

黄土中扩底长桩的竖向承载性状分析

赵楠,刘忠玉

(郑州大学土木工程学院,河南 郑州 450002)

摘 要 :对置于黄土层中并支承在粉质黏土层的人工挖孔扩底长桩进行了现场静载试验,量测了每级荷载作用下桩顶沉降 s 和桩底沉降 s_b ,据此分析了扩底长桩的竖向承载性状.指出扩底长桩的受力机理明显不同于扩底短桩,与置于黄土层的扩底超长桩承载性状基本相同,其极限承载力以侧阻力为主,具有显著的端承摩擦桩的特点.另外,试验数据表明,浸水对湿陷性黄土的桩侧摩阻力会产生很大的影响.
关键词 :湿陷性黄土;人工挖孔扩底长桩;静载试验;竖向承载性状;侧阻力
中图分类号 :TU 473.1 **文献标识码 :**A

0 引言

扩底桩以其承载力高,造价低廉,施工速度快的特点,得到广泛的应用和长足的发展.扩底桩由最初的人工挖孔发展到机械挖扩孔,桩身长度由长度小于等于 6 m 的扩底墩,发展到 10 m 左右的扩底桩和桩长在 20 m 以上的扩底长桩,桩身剖面形式也从原始的只扩大桩底,发展到沿桩身有多个扩径的竹节桩、支盘桩.实际上,爆破桩、支盘桩、夯扩桩也是扩底桩的发展和变化形式,不同的是它们增加了对扩径处土体的挤密、压实作用.

扩底桩桩长的增加、剖面形式的变化,会改变摩阻力与端阻力的比例及其发挥顺序,也必将改变其受力特性和荷载传递方式.常见的支承于良好持力层的扩底墩($L \approx 6$ m)或扩底桩(< 10 m)的荷载-沉降($Q-s$)曲线为缓变型,没有明显的极限荷载点^[1,2],属摩擦端承桩或端承桩;置于黄土层中的扩底超长桩($L \approx 40$ m,先浸水后加载试验)荷载-沉降($Q-s$)曲线为陡降型的“刺入”式破坏^[3],属端承摩擦桩,与桩长约为 10 m 但桩端土层承载力偏低的扩底桩^[4]的承载性状较为相似,但是,对于桩长介于上述两者之间的扩底长桩受力特性分析鲜见报道.

因此,本文就置于黄土层中并支承在粉质黏土层的扩底长桩做了静载试验,讨论分析了其承载特性和扩底长桩与扩底墩在受力机理上的差别.

1 静载试验概况

1.1 试验场地概况

试验场地位于豫西黄河北岸的黄河 II 级阶地,揭露地层为第四系冲洪积形成的 Q_4 黄土状黏性土层,地下水为潜水型,埋深约 35 m.地基土分层:①层:素填土;②层:黄土状粉质黏土,可塑~硬塑;③层:黄土状粉质黏土,硬塑;④层:黄土状粉质黏土,含少量礞石,硬塑;⑤层:粉质黏土,硬塑;⑥-1 层:粉质黏土,硬塑;⑥-2 层:粉质黏土,硬塑,局部坚硬;②-④层具 II 级自重湿陷性.试桩位置处的地基土物理力学指标见表 1.

1.2 试桩设置及测试内容、成果

试桩为相邻 4 m 的人工挖孔扩底混凝土灌注桩 2 根,桩径 0.8 m,扩底直径 1.6 m,桩长 23.0 m.桩顶位于地表,桩端入⑥-1 粉质黏土层 2.0 m;其中 2# 试桩桩周布置 16 m 深的浸水孔若干个,浸泡 7 d 后开始静载试验.

试验测试内容为桩顶沉降、桩底沉降和桩身结构完整性.桩底沉降的测量是在混凝土桩施工时,预先沿桩身钢筋笼内侧对称埋设 $\Phi 50$ mm 无缝钢管(在桩底处将管端部密封)作为桩底沉降通道,在试验时将沉降管($\Phi 25$ mm 钢管)插入桩底沉降通道中,利用沉降管将桩底沉降引至桩顶进行测量,桩底的沉降就表现为沉降管的沉降^[5],见图 1.还可以利用桩底沉降通道对桩身混凝土做超声透射法检测.

