

文章编号:1004-3918(2003)03-0315-05

# 土钉与桩锚联合支护结构的计算模式

郭院成, 王立明, 郑秀丽

(郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:**土钉与桩锚联合支护结构是由土钉支护与桩锚支护共同构成。在基坑边壁土压力及其它各种荷载作用下,土钉与桩锚作为一个整体共同抵抗荷载和变形。本文从分析土钉支护结构的受力特点、施工特点和破坏类型入手,研究分析了土钉与桩锚联合支护结构的协同工作机理,以及土钉与桩锚联合支护结构的设计计算内容与方法。

**关键词:**土钉支护;桩锚支护结构;破坏类型;外部稳定性;内部稳定性;重力式挡墙

**中图分类号:**TU470<sup>+</sup>.3 **文献标识码:**A

土钉支护结构通过加固边壁土体,使边壁土体成为支护结构的一部分。土钉支护结构随挖随支,具有施工速度快,工程造价低,施工难度小及土体适应性强等优点。但土钉支护结构随着开挖深度的增加,水平侧移较大,要求适当放坡。由于城市复杂建筑环境而无法放坡时,需要运用土钉与其他支护相结合的联合支护结构。

桩锚支护结构是基于排桩支护结构基础上的一种改良方法,通过设置单层或多层预应力锚杆,使排桩坑底的嵌固深度显著降低,排桩沿竖向侧压力分布趋于均匀,并有效的减小主动侧压力产生的水平侧移。但实际工程中,锚杆预应力水平较高时常要求锚杆长度较大,而通常情况下城区地理系统非常复杂,地下水位较高,且坑外可使用空间较小,给施工带来了极大困难,使锚杆预应力水平难以达到要求。

将土钉支护结构与桩锚支护结构联合使用,通过合理设计,可实现桩锚结构水平侧移小和土钉结构受力合理的优点。土钉与桩锚构成一个整体结构共同受力,土钉结构底部水平摩阻力的存在可有效降低桩锚结构中的桩体嵌入深度和锚杆预应力水平;而桩锚结构强度的预先形成,可显著提高土钉支护结构的施工进度,并有效提高土钉支护结构的稳定性。

## 1 土钉支护结构

### 1.1 土钉支护结构的受力特点

土钉支护结构在现场原位土中置入较密间距的细长杆件,如钢筋或钢管等,通常还外裹水泥砂浆或水泥净浆浆体(如注浆钉)。土钉沿通长与周围土体接触,以群体起作用,与周围土体形成一个组合体,在土体发生变形条件下,通过与土体接触界面上的粘结力或摩擦力,使土钉被动受拉,并主要通过受拉工作给土体以约束加固或使其稳定。因此土钉支护是一种被动约束机制。土钉受拉时,拉力沿其整个长度是变化的,一般是中间大、两头小。土钉拉力沿高度方向也是变化的,支护中受力最大的土钉位于中部,底部的土钉受力最小。但临近破坏时,底部土钉拉力显著增长。

土钉支护随着开挖深度的增加,支护结构不断地向外移动,产生水平位移。在匀质土中,支护面的位移沿高度大体呈线性变化,类似绕趾部向外转动,最大水平位移发生在顶部。但在非匀质土中或地表为斜坡或受有地表重载时,最大水平位移点的位置可能移向下部。土钉支护结构的水平位移较大,当土钉支护结构用于城市建筑物密集地区的深基坑工程时,或地下水位较高,或必须考虑相邻建筑物及地下管线因变形而引起的不良后果时,限制支护的变形,保证周围建筑物设施的环境安全就变得尤为重要,变形控制成为主要控制条件。现在已广泛采用土钉支护与其他支护结构(如排桩、锚杆等)联合使用的复合土钉支护模式,使土钉支护的应用范围得以扩大,变形条件更易符合要求。

收稿日期:2003-01-10

基金项目:河南省科技攻关计划项目(0224620011)

作者简介:郭院成(1965-),男,河南辉县人,郑州大学土木工程学院教授,博士。

1.2 土钉支护结构的施工特点

土钉支护的施工步骤遵循从上到下、分步修建,即边开挖、边支护的原则。控制每步的开挖深度,合理安排作业顺序,使开挖面上的裸露土体能在设置支护前的短时间内(至少几小时)保持稳定,对限制土钉支护的变形至关重要。土钉支护的变形不仅与结构设计参数有关,而且在很大程度上取决于施工方法、施工工序和施工速度。

