

文章编号: 1000—7598 (2013) 05—1242—05

红黏土承载比的土团尺寸效应研究

谈云志^{1,2}, 郑 爱¹, 吴 翩¹, 付 伟³

(1. 三峡大学 三峡库区地质灾害教育部重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 3. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 武汉 430056)

摘 要: 高液限红黏土用于路基填筑时, 因其不良的水理特性, 需要掺石灰或水泥改良。但红黏土成团现象十分突出, 进行灰土拌和时不易达到均匀状态, 影响预期改良效果。通过对不同直径的红黏土土团及石灰改良土土团进行承载比试验, 结果表明: 干密度随着土团直径尺寸的增大呈现先增大后减小的特征, 红黏土和石灰土的最大干密度对应的土团直径处在 0.2~5 mm 范围内; 而最大承载比 *CBR* 值对应的土团直径分别处在 5~10 mm 和 2~5 mm 的范围内。石灰土和红黏土的吸水率、膨胀率均随着土团尺寸的增大, 呈现先减小后增大的整体变化趋势。在 2~10 mm 的范围内, 两种土的膨胀量最小。石灰改良只对直径小于 5 mm 的土团的膨胀特性起到明显的抑制作用。可见, 现场施工中严格控制土团的大小对保证土体的强度和水稳定性具有十分重要的意义。

关 键 词: 土团; 尺寸效应; 红黏土; 加州承载比

中图分类号: TU 411

文献标识码: A

Effect of aggregate soil size on California bearing ratio values of laterite soil

TAN Yun-zhi^{1,2}, ZHENG Ai¹, WU Pian¹, FU Wei³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards in Three Gorges Reservoir Area, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 3. Second Highway Survey, Design and Research Institute of China Communications, Wuhan 430056, China)

Abstract: The high liquid limit laterite soil frequently needs to be improved by adding lime or cement due to its moisture susceptible property, while it is used to construct subgrade. However, it's difficult to uniformly mix ash and soil for the aggregate phenomenon of laterite soil; that would influence on the expected stabilization effects finally. California bearing ratio (*CBR*) tests are conducted on different sizes aggregation soil specimens of laterite soil and lime stabilized soil. The results show that, the dry density of soil mass increases first and then decreases with the increase of aggregate soil diameter, and the diameter corresponding to the maximum dry density is in 0.2–5 mm range for both laterite soil and lime stabilized soil; and the diameters of laterite soil and lime soil corresponding to the largest *CBR* values are in 5–10 mm and 2–5 mm range, respectively. The absorption and inflation rate decrease first and then increase with the increasing of aggregate soil size of them. The swelling percent of them are at minimum stage in the diameter range of 2–10 mm. Lime could reduce the expansive of the laterite soil significantly; when the aggregate soil diameter is less than 5 mm. It's very important to control the size of soil mass strictly in the site construction, so as to ensure the soil strength and moisture don't fluctuate.

Key words: aggregate soil; size effect; laterite soil; California bearing ratio

1 引 言

高速公路建设中经常遇到需要利用石灰、水泥等稳定材料处治不良路基填料的问题, 经过长期的实践和研究, 已取得颇为丰硕的成果^[1-3]。但总体来说, 改良机制的研究水平要遥遥领先于工程的实

际应用。造成它们脱节的根本原因是实际应用中无法破解稳定材料和填筑材料之间均匀拌和的难题^[4]。众所周知, 工程中的填筑材料, 特别是黏性土, 如膨胀土、红黏土, 成团现象十分突出, 都是由大小不一的土团构成。在改良的拌和过程中很难将土团打散^[1], 故稳定材料实际上只附着在土团的外表面;

收稿日期: 2012-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 51009084); 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金项目(No. Z011002); 湖南省科技进步与创新计划项目(No. 200910, No. 201045)。

第一作者简介: 谈云志, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事特殊土方面的教学与科研工作。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

