

Numerical Analysis of Stability and Failure Mechanism of Talus Slopes

Xinpo Li^{1,2}, Jun Xu³, Siming He^{1,2}, Yong Wu^{1,2}

¹Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, CAS, Chengdu Sichuan

²Inst. of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu Sichuan

³The Second Railways Survey and Design Institute, Ministry of Railway, Chengdu, Sichuan

Email: lixinpo@imde.ac.cn

Received: Apr. 8th, 2015; accepted: Apr. 25th, 2015; published: Apr. 30th, 2015

Copyright © 2015 by authors 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

Abstract

Talus is a common geomorphologic and geological presence in mountainous areas. In the construction of transportation lines and pipelines, talus can develop to a geohazard if they are not appropriately treated. Talus is composed with rock blocks and debris and cannot be treated as common soil or rock mass. The discrete element code PFC2D is used to study the stability of talus slopes. In the model setup, PFC can simulate the “natural” process of the sediment of talus slope. The effects of particle friction coefficient and rock blocks on the rest angle of talus slope, and the failure mechanism of talus slope are considered. It is found that rock blocks will increase the rest angle of talus slope and the failure mode is also different with a uniform-sized slope. Slopes composed of rock blocks are prone to an overall failure mechanism while slopes composed by uniform-sized particles are more like to take a shallow sliding mechanism.

Keywords

Talus, Talus Slope, Discrete Element Method, Numerical Simulation

岩堆边坡稳定性及破坏模式数值分析

李新坡^{1,2}, 徐 骏³, 何思明^{1,2}, 吴永^{1,2}

¹中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都

²中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都

³铁道部第二勘察设计院, 四川 成都

Email: lixinpo@imde.ac.cn

收稿日期：2015年4月8日；录用日期：2015年4月25日；发布日期：2015年4月30日

摘要

岩堆是高山峡谷区较常见的一种地貌类型，公路、铁路、管线等工程穿过岩堆体时，可能成为一种不良地质因素。由于岩堆体物质组成的特殊性，常用的土力学和岩石力学理论方法在解决岩堆边坡稳定性等问题时遇到了一些困难。采用基于离散元法的PFC2D软件，在建模过程中模拟岩堆边坡的“自然”形成过程，研究颗粒表面摩擦系数以及岩石块体对岩堆边坡休止角的影响，以及两种类型岩堆边坡的开挖破坏模式。岩石块体一般可以显著增大岩堆边坡的休止角，但最终休止角的大小有较大的离散性；由岩石块体组成的岩堆边坡的开挖破坏模式更接近于整体式破坏，而均布颗粒的岩堆边坡则为表层的平移破坏。

关键词

岩堆，岩堆边坡，离散元，数值模拟

1. 引言

岩堆是高山峡谷区较常见的一种地貌类型(图 1)，如果公路、铁路或管线等工程在岩堆体通过，则可能造成危害，从而成为一种不良地质因素。虽然还没有关于岩堆分布的详细调查资料，但根据一些研究文献，我国的西藏[1]、云南[2] [3]、四川的一些高山峡谷地带都有岩堆体分布。当公路或铁路通过岩堆体时，常遇到的问题一是岩堆边坡的稳定性问题，一是岩堆路基的不规则沉降问题。针对岩堆路基变形沉降问题，赵明阶等[2]和杨锡武等[3]以水麻高速公路工程为依托，采用离心模型试验模拟岩堆路基在自重及汽车荷载作用下的沉降变形，研究了不同组成、不同高度的典型岩堆体的沉降变形规律，取得了一些很好的成效。刘忠强等[4]基于模糊数学的基本原理，建立了岩堆边坡危险性的模糊综合评价体系，根据边坡失稳的等级权重对岩堆边坡进行危险性评价，并根据评价结果给出针对性的治理措施。张雷等[5]结合云南溪洛渡水电站专用线典型边坡工程，采用有限差分软件 FLAC3D 进行了三维数值模拟计算分析了抗滑桩、锚杆等对边坡稳定性的加固作用影响，给出了边坡的安全评价及处治意见。宋继宏等[6]以宜巴高速三里花岗岩堆体为研究对象，采用大型直剪试验研究岩堆体的强度特性，发现岩堆体具有应变硬化特征，强度随干密度增加而增加。熊冰[7]对四川某高速公路红层地区岩堆体特征及对路基工程稳定性的影响进行了分析，认为潜在滑动面一般为土石界面或两种土层的分界面，地下水对边坡稳定性有重要影响。国际上，前苏联地质学家杜别里尔较早进行了岩堆相关的研究，文献[8]详细分析了岩堆形成的自然条件、机理及苏联在岩堆地区修筑与养护路基的经验及岩堆地区的一系列工程地质问题，是对岩堆及岩堆路基系统研究的著作。Rapp and Fairbridge [9]也是较早关注岩堆地貌现象的学者，他们给出了自己对岩堆的定义。最近，日本学者 Obanawa and Matsukura [10]在前人研究的基础上提出了一种岩堆形成演化的数学模型，运用该模型可以模拟岩堆的发展和崖壁退化，并进而给出地形变化的过程。

