

立柱桩在深基坑分步开挖过程中的上拔位移分析

楼晓明¹, 杨晶¹, 李德宁¹, 刘建航^{1, 2}

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海申通地铁公司, 上海 200031)

摘要: 基于对坑底地基卸荷应力与回弹变形的新认识和一种可考虑桩间土承受附加荷载与变形的广义荷载传递法, 提出了深基坑立柱桩因开挖而隆起的分析方法。该方法可考虑立柱桩的变截面特性以及分步设撑、开挖的施工工况, 可分析桩土之间的荷载传递特性。由于支撑立柱桩容易实施位移观测, 立柱桩的分析结果便于与实测结果比较, 为分析方法的完善、计算参数的合理选取提供基础。通过和 2 个工程实例对比, 验证了用本方法计算立柱桩在开挖过程中受力及位移的合理性, 同时对计算值与实测值的差异原因进行了讨论。

关键词: 深基坑; 立柱桩; 荷载传递法; 隆起; 上拔位移

中图分类号: TU432

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)01-0193-06

作者简介: 楼晓明 (1965-), 男, 博士, 副教授。E-mail: louhanliang45502@vip.sina.com。

Uplift displacement of soldier piles during stepped excavation of deep foundation pits

LOU Xiao-ming¹, YANG Jing¹, LI De-ning¹, LIU Jian-hang^{1, 2}

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai

Shentong Metro Company, Shanghai 200031, China)

Abstract: Based on the new understanding about rebound stress and deformation at the bottom of deep foundation pits and the generalized load transfer method considering the additional load or deformation of the soil around piles, an analytical method is proposed for the uplift of soldier piles due to excavation. It can take many factors into account, e.g., variable cross-section character of soldier piles, installation and stepped excavation of strut system and construction situation, and it can be employed to analyze the load transfer behaviors of soldier piles. Because the uplift displacement of the soldier piles is easily monitored, the calculated results are easily compared with the measured ones, which can improve the method itself and the parameters to be chosen more reasonably. Through two cases, the rationality of the proposed method to calculate the uplift displacement of soldier piles is validated. The difference between the calculated and the measured values is also discussed.

Key words: deep foundation pit; soldier pile; load transfer method; heave; uplift displacement

0 引言

深基坑开挖时坑底土隆起, 在坑底附近土体位移大于工程桩位移, 土对桩产生向上的摩阻力; 在桩端附近土体位移小于桩的上抬位移, 土对桩产生向下的摩阻力。这样会导致桩身受拉, 在某些情况下使其在素混凝土或低配筋率段拉断或开裂^[1]。因此有必要对基坑开挖过程中的桩土之间的相互影响机理进行相关研究, 为工程桩在基坑开挖期间的受力特性计算提供理论依据。

基坑隆起对桩的影响, 与膨胀土对桩的影响相似, Poulos 等^[2]曾用弹性理论法, 假定膨胀量随深度分布已知来分析膨胀土隆起对桩的影响。杨敏和逯建栋^[3]曾用残余应力法^[4]计算基坑底地基土的自由回弹量, 再用弹性理论分析了刚性单桩的回弹量。

对于桩土相互作用, 弹性理论法不能很好地分析非线性特性, 而荷载传递法则相对较好。自 20 世纪 50 年代 Seed 和 Reese^[5]提出以来发展迅速, 应用广泛, 但这一方法主要适用于桩顶明确受力、地基土不直接受力的单桩情况。楼晓明和孙晓峰^[6]曾采用一种广义荷载传递法来分析带垫层刚性桩复合地基的桩土共同受力特性, 计算结果与实际较吻合, 该方法在研究桩身受力和地基土也同时承受附加荷载或变形时的适用性较好。

其他相关文献大多是用有限元程序模拟开挖对工程桩受力特性等的影响^[7-11], 由于基坑工程属于三

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50978201)

收稿日期: 2012-02-06

维问题,施工工况复杂,坑内工程桩很多,有限元模拟无论从计算量、计算时间还是从众多参数取值看,均显得困难很大,难以广泛应用。

关于工程桩在基坑开挖期间受拉变形破坏的实测资料很少,实测研究也较难入手。而基坑支撑的立柱桩在基坑开挖初始阶段即暴露,位移观测较方便,工程实测资料也比较多。立柱桩与工程桩不同之处主要是立柱桩多了上部分用于承担支撑重量的格构钢柱,格构钢柱截面尺寸较小,在各道支撑重量作用下的压缩变形不可忽视,因此对立柱桩的受力变形研究,必须考虑桩身变截面及桩身在支撑荷载作用下的压缩变形影响。

