

桩锚支护结构内力和变形试验分析

潘旭亮^{1,2}, 张钦喜¹, 杜修力¹, 王坚², 杨素春², 张略²

(1. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 2. 北京市勘察设计研究院有限公司, 北京 100038)

摘要: 桩锚支护正得到越来越多的应用, 其理论尚欠完善, 通过对护坡桩钢筋应力和水平位移动态测试数据的分析, 得出了内力与变形分布规律; 从钢筋受力和截面曲率两个途径, 推导了两种护坡桩弯矩反算方法, 并与 m 法和等值梁法进行了比较。结果表明桩身弯矩分布基本相同, 数值差异很大, m 法计算的弯矩最大, 实测数据得到弯矩最小, 传统的设计方法具有优化空间, 理论上可节省一半的钢筋量, 接近中和轴配筋越少。

关键词: 桩锚支护; 现场试验; 桩身弯矩; 水平位移; 截面曲率

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2012)S0-0277-05

作者简介: 潘旭亮(1980-), 男, 江西宁都人, 博士, 主要从事地基处理、基坑支护设计、施工与研究工作。E-mail: pxl1980@126.com。

Experimental study on internal force and deformation of anchored bracing piles

PAN Xu-liang^{1,2}, ZHANG Qin-xi¹, DU Xiu-li¹, WANG Jian², YANG Su-chun², ZHANG Lue²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 2. Beijing Engineering Consultants Ltd., Beijing 100038, China)

Abstract: The anchored bracing pile is more widely and more applied beyond its theory. Dynamic data of steel bar stress and horizontal displacement along piles are analyzed, and the distribution rules of internal force and deformation are gained. Based on steel bar force and section curvature, two methods to calculate bending moment along pile are deduced. Comparison between the m method and the equivalent beam method indicates that moment distribution is similar, but its numerical value is very discrepant. The m -method has the largest bending moment, and the in-situ measurement has the smallest bending moment. So the traditional design methods have large optimization space. Theoretically it can save half quantities of steel bars, which are less collocated near the central axis.

Key words: anchored bracing pile; field test; pile bending moment; horizontal displacement; section curvature

0 引言

m 法和等值梁法是桩锚支护设计常用两种基本方法^[1]。等值梁法基于极限平衡原理, 只能计算内力, 不能计算变形, 且对被动土压力取值敏感; 而 m 法可以计算变形, 但计算模型和计算参数相对前者复杂。两种方法计算出的弯矩, 在分布和数值上都有明显差异, 尤其反映在多支撑结构中。

由此可见基坑围护工程计算理论和方法还有待完善。随着基坑深度和规模的加大, 理论上更难准确计算出桩的弯矩和变形。现场原型监测和对监测数据的反演分析工作就显得尤为重要。通过不断积累现场监测数据^[2-3], 不断地为理论分析和设计计算方法的完善提供依据, 具有重要的现实意义和实际价值。

1 工程概况

朝阳区文化馆垡头文化中心位于北京市朝阳区垡头西里, 化工路西侧, 垡头南路北侧。建筑物为地上1~5层, 地下3层, 框架剪力墙结构, 建筑物西侧地下室基础外墙距现状平房仅1.75 m, 北侧12.7 m处现有5层住宅楼, 东侧分布两条南北走向的上水管, 管径分别为100 mm和200 mm, 埋深约为1 m, 最近处距基坑约3 m; 南侧场地无影响施工的管线和建筑物。基坑深15.65 m。

2 工程地质条件

表1 各层土物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soil layers

土层	层厚 /m	重度 γ /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	压缩模量 E_s/MPa
素填土	2.60	18	10	15	2.8
粉质黏土	2.35	20	20	25	6.0
细砂	2.20	20	0	28	12.6
粉质黏土	4.00	20	27	20	6.5
细粉砂	7.50	20	0	32	15.8
粉质黏土	1.00	20	20	25	6.9
黏质粉土	2.75	20	28	20	8.7

