

断续节理岩体随机模型三维离散元数值模拟*

汪远年 李世海

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

摘要 针对断续节理岩体提出了一种随机计算模型。在该模型中,假设结构面的形状为正方形,通过岩体结构面的统计分布函数模拟结构面的空间随机分布。给出了随机节理模型的实现方法,对该随机模型的算法可靠性进行了验证。通过单向加载模拟试验研究了节理岩体破坏强度与节理倾角及节理连通率等因素的关系,并与极限平衡条件推导的理论结果进行了比较,分析了数值模拟结果与极限平衡理论结果的异同性,进而验证了节理随机计算模型的可靠性。同时,研究了节理连通率与岩体等效弹性模量之间的影响关系,给出了二者的影响关系式。

关键词 岩石力学,随机模型,结构面,离散元,断续节理岩体

分类号 TU 452, O 242

文献标识码 A

文章编号 1000-6915(2004)21-3652-07

STOCHASTIC MODEL AND NUMERICAL SIMULATION FOR DISCONTINUOUS JOINTED ROCK MASS USING 3D DEM

Wang Yuannian, Li Shihai

(*Institute of Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080 China*)

Abstract A stochastic model for discontinuous jointed rock mass is presented. In the model, according to the statistical distribution function of structural surface, the spatial stochastic distribution of structural surface is simulated on the assumption that the shape of structural surface is square. The implementation approach and algorithmic reliability of the stochastic model are revealed. Through uniaxial compression simulation, the relation between strength of jointed rock mass and its influence factors such as joint obliquity and connection rate is studied under one set of diagonal joints. The computational results are compared with the theoretical value which is deduced through limit equilibrium condition to validate the stochastic joint model, and the similarities and differences between them are analyzed. Also the relationship between equivalent elastic modulus of discontinuous rock mass and connection rate of joint is studied with their influencing relation presented.

Key words rock mechanics, stochastic model, structural surface, DEM, discontinuous jointed rock mass

1 引言

岩土工程中经常会遇到节理岩体,通常节理岩体的节理面并非完全贯通,而表现为结构面大小服从一定的统计分布规律。大量岩体工程(边坡、坝基、隧道)的破坏和失稳,通常是由于开挖面附近载

荷的变化,岩体中断续节理面的张开、闭合和扩展而产生的新贯通滑移面所引起的。研究岩体中结构面的变化过程是岩土力学研究的重要内容之一。

关于结构面产状力学效应,文[1]利用石膏模型研究了岩体内的结构面,结果表明,因其产状不同,岩体力学性质具有很强的方向性;文[2]通过试验对含交叉节理的岩体的强度提出了复合破坏准

2003年12月8日收到初稿,2004年2月2日收到修改稿。

* 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412703)及中国科学院创新项目(KJCX2-SW-L1)资助课题。

作者 汪远年 简介:男,29岁,2003年于中国科学院力学研究所获工程力学专业硕士学位,主要从事岩土结构数值计算方面的研究工作。

则;文[3]用统计的方法给出了含节理岩体的损伤模型;文[4]建立了岩桥在不同贯通机制下,其峰值强度的计算模型;文[5]根据断续节理岩体结构力学效应和压剪断裂破坏特征,用 Hoek-Brown 准则预测断续节理岩体的强度;文[6, 7]对节理岩体的破坏方式进行过三维离散元计算分析。但是,对节理岩体三维问题进行定量的描述无论是在数值计算方面还是在试验研究方面都还有待于更深入的研究。

大量研究表明,岩体中结构面的分布具有统计的确定性特征,或者说具有表观随机性掩盖下的潜藏确定性特征。岩体结构面的产状规模、间距、连通率以及结构面表面形态的研究结果表明,这些参数无一不具有某种确定的概率分布形式,通过大量的现场地质测量数据,可以获取这些结构面参数的概率分布形式和概率参数,从而,可以用随机模拟的方法产生特定概率分布的随机变量来建立节理岩体的随机模型。借助于三维离散元法的3组节理面划分块体单元的思想可以比较有效地建立断续节理岩体的随机模型,并在此基础上对断续节理岩体的力学特性作出进一步的研究。

