

DOI: 10.11779/CJGE2014S2024

基于孔隙比随深度变化的基坑开挖对邻近刚柔性桩基的影响研究

马少坤^{1,2}, 黄艳珍^{2,3}, 陈欣², 江杰^{1,4*}, 邵羽²

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学工程防灾与结构安全重点实验室, 广西 南宁 530004;
3. 广西医科大学附属口腔医院, 广西 南宁 530021; 4. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063)

摘要: 基坑开挖引起邻近土体产生附加变形和应力松弛, 导致邻近建筑物桩基产生附加内力和附加位移。基于修正剑桥模型, 推导了孔隙比随深度非线性变化的计算公式, 采用ABAQUS中的用户子程序VOIDRI进行二次开发, 分析了基坑不同开挖工况下邻近桩基的附加内力和变形, 并讨论了不同桩基刚度对其附加内力和变形的影响规律, 得出了一些有意义的结论, 可为基坑设计和施工过程中的邻近建筑物桩基变形预测提供参考。

关键词: 基坑开挖; 修正剑桥模型; 刚柔性桩基; 孔隙比

中图分类号: TU47 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)S2-0140-06

作者简介: 马少坤(1972-), 男, 教授, 主要从事地下工程研究工作。E-mail: mashaokun@sina.com.

Influence of excavation on adjacent rigid-flexible piles considering change of void ratio coefficient with depth

MA Shao-kun^{1,2}, HUANG Yan-zhen^{2,3}, CHEN Xin², JIANG Jie^{1,4}, SHAO Yu²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. College of Stomatology of Guangxi Medical University, Nanning 530021, China; 4. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: Excavation will easily induce additional deformation and stress relaxation of soils, causing the additional inner forces and displacements of the adjacent piles. Based on the modified Cam-clay model, the user subroutine named VOIDRI of ABAQUS is used to achieve the void ratio nonlinearly changing with depth to perform numerical simulations. The elastic modulus and diameter of pile are taken into account, and the influences of excavation on the additional inner forces and displacements of the adjacent piles are discussed. Some suggestions for the design and construction are proposed.

Key words: excavation; modified Cam-clay model; rigid-flexible pile; void ratio

0 引言

基坑开挖引起的土层位移会使邻近建筑物桩基础产生附加内力和变形, 若附加内力和变形过大, 就会导致桩基破坏, 因此, 基坑开挖时, 紧邻建筑物桩基的内力和变形也就成为设计者所必须面对的重点和难点。

针对基坑开挖对邻近建筑物桩基的影响这一课题众多学者已经进行了大量的研究: 杨敏等^[1]讨论了基坑的空间效应、开挖深度、桩基和基坑距离和桩头约束条件等因素对临近桩基附加侧向位移和弯矩的影响; 匡希龙等^[2]运用Fortran90 编制了二维弹塑性有限元程序, 计算桩顶和邻近建筑物的墙顶位移; 郑刚等^[3]对某基坑进行三维有限元计算, 分析桩基和基坑间距、桩顶竖向荷载和桩基顶部约束条件等对桩基附加弯矩

和变形的影响; 陈福全等^[4]研究了在各种影响因素下基坑开挖对邻近桩基的附加位移及弯矩的影响; 杜金龙等^[5]在考虑时间效应的情况下, 分析了本构模型、应力历史、桩墙距离、开挖速度、降水等对桩基内力和变形的影响; 李龙剑等^[6]分析了不同加固方案下无支撑的基坑开挖对控制桥梁桩基变形的作用。然而, 目前相关研究鲜有考虑孔隙比随深度变化这一事实, 秦会来等^[7]研究表明考虑孔隙比随深度非线性变化能更好地反映土体变形。鉴于此情况, 本文先推导出土

基金项目: 国家自然科学基金项目(51068002, 41362016); 上海市青年科技启明星计划项目(13QB1404300); 广西理工科学实验中心重点项目(LGZX201103)

收稿日期: 2014-07-28

*通讯作者

体孔隙比随深度非线性变化的关系式, 继而采用 ABAQUS 中的用户子程序 VOIDRI 进行二次开发, 分析了不同开挖工况下基坑开挖对邻近桩基的附加内力和变形的影响, 并讨论了不同桩基弹模、不同桩基直径对其附加内力和变形的影响规律。

