

DOI: 10.11779/CJGE201607002

# 粉质黏土深基坑土钉墙支护作用机理模型试验研究

单仁亮, 郑 赟, 魏龙飞

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 以相似理论为基础, 确定模型试验的相似比, 然后按照相似比的要求选定相似材料, 建立试验所需的土钉墙物理模型。设计合理的测试系统、加载系统模拟基坑开挖、土钉墙支护及降雨过程。测试整个试验过程中的土钉墙的墙顶水平位移、土钉内力、土压力等。试验结果表明, 基坑开挖引起土体应力重新分布是影响土钉墙墙顶水平位移变化的主要因素, 且每步开挖均都会引起墙顶水平位移呈台阶式增大, 在土钉墙的施工阶段墙顶最终水平位移达基坑开挖深度的2.3%; 在墙顶的均布荷载不是很大的情况下, 墙顶水平位移会随荷载的增大近似呈线性增大, 且降雨是引起粉质黏土基坑位移的重要因素; 基坑开挖过程中, 墙侧土压力呈现先增大后减小再逐渐增加的变化规律; 随基坑开挖深度增加, 土钉受力逐渐由尾部向内部发展。

**关键词:** 深基坑; 土钉墙; 模型试验

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)07-1175-06

**作者简介:** 单仁亮(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: srl@cumt.edu.cn。

## Model tests on supporting mechanism of soil nailing wall in silty clay deep foundation

SHAN Ren-liang, ZHENG Yun, WEI Long-fei

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Based on the similarity theory, the similitude ratio of model tests is confirmed, the similar materials are selected according to the similitude ratio, and the physical model for soil nailing wall is established. The reasonable test system, loading system and precipitation testing procedure are designed. The horizontal displacement of soil nailing wall top, axial force of soil nails and earth pressure are tested and analyzed. The results show that the primary factor that affects the displacement of soil nailing wall is the soil stress redistribution caused by pit excavation, and every excavation makes the horizontal displacement of the wall top present stepped increases. The horizontal displacement reaches 2.3% of excavation depth at the excavation and supporting stage. The rainfall is an important factor of the horizontal displacement. If the loading on the top of the wall is not very large, the horizontal displacement of the wall top increases with the growth of excavation depth. With the pit excavation the lateral earth pressure of soil nailing wall first increases and then decreases but its overall trend is to increase. During the pit excavation, the forces on soil nails develop from the end to the inside.

**Key words:** deep foundation; soil nailing wall; model test

## 0 引 言

由于城市建设用地的日趋紧张, 高层、超高层建筑的大量兴起, 安全、经济、快速地进行深基坑的开挖与支护早已成为控制工程成败的关键。土钉墙支护<sup>[1]</sup>是近30多年发展起来的新型深基坑支护技术, 因其造价低廉、施工迅速、施工现场文明、支护质量高、适用多种地质条件等优点, 尤其是在北京地区的基坑支护和边坡加固中得到广泛的应用。

土钉墙支护技术是一种原位土体加筋技术<sup>[2-5]</sup>, 由被加固土体、放置于原位土体中的土钉及附着于坡面

的喷射混凝土面层组成, 类似于重力式挡墙的形式, 并以此来抵抗墙后传来的土压力, 使开挖面稳定。国外学者对土钉墙的作用机理及加固模式做了相当数量的研究并取得了很多理论成果<sup>[6-8]</sup>。中国对土钉墙的研究也取得了丰硕的成果。龚晓南的《土钉和复合土钉支护的若干问题》一文深入探讨了土钉支护的定义、计算模型、地下水处理、适用范围、环境效应、设计

基金项目: 教育部高等学校博士学科点专项科研基金项目  
(20120023110009)

收稿日期: 2015-07-12

表 1 原型与相似模型的支护参数

Table 1 Parameters of prototype and model

支护 参数	锚孔直径 /mm	垂直 间距/mm	水平 间距/mm	土钉 倾角/(°)	土钉直径或 边长/mm	土钉长度 /mm	钢筋网 /mm	面层 厚度/mm
原型	125	1250	1050	5~10	18	6000	Φ6.5@200	80
模型	25	250	210	5~10	5	1200	Φ1@40	16

