

DOI: 10.11779/CJGE201502009

石笼拱柔性拦截坝新技术及其数值模拟

苏 洁^{1, 2*}, 周 成^{1, 2*}, 陈生水², 何建村³, 何 宁², 吴 艳³, 张桂荣²

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室, 江苏 南京 210024; 3. 新疆水利水电科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830049)

摘 要: 针对常见的泥石流拦挡结构被冲击破坏的问题, 提出了柔性石笼拱拦截坝新技术。柔性石笼拱以石笼为主要材料, 砌筑成拱形, 上游面铺设废旧轮胎防冲垫层, 拦截泥石流。利用 ANSYS LS-DYNA 软件, 分析了柔性石笼拱结构对泥石流冲击的动力响应, 并与刚性浆砌石结构进行对比。通过 MIDAS GTS 软件计算, 分析了石笼拱拦蓄泥石流后孔隙水压力变化及静力稳定特性。数值计算结果表明, 柔性石笼拱结构能合理地优化结构受力, 变形自适应, 减小巨石冲击荷载以及饱和泥石流的浆体压力对结构的不利影响。

关键词: 泥石流防治; 石笼拱; 抗冲击; 柔性结构; 变形自适应

中图分类号: X43; TV64

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 4548(2015)02 - 0269 - 07

作者简介: 苏 洁(1989 -), 女, 硕士, 研究方向为环境岩土工程。E-mail: czhou@scu.edu.cn。

Numerical simulation of flexible gabion arch dam to prevent and control debris flow blocks

SU Jie^{1, 2}, ZHOU Cheng^{1, 2}, CHEN Sheng-shui², HE Jian-cun³, HE Ning², WU Yan³, ZHANG Gui-rong²

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Chengdu 610065, China; 2. Key Laboratory of Failure

Mechanism and Safety Control Techniques of Earth Rock Dam of the Ministry of Water Resource, Nanjing 210024, China; 3. Xinjiang

Hydraulic and Hydropower Research Institute, Urumqi 830049, China)

Abstract: Most of the widely used check dams are destroyed by huge impact force of debris flows. Flexible gabion arch dam is thus designed. The structure is made of stone gabions and built in the shape of arch with junked tires attached to the upside. Numerical simulation is performed using the software ANSYS LS-DYNA, focusing on the dynamic response of the structure to the impact of the debris flows. The pore pressure and statistic stability of the above two debris retaining structures are analyzed by MIDAS-GTS. The results indicate that the flexible arch structure can effectively reduce the impact force and mud flow pressure through appropriate deformation.

Key words: debris flow control; gabion arch dam; impact resistance; flexible structure; deformation self-adaption

0 引 言

汶川“5.12”地震以后, 中国西南地区泥石流山地灾害频发, 给国民经济和人民生命财产带来严重损失。目前中国西南地区面临大型泥石流灾害增多、中小型泥石流频繁的现状。以浆砌石、混凝土为材料的刚性拦挡结构是应用较为广泛的泥石流防治措施。刚性拦挡结构易被泥石流巨大的冲击力冲毁。例如 2010 年 8 月 8 日三眼峪暴发特大规模泥石流, 流域内 9 座拦砂坝均被摧毁; 2010 年 8 月 13 日文家沟泥石流, 也导致了浆砌石拦砂坝和谷坊群的冲击溃决^[1]。从泥石流特性讲, 拦挡结构遭受破坏主要原因是泥石流巨大的浆体压力和大块石的强大冲击力^[1-2]。但刚性拦挡结构在冲击作用下适应变形能力差, 且透水性差难以快速释放泥浆压力, 因而易被破坏。

为改良常规拦挡结构的不足, 国内外学提出了一些新型泥石流拦挡结构。陈晓青等^[3-4]提出了钢筋混凝土框架加浆砌石坝体式泥石流拦砂坝和预制钢筋混凝土箱体组装式拦砂坝技术。这两种新型结构在结构强度和施工便捷方面较大的提高, 但还是提高强度抵抗冲击的思路。格鲁吉亚水利工程及土壤改良所^[5]设计出泥石流弹性钢索拦挡物, 弹性钢索分流网与多级倾斜拦流架组合结构物。这两种拦挡物引入了柔性防

基金项目: 水利部公益性行业科研专项项目 (201301022, 201201037); 国家自然科学基金重大研究计划集成项目 (91215301); 水利部土石坝破坏机理与防控技术重点实验室开放基金项目 (YK913002); 江苏省交通运输科学研究计划项目 (2011Z01-1); 国家自然科学基金青年基金项目 (51009097)