1.3 土钉支护结构的破坏类型

土钉支护结构的破坏类型主要有体外破坏和体内破坏两种。

1.3.1 土钉支护结构的外部稳定性破坏

当土钉支护结构发生体外破坏时,发生失稳的破坏面在土钉加固土体的外部,这时整个支护作为一个刚体发生如图 1 的失稳情况:(1)沿支护底面滑动;(2)绕支护面层底端(墙趾)倾覆,或支护底面竖向土压力,超过地基承载力;(3)连同周围和基底深部土体滑动。

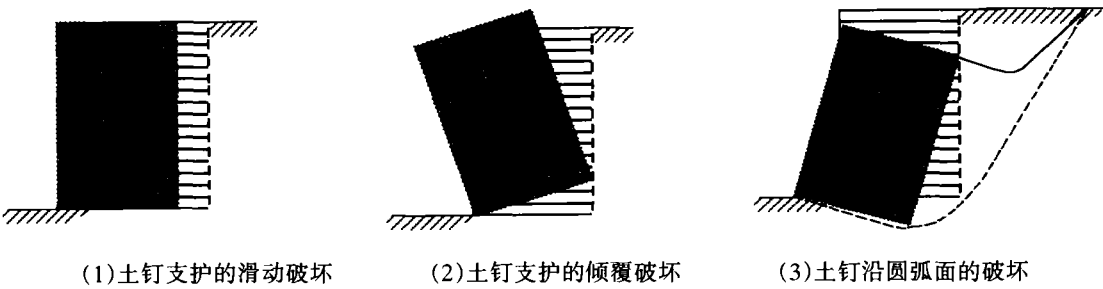


图 1 土钉的外部稳定性破坏

Fig. 1 The exterior stability failure of the soil - nailing retaining structure

1.3.2 土钉支护结构的内部稳定性破坏

当土钉支护结构发生体内破坏时,土体破坏面全部或部分穿过加固了的土体内部(如图 2),有时将部分穿过加故土体的破坏情况称为混合破坏。当支护结构内有薄弱土层时,还可能发生沿薄弱层的滑动破坏(如图 3)。另外,土钉支护还可能在施工阶段发生破坏,即当开挖到某一作业面深度,但尚未设置这一步土钉时,支护发生的破坏(如图 4)。

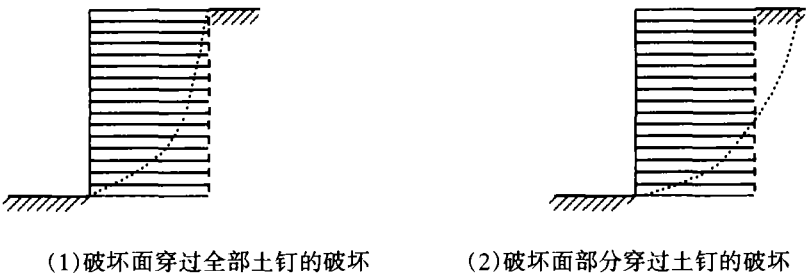


图 2 土钉支护内部稳定性破坏

Fig. 2 The interior stability failure of the soil - nailing retaining struture

1.4 土钉支护结构的设计计算内容

土钉支护结构分析的任务是使支护结构在极限状态(强度破坏和稳定破坏)下具有一定的安全储备,并在使用状态下满足变形控制要求。土钉支护结构的设计计算内容主要有:

- (1)结构的整体稳定性分析。可分为外部稳定性分析和内部稳定性分析;
- (2)土钉内力分析,又可称为土钉支护结构的局部稳定性分析;
- (3)土钉抗力计算,包括土钉的抗拉强度和抗拔能力两个方面;
- (4)支护面层的内力分析和强度验算;
- (5)支护变形及其对周围建筑物、道路和地下设施影响的环境安全评价。

