

文章编号: 1000-7598-(2007) 02-0371-05

加筋水泥土墙复合土钉支护的现场测试研究

司马军, 刘祖德, 徐书平

(武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072)

摘 要: 结合武汉某深基坑支护工程, 介绍了加筋水泥土墙复合土钉这一新型支护形式。通过对加筋水泥土和土钉的应力、位移进行测试和分析, 研究了加筋水泥土墙复合土钉支护的工作机理。主要结论为: (1) 支护变形特点为上大下小。(2) 在一定的应力水平下水泥土和加筋体可以共同工作。(3) 加筋水泥土墙在施工过程中起重要支撑作用。(4) 支护结构的工作机理主要为挡墙效应、加筋效应和锚固效应。

关 键 词: 基坑支护; 复合土钉; 加筋水泥土墙; 现场测试

中图分类号: TU 47

文献标识码: A

Field testing study on composite soil nail with reinforced cement retaining wall

SI Ma-jun, LIU Zu-de, XU Shu-ping

(School of Civil Engineer, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A kind of new composite soil nailing with reinforced cemented-soil wall is described and applied in a foundation excavation project in wuhan. A field investigation with extensive instrumentation and data collection is carried out, then the behaviors of the new composite soil nailing are further investigated based on the measurement. The main results are: (1) the deflection is large at the top and little at the bottom; (2) cemented soil and reinforcing bar can work together at some level of stress; (3) the reinforced cemented-soil wall plays an important role during construction; (4) the behaviors of this supporting system include retaining-wall effect, reinforcing effect and anchor effect.

keywords: excavation support; composite soil nailing; reinforced cement retaining wall; field test

1 前 言

武汉市汉口地区主要位于长江和汉江的 I 级阶地, 地下水位较高, 局部分布有软土、粉土、粉砂层, 单纯的土钉支护难以满足要求, 多采用土钉与搅拌桩相结合的复合土钉支护形式^[1,2]。在复合土钉整体稳定验算时, 通常将搅拌桩作为具有一定 c 、 ϕ 值的加固土考虑其抗滑贡献^[3], 由于搅拌桩 (特别是粉喷桩) 的抗弯和抗剪强度低, 施工质量离散性大, 在水平推力作用下极易产生脆性折断, 因此也出现了一些工程事故。文[4~6]表明, 在一定的应力水平下加筋体与水泥土可以共同工作, 加筋后水泥土的抗弯剪能力大大提高。为了提高搅拌桩的支撑能力和支护结构的可靠度, 工程上在搅拌桩中插入型钢或其他加筋体, 与土钉一起组成加筋水泥土墙复合土钉这一新型支护形式。为了解该支护结构

的受力变形特征, 本文结合工程对加筋水泥土和土钉的应力和变形进行了现场测试和分析, 并对其工作机理进行探讨。

2 工程概况^[7]

汉口某城市花园深基坑工程, 面积近 2 万 m^2 , 深 7.5~8.5 m。基坑地理位置处于汉口闹市区, 四周 10 m 范围内存在民房和马路, 最近处为 3 m, 周边环境较复杂。土层物理力学指标见表 1。基坑坑底为第 1 层粉质黏土, 该层土中含有淤泥质土软弱夹层, 力学性质较差。为提高基坑的整体稳定性, 设计采用以加筋水泥土复合土钉支护为主, 局部临近房屋坑段采用桩锚支护。另外为防止坑底承压水突涌, 设计了 16 口中深降水井。基坑支护典型设计断面如图 1 所示, 上部 3 m 采用 1:1 自然放坡加短土钉挂网护面, 下部 5 m 采用复合土钉支护, 共布

表 1 主要土层物理力学性质
Table 1 Properties of the main soils in the site

地层编号及名称	平均层厚 / m	γ / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	状态	P_s / kPa	直剪指标 (直快剪)		设计取值	
					c / kPa	ϕ / (°)	c / kPa	ϕ / (°)
①-1 杂填土	3.0	18.5	稍密				4	20
②-1 黏土	2.0	18.8	可塑	1.10	35.9	6.4	22	10
③-2 粉质黏土	2.0	18.7	软塑	0.95	24.9	10.4	20	11
③-1 粉质黏土夹粉土	4.0	18.0	软塑~流塑	1.5	21.8	12.2	15	14
③-2 粉土、粉砂夹粉质黏土	8.0	18.6	松散~稍密	5.01			10	22
④ 粉细砂	10.0	19.0	稍密~中密	5.29			0	32