3 桩锚支护设计参数

基坑深度 15.65 m，采用桩锚支护体系，护坡桩桩径 800 mm，桩距 1.6 m，桩长 20.65 m，嵌固深度 5 m，主筋为 14 Φ 22，布设三道锚杆，第一排 18 m (7+11 m)，锚杆设计值 282 kN，锁定值 226 kN；第二道 23 m (5+18 m)，锚杆设计值 353 kN，锁定值 282 kN；第三道 22m (5+17 m)，锚杆设计值 537 kN，锁定值 430 kN。

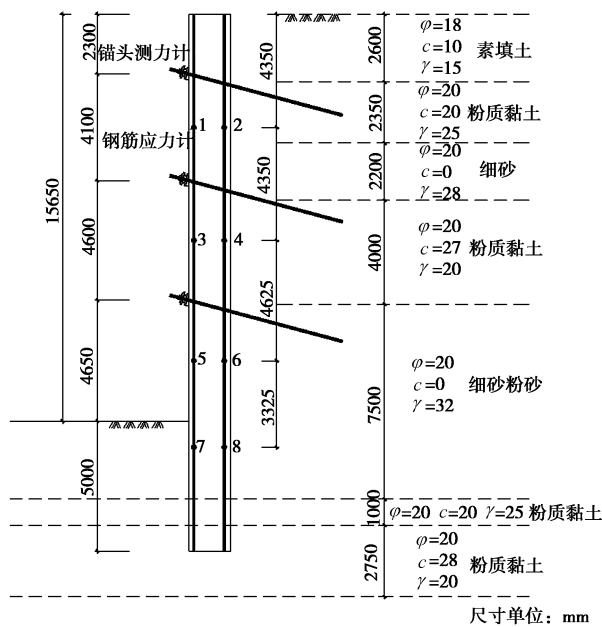


图1 地质条件及测点位置

Fig. 1 Geological conditions and position of measuring points

4 监测方案

4.1 内力监测方案

为了量测桩身内力，根据工程现场平面特点、周边环境因素，选取基坑东侧 76 号桩、西侧 7 号桩各 1

根为试验桩，每根共布设 8 个钢筋应力计。根据布设原则，应力计应布设在弯矩最大处，位置为相邻锚杆的中点，沿桩身 4 个不同深度布设，每个深度布设 2 个钢筋测力计，分别位于理论受拉受压最大处，其连线与护坡桩桩中心连线垂直，即临空面和迎土面。锚头测力计配套布设在试验桩相邻锚杆的锚头上^[4]，每组 3 个，共 2 组。布设位置见图 1。

4.2 桩身水平位移监测方案

为了量测桩身水平位移，布设 3 根测斜管，因施工中损坏一根，得到了 2 根有效数据。试验桩选在东侧护坡中部的 68 号桩及 72 号桩。测斜管长度与护坡桩深度相同，导槽应与测量方向保持一致，每节相邻测斜管应紧密对接，保持导槽顺畅，测斜管露出冠梁顶部约 10~20 cm。

5 监测结果分析

5.1 桩身内力试验分析

钢筋应力计随护坡桩施工埋设后，根据土方开挖情况和工程进展，及时采用振弦频率接收仪对埋设在桩身内部的 16 个钢筋应力计进行量测。从土方第一步开挖 3 月 29 日到基坑施工完工 7 月 20 日贯穿整个施工过程，历时约 4 个月，经整理得到护坡桩内钢筋受力随工程进展的变化情况。锚头测力计分别于 4 月 11 日、4 月 29 日和 5 月 15 日随第一排、第二排和第三排锚杆张拉时安装。由于场地狭窄，防水设计特殊性，外墙防水层直接贴于护坡桩外立面的面层上，而不是贴于外墙，腰梁直接垫于面层锁定锚杆，面层的强度相比护坡桩的强度要低，所以锚杆按设计值锁定后由于面层变形锚杆拉力降低。锚头测力计测得的实际锚杆拉力见图 2，3。

