

# 西北黄土地层中可回收钢筋锚杆的锚固性能研究

叶帅华<sup>1,2\*</sup>, 赵壮福<sup>1,2</sup>, 吴 强<sup>1,2</sup>, 樊黎明<sup>1,2</sup>

(1. 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, 甘肃 兰州 730050;

2. 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:** 通过数值模拟, 分析了西北黄土地层中可回收锚杆的锚固体长度、锚固体直径以及施加预应力值大小等参数的改变对其锚固性能的影响, 研究了可回收锚杆受荷服役及变形破坏情况, 并通过现场试验对可回收钢筋锚杆的抗拔锚固力以及可回收效果进行了验证, 得到了以下结论: 在加载情况及锚固体直径相同的情况下, 可回收锚杆可达到与不可回收锚杆相同的支护效果; 锚固体直径存在“有效周长效应”, 并非越大越好; 锚固体长度较小时, 施加预应力加速了边坡变形, 而在合理的锚固体长度范围内, 施加预应力对边坡起到了超前支护的作用; 黄土地层中可回收钢筋锚杆的破坏模式主要为锚固体与黄土黏结界面破坏, 相比不可回收锚杆, 可回收锚杆在保证安全性的前提下使用更经济, 受力更合理; 可回收钢筋锚杆能够达到承载力设计要求, 且回收率高, 操作简单, 在工程中可以推广使用。本文研究成果可为可回收锚杆的性能改进以及工程应用提供一些指导。

**关键词:** 黄土; 可回收锚杆; 数值模拟; 现场试验

中图分类号: TU435

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)03-0196-07

## Study on the anchorage performance of recoverable steel anchors in loess stratum in northwest China

YE Shuai-hua<sup>1,2\*</sup>, ZHAO Zhuang-fu<sup>1,2</sup>, WU Qiang<sup>1,2</sup>, FAN Li-ming<sup>1,2</sup>

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

Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Disaster Mitigation in Civil Engineering of Gansu Province,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Through numerical simulation, the influences of the parameters such as the length, diameter and prestressing value of the recoverable anchor in the northwest loess layer on the bearing capacity are analyzed. The service and deformation damage of the recoverable anchor are studied. The anti-pulling anchoring force and the recoverable effect of the recyclable steel anchor are verified by field test. The following conclusions are obtained: in the case of the same loading condition and the same diameter of the carrier, the recoverable anchor can achieve the same supporting effect as the conventional anchor. There is an “effective perimeter effect” in the diameter of the carrier, not the bigger the better; when the length of the bearing body is small, the application of prestress accelerates the deformation of the slope. And within a reasonable length range of the bearing body, the application of prestress plays a role in the advance support of the slope. The failure mode of the recoverable anchor in the loess layer is mainly the interface failure between the anchor and the loess. Compared with the conventional anchor, the recoverable anchor is more economical and more reasonable under the premise of ensuring safety. The recyclable anchor can meet the bearing capacity design requirements, and has high recovery rate and simple operation. So it can be popularized in engineering. The results of this paper can provide some guidance for the performance improvement and engineering application of recyclable anchors.

**Key words:** loess; recoverable anchor rod; numerical simulation; field test

收稿日期: 2020-06-06

基金项目: 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); 兰州理工大学红柳优青项目(061813)。

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。

\*通讯作者(E-mail: yesh@lut.edu.cn)

## 0 引言

随着岩土锚固技术的不断成熟,锚杆越来越多的应用于基坑工程、边坡工程、隧道工程以及采矿工程中,在国民经济的发展中发挥了巨大的作用。在传统的锚杆支护方式中,工程竣工后锚杆往往被大量的废弃在土体中,存在耐腐蚀性差、注浆体受拉破坏且影响场地二次开发等一系列环境与工程问题<sup>[1]</sup>,这不仅会对邻近工程的施工造成不利影响,而且资源浪费,与地下空间及建筑用地越来越紧张的趋势相悖。此外,近几年国家和地方出台的相关政策规定了建筑用地红线,这使得锚杆遗留问题急需解决。为了适应工程建设需要,可回收锚杆应运而生,它要求锚杆具有高承载力以及良好的回收性能,且工艺简单易于操作。

