

泥石流冲击作用下桥墩动力响应研究

黄云

(广西交通设计集团有限公司, 广西南宁 530022)

摘要: 针对桥墩在泥石流作用下的动力冲击问题, 该文基于 SPH—FEM 耦合的数值方法, 研究块石—浆体—桥墩之间的动态作用。分析含大块石泥石流冲击桥墩的全过程、冲击力时程、关键点位移时程、桥墩破坏情况等动力学行为。并将桥墩的冲击破坏机理与工程经验相结合, 分析桥墩外包钢板和桥墩外包缓冲层+钢板两种优化措施对桥墩的防护效果。研究表明: 大块石对桥墩的冲击作用容易对桥墩受冲击处造成局部破坏, 且墩顶位移较大; 在对桥墩进行外包钢板加固后, 墩顶位移有很大程度的降低, 桥墩所受的冲击力较未加固时有所增加, 综合考虑, 钢板厚度为 10 mm 时防护效果较好; 对桥墩进行泡沫铝和钢板加固后, 墩顶位移下降, 并且桥墩所受冲击力也较未加固时有所降低, 从桥墩所受冲击力的降低效果和桥墩塑性变形等方面综合考虑, 外包缓冲层+钢板桥墩防撞性能最优, 综合考虑, 泡沫铝厚度为 20 cm 时防护效果较好。采用 SPH—FEM 耦合数值方法对桥墩受含大块石泥石流冲击的动力响应有很好的模拟效果。

关键词: SPH—FEM 耦合; 泥石流; 动力学行为; 数值计算; 桥墩

1 前言

泥石流是一种存在于世界各地山区沟谷中的自然灾害, 是由地震、暴雨等激发的特殊洪流。据对中国西南山区及甘肃地区 38 条泥石流灾害现场统计来看, 其中含有体积大于 2 m^3 的大块石的泥石流条数占比达 71.1%, 含有体积大于 6 m^3 的巨大块石的泥石流条数占比达 28.9%, 泥石流裹挟大块石是很普遍的现象。

与一般的泥沙流相比, 由于携带的块石具有巨大的冲击动能, 其冲击破坏力更强。桥梁是保障交通干线贯通的重要结构, 但是由于泥石流灾害的频繁发生, 其桥墩经常会被冲坏, 对山区的交通沿线造成了重大的影响, 严重威胁了人民的生命财产安全。

泥石流冲击桥墩过程中, 最关键的问题是泥石流动态冲击的评估, 它直接关系到桥墩的设计。泥石流动态冲击过程中, 浆体与大块石、浆体与桥墩、块石与桥墩之间存在相互耦合作用, 泥石流的冲击力主要由

[3] 周水兴. 钢管初应力对钢管混凝土拱桥承载力的影响研究[D]. 重庆大学博士学位论文, 2007.

[4] 曹志光. 初应力对钢管混凝土拱桥极限承载力的影响研究[D]. 中南大学硕士学位论文, 2010.

[5] 孙晋城. 考虑初应力的钢管混凝土桁式拱桥极限承载力计算方法研究[D]. 福州大学硕士学位论文, 2013.

[6] 黄红兵, 崔海兴, 王耀君, 等. 考虑初应力的大跨度钢管混凝土拱桥极限承载力计算方法研究[J]. 工程质量, 2011(8).

[7] 赵均海, 李艳, 梁文彪, 等. 考虑初应力的哑铃型钢管混凝土拱肋极限承载力统一解[J]. 中国公路学报, 2012(5).

[8] 于洪刚, 周水兴, 陈强, 等. 钢管初始应力对大跨径钢管混

凝土拱桥稳定承载力的影响[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2005(2).

[9] 解威威, 杨绿峰, 王建军, 等. 钢管混凝土桁式拱桥稳定承载力的参数分析[J]. 中外公路, 2018(6).

[10] 顾箭峰. 钢管混凝土拱桥灌注混凝土仿真分析研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2012.

[11] 吴何. 钢管混凝土拱肋混凝土灌注工序研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2017.

[12] 涂光亚, 朱帆, 阳弛. 大跨度钢管混凝土拱桥混凝土灌注工序分析[J]. 交通科学与工程, 2019(2).

[13] 陈卫华. 大跨度钢管混凝土拱桥施工优化分析[J]. 中外公路, 2017(5).