作者针对断续节理岩体提出了一种随机计算模型,通过岩体结构面的统计分布函数模拟结构面的空间随机分布。给出了随机节理模型的实现方法,并对该随机模型的算法的可靠性进行了验证。通过单向加载模拟试验研究了节理岩体破坏强度与节理倾角及节理连通率等因素的关系,并与极限平衡条件推导的理论结果作了比较,进一步验证了节理随机计算模型的可靠性。

2 岩体节理的统计描述

岩体结构,从广义上讲,就是指岩体的物质分布和各种破裂的及潜在破裂的结构面排列组合的总体几何特征。岩体结构通常用下列5个基本要素来描述:结构面产状、形态、规模、间距(或密度)和张开度(隙宽)。大量具有这些要素的结构面的排列组合就组成了岩体结构的基本框架——岩体结构面网络。岩体中结构面的尺度变化范围是巨大的,可以从深大裂纹到显微裂纹,但岩体结构的研究通常只限于0.01~100 m的尺度范围。

在岩体露头面上,观察到的只能是结构面与露头面的交线,或称结构面迹线,因此,只能用迹线长度来表征结构面的规模。通常把迹线长度称为迹

长,用 l 表示,单位为 m,迹长的一半称之为半迹长。

结构面的迹长及其分布与结构面形状有关,也与结构面实际尺寸有关。结构面的平面形态及其形成机制至今尚不清楚,大多数学者把均质结晶岩体中的结构面视为圆形或椭圆形,但在层状介质中则多为长方形。在作者的研究中视结构面为正方形。

地质工程中,常采用测线测量方法测量与测线相交的结构面的迹长。测量方法:在露头面上平行地布置1条测线和1条删截线,测量与测线相交的结构面向删截线一侧的长度,当迹线超越删截线时按2线间的长度计,如图1所示。通常认为迹长分布的密度函数服从负指数分布。

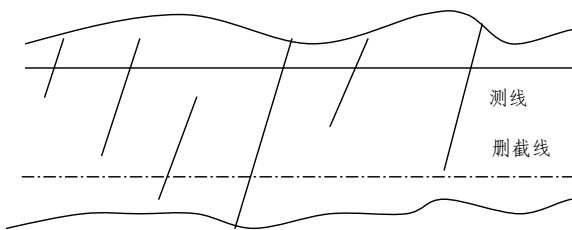


图1 迹长测量方法

Fig.1 Survey method of trace length

3 三维离散元法力学模型

作者讨论的三维离散元力学模型是基于 NURBM (Northwestern University Rigid Block Model)的面-面接触模型。离散元法是基于岩体的不连续性的,它认为岩体是由许多节理裂隙切割成的相互接触的单元组成的,因此,单元受节理等不连续结构面的控制,系统整体反映出岩体的空间各向异性。三维离散元法将岩体视为非连续弹性单元系统,单元之间通过虚拟的节理弹簧传递相互的作用力。作者采用面-面接触弹性模型的三维离散元法,其基本原理与方法可见文[8, 9]。

4 岩体随机节理模型实现方法

当节理岩体结构面空间分布确定后,假定结构面形状为正方形,在三维离散元法3组平行节理面划分块体单元的基础上,建立断续节理岩体随机模型,具体实施步骤如下。

4.1 给定结构面迹长分布函数

$$f(l) = \mu e^{-\mu l} \quad l \in (0, \infty) \quad (1)$$

式中： $\mu = 1/\bar{l}$ ， \bar{l} 为平均迹长。

4.2 由结构面迹长分布函数推算结构面面积分布函数

假定结构面形状为正方形，且面积 $s = l^2$ ，则有

$$f(s) = \frac{\mu}{2} s^{-\frac{1}{2}} e^{-\mu\sqrt{s}} \quad s \in (0, \infty) \quad (2)$$

