

复合土钉墙实例分析和变形评估

杨育文

(1. 武汉市测绘研究院, 湖北 武汉 430022; 2. 武汉市勘测设计研究院, 湖北 武汉 430022)

摘要: 尽管复合土钉墙在实际工程中广泛应用, 但是由于复杂的土层性质和变化多样的挡土结构形式, 一直没有能够找到实用的、被广泛认可的变形估算方法。通过分析我国已竣工的 26 个典型的复合土钉墙支护基坑实例, 探讨了复合土钉墙的最大水平位移、沉降与地质条件、支护设计参数之间的关系。统计分析表明, 复合土钉墙最大水平位移、最大沉降大多分别在 0.4%, 0.2% 倍的基坑开挖深度附近变化。其中, 最大水平位移是桩排和地下连续墙支护的两倍左右。设有预应力锚杆或微型桩的复合土钉墙, 最大水平位移值会有所减小。基于 Mohr-Coulomb 强度准则提出的土层单位抗剪强度的新概念, 反映了土层总的强度特性。当基坑主要土层单位抗剪强度增加时, 基坑变形有明显减小的趋势。

关键词: 基坑; 复合土钉墙; 变形

中图分类号: TU442 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)04-0734-08

作者简介: 杨育文(1963-), 男, 湖北孝感人, 博士, 教授级高级工程师, 从事深基坑、桩基工程理论研究以及人工智能、自动化监测技术研究与开发。E-mail: wayneywyang@163.com。

Case studies of composite soil-nailing walls and movement estimate

YANG Yu-wen

(1. Wuhan Geomatic Institute, Wuhan 430022, China; 2. Wuhan Geotechnical Engineering and Surveying Institute, Wuhan 430022, China)

Abstract: The displacement evaluation method for composite soil-nailing walls has not been discovered due to the complicated properties of soils and various retaining structures although composite walls have been widely applied. 26 typical case histories of composite soil-nailing walls in deep excavations are presented. The maximum lateral displacements and settlements are analyzed in these cases to find out the relationships between geology and retaining structures. The statistical results show that the maximum lateral displacements and settlements for composite soil-nailing walls are 0.4% and 0.2% of excavation depths, respectively. The former is about twice that for piles and diaphragms. The maximum lateral displacements are reduced slightly for the composite soil-nailing walls with prestressed anchors and micro-piles. The new concept, the unit shear strength of soil, is proposed based on the Mohr-Coulomb failure criterion to quantify the whole shear strength of soil. The maximum displacements are found to decrease significantly as the unit shear strength for the main strata increases.

Key words: deep excavation; composite soil-nailing wall; displacement

0 引言

复合土钉墙是近十多年来广泛应用的一种新型支护方式, 它具有造价低、施工速度快、简便、工期短等优点。在基坑工程中, 从施工流程上看, 它先分层开挖, 后分层支护, 允许土体发生一定的变形, 土体的抗剪能力得到了充分地发挥; 从挡土结构布置上看, 微型桩等维持坑底的稳定, 土钉、锚杆则限制了开挖面附近土体的侧向位移, 基坑的稳定性得到了增强。与桩排相比, 复合土钉墙刚度较小, 变形较大。由于影响基坑变形的因素很多, 其中还包括一些人为的、偶然的因素, 单纯的数值模拟计算等很难全面考虑变形问题, 从而人们开始转向从竣工实例中来探求变形规律。Peck^[1]通过收集分析桩排支护实例, 得到最大

沉降与距开挖边界距离的关系。Clough 等通过收集实例数据, 辅以非线性有限元计算, 得到最大侧向位移随支护刚度的变形规律^[2]。Long 收集 300 多个基坑支护的数据, 得到了基坑位移的一般性规律^[3]。Ou 等通过分析台北地区 10 个桩排支护监测数据, 获得了地面沉降的特性^[4]。Yoo 分析 62 个桩排和地连墙实例, 研究了侧向位移和视土压力的问题^[5]。通过分析实例, 辅以有限元计算, Kung 等建立半经验的沉降模型^[6]。这些研究成果可用于对桩排和地下连续墙支护变形的初步评估。桩排和地下连续墙是传统的支护方式, 在基坑工程中应用较多, 积累了大量的工程经验和数据。

复合土钉墙则是新型支护方式,积累的数据有限。文献[7]中统计分析了13个黏土中土钉墙实例,得出基坑最大水平位移大多小于0.7%倍开挖深度、最大水平位移平均值为0.4%倍开挖深度等一些结论。这些实例大多集中在汉口一级阶地一般黏性土地区,土层分布、强度差别不大。

复合土钉墙的变形规律与桩排或连续墙支护不同的,这是因为复合土钉墙是边开挖边支护的柔性支护结构,刚度小,变形较大,属主动支护。桩排或连续墙是在基坑开挖前预先设置的,其结构刚度大,由被动区土体和内支撑维持基坑稳定,是传统的支护方式。目前复合土钉墙设计中大多只进行整体稳定计算,不进行变形评估,主要原因是到目前为止还没有找到实用的变形估算方法。因此,有时基坑会发生过大变形,破坏周围相邻的地面上或地下构筑物、管道或设施等,甚至发生滑塌事故^[8-10]。本文收集到我国已竣工的26

