

文章编号: 1005-0523(2025)01-0038-07



## 基于 Pasternak 模型的基坑开挖对邻近桩基影响分析

陈晓飞

(中铁二局集团有限公司, 四川 成都, 610031)

**摘要:** 为准确预测基坑开挖过程中对邻近桩基础的影响, 文章基于 Pasternak 模型采用两阶段法分析桩基础水平变形及沉降等问题。第一阶段通过计算基坑开挖引起的桩基础轴线处地基土水平位移与竖向沉降, 第二阶段采用考虑土体剪切应变的 Pasternak 模型模拟桩基础变形, 并结合叠加法对基坑开挖引起邻近桩基础水平变形及沉降进行求解, 提出了简化计算方法。依托横琴松洲隧道工程基坑施工监测数据对比文章计算结果, 验证了文章方法的准确性。结果表明: 基坑开挖对邻近桩基的侧向位移、弯矩的影响主要在距离基坑 0.4 倍开挖深度范围内; 而对桩身沉降的影响主要在 0.6 倍开挖深度范围内。采取支护结构对邻近土体进行加固的方法, 能有效减小接近支护结构处地表沉降值。

**关键词:** 基坑开挖; 桩基础; 二阶段法; Pasternak 模型

**中图分类号:** TU437; [U25]

**文献标志码:** A

**本文引用格式:** 陈晓飞. 基于 Pasternak 模型的基坑开挖对邻近桩基影响分析[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(1): 38-44.

## Analysis of the Influence of Foundation Pit Excavation on Adjacent Pile Foundation Based on Pasternak Model

Chen Xiaofei

(China Railway ERJU Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** In order to accurately predict the influence of foundation pit excavation on adjacent pile foundation, this paper uses two-stage method to analyze the horizontal deformation and settlement of pile foundation based on Pasternak model. In the first stage, the horizontal displacement and vertical settlement of foundation soil at the axis of pile foundation caused by foundation pit excavation are calculated by the formula. In the second stage, the Pasternak model considering soil shear strain is used to simulate the deformation of pile foundation, and the horizontal deformation and settlement of adjacent pile foundation caused by foundation pit excavation are solved by superposition method, and a simplified calculation method is proposed. Based on the monitoring data of foundation pit construction of Hengqin-Mangzhou tunnel project, the accuracy of this method is verified by comparing the calculation results of this paper. The results show that the influence of foundation pit excavation on the lateral displacement and bending moment of adjacent pile foundation is mainly within the range of 0.4 times the excavation depth of foundation pit. The influence on the settlement of the pile is mainly in the range of 0.6 times the excavation depth. The method of reinforcing the adjacent soil by supporting structure can

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108321)

effectively reduce the surface settlement value near the supporting structure.

**Key words:** foundation pit excavation; pile foundation; two-stage method; Pasternak model

**Citation format:** CHEN X F. Analysis of the influence of foundation pit excavation on adjacent pile foundation based on Pasternak model[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 38–44.

基坑开挖过程中对邻近桩基础影响问题一直被重点关注<sup>[1]</sup>。基坑在开挖的过程中会使邻近地基土产生位移场,并且对邻近桩基础的桩-土相互作用状态也会有所改变,进而威胁到桩基础的承载性能<sup>[2-5]</sup>。因此,基坑在开挖过程中对邻近桩基础变形的影响如何进行准确的预测,成为有邻近桩基施工的基坑工程重点关注问题<sup>[6]</sup>。

国内外的研究人员采用大量试验方法研究,推导出估算基坑开挖导致围护墙及邻近建筑物变形的一些计算方法<sup>[7-8]</sup>。杨敏等<sup>[9]</sup>根据有限元法分析无支撑情况下基坑开挖和相邻桩基础之间的作用关系。Poulos 等<sup>[10]</sup>根据边界元及有限元计算方式,研究了内支护悬臂围护基坑开挖对黏性土中相邻单桩的影响,设计了该桩的附加弯矩和位移。随后木林隆等<sup>[11]</sup>和徐政峰<sup>[12]</sup>针对基坑开挖过程中导致相邻桩基变形提出二阶段研究方法,为基坑开挖对相邻桩基的影响提供了较快速的分析方法。其中木林隆提出针对基坑开挖过程中引起的相邻地基自由场公式计算简单,结果也比较准确,只需确定围护墙的最大水平位移值,即可得到土体在墙后的三维位移场。张治国等<sup>[13]</sup>依据 Winkler 地基梁模型,研究了在不同因素情况作用下基坑开挖过程中导致相邻建筑基础沉降变形及内力的影响。

