

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2016.01.026

静压桩荷载传递与承载性状试验研究

杨校辉^{1,2}, 朱彦鹏^{1,2}, 黄雪峰^{1,3}

(1. 兰州理工大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学 西部土木工程防灾减灾教育部工程研究中心, 甘肃 兰州 730050;

3. 中国人民解放军后勤工程学院 建筑工程系, 重庆 401311)

摘 要: 依托某实际工程,在对桩—土体系荷载传递机理分析的基础上,研究了现场静力压桩试验和载荷试验过程中桩侧阻力的变化规律及其承载特性。结果表明:在竖向压力作用下静压桩穿越不同的土层时,需同时克服土体对桩侧阻力和端阻力作用,不同阶段桩顶荷载作用时的端阻和侧阻的发挥性状不同;随着压桩荷载增加,桩身上部摩阻力先于下部发挥作用,较先进入极限状态,体现了其异步性,桩基设计时桩身中上部应适当加强;地基土自身的强度会随地基土水环境的变化而改变,对桩侧摩阻力和桩端阻力发挥影响显著;正常工作阶段,桩基大都处于弹性变形阶段,然而超出此范围后,桩基破坏大都表现为沉降或不均匀沉降。

关键词: 静压桩;承载性状;侧摩阻力;静载荷试验

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2016)01—0139—05

Experimental Research on Loading Transfer and Bearing Characteristics of a Jacked Pile

YANG Xiaohui^{1,2}, ZHU Yanpeng^{1,2}, HUANG Xuefeng^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China;

2. Northwest Center for Disaster Mitigation in Civil Engineering of Ministry of Education, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. Department of Architectural Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China)

Abstract: Based on one real construction project and analysis of pile-soil system load transfer mechanism, variety laws of pile side resistance during the process of loading test and static pressed pile were analyzed. The results are as follows: Under vertical pressure and passing through different soil layer, jacked pile need to overcome pile tip resistance and pile side resistance from soil. In the different stage of pile top load action, pile tip resistance and pile side resistance work in different character properties. With load increasing, frictional resistance firstly develops in the upper part of pile. The upper part firstly goes into limit state which shows asynchronism. therefore when design piles, the upper part should be strengthened. The strength of foundation soil itself will change along with the alternation of water and soil environment which affects the development of the pile tip resistance and pile side resistance observably. During the normal working stage, the pile is mostly in elastic deformation stage, and it then exceeds this stage. The failure of pile foundation is mostly caused by uneven settlement.

Keywords: jacked pile; bearing characteristic; side resistance; static load test

随着建(构)筑物使用年限的增加或地基土环境条件的改变,地基与基础问题时有发生,特别是在淤泥质土、砂土、湿陷性黄土和人工填土地区。静压桩以其施工过程中噪音低、振动小、对环境影响小、施

工质量易保证且经济效果好等诸多优点,近年来的工程实践中,得到了很好的发展和应用^[1-3]。类似静力触探的研究方法和手段,以往通常采用极限承载力理论、应变路径法、圆孔扩张理论、有限元分析

收稿日期:2015-08-19

修稿日期:2015-10-26

基金项目:教育部创新团队支持计划项目(2013 IRT13068);甘肃省科技重大专项计划项目(1302FKDA030)

作者简介:杨校辉(1986—),男,河南驻马店人,博士研究生,研究方向为非饱和土与特殊土地基处理、支挡结构。E-mail: yxhui86@126.com

法及模型槽试验等研究静压桩^[4-8]。分析上述成果,研究较多的是压桩过程中的侧向挤土效应,桩周土体运动随压入过程的变化而复杂,桩端土因受压而产生一定量的压缩变形并逐渐增大,桩顶周边地表土层随入土阻力增大产生隆起现象,而深部土体由于上覆土层的压力作用主要向桩周扩挤,离桩越近的土体扰动越严重。地基土的侧向位移和隆起不可避免的会对已入土的桩基产生较大的径向压力,严重时将会导致邻桩产生一系列不良后果,如桩身弯曲、倾斜、水平位移等,易引起上部建筑整体沉降或不均匀沉降^[9-11]。

