

公路边坡稳定性分析及加固技术研究

高金军

德州市公路事业发展中心宁津分中心 山东 德州 253400

摘要：公路边坡稳定性分析及加固技术研究旨在确保公路交通安全及边坡的长期稳定。本文深入探讨了公路边坡稳定性的内在与外在影响因素，包括岩土性质、地质构造、水的作用等。通过极限平衡法、数值模拟法、现场监测方法及综合分析法等多种手段，对边坡稳定性进行了系统评估。同时，本文还研究了放缓边坡、支挡结构、注浆加固、锚杆加固、生态型加固及自适应加固等边坡加固技术，为工程实践提供了理论依据和技术支持。

关键词：公路边坡；稳定性；加固技术

引言：公路边坡稳定性是公路交通安全与工程耐久性的重要保障。随着公路建设的快速发展，边坡失稳问题日益突出，对人民生命财产安全构成严重威胁。因此，开展公路边坡稳定性分析及加固技术研究具有重要的理论与现实意义。本研究旨在通过深入分析边坡稳定性的影响因素，探索有效的加固技术和方法，为公路边坡的设计、施工和维护提供科学依据和技术指导，以保障公路交通安全，促进交通基础设施的可持续发展。

1 公路边坡稳定性影响因素分析

1.1 内在因素

（1）岩土物理力学性质：岩土体的密度、孔隙比、含水量、抗压强度、抗拉强度、抗剪强度等物理力学性质，直接影响边坡的抗滑力和滑动面的抗剪强度，是评价边坡稳定性的基础。（2）地质构造：褶皱、断层、节理裂隙等地质构造的存在，使得边坡内部存在潜在的滑动面和软弱带，降低了边坡的整体稳定性。特别是在断层和节理发育的地区，边坡失稳的风险显著增加。（3）岩体结构：整体状、块状、层状等岩体结构的差异，导致边坡的抗滑能力和稳定性有所不同。层状岩体因层间结合力较弱，容易发生沿层面的滑动。（4）地应力分布：地应力是地壳内部因各种地质作用而产生的应力。地应力的分布和大小直接影响边坡的变形和破坏模式。（5）水的作用：地表水和地下水通过软化岩土体、增加岩土体重量、产生静水压力和动水压力等方式，显著降低边坡的稳定性。

1.2 外部因素

（1）地面水和地下水的干扰：外部水源的侵入会加剧边坡内部的水文地质条件恶化，导致边坡稳定性进一步下降。（2）工程荷载：在边坡附近进行工程建设时，附加的荷载可能改变边坡的应力状态，导致边坡失稳。（3）地震及振动：地震产生的强烈振动和地面运动可能

导致边坡内部裂纹扩展，降低边坡的抗滑能力，甚至直接引发边坡滑动。（4）侵蚀作用：风蚀、水蚀等自然侵蚀作用会不断改变边坡的形态和内部结构，降低边坡的稳定性。（5）气候和气象条件：极端气候条件，如暴雨、干旱、高温等，可能加剧边坡的水文地质条件变化，进而影响边坡的稳定性。（6）植被生长状况：植被的生长可能对边坡稳定性产生正负两方面的影响。一方面，植被的根系可以加固土壤，提高边坡的抗滑能力；另一方面，过度密集的植被可能增加边坡的重量，不利于其稳定^[1]。因此，合理的植被管理和恢复对于维护边坡稳定性至关重要。

2 公路边坡破坏类型及成因分析

2.1 边坡破坏类型

（1）崩塌：崩塌是指边坡上的岩土体在重力作用下，突然脱离母体，以垂直或近似垂直的方式向下运动的灾害现象。崩塌通常发生在高陡边坡或地质构造复杂的区域，具有突发性、速度快、破坏力强的特点。（2）坍塌：坍塌是指边坡上的岩土体在重力作用下，逐渐失去支撑而发生的缓慢或突然的倒塌现象。坍塌可能发生在任何类型的边坡上，但通常与岩土体的强度降低、地下水活动或人为破坏等因素有关。（3）滑塌：滑塌是指边坡上的岩土体沿某一滑动面或滑动带发生整体或部分的滑动现象。滑塌通常与岩土体的抗剪强度不足、地下水浸润或地应力分布不均等因素有关。滑塌可能引发严重的地质灾害，对人民生命财产造成威胁。（4）错落：错落是指边坡上的岩土体在重力作用下，沿节理、裂隙或软弱带发生相对位移的现象。错落通常发生在层状、块状岩体中，与地质构造的复杂性密切相关。错落可能导致边坡形态的改变，甚至引发更严重的边坡破坏。

