

顶推法架桥阶段桩基对邻近区间隧道影响的三维有限元分析

汤平, 秦渊, 王自民

上海临港新城市政工程有限公司, 上海

收稿日期: 2023年1月10日; 录用日期: 2023年1月30日; 发布日期: 2023年2月15日

摘要

顶推法架设钢箱梁在桥梁建设中广泛应用。但是顶推法架设过程中桥梁主墩的短期荷载会随着架设阶段进展发生变化, 部分主墩的短期荷载甚至大于主墩的设计长期荷载。对于主墩邻近区域存在运营盾构隧道的情况, 需要评估施工阶段主墩沉降对盾构隧道的影响, 以确保隧道的安全。本文对上海某跨线桥工程采用钢箱梁顶推法时的主墩沉降对邻近地铁隧道的影响采用Midas-GTSNX软件进行了三维有限元分析。分析中按架桥施工各阶段主墩短期荷载下隧道位移和运营期长期荷载下的隧道位移分别进行了计算, 发现施工期间的隧道位移小于设计荷载的隧道位移, 论证了顶推法的可行性。最后将计算结果和现场监测结果进行了对比, 证明顶推法施工对邻近隧道的影响在可控范围内, 是成功的。本文可为类似工程提供借鉴。

关键词

顶推法施工, 桥梁主墩, 盾构隧道, 隧道沉降, 固结沉降

3D-FEM Analysis of Effect of Piers' Foundation on Adjoining Tunnels during Girder Installation with Incremental Launching Method

Ping Tang, Yuan Qin, Zimin Wang

Shanghai Lin-Gang Special Area Municipal Engineering Construction Co., Ltd., Shanghai

Received: Jan. 10th, 2023; accepted: Jan. 30th, 2023; published: Feb. 15th, 2023

Abstract

Incremental launching method is becoming increasingly popular to build steel box girders. But when using this method, the load on main pier shall change during launching, and sometimes shall even be larger than the design service load. Therefore, for the safety of neighbouring tunnels, if any, it is necessary to appraise the effect of the settlement of pier foundation on tunnels before launching. Based on the construction of a bridge crossing metro tunnel in Shanghai, using the software Midas-GTSNX, this paper has presented a 3D finite element analysis of the effect of foundation settlement on neighbouring tunnels. This analysis includes the calculation of the tunnel displacements due to short-running and long-running loads, and the result shows that the displacement due to short-running load shall be less and proves that it is feasible to adopt incremental launching method. Finally, this paper has made a comparison between calculation and site measurement and shows that the effect of bridge launching on tunnels has been under the limit and the launching is a success. This method can be a reference for other similar projects.

Keywords

Incremental Launching Method, Main Pier of Bridge, Shield Tunnel, Tunnel Settlement, Consolidation Settlement

Copyright © 2023 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

在软土地区,桥梁基础主要形式是桩基础。但桩基础加载将对近距离地铁隧道结构的安全产生不利影响,为此需要就桩基础加载全过程对隧道的影响进行分析评判,以选择最佳的桩基设计和施工参数,确保地铁安全运营。

关于钻孔灌注桩基础加载对近距离地铁隧道的影响,国内外不少学者采用有限元数值模拟技术开展了研究[1]。叶永富等(2022)采用数值模拟方法分析新建人行桥桩基荷载作用下对隧道结构的影响[2]。张霄依托杭州市风情大道改建工程,通过理论计算与数值模拟方法研究了桥桩施工对既有地铁隧道纵、横向变形以及管片性能的影响[3]。闫静雅(2008)利用有限元软件 Plaxis-3D 分析荷载作用下群桩基础对隧道的影响[4]。路平等(2013)对天津某立交桥上跨地铁 2 号线工程进行了三维有限元模拟分析,以了解桩基成孔施工阶段和上部结构加载阶段对邻近隧道的结构及轨道影响[5]。邢凯等(2017)针对深圳地铁某停车场工程采用三维数值模拟分析桩体施工、桩体承受荷载以及停车场正式运营过程中对下部隧道结构的影响[6]。吕宝伟等(2017)利用有限元软件 Midas 对某立交桥多次跨越近邻盾构隧道的施工阶段进行数值模拟,并分析了施工对隧道结构的影响,依此对施工进行优化,以规避施工风险[7]。