表 1 地基土物理力学指标

Tab.1 Soil parameters											
层号	层底/m	层厚/m	w/%	e	s_r /%	W_l /%	W_p /%	a_{1-2}/MPa^{-1}	E_{s1-2}/MPa	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$
①	2.8	2.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—
②	4.0	1.2	16.6	0.89	50	27.8	15.7	0.37	5.1	27	28.3
③	5.2	1.2	15.5	0.71	60	30.3	16.9	0.095	24.4	—	—
④	16.1	9.9	11.1	1.05	29	29.0	17.6	0.30	29.5	48.4	24.3
⑤-1	19.0	2.9	14.9	0.62	65	28.6	17.5	—	32.4	106	30.6
⑤-2	21.0	2.0	17.6	0.62	77	29.9	17.8	—	8.5	69	25.2
⑥-1	27.7	6.7	19.5	0.61	86	29.4	17.4	—	22.3	97	28.8
⑥-2	>36.0	>8.3	18.9	—	—	29.4	17.0	—	—	—	—

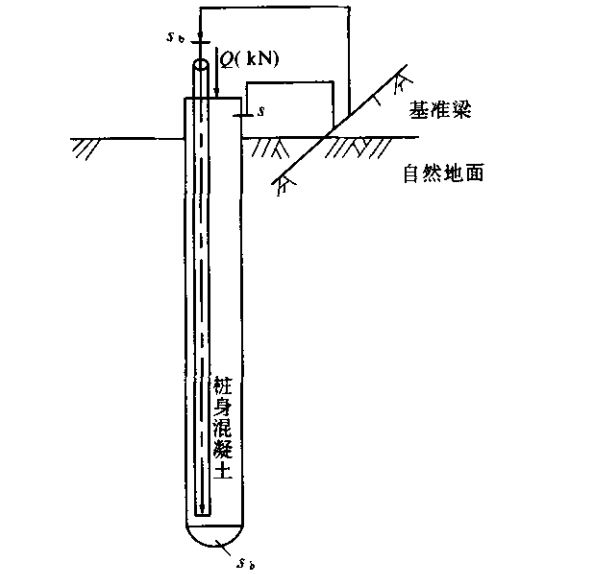


图 1 桩顶和桩底沉降测量装置示意图
Fig.1 Equipment for measured settlement of pile top and pile bottom

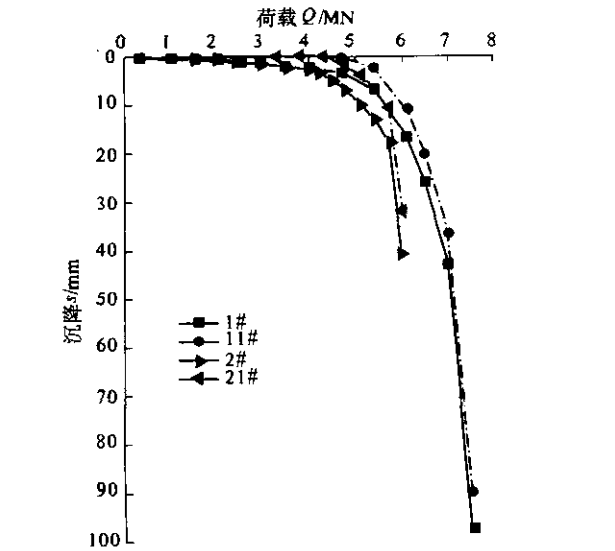


图 2 $Q-s, Q-s_b$ 曲线
Fig.2 $Q-s, Q-s_b$ curves

本次两根试验桩的超声透射法检测结果表明桩身结构完整性良好,混凝土密实度均匀。

静载试验得出的荷载-桩顶(桩底)沉降(Q

$-s, Q-s_b$)曲线见图 2,其中 1#、2# 曲线为两试桩的 $Q-s$ 曲线,11# 和 21# 曲线为两试桩的 $Q-s_b$ 曲线;桩底出现位移后的桩顶荷载 Q 与桩身压缩 $s_c(Q-s_c)$ 曲线及桩底沉降 $s_b(Q-s_b)$ 曲线见图 3,其中 12#、22# 曲线为两试桩的 $Q-s_c$ 曲线,11# 和 21# 曲线为两试桩的 $Q-s_b$ 曲线。部分荷载与桩顶、桩底沉降数据摘录于表 2 和表 3。

