

文章编号: 1673-9469 (2018) 03-0029-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.03.006

## 花岗岩和大理岩在不同应变率下的冲击试验研究

周耀珺, 朱珍德, 吴楠, 张聪

(河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210000)

**摘要:** 利用橡胶波形整形器改进后的分离式霍普金森压杆装置, 对花岗岩和大理岩在不同应变率下进行了冲击压缩试验。通过试验有效性的验证, 证明了数据的可靠性。试验结果表明: 应变率明显影响这两类岩石材料的动态力学特性, 不同冲击速度下的动态抗压强度、峰值应力、弹性模量表现出显著的率相关性, 峰值应变则变化不大, 其中分析了花岗岩和大理岩的峰值应力-冲击速度关系以及弹性模量-冲击速度关系, 两者呈弱幂函数关系; 加载过程中花岗岩表现出更显著的动态脆性, 在破坏形态方面花岗岩大多呈轴向劈裂破坏, 大理岩破碎程度明显更高呈压碎破坏, 并从微观结构方面进行了对比分析。

**关键词:** 岩石类材料; 冲击速度; SHPB; 率效应; 破坏形态

**中图分类号:** TD315

**文献标志码:** A

## Impact experimental study of granite and marble under different strain rates

ZHOU Yaojun, ZHU Zhende, WU Nan, ZHANG Cong

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210000, China)

**Abstract:** Experiments with different strain rate on granite and marble under impact compressive loading are conducted with the modified split Hopkinson pressure bar. Through verifying the validity of the test, the reliability of the data is proved. The experimental results show that the strain rate obviously affects the dynamic mechanical properties of these two kinds of rock materials, the dynamic compressive strength, peak stress and elastic modulus with different impact velocities show significant strain rate correlation, peak strain changes little, the relationship between the peak stress-impact velocity and the elastic modulus-impact velocity of granite and marble is analyzed, and both of them show weak power function; In the process of loading, granite showed more obvious dynamic brittleness, from destruction form, most of the granite present axial splitting mode, the fragment degree of marble is higher and the marble present crushing mode, conducting the comparison and analysis from the perspective of microstructure.

**Key words:** rock-like material; impact velocity; SHPB; strain rate effect; destruction form

矿山和水利水电等特大工程项目的爆破开挖涉及岩石动力特性的研究, 爆破产生的应力波不同于静载作用于岩石, 属于复杂的动力学过程<sup>[1-2]</sup>。其中, 应变率是影响岩石动态性质的重要因素之一, 岩石的动态力学参数具有显著的应变率依赖性<sup>[3-4]</sup>。爆破工程往往从两方向来控制岩石的稳定性, 一是使开挖部分合理破碎; 二是减少爆破对开挖边界以

外部分的损伤, 这些都是以率效应下岩石的动态特性为控制标准。近些年来, 有学者就花岗岩做了大量 SHPB 试验, 取得了很大进展。郭连军<sup>[5]</sup>等通过对不同冲击气压下花岗岩各个阶段曲线之间的对比, 发现存在一个使岩石试样破碎明显的冲击气压合理值, 并联系到破坏形式率相关性。翟越<sup>[6]</sup>等用黄铜波形整形器有效确保了岩石内部应力均匀, 并从微

收稿日期: 2018-02-23

基金项目: 国家自然科学基金面上基金资助项目(41272329, 51379065, 51579081); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB013504)

作者简介: 周耀珺(1993-), 男, 江苏丹阳县人, 硕士, 从事岩土工程动力学方面研究。

观结构特征和能量吸收方面分析对比了花岗岩和混凝土不同应变率下动态性能。也有学者对大理岩破坏特征进行了研究。许金余<sup>[7]</sup>等运用分形几何的方法得出了大理岩的平均破碎块度有较强率相关性,破碎分维可有效地反映岩石冲击破碎块度分布,并从能量的角度解释破碎分维的变化规律。但关于岩石类材料下的工程分析仍缺乏充足的理论支撑,因此本文利用分离式 Hopkinson 压杆装置对花岗岩和大理岩制成的圆柱形试样进行了不同冲击速度下的冲击压缩试验,分析了不同冲击速度下花岗岩和大理岩动态力学性能,以期对抗震、爆破等有一定的研究意义。

