

文章编号: 1000-7598-(2008) 04-1121-06

深基坑 SMW 工法模拟试验研究及工作机理分析

顾士坦, 施建勇

(河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098)

摘 要: 通过主动侧加载模拟开挖卸载, 进行了基坑 SMW 工法围护结构与型钢围护结构的室内模型对比试验。试验结果表明: SMW 工法相对于单独型钢围护结构, 由于水泥土对型钢的围箍作用, 使型钢、水泥土成为一整体, 共同协调工作, 提高了型钢的刚度, 同时有效地起到了减小水平位移的作用。SMW 工法结构内力相对于单独型钢围护结构内力, 由于水泥土的作用, 其内力明显要小, 与工程实测规律一致。从不同角度探讨了 SMW 工法的工作特性、型钢-水泥土组合结构的相互作用机理。

关 键 词: SMW 工法; 模型试验; 水平位移; 结构内力; 工作机理

中图分类号: TU 458⁺.4; TU 753

文献标识码: A

Simulation test & performance mechanism analysis of SMW engineering method in deep foundation pits

Gu Shi-tan, Shi Jian-yong

(Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: model comparison tests of SMW engineering method and shaped steel exterior-protected construction are proceeded by loading on active side to simulate unloading on excavation side. Test results show that: shaped steel and cement soil of SMW engineering method can be a whole body and perform jointly compared with single shaped steel exterior-protected construction because of cement soil enclosing of shaped steel, so that stiffness of shaped steel is increased; and horizontal displacement can be decreased effectively. Internal force of SMW is less than that of single shaped steel exterior-protected construction obviously because of cement soil; this is accordant with actual measurement of engineering. Performance character and interacting mechanism of SMW are discussed from various angles.

Key words: SMW engineering method; model test; horizontal displacement; internal force of structure; performance mechanism

1 引 言

随着城市地下空间的大规模开发利用, 由此产生了大量深基坑工程。SMW (Soil Mixing Wall) 工法复合围护结构是一种把水泥土的止水性能和 H 型钢等劲性材料高强度特性有效地组合在一起而成的一种抗渗性好、刚度高的围护结构, 同其它围护型式^[1-3]相比, 它具有大壁厚、大深度、经济、环保等优点。对 SMW 工法的性能研究, 在设计计算方法、型钢起拔试验^[4]、抗弯能力^[5,6]等方面取得了一系列研究成果, 对于正确认识型钢-水泥土的相互作用机理, 推动工程应用等起到了积极作用。

目前对于 SMW 工法的工作机理认识还不清

楚, 工程设计中, 一般忽略水泥土的挡土作用或者仅把水泥土的作用当成一种强度、刚度储备。SMW 工法是型钢与水泥土的组合结构, 型钢与水泥土协同工作, 水泥土的主要作用是防渗止水, 同时对于型钢的抗弯也有一定程度的贡献^[4], 文献^[5]参照型钢-混凝土试验规范, 通过室内足尺构件型钢-水泥土组合结构模型试验, 分析了型钢、水泥土的共同作用。但是在考虑基坑工程施工工况条件下的试验研究较少, 为了紧密结合深基坑工程实际, 更好地认识和理解 SMW 工法的工作机理以及型钢、水泥土的共同作用, 进一步推动 SMW 工法在基坑工程中的应用, 笔者通过地面分级加载模拟开挖的不同工况, 进行了室内 SMW 工法与纯型钢围护方式的模

型对比试验, 进而探讨这一围护型式的力学机理。

2 试验研究

本文试验不针对具体工程, 按一般工程情况考虑。

2.1 试验模型概况

试验装置包括模型槽、加载系统和量测系统 3 部分组成。试验包括 SMW 工法模型试验和型钢围护模型试验。为了减小试验数据的离散性, 用风干中砂模拟围护结构两侧土体, SMW 工法桩墙成型的水泥土用土为粉质黏土。模型槽为河海大学岩土力学实验室土工模型槽 (用钢板和槽钢焊接制作), 槽顶安装有钢梁, 以施加反力之用, 其平面尺寸为 $1.6\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 的矩形, 深 1.2 m 。

