

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2017.05.013

多支撑基坑开挖对邻近桩基影响的三维数值研究^{*}

李 琳^{1,2}, 宋 静^{1,2}, 张建新^{1,2}, 魏 祥³, 沈益源⁴

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384;
3. 上海申元岩土工程有限公司, 上海 200040; 4. 中国水利水电第十二工程局有限公司, 浙江 杭州 310004)

摘要: 基坑开挖引起的地层移动对临近建筑物下桩基产生影响。运用岩土数值计算软件 FLAC^{3D} 进行了多支撑围护基坑开挖对邻近桩基影响的三维数值研究, 采用修正剑桥硬化土模型模拟土体的非线性应力—应变关系, 桩基采用线弹性模型, 桩土之间建立接触面。首先在标准问题中对不同桩顶约束条件的邻近桩基进行了研究, 然后就围护墙体水平位移量、桩基与基坑开挖面的距离、桩基刚度、桩基长度和桩顶竖向荷载等因素对邻近桩基的影响规律进行了研究, 计算结果与先前学者的工程实测结果进行了对比, 与工程实测数据在其基本分布方面具有较高的一致性, 可为相关的设计施工提供参考。

关键词: 多支撑围护基坑; 地层移动; 邻近桩基; 桩顶约束条件; 桩侧土压力
中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2017)05-0782-08

Three-dimensional Numerical Analysis of Pile Response due to Multi-braced Excavation-induced Lateral Soil Movement

LI Lin^{1,2}, SONG Jing^{1,2}, ZHANG Jianxin^{1,2}, WEI Xiang³, SHEN Yiyuan⁴

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Soft Soil Characteristics and Engineering Environment, Tianjin 300384, China;
3. Shanghai Shen Yuan Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200040, China;
4. Sinohydro Bureau 12 Co., Ltd., Hangzhou 310004, China)

Abstract: Basement excavation work for a new building would result in soil movement behind the retaining structure. The soil movement might induce considerable bending moment and deflection on the pile foundations supporting existing structures nearby. In this paper, by using the explicit finite difference code FLAC^{3D}, the behavior of pile adjacent to multi-braced excavation is investigated. The modified-cam clay constitutive model is employed to model the non-linear stress-strain soil behavior, and the pile is assumed to have linear elastic behavior. The interface model incorporated in FLAC^{3D} code has been used to simulate the soil/pile contact. In “standard” problem, the effects of different pile head constraints on the pile response are investigated, the effects of lateral deflection of the wall, distance from the excavation face, pile stiffness, pile length and axial load on the pile response are also investigated when the pile head is free. The research finding is compared with other published case history and reasonably good agreement is found between them and could be valuable for the design and construction of the excavation.

Keywords: multi-braced excavation; soil displacement; adjacent pile; the pile head constraints; the lateral soil pressure along the pile shaft

^{*} 收稿日期: 2016-06-12; 修回日期: 2016-10-26
基金项目: 国家自然科学基金项目(41172233)、天津市自然科学基金重点项目(13JCZDJC35500)资助
作者简介: 李琳(1971-), 男, 副教授, 博士。主要从事基础工程和岩土数值模拟方面的教学和研究工作。
Email: lilintjuci@126.com

引言

随着城市建设的发展,建筑物越来越密集,新建建筑物的深基坑开挖引起的周围地层移动会使临近建筑物下的桩基产生附加弯矩和位移,导致桩基工作性能出现问题,甚至引起破坏。Poulos 等^[1]指出侧向土体移动对临近桩基的影响更为重要,尤其是对于混凝土桩基,在设计时并未考虑承担较大的水平向荷载。国内外很多学者进行了这方面的研究,杨敏等^[2]运用弹塑性有限元法研究了无支撑基坑开挖与邻近桩基的相互作用,陈福全等^[3]运用 Plaxis 8.2 土工有限元程序研究了内支撑排桩支护基坑开挖对邻近单、双排桩的影响,对支护桩的刚度、邻近桩基的刚度、桩基与支护面之间的距离、桩基长度、桩头约束等对桩基附加弯矩及侧向位移的影响进行了研究,郑刚等^[4]以实测工程为算例,采用三维有限元法进行了计算并与实测进行了对比,分析了桩基与基坑间距、桩基刚度、竖向荷载和桩顶约束条件等对桩基附加弯矩、位移的影响。Ding 等^[5]采用土工有限元软件 Plaxis,对土岩双层地基中的内支撑基坑开挖对邻近桩基位移和弯矩的影响进行了研究,Poulos 等^[1,6]运用边界元和有限元的两阶段计算方法分别进行了粘性土中无支撑基坑开挖、有内支撑基坑开挖对邻近桩基影响的研究,并设计了图表可计算桩基的附加弯矩和位移,并与工程测试结果进行了比较,具有良好的一致性。在深基坑开挖对邻近桩基影响的研究中,基坑周围土体位移场的模拟是首要问题,以上学者的数值模拟中采用了摩尔库伦或屈雷斯卡理想弹塑性模型,而采用硬化土模型可以更好地模拟基坑变形及周围土体的位移场,Li 等^[7]运用 FLAC^{3D},土体采用修正剑桥硬化土模型进行数值模拟研究了悬臂基坑开挖对邻近单桩的影响,李琳等^[8]运用 FLAC^{3D},土体采用修正剑桥硬化土模型研究了悬臂基坑开挖对邻近桩基 $P-\delta$ 曲线的影响。

