

# 既有地下室增层开挖引起的桩基侧摩阻力损失分析

龚晓南<sup>1, 2</sup>, 伍程杰<sup>1, 2</sup>, 俞峰<sup>3</sup>, 房凯<sup>1, 2</sup>, 杨森<sup>1, 2</sup>

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058;  
3. 浙江理工大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 既有高层建筑地下增层开挖, 不可避免地引起地基应力场改变, 导致桩土接触面和桩端土层应力变化, 从而降低原基础底板下桩基承载力。由于实际工程情况限制, 增层开挖后桩基的承载力无法通过现场试验获得, 因而采用理论分析和有限元模拟增层开挖后桩基承载力就显得尤为重要。采用经典桩侧摩阻力计算公式, 简单地考虑上覆土压变化以及应用 Mindlin 应力解考虑开挖引起的附加应力, 分别计算桩侧极限摩阻力, 然后利用有限元法计算桩侧摩阻力并和前述计算结果相对比, 最后分析了增层开挖条件下桩侧极限摩阻力损失比随不同增层开挖宽度和深度的变化规律, 结果表明: 损失比随增层开挖宽度的增大而增大, 开始呈线性增大然后趋于稳定; 损失比随增层开挖深度的增大而增大, 大致呈线性趋势; 损失比沿桩身由上往下逐渐减小。

**关键词:** 既有建筑; 地下增层; 开挖; Mindlin 应力解; 有限元; 桩侧摩阻力损失

**中图分类号:** TU473.1      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2013)11-1957-08

**作者简介:** 龚晓南(1944-), 男, 浙江金华人, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要从事软黏土工程学、地基处理及复合地基、基坑工程和土工计算分析等方面的研究。E-mail: xngong@hzcnrc.com。

## Shaft resistance loss of piles due to excavation beneath existing basements

GONG Xiao-nan<sup>1,2</sup>, WU Cheng-jie<sup>1,2</sup>, YU Feng<sup>3</sup>, FANG Kai<sup>1,2</sup>, YANG Miao<sup>1,2</sup>

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering of Ministry of Education, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The excavation beneath the existing high-rise buildings, which changes the ground stress field, will result in changes of the stresses at the pile-soil surface and the pile end so as to reduce the bearing capacity of piles. Considering the field conditions, the bearing capacity of piles can not be obtained by field tests after excavation, so it is particularly necessary to evaluate the resistance loss using the theoretical analysis and the finite element simulation. The classical theory is used to calculate the ultimate shaft resistance of the piles. The Mindlin's stress solution and a simplified method are adopted to consider the additional stress caused by excavation. Subsequently, the results of theoretical analysis are compared with those of the finite element analysis. The relationship among loss ratio of the ultimate shaft resistance, excavation width and depth is also analyzed. The results show that the loss ratio increases with the increase of excavation width and exhibits an initial linear increase followed by a more nonlinear increase until a constant value. Moreover, the loss ratio increases with the increasing excavation depth in a linear manner and decreases along the shaft from top to bottom.

**Key words:** existing building; basement-addition; excavation; Mindlin's stress solution; finite element method; pile shaft resistance loss

## 0 引言

近20 a 随着城市建设的发展, 全国各地兴建了大批无地下室或单层地下室的桩基建筑, 这批建筑物正处于服役青壮年期, 然而却被小汽车家庭化带来的日益凸显的停车难问题所困扰, 因此大城市在大力发展公共交通的同时, 也需增加汽车停车位。而露天停车位受城市用地紧张限制, 建筑物下的地下空间成了停

车的理想场所。若这批无地下室或单层地下室建筑拆除重建则代价过大, 在既有建筑下增层开挖地下空间是最佳的解决办法, 但目前鲜有付诸实践的工程。既有高层建筑地下增层开挖必然引起地基应力场的重分布, 导致桩侧土体和桩端土层的竖向有效应力降低,

从而引起原基础底板下桩基承载力损失。

既有高层建筑地下增层开挖涉及到一系列复杂技术。在桩基托换技术这方面已有一定的研究成果, 贾强等<sup>[1]</sup>研究了锚杆静压桩在增设地下空间中的应用, 对锚杆静压桩施工过程中的贯入阻力、承台抗剪和沉降规律等几个关键问题进行了研究; 杜斌等<sup>[2]</sup>研究了钢管纤维桩在基础托换工程中的应用, 全面介绍了其特点、设计以及施工。对于桩基在开挖条件下的承载力研究, Zheng 等<sup>[3]</sup>研究了基坑开挖对桩基承载力的影响, 认为开挖引起低摩擦桩承载力降低 16%~20%, 高摩擦桩承载力提高 22%~44%; 黄茂松等<sup>[4]</sup>、郦建俊等<sup>[5]</sup>通过理论方法研究、离心模型试验、有限元模拟以及现场实测数据相结合的方法研究了软土地基中开挖条件下抗拔桩的极限承载力及其损失; 胡琦等<sup>[6]</sup>、陈锦剑等<sup>[7]</sup>、杨敏等<sup>[8]</sup>、王卫东等<sup>[9]</sup>先后研究了大面积基坑深开挖对坑中桩受力性状的影响, 认为开挖条件下桩体会产生回弹受拉, 桩基承载力降低等; 然而既有高层建筑地下增层开挖后桩基承载力的研究却少有成果, 李勇等<sup>[10]</sup>通过模型试验的方法系统研究了既有建筑增层时桩基础的再设计, 对采用树根桩加固新基础进行了探讨。李超等<sup>[11]</sup>比较系统全面地分析了桩基在增设地下空间中的应用, 但对增层开挖条件下桩基承载力的损失方面研究较浅。

