DOI:10.14188/j.1671-8844.2024.0270 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-12

滚石冲击荷载作用下进水塔轨道梁动力响应及破坏模式研究

郑建月[1],王高辉[1],陈明[1*],齐智勇[2],薛炳[2],远近[2]

(1. 武汉大学 水资源工程与调度全国重点实验室,湖北武汉 430072; 2. 中国长江电力股份有限公司,湖北武汉 430072)

摘要: 我国西南山区是地震高发区,强震作用下易引发滚石灾害,是影响高坝附属建筑物安全的重要隐患。为了探讨滚石冲击作用下进水塔轨道梁损伤机理,建立了滚石冲击进水塔数值模型并利用滚石冲击试验验证了数值模拟方法的可靠性,对比分析了滚石冲击角度、直径以及速度对轨道梁破坏模式的影响。结果表明:轨道梁受滚石冲击后,破坏形式表现为冲击点被压碎并形成拉裂缝、两端产生剪裂缝、跨中形成弯曲裂缝以及贯穿至支座处的斜剪裂缝;梁内钢筋产生弯曲变形,呈现明显冲切特征。不同冲击角度下滚石冲击作用结束后对轨道梁造成二次破坏的可能性较小;当滚石入射角度小于45°时,入射角越大,反射角越小,滚石入射角度大于45°时,规律相反;冲击角度为60°时,轨道梁损伤最严重。轨道梁的损伤程度与滚石直径、滚石冲击速度呈正相关,当直径为1.0m的滚石的冲击能量大于5749J时,轨道梁会被破坏,影响正常运作。

关键词: 滚石冲击;轨道梁;数值模拟;动力响应;损伤机理

中图分类号: TV335;X43 **文献标志码:** A

Study on dynamic response and failure mode of track beam of intake tower under rockfall impact

Zheng Jianyue[1], Wang Gaohui[1], Chen Ming[1*], Qi Zhiyong[2], Xue Bing[2], Yuan Jin[2]

(1. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 2. China Yangtze Power Co., Ltd, Wuhan, Hubei 430072, China.)

Abstract: The mountainous areas in southwestern China are high-risk areas for earthquakes, and under strong earthquake action, they are prone to rock rolling disasters, which is an important hidden danger affecting the safety of the ancillary buildings of high dams. A numerical model is established to investigate the damage mechanism of the track beam of the intake tower under rockfall impact, and the reliability of this simulation method is verified through impact testing. What's more, the effects of rockfall impact angle, diameter, and velocity on the damage mode of the track beam were compared and analyzed. The results show that after the track beam is impacted by rockfall, the damage form is characterized by crushing at the impact point, forming tensile cracks, generating shear cracks at both ends, forming bending cracks in the midspan, and forming oblique shear cracks penetrating to the support; the reinforcement in the beam undergoes bending deformation,

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 郑建月(2001-),女,硕士生,研究方向为水利工程施工。E-mail: 17359002962@qq.com。

通信作者: 陈明(1978-),男,博士,教授。E-mail: whuchm@whu.edu.cn

基金项目: 国家重点研究发展计划项目(2022YFC3005402);湖北省自然科学基金联合基金项目(2022CFD166)

本文引用格式: 郑建月,王高辉,陈明,等.滚石冲击荷载作用下进水塔轨道梁动力响应及破坏模式研究[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-12.

Citation: Zheng Jianyue, Wang Gaohui, Chen Ming, et al. Study on dynamic response and failure mode of track beam of intake tower under rockfall impact[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-12.

showing obvious punching characteristics. The likelihood of secondary damage to the track beam following impact from a rolling stone at various angles is minimal. When the incident angle of rockfall is less than 45°, the larger the incident angle, the smaller the reflection angle, and when the incident angle is greater than 45°, the opposite rule holds. When the impact angle is 60°, the damage to the track beam is most significant. The degree of damage to the track beam is positively correlated with the diameter and impact velocity of rockfall. When the impact energy of a 1.0m rockfall is greater than 5749J, the track beam will be damaged and fail, affecting the normal operation.

Key words: rockfall impact; rail beam; numerical simulation; dynamic response; damage mechanism

我国高坝主要分布在西南山区,该地区为地震高发带,而强震作用下易引发滚石等次生灾害。由于滚石具有频繁发生、随机性强、破坏性大等特点,是影响高坝附属建筑物安全的重要隐患[1-2]。汶川地震时滚石灾害对以梁、柱、墙结构为主的附属建筑物有较大的破坏,如映秀湾水电站厂区大多数地面建筑物及交通桥被滚石砸毁、太平驿水电站泄洪闸的右支臂被飞石砸至严重变形、沙牌水电站下表机电设备中的桥机被砸掉、厂房左端墙中的砖墙被山石砸出若干孔洞[3-4];泸定地震引发了较多的崩塌碎石及巨石灾害,由滚石造成的人员死亡约占地震次生地质灾害致死总数的53%[5-6]。根据历史地质灾害的相关调查,滚石灾害对大坝等大体积混凝土结构的影响较小,但极有可能会破坏水电站的进水塔、闸门等附属建筑物。水电站进水塔结构中闸门启闭机需要保证闸门能够在动水中关闭、截断水流,因此维持其正常工作的轨道梁起着至关重要的作用。若轨道梁被崩塌滚石冲击损坏,将破坏水电工程的正常运作,且极有可能无法保证水电站大坝和下游人民的安全,因此研究滚石冲击下进水口轨道梁的损伤破坏模式具有重要的工程意义。

大量的学者对滚石冲击荷载下结构的损伤做了较多的研究,但现有的成果中,对于边坡滚石问题的研究多集中在公路、铁路以及桥梁防护方面,如:赵雷等[7]通过数值模拟分析了跨数、冲击位置等条件下落石冲击柔性防护网的力学响应特征,为防护网提供了设计依据;Liu Yang等[8]利用ABAQUS模拟了滚石冲击作用下棚洞的损伤以及能量变化等,对比了滚石不同冲击速度以及入射角度对冲击作用效果的影响;闫帅星等[9]利用LS-DYNA构建滚石冲击棚洞的数值模型,分析了不同冲击位置的棚洞损伤结果;Han Pengfei等[10]分析了滚石冲击作用下棚洞垫层材料的有效性,为棚洞垫层设计提供了参考;Zhao Wuchao等[11]利用LS-DYNA研究了空心钢筋混凝土桥墩在滚石冲击作用下的损伤破坏模式;Tavakoli等[12]针对滚石冲击作用下钢制地埋管的动力响应进行了相关研究,总结了使管道破坏失效的滚石跌落高度;刘占辉等[13]利用LS-DYNA模拟分析了桥梁柔性防护棚洞受落石冲击后的动态响应及破坏模式。

