

基于 DEM-FEM 耦合方法的崩塌滚石撞桥动力学行为研究

江茂盛, 邓芊芊*

广东和立交通养护科技有限公司, 广东 广州 511400

DOI:10.61369/ERA.2026070022

摘 要 : 崩塌滚石对桥梁的撞击是一个复杂的非线性动力学问题, 给桥梁的防撞设计带来了巨大挑战。为解决这一问题, 采用耦合的离散元-有限元 (DEM-FEM) 数值方法, 建立了崩塌滚石-桥梁-土壤耦合作用模型, 并通过模型试验验证其精确性。利用该数值模型, 成功模拟了彻底关大桥遭受滚石冲击的全过程, 并定量分析了滚石冲击速度、冲击高度和破裂强度对墩柱损坏等级的影响。结果表明: 当滚石速度在 4.5m/s 到 5.5m/s 之间时, 墩柱遭受中等破坏, 应限制通行; 速度超过 5.5m/s 时, 墩柱严重或完全破坏, 应禁止通行。当冲击高度小于柱高的 0.36 倍时, 墩柱严重或完全破坏, 应禁止通行; 高度在柱高的 0.36 倍到 0.6 倍之间时, 墩柱中等破坏, 应限制通行。当滚石破裂强度在 0.7MPa 到 1.9MPa 之间时, 墩柱中等破坏, 应限制通行; 强度超过 1.9MPa 时, 墩柱严重或完全破坏, 应禁止通行。该研究为山区桥梁防治崩塌滚石灾害及其设计提供了参考依据。

关 键 词 : DEM-FEM 耦合; 崩塌滚石; 墩柱损伤; 数值模拟; 动力学行为; 桥梁防撞

Study on Dynamic Behavior of Rockfall Impacting Bridge by Coupled DEM-FEM Method

Jiang Maosheng, Deng Qianqian*

Guangdong Heli Traffic Maintenance Technology Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 511400

Abstract : The impact of rockfall on bridges is a complex nonlinear dynamic problem, posing significant challenges for bridge anti-collision design. To address this issue, a coupled discrete element-finite element (DEM-FEM) numerical method was employed to establish a rockfall-bridge-soil interaction model, and its accuracy was validated through model experiments. Using this numerical model, the entire process of the Chutiegua Bridge being impacted by rockfall was successfully simulated, and the damage levels of bridge piers were quantitatively analyzed based on rockfall impact velocity, impact height, and fracture strength. The results showed that when the rockfall velocity is between 4.5m/s and 5.5m/s, the bridge piers suffer moderate damage, and traffic should be restricted; when the velocity exceeds 5.5m/s, the piers experience severe or total damage, and traffic should be prohibited. When the impact height is less than 0.36 times the pier height, the piers experience severe or total damage, and traffic should be prohibited; when the height is between 0.36 and 0.6 times the pier height, the piers suffer moderate damage, and traffic should be restricted. 3) When the rockfall fracture strength is between 0.7MPa and 1.9MPa, the piers suffer moderate damage, and traffic should be restricted; when the strength exceeds 1.9MPa, the piers experience severe or total damage, and traffic should be prohibited. This study provides a reference for the prevention and design of rockfall disaster mitigation for mountain bridges.

Keywords : coupled DEM-FEM ; rockfall; pier damage; numerical simulation; dynamic behavior; bridge collision prevention

引言

山区跨沟谷桥梁施工与运营面临崩塌滚石威胁, 汶川大地震后该问题更为严峻^[1], 2009年彻底关大桥、2023年恩广高速桥梁均因滚石发生事故, 造成人员伤亡与结构损毁。现行规范仅针对单滚石, 未考虑滚石碰撞破碎的复杂行为^[2]。目前滚石撞桥的动力学行

作者简介: 江茂盛 (1976.01-), 男, 汉族, 贵州普定人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 岩土工程。