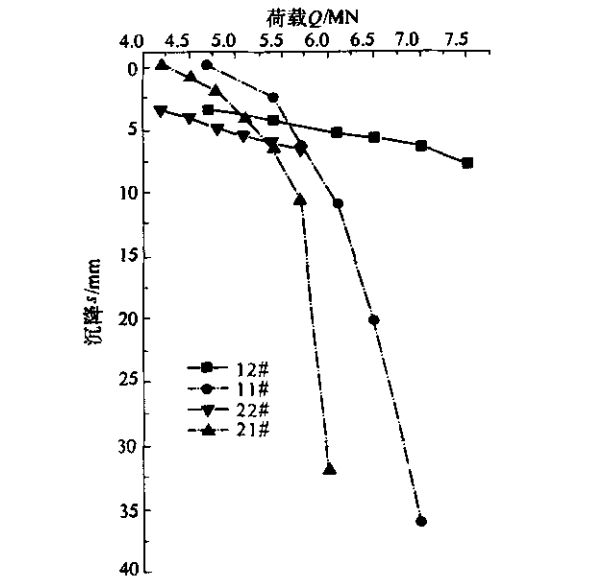


图 3 $Q-s_c, Q-s_b$ 曲线
Fig.3 $Q-s_c, Q-s_b$ curves

2 静载试验成果分析

2.1 扩底长桩的承载特性

据相关的研究资料,扩底桩的端承力随桩端直径的增大而减小^[6],在取值上应该予以折减^[7]。一般常见的扩底桩的荷载-沉降($Q-s$)曲线为缓变型,比例界限点不明显或对应的荷载值很小,没有明显的极限荷载点^[12],众多的极限承载力判定准则都是以沉降量控制^[67],相关规范对大直径桩更是作出了取 3%~6%^[7]和 5%^[8]桩端直径对应的荷载为极限承载力的规定。在正常使用荷载下,扩底墩的沉降较大,桩侧摩阻力已经得到

充分的发挥,桩端阻力也得到了一定程度的利用.

表 2 1# 试桩部分试验结果

Tab.2 Some test results of Pile 1

1# 试桩	2 h 稳定	2 h 稳定	2 h 稳定	3.5 h 稳定	4 h 稳定	8.5 h 稳定	14 h 未稳
桩顶荷载 Q/kN	4 000	4 700	5 400	6 100	6 500	7 000	7 500
桩顶沉降 s/mm	2.65	3.56	6.94	16.53	26.03	42.55	96.7
桩底沉降 s_b/mm	0	0.07	2.57	10.99	20.25	36.14	88.85
桩顶沉降比 $(s/D)\%$	0.2	0.2	0.4	1.0	1.6	2.7	6.0
桩底沉降比 $(s_b/D)\%$	0.0	0.0	0.2	0.7	1.3	2.3	5.6

表 3 2# 试桩部分试验结果

Tab.3 Some test results of Pile 2

2# 浸水试验	2 h 稳定	2 h 稳定	3 h 稳定	4 h 稳定	5 h 稳定	5 h 稳定	24 h 未稳
桩顶荷载 Q/kN	4 200	4 500	4 800	5 100	5 400	5 700	6 000
桩顶沉降 s/mm	3.58	5.02	7.12	9.63	12.77	17.37	40.58
桩底沉降 s_b/mm	0	0.84	2.31	3.97	6.64	10.65	32.13
桩顶沉降比 $(s/D)\%$	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.1	2.5
桩底沉降比 $(s_b/D)\%$	0.0	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	2.0

