

岩质边坡锚索自由段长度的确定与力学特性分析

王国斌, 王红明, 安彩龙

湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉
Email: 332788683@qq.com

收稿日期: 2020年9月29日; 录用日期: 2020年10月15日; 发布日期: 2020年10月22日

摘要

针对平面滑动边坡坡面与滑动面走向存在夹角时和楔形体滑动边坡两种复杂地质模型, 基于空间几何分析完善了传统岩质边坡锚索支护时处于不稳定岩土层中的长度计算公式, 并依据相关规范对三维支护下锚索自由段总长度的求解公式进行了修正。利用数值分析分别建立两种破坏模式下边坡的三维地质模型, 在锚索内锚固段长度不变的情况下, 通过调整锚索的支护高度改变其自由段长度来研究锚索的轴力和锚固体应力等力学特性。研究表明: 两种破坏模式下锚索自由段长度的求解公式形式是相同的, 推导公式有效地解决了锚索在三维支护情形下自由段长度求解难的问题; 锚索轴力及锚固体应力分布规律与以往的研究成果相吻合, 并分别给出了两种破坏模式下锚索支护高度的相关建议。

关键词

岩质边坡, 预应力锚索, 自由段, 长度, 力学特性

Determination of the Free Section Length of the Anchor Cable in the Rock Slope and Analysis of Its Mechanical Characteristics

Guobin Wang, Hongming Wang, Cailong An

Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd. in Hubei, Wuhan Hubei
Email: 332788683@qq.com

Received: Sep. 29th, 2020; accepted: Oct. 15th, 2020; published: Oct. 22nd, 2020

文章引用: 王国斌, 王红明, 安彩龙. 岩质边坡锚索自由段长度的确定与力学特性分析[J]. 土木工程, 2020, 9(10): 1057-1065. DOI: 10.12677/hjce.2020.910110

Abstract

Aiming at two complicated geological models of the plane sliding slope with an included angle between the trend of the sliding surface and the slope surface and the wedge sliding slope, the calculation formula of the length of the traditional rock slope in the unstable rock and soil layer with anchor cable support is improved based on spatial geometric analysis. And according to the relevant code, the formula for calculating the total length of free section of anchor cable under three-dimensional support is modified. Three dimensional geological models of slope with two failure modes are established by numerical analysis. The axial force and anchor stress of the anchor cable are studied by adjusting the supporting height of the anchor cable and changing the length of the free section under the condition that the length of the Inner anchorage section in the anchor cable remains unchanged. The results show that the formula forms of the free section length of anchor cable under the two failure modes are the same, which effectively solves the problem of solving the length of the free section of anchor cable in the case of three-dimensional support. And the axial force of anchor cable and the stress distribution of anchor body are consistent with the previous research results, and the relevant suggestions of anchor cable support height under two failure modes are given.

Keywords

Rock Slope, Prestressed Anchor Cable, Free Section, Length, Mechanical Characteristic

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

滑坡是人类面临时间最长、活动最广泛、危害最严重的地质灾害之一，其危害和影响程度仅居地震、火山之后[1]。因此，必须对滑坡采取相应的防治措施进行缓解或解决，改善边坡的稳定性。目前边坡的治理措施有很多，其中预应力锚固技术作为一种高效经济的实用工程技术，由于其优越的性能和适宜性，在岩质边坡防治工程中得到了广泛应用[2]。而在影响锚索支护效果的众多因素中，锚固长度的确定显得非常重要，其优化结果对提高边坡稳定性和经济效益具有重要意义[3]。