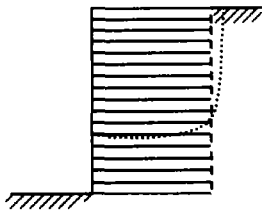


图 3 土钉支护沿薄弱层的破坏

Fig.3 The weak section failure of the soil - nailing retaining structure

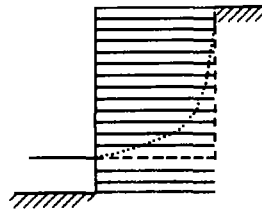


图 4 土钉支护施工阶段内部稳定性破坏

Fig.4 The interior stability failure of the soil - nailing retaining structure in the process of construction

## 2 桩锚与土钉联合支护结构

### 2.1 桩锚与土钉联合支护结构

土钉支护结构的使用具有一定的局限性,它仅适用于地下、水位较低的自立性较好的土层,例如,具有一定胶结能力和密实度的砂土、粉土和砾石土、素填土,坚硬或硬塑的粘性土,以及风化岩等。并且,对于支护位移和土体沉降有严格要求的情况下,不可以单独使用土钉支护结构。

采用土钉、排桩和预应力组成的联合支护结构,即可运用排桩的超前支护解决土体的自立性和隔水性等问题,又可以运用预应力锚杆减少支护的位移,使土钉支护结构的应用范围得以扩大,以满足复杂的城区工程建设要求。

将土钉与桩锚支护结构联合使用,土钉与桩锚构成一个整体共同受力。土钉支护结构底部水平摩擦阻力的存在可有效降低桩锚结构中桩体嵌入深度和锚杆预应力水平;而桩锚结构强度的预先形成,可显著提高土钉支护结构的施工进度,并有效提高土钉结构的内部稳定性。

### 2.2 桩锚支护结构

桩锚支护结构由竖向钢筋混凝土灌注桩和斜向(或水平)预应力锚杆构成。在基坑内外土压力作用下,桩体处于受弯状态,锚杆处于受拉状态。由于预应力锚杆对桩体提供了支撑力,使桩体在水平土压力作用下内力分布趋于均匀,桩身受力较合理。通过设置预引力锚杆,在基坑开挖过程中,可有效提高支护结构的抗倾覆稳定性,显著地缩短桩体在土中的嵌固深度,降低了施工难度和工程投资。

桩锚支护结构的设计计算包括预应力锚杆和排桩两部分,其中锚杆位置和预应力水平的设计按等值梁法计算,排桩插入土体深度依据支护结构整体抗倾覆稳定性条件确定。

### 2.3 土钉支护结构

土钉支护结构通过对基坑边壁土体强度的加强和提高,使基坑产生荷载的土体成为支护结构的一部分。基坑开挖支护过程中,随着边壁邻空高度的增加,土体侧压力增大,支护结构的抗力水平提高,使边壁土体强度得到最大限度的使用。

土钉支护结构的设计计算内容主要包括内部稳定性验算和外部稳定性验算。

### 2.4 土钉与桩锚联合支护结构的设计计算

在基坑边壁土压力作用下,土钉与桩锚作为一个整体结构共同承担荷载和变形。采用土钉和桩锚联合支护结构,可充分发挥土钉支护结构和桩锚支护结构的优点,并使两种支护结构相互促进,相互协调,更有利于发挥其各自的优越性,因此,工程中现已取得了实践应用。土钉与桩锚联合支护结构的设计计算内容主要包括:

(1)锚杆预应力的计算;(2)桩体嵌入深度的确定;(3)土钉内部稳定性验算;(4)土钉外部稳定性验算。

现以单支点桩锚结构与土钉结构联合支护为例,介绍支护结构的设计计算内容。

#### 2.4.1 锚杆预应力计算

锚杆预应力计算采用等值梁法,在土压力为零点(图 5 的 c 点)对其上部全部力取矩,由平衡条件得出  $T_1$  值。锚杆预应力值计算公式为:

$$T_1 = \frac{h_{a1} \sum E_{aj} - h_{c1} \eta_F F_a - Ga}{h_{T1} + h_{c1}} \quad (1)$$

式中:  $\sum E_{aj}$ —弯矩零点位置以上基坑外侧水平土压力之和;  $h_{a1}$ —合力  $\sum E_{aj}$  距弯矩零点的垂直距离;  $h_{c1}$ —弯矩零点距基坑底面的垂直距离;  $F_a$ —土钉底部水平摩阻力标准值;  $\eta_F$ —土钉底部水平摩阻力发挥系数。一般应根据基坑实际水平侧移的相对大小来确定,通常情况下取为 0.4~0.6;  $T_1$ —锚杆预应力水平值(以下公式同);  $h_{T1}$ —锚杆水平预应力距坑底的垂直距离。