如今国内外已发明了自旋式、机械式、化学式等可回收锚杆,解决了传统锚杆对场地的污染和二次开发障碍<sup>[2]</sup>。庞有师等<sup>[3]</sup>结合实际边坡加固工程进行了锚杆拉拔试验,验证了新型可回收锚杆设计的合理性和安全性。石立国等<sup>[4]</sup>研究了软土条件下不同类型可回收锚索的力学性能。孙玉宁等<sup>[5]</sup>利用有限元数值分析软件研究了可回收树脂锚杆锚固段的力学特征。陈志博等<sup>[6]</sup>利用有限元软件对大直径可回收锚杆的承载变形特性进行了数值模拟分析,并给出其极限特性与锚固体特性的相关规律。

诸多研究人员已对可回收锚杆的特性进行了探索<sup>[7-10]</sup>,但是这些工作大多针对于非黄土地区可回收锚杆的研究。在孔隙发育,结构疏松的西北黄土层中,可回收锚杆的锚固体长度、锚固体直径以及施加预应力值大小等参数在变化时对锚杆承载性能的影响以及荷载传递变化机理等情况的分析还涉及较少。通过数值模拟,本文对比分析了黄土层中可回收锚杆与不可回收锚杆的性能优劣,研究了黄土层中可回收锚杆的受荷服役及变形破坏情况,并通过现场试验对可回收锚杆的抗拔锚固力及锚杆可回收效果进行了验证,以期可为可回收锚杆的性能改进以及实际工程应用提供建议。

## 1 可回收锚杆装置

### 1.1 基本结构装置

基于绿色施工的理念,结合西北黄土地区的土质特性,笔者发明了可回收钢筋锚杆装置<sup>[11]</sup>(图1)。可回收钢筋锚杆装置由锚头、锚杆自由段以及承载

体组成,其中锚头是将锚杆固定于外锚结构物上的锁定部分,由槽钢、锚具、垫板等组成;自由段是锚杆的传力部分,其材料为带肋钢筋杆体,直径18~36 mm,外套PVC管,下端与承载体(含加强螺旋筋)连接。鉴于黄土土质较为疏松,故在承载体上设有握裹力加强槽,可以增加承载体与土体间的摩阻力。此外,在施工中,可贴近承载体固定锚固力加强螺旋筋增加承载体的锚固力<sup>[11]</sup>。

可回收钢筋锚杆装置主要由钢筋、密封圈、锁具及脱离仓等关键部件构成<sup>[11]</sup>,核心装置由工厂制造并在现场快速组装实现快捷施工。



图1 可回收锚杆装置

Fig. 1 Recoverable anchor rod

### 1.2 作用机理

在工程应用中,锚杆锚固力大小由钢筋杆体的抗拉强度、承载体与锚固体间的握裹力以及锚固体与孔周地层的黏结力所决定,锚杆和岩土体介质特性的差异使得二者在相同的力场下产生不协调变形,从而使锚杆产生轴向力。如图2所示,在锚杆受拉时,由砂浆-岩土界面以及承载体-砂浆界面的剪切应力组成锚杆径向锚固力,用深层稳定岩土来加固表层不稳定土体,控制岩土的初始变形;此外,由锚端横截面及黏结界面上的法向应力组成的锚杆环向锚固力可以约束土体在软弱面发生滑移,阻止土体产生新的剪切破坏面。

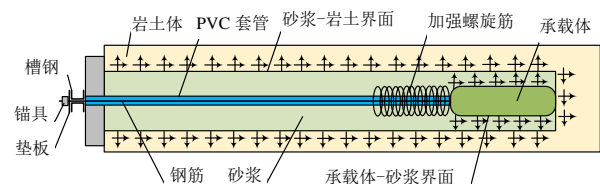


图2 作用机理

Fig. 2 Mechanism of action

## 2 数值模拟

### 2.1 数值分析简化模型

本文采用有限元分析软件 PLAXIS 3D 对可回收锚杆支护边坡建立了三维数值模型,模型的物理力学参数均参考实际工程取值,参数如表1和表2所示。为简化模型便于计算,仅取一榀单排锚杆试