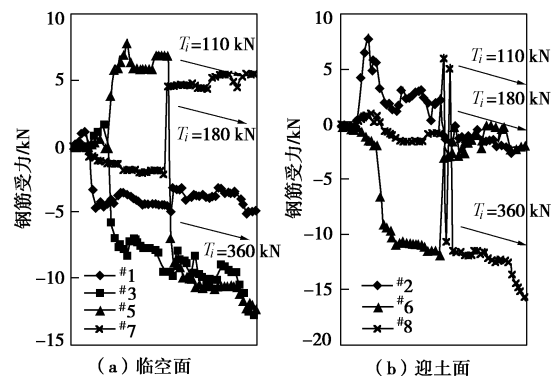


图2 西侧 7 号桩钢筋受力动态图

Fig. 2 Dynamic forces of steel bar in west pile No. 7

从图 2，3 来看，桩锚的受力特征有：

钢筋总体受力很小，远没有达到钢筋的屈服强度，测得的最大钢筋压力为 15.6 kN，拉力为 10.8 kN；

锚杆的拉力大小能改变钢筋的受力状态, 7 号桩和 76 号桩在相同位置点处钢筋呈不同的拉压状态;

增设锚杆改变钢筋受力状态, 7 号桩来看, 第二排锚杆增设后, 3 点钢筋由拉变压, 第三排锚杆增设后, #5 点钢筋由拉变压, #7 点钢筋由压变拉; 76 号桩来看, 第三排锚杆增设后, #6 点钢筋由拉变压。

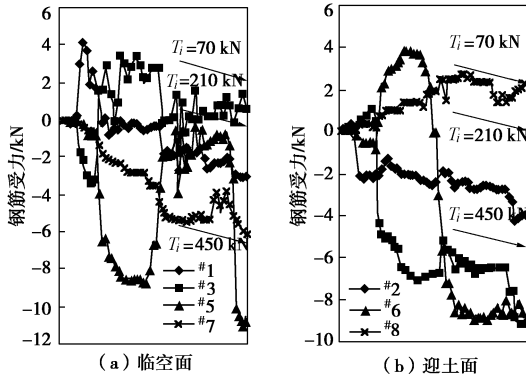


图 3 东侧 76 号桩钢筋受力动态图

Fig. 3 Dynamic forces of steel bar in east pile No. 76

5.2 桩身水平位移分析

至基坑施工完成, 共计进行了 6 次桩身测斜监测, 见图 4, 5。

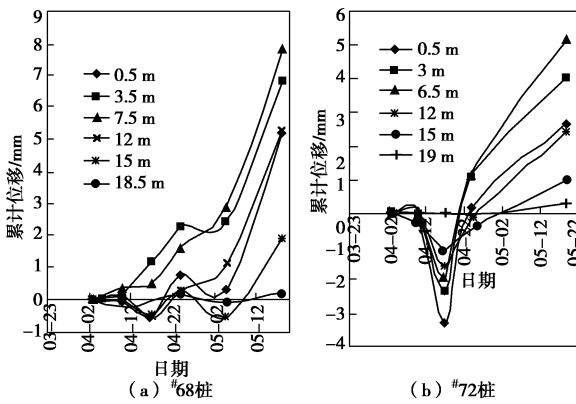


图 4 水平位移-时间曲线图

Fig. 4 Horizontal displacement-time curves

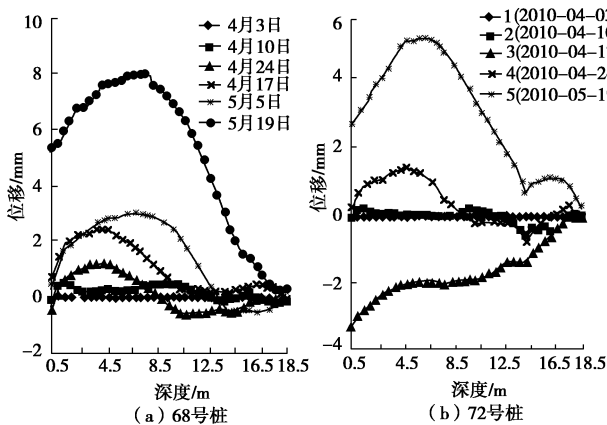


图 5 桩身水平位移变化图

Fig. 5 Curves of horizontal displacement along pile

从图 4, 5 来看:

(1) 最大的水平位移并不出现在桩顶, 出现在基坑中部, 68 号桩最大位移出现在 7.5 m 深处, 位移量为 8.01 mm, 最大位移速率为 0.17 mm/d; 72 号桩最大位移出现在 6.5 m 深处, 位移量为 5.21 mm, 最大位移速率为 0.11 mm/d。

(2) 两个监测点监测数据显示, 整个监测期间均未出现明显异常变形。护坡桩在施工前期位移不大, 变形速率很小, 在第二步开挖后护坡桩中上部累计位移有所变大, 但其位移速率及累计位移量均未出现监测预警, 监测成果均在可控范围内。

6 护坡桩弯矩反演计算

6.1 由钢筋受力反演护坡桩弯矩

以钢筋最大的拉力值 10.8 kN 计算, 得出钢筋应力为 28 MPa, 受拉区的砼开裂, 应力图形呈曲线分布, 中和轴位置略偏向于受压区, 但简化计算, 其变形规律符合平截面假定, 中和轴位置仍为护坡桩桩中心线, 由于黏结力存在, 受拉钢筋的应变与周围同一水平处的砼拉应变相等^[5], 根据简单推导弯矩计算公式为

$$M = \frac{E_c NI}{E_s A_s h} \quad (1)$$

式中, E_c , E_s 分别为砼、钢筋弹性模量, N 为钢筋受力 (kN), A_s 为钢筋截面积, I 为桩截面惯性矩, h 为应力计到中和轴的距离。

根据式 (1) 并结合钢筋应力计测试结果, 计算得到的弯矩见表 2。

表 2 钢筋最大受力及计算弯矩

Table 2 Maximum forces of steel bars and calculated bending moments

深度	桩号					
	7 号桩			76 号桩		
	点号	钢筋拉力	弯矩 / (kN·m ⁻¹)	点号	钢筋拉力	弯矩 / (kN·m ⁻¹)
4.35	1	-5	-123.4	1	-3	-74.06
8.70	3	-12.7	-313.5	3	-3.3	-81.46
13.33	5	-12.2	-301.2	5	-14.2	-350.5
16.65	7	-5.4	-133.3	7	-6.17	-152.3

6.2 由桩身曲率推算桩身弯矩

(1) 几何公式

下面通过建立桩体水平位移与变形曲率的几何关系, 推导桩体水平位移与桩身弯矩的关系公式。图 6 中 A, B, C 为护坡桩变形桩体相邻 3 点, 过 B 点做切线, 过 A 点做切线的垂线, y_{i-1} , y_i , y_{i+1} 为水平位移量, $l' = x_i - x_{i-1}$, $l' = x_{i+1} - x_i$ 为相邻测斜仪测点垂直距离, 显然有以下关系:

$$\theta \approx \theta' \quad (2)$$

$$\tan \theta \approx \tan \theta' \quad (3)$$

$$\tan \theta' = \frac{\widehat{AB}}{\rho} \approx \frac{\overline{AB}}{\rho} \approx \frac{l}{\rho}, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \tan \theta &= \frac{\Delta}{l} \approx \frac{\Delta'}{l} = \frac{n-m'}{l} \approx \frac{n-m}{l} \\ &= \frac{(x_i - x_{i-1}) - (x_{i+1} - x_i)}{l}. \end{aligned} \quad (5)$$

