

文章编号: 1000-7598-(2006)12-2208-05

软土中已打入桩对土体位移的遮帘作用研究

吴晓峰^{1,2}, 王 浩³, 文新伦⁴

(1. 同济大学 岩土工程重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092;
3. 上海市市政工程设计研究总院地下空间院, 上海 200092; 4. 上海市基础工程公司, 上海 200002)

摘 要: 采用侧向移动土中桩的理论分析结果以及有限元数值模拟, 较为系统地分析了沉桩工程中已打入桩对土体侧向位移及地表隆起的遮帘作用, 结果表明已打入桩对土体侧向位移的总体遮帘作用并不显著。采用不同切向刚度系数的接触面单元以模拟已打入桩间隔时间长短对地表隆起的遮帘效应, 结果表明: 打入桩间隔期较短时, 已打入桩对地表隆起的遮帘作用主要体现在对土体位移的“水平阻隔”上, 土体沿桩土界面发生流动向上隆起; 而间隔期较长时, 桩土间存在有较大的摩阻力而限制了土体的位移, 此时已打入桩对地表隆起的遮帘作用体现在竖向摩阻力对土体隆起的“抑制”上。

关 键 词: 沉桩工程; 软土; 遮帘作用; 地表隆起; 侧向位移

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

Analysis of sheltering effects of previously driven piles on soil displacements in soft soils

WU Xiao-feng^{1,2}, WANG Hao³, WEN Xin-lun⁴

(1. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Geotechnical Engineering, School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Vndergrond Space Design Institute, SMEDI, Shanghai 200092, China;
4. Shanghai Foundation Engineering Company, Shanghai 200002, China)

Abstract: Using the theoretical analysis results for the piles in soils undergoing lateral movement and the numerical simulation based on the finite element method, the sheltering effect of previously driven piles on the soil displacements in soft soils in pile driving engineering is discussed. The research shows that the sheltering effect of previously driven piles on the total lateral soil displacement is little. Different shear stiffness factors of the interface elements are used to analyze the influence of time interval between later and previously driven piles on the sheltering effect of previously driven piles. The sheltering effect of previously driven piles on ground heave is contributed mainly to the horizontal block to the soil movement and the restraining of soil heave by the large shaft friction for the short and long time interval, respectively.

Key words: pile driving engineering; soft soils; sheltering effects; ground heave; lateral soil displacement

1 引 言

软土中大规模沉桩引起的土体位移问题长期为工程界所关注。土体的隆起及侧向位移会对附近的构筑物造成不良影响, 使房屋隆起开裂或地下管线破坏^[1,2]。当群桩施工临近密集建筑群或重要地下管线时, 为减小土体位移产生的不良影响, 人们常采用控制打桩流水的方法 (如背向被保护构筑物打桩), 或预先在构筑物附件打入保护桩排, 以期先打入桩能够发挥对土体位移的遮帘作用, 减小沉桩对周围环境的影响^[1]。

然而, 关于已打入桩对土体位移遮帘作用的有效性及其机理尚缺乏相关分析研究。本文借助

Poulos 对侧向移动土中桩的理论分析结果及有限元数值模拟手段对这一问题进行探讨。

2 已打入桩对侧向位移的遮帘作用

Poulos (1973 年)^[3]分析了侧向移动土中桩的性状。在群桩的施工过程中, 后打入桩引起土体侧向挤出, 而已打入桩的遮帘效应, 在实质上表现为已打入桩与移动土体间的相互作用问题。因此, 可借助 Poulos 对侧向移动土中桩的研究结果, 分析已打入桩的遮帘效应。

2.1 侧向移动土中桩的理论分析

假定桩为宽 d 长 L 且具有柔度 $E_p I_p$ 为常数的竖直薄条, 将其分为 $n+1$ 个单元。土体假定为各向同

性弹性材料, 其杨氏模量 E_s 及泊松比不因土中有桩而改变。桩土之间产生的应力假定与桩表面垂直, 不考虑土与桩侧的剪应力。为接近土的真实性状, 假定土体的杨氏模量 E_s 可沿桩长变化, 且桩土之间的水平向压力 (即桩的相反两侧的土压力之差) 有一个也沿桩长有变化的界限值 P_y 。