上海浦东新区某跨线桥工程跨越地铁 2 号线,其基础采用钻孔灌注桩基础,距离地铁 2 号线区间隧道最小距离 3.35 m。采用顶推法架桥工艺[8],由于顶推过程中,桩基荷载不断变化,施工荷载甚至超过设计的运营荷载。施工单位认为:架桥荷载为短期荷载,其对区间隧道的影响不需要考虑土体固结因素,而运营荷载需要考虑土体固结因素。因此,架桥期间桥墩短期受荷对隧道影响将不会大于原设计荷载的量值,顶推法可以确保区间隧道的安全。对此,地铁维护部门要求施工单位提供相关论证依据。

为此,为了了解架桥瞬间荷载下对区间隧道的影响程度,评估地铁运营的安全性,本文采用 MIDAS GTS NX 三维有限元软件对此进行了分析计算。

2. 工程概况

上海浦东创新中路跨线桥工程的桥墩桩基础均位于地铁 2 号线区间隧道保护范围内,桩基础距离区间隧道最小距离为 3.35 m,桥梁基桩为钻孔灌注桩,直径 1 米,长度 58~63 m。跨线桥梁主跨 56 米,为

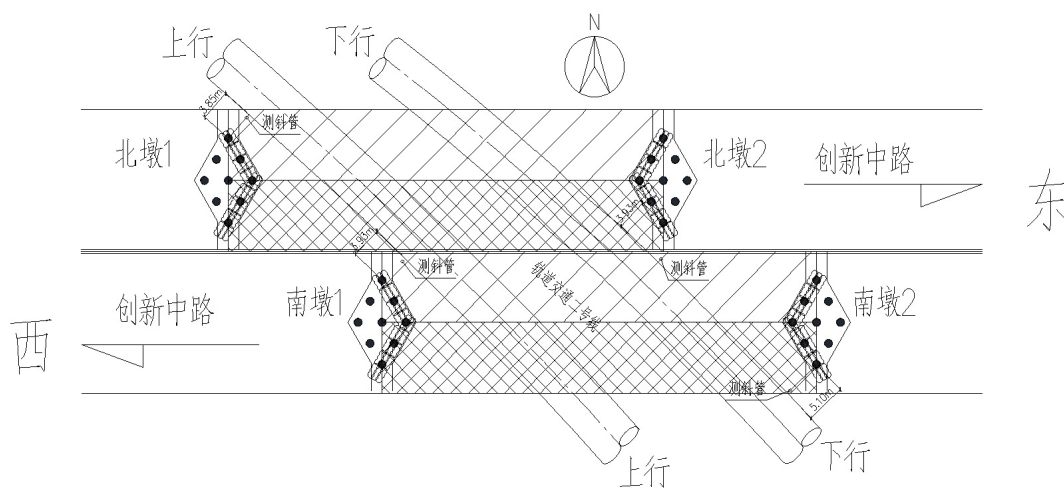


Figure 1. Layout of bridge and tunnel
图 1. 桥梁与区间隧道的平面位置关系

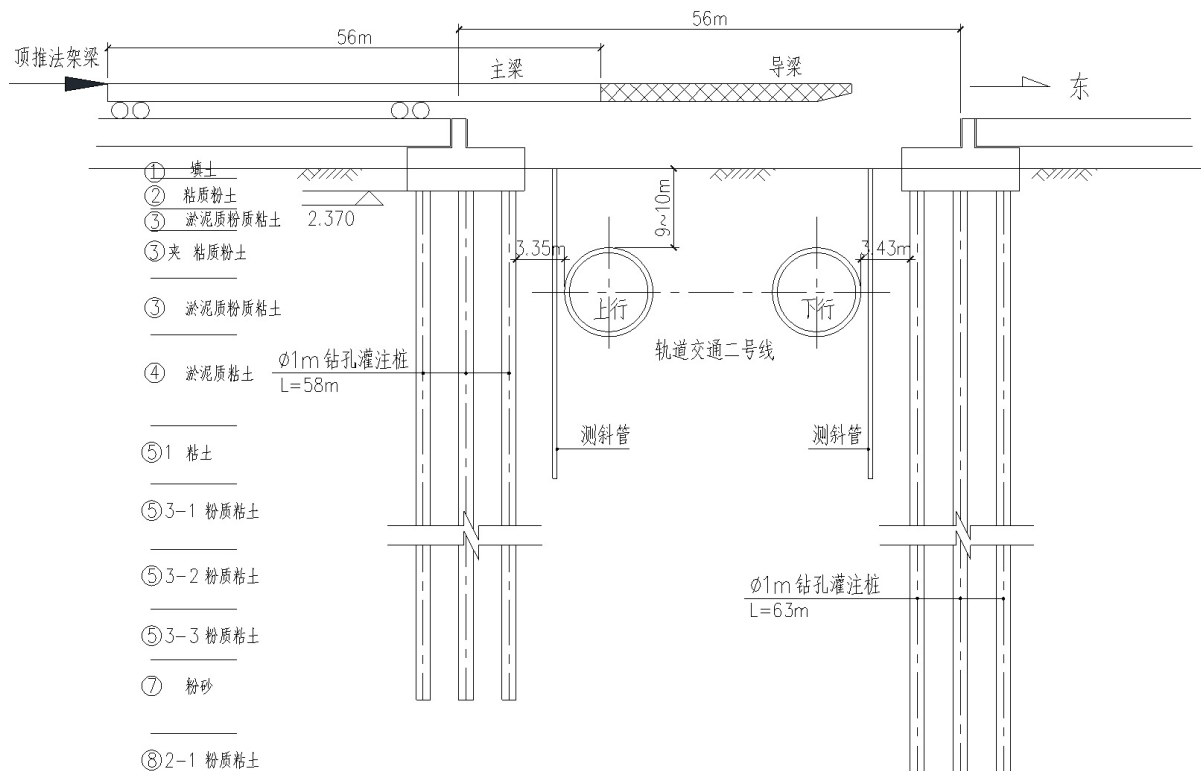


Figure 2. Profile of bridge substructure
图 2. 桥梁桩基剖面

