

基于多尺度的岩体地下结构开挖研究

陈健云, 张 凯, 徐 强, 李 静

(大连理工大学 工程抗震研究所, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 依据度分析的思想, 基于考虑岩体材料尺度节理裂隙特性的各向异性强度模型, 建立了岩体地下结构尺度的等效分析模型, 分析了施工过程中节理裂隙岩体的应力释放特征对地下结构的影响。对比分析各向异性本构模型和摩尔库伦本构模型的结果表明, 采用考虑节理裂隙分布特性的各向异性等效多尺度分析模型能较好的反映节理特征, 准确地反映岩体在地下结构施工过程中的塑性应变主要发生在节理面方向的现象。同时, 各向异性本构模型可以较好的改善网格的特性, 提高计算的效率和收敛性, 为复杂地质条件下的地下结构的模拟奠定基础。

关键词: 多尺度; 节理岩体; 各向异性屈服; 应力释放

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2013)04—0001—04

Study of Underground Rock Excavation Based on Multiscale Method

CHEN Jian-yun, ZHANG Kai, XU Qiang, LI Jing

(Seismic Institute of Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: Based on the thought of multiscale analysis and the anisotropic strength model of rock characters, the equivalent analysis model for the underground rock structure scale is set up, and the effects of the geostress releasing characters of jointed rock on the underground structure in construction are analyzed at the same time. Compared with Mohr-Coulomb constitution model, it is shown that using the equivalent multiscale analysis model could better reflect the joint characters and the phenomenon that the plastic strain of rock would always appear along the joint surface. Simultaneously, using the anisotropic constitution model could obviously improve the grid quality, as well as the calculation effectiveness and convergency, which could lay a foundation for the simulation of the underground structure under complex geologic conditions.

Keywords: multiscale method; jointed rock; anisotropic yield; geostress release

0 引 言

地下结构性能与围岩介质的性质密切相关。正确地把握地下结构性能, 就必须准确反映围岩介质的性质。因此, 研究围岩介质的性质有助于提高地下结构的安全性能。然而, 岩体中普遍存在节理、裂隙、夹层、断层等, 在借助有限元模拟岩体性质的过程中通常的做法是: 将大的断层进行单独模拟; 对于随机分布的一般性裂隙通过对岩体分级, 用增大安全富裕系数或者强度折减的方法来考虑随机裂隙的作用。

岩体包含的节理断层等初始缺陷使得岩体性质变得异常复杂。在包含节理裂隙体系的复杂地质条

件下, 岩体地下结构的准确模拟也更加困难, 通过网格拓扑关系反映结构面非线性影响所导致的收敛性和计算效率之间的矛盾是工程分析中难以回避的问题。如何在反映包含节理裂隙岩体的非线性性质的前提下提高分析的收敛性和计算效率是岩体地下结构大规模分析的前提条件。

结构面对岩体性质的影响方面的研究已经取得了较多成果, 在节理裂隙模拟方面: 汪小刚^[1]首先将岩体结构面模拟原理用于岩体连通率研究工作, 并将这种方法求得的连通率成功应用到了工程实践; 朱合华^[2]对施工过程进行了动态模拟, 编制了相应的计算软件并且指出岩体参数的选取和施工过程的动态相应模拟是地下工程模拟的主要任务; 朱焕

春^[3-4]采用以离散元为基础的 3DEC 软件对包含节理裂隙岩体的地下结构工程进行了研究,认为在应力控制型问题中岩体的变形不能忽略;在节理岩体本构方面:保长汉^[5]提出了节理裂隙的随机本构的概念,采用 Resenblueth 随机矩阵理论和摩尔库伦准则,根据节理裂隙的分布参数推导了岩体强度的随机特性;杨强^[6]采用二阶损伤张量,从摩尔库伦准则入手,推导出了裂隙岩体隐式表达的岩体抗剪强度;张贵科^[7]对包含节理的岩体采用正交各项异性的假设进行了研究,给出了考虑岩体正交各向异性的计算方法,并编制了相应的程序;张占荣^[8]针对裂隙规则分布的岩体利用 REV 的概念给出了等效的变形参数。陈健云、徐强^[9]综合了数值模拟和岩体各向异性本构两方面因素,提出了考虑岩体节理面分布特性的岩体各向异性强度准则,并给出了相应的数值算法,使得节理岩体的模拟得到了简化,给节理岩体的研究提供了新的思路。

针对节理岩体开挖施工过程中应力释放问题,本文提出通过分析节理岩体材料的各向异性强度特征,将其几何特征涵盖在单元尺度内,转变为单元的力学特性,避免通过拓扑关系反映裂隙或夹层等影响,从而在结构尺度上可以通过规则网格研究地应力释放过程中岩体变形和应力变化情况,进而提高收敛性和计算效率,给出了模拟节理裂隙岩体开挖过程中岩体状态的实用方法。

