

文章编号: 1000-4750(2011)Sup.I-0156-06

## 复合土钉墙变形的简化计算方法

\*魏焕卫<sup>1</sup>, 宋丰波<sup>2</sup>, 杨 敏<sup>3</sup>, 孙剑平<sup>1</sup>

(1. 山东建筑大学土木工程学院, 济南 250014; 2. 山东电力工程咨询有限公司, 济南 250013; 3. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

**摘 要:** 复合土钉墙的侧向变形计算是其设计的关键指标, 目前规范还没有相应的计算方法。该文假定复合土钉墙的最终侧向变形为部分土压力作用下微型桩的变形与土钉本身在其影响范围内土压力拉拔变形的叠加, 把前者等效为一个多跨简支梁变形, 建立了利用土钉和微型桩的水平刚度的大小来分配相应位置的微型桩所受到的侧向土压力的计算模型; 推导了土钉的水平刚度系数的计算公式, 研究表明土钉的水平刚度系数主要受到相应位置钉土间的剪切变形系数和潜在滑动面以外土钉长度  $L_1$  的影响; 提出了按照悬臂梁或水平受荷桩计算微型桩的水平刚度系数的方法; 讨论了该文提出的复合土钉墙变形计算方法中主要参数的计算模式, 包括土压力、钉土间剪切变形系数等。通过工程的实测资料对该文计算理论进行验证, 结果表明了该文复合土钉墙变形计算简化方法的有效性。该文所提出的复合土钉墙变形计算方法可以利用工程实践中大量的土钉抗拔实测资料, 比较容易地推算复合土钉墙开挖后的变形情况, 从而为复合土钉墙变形的预测和控制提供了设计和施工方面的依据和参考。

**关键词:** 复合土钉墙; 微型桩; 水平刚度系数; 分配系数; 土压力; 侧向变形

**中图分类号:** TU443; TU433 **文献标识码:** A

## CALCULATION MODEL OF SOIL PRESSURE DISPLACEMENT BASED ON MINDLIN SOLUTION

\*WEI Huan-wei<sup>1</sup>, SONG Feng-bo<sup>2</sup>, YANG Min<sup>3</sup>, SUN Jian-ping<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering of Shandong Jianzhu University, Ji'nan 250014, China;

2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Corporation, Ltd., Ji'nan 250013, China;

3. Geotechnical Engineering Department of Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** The lateral displacement of composite soil nailing is a key parameter for design, but the calculation method is not specified in the code. This paper adopts the assumption that the final lateral displacement of the composite soil nailing wall is the sum of the micro-pile deformation under partial soil pressure and the pull-out deformation of soil nail in its effective range, and the former is equivalent to that of a multi-span beam under partial soil pressure. Then the calculation model of the lateral soil pressure applied to the micro-pile is proposed by the magnitudes of the horizontal stiffness of the soil nail and the micro-pile. The formula of horizontal stiffness coefficient of soil nailing is derived, which is mainly affected by the shear deformation coefficient among the nailing soil at the corresponding position and the soil nail length ( $L_1$ ) outside the potential sliding surface. The horizontal stiffness coefficient of the micro-pile is calculated as per the cantilever beam or lateral load bearing pile. Some parameters presented in practical calculation method of soil nailing displacement are discussed including soil pressure style, shear displacement coefficient and calculation method of overall stability. One engineering example is used to demonstrate the validity of the proposed method. With the result derived from pullout tests, the

收稿日期: 2010-10-27; 修改日期: 2011-03-15

基金项目, 建设部科技攻关计划项目(2008-K2-30)

作者简介: \*魏焕卫(1974—), 男, 山东聊城人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程共同作用和变形控制设计(E-mail: weihuanwei@yahoo.com.cn);

宋丰波(1963—), 男, 山东桓台人, 高工, 学士, 主要从事岩土工程灾害治理研究(E-mail: songfengbo@sdepici.com);

杨 敏(1960—), 男, 江西南昌人, 教授, 博士, 主要从事基坑及桩基共同作用研究(E-mail: yangmin@tongji.edu.cn);

孙剑平(1963—), 男, 山东临沂人, 教授, 硕士, 主要从事地基基础加固研究(E-mail: jpsun1@263.net).

practical calculation method can serve as a theoretical basis in the predictive control of soil nailing displacement.

