

华信商厦深基坑锚杆试验研究

侯卫红, 王景春, 王锡朝

(石家庄铁道学院 土木工程分院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 锚杆支护在我国深基坑开挖和支护中得到了广泛的应用, 但对其工作机理和计算方法的研究尚不完善。以一个锚杆支护的深基坑工程为实例, 对工程锚杆进行了试验研究。通过试验, 测试了锚固体在岩土中摩阻力的分布规律, 得出了锚杆的抗拔力, 以此为工程设计提供了依据。研究表明, 锚固体与岩土体间的摩阻力沿锚杆长度不是均匀分布的, 其分布规律与摩阻力水平有关, 在孔口附近最大, 而从孔口沿锚杆长度逐渐衰减; 锚杆的承载力与注浆方式有关, 且对基坑的开挖较为敏感。

关键词: 基础工程; 锚杆; 深基坑; 现场试验; 抗拔力; 摩阻力

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 2 - 5418 - 05

EXPERIMENT STUDY ON ANCHOR FOR DEEP EXCAVATION OF HUAXIN BUILDING

HOU Wei-hong, WANG Jing-chun, WANG Xi-zhao

(Department of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The retaining of anchors is widely used in China, but the principle and calculating method for soil anchor are not clearly understood. In this paper, the tests on soil anchors are carried out based on a deep excavation. The distribution of the friction force on the interface between soil and mortar is obtained through test. The test result shows the distribution of the friction force is not uniform and the stress attenuates along the length of anchor, which is maximal in the orifice of hole and related to the level of friction force. The pullout resistance of anchor is obtained by the test, which is correlative to the mode of grouting and sensitive to the excavating. All provide the basis for engineering design.

Key words: foundation engineering; anchor; deep excavation; site test; pullout resistance; friction force

1 引言

岩土工程中的锚固技术是应用锚杆或锚索对岩土体进行加固, 可充分地发挥岩土体自身的稳定能力, 是一种对原岩扰动小、施工速度快、安全可靠且经济有效的加固技术, 在水利水电、铁路交通、城市建设、地下工程、国防建设和采矿工程等行业中得到了广泛的应用, 并获得巨大的成功, 取得了

良好的经济和社会效益^[1, 2]。随着锚固技术的发展, 锚杆在我国深基坑开挖工程中得到越来越多的应用, 随着对锚固理论研究的日益深入, 研究方向主要集中在锚固荷载传递机理和加固效应两大内容上^[3]。文[4, 5]采用数值模拟方法探讨了锚固段的应力分布规律。文[6]根据 Kelvin 问题的位移解, 导出了内部锚固型锚固段的剪应力和轴力分布规律, 但总的来说对其工作机理和计算方法的研究尚不完善, 它的实际受力情况尚不十分清楚^[7, 8]。在基坑

收稿日期: 2005 - 06 - 26; **修回日期:** 2005 - 08 - 15

作者简介: 侯卫红(1967 -), 女, 1989年毕业于西南交通大学土木工程系铁道工程专业, 现任副教授, 主要从事岩土力学方面的教学与研究工作。E-mail: hwh36295@sina.com.cn。

开挖过程中, 锚杆的加入改变了围护墙的受力状态, 约束了基坑边坡位移的发展, 锚杆的受力又反映了基坑的稳定状态和锚杆支护的工作性能。锚杆的现场试验提供了一种手段, 使设计人员能够检验他们的设计和假设, 并验证解析解和数值模型^[9]。同时现场试验提供的反馈, 为评价一个岩土工程的设计是否保守提供了可能。

本文以一个锚杆支护的深基坑工程为实例, 进行了锚杆的现场试验, 测试结果有助于了解锚杆支护的作用机理, 较全面分析其工作性能, 还可对设计于与施工的改进提供指导和帮助。