针对梁受冲击后的动力响应问题,目前主要采用落锤冲击试验模拟,研究滚石冲击问题时大多将滚石作为刚体,缺乏考虑滚石自身冲击特性的进水塔轨道梁损伤机理研究成果,如:赵嘉琛等[14]通过理论分析及落锤试验,分析了不同混凝土强度以及冲击能量对混凝土板塑性变形的影响;宋敏等[15]通过落锤冲击试验研究了冲击荷载下钢筋混凝缺口梁的破坏模式,分析了冲击速度以及配筋率的影响;Xuefeng Mei等[16]利用SPH-FEM耦合算法研究了滚石冲击作用下钢筋混凝土板及砂垫层防护结构的动力响应及抗冲击性能,为滚石防护结构设计提供思路;段莉斌、张亚芳[17]通过物理试验与数值模拟结合的方法,研究了落锤冲击下不同CFRP加固方式下损伤梁的动态响应及破坏模式,分析了梁的抗冲击性能;朱德举等[18]探究了落锤冲击能量、混凝土强度以及配筋率对梁破坏模式的影响;杜宇翔等[19]利用落锤冲击试验,探讨了梁上的受力分布以及裂缝扩展形态,分析了落锤冲击质量、速度对钢筋混凝土梁的动力响应及破坏形式的影响。

本文考虑滚石冲击荷载特性,通过建立滚石冲击水电站进水塔的数值模型,利用CDP及JH2本构模型从能量耗散以及结构损伤角度分析了滚石冲击荷载下进水塔轨道梁的结构动力响应与破坏模式,探讨滚石冲击角度、直径以及速度等对进水塔轨道梁的损伤发展过程及破坏模式的影响,为进水塔的安全防护提供参考。

1 混凝土及滚石动力材料本构模型

1.1 混凝土损伤塑性模型

1.1.1 混凝土应力—应变关系

混凝土损伤塑性模型(Concrete Damage Plas-

ticity，CDP）由 Lee 等[20]基于 Lublinear 等[21]提出的模型改进而来。该模型通过引入拉、压损伤因子来描述混凝土材料拉、压性能的差异，可以反映混凝土材料在循环加载和动态荷载作用下的损伤和响应，因此可用于模拟混凝土结构轨道梁的损伤破坏模式。

CDP模型基于连续塑性损伤，假定混凝土材料的破坏主要由拉伸开裂和压缩破坏导致。

当混凝土发生损伤破坏时，通过引入损伤因子来描述混凝土材料的刚度退化。假定某时刻t非线性变量$\{\varepsilon^e,\varepsilon^p,\kappa\}$已知，则损伤后混凝土的应力应变关系为：

$$\sigma=(1-d(\kappa))\bar{\sigma}=(1-d(\kappa))E_0(\varepsilon-\varepsilon^{pl}) \quad (1)$$

式中，$\bar{\sigma}$为有效应力；d为刚度退化因子（$0<d<1$），当$d=0$时，材料未发生损伤；当$d=1$时，材料完全破坏。该损伤模型可考虑混凝土材料拉伸开裂和压缩破坏的失效机制，因此引入拉、压损伤变量$\kappa=\{\kappa_t,\kappa_c\}$来考虑材料弹性刚度退化，$d_t$表示拉伸损伤因子，$d_c$表示压缩损伤因子。

则混凝土在在单轴拉伸和压缩荷载下的应力应变关系表达式为：

$$\sigma_t=(1-d_t)E_0(\varepsilon_t-\varepsilon_t^{pl}) \quad (2)$$

$$\sigma_c=(1-d_c)E_0(\varepsilon_c-\varepsilon_c^{pl}) \quad (3)$$

1.1.2 混凝土应变率效应

目前主要采用动态强度放大因子（*DIF*）来描述混凝土材料在高应变率情况下强度的增强。CDP本构模型中，单轴抗压强度的动态放大系数*CDIF*公式为：

$$CDIF=\begin{cases}(\dot{\varepsilon}_c/\dot{\varepsilon}_c)^{1.026\alpha_s}\geqslant 1,\dot{\varepsilon}_c\leqslant 30s^{-1}\\ \gamma_s(\dot{\varepsilon}_c/\dot{\varepsilon}_c)^{1/3},\dot{\varepsilon}_c>30s^{-1}\end{cases} \quad (4)$$

式中，$\dot{\varepsilon}_c$为混凝土材料的压应变率，取值区间为$3.0\times10^{-5}\sim300s^{-1}$；$\dot{\varepsilon}_{c0}$为准静态情况下混凝土的压应变率，$\dot{\varepsilon}_{c0}=3.0\times10^{-5}s^{-1}$；$\alpha_s=1/(5+9f_c/f_{c0})$，其中$f_c$为混凝土静态抗压强度，$f_{c0}$取10MPa；$\log(\gamma_s)=6.15\alpha_s-2$。

单轴抗拉强度的动态放大系数*TDIF*为：

$$TDIF=\begin{cases}(\dot{\varepsilon}_t/\dot{\varepsilon}_{t0})^{\delta_s}\geqslant 1,\dot{\varepsilon}_t\leqslant 1s^{-1}\\ \beta(\dot{\varepsilon}_t/\dot{\varepsilon}_{t0})^{1/3},\dot{\varepsilon}_t>1s^{-1}\end{cases} \quad (5)$$

式中，$\dot{\varepsilon}_t$为混凝土材料的拉应变率，取值区间为$1.0\times10^{-6}\sim160s^{-1}$；$\dot{\varepsilon}_{t0}$为准静态情况下混凝土的拉应变率，$\dot{\varepsilon}_{t0}=1.0\times10^{-6}s^{-1}$；$\delta_s=1/(1+8f_c/f_{c0})$；$\log(\beta_s)=6\ \ _s-2$。

1.2 JH2本构模型

JH2本构模型在JH本构模型的基础上，引入了弹性极限HEL，更适用于表征材料的冲击爆破，使材料具备在承受应力时逐渐软化，产生塑性应变，具有损伤积累的能力，还考虑了压力敏感和应变率效应等问题[22]。JH2本构模型在岩石损伤研究中得到了广泛应用，因此可采用JH2来模拟滚石的材料本构，可反应滚石冲击过程中的损伤和响应。

1.2.1 强度模型

JH2的强度模型与应变率及损伤因子D有关，强度的等效应力在HEL处的标准表达式为：

$$\sigma^*=\sigma_i^*-D(\sigma_i^*-\sigma_f^*) \quad (6)$$

式中：σ^*为真实等效应力，σ_i^*为标准完整等效应力；σ_f^*为标准断裂等效应力；D为损伤因子，$0\leqslant D\leqslant1$。

1.2.2 状态方程

状态方程描述了材料体积应变μ与静水压力P之间的关系，表示材料在高压下的非线性变形特征。当材料开始产生损伤时，引入修正量ΔP，状态方程表达式如下：

$$P=\begin{cases}K_1\mu+K_2\mu^2+K_3\mu^3,D=0\\ K_1\mu+K_2\mu^2+K_3\mu^3+\Delta p,0<D\leqslant1\end{cases} \quad (7)$$