通讯作者: 邓芊芊 (1998.05-), 女, 汉族, 广西玉林人, 硕士研究生, 研究方向: 结构工程。

为研究方法有试验、理论、数值模拟三类。试验研究方面，孟一^[3]通过落锤试验获取混凝土动态应力-应变全曲线。顾乡等^[4]分析墩柱损伤关键参数，但缩尺试验受缩尺效应限制，难以覆盖复杂工况。理论研究的滚石冲击力计算方法均针对混凝土栅洞，不适用于桥墩冲击^[5]。数值模拟多将滚石简化为刚体，未考虑撞击破裂效应，计算结果与实际不符^[6]，为此急需一个考虑滚石破裂的崩塌滚石-桥耦合模型，并研究其耦合动力学行为。

一、数值模型搭建

建立崩塌滚石撞桥耦合力学模型（图1），滚石破裂前包含粒子间约束力、粒子与桥梁的耦合接触力；滚石破裂后新增粒子间的耦合接触力，耦合接触力都可通过罚函数法来计算。

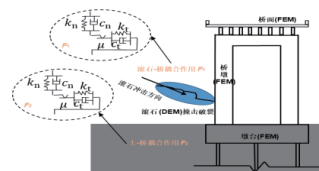


图1 崩塌滚石撞桥耦合力学模型

二、模型验证

Fujikake 等^[7]开展了钢筋混凝土梁冲击试验，试验梁为1700mm×250mm×150mm，落锤重400kg，冲头为90mm 半球形刚体。混凝土用8节点实体单元、CSCM 盖帽模型^[8]；钢筋用梁单元、弹塑性本构模型；落锤用离散元模拟，设为弹性材料。钢筋与混凝土约束耦合，支座竖向约束，落锤与梁体摩擦系数0.4，重力加速度9.8m/s²（图2）。数值与试验结果对比，冲击力峰值及持续时间误差5.4%，梁体跨中挠度误差4.9%，吻合度良好，验证了 DEM-FEM 耦合方法的可行性（图3）。

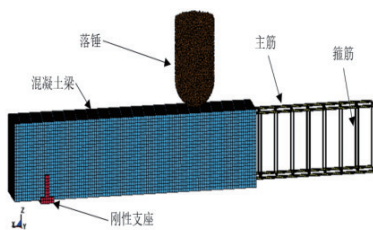


图2 钢筋混凝土梁落锤冲击数值模型

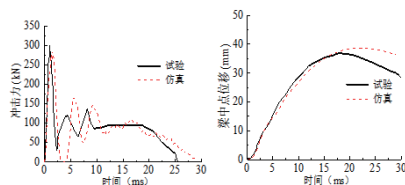


图3 钢筋混凝土梁落锤冲击数值结果与试验结果对比

三、耦合动力学行为

（一）耦合模型

1、彻底关大桥事故简介

2009年彻底关大桥遭遇130t 滚石冲击，滚石从500m 高处

滚落，速度10m/s，撞击桥墩致桥跨坍塌、墩柱损毁。原桥跨距23m，桥墩为双柱式，柱径1.5m、长10m，C30混凝土，配33根Φ22纵筋，Φ10箍筋（图4）。

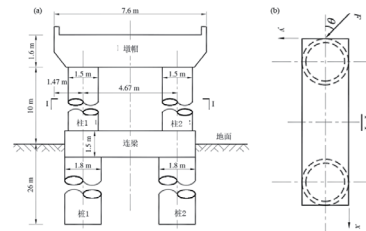


图4 彻底关大桥几何尺寸

2、数值模型

模型由土层、滚石、桩、连梁、墩柱、墩帽、桥面、车辆组成（图5）。土壤采用实体单元、MAT_MOHR_COULOMB 模型；滚石近似球体，离散元模拟，弹性模量30GPa，不考虑破裂效应。桩、梁、墩柱、墩帽用实体单元、MAT_159模型，混凝土轴心抗压强度30MPa；钢筋用梁单元、弹塑性随动强化模型、屈服强度为345MPa，采用 Cowper-Symons 模型来考虑材料的应变率效应（C=40、P=5）。桥面为壳单元、车辆为实体单元，均为刚体材料。钢筋和混凝土约束耦合，各接触面摩擦系数0.4，桥墩与土体按实际约束自由度，重力加速度取为9.8m/s²，计算时间取2.5s。