岩土离心机试验方面, Leung 等^[9]利用离心机模型试验研究了砂土地基中悬臂围护基坑开挖对邻近单桩影响, Ong 等^[10-11]分别利用离心机模型试验法研究了粘性土地基中悬臂围护基坑开挖(分围护墙体稳定和围护墙体倒塌两种情况)对邻近单桩影响, Leung 等^[12]利用离心机模型试验法研究了砂土地基中悬臂围护基坑开挖对邻近群桩的影响, Ong 等^[13]利用离心机模型试验法研究了粘性土地基中

悬臂基坑开挖对邻近群桩的影响。

目前,岩土离心机尚难以进行多支撑基坑开挖的试验研究,数值模拟在这一问题方面的研究显得更为重要,本文运用岩土数值计算程序 FLAC^{3D} 建立三维模型,土体采用修正剑桥模型,考虑桩顶约束条件、围护墙体位移量、桩基刚度、竖向荷载和桩长等因素,研究了多支撑基坑开挖对邻近桩基位移、剪力和弯矩的影响,并重点研究了基坑开挖引起的邻近桩基侧向土压力分布,最后数值模拟结果与 Goh 等^[14] 的现场实测结果进行了对比。

1 数值计算模型

1.1 模型概况

一矩形基坑平面尺寸为 $90\text{ m} \times 20\text{ m}$ 。基坑最大开挖深度为 14 m ，围护结构采用厚度为 0.6 m 的地下连续墙，墙深 26 m 。沿深度方向共设三道水平支撑，其中第一道支撑为 $500\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ 的 C30 混凝土支撑，高程为 -1.0 m ，其余两道支撑为 $\varphi 400\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 钢管支撑，高程分别为 -5.0 m 和 -9.0 m ，支撑的水平向间距为 6 m ，基坑剖面见图 1，由于对称按 $1/2$ 绘出。

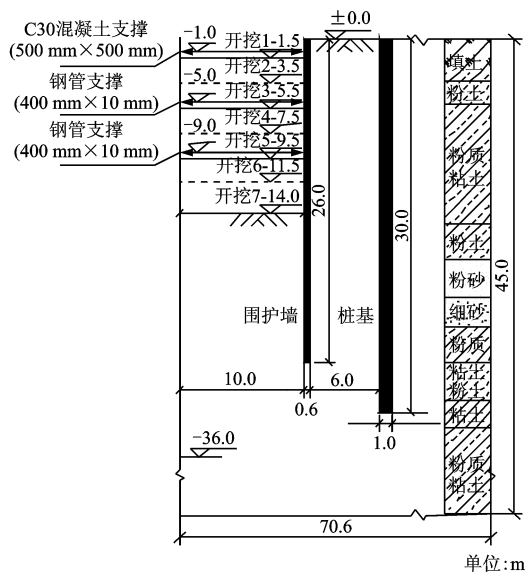


图 1 基坑开挖断面示意

Fig. 1 Cross section of excavation

由于该基坑为矩形基坑,而且长宽比远大于2,可以按平面问题考虑,数值计算模型中仅截取该基坑中长6 m的一段建立模型,邻近桩基为单桩,可满足桩间距要求。计算模型沿垂直于基坑围护墙方向长度为70.6 m(约为 $5H$, H 为基坑最大开挖深

度,以下同),计算模型深度方向为 45 m,可满足减小边界效应保证计算准确的需要。为保证计算结果的正确和提高计算精度,经反复优化对桩基周围附近土体网格加密,直到增加网格密度对计算结果影响很小以至于没有影响为止,距离桩基较远处网格尺寸逐渐增大。

围护墙体和桩基按弹性模型,采用实体单元模拟,水平支撑、立柱用梁单元(*beam*)模拟,立柱桩用桩单元(*pile*)模拟。为便于计算,水平支撑按轴向抗压刚度等效原则将三道支撑分别进行换算,第一道支撑换算为 0.3 m×0.3 m 的 C30 混凝土支撑,第二道、第三道支撑换算为 0.2 m×0.2 m 的 C30 混凝土支撑,换算后各道支撑水平间距均为 3 m。模型共 230400 个单元和 248306 个节点,结构单元共 198 个单元和 210 个节点。模型边界条件为:地表各节点均自由,其余各面均约束垂直于该面方向的位移。

采用修正剑桥模型模拟土体的非线性应力—应变特性,由于该基坑所在地天津第四土层较厚且第四土层参数比较接近各地层参数的平均值,为研究方便采用均质土层且所取参数与天津第四土层参数相一致^[15]。模型参数如下:土体重度 $\gamma=1.9$ kN/m³,泊松比 $\mu=0.35$,孔隙比 $e=0.78$,超固结比 $OCR=1.0$,压缩常数 $\lambda=0.090174$,回弹常数 $\kappa=0.009304$,摩擦常量 $M=0.82$ 。

