

软土地区桥梁桩基受临近基坑开挖影响数值分析研究

陈金祥 程建旗 吴杰良

(浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030)

[摘要] 文章针对软土地区的地质,采用有限元整体分析方法,研究了基坑开挖对邻近桥梁承台桩基的附加弯矩和变形。考虑土体的庇护效应,对比分析了基坑距离、群桩根数和承台轴力等主要因素对桥梁的影响,提出了控制深基坑开挖对邻近桥梁承台影响可采用的有效工程措施。

[关键词] 有限元; 基坑开挖; 变形曲线; 控制措施

1 引言

基坑开挖和临近承台桩基的相互影响相当复杂,涉及到基坑开挖影响的土体位移场对承台桩基的影响和承台桩基反过来对土体位移的限制作用等。学者普遍将这种问题归为“被动桩”的课题^[1],并采用了诸多分析方法,如经验法、土压力法、位移法等,其中经验法基于土力学基本原理,其假设和现实情况差距较大;而土压力法是估算桩的土压力分布,例如 Bege-mann and De Leeuw^[2]根据桩-土相对位移推求桩上土压力分布,但此法只能求解桩的最大弯矩和桩顶位移,不能完全分析桩的受力状态;位移法的发展较为完善,有诸多学者在此方面研究,通过桩的弹性地基反力法或复合地基反力法(P-Y曲线法)求得桩的全长位移内力分布,例如张陈蓉,黄茂松^[3]采用两阶段分析方法(TSAM),将开挖产生的自由土体位移作为输入条件,基于 Winkler 地基模型建立单桩的水平位移控制方程。然而,位移法需要准确的输入承台桩基所处的位移场数据,并未考虑承台桩基的存在对周围土体的限制位移作用,且没有考虑承台群桩之间的相互影响。因此,采用上述方法分析承台桩基与基坑开挖的相互作用均有

一定的局限。

本文对采用二维弹塑性有限元法对基坑开挖与邻近承台桩基的相互作用进行了整体分析。对于软土地区的地质条件,承台桥梁桩基主要为摩擦型桩,土质较差,其承载能力与土体的相互作用程度密切相关,因此受基坑开挖的影响更为显着。

2 数值分析

忽略纵向边界条件的影响,采用二维有限元分析,将桥梁桩基等效为板桩。实际情况下,虽然桩间土会产生绕流,但由于土拱效应的存在^[4],当桩中心距小于 $3d$ (d 为桩径)时,土侧压力90%以上由桩承担,因此可以近似采用板桩等效进行二维分析。

桩体采用梁单元离散,为了减小单元数量,土体采用高精度的15节点三角形离散单元。与此相匹配,支护板桩采用梁单元模拟。基坑宽30m,开挖深度为15m,由于对称性,基坑取其一半进行分析。土层简化为五层,桩基距离模型土层模型边缘水平方向取55m。承台厚度2m,支护桩长为30m,邻近承台桩基长度为45m,桩径为1.2m,排桩间中心距之间的距离为3m。如图1所示为分析的模型示意图。

收稿日期: 2021-12-23

作者简介: 陈金祥(1964-),男,正高级工程师,主要从事桥梁工程设计等工作。

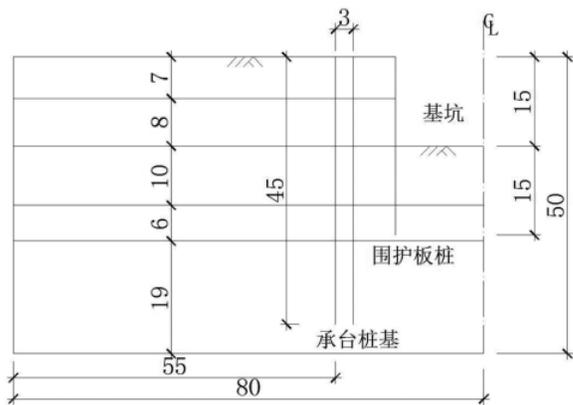


图1 有限元模型示意图

建立有限元模型，划分网格，采用左右边界水平约束，底部边界固定约束。分析时支护桩、邻近桩、承台及内支撑均采用线弹性梁单元，土体采用摩尔-库伦本构关系，桩与土的接触面采用库伦屈服准则，分析时不考虑打桩对土体的影响。其五层土体的计算参数表如表1。

