

Application of Flexible Steel Shed Hole in Falling Rock Prevention

Lei Wang¹, Kuo Li², Meng Wang¹

¹Second Highway Consultants Co., LTD., Wuhan Hubei

²Geological Survey Institute, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Email: 547772820@qq.com

Received: Nov. 27th, 2019; accepted: Dec. 26th, 2019; published: Jan. 3rd, 2020

Abstract

This article takes the prevention and control of rock fall at the exit of a highway tunnel at Jiuluzhai as an example to design a flexible steel shed-tunnel. In this paper, the basic dimensions of the shed are designed to limit the fall trajectory of the falling rock and the maximum impact energy by limiting the on-site topographic and geological conditions such as roads and tunnel heights at the exit, and then the size of the flexible steel is corrected by numerical simulation. The measures were followed by verification of the existing sheds using the newly proposed energy method, and finally the plan was established. The results show that in the impact of falling stone on the flexible steel shed-tunnel, the support rope in the flexible net absorbs most of the energy, and the maximum pressure on the steel arch is about twice of the tension.

Keywords

Passive Protection Measures, Flexible Steel Shed-Tunnel, Rock Fall Prevention, Structural Design

柔性钢棚洞在落石冲击中的防护应用研究

王磊¹, 李阔², 王猛¹

¹中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉

²中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北 武汉

Email: 547772820@qq.com

收稿日期: 2019年11月27日; 录用日期: 2019年12月26日; 发布日期: 2020年1月3日

摘要

随着落石防治的不断发展, 柔性钢棚洞以透光性好、造价低等优势在落石防治中具有广阔的前景。但目

文章引用: 王磊, 李阔, 王猛. 柔性钢棚洞在落石冲击中的防护应用研究[J]. 土木工程, 2020, 9(1): 1-11.

DOI: 10.12677/hjce.2020.91001

前对柔性钢棚洞的研究在内部结构应力等方面仍有空白。以某公路隧道出口针对落石防治设置的柔性钢棚洞为例,研究落石下落的轨迹和最大冲击能量,利用数值模拟的方法,对设计的柔性钢棚洞的内部结构进行分析,最后辅以能量法对已有棚洞进行计算验证。结果表明,在落石对柔性钢棚洞的冲击中,柔性网中支撑绳吸收了大部分的能量,钢拱架受到的最大压力为拉力的2倍左右。

关键词

被动防护措施, 柔性钢棚洞, 落石防护, 结构设计

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在我国西部山区交通中,不可避免遇到落石等灾害问题。针对小型落石的防护中,棚洞占有极其重要的地位[1][2]。棚洞属于明洞的范畴,即棚式明洞。指为抵挡危岩落石、塌方等自然灾害对已有道路的影响,在隧道进出口或线路特殊地段独立修建的以吸收落石为主要功能的棚式建筑物[3]。与其他措施相比,棚洞明显减少对环境的破坏,照明通风成本减少,长远来看,棚洞更具有优越性[4]。

自阳友奎[3]在2009年发明了由钢拱架与金属网组合形成的隔离防护飞石或落石的柔性棚洞的实用性专利以来,我国的各位专家学者对柔性棚洞不断有新的突破。

在针对柔性棚洞的使用效果的研究中,汪敏[4]、刘成清等[2]分别利用模型实验、数值模拟等方法研究了普通钢筋混凝土棚洞与柔性棚洞在实践中的优缺点和使用限制。在实际工程运用中,罗章波等[5]展示了一个较为完善的研究思路。刘成清等[6]将柔性钢棚洞的结构转化为简单的力学模型,研究了柔性钢棚洞的耗能与极限承载力的问题,提出针对柔性棚洞的设计理论。

本文以九路寨某隧道出口的柔性钢棚洞为例,在对落石运动分析的基础上,使用有限元数值模拟软件模拟落石撞击钢棚洞的过程,分析钢棚洞结构各构件能量、轴力的变化,利用柔性钢棚洞设计理论对已有结构进行验证。