2.2 破坏成因分析

（1）地质构造复杂性：地质构造的复杂性是导致边

坡破坏的重要因素。褶皱、断层、节理裂隙等地质构造的存在,使得边坡内部存在潜在的滑动面和软弱带,降低了边坡的整体稳定性。(2)岩土体强度变化:岩土体的强度变化可能导致边坡的失稳。例如,岩土体的风化、侵蚀、水软化等过程都会降低其强度,使边坡更容易发生破坏。(3)风化作用:风化作用是指岩土体在自然环境中的物理、化学和生物作用下逐渐分解和破碎的过程。风化作用降低了岩土体的强度,增加了边坡的破坏风险。(4)水文地质条件:地下水活动对边坡稳定性具有重要影响。地下水通过软化岩土体、增加岩土体重量、产生静水压力和动水压力等方式,显著降低边坡的稳定性。(5)人类工程活动:不合理的工程设计和施工活动,如边坡开挖过陡、爆破作业、排水设施不当等,都可能对边坡的稳定性造成不利影响,甚至直接引发边坡破坏。

3 公路边坡稳定性分析方法

3.1 极限平衡法

极限平衡法是边坡稳定性分析中最传统和广泛使用的方法之一。它通过考虑滑动面上的静力平衡来计算边坡的安全系数。(1)原理及应用。极限平衡法基于摩尔-库仑强度准则,其基本出发点是将边坡的潜在滑动体视为刚体,并计算其在极限状态下的抗剪强度与实际剪应力之比,即安全系数。安全系数大于1时,边坡被认为是稳定的;等于1时,处于极限平衡状态;小于1时,边坡会发生滑动。极限平衡法有多种具体实现方式,如瑞典圆弧法、简化毕肖普法、不平衡推力法等。这些方法适用于均质或层状土体以及简单岩体结构的边坡稳定性分析。(2)楔体分析与圆弧滑动面分析。楔体分析主要针对含有明显结构面的复杂边坡,它通过分析边坡中的楔形块体的受力平衡来计算安全系数。圆弧滑动面分析则是假定滑动面为圆弧形,通过优化技术找到最小安全系数的临界滑动面。

3.2 数值模拟法

数值模拟法是一种基于计算机技术的边坡稳定性分析方法。它通过构建边坡的数值模型,利用数值方法来模拟边坡的变形和破坏过程,从而评估边坡的稳定性。

(1)有限元法。有限元法是一种基于连续介质力学的数值分析方法。它将边坡划分为许多小的单元,对每个单元进行力学特性分析,然后组合起来得到整个边坡的应力、应变和位移分布情况。有限元法能够处理复杂的几何形状和材料非线性问题,是边坡稳定性分析中的重要工具。(2)离散元法。离散元法是一种基于离散介质力学的数值分析方法。它将边坡看作是由许多离散颗

粒组成的系统,通过模拟颗粒之间的相互作用来模拟边坡的变形和破坏过程。离散元法特别适用于处理具有大变形和破坏的边坡问题,如滑坡、崩塌等^[2]。(3)边界元法。边界元法是一种基于边界积分方程的数值分析方法。它将边坡的边界离散化,通过求解边界上的积分方程来获得内部区域的应力分布。边界元法在处理无限域或半无限域问题时具有优势,能够更准确地反映边坡的远场效应。

3.3 现场监测方法

现场监测方法是通过对边坡进行现场观测和数据采集来评估边坡稳定性的方法。它能够提供边坡变形和破坏的实时信息,为工程师们提供及时的预警和决策支持。(1)人工监测。人工监测是最基本的现场监测方法之一。它通过人工巡视、测量和记录边坡的变形情况来评估边坡的稳定性。虽然人工监测精度有限,但它在偏远地区和复杂地质条件下仍然具有不可替代的作用。

(2)GPS、高精度测量机器人系统。GPS和高精度测量机器人系统是现代化的现场监测手段。它们能够实时监测边坡的位移和变形情况,提供高精度的数据支持。这些系统特别适用于对边坡进行长期监测和预警。(3)TDR系统、纤维-玻璃质钻孔伸长仪。TDR系统和纤维-玻璃质钻孔伸长仪是专门用于监测边坡内部变形和破坏的仪器。它们通过测量钻孔中的电磁波传播时间或光纤应变来评估边坡的变形情况。这些仪器具有灵敏度高、测量范围广的优点,能够提供更详细和准确的边坡变形信息^[3]。

3.4 综合分析法

综合分析法是将多种分析方法结合起来,对边坡的稳定性进行综合分析的方法。它能够更全面地考虑边坡的稳定性问题,提供更可靠的评估结果。(1)定性分析与定量分析的结合。定性分析是根据边坡的地质构造、岩土体性质、水文地质条件等因素来评估边坡稳定性的方法。它通常依赖于工程师的经验和专业知识。定量分析则是通过数学模型和计算方法来评估边坡稳定性的方法。它能够提供更精确的评估结果,但也需要更多的数据支持。综合分析法将定性分析与定量分析结合起来,能够更全面地评估边坡的稳定性。(2)可靠度分析方法。可靠度分析方法是一种基于概率论的边坡稳定性分析方法。它考虑了边坡稳定性评估中的不确定性和随机性,通过计算边坡的安全系数和破坏概率来评估边坡的稳定性。这种方法能够提供更全面的风险评估结果,为工程师们提供更可靠的决策支持。