1 节理岩体各向异性强度模型

1.1 裂隙岩体的模拟

根据刘社豪^[10]给出的工程实际测量得到的岩体分布参数(如表 1)模拟岩体节理裂隙系统。采用蒙特卡洛随机方法按照图 1 所示的流程图,生成走向 100°截面的裂隙系统。

表 1 节理分布参数

参数	分布	均值	方差
间距	正态分布	2.71	6.03
倾向	正态分布	129.25	37.88
倾角	均匀分布	28.62	11.92
迹长	负指数分布	2.00	0.58

1.2 岩体力学连通率计算及各向异性强度模型

本文通过力学连通率求解岩体各个方向剪切破坏的等效摩擦系数和等效粘聚力,进而利用数值算法模拟岩体各向异性剪切破坏。

根据生成的节理系统求解裂隙系统的连通率,

求得的连通率分布如图 2 所示。连通率具体计算按照刘社豪^[10]给出的方法进行。

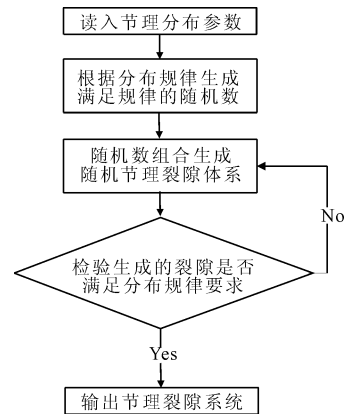


图 1 裂隙系统生成流程图

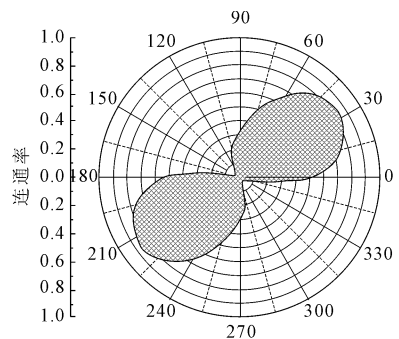


图 2 连通率玫瑰图

在已知连通率的基础上,根据陈健云^[9]等给出的式(1)、式(2)计算岩体的抗剪破坏面各个方向的等效摩擦系数和等效粘聚力,计算中认为各个节理面和岩桥的摩擦系数和粘聚力相同,根据 H. H. Einstein^[11]的研究选取参数见表 2。计算出的等效粘聚力和等效摩擦系数如图 3、图 4 所示。

表 2 等效粘聚力和摩擦系数计算参数

	岩桥	节理面
摩擦系数	1.7	0.7
粘聚力/MPa	2.0	0.2

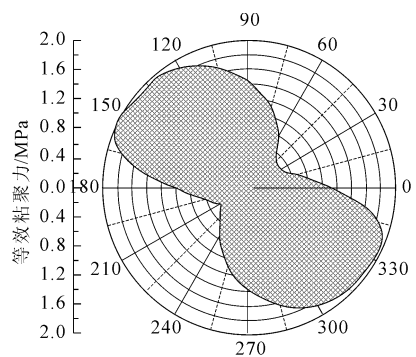


图 3 等效粘聚力图

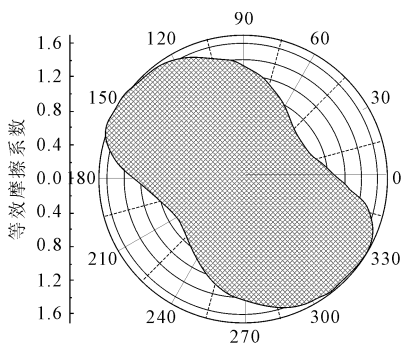


图 4 等效摩擦系数图

$$c_{\bar{N}} = k_{\bar{N}}c_j + (1 - k_{\bar{N}})c_r \quad (1)$$

$$f_{\bar{N}} = k_{\bar{N}}f_j + (1 - k_{\bar{N}})f_r \quad (2)$$

式中: $k_{\bar{N}}$ 为 \bar{N} 方向的力学连通率; f, c 分别表示摩擦系数和粘聚力, 下标 r, j 分别代表岩桥和节理面。

2 基于单元等效的地下结构开挖分析

选取某一矩形地下结构作为计算实例。地下埋深 150 m, 宽 20 m、高 10 m, 混凝土结构采用高 2 m 宽 1 m 的矩形截面梁单元模拟。岩体结构面抗剪参数选取如上文所述, 有限元模型如图 5、图 6 所示。在建模过程中采用了不同尺度的网格, 对于距离建筑物较远的部分采用较大的网格。不同尺度单元的过渡采用 abaqus 软件的 MPC 子程序完成。取岩体等级为一级, 混凝土标号为 C40, 具体参数见表 3。