对于桩-土相互作用传统的两阶段法主要采用 Winkler 模型<sup>[13]</sup>,但忽略了土中剪应力在桩-土相互作用时的影响。对于桩基础变形,这样的假定可能会产生明显的误差<sup>[14]</sup>。在满足 Winkler 模型计算简便的基础上, Pasternak 模型同时也考虑到了土中剪应力对于计算结果的影响,对于桩-土相互作用的精度有显著的提升<sup>[15]</sup>。因此,本文采用二阶段法结合 Pasternak 模型,首先基于文献[16]有关于邻近地基土在基坑开挖过程中引起的土体变形场和 Pasternak 模型模拟桩基础变形,将理论闭合计算结果与横琴杧洲隧道工程基坑施工监测数据进行对比

验证;然后对不同桩基距基坑距离和不同土层参数下桩基础变形情况进行分析。

## 1 基于 Pasternak 模型的二阶段分析法

本文采用文献[16]基坑开挖引起自由场变形公式,并结合 Pasternak 地基模型模拟基坑开挖引起的桩-土相互作用。第一阶段引入基坑开挖引起自由场变形公式<sup>[16]</sup>

$$u(x,y,z) = u_{\max} a_x e^{-\left(\frac{z-H_{\max}}{H+D}\right)^2 - \pi\left(\frac{y}{R}\right)^2} e^{-\left(\frac{x-b_x}{c_x}\right)^2} \quad (1)$$

$$w(x,y,z) = 0.8u_{\max} a_z \left(\frac{x}{H} + 0.5\right) e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2} e^{-\left(\frac{x-b_x}{c_x}\right)^2}, \quad (2)$$

$$0 \leq x \leq 0.5H$$

$$w(x,y,z) = 0.8u_{\max} a_z \left(-0.6\frac{x}{H} + 1.3\right) e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2} e^{-\left(\frac{x-b_x}{c_x}\right)^2}, \quad (3)$$

$$0.5H < x \leq 2H$$

$$w(x,y,z) = 0.8u_{\max} a_z \left(-0.05\frac{x}{H} + 0.2\right) e^{-\pi\left(\frac{y}{R}\right)^2} e^{-\left(\frac{x-b_x}{c_x}\right)^2}, \quad (4)$$

$$2H < x \leq 4H$$

式中:  $u(x,y,z)$  为垂直于基坑围护结构平面内的土体水平位移, mm;  $w(x,y,z)$  为基坑围护结构后土体竖向位移, mm;  $x, y, z$  为笛卡尔坐标系变量;  $u_{\max}$  为挡土墙的水平最大位移, mm;  $R=L[0.069 \ln(H/L) + 1.03]/2$ ,  $D, L, H$  分别为挡土墙总长、埋深与基坑开挖深度, m。图1为基坑围护墙及墙后土体变形示意图。 $a_x, b_x, c_x$  分别为与土体空间坐标和开挖尺寸有关的拟合参数

