

落石撞击下钢混组合梁桥上部结构 动力响应分析*

康俊涛, 章豪

武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070

摘要: 基于HJC混凝土损伤本构模型, 利用非线性显式动力分析软件ANSYS/LS-DYNA建立了钢混组合梁桥上部结构的有限元模型, 并采用能量守恒原理检验了计算结果的稳定性。从落石速度、落石质量、接触面积、碰撞位置四个影响因素方面, 研究了钢混组合梁桥上部结构在落石撞击下的动力响应。研究表明: ①各影响因素中, 落石速度变化对钢混组合梁桥上部结构的影响最显著; ②落石对桥面板的破坏以局部破坏为主; ③综合了落石速度和落石质量的落石动能可以作为落石撞击钢混组合梁桥研究中的自变量; ④碰撞位置不变时, 落石动能与混凝土损失体积呈正相关。

关键词: 钢混组合梁桥; 落石撞击; 动力响应; 有限元分析

中图分类号: TU312.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 06-0036-07

Analysis of dynamic response of steel-concrete composite beam bridge superstructure under rockfall impact

KANG Juntao, ZHANG Hao

School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract: Based on the Holmquist-Johnson-Cook (HJC) concrete damage constitutive model, the finite element model of the superstructure of the steel-concrete composite beam bridge was established by the nonlinear explicit dynamic analysis software ANSYS / LS-DYNA, and the stability of the calculation results was verified using the energy conservation principle. The dynamic response of the superstructure of the steel-concrete composite beam bridge under the impact of rockfall is studied from four aspects of rockfall speed, rockfall quality, contact area and collision position. The research shows, ① of all influencing factors, the change of rock fall speed has the most significant effect on the superstructure of the steel-concrete composite beam; ② the damage to the bridge deck caused by rockfall is mainly local damage; ③ rockfall kinetic energy, which combines the speed of rockfall and the quality of rockfall, can be used as an independent variable in the study of rockfall impacting a steel-concrete composite beam bridge; ④ when the collision position is unchanged, the kinetic energy of rockfall is positively correlated with the volume of concrete loss.

Key words: steel-concrete composite beam bridge; rockfall impact; dynamic response; finite element analysis

* 收稿日期: 2020-04-21

录用日期: 2020-05-16

网络首发日期: 2020-09-16

基金项目: 湖北省自然科学基金(2015CFB393)

作者简介: 康俊涛(1978年生), 男; 研究方向: 桥梁加固、检测、监测技术; E-mail: jtkang@163.com

通信作者: 章豪(1995年生), 男; 研究方向: 桥梁结构设计; E-mail: 1224631530@qq.com

西部山区地质灾害发生频繁, 落石撞击桥梁上部结构事故时有发生, 严重影响桥梁上部结构的正常使用以及生命财产安全。钢混组合梁桥综合了混凝土桥和钢桥的优点, 而且可以快速施工, 目前在高速公路线路上有很好的运用前景。因此, 研究落石撞击对钢混组合梁桥上部结构的影响具有实际意义。

国内外学者对落石撞击问题进行了一系列研究。Berthet-rambaud等^[1]通过落石撞击不同形式混凝土防护板实验, 分析了混凝土板在落石冲击荷载下的破坏模式, 并提出了一种能缓冲落石撞击作用的结构形式。Zineddin等^[2]分别对3种不同配筋方式的钢筋混凝土板进行冲击试验并利用ABAQUS对试验过程进行数值模拟。试验和数值结果表明: 钢混混凝土板在冲击作用下的失效模式主要取决于配筋方式和配筋率。Kishi等^[3]通过现场试验以及对落石撞击棚洞结构进行数值模拟, 分析了棚洞结构在落石冲击下的动力响应, 得到了棚洞结构在受到不同方向落石冲击时的能量变化及耗损情况。雷平等^[4]对落石冲击下棚洞顶板的破坏形式进行了研究, 结果表明: 低速大质量的落石会导致顶板贯穿块形成, 板内配筋多少对棚洞防护性能有明显影响, 顶板上方增加垫层有助于分散落石冲击力, 间接提高承载力。黄文等^[5]通过建立落石冲击埋地油气管道的有限元模

