

DOI: 10.11779/CJGE201607022

# 基于极限载荷试验的扩底抗拔桩承载变形特性的分析

王卫东, 吴江斌, 王向军

(华东建筑设计研究总院地基基础与地下工程设计研究中心, 上海 200002)

**摘要:**结合天津于家堡南、北地下车库项目开展了2组各3根扩底抗拔桩的极限承载力试验,其中一组试桩有效桩长19 m,另一组试桩有效桩长30 m,试桩均加载至极限破坏状态。载荷试验过程中,两组试桩均对桩顶、有效桩长桩顶以及桩端位置进行了位移测试;其中有效桩长为19 m的试桩还开展了桩身轴力测试。对2组试桩成果从荷载位移曲线、桩身轴力分布、桩侧摩阻力分布规律等方面进行了分析。结合有限元数值模拟分析表明,扩底抗拔桩的承载力由等截面段桩侧摩阻力与扩大头抗力共同组成,首先由等截面段桩土侧摩阻力提供抗拔力;当上拔荷载进一步增大后,扩大头开始逐渐发挥作用,并且扩大头抗力占总承载力的比例逐步上升。极限状态下,有效桩长为19, 30 m的试桩,扩大头提供的抗力占总抗拔承载力的比例分别约为50%和35%。扩大头的存在对于等截面段桩侧摩阻力的发挥影响较小。扩大头受周边土体法向力的竖向分量是扩大头抗力的主要组成部分,极限状态下,其可占扩大头抗力的70%左右。

**关键词:**扩底抗拔桩; 承载变形特性; 极限载荷试验

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2016)07-1330-09

**作者简介:**王卫东(1969-),男,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为深基坑工程设计理论与方法、高层建筑地基基础工程。E-mail: weidong\_wang@ecadi.com。

## Ultimate load tests on bearing and deformation behavior of uplift piles with enlarged base

WANG Wei-dong, WU Jiang-bin, WANG Xiang-jun

(Department of Underground Structure & Geotechnical Engineering, East China Architecture Design & Research Institute Co., Ltd.,  
Shanghai 200002, China)

**Abstract:** A series of ultimate loading tests on two types of uplift piles with an enlarged base with effective pile lengths of 19 m and 30 m are carried out. For each type, three test piles are loaded to failure. The deformations of the test piles at the top and toe are continuously monitored throughout the tests. For the 19 m-long piles, the axial force of pile shaft is measured as well. Load-displacement curves, distribution of axial force of pile shaft and shaft resistance are investigated. The monitoring data and numerical analysis results show that the uplift capacity of uplift piles with an enlarged base is composed of shaft resistance of the uniform section and uplift resistance of the under-reamed part. When a pile is pulled up, the shaft resistance of the uniform section works firstly, subsequently followed by the uplift resistance of the under-reamed part. At the ultimate state, the uplift resistance provided by the under-reamed part accounts for about 50% and 35% of the total uplift capacity for the 19 m-long and 30 m-long piles. It is also found that the influence of the under-reamed base on the development of shaft resistance is not significant. The uplift resistance of the under-reamed base mainly comes from the vertical component of the normal force of the soil around the base, which takes a proportion of approximately 70% at the ultimate state.

**Key words:** uplift pile with enlarged base; bearing and deformation behavior; ultimate load test

## 0 引言

扩底抗拔桩以其良好的抗拔承载能力在工程项目中得到越来越多的应用,笔者参与设计的杭州波浪文化城和上海虹桥综合交通枢纽等深大地下工程项目中均采用了扩底抗拔桩,相比于常规等截面抗拔桩,经济效益显著。当前对扩底抗拔桩的研究以有限元数值模拟<sup>[1]</sup>、室内模型试验<sup>[2]</sup>和现场足尺试验<sup>[3]</sup>为主。其中

尤以现场足尺试验工程实用价值最高,试验结果可直接指导工程设计,判定扩底抗拔桩的适用性。扩底抗拔桩现场足尺试验案例并不少<sup>[3-7]</sup>,然而试桩试验加载至极限破坏状态的案例不多。试桩不能加载至极限破坏状态,则试桩实测数据无法直观体现扩大头的抗拔

基金项目:国家科技支撑计划课题(2012BAJ01B02)

收稿日期:2015-06-04

承载能力, 也就无法进一步对扩底抗拔桩全过程荷载传递规律有更深入的认识。

结合天津于家堡南、北地下车库项目开展了2组共6根扩底抗拔桩的极限承载力试验, 其中一组试桩有效桩长19 m, 另一组试桩有效桩长30 m。两组试桩均加载至极限破坏状态, 基于试桩试验成果, 以及有限元数值模拟方法, 对扩底抗拔桩的承载变形特性从荷载位移曲线、桩身轴力分布、桩侧摩阻力分布、桩身变形以及扩大头的承载力等方面进行了分析。

## 1 试桩试验概况

### 1.1 工程概况及地质条件

天津于家堡南、北地下车库项目位于天津滨海新区于家堡金融起步区, 基地面积均约 $2.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。均为纯地下结构, 整体设置4层地下室(局部区域仅2层地下室), 基础埋深约为16 m。岩土工程勘察报告揭示, 浅层地下水主要为潜水, 静止水位埋深0.20~1.50 m。场地埋深50 m范围内主要为淤泥质黏土、粉质黏土和粉砂, 地层情况见表1。场地地层分布较均匀, 地质剖面示意如图1所示。

