

温度应力下边坡细石混凝土喷层开裂问题实测研究

王沐星, 陈志坚*

(河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 针对细石混凝土喷层开裂, 从而失去其作用, 尤其是喷层内的钢筋网失去保护而锈蚀的问题。为此, 根据连云港中云台山开挖深度约 200 m 的路堑岩质高边坡约 10 年的监测数据, 开展细石混凝土喷层开裂问题的分析, 结果表明, 对于岩体变形大的区域, 坡面钢筋网轴力与温度呈现正相关; 根据应变协调原则, 细石混凝土存在顺坡向拉裂问题, 是坡面细石混凝土出现开裂原因之一; 由于存在边坡岩体向坡内产生水平位移的部位, 导致坡面细石混凝土喷层存在被揭起现象, 这是坡面细石混凝土出现破坏的另一原因。

关键词: 温度应力; 混凝土喷层开裂; 钢筋网轴力; 监测

中图分类号: TU42

文献标识码: A

Experimental Study on Temperature Stress and Crack of Fine Stone Concrete Shotcrete Layer in Slope

WANG Muxing, CHEN Zhijian*

(School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: In view of the cracking of the fine stone concrete spray layer, it loses its function, especially the steel mesh in the spray layer loses its protection and corrodes. To this end, according to the monitoring data of about 10 years of cutting rocky high slopes with a depth of about 200 m in Zhongyuntai Mountain in Lianyungang, the analysis of the cracking of the fine stone concrete sprayed layer was carried out. The axial force of the steel mesh on the slope is positively correlated with the temperature. According to the principle of strain coordination, the fine-stone concrete has the problem of pulling cracks along the slope, which is one of the reasons for the cracking of the fine-stone concrete on the slope. The position of horizontal displacement leads to the phenomenon that the sprayed layer of the fine stone concrete on the slope surface is lifted, which is another reason for the damage of the fine stone concrete on the slope surface.

Key words: temperature stress; concrete spray cracking; axial force of steel mesh; monitoring

喷锚支护在边坡加固及地下工程基坑支护中的应用十分广泛^[1-3], 混凝土喷层开裂是十分普遍的、目前仍难以克服的难题, 是影响喷锚支护工程耐久性的重要因素之一。很多学者针对这一问题做了许多研究, 研究表明影响混凝土开裂的最主要因素是各种变形, 这些变形可能是混凝土水化热产生的收缩变形^[4-9]、环境温度变化产生的热胀冷缩^[10-11], 也可能是荷载增大产生的变形。朱伯芳院士在 20 世纪 90 年代提出了非均质弹性徐变体两个基本定

理及有限元徐变应力隐式解法, 开辟了混凝土温度应力和温度控制的研究领域^[12-14]。刘建友^[15]对雅袭江锦屏一级水电站地下厂房的下游拱腰处混凝土喷层裂缝展开详细的调查, 分析厂房下游拱腰处围岩变形破坏及混凝土喷层开裂剥落的原因并进行数值分析。发现裂缝形成原因是高地应力和偏压作用。李宇杰^[16]以北京地铁某区间隧道为研究背景, 在衬砌结构已经出现裂缝病害的情况下, 使用混凝土弹塑损伤本构模型, 通过模拟计算

收稿日期: 2022-02-08

基金项目: 江苏省政策引导类计划项目 (BY2015002-05)

作者简介: 王沐星 (1998-), 男, 湖南益阳人, 硕士, 从事工程地质方面的研究。

* 通讯作者: 陈志坚 (1963-), 男, 福建福清人, 博士, 教授, 主要从事地质工程、岩土工程的教学研究工作。

研究隧道衬砌结构的受力、损伤和承载力状态,给出了衬砌结构主要承受周围土层对隧道结构产生的压应力,格栅钢筋主要承受拉应力的结论。目前对于喷射混凝土裂缝成因的研究集中于隧道以及地下洞室这两种工况下,对于边坡喷锚支护混凝土喷层开裂问题,目前仍少见公开研究报导。因此,本文依托连云港中云台山路堑岩质高边坡喷锚支护工程开展温度应力下边坡细石混凝土喷层开裂问题实测研究。

