

高速公路隧道洞口边坡稳定性分析与防护

胡双龙

湖北交投建设集团有限公司桥隧分公司 湖北 武汉 433300

【摘要】：高速隧道洞口边坡受地层构造、开挖扰动及自然环境多重因素作用易产生失稳病害，对道路通行安全构成持续威胁。本文围绕边坡稳定制约因素与防护体系展开系统梳理，从地层岩性、施工扰动、环境侵蚀三类诱因完成机理剖析，并匹配不同工况形成分层加固工艺、标准化施工管控与长效防水蚀防护等成套处置方案。各类防护手段可有效抑制坡体位移扩张，提升边坡安全储备。该分析体系能够为隧道洞口边坡稳定控制提供理论支撑，降低边坡坍塌滑移灾害发生概率。

【关键词】：高速公路；隧道洞口；边坡稳定性；边坡防护

DOI:10.12417/2811-0528.26.17.063

引言

交通基建高质量发展背景下，隧道在高速路网中的应用规模持续扩大，洞口边坡作为线路关键薄弱区段，其失稳风险长期制约着工程运营品质。岩土内在结构、隧道开挖施工以及降雨风化等要素协同改变坡体应力状态，进而逐步诱发各类滑移变形。立足边坡失稳内在机理，搭建分层分类防护技术体系，兼顾施工扰动控制与长期环境抵御需求，形成适配不同坡体条件的稳固处置路径，能够为山区高速隧道边坡安全管控提供创新可行的技术思路。

1 高速隧道洞口边坡研究基础阐述

高速公路隧道洞口边坡属于隧道工程受力薄弱区段，天然边坡内部初始应力平衡被隧道开挖施工打破后，坡体易产生滑移与坍塌灾害，直接威胁道路通行安全。洞口边坡多分布于低山丘陵区域，原始坡面倾角区间多为 10° 至 45° ，复杂断层、软弱夹层及地下水位波动会持续削弱岩土体抗剪性能^[1]。隧道开挖扰动改变坡体位移分布规律，沿坡脚至坡顶水平及竖向变形量递增，埋深变化同步影响坡面位移特征，开挖后未及时支护将明显降低边坡安全储备，针对边坡开展稳定机理分析并配套防护体系，成为保障高速隧道长期运营安全的关键环节。

2 地质条件主导下隧道洞口边坡失稳诱因解析

2.1 地层岩性与构造对边坡整体稳定的制约作用

岩土体自身物理力学参数是决定边坡稳定状态的根本要素，完整坚硬岩体具备较高黏聚力与内摩擦角，抗滑能力充足，边坡整体变形幅度可维持在可控区间。坡面倾角处于 10° 至 45° 区间时，坡体内部应力分布差异明显，陡倾坡面会持续放大土体下滑推力，明显压缩边坡安全储备。区域内发育的断层与软弱土层会形成力学薄弱带，岩土体分层界面抗剪强度显著下降，自重应力作用下易出现分层滑移。埋深变化同步改变岩土体受力形式，浅层土体剪切作用更为突出，深层土体以压缩

变形为主，地层组合杂乱、构造裂隙发育的边坡，位移分布不均匀特征持续加剧，极易逐步发展为整体失稳破坏。如图1。

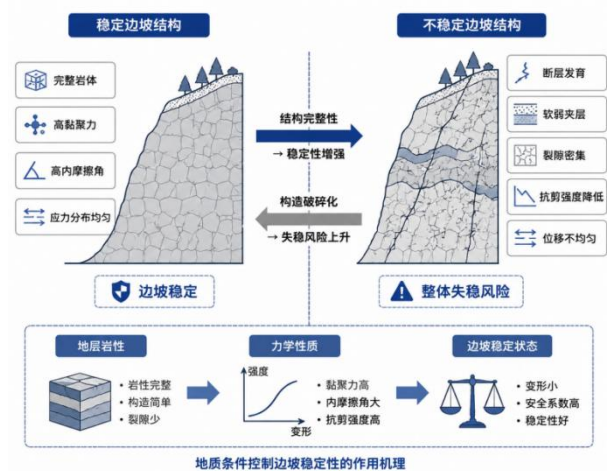


图1 地质条件调控边坡稳定性的作用机理示意图

2.2 隧道开挖施工产生的边坡应力扰动效应

隧道洞身开挖直接破除坡体原有应力平衡状态，不同开挖顺序对应的应力释放程度存在明显差别，开挖扰动同步诱发坡面水平与竖向位移增长，变形量沿坡脚向坡顶逐步提升。边坡各区域受开挖约束程度不同，坡脚土体受周边岩土支撑限制，变形增量相对微弱，坡腰与坡顶因缺少侧向约束，位移增幅显著扩大。边坡坡度超过 45° 时，隧道内部测点位移分布规律发生改变，洞顶位置变形持续增大。未施加支护结构条件下，开挖造成的应力空缺无法获得补偿，边坡安全系数明显衰减，开挖产生的附加应力持续作用于坡面，长期累积会逐步诱发裂缝拓展与局部坍塌。