表1 典型土层信息表

Table 1 Parameters of soils

土层	重度 $/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	固结快剪(峰值)		摩阻力(勘探建议值) $f_s/\text{kPa}$
		黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/^\circ$	
①a 素填土	18.0	—	22	—
①b 杂填土	18.0	—	22	—
③a 淤泥质黏土	17.5	6.1	5.2	22
③b 粉质黏土	19.2	11.2	16.4	35
③c 淤泥质黏土	18.0	8.1	6.3	25
③d 粉质黏土	19.1	11.5	14.1	38
③e 粉质黏土	20.2	8.3	21.3	48
⑤粉质黏土	20.3	16.0	19.3	52
⑥粉砂、粉土	20.4	9.3	30.2	70
⑦粉砂	20.2	8.0	31.0	78

### 1.2 试桩概况

如前所述, 背景工程为纯地下结构, 基础埋置深度达到16 m, 而地下水位埋深浅, 永久使用阶段, 地下结构的抗浮问题十分突出。经估算, 若设置常规等截面抗拔桩, 不仅桩数多, 且单桩长度较长, 工程造价较高。从经济性和环保性(减短桩长从而可以减少泥浆排放)角度考虑, 背景工程拟采用扩底抗拔桩。然而, 扩底抗拔桩在该地区并无工程应用先例, 有必要开展现场足尺试验, 以验证扩底抗拔桩在该地区地层条件下的适用性, 进而分析扩底抗拔桩的承载变形

特性。

背景工程普遍区域为地下4层结构, 局部区域为地下2层结构, 针对不同区域抗拔荷载的不同设计了两组试桩桩型, 各3根试桩。SBZ1A有效桩长为19 m, 适用于地下4层区域; SBZ1B有效桩长为30 m, 适用于地下2层区域。试桩尺寸见表2, 两种桩型等截面段桩径均为850 mm, 扩底直径均为1500 mm, 扩大头高度均为2.25 m。

表2 扩底抗拔桩试桩

Table 2 Parameters of test piles

桩型 (试桩编号)	桩径 /mm	扩底直 径/mm	桩长 /m	有效桩 长/m	扩大头 高度/m	扩展角 (°)
SBZ1A (#9, #11, #13)	850	1500	35.55	19	2.25	12.2
SBZ1B (#16, #18, #20)	850	1500	46.55	30	2.25	12.2

为了使试桩条件尽量与实际工程状态接近, 本次试桩试验采用双套管技术将地下室范围内的桩身与周边土体进行了隔离。如图1所示, 外套管内径为1050 mm, 内套管内径为950 mm, 壁厚皆为12 mm。为防止混凝土和注浆浆液沿内、外套管之间空隙上泛, 在外套管管底与内套管间的空隙采取封堵措施, 并保证试桩试验时内套管不受外套管的约束能自由滑动。

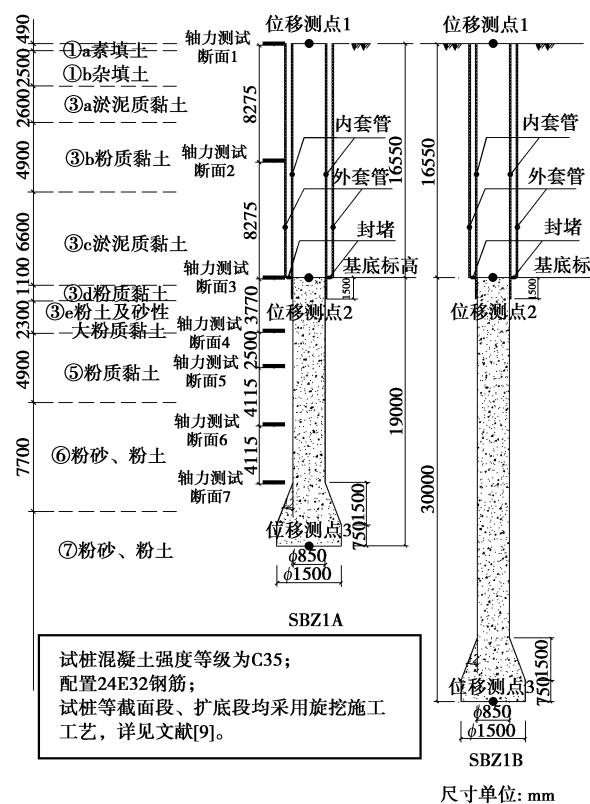


图1 抗拔试桩剖面图

Fig. 1 Profile of test piles



表 3 各试桩单桩竖向抗拔极限承载力试验结果

Table 3 Results of pile tests

桩号	最大试验荷载 /kN	桩顶上拔量 /mm	桩底上拔量 /mm	桩顶回弹量/mm	桩顶变形回弹率/%	单桩竖向抗拔极限承载力/kN	柱顶上拔量/mm	有效桩顶上拔量/mm	桩底上拔量 /mm	单桩竖向抗拔极限承载力平均值/kN
SBZ1A	#9	6500	94.57	90.94	8.33	6000	32.92	14.28	5.12	5666
	#11	6000	91.24	79.53	10.66	5500	29.75	13.38	4.19	
	#13	6000	83.72	75.11	14.80	5500	32.60	25.77	6.27	
SBZ1B	#16	7200	83.58	78.43	19.83	23.7	6600	25.47	11.49	2.18
	#18	7800	105.71	100.51	21.44	20.3	7200	42.11	15.37	5.73
	#20	7200	87.45	84.84	23.7	27.1	6400	19.50	12.57	6733

试桩试验中, SBZ1A、SBZ1B 均进行了桩顶、工程桩桩顶及桩端位置处的位移测试, SBZ1A 还进行了 7 个典型断面处的桩身轴力测试。测点位置详见图 1。

