

文章编号: 1000-4750(2014)05-0151-07

柔性棚洞在落石冲击作用下的数值分析

汪 敏¹, 石少卿¹, 阳友奎²

(1. 后勤工程学院军事建筑工程系, 重庆 401311; 2. 布鲁克(成都)工程有限公司, 四川 611731)

摘 要: 由于试验测试手段的限制, 通过试验无法测试得到柔性棚洞在落石冲击作用下的各种动力响应及能量吸收特性, 为此开展了柔性棚洞在落石冲击作用下的数值模拟研究。基于试验结论、理论分析和合理假设的基础上, 建立了柔性棚洞的数值模型。为验证数值模型及数值计算方法的可靠性, 从落石冲击作用时间、环形网下降的位移、横向拉索和环向支撑绳上最大荷载、柔性棚洞的变形特征以及钢拱架应变时程曲线5个方面, 对数值计算结果和试验结果进行了对比研究, 结果表明: 所采用的数值模型和数值计算方法能够较好地预测柔性棚洞在落石冲击作用下的各种动力响应特性, 为后续深入研究提供了可靠的方法。

关键词: 柔性棚洞; 落石; 耗能; 冲击; 数值分析

中图分类号: P642.2 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.12.0923

NUMERICAL SIMULATION OF A FLEXIBLE ROCK SHED UNDER THE IMPACT OF A ROCKFALL

WANG Min¹, SHI Shao-qing¹, YANG You-kui²

(1. Department of Civil Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China;

2. Geobrugg (Chengdu) Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 611731, China)

Abstract: Because field tests could not be used to obtain energy absorption in individual components and support system reactions due to restrictions on testing methods, a numerical simulation of a flexible rock-shed under impact of rockfall was carried out. The numerical simulation model for the flexible rock-shed was developed based on reasonable assumptions, theoretical analysis and experimental results. In order to validate the numerical model and numerical calculation method, the numerical simulation results were compared with the experimental data from during the impact of the rockfall, including the displacement of ring nets, the peak load on horizontal and hoop cables, the deformation of the rock-shed, and the strain-time curves of the steel vaulted structure. The results show that the numerical model and numerical calculation methods are shown to be reliable in predicting the dynamic behavior of this rock-shed under rockfall impact, and will be employed to investigate the performance of this structure.

Key words: flexible rock-shed; rockfall; dissipation energy; impact; numerical simulation

随着我国西部开发和交通建设大发展, 交通干线等逐渐向山区延伸, 落石灾害已愈发突出^[1]。采用钢筋混凝土结构形式的棚洞或明洞对落石灾害进行防护是广泛采用的结构形式。然而当棚洞或明洞直接承受落石冲击作用时, 受到的冲击动荷载很

大, 导致结构的体积、重量极大, 常需要埋深大、断面尺寸大的基础, 施工难度大、时间长, 建设成本高, 在交通运行线上补建, 时常需要断道施工^[2-3]。为了克服钢筋混凝土结构形式的明洞或棚洞施工难度大、周期长、费用高等不足, 同时适合于山区公路、

收稿日期: 2012-12-04; 修改日期: 2013-04-11

基金项目: 国家科技支撑计划课题项目(2012BAK05B02); 重庆市自然科学基金项目(cstc2012jjB30004, cstc2012jjA30005)

通讯作者: 石少卿(1966—), 男, 浙江新昌人, 教授, 博士, 主要从事防灾减灾工程及防护工程的研究(E-mail: ssq601@163.com).

作者简介: 汪 敏(1982—), 男, 湖北汉川人, 讲师, 博士, 主要从事防灾减灾工程及防护工程的研究(E-mail: wangmin198217@163.com);

阳友奎(1965—), 男, 重庆长寿人, 高工, 博士, 主要从事岩土工程、地质灾害防治研究(E-mail: youkui.yang@geobrugg.com).

