

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.02.021

滚石-桥墩防撞物刚性碰撞精细化分析及设计方法

叶 欣^{1,2}, 熊 文¹, 张娟秀¹

(1. 东南大学 交通学院, 210096 南京; 2. 东南大学 成贤学院, 210088 南京)

摘 要: 为了防止滚石撞击桥墩,按刚性防撞思路提出一种桥墩防滚石撞击的构造措施.首先基于动力学基本原理,建立滚石-桥墩防撞物刚性碰撞耦合精细化动态模型,并在动力学分析中考虑非线性、界面接触以及本构关系,同时对关键计算参数给出建议取值.进而基于所提出的精细化碰撞模型,采用 ANSYS/LS-DYNA 计算模块,数值仿真滚石撞击刚性防撞物的动态全过程,并从能量角度检验该计算方法的数值稳定性.最后,从材料破坏耗能与能量转换效率角度提出桥墩刚性防滚石撞击物的设计准则.计算结果表明,所提出的精细化碰撞计算方法具有良好的可行性与合理性,同时所提出的桥墩刚性防撞物亦达到预期的防撞效果.研究结论可以为今后此类刚性防撞结构设计或建立相关规程提供理论参考.

关键词: 滚石;刚性防撞;非线性有限元;撞击力;设计准则

中图分类号: U442.5+9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2015)02-0117-06

Collision simulation and rigid design between rolling stone and anti-collision structure for bridge piers

YE Xin^{1,2}, XIONG Wen¹, ZHANG Juanxiu¹

(1. School of Transportation, Southeast University, 210096 Nanjing, China; 2. Chengxian College, Southeast University, 210096 Nanjing, China)

Abstract: To avoid the rolling stone hitting on bridge piers, a new anti-collision rigid structure design was proposed. First, a fine simulation methodology for simulating the collision between the rolling stone and anti-collision structure was given using the nonlinearity, contact algorithm, and constitutive relation in the dynamics theory, and the key parameters in this simulation were suggested. Then the entire collision process was analyzed by ANSYS/LS-DYNA program, and the simulation stabilization was verified from the system energy viewpoint. Finally, a design criterion of this anti-collision rigid structure for bridge piers was built in terms of damage-released energy and energy conversion efficiency. Based on the results the proposed simulation methodology shows its good feasibility and rationality and the expected anti-collision effects of such structure are proved.

Keywords: rolling stone; rigid anti-collision; nonlinearity; impact force; design criterion

为防止破坏植被及周边环境并同时减少材料以及重量,山区公路桥梁多采用高墩基础直接跨越山谷.但一旦发生山体滑坡并伴随落石时,桥梁受到滚石冲击破坏的事故就可能发生,严重时甚

至会影响桥梁以及公路的使用寿命以及正常使用功能.例如我国彻底关大桥处便发生过上万立方的土石轰然坠下,其中一块 50 t 的巨石将一桥墩击垮,引发 100 m 长的桥面完全倒塌损毁,见图 1.近年来随山区高速公路桥梁的不断修建,桥梁桥墩的防滚石撞击设计已成为山区桥梁设计时需要重点考虑的环节之一^[1].

事实上,目前文献研究仍主要集中于船-桥之间碰撞或车-桥之间的碰撞分析,针对山区桥梁滚石-桥墩防撞物之间的碰撞动力学分析很少

收稿日期: 2013-12-25.

基金项目: 国家自然科学基金(51208097);

高等学校博士学科点专项科研基金(20120092120058);

江苏省自然科学基金(BK2012343).

作者简介: 叶 欣(1978—),男,博士,讲师.

通信作者: 熊 文,wxiong@seu.edu.cn.

