

扩底抗拔桩承载力试验与研究

孙洋波¹, 朱光裕¹, 袁聚云²

(1. 上海港湾工程质量检测有限公司, 上海 200032; 2. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092)

摘要: 早期的扩底桩主要是利用设置在坚硬土层中的桩底扩大头提高桩的端承力, 以降低基础工程造价; 扩底桩承担上拔荷载同样可以用增加不多的材料而较大幅度提高桩的抗拔力承载力。本文结合上海地区部分工程实体试验和室内试验, 对扩底桩与等截面桩的单桩抗拔承载力进行比较、分析了扩底桩抗拔承载力特性、提出了适用于软土地区扩底抗拔桩单桩承载力计算公式并对扩底桩的群桩效应进行了研究。

关键词: 扩底桩; 抗拔试验; 抗拔承载力; 扩底桩群桩效应; 抗拔承载力计算公式; 模型试验

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2011)S2-0428-05

作者简介: 孙洋波(1978-), 男, 陕西合阳人, 博士, 高级工程师, 主要从事桩基、码头结构等方面的检测研究工作。
E-mail: yangbosun@126.com。

Pull-out tests on belled piles

SUN Yang-bo¹, ZHU Guang-yu¹, YUAN Ju-yun²

(1. Shanghai Harbor Engineering Control & Testing Co., Ltd., Shanghai 200032, China; 2. Department of Geotechnical Engineering Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The belled pile has been widely applied in foundation engineering for long time. Early, it was mostly used to increase the tip resistance of piles through the enlarged base in hard soil to reduce the cost. The uplift capacity of a single belled pile could be remarkably increased by adding a bit of concrete when the pile was bearing pull-out load. Based on the results of the static uplift load tests in site and laboratory model tests, the uplift capacity of a single belled pile is compared with that of a single constant section pile, and the uplift capacity of belled tension pile is analyzed. The formula for the uplift capacity of a single belled pile in soft soil area is proposed. Moreover, the effect of group belled piles is also discussed.

Key words: belled pile; pull-out test; uplift capacity; group belled pile effect; uplift capacity formula; model test

0 引言

扩底桩早已在基础工程中得到广泛应用, 但早期主要是利用设置在坚硬土层中的桩底扩大头提高桩的端承力, 特别适用于持力层土质好且埋深较浅的地域, 以降低基础工程造价。利用扩底桩承担上拔荷载则相对起步较晚。随着地下工程的增多, 将扩底钻孔灌注桩作为抗拔桩也被工程采用, 众多工程实例表明不论桩端处在砂性土中还是处在黏性土中, 只要扩底端的形状和尺寸合理, 均能较大幅度提高桩的抗拔力。本文结合上海地区部分工程实体试验和室内试验, 对扩底桩的单桩抗拔承载能力及群桩效应进行探讨。

1 扩底桩与等截面桩的单桩抗拔承载力比较

1.1 试验实例

实例 1: 本试验共设 6 根混凝土钻孔灌注桩, 均采用泥浆护壁工艺。按不同桩径和桩长将试验分为两组, 同一组 3 根桩的长度和桩径相同, 其中一根为等截面桩, 另 2 根为扩底桩。桩周土层为黏性土, 桩径 $\phi 450 \text{ mm}$ 的桩端处在可塑—硬塑的粉质黏土层中, 其中^{#1} 为等截面桩, ^{#2}、^{#3} 为扩底桩; 桩径 $\phi 400 \text{ mm}$ 的桩端处在软塑黏土层中, 其中^{#4} 为等截面桩, ^{#5} 和^{#6} 为扩底桩; 桩周土层分布见图 1。试验采用慢速维持荷载法, 分级加载, 只有当桩顶在 60 min 内的上拔位移量不超过 0.1 mm, 并连续出现两次时方可加下一级荷载。6 根试验桩中, ^{#1}、^{#2}、^{#3}、^{#4} 四根桩均加载至地基破坏; ^{#5} 和^{#6} 桩虽未达到地基破坏, 但也达到极限。各试验桩的上拔荷载与桩顶位移之间的关系曲线