中应注意的问题以及复合土钉支护等问题<sup>[2]</sup>，并逐步在学术界和工程界形成统一，提高了土钉和复合土钉的工程应用水平。汪班桥等<sup>[9]</sup>通过土钉墙模型试验，研究了土钉在黄土中的变形情况、土钉加固黄土类深基坑的作用机理及土钉应力分布情况，得出了一些面层位移和土钉受力的变化规律。孙铁成等<sup>[10]</sup>通过深基坑复合土钉支护模型试验研究，比较了普通土钉支护和复合土钉支护，得出复合土钉支护能使更多土体参与支护作用，有效控制基坑变形，从而提高基坑稳定性。张建红等<sup>[11]</sup>对 8 组土钉支护基坑进行了离心模型试验，表明土钉长度和密度对支护效果影响显著。但是，由于中国幅员辽阔，各地工程地质和水文地质条件差距很大，基坑岩土类型和物理力学特性及工程场地条件千变万化，基坑土钉支护时有失效或工程事故。

粉质黏土是北京地区的一种代表性土体，一般分布在地表以下 2~10 m 范围内，常常以厚层或者与砂土层和卵石层呈夹层状态出现，且在更深的土层中也很常见。由于这种土体遇水（主要是降雨）软化性质明显，是北京地区深基坑工程最常发生事故的土层。目前，针对北京地区粉质黏土中的土钉墙的工作机理的研究还很少，本文通过在粉质黏土深基坑中的土钉墙物理模型试验，模拟了基坑开挖、土钉墙施工及降水过程，系统分析了土钉墙的水平位移、土钉内力及土压力变化等的规律。

1 模型试验介绍

1.1 模型相似比

根据相似理论<sup>[12-13]</sup>，选取基坑土钉支护相关参数如下。

几何参数：基坑深度  $H$ ，基坑宽度  $L$ ，土钉长度  $L_b$ ，土钉直径  $d$ 。

物理力学参数：土体重度  $\gamma$ ，土体变形模量  $E$ ，土单轴抗压强度  $R_c$ ，泊松比  $\nu$ ，黏聚力  $c$ ，内摩擦角  $\varphi$ ，土钉弹性模量  $E_b$ ，墙身应力  $\sigma$ ，应变  $\varepsilon$ ，墙身位移  $y$ 。

根据上述参数列出函数式：

$\Phi(\gamma, E, R_c, \nu, c, \varphi, L, H, E_b, L_b, d, \sigma, \varepsilon, y) = 0$ 。

以  $\gamma$  和  $L$  为基本量纲，将上式无量纲化得

$\Phi(E/\gamma L, R_c/\gamma L, \nu, c/\gamma L, \varphi, H/L, E_b/\gamma L,$

$L_b/L, d/L, \sigma/\gamma L, \varepsilon, y/L) = 0$ 。

方程有 14 个物理量，12 个无量纲量，得到以下相似准则： $\pi_1 = E/\gamma L$ ， $\pi_2 = R_c/\gamma L$ ， $\pi_3 = \nu$ ， $\pi_4 = c/\gamma L$ ， $\pi_5 = \varphi$ ， $\pi_6 = H/L$ ， $\pi_7 = E_b/\gamma L$ ， $\pi_8 = L_b/L$ ， $\pi_9 = d/L$ ， $\pi_{10} = \sigma/\gamma L$ ， $\pi_{11} = \varepsilon$ ， $\pi_{12} = y/L$ 。

根据参数的物理意义，以相似比  $C_L$ ， $C_\rho$  为基本量确定其他物理量相似比。几何相似比由模型尺寸和模拟土体的范围决定，模型尺寸依赖于投入的人力、物力和试验的可操作性，进行模型试验中要进行人工操作，因此试坑的尺寸必须足够人用手动工具操作。综合考虑试验条件、试验方案和操作工具要求等因素，确定几何相似比为  $C_L = C_H = C_d = 5$ ，密度相似比为  $C_\rho = 1$ ，则  $C_\gamma = C_\rho C_g = 1$ ，另外有  $C_\varphi = C_\nu = C_\varepsilon = 1$ ， $C_c = C_{R_c} = C_E = C_{E_b} = C_\sigma = C_y = 5$ 。