涉及,更没有提出过统一的桥墩防撞设计理念^[1-5]。另外,船撞分析中一般仅仅关注单次撞击的全过程,而滚石-桥墩防撞物的碰撞分析则还必须考虑到滚石二次碰撞的可能性及二次碰撞的运动轨迹与撞击效应。显然相关规范所提供的简单解析解公式由于把动态多次受力的力学过程简化成静态分析,使得撞击力计算结果与实际情况相差甚远^[3-6],计算结果无法在实际设计中使用。事实上,对滚石-桥墩防撞物的精确计算不仅仅为提出有效的防护措施以避免滚石直接撞击桥墩而提供理论支撑,更是为提出桥墩防撞准则提供研究工具。所以,防撞设计中滚石-桥墩防撞物之间的碰撞耦合相互作用的精细化分析显得非常重要。



(a) 现场 1

(b) 现场 2

图 1 落石撞击桥墩

为避免滚石直接撞击桥墩,本文按刚性防撞思路提出一种桥墩防滚石撞击的新型构造措施。首先基于动力学基本原理,建立滚石-桥墩防撞物之间的碰撞耦合精细化动态模型,并考虑几何材料双重非线性以及界面接触,同时对关键计算参数给出建议取值。进而采用 ANSYS/LS-DYNA 计算模块,按所提出的计算理论与模型进行滚石撞击防撞物的动态全过程数值仿真。对该模型动力响应计算结果进行分析,验证结构防撞效果,证明该精细化碰撞计算方法的可行性与合理性,并从能量守恒角度检验该计算方法的数值稳定性。最后,从材料破坏形式与能量转换角度提出桥墩刚性防滚石撞击物的设计准则,为今后此类刚性防撞结构设计或建立相关规程提供理论参考。

1 计算方法

滚石撞击桥墩防撞物是一个非常复杂的几何、材料双重非线性的结构接触动力学问题。具体来说,既要考虑结构撞击动力效应,又要考虑碰撞过程中短暂的接触问题,还要考虑材料进入塑性破坏之后的力学行为。

1.1 碰撞非线性动态方程

通常采用拉格朗日方法建立非线性有限元控制方程来计算碰撞动力学问题,即

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{d}} + \mathbf{K}\mathbf{d} = \mathbf{F}^{\text{ex}}. \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为滚石和桥墩防撞物质量矩阵, $\mathbf{C}$ 为阻

尼矩阵, $\mathbf{K}$ 为刚度矩阵, $\ddot{\mathbf{d}}$ 为加速度向量, $\dot{\mathbf{d}}$ 为速度向量, $\mathbf{d}$ 为位移向量, $\mathbf{F}^{\text{ex}}$ 为外力向量。

在碰撞过程中,整个系统保持质量守恒,动量守恒和能量守恒。随时间变化的撞击力以滚石和桥墩防撞物之间接触力形式输出。为保证计算稳定性,时间步长通常细分为网格中的最短自然周期。每一时刻的时步长由当前构形的稳定性条件控制,下一步长 Δt^{n+1} 取决于当前的最小值,即

$$\Delta t^{n+1} = \alpha \cdot \min \{ \Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_N \}. \quad (2)$$

式中: α 为比例系数; N 为单元数目; Δt 为单元的极限步长,由单元的特征长度和材料特性决定。

1.2 碰撞接触算法

碰撞过程中,用接触来模拟两个相互碰撞的物体。而物体相互之间需要定义一组接触面,该组接触面(两个面)一个称为主面,另一个称为从面,见图 2。接触面能有效地模拟滚石与防撞物之间的相互作用,并建立不可侵入性条件,允许结构之间连续不断地接触和滑动。接触问题的失效形式便是相互作用的接触面发生破坏。

