

基于整体强度折减法的公路边坡稳定性分析方法

张朝宝¹ 韩京利²

1. 德州市公路项目建设服务中心; 2. 德达交通建设发展集团有限公司

摘要:公路边坡稳定性一直是交通工程领域的重要问题,其稳定性直接影响着公路运输的安全和畅通。随着交通基础设施建设的不断发展和扩张,公路边坡工程面临的挑战也日益增加,开展基于整体强度折减法的公路边坡稳定性分析研究,具有重要的理论和实际意义。本文分析了公路边坡稳定性分析的基本方法,围绕整体强度折减法的理论基础,探讨了该方法在公路边坡稳定性分析中的实施步骤,为公路边坡稳定性方法提供了新的思路与创新方法,全面提高道路交通安全性,推动交通工程领域的发展,为公路工程的设计、施工和维护提供科学依据,具有重要的理论和实践意义。

关键词:整体强度折减法;公路边坡;稳定性;分析
【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.16.065

前言:随着交通运输需求的不断增加,公路工程规模不断扩大,对边坡稳定性的要求也越来越高。在实际工程中,边坡失稳引发的安全事故时有发生,给人们的生命财产造成了严重威胁,因此有必要对公路边坡的稳定性进行深入研究。基于整体强度折减法的公路边坡稳定性分析方法是一种在岩土工程领域中广泛应用的方法。该方法基于岩土体整体的强度参数,结合边坡几何特征和荷载条件,通过对边坡稳定性进行综合分析,确定其安全系数。

一、整体强度折减法的理论基础

整体强度折减法是一种基于岩土工程力学理论和力学原理的边坡稳定性分析方法,其核心思想是将边坡视为一个整体系统,在考虑到岩土材料的物理特性和力学性质的基础上,通过折减边坡体的整体强度来评估其稳定性。该方法主要涉及到边坡的内部结构、材料特性以及外部荷载的作用下边坡体的整体响应。首先,需要对边坡体的地质条件进行全面分析,包括地层的构造、岩土材料的力学性质、地下水位等因素。其次,根据边坡体的几何形态和土体性质,建立边坡的力学模型,考虑到边坡体的自重、地下水压力、附加荷载等外部力的影响。然后,通过应力和应变的分析,计算边坡体内部各点的受力情况,包括剪切力、压力等。在此基础上,结合岩土材料的强度特性和摩擦力学原理,对边坡体的整体强度进行折减,考虑到不同部位的强度折减系数。最后,通过稳定性分析,评估边坡在不同荷载条件下的稳定性,确定边坡体的安全系数。

总而言之,整体强度折减法充分考虑了边坡体内部结构和材料特性的影响,能够较为准确地反映边坡的实际稳定状态,为公路工程设计和施工提供了重要的理论参考和技术支持。

二、公路边坡稳定性分析方法

(一)地质条件调查与分析

公路边坡稳定性分析的第一步是进行地质条件调

查与分析,这一过程对于准确评估边坡的稳定性至关重要。地质条件的调查和分析涉及对边坡所在地区的地质特征、地层结构、岩土性质等因素的全面了解,旨在为后续稳定性分析提供必要的基础数据和详细的地质信息。

首先,需要对地质构造进行调查,包括断裂带、褶皱等构造特征,以及地层的分布情况和构造关系。其次,对地层结构进行详细分析,包括岩性、层理、节理等特征,了解地层的稳定性和岩土材料的力学性质。同时,需要对地下水位进行测定和监测,掌握地下水对边坡稳定性的影响。在此基础上,通过野外勘察和室内试验,获取地质样品,并对其进行室内实验室分析,包括土壤颗粒分析、含水量测定、压缩试验等,以获取更加详细的岩土性质数据。综合地质条件调查与分析的结果,可以对边坡所处地区的地质环境进行科学评价,为后续的稳定性分析提供可靠的依据。地质条件的调查与分析是公路边坡稳定性分析的基础,对于准确评估边坡的稳定性和制定合理的工程防护措施具有重要意义。

(二)工程特性分析

公路边坡稳定性分析需要进行工程特性分析,全面了解边坡的设计参数、工程构造以及施工工艺等方面的特性,为后续稳定性评估提供基础和依据。具体而言,需要详细了解边坡的几何形态,包括坡度、坡高、坡角等参数,以及边坡的形状特征,如平缓坡、陡坡等,通过对边坡几何形态的分析,可以评估边坡的整体结构和稳定性潜力。