$$a_x = 1 + e^{-10.47\frac{x}{H} + 0.76} \quad (5)$$

$$b_x = e^{-6.45\frac{x}{H} + 2.76} \quad (6)$$

$$c_x = e^{-2.86\frac{x}{H} + 2.64} \quad (7)$$

$$a_z = 1 + e^{-1.56\frac{x}{H} - 1.68} \quad (8)$$

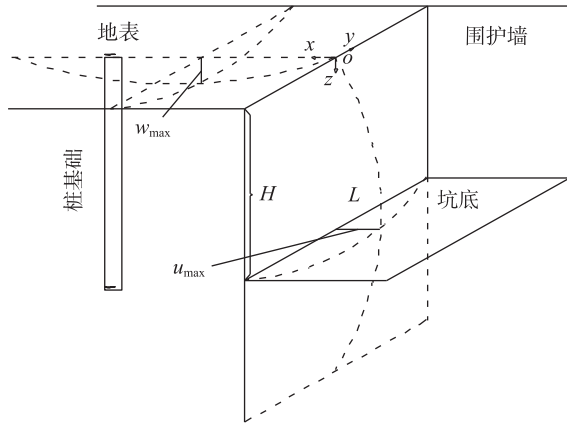


图1 基坑围护墙及墙后土体变形示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the deformation of the retaining wall of the foundation pit and behind the wall

$$b_z = e^{-2.56\frac{x}{H} + 1.02} \quad (9)$$

$$c_z = e^{-2.09\frac{x}{H} + 1.75} \quad (10)$$

在第二阶段, Pasternak模型将土体位移作为虚拟荷载在桩基础上引起的附加应力

$$q_v(z) = k_v w(z) - G_v \frac{d^2 w(z)}{z^2} \quad (11)$$

$$q_h(z) = k_h u(z) - G_h \frac{d^2 u(z)}{z^2} \quad (12)$$

式中:  $q_v(z)$  与  $q_h(z)$  分别为桩基受到的沿  $z$  轴方向的竖向与水平外荷载;  $k_v$  与  $k_h$  分别为桩侧土的竖向与水平向弹簧刚度;  $G_v$  与  $G_h$  分别为桩侧土的竖向与水平剪切刚度, MPa。其中  $k$  代表弹簧刚度, Mylonakis等<sup>[17]</sup>通过有限元计算结果反算,  $k = 2\pi G_s / \ln(r_m/r_0)$ ,  $r_0 = d/2$  代表桩基半径, m;  $r_m$  代表桩的有效影响半径,  $r_m = \chi_1 \chi_2 L(1-\nu)$ ,  $\nu$  表示泊松比,  $\chi_1, \chi_2$  代表经验系数, 对于均质土  $\chi_1 \chi_2 \approx 2.5$ <sup>[18]</sup>。根据Sun<sup>[18]</sup>基于连续介质模型确定的土体剪切系数取为  $g = E_s b / [2(1+\nu_s)]$ 。

根据叠加法作用在桩基础轴线( $z$ 轴)上任意位置处一点, 基坑开挖的影响下  $\zeta$  点上作用的附加荷载则为  $q_v(\zeta)d\zeta$ , 则该荷载引起桩基础轴线上任意点  $z$  的位移  $d\bar{w}(z)$  为

$$d\bar{w}(z) = \frac{q_v(\zeta)\lambda e^{-\lambda|z-\zeta|} (\cos \lambda|z-\zeta| + \sin \lambda|z-\zeta|)}{2k} d\zeta \quad (13)$$

桩基础沉降为  $w_p(z) = -\int_{-\infty}^{+\infty} d\bar{w}(z)$ , mm。线荷

载  $q_h(\zeta)$  引起桩基础轴线上任意点  $z$  桩基础水平位移  $d\bar{u}(x)$  为

$$d\bar{u}(x) = \frac{q_h(\zeta)b}{4E_p I_p \alpha \beta (\alpha^2 + \beta^2)} e^{-\alpha|x-\zeta|} (\beta \cos \beta|x-\zeta| + \alpha \sin \beta|x-\zeta|) d\zeta \quad (14)$$

式中:  $\alpha = \sqrt{\lambda^2/2 + \eta/4}$ ,  $\beta = \sqrt{\lambda^2/2 - \eta/4}$ ;  $\lambda^2 = kb/(E_p I_p)$ ,  $\eta = G_h b/(E_p I_p)$ ; 桩基础沉降为  $u_p(z) = -\int_{-\infty}^{+\infty} d\bar{u}(z)$ ,  $E_p$  为桩弹性模量;  $I_p$  为桩惯性矩。

桩身水平弯矩为

$$M(z) = -\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{q_h(\zeta) D e^{-\lambda|z-\zeta|} (\sin \lambda|z-\zeta| - \cos \lambda|z-\zeta|)}{4\lambda} d\zeta \quad (15)$$