2. 工程概况

九路寨生态旅游区位于保康县西南部歇马镇境内。通往本旅游区某公路隧道为双向单车道,宽6米,高5米,隧道出口上方为险峻的陡崖,陡崖高约30米。

2.1. 地形地貌和地质情况简介

本地为构造剥蚀中低山地貌区,地势险峻,山体陡直,多为断岩绝壁,深沟峡谷。山体坡表多为第四系崩积物所覆盖,厚度较薄。基岩大面积裸露,顶部被密集植被覆盖(图1)。

该地区地层由新到老分别为耕表土(Q^{pd}),松散至稍密状,厚约0.5m;粉质黏土(Q_4^{cl+dl}),硬塑状,厚约0.8m;下伏基岩为古生代奥陶系上统五峰组(O_3w)泥质灰岩、白云质灰岩等。

该地区岩层产状平缓,倾向 19° ,倾角 $8^\circ\sim 10^\circ$ 。发育两条主要节理,节理1倾向 146° ,倾角 80° ;节理2倾向 285° ,倾角 76° (图2)。根据隧道区周边地质调绘,沟底和路边落石多呈类球状,大小不一,直径 $0.05\sim 0.36$ m。



Figure 1. The situation of road tunnel exit
图 1. 公路隧道出口情况

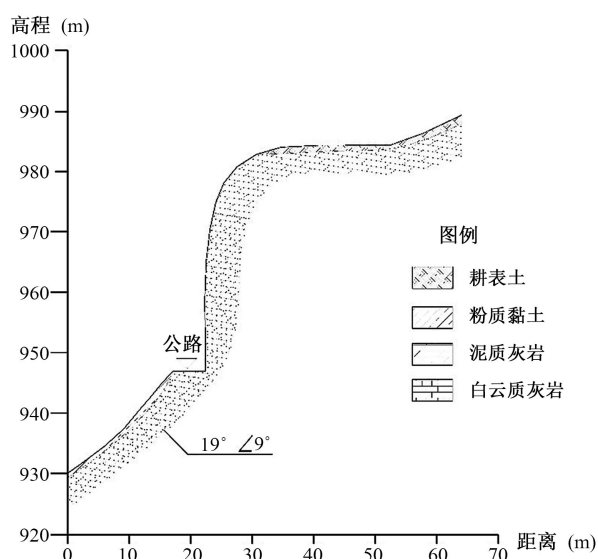


Figure 2. The profile of road tunnel
图 2. 公路隧道断面图

2.2. 柔性钢棚洞简介

该工程拟采用钢拱架加柔性网的形式进行设计。钢拱架一般使用 H 型钢。柔性网可分为环形网，支撑绳，加密钢丝网三个部分，环形网与支撑绳主要来承受落石的撞击，吸收落石下落的能量。加密钢丝绳用来阻止小型落石的进入。

根据道路的宽度 6 m 以及隧道的高度 5 m，同时考虑棚顶与隧道最高处应有一定的安全空间，一般为 1.5 m，设置棚洞的基本断面尺寸。

柔性钢棚洞的钢结构基本采用的是 H 型钢桁架[7]，选用的尺寸为 H500 mm × 300 mm。在效能和经济两方面的考虑，对防护网中的环形网采用 RXI-025 (ROCCO)环形网[8] [9]。以带支座的支撑绳纵向五跨，横向一跨，最终形成 8 个 2.5 m × 3 m 的网格。防护网分为上下两层，上层为环形网与支撑绳，每个环与周边四个环相互连接，圆环直径为 0.3 m；下层为加密钢丝网，加密钢丝网直径为 0.05 m × 0.05 m。钢棚洞棚顶防护网平面示意，见图 3，整体示意图如图 4 所示。