## 1 花岗岩和大理岩的冲击压缩试验

### 1.1 试验材料及制备

本试验所用天然花岗岩和大理岩呈不规则形状。为了减少惯性效应和摩擦效应对试验结果的影响,试验前按照通用的国际岩石力学学会 (ISRM) 的建议方法和标准<sup>[8]</sup>制成高径比为 1:2 的圆柱形岩石试样,并加工成 40 mm × 80 mm 的圆柱体试样。试样两个端平面经研磨抛光,保证其平行度和垂直度在 0.02 mm 公差范围以内。为减少压杆和试样之间接触面的摩擦力,避免端头效应,在试样的两端面上均匀涂抹润滑剂,本试验选取凡士林作为润滑剂。

### 1.2 试验设备及原理

采用的分离式 Hopkinson 压杆,主要由主体系统、动力系统和应变测量系统组成,如图 1 所示。入射杆和透射杆的直径为 100 mm,长度为分别为 4 100 和 3 100 mm,子弹的直径也是 100 mm,且与压杆材料相同,都是 45# 铬锰硅合金,其弹性模量为 209 GPa,密度为 7 890 kg/m<sup>3</sup>,屈服强度大于 400 MPa,纵波在合金上的传播速度是 5 100 m/s。再将半导体应变片贴在入射杆和透射杆靠近试样的端部位置,且布置在对称位置。

脉冲整形技术是 SHBP 试验中常用的波形控制方法,波形整形器的材料有多种如黄铜片、紫铜片等。综合考虑整形效果、材料与冲头的粘结效果以及操作性,本次试验采用的波形整形器为直径 30 mm,厚度 1.5 mm 的小块橡胶片,如图 2(a) 所示。本次试验选用半导体 BQ120-3AA-Q50 超动态信号采集仪作为数据采集系统,如图 2(b) 所示。该系统所采集的信号接为压杆应变信号,非传统采集的电压信号,省去了信号转换过程。

岩石试样夹在入射杆和透射杆之间。用子弹撞击入射杆产生入射波  $\varepsilon_i$ ,入射波沿入射杆传播并被入射杆上的应变片记录下来,当入射波传播至入射杆与试样的交界处,一部分反射回入射杆,产生了反射波  $\varepsilon_r$ 并被入射杆上的应变片记录下来,另一部分通过试样传入透射杆,产生透射波  $\varepsilon_t$ 并被透射杆

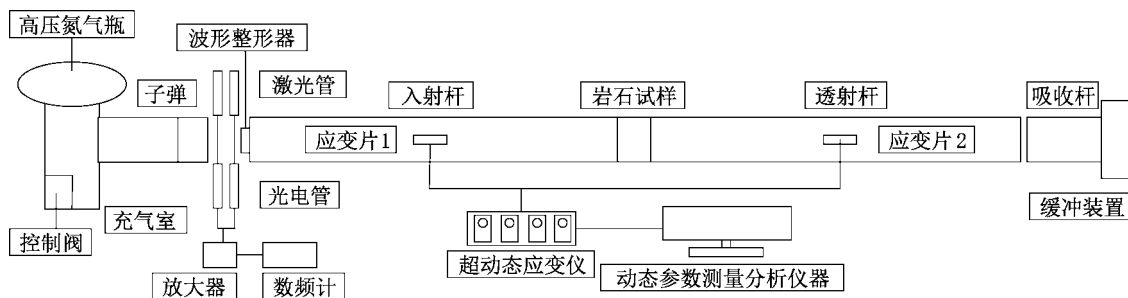
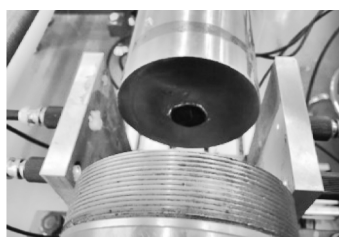
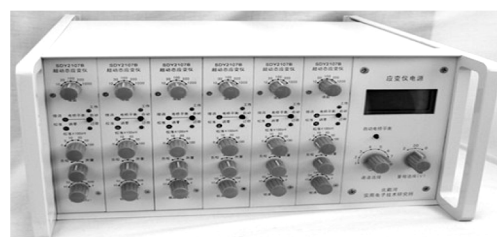


