

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.02.10

泥石流格宾拦挡坝在冲击荷载下的动力响应分析

王秀丽^{1,2}, 张智江^{1,2}, 冉永红^{1,2}

(1. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 格宾石笼作为一种防治工程新技术, 被应用到陇南市宕昌县吉那沟的泥石流治理中。利用有限元软件 ANSYS 中的 LS-DYNA 程序, 选用刚性球体以 10 m/s 的速度撞击坝体结构来模拟泥石流对拦挡坝的冲击。通过数值模拟, 将格宾石笼坝与浆砌石坝在冲击荷载下的冲击力、应力分布、位移和冲击物的动能进行对比分析。结果表明, 相对于浆砌石坝, 格宾石笼坝属柔性材料, 在冲击荷载作用下, 格宾石笼材料能够得到充分利用, 且通过产生较大的变形来耗散能量, 可以很好地缓冲泥石流的冲击。

关键词: 格宾坝; 泥石流治理; 冲击; 缓冲

中图分类号: P642.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)02-0066-06

Dynamic response analysis of the gabion dam under impact load

WANG Xiuli^{1,2}, ZHANG Zhijiang^{1,2}, RAN Yonghong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Research Center of Western Civil Engineering Disaster Prevention & Mitigation Attached to Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: As a new type of structure of debris dam, gabion is applied to the governance of debris flow in the ditch of Tanchang county in Longnan. By using the finite element software ansys and ls-dyna program, the dam is impact by the spherical stone at the speed of 10 m/s to simulate the impact of debris flow on debris dam, through numerical simulation, have some comparison and analysis with impact force, distribution of stress, displacement and the kinetic energy of impact object to gaion dam and stone masonry dam under the impact loading. The results show that gabion dam is flexible material, compared with the stone masonry dam, its material can be efficiently used under impact load, and the dam can dissipate much energy by larger deformation in a long time and can more effectively buffer the impact of the stone on debris flow.

Keywords: gabion; governance of debris flow; impact; buffer

0 引言

宕昌县属青藏高原边缘和西秦岭、岷山两大山系支脉的交错地带^[1-3], 区内地表多见黄土和厚层松散堆积物, 地表裸露、生态环境脆弱, 构造发育, 降雨集中

且多暴雨, 以泥石流、滑坡为主的地质灾害极为发育, 是甘肃省地质灾害严重发育区之一。位于宕昌县城北部的红河沟, 直穿县城中部, 大量泥沙输入岷江, 使城区段岷江河床不断抬升。1950 ~ 2006 年间, 这条沟内发生大小规模泥石流 15 次之多, 仅 2000 年 5 月 31 日

收稿日期: 2015-10-03; 修订日期: 2015-10-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(51278236); 国家科技支撑计划(2011BAK12B07)

第一作者: 王秀丽(1963-), 女, 辽宁沈阳人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为大跨度空间结构及泥石流防治结构。E-mail: 1135739056@qq.com

通讯作者: 张智江(1990-), 男, 硕士, 研究方向为钢结构、泥石流灾害与防治工程。E-mail: 1028321295@qq.com

发生的泥石流就造成 31 人死亡,17 人受伤,530 多间房屋毁坏,直接经济损失近 1100×10^4 余元。近年来,红河沟流域内中小型泥石流时有发生,人民群众的生命和财产安全存在严重隐患,防灾形势相当严峻。

治理泥石流最有效和最快捷的措施是修建各种拦挡坝^[4],它有泄洪、拦渣、固床、稳坡、控制固体物质补给量、防止沟道下切及沟壑继续发展的功效。而传统的拦挡坝主要为浆砌石坝和混凝土坝,其随基础变形能力差,坝体破坏比较严重。鉴于此,在宕昌县红河沟流域内的吉那沟采用了格宾结构作为泥石流拦挡坝,格宾也称铅丝笼。