一方面,需要考虑边坡的土质情况,包括土体类型、土层分布、土壤层厚度等参数,了解土体的力学性质和工程行为,分析边坡的地质构造情况,包括岩石的类型、节理、构造面等特征,对边坡的稳定性产生重要影响。另一方面,在工程特性分析中,还需要考虑边坡的附加结构,如支护结构、排水设施等,以及地表覆盖物的影响,如植被、建筑物等。此外,需要考虑边坡周围的环境因素,如降雨、地震等自然灾害的可能性,对边坡的稳定性进行全面评估。

(三)荷载情况计算

在公路边坡稳定性分析中,荷载情况计算是至关重要的环节,通过对不同荷载条件下边坡的稳定性进行全面计算和评估,可以确定边坡在不同情况下的安全系数,为后续的工程设计和施工提供重要参考,具体涉及到边坡在不同外部荷载作用下的稳定性评估,对于确定边坡的安全系数和采取相应的防护措施具有重要意义。

首先,需要考虑到边坡所受到的静载和动载荷载,其中静载包括边坡自身的重力以及地下水的压力等,而动载则包括车辆荷载、行人荷载等外部动态荷载。静载荷载通常可以通过边坡的几何形态和土体性质进行计算,而动载荷载则需要根据公路使用情况和交通量进行

合理估算。其次，需要考虑到不同荷载条件下边坡的稳定性变化情况，包括正常使用情况下的静载和动载，以及极端情况下的荷载作用，如突发降雨引发的地表水压力增加、地震引发的振动荷载等。最后，在荷载情况计算中，还需要考虑到边坡的变形和位移情况，以及不同荷载作用下边坡的可能失稳机制，如滑坡、崩塌等。

三、基于整体强度折减法的公路边坡稳定性分析步骤

(一) 整体强度折减法的建模

基于整体强度折减法进行公路边坡稳定性分析时，整体强度折减法的建模是关键步骤，需要将边坡视为一个整体系统，并考虑边坡内部各个部分之间的相互作用和影响，以建立边坡的力学模型。下面将详细描述整体强度折减法建模的步骤和方法。

首先，需要对边坡的几何形态进行详细分析，包括边坡的坡度、坡高、坡面结构等参数。通过测量和观察，获取边坡的实际几何形态，并记录相关数据。接下来，对边坡土体的特性进行分析，包括土质类型、密度、含水量、压缩特性等，需要采集土样并进行实验室测试，获取土体的物理力学参数，如摩擦角、内聚力等。其次，对边坡内部的结构和可能存在的支护结构进行分析，包括岩体的节理、裂缝、岩层的分布情况，以及可能的支护结构，如挡墙、护坡、防护网等，在此基础上还需要考虑边坡受到的各种外部荷载作用，包括自重荷载、地下水压力、交通荷载、地震力等，并根据实际情况合理估算不同荷载条件下边坡所受力的大小和方向。

以某一段公路边坡进行稳定性分析，该边坡的几何形态为一个倾斜的矩形平面，土体为含有不同岩石和土壤的星合材料，根据Mohr-Coulomb准则，边坡的稳定性可以通过以下公式进行评估：

$$\tau = c' + \sigma_v \cdot \tan(\phi')$$

其中， c' 是有效内聚力， ϕ' 是有效内摩擦角，可以根据以下公式计算：

$$c' = c + \sigma_v \cdot \tan(\phi)$$

$$\tan(\phi') = \frac{\tan(\phi)}{\sqrt{1 + (\tan(\phi))^2}}$$

通过引入土体的弹性模量 E 和泊松比 ν ，我们可以进一步描述边坡的弹性行为。假设边坡的岩土体是各向同性的，可以利用弹性力学理论推导出边坡的位移场。在应变能最小原则下，我们可以得到边坡位移的偏微分方程，如下所示：

$$\nabla \cdot \sigma + \rho_s \cdot \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = 0$$

其中， σ 是应力张量， \mathbf{u} 是位移场， t 是时间通过边界条件和初始条件的设定，可以求解该偏微分方程，得到边坡的稳定性分析结果，已括位移、应力分布等信