**Key words:** composite soil nailing; micro-pile; horizontal stiffness coefficient; distribution coefficient; soil pressure; lateral displacement

土钉墙因其经济、可靠、施工快速简便等优点得到广泛应用,但同时由于土钉属于被动受力,需要土体变形后才能发挥作用,因此往往变形较大,从而限制了土钉墙的应用。而复合土钉墙则通过设置其他变形控制构件(如微型桩、搅拌桩、预应力锚杆等)克服了土钉墙变形大的缺点,使得其近年来得到广泛的应用。目前规范对于复合土钉墙的变形控制机理、设计方面还没有涉及,但许多学者已通过多种方式对此进行了研究,如秦四清等<sup>[1-2]</sup>对预应力复合土钉墙的变形规律进行了实测和数值分析研究,尹骥等<sup>[3]</sup>提出的复合土钉墙变形的增量计算法,段建立等<sup>[4]</sup>通过现场实测研究了复合土钉支护的变形受力规律,魏有龙<sup>[5]</sup>利用弹性地基梁法建立了复合土钉墙变形计算方法,陈利洲等<sup>[6]</sup>利用实测对复合土钉墙和土钉墙的变形规律进行了对比分析。笔者在实测资料和一些假定的基础上提出了土钉墙变形实用计算方法<sup>[7]</sup>,并提出了土钉墙抗拔承载力的计算方法<sup>[8]</sup>。本文将微型桩+土钉形式的复合土钉墙为例,建立微型桩所受到土压力的刚度系数分配法,并据此提出了复合土钉墙变形的简化计算方法。

### 1 复合土钉墙变形机理

在一般的土钉墙中,首先要进行土方开挖(图 1(a)),然后进行土钉的成孔、注浆等工序(图 1(b)),在此期间土体由于暴露时间过长应力释放而引起变形(图 1(c))。而微型桩+土钉形式的复合土钉墙则首先进行微型桩的施工(图 2(a))后在进行土方开挖(图 2(b)),然后进行土钉施工(图 2(c)),这样微型桩就起到土钉施工之前的空档期间对土体变形的限制作用,同时在施工下一道土钉前可以对上部土钉施加部分预应力也起到限制基坑侧向变形的作用,从而使基坑的侧向变形明显减小。

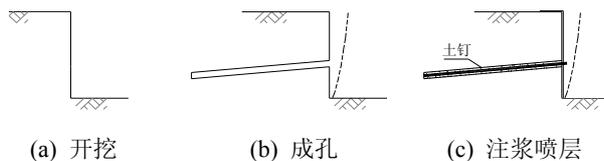


图 1 土钉墙施工工序示意图  
Fig.1 Soil nailing construction process

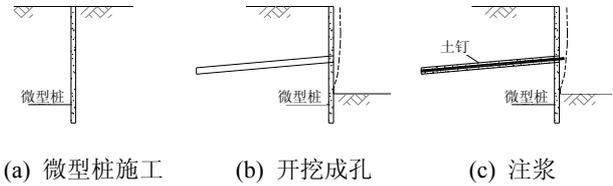


图 2 复合土钉墙施工工序示意图

Fig.2 Composite soil nailing construction process

### 2 复合土钉墙变形的理论计算方法

微型桩在复合土钉墙支护体系中主要是通过承受一定的侧向土压力限制了其侧向变形的发展,因此微型桩所受到的侧向土压力的大小决定了其变形的大小。微型桩+土钉+喷射混凝土面层+土体构成一个共同作用的体系,根据结构力学的力分配原理,刚度大的一方分配到的力也大,因此这里通过计算土钉抗拔刚度和微型桩侧向刚度得到侧向土压力在二者之间的分配系数。

#### 2.1 复合土钉墙中土钉的受力机理

复合土钉墙的潜在滑动面可以假定为圆弧面(图 3(a))或者平面(图 3(b)),在潜在滑动面以内(靠近基坑开挖一侧)土钉主要起加固土体的作用,在潜在滑动面以外(背离基坑开挖一侧)土钉主要起控制变形的作用。

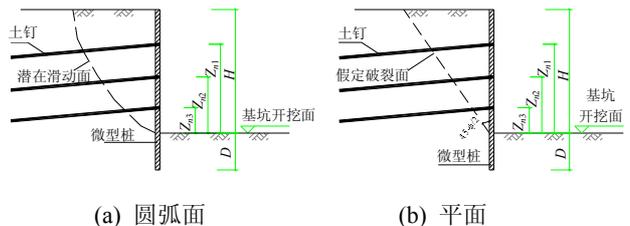


图 3 复合土钉墙潜在滑动面示意图

Fig.3 Potential sliding surface of composite soil nailing

土钉与周围土体的作用力方向在潜在滑动面两侧是相反的,根据力的平衡原理,土钉的受力可以按照下式表示:

$$T_a = T_p + T \tag{1}$$

其中:  $T_a$  /kN 为潜在滑动面以外土钉的与周围土体之间的作用力,为土钉影响范围内土压力的合力;  $T_p$  /kN 为潜在滑动面以内土钉的与周围土体之间的作用力;  $T$  /kN 为微型桩受到的侧向土压力合力。