格宾石笼作为一种防治工程新技术^[5],目前主要用作河道护岸和挡土护坡。它是由格宾网箱和放入其中的块石或卵石组成,格宾网是将抗腐高强的低碳钢丝或者 10% 铝锌合金镀层钢丝(或同质包覆聚合物)由机械绞合编织成六边形网片。此类结构用于工程中具有如下优点:(1)整体性和柔韧性好(2)高强耐久性(3)施工简便性(4)透水性好(5)造价低(6)施工周期短(7)施工要求不高(8)工期受气候影响小(9)损伤后易于修复。本工程的格宾材料采用覆塑镀锌网片,设计使用年限为 40 年,笼子局部破坏后坝体仍有继续承载的能力,坝体的设计使用年限为 60 年。

关于格宾石笼,赵吉学^[6]通过铅丝笼在临汾汾河生态工程中的应用,探讨铅丝笼在河道治理施工中的主要施工方法、质量控制及铅丝笼在工程上的优点及工程实施效果,以期促进铅丝笼在河道治理工程中的应用;李宇,陈尧隆^[7]从格宾石笼的发展、演变入手,

分析了格宾石笼结构特点,并重点研究了其劣性产生原因,提出了石笼结构不同破坏形式的预防和补强措施,可为类似石笼结构不同破坏形式的修复提供参考;张亚飞^[5]等文章从格宾结构物的结构特点和工程特性出发,全面细致地介绍玉树地区格宾结构物的施工工艺流程及每一流程的具体操作步骤,为该新技术的推广应用提供借鉴。综上可得,关于格宾的研究主要包括施工程序、施工工艺和应用等方面,而理论研究很少,本文结合国家科技支撑计划中的示范工程—宕昌县吉那沟格宾泥石流拦挡坝,进行数值模拟,分析其在动力冲击荷载下的响应。

1 工程概况

宕昌县吉那沟泥石流拦挡坝—格宾石笼坝的迎水面和背水面皆呈 V 形,坝体采用 $2\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的石笼单体,单体之间用绞合钢丝形成可靠连接,按照每层 1 m 的高度,层层交错堆砌形成格宾坝,保证整体结构中不出现上下通缝。格宾石笼坝顶宽 1 m,底宽 5 m,迎水坡与背水坡度均为 1:0.5,格宾单元错开 0.5 m 布置,增强坝体的稳定性。同时,在坝体的下游设有护坦和护坡,一方面可以与坝体形成一个整体结构,防止滑移和倾覆,增强结构的稳定性,以抵抗更大的冲击力,另一方面也可以作为消力池,进一步削弱产生水跃泥石流的剩余动能,保护河床免受水流的冲刷和侵蚀。吉那沟格宾石笼坝的剖面图和立面图分别见图 1 和图 2,其现场概况见图 3。

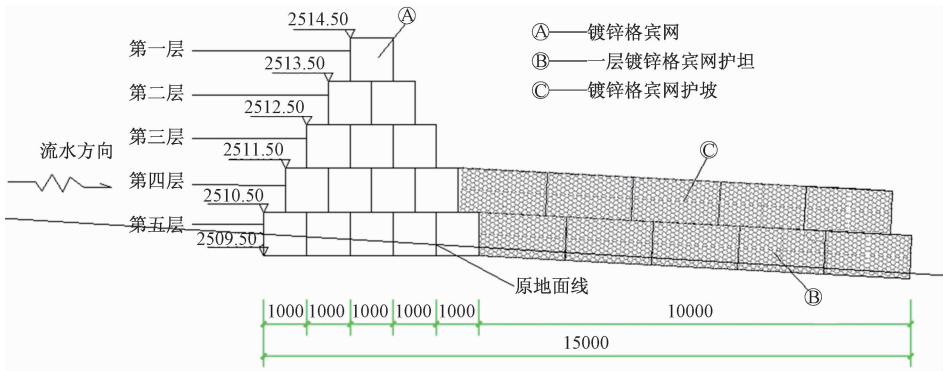


图 1 剖面图

Fig.1 The profile view

2 数值模拟及对比分析

泥石流运动特性复杂,边界不断变化,难以模拟。泥石流的冲击力巨大,一部分来自于巨型石块,另一部

分来自于泥浆。格宾坝石头之间的空隙使坝体的透水性良好,泥石流经过时,它使部分泥浆中的水渗出,同时,坝体通过石块的重力和网片及网箱间的拉力来拦挡泥石流中的石块和泥浆,通过一定的变形和耗