实际问题中，结构面的迹长不会是趋于无穷大的，而是小于某一特定值的。当 $l < c$ 时，即截去 $l \geq c$ 的样本后，得截尾分布函数：

$$f(s) = \frac{\mu}{2(1 - e^{-\mu c})} s^{-\frac{1}{2}} e^{-\mu\sqrt{s}} \quad s \in (0, \infty) \quad (3)$$

4.3 根据结构面面积分布函数和贯通率确定不同大小结构面的个数

对某一确定的节理平面，已知贯通率 η 可求出总的连通面积 $s_{\text{通}} = s_{\text{总}}\eta$ ，然后，对式(3)表示的截尾分布函数 $f(s)$ 进行分区段积分，区段端点： $0, s_1, s_2, \dots, c^2$ 。每一区段积分的值 p_i 即为结构面大小在这一区段范围内的概率百分比。假定结构面的大小分别为 s_1, s_2, \dots, c^2 ，不同大小结构面的个数可以近似表示为 $n_i = [s_{\text{通}} p_i / s_i]$ ，“ $[\]$ ”表示对括号里面的数取整。

4.4 对已确定好的结构面大小和数目在每一划分好的节理面上进行随机分布

在离散元单元法划分块体时，岩体的节理面表现为由沿不同方向的接触单元(面)所构成。在已划分的节理面(离散元划分单元时假定的节理面，其中有部分可能不贯通)上，根据前面所得的结构面大小和数目用随机生成函数的办法随机分布这些结构面。随机分布完这些结构面后，对应于贯通节理和非贯通节理对节理面上所有的接触单元的物理参数(节理刚度、粘聚力、内摩擦角等)赋值。

5 断续节理岩体随机分布模拟结果

5.1 不同贯通率 η 下的随机生成结果

验证按不同节理贯通率随机生成的贯通节理单元数。算例中的研究区域为 $40\text{ m} \times 40\text{ m} \times 40\text{ m}$ ，节理正交且3组节理间距皆为 1 m 。任取某一节理面上的随机分布结果如表1，其中节理面上的节理单

元总数： $40 \times 40 = 1600$ 。由表1可以看出，不同随机过程生成的贯通节理单元数基本符合预先给定的贯通率要求。

表1 某一节理面上随机生成统计结果

Table 1 Statistic results of random generation on a joint face

贯通率 η	贯通节理单元数	理论值	误差/%
0.1	153	160	4.4
0.2	307	320	4.0
0.3	493	480	2.7
0.4	624	640	2.5
0.5	825	800	3.1

5.2 断续节理空间形态分布

图2是某一 $40\text{ m} \times 40\text{ m}$ 的节理平面上结构面贯通区域的随机生成示意图，其中贯通率为0.6，节理间距为 1 m 。图3给出的是随机生成完成后某一组