表1 土体物理参数表

土层	土层厚度 /m	土层重度 / (kN/m ³)	弹性模量 /kPa	粘聚力 /kPa	摩擦角 / (°)
③淤泥质粉质粘土	7	17.6	6000	11	16.6
④淤泥质粘土	8	16.9	6000	12	11.5
⑤ ₁₋₂ 粉质粘土	10	18.1	10000	16	15.7
⑥粉质粘土	6	19.8	20000	50	16.2
⑦ ₁ 砂质粉土	19	18.4	30000	3	30.4

3 计算结果分析

3.1 围护墙变形对桩基的影响

实际开挖中，较多通过加强基坑围护墙的刚度或者增加支撑的刚度来减少对邻近桩基的影响，然而具体围护的刚度对结构的影响程度难以估算，因此对现场基坑围护设计的控制指标成为关键。根据“两阶段”分析方法，基坑开挖引起的土体自由运动场是引起桩基变形的直接因素。根据若干典型深基坑工程实例的围护结构水平位移变形实测数据为基础，蔡建鹏等总结了预测围护墙水平变形沿基坑深度方向变化的二维曲线公式^[5]。

$$h(y) = h_{\max} e^{-1.5 \left(\frac{y-H}{H} \right)^2} \quad (1)$$

式中： h_{\max} 为围护墙的最大水平位移， H 为基坑开挖深度， y 为沿围护墙的长度。基坑最大水平位移位于基坑开挖面坑底处，墙顶位移约为最大水平位移的1/5。基坑周边土体的沉降曲线与围护的水平位移曲线有相关性，因此基坑周边的土体自由位移场的水平位移和基坑围护的变形有密切关系。设计中往往根据建筑基坑规范，控制基坑侧向变形为围护设计的主要目标，因此确定基坑侧向变形与相邻桩基的变形和内力关系即可用来指导基坑围护和支撑刚度的设计。

为了验证围护墙位移和桩基位移、内力之间的相互关系，仅改变围护墙和支撑的刚度，控制围护墙水平最大位移。如表2所示。取基坑深度为15m深，水平钢支撑5道，竖向间距3m，围护桩竖向插入比为1:1。承台桩基距离基坑最近5m，取2排桩，考虑桩之间的水平和纵向间距均为3m。

表2 围护墙水平位移与桩基影响

围护抗弯刚度 %	支撑刚度 %	围护墙水平位移 mm	邻近桩水平位移 mm	邻近桩最大弯矩 mm
174.9	66.7	23.02	20.60	225.3
146.4	75.0	23.00	20.44	232.0
121.6	85.7	22.99	20.26	239.2
100.0	100.0	22.98	20.16	246.6
78.7	176.5	22.95	19.56	253.9
62.6	214.3	22.93	19.36	270.1
49.2	230.7	22.81	19.35	271.1

从以上计算结果可以看出，通过增大围护墙刚度、减小支撑刚度或减小围护墙刚度、增大支撑刚度，控制围护墙水平位移基本保持22.98mm左右。邻近的承台桩基的水平位移变形大小基本稳定，相互差距不大于6.45%，但弯矩有较大的差距，相对变化有20.4%。围护刚度减小，支撑刚度增大，控制围护墙水平位移不变的情况下，邻近桩的水平位移基本不变，弯矩增大。因此在实际施工基坑防护设计中，围护墙的水平位移是控制邻近桩的水平位移的关键因素，而减少邻近桩基的弯矩采用增大围护墙刚度的方法更有效。当然，基坑防护设计