现今关于基坑隆起对立柱桩影响的研究很少,贺翀^[12]通过简化受力分析了基坑开挖时立柱桩的隆起量,但没有考虑支撑重量,分步开挖、设撑的施工工况对立柱桩隆起过程的影响。

要开展基坑开挖导致立柱桩上拔位移的研究,计算坑底回弹变形沿深度方向的分布非常重要。楼晓明等^[13]结合坑底土的卸荷回弹试验与基坑开挖回弹的分层实测资料,提出了一种机理更加清晰的回弹应力与回弹变形的计算方法。

本文基于文献[6]的广义荷载传递法结合文献[13]的坑底回弹变形沿深度方向分布的计算方法提出了一种立柱桩随基坑开挖而隆起变形的分析方法。该方法可考虑桩身变截面,分步开挖、设撑等实际施工工况,可分析桩土之间的荷载传递特性。至于深基坑开挖对桩侧极限摩阻力或单桩承载力的影响则不在本文讨论范围之内。

1 深基坑坑底土的回弹应力与回弹变形计算

根据文献[13],对于开挖深度为 H 的基坑,坑底回弹应力 $\Delta\sigma_{rz}$ 随着深度呈近似线性衰减的关系。其计算公式为

$$\Delta\sigma_{rz} = \alpha_z p_c - \gamma' z \quad (1)$$

式中, α_z 为弹性半空间的附加应力系数, p_c 为开挖掉的土重, $\alpha_z p_c$ 即为卸荷应力, γ' 为坑底到离坑底深度为 z 处的平均有效重度。当 $\Delta\sigma_{rz}$ 小于0时,取0。对于规模较大的基坑, α_z 可取为1。

坑底回弹应力随深度发展情况如图1所示。根据公式(1),对于开挖深度为 H 的基坑,回弹应力在坑底最大,为开挖掉的土重。当坑底以下为均质土时,回弹应力将随深度线性衰减。当整个考虑深度范围内都为均质土时, $H=H'$ 。对于图1所示作用在围护结构外侧的净土压力,可以近似认为,三角形部分由支

撑承担,矩形部分由基坑内侧土承担。

知道了竖向卸荷应力和水平向的净土压力,根据弹性力学中的平面应变计算公式,可以把土的竖向隆起变形看成一维问题,用分层总和法及可得出坑底回弹变形的计算公式:

$$s_r = \psi_c \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_{rz} H_i}{E_{ri}} \quad (2)$$

式中, E_{ri} 为土层回弹模量, H_i 为各层土厚度, ψ_c 为考虑坑底土侧向受压影响的修正系数,对于长条窄形基坑,近似修正系数可取2^[13]。

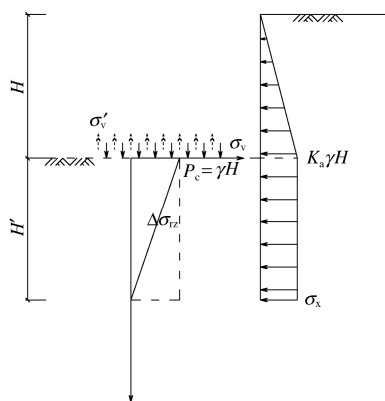


图1 坑底回弹应力示意图

Fig. 1 Diagram of rebound stress

2 坑底土隆起对立柱桩影响的分析方法

2.1 不考虑分步开挖工况

基坑开挖后土的隆起对立柱及工程桩有向上的摩阻力,产生上拔变形;同时立柱及工程桩对隆起区域土有向下摩阻力,约束坑底土的隆起变形。而对于工程桩,桩与土的受力特性会在地中性点深度处反向,上部分土的位移大于桩的上抬位移,下部分土位移小于桩的上抬位移。受力简化图如图2左侧所示。

