

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0034

预应力锚索加固高陡边坡机制探讨

李 剑, 陈善雄, 余 飞, 姜领发, 戴张俊

(中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 预应力锚索加固边坡是提高边坡稳定性的重要手段。弄清预应力锚索加固边坡的机制对于指导边坡加固设计具有重要的理论意义。通过建立高陡边坡计算模型, 不断提高边坡岩土体强度折减系数, 得到了边坡坡脚位移及预应力锚索内力变化规律, 并结合预应力锚索加固岩体应力分布规律, 得到了有益的结论: (1) 边坡岩土体强度折减系数超过边坡安全系数后, 预应力锚索内力开始迅速增加, 越靠近坡脚的预应力锚索, 内力增加越明显, 可以监测坡脚处锚索内力变化, 评价边坡稳定状态; (2) 对于高陡边坡, 绝大部分预应力锚索并不能提高潜在滑动面上的压应力, 不能提高滑动面的抗剪强度; (3) 预应力锚索加固高陡边坡的主要机制在于限制边坡潜在滑动体的位移。

关 键 词: 高陡边坡; 预应力锚索; 加固机制; 强度折减法

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2020) 02 - 0707 - 07

Discussion on mechanism of reinforcing high and steep slope with prestressed anchor cable

LI Jian, CHEN Shan-xiong, YU Fei, JIANG Ling-fa, DAI Zhang-jun

(State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: Prestressed anchor cable reinforcement is an important way to improve slope stability. Understanding the mechanism of reinforcement of slope by prestressed anchor cables is of great theoretical significance for guiding the design of slope reinforcement. Based on the calculation model of the high and steep slope, through continuously improving the strength reduction coefficient of rock and soil mass, we obtained the variation law of the displacement of slope foot and internal force of prestressed anchor cables. According to the stress distribution law of rock mass reinforced by prestressed anchor cables, some useful conclusions are drawn. When the strength reduction coefficient of rock and soil mass exceeds the safety factor of the slope, the internal force of prestressed anchor cables increases rapidly. The internal force is obvious when it is close to the foot of the slope. The change of internal force of anchor cables at the foot of slope can be monitored for evaluating the stability. For high and steep slopes, most of the prestressed anchor cables can not improve the compressive stress on the potential sliding surface and the shear strength of the sliding surface. The primary mechanism of the prestressed anchor cables to reinforce high and steep slopes is to control the displacement of the potential sliding body of the slope.

Keywords: high and steep slope; prestressed anchor cable; reinforcement mechanism; strength reduction method

1 引 言

预应力锚索是加固边坡的重要技术手段。作为一种主动加固技术, 预应力锚索可以改善边坡表面岩土体应力状态, 限制边坡表面岩土体变形, 提高边坡稳定性。预应力锚索对于边坡的加固效果已经被众多工程应用所证实^[1-3]。

多年以来, 工程界的学者和工程师们着力于研究预应力锚索的加固作用和机制, 以求能够更合理地将预应力锚索应用到工程实际中, 使之起到更好的加固效果。理论分析方面, 刘才华等^[4]将锚索预应力考虑到传递系数法中, 认为预应力为土条底部提供了压应力, 提高了土条的抗滑力; 张发明等^[5]指出预应力锚索为边坡提供了抗滑力, 并从整个滑

收稿日期: 2019-01-07

修回日期: 2019-04-29

基金项目: 湖北省交通厅科技项目 (No. 2016-600-1-1)

This work was supported by the Technology Project of Department of Transportation of Hubei Province (2016-600-1-1).

第一作者简介: 李剑, 男, 1983 年生, 博士, 副研究员, 主要从事岩土工程稳定性方面的研究。E-mail: lij@whrsm.ac.cn

体受力角度分析了预应力锚索加固边坡的稳定性。数值分析方面,丁秀丽等^[6]通过数值仿真试验,研究了预应力锚索张拉过程中岩体内的应力分布特征,解释了三峡船闸高边坡在预应力锚索加固作用下稳定性提高的原因;李铀等^[7]通过预应力锚索锚固效应的仿真试验与数值模拟研究,揭示了预应力锚索锚固技术的深层次的普适的工作机制;李忠等^[8]提出基于滑面上应力控制的边坡主动加固方法,从侧面反映出预应力锚索的加固作用在于恢复边坡岩土体的应力状态;Yang等^[9]提出了基于应力和位移场的预应力锚索加固边坡优化设计方法,指出预应力锚索的作用在于改善边坡岩土体应力状态,进而控制边坡变形。

