹角为节理面倾向。

各节理面强度屈服准则均采用 Mohr-Coulomb 和抗拉屈服准则的复合型强度屈服准则, 采用该强度准则使节理面参数的确定简易化, 可直接由现场试验数据获取。

其强度屈服准则的数学表达式为

$$f_s = t + s_{33'} \tan f_j - c_j \quad (13)$$

$$f^t = s_{33'} - s_j^t \quad (14)$$

式中, t 为节理面剪应力, c_j 为节理面黏聚力, f_j 为节理面内摩擦角, $s_{33'}$ 为节理面局部坐标系下的最小主应力, s_j^t 为节理面抗拉强度。

同时, 对节理面也考虑了双线性特性, 如图 2 中的 AB 段和 BC 段, 与岩体材料的双线性类似, 均满足 Mohr-Coulomb 屈服准则, 但两阶段与各自设置的塑性参数值有关。需指出的是本模型中考虑的双线性特性是用于描述随着围压或外力的不同, 岩体材料和节理面的力学特性表现为两个阶段性的线性特性。例如, 对于节理面而言, 图 2 中 AB 段黏聚力 c 大于 BC 段, 而内摩擦角 f 则小于 BC 段。即当压力增大至一定程度时, 节理面的塑性强度会有一定幅度的提高。当然, 线段 ABC 的形态与设置的参数大小相关, 若设置 AB 段黏聚力 c 小于 BC 段, 内摩擦角 f 大于 BC 段时, 线段 ABC 则为下凹型。因此, 节理岩体是否考虑双线性特性, 需结合室内外试验结果进行判断。也适用于考虑节理面闭合前后的力学性质的改变。而 CD 段则为受拉屈服段^[6]。

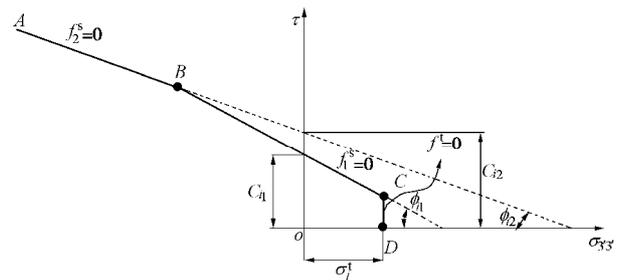


图 2 节理面强度屈服准则

Fig. 2 Strength yield criteria for joint plane

节理面软化参数的设置与岩体类似, 通过引入反映节理面硬化/软化特性的参数 k_j^s 和 k_j^t 来进行描述, 主要与节理面塑性剪切应变和拉应变相关, 其数学表达式为

$$\Delta k_j^s = \frac{1}{3} \sqrt{2(\Delta e_{33'}^{Ps})^2 + (\Delta e_{13'}^{Ps})^2 + (\Delta e_{23'}^{Ps})^2} \quad (15)$$

$$\Delta k_j^t = \Delta e_{33'}^{Pt} \quad (16)$$

式中, $\Delta e_{i3'}^{Ps}$ 为节理面局部坐标系内各主方向应变增量 ($i=1,2,3$), $\Delta e_{3'3'}^{Pt}$ 为节理面拉应变增量。

2 模型的开发及实现

2.1 模型的开发及其特点

本文所建立的复合型多弱面软化模型主要采用 VC++ 语言在 FLAC^{3D} 的自写本构平台下进行二次开发, 嵌入 FLAC^{3D} 程序后则可进行节理岩体的计算研究及工程应用。本模型的特点是将节理岩体看成是由节理和岩体组成的一种广义复合材料^[7-8], 可对节理和岩体单独定义材料属性。“等效复合”的含义是指将节理面的单元与所处位置处的岩体单元共用, 该复合型单元自身具有岩体材料的属性, 同时又具有节理面的材料属性。如图 3, 灰色区域为常规的岩体材料, 而白色区域则为复合型材料。节理面自身存在局部坐标系, 而节理面的应力则通过将整体坐标系下的应力向局部坐标系转换来获取。而节理面产生的变形和应力的分配也通过转换叠加为整体坐标系下复合单元的变形和应力。

