

递控式锚杆室内试验与光弹试验对比研究*

孟进宝, 郑静, 杨永鹏, 梁龙龙, 安孟康
(中铁西北科学研究院有限公司, 兰州 730000)

摘 要:目前,国内外专家学者对锚杆的传力机制和受力特性方面做了大量的研究工作,但他们的研究主要集中在锚固段,而对于锚杆自由段的研究很少,特别是锚杆自由段地层(被加固体地层)的充分利用问题研究更少。在前人研究的基础上,笔者研究开发了可充分利用被加固体地层(自由段)孔壁粘结强度的递控式锚杆新结构。通过对全长粘结型锚杆和递控式锚杆相关室内试验和光弹试验对比分析,深入研究了递控式锚杆的受力特性和加固效果,以及孔壁粘结强度的分布规律。相关研究成果对实际工程,尤其是暴雨、地震等灾后病害边坡的抢险加固具有重要的理论和应用价值。

关键词:递控式锚杆;室内试验;光弹试验;研究

中图分类号:TU432 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-0836(2017)03-0624-07

Contrast Research on Laboratory Test and Photoelastic Test of
Delivery Controlled Anchor

Meng Jinbao, Zheng Jing, Yang Yongpeng, Liang Longlong, An Mengkang
(Northwest Research Institute Co. Ltd of C.R.E.C, Lanzhou 730000, P.R. China)

Abstract: At present, domestic and foreign experts and scholars have done a lot of research on the force transmission mechanism and the mechanical characteristics of anchor, but their research is mainly concentrated on the anchoring section, and for the free segment of anchor research is seldom, especially research on making full use of the free segment of anchor formation (with solid formation) is rarely. On the basis of previous studies, a new structure of delivery controlled anchor is researched and invented, which can take full advantage of the adhesive strength between mortar and soil or rock of reinforced ground. Through the contrast analysis of fully bonded anchor and delivery controlled anchor laboratory test and photoelastic test, so as to perform in-depth research on the mechanical characteristics and reinforcement effect of delivery controlled anchor and the bond strength distribution of hole wall. The relevant research results has significant theoretical and applied value on practical engineering, especially the rainstorm, earthquake and other disaster slope diseases rescue and reinforcement.

Keywords: delivery controlled anchor; laboratory test; photoelastic test; research

0 引言

近年来,程良奎、闫莫明等国内外专家学者和工程设计人员在锚杆的传力机制和受力特性方面做了大量的研究工作^[1-4]。他们的研究工作主要

集中在锚杆锚固段,包括锚杆锚固段粘结应力、轴力等。其研究表明,锚杆粘结应力沿锚固段分布并不均匀,而是出现了渐进性破坏的现象。到目前为止,对锚杆自由段的研究很少^[5-10]。本文在前人研究的基础上,主要研究被加固体地层(自由

* 收稿日期:2016-12-14(修改稿)
作者简介:孟进宝(1988-),男,甘肃定西人,硕士,工程师,主要从事岩土工程、地下工程等领域的科研工作。
E-mail:912805719@qq.com。
基金项目:科技部科研院所技术开发研究专项资金项目(2009EG123201)

段)的受力以及孔壁粘结强度的分布规律。

项目组研究开发了可充分利用被加固体地层(自由段)孔壁粘结强度的递控式锚杆新结构^[11-12]。该锚杆通过在被加固体地层(自由段)交替设置粘结段和无粘结段来改变自由段孔壁粘结应力的分布,从而使锚杆自由段荷载传递均匀。一方面,在产生整体变形的岩土体内部,可以分段利用被加固体地层(滑体或潜在滑动体)的自身锚固性能反向锚固,有效利用自身锚固力;另一方面,可将多级破坏坡体的拉力逐段及时传递至深部稳定地层(锚固段),限制边坡的进一步变形与渐进性破坏。因此,递控式锚杆可以避免锚杆在受力过程中产生较大的应力集中,锚杆受力更加合理,达到控制滑面发展、限制边坡变形以及减小反力结构而快速治理边坡病害的作用。

