带摩擦阻尼器的新型泥石流拦挡坝的动力响应

王秀丽[1,2], 张秦琦[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: [目的] 为解决普通格栅泥石流拦挡坝容易被损毁的问题,提出带摩擦阻尼器的新型泥石流格栅拦挡坝,为摩擦阻尼器在新型泥石流格栅坝中的应用提供依据。[方法] 采用钢球模拟泥石流中的大块石,运用有限元软件 ABAQUS 对这种新型坝体进行泥石流大块石的冲击模拟。[结果] 与普通泥石流拦挡坝相比,带摩擦阻尼器的新型泥石流拦挡坝在巨石冲击坝体时梁柱节点处的应力响应明显减小。[结论] 新型泥石流格栅坝在位移、能量等方面具有良好的抗冲击性能。

关键词: 摩擦阻尼器; 新型泥石流拦挡坝; 动力响应分析; 数值模拟

文献标识码: A　　**文章编号**: 1000-288X(2016)04-0032-04　　**中图分类号**: P642.23

文献参数: 王秀丽, 张秦琦. 带摩擦阻尼器的新型泥石流拦挡坝的动力响应[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 32-35. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.006

Dynamic Responses of A Novel Debris Flow Blocking Dam with Friction Damper

WANG Xiuli[1,2], ZHANG Qinqi[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: [Objective] In order to reduce the damages of conventional grilled dam caused by debris flow, a novel debris dam with friction damper is proposed. [Methods] Simulating of massive stone in debris flow by steel ball, the finite element software ABAQUS was used to simulate the dynamic responses of the impact of large stones. [Results] As compared with the ordinary grilled dam, the stress response of beam-column joints was obviously reduced when an impacting force was applied against the dam. [Conclusion] The damped dam had well impact-resistance performance either in displacement withstanding or in energy reduction.

Keywords: friction damper; new debris flow dam; dynamic response analysis; numerical simulation

泥石流灾害往往具有规模大、危害严重,活动频繁、危及面广,且重复成灾等特点[1]。拦挡坝是泥石流防治工程的一种重要措施。早期,国内外泥石流拦挡坝多为封闭重力式实体结构,坝体上设有若干排水孔,泥石流中的固体物质被拦挡在拦挡坝坝体与泥石流沟沟壁三面形成的库存区域;由于实体坝无法对拦截物进行筛选,导致排水孔堵塞丧失排水作用,且清淤困难,随着对泥石流性质与防治工程的研究逐渐深入,兼具拦截和透水功能的格栅坝得到了广泛应用。游勇[2]对泥石流梁式格栅坝拦砂性能进行了研究;懒户俊彦等[3]对采用格栅型钢结构过水大坝对泥石流防止进行了分析;王秀丽等[4]则对冲击荷载下钢构格栅坝进行了动力响应分析。与重力式实体坝相比,格栅坝具有一些优点:(1) 具有部分拦挡、拦排结合功能,有利于浆体排泄并留下巨砾、漂石;(2) 减轻坝体所承受的水压力和冲击力,提高坝的稳定性,降低造价;(3) 提高库容系数、延长坝库使用寿命。但是随格栅坝体朝轻型化发展,往往容易由于泥石流中巨

收稿日期: 2015-10-23　　**修回日期**: 2015-10-30

资助项目: 国家自然科学基金项目"泥石流冲击下新型空间网格防护结构理论及试验研究"(51278236); 国家科技支撑计划项目"白龙江流域滑坡泥石流工程防治技术研究与示范"(2011BAK12B07)

第一作者: 王秀丽(1963—),女(汉族),辽宁省沈阳市人,博士,教授,博士生导师,主要从事大跨度空间结构方面的研究。E-mail: 404160163@qq.com。

通讯作者: 张秦琦(1989—),男(汉族),陕西省渭南市人,硕士研究生,研究方向为泥石流防治及其治理。E-mail: 1135739056@qq.com。

石的冲击力过大而发生破坏。因此王秀丽等[5]对普通重力式坝进行了改进,提出了新型泥石流拦挡结构,并对其进行对比分析。为了解决普通格栅泥石流拦挡坝容易被巨石损毁的问题,基于“拦疏一体、延长使用年限、保护整体”的思想,本研究提出了一种带摩擦阻尼器的新型泥石流格栅坝。并将其与普通格栅坝在受巨石冲击时进行对比分析,以期为摩擦阻尼器在新型泥石流格栅坝中的应用提供依据。

