

悬臂式支护桩内力的试验研究^{*}

Experimental investigation for the internal force of cantilever supporting piles in excavation

朱彦鹏 王秀丽 于 劲
甘肃工业大学建筑工程系, 兰州, 730050)

王立红
甘肃省第七建筑工程公司, 兰州, 730000)

中图法分类号 TU 413.62

作者简介 朱彦鹏, 1960 年生, 1984 年硕士研究生毕业, 现任甘肃工业大学建筑工程系系主任, 教授。主要从事结构优化设计、基础工程等方面的教学科研工作。

1 前 言

随着高层和高耸建筑物的蓬勃发展, 深基坑开挖支护技术的应用和研究日益重要。但是, 由于深基坑工程的复杂性和不确定性, 关于深基坑支护技术至今还未整理出一套系统完善的理论和设计方法, 特别是影响深基坑支护的主要因素——土压力的研究还不够深入。目前设计中常用来计算土压力的古典朗肯理论或库仑理论的建立条件与支护结构的工作机理存在着很大的差异^[1]。本文针对兰州地区湿陷性黄土, 通过钻孔灌注悬臂式支护桩在不同开挖阶段的工作性能测试, 实测出支护桩的桩身内力, 推算沿桩身的土压力分布形式, 供悬臂式支护桩的内力和变形分析与设计参考, 从而为制定本地区深基坑支护规范提供理论依据。

2 试验情况

本试验是在兰州市西固区某高层住宅楼工地进行的。基坑从地面标高至 -5.9 m 采用机械大开挖, 剩余部分进行人工挖土。试验选择了土压力分布清楚、能正确反映支护桩在不同开挖阶段的工作性能、桩距 2250 mm 的 2 根中间支护桩作为测试桩, 为了使测试结果更符合实际情况, 本试验将原设计中的桩顶锁口梁断开。具体情况见表 1 和图 1。

表 1 支护测试桩情况一览表

Table 1 Information about the tested supporting piles

工程地点	截面形状	测试时间	混凝土强度等级	贯入深度/m	混凝土保护层厚/mm
兰州市西固区	圆形	1997.8—1997.10	C20	6.4	50
成桩工艺	配筋	桩径/mm	桩长/m	卸载高度/m	基坑深度/m
钻孔灌注桩	8 Φ 22 + 12 Φ 18	800	12	1.2	6.8

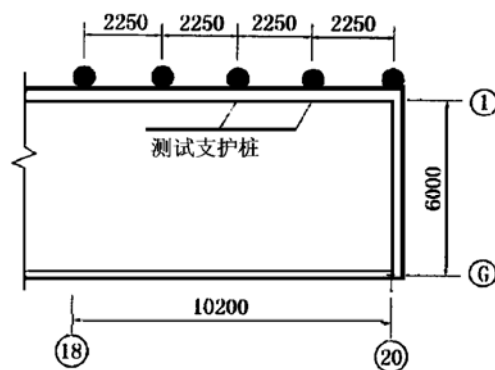


图 1 测试桩位置示意图

Fig. 1 Position of test piles

3 试验方案设计

3.1 试验目的与内容

实测各不同部位受力钢筋在不同开挖阶段的应变及应力, 根据实测结果计算测试桩桩身弯矩, 推导桩身剪力和所受土压力, 并将实测内力与设计内力进行比较分析, 为设计悬臂式支护结构提供可靠数据, 验证并修改现行理论及设计方法, 并优化支护方案。

3.2 钢筋笼测点和桩身测试截面设计

根据理论分析和工程经验, 悬臂式支护桩桩身弯矩随土压力、基坑深度、桩径以及配筋的变化而变化, 但最大弯矩往往发生在基底平面以下不远区域, 故钢筋笼在基底平面附近的区域都是重点测试部位, 应多设置测试截面, 每个截面多布置应变片。在钢筋笼的其它部位也布置测点来检测整根桩的内力分布情形。根据以上所述, 我们在 #1 桩钢筋笼上选择了 8 个截面, 布置了 80 个测点, 在 #2 桩钢筋笼上也选择了 9 个截面, 布置了 72 个