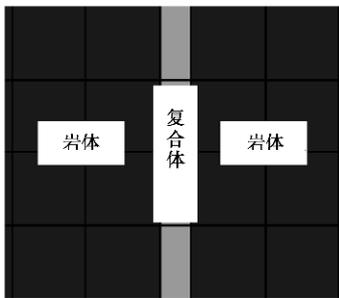


图 3 复合型单元

Fig. 3 Composite elements

两种材料均是弹塑性本构关系^[9], 但岩体材料可以通过设定其屈服因子选择 Mohr-Coulomb 或 Hoek-Brown 强度屈服准则。节理面则考虑了多组弱面的情况, 最多可设置 3 组相互正交或斜交的节理面, 节理面强度屈服准则均服从 Mohr-Coulomb 和抗拉屈服强度准则, 同时可考虑节理材料的双线性特性, 是否考虑双线性可通过设定材料因子进行切换。岩体材料和节理材料的软化特性均通过引入与应变相关的软化参数来进行描述, 将材料的软化特性曲线以数组的形式输入, 程序在进入软化阶段则自动进行赋值。

2.2 模型开发的程序流程

程序开发的思路: 首先指定复合型模型的相关参数, 如材料力学参数、引入因子及软化参数等等。其次, 在各参数赋值完成后, 即进行弹塑性的判别计算。引入材料因子 BIM 确定是否考虑双线性特性 (0 表示不考虑, 1 表示考虑)。在不同的计算模式下, 材料均

是弹塑性本构关系, 弹性阶段按照 Hooke 定律的线性关系进行应力应变的转换计算。塑性阶段则按设定(屈服因子 $Q_D=0$ 时为 Mohr-Coulomb 结合受拉破坏的复合型强度屈服准则, $Q_D=1$ 时为 Hoek-Brown 强度准则)的准则进行屈服判别, 当满足 1.1 节中的屈服方程时, 则判定为塑性屈服, 从而按照设定的修正准则对单元的应力进行修正。

同样, 对于节理材料其弹塑性判别方法相同, 但首先需建立局部坐标系将整体坐标系下岩体单元应力转化为各局部坐标系(每组节理面均建立独立局部坐标系, 即 3 组节理面则建立 3 个局部坐标系)下节理面应力, 当节理面发生屈服后, 主要对节理面应力进行修正。同时, 由于最多可设定 3 组节理面, 因此, 3 者之间需进行耦合计算, 即其中 1 组节理面发生屈服进而完成应力修正后, 需再次检验另两组是否出现由于应力修正而发生屈服的情况。如果出现屈服情况, 则对出现屈服的节理面再次修正, 修正后则再次对第 1 组节理面进行状态判断。对于同时出现 2 组节理面和 3 组节理面屈服的情况, 在应力修正后, 同样需按上述方法进行检验, 继而修正。节理面之间的这种耦合循环修正的最大次数设定为 20, 当不断修正的次数超过 20 次后, 则退出修正, 以避免进入死循环。节理面修正后的应力最终还需转化至整体坐标系下岩体的单元应力, 转换后的单元应力则自动在整体坐标系下按岩体屈服准则进行屈服判别, 继而修正。

材料的硬化/软化通过设定软化参数与力学参数之间的函数关系来进行参数的变换, 该函数主要以数组的形式输入, 当发生塑性变形后, 程序则按指定的公式计算相应的软化参数, 并按设定的力学参数值自动完成赋值。若前期考虑了双线性特性, 则软化阶段也需考虑双线性特性, 即需指定两条软化特性曲线。

最后, 程序是对大变形计算的修正算法及相关参数数值的存储。

2.3 模型相关 VC++ 函数介绍

FLAC^{3D} 本构模型的二次开发平台主要是生成动态链接库文件 (.DLL 文件), 通过调用该文件嵌入计算程序。而生成动态链接库文件的生成需要在 VC++ 中建立头文件 (.H 文件) 和源文件 (.CPP 文件), 头文件主要进行新的本构模型派生类的声明, 修改模型的 ID、名称和版本信息, 修改派生类的私有成员, 包括模型的基本参数及程序执行过程中主要的中间变量。源文件中则包含了各参数的赋值、屈服判断及算法等, 主要通过建立各个函数来进行实现, 主要有以下几类函数^[10]:

(1) 模型结构函数(`UserModel::UserModel(bool bRegister): Constitutive Model`), 主要功能是对头文件中的私有成员进行初始化赋值为零, 私有成员包含模型中的各力学参数、引入因子及软化参数等。

(2) `UserModel::Properties()`函数, 函数给定了模型参数的字符串, 即FLAC^{3D}中赋值时所应用的关键词。`UserModel::GetProperty()`和`UserModel::SetProperty()`函数则共同完成模型参数的赋值, 这三函数中变量的排序要确保完全一致。

(3) `UserModel::States()`函数是单元在计算过程中的状态指示器, 即发生塑性破坏单元的标示器, 此处包含岩体材料和节理材料两种状态指示器。

(4) `UserModel::Initialize()`函数在求解计算前对于每个模型单元进行调用, 主要执行参数和状态指示器的初始化, 并对派生类声明中定义的私有变量进行赋值。

(5) `UserModel::Run()`是整个模型编制过程中最主要的函数, 它对每一个子单元在每个求解步中均进行调用, 进行弹塑性本构关系的求解。在计算过程中, 根据单元的屈服情况对单元状态指示器进行修改, 并对发生屈服的单元进行应力修正。对软化参数进行自动计算, 并自动完成软化后参数的赋值。

(6) `UserModel::SaveRestore()`函数, 主要功能是对计算完成后单元的最终力学参数值和计算结果进行保存。

3 算例验证

为了验证所开发的复合型节理模型的正确性, 本文采用单轴压缩试验的数值模拟对该模型进行测试, 为了使计算结果更有直观性和代表性, 模型中考虑两组斜交节理面, 其力学参数^[11]见表 1, 2。

表 1 节理模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters for joint model

名称	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	剪胀角/(°)
岩体	200	100	1.6	40	1.0	10
节理面 1	—	—	1.0	30	0.5	10
节理面 2	—	—	1.0	30	0.5	10

表 2 材料软化力学参数

Table 2 Mechanical parameters for softening materials

塑性应变值	岩体			节理		
	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	剪胀角/(°)
0.00	1.6	40	10	1.0	30	10
0.05	0.8	32	3	0.5	25	3
0.10	0.4	25	0	0.2	22	0
1.00	0.4	25	0	0.2	22	0

单轴压缩试验建立的模型尺寸是直径为 20 cm, 高为 40 cm 的圆柱体。模型中设置了两组斜交的节理面, 其倾角为 45° 和 135°, 如图 4 所示。模型周边

均无约束, 顶面和底面的压缩模拟采用速度边界来进行控制, 其压缩速度为每步 2.5×10^{-5} m。其本构模型采用本文开发的复合型多节理面软化模型, 不考虑材料的双线性特性, 强度屈服准则为 Mohr-Coulomb 屈服准则。模拟出试块在压缩过程中的全应力应变曲线, 以及试块受压形成的剪切破坏面。

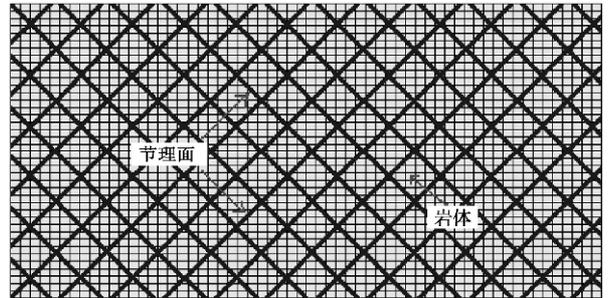


图 4 节理面的分布

Fig. 4 Distribution of the joints

为了进行对比分析, 分别模拟了单独岩体和设置两组斜交节理面情况下的单轴压缩试验。当仅仅对岩体材料进行单轴压缩试验的模拟时, 形成了可能发生对角破坏的两个由上至下斜向劈裂面, 如图 5, 7。当存在两组节理面时, 试块有沿着节理弱面发生破坏的趋势, 从而形成共轭剪切破坏。由于节理面属性相同, 所形成的两组剪切破坏面的交点出现在模型的中部, 如图 6, 8。两种情况的破坏存在明显差异, 这与相关的试验结果也很吻合。