型, 分析了落石速度、管道壁厚、管道埋深等参数对油气管道的影响。顾乡等^[6]分析了落石冲击能量对桥梁损伤的影响, 发现落石潜在危险能量为2 500 kJ; 并提出了几种混凝土桥墩的防撞措施。

目前, 对于落石撞击桥墩或者棚洞结构的研究较多, 对于落石撞击桥梁上部结构的研究较少。因此, 本文采用非线性显式动力分析方法, 利用ANSYS/LS-DYNA软件建立了有限元模型, 研究了落石撞击下钢混组合梁桥上部结构的动力响应。

1 原理与模型

1.1 模型的建立

选用某跨径为40 m的装配式先简支后桥面连续钢混组合梁为研究对象, 主梁部分包括工字型钢梁和钢筋混凝土桥面板, 见图1。桥面板截面采用变截面形式, 单幅宽12.75 m、厚0.18~0.28 m。其中悬臂端的端部厚0.18 m, 跨中处厚0.23 m, 支点处厚0.28 m; 板内纵筋为256 Φ 20, 箍筋为1 Φ 20, 混凝土保护层厚度为30 mm; 工字型钢梁高1.8 m, 顶板厚20 mm、宽500 mm, 腹板厚20 mm, 底板厚40 mm、宽750 mm。每隔1.7 m设置一道竖向加劲肋, 每3个加劲肋上设置一道钢横撑。工字型钢材采用Q345钢材, 桥面板混凝土等级为C55, 普通钢筋等级为HRB400。

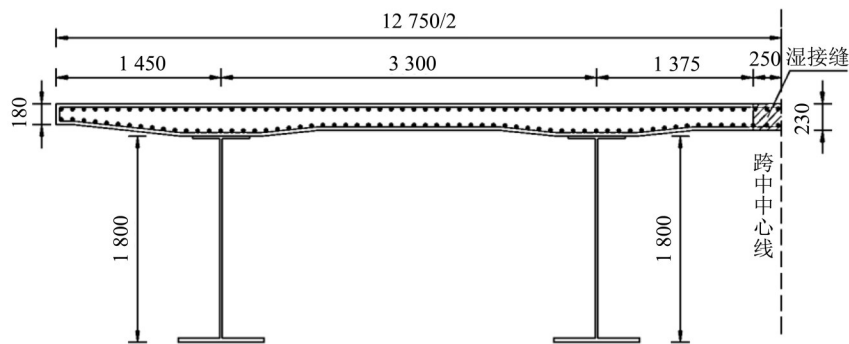


图1 钢混组合梁横截面 (单位: mm)

Fig. 1 Cross section of steel-concrete composite beam (unit: mm)

1.2 计算方法

采用非线性显式动力分析方法, 运用有限元软件ANSYS/LS-DYNA建立落石撞击钢混组合梁上部结构模型。在有限元模型中, 混凝土和工字型钢梁采用SOLID 164单元模拟, 普通钢筋和剪力钉采用BEAM 161单元模拟, 如图2所示。各部件分开建立, 并通过设置接触的方式使各部分协同

工作。

落石模型参照《欧洲技术认证指南: 落石防护系统》(ETAG027)中的标准, 如图3所示。落石模型有3个特征面, 正方形面(A面)、长方形面(B面)和等边三角形面(C面)。为了节省计算时间, 落石采用刚体模型, 关键字为*MAT_RIGID。

