

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2021.03.007

【工程应用】

基于桥桩保护的带撑双排桩基坑支护实例及有限元分析

熊一帆^{1,5}, 刘广新², 杜威³, 应宏伟^{1,4}

(1. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省铁投建设工程有限公司, 浙江 温州 325000;
3. 杭州铁路设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310016; 4. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058;
5. 浙江工业大学土木工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 基坑施工会引起邻近桥桩产生附加变形, 变形过大则可能影响桥梁正常使用, 此时基坑支护方案的确定还应基于桥桩保护的需求。某市政道路箱涵基坑下穿市域铁路桥梁, 为控制基坑变形对桥梁基础的影响, 采用了双排桩结合两道内支撑和坑内地基土加固的支护方案。现场实测结果表明, 基坑和邻近桥桩的变形控制效果较好。对该实例进行有限元模拟, 实测数据与数值模拟结果基本一致, 验证了有限元模型的可行性, 接着分析了有无支撑、支撑间距以及排桩间距对围护结构及桥桩变形的影响。

关键词: 桥桩; 箱涵基坑; 带撑双排桩; 有限元

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2021)03-0215-06

Case and finite element analyses of foundation pit structure of double-row piles with brace based on bridge pile protection

XIONG Yi-fan^{1,5}, LIU Guang-xin², DU Wei³, YING Hong-wei^{1,4}

(1. Institute of Geotechnical Engineering Science, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Zhejiang Tietou Construction Engineering Co., Ltd., Wenzhou 325000, China;

3. Hangzhou Railway Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310016, China;

4. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

5. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Foundation pit construction can cause additional deformation of adjacent bridge piles, and excessive deformation may affect the normal use of the bridge. The determination of foundation pit support scheme should therefore be based on the needs of bridge pile protection. This paper uses a box culvert foundation pit for municipal road that goes under the municipal railway bridge in order to control the influence of foundation pit deformation on bridge foundation. The supporting scheme of double-row piles, two internal supports, and foundation soil reinforcement in the pit are adopted. The field measurement results showed that the deformation control effect of foundation pit and adjacent bridge piles is reasonable. The finite element simulation is carried out. The measured data is consistent with the numerical simulation results, which verifies the feasibility of the finite element model. The influence of self-sustaining, support spacing and row pile spacing on the deformation of retaining structure and bridge pile were analyzed.

Key words: bridge pile; box culvert foundation pit; double-row piles; finite element

0 引言

随着城市建设的快速发展, 地上空间的开发和利用已渐渐不能满足人们的需求, 大量的深基坑工

程应运而生。近年来, 基坑工程的施工规模和难度逐渐增大, 周边环境也越来越复杂, 这对变形的控制提出了更高的要求。Clough 等^[1]研究了采用锚杆和内支撑的基坑土方开挖引起的围护结构变形

收稿日期: 2021-04-14

作者简介: 熊一帆 (1999—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 主要从事地下工程等方面的科研工作。E-mail: cxyf0831@163.com。

的3种形式；刘兴旺等^[2]对15个基坑工程的监测数据进行了分析，得出了软土地区围护结构的最大侧向变形一般在0.002~0.009倍开挖深度。基坑施工过程中，不仅需要关注围护结构本身的变形，也需要关注基坑卸荷导致的周边环境的变形。上世纪90年代初期，Finno等^[3]首先提出观点：深基坑的施工中，土方开挖卸荷易引起相邻建（构）筑物桩基的较大位移，从而对建（构）筑物产生不利影响。Poulos等^[4]、Chen等^[5]、杜金龙等^[6]、木林隆等^[7]利用离心机试验及数值分析等方法对此问题进行了更深入的研究，得到了一些重要的结论。当基坑邻近既有桥梁桩基对变形控制要求较高时，双排桩门架式结构常被作为支护结构，并设置水平内支撑，研究双排桩支护结构的具体参数对邻近桩基的影响具有十分重要的工程意义。

本文以某下穿市域铁路桥梁的市政道路箱涵基坑工程为研究对象，介绍了双排桩结合两道内支撑和坑内地基土加固的支护方案，对实测数据进行了分析，并采用有限元软件建立了数值模型，分析了有无支撑、支撑间距及排桩间距等因素对围护结构及桥桩变形的影响。

1 工程概况

1.1 基坑与轨道交通的相对关系

某城市新建道路下穿市域铁路立交工程，采用四孔分离式框架箱涵，该基坑南北方向长40.7 m，东西方向宽36 m，其平面如图1所示。基坑与已运营的市域铁路桥梁斜交，夹角为88°。基坑围护结构外侧与北承台结构净距为3 m，距桥墩8.6 m；与南承台结构净距仅为1.9 m，距桥墩7.5 m。

