

Discussion on Analysis Method of Rock Slope and Case Analysis of Rock Slope Failure Based on Particle Flow Method

Guanchao Niu, Feng Xia

Wuhan City Flood Control Survey and Design Institute, Wuhan Hubei
Email: rhkgg_007@163.com

Received: Feb. 25th, 2019; accepted: Mar. 12th, 2019; published: Mar. 19th, 2019

Abstract

Because of the specificity of rock mass structure, the safety analysis of slope composed of rock mass is particularly complex. Based on the discussion of the existing analysis methods of rock slope, this paper presents a stochastic fracture model based on particle flow method in order to simulate the structure of real rock mass to the greatest extent. Based on the engineering case, the method is used to establish the model of fractured rock mass slope, simulate and analyze the process of rock mass slope gradually destroyed, and draw a conclusion of guiding significance for engineering practice.

Keywords

Rock Slope, Particle Flow, Stochastic Fracture Model, Destruction

岩质边坡分析方法讨论及基于颗粒流方法的岩质边坡破坏案例分析

牛冠超, 夏峰

武汉市城市防洪勘测设计院, 湖北 武汉
Email: rhkgg_007@163.com

收稿日期: 2019年2月25日; 录用日期: 2019年3月12日; 发布日期: 2019年3月19日

摘要

岩体由于其构造的特异性, 由其构成的边坡的安全分析显得尤为复杂。本文通过对现有岩体边坡的分析

方法的讨论, 引出基于颗粒流方法的随机裂隙模型, 以期能够最大程度上模拟真实岩体的构造。以工程案例为基础, 使用该方法建立裂隙岩体边坡模型, 模拟分析岩体边坡逐渐破坏的过程, 得出对工程实践有指导意义的结论。

关键词

岩体边坡, 颗粒流, 随机裂隙模型, 破坏

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 岩质边坡分析方法

岩体边坡在工程中往往以高大边坡的形式出现, 其安全性分析对工程的意义很大。目前主流的边坡分析主要是针对土质边坡, 并开发有多种本构模型, 而在岩体边坡领域的可用方法较少。主要原因还是岩体的分析需考虑因素较多。受到岩性, 构造, 风化程度, 裂隙发育程度等诸多因素的影响, 尚没有一种本构模型能够完整地表现出岩体的特性。

岩体边坡的稳定分析分为定性及定量两种方法。但是由于岩体本身的构造复杂性, 现实中不可能模拟出岩体实际的特征, 定量分析也仅是最大程度地还原岩体真实的受力特征。

1.1. 定性分析

在工程中应用较多的定性分析方法主要为赤平投影法。将岩体的结构面特征反映在赤平投影中。将结构面与边坡坡面的关系划分为顺交坡、斜交坡、逆向坡及相应的组合边坡。不同的坡面特征反映的边坡安全度也不同。在赤平投影中, 可以反映单一结构面、组合结构面及由结构面相互切割形成的岩体楔形体与坡面的关系, 据此定性评价边坡的安全性。

1.2. 定量分析

岩体边坡的定量分析是将岩体特征进行了适当的假定及简化。目前使用较多的主要为以下四种。

1) 滑动圆滑法。建筑边坡规范[1]中对于无外倾结构面的岩体边坡, 推荐以岩体的等效内摩擦角按照土体边坡的计算方法进行分析。实际多以土体的圆弧滑动模型进行计算。此种方法对结构面不甚发育, 整体接近均质的软质岩体较适宜。

2) 折线滑动法。假定边坡沿某几个组合的结构面滑动。将滑动块体假定为刚体, 给出滑动面的抗剪参数, 以此计算边坡的稳定性。

3) 各向异性折减[2]。岩体因为结构面的切割, 呈现各向异性特性。利用结构面的空间分布特性, 统计出结构面空间分布上的连通率, 对岩体本身的强度参数进行折减, 进而得到岩体在各个方向上的强度特征, 再利用数值计算软件进行分析。