个典型的复合土钉墙支护基坑实例,对这些资料进行整理、分析,试图找到复合土钉墙变形与地质条件、支护设计参数等它们之间的一些关系,为进一步的理论分析提供依据和基础性数据。

1 实例收集和资料整理

从发表在我国各类学术期刊上关于复合土钉墙支护在深基坑工程领域应用的近2000篇学术论文中,挑选出包含有:①地质条件;②设计方案;③施工过程;④监测点布置和监测结果;⑤坑安全稳定状态的典型实例。另外,笔者从事深基坑工程实际工作多年,已收集到一些类似工程资料。对所收录到的文献进行筛选后,有26个复合土钉墙实例基本满足要求。将它们收录进来,建立一个数据库(表1~4),作为进一步分析的基础。表1~4中 S_h , S_v 分别表示土钉水平和

表1 基坑概况和地质条件

Table 1 Overview and geology for case histories

编号	工程名称	地下水类型与控制	边坡几何形状			土层名称	场址主要土层			
			d_0 /m	d_u /m	坡度		重度/(kN m ⁻³)	c/kPa	φ (°)	摩阻力/kPa
01	汉口住宅10号 楼	上层滞水,明排	5.1	2.0	垂直	粉质黏土	18.3	14	11.5	40
02	汉口大水巷综 合楼	上层滞水、承压 水。中深井	6.3	0	垂直	粉质黏土互层	18.3	12	18	35
03	汉口世界公寓	上层滞水, 明排	5.7	1.5	垂直	杂填土	17.1	8	18	25
04	汉口圣淘沙	上层滞水, 明排、深管降水	5.1	0	垂直	淤泥质黏土互层	17.9	16	12	25
05	汉口凤凰城	承压水。减压降水	5	1.5	垂直	素填土	16.7	8	6	15
06	汉口25街坊楼	上层滞水,明排。	4.5	0	1:0.8	淤泥质粉质黏土	17.7	14	8	25
07 ^[11]	青岛,福林大厦	?	9.5	0	垂直	含黏性土砾	19.9	10	40	?
08 ^[12]	商业综合楼	?	6.8	0	垂直	粉土	19	9	28.6	?
09 ^[13]	湖州市科技中 心	潜水	3.8	2	垂直	淤泥质黏土	16.8	5.6	3.6	?
10 ^[14]	上海雨水泵站	深井降水	9.4	5.3	垂直	粉质黏土夹淤泥 质黏土	18(?)	8.5(?)	15(?)	20(?)
11 ^[15]	?	?	5.7	?	?	淤泥质粉质黏土	18	7	12	?
12 ^[16]	岳阳商住楼	潜水	5.35	1.2	垂直	淤泥质粉质黏土	18	8.8	5.2	?
13 ^[17]	东台市	?	7.5	?	?	淤泥质粉质黏土	18	5.8	11.2	?
14 ^[18]	郑州市	?	6.4	0	垂直	粉土	20.3	16	22	58
15 ^[19]	上海市	?	6.2	1.5	垂直	砂质粉土	18.3	9	26.5	43(?)
16 ^[20]	购物广场	潜水	9.5	?	?	卵石	20	5	38	120
17 ^[21]	菏泽市培训中心	?	6.0	0	垂直	粉土	18.9	3.2	20	?
18 ^[22]	杭州市庆隆苑 小区	?	5.3	2	垂直	淤泥质黏土	17(?)	8	3.6	?
19 ^[23]	郑州商住楼	承压水。管井降水	10.2	0	1:0.2	粉质黏土	19.7	28.7	14	?
20 ^[17]	无锡	?	4.8	?	?	粉质黏土	20.3	58.2	15.6	?
21 ^[24]	北京朝阳广场	上层滞水。泄水管	8	0	1:0.15	细砂	20	8	32	?
22 ^[25]	沈阳	潜水。轻型井点降 水	8.5	0	垂直	粉质黏土	19.7	29.8	11.8	?
23 ^[26]	青岛市	承压水。	10.7	0	垂直	粉质黏土	20	26	4.7	60
24 ^[27]	深圳地下停 车库	降水	10.8	0	垂直	含砾粉质黏土	18	20	20	?
25 ^[28]	?	井点降水	10.5	0	垂直	粉土	19.5(?)	10.6	12	?

26 ^[29]	湖南常德	?	10	0	1:0.1	细砂	19.9(?)	0	28	?
--------------------	------	---	----	---	-------	----	---------	---	----	---

表 2 水泥土复合土钉墙支护与变形

Table 2 Cement-soil-nailing walls and displacements

编号	土钉布置				水泥土墙			变形	
	排数	总长度 L_n/m	S_h/m	S_v/m	长度 L_c/m	宽度 W_c/mm	墙顶埋深 D_c/m	水平 δ_{hmax}/mm	垂直 δ_{vmax}/mm
01	4	39	1.5	1.2	9.0	500	2.0	12	10
02	5	58	1.1	1.1	10.0	850	1.4	11	6
03	3	34	1.2	1.5	7.0	850	1.5	65	28.3
04	3	24	1.3	1.4	5.0	500	1.6	24	1.6
05	3	27	1.5	1.3	5.5	500	1.5	20	2.5
06	3	26	1.5	1.5	9.0	850	3.0	28	17.0
07 ^[11]	5	30	1.5	2.0	7.5	550	0	18.8	9.9
08 ^[12]	4	42	1.0	0.9	11.4	850	0	20.0	?
09 ^[13]	4	44	1.0	0.9	10.3	1200	2.0	13.3	11.1
10 ^[14]	5	35	1.0	1.0(?)	14.4	700	5.3	74	?
11 ^[15]	5	42	1.0	1.0	12	700	?	19	14
12 ^[16]	4	50	1.0	1.0	12.5	1200	1.2	38.4	
13 ^[17]	4	36	1	1.2	11.0	1200	?	66	?
14 ^[18]	4	24	1.2	1.3	10	500	1.5	30	30
15 ^[19]	5	64.5	1.2	1	12	1200	1.5	38	25.4
16 ^[26]	3	26.5	1.6	1.8	8.1	500(?)	4	3	?