验单元以作研究,其中锚杆总长为 7.5 m,由于单排锚杆对周边土体的影响有限,因而取模型尺寸为 50 m×25 m×2 m。有限元数值模型如图 3~图 4 所示。

表 1 有限元数值模拟参数

Tab. 1 Simulation parameters of finite element analysis

土层	重度/ kN m <sup>-3</sup>	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ °	弹性模量/ MPa
黄土	16.7	16.0	22.0	7.7

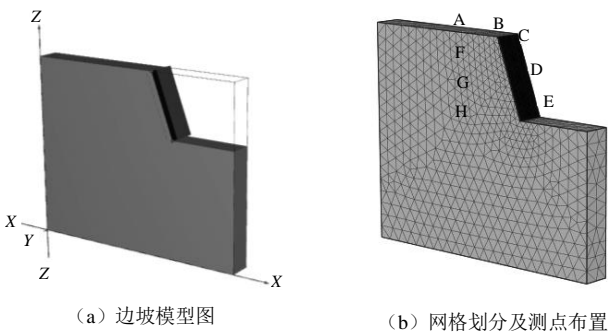


图 3 三维有限元模型

Fig. 3 Three-dimensional finite element model

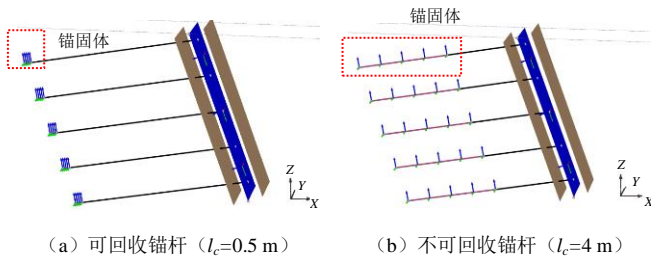


图 4 锚杆模型

Fig. 4 Model of anchor rods

土体本构模型采用 Mohr-Coulomb 准则<sup>[12]</sup>,在模型建立中不考虑水位影响,挡土板采用板单元模拟,锚杆自由段采用点对点锚杆单元,锚杆锚固段采用嵌入式梁单元。模型的侧向边界条件为法向固定,底部边界完全固定,模型顶部为自由边界。数值模拟的施工工况为:①生成初始应力场;②开挖土体、施加挡墙、施工锚杆;③施加预应力荷载。

在保证其他参数一致的情况下通过改变可回收锚杆的锚固体长度 ( $l_c=0.3$  m,  $0.5$  m,  $0.8$  m)、锚固体直径 ( $d=100$  mm,  $150$  mm,  $200$  mm,  $300$  mm) 以及预应力加载值大小 ( $p=30$  kN,  $60$  kN,  $90$  kN) 得到可回收锚杆支护结构的水平向 X 位移、竖向 Z 位移 (沉降)、深层水平位移以及锚杆轴力的变化情况,与此同时,采用不可回收锚杆 (自由段长度  $l_f=3.5$  m, 锚固段长度  $l_c=4$  m) 与之作相应的数值模拟,以此来对比单因素变化的情况下可回收锚杆及不可回收锚杆的锚固性能的优劣情况。

## 2.2 数值模拟结果

### (1) 考虑锚固体直径变化影响分析

取同一规格的锚杆 (以锚固体长度  $l_c=0.5$  m、预应力值  $p=60$  kN 为例),仅改变锚固体的直径,观察可回收锚杆的受力及变形状况,得到数值模拟结果见表 3,其中 Z 位移负号表示沉降,直径的变化影响了承载体表面与锚固体的接触面积,进而影响到界面黏结力,在长度一定的情况下,界面黏结力主要由锚固体周长起决定作用。

由模拟结果可以看出锚固体直径为 100 mm、150 mm、200 mm 和 300 mm 的水平位移 X、竖向位移 Z 均相近,边坡安全性系数分别为 1.564、1.758、1.758、1.762。这意味着锚固体直径对边坡安全性有一定影响,但其变形控制效果的差别不明显。其中锚固体直径为 150 mm 时,安全性系数与直径 200 mm 和 300 mm 时相近,位移也相差不大,由此可见锚固体直径并非越大越好,而是有一个有效周长,即存在“有效周长效应”。