影响  $T_p$  和  $T$  之间分配主动侧向土压力的因素主要为潜在滑动面以外(背离基坑开挖一侧)土钉的长度  $L_1$ (图 4),  $L_1$  越长刚度大的分配荷载多, 反之则少, 因此采取合理方式计算二者水平刚度是确定二者大小的关键因素。

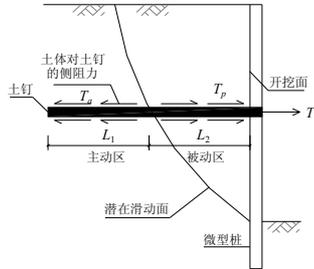


图 4 复合土钉墙中土钉受力示意图

Fig.4 Soil nail stress of composite soil nailing

### 2.2 土钉的水平刚度系数

考虑极限荷载作用下长度为  $L_2$  的土钉锚杆的拉出量  $\delta_n$  为土钉锚固体自身的变形量  $\delta_{ne}$  和土钉锚固体与周围土体间的剪切位移量  $\delta_{sn}$  之和, 按照下式计算土钉的抗拔刚度系数  $k_n$  :

$$\tau_n = rz_n \tan \varphi + c \quad (2)$$

$$T_n = u_n \tau_n L_n = \pi d_n \tau_n L_n \quad (3)$$

$$\delta_n = \delta_{sn} + \delta_{ne} \quad (4)$$

$$\delta_{ne} = \int_0^{L_n} \frac{u_n \tau_n}{A_n E_n} dx = \int_0^{L_n} \frac{\pi d_n x \tau_n}{\pi d_n^2 E_n / 4} dx = \frac{2 \tau_n L_n^2}{d_n E_n} \quad (5)$$

$$\delta_{sn} = \frac{\tau_n}{k_s} \quad (6)$$

$$k_n = \frac{T_n}{\delta_n} = \frac{\pi d_n L_n}{\frac{2 L_n^2}{d_n E_n} + \frac{1}{k_s}} \quad (7)$$

$$E_n = \frac{d_e^2 E_g + (d_n^2 - d_e^2) E_c}{d_n^2} \quad (8)$$

其中:  $E_n$  /MPa 为土钉锚固材料弹性模量  $E_c$  与杆体弹性模量  $E_g$  的加权平均值;  $d_e$  /m 为土钉杆体的直径;  $d_n$  /m 为土钉锚固体的直径;  $r$  /(kN/m<sup>3</sup>) 为土体的重度;  $\varphi$  /(°) 为土体的内摩擦角;  $c$  /kPa 为土体的内粘聚力;  $z_n$  /m 为土钉的竖向设置深度;  $L_n$  /m 为土钉在潜在滑动面以外(远离基坑开挖一侧)的长度;  $k_s$  /(MPa/m) 为土钉锚固体与周围土体间的剪切位移系数, 该参数主要通过土钉的拉拔试验, 分析土钉拉力-位移曲线得到。当有相应实测数据时, 可按照下式计算屈服变形之前的钉土间剪切变形系数  $k_s$  :

$$k_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta F_i \cos \alpha / (\Delta U_i L \pi D)}{n-1} \quad (9)$$

其中:  $n$  为加载次数;  $\Delta F_i$  /kN 为相邻两次荷载增量;  $\Delta U_i$  /m 为相邻两次变形增量。

当没有相应场地的拉拔试验数据时, 可以参考秦四清在文献[9]中提出如下经验表格进行取值。当土质较好时, 表 1 的剪切变形系数  $k$  取值偏小; 当土质较差时(如淤泥质土), 表 1 的剪切变形系数  $k$  取值偏大。