1.2 试验模型

模拟试验的目的不同，则相似模型需要模拟的范围也不尽相同。在深基坑土钉支护施工过程中，随着开挖深度的不断增加，每层土钉的受力、变形不断变化，本次试验主要研究土钉墙支护钉-土相互作用机理、支护后土体中土压力的特点以及土钉墙体的工作特性。试验模型坑的尺寸长×宽×深为 3.5 m×1.8 m×1.8 m。如图 1 所示，坑壁按防水层施工，表面用水泥砂浆打磨光滑，刷上一层黄油并粘贴一层塑料薄膜，以满足试坑防渗并减少试验过程中坑壁对试墙的摩擦约束。



图 1 试验模型及填土夯实

Fig. 1 Test model and filling compaction

1.3 相似材料的选取

土层的模拟：本次试验用土使用现场采集的原状土，土样先经筛分均匀，去除全部粒径大于 5 mm 的粗颗粒，填筑时按 20 cm 分层填筑，并均匀夯实。

土钉支护模拟设计：由于金属材料较好地符合弹

性理论的基本假定, 因此当原型结构是金属结构或者测量精度要求高时, 可使用金属材料进行相似模拟。工程中常用的土钉材料为 HPB235 或 HRB335, 其弹性模量约为  $2.0 \times 10^5$  MPa, 泊松比约为 0.3, 而铝合金作为模型材料具有良好的导热性和相对较低的弹性模量 (约为  $7.0 \times 10^4$  MPa), 泊松比为 0.33, 接近于模型试验的相似比要求, 且采用铝合金在试验中既能获得较大的变形量, 又能较好地消除应变传感器元件本身的刚度影响, 本次试验使用边长为 5 mm 的矩形铝合金棒模拟工程中常用的钢筋土钉, 如图 2 所示。



图 2 土钉模型

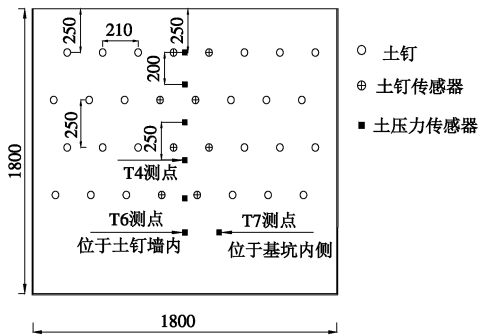
Fig. 2 Soil nailing model

1.4 测试系统设计

整个测试系统包括土钉测试、土压力测试和土钉墙的变形测试。土钉测试采用粘贴应变片量测土钉应变, 通过静态应变仪采集数据。在土钉长度方向布置 4 个测点, 为避免数据线过于集中影响测试精确度, 将测点分散在两根土钉上, 4 排土钉共计 8 个传感器 16 个测点。土压力采用埋设应变式土压力盒的方法, 几何尺寸为: 直径 30 mm, 厚 7 mm, 量程为 0~200 kPa, 测点布置见图 3。土钉墙的水平位移用大量程的百分表量测, 在土钉墙的墙顶对称布设两个大量程百分表。

1.5 加载及降雨过程模拟

加载采用静力堆载的方法, 加载在第五次开挖及面层施工结束约 48 h 后开始, 通过在墙顶堆积单块质量为 25 kg 的混凝土配重块来实现, 堆积之前在墙顶土层上放置一块 100 cm×100 cm, 厚度为 1.5 cm 的矩形钢板, 钢板距墙顶边缘 10 cm, 距两侧坑壁 40 cm, 钢板可以保证对土体施加的荷载为均布荷载, 见图 4。每级堆载为 500 kg, 时间间隔为 30 min, 共加 10 级。