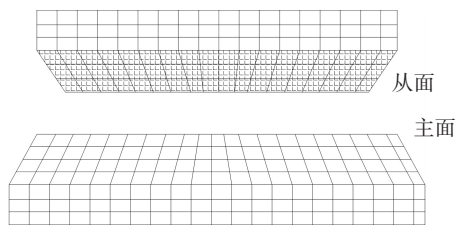


图 2 接触模拟方法

本次分析中采用对称罚函数法进行接触计算处理。在每一个时间步首先检查各从面节点是否穿透主面,如没有穿透不作任何处理。如果穿透,则在该从面节点与被穿透主面间引入一个较大的界面法向接触力,这在物理上相当于在两者之间放置一法向弹簧,以限制从面节点对主面的穿透,法向接触力的大小与穿透深度、主面的刚度成正比,即

$$f_s = lk_i n_i. \quad (3)$$

式中: l 为穿透深度,用来判断是否发生穿透; k 为主单元面刚度因子,与接触单元体模量、面积、长度等有关; n_i 为接触点处主单元面的外法线单位矢量的大小。

在进行网格划分时,网格划分细密,同时单元形状良好,有利于提高计算精度。在主接触面与从接触面的网格划分中,为防止发生主接触面过多贯入从接触面,从接触面上的网格划分稀疏些,而主接触面的网格划分密集些。

1.3 混凝土材料

本文选用弹塑性混凝土硬化断裂本构关系描

述刚性防撞物的混凝土材料,以避免其在碰撞过程中存在硬化效应.不同的塑性硬化断裂本构模型在屈服条件、流动法则、硬化法则等方面均具有不同的假设.而与流动法则相关的 Drucker-Prager 模型可以准确反映有相当量体积的膨胀效应;这一点与试验中混凝土材料接近破坏时所表现出的膨胀效应相一致.具体来说,采用 Colorado 混凝土帽盖材料模型,即在外荷载作用下加一个帽盖,来反映材料的这种非弹性体积反应.该塑性模型通过一个由失效包络面、硬化端帽盖面及拉力切断极限面而组成的失效面来定义^[7].

分析中判断混凝土材料是否破坏主要依据事先给定的混凝土破坏准则.由于目前强度破坏理论并不完善,一般采用强度试验结果作为计算依据.复杂应力状态下混凝土强度需考虑不同应力分量之间的相互影响,可表示为

$$f(\sigma, k_1, k_2, \dots, k_n) = 0. \tag{4}$$

式中: σ 为混凝土的应力状态; $k_1, k_2, \dots, k_n$ 均为反映材料性质的参数,由材料强度试验确定, n 个参数则称为 n 参数破坏准则.

事实上,考虑到混凝土脆断破坏以及混凝土延性流动破坏的特殊条件,本文选用适合于该特点的较简单的单参数混凝土强度准则模型,即最大拉应力强度的破坏准则(Rankine 强度准则).当然还可以采用更为复杂的 HJC 模型(Holomquist, Johnson, Cook 模型)进行混凝土应变损伤、塑性体积应变和破坏计算.

1.4 钢材材料

滚石与钢材构件碰撞时,碰撞区域构件将发生钢材塑性变形为主的弹塑性大变形,显然钢材材料本构关系是关系到碰撞分析准确与否的重要参数.此处采用线性强化弹塑性模型来描述钢材材料特性,其屈服应力为

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{EE_{\text{TAN}}}{E - E_{\text{TAN}}} \varepsilon_{\text{eff}}^p. \tag{5}$$

式中: σ_0 为静屈服应力,本文中取 $\sigma_0 = 235 \text{ MPa}$; $\varepsilon_{\text{eff}}^p$ 为有效塑性应变; E 为弹性模量,本文中取 $E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa}$; E_{TAN} 为硬化模量,本文中取 $E_{\text{TAN}} = 1.18 \times 10^9 \text{ Pa}$.

另外在高速碰撞过程中,需要在材料模型中引入应变率敏感性来反映滚石与钢材碰撞响应过程中低碳钢的塑性性能对应变率的高敏感度.本研究采用 Cowper-Symonds 本构方程来考虑屈服应力与应变率的关系,即

$$\frac{\sigma_0'}{\sigma_0} = 1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}}. \tag{6}$$

式中: σ_0' 为塑性应变率 $\dot{\varepsilon}$ 所对应的动屈服应力; σ_0 为相应的静(初始)屈服应力; C, p 均为应变率参数,可从材料的单轴动态拉伸试验或动态纯剪切试验得到,本文取 $C = 40.4, p = 5$ ^[6].