置 3 排土钉，杆材为二级螺纹钢，土钉钻孔直径为 110 mm，倾角为 13°，注浆材料为纯水泥浆，水灰比为 0.5，锚固体设计强度为 M10；2 排直径 500 mm 的水泥搅拌桩通过相互搭接形成宽 800 mm 的水泥土墙，靠基坑一侧每隔 1.05 m 在搅拌桩内插入一根长 12 m 的 14 号工字钢，靠坑壁一侧每隔 1.05 m 插入一根 6 m 长的 $\phi 48$ mm 钢管。搅拌桩采用浆喷工艺，材料采用 p.o.32.5 水泥，水灰比为 1:1，掺入比为 15%，水泥土 28 d 极限抗压强度为 1 MPa。

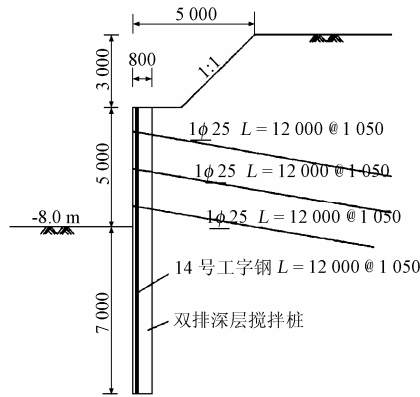
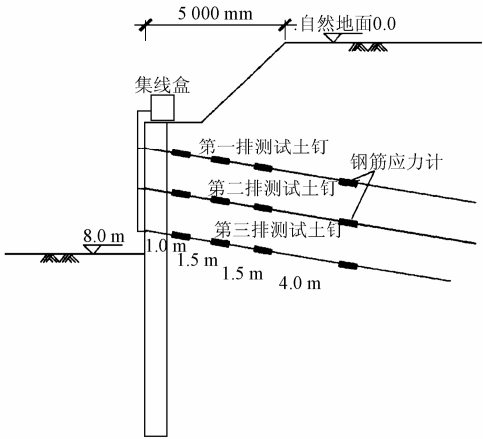


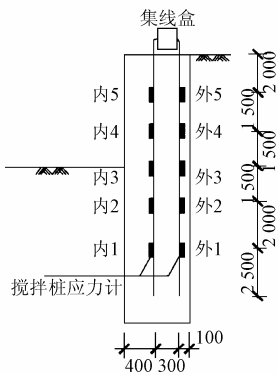
图 1 基坑支护典型剖面图 (单位: mm)
Fig.1 Typical section of foundation pit supporting (unit: mm)

3 现场综合测试方案

现场设置了两个测试断面 1-1、2-2，相距约 3 m，典型监测点位的布置如图 2 所示。测斜孔布置于水泥土墙内，钻孔直径为 110 mm，孔深 15 m，测斜管采用内径为 43 mm、外径为 53 mm 的 PVC 硬塑料管，水平位移测试采用 CX-010 测斜仪。埋设测斜管时，用水泥砂浆填满钻孔和测斜管之间的空隙。测试时，将测头在测斜管内自下而上以 50 cm 的间距于不同的深度处逐段滑动测量，换算每一深度处的倾斜量，然后自下而上



(a) 土钉测试



(b) 水泥土墙测试 (单位: mm)

图 2 现场测试点布置示意图
Fig.2 Schematic diagram of field test

逐段累加，便得到测斜仪在各深度上的位移量。测试土钉轴力和水泥土墙内力采用钢弦式钢筋计，布置方案如图 2(a)、图 2(b)所示。测量导线从各测点引出，并沿着边坡面汇集到坡顶的集线箱内。土钉前 3 个测点间距为 1.5 m，第 4 个测点间距为 2 m，以便测到土钉轴力的分布。水泥土墙内力测试方法为：在墙顶中心和外侧施工 2 个直径为 110 mm 钻孔，埋设 $\phi 12$ mm 钢筋后注水泥浆封闭，在钢筋内设置钢筋计，通过测试钢筋应力来计算搅拌桩内力。