(a) 立面图

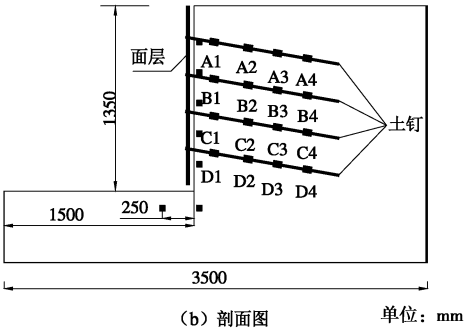


图 3 模型试验平面和剖面图

Fig. 3 Elevation and section of model tests

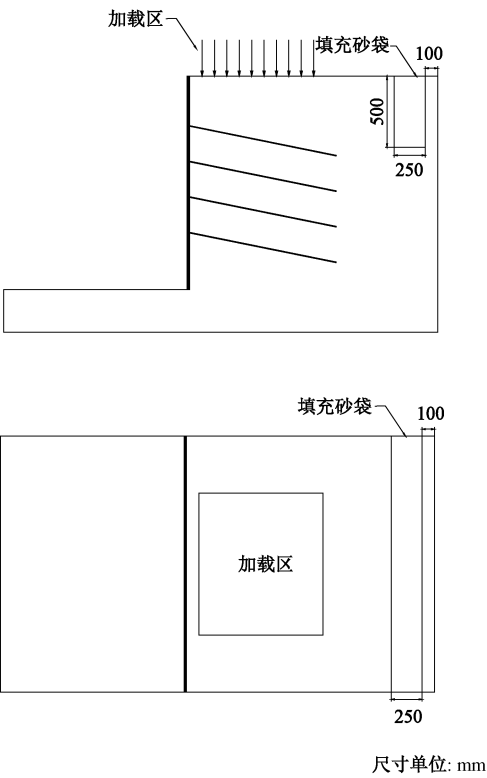


图 4 加载及降雨模型示意图

Fig. 4 Loading and precipitation model

在加载完成 150 h 后开始降雨过程模拟。在试坑顶部距离模型边缘 100 mm 处, 开挖一个宽度为 250 mm, 深度为 500 mm 的注水坑, 坑内满填粗砂砂袋。向注水坑内注水, 注水量为 18 L/h, 12 h 注水量为 216 L/h, 相当于 12 h 内降雨量为 60 mm, 属于暴雨范畴 (暴雨降水量标准为 12 h 降水量大于等于 30 mm, 小于 70 mm)。

2 试验结果与分析

本次模型试验开挖工况与实际工程施工基本保持一致。基坑开挖分 5 步进行, 前 4 步每步开挖深度为 30 cm, 最后一步 15 cm, 具体程序为开挖→人工挖孔→埋置土钉→灌浆→面层施工→导线连接。图 5 为第一次施工循环中的模拟坑壁图。在分步开挖时, 前

4 层每层开挖前即对土层进行取样, 测量其物理力学参数, 再进行开挖。由上至下, 各土层参数如表 2 所示。



图 5 第一次施工循环中的坑壁

Fig. 5 Photo of pit wall in first construction cycle

表 2 各土层参数

Table 2 Soil parameters

土层	含水率 /%	密度 /(g·cm <sup>-3</sup> )	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
1	10.98	1.788	47.42	32.904
2	17.16	1.776	47.88	29.337
3	13.01	1.737	53.52	32.661
4	17.78	1.766	28.64	33.775
均值	14.73	1.767	44.37	32.170

2.1 水平位移

本次试验采用布设大量程百分表的方式测量土钉墙顶在试验过程中的水平位移变化, 测量结果如图 6 所示。从图中可以看出: ①每一次开挖后的 2 d 内, 位移都有一个较大的上升, 第 3 天位移趋于平缓, 说明开挖是土钉墙产生水平位移的重要原因, 土钉作用发挥后又能使土钉墙位移趋于稳定。②从整个过程来看, 墙顶水平位移是逐渐增加的, 基坑开挖完成后, 墙顶最大水平位移为 3 mm, 为基坑深度的 2.3%。③开挖结束后, 墙顶加载过程中位移基本呈现线性增长 (图 7), 说明地面的超载加速了土钉墙体侧向变形。④降雨对基坑位移产生巨大影响。随着注水量逐渐增加, 土钉墙墙体变形急剧增大。在 150 h 内, 墙体位移迅速增加了 5 mm, 位移总量超过开挖与加载过程之和。随后增速放缓, 逐渐趋于稳定, 墙顶最大位移达到 12 mm。可见北京地区粉质黏土遇水软化的性质非常明显, 降雨是引起北京地区粉质黏土层基坑变形的重要因素。