本文依托工程实践, 采用平面单桩模型分析增层开挖对既有桩基桩侧摩阻力影响。首先应用国外学者提出的黏性土中桩侧摩阻力计算公式, 简单地考虑土体开挖卸载和原基础底板下土体超载引起的上覆土压力变化, 给出一个实用的桩侧极限摩阻力计算公式; 然后应用经典 Mindlin 应力解考虑开挖卸载和土体超载引起的附加应力, 计算桩基极限侧摩阻力, 两者对比验证; 接着利用弹塑性有限元法分析增层开挖条件下桩侧摩阻力并和前述方法的计算结果相对比; 最后对桩侧极限摩阻力损失比随不同增层开挖宽度和深度的变化规律进行分析。

## 1 增层开挖条件下桩侧摩阻力计算

### 1.1 桩侧单位面积侧阻 $f_s$ 计算公式推导

假设在极限荷载作用下, 桩沿桩土接触面破坏, Chandler<sup>[12]</sup>、Burland<sup>[13]</sup>和 Azzouz 等<sup>[14]</sup>分别提出黏性土中桩侧单位面积摩阻力  $f_s$  的计算公式:

$$f_s = K \sigma_v \tan \delta \quad , \quad (1)$$

式中,  $K$  为桩侧土的侧压力系数,  $\sigma_v$  为计算点的竖向有效应力,  $\delta$  为桩土破坏面摩擦角。

土体在增层开挖之前, 桩-土体系经历了相当长时间的固结, 超静孔隙水压力已经充分消散, 相当于

正常固结土的静止侧压力系数, 此时有

$$K = K_0^{\text{NC}} = 1 - \sin \varphi' \quad . \quad (2)$$

土体在增层开挖之后, 土体中的应力和超静孔隙水压力还没来得及达到新的平衡, 相当于超固结土的静止侧压力系数, 此时有<sup>[3]</sup>

$$K = K_0^{\text{OC}} = (1 - \sin \varphi') \text{OCR}^{\sin \varphi'} \quad , \quad (3)$$

式中,  $\varphi'$  为土体有效内摩擦角, OCR 为土体的超固结比, 等于增层开挖之前与增层开挖之后的竖向有效应力之比。

在实际应用中, 有

$$K_0^{\text{OC}} \leq K_p = (1 + \sin \varphi') / (1 - \sin \varphi') \quad . \quad (4)$$

根据桩基和土层性质不同,  $\delta$  可取  $0.6 \varphi' \sim 0.9 \varphi'$ <sup>[15]</sup>, 桩侧壁后注浆工艺可以考虑取  $\delta = 0.8 \varphi'$ , 本工程处于杭州软土地区, 取  $\delta = 0.6 \varphi'$ <sup>[4]</sup>。

因此, 最终得到增层开挖之前:

$$f_{s1} = K_0^{\text{NC}} \sigma_v \tan(0.6\varphi') = (1 - \sin \varphi') \sigma_v \tan(0.6\varphi') \quad , \quad (5)$$

增层开挖之后有

$$f_{s2} = K_0^{\text{OC}} \sigma_v \tan(0.6\varphi') = (1 - \sin \varphi') \text{OCR}^{\sin \varphi'} \sigma_v \tan(0.6\varphi') \quad . \quad (6)$$

### 1.2 简单考虑开挖卸载和土体超载

如图 1 所示, 设桩在坑底以下长度为  $L$ , 以桩与水平地面的交点为原点, 竖直向下为  $Z$  轴建立坐标系。竖向高度取计算点至坑底位置之间的距离, 因此对于桩周土体中地面下  $z$  处计算点的竖向有效应力, 在增层开挖之前有

$$\sigma_v = \bar{\gamma}'(z - h_1) + q \quad , \quad (7)$$

在增层开挖之后有

$$\sigma_v = \bar{\gamma}'(z - h_2) \quad . \quad (8)$$

式中  $\bar{\gamma}'$  为土层平均有效重度;  $h_1$  为增层开挖之前地下室埋深;  $h_2$  为增层开挖之后地下室埋深;  $q$  为原基础底板下土体超载。

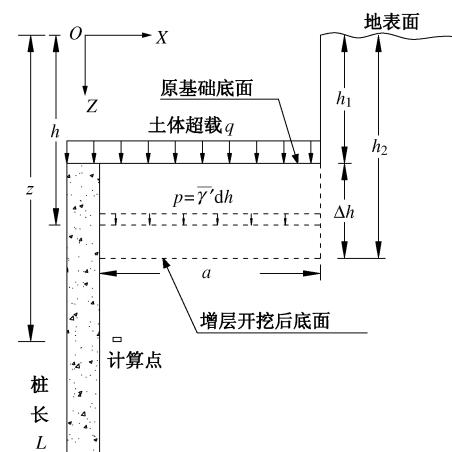


图 1 竖向有效应力计算示意图

Fig. 1 Calculation diagram for vertical effective stress  
整个桩长范围内桩侧摩阻力为

$$Q_{us} = \pi d \int_L f_s dz \quad , \quad (9)$$

式中,  $d$  为桩体直径, 由此即可求出增层开挖前后的桩侧摩阻力。

联合式 (5)、(9) 得到增层开挖之前:

$$\begin{aligned} Q_{us1} &= \pi d \int_L K_0^{NC} [\bar{\gamma}'(z - h_1) + q] \tan(0.6\varphi') dz \\ &= \pi d \sum_{i=1}^{m_1} \int_{l_{i-1}}^{l_i} K_0^{NC} [\bar{\gamma}'(z - h_1) + q] \tan(0.6\varphi') dz \quad . \end{aligned} \quad (10)$$

