

DOI: 10.11779/CJGE20221536

# 考虑破碎带节理分布特征的隧道开挖诱发近断层错动随机性分析

禹海涛<sup>1</sup>, 李婷婷<sup>2</sup>, 陈志伟<sup>2,3</sup>, 闫晓<sup>\*2</sup>

(1. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;  
3. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 隧道开挖往往会引起邻近断层错动, 并进一步诱发岩爆、地震等灾害。然而, 断层破碎带内部岩体物理力学特征复杂, 不仅表现出非连续性、非线性和各向异性, 还存在节理随机分布特征, 隧道开挖诱发近断层错动机制仍不清晰。基于连续-离散耦合分析方法建立了含断层工程场地多尺度力学模型, 采用基于离散单元法的人工合成岩体模型模拟断层破碎带, 采用有限差分法描述断层上、下盘及内部隧道开挖影响下的宏观动力特征。开展了近断层隧道开挖多因素模拟, 探究了断层岩体节理随机分布特征对近断层隧道开挖的影响规律。分析结果表明: 破碎带内部节理随机性对隧道开挖诱发近断层错动影响显著; 节理倾角均值越接近断层倾角, 隧道开挖导致的近断层错动量越大; 正交试验情况下, 断层节理倾角方差对最终错动量均值大小影响较小; 节理长度的均值和方差越大, 断层破碎带越容易发生错动; 节理密度越大, 破碎带介质越破碎, 断层带整体的强度和刚度越低, 抵抗错动的能力也越弱。通过对比分析得出节理分布特征参数对断层错动量均值影响程度的排序分布: 节理密度>节理倾角均值>节理长度均值>节理长度标准差>节理倾角标准差; 且当显著性水平为 0.05 时, 节理密度对断层错动量的影响达到显著水平 ( $p<0.05$ )。

**关键词:** 断层错动; 多尺度耦合; 随机性; 隧道开挖

中图分类号: U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)04-0746-09

**作者简介:** 禹海涛(1983—), 男, 工学博士, 博士后, 教授, 博士研究生导师, 主要从事地下结构抗震等方面的教学和科研工作。E-mail: yuhaitao@tongji.edu.cn。

## Stochastic analysis of fault dislocation induced by tunnel excavation considering distribution characteristics of joints in fracture zones

YU Haitao<sup>1</sup>, LI Tingting<sup>2</sup>, CHEN Zhiwei<sup>2,3</sup>, YAN Xiao<sup>\*2</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute, Shanghai 200125, China)

**Abstract:** Tunnel excavation often causes the dislocation of adjacent faults, and further induces rockbursts, earthquakes and other disasters. Due to the complex physical and mechanical characteristics of rock mass, the fault exhibits discontinuity, nonlinear and anisotropy and has the random distribution of joints, which makes the mechanism of adjacent fault dislocation induced by tunnel excavation still unclear. A multi-scale model is established based on the continuous-discrete coupling method. The synthetic rock mass model based on the discrete element method is used to simulate the fault damage zone, and the finite difference method is used to describe the macroscopic dynamic characteristics of the upper and lower walls. The influence laws of the random distribution characteristics of joints on the excavation simulation of a near-fault tunnel are explored. The results show that the randomness of joints in the fracture zone has a significant effect on fault dislocation. The fault dislocation increases with the mean dip angle of joints closer to that of fault. In the case of orthogonal tests, the variance of dip angle has small effects on the mean value of final dislocation. The increase of the mean and variance of joint length causes the fault prone to dislocation. The greater the joint density, the more broken the media in the fracture zone, the lower the overall strength and stiffness, and the weaker the resistance to dislocation.

Through a comparative analysis, the influence degree of distribution characteristic parameters of joints on the mean

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2022YFE0128400); 国家自然科学基金项目 (42177134); 中央高校基本科研业务费专项资金项目  
**收稿日期:** 2022-12-13

**\*通信作者** (E-mail: xiao\_yan@tongji.edu.cn)

value of fault dislocation is: density > mean value of dip angle > mean value of length > standard deviation of length > standard deviation of dip angle. When the significance level is 0.05, the influences of joint density on the momentum of fault dislocation reach a significant level ( $p < 0.05$ ).

**Key words:** fault dislocation; multi-scale coupling; randomness; tunnel excavation

## 0 引言

隧道等大型地下工程的开挖必然会引起岩体变形和围岩应力场的改变。当开挖范围临近断层时, 上、下盘岩体极有可能发生错动, 并进一步诱发岩爆、地震等灾害<sup>[1-2]</sup>。2005年10月至2007年8月, 瑞士圣哥达基线隧道修建期间, 地震台网监测到了112次微震事件, 隧道发生了严重的破坏, 包括衬砌的大范围开裂、剥落, 以及底板约0.5 m的抬升<sup>[3]</sup>。2009年11月28日, 锦屏二期水电站进水隧洞建设过程中发生了里氏震级为2.0的地震事件<sup>[4-5]</sup>。震后调查皆表明, 地震发生的主要原因是与隧道开挖面邻近的断层破碎带在隧道开挖扰动作用下发生了多次错动<sup>[6-7]</sup>。

对于隧道开挖诱发近断层错动的问题, 目前研究工作以数值模拟为主, 学者们主要通过接触面法<sup>[8-9]</sup>、弱化带法<sup>[10]</sup>或两者结合的方式<sup>[11]</sup>模拟断层破碎带。然而, 断层破碎带内部含有角砾岩、碎裂岩等填充物, 上述模拟方法无法考虑由此产生的不连续性、非线性和各向异性。为了克服传统数值模拟方法的局限性, 笔者<sup>[12]</sup>采用基于离散单元法的人工合成岩体模型(synthetic rock mass, SRM)模拟断层破碎带, 即通过在完整岩石中嵌入节理的方式来模拟破裂岩体, 不仅能表征破碎带既有的非连续、不均匀特征, 还能描述岩块的进一步渐进性破裂过程。然而该方法无法直接获得破碎带介质中节理的尺寸、方位及出现频率, 只能采用确定的节理的统计分布类型及参数。已有研究<sup>[13]</sup>表明, 即使岩体内部节理服从相同的统计分布, 不同样本也会在强度、破坏形式等方面表现出截然不同的特征。因此, 为了探究隧道开挖诱发近断层错动机制, 若仅考虑单一样本, 而不考虑随机性的影响, 必然会影响计算结果的代表性和实际意义。

