

基于大三轴试验的胶凝堆石料力学特性

杨杰^{1,2}, 蔡新^{1,2,3}, 宋小波³

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了研究胶凝堆石料的特性,进行了大三轴固结排水剪切试验,得出不同胶凝掺量的应力与应变关系、体积应变与轴向应变关系,分析比较了不同围压、不同胶凝掺量对胶凝堆石料剪胀特性的影响。试验结果表明:围压相同时,胶凝掺量增大,破坏偏应力和残余强度都增大,而轴向偏应变减小;胶凝掺量相同时,围压增大,破坏偏应力、残余强度和轴向偏应变都增大;不同围压、不同胶凝掺量的体积应变与轴向应变关系曲线均表现出不同程度的剪胀性,且胶凝掺量越大,围压越小时,胶凝堆石料剪胀现象越明显。

关键词: 胶凝堆石料;大三轴试验;强度特性;体积增量比;剪胀特性

中图分类号: TV321;TV649 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)04-0024-05

Mechanical properties of CSG material based on large triaxial tests//YANG Jie^{1,2}, CAI Xin^{1,2,3}, SONG Xiaobo³
(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to study the mechanical property of cement sand and gravel (CSG) dam material, a large triaxial test was conducted to obtain the relation between different cement content and different confining pressure on the stress-strain and the relation between the volumetric strain and axial strain. Additionally, we also analyze the influence on the shear dilatation of CSG dam material of different cement content and different confining pressure. The results show that when the confining pressure is the same, with the increase of cement content, the peak strength and residual strength will increase while the peak axial strain will decrease. Furthermore, when the cement content is the same, with the confining pressure increasing, peak strength, residual strength and peak axial strain will increase. Different degrees of the shear dilatation of CSG material are showed because of the influence of different cement content and different confining pressure, and when cement content is more, and confining pressure is less, the shear dilatation is more obvious.

Key words: CSG material; large triaxial test; strength; increment ratio of volume; the shear dilatation

大坝是高效发挥水资源的水工建筑物。我国重大水电工程大多建设在地质条件较复杂、水电开发难度大、生态环境保护要求较高的西南地区,经济性与安全性的矛盾越发突出。利用胶凝堆石料筑坝能在很大程度上解决上述问题,但是胶凝堆石坝是近几十年兴起的新坝型,其材料力学特性等尚处于初步研究阶段^[1]。

唐新军等^[2]进行了抗压强度及抗折强度试验,研究了胶凝堆石料的抗压强度、抗拉强度以及弹性模量特性;贾金生等^[3]通过试验研究了胶凝堆石料的抗压强度、抗拉强度和渗透溶蚀性能;孙明权等^[4]对不同胶凝掺量的胶凝堆石料进行了三轴试验,表明胶凝堆石料的应力-应变关系曲线具有非线性及软化性特征;杨朝晖等^[5]结合贵州省道塘水库工程,通过室内试验研究了CSG坝料性能;Batmaz^[6]结合土耳其Cindere坝,进行了胶凝堆石料的强度试验研究;杨首龙^[7]进行了胶凝堆石料拉、压强度以及弹性模量和泊松比等的试验研究;蔡新等^[8-9]对胶凝堆石料进行了基本材料试验、大三轴试验,研究了胶凝堆石料的破坏强度、初始切线弹性模量与围压之间的关系以及泊松比与应力之间的关系;Wu等^[10]通过胶凝堆石料不同龄期的大三轴试验,着重分析了胶凝堆石料的胶结作用在不同龄期对应力-应变关系的影响,进一步揭示了胶凝堆石料

基金项目:国家自然科学基金(51179061);高等学校博士学科点专项科研基金(博士生导师类)(20100094110014);国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD10B02)

作者简介:杨杰(1987—),男,江苏如东人,博士研究生,主要从事胶凝堆石坝坝料研究。E-mail:Turtlesky@126.com

的强度和应力-应变特征。目前基于胶凝堆石料大三轴试验的软化、剪胀等特性的具体研究较少,因此本文通过胶凝堆石料大三轴试验对其应力-应变、强度、剪胀等特性进行系统研究。