1 工程概况

中云台山路堑边坡坡面走向 $52.5^{\circ} \sim 232.5^{\circ}$,高速公路从一垭口处横穿中云台山山脉,路面标高 $15 \sim 17 \text{ m}$,路左侧山顶标高 289.2 m 、右侧山顶标高 287.7 m ,两侧路堑边坡总高度约 270 m 。其中,左边坡 2010 年 6 月开挖完成,人工坡高(即开挖深度)约 200 m 、总体坡度为 42.4° ,布置 20 级台阶,主体台阶坡度为 55° 、台面宽度为 3 m (有 3 级台阶的宽度为 10 m)。岩体发育的结构面主要有 4 组(图 1),由于边坡高陡,且存在结构面不利组合,为防止掉块产生的落石危害高速公路安全运营,坡面采取了喷锚支护,其中,锚杆为随机锚杆,长度为 6 m 和 8 m ,设计抗拔力为 60 kN 和 70 kN ,坡面钢筋网采用 $\varphi 8 \text{ mm}$ 的圆钢,间距为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$,混凝土喷层设计厚度 10 cm ,但由于岩石坚硬、完整性较好以及控制爆破问题,坡面超欠挖问题突出,混凝土喷层厚度差异较大。此外,坡面混凝土喷层顺坡向设置了间距约 20 m 的施工缝。边坡总体形态及传感器组成见图 2。

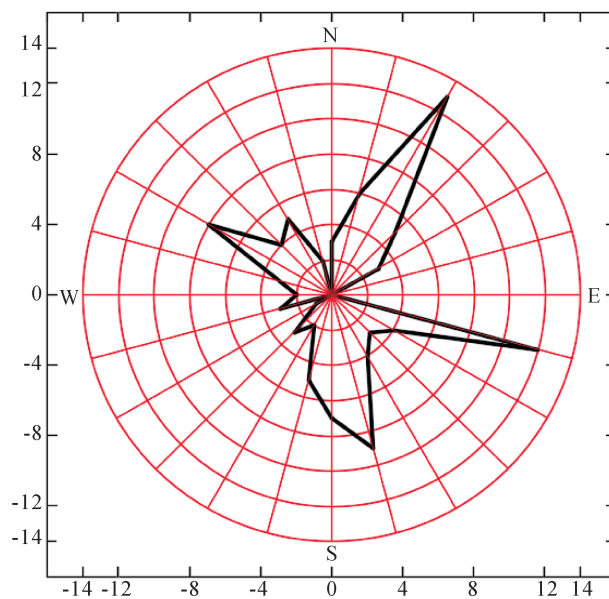


图 1 结构面倾向玫瑰花图

Fig. 1 Structural plane inclining to rose diagram

2 监测仪器及工作原理

本文根据连云港中云台山开挖深度约 200 m 的路堑岩质高边坡约 10 年的钢筋网监测数据,开展细石混凝土喷层开裂问题的分析。其中,坡面钢筋网应变计采用美国基康公司生产的 GK4000 型表面应变计(图 3),该传感器长 150 mm ,量程为 $3000 \mu\epsilon$,灵敏度为 $0.4 \mu\epsilon$,精度为 $\pm 0.5\% \text{ F.S.}$,非线性 $< 0.5\% \text{ F.S.}$,工作温度 $-20^{\circ}\text{C} \sim 80^{\circ}\text{C}$,可同时观测坡面钢筋网的应变和温度,并根据钢筋的弹性模量,换算坡面钢筋网的应力。埋设方法采用锚固块直接焊接在钢筋上。

根据钢筋应变计的实测模数,按式(1)计算坡面钢筋的微应变:

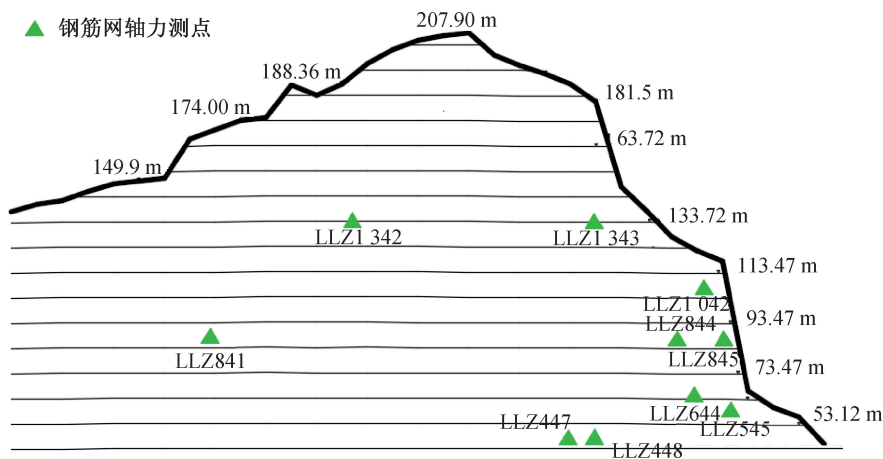


图 2 边坡形态及传感器布置图

Fig. 2 Slope shape and sensor layout

$$\varepsilon = (R_1 - R_0) \times 0.391 \quad (1)$$
式中, R_0 和 R_1 分别为安装后的钢筋应变计的初始模数和实测模数(digit, 即 $10^{-3} \times \text{Hz}^2$)。