钢箱梁结构，上下行线各一幅，每幅重约 5500 kN，每幅分两片顶推到位拼装而成。地铁 2 号线区间隧道埋深 9~10 米，隧道外径 6.2 米。桥梁与区间隧道的位置关系如图 1 和图 2 所示。

根据地质钻孔资料，桩基穿越如下土层：①层填土，②层粉质黏土，③层淤泥质粉质黏土，③夹层黏质粉土，④层淤泥质粘土，⑤1 层粘土，⑤3-1 层粉质黏土，⑤3-2 层粘质粉土，⑤3-3 层粉质黏土，⑦层粉砂，⑧2-1 粉质黏土粉砂互层。

桩基持力层为⑦层粉砂。地铁隧道位于③层淤泥质粉质黏土，③夹层粉质黏土，④层淤泥质粘土土层。

顶推法施工时，钢箱梁由西向东顶推，此时主墩会产生大于原设计的短期荷载。原设计的主墩设计荷载(恒载)为：北墩 5175 kN，南墩 5650 kN。顶推法施工时主墩最不利荷载为：北墩 5845 kN，南墩 6335 kN。

3. 三维有限元数值模拟计算

针对跨线桥桥墩不同荷载工况下对邻近区间隧道的影响，采用大型有限元商业软件 MIDAS GTS NX 进行计算分析。

3.1. 三维有限元网格

按照圣维南原理，为使边界约束对计算结果的影响降到最小，计算区域的平面尺寸确定为 110 m × 65 m (长度 × 宽度)，计算深度为地面以下 80 m。即平面尺寸考虑桩底向上的扩散角范围内(各层土内摩擦角加权值的 1/4)，深度尺寸为桩长的 1.25 倍(即考虑桩间下部土的压缩沉降)。对两侧垂直边界施加水平向约束，底部水平边界施加垂直向约束。采用六面体(或五面体)单元模拟土体。图 3 为计算的三维有限元网格。

