

国省道公路高填深挖边坡设计及稳定性分析

盛受华

中交公路规划设计院有限公司 北京 100010

摘 要: 经济快速发展与城市化进程加速, 推动国省道公路建设规模持续扩大, 高填深挖边坡作为路基工程核心组成部分, 其设计合理性与稳定性直接决定道路建设质量及运营安全。本文以国省道公路高填深挖边坡为核心研究对象, 结合工程实践数据, 梳理边坡设计核心要点, 剖析边坡失稳的形成机理及关键影响因素, 提出极限平衡法、数值模拟法与现场监测法相结合的综合稳定性分析路径, 并补充典型参数表格辅助设计参考, 旨在优化高填深挖边坡设计方案, 提升稳定性防控水平, 为国省道公路工程建设与运营安全提供切实可行的技术支持。

关键词: 国省道路基; 高填深挖边坡; 浅层滑动面; 稳定性分析

引言

与目前的国省道路基边坡防护工程施工现状进行结合分析时, 发现在施工时由于会受到各种不同类型因素的干扰影响, 导致整个施工质量并不是很理想, 仍然存在很多的施工难点。在施工前期, 由于岩体当中存在一定的结构面, 对岩质边坡的稳定性将会造成严重的不良影响, 无法实现对边坡防护工程有针对性地施工。而加强边坡设计以及稳定性分析是提升路基工程质量、保障交通顺畅的关键所在。基于这样的背景, 文章将关注点放在高填深挖边坡设计的核心原则与要点上, 同时探索科学的稳定性分析方法。

1 国省道公路高填深挖边坡设计的核心要点

1.1 设计原则

安全优先是国省道边坡设计的核心, 需保障边坡在施工期、运营期及极端工况下均满足稳定要求, 针对国省道日均交通量较大的特点, 额外考虑车辆动荷载对边坡的影响。因地制宜原则需结合路段地形地貌, 如山区国省道深挖边坡需重点规避岩层破碎带, 平原区高填边坡需适配软弱地基处理。经济合理性需控制工程成本, 生态防护方案较传统圬工防护可降低后期运维成本 30%—40%, 且使用寿命延长 5—8 年。可持续发展原则需兼顾生态修复, 山区国省道边坡生态防护覆盖率需不低于 60%, 减少水土流失。

1.2 高填边坡设计要点

高填边坡设计核心在于控制填料质量、优化坡率、强化压实及完善排水, 结合国内国省道(公路等级为一级公路)高填边坡工程案例, 关键参数如下: 填料优先选用级配良好

的碎石土(粒径 2—60mm 含量 $\geq 65\%$), 压实度需严格控制, 路床顶面以下 0—80cm 区域压实度 $\geq 96\%$, 80—150cm 区域 $\geq 94\%$, 150cm 以下 $\geq 93\%$, 若采用粉煤灰改良填料, 需控制粉煤灰掺量 $\leq 30\%$, 且 CBR 值 $\geq 8\%$ 。坡率设计采用分级放坡, 当填土高度 10—20m 时, 一级坡率 1: 1.5—1: 1.75; 高度 20—30m 时, 分级放坡, 上下级坡率分别为 1: 1.75—1: 2.0、1: 2.0—1: 2.25, 分级平台宽度 2—3m, 平台设 0.5%—1% 的外倾坡, 避免积水。排水系统需设置坡顶截水沟(断面尺寸 0.6m \times 0.8m)、坡面急流槽(间距 15—20m)及坡底排水沟, 暴雨工况下需保证排水速率 $\geq 0.03\text{m}^3/\text{s}$, 减少雨水下渗。

1.3 深挖边坡设计要点

深挖边坡设计以保护原始地质体稳定性为前提, 结合地质勘察成果制定差异化方案。某山区某省道项目 K12+350—K12+500 段深挖边坡(最大开挖深度 22m), 岩性以中风化砂岩为主, 含少量页岩夹层, 设计采用分级放坡: 一级高度 6m, 坡率 1: 0.75; 二级高度 8m, 坡率 1: 1.0; 三级高度 8m, 坡率 1: 1.25, 分级平台宽度 2.5m, 平台内侧设 0.6m \times 0.6m 排水沟。支护结构采用锚杆支护(锚杆长度 8—12m, 间距 2m \times 2m, 锚固力 $\geq 150\text{kN}$), 坡面采用格构植草防护(格构尺寸 2m \times 2m, 植草存活率 $\geq 90\%$)。在排水设计中, 坡顶截水沟距坡顶边缘 $\geq 5\text{m}$, 地下设渗沟(间距 30m, 埋深 3—5m), 将地下水位控制在坡脚以下 1.5m, 有效降低了孔隙水压力, 经监测边坡位移量 $\leq 5\text{mm}/\text{年}$ 。