桩的位移可根据梁挠曲方程得到。对沿桩的每个节点用有限差分写出方程, 桩的位移可表述为

$$[D]\{\rho\} = -\frac{dL^4}{E_p I_p}\{P\} \quad (1)$$

式中 $\{\rho\}$ 为桩位移矢量; $\{P\}$ 为水平压力矢量; $[D]$ 为有限差分系数矩阵。

土位移是由外因运动 (本文中可认为是由后打入桩挤土引起) 和桩—土互相作用引起的压力而产生的, 可表述如下:

$$\{\rho\} = \frac{d}{E_{sr}}\{E_{sr}/E_s\}[I]\{P\} + \{\rho_e\} \quad (2)$$

式中 E_{sr} 为土模量参考值; E_s 为节点处土模量; $[I]$ 为土位移影响系数矩阵, 可用 Mindlin 方程, 按半无限体内水平荷载引起的水平位移估算; $\{\rho_e\}$ 为外部土位移矢量。

当土体保持为弹性时, 令桩土位移相等, 有

$$\left[D + \frac{\Pi}{K_R n^4}\right]\{\rho\} = \frac{[\Pi]}{K_R n^4}\{\rho_e\} \quad (3)$$

式中 $[\Pi] = [I]^{-1}$ 为土位移系数逆矩阵; $K_R = E_p I_p / E_s L^4$ 为桩柔度系数。

求解上述方程, 并注意压力值的上限为屈服压力 P_y , 则可解得桩体的位移及应力。

2.2 理论分析结果

据此, 在桩长宽比 $L/d = 25$, 土的泊松比为 0.5, 土的杨氏模量 E_s 与界限值 P_y 均为常数且比值为 10 的情况下, Poulos (1973 年)^[3]给出如下研究成果。

当桩头自由, 桩底铰接, 在给定的土体位移下, 当桩的柔度系数 K_R 为 10^{-3} (中等柔度桩) 及 10^{-1} (相当刚性桩) 时, 桩体位移如图 1 所示。相同土体位移下, 桩头自由, 桩底固定时中等柔度桩的桩体位移也示于图 1 中。

由图 1 可见, 在同样桩底铰接的情况下, 相当刚性桩的桩体位移与中等柔度桩完全不同。由于相当刚性桩桩身没有挠曲, 在土体位移作用下, 桩身绕桩底转动, 从而在桩的上半部分发生大的位移。

而中等柔度桩的位移模式与土体类似, 呈现中间大两头小的态势。对于同样中等柔度下的桩, 桩底固定时, 桩头的位移一样而桩身的位移则较桩底铰接时来得小。

当桩头自由, 桩底铰接, 土质均一时, 改变土体的位移分布模式, 对于中等柔度桩 (K_R 为 10^{-3}), 其桩体位移如图 2 所示。比较可见, 桩的位移依赖于土体位移量。大的表面土体位移引起大的桩头位移。受桩底铰接影响, 在位移模式为 2 及 3 的情况下, 桩体的最大位移量均大于土体的最大位移量。

