

柔性防护结构破坏机理与设计对策

吴嘉煊¹, 方思婷¹, 吴雨阳¹, 邓芊芊², 柳春^{2*}

1. 广东潮汕环线高速公路有限公司, 广东 广州 510623

2. 广东和立交通养护科技有限公司, 广东 广州 511400

DOI:10.61369/ERA.2026080030

摘 要 : 在山区地质灾害防护工程里, 柔性防护体系易出现各类失效问题, 但现阶段针对其破坏规律与优化设计方案的研究仍较为有限。本文依托西南地区 11 处实地工程点位开展现场调研, 重点分析坡面灾害冲击作用下防护结构的失效形式与内在机理。分析结果表明, 该类防护结构常见的失效形式包含 4 大类型, 且钢柱出现屈曲变形的概率远高于其他的失效类型, 边界处的滑移锁死更是导致该现象的主要因素, 基于此制定了相应的结构优化措施。

关 键 词 : 柔性防护结构; 破坏机理; 设计对策; 钢柱屈曲; 滑移锁死

Failure Mechanism and Design Countermeasures of Flexible Protective Structures

Wu Jiahuan¹, Fang Siting¹, Wu Yuyang¹, Deng Qianqian², Liu Chun^{2*}

1. Guangdong Chaoshan Ring Expressway Co., LTD, Guangzhou, Guangdong 510623

2. Guangdong Heli Transportation Maintenance Technology Co., Ltd, Guangzhou, Guangdong 511400

Abstract : In geological disaster protection projects in mountainous areas, flexible protection systems are prone to various failure modes; however, research on their failure mechanisms and optimized design schemes remains limited at this stage. This paper conducts field investigations at 11 project sites in Southwest China, focusing on the failure modes and underlying mechanisms of protection structures under the impact of slope disasters. The analysis reveals that common failure modes of such structures fall into four major categories, with buckling deformation of steel columns occurring far more frequently than other failure types. Slip locking at the boundaries is identified as the primary factor contributing to this phenomenon, and corresponding structural optimization measures have been formulated based on these findings.

Keywords : flexible protective structures; failure mechanism; design countermeasures; buckling of steel columns; sliding lock

引言

自上世纪 60 年代起, 欧洲开始对传统的柔性防护结构开展技术升级, 新增钢柱与耗能装置后, 逐步形成现代被动防护结构的基本样式。按照 ETAG027 相关标准, 这套系统已更新至第三代产品, 其试验防护能力达到 8000kJ。该结构因装配便捷、拦截效率高、易维护等优势被广泛应用^[1-2]。但工程中大量破坏现象的出现, 为其应用安全性埋下隐患。柔性防护结构力学构件多, 机理复杂, 破坏类型与破坏机理也十分复杂^[3]。设计时需根据破坏调查梳理破坏类型, 分析机理, 设计对策, 才能实现结构优化。目前学者针对滚石、碎屑流、泥石流等坡面地质灾害冲击柔性防护网展开了相关研究^[4-7], 揭示了灾害的运动规律与冲击特征, 但目前对其破坏机制及相关设计建议的研究鲜见报道。为此, 本文基于 11 个工点的实地调查, 系统分析其破坏模式与机理, 并提出设计对策。

一、破坏模式

流、泥石流等主要坡面地质灾害类型。

(二) 破坏统计

(一) 工点调查

在本次调研选取四川、重庆市山区 11 个柔性防护结构工点, 涵盖桃关 1 号隧道、毕棚沟、九寨沟等点位, 涉及崩塌滚石、碎屑

11 个工点中, 仅烧火坪隧道、重庆酉阳 2 个工点的防护结构完好, 其余 9 个均发生不同类型破坏, 拦截成功率仅约 18%。破坏模式分为 4 类: 网片破损、钢柱屈曲、支撑绳断裂、锚固端失

作者简介: 吴嘉煊 (1989.10.12-), 男, 广东省揭阳市揭东区人, 本科, 中级工程师, 研究方向: 路桥方向。

通讯作者: 柳春 (1991.9.17-), 男, 湖南邵阳人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 结构工程。

效^[1]。其中钢柱屈曲为最主要的损坏类型，凸显了钢柱作为防护结构中唯一承压构件的关键地位。

二、破坏机理

（一）网片破坏

网片为直接受冲击构件，不同类型防护网的破坏机理不同。被动防护网中缝合绳缠绕不当易导致网片脱落或无法滑移，造成面外顶破。由于主动防护网通常是紧贴着坡面设置的，从而导致落石无法被顺利引导滚出网面，从而导致网片发生面内撕裂破坏（图1）。