一根完整的预应力锚索通常包括三个部分：内锚固段、自由段和外锚固段。目前国内外主要针对的是锚索内锚固段长度进行研究。郑全明[4] (2000)利用变位 - 剪应力理论分析了拉力型土锚最优长度的确定方法；张发明等[5] (2002)通过统计分析给出了岩体与锚索内锚固段间粘结强度的经验公式，为便于设计人员确定内锚段长度，建立了内锚段长度设计系数图；肖世国等[6] (2004)以锚固段最大剪应力不超过砂浆体与岩体间粘结强度为基准，对锚索的锚固段长度作了相关研究。此后，张德圣等[7] (2010)；Xiong T B, *et al.* [8] (2011)；Li C D, *et al.* [9] (2015)；Ren F, *et al.* [10] (2017)；高毅博[11] (2019)均对锚索内锚固段长度的优化方法进行了探索。而针对锚索自由段长度确定的研究成果非常少，仅岳伟伟[12] (2013)和刘桂宏等[13] (2014)针对巷道工程锚索自由段长度的确定方法和力学特性进行了研究。然而大量研究表明，边坡工程与隧洞工程的支护存在很大的区别，以往针对巷道工程的研究成果很难将其直接应用于边坡工程，此外三维支护下锚索自由段长度的确定还包括以下三点用途：1) 用于岩质边坡锚索锚固方向角等其他参数的优化；2) 用于在数值分析边坡施加锚索时，区分自由段和内锚固段的界线；3) 分析不同自由段长度锚索力学特性间接指导锚索的支护高度。因此锚索自由段长度的优化具有重要的理论意义与工程应用价值。

基于上述分析,本文在文献[2]锚固方向角三维优化的基础上,通过空间几何分析完善了传统岩质边坡锚索支护时自由段长度的求解公式,有效地解决了平面滑动边坡坡面与滑动面走向存在夹角时和楔形体滑动两种破坏模式在锚索三维支护情形下自由段长度求解难的问题,并在上述两种破坏模式的基础上通过数值分析探究了不同自由段长度锚索轴力和应力等力学特性的分布规律,希望对今后岩质边坡锚索的设计施工及稳定性分析起到一定的理论参考作用。

2. 锚索自由段长度的确定

在边坡支护过程中,锚索自由段通常处于不稳定岩土层中,与钻孔壁不直接接触。其功能是利用该段筋体张拉过程的自由弹性伸长对筋体施加张拉力,并将拉力完全传递给锚固体及锚固体周边的地层[14]。长度的计算与坡面(由内锚根[15]确定锚索支护角度)或滑动面(由外锚头确定锚索支护角度)的倾角、不稳定岩土层的厚度以及优化的锚索方向角相关,通常随着锚索锚固方向角的优化而产生,即先求出锚索的最优锚固方向角,然后再调整自由段的长度。锚索自由段的长度包括两个部分:第一部分是处于不稳定岩土层中的长度;第二部分是超过潜在滑裂面的长度,在优化过程中主要针对的是第一部分进行优化。依据文献[15]中的研究成果,由内锚根确定锚索支护角度时考虑坡面与滑动面的特征参数更为全面,优化效果也更好,因此本文锚索自由段的长度也依据锚索内锚根(锚索在滑动面上的支护点)进行优化。此外,由内锚根确定锚索自由段长度还有一点好处就是在优化过程中无需考虑岩质边坡潜在滑动面的情况,其主要取决于坡面的倾角与锚索的支护角度,因此无论是平面滑动边坡还是楔形体滑动边坡,锚索自由段的长度的求解公式形式是相同的。

2.1. 锚索平面分析

以往在预应力锚索支护设计中,锚索通常采用与坡面走向垂直的方式进行加固[2]。下图1为锚索加固方向与坡面走向垂直时的情况。假设坡面的倾角为 β_0 ;在该情况下锚索与水平面之间的夹角为 θ' ;O点为锚索的内锚根,OA与OB之间的夹角为 γ ;内锚根到坡面的垂直距离(OB)为 h ,则:

$$\gamma = 90^\circ - \beta_0 - \theta' \quad (1)$$

$$L_{OA} = \frac{h}{\cos \gamma} = \frac{h}{\cos(90^\circ - \theta' - \beta_0)} \quad (2)$$