收稿日期: 2014 - 05 - 20

***通讯作者**

护的思想,但是该结构钢材需求量大,离工程实用还有一定的距离。

为了提高泥石流拦挡结构抵抗冲击的能力,本文提出了柔性石笼拱拦截坝技术。该结构设计在泥石流小型支沟和毛沟等泥石流物源区或潜在物源区分级修筑,形成石笼拱群。该结构具有良好的变形自适应和强透水特性,充分利用材料抗压强度,提高抵抗超载的能力,可拦蓄一定方量泥石流,逐级削减泥石流能量,抑制泥石流的发展壮大。在机理分析的基础上,针对修筑材料的物理力学特性和拱形构造两大特点,利用 ANSYS LS-DYNA 软件开展了泥石流冲击动力有限元计算,并通过 MIDAS GTS 软件进行泥石流冲击后的静力数值试验。数值试验表明,石笼拱在动态冲击作用下通过变形自适应减小冲击荷载峰值;石笼的强透水性利于削减泥浆压力,维持结构的长期稳定。

1 柔性石笼拱工作机理分析

1.1 石笼拱材料组成及拱群分布

图 1 所示为柔性石笼拱结构,它以石笼网和块石为材料,砌筑成拱形拦挡泥石流。石笼网是将高抗腐蚀、高强度、具有延展性的低碳钢丝或包裹 PVC 的钢丝,使用机械编织而成。将石料填入网中进行封装,按照结构尺寸要求层叠堆砌,石笼条块之间用钢丝进行有效的连接,并辅以拉筋加强结构整体性。填充的块石粒径相当,满足一定的孔隙率,保证较强的渗透能力。石笼网片延展性强,块石之间也能滑动调整位置,因此结构具有较强的变形适应性。石笼拱上游面设置废旧轮胎作缓冲层。在石笼附近种植根系发达植被,植被根系具有较高抗拉强度^[6],辅助增强拦挡结构稳定性。在石笼拱结构上下游抛填大粒径的块石,保护基础免受淘蚀,增加对结构的约束。

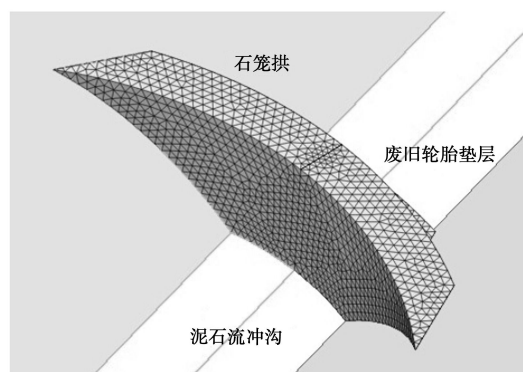


图 1 柔性石笼拱结构

Fig. 1 Structure of flexible gabion arch

柔性石笼拱设计在泥石流的物源区、潜在物源区分级修筑,形成石笼拱群。Remaitre 等^[7]从拦挡结构

位置对泥石流的强度影响研究中发现:相对少量的拦挡坝,修筑在泥石流潜在物源区能够有效地降低泥石流的能量。泥石流启动和发展壮大是一个能量骤然增大、破坏力激增的过程。在物源区修筑石笼拱群,可以避开泥石流的锋芒,阻止泥石流的发展壮大。

1.2 石笼拱与土石料受压特性

与重力式拦挡坝相比,石笼拱具有显著的结构优势。拱形结构荷载由梁系、拱系共同承担,属于高次超静定结构,承受超载能力强,安全度高,荷载增加时,结构能自行调整应力^[8]。拱形构造使得坝前的荷载均匀地向岸坡传递,结构整体应力均匀,能充分发挥石笼的抗压能力。在相同的承载要求下,较重力式结构,拱形结构可以更轻薄,有效地降低工程量和工程造价。

泥石流易发地区的沟床通常为破碎的松散堆积物。重力式拦挡坝主要依赖稳固的基础来抵抗滑动和倾覆,拱形结构更多通过两边岸坡的反推力来抵抗冲击荷载。因此拱形结构更能适应泥石流易发区特殊的地质条件。

1.3 石笼拱变形自适应与过水减压

泥石流具有强大的冲击力,文献[5]给出了刚性拦挡坝设计采用的泥石流冲击力值 $5\sim 30\text{ t/m}^2$,测得某中等规模泥石流钢索网格坝中部最大冲击力约为 9 t 。数据表明,无论对于刚性结构还是柔性结构,泥石流冲击力都是巨大的,是对拦挡措施的极大考验。石笼拱允许适当的变形,与上游面废旧轮胎共同作用能通过形变吸收巨大的冲击能量,可在一定程度上降低迎水面的动压力,保护坝体免受冲击破坏。这一假定将通过块石冲击石笼拱动力数值试验验证。