加载系统采用千斤顶, 千斤顶上放置荷载传感器, 通过荷载传感器控制分级加载。

试验主要量测主动侧与被动侧的侧向土压力、墙体水平位移、墙体应变等。试验仪器布置如图 1 所示。型钢围护结构类似于工程中的钢板桩, 其模型试验仪器布置类似于图 1, 只是围护结构型式不同。土压力盒、百分表具体位置见试验结果分析有关曲线图。

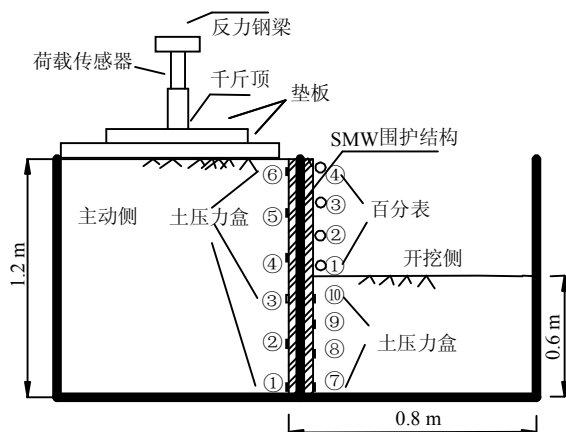


图 1 SMW 工法模型试验仪器布置示意图

Fig.1 Apparatus arrangement of SMW model test

2.2 模型墙设计

本次试验的模型桩墙制作包括第 1 组 SMW 工法模型试验的模型桩墙和第 2 组型钢 (劲性材料)。

第 1 组试验: SMW 工法模型桩墙的劲性材料采用 $5^{\#}$ 槽钢, 水泥为 32.5 普通硅酸盐水泥, 水泥土配比采用工程常用配比, 属同种材料小尺寸模拟, 刚度、强度匹配性较好。黏土风干后粉碎过筛, 按照水、水泥、黏土的重量比例 (1:2:10) 把水泥土搅拌均匀, 根据“全位二插一”的形式预制 SMW

工法挡墙, 水泥土内等间距共插入槽钢 3 根, 每根长度 1.2 m , 在中间一根槽钢的拉、压翼缘分别等间距 (10 cm) 黏贴应变片, 每侧 11 片, 共 22 片, 如图 2(a)所示; 养护时 24 h 洒水一次, 7 d 拆模, 继续养护共 28 d 后进行试验。制作模型挡墙的同时, 制作水泥土试样, 养护 28 d 后测得其无侧限抗压强度为 1.49 MPa 。模型槽实际宽度为 0.8 m , SMW 工法模型墙实际宽度为 0.33 m , 居中放置, 两侧分别用建筑模板, 共同组成基坑挡墙, 支护侧向土体。

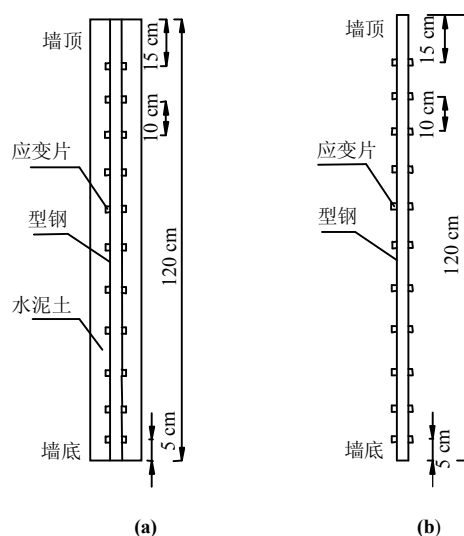


图 2 两组试验模型桩墙应变计布置

Fig.2 Strain foil arrangement of pile wall of model tests

第 2 组试验: 劲性材料 (槽钢) 围护墙共用 3 根槽钢, 每根 1.2 m , 间距同第 1 组试验, 在中间一根槽钢的拉压翼缘上等间距黏贴应变片, 每侧 11 片, 共 22 片, 如图 2(b)所示, 在两根槽钢间空隙及两侧槽钢与模型槽间空隙, 分别用预先切割好的建筑模板拼装共同组成基坑挡墙。

2.3 试验方法

为在短时间内直观、明显、正确地模拟支护结构物的应力及变形过程, 通过在模型槽填土表面施加荷载来补偿小模型的自重, 同时达到模拟试验开挖卸载的目的, 如图 1 所示。