基于此, 本文计算基坑开挖引起邻近桩基础竖向及水平位移的具体步骤如下:

步骤1: 采用式(1)~式(4)计算出基坑开挖引起的基坑邻近土体竖向及水平自由场  $w(x, y, z)$ ,  $u(x, y, z)$ ;

步骤2: 按照式(11)、式(12)确定土体竖向及水平位移在桩身引起的轴向及径向附加荷载  $q_v(z)$ ,  $q_h(z)$ ;

步骤3: 根据式(13)~式(15), 基于已确定的桩身线荷载  $q_v(z)$ ,  $q_h(z)$ , 分别确定桩竖向位移, 桩水平位移, 桩身弯矩。

## 2 验证

为了验证本文所提方法的准确性, 以本文所提方法模拟群桩基础基坑开挖对邻近自由场变形影响的计算结果与横琴杧洲隧道工程某基坑施工监测数据进行对比。本段工程位于珠江出海口西江流域, 沿线勘察地貌单元属海滩~海岸阶地地貌。根据地勘资料, 并依据土层相似合并原则, 场地土体物理力学性质指标可见下表1。群桩基础基坑开挖对自由场影响监测方案见图2所示。

## 3 基坑支护-桩基础系统参数变化对桩变形的影响

以往用二阶段法求解基坑开挖对邻近桩基础影响时, 需对基坑开挖引起的墙背土体位移函数拟合, 运用有限差分法进行计算, 计算过程复杂且不适用于分析桩基水平位移与支护-桩基础系统各物

表1 土体物理力学性能指标  
Tab.1 Physical and mechanical performance indexes of soil

土层名称	厚度/m	天然重度/(kN/m <sup>3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	土压力系数	泊松比	压缩模量/MPa
素填土	1.9	17.3	7.8	14	0.73	0.33	3.1
粉土	5.6	19.1	6.1	26	0.58	0.31	8.4
粉质黏土	14.4	19.3	7.9	25	0.56	0.31	8.2
淤泥粉质黏土	30.0	18.1	13.2	13	0.73	0.36	3.8

