

川藏铁路工程中岩土体力学行为与灾害防控研究综述

朱继晨

同济大学土木工程学院地下建筑与工程系 上海 200092

【摘要】：川藏铁路穿越青藏高原东缘强烈隆升带，面临高地应力、活动断裂、冻融循环与强降雨等多重极端地质环境的耦合作用。沿线岩土体具有高度非均质性、结构破碎性和力学响应复杂性，易诱发岩爆、软岩大变形、岩崩及隧道突水突泥等重大岩土工程灾害。本文系统梳理川藏铁路典型区段岩土体的工程地质特征，归纳四类主要岩土体力学灾害的成因机制、演化模式与破坏特征；总结当前在岩土体参数识别、多场耦合数值模拟、智能监测预警及灾害防控技术等方面的研究进展；并指出未来需重点突破岩土体多尺度本构模型、灾变链式演化机理以及数字孪生驱动的智能防控体系等关键科学问题。研究成果可为川藏铁路的安全建设与长期运维提供理论支撑，亦对类似艰险山区重大工程具有借鉴意义。

【关键词】：岩土体；川藏铁路；岩爆；软岩大变形；岩崩；隧道突涌；多场耦合；智能监测

DOI:10.12417/2811-0536.26.03.012

1 引言

川藏铁路横贯青藏高原核心区域，全长 1543 公里，东起成都，西至拉萨，兼具重大战略意义与社会经济价值，有望显著缩小中国东西部发展差距。其中，成都—雅安段和拉萨—林芝段已分别于 2018 年 12 月和 2021 年 6 月开通运营；而雅安—林芝段桥隧比高达 94.45%，累计爬升逾 14,000 米，地形起伏剧烈，工程难度极大^[1]。该线路跨越七河八山，穿越全球最活跃的构造带之一。受特提斯构造域影响及青藏高原快速隆升作用，区域地质结构极为复杂，岩性差异显著，气候垂直分异明显^[1-3]。近年来，高原气温急剧上升，极端天气事件频发，进一步加剧了环境敏感性。

在铁路全生命周期中，活动断层、强震、滑坡、落石、泥石流、冰湖溃决洪水等灾害风险持续存在。隧道工程面临岩爆、软岩大变形、突水突泥、高温热害等多重挑战，还需应对低温、暴雨、冰雪及冻融循环等气象灾害^[4-6]。这些高度耦合的自然因素使川藏铁路的建设与运维异常艰巨，同时当前对多灾种耦合演化机制、岩土体多场响应的动态判据及智能防控技术的系统集成仍显不足。亟需构建系统性灾害防控体系，并依托先进技术提供支撑。

2 主要岩体力学行为与灾害防控体系

在地质灾害监测预警领域，已提出“空间—空中—地面—地下”三维多源传感技术体系，用于地质灾害识别与预警^[7]。星载 InSAR、三维激光扫描、地基 SAR 等技术可动态获取灾害变形信息^[7]，但主要用于周期性监测，难以实现实时监控。全球卫星导航系统虽具高精度，但在川藏铁路高寒峡谷区域可靠性较差。通过深化对特殊岩体及地震破裂行为的理解，关联深

部动力学与地表地形过程，可为灾害风险认知提供关键证据。研究隧道灾害机理与软岩大变形破坏，有助于预测隧道灾害、建立山地灾害模型，并解释其对铁路的影响。结合青藏高原气候变化及风场演化，可预测地表灾害的发展趋势。基于多圈层相互作用分析，可进一步探索川藏铁路沿线环境梯度及其驱动机制（图 1）。

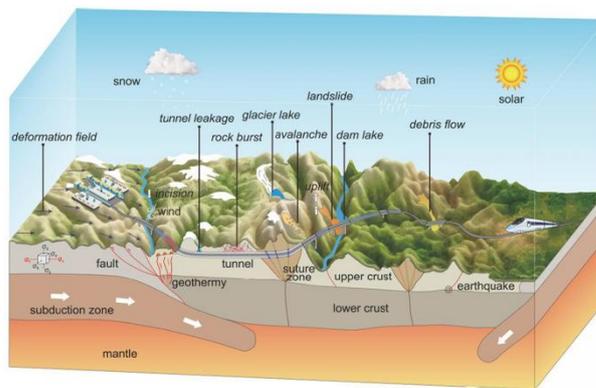


图 1 内因与外因耦合作用下铁路工程灾害的形成与演变^[8]

2.1 岩爆

岩爆是在高应力环境下常见的严重岩体力学现象，表现为岩体突然破裂并释放大量能量。根据触发机制，岩爆可分为应力诱发型和冲击诱发型两类^[9]。应力诱发型岩爆通常发生在地下工程开挖面，由高地应力下岩石内部应变能的突然释放引起；冲击诱发型岩爆则可能由爆破、坍塌或邻近开挖等外部扰动触发^[9]。岩爆研究旨在揭示其成因、预测其行为并制定有效控制策略，主要包括成因分析、动态特性研究、预测模型构建及实验验证。研究依赖高精度应力监测技

