



## 接触面单元对单桩位移应力的影响分析

张代军<sup>1</sup>, 阮涛<sup>2</sup>, 丁明武<sup>2</sup>, 卢廷浩<sup>3</sup>

(1. 温州东瓯建设集团有限公司, 浙江温州 325605; 2. 中交四航工程研究院有限公司, 广东广州 510230;  
3. 河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 210098)

**摘要:** 在用有限元法分析桩土相互作用的研究中, 采用不同的接触面单元得到的结果必然不同。通过分别引入 Goodman 单元和 Desai 单元进行单桩有限元分析, 研究接触面单元对桩土接触面力学特性及单桩位移应力的影响。分析认为: 在桩顶荷载较小时两者的桩土接触面力学特性以及单桩的位移应力差别很小; 桩顶荷载较大时, 采用 Goodman 单元计算所得的桩顶沉降小, 接触面剪应力大, 轴力沿桩身递减快, 桩端阻力和沉降都较小, 单桩的竖向抗压极限承载力较大。

**关键词:** 接触面; 桩土相互作用; 桩侧阻力; 桩端阻力

中图分类号: U 655.54<sup>+</sup>4.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)07-0051-07

### Stress and displacement analysis of single pile considering influence of interface element

ZHANG Dai-jun<sup>1</sup>, RUAN Tao<sup>2</sup>, DING Ming-wu<sup>2</sup>, LU Ting-hao<sup>3</sup>

(1. Wenzhou Dongou Construction Group Co., Ltd., Wenzhou 325605, China;

2. Engineering Technology Research Co., Ltd. of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

3. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In the research of soil-pile interaction with finite element method, the results are consequently varying when we adopt different interface elements. Conducting finite element analysis of single pile separately with Desai element and Goodman element, we study the interface element's impact on the feature of interface mechanic behavior between soil and pile, and the stress and displacement behavior of the single pile. It is concluded that the differences of mechanical traits of contact interface and the differences of the stress and displacement are minor when the top load of pile is relatively low. On the contrary, when the top load of pile is comparatively high, the differences of two kinds of element are apparent in the following aspects: when adopting Goodman element the subsidence of the pile block is smaller than that of Desai element, the shear stress on the contact interface is bigger, and the axial force descends quickly along the pile body. The resistance and subsidence of the pile tip are smaller while the vertical allowable load capacity of single pile is greater.

**Key words:** interface; pile-soil interaction; pile side resistance; pile bottom resistance

桩土间荷载传递机理较复杂, 桩土相互作用一直是被关心的热点问题, 桩土接触面力学特性是研究桩基荷载传递规律的关键因素。在用有限元法分析桩土相互作用的研究中, 通过引入接触面单元模拟桩土界面力和变形的特征, 采用不同

的接触面单元得到的结果必然不同。利用土与混凝土板接触面单剪直剪试验分别确定有厚度和无厚度单元的双曲线模型参数, 在单桩有限元模型中分别引入有厚度单元和无厚度单元模拟桩土接触面, 以研究接触面单元的不同对桩土接触面力

收稿日期: 2011-12-13

作者简介: 张代军(1973—), 男, 工程师, 一级建造师, 主要从事围垦、软基处理工程施工和管理工作的。

学特性及单桩位移应力的影响。

### 1 单桩有限元计算模型及计算参数

为了减少其他因素对单桩有限元计算分析的影响，计算模型中土体为均质土。计算时，首先对桩和土施加自重，之后在桩顶施加9级荷载，每级荷载增幅为600 kN。模型底部及侧面边界全部采用三向约束，其他节点全部自由。桩为灌注桩，桩长15 m，桩径0.5 m，不考虑桩底沉渣的存在。保持横截面积不变，将圆桩简化成正八面体桩。模型的径向范围取1倍桩长，深度范围从桩端向下延伸1倍桩长，模型横断面及纵剖面网格如图1和图2所示。图中阴影部分为桩体，桩体周围为一层接触面单元，有厚度单元取0.03 m。单元采用六面体八节点单元，尽量使用形状规则的单元，在桩端上下一定范围内和桩体周围将网格加密，以使关心的部位计算更加精确。