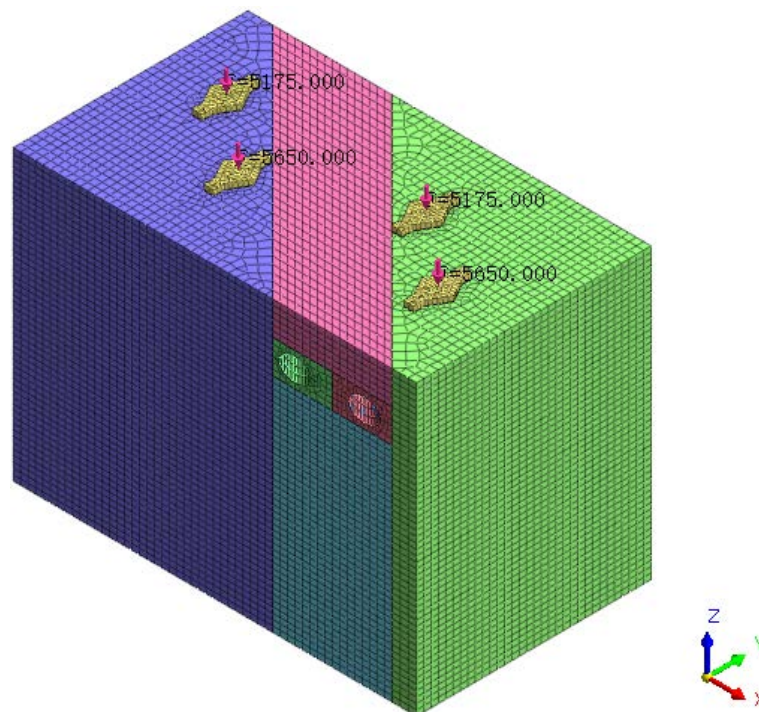


Figure 3. Mesh of 3D-finite element model
图 3. 三维有限元网格

3.2. 土层本构模型和参数

对于隧道所在的土层，本构模型采用修正摩尔-库伦模型(Modified Mohr-Coulomb, MMC)。而对于其它土层，本构模型采用经典摩尔-库伦模型(Classical Mohr-Coulomb, CMC)。这两个模型已在 MIDAS GTS NX 软件中内置实现。

MMC 模型是在 CMC 模型上又考虑了小应变硬化特点，可以很好地模拟加卸载情况下软土介质的应力应变特性。

如图 4 所示为 MMC 模型的应力-应变关系，其表达式为：

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q \cdot q_a}{q_a - q} \text{ 对于 } q < q_f \quad (1)$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cdot \cot \varphi - \sigma_3}{c \cdot \cot \varphi - p^{ref}} \right)^m \quad (2)$$

MMC 模型的破坏准则为：

$$q_f = (c \cdot \cot \varphi - \sigma_3) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad (3)$$

