

文章编号: 1000-7598-(2009)01-0086-05

土坡稳定分析的颗粒流模拟

周 健^{1,2}, 王家全¹, 曾 远³, 张 姣⁴

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;
3. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 4. 上海城市管理职业技术学院 土木工程系, 上海 200432)

摘 要: 边坡的失稳破坏运动是一个存在岩土体的滑动、平移、转动的复杂过程, 具有宏观上的不连续性和单个块体运动的随机性。采用颗粒流模拟土坡的变形破坏全过程, 不需要假定滑移面的位置和形状, 颗粒根据所受到的接触力调整其位置, 最终从抗剪强度最弱的面发生剪切破坏, 因此离散元法是模拟边坡变形破坏力学行为的比较理想的途径。运用 PFC (颗粒流) 程序对砂性土坡和黏性土坡分别进行数值模拟, 分析细观参数对土坡破坏型式的影响。结果显示, 土性对边坡的破坏型式有很大的影响, 随着颗粒黏性的增大, 边坡破坏类型从塑性破坏向脆性破坏过渡。

关 键 词: 边坡失稳; 颗粒流(PFC); 离散元; 数值模拟; 土坡稳定

中图分类号: TU 432

文献标识码: A

Simulation of slope stability analysis by particle flow code

ZHOU Jian^{1,2}, WANG Jia-quan¹, ZENG Yuan³, ZHANG Jiao⁴

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;
4. Department of Civil Engineering, Shanghai Technical College of Urban Management, Shanghai 200432, China;)

Abstract: The slope failure is a complicated process with the rock soil body's slide, translation and rotation, which has uncontinuity in macroscopic view and randomness of a single block movement. It is unnecessary to assume position of slip surface and the shape on using particle flow code(PFC) to simulate the deformation and failure of soil slope; and particles adjust their position according to their contact forces received, and finally slope occur shearing failure from the weakest surface. Therefore, the discrete element method is comparatively ideal approach to simulate the mechanical behavior of side slope deformation and failure. The influences of microscopic parameters on slope failure's forms of sandy slope and clay slope are analyzed respectively by PFC numerical simulation. The results reveal that the soil property greatly influences the form of soil slope failure; with the increase of the particle viscosity, the types of the slope failure transit from plastic failure to brittle failure.

Key words: side slope instability; particle flow code (PFC); discrete element method; numerical simulation; slope stability

1 引 言

边坡的失稳破坏运动是一个存在岩土体滑动、平移、转动的复杂过程, 具有宏观上的不连续性和单个块体运动的随机性。对于边坡力学行为的分析, 常用的有极限平衡法和有限元法。采用极限平衡法时, 通常把边坡块体视为由若干个不变形的刚性块体组成, 计算各个刚性块体的下滑力和抗滑力, 通过推力传递等计算方法来确定滑坡推力, 这种方法通常需要确定滑动面的几何位置及刚性滑块和滑动面之间以及刚性块之间的黏聚力和摩擦角等参数。

应用有限元法分析滑坡的应力状态要比极限平衡法的结果准确些, 但在分析的过程中并未考虑滑动面的存在对其应力状态的影响。更为重要的是, 边坡体作为一种复杂的地质体属于非连续介质, 边坡体的不同部位其力学性质、应力状态、位移的规律等是不同的。离散元方法作为描述非连续介质的一种方法已经在许多工程中得到了应用, 1974 年离散元程序趋于成熟, 随后国外学者利用离散元进行了大量的研究^[1-4]。国内多位学者和多家单位均对离散元法的开发与运用进行了积极的研究^[5-10]。本文采用 PFC 颗粒流程序对土坡滑动进行了仿真模拟,

收稿日期: 2007-05-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No. 50578122)。

作者简介: 周健, 男, 1957 年生, 教授, 博导, 同济大学地基基础工程研究所所长, 主要从事软土地基处理技术、土-桩基-结构动力相互作用分析、地基液化与振陷、土体细观力学模拟、环境岩土工程等方面的研究工作。E-mail: tjuzj@vip.163.com

分析了细观参数对土坡破坏型式的影响，并对砂性土坡和黏性土坡分别进行颗粒流模拟，从模拟的结果看出，土性对边坡的破坏型式有很大的影响，随着颗粒黏性的增大，边坡破坏类型从塑性破坏向脆性破坏过渡。