在满足施工安全的情况下，最优经济成本控制也是影响因素之一。

3.2 临近基坑的距离对承台桩基的影响

基坑开挖对承台桩基影响与距离有关。建立二维计算模型，模拟基坑开挖 15m 深对不同距离双排桩的影响。由于群桩相互之间有“庇护”作用，群桩内土体会形成土拱作用在外侧靠近基坑的排桩上，因此对于内侧桩是一个保护作用，内侧桩的弯矩小于外侧桩，桩群的数量越多，这种“庇护”越大。计算得出不同距离下外侧桩的弯矩曲线如图 2。

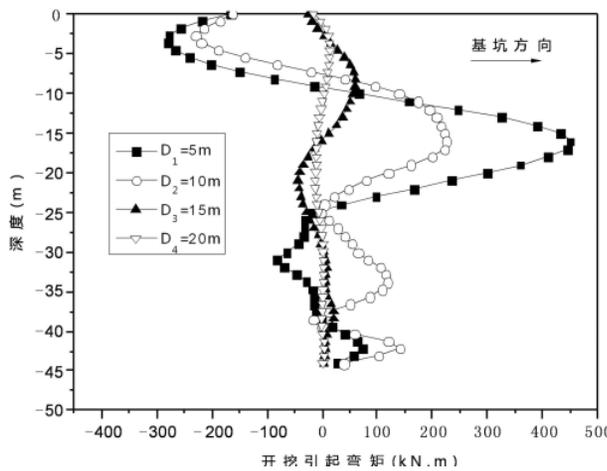


图 2 不同距离下桩基的弯矩内力图

可见，由于承台的约束作用，桩基的内力分布分为靠近基坑侧的正弯矩和反之的负弯矩，正弯矩比负弯矩要大，因为基坑开挖引起的土体位移相对于承台桩基而言是主动作用，负弯矩是承台对于桩基的限制作用，土体位移的效应要大于承台的限制效应。如果没有承台的限制作用，正弯矩将更大，因此承台的刚度对于桩的内力影响显著。随着和临近基坑的距离增大，桩基的正弯矩减小，且随着距离增大，其正弯矩的峰值在桩基深度方向的位置是上移的，这是因为土体的滑动面在平面上是一个三角楔形，如图 3，随着距离变大，土体向基坑方向滑动的趋势越小。靠近基坑侧，由围护墙引起的水平位移占主导，因此桩基正弯矩最大在坑底位置，也就是围护变形最大的位置；远离基坑侧，只有楔形体上方土体位移较大，下方土体

位移很小，因此，正弯矩上移，且大小和土体位移的量有关。

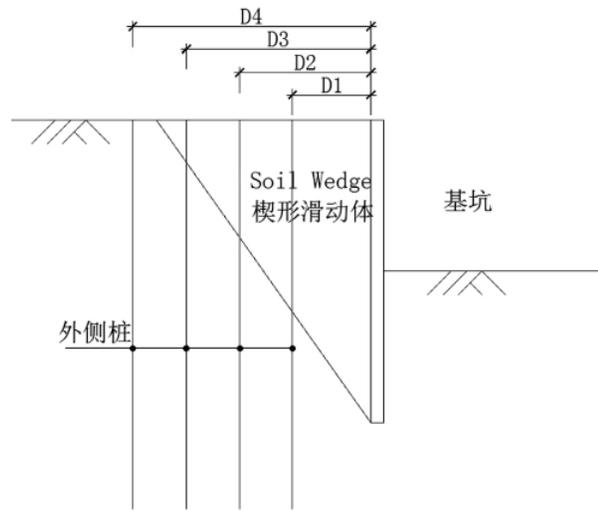


图 3 土体滑动面示意图

承台的水平位移进而影响与其连接的桩基位移，直接影响桥梁上部结构的安全，其距离基坑不同间距产生的水平位移也不同，如图 4，可见与基坑距离对承台的水平位移影响很大，而桩的排数越多，群桩效应越显著，承台的水平位移越小。