然而,室内试验研究中严格控制了土体颗粒的粒径大小,如公路土工试验规程中规定击实试验用土的颗粒粒径不大于 40 mm^[5]。黏性土颗粒易成团、难打散的特征影响了稳定材料改良黏土的效果,致使工程界质疑改良处置的技术方案。目前,对土团尺寸效应进行定量分析的报道不多,就查阅的文献来看,只有施斌^[7]、蔡奕^[8]等探讨了集聚体大小对剪切强度、无侧限抗压强度等的影响。显然,土团尺寸效应的研究还有待加强。本文拟以成团现象较为典型的红黏土为研究对象,以承载比为评价指标,探讨土团尺寸大小对其工程特性及改良效果的影响,为确定实际工程中黏土填料的最大土团尺寸控制范围提供参考。

2 试验研究

2.1 基本物理力学性质

试验用土取自某高速公路标段,参照《公路土工试验规程》^[5]对土的基本物理力学指标进行了测试,结果见表 1。

表 1 红黏土基本物理力学指标

Table 1 Basic physico-mechanical indexes of laterite soil							
天然含水率 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性指数	相对密度	<0.005 mm 的黏粒含量 /%	最优含水率 /%	最大干密度 /(g/cm ³)
35.6	56.5	35.4	20.1	2.74	40.4%	29.8	1.44

按照公路中特殊土分类标准,该土的液限大于 55%、在特殊土塑性图中的 A 线以下,故定名为高液限红黏土,属于公路填筑中难以处理的填料。

为探索红黏土的土团尺寸大小对压实特性、强度特性的影响。按照试验计划,利用 7 种不同孔径的筛子把成团的红黏土进行筛选分组。

2.2 试样制备

土样制备:①将碾碎的土团分别过 60、40、20、10、5、2、0.5 mm 孔径筛,每组粒径制备两份试样,分别用胶袋装好并进行编号;②测定每个试样的初始含水率;③为使改良时石灰与土团有效接触反应,按高于最优含水率 3%,即 32.8%的含水率配比各个土样,配水结束后,用胶袋密封闷料 5~6 d;④石灰改良组在闷料完成后,各个土样掺 4%的石灰,并在掺灰前,按照石灰的初始含水率为 0%、预期含水率为 32.8%计算所需加水量,然后直接将水加入土样中拌均匀,再将石灰与土样拌和,达到土样颗粒与石灰有效接触的目的。

2.3 试验过程

首先,对红黏土和石灰土两组试样进行标准重型击实(98 击);击实完成后削平称重;把削好的击实试样放入水槽中,调整好百分表后缓慢加水,浸泡 4 d 后读取百分表读数,以便计算膨胀量所用;将试件从水槽中取出,倒出顶面的水,静置约 15 min 后,卸去荷载板等附件,称量并做好记录;最后,进行标准贯入试验。