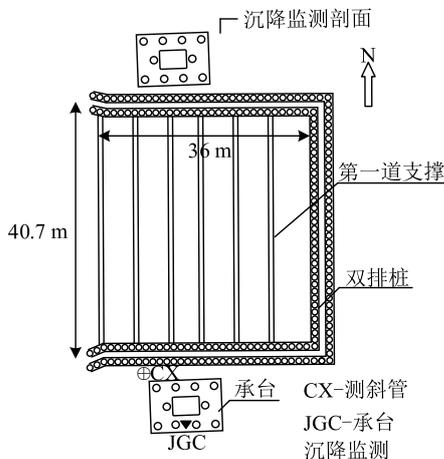
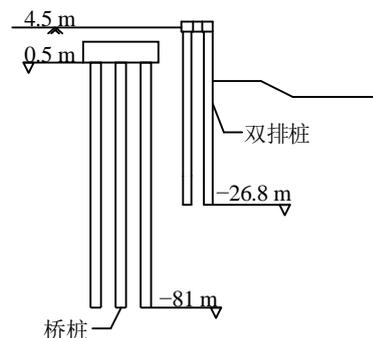


图1 基坑平面示意图

Fig. 1 Plane diagram of foundation pit

1.2 基坑支护方案

基坑剖面如图2所示，开挖深度8.6 m，辅道箱涵底标高-1.575 m，辅道箱身高度7.45 m，主道箱涵底标高-3.308 m，主车道箱身高度7.25 m。基坑围护结构采用直径1.0 m、桩间距1.2 m的双排门架式钻孔灌注桩加两道内支撑和两道换撑形式，桩长32~36 m。第一道内支撑梁采用1.2×1.2 m钢筋混凝土梁支撑，第二道内支撑及两道换撑均采用Φ609×16 mm钢管支撑，支撑水平间距4.0~6.0 m。受场地限制，双排桩的排距为2.5 m，小于3~5 d（d为围护桩直径）的常规排距，属小排距双排桩。



(a) 基坑与桥桩剖面位置关系

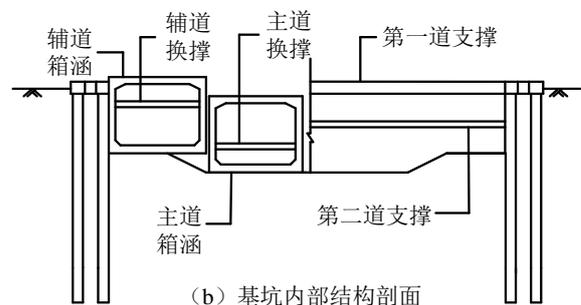


图2 基坑剖面示意图

Fig. 2 Section of foundation pit

1.3 土层条件

表1给出了包括加固土在内的土层力学参数，开挖影响深度范围内为深厚淤泥，呈流塑，厚层状，偶含贝壳碎屑、粉砂薄层及有机质，土质不均，局部为淤泥质黏土或淤泥质粉质黏土，有光泽，干剪强度高，韧性高，该层力学性质极差，渗透性能弱。因缺少相关资料，将全风化基岩等效为上层粉质黏土层进行建模。地下水埋藏较浅，渗透性能弱，接受大气降水与地下径流补给，以蒸发或向低洼处径流为排泄方式，受季节气候变化影响较大，稳定水位埋深0.30~3.50 m。

1.4 施工工况

基坑的施工分为11个阶段，具体工况见表2。

表 1 土层力学参数

Table 1 Soil mechanical parameters

土层	厚度/m	压缩模量/MPa	$\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	c'/kPa	$\phi'/(^\circ)$
淤泥	31.3	1.70	16.2	1	20
黏土	12.3	3.81	18.1	29	28
粉质黏土/全风化岩	46.4	4.63	18.8	25	27
加固土	20.0	5.12	19.0	29	28

表 2 施工工况

Table 2 Construction conditions

施工工况	施工内容
工况 1	围护桩以及工程桩施工, 地基加固
工况 2	场地平整, 土方挖至冠梁底标高, 浇筑冠梁和第一道内支撑梁, 坑外做排水沟
工况 3	土方挖至-4.86 m
工况 4	施工第二道支撑
工况 5	土方挖至-8.6 m
工况 6	施工箱涵至第二道支撑处, 安装主道换撑
工况 7	拆除第二道支撑
工况 8	施工主道上部箱壁和顶板, 加高辅道箱壁并安装辅道换撑
工况 9	拆除第一道支撑和主道换撑
工况 10	施工辅道上部箱壁和顶板
工况 11	拆除辅道换撑