铁路、桥隧相连等地段的快速抢修抢建，将目前工程中应用广泛的被动防护网和钢筋混凝土结构式棚洞各自特点结合，提出了能够降低施工难度、满足快速抢修抢建的柔性棚洞的概念^[4]。

柔性棚洞主要由钢拱架和金属网组成，由于采用金属构件制作，各构件实现工厂化加工，现场安装，施工简单快捷，建设费用低，同时结构相对较轻，降低了对基础和场地条件的要求，在交通线上补建时可不阻断交通。为将柔性棚洞应用到实际工程中，作者已开展足尺模型试验^[5]，但由于测试手段的限制，棚洞内构件间能量吸收特性、荷载传递规律等均无法通过试验测试得到，而这对于柔性棚洞优化设计及计算理论的建立具有重要的作用。由于数值方法可以较好的解决上述问题，为此本文开展了柔性棚洞在落石冲击作用下的数值分析，对比试验和数值分析结果，验证数值模型和数值计算方法的可靠性，为后续柔性棚洞的优化及设计计算理论的建立奠定良好的研究基础。

1 柔性棚洞的落石冲击试验介绍

制作的柔性棚洞足尺模型如图 1 所示，支撑体系采用钢拱架，金属网采用 ROCCO 圆环组成的环形网，是承受落石直接冲击作用的主体，同时在环形网上覆盖一层钢丝格栅，以拦截小块落石。设计的柔性棚洞出于自身技术特点，同时考虑经济性及适用性等因素，将防护的最大能级确定为 250kJ。



图 1 由钢拱架和环形网组成的柔性棚洞

Fig.1 Flexible rock-shed composed of avaulted structure and ring nets

试验中，落石的质量为 800kg，冲击速度为 25m/s，形状为正方体切角形成的 14 面体。为了获得落石的冲击能量和速度，用吊车将落石起吊到约 39m 高度，自由下落。采用铅垂线对冲击作用位置进行定位，保证落石冲击作用到柔性棚洞的跨中(图 2(b))。

