

文章编号: 1007-2993(2022)03-0196-07

# 可回收土钉墙支护结构体系施工工艺及受力研究

张钦喜<sup>1</sup> 张振双<sup>1</sup> 翟玉新<sup>2</sup> 魏 锰<sup>1</sup> 王 钰<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 中铁建设集团有限公司, 北京 100072)

**【摘要】** 基于绿色环保与碳中和理念, 提出一种可回收的土钉墙支护结构体系, 对该体系构件及施工工艺流程进行了介绍, 依托实际工程, 探讨了 1 : 0.30、1 : 0.50、1 : 0.70 支护坡比下土钉轴力、主动土压力的变化规律, 分析了不同支护坡比对土钉轴力、主动土压力的影响, 与规范中的修正公式计算出的理论值进行对比。研究表明, 同一深度的主动土压力和土钉轴力随坡比增加而增加, 同一坡比下的主动土压力和土钉轴力随深度增加而增加; 主动土压力的实测值与计算值随深度变化呈现相同趋势, 计算值略大于实测值, 土钉轴力的实测值与计算值随深度变化亦呈现相同趋势, 但计算值远大于实测值。

**【关键词】** 可回收土钉墙; 施工工艺; 主动土压力; 土钉轴力

**【中图分类号】** TU 413

**【文献标识码】** A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2022.03.005

## Research on Construction Technology and Stress of Retaining Structure System with Recoverable Soil Nail Wall

Zhang Qinxi<sup>1</sup> Zhang Zhenshuang<sup>1</sup> Zhai Yuxin<sup>2</sup> Wei Meng<sup>1</sup> Wang Yu<sup>1</sup>

(1. College of Architecture and Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing 100072, China)

**【Abstract】** Based on the concept of green environmental protection and carbon neutrality, a recyclable soil nail wall supporting structure system was proposed, and the composition and construction process of the supporting structure system were introduced. The new supporting structure system was applied to practical engineering, and its mechanical performance was discussed. The variation laws of soil nailing axial force and active earth pressure under 1 : 0.30, 1 : 0.50 and 1 : 0.70 supporting slopes were discussed, and the influences of different supporting slopes on soil nailing axial force and active earth pressure were analyzed, which were compared with the theoretical values calculated by modified formula in the code. The test results show that the axial force of soil nailing and active earth pressure increase with the increase of slope in the same depth. For the earth pressure at the same slope, the axial force of soil nailing increases with the increase of depth. According to the change of depth, comparing the actual value with the theoretical value, it can be concluded that the theoretical value and the actual value of active earth pressure have the same trend with the change of depth, and the theoretical value is slightly larger than the actual value. The theoretical value and actual value of axial tensile force of soil nailing show the same trend with the increase of depth. There is a big difference between the calculated axial force and the actual monitored axial force, and the theoretical calculation is relatively conservative.

**【Key words】** recyclable soil nail wall; construction technique; active earth pressure; axial force of soil nail

### 0 引言

土钉墙支护体系是指在原位土体中植入土钉, 使土钉与原位土体形成一整个受力体<sup>[1]</sup>, 从而达到增加土体抗剪强度的目的, 待土钉植入土体后, 再对边坡的面层喷射一层混凝土来进行护坡。土钉墙支护结构对施工场地要求低, 不需要大型施工机具, 施工速度也比较快, 施工成本低, 并且支护完成后不会单独占用空间。然而, 传统土钉墙中的土钉以及混凝土面层属于一次性投入, 无法回收再利用, 存在一定的

浪费; 在狭窄的场地施工土层锚杆时, 往往超出用地红线; 面层混凝土喷射过程中对环境有一定的污染。因此, 基于绿色环保和碳中和的理念, 可回收土钉墙是必要的发展趋势<sup>[2]</sup>。

土钉墙设计中稳定性是最重要的问题。Seed<sup>[3]</sup>通过现场试验监测, 介绍了土钉墙的施工工艺, 同时通过数值模拟, 对土钉墙进行了试验验证。张建龙<sup>[4]</sup>等通过对某基坑土钉内力及土体位移的现场测试, 分析了土钉支护的内力分布规律和土体位移特征, 研究

作者简介: 张钦喜, 男, 1964年生, 教授, 研究生导师, 主要从事地基处理及基坑工程等方面的教学与研究工作。E-mail: qinxizhang@126.com