注: 随箱涵施工同步回填 C20 混凝土

表 3 部分 HSS 模型参数

Table 3 Partial HSS model parameters

土名	$\gamma_{0.7}/10^{-4}$	R_f	m	μ_{ur}
淤泥	2.0	0.6	0.8	0.2
黏土	2.0	0.9	0.8	0.2

2 二维数值分析

2.1 计算模型

为了研究基坑开挖对邻近桥桩的影响, 本文以图 2 为基础构建了二维有限元模型。为了减小边界效应对最终计算结果的影响, 本文模型水平宽度取 90 m, 竖向边界则取至粉质黏土层底部。

HSS 土体本构模型能够合理模拟土体小应变下的刚度和土体非线性、硬化等特性, 因此本文选取 HSS 本构模型进行计算, 部分模型参数采用王卫东等^[8]的建议, 具体数值见表 3。

HSS 土体本构模型的强度参数为有效应力指标, 具体取值如表 1 所示。土体的刚度系数关系则由王卫东等^[8]的建议及工程经验得到。土体刚度参数取值见表 4, 围护桩、桥桩等结构参数见表 5。

模型的网格划分精度为中等, 共生成 3 711 个单元、31 291 个节点, 网格划分如图 3 所示, 施工步则按照实际工况模拟。

2.2 结果分析

实际工程中基坑测斜管、桥桩沉降以及坑外土体沉降监测点如图 3 所示。工况 11 中后排桩和桥桩的监测数据、有限元结果及其对比见图 4 和表 6,

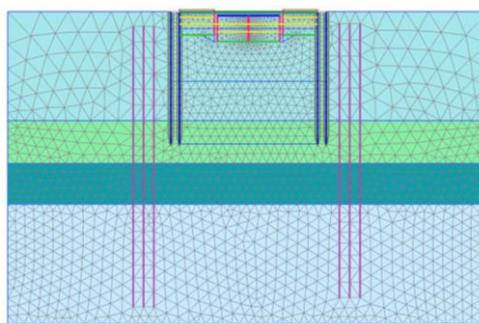


图 3 网格划分

Fig. 3 Mesh subdivision

表 4 HSS 模型的刚度参数

Table 4 Stiffness parameters of HSS model kN/m^2

土层	E_{50}^{ref}	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$	$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$	G_0^{ref}
淤泥	2.21	1.70	9.35	37.40
黏土	4.95	3.81	15.24	60.96
粉质黏土	6.02	4.63	18.52	74.08
加固土	6.66	5.12	20.48	81.92

表5 结构参数
Table 5 Structural parameters

结构	γ /(kN/m ³)	E /GPa	D or d /m	结构	EA /GN	$L_{spacing}$ /m
双排桩	25	30.0	0.788 7	第一道混凝土支撑	43.20	5.06
箱涵	25	32.5	0.65~0.8	第二道钢支撑及换撑	12.44	5.06
桥桩	25	30.0	1.25	联系梁	50.40	1.20

图4中位移为正代表排桩向坑内变形(下同)。值得说明的是,所有数据均取自工况11拆除辅道换撑,此时箱涵及回填混凝土已有一定的强度,形成了完整的支护体系,这对于变形控制极为关键。从后排桩水平位移的实测曲线可以看出,围护桩最大位移24.2 mm,最大变形出现在坑底以上2.6 m,小于预警值35 mm,说明基坑处于安全状态。至于桥桩变形,表6中桥桩沉降的监测值为2.2 mm,小于预警值4 mm,说明桥桩处于安全状态。经过对比,有限元计算得到的围护结构侧向位移曲线形状与实测侧向位移曲线基本吻合,桥桩沉降值与实测值吻合,验证了数值模型和计算参数的合理性,为下文的研究奠定了坚实的基础。

地表沉降也是基坑施工时需要关注的重点,由于地表沉降监测剖面与数值模型选取的剖面并不一致,因此不将二者进行比较而只分析实测数据。地表沉降的监测数据如图5所示。拆除辅道换撑时,坑外最大沉降出现在了距离后排桩约4.5 m处,数值为22.53 mm,说明基坑施工对周边环境影响不大。

