

颗粒流离散元在滑坡运动过程模拟中的应用

孟云伟^{1,2}, 柴贺军¹

(1. 重庆交通科研设计院 重庆 400067; 2. 重庆交通大学 重庆 400074)

摘 要: 介绍了颗粒流离散元的分析原理, 以某岩质边坡为实例, 构建了计算模型。根据实际资料, 在计算模型中加了节理, 节理的力学参数弱于岩体。在下方的抗滑挡土墙完全失去作用的情况下, 用此模型对该滑坡的运动过程进行了计算预测, 分析了整体的变形、不同部位的位移和应力等运动特点, 上部粉质粘土区系拉裂引起的下滑, 下部碎石土区因挡墙损坏而产生沿节理面的滑动, 但拉应力变化不大。指出了在该滑坡存在 2 个滑动面, 并针对 2 个滑动面提供了相应的治理建议。

关 键 词: 颗粒流 (PFC); 滑坡; 模拟; 运动特点

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Application of particle flow code to simulation of movement of landslide

MENG Yun-wei^{1,2}, CHAI He-jun¹

(1. Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China

2. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The particle flow analysis method is introduced and applied to simulate a rock slope. The joints are formed according to the practical data; and the mechanical parameters of joints are smaller than those of the rock. When the retaining wall below fails to function completely; the movement process of the landslide is calculated and forecasted; and the deformation of the whole landslide, displacements and stresses of various positions, are analyzed. The upside powder clay slips resulting from ripping within itself, while downside gravel slip because of the destruction of the retaining wall and decrease of the tensile stress. The 2 sliding planes are determined and the suggestions for treatment are proposed.

Key words: particle flow code; landslide; simulation; characteristic of movement

1 前 言

颗粒流离散元是离散单元法的一种, 离散单元法的思想源自于分子动力学 (molecular dynamics)。Cundall 于 20 世纪 90 年代末期首次提出了适用于解决岩石力学问题的颗粒流离散元 PFC^[1,2] (particle flow code), PFC 是建立在块体离散元的基础上的, 块体离散元 UDEC 在岩土工程中的作用已得到了广泛证明^[3-5], 而 PFC 则是新兴的研究方法, 正逐渐为众多学者所利用^[6-9]。

滑坡运动问题是典型的不连续体的动力学问题, 目前的研究大多采用极限平衡法进行边坡的稳定性分析, 该方法认为滑坡体为刚体, 不考虑岩土体间的变形, 通过力或力矩的平衡来建立方程求解, 但这种方法无法表述滑坡的运动特点; 而有限单元

法是基于连续性的假设, 不能求解滑坡的大变形和大位移。颗粒流离散元本身就是针对节理岩体、破碎岩体提出的, 能充分考虑实际岩体的大变形和大位移, 与它的前身 UDEC 和 3DEC 相比, 具有很多优点, 如潜在的高效率、不限制实际发生的位移量、岩体可以产生破裂等, 能更有效、更真实地模拟滑坡的变化过程。

2 滑坡地质工程特征

某边坡为顺向斜坡, 在开挖施工过程中曾出现斜坡变形开裂, 并产生小规模短距离的顺层滑塌 (坡), 随着开挖强度的增大, 切坡高度增高, 斜坡变形加剧。施工中曾对该斜坡进行了削坡减载和支挡处理。建成后, 通过近期的观测, 发现下方护坡挡墙变形开裂, 斜坡顶部地面出现裂缝, 随时间增

加裂缝有增宽的趋势。

该斜坡为顺向岩质斜坡,地质断面图见图 1。由于受斜坡滑动影响,现向西面及北面有延伸的趋势。变形体纵向长大于 135 m,宽(顺公路方向)约 150.0 m,高差 35.0~62.0 m。该段斜坡坡向近 NE90°,倾角 20°~30°,局部成陡坎状,变形区坡度较缓,5°~10°。斜坡顶部及北侧(变形区)由坡残积土及岩石组成,中下部(滑动区)由松散的碎块石(滑坡堆积物)和岩石组成。