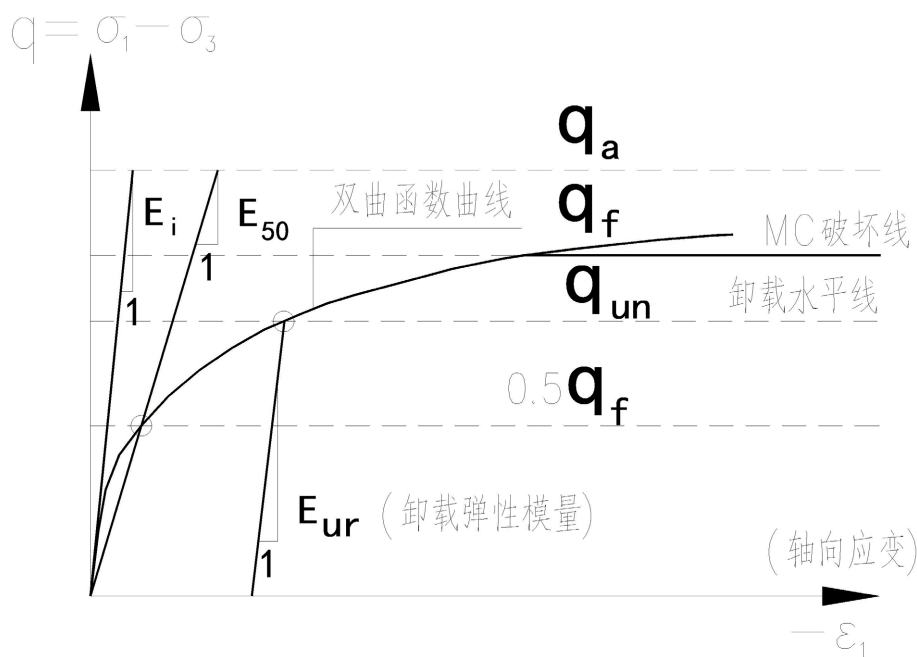


Figure 4. Stress-strain relation of modified Mohr-Coulomb model

图 4. 修正 Mohr-Coulomb 模型应力应变关系

上述各式中，

ε_1 —土体垂直方向应变； q —土体剪应力(kPa)， $q = \sigma_1 - \sigma_3$ ； q_a —土体抗剪强度极限值， $q_a = \frac{q_f}{R_f}$ ，

q_f —土体抗剪强度； R_f —破坏比，取值 0.9； c 、 φ —土体粘聚力(kPa)和内摩擦角(°)； σ_3 —最小主应力(kPa)。

$E_{50} - q = q_f$ 时的割线刚度； E_{50}^{ref} —参考割线刚度； m —指数， $0 < m < 1$ ，砂土取 $m = 0.5$ ，粘土取 $m = 1$ ；

p^{ref} —参考围压压力，取 $p^{ref} = 100$ kPa。

CMC 模型计算参数从地质勘察报告中获取, 如表 1 所示。MMC 模型计算参数采用了近年来学者们对上海地区相同类型土层的研究成果[9] [10], 如表 2 所示。

Table 1. Soil properties of CMC model
表 1. 经典摩尔 - 库伦模型计算参数一览表

土层	重度 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	C(kPa)	φ	泊松比 μ	$K_v(1\text{e-}6 \text{ cm/s})$	Kh (1e-6 cm/s)
②粉质黏土	18.5	21	20.5	0.25	0.924	1.48
③淤泥质粉质黏土	17.8	13	15.5	0.35	4.27	7.88
③夹黏质粉土	18.3	9	28.5	0.25	297	468
④淤泥质粘土	16.8	12	12	0.40	0.147	0.274
⑤1 粘土	18.9	14	14.5	0.25	0.581	0.752
⑤3-1 粉质黏土	18.6	18	20	0.25	4.23	5.34
⑤3-2 粘质粉土	18.5	14	27.5	0.25	36.3	40.1
⑤3-3 粉质黏土	19.1	20	22.5	0.25	6.25	6.36
⑦粉砂	20.1	2	35	0.25	426	517
⑧2-1 粉质黏土粉砂互层	19.5	19	23.5	0.25		

Table 2. Soil properties of MMC model
表 2. 修正摩尔 - 库伦模型计算参数

土层	重度 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	C(kPa)	φ	泊松比 μ	$E_i(\text{MPa})$	$E_{50}(\text{MPa})$	$E_{ur}(\text{MPa})$
③淤泥质粉质黏土	17.8	13	15.5	0.35	12.5	12.5	37.5
③夹黏质粉土	18.3	9	28.5	0.25	17.5	17.5	66.5
④淤泥质粘土	16.8	12	12	0.40	7.9	7.9	23.5

3.3. 桥承台、桩基和隧道结构的本构模型和物理力学参数

本工程桥墩承台、桩基及轨交隧道结构均为钢筋混凝土材料, 计算时按照线弹性模型进行模拟。物理力学参数如表 3 所示。

Table 3. Mechanical properties of pier, pile and tunnel
表 3. 桥承台、桩基和隧道结构的力学参数

构件	混凝土标号	弹性模量 E(MPa)	泊松比 μ
承台	C40	32,500	0.2
桩基	C35	31,500	0.2
隧道管片	C50	34,500	0.2