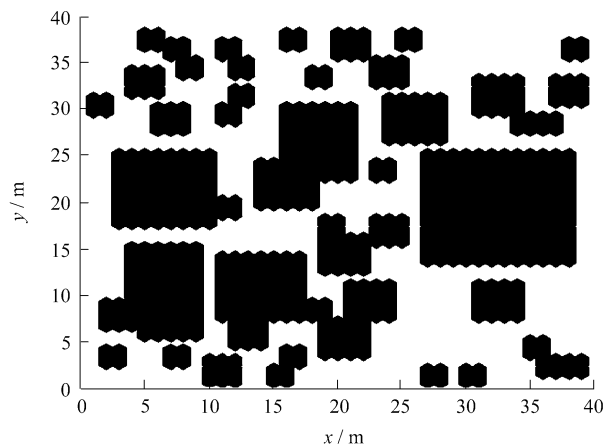


图2 某一节理面上贯通区域示意图

Fig.2 Sketch of connection area on a joint face

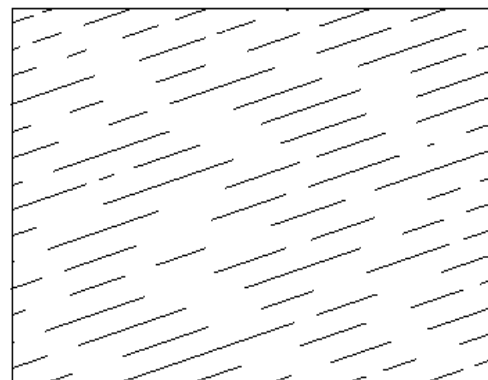


图3 某一组斜节理随机分布后的断面

Fig.3 Distribution of a set of diagonal joint on a section

斜节理的断面示意图。可以看出断续节理岩体的结构面分布随机性较好，可以比较好地描述断续节理岩体。

6 断续节理岩体结构面产状力学效应理论分析与数值模拟试验

6.1 断续节理岩体结构面产状力学效应理论分析

节理岩体的强度包括节理面和结构体的强度贡献，其中节理面的空间展布形式对岩体强度的影响集中反映为节理岩体强度的各向异性。对于结构效应较强的岩体，特别是断层、节理、裂隙成组分布的块裂结构、断续结构和碎裂结构，结构面的形态各异，给强度分析带来了困难。特别是断续节理岩体，岩桥的存在使得岩体破坏机制不同于普通节理岩体，其强度规律亦因此而独具特色。当前，对断续节理岩体的强度，国内外普遍采用的分析方法是将节理面抗剪强度参数 c_j, φ_j 和完整岩体(岩桥部分)抗剪强度参数 c_r, φ_r ，按连通率进行加权平均，也有按各自应力分配比进行加权平均的，这种分析方法的出发点是确认岩体沿节理平面发生剪切的破坏机理，即剪穿同一直线上的岩桥。如图 4，节理面上节理的贯通率为 η ；节理倾角为 β ；结构面抗剪强度参数为 c_j, φ_j ；岩石(岩桥部分)抗剪强度参数为 c_r, φ_r 。假定岩体沿节理面发生剪切破坏，根据极限平衡条件可得

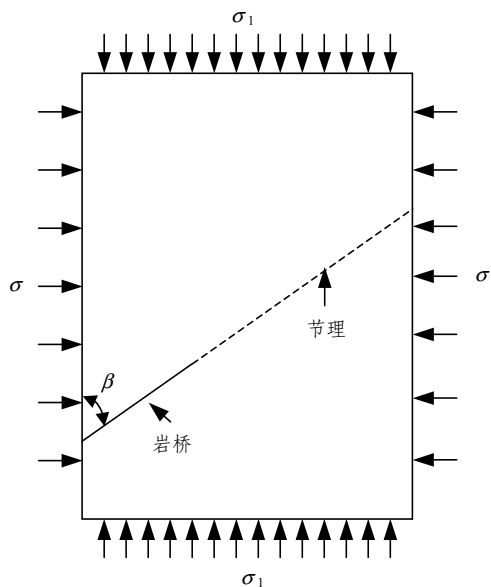


图4 结构面产状作用的力学模型

Fig.4 Mechanical model of attitude effect with structural surface

$$\sigma_1 = (1 - \eta) \cdot$$

$$\left[\sigma_3 \cot \beta \tan(\varphi_r + \beta) + \frac{c_r}{\sin \beta \cos \beta (1 - \tan \beta \tan \varphi_r)} \right] + \eta \left[\sigma_3 \cot \beta \tan(\varphi_j + \beta) + \frac{c_j}{\sin \beta \cos \beta (1 - \tan \beta \tan \varphi_j)} \right] \quad (4)$$

当 $\sigma_3 = 0$ 时，由式(1)求得

$$\sigma_1 = (1 - \eta) \cdot \frac{c_r}{\sin \beta \cos \beta (1 - \tan \beta \tan \varphi_r)} + \eta \frac{c_j}{\sin \beta \cos \beta (1 - \tan \beta \tan \varphi_j)} \quad (5)$$