联合式 (6)、(9) 得到增层开挖之后:

$$\begin{aligned} Q_{us2} &= \pi d \int_L K_0^{OC} \bar{\gamma}'(z - h_2) \tan(0.6\varphi') dz \\ &= \pi d \sum_{i=1}^{m_2} \int_{l_{i-1}}^{l_i} K_0^{OC} \bar{\gamma}'(z - h_2) \tan(0.6\varphi') dz \quad , \end{aligned} \quad (11)$$

式中,  $m_1$  为增层开挖之前沿桩身土体分层数,  $m_2$  为增层开挖之后沿桩身土体分层数, 具体计算中,  $K_0^{OC}$  可取各层土体中点之值。

### 1.3 应用 Mindlin 应力解考虑开挖卸载和土体超载

平面应变问题中, 在土体中作用均布荷载的 Mindlin 应力解分别由徐志英<sup>[16]</sup>和王士杰等<sup>[17]</sup>给出。若宽度为  $a$  的条形均布荷载  $p$  作用于均质各向同性弹性半空间内部深度  $h$  处, 如图 2 所示, 则边缘点下的竖向附加应力公式为

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{p}{4\pi(1-\mu)} \left\{ 2(1-\mu) \left( \arctan^{-1} \frac{a}{Z_1} + \arctan^{-1} \frac{a}{Z_2} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{a[h + (3-4\mu)Z]}{r_1^2} + \frac{4ahZZ_2}{r_2^4} \right\} \quad . \end{aligned} \quad (12)$$

式中  $p$  为土体中作用的均布条形荷载;  $\mu$  为土体的泊松比;  $a$  为条形荷载作用宽度;  $Z_1 = Z - h$ ;  $Z_2 = Z + h$ ;  $r_1^2 = a^2 + Z_1^2$ ;  $r_2^2 = a^2 + Z_2^2$ 。

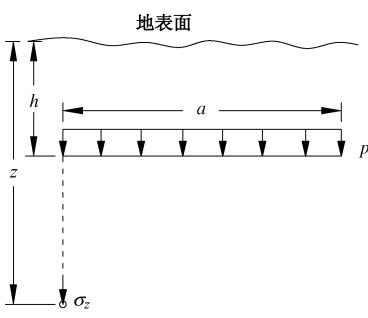


图 2 Mindlin 应力解示意图

Fig. 2 Sketch of Mindlin's stress solution

分析时, 单桩处于增层开挖宽度的对称轴上(见图 1), 即开挖宽度为  $2a$ , 忽略桩体的存在对土体中应力的影响, 则桩周土体由于在深度  $h$  处施加超载或卸载  $p$  引起计算点  $z$  处的竖向有效应力增加或减少为

$$\sigma_z = \frac{p}{2\pi(1-\mu)} \left\{ 2(1-\mu) \left( \arctan^{-1} \frac{a}{Z_1} + \arctan^{-1} \frac{a}{Z_2} \right) + \right.$$

$$\left. \frac{aZ_1}{r_1^2} + \frac{a[h + (3-4\mu)Z]}{r_2^2} + \frac{4ahZZ_2}{r_2^4} \right\} \quad . \quad (13)$$

符号意义同式 (12), 则桩周土体中地面上  $z$  处计算点的竖向有效应力为

$$\sigma_v = \bar{\gamma}'Z \pm \sigma_z \quad . \quad (14)$$

在地面下深度  $h$  处取微小高度  $dh$  的土体, 开挖这部分土体引起的卸载量即这部分土体的竖向有效重度  $\bar{\gamma}'dh$  (见图 1), 即  $p = \bar{\gamma}'dh$ , 将其代入式 (13), 则开挖这部分土体引起计算点  $z$  处的竖向有效应力减少为

$$\begin{aligned} \sigma_z &= \frac{\bar{\gamma}'dh}{2\pi(1-\mu)} \left\{ 2(1-\mu) \left( \arctan^{-1} \frac{a}{Z_1} + \arctan^{-1} \frac{a}{Z_2} \right) + \right. \\ &\quad \left. \frac{aZ_1}{r_1^2} + \frac{a[h + (3-4\mu)Z]}{r_2^2} + \frac{4ahZZ_2}{r_2^4} \right\} \quad . \end{aligned} \quad (15)$$

因此开挖地面下深度  $h$  范围内土体引起计算点  $z$  处的竖向有效应力减少量为

$$\begin{aligned} p_t &= \int_0^h \sigma_z \\ &= \frac{\bar{\gamma}'}{\pi} \left[ h \tan^{-1} \frac{a}{Z_1} - \frac{a}{2} \ln(r_1^2) + Z \arctan^{-1} \frac{Z_1}{a} + h \arctan^{-1} \frac{a}{Z_2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{a}{2} \ln(r_2^2) - Z \arctan^{-1} \frac{Z_2}{a} \right] + \frac{\bar{\gamma}'}{2\pi(1-\mu)} \left[ \frac{a}{2} \ln(r_2^2) - \right. \\ &\quad \left. \frac{a}{2} \ln(r_1^2) + 2Z(1-2\mu) \left( \arctan^{-1} \frac{Z_2}{a} - \arctan^{-1} \frac{Z_1}{a} \right) - \frac{2ahZ}{r_2^2} \right] \end{aligned} \quad (16)$$

基础底板下土体超载  $q$  引起计算点  $z$  处的竖向有效应力增加, 即  $p = q$ , 将其代入式 (13), 则有效应力增量为

$$\begin{aligned} p_c &= \frac{q}{\pi} \left( \arctan^{-1} \frac{a}{Z_1} + \arctan^{-1} \frac{a}{Z_2} \right) + \frac{q}{2\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{aZ_1}{r_1^2} + \right. \\ &\quad \left. \frac{a[h + (3-4\mu)Z]}{r_2^2} + \frac{4ahZZ_2}{r_2^4} \right\} \quad . \end{aligned} \quad (17)$$