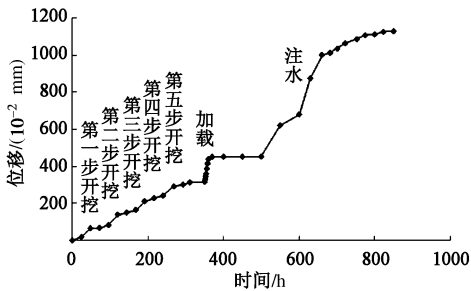


图 6 墙顶水平位移曲线

Fig. 6 Horizontal displacement curves of wall top

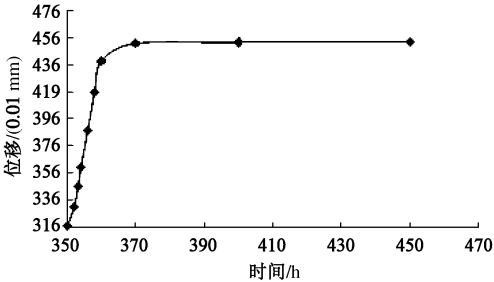


图 7 加载状况下墙顶水平位移曲线

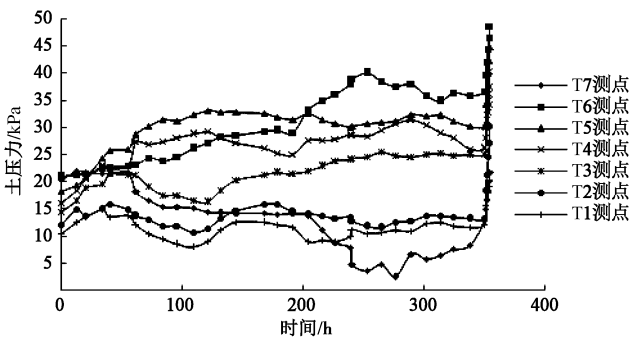
Fig. 7 Horizontal displacement of top under loading circumstances

2.2 土压力

图 8 (a) 为试坑中由上而下埋设的土压力传感器各测点测得的土压力时程曲线, 分析可得出土钉墙侧向土压力变化规律。①由于土体开挖卸载的影响, 导致墙外土体内部出现应力调整, 土压力呈现增大趋势, 最大处增加了 40.9%。上部土体增加较多, 下部土体增加较少。②土压力整体呈现出先增大再减小又逐渐增加的变化规律, 前期开挖对土压力的增加起主要作用, 增长较为激烈, 后期开挖土压力变化趋于平缓, 这说明基坑开挖前期对土钉墙侧向土压力的内部调整影响最大, 后期开挖时土压力已经充分发展并逐渐稳定。③T7 测点布设于基坑内侧, 埋深 1.45 m, 由图中可以得出, 随着基坑开挖坑内土体卸载, T7 测点的土压力逐步减小, 前几次的开挖影响较小, 开挖到底时, 该点的土压力已经减小了 28.8%。加载阶段土压力有略微的上升, 这是由于施加的荷载不足以使基坑底部土体产生隆起作用。④基坑开挖完成后的加载阶段, 如图 8 (b) 所示每一级荷载都会引起土压力的增加, 但是整体并不是呈线性增长的, 第一级荷载的施加使土压力增量最大, 约占总增加量的 40%~50%, 然后随着每级荷载施加, 土压力近似呈线性增加, 每级增量约为总增加量的 10%左右。