综上,在静压桩贯入过程中,大多会涉及桩侧滑动摩擦,但对贯入过程的深入分析尚不够彻底,具体表现为对桩端阻力与桩侧阻力及其相互承载关系的研究仍待加强,部分研究尝试用滑移线理论来分析静压桩的贯入,即将其等效认为承载力问题,但均缺乏合理的试验验证;另外,部分研究从压缩机理出发给出了桩端承载力的算式,然而其应用范围仅适于较为均匀的砂土,且承载力的确定具有明显的经验性和区域性的基本特性被忽略。因此,本文依托某实际工程,选择典型地层进行现场静力压桩试验及载荷试验,研究静压桩贯入过程中桩侧阻力的变化规律及其承载特性。

1 现场试验

1.1 试验场地

现场试验依托兰州市某工程展开,试验场地地形较为平坦,属于黄河南岸Ⅱ级阶地。在控制深度内钻,探揭露场地土层自上而下为:

(1) 杂填土层:杂色,稍湿,松散,成分以建筑垃圾为主,回填时间较短,含有少量的圆砾、石灰等,分布连续,厚度约为 1.5 m~3.5 m。

(2) 粉土层:褐黄色,稍湿,稍密,以粉土为主,含有少量的圆砾和粗砂,针状孔发育,无光泽,干强度低,韧性差,中压缩性,厚度约为 1.2 m~4.3 m。

(3) 黄土状粉土层:浅黄—褐黄色、稍湿—湿,稍密—中密,以粉土为主,针状孔发育,具有湿陷性,厚度约 4.0 m~8.1 m。

(4) 淤泥质黏土层:灰—灰黑色,湿—饱和,硬塑—软塑状,以淤泥质黏土和粉土为主,泥炭及有机质含量较高,厚度 1.6 m~2.3 m。

(5) 卵石层:杂色,湿—饱和、稍密—中密,颗粒粒径大于 20 mm 占总质量的 54.2%~61.5%左右,一般粒径为 20 mm~60 mm,骨架颗粒,排列混杂,卵

石颗粒成分以花岗岩、石英岩、砂岩、变质岩为主;充填物为各级砂、砾石及粉土,分选性差。层厚 4.4 m~6.2 m。

(6) 强风化砂质泥岩层:棕红—褐红色,中密,砂泥岩互层,泥钙质胶结,遇水极易软化、崩解,该层未穿透,层厚大于 5.5 m。

1.2 试验方案

试桩采用钢管桩,壁厚 5 mm,桩长 2.5 m,桩径 500 mm,桩盖为 2 cm 厚的钢板,为便于连接应变片的导线引出,且使导线在压桩时不被破坏,在桩顶侧面钻 3 个圆孔。沿桩身间隔 25 cm 贴一个应变片,每列共 10 个,在同一高度贴 3 个,共计 30 个。具体步骤为:

(1) 对每一个应变片进行电阻测量,进行标定;用抛光机将桩身表面贴应变片部位打磨光滑,定点编号。

(2) 贴应变片时,先用无水乙醇清除表面,再用丙酮擦拭,使表面清洁,再用 502 胶将应变片粘贴在桩身内壁,最后用端子把引出线与应变片焊接在一起。

(3) 用 703 胶或环氧树脂涂在应变片表面保证应变片绝缘和防潮。一个应变片有 4 个连接导线,为了方便编束,采用 4 种颜色的引出线,统一位置编束编号,并测量是否绝缘。

(4) 应变片粘贴完毕后,测量每一个电阻阻值,桩顶侧面开孔引出导线,试桩端部焊接桩尖。

1.3 试验操作

(1) 压桩试验

试桩压入使用静力压桩机,即用送桩器从桩顶部加压,选择一压入点,清除表面杂填土,使预制桩就位后移动压桩机到待压点,将测点导线依次连接至仪器、贴好标签,调试应变采集器。在桩顶与压桩机接触部位之间安装荷载传感器,和压桩机输出力进行对比。当每节桩头被压入剩 0.5 m~1.0 m 时,按规范实施接桩。