泥石流初期,拦挡坝主要承受泥石流“龙头”的冲击力。泥石流物料在坝前停滞,坝体主要承受泥石流浆体的静压力作用^[9]。黏性泥石流具有大量的细颗粒,水和泥砂石块凝聚成黏稠整体,物料中的水难以渗出。若坝体材料不透水且仅设少量排水孔,泥石流水石分离将更加困难。极大的泥浆压力不利于结构的稳定性,坝基也有渗透破坏的风险。石笼拱有良好的透水能力,可有效减小泥浆压力,这将通过泥石流冲击后结构静力数值试验论证。

此外沟道水流是泥石流启动、运动的重要能量来源,水流在逐个通过各级石笼拱结构,与结构的碰撞也能够耗散一定的水流能量,对降低水流能量至低于引起沟谷侵蚀和泥石流爆发的临界值起到一定的作用^[10]。

2 石笼拱与浆砌石坝受冲击数值试验

以四川北川姜家沟泥石流为例,采用 ANSYS 软

表 1 动力计算材料参数

Table 1 Material parameters for dynamic simulation

| 结构 | 材料模型 | 密度/(kg·m ⁻³) | 弹性模量/kPa | 泊松比 | 屈服应力/kPa | 切线模量/kPa |
|------|----------------|--------------------------|---------------------|-------|---------------------|---------------------|
| 石笼拱 | 双线性 | 1500 | 2.1×10 ³ | 0.300 | 7.1×10 ² | 5.0 |
| 浆砌石 | 双线性 | 2300 | 8.0×10 ⁶ | 0.230 | 8.0×10 ³ | 1.0×10 ³ |
| 块石 | 弹性 | 2500 | 4.0×10 ⁷ | 0.250 | — | — |
| 废旧轮胎 | Mooney-Rivlinm | 1500 | — | 0.499 | — | — |

件中 LS-DYNA 显式动力分析模块, 对比分析石笼拱和浆砌石坝受泥石流冲击后的动力响应。

2.1 模型建立

姜家沟位于擂鼓镇柳林村三社, 呈近南北向展布, 总长约为 1.60 km, 汇水面积 0.419 km², 主沟沟床平均比降 373.67‰。沟谷形态多呈“V”字型, 原冲沟宽 4~8 m, 沟床两侧斜坡较陡, 地形坡度 25°~55°, 少数可达 60° 以上。调查发现, 泥石流搬运到姜家沟下游的大石块较多, 最大体积达到 16 m³, 最大直径 3 m^[11]。

为减少单元数量提高计算速度, 只考虑拦挡结构与块石相互作用, 河床基岩不参与计算。参考何思明等^[12]滚石冲击冲击棚洞结构算例, 对拦挡结构与地基的接触面设定了 3 个方向自由度的约束边界。参照姜家沟沟床的特点, 假定地形为: 冲沟底宽 6 m, 沟床比降 370‰, 两侧斜坡对称, 坡度为 45°。

泥石流运动特性和物理力学性质复杂, 边界不断变化, 难以用有限元模拟。拦挡结构被毁坏的主要原因是泥石流的冲击力, 特别是泥石流中巨石的冲击力^[13]。石块的本构模型便于确定, 运动状态明确。所以用巨石撞击石笼拱结构模拟泥石流冲击引起的结构动力响应。模型中选取直径 1 m 的石块, 以 4 m/s 的水平速度, 冲击石笼拱中央约 1.3 m 高度处。废旧轮胎缓冲层简化为薄壳单元。计算过程持续 0.6 s。

石笼拱结构的设置参照谷坊、拱坝的结构特性确定。石笼拱高度为 3 m, 厚高比取 0.23, 石笼拱厚 0.7 m。水平拱圈中心角为 100°。

为比较由于材料和构造区别而产生的差异, 边界条件荷载与石笼拱相同, 浆砌石坝的体形不按照常规的设计方案建模, 厚度和高度与石笼拱一致, 平面式构造, 嵌于沟谷中。计算模型如图 2 所示。

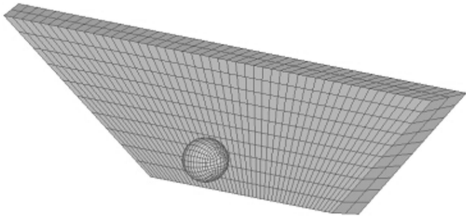
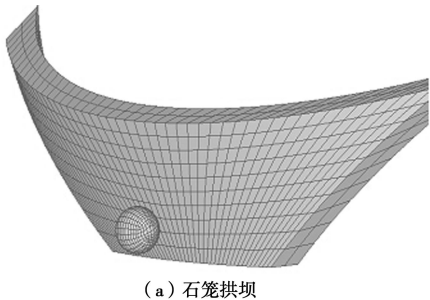