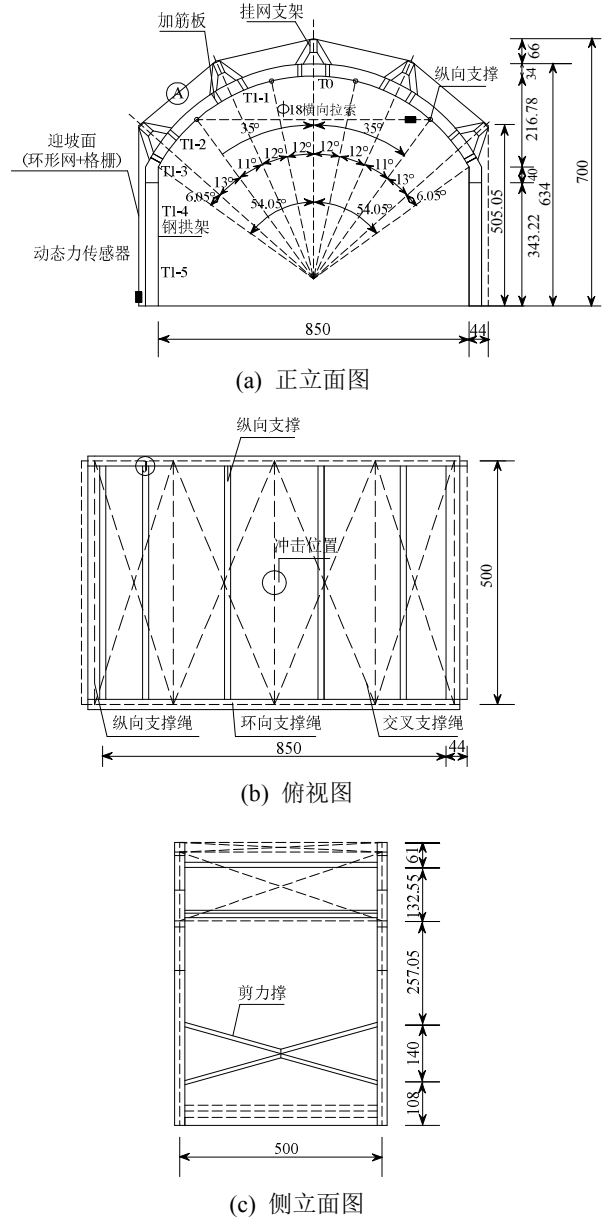


图 2 柔性棚洞断面尺寸布置示意图 /cm

Fig.2 Flexible rock-shed design and dimensions

试验中采用如下方法测试和记录冲击图像和试验数据：

1) 利用高速摄像机拍摄记录冲击过程，高速摄像机的拍摄频率为 300 帧/秒。依据高速摄像机拍摄各个时刻照片，观测钢拱架的变形情况和落石的位移变化情况；

2) 在钢拱架上粘贴动态应变花测试钢拱架上观测点的应变时程曲线。由于落石冲击柔性棚洞的跨中，钢拱架的反应近似对称，因此，仅在一榀钢拱架一半区域布置动态应变花，具体位置为图 2(a)中 T0、T1-1、T1-2、T1-3、T1-4、T1-5。同时将动态应变花与高速应变采集系统连接，记录测试得到

的数据;

3) 在横向拉索和环向支撑绳上串接动态力传感器, 测试横向拉索和环向支撑绳上的荷载大小(图 2(a)), 同时将动态力传感器与高速数据采集系统连接, 记录测试得到的数据。

2 柔性棚洞数值分析模型的建立

2.1 环形网计算模型的简化

环形网是柔性棚洞中直接承受落石冲击的构件, 依靠自身的弹塑性变形来吸收落石的冲击能量。环形网主要由单个 ROCCO 圆环与周围四个圆环相连接组成。单个 ROCCO 圆环(图 3)由直径为 3mm 的钢丝按网孔内切圆直径 300mm, 盘结多圈编织而成, 编制过程中一般采用 3 个金属卡扣对盘结的钢丝进行约束^[6]。



图 3 单个 ROCCO 圆环
Fig.3 Single ROCCO ring

对环形网的简化数值计算模型研究较多。Volkwein 等^[7]提出了根据环形网中单个 ROCCO 圆环与周围圆环的连接个数情况, 将单个的圆环简化成 2 个、3 个或 4 个节点, 节点之间采用弹簧单元进行连接; Gentilini 等^[8-9]、Nicot 等^[10-11]提出了将环形网中圆环简化成单个节点, 圆环与圆环之间的连接简化为节点与节点之间的杆件连接。本文中, 考虑到柔性棚洞尺寸效应的影响, 将环形网中圆环与圆环的连接关系简化为相切, 直接建立圆形单元来模拟圆环。为考虑钢丝盘结效应, 研究了对径受拉荷载作用下的圆环力学特性, 提出了圆环等效截面半径的计算方法^[12-13]。将由半径为 r 的钢丝盘结 n 圈组成的圆环, 简化成等效截面半径为 r_1 的圆环, 推导出的计算公式如下:

$$r_1 = n^{1/3} \cdot r \quad (1)$$

单个 ROCCO 圆环在对径受拉荷载作用下的荷载-位移关系可以近似用下列等式表示:

$$\frac{P}{2} R(1 - \sin \theta) = 2M_p \quad (2)$$

$$\delta = 2R(\cos \theta + \theta - 1) \quad (3)$$

$$M_p = \frac{4}{3} \sigma_0 r_1^3 \quad (4)$$

式中: P 为径向受拉荷载; R 为圆环半径; θ 为角度变量; δ 为径向位移; M_p 为圆环的塑性极限弯矩; σ 为圆环截面屈服应力; r 为钢丝直径, $r = 3\text{mm}$; r_1 为等效截面半径; n 为盘结圈数。

图 4 给出了单个 ROCCO 圆环在对径受拉荷载作用下的荷载位移曲线以及理论计算得到的荷载位移曲线。从图中可以看出, 试验结果与理论计算结果吻合好。因此, 采用等效截面法对单个圆环进行简化是可行的。

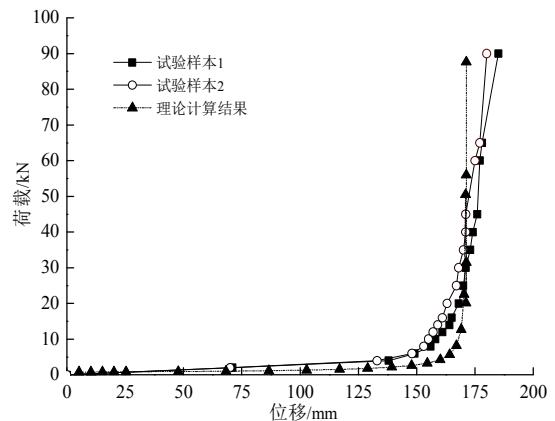


图 4 对径受拉荷载作用下圆环荷载-位移曲线
Fig.4 Force-displacement curves of single rings pulled diametrically