由于 θ' 很小, 近似认为 $l \approx l'$, 得出

$$\frac{1}{\rho} \approx \frac{(x_i - x_{i-1}) - (x_{i+1} - x_i)}{l^2} \approx \frac{(x_i - x_{i-1}) - (x_{i+1} - x_i)}{l'^2}. \quad (6)$$

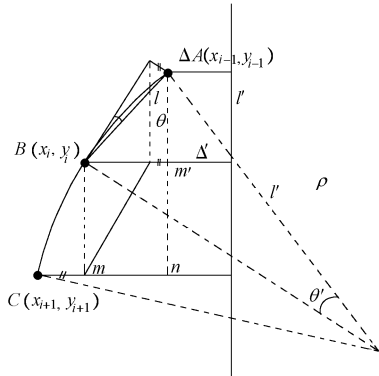


图6 水平位移与截面曲率几何关系

Fig. 6 Relation between horizontal displacement and curvature

(2) 护坡桩弯矩计算公式

假定与 6.1 相同, 截面应变如图 7 所示, 护坡桩轴线单位长度的截面相对转角 φ 为 (即截面曲率有 $\varphi = 1/\rho$)

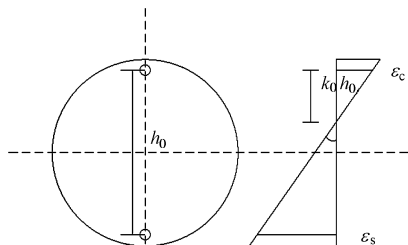
$$\varphi = \frac{1}{\rho} = \frac{\varepsilon_c + \varepsilon_s}{h_0} = \frac{\varepsilon_c}{k_0 h_0}, \quad (7)$$

由 $\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c}$, $\sigma_c = \frac{Mh}{I}$ 和式 (6)、(7) 得出

$$M = \frac{[(x_i - x_{i-1}) - (x_{i+1} - x_i)] k_0 h_0 I E_c}{l'^2 h}, \quad (8)$$

护坡桩圆截面、假定中和轴不变即 $k_0 = 0.5$, $h = k_0 h_0$, 式 (8) 可变为

$$M = \frac{[(x_i - x_{i-1}) - (x_{i+1} - x_i)] I E_c}{l'^2}. \quad (9)$$



中和轴不变, k_0 取 0.5

界限高度, $k_0 = \frac{0.00264}{0.0033 + f_y/E_s}$

图7 截面应变图

Fig. 7 Sectional strain

(3) 桩身弯矩反演分析

根据测斜仪测得的数据、式 (9) 计算得出桩身弯矩见图 8, 弯矩较大出现在桩身中下部, 大致反映了弯矩分布情况。这种方法主要有 4 个特征①计算公式比较简单, 便于通过测斜仪测得数据计算桩身弯矩; ②理论上测斜仪测点间距越小越精确, 但由于测斜仪不可避免的测量误差, 间距越小误差反而有放大可能; ③一个测点数据会影响相邻两点的弯矩计算, 所以应保证数据的精确度; ④由于实际计算曲率偏大, 计算得到的实际弯矩值比理论要大。

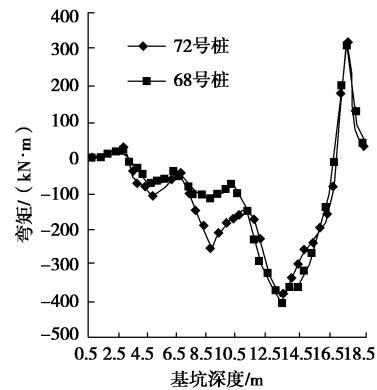


图8 桩身弯矩图

Fig. 8 Bending moment along pile

6.3 式 (1)、(9)、 m 法及等值梁法计算弯矩对比

表 2 为 4 种不同计算方法计算弯矩对比表, 除 7 号桩外, 最大处均出现在桩身约 13.5 处, 弯矩分布基本相同, 但数值差异很大, m 法计算的弯矩最大, 式 (9) 其次, 等值梁法第三, 式 (1) 最小。反映了基坑工程计算理论和方法存在的普遍问题。等值梁法对被动土压力取值比较敏感 (表 3 计算中被动土压力修正值为 1.6), 取值差异可能导致护坡桩受力和嵌固深度大幅度变化。而 m 法基本忽视土的强度问题, 嵌固深度取值又通常参考等值梁法, 所以两者应相互补充, 互为参照。