1 递控式锚杆技术特点

递控式锚杆与非预应力锚杆、预应力锚杆(索)相比,具有以下技术特点:

(1)递控式锚杆与预应力锚杆(索)与非预应力锚杆相比,因其充分利用了被加固体地层(滑体或潜在滑动体)的抗剪强度,可以大大减小外锚结构物尺寸甚至取消外锚结构物,从而缩短了外锚结构物施工所占时间,达到快速治理的目的。

(2)递控式锚杆与预应力锚杆(索)相比,预应力锚杆(索)需要张拉锁定后才能发挥作用,而递控式锚杆注浆后即可随着注浆体的凝固和强度的提高而发挥作用,因而在同等条件下递控式锚杆可尽早发挥作用。递控式锚杆与非预应力锚杆相比,递控式锚杆受力时自由段地层岩土体与注浆体之间的粘结应力比非预应力锚杆均匀,在同等条件下递控式锚杆的加固效果更好,发挥的作用更大。

(3)递控式锚杆与非预应力锚杆相比,无论是自由段地层产生由前向后的牵引变形,还是产生由后向前的整体推动式滑移,推力或下滑力通过被加固体段各粘结单元和锚筋,及时传至锚固段地层,因而自由段地层的变形和变形范围均较小。

(4)因递控式锚杆可以大大减小外锚结构物尺寸甚至取消外锚结构物,所以,其布置灵活、施工方便,适用于地震灾后边坡的快速治理,特别是对小型边坡、高位崩塌落石的治理效果更佳。

2 递控式锚杆的结构形式和荷载传递机理

从理论上讲,递控式锚杆结构单元锚筋的数

量越多,自由段无粘结段设置相应越多,锚杆应力分散越明显,越能体现自身的优越性,但是由于实际的可操作性,单元锚筋的数量受到了限制。因此,本次试验递控式锚杆为两段控压,截面内部单元锚筋为两根同型号钢筋并排布设,两根单元锚筋与一根螺杆焊接再在头部采用螺帽连接,两根单元锚筋无粘结段长度按自由段总长度平均且依次错位布置(注:粗线表示无粘结段),无粘结段由PVC管内涂设黄油实现。递控式锚杆结构图如图1所示。

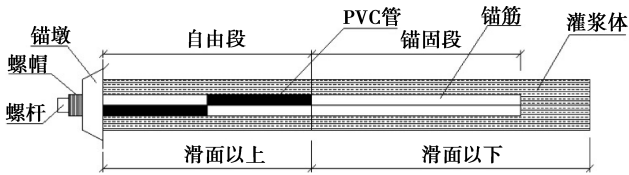


图1 递控式锚杆结构图

Fig. 1 Structure of delivery controlled anchor

递控式锚杆的锚头部位设置小型钢筋混凝土锚墩,螺杆穿过锚墩,由螺帽固定在锚墩上;也可采用钢板代替锚墩。需说明的是,若采用钢板施工,应采用细石混凝土或素混凝土现浇的方法对锚头进行密封防腐。递控式锚杆粘结应力沿长度方向的分布如图2所示。

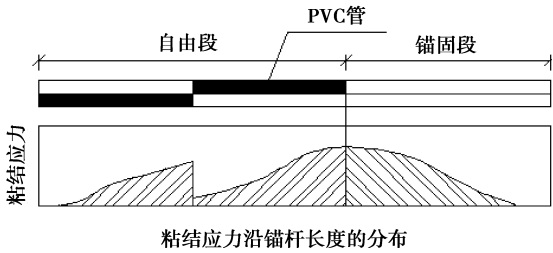


图2 递控式锚杆粘结应力沿锚杆长度方向的分布

Fig. 2 Distribution of bond stress along the anchor length on delivery controlled anchor