术,通过地下布设的仪器实时获取岩体应力信息。常用设备包括应力计、应变计和微震监测系统,分别用于测量内部应力、表面应变及微震活动。

应力分析方法包括统计分析、力学模型和机器学习。其中,机器学习可有效提取岩爆前兆特征。常用的岩爆判据有应力比判据和梯度应力判据:前者基于最大主应力与岩石单轴抗压强度之比评估岩爆可能性;后者引入应力梯度强度比,适用于复杂应力场^[10]。

2.2 软岩大变形

软岩大变形是川藏铁路建设中的另一重大岩体力学难题。在高应力条件下,软岩易发生显著塑性流动和渐进性破坏,导致隧道支护结构受损甚至失效,严重威胁工程稳定性与安全性^[11]。软岩通常抗压和抗剪强度较低,因其富含黏土矿物,力学行为对含水状态极为敏感:干燥时强度较高,潮湿或饱和时显著降低,直接影响地下工程的稳定性。其变形特性表现为初始弹性模量和泊松比较高,但随应力增加,变形模量逐渐减小。层理、节理等结构面进一步削弱其整体刚度与强度。软岩破坏模式多样,包括剪切、张拉和压缩破坏,受内部结构、应力状态及加载速率等因素控制。其力学性质具有显著时间效应,即蠕变特性——在长期荷载下持续变形,可能引发结构失稳。此外,温度、化学环境和生物作用亦可改变其性能。

数值模拟在软岩大变形研究中至关重要。本构模型需反映其非线性、各向异性及时间依赖性。结合复杂边界条件与加载路径,可模拟开挖、支护及地下水作用下的变形与破坏过程。多物理场耦合方法能更全面揭示其力学响应。通过与室内试验和现场监测数据对比,可验证模型可靠性,并用于优化设计与施工,提升工程安全性。

2.3 岩崩

岩崩是山区最具威胁性的地质灾害之一。青藏高原特殊的高原气候、强烈地震活动及深切峡谷地貌共同促进了大型岩崩的形成。史前大型岩崩常表现出流体化运动、拖曳力减小、卷入效应、长距离运移及脊状堆积等地貌特征。现场调查可识别其地表形态,而运动过程多依赖数值模拟复现^[5]。

地质结构调查是理解岩崩机制的基础。通过分析岩层倾角、断层、裂缝和节理,可以明确岩崩的触发条件和运动路径。例如,断层可能成为滑动面,而节理发育程度影响岩崩体稳定性。绘制地质图和剖面使地质条件更直观。岩性分析评估岩石硬度、抗剪强度、吸水性和风化程度等特性,这些因素影响岩崩的发生

与运动。易溶石灰岩容易发生岩崩,而花岗岩由于硬度高相对稳定^[12]。地貌特征如坡度、坡向、地形起伏和地表覆盖决定岩崩的运动路径和影响范围。陡坡加速岩崩运动,复杂地形改变其传播方向。研究依赖地形图分析、高程数据获取和地表覆盖调查。地下水位升高削弱岩体强度,强降雨增加失稳风险;地震直接接触岩崩,采矿和道路建设等活动可能诱发新的不稳定结构。

数值模型需参数化岩崩体的质量、体积、形状及其运动特性,并考虑摩擦和空气阻力等相互作用。离散元适用于破碎与分散过程模拟;有限元提供应力与应变分布;计算流体动力学用于分析空气阻力影响。模型验证通过实测数据对比完成,敏感性分析评估参数变化的影响。多物理场耦合模型综合反映岩崩与环境的相互作用,并行计算技术提升模拟效率。

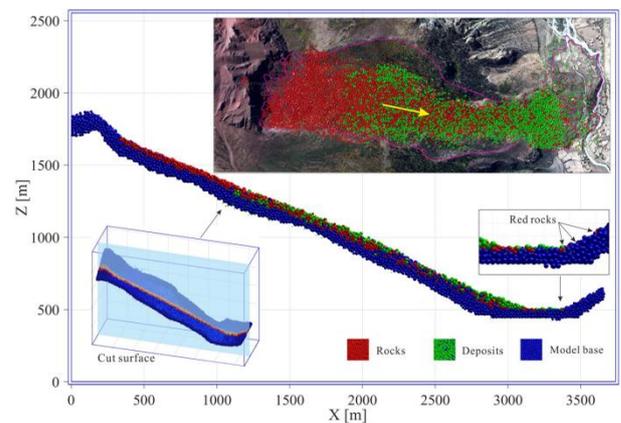


图2 Chada 岩崩过程的数值模拟^[5]