1　有限元模型的建立

依据实际工程中的格栅坝建立有限元计算模型,本研究格栅坝由三榀混凝土框架通过横向钢管梁及纵向混凝土梁相连,摩擦阻尼器装于坝顶中间纵向梁处,各榀间距为 2.4 m,跨度均为 1.4 m。在模型前柱底施加铰接约束,后柱底施加固结约束。摩擦阻尼器外套筒与铜套筒采用 TIE 联接,铜套筒与摩擦滑块采用罚接触约束公式,摩擦系数 0.3,摩擦阻尼器加装与坝体顶部正中纵向连梁处。新型坝与普通坝均采用理想弹塑性模型,材料遵循 Von Mises 屈服准则,由于在钢球撞击泥石流拦挡坝的过程中不考虑钢球的应力及变形,故其本构关系采用刚体模型。其中格栅柱采用 C_{20} 混凝土,泊松比 $\mu=0.2$,密度 $\rho=2\ 500\ \mathrm{kg/m^3}$,弹性模量 $E=25.5\ \mathrm{GPa}$,立方体抗压强度 $f_{cuk}=20\ \mathrm{MPa}$。横向钢管梁及钢球采用 Q_{345} 钢材,密度 $\rho=7\ 800\ \mathrm{kg/m^3}$,弹性模量 $E=206\ \mathrm{GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$,屈服强度 345 MPa。新型坝摩擦阻尼器铜套筒密度 $\rho=8\ 900\ \mathrm{kg/m^3}$,弹性模量 90 GPa,屈服应力 80 MPa,摩擦滑块及外套筒采用 Q_{235} 钢材,密度 $\rho=7\ 800\ \mathrm{kg/m^3}$,弹性模量 $E=206\ \mathrm{GPa}$,泊松比 $\mu=0.3$,屈服强度 235 MPa。

将巨石等效为刚性球体,以甘肃舟曲三眼峪泥石流为例[6],得到沟口堆积扇区域泥石流中巨石流速为 10.95 m/s,故设定钢球初速度为 10 m/s,从而对格栅坝体进行动力响应分析。

2　有限元结果对比分析

钢球以 10 m/s 的速度下,分别冲击无摩擦阻尼器的普通格栅坝与带摩擦阻尼器的新型格栅坝,对其冲击力、能量、Von Mises 应力、位移及加速度进行对比分析。

2.1　冲击力对比

泥石流的冲击力由泥石流整体冲击力和泥石流中大块石的冲击力共同构成[7]。普通坝、新型坝产生的冲击力随时间变化如图 1 所示。有图 1 可以看出,新型坝及普通坝的最大冲击力分别为 4.69×10^5 N 和 5.39×10^5 N;钢球对新型坝的冲击时间明显增长,且冲击力时程曲线出现平台期。由以上比较分析可知,结构刚度和冲击力大小相关[8],结构刚度越大,冲击力越大,反之刚度越小,冲击力越小。由于加装摩擦阻尼器的原因,新型坝较普通坝刚度减小,冲击力从而减小;刚度的减小,使冲击时间增长,平台期的出现,说明摩擦阻尼器通过摩擦变形起到了耗能的效果,与设计理念相符合。