1 大三轴试验

1.1 材料及试件

试验材料采用 P32.5 普通硅酸盐水泥,按 20 kg/m^3 、 40 kg/m^3 、 60 kg/m^3 和 80 kg/m^3 等 4 种胶凝掺量制作试件。每种试件中粗细骨料控制干密度为 2130 kg/m^3 ,其中砂占 20%,岩石爆破的碎石占 80%。碎石颗粒组成为:粒径 $40\sim 20\text{ mm}$ 的占 42%; $20\sim 10\text{ mm}$ 的占 35%; $10\sim 5\text{ mm}$ 的占 20%;小于 5 mm 的占 3%。水灰比为 1.0。胶凝掺量分别为 20 kg/m^3 、 40 kg/m^3 、 60 kg/m^3 、 80 kg/m^3 的成品试件的干密度分别为 2150 kg/m^3 、 2170 kg/m^3 、 2190 kg/m^3 、 2210 kg/m^3 。

制作胶凝堆石料试件时,首先进行粗料的筛选,然后按照确定的配合比将粗料、水泥、砂及水等掺入并拌和均匀(图 1),最后分 5 层装入直径为 300 mm 、高度为 700 mm 的圆筒模具,每层需用振动碾击实成样(图 2),均应养护 28 d。



图 1 胶凝堆石料拌和



图 2 胶凝堆石料试件

1.2 试验设计

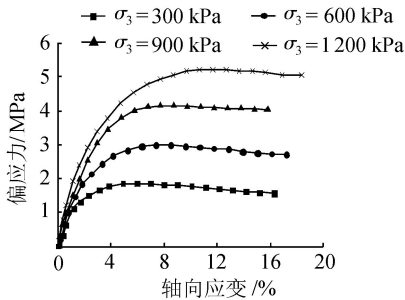
试验在南京水利科学研究院大三轴剪切试验仪上进行,采用 4 种围压,即 σ_3 分别为 300 kPa 、 600 kPa 、 900 kPa 、 1200 kPa 。参照有关规程^[11-12] 先进进行等压固结,然后再进行慢速排水剪切。为了更精确地测量试样体积变形,将养护好的试件没入水中使试样充分饱和后进行排水剪切试验。

2 试验结果及特性分析

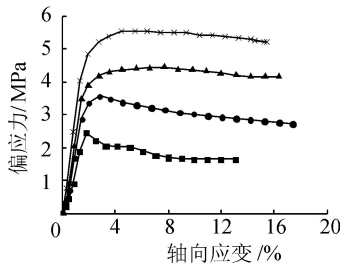
2.1 试验结果

2.1.1 应力与应变关系

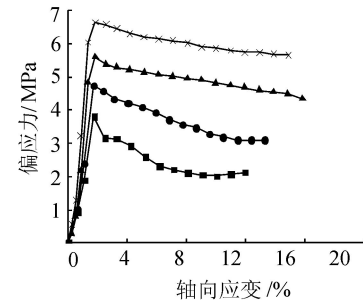
胶凝堆石料大三轴试验的应力与应变关系曲线如图 3 所示。当胶凝掺量较小时,胶凝堆石料不同围压的应力与应变关系曲线是非线性的软化曲线,尤其是高围压作用下的非线性更明显,这与孙明权等^[4] 进行的三轴试验结果基本一致;当胶凝掺量较大时,曲线峰值之前的应力与应变关系曲线趋于直线,这主要由于胶凝掺量增大,胶凝堆石料更接近混凝土,应力与应变关系趋于混凝土的本构关系。