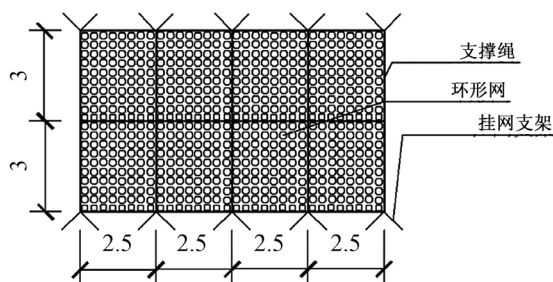


Figure 3. The plane diagram of roof protection net
图 3. 棚顶防护网平面示意图

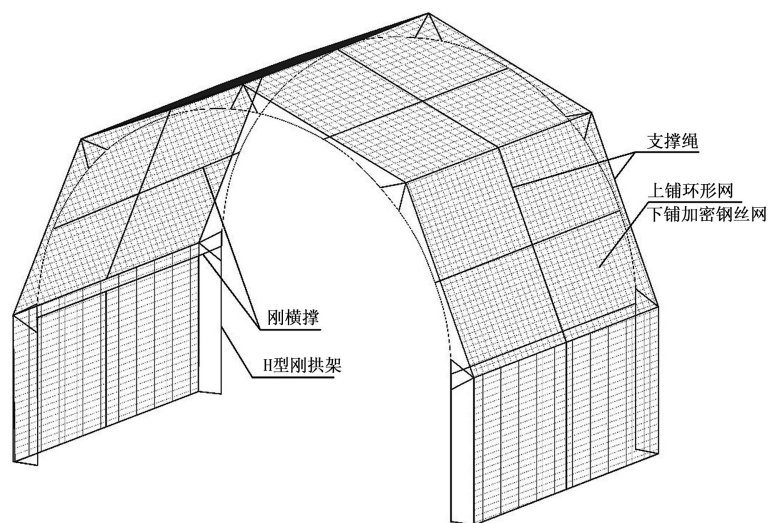


Figure 4. The overall schematic diagram of flexible steel shed-tunnel model
图 4. 柔性钢棚洞模型整体示意图

3. 边坡落石运动分析

3.1. 落石产生原因

落石的形成与其工程地质条件有极其紧密的关系。主要有地形地貌条件，气候、地层岩性，地质构造，风化作用及人类工程活动等[10] [11]。

3.2. 落石下落的运动状态分析

当崩塌落石在重力作用下，沿山体坡面滑动、滚动或跳动，当与坡面接触后发生反弹，根据坡面接触点的法向弹性系数和切向摩擦系数的不同，落石的弹跳高度亦不同[12] [13]。此时，接触坡面对落石产生消能作用，致使落石的动能衰减，直至落石停留动能为零[14]。整个过程遵循能量的转化和守恒定律。

3.3. 落石运动模型计算

3.3.1. 模型参数

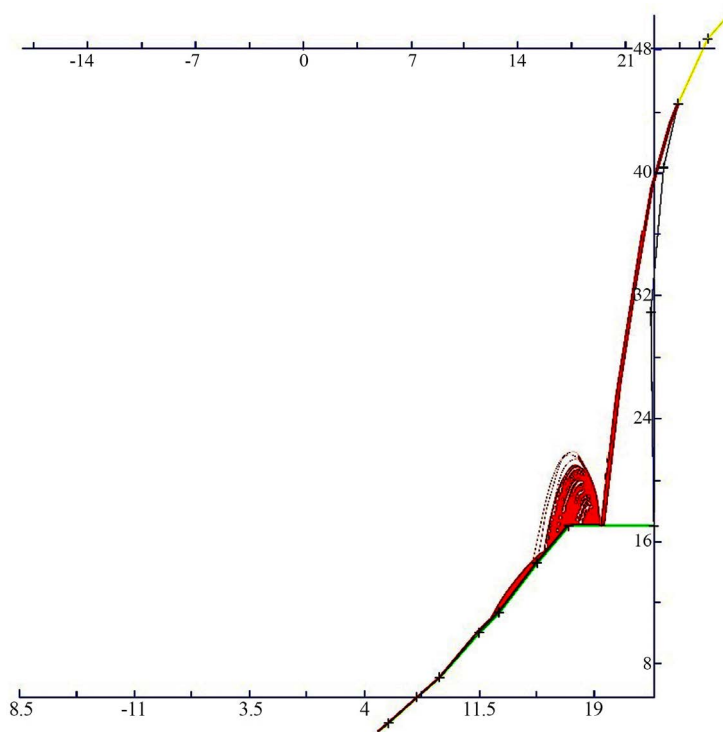
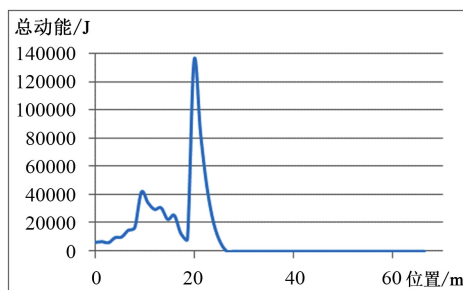
导入工程地质剖面图的 CAD 文件，建立模型。对不同的地层设置不同的法向弹性系数、切向弹性系数(表 1)。根据散落在道路中的落石及边坡节理调查，将道路边坡单块落石方量取 0.2 m^3 ，按平均密度 2500 kg/m^3 ，设置落石质量为 500 kg 。只在自重作用下沿着斜坡面滑动的状况进行 50 次模拟。落石模拟轨迹中，边坡上的落石基本全部掉落在公路内。