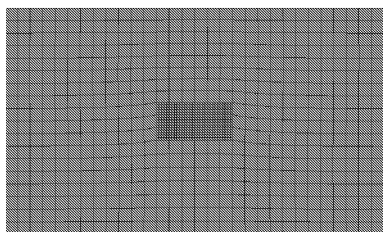


图 5 岩体开挖前有限元模型

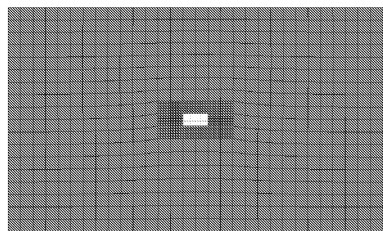


图 6 开挖后有限元模型

表 3 计算模型材料参数

	杨氏模量 /GPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
岩体	33.0	0.15	2.7×10^3
混凝土	32.5	0.20	2.5×10^3

为了验证各向异性节理本构能够较好的反映节理岩体的性质, 另取岩体材料为理想弹塑性材料进行对比计算。岩体屈服准则是与本文相似的摩尔库伦屈服准则, 摩擦角取为 30° (与等效摩擦系数最小值一致), 粘聚力取 2 MPa (与等效粘聚力的最大值一致)。地下结构周围 75 m 范围内的岩体, 更远距离的岩体采用等效荷载的方式模拟。得到的地应力平衡结果如图 7 所示 (由于天然应力没有达到屈服状态, 都在弹性范围, 所以两种本构得到了相同初始地应力分布。也就是说在弹性范围内两种本构所描述的性质是相同的)。

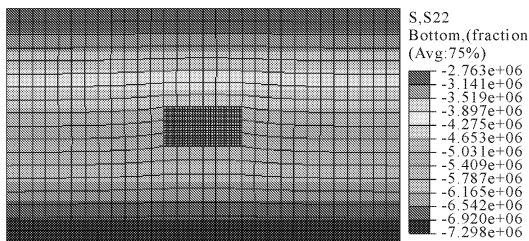


图 7 天然岩体的竖向应力分布

地下结构的开挖采用生死单元进行模拟。在模拟过程中不考虑施工过程中的应力释放, 即在去掉开挖的岩体单元的同时生成地下结构的梁单元。最终使岩体和地下结构达到应力平衡状态。

深层的岩体在天然状态下处于受压状态, 当地下岩体开挖完后, 岩体失去约束, 向开挖面回弹。从采用各向异性屈服准则模型的计算结果可以看出节理面对岩体的回弹有较为显著的影响, 如图 8, 塑性应变基本沿节理面分布, 如图 9; 对比摩尔库伦本构模型的最大应变出现在开挖面的左右两壁的中间位置, 如图 10、图 11, 应变的分布呈现出左右对称的形式。

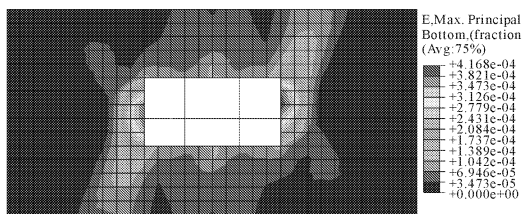


图 8 应变云图 (各向异性本构)

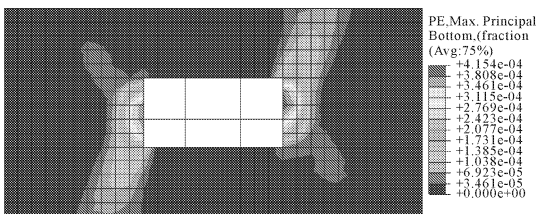


图 9 塑性应变云图 (各向异性本构)

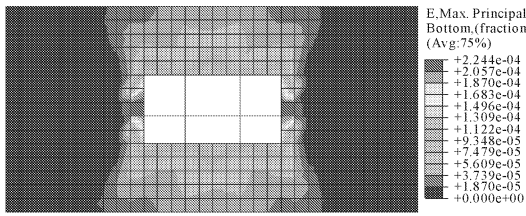


图 10 应变分布(摩尔库伦本构)

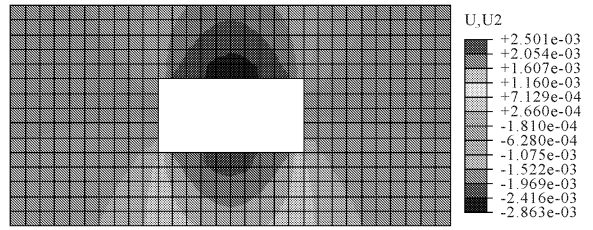


图 15 竖向位移分布(摩尔库伦本构)