2.3 土钉受力分析

图 9 为试验土钉各测点所受拉力曲线, 图中 4 条曲线分别表示了土钉施工完毕后以及下次开挖对土钉的影响。



(a) 土压力时程曲线

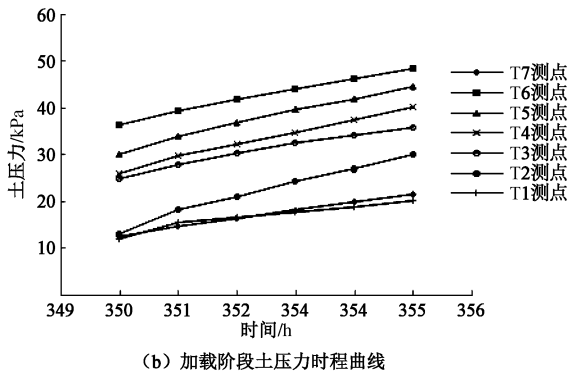


图8 土压力时程曲线

Fig. 8 Time histories of soil pressure

(1) 由图9(a)可以看出,首层土钉尾部轴力增加并向里面发展,最大值位于土钉尾部,头部轴力增加较慢且拉力值最小。下部紧临土层的开挖对土钉的受力影响更为明显,拉力值增幅较大,受力作用进一步向里面发展。由于土体开挖造成的土钉墙变形,靠近开挖面的土体变形较大,土压力的调整最为激烈,因此土钉的尾端受力最大。

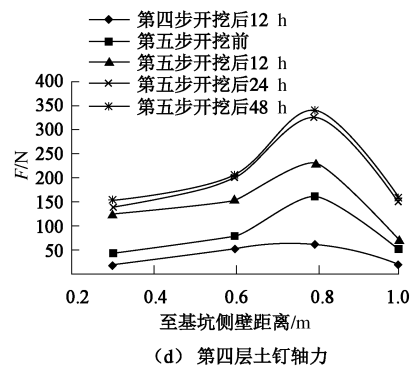
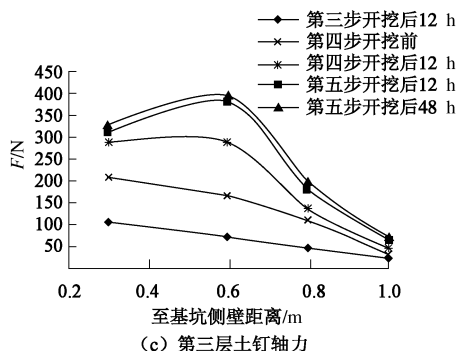
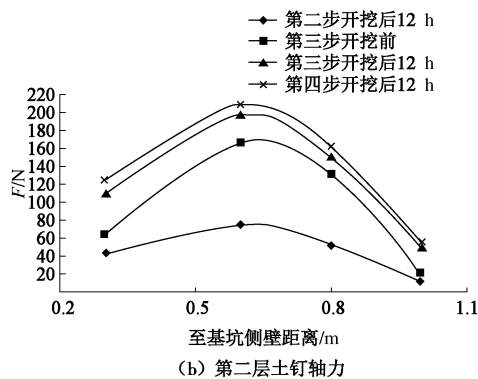
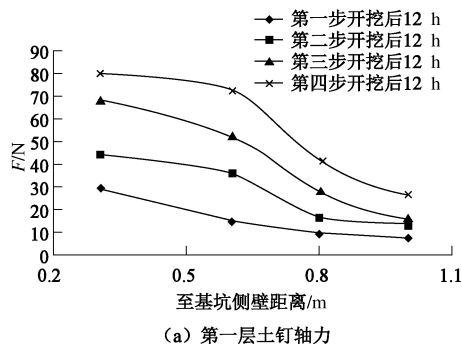


图9 土钉轴力

Fig. 9 Axial forces of soil nails

(2) 第二层土钉受力状况是基坑第二、第三和第四次开挖完成后测得的,由图9(b)可以看出,第三步开挖后土钉受力最大值在0.6 m的位置,且土钉施工完成后该点附近拉力值出现激增。这说明此次开挖对土体内部应力状态调整作用较大,而且墙体变形延伸到土体内部。

(3) 图9(c)所示第三、四步开挖对第三层土钉的作用,土钉施工完成以后,土钉受力表现出了较大的增长,尤其是第四步开挖后,该层土钉整体轴力增大最为明显,0.6 m附近土钉拉力出现突变,拉力达到极值。土钉施工结束后,土体变形及面层协调墙侧土压力调整引起土钉受力增加,在0.6 m附近的增加主要是土体变形应力调整作用的结果,面层传递的应力作用较小。

(4) 图9(d)中所示曲线为最后一层土钉受力曲线,整个施工开挖过程中各测点表现出平稳的增长,且都显示出中间大两端小的规律。最大值均出现在0.8 m位置,由于该层土钉离坑底近,坑内土体限制墙体位移,所以该层土钉轴力值要比第三层土钉小。