试验加载采用慢速维持荷载法^[11],每级加载为预估极限荷载的 1/10~1/15,第一级按 2 倍分级荷载加荷;每级荷载达到相对稳定后加下一级荷载,直到试桩破坏,然后分级卸载到零。沉降观测:每级加载后间隔 5 min、10 min、15 min 各测读一次,以后每隔 15 min 测读一次,累计 1 h 后每隔 30 min 测读一次。

卸载与卸载沉降观测:每级卸载值为每级加载值的 2 倍。每级卸载后隔 15 min 测读一次残余沉

降,读两次后,隔 30 min 再读一次,即可卸下一级荷载,全部卸载后隔 3 h~4 h 再读一次。

(2) 静载荷试验

试桩压入土中 10 d 后进行载荷试验,反力加荷系统采用载荷平台式,加荷设备为配有稳压装置的油压千斤顶,位移观测采用基准梁和较灵敏的百分表。加荷每级 30 kN,共计加 10 级,加载、卸载按规范进行^[11]。

在整个静载试验过程,静载试验仪始终自动纪录压力值,桩顶沉降 $Q-S$ 等曲线由仪器自动绘出,在桩端处焊接一钢丝绳,并将钢丝绳引到桩头以外,在静载试验时,量测钢丝绳的下降距离即为桩端的沉降。现场载荷试验见图 1。



图 1 现场载荷试验图

2 试验结果与分析

2.1 压桩试验结果分析

预加载调试时发现 4 个不同测点的应变片未成活,但由于每一高度上粘贴了 3 个应变片,因此 4 个失效的测点不影响正常试验。压桩试验过程中桩体完好无损,只是顶板传力杆稍有滑移趋势。现场试验中应变片、导线焊接、预加载等将产生初始应力,测试时严格将桩顶与传力杆刚接触时的预加载初值平衡归零;堆载、荷载施加速率等均会对试验精度产生不同程度的影响,试验过程 and 数据分析时应适当考虑其影响。将测量得到的应变值换算成桩侧压力和侧摩阻力的动态变化,换算方法不再赘述^[12],试验成果如图 2~图 5 所示。

由图 2 可知,沿桩身向下桩的侧压力逐渐增加,静压桩在贯入时,压力不大于 80 kPa,曲线基本表现为线性关系,随着桩入土深度增加,压入速度逐渐变慢,曲线逐渐变为非线性。但值得注意的是,静压桩沉桩穿越的土层不同,桩侧表面与桩周土体的滑动摩擦力也因土层不同而异,在同一土层中滑动摩擦力变化不大且绝对值较小;压桩完成以后,桩周超孔

