

高地震烈度区山区公路路线总体设计的思考

宋海博

远洲大道（北京）工程咨询有限公司西安分公司 陕西 西安 710000

【摘要】：高地震烈度区山区公路建设面临复杂地形与强震动叠加影响，路线总体设计成为保障工程安全与运营稳定的关键环节。围绕“安全优先、避险为本、系统协同”的核心论点，分析高烈度山区地震地质特征及其对路线选线、线形控制和结构布设的约束作用，提出以风险分区为基础的总体布局思路，强化地质灾害评估与抗震设防标准的统筹衔接，构建集选线优化、工程措施与应急保障于一体的综合设计框架，以提升公路工程在强震环境下的整体安全性与耐久性。

【关键词】：高地震烈度区；山区公路；路线总体设计；抗震设防；地质灾害防治

DOI:10.12417/2811-0536.26.05.017

引言

高地震烈度区山区公路建设始终处于自然风险与工程需求的交汇点。强震作用叠加复杂地形条件，使路线总体设计关乎工程造价与施工难度，更直接影响结构安全与运营可靠性。如何在满足通行功能时实现主动避险与系统防灾，成为当前山区公路规划设计亟需回应的重要课题。基于安全优先与风险控制理念，对高烈度山区公路路线总体设计进行系统思考，具有重要的理论价值与实践意义。

1 高地震烈度区山区公路路线总体设计面临的主要问题

1.1 复杂地形与强震动耦合作用带来的选线约束

高地震烈度区山区公路路线总体设计面临地形条件与地震动参数双重控制。山区普遍发育深切峡谷、高陡边坡及断裂构造带，地形起伏大、坡面稳定性差，工程布线空间受限。在强震动作用下，峰值加速度放大效应与地形放大效应叠加，易引发边坡失稳、崩塌及滑坡等次生灾害，导致路线走向与纵坡控制受到明显约束。活动断层附近地段还需满足断层避让距离、跨断层结构形式及抗震设防类别等规范要求，使选线过程必须在安全距离与工程可行性之间寻求平衡。

地震动反应谱特征与场地类别划分直接影响桥隧比例和控制性工程布设方案。软弱覆盖层厚度较大的坡麓或河谷地段，场地放大系数较高，结构地震反应显著增强，增加基础处理和抗震构造措施的复杂度。高填深挖路段在强震条件下可能出现路基沉陷、差异变形及挡土结构破坏，对平纵线形连续性构成挑战。路线总体设计需要结合工程地质勘察成果，通过地震危险性分析和地质灾害易发性分区，对走廊带进行比选论证，避免将路线布设于不利场地或高风险构造单元之内，从源头上降低震害风险。

1.2 地质灾害频发对路线稳定性的影响

高烈度山区通常构造活动频繁，岩体破碎带发育，风化强烈，加之降雨与地震耦合作用，滑坡、泥石流及崩塌灾害呈现高频率与高强度特征。路线总体设计若未充分考虑区域地质灾害分布规律，极易形成长大高边坡或穿越潜在滑移面区域，削弱路基整体稳定性^[1]。强震发生时，岩土体抗剪强度衰减，孔隙水压力骤升，可能触发既有隐伏滑坡体复活，造成路基结构整体位移甚至断裂。对桥梁基础和隧道洞口段而言，地质灾害还会导致地基承载力降低与不均匀沉降问题，增加结构震损概率。

山区沟谷密集地段往往是泥石流物源集中区，路线穿越此类区域需综合考虑拦挡工程、排导系统与线路高程控制。若总体布局忽视流域汇水面积与物源条件分析，极端气候叠加地震扰动后，泥石流规模可能超出既有防护能力，威胁行车安全与运营连续性。地质灾害的时空不确定性还对后期养护管理提出更高要求，频繁的边坡治理与加固措施会显著提高全寿命周期成本。路线总体设计阶段应依托地质灾害风险评估成果，优化走廊选择与工程组合形式，实现风险规避与工程经济性的统一。

1.3 传统设计模式在高烈度区的适应性不足

传统山区公路路线设计多侧重地形适应与工程量控制，强调纵坡、曲线半径及土石方平衡等技术指标，对地震动参数及场地响应特征关注不足。在高地震烈度区，单纯依据地形条件进行线位比选，可能忽略断裂构造活动性与场地动力特性差异，导致路线通过不利地段，增加后期加固与改造压力。部分设计仍以经验判断为主，缺乏系统性的地震危险性分析与动力稳定性计算，使总体布局难以满足高设防要求。