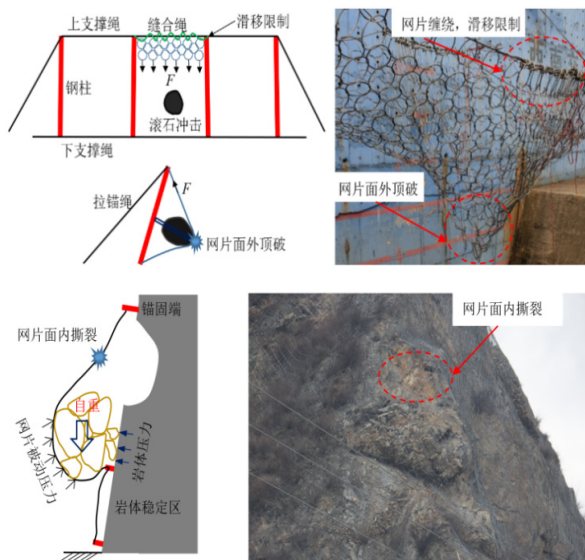


图1 网片破坏机理

（二）钢柱屈曲

钢柱有两类破坏：一是碎屑流冲击时钢柱局部被砸，导致翼缘屈曲；二是整体屈曲破坏，为最典型的钢柱破坏模式。钢柱与支撑绳、网片形成拉压平衡体系，未受冲击时呈轴心受压状态。受冲击后支撑绳“锁死”，拉力直接传给钢柱引发偏摆；钢柱面外转动受柱脚约束从轴压转为偏压状态，加之抗弯刚度不够，因此导致压溃（图2）^[1]。

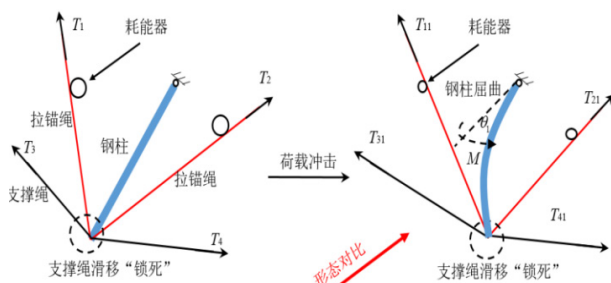


图2 钢柱整体屈服机理

（三）支撑绳断裂

支撑绳用于系挂柔性网片并传递冲击力，耗能器连接于支撑

绳上实现耗能。导致支撑绳失效断裂的核心原因为钢柱端部滑移锁死及构件嵌卡。支撑绳滑脱、部件几何干涉、构造设计不合理等情况，都会阻碍其正常滑动。在灾害体高速冲击下，耗能缓冲系统无法运转，伴随明显的制动效应与脉冲作用，支撑绳会迅速断裂，最终导致防护系统整体损毁（图3）^[1]。

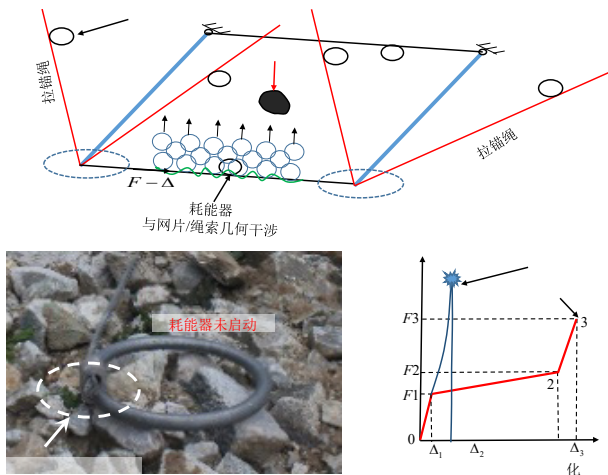


图3 支撑绳断裂机理

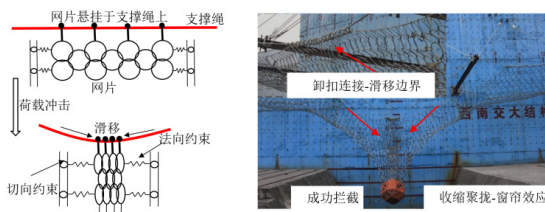
（四）锚固端破坏

钢丝绳与钢柱均通过端部锚杆锚固。根据现行的技术规范，被动柔性防护网锚杆锚固长度的最小值为2.5m，该指标与防护能级相互独立。然而该规定忽略了锚杆材质性能和锚固处地质条件的差异，容易导致柔性防护结构在遭受落石冲击时出现锚固力不足，锚杆脱出的现象，最终直接引发防护系统整体失稳^[8]。