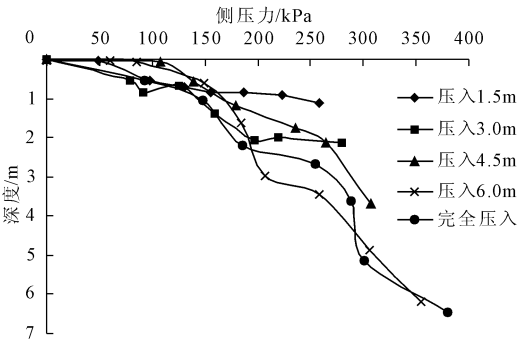


图 2 侧压力与压入深度关系图

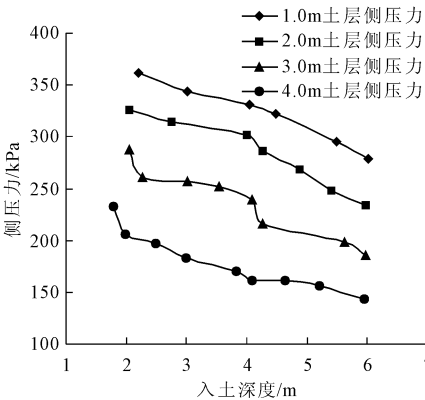


图 3 不同深度土层侧压力随入土深度的变化图

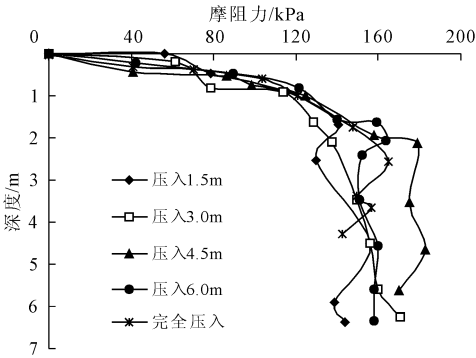


图 4 侧摩阻力与压入深度关系图

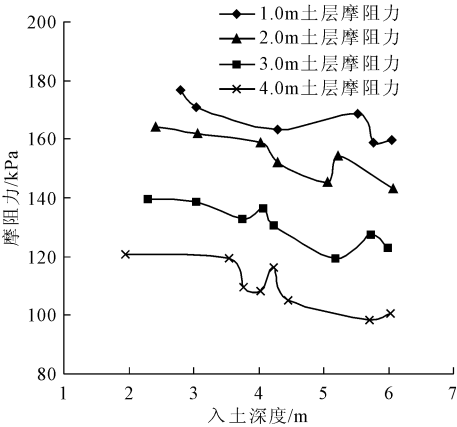


图 5 不同深度土层侧摩阻力随入土深度的变化图

隙水压将随着压完时间的延长而逐渐减小,深层土

体发生固结变形,土体强度参数及强度慢慢恢复,承载力趋于稳定。当静压桩周土体强度恢复后,贯入过程中桩侧产生的滑动摩擦力即转变为正常工作的静摩擦力,此时真正得到实际设计时所需的所谓承载力特征值^[1]。

由图 3 可知,随着静压桩贯入深度的增加,相同深度土层侧压力显著降低,随土层密实程度等发生变化。总体而言,当桩刚压到某一土层时桩周侧压力最大,随着静压桩贯入深度的增加,侧压力逐渐衰减。

从图 4 可以看出,随着贯入深度的增加,静压桩侧摩擦力呈线性增大,到达桩深 2.0 m~3.0 m 后出现明显拐点;沿桩身深度内,桩侧摩擦力并不是沿深度保持不变,更不是—直增大,而是增大到某一定值后仅发生随土质不同的变化,本试验中约在 120 kPa~160 kPa,大于规范中桩的极限侧阻力标准值^[11],说明了静压桩在竖向压力作用下贯入过程中同时克服侧阻力和端阻力作用,在对桩周一定范围内土产生挤密作用、形成土的重塑区,特别是湿陷性黄土地区,地基土自身的结构性被扰动或破坏,应力发生重分布,桩周土体强度参数将明显减小,因此桩侧摩阻力大幅降低。

图 5 分别列出了土层深度为 1.0 m、2.0 m、3.0 m 和 4.0 m 处摩阻力随桩的入土深度变化的曲线。由图知,如前所述,随着静压桩贯入深度的增大,同一深度土层的摩阻力除夹层处变化较大外,基本呈平行的降低趋势,入土深度 2.0 m~6.0 m 之间的减小值大约在 20 kPa 左右。与不同深度土层侧压力随入土深度变化一致,当静压桩被贯入到某一土层时,摩阻力为最大值,其数值随着桩端入土深度的增大而不断降低,这与目前桩基规范^[11]中摩阻力沿纵深均匀分布的假定不同。

在竖向荷载作用下,基桩轴向弹性压缩使桩土产生相对位移,同时产生桩侧阻力,而竖向荷载则克服侧阻力沿桩身向下传递,图中某区间的陡缓程度反映了该段土层的侧阻力大小;桩在不断加大的竖向荷载作用下,桩身压缩而向下位移,桩侧表面受到土的向上摩阻力,桩身荷载通过发挥出来的侧摩阻力传递到桩周土层中去,从而使桩身荷载与桩身压缩变形随深度增加而递减。但是,桩的压缩变形和桩端位移加剧了桩顶下移,同时使得桩侧摩阻力充分作用;桩顶荷载在传递过程中,上部和下部土层侧摩阻力的发挥是一个异步的过程,上部土层侧阻力先于下部发挥,随荷载增加,下部土层的侧阻力逐步被激发,各土层侧阻力的增速不同,其峰值有逐渐下

