

# 高原山区桥隧全生命周期韧性管理

子秦华

云南交投集团云岭建设有限公司 云南 昆明 650000

**摘要：**高原山区以其复杂的地形地貌、脆弱的生态环境和频发的自然灾害，对交通基础设施构成了严峻挑战。桥梁与隧道作为此类区域交通网络的关键节点和咽喉要道，其安全、可靠与持续服务能力直接关系到区域经济发展、国防安全与民生保障。传统的工程管理模式已难以应对日益加剧的多重灾害耦合风险。本文聚焦于“韧性”这一核心理念，系统阐述了高原山区桥隧全生命周期韧性管理的内涵、框架与关键技术。文章首先剖析了高原山区桥隧面临的主要灾害风险特征，继而构建了涵盖规划、设计、施工、运维至退役更新五大阶段的全生命周期韧性管理框架，并深入探讨了各阶段提升韧性的具体策略与技术路径。最后，文章展望了未来在数字孪生、人工智能、新材料等前沿技术驱动下，高原山区桥隧韧性管理的发展方向，旨在为提升我国西部重大交通基础设施的抗灾能力与可持续发展水平提供理论支撑与实践指导。

**关键词：**高原山区；桥梁隧道；全生命周期；韧性管理；灾害风险

## 引言

国家“西部大开发”“一带一路”及“交通强国”战略推动下，交通建设向高原、高寒等复杂艰险山区拓展。青藏高原、云贵高原等地成为全球交通工程最具挑战性的区域之一。桥隧工程在此不仅是克服地形障碍的关键，更是维系区域经济、保障国防安全、促进民族团结的生命线。然而，高原山区自然环境严酷，带来一系列极端且耦合的风险：高海拔加速材料性能退化，复杂地质构造孕育高烈度地震与活动断裂带，陡峭地形与丰沛降水诱发滑坡等地质灾害，冰川融雪与冻融循环导致路基失稳。近年来，多次地震及暴雨引发的地质灾害，严重损毁桥隧结构，凸显其脆弱性。传统工程管理侧重于结构在常规荷载下的安全性与耐久性，采用“防-抗”策略，在应对单一、可预测灾害时有效，但面对多灾种并发、链式传递、超设防基准的极端事件时则力不从心。关键桥隧节点失效将导致交通网络瘫痪，救援受阻，经济损失和社会影响巨大。在此背景下，“韧性”理念成为国际工程界应对不确定性和极端风险的核心。工程韧性强调系统在遭受扰动后吸收冲击、维持核心功能，并快速恢复甚至适应性学习，实现系统重构与提升。它超越“不倒塌”或“少损坏”，追求“功能不中断”“损失最小化”“恢复最优化”。因此，将韧性理念贯穿高原山区桥隧工程全生命周期，构建系统化、前瞻性的韧性管理体系，是保障国家战略实施、推动土木工程学科发展的必然趋势。

## 1 高原山区桥隧灾害风险特征分析

高原山区桥隧工程所面临的灾害风险具有显著的地

域性、复杂性和耦合性，是开展韧性管理的逻辑起点。

### 1.1 地质与地震灾害

高原山区多位于板块碰撞挤压带，地壳活动剧烈，地震频发且强度高。桥隧结构不仅直接承受地震动的作用，还可能遭遇由地震触发的次生灾害，如：（1）活动断裂带错动：跨越活动断裂带的隧道和桥梁，会因断层的突然错动而产生巨大的非一致位移，远超结构的变形能力，导致灾难性破坏。（2）岩爆与大变形：高地应力环境下，深埋隧道在开挖过程中极易发生岩爆（硬岩）或软岩大变形，威胁施工安全并影响长期稳定性<sup>[1]</sup>。（3）地震液化与震陷：桥梁基础若置于饱和砂土或粉土地基上，在地震作用下可能发生液化，导致地基承载力骤降，引发桥梁倾斜或沉降。

### 1.2 气象水文与地质灾害

高原山区气候垂直分异明显，局地强降雨、冰雪融水是常态，极易诱发多种地质灾害：（1）滑坡与崩塌：陡峭边坡在雨水入渗、冻融循环等作用下失稳，高速运动的滑体或崩落的巨石可直接冲击桥墩、隧道洞门或明洞，造成结构损毁。（2）泥石流：沟谷内松散固体物质在暴雨激发下形成高容重、高流速的泥石流，其强大的冲击力和淤埋效应可瞬间摧毁跨越沟道的桥梁或堵塞隧道进出口。（3）洪水冲刷：山洪暴涨暴落，水流湍急，对桥梁基础的冲刷作用极为强烈，可能导致基础掏空、桥墩失稳。