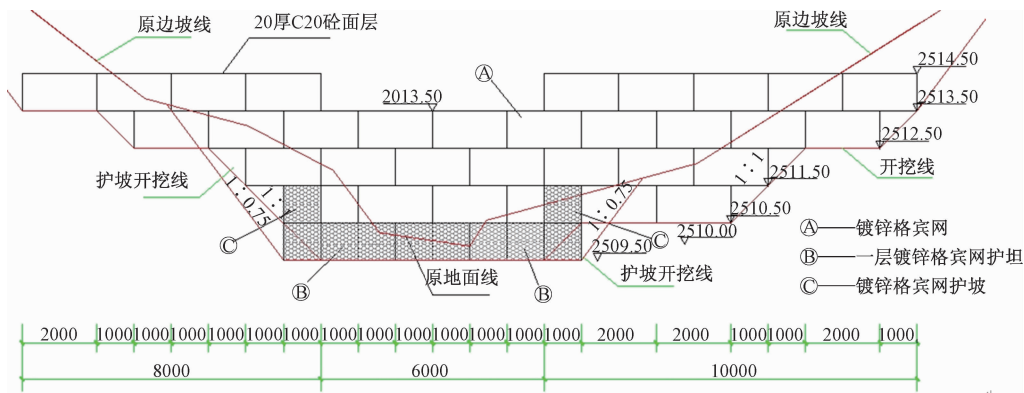


图 2 立面图

Fig. 2 The elevation view



图 3 宕昌格宾坝的现场图

Fig. 3 Engineering of gabion dam

能^[8],减缓泥石流的流速,达到拦截固体冲击物的效果。由于造成拦挡坝破坏的主要因素是冲击力,尤其是巨型石块的冲击^[9-10],因此本文采用 ANSYS/LS-DYNA 显式动力分析模块,选用直径 $D = 2 \text{ m}$ 的球形石块以 10 m/s 的速度撞击坝体模型的心形处来模拟泥石流对拦挡坝的冲击,得出格宾坝和浆砌石坝遭受泥石流冲击时的冲击力、应力分布、位移和冲击物的动能,并进行对比分析。数值模拟的模型按结构的实际尺寸建模。

2.1 材料参数

格宾石笼的材料参数参考文献^[10-12]:单元类型取Solid164,密度为1500 kg/m³,弹性模量为2.1 MPa,泊松比为0.3,屈服应力为0.71 MPa,切线模量为5 kPa。格宾坝材料模型采用双线性各向同性模型。

浆砌石坝的模型尺寸参考格宾坝模型的底层及顶层,迎水面及背水面为斜坡式平面。浆砌石的参数参照文献和规范^[13]:单元类型取 Solid164,密度为 2300 kg/m³,弹性模量为 8GPa,泊松比为 0.23,屈服应力为 8MPa,切线模量为 1Pa。浆砌石坝材料模型采用双线性各向同性模型。

撞击球体的参数取自花岗岩:单元类型取Solid164,密度为 2500 kg/m^3 ,弹性模量为 40 GPa ,泊松比为 0.25 ,材料模型选用刚体,直径 $D=2\text{ m}$,初速度为 10 m/s 。