由图 2 可以看出,试验的两根扩底长桩 $Q-s$ 曲线形态和趋势相同,即都可以明显地分为三段:直线段(比例界限段)、弯曲段和陡降段.在比例界限荷载作用下,扩底长桩的侧摩阻力还没有得到充分的发挥,桩端阻力几乎没有得到利用.试桩在正常使用荷载下对应的桩顶沉降小于 3 mm(从图 2 可以明显看出桩底还未发生位移),明显小于比例界限值.当桩顶荷载超过极限荷载的 75% 以上时,桩端阻力才得以发挥, $Q-s$ 曲线进入弯曲段.在极限荷载作用下,桩呈现“渐进式刺入”破坏模式,此时的 $Q-s$ 曲线均表现为近似陡降型.两桩的 $Q-s$ 曲线和承载性状与置于黄土层的扩底超长桩($L\approx 40\text{ m}$,正常使用荷载值对应的桩顶沉降在 3~4 mm 左右)基本相似^[3],尤以 2# 试桩更为相近.

图 2 还表明,两桩的比例界限 4 700 kN 和 4 200 kN 所对应的桩底沉降 s_b 几乎都为零,所以扩底长桩 $Q-s$ 曲线的比例界限点具有明确的物理意义,即桩底刚发生微量沉降.另外,自比例界限到极限承载力的荷载增量幅度不大,两桩分别为 2 300 kN 和 1 500 kN,之后均发生不停滞的下沉,明显不同于扩底短桩缓变型的 $Q-s$ 曲线.极限承载力状态下的桩顶沉降与扩底直径比 (s/D) 分别为 2.7% 和 1.1%,远小于规范规定 3%~6% 或 5% 的取值量.结合文献[3]中关于扩底超长桩的试验结果,表明扩底长桩和扩底超长桩的极限承载力取值不能采用规范推荐的方法.

2.2 扩底长桩的桩侧摩阻力

在比例界限点上,由于桩端位移为零,所以比例界限荷载 Q_c 数据包括桩侧摩阻力,而两桩的比

例界限荷载 Q_c 与极限承载力 Q_u 的比值都较大,分别为 0.67 和 0.74.表明扩底长桩的承载力性状是以摩擦为主,应属端承摩擦桩.在桩顶荷载小于比例界限荷载 Q_c 时,由于桩端阻力为零,所以两桩的桩顶荷载即等于桩侧摩阻力.从图 3 的桩底沉降曲线可以明显看出,天然状态下黄土的桩侧摩阻力值大于浸水饱和状态下的摩阻力值.另外,由图 3 的桩身压缩曲线可以看出,同等荷载作用下的桩身压缩量是 2# 较大,表明 2# 桩身承受的平均轴力大于 1# 桩,也可以说明 2# 桩侧受到的阻力较小.

另外,注意到桩端土是饱和的粉质黏土,因此 2# 桩侧土的注水浸泡对其桩底土层的饱和度影响不大,可以认为桩端土层条件不变.因此在相同的桩端沉降时,两桩的桩端阻力可认为是相等的,那么此时两桩的桩顶荷载的差值就等于两桩侧摩阻力的差值.由图 2、图 3 可知,在比例界限点处两桩对应的荷载差值为 500 kN,在桩端位移为 10.6 mm 时两桩对应的荷载差值为 400 kN 左右,而当桩端位移为 32 mm 时,两桩对应的荷载差值急剧增大到约 1 000 kN.所以,浸水对湿陷性黄土的桩侧阻力的大小及其变化规律有很大的影响.

2.3 扩底长桩的桩端阻力

本次试验的两根扩底长桩在极限承载力作用下的桩端沉降变形不大: s_b/D 仅为 0.023 和 0.007,即 1# 桩的桩底沉降比为 2# 试桩桩底沉降比的 3 倍,均远不及扩底墩端阻力充分发挥所需的沉降比,说明扩底长桩的端阻力发挥与扩底墩的端阻力发挥有着明显的差别.尤其是浸水的 2# 试桩,在桩底沉降不大的情况下,出现了沉降

长时间难以达到稳定状态、发生“渐进式刺入”破坏的现象,表明浸水饱和黄土中扩底长桩的桩端阻力比天然状态下黄土中的桩端阻力更难以得到充分的发挥.这一现象可以通过摩阻力与端阻力的协调工作原理作初步解释.