1.2 桩基模型

邻近桩基采用线弹性模型,桩基直径为 1 m,泊松比 $\mu=0.3$,在标准模型中桩基按 C30 混凝土考虑,桩基弹性模量 $E_P=30$ GPa,桩基横剖面沿径向 4 等分,沿圆周 32 等分,沿竖直方向桩基网格尺寸为 0.5 m,桩基按 1/2 建模,共 3840 个单元。

1.3 接触面模型

桩-土界面和围护墙-土界面上均设置接触面,FLAC^{3D}中的无厚度接触面单元由一系列三节点的三角形单元构成,采用库伦剪切本构关系,接触面参数主要有粘结力 c 、摩擦角 φ 、法向刚度 K_n 、切向刚度 K_s 、抗拉强度 T 和膨胀角 ψ 。如果接触面所受拉应力超过接触面的抗拉强度的话,接触面单元允许产生分离,接触面分离后节点的法向力和切向力就会为零。接触面的粘结力 c 和摩擦角 φ 按桩周土的 2/3 取值,则接触面上粘结力 $c=13$ kPa,摩擦角 $\varphi=14^\circ$,膨胀角 $\psi=0$,抗拉强度 $T=0$,接触面刚度 K_n 、

K_s 按邻近最硬区域 10 倍等效刚度取值,见公式(1)^[16],同时考虑计算速度,在保证计算结果准确的条件下进行适当折算后按表 1 取值。

$$K_n=K_s=10\times\max\left[\frac{K+\frac{4G}{3}}{\Delta Z_{\min}}\right]$$

(1)

式中, K 为体积模量; G 为剪切模量; $\Delta Z_{\min}$ 为接触面法向方向上邻接区域上最小单元尺寸。

表 1 接触面参数
Table 1 Interface parameters

单位:(Pa/m)

接触面	法向刚度 K_n	切向刚度 K_s
围护墙体侧向	2.1×10^9	2.1×10^9
围护墙体底面	4.2×10^9	4.2×10^9
桩基侧向	3.8×10^9	3.8×10^9
桩基底面	7.6×10^9	7.6×10^9

1.4 基坑开挖步

计算中首先施加重力场,进行初始地应力平衡。为了提高计算结果精度,共进行了 7 个开挖计算步,具体施工工况见表 2。

表 2 基坑开挖计算步
Table 2 Calculation steps of excavation

计算步	施工工况
0	初始地应力平衡
1	开挖至-1.5 m(悬臂开挖段)
2	施加第一道水平支撑于-1.0 m 高程,开挖至-3.5 m
3	开挖至-5.5 m
4	施加第二道水平支撑于-5.0 m 高程,开挖至-7.5 m
5	开挖至-9.5 m
6	施加第三道水平支撑于-9.0 m 高程,开挖至-11.5 m
7	开挖至-14.0 m

2 结果与分析

首先进行一个标准问题的研究,在标准问题中的各参数为常量,参数如下:围护墙厚 0.6 m,弹性模量为 30 GPa,围护墙体抗弯刚度 $EI_w=0.54\times10^9$ N·m²/m,邻近桩基与基坑开挖面之间的距离 $X=6$ m,桩长 $L_P=30$ m,桩基弹性模量 $E_P=30$ GPa,下面先进行标准模型的研究,然后通过改变模型中的参数来进行其它方面的研究。标准模型中基坑围护墙体的最大水平位移为 39.2 mm,相当于 0.28% H (H 为基坑最大开挖深度, $H=14$ m,下同),按天津市一级基坑的变形控制要求处于正常变形控制范围以内(按天津市基坑设计监测规程一级

基坑采用地下连续墙或排桩支护时,深层水平位移监测报警值为 $0.4\% H \sim 0.5\% H$),图 2 为基坑不同开挖步时围护墙体位移及弯矩,围护墙体变形基本呈抛物线型,符合多支撑基坑围护墙体变形规律。

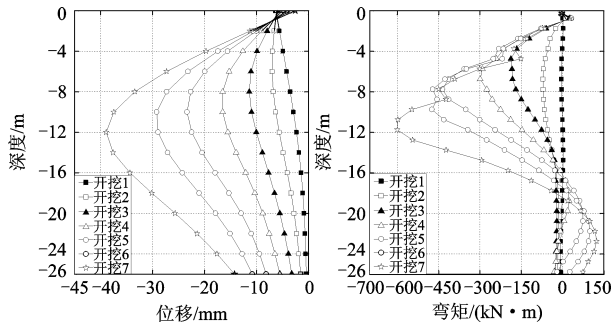


图 2 围护墙体位移和弯矩

Fig. 2 The deflection and bending moment of retaining walls

本文中关于位移、弯矩、剪力和桩侧土压力的方向规定如下:桩基位移为负值则表示桩基产生朝向坑内的位移,反之则产生朝向坑外的位移;桩基截面剪力以剪力使桩基一微段产生顺时针方向旋转为正,反之为负;弯矩以桩基在远离基坑的一侧弯曲受拉为正,反之为负;桩侧土压力(净土压力,下同)以桩侧土压力指向基坑内方向为正,反之为负。桩基位移为桩基轴心线的位移,桩侧土压力是通过累加单位桩长上接触面节点上的法向力及切向拖曳力在土体位移方向上的分量得到。