图 2 块石冲击石拦挡结构计算模型

Fig. 2 FEM model of stone impact on retaining structures

2.2 材料参数

表 1 为动力有限元计算的材料参数。石笼参数参考付丹等^[14]对石笼单体进行的压缩试验研究结果拟定。废旧轮胎参照罗祥等^[15]的数模参数拟定: 采用 Mooney-Rivlin 模型, 其应变能密度函数方程:

$$W = A(J_1 - 3) + B(J_2 - 3) + 0.5K(J_3 - 1)^2 \quad , \quad (1)$$
式中,

$$J_1 = I_1 I_3^{-1/3} \quad , \quad (2)$$

$$J_2 = I_2 I_3^{-2/3} \quad , \quad (3)$$

其中, K 为体积模量。 I_1, I_2, I_3 为柯西格林应变张量的 3 个不变量。 A, B 为材料参数, 模型中 A 取 551 kPa, B 取 137 kPa。

参照规范^[16]确定浆砌石的参数。浆砌石骨料为标号 600 的块石, 胶结材料选标号 50 的砂浆, 将其视作理想弹塑性模型, 用双线性模型近似。块石参照文献^[17]中给定的常见岩石物理力学指标范围进行选取。由于块石相对石笼和浆砌石有较高的刚度, 因此按照理想弹性材料处理。

2.3 结果分析

(1) 石笼拱与浆砌石坝冲击位移分析

图 3, 4 分别为石笼拱、浆砌石结构位移与时间关系图。位移变化选取两个点作为考察: 坝顶中央位置上游侧节点、块石冲击点。石笼拱两参考点的最大位移分别为 0.056, 0.088 m。冲击点位置位移略大, 坝顶位移有一定的滞后性。冲击点与坝顶处位移波峰交替出现。浆砌石坝最大位移分别为 0.0021, 0.0028 m, 位移曲线振荡性明显且频率较高, 两处位移的波峰叠加。由于结构整体刚性大, 致使两处的位移差异不大。石笼拱位移更大, 利于能量吸收, 位移峰谷叠加, 利于结构整体稳定; 浆砌石结构位移震荡性明显、频率

高、峰谷叠加。

(2) 石笼拱与浆砌石坝冲击力分析

图 5, 6 为冲击力与时间的关系曲线。石笼拱冲击荷载峰值 337 kN, 历时约 0.07 s。块石接触拱结构初期冲击力震荡剧烈, 然后逐步趋于平稳缓慢降低。浆砌石坝冲击力峰值 1740 kN, 远大于石笼拱承受的冲击力, 冲击荷载历时极短约为 0.01 s。

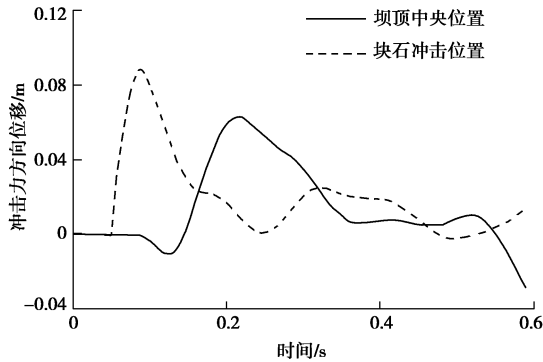


图 3 石笼拱结构位移与时间关系曲线

Fig. 3 Relationship between time and displacement of flexible gabion arch dam

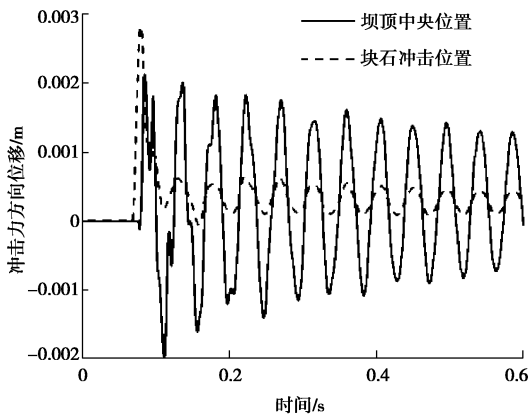


图 4 浆砌石结构位移与时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between time and displacement of mortar stone check dam

