

不同场地条件下长桩的承载性状研究

秋仁东¹ 孙轶斌² 石玉成³

(1. 中国建筑科学研究院,北京 100013; 2. 河南省建筑科学研究院,河南郑州 450053;
3. 中国地震局兰州地震研究所,甘肃兰州 730000)

【摘要】 根据软土地基、非软土地基中长钻孔灌注桩静载荷试验和桩身轴力的测试结果,分析探讨了竖向荷载下长桩的受力性能及沉降特征的一些规律。桩侧土模量较高的非软土地区的长桩静力试桩所测得的结果表明,荷载传递和桩身压缩与软土地区超长桩性状相似,长桩的桩身压缩量相当可观,计算中应予以考虑。极限侧阻力与端阻力不同步发挥,不同深度处的不同土层处基桩的侧阻也不能同步发挥;同时指出相关规范中极限承载力计算公式的不严密之处,并且探讨说明了竖向荷载下的长群桩基础变形性状及沉降计算有待进一步的研究。本研究对今后超长桩的理论研究和工程设计应用具有一定的借鉴作用。

【关键词】 长桩;桩身弹性压缩;极限承载力

【中图分类号】 TU 473.12

【文献标识码】 A

doi:10.3936/j.issn.1007-2993.2010.03.002

Study on the Transfer Mechanism and Settlement of Long Piles in Different Strata

Qiu Rendong¹ Sun Yibin² Shi Yucheng³

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

2. Henan Provincial Academy of Building Research, Zhengzhou 450053, Henan, China;

3. Lanzhou Institute of Seismology, CEA, Lanzhou 730000, Gansu, China;)

【Abstract】 Based on the static tests' results of long piles in different strata, some conclusions about the load transfer mechanism and settlement of long piles under vertical loads are drawn. The settlement behavior of long piles in hard soil ground are similar to the super-long piles in soft soil ground. The value of elastic compression of pile shaft are at a high proportion of the pile settlement, it should be considered in the settlement calculation. The ultimate capacity of end resistance and lateral resistance are not occurred in the same time under vertical loads. The ultimate capacity of lateral resistance are not occurred in the same time in different layers for a pile. We discussed the applicability of the ultimate bearing capacity formula of the Technical Code. At last, the authors point that the transfer mechanism and settlement of long piles' group foundation should be further studied. And some important references for the theoretical research and technical application of super long piles are provided.

【Key words】 long pile; elastic compression of pile shaft; ultimate bearing capacity

0 引言

竖向荷载下的短桩、中长桩桩基的沉降变形机理和沉降计算研究较为成熟,对独立长桩和超长桩的受力特性和沉降变形虽有研究,但长群桩的受力变形性状的研究远远不够。工程设计为减少沉降片面追求压缩模量很高的桩端持力层,将桩打入过深,既不经济也不合理。静力试桩结果表明,长桩和超长桩桩端的荷载很小,桩身压缩占桩基沉降的比率较大^[1-3],但常规的桩基沉降计算模式(小桩距)是假定附加荷载作用于桩端以下

压缩层来计算压缩量^[4],不考虑荷载实际传递特性和桩身压缩;为使沉降计算接近于实际,往往采用经验系数进行调整。对于桩侧土模量较高的非软土地区的独立长桩静力试桩所测得的结果表明,荷载传递和桩身压缩与上述软土地区的超长桩性状相似(桩长 $L > 50$ m 且长径比 $L/D \geq 50$ 的桩为超长桩),本文标题中统称为长桩。本文通过不同场地条件下4根长桩的试桩资料的分析来阐述其受力性状,并对相关的几个问题进行了探讨。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878200)

作者简介:秋仁东,1981年生,男,满族,辽宁大连人,博士研究生,主要从事基础工程与桩基础的研究工作。E-mail:qiurend@

163.com

1 试桩概述

1.1 非软土地区试桩

实验场地的地层情况见表1。中央电视台新址位于北京中央商务区(CBD)规划范围内,占地面积总计18.7万m²,总建筑面积约55万m²。工程最高建筑高度234m,建筑面积38万m²。主体部分由两座斜塔、空中悬臂及塔间裙房组成^[5]。