了基坑土钉支护的工作性能。胡渊等<sup>[5]</sup>通过模型试验对比不同工况下原位土、土钉墙支护下不同的土钉间距、不同的土钉长度以及不同的入射角度四种工况下的土压力以及土钉拉力的变化情况。作用在面层上的主动土压力没有统一的结论,有些学者认为,面层的土压力应该取 Rankine 主动土压力<sup>[6]</sup>或者 Peck 土压力<sup>[7]</sup>,一些工程中,基于绿色环保和可持续发展的理念,本文拟针对土钉墙这一传统的基坑支护形式进行技术革新,研发可回收土钉支护技术和施工工艺,从而达到节约资源、减少污染、方便施工的目的。

## 1 可回收土钉墙支护体系施工工艺

### 1.1 构件组成

可回收土钉墙结构体系由面层锚板、土钉、封头螺母、PVC管、承压板、复合土工布等构件采用装配式施工工艺进行施工组装而成(见图1、图2)。

(1)面层锚板:面层锚板是由 6061-T6 的铝合金材料制成,其材料的弹性系数为 68.9 GPa,密度 2800 kg/m<sup>3</sup>。面层锚板由底板、方环以及肋板焊接组成。将面层锚板布置在土体临空面,土钉穿过锚板中间的方环插入土体中,通过螺母将锚板与土钉固定到一起,当受到侧向土压力时,锚板底板能起到有效的约束作用,是新型土钉墙支护体系约束土体变形的受力构件。

(2)土钉:与传统土钉相比,新型土钉的不同之处在于对土钉的两个端部进行了套丝,一端与插入土体内部的承压板相连,另一端套丝与面层锚板相连。土钉的套丝部分需要能保证与螺母较好地连接,同时在土钉外部套置一层 PVC 管,使得注浆时,土钉不与浆体直接接触,能保证在支护完成时较容易地拔出回收。土钉示意图见图1(d)。

(3)土钉底部承压板及封头螺母:封头螺母与承压板焊接固定,土钉一头拧入封头螺母,再将 PVC 管一头涂胶插入承压板,承压板由 10 mm 厚的 A3 钢板制作,封头螺母选用 8.8 级 M20×2 的高强螺母。螺母的型号应与土钉套丝的预留位置相匹配。

(4)复合土工布:复合土工布是由土工织物与土工膜复合而成的材料,由于在土工织物中加入了防水性较好的土工膜,所以复合土工布也具有较好的防水性。复合土工布为两布一膜,幅宽 4~6 m,单位面积质量为 80~600 g/m<sup>2</sup>。复合土工布在生产过程中加入了防老化剂,可在较恶劣的环境中使用。