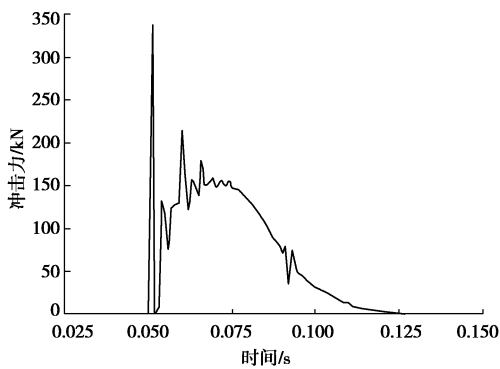


图 5 石笼拱结构冲击力与时间关系曲线

Fig. 5 Relationship between time and impact force on flexible gabion arch dam

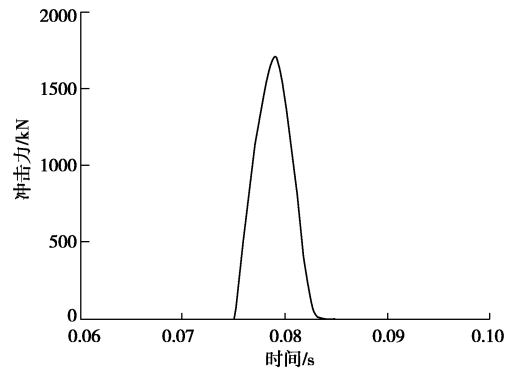


图 6 浆砌石结构冲击力与时间关系曲线

Fig. 6 Relationship between time and impact force on mortar stone check dam

由于石笼具有变形自适应特性, 附加柔性轮胎材料, 有效地降低了冲击力峰值, 延长了冲击作用结构时间历程, 从而耗散了石块作用在结构上的部分冲击能量。刚性拦挡坝刚度高、所能允许的变形很小, 难以有效吸收冲击能量, 降低冲击荷载。冲击作用后刚性结构内部应力激增, 容易达到破坏应力而破坏。

3 泥石流冲击后结构静力数值试验

泥石流冲击拦挡结构后停滞堆积在坝前, 结构承受泥石流堆积物的静态土水压力。为了进一步论证石笼拱结构多孔透水减小坝前压力的特性, 通过 MIDAS GTS 进行石笼拱结构的静力数值试验。

3.1 模型建立及参数选取

图 7 为静力计算的有限元模型。周必凡等^[18]总结出坝后回淤的设计值范围在原沟床比降的 70%~90%之间。文中选取沟床比降 370%, 沟床比的 80% 即 296%。因此对于泥石流堆积体的尺寸, 考虑淤积高度达到拦挡坝顶部的最不利情况, 假定坝前堆积体回淤坡降 296%。浆砌石拦挡坝的排水孔设计, 参照吴积善等^[19]关于浆砌石拦挡结构排水孔的布置方式, 尺寸 20 cm×30 cm, 总计 4 个排水孔按照方形布置。

材料参数取值如表 2, 基岩渗透系数参照胡卸文等^[20]拟定, 泥石流渗透系数拟定, 参考碎石土渗透系数进行假定, 石笼拱的渗透系数参照堆石料假定^[21]。

表 2 静力计算材料参数

| Table 2 Material parameters for static simulation | | | | | | | |
|---|-------|-------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 材料 | 模型 | 渗透系数 /(m·s ⁻¹) | 重度 /(kN·m ⁻³) | <i>c</i> /kPa | <i>φ</i> /(°) | <i>E</i> /MPa | 泊松 比 <i>ν</i> |
| 基岩 | 弹性 | 1.0×10 ⁻⁷ | 24 | — | — | 45000 | 0.25 |
| 石笼拱 | 莫尔-库仑 | 1.0×10 ⁻⁴ | 15 | 1000 | 40 | 6 | 0.30 |
| 浆砌石 | 弹性 | 5.0×10 ⁻⁷ | 22 | — | — | 8000 | 0.23 |
| 泥石流 | 莫尔-库仑 | 5.0×10 ⁻⁵ | 18 | 5 | 10 | 1 | 0.32 |

目前对泥石流流体力学特性的研究主要集中在将其视作非牛顿流体,但有限元软件中的模型主要是基于圣维南刚塑性体理论,所以无可参考的饱和泥石流力学参数。部分黏性泥石流为饱和和流塑状态的泥浆夹杂粒径跨度较大的粗粒料。流塑状态的泥浆特性与淤泥性质类似,粗颗粒的加入,其力学特性会有所改变。因此饱和泥石流堆积体的力学参数,参照文献[22, 23]中淤泥土假定。

