

公路路基稳定性分析及加固技术研究

孙灵冉

克什克腾旗交通运输局 内蒙古 赤峰 025350

摘要:公路作为国家基础设施的关键构成,其路基稳定性关乎公路使用寿命、行车安全及社会经济效益。本文深入剖析影响公路路基稳定性的地质、水文、荷载及施工等因素,详细阐述极限平衡法、有限元法、可靠度分析法等稳定性分析方法,并着重探讨换填法、强夯法、注浆加固法、土工合成材料加固法及桩基础加固法等加固技术的技术细节与数据。通过实际工程案例分析,验证不同加固技术在提升路基稳定性方面的有效性,为公路路基设计与施工提供有力理论依据和技术支撑。

关键词:公路路基;稳定性分析;加固技术;工程应用

1 引言

在我国经济迅猛发展的当下,公路交通建设规模持续扩张,对公路质量与性能的要求也日益严苛。公路路基作为公路的基础结构,承受着车辆荷载与自身重力的双重作用,其稳定性是保障公路正常运营的核心要素。然而,实际工程中因地质条件复杂、水文环境多变以及施工不当等因素,公路路基稳定性问题频发,如路基沉降、边坡滑塌等,严重威胁公路使用寿命与行车安全。因此,深入研究公路路基稳定性分析及加固技术具有重要的现实意义。

2 公路路基稳定性影响因素分析

2.1 地质条件

地质条件对公路路基稳定性的影响显著。不同地质构造、岩土类型和地层分布会导致路基稳定性差异巨大。以软土地基为例,其含水量通常在30%-60%之间,孔隙比大于1.0,压缩系数在0.5-1.5MPa⁻¹范围内,抗剪强度指标内摩擦角一般小于10°,黏聚力小于20kPa。在车辆荷载作用下,软土地基容易发生较大的沉降,沉降量可达数十厘米甚至更多,严重影响路基稳定性。山区公路可能遭遇岩溶、滑坡、泥石流等不良地质现象。岩溶地区,溶洞、溶槽等发育,可能导致路基出现空洞,引发不均匀沉降;滑坡地段,滑坡体的滑动会直接破坏路基结构,造成路基失稳。

2.2 水文条件

水文条件对公路路基稳定性的影响不容小觑。地下水的存在会降低岩土体的抗剪强度,增加路基自重。当路基处于地下水位较高区域时,岩土体的有效应力减小,抗剪强度降低。例如,砂土在干燥状态下的内摩擦角可达30°-40°,而在饱和状态下内摩擦角可能降低至20°-30°。同时,地下水的浮力作用会减轻路基土体的有效重量,

进一步影响路基稳定性^[1]。地表水的冲刷和侵蚀作用会破坏路基的边坡防护结构,使路基土体流失。在暴雨季节,地表径流速度可达数米每秒,对路基边坡的冲刷力极大,可能导致边坡土体被冲走,引发边坡滑塌。

2.3 荷载作用

车辆荷载是公路路基承受的主要外力之一。随着交通量的不断增加和车辆轴重的增大,路基所承受的荷载也越来越大。例如,大型货车的轴重可达30-50吨,在长期重载作用下,路基土体会产生累积变形。研究表明,当车辆荷载重复作用次数达到一定值时,路基的沉降量会显著增加。一般来说,在重载交通路段,路基的年沉降量可达1-3厘米。此外,地震、风力等自然荷载也可能对路基的稳定性产生影响。地震时,地震波会使路基土体产生振动,导致土体强度降低,可能引发路基失稳;强风作用下,路基边坡可能受到风力侵蚀,影响边坡稳定性。

2.4 施工因素

施工过程中的质量控制对公路路基稳定性至关重要。填筑材料的选用不当、压实度不足、排水设施不完善等都可能导致路基在运营过程中出现稳定性问题。例如,若填筑材料为含水量过高的黏性土,其压实性能较差,难以达到规定的压实度。根据相关规范,路基压实度应满足不同等级公路的要求,如高速公路、一级公路的路床压实度应不小于96%。若压实度不足,路基在车辆荷载作用下容易产生较大的变形。施工顺序的不合理、施工机械的不当操作等也可能对路基造成破坏。如在填筑过程中,若未按照分层填筑、分层压实的原则进行施工,可能导致路基出现不均匀沉降。

