

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2018.05.04

土体结构性对突发性边坡失稳的控制作用

汪儒鸿¹,周海清¹,彭国园²

(1. 陆军勤务学院军事设施系, 重庆 401331; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 云南、广西等地部分边坡在变形与破坏过程中常表现出一定的突发性。经分析, 土体的高结构性强度有可能是导致该类现象产生的原因之一, 但尚未得到验证。传统的边坡稳定分析方法诸如有限元强度折减法、极限平衡法均着重于边坡安全系数的求解, 强调稳定到不稳定状态的突变, 对不同土质边坡在滑坡过程中坡体变形程度的强弱很难加以分析。针对以上问题, 通过离散元软件 PFC^{2D} 模拟土体的结构性, 分析结构性土质边坡的失稳变形规律。结果表明: 边坡潜在滑面上土体结构性的损伤是导致结构性土坡失稳的主要原因之一。土体的初始结构性强度越高, 边坡失稳的突发性越强, 灾前位移变形越小。

关键词: 滑坡; 突发性; 结构性土; 离散元; 变形

中图分类号: U213.1+3

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2018)05-0020-06

Analysis of the sudden slope instability controlled by the soil structure

WANG Ruhong¹, ZHOU Haiqing¹, PENG Guoyuan²

(1. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401331, China;

2. Northwest Nuclear Technology Institute, Xi'an, Shaanxi 710024, China)

Abstract: Some slopes in Yunnan, Guangxi and other places often show some suddenness during deformation and destruction. After analysis, the high structural strength of the soil may be one of the reasons for this phenomenon, but it has not yet been verified. Traditional slope stability analysis methods such as finite element strength reduction method and limit equilibrium method all focus on solving the slope safety factor, emphasizing the sudden change to the unstable state, and the degree of slope deformation of different soil slopes during the landslide process. It is difficult to analyze strengths and weaknesses. To solve the above problems, the structural properties of the soil are simulated by the discrete element software PFC^{2D} to analyze the instability deformation law of the structural soil slope. The results show that the structural damage of the potential slippery surface of the slope is one of the main reasons leading to structural instability. The higher the initial structural strength of the soil, the stronger the sudden instability of the slope, and the smaller the displacement deformation before the disaster.

Keywords: landslide; suddenness; structural soil; discrete element; deformation

我国是一个地质灾害发生较为频繁的国家, 据国家地质环境信息网统计, 仅 2013 年全国就发生地质灾

害 15 403 起, 其中滑坡、崩塌、泥石流共 14 703 起, 占地质灾害总数的 95.4%, 共造成 669 人死亡或失踪,

收稿日期: 2018-04-13; 修订日期: 2018-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目: 锚索框架—抗滑桩联合支挡结构的受力规律与设计(41272356)

第一作者: 汪儒鸿(1994-), 男, 湖北恩施人, 防灾减灾及防护工程专业, 硕士研究生, 从事防灾减灾及防护工程研究。E-mail: 13167943342@163.com

通讯作者: 周海清(1973-), 男, 湖南祁东人, 防灾减灾及防护工程专业, 博士, 教授, 主要从事岩土工程稳定性与支挡结构设计理论研究。E-mail: 976922172@qq.com

直接经济损失 102 亿元。政府和社会为治理这些地质灾害投入了大量的工程经费,因此加强对边坡变形破坏机理与规律的研究,具有重要的社会效益和工程应用价值。在不同边坡的破坏形式中,有一类边坡滑坡破坏作用特别巨大。发生和进行得非常迅速,破坏前没有明显的变形迹象,缺乏灾变预兆。2010 年 9 月 1 日发生在云南省保山市隆阳区瓦马乡河东村的一起滑坡灾害,灾前没有明显的变形迹象,因此没有引起坡下村民的警觉。滑坡启动后快速下滑,解体严重,破坏力巨大,最终导致 48 人死亡和失踪(图 1)。



图 1 云南省保山市隆阳区瓦马乡河东村滑坡灾害

Fig. 1 Landslide in Hedong Village Wama Township, Longyang District, Baoshan City, Yunnan Province