2 土坡破坏型式

早在 1943 年，Terzaghi 就提出了土体渐进破坏的概念，他把土体由初始状态向塑性流动过渡的中间状态称为渐进破坏，但直到 20 世纪 60—70 年代后，人们才深入地分析了渐进破坏问题，尤其是 Skempton^[11]和 Bjerrum^[12]的工作，为人们后来考虑土体的渐进破坏问题奠定了坚实的理论基础。

渐进破坏总是与土的软化特性相联系。在传统土坡稳定分析中，总是假定土体破坏时塑性区内各点剪应力同时达到抗剪强度。由于土体内的应力分布总是不均匀的，应力大的点先超过峰值强度而出现软化，原先承担的剪应力将超过抗剪强度。超额的剪应力转嫁给相邻的未软化的土体，引起这一部分剪应力的增大而超过其峰值强度，随之而发生软化。这时，在潜在的滑动面上，一部分土体单元的剪应力已超过峰值强度，强度跌落为大变形强度或残余强度，而另一部分单元还没有到达峰值强度。如果不能维持平衡状态，这一过程将持续进行直至整个滑动面满足破坏条件，从而导致土体最终破坏（Leroueil, 2001 年）^[13]，这就是渐进破坏的发展过程。根据渐进破坏的概念，滑坡是一个土体随时间而缓慢变形和突发性崩塌的过程，因此一个可靠的边坡稳定性分析方法应该考虑渐进破坏的影响。

3 破坏标准的确定

如何以数值模拟确定边坡失稳一直是困扰数值模拟的问题，使数值分析用于工程受到限制，往往数值分析只是作为一个辅助手段。目前土体破坏的标准有如下几种^[14]：（1）以有限元静力平衡计算不收敛作为边坡整体失稳的标志。（2）以塑性区从坡脚到坡顶贯通作为边坡整体失稳的标志。（3）土体破坏标志应当是滑动土体无限移动，此时土体滑移面上应变和位移发生突变且无限发展。

离散元是位移分析法，用临界位移来确定破坏标准是比较合适的方法。根据颗粒流的自身特点，采用综合判断分析方法，不仅仅以位移作为判断失稳的依据，还看整个模拟过程中位移的发展与变化过程以及颗粒最大不平衡力的发展情况。在有明显位移的情况下，以累计位移导致边坡失稳作为破坏

标准。当无明显位移时，以颗粒的平均不平衡力小于 10^{-1} N，并且最大不平衡力/平均不平衡力小于 10 作为计算结束的标准。

4 黏性土坡和砂性土坡的颗粒流模拟

4.1 粘结模型简介与计算模型

PFC^{2D} 提供了两种粘结模型，即接触粘结模型（Contact-bond model）和平行粘结模型（Parallel-bond model）。接触粘结模型在机理上相当于接触点处的刚性环粘结，粘结本身不可变形，当作用力大于粘结强度时，粘结断裂。平行粘结模型在机制上相当于接触面上的柔性胶粘结，粘结本身有刚度，可发生一定变形，同时，当作用力大于粘结强度时粘结断裂。接触粘结模型的模型细观参数有法向粘结强度、切向粘结强度。平行粘结模型的模型细观参数有法向粘结强度、切向粘结强度、法向粘结刚度、切向粘结刚度、粘结半径。

根据宏细观参数的对应关系对黏性和砂性土坡进行模拟分析，其参数的取值见表 1、2，其中三面用墙（wall）模拟。颗粒集合体生成后在自重应力下平衡，然后根据边坡形状削去多余的颗粒形成边坡，因为在删除颗粒时底部颗粒应力释放，所以削坡以后还要再进行一次平衡。在该尺寸的模型箱中，如果按实际砂土颗粒的大小模拟，得到的颗粒数量达到几十万甚至上百万，目前的计算机速度和容量还无法满足要求。笔者关心的是土体的破坏机制，而不是具体量的大小，所以在模拟过程中对颗粒的尺寸进行了放大，生成的颗粒数量在 2 万~3 万个之间，既克服了计算机容量和速度的限制，又满足了计算精度的要求。根据坡顶的长度和颗粒的数量把坡顶均布荷载换算成作用在每个颗粒的集中荷载施加在颗粒上。为了保证所施加的为柔性荷载，坡顶的一排颗粒用平行接触粘结起来，并限制这一排颗粒 X 方向的自由度，每级荷载施加完后，让模型达到平衡，并记录该状态的颗粒的位移及变形情况。