3 公路路基稳定性分析方法

3.1 极限平衡法

极限平衡法是公路路基稳定性分析中最常用的方法之一。该方法基于静力平衡原理,将路基边坡划分为若干个条块,通过分析每个条块的受力情况,建立平衡方程,求解边坡的安全系数。极限平衡法具有计算简单、直观易懂等优点,适用于各种复杂的地质条件和边坡形式。

常用的极限平衡法有瑞典条分法、毕肖普法、简布法等。

瑞典条分法假设条块间作用力方向平行于滑面,不考虑条块间的水平作用力,计算相对简单。其安全系数计算公式为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i l_i + W_i \cos \alpha_i \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$

其中, F_s 为安全系数, c_i 为第 i 个条块滑面的黏聚力, l_i 为第 i 个条块滑面的长度, W_i 为第 i 个条块的重量, α_i 为第 i 个条块滑面的倾角, φ_i 为第 i 个条块滑面的内摩擦角, n 为条块总数。

毕肖普法考虑了条块间的水平作用力,计算结果更准确。其安全系数计算公式为:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_{\alpha_i}} [c_i b_i + (W_i - u_i b_i) \tan \varphi_i]}{\sum_{i=1}^n W_i \sin \alpha_i}$$

其中, $m_{\alpha_i} = \csc \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \tan \varphi_i}{F_s}$, u_i 为第 i 个条块滑面上的孔隙水压力, b_i 为第 i 个条块的宽度。

简布法适用于任意形状的滑动面,考虑了条块间的所有作用力,计算精度较高,但计算过程较为复杂。

3.2 有限元法

有限元法是一种数值分析方法,它将路基边坡离散为有限个单元,通过建立单元的力学模型和边界条件,求解整个边坡的应力、应变和位移分布^[2]。有限元法可以考虑岩土材料的非线性、各向异性以及复杂的边界条件,能够更准确地模拟路基边坡的实际受力状态。

在有限元分析中,常用的岩土本构模型有摩尔-库仑模型、邓肯-张模型等。摩尔-库仑模型是一种弹塑性模型,其屈服准则为:

$$f = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} = 0$$

其中, σ_1 和 σ_3 分别为最大和最小主应力, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

通过有限元分析,可以得到路基边坡在不同荷载作用下的应力、应变和位移分布情况,进而评估路基的稳定性。例如,当边坡某一点的位移超过一定限值时,可

能表明该区域存在失稳风险。

3.3 可靠度分析法

可靠度分析法是基于概率论和数理统计的方法,它考虑了各种不确定性因素对路基稳定性的影响,如岩土参数的变异性、荷载的不确定性等。通过建立路基稳定性的功能函数,计算边坡的失效概率和可靠度指标,评估路基的稳定性。

路基稳定性的功能函数一般表示为:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$$

其中, $X_1, X_2, \dots, X_n$ 为影响路基稳定性的随机变量,如岩土参数、荷载等。

失效概率 P_f 为功能函数 Z 小于零的概率,即:

$$P_f = P(Z < 0)$$

可靠度指标 β 与失效概率 P_f 的关系为:

$$\beta = \Phi^{-1}(1 - P_f)$$

其中, Φ^{-1} 为标准正态分布函数的反函数。

可靠度分析法能够更全面地反映路基稳定性的实际情况,为工程设计提供更科学的依据。

4 公路路基加固技术研究

4.1 换填法

换填法是将路基软弱土层挖除,换填强度较高、稳定性较好的材料,如砂砾、碎石等,并进行分层压实。换填法适用于浅层软土地基的处理,一般换填深度不宜超过 3m。在换填过程中,应严格控制换填材料的质量和压实度。砂砾、碎石等换填材料的粒径应符合要求,一般最大粒径不宜超过换填层厚度的 2/3。压实度应满足设计要求,通常采用重型击实标准,压实度应不小于 96%。例如,某工程采用换填法处理软土地基,换填材料为级配良好的碎石,换填深度为 2.5m,分层压实厚度为 30cm,经过压实度检测,各层压实度均达到 96% 以上,处理后路基的承载力显著提高,沉降量明显减小。