移的趋势。

2.2 静载荷试验结果分析

桩基载荷试验的 $Q-S$ 曲线可宏观反映桩身材料、桩周土破坏模式等。压桩完成后,按规范采用静载试验法^[11]研究其承载性状。试桩静载荷试验的荷载—沉降关系见图 6,桩身侧压力和侧摩阻力分布见图 7 和图 8。

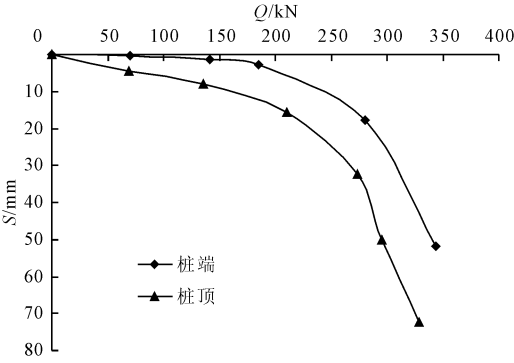


图 6 荷载—沉降曲线图

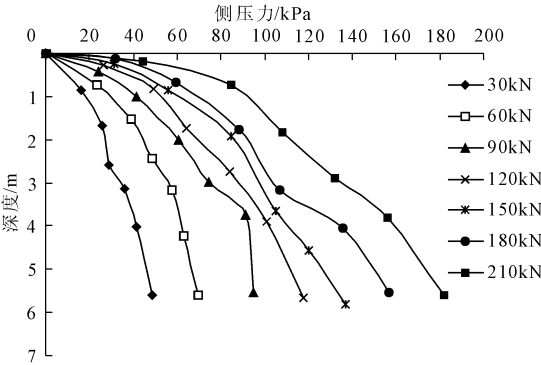


图 7 侧压力沿桩身变化图

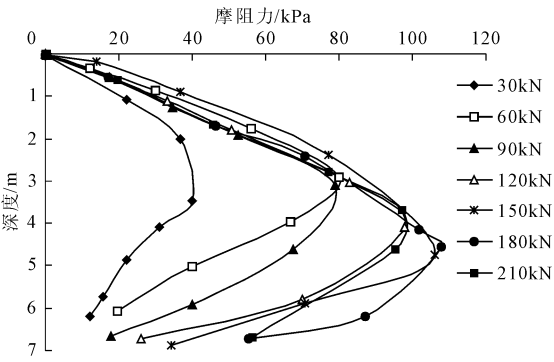


图 8 侧摩阻力沿桩身变化图

由图 6 可知,桩顶和桩端荷载—沉降曲线变化趋势基本相同,荷载—沉降曲线上没有明显的拐点。当荷载较小时,荷载—沉降曲线基本呈线性增大,如图示 0~8.5 mm 阶段,而桩端沉降变化远小于桩顶;随着荷载的不断增大,沉降增速急剧增加,呈非线性变化,如图在 150 kN~300 kN 阶段,桩顶沉降量迅速

增大为 31.2 mm,桩端沉降为 16 mm、几乎是桩顶沉降量的一半;如图在 300 kN ~ 360 kN 阶段,桩顶、桩端的 $Q-S$ 曲线均发生急剧下降,出现明显的拐点,桩顶沉降达到 75.8 mm,桩端沉降增加到 49 mm。

结合地区大量的桩基工程实践,正常工作阶段,桩基大都处于弹性变形阶段,如图 6 中的 0 ~ 150 kN 变化阶段,然而超出此范围后,桩基破坏大都表现为沉降或不均匀沉降,建议进行建筑桩基设计时要在满足承载力控制的同时按沉降控制桩进行设计,特别是在湿陷性黄土地区,有条件情况下可优先考虑桩筏基础,充分发挥桩间土作用,形成桩土筏板复合基础,以降低桩基工程造价。

从图 7 可知,上部土层侧压力变化较小,随着土层深度增加,中部土层侧压力逐渐增大,3 m 和 4 m 处土层侧压力变化呈曲线变化,与前述土层变化影响一致,荷载小于 90 kPa 时,深部侧压力增幅不大,荷载大于 120 kPa 时,侧压力增幅明显提高,体现了摩擦端承桩的非线性特征。值得注意的是,在深度 1 m 以下,随着荷载增加,同一位置桩土界面的环向侧压力增大较为显著。