4 公路边坡加固技术

4.1 放缓边坡

(1) 原理及适用条件。放缓边坡是通过减小边坡的坡度来增加其稳定性的一种方法。原理在于降低边坡的坡度可以减少重力沿边坡方向的分力,从而降低边坡滑动的风险。这种方法适用于土质或风化岩石边坡,尤其是那些稳定性较差、坡度较陡的边坡。(2) 工程实践。放缓边坡的工程实践通常包括削坡和减载。削坡是通过机械或人工方式将边坡的坡度减小到更稳定的水平。减载则是移除边坡顶部或坡面的部分岩土,以减轻边坡的总重量和应力。在实际工程中,放缓边坡常与排水措施、植被恢复等措施结合使用,以达到更好的加固效果。

4.2 支挡结构

(1) 抗滑桩。抗滑桩是一种常用的支挡结构,由钢筋混凝土或钢管制成,并打入或钻入稳定的基岩层中。它们通过提供水平支撑力来抵抗边坡的滑动。抗滑桩适用于浅层和中厚层滑坡、土质与岩质边坡的加固,尤其适用于需要深层加固的高边坡工程。(2) 挡土墙。挡土墙是另一种常见的支挡结构,通常由混凝土或石块制成,用于直接抵抗边坡的推力。挡土墙适用于施工空间有限、边坡高度较小或地质条件相对稳定的场合。在设计时,需要考虑墙体的稳定性、抗倾覆能力和抗滑移能力。

4.3 加固技术

(1) 注浆加固。注浆加固是通过向边坡岩土体内部注入浆液(如水泥浆、化学浆)来填充和固化松散部分的空隙和缝隙。注浆加固可以有效提高边坡的整体强度和稳定性,尤其适用于松动、破碎的岩层或节理裂隙发育的岩体。(2) 锚杆加固。锚杆加固是在边坡中钻孔并安装锚杆,通过锚杆与周围岩土体的相互作用来增强边坡的稳定性。锚杆加固适用于中浅层滑坡或地层软弱的边坡,其作用机理类似于螺栓的作用。(3) 土钉加固。土钉加固是向坡体内打入足够数量的土钉,通过土钉与土体的摩擦力来增强边坡的稳定性。土钉加固适用于软质岩石边坡或土质边坡,其作用机理类似于群锚的作用。(4) 预应力锚索加固。预应力锚索加固是在边坡的潜在滑动面或软弱带中钻孔并安装锚索,然后对锚索施加预应力,使其与周围岩土体牢固锚固。预应力锚索加固适用于高陡边坡或复杂地质条件的边坡加固,可以显著提高边坡的稳定性和抗滑能力^[4]。

4.4 生态型加固

(1) 植被恢复。植被恢复通过在边坡上种植适宜的植被来改善边坡的力学性能和生态环境。植被的根系可以起到锚固作用,增加边坡的抗滑能力;同时,植被的蒸腾作用可以降低地下水位,减少边坡的水压力。(2) 土壤生物工程。土壤生物工程是利用生物材料(如植物、木材、石料等)和工程技术手段来加固边坡。这种方法不仅可以提高边坡的稳定性,还可以改善生态环境,促进生物多样性。

4.5 自适应加固

(1) 新型材料应用。新型材料如水泥毯、柔性混凝土复合垫等具有优异的物理力学性能和防水防渗效果,可以显著提高边坡的承载力和抗渗能力。这些新型材料的使用可以大大缩短施工时间,降低工程造价,提高加固效果。(2) 智能化加固技术。智能化加固技术通过引入传感器网络、数据分析等智能化手段来实时监测边坡的变形和应力状态,及时预警潜在风险。这种技术可以实现对边坡的动态监测和预警,提高边坡加固的准确性和可靠性。同时,智能化加固技术还可以与自适应控制系统相结合,根据边坡的实时状态自动调整加固措施,进一步提高边坡的稳定性和安全性。

结束语

综上所述,公路边坡稳定性分析及加固技术研究对于确保公路交通安全和工程长期稳定性具有重要意义。通过本研究,我们不仅深入了解了边坡稳定性的影响因素和破坏机制,还掌握了一系列有效的加固技术和方法。未来,我们将继续深化这一领域的研究,探索更加高效、环保、经济的加固技术,为公路边坡的设计、施工和维护提供更加全面的技术支持,为构建安全、便捷、绿色的公路交通网络贡献力量。

参考文献

- [1]张伟,李明.公路边坡稳定性分析及加固技术研究进展[J].公路交通科技,2023,(06):56-57.
- [2]王强,赵丽.公路边坡稳定性评价方法综述[J].岩土力学,2022,(21):234-235.
- [3]张晓燕,姬俊慧.公路工程中边坡稳定性分析与加固技术[J].汽车周刊,2024,(10):118-120.
- [4]田小军.高速公路高边坡稳定性分析与加固技术研究[J].科学技术创新,2024,(11):126-127.