2 工程概况与地质条件

华信商厦由主楼和裙楼构成, 其中主楼为 48 层的商业中心, 高 188 m, 地下 3 层呈正六边形。裙楼为 8 层的购物中心, 高 40 m, 地下 2 层(局部 3 层)。基坑开挖深度为 9 m, 平面为不规则抹角长方形(160 m×90 m), 采用地下连续墙+预应力锚杆围护结构(如图 1 所示)。地下连续墙厚 0.7 m, 高 18 m, 墙入基底 9.0 m。预应力锚杆长 23 m, 位于地面下 2.3 m, 间距 0.80 m, 采用 20°和 15°相间隔的倾角, 锚杆锚固段长 18 m, 采用 3 根 $\phi 25$ 的 HRB335 20 MnSi 钢。施工时采用二次高压注浆, 2 次注浆间隔时间 48 h。

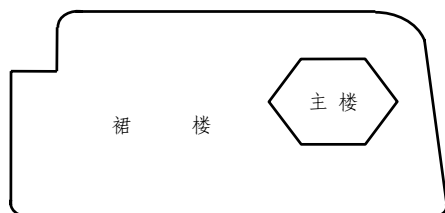


图 1 基坑平面

Fig.1 Plan view of deep excavation

建筑场地的地表为原有的建筑物基础和人工杂填土, 厚约 3.0 m, 下面为沉积土层。在埋深 2.0~10.5 m 范围为全新统的上部陆相冲积层和海相沉积层, 土质为粉质粘土; 埋深 23.0~27.0 m 段内为全新统下组陆相冲积层的粉质粘土与粉土互层, 场地的其他深度直到地下 40 m 范围为均匀的粉质粘土, 整体来看场地的土层较均匀。该场地的地下水较丰富, 地下水位在地面以下 2.0 m, 水位随季节变化有所升降, 年变幅为 0.5~1.0 m。土的渗透性和可疏

干性较差, 渗透系数约 0.7 m/d。

锚固土层为粉质粘土, 天然容重为 19.8 kN/m³, 固结快剪强度指标为 $c = 15.4$ kPa, $\varphi = 19.2^\circ$ 。

3 锚杆的试验与结果分析

3.1 锚杆的抗拔试验

锚杆的破坏形态有: (1) 注浆体与岩土体间剪切破坏; (2) 锚杆杆体抗拉强度破坏; (3) 锚杆杆体与注浆体界面破坏; (4) 锚杆埋入稳定地层能够使地层呈锥体拔出。一般情况下第 4 种破坏不会发生, 锚杆杆体的强度也很容易计算和控制, 而对软岩和土层情况, 锚杆的承载力通常不由杆体与注浆体间握裹力控制, 由注浆体与岩土体间极限剪切强度确定。

根据文[10], 需对锚杆进行抗拔试验, 以确定锚杆的施工质量, 检验锚杆是否达到设计要求。根据场区的岩土情况, 进行了 2 组 6 根破坏性试验, 分布在场区不同位置。锚孔的直径采用 $\phi 130$, 使用 32.5R 普通硅酸盐水泥, 水灰比为 0.45, 锚杆的自由度段长 5 m 且不注浆。典型的锚杆的基本试验曲线如图 2 所示。

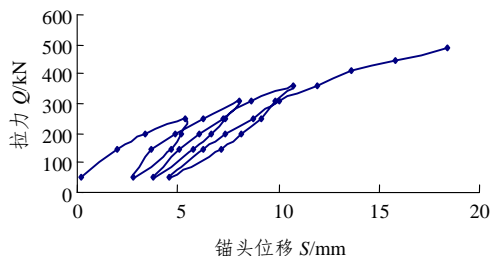


图 2 锚杆的 Q-S 曲线

Fig.2 Representative Q-S curves of anchor

根据现场拉拔试验, 将试验结果列于表 1。从中可知锚杆的承载力最大 427 kN, 最低 367 kN, 锚杆在粉质粘土中的工作荷载为 350 kN, 满足设计要

表 1 锚杆抗拔试验结果

Table 1 Result of pull resistance test for anchors

锚杆	倾角/(°)	承载力/kN
D34M1	15	372
D32M3	20	414
D34M4	20	427
D32M1	15	367
D34M5	15	408
D35M3	20	397