表1 场地地层信息表

CCTV				天津工程			
地层 编号	地层 名称	层底 深度/m	层厚 /m	地层 编号	地层 名称	层底 深度/m	层厚 /m
④	粉土	4.80	4.80	① ₁	杂填土	2.60	2.60
⑤ ₁	细砂	9.50	4.70	⑥ ₁	粉质 粘土	28.10	25.50
⑤ ₂	卵石	15.10	5.60	⑦ ₁	粉土	32.40	4.30
⑥	粉质 粘土	21.50	6.40	⑦ ₂	粉砂	36.70	4.30
⑦	卵石	26.20	4.70	⑦ ₄	粉质 粘土	50.90	14.2
⑧	粉质 粘土	31.80	5.60	⑧ ₁	粉质 粘土	68.40	17.50
⑨	细砂	33.90	2.10	⑨ ₁	粉质 粘土	76.00	7.60
⑩	粉土	39.73	39.73	⑩ ₁	粉质 粘土	82.70	6.70
⑪	粉质 粘土	45.47	5.74	⑩ ₂	粉土	92.40	9.70

表2 CCTV试桩参数表(非软土地区试桩)

编号	桩径/mm	有效桩长/m	实际桩长/m	试验类型	混凝土设计强度	主筋类型	试验最大加载/kN
S1	1200	33.40	33.40	抗压桩	水下C40		33000
S2	1200	51.70	51.70	抗压桩	水下C40		33000

1.2 软土地区试桩

实验场地的地层情况见表1。天津某工程由110多层塔楼、37层靠山楼以及2层裙房楼组成,其下设置四层地下室,建筑高度近600m,总建筑面积112万m²。基础采用 ϕ 1000mm的钻孔灌注桩。天

表3 天津试桩参数表(软土地区试桩)

编号	桩径/mm	有效桩长/m	实际桩长/m	试验类型	混凝土设计强度	主筋类型	试验最大加载/kN
S1	1000	76	101.1	抗压桩	水下C50	HRB400	42000
S2	1000	95.5	120.6	抗压桩	水下C50	HRB400	42000

续表

CCTV				天津工程			
地层 编号	地层 名称	层底 深度/m	层厚 /m	地层 编号	地层 名称	层底 深度/m	层厚 /m
⑫	圆砾 卵石	52.18	6.71	⑩ ₃	粉砂	98.40	6.0
				⑩ ₄	粉质 粘土	100.50	2.1
				⑪ ₁	粉质 粘土	111.40	10.9
				⑪ ₂	粉质 粘土	120.00	8.6

本工程主楼基础采用 ϕ 1200mm的钻孔灌注桩,桩端持力层拟定了两个方案,分别设置于第⑨层和第⑫层。⑨层厚度较小,砂层中夹有不同厚度的粘性土与粉土透镜体,且层下有约15m厚以粘性土、粉土为主的⑩、⑪层,将其作为桩端持力层需作进一步桩基的变形验算,但桩长短、造价低、采用桩侧桩端后注浆技术可以提高承载力并减小变形。⑫层卵石层、砂层累计厚度11~15m,将其作为桩端持力层,对沉降控制有利,但桩较长,造价高,而且由于桩基施工要穿过多层承压水和砂土、碎石土与粘土的交互层,保证成桩质量将是一个主控因素。试验桩工程目的之一是通过静载试验对主楼基础桩设计的两个桩型方案进行比选。CCTV-S1桩端持力层为⑨层(桩长为33.40m);CCTV-S2桩端持力层为⑫层(桩长为51.70m)。均采用后注浆处理工艺,预计单桩承载力极限值均不低于30000kN,见表2。

津-S1桩端持力层位于⑩层(桩长 \approx 101.1m);天津-S2桩端持力层位于⑫层(桩长 \approx 120.6m)。为了更加真实准确的反应桩身的承载力,试验桩对 -26.5 m以上的非摩擦段采用护筒设计,均采用后注浆处理工艺,试验最大荷载为42000kN或压至破坏,见表3。

2 试桩在竖向荷载作用下变形性状

2.1 非软土地区试桩(CCTV)

1)从图1可以看出,CCTV的两根试桩 $Q-s$ 曲线呈缓变型,分别加载到 33000kN 时,没有出现明显的向下转折段,也没有出现第二拐点,没有达到极限状态。

2)桩端的沉降伴随着桩顶沉降的增加而增大,桩端的沉降与桩顶部荷载的大小大致呈线性,而桩顶的沉降与桩顶的荷载呈非线性关系。桩端的初始沉降均出现于加载至一定量级时,与桩端反力的出现同步。