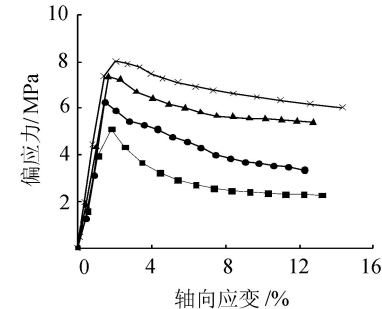
(a) 胶凝掺量 20 kg/m^3



(b) 胶凝掺量 40 kg/m^3



(c) 胶凝掺量 60 kg/m^3



(d) 胶凝掺量 80 kg/m^3

图 3 大三轴试验应力与应变关系曲线

从图 3 可以看出,尽管胶凝掺量不同,但不同试

件的应力与应变关系曲线具有相似的特性,初始模量随着围压的增大而增大。当围压较小(300 kPa、600 kPa)时,曲线有明显的峰值,随着轴向应变的增大,偏应力减小较明显;当围压较大(900 kPa、1200 kPa)时,曲线也有峰值,不过随着轴向应变的持续增大,偏应力减小的幅度偏小。上述4种围压的应力与应变关系曲线为应变软化型曲线,且随着围压的增大,软化性变弱。胶凝掺量对应力与应变关系曲线具有一定的影响,在围压相同时,胶凝掺量越大,应力与应变关系曲线的软化性越明显。随着胶凝掺量的增大,同一围压时的初始模量也逐渐增大,但增大幅度很小。

2.1.2 体积应变与轴向应变关系

图4为体积应变与轴向应变关系曲线。从图4

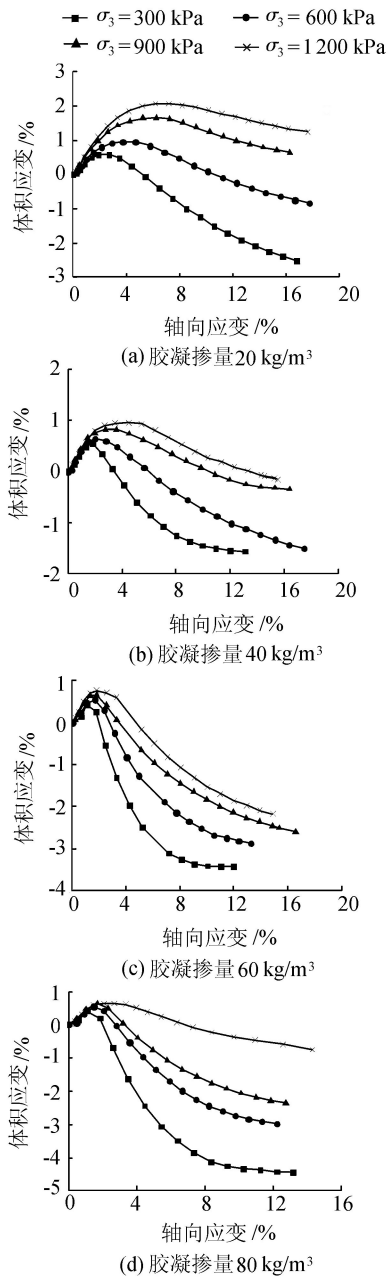


图4 体积应变与轴向应变关系曲线

可以看出,胶凝掺量相同时,低围压的关系曲线有明显的峰值且应变软化性更明显;高围压的关系曲线没有明显的峰值出现,加载到一定程度后,随着轴向应变的增大,体积应变变化较小。根据曲线峰值对应的轴向应变可知,与高围压相比,低围压的试件会较早出现剪胀峰值;轴向应变相同时,围压越大,体积应变越大。