表 1 剪切变形系数  $k$  经验值

Table 1 The experience value of shear displacement coefficient

土体类型	孔隙比 $e$	剪切变形系数 $k$ / (MPa/m)				
		$<0.5$	$0.5-0.6$	$0.61-0.7$	$0.71-0.8$	$>0.8$
1		3.3	3.0	2.7	2.5	2.5
2		2.5	2.1	2.1	1.9	1.9
3	$0 \leq I_L \leq 0.025$	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0
	$0.025 < I_L \leq 0.25$	3.5	3.2	3.0	2.5	2.5
4	$0.25 < I_L \leq 0.30$	3.8	3.5	3.5	3.2	3.0
	$0.3 \leq I_L \leq 0.75$	3.5	3.2	3.0	2.5	2.0
5	$0 \leq I_L \leq 0.3$	4.0	3.8	3.5	3.3	3.0
	$0.3 < I_L \leq 0.75$	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0

注: 1. 砾/粗/中砂; 2. 细砂和粉砂; 3. 亚砂土; 4. 亚粘土; 5. 粘土  
用于土钉锚固体自身的变形量  $\delta_{ne}$  远小于土钉锚固体与周围土体间的剪切位移量  $\delta_{sn}$ , 因此式(8)可以简化为:

$$k_n = \frac{T_n}{\delta_{sn}} = \pi d_n L_n k_s \quad (10)$$

### 2.3 微型桩在土钉位置的水平刚度系数

微型桩在相应土钉位置的水平刚度系数可以按照悬臂梁或者水平受荷桩计算水平集中力( $T_n$ )作用下的变形  $\delta_p$ (图 5), 进而得到其相应位置的水平刚度系数  $k_p$ 。

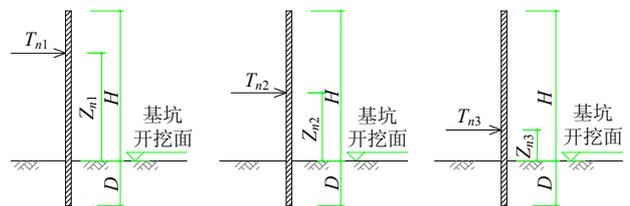


图 5 微型桩水平刚度计算简图(按悬臂梁)

Fig.5 Calculation diagram of horizontal stiffness of micro-pile (as cantilever beam)

按照悬臂梁计算公式如下:

$$\delta_p = \frac{T_n z_n^3}{3 E_p I_p} = \frac{\pi d_n \tau_n L_n z_n^3}{3 E_p I_p} \quad (11)$$

$$k_p = \frac{T_n}{\delta_p} = \frac{3E_p I_p}{z_n^3} \quad (12)$$

其中： $E_p/\text{MPa}$  为微型桩桩体材料的弹性模量； $I_p/\text{mm}^4$  为微型桩桩身截面的惯性距。

按照水平受荷桩计算时，可以采用极限地基反力法( $m$ 法)、弹性地基反力法、 $p$ - $y$ 曲线法等<sup>[10]</sup>，这里主要按照  $m$  法进行微型桩的侧向变形(图 6)。

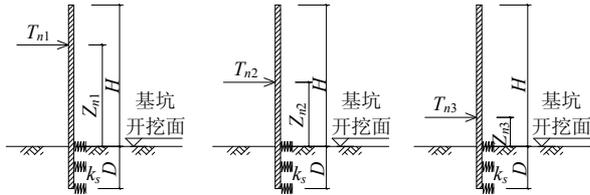


图 6 微型桩水平刚度计算简图(按水平受荷桩)

Fig.6 Calculation diagram of horizontal stiffness of micro-pile (as lateral load bearing pile)

### 2.4 土钉墙侧向土压力

自土钉开始应用以来，许多学者和工程技术人员通过模型试验、实测分析、数值计算对不同情况下的土钉墙侧向土压力进行了研究，主要由简化 Schlosser 法、王步云法、规范法、Peck 法<sup>[11]</sup>、四边形<sup>[12]</sup>，这里主要介绍其中后三种。

#### 1) 规范法<sup>[13]</sup>。

在土体自重和地表均布荷载作用下，其侧土压力分布在  $0-0.25H$  深度处为三角形分布，在  $0.25H$  深度处侧土压力为均匀分布(图 7)。图 7 中的  $P_q$  为地表均布荷载引起的侧土压力， $P_m$  为土中自重引起的侧向土压力峰压，按式(13)或式(14)计算，且粘性土  $P_m$  的取值应不小于  $0.2\gamma H$ 。