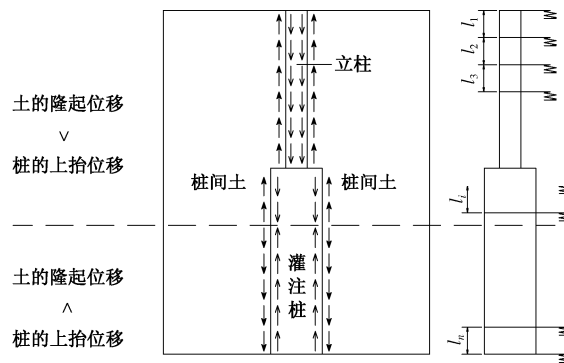


图2 深基坑卸荷桩与桩间土受力简化图

Fig. 2 Simplified diagram of forces acting on pile and soil in deep foundation pit during unloading

无桩条件下坑底土隆起位移可利用前面提到的

坑底隆起位移计算理论求得。当有桩的情况下,对于大面积群桩里面的单桩与周围土的受力传递特性,本文采用广义荷载传递法。

广义荷载传递法的优点:①对大面积群桩仅取其中的一根桩及代表的桩间土进行分析,计算范围得到合理简化;②对桩与桩间土当作相互独立又相互联系的柱体进行分析,可考虑桩间土的受力情况。

将桩、土分成 n 个小单元,单元之间用非线性弹簧连接,如图2右侧所示。

对于离散了的桩,可以列出桩、土单元的平衡方程。特定情况下,当桩上有外荷载 $\{Q_p\}$ 、土上无外荷载时,可以得出桩、土的位移表达式^[6]

$$([K_p] + [K_w])\{s_p\} = \{Q_p\} + [K_w]\{s_s\}, \quad (3)$$

$$([K_s] + [K_w])\{s_s\} = [K_w]\{s_p\}, \quad (4)$$

式中, $[K_p]$, $[K_s]$ 为桩、土的刚度矩阵, $\{s_p\}$, $\{s_s\}$ 为桩以及土的位移, $\{Q_p\}$ 为作用于桩上的外荷载列向量,在立柱上表现为支撑荷载, $[K_w]$ 为桩土相互作用刚度矩阵,根据荷载传递函数与桩土相对位移确定。

桩土作用的传递函数采用线弹性全塑性模型,桩土间极限摩阻力按下式计算:

$$\tau_u = \begin{cases} \xi_i \sigma' & \xi_i \sigma' \leq f_s \\ f_s & \xi_i \sigma' > f_s \end{cases}, \quad (5)$$

式中, ξ_i 为第 i 层桩间土摩阻力系数, σ' 为桩间土有效应力, f_s 为土的极限侧阻力。

先计算无桩条件下坑底土的隆起位移,并考虑桩的存在,根据桩土相对位移与荷载传递函数计算 $[K_w]$,加上支撑荷载,运用公式(3)即可求出坑底隆起导致的桩位移列向量,代入公式(4)得桩影响下土的位移变化量,该变化量与土的天然隆起位移叠加,即为有桩条件下土的最终隆起位移。上述计算过程重复多次,以前后两次计算结果相对误差足够小为稳定条件,这是一种迭代分析方法。

2.2 考虑分步开挖工况

实际基坑开挖一般是分步开挖,开挖到一定深度,土带动桩产生一定的隆起位移,同时架好该道支撑,支撑荷载使立柱桩有下沉趋势。再开挖到下道支撑位置,架好支撑,桩在原先隆起的基础上再产生一定的隆起量。由于立柱桩的位移变化在基坑开挖过程中可以全过程监测,为便于计算与实测结果比较,有必要模拟分步开挖、设撑的施工工况,这需要采用增量法来描述。

增量法公式可表示为

$$([K_p] + [K_w])\{\Delta s_p\}^i = \{\Delta Q_p\}^i + [K_w]\{\Delta s_s\}^i, \quad (6)$$

$$([K_s] + [K_w])\{\Delta s_s\}^i = [K_w]\{\Delta s_p\}^i, \quad (7)$$

式中, $[K_w]^i$ 为第 i 步开挖桩土相互作用刚度矩阵,桩土接触面积随开挖深度变化而变化; $\{\Delta s_p\}^i$, $\{\Delta s_s\}^i$ 为第 i 步开挖桩、土的位移增量; $\{\Delta Q_p\}^i$ 为第 i 步设置的支撑重量; $[K_s]^i$ 为第 i 步开挖时土柱刚度矩阵,土柱高度随开挖深度变化而减小,立柱桩体刚度矩阵 $[K_p]$ 则不随开挖过程而变化。