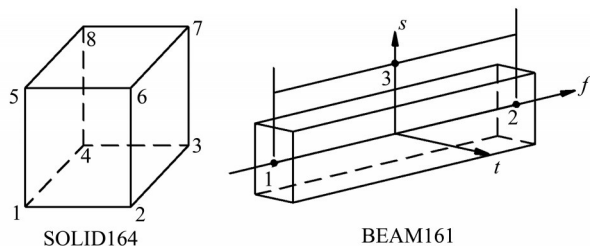


图2 单元形状

Fig. 2 Element shape

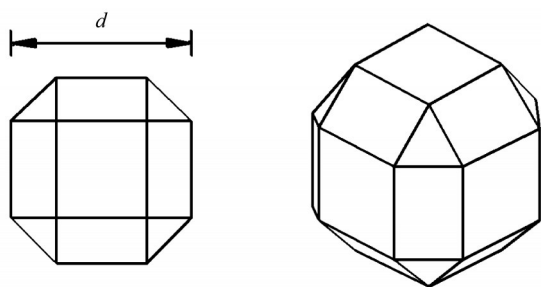


图3 落石模型

Fig. 3 Rockfall model

混凝土采用 HJC 损伤本构模型^[7], 关键字 *MAT_JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE, 由屈服面方程、损伤演化方程、状态方程组成; 工字型钢梁采用 JC 本构模型^[8], 关键字为 *MAT_JOHNSON_COOK; 普通钢筋采用随动双线性强化弹塑性本构模型, 考虑应变率的影响, 关键字为 *MAT_PLASTIC_KINEMATIC。材料的密度为 $\rho_0 = 2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, 弹性模量 $G = 14.79 \text{ GPa}$, 抗压强度 $f'_c = 35.5 \text{ MPa}$, HJC 损伤本构模型、JC 本构模型参数见参考文献 [9-13]。普通钢筋本构模型参数见表 1。

表1 普通钢筋本构模型参数

Table 1 Parameter of common reinforcement constitutive model

$\rho_0 / (\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/GPa	σ_0/MPa	PR	β
7 850	200	400	0.3	0
C / s^{-1}	P	FS	$E_{\text{tan}} / \text{GPa}$	
40	5	0.2	2	

混凝土 HJC 损伤本构模型并不能很好地控制混凝土失效^[14], 需额外定义混凝土失效准则, 关键字为 *MAT_ADD_EROSION, 采用主应变失效准则作为混凝土失效的判断依据。为了保证普通钢

筋和混凝土之间的可靠连接, 利用关键字 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID^[15], 将混凝土单元和普通钢筋单元耦合在一起, 将钢筋限制在混凝土中。设置侵蚀接触, 关键字 *CONTACT_ERODING_SURFACE_TO_SURFACE, 保证混凝土单元失效后, 落石还能与新混凝土单元发生正常接触。由于采用单点高斯积分, 为了保证计算结果稳定, 避免沙漏能过大, 通过关键字 *CONTROL_HOURGLASS 来控制模型沙漏模式, 沙漏系数取 0.05。计算模型沙漏能需控制在总能量的 10% 以下。

2 结果分析

研究撞击速度、落石质量、撞击面积等参数变化对钢混组合梁上部结构的影响。重点关注桥面板正中心 (A 位置) 和边梁跨中正上方 (B 位置) 在落石撞击下的动力响应情况。落石撞击位置如图 4 所示。

基本工况的落石速度为 25 m/s, 落石直径为 1 m, 落石质量约为 1 846 kg, 落石体积约为 0.71 m^3 , 撞击面为 A 面, 撞击角度为 90° (y 轴方向)。试验采用控制变量法, 当一个参数为变量时, 其它参数同基本工况中的参数一致。参数数值见表 2。