式中，$\mu=\rho/\rho_0-1$，ρ是当前密度，ρ_0为初始密度；K_1——材料体积模量，K_2、K_3——材料常数。

1.2.3 损伤模型

JH2本构模型中的损伤模型描述了材料从初始状态到破坏状态的过渡阶段，与Johnson-Cook的损伤模型相同，损伤变量D可按下式计算：

$$D=\sum\frac{\Delta\varepsilon^f}{\varepsilon_p^f} \quad (8)$$

式中，$\Delta\varepsilon^f$——一个计算步内有效塑性应变积分；ε_p^f——压力f作用下材料的破碎塑性应变。

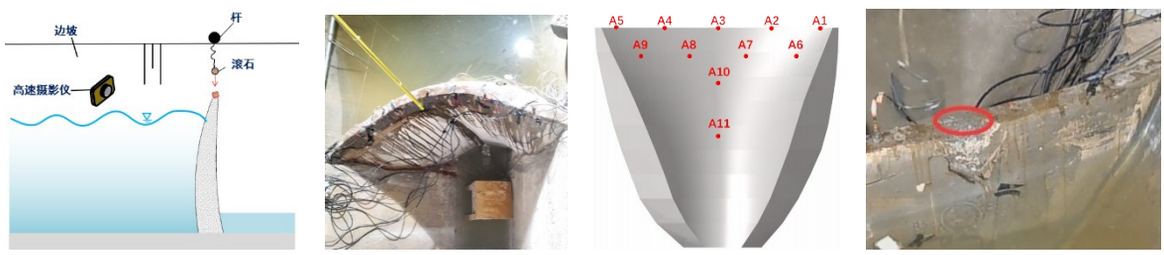
2 滚石冲击进水塔轨道梁的动力响应

2.1 滚石冲击模型试验及数值计算方法验证

采用物理模型试验验证上述理论方法模拟滚石冲击的可行性，但是根据现场试验条件，进水口轨道梁模型浇筑时需要考虑到轨道梁内部钢筋布置、轨道梁边界条件设置等问题，难以与数值模型完全对应。本文参考滚石冲击双曲拱坝的试验，来证明滚石冲击数值模拟方法的可靠性。

模型试验的几何缩尺为1:200，模型试验拱坝高度为135 cm，坝顶宽度6 cm，坝基混凝土厚度为

25 cm,混凝土均采用C30等级,现场测量混凝土弹性模量为31 GPa。在坝体附近边坡上固定一根长杆,长杆横跨河道,方形混凝土试块模拟滚石,利用吊绳将滚石试块悬挂在长杆上,将滚石提起一定高度后使其自由下落冲击坝体,实验装置及加速度传感器等仪器布置如图1(a)、(b)所示。根据现场试验结果,当边长7 cm的滚石试件冲击坝顶时,冲击部位的混凝土有少量飞溅,但未造成结构裂缝,坝顶损伤较小,图1(c)为7 cm滚石从0.7 m自由下落冲击坝顶时的损伤破坏模式。

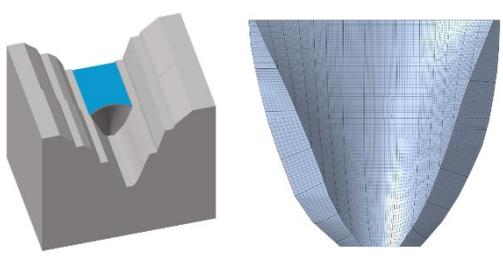


(a)实验装置示意图 (b)加速度仪器布置示意图 (c)滚石冲击作用下坝体损伤图

图1 滚石冲击拱坝现场试验示意图

Fig.1 Schemram of field test of rockfall impact arch dam

根据物理试验模型建立库坝系统耦合有限元模型,如图2(a)所示。坝体在滚石冲击作用下可能会产生细小的裂纹损伤,因此对坝体进行网格划分时控制网格边长为1 cm,网格划分如图2(b)所示,滚石试件网格尺寸与坝体网格尺寸相匹配,也控制为1 cm。利用ABAQUS有限元计算软件计算滚石冲击拱坝坝顶的损伤破坏模式,其中坝体密度为2500kg/m^3,弹性模量为31 GPa,泊松比为0.167;地基密度为2400 kg/ m^3,弹性模量为9 GPa,泊松比为0.2;上游库水密度为1000 kg/ m^3,体积模量为2.04 GPa,滚石下落高度为0.7 m时,根据自由落体公式计算冲击速度为3.74 m/s。

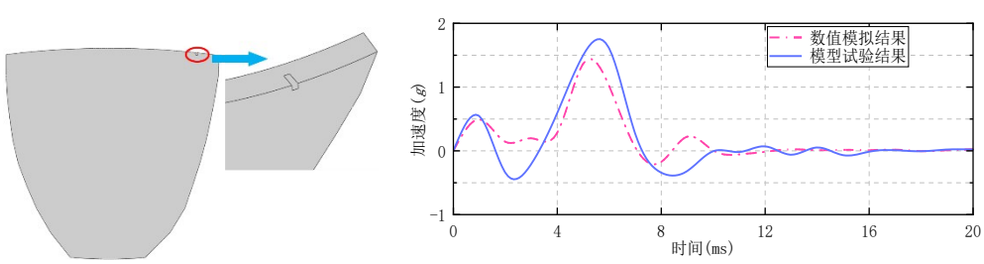


(a)库坝系统耦合有限元模型 (b)拱坝模型网格划分

图2 数值模拟滚石冲击坝体示意图

Fig.2 Schematic diagram of the numerical simulated rockfall impact dam body

数值模拟计算得到的坝体损伤结果及结果如图3(a)所示;以A3测点为例,现场试验及数值模拟滚石冲击坝体后坝体的加速度时程曲线对比图如图3(b)所示。根据对比结果可知,本文采用的数值模拟计算方法得到的坝体损伤及动力响应结果与试验结果基本一致,误差平均为14.5%,在可接受范围内,验证了数值模拟计算方法的可行性、可靠性,可用于模拟计算滚石冲击作用下的结构损伤破坏模式。



(a)滚石冲击拱坝坝顶损伤示意图 (b)现场试验及数值计算A3测点的加速度时程曲线对比图

图3 滚石冲击拱坝数值模拟结果与试验结果对比

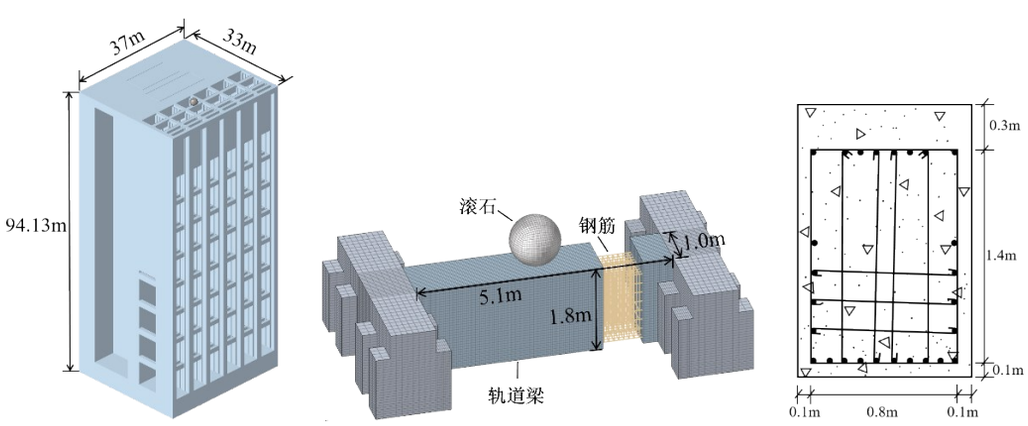
Fig.3 Comparison of numerical simulation results and test results of rockfall impacting arch dam