综上所述,可以看到,目前对于预应力锚索加固边坡机制的研究多从受力状态的角度出发,一是认为预应力锚索直接增加了边坡的抗滑力,从而提高了边坡稳定性;或是认为预应力锚索改善了边坡表面一定范围内岩土体的应力状态,使边坡变形得到控制,从而提高了边坡稳定性。但是,总结现有的预应力锚索加固边坡机制的成果,可以发现,锚索预应力的传递深度有限,不能改善边坡深部岩土体的应力状态,特别是对高陡边坡这个现象更加明显。也就是说,对于滑动面较深的边坡来讲,锚索预应力不能明显提高滑动面上的压力,不能改善滑体的应力状态,也就不能提高滑体的抗剪强度,并且能提供的抗滑力也较为有限,因此,将应力状态的改善作为边坡变形减小、边坡稳定性提高的根本原因似有不妥。

为了更清楚地解释预应力锚索加固边坡的深层次机制,本文利用FLAC^{3D}建立了高陡边坡计算模型,拟从数值仿真的角度加以研究,以便为预应力锚索加固边坡稳定性分析和预应力锚索边坡加固设计提供更符合实际的指导。

2 预应力锚索加固边坡安全系数

2.1 数值仿真模型

某岩质边坡坡度 80° ,高度44.5 m,岩质为弱风化灰岩。由于边坡坡脚处有一跨峡谷高速公路桥

桥墩,为保证桥梁安全,该岩质边坡采用预应力锚索加固。地质勘察资料显示,该边坡地质条件较好,岩质较完整,但是,为了研究预应力锚索的加固机制,采用FLAC^{3D}强度折减法预先计算了边坡失稳的潜在滑动面,以其作为危险源来详细研究预应力锚索的作用。预应力锚索锚固段长度为10 m,预应力为500 kN,锚索从坡脚至坡顶编号为1~15。

数值仿真模型根据图1所示的地质模型、利用FLAC^{3D}建模,边坡分为两部分,潜在滑动面以上部分和潜在滑动面以下部分,如图2所示。潜在滑动面按无厚度的结构面考虑。计算模型参数如表1所示。

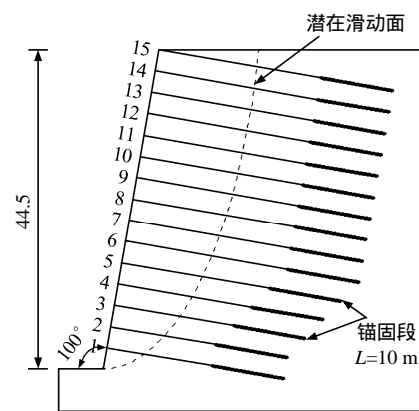


图1 某岩质边坡示意图

Fig.1 Schematic of a rock slope

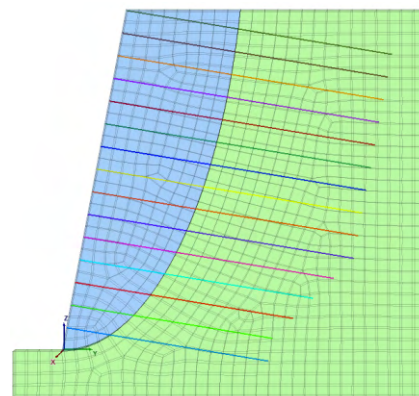


图2 某岩质边坡数值模型

Fig.2 Numerical model of a rock slope

表1 数值计算参数表

Table 1 Parameters for numerical modelling

材料类型	弹性模量 / GPa	泊松比	黏聚力 / kPa	摩擦角 / ($^\circ$)	法向刚度 / (kN · m)	切向刚度 / (kN · m)	横截面积 / m ²	屈服强度 / kN	锚固周长 / m
弱风化灰岩	25	0.23	1 000	40	-	-	-	-	-
结构面	-	-	0	40	2.0×10^6	2.0×10^6	-	-	-
锚索	200	0.20	-	-	-	-	0.001 885	1 000	-
锚固体	-	-	100	30	-	2.0×10^6	-	-	0.408 4