2.2 数值分析中选用的单元及材料参数

考虑到柔性棚洞中钢拱架、纵向支撑、剪力撑等都属于薄壁结构, 因此采用 4 节点的空间薄壳单元 shell 163 来模拟; 对横向拉索、环向支撑绳、纵向支撑绳以及交叉支撑绳采用 link 160 单元建立分析模型, 该单元只能考虑材料受轴向荷载作用, 不能承受弯矩; 对圆环采用 beam 161 单元模拟, 主要是考虑圆环在拉伸的过程中能够承受一定的弯矩; 对落石采用 8 节点三维实体显示结构单元 solid 164 单元模拟^[14]。

对于支撑绳、环形网以及钢拱架, 在数值分析时, 需要考虑失效。因此选用塑性随动强化模型来考虑这种效应, 同时采用 Cowper-Symonds 模型来考虑应变率效应的影响。考虑到在整个试验过程中落石没有发生破损, 采用刚体材料模型来模拟落石。

数值计算中,对钢材、钢丝及钢丝绳的本构模型进行了简化处理,均采用双线性本构模型,取材料的屈服强度和拉伸破断时的极限应变作为计算依据,结合 Castro-Fresno 等^[15]和 Cazzani 等^[16]对钢丝绳单轴拉伸试验结果、del Coz Diaz 等^[17]对 TECCO 钢丝单轴拉伸试验结果以及作者对钢丝绳、钢丝以及钢材的试验结果^[5],确定材料的力学性能参数指标见表 1。对钢丝绳采用等效截面面积的方法进行计算,支撑绳和横向拉索的直径分别为 16mm 和 18mm,对应的等效截面面积分别为 90.96mm² 和 115.25mm²;环形网中单个圆环采用直径为 3mm 的钢丝盘结 9 圈编制而成,根据式(1)计算得到盘结 9 圈圆环的等效截面半径为 3.12mm。此外,钢拱架中构件截面尺寸见表 2。

表 1 材料力学性能参数指标

Table 1 Material parameters of the numerical model

类型	钢材	钢丝绳	钢丝
弹性模量/MPa	2.10×10^5	1.70×10^5	1.77×10^5
密度/(kg/m ³)	7850	7850	7850
屈服强度/MPa	500	1770	1770
泊松比	0.3	0.3	0.3
极限应变	0.15	0.03	0.05

表 2 H 型钢结构截面尺寸及截面特性

Table 2 Cross-sectional dimensions of the steel vaulted structure

构件名称	型号(代号+H×B)	其他尺寸/mm		
		t_1	t_2	r
钢拱架	HM340×250	9	14	13
挂网支架	HM244×175	7	11	13
支撑构件	HM150×150	7	10	8

2.3 柔性棚洞的数值分析模型

由于柔性棚洞构件组成方式及连接节点措施非常复杂,为了提高计算效率和计算精度,基于试验结论、理论分析和合理假设的基础上,对柔性棚洞分析模型进行了简化:

1) 由于环向支撑绳、纵向支撑绳、交叉支撑绳穿过挂网支架的上端连接节点(图 5),相互之间能够传递荷载。因此,建立模型时,将环向支撑绳、纵向支撑绳、交叉支撑绳连接处看作一个节点,该节点与挂网支架上两处节点的位移自由度耦合,保证环向支撑绳、纵向支撑绳、交叉支撑绳以及挂网支架能够协同工作;

2) 由于钢丝格栅只是起到拦截小块落石的作用,且处于完全松散状态,相比环形网其吸收的能量很小,因此,数值分析中予以忽略;