当锚固体直径较小时,往往会存在锚杆锚固力不足的现象,而当直径达到有效周长时,锚杆锚固力不再因直径的增加而增加;此外,在实际工程中,锚固体直径越大,则需要的钻孔直径越大,这样往往不经济;而在锚杆钻孔直径一定的情况下,锚固体直径越大,意味着锚固体表面黏结的砂浆层越少,这样更不利于锚杆锚固力的发挥。综合各种因素来说,锚固体直径为 150 mm 时锚杆锚固力充分发挥,且相对经济安全,适用于实际工程建设。

### (2) 考虑锚固体长度及预应力变化影响分析

为了研究西北黄土地区可回收钢筋锚杆的锚固体长度及施加预应力值的大小对可回收锚杆支护结构性能的影响,取锚固体直径均为 150 mm,通过改变锚固体的长度 ( $l_c=0.3$  m、 $0.5$  m、 $0.8$  m) 以及预应力值的大小 ( $p=30$  kN、 $60$  kN、 $90$  kN) 进行数值模拟,并以相同工况下的不可回收锚杆 ( $l_c=4.0$  m) 作为对比,汇总结果见表 4。

由边坡的坡顶竖向位移图及坡面水平位移图 (图 5) 可以看出:当锚固体长度为 0.3 m 时,随着施加预应力值的增大,位移值逐渐增大,安全性系数逐渐减小。当锚固体长度为 0.5 m、0.8 m 和 4 m 时,随着施加预应力值的增大,位移值逐渐减小,安全性系数逐渐增大。说明在锚固体长度较小时,预应力与边坡安全性系数呈负相关关系,而锚固体长度达到一定长度后则呈正相关关系。随着锚固段长度的增加,位移逐渐减小。

分析认为:可回收锚杆锚固段的注浆体与周围

岩土体之间的黏结力大小主要与土体性质有关,黄土具有大孔隙架空结构,颗粒松散<sup>[13]</sup>,当锚固体长度较短( $l_c=0.3\text{ m}$ )时,在锚固体-土体界面无法提供足够的抗剪力,施加的预应力对锚杆产生向边坡临空面的拉拔力,实际增加了锚固体-土体界面的

剪切力,在预应力值增大时,边坡位移亦在增加;而当锚固体达到一定长度时,随着锚固段长度的增加,锚杆自由段减小,产生的弹性位移也减小,而预应力的施加对位移起到了很好的控制作用,对边坡稳定性大有裨益。

表2 支护结构材料参数

Tab. 2 Material parameters of supporting structures

参数	横梁、立柱	锚杆自由段	锚杆锚固段	挡土板
弹性模量 $E/(\text{KN}/\text{m}^2)$	2.5e7	6.5e4	3.0e7	1.495 e6
重度 $\gamma/(\text{KN}/\text{m}^3)$	25	—	22	22
梁类型	预定义	—	预定义	—
预定义梁类型	大直径矩形梁	—	大直径圆形梁	—
高/m	0.8	—	—	厚度 $d=0.15$
宽/m	0.8	—	—	—

表3 数值模拟结果(考虑直径变化)

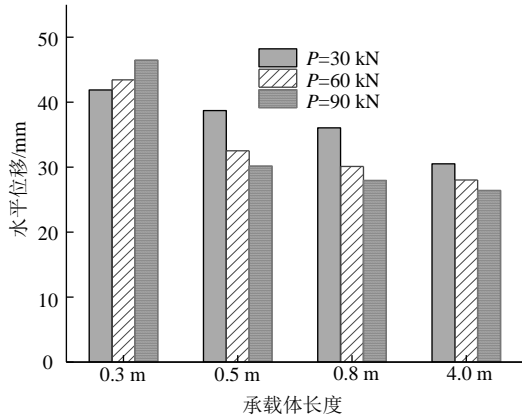
Tab. 3 Numerical simulation results (Considering diameter variation)