虽然岩堆这一特殊的地质地貌类型得到了国内外学者的关注，并有一些相关的研究成果，但由于岩堆体、岩堆边坡以及岩堆路基具有特殊的组成结构，表现出不同于一般的岩体和土体的工程力学特征，给工程设计和施工带来了很大困扰。本文在对岩堆成因特征分析的基础上，拟采用离散元数值方法研究岩堆边坡稳定性及破坏过程，岩堆路基变形破坏机理。

2. 岩堆

对于岩堆的定义，不同的文献资料有所差别，被中文文献引用最多的一种定义是铁路工程设计技术



Figure 1. A typical talus slope (The photo is taken in Jiacha-Sangri road, Tibet)

图 1. 典型岩堆边坡(照片拍摄于西藏加查 - 桑日公路工程)

手册——路基[11]给出的，即岩堆是岩石山坡经过物理、风化作用，形成的岩石碎块、碎屑，通过重力作用或雨水搬运至山坡上或山脚下的疏松堆积体，岩堆的主要物质来源是崩塌和落石。公路路基手册[12]没有对岩堆进行明确的定义，而是把岩堆和崩塌联系在一起，认为经常发生崩塌、碎落和落石的山坡坡脚，由于崩落物的不断堆积，就会形成岩堆。Rapp and Fairbridge [9]采用源于法语的“Talus”一词描述岩堆，他们给出的定义为：由小型崩塌作用产生的靠近山坡的岩屑堆积体(an accumulation of rock debris, formed close to a mountain wall, mainly through many small rockfalls)。这一定义和我国的铁路工程设计技术手册的定义都明确了岩堆是崩塌作用形成的这一关键性问题，综合分析两个定义可以确定 Talus 和岩堆是指向的同一事物。文献[10]给出了与岩堆相关的一些地貌学术语的定义，图 2 为他们给出的岩堆形成示意图以及相关词汇。根据图 2，对应的中英文词汇为：岩堆(Talus)、岩堆边坡(Talus slope)、岩堆堆积体(Talus sediment)、岩堆原始坡面(Basal surface beneath the talus sediment)。国内文献对岩堆的英文翻译也存在很大的差别，如文献[2]把岩堆翻译为 rocky heap，文献[3]翻译为 cliff debris，文献[5]则把岩堆体翻译为 accumulation of rock mass，这些翻译是根据岩堆的一些特征进行的字面翻译，并不是学术研究中使用的专有词汇。

岩堆大多为近代堆积，自然岩堆边坡的坡度一般接近组成岩堆的岩石碎块干燥状态下的天然休止角，岩堆的天然休止角与组成岩堆的岩体摩擦系数、岩块的大小和形状有关，一般在 $25^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 之间。岩堆体结构一般比较松散，特别是由大块石组成的岩堆体孔隙率大，并且结构不均匀，或有软弱松散的夹层，因此在外荷载作用下容易产生不均匀沉降。稳定岩堆体在长期风化侵蚀作用下，表层有细颗粒的填充，并