本文基于连续-离散耦合分析方法, 其中断层破碎带和上下盘岩体分别采用离散元和有限差分法来建立, 充分利用两者建模优势。基于离散元的合成岩体模型, 依据断层破碎带内部节理的统计分布模型和特征参数, 建立了表征破碎带内部节理分布特征的随机多尺度分析模型, 开展了隧道开挖诱发断层错动的多因素随机性分析, 探讨了断层岩体节理随机特征参数如节理倾角、节理长度和节理密度对隧道开挖诱发近断层错动的影响规律。

## 1 模型与方法

### 1.1 断层破碎带模拟

基于离散元细观力学模型<sup>[9, 12]</sup>, 断层破碎带采用人工合成岩体模型(SRM)模拟, 即采用平行黏结模型(PBM)模拟完整岩石, 将光滑节理模型(SJM)按照离散裂隙网络(DFN)嵌入颗粒集合体中生成裂隙岩体, 如图1所示。其中, 对于平行黏结模型和光滑节理模型, 可以通过模拟室内试验的方式标定其细观力学参数。

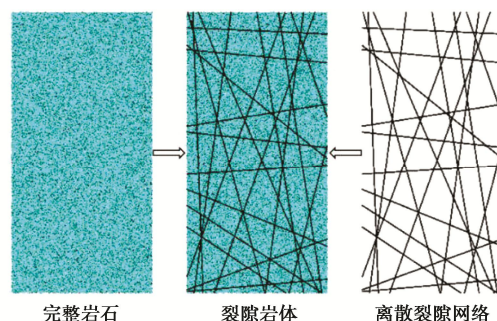


图1 人工合成岩体模型示意图

Fig. 1 Model of synthetic rock mass

通常情况下, 不能直接确定破碎带中节理的尺寸、方位以及出现频率, 但可以借助地质勘探或者地球物理方法来估计断层带内部节理特征, 将有助于确定节理的统计分布。节理特征分布通常可以考虑为正态分布<sup>[14]</sup>。在离散元软件PFC中, 可以基于蒙特卡洛方法生成随机离散裂隙网络以模拟节理的空间分布, 具体步骤(图2)包括: 首先, 确定节理的统计分布模型以及物理特性参数; 然后, 利用“fracture template create”命令创建裂隙模板, 包含了离散裂隙网络的统计信息, 可以用来创建一系列具体的离散裂隙网络, 程序将根据指定的随机种子(random seed)生成一组随机数, 从而确定裂隙的位置、倾角、长度等参数并生成具体的裂隙模型; 最后, 程序会判断生成的裂隙数目是否达到指定要求, 若达到目标数目, 结束循环, 否则将返回继续生成裂隙。

### 1.2 近断层隧道开挖模拟

假设隧道开挖方向与断层面平行, 可将近断层隧道开挖简化为平面应变问题, 如图3所示。为降低计算代价, 采用有限差分法描述断层上盘、下盘以及内部隧道开挖影响下的宏观动力特征, 宏细观模型之间通过界面耦合方式来满足连续性条件。需要说明的是,

本文主要关注断层带内部节理分布特性对其错动的影响机制，故简化了断层带到原岩的节理过渡，并将错动观测点分别布置在断层带与上下盘的边界上。

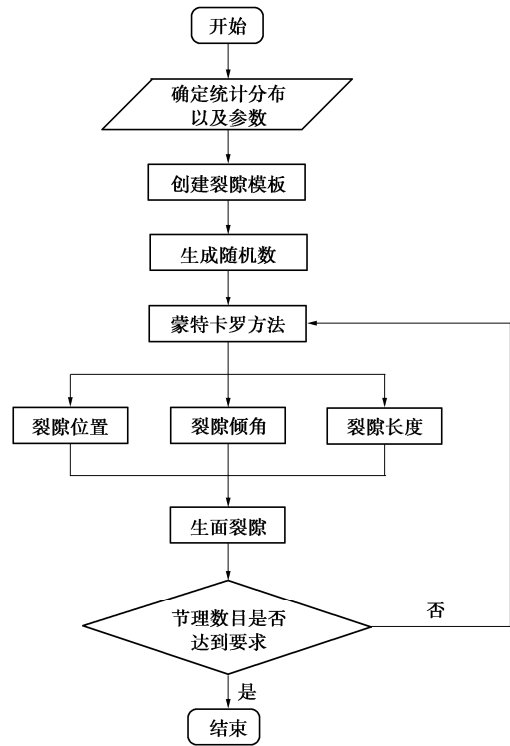


图2 随机离散裂隙网络的生成

Fig. 2 Generation of random discrete fracture network

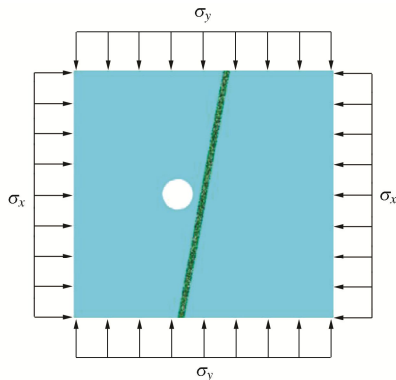


图3 近断层隧道开挖模拟

Fig. 3 Simulation of tunnel excavation near fault

为考虑远场的初始地应力作用，在模型的上、下边界施加竖向均布荷载  $\sigma_y$ ；左、右边界施加水平均布荷载  $\sigma_x$ 。初始地应力场的具体施加流程如下：首先，将模型的材料强度参数均设置为较大值，施加应力边界条件并进行弹性求解，直至模型达到平衡；然后，将强度参数调整为实际取值并进行求解，直至模型再次达到平衡；最后，将模型的位移和速度清零，从而获得初始地应力场。采用有限差分软件  $\text{FLAC}^{2\text{D}}$  内置的“zone relax”方法来模拟隧道开挖过程中应力的逐步释放，该方法通过乘以给定的折减系数来减小单元的刚度、应力和密度，从而实现隧道开挖过程模拟。