4.2 强夯法

强夯法是利用重锤自由落下的巨大冲击能,对路基土体进行强力夯实,使土体颗粒重新排列,提高土体的密实度和强度。强夯法适用于处理碎石土、砂土、低饱和度的粉土与黏性土等地基。强夯法的加固效果与夯击能、夯击次数、夯击间距等因素有关。夯击能一般根据地基土的性质和设计要求确定,通常在 1000-5000 kN·m 之间。夯击次数应根据现场试夯结果确定,一般每点夯击 3-10 击^[3]。夯击间距一般为夯锤直径的 1.5-3 倍。例如,某工程采用强夯法处理砂土地基,夯击能为 3000 kN·m,每点夯击 6 击,夯击间距为 3m,经过强夯处理后,地基土的干密度提高了 15%-20%,承载力特征值

从原来的120kPa提高到200kPa以上。

4.3 注浆加固法

注浆加固法是通过注浆管将浆液注入路基土体中，浆液在土体中扩散、填充和固结，形成具有一定强度和防水性能的加固体，从而提高路基的稳定性和承载能力。注浆加固法适用于处理软土地基、岩溶地基以及路基的裂缝和空洞等病害。常用的注浆材料有水泥浆、水泥-水玻璃双液浆等。水泥浆的水灰比一般为0.5-1.0，水泥-水玻璃双液浆的水泥浆与水玻璃的体积比一般为1:0.5-1:1。注浆压力应根据地基土的性质和注浆深度确定，一般在0.5-3.0MPa之间。例如，某工程采用水泥-水玻璃双液浆注浆加固软土地基，注浆压力为1.5MPa，注浆量根据地基土的孔隙率和注浆半径计算确定，经过注浆加固后，地基土的强度提高了30%-50%，沉降量得到有效控制。

4.4 土工合成材料加固法

土工合成材料是一种新型的岩土工程材料，具有重量轻、强度高、耐腐蚀等优点。在公路路基加固中，常用的土工合成材料有土工格栅、土工布等。土工格栅可以与路基土体形成复合结构，提高土体的抗拉强度和抗剪强度，增强路基的整体稳定性。土工格栅的拉伸强度一般在20-200kN/m之间，伸长率一般为3%-15%^[4]。在铺设土工格栅时，应保证其平整、无褶皱，搭接宽度不小于20cm。例如，某工程在高填方路基中铺设土工格栅，铺设层数为3层，间距为50cm，经过监测，路基的沉降量比未铺设土工格栅的路段减少了30%-40%。土工布可以起到反滤、排水和隔离的作用，防止路基土体的流失和污染。土工布的透水性应满足设计要求，一般渗透系数不小于 1×10^{-3} cm/s。在铺设土工布时，应避免破损，搭接宽度不小于10cm。

4.5 桩基础加固法

桩基础加固法是在路基中设置桩基础，将上部荷载传递到深层稳定的土层或岩层中，从而提高路基的承载能力和稳定性。常用的桩基础有钢筋混凝土桩、钢管桩等。钢筋混凝土桩的直径一般为0.3-1.2m，长度根据地基土的性质和荷载要求确定，一般在10-30m之间。钢管桩的直径一般为0.3-1.0m，壁厚一般为6-20mm。桩基础的施工方法有钻孔灌注桩、沉管灌注桩、打入桩等。例如，某工程采用钻孔灌注桩加固软土地基，桩径为0.8m，桩长为25m，桩间距为3m，经过桩基础加固后，路基的承载力特征值从原来的100kPa提高到300kPa以上，沉降量明显减小。

结语

本研究围绕公路路基稳定性及加固技术得出结论：地质、水文、荷载与施工等因素影响路基稳定性，工程中需针对性预防。常用稳定性分析方法各有特点，极限平衡法适用于初步设计，有限元法结果精准，可靠度分析法可考量不确定性。常用加固技术适用于不同工况。未来研究可从四方面推进：一是深化岩土材料本构与破坏机理研究，提升分析准确性；二是开发新型加固材料与技术，提高效率；三是加强监测技术研究，实现实时预警；四是研发绿色环保加固技术，降低环境影响。

参考文献

- [1]蔡鸿成.复杂地质条件下公路路基稳定性评估与加固技术[J].汽车周刊,2025,(02):134-136.
- [2]刘伟.高速公路路基高边坡稳定性及加固方案[J].黑龙江交通科技,2025,48(01):38-41+45.
- [3]王梅.公路路基边坡稳定性及加固措施研究[J].运输经理世界,2023,(24):113-115.
- [4]张立军.山区高速公路路基边坡稳定性及加固措施分析[J].四川水泥,2023,(04):257-258+261.