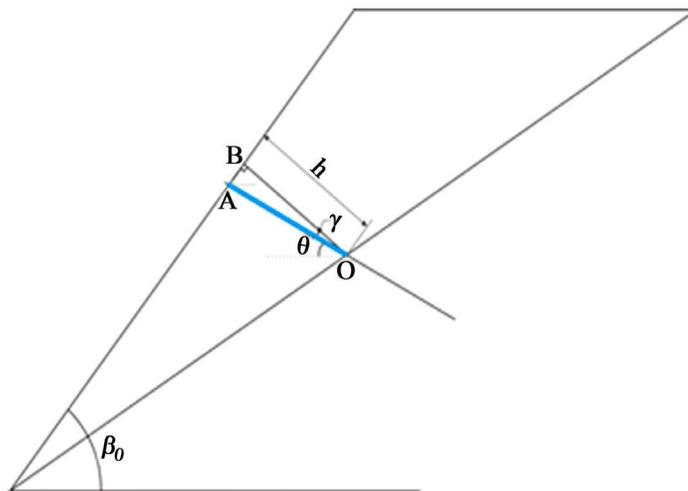


Figure 1. Plane calculation model of anchor cable

图 1. 锚索平面计算模型

2.2. 锚索空间分析

将前述锚索二维支护的情况推广到本文推荐的三维支护的情形，即锚索的加固方向不受任何限制，如图 2 所示。假设 AC 为坡面的走向线，则 $L_{AA'} = L_{CC'}$ ；在该情况下锚索与水平面之间的夹角为 θ (孔口高于孔底时为正)；锚索加固方向与坡面倾向之间的夹角为 α (以顺时针方向为正)，则：

$$L_{OA'} = \frac{L_{AA'}}{\tan \theta'} \tag{3}$$

$$L_{OC'} = \frac{L_{OA'}}{\cos \alpha} = \frac{L_{AA'}}{\tan \theta' \cos \alpha} \tag{4}$$

而锚索与水平面之间的夹角为 θ 满足：

$$\tan \theta = \frac{L_{CC'}}{L_{OC'}} = \tan \theta' \cos \alpha \tag{5}$$

则可得出：

$$\theta' = \arctan \frac{\tan \theta}{\cos \alpha} \tag{6}$$

将上式(6)带入式(2)，可得：

$$L_{OA} = \frac{h}{\cos \left(90^\circ - \arctan \frac{\tan \theta}{\cos \alpha} - \beta_0 \right)} \tag{7}$$

则在三维支护方式下，锚索处于不稳定岩土层中的长度 L_{OC} 为：

$$L_{OC} = \frac{L_{OA} \cos \theta'}{\cos \alpha \cos \theta} = \frac{h \cdot \cos \left(\arctan \frac{\tan \theta}{\cos \alpha} \right)}{\cos \left(90^\circ - \arctan \frac{\tan \theta}{\cos \alpha} - \beta_0 \right) \cos \alpha \cos \theta} \tag{8}$$

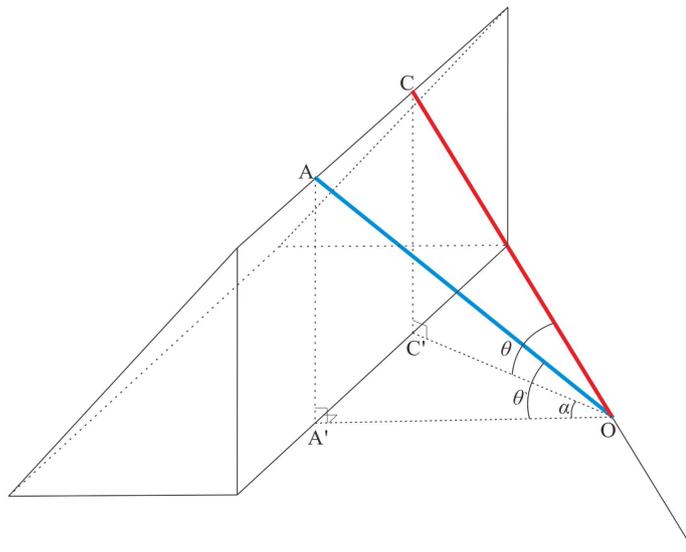


Figure 2. Spatial calculation model of anchor cable
图 2. 锚索空间计算模型

依据《建筑边坡工程技术规范》[16], 预应力锚索自由段长度不小于 5.0 m, 且应超过潜在滑裂面 1.5 m, 以保证能将锚固段设置于抗剪强度较高的地层中, 且滑裂面与坡面间有足够的压应力区[14]。因此, 还需要对锚索自由段总长度 L_{fs} 的求解公式进一步修正, 其求解公式应为:

$$L_{fs} = L_{OC} + \Delta = \frac{h \cdot \cos\left(\arctan \frac{\tan \theta}{\cos \alpha}\right)}{\cos\left(90^\circ - \arctan \frac{\tan \theta}{\cos \alpha} - \beta_0\right) \cos \alpha \cos \theta} + \Delta \quad (9)$$