当折减系数为 0 时，开挖区域将被赋予“null”模型，即该区域被完全“开挖”。

1.3 考虑节理分布特征的随机多尺度模型

基于上述内容，建立考虑破碎带内部节理特征的随机多尺度模型，以进行隧道开挖诱发断层错动模拟。模拟流程如图 4 所示，具体步骤如下：

(1) 根据现场调查确定破碎带内部节理统计分布模型及特征参数。利用“fracture template create”命令创建裂隙模板，以储存上述统计信息。此外，还需要确定节理数量评价指标。

(2) 在 PFC 程序中指定随机种子数生成一组随机数，确定裂隙的位置、倾角、长度并生成具体的裂隙模型。离散裂隙网络的统计特征参数相同时，不同随机种子数代表不同的样本，即一个随机种子数代表一个具体的离散裂隙网络。根据指定节理分布统计参数以及随机种子数生成离散裂隙网络。

(3) 按 1.2 节所述流程建立基于连续-离散耦合方法的多尺度数值模型。同样按 1.2 节所述方法进行隧道开挖诱发近断层错动的模拟，并记录各观测点处断层错动量的变化。

(4) 将前  $N$  次模拟中断层错动量均值记为  $\mu(N)$ ，并编写 fish 程序进行计算和储存。每计算一次  $\mu(N)$ ，均按下式进行均值收敛判断：

$$\frac{|\mu(N) - \mu(N-1)|}{|\mu(N-1)|} \leq 0.001 \quad (1)$$

重复步骤 (2) ~ (4)，使蒙特卡洛模拟次数不小于  $N_{\text{sim}}$ ，并对计算得到的结果进行统计分析。

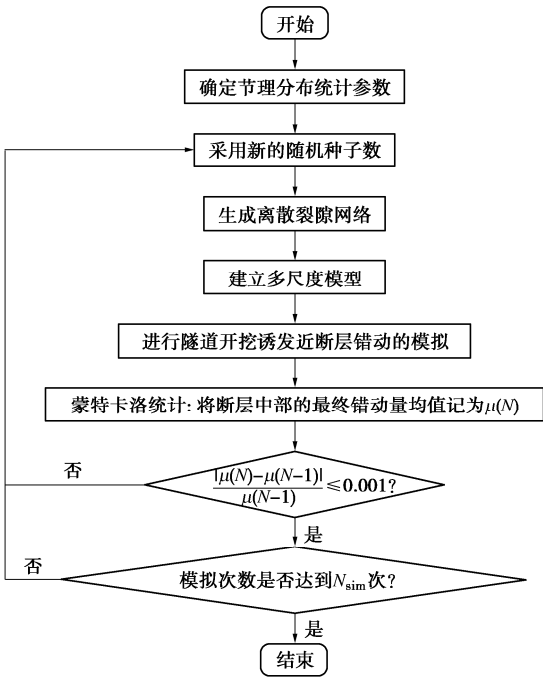


图4 模拟流程

Fig. 4 Simulation process

2 数值算例

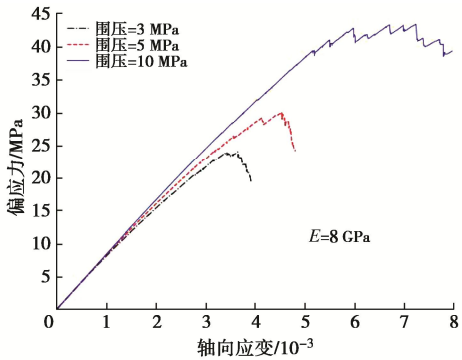
2.1 模型参数

鉴于实际工程中最常见的断层宽度分布从  $m^2$  到  $m$  级不等, 且隧道或地下洞室设计一般远离宽度较大的断层, 故本算例假设断层破碎带宽度为 2 m。断层倾角为  $80^\circ$ , 隧洞断面为圆形, 直径为 10 m, 位于上盘, 且与断层走向平行, 隧道边缘与破碎带边缘水平距离为 2 m<sup>[7]</sup>。对于初始地应力场模拟, 在模型上、下边界施加均布荷载 15 MPa, 因模型高 100 m, 水平地应力变化可忽略, 故左、右边界施加均布荷载 10 MPa。上、下盘岩体为 III 级围岩, 本构模型采用 Drucker-Prager 准则, 材料参数如表 1 所示。

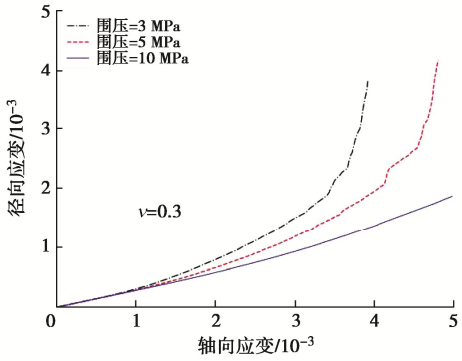
表 1 DP 模型参数

Table 1 Parameters of DP model				
密度/ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^\circ$ )
2200	8	0.3	400	31