综合以上迭代法与增量法的思路,编制 MATLAB 程序的求解过程如下:

(1) 将桩与桩周土分成若干个单元,利用基坑坑底隆起位移计算理论,计算每一步基坑卸荷后土体的天然隆起位移 $\{ht\}^i$,进而得出该开挖步骤的天然隆起位移增量 $\{\Delta ht\}^i$ 。

(2) 对于每一步开挖,令土的初始位移 $\{\Delta s_s\}_1^i = \{\Delta ht\}^i$,运用弹塑性荷载传递函数模型,得出土的初始位移影响下的桩隆起位移 $\{\Delta s_p\}^i$ 。

(3) 根据公式得出在桩的摩阻力作用下由给定桩位移产生的土位移 $\{\Delta s_s\}^i$,它需要与卸荷土体的天然隆起位移增量 $\{\Delta ht\}^i$ 叠加才是有工程桩影响时土的位移。将两者相减,得出加入桩的影响之后的土位移,若为负值则赋值 0。

(4) 如果相邻两次求的土位移 $\{\Delta s_s\}_1^i$ 与 $\{\Delta s_s\}^i$ 之差超过预先设定的容许值 ε ,则用土的新位移 $\{\Delta s_s\}^i$ 求桩的位移。

(5) 重复步骤(3)和(4)。循环下来若相邻两次土的计算位移差值小于容许值 ε ,则迭代结束。得出第 i 步桩、土的位移增量最终计算值 $\{\Delta s_p\}^i$, $\{\Delta s_s\}^i$ 。

(6) 将第 i 步位移增量与以前各步的位移增量相加,即为第 i 步的桩、土位移总量列向量 $\{\Delta s_p\}^i$, $\{\Delta s_s\}^i$,其代入各柱体的力与位移方程,可求出该步开挖时的桩、土柱体的轴力和相互作用摩阻力列向量。

3 实例分析

3.1 上海某地铁站基坑多步开挖模拟

上海地铁某基坑,分为东坑和西坑2个基坑,基坑宽 22 m,东侧基坑长度 174 m,西侧基坑长度 62 m,开挖深度约 37.9 m。基坑采用了 9 道钢筋混凝土支撑,立柱桩采用直径 1200 mm 的钻孔灌注桩,立柱采用边长 850 mm 的格构柱。由于基坑实行全过程监测,故能测量到每次每步开挖加撑时的立柱位移情况。

基坑的剖面、土层分布如图3所示^[14-15]。基坑设置 9 道撑,所以施工时分 9 步开挖。前两步开挖隆起位移小,本文收集了第三步开挖后的立柱隆起位移监测资料。支撑荷载取 150 kN/道。开挖地区所处土层特性表如表1所示^[14]。

实测资料及计算结果如图4所示。根据计算曲线,

第(1)~(5)步开挖即基坑挖到19.6 m前,立柱隆起曲线较缓,后面几步开挖立柱隆起曲线陡增,可以推测实际基坑开挖时桩与土相互作用的完全发挥需要一定的开挖深度积累。另一方面也说明当开挖深度大于19.6 m(第5道支撑位置)时,立柱隆起变形的计算增幅越来越大,这对于立柱上的水平支撑来说是比较危险的。因为支撑浇筑后立柱与连续墙的上拔位移之差就相当于水平支撑的竖向挠度,立柱对支撑有上顶力,根据实测,地下连续墙顶最大上抬量为13.2 mm,支撑最大竖向挠度在开挖过程中未超过2 cm,即小于立柱与连续墙之间跨度的2‰,现场支撑未发现裂缝^[14],说明这种影响还在安全范围内;反之,支撑对立柱除了重力外还有附加下压力,也就是说支撑对立柱桩的隆起变形有约束作用,支撑越多,约束作用越强,实测曲线在最后一步开挖开始变得平缓,可能与这个因素有关。当然还有一个因素不可忽视:注浆加固措施明显提高了粉细砂的坑底地基抗力系数,减小主动土压力和坑底未注浆区的侧压力,也有助于减小基坑、立柱桩的隆起量。