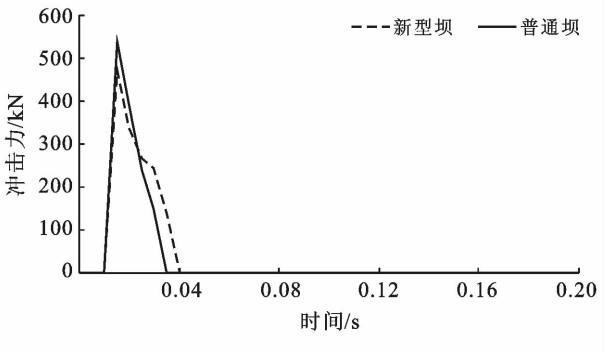


图 1　钢球冲击力对比时程曲线

2.2　能量对比

通过对比新型坝与普通坝的内能与动能时程曲线,进而分析新型坝的耗能效果。泥石流冲击过程中普通坝及新型坝的内能与动能时程曲线如图 2—3 所示。由图 2—3 可知,新型坝及普通坝的最大内能分别为 173 461 和 191 859 J;最大动能分别为 25 160.4 和 30 319.4 J;普通坝动能时程曲线在撞击 0.08 s 后仍有上下波动的现象,而新型坝却趋于稳定逐渐减小,说明冲击作用后,刚度更大的普通坝内部惯性效应更加明显,结构也更易达到局部冲切破坏。而由于加装摩擦阻尼器的新型坝,相当于增加了结构的柔度,使新型坝结构的内能及动能比普通坝分别降低了 9.59%和 17.1%,有效地耗散了大块石作用于结构上的部分撞击能量,从而减小了冲击力对坝体的破坏,也对减轻坝体局部的冲切破坏起到了积极的作用。

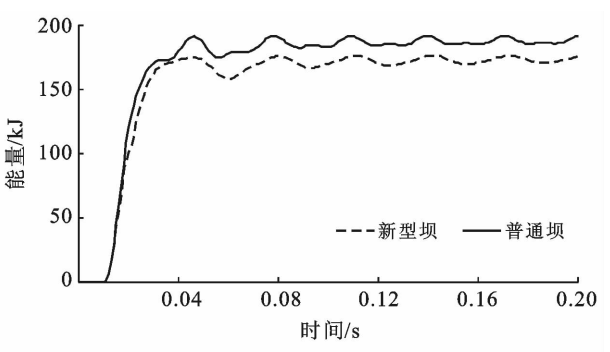


图 2　坝体内能对比时程曲线

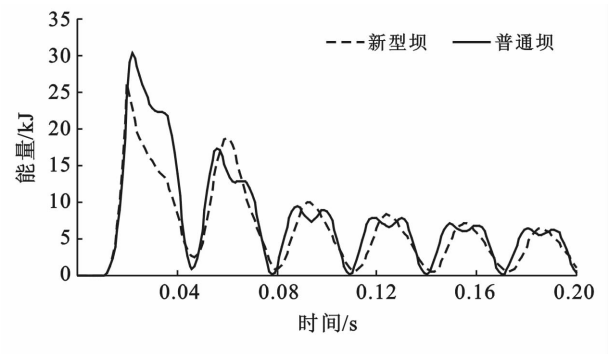


图3 坝体动能对比时程曲线

2.3 应力对比

通过对比新型坝和普通坝的Von Mises应力来评价新型坝抗冲击性能的优劣。通过对比普通坝和新型坝的Von Mises应力云图可以看出：(1) 普通坝在钢球撞击的瞬间，撞击位置的前后格栅柱与横向钢管连梁焊接节点处均出现应力，说明撞击位置处的混凝土与钢管的焊接节点是最易产生应力集中及破坏的；(2) 随着冲击的进行，应力范围逐步扩大到各个横向钢管连梁，且在冲击荷载达到峰值时，后格栅柱与钢管连梁节点处应力也已达到钢管极限抗压承载力，说明钢管连梁与格栅柱焊接节点已经完全破坏，普通坝已经丧失承载能力；(3) 钢球撞击坝体所用时间很短，整个冲击时间仅为20 ms。对于新型坝来说：(1) 当t=10.1 ms时(即冲击发生的瞬间)，新型坝前格栅柱在柱顶撞击区域内混凝土的应力达到极限抗压承载力；摩擦阻尼器出现应力响应，而后格栅柱仅柱顶出现应力，且幅值在8～10 MPa；后格栅柱与横向钢管连梁焊接节点及钢管连梁均未出现应力。说明钢球对新型坝的冲击作用经过阻尼器的作用耗散了部分能量。(2) 当t=20.0 ms时，新型坝仅有上部两根横向钢管连梁与前格栅柱焊接节点已发生破坏，而后横向钢管连梁并未产生应力；(3) 当t=30.0 ms时，新型坝后格栅柱与横向钢管连梁焊接节点处才出现应力峰值，且并未发生破坏。(4) 整个冲击过程持续时长为55 ms，为普通坝冲击时间的1.84倍。由冲量定理$I=F_t$可知，在冲量大小相同时，当撞击时间t越长，冲击力F则越小，这一点正好印证了本文在前面所提出的结论：新型泥石流格栅坝所受冲击力要小于普通格栅坝。