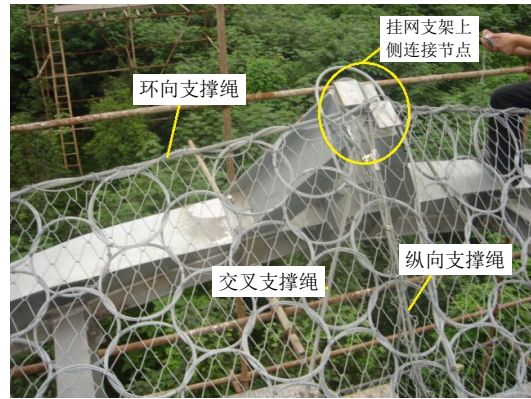


图 5 支撑绳穿过挂网支架上部的构造措施详图

Fig.5 Detail of the upper connection of net-hanging bracket

3) 在试验中,挂网支架下侧加劲板,剪力撑、纵向支撑与钢拱梁之间采用节点板焊接连接。因此在建立模型考虑挂网支架下侧加劲板,剪力撑、纵向支撑与钢拱梁之间节点板的连接问题时,均按与钢拱架上下翼缘共节点,不考虑焊接节点发生破坏;

4) 由于环形网与环向支撑绳采用缝合绳进行连接,试验中未发现缝合绳断裂、存在明显松动迹象,因此建模过程中,将环形网与环向支撑绳在交接处采用共节点方式处理;

5) 在安装过程中,环形网中的圆环相互嵌套造成了一定的尺寸缩减。而在建立环形网模型的过程中,没有考虑环形网中圆环之间相互嵌套造成的尺寸缩减,将圆环之间的相互嵌套设定为圆环与圆环之间相切,数值模型与实际模型之间存在一定的偏差。为了保证建立的数值分析模型能够反映真实的实物模型,数值模型中沿棚洞环向、纵向圆环的个数以及环形网中的总个数与实际模型一致。

采用商用软件 ANSYS/LS-DYNA 进行计算。计算中定义落石与柔性棚洞的接触为自动接触,其关键字选项为 AUTOMATIC_GENERAL,定义接触时的动摩擦系数为 0.8,定义总的计算时间为 0.25s,开始接触时的起始时间为 0s。

数值分析中模型的约束情况:对钢拱架的四个柱端底部采用固定约束,这一点符合模型柱端底部的构造特点,对环向支撑绳与地面连接处采用固定连接,约束节点处所有自由度。建立的落石模型位于钢拱架的跨中,稍高于环形网。落石的初始速度为 25m/s,重力加速度为 9.8m/s²。建立的数值分析模型及其约束情况见图 6 所示。

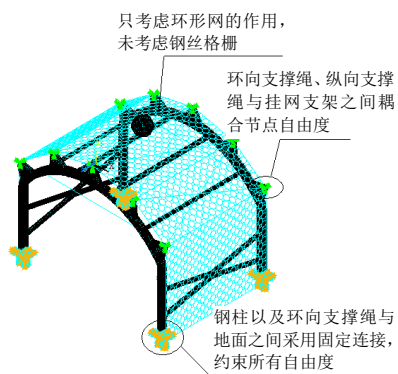


图 6 建立的数值分析模型及其约束情况

Fig.6 Numerical simulation model with boundary conditions

3 数值计算结果与试验结果对比

为了验证数值模型和相关数值计算方法的可靠性, 将数值计算结果与试验结果从五个方面进行了对比: 一是从落石冲击作用时间上进行对比; 二是从环形网下降的位移上进行对比; 三是将横向拉索和环向支撑绳的最大荷载进行对比; 四是从柔性棚洞的变形特征上进行对比; 五是从钢拱架的应变时程曲线上进行对比。

表 3 数值计算结果与试验结果对比

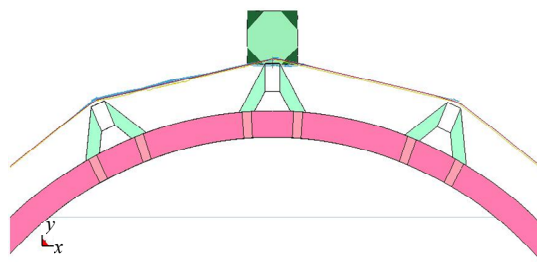
Table 3 Comparison between experimental and numerical results

类别		试验	数值计算	相差/(%)
落石冲击到最低点	位移/m	2.310	2.066	10.6
	时间/s	0.143	0.128	10.5
钢拱架回弹停止	位移/m	1.780	1.402	21.2
	时间/s	0.227	0.198	17.7
最大荷载/kN	横向拉索	29.5	32.3	9.5
	环向支撑绳	21.4	18.1	15.4

