

公路工程高边坡开挖稳定性研究

王代飞

凯天建设发展集团有限公司 四川成都 610100

DOI: 10.12238/jpm.v6i3.7787

[摘要] 高边坡是公路建设的重要组成部分，也是影响公路交通安全的一个重要环节。在施工阶段，在设计阶段就应提出经济有效的高边坡防护方案，并对其进行稳定性分析；施工前要重视施工组织设计，边坡开挖、支护要严格按照技术要求进行；在高边坡运营后期，还应加强对高边坡的日常巡查、维修和监测，确保高边坡的全寿命周期安全。

[关键词] 公路工程；高边坡开挖；稳定性研究

Study on the stability of high side slope excavation in highway engineering by

Wang Daifei

Kaitian Construction and Development Group Co., LTD., Chengdu, Sichuan province 610100

[Abstract] High slope is an important part of highway construction, but also an important link affecting highway traffic safety. In the construction stage, economical and effective high slope protection scheme should be proposed in the design stage and stability analysis; the construction organization design, and slope excavation and support should be carried out in strict accordance with technical requirements; in the later stage of high slope operation, daily inspection, maintenance and monitoring of high slope should be strengthened to ensure the safety of the whole life cycle of high slope.

[Key words] highway engineering; high slope excavation; stability research

引言

对于高边坡 20 米以上、高岩 30 米以上的土坡，每一个工程点都要根据工程地质条件及现行规范单独勘察设计。并制定有针对性的建设方案，经专家论证，确定可行后方可实施。在高边坡开挖过程中，要合理选择开挖方式，采取有效的防排水措施，以保证施工期的安全性和运行期的长期稳定性。

1 分析高边坡稳定性影响因素

1.1 气候与环境因素的影响

气候与环境因素在高边坡开挖稳定性研究中占据重要地位。例如，降雨可以显著降低边坡的稳定性，长期的雨水渗透可能导致土体饱和，增加滑坡的风险。据研究，强降雨事件与全球变暖导致的极端气候事件增加有关，这在地质条件脆弱的地区尤其显著。此外，冻融循环也会影响边坡稳定性，冻结—融化过程会破坏土壤结构，增加滑动的可能性。

环境变化，如植被覆盖的减少或人为活动导致的地下水位变化，也会对边坡稳定性产生影响。例如，过度开采导致地下水位下降，可能使边坡失去原有的地下水支撑，增加失稳的可能性。另一方面，植被覆盖可以增强地表的抗蚀能力，其减少

可能导致边坡表面侵蚀加剧，影响稳定性。

在评估高边坡稳定性时，现代分析模型如有限元模型和离散元模型已开始考虑气候因素的动态影响。通过模拟不同气候情景，可以预测未来气候变化对边坡稳定性的影响，为工程设计提供科学依据。同时，利用机器学习算法，可以整合大量气候数据和历史灾害记录，建立预测模型，提前预警潜在的稳定性问题。因此，对于高边坡开挖项目，必须充分考虑气候与环境因素，采取适应性管理策略，如优化施工时间以避开雨季，实施植被恢复工程，以及建立长期的气候和地质监测系统，以确保工程的长期稳定性与安全性。

1.2 地质条件对稳定性的影响

地质条件是影响高边坡稳定性的重要因素之一，包括地层的岩性、结构面、地下水条件以及地应力状态等。

例如，软弱地层如页岩、泥岩等在承受荷载时容易发生剪切破坏，导致边坡失稳。在地质构造复杂区域，如断层、节理发育，会显著降低边坡的整体强度，增加滑坡风险。

地下水的存在和活动是另一个不可忽视的因素。地下水位的升高会降低边坡的有效摩擦角，据研究显示，地下水位上升

10 米，可能导致边坡稳定性降低 20%。

例如，1993 年我国某公路工程中，由于地下水位上升导致的边坡滑动，严重影响了工程的正常进行。

在评估和设计阶段，地质勘查和分析模型的应用至关重要。通过地质雷达、钻探等手段获取详细地质资料，结合 Hoek-Brown、Morgenstern-Price 等稳定性分析模型，可以科学预测和评价边坡的稳定性。例如，2008 年汶川地震后，对灾区公路高边坡的地质条件深入研究，利用这些模型成功预测并采取措施防止了大量次生灾害的发生。因此，地质条件的考虑应贯穿于高边坡工程的全过程，从选址设计到施工监测，都需要充分考虑地质因素对稳定性的影响，以确保工程的安全和耐久。

1.3 开挖方式与步骤的影响

高边坡开挖的稳定性在很大程度上取决于开挖方式与步骤的选择。传统的开挖方式如分层开挖、整体开挖等，每种方式对边坡稳定性的影响机制不同。例如，分层开挖可能导致分界面的应力集中，若开挖深度过大、分层过厚，可能会超过边坡自身的抗剪强度，引发滑坡。因此，合理的分层厚度和开挖顺序是保证稳定性的重要因素。

