

软土地区超长灌注桩竖向承载性能实测研究

徐先坤, 水伟厚, 陈国栋

(现代建筑设计集团上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040)

摘要: 结合上海某软土地区的超长灌注桩试桩检测结果研究了超长灌注桩的竖向极限承载力、桩端及桩身变形特性、桩端阻力及桩侧摩阻力变化规律等性能, 首次提出: ①在超长灌注桩施工中须采用人工造浆以保证桩基成孔质量; ②在竖向压力作用下, 超长灌注桩桩身压缩量占总沉降量的94%, 桩端沉降量占总沉降量的6%, 桩身压缩量计算时桩身压缩系数取值应小于0.5; ③超长灌注桩在上拔力作用下桩身变形量占总变形量的95%, 桩端变形量仅占总变形量的5%, 桩身上拔变形计算时桩身压缩系数可取0.75~1.0; ④浅层土体侧摩阻力随荷载增加基本没有变化, 深层土体侧摩阻力随荷载增加逐渐增大至稳定值; ⑤当桩端位移小于2 mm时, 端阻力-桩端位移曲线基本呈线性变化, 当桩端位移大于2 mm时, 端阻力急剧增加。这对于软土地区超长灌注桩的设计施工具有借鉴意义, 对进一步研究桩基荷载传递机理具有重要价值。

关键词: 超长灌注桩; 极限承载力; 侧摩阻力; 端阻力

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S2-0502-06

作者简介: 徐先坤(1983-), 男, 山东青岛人, 硕士, 工程师, 主要从事地基处理设计、检测、监测、咨询等方面的工作。E-mail: xiankun_xu@xd-ad.com.cn。

Vertical bearing capacity of super-long bored piles in soft soil area

XU Xian-kun, SHUI Wei-hou, CHEN Guo-dong

(Xian Dai Architectural Design Group Shanghai Shenyuan Geotechnical Engineering Co, Ltd, Shanghai 200040, China)

Abstract: Through the analysis of the results of super-long bored testing piles in soft soil area in Shanghai, the properties of the ultimate bearing capacity, the deformation characters of the pile tip and pile body, the change laws of side friction and tip resistance are investigated. The followings are proposed: (1) the construction of super-long bored pile should take the way of artificial drilling fluid to guarantee the quality of bored hole; (2) under the vertical pressure, the self-compression of super-long bored pile is 94% of the total settlement, and the self-compression coefficient is less than 0.5; (3) under the uplift force, the self-deformation of super-long bored pile is 95% of the total deformation, and the self-deformation coefficient is between 0.5 and 1.0; (4) the side friction of shallow layer soil keeps constant under the increasing loads, but that of deep layer soil increases to constant value; (5) the curve of tip resistance-displacement is linear varied when the tip displacement is less than 2 mm, which is rapidly changes when the tip displacement is more than 2 mm. This research is useful for the design and construction of the super-long bored piles in soft soil area. Also, it has important significance for further studies on load transfer laws of foundation piles.

Key words: super-long bored pile; ultimate bearing capacity; side friction; tip resistance

0 引言

工程中一般把桩长 $l > 50$ m 或长径比 $l/d > 100$ 的灌注桩定义为超长灌注桩。随着高层建筑和大跨度桥梁建设中基础所受荷载越来越大, 超长灌注桩的应用日益广泛。但是, 由于超长灌注桩的受力机理比普通灌注桩更加复杂, 目前关于超长灌注桩的理论研究远落后于工程实际应用, 其承载性能、荷载传递规律等方面多采用一般的桩基理论进行分析, 存在很多问题

[1-5]: ①一般桩基理论对于极限承载力的计算往往是建立在桩侧摩阻力和桩端阻力同时达到极限状态的假定之上, 而实际上, 超长桩的侧阻远先于端阻发挥, 且端阻往往难以达到极限; ②一般的桩基理论并没有考虑长径比对竖向承载力的影响, 通常认为桩长越长、

基金项目: 国家建设部科研攻关基金资助项目 (04-2-016); 上海市科技启明星资助项目 (08QB14026)