表3 不同计算方法计算弯矩对比

Table 3 Comparison of moments calculated by different methods

深度 /m	m 法 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	等值梁 /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	式 (1) /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)		式 (9) /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	
			7 号	76 号	72 号	68 号
4.35	-100	-65	-123.43	-74.06	-110	-80
8.70	-250	-183	-313.50	-81.46	-260	-120
13.33	-680	-489	-301.16	-350.5	-380	-405
16.65	20	166	-133.30	-152.3	-160	-137

在桩锚支护体系设计中, 弯矩折减系数取值是设计关键, 设计者常常借助工程经验进行取值, 从实测数据来看, 弯矩并没有理论计算那么大, 两种设计方法偏保守。基坑工程护坡桩通常采用圆形截面, 纵向

钢筋一般沿圆周均匀布置, 桩身受力后, 各受力筋至中和轴的距离不等, 应力应变也不同, 不可能同时到达屈服强度, 根据截面应变图分布, 护坡桩配筋量从理论上可以减少一半, 接近中和轴越近配筋越少。

7 结 论

本文采用钢筋应力计和测斜仪分别量测了钢筋受力和桩身水平位移动态数据, 分析了钢筋受力和桩身水平位移的变化规律, 得到以下基本结论:

(1) 利用本文提出的式(1)、(9), 利用监测得到的钢筋应力、桩身变形反演得出了桩身的弯矩, 并与 m 法和等值梁法弯矩结果进行了对比分析, 结果表明弯矩分布基本相同, 但数值差异很大, m 法计算的弯矩最大, 式(9)其次, 等值梁法第三, 式(1)最小, 说明桩锚设计有优化空间, 根据平截面假定, 理论上可节省一半的钢筋量, 接近中和轴越近配筋越少。

(2) 从钢筋受力和截面曲率的几何算法不同出发点推导了两种桩身弯矩计算方法, 可以作为实测数据相互校核, 也可以作为不同计算方法的相互参照。

参考文献:

[1] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册[M]. 2版. 北京: 中国建筑

工业出版社, 2009. (LIU Guo-bin, WANG Wei-dong. Excavation engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Building Industry Press, 2009. (in Chinese))

[2] CU C Y, Liao J T, CHENG W L. Building response and ground movements induced by a deep excavation[J]. Géotechnique, 2000, **50**(3): 209 - 220.

[3] 陆培毅, 顾晓鲁, 钱 征. 天津港务局综合业务深基坑支护与监测[J]. 岩土工程学报, 1999, **21**(3): 323 - 327. (LU Pei-yi, GU Xiao-lu, QIAN Zheng. Supervising and in-situ measurement of retaining structure on the Multiple Building of Tianjin Port Office[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, **21**(3): 323 - 327. (in Chinese))

[4] 张建龙, 胡 辉, 尹敬泽. 预应力锚杆在张拉锁定时的应力损失问题[J]. 施工技术, 2001, **30**(1): 24 - 25. (ZHANG Jian-long, HU Hui, YIN Jing-ze. Stress loss problem of pre-stressed anchor during stretch locking[J]. Construction Technology, 2001, **30**(1): 24 - 25. (in Chinese))

[5] 过镇海. 钢筋混凝土原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. (GUO Zhen-hai. Principles of reinforced concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1999. (in Chinese))

(本文责编 黄贤沙)