

钢箱梁顶推法顶推反力对桥墩桩基的影响分析

——上海浦东新区某跨线桥工程案例分析

沙晓丹, 汤新春, 吴志刚

上海两港市政工程有限公司, 上海

Email: 51588567@qq.com

收稿日期: 2021年7月20日; 录用日期: 2021年8月4日; 发布日期: 2021年8月20日

摘要

顶推法架设钢箱梁在桥梁建设中广泛应用。但是顶推法会对桥梁下部结构产生巨大的水平反力, 而该水平反力往往在设计阶段未予以考虑, 而在采用顶推法工艺时又常被忽视, 这给工程安全埋下隐患。因此, 选择顶推法时, 需要采取科学方法全面评估顶推反力对桥梁桩基的影响及其承载能力, 确保结构安全。本文针对软土地基上的矮墩直桩情况, 提出了桥梁桩基顶推力作用下内力和变形的简化计算方法, 并以上海浦东新区创新中路某跨线桥工程作为案例进行了实例验证, 同时就计算结果和现场实测结果进行了对比分析。本文可为分析类似工程提供借鉴。

关键词

钢箱梁, 顶推法, 顶推反力, 桥梁桩基, 抗水平力桩

Analysis of the Effect of the Push Force on the Pier's Piles When Using Incremental Launching Method to Build Steel Box Girder Bridge

—A Case Study on an Incremental Launched Bridge in Eastern Shanghai

Xiaodan Sha, Xinchun Tang, Zhigang Wu

Shanghai Lianggang Municipal Engineering Construction Co., Ltd., Shanghai

Email: 51588567@qq.com

Received: Jul. 20th, 2021; accepted: Aug. 4th, 2021; published: Aug. 20th, 2021

Abstract

Incremental launching method is becoming increasingly popular to build steel box girder. But this method shall often exert huge lateral load, which is usually beyond the consideration of the designer, on the underground structures such as pile foundation on which the sliding tracks are placed. As such, for the safety of its underground structure, it is necessary to wholly appraise the effect of push force on piles before launching. Aiming at pile foundation with low cap at soft ground and based on frame theory, this paper has presented a simplified method to analyse the behaviour of piles subject to lateral load. In the end, as a case history, the foregoing methods are applied in analysing a project of incrementally launched bridge, and a comparison between theoretical calculation and site measurement has been carried out. This simplified method can be a reference for other similar projects.

Keywords

Steel Box Girder, Incremental Launching Method, Push Force, Pile Foundation of Bridge, Laterally Loaded Pile

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

桥梁顶推法具有施工作业面较小、施工装备简单、施工费用低、施工平稳、噪音小、施工质量好等众多优点, 常常用于建造跨越深谷、宽深河道的桥梁和跨越地铁隧道的跨线桥[1]。

但是, 顶推法施工时, 顶推后座会将巨大顶推反力传递到桥墩桩基上, 而且这个顶推反力大部分是以水平荷载形式沿顺桥向作用于桥梁桩基上。而这个水平荷载往往在设计阶段未予以考虑, 在软弱地基环境中, 桥梁桩基抵抗水平荷载的能力是比较低的, 这就给桥梁安全带来了威胁。因此, 顶推施工前组织方必须对顶推反力对桥墩桩基的影响进行计算分析和安全评估, 确保工程安全。

软土地基中, 桥梁桩基受到过大水平荷载后, 桥墩发生很大的侧移, 严重的甚至发生结构损坏, 这样的案例不断见诸学者的报道。导致桥梁桩基受到额外水平荷载的原因各种各样, 有堆载引起, 有挖方引起, 有结构自重分力引起, 也有邻近桩基施工引起。孙剑平(2020)报道了山东某工程因附近堆载致桥梁桩基偏移的案例[2]; 张良山(2012)报道了某桥墩桩基由于墩前挖砂致产生水平荷载差, 最终导致桩基偏位的案例[3]; 姜凯(2019)报道了某高速公路桥梁墩柱由于纵坡向水平分力过大导致桥墩偏位致上部结构挤压破碎的案例[4]; 朱晗迓(2008)报道了华东滨海地区某桥梁桩基因邻近水泥搅拌桩施工产生水平挤压力导致桥梁钻孔灌注桩发生侧移倾斜的案例[5], 等等。以上案例表明, 在既有桥梁桩基上施加过大的水平荷载可能导致桩基侧移、桥墩偏位、桩基损坏、上部结构损坏或整体失稳等工程事故。