2.1 标准问题分析

在标准问题中桩顶的约束条件简化为桩顶自由、桩顶铰接和桩顶固定 3 种情况。当邻近基坑的单桩在垂直于基坑边线方向无约束时,桩顶可视为自由(例如高架桥走向和基坑边线平行时)。桩顶铰接情况(桩顶位移约束但是转动自由)多出现在当建筑物采用单桩支撑上部柱子时,为提高基础的整体稳定性在桩顶采用系梁连接,系梁一般较为长细仅对各桩基发挥横向支撑作用而转角约束作用很小,因此可以将桩基顶部视为铰接。而桩顶固定适用于带有大型桩帽的桩基或者大型桩筏基础结构中的桩基等。随着基坑开挖深度增加,邻近桩基位移、内力和桩侧土压力均增大,图 3 仅绘出基坑最后一个开挖步时邻近桩基沿桩长的水平位移、弯矩、剪力和桩侧土压力分布。

由图 3 可以看出,不同桩顶约束的影响较大,不同桩顶约束时桩身最大水平位移及发生位置基本相同,但是弯矩、剪力和桩侧土压力的分布相差较大。

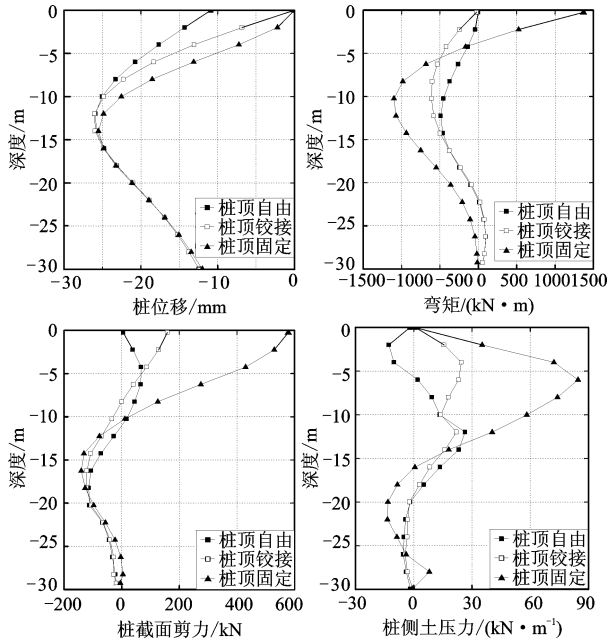


图 3 标准问题桩基性状

Fig. 3 Pile response for “standard” problem

在桩顶自由情况下,地表浅层桩身上部出现反向土压力,即桩侧土压力指向基坑外方向,主要是由于在基坑开挖过程中在地表浅层(0~6 m 左右)中桩基由于转动导致桩身上部的位移量比土体位移大(多支撑基坑围护墙体变形呈抛物线型,在地表附近处围护墙体水平位移量较小,引起地表浅层土体位移量也较小),相对应出现的剪力图上,在桩顶自由时在地表浅层 0~6 m 范围内剪力一直呈增大趋势,在深度 6 m 左右位置桩基剪力达到极值,由于桩侧土压力方向发生改变,然后随深度增加桩基剪力开始减小。在桩顶固定情况下,桩身弯矩总的来说比其他两种情况都要大,桩基顶部会产生非常大的固端弯矩,桩顶剪力也是 3 种情况中最大的,说明桩顶固定情况时桩顶部位受力很大,应考虑该部位桩基承载性能,在开挖时应对桩顶部位重点监测。

2.2 围护墙体水平位移量的影响

由于文章篇幅所限,在考虑围护墙体水平位移量对桩基影响时,桩顶约束按桩顶自由考虑,在接下来的研究中,桩顶约束也都按桩顶自由考虑。在实际工程中基坑围护墙体的水平位移量变化范围较大,对多支撑围护结构围护墙体的刚度对基坑水平变形的影响较小,所以通过改变水平支撑的刚度以实现不同的围护墙体变形,其它参数均与标准模型中一致。最大开挖深度($H=14\text{ m}$)时,围护墙体水平位移量分别为 $0.20\% H$ 、 $0.28\% H$ 、 $0.32\% H$ 、

0.38%*H* 和 0.41%*H*, 所对应的邻近桩基的位移、内力及桩侧土压力分布见图 4, 可以看出邻近桩基的位移、弯矩、剪力和桩侧土压力均随围护墙变形量增加而增大, 以桩基位移增大最为明显。