收稿日期: 2011-08-09

见图 2。各级荷载时桩顶与桩端位移实测值比较曲线

见图 3。

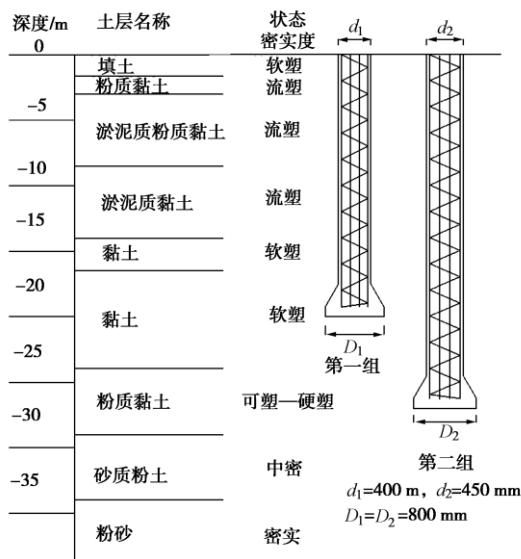


图 1 试桩区土层分布及试桩尺寸

Fig. 1 Soil profile and sectional dimensions of pile

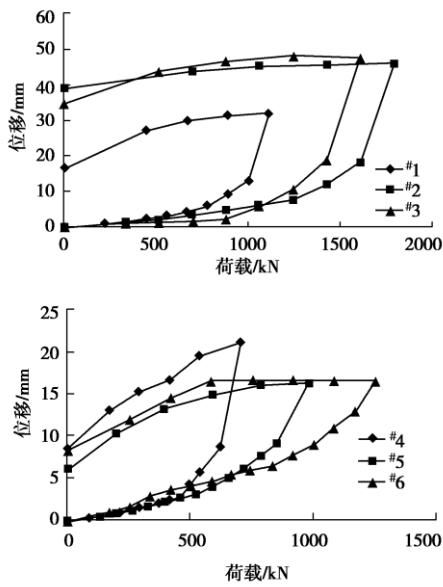


图 2 桩顶荷载与上拔位移关系 $U - \delta$ 曲线

Fig. 2 Uplift load vs uplift displacement ($U - \delta$) of pile top

从上述试验结果可以看出:

(1) 在桩长、桩径、桩周土层及施工工艺相同的条件下, 扩底桩的抗拔承载力明显高于非扩底的等截面桩。以 $\phi 450$ mm 桩为例, #1 等截面桩抗拔极限承载力 998 kN, #2 和 #3 扩底直径 $\phi 800$ mm 桩的抗拔极限承载力分别为 1605 kN 和 1423 kN, 比等截面桩提高了 1.4 倍和 1.6 倍。 $\phi 400$ mm 桩的试验结果也与上述相似。

(2) 扩底桩由于端部的扩大头阻止了桩的上拔位移, 因此具有上拔位移相对较小、且较稳定的特点。由图 3 可以直观地看出, #1 等截面桩在上拔荷载 776

kN 前桩端位移与荷载基本呈线性变化, 但自 776 kN 起, 每次加载后桩端与桩顶同步位移; #3 扩底桩在 877 kN 前桩端位移与荷载同样呈线性变化, 在 877~1423 kN 之间桩端位移明显小于桩顶位移, 直到加载 1605 kN 时桩底和桩顶才同步上升, 表明扩底端对阻止桩的上拔位移起到了很重要的作用。