息。

式中：

H : 边坡的高度(m)。

L : 边坡的长度(m)。

θ : 边坡的坡度角度(弧度)。

ρ_s : 土体的密度(kg/m^3)。

ϕ : 土体的内摩擦角(度)。

c : 土体的内聚力(kPa)。

γ : 重力加速度(m/s^2)。

P : 荷载作用于边坡上的外部荷载(N)。

σ_v : 垂直应力(kPa)。

τ : 剪切应力(kPa)。

基于分析结果，建立边坡的整体强度折减模型。将边坡视为一个整体系统，考虑土体的强度特性、岩体的裂缝和节理特性，以及支护结构的影响。除此之外，根据土体和岩体的强度特性，确定不同部位的强度折减因素，考虑土体的剪切强度、压缩强度、摩擦特性等。根据岩体的节理和裂缝情况，确定不同部位的强度折减系数。

(二) 强度折减分析

基于整体强度折减法的公路边坡稳定性分析中，强度折减分析能够有效地评估边坡不同部位的强度，并综合考虑各种因素对边坡整体稳定性的影响。这一过程旨在全面了解边坡的力学性质，进而提供准确可靠的稳定性评估，为工程设计和施工提供重要依据。

其一，需要进行地质条件调查和岩土试验，获取边坡土体的力学参数，包括土壤的内聚力、摩擦角，以及岩石的抗压强度、剪切强度等。通过野外勘察和实验室试验，获取土壤和岩石样本，并进行相应的力学性质测试，以获得准确的土体参数。其二，可以结合边坡的几何形态和荷载情况，分析边坡内部各部位的受力情况，包括坡脚、坡面、坡顶等不同部位的应力和应变分布，考虑到边坡的自重、地下水压力、交通荷载等外部荷载的作用，对边坡在不同荷载条件下的受力情况进行全面评估。其三，应该根据土体和岩石的强度特性，对边坡各部位的强度进行评估。结合地质条件和试验数据，计算出各部位的有效内聚力、摩擦角等强度参数，以及岩石的弹性模量、泊松比等力学性质。其四，根据强度折减法的原理，考虑边坡不同部位的强度折减系数。强度折减系数的确定通常基于经验公式或根据实测数据，综合考虑土体和岩石的强度特性，以及受力情况下的变形和破坏机制。

基于弹性理论和动力学模型，我们可以建立边坡的位移场方程和应力场方程。考虑到地震荷载的影响，我们可以引入地震动的频率和加速度等参数，可以考虑边坡的非线性行为，例如土体的非线性弹性特性和岩石的破坏机制。综合考虑边坡的几何形态、土体特性和荷载情况，可以得到边坡的位移场方程和应力场方程，其中包括时间、空间和频率等多个变量，通过数值方法和计算模拟，我们可以求解这些方程，得到边坡在地震荷载作用下的位移和应力分布情况。

考虑一个简单的边坡模型，其动力学方程可以表示

为:

$$\rho_s \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = c \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left(K \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} \right) + P \sin(\omega t)$$

其中, $u(x, t)$ 是边坡的位移场, x 是空间坐标, t 是时间, ρ_s 是土体的密度, c 是土体的内聚力, K 是土体的弹性模量, P 是地震荷载的幅值, ω 是地震动的角频率。

这个简化的方程描述了边坡在地震荷载作用下的动态响应, 其中考虑了土体的非线性弹性特性和地震荷载的影响。通过数值求解这个方程, 我们可以得到边坡在地震作用下的位移响应和应力分布, 进而评估边坡的稳定性。

式中:

H: 边坡的高度(m)。

L: 边坡的长度(m)。

θ : 边坡的坡度角度(弧度)。

ρ_s : 土体的密度(kg/m^3)。

ϕ : 土体的内摩擦角(度)。

c : 土体的内聚力(kPa)。

γ : 重力加速度(m/s^2)。

P : 地震荷载作用于边坡上的外部荷载(N)。

σ_v : 垂直应力(kPa)。

τ : 剪切应力(kPa)。

举一个简化的例子, 假设我们在得到各部位的有效强度值后, 将其与荷载作用下各部位的应力进行对比, 评估边坡各部位的稳定性。综合考虑边坡的整体稳定性, 计算出边坡的安全系数, 并对边坡在不同荷载条件下的稳定性进行评估。根据强度折减分析的结果, 提出合理的加固设计和建议, 以改善边坡的稳定性并确保公路工程的安全运行。强度折减分析通过综合考虑土体和岩石的强度特性, 以及受力情况下的变形和破坏机制, 为公路边坡稳定性分析提供了可靠的理论基础和技术支持。