3 试验结果分析

3.1 破坏模式分析

不同土团尺寸红黏土、改良土的单位压力与贯入量关系见图 1。

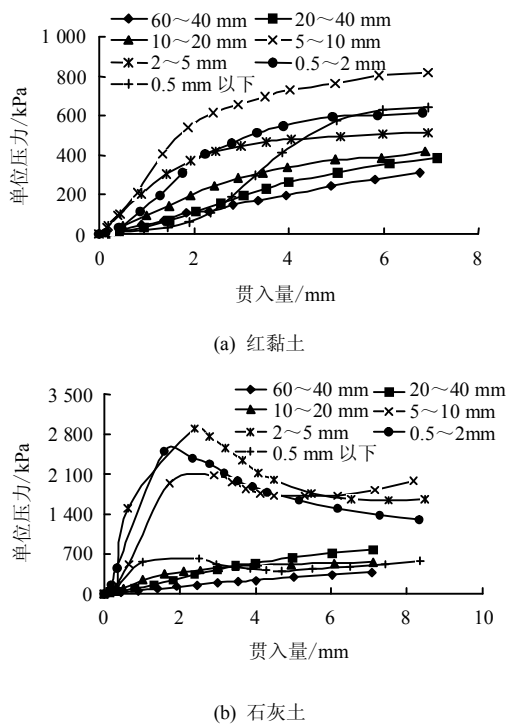


图 1 单位压力与贯入量关系

Fig.1 Unit pressure vs. penetration quantity

图 1(a)表明,不同土团尺寸的红黏土单位压力与贯入量呈现应力增长型变化趋势;而图 1(b)中当土团尺寸处于 10~60 mm 的范围时,石灰土的单位压力与贯入量关系亦属于应力增长型,但当土团尺寸小于 5 mm 时,二者呈峰值变化型关系,具有脆性破坏的特征。

对比分析石灰土与红黏土的贯入曲线,石灰土的贯入试验破坏模式可概化为应力增长型、应力峰值型、应力峰值-增长型 3 种模式,而红黏土则均为应力增长型模式,如图 2 所示。

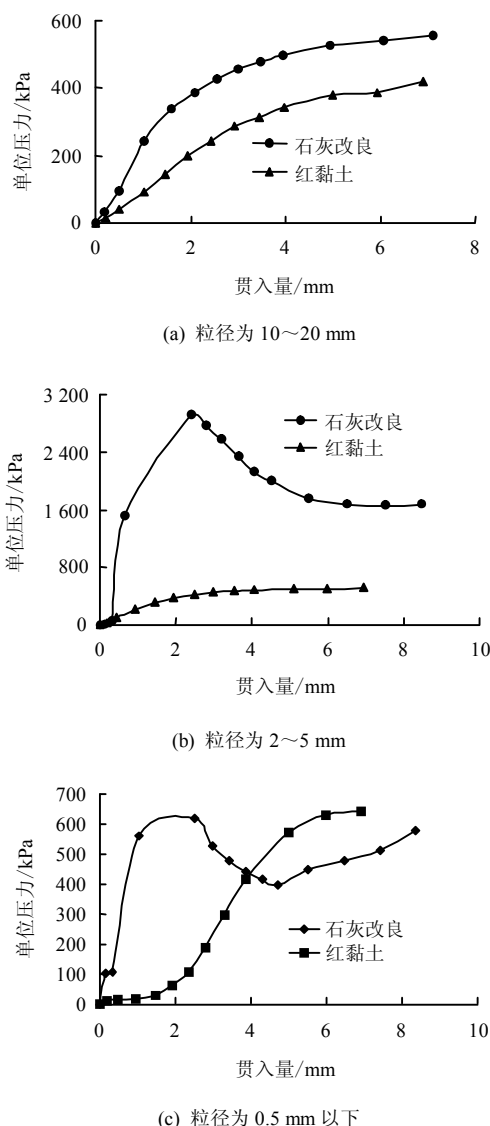


图2 石灰土和红黏土的破坏模式

Fig.2 Failure modes of limed soil and laterite soil

石灰土的破坏模式反映了土团尺寸大小对石灰改良黏土效果的影响。土团尺寸过大,石灰只在土团外表层与黏土颗粒发生系列反应,形成一层薄壳状保护结构,但土团内部依然是未改良的红黏土,在外部荷载作用下土团很容易被压缩变形,故呈现应力增长型破坏特征。土团缩小到颗粒状后,土团内部未改良的红黏土比例急剧减少,石灰稳定形成的薄壳效应占据优势,土团内部红黏土可压缩的量变小,故呈现应力峰值型破坏特征。当变成细颗粒状后,石灰包裹在颗粒周围,颗粒内部基本没有压缩空间,但被石灰稳定的颗粒之间还存在一定的孔隙,故出现先发生脆性破坏后又应力增长的现象。

3.2 CBR 特征分析

按照承载比值 CBR 的取值标准,结果见表 2。

表2 CBR 值的试验结果

Table 2 CBR test results

土团尺寸 /mm	CBR /%	
	红黏土	石灰土
<0.5	5.5	8.9
0.5~2	6.0	33.4
2~5	6.2	40.9
5~10	8.9	29.0
10~20	3.6	6.1
20~40	3.0	5.5
40~60	2.3	2.8