泥石流浆体的动压力和块石冲击力两部分组成:前者基于流体力学中压力公式,后者基于经典弹塑性碰撞力学理论并结合冲量定理。这类方法有两个缺点:①两个公式是基于单向非耦合计算方法,没有考虑实际中浆体—桥墩、块石—桥墩存在相互耦合作用,且不能进行结构破坏的全过程分析;②计算冲击力时,没有考虑浆体与块石的耦合作用,该方法对于固相颗粒含量少且粒径较小的黏性泥石流是实用的,但对于稀性泥石流、过渡性泥石流及块石含量较多的黏性泥石流则相对误差较大。因此,结构设计有必要考虑泥石流浆体—块石—桥墩之间的相互耦合作用。然而,到目前为止,泥石流浆体—块石—桥墩之间的相互耦合作用很少被详细研究。在实际工程中,这些桥墩经常在泥石流灾害中被破坏,因此,深入开展含大块石泥石流动态冲击的研究,不仅可为泥石流冲击桥墩提供可靠的荷载依据,也为研究桥墩结构的动力演化过程提供重要的动力学依据。

既有文献对泥石流冲击桥墩的动力学行为研究主要集中在泥石流对桥墩的冲击力上。现有的研究方法主要包括试验方法、理论方法、数值方法。王友彪综合考察了泥石流流变特性、流速、桥墩形状与冲击力的关系。室内试验可以直观地了解泥石流力学特征,但是很难满足试验中的相似性原则,因此试验得到的冲击力与实际值有较大差距;Hu等在云南蒋家沟对泥石流开展了实地试验,但是由于场地的限制,对泥石流冲击力进行有效记录很难。此外,国内外的一些学者也对泥石流的冲击力进行了理论研究。Chen等将泥石流进行了简化,认为泥石流是两相流体,并基于二维流体模型使用牛顿第二定律建立了流体的冲击力计算公式,但是还需要工程实践的检验。目前,大块石冲击力的计算方法主要基于赫兹接触理论为基础的冲击力公式、能量法为基础的计算公式。但是这些公式均没有考虑流体的作用。此外,各种数值模拟方法也广泛地应用于泥石流的研究当中。Han等利用有限差分法对泥石流的运动方程进行计算。在上述研究中,因为对运动方程进行了简化,导致计算得到的压力值与实际结果相比有一定的偏差。姚昌荣对泥石流冲击下桥墩的动力学行为进行了研究,把泥石流浆体冲击荷载和大块石冲击分别施加在桥墩结构上;吴永等对含大块石泥石流冲击作用下桥墩的破坏过程进行了研究,并根据计算结果提出了优化对策。但是基于FEM的方法在模拟结构大变形的的问题上会容易发生网格畸变,造成计算的失败。

SPH方法在处理大变形问题方面具有一定的优势,能够避免FEM中发生网格大变形从而导致计算失败等问题。Wang等采用了SPH方法模拟了泥石流的动力学行为;Dai等采用SPH方法对泥石流砂的动态过程进行了模拟;潘建平等采用SPH—FEM耦合方法对溃决尾砂的运动特征及其对下游墩柱的冲击作用进行了研究,并将数值模拟结果和室内试验进行了对比,两者吻合较好,验证了SPH—FEM耦合方法对泥石流动力特性进行模拟的正确性。

综上所述,已有的泥石流冲击模型通常只单一考虑浆体冲击作用,或者只考虑块石的冲击作用,或者分别将泥石流浆体与块石当成两种动力荷载施加在结构上,均没有考虑浆体—块石—桥墩之间的耦合作用。该文旨在利用已有的SPH—FEM耦合数值方法对桥墩在含大块石泥石流冲击下的动力响应进行研究,并提出相应的措施,对于桥墩的防撞设计具有一定的参考意义。

2 计算理论

2.1 SPH算法基础

SPH方程构造的两个关键步骤分别为核函数插值和粒子近似,以实现核函数估计积分表达式的粒子离散。

在SPH方法中,通过函数 $f(r)$ 在定义域 Ω 中的积分,可以获得任意宏观变量 $f(r)$ 在空间某一点 r 上的核估计:

$$\langle f(r_i) \rangle = \int f(r') W(r - r', h) dr' \quad (1)$$

式中: $W(r - r', h)$ 为核函数; h 为光滑长度,该文取为 $1.2d_0$, d_0 为相邻粒子间距离。

为了最终得到粒子的离散化控制方程,需要对支持域内的一系列粒子进行离散化求和,即可以通过核函数对该粒子紧支域内所有粒子的函数值加权平均得到粒子 i 处的场函数值:

$$\langle f(r_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(r_j) W(r_i - r_j, h) \quad (2)$$