## 2 试桩试验结果及分析

### 2.1 试桩试验结果

本工程试桩开展竖向抗拔静载试验, 采用反力桩提供支座反力, 每根试桩设置 2 根反力桩。试验采用分级加载方式进行, 试验终止加载条件以及极限承载力确定原则满足 JGJ 106—2003《建筑基桩检测技术规范》的相关要求。具体到本次试桩试验, 终止条件为: 在某级荷载作用下, 桩顶上拔量大于前一级上拔荷载作用下的上拔量 5 倍。极限承载力确定原则: 根据上拔量随荷载变化的特征确定, 对陡变型荷载位移曲线, 取陡升起始点对应的极限承载力值。极限载荷试验结果详见表 3。各试桩的试验过程总体较为类似, 以试桩 SBZ1A-13 为例, 试验过程如下: 当桩顶荷载加荷至 5500 kN 时, 维持 3 h, 试桩上拔量达到稳定, 此时桩顶累计上拔量为 32.60 mm; 桩端累计上拔量为 4.42 mm, 当继续施加下一级荷载 6000 kN 时, 试桩上拔量骤然加大, 仅经过 30 min 维持时间, 桩顶累计上拔量达到 83.72 mm; 桩端累计上拔量达到 75.11 mm。表明此时试桩发生了整体向上的位移, 达到破坏状态, 终止加载。试验过程中外套管最大上拔量为 0.68 mm, 表明内外套管之间没有额外的约束力, 双套管有效发挥了隔离作用。根据试桩试验极限承载力的判别标准, 3 根 SBZ1A 试桩的极限抗拔承载力分别为 6000, 5500, 5500 kN, 扩底抗拔桩 SBZ1A 的单桩极限抗拔承载力平均值为 5666 kN。

SBZ1B 的试验过程也较为类似, 根据试桩试验极限承载力的判别标准, 3 根 SBZ1B 试桩的极限抗拔承载力分别为 6600, 7200, 6400 kN, 扩底抗拔桩 SBZ1B 的单桩极限承载力平均值为 6733 kN。

### 2.2 试桩试验结果的分析

本节根据表 3 中的测试内容, 对各试桩的荷载 -

位移曲线(桩顶、有效桩长桩顶以及桩端), 试桩 SBZ1A 的桩身轴力、桩侧摩阻力分布曲线等试验结果进行分析。

#### (1) 荷载位移曲线

图 2, 3 所示为各试桩荷载位移曲线, 每根试桩包括桩顶、有效桩长桩顶以及桩端 3 个位置的荷载位移曲线。

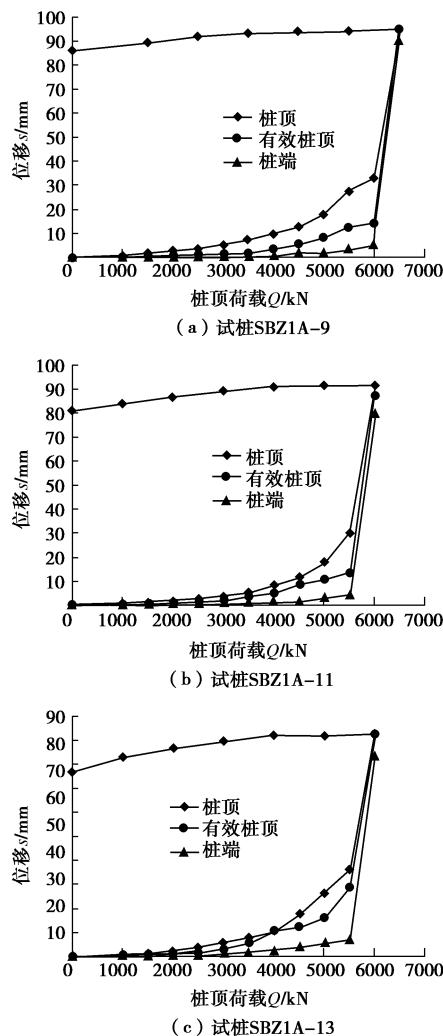


图 2 试桩 SBZ1A 荷载位移曲线

Fig. 2  $Q$ - $s$  curves of test pile SBZ1A

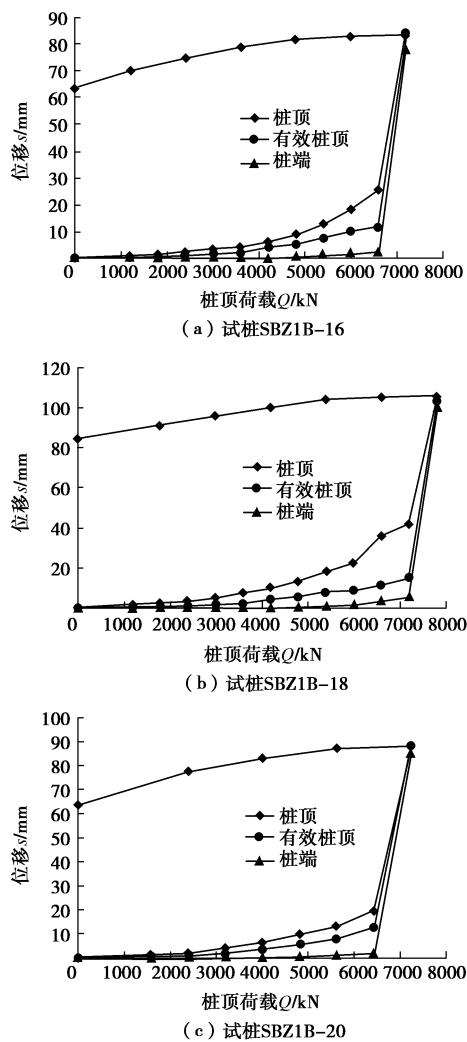


图3 试桩SBZ1B荷载位移曲线

Fig. 3  $Q-s$  curves of test pile SBZ1B

由图3可以看出,6根试桩的荷载位移曲线总体发展形态较为类似:在试桩荷载较小时,桩身各处的荷载位移曲线均呈“缓变”型;当加载至最后一级荷载时,荷载位移曲线发生突变,出现“陡升”现象。且在最后一级试桩荷载时,各试桩的桩顶、桩端同时发生了较大的上拔变形,表明试桩整体往上发生了较大的位移,达到极限破坏状态。

