

公路边坡稳定性分析及加固措施设计研究

邓永博 张勇

山东智行勘察设计院有限公司

摘要: 在修路时挖坑填土,破坏了边坡天然平衡条件,使边坡产生不稳定现象。文章为了研究斜坡稳定性,利用Flac3D有限差分软件,对锚杆布置参数对斜坡稳定性的影响进行研究。结果表明,有效锚固边坡长度最佳约为18m。边坡倾角的增加会导致边坡的稳定性降低,10°为最佳的锚固倾角,可以获得最佳的加固效果。通过优化锚杆设计参数,可以提高边坡的稳定性,确保锚固设计的合理性,为公路工程提供了可靠的参考依据。

关键词: 公路边坡稳定性分析; 加固措施设计; 研究

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.10.064

引言

边坡稳定性影响因素多,破坏机理复杂,如果处治不当可能导致一定的人员伤亡和经济损失。鉴于此,国内外众多学者通过理论推导、室内模型、现场监测等手段研究了边坡稳定性,并取得了许多先进成果,但并未形成统一的观点。同时,部分设计人员在进行路基边坡设计时,存在盲目套用类似项目通用图表的情况,对边坡的变形规律认识不够深入,选择的处治措施偏保守。因此,进一步研究公路边坡稳定性分析及加固措施设计具有十分重要的工程价值。

一、影响公路边坡稳定性的因素

(一) 潜在影响因素

一是地形因素。自然和人为因素是目前公路边坡工程形成的主要影响因素,具体的地形表现以坡度、坡向、坡高等为主,这些因子的共同作用将会对边坡建成之后受到环境的影响程度产生决定性的影响,并且坡度对边坡的影响最为直接。如果边坡的坡度过大,不仅边坡上的植物无法顺利成长,同时土壤和岩石这类组成边坡的主要成分很容易出现力学失衡的状态,最终带来土壤侵蚀和山崩等边坡破坏形象。二是地质材料因素。一般而言,边坡包括了单一或者是多种地质组成材料,自身的特性将会对边坡稳定性产生直接影响。地质材料的组成成分以矿物的种类、组织、胶结状况和成岩时间等为主,最为明显的外在表现便是岩性和土壤的种类以及力学强度和抗风化能力。三是地质构造因素。在影响公路边坡稳定性的因子中,地质工作是最为主要的因素,如果边坡的岩体中存在层面、剪裂带、断层这类分布不连续的结构,岩体将会出现不连续的现象,强度明显下降。在外界长时间雨水和风力作用的因素下,不连续结构面也会逐渐发展成为破坏滑动面,边坡的稳定性会受到明显影响。

(二) 诱发影响因素

一是外界的环境因素。自然环境因素的覆盖范围较为广阔,但对于公路边坡稳定性产生影响的主要因素,可以分为疆域、地下水、风化侵蚀以及地震等。水分是

边坡稳定性受到破坏的主要外界因素,在长时间降雨之后,边坡地表材料会逐渐出现软化现象,强度水平下降明显,并且孔隙水压数值明显增加,边坡的稳定性有所下降。持续性的暴雨是对公路自然边坡产生影响的主要负面因素,很容易带来边坡的侵蚀和坍塌问题,并且水分渗透作用会抬高边坡附近区域的地下水位,从而影响到边坡的稳定性。地下水对于边坡稳定性带来的影响,主要体现在地下水的压力直接对垂直裂缝产生影响,并最终形成水平推力,使得边坡逐渐出现向下方滑动的现象。地下水的浮动作用会在潜在滑动面上产生作用,使得边坡的有效正应力数值明显减小,潜在滑动面的摩擦力下降,产生对于黏土矿物的润滑作用,物理性质和化学性质将会逐渐改变,直接降低边坡的稳定性。公路边坡的岩石在经过长时间风化之后,强度下降十分明显,侵蚀量有所增加,随后全新的岩石会再次暴露,进一步接受风化和侵蚀作用的影响。长此以往,边坡的稳定性会明显下降。如果边坡地下出现了地震现象,地表加速度会直接增加边坡的下滑力,并且地震水平方向上的震波很容易破坏不具备横向剪力抵抗作用的边坡稳定性。二是人为因素。在公路施工建设过程中,对于边坡产生影响的主要人为因素包括了道路开发、坡地开发以及采矿、开垦等。在公路边坡地尚未得到合理使用的情况下,边坡原有的地形和自然植被会出现改变,边坡坡度会因为受到挖掘、填补等工作的影响明显增加,再加之自然植被的乱砍滥伐,导致边坡的水土保持功能下降十分明显,崩塌事故的发生概率有所增加。同时,在公路施工建设的过程中,如果需要对边沟进行回填处理,并且填方区尚未全方位进行压实处理,土体的松散度有所提高,很容易出现不均匀的沉陷和变形问题。如果填方区上方分布有建筑物,将会带来倾斜、倒塌的问题。在公路建设中的坡脚开挖施工会明显拉低边坡的抗剪力强度,在受到其他外界自然因素的影响下,边坡可能会出现立刻崩塌或者滑落的问题。