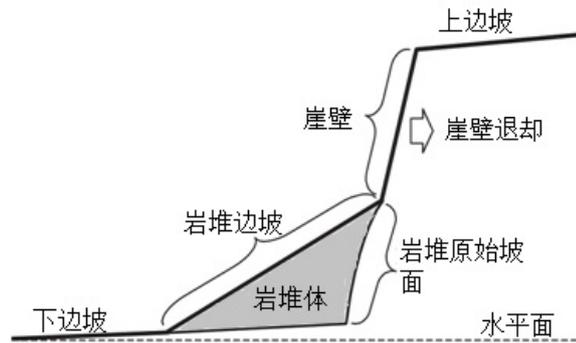


Figure 2. A schematic of talus slope and the geomorphological terms [10]
图 2. 岩堆示意图及与之相关的地貌学术语 [10]

可能发育有植被，随着地表水入渗带入细颗粒，岩堆体内部局部有一定的胶结。岩块的颗粒级配是影响岩堆体稳定性的重要因素。颗粒均匀时，在加载或扰动下，其滑塌表现出较强的规律性；而当级配粒径差别大时，细微的扰动可能引起的滑塌是多值变化的、难以准确预测。因此，岩堆体级配的大差异性、大变异性导致其用常规理论进行稳定性分析的困难[11] [13]。岩堆体的物质组成也对其稳定性有直接的影响，如碎屑岩类岩堆一般较松散，稳定性差，而碳酸盐类岩堆多呈半胶结状态，稳定性较好。岩堆体的物质组成也会影响其在受压时的力学表现。岩堆体压实过程中，压缩量部分来自岩堆体中的软岩块体在压实过程中发生破碎，小颗粒填充原有的空隙，孔隙率降低，发生压缩。另外一部分压缩量则可能来自于颗粒之间的滑移、旋转等产生位置的变化，从而实现颗粒重新排列，产生压缩。

3. 岩堆边坡稳定性数值分析

3.1. 离散元程序 PFC

数值模拟采用的二维颗粒流软件 PFC2D [14]，基于 Cundall and Strack 首先提出的离散元法[15]。PFC 采用的是一种刚性颗粒和柔性接触的方法，即单元体采用刚性的圆盘(二维)或球体(三维)不产生变形，而柔性接触则允许在接触中发生变形，从而实现整个颗粒体系的变形。颗粒在力和弯矩的作用下发生运动，力和运动之间遵循牛顿第二运动定律。颗粒之间的接触有三种接触模型：刚性接触模型、滑移接触模型和粘结模型，分别描述法向的弹性接触、切向摩擦接触以及颗粒之间的粘结接触。相互接触的颗粒体可以通过接触点上的粘结接触模型粘结在一起形成一定形状尺寸的物体。PFC2D 提供的粘结接触模型有两种，接触粘结模型和平行粘结模型。接触粘结可以传递压、拉和剪切荷载，平行粘结除可以传递压、拉和剪切荷载外，还可以传递弯矩。两种类型粘结均在法向和切向具有粘结强度，当受力超过强度时，粘结破坏，接触粘结破坏后除非重新建立粘结则不可恢复。PFC2D 进行颗粒运动模拟基于以下假定[14]：

- (1) 所有颗粒体均为刚体；
- (2) 颗粒之间的接触面积非常；
- (3) 颗粒之间的接触为柔性接触，刚性颗粒允许在接触点发生重叠变形；
- (4) 颗粒间接触重叠的大小与接触力相关，由力 - 位移关系控制，且所有的重叠相对于颗粒粒径来说很小；
- (5) 所有颗粒均为圆形。