收稿日期: 2011-08-28

桩径越大,承载力越高,但大量试验研究表明,桩身长径比对超长桩桩端阻力的发挥及桩基破坏模式影响较大,超长桩可能发生端阻力并未完全发挥而桩身已发生压曲破坏的现象;③一般桩基理论认为桩侧摩阻力和桩端摩阻力的发挥与桩-土体系的相对变形有关,与变形值大小无关,但实际工程中超长桩的总沉降量对桩身竖向承载力起着重要的控制作用。

本文结合上海地区某办公塔楼及附属裙楼的试桩检测结果,进一步研究了软土地区超长灌注桩的承载性能,为软土地区超长灌注桩的理论分析和工程应用提供参考。

1 研究概况

1.1 工程概况

拟建办公塔楼高 322 m,地上 67 层,地下 4 层,附属裙楼由一座 38 层、高 171.2 m 的西楼和一座 25 层、高 116.8 m 的东楼组成,拟建场地为古河道沉积区。

1.2 工程地质条件

根据勘察报告,本场地地层情况及钻孔灌注桩设计参数见表 1。

表 1 工程地质条件

Table 1 Geological conditions

层序	土层名称	标贯 N/击	静探 P_s /MPa	钻孔灌注桩 设计参数	
				f_s /kPa	f_p /kPa
① ₁	杂填土				
① ₂	灰-灰黑色浜填土				
②	灰黄色黏土		0.73	15	
③	灰色淤泥质粉质黏土		0.64	15 25	6 m 上 6 m 下
④	灰色淤泥质黏土		0.59	20	
⑤ ₁	灰色粉质黏土		1.06	35	
⑤ ₂	灰色粉砂夹粉质黏土	16.2	3.14	45	
⑤ ₃₋₁	灰色粉质黏土		1.68	45	
⑤ ₃₋₂	灰色黏质粉土夹粉质黏土	14.7	2.75	50	1000
⑤ ₄	暗绿色粉质黏土		2.16	55	
⑦	灰色粉砂	28.3	7.94	65	
⑧ ₁	灰色粉质黏土		2.21	50	900
⑧ ₂	灰色粉质黏土、粉砂互层	26.9	4.08	60	1700
⑨ ₁	灰色细砂	>50	22.71	95	3300
⑨ ₂₋₁	灰色含砾中粗砂	>50	33.11	100	3500
⑨ ₂₋₂	灰色细砂	>50			
⑩	灰色粉质黏土				

1.3 试桩概况

办公塔楼试桩采用 $\Phi 1000$ 钻孔灌注桩,共 4 根(STZ1-1~STZ1-4),桩长 85 m(有效桩长 61 m),

桩尖持力层为⑨₂₋₁,采取桩端后注浆工艺。附属裙楼试桩采用 $\Phi 700$ mm 钻孔灌注桩,共 14 根(STZ4-1~STZ4-10),桩长为 65 m(有效桩长 43m),桩尖持力层为⑧₂,采取桩侧后注浆工艺,其中 4 根试桩采用双套管工艺处理(STZ4-2、STZ1-5、STZ4-6、STZ4-8),将工程桩桩顶标高以上段土体与桩身隔离。

1.4 试桩检测方法

本次超长灌注桩竖向承载性能研究采用多种方法对试桩桩身完整性、单桩承载力、桩身侧摩阻力、端阻力、桩身变形等方面进行了测试,包括:①采用成孔检测、超声波、低应变、钻孔取芯方法得到实际桩长、桩径、桩身完整性、桩底沉渣及桩身强度等信息;②采用抗压静载试验、抗拔静载试验确定单桩抗压/抗拔极限承载力;③采用桩身内力测试法得到静载试验过程中桩身轴力分布情况及桩侧摩阻力、桩端摩阻力变化情况;④采用桩端及桩身变形测量法得到静载试验过程中桩身压缩变形量及桩端变形量。