表 3 微型桩复合土钉墙支护与变形

Table 3 Micro-pile-soil-nailing walls and displacements

编号	土钉布置				微型桩				变形			
	排数	总长度 L_n/m	S_h/m	S_v/m	桩型	排数	长度 L_p/m	直径 D_p/mm	间距 /m	桩顶深度 /m	水平 δ_{hmax}/mm	垂直 δ_{vmax}/mm
01 ^[20]	3	30	0.75	1(?)	钢管	1	15	89	0.75	0	17	2.3
02 ^[21]	4	45	1.2	1.2	钢混(?)	1	9	220	0.6	0	18	10.1
03 ^[22]	5	60	1.0	0.9	毛竹	2	>10	110	1.8	2	22	?
04 ^[23]	7	111	1.2	1.2	钢管	2	18	120	1	3	13	12

表 4 预应力锚杆复合土钉墙支护与变形

Table 4 Prestressed anchor-soil-nailing walls and displacements

编号	土钉布置				预应力锚杆				变形			
	排数	总长度 L_n/m	S_h/m	S_v/m	类型	排数	总长度 L_a/m	水平间距 /m	垂直间距 /m	预应力 /kN	水平 δ_{hmax}/mm	垂直 δ_{vmax}/mm
01 ^[17]	2	12	1	0.9	钢筋	2	18	1	0.9	70	3	5
02 ^[24]	5	45	1.3	1.6	钢筋	1	12	1.6	—	100	22	14
03 ^[25]	5	29	1.2	1.2	钢索	2	14	1.2(?)	1.2	?	22	8
04 ^{[26]**}	3	26.5	1.6	1.8	钢索	3	43.5	1.6	1.8	?	3	?
05 ^[27]	6	56	1.4	1.4	钢绞线	2	38	1.4	1.4	200	2	?
06 ^[28]	5	60	1.3	1.3	钢筋	2	36	1.3	2.6	?	13.3	12.6
07 ^[29]	6	36	1.6	1.6	钢索	1	13	1.6	—	120	47	31

注: **略去水泥土墙数据。

垂直间距; L_n 为该剖面土钉总长; d_0 , d_u 分别表示最终开挖深度和坡顶卸载深度。须说明的是, 表 1~4 中只包含了复合土钉墙支护主要信息和数据, 一些不重要的没有录入。26 个工程中, 开挖深度为 4.5~10.7 m, 统计情况如表 5 所示。大多基坑深度大于 5.0 m,

其中 9~11 m 深基坑 8 个。

表 5 按开挖深度统计的实例数

开挖深度/m	3~5	5~7	7~9	9~11
实例数	3	12	3	8

Table 5 Cases statistics by excavation depth

这 26 个实例中大多介绍了地下水的情况（见表 1），涉及到上层滞水、潜水、承压水这 3 种基本形式。地下水控制包括明排、井管降水、竖向隔渗帷幕等主要方式。地下水处理对复合土钉墙的变形有影响，主要是降水引起的固结沉降。但是，根据工程经验，固结沉降影响程度是有限的。例如，武汉地铁范湖车站水位降幅 10 m 时，引起的地面最大沉降只有 20 mm^[30]。在 26 实例中，由于对地下水进行了有效的控制，没有发生渗透破坏，与基坑开挖引起的变形相比，固结沉降较小。因此，文中忽略了地下水对复合土钉墙变形的影响。

2 实例数据分析

下面分析中，着重考虑常见的、主要的影响因素，如土钉布置等，暂不考虑偶然的、次要的、人为等因素，以突出重点、简化分析过程。本节中，首先分析基坑变形总体状况，然后进一步探讨地质情况等对复合土钉墙变形的影响，找出变化趋势。

2.1 整体分析

根据表 1~4 中的数据，得到图 1 复合土钉墙最大水平位移与开挖深度之比 d_0 （以下简称最大水平位移比）和开挖深度 d_0 之间的关系。实例中，最大水平位移大部分为 0.2%~0.6% 倍的开挖深度，平均值为 0.4%。桩排、地下连续墙支护的最大水平位移平均值在 0.2% 倍左右的开挖深度^[3]。因此复合土钉墙最大水平位移较大，是桩排、地下连续墙支护的两倍左右。对水泥土墙和土钉墙组成的复合土钉墙，最大水平位移一般位于地表以下 0.5~1.0 倍的开挖深度的位置^[7]。如图 2 所示，最大沉降大部分为 0.1%~0.3% 倍的开挖深度，平均值为 0.2%，而桩排、地下连续墙支护的最大沉降平均值在 0.1%~0.2% 倍左右的开挖深度^[3]。因此，桩排和地下连续墙支护的最大沉降略小于复合土钉墙。基坑开挖越深，变形一般也越大，但图 1 表明开挖深度增加时，变形与开挖深度之比没有出现增大的趋势。最大水平位移增加时，最大沉降也增加，呈明显的线性关系，见图 3，可用 $\frac{\delta_{\text{vmax}}}{d_0} = 0.4463 \frac{\delta_{\text{hmax}}}{d_0} + 0.4418$