表 1 黏性土 PFC 模型输入参数
Table 1 PFC model parameters of clay

输入参数	试样尺寸 (高×宽) / mm× mm	粒径 R_{min} / mm	$\frac{R_{max}}{R_{min}}$	摩擦 系数	颗粒法 向接触 刚度 E_c / MPa	颗粒 刚度 比	接触 强度 偏差	初始锁 定应力 / kPa
接触 强度 / Pa								
1	80×35	0.5	4.0	0.1~0.5	20	1.50	0.25	75
5	80×35	0.5	4.0	0.1~0.5	20	1.50	0.25	75
10	80×35	0.5	4.0	0.1~0.5	20	1.50	0.25	75
15	80×35	0.5	4.0	0.1~0.5	20	1.50	0.25	100

表 2 砂性土的 PFC 细观参数
Table 2 PFC model parameters of sandy soil

颗粒 比重	最小 粒径 / mm	最大 粒径 / mm	初始 孔隙 率/%	颗粒 摩擦 系数	颗粒刚度/MPa		C_u	C_v	D50 / mm
					法向	切向			
2.643	0.25	0.65	15	0.4	125	125	1.29	1.03	0.53

4.2 模拟结果

图 1、2 为模拟的黏性土坡破坏时变形及颗粒位移场。为了便于观察,用不同颜色的颗粒把模型分成网格状。从颗粒的位移,剪切带的发生发展位置来看,模拟的结果和室内模型试验的结果基本吻合。在荷载作用下首先产生压缩,随着荷载的增大,在坡顶先产生微小裂隙并开始出现剪切破坏。最后剪切带自上而下从坡脚处完全贯通,整个坡体向外滑出,滑裂面形状呈圆弧形。图 3、4 为砂性土坡的模拟结果。从模拟的试样变形图上看,砂性土坡的破坏过程表现出突发性。其滑裂面形状也很接近室内模型试验的结果,从坡顶至坡脚形成一条近似直线型滑裂面^[15]。

4.3 模拟细观分析

图 5(a)为砂性土坡剪切带贯通时颗粒旋转梯度,图中深颜色的颗粒为旋转角度超过 10° 的颗粒。可以看出,土坡破坏时颗粒旋转只发生在剪切带内,滑动土体基本上保持刚体运动。图 5(b)为局部放大的颗粒角度示意图,图中线段的方向代表每个颗粒的角度。从图上可以更清楚地看到,除了剪切带内,其余各处颗粒的方向基本没变,保持在水平方向,且在坡顶处颗粒较密,而坡底处颗粒的孔隙率明显增大。如图 6 所示,土坡中不同部位的孔隙率变化过程,初期各个部位都是受压状态,上部荷载下孔隙率不断减小,到一定程度后底部和中部的孔隙率由于颗粒之间剪切破坏,材料发生剪胀,孔隙率增大。当剪切带贯通后,在荷载作用下产生错动的颗粒重新排列,颗粒之间又相互靠近趋于紧密,最后颗粒间的作用力互相调整而趋于稳定并形成持续的滑裂面。

4.4 细观参数对边坡破坏型式的影响

边坡的破坏型式受内部结构和外部条件影响,以上分析了外部条件对边坡变形和破坏的影响。边坡的变形、失稳从根本上来说是边坡自身求得稳定状态的自然调整过程,坡体变形和失稳是由多种因素引起的。从坡体自身结构特点来说,软弱结构面和自身材料抗剪强度是决定坡体稳定的主要因素;从坡体外部赋存环境来说,是由于自然因素和人类活动改变了边界条件和降低了山体结构的力学性质。

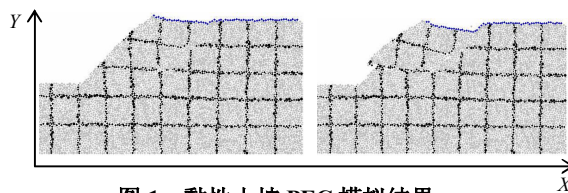


图 1 黏性土坡 PFC 模拟结果
Fig.1 PFC simulation result in clay slope

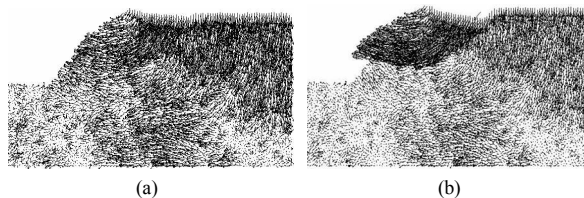


图 2 黏性土坡在各级荷载下的位移矢量图
Fig.2 The displacement vectograph under various levels load in clay slope