Table 1. The setting parameters of slope formation**表 1.** 边坡地层设定参数

地层	切向阻尼系数 R_t	法向阻尼系数 R_n
耕表土	0.80	0.30
粉质黏土	0.80	0.30
泥质灰岩	0.82	0.32
白云质灰岩	0.85	0.35

3.3.2. 计算结果及落石冲击力分析

在落石的能量方面，在 19 m 到 25 m 处能量较高(图 5，图 6)，最高达到了 135 kJ，公路在 17 m 到 23 m 的范围，正是在公路靠近陡崖的一侧，设计的棚洞须能够承受住这些冲击力。

**Figure 5.** The simulation of rock fall trajectory**图 5.** 对落石轨迹的模拟**Figure 6.** The kinetic energy variation of falling rock at horizontal position**图 6.** 水平位置落石动能变化图

4. 落石对柔性钢棚洞冲击数值模拟

本文拟用有限元数值模拟软件模拟落石对柔性网的冲击过程，对已有的结构进行显式非线性动力分析，从而获取模拟后的各构件能量及轴力等结果。

4.1. 落石对柔性钢棚洞冲击受力分析

落石冲击力是棚洞结构设计所依据的主要荷载之一[15]，冲击力代表着落石下落对棚洞造成的作用力。

冲击力计算公式应用较为广泛的主要有公路路基规范和日本道路公团[16]等方法。将落石假设为直径 0.36 m 的球体，密度为 2500 kg/m³，质量为 500 kg。路基土层为黏土层，填土重度为 18.7 kN/m³，内摩擦角为 25°，拉梅常数取 1000 kN/m²，泊松比为 0.3。使用公路路基设计规范求得冲击力为 184.01 kN，使用日本道路公团的计算冲击力为 $P = 161.98$ kN。取两者的较大值即 184.01 kN。

4.2. 模型建立

Link160 作柔性网中环形网、支撑绳的模拟单元[17]。采用 Beam161 梁单元模拟柔性棚洞的拱形钢、挂网支架及横撑。Sold164 单元可模拟落石。根据已有的构件的各项基本参数(表 2)，设置相应的单元参数(表 3)。在柔性钢棚洞的模型中，采用非弹性非线性的 Plastic Kinematic (塑形随动)材料模型[18]。落石一般模拟成球形，同体积球型落石与片状、立方体状等落石相比，在位移、冲击力、能量方面破碎性最大[19]。为简化模型将环形柔性网概化为同面积的正方形进行模拟(图 7)。

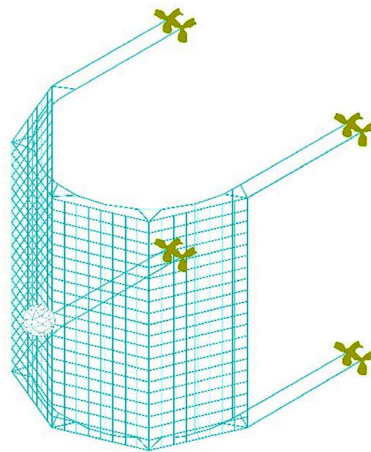


Figure 7. The schematic diagram of simulation mode

图 7. 模拟模型示意图

Table 2. The model parameter table

表 2. 模型参数表

构件	弹性模量 ($\times 10^5$ Mpa)	密度(kg/m ³)	屈服强度 (MPa)	泊松比	应变率		极限应 变
					C	P	
钢拱架(挂网支架)	2.05	7850	235	0.3	—	—	0.05
环形网	2.05	7850	1770	0.3	40	5	0.05
支撑绳	2.05	7850	1770	0.3	40	5	0.05
落石	0.3	2500	—	0.3	—	—	—

Table 3. The model element set table**表 3.** 模型单元设置表

构件	单元类型	截面面积(mm ²)	材料模型
环形网	Link160	35.325	塑形随动模型
支撑绳	Link160	226.08	塑形随动模型
钢拱架	Beam161	15920	塑形随动模型
落石	Solid164	—	刚体