测点	$d=300\text{ mm}$			$d=200\text{ mm}$			$d=150\text{ mm}$			$d=100\text{ mm}$		
	X 位移/ mm	Z 位移/ mm	安全性 系数	X 位移/ mm	Z 位移/ mm	安全性 系数	X 位移/ mm	Z 位移/ mm	安全性 系数	X 位移/ mm	Z 位移/ mm	安全性 系数
A	20	-10	1.762	22	-10	1.758	21	-10	1.758	26	-11	1.564
B	23	-10		24	-11		23	-10		28	-15	
C	22	-10.5		24	-11.5		24	-11.0		25	-11.8	
D	30	-8.0		31	-8.73		30	-8.69		31	-8.79	
E	30	-8.0		32	-8.54		30	-8.35		34	-8.56	
F	26	-8.5		27	-10		25	-8.2		29	-11	
G	25	-8.1		29	-8.65		27	-8.53		32	-8.69	
H	24	-6.00		28	-6.04		25	-6.02		28	-6.19	

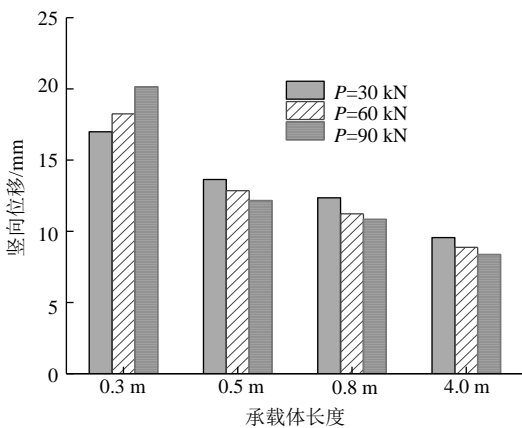
表4 数值模拟结果汇总

Tab. 4 Summary of numerical simulation results

预应力值	监测项目	$l_c=0.3\text{ m}$	$l_c=0.5\text{ m}$	$l_c=0.8\text{ m}$	$l_c=4\text{ m}$
30 kN	水平位移 $X_{\text{max}}/\text{mm}$	41.89	38.71	36.05	30.52
	竖向位移 $Z_{\text{max}}/\text{mm}$	16.99	13.64	12.35	9.56
	轴力 $F_{\text{max}}/\text{kN}$	30.82	36.38	38.88	40.90
	安全性系数	1.295	1.538	1.543	1.588
60 kN	水平位移 $X_{\text{max}}/\text{mm}$	43.45	32.53	30.11	28.03
	竖向位移 $Z_{\text{max}}/\text{mm}$	18.25	12.85	11.23	8.87
	轴力 $F_{\text{max}}/\text{kN}$	60.56	66.38	68.09	69.90
	安全性系数	1.615	1.738	1.742	1.768
90 kN	水平位移 $X_{\text{max}}/\text{mm}$	46.46	30.16	27.95	26.41
	竖向位移 $Z_{\text{max}}/\text{mm}$	20.15	12.16	10.84	8.37
	轴力 $F_{\text{max}}/\text{kN}$	91.45	97.35	98.46	99.94
	安全性系数	1.251	1.849	1.853	1.878



(a) 坡面水平位移



(b) 坡顶竖向位移

图 5 位移曲线图

Fig. 5 Curve of displacement

锚杆的轴向力越大，表明锚固体-土体界面的摩擦力越大<sup>[15]</sup>，对边坡的锚固效果越佳。由表 4 可以看出：当预应力相同时，可回收锚杆 ( $l_c=0.5\text{ m}$ 、 $l_c=0.8\text{ m}$ ) 与不可回收锚杆 ( $l_c=4.0\text{ m}$ ) 在位移值、锚杆轴力以及安全性系数相近，说明此时可回收锚杆可达到与不可回收锚杆相同的支护效果。而从经济环保的角度，可回收锚杆 ( $l_c=0.5\text{ m}$ ) 性能更佳。