### 1.2 工艺流程

(1)修整边坡:对土体进行开挖,挖至土钉的设计

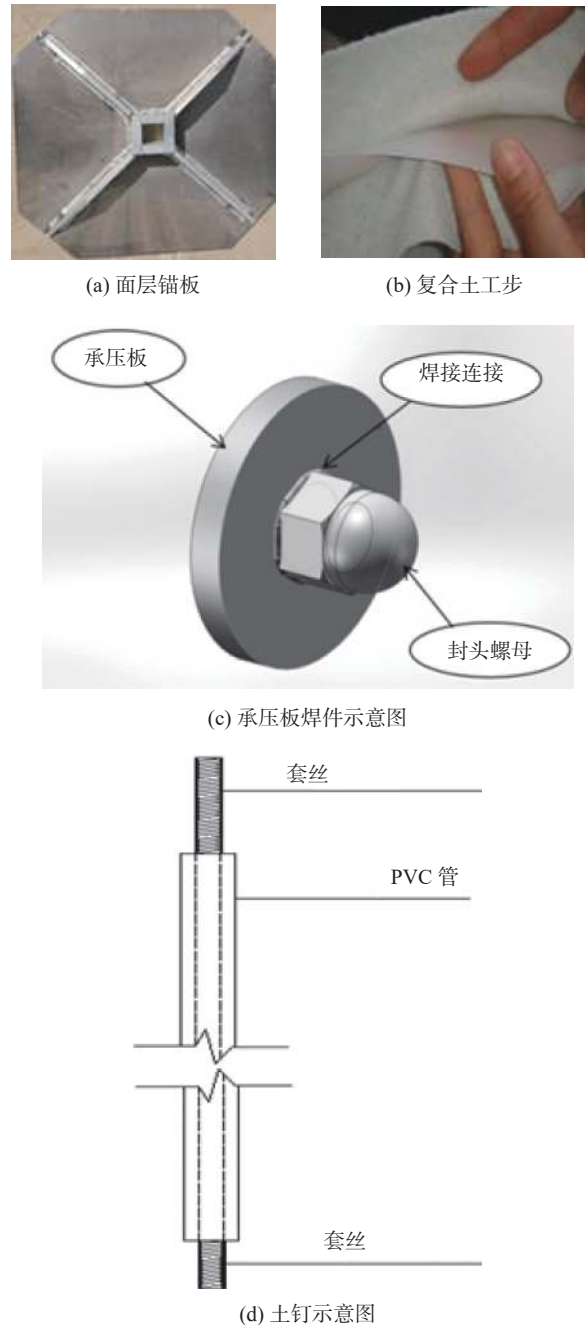


图1 各构件示意图

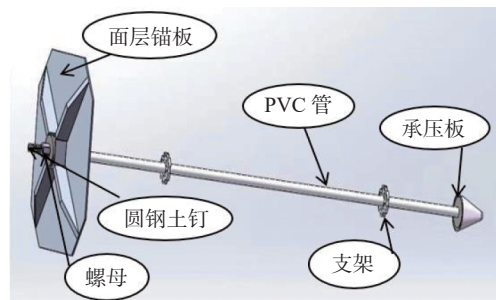


图2 可回收土钉结构示意图

标高后,需要继续超挖 0.5 m,同时进行边坡的修整。注意边坡一定要平整,若未达到平整度允许范围内的

要求,则会影响后期面层锚板的安装。

(2)土钉孔放点:在成孔前需要根据设计给定的土钉点位标高以及土钉之间的水平距离确定孔位。

(3)钻机成孔:在钻孔过程中,为了保证钻孔倾斜角度的准确性,需要用专门的角度测量仪器对其倾角进行控制,严格控制其倾斜角度进行钻孔。为了防止因钻孔深度不够而对支护结构造成的影响,新型土钉墙在钻机成孔时,要比设计深度多钻进 500 mm。

(4)插入土钉组合:将加工好的土钉组合体尽量沿钻孔的中心放入孔内。在插入土钉时,要控制土钉的支架处于土钉下侧。土钉全长套  $\phi 25$  的 PVC 管,沿土钉的长度方向,在 PVC 管上每间隔 2 m 安装一个隔离架,以便安放注浆管和排气管。

(5)注浆:将注浆管和排气管插入隔离架中心孔至杆端 30 ~ 50 cm 处,并用水灰质量比为 0.50 ~ 0.55 浆液进行注浆,在一次注浆完成 2.0 h 内进行二次补浆,并将孔口封堵,保证水泥浆体充满整个钻孔。

(6)铺放土工布:在距离坡顶 1 m 远处的自然地面打下  $\phi 20$ 、间距 1500 mm 的摩擦钉将复合土工布固定,然后从坡顶顺坡铺展土工布。每块土工布之间的搭接长度为 800 mm。

(7)安装面层压板:在铺放好的土工布上人工开孔,将每一横排土钉都穿过土工布后,再把面层承压板套入土钉端部并压在土工布上,通过电动扳手拧进加厚螺母将面层压板压紧在土工布上(见图 3)。

(8)可回收土钉土钉墙的拆卸流程为:先将带肋面层锚板上螺母拆卸,然后取下面层锚头,可以用液压钳将土钉回收。拆卸过程中要逐层拆卸,然后保存每个回收的土钉构件,下次循环使用。



图3 支护效果图

### 1.3 工作机理

可回收土钉墙的构造与传统土钉墙的构造不同,前者是杆体和灌浆体不直接接触,土钉支护完成后,当土体发生位移时,端部的承压板将荷载传递给灌浆体,使其受到压力,灌浆体再通过与周围土体或岩层的粘结力和咬合力提供与之相对应的抗力。其受力示意图见图 4。

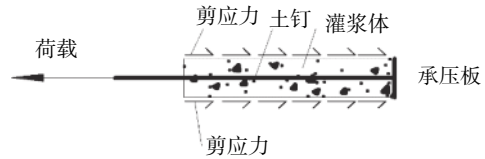


图4 可回收土钉受力示意图

## 2 试验概况

### 2.1 场地概况

项目位于北京市丰台区东铁营,总建筑面积 66459.87 m<sup>2</sup>,由 3 栋住宅楼、5 栋配套用房及 1 座地下车库组成。因面积较大,项目分为两期施工。本次新型土钉墙支护应用于一二期交界位置,基坑开挖深度 9.92 m,基坑分两级开挖,级间设置 2 m 宽平台,第一级边坡高度 4 m,坡比 1 : 0.50,第二级边坡坡高 5.92 m,为测试不同坡比条件下新型土钉墙的受力特性,第二级边坡在开挖过程中,分为 1 : 0.30、1 : 0.50、1 : 0.70 三种坡比进行支护。