根据现场调查和钻孔资料,该滑坡区域底层结构从新到老依次为:①人工填土层(Q_4^{ml}):主要由粉质粘土、砂、泥岩碎块石组成,结构松散,厚度一般在 0.5~5.3 m;②残坡积层(Q_4^{dl+el}):由粘粒、粉粒组成,含少量强风化碎块石,厚度一般在 0.5~2.0 m;③滑坡堆积层(Q_4^{del}):主要由泥岩、泥质砂岩、砂岩块碎石组成,由滑动的斜坡岩体组成,局部表层有少量的粉质粘土,厚度 1.0~6.5 m;④中生界侏罗系中下统自流井组(J_{1-2Z}):为内陆浅湖相沉积,呈互层状产出,岩性和厚度相变较大;⑤砂岩:局部含泥质条带或团块,质较坚,该层在上部裂隙发育,局部裂隙间充填次生褐黄色粘土,一般厚度 1.0~6.0 m;⑥泥质砂岩:薄~中厚层状构造,泥质胶结,局部泥质含量较多,渐变为泥岩,偶夹砂岩条带;⑦泥岩:主要由粘土矿物组成,次为粉砂等,粉砂泥质结构,以薄层构造为主,少量中厚层状构造,单层厚 0.03~0.4 m。

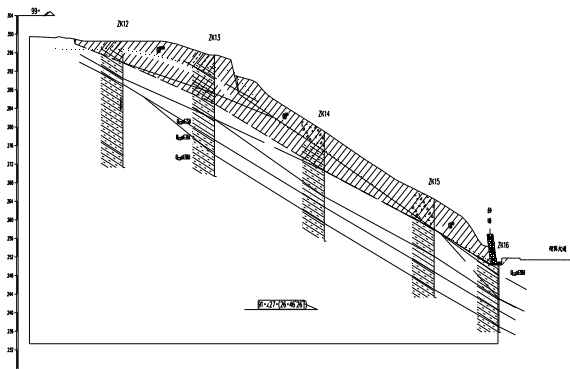


图 1 滑坡地质断面图

Fig.1 Geologic section of the slope

该滑坡的变形破坏明显,变形体平面形态总体呈宽缓的圈椅状,滑动区和变形区的周界明显,后缘拉裂缝,滑坡后壁、台地、剪切裂缝、前缘隆起明显、清晰,为一中型顺层滑坡。前部挡墙在后方下滑力的作用下发生断裂,这种现象又反过来加剧了滑坡体的下滑,前部牵引后部,从而发生整体滑动。

3 颗粒流离散元原理

在颗粒流离散元 PFC^{2D} 中,由颗粒(ball)和墙体(wall)两者组成模型,墙体主要用来限定边界条件,视物体都是由具有刚度的圆形颗粒组成的。对每个颗粒设定半径、密度、摩擦系数、接触形式等参数,整体在重力作用下达到平衡后,在外力作用下,颗粒间将产生位移,引起应力的变化。在此过程中,对每个颗粒应用牛顿第二定律,在颗粒接触处应用力-位移定律。牛顿第二定律确定每个颗粒由于接触或体力引起的颗粒运动,而力-位移定律用来更新接触力,接触力是随着接触处产生相对运动而时刻变化的。这两个定律在计算过程中交替使用,直至整体达到新的平衡,见图 2 所示。在计算过程中,随时监测颗粒的运动。