式中, h 为锚索内锚根到坡面的垂直距离; θ 与 α 分别为锚索支护时的锚固竖直角与水平角; β_0 为坡面的倾角; Δ 为修正系数, 取值为 1.5 m。

3. 不同自由段长度锚索力学特性数值分析

在同一边坡上插入多根不同支护高度的锚索, 分析不同自由段长度锚索的力学特性可间接指导锚索的支护高度。采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件分别建立平面滑动边坡和楔形体滑动边坡三维地质模型, 在锚索内锚固段长度不变(规范法求得)的情况下, 通过调整锚索的支护高度改变其自由段长度来研究锚索力学特性。选取的岩质边坡位于如美水电站中坝址左岸, 地势险峻, 岩体、结构面及锚索的力学参数选取详见表 1~3。

Table 1. Parameter values of rock mass

表 1. 岩体参数取值

名称	容重 (kN/m ³)	密度 (kg/m ³)	粘聚力 (kPa)	内摩擦角 (°)	体积模量 (GPa)	剪切模量 (GPa)	泊松比	抗拉强度 (MPa)
英安岩 滑动面上方岩体	26.0	2600	300	24.99	0.56	0.42	0.20	4.0
英安岩 滑动面下方岩体	26.2	2620	450	36.9	1.79	1.33	0.22	4.5

Table 2. Parameter values of structural plane

表 2. 结构面参数取值

名称	内聚力(kPa)	内摩擦角(°)	法向刚度(GPa)	剪切刚度(GPa)
结构面	40	23	0.8	0.5

Table 3. Parameter values of anchor cable

表 3. 锚索参数取值

名称	弹性模量(GPa)	抗拉强度(kN)	粘结刚度(MPa)	水泥浆粘聚力(kPa)	水泥浆内摩擦角(°)
锚索	60	600	27.5	500	20

3.1. 平面滑动边坡锚索支护力学特性分析

选取的岩质边坡位于如美水电站中坝址左岸, 坡角为 53°, 向 258°方向倾斜。岩体类型主要为英安岩, 卸荷不明显, 属于弱风化岩体。该边坡的破坏模式为平面滑动, 潜在滑移面为边坡岩体弱风化上带的下限线, 倾向为 238°, 倾角为 30°, 内摩擦角为 23°。拟采用预应力锚索进行支护, 经计算最优锚固竖直角 θ 和水平角 α 分别为 15.22°和 -11.09°, 间距设计为 4 × 4 m 布置, 单根锚索轴向拉力的设计值为 500 kN。采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对该边坡进行建模, 岩体采用库仑 - 摩尔本构模型; 滑动面采用库仑模型; 锚索采用 cable 结构单元, 且对其自由段和内锚固段进行区分, 约束边坡模型的各侧面和底面。所建边坡及锚索支护模型如图 3 所示。

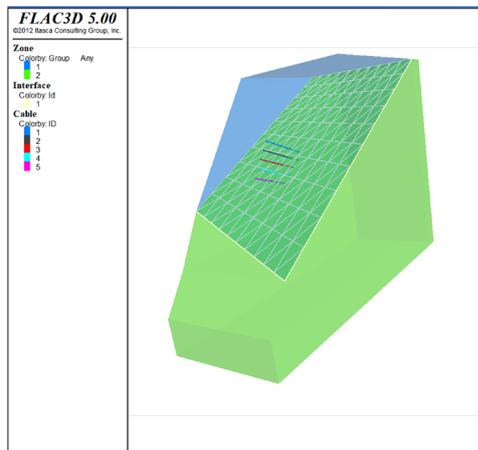


Figure 3. Slope and anchor cable support model
图 3. 边坡锚索支护模型

依据《建筑边坡工程技术规范》，锚索内锚固段的长度为 7.528 m。而用于加固的五根锚索自由段的长度至下而上分别为 16.7 m、19.1 m、21.4 m、23.8 m 和 26.1 m。各锚索的轴力分布情况及锚固体的应力分布情况如图 4 所示。

