

雪崩灾害防护韧性设计理论

王晨

同济大学, 中国·上海 200092

摘要: 本研究提出了一种基于柔性支护网的雪崩防护韧性评价方法, 并为离散元法 (DEM) 模拟提供了合理的建议, 重点评估了柔性支护网在雪崩冲击下的表现。结果表明, 柔性支护网相比传统刚性防护结构, 凭借其卓越的吸能能力和高适应性, 能够在雪崩冲击下有效减缓动能传递, 减少对道路及基础设施的破坏。论文提出了一种综合韧性指数 (Resilience Index, RI) 评价方法, 量化柔性支护网的鲁棒性、恢复性和适应性, 提供了更全面的防护效果衡量标准。该韧性评价方法不仅关注结构的初始抗灾能力, 还引入了恢复时间和成本的考虑, 为防灾减灾系统设计提供了更具针对性的解决方案。

关键词: 雪崩; 灾害; 防护

Theory of Resilience Design for Avalanche Disaster Protection

Chen Wang

Tongji University, Shanghai, 200092, China

Abstract: This study proposes a resilience evaluation method for avalanche protection based on flexible support mesh, and provides reasonable suggestions for discrete element method (DEM) simulation, focusing on evaluating the performance of flexible support mesh under avalanche impact. The results indicate that compared to traditional rigid protective structures, flexible support nets, with their excellent energy absorption capacity and high adaptability, can effectively slow down kinetic energy transfer and reduce damage to roads and infrastructure under avalanche impact. The paper proposes a comprehensive resilience index (RI) evaluation method to quantify the robustness, resilience, and adaptability of flexible support networks, providing a more comprehensive measure of protection effectiveness. This resilience evaluation method not only focuses on the initial disaster resistance of the structure, but also introduces considerations of recovery time and cost, providing a more targeted solution for the design of disaster prevention and mitigation systems.

Keywords: avalanche; disaster; protect

0 前言

雪崩是全球冰冻圈环境中对山区基础设施和人类生命构成重大威胁的自然灾害, 尤其在天山、阿尔卑斯山和北美落基山脉等高山地区, 复杂的地形条件和极端气候变化导致雪崩频发。这些区域的雪崩事件具有突发性和难以预测性, 同时伴随显著的破坏力, 对交通基础设施的安全运行构成严峻挑战。以中国独库公路为例, 该交通干线贯穿天山南北, 频繁受到雪崩威胁, 已成为防灾减灾工程的重点研究对象。通过雪廊、支护网等结构的应用, 独库公路在应对雪崩灾害方面取得了一定成效, 降低了风险, 保障了交通廊道的安全和稳定。然而雪崩的防治目前发展仍较为简单和粗放, 仅有少量量化的指标用来规范和指导雪崩防护。因此, 设计高效、可靠的雪崩支护结构, 对于全球冰雪高发山区的基础设施建设与维护至关重要。

论文以新疆边坡系统的雪崩韧性设计为例, 提出可以利用离散元法 (DEM) 模拟柔性支护网在不同雪崩条件下的表现, 并分析系统的吸收、恢复能力及恢复时间。此外, 提出了针对支护网-道路体系的韧性评价方法框架, 涵盖从

结构响应到系统功能恢复的综合评估。这些方法可用于优化支护系统的设计参数 (如弹性模量、抗拉强度和阻尼特性), 从而提高其在雪崩条件下的韧性。在本研究中, 我们提出了一种新型的韧性设计方法, 旨在减轻雪崩对道路沿线的影响。该方法将韧性设计理念整合到斜坡系统的稳定性分析中。我们提出了一套面向设计的韧性准则, 涵盖了对受雪崩威胁的斜坡系统的吸收和恢复工程。

研究为新疆天山地区及其他受雪崩影响的区域提供了定制化的韧性防护方案和科学依据, 有助于增强基础设施的抗灾能力, 实现长期保护和可持续性并被认为是新的概念, 将取代“可持续发展” (Linkov et al., 2014)。韧性是自然或人工系统的最佳目标之一, 并有不同的定义。韧性通常被定义为“准备和计划、吸收、恢复和更成功地适应不良事件的能力”