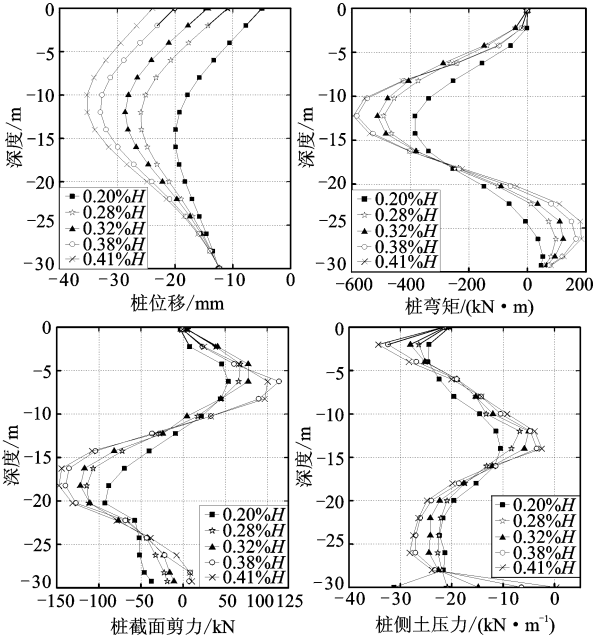


图 4 围护墙体水平位移量变化对桩基性状的影响
Fig. 4 Effect of deflection of retaining wall on the response of pile

2.3 桩基与基坑开挖面距离的影响

图 5 为在最大挖深时桩基与基坑开挖面距离 *X* 为 3、6、9、12、18、21、25 m 时邻近桩基的位移、内力和桩侧土压力分布。当桩基与基坑开挖面距离 *X* ≤ 12 m 时, 桩基水平位移、弯矩、剪力和桩侧土压力分布形状很相似, 但是随距离增大很快降低, 当距离 *X* > 12 m 后, 桩基的各反应均较小, 这说明当桩基距离基坑开挖面超过 1.0*H* 后, 基坑开挖对邻近桩基影响已经比较小了。

2.4 桩基刚度的影响

对水平受荷桩及被动桩可采用 Poulos 等^[17]提出的桩基柔度因数 *K_R* 来评价桩土相对刚度:

$$K_R = \frac{E_P I_P}{E_S L^4} \quad (2)$$

式中, *E_P* 为桩基弹性模量; *I_P* 为桩基横截面惯性矩; *E_S* 为土体压缩模量; *L* 为桩基长度。当 *K_R* = 10⁻² 时, 为刚性桩, *K_R* = 10⁻³ 时, 为中等刚度桩, 当 *K_R* = 10⁻⁴ 时, 为柔性桩。

由于桩径、桩长和土体模量的变化都对桩基柔度因数产生影响, 按标准模型中的参数(土体模量按

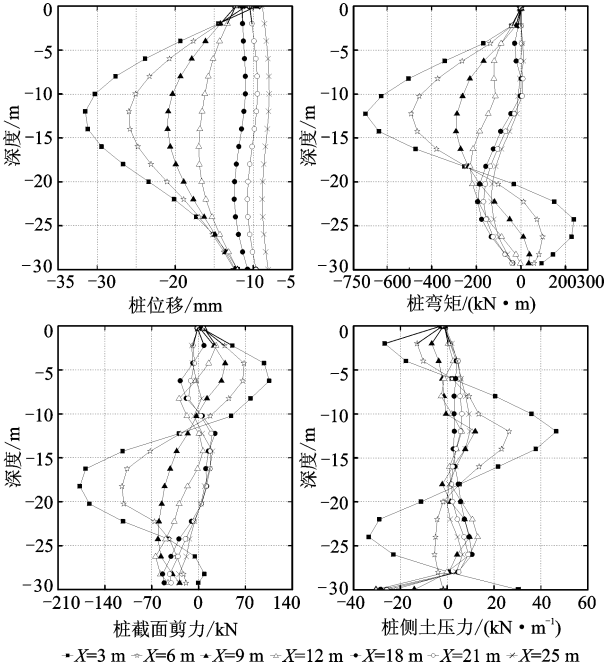


图 5 桩基与基坑开挖面距离变化对桩基性状的影响
Fig. 5 Effect of distance from excavation face on the response of pile

桩长深度范围内地层平均模量取值) 计算得到的 *K_R* 约为 10⁻⁴, 属于柔性桩。为简化计算, 本文计算中仅通过改变桩基的刚度来实现桩基柔度因数的改变。桩基刚度分别取标准模型中桩基刚度的 0.1 *EI*、1.0 *EI* (*E* = 30 GPa)、10 *EI*、40 *EI* 和 60 *EI*, 其中 40 *EI* 和 60 *EI* 时桩基柔度因数 *K_R* 约为 10⁻³, 属于中等刚度桩。在最大挖深时桩基位移、内力和桩侧土压力分布见图 6, 可以看出随着桩基刚度增加桩基的挠曲变形减小, 但是桩基的内力和桩侧土压力增大。当桩基刚度较小, 在 10 *EI* 以内时, 桩身位移中间大、两端小, 最大位移在基坑开挖面附近, 当桩基刚度超过 40 *EI* 后, 桩顶位移最大且随桩基刚度进一步增大, 桩基挠曲变形减小。