4.3. 数值模拟结果分析

从各构件能量、变形、轴力等方面进行分析。

4.3.1. 能量分析

在落石下落中，由于重力作用，与柔性网的摩擦撞击，会引起总能量变大变小的现象。

能量的途径是落石的动能转化为柔性网的内能。由图 8、图 9 可知，落石最高总能量为 120 kJ。

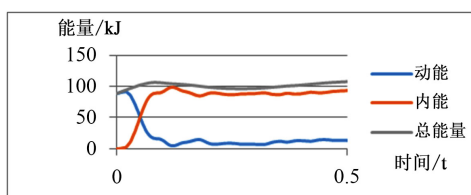


Figure 8. The time-history curve of component total energy

图 8. 构件总能量时程曲线

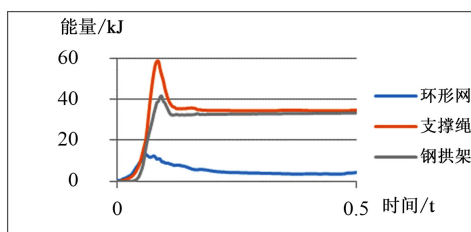


Figure 9. The time-history curve of each component energy

图 9. 各构件能量时程曲线

4.3.2. 构件变形分析

选取落石竖向位移最大时刻，绘制各构件的位移云图(图 10~12)。

位移数值向下为负，对于环形网的最大位移为 1.22 m，安全距离取 1.5 m 是合适的。从中心到四周，位移量逐渐减少。在支撑绳中的最大位移发生的位置与环形网基本一致，都为落石落入接触的中心位置附近。最大位移为 1.18 m。

钢拱架发生最大位移是由于落石下落冲击引起，因落石对柔性网的挤压使得连接柔性网的两个横撑发生相对移动。最大位移的位置为两个钢拱架之间的横杆中，受到挤压力发生位移。最大位移为 0.51 m。