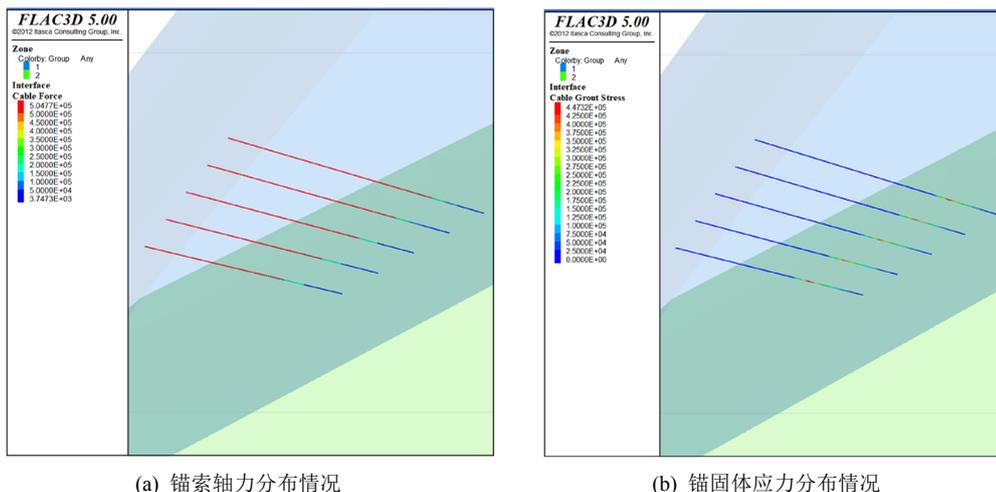


Figure 4. Analysis of mechanical characteristics of anchor cables with different free lengths in plane sliding
图 4. 平面滑动不同自由段长度锚索力学特性分析

由图 4(a)分析可知，平面滑动边坡支护的各根锚索在不同自由段长度下轴力分布规律基本一致，自由段的轴力为一定恒定值，内锚固段的轴力在与自由段的接触点最大，随着距离接触点的距离增大，锚索的轴力逐渐减小，在锚索远端趋近于零，这与以往研究成果的结果是相同的，因此自由段的长度对平面滑动边坡锚索轴力分布规律的影响并不明显。而由图 4(b)分析可知，在不同自由段长度下，各根锚索锚固段的应力分布规律也基本相同，自由段并无砂浆体，锚固体的应力分布为 0；而锚索内锚固段应力在距锚固段起点很小的距离达到峰值，呈集中于前端向末端逐渐减小并趋于零的单峰曲线分布，这与文献[6]中的研究成果分布趋势是相同的，因此自由段的长度对锚索锚固段应力分布规律的影响也并不明显。考虑到锚索支护时的成本，平面滑动边坡锚索布置时可在保证自由段长度大于 5 m 且超过滑裂面 1.5 m 的条件下，尽量在滑坡底部进行加固，以减小锚索支护时的总用量与施工长度，降低边坡的支护费用。

3.2. 楔形体滑动边坡锚索支护力学特性分析

选取的岩质边坡也位于如美水电站中坝址左岸，地面坡度 53° ，向 125° 方向倾斜。基岩为英安岩，潜在滑动面包括一组岩层面和一组节理面，岩层面倾向/倾角分别为 $183^\circ/33^\circ$ ，节理面倾向/倾角分别为 $87^\circ/44^\circ$ 。边坡拟采用预应力锚索进行支护，依据文献[2]可得锚固垂直角 θ 和水平角 α 分别为 16.20° 和 9.36° ，间距设计为 $4 \times 4 \text{ m}$ 梅花形布置，单根锚索轴向拉力设计值为 500 kN 。采用 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 数值模拟软件对该边坡进行建模，所建边坡及锚索支护模型如图 5 所示。

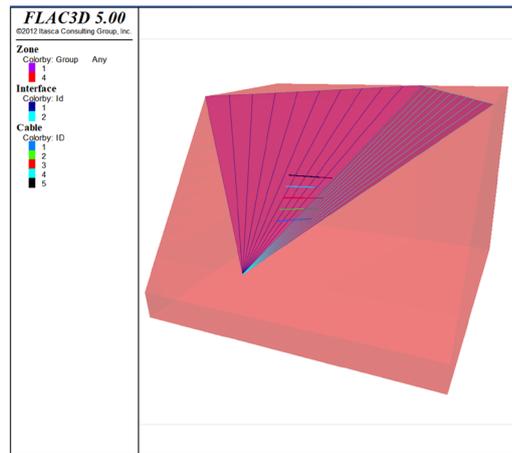


Figure 5. Slope and anchor cable support model
图 5. 边坡锚索支护模型

依据《建筑边坡工程技术规范》，用于加固的五根锚索内锚固段的长度也为 7.528 m ，自由段的长度至下而上分别为 11.8 m 、 14.7 m 、 16.2 m 、 17.7 m 和 19.2 m 。各锚索的轴力分布情况及锚固体的应力分布情况如下图 6 所示。