图 1 分离式 Hopkinson 压杆装置示意图

Fig.1 Sketch of SHPB apparatus



(a)



(b)

图 2 橡胶波形整形器及数据采集系统

Fig.2 rubber pulse shaper and data acquisition system

上的应变片记录下来。根据一维应力波假定和均匀化假定，以及位移的连续性要求，得出两波法公式如下<sup>[9-10]</sup>：

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon} &= -\frac{2C_0}{L} \varepsilon_r \\ \varepsilon &= -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \varepsilon_r dt \\ \sigma &= \frac{A_0}{A} E_0 \varepsilon_t \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $A_0$ 、 $E_0$ 、 $C_0$  分别为压杆的横截面积、弹性模量、纵波速度； $A$ 、 $L$  分别为试样的横截面积和长度。通过如上一系列运算可得到动态应力、应变及应变率等参数。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 试验有效性验证

验证试验数据有效性依据其能否满足均匀性假定。均匀性假定表示为  $\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$ ，表示只要入射应

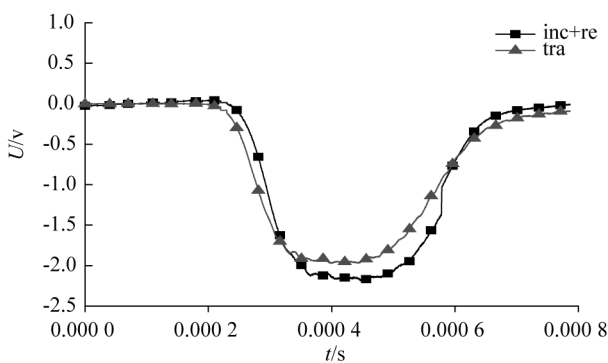


图 3 试验有效性验证波形图

Fig.3 Waveform diagram for validation of test effectiveness

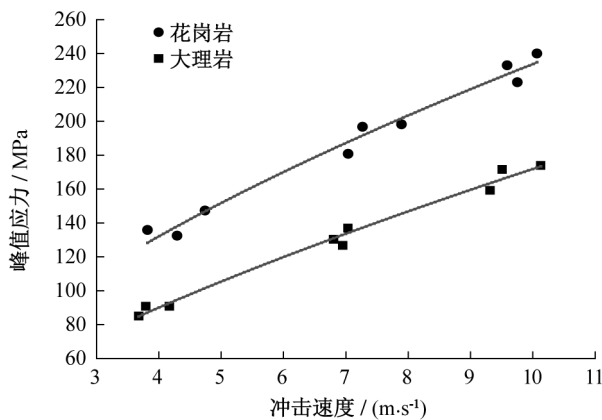


图 4 花岗岩和大理岩的峰值应力 - 冲击速度关系

Fig.4 Peak stress-impact velocity relationship of granite and marble

变和反射应变的和与透射应变相差不多，就基本满足均匀性假定。此处选取冲击速度 7.055 m/s 下大理岩的波形图，如图 3，入射波与反射波叠加（曲线 inc+re）和透射波（曲线 tra）基本重叠，表示试样在破坏前已达到应力平衡状态，即较好地满足了均匀性假定。

### 2.2 不同应变率下花岗岩和大理岩动态力学性能分析

#### 2.2.1 试验方法

SHPB 试验中的应变率是通过改变驱动气压赋予子弹不同的速度来实现的，随着冲击速度增加，试样应变率也增大。利用直径为 100 mm 的 SHPB 试验装置分别对花岗岩和大理岩试样在 3 种冲击速度下进行单轴冲击压缩试验，分 6 组试验，每组选 3 个代表性试样，以期使针对率效应研究所得的试验数据及结论具有参考价值。