由图 6 可看出当锚固体长度为  $0.3\text{ m}$ ，预应力值为  $90\text{ kN}$  时，在边坡内部形成明显的潜在滑移面，而锚杆则处于边坡潜在滑移面内，这意味着锚杆未有效的利用边坡深层稳定区土体来紧固浅层滑移区土体，使边坡易失稳并造成土体坍塌。

图 7 给出了总位移矢量图，可以看出，可回收锚杆的位移矢量主要集中在边坡内部锚固体周围，呈条状分布，而不可回收锚杆则主要集中于坡面附近，在坡体内部形成圆弧滑动带，位移矢量指向边坡临空面。这说明在黄土地层中可回收锚杆的锚固体部分可以充分发挥作用，在坡体内部锚固作用明显，能够有效的约束坡体位移；不可回收锚杆的锚固段仅部分区域起到了锚固作用，存在有效受力范

围，在坡体内易形成圆弧滑裂带，坡面位移相对较大。而由图 8 也可以看出：可回收锚杆在锚固体范围内全长受力，作为对比，不可回收锚杆锚固段并非全长受力，仅在有效长度范围内起到锚固作用，在此范围以外增加锚杆长度不再提供有效锚固力。

根据数值模拟结果，发现各锚杆轴力的最大值均位于锚固段与自由段的结合处，并沿着杆长方向越接近土层深部轴力越小，这与锚杆的受力原理一致：锚杆剪应力并非均匀分布，而是随土层深度逐步呈规律性衰减，直至为零<sup>[14]</sup>。

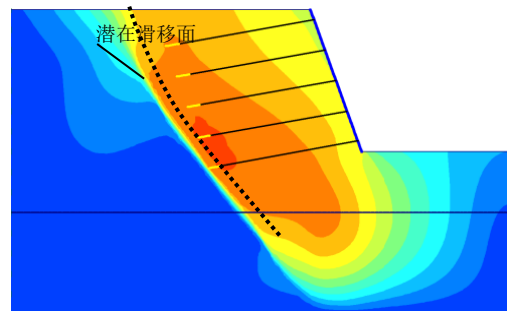
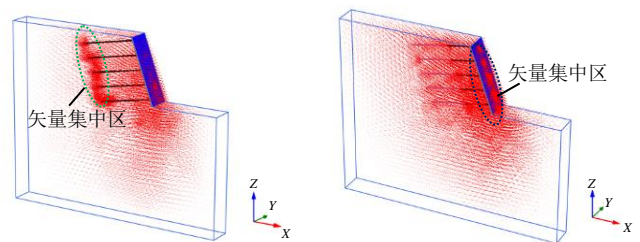


图 6 总位移云图 ( $p=90\text{ kN}$ ,  $d=150\text{ mm}$ )

Fig. 6 Nephogram of total displacement ( $p=90\text{ kN}$ ,  $d=150\text{ mm}$ )

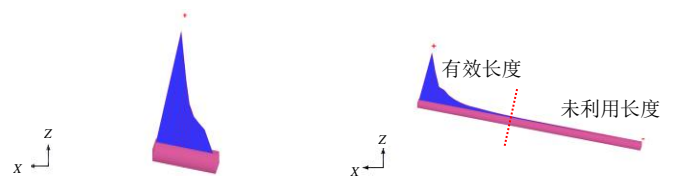


(a) 可回收锚杆 ( $l_c=0.5\text{ m}$ )

(b) 不可回收锚杆 ( $l_c=4.0\text{ m}$ )

图 7 总位移矢量图 ( $d=150\text{ mm}$ ,  $p=60\text{ kN}$ )

Fig. 7 Vector diagram of total displacement ( $d=150\text{ mm}$ ,  $p=60\text{ kN}$ )



(a) 可回收锚杆 ( $l_c=0.5\text{ m}$ )

(b) 不可回收锚杆 ( $l_c=4.0\text{ m}$ )

图 8 锚固体轴力变形图 ( $p=60\text{ kN}$ )

Fig. 8 Axial force deformation diagram of anchorage body ( $p=60\text{ kN}$ )

综上所述，对于可回收锚杆，锚固体长度有一个合理的长度范围，长度过短时锚固力提供不足，施加预应力只会适得其反，加速边坡变形，易使得边坡失稳坍塌；长度过长则无法在锚固体全长范围内受力，造成不必要的浪费；在合理的长度范围之