### 1.3 高寒与冻融灾害

高海拔地区冬季漫长，低温环境带来独特的工程挑战：（1）冻胀与融沉：富含水分的细粒土在冻结时体积

膨胀,对隧道衬砌和桥梁基础产生巨大的冻胀力;春季融化时,土体强度急剧下降,又会发生融沉变形。(2)冰害:隧道内的渗漏水在低温下结冰,反复冻融循环会胀裂衬砌混凝土;桥面结冰则严重影响行车安全。(3)材料性能劣化:低温、强紫外线辐射会加速混凝土碳化、钢筋锈蚀以及沥青路面的老化开裂,降低结构的耐久性和承载能力。

这些灾害并非孤立存在,而是常常以“灾害链”的形式出现。例如,一次强震可能同时引发多处滑坡、崩塌,并堵塞河道形成堰塞湖,后续的溃决洪水又会对下游桥隧构成二次威胁。这种多灾种、多过程的耦合作用,极大地增加了风险评估与防控的难度,也凸显了全生命周期韧性管理的必要性。

## 2 全生命周期韧性管理框架

针对上述复杂风险,高原山区桥隧的韧性管理必须摒弃“头痛医头、脚痛医脚”的碎片化思维,建立一个覆盖“规划—设计—施工—运维—退役更新”五个阶段的闭环式、动态化管理框架。该框架以“预防—抵御—适应—恢复—学习”为核心逻辑,确保韧性目标在每个环节都得到贯彻。

### 2.1 规划阶段:韧性选址与路线优化

此阶段是奠定工程韧性的基石。核心任务是通过宏观层面的风险规避,从源头上降低潜在灾害暴露度。(1)多源灾害风险区划:综合利用遥感(RS)、地理信息系统(GIS)、地质勘探等手段,对规划区域进行高精度的地震、地质、气象水文等多灾种风险评估与区划。识别出高风险的活动断裂带、大型滑坡体、泥石流沟、雪崩路径等,将其划定为工程避让区。(2)基于韧性的路线比选:在路线方案比选中,引入韧性评价指标体系,不再仅考虑工程造价和里程长短,而是综合评估各方案在整个生命周期内可能面临的灾害风险、预期损失、修复难度及社会影响。优先选择穿越地质稳定、灾害风险低、便于后期维护和应急抢通的走廊带<sup>[2]</sup>。(3)冗余与替代路径规划:对于区域交通网络中的关键通道,应前瞻性地规划备用线路或迂回方案。即使主通道上的桥隧因灾中断,也能通过替代路径维持基本的交通功能,避免“一点断、全线瘫”的局面。

### 2.2 设计阶段:韧性结构体系与设防标准

设计阶段是将韧性理念转化为具体工程措施的关键环节。(1)性能化抗震与抗灾设计:突破传统基于强度的设计方法,采用基于性能抗震设计(PBSD)理念。明确设定不同水准地震(如小震、中震、大震、罕遇地震)下桥隧结构的预期性能目标(如正常使用、可修复、生命安全、不倒塌),并据此进行精细化设计。对于其他灾害,

如抗滑桩、明洞棚洞等防护结构,也应进行类似的性能化设计。(2)结构体系创新与冗余设计:采用具有高延性、高耗能能力的结构体系,如延性桥墩、减隔震支座、可更换构件等。在关键受力部位引入冗余设计,确保局部损伤不会导致整体结构连续倒塌。例如,隧道可采用复合式衬砌,初期支护与二次衬砌共同受力,互为备份。(3)提升设防基准:鉴于高原山区灾害的极端性,应在规范基础上适当提高关键桥隧的设防标准。例如,对跨越深切峡谷的特大桥,其抗震设防烈度可提高半度至一度;对穿越大型堆积体下方的隧道,其结构抗冲击能力需按可能发生的最大规模崩塌落石进行验算。

### 2.3 施工阶段:韧性建造与过程控制

施工阶段是将设计蓝图变为实体的过程,也是暴露于风险之中的高危期。(1)精细化施工组织与风险预案:针对施工期间可能遭遇的季节性灾害(如雨季滑坡、冬季雪崩),制定详细的施工组织计划和应急预案。合理安排工期,尽量避开灾害高发期进行高风险作业。(2)信息化施工与动态反馈:广泛应用BIM(建筑信息模型)、物联网(IoT)等技术,对施工过程进行实时监控。通过对围岩变形、地表沉降、地下水位等关键参数的监测,及时反馈信息,动态调整施工工法和支护参数,确保施工安全和结构质量,这本身就是一种过程韧性的体现<sup>[3]</sup>。(3)高质量建造与材料优选:严格控制施工质量,特别是混凝土浇筑、钢筋连接、防水层铺设等关键工序。选用高耐久性、抗冻融、抗腐蚀的特种材料,从源头上提升结构抵抗环境侵蚀的能力。