(三) 稳定性评估

在基于整体强度折减法的公路边坡稳定性分析中, 稳定性评估可以全面评估边坡在不同荷载条件下的稳定性, 并确定边坡的安全系数, 考虑边坡所受到的静态荷载和动态荷载, 包括自重荷载、地下水压力、交通荷载以及地震力等外部荷载作用, 需要根据实际情况和设计的要求, 合理估算不同荷载条件下边坡的受力情况, 实际可以根据地质条件和岩土试验数据, 评估边坡各部位的强度特性, 基于边坡的几何形态和荷载情况, 考虑边坡不同部位的强度折减系数, 确定各部位的有效强度值。

一方面, 通常采用稳定性分析方法, 如切线法、平衡法等, 计算边坡在不同荷载条件下的安全系数或稳定性指标。随后需要分析稳定性评估结果, 发现可能存在的问题和不足之处。根据分析结果, 提出合理的加固设计和优化建议, 以改善边坡的稳定性, 并确保公路工程的安全运行, 对模型进行调整和改进, 提高稳定性分析

的准确性和可靠性。另一方面, 考虑到不确定性因素和自然灾害的影响, 进行边坡稳定性的风险评估, 并采取相应的管理措施, 在此基础上对边坡进行监测和检测, 及时发现和解决可能存在的稳定性问题, 确保公路工程的安全运行。

(四) 加固设计与改善

在基于整体强度折减法的公路边坡稳定性分析中, 加固设计与改善旨在针对边坡可能存在的稳定性问题, 提出合理有效的加固设计方案和改善措施, 以确保公路工程的安全可靠。具体而言, 根据前期的稳定性分析结果, 评估边坡在不同荷载条件下的稳定性, 确定边坡可能存在的稳定性问题和不足之处, 在此基础上对边坡的地质条件、工程特性和荷载情况进行全面综合评估, 明确加固设计的重点和目标。

首先, 根据稳定性评估结果和边坡的实际情况, 设计合理有效的加固方案, 包括结构加固、土体加固、排水加固等措施。根据边坡的特点和所处环境, 选择适当的加固材料和加固方法, 确保加固设计方案的科学性和可行性。其次, 根据加固设计方案, 编制详细的加固施工设计图纸和施工方案, 明确施工工艺和施工工序, 确保施工过程安全可靠, 保证加固工程质量。考虑到边坡的地形地貌和周边环境, 制定相应的施工措施和安全防护措施, 确保施工的顺利进行。最后, 根据施工设计方案, 组织施工人员和施工设备, 按照施工工序和施工要求, 进行加固施工作业。严格控制施工质量, 确保加固工程的安全可靠, 同时注意施工现场的环境保护和安全生产。除此之外, 在加固施工完成后, 对加固后的边坡进行监测和检测, 评估加固效果和稳定性改善情况。根据实际监测数据和检测结果, 对加固效果进行评估, 并根据需要调整和优化加固设计方案, 进一步提高边坡的稳定性和安全性。

结语: 综上所述, 整体强度折减法进行公路边坡稳定性分析中, 可以对边坡的地质条件、工程特性和荷载情况进行全面评估, 充分考虑土体和岩体的强度特性以及外部荷载的影响, 为公路工程的安全性提供了重要保障。该方法以多方面的数据和理论为基础, 通过强度折减分析和稳定性评估, 全面评估边坡在不同荷载条件下的稳定性, 并确定合理有效的加固设计方案和改善措施。加固设计与改善的实施将边坡的稳定性提升到一个更高的水平, 确保公路工程的安全可靠。因此, 综合整体强度折减法的公路边坡稳定性分析方法在实际工程中具有重要的应用价值, 为工程设计和施工提供了科学依据和技术支持, 为公路交通的安全运行提供了保障。

参考文献

- [1] 陈国庆, 黄润秋, 石豫川, 等. 基于动态和整体强度折减法的边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(2): 14.
- [2] 郭昊天, 王志丰, 王亚琼. 基于有限元强度折减法的路堑高边坡稳定性分析[J]. 公路, 2019, 64(11): 6.
- [3] 陈华, 房锐, 赵有明, 等. 基于有限元强度折减法的岩石高边坡稳定性分析[J]. 公路, 2009(10): 4.