为便于描述，将接触面单元采用Goodman单元的称为A01方案，采用Desai单元的称为A02方案。

接触面模型参数采用由接触面单剪直剪试验得到的双曲线模型参数，试验设备采用河海大学研制的大型单剪直剪仪（DHJ-30），土样为按最优含水率配制并击实的黏土，接触面板为混凝土板，如表1所示。土体为黏性土，采用邓肯-张E-B模型参数，其参数如表2所示。桩体混凝土强度等级为C25，采用弹性模型，弹性模量取 $2.8 \times 10^4$  MPa，

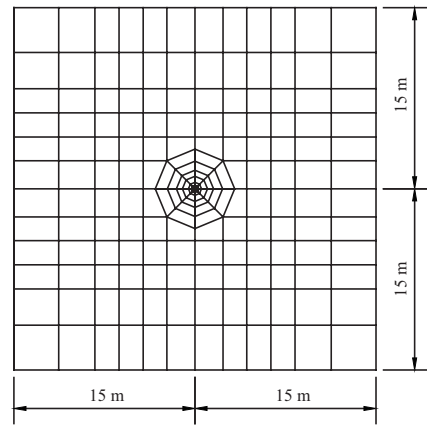


图1 横断面网格

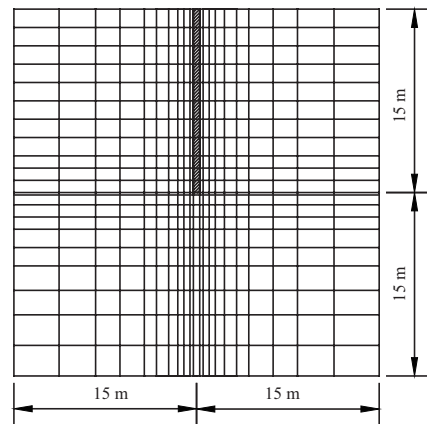


图2 纵剖面网格

泊松比取0.17，密度取 $2\ 400\text{ kg/m}^3$ 。

## 2 计算结果分析

### 2.1 单桩P-S曲线

单桩P-S曲线是确定单桩承载力的重要依

表1 接触面双曲线模型参数

单元	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{°})$	$n$	$K$	$R_f$
Goodman单元(A01)	61.72	30.43	0.83	9036	0.93
Desai单元(A02)	77.12	18.80	0.72	21.98	0.91

注： $c$ 、 $\phi$ 为强度指标， $n$ 、 $R_f$ 、 $K$ 为非线性指标。

表2 土体E-B模型参数

$R_f$	$n$	$K$	$c/\text{kPa}$	$\phi/(\text{°})$	$K_{ur}$	$n_{ur}$	$K_b$	$m$	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$
0.85	0.68	180	30	20	300	0.68	80	0.28	2 000

注： $c$ 、 $\phi$ 为强度指标， $\rho$ 为经过击实的土体密度， $n$ 、 $R_f$ 、 $K$ 为切线变形模量非线性指标， $m$ 、 $K_b$ 为切线体积模量非线性指标， $K_{ur}$ 、 $n_{ur}$ 为卸荷变形模量参数。