1 孔隙比随深度变化公式的推导

在 ABAQUS 修正剑桥模型中, 孔隙比 e 可以直接输入, 但众所周知, 土体的孔隙比是随深度非线性分布的。根据 $e-\ln p'$ 平面上的 NCL 线、CSL 线与 K_0 状态固结线之间的关系并结合修正剑桥模型的原理, 可推出 $e-\ln p'$ 平面上 K_0 状态固结方程式:

$$e_k = e_i + (\kappa - \lambda) \ln \left[1 + \left(\frac{q}{p'M} \right)^2 \right] - \lambda \ln p'。 \quad (1)$$

式中 q , p' 为土体某处的偏应力和平均主应力, 即可以通过式 (1), 并结合 ABAQUS 中的用户子程序 VOIDRI 来编写子程序以实现孔隙比随深度的非线性变化情况。式 (1) 详细推导过程见文献[8]。

2 模型验证

为了确定本文数值方法的可靠性, 对本文数值模拟方法进行了验证。验证模型尺寸为 $158.6 \text{ m} \times 60 \text{ m}$, 最终开挖深度为 16 m 。围护结构采用地下连续墙加钢筋混凝土水平支撑, 混凝土强度等级为 C30。基坑分 4 个步骤开挖, 分别为降水开挖至 $2, 7, 12, 16 \text{ m}$, 为减小模型边界对计算结果的影响, 该模型模拟区域为基坑两侧向外延伸 90 m , 模型总高度取为 70 m 。图 1 为考虑降水及孔隙比随深度变化的模拟结果与经验预测值对比。本次考虑降水及孔隙比随深度变化的模拟结果与 Ou 等^[9]提出的地表沉降预测曲线基本吻合, 因此, 数值模拟中考虑降水和考虑孔隙比随深度变化这一实际情况能较好地反映土体的变形, 而土体的变形直接影响到土体内的桩基, 由此产生的附加变形也会更接近实际情况。

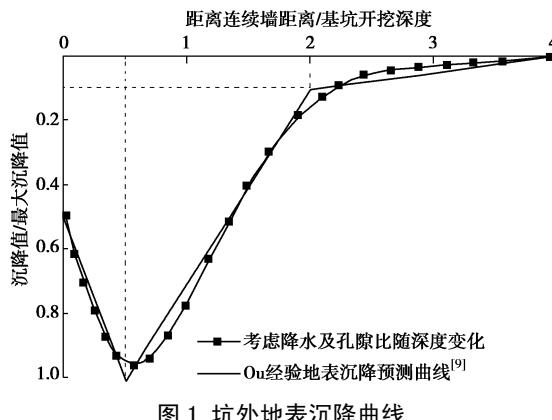


Fig. 1 Ground settlement outside foundation pit

3 本文模型

计算模型基坑宽度为 40 m , 标准段开挖深度为 14 m , 桩与基坑间距 2 m , 桩基直径 1.0 m , 桩长 30 m , 桩顶竖向荷载为 1000 kN 。支护形式采用地下连续墙加两道内支撑的方式, 地下连续墙厚度为 0.6 m , 深度为 30 m , 内支撑分别位于地表以下 1 m 和 5 m 的位置, 水平间距为 8 m , 地下连续墙及内支撑均采用 C30 的钢筋混凝土。基坑分四次开挖, 分别为降水开挖至 -2 m , 在 -1 m 处施加第一道支撑, 降水开挖至 -6 m , 在 -5 m 处施加第二道支撑, 降水开挖至 -10 m , 降水开挖至 -14 m , 具体开挖步骤如图 2 所示。

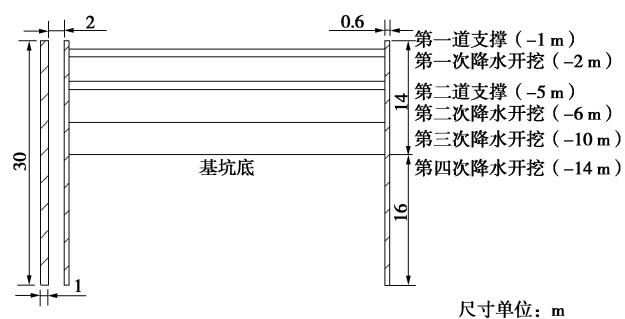


图 2 基坑降水开挖步骤

Fig. 2 Sketch for procedure of deep excavation

为进一步研究基坑开挖对桩基的影响, 选取模型尺寸为 $360 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 。模型的边界条件为: 侧面约束水平方向位移, 底部约束水平方向和竖直方向位移, 有限元计算土体采用考虑双向线性孔隙压力及减缩积分的八节点平面应力四边形单元 CPE8RP, 地下连续墙和桩基采用考虑减缩积分的八结点双向二次平面应变四边形单元 CPE8R, 支撑采用二结点二维桁架单元 T2D2, 模型网格划分如图 3 所示。土体参数选用黏土的修正剑桥模型参数如表 1 所示。