#### 2.2.2 花岗岩和大理岩的动态力学参数分析

由于抗压强度是反映岩石类材料物理力学性能的重要参数之一，本文对花岗岩和大理岩的抗压强度率相关性进行研究，首先将峰值应力和冲击速度进行拟合：

$$\begin{cases} P_H = 55.68v^{0.623} & (R^2 = 0.9764) \\ P_D = 33.87v^{0.705} & (R^2 = 0.9860) \end{cases} \quad (2)$$

如图 4 所示，相近冲击速度下花岗岩的峰值应力大于大理岩，且花岗岩和大理岩的峰值应力都随着冲击速度的增加而增大，两者呈幂函数关系 ( $y=Ax^B$ )，通过 (2) 式可以看出，花岗岩的系数  $A$  远大于大理岩且花岗岩的指数  $B$  和大理岩接近，表明了花岗岩的峰值应力对冲击速度的敏感程度略高于

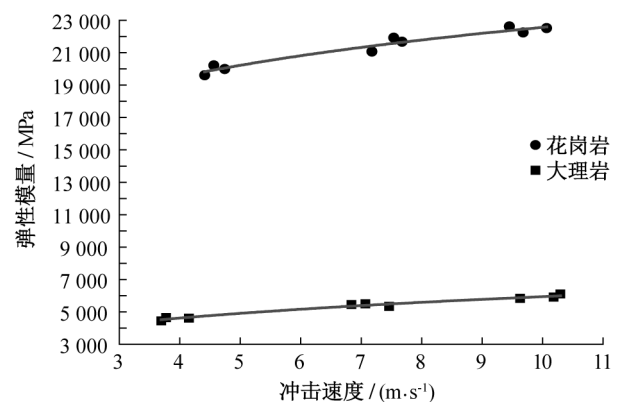


图 5 花岗岩的大理岩的弹性模量 - 冲击速度关系

Fig.5 Elastic modulus-impact velocity relationship of granite and marble

大理岩。

岩石类材料加载初期发生近似弹性变形,由虎克定律知,应力-应变曲线即为弹性模量,依据试验结果再将花岗岩和大理岩的弹性模量和冲击速度进行拟合:

$$\begin{cases} E_H = 15\,670.14 v^{0.158} & (R^2 = 0.948\,4) \\ E_D = 3\,148.45 v^{0.276} & (R^2 = 0.971\,1) \end{cases} \quad (3)$$

由图5可以看出,花岗岩的初始弹性模量在相近冲击速度下远大于大理岩,且随着冲击速度的增加花岗岩和大理岩的初始弹性模量都增大,两者也是幂函数关系( $y = Ax^B$ ),花岗岩系数 $A$ 远大于大理岩但指数 $B$ 远小于,在3~11 m/s的冲击速度下结合图可知,此情况下随着冲击速度的增加两者弹性模量的增量相近,由于不同冲击速度下花岗岩的初始弹性模量远大于大理岩,因此大理岩初始弹性模量的增幅更大,受冲击速度的影响更大。相对于花岗岩加载前期弹性模量的增幅较小,大理岩与冲击速度则体现出相关性,表现为应变率越大弹性模量越大。

### 2.2.3 花岗岩和大理岩的动态应力-应变曲线

用两波法对试验数据进行处理,得到试样的应力-应变曲线,图6给出了花岗岩试样和大理岩试样在不同冲击速度下的应力-应变曲线。实验表明,花岗岩和大理岩试样的单轴动态抗压强度都随着冲击速度的增加而明显增加,表现出较强的率相关性。结合图4,随着冲击速度的增加花岗岩和大理岩试样的峰值应力明显增加,但是花岗岩和大理岩的峰值应力所对应的破坏应变(峰值应变)并没有明显的增加,则表现出较弱的率相关性,加载过程中大理岩试样的总应变远大于花岗岩,是花岗岩的3~