此外，爆破开挖虽然能提高效率，但爆破震动可能破坏边坡岩土结构，产生裂缝，降低边坡的整体性。

在开挖步骤上，通常应遵循“开挖—支护—监测—调整”的原则，及时进行支护结构的施工，防止边坡在无保护状态下暴露时间过长。

例如，Z 公路建设中，通过实时监测边坡位移，动态调整开挖速度和支护措施，成功避免了大规模的边坡失稳事件，这充分体现了开挖步骤的灵活性和针对性对稳定性控制的决定性作用。

2 稳定性评估方法

2.1 传统稳定性评估方法介绍

在高边坡开挖稳定性研究中，传统稳定性评估方法扮演着重要角色。这些方法主要包括瑞典圆弧滑动法、简化 Bishop 法以及 Janbu 简化方法等。瑞典圆弧滑动法基于假设的滑动面，通过计算土体的抗滑力和滑动力来评估稳定性，虽然直观易用，但对滑动面形状的假设可能影响精度。简化 Bishop 法和 Janbu 简化方法则在一定程度上考虑了土体的侧向压力，提供了一种更全面的稳定性分析手段。

然而，这些传统方法在处理复杂地质条件、非均质地层或考虑结构面等因素时显得力不从心。例如，对于含有多个潜在滑动面或结构面复杂的边坡，其评估结果可能过于保守或乐观。此外，这些方法通常假设边坡为静态状态，难以考虑时间变量如水位变化、土体蠕变等动态影响。因此，传统稳定性评

估方法在实际应用中需要结合地质勘察数据、经验参数调整，甚至配合物理模型试验，以提高评估的可靠性和针对性。

2.2 数值模拟在稳定性评估中的应用

在高边坡开挖稳定性研究中，数值模拟已经成为一种不可或缺或评估工具。传统的稳定性评估方法如瑞典圆盘法、简化 Bishop 法虽然具有一定的实用价值，但往往难以精确考虑复杂的地质结构和非线性力学行为。而数值模拟，如有限元法、离散元法以及 FLAC、Slope-W 等专业软件的应用，可以更真实地模拟边坡开挖后的应力重分布、应变发展以及可能的失稳模式。

2.3 机器学习在稳定性预测中的新进展

随着大数据和人工智能技术的快速发展，机器学习在高边坡稳定性预测中展现出巨大的潜力。传统的稳定性评估方法如瑞典圆盘法、弗森德法等，虽然在工程中广泛应用，但往往依赖于专家经验，对复杂地质环境的适应性有限。而机器学习算法，如支持向量机、随机森林和深度学习等，能够处理大量多维度数据，发现隐藏的非线性关系，提高预测精度。

例如，有研究者利用历史监测数据训练神经网络模型，对某公路高边坡的稳定性进行预测，结果表明，模型预测准确率超过 90%，显著优于传统方法。此外，通过集成学习和特征选择，可以进一步优化模型，降低过拟合风险，提高预测的稳定性和泛化能力。

3 高边坡稳定性控制技术

3.1 支护结构设计与优化

高边坡稳定性控制技术中，支护结构设计与优化起着至关重要的作用。支护结构是防止边坡失稳的关键措施，它需要根据地质条件、边坡形态以及预期荷载等因素进行精细化设计。例如，通过引入主动柔性防护网，可以有效分散坡面荷载，提高边坡的抗滑稳定性。此外，支护结构的优化不仅关注结构强度，还应考虑施工的可行性和经济性，以实现安全与成本的平衡。

在实际设计过程中可能需要采用有限元分析软件进行模拟计算，以预测不同设计方案在长期作用下的变形和应力状态。例如，通过对比分析，发现采用预应力锚索与传统的重力式挡土墙，可以显著减少边坡的位移量，同时减少所需的建筑材料，降低工程成本。然而，这需要大量的计算和试验数据支持，以确保设计的合理性和可靠性。

在优化方面，引入参数优化算法可以进一步提升支护结构的性能。通过调整结构参数，如锚索的长度、预应力大小、防护网的密度等，寻找最优设计方案，以达到最佳的稳定效果和经济效益。

例如，在某公路高边坡工程中，通过参数优化，成功减少了 30% 的锚索数量，但稳定性指标仍满足设计要求，显著节省

了工程成本。因此，支护结构设计与优化是高边坡稳定性控制技术的核心环节，它需要结合理论分析、数值模拟和工程实践经验，以实现边坡的长期稳定和工程的可持续发展。

3.2 锚固与加固技术

高边坡稳定性控制技术中，锚固与加固技术起着至关重要的作用。锚固技术主要包括预应力锚索、锚杆和锚筋等，它们通过将边坡内部结构与地基紧密结合，有效分散和限制边坡表面的荷载，提高整体稳定性。