摩阻力与端阻力的协调工作情况与摩阻力的传递函数模式密切相关.桩周土摩阻力的发挥只需较小的位移量,而桩端承载力的发挥则需要较大的位移量.若摩阻力的传递函数为线性强化型弹性(加工硬化)模式,随着位移的增加桩侧摩阻力继续增大(或维持不变),桩端承受的荷载增量不会大于桩顶的荷载增量,这有利于桩端承载力的发挥;若摩阻力与位移的关系曲线是在线性增长达峰值后逐渐降低(加工软化)的模式,在达到峰值点后,桩侧摩阻力将随着位移的增加逐渐变小,则桩端承受的荷载增量将大于桩顶的荷载增量,桩端必须以较大的位移为代价才能产生较大的端阻力,而大端阻需要大位移,大位移降低的摩阻力又需要以增大端阻力来平衡,如此循环的阻力重分配方式,就会在荷载增量不变的情况下使桩顶沉降出现长时间难以达到稳定的现象,发生“渐进式刺入”破坏.

3 结论

(1)扩底长桩静载试验 $Q - s$ 曲线上比例界限点明显,并具有明确的物理意义,即比例界限点对应于桩端发生微量沉降时的桩顶荷载.扩底长桩的正常使用荷载值明显小于比例界限值.

(2)扩底长桩的承载力特性明显区别于扩底

短桩的受力特性,而与扩底超长桩的承载性状基本相同,类似于直身超长桩的承载力性状.

(3)扩底长桩的承载力以摩擦力为主,具有显著的端承摩擦桩的特点, $Q - s$ 曲线近似于陡降型,不适用相关规范规定的按沉降量确定扩底桩极限承载力的取值方法.

(4)浸水对湿陷性黄土的桩侧阻力和桩侧阻力传递函数会产生显著的影响.

(5)对扩底长桩的荷载传递机理、侧阻力传递函数以及侧阻力与端阻力协调工作模式等问题,有待进一步的试验研究和探讨.

参考文献:

[1] 温特科恩 H F,方晓阳主编.钱鸿缙,叶书麟译校.基础工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1983. 825 ~ 829.

[2] 《桩基工程手册》编写委员会.桩基工程手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1995. 63 ~ 64.

[3] 李大展,滕延京,何颐华,等.湿陷性黄土中大直径扩底桩垂直承载性状的试验研究[J].岩土工程学报,1994,16(2):11 ~ 21.

[4] 王志玲,李明,李民生.人工挖孔扩底桩的承载力试验研究[J].郑州工业大学学报,1998,19(3):58 ~ 61.

[5] 任光勇,张忠苗.一种既观测桩顶又观测桩端沉降的多参数静载荷试验方法[J].岩石力学与工程学报,2004,23(3):510 ~ 513.

[6] 黄强.大直径扩底桩承载力及变形计算[J].建筑结构学报,1994,15(1):67 ~ 77.

[7] JGJ 94 - 94.建筑桩基技术规范[S].

[8] JGJ 106 - 2003.建筑基桩检测技术规范[S].

Vertical Bearing Behavior of Manually Excavated Belled Long Pile in Loess

ZHAO Nan , LIU Zhong - yu

(School of Civil Engineering , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002 , China)

Abstract : The vertical bearing behavior of manually excavated belled long pile penetrating through the upper loess layer and ended in the saturated silty clay layer is studied by means of measuring the settlements on the top and tip of pile in the field static load tests. It is illustrated that the vertical bearing behavior of belled long pile is distinguished from that of belled short pile , and similar to that of belled supper - long pile embedded in loess layer , that is , the former belongs to the kind of end - bearing friction pile because its ultimate bearing capacity is predominated by its skin friction. In addition , it proves that the influence of the immersion on the skin friction of pile in the collapsible loess layer is remarkable.

Key words : collapsible loess ; manually excavated belled long pile ; static load test ; vertical bearing behavior ; skin