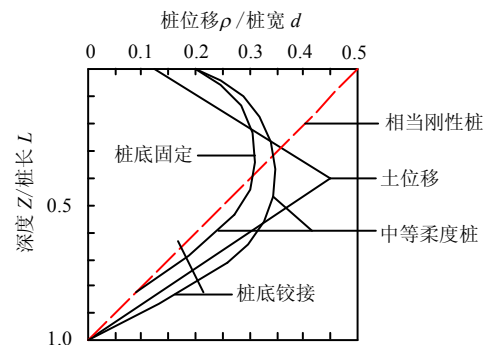


图 1 不同刚度桩位移比较

Fig.1 Comparison of pile displacements under different pile stiffnesses

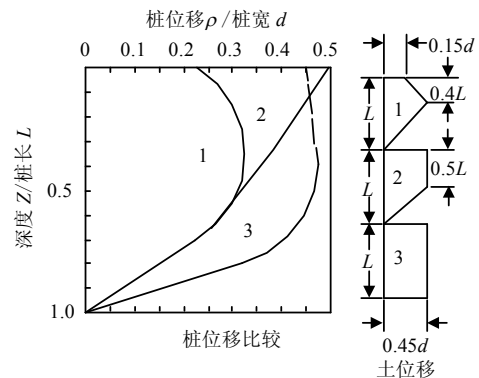


图 2 不同土位移下的桩位移比较

Fig.2 Comparison of pile displacement under different soil displacements

2.3 沉桩引起的土体侧向移动

沉桩挤土所引起的土体侧向位移随已打入桩与沉桩点的水平距离发生变化。图 3 给出了有限元计算得到的土体侧向位移随沉桩点距离变化的情况。作为趋势预测, 为减小计算工作量, 有限元分析按平面应变问题考虑, 利用对称性取半截面分析, 土体单元采用四节点等参元, 为理想弹塑性材料, 参数如表 1 所示。假定桩长 24 m, 桩截面为 300 mm × 300 mm。将 40 m × 60 m 的计算域划分为 760 个单元, 878 个结点。在沉桩点给予侧向土体位移 15 cm。

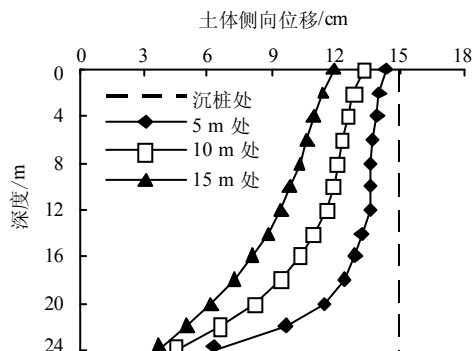


图3 土体侧向位移随沉桩点距离变化

Fig.3 Change of lateral soil displacements with the distance from pile driving location

表1 有限元计算土体参数
Table 1 Soil parameters in FEM

土类	深度 /m	重度 /kN·m ⁻³	E_s /kPa	泊松比	c /kPa	ϕ /(°)
淤泥质土	0~12	17.5	3 000	0.4	35	0
粉质黏土	12~24	18.5	5 000	0.3	9	12
砂质粉土	24~30	18.5	19 000	0.3	19	20
粉质黏土	30~40	18.5	5 000	0.3	9	12

由图3可见,随着距沉桩距离的增大,由沉桩引起的土体侧向移动在不断减小。对比图2中的土体移动模式,可见在近沉桩处,类似土位移模式3;随着水平距离的增加,呈现出土位移模式2的态势。可以预计,当采取一定深度预钻孔减小沉桩上部土体侧向移动的情况下,土位移将类似于图2中的土体移动模式1。

2.4 分析结果的讨论

由于桩土变形协调,因此,将问题的角度从桩体的位移转移到桩后土体的位移即可考查已打入桩对土体水平移动的遮帘作用。由图1及图2中Poulos的研究成果可知:

(1)已打入桩的存在一定程度上能够遮帘部分深部土体侧向移动,然而地表土体的位移则会增大。相对较小刚度的桩,较大刚度桩的这一特征更为明显(如图1)。

(2)从图1及2桩体位移曲线包络的面积可知,已打入桩更多的是改变了桩后土体的位移分布模式,而对土体移动总量并无明显影响。

(3)图1显示,桩底固定比桩底铰支时能够遮帘更多的土体位移。沉桩过程中,随着桩体贯入,土体移动的深度增大,已打入桩逐渐由相对桩底固定变为桩底铰支,对移动土体的遮帘效应不断降低。由此可见,欲使已打入桩遮帘更多的土体位移,已打入桩的桩长应该比后打入桩引起的土体移动深度大,此外已打入桩需进入相对坚硬的土层,以起到