2.2 滚石冲击进水口轨道梁三维有限元模型

根据某水电站地质条件，进水塔附近有成分主要为灰岩及白云岩的堆积体，大小 10 cm ~ 100 cm 不等，自然状态下整体稳定，但局部可能出现少量垮落。进水塔附近的边坡的倾角 73° ~ 84°，单级坡高 10 m ~ 15 m，则滚石从单级边坡自由掉落时速度约为 15 m/s。滚石的形状可以分为球形、方形、长条形和薄片形[23-24]，其中最常见的为球形滚石。因此，以直径为 1.0 m、速度为 15 m/s 的滚石以 75°冲击轨道梁为例，分析滚石及梁结构的损伤机制。

采用有限元分析软件 ABAQUS 建立了滚石冲击进水塔顶部轨道梁的有限元模型。由于进水塔是对称结构，为简化计算，截取其具有代表性的一段进行数值模拟，长 37 m、宽 33 m、高 94.12 m，如图 4(a)所示。受冲击的轨道梁段长 5.1m、宽 1m、高 1.8m；轨道梁中按照工程图纸配置钢筋，纵筋直径均为 32 mm；箍筋间距为 0.1 m，直径为 12 mm，顶部保护层厚度为 0.3m，底部以及侧边保护层厚度为 0.1 cm，如图 4(b)、(c)所示。进水塔混凝土结构及滚石采用 C3D8R 线性减缩积分单元，钢筋采用 T3D2 单元。为减少计算工作量，远离滚石冲击部位的进水塔结构网格尺寸较大，但为保证数值分析模型具有足够的精度，对滚石冲击部位的梁结构局部加密，进行网格划分时控制网格边长不超过 4 cm，局部的网格划分如图 4(b)所示，滚石的网格尺寸与轨道梁网格尺寸相匹配，也控制为 4 cm；经统计滚石冲击进水塔轨道梁数值模型共 1625993 个单元。

进水塔混凝土结构采用 CDP 本构模型，混凝土强度为 C30，密度为 2400 kg/m^3，弹性模量为 33.4 GPa，泊松比为 0.167，考虑应变率；滚石采用 JH2 本构模型，密度为 2440 kg/m^3，剪切模量为 1.49 GPa，HEL＝80 GPa；钢筋采用理想弹塑性模型，密度为 7850 kg/m^3，泊松比为 0.32。整体模型设置通用接触，滚石与进水塔轨道梁法向方向设置硬接触，钢筋与混凝土之间采用嵌入接触，关于接触的理论详见相关文献[25]。关于轨道梁损伤失效的问题，本文利用关键字“*concrete failure”控制进水塔轨道梁的单元删除，当轨道梁混凝土的拉伸应变达到 0.01、压缩应变达到 0.1 时，单元将失效被删除，即认为轨道梁被破坏。



(a)整体结构图 (b)局部结构图 (c)轨道梁配筋图

图 4 滚石冲击进水塔模型示意图

Fig.4 Schematic diagram of rockfall impacting the intake tower model

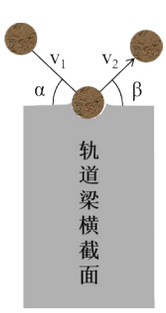


图 5 滚石冲击条件示意图

Fig.5 Schematic diagram of rockfall impacting conditions

如图 5 所示，滚石的冲击角度 α 为滚石入射速度 v_1 与水平方向的夹角，β 为滚石冲击结束后速度 v_2 与水平方向的夹角，α＝90°时即为滚石沿竖直方向冲击。此外，本文不考虑滚石从边坡掉落的运动轨迹，只分析滚石冲击轨道梁后动力响应问题，因此设置滚石与轨道梁直接接触。

2.3 滚石及轨道梁的动力响应

2.3.1 *滚石动力响应过程*

图 6 为滚石冲击轨道梁后的运动轨迹变化，可

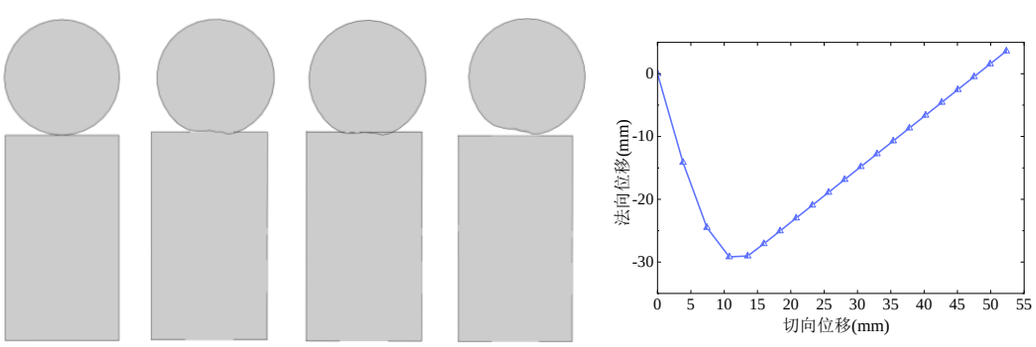
知滚石对轨道梁的冲击作用时间较短,约4 ms后滚石动能及速度不再发生变化;冲击作用过程中滚石与梁接触的区域被压缩并产生少量破碎;滚石的法向冲击深度为29 mm,最大压入深度发生在4 ms左右;经计算得,当滚石以75°入射角冲击轨道梁结束后,反射角度为40.24°,且法向速度发生改变,对轨道梁造成二次破坏的可能较小。

图7为滚石的能量及速度变化曲线,在4ms内滚石的塑性耗散能从0迅速增加至最大值107 kJ、动能迅速减小,法向速度有所回弹,由-14.5 m/s(负号表示速度方向)变为2.04 m/s,切向速度无明显减小,表明此种工况下滚石主要在轨道梁的法向上做功,切向做功较小。

此外,本文考虑了滚石的冲击荷载特性,与刚体冲击特征不同的是刚体冲击后自身不会产生损伤,而从图7(a)可以看出,滚石冲击轨道梁后自身的能量主要由动能转化为了塑性耗散能,表明滚石与轨道梁发生碰撞后自身也产生了塑性变形。

