

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2022.03.007

【工程应用】

挤压锚式可回收锚索在卵石基坑的回收试验分析

叶帅华*, 吴映坤, 黄安平

(兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心/
兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 目前国内外学者研发的可回收锚索种类较多, 主要应用在软土地区的基坑工程中, 很少有人在西北地区进行可回收锚索试验, 因此在该地区进行可回收锚索试验具有重要意义。挤压锚式可回收预应力锚索是一种新型压力型可回收锚索。本文在简要介绍该可回收锚索结构、工作原理及回收原理的基础上, 以兰州市某深基坑工程为依托, 进行挤压锚式可回收预应力锚索在卵石地层的试验研究。本次现场试验共设置6组锚索, 其中4组为挤压锚式可回收预应力锚索, 2组为普通预应力锚索。在卵石地层试验场地进行了锚索钻孔、穿索、注浆、拉拔试验和补张拉作业, 并安装智能采集设备用于监测锚索轴力变化, 待施工建筑物地下结构时回收锚索。试验结果表明: 挤压锚式可回收锚索结构设计合理, 在卵石地层中能顺利回收钢绞线, 且在锚索工作期间其轴力损失较小, 能满足基坑支护要求, 保证基坑的稳定性。

关键词: 挤压锚式可回收预应力锚索; 卵石基坑; 拉拔试验; 施工工艺; 自动化监测; 锚索回收

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2022)03-0226-08

Experimental analysis on jacked removable anchor cable in excavation of pebble stratum

YE Shuai-hua*, WU Ying-kun, HUANG An-ping

(Western Center of Disaster Mitigation in Civil Engineering, Ministry of Education, Lanzhou University of Technology/

Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: There are many kinds of recoverable anchor cable developed by domestic and foreign researchers. But the removable anchor cable is mainly used in excavation engineering in soft soil area, and few test of recyclable anchor cable has been carried out in Northwest China. Therefore, it is of great significance to perform the test in this area. Jacked removable anchor type is a new kind of pressured removable anchor. Brief introduction of the structure, working mechanism and recovery principle of the removable anchor is presented. On the basis of a deep excavation project in Lanzhou, experimental study on the jacked removable anchor in pebble stratum was carried out. In the field test, altogether 6 groups of anchor tests were conducted, of which 4 groups were jacked removable anchor with prestressed cables and 2 groups were normal prestressed cables. Anchor drilling, cable piercing, grouting, pulling test and supplementary tension operation were carried out in the pebble stratum. Intelligent acquisition equipment was installed to monitor the axial force of the anchor cable. The steel strands were retrievable when the underground structure of the building was constructed. The test results show that the structure design of jacked removable prestressed anchor cable is reasonable, and the steel strands can be retrieved smoothly in pebble stratum. The loss in axial force was small during the working period, which can meet the requirements of excavation support and ensure the stability of foundation pit.

Key words: jacked removable prestressed anchor cable; pebble foundation pit; pull-out test; construction technology; automatic monitoring; anchor cable retrieved

收稿日期: 2021-09-26

基金项目: 甘肃省建设科技项目 (JK2022-02); 中科院“西部之光”人才培养引进计划 (020119); 兰州市人才创新创业项目 (2019-RC-52)。

作者简介: 叶帅华 (1983—), 男, 河南巩义人, 博士后, 教授, 主要从事支挡结构、地基处理及岩土工程抗震方面的教学和研究工作。E-mail: yesh@lut.edu.cn。

0 引言

随着城市化进程的加快,城市可用于开发的土地面积越来越少,因而对于地下空间的开发愈来愈热,随之产生的深基坑数量众多。锚索作为一种柔性支护结构,能够很好的控制深基坑的变形,提高基坑的稳定性,所以很多建筑基坑采用锚索支护结构^[1-2]。传统锚索支护的基坑,当基坑回填后,锚索被当成建筑垃圾常埋于地下,造成地下空间的污染,严重影响公共设施以及周围建筑物的修建,尤其影响城市地铁和地下商场的建设。为了满足城市发展要求,不得不拆除这些埋于地下的普通锚索,但拆除这些普通锚索将花费巨大的人力和财力,因此研发可回收锚索非常必要。在国外一些发达国家,例如美国、德国、奥地利、英国、日本等国家的一些市政当局都要求工程完工后,拆除预埋在地下的锚索^[3]。在国内深圳等城市建筑基坑也成功应用了可回收锚索,取得了不错的经济效益。若把传统锚索支护换成可回收锚索支护,会减少建设成本、节约资源、减少污染^[4]。