2 检测结果分析

2.1 成孔检测、超声波、低应变、钻孔取芯检测结果

(1)由于地层中含有较多的黏性土、粉性土和砂土,为监测成孔施工过程中的孔壁稳定性,在试桩施工前进行了试成孔检测,发现原土造浆成孔的孔壁稳定性较差,在护壁泥浆中掺入一定量的膨润土后的孔壁稳定性明显提高,建议超长灌注桩施工中采用人工造浆以保证桩基成孔质量。14 根试桩成孔检测结果见表 2。

表 2 成孔检测结果汇总表

Table 2 Test results of pore-forming

试桩	孔径/mm				孔深/m		垂直度/%	沉渣/cm
	设计	最大	最小	平均	设计	实测		
STZ1-1	1000	1286	1000	1035	84.95	85.20	0.26	8
STZ1-2	1000	1236	1000	1028	84.95	85.12	0.23	6
STZ1-3	1000	1123	1000	1024	84.97	85.11	0.26	6
STZ1-4	1000	1176	1000	1027	84.97	85.15	0.23	7
STZ4-1	700	879	706	768	63.62	63.9	0.20	7
STZ4-2	700	788	700	734	63.56	63.80	0.17	6
STZ4-3	700	922	701	743	63.68	63.90	0.20	5
STZ4-4	700	893	700	735	63.69	63.86	0.18	8
STZ4-5	700	783	700	734	63.75	63.98	0.18	6
STZ4-6	700	885	701	764	63.68	63.84	0.21	7
STZ4-7	700	849	700	724	63.78	64.05	0.18	8
STZ4-8	700	797	704	756	63.84	64.02	0.17	8
STZ4-9	700	906	705	747	62.18	62.40	0.21	6
STZ4-10	700	879	704	758	62.03	62.30	0.21	6

(2)根据超声波、低应变检测结果,该 14 根试桩均为 I、II 类桩,桩身无明显缺陷。

(3)根据钻孔取芯结果,塔楼工程 4 根试桩取样率较完整、取样段均为柱状、端口吻合、连续性较好、胶结良好、骨料均匀、局部有蜂窝或气孔存在,混凝土试验强度达到规范要求。

根据以上检测结果可知,所有 14 根试桩桩身完

整、桩身强度、桩长、桩径符合规范及设计要求，其研究结果可代表正常工程桩承载性能。

2.2 抗压、抗拔静载试验结果

本工程共进行了 4 组抗压静载试验（STZ1-1～STZ1-4），10 组抗拔静载试验（STZ4-1～STZ4-10）。静载试验过程中对所有 14 根试桩进行了桩端及桩身变形测量。

（1）极限承载力计算值

a)塔楼工程 Φ1000 mm 钻孔灌注桩抗压承载力计算

根据《建筑桩基技术规范》中：

$$Q_{uk} = u \sum q_{sjk} l_j + u \sum \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + \beta_p q_{pk} A_p, \quad (1)$$

得到后注浆灌注桩的单桩抗压极限承载力标准值 Q_{uk} =21340 kN。

b) 裙楼工程 Φ700 mm 钻孔灌注桩抗拔承载力计算

根据《建筑桩基技术规范》中：

$$T_{uk} = \sum \gamma_i q_{sik} u_i l_i, \quad (2)$$

$$Q_{uk} = Q_{sk} + Q_{gsk} + Q_{gpk}$$
$$= u \sum q_{sjk} l_j + u \sum \beta_{si} q_{sik} l_{gi} + \beta_p q_{pk} A_p \quad (3)$$

公式 5.3.10，得到 STZ4-2、STZ1-5、STZ4-6、STZ4-8 共 4 根双套管施工的后注浆灌注桩的单桩抗拔极限承载力标准值 Q_{uk} =4314 kN。

其它 6 根未采用双套管施工的后注浆灌注桩的单桩抗拔极限承载力标准值 Q_{uk} =5293 kN。

（2）抗压静载试验结果分析

本次抗压静载试验原定最大加载量为 25000 kN，采用锚桩横梁反力装置。但由于加载过程中锚桩破坏，无法提供足够反力，SZT1-1、STZ1-2、STZ1-4 试桩并未加载到最大加载量，各试桩抗压静载试验的最大加载量、桩顶、桩身、桩端沉降量汇总表见表 3。