基坑施工于2002年5月开始,9月竣工,基坑四周变形均控制在20 mm以内,其中测试段基坑开挖及土钉施工过程如图3所示。

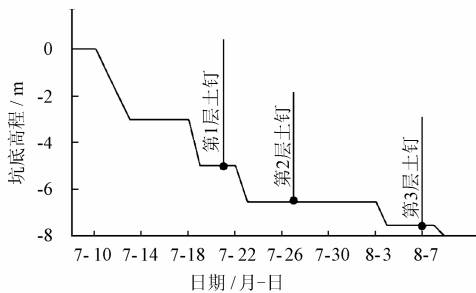


图3 基坑开挖及测试土钉设置过程

Fig.3 Program of excavation and installation of soil nailing

4 主要量测结果及分析

4.1 水泥土墙水平位移

基坑开挖前测试水平位移的初始值,以后每开挖一步都进行多次连续测量,测得水泥土墙不同深度的水平位移随施工日期的变化曲线如图4所示。

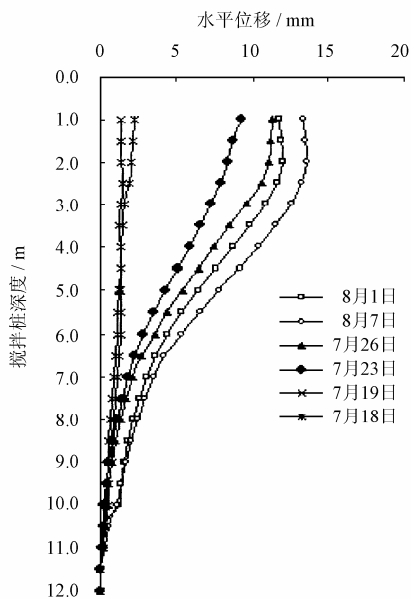


图4 水泥土墙水平位移

Fig.4 Horizontal displacement of cemented soil wall

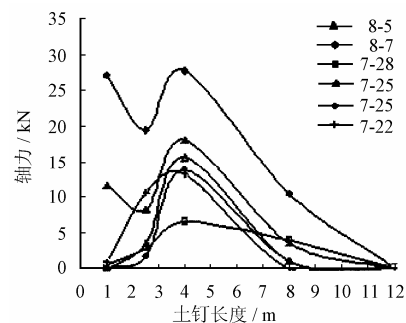
由图4可见,(1)随着开挖深度增大,水泥土墙沿深度各点的水平位移逐渐增大,总体上呈上部大下部小的特点,最大变形为13 mm,与深度的比值为0.26%;(2)每层土开挖阶段和土钉设置初期,位移速率最大,以后速率放慢并趋于稳定,表明土钉的锚固作用有滞后现象;(3)在基坑开挖初期,墙顶变形最大,受力接近悬臂状态;随着土钉设置

和开挖深度增加,墙顶明显产生反向弯曲,最大变形点由墙顶逐渐向下移至第二、二排土钉之间,可见随着变形的发展,土钉的锚固作用越来越明显;

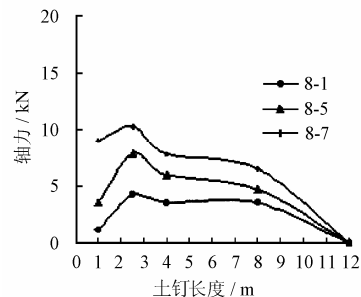
(4)坑底以下变形影响深度为4~5 m,表明通过挡墙将压力往下传递,发挥了深部土体抗力,提高了边坡的整体稳定性。

4.2 土钉应力

现场共测试了3层6根土钉,但由于土方开挖与土钉施工之间衔接问题,每层土钉施工时间均有滞后,因此实测土钉轴力普遍偏小,最大轴力为27.7 kN,以下仅列出1-1断面的第一层土钉(3#),第二层土钉(1#)的实测结果。



(a) 3#土钉(第一层)



(b) 1#土钉(第二层)

图5 土钉轴力沿土钉延长的分布

Fig.5 Distribution of axial force along the soil nailing

由图5可以看出,(1)各层土钉受力大小不同,上一排土钉受力比下一排大;(2)随着开挖深度增加,各层土钉应力均呈增长趋势;(3)随着变形的发展,土钉的最大轴力点位置也在不断变化。在基坑变形较小和土钉设置初期,土钉内力呈中间大两头小分布,内力最大值分别在4 m(第一排)、2.5 m(第二排),基本接近 $(45^\circ - \phi/2)$ 的主动滑裂面,说明受力机理类似于土钉支护。随着变形增大,土钉对搅拌桩的锚固作用力增大,中前段应力增长较快,最大轴力点逐渐向搅拌桩一端移动,土钉受力类似于无自由段的锚杆,说明支护体系受力机理类