图4所示为两种桩型6根试桩柱顶荷载位移曲线的对比图。图上可以看出,当柱顶荷载较小时,SBZ1A和SBZ1B的荷载位移曲线基本一致。当试桩荷载逐渐增大后,两者荷载位移曲线出现一定的差别:在同等试桩荷载条件下,SBZ1B的桩顶变形量比SBZ1A的桩顶变形量稍小,也即相对来说,桩长越长,其抵抗变形的能力越强。从荷载位移曲线还可看出,3根SBZ1B试桩的极限抗拔承载力普遍比3根SBZ1A的极限抗拔承载力大,从表4可知,前者比后者大约18.8%。

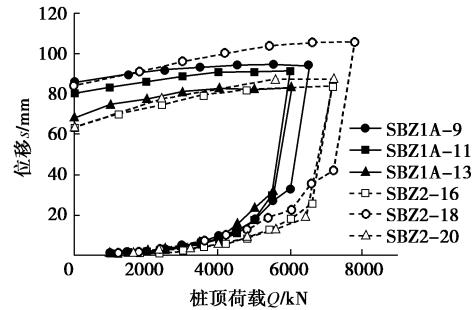


图4 两种桩型荷载位移曲线的对比

Fig. 4  $Q-s$  curves of test piles

## (2) 桩身轴力分布规律

如图1所示,3根试桩SBZ1A在桩身范围内设置了7个轴力测试断面。图5为每一级上拔荷载作用下,桩身各轴力测点的轴力分布曲线。

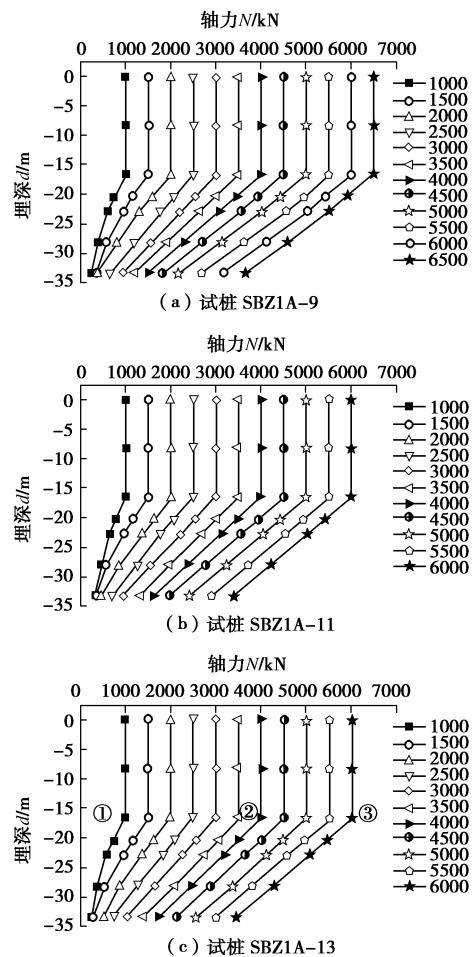


图5 各级荷载作用下的桩身轴力曲线

Fig. 5 Distribution of shaft axial forces of pile tests

由图5可以看出,3根试桩的桩身轴力曲线分布规律基本类似:由于双套管的隔离作用,在基础埋深范围内,各试桩的桩身轴力曲线呈竖直分布,表明双套管范围内,没有侧摩阻力,因而不存在桩身轴力的递减。以图5(c) SBZ1A-13的桩身轴力分布为例,

有效桩长范围内桩身轴力分布规律主要有如下 2 个特点。

a) 各级桩顶上拔荷载作用下, 桩身轴力大小沿着桩深均呈递减分布状态。桩侧摩阻力逐渐发挥抵抗上拔荷载作用是桩身轴力沿着桩深逐渐递减的原因。桩身轴力分布曲线斜率越大表明桩侧摩阻力发挥越充分。从不同桩顶荷载条件下的①、②、③三条桩身轴力曲线可以看出, 随着桩顶荷载的增大, 桩身轴力分布曲线的斜率在逐渐增大, 但增大的幅度越来越小。当桩顶荷载超过 4000 kN 后, 桩身轴力分布曲线基本呈平行分布, 曲线斜率的变化幅度可忽略, 表明此时桩侧摩阻力已经得到充分的发挥, 不再贡献更多的承载力。这从另一个角度说明此后桩顶上拔荷载的继续增加, 主要来自于扩大头的贡献。

b) 由抗拔桩的受力机理可知, 在各级上拔荷载作用下, 常规等截面抗拔桩靠近桩端区域的桩身轴力应处于较小的水平。而从图 5 可以看出, 扩底抗拔桩靠近桩端处(图 1 断面 7)的桩身轴力, 随着桩顶荷载的增大而增大, 且增幅较大。最后一级荷载条件下, 桩端处桩身轴力可占桩顶总荷载的 50%以上。这是由扩大头的存在所引起的, 详见后文分析。