4) 数值模拟。能够真实模拟岩体裂隙特征的方法主要为离散单元法。在离散元程序 UDEC 中使用蒙特卡洛法, 引入随机裂隙模型可以很好地用于岩体边坡分析[3]。而颗粒流离散单元法在真实还原岩体特征上具有明显优势。将岩体分解为数量很大的颗粒的集合体, 岩体的力学特征并不以简单的本构模型表示, 而是用颗粒的接触力学行为反映岩体内部及各种结构面特性。用颗粒流程序不仅可以模拟岩体的力

学试验[4], 也可以用于实际工程中。

2. 颗粒流软件及随机裂隙模型

2.1. 颗粒流软件

目前使用的颗粒流软件为 itasca 公司的 PFC 系列软件。PFC 软件是利用离散单元法模拟球形颗粒的运动和相互作用的软件。它最早是被用来模拟颗粒状材料的行为; 颗粒模型被用来代表单元的行为, 而连续的方法则被用来解决真实的具有复杂变形模式的问题。颗粒间的相互作用通过接触本构关系来实现, 数值边界条件的确定和试样的若干应力平衡状态通过迭代分析进行, 直到使数值试样的宏观力学特性逼近材料的真实力学行为或者工程特性。颗粒流程程序的数学实现方法见图 1。

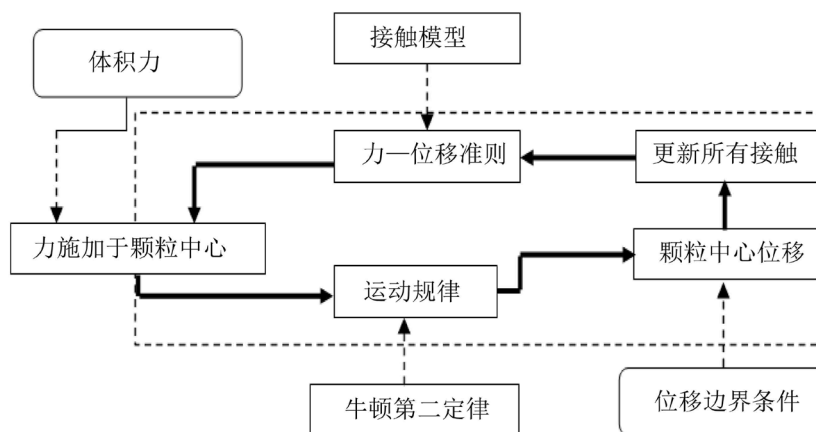


Figure 1. Schematic diagram of mathematical realization process of particle flow
图 1. 颗粒流数学实现过程示意图

PFC 拥有以下三个优势。1) 它具有潜在的便捷性, PFC 可以用颗粒模拟工程实体而不需考虑其本构特征; 2) 本质上, PFC 对物体的位移没有限制, 即其可以任意大位移移动; 3) 不像离散元软件那样, 在 PFC 中, 块体可以破裂。PFC 在应用中也会存在一些问题, 比如从微观上用颗粒来表现实体, 对实体的计算要分解到每个颗粒上。对于一个项目用到的颗粒数量是很庞大的, 对电脑的运算能力要求很高。颗粒的接触力学行为用到的参数很多, 而这些参数的标定需要进行很多的前期工作。

2.2. 随机裂隙模型

PFC 中引入了随机裂隙模型(DFN)来模拟岩体。岩体裂隙结构示意图见图 2。粘性颗粒上覆盖裂隙, 并插入光滑节理接触模型, 以模拟综合岩体。DFN 可以根据统计学上的裂隙分布特征生成反映实际岩体的裂隙模型。裂隙的一些特性比如抗剪参数, 张开与闭合行为等在软件中可以很好的体现。

3. 基于颗粒流的岩体边坡破坏分析

颗粒流方法能够从微观上反映岩体的组成, 以颗粒的相互作用来反映岩体内部结构及结构面间的接触。由此使用颗粒流方法能够直观的观察岩体边坡的破坏过程。曾有使用 PFC2D 软件构建含 2 条断续节理岩体及顺层断续节理岩质边坡模型来进行边坡破坏分析[5], 从细观力学角度深入研究其破坏过程中的力学机制。而从工程实际考虑, 引入足够多的裂隙数量才能逼近真实岩体边坡的受力特征, 据此进行的分析也更有针对性。