似于桩锚结构。

4.3 加筋水泥土墙内力

图 6 为搅拌桩应力分布情况。图 6(a)表明, 墙体中线附近的实测应力较小且多为拉应力, 表明截面中性轴向型钢一侧偏移, 进而证实了在一定的应力水平下水泥土和型钢是可以共同工作的。在开挖开始阶段, 随开挖深度增大整个墙体中线拉应力有增加趋势, 7 月 24 日后土钉顶端受力增大, 墙身上段中线拉应力逐渐减小, 下段拉应力则变化不大。图 6(b)表明, 随着开挖深度增加, 水泥土墙身应力逐渐增大, 同时受力模式也随之变化。在开挖初期, 水泥土墙外侧受拉, 类似悬臂墙。设置土钉后, 随着变形发展, 在土钉作用部位局部出现反弯, 上部受拉区逐渐转化为受压区, 下部拉应力先迅速增长, 后受反弯矩影响略有下降, 受力模式类似于桩锚支护。

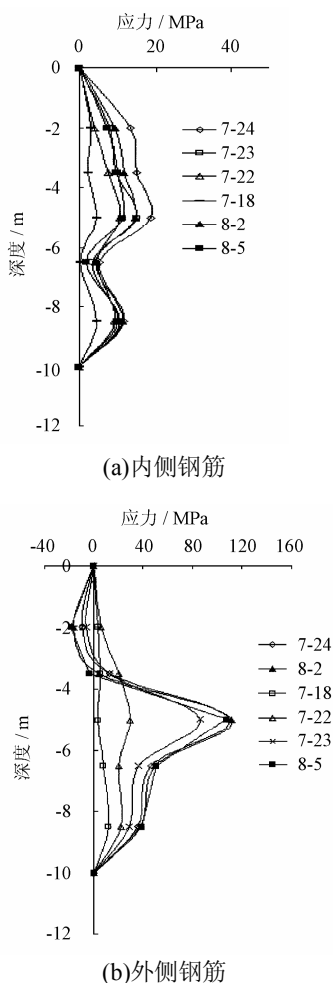


图 6 搅拌桩钢筋应力分布

Fig.6 Distribution of stress along the steel bar in the the reinforced cement retaining wall

由图 6(b)亦见, 水泥土墙内的钢筋实测最大拉应力为 112.7 MPa, 水泥土墙受力较大, 在施工过

程中对基坑稳定起着重要作用。若假定钢筋和水泥土之间变形完全协调, 钢筋为 1 级钢, 取 $E_s=210$ GPa, 水泥土的弹性模量取 $E_c=100$ MPa, 则水泥土的最大拉应力 (kPa) 为

$$\sigma_c = \frac{E_c}{E_s} \sigma_s = 53.7 \quad (1)$$

由文[2]知, 水泥土的设计抗拉强度可取为 75 kPa, 则水泥土墙的最大拉应力小于设计抗拉强度, 表明在该应力水平下加筋体与水泥土均处于正常工作状态。

5 加筋水泥土墙复合土钉工作机理分析

由以上分析可见, 加筋水泥土墙复合土钉支护与一般土钉支护有较大差异, 加筋水泥土墙、土钉和土体三者之间存在较复杂的相互作用和应力转移现象, 其工作机理如下:

(1) 挡墙效应 对于一般土钉, 由于面层较柔, 对土体的侧向位移约束较小, 钉土之间相对位移较大, 土压力通过土拱效应转移至土钉, 因此面层压力小。在复合土钉支护中, 加筋水泥土墙的刚度相对较大, 限制了钉土之间的相对位移, 使得土钉之间的土拱效应降低, 大部分土压力作用在水泥土墙上, 挡墙效应使该复合土钉中加筋水泥土墙和面层受力大大增加, 类似于桩墙。

(2) 加筋效应 与桩锚结构相比, 复合土钉支护中的土钉无自由段, 且密度大, 而且土钉与水泥土墙的联结节点不够紧密。当变形较小时, 加筋水泥土墙与土钉之间的作用力较小, 土钉受力主要是钉土相对位移产生的摩阻力, 类似于加筋体。土钉依靠摩阻力分担了部分土压力, 约束了主动区土体的侧向变形, 可见加筋效应使得作用在水泥土墙土的土压力小于主动土压力。

(3) 锚固效应 当支护结构的位移进一步增大时, 加筋水泥土墙与土钉之间连接逐渐紧密, 挡墙效应更加明显, 限制了钉土相对位移, 土钉受力模式逐渐类似于无自由段的锚杆, 对水泥土墙可起到一定的锚固作用。

根据上述工作机理分析, 笔者采用类似桩锚支护的模式来计算该复合土钉的内力和变形。计算方法采用文[8]推荐的弹性地基反力法, 考虑加筋效应, 假定在土钉设置范围内水泥土墙上作用的土压力取主动土压力的 60%。加筋水泥土墙的内力和变形计算值与实测值比较见图 7。图 7 表明, 位移计算值与实测值的分布形态和数值均基本吻合, 基