式中: ρ_j 、 m_j 分别为粒子 j 的密度、质量。

SPH方法通过使用光滑核函数进行积分表示,该文采用三次样条型核函数来处理三维问题:

$$W(q, h) = \frac{1}{\pi h^3} \begin{cases} 1 - \frac{3q^2}{2} + \frac{3q^3}{4}; 0 \leq q < 1 \\ \frac{1}{4}(2 - q)^3; 1 \leq q < 2 \\ 0; q \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

2.2 SPH—FEM 耦合

SPH 和 FEM 耦合首先进行的是接触搜索,寻找临近单元,在计算过程中,将 SPH 定义为从节点, FEM 定义为主段。采用点面接触实现两者的耦合,通过罚函数算法将从节点的力施加到有限单元上,罚函数的基本原理相当于在 SPH 和 FEM 之间加上法向接触弹簧,以此限制质点穿透主面。并在每一个计算时间步内检查各节点是否穿透主面,若没有穿透则不进行处理,若穿透则引入大小与主面刚度和穿透深度成正比的接触力。图 1 为 SPH 与 FEM 的接触模型。图 2 为耦合计算流程。

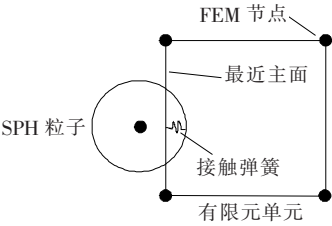


图 1 SPH 与 FEM 接触模型

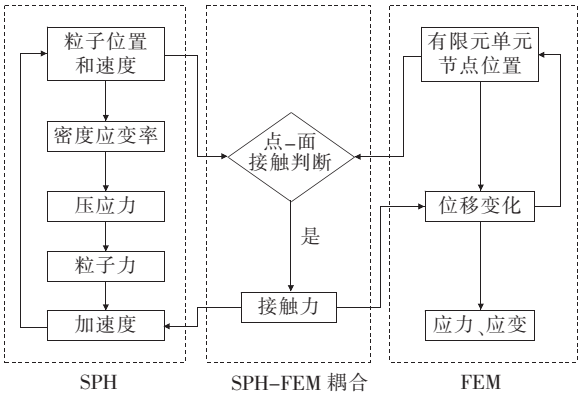


图 2 SPH—FEM 接触算法流程

3 计算模型的建立

3.1 几何模型

以川藏线常见的桥墩为例构建模型。如图 3 所示,结构模型由桥墩、浆体、大块石、河道共同组成,桥墩直径 2 m,高 10 m,墩内纵筋为 36 ϕ 32,箍筋采用 1 ϕ 14,箍筋间距取 120 mm。该文对模型进行了简化,认为河道底部和侧面均为平面。

3.2 材料模型

采用刚性球体模拟大块石,其密度为 3 000 kg/m³,弹性模量为 30 GPa;泊松比为 0.3。

桥墩是由混凝土浇筑而成。混凝土的材料模型采

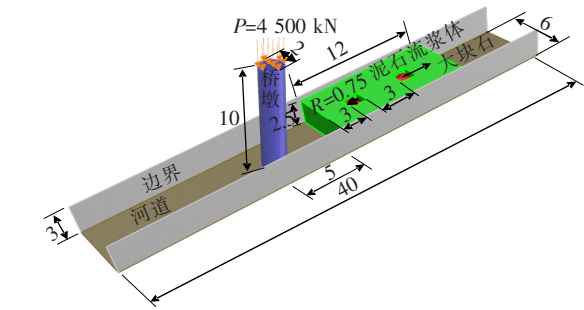


图 3 大块石冲击桥墩几何模型(单位:m)

用连续盖帽模型,根据最大主应变失效准则判定混凝土的失效,失效应变为 0.05。混凝土参数见表 1。

表 1 混凝土材料参数

密度/ (kg·m ⁻³)	控制参数	预损伤	侵蚀系数
2 320	0	0	1.1
恢复系数	盖帽选项	抗压强度/MPa	骨料粒径/mm
10	0	32.0	20

采用理想弹塑性材料模拟钢筋。纵筋钢筋材料参数如下:密度 7 800 kg/m³;弹性模量 210 GPa;泊松比 0.3;屈服强度 400 MPa;失效应变 0.3。箍筋材料参数如下:密度 7 800 kg/m³;弹性模量 210 GPa;泊松比 0.3;屈服强度 335 MPa;失效应变 0.3。