这里只研究单轴加载情况下节理岩体的破坏强度。式(5)表明，当 $\beta = 0$ 和 $\beta = \pi/2$ 时，求得的实际为单轴抗压强度。

6.2 断续节理随机模型数值模拟及结果分析

下面分别从节理面倾角及连通率 2 个方面来对断续节理岩体的破坏强度进行分析，并比较由极限平衡条件得出的理论值与离散元法的数值计算结果。单向加载数值模拟试验中，轴向为均布荷载，侧向为自由边界，下表面为法向位移约束，如图 5。

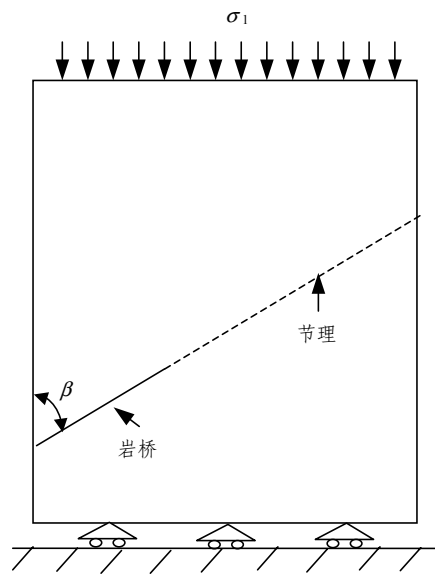


图5 数值模拟单向加载示意图

Fig.5 Sketch of uniaxial loading with numerical simulation

(1) 不同随机过程节理生成对结果的影响
对同一种结构面迹长分布函数，不同随机过程随机分布出来的结构面的空间分布形态会有一些的

差别，由于结构面空间的分布差异会对节理岩体的强度产生一定的影响，为此，给出了相同研究条件、不同随机过程情况下节理岩体荷载与加载位移(总变形)的关系曲线。

试验条件：研究区域为 20 m×20 m×20 m，1 组斜节理 $\beta=300^\circ$ ，连通率为 0.7，具体节理参数赋值如表 2。总共进行了 5 次不同随机过程单轴加载试验，试验结果相差不大，这里选取 3 次试验结果，如图 6 所示。可以看出：(1) 相同研究条件、不同随机过程情况下，节理岩体的变形和强度特性有一些差异，但强度的差异不是很大；(2) 节理岩体在低应力水平下接近线弹性变形，在达到完全破坏之前，由于局部岩体发生破坏，表现有“屈服”阶段出现，这和完整岩石材料的破坏有一定的不同之处。

表 2 接触单元物理参数

Table 2 Physical parameters of contact element

接触单元	法向刚度 /N·m ⁻³	切向刚度 /N·m ⁻³	粘聚力 /Pa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
结构面	1.5×10 ⁹	1.0×10 ⁹	2.0×10 ⁴	20
岩桥	3.0×10 ¹⁰	1.5×10 ¹⁰	2.0×10 ⁶	35

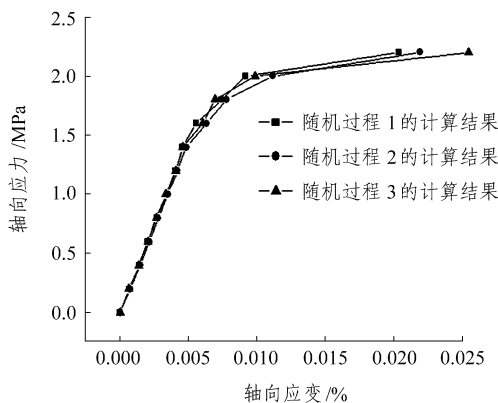


图 6 不同随机过程应力-应变关系曲线

Fig.6 Strain-stress curve under different stochastic process

(2) 节理面倾角对极限强度的影响

进行离散元计算时，采用 3 组节理面划分块体单元，这里为了简化问题，只考虑 1 组斜节理的效果，在节理参数赋值时把另外 2 组节理的强度值设置为相对很大，即不可破坏。研究区域大小为 20 m×20 m×20 m，1 组斜节理，连通率为 0.8，具体节理参数赋值如表 2。