据，P-S曲线对于研究采用不同接触面单元计算所得的单桩竖向抗压极限承载力具有重要意义。本文桩基有限元计算所得P-S曲线如图3所示。

从图3可知：

- 1) A01, A02方案在P值分别为4 200 kN, 3 600 kN时沉降速率加快，根据单桩竖向抗压静

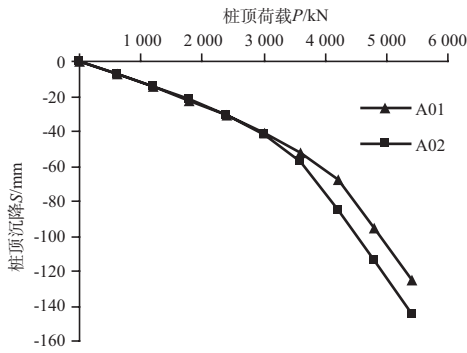


图3 单桩P-S曲线

载荷试验P-S曲线划分极限侧阻力和端阻力的方法<sup>[1]</sup>, 可以认为A01, A02方案桩侧阻达到极限值时的P值分别为4 200 kN, 3 600 kN, 所以A01方案的桩极限侧阻力值大于A02方案的值, 这与单剪直剪试验所体现的接触面抗剪强度的差别是一致的<sup>[2]</sup>。

2) 桩顶荷载较小时, 两者的沉降值差别不明显, 随着P的增大, 两者的差异逐渐明显, 相同P下A02方案的S值大于A01方案的S值。通过接触面单剪、直剪试验发现, 接触面错动变形较小时两者产生的剪应力值相差不大, 当位移发展到破坏时, 直剪试验的抗剪强度大于单剪试验的抗剪强度, 即无厚度单元的抗剪强度更高, 能够承担更大的侧阻力, 所以在桩顶荷载较大时A01方案的桩顶沉降较A02方案的要小。

### 2.2 地面及桩端面沉降曲线

图4为在不同的桩顶荷载下A01, A02方案的地面沉降曲线。在桩顶荷载较小时, 两者的地面沉降基本相等; 当桩顶荷载较大时, 两者在距桩较近时有明显差别, A02方案的沉降大于A01方案的沉降。

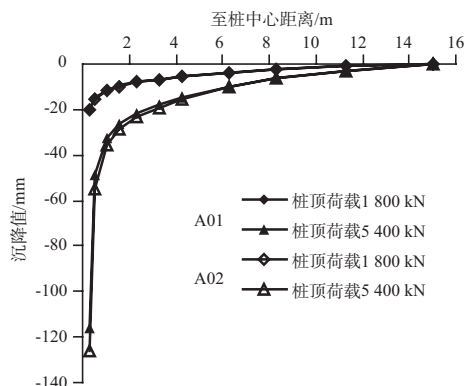


图4 地面沉降曲线

图5为不同荷载作用下两方案的桩端平面沉降。在桩顶荷载较小时, 两者沉降值的差别不明显, 桩顶荷载较大时, A01方案大于A02方案的值。

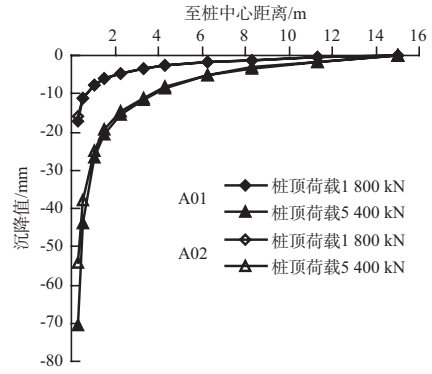


图5 端面沉降曲线

### 2.3 桩与桩侧土之间的相对错动位移

图6为在桩的加载过程中, A01, A02方案桩土之间相对错动滑移的分布及发展过程。

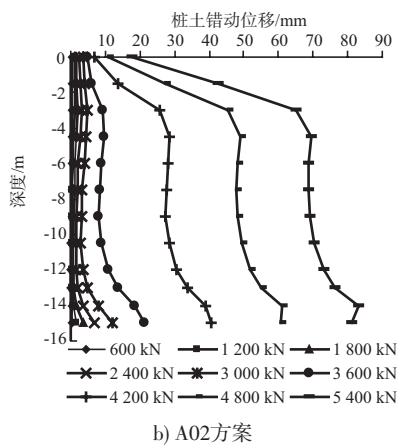
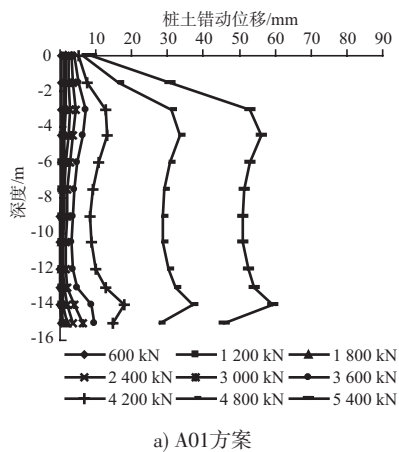