2.3.2 轨道梁受滚石冲击后的动力响应及损伤机制

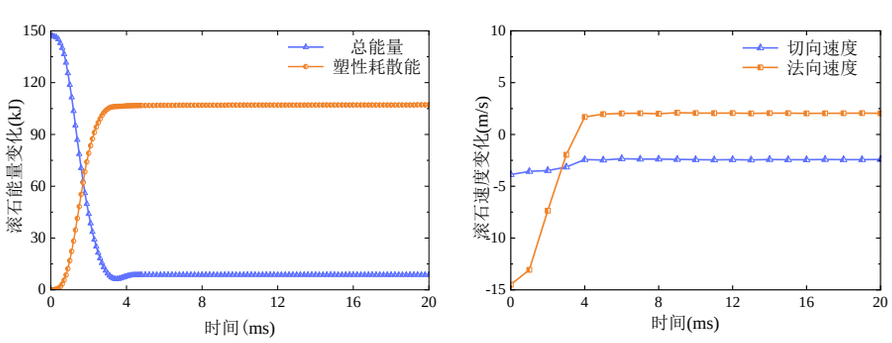
图8、9为轨道梁受冲击后的拉、压损伤破坏云图,轨道梁受滚石冲击后的动力响应主要分为三个阶段:弹性破坏阶段,由于在初始冲击阶段,施加在钢筋混凝土梁上的冲击载荷主要由钢筋混凝土梁的惯性力平衡,轨道梁塑性变形较小,未产生结构裂缝,主要为弹性破坏。塑性损伤变形阶段,梁结构损伤快速发展,此阶段梁的损伤机制为:首先冲击点处的混凝土被压碎,形成破碎坑;随后梁的下部跨中拉应力超过梁的承载极限,产生一条弯曲拉裂缝,并逐渐扩展至梁上部与滚石接触的受压区域;随着冲击时间继续延长,梁上竖直向的弯曲裂缝逐渐增多、裂缝宽度逐渐变大;同时,梁的两端顶部位置超过承载极限产生剪裂缝,在距滚石接触中心点0.2 m左右的圆周区域产生了拉破坏,并产生了由冲击点向支座延伸的拉裂缝;最后轨道梁发生剪切破坏,产生两条由冲击点边缘贯穿至支座处的斜剪裂缝。损伤失效阶段,梁上裂缝宽度逐渐增大,但损伤机制无明显改变;钢筋开始产生变形,滚



(a)0 ms (b)5 ms (c)10 ms (d)20 ms (e)滚石运动轨迹变化

图6 滚石的运动轨迹

Fig. 6 The motion trajectory of the rockfall

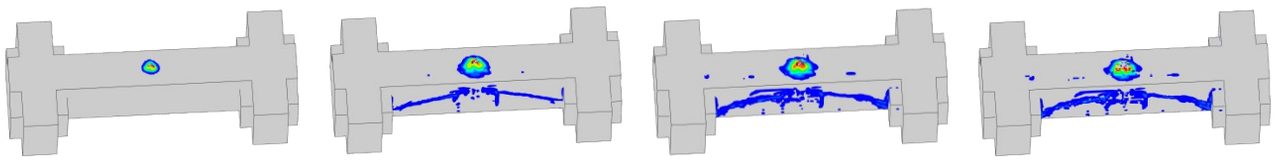


(a)滚石能量变化曲线 (b)滚石速度变化曲线

图7 滚石的能量及速度变化

Fig. 7 Kinetic energy and displacement variation diagram of the rockfall

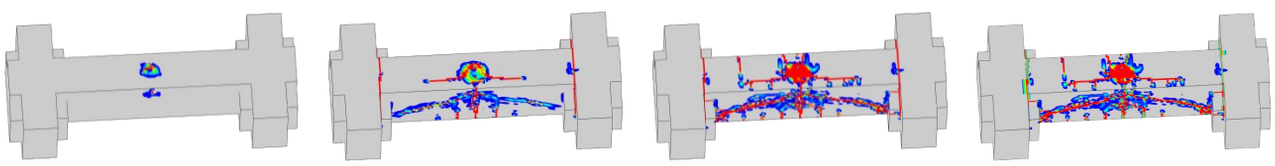
石冲击处附近的纵筋、箍筋开始弯曲，最大主应力241 MPa，如图10所示。12 ms后，在跨中和支座之间的钢筋混凝土梁顶部出现少量细小的垂直裂缝；梁的压缩及拉伸损伤范围几乎不再发生变化，塑性耗散能曲线趋于平缓，可认为12 ms之后轨道梁的动力响应结束。



(a)1 ms (b)4 ms (c)12 ms (d)20 ms

图8 轨道梁受冲击后混凝土压损伤云图

Fig. 8 Cloud map of concrete compression damage to track beams after impact



(a)1 ms (b)4 ms (c)12 ms (d)20 ms

图9 轨道梁受冲击后混凝土拉损伤云图

Fig. 9 Cloud map of concrete tensile damage after impact on track beams

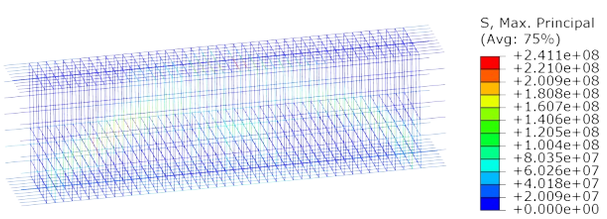


图10 钢筋最大主应力包络图

Fig. 10 Maximum stress envelope diagram of the reinforcement

根据上述分析，轨道梁受滚石冲击后产生的损伤破坏形式主要表现为：滚石冲击点附近的压破碎、梁向下弯曲并在跨中产生竖直向的弯曲裂缝、梁上产生由两端延伸至冲击点附近的弯剪斜裂缝以及梁两端的剪切裂缝，损伤机理可用图11描述。

3 不同滚石冲击荷载作用下进水塔轨道梁破坏模式

为探讨不同因素下进水塔轨道梁受冲击后的破坏模式，参考滚石冲击荷载计算公式[26]及进水塔所在地区的地质条件以及钢筋混凝土梁的特性，采用第2.2节建立的数值模型分析了冲击角度、滚石直径以及冲击速度对轨道梁破坏模式的影响。

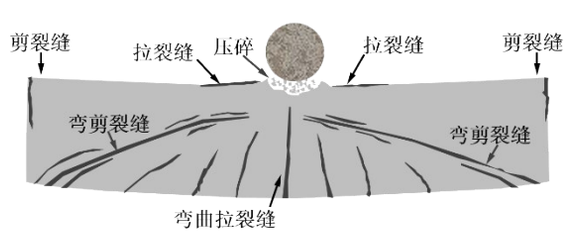


图11 轨道梁的损伤机理

Fig. 11 Injury mechanism of the track beam

3.1 滚石冲击角度对轨道梁破坏模式的影响

对比了冲击角度分别为15°、30°、45°、60°、75°、90°时，1.0m滚石以15m/s速度冲击轨道梁的损伤破坏模式，如图12所示。当滚石冲击能量一定、冲击角度变化时，梁的破坏模式与2.3.2节描述的大致相同。当滚石冲击角度较小时，切向速度较大法向速度较小，滚石在法向侵入深度以及切向做功都较小；而滚石冲击角度大于45°后，由于滚石法向侵入深度相对增加，切向做功也相应增大，在滚石的冲切作用下轨道梁临空面上的裂缝更多，宽度更大；但滚石冲击角度进一步增大时，切向速度较小，滚石主要在法向做功。根据计算结果，滚石冲击角度分别为15°、30°、45°、60°、75°、90°时，冲击作用结束后相应的轨道梁单元删除总数分别为1951、4894、6610、8450、5647、5271。可知，当滚石冲击角度为60°时，轨道梁有最大塑性耗散能27.04kJ，轨道梁的损伤相较于其他工况更为严重。