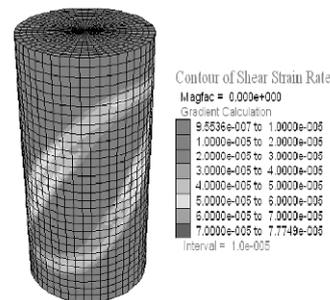


图 5 无节理面剪切应变率

Fig. 5 Contour of shear strain rate without joints

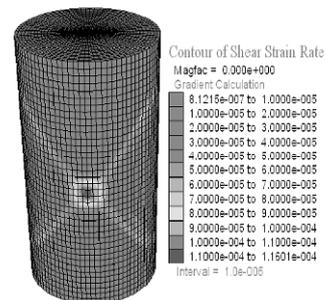


图 6 两组节理面剪切应变率

Fig. 6 Contour of shear strain rate with two joints

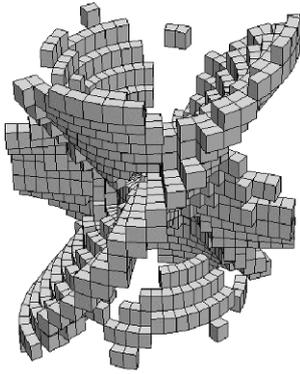


图 7 无节理面剪切破坏带

Fig. 7 Map of shear failure without zone joints

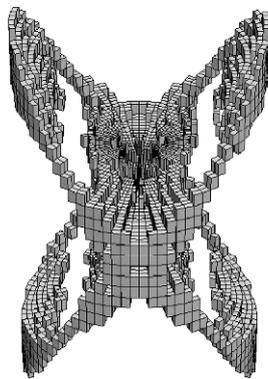


图 8 两组节理面剪切破坏带

Fig. 8 Map of shear failure zone with two joints

图 9 为试块受压后的塑性区分布图，与所形成的剪切破坏带相一致，主要表现为剪切破坏和拉破坏。图 10 为单轴压缩全过程的应力 - 应变曲线图。分别采用 Mohr-Coulomb 和 Hoek-Brown 强度准则进行对比计算。由于节理面的存在，因此其弹性阶段 AD 表现为阶段性线弹性，随着塑性变形的产生，则表现出软化特性，即 DE 和 EF 段。压缩过程中进行了加卸载试验，其卸荷段曲线基本与 AB 段平行。两种破坏准则下的计算参数通过换算确保其一致性，因而所得的破坏模式无明显差别。

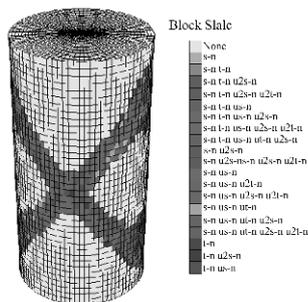


图 9 塑性区分布图

Fig. 9 Distribution of block plastic zone

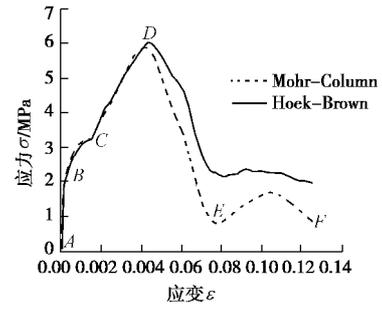


图 10 全应力 - 应变曲线图

Fig. 10 Curves of total stress and strain

4 结 语

本文针对岩土工程中经常遇到的破碎节理岩体，开发了能描述三组节理弱面相互斜交的节理岩体力学行为的复合型软化模型，采用 VC++ 语言在 FLAC^{3D} 二次开发平台上成功实现模型的嵌入。通过模拟完整岩块和双节理面斜交岩体的单轴压缩试验对所开发的模型进行了验证，所形成的剪切带及破坏形式与相关试验结果^[12]比较吻合，符合岩石宏观破坏的机理^[13]，从而验证了模型的正确性^[14]。