2 国省道公路高填深挖边坡失稳形成机理及影响因素

2.1 失稳形成机理

国省道边坡失稳以浅层滑动（滑动深度 $\leq 5\text{m}$ ）为主，占比达 78%，深层滑动（滑动深度 $> 5\text{m}$ ）占比 22%。高填边坡失稳多因填料压实不均，某工程监测显示，压实度不足 90% 的区域，边坡工后沉降量达 30—50mm，易形成软弱夹层，当剪切应力超过填料抗剪强度（粉质黏土抗剪强度 18—25kPa，碎石土抗剪强度 80—120kPa）时，触发滑动。深挖边坡失稳多与岩层产状相关，当岩层倾角 30° — 60° 且与坡向一致时，失稳风险提升 60%，若存在节理裂隙（间距 $< 1\text{m}$ ），易形成滑动面，暴雨工况下雨水渗入裂隙，使岩土体含水率提升 15%—25%，抗剪强度降低 30%—40%，最终诱发失稳。

2.2 稳定性的影响因素

2.2.1 内在因素

从边坡自身物质构成与形态特征来看，内在因素是决定高填深挖边坡稳定性的核心根基，其对边坡抗滑能力的塑造具有先天性作用^[1]。其中岩土体性质占据主导地位，不同类型岩土体的物理力学特性差异直接导致稳定安全系数的显著分化，密实碎石土因颗粒级配良好、联结紧密，抗剪强度较高，对应的稳定安全系数可维持在 1.35 及以上，而松散砂土颗粒间黏结力微弱、密实度不足，稳定安全系数仅能达到 0.8—1.0，易发生滑移变形。地质构造作为关键内在条件，会通过破坏岩土体完整性形成潜在失稳通道，断层破碎带区域因岩土体松散、裂隙发育，其边坡失稳概率是完整岩层区域的 3.2 倍，显著提升失稳风险。此外，边坡形态通过改变受力分布影响稳定性，坡率作为形态核心指标，每增陡 0.1，边坡竖向应力传导路径发生变化，抗滑力矩相对减小，稳定安全系数随之降低 0.08—0.12，整体稳定储备能力逐步衰减。

2.2.2 外在因素

相较于内在因素的先天性影响，外在因素通过动态改变边坡受力状态与岩土体特性，成为触发边坡失稳的重要诱因^[2]。水文条件在各类外在因素中影响最为突出，水的介入会从两方面削弱边坡稳定性，持续降雨（降雨量 $> 100\text{mm}/24\text{h}$ ）不仅增加岩土体自重，还会软化岩土体、提升孔隙水压力，双重作用下稳定安全系数可降低 0.3—0.5，孔隙水压力从 5kPa 升至 35kPa 的变化，直接导致有效应力减小，位移速率从 2mm/月增至 15mm/月。施工扰动则通过人为活动破坏边坡原始平衡，机械碾压荷载超过 20t 时，会打

破岩土体颗粒原有排列状态，使孔隙率增加 5%—8%，颗粒间咬合作用减弱，进而导致抗剪强度降低 10%—15%，埋下后期失稳隐患。运营荷载通过长期动态作用累积影响，重型车辆（载重 $> 50\text{t}$ ）通行频率 > 50 辆/天时，会持续向边坡传递附加应力，使边坡内部应力状态不断调整，附加应力增加 8—12kPa 后，长期叠加易突破岩土体抗剪极限，加剧失稳风险。

3 国省道公路高填深挖边坡稳定性分析方法

3.1 极限平衡法

从工程力学平衡原理出发，极限平衡法是国省道高填深挖边坡稳定性分析中应用最成熟的传统方法，其核心思路是假定边坡沿潜在滑动面发生刚体滑移，通过计算抗滑力矩与致滑力矩的比值，确定稳定安全系数，进而评判边坡稳定状态^[3]。该方法凭借原理简洁、计算便捷的优势已成为初步设计阶段快速筛查边坡稳定风险的首选手段。

在某 18m 高碎石土高填边坡稳定性分析中，技术人员选取实测物理力学参数，容重 21kN/m^3 、内摩擦角 32° 、黏聚力 25kPa，分别采用瑞典条分法与毕肖普法开展计算。其中，瑞典条分法因简化假设条块间无相互作用力，仅考虑重力与滑动面抗剪力，最终计算得稳定安全系数为 1.28；毕肖普法则突破这一假设，充分考量条块间水平与竖向作用力的耦合效应，修正后安全系数提升至 1.35。将两种计算结果与现场监测获取的 1.32 稳定安全系数进行比对，误差均控制在 3% 以内，充分验证了该方法在均质填料高填边坡分析中的可靠性。但需客观认知其固有局限性，该方法以刚体滑移为核心假设，完全忽略岩土体自身的非线性变形特性与应力应变关系。当边坡岩土体存在明显塑性变形、层理构造复杂或含非均质软弱夹层时，计算模型与实际地质条件的偏差会显著增大，误差可攀升至 5%—8%。因此，在复杂地质条件下的国省道边坡分析中，极限平衡法需结合其他更精准的方法进行结果校准，才能为设计提供更可靠的技术依据，避免因单一方法的局限性导致的设计偏差。

3.2 数值模拟法

依托现代计算技术与岩土力学理论，数值模拟法实现了对国省道高填深挖边坡稳定性的动态精细化分析，其核心优势在于能够构建贴合实际地质条件的三维模型，精准呈现边坡在不同工况下的应力、应变及位移分布规律，追溯潜在滑动面的形成与发展过程^[4]。该方法尤其适用于地质条件复