表1 案例1各土层的力学特性表

Table 1 Mechanical parameters of soil layers for case 1					
层数	地基土名称	饱和重度 (kN·m ⁻³)	极限侧摩阻力 f _s /kPa	回弹模量 /MPa	埋深 /m
① ₂	杂填土	17.6	20	20	1.6
②	淤泥质黏土	18.2	20	15	11.9
③	软黏土	16.8	25	20	14.8
④	淤泥质黏土	18.3	40	12	25.9
⑤ ₂	砂质粉土	19	45	40	34.4
⑦ ₂	粉细砂	19.3	80	60	64.9
⑨ ₁	细砂	19.8	85	100	81.9

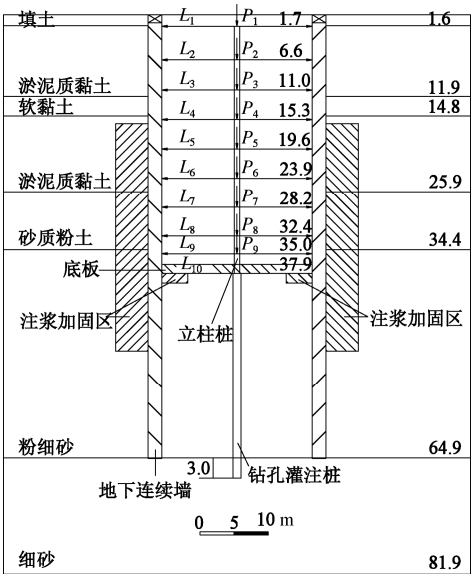


图3 开挖工况

Fig. 3 Excavation condition

上述未考虑支撑体系约束作用和坑底加固作用的因素使立柱桩的隆起计算值偏大;引言中提及的不考虑开挖卸载对桩侧极限摩阻力的影响也会使计算值偏大。但是,回弹模量根据经验取值,没有考虑回弹模量以及立柱桩灌注桩部分混凝土受拉模量的非线性,使立柱桩的计算隆起值有些偏小。这些偏差在某种程度上相互抵消,使得本案例立柱桩上拔位移的计算趋势跟实测情况吻合较好。尽管如此,这些问题还是值得进一步研究,为全面揭示基坑隆起机理,优化立柱、支撑体系的设计创造条件。

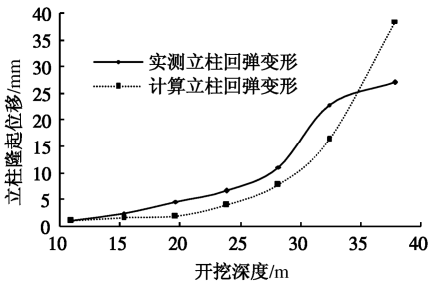


图4 立柱隆起位移计算值与实测值对比

Fig. 4 Comparison between calculated and measured values of uplift of soldier pile

桩侧摩阻力发展曲线如图5所示。在初期开挖加撑的时候,桩侧只有上部分有正摩阻力。随着开挖深度的加大,土体隆起位移变大,与桩的相互作用也更加明显,桩身下部分有越来越明显的负摩阻力。由后几步开挖的图形看出,正摩阻力沿桩身上部分逐渐增加,到达极限摩阻力,之后很快便发展成负摩阻力并逐渐达到极限值。图中显示后面几个开挖步的正摩阻力曲线处,先达到极限值,之后会突然变小,再逐渐增大。这是由于之前的开挖已经让该点出现了极限位移,所以侧阻力以极限侧摩阻力发挥,如果该点之前没有达到极限位移,则侧摩阻力发挥仍按线弹性模型计算。

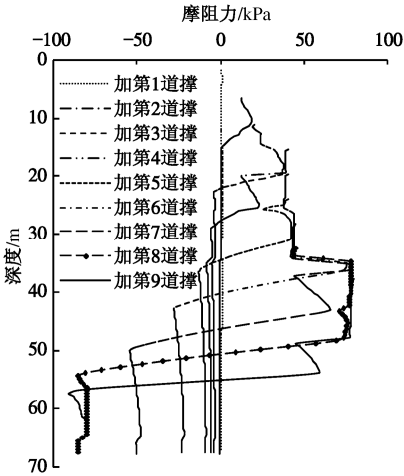


图5 桩侧摩阻力随开挖支撑施工的变化

Fig. 5 Variation of skin friction of pile with excavation and support construction

图中还可以看出, 中性点位置随挖深加深而下移, 到最后当开挖深度为 37.9 m 时, 中性点约在 55 m 深度处。此时桩周土对桩向下的摩阻力已经达到极限, 加上中性点下移, 使阻碍桩向上隆起的总摩阻力减小了, 所以最后一步开挖桩的隆起位移较大。