2.1 基本工况

基本工况下, 系统总能量守恒, 落石动能迅速减小, 系统内能迅速增加, 沙漏能控制在较低水平, 系统能量变化趋势如图 5 所示。

基本工况下桥面板混凝土损失情况如图 6-7 所示。落石撞击 A 位置时, 与桥面板发生接触的瞬间, 接触面四条边上混凝土单元的应力迅速增加并随之失效, 撞击位置的普通钢筋也瞬间屈服, 混凝土单元的破坏形式为侵彻破坏, 即落石尚未侵入桥面板内部, 桥面板内部混凝土单元已失效。对混凝土应力变化进行观测, 发现落石撞击桥面板后会产生冲击应力波, 落石还在桥面板表面时应力波已传递到桥面板内部, 内部混凝土在应力波的作用下破坏失效。随着碰撞时间的增加, 落石渐渐侵入桥面板内部, 落石侧面与桥面板发生接触, 接触面外混凝土单元发生失效破坏, 接触面内混凝土始终没有失效破坏。工字型钢梁在撞击过程中最大应力不超过 25 MPa, 说明落石撞击桥面板正中心时对工字型钢梁影响较小, 主要破坏形式为局部破坏, 整桥承载能力影响较小。

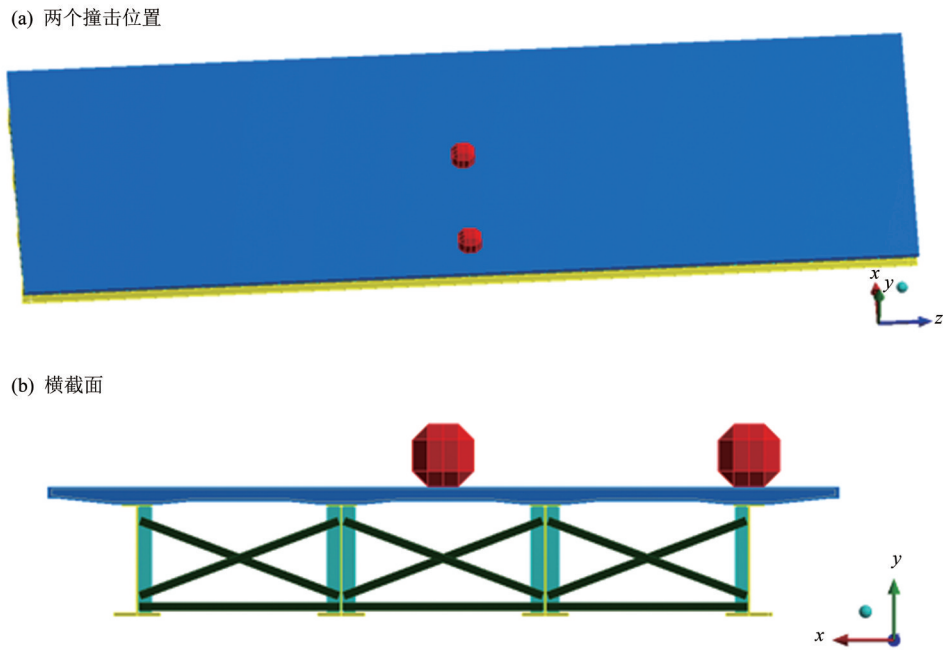


图 4 落石撞击位置

Fig. 4 Rockfall impact position

表 2 参数数值
Table 2 Variable value

速度/(m·s ⁻¹)	质量/kg	接触面积/m ²
15	1 136	0.05 (C 面)
20	1 491	0.18 (B 面)
25	1 846	0.25 (A 面)
30	2 201	-
35	2 556	-

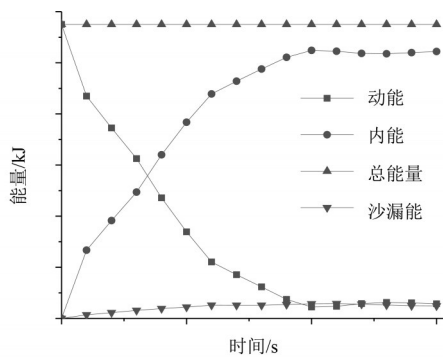


图 5 基本工况的能量变化图

Fig. 5 Energy change under basic operating condition

落石撞击 B 位置时, 落石在与桥面板发生接触的瞬间, 接触面四条边上混凝土单元的应力迅速增加并随之失效, 普通钢筋也瞬间屈服, 混凝土单元的破坏形式为侵彻破坏, 但是侵彻破坏的深