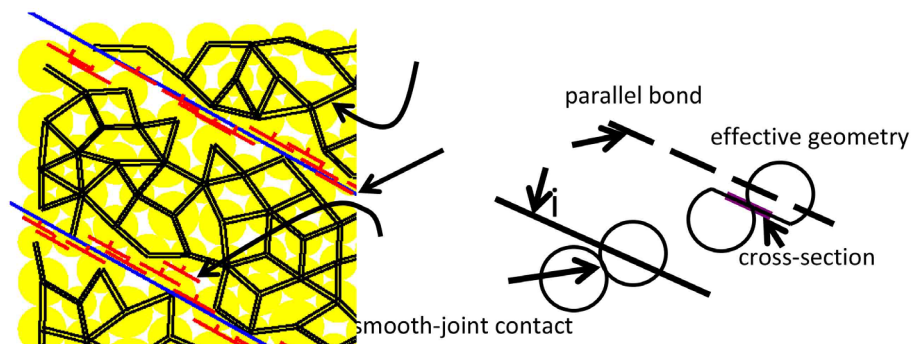


Figure 2. Schematic diagram of fracture structure of rock mass
图 2. 岩体裂隙结构示意图

3.1. 工程背景

该岩质边坡高度约 30 m, 设计中采用 1:0.35 的坡率放坡并锚喷加固。该边坡地层以石英砂岩为主, 节理裂隙发育, 岩体基本质量分级为 III~IV 级, 岩体呈较破碎至破碎状。岩体主要裂隙为层面及二组结构面。结构面微张开, 粘结性欠佳。

3.2. 模型建立

采用二维 PFC 软件进行模拟。构件模型尺寸如图 3 所示, 模型标注单位为米。考虑裂隙的延伸长度、分布密度、裂隙产状等分布特征, 对其进行了简化处理。将裂隙主要分为了三组, 一组层面及两组呈共轭关系的结构面。各结构面的主要特征见表 1。为了表现岩体边坡的破坏, 在模型中忽略了锚喷加固支护结构。

3.3. 接触模型设置

用球体通过设置特定的连接来模拟岩体。球体的连接使用两种连接模型(见图 4)。线接触模型(Linear Model)是颗粒流里的基础接触模型, 用以模拟简单接触的情况。它只传递接触力, 不考虑粘结等属性。平行粘结连接模型(Linear Contact Bond Model)用于模拟完整状态的岩块。连接模型考虑了颗粒之间的刚度、阻尼及传递的力和弯矩等接触参数, 可以很好的表现出实际岩块的结构特性。因此先设定岩体为平行粘结连接, 用以表现完整岩体。当岩体破坏后, 重建的连接为线接触连接, 以表现岩体碎块的搭接。

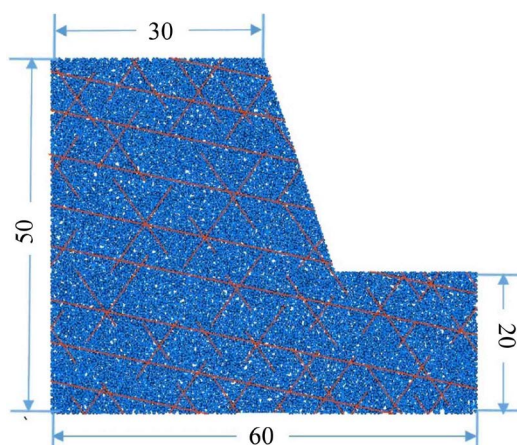


Figure 3. Rock slope model
图 3. 岩体边坡模型

Table 1. Structural plane characteristic parameters
表 1. 结构面特征参数

	倾角(°)	粘聚力(kPa)	内摩擦角(°)	特征
层面	52	100	30	硬质结构面, 呈闭合状, 结合一般
结构面 1	68	70	25	硬质结构面, 微张开, 结合差
结构面 2	60	70	25	硬质结构面, 微张开, 结合差