类似的滑坡并不鲜见,2015 年 11 月 13 日浙江省丽水市莲都区里东村滑坡^[1]、2013 年 1 月 11 日云南省镇雄县高坡村滑坡^[2]、以及 2015 年深圳光明新区“12·20”余泥渣土受纳场滑坡^[3]都具有突发、快速、解体严重的特点。

普通的滑坡变形过程通常包括蠕动这一前期变形阶段,坡体在这一阶段滑动了一定的距离之后,通常滑动面的强度只剩下残余强度,较之蠕动变形之前强度已大大降低,即边坡的抗滑力大大减少,而下滑力则并没有减少,甚至由于蠕动变形的结果坡体还具有了一定的初速度,由此滑坡进入快速下滑的剧滑阶段。而此类滑坡则没有明显的蠕动变形阶段,或者这一阶段很短,滑坡发生后直接就进入剧滑阶段。参照典型滑坡剧滑前的变化,发生这种没有前期变形积累的突然快速下滑说明边坡失稳后其滑动面强度发生了快速的下降。根据这一特点和现有对滑坡的认识,一个合理的假设就是发生该类滑坡的边坡体存在较大的结构性强度^[4],使得边坡一旦失稳发生滑移后,其滑面土体的结构性被破坏,强度突然降低,导致边坡下滑的阻力大大减少,滑动大大加速,从而产生突然的缺少前期变形迹象的快速下滑。相关研究也从侧面验证了这一推理的合理性:林威^[5]通过对花岗岩残积土微观结构及工程特性的研究,得出土体结构性的存在增强了土体

抵抗外荷载破坏的能力,但一旦结构受到破坏边坡稳定性就会急剧下降的结论;刘邦安^[6]通过对人工制备结构性土进行室内边坡实验发现,结构性土边坡的静力破坏具有均匀变形不明显,表现出一定脆性破坏的特征。综上,研究土体的结构性对边坡失稳突发性的影响,对边坡防灾减灾有重大意义。

1 数值分析方法

边坡滑坡变形是一个十分复杂的过程,其现象涉及深层土体滑动、地表植被破坏以及地面裂隙扩张等等。为方便统计滑坡过程中坡体的位移变形量,分析土体的结构性对边坡失稳变形规律的影响,采用离散元软件 PFC^{2D} 来模拟不同土体强度的结构性土质边坡,具体方法如下。

1.1 数值模型搭建

根据研究需要搭建边坡二维数值模型,即搭建具有特定尺寸及边界形状的离散元颗粒集合。通过赋予离散元颗粒集合相应材料参数,使其力学特性与真实土体相似,从而使数值边坡整体的力学响应接近真实边坡。其中颗粒摩擦强度的大小主要由接触滑动模型参数(fric)控制;颗粒结构性强度的大小主要由平行黏结接触模型控制。平行黏结模型主要包括五个特征参数:法向和切向刚度(Pb-kn/Pb-ks)、法向和切向强度(Pb-nstren/Pb-sstren)、黏结半径(Pb-rad),反映了接触颗粒在有限区域内填充胶合材料的本构特性。由于平行黏结接触模型的定义近似于结构性土二元介质模型^[7],也有较多文献^[8-10]验证过离散元分析方法模拟结构性土的可行性,故不再展开讨论。

1.2 边坡失稳方法

以有限元、有限差分法为主的边坡稳定分析方法通常采用强度折减^[11]来使边坡失稳,但这类方法并不适用于结构性土坡的滑坡模拟。因为结构性土具有应变软化特性,对该类土体采用人工强度折减不一定能反映其土体强度的真实非线性变化。更重要的是,结构性土目前尚无公认的有限元数值本构模型。因此,采取逐级增加坡顶荷载的方法使结构性土坡滑坡失稳。首先,使边坡在自重状态下计算至应力平衡,令坡体的位移形变归零;然后,在坡顶局部范围内对边坡逐级施加竖向荷载,每施加一级荷载,使边坡颗粒自主运动并重新计算至应力平衡。当施加至某一级荷载后,边坡颗粒无法再靠自身运动达到平衡,其最大位移无法收敛,边坡彻底失稳,称该级荷载为边坡最终荷载。在整个加载过程中,利用离散元软件的可视化技术,监