2.2 强度特性分析

为了研究胶凝掺量对胶凝堆石料强度特性的影响,整理出不同围压时破坏偏应力、残余强度及破坏偏应变与胶凝掺量的关系,如图5~7所示。

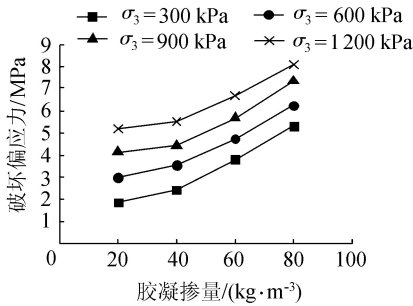


图5 破坏偏应力与胶凝掺量关系曲线

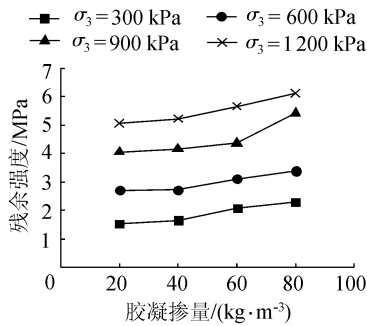


图6 残余强度与胶凝掺量关系曲线

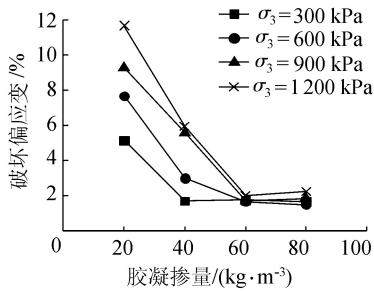


图7 破坏偏应变与胶凝掺量关系曲线

从图5~7可看出,4种胶凝掺量的破坏偏应力分布在1800~8100 kPa之间,残余强度分布在1500~6200 kPa之间,破坏偏应变分布在2%~12%之间。胶凝掺量相同时,随着围压增大,破坏偏应力和残余强度几乎等量增大,但破坏偏应变在胶凝掺量较小(20 kg/m³、40 kg/m³)时增幅较大,在胶凝掺量较大(60 kg/m³、80 kg/m³)时增幅较小。

胶凝掺量对破坏偏应力、残余强度和破坏应变

的影响也很大。破坏偏应力随胶凝掺量的增大而增大;在胶凝掺量较小时变幅较小,在胶凝含量较大时变幅较大;所有破坏偏应力与胶凝掺量关系曲线的形状几乎一样。残余强度随胶凝掺量的增大而增大,且所有残余强度与胶凝掺量关系曲线的形状类似,变幅相差不大。破坏偏应变随胶凝掺量的增大而减小,且在低胶凝掺量较小时变幅较大,在胶凝掺量较大时几乎不变。

2.3 剪胀特性

从图 4 可看出,随着轴向应变的增大,胶凝堆石料渐渐由剪缩转变为剪胀,且围压越小,剪胀越明显。当胶凝掺量较小时,胶凝堆石料在剪切初期先剪缩,随着轴向应变的增大转变为剪胀;当胶凝掺量较大时,低围压的胶凝堆石料由剪缩转变为剪胀,高围压的胶凝堆石料在剪切初期先剪缩,随着轴向应变的增大,转变为剪胀,但较低围压曲线平缓。

当胶凝掺量较小时,低围压的胶凝堆石料颗粒不能破碎,由于胶凝材料较少,颗粒之间的黏结力较小,在剪切力的作用下容易滚动和翻转,表现为较明显的先缩后胀;高围压的胶凝堆石料颗粒容易破碎,也可能滑动、挤压或者填充孔隙,翻转和滚动较少,先剪缩后剪胀的特性表现比较弱。

当胶凝掺量较大时,低围压的胶凝堆石料颗粒不会破碎,颗粒之间的黏结力变大,使得颗粒在剪切力作用下不易翻转和滚动,但内部发生一定的错动,表现为随着轴向应变的增大,胶凝堆石料先缩后胀且趋势较为明显;高围压的胶凝堆石料颗粒容易破碎,但黏结力变大,颗粒黏结在一起,在剪切力的作用下颗粒易沿破碎处翻转和滚动,类似于小胶凝掺量、低围压的情况,表现为先缩后胀。

依据试验数据,绘制 4 种胶凝掺量、不同围压的体积增量比与轴向应变关系曲线如图 8 所示,其中体积增量比为负值表示剪胀,正值表示剪缩。

由图 8 可以看出,剪切开始时体积增量比为正,表明胶凝砂砾石料处于剪缩状态;当轴向应变到达某一值时,体积增量比转变为负,表明胶凝砂砾石料处于剪胀状态;体积增量比最终趋向于零,胶凝砂砾石料体积基本保持不变。

图 8 还表明,特定胶凝掺量条件下,围压越小,体积增量比由正转负的点所对应的轴向应变值越小,但剪胀较明显;高围压下的胶凝砂砾石料体积增量比曲线在低围压曲线的上方。