表 3 抗压静载试验结果汇总表

Table 3 Results of compressive static load tests

编号	最大加载量/kN	桩顶沉降/mm	桩身沉降/mm (-52 m)	桩端沉降/mm (-85 m)
STZ1-1	22000	31.65	5.16	1.89
STZ1-2	21000	27.75	4.24	1.61
STZ1-3	25000	39.94	6.29	2.37
STZ1-4	20000	30.29	3.68	1.38

图 1 为以 STZ1-3 桩端、桩身和桩顶的 $Q-s$ 曲线为例的抗压静载试验典型曲线，各 $Q-s$ 曲线均为缓变型，其桩顶最终沉降量较小。

按照《建筑基桩检测技术规范》，对于直径大于或等于 800 mm 的桩，可取 $s=0.05D=50$ mm 对应的荷载值为极限承载力，判定的各试桩抗压极限承载力见表 4。

根据《建筑基桩检测技术规范》，对于桩长大于 40 m 的超长桩，极限承载力判定时宜考虑桩身弹性压缩量。

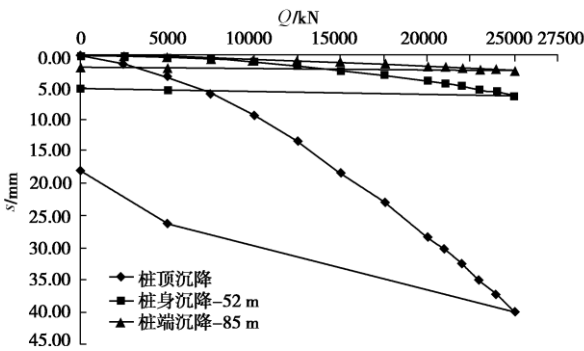


图 1 STZ1-3 试桩 $Q-s$ 曲线图

Fig. 1 $Q-s$ curves of pile STZ1-3

表 4 极限承载力实测值及理论值对比表

Table 4 Comparison between measured and theoretical values of ultimate bearing capacity

编号	实测值/kN	理论值/kN
STZ1-1	≥22000	21340
STZ1-2	≥21000	
STZ1-3	≥25000	
STZ1-4	≥20000	

根据《建筑桩基技术规范》，可以得到桩身压缩量计算值。根据沉降量观测结果（表 3），桩顶沉降量与桩端沉降量的差值即为桩身压缩量实测值。实测值与计算值对比表见表 5。

表 5 抗压静载试验沉降量统计表

Table 5 Settlements of compressive static load tests

编号	总沉降量		桩端沉降		桩身总压缩		
	实测值	比例	实测值	比例	实测值	比例	计算值
	/mm	%	/mm	%	/mm	%	/mm
STZ1-1	31.65	6.0	1.89	6.0	29.76	94.0	39.70
STZ1-2	27.75	5.8	1.61	5.8	26.14	94.2	37.90
STZ1-3	39.94	5.9	2.37	5.9	37.57	94.1	45.12
STZ1-4	30.29	4.6	1.38	4.6	28.91	95.4	36.09

根据表 5 可知：①超长灌注桩发生的大部分沉降量为桩体自身压缩量，桩身压缩量占总沉降量的 94% 左右。而桩端沉降量仅占总沉降量的 6% 左右；②根据计算得到的桩身压缩量比实测值偏大，实测值仅为计算值的 70%~80%，超长桩桩身压缩量计算时桩身压缩系数可取 <0.5 ；③本次抗拔静载试验最大加载量为 4800 kN，在该最大荷载作用下试桩上拔量达到稳定标准但未达到总变形量控制标准。