测颗粒之间平行黏结接触来评估边坡土体结构性的完整性。

需要说明的是:逐级增加坡顶荷载使边坡失稳的方法属于特定数值分析方法,并不对应某类真实滑坡情况。但从破坏本质上来说,该过程与真实边坡在各种不利工况影响下滑面逐渐损伤的过程相对应,符合边坡渐进破坏^[12-13]的定义,其结果具有一定分析价值。

1.3 滑坡变形度量

在边坡坡顶、坡中以及坡脚等不同位置选取表面颗粒作为滑坡监测点,提取各监测点的信息来度量边坡位移变形的大小。以某监测点为例:在坡顶荷载作用下,边坡变形导致该点颗粒产生相应位移,反映在二维数值平面上就是颗粒坐标的变化。由于岩土材料和边坡滑动方向的不确定性,在各级荷载作用下该点颗粒的位移应分解在 x 轴、 y 轴两个方向上来同时进行研究。通过统计该点颗粒在滑坡过程中实时 x 轴、 y 轴方向上的累积坐标增量,即可分析边坡在该点处的滑坡变形特征。

2 算例

2.1 基本模型搭建

在图 2 所示的框架内搭建结构性土坡的离散元模型。选取 A-D 四处表面颗粒作为滑坡监测点,并每隔一定距离给颗粒上色以便于观察坡体变形。

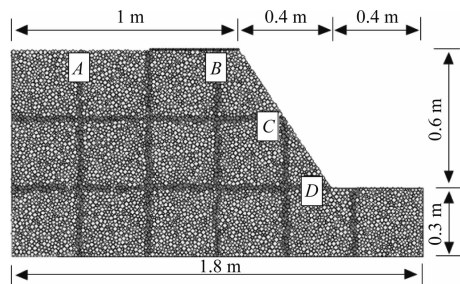


图 2 PFC^{2D} 边坡模型

Fig. 2 PFC^{2D} slope model

2.2 材料参数赋予

应用 PFC^{2D} 搭建模型材料的力学性质主要定义颗粒密度、粒径分布、基本颗粒形状及颗粒基本细观属性,并通过控制颗粒的接触本构模型来模拟材料的本构模型^[14]。材料宏观参数与微观参数的对应建立在大量的双轴压缩实验模拟^[15]及参数调试上。该过程相对复杂,又并非本文重点,这里不做深入讨论,仅展示三种不同结构性强度土坡的颗粒主要微观参数及对

应宏观参数(表 1)。

以高结构性强度组及低结构性强度组边坡为例,两组边坡的颗粒集合在 100 kPa 围压作用下的偏应力-轴向应变曲线如图 3 所示。可以看出高结构性强度组颗粒的峰值强度更高,其残余强度与峰值强度之比较低结构性强度组颗粒更小。说明高结构性强度组颗粒的结构性较强,具有更加明显的应变软化现象,这也进一步验证了利用平行黏结接触模型模拟土体结构性的可行性。同理,将三组颗粒集合在不同围压下进行离散元双轴压缩测试,绘出其各自的应力莫尔圆,即可得到对应宏观力学参数。

表 1 颗粒宏观参数

Table 1 Microscopic macro parameters

边坡土体的结构性强度级别	主要微观参数				对应宏观参数	
	fric	Pb-kn/ Pb-ks	Pb- nstren/ Pb- sstren	Pb-rad	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(\text{°})$
高	0.122	6e9	1.8e6	0.06	32.64	12
中	0.042	6e9	1.8e6	0.042	22.64	8
低	0.001	6e9	1.8e6	0.022	7.63	6