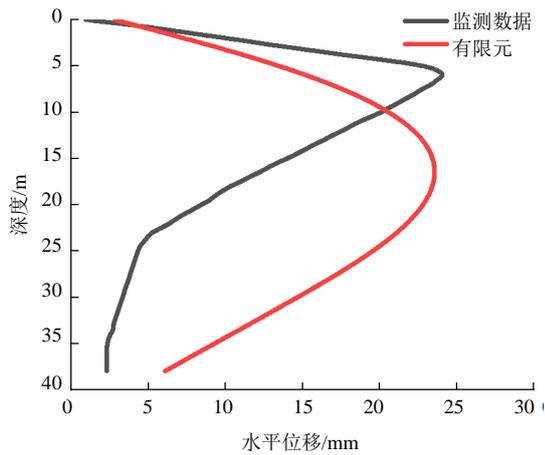


图4 排桩水平位移对比

Fig. 4 Comparison of row piles horizontal displacement

表6 桥桩沉降对比

Table 6 Comparison of bridge pile settlement

项目	监测数据	有限元
桥桩沉降/mm	2.2	2.188

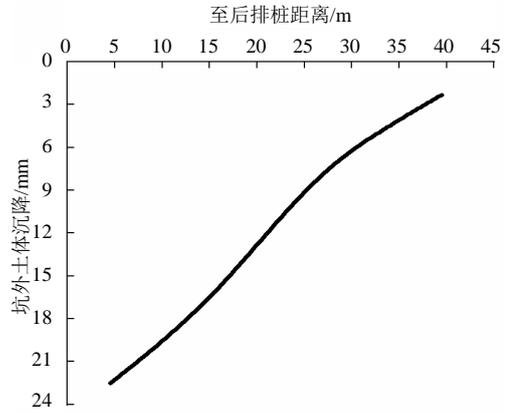


图5 地表沉降实测结果

Fig. 5 Measured results of surface subsidence

3 影响因素分析

以上述模型作为参考算例,进一步研究有无支撑、支撑间距以及排桩间距对围护结构及桩基变形的影响。

3.1 算例1(有无支撑的影响)

不激活参考算例中的第一道和第二道支撑作为算例1来计算。算例1与参考算例的后排桩水平位移比较见图6,桩基沉降对比见表7。由图6和表7可知,悬臂式支护结构使后排桩水平位移及墙后桩基沉降明显增大,不利于基坑整体变形的控制。因此,在设计中合理地布置内支撑可以明显改善基坑支护的效果。

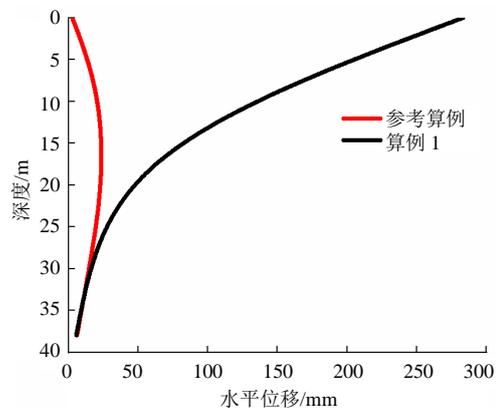


图6 有无支撑对排桩水平位移的影响

Fig. 6 Influence of support on horizontal displacement of row piles

表7 不同算例的沉降对比

Table 7 Settlement comparison of different examples					
项目	参考	算例	算例	算例	算例
	算例	1	2	3-1	3-2
桩基沉降/mm	2.188	2.554	2.219	2.14	2.165

3.2 算例2 (支撑间距的影响)

将参考算例中的支撑及临时换撑的间距从5.06 m增大到10.12 m作为算例2。算例2与参考算例的后排桩水平位移比较见图7, 桩基沉降对比见表7。由图7和表7可知, 相对参考算例, 算例2的后排桩水平位移和桩基沉降增大, 增大支撑间距起到了与减小支撑刚度同样的作用, 即降低了带撑双排桩支护结构的整体刚度, 对变形控制不利^[9]。但在支撑间距成倍增加的情况下, 变形变化量并不大。

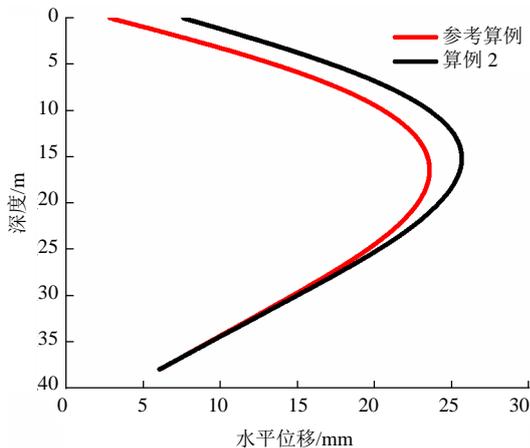


图7 支撑间距对排桩水平位移的影响

Fig. 7 Influence of support spacing on horizontal displacement of row piles

3.3 算例3 (排距的影响)