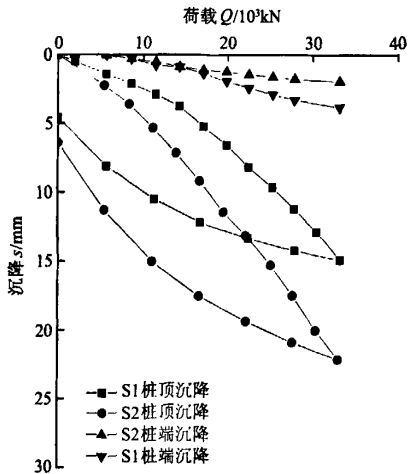


图1 CCTV 试桩荷载-沉降曲线

3)加载到 33 000 kN 时,CCTV—S1 试桩(桩长为 33.40 m)的桩顶沉降为 14.50 mm,桩端沉降为 3.79 mm;CCTV—S2 试桩(桩长为 51.70 m)的桩顶沉降为 21.78 mm,桩端沉降为 1.98 mm。结果表明,CCTV—S1、CCTV—S2 试桩虽然桩长差异较大,但在同等荷载下的桩顶变形差别不大,承载能力均能达到预估值,作者暂认为是因为桩身较长桩身质量较难保证、弹性压缩量较大所致。(见表4)

2.2 软土地区试桩(天津)

1)从图2可以看出,天津工程的试桩 $Q-s$ 曲线

同样呈缓变型,分别加载到 42 000 kN 时,没有出现明显的向下转折段,也没有出现第二拐点,没有达到极限状态。其单桩竖向抗压极限承载力实测值均不小于 42 000 kN。

2)桩端的沉降伴随着桩顶沉降的增加而增大,桩端的沉降与桩顶部荷载的大小大致呈线性,而桩顶的沉降与桩顶的荷载呈非线性关系。桩端的初始沉降均出现于加载至一定量级时,与桩端反力的出现同步,这是由于起始加载阶段桩顶荷载由桩侧阻力承担所致,即桩端初始阶段无反力,当桩端出线反力(又由于桩侧阻力的向下传递的作用),即桩端开始沉降。

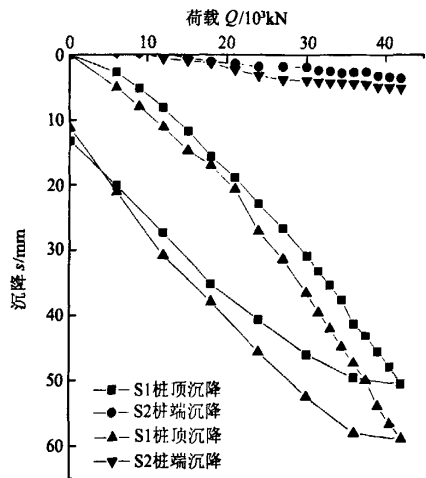


图2 天津工程试桩荷载-沉降曲线

3)加载到 42 000 kN 时,天津—S1 试桩(桩长为 101.1 m)的桩顶沉降为 50.54 mm,桩端沉降为 3.62 mm;天津—S2 试桩(桩长为 120.6 m)的桩顶沉降为 58.92 mm,桩端沉降为 5.16 mm。结果同样表明,虽然桩长差异较大,持力层选择不同,但在同等荷载下的桩顶变形差别不大,承载能力均不小于 42 000 kN。(见表5)

表4 CCTV 试桩桩端荷载、桩身压缩实测结果^[6]

桩号	桩长/m	持力层	桩顶荷载 Q /kN	桩顶沉降 s /mm	桩端荷载 Q_b /kN	桩端荷载比 Q_b/Q	桩端沉降 s_b /mm	桩身压缩 s_c /mm	桩身压缩沉降比 s_c/s
CCTV-S1	33.40	细中砂	33000	14.50	1567	4.7%	3.79	10.72	0.74
CCTV-S2	51.70	砂卵石	33000	21.78	940	2.8%	1.98	19.8	0.91

表5 天津试桩桩端荷载、桩身压缩实测结果

桩号	桩长/m	持力层	桩顶荷载 Q /kN	桩顶沉降 s /mm	桩端荷载 Q_b /kN	桩端荷载比 Q_b/Q	桩端沉降 s_b /mm	桩身压缩 s_c /mm	桩身压缩沉降比 s_c/s
天津-S1	≈101.1	粉质粘土	42000	50.54 mm	362	0.009	3.62	46.92	0.93
天津-S2	≈120.6	粉质粘土	42000	58.92 mm	176	0.0042	5.16	53.76	0.91