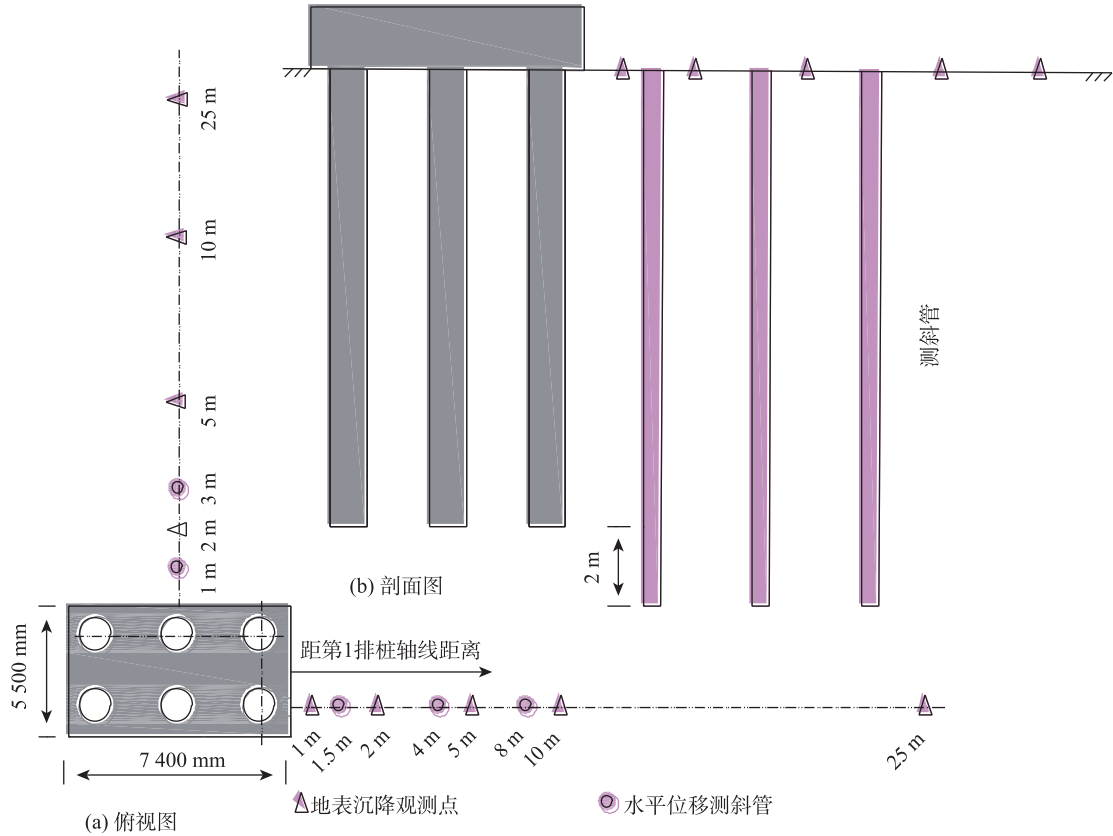


图2 群桩基础基坑开挖对自由场影响监测方案示意图

Fig. 2 Schematic diagram of monitoring plan for the impact of pile group foundation excavation on free field

理参量之间的关系。本文所提计算方法无需进行有限差分法中的数值计算,简化了计算过程,同时本文方法易于进行桩基水平位移与各物理参量之间关系的研究。

图3表示了随着基坑开挖深度的增加支护结构水平侧移曲线。由图3可看出在开挖深度的不断增加下,支护结构最大位移也随之不断增大,且最大水平位移位置不断下降。而支护结构顶部由于水平支撑作用故水平位移为0,实测值和模拟值均表明,在开挖深度不断增加的情况下,土墙水平横向位移也随之不断增大,水平横向位移点位置不断向下移动;因为在地连墙顶部的实测值始终为零,表

明在地连墙的墙顶没有产生位移,由图3可看出监测数据和数值模拟结果吻合良好。

基坑开挖深度变化及支护结构桩基础距离变化会显著改变邻近桩基础位移,本文通过改变基坑开挖深度及基坑至桩基础距离研究基坑开挖对邻近桩基础变形的影响。取开挖深度及桩到基坑支护边缘分别为 $0.1H, 0.2H, 0.4H, 0.6H, 0.8H, 1.0H$ 。 $L$ 为桩长30 m。现场的工程地质条件与基坑开挖的深度以及围护结构参数与表1一致。基于Pasternak的二阶段法基坑开挖引起的地表沉降及桩基础沉降见图4与图5。

图4为不同开挖深度邻近基坑地表沉降图,由

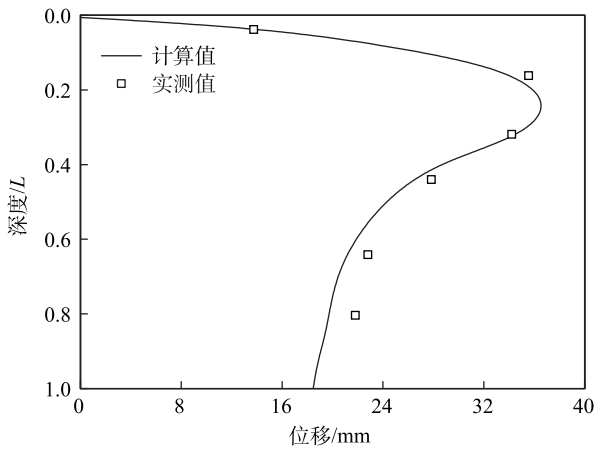


图3 基坑开挖深度的增加支护结构水平侧移曲线  
Fig. 3 The horizontal lateral displacement curve of the supporting structure with the increase of the excavation depth of the foundation pit