表 1 修正剑桥模型主要参数取值

Table 1 Values of parameters of modified Cam-day model

$e - \ln p'$ 平面 正常固结 线斜率 λ	$e - np$ 平面 回弹曲线 斜率 κ	临界状态线斜率 M	泊松比 ν	渗透系数 k $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
0.0685	0.0078	1.3	0.32	6×10^{-7}

4 计算结果分析

4.1 不同开挖步的基坑开挖对桩基影响分析

图 4~7 分别为不同开挖分析步下的桩基剪力、弯矩、水平位移和竖向位移图, 基坑开挖至 $2, 6, 10, 14 \text{ m}$ 分别为开挖第一步至第四步。由图 4 可知, 桩基剪力在基坑开挖至地表以下 2 m 和开挖至 $6, 10, 14 \text{ m}$

的规律不一致，主要原因是基坑开挖至地表以下2 m后才设置第一道内支撑，地下连续墙表现为悬臂梁的变形形式，周围土体也随着变形，故桩基在开挖2 m后，桩基上三分之一部分表现为向基坑方向的正剪力，桩基下三分之二部分为负剪力。第一道支撑开始设置后，基坑再往下开挖，桩基的正负剪力位置互换，正负剪力的最大值也自上而下逐渐改变，负剪力的最大值由开挖第二步后的-3 m的位置下移至-6 m的位置；同样的，正剪力的最大值由开挖第二步时的-9 m的位置下移至-12 m和-15 m的位置。

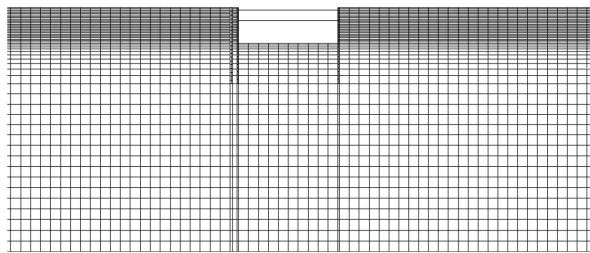


图3 计算模型网格

Fig. 3 Finite element mesh

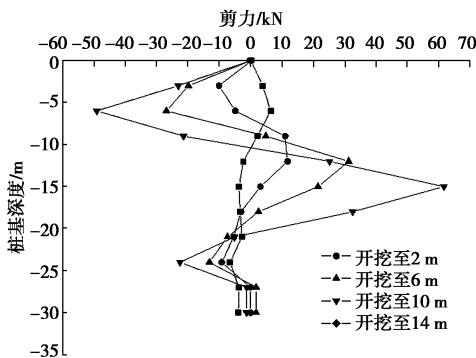


图4 不同开挖步的桩基剪力

Fig. 4 Lateral force of piles with different excavation steps

由图5可知，桩基弯矩在基坑开挖第一步与第二、第三和第四步的变形规律不一致，主要表现在桩基上半部分，基坑开挖第一步时未设置内支撑，桩基上部分产生负弯矩，最大值发生在-9 m处，继续往下降水开挖基坑，桩基上部分产生正弯矩，随着开挖步的继续，正弯矩的最大值逐渐往下移动，第二至第四步开挖后的弯矩最大值分别下移至-6，-9，-9 m处。

对于一般的基坑开挖，最初阶段的开挖过程中围护结构的水平位移往往表现为悬臂梁式的变形，最大水平位移发生在围护结构顶部，如图6所示，前三步基坑降水开挖后所产生的墙体位移与前述相符，表现为悬臂梁的变形形式。随着基坑降水开挖步的继续，桩顶的水平位移增量变小，且其最大的水平位移向下移动，最大水平位移发生在桩顶以下9 m处。对于桩基的竖向位移，每个开挖步的完成，都使桩基的竖向位移增加，在分别开挖了2，4，4，4 m后，桩基