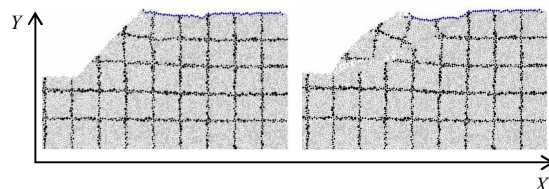


图 3 砂性土坡 PFC 模拟结果
Fig.3 PFC simulation result in sandy slope

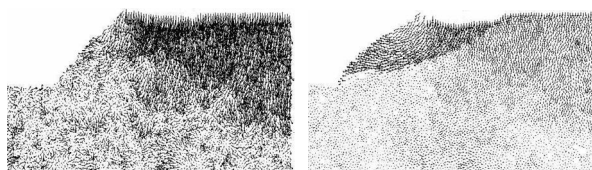


图 4 砂性土坡在各级荷载下的位移矢量图
Fig.4 The displacement vectograph under various levels load in sandy slope

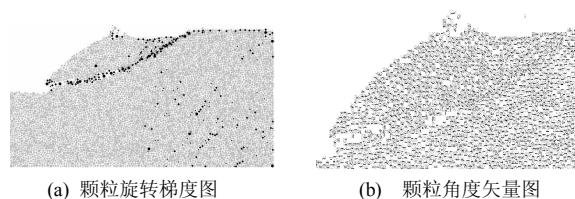


图 5 颗粒旋转角度变化
Fig.5 The variation of particle rotation angle

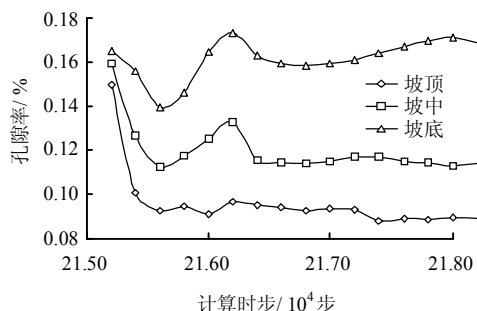


图 6 不同位置孔隙率变化曲线
Fig.6 The curves of porosity change of different positions

因此,有必要从坡体自身的结构特点出发,研究土体的细观参数(颗粒粘结强度、颗粒摩擦系数)对边坡的破坏、变形的影响。为了便于观察颗粒的位移情况,每隔一定距离用隔栅把颗粒设成不同颜色见图7,边坡参数见表3。

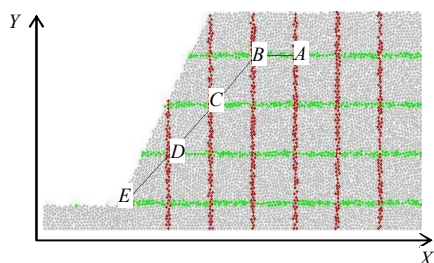


图7 边坡 PFC 模型
Fig.7 PFC model of slope

表3 边坡 PFC 模型参数
Table3 PFC model parameters of slope

颗粒模型	粘结强度 pb/kPa	摩擦 系数 f	密度 $/(\text{g}/\text{m}^3)$	K_n $/\text{MPa}$	K_s $/\text{MPa}$
Model-1	0	0.9	2.6	600	600
Model-2	100	0.9	2.6	600	600
Model-3	300	0.9	2.6	600	600
Model-4	300	0.5	2.6	600	600
Model-5	550	0.4	2.6	600	600

由图8看出,当颗粒粘结强度为0时,相当于无黏性材料,首先颗粒由坡顶向下滚动,同时带动下面的颗粒,直至坡脚位置,将坡脚处起支撑作用的砂粒带动,使整个坡脚的颗粒向外滑出,导致坡面中上部的砂粒失去支撑而发生大规模滑动。由于颗粒之间没有粘结强度,颗粒之间完全靠接触力,前面的颗粒滚下去后,后面的颗粒失去支撑,马上填补前面的颗粒留下的空白。从图9也可以看出,刚开始,坡脚出现压密现象,即CD的距离不断变小,而坡的中部和顶部表现为受拉。计算30000步时,首先在坡的中部和顶部由上而下开始出现较大的错动,在AB点之间出现较明显的滑移-拉裂型破坏面,而滑坡体内BC、CD的距离变化不大,坡体前缘底部出现明显隆起。