泥石流浆体采用弹塑性流体动力学模型进行模拟。泥石流浆体的材料参数见表 2。

表 2 泥石流浆体材料参数

密度/ (kg·m ⁻³)	剪切模量/ MPa	屈服应力/ Pa	塑性硬化 模量/Pa
1 700	1.68	90	0

3.3 计算单元

对于大块石、桥墩和泡沫材料,该文采用实体单元进行模拟,共有 41 600 个实体单元。钢筋采用桁架单元模拟,共有 5 796 个桁架单元。采用 SPH 粒子模拟浆体,共有 22 702 个粒子。河道采用壳单元模拟,共有 21 360 个壳单元。计算模型如图 4 所示。

3.4 荷载及边界条件

对桥墩底部、河道底部和河道两侧壁面施加全固定约束。桥墩顶部承受的集中荷载为 4 500 kN,将其转换为均布荷载施加于桥墩顶面。

泥石流浆体与块石、桥墩、河道之间采用点一面接触,摩擦系数取为 0.4,大块石、缓冲层、桥墩、河道之

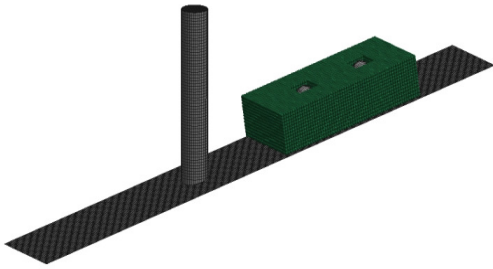


图 4 计算模型

间采用面面接触,摩擦系数取为 0.4。大块石与钢筋之间采用梁单元一面接触,摩擦系数取为 0.4。钢筋嵌固在混凝土里。

泥石流浆体和大块石的初始冲击速度为 12 m/s,冲击方向与桥墩竖向夹角为 80°。计算时间取 3.50 s。

4 冲击结果分析

4.1 冲击过程

泥石流冲击桥墩的过程如图 5 所示,泥石流浆体与大块石共同运动, $t=0.38\text{ s}$ 时,泥石流与桥墩发生接触,泥石流的冲击“龙头”速度达到最大值 16.48 m/s; $t=0.68\text{ s}$ 时,第一个大块石冲击桥墩,产生巨大的局部冲击力,桥墩受冲击部分混凝土因其最大主应变超过失效应变而发生失效,同时,浆体冲击桥墩,引起浆体的飞溅。 $t=1.05\text{ s}$ 时,第二块大块石冲击前一块大块石,造成更多桥墩混凝土的失效,泥石流浆体飞溅高度增大; $t=3.50\text{ s}$ 时,冲击过程结束,一部分泥石流浆体堆积在桥墩底部;另一部分泥石流浆体顺河道继续流动,由于泥石流浆体对块石的阻碍,块石的回弹能量被消耗,最终停留在桥墩底部。

4.2 关键点位移

墩柱顶部中心点位移与时间关系曲线如图 6 所示, $t\leq 0.38\text{ s}$ 时,墩柱只受到泥石流浆体的作用,冲击力较小,墩柱顶部位移较小,之后,大块石撞击墩柱,使得柱顶位移急剧增大,墩柱顶部最大位移为 17 mm。并产生了约 10 mm 的永久变位。此现象表明进行含大块石泥石流对桥墩冲击作用研究的必要性。

如图 7 所示,提取时刻 t 为 0.38、0.68、1.05、3.50 s 墩柱轴线上各点的位移,各时刻的最大位移均发生在桥墩顶部,其位移分别为 0.11、1.61、9.75、10.47 mm。由图 7 可以看出:冲击完成后墩柱有不可恢复变形,整个桥墩产生了塑性变形。