0.44 近似地表示。

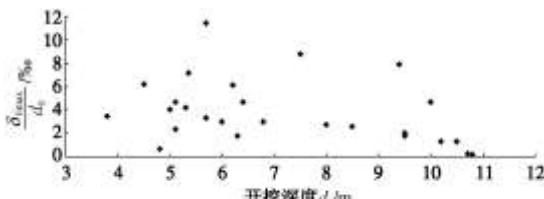


图 1 最大水平位移比和开挖深度的关系

Fig. 1 Relation between ratio of maximum lateral displacements to

depths and excavation depth

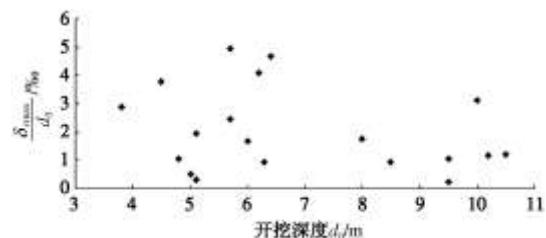


图 2 最大沉降比和开挖深度的关系

Fig. 2 Relation between ratio of maximum settlements to depths and excavation depth

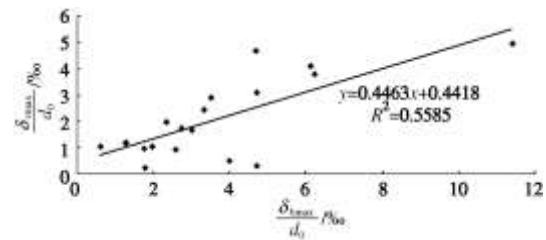


图 3 最大水平位移比与最大沉降比的关系

Fig. 3 Relation between maximum lateral displacements and settlements

统计设有预应力锚杆和微型桩的复合土钉墙实例，得到它们的最大水平位移为 0.1%~0.3% 倍的开挖深度（图 4），几乎是平均值的一半，但大于桩排和地下连续墙支护。这说明，锚杆或微型桩对复合土钉墙的变形有明显的约束作用。

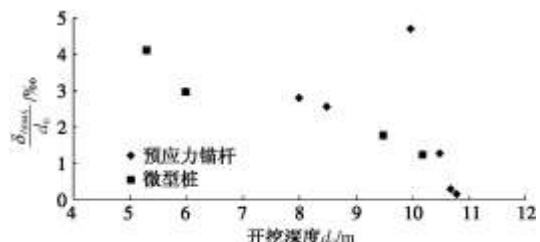


图 4 最大水平位移比和开挖深度的关系

Fig. 4 Relation between ratio of maximum lateral displacements to depths and excavation depth

2.2 地质条件的影响

在桩排和地下连续墙支护方式中，场址的土层结构不同，变形规律也存在差异^[3, 6]。同样，复合土钉墙的变形也与地质条件相关。与桩排等支护方式相比，复合土钉墙大多用于开挖深度较浅的基坑（例如，小于 10 m），主要与第四纪土层相关，涉及杂填土、黏性土、淤泥质土、粉土、粉砂等浅部土层。土抗剪强度指标 c 、 φ 及物理指标 γ 是土的重要参数，与基坑的变形相关。为综合衡量土层强度，这里提出土层单位抗剪强度 τ_u 的概念，定义为 1 m 深度处土层的抗剪强度。根据莫尔 - 库仑强度准则，有

$$\tau_u = c + \gamma \tan \varphi , \quad (1)$$

式中, c , φ , γ 分别是土层的黏聚力 (kPa)、内摩擦角 ($^\circ$) 和重度 (kN/m^3)。由表 1 计算得到每个实例主要土层的单位抗剪强度值 τ_u (kPa), 在表 2~4 中找到对应的最大水平位移, 得到图 5 中的关系。从图 5 可以看出, τ_u 增大时, 最大水平位移有明显减少的趋势。拟合的包络曲线是一指数函数, 方程由下式确定

$$\frac{\delta_{\max}}{d_0} = 17.643e^{-0.0532\tau_u} , \quad (2)$$

式中, δ_{\max} 为最大水平位移 (mm), d_0 为开挖深度 (m), τ_u 是主要土层单位抗剪强度值 (kPa) 计。举一例说明。对一稳定的复合土钉墙, 若主要土层 $\tau_u=25$ kPa, 开挖深度 8 m, 则由式 (2) 估算知, 最大水平位移将不大于 37.3 mm。须特别指出, “主要土层”是指决定复合土钉墙稳定性的关键土层, 如坑底附近最软弱土层或较大厚度土层。图 5 表明, 复合土钉墙的变形受主要土层强度控制, 土层单位抗剪强度是决定性因素之一。