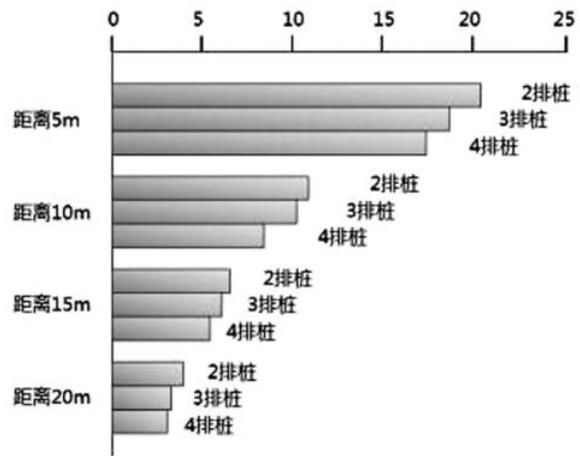


图 4 承台水平位移对比图

3.3 竖向荷载对承台桩基的影响

桥梁承台桩基的竖向荷载一般较大，因此其初始工作的轴力对桩土相互作用不容忽视。Rongjun Zhang^[6]等运用数值解析方法研究了盾

构开挖临近轴压单桩的工作状态，指出了轴力对单桩的显著影响作用。建立有限元模型，双排承台桩，距离 15m 深基坑 10m 间距，承台桩基长 45m，研究邻近基坑桩在不同竖向力作用下桩基的内力和变形情况如图 5、图 6 所示。

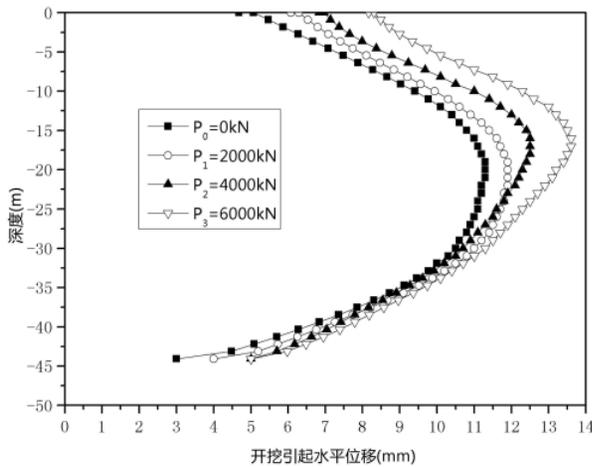


图 5 竖向力对桩基水平位移影响曲线

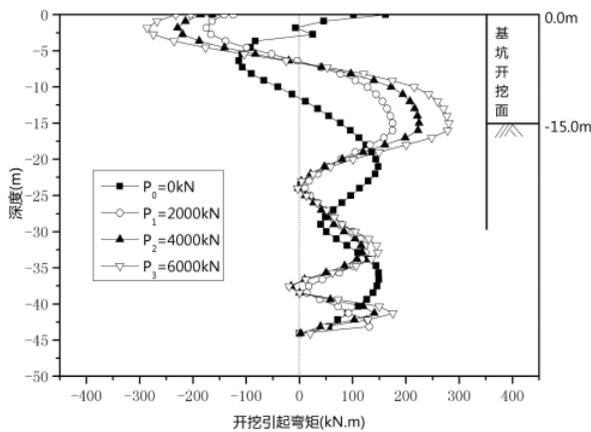


图 6 竖向力对桩基弯矩影响曲线

由图可知，同样的开挖环境，承台受不同竖向力折算到单根桩基上轴力 P_0 分别取 0kN、2000kN、4000kN、6000kN 不同情况，桩基的位移随着荷载的增大而增大，水平位移在 $P_0 = 6000\text{kN}$ 较不受轴力增大 22.7%。桩基的水平弯矩增大大幅度较大，在 $P_0 = 6000\text{kN}$ 下，桩基正弯矩较不受轴力增大 85.7%，负弯矩增大 102.9%。因此承台的竖向荷载对桩基的侧向弯矩有显著的影响，原因可能在于桩基的侧向位