由图 8 可知,随着桩顶荷载变化,沿桩身侧摩阻力分布整体呈“ $\cup$ ”型变化,即先增加再减小;同一深度的桩土摩阻力随着桩顶荷载的增大也迅速增加,特别是 3.0 m ~ 4.0 m 以上部位;不同深度摩阻力变化趋势,体现了地基土层对桩基设计地区差异较为明显,大体可分为 0 ~ 3 m 段线性增加,3 m ~ 4 m 处土层曲线型过渡、达到极值,4 m 以下且大于 200 kN 时,逐渐减小。说明实际工程中,随着桩顶荷载增加,此类桩基上部摩阻力先于下部发挥作用,较先进入极限状态,体现了其异步性;中上部摩阻力趋于极限状态,桩土发生塑性变形,最大之作用点不断下移,直至桩端土体发生压缩变形或达到破坏,对比图 7 可知,桩身下部桩土界面的摩擦力一般没有完全发挥,因此,桩基设计时桩身中上部应当加强。与侧压力变化不同的是,摩阻力随着土层深度先增大后变小,侧压力随着土层深度增加一直增大。

3 结 论

(1) 静力压桩过程中,不同阶段桩顶荷载作用时的端阻和侧阻的发挥性状有明显差异;其在竖向压力作用下穿越不同的土层时,需同时克服土体桩侧阻力和端阻力,桩-土体系的摩擦力属于滑动摩

擦力,此类滑动摩擦力在同一土层中变化不大且数值较小。

(2) 随着压桩荷载增加,桩身上部摩阻力先于下部发挥作用,较先进入极限状态,体现了其异步性,桩基设计时桩身中上部应适当加强;地基土自身的强度会随地基土水环境的变化而改变,对桩侧和桩端阻力的发挥影响较大。

(3) 正常工作阶段,桩基大都处于弹性变形阶段,然而超出此范围后,桩基破坏大都表现为沉降或不均匀沉降,建议进行建筑桩基设计时可考虑承载力和沉降双重控制;特别是在湿陷性黄土地区,有条件情况下可优先考虑桩筏基础,充分发挥桩间土作用,形成桩土筏板复合基础,以降低桩基工程造价。

(4) 现场试验中应变片、导线的焊接等将产生初始应力,测试前应严格控制初值的平衡归零,采取有效措施减小测试和分析误差。

参考文献:

- [1] 林本海,王 离.静压桩承载性能的分析研究[J].建筑结构学报,2004,25(5):120-124.
- [2] 朱彦鹏,谢 强,张丹丽.静压桩托换技术在建筑物地基加固中的应用[J].甘肃科学学报,2007,19(2):118-120.
- [3] 李富荣,王照宇.沉桩挤土效应对工程环境的影响及研究综述[J].水利与建筑工程学报,2011,9(2):31-35.
- [4] 王 伟,卢廷浩,宰金珉.单桩极限承载力时间效应估算方法比较[J].岩土力学,2005,26(S1):244-247.
- [5] 张建新,吴东云.桩端阻力与桩侧阻力相互作用研究[J].岩土力学,2008,29(2):541-544.
- [6] 张忠苗,张乾青.桩端土强度对桩侧阻力影响的研究[J].岩土工程学报,2010,32(S2):59-63.
- [7] 毕庆涛,肖昭然,丁树云,等.静压桩压入过程的数值模拟[J].岩土工程学报,2011,33(S2):74-77.
- [8] 张明义,邓安福.桩-土滑动摩擦的试验研究[J].岩土力学,2002,23(2):246-249.
- [9] 胡立峰,龚维明,过 超,等.静压桩沉桩机理及承载力试验[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2009,10(6):610-614.
- [10] 王遇国,梅志荣,张季超.单桩承载性状试验研究[J].岩土工程学报,2010,32(1):7-11.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑桩基技术规范:JGJ94-2008[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [12] 杨校辉,朱彦鹏,郭 楠,等.地铁车站深基坑桩锚支护结构内力试验研究[J].岩土力学,2014,35(S2):185-197.