3.2. 微观参数的确定

PFC 数值模拟采用的材料微观参数通常采用已知的宏观参数进行校订得到。进行材料微观参数校订

和反算最常用的方法是数值双轴试验[16] [17]。基于本文研究对象岩堆的物质组成特点,采用单独的颗粒模拟岩堆中的小颗粒,采用多个颗粒粘在一起模拟岩堆中的大块石。需要确定的微观参数包括颗粒摩擦系数、颗粒-颗粒的接触刚度,以及粘结的刚度和强度参数。本文不以具体的岩堆为研究对象,重点在于通过数值模拟的手段分析岩堆的工程力学特性以及岩堆边坡稳定性,因此主要通过参考相关文献以及数值双轴试验试算的途径确定模型微观参数,见表1。

3.3. 岩堆边坡 PFC 数值建模

由于岩堆体是由高处岩壁发生的许多小规模崩塌形成的,因此建立数值模型时也模拟岩堆体这一自然形成过程。如图3所示,首先才用 PFC2D 的 Wall 单元建立原始边坡,然后在边坡上部生成一簇颗粒,然后这些颗粒在重力作用下滚落并在坡脚堆积,从而实现一次小型崩塌的过程。然后,在同一位置再生成另一簇颗粒,并重复下落和堆积过程。这样,通过反复的生成颗粒和重力下落堆积,实现岩堆边坡的“自然”堆积过程。

建模时,首先生成一定数量的单体颗粒,颗粒粒径在 0.1 m~0.2 m 区间内的均匀分布,然后随机选择部分“种子”颗粒,然后在这些“种子”颗粒四周生成相同粒径的颗粒并粘结在一起形成我们需要的岩块。为考虑块石形状的影响,模型通过颗粒数量和排列方式形成三种基本形状的块石,如图3所示,2个颗粒形成的长方形,3个颗粒形成的三角形,以及5个颗粒形成的梯形形状。根据块石颗粒数目,可以得出块石的粒径大致范围在 0.2 m~0.6 m 之间。颗粒摩擦系数体现岩石的表面摩擦特性,本文摩擦系数在 0.3~0.7 范围内取值,以研究颗粒摩擦对岩堆体稳定性的影响。崩塌发生位置高 20 m,原始边坡坡度为 75°。原始边坡的陡崖后壁部分采用 Wall 单元模型,坡脚底部采用粘结固定颗粒作为边界。图4给出了两种堆积体模型,其中(a)由粒径均匀分布的圆形颗粒组成,用于模拟由较均匀的颗粒组成的岩堆体;(b)由岩石块体为夹少量圆形颗粒组成,模拟由大块石组成的岩堆体。图示为两种类型的堆积体边坡在天然自重作用下力链分布,可以看出(a)中的力链为比较规律的“树干+树枝”状分布,而(b)中的重力力链分布则具有更大的不均匀性,表现出重力沿少数几个链条上的集中传递。

3.4. 岩堆边坡的天然休止角

自然形成的岩堆边坡的坡度可认为即该岩堆体的休止角。岩堆边坡的天然休止角受岩石的表面摩擦系数、岩块的粒径以及岩块的形状影响,并可能受某几个大颗粒的影响,具有一定的随机性,可能与破碎均匀的同种岩石的休止角相差较大。图5为颗粒摩擦系数和岩石块体对岩堆边坡休止角的影响情况。从图5可以看出,无论圆形颗粒边坡还是岩堆边坡,颗粒摩擦系数对其休止角都有显著的影响。在颗粒摩擦系数相同的情况下,粒径均匀分布的圆形颗粒堆积边坡的休止角明显低于岩堆边坡的休止角。岩堆边坡的堆积过程具有很大的随机性,过程中的小小扰动可能对最后的结果有明显的影。为考虑随机性的影响,对应于每一个颗粒摩擦系数值,对两种类型的堆积体边坡在形成过程中通过改变少量颗粒的初始位置加入微小的扰动,得到的休止角数据分别用圆形、三角形和正方形点表示。根据图5中的结果可以看出,粒径均匀分布的圆形颗粒堆积体的休止角则较集中,而岩堆边坡的最终自然休止角具有很大的离散性。