根据上述计算得到的钢筋的微应变, 按式(2)计算坡面钢筋网的轴力(kN, 以拉为正):

$$P = \varepsilon \times E \times S \quad (2)$$
式中, S 为钢筋截面积, 钢筋直径为 8 mm; E 为锚筋模量, 取 210 GPa。

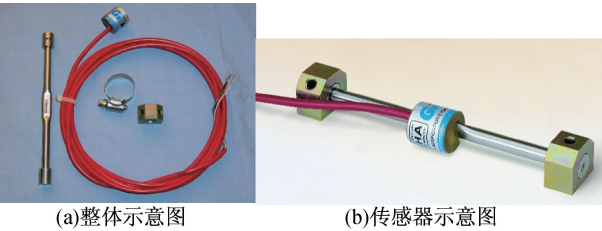


图 3 钢筋应变计示意图
Fig. 3 Schematic diagram of reinforcement strain gauge



图 4 监测数据现场实测
Fig. 4 Monitoring data field measurement

3 监测数据分析

监测传感器安装埋设随边坡开挖及其喷锚支

护施工同步进行, 时间为 2009 年 9 月 7 日—2011 年 8 月 12 日, 各传感器安装埋设完成后, 即开始数据自动采集。左边坡开挖和喷锚支护完成时间为 2010 年 6 月, 高速公路于 2011 年 6 月 23 日通车, 监测工作持续进行, 本文以 2018 年 10 月 9 日—2019 年 10 月 9 日的监测数据进行分析。

在 134 平台的坡面上布置坡面钢筋网轴力监测点 2 个; 104 平台的坡面上布置坡面钢筋网轴力监测点 1 个; 84 平台的坡面上布置坡面钢筋网轴力监测点 3 个; 64 平台的坡面上布置坡面钢筋网轴力监测点 3 个, 选取具有代表性的一个监测点进行分析; 54 平台的坡面上布置坡面钢筋网轴力监测点 1 个; 44 平台的坡面上安装埋设坡面钢筋网轴力监测点 2 个。监测结果见表 1, 图 5 和图 6。

由图 5、图 6 可知, 坡面钢筋网轴力的变化主要受气温变化、降雨入渗产生的地温变化影响。通常情况下, 坡面钢筋网轴力也与温度呈现负相关。与锚杆轴力监测点不同的是, 坡面钢筋网轴力监测点位于坡面细石混凝土喷层内, 受日照辐射影响强烈, 监测点位置的温度不仅呈季节性变化, 日变幅也较大。相应的, 坡面钢筋网轴力也呈现季节性变化和日变化, 而且一个降雨过程也会产生显著变化。由于坡面细石混凝土喷层能够起到约束边坡岩体变形的作用, 而温度变化也会引起边坡岩体的胀缩变形。故对于岩体变形大的区域(如路堑边坡南侧 84~124 m 高程平台之间的欠稳定三角体), 坡面钢筋网轴力则与温度呈现正相关, 如图 6 所示。

此外, 坡面钢筋网轴力在较大程度上受 2018 年 10 月—2019 年 6 月断续性降水和 2019 年 6 月上旬—8 月下旬的丰水期降水入渗诱发的路堑边坡整体应力松弛调整的影响。受这些因素的综合

表 1 各测点监测期内钢筋网轴力变化

Tab. 1 Changes of axial force of steel mesh at each monitoring point during the monitoring period

测点编号	监测期初始轴力/kN	监测期最高轴力/kN	监测期最低轴力/kN	监测期终轴力/kN
LLZ1342	-0.34	1.99	-2.87	0.54
LLZ1343	1.65	4.8	-1.16	0.54
LLZ1042	-2.28	5.25	-8.17	1.88
LLZ841	-2.02	0.32	-8.22	-2.23
LLZ844	0.25	2.69	-0.45	0.32
LLZ845	-0.27	0.25	-2.49	-0.26
LLZ644	4.05	5.98	-0.32	4.01
LLZ545	-5.03	-0.14	-5.3	-4.41
LLZ447	2.21	8.57	1.41	1.64
LLZ448	-2.25	1.08	-2.76	-1.83