图6 加载过程中桩与桩侧土之间相对错动位移

从图6可知:

1) 桩顶荷载较小时, 两方案的桩土之间的相对错动位移都较小, 沿着深度方向, 两方案的

相对错动位移都是先减小再增大；桩顶荷载较大时，桩土间的相对错动位移都较大，沿着深度，相对错动位移曲线呈“M”形分布。

2) 对于A01方案，当桩顶荷载达到4 200 kN之后桩土间的相对错动突然变大，此时桩侧阻力达到极限值；对于A02方案，桩顶荷载达到3 600 kN时开始发生较大的滑移，这与桩P-S曲线表现的规律相对应，也表明了采用Goodman单元计算所得的桩竖向抗压承载力值大于采用Desai单元计算所得到的值。

3) 对于A01方案，桩侧阻达到极限值所需桩土间相对错动位移约9~12 mm，对于A02方案，桩侧阻达到极限值需相对错动位移约为8~10 mm。

为了能更清晰对比两方案在加载过程中相对错动滑移的差别，将桩顶荷载为1 800 kN，3 600 kN，5 400 kN时两方案的桩土相对错动滑移曲线绘于同一图中，如图7所示。

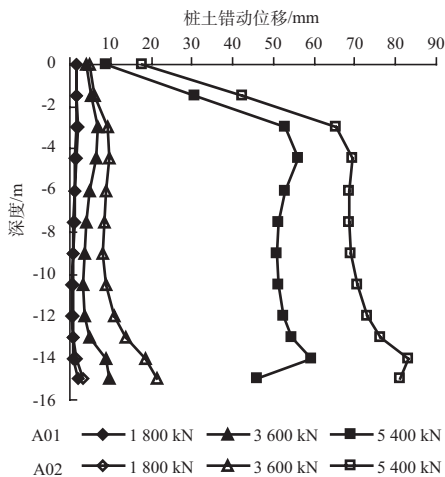


图7 不同桩顶荷载下两方案桩土间相对错动位移比较

可见，两种方案的桩土间错动位移的发展和分布规律非常接近，在桩顶荷载较小时，两方案的桩土间相对错动位移量非常接近，荷载较大时，A01方案的滑移量小于A02方案的滑移量。