1.5 滚石材料

本研究暂不考虑滚石材料本身的破坏,即将滚石材料选取为刚性体模型,计算结果可偏安全地检验桥墩防撞物的防撞效果.滚石材料弹性模量 $E = 5 \times 10^{10} \text{ Pa}$; 密度 $\rho = 2\,690 \text{ kg/m}^3$; 泊松比 $\nu = 0.24$.碰撞中滚石(球体)直径取 0.5 m ,碰撞前初始速度偏安全值取 20 m/s ^[6,8-10].

2 刚体碰撞实例分析

2.1 刚性防撞设计

仿照桥墩刚性防船撞的基本设计思路^[2,7-9],采用辅助混凝土结构“硬碰硬”来抵消落石碰撞能量,提出一种新型桥墩刚性防撞无结构设计思路.该桥墩防撞物设计具有以下特点:1)为防止混凝土材料破坏或严重破化,桥墩防撞物采用弧形设计,该弧形设计与山体方向切向连接,能够大幅度缓冲直接碰撞力.2)当落石滚动至桥墩防撞物弧形轨道后,利用动能转化势能的方式进行耗能;同时在弧形轨道上建立阻挡突起结构(挡块条),以该突起结构材料破坏的形式进行进一步耗能.3)当落石行至防撞设施顶部时,为防止滚石越过防撞物而二次碰撞桥墩,顶部设计为型钢护栏结构,利用钢材的柔性变形进行吸能,以确保落石碰撞的能量被防撞物完全吸收,而不会撞击桥墩.4)依靠方便更换/修建的局部构件材料破坏从而释放碰撞能量显然是一种比较经济的防撞设计.总体结构设计见图 3.

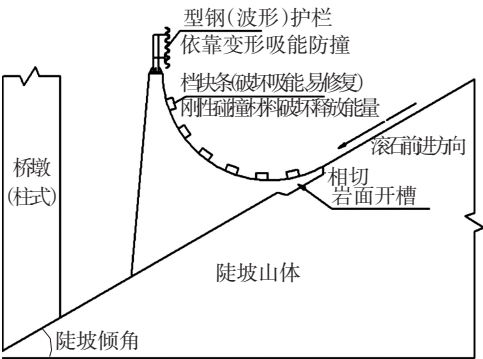


图 3 防撞装置总体布置

2.2 数值仿真模型

本文采用 ANSYS/LS-DYNA 大型有限元软件,按第 1 节所提出的计算理论与材料模型,选择合适的计算模块与单元,建立有限元模型如图 4 所示.其中混凝土结构部分(包括防阻块)采用

SOLID164 单元进行模拟,共建立 59 151 个单元,14 877 个节点.混凝土结构顶部的型钢护栏结构,包括立柱和波形板,均采用壳单元 SHELL163 进行模拟,共建立 9 872 个单元,12 066 个节点.整个计算过程中均考虑几何、材料双重非线性.为计算极限碰撞工况,此处陡坡斜率偏安全地取 45° 倾斜角.在碰撞区域特别对单元划分进行加密以达到计算精细化.同时为提高计算效率,在非碰撞区域将建模的精细程度适当放宽.

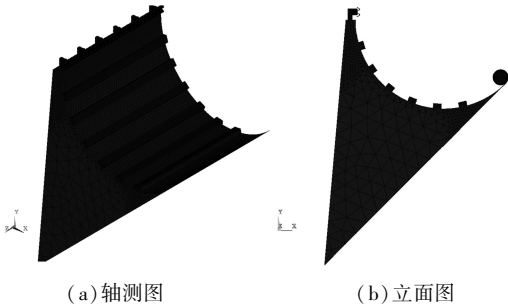


图 4 防撞装置有限元模型

相互接触结构之间的相互作用,包括滚石与弧形结构面、滚石与阻挡突起结构以及滚石与顶部型钢护栏结构之间的相互作用,均通过接触算法来进行数值模拟.通过接触面的设置不仅能有效模拟相撞结构之间的相互作用,并且能够模拟结构之间连续的接触和滑动.本分析采用 ANSYS/LS-DYNA 中自动单面接触 (ASSC) 和自动面-面接触 (ASTS) 分析模块,静、动摩擦系数均偏安全地取 0.1.

