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：首先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施加了节理，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

作者简介：孟云伟（1980－　），男，硕士研究生，主要从事岩土工程等方面的研究。

0　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。

1　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

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。

2　颗粒流离散元的原理

在颗粒流离散元 PFC^{2D} 中，由颗粒和墙体两者组成模型，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，外力作用下，颗粒间将产生位移，引起应力的变化。在这个过程中，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

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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。

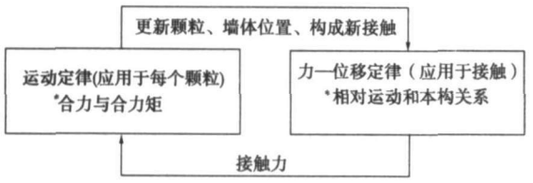

图2 计算过程循环图

3 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16610个，在自重应力作用下平衡（重力加速度取为10 m/s^2），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4×10^7 N/m^{3}和2×10^7 N/m^3，其余参数设置见表1。



图3 滑坡计算模型

表1 计算模型力学参数

岩土分类	颗粒密度/(kg·m^{-3})	颗粒摩擦系数	颗粒切向刚度/(N·m^{-1})	颗粒法向刚度/(N·m^{-1})	接触连接切向强度/N
中风化泥岩	2500	0.35	1×10^8	2×10^8	8×10^6
中风化泥质砂岩	2350	0.20	6×10^7	8×10^7	5×10^6
中风化砂岩	2250	0.15	3×10^7	6×10^7	2×10^6
中强风化泥质砂岩	2350	0.20	6×10^7	8×10^7	5×10^6
强风化砂岩	2200	0.10	3×10^7	6×10^7	1.5×10^6
碎石土	2100	0.05	4×10^7	8×10^7	6×10^5
粉质粘土	1800	0.25	2×10^6	4×10^6	1×10^6

4 PFC^{2D}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，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。

4.1 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。



图4 滑坡计算结果

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，就很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。

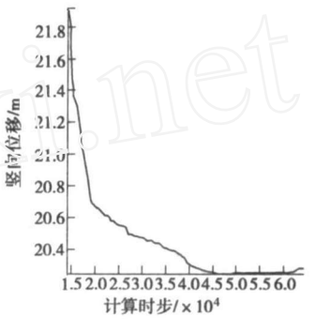

图5 碎石土中部颗粒竖向位移

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。

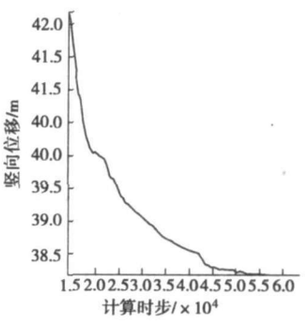

图6 陡坡颗粒竖向位移

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。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。

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

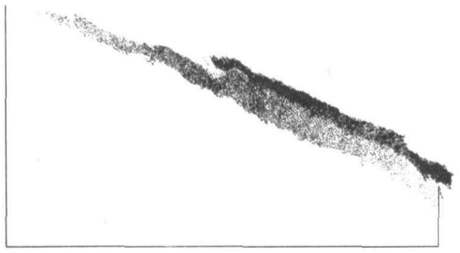

图 7 碎石土区与其下方区域的位移比较

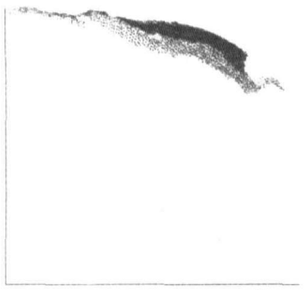

图 8 粉质粘土去与其下方区域的位移比较



图 9 破坏前的颗粒接触力

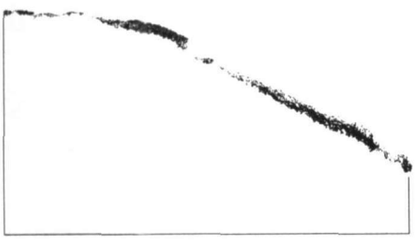

图 10 破坏后的颗粒接触力

4.2 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。

5 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阻制诱发滑动的产生之结合形式处治。

参考文献：

[1] CUNDALL P A, STRACKO D L. 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):2124 - 2128.

[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.

[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.

[6] WANG C, TANNANT D D, LILLY P A. 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):1044 - 1050.

[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.

[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.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net