### c) 桩侧摩阻力发挥特性

桩侧摩阻力大小可由两相邻轴力测点轴力差值与对应的侧表面积之比得到。图 6 为试桩 SBZ1A 在各级荷载作用下桩侧摩阻力的分布曲线。

由图 6 可以看出, 3 根试桩桩侧摩阻力分布形态、发展规律基本一致, 以试桩 SBZ1A-13(图 6(c))为例分析桩侧摩阻力的分布及发展规律。

a) 在双套管隔离段, 由于相邻测点的轴力基本一致, 反算得到侧摩阻力相当小, 基本可以忽略。

b) 在有效桩长范围内, 当桩顶荷载较小时, 浅部土层的侧摩阻力先于深部土层发挥, 如图 6(c)中的斜线①, 桩侧摩阻力呈“上大下小”的分布形态。

c) 随着桩顶荷载的增加, 深部土层桩侧摩阻力逐渐发挥出来, 有效桩长范围内桩侧摩阻力均有不同程度的增长, 且桩侧摩阻力的分布较为均匀, 如图 6(c)中的斜线②, 桩侧摩阻力大致呈“上下一致”的分布形态。

d) 当桩顶上拔荷载超过 5000 kN 后, 直至极限状态, 有效桩长范围内各土层侧摩阻力均有不同程度的增长, 但增长幅度逐渐减小, 如图 6(c)中的斜线③, 桩侧摩阻力呈“上小下大”的分布形态, 但是上下侧摩阻力在数值上的差异并不十分明显。

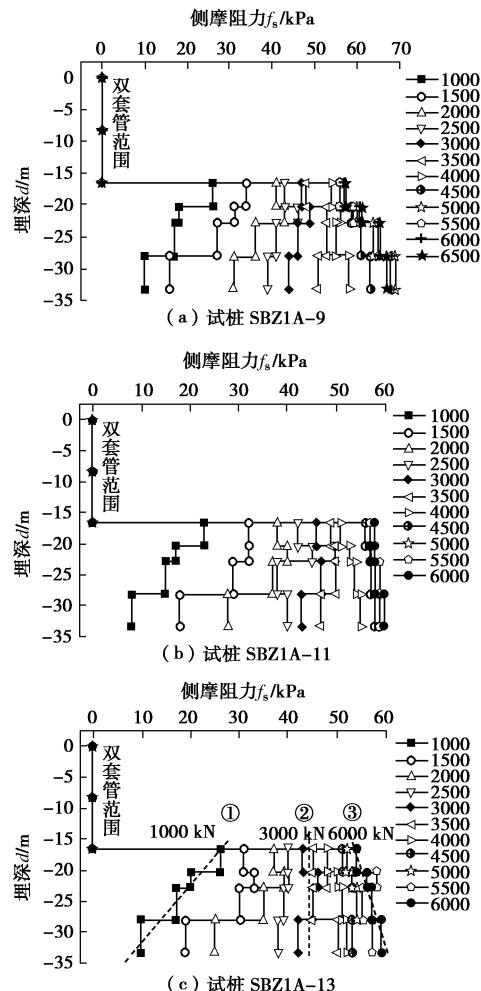


图 6 试桩桩侧摩阻力分布曲线

Fig. 6 Distribution of side resistances of test piles

极限状态下, 有效桩长范围内实测桩土侧摩阻力与勘察报告建议值的比较见表 4。可以看出, 实测值与建议值的比值  $\beta$  约为 0.86~1.17, 两者相差不大, 也即扩大头的存在对于等截面段桩侧摩阻力的发挥并无明显影响。

表 4 极限荷载下试桩桩侧摩阻力实测值与勘察建议值的比较

Table 4 Comparison between side resistances measured and code results

土层	SB1ZA-9	SB1ZA-11	SB1ZA-13	平均侧阻		
				值 /kPa	建议值 /kPa	力比值 $\beta$
⑥粉质黏土	57	58	54	56.3	48	1.17
⑦粉质黏土	61	57	56	58.0	52	1.12
⑧粉土 粉砂	65	58	57	60.0	70	0.86
⑨粉土 粉砂	67	60	59	62.0	70	0.89

表 5 极限状态下各试桩桩身伸长量

Table 5 Extensions of pile shaft at ultimate state

试桩	桩顶变形 /mm	工程桩桩顶变形 /mm	桩端变形 /mm	桩身总伸长量 /mm	双套管段		有效桩长段	
					伸长量/mm	占比/%	伸长量/mm	占比/%
SBZ1-#9	32.92	14.28	5.12	27.80	18.60	67	9.16	33
SBZ1-#11	29.75	13.38	4.19	25.60	16.40	64	9.19	36
SBZ1-#13	32.60	15.77	6.27	26.30	16.80	64	9.50	36
平均	31.76	14.48	5.19	26.57	17.27	65	9.29	35
SBZ2-#16	25.47	11.49	2.18	23.30	14.00	60	9.31	40
SBZ2-#18	42.11	15.37	5.73	36.40	26.70	75	9.64	25
SBZ2-#20	19.50	12.57	2.06	17.40	6.90	40	10.51	60
平均	29.00	13.14	3.32	25.70	15.87	58	9.82	42

#### (4) 桩身变形

桩顶的上拔变形由桩身伸长量和桩身的整体向上位移两部分组成, 而桩身伸长量则由双套管隔离段的桩身伸长量和有效桩长桩身伸长量两部分组成。各试桩的桩身变形曲线较为类似, 以试桩 SBZ1-9 及 SBZ2-18 为例, 如图 7 所示。