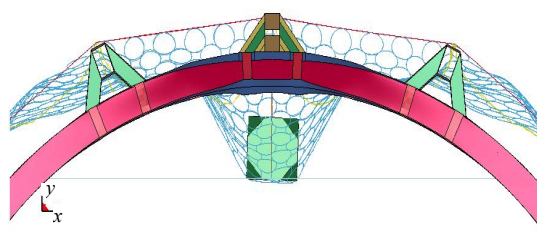
表 3 给出了试验和数值计算得到的落石冲击作用时间、环形网下降的位移、环向支撑绳和横向拉索上的最大荷载值。从表中可以看出: 在两个关键时刻, 数值计算得到的环形网下降的位移分别为 2.066m 和 1.402m, 冲击作用时间为 0.128s 和 0.198s, 均低于试验结果。产生偏差的主要原因如下: 1) 环形网在数值模型中是处于张紧状态的, 但物理模型中处于松散状态; 2) 数值建模在处理钢拱架内部、钢拱架与纵向支撑等节点时, 均考虑为刚结, 与试验模型有一定的差别; 3) 建立模型时, 环形网中单个圆环是相切的, 但是试验模型中是相互嵌套的, 这在一定程度上造成了尺寸之间的不匹配; 4) 试验模型中环形网和环向支撑绳是采用缝合绳进行连接的, 而数值模型中没有考虑缝合绳的连

接作用; 5) 试验模型中纵向支撑绳、交叉支撑绳是与挂网之间进行连接的, 而数值模型中, 对环形支撑绳、纵向支撑绳和交叉支撑绳采用了共节点的方式处理, 与真实的约束情况存在一定的差异。

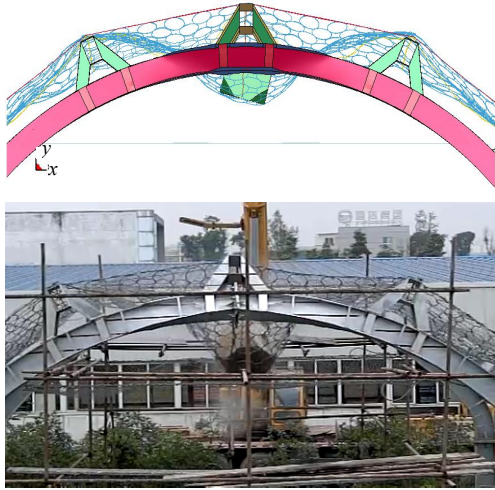
图 7 给出了数值计算和试验得到的落石冲击作用下柔性棚洞在 3 个关键时刻变形的对比图。从中可以看出: 数值计算得到的棚洞在落石冲击作用下的变形特征与试验结果吻合好, 采用数值计算方法可以较好的模拟落石冲击柔性棚洞的整个动态过程。