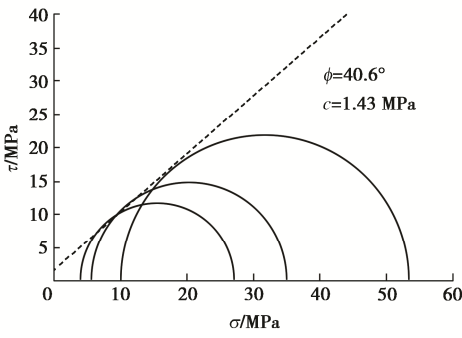
PFC 通过颗粒间细观接触模型表征介质物理力学性质, 建模前需进行细观参数标定。针对完整岩石材料采用平行黏结模型, 通过双轴压缩试验标定。本算例假定破碎带中完整岩石力学参数同表 1, 采用高 10 m, 宽 5 m 的试样模型, 分别开展围压为 3, 5, 和 10 MPa 的双向压缩数值试验。标定后的轴向应变-偏应力、轴向应变-径向应变和莫尔-库仑拟合曲线如图 5 所示, 标定后细观力学参数如表 2 所示。



(a) 偏应力-轴向应变曲线



(b) 径向应变-轴向应变曲线



(c) 应力莫尔圆与强度包络曲线

图 5 围岩参数标定结果图

Fig.5 Parameter calibration for surrounding rock

对于断层破碎带中的不连续面, 本研究采用文献[9]所述的直剪试验标定细观参数。数值标定试样高和宽均设置为 10 m, 分别进行法向应力为 2~10 MPa 时的直剪试验, 标定后的细观参数以及对应的宏观参数如表 3 所示。图 6 描述了含节理岩体法向应力与剪切强度之间的关系。

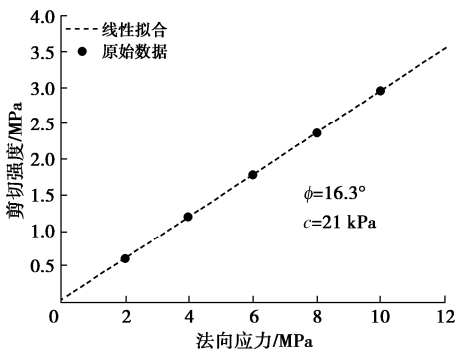


图 6 节理参数标定结果图

Fig. 6 Parameter calibration for joints

2.2 观测方案

本算例分 10 步进行开挖, 在断层上、下盘分别布置 7 对位移观测点, 如图 7 所示, 按照式 (2) 编制 fish 函数记录每次开挖后的断层错动量  $\Delta l_i$ 。 $\Delta l_i > 0$  时, 下盘相对于上盘向上运动;  $\Delta l_i < 0$  时, 下盘相对于上盘向下运动。

$$\Delta l_i = (d_i - u_i) \cdot L - [(d_i)_0 - (u_i)_0] \cdot L \quad (2)$$

式中:  $u_i$  为上盘观测点  $i$  的坐标向量,  $d_i$  为下盘观测点  $i$  的坐标向量,  $L$  为断层倾斜方向向量, 下标 0 表示开挖之前的状态。

2.3 计算工况

本算例假定节理位置在计算域内服从均匀分布; 节理倾角服从均值为  $\mu_{dip}$ 、标准差为  $\sigma_{dip}$  的正态分布; 节理长度服从均值为  $\mu_{len}$ 、标准差为  $\sigma_{len}$  的正态分布。采用节理密度  $FD$  作为节理数量指标, 即单位面积内节理总长度。节理参数可依据文献[11]得到。

为研究上述 5 个节理统计参数对隧道开挖诱发近



表 2 平行黏结模型参数  
Table 2 Parameters of parallel bonded model

线性组			平行黏结组				
有效模量/GPa	刚度比	摩擦系数	有效模量/GPa	刚度比	摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	黏结强度/MPa
6.5	3.6	0.577	6.5	3.6	85	12	10

断层错动的影响，将每个参数作为可变因素，各取 5 个不同值（水平），即五因素五水平。若按全面试验要求，则要计算  $5^5=3125$  个工况，计算代价过于高昂。为此，按照正交试验思想，选择有代表性的水平组合进行计算分析。针对五因素五水平问题，采用  $L25(5^6)$  正交表，共设置 25 个工况，如表 4 所示。

表 3 光滑节理模型参数及对应的宏观参数

Table 3 Parameters of smooth-joint model and corresponding macroscopic parameters				
宏观参数				
法向刚度/ GPa	切向刚度/ GPa	黏结强度/ kPa	抗拉强度/ kPa	摩擦角/(°)
20	6	4	1	0.3

表 4 正交设计表

Table 4 Orthogonal design table					
编号	$\mu_{\text{dip}}/(^{\circ})$	$\sigma_{\text{dip}}/(^{\circ})$	$\mu_{\text{len}}/\text{m}$	$\sigma_{\text{len}}/\text{m}$	FD
S1	40	20	4	1	1
S2	40	30	8	7	5
S3	40	40	12	3	4
S4	40	50	6	9	3
S5	40	60	10	5	2
S6	60	20	12	7	3
S7	60	30	6	3	2
S8	60	40	10	9	1
S9	60	50	4	5	5
S10	60	60	8	1	4
S11	80	20	10	3	5
S12	80	30	4	9	4
S13	80	40	8	5	3
S14	80	50	12	1	2
S15	80	60	6	7	1
S16	100	20	8	9	2
S17	100	30	12	5	1
S18	100	40	6	1	5
S19	100	50	10	7	4
S20	100	60	4	3	3
S21	120	20	6	5	4
S22	120	30	10	1	3
S23	120	40	4	7	2
S24	120	50	8	3	1
S25	120	60	12	9	5