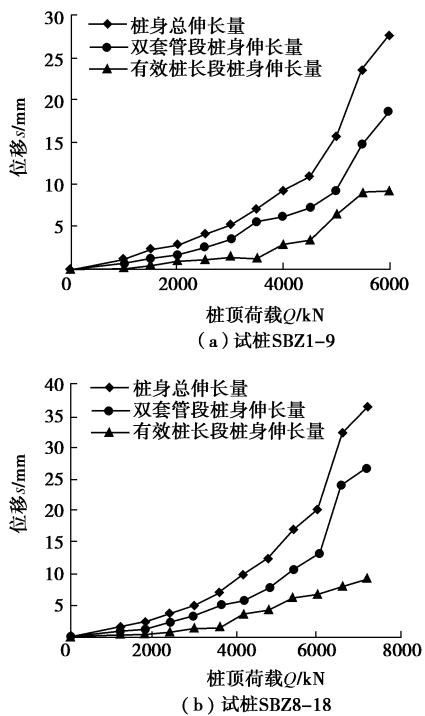


图 7 桩身伸长量

Fig. 7 Extension of test piles

图 7 可以看出, 随着桩顶上拔荷载的增加, 桩身各段的伸长量逐渐增加。极限状态下, 桩长为 19, 30 m 的试桩, 有效桩长段的桩身伸长量均约 10.0 mm。

各试桩桩身伸长量如表 5 所示, 极限状态下, 双套管段桩身伸长量可占桩身总伸长量的 60%, 而有效桩长范围内桩身伸长量约占桩身总伸长量的 40%。

工程桩的桩顶变形由有效桩长范围内桩身的伸长量和扩底抗拔桩的整体向上变形组成。极限状态下, 3

根有效桩长为 19 m 的扩底抗拔桩的工程桩桩顶变形平均值为 14.48 mm, 桩端变形平均值为 5.19 mm, 则有效桩长范围内桩身伸长量为 9.29 mm, 占工程桩桩顶总变形量的 65%; 扩底抗拔桩的整体变形即为桩端变形 5.19 mm, 占工程桩桩顶总变形量的 35.8%。同样的有效桩长为 30 m 时, 达到极限状态时桩端变形仅为 3.32 mm, 占工程桩桩顶总变形量的 25.2%。由于扩大头的存在, 受荷状态下, 其与桩周土体之间除侧向的摩阻力外, 还存在较高的法向压力, 使得桩身需要克服此压力才能发生变形。因此, 极限状态下, 扩底抗拔桩端处的变形均较小。

### 3 扩底抗拔桩的承载特性

笔者基于扩底抗拔桩的工程实践, 对其承载变形特性开展过一些研究分析工作<sup>[1-2, 4-5]</sup>, 包括扩底桩与等截面抗拔桩的对比、扩大头作用的数值模拟分析等等, 但这些研究均是基于未达到极限破坏状态的试桩试验数据, 存在一定的不足。本次试桩试验达到极限破坏状态, 通过对前文桩身轴力、桩侧摩阻力的进一步分析, 并结合笔者对背景工程试桩试验开展的数值模拟分析<sup>[8]</sup>, 可对扩底抗拔桩的荷载传递机理进行一般的总结。

如图 8 所示, 扩底抗拔桩的桩顶上拔荷载  $Q$ , 由等截面段桩侧摩阻力  $F_s$  和扩大头抗力  $P$  组成。扩底抗拔桩的特殊之处在于扩大头的存在, 从等截面段桩侧摩阻力  $F_s$  和扩大头抗力  $P$  的发挥特性, 以及扩大头的承载机理两个方面详述扩底抗拔桩的承载特性。

#### 3.1 等截面段侧阻与扩大头抗力的发挥特性

图 9 为试桩 SBZ1A-13 的桩顶上拔荷载  $Q$ 、等截面段桩侧摩阻力提供的抗拔承载力  $F_s$ , 以及扩大头抗力  $P$  与桩顶变形的关系曲线。

图上可以看出, 当桩顶变形小于 10 mm 时, 桩侧摩阻力  $F_s$  始终大于扩大头抗力  $P$ 。当桩顶变形大于 10 mm 后, 桩侧摩阻力提供的抗拔承载力  $F_s$  接近达到极

限状态，增长有限；而扩大头抗力  $P$  则随着桩顶变形的增加而增长迅速。表明当桩顶变形达到一定程度后（或桩顶荷载达到一定程度后），等截面段桩侧摩阻力已无法提供更高的抗拔承载力，主要依靠扩大头继续提供后续抗拔承载力。当桩顶变形大于 20 mm 后扩大头抗力  $P$  开始大于桩侧摩阻力  $F_s$ 。从前文分析可知，当扩大头的变形达到约 5.0 mm 后，扩大头的承载力亦达到极限状态。

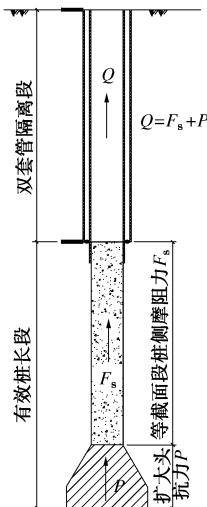


图 8 抗拔桩试桩受荷示意图

Fig. 8 Loading diagram of uplift pile with enlarged base

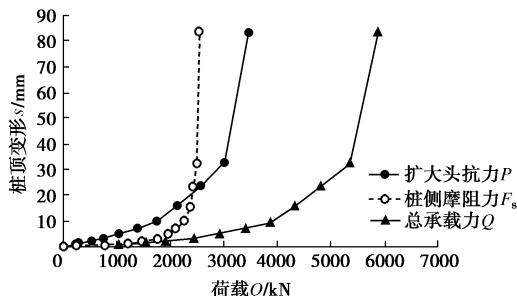


图 9 扩大头抗力与试桩荷载关系曲线

Fig. 9 Relationship between bearing of enlarged base and test load

图 10 为扩大头抗力  $P$ 、桩侧摩阻力  $F_s$  分别占试桩总荷载  $Q$  的比重与桩顶荷载的关系。图上可以看出，当桩顶荷载小于 2000 kN 时，等截面段桩侧摩阻力提供了近 80% 的抗拔承载力；随着桩顶荷载的增大，桩侧摩阻力提供的抗拔承载力占总承载力的比例不断下降，而扩大头提供的抗拔承载力占总承载力的比例则不断增大；当桩顶荷载大于 5500 kN 后，扩大头提供的抗力已经超过桩侧摩阻力所提供的抗力。