因此在增层开挖之前, 计算点  $z$  处的竖向有效应力为

$$\sigma_v = \bar{\gamma}'Z + p_c - p_t \quad . \quad (18)$$

联合式 (5)、(9) 可得桩侧摩阻力为

$$\begin{aligned} Q_{us1} &= \pi d \int_L K_0^{NC} (\bar{\gamma}'Z + p_c - p_t) \tan(0.6\varphi') dz \\ &= \pi d \sum_{i=1}^{m_1} \int_{l_{i-1}}^{l_i} K_0^{NC} (\bar{\gamma}'Z + p_c - p_t) \tan(0.6\varphi') dz \quad . \end{aligned} \quad (19)$$

增层开挖之后, 计算点  $z$  处的竖向有效应力为

$$\sigma_v = \bar{\gamma}'Z - p_{t2} \quad , \quad (20)$$

联合式 (6)、(9) 得桩侧摩阻力为

$$\begin{aligned} Q_{us2} &= \pi d \int_L K_0^{OC} (\bar{\gamma}'Z - p_{t2}) \tan(0.6\varphi') dz \\ &= \pi d \sum_{i=1}^{m_2} \int_{l_{i-1}}^{l_i} K_0^{OC} (\bar{\gamma}'Z - p_{t2}) \tan(0.6\varphi') dz \quad . \end{aligned} \quad (21)$$

式(18)~(21)中,  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  分别为增层开挖前后卸载  $h_1$ ,  $h_2$  深度范围内土体引起计算点  $z$  处的竖向有效应力减少量,  $K_0^{OC}$  可取各层土体中点之值, 其余符号意义同 1.2 节所述。

## 2 实例分析与验证

为了验证 1.2 和 1.3 节所介绍两种理论方法的合理性并分析各自优劣性, 本文应用平面弹塑性有限元法对浙江饭店地下增层开挖条件下单桩承载力进行分析, 并与理论方法计算得到的结果进行比较。

### 2.1 浙江饭店地下扩建工程概况

浙江饭店主楼 12 层, 框剪结构, 附楼 4 层, 整体设一层地下室, 平面呈狭长 L 形, 占地面积约  $2600 \text{ m}^2$ 。基础为桩筏基础, 工程桩均采用钻孔灌注桩, 桩径从  $600 \sim 900 \text{ mm}$ <sup>[18]</sup> 不等。场地位于杭州典型的软土地区, 场地土层分布及物理力学参数<sup>[19]</sup>如表 1 所示。

场地内地下水丰富, 大约在地表下  $0.5 \text{ m}$ , 本文统一考虑地下水位在地表面, 土层平均有效重度  $\bar{\gamma}'$  取  $8 \text{ kN/m}^3$ 。既有地下室埋深为  $5.1 \text{ m}$ , 按照工程前期规划方案, 地下室增层开挖宽度为  $18.5 \sim 34.5 \text{ m}$  不等, 增层开挖深度为  $4.5 \sim 10 \text{ m}$  不定。

### 2.2 弹塑性有限元分析

本文采用大型岩土工程商业软件 PLAXIS 进行分析, 建立平面应变单桩模型。分析时采用  $\varnothing 900$  工程桩, 位于对称轴上, 桩长为  $34 \text{ m}$ , 桩身混凝土 C30, 桩顶既有荷载取单桩承载力特征值为  $4330 \text{ kN}$ <sup>[18]</sup>。桩体用板材料组的梁单元进行模拟, 桩身弹性模量  $E$  按照陈福全等<sup>[20]</sup>提出的计算公式进行取值。建模时依对称轴取平面应变模型宽度的一半, 则建模宽度按照 Randolph 等<sup>[21]</sup>的理论取为  $55 \text{ m}$ , 建模高度为  $55 \text{ m}$ , 首次分析时增层开挖宽度取  $18.5 \text{ m}$ , 增层开挖深度取  $6.5 \text{ m}$ , 如图 3 所示。土体采用硬化土模型进行模拟, 因这种模型能很好地反映开挖卸载这类作用引起的土

体应力应变状态变化。底板下土体超载根据考虑承台效应的桩土共同作用承载力计算方法<sup>[22]</sup>进行计算, 可以得到考虑承台效应的底板下土体承载力特征值为  $11 \text{ kPa}$ , 即本文考虑增层开挖之前基础底板下土体超载  $q=11 \text{ kPa}$ 。

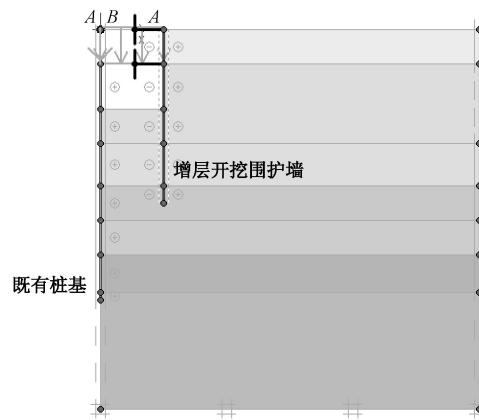


图 3 增层开挖有限元模型

Fig. 3 Finite element model for excavation

数值分析时, 用界面单元来模拟桩侧摩阻力作用, 并引入强度折减因子来反映桩土接触面摩擦角取相应土层摩擦角的折减, 如此能够与 1.1 节桩侧摩阻力计算公式相吻合, 取得较好的比较效果。具体计算步骤如下: 首先计算桩 - 土体系重力加载, 将重力场计算结果作为初始条件, 同时忽略初始位移场, 进行既有地下室的开挖计算, 既有地下室施工完成后再进行长时间 (15 a) 的固结计算, 模拟既有地下室建成后桩土相互作用和土体超孔隙水压力的消散。固结分析完成后再进行增层开挖计算, 由于本文的目的并不是为了分析整个增层开挖施工过程, 而是为了验证第 1 节介绍的桩侧摩阻力计算方法合理性, 因此分析时假设一步开挖完成, 最后将增层开挖的计算结果作为初始条件, 模拟单桩静载试验的整个过程, 分级施加轴向