目前国内研发的可回收锚索种类众多,郭彦朋等^[5]和张鑫鑫等^[6]以文献综述的形式介绍了几种国内外研发的可回收锚索,张浩宇等^[7]也介绍了几种常见的可回收锚索的工作原理,另外,还有两种国外比较特殊的可回收锚索^[8-9]。但绝大多数可回收锚索适用于软土地区的建筑基坑^[10-12],很少用于西北黄土地区的卵石基坑。在卵石基坑中施工锚索需采用跟管钻进的施工工艺,因此,可回收锚索的结构设计必须要满足该施工工艺的要求,此外,卵石地层中的锚索孔道较易塌孔,对于可回收锚索的PE塑料管要求较高。

为解决西北黄土地区常见的卵石基坑中锚索回收的技术问题,在大量试验的基础上,笔者研发了挤压锚式可回收锚索^[13]。通过在兰州市某卵石地层深基坑中的试验,证实了该挤压锚式可回收锚索能满足卵石层基坑中的使用要求且能成功回收钢绞线。本文结合挤压锚式可回收锚索在卵石基坑的试验及长期自动化监测结果,对该技术进行分析和总结,可为西北黄土地区绿色建筑的发展及城市地铁建设提供依据。

1 挤压锚式可回收预应力锚索

1.1 可回收锚索结构

挤压锚式可回收锚索属于压力型可回收锚索,

其结构是由普通钢绞线、PE塑料管、承载板、挤压锚、丝锥套、保护套、限位器、螺旋筋等构件组成。其中的丝锥套是由高强螺杆加工而成,具有较高的强度及硬度,钢绞线包裹丝锥套、挤压锚在挤压机的作用下压紧钢绞线。该结构可实现钢绞线、锚具和夹片的回收重复使用,其结构如图1所示。

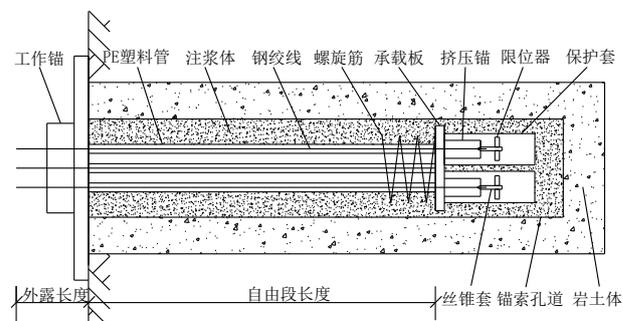


图1 挤压锚式可回收锚索结构

Fig. 1 Structure diagram of jacked removable anchor cable

挤压锚式可回收锚索可根据地层条件的不同,调整其承载板的个数及组装的前后位置,实现压力集中型可回收锚索和压力分散型可回收锚索的转换,使其能够满足多种地层条件的使用要求,增强其适应性。通过了解和分析目前已研发的各种可回收锚索结构^[5-7],可以看出,绝大多数现有的机械式可回收锚索结构设计复杂,主要结构采用价格较高的异形夹具,且该夹具的可靠性有待商榷,此外,多数化学式可回收锚索需外接电源,依靠电源实现钢绞线的解锁,该方式无疑增加使用成本,对地下环境造成一定程度的污染。相比而言,挤压锚式可回收锚索具有结构简单、锚固力高、安全性高、回收率高、操作方便、造价低等特点。

1.2 工作原理

普通锚索一般分为自由段和锚固段,自由段用来传递土压力,而锚固段则依靠其与周围稳定地层之间的锚固力(即抗拔力)抵抗土压力,以维护支护结构的稳定性。

对于挤压锚式可回收锚索而言,锚索全长都为自由段,当基坑开挖至锚索设计标高以下0.5m处,在相应位置打孔、穿索、注浆及养护后,逆时针旋转钢绞线,使挤压锚接触承载板,张拉钢绞线,使承载板受压,并将压力传递给周围注浆体,压力再通过注浆体以剪应力的形式传递给周围的岩土体中^[14]。