2.2 边坡安全系数

2.2.1 数值方法确定边坡安全系数

目前，利用数值方法（有限元或有限差分）确定边坡安全系数主要有两种方式： 拐点法：按一定数值折减边坡岩土体强度参数，计算边坡坡脚位移，画出坡脚位移与强度折减系数的关系曲线，将该曲线的拐点（位移突变点）对应的强度折减系数作为边坡安全系数^[10]； 收敛法^[11]：按一定数值折减边坡岩土体强度参数，将计算能否收敛（FLAC^{3D}中以不平衡力是否小于 1.0×10^{-5} 作为收敛标准）作为边坡稳定的控制标准，刚好收敛对应的强度折减系数作为边坡稳定的安全系数。

2.2.2 数值方法确定的边坡安全系数

图 3 为无预应力锚索加固时，边坡坡脚位移与边坡安全系数的关系曲线。利用拐点法可知，边坡安全系数 1.0 对应的是曲线的拐点，当安全系数大于 1.0 时，边坡坡脚位移迅速增大，说明在无预应力锚索加固时，边坡处于极限稳定状态，安全系数 1.0。

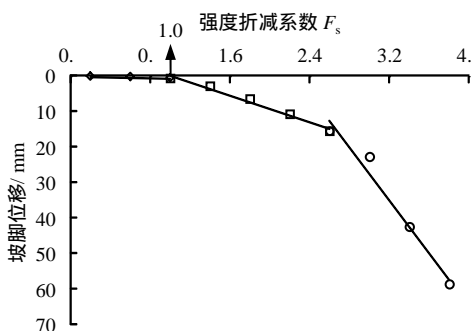


图 3 无预应力锚索边坡坡脚位移与强度折减系数关系曲线

Fig.3 Relationship between the displacement of slope foot without prestressed anchor cable and the strength reduction factor

图 4 为拐点法计算的预应力锚索加固边坡坡脚位移与强度折减系数的关系曲线。可以看到，由于加入了预应力锚索，边坡的安全系数有较大提高，图中强度折减系数 1.8 的点对应曲线的拐点，当强度折减系数大于 1.8 时，边坡坡脚位移迅速增大，说明拐点法确定预应力锚索加固边坡安全系数为 1.8。

图 5 为收敛法计算得到的预应力锚索加固边坡坡脚位移与强度折减系数的关系曲线。可以看到，曲线在强度折减系数为 1.59 处出现拐点，说明收敛法计算时，强度折减系数 1.59 为极限收敛状态，超过 1.59 后，模型不收敛，说明收敛法确定的预应力

锚索加固边坡安全系数为 1.59。

对比图 3~5 可知，在预应力锚索的加固作用下，边坡安全系数有较大提高，边坡由极限平衡状态提升到稳定状态。对于图 4 和图 5 可知，相较于拐点法，收敛法得到边坡安全系数更为保守，更偏于工程安全。

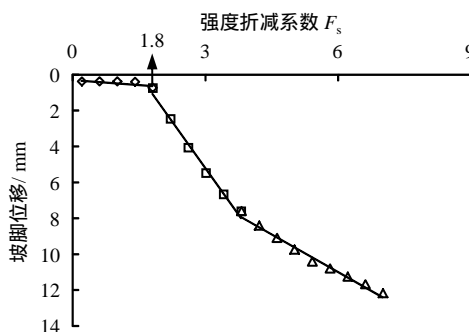


图 4 预应力锚索加固边坡坡脚位移与强度折减系数关系曲线（拐点法）

Fig.4 Relationship between the displacement of slope foot strengthened by prestressed anchor cable and the strength reduction factor (obtained by the inflected point method)

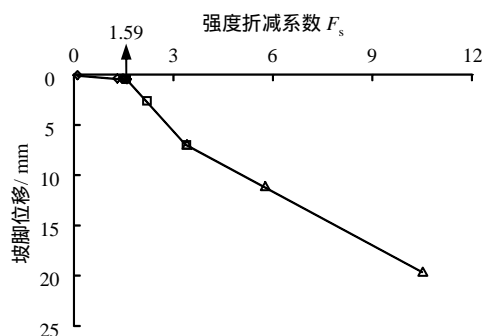


图 5 预应力锚索加固边坡坡脚位移与强度折减系数关系曲线（收敛法）

Fig.5 Relationship between the displacement of slope foot strengthened by prestressed anchor cable and the strength reduction factor (obtained by the convergence method)