4.3 冲击力

图 8 为冲击力时程曲线。大块石对桥墩的第 1 次

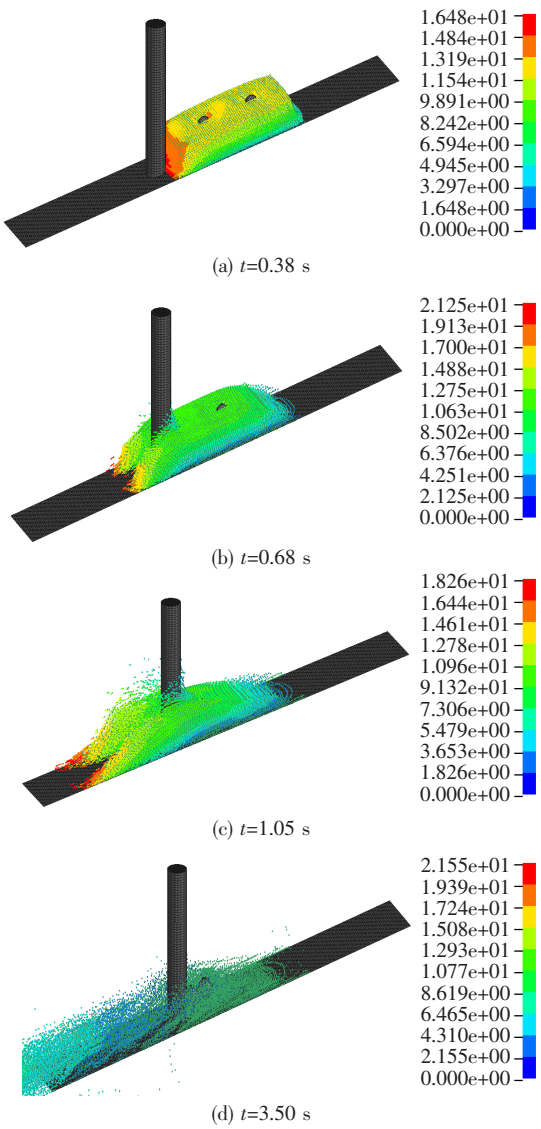


图 5 泥石流冲击桥墩过程(单位:m/s)

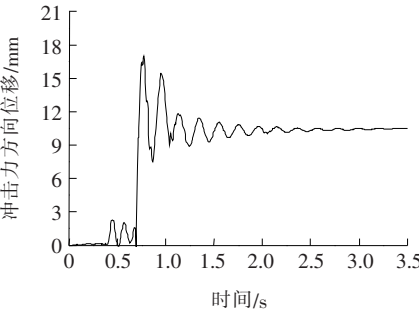


图 6 墩柱顶部中心点位移与时间关系曲线

冲击力峰值为 $12.11\times 10^6\text{ N}$,并且由于泥石流浆体对块石“携带”的作用,冲击力达到第 2 次峰值 $1.79\times 10^6\text{ N}$,第 3 次冲击荷载峰值出现在第 2 块大块石冲击第 1 块大块石时,峰值为 $3.37\times 10^6\text{ N}$,后两次局部荷载峰值均比第 1 次小。块石冲击作用都可视为集中荷

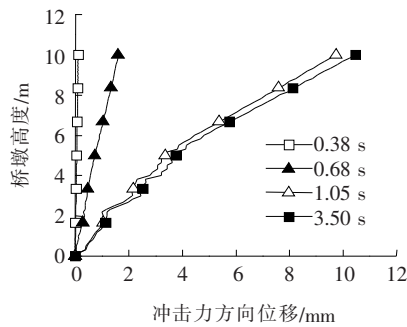


图7 墩柱轴线位移

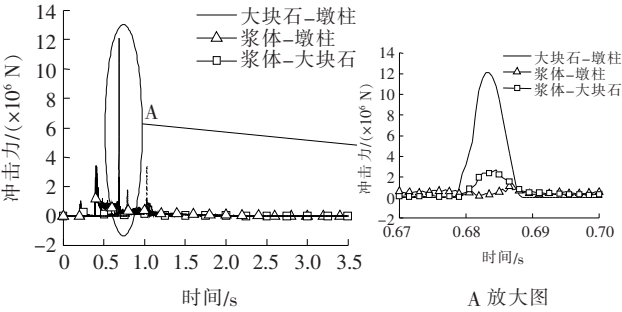


图8 冲击力时程

载,对墩柱局部影响较大。泥石流浆体对桥墩的冲击力峰值为 3.43×10^6 N。在泥石流冲击墩柱的过程中,大块石对墩柱的冲击力峰值约为泥石流浆体的 3.56 倍,大块石对桥墩结构强度的影响重大。从泥石流浆体与大块石之间的相互作用力可以看出,浆体可带动块石运动以补充摩擦损失的能量,浆体对大块石的冲击具有加强作用,这就造成泥石流浆体与块石共同作用下的块石冲击力大于块石单独冲击桥墩所产生的冲击力。