在计算锚杆预应力值时,忽略弯矩零点至基坑底面的内侧水平土压力的有利影响。

#### 2.4.2 桩体嵌入深度的确定

计算桩体嵌入深度时,桩底以上所有力都对桩底取矩,运用平衡条件求嵌入深度值:

$$h_p \sum E_{pj} + h_d \eta_F F_a + T_1(h_{T1} + h_d) + Ga - 1.2\gamma_0 h_a \sum E_{aj} \geq 0 \quad (2)$$

式中:  $h_d$ —坑底至桩底的垂直距离;  $\sum E_{aj}$ 、 $\sum E_{pj}$ —桩底以上基坑外侧和内侧水平土压力和;  $h_p$ 、 $h_a$ —合力  $\sum E_{aj}$ 、 $\sum E_{pj}$  距桩底的垂直距离;  $\gamma_0$ —结构重要性系数。

#### 2.4.3 土钉内部稳定性验算

对于土钉与桩锚联合支护结构,由于桩锚在土钉支护结构的施工过程中已基本达到设计强度,在对土钉进行内部稳定性验算时,认为桩锚已达到控制状态。根据施工期间不同开挖深度及基坑底面以下可能的滑动破坏面,采用圆弧滑动简单条分法进行内部整体稳定性验算(图 6)。土钉与桩锚联合支护结构内部稳定性验算的计算公式为:

$$\sum c_{ik} L_i s + s \sum (w_i + q_0 b_i) \cos \theta_i \tan \phi_{ik} + \sum T_{nj} [\cos(\alpha_j + \theta_j) + 0.5 \sin(\alpha_j + \theta_j) \tan \phi_{jk}] + \sum T_1 [\cos(\alpha_1 + \theta_1) + 0.5 \sin(\alpha_1 + \theta_1) \tan \phi_{ik}] - \gamma_k \gamma_0 s \sum (w_i + q_0 b_i) \sin \theta_i \geq 0 \quad (3)$$

式中:  $n$ 、 $m$ —滑动体分条数和滑动体内土钉数;  $\gamma_k$ —整体滑动分项系数,可取 1.3;  $w_i$ —第  $i$  分条土重,滑裂面位于粘性土或粉土时,按上覆土层的饱和重度计算;滑裂面位于砂土或碎石类土中时,按上覆土层的浮重度计算;  $b_i$ —第  $i$  分条宽度;  $c_{ik}$ 、 $\phi_{ik}$ —第  $i$  分条滑裂面处土体固结快剪粘聚力标准值、内摩擦角标准值;  $\theta_i$ —第  $i$  分条滑裂面处中点切线与水平面夹角;  $\theta_j$ —土钉和可能滑动面交点所属滑动条的中点与水平面之间的夹角;  $\alpha_j$ —土钉与水平面之间的夹角;  $L_i$ —第  $i$  分条滑裂面处弧长;  $s$ —计算滑动体单元厚度;  $T_{nj}$ —第  $j$  根土钉在圆弧滑动面外锚固体与土钉的极限抗拉力;  $\alpha_1$ —预应力锚杆与水平面的夹角;  $\theta_1$ —预应力锚杆和可能滑动面交点所属滑动条的中点与水平面之间的夹角;  $\phi_{ik}$ —预应力锚杆和可能滑动面交点处土体固结不排水(快)剪内摩擦角标准值。

#### 2.4.4 联合支护结构的外部稳定性验算

将土钉与桩锚联合支护结构看做一个整体,假定其为具有水平支撑力的“重力式挡墙”,对它进行外部稳定性分析。外部稳定性分析的主要内容有:

(1)滑移验算;(2)抗倾覆验算;(3)软土地基中的抗隆起验算(略)。

##### (1)抗滑移验算

整个支护结构受背面主动土压力  $E_a$  的作用。在进行抗滑移验算验算时,为简化计算,取墙背摩擦角  $\delta=0$ 。抗滑力与滑动力的比值称为抗滑安全系数  $K_s$ ,应满足(图 7):

$$K_s = \frac{\mu G + T_1}{E_a} \geq 1.3 \quad (4)$$

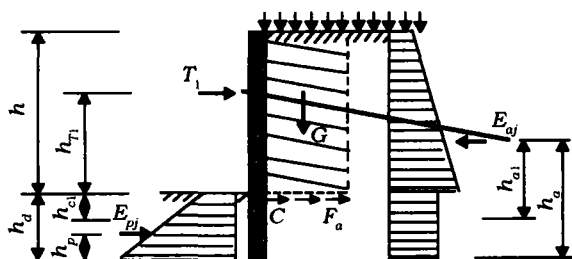


图 5 土钉与桩锚联合支护结构的受力模式

Fig. 5 The pressure model of the combined support structure of soil-nailing and pile-anchor

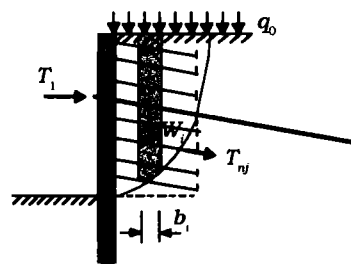


图 6 联合支护结构内部稳定性分析

Fig. 6 The interior stability analysis of the combined support structure

式中:  $G$ —联合支护结构挡土墙自重;  $\mu$ —土对挡土墙基底的摩擦系数。

### (2) 抗倾覆验算

整个支护结构可能绕  $c$  点倾覆(图 7)。抗倾覆力矩与倾覆力矩的比值称为抗倾覆安全系数  $K_t$ , 应满足:

$$K_t = \frac{0.5GB + T_1 h_{T1}}{E_a h_a} \geq 1.5 \quad (5)$$

式中:  $h_{T1}$ —锚杆预应力距倾覆点的垂直距离;  $h_a$ —主动土压力距倾覆点的垂直距离;  $B$ —挡土墙的计算宽度。

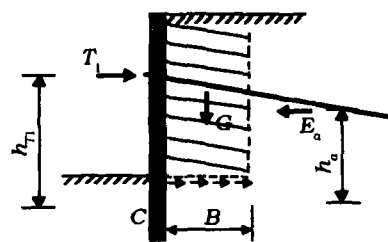


图 7 联合支护结构的外部稳定性分析

Fig. 7 The exterior stability analysis of the combined support structure

## 3 结语

土钉与桩锚联合支护结构是城市建设过程中由于地理环境等客观因素的制约, 基坑支护结构型式的一个新的发展。通过合理的设计可使土钉与桩锚协同工作, 一方面, 土钉结构部分的使用可有效的降低桩锚结构中桩体的嵌固深度和锚杆预应力水平, 减小施工难度, 加快施工进度; 另一方面, 桩锚结构部分的使用, 也使土钉支护结构的开挖支护速度得以加快, 坑底桩体较高的抗剪强度和上部锚杆预应力的存在使土钉支护结构的内部稳定性系数显著提高, 并且也使其外部稳定性得到了加强。本文从理论上分析了土钉支护结构与桩锚支护结构联合使用的工作机理, 设计计算的主要内容和主要方法。其中还存在许多问题有待进一步深入、系统的研究。

### 参考文献:

- [1] 黄强. 建筑基坑支护技术规程应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.
- [2] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [3] 郭院成, 宋建学, 周同和. 桩锚与复合土钉联合支护结构的工程设计[J]. 建筑施工, 2001, 21(6): 27-29.

## The calculation model of the combined support structure of soil-nailing and pile-anchor

GUO Yuan-cheng, WANG Li-ming, ZHENG Xiu-li

(School of Civil Engineering of Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The combined support structure of soil-nailing and pile-anchor consists of the soil-nailing retaining and the pile-anchor retaining. With the effect of the foundation pit wall earth pressure and other kinds of loads, the soil-nailing and pile-anchor, as a whole, supports the loads and deformation. With the beginning of analyzing the pressure features; the construction features and failure types, the cooperation mechanism of the combined support structure of soil-nailing and pile-anchor is studied and researched, together with the contents and methods of designing and calculating.

**Key words:** soil-nailing retaining structure; pile-anchor retaining structure; failure type; interior stability; exterior stability; self-support retaining wall