韧性设计在工程领域的优势在于其能够提高系统在面对不确定性和突发事件时的反应能力和恢复能力。韧性设计不仅可以增强基础设施的耐久性, 还能在长期内降低维护成本和风险。在雪崩支护系统中, 韧性评价尤为重要, 因为这

些系统需要在极端环境下保持功能性，并且在灾害后能够迅速恢复。这种先进的设计理念在现代工程中越来越受到重视，尤其是在涉及灾害防护的领域^[1]。

在天山地区，雪崩类型以小型、中型和大型的沟槽型、坡面型及湿雪崩为主，主要分布于那拉提镇、尼勒克县、巩乃斯镇、果子沟以及独库公路沿线。针对这些区域的雪崩风险评估，通常采用点—线—面的多层次框架，以支持防灾减灾和基础设施建设。其中，点层面的评估主要针对山区居民点、关键路段、矿山、营地和野外滑雪场等特定目标，通过计算雪崩的最大抛程和发生频率，并结合威胁目标的暴露度和敏感度，进行雪崩风险的综合评估^[2,3]。

研究提供了关于被动防护措施（如雪网和挡雪墙）的工程指南，这些措施旨在减轻雪崩的直接冲击。详细讨论了材料选择、结构布局及其对周围环境的影响。专注于雪崩防护大坝的设计，提出了一种新的方法来评估大坝结构对雪崩动力的影响。研究结果对于在雪崩频发地区设计更安全的防护大坝具有直接的应用价值 Keylock, C. J 通过模拟不同类型的雪崩及其与防护结构的相互作用，评估了各种设计参数对防护效果的影响。研究强调了通过数值模拟优化防护结构设计的重要性^[4]。

1 韧性设计方法

1.1 韧性概念

在工程科学中，Ayyub (2014) 提出了对韧性最常见和最宽泛的定义，他指出，韧性意味着为不断变化的条件做好准备和适应，并从中断中快速恢复。韧性分为四个阶段：准备、吸收、恢复和适应，中间两个阶段需要科学家进行量化，其余两个主要决策者采取有效的策略来增强韧性。

雪崩隐患斜坡系统由承载道路、积雪及支护结构共同构成，协同实现特定功能。斜坡系统在雪崩条件下的韧性主要体现在吸收、应对与恢复三个方面。吸收能力指系统通过合理设计的支护结构，如柔性支护网或挡雪棚，减轻雪崩对道路及基础设施的直接冲击，从而最大限度地降低破坏风险。应对能力体现在系统在雪崩过程中快速采取有效措施的能力，诸如雪崩监测与预警机制的应用，使系统能够及时反应，保护交通廊道的安全。恢复能力则体现为系统在雪崩事件后迅速恢复到正常功能状态的效率，包括支护结构的修复及积雪清理的及时性。这三个韧性要素协同作用，确保斜坡系统能够在雪崩事件中抵御冲击、迅速反应并有效恢复，保障基础设施的长期安全与稳定。

1.2 柔性支护网单一韧性度量指标

1.2.1 柔性支护网的韧性作用

柔性支护网在雪崩防护中的作用主要体现在其卓越的韧性表现上。韧性不仅指结构抵御初始冲击的能力，还包括系统在灾后恢复与适应的能力。柔性支护网通过其高效的能量吸收和变形能力，减少了雪崩对道路和基础设施的破坏，同时具备快速恢复功能。

1.2.2 吸能能力

柔性支护网的核心优势在于其能通过变形吸收雪崩的巨大冲击力。相比刚性结构，柔性支护网能够在雪崩冲击下发生大幅度变形，消耗大量的动能，减少结构本身及周围设施的损坏。研究表明，柔性支护网在多种雪崩条件下能吸收高达 80% 的冲击能量。