岩崩预警系统集成监测、数据融合、风险评估与信息发布功能,依托多源感知技术实现灾害概率预测与分级预警。当前系统正向智能化、一体化方向演进,显著提升响应时效与决策支持能力。类似地,隧道突水突泥风险亦高度依赖地质结构判识。高渗透性岩层(如砂岩、灰岩)易形成导水通道;断层与密集裂隙削弱围岩完整性,构成突涌路径;岩层倾向控制地下水渗流方向,进而影响突涌可能性^[13]。因此,精细刻画区域水文地质条件至关重要。

为准确掌握地质条件,需综合运用多种勘探技术。传统方法如地质调查、钻探与取样;现代技术包括地球物理探测、地质雷达和遥感,高效获取隧道周边地质信息。不同地质条件和结构面可能导致局部破坏或区域性突涌。实验研究揭示泥浆物理特性和突涌机制。流变实验测定泥浆黏度和屈服应力,指导泥浆配制;突涌模拟实验重现地质结构、水压力和施工条件,分

析突涌动态；注浆实验评估材料和工艺效果，提供控制措施依据。这些研究有助于优化施工方案，减少突涌风险^[14]。

2.4 隧道泥浆突涌

隧道泥浆突涌是一种极具破坏性的地质灾害，通常由特定地质条件、地下水活动及地表水入渗共同引发。其发生与地质构造（如断层、裂隙）、围岩渗透性及水压力密切相关。为防控此类灾害，需对隧道周边地质环境进行详查，采取有效支护与注浆措施，并建立实时监测与预警系统^[15]。

3 总结与讨论

川藏铁路工程是岩体力学研究 with 重大基础设施建设深度融合的典范。推进多场耦合研究，综合考虑应力、温度、水力与化学场的相互作用，有助于精准预测岩体在极端环境下的稳定性与变形行为。发展基于人工智能与大数据的智能监测预警系统，可实现对岩体微小变形的实时感知与风险超前识别。同时，纳米材料、智能材料及自修复材料等新技术的应用，有望提升结构耐久性并降低运维成本。加强国际合作，借鉴先进理论与方法，将助力攻克复杂地质难题。该工程的成功实施，不仅依赖多学科协同创新，也将推动岩体力学理论与工程实践迈向新高度。

参考文献 (References) :

- [1] ROYDEN L H, BURCHFIEL B C, VAN DER HILST R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 2008, 321(5892): 1054–1058.
- [2] YANG K, WU H, QIN J, et al. Recent climate changes over the Tibetan Plateau and their impacts on energy and water cycle: A review[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 112: 79–91.
- [3] YOU Q, CHEN D, WU F, et al. Elevation dependent warming over the Tibetan Plateau: Patterns, mechanisms and perspectives[J]. *Earth-Science Reviews*, 2020, 210: 103349.
- [4] BAI M, CHEVALIER M L, LELLOUP P H, et al. Spatial slip rate distribution along the SE Xianshuihe fault, eastern Tibet, and earthquake hazard assessment[J]. *Tectonics*, 2021, 40(11): e2021TC006985.
- [5] LAI Q, ZHAO J, HUANG R, et al. Formation mechanism and evolution process of the Chada rock avalanche in Southeast Tibet, China[J]. *Landslides*, 2022, 19(2): 331–349.
- [6] LIU J, WANG T, LI Z, et al. Coseismic deformation of the 2022 Mw 6.7 Menyuan earthquake from Sentinel-1 and ALOS-2 InSAR observations: Implications for fault geometry and seismic hazard[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(6): 1404.
- [7] DAI K, LI Z, XU Q, et al. Entering the era of earth observation-based landslide warning systems: A novel and exciting framework[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2020, 8(1): 136–153.
- [8] CUI P, GE Y, LI S, et al. Scientific challenges in disaster risk reduction for the Sichuan–Tibet Railway[J]. *Engineering Geology*, 2022, 309: 106837.
- [9] ZHANG D, SUN Z, FANG Q. Scientific problems and research proposals for Sichuan–Tibet railway tunnel construction[J]. *Underground Space*, 2022, 7(3): 419–439.
- [10] 何佳其, 吝曼卿, 刘夕奇, 等. 引入梯度应力的岩爆预测方法[J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(11): 2098–2105.
- [11] MENG L, LI T, JIANG Y, et al. Characteristics and mechanisms of large deformation in the Zhegu mountain tunnel on the Sichuan–Tibet highway[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, 37: 157–164.
- [12] 张玉芳, 范家玮, 袁坤. 重大滑坡灾变机制与防治新技术研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2023, 42(8): 1910–1927.
- [13] 肖洋, 全凯, 卢松, 等. 隧道穿越压性断层突水突泥综合地质预报[J]. *地质灾害与环境保护*, 2025, 36(02): 56–61.
- [14] 王复明, 蔡直言, 郭成超, 等. 隧道工程水灾害防治研究进展[J]. *岩土工程学报*, 2025, 47(11): 2225–2236.
- [15] ZHANG J, LI S, ZHANG Q, et al. Mud inrush flow mechanisms: a case study in a water-rich fault tunnel[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2019, 78: 6267–6283.