抗拔静载试验结果见表 6。

根据表 6 可知，在相同上拔荷载作用下，采用双套管施工的 4 根试桩（SZT4-6 除外，该试桩实测桩径

较大, 承载力偏高) 的上拔变形量明显比其它 6 根试桩大, 主要由于缺少有效桩长以上土体对桩的束缚作用。

表 6 抗拔静载试验结果汇总表

Table 6 Results of uplift static load tests

编号	最大加载量/kN	桩顶上拔量/mm	桩身变形/mm (-42 m)	桩端变形/mm (-65 m)
STZ4-1	4800	15.02	2.52	0.72
STZ4-2	4800	16.96	5.35	0.76
STZ4-3	4800	13.97	2.37	0.73
STZ4-4	4800	13.58	2.80	0.65
STZ4-5	4800	15.57	5.04	0.77
STZ4-6	4800	9.03	3.50	0.74
STZ4-7	4800	17.40	3.13	0.82
STZ4-8	4800	18.99	5.26	0.84
STZ4-9	4800	15.54	2.83	0.83
STZ4-10	4800	17.36	3.26	0.92

图 2 为以 STZ4-5 桩顶上拔、桩身上拔和桩端上拔 $Q-S$ 曲线为例的抗拔静载试验典型曲线, 所有 $Q-S$ 曲线均为缓变型, 可判定其抗拔极限承载力 ≥ 4800 kN。

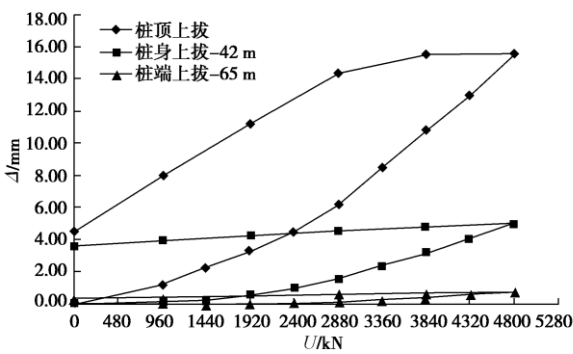


图 2 STZ4-5 试桩 $Q-s$ 曲线图

Fig. 2 $Q-s$ curves of pile STZ4-5

抗拔极限承载力实测值与计算值对比情况见表 7。可知, 双套管施工的 4 根试桩上拔极限承载力实测值大于计算值。

表 7 极限承载力实测值及计算值对比表

Table 7 Comparison between measured and theoretical values of ultimate bearing capacity

编号	实测值/kN	理论值/kN
双套管施工 4 根试桩	≥ 4800	4314
其它 6 根试桩	≥ 4800	5293

根据表 6, 桩顶上拔量与桩端变形量的差值即为桩身变形量。桩端变形量与桩身变形量对比情况见表 8。

根据表 8 可知: ①超长灌注桩在上拔力作用下发生的大部分上拔变形为桩体自身变形量, 桩身变形量

占总变形量的 95% 左右, 而桩端变形量仅占总变形量的 5% 左右; ②目前《建筑桩基技术规范》中并没有

表 8 抗拔静载试验沉降量统计表

Table 8 Settlements of uplifts static load tests

编号	总上拔量 实测值 /mm	桩端变形		桩身总变形		
		实测值 /mm	比例 /%	实测值 /mm	比例 /%	计算值 /mm
STZ4-1	15.02	0.72	4.8	14.30	95.2	13.52
STZ4-2	16.96	0.76	4.5	16.20	95.5	
STZ4-3	13.97	0.73	5.2	13.24	94.8	
STZ4-4	13.58	0.65	4.8	12.93	95.2	
STZ4-5	15.57	0.77	4.9	14.80	95.1	
STZ4-6	9.03	0.74	8.2	8.29	91.8	
STZ4-7	17.40	0.82	4.7	16.58	95.3	
STZ4-8	18.99	0.84	4.4	18.15	95.6	
STZ4-9	15.54	0.83	5.3	14.71	94.7	
STZ4-10	17.36	0.92	5.3	16.44	94.7	