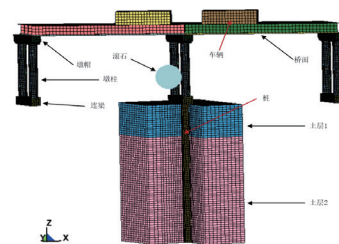


图5 彻底关大桥数值模型

（二）动力学行为

1、冲击过程

t=0.1s 滚石冲击墩柱，冲击处局部损毁；t=0.22s 冲击处混凝土完全损毁，仅钢筋相连，墩柱丧失承载能力；t=0.45s 墩帽受弯剪断裂；t=2.5s 桥面滑落（图6）。模拟破坏形态与实际一致，验证模型的精确性。

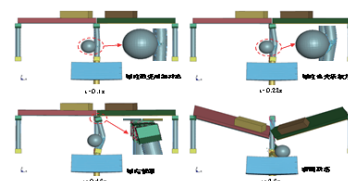


图6 滚石冲击彻底关大桥过程

2、冲击力

滚石冲击力先迅速增大和逐渐较小,冲击持时1.5s。借鉴我国《铁路桥涵设计基本规范公式》、欧洲规范公式、美国AASHTO公式,本文假设滚石为船体,计算得到冲击力分别为:13960kN、8060kN、6984kN,与数值计算结果(13648kN)的误差分别为2.3%、-40.9%、-48.8%(图7)。数值结果与经验公式同量级,验证可靠性;但经验公式误差大,需建立精准的滚石冲击桥墩模型。

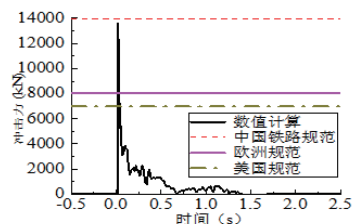


图7 滚石冲击桥墩的冲击力时程

3、墩柱破坏状态

定义桥墩损伤指标为:

$$D = 1 - \frac{N_t}{N_0} \quad (1)$$

式中: D 为桥梁损伤度; N_0 为桥墩初始承载力; N_t 为桥墩遭受滚石冲击后的剩余承载力。 D 范围在 $0 \leq D \leq 1$ 。 $D=0$ 为无破坏; $D=1$ 为完全失去承载能力。依据《公路桥涵设计通用规范》计算轴心受压构件承载力,结合顾乡^[4]的墩柱破坏分类标准,将破坏状态分为基本完好、轻微破坏、中等破坏、严重破坏、完全破坏。由图7可知,本工况墩柱被击断, $N_t=0$ 、 $D=1$,为完全破坏,禁止通行。

四、参数分析

(一) 冲击速度

冲击速度选取1m/s、3m/s、5m/s、7m/s、9m/s,随速度增大,冲击力递增但增幅渐减;墩柱损伤度递增。当速度小于4.5m/s时,轻微破坏或基本完好,正常通行;当滚石速度大于4.5m/s而小于5.5m/s时,中等破坏,限制通行;当滚石速度大于5.5m/s时,严重破坏或者完全破坏,禁止通行(图8)。