顶部的竖向位移分别增大了219%，323%，66.7%，24.6%，即桩基的竖向位移主要在基坑开挖的第二、第三开挖步产生。

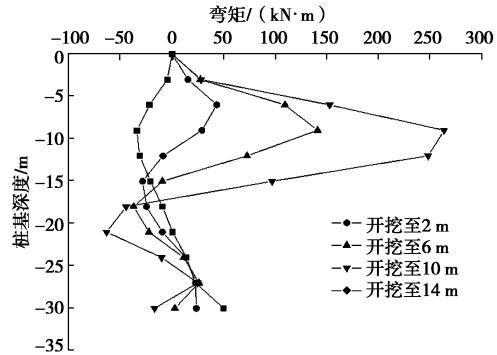


图5 不同开挖步的桩基弯矩

Fig. 5 Bending moment of piles with different excavation steps

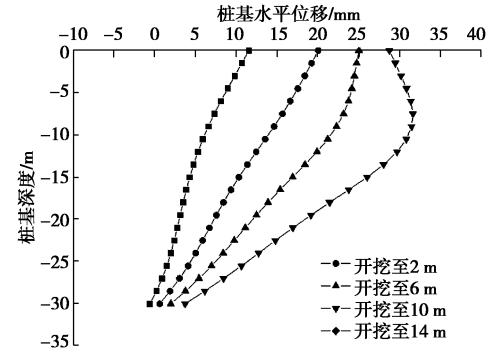


图6 不同开挖步的桩基水平位移

Fig. 6 Lateral displacement of piles with different excavation steps

图7为不同开挖步桩基的竖向位移，每个开挖步基坑的竖向位移分别为3.9，1.5，2.4，2.8 mm，基坑降水开挖第一步后桩基水平位移相对比较大，达到了3.9 mm，主要原因可能是基坑第一步降水开挖时还未设置内支撑，故桩基有向基坑方向的水平位移，加之桩顶上有竖向荷载，相当于桩基受到了压弯荷载作用，故第一步开挖降水后桩基的竖向位移相对比较大，基坑第二、第三和第四步的降水开挖因为有了内支撑的作用，桩基的竖向位移虽然继续增大，但变化幅度不明显。

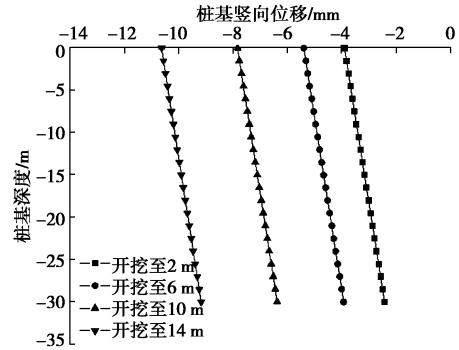


图7 不同开挖步的桩基竖向位移

Fig. 7 Vertical displacement of piles with different excavation steps

4.2 桩基刚度不同的基坑开挖对桩基的影响

为了分析基坑开挖对不同刚度桩基的影响, 本文拟通过改变桩基弹模和桩基半径这两个物理量对基坑开挖进行数值模拟, 同时考虑孔隙比随深度非线性变化这一实际情况, 研究不同刚度下桩基的附加内力和附加位移。

(1) 基坑开挖对不同弹模的桩基的影响

本次模拟分别取桩身弹模 0.25 GPa (水泥土搅拌桩)、2.5 GPa (低标号素混凝土桩)、25 GPa (钢筋混凝土桩), 100 GPa (低标钢桩), 250 GPa (普通钢桩), 模型其他参数如上文。图 8~11 分别为不同桩基刚度下基坑开挖时桩身的剪力、弯矩、水平位移和竖向位移图。

由图 8 可知, 桩基剪力变形规律基本一致, 桩基剪力随着桩基弹模的增大而增大, 且随着桩基弹模增大桩基剪力的增大量逐渐减小, 桩基最大负向剪力均发生在桩顶以下 6 m 处, 最大正向剪力均发生在桩顶以下 15 m 处, 即基坑底部附近。由图 9 可知, 桩基弯矩随着桩基弹模的增大而增大, 且随着桩基弹模增大桩基弯矩的增大量逐渐减小, 最大弯矩均发生在桩顶以下 12 m 处, 对应于图 8 桩基剪力为零的位置。