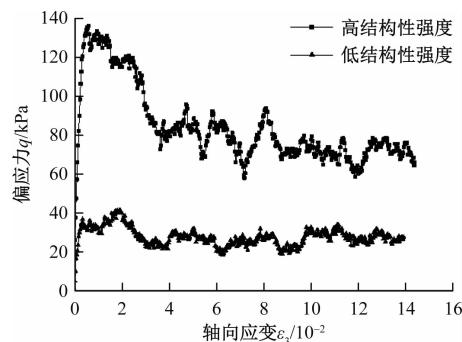


图 3 偏应力-轴向应变曲线

Fig. 3 Deviatoric stress-axial strain curve

2.3 施加坡顶荷载

根据边坡的坡顶长度和颗粒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。为保证所施加的为柔性荷载,坡顶的一排颗粒也用平行黏结模型黏结起来。根据土体参数设置,三组结构性土坡的坡顶初始荷载均设为 0.25 kN/m,并同样以此大小逐级递增,在这个过程中每施加一级荷载使边坡重新计算至应力平衡,再继续施加下一级别荷载。当施加至某一级荷载之后,颗粒的最大位移无法收敛,边坡失稳,则将该级荷载定为最终荷载。

2.4 结果及分析

2.4.1 最终荷载与边坡稳定性

数值模拟得出三组不同结构性强度土坡的最终荷载大小如表 2 所示。以高结构性强度土坡为例:图 4

表示离散元边坡颗粒的实时状态。由于坡顶荷载是逐级增加的,图 4a 为边坡在坡顶荷载为 16 kN/m 的条件下达到应力平衡时的状态。此时颗粒最大位移以及最大不平衡力都是收敛的,说明边坡还未失稳;图 4b 及图 4c 则是对边坡施加最终荷载以后,在坡顶荷载 16.25 kN/m 的条件下滑坡的动态发展过程。可以看出边坡此时已经失稳,坡体裂隙大量发育,颗粒最大位移也不收敛。

除直接观察以外,还可以结合颗粒位移矢量图来分析边坡稳定性。图 5a 为边坡在坡顶荷载 16 kN/m 的条件下达到应力平衡时的颗粒位移矢量图,此时边坡还未形成完整的滑面;而在最终荷载施加以后,颗粒不断滑动,逐渐形成了完整的滑面,边坡最终失稳,其动态发展过程如图 5b 及图 5c 所示。以上分析可知:各边坡在最终荷载施加之前,都能够通过颗粒的自主运动达到应力平衡,边坡尚未失稳。而一旦施加最终荷载以后,由于外界荷载超出了边坡所能承担的限制,导致边坡失稳,产生滑坡。

表 2 各边坡最终荷载
Table 2 Final load on the slope

边坡类型	高结构性 强度土坡	中结构性 强度土坡	低结构性 强度土坡
最终荷载/(kN·m ⁻¹)	16.25	10.5	4.5

2.4.2 边坡失稳与土体结构性的损伤

在整个加载过程中,边坡土体结构性的完整情况也在不断发生变化,同样以高结构性强度土坡为例:图 6 中黑线表示颗粒之间的平行黏结接触。图 6a 为边坡施加坡顶荷载之后,于坡顶荷载为 16 kN/m 的条件下达到应力平衡时的颗粒平行黏结接触情况。可见颗粒之间的黏结接触已经出现损伤,特别是坡顶范围内有明显断裂现象,但从整个边坡来看并没有形成贯通的破坏面;图 6b 及图 6c 为边坡在施加最终荷载之后的颗粒平行黏结接触破坏情况。此时颗粒的平行黏结接触出现大量断裂破坏,并形成贯通的破坏面。

将其与图 4 和图 5 进行对比:土体结构性的损伤贯穿于结构性土坡整个滑坡过程,且同样动态反映出边坡的实时稳定性。在施加坡顶荷载以后,边坡土体的结构性处在不断损伤的情况下,但一直到最终荷载施加之前都没有形成贯通的破坏面,说明局部平行黏结接触的断裂对边坡整体稳定性的影响并不大,或者说此时潜在滑面土体的残余强度仍然满足承担外界荷载的要求;而在施加最终荷载以后,与边坡失稳相对应的就是颗粒平行黏结接触大量断裂,并形成贯通的破