关于上拔荷载作用下桩身变形的计算公式, 但按照桩身压缩变形公式, 通过计算可得到桩身上拔变形量为 13.52 mm, 与实测值相比明显偏低。建议利用公式进行计算时, 桩身压缩系数 ξ_c 可取 0.75~1.0, 即超长桩在上拔荷载作用下的桩身变形量可为

$$s_e = \xi_c \frac{Q_j l_j}{E_c A_{ps}} \quad (4)$$

式中, 桩身变形系数 ξ_c 取 0.75~1.0。

2.3 桩身内力测试结果

静载试验过程中, 对 STZ1-1~STZ1-4、STZ4-2、STZ1-5、STZ4-6、STZ4-8 共 8 根试桩进行了桩端及桩身内力测试。

(1) 抗压试桩内力测试结果

图 3 为静载试验加载过程中以 STZ1-3 试桩为例的典型桩身轴力-荷载变化曲线, 试桩桩身轴力随深度增加而减小, 随荷载增加而增大。

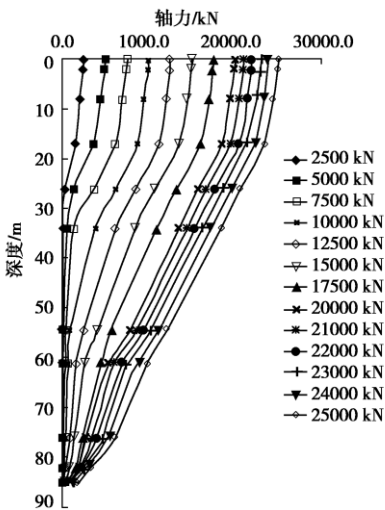


图 3 抗压试桩 STZ1-3 桩身轴力-荷载变化曲线

Fig. 3 Axial force-load curves of pile STZ1-3

图 4 为试桩 STZ1-1~STZ1-4 静载试验得到的以试桩 STZ1-3 为例的典型侧摩阻力-荷载变化曲线,

根据该曲线可得到以下结论:①第一级荷载(2500 kN)施加后,浅层土体(18 m 以上)的侧摩阻力立即发挥作用。随着荷载增加,其大小基本没有变化,可判定该浅层土体侧摩阻力已达到极限值;②深层土体(18 m 以下)侧摩阻力并非一个定值,而是随荷载增加逐渐增大至稳定值,即极限值;③基桩受力较小时,浅层土体提供大部分向上抗力。随着荷载增加,浅层土体提供抗力不变,增加的荷载由深层土体承担,深层土体承担的荷载占总荷载的比例越来越大。

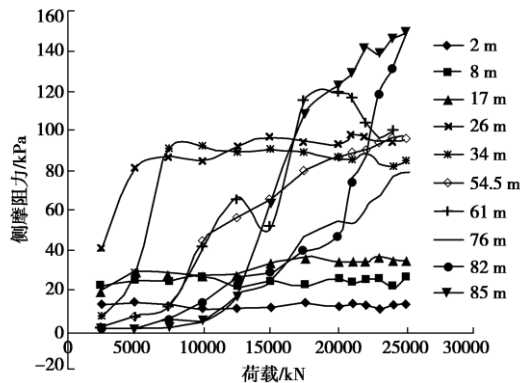


图 4 STZ1-3 侧摩阻力 - 荷载变化曲线

Fig. 4 Side friction-load curves of pile STZ1-3

图 5 为抗压试桩 STZ1-1~STZ1-4 在最大荷载作用下各点侧摩阻力 - 深度变化曲线。可以看出,虽然各试桩的最大加载量不同,但各试桩浅层土体侧摩阻力差异较小,基本达到极限承载力。而深层土体侧摩阻力差异较大,土体侧摩阻力并未完全发挥,故桩基并未达到抗压承载力极限状态。

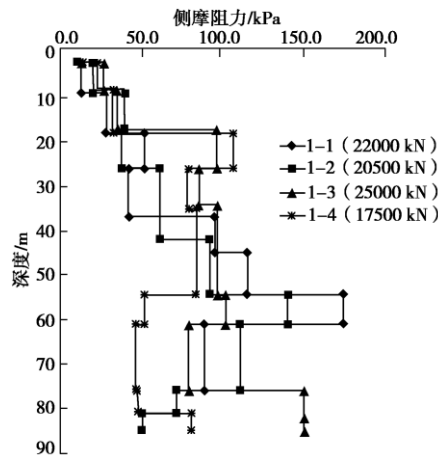


图 5 抗压试桩侧摩阻力 - 深度曲线

Fig. 5 Side friction-depth curves of compressive test piles

根据桩端内力测试结果(85 m 处),在 7500 kN 荷载施加以前,桩端受力为零,此时桩端并未开始发挥作用。随荷载增加,桩端力逐渐增大。在最大荷载(25000 kN)作用下,桩端仅承受 7.1% 的荷载。