工程措施与路线布局脱节也是传统模式的突出问

题。桥梁、隧道及高边坡防护工程往往在路线确定后被动优化，缺乏从总体层面统筹抗震性能与结构体系的协同设计。面对强震可能引起的大范围边坡失稳与结构损伤，单点加固难以保障线路整体功能连续性。信息化勘察与风险分区成果在部分项目中未能充分融入选线决策，导致设计缺乏数据支撑与动态调整机制。高烈度山区公路建设需要突破以往分散式设计思路，将抗震设防、地质灾害防治与路线总体规划深度融合，形成系统化、精细化的设计框架。通过统筹区域构造特征、场地动力参数及灾害易发分布规律，在总体布局阶段嵌入风险分级控制与差异化设防策略，实现工程安全、技术可行与全寿命周期管理的协调统一。

2 高地震烈度区山区公路路线总体设计优化思路

2.1 基于地震风险分区的总体选线原则

高地震烈度区山区公路路线总体设计应以地震危险性分析和区域构造稳定性评价为前提，建立地震风险分区图，对不同烈度水平、断裂活动性及场地类别进行分级管控。在走廊带比选阶段，将活动断层缓冲带、地震动峰值加速度分布区以及不利场地单元纳入约束条件，结合工程地质钻探、物探资料与历史震害数据，对线路通过区域进行综合判识。对Ⅷ度及以上烈度区，应严格控制路线穿越断裂破碎带和强震动放大区段的长度，优先选择基岩完整、地层结构稳定的山脊或稳定台地作为控制线位，从源头降低结构震害风险。风险分区成果还应与交通功能需求、生态环境保护及工程投资控制相统筹，实现安全性与经济性的动态平衡。对于无法完全避开的高风险地段，可通过缩短暴露长度、提高桥隧比例或调整路线高程等方式降低震害影响范围。路线总体布局需形成分级设防策略，在不同风险等级区段采用差异化抗震标准与构造措施，使总体选线既符合规范设防要求，又具备可实施性与可维护性。将风险分区成果嵌入选线决策流程，构建以避险为核心的总体选线原则，有助于提升高烈度山区公路的本质安全水平。依托地震危险性评价与地质灾害易发性分析，对高风险区段实施主动绕避或工程替代方案，优化走廊带布局与控制性工程设置，从源头降低震害暴露程度与结构失效概率。

2.2 线形控制与结构布置的抗震协同设计

高地震烈度区山区公路的平纵线形设计关系行车安全与舒适性，还直接影响结构受力体系和震时响应特征。较大的纵坡和连续小半径曲线会增加高填深挖工程比例，在强震作用下易产生路基滑移与结构附加内力^[2]。路线总体设计阶段应结合地震反应谱分析与

动力稳定性计算，对关键控制点进行多方案比选，合理控制最大纵坡、最小曲线半径及缓和曲线长度，降低地震作用下的动力放大效应。桥梁与隧道的设置需服从整体线形控制，优化桥跨布置、调整隧道进出口位置，使结构受力更加均匀，减少不利地形对抗震性能的削弱。

结构布置应与地震设防类别、场地条件和地基承载特性相匹配，实现路线与工程构造的协同优化。桥梁基础形式可根据地层条件选择桩基础或扩大基础，并结合抗震支座、限位装置与阻尼构件提升整体延性性能。隧道设计需考虑围岩类别及断层破碎带分布，合理确定衬砌厚度与抗震构造措施，避免洞口段成为薄弱环节。在总体设计层面统筹线形控制与结构布置，将抗震理念贯穿于路线规划全过程，可有效提高公路在强震条件下的整体稳定性与功能连续性。结合地震动参数分区与场地类别划分，对平纵线形指标、桥隧比例及基础形式进行协同优化，强化结构延性设计与构造细节控制，减少不利地形和软弱地基对震时响应的放大影响，增强关键节点工程在设防地震作用下的安全冗余与恢复能力。

2.3 地质灾害防治与工程措施一体化布局

高地震烈度区山区公路建设环境中，地震诱发的滑坡、崩塌与泥石流往往呈链式反应，对线路安全构成持续威胁。路线总体设计应以地质灾害易发性评价为依据，将潜在灾害点、物源区及汇水通道纳入总体布局控制范围，避免在大型滑坡体、古滑坡堆积区或松散堆积层厚度较大的沟谷地段布设控制性工程。对不可避免区域，可通过调整路线位置、提高线路标高或采用桥梁跨越方式，减少路基直接受灾概率，实现主动避险与工程可控性的统一。

工程措施的配置需要与灾害类型和规模相匹配，形成系统化防护体系。高边坡地段可采用抗滑桩、锚索框架梁及喷混植生等综合治理技术，提高边坡整体稳定系数；泥石流沟谷应布设拦砂坝、排导槽及消能设施，并结合完善的排水系统，降低震后暴雨条件下的灾害强度。路线总体设计阶段应统筹防护工程规模、施工条件与后期养护需求，避免零散布置导致的功能缺失。构建地质灾害防治与工程措施协同的一体化布局体系，可增强高烈度山区公路在全寿命周期内的安全保障能力。