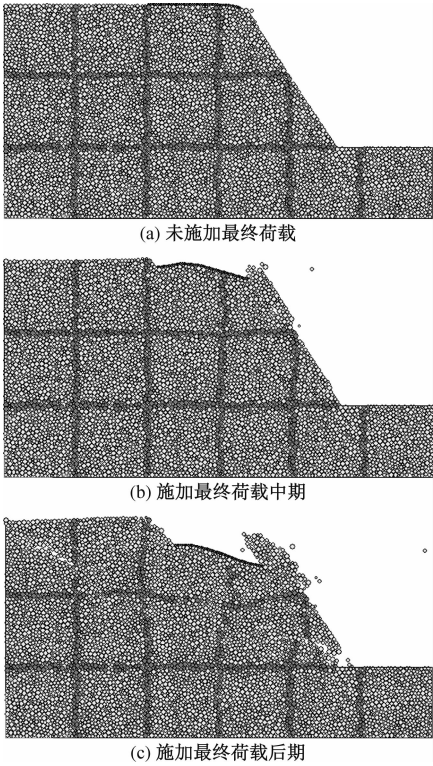


图 4 离散元边坡颗粒

Fig. 4 Discrete element slope particles

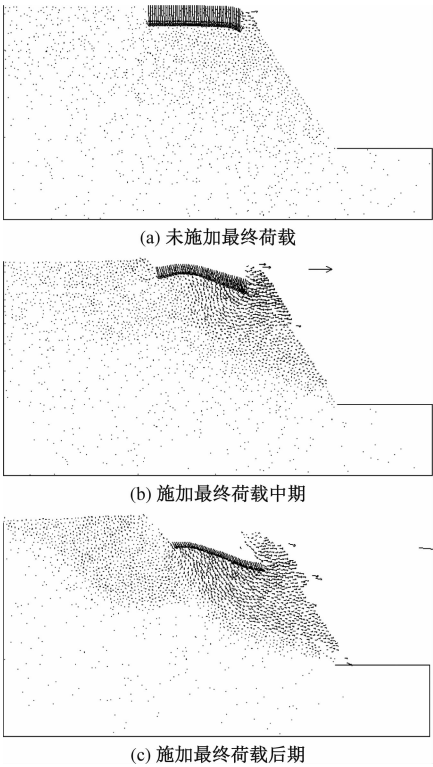


图 5 颗粒位移矢量图

Fig. 5 Particle displacement vector

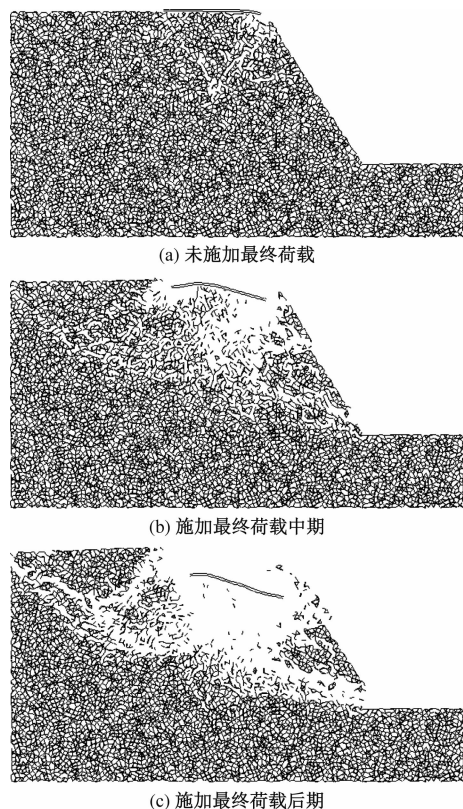


图6 颗粒平行黏结接触示意图

Fig. 6 Particle parallel adhesion contact diagram

坏面。图6所示平行黏结接触的破坏贯通面与图5所示边坡滑面位置基本重合,说明潜在滑面的土体结构性受损最大,反之也说明由于土体结构性的损伤主要集中于边坡潜在滑面位置,导致该部分土体强度迅速下降,边坡沿该面加速下滑,最终失稳。因此边坡潜在滑面土体结构性的损伤是结构性土坡失稳的主要原因之一。