图13为滚石从不同角度冲击轨道梁时的速度

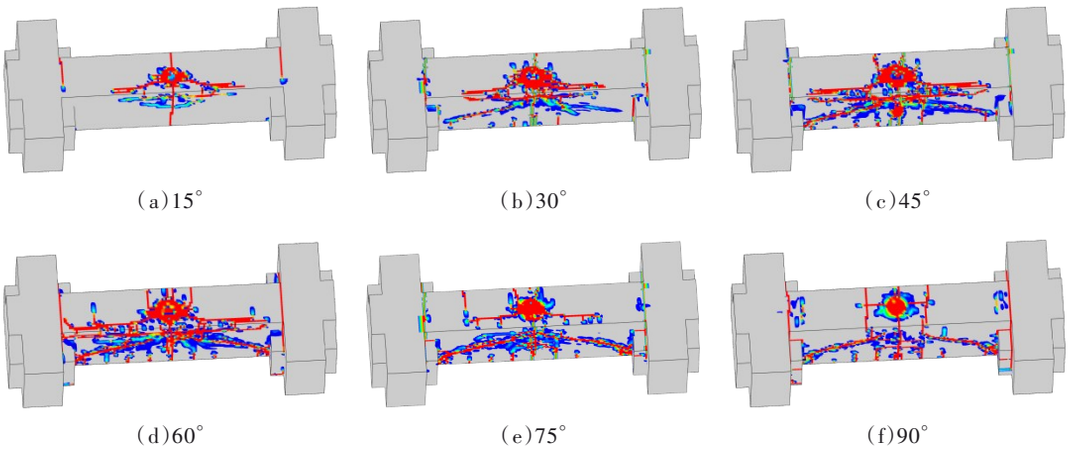
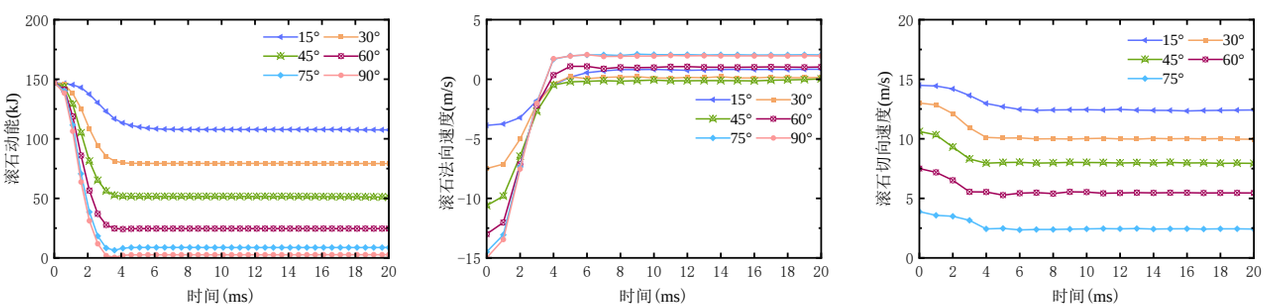


图 12 滚石从不同角度冲击轨道梁的损伤图

Fig.12 Damage diagram of rockfall impacting track beams from different angles

及动能变化,可知滚石冲击作用时间在4 ms左右;滚石的入射角度越大,滚石动能损失越快,冲击结束后滚石的动能越小。这主是因为冲击角度小时,滚石的切向速度较大,但冲击作用过程中滚石法向侵入深度较小、切向摩擦耗散少,因此动能损失也相对较小。



(a)滚石动能变化 (b)滚石法向速度变化 (c)滚石切向速度变化

图 13 不同冲击角度冲击轨道梁时滚石动能及速度变化

Fig.13 Changes in kinetic energy and speed of rockfall when impacting the track beam at different impact angles

表1为冲击作用过程结束后的滚石速度及运动角度,可知滚石冲击结束后的运动角度较小或者冲击速度较小,因此可认为滚石冲击作用结束后对轨道梁造成二次破坏的可能性较小。此外,当入射角度小于45°时,滚石切向速度较大,冲击轨道梁时会产生滚动摩擦力,这会影响滚石的接触应力及其本身的位移变形等,且滚石冲击角度越小切向速度越大、斜碰撞过程中产生的切向摩擦越显著,不能用简单的碰撞定律分析,因此会出现α越大、β越小的现象;而当入射角度大于45°时,切向速度减小,可按照碰撞定律分析滚石角度变化,α越大,β越大。

表 1 滚石冲击梁前后的角度变化统计表

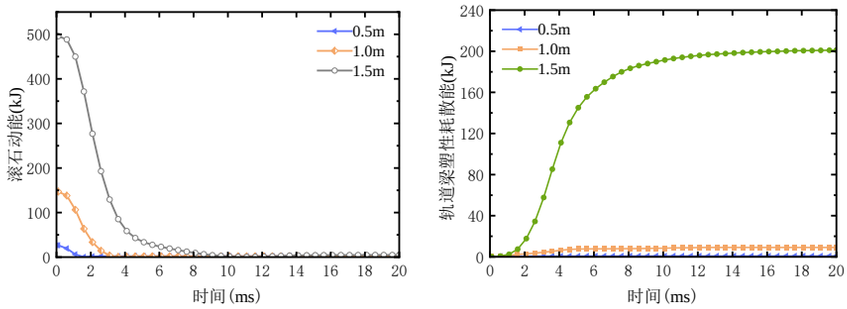
Tab.1 Statistics of Angle change before and after the rockfall impact beam

冲击前角度α	15°	30°	45°	60°	75°	90°
冲击后法向速度(m/s)	0.83	0.21	0.02	1.03	2.30	1.97
冲击后切向速度(m/s)	12.42	9.95	7.93	5.44	2.03	0
冲击后角度β	3.92°	1.22°	0.18°	10.68°	48.62°	90°

3.2 滚石直径对轨道梁破坏模式的影响

分析总结了直径分别为0.5 m、1.0 m、1.5 m三种的滚石以15 m/s的速度从75°方向冲击梁跨中位置时轨道梁的破坏模式。图14表明滚石直径越大,滚石动能降低的速度越快,滚石冲击作用时间越长:0.5 m滚石冲击时间约为2 ms、1.0 m滚石冲击时间约为4 ms、1.5 m滚石冲击时间约为8 ms;滚石直径越大,轨道梁的塑性耗散能越大,趋于稳定所需时间也越长,即轨道梁的动力响应时间越长。

分析图15可知,滚石直径越大,冲击作用下滚石的破碎程度越小。同时,滚石直径对轨道梁的破



(a)滚石动能时程变化曲线 (b)轨道梁塑性耗散能时程变化曲线

图 14 滚石以不同速度冲击轨道梁时能量变化

Fig.14 Energy change diagram when rockfall impacts the track beam at different speeds

坏模式影响较大：0.5 m滚石冲击时，此时滚石的冲量为轨道梁上冲击点附近被压碎，产生较短的拉剪裂缝。1.0 m撞击时裂缝增多，裂缝长度、宽度都有所增加，并且出现了弯剪斜裂缝。当滚石直径继续增大至1.5 m时，此时轨道梁的损伤最为严重，冲击点附近大面积混凝土失效，弯剪斜裂缝大幅增多，且几乎延伸至轨道梁的顶部区域。本文还对滚石冲击作用结束后轨道梁单元数目进行了统计，发现轨道梁在0.5m、1.0 m、1.5 m三种直径的滚石冲击作用下删除单元数分别为27、5647、6119，进一步说明滚石直径越大，进水口轨道梁损伤越严重。