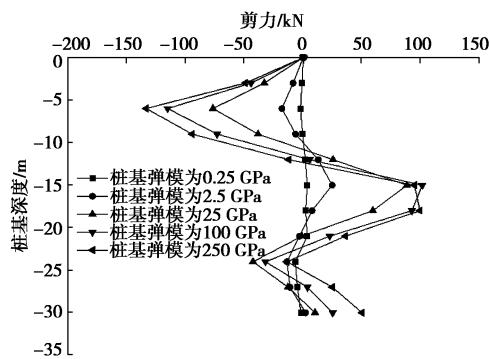


图 8 不同桩基弹模的桩身剪力

Fig. 8 Lateral force of piles with different elastic moduli

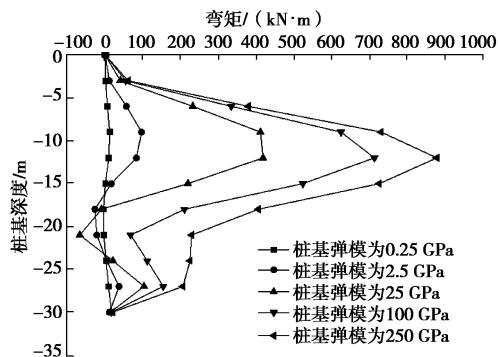


图 9 不同桩基弹模的桩身弯矩

Fig. 9 Bending moment of piles with different elastic moduli

由图 10 可知, 当桩基弹模小于 25 GPa 时, 桩基最大水平位移发生在桩顶以下 9 m 附近, 且随着弹模

的增大最大水平位移逐渐减小; 当桩基弹模大于 25 GPa 时, 桩基最大水平位移发生在地表, 但随着桩基弹模的增大最大水平位移逐渐增大, 主要原因可能是桩基弹模增大时, 桩身自身变形减小, 桩基表现出了刚性桩的特性。

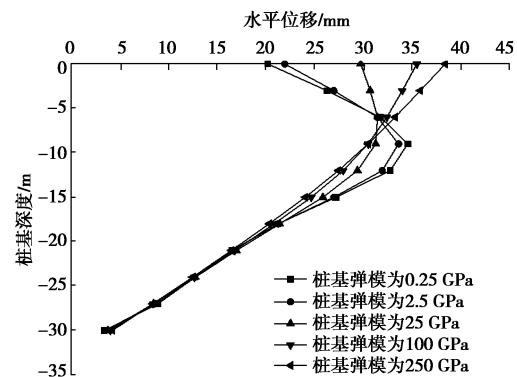


图 10 不同桩基弹模的桩基水平位移

Fig. 10 Lateral displacement of piles with different elastic moduli

由图 11 可知, 当桩基弹模为 0.25 GPa 的水泥土搅拌桩时, 桩顶竖向位移到达 136 mm, 随着桩基弹模的增大桩基竖向位移大幅度减小, 但当桩基弹模增大到 25 GPa 时, 桩基竖向位移变化很微小, 工程实践可作参考。

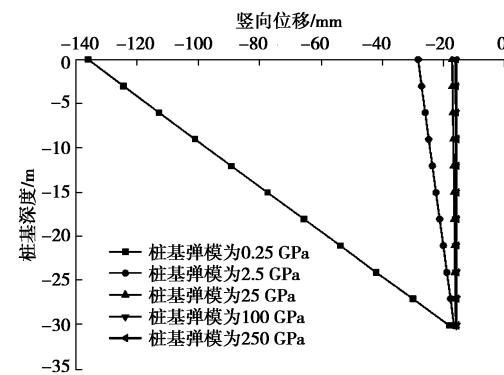


图 11 不同桩基弹模的桩基竖向位移

Fig. 11 Vertical displacement of pile with different elastic modulus

(2) 基坑开挖对不同桩径的桩基的影响

本次模拟桩径分别为 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 m, 模型其他参数如上文, 桩基的附加剪力、弯矩和附加位移分别如图 12~15。由桩身剪力、弯矩和水平位移图看出, 随着桩径的增大, 桩身水平位移逐渐减小, 与此同时, 桩身附加剪力和弯矩却逐渐增大, 表现出刚性桩的性状。