4.4 桥墩破坏分析

如图 9 所示,桥墩在块石的冲击作用下,其第一主应变的最大值发生在集中荷载作用的位置,由于混凝土的最大主应变达到了失效值,在块石冲击区发生破坏,并形成小凹坑,造成这种现象的原因是墩柱自身的刚度较大,导致其难以对冲击能量进行有效的耗散,造成混凝土的应变极易达到失效应变。而在泥石流浆体的冲击作用下,虽然桥墩整体受到的冲击力比较大,但是由于浆体的冲击作用面积较大,最终分散在冲击区域各处的冲击压力比较小。通过数值模拟可以发现,泥石流浆体对桥墩造成的危害主要有两个方面:① 当大块石在第 1 次冲击桥墩过后,浆体会带动块石对桥墩造成第 2 次冲击;② 大块石冲击桥墩形成的凹坑经过泥石流浆体的冲刷,部分砂浆脱离桥墩,造成其承载能力下降,容易使桥梁发生倒塌。

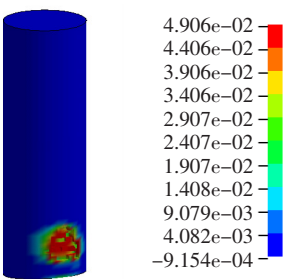


图9 桥墩混凝土损伤

5 优化分析

5.1 墩柱外包钢板

外包钢板的工作原理是在混凝土墩柱表面粘贴钢板,将混凝土墩柱和钢板黏结成整体共同抵抗泥石流的冲击。外包钢板对混凝土的约束作用使得混凝土的保护层不会被轻易破坏,使得桥墩的承载能力和变形能力有较大程度的提升。

对表面包裹钢板后的桥墩进行泥石流冲击数值模拟,钢板用壳单元模拟,厚度分别取 10、20、30、40 mm。材料选用 Q345 钢材,密度 $7\,800\text{ kg/m}^3$;弹性模量 210 GPa;泊松比 0.3;屈服强度 345 MPa。

加固后的冲击力及位移变化见图 10、表 3。

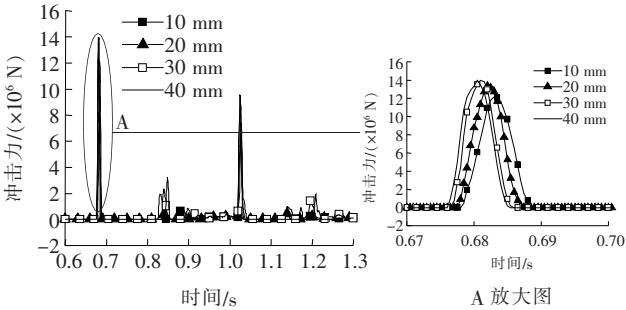


图10 不同厚度外包钢板冲击力时程曲线

由图 10、表 3 可以看出:① 桥墩所受冲击力最大值随着钢板厚度的增加而增大,冲击力在钢板厚度为 40 mm 时达到最大值 13.98×10^6 N,桥墩外包钢板加固后的冲击力最大值比未加固时的冲击力最大值 12.11×10^6 N 增加了 15.44%,主要是外包钢板增加了桥墩的刚度造成的;② 采用钢板加固桥墩后,钢板对桥墩顶部位移的影响十分明显。

桥墩顶部位移随着钢板厚度的增大而减小,外包钢板可以有效地对受含大块石泥石流冲击的桥墩进行防护,降低桥墩横向位移。对于该文桥墩防护,综合考

表 3 外包钢板加固后结果对比

钢板厚度/ mm	冲击力最大值/ ($\times 10^6$ N)	冲击力变化量/ ($\times 10^6$ N)	冲击力变 化率/%	墩顶位移/ mm	位移变化 量/mm	位移变化 率/%
0(未加固)	12.11			17.00		
10	12.18	0.07	0.58	5.90	-11.10	-65.29
20	13.40	1.29	10.65	5.53	-11.47	-67.47
30	13.97	1.86	15.36	5.08	-11.92	-70.12
40	13.98	1.87	15.44	4.78	-12.22	-71.88