^{*} 甘肃省科技攻关项目 (No. GG-97005).
到稿日期: 1998-06-25

测点。确定了每个测点位置后,采用合理的粘贴工艺粘贴应变片,并焊接导线用塑料管保护以引至 7V08 数据采集系统,如图 2、图 3 所示。

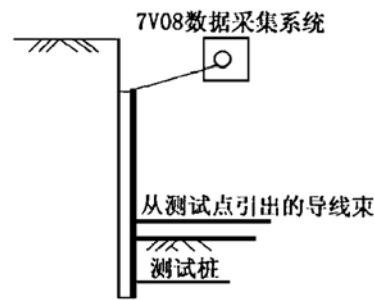


图 2 #1 测试桩装置连接图
Fig.2 Pile No.1 and its test equipment

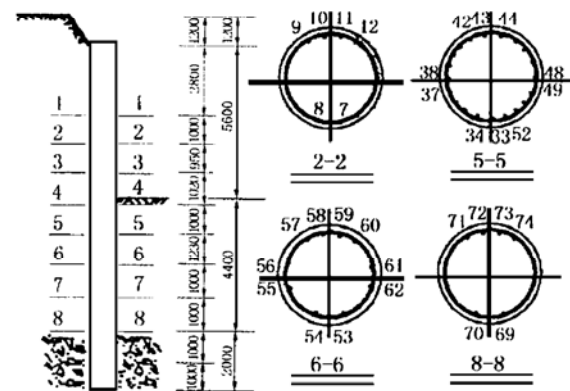


图 3 #1 测试桩测点布置图
Fig.3 Layout of measuring points for test pile No.1

3.3 实验测试

在实验室制作钢筋笼贴应变片,运至现场吊装。吊装 #2 桩钢筋笼时,由于操作不当致使钢筋笼变形和部分应变片损坏。灌注混凝土时,混凝土浆体向坑周边土体渗透,因而改变了桩外观形状和钢筋相对位置。由于测试桩是在水下浇筑的,混凝土质量不理想,造成测试结果稍大。另外在大开挖阶段,挖掘机的重量作用使得部分测试数据失真,经分析决定舍去前几组数据,数据整理以 #1 桩为基础, #2 桩仅作参考。卸载 1.2 m 至桩顶,然后采用分层挖土加载 (自然加载) 的方式,每开挖一层采集一批数据,并测量开挖深度。采用井点降水法将地下水降至基坑底面以下,故可舍去地下水的影响。此试验的测试桩是实际工程桩,待基坑开挖至设计标高稳定后就可终止试验。桩周土性能参数见表 2。

表 2 桩周土的性能参数

Table 2 Parameters of soil around test piles			
重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{^\circ})$	平均含水量 $w/\%$
16.78	5.0	24.2	11.6

4 试验结果分析

4.1 桩身实测弯矩

不同开挖阶段的桩身各截面弯矩可由实测钢筋应

变值推算^[1]。现在根据桩身混凝土是否开裂分 2 种情况予以考虑。

1) 桩身混凝土未开裂

当桩身混凝土未开裂时,其截面中性轴位置是确定的。从实测钢筋应变值看,对称位置钢筋拉压应变值差值很小,这些差值主要是混凝土灌注时浆体向周边土体渗透,造成桩身截面不规则以及钢筋笼位置移动所致。但这些因素只使中性轴偏离形心轴很小距离。故仍可认为中性轴重合于形心轴。此时,应力应变符合“平截面假定”。混凝土桩身截面基本处于弹性工作阶段,桩身弯矩由钢筋和全截面混凝土承担。如图 4 所示。

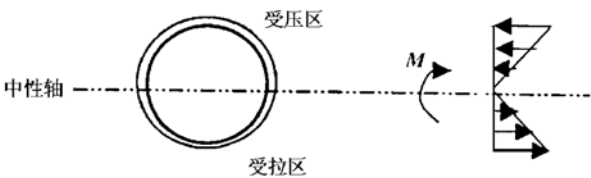


图 4 未开裂时桩身截面受力示意图
Fig.4 Internal force in cross-section of the pile without cracking of concrete

2) 桩身混凝土已开裂

随着开挖深度的增加,桩身所受荷载增加,最大拉应力处混凝土超过极限抗拉强度而开裂,裂缝向形心轴发展。此时,中性轴离开形心轴向受压区偏移,开裂区混凝土退出工作,但从实测钢筋拉压应变值来分析,受拉区未开裂部分混凝土仍在参与工作,且还发挥着相当的作用。故此时桩身截面弯矩由钢筋、受压区混凝土以及受拉区非裂缝区混凝土共同承担,如图 5 所示。

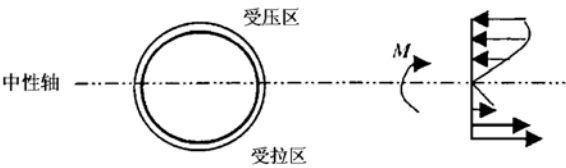


图 5 开裂时桩身截面受力示意图
Fig.5 Internal force in cross-section of the pipe with cracking of concrete