通过千斤顶在主动侧顶面分级加载, 每级 5 kN , 最大荷载 35 kN 。通过荷载传感器控制分级加载。

为使围护结构侧向变形明显, 便于试验分析, 同时考虑到挡墙插入较深 (开挖深度的 2 倍), 试验过程中, 不架设横撑, 实际为悬臂式围护结构。试验过程中, 基坑挡墙大体绕坑底转动; 用来挡土的建筑模板, 由于其抗弯刚度较低, 水平位移

明显大于 SMW 结构和型钢围护结构。

3 试验结果及分析

3.1 挡墙水平位移

(1) 各级荷载下基坑挡墙的水平位移

试验是利用地面超载模拟开挖卸载,即主动侧千斤顶加载模拟基坑的开挖卸载,从图3与图4的比较可看出,当地面超载较小时,两种围护方式的水平位移差别不大;当超载达到 25 kN 时,SMW 工法挡墙水平位移明显小于型钢模型,地面超载 35 kN 时,在距桩墙顶 10 cm 处,最大水平位移分别是 11.6 mm 和 15 mm。由于水泥土对型钢的包裹作用,使型钢、水泥土成为一个有机整体,共同协调工作,可有效抵挡土体水平变形。实际基坑工程中,基坑周围高层建筑、地面施工吊车、挖掘机以及地面堆土等情况均可看作地面超载,这将对基坑侧向位移产生较大影响,这些引起地面超载的情况若能避免,如地面堆土、吊车等,应尽可能地远离基坑。

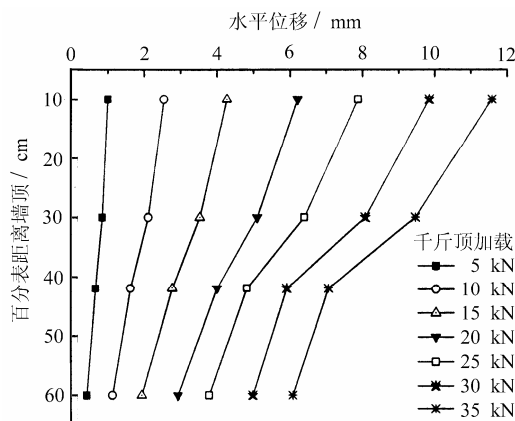


图3 SMW 模型各级荷载下水平位移
Fig.3 Horizontal displacements at different load levels of SMW model

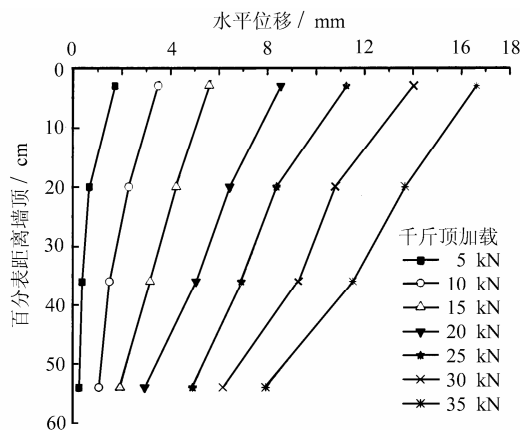


图4 型钢模型各级荷载下水平位移变化
Fig.4 Horizontal displacements ment at different load levels of shaped steel model

(2) 不同深度处挡墙的水平位移

图5和图6是不同深度处挡墙水平位移。在千斤顶第1次加载前,挡墙由于受主动侧土压力作用,挡墙不再竖直,已经有了水平位移。根据文献[7]悬臂式支护结构水平位移模式,支护桩墙可近似为绕桩墙底转动,如图7所示,并假设桩顶位移为 $L_{\max}$,可得到几何关系:

$$L(z) = \frac{H-z}{H} L_{\max} \quad (1)$$

式中 H 挡墙深度。

将图5与图6中各点坐标代入式(1),计算结果与试验结果的对比如图8所示,表明2组试验的水平位移大体满足悬臂式支护结构土压力变化规律。

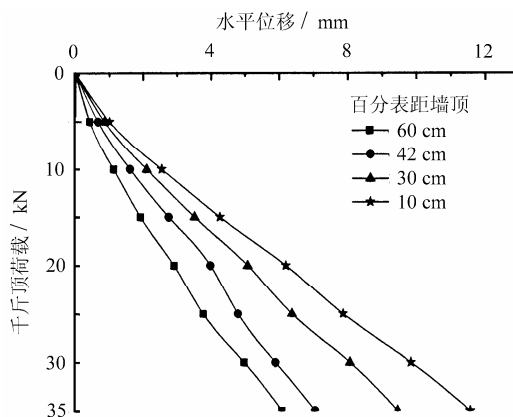


图5 SMW 模型挡墙不同位置水平位移变化
Fig.5 Horizontal displacements at different positions of SMW model

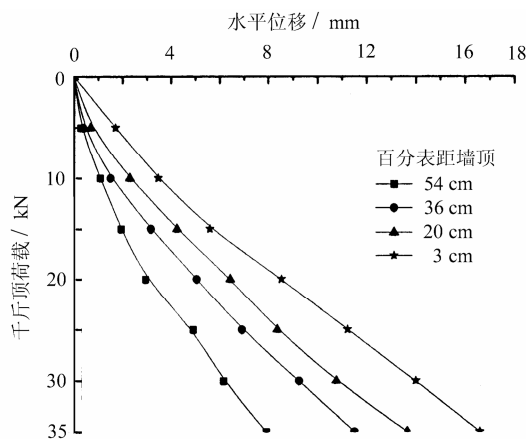


图6 型钢模型不同位置水平位移变化
Fig.6 Horizontal displacements at different positions of shaped steel model

3.2 侧土压力

模型试验采用风干中砂模拟围护结构两侧土体,试验得到砂的内摩擦角 $\varphi = 33^\circ$, 容重 $\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$, 根据朗肯土压力理论,主动侧土压

力变化规律基本与朗肯主动土压力规律一致, 试验值稍小于朗肯主动土压力理论计算值, 原因是主动侧土体未达到极限平衡状态或每级加载后采集数据时, 千斤顶卸载所造成。限于篇幅, 文中没有未列出其变化曲线。