### 3 结 论

(1) 每次开挖引起墙顶水平位移呈台阶式增大,基坑的开挖卸载是产生位移的主要原因,土钉墙的墙顶最大位移为基坑开挖深度的2.3%。当在墙顶施加均布荷载时,在荷载不是很大的情况下,墙顶水平位移近似随荷载的增大而线性增长,若此时保持荷载不变,位移增速不断减缓,最后基本趋于定值。

(2) 北京地区粉质黏土遇水软化的性质非常明显,降雨是引起北京地区粉质黏土层基坑变形的重要因素。在粉质黏土中的土钉墙度过雨季时,应采取必要措施,如将墙顶一定距离内地面硬化等,防止雨水冲刷和下渗对墙体产生过大影响,威胁工程安全。

(3) 墙侧土压力呈现出先增大后减小再逐渐增加的变化规律,上部土体的开挖对土压力有较大的影响。



随着基坑开挖深度的增加,土压力不断增长直至稳定。

(4) 土钉内力变化规律为: 受力从土钉端部起逐渐向内部发展; 每层土钉拉力最大值随着基坑开挖深度的增加逐渐向远离面层的方向移动。

#### 参考文献:

- [1] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用[M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 19. (CHEN Zhao-yuan, CUI Jing-hao. The application of soil nailing supporting in the foundation pit[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 19. (in Chinese))
- [2] 龚晓南. 土钉和复合土钉支护的若干问题[J]. 土木工程学报, 2003, **36**(10): 80 - 83. (GONG Xiao-nan. Some problems on soil nailing and composite soil nailing[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, **36**(10): 80 - 83. (in Chinese))
- [3] 叶书麟, 陈仲颐. 基础工程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991: 16. (YE Shu-lin, CHEN Zhong-yi. The foundation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1991: 16. (in Chinese))
- [4] 张明聚. 土钉支护工作性能的研究[D]. 北京: 清华大学, 2000. (ZHANG Ming-ju. Research on behavior of soil Nailing[D]. Beijing: Tsinghua University, 2000. (in Chinese))
- [5] 程良奎, 杨志银. 喷射混凝土与土钉墙[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 13. (CHENG Liang-kui, YANG Zhi-yin. The shotcrete and soil nailing wall[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 13. (in Chinese))
- [6] FARID E, MASOOD V, MOHAMMAD S, et al. Displacement measurement of soil nail walls using close range photogrammetry[J]. Procedia Engineering, 2013, **54**(1): 516 - 524.
- [7] SANG C B, YOUN I C. The effect of the nail skew angle of soil nailing wall[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 1999, **3**(1): 73 - 39.
- [8] VIKAS P S, BABU G L S. 2D numerical simulations of soil nail walls[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2010, **28**(4): 299 - 309.
- [9] 汪班桥, 门玉明, 陈文玲. 土钉墙模型试验研究[J]. 西安工程学院学报, 2004, **24**(3): 15 - 17. (WANG Ban-qiao, MEN Yu-ming, CHEN Wen-ling. Studies of model test on soil-nailing wall[J]. Journal of Xi'an Engineering University, 2002, **24**(3): 15 - 17. (in Chinese))
- [10] 孙铁成, 张明聚, 杨 茜. 深基坑复合土钉支护模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, **23**(15): 2585 - 2592. (SUN Tie-cheng, ZHANG Ming-ju, YANG Qian. Modeling study on composite soil nailing for deep excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, **23**(15): 2585 - 2592. (in Chinese))
- [11] 张建红, 张 雁, 濮家骝, 等. 土钉支护的离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, **42**(1): 76 - 80. (ZHANG Jian-hong, ZHANG Yan, PU Jia-liu. et al. Centrifuge modeling of soil nail reinforcements[J]. China Civil Engineering Journal, 2009, **42**(1): 76 - 80. (in Chinese))
- [12] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998. (YUAN Wen-zhong. The similarity theory and the statics model test[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998. (in Chinese))
- [13] 徐 挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982. (XU Ting. The similarity theory and the model test[M]. Beijing: China Agricultural Mechanical Press, 1982. (in Chinese))