### 2.2 场地地质条件

场地表层为人工填土,其下为第四纪沉积层,按其物理力学指标划分为若干大层和亚层,各地层分布厚度及有关物理力学参数见表 1。

表 1 剖面土层参数

序号	土类名称	土层厚度/m	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
1	杂填土	4.20	1.80	10.00	18.00
2	粉砂	2.00	2.00	0.00	28.00
3	砂质粉土	1.60	1.98	10.00	28.50
4	粉质黏土	2.20	2.06	24.50	20.60
5	黏质粉土	4.20	2.04	24.00	19.40
6	粉质黏土	4.00	2.04	26.00	21.55
7	粉砂	1.50	2.00	0.00	28.00
8	黏土	2.80	1.83	50.50	12.50
9	细砂	7.20	2.05	0.00	32.00
10	卵石		2.15	0.00	36.00

### 2.3 试验设备

本测试选用振弦式钢筋计,型号为 HF-100,频率读数仪型号为 609A,通过频率读数仪可以直接测得读数,并通过计算公式将测得的频率转化为相应应力。主动土压力采用振弦土压力盒测试,量程为 0 ~ 0.15 MPa,直径为 100 mm。见图 5、图 6、图 7。

### 2.4 监测方案设计

出于施工和测试安全便利考虑,数据监测安排在第二级边坡处,在 1 : 0.30、1 : 0.50、1 : 0.70 三种坡比剖面均设置四排土钉。不同坡比下每排土钉根



图5 HF-100型钢筋计传感器



图6 609A型频率读数仪

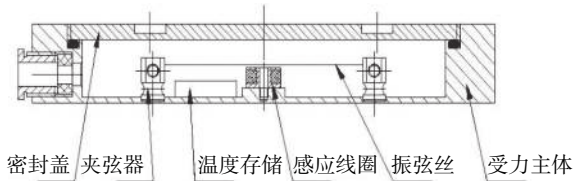


图7 土压力盒内部结构图

数为6根,所以共计72个土钉拉力测点以及72个土压力测点来对土钉轴力以及侧向土压力进行监测。监测点位置分布情况见图8。

### 3 主动土压力分析

#### 3.1 主动土压力的理论计算

《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)中,对于采用土钉墙支护的边坡,不同坡比情况下,其主动土压力的计算有明确的计算方法,即用朗肯土压力的理论计算值乘以一个折减系数。修正后的主动土压力计算公式见式(1)一式(4)<sup>[6]</sup>:

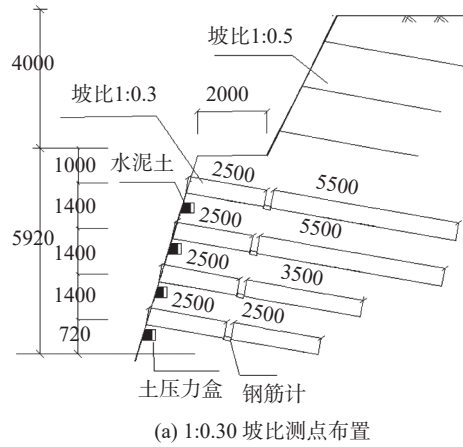
$$p'_a = p_{a,k} \zeta \quad (1)$$

$$p_{a,k} = \sigma_{ak} K_{a,i} - 2c_i \sqrt{K_{a,i}} \quad (2)$$

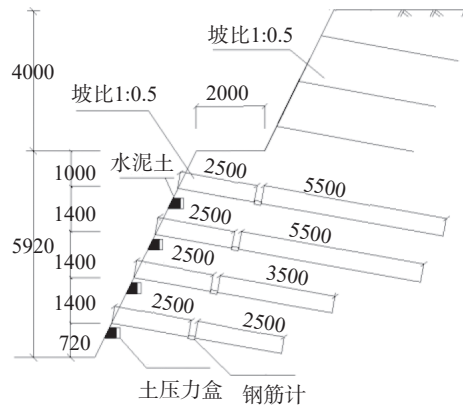
$$K_{a,i} = \tan^2 \left( 45 - \frac{\varphi_i}{2} \right) \quad (3)$$

$$\zeta = \tan \left( \frac{\beta - \varphi_m}{2} \right) \left( \frac{1}{\tan \frac{\beta - \varphi_m}{2}} - \frac{1}{\tan \beta} \right) \tan^2 \left( 45 - \frac{\varphi_m}{2} \right) \quad (4)$$