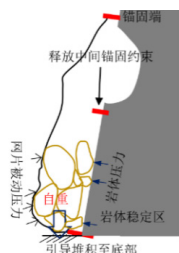
三、设计对策

（一）网片

针对在网片在进行结构设计的时候，除了要考虑本身的承载能力外，还需要合理的约束条件来实现网片的自由滑移。就被动柔性防护结构而言，网片需具备沿支撑绳滑移的能力，具体可借助卸扣将其悬挂在支撑绳上。当遭受荷载冲击时，网片能通过滑移产生大变形，进而降低冲击力。如图4所示，冲击作用下网片整体收缩，借助窗帘式的变形特征完成卸荷，构件不容易发生损坏，能够顺利阻拦滚石。主动防护网则优化了网片约束构造，让灾害物质集中堆积在坡体下部，依托山体承担荷载重量，该方案在现场应用中，可稳定抵御落石的侵害。



a) 面外顶破设计建议



b) 面内撕裂设计建议

图4 网片设计建议



(二) 钢柱

钢柱的翼缘在遭受撞击后会产生局部屈曲，是落石作用于防护网时较为常见的现象。该类损伤危害较小，只需在柱体外面包裹缓冲材料便可改善。若钢柱出现整体性屈曲破坏，则需从两大方向优化设计：一是强化抗弯性能，通过加宽翼缘、改用 H 型钢截面提升刚度，弥补标准工字型钢柱抗弯性能偏弱的短板；二是改良节点构造，借助柱头鞍座实现支撑绳自由滑移，搭配拉结装置控制柱头晃动范围。柱脚设置为半刚性连接，也能让钢柱具备适度的面外变形能力。（图5）。

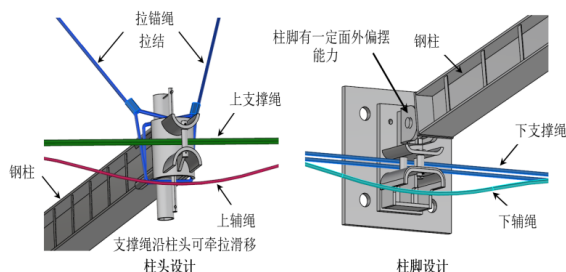


图5 钢柱连接构造设计对策

(三) 支撑绳

从受力特性来看，耗能器和支撑绳形成统一整体，力学分析中常简化为单向受拉的弹簧阻尼构件。结合图6可知，为了让上下支撑绳穿过钢柱鞍座后正常滑移，柱端可搭配过渡绳与辅助绳使用：网片依托辅绳或过渡绳悬挂，再由后者衔接主支撑绳。除此之外，将耗能器调整至支撑绳锚固位置，可有效规避和网片的结构干涉，保证其在绳体拉力作用下正常启动。端部支撑绳也必须满足自由滑移要求，并配套设置锚固端耗能装置。一旦该类绳体卡死不动，冲击作用下网片的拉力会转化为侧向力作用于边柱，极易引发柱体屈曲破坏。

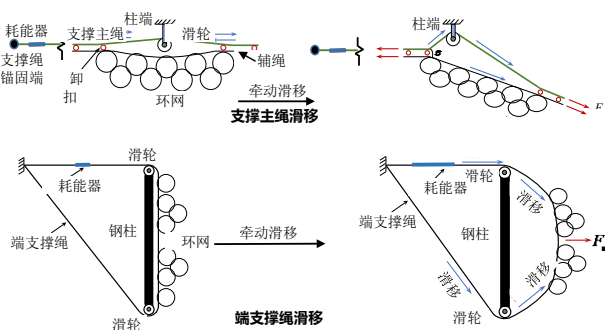


图6 支撑绳设计对策

(四) 锚固端

在被动防护体系施工设计中，钢柱基础优先选用独立基础，且必须完成现场地质勘探，摸清持力层实际状况。计算锚杆端部尺寸时，必须准确考虑锚固点处的地质地质条件以及锚杆的性能参数。鉴于易发生泥石流地区的恶劣地质条件，以及地基承载力的有限，设计必须充分考虑地基与锚杆之间的连接强度。