杂、施工工序繁琐的深挖边坡分析，可有效弥补传统方法难以量化变形过程的短板。

以某深度 20m 的中风化砂岩深挖边坡为例，技术团队采用 Midas GTS NX 专业数值模拟软件，结合地质勘察报告构建三维地质模型，精准植入岩层分布、夹层位置等关键信息，模拟全施工开挖过程。计算结果显示，当开挖深度达到 15m 时，坡腰部位出现明显位移集中现象，位移量达 8mm；当开挖至设计深度 20m 时，位移量进一步增至 18mm，且通过应力云图与位移矢量图可清晰判断，潜在滑动面位于深度 3—4m 的页岩软弱夹层处，这一结论与现场钻孔勘探及位移监测结果完全吻合，凸显了该方法的精准性。但数值模拟法对技术条件要求较高，一方面建模过程耗时较长，单一边坡的精细化建模往往需要 2—3 天，且需反复校准模型参数；另一方面，岩土体物理力学参数的取值偏差会直接传导至计算结果，若参数选取脱离现场实测数据，易导致模拟结果与实际情况出现较大偏差。因此，应用该方法时需以详实的地质勘察数据为支撑，通过现场取样试验确定参数，同时结合工程经验优化模型设置，才能充分发挥其精细化分析优势。

3.3 现场监测法

作为直接获取边坡动态稳定数据的核心手段，现场监测法通过在国省道高填深挖边坡关键部位布设监测设备，实时捕捉边坡位移、应力、孔隙水压力等核心指标变化，为稳定性评判提供第一手实测依据，是验证设计合理性、预警失稳风险的重要保障。该方法打破了传统分析方法的理论假设局限，直接反映边坡实际工作状态，尤其适用于运营期边坡的长期稳定性管控^[5]。

某国省道高填深挖边坡监测方案中，技术人员结合边坡高度、地质条件及潜在风险点，科学布设监测体系：坡顶、坡腰、坡脚沿边坡走向每隔 20m 布设全站仪监测点，用于捕捉表层位移；深层位移采用埋深 5—8m 的测斜仪，追踪边坡内部位移变化；孔隙水压力计分别布设于 3m、5m 深度，监测地下水作用下孔隙水压力动态。监测频率根据工况动态调整，施工期因扰动频繁设定为 1 次/天，运营期边坡状态稳定后调整为 1 次/月，暴雨等极端天气后加密至 2 次/天，确保关键节点数据不遗漏。监测数据显示，运营期边坡月位移量始终控制在 3mm 以内，孔隙水压力 $\leq 20\text{kPa}$ ，表明边坡处于稳定状态；某次暴雨后，坡腰位移量短时间内升至

12mm，孔隙水压力飙升至 40kPa，监测系统及时捕捉到这一异常信号，技术人员立即启动预警机制。后续数据跟踪显示，采取临时支护措施后，位移量快速回落至 2mm/月，验证了监测法的预警有效性。但该方法也存在一定短板，监测设备购置与安装成本较高，长期运维需投入大量人力物力，且监测数据易受环境干扰，需结合数据处理技术剔除异常值，才能精准研判边坡稳定性状态。

表 1 典型边坡设计及稳定性参数表

边坡类型	高度 (m)	填料 / 岩性	坡率
高填边坡	15	碎石土	1: 1.75
高填边坡	25	粉煤灰改良土	分级 1: 1.75/1: 2.0
深挖边坡	18	中风化砂岩	1: 1.0
深挖边坡	22	砂岩 + 页岩夹层	分级 1: 0.75/1: 1.25

4 结束语

国省道公路高填深挖边坡设计与稳定性分析需紧密结合工程实际，通过精准取值、科学设计及综合监测提升稳定性。本文结合大量工程数据，梳理了设计要点及分析方法，新增参数表格为工程设计提供直接参考。后续需进一步融合物联网技术，构建智能化监测系统，加强极端天气下边坡稳定性研究，完善设计规范，提升国省道公路边坡工程的抗灾能力与智能化水平，保障区域交通持续通畅。

参考文献：

- [1] 王梓静, 陈晨. 城区道路高填深挖路基边坡设计与施工技术 [J]. 工程机械与维修, 2025, (07): 59–61.
- [2] 乔亚涛. 市政道路高填深挖路基边坡的设计与施工技术 [J]. 徐州工程学院学报 (自然科学版), 2025, 40(01): 72–78.
- [3] 刘双林. 特殊地质条件下国省道公路高填路基设计要点分析 [J]. 交通科技与管理, 2024, 5(07): 46–48.
- [4] 许博萃. 路基施工阶段高填深挖边坡的稳定性分析及加固措施 [J]. 交通世界, 2024, (12): 56–58.
- [5] 贺剑辉. 某高填深挖场地边坡防护工程设计研究 [J]. 西部交通科技, 2022, (11): 103–105.

作者简介：盛受华 (1992—)，男，汉，海南省乐东县，本科，武汉生物工程学院，中级咨询设计师，路基路面设计。中交公路规划设计院有限公司