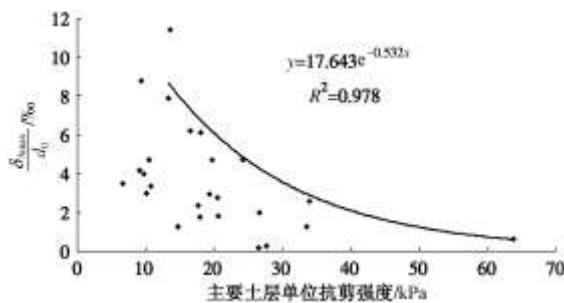


图 5 主要土层单位抗剪强度与最大水平位移比之间的关系

Fig. 5 Relation between ratio of maximum lateral displacements to depths and unit shear strength for main soil layers

2.3 支护方案对变形的影响

(1) 土钉

由表 2~4 中的数据, 可知道土钉平均长度 l 与开挖深度 d_0 之比 R_n 在 0.6~2.89 之间变化, 统计结果如表 6 所示。

表 6 土钉设计长度统计

Table 6 Case statistics by nail relative length

R_n 变化范围	0.5~1	1~1.5	1.5~2	2~2.5	2.5~3
实例数	7	6	9	3	1

表 6 中, 土钉相对长度 R_n 在 1.5~2.0 之间剖面较最多, 占总数的 35.7%; 在 0.6~1.0、1.0~1.5 这两个区间实例数随后, 分别占 25%, 21.4%, 这 3 个区间的实例占总数的 82.1%。这说明目前国内复合土钉墙中, 土钉平均长度大多小于 2.0 倍的基坑开挖深度, 在 1.5 倍左右开挖深度的较多。对场址土层以软土层

为主的 11 例中, R_n 在 0.74~2.89 之间变化, 其中有 5 个剖面 R_n 在 1.5~2.0, 2.0~2.5 这两个区间内, 这说明软土地区复合土钉墙中土钉设计长度大多在 2 倍左右的开挖深度范围内, 比平均值长度要长一些。

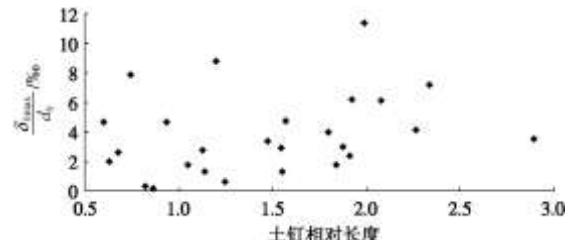


图 6 最大水平位移比与土钉相对长度的关系

Fig. 6 Relation between ratio of maximum lateral displacements to depths and relative nail lengths

由表 2~4 中的数据, 得到土钉相对长度值, 然后可确定图 6 所示的最大水平位移比与土钉相对长度的关系。图 6 表明, 土钉相对长度增加时, 复合土钉墙最大水平位移比没有明显减小的趋势。

$$\text{土钉空间布置 } n = \frac{1}{S_h \times S_v} , \text{ 指复合土钉墙面层上}$$

单位面积内所布置土钉的根数。土钉空间布置反映了土钉提高主动区土体强度和抗滑的性能。

表 7 土钉空间布置

Table 7 Case statistics by spacing of soil nails

n 值变化范围	0.3~0.6	0.6~0.9	0.9~1.2	1.2~1.5
实例数	11	7	7	1

这 26 个实例中, n 在 0.33~1.33 之间变化, 其统计结果如表 7 所示, 大多情况下, 面层上每平方米布置 0.5~1.0 根土钉。同样, 由表 2~4 中的数据, 得到土钉空间布置 n 与变形的关系, 如图 7 所示。 n 增加时, 最大水平位移没有明显增加的趋势。按照目前的经验, S_h 或 S_v 最小值为 1.0 m。因为群锚效应, 当间距小于 1.0 m 时, 由于土钉相互影响加强, 土钉功能并不能相应地提高。它们的合理取值, 是一个与土层性质、边坡几何尺寸、土钉长度、坡顶超载等众多因素相关的一个优化问题, 还有待进一步的研究。

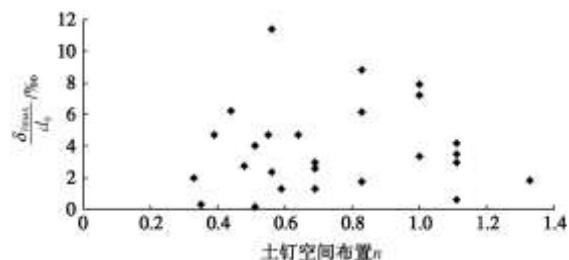


图 7 最大水平位移比与土钉空间布置的关系

Fig. 7 Relation between ratio of maximum lateral displacements to

depths and nail spacing

土钉的刚度远大于周围土体，它的加筋和锚固双重作用增强了基坑稳定性，与土钉相关的因素也可能影响到基坑变形大小。例如，土钉长度 l 、孔径 D 、土钉或土钉砂浆复合体的弹模 E 、土钉与水平方向倾角 α 、土钉空间布置 S_h 、 S_v 等等。为了综合考虑土钉的加筋和锚固效应，提出土钉刚度系数 C_{sn} 概念^[7]，定义：

$$C_{sn} = \frac{EA \sum_{i=1}^n l_i}{10^3 p_a S_h d_0^2} \cos \alpha \quad . \quad (3)$$