上述分析表明，扩底抗拔桩的抗拔承载力由等截面段桩侧摩阻力和扩大头抗力共同组成，但两者的发挥是一个异步的过程，首先由等截面段桩侧摩阻力发挥主要的抗拔作用，当上拔荷载达到一定程度后，扩大头抗力开始发挥作用，其承载潜力大；当桩侧摩阻

力达到极限状态后，扩大头可继续提供抗力。极限状态下，有效桩长为 19 m 的试桩，扩大头提供的抗力可占总抗拔承载力的 50% 以上。笔者采用有限元数值分析<sup>[8]</sup>可知，有效桩长为 30 m 的试桩，扩大头提供的抗力约占总承载力的 35%。

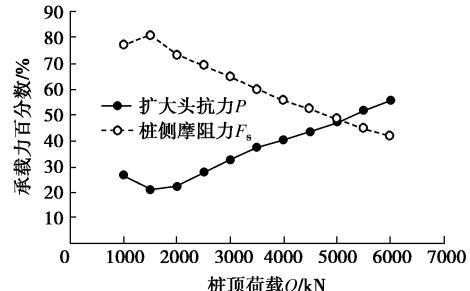


图 10 扩大头抗力、桩侧摩阻力占试桩荷载的比例

Fig. 10 Ratios of bearing of enlarged base and side resistance to test load

### 3.2 扩大头的承载特性

扩底抗拔桩的承载力由等截面段的桩侧摩阻力和扩大头抗力两部分组成。根据桩身受力机理，常规等截面抗拔桩桩端附近的桩身轴力应处于极小的水平。而从图 5 桩身轴力分布曲线可知，由于扩大头的存在，使得桩端附近存在较大的桩身轴力，且随着上拔荷载的不断增大，桩端轴力亦不断增大。图 11 所示为测点 7 位置处桩身轴力随上拔荷载而逐渐增大的曲线。

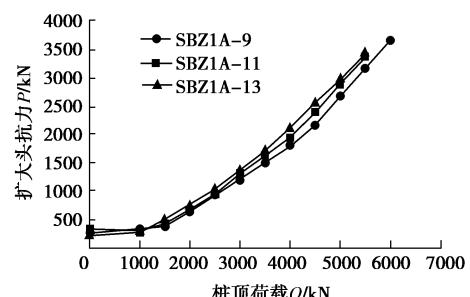


图 11 扩大头抗力与试桩荷载关系曲线

Fig. 11 Relationship between bearing capacity and test load

由于桩身轴力测点 7 位于等截面段与扩底段连接处，根据受力平衡原理，该测点的轴力大小即等于扩大头所提供的抗力大小。也即图 11 亦反映了扩大头抗力与试桩荷载的关系。图上可以看出在试桩荷载大于 2000 kN 以后，扩大头的抗力大小与试桩荷载大小呈线性增长趋势。

极限状态下，3 根试桩的扩大头抗力如表 6 所示，3 根试桩的扩大头抗力可占极限承载力的 50% 以上。

根据对 SBZ1-B 的有限元数值模拟分析<sup>[8]</sup>可知，有效桩长为 30 m 时，极限状态下扩大头的抗力约 2560 kN，约占总抗拔承载力的 35%。两种桩型极限状态下

扩大头提供的抗拔承载力相差不大, 表明特定土层条件下, 扩大头尺寸相同时, 由扩大头提供的抗拔承载力与桩长的关系较小。也说明在同等条件下, 桩长越短, 扩底抗拔桩的承载效率越高。

表 6 扩大头抗力

Table 6 Bearing capacities of enlarged base

桩号	极限承载力 /kN	扩大头抗力 /kN	扩大头抗力占比/%
SBZ1A-9	6000	3172	52.87
SBZ1A-11	5500	2896	52.65
SBZ1A-13	5500	3003	54.60

另外, SBZ1A 的扩大头体量仅占总桩身体量的 15%, SBZ1B 的扩大头体量仅占总桩身体量的 10%, 但扩大头提供的抗拔承载力分别约占总承载力的 50%, 35%。说明扩大头的体积量不大, 但提供的抗拔承载力却较大, 其承载效率高。

### 3.3 扩大头的承载机理

极限载荷试验成果可以宏观反映扩大头可以提供较高的承载力, 但在揭示扩大头为何可以提供高承载力的原因方面有所不足。笔者采用大型通用有限元软件 ABAQUS, 对扩大头的承载机理作进一步分析<sup>[8]</sup>。桩身采用弹性模型、土层采用莫尔库仑模型、桩土接触面采用库仑摩擦模型。首先对试桩试验进行数值拟合, 使得有限元计算的桩顶、桩端荷载位移曲线, 桩身轴力分布曲线与实测值较吻合; 然后采用该方法对扩大头与周边土体的相互作用作进一步的模拟分析。数值模拟计算表明, 扩大头区域周边土体塑性区的发展情况如图 12 所示。

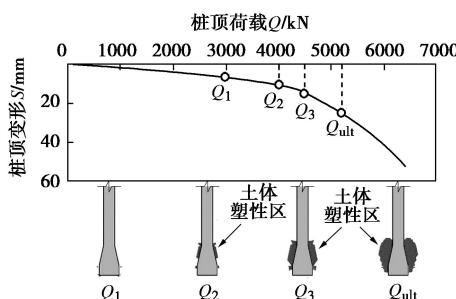


图 12 扩大头段桩周土体塑性区发展

Fig. 12 Development of plastic region of the soil around enlarged base

由图 12 可以看出, 扩大头区域桩土相互作用过程如下: 当桩顶上拔荷载较小时, 首先由等截面段与扩大头段交界处出现塑性区, 随着上拔荷载的增大, 塑性区分布范围逐渐扩大并贯通整个扩大头区域, 最终由于扩大头周边的土体全部进入塑性区受压破坏而导致扩底抗拔桩的破坏。极限状态下, 扩大头受周边土体法向力的竖向分量是扩大头抗力的主要组成部分