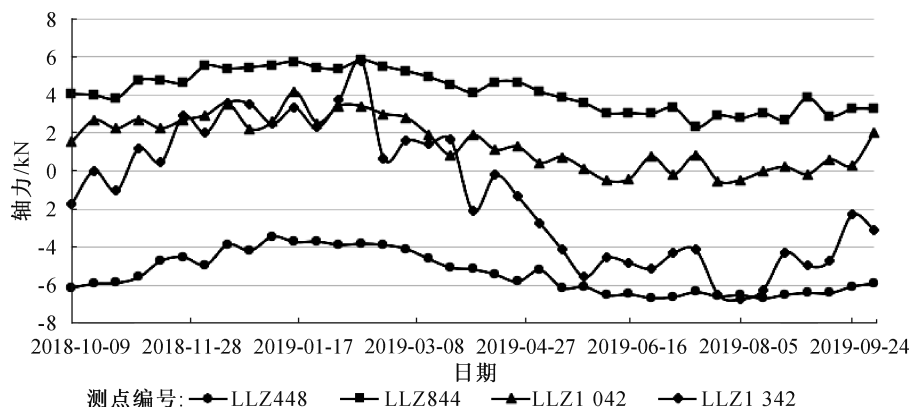


图 5 各平台坡面钢筋网轴力变化时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of axial force variation of steel mesh on slope surface of each platform

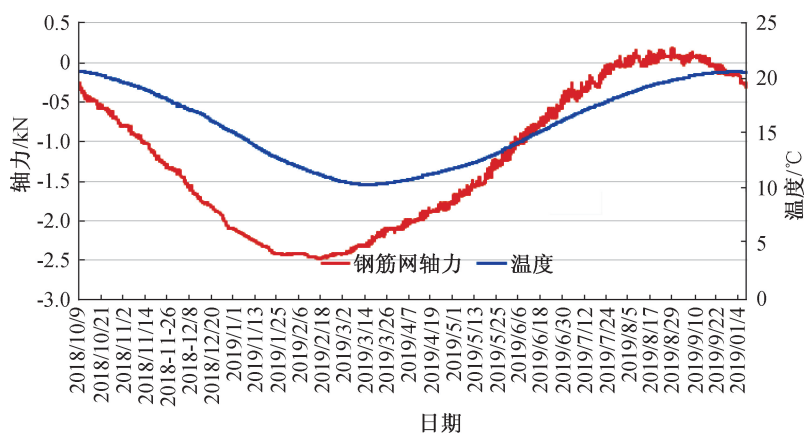


图 6 84 平台坡面钢筋网轴力与温度变化时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of axial force and temperature change of steel mesh on 84 platform slope

影响,本年度坡面钢筋网轴力均有不同幅度的变化,且呈现拉压变换现象,变化量在 $-8.0 \text{ kN} \sim +8.0 \text{ kN}$ 以内。目前所有测点的防护网拉力均呈现平稳状态。

仅从数值大小看(表 1),坡面钢筋网轴力在 8 kN 以内变化。但较之锚杆轴力,坡面钢筋网钢筋的截面积更小, $\phi 6 \text{ mm}$ 钢筋实测 1 kN 轴力对应的拉应力为 35 MPa 、 $\phi 8 \text{ mm}$ 钢筋实测 1 kN 轴力对应拉应力为 20 MPa 。由此可见,坡面钢筋网拉应力普遍较大。坡面钢筋网钢筋受力较大的原因为:坡面细石混凝土喷层具有约束边坡岩体变形、防止局部失稳的作用,现场调查表明,与坡面近平行的 NE 向裂隙的产状为 $32^\circ/\text{NW}$ 、 $\text{SE} \angle 74^\circ \sim 90^\circ$,该组裂隙控制了边坡结构类型,使左边坡呈现纵向坡结构,由于该组裂隙近直立,倾向在 NW 向和 SE 向之间变化,当裂隙倾向 NW 时,左边坡结构类型为陡倾顺向坡;当裂隙倾向 SE 时,左边坡结构类型为陡倾反向坡,倾角变形问题突出。故在边坡的不同部位,其变形存在较大的、质的差异,有