为便于对比分析,将不同土团粒径的石灰土和红黏土的承载比强度绘制于图 3。

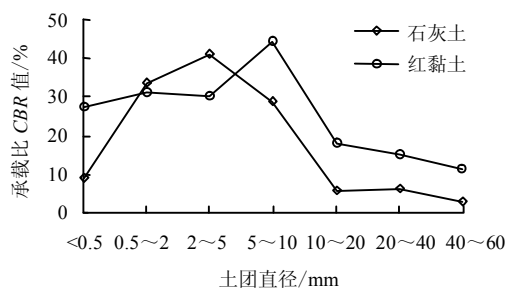


图3 CBR 值与土团直径的关系

Fig.3 CBR value vs. aggregate soil diameter

从图 3 可以看出,随着土团直径的减小,承载比逐渐增大,但增大到一定值后会出现不同程度的减小。总体说来,土团尺寸对土体承载比强度的影响规律呈现类似“驼峰状”的特征,即对承载比而言,存在一个最优的土团粒径控制范围。只是控制范围受土体的性质影响,红黏土的最优土团尺寸控制范围分布在 5~10 mm,而石灰土分布在 2~5 mm。但石灰土的承载比强度均大于红黏土的强度,特别是对于直径小于 5 mm 的土团,石灰改良效果十分显著,约提高了 3~6 倍。

4 土团尺寸的影响机制分析

红黏土的承载比随土团直径的大小变化,只是土团尺寸效应的表现形式之一。其实决定承载比的两个主要影响因素是压实状态和水稳定性特征。

4.1 压实状态的影响

相同初始含水率的石灰土和红黏土,在同一击实功作用下的干密度值变化情况如图 4 所示。

图 4 表明,石灰土和红黏土的干密度随着土团尺寸的增大呈现先增大后减小的特征;同一粒径范围,石灰土的干密度要比红黏土的干密度小。干密

度的最大值约为 1.42 g/cm^3 , 对应的土团直径处于 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 的范围内。直径小于 0.5 mm 的土团, 确切地说, 它属于土粒, 因为宏观的集聚现象不明显, 相对而言, 它更类似于“级配不良”的土, 故同一条件下击实的效果不佳。随着土团直径的增大, 因受土团的结构强度及聚集体间和聚集体内孔隙的影响, 在 $2 \sim 60 \text{ mm}$ 范围内击实功的作用效果也不一样, 具体表现为干密度逐渐减小。可见, 土团在不同尺寸范围内对击实效果的影响机制是不同的。

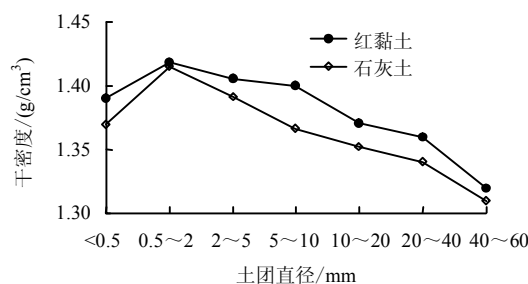


图4 干密度和土团直径的关系

Fig.4 Dry density vs. aggregate soil diameter

对比分析图3、4可知, 红黏土和石灰土的最大 CBR 值对应的土团直径分别处在 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 的范围内, 而两者的最大干密度对应的土团尺寸范围均处于 $0.5 \sim 2 \text{ mm}$ 之间。可见, 获得最佳压实状态并不能保证其承载比是最高的。因为 CBR 值是压实土体充分泡水后获得的值, 故还取决于土体的水稳定性特征。换言之, CBR 值不仅与压实状态相关, 还与土体赖以依存的环境有关。

4.2 水稳定性的影响

为了评价压实红黏土土体在后期运营过程中和外部环境的水分交换量大小, 定义吸水率 I 为

$$I = \frac{\Delta W}{W} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ΔW 为试样吸水量; W 为试样浸水前质量。