根据桩端变形测量结果,桩端变形随荷载增加逐渐增大,最大位移为 2.37 mm。

根据桩端变形测量结果及桩端内力测试结果,可得到桩端阻力 - 桩端位移变化曲线(图 6)。可以看出,当桩端位移小于 2 mm 时,端阻力 - 桩端位移曲线基本为线性变化;当桩端位移大于 2 mm 时,端阻力急剧增加。

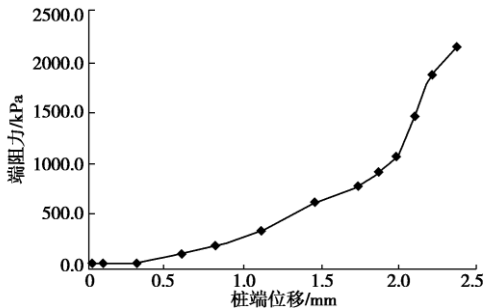


图 6 STZ1-3 端阻力 - 桩端位移变化曲线

Fig. 6 Tip resistance-displacement curves of pile STZ1-3

(2) 抗拔试桩内力测试结果

图 7 为抗拔静载试验加载过程中典型的桩身轴力 - 荷载变化曲线。可以看出,与抗压试桩桩身轴力 - 荷载变化曲线规律类似,桩身轴力随深度增加而减小,随荷载增加而增大。

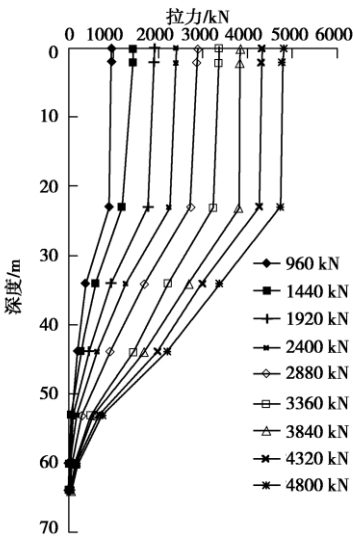


图 7 抗拔试桩 STZ4-6 桩身轴力 - 荷载变化曲线

Fig. 7 Axial force-load curves of pile STZ4-6

图 8 为抗拔试桩静载试验过程中得到的以 STZ4-6 为例的典型侧摩阻力 - 荷载变化曲线,根据该曲线可得到以下结论:①23 m 以上土体侧摩阻力较小,可忽略不计。由此可以看出,双套管法施工对桩 - 土隔离效果较好,试桩抗拔性能与工程桩相同;②23 m 以下土体侧摩阻力随荷载增加逐渐增大,各土层侧摩阻力 - 荷载曲线持续上升,但并未趋于稳定值。可见,土层侧摩阻力并未达到极限值,试桩抗拔性能并未完全发挥。根据规范判定的抗拔极限承载力 ≥ 4800 kN。