3.5. 岩堆边坡的破坏模式

边坡的破坏模式一般与边坡的物质组成有关,粘性土质边坡的破坏模式以圆弧形或对数螺线形滑面的旋转破坏模式为主,砂性土质边坡的破坏模式则可能是直线形滑面的平移破坏模式,而岩堆体边坡的破坏模式则与一般土质边坡不同。对图4所示的两种“自然”堆积形成的岩堆边坡,假设公路从距离原始坡脚 4 m 处通过,需要对边坡进行开挖。开挖后两个边坡均发生坍塌破坏, PFC 数值模拟给出了破坏后颗粒累积位移矢量图(图6)。从图6可以看出,两种类型的岩堆边坡破坏模式有显著不同,(a)图所

Table 1. The micro-parameters used in PFC modeling
表 1. PFC 数值模拟分析采用的微观参数

微观参数	值
颗粒法向刚度, k_n	20.0 MN/m
颗粒切向刚度比, k_s	20.0 MN/m
颗粒摩擦系数, μ	0.3~0.7
颗粒密度, ρ	2300 kg/m ³
颗粒粒径, m	0.1~0.2 均匀分布
颗粒平行粘结法向刚度, k_{np}	20.0 MN/m ³
颗粒平行粘结切向刚度, k_{ns}	20.0 MN/m ³
颗粒平行粘结抗拉强度, σ_{np}	2.0 MPa
颗粒平行粘结抗剪强度, σ_{sp}	2.0 MPa
颗粒平行粘结半径系数, r_{pb}	1.0