与此同时,为了体现递控式锚杆的优越性,可以比较递控式锚杆和全长粘结型锚杆粘结应力沿长度方向的分布。全长粘结型锚杆粘结应力沿长度方向的分布如图3所示。

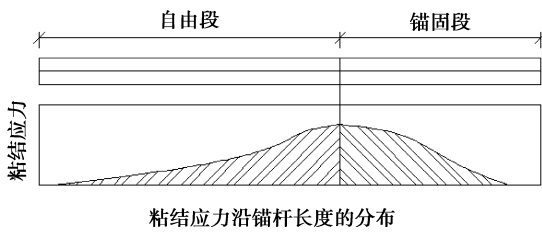


图3 全长粘结型锚杆粘结应力沿锚杆长度方向的分布

Fig. 3 Distribution of bond stress along the anchor length on fully bonded anchor

通过对图 2 和图 3 比较可知,全长粘结型锚杆粘结应力分布不均匀,呈单峰曲线形式,在自由段仅出现了一次峰值,且在滑面附近,应力集中现象较为明显。由于递控式锚杆在自由段交替设置了无粘结段,故该段只起到传递荷载的作用,使得自由段粘结应力出现了不同的峰值,锚杆的粘结应力得以分散,从而增加了峰值的长度区间,有效地避免了滑面应力集中现象。同时,递控式锚杆充分利用了被加固体地层(自由段地层)的抗剪强度,增加了锚杆的反向锚固作用,这也充分说明了递控式锚杆分段受力并发挥作用的特点。

3 递控式锚杆室内试验研究

为了分析递控式锚杆的受力特性,本文拟通过递控式锚杆和全长粘结型锚杆室内对比试验,研究递控式锚杆自由段的受力变形特征及其作用效果。本次试验所用试验箱长度为 140 cm,宽度为 80 cm,高度为 100 cm,如图 4 所示。



图 4 试验箱示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental box

3.1 试验分组

为了研究递控式锚杆加固边坡的效果及锚杆的受理与变形,以及锚杆数量的影响等,本次试验设计了 2 种不同的工况:

工况 1:1 组滑动面,2 根锚杆(1 根递控式锚杆、1 根全长粘结型锚杆)

工况 2:1 组滑动面,4 根锚杆(2 根递控式锚杆、2 根全长粘结型锚杆)

本次试验所用测试系统包括测试元件和数据采集系统。试验中采用的测试元件为应变片和百分表,应变片型号为 BX120-3AA,数据采集系统为 INV2312N 无线总线多功能静态应变测试系统,数据采集系统如图 5 所示。

为增强黄土材料滑床和滑体的整体性,试验中采用分层填筑,每层填筑厚度为 10 cm,试验前先



图 5 数据采集系统

Fig. 5 Data collection system

进行相关的室内击实试验,确定土体的最优含水率和最大干密度。然后按最优含水率将黄土拌和,为了防止模型土体含水率发生变化,及时进行土体的填筑,并控制好土体的压实度。

本试验采用人工设置滑面,滑面形状为圆弧形,采用双层塑料薄膜模拟,两层塑料薄膜之间涂撒滑石粉,目的是增强滑面的滑动性能。

本次试验递控式锚杆所用单元锚筋为两根空心铝管,铝管外径 10 mm,壁厚 1 mm。将空心铝管表面用砂纸打磨平整,在自由段和锚固段分别贴上应变片,然后用防水胶布对其进行防水处理,递控式锚杆自由段分段依次间隔设置自由单元和粘结单元进行分段处理,在自由单元锚筋表面涂设一层黄油,再外套一层 PVC 管。锚杆表面涂一层环氧树脂,目的是提高锚杆与土体的摩擦力。锚杆自由段分段情况和应变片布置如图 6、图 7 所示。

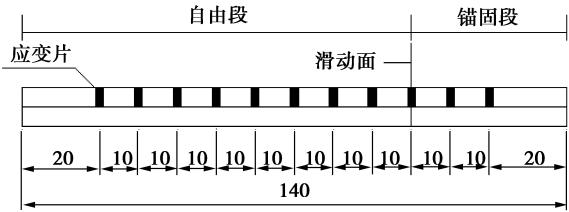


图 6 全长粘结型锚杆应变片布置图(单位:cm)