2.5 桩长的影响

计算中分别取桩长为 8、14、21、30、35、40 m, 在基坑最大挖深时桩基位移、内力和桩侧土压力分布见图 7。当桩长不超过 14 m (约为 1.0 倍基坑最大挖深) 时, 桩基主要产生倾斜和转动, 挠曲变形很小, 桩基的内力和桩侧土压力也较小, 这时可将其称为短桩情况; 当桩长在 14~21 m (约为 1~1.5 倍基坑最大挖深) 时, 桩基挠曲变形增大, 同时桩基位移、内力和桩侧土压力随桩长增加而增大, 这时可将其称为中长桩情况; 当桩长大于 21 m (约为 1.5 倍基坑

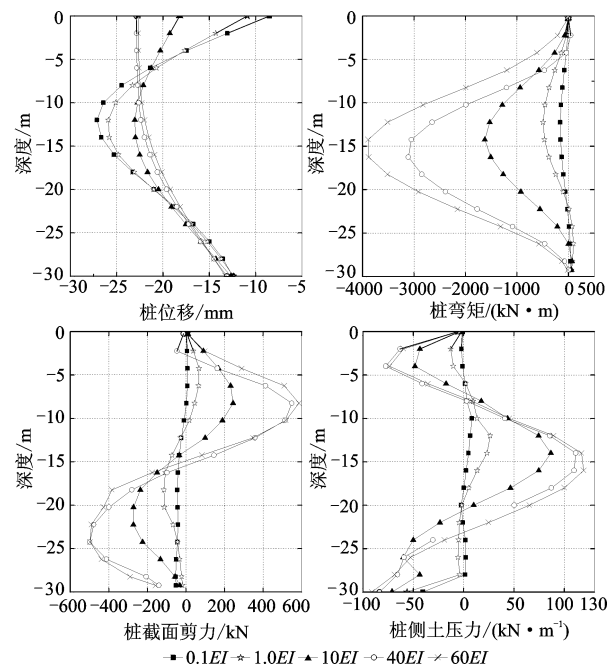


图 6 桩基刚度变化对桩基性状的影响
Fig. 6 Effect of pile stiffness on the response of pile

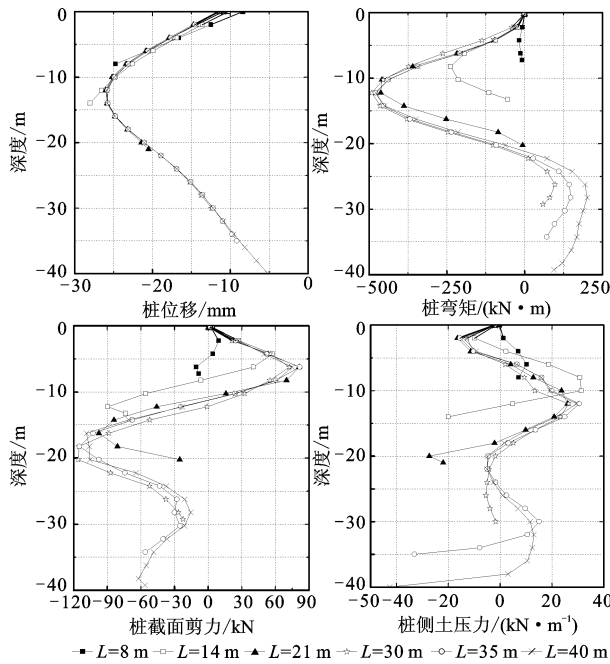


图 7 桩长变化对桩基性状的影响
Fig. 7 Effect of pile length on the response of pile

最大挖深)以后,桩基的位移、内力和桩侧土压力基本上不再随桩长变化而变化,这时可将其称为长桩情况。

2.6 桩顶竖向荷载的影响

实际工程中桩基础大多同时还要承受上部结构传下来的荷载,所以需要考虑桩顶竖向荷载的影响,为确定所需施加竖向荷载的大小,进行单桩静载荷

试验的数值模拟以获得桩基极限承载力,土体采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型(土体参数由原来修正剑桥模型参数相应转换),桩基的各参数不变,静载试验数值模拟得到桩基极限承载力为 2513 kN,则允许承载力可取 1257 kN。取桩顶竖向荷载分别为 628 kN(0.5 倍允许承载力),1257 kN(1.0 倍允许承载力)、2513 kN(极限承载力),不同竖向荷载时在最大挖深时的邻近桩基位移、内力和桩侧土压力见图 8,可以看出当桩顶竖向荷载小于允许承载力时,竖向荷载影响较小,当桩顶竖向荷载达到其极限承载力时,桩基的位移量稍有增大,弯矩明显减小,剪力明显减小,桩侧土压力变化不明显。