对于  $c/(\gamma H) \leq 0.05$  的砂土和粉土：

$$P_m = 0.55k_a\gamma H \quad (13)$$

对于  $c/(\gamma H) \geq 0.05$  的一般粘性土：

$$P_m = k_a \left( 1 - \frac{2c}{\gamma H \sqrt{k_a}} \right) \gamma H \leq 0.55k_a\gamma H \quad (14)$$

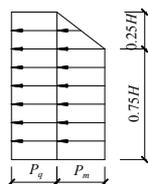


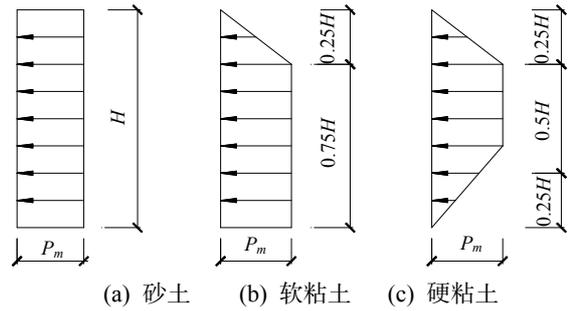
图 7 规范法侧土压力分布模式

Fig.7 Distribution for lateral soil pressure of standard method

#### 2) Peck 法<sup>[14]</sup>。

Peck 针对不同的土质情况(砂土、软粘土和硬

粘土)提出了三种土压力分布模式(图 8)。



(a) 砂土 (b) 软粘土 (c) 硬粘土

图 8 Peck 法侧土压力分布模式

Fig.8 Distribution for lateral soil pressure of Peck method

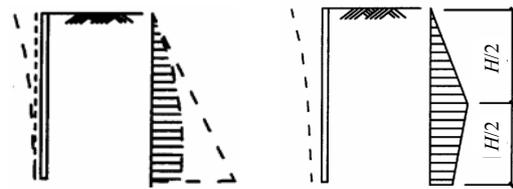
砂土： $P_m = 0.65k_a\gamma H$ ， $k_a = \tan^2(45 - \varphi/2)$

软粘土( $\gamma H/c > 4$ )： $P_m = (1 - 4c/(\gamma H))\gamma H > 0.3\gamma H$

硬粘土( $\gamma H/c < 4$ )： $P_m = 0.2\gamma H - 0.4\gamma H$

#### 3) 四边形模型<sup>[12]</sup>。

文献[12]认为无论土钉墙还是复合土钉墙，它的侧向土压力基本都呈抛物线分布(图 9(a))，并简化为四边形分布模型(图 9(b))。



(a) 抛物线分布 (b) 四边形分布

图 9 四边形土压力分布模式

Fig.9 Distribution for lateral soil pressure of standard method

当  $z < H/2$  时，对无粘性土： $\sigma_x(z) = k_a\gamma z$ ；

对于粘性土： $\sigma_x(z) = k_a\gamma z - 2c\sqrt{k_a}$ 。

当  $z > H/2$  时， $\sigma_x(z) = \frac{1}{2}k_a\gamma \left( \frac{3H}{2} - z \right)$ 。

其中： $\sigma_x(z)/\text{kPa}$  为深度  $z$  处土钉墙的侧向土压力强度； $z/\text{m}$  为计算点距离基坑坡顶的深度； $k_a$  为土钉墙的主动土压力系数， $k_a = \tan^2(45 - \frac{\varphi}{2})$ 。

### 2.5 土压力分配计算

根据土压力计算模型得到开挖面范围内不同土钉位置分配系数  $\eta_{pi}$ ，然后得到微型桩所受到的侧向土压力分布  $e_{pi}$ 。

$$\eta_{pi} = \frac{k_p}{k_n + k_p} = \frac{3E_p I_p / z_n^3}{\pi d_n L_n k_s + 3E_p I_p / z_n^3} \quad (15)$$

$$e_{pi} = \eta_{pi} e_{ai} = \frac{3E_p I_p / z_n^3}{\pi d_n L_n k_s + 3E_p I_p / z_n^3} e_{ai} \quad (16)$$

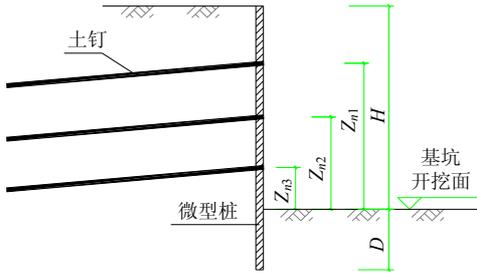


图 10 复合土钉支护计算剖面图

Fig.10 Section of composite soil nailing

以 3 道土钉为例(图 10), 计算土压力时各道土钉的影响范围  $z_{pi}$  和相应的土压力  $e_{pi}$  为:

第 1 道土钉:

$$z_{p1} = H - (z_{n1} + z_{n2}) / 2, \quad e_{p1} = \eta_{n1} e_{a1}$$

第 2 道土钉:

$$z_{p2} = (z_{n1} - z_{n3}) / 2, \quad e_{p21} = \eta_{n2} e_{a1}, \quad e_{p22} = \eta_{n2} e_{a2}$$

第 3 道土钉:

$$z_{p3} = (z_{n2} + z_{n3}) / 2, \quad e_{p31} = \eta_{n3} e_{a3}, \quad e_{p32} = \eta_{n3} e_{a3}$$

其中,  $e_{ai}$ /kPa 为对应位置的土钉墙侧向土压力值(图 11)。

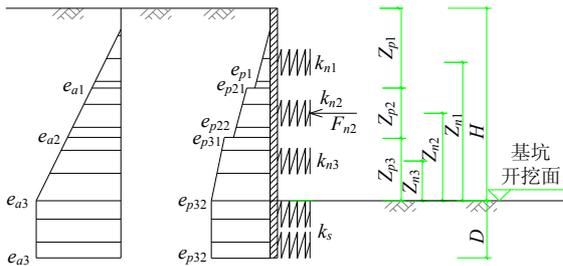


图 11 复合土钉墙土变形计算示意图

Fig.11 Section of composite soil nailing displacement

### 2.6 复合土钉墙变形的计算

利用上述公式得到的土钉刚度系数和微型桩土压力, 把土钉等效成水平弹簧, 相应的弹簧系数  $k$  即为土钉的刚度系数  $k_{ni}$ , 对于微型桩嵌固部分土体的抗力按照  $m$  法计算地基反力系数, 按照图 11 所示的模型进行有限元分析, 同时把土钉墙自身内力作用下的变形  $\delta_{2i}$  作为初始位移条件, 从而得到复合土钉墙侧向变形  $\delta_i$ 。同时对于土钉墙在土压力作用下自身的变形  $\delta_{2i}$  按照如下公式进行计算:

$$\delta_{2i} = \frac{\sigma_{ai} A_{hvi}}{k_{ni}} = \frac{\sigma_{ai} S_{hi} S_{vi}}{k_{ni}} \quad (17)$$

其中:  $A_{hvi}/m^2$  为第  $i$  根土钉锚杆影响范围内的应力面积;  $S_{hi}/m$  为第  $i$  根土钉锚杆水平向间距;  $S_{vi}/m$  为第  $i$  根土钉锚杆竖向间距;  $\sigma_{ai}$ /kPa 为第  $i$  根土钉锚杆影响范围主动土压力;  $k_{ni}$ /(MPa/m) 为第  $i$  根土钉锚杆的水平刚度系数。

### 3 复合土钉墙变形的实测对比分析

临沂城建时代广场基坑开挖深度为 11.5m, 采用微型桩与部分预应力复合土钉支护<sup>[15]</sup>, 在第 2 排和第 4 排土钉上施加预应力。根据场地的《岩土工程勘察报告》, 基坑开挖范围内的土层主要为黄褐色杂填土、灰褐-灰黑色可塑的粘土、稍密至中密的粗砂及中风化石灰岩, 各层土的主要物理力学指标见表 2。

表 2 土的物理力学性质指标

Table 2 Physical and mechanical properties index of soil

土层名称	厚度/m	重度/(kN/m <sup>3</sup> )	$\phi$ /(°)	$c$ /(kPa)
填土	2	19.5	15	10
粉质粘土	2.9	20.2	11.7	27.3
粗砂	6.4	22	30	0
中风化岩	5			

沿基坑侧壁自上而下布置 7 道土钉锚杆, 土钉直径 120mm, 水平间距 1.5m; 同时设置超前支护微型桩, 直径 220mm, 水平间距 1m, 微型桩嵌入中风化岩层 0.5m(图 12)。

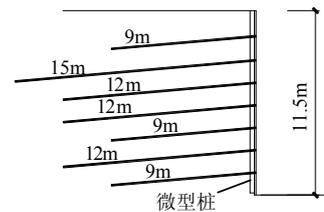


图 12 复合土钉墙支护方案

Fig.12 Section of composite soil nailing

采用四边形土压力计算模型, 土层的剪切变形系数取 3MPa/m, 计算时土的参数取加权平均值, 按照本文计算方法得到该基坑的侧向变形并与实测进行比较(图 13)。由图 13 可以看出, 理论结果和实测结果在趋势上是一致的, 其中最大侧向变形出