Fig. 6 Strain gauge layout on fully bonded anchor(unit:cm)

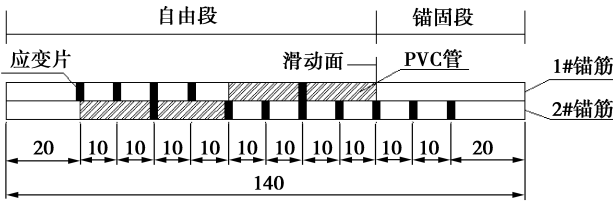


图 7 递控式锚杆应变片布置图(单位:cm)

Fig. 7 Strain gauge layout on delivery controlled anchor(unit:cm)

锚杆的布设分一排 2 根和一排 4 根两种情况。第一种情况,一排布设 2 根锚杆,锚杆间距为 27 cm,布设于中部,左侧一根为递控式锚杆,右侧

一根为全长粘结型锚杆,具体布置如图 8 所示。

第二种情况,一排布置 4 根锚杆,锚杆间距为 27 cm,均匀布置,左侧两根为递控式锚杆,右侧两根为全长粘结型锚杆,具体布置如图 9 所示。



图 8 一排两根锚杆的布置图
Fig. 8 Layout of two anchors in a row



图 9 一排四根锚杆的布置图
Fig. 9 Layout of four anchors in a row

边坡模型制作完成后,将边坡顶部表面用工具整平,为了使荷载均匀分布于边坡顶部整个土体表面,采用分级堆加铅袋的方法施加竖向荷载。具体加载装置如图 10 所示。



图 10 加载装置示意图
Fig. 10 Schematic diagram of loading device

3.2 试验结果与分析

由于直接测得的为锚杆锚筋的应变,且锚筋变

形为弹性变形,因而锚杆锚筋相应部位的应力由公式(1)计算求得。

$$\sigma = E\varepsilon \tag{1}$$

式中: σ 为锚杆的应力; E 为锚杆的弹性模量; ε 为锚杆的应变

锚杆的轴力由公式(2)计算求得:

$$F = \sigma A \tag{2}$$

式中: F 为锚杆的轴力(拉力); σ 为锚杆的应力; A 为锚杆的横截面积。

测试数据经过计算整理,工况一条件下两种不同锚杆沿长度方向的应力分布如图 11 和图 12 所示。

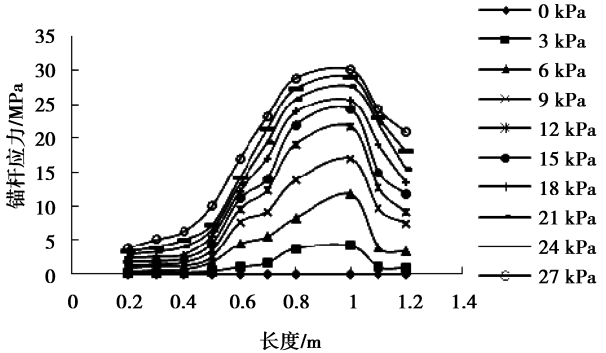


图 11 全长粘结型锚杆应力分布图
Fig. 11 Stress distribution of fully bonded anchor

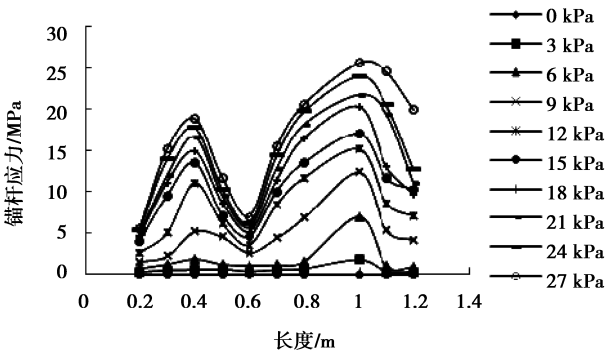


图 12 递控式锚杆应力分布图
Fig. 12 Stress distribution of delivery controlled anchor

由图 11 和图 12 可以看出,全长粘结型锚杆和递控式锚杆的应力最大值均发生在滑动面附近,全长粘结型锚杆的应力最大值为 30.03 MPa,而递控式锚杆的应力最大值为 25.69 MPa,较全长粘结型锚杆减小 14.5%,有效地改善了锚杆的应力集中现象;递控式锚杆应力分布在自由段出现两个峰值,较全长粘结型锚杆应力均匀,且分段发挥粘结作用,锚杆自由段孔壁粘结强度得到有效发挥。