固端作用。

(4)图2表明,已打入桩后土体的位移取决于移动土体的位移。而图3显示,随距沉桩处距离的增大,土体的水平位移量减小。由此可见,当背向构筑物打桩时,随着沉桩点距构筑物距离的增大,在构筑物附近沉桩引起的土体水平位移减小,这是背向构筑物打桩时沉桩挤土影响小的主要原因,而已打入桩对水平位移的遮帘作用则是次要的。

3 已打入桩对地表隆起的遮帘作用

采用有限元数值模拟分析已打入桩对地表隆起的遮帘作用。

3.1 桩周强扰动区的存在

理论分析及试验研究均证实,软土中打桩引起桩周土体扰动,在桩周约 $1.5D$ 范围内形成强扰动区。沉桩过程中,该区不仅经历了较大位移,而且由于打桩扰动,导致该区土体上下左右错动,结构完全破坏,土体强度大大降低,甚至于出现某些流体的特征。但随着土体的固结,这一区域内的土体强度逐渐恢复,甚至于超过原有的强度。对这一问题的认识,有助于在数值模拟时根据桩周土的固结时间确定合理的桩土接触面单元强度参数,对已打入桩的遮帘作用做出正确分析。

3.2 计算模型

与2.3节相似,仍采用平面四节点等参元及表1中的土体参数进行数值模拟分析,在沉桩点24 m深度范围内给予侧向土体移动15 cm,计算域为 $40\text{ m} \times 60\text{ m}$ 。在距沉桩区1.5 m处设置一排24 m长的桩体单元,考虑已打入桩与土体的材料特性差异,在桩土接触面上设置Goodman四节点接触面单元。为模拟土体单元与结构物单元不会在接触面处重叠,将接触面的法向劲度系数取为 10^8 kN/m^3 。

假定已打入桩为混凝土桩,重度为 24 kN/m^3 ,弹模为 $3.0 \times 10^7\text{ kPa}$,泊松比为0.15。考虑桩排间距,将桩单元计算参数进行折算。如图4所示。

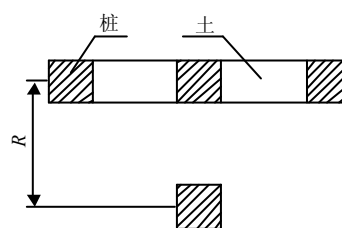


图4 已打入桩排参数折算示意图

Fig.4 Sketch for the calculation of parameters of previously driven piles

假定在距沉桩轴线 R 处有 n 根桩时, 将 n 根桩及桩间土所组成的矩形体看作由另一种均质弹性材料组成。由于桩间土的弹模较混凝土小得多, 在此可忽略不计。可知折算后的弹模为

$$E' = EnA / A'$$

式中 E 为桩体弹模; n 为桩数; A 为桩身截面积; A' 桩排外包面积。本文计算中将折算后的桩排单元重度取为 20 kN/m^3 , 弹模为 $1.0 \times 10^7 \text{ kPa}$, 泊松比为 0.3。

3.3 间隔期较短时的单排桩遮帘作用

当已打入桩间隔期较短时, 考虑到桩周强扰动区呈流体特征, 因此桩土接触面单元的切向劲度系数取一个很小值 $k_s = 3 \text{ kN/cm}^3$, 其他参数如前所述。与没有已打入桩遮帘情况下的地表隆起比较如图 5 所示。

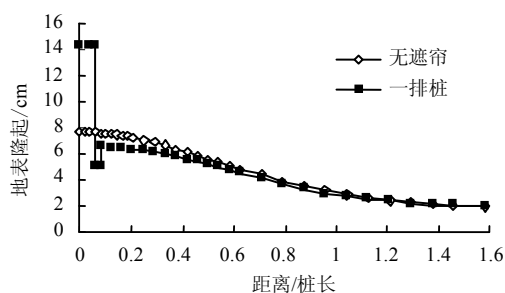


图 5 一排桩遮帘(间隔短)下的地表隆起

Fig.5 Ground surface heave under the shielding of single row pile (short interval)