### 2.4 运维阶段:韧性监测、评估与快速恢复

这是全生命周期中最长的阶段,也是韧性价值得以彰显的阶段。(1)智能健康监测系统(SHM):构建集传感器网络、数据传输、智能诊断于一体的SHM系统。利用光纤光栅、加速度计、倾角仪、裂缝计等设备,对桥隧的应力、应变、位移、振动、裂缝等状态进行全天候、自动化监测。(2)基于大数据的风险评估与预警:整合SHM数据、气象预报、地质灾害预警等多源信息,利用机器学习、人工智能算法,建立结构健康状态评估模型和灾害风险动态预警模型。实现从“被动响应”到“主动预警”的转变,为提前采取交通管制、人员疏散等措施赢得宝贵时间。(3)快速检测、评估与抢修机制:灾害发生后,迅速启动应急响应。利用无人机、三维激光扫描等快速检测技术,对受损结构进行高效、精准的损伤识别与安全评估。预先制定模块化、标准化的抢修预案,储备关键应急物资(如装配式钢桥、快速固化材料),确保在最短时间内恢复交通“生命线”功能。这是韧性

“恢复”维度的核心体现。

### 2.5 退役更新阶段：韧性再利用与知识传承

工程的终点亦是新循环的起点。(1) 适应性再利用评估：对于达到设计使用年限或功能老化的桥隧，并非一拆了之。应评估其结构剩余价值，探索适应性再利用的可能性，如改造为景观步道、地下管廊等，延长其社会服务寿命<sup>[4]</sup>。(2) 全生命周期数据归档与知识库构建：系统性地收集、整理、归档项目从规划到退役全过程的设计、施工、监测、维修、灾害事件等数据，形成宝贵的工程知识库。这些数据是未来同类工程进行韧性设计、风险评估和决策支持的基石，体现了韧性管理中的“学习”与“进化”能力。

## 3 关键技术与未来展望

实现高原山区桥隧全生命周期韧性管理，离不开一系列关键技术的支撑与发展。

### 3.1 数字孪生 (DigitalTwin) 技术

数字孪生是物理实体在虚拟空间的精确映射和动态仿真。通过构建桥隧的数字孪生体，可以集成BIM模型、实时监测数据、环境荷载信息、历史维修记录等，实现对物理桥隧全生命周期状态的可视化、可预测、可交互。管理者可以在虚拟环境中模拟各种灾害场景，预演应急预案，优化维护策略，从而做出更科学、更具前瞻性的决策。

### 3.2 人工智能 (AI) 与大数据分析

AI和大数据是处理海量、多源、异构工程数据的核心引擎。深度学习算法可以从历史灾害案例和监测数据中挖掘出隐藏的风险模式和损伤演化规律；强化学习可用于优化应急资源调度和抢修路径规划；自然语言处理技术则能高效地从海量文献和报告中提取知识，辅助专家决策。

### 3.3 新型韧性材料与结构

材料是结构韧性的物质基础。研发和应用具有自感知、自诊断、自修复功能的智能材料（如微胶囊修复混凝土、形状记忆合金），以及高韧性、轻质高强的复合材料，将从根本上提升桥隧结构抵御损伤和自我恢复的能力。

### 3.4 多灾害耦合风险量化评估方法

未来的研究亟需发展能够定量描述地震-地质、暴雨-泥石流-洪水等多种灾害链式传递与耦合作用的先进数值模型和概率风险评估方法。这将为全生命周期韧性管理提供更精准的风险输入。

## 4 结语

高原山区桥隧工程的安全与韧性，关乎国计民生与国家战略全局。面对复杂多变、耦合叠加的自然灾害风险，必须将“韧性”理念作为核心指导思想，贯穿于工程的全生命周期。通过在规划阶段科学避灾、设计阶段强化设防、施工阶段精细管控、运维阶段智能预警与快速恢复、退役阶段知识传承，构建一个系统、动态、闭环的韧性管理体系。未来，随着数字孪生、人工智能、新材料等前沿技术的深度融合与应用，高原山区桥隧全生命周期韧性管理将迈向更高水平的智能化、精准化和自主化，为筑牢国家西部交通“生命线”提供坚实保障。

## 参考文献

- [1] 王晓波.公路桥隧养护管理问题及解决措施[J].运输经理世界,2023,(30):137-139.
- [2] 中铁通轨道运营有限公司,温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司运营分公司.桥隧管理与维护[M].中国铁道出版社:202208:99.
- [3] 汪珏.桥隧养护管理:人工智能赋新篇[J].交通建设与管理,2021,(03):1.
- [4] 牛子孺.桥隧工程管理中创新模式的应用及发展分析[J].四川建材,2021,47(09):208-209.