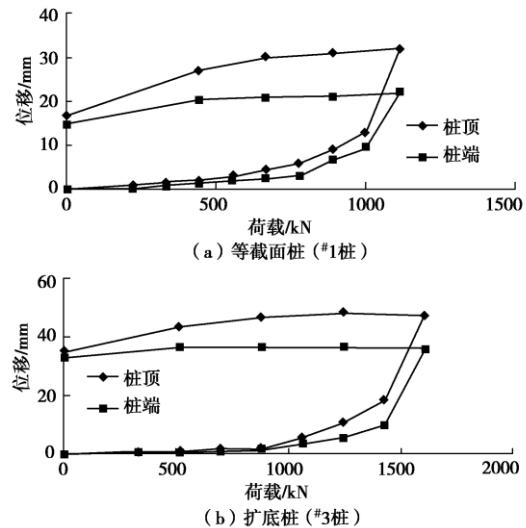


图 3 桩顶与桩端位移曲线

Fig. 3 Uplift load vs uplift displacement ($U - \delta$) of pile top and tip

实例 2: 上海某工程中进行了直径 $\phi 700$ mm、桩长 52 m 的等截面直桩与上部直径 $\phi 600$ mm、扩底直径 $\phi 1150$ mm、桩长 37 m 的扩底钻孔灌注桩抗拔对比试验。这些桩均为泥浆护壁钻孔灌注桩, 试验区地质情况相同, 其中等截面桩 2 根, 桩端处在粉砂土层; 扩底桩 6 根, 桩端处在砂质粉土层, 见图 4。由于这批桩要作为工程桩使用, 因此均按设计要求的控制荷载进行抗拔试验, 其中等截面桩的最大加载量为 2200 kN、扩底桩最大加载量为 3500 kN。试验采用慢速维持荷载法分级加载, 每级荷载在达到每小时桩顶上拔位移不大于 0.1 mm、且连续二次的情况下才能施加下级荷载。8 根桩的荷载及对应上拔位移曲线列于图 5 中。这里仅举两个典型荷载时的桩顶上拔量作对比: 在荷载 1760 kN 时, 二根等截面桩在 1760 kN 时的桩顶位移分别为 8.86 mm 和 9.54 mm, 平均 9.20 mm; 6 根扩底桩的桩顶位移在 6.63~7.43 mm 范围, 平均为 6.90 mm。在荷载 2200 kN 时, 二根等截面桩的桩顶位移分别为 16.94 mm 和 16.66 mm, 平均 16.80 mm; 6 根扩底桩的桩顶上拔量在 10.21~12.41 mm 范围, 平均 11.99 mm。尽管扩底桩的桩径、长度都小于等截面桩, 且桩端所在土层也较差, 但在相同荷载下前者的上拔位移量却小于后者, 再一次显示出扩底抗拔桩

的优越性。

1.2 扩底桩抗拔承载力特性

与常规等截面桩相比, 扩底桩抗拔承载力增大主要有以下几方面的因素:

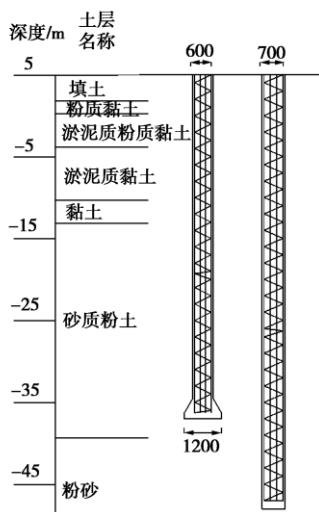


图4 试桩区土层分布及试桩尺寸

Fig. 4 Soil profile and sectional dimensions of pile

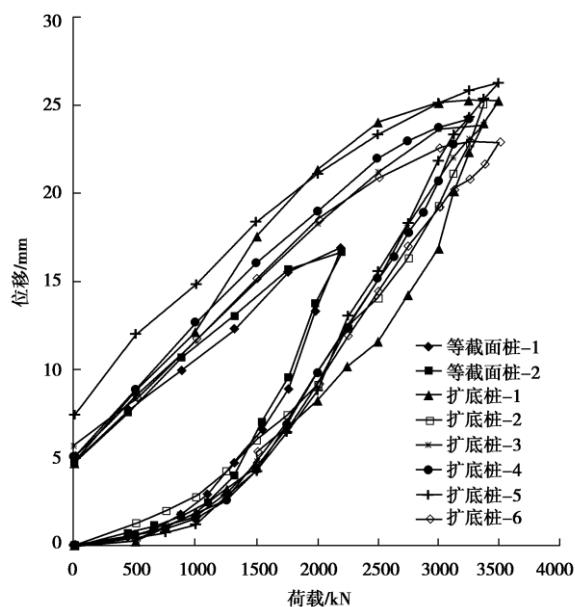


图5 桩顶荷载与上拔位移关系($U-\delta$)曲线

Fig. 5 Uplift load vs uplift displacement ($U-\delta$) of pile top

(1) 扩底端圆台型部分的侧面积较相同部位等截面桩大, 相应增大了桩侧总土阻力;

(2) 桩在上拔荷载作用下, 桩身向上位移, 扩底部位斜面上的土体呈受压状态, 相当于增加了一个圆环型端部的抗压土阻力;

(3) 在扩底端向上位移时, 邻近土体中的水平应力增大, 导致作用在斜面上的垂直应力增大。

扩底桩抗拔承载力大小除与桩径、桩长、桩周土

的特性及施工工艺等常规因素有关外, 还与扩底部分直径及扩底角 θ 的大小有关, 根据已有试验资料及工程实践, 当桩的长径比 $L/d \geq 20$, 扩底端直径 D 达到上部桩径 d 的1.5~2.0倍, 扩底角 θ 在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 左右时, 无论扩底端处在砂土或黏土层中, 扩底桩的抗拔承载力都有较大幅度的提高。

扩底桩抗拔承载力大小除与桩径、桩长、桩周土的特性及施工工艺等常规因素有关外, 还与扩底部分直径及扩底角 θ 的大小有关, 根据已有试验资料及工程实践, 当桩的长径比 $L/d \geq 20$, 扩底端直径 D 达到上部桩径 d 的1.5~2.0倍, 扩底角 θ 在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 左右时, 无论扩底端处在砂土或黏土层中, 扩底桩的抗拔承载力都有较大幅度的提高。

1.3 扩底桩抗拔承载力计算

关于扩底桩抗拔时的桩周土体破坏模式有多种假定, 但目前大多数研究者认为的土体破坏模式如图6(a)所示的梨形状二次曲面。由于二次曲面计算复杂, 通常将二次曲面破坏面简化成图6(b)的桩型破坏模式。笔者在分析数十根扩底抗拔桩试验资料的基础上, 提出如下扩底桩抗拔承载力的计算公式:

$$Q_u = \sum f_{sit} u_i l_i + W_c + W_{sh1} \quad (1)$$

式中 Q_u 为扩底桩抗拔极限承载力(kN); f_{sit} 为桩侧第*i*层土的单位面积抗拔极限侧摩阻力(kPa); u_i 为抗拔时桩侧土体破坏面周长(m), 其中自桩底以上(10~15) D 按扩底直径 D 计算, 其余按桩径 d 计算; l_i 为桩侧相应土层的厚度(m); W_c 为桩身自重(水位以下按浮重度计算)(kN); W_{sh1} 为桩底以上(10~15) D 范围内按直径 D 计算的圆柱形土重(kN)。

如果工程缺乏桩的抗拔侧摩阻力数据, 也可以通过相同桩型、相同土类桩的抗压侧摩阻力换算:

$$f_{sit} = \lambda_i f_{si} \quad (2)$$

式中 f_{sit} 为桩侧第*i*层土的单位面积抗拔极限侧摩阻力(kPa); f_{si} 为桩侧第*i*层土的单位面积抗压极限侧摩阻力(kPa); λ_i 为第*i*层土的抗拔摩阻力折减系数, 可根据不同土质按有关规范或地区标准取用。