式中 C_{sn} 为无量纲参数； E 为土钉弹模； A 为土钉横截面面积； l_i 为第 i 根土钉长度； n 为同一剖面上土钉总数； p_a 为大气压值， $p_a = 101.325 \text{ kPa}$ ； α 是土钉与水平方向的夹角， $0 \leq \alpha < 90^\circ$ ； S_h 为土钉水平间距； d_0 为开挖深度。式(3)中， $\cos \alpha$ 称为加筋效应系数。文中介绍的 26 个实例中，已知 $E = 2.2 \times 10^7 \text{ kPa}$ ， $A = 0.0113 \text{ m}^2$ ， $\alpha = 15^\circ$ ，代入其余参数值，可以得到最大位移 δ_{max} 与 C_{sn} 之间的关系，如图 8 所示。图 8 表明，当 C_{sn} 增大时， δ_{max} 有减少的趋势，这与桩排支护类似^[3, 5]。

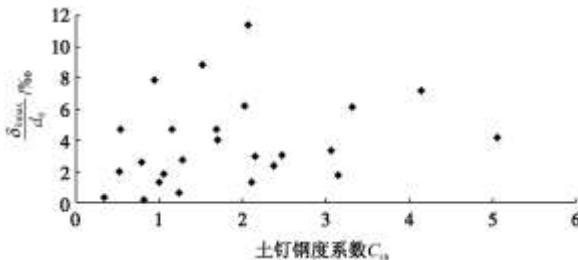


图 8 土钉刚度系数 C_{sn} 与最大水平位移比之间的关系

Fig. 8 Relation between ratio of maximum lateral displacements to depths and nail stiffness coefficient

(2) 预应力锚杆复合土钉墙

锚杆比土钉长。与土钉相比，它的锚固作用更明显，但由于布置空间较大，对主动区土体加筋作用减弱。锚杆大多施加了预应力，对土体侧向位移的限制更明显。同样，锚杆承受土体传来的摩擦力，弥补了由于开挖在土体中释放的部分侧向应力，使得锚杆一定范围内土体位移减少。预应力锚杆大多用于基坑深度大于 6 m 的基坑。26 个工程中，有 7 个有预应力锚杆，预应力在 70~200 kN 之间不等，锚杆多为钢筋、钢索或钢绞线材料，1~2 排不等，水平间距 1~1.6 m。锚杆长度与开挖深度之比 0.8~1.9，大多大于 1.5。锚杆复合土钉墙发生的大侧向变形大多小于 0.3% 倍的开挖深度，比平均值小（如图 4）。这表明锚杆对土体侧向变形有明显的限制作用。

(3) 水泥土墙复合土钉墙

收集到的 26 个工程中，共有 16 个设计方案中布置有水泥土墙，由两排或单排水泥土搅拌桩形成，宽度 W_c 在 500~1200 mm 之间。大多水泥土墙墙顶位于地表以下 1.0~2.0 m，底部嵌入基坑坑底以下 0.13~1.0 倍的基坑开挖深度。大多嵌固深度在约 0.5 倍的开挖深度，嵌固在较好土层中。由于水泥土墙复合土钉墙多用于土层较差的地层条件下，与预应力锚杆复合土钉墙相比，它发生的变形要大一些，如图 9 所示。最大水平位移在 0.5% 倍的开挖深度附近变化。

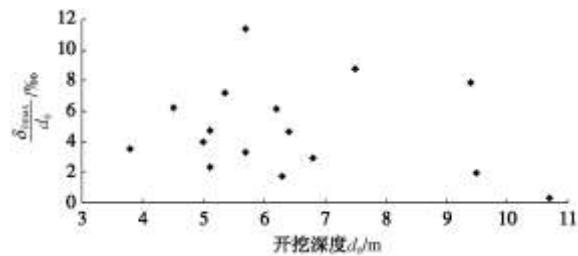


图 9 开挖深度与最大水平位移比的关系

Fig. 9 Relation between ratio of maximum lateral displacements to depths and excavation depth

(4) 微型桩复合土钉墙

在 26 个实例中，有 4 个存在微型桩。微型桩多为直径 $\phi 120\sim220 \text{ mm}$ 钢管或毛竹这两种材料。布置 1~2 排，桩顶位于地表以下 2~3 m，沿基坑走向桩间距 0.5~1.8 m。加微型桩后，基坑发生的位移较平均值要小（如图 4 所示）。

3 结 论

基坑是开挖形成的人工边坡，其安全性取决于坡脚的稳定和边坡中部不发生过大的位移这两个方面的因素。支护结构须首先确保坡脚的稳定性，其次才是控制边坡中部附近土体的过大位移，这是基坑支护设计的基本原则。复合土钉墙支护结构正好能满足这两个方面的要求：土泥土挡墙、微型桩增强了坡脚的稳定性，而预应力锚杆、土钉则限制了边坡中间附近土体的位移。统计数据表明，目前复合土钉墙设计方案中，土钉长度大多在 1.5 倍左右开挖深度、软土地区大多则在 2 倍左右的开挖深度范围内变化；土钉和锚杆水平间距大于 1 m。水泥土墙一般用于土质较差基坑，底部大多嵌入强度较高土层。复合土钉墙应用范围比土钉墙广泛。本文介绍的 26 个典型复合土钉墙基坑工程，其信息是全面客观的。通过以上分析，得到如下一些结论：