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil

| 层号             | 名称      | 层厚/m | 重度<br>( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 渗透系数<br>( $\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$ ) | 黏聚力<br>/kPa | 内摩擦角<br>( $^{\circ}$ ) | 压缩模量<br>/MPa | 泊松比  |
|----------------|---------|------|---|--|-------------|------------------------|--------------|------|
| ① <sub>2</sub> | 素填土     | 5.1  | 17.7                                    | $5.3 \times 10^{-4}$                     | 9.0         | 12.0                   | 40           | 0.35 |
| ③ <sub>2</sub> | 淤泥质粉质黏土 | 11.5 | 17.9                                    | $2.2 \times 10^{-4}$                     | 11.2        | 19.5                   | 35           | 0.35 |
| ③ <sub>3</sub> | 淤泥质黏土   | 6.0  | 17.1                                    | $1.3 \times 10^{-4}$                     | 19.6        | 7.0                    | 30           | 0.35 |
| ④ <sub>3</sub> | 黏土      | 5.0  | 19.0                                    | $3.0 \times 10^{-4}$                     | 37.0        | 14.5                   | 73           | 0.35 |
| ⑤              | 粉质黏土    | 5.0  | 18.9                                    | $3.9 \times 10^{-4}$                     | 35.0        | 16.0                   | 70           | 0.35 |
| ⑥ <sub>1</sub> | 黏土      | 5.4  | 18.0                                    | $3.0 \times 10^{-4}$                     | 52.5        | 9.0                    | 45           | 0.35 |
| ⑧ <sub>2</sub> | 强风化安山岩  | —    | 22.0                                    | $7.8 \times 10^{-2}$                     | 450.0       | 53.0                   | 150          | 0.25 |

荷载, 直至得到桩侧摩阻力的极限值。

利用弹塑性有限元对增层开挖后桩基的承载力进行模拟, 总加载量 7000 kN, 分 5 级完成。图 4, 5 分别为增层开挖后桩基加载过程中的桩侧摩阻力和桩身轴力图, 从图中可以看到从-5.1 m 至-11.6 m 段由于桩周土体已经开挖卸载, 所以这段桩体无桩侧摩阻力, 桩身轴力保持不变; 从-11.6 m 至-39.1 m 段, 桩侧摩阻力随着加载过程从上往下逐渐发挥, 直到总加载量为 7000 kN 时, 此时桩侧摩阻力达到极限值, 大约为 1396 kN; 在整个加载过程中, 桩身轴力从上往下逐渐减小, 图 5 中曲线在土体上部大致平行, 在土体下部斜率增大, 轴力减小速率加快, 这说明土体上部桩侧摩阻力在较小的荷载下即已发挥完全, 而土体下部桩侧摩阻力随加载量增大逐渐发挥而达到极限值。

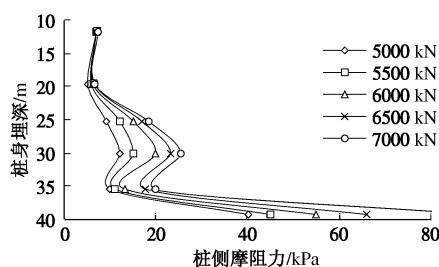


图 4 增层开挖后桩侧摩阻力随加载过程变化图

Fig. 4 Variation of shaft resistance with loading after excavation

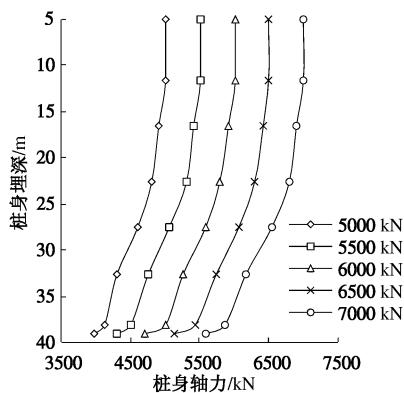


图 5 增层开挖后桩身轴力随加载过程变化图

Fig. 5 Variation of axial force with loading after excavation

## 2.3 有限元法与理论公式计算结果对比分析

本节利用弹塑性有限元法研究地下增层开挖对桩侧摩阻力的影响, 并将有限元模拟结果和理论计算结果进行对比分析。对于简单考虑开挖卸载和土体超载的方法称之为简单公式法, 对于应用 Mindlin 应力解考虑开挖卸载和土体超载的方法称之为 Mindlin 应力解法。表 2 为增层开挖深度为 6.5 m 时, 不同增层开挖宽度下桩侧极限摩阻力的 2 种理论计算结果与有限元模拟结果的对比, 表 3 为增层开挖宽度为 18.5 m 时,

不同增层开挖深度下桩侧极限摩阻力的 2 种理论计算结果与有限元模拟结果的对比。从表 2 中可以看出, 简单公式法计算结果偏小, 而 Mindlin 应力解法计算结果跟有限元模拟结果比较相近, 偏差在 5% 左右。

简单公式法可以考虑不同增层开挖深度对桩侧摩阻力的影响, 但无法考虑不同增层开挖宽度对桩侧摩阻力的影响, 这是其计算公式本身决定的, 且其计算结果偏于保守, 跟有限元模拟结果相比较偏小 5%~35% 不等, 这是由于其过分地考虑了开挖土体部分卸掉的荷载, 相当于无穷大宽度的开挖, 但这种方法简单, 便于工程技术人员掌握和手算, 因此在工程规划初期作为对桩基侧摩阻力损失的预判, 不失为一种可取的方法。