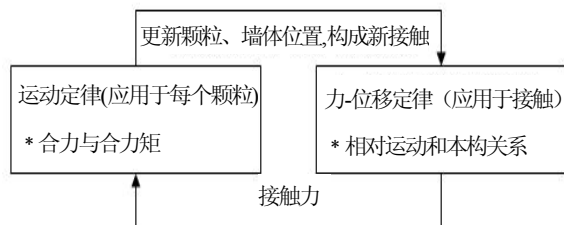


图 2 计算过程循环图

Fig.2 Calculation cycle in PFC^{2D}

4 颗粒流计算模型的建立

参照颗粒流离散元法,结合该滑坡岩体较为破碎的特点,选用 PFC^{2D} 来做计算模型,可以较为准确地显示出滑坡失稳破坏的运动学特点,是非常有效的。用性质不同的颗粒代表不同的岩体,共使用颗粒 16 610 个,在自重应力作用下平衡(重力加速度取为 10 m/s²),在钻孔资料揭示的位置处施加一组节理,以此建立的计算模型如下图 3。考虑工程实际和计算效率,将滑体以下的滑床基岩部分作为固定体处理。共分了 7 种性质不同的岩体组成模型,平行连接法向和切向强度均取为 4×10⁷ N/m³ 和 2×10⁷ N/m³,其余参数设置见表 1。

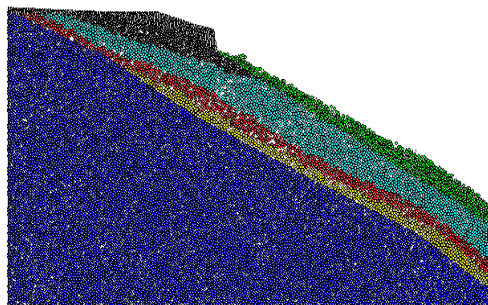


图 3 滑坡计算模型

Fig.3 Slope calculation model

表 1 计算模型力学参数

Table 1 Mechanical parameters for calculation model

岩土分类	颗粒密度 /kg · m ⁻³	摩擦系数	k_s /N · m ⁻¹	k_n /N · m ⁻¹	$s_bond=n_bond/N$
中风化泥岩	2 500	0.35	1×10^8	2×10^8	8×10^6
中风化泥质砂岩	2 350	0.20	6×10^7	8×10^7	5×10^6
中风化砂岩	2 250	0.15	3×10^7	6×10^7	2×10^6
中强风化泥质砂岩	2 350	0.20	6×10^7	8×10^7	5×10^6
强风化砂岩	2 200	0.10	3×10^7	6×10^7	1.5×10^6
碎石土	2 100	0.05	4×10^7	8×10^7	6×10^5
粉质粘土	1 800	0.25	2×10^6	4×10^6	1×10^6

5 PFC2D 模拟结果分析

依据上面建立的计算模型, 对该滑坡进行了全过程的数值模拟。在右侧, 因挡墙已经在上部岩体的推力作用下破坏严重, 因此在模拟过程中, 去掉相应部位的墙体 (wall), 然后在自重作用下计算 50000 时步, 最终的整体变形图如图 4。同时分别在边坡上部较陡处、下部滑体中部、滑体最底部各选择一个颗粒, 代表相应的部位, 记录其水平、竖直 2 个方向的位置和速度变化。

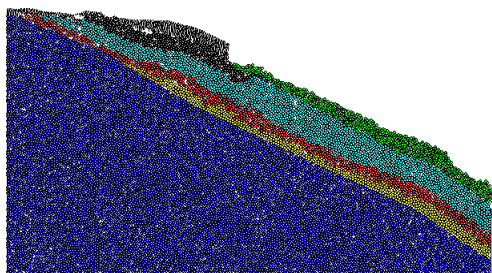


图 4 滑坡计算结果

Fig.4 Plot of slope calculation result

5.1 位移

分析图 4, 可以看出, 滑坡的变形主要发生在 2 个区域, 一是在滑坡的表层碎石土, 一是滑坡上部较陡段粉质粘土区。前者沿边坡中的节理面发生了滑动, 后方推动前方向下滑动, 但整体性尚保存; 而后者与其下方的强风化砂岩产生了脱离, 可用看出这一部分的粉质粘土是整体性较差的, 已在内部破裂。

表层碎石土, 由于下方挡墙失去了支挡作用, 碎石土自身稳定性又差, 就非常容易发生向下的滑动, 比较图 3 和图 4, 下部的碎石土坠落后, 上部的碎石土将以更快的速度向下滑动, 图 5 为碎石土中部的滑移记录。滑体底部的颗粒脱离滑坡, 发生掉落。