2.2 网格划分与边界条件的设定

为了提高计算精度,坝体网格划分时采用扫略划分,网格的尺寸大小为 0.1 m,对于球体,先等份切割成八部分,然后进行映射划分。

在实际工程中,沟谷两侧开挖,坝肩呈锯齿状直接堆放在开挖处,坝体无基础,直接嵌入沟道水平面以下 0.5 m 处,而且背水面有格宾护坦和护坡的加固作用,因此数值模拟中模型坝肩的约束条件设为 X、Y、Z 方向固定的铰接约束,坝底的约束条件设为固定约束,模型见图 4。

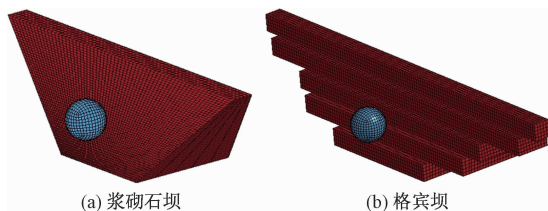


图 4 有限元模型

Fig. 4 FEM model dam

3 计算结果的对比分析

3.1 冲击力的对比分析

拦挡坝的破坏主要表现在冲击力方面,具体的冲击力-时间曲线见图5。

由图可知,石块冲击坝体产生的冲击力与坝体本身的材料性质相关。浆砌石坝体的石块的冲击持续时间很短,约 0.025 s,石块与坝体从约 0.025 s 时开始接触,约 0.04 s 时曲线达到波峰,即冲击力值很短时间内很快达到最大值约 10000 kN,此后,值又瞬间恢复至零;格宾坝的冲击力-时间曲线较为平缓,整个接触过程持续时间约 0.5 s,最大冲击力在 0.2 s 时达到最大,约为 700 kN,此后,冲击力缓慢恢复至零,在此时

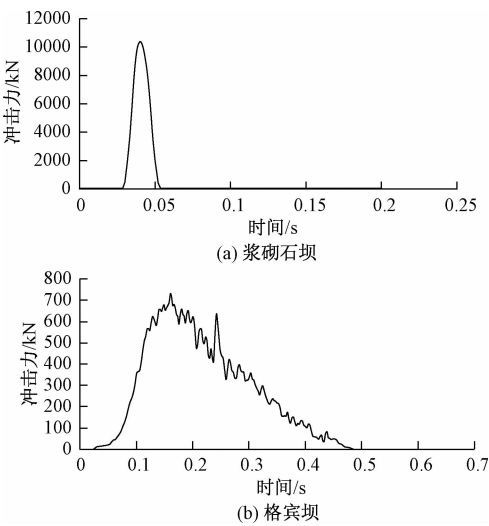


图 5 坝体的冲击力-时间曲线

Fig.5 Relationship between time and impact force of dam

间内坝体产生较大的变形。后者的最大冲击力值为后者的 1/14 倍,持续时间约为后者的 20 倍,即由于格宾坝的材料为柔性材料,从而使作用时间延长,冲击力大大减小,耗能效果显著提高。

3.2 应力的对比分析

坝体应力采用 Von Mises 应力,应力云图如图 6 所示,其中,浆砌石坝的应力在球体撞击处比较集中,最大应力达到 7.874eMPa,且红色区域(应力大于 7.460MPa)面积较大,80% 以上区域的应力很小或者可以忽略不计;格宾坝应力分布均匀且红色区域的面积很小,最大应力为 82.86e kPa,远小于浆砌石坝的最大应力,大部分区域的应力均小于 41.55 kPa。由此可知,在冲击荷载作用下,浆砌石坝刚度较大,应力集中。相反,格宾石笼坝能够通过应力传递,将集中应力分散至坝身,使结构整体受力,材料得到充分利用。

3.3 位移的对比分析

按照 1 m 的高度将坝体从上至下分为五层(图 1),由于最底层产生的位移极小,所以底层位移不作对比。取其余各层中点处的位移进行对比分析,经模拟分析,得出浆砌石坝和格宾坝各层中点的位移-时间曲线见图 7。各层中点的位移大小见表 1。