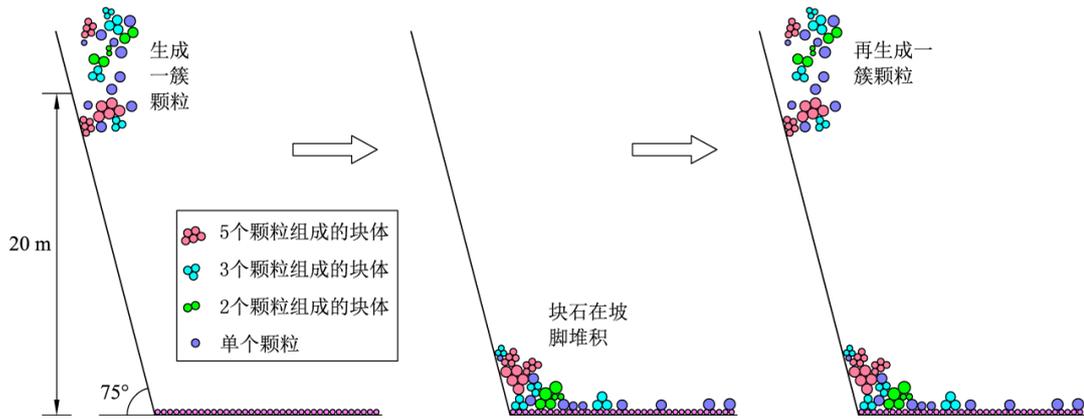


Figure 3. Set-up of the numerical model
图 3. 岩堆边坡数值建模过程

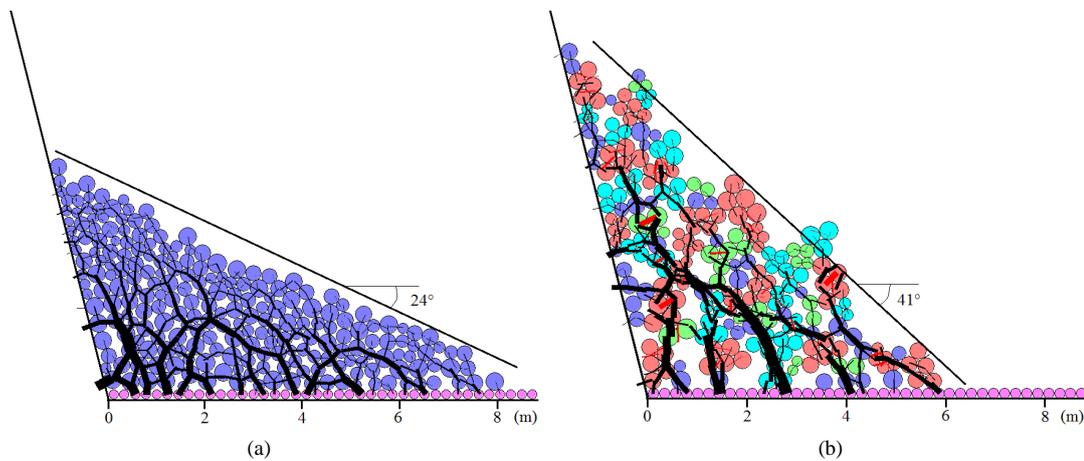


Figure 4. The force chain and rest angle of talus slope under gravity. The rest angel of a slope composed by round discs is 24° (a), and that composed by blocks is 41° (b) when the particle friction coefficient is the same
图 4. 岩堆在天然状态下的重力力链和休止角。在颗粒摩擦系数相同时，圆形颗粒堆积边坡(a)的休止角为 24°，块石堆积(b)的休止角为 41°

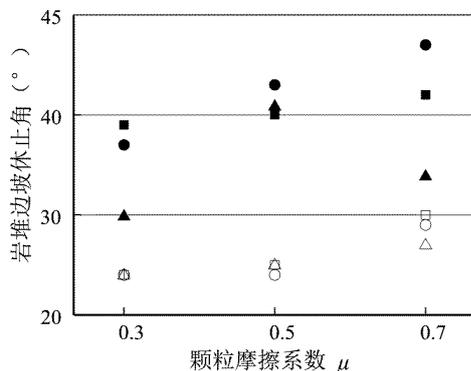


Figure 5. The effect of grain friction on talus slope's rest angle. Talus slope compose by blocks and round disks are shown by dark and blank shapes, respectively
图 5. 颗粒摩擦系数及块体对岩堆边坡休止角的影响。有黑色填充的点为岩堆边坡，空心形点为圆形颗粒边坡

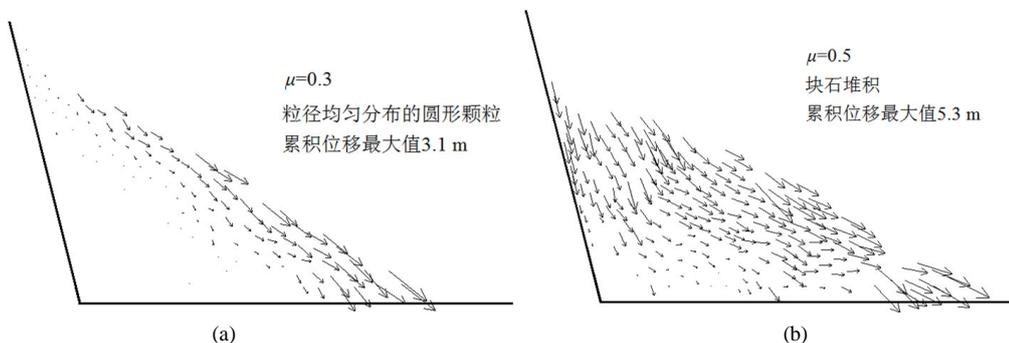


Figure 6. Failure modes illustrated by accumulated displacement
图 6. 累积位移表示的岩堆边坡破坏模式

表示的圆形颗粒组成的岩堆体边坡的破坏模式是表层滑动/滚动破坏，滑面接近于直线形，总体接近于砂性土边坡的平移破坏模式。(b)所表示的由块石组成的岩堆体边坡的破坏则接近于整体式的破坏，从位移矢量图上难以确定破坏的滑面位置和形状，破坏过程接近于整体结构破坏和重组。