, 可占扩大头抗力的 70%左右。

## 4 结 论

结合天津于家堡南北地下车库项目, 在天津地区首次开展了扩底抗拔桩的极限承载力试验, 共 2 组桩型, 各 3 根试桩, 其中一组试桩有效桩长 19 m, 另一组试桩有效桩长 30 m。两组试桩均加载至极限破坏状态, 基于试桩试验成果, 对扩底抗拔桩的承载变形特性从荷载位移曲线、桩身轴力分布、桩侧摩阻力分布、桩身变形以及扩大头的承载特性等方面进行了分析。得到如下 4 点结论。

(1) 扩底抗拔桩的承载力由桩侧摩阻力与扩大头抗力共同组成, 两者承载力的发挥是一个异步的过程, 首先由等截面段桩土侧摩阻力提供抗拔力; 当上拔荷载进一步增大后, 扩大头开始逐渐发挥作用, 并且扩大头抗力占试桩总荷载的比例逐步上升, 当等截面段桩侧摩阻力达到极限状态后, 扩大头可继续提供抗拔承载力。扩大头周边土体随桩顶加载增加, 受到扩大头的挤压力逐渐增大, 逐渐进入塑性状态, 并最终贯穿整个扩大头区域, 周边土体受压达到极限状态后, 扩底抗拔桩发生整体向上的变形, 达到破坏状态。

(2) 扩大头体量占总桩身体量的比重较小, 但扩大头提供的抗拔承载力占总承载力的比重较高。在持力层相同、扩大头尺寸也相同, 扩大头埋深不同的情况下, 由扩大头提供的抗拔承载力相差不大, 从经济性角度来说, 扩底抗拔桩越短, 其承载效率越高。

(3) 扩大头受周边土体法向力的竖向分量是扩大头抗力的主要组成部分, 极限状态下, 可占扩大头抗力的 70%左右。

(4) 试桩试验采用双套管技术隔离了基础埋深段的侧摩阻力, 使得试桩结果与工程桩实际工作状态较接近。然而由于基础开挖深度大, 实际工程中抗拔桩设计时应考虑开挖卸荷引起的桩身预拉力与承载力损失问题。应根据工程实际情况, 采取加强桩身配筋以及增加桩长等措施解决深开挖引起的不利影响。

## 参考文献:

- [1] 吴江斌, 王卫东, 黄绍铭. 等截面桩与扩底抗拔桩承载特性数值分析研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 29(9): 2583 – 2588. (WU Jiang-din, WANG Wei-dong, HUANG Shao-ming. Numerical modeling of uplift behavior of normal piles with straight shaft and pedestal piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical and Engineering, 2008, 29(9): 2583 – 2588. (in Chinese))
- [2] 郦建俊, 黄茂松, 王卫东, 等. 开挖条件下抗拔桩承载力的

- 离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(3): 388 - 396.  
(LI Jian-jun, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong, et al.
- Centrifugal model tests on bearing capacity of uplift piles under deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(3): 388 - 396. (in Chinese))
- [3] 刘文白, 周健, 孟克特木尔. 扩底抗拔桩承载力试验及计算[J]. 工业建筑, 2003, 33(4): 42 - 45. (LIU Wen-bai, ZHOU Jian, MENGKE Temuer. Uplift tests and calculations of under-drained piles[J]. Industrial Construction, 2003, 33(4): 42 - 45. (in Chinese))
- [4] 吴江斌, 王卫东, 王向军. 软土地区多种桩型抗拔桩侧摩阻力特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 93 - 98.  
(WU Jiang-din, WANG Wei-dong, WANG Xiang-jun. Side resistance properties of multiple uplift piles in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 93 - 98. (in Chinese))
- [5] 王卫东, 翁其平, 吴江斌. 上海世博 500kV 地下变电站超深抗拔桩的设计与分析[J]. 建筑结构, 2007, 37(5): 107 - 110. (WANG Wei-dong, WENG Qi-ping, WU Jiang-din. Design and analysis of the deep substructure's uplift piles in the project of shanghai world exposition 500kV underground
- electric substation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 37(5): 107 - 110. (in Chinese))
- [6] 孙洋波, 朱光裕, 袁聚云. 扩底抗拔桩承载力试验与研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 428 - 432. (SUN Yang-bo, ZHU Guang-yu, YUAN Ju-yun. Pull-out tests on belled piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 428 - 432. (in Chinese))
- [7] 张栋梁, 杨龙才, 王炳龙. 扩底抗拔桩试验分析与抗拔承载力计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5): 775 - 780. (ZHANG Dong-liang, YANG Long-cai, WANG Bing-long. Experimental analysis and calculation of the up-lift resistance bearing capacity of bored cast-in-place pile with enlarged bottom[J]. Chinese Journal of Underground, 2006, 2(5): 775 - 780. (in Chinese))
- [8] 常林越, 王卫东, 吴江斌. 基于极限承载力试验的扩底抗拔桩承载特性数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊 1): 657 - 663. (CHANG Lin-yue, WANG Wei-dong, WU Jiang-bin. Numerical analysis of uplift behavior of enlarged base piles based on uplift ultimate bearing capacity tests[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 657 - 663. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex 数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 25 元, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)