顶推施工法的顶推反力一般沿顺桥方向作用, 如图 1 和图 2 所示。顺桥向承担顶推反力的各桥墩及其桩基和连续梁组成排架结构。计算这组排架的结构受力, 就可以得到桩基的内力和变形。

针对顺桥向水平荷载对桥梁桩基的影响分析, 不少学者开展了相关的研究工作。渠述锋等人(2020)针对连续刚构桥梁合龙时的顶推力, 考虑桥墩实测抗推刚度提出了一种简化算法, 实现对合龙顶推力快速精确的调整, 且在调整过程中避开了复杂的有限元计算分析[6]; 何娅(2017)针对连续钢箱梁桥步履式

顶推施工过程中顶推反力对桥墩结构的作用,按各桥墩不同刚度(考虑桥墩和桩基综合刚度)推导了水平荷载的计算公式[7]。上述学者的工作主要针对高墩桥梁结构情况展开,同时考虑了高墩抗侧移刚度和桩基抗侧移刚度。其结论当然也适用于矮墩情况,但是略显繁琐。针对矮墩直桩情况,考虑到墩部抗侧移刚度占比极小,可以略去。为此,本文提出了简化的计算方法,用以计算桩基内力和变形。最后以上海浦东新区创新中路跨线桥的顶推法施工作为案例,进行了实例验证。



Figure 1. Photo of the nose-deck and guide beam for incremental launching

图 1. 顶推法后座及滑轨施工照片

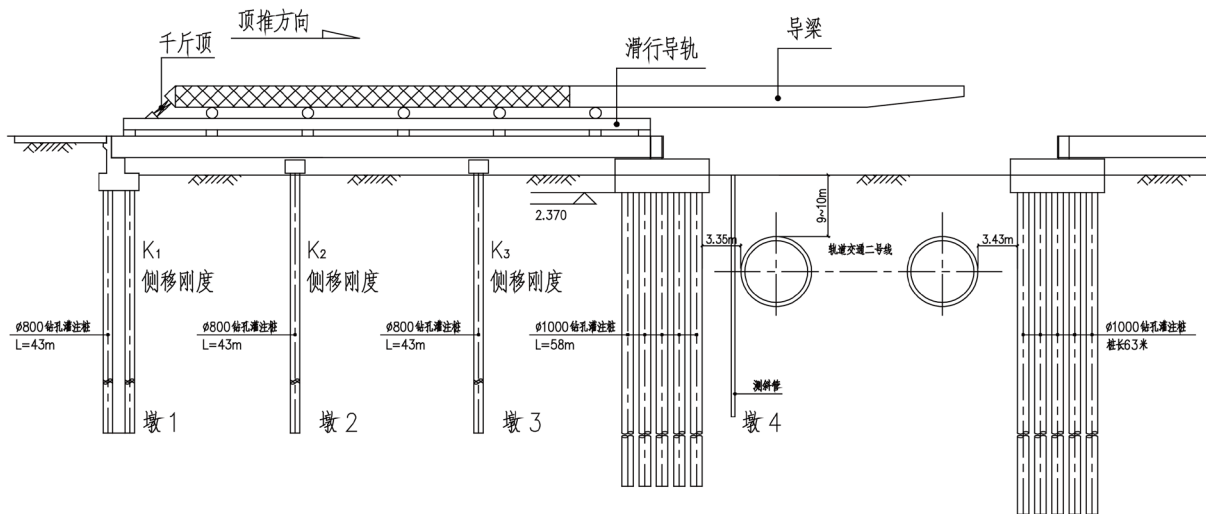


Figure 2. Sketch of a subway-crossing bridge by incremental launching

图 2. 跨线桥顶推法施工示意图

2. 顶推反力下桥梁桩基内力和变形分析

2.1. 计算简图

顶推法施工时,顶推反力以顺桥向水平荷载方式作用于引桥结构上。顶推后座下的引桥梁与桥墩及其桩基构成了一组特殊的排架。所谓“特殊”,是指其和地面建筑结构的排架有所不同,它的立柱不是单一的结构柱,而是桩,桩全长范围受到土的约束作用。计算时假定引桥梁的抗压刚度无穷大,压缩变形极小,可以忽略;土对排架“柱”的约束作用以水平弹簧模拟,土弹簧刚度采用“m”法假定。