红黏土和石灰土试样充分浸泡后的吸水量和膨胀量关系, 见图5。

从图中可以看出, 石灰土和红黏土的吸水率、膨胀率均随着土团尺寸的增大, 呈现先减小后增大的整体变化趋势。在 $2 \sim 10 \text{ mm}$ 的范围内, 两种土的膨胀量最小。在 $10 \sim 60 \text{ mm}$ 的范围内, 两种土的膨胀量差别不显著, 最低都达到 10% ; 小于 2 mm 的范围, 两种土的膨胀量差别比较大, 石灰土的膨胀量明显小于红黏土。石灰的稳定效果对直径小于 5 mm 的土团起到了明显作用。

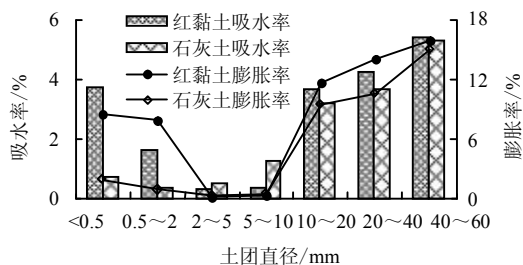


图5 吸水率与膨胀量

Fig.5 Ratio of soaking and swelling

吸水率只反映了土体孔隙吸水的多少, 而膨胀率则反映了吸水后黏土孔隙的总体增加量, 是评价其水稳定性特征的直观指标。黏土吸水膨胀的本质原因是: 土与水相互作用, 自由水渗入颗粒之间转化为结合水, 随着结合水膜的增厚, 颗粒之间的“楔力”增大, 使土颗粒之间的净距离增加, 导致土体的体积膨胀。但当颗粒之间有结构强度时, 能克服部分膨胀力的作用, 膨胀趋势在一定程度上得到了抑制。石灰改良土实际上是在部分黏土颗粒之间形成了胶结, 所以尺寸较小的石灰稳定土团吸水后膨胀量没有同等条件下的红黏土膨胀量大。相反, 土团尺寸较大, 石灰只在土团的表面形成一层比较薄的改良层, 吸水以后土团内部的土颗粒发生膨胀, 膨胀力大于石灰改良层的“包裹”作用。因此, 石灰对直径较大的土团改良效果并不理想。

土团吸水膨胀量大, 对于水敏性强的黏土其表层极易泥化^[9], 与未浸泡水的情况相比, 压实土体因吸水膨胀引起孔隙体积增大, 而且土颗粒之间的黏结力减小, 因此, 浸水后承载比明显减小。这也是为何获得最佳压实状态并不能保证其承载比也是最高的原因。

5 结 论

(1) 红黏土和石灰土的破坏特征各不相同。红黏土表现为应变硬化型塑性破坏, 石灰土则随土团直径的减小从应变硬化逐渐过渡到脆性破坏。

(2) 干密度随着土团直径的增大呈现先增大后减小的特征, 红黏土和石灰土的最大干密度对应的土团直径处在 $0.2 \sim 5 \text{ mm}$ 范围内; 而最大 CBR 值对应的土团直径分别处在 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 和 $2 \sim 5 \text{ mm}$ 的范围内。获得最佳压实状态并不能保证其承载比是最高的。

(3) 石灰土和红黏土的吸水率、膨胀率均随土团尺寸的增大, 呈现先减小后增大的整体变化趋势。在 $2 \sim 10 \text{ mm}$ 的范围内, 两种土的膨胀量最小, 此时的承载比强度是最大的。因此, 承载比强度实际受压实状态和水稳定性的双重控制。

(4) 石灰土和红黏土的膨胀量在 10~60 mm 的范围内差别不显著; 在小于 5 mm 的范围内, 石灰土的膨胀量明显要小于红黏土。可见, 利用石灰改良土团时需要严格控制其尺寸大小。