度比落石撞击桥面板正中心时小。这主要是因为工字型钢梁阻碍了桥面板下挠的趋势, 吸收了大量能量。随着碰撞时间的增加, 落石渐渐侵入桥面板内部, 落石侧面与桥面板发生接触, 接触面外混凝土单元失效破坏; 由于工字型钢梁与落石同时挤压接触面内混凝土, 接触面内混凝土也开始失效破坏。工字型钢梁应力在碰撞瞬间迅速升高, 碰撞过程中最大应力为 516.94 MPa, 超过了 Q345 钢材的屈服极限, 整桥承载能力降低。

2.2 A 位置各参数对钢混组合梁上部结构的影响

各工况下的落石侵入深度和桥面板混凝土体积损失曲线如图 8-9 所示。图 8 中, 落石侵入深度与落石速度或落石质量之间基本呈线性增长; 随着接触面积增加, 落石侵入深度先减小后增加。对比速度工况和质量工况的曲线斜率, 落石速度变化对落石侵入深度影响比落石质量的影响更显著。速度工况中, 落石速度从 15 m/s 增加到 35 m/s, 侵入深度从 0.03 m 增加到 0.187 m, 变化率为 6.2 倍。质量工况中, 落石质量从 1 136 kg 增加到 2 556 kg, 落石侵入深度从 0.066 m 增加到 0.153 m, 变化率为 2.3 倍。面积工况中, 接触面积从 0.05 m² 增加到 0.25 m², 落石侵入深度从 0.193 m 先减小到 0.107 m, 后增加到 0.117 m。