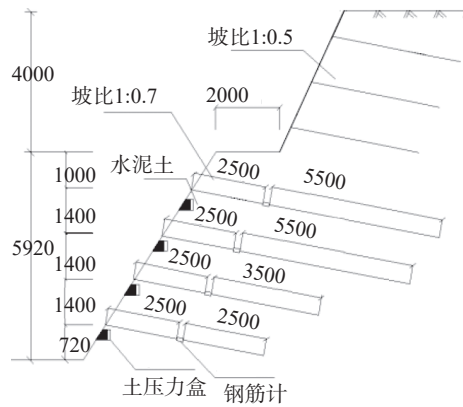
式中:  $p'_a$  为土钉墙支护下,修正后的主动土压力;  $p_{a,k}$  为支护结构外侧,第  $i$  层土中计算点的主动土压力强度标准值, kPa;  $\zeta$  为墙面倾斜时主动土压力折减系数;  $\sigma_{ak}$  为第  $i$  层土的主动土压力系数;  $c_i$  为第  $i$  层土的黏聚力, kPa;  $\varphi_i$  为第  $i$  层土的内摩擦角, ( $^\circ$ );  $\beta$  为土钉墙坡面与水平面的夹角, ( $^\circ$ );  $\varphi_m$  为基坑底面以上各土层按厚度加权的等效内摩擦角平均值, ( $^\circ$ )。



(a) 1:0.30 坡比测点布置



(b) 1:0.50 坡比测点布置



(c) 1:0.70 坡比测点布置

图8 测点布置图(单位:mm)

根据相关土层参数,计算出基坑底面以上各土层按厚度加权的等效内摩擦角平均值 $\varphi_m$ ,即:

$$\varphi_m = \frac{20.6^\circ \times 2.12 + 1.6 \times 28.5^\circ + 2 \times 28^\circ + 4.2 \times 18^\circ}{9.92} = 22.26^\circ$$

据式(2)可以计算出不同测点处的郎肯主动土压力值(见表2)。

表2 郎肯主动土压力值

深度/m	$\varphi/(\circ)$	$K_{a,j}$	$\sigma_{ak}/\text{kPa}$	$c_j/\text{kPa}$	$P_{a,k}/\text{kPa}$
5	28	0.361	91.6	0	33.068
6.4	28.5	0.354	133.68	10	35.424
7.8	28.5	0.354	147.28	10	40.237
9.2	20.6	0.479	176.12	20.6	55.851

通过三角函数可以求出土钉墙的坡角,即当坡比为1:0.30时, $\beta=73.3^\circ$ ;1:0.50时, $\beta=63.4^\circ$ ;1:0.70时, $\beta=55^\circ$ 。将 $\beta$ 和 $\varphi_m$ 代入式(4),可求出不同坡比下对应的主动土压力折减系数 $\zeta$ (见表3)。

表3 不同坡比下主动土压力折减系数

$\zeta$ (坡比1:0.30)	$\zeta$ (坡比1:0.50)	$\zeta$ (坡比1:0.70)
0.642	0.481	0.359

根据式(1)可知,将不同坡比下的 $\zeta$ 值乘以朗肯主动土压力,即可得出《建筑基坑支护技术规程》中修正后的主动土压力值,故根据表1与表2中的数据,即可求出土压力修正值,修正后的主动土压力见表4。

表4 修正后的主动土压力

深度/m	$p'_a/\text{kPa}$		
	坡比1:0.30	坡比1:0.50	坡比1:0.70
5	21.23	15.906	11.871
6.5	22.531	17.039	12.717
7.8	25.832	19.354	14.445
9.2	35.856	26.864	20.051

### 3.2 主动土压力实际监测

对数据进行持续监测,在施工完成后的第7天,数值趋于稳定,所以取支护完成后第7天稳定的数据与修正后的主动土压力值进行对比分析。第7天不同坡比下主动土压力监测值见图9。