图 9 为抗拔试桩在最大荷载(4800 kN)作用下各

点侧摩阻力 - 深度变化曲线。从该图可以明显看出双套管施工的桩 - 土隔离效果。

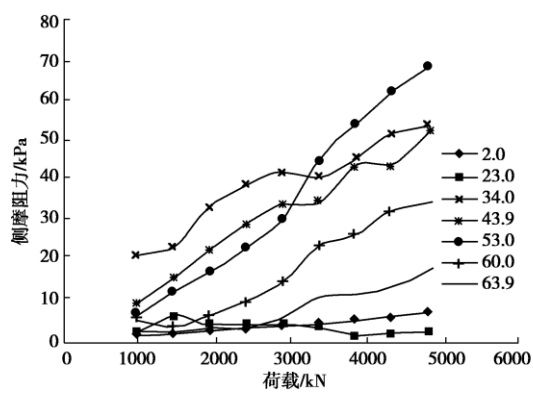


图 8 STZ4-6 侧摩阻力 - 荷载变化曲线
Fig. 8 Side friction-load curves of pile STZ4-6

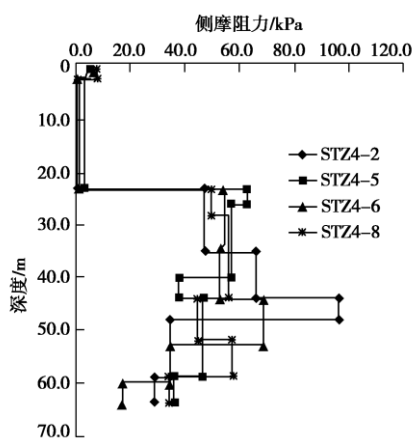


图 9 抗拔试桩侧摩阻力-深度曲线
Fig. 9 Side friction-depth curves of uplift test piles

3 结 论

综合该超长桩试桩检测结果,可以得到超长灌注桩在竖向荷载作用下具有以下特点:

- (1)根据规范计算得到桩基极限承载力理论值小于实测值,桩端阻力难以完全发挥。
- (2)在竖向荷载作用下,超长灌注桩发生的大部分变形量为桩体自身变形量。桩身变形量占总变形量的 95%左右,而桩端变形量仅占总变形量的 5%左右。
- (3)在竖向荷载作用下,根据规范计算得到的桩身变形量与实测值有一定差异,需要调整变形系数。
- (4)根据抗压静载试验可知,随着竖向压力增加,浅层土体侧摩阻力逐渐达到极限值,侧摩阻力向深度传递。深层土体侧摩阻力逐渐增大,其承担的荷载占总荷载的比例越来越大。
- (5)在竖向压力荷载作用下,超长桩桩端变形值为 1.4~2.4mm,端承力在总承载力中所占的比例仅为

7.1%,灌注桩设计中应考虑长径比对竖向承载性能的影响。

(6)根据抗拔试验结果可以看出,双套管施工区域的土体侧摩阻力基本为零,外套管有效保证了桩-土的隔离效果。

参考文献:

[1] 郭连盛. 软土地区超长灌注桩桩底后注浆效果研究[J]. 建筑, 2011, 11: 95 - 97.(GUO Lian-sheng.The research on effect of the pile-end post-grouting of super-long bored piled in soft soil area[J]. Architecture, 2011, 11: 95 - 97. (in Chinese))

[2] 董金荣, 林胜天, 戴一鸣. 大口径钻孔灌注桩荷载传递性状[J]. 岩土工程学报, 1994, 6(16): 123 - 131.(DONG Jin-rong, LIN Sheng-tian, DAI Yi-ming.The load tradfer behavior of large diameter cast-in situ pile in crushed pebble stratum[J]). Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 6(16): 123 - 131. (in Chinese))

[3] 赵明华, 邹新军, 刘齐建. 洞庭湖软土地区大直径超长灌注桩竖向承载力试验研究[J]. 土木工程学报, 2004, 10(37): 63 - 67. (ZHAO Ming-hua, ZOU Xin-jun, LIU Qi-jian. Experimental research on vertical bearing capacity of super-long bored piles in Dongting Lake soft area. Chinese Journal of Civil Engineering, 2004, 10(37): 63 - 67. (in Chinese))

[4] 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, 4(28): 464 - 469.(ZHANG Fan, GONG Wei-ming, DAI Guo-liang. Experimental research on the load transfer mechanism of super-long large diameter bored pile with the self-balanced load test method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 4(8): 464 - 469. (in Chinese))

[5] 唐胡乐. 超长灌注桩桩身压缩量对单桩抗压静载结果的影响[J]. 岩土工程界, 2005, 12(8): 29 - 30. (TANG Hu-le. The effect of self-deformation of super-long bored piles to compressive static load test[J].The field of Geotechnical Engineering, 2005, 12(8): 29 - 30. (in Chinese))

[6] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundations[J]. 2008. (in Chinese))

[7] JGJ 106—2003 建筑基桩检测技术规范[S]. 2003. (JGJ 106—2003 Technical code for testing of building foundation piles[S]. 2003. (in Chinese))