4. 结论

基于 PFC2D 的数值模拟方法在分析岩堆边坡中具有一定的优势，采用颗粒单元在数值建模时可以模拟岩堆体“自然”形成的过程，通过不同形式和数目的粘结颗粒，可以模拟不同形状的岩石块体。通过对两类岩堆体，即粒径均匀分布的圆形颗粒组成的岩堆体和由块石组成的岩堆体，进行对比分析发现，在颗粒摩擦系数相同的情况下，由块石组成的岩堆体休止角明显大于同种岩石的均匀颗粒堆积体，但随机性大。在边坡开挖时，两类岩堆体的破坏模式也有很大不同，一种是接近平移式的表层破坏，一种则是接近于整体破坏模式。

基金项目

中铁二院科学技术研究计划项目(院计划 13164196 (13-15)); 国家重点基础研究发展计划(No. 2013CB733201)。

参考文献 (References)

[1] 陈如海 (2004) 青藏铁路桑利至拉萨段岩堆路基处理措施. *甘肃科技*, **4**, 110-112.

- [2] 赵明阶, 王昌贤, 杨锡武, 刘明华, 范玮佳 (2010) 公路岩堆路基沉降变形规律与施工控制深度研究. *岩土工程学报*, **1**, 33-40.
- [3] 杨锡武, 赵明阶, 王昌贤 (2009) 岩堆路基沉降稳定性及处治方法的离心模型试验研究. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, **2**, 236-240.
- [4] 刘忠强, 黄宏伟, 薛亚东, 李罡 (2007) 岩堆边坡危险性评价及减轻对策研究. *地下空间与工程学报*, **8**, 1472-1489.
- [5] 张雷, 顾文红, 文谦, 郑常辉 (2007) 岩堆体边坡稳定性的三维数值模拟分析. *地下空间与工程学报*, **6**, 1104-1108.
- [6] 宋继宏, 胡明鉴, 付克俭, 阿颖 (2012) 宜巴高速岩堆不同密实度大型直剪强度特性. *工程地质学报*, **5**, 687-692.
- [7] 熊冰 (2014) 某高速公路岩堆体特征及对路基工程影响分析. *铁道工程学报*, **1**, 49-52.
- [8] (苏)Г.Д.杜别里尔 (1956) 滑坡与岩堆地区的路基工程. 奉力人 译, 人民交通出版社, 北京.
- [9] Rapp, A. and Fairbridge, R.W. (1968) Talus fan or cone: Scree and cliff debris. In: Fairbridge, R.W., Ed., *The Encyclopedia of Geomorphology*, Reinhold Book Corporation, New York.
- [10] Obanawa, H. and Matsukura, Y. (2006) Mathematical modeling of talus development. *Computers & Geosciences*, **32**, 1461-1478.
- [11] 铁道部第一勘测设计院 (1995) 铁路工程设计技术手册——路基. 中国铁道出版社, 北京.
- [12] 交通部第二公路勘察设计院 (1996) 公路路基手册. 人民交通出版社, 北京.
- [13] 马爱霞, 曹淑上 (2005) 山区高等级公路岩堆稳定性及处治思路. *工程抗震与加固改造*, **S1**, 145-147.
- [14] Itasca Consulting Group Inc. (2002) PFC2D Particle Flow Code in 2 Dimensions, User's Guide. Minneapolis.
- [15] Cundall, P.A. and Strack, O. (1979) A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*, **29**, 47-65.
- [16] Han, J., Bhandari, A. and Wang, F. (2012) DEM analysis of stresses and deformations of geogrid-reinforced embankments over piles. *International Journal of Geomechanics*, **12**, 340-350.
- [17] Potyondy, D.O. and Cundall, P.A. (2004) A bonded-particle model for rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **41**, 1329-1364.