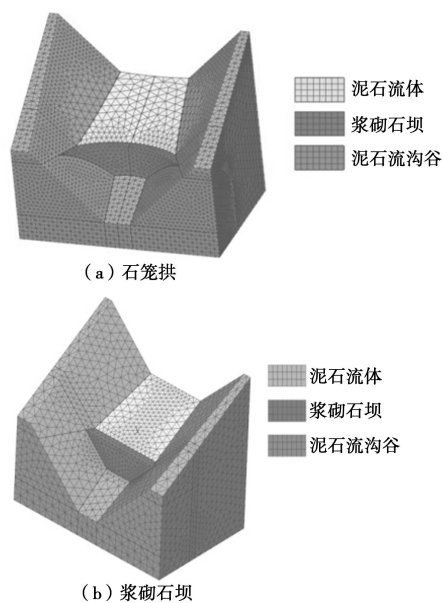


图 7 石笼拱拦蓄泥石流静力数值试验模型
Fig. 7 FEM model of static simulation of gabion arch dam when storing debris flows

3.2 工况设计及结果分析

静力计算工况分为: ①工况 1, 石笼拱、浆砌石拦蓄泥石流初期,堆积体还未排水,处于饱和状态; ②工况 2,堆积体中水体部分排出。计算方法: 分别对两种工况进行稳定渗流分析,获得相应的孔隙水压力分布,再进行静力计算。

图 8, 9 是将模型沿着河谷中轴面剖开,拦挡坝与泥石流堆积体相应剖面的孔压分布。工况 1 假定泥石流堆积体中的水尚未排除,堆积体大部分区域处于饱和状态,如图 8 (a)、9 (a) 所示。工况 2 假定泥石流堆积体上游边界总水头下降 0.8 m,进行稳定

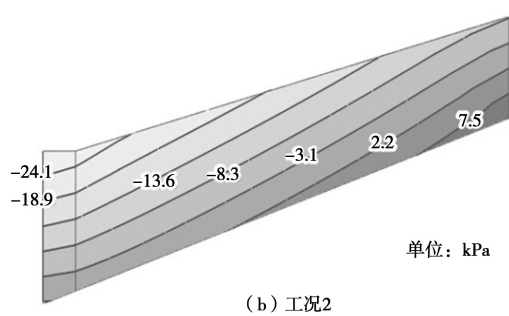
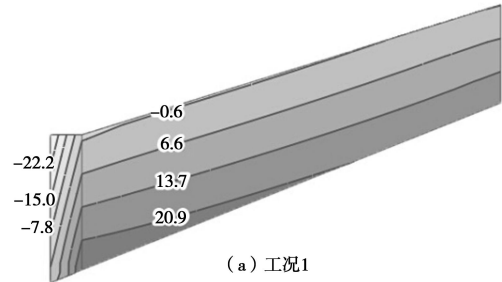


图 8 石笼拱及泥石流堆积体的孔压分布
Fig. 8 Pore pressures of gabion arch dam and debris flow deposition

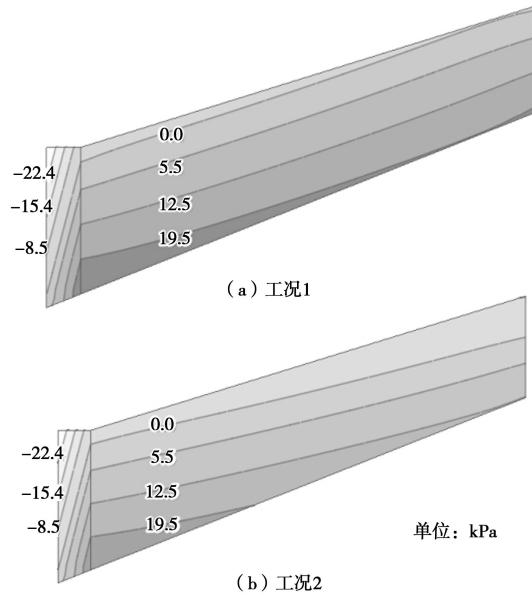


图 9 浆砌石拦挡坝及泥石流堆积体的孔压分布
Fig. 9 Pore pressures of mortar stone dam and debris flow deposition

渗流分析。对比图 8 (b)、9 (b) 可见,前者由于水体大量排除,孔压急剧减小;后者孔压减少有限,大部分堆积体仍然处于饱和状态。可见,浆砌石透水性差而排水孔泄水能力有限,致使坝前长期承受较高水压力。

图 10, 11 分别为石笼拱和浆砌石坝上游中央位置水平应力沿高度分布图,压应力为正值。工况 1 石笼拱水平应力最大值为 15.0 kPa,工况 2 减小到 7.2 kPa。最大值大约在 1/3 高度处,这与拱坝在 1/2~1/3 高度处为最大应力值^[8]相符。浆砌石坝工况 1、工况 2 水平应力变化很小,最大值分别为 25.3, 24.6 kPa,远大于石笼拱的水平应力状态。这是由于浆砌石刚度大、透水能力差共同导致的结果。结果表明石笼透水性强可倾泻堆积体中的水,有效减小石笼拱坝前压力,试验验证了石笼拱坝透水减压、变形自适应的特质。