### 2.4 桩侧阻力曲线

桩土相对错动位移与桩侧阻力的发挥密切相关，图8为在加载过程中A01，A02方案的桩侧阻力的分布和变化过程。两方案有以下相同之处：

1) 总体上，桩侧阻力沿深度是逐渐增大的。在某一桩顶荷载下，桩侧阻力沿桩深度的变

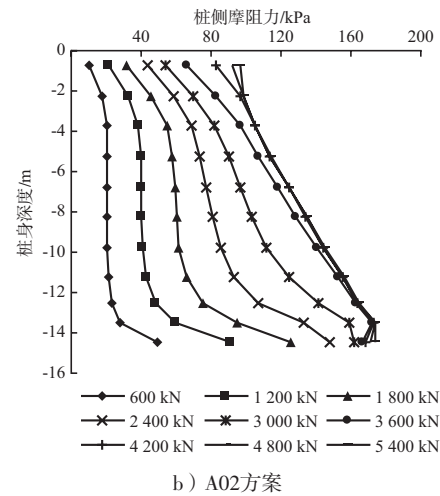
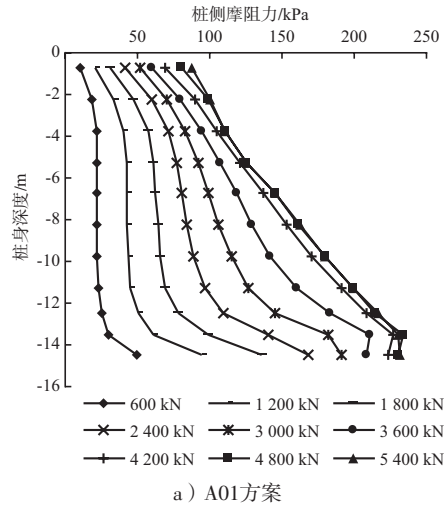


图8 加载过程中桩侧阻力的变化

化规律与桩土间错动位移规律相似，当桩土间相对错动位移较大时，相对应的桩侧阻力就较大。但沿桩身向下桩土相对错动位移变小时桩侧阻力并未减小，这是因为桩侧阻力不仅与桩土间相对滑移量有关，还与桩侧的法向应力有关，法向应力沿深度逐渐增大，所以桩侧阻力仍然增大。通过观察剪切劲度系数和剪切模量表达式也可以证明这一点，在参数一定的情况下，劲度系数和剪切模量的大小取决于法向应力 $\sigma_n$ 及错动位移 $\delta(\rho)$ 的大小。

2) 随桩顶荷载的增大，桩身侧阻力逐渐增大，并且在桩身的中下部增长的幅度较大，这说明法向应力越高，侧阻力增长的幅度越大；侧阻力不是随荷载的增大而一直增大的，达到一定值时，桩土之间的滑移继续增大，而侧阻力不再变化，此时，侧阻力达到极限值，极限侧阻力沿桩



身深度呈斜直线分布。

为比较两方案桩侧阻力的差异, 取桩顶荷载分别为1 800 kN, 3 600 kN, 5 400 kN时两方案的侧阻力绘于图9。

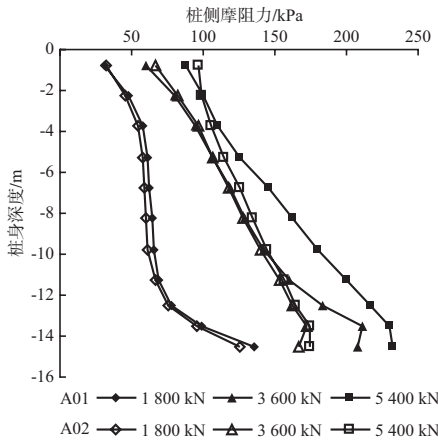


图9 A01和A02方案桩侧阻力比较

由图9可知:

1) 桩顶荷载较小时, A01方案的侧阻力值略大于A02方案的值, 而在荷载较大时, A01方案的侧阻力明显的较大。

2) 观察桩顶附近桩侧阻力, 在荷载较小时, 两方案的结果接近; 荷载较大时, 桩侧阻力都达到极限值, A01方案的侧阻力小于A02方案的值。这是由于在地面附近桩侧法向压力较小, 此时Desai单元的抗剪强度大于Goodman单元的抗剪强度。这就是在荷载较大时A02方案产生的地面沉降较大的原因。

3) 观察桩端附近的侧阻力, 在荷载较大时, A01的侧阻力明显的大于A02的侧阻力, 侧阻力传递给桩周土层, 桩周土层进而传递给桩端附近的土层, 使得桩端面土层产生变形, 所以在桩端平面A01方案产生的土体沉降要大于A02产生的沉降, 这就解释了图5中的现象。

4) 桩顶荷载从3 600 kN加载到5 400 kN的过程中, A02方案的侧阻力变化不大, 说明已经达到了极限侧阻力。结合图8可见, 对于A01方案, 侧阻力在荷载为4 200 ~ 4 800 kN时达到极限值; 对于A02方案, 侧阻力在荷载为3 600 ~ 4 200 kN时达到极限值。A01、A02方案的桩为摩擦型桩, 可以认为桩侧阻力达到极限值时桩的承载力达到了极