由图 7 和表 1 可知,浆砌石坝各层的位移均较小,最小位移为 0.8 mm,撞击处附近位移最大,约为 1.3 mm,而格宾坝的各层的位移均较大,达到浆砌石坝各层位移的 100 倍以上,撞击处的位移最大,约为 0.18 m,并且各层位移相近,同时,第一层距离撞击层最远,其中点的位移相对其他层有明显的滞后,表明应力的扩散使坝体均匀受力,说明坝体能通过整个结构

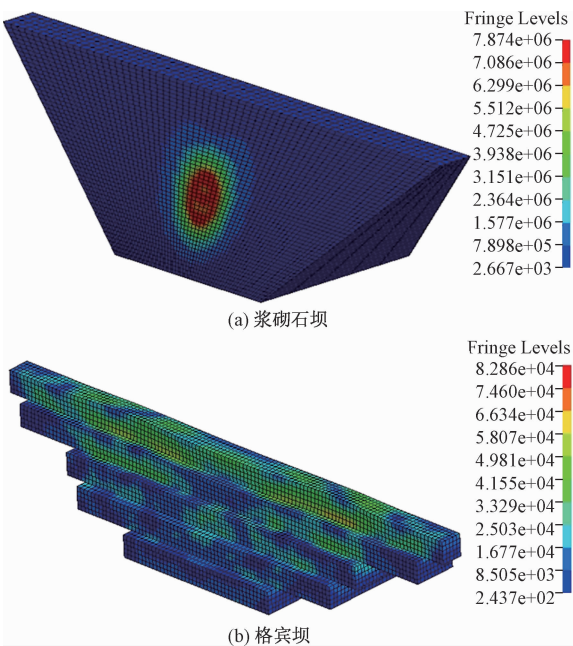


图 6 Von Mises 应力云图

Fig.6 Von Mises stress nephogram

的能量耗散来承受更大的荷载。

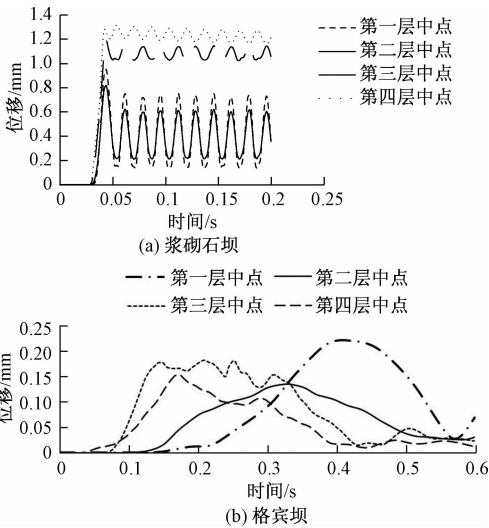


图 7 坝体的位移-时间曲线

Fig.7 Relationship between time and displacement of dam

表 1 坝体各层中点的位移
Table 1 Displacement of midpoint on each layer

位置	第一层 中点	第二层 中点	第三层 中点	第四层 中点
最大位移 d_1 (浆砌石坝)/mm	0.9	0.8	1.2	1.3
最大位移 d_2 (格宾坝)/mm	240	140	180	150
增幅 (d_2/d_1)	267	175	150	115