坑外侧弯矩分布形态和数值也较接近, 基坑内侧弯矩分布形态相似, 但数值相差较大, 可能受喷射混凝土面层和施工工况影响。总之, 采用上述类似桩锚支护的模式计算, 大致可以反映该复合支护结构的内力与变形规律, 进而也验证了上述作用机理。

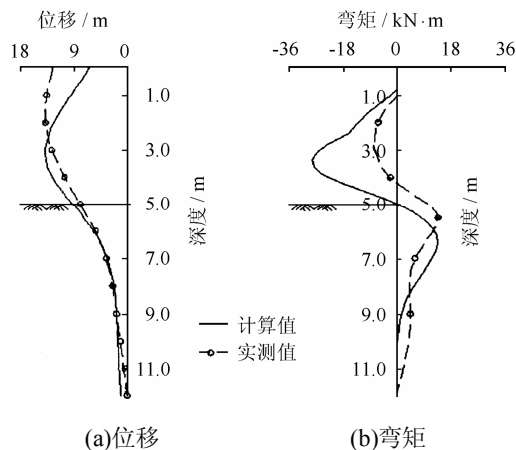


图7 加筋水泥土墙计算值与实测值比较
Fig.7 Comparison between calculating result and field data of the reinforced cement retaining wall

6 结 论

通过对加筋水泥土墙复合土钉支护的现场测试分析, 可得出如下结论:

(1) 支护变形总体上表现为上大下小, 随着开挖深度增大, 最大位移点有向下移动的趋势, 最大位移与深度的比值为 0.26%。

(2) 在一定的应力水平下水泥土和筋体可以共同工作, 因此在搅拌桩中插入筋体后, 可提高搅拌桩的支挡能力。

(3) 加筋水泥土墙在施工过程中发挥重要支挡作用, 受力模式类似于桩锚结构中的桩墙。土钉受力模式则介于拉筋和无自由段的锚杆之间。

(4) 该支护结构的工作机理主要为挡墙效应、加筋效应和锚固效应, 采用类似桩锚模式得出的结果与实测值大致吻合。

加筋水泥土墙复合土钉支护是一种新型的支护形式, 本文只是对其受力变形特征和工作机理作了初步探讨, 还需要针对不同的地层条件研究其适用性, 该复合支护结构的设计计算理论也还需进一步完善。

致谢: 本次现场测试工作得到了中冶集团武汉勘察研究院邓小雄经理、机械部第三勘察院刘晖工程师等的支持和帮助, 在此一并致谢!

参 考 文 献

- [1] 陈肇元, 崔京浩. 土钉支护在基坑工程中的应用(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] DB42/159—2004, 湖北省深基坑工程技术规定[S].
- [3] 李象范, 徐水根. 复合土钉墙的研究[A]. 岩土锚固技术的新进展[C]. 阎莫明, 徐祯祥, 苏自约主编. 北京: 人民交通出版社, 2000. 14—26.
- [4] 黄新, 邹东峰, 张建平. 水泥土墙离应力区加筋基坑围护新技术[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 616—618. HUANG Xin, ZOU Dong-feng, ZHANG Jian-ping. A new technology of cement soil retaining wall reinforced in high stress area[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(5): 616—618.
- [5] 梁仁旺, 于宁. 加筋水泥土梁力学性能的试验研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(3): 267—270. LIANG Ren-wang, YU Ning. An experimental study of mechanical properties of reinforced cemented-soil beams[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2000, 21(3): 267—270.
- [6] 刘毅, 陆贻杰. 加筋水泥土挡墙室内试验研究[A]. 第三届地基处理学术讨论会论文集[C]. 龚晓南主编, 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 144—147.
- [7] 司马军. 加筋水泥土墙复合土钉支护新技术在武汉地区的应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2003.
- [8] JGJ120—99, 建筑基坑工程技术规范[S].

书 讯

土木工程材料学

建筑科学类 葛勇主编

16开 535千字 358页 平装 估价: 34.00元 2007年1月出版 ISBN7-80227-186-X

本书主要包括土木工程材料的基本性质、石材、砖、陶瓷、玻璃及其他熔融制品、气硬性无机胶凝材料、各种水泥、混凝土及新型混凝土、砂浆、金属材料、木材、建筑塑料与建筑涂料、合成高分子防水材料与功能分类与综合应用、常用土木工程材料的试验方法等。

读者对象: 高等学校土木建筑类专业本科生, 土木建筑、交通、水工、建筑材料等部门科研、设计、施工、管理人员

(新华书目报·科技新书目)