针对矮墩情况, 进一步补充如下假定: 即引桥梁直接和桩基承台连接, 不计承台的抗侧刚度, 桥墩的抗侧移刚度完全取决于桩基的抗侧移刚度。对于软土地基, 浅层土对承台抗力占比很小, 因此, 此简化是符合实际的。计算简图如图 3 所示。

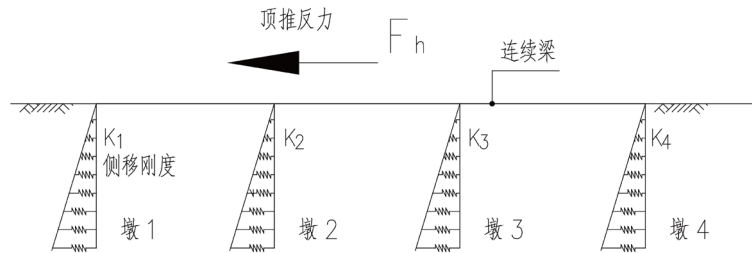


Figure 3. Sketch of pier for the calculation of the push force
图 3. 墩台反力计算简图

2.2. 墩台抗侧移刚度计算

墩台的抗侧移刚度是指当墩台顶受到单位推力作用时产生的水平位移 δ 的倒数, 如图 4 所示, 即:

$$K = 1/\delta \quad (1)$$

式中 K ——墩台的抗侧移刚度, δ ——墩台顶受到单位水平力时的水平位移。

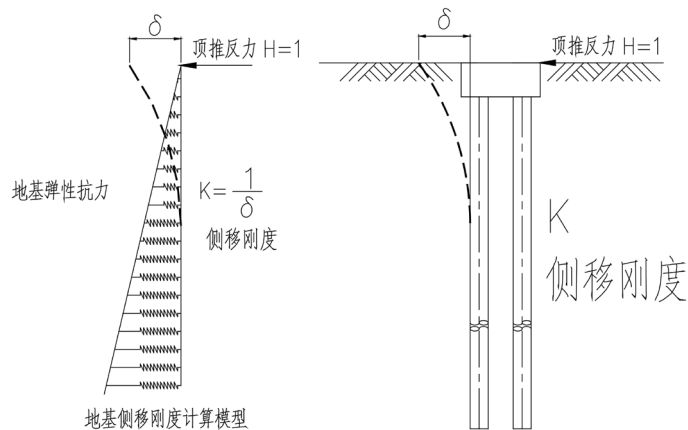


Figure 4. Sketch model for the calculation of lateral stiffness K
图 4. 墩台侧移刚度计算模型简图

一般同一墩台下桩的设计参数是完全一样的。假定墩台下布置 n 根相同的桩, 不考虑群桩效应, 则

$$K = n/\delta_0 \quad (2)$$

式中 δ_0 ——单根桩桩顶受到单位水平力时的水平位移, 可以根据“ m ”法计算得到; n ——桩数。

针对 δ_0 的计算, 公路桥涵地基与基础设计规范(JTG 3363-2019)附表列出了其计算公式和图表[8], 也可以按此编制简单的 Mathcad 或 MATLAB 计算软件进行计算。

2.3. 各墩台的分担的顶推反力

各桥墩相距较远, 各墩台的桩基设计参数和地质情况不可能完全一样, 因此, 各墩的抗侧移刚度 K

也不一样。根据结构力学排架计算理论,水平荷载将按墩台的抗侧移刚度进行分配。假定排架为三跨排架,如图3所示,各墩分配的顶推反力为:

$$\begin{aligned} H_1 &= \frac{K_1}{K_1+K_2+K_3+K_4} F_h; & H_2 &= \frac{K_2}{K_1+K_2+K_3+K_4} F_h \\ H_3 &= \frac{K_3}{K_1+K_2+K_3+K_4} F_h; & H_4 &= \frac{K_4}{K_1+K_2+K_3+K_4} F_h \end{aligned} \quad (3)$$