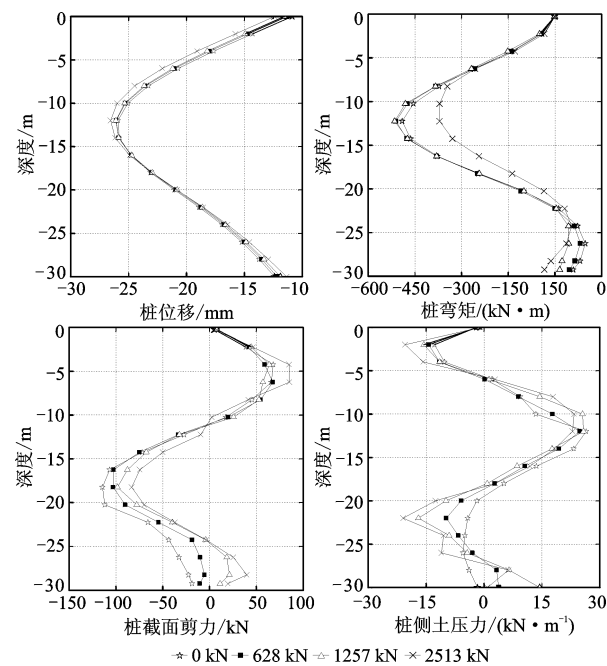


图 8 桩顶竖向荷载变化对桩基性状的影响
Fig. 8 Effect of axial load on the response of pile

3 与实测结果对比

Goh 等^[14]进行了一个明挖隧道基坑开挖对邻近桩基影响的实测研究,其基坑宽度为 20 m,最大开挖深度为 16 m,围护结构采用地下连续墙加 6 道水平支撑,墙厚为 0.8 m,墙深度达到 31 m,6 道支撑位置分别在 -1、-4、-6.5、-9、-11.5、-13.5 m 高程处,邻近桩基的直径为 1 m、桩长为 46 m,桩基位于基坑开挖面后 3 m 位置处。在两个不同开挖深度时对基坑地下连续墙后 3m 处的土体位移、桩基位移和弯矩分别进行了实测,其中 stageA 为开挖至第三道水平支撑位置处,stageB 为开挖至最大深度处(最大挖深为 16 m)。

利用本文的计算结果与 Goh 等^[14]的实测数据进行对比,为了和实际工程保持一致,计算中桩基位于基坑开挖面后 3 m,桩长分别取 30、40 m,计算模型中的其它参数与标准模型一致。

计算结果也取两个开挖高程,对应于 stageA 基坑开挖至 -7.5 m,对应于 stageB 基坑开挖至最大深度为 -14 m,两个开挖深度分别与 Goh 等^[14]的实测数据进行了对比,桩长都按相应的基坑开挖深度进行了归一化处理(stageA 定义基坑开挖深度为 H_1 ,stageB 定义开挖深度为 H)。

从图 9 中可以看出,两个不同开挖深度时计算结果与 Goh 等^[14]的实测结果相比尽管具体数值上有所不同(土层参数等情况都不同),但是其沿桩长的分布变化趋势很相近。主要差别在于本文的计算结果中桩基位移、弯矩在开挖面以下偏大,桩基位移偏大原因可能是由于本文计算模型中开挖面以下基坑围护墙体的位移有些偏大,从而使得基坑开挖面以下土层对桩基约束能力不强造成的。

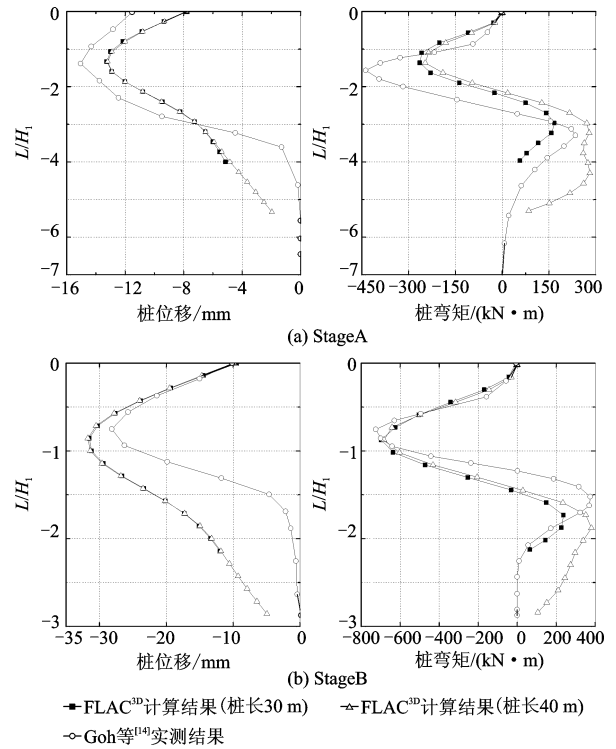


图 9 与 Goh 等^[14]实测结果对比

Fig. 9 Contrast with the measured results of Goh et al

4 结 论

(1)邻近桩基桩顶约束条件对桩基位移、内力和桩侧土压力的分布影响较大,桩基水平位移在桩顶自由时最大,桩顶铰接或固定时桩基略有减小。桩

基弯矩在桩顶自由时最小,桩顶铰接时增大,桩顶固定时最大,桩顶固定时还会在桩基顶部产生显著的固端弯矩。桩顶铰接及桩顶固定时在桩基顶部会产生较大剪力,以桩顶固定时桩基顶部剪力最大,使得桩基顶部成为危险部位。桩侧土压力方面以桩顶自由时最小,桩顶铰接时桩侧土压力增大,桩顶固定时桩侧土压力最大。