Mindlin 应力解法可以分别考虑不同增层开挖宽度和开挖深度对桩侧摩阻力的影响, 注意到当增层开挖宽度趋向于无穷大时, 其计算结果等于简单公式法的计算结果, 这印证了前述说法的正确性, 同时也证明了 Mindlin 应力解法的合理性, 但其计算结果较其余两种方法偏大, 与有限元模拟结果相比偏大 5% 左右, 这是由于其考虑土体为连续介质, 并没有考虑土体孔隙的存在, 这种方法总体来说是可靠的, 是笔者推荐的方法, 其计算误差在工程可接受范围之内, 并且工程技术人员可以手算, 适合工程计算书编制阶段深入分析。

表 2 不同开挖宽度时桩侧极限摩阻力理论结果与有限元结果对比

Table 2 Comparison between calculated ultimate shaft resistances and finite element simulations under different excavation widths

| 增层开挖宽度 $2a/m$ | (kN) |      |      |      |          |
|---------------|------|------|------|------|----------|
|               | 0    | 18.5 | 34.5 | 70   | $\infty$ |
| 简单公式法         | 1605 | 1099 | 1099 | 1099 | 1099     |
| Mindlin 应力解法  | 1776 | 1417 | 1253 | 1138 | 1099     |
| 有限元法          | 1677 | 1396 | 1201 | 1092 | 1033     |

表 3 不同开挖深度时桩侧极限摩阻力理论结果与有限元结果对比

Table 3 Comparison between calculated ultimate shaft resistances and finite element simulations under different excavation depths

| 增层开挖深度 $\Delta h/m$ | (kN) |      |      |      |      |
|---------------------|------|------|------|------|------|
|                     | 0    | 4.5  | 6.5  | 10   | 15   |
| 简单公式法               | 1605 | 1225 | 1099 | 896  | 661  |
| Mindlin 应力解法        | 1776 | 1494 | 1417 | 1259 | 1082 |
| 有限元法                | 1677 | 1409 | 1396 | 1207 | 1018 |

图 6, 7 分别是在不同增层开挖宽度和深度时桩侧极限摩阻力沿桩身分布的 Mindlin 应力解法计算结果与有限元模拟结果的对比图, 从图中可以看出 Mindlin

应力解法计算的桩侧摩阻力沿桩身的分布规律跟有限元模拟结果基本一致, 随着增层开挖宽度增大桩侧极限摩阻力减小, 随着增层开挖深度增加桩侧极限摩阻力减小。但两种方法的结果在数值上还是有一些偏差, 这主要是由于本文弹性有限元法是一种整体分析方法, 而 Mindlin 应力解法则采用了一些假设简化分析模型。

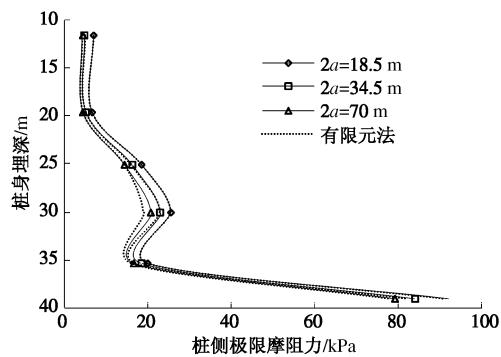


图 6 不同开挖宽度时桩侧极限摩阻力沿桩身分布图

Fig. 6 Distribution of ultimate shaft resistance along piles under different excavation widths

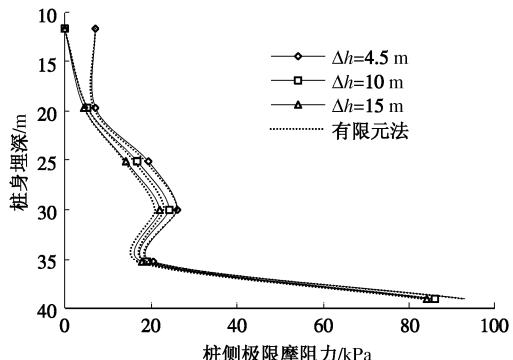


图 7 不同开挖深度时桩侧极限摩阻力沿桩身分布图

Fig. 7 Distribution of ultimate shaft resistance along piles under different excavation depths

### 3 增层开挖后桩侧摩阻力损失比分析

由上述分析可知, 桩侧摩阻力在增层开挖后会有一定的损失, 定义桩侧摩阻力损失比为增层开挖后桩侧极限摩阻力损失值与增层开挖前桩侧极限摩阻力值之比, 考虑到工程设计时最关心的问题是已知建筑物既有桩基资料的情况下, 既有桩基的桩侧摩阻力损失比随不同增层开挖宽度和深度的变化规律, 和群桩中不同位置基桩的桩侧摩阻力损失比规律, 本文采用不同的增层开挖宽度来近似考虑群桩中不同位置的基桩, 应用上述的 Mindlin 应力解法分析基桩的桩侧摩阻力损失比随增层开挖宽度和深度的变化规律。

图 8 是保持增层开挖深度  $\Delta h=6.5$  m 不变的情况下

下, 桩侧摩阻力损失比随增层开挖宽度的变化曲线, 描绘了整个桩长范围以及 3 个典型黏性土层范围内的桩侧摩阻力损失比。从图 8 中可以看出随增层开挖宽度增加桩侧摩阻力损失比逐渐增大, 损失比在前期近似呈线性增大, 达到一定增层开挖宽度 (大约 2 倍桩端埋深) 后, 桩侧摩阻力损失比趋于平稳, 最终完全开挖 ( $2a \rightarrow \infty$ ) 时整个桩长的桩侧摩阻力损失比达到 38%; 在整个增层开挖宽度范围内, 均有桩长范围内的损失比  $>④_3$ , 土层范围内的损失比  $>⑤$ , 土层范围内的损失比  $>⑥_1$ , 土层范围内的损失比, 这说明越靠近增层开挖底部桩侧摩阻力损失比越大, 损失比沿桩身由上往下逐渐减小; 图 8 说明群桩中不同位置的基桩在增层开挖后桩侧摩阻力损失比是不同的, 中心桩的桩侧摩阻力损失比相比边角桩要大, 当增层开挖宽度为 18.5 时, 中心桩的桩侧摩阻力损失比达到 20.2%, 而临近增层开挖基坑边的边角桩的桩侧摩阻力损失比只有 3%。