4.3.3. 构件轴力分析

选取环形网、支撑绳及钢拱架中轴力较大的几个单元，以单元为研究对象，分析轴力与时间的变化关系。

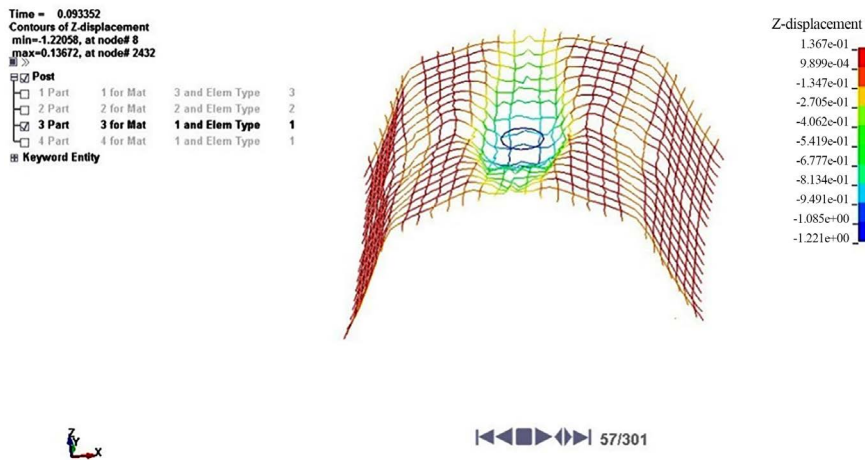


Figure 10. The diagram of maximum displacement of ring network
图 10. 环形网最大位移图



Figure 11. The diagram of maximum displacement of support rope
图 11. 支撑绳最大位移图

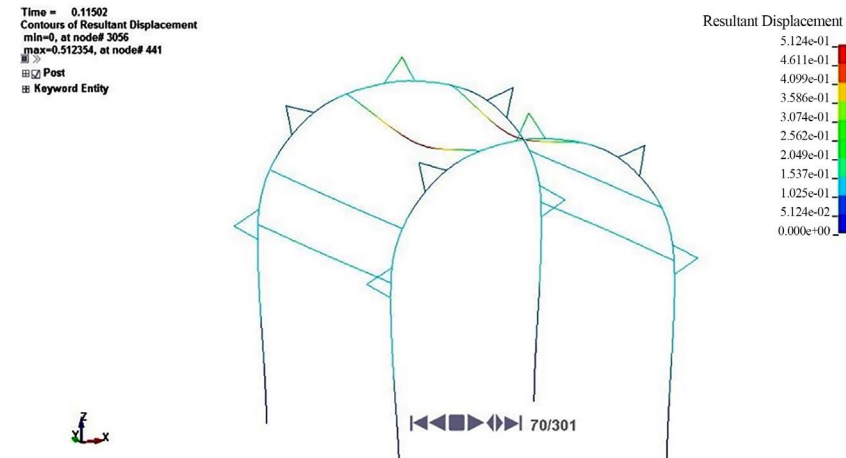


Figure 12. The diagram of maximum displacement of steel arch
图 12. 钢拱架最大位移图

环形网与支撑绳只受到压力的作用, 环形网所受轴力较小但起伏较大, 最大超过了 15 kN 将近 20 kN (图 13), 落石下落直接接触点为支撑绳, 因此支撑绳最大超过 300 kN, 达到了 350 kN, 起到了主要承受拉力的作用(图 14)。

钢拱架既受压力也受拉力的作用(图 15), 轴力为正时为拉力, 负时为压力。钢拱架的拉力最大不超过 120 kN, 但压力最大不超过 220 kN, 因此对钢拱架来说主要受到压力的作用。压力的位置主要在两个钢拱架之间的横杆中。拉力主要在于挂网支架之间的横撑之间。

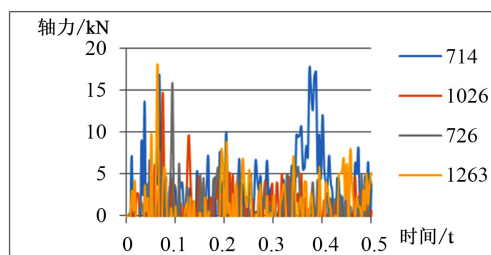


Figure 13. The time-history curve of axial force of ring network element

图 13. 环形网单元轴力时程图

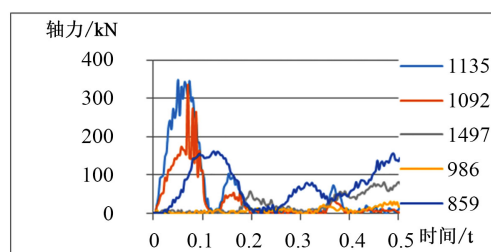


Figure 14. The time-history curve of axial force of support rope

图 14. 支撑绳轴力时程图

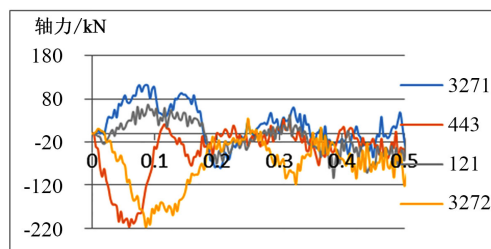


Figure 15. The time-history curve of axial force of steel arch shelf

图 15. 钢拱架轴力时程图

4.4. 数值模拟对结构尺寸修正

在能量分析中, 根据软件模拟的落石最大能量为 120 kJ, 这数据与数值模拟的 135 kJ 较为接近, 取其最大值 135 kJ。这也从侧面证明了数值模拟的一个相对准确程度。

根据最大轴力可以修正最小截面。最小截面面积如表 4 所示。

柔性网根据截面尺寸, 选用 ROCCO R5/3/300 型即 RXI-025 防护网, 钢拱架由于经济因素, 可以选用尺寸为 500 mm × 200 mm 型号的 H 型钢。

Table 4. The minimum section area of each member
表 4. 各构件最小截面面积

构件	原截面面积 (mm ²)	最大轴力 (kN)	屈服极限 (MPa)	最小截面面积 (mm ²)
环形网	35.325	20	1770	11.3
支撑绳	226.08	350	1770	197
钢拱架	23150	220	235	936

5. 基于能量法对柔性钢棚洞的验证

5.1. 理论假设

利用西南交大刘成清等人提出的能量法理论[6]对柔性钢棚洞进行验证, 该设计理论从钢拱架以及柔性钢绳索开始, 针对两者的屈服机制, 分别求得在两种情况下的钢拱架、刚绳索以及防护网最终的吸收能量值, 加在一起即为整个钢棚洞的耗能值。理论假设: 1) 落石下落位置取最不利的情况, 一般为两个钢拱架中间的刚绳索中。2) 落石撞击的力, 由两条支撑绳承受。