3 结果分析

3.1 隧道开挖过程及对邻近断层带的影响分析

取 S13 作为基本工况，图 8 给出了隧道开挖过程

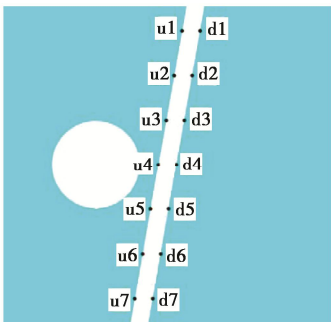


图 7 观测点布置

Fig. 7 Locations of monitoring points

中周围围岩的应力云图和邻近断层带内的岩体裂隙发展过程。由图可知，随着开挖过程中的应力释放，其扰动范围不断扩大，且邻近断层带内裂隙明显增多。图 9 为不同观测点处的断层错动量。随着隧道开挖，断层错动量逐渐增加，且增加速率不断加快，当折减系数达到 0.1 时，断层趋于稳定。值得注意的是，断层在不同空间位置处表现出不同的错动形式。当断层深度小于隧道开挖面深度时（观测点 1~4），断层错动量为正，呈现正断层错动形式；当断层深度大于隧道开挖面深度时（观测点 5~7），断层错动量为负，呈现逆断层错动形式。同时，距离隧道开挖面水平越近，错动量越大，越易诱发地震，这与圣哥达基线隧道观测到的地震现象相符，其中震源和隧道开挖面均位于相同深度。

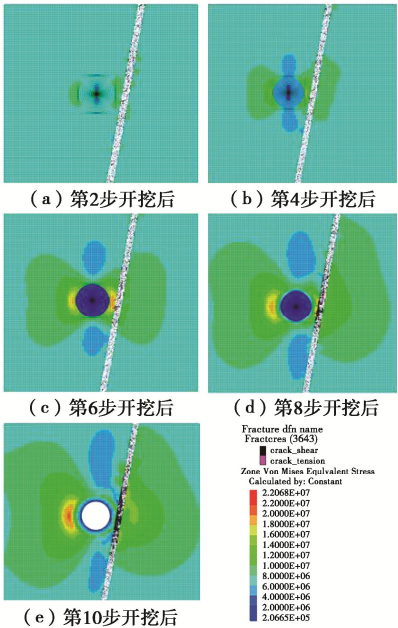


图 8 隧道开挖过程应力云图

Fig. 8 Stress nephograms during excavation process for Case S13

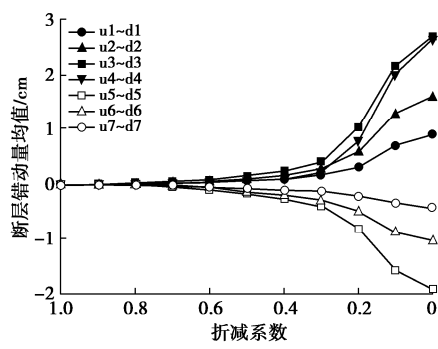


图 9 工况 S13 各观测点错动量均值

Fig. 9 Fault dislocations during excavation process for Case S13

3.2 蒙特卡洛收敛性分析

以工况 S13 为例, 进行 200 次蒙特卡洛试算, 图 10 描述了观测点 3, 4, 5 处 (图 7) 断层最终错动量均值和标准差随蒙特卡洛模拟次数的变化。可以看出, 模拟次数达到 100 次时可以获得计算结果的收敛值。在保证正确性的前提下, 为降低计算代价, 后续工况均基于 100 次蒙特卡洛模拟结果进行对比分析。

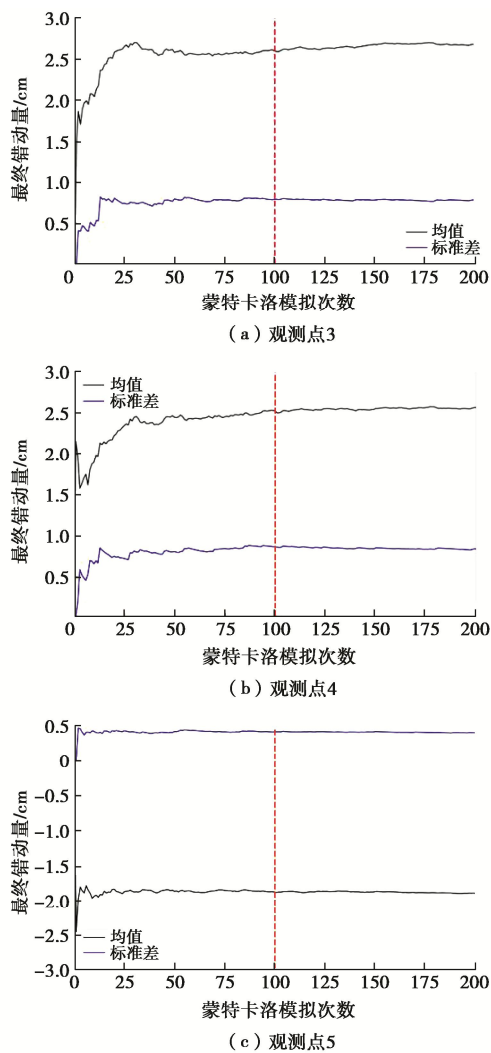


图 10 各观测点最终错动量计算结果

Fig. 10 Dislocations at different monitoring points

3.3 节理随机性的影响

同样以工况 S13 为例, 取样 100 次的计算结果如图 11 所示。可以看出, 在开挖的全过程中, 各样本的计算结果均表现出显著差异, 尤其是开挖完成后的错动量上限可达到下限的 6 倍。可见, 在实际工程中不能确定不连续面分布的情况下, 若仅考虑单一样本的确定性分析, 势必不能包络最不利情况, 而对工程安全构成威胁。故对于隧道开挖诱发近断层错动机制研究, 应考虑破碎带内部节理随机性。基于全部样本的计算结果, 可计算出样本各观测点错动量均值以及

95%置信区间分布 ( $\mu - 1.69 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \mu + 1.69 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ ), 其中  $\mu$  为均值,  $\sigma$  为标准差,  $n$  为样本数量。可以看出, 相比错动量的上、下限距离, 95%置信区间宽度较小, 表明样本均值可以精确地估计总体的均值变化。