由式(5)可知，节理面倾角对节理岩体的破坏强

度的影响并非是线性的。图 7 中曲线 a 与 b 给出了破坏强度与节理面倾角 β 的关系，可以看出：(1) 理论值略大于离散元计算值；(2) 当倾角 β 接近 0° 时岩体的破坏强度近似于岩石的单轴抗压强度；(3) 当倾角 β 接近临界值 54° 时，岩体的破坏强度近似于岩石的单轴抗压强度，此时破坏强度不再随倾角变化，即为单轴抗压强度。当参数值 c_r ， φ_r 及 c_j ， φ_j 发生改变时，这一临界值会改变。

为了说明模型适用的广泛性，特别增加了 2 组斜节理控制岩体强度的算例，其中增加的 1 组斜节理方向为平行于 X 轴，与 Z 轴夹角为 60°，并且该组斜节理方向保持不变，改变另 1 组斜节理的倾角 β ，计算其相应的强度值，计算结果如图 7 曲线 c 所示。可以看出 2 组斜节理控制下的岩体强度相对于 1 组节理控制下的岩体强度要低，而且岩体的破坏强度与其中 1 组节理面倾角 β 的关系相比 1 组节理面控制下的关系有所变化，相比 1 组节理面作用下的曲线 b，在 β 较小时极限强度降低较小，而在 β 较大时极限强度降低得比较大，主要是由于 2 组节理控制时其节理面的空间几何关系的相互作用对强度的影响所造成的。

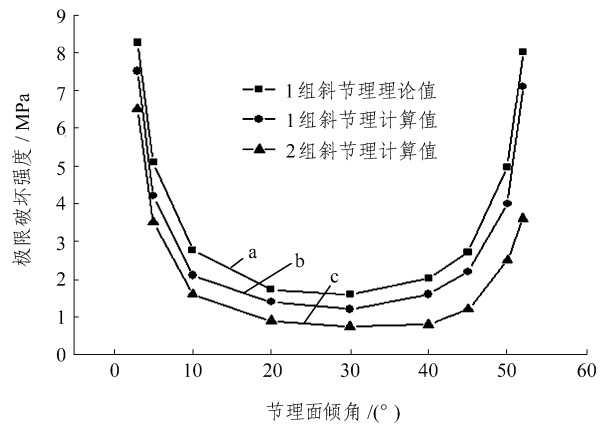


图 7 破坏强度与节理面倾角 β 的关系

Fig.7 Relations between limit strength and obliquity of joint face

由离散元计算所得的结果与采用极限平衡条件推出的理论曲线随倾角变化的趋势大致一致，只是采用离散元法计算所得的结果比理论值偏小。实际上，离散元法采用的是动态松弛法计算方式，其破坏由局部发生，逐渐扩展导致整体破坏，在这个过程中会发生应力聚集和破坏后应力的重新分布。而极限平衡条件假定节理岩体强度为结构面和岩桥极限强度的加权平均值，没有破坏的动态调整过程，

从而导致2种结果的差异。

图8给出的是离散元计算的达到破坏强度以后断面上的块体的位移矢量图，图9给出的是临界破坏强度以前断面上的块体的位移矢量图。可以看出，在未达到破坏强度以前岩体的变形是连续的，而当加载超出极限强度以后，出现整体失稳，块体沿节理面出现大位移的滑动。