3.4 能量的对比分析

在耗能方面主要体现在拦挡物动能的改变。在此

模拟中,主要是判断冲击球体的动能的变化,具体的动能-时间曲线见图 8。

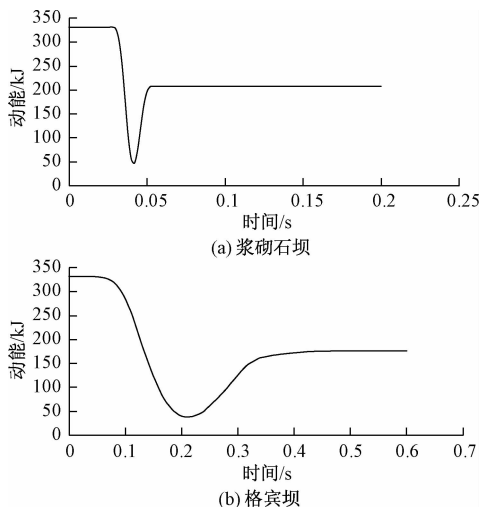


图 8 球体的动能-时间曲线

Fig. 8 Relationship between time and kinetic energy of the ball

由关系曲线可知,前者的曲线比较陡峭,后者的曲线比较平缓,即球体以同样的速度开始运动,在拦挡坝的作用下,浆砌石坝中的球体在约 0.01 s 时间内动能减少至最小,大小为 47 kJ,动能减少约 293 kJ,此后,球体在 0.01 s 内反方向运动,动能恢复至约 200 kJ。而格宾坝的球体在约 0.12 s 时间内动能减少至最小,大小为 38 kJ,动能减少约 302 kJ,球体在 0.1 s 内反方向运动,动能恢复至约 150 kJ,坝体的耗能效果明显优于浆砌石坝。

4 结论

格宾拦挡坝建在宕昌县吉那沟的上游,用来减小泥石流对下游的冲击破坏作用,更好地保护当地的生命财产。通过数值模拟,对格宾拦挡坝与浆砌石拦挡坝的冲击力等进行对比分析,可以得出以下结论:

(1) 格宾属于柔性材料,在冲击作用下,坝体的位移明显增大,且坝体各处的变形比较均匀,材料得到充分利用,能够抵抗更大的冲击力,证明能够很好地缓冲泥石流的冲击。

(2) 耗能效果方面主要体现在冲击石块动能的改变。在相同条件下,格宾石笼坝能够通过较长时间的变形,将拦挡物的动能降至最小。

(3) 在坝体破坏方面,浆砌石坝在极短时间内将极大的冲击力缓冲至零,在石块冲击区域与非冲击区域的位移相差较大,同时在冲击区域应力大且集中,易于破坏;而格宾坝产生的冲击力特别小,约为浆砌石坝

的 1/14,且在冲击区域各处协调变形使应力能够均匀传递,极大地降低应力的峰值,使坝体材料得到充分利用,不仅起到耗能作用,而且具有较好的安全性能。

参考文献:

- [1] 何斌,赫明林,徐新兰. 甘肃省宕昌县地质灾害发育特征与形成条件分析[J]. 甘肃地质, 2013:64-70.
HE Bin, HE Minglin, XU Xinlan. Formation conditions and development characteristics of geological hazards in Tanchang county of Gansu province [J]. Gansu Geology, 2013:64-70.
- [2] 孟兴民,陈冠,郭鹏,等. 白龙江流域滑坡泥石流灾害研究进展与展望[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013,33(4):1-15.
MENG Xingmin, CHEN Guan, GUO Peng, et al. Research of landslides and debris flows in Bailong river basin: progress and prospect [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2013, 33(4):1-15.
- [3] 王奎,岳方伟,朱力军. 甘肃陇南市武都区小水沟泥石流治理防治工程[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2010,21(3):46-51.
WANG Kui, YUE Fangwei, ZHU Lijun. Engineering treatment for debris flow at Xiaoshui Gully, in Puchi Town, Wudu District, Longnan city [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2010, 21(3):46-51.
- [4] 王秀丽,关彬林,李俊杰. 泥石流块石冲击下新型钢管混凝土桩林坝“品”单元动力响应分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(2):69-75.
WANG Xiuli, GUAN Binlin, LI Junjie. Dynamic response analysis of “trefoil”-shaped unit of concrete-filled steel tubular piles under impact of big stone in debris flow [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(2):69-75.
- [5] 张亚飞,徐光黎,谢书萌,等. 格宾石笼拦挡坝在玉树地震灾区泥石流治理工程中的应用[J]. 安全与环境工程, 2013,20:11-14.
ZHANG Yafei, XU Guangli, XIE Shumeng, et al. Application of gabion dam to the regulation project of debris flow in Yushu seismic disaster area [J]. Safety and Environmental Engineering, 2013, 20:11-14.
- [6] 赵吉学. 铅丝笼石护底及护坡在某生态工程中的应用[J]. 山西建筑, 2011, 37:206-207.
ZHAO Jixue. Application of gabion on protection of bottom and slope to ecological engineering [J]. Shanxi