考虑冲击力最大值、墩顶位移以及经济性,钢板厚度取 10 mm 时,冲击力增加了 0.58%,位移减少了 65.29%,此时的防护效果较好。

5.2 墩柱外包缓冲层+钢板

目前,最常用的方法就是直接用钢板包裹桥墩来抗大块石的冲击。但工程实践表明:钢板内部的混凝土在受到落石冲击后会严重碎裂,这种方法对落石的缓冲效果较差。泡沫铝材料不仅具有质量小、比强度大、耗能能力强的特点,而且它抗重复冲击荷载的能力也较强,是很好的防碰撞冲击吸能材料。但是泡沫铝的强度较低,在冲击荷载较大时可能发生破坏,而外包泡沫铝+钢板这种防护措施能够在充分发挥泡沫铝优点的同时又能够改善泡沫铝强度低的缺点。因此该文对外包泡沫铝+钢板的桥墩进行了研究。

该文缓冲层采用泡沫铝材料,采用可压碎泡沫材料模型模拟。外层钢板厚度取 10 mm,泡沫铝厚度分别取 10、20、30 cm,其材料参数为:密度 $\rho=300\text{ kg/m}^3$,弹性模量 $E=1.5\text{ GPa}$,泊松比 $\mu=0.05$ 。泡沫铝材料应力—应变曲线如图 11 所示。

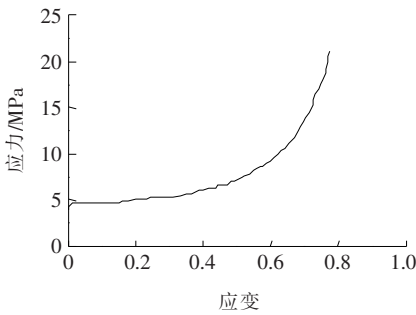


图 11 泡沫铝的应力应变曲线

加固后的冲击力时程曲线及结果分析见图 12、表 4。

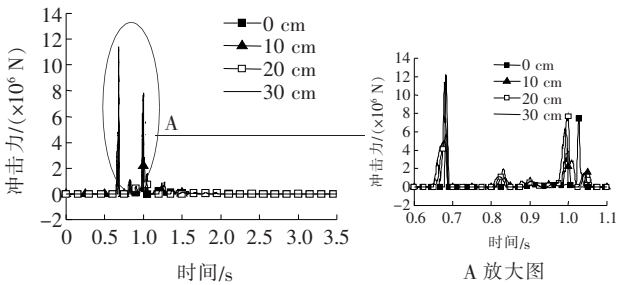


图 12 不同厚度外包泡沫铝冲击力时程曲线

表 4 外包缓冲层+钢板分析结果对比

泡沫铝 厚度/mm	冲击力最大值/ ($\times 10^6$ N)	冲击力变化量/ ($\times 10^6$ N)	冲击力变 化率/%	墩顶位移/ mm	位移变化 量/mm	位移变化 率/%
0(未加固)	12.11			17.00		
10	11.40	-0.71	-5.86	15.32	-1.68	-9.88
20	7.81	-4.30	-35.51	7.00	-10.00	-58.82
30	6.29	-5.82	-48.06	5.98	-11.02	-64.82

由图 12、表 4 可以看出:① 与包钢板的情况不同,桥墩所受冲击力最大值随泡沫铝厚度的增加而减小。这是由于泡沫铝刚度低,对冲击通过自身材料的大变形从而起到了缓冲耗能效果,使得桥墩承受的冲击力变小;② 采用泡沫铝+钢板加固桥墩后,桥墩顶部位

移的变化十分明显。墩顶位移随着泡沫铝厚度的增加而减小,外包泡沫铝+钢板不仅可以降低桥墩所受的冲击力,同时还能降低桥墩横向位移,对含大块石泥石流冲击的桥墩进行有效地防护。

对于该文桥墩防护,泡沫铝厚度取为 20 cm 时,冲

击力减少了 35.51%, 位移减小了 58.82%, 虽然增大泡沫铝厚度还能继续降低冲击力和位移, 但是从经济性方面考虑, 泡沫铝厚度为 20 cm 时的防护效果较好。

6 结论

通过有限元模拟含大块石泥石流冲击荷载下桥墩的动力响应。得出以下结论:

(1) 在泥石流冲击墩柱的过程中, 大块石对墩柱的冲击力峰值约为泥石流浆体的 3.56 倍, 同时, 泥石流浆体对块石的冲击力具有加强作用, 造成泥石流浆体与块石共同作用的冲击力要大于块石单独冲击桥墩所产生的冲击力, 所以有必要考虑泥浆与大块石的耦合作用。