由图 12 可知, 桩基剪力在底附近以上为负剪力, 基坑底附近以下为正剪力, 即坑底附近出现一个拐点。桩基最大剪力约在桩顶以下 6 m 的位置, 当桩径从 0.8 m 增大到 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 m 时, 桩基负向剪力分别增大了 42.1%, 6.7%, 21.7%, 9.2%, 12.4%

和 3.8%，即随着桩径的增加，桩基负向剪力增加量呈现梯级形式，且约为 0.4 m 一个梯级，但当桩径达到 1.8 m 以上时，桩基剪力增加量明显减小。

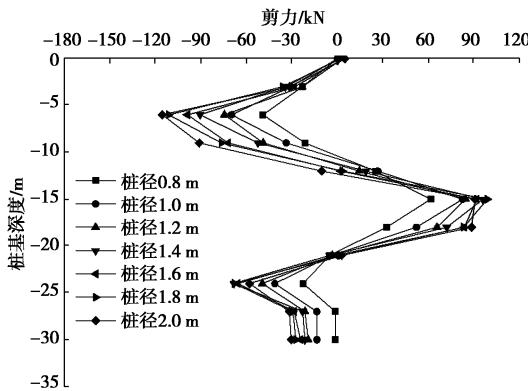


图 12 不同桩径的桩基剪力

Fig. 12 Lateral force of piles with different diameters pile

由图 13 可以看出，桩基最大弯矩发生的位置约为桩顶以下 12 m 处，对应于剪力为零的位置，当桩径从 0.8 m 增大到 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 m 时，桩基弯矩分别增大了 41.7%, 11.3%, 8.2%, 6.7%, 3.4% 和 2.4%，即桩基弯矩随着桩径增大而增大，但增大量随着桩径增大而减小，尤其是当桩径达到 1.6 m 以上时，桩基剪力增加量小于 5%。由于桩基下部受被动区土体的约束作用，其下部出现了负弯矩，但其值较小。

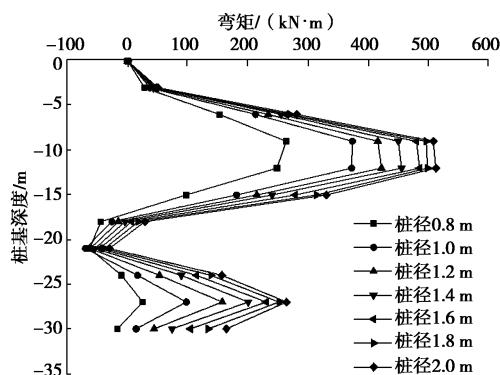


图 13 不同桩径的桩基弯矩图

Fig. 13 Bending moment of piles with different pile diameters

由图 14 可知，桩基最大水平位移均在地表以下 10 m 附近且随着桩径的增大水平位移逐渐减小。桩顶水平位移随着桩径增大而减小，当桩径从 0.8 m 增大到 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 m 和 2.0 m 时，桩基剪力分别减小了 17.2%, 16.9%, 6.0%, 5.9%, 5.7% 和 5.6%，即随着桩径的增大，桩顶水平位移减小量逐渐减小，尤其是桩径达到 1.2 m 以上时，桩顶水平位移减小值明显减小。

由图 15 可知，桩顶竖向位移随着桩径的增大而减小，当桩径从 0.8 m 增大到 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 m

和 2.0 m 时，桩顶竖向位移分别减小了 20.2%, 21.2%, 15.4%, 18.2%, 13.0% 和 10.6%，即随着桩径的增大，桩顶竖向位移逐渐减小，且减小量逐渐减小。