上述各式中 H_1, H_2, H_3, H_4 ——各墩台承担的顶推反力; K_1, K_2, K_3, K_4 ——各墩台的抗侧移刚度。

2.4. 基桩内力和变形

根据式(3)求得各墩台承担的顶推反力 H 后,除以桩数 n 即得到单根桩桩顶的水平荷载 H_0 :

$$H_0 = \frac{H}{n} \quad (4)$$

式中 H ——某墩台承担的顶推反力, H_0 ——单根桩桩顶受到水平力, n ——桩数。

根据“m”法,求得桩顶的位移 Δ_0 和转角 φ_0 :

$$\Delta_0 = \frac{H_0}{\alpha^3 EI} \cdot \frac{B_2 D_1 - B_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (5)$$

$$\varphi_0 = -\frac{H_0}{\alpha^2 EI} \cdot \frac{A_2 D_1 - A_1 D_2}{A_2 B_1 - A_1 B_2} \quad (6)$$

进一步地,可求得桩顶以下 y 深度处截面的侧移 x 和弯矩 M :

$$x = \Delta_0 \cdot A_1 + \frac{\varphi_0}{\alpha} \cdot B_1 + \frac{H_0}{\alpha^3 EI} \cdot D_1 \quad (7)$$

$$M = \alpha EI (\alpha \cdot \Delta_0 \cdot A_3 + \varphi_0 \cdot B_3) + \frac{H_0}{\alpha} \cdot D_3 \quad (8)$$

式中 Δ_0 ——某桩顶位移; φ_0 ——桩顶转角; x ——桩顶以下 y 处截面的侧移; M ——桩顶以下 y 处截面的弯矩; $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3, D_1, D_2, D_3$ ——桩身作用效应无量纲系数,可以根据公路桥涵地基与基础设计规范(JTG 3363-2019)的图标计算得到。也可以编制简单的 Mathcad 或 MATLAB 计算软件进行计算。

3. 工程案例

3.1. 工程概况

上海浦东新区某跨线桥主桥跨越地铁,与现状地铁二号线线位相交。主桥跨径 56 m,采用简支钢箱梁,引桥采用连续刚接板梁。下部结构采用墙式或排架式桥墩,直壁式桥台,跨地铁主桥基础采用 $\varnothing 1000$ 桩基础,基桩抗弯承载力 1063 kN·m;引桥基础采用 $\varnothing 800$ 桩基础,基桩抗弯承载力 608 kN·m。

前述的图2为跨线桥纵剖面图。为了保护地铁2号线区间隧道,主桥架设采用多点拖拉顶推法施工,顶推力约为 550 kN 吨。

按地质钻孔资料,桩基穿越如下土层:① 填土,② 粉质黏土,③ 淤泥质粉质黏土,④ 夹层粉质黏土,⑤ 淤泥质粘土,⑥ 1 粘土,⑦ 3-1 粉质黏土,⑧ 3-2 粘质粉土,⑨ 3-3 粉质黏土,⑩ 3-4 粉质黏土夹粉性土,⑪ 2 粉砂,⑫ 1 粉质黏土,⑬ 2-1 粉质黏土粉砂互层。土层分布与桩的位置关系如图

5 所示, 各土层的物理力学指标如表 1 所示。

Table 1. Properties of soils
表 1. 土层的物理力学参数

土层	厚度(m)	重度(kN/m ³)	内聚力 C (kPa)	内摩擦角φ(°)	地基基床比例系数 m (MN/m ⁴)
② 层粉质黏土	1.7	18.50	19	19.0	7.22
③ 层淤泥质粉质黏土	5.1	17.8	14	18.0	6.00
③ 夹层粉质黏土	4.1	18.3	14	19.0	6.72
④ 层淤泥质粘土	6.7	16.8	11.0	8.5	1.70
⑤ 1 层粘土	9.0	18.9	18.0	18.0	6.48
⑤ 3-1 层粉质黏土	23.5	18.6	19.0	22.0	9.38
⑦ 2 层粉砂	7.1	20.1	0	32.0	17.28