对于黏性土,选取几组典型的模型图片,见图10和图11。边坡先在坡脚滑动,滑动不断增大,然后坡面由上而下出现裂缝,坡脚滑移加剧,导致裂缝增大,随着裂缝的扩大,坡体中部出现剪切滑动,边坡上部块体翻滚滑落,底部的土体受上部重压下开始错位。到 $t = 50\,000$ 时,上部的拉裂和底部的压实效应进一步加剧,最后整个边坡出现平面滑动破坏。位移图中各颗粒的位移(除坡脚的y方向位

移外)都在不断增大,这些都显示边坡最终发生了破坏,破坏型式表现为上部拉裂,中部剪切,底部挤压破坏。

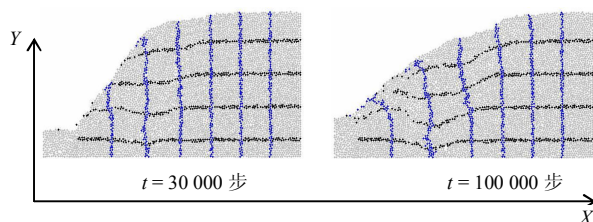


图8 无黏性土坡破坏示意图 ($pb = 0\text{ kPa}$, $f = 0.9$)
Fig.8 Destruction of non-cohesive soil slope

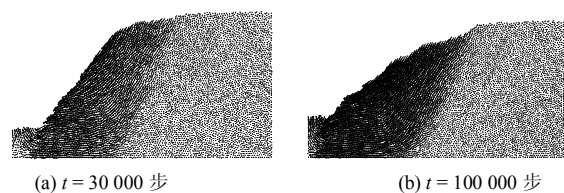


图9 无黏性土坡颗粒位移矢量图 ($pb = 0\text{ kPa}$, $f = 0.9$)
Fig.9 The displacement vectograph of non-cohesive soil slope

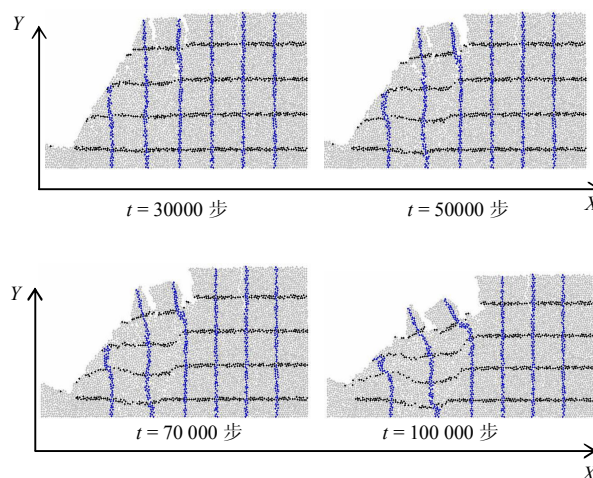


图10 黏性土坡破坏示意图 ($pb = 300\text{ kPa}$, $f = 0.9$)
Fig.10 Destruction of cohesive soil slope

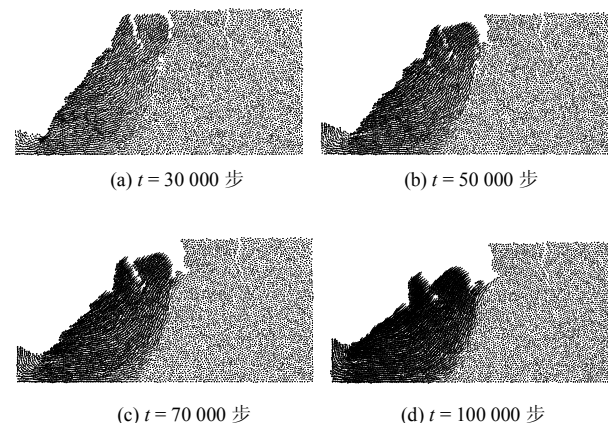


图11 黏性土坡颗粒位移矢量图 ($pb = 300\text{ kPa}$, $f = 0.9$)
Fig.11 The displacement vectograph of cohesive soil slope