滚石模型同样采用 SOLID164 单元,共 5 200 个单元,如图 4(b) 中的球体所示.需要说明的是,本文将滚石作为一个理想圆体,虽然有一定近似,但碰撞分析的计算结果偏保守,有利于防撞设计,同时大大增强了非线性计算的收敛性^[1,6].

2.3 碰撞动力学特性分析

研究桥墩防撞物防撞效果也就是研究其消能效果以及改变滚石滚落路径的能力,主要通过获得滚石-防撞装置之间的瞬态撞击力及撞击全过程中滚石运动速度、加速度等关键动力学参数随撞击时间的变化曲线进行分析.

经过显示动力学计算,滚石以 20 m/s 的撞击前初始速度,沿 45° 坡角滚落并撞击至桥墩防撞物之后的运动轨迹如图 5 所示.滚石顺弧面继续前进,但此时滚动方向已由前方逐渐变至上前方,撞到 1 号挡块后被弹起,继续向上前方作抛物线运动,落下撞到 6 号挡块后顺着弧面向下滚落,然后依次撞到了 5、4、3 和 2 号挡块,并停止运动(本文计算中滚石并未撞击至混凝土结构顶部的型钢

护栏结构).最终滚石未能突破刚性防护装置的防线,即刚性防护装置成功地拦截了滚石,改变了滚石直接撞击桥墩的行进路径,有效地规避了滚石直接撞击桥墩这一灾害发生.此处由于刚性设计的防撞措施足够强大,碰撞对结构材料造成的损失仅仅是局部的,并未考虑碰撞对其二次碰撞处的结构强度或刚度影响.

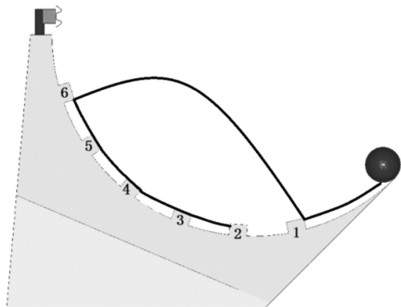


图 5 滚石运动轨迹

图 6 为滚石-桥墩防撞物相互撞击力的时程曲线,显然可以看出图中共出现 5 个撞击力峰值,每个峰值代表与每一个挡块产生撞击作用,这与上述滚石运动轨迹的运动描述完全相对应.从图中可以看出整个撞击过程最大撞击力为 83.65 kN,发生在 $t = 0.06$ s 时,即滚石与 1 号挡块撞击的瞬间.此后滚石沿抛物线弹起,与后续 2~6 号挡块的撞击力均远小于 83.65 kN.这是因为与 1 号挡块撞击之后,滚石的速度急剧减小(见图 7),滚石的动能急剧下降,同时在其上升过程中,动能还在不断转化为重力势能.在发生第 1 次碰撞之后滚石速度量值虽有波动,但已远小于滚石的初始速度 20 m/s.在 $t = 2$ s 时,即与 2 号挡块撞击之后,滚石的速度已接近于 0.最终桥墩防撞物有效降低了滚石的运动速度,达到阻止滚石前进的动力.另外还可以看出,图 6 撞击力 F 时程曲线的每次突变与图 7 滚石速度时程曲线中的每次跳跃变化是一一对应的,满足动量定理.