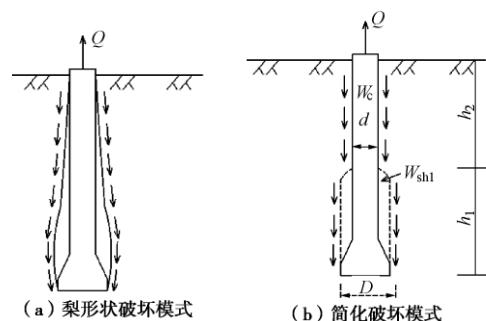


图6 梨形状破坏模式及其简化模式

Fig. 6 Failure mode of pear-shaped quadric surface and its

simplified failure mode

根据上海地区 30 余根扩底桩抗拔承载力试验结果与计算值比较, 公式(1)适用于桩长不小于 20 m、长细比 L/D 不小于 20、且扩底直径与桩身直径之比 D/d 不大于 2.0 的情况下扩底抗拔桩极限承载力的计算。当桩长小于 20 m、 $L/D < 20$ 或 $D/d > 2.0$ 时, 宜通过现场抗拔试验验证。

2 扩底群桩抗拔承载力群桩效应

“群桩效应”是指桩在上拔荷载作用下, 由于临近桩的存在而导致单桩抗拔承载力降低。为了研究抗拔桩的群桩效应; 在室内模型箱砂土中进行了不同间距的等截面和扩底模型群桩试验, 初步获得了在特定条件下等截面桩和扩底桩的群桩效应系数, 并通过现场试验对扩底桩的群桩效应进行了验证。

2.1 室内模型群桩试验

室内模型试验在模型箱中进行, 箱内置标准砂, 埋入桩时分层将砂压实, 并喷水将砂潮湿, 用于对比试验的群桩和单桩处在相同的边界条件下。这次试验所采用的扩底模型桩(以下简称 A 型桩)和等截面模型桩(以下简称 B 型桩)均为直径 $\phi 40$ mm、桩长 1500 mm、管壁厚度 5 mm 的钢管桩、A 型桩扩底直径 D 为 $\phi 80$ mm; 两种桩型的单根桩质量分别为 9.9 kg 和 8.8 kg。试验时的桩位布置见图 7, 图中尺寸以 cm 计。

A 型桩的群桩分别进行了 $2D$ 、 $2.5D$ 和 $3D$ 三种不同桩间距的三桩群桩抗拔试验, B 型桩的群桩分别进行了 $2.5d$ 和 $3d$ (d 为桩身直径) 两种不同桩间距的三桩群桩抗拔试验, 单桩抗拔试验均在对应的群桩试验结束后 2 d 进行。

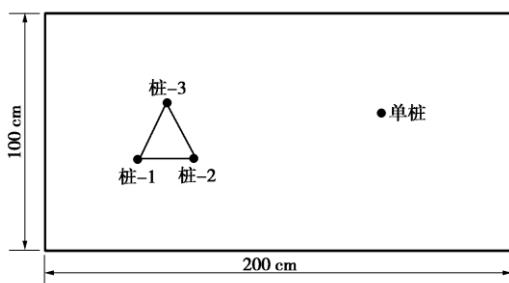


图 7 试验群桩桩位布置示意图

Fig. 7 Layout of test group pile configuration

图 8 为 $2.5d$ 桩距时 B 型桩群桩和单桩的荷载与位移对比曲线, 图 9 为 $3D$ 桩距时 A 型桩群桩和单桩的荷载与位移对比曲线; 表 1 中列出了不同桩间距时模型桩抗拔试验得出的单桩极限承载力(扣除桩自重)和群桩抗拔效应系数。

从模型试验结果可以看出: 设置在砂土中的 B

型桩, 当三桩的群桩间距达到 $3d$ 时, 群桩抗拔效应系数达到 1.0, $2.5d$ 间距时的群桩抗拔效应系数为 0.75 左右。A 型桩三桩间距在 $2D$ 时, 群桩效应系数只有 0.63, 当桩间距扩大到 $3D$ 时, 群桩抗拔效应系数增大到 0.94。因此可以认为, 当等截面桩的群群桩间距达到 $3d$ 以上, 扩底桩的群桩间距达到 $3D$ 以上时, 三桩群桩抗拔效应系数均接近于 1。当然群桩抗拔效应系数除与桩间距有关外, 还与群桩的桩数、桩长及桩周土质有关, 这些还有待于继续探讨。