(1) 复合土钉墙最大水平位移、最大沉降平均值分别为 0.4%，0.2% 倍的基坑开挖深度，前者是桩排或地下连续墙支护的两倍左右。设有预应力锚杆的复合

土钉墙, 最大水平位移值减小到 0.2% 倍的开挖深度。复合土钉墙最大水平位移增加时, 最大沉降也增加, 它们之间的关系可由式 $\frac{\delta_{vmax}}{d_0} = 0.4463 \frac{\delta_{hmax}}{d_0} + 0.4418$ 确定 (δ_{hmax} , δ_{vmax} 以 mm 为单位; d_0 以 m 为单位)。最大水平位移或最大沉降与开挖深度之比, 它们和开挖深度之间没有明显的关系。

(2) 主要土层, 是指影响复合土钉墙稳定的关键土层。复合土钉墙的变形受主要土层强度控制。本文提出的土层单位抗剪强度的概念, 涉及到土层 c , φ , γ 3 个重要参数, 能反映土层抗剪性能, 比单独用 c 或 (和) φ 来衡量要更全面。基坑主要土层单位抗剪强度增加时, 基坑变形明显减小。拟合的变形包络曲线是一指数函数形式, 可用于估算复合土钉墙最大变形。

参考文献:

- [1] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of 7th Int Conf on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1969: 225 - 290.
- [2] CLOUGH G W, O'ROURKE T D. Construction induced movements of in situ walls[C]// Proceedings of Design and Performance of Earth Retaining Structure. Geotechnical Special Publication, ASCE, New York, 1990, 25: 439 - 470.
- [3] LONG M. Database for retaining wall and ground movements due to deep excavations[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 127(3): 203 - 224.
- [4] OU C Y, HSIEN P G, CHIOU D C. Characteristics of ground surface settlement during excavation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1993, 30: 758 - 767.
- [5] YOO C. Behavior of braced and anchored walls in soils overlying rock[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 127(3): 225 - 233.
- [6] KUNG G T C, JUNG H, HSIAO E C, et al. Simplified model for wall deflection and ground-surface settlement caused by braced excavation in clays[J]. Journal of Geoenviromental and Geotechnical Engineering, 2007, 133(6): 731 - 747.
- [7] 杨育文. 黏土中土钉墙实例分析和变形评估[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(9): 1427 - 1433. (YANG Yu-wen. Case studies of soil nailing walls and estimation of their displacement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(9): 1427 - 1433. (in Chinese))
- [8] 徐国民, 吴道明, 杨金和. 昆明某训练基地基坑变形失稳原因分析[J]. 岩土工程界, 2003, 6(2): 31 - 33. (XU Guo-ming, WU Dao-ming, YANG Jian-he. Cause of displacement and collapse of deep excavation in Kunming[J]. Geotechnical Engineering World, 2003, 6(2): 31 - 33. (in Chinese))
- [9] 杜常春. 复合土钉墙支护基坑事故分析与处理[J]. 土工基础, 2007, 21(2): 7 - 9. (DU Chang-chun. Accident analysis and technology dispose of the composite soil nailing wall support in the soft-clay deep foundation pit[J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(2): 7 - 9. (in Chinese))
- [10] 王荣彦, 孙芳. 某复合土钉墙支护体变形原因分析[J]. 土工基础, 2007, 21(4): 10 - 12. (WANG Rong-yan, SUN Fang. The cause of bracing deformation of a combined soil nailed wall[J]. Soil Engineering and Foundation, 2007, 21(4): 10 - 12. (in Chinese))
- [11] 李明, 魏一祥. 复合土钉墙支护技术在青岛福林大厦基坑支护中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008(6): 63 - 66. (LI Ming, WEI Yi-xiang, Application of technique of composite soil nailing in deep excavation in Qingdao[J]. Exploring Mineral Engineering, 2008(6): 63 - 66. (in Chinese))
- [12] 金家兴, 吕艳兵. 复合型土钉墙支护在软土中的运用[J]. 岩土工程界, 2008, 11(11): 39 - 44. (JIAN Jia-xin, LU Yan-bing. Application of technique of composite soil nailing in soft soil[J]. Geotechnical Engineering World, 2008, 11(11): 39 - 44. (in Chinese))
- [13] 唐波, 张艳蓉, 马蒸, 等. 湖州地区软土基坑复合土钉墙支护工程实例[J]. 浙江建筑, 2008, 25(9): 33 - 35. (TANG Bo, ZHANG Yan-rong, MA Zheng, et al. Engineering cases of retaining of soft soil foundation pit with composite soil nailing walls in Huzhou area[J]. Zhejiang Construction, 2008, 25(9): 33 - 35. (in Chinese))
- [14] 张利慧. 浦东国际机场二期工程北雨水泵站基坑施工[J]. 中国市政工程, 2005(6): 56 - 58. (ZHANG Li-hui. Construction of deep excavation of pump station in Pudong international airport[J]. China's Municipal Engineering, 2005(6): 56 - 58. (in Chinese))
- [15] 马军, 郑伟丛. 软土地基基坑搅拌桩加土钉墙支护技术[J]. 建筑技术, 2002, 33(2): 123 - 124. (MA Jun, QIE Wei-cong, Soil-mixing piling and soil nailing wall in soft soil[J]. Architecture Technology, 2002, 33(2): 123 - 124. (in Chinese))
- [16] 白三贵. 水泥搅拌桩—土钉墙复合支护技术在建筑软土