根据图9中实测的土压力值可以知,土钉墙支护完成后,在同一深度处,随着边坡坡比的增加,土压力也相应地增大。对于同一坡比下的土压力,土压力会随着深度的增加而增加。

将不同坡比下数值稳定后的土压力与按规范公式修正后主动土压力理论值进行对比,见图10。

根据图10可以看出,三种不同坡比下的主动土

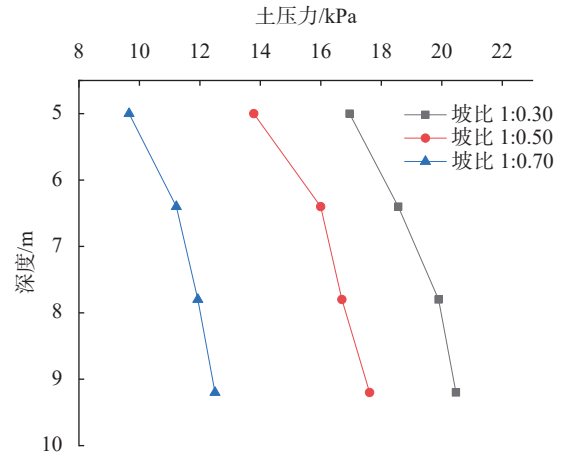


图9 第7天主动土压力实测值

压力实测值与理论值沿深度变化的规律相类似,即均随着深度的增加而增大。但是,随着深度的增加,实测得主动土压力比理论计算值增加更缓慢。同时,实测的主动土压力比理论计算值要小,造成的原因可能是基坑开挖深度较深,分两级边坡进行支护,中间2m宽度的平台减小了上部土体的自重应力,从而导致平台以下的侧向土压力比理论值偏小。由图中的信息可以看出,三种坡比下,在最深的测点处,实测主动土压力与理论计算值有较大的差别。

## 4 土钉轴力分析

### 4.1 土钉轴力的理论计算

《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012)中,对于采用土钉墙支护的边坡,其单根土钉的轴向拉力标准值 $N_{k,j}$ 有明确的公式计算方法。轴向拉力标准值的计算见式(5):

$$N_{k,j} = \frac{1}{\cos \alpha_j} \zeta \eta_j p_{ak,j} s_{x,j} s_{z,j} \quad (5)$$

土钉轴向拉力调整系数 $\eta_j$ 的计算见式(6)、式(7):

$$\eta_j = \eta_a - (\eta_a - \eta_b) \frac{z_j}{h} \quad (6)$$

$$\eta_a = \frac{\sum (h - \eta_b z_j) \Delta E_{a,j}}{\sum (h - z_j) \Delta E_{a,j}} \quad (7)$$

式中: $N_{k,j}$ 为第 $j$ 层土钉的轴向拉力标准值,kN; $\alpha_j$ 为第 $j$ 层土钉的倾角, $(^\circ)$ ; $\eta_j$ 为第 $j$ 层土钉的轴向拉力调整系数; $p_{ak,j}$ 为第 $j$ 层土钉处的主动土压力强度标准值,kPa; $s_{x,j}$ 为土钉水平间距,m; $s_{z,j}$ 为土钉垂直间距,m; $z_j$ 为第 $j$ 层土钉至基坑顶面的垂直距离,m; $\Delta E_{a,j}$ 为作用在 $s_{x,j}$ 、 $s_{z,j}$ 为边长的面积内的主动土压力标准值,kN; $\eta_a$ 为计算系数; $\eta_b$ 为经验系数,可取0.6~1.0。