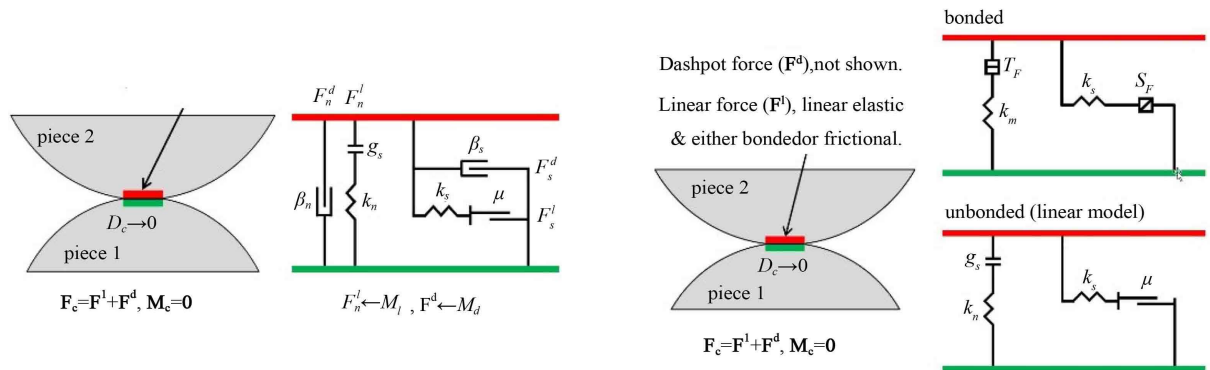


Figure 4. Schematic diagram of spherical contact model (Linear Model and Linear Contact Bond Model)
图 4. 球体接触模型示意图(线接触模型及平行粘结连接模型)

结构面模型采用平面接触模型(Smooth-Joint Contact Model) (见图 5)。该模型用于模拟平面摩擦的接触行为。首先模型表现为线弹性力学状态, 具有粘结属性。当达到强度极限, 粘结破坏, 接触界面为线性摩擦状态。

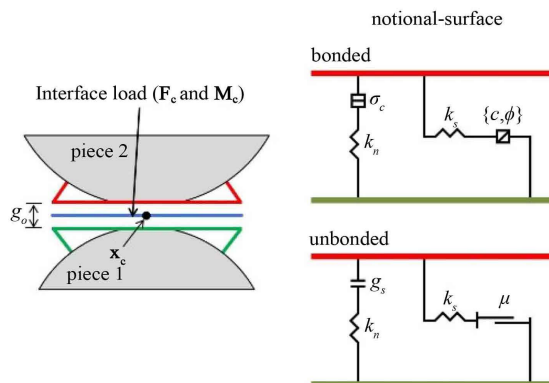


Figure 5. Schematic diagram of contact model of structural surface (Smooth-Joint Contact Model)
图 5. 结构面接触模型示意图(平面接触模型)

3.4. 岩体边坡破坏分析

硬质岩体的破坏大部分情况是受到结构面的影响而发生的。岩体受到结构面的切割形成很多弱联结的相对独立的楔形体。在受到扰动的情况下, 最脆弱的部分先滑动, 进而影响到与其相连的其它块体的平衡, 这种影响逐渐向内部传递, 最终导致大范围的垮塌崩落。从以下的模拟结果中可以直观观察破坏的进程。

3.4.1. 整体破坏的发生

受结构面影响的岩体破坏大体可分为四个阶段(见图 6)。阶段 1, 边坡临空面小块体的破坏。此时内

部岩体尚处于稳定状态, 与失稳块体相连区域有轻微位移, 破坏只发生在临空面上的较小范围; 阶段 2, 破坏向内部传递。边坡临空面的小块体破坏后, 又为后面的岩体形成新的临空面, 后方受扰动岩体继续破坏, 造成边坡浅层岩体的破坏; 阶段 3, 大范围垮塌破坏, 在破坏向内部传递后, 更大范围的岩体受到影响, 导致更多的不稳定岩体出现, 破坏进一步扩大, 直至达到更深层的稳定岩体; 阶段 4, 新的稳定状态, 岩体的破坏已经停止, 受到影响的岩体已达到新的平衡状态, 或者位移至新的位置达到新的平衡, 或者周围应力改变而达到新的平衡。在模拟图中, 因达到最终稳定耗时很长, 阶段 4 配图已经可以明显观察到深层的岩体已经很稳定, 外层岩体垮落之后也会达到新的平衡。