1.3 回收原理

不可回收锚索即普通预应力锚索,在设计和施工时,一般不考虑锚索的拆除,这会对后期周围建

筑和地铁的施工带来很大的影响,但拆除这些普通锚索的技术难度很大、成本很高。

对于挤压锚式可回收锚索,当建筑物主体竣工验收后,需要回填基坑时,进行锚索回收作业。若基坑较深,沿竖向设置多排可回收锚索时,按照和基坑开挖支护工况相反的顺序,回填一层,回收一排,直至拆除基坑最上一排可回收锚索。

具体的回收流程是,先回收工作锚和夹片,之后有两种回收钢绞线的方法可供选择。第一种方法是:顺时针旋转钢绞线,让挤压锚向里移动直至和限位器接触,使挤压锚和承载板空出 2~3 cm 距离,之后利用单根张拉千斤顶向外拉动钢绞线使丝锥套从钢绞线中拔出,接着继续张拉钢绞线使钢绞线脱离挤压锚,最后通过人力将钢绞线从 PE 塑料管中拉出,完成钢绞线的回收。第二种方法是:用小型千斤顶先将钢绞线最中间的直钢丝从挤压锚中拔出,之后再继续张拉钢绞线,使钢绞线剩下的 6 根钢丝从挤压锚中拔出,最后人工将钢绞线从塑料管中拉出来,就完成了钢绞线的回收。在回收作业时,通常采用第一种方法,若第一种方法失效,便采用第二种方法,本次试验采用第一种回收钢绞线的方法。

2 试验方案

2.1 试验场地

该试验场地位于兰州市安宁区安宁西路南侧,建宁西路北侧,枣林路西侧,街坊路东侧。基坑场地南北长约 240 m,东西宽约 130 m。基坑深度为 14.8~15.8 m,基坑安全等级为 1 级,采用桩锚支护结构,桩径 900 mm,预应力锚索采用无水跟管钻进方式成孔,成孔直径为 150 mm,锚索倾角为 15°。

2.2 地质水文条件

根据该项目岩土工程勘察报告,场地内地层如下:①杂填土层:厚度 0.40~5.00 m。②黄土状粉土层:埋深 0.50~5.00 m,厚度 1.00~6.00 m。③卵石层:埋深 3.30~6.80 m,勘察厚度 16.20~27.10 m(未穿透)。地下水位埋深 14.8~17.5 m。各土层力学参数见表 1。本次挤压锚式可回收预应力锚索试验在卵石地层中进行。

2.3 挤压锚式可回收锚索参数

本次试验选在基坑北侧中部,在距坑顶 13.5 m 位置沿水平方向设置 6 个锚索试验孔,试验孔单独成孔,位于工程锚索孔的旁边,如图 2 所示。其中 1 号、2 号为采用两次注浆的挤压锚式可回收锚索,

3 号、4 号为采用一次注浆的挤压锚式可回收锚索,5 号、6 号为传统锚索。6 孔锚索均采用 19 m 长 3S×15.2 钢绞线,锚索设计锁定值为 230 kN。

对于 1 号、2 号、3 号、4 号挤压锚式可回收锚索,整根钢绞线均套 PE 塑料管。对于 5 号、6 号不可回收锚索,自由段套塑料波纹管,自由段与锚固段相接部位用防水胶带封住波纹管口,防止水泥浆进入自由段。

表 1 土层参数

Table 1 Parameters of soil

序号	土层名称	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$	极限侧摩阻力/kPa
①	填土	17.0	8.0	12.0	20.0
②	黄土状粉土	16.0	12.0	24.0	60.0
③	卵石	21.0	3.0	43.0	130.0



图 2 现场试验

Fig. 2 Field test

2.4 试验设备

本次挤压锚式可回收锚索试验采用的设备有:挤压机、履带式跟管钻机、拔管机、泥浆泵、500 kN 穿心千斤顶、250 kN 单根张拉千斤顶。

2.5 试验目的

进行本次挤压锚式可回收锚索在卵石基坑的试验有以下几点目的:

- (1) 通过现场试验来验证研发的挤压锚式可回收锚索结构的合理性;
- (2) 通过试验总结出挤压锚式可回收锚索在卵石地层基坑中的施工工艺;
- (3) 通过试验确定挤压锚式可回收锚索在卵石地层基坑中的张拉数据及一次和二次注浆对数据的影响;

(4) 通过自动化监测系统监测挤压锚式可回收锚索的预应力损失情况。

2.6 试验流程

(1) 可回收锚索成孔

可回收预应力锚索采用与普通锚索相同的机械成孔, 锚孔倾斜角为水平向 $12^{\circ} \sim 20^{\circ}$, 锚孔成孔直径为 150 mm。因为地层为卵石层, 所以锚孔成孔需采用无水根管钻进施工工艺以防孔内坍塌, 如图 3 (a) 所示。考虑到沉渣的影响, 为确保锚索深度, 实际钻孔深度要大于设计深度 0.50 m。锚孔成孔后必须进行清理孔内的沉渣, 力求清理干净。

(2) 可回收锚索组装和安装

挤压锚式可回收锚索需在锚孔成孔前组装完毕, 如图 3 (b) 所示, 要求挤压锚式可回收锚索杆体平直, 并严格按锚索设计长度尺寸下料。挤压锚式可回收锚索放入钻管前尽可能对管内的沉渣清理干净。挤压锚式可回收锚索连同注浆管放入钻管中应沿钻管中心线放入, 且注浆管长度和钢绞线长度一样长, 如图 3 (c) 所示, 而普通锚索无需单独安装注浆管。安装完挤压锚式可回收锚索后, 要及时从卵石层中拔出钻管, 如图 3 (d) 所示, 拔钻管时要防止挤压锚式可回收锚索被带出和 PE 塑料管被钻管磨破。

(3) 可回收锚索注浆

可回收锚索注浆工艺和普通锚索相同, 注浆体应严格按照设计要求水灰比为 0.50 进行配置, 水泥选用 42.5 等级的水泥, 等级强度 M20, 不得随意变动。注浆时, 一次注浆压力需要达到 0.60 MPa, 稳压 2 min, 且直到浆液从孔口溢出为止, 否则应进行补浆。需要进行二次注浆时, 注浆压力需要大于 1.0 MPa 以上, 最后进行孔口补浆, 如图 3 (e) 所示。注浆后, 在浆体强度未达到设计要求前, 锚索不得受到干扰。

(4) 可回收锚索张拉

当注浆体强度达到设计强度的 85% 后, 进行张拉锁定。锚索张拉前安装好 6 个 500 kN 的振弦式锚索测力计及智能采集站, 用于长期监测锚索轴力变化, 如图 3 (g) 所示。锚索张拉作业所采用的千斤顶需提前标定好, 正式张拉前先对 3 根钢绞线同时进行 1~2 次预张拉, 张拉等级为 0.1 倍的设计拉力值。正式张拉采用分级张拉和超张拉, 张拉分级系数为 0.25、0.50、0.75、1.0、1.10, 每级持荷时间为 2~5 min, 最后一级超张拉持荷时间为 10~20 min, 待数据稳定后, 锁定钢绞线, 如图 3 (f) 所示。张拉锁定后若发现锁定值不满足设计要求, 还需补张拉, 直至锁定值满足要求^[15]。最后将外露

钢绞线全部套 PE 塑料管, 防止锈蚀, 且外露钢绞线在回收前不能切断, 一方面是为了后期回收锚索作业的方便, 另一方面, 在基坑服役期间监测发现锚索轴力损失严重, 需重新对锚索进行补张拉。

(5) 可回收锚索回收

回收锚索作业流程是先回收工作锚及夹片, 然后顺时针旋转钢绞线, 直至不能旋转, 之后采用单根张拉千斤顶, 逐根解锁钢绞线, 最后人工将钢绞线从塑料管中回收出来, 如图 3 (h) 所示。回收后的钢绞线放置在干燥的仓库, 经检测单位检测达标后, 方可重复使用。