2.3 不同折减系数下锚索内力变化

图 6 为不同的强度折减系数下锚索内力的变化。图 7 为锚索内力随折减系数增加的变化曲线。

从图 6 和图 7 可以看到，当岩体强度折减系数 F_s 小于安全系数 $K = 1.8$ 时，随着强度折减的增大，锚索内力并没有明显变化，说明边坡没有发生明显滑动。

对比不同锚索的内力变化可以发现，当安全系数 $K = 1.8 < \text{折减系数 } F_s < 3.0$ 时，靠近边坡坡脚位置的锚索内力有了较为明显的增大，图中 1~6 号锚索内力增大明显，而且越靠近边坡坡脚，锚索内力

增加越明显，即1号锚索内力变化最明显。另外，边坡上部的锚索内力变化不甚明显，但是，当强度折减系数大于3.0时，1~15号锚索的内力都有一个明显的增大。这种规律说明边坡滑动首先从坡脚开始，并逐渐向边坡上坡发展，当强度折减系数大于3.0时，滑动面贯通，边坡上部锚索内力增加，但是滑动体最大的位移仍然发生在靠近坡脚的位置，因此，仍然是越靠近坡脚的锚索内力增加越明显。

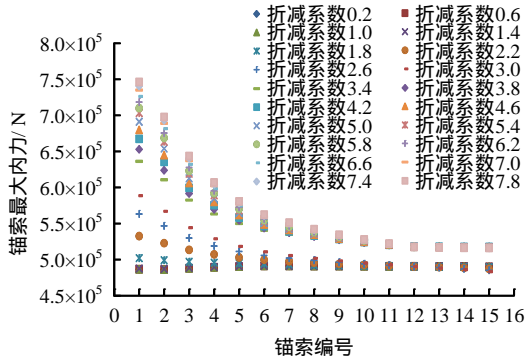


图6 不同强度折减系数下不同锚索内力变化
Fig.6 Variation of different cable inner forces under different strength reduction factors

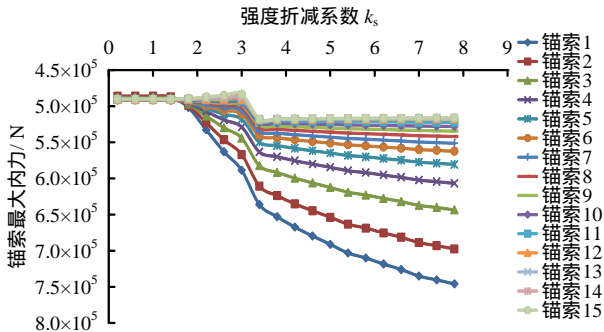


图7 不同锚索内力随强度折减系数的变化曲线
Fig.7 Variation curves of different cable inner forces with strength reduction factors

3 预应力锚索加固边坡机制探讨

3.1 预应力锚索边坡稳定一般评价方法

对边坡稳定性的评价一般采用条分法或传递系数法计算的边坡安全系数作为评价标准。无论是条分法还是传递系数法，均采用抗滑力与下滑力的比值作为边坡安全系数，计算式如下：

$$K = \frac{\sum R_n}{\sum T_n} = \frac{\sum (cl_i + W_i \cos \theta_i \tan \varphi)}{\sum W_i \sin \theta_i} \quad (1)$$

$$K = \frac{R_n + \sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j)}{T_n + \sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j)} \quad (2)$$

式中： K 为边坡安全系数； R_n 为抗滑力； T_n 为下滑力； c 为滑动面上黏聚力； l_i 为滑动面上第*i*个条块的长度； W_i 为第*i*个条块的自重； θ_i 为第*i*个条块底面与水平面的夹角； φ 为边坡岩土体内摩擦角； ψ_j 为计算第*i*条块剩余下滑力或抗滑力的传递系数。