二、边坡稳定性分析方法

(一) 极限平衡分析法

在坡面稳定性分析中,应用较多的是极限平衡法(极限平衡法),也是设计程序中使用频率最高的一种,算是一种数值分析法。极限平衡法的优点是简单的力学模型可以定量评估斜坡的稳定性,但是只能提供所有可能危险滑行范围内斜坡中的应力—应变状态;虽然在处理均匀土质边坡时方法比较可靠,而在涉及复杂介质和边界的岩质滑坡体时,仅能提供一定程度的估计,计算结果与实际情况可能相差较大。

(二) 极限分析法

塑性极限分析法是根据极限状态下自重和外荷载所做的功等于滑裂面上阻力所消耗的功的条件,求解极限荷载和边坡安全系数的方法,将滑坡体作为服从流动规

律的理想塑性材料。这种方法将上限和下限定理与塑性极限分析相结合。塑性极限分析法给出了在理想条件下才能得到边坡稳定解析解的边坡安全系数范围。此外，对于边坡稳定性的影响，复杂的荷载、渗流等因素也很难考虑这种方法。所以，在实际运用中，需要注意其局限性。

(三) 数值计算法

在坡面稳定性分析中，常用的数值方法有离散单元法、Flac3D、Limited元法等。这些方法适用条件不同，利弊得失也不同。离散单元方法和Flac3D主要是处理离散问题、非连续性和变形较大的问题。可以考虑岩土体的断裂和破碎行为，但其理论基础相对较为复杂，需要对模型进行合理的离散化设置。有限元法(Limited Method)是一种应用广泛、理论基础成熟的数值方法。

可以考虑岩土体的应力—应变关系，以及滑体和支护结构之间的相互影响。流形元法将有限元法和离散单元法的优点结合在一起，可以对连续到非连续的岩土体大变形过程进行有效的计算，能够更准确地描述岩土体的断裂和破坏行为，在处理复杂边坡问题时具有一定的优势。这些方法推动了边坡破坏机制认识的发展，并作为边坡工程设计和风险评估的依据。

三、边坡锚固机理及计算模型的建立

(一) 边坡锚固机理

路基边坡在自然状态下，承受滑动面上方岩土体的切向力、渗透力等作用，同时还承受其他荷载。滑坡面岩土体的抗剪强度参数主要依赖于边坡的稳定性。在坡面工程中应用了锚固技术，以增强坡面稳定性。锚固技术通过设置锚杆或索，将其与边坡和周围岩土体紧密连接。锚杆或索的固定和深入长度能够产生摩擦力、摩擦力和抗拉强度，从而分担边坡荷载并增加抗滑能力。通过合理布置锚杆或索形成稳定的支撑系统，可以提高边坡的抗倾覆能力。锚固作用力的作用使坡面各力系保持平衡，从而使坡面稳定性得到保证。锚固力一定要能在滑行面上平衡作用的力量，保证其抗滑力力矩比下滑力力矩要大，这样才能防止对边坡造成不稳定的破坏，这就是锚固力的作用，具体见公式(1)。
$$\sum \Delta N \times f + \sum C \times \Delta L \geq \sum \Delta T \times r$$
 (1) 式中， $\sum \Delta N$ ——所有锚索受力变化量的总和； $\sum C$ ——表示所有锚杆的刚度之和； ΔL ——表示锚索长度的变化量； $\sum \Delta T$ ——所有附加荷载的总和； f ——表示锚索摩擦系数的大小与某一固定件的摩擦特性； r ——锚杆与岩体之间的距离。公式(1)左侧的部分表示锚固系统的抗滑力，由锚索受力、摩擦力和锚杆刚度共同作用产生。右侧的部分表示附加荷载施加在锚固系统上产生的滑移力。当公式左侧的抗滑力要大于等于右侧的滑移力时，可以确保锚固系统的稳定性和安全性。锚杆是一种用于防止边坡塌方的加固技术，通过将锚杆插入稳定地层并与岩土体相互作用，利用稳定地层的锚固效应和被动性抵抗能力，将滑坡体产生的推力传递到更深的地下，从而保持边坡的稳定状态。锚杆通过与潜在滑动面上的岩土体相互作用，防止滑坡体滑落。发挥锚杆锚固作用的关键是