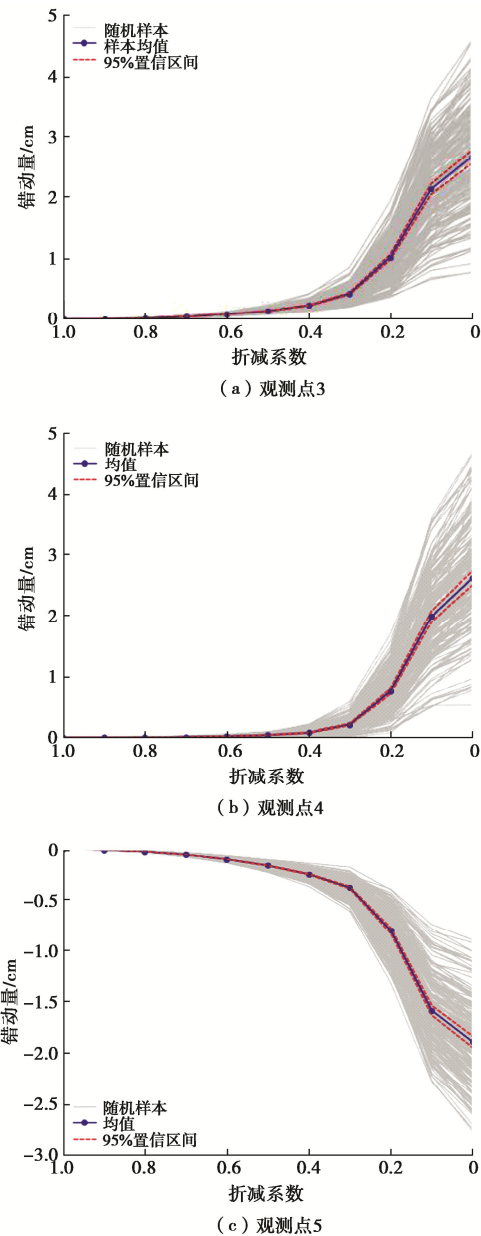


图 11 考虑破碎带内部节理随机性的模拟结果

Fig. 11 Simulated results considering randomness of joints

### 3.4 节理几何参数影响分析

图12给出了节理倾角均值 $\mu_{\text{dip}}$ 对断层最终错动量均值的影响。图中各数据点的效应值(错动量均值)为该水平( $\mu_{\text{dip}}$ )对应所有工况计算结果的平均值。如, $\mu_{\text{dip}}$ 为 $40^\circ$ 时,观测点3的最终错动量均值为工况S1~S5计算的观测点3最终错动量均值的平均值,后续分析均作类似处理。由图12可知,破碎带内 $\mu_{\text{dip}}$ 越接近断层倾角( $80^\circ$ ),近断层错动量越大。

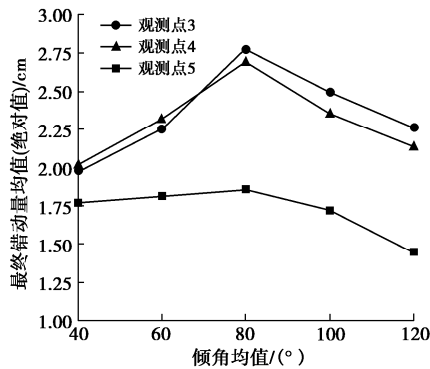


图12 错动量均值(绝对值)-倾角均值

Fig. 12 Mean of dislocation (absolute) vs. mean of dip

图13为最终错动量均值与节理倾角标准差 $\sigma_{\text{dip}}$ 的关系曲线。可看出,正交试验情况下, $\sigma_{\text{dip}}$ 对最终错动量均值的影响较小。需注意的是,标准差会影响节理倾角与均值之间的差异度,标准差越大,节理倾角与均值的差距越大。如图14所示,当节理倾角均值为 $80^\circ$ 时,标准差越大,断层错动量越小。这正如图12所示,节理倾角均值 $\mu_{\text{dip}}$ 越接近断层倾角,最终错动量越大, $\sigma_{\text{dip}}$ 影响 $\mu_{\text{dip}}$ 的代表性,从而影响节理倾角与断层的相对方位关系。

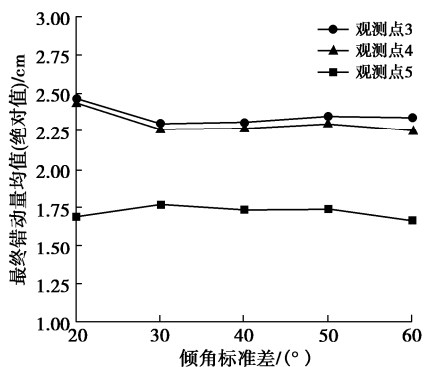


图13 错动量均值(绝对值)-倾角标准差

Fig. 13 Mean of dislocation (absolute) vs. standard deviation of dip

图15反映了断层最终错动量均值与节理长度均值 $\mu_{\text{len}}$ 的变化关系。可以看出,断层最终错动量总体上随着 $\mu_{\text{len}}$ 的增加而增长。这是由于 $\mu_{\text{len}}$ 较小时,岩体中生成大量长度较小的非贯通节理,形成了大量岩桥<sup>[15]</sup>,对断层错动的抵抗能力较强;而 $\mu_{\text{len}}$ 取值越大,岩体越容易出现局部贯通,导致破碎带介质强度下降,抵

抗剪切的能力变弱,从而更容易发生错动。

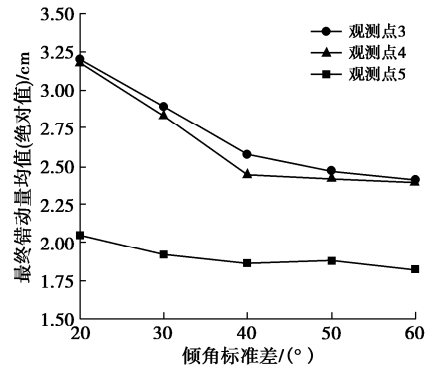


图14 倾角均值为 $80^\circ$ 时错动量均值-倾角标准差

Fig. 14 Mean of dislocation vs.  $\sigma_{\text{dip}}$  when  $\mu_{\text{dip}} = 80^\circ$