(五) 整体设计

对于整体倾覆一是采用多道防护措施，由于荷载体量特别大，采取刚性+柔性多道组合防护措施进行防护（图7）；二是推行整体协同设计理念，防护网的破坏机制具有复合性特征，各构件间存在连锁反应机制。例如支撑绳滑移失效可能引发支撑绳断裂、钢柱屈曲及网片破损三重破坏形态。因此柔性防护网设计需摒弃模块化思维，通过科学配置实现构件协同，重点强化网片、支撑绳-耗能器、钢柱三大核心组件的协同效能，确保系统整体防护性能最大化。



图7 多道防护措施

如图8所示，一个优质的结构系统在整个受力变形应呈现出三阶段特性：第一阶段（0-1）是拦截网片从松弛状态转变为绷紧状态的过程，此阶段变形主要源于网环间的滑移以及网环自身的形变；第二阶段（1-2）为支撑绳与耗能器构成的弹性弹簧的拉伸工作阶段，系统耗能主要依靠耗能器发挥作用；第三阶段（2-3）是系统再张紧阶段，该阶段耗能主要来自非冲击区域网片的滑移摩擦耗能以及冲击区域网片的变形耗能，此时钢柱承受的力达到最大值。被动柔性防护结构工作性能曲线的意义在于，它揭示了该体系的抗冲击原理，即通过科学合理地配置构件，充分激发各结构构件的协同工作能力。

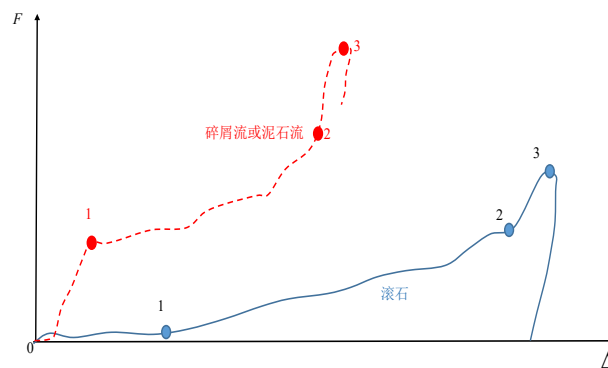


图8 被动柔性防护结构整体协同多阶段 F-Δ 曲线

四、结论

本文基于西南山区11个工点调查,得出以下失效破坏。这些破坏并非孤立存在,而是相互关联,其中边界滑移锁死是导致其失效的主因。

对以上4种破坏模式分别给出了相应的设计对策。柔性防护结构设计不宜采用拼凑式方法,除确保结构自身强度外,更需通过科学布局,强化构件间协同作用,以充分激发主体结构部件的性能潜力。

参考文献

-
- [1] 赵世春,余志祥,赵雷,等.被动防护网系统强冲击作用下的传力破坏机制[J].工程力学,2016,33(10):11.
- [2] EOTA, ETAG 27. Guideline for European Technical approval of falling rock protection kits [M]. European Organization for Technical Approvals, 2008.
- [3] Liu Chun, Yu Zhixiang, Zhao Shichun. Quantifying the impact of a debris avalanche against a flexible barrier by coupled DEM-FEM analyses [J]. Landslides, 2020, 17: 33-47.
- [4] Spadari M, Giacomini A, Buzzi O, et al. Prediction of the Bullet Effect for Rockfall Barriers: a Scaling Approach [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2012, 45(2):131-144.
- [5] Hambleton J P, Buzzi O, Giacomini A, et al. Perforation of Flexible Rockfall Barriers by Normal Block Impact [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2013, 46(3): 515-526.
- [6] Ashwood W, Hungr O. Estimating total resisting force in flexible barrier impacted by a granular avalanche using physical and numerical modeling [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(10): 1700-1717.
- [7] Tan DY, Yin JH, Feng WQ, et al. Large-scale physical modelling study of a flexible barrier under the impact of granular flows [J]. Natural Hazards & Earth System Science, 2018, 18(10): 2625-2640.
- [8] 中华人民共和国铁道行业标准. TB/T3089-2004 铁路沿线斜坡柔性安全防护网 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.