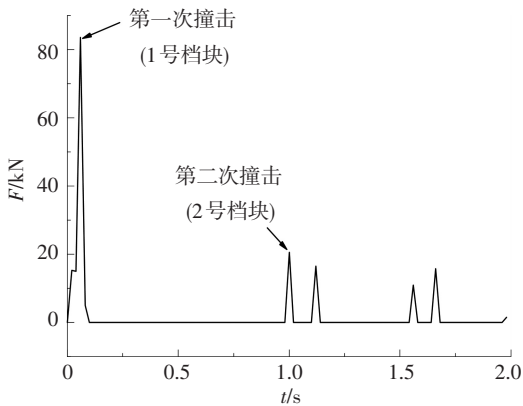


图 6 撞击力时程曲线

图 8 给出了滚石-桥墩防撞物之间相互撞击全过程中滚石的水平位移与竖向位移时程曲线。可以看出水平位移与竖向位移在第 1 次撞击(1 号挡块)之后仍均保持直线上升,直至发生第 2 次撞击(2 号挡块),滚石位移呈现下降趋势,也就是滚石撞击后开始反向回弹,最终停止向前滚动,继续撞击。

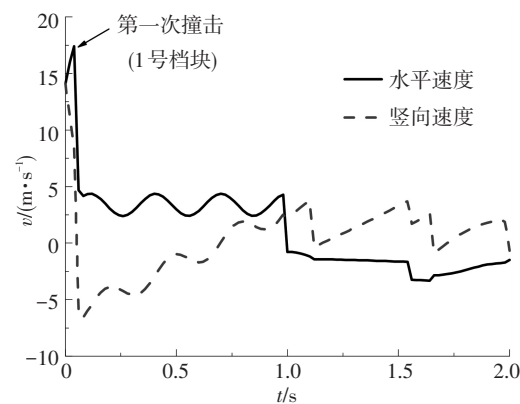


图 7 滚石速度时程曲线

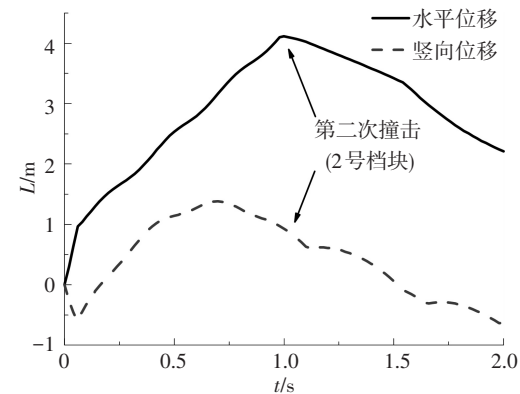


图 8 滚石位移时程曲线

图 9 给出同一时间速度对应的加速度时程曲线。可以清晰看出,与速度发展规律不同,加速度(无论水平方向还是竖直方向)在第 1 次撞击之后便迅速降低并接近零。换句话说,滚石撞击 1 号挡块之后,就立即失去了前进的动力。

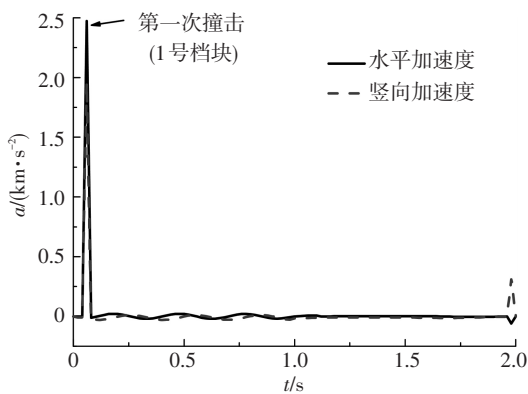


图 9 滚石加速度时程曲线

需要说明的是,图 6 中撞击力是通过碰撞接触面力的积分得到的,图 9 中加速度数值取自滚

石与防撞物碰撞接触面最前端的一个点。

从以上分析中可以看出,本文提出的桥墩防撞物,在偏安全设计的极限状态下,不仅可以使滚石改变直接撞击桥墩的运动路径,而且可以从耗能的角度迅速降低其速度及加速度,最终使其反方向运动并停止,从而达到防止滚石直接撞击桥墩的设计目的。需要说明的是,研究中实际验算了多种撞击角度,包括变化竖向角度、水平向角度以及撞击高度,其中正撞的结构力学响应最大,故由于篇幅所限,文中仅仅给出一种正撞的计算结果。