图 13 为两种不同锚杆的锚头位移曲线图。由图可以看出,两种锚杆锚头位移随荷载的增加均增大,但递控式锚杆锚头位移最大值为 1.51 mm,略

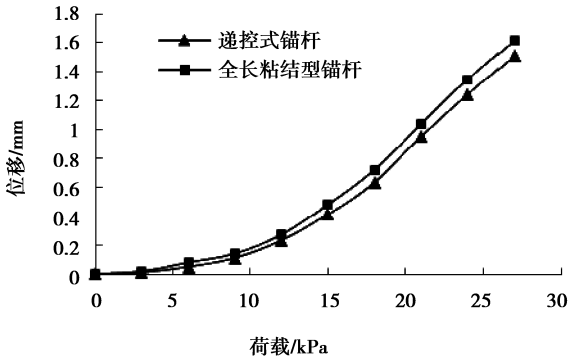


图 13 两种不同锚杆的锚头位移曲线

Fig. 13 Displacement of two different kinds of anchor head
小于全长粘结型锚杆锚头位移最大值 1.62 mm,分析原因主要是由于两种锚杆位于同一边坡模型中,且相距较近,相互受影响而差值较小。

根据测试数据经计算整理,工况二条件下两种不同锚杆沿长度方向的应力分布如图 14、图 15 所示。

由图 14、图 15 可以看出,全长粘结型锚杆和递控式锚杆的应力最大值均发生在滑动面附近,全长粘结型锚杆应力最大值为 24.15 MPa,而递控式锚杆应力最大值为 17.75 MPa,较全长粘结型锚杆减小 26.5%,有效地改善了锚杆的应力集中现象;递控式锚杆应力分布在自由段出现两段峰值,较全长粘结型锚杆应力均匀,且分段发挥粘结作用,锚杆自由段孔壁粘结强度得到有效发挥。同样,1 组滑动面 4 根锚杆与 1 组滑动面 2 根锚杆的情况相同,但由于锚杆数量的增多而单根锚杆承受荷载减小,递控式锚杆较全长粘结型锚杆应力最大值的降幅更大;全长粘结型锚杆应力最大值 4 根锚杆比 2 根锚杆降低 19.6%,递控式锚杆应力最大值 4 根锚杆比 2 根锚杆降低 30.9%,这也说明递控式锚杆的作用效果较全长粘结型锚杆好。

图 16 为两种不同锚杆的锚头位移曲线图,由图可以看出,两种锚杆锚头位移随荷载的增加均增大,递控式锚杆锚头位移最大值为 1.63 mm,小于全长粘结型锚杆锚头位移最大值 1.84 mm。但递控式锚杆锚头位移最大值与全长粘结型锚杆锚头位移最大值相差不大,分析原因同样是由于两种锚杆位于同一边坡模型中,且相距较近,相互受影响而造成的。