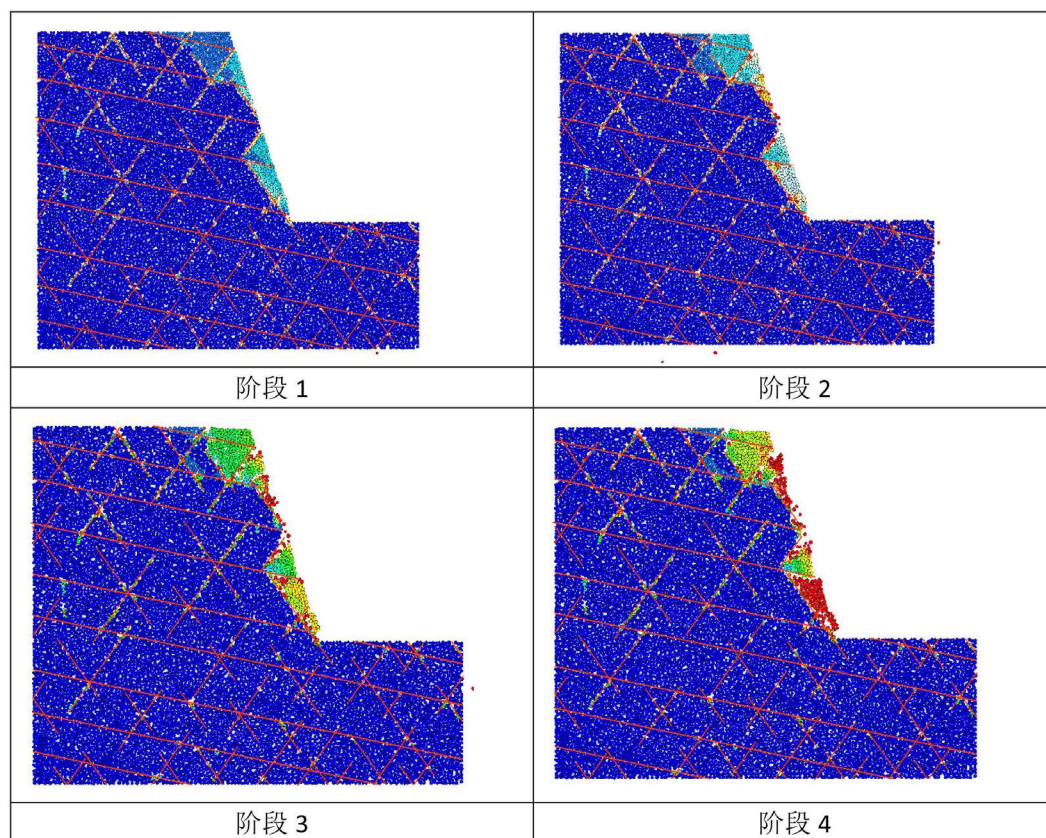


Figure 6. Failure process of rock slope
图 6. 岩体边坡破坏过程

3.4.2. 不稳定楔形体区域破坏分析

对失稳楔形体及其影响区域的位移及不平衡力进行监测。在 PFC 软件中监测的数值是对应一个区域的平均值, 而不是一个具体的颗粒。

监测的楔形体为最初破坏发生时临坡面的失稳块体。在位移监测图图 7 中, 4 条曲线自上而下分别对应着楔形体外围上、外围左、下部、下部稳定区域。在破坏过程中, 外围上部, 外围左侧均处于不平衡状态, 位移在逐步增加。楔形体下部初期位移较小, 处于暂时平衡状态, 随着周围岩体位移的增大, 突然发生脆性破坏, 下部稳定区域一直处于小位移的状态, 直至达到新的平衡。

在不平衡力监测图图 8 中, 楔形体外围上部、左部的岩体不平衡力均处于较高状态, 破坏一直在发生。楔形体下部的岩体不平衡力在脆性破坏的瞬间突然增大, 即尔持续保持较高状态, 下部稳定区域岩体存在较低的平衡力, 状态较为稳定。