限值, A01、A02的P-S曲线也说明了这一点, 桩侧阻力达到极限值时的荷载与桩的极限承载力是一致的。

观察在桩同一深度处侧阻力随荷载的变化过程, 选取深度为-3.75 m, -9.75 m, -14.5 m时A01和A02方案的侧阻力的发展过程, 如图10所示。

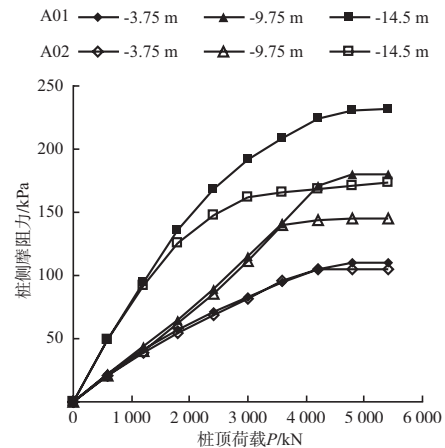


图10 同一深度侧阻力随荷载的变化

1) 同一深度处侧阻力都是随荷载的增加而增大, 曲线近似呈双曲线形状。

2) 在深度较浅的桩侧表面, A01和A02方案的侧阻力值非常接近, A01方案的略大于A02的值; 在深度较深的桩侧表面, 由于法向应力较高, 荷载较小时, 两者的差别不大, 随着荷载的增大, A01方案的侧阻力值比A02方案的值越来越大, 这与单剪直剪试验的差别是相一致的, 即在法向应力较大, 并且剪切错动位移较大时, 两者剪应力的差值比较大。

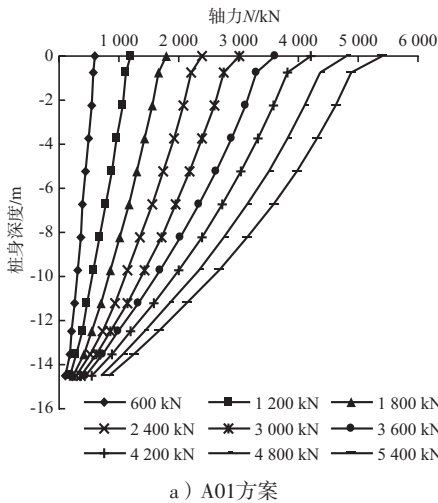
观察图10并结合图8、图9, 可以认为在桩顶荷载较小时, 采用两种接触面单元计算所得到的侧阻力基本相同, 两种接触面单元侧阻力的差别主要在桩的较深处以及桩顶荷载较大时才体现出来, 此时A01方案的侧阻力远大于A02方案的侧阻力。

此外, 通过以上对桩侧阻力的讨论, 得知在同种土层中极限侧阻力是随深度逐渐增大的。通过本文单桩模型的计算结果发现, 在桩顶附近极限侧阻力大为80 ~ 90 kPa, 而在桩端附近极限侧阻力达到了160 ~ 220 kPa, 几乎是桩顶附近极限侧阻的2倍, 说明极限侧阻在不同深度其值的变化幅度很大。所以对于较短的桩, 其极限侧阻力平均

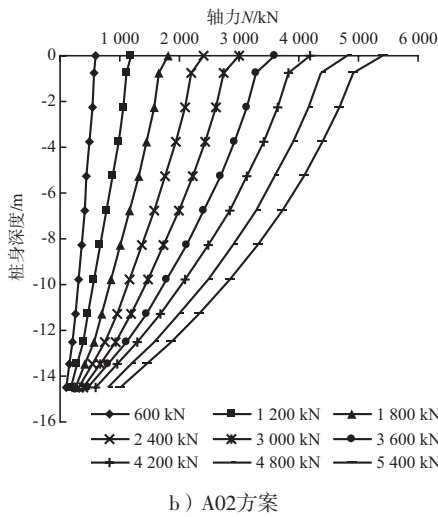
值较小，对于较长的桩，极限侧阻力的平均值较大。故在桩基设计计算时应考虑桩身长度的不同取桩的极限侧阻力标准值。