假定中性轴偏离形心轴的距离为 a ,以受拉区混凝土拉应变是否达到极限拉应变来判断此处混凝土退出工作的临界点;受压区混凝土进入塑性阶段,按抛物线加直线段计算混凝土合力,利用截面受力平衡条件可求出 a 值。确定中性轴位置后,各参与工作部分的混凝土应力与拉压钢筋应力对中性轴求矩来计算桩身截面弯矩值。根据以上原理,从实测应变值求出桩身各设计截面的弯矩,绘制成实测桩身弯矩分布曲线图,如图 6 a)、b)所示。

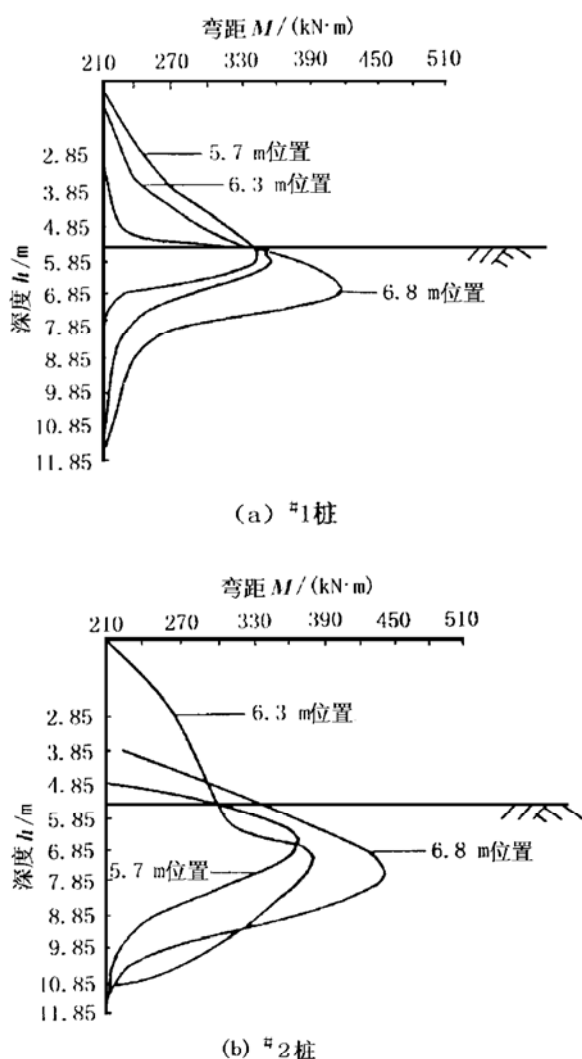


图6 桩身弯矩分布图

Fig.6 Distribution of the moment in pipe

从实测弯矩分布图的分析,得出以下结论:

a)在支护桩悬臂端靠上 2/3 区段,桩身弯矩增长缓慢,当越过此区段进入悬臂端较下区域,桩身弯矩急速增长,直至在基坑下 1 m 左右达到最大值,此后桩身弯矩迅速衰减,到嵌固端中部衰减了近 6/7,然后缓慢衰减直至在桩脚处趋于零。这一点说明目前支护桩设计中对桩脚取力矩平衡是合理的。

b)支护桩的抗弯强度远未发挥出来。将测试桩钢筋等效为周边均匀配筋,根据现行《混凝土结构设计规范》GBJ10—89)中的公式可以核算桩身最大抵抗弯矩约为 $945 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ^[6],而实测桩身最大弯矩仅为 $410 \text{ kN}\cdot\text{m}$,为最大抵抗弯矩的 2/5 左右。说明目前支护桩设计方法存在明显不足,造成浪费。