(a) 数值分析和试验得到的落石接触柔性棚洞时的特征



(b) 数值分析和试验得到的柔性棚洞在落石冲击到达最低点时的变形特征

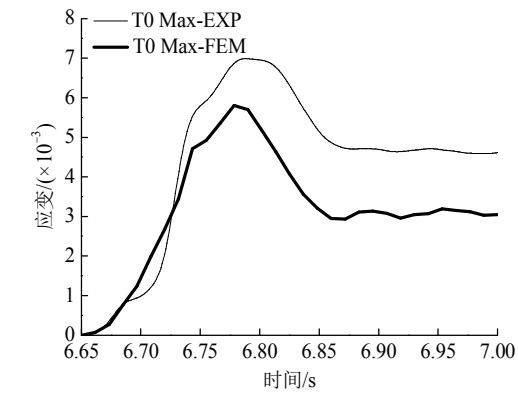


(c) 数值分析和试验得到的柔性棚洞在钢拱架回弹停止时的变形特征

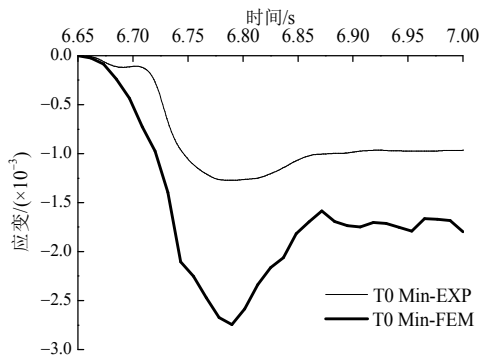
图 7 数值计算和试验得到的柔性棚洞变形特征

Fig.7 Experimental and simulated deformation of the rock-shed

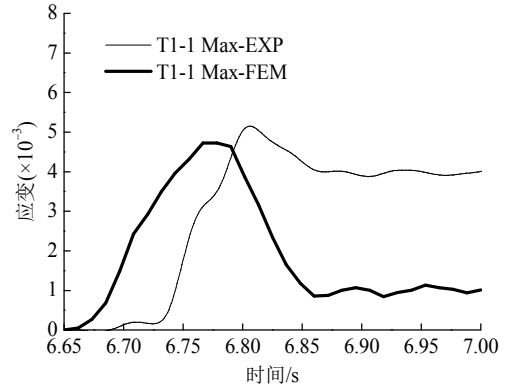
图 8 给出了 T0、T1-1、T1-2 位置处数值计算和试验得到的最大和最小主应变时程曲线(粗线为数值计算得到的曲线,细线为通过试验测试数据计算得到的曲线)。从图中可以看出:数值计算得到的主应变时程曲线与试验数据计算得到的主应变时程曲线变化趋势吻合较好,能够较合理的反映钢拱架的应变变化规律。



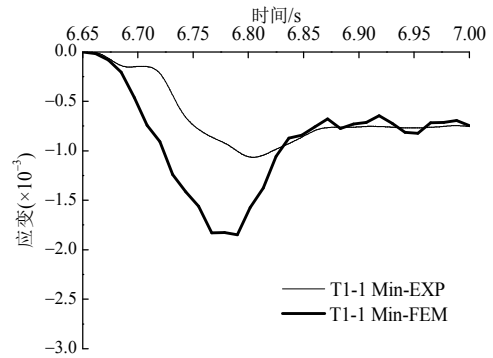
(a) T0 位置处最大主应变时程曲线



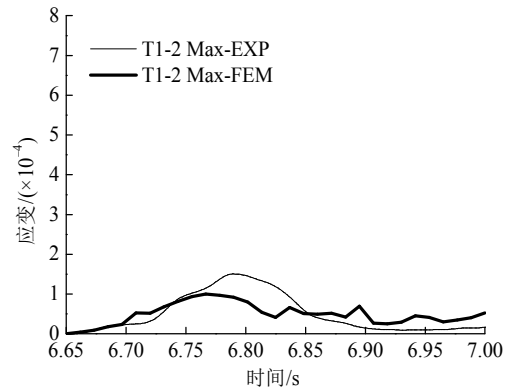
(b) T0 位置处最小主应变时程曲线



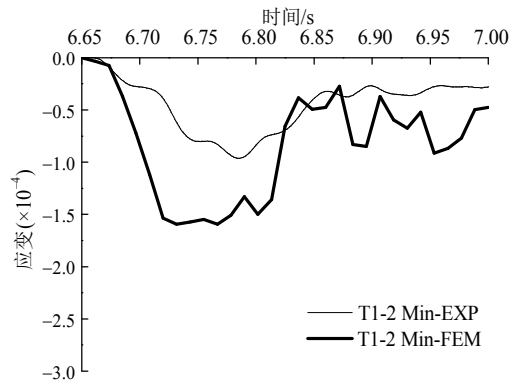
(c) T1-1 位置处最大主应变时程曲线



(d) T1-1 位置处最小主应变时程曲线



(e) T1-2 位置处最大主应变时程曲线



(f) T1-2 位置处最小主应变时程曲线

图 8 数值计算和试验得到的钢拱架在 T0、T1-1、T1-2 位置处的主应变时程曲线

Fig.8 Experimental and simulated principal strain-time curves for the steel structure at locations T0, T1-1, and T1-2