图3 可回收锚索试验流程

Fig. 3 Test procedures of removable anchor cable

3 试验结果分析

3.1 张拉值与位移值关系

挤压锚式可回收锚索在张拉作业时按照设计图纸及施工规范要求分级张拉, 张拉值按照 1.1 倍锁定值超张拉。6 组锚索在张拉过程中张拉值与锚索伸长量关系如图 4 所示。

由图4可知,6束锚索的变形均在弹性变形范围内,其中1~4号挤压锚式可回收锚索在分级张拉时,锚索的伸长量基本相同。当张拉值基本相同时,挤压锚式可回收锚索的伸长量大致是普通锚索的两倍。主要原因是:1~4号挤压锚式可回收锚索全长18m,钢绞线都是自由段,而5号和6号普通锚索只有8m钢绞线是自由段,从锚索张拉时理论伸长量方面考虑,张拉值相同时,锚索自由段越长,伸长量越大^[16]。

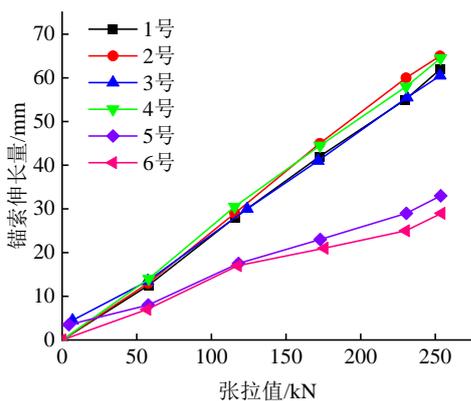


图4 张拉值与锚索伸长量关系

Fig. 4 Relationship between tension value and cable elongation

3.2 补张拉数据分析

本试验中1~6号锚索都安装了振弦式锚索测力计,且智能采集箱能时刻传输1~6号锚索的轴力值。张拉完成后通过智能采集箱读取数据发现,按照1.1倍的设计锁定值超张拉锁定后,锚索的实际轴力值达不到设计要求的230kN,故对1~6号锚索进行补张拉作业,补张拉数据如表2所示。

从补张拉数据看出,数据存在差异性,主要表现在相同的油泵张拉值锁定后,对于可回收锚索,一次注浆锚索轴力损失值小于二次注浆的锚索轴力损失值,可能是由两方面的原因造成,一方面是:1号和2号锚索的锚孔坍塌量大于3号和4号锚索的锚孔坍塌量,导致1号和2号锚索的注浆体不完整;另一方面是:1号和2号锚索杆体比3号和4号锚索杆体多一根注浆管,注浆管会占用锚孔的一定体积,导致1号和2号锚索的有效注浆体体积比3号和4号锚索的少,进而导致1号和2号锚索注浆体的直径减少,从而使锚索的极限抗拔承载力降低。因此,对于卵石地层,一次注浆可完全满足锚索设计要求。

此外,挤压锚式可回收锚索在卵石地层中,若

按照1.6倍设计锁定值张拉可满足锚索设计锁定值,这个数据可以为后续在卵石地层中使用挤压锚式可回收锚索提供指导意见。另外也说明了在卵石地层锚索张拉锁定中,普通不可回收锚索的张拉损失值大于挤压锚式可回收锚索的张拉损失值,主要原因是挤压锚式可回收锚索的自由段比普通锚索的自由段长^[17]。

表2 锚索补张拉数据

Table 2 Anchor cable tensioning data

编号	设计锁定值/kN	补张前轴力值/kN	油泵值/kN	补张后轴力值/kN	超张拉倍数
1号	230	150.346	369.12	247.598	1.60
2号	230	132.530	368.54	212.699	1.60
3号	230	170.058	365.48	259.420	1.59
4号	230	213.803	370.27	327.711	1.61
5号	230	78.795	368.42	170.334	1.60
6号	230	177.894	367.95	216.589	1.60

3.3 长期监测数据分析

1~6号锚索补张拉后,利用智能采集箱远程监测锚索轴力数据变化,监测时间为:2020年1月14日—2020年3月20日,共计67d。由于兰州市冬季停工和新型冠状病毒引发的肺炎疫情,导致节后复工时间有所推迟,试验场地没有施工,且基坑深度也没有增加,所以采集的锚索轴力数据无人为干扰因素。