4 室内试验结果与光弹试验结果对比分析

项目组针对研究的递控式锚杆新型结构,应用

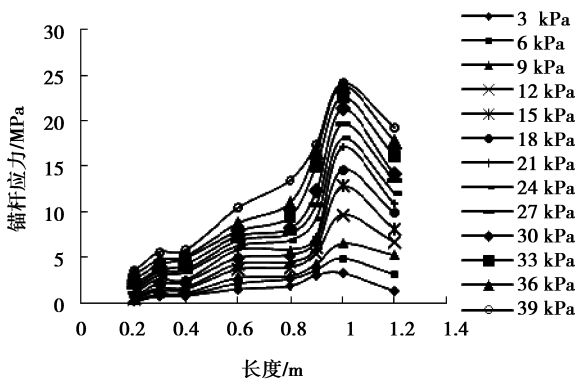


图 14 全长粘结型锚杆应力分布图

Fig. 14 Stress distribution of fully bonded anchor

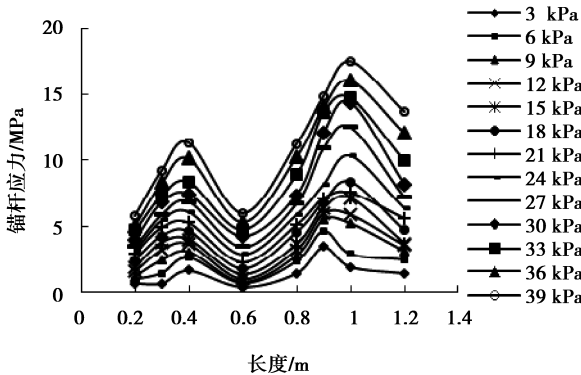


图 15 递控式锚杆应力分布图

Fig. 15 Stress distribution of delivery controlled anchor

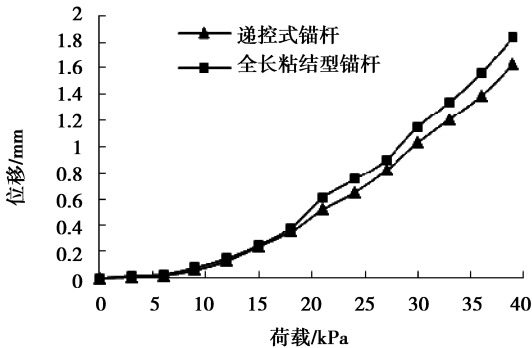


图 16 两种不同锚杆的锚头位移曲线图

Fig. 16 Displacement diagram of two different kinds of anchor head

光弹性应力测试方法,测试负荷时杆体周围区域的应力分布规律,即切应力分布规律。本次试验采用国产 409-2(WZD—Ⅲ型)光测弹性仪进行,用来分析递控式锚杆的受力特性,其装置如图 17 所示。

为得到递控式锚杆杆体及其锚固围岩的应力分布特性,按照平面应力问题,设计了两种锚固形式,分别为全长锚固(模拟全长粘结型锚杆)和分两个单元锚固(模拟递控式锚杆)。具体尺寸如下:模型厚度 8 mm,锚杆左右两侧围岩模拟板尺寸为 95 mm×365 mm,材料为环氧树脂板;注浆材料



图 17 国产 409-2 型光测弹性仪

Fig. 17 Domestic 409-2 photoelastic instrument

采用环氧树脂胶模拟,模拟注浆体宽度为 10 mm;锚杆锚筋采用直径 4 mm 钢丝制作,递控式锚杆 1 号单元锚筋粘结段长度为 160 mm,2 号单元锚筋粘结段长度为 310 mm。

室内试验结果与光弹试验结果对比分析如下。

4.1 全长粘结型锚杆

图 18 为全长粘结型锚杆加载力为 1 kN 时的光弹试验剪应力光谱照片。从剪应力图形状来分析,全长粘结型锚杆受力时,在受力近端锚杆和孔壁围岩中均形成剪应力集中,向远端剪应力逐渐衰减,因而其沿锚杆长度方向剪应力分布很不均匀,孔壁粘结强度得不到充分发挥。其结果与全长粘结型锚杆应力分布图基本一致。