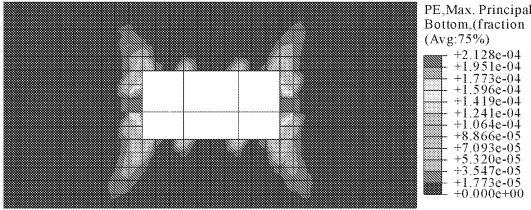


图 11 塑性应变分布(摩尔库伦本构)

从计算结果的位移分布来看,采用各向异性节理本构计算得到的水平向和竖向位移相差较小分别为 3.87 mm 和 3.68 mm,而且水平和竖向位移的分布形式都不具有对称性(见图 12,图 13)。而摩尔库伦本构计算的结果为:水平(0.4 mm)和竖直方向(2.5 mm)的结果都呈对称分布且竖向位移为主,水平向位移仅为竖向位移的 20%(见图 14,图 15)。

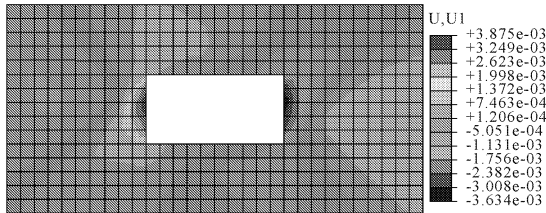


图 12 水平向位移分布(各向异性本构)

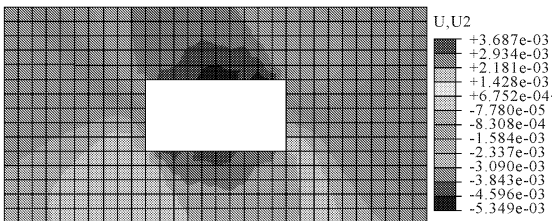


图 13 竖向位移分布(各向异性本构)

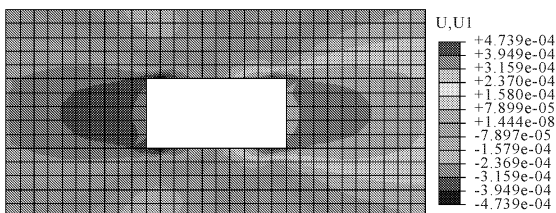


图 14 水平向位移分布(摩尔库伦本构)

本文生成的节理裂隙方向与水平轴的夹角大致为 30° ,对比可以看出,本文的各向异性节理本构计算的位移的方向与节理面的走向基本一致,较好的反映了岩体沿节理面滑动变形的现象。

3 结论与展望

本文采用能够反映岩体性质的各向异性本构,基于多尺度分析的思想,在不模拟节理裂隙准确位置的情况下,合理的模拟了包含节理裂隙岩体的地应力释放和回弹。

这样的模拟方法大量减少了网格划分和实际计算的工作量,提升了对于节理裂隙岩体模拟的效率,给节理岩体的地下结构的数值模拟提供了新的思路。

在界面过渡方面本文所采用的多点约束算法对不同尺度的网格进行耦合,取得了很好的精度。

由于岩体有明显尺寸效应,对于不同大小的单元其强度分布特征是不同的,今后将进一步研究不同尺度单元的变形和破坏特征,将节理岩体本构与节理岩体的多尺度基函数耦合,给出能够反映岩体性质的多尺度单元的数值算法。

参考文献:

- [1] 汪小刚,贾志欣,陈祖煜.岩石结构面网络模拟原理在节理岩体连通率研究中的应用[J].水利水电技术,1998,29(10):43-47.
- [2] 朱合华,丁文其.地下结构施工过程的动态仿真模拟分析[J].岩石力学与工程学报,1999,18(5):558-562.
- [3] 朱焕春,Andrieux Patrick,钟辉亚.节理岩体数值计算方法及其应用(二):工程应用[J].岩石力学与工程学报,2005,24(1):89-96.
- [4] 朱焕春,Brummer Richard,Andrieux Patrick.节理岩体数值计算方法及其应用(一):方法与讨论[J].岩石力学与工程学报,2004,23(20):3444-3449.
- [5] 保长汉.节理岩体的随机本构关系[C]//第五届全国结构工程学术会议论文集,海口,1996.
- [6] 杨强,陈新,周维垣.基于二阶损伤张量的节理岩体各向异性屈服准则[J].岩石力学与工程学报,2005,24(8):1275-1282.