4倍,表明前者的变形能力大于后者。因此相对大理岩,花岗岩的动态抗压强度更高和变形性能却更低,花岗岩表现出更显著的动态脆性。加载初期应力-应变曲线近似为直线,表明这阶段花岗岩和大理岩都具有较好的线弹性,花岗岩在加载初期的曲线能较好的重叠,但大理岩有偏离,重合度不高,结合图5得出大理岩的峰前斜率(弹性模量 $E$ )与具有明显率效应,花岗岩则不明显。花岗岩在冲击速度中等或很高的情况下,随着变形的不断加强峰后曲线有一段表现出微弱的反弹趋势,说明试样此时仍具有一定的抵抗能力,而大理岩在三种冲击速度下峰后出现一段负斜率且接近水平的曲线,展现出大理岩由脆性状态向塑性状态转变的趋势,代表了大理岩受冲击后的塑性特征。大理岩在冲击速度较低时,峰后的应变先增大然后有减小的趋势,这种回弹现象说明大理岩试样在冲击后已经破坏但没有被严重破碎,由于保持了一定完整性,加载后期仍具有一定的反弹;而花岗岩在高、中、低冲击速度下都没有出现回弹,随峰后应力持续减小,应变都在增大,表明花岗岩试样在冲击后破坏严重,丧失了抵抗能力。花岗岩后期很可能出现应变随着应力的不断减小持续增加的现象,说明试样完全破碎且已从侧面飞移,此时试样和入射杆及透射杆之间是自由状态,应力-应变关系中的应变只是入射波在入射杆自由端的反射的虚假结果<sup>[11]</sup>。

### 2.3 不同应变率下花岗岩和大理岩动态断裂破坏形态分析

不同冲击速度下,花岗岩和大理岩试样的破坏程度及形式分别如图7和图8所示,随着冲击速度

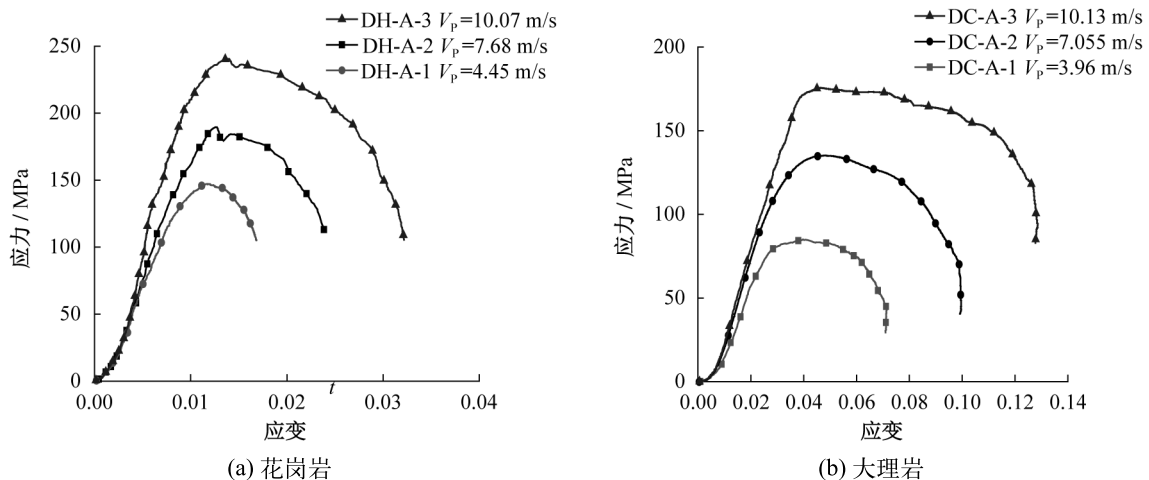
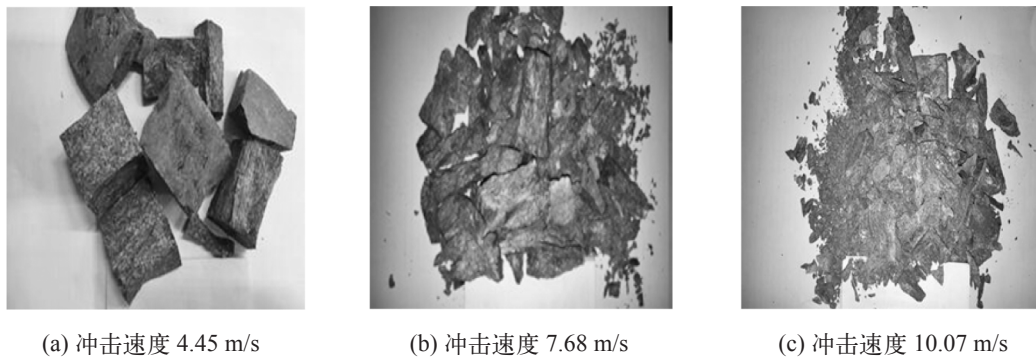