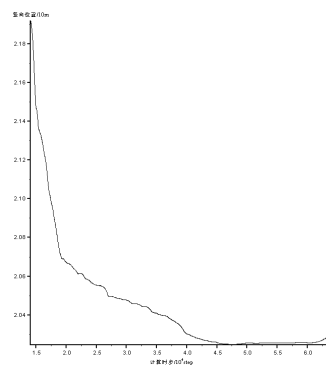


图 5 碎石土中部颗粒竖向位移

Fig.5 Vertical displacements of grain in middle of gravel

滑坡上部较陡段, 此段为粉质粘土区, 整体结合性较差, 当下部边坡产生向下的滑动后, 底部失去了支撑其重量的载体, 加之临空面较陡, 与下部边坡连接处坡比变化大, 很容易发生向下的滑动或掉落, 如图 6 所示。在粉质粘土与其下方的强风化砂岩的交界面形成了滑动面。

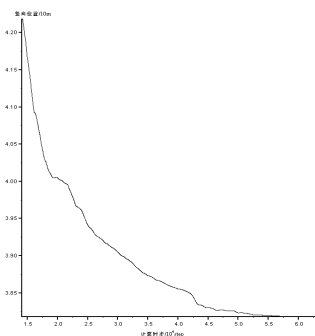


图 6 陡坡颗粒竖向位移

Fig.6 Vertical displacements of grain in steep slope

为了更直观地观察滑面的产生, 分别绘出碎石土区、粉质粘土区与各自下方区域的位移变化图, 如图 7~8。在图 7 中, 碎石土与其下方的强风化泥质砂岩区的位移差别是很明显的, 前者位移约为后者的 2 倍, 这主要是因为碎石土的剪出口处抗滑挡土墙已损坏, 向下滑移的阻力大大减小。

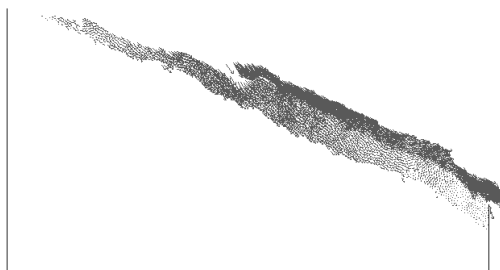


图 7 碎石土区与其下方区域的位移比较

Fig.7 Displacement comparison between gravel area and its lower region

在图 8 中, 粉质粘土区与其下方的强风化砂岩区位移量相差很大, 已可以确定出现了较易辨认的滑面。

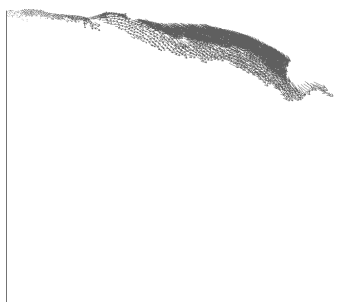


图 8 粉质粘土区与其下方区域的位移比较
Fig.8 Displacement comparison between powder clay area and its lower region

5.2 接触力

在 PFC^{2D} 中, 颗粒间的接触力可以反映岩体间的相互作用, 如相互挤压和拉裂等, 分别绘出碎石土区和粉质粘土区破坏前、后的接触力图, 如图 9~10。从中看出, 上部粉质粘土区的大变形主要是由于张拉破坏引起的, 尤其是在此区的下部, 临空面土体的下滑加剧了张力的增长; 碎石土区的颗粒接触力变化没有粉质粘土区那么明显, 说明应力变化不是其下滑的主要原因, 综合分析上节结果, 可知碎石土区的下滑基本是呈整体性的, 其与下方的中强风化泥质砂岩间连接性极差, 节理面即为滑动面, 这样就呈现出整体下滑的现象。