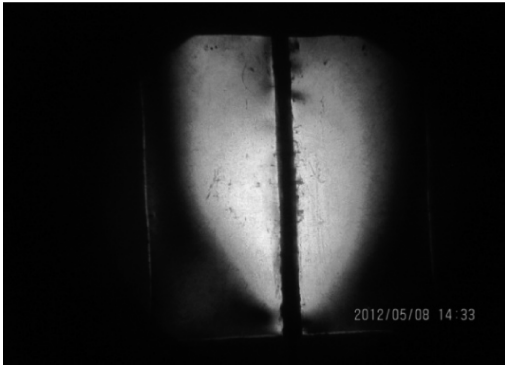


图 18 全长粘结型锚杆剪应力光谱

Fig. 18 Shear stress spectrum of fully bonded anchor

4.2 递控式锚杆

图 19 为递控式锚杆加载力为 1.4 kN 时的光弹试验剪应力光谱照片。从图中可以看出,中上部 1 号锚筋粘结段起始位置处呈最明亮的淡黄色,形状近似呈“水滴”形。而底部 2 号锚筋粘结段起始位置处呈较亮的灰白色,形状亦近似呈“水滴”形,由于递控式锚杆光弹试验先对 1 号锚筋进行了加载补偿,当加载力为 1.4 kN 时 2 号锚筋分担的力还未大于 1 号锚筋,因而光弹试验剪应力光谱不完

全一致。

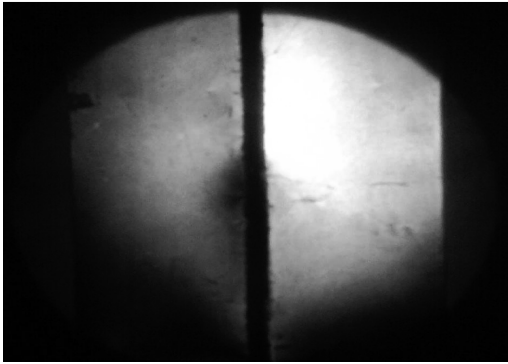


图 19 递控式锚杆剪应力光谱(加载力 1.4 kN)

Fig. 19 Shear stress spectrum of delivery controlled anchor(loading force is 1.4 kN)

图 20 为递控式锚杆加载力为 2.0 kN 时的光弹试验剪应力光谱照片。从图可以看出,在 1 号锚筋和 2 号锚两根锚筋应力进行叠加后,明亮的剪应力光谱已扩展至锚杆全长且较均匀,说明剪应力沿锚杆长度方向分布较均匀,两根锚筋叠加后的剪应力光谱图与室内试验应力分布图基本基本一致。

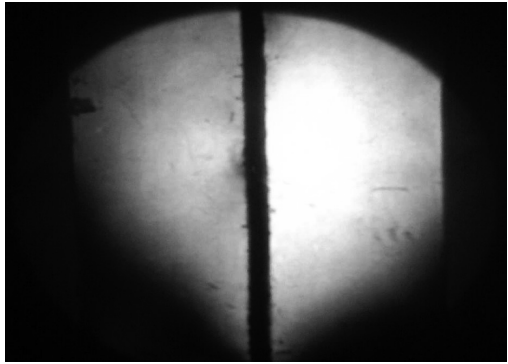


图 20 递控式锚杆剪应力光谱(加载力 2.0 kN)

Fig. 20 Shear stress spectrum of delivery controlled anchor(Loading force is 2.0 kN)

通过与全长粘结型锚杆比较,递控式锚杆沿锚杆全长剪应力分布均匀,孔壁粘结强度能够得到充分发挥。

5 结论

通过对两种不同锚杆室内试验和光弹试验结果对比分析,可得出以下结论:

(1)在一组滑动面两根锚杆情况下,递控式锚杆和全长粘结型锚杆应力、轴力最大值均发生在滑面附近,递控式锚杆应力和轴力最大值较全长粘结型锚杆减小 14.5%,有效避免了滑面应力集中。1 组滑动面 4 根锚杆的情况和 2 根的情况趋势基本一致,但由于锚杆数量的增多而单根锚杆承受荷载

减小,递控式锚杆较全长粘结型锚杆应力最大值的降幅更大。全长粘结型锚杆应力最大值4根锚杆比2根锚杆降低19.6%,递控式锚杆应力最大值4根锚杆比2根锚杆降低30.9%,这也说明递控式锚杆的作用效果较全长粘结型锚杆好。