图 9 中, 混凝土体积损失与落石速度或落石质量之间呈非线性增长; 随着接触面积增加, 桥面

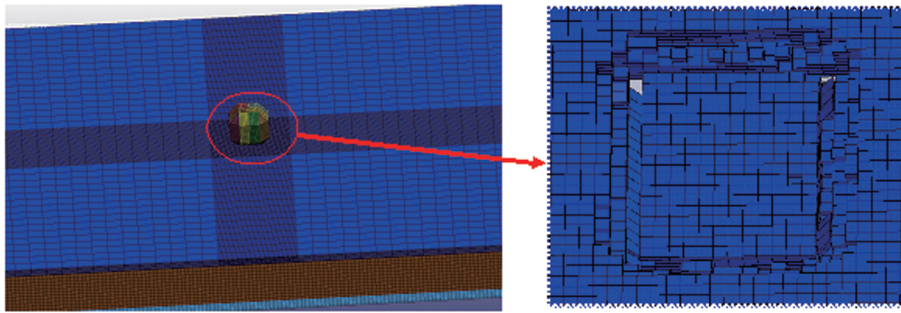


图 6 落石撞击 A 位置时桥面板混凝土的损失情况

Fig. 6 Concrete loss of bridge deck when rockfall hits position A

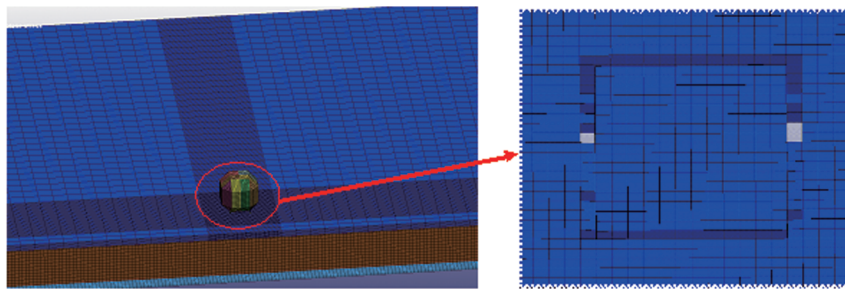


图 7 落石撞击 B 位置时桥面板混凝土的损失情况

Fig. 7 Concrete loss of bridge deck when rockfall hits position B

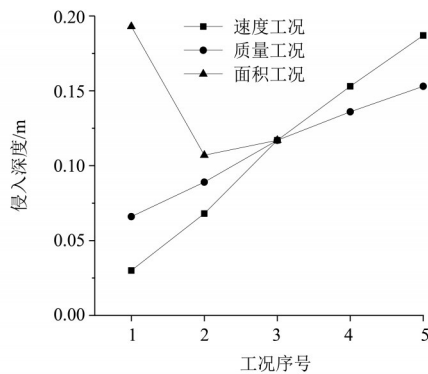


图 8 各参数下的侵入深度曲线

Fig. 8 Intrusion depth curve under various parameters

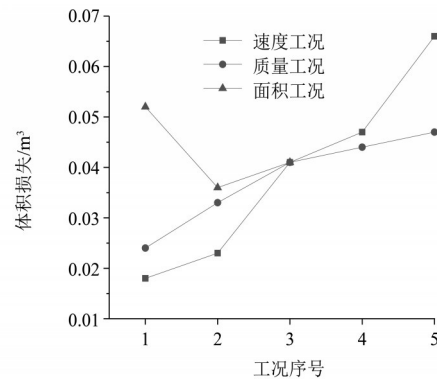


图 9 各参数下的体积损失曲线

Fig. 9 Volume loss curve under various parameters

板混凝土损失体积先减小后增加。对比速度工况和质量工况的曲线斜率, 落石速度变化对桥面板混凝土体积损失的影响比落石质量的影响更显著。速度工况中, 落石速度从 15 m/s 增加到 35 m/s, 体积损失从 0.018 m^3 增加到 0.066 m^3 , 变化率为 3.7 倍。质量工况中, 落石质量从 1 136 kg 增加到 2 556 kg, 体积损失从 0.024 m^3 增加到 0.047 m^3 , 变化率为 2.0 倍。面积工况中, 接触面积从 0.05 m^2 增加到 0.25 m^2 , 体积损失从 0.052 m^3 先减小到 0.036 m^3 , 后增加到 0.041 m^3 。

2.3 B 位置各参数对钢混组合梁上部结构的影响

图 10~11 为各工况下的落石侵入深度和桥面板

混凝土体积损失曲线。图 10 中, 落石侵入深度与落石速度之间呈非线性增长, 与落石质量之间基本呈线性增长; 随着接触面积的增加, 落石侵入深度逐渐减小。对比速度工况和质量工况的曲线, 落石速度变化对落石侵入深度的影响比落石质量的影响更显著。速度工况中, 落石速度从 15 m/s 增加到 35 m/s, 落石侵入深度从 0.013 m 增加到 0.141 m, 变化率为 10.8 倍。质量工况中, 落石质量从 1 136 kg 增加到 2 556 kg, 落石侵入深度从 0.021 m 增加到 0.056 m, 变化率为 2.7 倍。面积工况中, 接触面积从 0.05 m^2 增加到 0.25 m^2 , 落石侵入深度从 0.063 m 减小到 0.022 m, 变化率为 3.1 倍。