3.2. 计算分析

3.2.1. 计算模型和简图

根据顶推法工艺设计, 顶推反力 $F_h = 550 \text{ kN}$ 。其计算简图如图 5 所示。

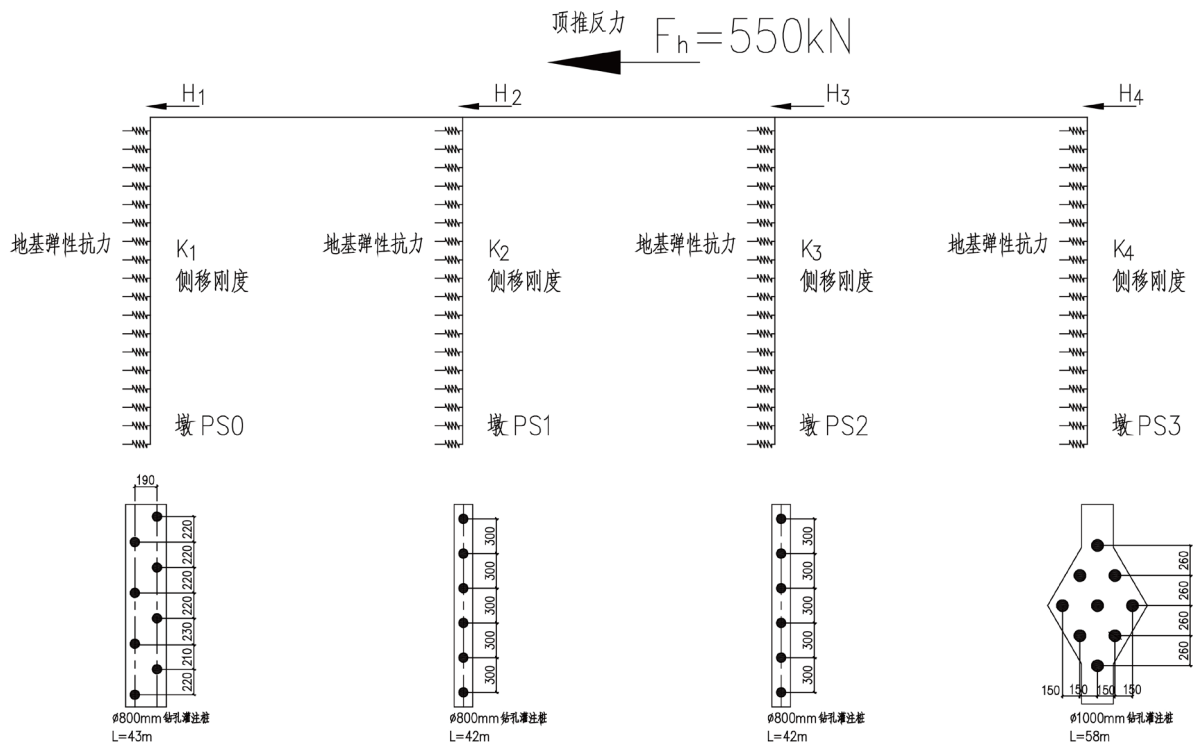


Figure 5. Model analyzing the push force acted on the piers of approaching bridge
图 5. 主桥顶推计算简图

3.2.2. 各墩台承担的顶推反力计算

根据各墩台桩基参数和地层参数, 可得到各墩台承担的顶推反力。计算结果如表 2 所示。

Table 2. Push force acted on each pier
表 2. 各墩台承担的顶推反力

墩台号	抗侧移刚度 K (kN/m)	顶推反力 H (kN)
PS0	125,000	134.1
PS1	93,750	100.6
PS2	93,750	100.6
PS3	200,000	214.6

从表 2 可以看出，引桥梁的两边墩抗侧移刚度大，中间墩抗侧移小；墩台承担的顶推反力依刚度大小正比例分配。

3.2.3. 各墩台桩基的内力和变形计算

基于各墩台桩基不考虑群桩效应之假定，由于各桩设计参数完全一样，因此各桩基受到的顶推反力也是一样的。将各墩台承担的顶推反力除以各自桩数，即得各墩台桩基的顶推反力，如表 3 所示。图 6 为各墩台侧移挠曲线。