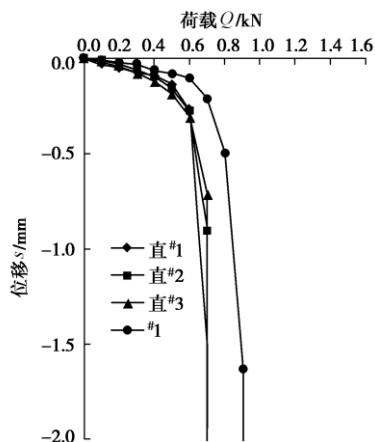


图 8 $2.5d$ 桩距时等截面桩群桩与单桩荷载与位移对比曲线

Fig. 8 Relationship curves between load and settlement of group B-pile with pile spacing $2.5d$ and single B-pile

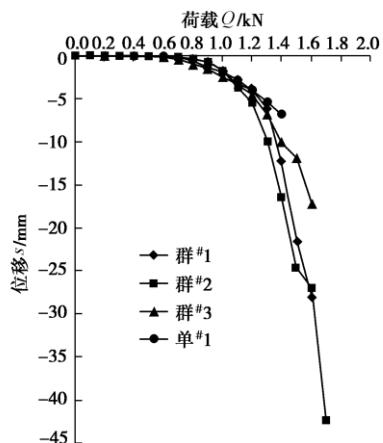


图 9 $3D$ 桩距时扩底桩群桩与单桩荷载与位移对比曲线

Fig. 9 Relationship curves between load and settlement of group A-pile with pile spacing $3D$ and single A-pile

表 1 不同桩间距时模型桩抗拔承载力及群桩抗拔效应系数

Table 1 Ultimate uplift capacity and group effect coefficient from laboratory tests

桩间距	抗拔极限承载力(扣除自重)/kN				群桩抗拔效应系数	
	A 型		B 型		A 型	B 型
	群桩	单桩	群桩	单桩		
$2.0D(d)$	0.631	1.001			0.63	
$2.5D(d)$	0.751	1.001	0.612	0.812	0.75	0.75

3.0D(d)	1.031	1.101	0.712	0.712	0.94	1.00
---------	-------	-------	-------	-------	------	------

2.2 工程实体群桩试验

上海某工程进行了 2 组 2 桩群桩和 2 组 3 桩群桩的扩底桩抗拔试验, 试验桩的桩身直径 $\phi 600 \text{ mm}$ 、扩底直径 $\phi 1150 \text{ mm}$ 、桩长 37 m、桩端持力层为砂质粉土, 地质剖面见图 4。群桩的中心间距 3.89 m, 为桩身直径的 6.5 倍, 扩底直径的 3.38 倍。3 桩群桩采用等边三角形布置。这里仅介绍一组 2 桩群桩(编号 2A1、2A2) 和一组 3 桩群桩(编号 3B1、3B2、3B3) 的试验结果。

图 10 及图 11 分别给出了一组两桩群桩抗拔试验和一组三桩群桩抗拔试验的 $U-\delta$ 曲线。2A2 和 2B3 同一根桩在群桩抗拔时的 $U-\delta$ 曲线及之后的单桩 $U-\delta$ 曲线比较于图 12。

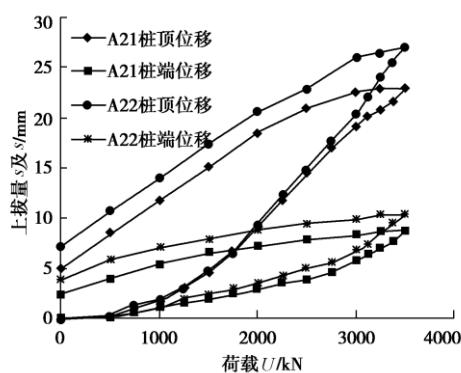


图 10 2 根群桩抗拔试验 $U-\delta$ 曲线

Fig. 10 $U-\delta$ curves of group piles (2A1 and 2A2)