c)桩身最大弯矩作用点位于基坑底面以下约 1 m 的位置,且有随基坑开挖深度增加(荷载增加)下移的趋势。由于测点有限无法给出最大弯矩的确切位置。

4.2 土压力分布情况

根据桩身弯矩按增量法推导出桩身剪力,进而根据桩身剪力推导出作用于支护桩上的实际土压力分布情形,绘制成土压力分布图,如图 7 所示。

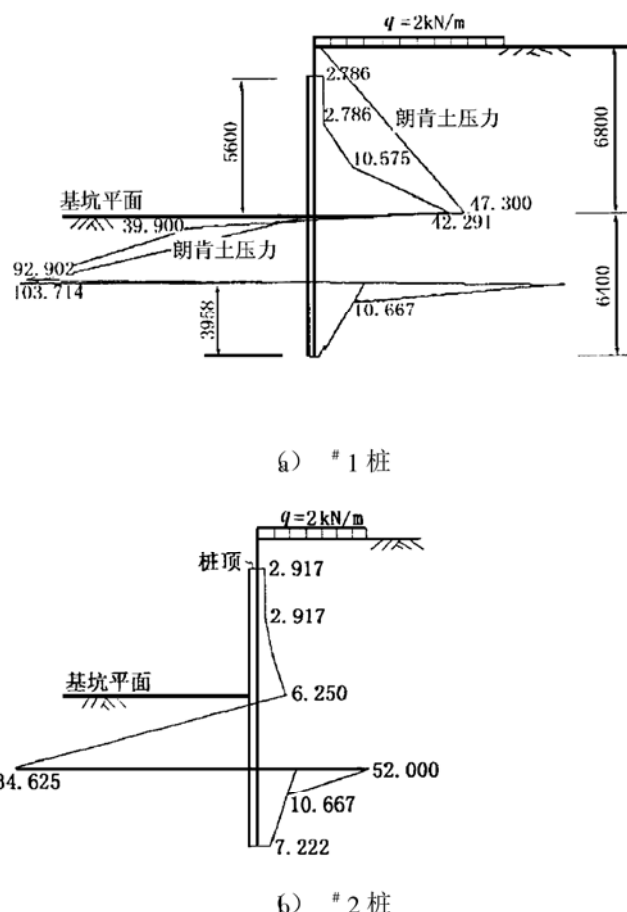


图7 测试桩土压力分布图 (kPa)

Fig.7 Distribution of soil pressure along the pipe (kPa)

其计算公式如下:

$$\Delta M / \Delta X \approx V \quad (1)$$

$$\Delta V / \Delta X \approx -q \quad (2)$$

在测试桩的悬臂端,桩身背离土体发生位移而产生主动土压力;在嵌固端,测试桩与土共同工作绕桩脚以上某点旋转产生的弹性变形对周边土体的挤压而产生了被动土压力。从土压力分布图(图7)可分析得出实测土压力与目前支护桩设计中常采用的呈三角形线性分布的朗肯土压力或库仑土压力在分布规律、变化趋势及数值大小上有着相当大的差异,具体分析如下。

(1) 悬臂端背侧的土压力分布及变化趋势

随着基坑开挖,悬臂端背侧土压力比朗肯土压力小,且靠上部位的土压力减小的幅度大于较下部位减小的幅度,土压力分布值为朗肯理论值的 1/3 ~ 3/4,实测土压力合力是朗肯理论值的 1/2 左右,且合力作用点下移了 1.5 m 左右。原因是具有一定强度和粘聚力的天然土体的变形与支护桩侧向位移不协调,较上部位桩的位移大于土体变形而致使桩土脱开,产生沿桩身向下延伸的张力缝,且随基坑开挖向下发展^[5],如图 8 所示。

由于天然土体有一定强度及粘聚力,裂缝处土体不会坍落,此处土压力几乎为零。而在桩土未脱开区段,作用于支护桩上的土压力急速增长,至基底平面位置达到最大值,此值与朗肯理论值较为接近。

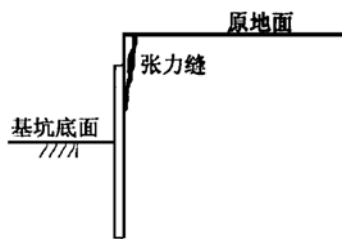


图 8 张力缝对土压力影响示意图

Fig.8 Effect of crack of soil on soil pressure

2) 嵌固端土压力分布及变化趋势

在嵌固端较上部位(桩身旋转点以上部位),桩的弹性变形所产生的位移是朝向开挖一侧挤压土体而产生被动土压力的,此力自开挖面急速增长至旋转点稍上位置产生最大被动土压力,随即急速衰减至旋转点趋于零。从实测结果分析得知:此区段土压力的分布规律与变化趋势与朗肯理论值较为接近,土压力值也与理论值接近,但是其作用点有所上移。在嵌固端较下部位(桩身旋转点以下),由于桩身位移方向与旋转点以上部位相反,故产生方向相反的被动土压力。此处被动土压力的分布形式及变化规律就与朗肯理论值有着本质的不同,其分布是上大下小,在桩脚处趋于零。