2.3 降雨风化等外界环境引发边坡形变发展

长期风化作用持续侵蚀表层岩土体，弱化岩体完整度，降低黏聚力与内摩擦角，坡面表层土体趋于松散破碎，浅层滑动

风险大幅提升。降雨入渗抬升地下水位,软化软弱夹层,增加坡体自重荷载,同步削弱岩土接触面抗剪性能,下滑力因此进一步放大^[2]。外界环境因素与开挖扰动形成叠加效应,加剧坡面位移发展,浅层土体水平滑移趋势持续增强。无防护裸露坡面长期经受干湿循环与雨水冲刷,表层土体不断流失,坡面有效约束持续减弱,初始稳定状态良好的边坡在长期环境侵蚀下安全系数缓慢下降,逐步产生持续性形变,最终诱发滑坡与坠石等灾害。

3 隧道洞口边坡针对性稳固防护技术运用

3.1 适配地层岩体特性的边坡加固处置工艺

加固工艺需依据岩土体力学指标差异化设计,岩体黏聚力与内摩擦角数值偏低时坡体抗滑基础薄弱,须采用主动支护体系以抵消土体下滑推力。坡面倾角处于 10° 至 45° 区间时,缓坡可依托喷混凝土封闭表层岩体,填充表层裂隙以避免风化侵蚀;坡度接近或超过 45° 的高陡边坡仅靠表层封闭无法控制深层变形,须搭配锚杆与锚索实现深部岩土体锚固约束。隧道洞身开挖完成后及时施作衬砌支护结构,能够填补开挖形成的应力空缺,有效提升边坡整体安全系数。地层内部存在软弱夹层与构造裂隙的区域可同步配合注浆工艺固结松散土体,优化岩土体整体性,减少沿软弱结构面产生的剪切滑移。不同埋深条件下边坡变形特征存在差异,浅层土体水平位移突出,加固构件侧重限制侧向变形,深层土体压缩变形明显,加固体系强化竖向承载能力,以此全方位控制坡体位移持续扩张。

3.2 削减开挖扰动影响的标准化施工管控措施

施工阶段管控核心在于降低应力释放引发的坡体变形,合理调整洞室开挖顺序能够有效减小坡面整体位移幅值,不同工序产生的土体扰动程度存在明显区分,优先选择扰动更小的方案可缩小坡体各处位移差值。开挖作业需分层分段推进,单次开挖尺度保持合理范围,避免一次性大面积开挖造成应力瞬时释放,进而加剧坡脚至坡顶的变形递增趋势。坡脚区域土体约

束能力较强,扰动带来的变形增量有限,坡腰与坡顶缺少侧向支撑,施工过程中应加密动态监测点位,实时把控水平与竖向位移变化,依据监测数据动态调整开挖及支护节奏。开挖工序结束后需迅速跟进支护施工,裸坡长时间暴露会持续削弱边坡安全储备,完整支护结构可大幅抵消开挖引起的稳定性衰减,坡度大于 45° 的边坡应同步提升支护构件布设密度,以削弱陡坡滑动力增长带来的失稳隐患。

3.3 抵御外界环境侵蚀的边坡长效防护布设

长效防护布设以隔绝水与风化作用为核心,从表层至深部构建多层防护体系,削弱外部环境与开挖扰动的叠加破坏效应。坡面表层设置封闭防护层,阻断雨水直接冲刷及空气风化作用,防止表层岩土体持续松散破碎,弱化干湿循环对岩土力学参数的损耗。配套分级排水系统疏导坡面径流,减少雨水下渗导致的地下水位抬升,避免软弱夹层遇水软化及坡体自重荷载增加^[3]。对于倾角 10° 至 45° 的各类边坡,排水设施沿坡体纵向与横向同步布设,疏导水体远离隧道洞口区域,规避水体长期浸润诱发的深层滑移隐患。表层防护与深部锚固加固相互配合,表层结构阻挡土体流失,深部支护维持坡体整体结构稳定,长期降低环境侵蚀造成的持续性形变。完整防护布设能够减缓边坡安全系数逐年下降趋势,减少坠石与浅层滑移等病害,持续削弱内外因素耦合带来的劣化效应,保障隧道洞口边坡长期稳定运行。

4 结语

多重内外因素共同作用持续改变高速隧道洞口边坡应力状态,地层构造、隧道开挖与降雨风化分别从内在结构、施工扰动及外部侵蚀层面推动坡体变形乃至失稳。差异化加固工艺、标准化施工管控与多层长效防护可形成完整治理体系,有效抑制坡面位移增长,提升边坡安全储备。各类防护措施需结合坡体地质条件与坡度特征统筹布设,兼顾施工扰动控制与长期环境抵御能力,持续降低洞口滑坡与坍塌风险,为山地高速公路隧道安全运营提供稳定保障。

参考文献:

- [1] 张宏宇,张雷,陈实雨,等.高速公路隧道高陡边坡稳定性的影响因素与灾害防治措施分析[J].科技资讯,2025,23(17):191-193.
- [2] 赵继康.高速公路隧道洞口仰坡不稳定坡体评价分析及治理研究[J].科技创新与生产力,2025,46(6):145-148.
- [3] 庞甲辉.高速公路隧道进洞口边坡稳定性分析[J].工程技术研究,2023,8(23):24-26.