1.2.3 变形与适应性

柔性支护网能够根据雪崩规模和强度自动适应并调节其形变。其适应性确保在面对不同雪崩规模时，结构仍能保持功能。这种自适应能力使柔性支护网特别适合于地形复杂、雪崩频发的区域。

1.2.4 恢复能力

柔性支护网的恢复性表现在其在雪崩冲击后迅速恢复原状，并继续保持防护功能。通过精确设计的材料参数，柔性支护网能够在短时间内恢复大部分功能，减少雪崩后对基础设施运行的影响。

为了全面评估雪崩防护，论文提出了一套基于韧性的评价标准，涵盖鲁棒性、恢复性和适应性三大维度。这些定量指标为雪崩防护结构的设计与优化提供了科学依据。

1.3 雪崩对道路影响的数值模拟

离散元方法 (DEM) 在模拟雪崩流动及其与障碍物的相互作用方面展现出显著优势。该方法能够详细捕捉雪的微观特性，包括颗粒间的接触力学、质量传输过程、摩擦行为及粘附和断裂机制，从而精准再现雪崩的动力学过程。DEM 还具有处理复杂几何形状和多物理特性场的能力，使其在模拟障碍物对雪崩的影响时尤为有效。此外，DEM 的可扩展性和灵活性使其适用于不同尺度和类型的雪崩模拟，为深入理解和预测雪崩行为提供了强有力的科学工具^[5]。

平行键模型 (PBM) (Potyondy 和 Cundall, 2004) 可以用来模拟雪颗粒的相互作用，增加了对颗粒自然聚集行为的模拟能力。此前类似模型已被用于探讨雪崩冲击压力 (Kyburz 等人, 2020, 2022a, 2022b) 和雪颗粒化过程 (Steinogler 等人, 2015) 的动态演变。在改进模型中，颗粒接触可分为未键合和键合两种状态。未键合状态模拟粘弹性摩擦接触，参数包括杨氏模量 (E)、阻尼系数 (β) 和摩擦系数 (μ)；而键合状态则在两颗粒间引入一个弹性键，具备与颗粒相同的杨氏模量，并与粘弹性模型并行作用。当剪切或拉伸应力超过粘结强度时，键会断裂，系统随之恢复未键合状态，直至重新形成键或颗粒完全分离。键的生成不仅可以在模拟初始时刻设置，以提供初始强度，还可以在模拟过程中，当颗粒间的压应力超过阈值时动态创建。键的断裂受应力阈值的限制，确保了模型的灵活性和真实感。为应对计算资源的限制，模型中的离散颗粒不代表单个冰晶，而是雪结块，这种处理方式使得模型能够更有效地反映雪的宏观力学行为，而非局限于微观尺度的冰晶特性，从而更好地再现雪崩的复杂动力学过程。雪崩模拟建议选取参数范围表如表 1 所示。

表 1 雪崩模拟建议选取参数范围表

参数名称	典型值	单位	描述
雪颗粒直径 (Particle Diameter)	0.02~0.05	m	单个雪颗粒的直径, 取决于雪的颗粒特性
雪颗粒密度 (Particle Density)	300~500	kg/m ³	雪颗粒的密度, 受雪的含水量和密度影响
杨氏模量 (Young's Modulus)	10 ⁴ ~10 ⁶	Pa	描述雪颗粒的弹性模量
泊松比 (Poisson's Ratio)	0.2~0.4	无量纲	雪颗粒的泊松比, 影响颗粒间的形变关系
内摩擦角 (Internal Friction Angle)	20~35	度	雪颗粒内部的摩擦角, 影响流动性
粘滞阻尼系数 (Viscous Damping Coefficient)	0.1~0.5	无量纲	粘滞阻尼用于描述雪的阻尼行为
接触摩擦系数 (Contact Friction Coefficient)	0.3~0.5	无量纲	雪颗粒与支护网或地表之间的摩擦系数
颗粒间粘结强度 (Bond Strength)	500~2000	Pa	雪颗粒之间的粘结强度, 影响颗粒破裂行为
剪切模量 (Shear Modulus)	10 ³ ~10 ⁶	Pa	雪的剪切模量, 决定雪崩流动时的变形行为
雪颗粒数目 (Number of Particles)	10000~100000	无量纲	模拟中使用的雪颗粒数量, 取决于模拟规模
粘结断裂阈值 (Bond Breakage Threshold)	5~50	Pa	粘结断裂的应力阈值, 决定颗粒破碎时的强度