- [16] 基坑工程中应用[J]. 广东建材, 2009(5): 112 - 114. (BAI San-gui. Application of soil-mixing piling and composite soil nailing wall in building excavation in soft soil[J]. Gunagdong Building Materials, 2009(5): 112 - 114. (in Chinese))
- [17] 张 建. 新型土钉墙技术在基坑支护工程中的应用[J]. 江苏地质, 2002, 26(6): 221 - 224. (ZHANG Jian. Application of soil nailing wall in deep excavation[J]. Jiangsu Geology, 2002, 26(6): 221 - 224. (in Chinese))
- [18] 余建民, 冯翠红, 闫银刚. 止水型复合土钉墙支护的研究与应用[J]. 建筑技术, 2009, 40(2): 132 - 135. (YU Jian-min, FENG Cui-hong, YAN Yin-gang. Research and application of waterproof compound soil-nailed wall[J]. Architecture Technology, 2009, 40(2): 132 - 135. (in Chinese))
- [19] 樊向阳, 徐水根. 自钻式锚杆在软土地区复合土钉墙支护中的应用[J]. 岩土工程界, 2004, 7(1): 67 - 69. (FAN Xiang-yan, XU Shui-gen. Application of self-boring anchor composite soil nailing walls[J]. Geotechnical Engineering World, 2004, 7(1): 67 - 69. (in Chinese))
- [20] 张利生, 张昭善. 复合土钉墙技术在某基坑支护中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2005(1): 35 - 36. (ZHANG Li-Sheng, ZHANG Zhao-shan. Application of composite soil nailing wall in a deep excavation[J]. Shandong Coal Technology, 2005(1): 35 - 36. (in Chinese))
- [21] 陈启辉, 张 鑫, 孙剑平, 等. 控制邻近建筑物变形的复合土钉支护技术设计和施工[J]. 工业建筑, 2008, 38(5): 115 - 118. (CHEN Qi-hui, ZHANG Xin, SUN Jian-ping, et al. Construction and design of composite soil nailing technology for controlling slope displacement[J]. Industrial Construction, 2008, 38(5): 115-118. (in Chinese))
- [22] 陈旭伟, 缪曙光, 严 平, 等. 双排毛竹桩复合土钉墙在软土基坑围护中的应用[J]. 浙江建筑, 2005, 22(2): 29 - 30. (CHEN Xu-wei, MIAO Shu-guang, YIN Ping, et al. Application of two rows of bamboo in excavation in soft soil[J]. Zhejiang Construction, 2005, 22(2): 29 - 30. (in Chinese))
- [23] 何德洪, 付进省. 郑东新区土钉墙加微型钢管桩基坑支护技术[J]. 探矿工程, 2009(1): 49 - 51. (HE De-hong, FU Jing-sheng. Application of micro-steel pile in deep foundation excavation retaining and protection[J]. Exploring Mineral Engineering, 2009(1): 49 - 51. (in Chinese))
- [24] 刘兴旺. 复合土钉墙支护技术在朝阳广场深基坑中的应用[J]. 施工技术, 2007, 36(6): 80 - 82. (LIU Xing-wang. Application of composite soil nail wall technology in deep excavation of Chaoyang Plaza[J]. Construction Technology, 2007, 36(6): 80 - 82. (in Chinese))
- [25] 赵乃志, 刘 丹, 张敏江, 等. 复合土钉支护技术在深基坑中的应用[J]. 沈阳建筑大学学报 (自然科学版), 2007, 23(3): 411 - 414. (ZHAO Nai-zhi, LIU Dan, ZHANG Min-jiang, et al. Application of soil-nailing support to deep excavation[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Nature science), 2007, 23(3): 411 - 414. (in Chinese))
- [26] 丁明海, 张启军. 复合型土钉墙在深基坑围护工程中的应用[J]. 现代矿业, 2009(6): 136 - 138. (DING Min-hai, ZHANG Qi-jun. Application of composite soil nailing wall in deep excavation[J]. Modern Mining, 2009(6): 136 - 138. (in Chinese))
- [27] 江时才. 某公用地下停车库基坑支护的施工[J]. 施工技术, 2006, 35(2): 49 - 51. (JIANG Shi-cai. Construction of foundation pit support in an underground parking[J]. Construction Technology, 2006, 35(2): 49 - 51. (in Chinese))
- [28] 刘方渊, 左文贵. 土钉墙与预应力锚杆支护在某大厦基坑工程中的应用[J]. 采矿技术, 2008, 8(4): 53 - 55. (LIU Fang-yuan, ZUO Wen-gui. Application of soil nailing wall and prestressed anchor in a building excavation[J]. Mining Technology, 2008, 8(4): 53 - 55. (in Chinese))
- [29] 肖 峰. 预应力锚索—土钉墙复合支护技术在建筑深基坑工程中的应用[J]. 广东建材, 2009(3): 70 - 72. (XIAO Feng. Prestressed cable and composite soil nailing wall in deep excavation[J]. Guangdong Building, 2009(3): 70 - 72. (in Chinese))
- [30] 范士凯, 杨育文. 长江一级阶地基坑地下水控制方法和实践[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 1): 63 - 68. (FAN Shi-kai, YANG Yu-wen. Groundwater control and practice of deep foundation pits in 1st terrace along Yangtze River[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 63 - 68. (in Chinese))