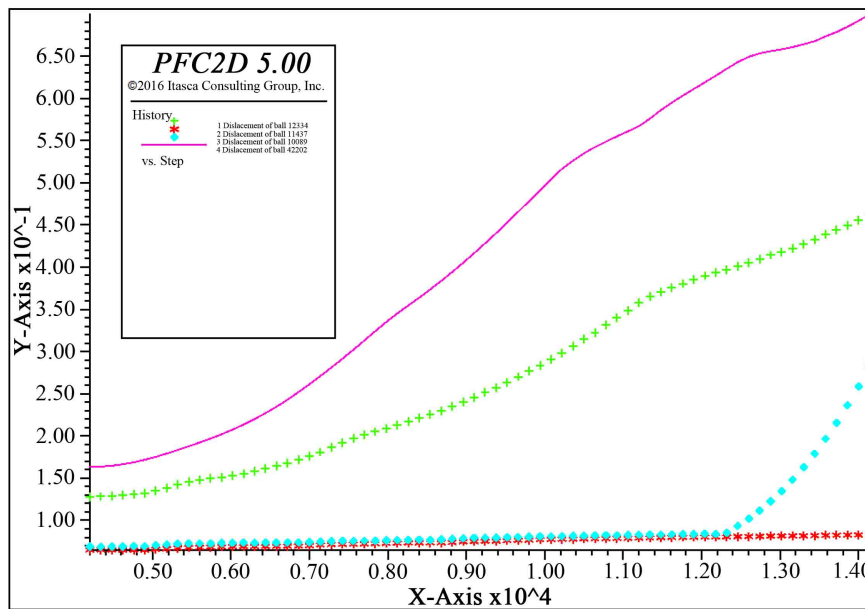


Figure 7. Regional displacement data curve of unstable wedge

图 7. 不稳定楔形体区域位移数据曲线

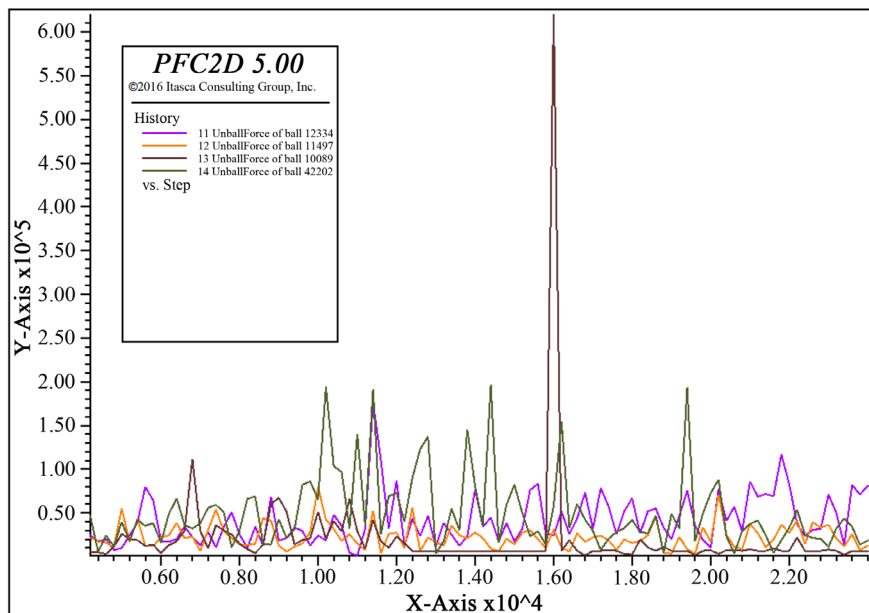


Figure 8. Regional unbalanced force data curve of unstable wedge

图 8. 不稳定楔形体区域不平衡力数据曲线

通过针对破坏楔形体周围区域的位移和不平衡力的监测可以发现，在楔形体发生破坏的同时，周围脆弱联结的区域一直都在持续弯形中，在楔形体破坏发生后，此处影响区域进入后续的破坏进程中。楔形体下部暂时平衡状态区域，在破坏发生的瞬间，平衡状态被打破，也发生急剧破坏。较深层的稳定区域连接强度较高，自始均保持稳定状态。