3.3 滚石速度对轨道梁破坏模式的影响

由2.3.2节可知，滚石速度为15 m/s时，轨道梁已经产生了较大的损伤，本节主要为了研究不同冲击速度下轨道梁的损伤机理，继续增加滚石速度轨道梁的破坏模式没有较大的改变，因此本节研究了15 m/s以下的冲击速度。图16给出了不同冲击速度下的轨道梁损伤图，滚石冲击速度小于3 m/s时，轨道梁无明显损伤，且由于滚石速度较小，滚石本身几乎没有破碎，只在接触点附近有少量剥落；当滚石冲击速度大于3m/s即冲击能量大于5749J时，轨道梁即会产生明显损伤，但由于滚石冲击速度相对较小，轨道梁只有冲击点附近区域有损伤，主要为冲击位置压碎、跨中的拉裂缝，如图16(a)，其中轨道梁单元删除总数为18；当滚石速度进一步增大时，梁上拉裂缝、剪裂缝逐渐增多且裂缝逐渐变长；滚石速度继续增大时，梁上会产生从冲击点贯穿至支座两端的弯剪斜裂缝。图17为滚石以3、5、10、15 m/s四种不同速度冲击轨道梁时的动能变化，可知对于直径为1.0 m的滚石，初始速度越大，动能减小得越快，滚石冲击作用结束后的动能较大，滚石自身的变形损伤区域也越大。

4 结论

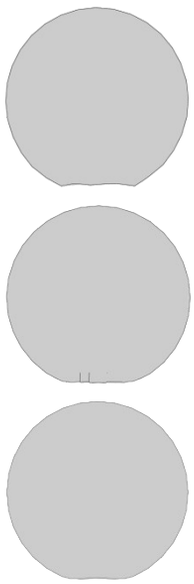
为了探讨滚石冲击作用下进水塔轨道梁的动力响应和损伤破坏模式，利用ABAQUS数值软件建立了滚石冲击进水塔数值模型，通过物理试验验证了数值计算方法的可靠性，研究了滚石冲击轨道梁后的运动轨迹变化，探讨了滚石冲击作用下进水塔轨道梁的损伤发展过程及破坏模式，对比分析了滚石直径、冲击速度以及冲击角度等因素对轨道梁损伤破坏模式的影响。结果表明：

(1)滚石冲击轨道梁后，法向速度迅速减小且方向发生改变，切向速度变化较小；轨道梁受滚石冲击后主要经历了三个阶段，即弹性变形阶段、塑性损伤变形阶段以及损伤失效阶段。轨道梁的损伤机制为：与滚石接触区域被压碎形成冲坑，梁跨上形成弯曲裂缝、剪裂缝以及由冲击点边缘贯穿至支座处的斜剪裂缝，轨道梁内钢筋产生弯曲变形，呈现明显冲切特征。

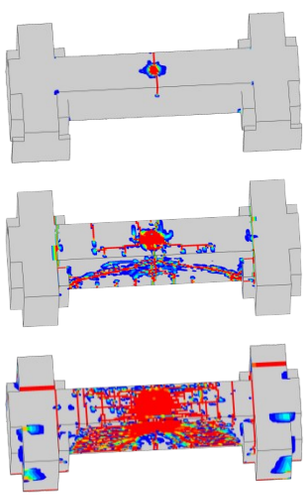
(2)对比了直径1.0m的滚石从不同的冲击角度冲击时，轨道梁的损伤破坏模式，研究发现不同冲击角度下滚石冲击轨道梁结束后对轨道梁造成二次破坏的可能性较小；当滚石入射角度小于45°时，入射角越大，反射角越小，滚石入射角度大于45°时，规律相反；当冲击角度为60°时，轨道梁单元共删除8450个，塑性耗散能为27.04kJ，损伤最严重。

(3)轨道梁的损伤程度与滚石直径、滚石冲击速度呈正相关。相同速度下，滚石直径越大，轨道梁损伤破坏越严重，滚石自身损伤也较大；直径为1.0m的滚石，冲击速度大于3m/s即冲击能量大于5749J时，轨道梁即会被破坏失效，影响进水塔正常运作。

参考文献：



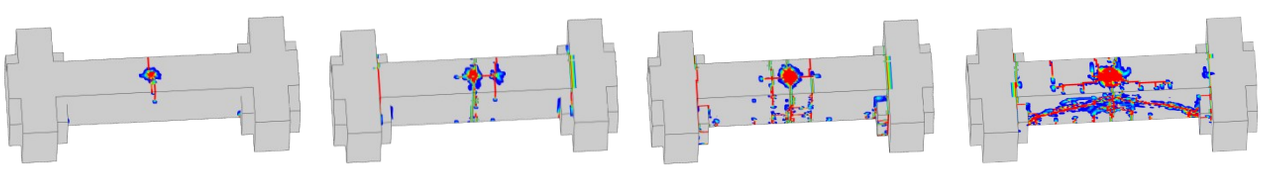
(a)直径为0.5m的滚石损伤 (b)直径为1.0m的滚石损伤 (c)直径为1.5m的滚石损伤



(d)直径0.5m滚石冲击下轨道梁损伤 (e)直径1.0m滚石冲击下轨道梁损伤 (f)直径1.5m滚石冲击下轨道梁损伤

图 15 不同直径的滚石冲击轨道梁的损伤图

Fig.15 Damage diagram of rockfall impact track beams with different diameters



(a)3 m/s (b)5 m/s (c)10 m/s (d)15 m/s

图 16 直径为1.0m的滚石以不同速度冲击进水塔混凝土损伤图

Fig.16 Concrete damage drawing of 1.0m rockfall impact the inlet tower at different speeds

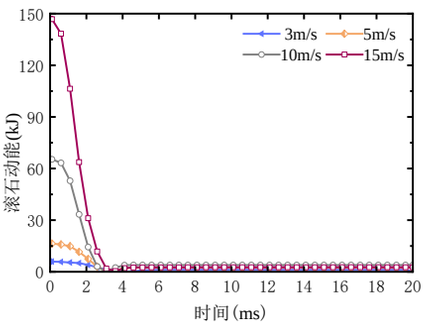


图 17　不同速度冲击轨道梁时滚石动能变化

Fig.17　Changes in kinetic energy of rockfall when impacting the track beam at different speeds

[1] 铁永波，葛华，高延超，等．二十世纪以来西南地区地质灾害研究历程与展望[J]．沉积与特提斯地质，2022，42（04）：653-665．DOI：10.19826/j．cnki．1009-3850．2022.11005.
Tie YB，Ge H，Gao YC，et al．The research progress and prospect of geological hazards in Southwest China since the 20th Century[J]．Sedimentary Geology and Tethyan Geology，2022，42(04)：653-665.

[2] 孙磊．中国地震灾害管理的历史进路、变迁动力与现实挑战[J]．中国应急管理科学，2023(11)：53-65.
Sun L．Historical Develpment，Dynamics of Change，and Current Challenges of China's Earthquake Disaster Management[J]．Journal of China Emergency Management，2023(11)：53-65.