些部位的边坡岩体向坡内位移,而相邻的另一些部位则表现为向坡外临空方向的位移。显然,这些部位的坡面钢筋网“绷得很紧”,故钢筋受拉问题突出。对于边坡岩体向坡内产生水平位移的部位其周边边坡岩体向坡外临空方向位移,坡面细石混凝土喷层存在被揭起的作用,这是坡面细石混凝土出现鼓起破坏的主要原因之一。根据应变协调原则, $\phi 8 \text{ mm}$ 钢筋轴力超过 1.2 kN 时,细石混凝土的拉应力即达 35 MPa ,超过其抗拉强度,这是坡面细石混凝土出现老化开裂的重要原因之一。

4 结论

1) 根据现场调查结果,与坡面近平行的 NE 向裂隙近直立,倾向在 NW 向和 SE 向之间变化,从而导致在边坡的不同部位、不同高程,其变形存在较大的、质的差异,有些部位的边坡岩体向坡内位移,而相邻的另一些部位则表现为向坡外临空方向的位移,导致附近混凝土喷层开裂问题严重。

2) 实测结果表明坡面钢筋网轴力在 8 kN 以内。根据应变协调原则, $\varphi 8$ mm 钢筋轴力超过 1.2 kN 时, 细石混凝土的拉应力即达 35 MPa, 超过其抗拉强度, 细石混凝土存在顺坡向拉裂问题(水平向因顺坡向伸缩缝而减缓)。

3) 对于边坡岩体水平位移方向突变的部位, 细石混凝土喷层存在顺坡向受压和鼓起问题(水平向因顺坡向伸缩缝而减缓), 这是坡面细石混凝土出现鼓起破坏的主要原因之一。通过分析混凝土喷层开裂影响下会导致降雨入渗增加, 边坡南部地下水位的起伏变化将有可能导致边坡失稳, 故应继续加强对混凝土喷层裂缝的监测。

参考文献:

- [1] 肖国峰, 陈从新. 喷锚网支护基坑监测及变形特性分析[J]. 岩土力学, 2003(S2): 275-278.
- [2] 于亮飞. 浅谈喷锚支护在边坡工程中的应用[J]. 西部资源, 2019(2): 198-199.
- [3] 孔庆庆. 深基坑工程中喷锚支护施工技术应用研究[J]. 绿色环保建材, 2019(9): 175+179.
- [4] 韩素芳, 耿维恕. 钢筋混凝土结构裂缝控制指南[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [5] 陈长青. 论水工建筑物结构裂缝的分析与防治对策[C]//2021年7月建筑科技与管理学术交流会议论文集. 2021: 96-97. DOI: 10. 26914/c. cnkihy. 2021. 012215.
- [6] 贺罗, 李雄飞, 唐斌峰. 桥梁施工中大体积混凝土裂缝成因及处理对策[J]. 公路, 2019, 64(9): 98-101.
- [7] 程昱, 邢运刚. 基于道路桥梁施工中裂缝形成原因的分析[J]. 科技创新导报, 2019, 1(10): 64-65.
- [8] 申东. 公路桥梁施工中混凝土裂缝产生的原因及防治措施[J]. 交通世界, 2019(Z2): 166-167.
- [9] 翟金军. 分析道路桥梁工程施工中的混凝土裂缝成因与防治措施[J]. 居舍, 2018(29): 14.
- [10] 朱秋菊. 闸墩混凝土结构温度应力分析及其应用[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
- [11] 陈志坚, 黄清保, 王霄. 岩质边坡锚杆及防护网温度应力分析[J]. 中外公路, 2012, 32(5): 20-23.
- [12] 朱伯芳. 多层混凝土结构仿真分析的并层算法[J]. 水利发电报, 1994(3): 19-27.
- [13] 朱伯芳. 不稳定温度场时间域分区异步长解法[J]. 水利学报, 1995(8): 46-52.
- [14] 朱伯芳. 弹性徐变体时间域分区异步长解法[J]. 水利发电报, 1995(7): 24-27.
- [15] 刘建友, 伍法权, 赵振华, 等. 锦屏一级水电站地下厂房下游拱腰喷层裂缝成因分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S2): 3777-3784.
- [16] 李宇杰, 王梦恕, 徐会杰, 等. 已有裂缝病害的地铁区间隧道衬砌结构受力分析[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(3): 64-69.

(责任编辑 王利君)