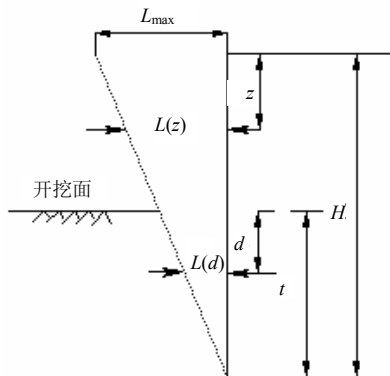


图 7 桩墙水平位移示意图

Fig.7 Horizontal displacements of pile wall

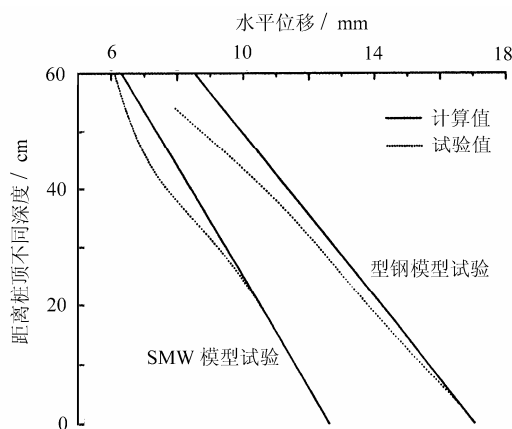


图 8 计算值与试验值对比

Fig.8 Comparison between calculation values and test values

图 9 与图 10 是两组试验被动侧土压力, 在千斤顶荷载为 0 时, 试验得到的被动侧土压力数值与

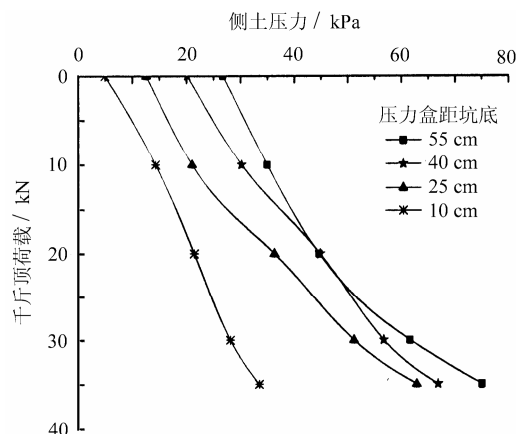


图 9 被动侧 SMW 模型挡墙不同深度处侧土压力

Fig.9 Side soil pressures of passive side at different depths of SMW model

朗肯被动土压力值基本吻合, 整体稍小于理论计算值; 在千斤顶各级荷载下, 被动侧土压力逐渐增大, 在千斤顶超载 35 kN 时, 两组试验最深位置的侧土压力均达到 75 kPa 左右。

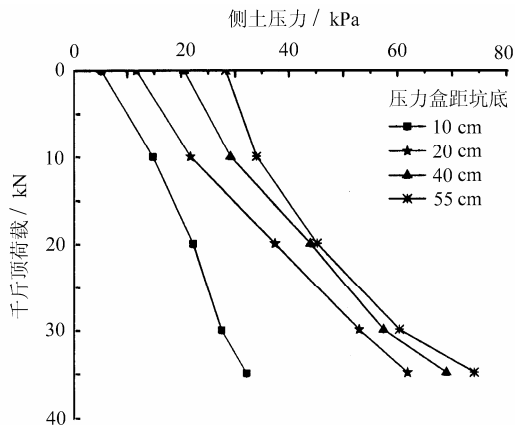


图 10 被动侧型钢模型挡墙不同深度处侧土压力

Fig.10 Side soil pressures of passive side at different depths of shaped steel model

3.3 围护结构内力变化规律

SMW 工法围护结构模型试验, 在 SMW 工法围护结构成型前, 在型钢上黏贴应变片, 型钢外侧包裹水泥土, 如图 2(a)所示; 型钢围护结构模型试验, 直接在型钢上黏贴应变片, 如图 2(b)所示。

本试验选用 5# 槽钢模拟 SMW 工法劲性材料, 属同种材料小尺寸模拟, 由于钢的弹性模量较大, 5# 槽钢的抗弯刚度也较大 (刚度 $EI = 5.46 \times 10^4 \text{ Nm}^2$), 同时 SMW 工法围护结构由于水泥土对型钢的包裹, 限制了型钢的变形, 该组试验应变计数值较小; 图 11 是 SMW 工法模型受压侧应变变化关系, 从图中可看出: SMW 工法挡墙在各级荷载下, 压应变均较小, 从而组合结构内力很小。随荷载增大, 压应变整体呈增大趋势, 但荷载从 20 kN 增大到 25 kN 时, 应变普遍减小, 原因在于加载到 20 kN 时, 百分表水平位移读数的过程中, SMW 工法挡墙受到轻微扰动, 从而导致应变增大过快。文献[8]的工程实测表明: SMW 工法在正常工作期间, 型钢内力值很小, 通过受力截面积换算, 受压侧最大值为 1 kN, 而受拉侧内力更小, 最大值不超过 0.2 kN, 型钢弯曲变形很小, 这也是型钢能重复使用的原因。

图 12 和图 13 是第 2 组试验时型钢围护结构压、拉侧应变随各级荷载变化。从图 12 可看出: 型钢围护结构受压侧不同位置既有拉应变又有压应变, 在离挡墙底最近的 5 cm, 35 cm 2 个位置, 型钢应变为压应变, 而在其他位置, 型钢应变则表现为拉应

变,这是因为型钢围护结构虽然没有受到支撑的作用,但是受主动侧土压力和被动侧土压力共同作用,所以围护结构两侧均有受拉的可能,受力形式比较复杂,但此时型钢并没有失稳,文献[6]对两侧受拉的情况进行了分析。从图13中可看出:地面超载35 kN时,型钢受拉侧最大应变已超过800 $\mu\epsilon$,且应变数值较大及应变变化较大的位置在模型挡墙的底部;距离加载面越远,随荷载增加,型钢应变变化越来越大。