求，可将此锚杆的抗拔力作为设计依据。

3.2 锚杆杆体的受力变化规律

锚杆杆体的受力分布规律是通过在杆体不同位置粘贴应变片进行的，试验是在锚杆施加预应力锁定后开始，共进行了 3 根，应变片的贴片位置如图 3 所示。但是在施工过程中，将其中的 2 根损坏，实际只有一根测试结果，试验结果如图 3 所示。

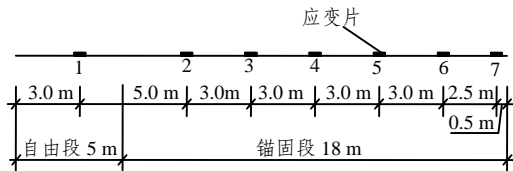


图 3 电阻应变片的布置图
Fig.3 Layout of strain gauges

随试验时间和开挖深度的增加，锚杆钢筋传力的位置和传力大小从图 4 中可一目了然。通过曲线可以看出，在基坑开挖深度不变的时间里(即基坑不挖土)，杆体不同位置处钢筋受力变化比较均匀或者说没有突变(除测点 7 破坏，没有反应外)；当基坑开挖时(基坑挖至 3 m 安装锚杆，图 4 中第 45 d 进行土体开挖，挖至 6 m；第 89 d 再次开挖直到基底，110 d 底板浇注完成)，随开挖深度增加，从图 4 中曲线看出明显地表现为陡升。这一现象说明杆体的受力变化对基坑的开挖深度比较敏感，其敏感性的大小程度视一次的开挖深度而定。当然，另外一个表现敏感性的因素是一次基坑的开挖宽度，随基坑的开挖宽度的增大，杆体各部位的受力也在增加，但是增加的幅度不大。

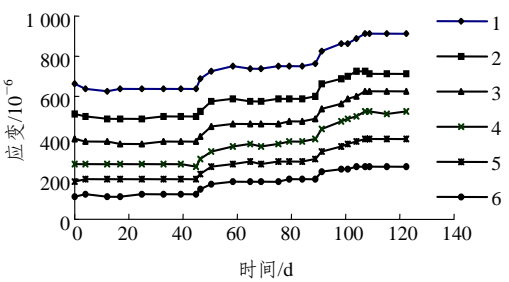


图 4 锚杆的应变随时间的变化曲线
Fig.4 Curves between strain of anchor and time

3.3 摩擦力的计算与变化规律

锚杆在外荷载作用下，任一截面上的内力等于钢筋内力与注浆体内力之和，而两截面内力之差即为该区间注浆体与岩土间的剪切力，剪切力除以该

区间注浆体表面积即为该区间的平均剪应力。

锚杆任一截面的内力为

$$N_i = E_g A_g \epsilon_{gi} + E_c A_c \epsilon_{ci} = (E_g A_g + E_c A_c) \epsilon_i \quad (1)$$

区间平均剪应力为

$$\tau = (N_i - N_{i-1}) / (\pi D \Delta l) \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得

$$\tau = (E_g A_g + E_c A_c) (\epsilon_i - \epsilon_{i-1}) / (\pi D \Delta l) \quad (3)$$

式(1)~(3)中： E_g 、 E_c 分别为锚杆和注浆体的弹性模量； A_g 、 A_c 分别为锚杆和注浆体的截面积； ϵ_i 为任一截面 i 的应变值，假定锚杆的变形 ϵ_{gi} 和注浆体的变形 ϵ_{ci} 是相等的； Δl 为两测点之间的距离； D 为锚固体的直径，假定为钻孔直径。

根据式(3)计算出摩擦力随时间的变化规律，绘于图 5 中，从图 5 中可以看出：(1) 在任一时间内(一级荷载作用下)，锚固体与岩土体间的剪应力沿锚杆长度分布是不均匀的，在于孔口附近最大，从孔口沿锚杆长度逐渐衰减。(2) 随着时间的延长，锚杆锚固体与土体之间的摩擦力是逐渐提高的，但是锚杆的摩擦力在不同的位置其增长的幅值却不是同时出现的，但在基坑开挖到底，且底板打好后，则摩擦力基本趋于稳定。