以往在计算预应力锚索加固边坡安全系数时，往往将锚索预应力直接等效作用在破裂面上^[4-6]，如图8所示，预应力可以分解成垂直于破裂面的压力和平行于破裂面的力。虽然平行于破裂面的力可以分为两种情况，即 $\beta < 90^\circ - \alpha$ 时， T'_1 为抗滑力，有利于边坡安全； $\beta > 90^\circ - \alpha$ 时， T'_2 为下滑力，不利于边坡安全，但是从一般锚索施工角度来讲（小于 25° ），抗滑力的条块占绝大多数。对比平行破裂面的力和垂直于破裂面的压力可以明显看出， T' 明显小于 N' ，也就是说，按照目前计算预应力锚索边坡安全系数时，预应力对边坡稳定性的提高作用主要是在破裂面上提供了较大的压力，从而提高了条块底面的摩擦力，增加的摩擦抗滑力如式(3)所示。

$$T'_{N1 \text{ or } N2} = N'_{1 \text{ or } 2} \tan \varphi \quad (3)$$

式中： T'_N 为由破裂面上压力提供的抗滑力； N' 为垂直于破裂面的压力。

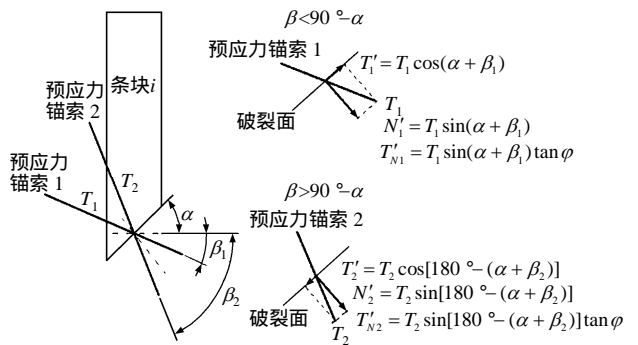


图8 传统方法考虑预应力锚索加固边坡作用示意图
Fig.8 Schematic of the reinforcement function of the prestressed anchor cable to the slope stability considered by the traditional method

3.2 预应力锚索加固围岩应力分布规律

图9为预应力锚索加固围岩应力分布计算模型。计算模型分为单锚模型和群锚模型，其中模型x方向和z方向长度均为20m，y方向长度为50m，预应力锚索长度均为30m，锚固段长度为10m，群锚模型中锚索间距为3m，锚索预应力为500kN。

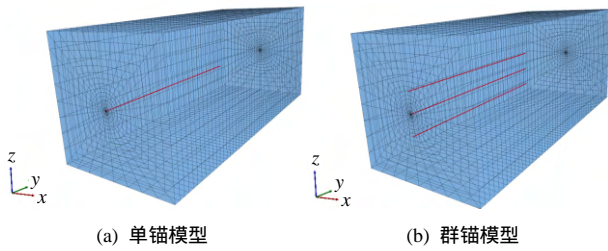


图 9 预应力锚索计算模型

Fig.9 Calculation model of the prestressed anchor cables

图 10、11 为锚索轴向压应力分布。从图 10 可以看到，在单锚情况下，自由段上由锚索预应力引起的围岩压应力由围岩表面向围岩深部传递并迅速减小，预应力引起的围岩表面最大压应力约为 280 kPa，锚索轴向上由预应力产生的压应力范围在 0~5 m（自围岩表面起算），压应力相对较大的范围集中在 0~1.5 m，超过 5 m 后，围岩几乎没有压应力。锚固段上，在预应力作用下，锚固段起始面前方 2 m 范围的围岩产生了一定的压应力，最大压应力约为 50 kPa，锚固段自起始面向深部的围岩受拉应力，范围约自锚固段起始面 0~3 m，拉应力最大值约 40 kPa。

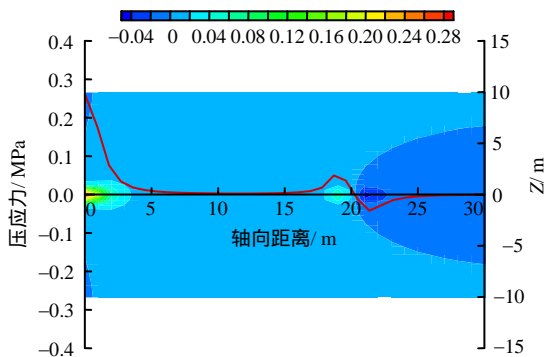


图 10 锚索轴向压应力分布（单锚）

Fig.10 Compression stress along the anchor cable axial direction (a single anchor cable)