1.4 韧性评价体系

为了评估道路系统在雪崩冲击下的表现, 我们可以从鲁棒性 (Robustness)、恢复性 (Recoverability) 和适应性 (Adaptability) 三个维度进行详细量化评价。论文基于实际的防护系统和灾害响应机制, 提出一套韧性评价标准, 结合相关公式和参考值, 量化道路在雪崩冲击下的抗灾能力与恢复效率。

鲁棒性是指道路系统及其防护设施在雪崩冲击时能够维持结构完整性和功能的能力。通过以下几个定量指标进行评估。

1.4.1 吸能能力

吸能能力评估防护结构 (如柔性支护网、挡雪墙等) 吸收雪崩冲击能量的有效性, 减少雪崩对道路的直接冲击。

$$E_{abs} = \frac{E_{total} - E_{road}}{E_{total}} \times 100\%$$

其中: $E_{total} = \frac{1}{2}mv^2$ 是雪崩的总能量, m 为雪崩质量 (kg), v 为雪崩速度 (m/s), E_{road} 为传递到道路的剩余能量。

参考值: 防护结构应吸收至少 80% 的雪崩冲击能量, 即 $E_{abs} \geq 80\%$ 。

1.4.2 最大变形量

防护结构在雪崩冲击后的最大变形量应不超过设计高度的 15%, 即认为最大变形量超过 15% 时防护结构失效。

$$\delta_{max} \leq 0.15H$$

其中, h 是柔性支护网的设计高度, δ_{max} 是冲击后的最大变形。

参考值: 柔性支护网的变形应不超过其设计高度的 15%。

1.4.3 道路阻断宽度

评估道路在雪崩后受到的阻断情况, 阻断长度应不超过道路总宽度的 50%:

$$L_{blocked} \leq 0.5L_{total}$$

其中, $L_{blocked}$ 是雪崩后阻断的道路宽度, L_{total} 是道路的总宽度。

参考值: 阻断宽度不应超过 50%。

恢复策略对功能韧性图如图 1 所示。

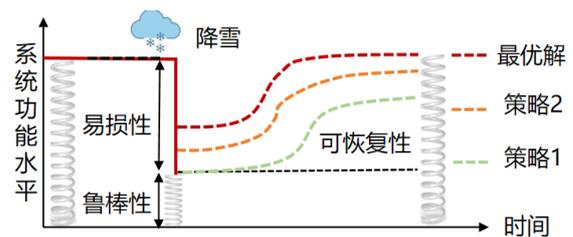


图 1 恢复策略对功能韧性图

2 恢复性 (Recoverability)

恢复性指的是在雪崩后道路及其防护系统的恢复速度与恢复成本, 主要包括恢复时间、功能恢复率和恢复成本等定量指标。

2.1 恢复时间

恢复时间是指道路在雪崩后恢复至 80% 以上功能的时间。

$$T_{recover} \leq 48 \text{ 小时}$$

参考值: 对于主要道路, 恢复时间应不超过 48 小时; 次要道路不应超过 72 小时。

2.2 功能恢复率

功能恢复率是指道路在雪崩冲击后恢复的通行能力百分比:

$$R_f = \frac{F_{re}}{F_{ini}} \times 100\%$$

其中: F_{re} 为道路恢复的通行能力; F_{ini} 为道路的初始通行能力。

参考值: 在雪崩后的 24 小时内, 功能恢复率应达到 80% 以上。

2.3 恢复成本

恢复成本主要衡量雪崩后的维修和功能恢复所需的经济成本, 通常以恢复占总系统建设成本的百分比表示:

$$C_{re} \leq 0.30C_{total}$$

其中, C_{total} 为防护系统的总建设成本。

参考值：恢复成本应不超过系统总建设成本的 30%。

3 适应性 (Adaptability)