(2) 当对桥墩进行外包钢板加固时, 桥墩所受冲击力最大值随钢板厚度的增加而增大, 墩顶位移随钢板厚度的增加而减小。外包钢板可以有效地对受含大块石泥石流冲击的桥墩进行防护, 降低桥墩横向位移。对该文桥墩防护进行综合考虑, 钢板厚度为 10 mm 时的防护效果较好。

(3) 当对桥墩进行外包泡沫铝+钢板加固时, 桥墩所受冲击力最大值和墩顶位移均随泡沫铝厚度的增加而减小, 外包泡沫铝+钢板不仅可以降低桥墩所受的冲击力, 还能降低桥墩横向位移。对该文桥墩防护进行综合考虑, 泡沫铝厚度为 20 cm 时的防护效果较好。

该文利用已有的 SPH-FEM 耦合数值方法对含大块石泥石流冲击桥墩的动力学行为进行研究, 对于桥墩的防撞设计具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 蔡红刚. 汶川震区泥石流防护工程损毁特征及破坏机制研究[D]. 成都理工大学硕士学位论文, 2012.
- [2] 胡桂胜, 陈宁生, 邓明枫, 等. 甘肃舟曲三眼峪沟泥石流粗大颗粒冲击力特征分析[J]. 地球与环境, 2011(4).
- [3] 吴长奎. 山区滚石对桥墩撞击力和防护措施的研究[D]. 长安大学硕士学位论文, 2013.
- [4] 王强, 何思明, 张俊云. 泥石流防撞墩冲击力理论计算方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2009(4).
- [5] Kwan, J. S. H.. Supplementary Technical Guidance on Design of Rigid Debris-Resisting Barriers. Technical Note No. TN 2/2012. Geotech. Eng. Off (Civil Engineering and Development Department, The HKSAR Government).
- [6] 何思明, 李新坡, 吴永, 等. 考虑弹塑性变形的泥石流大块石冲击力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2007(8).
- [7] 王友彪, 姚昌荣, 刘赛智, 等. 泥石流对桥墩冲击力的试验研究[J]. 岩土力学, 2019(2).
- [8] HU Kai-heng, WEI Fang-qiang, LI Hong. Real-Time Measurement and Preliminary Analysis of Debris-Flow Impact Force at Jiangjia Ravine, China[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36(9): 1 268-1 278.
- [9] CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei, CHEN Ye-ying. Research on Method to Calculate Velocities of Solid Phase and Liquid Phase Debris Flow[J]. Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), 2006, 27(3): 399-408.
- [10] 王强, 何思明, 张俊云. 泥石流防撞墩冲击力理论计算方法[J]. 防灾减灾工程学报, 2009(4).
- [11] 陈剑, 王全才, 陈颖骥, 等. 基于 Hertz 理论的泥石流大块石冲击力修正计算[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017(2).
- [12] Han Z, Chen G, Li Y, et al. Numerical Simulation of Debris-Flow Behavior Incorporating a Dynamic Method for Estimating the Entrainment[J]. Engineering Geology, 2015, 190: 52-64.
- [13] 姚昌荣, 王友彪, 刘赛智. 重力式桥墩在泥石流冲击作用下的响应分析[J]. 桥梁建设, 2017(4).
- [14] 吴永, 何思明, 李新坡, 等. 山区桥墩抗大块石冲击的双腔椭圆偏心包裹结构研究[J]. 工程力学, 2017(10).
- [15] LIU G R, LIU M B. Smoothed Particle Hydrodynamics - A Meshfree Particle Method[M]. New Jersey: World Scientific Publishing Company, 2003.
- [16] Wang W, Chen G, Han Z, et al. 3D Numerical Simulation of Debris-Flow Motion Using SPH Method Incorporating non-Newtonian Fluid Behavior[J]. Nat Hazards, 2016, 81(3): 1 981-1 998.
- [17] Z Dai, Y Huang, H Cheng, et al. SPH Model for Fluid-Structure Interaction and its Application to Debris Flow Impact Estimation[J]. Landslides, 2016, 14(3): 1-12.
- [18] 潘建平, 曾庆筠, 王超众, 等. 尾砂流滑冲击效应数值分析[J]. 中国安全科学学报, 2016(10).
- [19] 柳春, 余志祥, 郭立平, 等. 基于 SPH-FEM 耦合方法的落石冲击拱形钢筋混凝土棚洞数值模拟[J]. 振动与冲击, 2019(13).
- [20] 肖励之. 山区滚石对桥墩的冲击及其防护加固研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2017.