3 从实测的数据剖析沉降变形性状

如前所述,长桩基础桩顶沉降的很大一部分是由桩身混凝土弹性压缩所贡献的,长桩基础的弹性压缩所致沉降量不容忽视。

1) 桩顶在荷载较小的情况下,桩端没有沉降。从图 3、图 4 中可以知道,在较小的加载条件下,桩端没有产生端阻,上部的荷载都由桩的侧阻力来承担。随着上部荷载的增大,侧阻逐渐发挥,此时端部出现端阻,从而产生桩端沉降。即在小荷载条件下,桩身上部的侧阻先行发挥,此时的桩顶沉降都是桩身的弹性压缩。

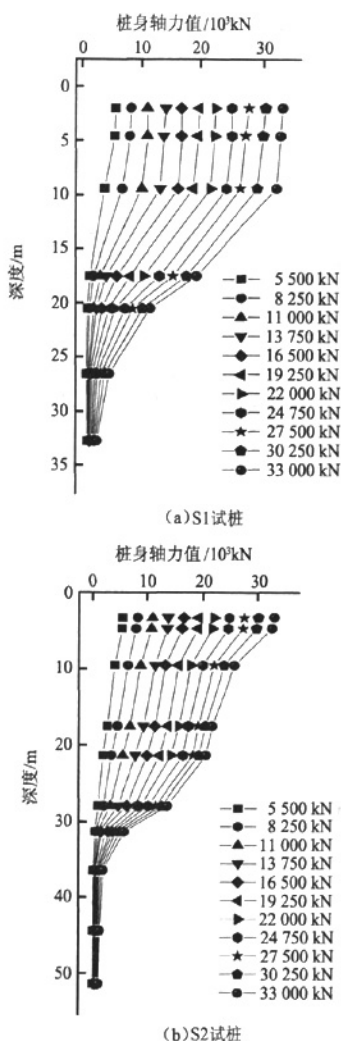


图 3 CCTV 试桩各级荷载下桩身轴力

2) 桩顶在高荷载水平下,桩端产生沉降,但占桩顶沉降份额较小。从图 3、图 4 中可以看到,随着荷载水平的提高,侧阻阻力逐渐发挥的同时,端阻也逐渐增大,桩端沉降随荷载水平增加而增大。

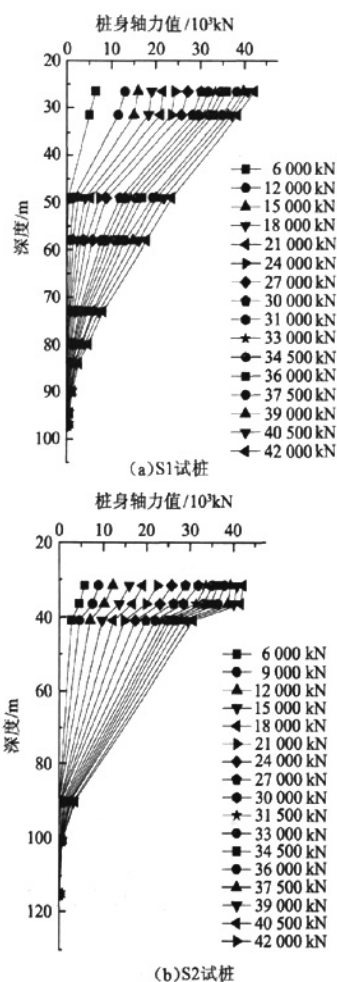


图 4 天津工程试桩各级荷载下桩身轴力

3) CCTV、天津工程的试桩沉降曲线可知,CCTV—S1 试桩(桩长为 33.40 m)、天津—S1 试桩(桩长为 101.1 m)的桩顶沉降都小于 CCTV—S2 试桩(桩长为 51.70 m)、天津—S2 试桩(桩长为 120.6 m)的桩顶沉降。即长桩型的装顶沉降值要大于较短桩型。从轴力图可知,较短的桩型能够激发桩身下部较高的桩侧阻力和桩端阻力。从工程施工角度来说,较短桩型的方案周期短,施工质量更易得到保证。