土团的尺寸大小是影响土体改良效果及工程特征的关键因素之一。本文仅从承载比特征角度探讨土团的尺寸效应, 而其压缩性等特征将会在后续工作中做进一步的研究。

参考文献

- [1] 胡明鉴, 孔令伟, 郭爱国, 等. 襄十高速公路石灰改性膨胀土填筑路基施工工艺和影响因素分析[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(增刊 1): 4623—4627.
HU Ming-jian, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Techniques and influencing factors of embankment of lime-treated expansive soil in Xiang-Shi Highway[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(Supp.1): 4623—4627.
- [2] 陈善雄, 孔令伟, 郭爱国. 膨胀土工程特性及其石灰改性试验研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(增刊): 9—12.
CHEN Shan-xiong, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Experimental research on engineering properties of expansive soil and lime stabilized soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(Supp.): 9—12.
- [3] 孔令伟, 郭爱国, 赵颖文, 等. 荆门膨胀土的水稳性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727—732.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Jingmen expansive soils and their mechanical effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 727—732.
- [4] 程钰, 石名磊. 石灰改性膨胀土击实曲线的双峰特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 979—983.
CHENG Yu, SHI Ming-lei. Bimodal characters of compaction curve of lime treated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 979—983.
- [5] 中华人民共和国交通部. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [6] 程钰, 石名磊, 周正明. 消石灰对膨胀土团粒化作用的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2209—2213.
CHENG Yu, SHI Ming-lei, ZHOU Zheng-ming. Aggregation effect of slaked lime on treated expansive soils[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2209—2213.
- [7] SHI B, MURAKAMI Y, WU Z S. Orientation of aggregates of fine-grained soil: quantification and application[J]. **Engineering Geology**, 1998, 50(12): 59—70.
- [8] 蔡奕, 施斌, 刘志彬, 等. 团聚体大小对填筑土强度影响的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1482—1486.
CAI Yi, SHI Bin, LIU Zhi-bin, et al. Experimental study on effect of aggregate size on strength of filled soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(12): 1482—1486.
- [9] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 红黏土路基填筑压实度控制指标探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 851—855.
TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Discussion on the compaction degree index of subgrade filled with laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 851—855.
- [9] 杨圣奇, 戴永浩, 韩立军, 等. 断续预制裂隙脆性大理岩变形破坏特性单轴压缩试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(12): 2391—2404.
YANG Sheng-qi, DAI Yong-hao, HAN Li-jun, et al. Uniaxial compression experimental research on deformation and failure properties of brittle marble specimen with pre-existing fissures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(12): 2391—2404.
- [10] JAEGER J C, COOK N G W, ZIMMERMAN R W. Fundamentals of rock mechanics[M]. London: Blackwell Publishing, 2007.
- [11] YANG Z Y, CHEN J M, HUANG T H. Effect of joint sets on the strength and deformation of rock mass models[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1998, 35(1): 75—84.
- [12] RIBACCHI R. Mechanical tests on pervasively jointed rock material: insight into rock mass behavior[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2000, 33(5): 243—66.
- [13] KULATILAKE P H S W, LIANG J, GAO H. Experimental and numerical simulations of jointed rock block strength under uniaxial loading[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2001, 27(2): 1240—1247.
- [14] TIWARI R P, RAO K S. Physical modeling of a rock mass under a true-triaxial stress state[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2004, 41(Supp.1): 396—401.
- [15] 翟越, 马国伟, 赵均海, 等. 花岗岩在单轴冲击压缩载荷下的动态断裂分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 385—390.
ZHAI Yue, MA Guo-wei, ZHAO Jun-hai, et al. Dynamic failure analysis of granite under uniaxial impact compressive load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(3): 385—390.
- [16] GRANGE S, FORQUIN P, MENCACCI S, et al. On the dynamic fragmentation of two limestones using edge-on impact tests[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2007, doi:10.1016/j.ijimpeng. 2007-07-006.

上接第 1241 页