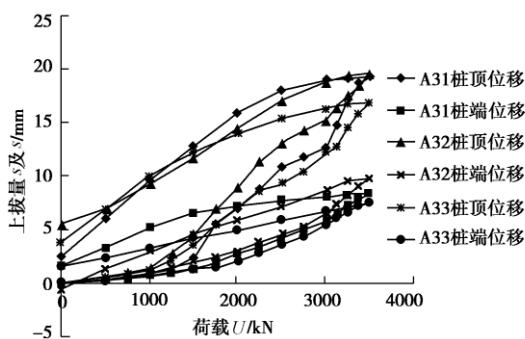


图 11 3 根群桩抗拔试验 $U-\delta$ 曲线

Fig. 11 $U-\delta$ curves of group piles (2B1, 2B2 and 2B3)

从图 10~11 可以看出, 无论是 2 桩群桩还是 3 桩群桩, 各桩的 $U-\delta$ 曲线与单桩变化规律相似, 各级荷载下的桩顶上拔位移量也接近。这表明在桩型尺寸、地质条件和施工工艺等边界条件相同的情况下, 扩底群桩间距为 $3.38D$ 时, 无明显的群桩效应。图 12 是同一根桩在群桩抗拔试验时和之后的单根桩抗拔试

验时的 $U-\delta$ 曲线对比图, 同一根桩对比可以排除施工和孔径的误差, 图中看出当扩底抗拔桩的中心距为 $3.38D$ 时, 无论是 3 根桩同时抗拔, 还是单桩抗拔, 其得出的 $U-\delta$ 曲线相近, 可以认为无群桩效应产生。这与前文所介绍的模型桩的试验结论一致。

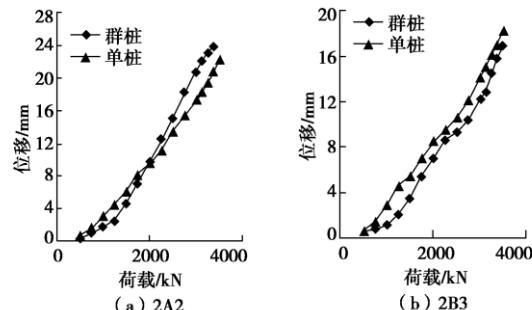


图 12 群桩抗拔时的 $U-\delta$ 曲线及单根桩抗拔的 $U-\delta$ 曲线
Fig. 12 Comparison of $U-\delta$ curves of 2A2 pile and 2B3 pile between group piles and single pile

3 结 论

(1) 当桩侧处在软黏土层、桩端在黏土或粉细砂层时, 扩底桩抗拔极限承载力可达到相同直径与桩长等截面桩的 1.5 倍以上, 且稳定性较好。

(2) 在原型抗拔试验研究的基础上, 提出了适用于软土地区扩底抗拔桩单桩承载力计算公式。

(3) 模型桩及工程实体桩试验结果表明: 当桩距达到扩底直径 3 倍时, 群桩效应系数接近于 1。

参 考 文 献:

- [1] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [2] 孙洋波, 朱光裕. 软土地区恒载作用下群桩的抗拔试验分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010(1): 75~79. (SUN Yang-bo, ZHU Guang-yu. Field tests on uplift behavior of belled bored pile under constant load in soft ground[J]. Chinese Journal of Undergruoud Space and Engineering, 2010(1): 75~79. (in Chinese))
- [3] DGJ08—11—2010 地基基础设计规范[S]. 上海: 上海市建筑建材业市场管理总站, 2010. (DGJ08—11—2010 Code for design of building foundation[S]. Shanghai: Building Materials Industry Market Management Station, 2010. (in Chinese))