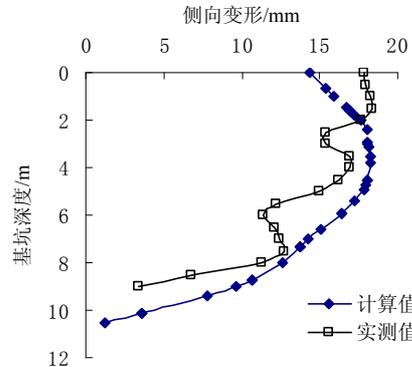


图 13 复合土钉墙实测曲线与理论曲线比较

Fig.13 Comparison of lateral displacement between theory computing values and monitoring values

现在基坑偏上位置,但理论值整体比实测值偏大,而坡顶位置实测值则比计算值偏小,主要是因为由于钉土抗拔力的大小与上覆土的厚度有一定的关系,即钉土剪切系数受深度影响,在均质土时必然表现为随深度逐渐增加,而本文理论未考虑其受深度的影响,使得顶部钉土剪切系数取值偏大,根据式(17)得到上部变形计算值比实测值偏小。

## 4 结论

(1) 本文主要基于假定部分侧向土压力由微型桩承担,通过土钉和微型桩之间的水平刚度的大小来分配相应位置的微型桩所受到的侧向土压力,然后把复合土钉墙变形的计算等效为一个多跨简支梁来计算复合土钉墙的变形。

(2) 土钉的水平刚度系数主要受到相应位置钉土间的剪切变形系数和潜在滑动面以外土钉长度 $L_1$ 的影响。

(3) 微型桩的水平刚度系数按照悬臂梁或水平受荷桩进行计算,不同位置(土钉设置位置)的刚度系数结果与相应位置的土钉水平刚度系数结合计算土压力分配系数。

(4) 复合土钉墙的最终侧向变形为在部分土压力作用下微型桩的变形与土钉本身在作用范围内土压力变形量的叠加,其中假定后者变形为前者变形计算的初始变形。

利用本方法计算结果还受到土压力模式、钉土剪切变形系数等若干因素的影响,因此本方法是为了方便工程应用而提出的一种简化方法。

### 参考文献:

- [1] 秦四清, 贾洪, 马平. 预应力土钉支护结构变形与破坏的数值分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(9): 1356—1362.  
Qin Siqing, Jia Hong, Ma Ping. Numerical analysis of deformation and failure in prestressed soil-nailed reinforcement structure [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1356—1362. (in Chinese)
- [2] 秦四清, 陈辉, 张明中. 土钉支护结构有限元法变形与破坏数值模拟分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2005, 32(增刊 1): 102—105.  
Qin Siqing, Chen Hui, Zhang Mingzhong. Deformation and destruction value analogy analyses for soil nail support by finite element method [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005, 32(Sup.1): 102—105. (in Chinese)
- [3] 尹骥, 魏建华, 李象范. 计算复合土钉支护变形的增量方法[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 755—759.  
Yin Ji, Wei Jianhua, Li Xiangfan. Increment method to calculate displacement of composite soil nailed wall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 755—759. (in Chinese)
- [4] 段建立, 谭跃虎, 樊有维. 复合土钉支护的现场测试研究[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(12): 2128—2132.  
Duan Jianli, Tan Yuehu, Fan Youwei. Field testing study on composite soil nailing [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2128—2132. (in Chinese)
- [5] 魏有龙. 复合土钉墙的水平位移分析与预测[M]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
Wei Youlong. Horizontal displacement analysis and prediction of composite soil-nail wall [M]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [6] 陈利洲, 李象范, 何之民. 复合型土钉墙支护的变形分析[J]. 岩土工程师, 2000, 12(1): 22—25.  
Chen Lizhou, Li Xiangfan, He Zhimin. On the deformation analysis of compound soil-nailed wall [J]. Geotechnical Engineer, 2000, 12(1): 22—25. (in Chinese)
- [7] 魏焕卫, 杨敏, 孙剑平. 土钉墙变形的实用计算方法[J]. 土木工程学报, 2009, 42(1): 81—90.  
Wei Huanwei, Yang Min, Sun Jianping. Calculation method of soil nailing displacement [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(1): 81—90. (in Chinese)
- [8] 魏焕卫, 杨敏, 孙剑平. 土钉抗拔承载力计算方法[J]. 水文地质工程地质, 2009, 229(5): 23—26.  
Wei Huanwei, Yang Min, Sun Jianping. Calculation method of pull-out bearing capacity of soil nail [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2009, 229(5): 23—26. (in Chinese)
- [9] 秦四清, 王建党. 土钉支护机理与优化设计[M]. 北京: 地质出版社, 1999.  
Qin Siqing, Wang Jiandang. Design optimization and mechanism of soil nailing [M]. Beijing: Geology Press, 1999. (in Chinese)
- [10] 张雁, 刘金波. 桩基手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
Zhang Yan, Liu Jinbo. Pile foundation engineering handbook [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)
- [11] 刘晓红, 饶秋华. 土钉支护侧土压力合理分布模式探讨[J]. 中南公路工程, 2006, 31(2): 29—32.  
Liu Xiaohong, Rao Qiuhua. More reasonable model for the lateral soil pressure distribution of soil nail bracing [J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2006, 31(2): 29—32. (in Chinese)