Table 3. Inner force and displacement of the pile of each pier
表 3. 各墩台下基桩内力和变形

基桩所处墩台	桩数	桩径 (mm)	桩长 (m)	顶推反力 H (kN)	最大弯矩 kM·m	桩顶位移 (mm)	抗弯承载力 kM·m
PS0	8	800	43	18.50	31.01	4.27	608
PS1	6	800	42	17.8	31.01	4.31	608
PS2	6	800	42	18.3	31.01	4.31	608
PS3	9	1000	58	16.8	69.93	4.29	1063

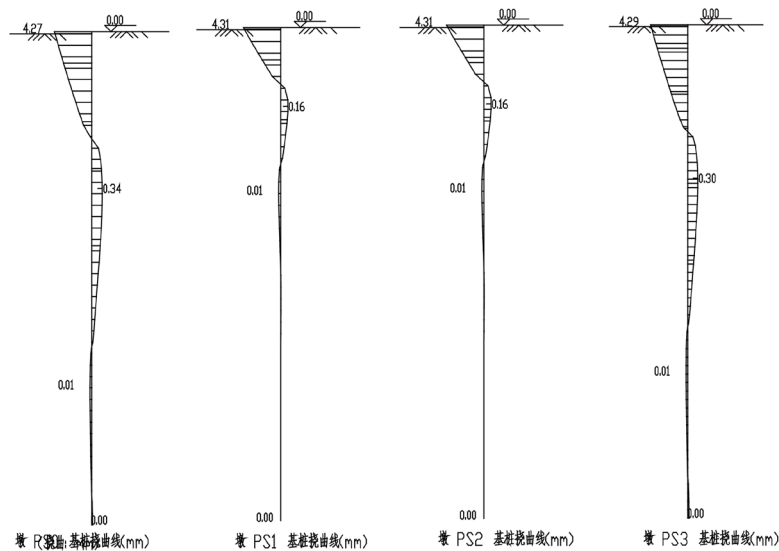


Figure 6. Calculated deflections of the piles of each pier
图 6. 各墩台基桩的计算侧移挠曲线

从表 3 可以看出，引桥梁的两边墩基桩受到的弯矩大，中间墩基桩受到的弯矩小；基桩顶部位移基本一样，和假定是一致的。各基桩弯矩均小于抗弯极限承载力。

从图 6 可以看出，基桩侧移挠曲线主要发生在顶部，埋深 12 米之后就无变形了。

3.3. 主墩基桩侧移计算值和实测值比较分析

架桥全过程中对主桥主墩邻近土体的侧向位移进行了监测，测斜管的测点布置如图 7 所示。监测结果如图 8 所示。三次监测对应工况为：2020 年 7 月 15 日为开始顶推时，2020 年 8 月 6 日为最近一幅顶推完成时，2020 年 8 月 26 日为所有顶推完成时。

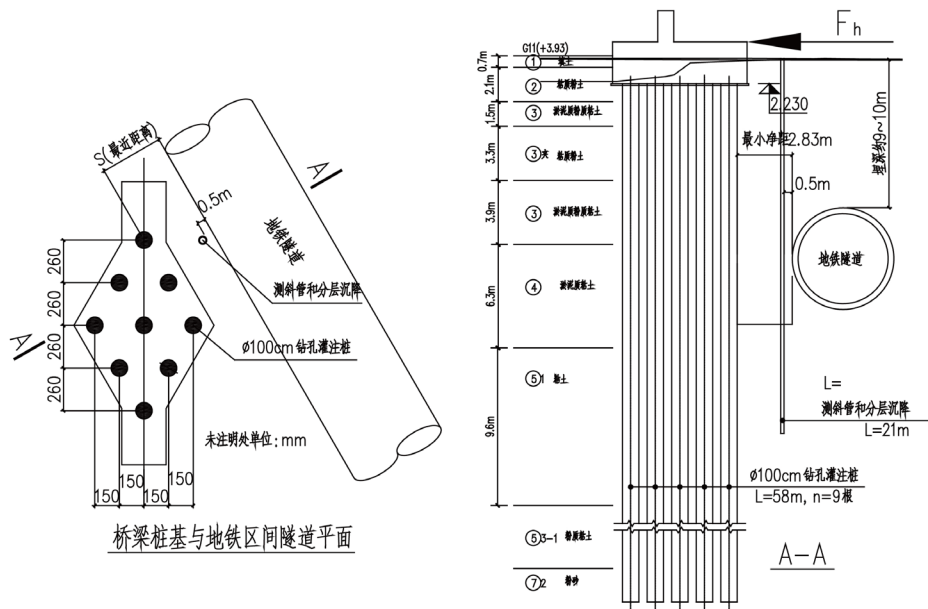


Figure 7. Layout of the inclinometer tube near the main pier of crossing bridge
图 7. 主墩基桩邻近土体测斜管布置图