内时,可回收锚杆可达到与不可回收锚杆相同的支护效果,施加预应力对边坡起到了超前支护的作用,可以有效的约束边坡变形。

### 3 现场试验

#### 3.1 试验概况

结合实际工程选取试验段进行了可回收锚杆的现场拉拔试验以及锚杆回收试验,其目的在于通过现场试验检验黄土层中可回收锚杆的抗拔承载力是否满足工程要求,验证锚杆设计的合理性及安全性,并检验锚杆的回收效果。

试验段位于兰州市某基坑,土质为黄土,试验共设置6根可回收锚杆,编号分别为1号到6号,(图9),其最大加载值为设计承载力的1.2倍。试验采用穿心千斤顶系统进行多循环加载(图10)。



图9 试验现场  
Fig. 9 Test site

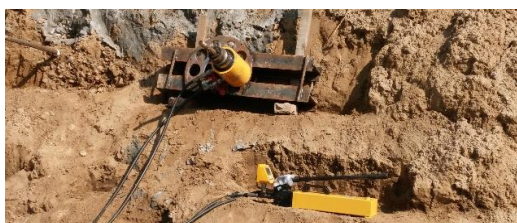


图10 试验加载  
Fig. 10 Test loading

锚杆杆体采用长7.5 m的HRB400级钢筋,锚固体长度为0.5 m,直径为150 mm,锚杆钻孔直径为150 mm。锚杆杆体采用PVC管封闭防止浆液渗入,PVC管接头处及承载体与钢筋结合处均用防水胶布密封,钢筋杆身固定对中支架,杆体外露部分用PVC管和防水胶布密封(图11)。锚杆安装完毕后从1号到6号开始第1次常压注浆(图12),每孔注满约需4 min,注完浆后倒序补浆,静置45 min后2次高压注浆。养护21 d后进行拉拔试验和回收试验。

#### 3.2 试验结果

试验结果如表5所示,试验共进行了2组,每组试验3根锚杆,预加荷载值分别为196.35 kN和246.301 kN。试验结果表明,除了4号锚杆因注浆工艺不合格致使锚杆未达到承载要求,锚杆拔出而



图11 可回收锚杆安装完成图

Fig. 11 Recoverable anchor rod after installation



图12 锚杆注浆

Fig. 12 Anchor grouting

表5 试验结果汇总

Tab. 5 Summary of test results

组号	编号	杆径/mm	预加荷载值/kN	试验荷载/kN	最大位移/mm
一	1	28	196.35	196.95	17.2
	2	28	196.35	197.25	16.8
	3	28	196.35	196.77	18.9
二	4	28	246.301	57.2	失效
	5	28	246.301	246.52	24.5
	6	28	246.301	249.09	25.2

失效外,其余锚杆承载力均达到要求。

图13给出了5号锚杆锚头在多循环荷载下的P-S曲线,可以看出锚杆P-S曲线呈现出滞回环,锚头在每级循环后均有一定的塑性位移,随着张拉荷载的不断增大,锚杆塑性位移持续增长,但从卸荷过程的变化曲线近似平行可以看出锚杆弹性变形状态较稳定,锚杆在拉拔试验中锚杆未失效,承载力达到要求。拉拔试验完成后,本试验6根可回收锚杆均得到有效回收,回收率为100%,且钢筋杆体未被腐蚀,可用于后期再利用,回收后的锚杆见图14。

#### 3.3 试验中需注意的问题

(1) 试验需严格按照规范进行压力注浆,否则会影响锚固体质量,同时影响可回收锚杆锚端解锁,继而影响后续锚杆的回收。

(2) 锚杆拉拔试验中承压板的设计很重要,承压板面积过小会使得对土体的压强较大而致使承压板向土体内运动,影响试验结果的准确性。

(3) 试验中,钢筋表面需刷防锈漆,锚杆杆

体采用 PVC 管封闭,并用防水胶布密封,可避免钢筋锈蚀,有利于后期回收再利用。

(4) PVC 套管直径过小不利于锚杆回收,根据此次试验可知套管直径比锚杆直径大 8 mm 左右较为合适,且 PVC 管表面宜作拉毛处理,以此可增大与砂浆之间的黏合程度。