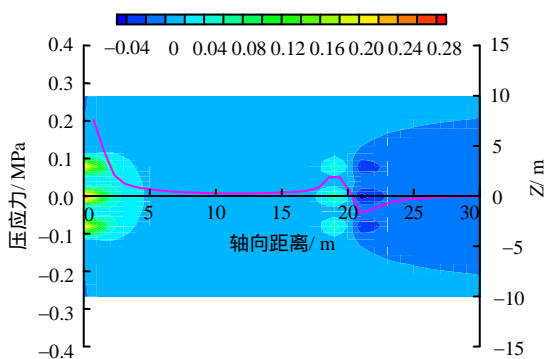


图 11 锚索轴向压应力分布（群锚）

Fig.11 Compression stress along the anchor cable axial direction (group anchor cables)

从图 11 可以看出，3 根锚索且锚索间距较大（3 m）的情况下，中心锚索轴向上，各锚索预应力产生的围岩应力范围重叠部分很小，因此，围岩的应力分布与单根锚索的情况并无太大差别。即使减小锚索间距，增大不同锚索引起的围岩应力重叠范围，锚索自由端轴向方向上，预应力产生的围岩压应力的范围也有限，超过锚定面 5 m 后，由预应力产生的围岩压应力很小，可以忽略不计。而锚固段前方的压应力区范围也很有限，超过锚固起始面前方 2 m 后，围岩压应力也很小，可以忽略不计。

图 12、13 为预应力锚索锚定面上围岩应力分布。从图 12 可以看出，单根锚索条件下，锚索预应力引起的围岩表面压应力范围在锚索中心向外 2 m 的圆形范围，压应力较大的区域为锚索中心向外 1 m 的圆形范围。

从图 13 可以看出，3 根锚索条件下，由于锚索预应力引起的围岩压应力范围有限，在 3 m 的间距下，预应力群锚引起的围岩压应力范围重叠部分很小。

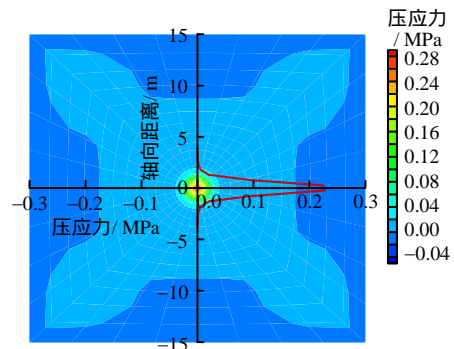


图 12 锚定面上压应力分布（单锚）

Fig.12 Compression stress on the anchoring surface (a single anchor cable)

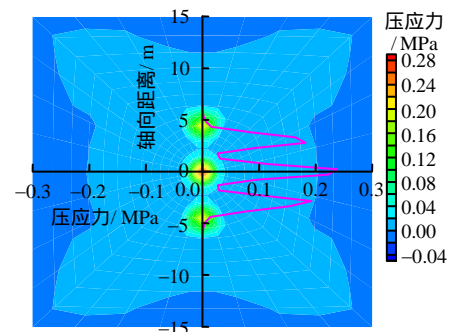


图 13 锚定面上压应力分布（群锚）

Fig.13 Compression stress on the anchoring surface (group anchor cables)

3.3 加固机制探讨

从上述介绍的传统预应力锚索边坡稳定评价方

法,以及预应力锚索加固围岩的应力分布规律,可以认识到:

(1)传统的条分法或传递系数法认为,预应力锚索加固边坡的机制有两个方面:一是提供了一定的抗滑力,二是提供了较大的破裂面上压应力,从而提高了破裂面的抗剪强度。

(2)从预应力锚索加固围岩的应力分布规律看,由锚索预应力引起的围岩中压应力范围有限,预应力产生的压应力范围主要有两个:一个是自锚定面向深部0~5 m的范围,一个是自锚固起始面向前0~2 m的范围,其他范围的围岩中几乎没有压应力。

对于预应力锚索设计,为了调动深部围岩的承载能力,锚索长度一般设计较长,穿过了边坡潜在滑裂面,因此,滑裂面所在的区域基本上位于没有压应力的区段,也就是说常规的预应力锚索无法提供破裂面上的压应力,即使有一点压应力也很小。所以从这个角度来讲,按照传统的条分法或传递系数法考虑预应力锚索的加固作用是不合理的。