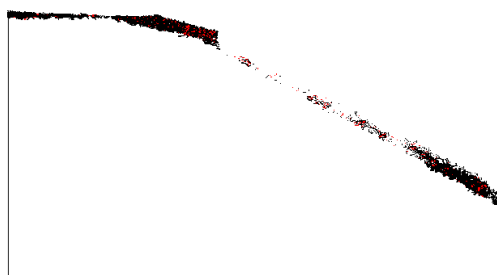


图 9 破坏前的颗粒接触力
Fig.9 Contact force between balls before failure

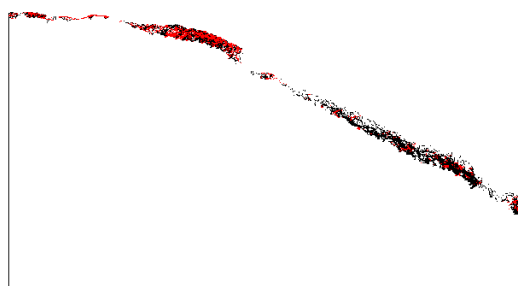


图 10 破坏后的颗粒接触力
Fig.10 Contact force between grains after failure

6 结 论

由于下方挡墙的损坏, 该滑坡在其表层处将发生较大规模的滑移变形。通过颗粒流离散元的计算分析, 可对此边坡做出如下预测:

(1) 上部粉质粘土区和表层的碎石土区将发生滑动, 滑动面分别为粉质粘土区与其下方的强风化砂岩的交界面、碎石土区下方已为钻孔资料揭示的节理。

(2) 粉质粘土区的滑动系拉裂破坏所致, 整体性较差, 当下方失去天然的支撑时, 加之临空面较陡, 将以较为破碎的形式滑动, 有掉石滚落的危险。

(3) 下方碎石土区因抗滑挡墙失去支挡作用, 将发生较大的整体性滑动, 变形最大处位于剪出口, 整体变形有随时间继续增大的趋势。

(4) 针对上述滑动的运动特点, 建议对上方较陡的粉质粘土区采用锚杆支护、喷浆等形式做加固处理, 而碎石土区则可考虑在其上部喷浆稳固易滑区、下部修好抗滑挡墙以限制诱发滑动的产生之结合形式处治。

参 考 文 献

- [1] Cundall, PA, ODLStrack. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 1979(29): 47—65.
- [2] Itasca Consulting Group. PFC2D Theory and Background[M]. Minneapolis, Minnesota, 1999.
- [3] 郑书彦, 李占斌, 李甲平, 等. 滑坡侵蚀离散元分析研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(12): 2 124—2 128.
ZHENG Shu-yan, LI Zhan-bin, LI Jia-ping, et al. Study on landslide erosion by discrete element method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(12): 2 124—2 128.
- [4] 乐晓阳, 谭国焕, 李启光, 等. 节理岩体圆形洞室岩爆过程的离散元分析与模拟[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(6): 676—679.
XIAO Yang, Tan Guo-huan, LI Qi-guang, et al. Analysis and simulation for rock-burst of circular cavern with joints by using discrete element method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1999, 18(6): 676—679.
- [5] 焦玉勇, 葛修润, 刘泉声, 等. 三维离散单元法及其在滑坡分析中的应用[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(1):

- 101—104.
- JIAO Yu-yong, GE Xiu-run, LIU Quan-sheng, et al. Three-dimensional discrete element method and its application to landslide analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(1): 101—104.
- [6] Wang, D.D.Tannant, P.A.Lilly. Numerical analysis of the stability of heavily jointed rock slopes using PFC^{2D} [J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2003, 40: 415—424.
- [7] 周健, 廖雄华, 池永, 等. 土的室内平面应变试验的颗粒流模拟[J]. 同济大学学报, 2002, 30(9): 1 044—1 050.
- ZHOU Jian, LIAO Xiong-hua, CHI Yong, et al. Simalation plane strain test of soils by particle flow code[J]. **Journal of Tongji University**, 2002, 30(9): 1 044—1 050.
- [8] 曾庆有, 周健. 不同墙体位移方式下被动土压力的颗粒流模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(增): 43—47.
- ZENG Qing-you, ZHOU Jian. Analysis of passive earth pressure due to various wall movement by particle flow code(2D)[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp.): 43—47.
- [9] 孔祥臣, 陈谦应, 贾学明. 土石混合料振动击实试验的 PFC2D 模拟研究[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(1): 61—67.