§) 建议土压力取值

实测土压力与朗肯土压力有着较大的差异,究其原因主要是因为桩-土共同工作下的弹性支护桩与朗肯理论适用的完全刚性挡土墙在工作机理上有着本质的区别。故目前在支护桩设计中常采用朗肯理论来计算支护桩所受土压力显然是不适合的。造成正常使用状态下桩内钢筋应力偏小,桩身强度远远未充分发挥,设计过于保守,带来很大浪费。本文根据实测土压力结果和以上的分析结论,提出一设计土压力分布曲线图(图9)。

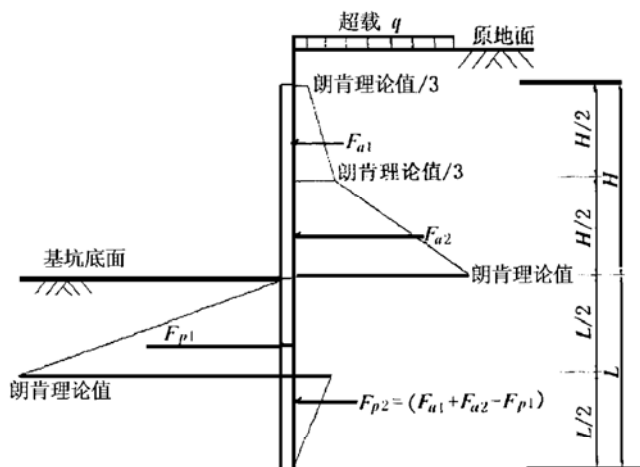


图9 假定土压力

Fig.9 The assumed distribution of soil pressure

根据测试结果,桩顶取朗肯土压力值的 $1/3$,从桩顶至悬臂端中部,由于张力缝的影响桩土脱开,土压力

大幅度减小,故根据测试结果,中间点也取朗肯值的 $1/3$ 。从中间点至基坑平面处,桩土共同工作,且桩身侧移较小,土压力急速增加至朗肯值,故基坑平面处取朗肯值。在支护桩嵌固端,考虑诸多不可预见因素,偏于安全地将桩变形旋转点设于嵌固端中部。根据以上测试结果和理论分析,从基坑平面处至旋转点的土压力较符合朗肯理论值,故在旋转点处取朗肯理论值。从旋转点至桩脚处的土压力是为保证支护桩的水平平衡而设,桩脚处土压力设为零。需要说明的是,此设计土压力分布图只适合于黄土地区悬臂式支护体系结构。其它地区仅供参考。

5 结 语

④从试验实测弯矩分布图(图6)可以看出:桩身最大弯矩发生于基坑底面以下0.3~1.5 m的区域内,且其位置随基坑开挖有向下移动的趋势。

2) 测试资料表明,用目前支护桩常规设计方法设计出的支护桩的强度远远未充分发挥,桩身截面实际弯矩远远小于设计弯矩,造成浪费。而造成这种浪费的主要原因是计算土压力大于实际土压力,说明此设计方法亟待改进。

§)实际土压力强度与朗肯理论土压力在分布规律和变化趋势上存在着相当的差异,这不仅与弹性支护桩和刚性挡土墙的不同工作机理以及施工流程有关,而且还与桩土间变形不协调有关。

4) 桩身位移及桩后土体的位移和沉降等因素构成整个支护体系的位移场,也有待进一步深入研究和探讨,以便对支护结构的工作过程实行信息化监测,以确保基坑安全开挖和周边建筑物以及市政设施的安全和正常使用。

5)天然土体的粘聚力对减少支护结构所受土压力和减少支护桩桩身内力的作用机理也有待研究和探讨。

6) 本文提出的土压力分布图,可供黄土地区悬臂式支护体系结构的设计参考使用。

参考文献

- 1 林天健. 深基坑开挖支护体系理论及其应用评述. 力学与实践, 1996, 18 (2): 46 ~ 50
- 2 朱彦鹏, 王秀丽, 张安疆等. 人工灌注桩水平承载力的试验研究. 工程力学, 1997 (增刊): 493 ~ 500
- 3 朱彦鹏, 张安疆, 王秀丽. m 法求解桩身内力与变形的幂级数解. 工程力学, 1997 (增刊): 488 ~ 492
- 4 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范 (GBJ10—89). 北京: 中国建筑出版社, 1989
- 5 Joseph E Bowles. Foundation analysis and design. Third edition. McGraw - Hill Book company, 1982. 380 ~ 402