边坡变形、失稳形式将因坡体材料参数不同表现出不同形式。随着颗粒粘结强度的增大, 边坡破坏类型从塑性破坏向脆性破坏过渡。对于无黏性土质边坡, 变形边坡自身的弹性变形、塑性变形或流变变形较大、流变趋势持续时间过长。整个坡体表现塑性流动状态, 没有明显的裂缝出现, 随着粘结强度增大到一定程度, 边坡破坏型式表现为脆性破坏, 大多数脆性边坡自变形开始至失稳, 其间变形量很小, 或者说一旦超过允许应变量即可失稳, 并不一定反映在变形量上, 而且在发生分离破坏时, 由于块体自身的材料性质较好, 一般只沿着破坏面拉裂或滑动, 块体内部并不产生变形, 如一种坡体主要破坏型式: 坡体在后缘张开、前缘压缩隆起, 滑动面也早已不再是滑动前的形状。从许多工程实例观测结果得知, 许多土质边坡的自变形开始至失稳, 其间变形量很大, 变形量达到米级也不一定导致整体失稳, 而大多数是局部位置的小滑移和拉裂破坏, 通常是众多的破坏面贯通造成坡体整体性位置大幅运动。

5 结 论

(1) 采用颗粒流模拟土坡的变形破坏全过程, 不需要假定滑移面的位置和形状, 颗粒根据所受到的接触力调整其位置, 最终从抗剪强度最弱的面发生剪切破坏。

(2) 从模拟的结果看出, 土性对边坡的破坏型式有很大的影响, 随着颗粒黏性的增大, 边坡破坏类型从塑性破坏向脆性破坏过渡。对于无黏性土土质边坡, 变形边坡自身的弹性变形、塑性变形或流变变形较大, 流变趋势持续时间过长。整个坡体表为现塑性流动状态, 没有明显的裂缝出现。而随着粘结强度增大到一定程度, 边坡破坏型式表现为脆性破坏, 大多数脆性边坡自变形开始至失稳, 其间变形量很小, 或者说一旦超过允许应变量即可失稳, 并不一定反映在变形量上。

(3) 荷载所引起的土坡破坏形式与由于土坡本身强度不足而引起的土坡破坏的形式有所不同。总的来说, 土坡本身强度不足而造成的破坏首先从坡角处的小滑坡开始, 而后演变成大的滑坡, 破坏形式表现为上部拉裂, 中部剪切, 底部挤压破坏。而受上部荷载作用下破坏形式表现为上部挤压破坏, 中部和底部剪切破坏。

参 考 文 献

- [1] CUNDALL P E, HART R G. Numerical modeling of discontinua[J]. **Engineering Computations**, 1992, 9(2): 101—113.
- [2] Itasca Consulting Group. PFC2D user's manual (version 3.1)[M]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc, 2004.
- [3] Itasca Consulting Group. PFC2d theory and background[M]. Minnesota, Minneapolis: Itasca Consulting Group, 2004.
- [4] MOROTO M. Some considerations on shearing resistance angles of sands[C]//Micromechanics of Granular Materials. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B V, 1988: 47—54.
- [5] 刘建武. 静力松弛离散单元法及其在岩体工程稳定分析中的应用[D]. 武汉: 中国科学院武汉岩土力学研究所, 1988.
- [6] 焦玉勇, 葛修润. 基于静态松弛法求解的三维离散单元法[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 451—456.
JIAO Yu-yong, GE Xiu-run. Three-dimensional discrete element method based on static relaxation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(4): 451—456.
- [7] 蒋爵光, 谢强. 岩体力学基础[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1996.
- [8] 程谦恭, 彭建兵. 高速岩质滑坡动力学[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1999.
- [9] 周健, 池毓蔚, 池永, 等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6): 701—704.
ZHOU Jian, CHI Yu-wei, CHI Yong, et al. Simulation of biaxial test on sand by particle flow code[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(6): 701—704.
- [10] 刘文白, 周健. 扩底桩的上拔试验及其颗粒流数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, (25): 201—206.
LIU Wen-bai, ZHOU Jian. Prototype tests and particle flow numerical simulation of under-reamed piles on uplift loading[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25: 201—206.
- [11] SKEMPTON A W. Long-term stability of clay slopes [J]. **Géotechnique**, 1964, 14(2): 77—102.
- [12] BJERRUM L. Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division**, American Society of Civil Engineers, 1967, 93: 3—49.
- [13] LEROUEIL A. Natural slopes and cuts: Movement and failure mechanisms[J]. **Geotechnique**, 2001, 51(3): 197—243.
- [14] 郑颖人, 赵尚毅, 宋雅坤. 有限元强度折减法研究进展[J]. 后勤工程学院学报, 2005, (3): 1—6.
ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, SONG Ya-kun. Advance of study on the strength reduction finite element method[J]. **Journal of Logistical Engineering University**, 2005, (3): 1—6.
- [15] 曾远. 土体破坏微观机理及颗粒流数值模拟[D]. 上海: 同济大学, 2006.