(1) 锚索轴力在24h之内的变化分析

由于振弦式锚索测力计不会因为温度的变化而发生参数变化,所以温度变化对锚索计无影响,只可能对锚索轴力有影响。在2020年2月10日,通过智能采集基站网络平台,每隔2h采集一次锚索轴力值,气温按照锚索轴力采集时间做相应记录。1~6号锚索轴力与起始时刻(0:30)的差值变化和现场温度在24h内变化关系如图5所示。

由图5可以看出:1~6号锚索轴力在24h内是连续变化的,且与温度变化有关系。锚索轴力差值的峰值出现在当天气温最高时。当气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ 时,锚索轴力差值均小于0,且随时间推移而减小;当气温 $> 0^{\circ}\text{C}$,升温至最高温度时,锚索轴力差值均大于0,且随时间推移而增加;锚索轴力在负温时的变化率小于正温时的变化率,说明锚索轴力对升温更敏感;在气温变化相同时,5号和6号普通不可回收锚索轴力变化值及变化趋势比1~4号挤压锚式可回收锚索的变化值 and 变化趋势更大,说明普

通不可回收锚索轴力相比于挤压锚式可回收锚索对温度变化更敏感, 原因是普通不可回收锚索的自由段长度短于挤压锚式可回收锚索的。

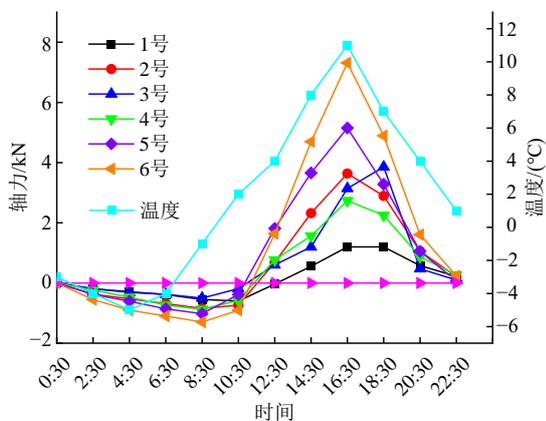


图 5 24 h 内锚索轴力与初始时刻的差值变化

Fig. 5 Difference between axial force of the anchor cable and the initial value in 24 hours

(2) 锚索轴力损失分析

1~6 号锚索补张拉完成后开始对其锚索轴力进行长时间监测, 所采集的锚索轴力值均来自于每天中午 12 点左右智能采集设备所储存的数据。锚索轴力损失累计量随时间的变化关系如图 6 所示。

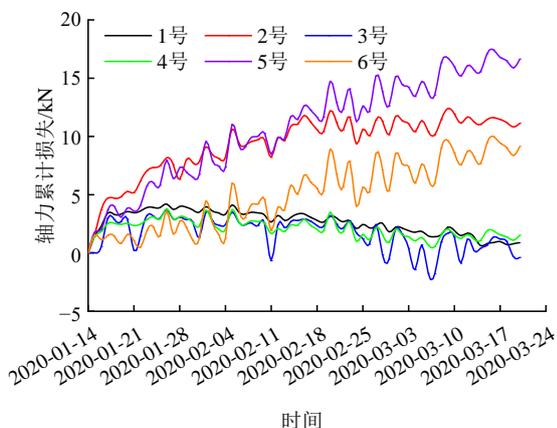


图 6 锚索轴力累计损失随时间变化关系

Fig. 6 Accumulated loss in axial force of anchor cable with time

从图 6 中可以看出: 1~6 号锚索轴力累计损失值随时间连续变化, 其中 2 号、5 号和 6 号锚索轴力累计损失值呈现上升趋势, 剩余 3 束挤压锚式可回收锚索轴力累计损失值呈现缓慢下降趋势, 说明 2 号、5 号和 6 号锚索的轴力值不断降低, 而 1 号、3 号和 4 号锚索的轴力值先减小后增大。2 号可回收预应力锚索的轴力累计损失值变化规律和其他 3 束可回收锚索的变化趋势相差较大, 主要原因是 2