基坑常规设计中, 双排桩排距可取 $2\sim 5d$ 。将参考算例中的排距从 $2.5d$ 增大到 $3.75d$ 和 $5d$ 作为算例3-1和3-2。算例3-1和3-2与参考算例的后排桩水平位移比较见图8, 桩基沉降对比见表7。由图8和表7可知, 相对参考算例, 算例3-1和3-2的后排桩水平位移以及桩基沉降减小, 增大排距即增大双排桩支护结构的整体刚度^[10], 可以有效地降低带撑双排桩支护结构的水平位移和邻近桩基的沉降。然而, 在整体刚度增大的情况下, 算例3-1中的桩基沉降反而要小于算例3-2, 这是因为改变排距会改变后排桩到桩基的距离, 使两个算例中的桩基处在了沉降三角影响区的不同位置, 进而导致最终沉降的差异。

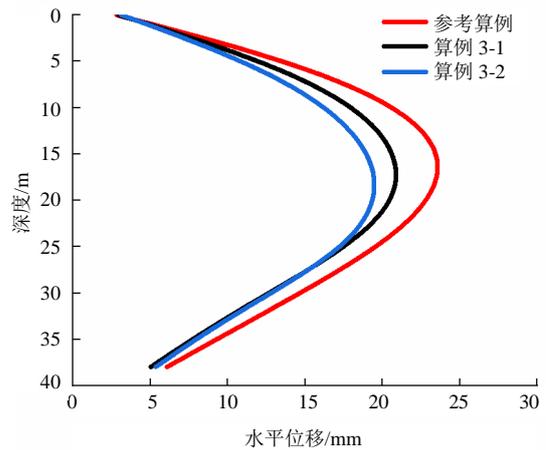


图8 排距对排桩水平位移的影响

Fig. 8 Influence of row spacing on horizontal displacement of row piles

4 结 论

(1) 结合某下穿既有市域铁路的箱涵基坑工程, 分别对后排桩水平位移、桥桩沉降以及地表沉降进行分析。实测结果表明, 后排桩水平位移、桥桩沉降以及地表沉降都小于预警值, 证明该工程变形控制得较好, 小排距带撑双排桩支护结构的支护效果较为明显。

(2) 对监测数据和有限元结果进行对比, 验证了该模型的合理性。改变支护结构参数并进行分析, 发现排桩间距越大, 带撑双排桩整体刚度就越大, 对于围护结构变形的控制效果就越好, 但改变排距的同时会改变排桩与桩基的间距, 进而影响最终沉降量的大小, 所以一味地增大排距并不一定能保证邻近桩基沉降的减小。

参考文献

- [1] CLOUGH W, O'ROURKE T. Construction induced movements of in situ wall[C]//Geotechnical Special Publication. New York, 1990: 439-470.
- [2] 刘兴旺, 施祖元, 益德清, 等. 软土地区基坑开挖变形性状研究[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(4): 456-460.
LIU Xing-wang, SHI Zu-yuan, YI De-qing, et al. Study on deformation characteristics of foundation pit excavation in soft soil area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1999, 21(4): 456-460.
- [3] FINNO R, LAWRENCE S, ALLAWH N, et al. Analysis of performance of pile groups adjacent to deep excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1991,

- 117(6): 934–955.
- [4] POULOS H, CHEN L. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(2): 94–99.
- [5] CHEN L, POULOS H. Piles subjected to lateral soil movements[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1997, 123(9): 802–811.
- [6] 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.
- [7] 木林隆, 黄茂松. 基于小应变特性的基坑开挖对邻近桩基影响分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(S2): 304–310.
MU Lin-long, HUANG Mao-song. Small-strain behavior-based method for effect of excavations on adjacent pile foundations[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(S2): 304–310.
- [8] 王卫东, 王浩然, 徐中华. 上海地区基坑开挖数值分析中土体 HS-Small 模型参数的研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(6): 1766–1774.
WANG Wei-dong, WANG Hao-ran, XU Zhong-Hua. Study of parameters of HS-Small model used in numerical analysis of excavations in Shanghai area[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(6): 1766–1774.
- [9] 应宏伟, 初振环. 深基坑带撑双排桩支护结构有限元分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(S2): 4325–4331.
YING Hong-wei, CHU Zhen-huan. Finite element analysis of deep excavation with braced retaining structure of double-row piles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(S2): 4325–4331.
- [10] 应宏伟, 初振环. 带撑双排桩支护结构性状分析[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(S1): 1450–1454.
YING Hong-wei, CHU Zhen-huan. Analysis of braced retaining structures with double-row piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(S1): 1450–1454.