4) 对于桩侧土模量较高的非软土地区的长桩静力试桩所测得的结果表明,荷载传递和桩身压缩与软土地区和超长桩性状相似。桩身的弹性压缩是桩顶沉降的主要部分。

4 讨论

1) 独立短桩在竖向荷载作用下,其顶部沉降与端部沉降可以认为是一致的。大量的长桩试桩表

明,长桩顶部的沉降与端部沉降是不一致的,桩身压缩量占桩顶沉降的比例相当可观。短群桩相关的研究表明^[7]:在小荷载下桩身下部的桩侧阻力先行发挥,而与单桩的荷载传递特性恰恰相反。

长桩的试桩资料表明,无论是在低压缩性土层中还是在高压缩性的土层中,桩身上部的侧阻力都先行发挥。加载至设计的极限荷载水平上,桩身下部的侧阻发挥的很少,甚至不发挥。而对于长群桩基础而言,其竖向荷载下的群桩变形性状及沉降计算有待进一步的研究。

2)《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中的大直径桩竖向承载力极限值的计算公式明确了单桩承载力由桩侧及桩端阻组成,即:

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk} = u \sum \psi_{si} q_{sik} l_i + \psi_p q_{pk} A_p \quad (1)$$

当桩侧阻及桩端阻都充分激发的情况下, $Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{pk}$ 公式成立。试桩过程中,随着桩顶荷载的增大,试桩与周边土体的相对变形逐步增大,变形到达一定的程度时,桩身的侧阻便达到了极限状态。这种极限状态是自桩顶到桩端按土层分步渐进完成的。桩的侧阻存在软化现象^[8-10],而不同土层的极限侧阻也需要不同的桩土相对位移,即对于长桩、超长桩而言,桩的侧阻很难同时达到侧阻的极限状态。同样可以知道,桩的极限侧阻 Q_{sk} 和极限端阻 Q_{pk} 也很难同步。前面所述的桩身内力测试结果也证实,当桩上部侧阻力发挥到较高水平时,桩底部的侧阻力和端阻力都基本未发挥。对于 $Q-s$ 曲线为缓变形特点的大直径长桩,若将侧阻与端阻均考虑为极限状态,按公式计算单桩极限承载力,可能是欠妥当的。作者认为采用现场原位试验确定桩基承载力是最为可靠的方法,对工程桩进行静载试验以检测验证承载力是否满足设计要求也是必不可少的。

5 结论

1)从天津工程的试桩的轴力结果可以看到,软土地层中120m的超长桩的侧阻力的发挥远没有100m长桩的充分,即靠增加桩长来提高承载力并

不是一个科学合理的方法。

2)静力试桩结果表明,长桩和超长桩桩端的荷载很小,桩身压缩占桩基沉降的比率较大。对于桩侧土模量较高的非软土地区的长桩静力试桩所测得的结果表明,荷载传递和桩身压缩与软土地区长桩和超长桩性状相似。

3)极限侧阻力与端阻力不同步发挥,不同深度处的不同土层处基桩的侧阻也不能同步发挥。桩基承载力的公式用于长桩、超长桩基础的极限承载力的计算有所不妥。

参 考 文 献

- [1] 阳吉宝,钟正雄.超长桩的荷载传递机理[J].岩土工程学报,1998,20(6):108-112.
- [2] 张忠苗,辛公锋,夏唐代.深厚软土非嵌岩超长桩受力性状实验研究[J].土木工程学报,2004,37(4):64-69.
- [3] 朱向荣,方鹏飞,黄洪勉.深厚软基超长桩工程性状试验研究[J].岩土工程学报,2003,25(1):76-79.
- [4] 中国建筑科学研究院. JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [5] 邹东峰,钟东波,徐寒. CCTV 新址主楼 $\phi 1200$ mm 钻孔灌注桩承载特性研究[C]//桩基工程技术进展.北京:知识产权出版社,2005:90-96.
- [6] 刘金砺,邱明兵.单桩、单排桩、疏桩基础及其复合桩基的沉降计算[J].土木工程学报,2007,40(增):152-158.
- [7] 刘金砺,黄强,李华,等.竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算[J].岩土工程学报,1995,17(6):1-13.
- [8] 辛公锋.大直径超长桩侧阻软化实验与理论研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [9] 辛公锋.竖向受荷超长桩承载变形机理与侧阻软化研究[D].杭州:浙江大学,2003.
- [10] 张帆,龚维明,戴国亮.大直径超长灌注桩荷载传递机理的自平衡试验研究[J].岩土工程学报,2006,28(4):464-469.

收稿日期:2010-04-13