号锚索在张拉作业时发生了误操作, 使一根钢绞线提前被解锁, 2 号锚索在工作期间实际只有两根钢绞线起作用, 最终导致 2 号锚索的轴力累计损失值相对较大。整体而言, 锚索轴力主要的损失发生在补张拉之后的头几天^[18-19], 挤压锚式可回收预应力锚索轴力累计损失值小于普通锚索轴力累计损失值, 且 1 号挤压锚式可回收锚索轴力损失经长时间变化后基本消失。从最后一天的轴力累计损失值可以看出, 6 束锚索的轴力累计损失值不大, 能满足基坑稳定性要求。

3.4 回收数据分析

本次试验的 1~4 号可回收锚索均由 3 根钢绞线组成, 编号为: ①、②、③。参与试验的 12 根钢绞线均成功回收出来, 回收率为 100%, 且每根钢绞线的总回收时间为 15 min 左右, 回收效率较高。除此之外, 解锁每根钢绞线所需的力也较小, 约为 40 kN, 如表 3 所示。

表 3 锚索回收所需解锁力

Table 3 Required releasing force for removable anchor cable

kN					
编号	①	②	③	平均值	总平均值
1 号	43.86	45.12	45.65	44.88	41.49
2 号	37.03	48.45	39.60	41.69	
3 号	35.80	39.32	41.07	38.73	
4 号	41.08	45.25	35.64	40.66	

回收后的钢绞线表面无任何锈迹、无卷曲变形, 后期在质量检验合格的情况下, 结合回收的锚具和夹片可重复使用, 回收后的锚具及钢绞线如图 7 所示。



图 7 回收的锚具及钢绞线

Fig. 7 Removable anchors and strands

4 结 论

采用现场试验的方法, 分析了挤压锚式可回收锚索的拉拔试验、自动化监测锚索数据, 总结出该可回收锚索在西北黄土地区卵石地层中的施工工艺, 主要得到以下结论:

(1) 挤压锚式可回收锚索在卵石基坑中能成功解锁并回收钢绞线, 验证了挤压锚式可回收锚索结构的合理性。该技术可以应用到实际工程中, 为西北地区常见卵石层基坑应用可回收锚索提供一定的方案和技术支持。