3.4.3. 边坡坡体竖向应力分析

设置竖向应力监测点。图 9 中曲线上部近水平曲线为边坡顶部破坏区边界监测点，下部近水平曲线

为边坡底部稳定区域监测点, 变化较陡的曲线为边坡顶部破坏区内监测点。由图中可以发现, 破坏区外应力受到破坏区的扰动, 出现振荡变化, 整体保持均值; 而边坡顶部破坏区随着破坏的发展, 呈现垮塌现象, 以至于竖向应力逐渐降低, 到破坏的第 3 阶段时趋于水平震荡; 边坡底部监测同样受到破坏的影响呈现振荡变化, 后期由于垮塌物的堆积, 竖向应力有所增加。

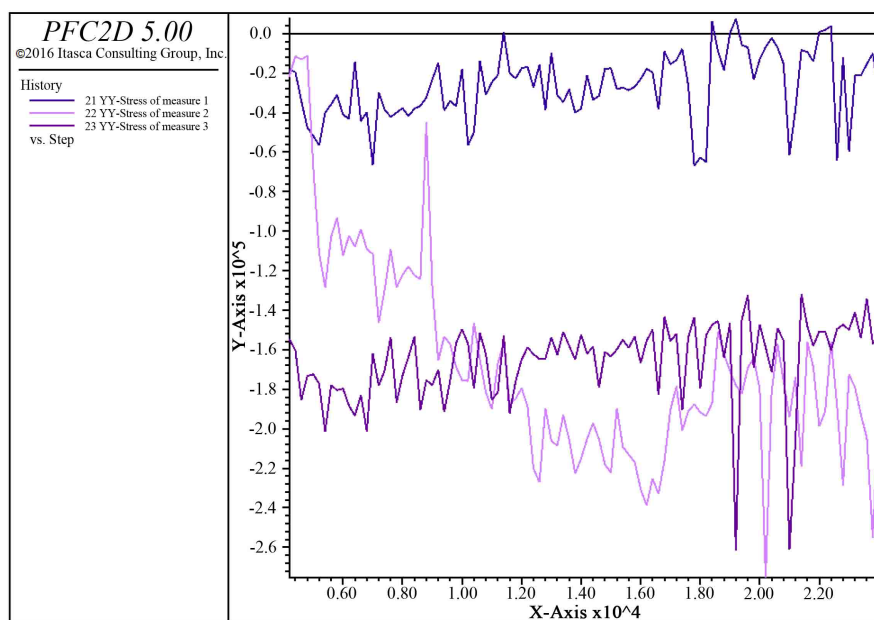


Figure 9. Data curve of vertical stress of slope body
图 9. 坡体竖向应力数据曲线

4. 结论

1) 由颗粒流软件基于随机裂隙模型对带有结构面的岩体的分析在现有针对岩体分析的方法中具有比较显著的优势。能够比较真实地反映岩体的实际受力状态。

2) 二维软件仅是真实情况在平面上的投影, 对真实情况做了很大的简化。目前 PFC 三维软件对真实岩体的模拟, 所需的颗粒数量及节理裂隙数量是很庞大的, 对计算机的运算能力要求很高, 由此三维颗粒流在真实岩体边坡的稳定性分析中使用较少。随着计算机能力的发展, 对岩体边坡的模拟将愈接近实际。

3) 对硬质岩石形成的边坡, 其破坏往往是由浅层薄弱楔形体率先破坏, 继而引起深层岩体破坏。所以在针对此类岩体的边坡支护中, 往往以加固薄弱楔形体为主, 采用锚索挂网形式进行支护。

参考文献

- [1] 建筑边坡工程技术规范 GB50330-2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [2] 胡细伟. 节理岩体抗剪强度参数研究及其工程应用[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [3] 常峻岭. 基于随机裂隙模型的岩质边坡稳定性参数分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [4] 姜兆华, 林山泉. 单裂隙岩体单轴压缩颗粒流数值模拟[J]. 建筑结构, 2018(A2): 940-943.
- [5] 周喻, 韩光, 等. 断续节理岩体及岩质边坡破坏的细观机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2016(A2): 3878-3889.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org