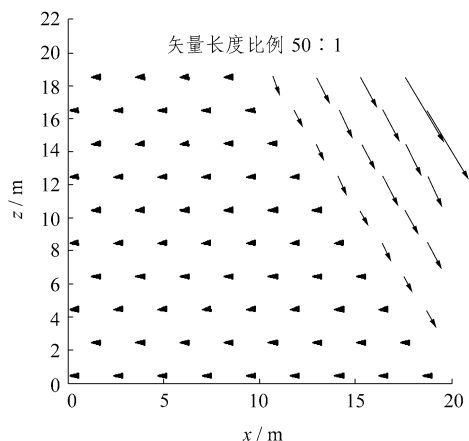


图8 破坏后断面位移矢量图

Fig.8 Displacement vector on a cross section after failure

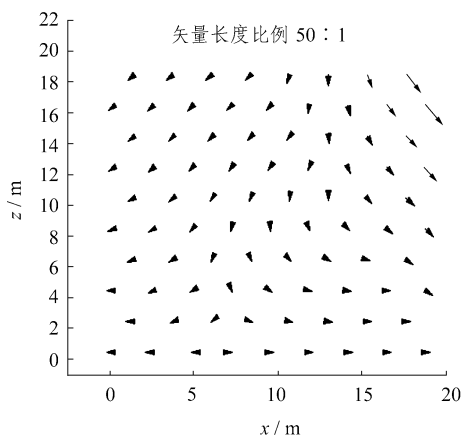


图9 达到破坏强度前断面位移矢量图

Fig.9 Displacement vectorgraph on a cross section just before failure

(3) 节理连通率对节理岩体破坏强度的影响

对于断续节理岩体，除了节理面倾角对其破坏强度影响比较大外，节理连通率也是影响其强度的一个至关重要的因素。由式(5)可明显看出来，当倾角 β 一定时，岩体破坏强度与节理贯通率 η 成线性关系。

计算时的研究区域、节理参数的选取和前面均一样，节理面倾角 β 为 30° ，改变节理连通率进行多次计算，得出不同连通率下的岩体的强度，并与

由极限平衡条件求得的理论值进行比较(见图10)。可以看出，(1)数值计算结果略小于理论值；(2)节理岩体强度值与连通率的关系基本成线性，离散元计算的拟合结果为 $\sigma_s = 6.64 - 6.71\eta$ ，由式(5)推得的解析结果为 $\sigma_s = 7.35 - 7.41\eta$ ，其中 σ_s 表示强度值，两者的变化趋势基本上是一致的；(3)断续节理岩体强度按照连通率加权平均岩桥和节理的强度的假定存在很大的不合理性，从某种意义上说，按各自应力分配比进行加权平均更可靠。

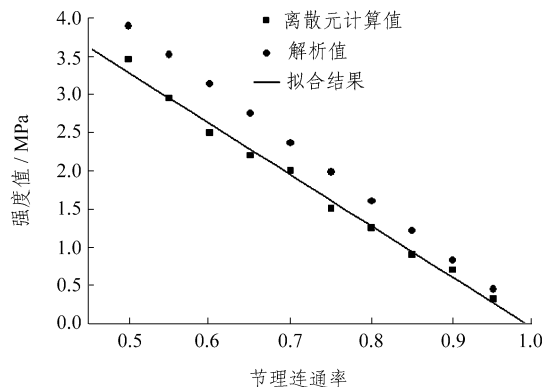


图10 破坏强度与节理连通率的关系

Fig.10 Relations between limit strength and connection rate of joint face

(4) 节理连通率对节理岩体等效弹性模量的影响

显然，断续节理岩体的变形特性参数应该受多个参数的共同影响。这些参数主要包括岩块的弹性模量 E_r ，节理间距 d ，节理刚度 K ，节理倾角 β ，节理连通率 η 。文[7]曾研究过完全贯通节理岩体的等效弹性模量 E 与这些参数之间的影响关系，并给出解析的表达式：

$$E = \frac{Kd}{(1 + \cos^2 \beta) + \frac{Kd}{E_r}} \quad (6)$$

这里假定节理单元间的法向刚度 K_n 与切相刚度 K_s 相等，即 $K = K_n = K_s$ 。

对于断续节理岩体，节理连通率也是影响其等效弹性模量 E 的一个很重要的因素，同时，由于其节理的不连续性，岩桥刚度 K_r 和结构面刚度 K_j 均有较大的差异，这里也假定法向刚度和切向刚度值相等，结合式(6)可推导出断续节理岩体的等效弹性模量解析表达式：

$$E = \frac{\eta K_j d}{(1 + \cos^2 \beta) + \frac{K_j d}{E_r}} + (1 - \eta) E_r \quad (7)$$