### 2.5 桩轴力变化曲线

图11为A01和A02方案桩身轴力随荷载的变化过程，两图所呈现的规律非常相似，有以下共同点：



a) A01方案



b) A02方案

图11 加载过程中桩身轴力的分布及变化

1) 在同一荷载下，轴力的递减速率沿着深度逐渐增大，这是由于桩身侧阻力随深度逐渐增大的结果。

2) 在荷载逐渐增大的过程中，桩身上部轴力增长幅度较大，而桩端附近轴力增长幅度非常小，这说明大部分荷载在向下传递过程中传递到了桩周土体中，传递到桩端的荷载很小，只有在最后几级荷载下桩端轴力增长幅度较大，这是因为桩侧阻力

达到了极限值，荷载传递到桩端土层的比例增大。

为观察两方案的不同，取桩顶荷载分别为1 800 kN，3 600 kN，5 400 kN时两方案的轴力绘于图12。从图12可知：

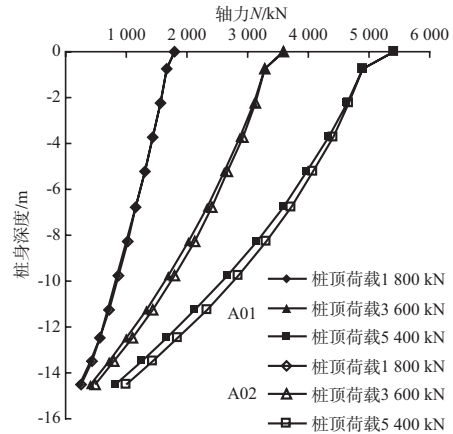


图12 不同桩顶荷载下A01和A02方案轴力

1) 在荷载较小时，同一桩顶荷载下两方案的轴力沿桩身基本相等，说明桩侧阻力的大小及分布规律是一样的，与之前关于侧阻力的分析是一致的；

2) 随着荷载的增大，两方案的桩身轴力差别逐渐增大，桩顶荷载为5 400 kN时，两方案的侧阻力都达到极限值，A01方案的桩身轴力明显小于A02方案的轴力，这是A01方案的极限侧阻力大于A02方案的极限侧阻力的原因。

由此可以看出，轴力的发展及分布规律与侧阻力的发展和分布规律是吻合的。桩顶荷载一部分通过桩身传递给桩周土体，剩余的部分则传递到桩端土体，下面观察桩端土体分担荷载的情况。

### 2.6 桩端土分担荷载

图13为A01和A02方案桩端阻力随桩顶荷载的变化过程。从图13可知：

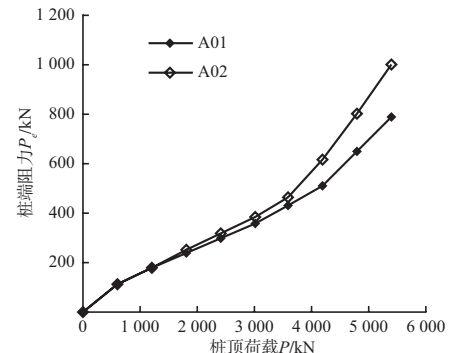


图13 桩端阻力随桩顶荷载的变化曲线

1) 在施加第一级荷载时, 桩端便出现阻力, 没有表现出桩顶荷载先传递给桩周土层然后再到桩端土层的先后顺序。这是因为桩身较短, 桩体弹性模量较大, 桩顶荷载相对较大, 受载后桩自身压缩变形量很小, 完全靠桩自身压缩与土之间相对错动产生的侧阻力来传递荷载是不可能的, 所以必然会将部分荷载传递给桩端土体。