由图可见, 随着距沉桩点距离的增大, 地表隆起量减小。在沉桩点与已打入桩之间桩间土的隆起超过 14 cm , 远大于无桩遮帘情况下的 7.7 cm 。而在已打入桩后的地表隆起则小于无桩遮帘的情形。

这是因为饱和软土的压缩性较低, 当桩土界面土体严重扰动后, 已打入桩的遮帘作用主要体现在对土体位移的“水平阻隔”上。在沉桩点与已打入桩之间土体沿桩土界面发生流动向上隆起, 从而使地表隆起量大幅增加。而沉桩点与已打入桩之间土体的大量隆起使已打入桩后土体的隆起相应减小。

3.4 间隔期较长的单排桩遮帘作用

当间隔时间较长时桩周强扰动区的土体强度随时间恢复, 甚至可能超过原土体强度。网格划分及计算模型等均与间隔期较短相同, 唯一的区别在于桩土间的接触面单元切向劲度系数取较大值 $k_s = 100 \text{ kN/m}^3$ 。

地表隆起计算结果如图 6 所示。随着距沉桩点距离的增大, 地表隆起量减小。然而, 与间隔期较短时不同, 有已打入桩遮帘的情形下, 沉桩点以后的地表隆起均小于无遮帘时。

当间隔时间较长时, 此时已打入桩与桩周土体间存在有较大的摩阻力而限制了土体的位移, 使桩与桩之间及桩后土体的隆起均小于无打入桩的情形。此时已打入桩的遮帘作用体现在竖向摩阻力对土体隆起的“抑制”上。

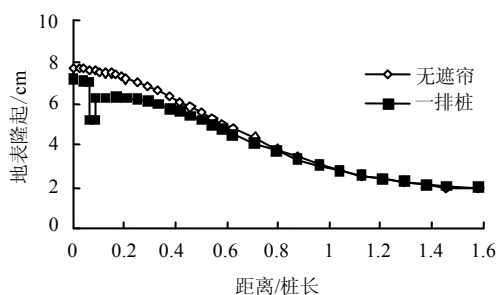


图 6 一排桩遮帘(间隔长)下的地表隆起

Fig.6 Ground surface heave under the shielding of single row pile (long interval)

4 工程实例分析

文献[1]报道某钢厂在已建成的车间内打桩, 打桩区面积为 $15 \text{ m} \times 25 \text{ m}$, 共打了长 45 m , $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$ 混凝土预制桩 72 根。打桩区离最近一排柱基础中心线只有 5.5 m 。当时为考虑减少打桩的影响, 在打桩区边上设置了一排长 12 m 的钢板桩加以保护。结果发现钢板桩向外推移了 79 mm 。尽管被保护柱基础下有与打入桩同样桩长及截面的桩 16 根, 仍向外推移了 62 mm 和 55 mm 。打入桩长 45 m , 挤土深度远大于钢板桩的桩长, 整个钢板桩都处于移动土体的影响深度范围中, 甚至桩底连铰接都谈不上; 此外, 钢板桩本身的刚度很小, 类似柔性桩。从前面的分析可见, 这样的钢板桩设置对土体侧向位移的遮帘效应是微乎其微的。

Hagerty 和 Peck (1971 年)^[4]调查了 13 个涉及到土体位移和桩身位移的工程实例, 对土体位移和地表隆起作了分析。表明当打桩顺序是从桩基周边向中间包围时, 桩基中间地表隆起比按从一端打到另一端顺序的大。虽然没有对间隔时间进行报道, 但可以推测, 在沉桩施工过程中, 已打入桩的间隔时间是比较短的。因此, 当从桩基周边向中间包围时, 已打入桩阻隔了土体位移, 在沉桩点与已打入桩之间的地表隆起大幅度增加。当采用从一端打到另一端的打桩顺序时, 由于已打入桩的遮帘使其后的土体隆起减小。这是造成不同打桩顺序桩基中间地表隆起量差异的原因。