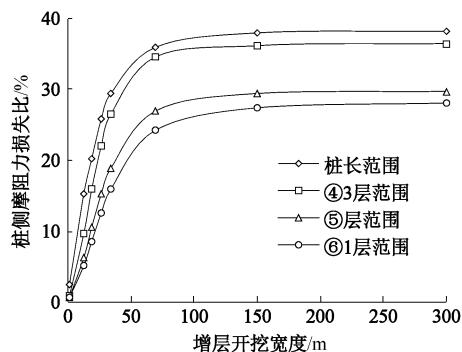


图 8 桩侧摩阻力损失比随增层开挖宽度变化曲线

Fig. 8 Variation of loss ratio of shaft resistance of piles with excavation width

图 9 是保持增层开挖宽度  $2a=18.5$  m 不变的情况下, 桩侧摩阻力损失比随增层开挖深度的变化曲线, 描绘了整个桩长范围以及 3 个典型黏性土层范围内的桩侧摩阻力损失比。从图中可以看出随增层开挖深度增加桩侧摩阻力损失比逐渐增大, 大致呈线性增大趋势 ( $④_3$  土层在增层开挖深度 20 m 时大部分已被挖掉, 故损失比突然快速增大), 在增层开挖深度为 4.5 m 时桩侧摩阻力损失比为 15.5%, 当增层开挖深度达到 20 m 时 (超过一半桩长 17 m) 桩侧摩阻力损失比超过 50%; 在整个增层开挖深度范围内, 均有桩长范围内的损失比  $>④_3$ , 土层范围内的损失比  $>⑤$ , 土层范围内的损失比  $>⑥_1$ , 土层范围内的损失比, 这同样说明越靠近增层开挖底部桩侧摩阻力损失比越大, 损失比沿桩身由上往下而逐渐减小; 图 9 说明在地下增层开挖施工过程中桩侧摩阻力损失比是呈线性增加的, 在增层开挖宽度为 18.5 m 的前提下, 当地下增层开挖 1 m 时

桩侧摩阻力损失比为 7%, 随着开挖施工的进行开挖深度逐渐增大, 桩侧摩阻力损失比也呈线性增大。

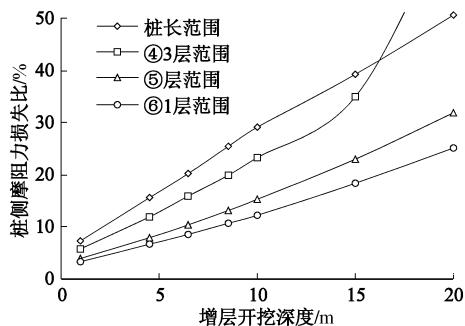


图 9 桩侧摩阻力损失比随增层开挖深度变化曲线

Fig. 9 Variation of loss ratio of shaft resistance of piles with excavation depth

## 4 结 论

本文首先推导了开挖条件下桩侧单位面积极限摩阻力的计算公式, 并分别就简单考虑开挖卸载和土体超载(即简单公式法)以及应用 Mindlin 应力解考虑开挖卸载和土体超载(即 Mindlin 应力解法)给出了桩侧极限摩阻力  $Q_{us}$  的理论计算公式, 然后采用 2 种理论方法和有限元法分析了浙江饭店地下扩建工程增层开挖对桩侧摩阻力的影响, 并对分析验证了所提出的 Mindlin 应力解法的合理性, 在此基础上进一步分析了桩侧摩阻力损失比随不同增层开挖宽度和深度的变化规律。本文着重于卸载引起的桩侧摩阻力损失, 不考虑承载力的时效性, 通过理论公式推导以及数值模拟分析, 针对具体实际工程, 比较理论计算结果和数值分析结果, 得出以下 4 点结论。

(1) 简单公式法的计算结果虽然偏于保守, 但其作为工程规划初期对桩基侧摩阻力损失的预判, 不失为一种可取的方法; Mindlin 应力解法和有限元法都可以分别考虑不同增层开挖宽度和深度对桩侧摩阻力的影响, 并且在本文中两者计算结果相差 5% 左右, 符合工程精度要求。

(2) 随着增层开挖宽度的增加, 桩侧摩阻力损失比逐渐增大, 开始呈线性增大趋势, 在开挖宽度接近 2 倍桩端埋深时趋于稳定; 中心桩的桩侧摩阻力损失比相对边角桩要大, 中心桩受增层开挖影响较大, 边角桩受增层开挖影响较小。

(3) 随着增层开挖深度的增加, 桩侧摩阻力损失比大致线性增大, 当增层开挖深度超过一半桩长时桩侧摩阻力损失比超过 50%; 在增层开挖施工的过程中, 随着开挖进度的进行桩侧摩阻力损失比线性增加。