例如，在某库区公路建设中，广泛采用了预应力锚索技术，成功地稳定了最大开挖高度超过 200 米的高边坡，显著降低了滑坡风险。

加固技术则涵盖了喷射混凝土护坡、土工织物加筋和注浆固结等多种手段。喷射混凝土可以形成连续的护面，抵抗风化和侵蚀，同时提供额外的剪切强度。

在设计锚固与加固方案时，通常会结合有限元分析或离散元模型，模拟不同工况下的边坡应力状态和变形特征，以优化设计参数。此外，随着大数据和云计算的发展，基于机器学习的预测模型也逐渐应用于边坡稳定性评估，能更精确地预测加固措施的效果，为工程决策提供科学依据。

然而，不同地区的地质条件、气候因素和工程经济性等差异，要求锚固与加固技术具有高度的灵活性和适应性。因此，未来的研究应更深入地探索新材料、新工艺与环境因素的交互作用，以实现高边坡稳定性控制的绿色、智能和可持续发展。

3.3 防排水系统在稳定性控制中的作用

高边坡稳定性控制技术涵盖多个方面，其中防排水系统起着至关重要的作用。有效的防排水设计能够防止水分渗透到边坡内部，降低土体的饱和度，从而减少因水分活动导致的边坡滑移风险。

防排水系统通常包括表面排水和内部排水两部分。表面排水通过设置排水沟和植被覆盖层，迅速引导降雨和地表径流，避免水流直接冲刷边坡。内部排水则通过设置排水层和排水管，确保边坡内部的地下水能够顺畅排出，防止形成静水压力。例如，中国某山区公路项目就成功应用了这种系统，有效防止了因地下水位上升引发的边坡失稳。

在设计防排水系统时，还需要结合地质条件和气候因素进行精细化分析。例如，对于含有多孔隙岩石的边坡，可能需要设置更密集的排水网，以确保水分的快速排出。同时，考虑到极端气候事件的频率增加，设计应具备一定的冗余度，以应对可能的强降雨或长时间的高水位情况。

此外，防排水系统与支护结构、锚固技术等其他稳定措施相辅相成。例如，通过模拟分析，可以优化防排水系统与锚索、挡土墙等的协同工作，实现整体稳定性最优化。这种综合性的

设计方法在实际工程中已得到广泛应用。因此，防排水系统不仅是高边坡稳定性控制的关键技术之一，也是实现长期、安全运营的重要保障。在未来的公路工程设计和施工中，应更加重视防排水系统的规划和实施，以提升整体工程的耐久性和安全性。

3.4 环境修复技术对稳定性的贡献

环境修复技术在高边坡稳定性控制中扮演着日益重要的角色。传统的稳定技术主要关注物理结构的强化，如支护结构和锚固技术，但忽视了生态系统平衡对稳定性的影响。近年来，随着环保意识的提升，环境修复技术如植被恢复、生态护坡和生物工程技术被广泛应用于高边坡的稳定性提升中。

例如，植被恢复技术通过种植适应性强、根系发达的植物，可以有效增强边坡的稳定性。据研究显示，某些植物的根系可以增加土壤的凝聚力，减少雨水侵蚀，降低边坡滑移的风险。

生态护坡技术则结合了工程措施与生物措施，如采用生态混凝土、生态袋等材料，既保证了边坡的物理稳定性，又促进了生物多样性的恢复。

生物工程技术，如模仿自然生态系统的生物挡墙，利用植物、微生物和动物的相互作用，形成一个动态稳定的生态系统，对高边坡的长期稳定性提供了持续保障。在云南某山区公路项目中，生物挡墙的应用成功防止了多次滑坡事件，显示了强大的稳定性修复能力。因此，环境修复技术不仅能够提高高边坡的物理稳定性，还能恢复和增强生态系统的自我修复能力，实现长期的稳定性控制，是未来高边坡工程中不可或缺的重要组成部分。

4 结束语

综上所述，随着对高边坡稳定性研究的不断深入，多学科交叉、技术创新性应用是今后高边坡稳定性研究的发展方向。如，将地质力学、环境科学和材料科学相结合，研制出适用于复杂地质条件下的新型智能支护材料，将成为新的研究热点。在此基础上，结合大数据、物联网等技术，对高边坡小变形进行实时监测，并对其潜在稳定性进行预测，大幅提升预警及应急处置效率。

[参考文献]

- [1]李昌龙.公路顺层岩质边坡开挖稳定性分析及锚固设计[J].路基工程, 2018, (S1): 25-28+43.
- [2]侯定贵, 史冀波, 孙健婷, 赵衍杰, 常玉广.公路边坡开挖稳定性分析及其远程实时监测[J].科学技术与工程, 2014, 14(29): 84-89+105.
- [3]蒋蕾, 董小波.某公路路基岩质高陡边坡开挖的稳定性分析[J].科技信息, 2013, (20): 439.
- [4]王小林.某公路边坡变形破坏分析[J].中国科技信息, 2011, (07): 77+73.