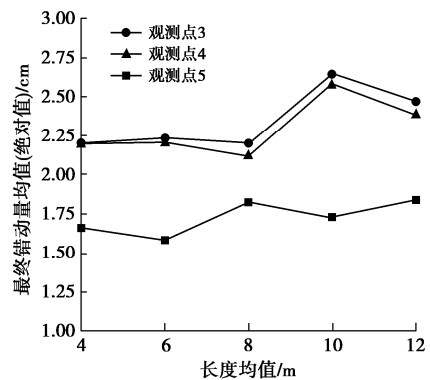


图15 错动量均值(绝对值)-长度均值

Fig. 15 Mean of dislocation (absolute) vs. mean of length

图16给出了节理长度标准差 $\sigma_{\text{len}}$ 变化对断层最终错动量的影响。可以看出,断层最终错动量总体上随着 $\sigma_{\text{len}}$ 的增长而增长。这是因为 $\sigma_{\text{len}}$ 取值较大时,出现了部分较大的不连续面,岩体可能出现局部贯通,断层更容易沿着这些不连续面发生错动。

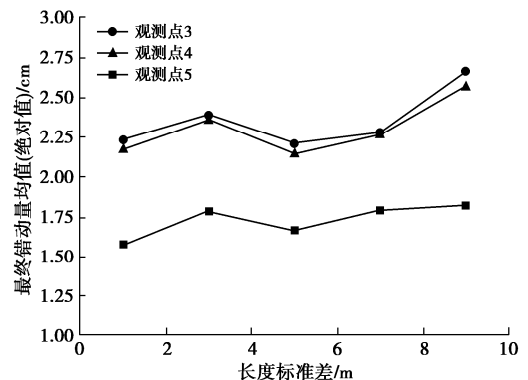


图16 错动量均值(绝对值)-长度标准差

Fig. 16 Mean of dislocation (absolute) vs.  $\sigma_{\text{len}}$

### 3.5 节理密度影响分析

图17给出了节理密度FD变化对断层最终错动量均值的影响。可看出,FD越大,断层各观测点处错动量增长明显。这是由于FD越大破碎带介质越破碎,整体刚度和强度越低,抗错动的能力也就越弱。

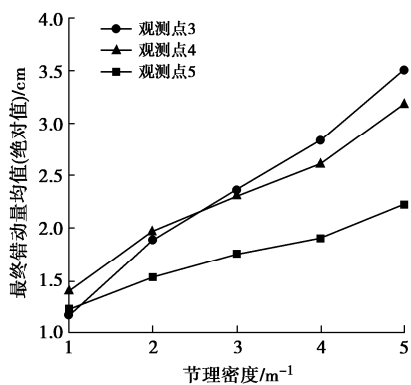


图 17 错动量均值-节理密度

Fig. 17 Mean of dislocation (absolute) vs. joint density

4 讨 论

针对试验结果, 可通过极差或方差分析判断影响因素的优劣情况, 而确定最优或最不利组合<sup>[16]</sup>。极差分析计算量小, 但无法精确评价各因素的重要程度。本研究采用方差分析研究各因素影响程度。

分别以观测点 3, 4, 5 的错动量均值为因变量, 对表 3 所述 25 个工况进行多因素方差分析, 各观测点的分析结果分别见表 5~7。表中  $R^2$  为回归平方和与总偏差平方和之比, 表示自变量对因变量变异的解释率。各观测点结果对应的  $R^2$  值分别为 0.962, 0.932, 0.966, 这表明节理特征参数如节理倾角均值、倾角标准差、长度均值、长度标准差、节理密度可以用来解释观测点 3, 4, 5 处错动量均值 96.2%, 93.2%, 96.6% 的变化原因。说明观测点 3, 4, 5 处的断层错动量均值与这 5 个因素的关联性极强。另外, 通过比较误差平方和大小可以看出, 各因素对观测点 3, 4, 5 处断层错动量均值影响大小顺序是: 节理密度>节理倾角均值>节理长度均值>节理长度标准差>节理倾角标准差。其中, 节理密度会对观测点 3, 4, 5 处断层错动量均值产生显著性影响 ( $p<0.05$ ), 而其它因素影响没有显著变化。

表 5 观测点 3 错动量均值多因素方差分析结果

Table 5 Results of multivariate analysis of variance of dislocation at monitoring point No. 3

均值	误差平方和	自由度	均方	F 检验值	p 值
截距	138.255	1	138.225	741.732	0.000**
节理倾角均值	1.688	4	0.422	2.264	0.224
节理倾角标准差	0.082	4	0.021	0.11	0.972
节理长度均值	0.791	4	0.198	1.061	0.478
节理长度标准差	0.705	4	0.176	0.946	0.521
节理密度	15.848	4	3.962	21.26	0.006**
残差	0.745	4	0.186		

$R^2 = 0.962$   
\*  $p<0.05$  \*\*  $p<0.01$

表 6 观测点 4 错动量均值多因素方差分析结果

Table 6 Results of multivariate analysis of variance of dislocation at monitoring point No. 4

均值	误差平方和	自由度	均方	F 检验值	p 值
截距	132.951	1	132.951	621.294	0.000**
节理倾角均值	1.337	4	0.334	1.562	0.338
节理倾角标准差	0.123	4	0.031	0.144	0.956
节理长度均值	0.685	4	0.171	0.801	0.583
节理长度标准差	0.569	4	0.142	0.665	0.649
节理密度	8.978	4	2.245	10.489	0.021*
残差	0.856	4	0.214		