(2) 在卵石基坑中运用挤压锚式可回收锚索, 在张拉锁定过程中可以按照 1.6 倍的设计锁定值进行超张拉锁定。

(3) 从锚索补张拉数据可以看出, 在卵石基坑中运用挤压锚式可回收锚索, 注浆时只需要一次注浆即可满足要求, 无需二次注浆。

(4) 由长期自动化监测数据可知, 补张拉完成后, 该挤压锚式可回收锚索轴力损失小, 工作性能好, 能满足基坑设计和稳定性要求。

参考文献

- [1] 周勇, 郭楠, 杨校辉, 等. 某桩锚支护深基坑超挖变形分析与加固处理[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 1): 211-216.
ZHOU Yong, GUO Nan, YANG Xiao-hui, et al. Deformation analyses and reinforcement treatment of an over break deep foundation pit supported with pile-anchor retaining structure[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(S1): 211-216.
- [2] 秦艳萍, 陈春梅, 王俊华. 预应力锚索在基坑支护中的应用[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(3): 133-135.
QIN Yan-ping, CHEN Chun-mei, WANG Jun-hua. Application of prestressed anchor cable in foundation pit support[J]. Sichuan Building Sciences, 2008, 34(3): 133-135.
- [3] LUCIAN B, PATRICK W. Innovations in removable post tensioned strand ground anchors[C]/IFCEE 2018 International Foundations Congress and Equipment Expo Conference Proceedings. Orlando, 2018: 33-42.
- [4] 赵启嘉, 刘正根. 可回收锚索在基坑支护工程中的技术研究及应用探讨[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊 1): 480-483.
ZHAO Qi-jia, LIU Zheng-gen. Application of recycling anchor cables in support of excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S1): 480-483.
- [5] 郭彦朋, 李世民, 李洪鑫. 可回收锚索的发展现状及展望[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(2): 136-140.
GUO Yan-peng, LI Shi-min, LI Hong-xin. Development status and prospect of recyclable anchor cable[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(2): 136-140.
- [6] 张鑫鑫, 符贵军, 刘海康, 等. 可回收锚杆(索)技术研究现状及展望[J]. 公路, 2017, 62(11): 1-8.
ZHANG Xin-xin, FU Gui-jun, LIU Hai-kang, et al. Research status and prospect of recoverable anchor rod (cable) technology[J]. Highway, 2017, 62(11): 1-8.
- [7] 张浩宁, 刘朋, 王岫宇. 可回收锚索应用技术及其原理研究[J]. 安徽建筑, 2020, 27(1): 143-144.
ZHANG Hao-ning, LIU Peng, WANG Shen-yu. Research on application technology and principle of recoverable anchor cable[J]. Anhui Architecture, 2020, 27(1): 143-144.
- [8] 伏屋行雄. 先端に切断機構を備えた新型除去式アンカー工法の開発[J]. 地盤工学ジャーナル, 2009, 4(4): 307-315.
- [9] XANTHAKOS, PETROS P. Special Anchor System[M]. John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
- [10] 石立国, 徐平, 王文渊, 等. 不同类型可回收式锚索基本试验研究[J]. 施工技术, 2017, 46(21): 111-116.
SHI Li-guo, XU Ping, WANG Wen-yuan, et al. Basic experimental research on different types of recyclable anchor cables[J]. Construction Technology, 2017, 46(21): 111-116.
- [11] 蔡信国, 虞革新. 可回收式预应力浆囊袋锚杆在软土地基基坑工程中的应用[J]. 地基处理, 2019, 1(3): 78-83.
CAI Xin-guo, YU Ge-xin. Application of recyclable prestressed bag grouting anchor in foundation pit of soft ground[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2019, 1(3): 78-83.
- [12] 蔡信国. 砂性土地基中深基坑围护方案的优化与实施[J]. 地基处理, 2020, 2(3): 226-230.
CAI Xin-guo. Optimization and implementation of retaining structure scheme for deep foundation pit in sandy soil foundation[J]. Chinese Journal of Ground Improvement, 2020, 2(3): 226-230.
- [13] 叶帅华, 吴映坤, 叶炜钠. 第二代挤压锚式可回收锚索: 中国, CN211646382U[P]. 2020-10-09.
YE Shuai-hua, WU Ying-kun, YE Wei-na. The Second Generation of Jacked Recyclable Anchor Cable: China, CN211646382U[P]. 2020-10-09.

- [14] 李兆平, 黄明利, 王建, 等. 地铁深基坑采用可回收锚索支护方案优化设计[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 154-160.
LI Zhao-ping, HUANG Ming-li, WANG Jian, et al. Study on the recoverable anchor cable supporting scheme optimization design for metro foundation pit[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 154-160.
- [15] 张勇, 许蔚峰, 盛宏光, 等. 张拉工艺对压力分散型锚索荷载不均匀系数的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 1): 2954-2959.
ZHANG Yong, XU Wei-feng, SHENG Hong-guang, et al. Influence of stretching technology on load non-uniform coefficient of pressure-dispersive anchor cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2954-2959.
- [16] 刘鸿. 考虑加固变形条件下的压力分散型锚索张拉方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(1): 70-76.
LIU Hong. Study of tensioning method for dispersed pressure anchor considering the reinforcement deformation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(1): 70-76.
- [17] 余瑜, 刘新荣, 刘永权. 基坑锚索预应力损失规律现场试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1932-1939.
YU Yu, LIU Xin-rong, LIU Yong-quan. Field experimental investigation on prestress loss law of anchor cable in foundation pits[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1932-1939.
- [18] 王建松, 俞强山, 刘庆元, 等. 预应力锚索张拉方式对预应力损失影响探究[J]. 公路交通科技, 2019, 36(9): 37-42.
WANG Jian-song, YU Qiang-shan, LIU Qing-yuan, et al. Study on influence of prestressed anchor cable tensioning mode on prestress loss[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(9): 37-42.
- [19] 韩健勇, 赵文, 贾鹏蛟, 等. 桩锚支护结构深基坑受力变形及稳定性分析[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(增刊 2): 907-914.
HAN Jian-yong, ZHAO Wen, JIA Peng-jiao, et al. Analysis on stress, deformation and stability of deep excavation supported by anchored pile[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S2): 907-914.