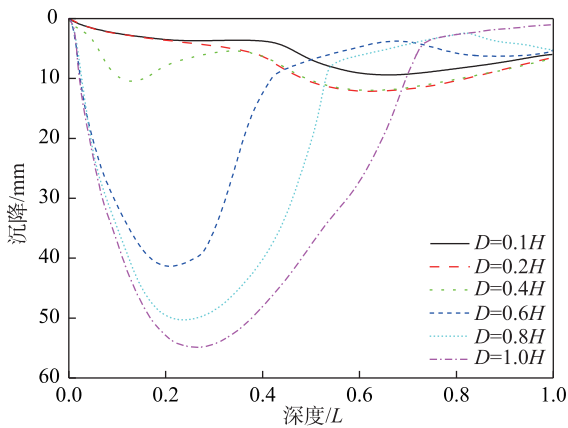


图4 不同开挖深度邻近基坑地表沉降图  
Fig. 4 Surface settlement of adjacent foundation pits at different excavation depths

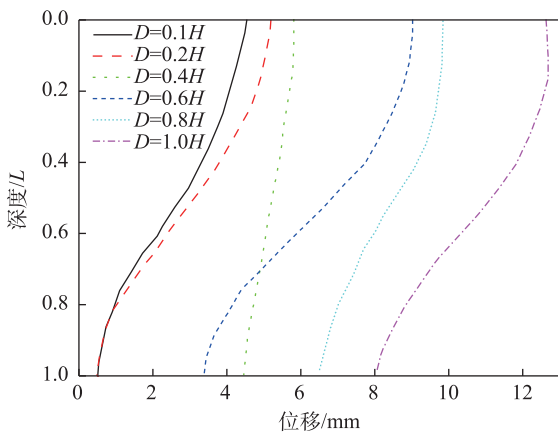


图5 不同开挖深度桩基础沉降图  
Fig. 5 Settlement diagram of pile foundation at different excavation depths

图4可以看出,随着基坑不断向下开挖,基坑周边土体表面最大沉降值逐渐增大,且最大值产生位置逐渐外移。本文计算结果表明,当基坑开挖深度为 $0.1H$ 及 $0.2H$ 时,地面最大沉降值较小约为 $10\text{ mm}$ 且邻近基坑地表土体沉降很小。当开挖深度达到并超过 $0.4H$ 时,地面沉降峰值出现在基坑支护结构附近并随着开挖深度的增大逐渐增大,当开挖深度达到 $1.0H$ 时,地表沉降达到 $55\text{ mm}$ 。地面沉降属于“凹槽型”,在接近支护结构时,由于支护结构的加固作用土体沉降急剧减小,随着距离增大加固作用越来越小地表沉降也逐渐增大;当距离继续增大,逐渐脱离了开挖影响范围,地表沉降重新减小。

图5表示的是基坑开挖深度对邻近桩基础沉降变形的影响规律。由图5可看出,桩身沉降最大位置为桩顶,沿着桩轴线方向逐渐减小。计算结果表明,基坑开挖深度达到 $1.0H$ 时,桩身沉降值最大,距离为 $0.1H$ 时,桩身最大沉降是开挖深度为 $1.0H$ 时的 $36\%$ 。

图6表示随着基坑—桩基础距离由 $0.1H$ 增加至 $1.0H$ 时,桩基础水平位移变化。对比图6与图3可看出桩基础接近基坑,其变形特征也与支护结构类似,中间水平位移大,顶部与底部水平位移较小。当桩基础距离基坑距离在 $0.1\sim 0.5H$ 范围内增大时,桩基础最大水平位移值出现在桩中且快速衰减,此时桩顶水平位移变化较小。当桩基础与基坑相对距离超过 $0.5H$ 时,桩基础水平位移最大值由桩中转为桩顶,且随着桩基础与基坑距离增大,顶部

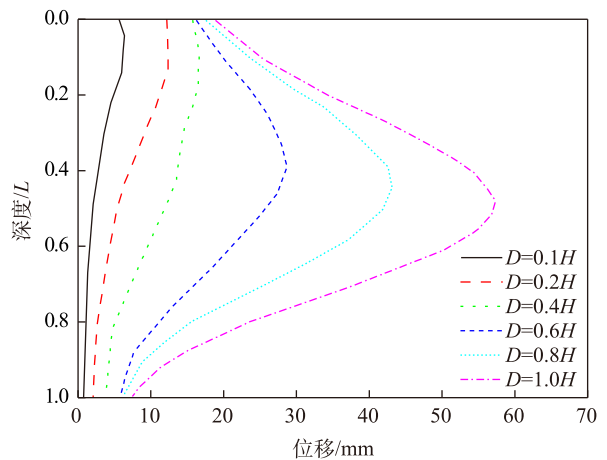


图6 不同基坑桩基础距离下桩基础水平位移  
Fig. 6 Horizontal displacement of pile foundation under different distances of pile foundation of foundation pit