(4) 在整个桩长范围内, 越靠近增层开挖底部桩

侧摩阻力损失比越大, 损失比沿桩身由上往下而逐渐减小。

## 参 考 文 献:

- [1] 贾 强, 应惠清, 张 鑫. 锚杆静压桩技术在既有建筑物增设地下空间中的应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(7): 2053 - 2057. (JIA Qiang, YING Hui-qing, ZHANG Xin. Construction of basement in existing buildings by static bolt-pile[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(7): 2053 - 2057. (in Chinese))
- [2] 杜 斌, 刘祖德, 聂向珍, 等. 既有建筑物基础托换技术中的钢管纤维桩工法[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 1040 - 1044. (DU Bin, LIU Zu-de, NIE Xiang-zhen, et al. Steel fiber pile technology in underpinning project of existing building[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 1040 - 1044. (in Chinese))
- [3] ZHENG Gang, PENG Si-yuan, CHARLES W W Ng, et al. Excavation effects on pile behaviour and capacity[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2012, 49(12): 1347 - 1356.
- [4] 黄茂松, 郦建俊, 王卫东, 等. 开挖条件下抗拔桩的承载力损失比分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9): 1291 - 1297. (HUANG Mao-song, LI Jian-jun, WANG Wei-dong, et al. Loss ratio of bearing capacity of uplift piles under deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1291 - 1297. (in Chinese))
- [5] 郦建俊, 黄茂松, 王卫东, 等. 软土地基中扩底抗拔中长桩的极限承载力分[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2643 - 2651. (LI Jian-jun, HUANG Mao-song, WANG Wei-dong, et al. Analysis of uplift capacity of long enlarged-base pile in soft soil ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(9): 2643 - 2651. (in Chinese))
- [6] 胡 琦, 凌道盛, 陈云敏, 等. 深基坑开挖对坑内基桩受力特性的影响分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(7): 1965 - 1970. (HU Qi, LING Dao-sheng, CHEN Yun-min, et al. Study of loading characters of pile foundation due to unloading of deep foundation pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1965 - 1970. (in Chinese))
- [7] 陈锦剑, 王建华, 范 巍, 等. 抗拔桩在大面积深开挖过程中的受力特性分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 402 - 407. (CHEN Jin-jian, WANG Jian-hua, FAN Wei, et al. Behavior of up-lift pile foundation during large-scale deep excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 402 - 407. (in Chinese))
- [8] 杨 敏, 逮建栋. 深开挖基坑回弹引起的坑中桩受力与位移计算[J]. 同济大学学报, 2010, 38(12): 1730 - 1735.

- (YANG Min, LU Jian-dong. A calculation of behavior of underpinning pile subject to excavation of deep foundation pit[J]. Journal of Tongji University, 2010, **38**(12): 1730 - 1735. (in Chinese))
- [9] 王卫东, 吴江斌. 深开挖条件下抗拔桩分析与设计方法[J]. 建筑结构学报, 2010, **31**(5): 202 - 208. (WANG Wei-dong, WU Jiang-bin. Design and analysis of uplift pile under deep excavation[J]. Journal of Building Structures, 2010, **31**(5): 202 - 208. (in Chinese))
- [10] 李 勇. 既有建筑增层改造时桩基础的再设计试验研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2010. (LI Yong. Experimental study on redesign of pile foundation for increasing storey on built building[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2010. (in Chinese))
- [11] 李 超. 桩式基础托换在地下加层工程中的应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2008. (LI Chao. Study on the application of pile foundation underpinning in the basement-addition of existing buildings[D]. Nanjing: Southeast University, 2008. (in Chinese))
- [12] CHANDLER R J. The shaft friction of piles in cohesive soils in terms of effective stresses[J]. Civil Engineering and Public Works Review, 1968, **63**: 48 - 51.
- [13] BURLAND J B. Shaft friction of piles in clay-a simple fundamental approach[J]. Ground Engineering, 1973, **6**(3): 30 - 42.
- [14] AZZOUZ A S, BALIGH M M, Whittle A J. Shaft resistance of piles in clay[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1990, **116**(2): 205 - 221.
- [15] POTYONDY J G. Skin friction between various soils and construction materials[J]. Géotechnique, 1961, **11**(4): 339 - 345.
- [16] 徐志英. 以明特林(Mindlin)公式为根据的地基中垂直应力的计算公式[J]. 土木工程学报, 1957, **4**(4): 485 - 497. (XU Zhi-ying. Calculation formula of vertical stress in foundation depends on Mindlin's formula[J]. Chinese Journal of Civil Engineering, 1957, **4**(4): 485 - 497. (in Chinese))
- [17] 王士杰, 张 梅, 张吉占. Mindlin 应力解的应用理论研究[J]. 工程力学, 2001, **18**(6): 141 - 148. (WANG Shi-jie, ZHANG Mei, ZHANG Ji-zhan. Study on the application of theory of Mindlin's stress solution[J]. Engineering Mechanics, 2001, **18**(6): 141 - 148. (in Chinese))
- [18] 浙江城建建筑设计院. 浙江饭店翻扩建工程施工图[R]. 杭州: 浙江城建建筑设计院, 1996. (Zhejiang Urban Construction and Architectural Design Institute. Design paper of Zhejiang Hotel Expansion Project[R]. Hangzhou: Zhejiang Urban Construction and Architectural Design Institute, 1996. (in Chinese))
- [19] 杭州市勘察测绘院. 浙江饭店翻扩建工程地质勘察报告[R]. 杭州: 杭州市勘察测绘院, 1996. (Hangzhou Surveying and Mapping Institute. Geological survey report of Zhejiang Hotel Expansion Project[R]. Hangzhou: Hangzhou Surveying and Mapping Institute, 1996. (in Chinese))
- [20] 陈福全, 杨 敏. 地面堆载作用下邻近桩基性状的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(11): 1286 - 1290. (CHEN Fu-quan, YANG Min. Numerical analysis of piles influenced by lateral soil movement due to surcharge loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(11): 1286 - 1290. (in Chinese))
- [21] RANDOLPH M F, WROTH C P. Analysis of deformation of vertically loaded piles[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1978, **104**(12): 1465 - 1488.
- [22] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ 94—2008. Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))