除此之外,对于预应力锚索边坡加固机制的讨论多从改善边坡应力状态角度考虑,认为预应力锚索的作用是改善甚至恢复边坡岩土体的应力状态,从而达到提高边坡安全性的目的。如李忠等^[8]提出通过恢复滑面的应力状态加固边坡的设计方法, Yang等^[9]提出通过分析边坡应力场和变形场加固边坡的设计方法,都是基于这个认识提出的。但是,从预应力锚索加固围岩的应力分布可知,预应力锚索能改善或恢复的边坡应力状态的范围有限,特别是对于高陡边坡,滑面较深,这种认识显然已经不能解释预应力锚索加固边坡的真正机制。

丁秀丽等^[6]通过研究三峡船闸高边坡锚索的加固效果,提出了岩石锚固墙的概念,并认为锚固墙范围内的岩体力学性状劣化过程得到缓解,抑制了边坡岩石的变形,改善边坡的稳定性。这在一定程度上解释了开挖的高陡边坡在预应力锚索施工后稳定性提高的一部分原因,但是预应力锚索的加固作用并不单是缓解边坡表面压缩区内岩土力学性状劣化,毕竟边坡稳定的控制因素还是潜在滑动面是否滑动。

为进一步说明预应力锚索对边坡的加固机制,将没有预应力锚索加固边坡和有预应力锚索加固边坡的坡脚位移与岩体强度折减系数关系曲线,合并在一幅图中,并将坡脚处锚索内力增量随岩体强度折减系数的关系曲线绘入图中,见图14。

对比没有预应力锚索加固的边坡和有预应力锚

索加固的边坡在不同强度折减系数下坡脚的位移曲线可以看到,在相同的岩体强度折减系数下,预应力锚索加固边坡的坡脚位移更小,且折减系数越大,无预应力锚索支护的边坡坡脚位移与有支护的边坡坡脚位移差距越大。从图14可以看到,用拐点法和收敛法计算的预应力锚索加固边坡安全系数对应的坡脚位移分别是0.76 mm和0.47 mm,而在相同的强度折减系数下,无预应力锚索加固的边坡坡脚位移分别为4.2、6.0 mm,这说明预应力锚索有效限制了边坡潜在滑动体的滑移。

另一方面,对比不同岩体强度折减系数下坡脚处预应力锚索的内力增量曲线可以看到:当岩体强度折减系数小于1.59时,预应力锚索的内力增量并不明显;在折减系数超过1.59后,随着岩体强度折减系数的增加,预应力锚索的内力也逐渐开始增加;当折减系数达到边坡安全系数1.8后(以拐点法确定),预应力锚索内力增量达到了15 kN,锚索内力增量曲线开始有明显的增加速率,说明边坡开始滑移,而预应力锚索开始起到限制边坡滑移的作用。

综上所述,结合预应力加固围岩应力分布规律,笔者认为,对于高陡边坡,预应力锚索一方面改善了边坡表面压缩区内岩土体的应力状态,缓解了坡面岩土体劣化的趋势,但更主要的作用在于预应力锚索可以直接限制边坡的位移,降低了边坡滑动的趋势,进而提高了边坡的稳定性。因此,对于预应力锚索加固边坡稳定性的计算应该更多地从边坡位移的角度来评价,并计算相应的安全系数。

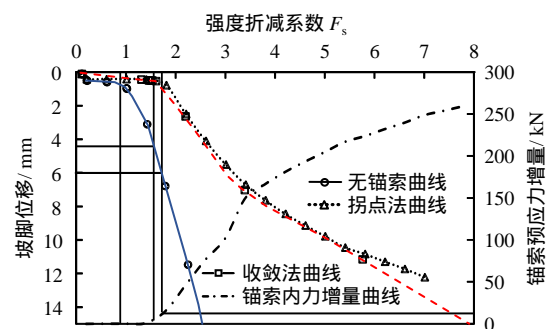


图14 高边坡坡脚位移及锚索内力与强度折减系数的关系曲线

Fig.14 Relationship between the high slope foot/ the cable inner force and the strength reduction factor

4 结论

通过建立高陡边坡计算模型,利用不同方法得到了边坡坡脚位移、预应力锚索内力与岩体强度折减系数之间的关系,对比研究了不同数值方法得到

了边坡安全系数的差异，以及在岩体强度折减过程中锚索内力的变化过程。同时，通过研究预应力锚索加固岩体应力分布规律，阐释了预应力锚索加固高陡边坡的主要机制，得到结论如下：