合理确定约束点的数量、位置和强度安排。只有当这些约束点的布置与设计合理时，锚杆才能有效地保持边坡的稳定状态。通过以国道望册公路沿线边坡稳定性分析为背景，得出如下研究结果：锚杆支护可以显著减小坡体的变形量，同时防止塑性区形成贯通带，提高滑体的稳定性。在河南南阳内乡西站附近工点岩坡变形规律分析通过极限平衡法、FLAC3D数值模拟和正交试验得出边坡安全系数，边坡锚杆通过正交试验优化设计确定最佳锚固组合。因此，在实际工程中，为保证边坡的稳定性，需要针对具体情况，设计布置合理的锚杆。

(二) 边坡计算模型建立

该公路工程项目位于西南地区，设计时速80km，双向四车道。工程采用了现代化的设计标准，旨在提供高效、安全的交通通行条件。这条路最大的一条挖方坡，是一个高38m、坡度达60°的斜坡。道路设有坡面等级，坡面总高度30m，分为每级10m的3个等级，并设有宽2m的平台。这样的设计在提高边坡稳定性的同时，减少了土方开挖量。边坡模型如图1所示。

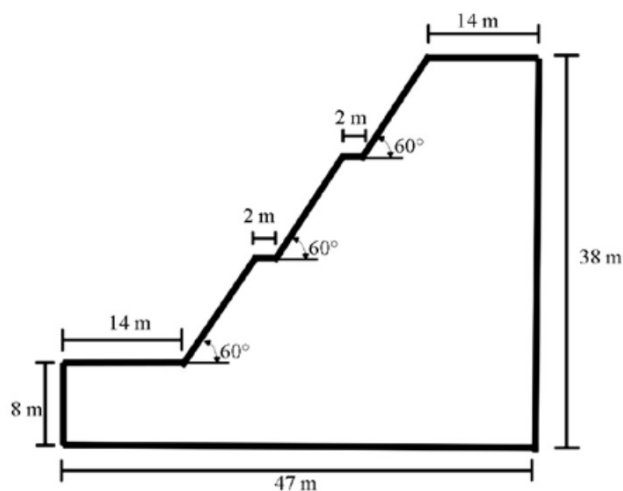


图1 边坡模型示意图

四、锚固参数优化设计

预应力锚索的使用，对边坡稳定性起到明显改善作用，减少了坡面位移。根据工程经验，预应力锚索的倾角、间距和长度是影响加固效果的主要因素。为了确保边坡的稳定性，并使预应力锚索发挥最佳作用，需要进行优化设计以确定最合适的锚固参数。

(一) 倾角优化设计

在优化设计时，锚索的倾角是关键因素。锚索倾斜度较大，影响了锚固作用。为保证注浆饱和度符合设计要求，在进行锚索钻孔前需要进行注浆处理。锚索的斜角和横向夹角要达到10°以上。然而，过大的倾角也不利于锚固效果，因此规范规定了锚索倾角的取值范围为10~35°。设计的时候要综合各方面的因素，选择最好的倾斜角度，这样才能起到抛锚的效果。为研究锚索倾斜度对边坡稳定性的影响，采用控制变量法进行了优化设计。在保持锚索长度(15m)和垂直间距(2m)不变的情况下，通过软件将锚固角分别设置为10°、12°、

14°、16°、18°、20° 进行分析。如图2所示为锚索布置，如图3所示为边坡稳定性受到锚索倾斜影响的结果。通过这样的设计方式，可以更好地理解锚索倾斜程度对斜坡稳定性的影响，同时也可以找到最佳状态的倾斜数值。这将有助于指导实际工程中的边坡设计和锚固施工。从图3可以观察到坡度的安全系数随着倾斜度的提高而逐渐降低。这同时也意味着边坡的水平位移也呈现相似的趋势。通过前面的分析可以知道，边坡失稳的原因主要是岩层之间存在着薄弱的结构层。而锚索的作用在于使坡面的抗滑性更好地通过横向的方式来实现。随着倾角的增大，水平拉力的值会减小。因此，为了保证边坡的稳定性，可以选择10° 作为最佳的锚固倾角，以获得最佳的锚固效果。这样的设计在实际工程中可以有效地起到引导作用，应对坡面稳定性的问题。