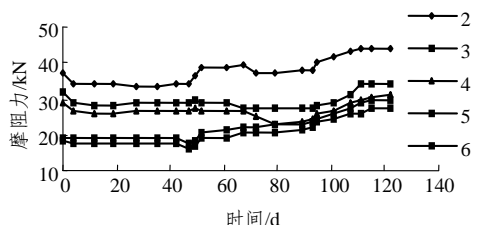


图 5 摩擦力随时间的变化规律
Fig.5 Variation of friction versus time

摩擦力在同一天时间内沿杆体锚固段的摩擦力分布规律如图 6 所示，图 6 中曲线 1 为较低摩擦力时的前期分布，曲线 2 为摩擦力水平高时的后期

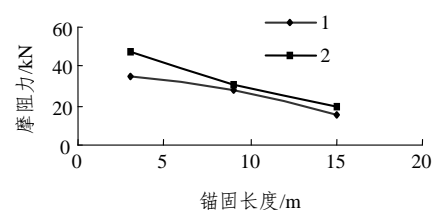


图 6 沿锚固长度锚固体与土体之间的摩擦力分布
Fig.6 Distribution of friction force along anchoring length

分布。曲线 1, 2 之间有一个转换过程, 曲线的性状由凸形变为凹形, 则在曲线 1, 2 之间一定有一个直线分布, 这就是所说的摩阻力沿锚固长度逐渐递减的分布规律, 但是在锚固段的末端摩阻力的水平并不趋于 0, 而是有一定数值大小的摩阻力。

3.4 锚杆对墙顶水平位移的影响

为及时反映工程信息, 采取工程措施, 该基坑施工时进行了现场监测, 图 7 为锚杆所在连续墙墙顶位移随时间的变化曲线。

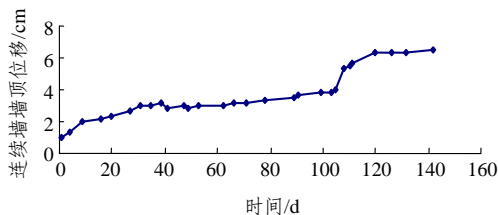


图 7 连续墙墙顶水平位移随时间的变化
Fig.7 Displacement on diaphragm top versus time

从图 7 中可以看出:

(1) 施加锚杆前位移 - 时间的变化速率比施加锚杆后位移 - 时间变化速率大。(2) 锚杆张拉完毕后(第 41 d), 由于预应力的作用, 可以将连续墙拉回去 2~4 mm。(3) 在基坑开挖到设计深度, 底板浇注完成后, 连续墙的位移较稳定, 近于不变, 且连续墙的位移对突然的开挖较为敏感, 这和锚杆的受力在同一时间内的变化相似。

3.5 注浆对锚杆承载力的影响

为研究注浆对锚杆承载力的影响, 本工程对其中 2 根锚杆进行了二次常压注浆与二次高压注浆的对比试验, 其中一次注浆的压力均为 0.9 MPa, 试验结果如表 2 所示。

表 2 注浆方式对承载力的锚杆影响

Table 2 Effect of grouting mode on pull resistance of anchor

注浆方式	最大注浆压力/MPa	注浆量/kg		承载力/kN
		一次	二次	
二次高压	3.7	800	500	427
	3.5	900	350	408
二次常压	1.0	1 000	100	327
	0.9	1 200	50	282