(1) 随着边坡岩土体强度折减系数的增加，当超过边坡安全系数时，预应力锚索内力开始逐步增加，越靠近坡脚处，锚索内力增量越明显，说明边坡滑动首先从坡脚开始，并逐渐向上延伸。当岩土体强度折减系数超过 3.0 后，锚索内力有一个明显的增加，说明边坡潜在滑面贯通，靠近坡脚处锚索内力增加更加明显。因此，可以通过监测坡脚处锚索内力来判断边坡是否存在滑动风险。

(2) 锚索预应力段中部较长的范围内，边坡岩土体的压应力很小，也就是说对于高陡边坡来讲，大部分预应力锚索不能为潜在滑面提供压应力。从这个角度讲，预应力锚索对边坡的加固机制不在于提高潜在滑面的抗剪强度。

(3) 相同的强度折减系数下，相比没有预应力锚索的边坡，预应力锚索加固边坡的坡脚位移更小，并且强度折减系数越大，这种差异越明显。同时，岩土体强度折减系数超过安全系数后，预应力锚索内力增量增加开始明显，这说明对于高陡边坡，预应力锚索加固边坡的主要机制是阻止了边坡滑动体的滑动，从而提高了边坡的稳定性。

参 考 文 献

- [1] 张玉芳, 袁坤. 双锚固段新型锚索锚固性能研究及工程应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(增刊 1): 461-468.
ZHANG Yu-fang, YUAN Kun. Experimental study and application of anchor performance of a new type anchor cable with double anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(Suppl.1): 461-468.
- [2] 朱海西. 预应力锚索在黄土地层的锚固效果研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2017.
ZHU Hai-xi. Research on anchoring effect of prestressed anchor cable in loess formation[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2017.
- [3] 蒋泽锋, 张戈, 朱大勇, 等. 锚固力作用下的边坡临界滑动场法研究与应用[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2799-2806, 2837.
JIANG Ze-feng, ZHANG Ge, ZHU Da-yong, et al. Critical sliding field method for slope under anchorage force and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(7): 2799-2806, 2837.
- [4] 刘才华, 陈从新, 冯夏庭. 土质边坡预应力锚索设计方法[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1349-1352.
LIU Cai-hua, CHEN Cong-xin, FENG Xia-ting. Discussion on design method of prestressed cable for soil slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(8): 1349-1352.
- [5] 张发明, 刘宁, 赵维炳, 等. 岩质边坡预应力锚索加固的优化设计方法[J]. 岩土力学, 2002, 23(2): 187-190.
ZHANG Fa-ming, LIU Ning, ZHAO Wei-bing, et al. Optimizing design method of prestressed cables in reinforcing rock slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(2): 187-190.
- [6] 丁秀丽, 盛谦, 韩军, 等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980-988.
DING Xiu-li, SHENG Qian, HAN Jun, et al. Numerical simulation testing study on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(7): 980-988.
- [7] 李铀, 白世伟, 朱维申, 等. 预应力锚索锚固效果的仿真试验与数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 1): 260-264.
LI You, BAI Shi-wei, ZHU Wei-shen, et al. Simulation test and numerical simulation of anchoring effect of prestressed cable[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Suppl.1): 260-264.
- [8] 李忠, 朱彦鹏, 余俊. 基于滑面上应力控制的边坡主动加固计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 979-989.
LI Zhong, ZHU Yan-peng, YU Jun. Calculation methods for active slope reinforcement based on stress control in critical slip surface[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(5): 979-989.
- [9] YANG Guang-hua, ZHONG Zhi-hui, ZHANG Yu-cheng, et al. Optimal design of anchor cables for slope reinforcement based on stress and displacement fields[J]. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, 2015, 7(4): 411-420.
- [10] 李宁, 郭双枫, 姚显春. 再论岩质高边坡稳定性分析方法[J]. 岩土力学, 2018, 29(2): 397-416.
LI Ning, GUO Shuang-feng, YAO Xian-chun. Further study of stability analysis methods of high rock slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 29(2): 397-416.
- [11] 李剑, 陈善雄, 余飞. 基于最大剪应变增量的边坡潜在滑动面搜索[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 371-378.
LI Jian, CHEN Shan-xiong, YU Fei. A method for searching potential failure surface of slope based on maximum shear strain increment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(Suppl.1): 371-378.