桩身轴力发展情况如图 6 所示。开挖初期沿桩身只有轴向压力, 随着开挖加深, 桩身下部分会出现越来越明显的拉力。当达到拉力最大值后, 会逐渐减小最后在桩端受力近似为 0。最大拉力值出现的深度越来越往下移, 这与图 5 中的中性点逐步下移相对应。最大拉力值出现在第 8 步开挖时, 最大拉力值可以达到近 500 t, 数值相当大。最后一步开挖到 37.9 m 时, 由于总摩阻力减小, 使最大拉拔力降低了。

所以深基坑开挖应特别注意立柱桩配筋、桩长等的设计, 以满足抵抗拉拔的承载力要求; 要控制立柱桩的隆起位移, 必须要有足够的桩长。

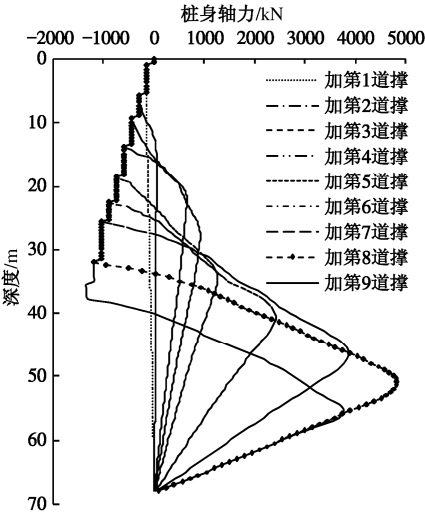


图 6 桩身轴力随开挖加撑施工的变化

Fig. 6 Variation of axial force of pile with excavation and support construction

3.2 某高层建筑单步开挖模拟

引用文献[12]中的工程实例, 某上海高层建筑基坑长约 167 m, 宽约 144 m。基坑开挖深度 18.75 m(裙房)~21.8 m(主楼)。基坑立柱采用 475 mm×475 mm 钢格构柱, 以 Φ850 mm、深 72.5 m 的钻孔灌注桩为基础, 土层特性如表 2 所示。实测数据根据距离基坑中心不同而呈现差异隆起现象, 大体趋势为离中心越近, 立柱隆起量越大, 平均隆起量大约为 3.6 mm。

将土层特性各参数代入程序中, 取基坑平均开挖深度 19.5 m, 由于文献没有提供立柱桩的位移过程, 用程序模拟开挖、设撑一步到位, 隆起量计算得 3 mm,

可见模拟结果已相当接近实测值。

表 2 案例 2 各土层的力学特性表

Table 2 Mechanical parameters of soil layers for case 2

层数	地基土名称	饱和重度 /(kN·m ⁻³)	极限侧阻力 f _s /kPa	回弹模量 /MPa	埋深 /m
①	杂填土	18	20	15	1.4
②	黏土	18.3	20	15	3.4
③	淤泥质粉质黏土	17.4	20	16.4	6.8
④	淤泥质黏土	16.6	15	9.7	15.2
⑤	黏土	17.5	25	17.7	22.0
1-1 ⑤	粉质黏土	17.8	25	22.5	28.0
1-2 ⑤	粉质黏土夹	17.9	45	26.2	39.0
3-1 ⑦ ₂	黏质粉土	19.1	80	150*	45.2
⑧ ₁	粉细砂	18.0	50	30*	52.0
⑧ ₂	粉质黏土夹砂	18.2	60	45*	58.5
⑨ ₁	粉砂	19.0	85	165*	76.5

注: *表示的数值为根据经验, 按土体压缩模量的 3 倍估算得到。

4 结 论

(1) 本文采用的方法能直接预测超深基坑分步开挖情况下对应深度的土体与立柱桩的位移值, 同时能得出此时的桩身轴力及侧摩阻力。经与工程实际资料比较, 模拟结果与实测值较为接近。方法能为考虑超深基坑开挖对既有工程桩、支撑的影响提供参考。

(2) 当基坑深度超过 20 m 时, 立柱隆起实测与计算值都会有一个陡增的趋势, 隆起量非常明显。因此挖深超过 20 m 的深基坑, 应特别注意工程桩的抗拔特性。