2.4.3 失稳变形比较

潜在滑面土体结构性的损伤是导致结构性土坡失稳的主要原因之一,其破坏面的贯通是该类边坡失稳的重要标志。因此可通过统计各边坡在土体结构性的破坏面刚好贯通时的边坡位移变形大小,即各监测点的累积方向坐标增量,来评估不同结构性土坡的失稳突发性。

各边坡监测点的统计数据如表3所示。可以看出土体的初始结构性强度越高,边坡失稳前累积的滑动变形越小,失稳的突发性越大。为验证该统计结果的合理性,并直观展示不同结构性土坡在滑面损伤过程中累积位移形变的不同。这里选取高、低两种不同结构性强度土坡在各自潜在滑面土体的结构性完全破坏、形成贯通破坏面时的颗粒位移矢量图进行比较(图7)。可以看

出高结构性强度土坡失稳时颗粒位移矢量较小,说明边坡滑动变形小,其失稳风险性较大。

表3 各监测点累积方向坐标增量

Table 3 Cumulative direction coordinate increment of each monitoring point

各点累积方向 坐标增量/cm	高结构性 强度土坡	中结构性 强度土坡	低结构性 强度土坡
A点x轴方向	0.29	0.29	0.35
A点y轴方向	0.56	0.69	0.74
B点x轴方向	1.63	1.84	2.02
B点y轴方向	3.32	4.06	5.1
C点x轴方向	1.3	1.4	1.8
C点y轴方向	0.6	1.2	1.6
D点x轴方向	—	—	—
D点y轴方向	—	—	—

“—”表示数据过小,不予统计。

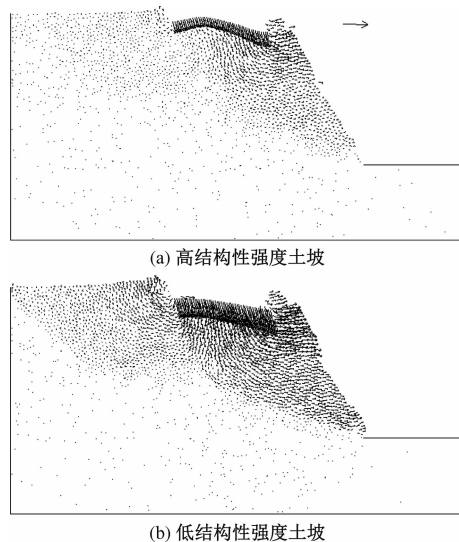


图7 颗粒位移矢量图

Fig. 7 Particle displacement vector

3 结 论

以边坡渐进破坏理论为基础,对土体的结构性对边坡失稳突发性的影响进行了探讨。通过离散元数值模拟方法比较了不同结构性强度土坡的失稳变形规律,所得结论如下:

(1) 土体结构性的损伤贯穿于结构性土坡滑坡的整个过程。该损伤集中于边坡潜在滑面的位置,由于滑面土体结构性的损伤导致该区域土体强度下降,进一步加剧了坡体的下滑,最终导致边坡失稳。

(2) 结构性土坡在滑坡过程中会形成与滑面类似的土体结构性损伤贯通面,是结构性土坡失稳的重要标志之一。

(3)土体初始结构性强度越高的边坡,在边坡滑坡过程中累积的位移变形越小,失稳突发性越高。

参考文献:

- [1] 韩菁雯,陈安,揣小明. 山区典型地质灾害孕育机理分析与应对策略——以丽水滑坡和文成泥石流事件为例[J]. 河南科技,2017(19):147-151.
HAN Jingwen, CHEN An, CHUAI Xiaoming. Mechanism of mountain typical geological disaster and corresponding strategies; the case of Lishui landslide and Wencheng debris flow [J]. Henan Science and Technology, 2017(19): 147-151.
- [2] 张维顺. 云南省镇雄县赵家沟高速远程堆积层滑坡形成机制研究[D]. 成都理工大学,2014.
ZHANG Weishun. Research on the formation mechanism of Zhaojiagou town high-speed remote accumulation landslide in Zhenxiong, Yunnan [D]. Chengdu University of Technology, 2014.
- [3] 殷跃平,李滨,王文沛,等. 深圳“12·20”渣土场灾难滑坡成灾机理与岩土工程风险控制研究[J]. Engineering, 2016(2): 176-216.
YIN Yueping, LI Bin, WANG Wenpei, et al. Mechanism of the december 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization [J]. Engineering, 2016(2): 176-216.
- [4] 刘恩龙,沈珠江. 结构性土的强度准则[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1248-1252.
LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Strength criterion for structured soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1248-1252.
- [5] 林威. 花岗岩残积土结构性与边坡稳定分析[D]. 福州大学,2014.
LIN Wei. The analysis of the structure property and the slope stability of the granite residual soil [D]. Fuzhou University, 2014.
- [6] 刘邦安. 结构性土坡与粘性土坡的动力变形和破坏特性研究[D]. 清华大学,2008.
LIU Bangan. Study on dynamic behavior of deformation and failure of structural and cohesive soil slope [D]. Tsinghua University, 2008.
- [7] 刘恩龙,沈珠江. 结构性土的二元介质模型[J]. 水利学报,2005,36(4):391-395.
LIU Enlong, SHEN Zhujiang. Binary medium model for structured soils [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(4): 391-395.
- [8] 蒋明镜,李涛,胡海军. 结构性黄土双轴压缩试验的离散元数值仿真分析[J]. 岩土工程学报,2013,35(S2):241-246.
JIANG Mingjing, LI Tao, HU Haijun. Numerical simulation of biaxial tests on structured loess by distinct element method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 241-246.
- [9] 蒋明镜,孙渝刚. 结构性砂土粒间胶结效应的二维数值分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(8):1246-1253.
JIANG Mingjing, SUN Yugang. Two-dimensional numerical investigation on bonding effect between particles of structured sands [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1246-1253.
- [10] 蒋明镜,孙渝刚. 人工胶结砂土力学特性的离散元模拟[J]. 岩土力学,2011,32(6):1849-1856.
JIANG Mingjing, SUN Yigang. A DEM modelling of mechanical behaviour of artificially cemented sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1849-1856.
- [11] 陈国庆,黄润秋,石豫川,等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(2):243-256.
CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, SHI Yuchuan, et al. Stability analysis of slope based on dynamic and whole strength reduction methods [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(2): 243-256.
- [12] 陈国庆,黄润秋,周辉,等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究[J]. 岩土力学,2013,34(4):1140-1146.
CHEN Guoqing, HUANG Runqiu, ZHOU Hui, et al. Research on progressive failure for slope using dynamic strength reduction method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(4): 1140-1146.
- [13] 谭福林,胡新丽,张玉明,等. 不同类型滑坡渐进破坏过程与稳定性研究[J]. 岩土力学,2016,37(S2):597-606.
TAN Fulin, HU Xinli, ZHANG Yuming, et al. Study of progressive failure processes and stabilities of different types of landslides [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S2): 597-606.
- [14] 贾学明,柴贺军,郑颖人. 土石混合料大型直剪试验的颗粒离散元细观力学模拟研究[J]. 岩土力学,2010,31(9):2695-2703.
JIA Xueming, CHAI Hejun, ZHENG Yingren. Mesomechanics research of large direct shear test on soil and rock aggregate mixture with particle flow code simulation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2695-2703.
- [15] 焦玉勇,王浩,马江锋. 土石混合体力学特性的颗粒离散元双轴试验模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(S1):3564-3573.
JIAO Yuyong, WANG Hao, MA Jiangfeng. Research on biaxial test of mechanical characteristics on soil-rock aggregate (SRA) based on particleflow code simulation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S1): 3564-3573.