水平位移快速衰减。图6表示桩顶水平位移最大为15.5 mm,此时桩距离基坑 $0.6H$ ,约为桩中最大水平位移( $1.0H$ )的27%。在分析基坑开挖过程如何影响邻近的桩基础时,如果基坑顶部有水平支撑则主要应考虑距离基坑 $0.6H$ 范围内桩基础中间水平位移。

图7表示随着基坑—桩基础距离由 $0.1H$ 增加至 $1.0H$ 时,桩身弯矩分布。图7表明,沿桩身变化的动力弯矩随着基坑与桩基础距离增大呈现出明显减小的一种趋势,桩顶与桩底两端反向弯曲,中部正向弯曲。计算结果表明当距离为 $0.1H$ 时的最大弯矩值仅为距离为 $1.0H$ 时的十分之一,此时桩身弯矩可以忽略不计。

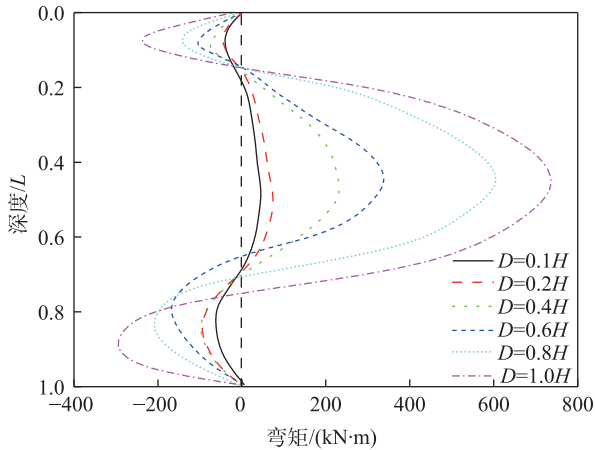


图7 基坑与桩基础不同距离下桩身弯矩分布

Fig. 7 Distribution of pile bending moments at different distance between the pit and the pile foundation

#### 4 结论

本文采用基于双参数模型的二阶段解析法研究了基坑开挖引起邻近桩基础变形特征,结合横琴坳洲隧道工程基坑施工监测数据,可以得出如下结论。

1) 当邻近桩基础距离开挖基坑的距离大于 $0.4$ 倍开挖深度时,桩身横向移动和桩身弯矩对基坑开挖的影响可以忽略不计。应重点监测距离基坑 $0.4$ 倍开挖深度范围内的桩基础水平弯矩及变形。

2) 对桩身沉降而言,桩基础距离基坑距离超过 $0.6$ 倍开挖宽度时,沉降较小。在基坑开挖施工中,应当重点监测 $0.6$ 倍开挖深度范围内的桩基础沉降变形。

3) 随着基坑开挖深度的降低,地表沉降在邻近基坑处呈现出显著的“凹槽”,沉降影响范围大致为 $0.4$ 倍的基坑开挖深度。支护结构对于邻近土体的加固作用能有效减小接近支护结构处地表沉降值。