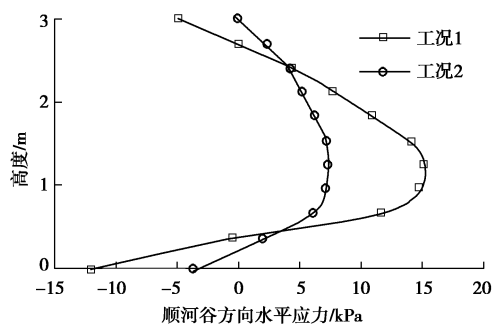


图 10 石笼拱上游面中间位置水平应力沿高度分布

Fig. 10 Distribution of horizontal stresses along upstream slope of gabion arch dam at central line

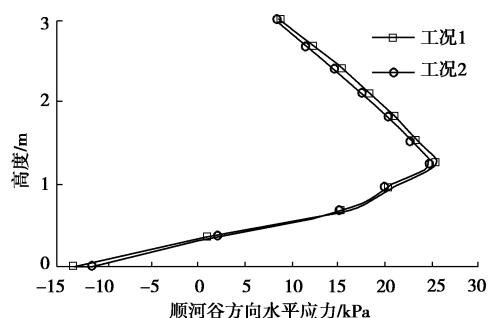


图 11 浆砌石上游面中间位置水平应力沿高度分布

Fig. 11 Distribution of horizontal stresses along upstream slope of mortar stone dam at central line

4 结 论

柔性石笼拱是设计修筑在泥石流启动和发展区的中低型拦挡结构群,实现逐级削减泥石流能量的目标。通过对柔性石笼拱的冲击动力和水土压力作用下,进行静动数值试验得到以下 3 点结论。

(1) 拱形构充分利用石笼的抗压强度,削减结构厚度降低工程成本。

(2) 泥石流冲击数值试验表明,石笼拱相对于浆砌石结构而言,能够良好地变形自适应,有效地降低冲击荷载峰值,从而提高石笼抵抗泥石流冲击的能力。

(3) 石笼拱拦蓄泥石流静力数值试验表明,石笼强透水性利于泥浆压力释放,减小坝前荷载,有助于维持结构的长期稳定。

参考文献:

[1] 陈晓清, 游 勇, 崔 鹏, 等. 汶川地震区特大泥石流工程防治新技术探索[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 14 - 22. (CHEN Xiao-qing, YOU Yong, CUI Peng, et al. New control methods for large debris flows in Wenchuan earthquake area[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2013, 45(1): 14 - 22. (in Chinese))

Chinese))

- [2] 王根龙, 张茂省, 赵 成, 等. 对三眼峪泥石流以往防治措施的反思[J]. 西北地质, 2011, 44(3): 115 - 121. (WANG Gen-long, ZHANG Mao-sheng, ZHAO Cheng, et al. Post-thinking of the former mitigation measures for the Sanyanyu Debris Flows[J]. Northwestern Geology, 2011, 44(3): 115 - 121. (in Chinese))
- [3] 陈晓清, 崔 鹏, 游 勇, 等. 一种框架式泥石流拦砂坝及其施工方法: 中国, 201110135612.8[P]. 2011. (CHEN Xiao-qing, CUI Peng, YOU Yong, et al. A new check dam of frame type and its construction method: China, 201110135612.8[P]. 2011. (in Chinese))
- [4] 陈晓清, 李德基, 游 勇, 等. 一种组装式泥石流拦砂坝及其施工方法: 中国, ZL201110082348.6[P]. 2012. (CHEN Xiao-qing, YOU Ji-de, YOU Yong, et al. A new assemble check dam and its construction method: China, ZL201110082348.6[P]. 2012. (in Chinese))
- [5] 兰肇声, 曹光尧, 姚德基. 国外泥石流拦挡坝工程[C]// 泥石流(2). 成都, 1983: 76 - 84. (LAN Zhao-sheng, CAO Guang-rao, YAO De-ji, et al. Sediment control dam of debris flow abroad[C]// Debris Flows(2). Chengdu, 1983: 76 - 84. (in Chinese))
- [6] 杨永红, 刘淑珍, 王成华, 等. 浅层滑坡生物治理中的乔木根系抗拉实验研究[J]. 水土保持研究, 2007, 14(1): 138 - 140. (YANG Yong-hong, LIU Shu-zhen, WANG Cheng-hua, et al. A study of tensile strength tests of arborous species root system in forest engineering technique of shallow landslide[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 138 - 140. (in Chinese))
- [7] REMAITRE A, VAN ASCH TH W J, MALET J P, et al. Influence of check dams on debris-flow run-out intensity[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2008, 8: 1403 - 1416.
- [8] 林继镛. 水工建筑物[M]. 5 版. 北京: 中国水利水电出版社, 2009. (LIN Ji-yong. The hydraulic structures[M]. 5th ed. Beijing: China WaterPower Press, 2009. (in Chinese))
- [9] 中国科学院甘肃省冰川冻土沙漠研究所. 泥石流[M]. 北京: 科学出版社, 1973. (The Chinese Academy of Sciences of Gansu Province Glacier Desert Research Institute. Debris flows[M]. Beijing: Science Press, 1973. (in Chinese))
- [10] 王兆印, 漆力健, 王旭昭. 消能结构防治泥石流研究——以文家沟为例[J]. 水利学报, 2012, 43(3): 253 - 263. (WANG Zhao-yin, QI Li-jian, WANG Xu-zhao. Debris flow control with energy dissipation structures-experiences from