5.2. 理论验算

在设计中, 柔性网是由环形网及支撑绳共同承担, 但在能量法中, 只有两个刚绳索承担作用力, 因此需要求得环形网与支撑绳等效为两根刚绳索的半径。

通过对比钢拱架顶部与根部屈服分析可知钢拱架的根部先于顶部出现塑性铰。钢拱架结构极限荷载计算中, 在钢结构根部先出现塑性铰的情况下, 会经历弹性阶段、2个塑性铰阶段、3个塑性铰阶段、最终达到极限状态。通过验算, 最终极限状态时极限承载力为 448.92 kN。而刚绳索的极限承载力为 143.80 kN。刚绳索比钢拱架先屈服。最终的总耗能为钢拱架、刚绳索以及柔性网耗能的总和, 为 206.54 kJ。

6. 结语

本文以九路寨公路隧道出口落石防治设计为例, 通过对落石的研究, 研究落石轨迹、冲击能量以及冲击力。使用有限元数值模拟软件模拟落石对棚洞的碰撞作用, 得到构建内部能量轴力等数据, 最后基于能量法对已有钢棚洞进行检验。

在本次设计中得到的结论如下: 1) 在柔性钢棚洞对落石的冲击中, 钢拱架受到的最大压力为拉力的 2 倍左右, 因此要注意钢拱架的抗压性能; 2) 在对落石能量吸收中, 柔性网中支撑绳吸收了大部分的能量, 因此要重视对支撑绳的选取; 3) 在利用能量法理论计算时, 由于能量法理论模型为两条纵线与实际结构的环形网有较大出入, 能量法偏于保守。

参考文献

- [1] 姚万森, 尤梦洁, 曹志平, 刘博韬, 刘飞, 刘春雨. 柔性防护网在山体崩塌治理工程中的选型及应用[J]. 市政技术, 2015, 33(1): 162-166+176.
- [2] 刘成清, 陈林雅, 陈驰, 李俊君, 赵世春. 柔性钢棚洞结构在落石灾害防治中的应用研究[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 110-117.
- [3] 阳友奎. 用于隔离防护飞石或落石的柔性棚洞[P]. CN201538945U, 2010-08-04.
- [4] 汪敏, 石少卿, 阳友奎. 新型柔性棚洞在落石冲击作用下的试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(9): 131-138.
- [5] 罗章波. 小平地隧道进口危岩落石分析及整治设计[J]. 隧道建设, 2013, 33(9): 768-773.
- [6] 刘成清, 倪向勇, 杨万理, 李福海, 赵世春. 基于能量法的被动柔性棚洞防护结构设计理论[J]. 工程学, 2016,

33(11): 95-104.

- [7] 漆小军. 公路防落石钢架棚洞结构设计和静动力分析研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [8] 崔廉明, 石少卿, 汪敏, 罗伟铭. 落石冲击作用下环形网耗能性能数值分析[J]. 后勤工程学院学报, 2014, 30(3): 13-17 + 40.
- [9] 刘成清, 陈林雅, 陈驰, 韦韬. 落石冲击作用下被动柔性防护网整体结构试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(4): 37-44.
- [10] 章照宏. 斜坡落石灾害及其 SNS 柔性防护[J]. 湖南交通科技, 2006(1): 65-69.
- [11] 王坛华, 陈剑平, 安鹏程. 边坡滚石灾害的作用机理与防治对策[J]. 世界地质, 2008(1): 68-72 + 88.
- [12] 叶四桥. 隧道洞口段落石灾害研究与防治[D]: [博士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [13] 宁超. 高陡边坡山岭隧道洞口危岩落石灾害风险评估研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [14] 曾舜. RocFall 软件在危岩崩塌处治设计中的应用[J]. 中国水运(下半月刊), 2011, 11(1): 211-212.
- [15] 陈世刚. 铁路隧道进出口段落石冲击力计算分析[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(5): 35-39.
- [16] 叶四桥, 陈洪凯, 唐红梅. 落石冲击力计算方法的比较研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(2): 59-64.
- [17] 边小华, 孙建虎, 汪敏, 成培江, 黄俊伟. 环形网受落石冲击作用的数值分析[J]. 后勤工程学院学报, 2012, 28(5): 5-9.
- [18] 刘成清. ANSYS/LS-DYNA 工程结构抗震、抗撞击与抗连续倒塌分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [19] 宋男男, 王林峰, 宋小波, 闻锋. 落石冲击作用下柔性被动防护系统结构的动力响应分析[J]. 安阳工学院学报, 2017, 16(6): 92-95+102.