图6 不同冲击速度下花岗岩和大理岩的应力-应变曲线  
Fig. 6 Stress-strain curves of granite and marble with different impact velocities



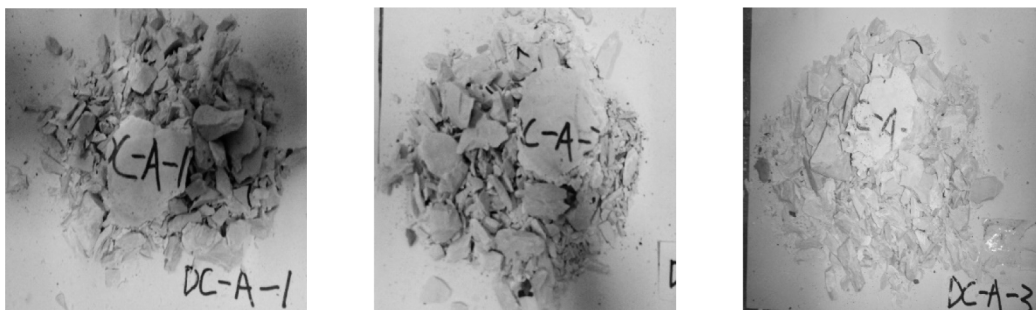
(a) 冲击速度 4.45 m/s

(b) 冲击速度 7.68 m/s

(c) 冲击速度 10.07 m/s

图7 不同冲击速度下花岗岩试样的破碎程度及形式

Fig.7 Fragment degree and failure forms of granite specimen with different impact velocities



(a) 冲击速度 3.96 m/s

(b) 冲击速度 7.055 m/s

(c) 冲击速度 10.13 m/s

图8 不同冲击速度下大理岩试样的破碎程度及形式

Fig.8 Fragment degree and failure forms of marble specimen with different impact velocities

的增加, 试样破坏的碎块尺度显著减小, 碎块数量则明显增加, 表现出显著的应变率相关性。在低冲击速度下, 试样产生的破坏是由已有的裂纹缺陷开始, 并沿着平行于压应力的方向扩展, 具有方向性, 然后相互贯通兼并, 此时花岗岩为轴向劈裂破坏(即拉应力破坏), 由于大理岩相对花岗岩更具韧性则大理岩多为剪切破坏。由图7、图8可以看出, 随着冲击速度的增加, 花岗岩呈轴向劈裂破坏的同时碎屑增多, 大理岩则呈完全压碎破坏, 破碎程度明显高于花岗岩。从微观方面看, 由于在高速冲击速度下随着岩石裂隙的扩展速度不及加载速度, 岩石在短时间内积聚了大量能量, 岩石本身固有的裂隙、缺陷会向不同的方向和层次发展, 而且大量的微裂纹能够扩展进而加入到破碎过程, 使得试样的破碎尺度更小, 试样达到破碎的临界应力值也就更高。

### 3 结论

- 1) 通过橡胶波形整形器, 减少应力波的高频震荡, 有效地修正了应力波形。
- 2) 取冲击速度 7.055 m/s 下的大理岩为例, 其入

射波与反射波叠加曲线和透射波曲线基本重叠, 验证了试验的有效性。

3) 对花岗岩和大理岩的峰值应力 - 冲击速度关系以及弹性模量 - 冲击速度关系进行拟合, 成弱幂函数关系。其中, 花岗岩的峰值应力对冲击速度的敏感程度略高于大理岩。大理岩的初始弹性模量更小, 且初始弹性模量的率相关性更显著。