- Wenjiagou[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, **43**(3): 253 - 263. (in Chinese))
- [11] 虞跃, 魏良帅, 陈廷方. 四川北川姜家沟泥石流特征及其防治对策[J]. 地质灾害与环境保护, 2012, **23**(4): 5 - 9. (YU Yue, WEI Liang-shuai, CHEN Ting-fang. Characteristic of debris flows and their control in Jiangjia gully of Beichuan, Sichuan[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2012, **23**(4): 5 - 9. (in Chinese))
- [12] 何思明, 沈均, 吴永. 滚石冲击荷载下棚洞结构动力响应[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 781 - 788. (HE Si-ming, SHEN Jun, WU Yong. Rock shed dynamic response to impact of rock-fall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 781 - 788. (in Chinese))
- [13] 余斌, 杨永红, 苏永超, 等. 甘肃省舟曲8.7特大泥石流调查研究[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(4): 437 - 444. (YU Bin, YANG Yong-hong, SU Yong-chao, et al. Research on the giant debris flow hazards in Zhouqu County, Gansu Province on August 7, 2010[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(4): 437 - 444. (in Chinese))
- [14] 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论文集第II册. 广州, 2009: 240 - 243. (FU Dan, GUO Hong-xian, CHENG Xiao-hui, et al. Compression Test Research of Stone Cage Element[C]//The 18th national structure engineering academic conference proceedings(II). Guangzhou, 2009: 240 - 243. (in Chinese))
- [15] 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 Shao-qing, YAN Qing-ping, 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. (in Chinese))
- [16] SL 25—91 浆砌石坝设计规范[S]. 1991. (SL 25—91 The standard for stone masonry dam design[S]. 1991. (in Chinese))
- [17] 徐志英. 岩石力学[M]. 3版. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (XU Zhi-ying. Rock mechanism[M]. 3rd ed. Beijing: China WaterPower Press, 2007. (in Chinese))
- [18] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991. (ZHOU Bi-fan, LI De-ji, LUO De-fu, et al. Debris flow prevention guide-lines[M]. Beijing: Science Press, 1991. (in Chinese))
- [19] 吴积善, 康志成, 田连权, 等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993. (WU Ji-shan, KANG Zhi-cheng, TIAN Lian-quan, et al. Debris flow and its comprehensive control[M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese))
- [20] 胡卸文, 罗刚, 王军桥, 等. 唐家山堰塞体渗流稳定及溃决模式分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, **29**(7): 1409 - 1417. (HU Yu-wen, LUO Gang, WANG Jun-qiao, et al. Seepage stability analysis and dam-breaking mode of Tangjiashan Barrier Dam[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, **29**(7): 1409 - 1417. (in Chinese))
- [21] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(11): 2264 - 2271. (XU Jian-cong, SHANG Yue-quan. Influence of permeability of gravel soil on debris stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(11): 2264 - 2271. (in Chinese))
- [22] 朱智勇, 曹玉苹. 温州地区淤泥的工程地质特性[J]. 西部探矿工程, 2006(4): 24 - 25. (ZHU Zhi-yong, CAO Yu-ping. Geotechnical characteristics of sludge in Wenzhou region[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(4): 24 - 25. (in Chinese))
- [23] 陈慕杰. 汕头市区软土的工程地质特性[J]. 桂林工学院学报, 1998, **18**(3): 261 - 265. (CHEN Mu-jie. Engineering properties of soft clay in Shantou[J]. Journal of Guilin Institute of Technology, 1998, **18**(3): 261 - 265. (in Chinese))