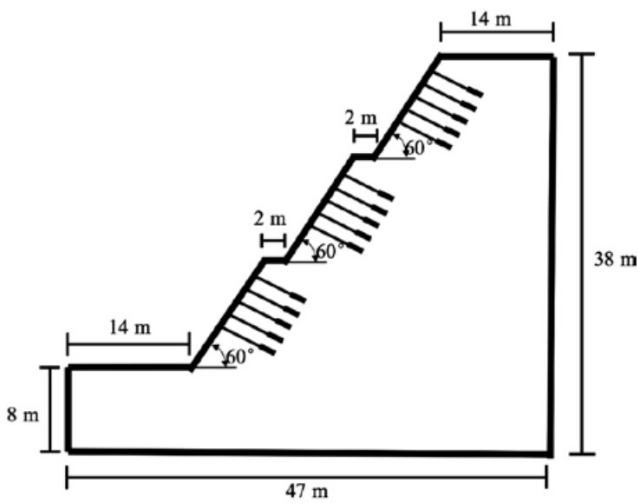


图2 锚索布置图

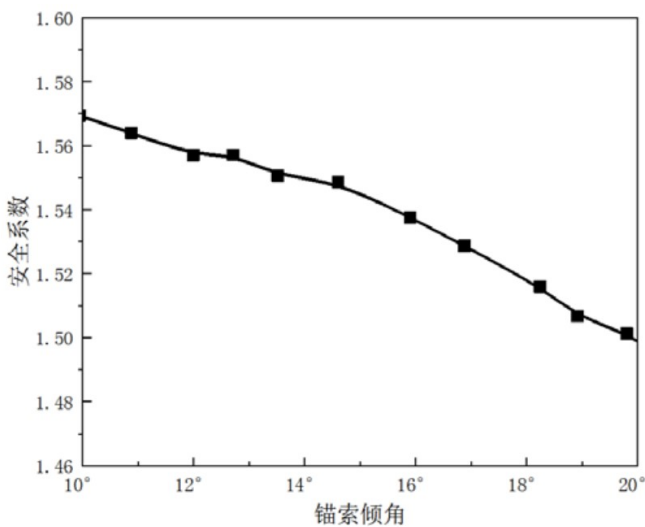


图3 不同倾角下的安全系数变化图

(二) 锚索长度优化设计

在锚杆长度纵距2m，锚杆倾角10° 的情况下，根据图2的设置对锚索长度进行优化设计，以保证锚固

效果。分析不同长度锚杆（4m，6m，8m，10m，12m，14m，16m，18m，20m）对边坡安全系数的影响。利用有限元软件对不同锚索长度下的边坡稳定情况进行了模拟，并得到了变化趋势如图4所示。

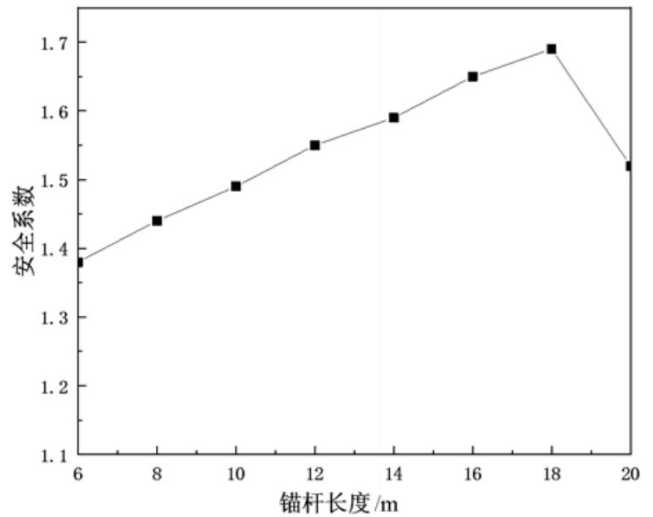


图4 不同锚杆长度下安全系数变化图

研究表明，如果斜坡锚杆加固的长度在18m以下，那么斜坡的安全系数会随着锚杆长度的增加而逐渐增加，只不过这种关系是非线性的。但锚杆长度的增加，反而会导致在超过18m的坡面锚杆加固时，坡面安全系数降低。在实际工程中，选择适当的边坡锚杆加固长度是非常重要的，过长或过短的锚杆长度都可能不利于边坡的稳定性。

结语

(1) 倾斜面增大，边坡安全系数降低，说明倾斜面增大会使边坡稳定性降低，这是由于斜面增大而引起的。为了提高边坡的抗滑力，选择10° 作为最佳的锚固倾角能够获得最佳的锚固效果。这样的设计对于边坡稳定性的问题，在实际工程中能够得到有效的解决，起到一定的导向作用。(2) 在实际工程中，坡面安全系数与锚杆加固长度呈现非线性正相关关系。但是过长的锚杆长度在锚杆加固18m以上的时候，反而会对边坡的安全系数造成不利的影 响，即引起安全系数的下降。

参考文献

[1]何如许, 裴向军, 刘明. 锦屏一级水电站左岸边坡变形监测及机制分析[J]. 人民黄河, 2021 (43): 1-7.
 [2]史戩, 李兴华, 赵瑞欣, 等. 顺层岩质边坡锚索锚固参数与优化设计分析[J]. 公路, 2022 (10): 1-8.
 [3]李剑, 陈善雄, 余飞, 等. 预应力锚索加固高陡边坡机制探讨[J]. 岩土力学, 2020 (2): 707-713.
 [4]经仁龙. 贵州望册公路边坡稳定性分析及防治措施[D]. 北京: 中国地质大学, 2021.
 [5]雷越. 岩质高边坡稳定分析及锚固优化研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.