进一步分析还发现,相同围压条件下,胶凝掺量越大胶凝砂砾石料体积增量比由正转为负的点所对应的轴向应变值越小,胶凝掺量越大胶凝砂砾石料体积增量比变化幅度越小,但剪胀越明显。

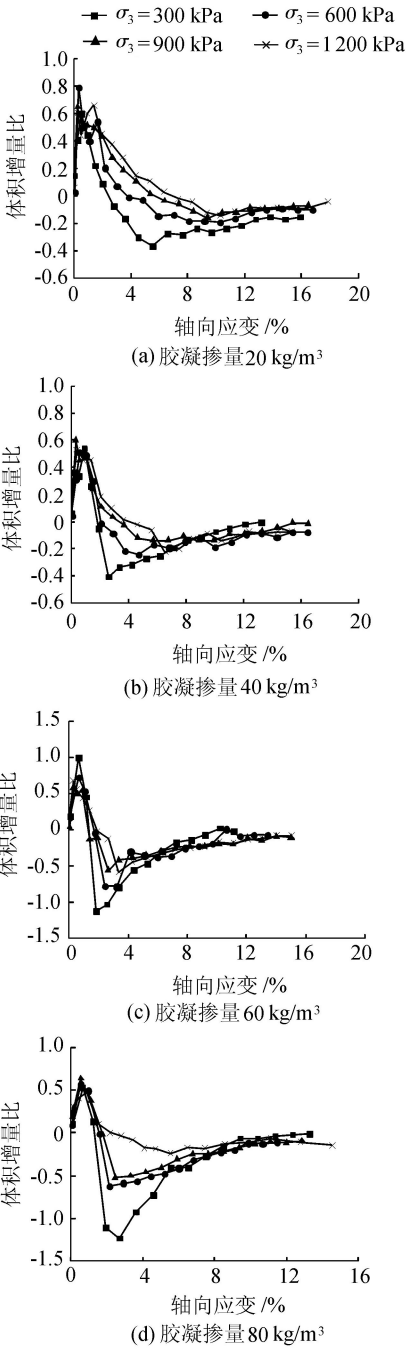


图 8 体积增量比与轴向应变关系曲线

3 结 论

- a. 胶凝堆石料在不同围压和不同胶凝掺量下,应力-应变曲线呈非线性软化特征。围压越小,胶凝掺量越小时,曲线非线性越明显;而胶凝掺量越大,围压越小时,软化特性越明显。
- b. 相同围压下,随着胶凝掺量的增加,破坏偏应力、残余强度都增大,而轴向偏应变减小;而在同一胶凝掺量下,随着围压的增大,峰值强度、残余强度、峰值轴向应变值都增加。
- c. 胶凝堆石料在应力作用下会发生剪胀现象,且胶凝掺量越大,围压越小时,剪胀现象越明显。

参考文献:

[1] RAPHAEL J M. The optimum gravity dam,rapid construction of concrete dams[M]. New York: ASCE,1970.

[2] 唐新军,陆述远. 胶结堆石料的力学性能初探[J]. 武汉水利电力大学学报,1997,30(6):15-18. (TANG Xinjun,LU Shuyuan. Preliminary research on mechanical behaviors of cemented rockfill material [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering,1997,30(6):15-18. (in Chinese))

[3] 贾金生,马锋玲,李新宇,等. 胶凝砂砾石坝材料特性研究及工程应用[J]. 水利学报,2006,37(5):578-582. (JIA Jinsheng, MA Fengling, LI Xinyu, et al. Study on material characteristics of cement-sand-gravel dam and engineering application [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2006,37(5):578-582. (in Chinese))

[4] 孙明权,彭成山,李永乐,等. 超贫胶结材料三轴试验[J]. 水利水电科技进展,2007,27(4):46-49. (SUN Mingquan,PENG Chengshan,LI Yongle,et al. Triaxial test of over lean cemented material[J]. Advances in Science and Technology of Water Resource,2007,27(4):46-49. (in Chinese))

[5] 杨朝晖,赵其兴,符祥平,等. CSG 技术研究及其在道塘水库的应用[J]. 水利水电技术,2007,38(8):46-49. (YANG Chaohui,ZHAO Qixin,FU Xiangping,et al. Study on CSG dam construction technique and its application to Daotang Reservoir Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering,2007,38(8):46-49. (in Chinese))

[6] BATMAZ S. Clidere dam-107m high roller compacted dam (RCHD) inThrkey[C].//Proceedings 4th international Symposiumon Roller Compacted Concrete Dams. Madrid: [s. n.],2003:121-126.