比较的极限承载力, 可以看出二次高压注浆的极限承载力平均可以提高 1.4 倍; 二次常压注浆甚至达不到设计工作荷载, 可见注浆方式对锚杆的承

载力的影响不可忽视。究其原因, 常压(0.5~1.0 MPa)注浆主要是充填钻孔掏空或天然沉积溶空, 这时基本上没有多大的阻力。二次高压(3.0~5.0 MPa)注浆是在一次充填完成的基础上进行的, 一次注浆形成的浆液已有一定的强度。高压对原水泥浆进行沿锚杆杆体不同位置的劈裂, 这样浆液在土中沿部分土层层理界面对土体进行挤压、扩散, 形成层状、板块状、脉状分布, 构成土体的骨架。随着注浆的连续进行, 注浆压力增大, 土层的吃浆量、吃浆速度逐渐减小, 层面裂隙不断填满, 土层被压密, 土颗粒移动、重新排列、水气排出, 这样起到加固土体的作用, 从而提高锚杆的承载力。

4 结 论

(1) 对于本工程来说, 锚杆的设计是合理的, 达到了设计的承载力, 锚杆对地下连续墙的水平位移有一定的影响, 锚杆杆体的受力变化对基坑的开挖比较敏感, 注浆方式对锚杆的承载力的影响不可忽视。

(2) 锚固体与土体间摩阻力沿锚杆长度的分布是不均匀的, 在孔口附近最大, 沿锚杆长度从孔口向孔底衰减。根据本试验, 随着时间的延长, 锚杆锚固体与土体之间的摩阻力是逐渐提高的, 但是锚杆的摩阻力在不同的位置其增长的幅值却不是同时出现的。摩阻力的分布规律与摩阻力水平有关。

参考文献(References):

[1] 刘建航, 侯学渊. 深基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 731 - 774.(Liu Jianhang, Hou Xueyuan. Handbook for Deep Excavation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1997, 731 - 744.(in Chinese))

[2] 程良奎. 岩土锚固的现状与展望[J]. 土木工程学报, 2001, 34(3): 7 - 12.(Cheng Liangkui. Present status and development of ground anchorages[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(3): 7 - 12.(in Chinese))

[3] 张乐文, 汪 稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 627 - 631.(Zhang Lewen, Wang Ren. Research on status quo of anchorage theory of rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 627 - 631.(in Chinese))

[4] 高永涛, 吴顺川, 孙金海. 预应力锚杆锚固段应力分布规律及应用[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(4): 387 - 390.(Gao Yongtao, Wu Shunchuan, Sun Jinhai. Application of the pre-stress bolt stress distributing principle[J]. Journal of University of Science and

- Technology Beijing, 2002, 24(4): 387 - 390.(in Chinese)
- [5] 崔政权, 李 宁. 边坡工程——理论与实践最新发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.(Cui Zhengquan, Li Ning. Slope Project—New Develop of Theory and Practice[M]. Beijing: China Water Power Press, 1999.(in Chinese))
- [6] 尤春安, 战玉宝. 预应力锚固段锚索的应力分布规律及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 925 - 928.(You Chun'an, Zhan Yubao. Distributing characters and analysis of stresses in prestressed cables[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 925 - 928.(in Chinese))
- [7] 贾金青. 复杂地层深基坑支护的方法与实践[J]. 岩土锚固工程, 2000, (2): 48 - 52.(Jia Jinqing. Method and practice for retaining of deep excavation in complex ground[J]. Engineering of Anchorage of Rock and Soil, 2000, (2): 48 - 52.(in Chinese))
- [8] 朱焕春, 吴海滨, 赵海斌. 反复张拉荷载下锚杆工作机理试验研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 662 - 665.(Zhu Huanchun, Wu Haibin, Zhao Haibin. Experiment study on bolting mechanism under cyclic tensile load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(6): 662 - 665.(in Chinese))
- [9] 李 宁, 韩 焯, 陈飞熊, 等. 预应力群锚加固机理的数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(6): 60 - 66.(Li Ning, Han Xuan, Chen Feixiong, et al. Numerical model test on strengthening mechanism of prestressed bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(6): 60 - 66.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国行业标准编写组. 土层锚杆设计与施工规范(CECS(22: 90))[S]. 北京: 中国计划出版社, 1991.(The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. Technical Code for Anchored Bar in Soil(CCES(22: 90))[S]. Beijing: China Planning Press, 1991.(in Chinese))