3 防撞设计准则

本文提出的刚性桥墩防撞物主要通过以下两个角度对滚石进行耗能,以达到防撞目的。

3.1 可修复构造材料破坏耗能

图 10 给出滚石撞击桥墩防撞物全过程,并且可以清晰看出 6 次撞击挡块条时挡块条所发生不同程度的材料破坏,显然以第 1 次滚石撞击 1 号挡块条时材料破坏最严重;而此时恰恰撞击力最大且随后速度(动能)迅速降低并接近 0。也就是说,从桥墩防撞物应力分析结果看,第 1 次撞击依靠混凝土挡块条的材料损伤来达到转化滚石动能至应变能,并最终材料破坏(多为压溃破坏)得以释放能量。所以依靠可方便修复的材料自身破坏耗能是桥墩刚性防撞物的设计准则之一。

3.2 能量转化效率

事实上,在整个碰撞过程中滚石-桥墩防撞物这一大系统就是在以下几种能量之间进行不断的相互转换:1)滚石在碰撞过程中的动能。2)挡块条以及型钢护栏结构的弹塑性变形能,即内能。3)构件之间摩擦引起的热能损失。4)计算中由于沙漏现象损失的能量。其中前两种是主要部分,后两种是次要部分,量值很小。显然在整个碰撞过程中,滚石动能向系统内能转换的效率是桥墩刚性防撞物的另一个重要设计准则,其转换率越高,则该桥墩防撞物性能越优。图 11 给出本文计算中整个系统的动能和内能变化时程曲线。

由图 11 可以看出,最显著的能量转换时刻发生在滚石与 1 号挡块条相撞击的瞬间,之后每次撞击虽有能量转换,但量值均很小。这与前一节中碰撞动力学特性分析所得出的结论也是一致的。这里可参考船撞设计,认为最终动能转化为系统内能的转化率大于 60%^[2,7],即可达到较好的桥墩防撞效果。

另外,在忽略次要因素的情况下,可以发现系统内能和动能之间虽有转换,但两者之和基本保

持不变,符合能量守恒定律.此外,动能在相邻两次撞击之间呈曲线变化,并且前段是下降段,而后段存在微小的上升段.这主要因为重力势能在前

段参与消耗动能(动能转为势能),而后端虽然增加动能(势能转为动能),但是此时速度方向与之前滚石运动方向已经不同甚至相反了.