2) 两方案的桩端阻力都随着荷载的增大而逐渐增大, 两者的曲线都呈折线状, A01方案的曲线在桩顶荷载为4 200 kN时出现拐点, A02方案的曲线在桩顶荷载为3 600 kN时出现拐点。出现拐点是因此时桩侧阻力达到极限值, 不能承担更多的荷载, 新增的桩顶荷载由桩端土体承担。

3) 桩顶荷载较小时, 两方案的桩端阻力几乎相等, 随荷载的增大, A02方案的桩端阻力逐渐大于A01方案的桩端阻力, 这是A01方案的极限侧阻力大于A02方案的结果, 与侧阻力的分布规律是相对应的。

图14为A01和A02两方案的桩端荷载分担比( $P_e/P \times 100\%$ )随桩顶荷载的变化规律, 图表明两方案的桩端荷载分担比都是随桩顶荷载的增大而先较小后增大。这是由于在加载的初始阶段, 桩土间错动位移量较小, 侧阻力发挥较少, 故桩端承担了较多的荷载, 随着荷载的增大, 桩土间相对错动滑移量增大, 侧阻力增长较快, 桩侧阻力分担了更多的桩顶新增荷载。另外, 本文中的桩是摩擦型桩, 虽然桩端土在承载过程中产生了压缩, 但桩端土体不够坚硬, 不能提供较高的桩端阻力, 这也是荷载分担比降低的原因。随着荷载的增大, 桩侧阻力逐渐发挥到极限值, 桩端土体产生较大的压缩, 此时桩顶新增的荷载则会更多的由桩端土体来承担, 所以荷载分担比又逐渐增大, 最终形成了凹形曲线。

### 3 结论

1) 采用Goodman单元计算所得单桩竖向抗压极限承载力大于采用Desai单元所得结果, 对桩的

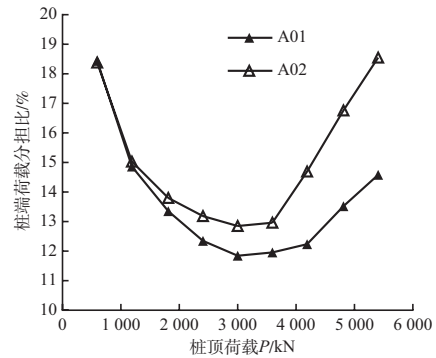


图14 桩端荷载分担比随桩顶荷载的变化曲线

设计来说, 参考采用Desai单元计算得到的结果更安全。

2) 在桩顶荷载较小时(本文中桩顶荷载小于1 800 kN时), 采用两种接触面单元所得到的桩身侧阻力、轴力、端阻力以及桩顶、桩身、地面和端面的沉降都非常接近, 几乎没有差别。

3) 在桩顶荷载较大时(本文中桩顶荷载大于1 800 kN时), 采用两种接触面单元所得到的计算结果的差异逐渐显现出来。由于采用Goodman单元和与之对应的接触面参数得到的桩侧极限阻力大于采用Desai单元所得到的极限侧阻力, 从而导致了一系列的差异。此时, 在同一桩顶荷载下, 相对于采用Desai单元而言, 采用Goodman单元得到桩侧阻力较大, 轴力沿桩身递减较快, 将更多的荷载传递给桩周土, 使得桩身中下部桩周土体应力较高, 产生较大的变形, 桩端阻力较小, 桩顶沉降较小, 单桩竖向极限承载力较高。

### 参考文献:

- [1] 祝龙根, 刘利民, 耿乃兴. 地基基础测试新技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [2] 丁明武. 接触面单元对单桩位移应力的影响分析[D]. 南京: 河海大学, 2009.
- [3] 史佩栋. 桩基工程手册[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [4] 《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.

(本文编辑 郭雪珍)