[3] 陈秋华．"5·12"地震给水电工程建设的启示[J]．中国水利，2009（9）：18-20．DOI：10.3969/j．issn．1000-1123．2009.09.011.
CHEN QH．Revelation of the "5.12" Earthquake to Hydropower Engineering Construction [J]．China Water Resources，2009(9)：18-20.

[4] 黄润秋．"5·12"汶川地震地质灾害与地质环境概况[C]．//纪念汶川地震一周年—抗震减灾专题学术讨论会论文集．2009：153-158.
Huang RQ．Overview of the geological disasters and geological environment of the '5 12' Wenchuan earthquake[C]//Proceedings of the first anniversary of Wenchuan Earthquake．2009：153-158.

[5] 张翼，宴金旭，赵雪慧，等．四川泸定MS6.8地震灾害主要特征分析[J]．中国地震，2023，39(1)：1-20．DOI：10.3969/j.issn.1001-4683.2023.01.001.
ZHANG Y，YAN JX，ZHAO XH，et al．Analysis on the main characteristics of the Luding MS6.8 earthquake disaster in Sichuan Province [J]．Earthquake Research in China，2023，39(1)：1-20.

[6] 邓建辉，韦晓，戴仕贵，等．泸定地震诱发灾害特征分析[J]．工程科学与技术，2024，56(1)：117-126．DOI：10.15961/j.jsuese.202201236.
Deng JH，Wei X，Dai SG，et al．Analysis of disaster characteristics induced by the Luding earthquake[J]．ADVANCED ENGINEERING SCIENCES．，2024，56(1)：117-126.

[7] 赵雷，邹定富，张丽君，等．落石被动柔性防护网冲击力学响应的参数化研究[J]．振动与冲击，2023，42(12)：8-17．DOI：10.13465/j.cnki.jvs.2023.012.002.
Zhao L，Zou DF，Zhang LJ，et al．Parametric study on the mechanical response of a flexible rockfall[J]．Journal of Vibration and Shock，2023，42(12)：8-17.

[8] Yang L，Li M S，Chen H D，et al．Impact Dynamics Analysis of Shed Tunnel Structure Hit by Collapse Rock-Fall[J]．Applied Mechanics and Materials，2011，1449(99-100)：1023-1026.

[9] 闫帅星，何思明，李新坡．滚石冲击作用下钢筋混凝土棚洞板动力学响应及冲切损伤评估研究[J]．兰州大学学报（自然科学版），2019，55(1)：64-72．DOI：10.13885/j.issn.0455-2059.2019.01.008.
YAN SX，HE SM，LI XP．Dynamic responses and punching damage assessment of a reinforced concrete slab impacted by rock-falls[J]．Journal of Lanzhou University(Natural Sciences)，2019，55(01)：64-72.

[10] Peifeng H，Xingkai L，Guocheng Y，et al．Study on the motion law and force chain characteristics of buffer cushion layer of rolling stone impacting shed hole[J]．Case Studies in Construction Materials，2024，20e02833-.

[11] Wuchao Z，Weiqiang L，Huida F，et al．Residual performance of hollow RC piers damaged by rockfall impact[J]．Structures，2024，59105726-.

[12] Gholamhosein M T，Masoud K，Farough A，et al．Large-Scale Experimental Study of the Response of Steel Buried Pipe Subjected to Rockfall Impacts[J]．Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice，2024，15(2)：

[13] 刘占辉，卢治谋，李永乐，等．山区桥梁柔性防护棚洞抗冲击性能研究[J]．铁道学报，2023，45(3)：129-136.
Liu ZH，Lu ZM，Li YL，et al．Study on Impact Resistance of Flexible Shed Tunnel for Bridges in M0untainous Areas．Journal of the China Railway Society，2023，45(3)：129-136.

[14] 赵嘉琛，古松，任松波，等．低速冲击下混凝土板的能量耗散研究[J]．振动与冲击，2023，42(23)：300-306．DOI：10.13465/j.cnki.jvs.2023.23.036.
Zhao JC，Gu S，Ren SB，et al．Energy dissipation of concrete slabs under[J]．Journal of Vibration and Shock，2023，42(23)：300-306.

[15] 宋敏，王志勇，张杰，等．冲击荷载下钢筋混凝土缺口

梁破坏模式的试验研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41(13):126-134. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2022.13.017.
Song M, Wang ZY, Zhang J, et al. Tests for failure mode of RC notched beam under impact load Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(13):126-134.

[16] Mei X , Wu J , Wang T , et al. Study on dynamic response of cushion layer-reinforced concrete slab under rockfall impact based on smoothed particle hydrodynamics and finite-element method coupling[J]. REVIEWS ON ADVANCED MATERIALS SCIENCE, 2024, 63(1):

[17] 段莉斌,张亚芳. CFRP加固损伤钢筋混凝土梁抗冲击性能数值研究[J]. 深圳大学学报(理工版), 2023, 40(2):155-162. DOI:10.3724/SP.J.1249.2023.02155.
Duan LB, Zhang YF. Numerical study on impact performance of damaged beams strengthened with CFRP. Journal of Shenzhen University (Science & Engineering), 2023, 40(2):155-162.

[18] 朱德举,钟伟霖,徐振钦,等. BFRP筋增强海水海砂混凝土梁的抗冲击性能[J]. 振动与冲击, 2023, 42(14):220-228. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2023.014.026.
Zhu DJ, Zhong WL, Xu ZQ, et al.Impact resistance of seawater sea—sand concrete beams reinforced with BFRP bars. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(14):220-228.

[19] 杜宇翔,贾永胜,孙金山,等. 落锤冲击作用下钢筋混凝土短梁响应及破坏试验研究[J]. 爆破, 2023, 40(4):115-123. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.016.
Du YX, Jia YS, Sun JS, et al. Experimental Study on Response and Failure of Short Reinforced Concrete Beams under Impact Load by Drop Hammer. Blasting, 2023, 40(4):115-123.

[20] LEE JH., FENVES GL.. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8):892-900.

[21] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of solids and structures, 1989, 25(3): 299-326.

[22] JOHNSON G R, HOLMQUIST T J. An improved computational constitutive model for brittle materials [C].//AIP Conference Proceedings. Colorado Springs, Colorado(USA): AIP, 1994, 309(1):981-984.

[23] 黄润秋,刘卫华,周江平,等. 滚石运动特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9):1296-1302. DOI:10.3321/j.issn:1000-4548.2007.09.003.
HUANG RQ, LIU WH, ZHOU JP, et al. Rolling tests on movement characteristics of rock blocks[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(9):1296-1302.

[24] 王荣,董洁,方怡. 地震作用下边坡的崩塌落石距离研究[J]. 金属矿山, 2016(11):21-27.
Wang R, Dong J, Fang Y. Collapse Distance of Rock Fall of Slope under the Earthquake[J]. METAL MINE, 2016(11):21-27.

[25] 天工在线. Abaqus 2022有限元分析从入门到精通:实战案例版. 北京:中国水利水电出版社, 2024

[26] 袁进科,黄润秋,裴向军. 滚石冲击力测试研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(01):48-54. DOI:10.16285/j.rsm.2014.01.011.
Yuan JK, Huang RQ, Pei XJ. Test research on rockfall impact force[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014 (1): 48-54.