3 高地震烈度区山区公路路线总体设计的系统保障机制

3.1 多专业协同与全过程风险评估机制

高地震烈度区山区公路路线总体设计涉及地质、

地震、桥梁、隧道、路基及交通工程等多学科内容，单一专业主导的设计模式难以全面识别潜在风险。建立多专业协同机制，有助于在选线阶段整合工程地质勘察成果、地震动参数区划、地质灾害易发性评价及生态环境约束条件，形成统一的风险判识框架。构建基于GIS平台的综合信息数据库，将断裂构造分布、场地类别划分、边坡稳定性分析结果与路线方案进行空间叠加，可实现对高风险区段的直观识别与动态调整，提高总体布局决策的科学性。

全过程风险评估机制应贯穿可行性研究、初步设计及施工图设计阶段，通过量化指标体系对震害概率、结构脆弱性及次生灾害影响进行综合评价。动力稳定性分析、反应谱计算及数值模拟技术可用于预测关键结构在设防地震作用下的响应特征，辅助优化设计参数。设计阶段形成的风险分级结果还应为施工组织与后期养护提供依据，构建从规划到运营的闭环管理体系。多专业协同与全过程风险评估相结合，有利于实现高烈度山区公路路线总体设计由经验型向数据驱动型转变，提升整体抗震安全水平。

3.2 抗震设防标准与技术体系的完善路径

高地震烈度区山区公路建设对抗震设防标准提出更高要求，传统按行政区划划分设防烈度的方法难以反映复杂地形条件下的实际地震动特征。路线总体设计需要结合场地地震安全性评价成果，对峰值加速度、特征周期及场地放大系数进行精细化分析，在不同区段采用差异化设防参数^[3]。针对桥梁、隧道及高填方路基等控制性工程，应明确抗震设防类别和性能目标，强化延性设计理念，通过合理的构造措施和冗余体系提高结构在强震下的变形能力与承载稳定性。

技术体系的完善还体现在新材料与新技术的应用层面。隔震支座、消能减震装置以及高性能混凝土等技术手段，可有效降低地震输入能量对结构的影响；对软弱地基和断层破碎带，可采用注浆加固、复合地基

处理及抗滑桩加固等措施提高整体稳定性^[4]。相关设计规范与技术指南应结合震害实例和工程实践不断修订，形成适应高烈度山区特点的技术标准体系。完善设防标准与技术路径，使路线总体设计在满足安全性的同时兼顾工程经济性与可实施性。

3.3 运营阶段安全监测与应急保障体系构建

高地震烈度区山区公路在建成通车后仍面临地震活动及次生地质灾害的长期影响，运营阶段的安全监测成为保障线路功能连续性的关键环节。依托结构健康监测监测系统，在桥梁关键构件、隧道衬砌及高边坡区域布设加速度传感器、位移计与应变计，可实时获取结构响应数据，分析震后残余变形与损伤程度。结合遥感监测和无人机巡检技术，对滑坡体位移速率及裂缝发展趋势进行动态观测，有助于提前识别潜在失稳风险^[5]。

应急保障体系需建立分级响应机制和信息联动平台，实现地震预警信息与交通管控系统的快速对接。在强震发生后，通过应急评估程序对桥梁支座、伸缩装置及边坡防护工程进行快速检查，及时采取交通管制或临时加固措施，避免次生事故扩大。完善的物资储备与专业抢险队伍配置，可缩短恢复通行时间，降低社会影响。将监测数据与前期风险评估成果相结合，形成持续反馈与优化机制，有助于不断提升高烈度山区公路在全寿命周期内的安全保障能力。

4 结语

本文围绕高地震烈度区山区公路路线总体设计展开系统分析，从问题识别、优化思路到保障机制构建进行了全面论述。通过引入地震风险分区理念、强化线形与结构协同设计、完善多专业协同与全过程风险评估机制，提出了兼顾安全性与工程可行性的总体设计路径。相关措施有助于提升公路工程在强震环境下的稳定性与耐久性，为类似地区公路建设提供技术参考与实践借鉴。

参考文献:

- [1] 叶洪波,张哲.高烈度山区不同地形下常规桥梁地震响应分析[J].公路交通技术,2024,40(02):106-115.
- [2] 文丽娜,王万江,何健杰,等.高寒高海拔高烈度地区高速公路总体设计研究[J].公路与汽运,2022,(03):80-85.
- [3] 温影影.高地震烈度山区公路路线方案设计难点探讨[J].建筑技术开发,2021,48(08):140-142.
- [4] 赵立廷,邢智,袁伟民,等.路过震区——高地震烈度地区公路勘察设计初探[J].中国公路,2023,(23):14-15.
- [5] 葛正辉,田志宇,陈行.高地震烈度区公路隧道二次衬砌参数与抗震设防段措施研究[J].四川建筑,2020,40(03):276-277+280.