- Architecture, 2011, 37:206-207.
- [7] 李宇, 陈尧隆. 格宾石笼结构的劣性及其补强措施[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1):42-45.
LI Yu, CHEN Yaolong. The recessive and reinforcing measures of gabion structure[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(1):42-45.
- [8] 罗祥, 石少卿, 严庆平, 等. 利用废旧轮胎防治滚石的数值模拟分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2011, 22(4):36-40.
LUO Xiang, SHI Shaoqing, YAN Qingping, et al. Numerical analysis of rock fall prevention using discarded tires[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2011, 22(4):36-40.
- [9] 王秀丽, 胡志明, 崔晓燕. 泥石流巨石冲击下的钢构格栅坝动力响应分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4):30-36.
WANG Xiuli, HU Zhiming, CUI Xiaoyan. Dynamic response analysis of steel grille dam under the impact of big stones in debris flow[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(4):30-36.
- [10] 苏洁, 周成, 陈生水, 等. 石笼拱柔性拦截坝新技术及其数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(2):269-275.
SU Jie, ZHOU Cheng, CHEN Shengshui, et al. Numerical simulation of flexible gabion arch dam to prevent and control debris flow blocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(2):269-275.
- [11] 付丹, 郭红仙, 程晓辉, 等. 石笼单元压缩试验研究[C]//第18届全国结构工程学术会议, 广州, 2009:240-243.
FU Dan, GUO Hongxian, CHENG Xiaohui, et al. Compression test research of stone cage element[C]//The 18th national structure engineering academic conference proceedings(II). Guangzhou, 2009:240-243.
- [12] 蒋洋, 徐慧, 柴贺军, 等. 石笼单体结构应力-应变特征试验研究[J]. 公路交通科技:应用技术版, 2008.
JIANG Yang, XU Hui, CHAI Hejun, et al. The experimental study of stress-strain characteristics on stone cage monomer structure[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008.
- [13] SL 25—91 浆砌石坝设计规范[S]. 中华人民共和国水利部, 1991.
SL 25—91 The standard for stone masonry dam design [S]. The Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 1991.

关于为《中国地质灾害与防治学报》征集照片的启事

为了使本刊论文内容更加形象、生动,便于读者清晰地识别地质灾害的各种地质作用及现象,反映治理措施及治后效果,我刊每期另附彩版照片。凡为彩版或封面提供照片者,每版应附100~500字说明,每张照片也应有相应说明。为保证出版效果,请提供原照片;若用数码相机拍摄,请采用200万像素以上的模式拍照。照片的分辨率应在1600×1200dpi以上(Fine或High模式);如照片文件为扫描版,请采用600dpi以上的设置扫描。如用电子邮件发送,请提供照片的原电子文档JPG格式(勿自行用Photoshop或ACDsee等软件处理),以保证照片的清晰度。另请提供1份Word文档,但其仅供排版时参考,不能作为印刷、排版的原始稿件。提供的照片采用刊登后,付稿酬。欢迎各地、各界同仁踊跃选送各种典型照片(含国外照片)。

感谢您的支持与合作!

本刊网址: www.zgdzzhyfzxb.com; <http://zgdzzhyfz.paperopen.com>

电子信箱: nitx@mail.cigem.gov.cn zhaoh@mail.cigem.gov.cn

《中国地质灾害与防治学报》编辑部