(2)邻近桩基的反应随开挖深度增加而增强。围护墙体水平位移量增加会引起桩基反应增强,其中以邻近桩基位移量增大最为明显;桩基距离基坑的距离增加,桩基反应会降低,当距离超过 1.0 H 后,基坑开挖对邻近桩基的影响较小;桩基刚度的增加会使桩基的挠曲变形减小,但是桩基内力和桩侧土压力会增大。

(3)可以根据桩长不同将邻近桩基分为三种情况:短桩情况,中长桩情况,长桩情况。在短桩情况时,由于基坑开挖,桩基主要产生倾斜或转动,内力增加较小,随桩基长度增加,基坑开挖引起的桩基挠曲变形和内力增大,但当达到长桩情况以后,桩基挠曲变形和内力基本不再随桩长的增加而增大。

(4)随竖向荷载增加桩基反应不明显,当竖向荷载小于桩基的允许承载力时,竖向荷载影响较小,当竖向荷载接近桩基极限承载力时,桩基弯矩有较明显减小,剪力稍有减小,位移稍有增大,桩侧土压力变化不明显。

(5)数值计算结果与工程实测结果在桩基位移、桩基弯矩沿桩长的分布规律方面是相当吻合的,这对数值计算结果的可靠性进行了验证。

参考文献:

[1] Poulos H G, Chen L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 123(2): 94-99.

[2] 杨 敏,周洪波,杨 桦. 基坑开挖与邻近桩基相互作用分析[J]. 土木工程学报,2005,38(4):91-96.

Yang M, Zhou H B, Yang H. Numerical analysis of pile responses due to unsupported excavation-induced lateral soil movement [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(4): 91-96. (in Chinese)

[3] 陈福全,汪金卫,刘毓毓. 基坑开挖时邻近桩基性状的数值分析[J]. 岩土力学,2008,29(7):1971-1976.

Chen F Q, Wang J W, Liu Y Ch. Numerical analysis of pile response due to braced excavation-induced soil

- lateral movement[J]. Chinese Journal of Rock and Soil Mechanics, 2008,29(7): 1971-1976. (in Chinese)
- [4] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等. 基坑开挖对邻近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J]. 岩土工程学报, 2007,29(5):638-643.
- Zheng G, Yan Zh X, Lei H Y, et al. Field observation and finite element numerical simulation analysis of effect on adjacent piles due to excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 638-643. (in Chinese)
- [5] Ding Wenqi, Qiao Yafei. Numerical analysis of pile response to deep excavation in soil overlying rock[C]//Geotechnical Special Publication, n 242 GSP, 2014: 700-709.
- [6] Poulos H G, Chen L T. Pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(6): 670-677.
- [7] Li Lin, Dong Guanghui, Zhang Fenghui, et al. Three-dimensional numerical analyses of pile response due to unstrutted excavation-induced lateral soil movement [C]//Geotechnical Special Publication, n 242 GSP, 2014: 808-817.
- [8] 李琳,胡小新,杨敏,等. 悬臂基坑开挖对邻近桩基 $p-\delta$ 曲线影响的数值研究[J]. 2015,31(增2):32-39.
- Li L, Hu X X, Yang M, et al. Numerical studies on the adjacent pile $p-\delta$ responses due to the unstrutted excavation-induced lateral soil movement[J]. Building Science, 2015, 31(Sup2): 32-39. (in Chinese)
- [9] Leung C F, Chow Y K, Shen R F. Behaviour of pile subject to excavation-induced soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, 126(11): 947-954.
- [10] Ong D E L, Leung C F, Chow Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. I: stable wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006,132(1):36-44.
- [11] Ong D E L, Leung C F, Chow Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. II: collapsed wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006,132(1):45-53.
- [12] Leung C F, Lim J K, Shen R F, et al. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(1):58-65.
- [13] Ong D E L, Leung C F, Chow Y K. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement in very soft clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2009, 135(10): 1462-1474.
- [14] Goh A T C, Wong K S, Teh C I, et al. Pile response adjacent to braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(4):383-386.
- [15] 孟梁. 天津软土的结构性及本构模型研究[D]. 天津:天津大学,2009.
- Meng L. Study on structural property and constitutive model for Tianjin soft clay[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [16] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC3D (fast lagrangian analysis of continua in 3d dimensions) user manuals version4.0[R]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group, Inc,2009.
- [17] Poulos H G, Davis E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980: 178-179.