2.4 位移对比

在钢球的冲击作用下，新型坝与普通坝被冲击的格栅柱前后柱顶冲击方向位移如图4—5所示。由图4—5可知，新型坝前格栅柱冲击方向最大位移为－75.02 mm，后格栅柱冲击方向最大位移为－21.52 mm；普通坝前格栅柱冲击方向最大位移为－48.2 mm，后格栅柱冲击方向最大位移为－41.04 mm，新型坝前柱位移是普通坝前柱位移的1.56倍，这是由于摩擦阻尼器的作用，使新型坝较普通坝刚度更小，有更大的位移空间，故而新型坝前柱位移比普通坝的前柱位移要大，然而由于摩擦阻尼器与前柱的耗能缓冲作用，新型坝后柱位移则仅是普通坝的1/2。

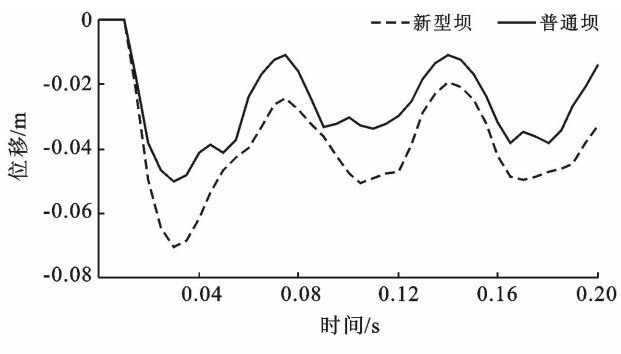


图4 坝体前柱顶冲击方向位移时程曲线

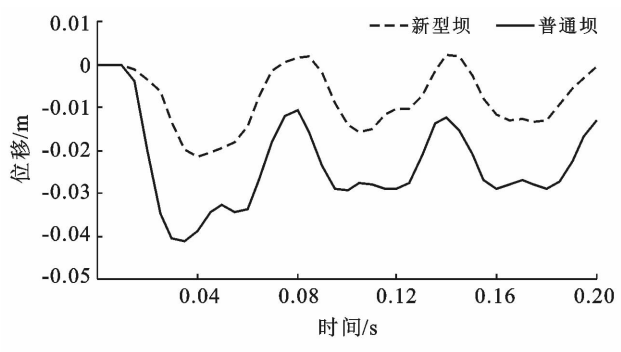


图5 坝体后柱顶冲击方向位移时程曲线

2.5 加速度对比

在巨石冲击作用下，加速度尤其是最大加速度对于结构的动力响应是一个重要参数。由达朗贝尔原理可知，在结构受力运动的任何时刻，作用于结构上的真实外荷载、虚拟的惯性力及加速度在结构中产生惯性力的共同作用下，结构处于动态平衡状态。在大部分的工程材料中，由于应力波的传导速率很快，从而在有限尺度的结构中受到的动载将会快速达到平衡，此时应力波效应也将顺应消失；可是结构自身还会继续发生变形及整体运动，从而惯性效应仍会持续相当长的一段时间，这是不能被忽视的[9]。通过模拟分析得到普通坝、新型坝的加速度时程曲线。普通坝、新型坝的前格栅柱冲击方向的加速度时程曲线如图6所示。由图6可以看出：(1) 新型坝坝体在冲击方向的最大响应加速度比普通坝减小很多，只有普通坝的1/7.14。(2) 新型坝在撞击过程中，坝体响应加速度仅峰值较大，在t=0.02 s后，其值基本保持稳定，而普通坝在撞击过程中，坝体响应加速度幅值较大且来回震荡、上下波动，直到t=0.05 s后，波动才

逐渐趋于平缓,说明在撞击结束后普通坝坝体的惯性效应比新型坝要明显。

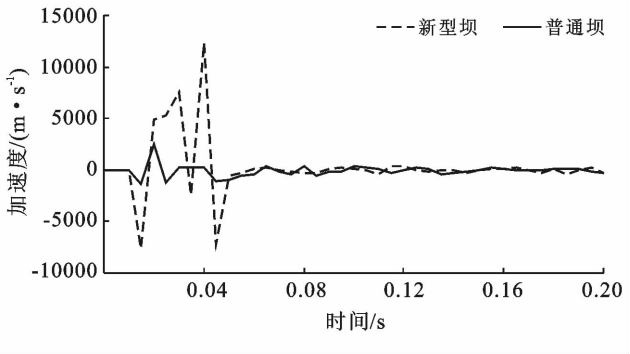


图 6　不同坝体冲击方向的加速度时程曲线

3　结 论

(1) 新型坝与普通坝相比,其冲击力可减小 1/1.15 左右,坝体的响应加速度可降到普通坝的 1/7.14,内能及动能比普通坝分别降低了 9.59%和 17.1%,从而减轻坝体局部的冲切破坏,说明本设计中新型带摩擦阻尼器的泥石流拦挡坝具有良好的抗冲击性能。