移和桩基的轴力产生二阶效应，增大了桩基的弯矩。桩侧土受到较大竖向剪切力，侧向应力的释放会减小土的抗剪能力，从而增大土的侧向位移，如图 7 所示。其中土体某一点屈服状态下， t 为土的抗剪强度， s 为土单元平均侧向应力， t 和 s 满足 (2) 式。

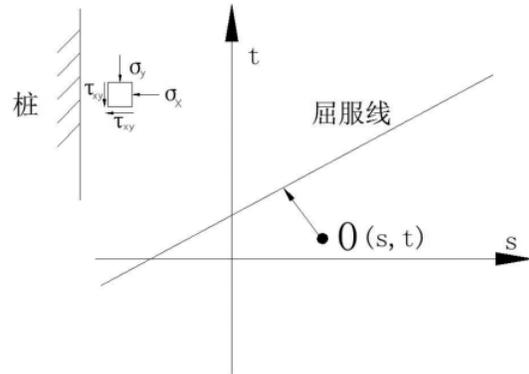


图 7 桩侧土应力路径

$$t = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$s = \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y)$$

随着侧向土松弛引起 σ_x 减小，所以应力路径沿着箭头方向运动，更加接近土体的屈服曲线，土体承载力下降。处于塑性状态的土将促进桩基的竖向和侧向位移。

因此在基坑开挖施工防护设计时，承台桩基的竖向荷载不可忽略。

4 结论

本文以软土地区地质条件为依托，采用弹塑性有限元方法，模拟分析了基坑施工可采取的不同防护措施，研究了基坑开挖对邻近桥梁承台桩基造成的影响。得出如下结论：

(1) 邻近桥梁承台桩基的位移和内力属于被动受力，与土体自由场位移有关。控制桩基的位移，通过支撑和围护墙刚度控制围护墙位移即可，桩基的内力可通过加大围护墙刚度而减小。

(2) 由于土体位移场的楔形滑移，邻近桥梁桩基的内力分布、承台的水平位移与基坑的距离远近相关；群桩的根数也 (下转第 39 页)

(上接第 32 页) 影响承台的变形, 桩基根数越多, 承台的变形越小。

(3) 承台所受竖向荷载对桩基的弯矩和水平位移有较大影响。

(4) 增大支撑刚度、围护墙体刚度和加固土体可以有效控制土体自由场变形, 是减小基坑施工对于临近桥梁承台桩基影响的有效措施。

参考文献

- [1] DeBeer, E. E. . The effects of horizontal loads on piles due to surcharge or seismic effects. Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, 1977, vol. 3, pp. 547-558.
- [2] Begemann, H. K. S. & De Leeuw, E. H. . Horizontal earth pressures on foundation piles as a result of nearby soil

fills. Proc. 5th Eur. Con. SMFE, Marid, 1972, Vol. 1: 3-9.

- [3] 张陈蓉, 黄茂松. 基坑开挖引起的邻近建筑物桩基变形受力响应 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34 (增刊): 565 - 570.
- [4] 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.
- [5] 蔡建鹏, 黄茂松, 钱建固, 徐中华. 基坑开挖对邻近地下管线影响分析的 DCFEM 法 [J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6 (1): 120 - 124.
- [6] Rongjun Zhang, Junjie Zheng, Hefu Pu, Limin Zhang. Analysis of excavation-induced responses of loaded pile foundations considering unloading effect [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010, 26: 320-335.
- [7] 郑颖人, 孔亮. 岩土弹塑性力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.