当 $\eta = 0$ 时, 节理岩体的等效弹性模量等于岩块的弹性模量, 这其实就是连续体模型的情况。

采用三维离散元法模拟 1 组节理情况下, 断续节理岩体等效弹性模量 E 与节理连通率 η 之间的关系。研究区域: $20\text{ m} \times 20\text{ m} \times 20\text{ m}$, 节理间距为 2 m , 只考虑 1 组斜节理的变形, 倾角 $\beta = 30^\circ$, 岩石弹性模量 $E_r = 30\text{ GPa}$ 。具体节理参数赋值如表 3。

表 3 模拟等效弹性模量的离散元计算参数选取

Table 3 Parameters used in DEM simulation for equivalent elastic modulus

接触单元	法向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$	切向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$
结构面	3.0×10^9	3.0×10^9
岩桥	3.0×10^{11}	3.0×10^{11}

通过离散元计算, 求得弹性阶段下不同连通率时的等效弹性模量, 结果见表 4。等效弹性模量数值模拟计算的结果以及解析解的曲线对比如图 11。其中解析解为 $E = E_r(1 - 0.97\eta)$, 计算拟合结果为 $E = E_r(1.01 - 0.94\eta)$ 。断续节理岩体的等效弹性模量与节理连通率成线性关系, 数值计算结果和解析解的趋势是一致的。

表 4 不同连通率下的节理岩体等效弹性模量

Table 4 Equivalent elastic modulus of jointed rock mass under different connection rate

连通率	等效弹性模量/GPa
0.9	4.68
0.8	7.92
0.7	11.02
0.6	13.68
0.5	15.24
0.4	17.98
0.3	22.97

7 结 语

(1) 断续节理岩体随机模型可以依据迹长分布和连通率给出节理岩体的结构面的随机分布状态。

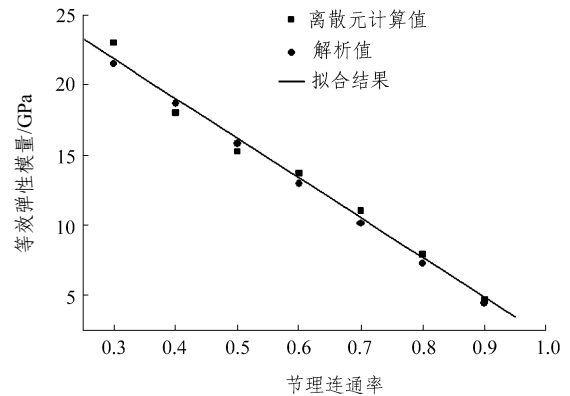


图 11 等效弹性模量与连通率间的关系曲线

Fig.11 Relation curve between equivalent elastic modulus and connection rate

(2) 该随机模型的单轴加载数值模拟强度试验相比极限平衡条件下通过连通率加权推得的破坏强度理论值略低。

(3) 节理面倾角和节理连通率是影响断续节理岩体的破坏强度的 2 个重要因素, 离散元数值计算结果和理论推导得出的节理岩体破坏强度与节理面倾角及节理连通率的影响关系基本一致。

(4) 节理连通率是影响断续节理岩体等效弹性模量的一个重要因素, 两者基本成线性关系。

参 考 文 献

- 1 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988
- 2 Hoek B, Brown E T. The Hoek-Brown failure criteria—a 1998 update[A]. In : Proceedings of Canadian Rock Mechanics Symposium[C]. Ottawa: [s. n.], 1998
- 3 伍法权. 统计岩体力学原理[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1993
- 4 陈卫忠, 朱维申. 船闸边坡断续节理岩体强度特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 479~486
- 5 刘东燕, 朱可善. 含断续节理岩体强度的各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(4): 366~371
- 6 李世海, 董大鹏, 燕琳. 含节理岩块单轴受压试验三维离散元数值模拟[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 648~652
- 7 陈伟, 李世海. 允许变形及断裂的三维离散元计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 545~549
- 8 王泳嘉, 邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991
- 9 Dowding C H, O'Connor K M. Distinct element modeling and analysis of mining induced subsidence[J]. Rock Mech. Rock Engng., 1992, 25(1): 1~24