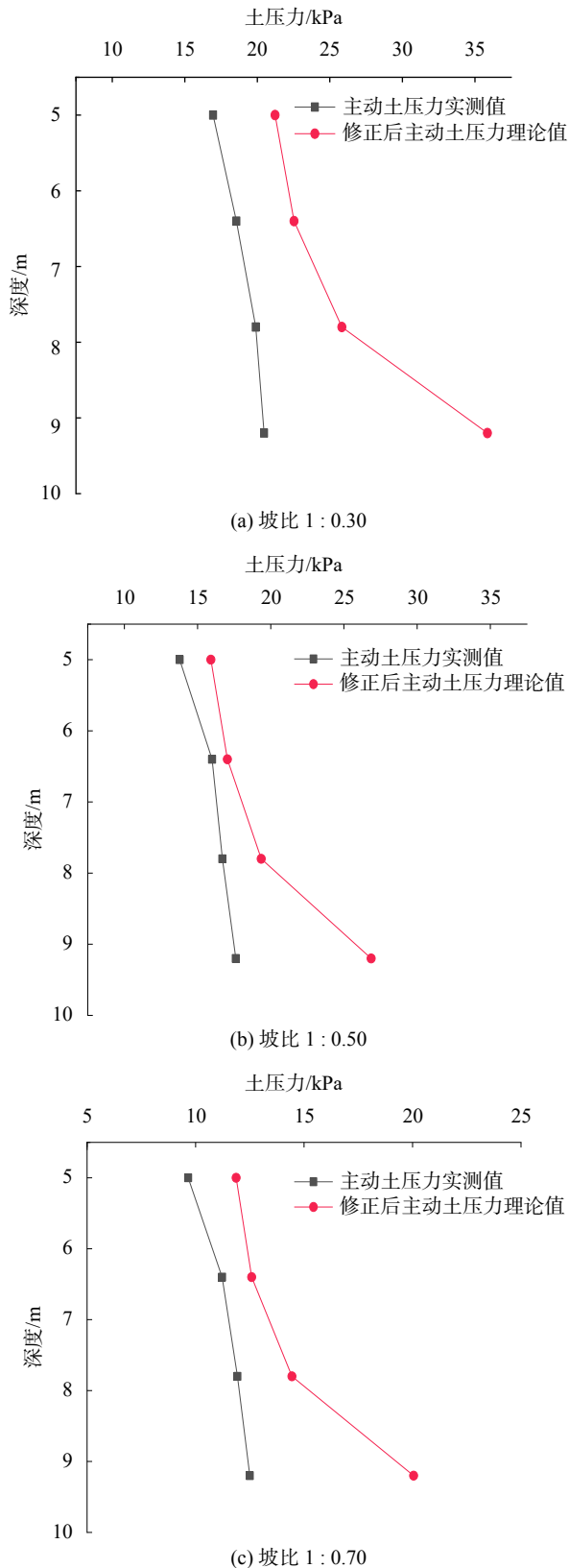


图 10 不同坡比下主动土压力实测值与理论值对比

本次计算时,经验系数 $\eta_b$ 取 0.8,根据表 3 及式(6)、式(7)可以计算出 $\eta_a = 1.6$ ,由此可以计算深度为 5 m、6.4 m、7.8 m 及 9.2 m 处的 $\eta_j$ 分别为 1.191、

1.084、0.971、0.858。主动土压力取值见表 2,主动土压力折减系数 $\zeta$ 的取值同表 3,根据式 5 计算出的第  $j$  层土钉的轴向拉力标准值 $N_{k,j}$ 见表 5。

表 5 土钉轴向拉力标准值

深度/m	$N_{k,j}/\text{kN}$		
	坡比1 : 0.30	坡比1 : 0.50	坡比1 : 0.70
5	54.166	40.582	30.289
6.5	51.547	38.370	28.384
7.8	53.465	40.057	29.897
9.2	65.575	49.130	36.669

#### 4.2 土钉轴力实际监测

监测同主动土压力监测时间一样,取施工完成后第 7 天的数据,与土钉轴向拉力标准值进行对比分析。图 11 为不同坡比下的土钉轴向拉力监测值。

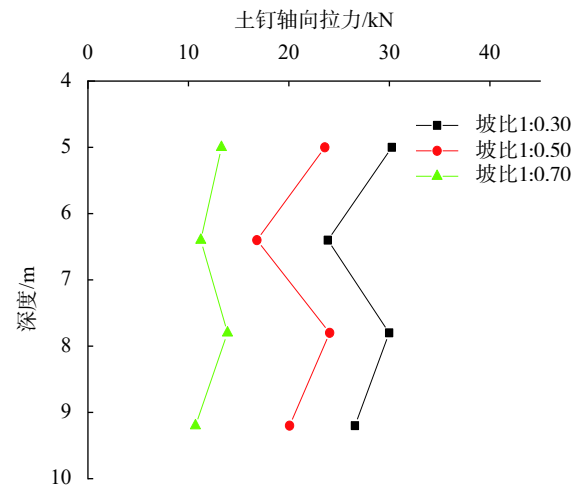


图 11 第 7 天土钉轴向拉力实测值

根据图 11,可以得出:

(1)在同一深度处,土钉轴力随着坡比的增加而增加;

(2)三种坡比中,实测的土钉轴向拉力最大值大致出现在倒数第二排位置处,同时第一排土钉的拉力值也比较大。出现这种情况的原因一方面是上部土层比较松软,物理力学性质较差,会使得在支护过程中产生的位移较大,从而导致土钉拉力较大;另一个方面是上部土钉的变形具有一定的累加效应,随着基坑开挖深度的增加,上部土层产生的位移变形累加值不断增加,从而导致土钉轴向拉力较高。