(2) 新型坝的前格栅柱虽然在钢球冲击作用下会发生破坏,但是新型坝的后格栅坝及横向钢管连梁不论是位移、变形还是坝体响应的加速度等都很小,从而确保了新型坝在巨石冲击作用下不会发生整体破坏,仍然能够正常发挥拦挡作用。

(3) 基于"拦疏一体、延长使用年限、保护整体"的思想提出的新型坝具有良好的抗冲击性能。

[参 考 文 献]

[1] 王启亮,吕义清,员孟超.虎峪沟泥石流特征及其危险度评价[J].水土保持通报,2010,30(6):219-222.

[2] 游勇.泥石流梁式格栅坝拦砂性能试验研究[J].水土保持学报,2001,15(1):113-115.

[3] 懒户俊彦,葛西俊一郎,山口健太郎,等.采用格栅型钢结构过水大坝防止泥石流[J].水土保持科技情报,2000(2):37-39.

[4] 王秀丽,黄兆升.冲击荷载下泥石流拦挡坝动力响应分析[J].中国地质灾害与防治学报,2013,24(4):61-65.

[5] 王秀丽,郑国足.新型带弹簧支撑抗冲击研究及其在泥石流拦挡坝中的应用[J].中国安全科学学报,2013,23(2):3-9.

[6] 邓虎,陈宁生,胡桂胜,等.甘肃舟曲三眼峪沟泥石流动力学特征参数计算[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2011,30(4):833-838.

[7] 中国地质调查局.DZ/T0239-2004 泥石流灾害防治工程设计规范[S].北京:中国标准出版社,2010.

[8] 何思明,吴永,沈均.泥石流大块石冲击力的简化计算[J].自然灾害学报,2009,18(5):51-56.

[9] 余同希,邱信明.冲击动力学[M].北京:清华大学出版社,2011:81-82.

(上接第 31 页)

[3] Serpico S B, Dellepiane S, Boni G, et al. Information extraction from remote sensing images for flood monitoring and damage evaluation[J]. Proceedings of the IEEE, 2012,100(10):2946-2970.

[4] Ahmed M Y, Biswajeet P, Abdallah M H. Flash flood risk estimation along the St. Katherine road, Southern Sinai, Egypt using GIS based morphometry and satellite imagery[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(3):611-623.

[5] Matthias K, Christian H, Juan M R. A risk analysis for floods and lahars: Case study in the Cordillera Central of Colombia[J]. Natural Hazards, 2012,64(1):767-796.

[6] 方建,李梦婕,王静爱,等.全球暴雨洪水灾害风险评估与制图[J].自然灾害学报,2015,24(1):1-8.

[7] 赵庆良,王军,许世远,等.沿海城市社区暴雨洪水风险评价:以温州龙湾区为例[J].地理研究, 2010,29(4):665-674.

[8] 殷淑燕,黄春长.汉江上游近 50 a 来降水变化与暴雨洪水发生规律[J].水土保持通报,2012,32(1):19-25.

[9] 何文华.城市化对济南市暴雨洪水的影响及其洪水模拟研究[D].广东 广州:华南理工大学,2010.

[10] 薛仓生,金菊良,丁峰,等.淮河流域安徽省 2007 年的暴雨洪水特性分析[J].灾害学,2009,24(1):86-91.

[11] 陈吉虎.北京市"7·21"特大暴雨对城市水土保持和监测工作的启示[J].水土保持通报,2013,33(6):313-316.

[12] 郭恩亮.辽宁中部地区暴雨洪涝灾害风险评价[D].辽宁 大连:辽宁师范大学,2013.

[13] 郁淑华.西南地区洪涝灾害的监测与预报[M].北京:气象出版社,2004:1-33.