(2)由锚杆锚头位移曲线图可以看出,递控式锚杆比全长粘结型锚杆能够更好地限制边坡的位移,从而体现了递控式锚杆新结构的优越性。

(3)递控式锚杆与全长粘结型锚杆相比,由于在锚杆自由段设计无粘结段来改善锚杆的受力形态,使锚杆在受力过程中多段达到粘结强度峰值,从而增加了峰值的长度区间,充分提高了自由段地层强度的利用率。无论是被加固体产生由前向后的牵引变形,还是产生由后向前的整体推动式滑移,推力或下滑力通过被加固体段各粘结单元和锚筋及时传至锚固段地层,因而被加固体的变形和变形范围均比全长粘结型锚杆小。

参考文献(References)

- [1] 程良奎,范景伦,韩军,等. 岩土锚固[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003.(Cheng Liangkui, Fan Jinglun, Han Jun, et al. Rock and soil anchoring [M]. Bei Jing: China Architectural Industry Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 程良奎. 岩土锚固研究与新进展[J]. 岩石力学与工程报, 2005, 24(21): 3803-3811. (Cheng Liangkui. Research and new progress in ground anchorage [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3803-3811. (in Chinese))
- [3] 闫莫明,徐祯祥,苏自约. 岩土锚固技术手册[M]. 北京:人民交通出版社,2004. (Yan Moming, Xu Zhenxiang, Su Ziyue. Geotechnical anchoring technology handbook [M]. Bei Jing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [4] 张培胜,阴可. 拉力型锚杆锚固段传力机理的全过程分析方法[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 716-723. (Zhang Peisheng, Yin Ke. An Analysis Method of the Whole Working Course for the Force Transferring Mechanism in Fixed Segment of Tensile-type Anchor Bar [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 716-723. (in Chinese))
- [5] 尤春安. 全长粘结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339-341. (You Chun'an. Mechanical analysis on fully grouted anchor [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 339-341. (in Chinese))
- [6] 薛亚东,黄宏伟. 锚索锚固力影响因素的试验分析研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1523-1526. (XueYadong, Huang Hongwei. Experimental study on affect factors on anchoring force of cable bolts [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1523-1526. (in Chinese))
- [7] 许锡宾,刘涛,褚广辉. 基于荷载传递法的锚杆锚固段荷载载变形分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 216-219. (Xu Xibin, Liu Tao, Zhu Guanghui. Analysis of load deformation of anchorage section based on transfer method. [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science). 2010, 29(2): 216-219. (in Chinese))
- [8] 郑俊杰,刘秀敏,欧阳院平,等. 大断面隧道锚杆设置的优化分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 341-346. (Zheng Junjie, Liu Xiumin, OuYang Yuanping, et al. Optimum Analysis of Large-Section Tunnel's Bolts Location by FLAC [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 341-346. (in Chinese))
- [9] 尤春安,战玉宝. 预应力锚索锚固段的应力分布规律及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 925-928. (You Chun'an, Zhan Yubao. Distributing characters and analysis of stresses in prestressed cables [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 925-928. (in Chinese))
- [10] 何思明,田金昌,周建庭. 胶结式预应力锚索锚固段荷载传递特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 117-121. (He Siming, Tian Jinchang, Zhou Jianting. Study on load transfer of bond prestressed anchor rope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 117-121. (in Chinese))
- [11] 郑静,孟进宝,王旭,等. 递控式锚杆受力特性室内试验研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(7): 17-21. (Zheng Jing, Meng Jinbao, Wang Xu, et al. Laboratory test research on mechanical characteristics of delivery controlled anchor [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(7): 17-21. (in Chinese))
- [12] 胡田飞,朱本珍,郑静,等. 递控式锚杆荷载传递规律的数值分析[J]. 铁道工程学报, 2013, 30(7): 11-15. (Hu Tianfei, Zhu Benzhen, Zheng Jing, et al. Numerical analysis of load transfer of recursive control anchor [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2013, 30(7): 11-15. (in Chinese))