[7] 杨首龙. CSG 坝筑坝材料特性与抗荷载能力研究[J]. 土木工程学报,2007,40(2):97-103. (YANG Shoulong. Charateristics and load carrying capacity of CSG dam construction materials [J]. China Civil Engineering Journal,2007,40(2):97-103. (in Chinese))

[8] 蔡新,武颖利. 胶凝堆石料本构特性研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(9):1340-1344. (CAI Xin, WU Yingli. Constitutive equation for CSG materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2010,32(9):1340-1344. (in Chinese))

[9] 武颖利. 胶凝堆石坝坝料力学特性及大坝工作性态研究[D]. 南京:河海大学,2010.

[10] WU Mengxi, DU Bin, YAO Yuancheng, et al. An experimengtal study on stress-strain behavior and constitutive model of hardfill material[J]. Science China: Physics, Mechanics& Astronomy, 2011, 54(11):2015-2024.

[11] DL/T5355—2006 水利水电工程土工试验规程[S].

[12] 南京水利科学研究所土工研究所. 土工试验技术手册[M]. 北京:人民交通出版社,2003.

(收稿日期:2013-07-03 编辑:周红梅)

+++++

(上接第 23 页)

[5] 王光纶,张楚汉,彭冈,等. 刚块体动力试验与离散元法动力分析参数选择的研究[J]. 岩石力学与工程学报 1994,13(2):124-133. (WANG Guanglun, ZHANG Chuhan, PENG Gang,et al. Dynamic test of rigid blocks and parameter study in dynamic analysis of distinct elements. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,1994,13(2):124-133. (in Chinese))

[6] 李世海,汪元年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. 岩石力学与工程学报 2004,23(21):3642-3651. (LI Shihai, WANG Yuannian. Selection study of computational parameters for DEM in geomechanics. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(21):3642-3651. (in Chinese))

[7] 王卫华,李夕兵,胡盛斌. 模型参数对 3DEC 动态建模的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(增刊1):4790-4797. (WANG weihua, LI xibing, HU Shengbin. Effect of model parameters on 3DEC dynamic modeling. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(Sup1):4790-4797. (in Chinese))

[8] 石崇,王盛年,刘琳. 地震作用下陡岩崩塌颗粒离散元数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(增刊1):2798-2805. (SHI Chong, WANG Shengnian, LIU Lin. Research of avalanche disaster numerical simulation based on granular discrete element method of high-steep slope under seismic loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(Sup1):2798-2805. (in Chinese))

[9] 贺续文. 基于离散单元法的节理岩体边坡稳定性分析[D]. 湘潭:湘潭大学,2010.

[10] 李新坡,何思明. 节理岩质边坡破坏过程的 PFC2D 数值模拟分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2010,42(增刊1):70-75. (LI Xinpo, HE Siming. Numerical analysis of the failure of heavily jointed rock slopes using PFC2D[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science,2010,42(Sup1):70-75. (in Chinese))

[11] 李海波,肖克强,刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(12):2385-2393. (LI Haibo, XIAO Keqing, LIU Yaqun. Factor of safety analysis of bedding rocking slope under seismic load. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(12):2385-2393. (in Chinese))

[12] 李海波,蒋会军,赵坚,等. 动荷载作用下岩体工程安全的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(11):1887-1891. (LI Haibo, JIANG Huijun, ZHAO jian,et al. Some problems about safety analysis of rock engineering under dynamic load. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2003,22(11):1887-1891. (in Chinese)) (收稿日期:2013-07-17 编辑:熊水斌)