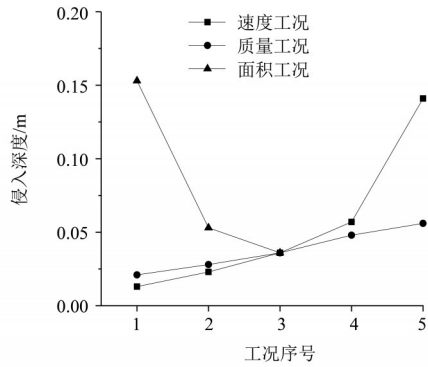


图10 各参数下的侵入深度曲线

Fig. 10 Intrusion depth curve under various parameters

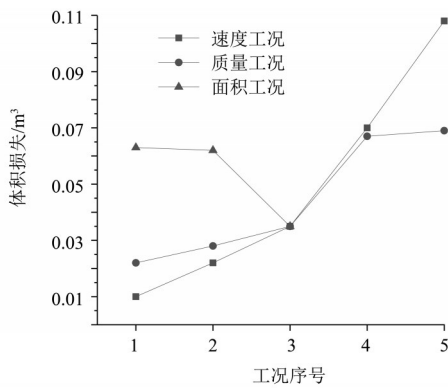


图11 各参数下体积损失曲线

Fig. 11 Volume loss curve under various parameters

图11中, 混凝土体积损失与落石速度或落石质量之间呈非线性增长; 随着接触面积的增加, 混凝土体积损失先基本保持不变再减小。对比速度工况和质量工况的曲线斜率, 落石速度变化对桥面板混凝土体积损失的影响比落石质量的影响更显著。速度工况中, 落石速度从15 m/s增加到35 m/s, 体积损失从0.010 m³增加到0.108 m³, 变化率为10.8倍。质量工况中, 落石质量从1 136 kg增加到2 556 kg, 体积损失从0.022 m³增加到0.069 m³, 变化率为3.1倍。面积工况中, 接触面积从0.05 m²增加到0.18 m², 体积损失从0.063 m³减小到0.062 m³, 体积损失基本不变; 接触面积从0.18 m²增加到0.25 m², 体积损失从0.062 m³减小到0.035 m³, 变化率为1.8倍。

3 落石动能与混凝土体积损失关系

顾乡^[16]在研究落石撞击对桥墩的动力响应时, 提出用落石能量作为参考量。随机选择3对能量工况进行验证, 每对能量工况保证接触面积以及碰撞位置不变, 同时调整落石速度以及落石质

量, 使落石初始动能相同。具体参数见表3。

表3 能量工况参数

Table 3 Energy conditions parameters

工况	速度/(m·s ⁻¹)	质量/kg	接触面积/m ²	落石动能/kJ
1-1	10	4 000	0.25	200
1-2	20	1 000	0.25	200
2-1	20	3 000	0.25	600
2-2	30	1 333	0.25	600
3-1	25	2 560	0.25	800
3-2	35	1 306	0.25	800

各个工况能量守恒, 沙漏能控制在总能量的10%以下, 体积损失计算结果如表4所示。表4

表4 计算结果

Table 4 Calculation results

工况	落石动能/kJ	撞击A位置时的体积损失/m ³	撞击B位置时的体积损失/m ³
1-1	200	0.017	0.009
1-2	200	0.016	0.010
2-1	600	0.040	0.048
2-2	600	0.042	0.048
3-1	800	0.047	0.070
3-2	800	0.047	0.069

中, 接触面积以及撞击位置相同且落石初始动能相同的混凝土体积损失基本相同。因此, 可把落石动能作为自变量。根据速度工况以及质量工况中的数据, 落石动能与混凝土体积损失见表5。对数据进行线性拟合, 落石撞击桥面板正中心时,

表5 落石动能及对应混凝土体积损失

Table 5 Rockfall kinetic energy and corresponding volume loss of concrete

落石动能/kJ	撞击A位置时的体积损失/m ³	撞击B位置时的体积损失/m ³
207.02	0.018	0.010
353.88	0.024	0.022
368.04	0.023	0.022
464.47	0.033	0.028
575.06	0.041	0.035
685.65	0.044	0.067
796.24	0.047	0.069
828.09	0.047	0.070
1 127.12	0.066	0.108