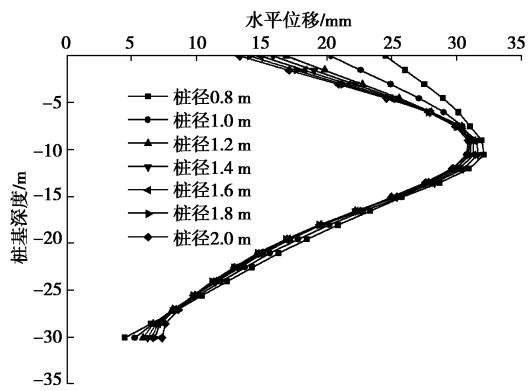


图 14 不同桩径的桩基水平位移

Fig. 14 Lateral displacement of piles with different pile diameters

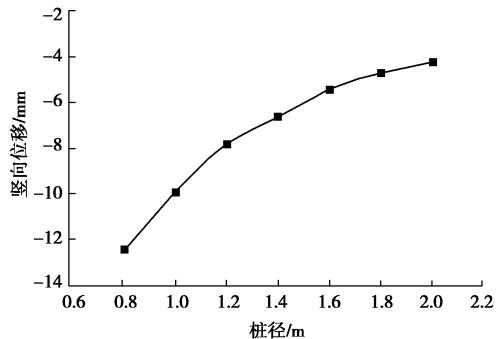


图 15 不同桩径的桩基竖向位移

Fig. 15 Vertical displacement of piles with different pile diameters

5 结 论

通过对不同开挖步下、不同桩基弹模、不同桩基半径下基坑开挖对邻近桩基的影响进行分析，可以得到以下 4 点结论。

(1) 考虑降水和考虑孔隙比随深度变化这一实际情况能更好地反映土体的变形，桩基由此产生的附加变形也更接近实际情况。

(2) 在未设置第一道内支撑时，桩基内力和位移总表现悬臂梁的性状，开始设置第一道支撑以后，桩基附加内力和附加位移的变形规律则基本一致，且随着第二道支撑的设置，桩基的内力和位移的最大值均往下移动。

(3) 桩基弹模增大，桩基附加剪力和弯矩增大但附加水平位移和竖向位移减小，且弹模大于 25 GPa 时，桩基最大水平位移增大，表现刚性桩的特性，工程设计可做参考。

(4) 当桩径达到 1.2 m 以上时，桩基的内力及变形变化均较小，故再增大半径对减小桩基变形意义不

大, 工程设计中可作参考。

参考文献:

- [1] 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, 38(4): 91 - 96. (YANG Min, ZHOU Hong-bo, YANG Hua. Numerical analysis of pile response due to unsupported excavation-induced lateral soil movement[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(4): 91 - 96. (in Chinese))
- [2] 匡希龙, 龚锦林, 汤春林. 有限元模拟分析基坑开挖对邻近建筑桩基影响[J]. 路基工程, 2006(6): 4 - 6. (KUANG Xi-long, GONG Jin-lin, FANG Chun-lin. Finite element analysis for effect of foundation pit excavations to adjacent existing piles[J]. Subgrade Engineering, 2006(6): 4 - 6. (in Chinese))
- [3] 郑 刚, 颜志雄, 雷华阳, 等. 基坑开挖对临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 Gang, YAN Zhi-xiong, LEI Hua-yang, 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))
- [4] 陈福全, 汪金卫, 刘毓氚. 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 Fu-quan, WANG Jin-wei, LIU Yu-chuan. Numerical analysis of pile response due to braced excavation-induced soil lateral movement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(7): 1971 - 1976. (in Chinese))
- [5] 杜金龙, 杨 敏. 软土基坑开挖对邻近桩基影响的时效分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 1038 - 1043. (DU Jin-long, YANG Min. Time effect analysis of influence of excavation on adjacent pile foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 1038 - 1043. (in Chinese))
- [6] 李龙剑, 杨宏伟, 李政林, 等. 基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊 2): 1697 - 1701. (LI Long-jian, YANG Hong-wei, LI Zheng-lin, et al. Numerical analysis of the influence of unsupported excavation on adjacent viaduct foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(S2): 1697 - 1701. (in Chinese))
- [7] 秦会来, 张甲峰, 郭院成, 等. ABAQUS 在计算基坑开挖变形中的应用研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 82 - 86. (QIN Hui-lai, ZHANG Jia-feng, GUO Yuan-cheng, et al. Application of ABAQUS in calculation deformation of excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 82 - 86. (in Chinese))
- [8] 马少坤, 邵 羽, 黄艳珍. 基于孔隙比和渗透系数与深度相关的深基坑开挖变形分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊 2): 940 - 944. (MA Shao-kun, SHAO Yu, HUANG Yan-zhen. Deformation of deep foundation pits due to excavation considering change of void ratio and permeability coefficient with depth[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(S2): 940 - 944. (in Chinese))
- [9] OU C, HSIEH P. A simplified method for predicting ground settlement profiles induced by excavation in soft clay[J]. Computers and Geotechnics, 2011, 38: 987 - 997.

(本文责编 孙振远)