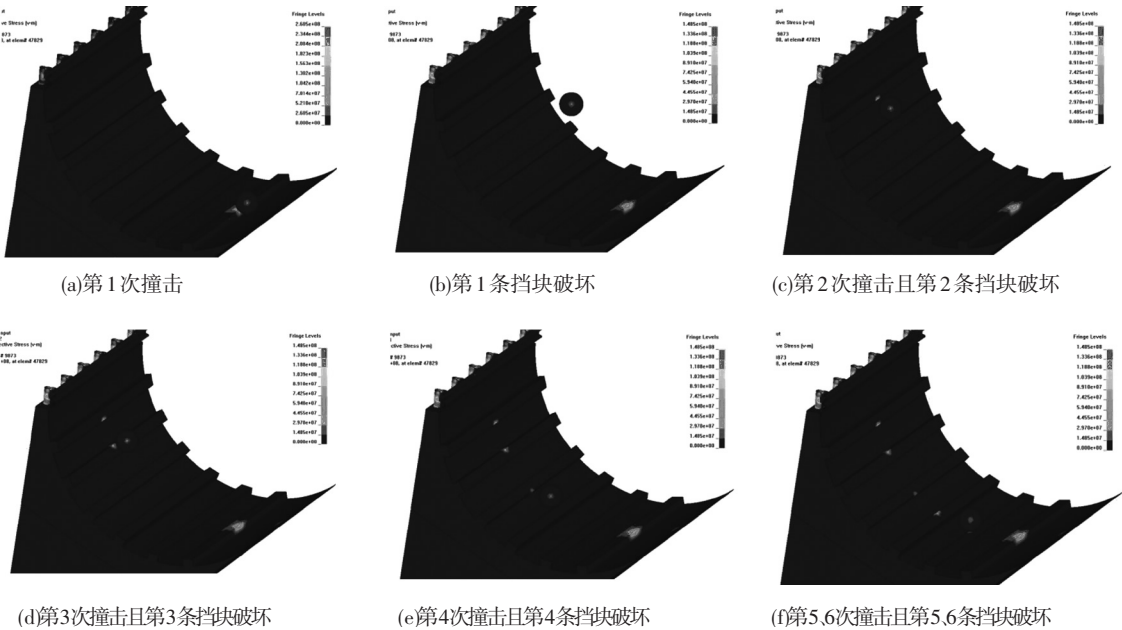


图 10 各时刻桥墩防撞物材料应力云图

3) 针对桥墩刚性防撞物分别提出可修复构造材料破坏耗能以及能量转化效率两个刚性防撞设计准则,以供今后设计参考.

参考文献

[1] 沈均,何思明,吴永. 滚石灾害研究现状及发展趋势[J]. 灾害学, 2008, 23(4): 225-231.

[2] 梁文娟,金允龙,陈高增. 船舶与桥墩撞击碰撞力计算及桥墩防撞[C]//第14届全国桥梁学术会议论文集.上海: 同济大学出版社, 2000: 566-571.

[3] 孙振. 桥梁防撞撞设施的比较研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

[4] JTG D60—2004. 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 中交公路规划设计院, 2004.

[5] JTG D62—2004. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S]. 北京: 中交公路规划设计院, 2004.

[6] 李兴民,韩建明,朱东生,等. 滚石与桥墩碰撞的数值仿真分析[J]. 重庆交通大学学报, 2011, 30(5): 934-937.

[7] 庄茁. 连续体和结构的非线性有限元[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[8] 李升玉,王曙光,刘伟庆. 船舶与桥墩防撞系统碰撞的数值仿真分析[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(5): 100-106.

[9] 罗琳. 船桥碰撞理论及猎德大桥防撞装置的性能研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2008.

[10] 孙波,石少卿,汪敏. 爆炸落石形成过程数值模拟研究[J]. 爆破, 2011, 28(1): 5-9.

(编辑 魏希柱)

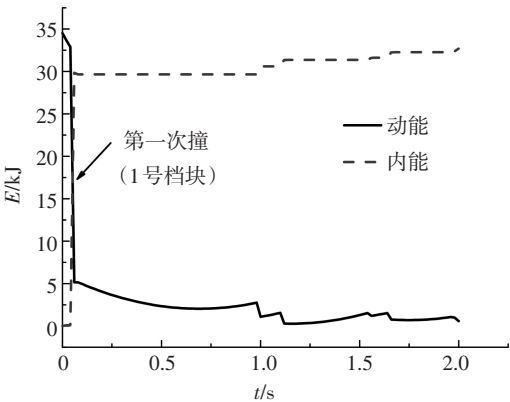


图 11 系统能量时程曲线

4 结 论

1) 基于动力学基本理论,从非线性、接触以及本构关系 3 个角度分别选择合适的计算理论建立滚石-桥墩防撞物之间的碰撞耦合精细化动态模型,并对关键计算参数给出建议取值.同时通过实例设计从冲量定理、能量守恒等角度对计算准确性进行了定性验证.

2) 提出一种桥墩刚性防撞物设计,其中弧形面设计可以改变滚石运动路径,而防撞条以及顶部型钢护栏结构设计可以通过材料破坏或进入塑性变形从而达到消耗滚石动能的作用.通过对所提出的碰撞耦合精细化动态模型的实例分析,以一个偏安全的极限状态证明这一设计思路的合理性与优越性.