参考文献:

- [1] GOODMAN R E, TAYLOR R L, BREKKE T L. A model for the mechanics of joint rock[J]. J of Soil Mech Found Div, ASCE, 1968, **94**(SM3): 637 - 659.
- [2] HART R D, CUNDALL P A, LEMOS J V. Formulation of a three-dimensional distinct element model: part ii. mechanical calculations[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1988, **25**(3): 117 - 126.
- [3] 牛 斌, 杨海天. 基于均匀化方法的斜交节理岩体复合本构关系研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(5): 773 - 778. (NIU Bin, YANG Hai-tian. Homogenization-based investigation on constitutive relationship of oblique joint rock[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(5): 773 - 778. (in Chinese))
- [4] Itasca Consulting Group Inc FLAC^{3D}[CP]. Version 2.10, USA, 1995.
- [5] GERRARD C M. Elastic models of rock masses having one, two and three sets of joints[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1982, **19**(1): 15 - 23.
- [6] CUNDALL Marti J P. Mixed discretization procedure for accurate modelling of plastic collapse[J]. Int J Num & Analy Ethods in Geomech, 1982(6).
- [7] 杨海天, 郭瑞峰. 双向正交节理岩体的一个复合蠕变模型

- [J]. 大连理工大学学报, 1991, **31**(3): 267 - 274. (YANG Hai-tian, WU Rui-feng. Composite creep model for rock with bilateral orthogonal joint[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1991, **31**(3): 267 - 274. (in Chinese))
- [8] 杨海天, 邬瑞峰, 王刚, 等. 节理岩体的复合本构有限元仿真计算[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(6): 69 - 76. (YANG Hai-tian, WU Rui-feng, WANG Gang, et al. Finite element simulating computation for joint-rock based on composite constitutive models[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(6): 69 - 76. (in Chinese))
- [9] 刘书田, 常崇义, 杨海天, 等. 节理岩体的黏弹性性能预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(4): 582 - 588. (LIU Shu-tian, CHANG Chong-yi, YANG Hai-tian, et al. Prediction of viscoelastic property of unidirectionally jointed rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(4): 582 - 588. (in Chinese))
- [10] 陈育民, 刘汉龙. 邓肯-张本构模型在FLAC^{3D}中的开发与实现[J]. 岩土力学, 2007, **28**(10): 2123 - 2126. (CHEN Yu-min, LIU Han-long. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in FLAC^{3D}[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(10): 2123 - 2126. (in Chinese))
- [11] 朱道建, 杨林德, 黄建勇. 厦门海底隧道地表沉降控制效果分析及其预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **22**(6): 2356 - 2362. (ZHU Dao-jian, YANG Lin-de, HUANG Jian-yong. Analysis and prediction of controlling effect of surface settlement on Xiamen subsea tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **22**(6): 2356 - 2362. (in Chinese))
- [12] 尤明庆, 华安增. 岩石单轴压缩的破坏形式和承载能力降低[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, **17**(3): 292 - 296. (YOU Ming-qing, HUA An-zeng. Damage form of rock uniaxial compression and weaken of bearing capacity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, **17**(3): 292 - 296. (in Chinese))
- [13] 谢和平, 陈忠辉. 岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 60 - 62. (XIE He-ping, CHEN Zhong-hui. Rock mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2004: 60 - 62 (in Chinese))
- [14] 朱道建, 杨林德, 蔡永昌. 柱状节理岩体压缩破坏过程模拟分析及机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(4): 716 - 724. (ZHU Dao-jian, YANG Lin-de, CAI Yong-chang. Simulation analysis of compressive failure process of columnar jointed rock mass and research on failure mechanism[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(4): 716 - 724. (in Chinese))

本期广告索引

- 彩色广告 封2 北京金土木软件技术有限公司
封3 北京理正软件设计研究院有限公司
封4 上海分元土木工程科技有限公司
前插1 武汉中科智创岩土技术有限公司
前插2 金源土木工程仪器厂
后插1 广州市中海达测绘仪器有限公司
后插2 台州市建元工程勘察仪器有限公司
后插3 常州金土木工程仪器有限公司
后插4 中仿科技