4) 花岗岩和大理岩试样的单轴动态抗压强度都随着冲击速度的增加而明显增加, 峰值应变则呈较弱的率相关性, 花岗岩表现出更显著的动态脆性。在中、高冲击速度下, 受冲击后的花岗岩仍具有一定的抵抗能力, 大理岩则体现出塑性特征。在低冲击速度下, 加载后期的大理岩试样保持了一定完整性, 花岗岩则丧失了抵抗能力。

5) 由于材料的微观结构特征不同, 花岗岩表现为显著的轴向劈裂破坏; 大理岩的应变率敏感度则高于花岗岩, 呈压碎破坏, 破碎程度更高。

### 参考文献:

- [1] 李夕兵, 古德生. 岩石冲击动力学研究内容及其应用 [M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994. (下转第 38 页)

- [8]BROMS B. Lateral resistance of piles in cohesionless soils[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, 1964, 40(1): 73-84.
- [9]FLEMIN W G K, WELTMAN A I, RANDOLPH M F, et al. Piling engineering[J]. Geotechnical Engineering, 2013.
- [10]方薇, 杨果林, 刘晓红, 等. 非均质边坡稳定性极限分析上限法[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(6): 14-20.
- [11]杜佐龙, 黄茂松. 非均质与各向异性黏土基坑抗隆起稳定分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(2): 455-461.
- [12]栾茂田, 年廷凯, 杨庆. 考虑非均质各向异性效应的阻滑桩加固土坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 530-536.
- [13]年廷凯, 栾茂田, 杨庆. 考虑各向异性效应的阻滑桩加固土坡稳定性分析[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(6): 858-864.
- [14]廖海, 龙林焕. 基于极限平衡方法的堆积体斜坡稳定性分析与抗滑桩加固措施敏感性讨论[J]. 交通建设与管理, 2013(7): 54-55.
- [15]古浩. 边坡稳定及抗滑桩加固研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [16]郑轶轶. 抗滑桩加固边坡的稳定性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [17]张连卫. 各向异性对土质边坡稳定性的影响[J]. 中国矿业, 2011, 20(12): 108-110.
- [18]曹威, 王睿, 张建民. 横观各向同性砂土的强度准则[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 2026-2032.
- [19]高洪波. 轴对称横观各向同性饱和土中单桩竖向振动的简化模型求解[J]. 振动工程学报, 2014, 27(3): 451-456.
- [20]CHEN W F, SNITBHAN N, FANG H Y. Stability of Slopes in Anisotropic, Nonhomogeneous Soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 12(1): 146-152.
- [21]LI L, LIANG R Y, LIU H. Reliability Based Design for Slope Stabilization Using Both Anchors and Drilled Shafts[C]// Transportation Research Board 93rd Annual Meeting. 2014.

(责任编辑 王利君)

(上接第 33 页)

- [2]尚嘉兰, 沈乐天, 赵坚. 粗粒花岗岩中应力波的传播衰减规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 212-215.
- [3]刘晓辉, 张茹, 刘建峰. 不同应变率下煤岩冲击动力试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(9): 1528-1534.
- [4]KOLSKY H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. Proceedings of the Physical Society, 1994, 62(11): 676-700.
- [5]郭连军, 杨跃辉, 华悦含, 等. 冲击荷载作用下花岗岩动力特性试验分析[J]. 工程爆破, 2014, 20(1): 1-5.
- [6]翟越, 马国伟, 赵均海, 等. 花岗岩和混凝土在单轴冲击压缩荷载下的动态性能比较[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 762-768.
- [7]许金余, 刘石. 大理岩冲击加载试验碎块的分形特征分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(11): 3225-3229.
- [8]International Society for Rock Mechanics(ISRM). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(1): 99-103.
- [9]胡时胜. 霍普金森压杆技术[J]. 兵器材料科学与工程, 1991, 11(11): 40-47.
- [10]王礼立, 王永刚. 应力波在用 SHPB 研究材料动态本构特性中的重要作用[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 17-25.
- [11]单仁亮, 陈石林, 李宝强. 花岗岩单轴冲击全程本构特性的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(1): 32-38.

(责任编辑 王利君)