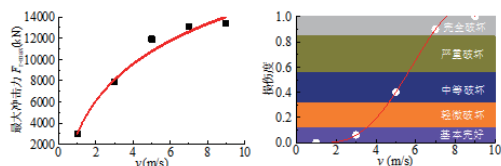


图8 冲击速度对耦合力学行为影响

(二) 冲击高度

冲击高度选取为0.3~0.7倍柱高,冲击速度5m/s。随高度增大,冲击力先减后增(柱端抗侧刚度大于中间段),损伤度递减。当冲击高度小于0.36时,墩柱严重破坏或者完全破坏,禁止通行;当冲击高度大于0.36而小于0.6时,中等破坏,限制通行;当滚石冲击高度大于0.6时,基本轻微破坏或基本完好,正常通行(图9)。

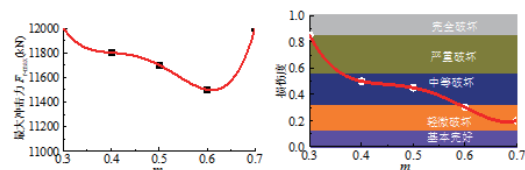


图9 冲击高度对耦合力学行为影响

(三) 滚石破裂强度

离散元粒子法向阻尼比取为0.7,切向阻尼比取为0.4,法向弹簧刚度取为0.01,切向弹簧刚度取为0.0027。Bond约束弹性模量17GPa、泊松比0.39。选取粒子最大拉应力2~34MPa,对应单轴抗拉强度0.01~4.5MPa,冲击速度7m/s。随破裂强度增大,最大冲击力递增但增幅渐减;墩柱损伤度递增且增速渐降。当滚石破裂强度小于0.7MPa时,墩柱基本轻微破坏或基本完好,可继续通行;当滚石破裂强度大于0.7MPa而小于1.9MPa时,墩柱中等破坏,应禁止通行;当滚石破裂强度大于1.9MPa时,墩柱严重破坏或者完全破坏,应禁止通行(图10)。

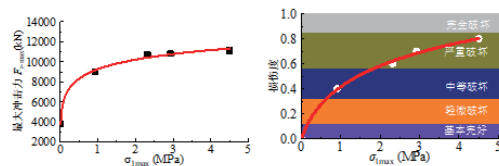


图10 滚石破裂强度对耦合力学行为影响

五、结论

本文提出考虑滚石破裂效应的DEM-FEM滚石-桥-土耦合模型,经试验验证,该模型精度较高,适用于滚石撞桥动力学分析;同时精准还原了彻底关大桥滚石冲击过程与破坏形态,证明现有冲击力计算公式误差较大,本模型可为工程设计提供可靠参考;研究还确定冲击速度4.5m/s、5.5m/s,冲击高度0.36、0.6倍柱高,滚石破裂强度0.7MPa、1.9MPa为墩柱破坏与通行管控关键阈值,各参数与墩柱损伤度正相关(冲击高度除外)

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):5.
- [2] Glover J, Volkwein A, Dufour F, et al. Rockfall attenuator and hybrid drape systems-design and testing considerations [CV/Third Euro-Mediterranean Symposium on Advances in Geomaterials and Structures, edited by: Darve, F. Doghri, L El Fatmi, R., Hassis, H., and Zenzri, H, 2010.379-384.
- [3] 孟一. 冲击荷载作用下钢筋混凝土梁的试验及数值模拟研究[D]. 博士学位论文, 湖南大学, 2012: 125-127.
- [4] 顾乡. 落石冲击作用下桥梁墩柱损伤和防护研究[D]. 西南交通大学, 2017.
- [5] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石冲击力计算方法[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(6): 56-62.
- [6] Zhang X, Wang X, Chen W, et al. Numerical study of rockfall impact on bridge piers and its effect on the safe operation of high-speed trains [J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2020: 1-19.
- [7] Fujikake K, Li B. Impact response of reinforced concrete beam and its analytical evaluation [J]. Journal of Structure, ASCE, 2009, 135(8): 938-950.
- [8] 柳春, 余志祥, 骆丽茹, 等. 含大块石泥石流冲击作用下混凝土拦挡坝的动力学行为研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(14): 161-168.