适应性反映的是道路及其防护系统在应对不同规模和频率的雪崩事件时，保持防护功能的能力，主要包括以下定量指标。

3.1 多次雪崩适应性

防护结构应在多次雪崩冲击下保持高效的防护功能，其适应性可定义为在多次冲击后系统维持的防护功能百分比：

$$A_{\text{multi}} \geq 90\%$$

3.2 极端气候适应性

防护系统的设计应能应对极端气候条件（如极寒、强降雪、风吹雪等），其适应性指标为：

$$A_{\text{climate}} = \frac{F_{\text{extreme}}}{F_{\text{normal}}} \times 100\%$$

其中， F_{extreme} 为极端气候条件下的防护功能； F_{normal} 为正常气候条件下的防护功能

3.3 可维护性

防护结构应易于维护，维护频率不应过高：

$$M_f \leq 2 \text{ 次/年}$$

参考值：系统维护频率应不超过每年 2 次，且维护时间应尽可能短。

韧性评价公式总结：

基于上述标准，可以定义道路防护系统的综合韧性指数 (Resilience Index, RIRIRI)，通过结合鲁棒性、恢复性和适应性加权平均：

$$RI = \omega_1 \times R_{\text{robustness}} + \omega_2 \times R_{\text{recoverability}} + \omega_3 \times R_{\text{adaptability}}$$

其中， ω_1 ω_2 ω_3 为权重，通常均设为 $\frac{1}{3}$ 。根据设计理念，工程施工难度，历史经验可以进行更科学的赋值。

$R_{\text{robustness}}$ ， $R_{\text{recoverability}}$ ， $R_{\text{adaptability}}$ 分别为鲁棒

性、恢复性和适应性得分。

4 结语

本研究提出了一种基于柔性支护网的雪崩防护韧性评价方法，并为离散元法 (DEM) 模拟提供了合理的参数建议，重点评估了柔性支护网在雪崩冲击下的表现。主要结论如下：

柔性支护网的防护作用：相比传统刚性防护结构，柔性支护网凭借其卓越的吸能能力和高适应性，能够在雪崩冲击下有效减缓雪崩动能的传递，降低对道路和其他基础设施的破坏。柔性支护网通过大幅度变形吸收雪崩冲击，确保在面对不同规模和频率的雪崩时仍能提供持久的防护效果。

论文提供了用于离散元法 (DEM) 模拟雪崩与柔性支护网相互作用的合理参数区间，包括雪颗粒的直径、密度、杨氏模量、摩擦系数等。这些参数可帮助研究者更准确地模拟雪崩动力学以及支护结构的响应，优化柔性支护网的设计和应用。

参考文献：

- [1] 翟长海,岳清瑞,谢礼立.抗震韧性城市评估与构建[J].建筑结构学报,2024,45(5):1-13.
- [2] 郝建盛,李兰海.雪崩灾害防治研究进展及展望[J].冰川冻土, 2022,44(3):762-770.
- [3] 杨金明,张旭,毛炜峰,等.中国天山雪崩灾害调查分析[J].自然灾害学报,2022,31(1):188-197.
- [4] 张永华,刘健,张永忠.新疆山区公路雪崩灾害防治试验工程效益分析[J].交通标准化,2010(Z1):195-198.
- [5] 徐小蓉,田园诗,孙其诚,等.国内外雪崩试验、流变模型与动力模拟进展综述[J/OL].力学与实践,1-13[2024-10-13].

作者简介：王晨 (1999-)，男，中国山东临沂人，硕士，从事地质灾害和韧性防灾研究。