$R^2 = 0.932$   
\*  $p<0.05$  \*\*  $p<0.01$

表 7 观测点 5 错动量均值多因素方差分析结果

Table 7 Results of multivariate analysis of variance of dislocation at monitoring point No. 5

均值	误差平方和	自由度	均方	F 检验值	p 值
截距	74.61	1	74.61	2209.555	0.000**
节理倾角均值	0.511	4	0.128	3.783	0.113
节理倾角标准差	0.035	4	0.009	0.261	0.889
节理长度均值	0.241	4	0.06	1.783	0.295
节理长度标准差	0.207	4	0.052	1.532	0.345
节理密度	2.864	4	0.716	21.206	0.006**
残差	0.135	4	0.034		

$R^2 = 0.966$   
\*  $p<0.05$  \*\*  $p<0.01$

5 结 论

本文建立了基于连续-离散耦合分析方法的含断层工程场地多尺度力学模型, 可同时表征断层两侧上下盘及内部隧道开挖模拟的宏观力学行为和断层破碎带的细观非均质离散特征。开展了近断层隧道开挖随机多尺度模拟分析, 探究了断层节理随机分布特征对近断层隧道开挖模拟的影响规律, 分析结果表明:

(1) 隧道开挖诱发近断层错动模拟中, 破碎带内部节理随机性对断层错动量计算结果影响显著。实际工程中应结合现场地质勘测数据合理考虑破碎带内部节理分布特征及随机性影响。

(2) 节理倾角均值越接近断层倾角, 开挖导致的断层错动量越大, 在正交试验情况下, 可忽略节理倾角方差对断层最终错动量均值大小的影响。

(3) 节理长度均值和方差越大, 岩体越容易出现贯通节理, 断层也更容易发生错动。

(4) 节理密度越大, 破碎带介质越破碎, 整体强度和刚度越低, 抵抗错动能力也越弱。

(5) 节理分布特征参数对断层错动量均值影响大小排序为: 节理密度>节理倾角均值>节理长度均值>节理长度标准差>节理倾角标准差, 且显著性水平为 0.05 时, 节理密度对断层错动量具有显著影响。



## 参考文献:

- [1] MANOUCHEHRIAN A, CAI M. Analysis of rockburst in tunnels subjected to static and dynamic loads[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017, **9**(6): 1031-1040.
- [2] RINALDI A P, URPI L. Fault reactivation induced by tunneling activity in clay material: hints from numerical modeling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, **102**: 103453.
- [3] MICHAEL R S, THOMAS J. Fault induced rock bursts and micro-tremors: experiences from the Gotthard Base Tunnel[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2018, **81**: 358-366.
- [4] ORTLEPP W D, STACEY T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, **9**(1): 59-65.
- [5] MANOUCHEHRIAN A, CAI M. Numerical modeling of rockburst near fault zones in deep tunnels[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, **80**: 164-180.
- [6] ZHANG C, FENG X T, ZHOU H, et al. Case histories of four extremely intense rockbursts in deep tunnels[J]. Rock mechanics and rock engineering, 2012, **45**: 275-288.
- [7] HUSEN S, KISSLING E, VON Deschanden A. Induced seismicity during the construction of the Gotthard Base Tunnel, Switzerland: hypocenter locations and source dimensions[J]. Journal of Seismology, 2012, **16**(2): 195-213.
- [8] 姜耀东, 王涛, 赵毅鑫, 等. 采动影响下断层活化规律的数值模拟研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, **42**(1): 1-5. (JIANG Yaodong, WANG Tao, ZHAO Yixin, et al. Numerical simulation of fault activation pattern induced by coal extraction[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, **42**(1): 1-5. (in Chinese))
- [9] 张亚民, 马凤山, 王杰, 等. 陡倾断层上下盘开挖引起地表变形的数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2012, **23**(3): 61-65. (ZHANG Yamin, MA Fengshan, WANG Jie, et al. Numerical analysis on the ground deformation due to underground excavation in hanging walls and footwalls of steep faults[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2012, **23**(3): 61-65. (in Chinese))
- [10] 蔡胜海. FLAC<sup>3D</sup> 断层模拟中接触面法与弱化法的研究及应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2016. (CAI Shenghai. Study and Application of the Interface and Weaken Method in FLAC3D Fault Simulation[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2016. (in Chinese))
- [11] ZHONG Z L, WANG Z, ZHAO M, et al. Structural damage assessment of mountain tunnels in fault fracture zone subjected to multiple strike-slip fault movement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020(104): 103527.
- [12] 禹海涛, 陈志伟. 基于连续-离散耦合方法的隧道开挖对近断层的影响机制研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021(3): 20-28. (YU Haitao, CHEN Zhiwei. Influence mechanism of tunnel excavation on adjacent fault based on FDM-DEM coupling method[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021(3): 20-28. (in Chinese))
- [13] LIN H, SHENG B Y. Failure Characteristics of complicated random jointed rock mass under compressive-shear loading[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, **39**(5): 3417-3435.
- [14] ZHANG C, LIU X, ZHU G, et al. Distribution patterns of rock mass displacement in deeply buried areas induced by active fault creep slip at engineering scale[J]. Journal of Central South University, 2020, **27**(10): 2849-2863.
- [15] 陈欣, 周小涵, 许彬, 等. 裂隙岩体宏观剪切损伤力学行为研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, **41**(12): 2509-2521. (CHEN Xin, ZHOU Xiaohan, XU Bin, et al. Investigation on the macro-meso shear damage mechanical behaviors of fractured rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, **41**(12): 2509-2521. (in Chinese))
- [16] 杨维忠, 陈胜可, 刘荣. SPSS 统计分析从入门到精通[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2019. (YANG Weizhong, CHEN Shengke, LIU Rong. SPSS Statistical Analysis from Entry to Mastery[M]. 4th ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2019. (in Chinese))