(3) 本文研究的是大面积基坑开挖条件下工程桩中一根桩与周围土的相互作用, 利用坑底算得的土体平均隆起位移结合荷载传递法得出桩与土各自的最终位移; 当桩间距足够大时, 接近于大面积基坑开挖条件下单桩的隆起位移计算;

(4) 要控制立柱桩的隆起位移, 必须要有足够的桩长。

参考文献:

[1] 朱火根, 孙加平. 上海地区深基坑开挖坑底土体回弹对工程桩的影响[J]. 岩土工程界, 2005, 8(3): 43 - 46. (ZHU Huo-gen, SUN Jia-ping. Impact of subsoil rebound on engineering piles due to deep excavation in soft soil area[J]. Geotechnical Engineering World, 2005, 8(3): 43 - 46. (in Chinese))

- [2] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: Wiley, 1980.
- [3] 杨敏, 禄建栋. 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(自然科学版), 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 (Natural Science), 2010, **38**(12): 1730 - 1735. (in Chinese))
- [4] 刘国彬, 侯学渊. 软土基坑隆起变形的残余应力法[J]. 地下工程与隧道, 1996(2): 1 - 7. (LIU Guo-bin, HOU Xue-yuan. Residual stress method of rebound deformation of foundation pit in soft soil area[J]. Underground Engineering and Tunnels, 1996(2): 1 - 7. (in Chinese))
- [5] SEED H B, REESE L C. The action of soft clay along friction piles[J]. Transaction, ASCE, 1957, **122**: 731 - 754.
- [6] 楼晓明, 孙晓锋. 大面积带垫层刚性桩复合地基的荷载传递分析方法[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(11): 2027 - 2030. (LOU Xiao-ming, SUN Xiao-feng. Analysis on load transfer for large area composite foundation with rigid piles and cushions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(11): 2027 - 2030. (in Chinese))
- [7] 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))
- [8] 巢斯, 王磊, 雷小虎, 等. 上海软土地区深基坑回弹引起桩拉力的探讨[J]. 结构工程师, 2009, **25**(5): 88 - 92. (CHAO Si, WANG Lei, LEI Xiao-hu, et al. Discussion on tensile force of piles caused by subsoil rebound in soft soil area[J]. Structural Engineers, 2009, **25**(5): 88 - 92. (in Chinese))
- [9] 肖健. 考虑工程桩存在的深基坑回弹空间效应有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2004. (XIAO Jian. FEM analysis on 3D behavior of the pit resilience considering foundation piles[D]. Tianjin: Tianjin University, 2004. (in Chinese))
- [10] 范巍. 大面积深基坑开挖过程中桩基受力特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007. (FAN Wei. Behavior of pile foundation during large-scale deep excavation[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese))
- [11] 葛强强. 超深开挖对单桩承载性状的影响性研究[D]. 天津: 天津大学, 2008. (GE Qiang-qiang. Impact of ultra-deep excavation on bearing capacity of single pile[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese))
- [12] 贺翀. 深基坑的立柱桩隆起计算[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(增刊 1): 74 - 78. (HE Chong. Calculation of heave of soldier piles in deep foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(S1): 74 - 78. (in Chinese))
- [13] 楼晓明, 李德宁, 刘建航. 深基坑坑底地基的回弹应力与回弹变形[J]. 土木工程学报, 2012, **45**(14): 134 - 138. (LOU Xiao-ming, LI De-ning, LIU Jian-hang. Rebound stress and deformation below the bottom of deep excavations[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, **45**(14): 134 - 138. (in Chinese))
- [14] 江娟, 亓宾, 刘国彬. 软土深基坑中立柱桩变形影响因素和变形预测研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **30**(增刊 1): 363 - 368. (JIANG Juan, QI Bin, LIU Guo-bin. Factors and prediction on deformation of soldier piles in deep foundation pits in soft area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **30**(S1): 363 - 368. (in Chinese))
- [15] 刘涛, 刘万兰, 刘国彬. 超深基坑立柱桩竖向位移引起危害探讨[J]. 土木工程学报, 2007, **40**(增刊 1): 387 - 390. (LIU Tao, LIU Wan-lan, LIU Guo-bin. Discussions on vertical displacement of stud piles in deep foundation pit[J]. China Civil Engineering Journal, 2007, **40**(S1): 387 - 390. (in Chinese))