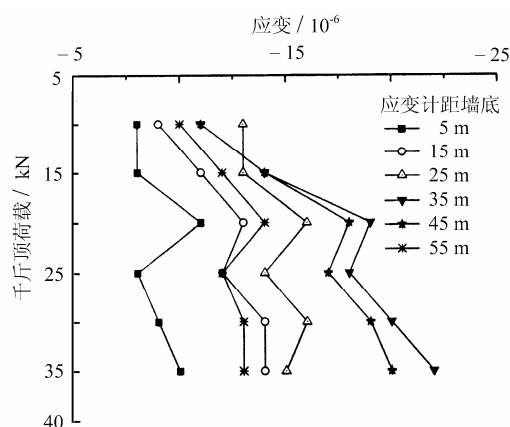


图11 SMW工法模型受压侧应变
Fig.11 Strains on compression-side of SMW model

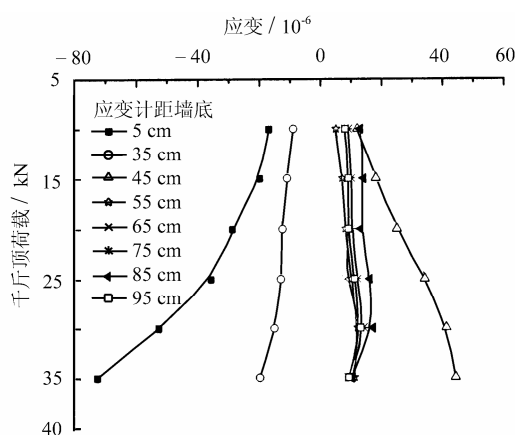


图12 型钢围护结构受压侧应变变化
Fig.12 Strains on compression-side of shaped steel model

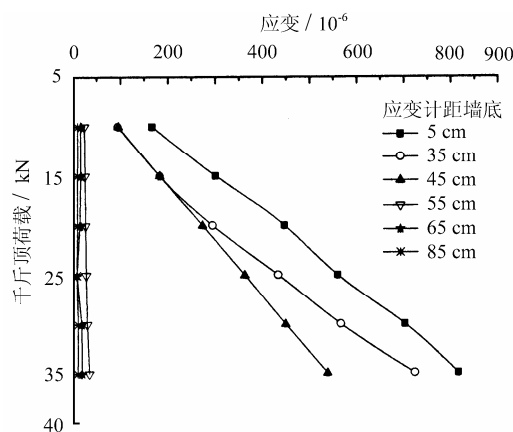


图13 型钢围护结构受拉侧应变变化
Fig.13 Strains on tension side of shaped steel model

从图12,图13及图11的对比还可以看出:在相同加载条件下,SMW工法挡墙应变相对于型钢围护结构应变要小的多,SMW工法中,型钢由于水泥土的包裹作用,提高了型钢的刚度,除了可起到减少位移的作用外,还可起到防止翼缘失稳的作用。工程实际中,SMW工法围护结构作为基坑工程的临时支护型式,保证正常工作期间,内力不大,工程完工后,型钢一般回收,多次重复使用。

4 SMW工法围护结构工作机理探讨

SMW工法是型钢等劲性材料与水泥土搅拌桩的组合结构,把型钢等劲性材料的高抗弯特性与水泥土的止水等特性有机地结合在一起。

水泥土在SMW工法围护结构中的作用主要是防渗、止水,同时研究表明:水泥土对SMW工法组合围护结构具有一定的增强作用,对于提高型钢的抗弯刚度,有一定的贡献,文献[5]通过室内型钢-水泥土构件的抗弯模型试验,研究了型钢-水泥土的共同作用,研究结果表明:SMW工法在“全位二插一”型式下抗弯刚度增加幅度最大,达到17%。

笔者结合基坑工程实际,通过对试验结果的分析,对SMW工法组合围护结构的工作机理作如下探讨:

(1)水泥土搅拌桩作为基坑围护结构无法承受较大弯矩与剪力,插入型钢可大大改善墙体受力。钢结构计算中,要考虑型钢腹板和翼缘的稳定性,为防止翼缘与腹板失稳,翼缘和腹板不能太薄,而SMW工法中型钢因为水泥土的围箍作用,可不考虑翼缘与腹板的失稳,可将翼缘与腹板做得很薄(小于10 mm)。