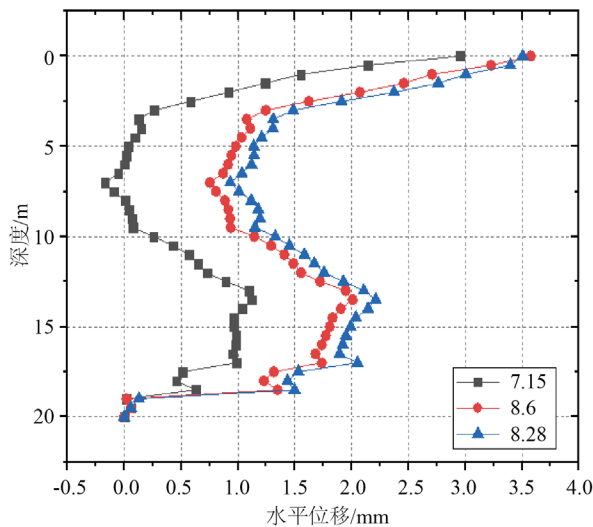


Figure 8. Horizontal displacement-vs-depth curves of surrounding soil near main pier
图 8. 主墩基桩邻近土体水平位移曲线

监测得到主墩基桩邻近土体的位移，地表处最大，为所有各幅箱梁顶推结束时，最大达到 3.5 mm。

但衰减很快,在地表以下 5 米即至 1 mm。由于测斜管埋设在土体中,因此小于计算的基桩挠曲,且其受邻近地表环境施工活动影响大。监测结果和计算结果都表明,钢箱梁顶推施工时导致的基桩变形和土体变形均很微小,对邻近地铁区间隧道安全无影响。

4. 结论

根据前述分析,可得如下结论:

- 1) 对于矮墩竖桩情况,只需考虑竖桩桩基的抗侧移刚度,如此可以使计算简化;
- 2) 抗侧移刚度取决于桩基几何参数和地质参数,各墩所处地质条件不一样,顶推反力在各墩台的分配也不相同;
- 3) 减少顶推反力对桩基的不利影响,关键是减少顶推荷载,这取决于顶推系统改进;也可以提高桩基的抗侧移刚度,如对浅层地基进行土体加固;
- 4) 为了确保基桩安全,建议对基桩挠曲变形进行跟踪监测,及时反馈信息,确保基桩安全。

致 谢

本文撰写得到同济大学赖允瑾同志的帮助,特此致谢。

基金项目

2019 年上海浦东新区城建系统科学技术研究项目,项目编号:2019-015。

参考文献

- [1] 李慧敏. 钢箱梁顶推施工安全分析[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [2] 孙剑平, 唐超, 王军, 等. 堆载致桥梁桩基偏移机理分析与纠偏技术研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(6): 61-67.
- [3] 张良山. 某桥墩桩基偏位受力分析及纠偏施工研究[J]. 山西建筑, 2012, 38(1): 214-215.
- [4] 姜凯. 高速公路桥梁墩柱纠偏技术[J]. 国防交通工程与技术, 2019, 17(1): 55-65.
- [5] 朱晗迓. 某软土地场地桥梁施工中桥桩偏移事故分析及处理[J]. 广东土木与建筑, 2008(3): 37-38.
- [6] 渠述锋, 孟栋梁, 杨孟刚. 考虑桥墩实测刚度的墩梁固结桥梁合龙顶推力调整简化算法[J]. 铁道科学与工程学报, 2020(11): 2864-2872.
- [7] 何娅. 连续钢箱梁桥步履式顶推施工过程中的结构行为研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [8] 中交公路规划设计院有限公司, 等. JTG 3363-2019 公路桥涵地基与基础设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.