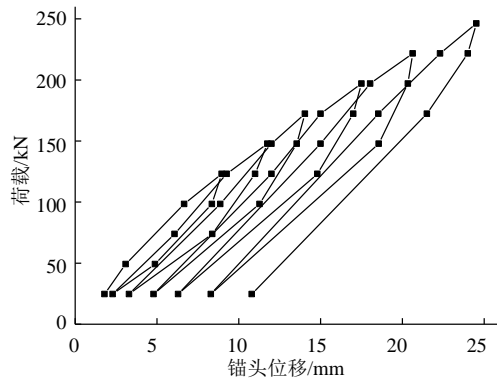


图 13 锚杆 P-S 曲线

Fig. 13 P-S curve of anchor rod



图 14 回收的锚杆

Fig. 14 Recovered anchor

## 4 结论及讨论

本文通过数值模拟与现场试验对黄土地区可回收锚杆的承载性能、受荷服役、变形破坏以及回收效果进行了研究,现讨论如下:

(1) 在加载情况相同,锚固体直径相同的情况下,可回收锚杆可达到与不可回收锚杆相同的支护效果;可回收锚杆的锚固体部分能够充分发挥作用,在锚固体范围内全长受力,在坡体内部锚固作用明显,而不可回收锚杆则仅有部分区域发挥了锚固作用。相比而言,可回收锚杆更经济。

(2) 可回收锚杆锚固体直径变化对边坡稳定性有一定影响,但影响不大。锚固体直径存在“有效周长效应”,并非越大越好。当直径较小时,存在锚杆锚固力不足的现象,当直径达到有效周长时,锚杆锚固力不会因直径的增加而增加,直径越大,往往越不利于锚固力发挥且越不经济。

(3) 可回收锚杆锚固体长度有一个合理的长

度范围,锚固体长度较短时,无法提供足够的抗剪力,施加预应力起到消极效果,加速了边坡的变形,在工程设计中,应避免该类情况的发生;当锚固体达到一定长度时,施加预应力可对边坡进行预加固,达到超前支护的效果。

(4) 通过现场试验证明可回收钢筋锚杆的锚固力可以达到设计要求,且回收率高,操作简单。但在施工过程中需要严格按照要求注浆,并做好锚杆防锈工作。

(5) 黄土地区可回收锚杆的锚固力主要由黄土的力学性质决定。根据试验结果其破坏模式主要为锚杆锚固体与黄土黏结界面破坏。相比不可回收锚杆,可回收锚杆在保证安全性的前提下使用更经济,受力更合理。

## 参考文献

- [1] 龚医君. 新型可回收式锚杆抗拔试验及数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [2] 任非凡, 满夏美, 于航. 循环荷载作用下可回收锚杆抗拔机理研究[J]. 工程勘察, 2017, 45(1): 7-11.
- [3] 庞有师, 刘汉龙, 龚医军. 可回收锚杆抗拔试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1813-1816.
- [4] 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.
- [5] 孙玉宁, 周鸿超, 宋维宾. 端锚可回收锚杆锚固段力学特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 3014-3021.
- [6] 陈志博, 王向军, 丁文其. 大直径可回收锚杆力学特性数值分析[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(S): 172-176.
- [7] 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.
- [8] 刘钟, 郭钢, 张义, 等. 囊式扩体锚杆施工技术与工程应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 205-211.
- [9] 唐士鑫, 阴可, 刘汉龙. 压力型可回收式锚杆锚固段应力分布[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(2): 1-5.
- [10] 彭文祥, 张旭, 曹佳文. 充气锚杆极限承载力计算方法[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1696-1702.
- [11] 叶帅华, 叶炜钠. 二代手动式可回收钢筋锚杆及其回收方法: 中国, 201811117077.1[P]. 2018-09-25.
- [12] 王兰民. 黄土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 2003.
- [13] 王毅. 黄土地层预应力锚索(杆)的锚固机理试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2009.
- [14] 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.