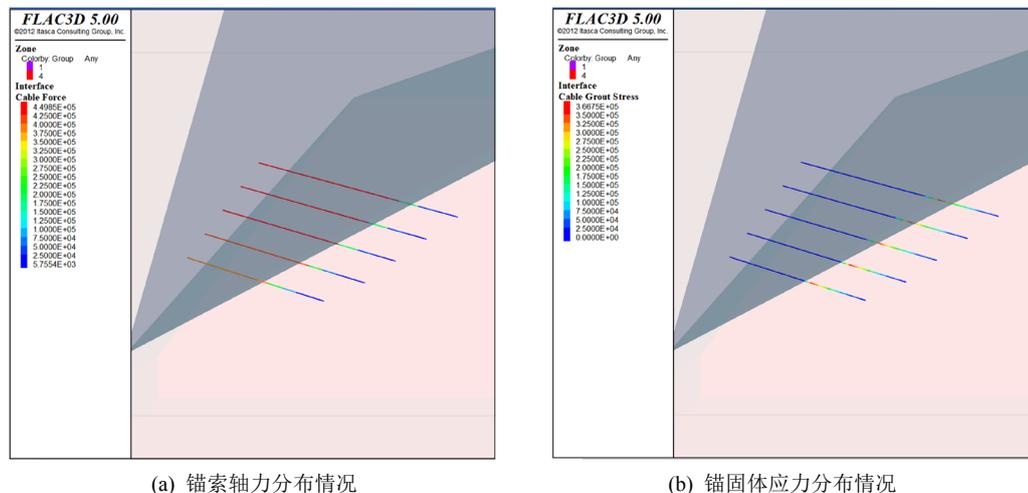


Figure 6. Analysis of mechanical characteristics of anchor cables with different free lengths in wedge sliding
图 6. 楔形体滑动不同自由段长度锚索力学特性分析

由图 6(a) 分析可知，楔形体滑动边坡支护的各根锚索在不同自由段长度下轴力分布规律也基本一致，自由段的轴力为一定恒定值，内锚固段的轴力在与自由段的接触点最大，随着距离接触点的距离增大，

锚索的轴力逐渐减小,在锚索远端趋近于零,这与以往研究成果的结果是相同的。但楔形体滑动边坡在不同自由段长度(不同支护高度)下显示为由支护上方向支护下方最大轴力(自由段上的轴力)逐渐减小的趋势,因此对于楔形体边坡而言,预应力张拉实施之后扣除各种损失剩余的有效预应力(锚固力)会随着支护高度的降低而略微减小,即锚索预拉力的损失率会随着支护高度的降低而增高,这在楔形体边坡锚索支护设计中应予以考虑。而由图 6(b)分析可知,在不同自由段长度下,各根锚索锚固段的应力分布规律也基本相同,自由段并无砂浆体,锚固段的应力分布为 0;而锚索内锚固段应力在距锚固段起点很小的距离达到峰值,呈集中于前端向末端逐渐减小并趋于零的单峰曲线分布,这与文献[6]中的研究成果分布趋势是相同的,因此自由段的长度对锚索锚固段应力分布规律的影响也并不明显。考虑到锚索支护时的成本,楔形体滑动边坡锚索布置时应在保证自由段长度大于 5 m 且超过滑裂面 1.5 m 的基础上,充分考虑锚索因支护高度降低而造成的自由段轴力损失现象,以保证边坡支护满足设计要求。

4. 结论

本文通过空间几何分析完善了传统岩质边坡锚索支护时自由段长度的求解公式,并通过数值分析探究了不同自由段长度锚索轴力和应力等力学特性的分布规律,可得出以下结论:

1) 通过空间几何分析,对锚索处于不稳定岩土层中的长度计算公式进行了推导;并结合《建筑边坡工程技术规范》中对锚索自由段长度的相关规定,对三维支护下锚索自由段总长度 L_{fs} 的求解公式进行了修正,有效地解决了平面滑动边坡坡面与滑动面走向存在夹角时和楔形体滑动两种破坏模式下锚索自由段长度求解难的问题。

2) 采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件分别建立两种破坏模式边坡的三维地质模型,在锚索内锚固段长度不变的情况下,通过调整锚索的支护高度改变其自由段长度研究了锚索的力学特性,发现锚索自由段轴力最大且为一定值,应力分布恒为 0;同时还发现锚索自由段长度变化,对平面滑动边坡锚索轴力分布规律和锚固段应力分布规律及楔形体边坡锚固段应力分布规律的影响并不明显,但对楔形体边坡锚索轴力分布会有一定的影响。

3) 通过两种破坏模式下不同自由段长度锚索力学特性分析,考虑锚索支护时的成本,建议平面滑动边坡锚索布置时可在保证自由段长度大于 5 m 且超过滑裂面 1.5 m 的条件下,尽量在滑坡底部进行加固,以减小锚索支护时的总用量与施工长度,降低边坡的支护费用;而楔形体滑动边坡锚索布置时应在保证自由段长度大于 5 m 且超过滑裂面 1.5 m 的基础上,充分考虑锚索因支护高度降低而造成的自由段轴力损失现象,以保证边坡支护满足设计要求。

基金项目

本研究得到科研项目滑坡地质灾害防控与应急处置关键技术研究的资助,为中南工程咨询设计集团有限公司资助的科研项目。

参考文献

- [1] 郑孝玉. 滑坡预报研究方法综述[J]. 世界地质, 2000, 19(4): 370-374.
- [2] 安彩龙, 梁焯, 王亮清, 等. 岩质边坡楔形体锚索加固方向角三维优化设计[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 2765-2772.
- [3] Tang, H.M., Wasowski, J. and Juang, C.H. (2019) GeoHazards in the Three Gorges Reservoir Area, China—Lessons Learned from Decades of Research. *Engineering Geology*, 261, Article ID: 105267. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105267>
- [4] 郑全明. 拉力型土锚最优长度及最大极限承载力的确定[J]. 西部探矿工程, 2000(2): 27-28.
- [5] 张发明, 刘宁, 陈祖煜. 预应力锚索内锚段粘结强度及长度的确定[J]. 水利水电科技进展, 2002, 22(3): 1-3.

-
- [6] 肖世国, 周德培. 非全长粘结型锚索锚固段长度的一种确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1530.
- [7] 张德圣, 姜玉松, 林舸, 等. 数值模拟法确定锚固段长度[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2010, 30(3): 32-35.
- [8] Xiong, T.B., Jin, Q.J., Hong, S.Y., *et al.* (2011) Analysis on Anchorage Length of Compression Anchor. *Advanced Materials Research*, **255-260**, 345-349. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.255-260.345>
- [9] Li, C.D., Wu, J., Wang, J., *et al.* (2015) Layout and Length Optimization of Anchor Cables for Reinforcing Rock Wedges. *Bulletin of Engineering Geology & the Environment*, **75**, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10064-015-0756-3>
- [10] Ren, F., Wu, S., Liu, Y., *et al.* (2017) Study on Effective Anchorage Length of Anchor Cable Based on Gauss's Function. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **94**, Article ID: 012203. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/94/1/012203>
- [11] 高毅博. 预应力锚索锚固段应力分布与锚固段长度研究[J]. 山西建筑, 2019, 45(9): 58-59.
- [12] 岳伟伟. 不同自由段长度预应力锚索力学特性分析[J]. 采矿技术, 2013, 6(13): 31-34.
- [13] 刘桂宏, 罗斌. 一种确定预应力锚索在地下工程支护设计中自由段长度的方法[J]. 公路交通技术, 2014(2): 97-98, 102.
- [14] 程良奎, 张培文, 王帆. 岩土锚固工程的若干力学概念问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 668-682.
- [15] 熊文林, 何则干, 陈胜宏. 边坡加固中预应力锚索方向角的优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2260-2265.
- [16] 重庆市城乡建设委员会. 建筑边坡工程技术规范(GB50330-2013) [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.