#### 参考文献:

- [1] 袁静, 龚晓南. 基坑开挖过程中软土性状若干问题的分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2001(5): 3-8.  
YUAN J, GONG X N. Analysis of soft clay during excavation[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2001(5): 3-8.
- [2] 许超长. 桥梁墩台基坑降水开挖对邻近高铁营业线影响研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2023.  
XU C C. Study on the influence of dewatering and excavation of bridge pier foundation pit on adjacent operation lines[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2023.
- [3] 李忠超, 陈仁朋, 陈云敏, 等. 软黏土中某内支撑式深基坑稳定性安全系数分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(5): 769-775.  
LI Z C, CHEN R P, CHEN Y M, et al. Factor of safety of a braced deep excavation in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(5): 769-775.
- [4] 可文海, 管凌霄, 薛齐, 等. 盾构隧道开挖引起的邻近群桩竖向位移研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(8): 2353-2360.  
KE W H, GUAN L X, XUE Q, et al. Study on vertical displacement of adjacent pile group caused by shield tunnelling[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(8): 2353-2360.
- [5] 丁志文, 马斌, 张艺瀚, 等. 南昌二元地层便道荷载对邻近桥梁桩基的影响[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(5): 30-39.  
DING Z W, MA B, ZHANG Y H, et al. Influence of adjacent construction access load on the existing bridge pile foundation in nanchang binary strata[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(5): 30-39.
- [6] 施展, 朱鹏, 颜荣华. 深大基坑开挖对临近建筑的影响[J]. 低温建筑技术, 2023, 45(8): 138-141.  
SHI Z, ZHU P, YAN R H. Influence of deep and large foundation pit excavation on adjacent buildings[J]. Low Temperature Architecture Technology, 2023, 45(8): 138-141.
- [7] 梁发云, 于峰, 李镜培, 等. 土体水平位移对邻近既有桩

- 基承载性状影响分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 449-454.
- LIANG F Y, YU F, LI J P, et al. Analysis of bearing capacity of a single pile under adjacent building subjected to lateral soil movements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 449-454.
- [8] LEE F H, YONG K Y, QUAN K C N, et al. Effect of corners in strutted excavations: field monitoring and case histories[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(4): 339-349.
- [9] 杨敏, 周洪波, 杨桦. 基坑开挖与临近桩基相互作用分析[J]. 土木工程学报, 2005(4): 91-96.
- YANG M, ZHOU H B, YANG H. Numerical analysis of pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005(4): 91-96.
- [10] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, 33(4): 670-677.
- [11] 木林隆, 黄茂松. 基坑开挖引起的周边土体三维位移场的简化分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 820-827.
- MU L L, HUANG M S. Simplified method for analysis of soil movement induced by excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 820-827.
- [12] 徐政峰. 基坑开挖对邻近桩基影响的两阶段分析方法研究[J]. 建筑技术开发, 2017, 44(15): 113-114.
- XU Z F. Study on two-stage analysis method of influence of foundation pit excavation on adjacent pile foundation[J]. Building Technology Development, 2017, 44(15): 113-114.
- [13] 张治国, 鲁明浩, 宫剑飞. 黏弹性地基中基坑开挖对邻近桩基变形影响的时域解[J]. 岩土力学, 2017, 38(10): 3017-3028.
- ZHANG Z G, LU M H, GONG J F. Time-domain solution for influence of excavation on adjacent pile deformation in visco-elastic foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 3017-3028.
- [14] 陈林靖, 戴自航. 深基坑内撑式支护结构计算的综合刚度和双参数法[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 891-895.
- CHEN L J, DAI Z H. Composite stiffness and biparameter method for analyzing retaining structures of deep foundation pits with internal braces[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(3): 891-895.
- [15] 陈林靖, 王志刚, 戴自航. 基坑悬臂支护桩的双参数有限差分算法研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(6): 1222-1229.
- CHEN L J, WANG Z G, DAI Z H. Finite difference method of bi-parameter elastic foundation for calculations of cantilever retaining piles[J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(6): 1222-1229.
- [16] MU L, CHEN W, HUANG M, LU Q. Hybrid method for predicting the response of a pile-raft foundation to adjacent braced excavation[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(4): 04020026
- [17] MYLONAKIS G, GAZETAS G. Settlement and additional internal forces of grouped piles in layered soil[J]. Géotechnique, 1998, 48(1): 55-72.
- [18] SUN K. Laterally loaded piles in elastic media[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(8):1324-1344.



通信作者: 陈晓飞(1984—),男,高级工程师,研究方向为铁路、公路工程建设技术。E-mail:1156113574@qq.com。

(责任编辑:吴海燕)