(参考文献[12]—[15]转第 166 页)

- Zhang Xin, Jia Liudong, Wei Huanwei, Xia Fengmin. Technology of building moving and rectification [M]. Beijing: Chinese Water Publishing House, 2008. (in Chinese)
- [3] 杜建民, 袁迎曙, 向伟. 框架柱托换体系抗冲剪承载力预计模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(1): 60—64.  
Du Jianmin, Yuan Yingshu, Xiang Wei. Prediction model of punching and shear bearing capacity for frame columns underpin system [J]. Journal of Chinese Mining Industry University, 2007, 36(1): 60—64. (in Chinese)
- [4] 王恒. 托换梁剪跨比对柱托换节点受力性能影响的试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2009.  
Wang Heng. Experimental study on mechanical behaviors of column underpinning joints under the influence of shear-span ratio of underpinning beam [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2009. (in Chinese)
- [5] 司道林. 托换梁纵筋配筋对柱托换节点受力性能影响的试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2009.  
Si Daolin. Experimental study on column underpinning joints under the influence of longitudinal reinforcement of underpinning beam [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2009. (in Chinese)
- [6] 李玉萍. 托换梁配箍率对柱托换节点受力性能影响的试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2009.  
Li Yuping. Experimental study on mechanical behaviors of column underpinning joints under the influence of stirrup ratio of underpinning beam [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2009. (in Chinese)
- [7] 谭天乐. 移位建筑柱托换节点梁柱结合面受力性能试验研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2009.  
Tan Tianle. Experimental research on mechanical behavior of column underpinning joint bonding interface between beam and column for structure moving [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2009. (in Chinese)
- [8] Wang H, Lu W, Lee H. Shear strength prediction for reinforced concrete corbels [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(4): 543—552.
- [9] Hagberg T. Design of concrete brackets: on the application of the truss analogy [J]. ACI Structural Journal, 1983, 18(6): 3—12.
- [10] 周朝阳. 配置抗冲切钢筋的混凝土板柱连接的破坏形态与承载力分析[J]. 建筑结构学报, 1997, 18(6): 26—32.  
Zhou Zhaoyang. Failure modes and strength concrete flat slab with punching shear reinforcement [J]. Journal of Building Structure, 1997, 18(6): 26—32. (in Chinese)

(上接第 161 页)

- [12] 黄云. 复合土钉墙中的侧向土压力研究[M]. 武汉: 武汉理工大学, 2003.  
Huang Yun. The research of the lateral force in composite soil nailing wall [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003. (in Chinese)
- [13] CECS 96: 97, 基坑土钉支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.  
CECS 96: 97 Specification for soil nailing in foundation excavation [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1997. (in Chinese)
- [14] 陈恒超, 李承, 王来. 土钉支护结构内部稳定性简化计算方法研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2004, 23(2): 33—36.  
Chen Hengchao, Li Cheng, Wang Lai. Research on simplified calculation method of internal stability in soil-nailing supporting structure [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2004, 23(2): 33—36. (in Chinese)
- [15] 孙剑平, 魏焕卫, 刘绪峰. 复合土钉墙的变形规律的实测分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 27(增刊 1): 174—178.  
Sun Jianping, Wei Huanwei, Liu Xufeng. Displacement law analysis of composite soil nailing [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 27(Sup.1): 174—178. (in Chinese)