将不同坡比下第 7 天实测的土钉轴向拉力值与按规范公式修正后土钉轴力理论值进行对比(见图 12)。

由图 12 可以得出,土钉在实际工程中所受到的力与理论计算值相差较大,实际产生的轴向拉力要远小于理论计算得到的拉力。由本次的试验的对比结

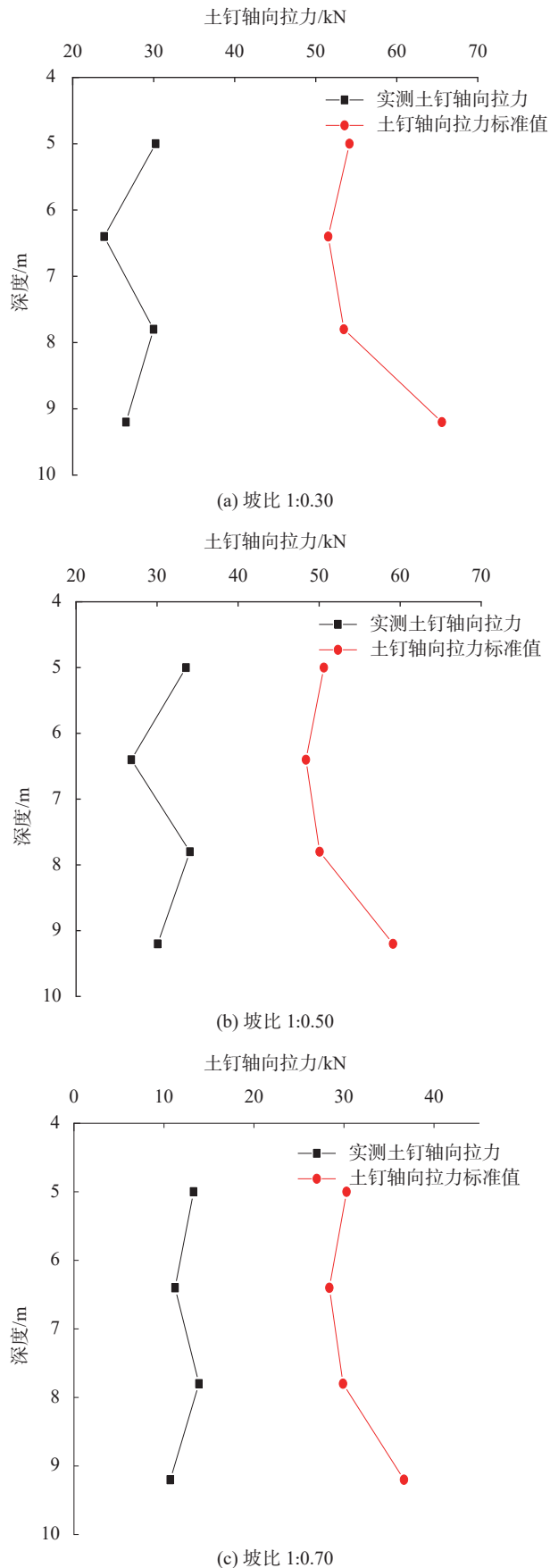


图 12 不同坡比下土钉轴力实测值与理论值对比

果可以看出,在支护过程中,土钉实际受到的拉力一般小于 25 kN,最大拉力也没有超过 35 kN。如果按照理论方法计算土钉所受到的轴向拉力,并用此拉力对土钉进行设计,那么设计将过于偏保守,对材料有一定的浪费。

## 5 结论

(1)提出了一种可回收土钉支护结构体系,并对各构件组成及施工工艺进行了介绍。

(2)试验研究表明,在同一深度处,土压力和土钉轴力均会随着边坡坡比的增加而增大;同一坡比条件下,土压力和土钉轴力亦会随着深度的增加而增大。

(3)按照《建筑基坑支护技术规程》中计算出的主动土压力理论值比实测的主动土压力值略大,尤其在坡底位置处两者的土压力值相差较大。但是不同坡比下的土压力实测值和理论值随深度变化规律相类似,可以为实际工程中的应用提供参考。

(4)不同坡比下,土钉在实际工作过程中受到的拉力均远小于按理论公式计算得到的拉力值。

## 参考文献

- [1] 何江飞. 土钉墙支护结构的作用机理及面层受力分析研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
- [2] 柳颂丹. 绿色土钉墙支护结构体系施工工艺及经济性分析[D]. 北京: 北京建筑大学, 2020.
- [3] SEED H B, REESE L C. The action of soft clay along friction piles[J]. ASCE Translation, 1957, 122: 92-101.
- [4] 张建龙, 何家柱. 基坑土钉支护结构受力及变形分析[J]. 工程勘察, 2003, (2): 39-41.
- [5] 胡 渊, 张福龙, 王 旭, 等. 土钉墙支护技术室内模型试验对比研究[J]. 兰州工业学院学报, 2015, 22(1): 23-28.
- [6] JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [7] 林宗元. 岩土工程治理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.

收稿日期: 2021-07-14