落石动能与混凝土体积损失的关系为

$$y = 5.1963 \times 10^{-5}x + 0.0069. \quad (1)$$

落石撞击工字型钢梁正上方时, 落石动能与混凝土体积损失的关系为

$$y = 1.0971 \times 10^{-4}x - 0.018. \quad (2)$$

4 结 论

本文利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立了落石撞击钢混组合梁上部结构的模型。通过参数设置以及以能量守恒原理作为检验标准, 将沙漏能控制在了总能量的 10% 以下, 保证了计算结果的稳定可靠。并得到如下结论:

1) 分析 3 种工况曲线的变化趋势, 不管落石

撞击位置如何变化, 落石速度变化对钢混组合梁上部结构的影响最显著。

2) 落石撞击桥面板正中心时, 落石对桥面板以局部破坏为主, 对工字型钢梁受力基本无影响, 进而对整桥的承载能力影响较小。落石撞击工字型钢梁正上方时, 工字型钢梁腹板受压屈服, 对整桥承载能力影响很大。

3) 在研究落石撞击钢混组合梁时, 可以用同时考虑了落石质量以及落石速度的落石动能作为自变量。

4) 对计算结果进行线性拟合, 发现落石动能与混凝土体积损失成正相关。

参考文献:

- [1] BERTHET-RAMBAUD P, TIMSAY Y, DAUDEVILLE L, et al. Experimental study of the dissipative efficiency of a multilayered protective structure against rock fall impact[J]. *Revue Europeenne de Genie Civil*, 2006, 10(3):295-308.
- [2] ZINEDDIN M, KRAUTHAMMER T. Dynamic response and behavior of reinforced concrete slabs under impact loading[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(9):1517-1534.
- [3] KISHI N, MIKAMI H, MATSUOKA K G, et al. Impact behavior of shear-failure-type RC beams without shear rebar[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(9): 955-968.
- [4] 雷平, 周天跃, 王星, 等. 冲击荷载下棚洞抗冲切性能研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(4): 1091-1097.
- [5] 黄文, 谢锐, 陈小华. 落石冲击荷载下埋地油气管道力学分析[J]. *石油机械*, 2019, 47(9): 138-144.
- [6] 顾乡, 余志祥, 赵雷, 等. 落石冲击能量对山区桥梁损伤的影响[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(6): 1131-1137.
- [7] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressure[C]// 14th International Symposium on Ballistics. USA: American Defense Preparedness Association, 1993: 591-600.
- [8] JOHNSON G R, COOK W H. Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strains rates, temperatures and pressures [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1985, 21(1): 31-48.
- [9] 任根茂, 吴昊, 方秦, 等. 普通混凝土 HJC 本构模型参数确定[J]. *振动与冲击*, 2016, 35(18): 9-16.
- [10] 巫绪涛, 李耀, 李和平. 混凝土 HJC 本构模型参数的研究[J]. *应用力学学报*, 2010, 27(2): 340-344+443.
- [11] 吴赛, 赵均海, 王娟, 等. 基于砧 SHPB 试验数值分析的 HJC 模型参数研究[J]. *计算力学学报*, 2015, 32(6):789-795.
- [12] 于文静, 史健勇, 赵金城. Q345 钢材动态力学性能研究[J]. *建筑结构*, 2011, 41(3): 28-30+63.
- [13] 孟利平, 程远征, 张伦平, 等. 应变率和应力三轴度对 Q345B 钢动态力学性能的影响研究[J]. *船舶力学*, 2019, 23(10): 1210-1220.
- [14] 林琛, 徐建军, 杨晋伟, 等. 基于 HJC 模型的钢筋混凝土侵蚀仿真失效准则与参数[J]. *探测与控制学报*, 2017, 39(2): 100-105.
- [15] 姜华, 贺拴海, 王君杰. 钢筋混凝土梁冲击试验数值模拟研究[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(15): 140-145.
- [16] 顾乡, 赵雷, 余志祥, 等. 落石冲击对山区桥墩的损伤研究[J]. *铁道工程学报*, 2016, 33(3): 72-75+98.

(责任编辑 王海蓉)