遗憾的是, 对已打入桩遮帘作用的详细实测数据还未见报道, 不能做进一步的分析。

5 结 语

采用侧向移动土中桩的理论分析结果以及有限元数值模拟, 较为系统地分析了沉桩工程中已打入桩对土体侧向位移及地表隆起的遮帘作用, 分析结果表明:

(1) 已打入桩的存在更多的是改变了桩后土体的位移分布模式, 而对土体侧向移动总量并无明显的影响。已打入桩在一定程度上能够遮帘部分深部土体侧向移动, 然而地表土体的位移则会增大。桩底固定比桩底铰支时能够遮帘更多的土体位移。欲使已打入桩遮帘更多的土体位移, 已打入桩的桩长应该比后打入桩引起的土体移动深度大, 此外已打入桩需进入相对坚硬的土层, 以起到固端作用。

(2) 已打入桩的存在可减小其后的地表隆起量。随着打桩间隔时间的不同, 已打入桩对土体隆起遮帘作用的内在机理有所不同。打入桩间隔期较短时, 已打入桩的遮帘作用主要体现在对土体位移

的“水平阻隔”上, 土体沿桩土界面发生流动向上隆起, 而桩与桩之间土体的大量隆起使桩后土体的隆起相应减小。而间隔期较长时, 桩土间存在有较大的摩阻力而限制了土体的位移, 此时已打入桩的遮帘作用体现在竖向摩阻力对土体隆起的“抑制”上。

参 考 文 献

- [1] 胡中雄. 土力学与环境土工学[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
- [2] Poulos H G, Davis E H. Pile Foundation Analysis and Design[M]. New York: John Wiley & Sons, 1980.
- [3] Poulos H G. Analysis of piles in soil undergoing lateral movement[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE**, 1973, 99(5): 391—406.
- [4] Hagerty D J, Peck R B. Heave and lateral movement due to pile driving[J]. **Journal of Soil Mechanics and Foundation Division ASCE**, 1971, 97(11): 1 513—1 532.
- [5] movement at embankment/bridge structure interface in Illinois[R]. Transportation Research Board Paper, 1998.
- [6] Wahls H E. NCHRP synthesis of highway practice 159: design and construction of bridge approaches[R]. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1990.
- [7] ABAQUS/Standard & Explicit User's Manual[M]. Version 6.4, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., USA, 2004.
- [8] Briaud J L, Lim Y J. Tieback walls in sand: numerical simulation and design implications[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering, ASCE**, 1999, 125(5): 101—110.
- [9] Jeeho L, Gregory L F. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 1998, 124(8): 439—448.
- [10] Weihe S, Kroplin B. Classification of smeared crack models based on material and structural properties[J]. **International Journal of Solid Structures**, 1998, 35(12): 1 289—1 308.
- [11] pavement[J]. **Computers & Structures**, 1998, 68: 231—249.
- [12] 黄仰贤. 路面分析与设计[M]. 余定选, 齐诚译. 北京: 人民交通出版社, 1998.
- [13] 王金昌, 朱向荣, 叶俊能. 动荷载作用下含裂缝公路结构体的应力强度因子[J]. 振动工程学报, 2003, 16(1): 114—118.
- [14] WANG Jin-chang, ZHU Xiang-rong, YE Jun-neng. SIF of pavements with cracks under dynamic loading[J]. **Journal of Vibration Engineering**, 2003, 16(1): 114—118.
- [15] Siddharthan R V, Yao J, Sebaaly P E. Pavement strain from moving dynamic 3D load distribution[J]. **Journal of Transportation Engineering, ASCE**, 1998, 124(6): 557—566.
- [16] White T D, Zaghoul S M, Anderton G L. Pavement analysis for moving aircraft load[J]. **Journal of Transportation Engineering, ASCE**, 1997, 123(6): 436—446.
- [17] James H L, Scott M O, Timothy D S. Differential

上接第 2207 页