4 结论

本文主要开展了柔性棚洞在落石冲击作用下的数值分析,从落石冲击作用时间、环形网下降的位移、横向拉索和环向支撑绳上最大荷载、柔性棚洞的变形特征以及钢拱架应变时程曲线五个方面,对数值计算结果和试验结果进行了对比研究,验证了所采用的数值模型和相关数值计算方法的可靠性,并分析了产生误差的原因,为后续柔性棚洞的优化及设计计算理论的建立奠定良好的研究基础。

参考文献:

- [1] 汪敏,石少卿,阳友奎. 边坡主动防护系统加固力简化计算方法研究[J]. 公路交通科技, 2011, 28(5): 12—16, 32.
Wang Min, Shi Shaoqing, Yang Youkui. Research on simplified calculation method of reinforcement force of slope active protection system [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28(3): 12—16, 32. (in Chinese)
- [2] 何思明. 滚石对防护结构的冲击压力计算[J]. 工程力学, 2010, 27(9): 175—180.
He Siming. Calculation of compact pressure of rock-fall on shield structure [J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(9): 175—180. (in Chinese)
- [3] 何思明,吴永. 新型耗能减震滚石棚洞作用机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 926—932.
He Siming, Wu Yong. Research on cushioning mechanism of new-type energy dissipative rock shed [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(5): 926—932. (in Chinese)
- [4] 阳友奎. 用于隔离防护飞石或落石的柔性棚洞[P]. 中国, 实用新型专利, 专利号 CN101666070, 2010.
Youkui Yang. A new type flexible rock-shed used for isolation and protection of the flying rocks and rockfall [P]. China, Utility Model Patent, Patent number CN101666070, 2010. (in Chinese)
- [5] 汪敏. 柔性防护技术和柔性棚洞的设计及工程应用研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2011.
Wang Min. The engineering application and the design research of the flexible protective technique and the flexible rock shed [D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [6] TB/T3089-2004, 铁路沿线斜坡柔性安全防护网[S]. 北京: 铁道出版社, 2004.
TB/T3089-2004, The flexible safety net for protection of slope along the line [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004. (in Chinese)
- [7] Volkwein A. Numerical simulation of flexible rockfall protection systems [C]// Proceedings of Congress on Computing in Civil Engineering. Cancun Mexico, 2005: 12—16.
- [8] Gentilini C, Govoni L, Miranda S D, et al. Three-dimensional numerical modelling of falling rock protection barriers [J]. Computer Geotechnics, 2012, 44: 58—72.
- [9] Govoni L, Miranda S D, Gentilini C, Ubertini F. Modelling of falling rock protection barriers [J]. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2011, 11(4): 126—137.
- [10] Nicot F, Cambou B, Mazzoleni G. Design of rockfall restraining nets from a discrete element modeling [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2001, 34(2): 99—118.
- [11] Nicot F, Cambou B, Mazzoleni G. From a constitutive modelling of metallic rings to the design of rockfall restraining nets [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25(1): 49—70.
- [12] 汪敏,石少卿,阳友奎. 两种不同组合形式的环形网耗能性能的对比分析[J]. 振动与冲击, 2012, 31(2): 55—61.
Wang Min, Shi Shaoqing, Yang Youkui. Comparative analysis for capacity of energy dissipation of a ring net with two different connection forms [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(2): 55—61. (in Chinese)
- [13] 汪敏,石少卿,康建功. 落石冲击作用下环形网耗能性能的理论及数值模拟研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(3): 10—13, 21.
Wang Min, Shi Shaoqing, Kang Jiangong. Numerical and theoretical analysis of dissipation energy capacity of ring net impacted by rockfall [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(3): 10—13, 21. (in Chinese)
- [14] Moaveni S. Finite element analysis: Theory and application with ANSYS [M]. New Jersey: Prentice-Hall Publications, 1999: 75—88.
- [15] Castro-Fresno D, del Coz Diaz J J, López L A, Nieto P J G. Evaluation of the resistant capacity of cable nets using the finite element method and experimental validation [J]. Engineering Geology, 2008, 100(1/2): 1—10.
- [16] Cazzani A, Mongiovi L, Frenez T. Dynamic finite element analysis of interceptive devices for falling rocks [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(3): 303—321.
- [17] del Coz Diaz J J, Nieto P J G, Fresno D C, Fernández E B. Non-linear analysis of cable networks by FEM and experimental validation [J]. International Journal of Computer Mathematics, 2009, 86(2): 301—313