(2)水泥土对型钢的包裹作用。工程实际中,冠顶梁把所有的型钢通过钢筋混凝土联系在一起,使型钢、水泥土成为一个有机整体,共同协调工作,提高了型钢的刚度,有效地起到了减小位移的作用,还可起到防止翼缘失稳的作用。

(3)SMW工法型钢-水泥土组合结构,类似于型钢-混凝土结构,区别在于基体材料不同以及型钢混凝土结构一般都有箍筋。工程实际中,考虑到型钢的拔出回收,一般在插入型钢前,都要在型钢表面涂减摩剂,因此SMW工法中型钢、水泥土、减摩剂三者之间的黏结、滑移关系非常复杂。一般认为:若不考虑减摩剂的影响,型钢-水泥土间的黏结作用由3部分组成:水泥土中水泥胶体与型钢表面的化学胶结力;型钢与水泥土接触面上的摩擦阻力;以及型钢表面粗糙不平的机械咬合力。一般水泥土

的强度比土的强度要高 10 几倍或几 10 倍,但水泥土的强度比混凝土强度要低的多。总体来说,型钢-水泥土结构相对于型钢-混凝土结构,黏结强度很小。

(4) SMW 工法劲性围护桩是一种典型的复合材料桩^[9],型钢、水泥土可看作复合材料力学中两种典型的组份材料,水泥土为基体,型钢为增强体,同时考虑二者接触面有减摩剂的作用。SMW 工法是加筋水泥土墙围护结构的一种型式,水泥土是一种特殊的土体,可从复合材料力学加筋土^[10]中土与加筋的相互作用机理来理解、分析 SMW 工法型钢-水泥土的工作机理;型钢与水泥土的相互作用关系,特别是型钢回收拔出时的作用机理,可通过复合材料力学层间应力^[11]获得较好的解释。

5 结 语

通过室内的 SMW 工法围护结构与劲性加筋材料围护结构的模型对比试验,试验结果表明: SMW 工法基坑围护结构型钢由于水泥土的围箍作用,在较大地面超载时(35 kN),侧向位移明显小于纯型钢围护结构。

SMW 工法结构内力相对于纯型钢的结构内力要小的多,这是因为型钢周围有了水泥土的复合作用,形成一种新的复合体,该复合体的强度和抗弯性能均比纯型钢优越,与工程实测规律相符。

在模型试验的基础上,从 SMW 工法的受力形式、型钢混凝土、复合材料力学以及加筋土等不同角度探讨了 SMW 工法复合围护结构的工作机理。

参 考 文 献

- [1] 范秋雁, 陈波, 沈冰. 考虑施工过程的基坑锚杆支护模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1 874—1 878.
FAN Qiu-yan, CHEN Bo, SHEN Bing. Model test research of bolt supporting of foundation pit considering construction process[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(12): 1 874—1 878.
- [2] 陆培毅, 李绍忠, 顾晓鲁. 基坑支护结构的空间分析[J]. 岩土力学, 2004, 25 (1): 121—124.
LU Pei-yi, LI Shao-zhong, GU Xiao-lu. Space analysis of retaining structures for foundation pits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25 (1): 121—124.
- [3] 陈晓平, 闫军. 深基坑支护结构的三维杆系有限元分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(3): 258—261.
CHEN Xiao-ping, YAN Jun. 3D pole system finite element analysis of bracing structure of deep foundation pit[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(3): 258—261.
- [4] 王健. H型钢-水泥土组合结构试验研究及SMW 工法的设计理论与计算方法[博士论文D]. 上海: 同济大学, 1998.
- [5] 吴飞. 型钢-水泥土组合梁抗弯试验模型的有限元分析及理论研究[硕士论文D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [6] 孔德志. 劲性搅拌桩性能与分析理论研究[博士论文D]. 上海: 同济大学, 2004.
- [7] 高俊合. 深基坑支护结构设计理论研究[博士论文 D]. 南京: 河海大学, 1998.
- [8] 河海大学土木工程学院. 南京地铁二号线向兴路车站施工监测研究报告[R]. 南京: 2004: 11.
- [9] 曹名葆. 水泥土搅拌法处理地基[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] SAWICKI A. Mechanics of Reinforced Soil[M]. A.A Newtherlands: Balkema Rotterdam, 2000.
- [11] 张福范. 复合材料层间应力[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.