3.4. 计算工况

按照顶推法架桥施工至永久荷载施加的情况, 计算了施工阶段和运营阶段下邻近隧道的受力变形情况。计算工况如表 4 所示。

3.5. 计算结果

3.5.1. 架桥阶段下各工况下隧道沉降的计算结果

计算得到架桥阶段各工况结束时隧道的沉降。如表 5 所示。其中工况 3 结束时, 隧道竖向变形云图如图 5 和图 6 所示。图 5 为沿北幅桥剖面; 图 6 为沿南幅桥剖面。

Table 4. Cases of calculation

表 4. 计算工况一览表

工况序号	工况描述	备注
1	北墩 1 加载 5845 kN, 其余墩不加载	架桥荷载
2	北墩 1 和北墩 2 加载 5175 kN, 其余墩不加载	架桥荷载
3	北墩 1 和北墩 2 加载 5175 kN, 南墩 1 加载 6335 kN, 其余墩不加载	架桥荷载
4	北墩 1 和北墩 2 加载 5175 kN, 南墩 1 和南墩 2 加载 5650 kN	永久荷载
5	北墩 1 和北墩 2 加载 5175 kN, 南墩 1 和南墩 2 加载 5650 kN, 考虑 5 年固结	永久荷载

Table 5. Calculation results of tunnel settlement during bridge installation

表 5. 架桥阶段隧道沉降计算值(单位: mm)

隧道	工况 1	工况 2	工况 3
上行线	3.5	3.7	4.0
下行线	2.2	2.8	4.2

从表 5 可以看出, 隧道沉降按架桥进程的各工况不断增加, 且具有叠加效应。

3.5.2. 永久荷载下考虑土体固结因素时隧道沉降的计算结果

1) 土体超孔隙水压力消减曲线

架桥完成后, 桥墩进入永久荷载作用阶段。土体在外荷载作用下, 开始固结。固结过程中, 地层中超孔隙水压力随时间的消散, 根据各层土体的透水性参数, 计算得到超孔隙水压力随时间变化的曲线, 如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 孔隙水压力从最大处开始迅速消减, 至 60 天时, 土体固结度可达到约 84%; 然后消减进入缓慢发展阶段, 5 年(1800 天)的固结度约为 92%。说明地层的主要固结时段主要为工后两个月。

2) 永久荷载下隧道的固结沉降

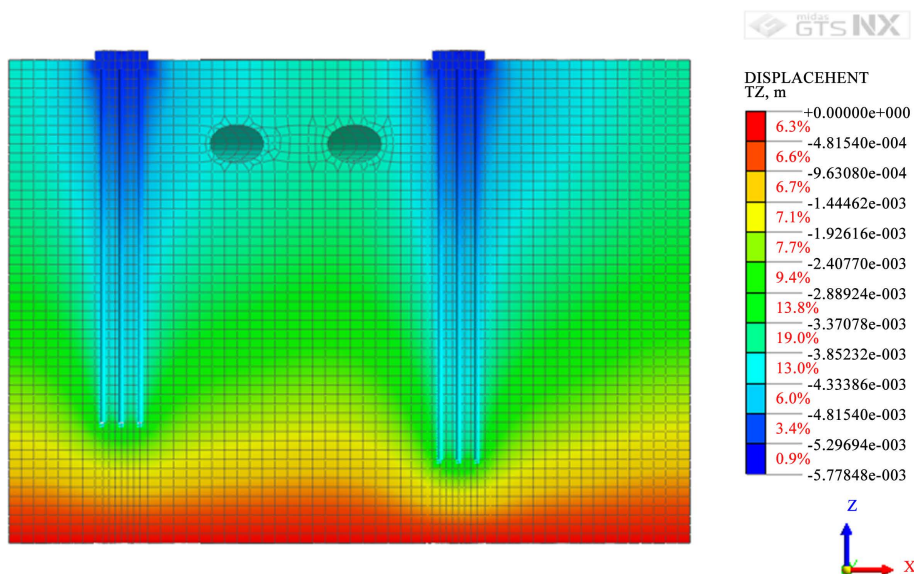


Figure 5. Vertical displacement cloud of tunnel at the end of case No.3 (north section profile)

图 5. 工况 3 结束时隧道竖向位移云图(北幅桥剖面)

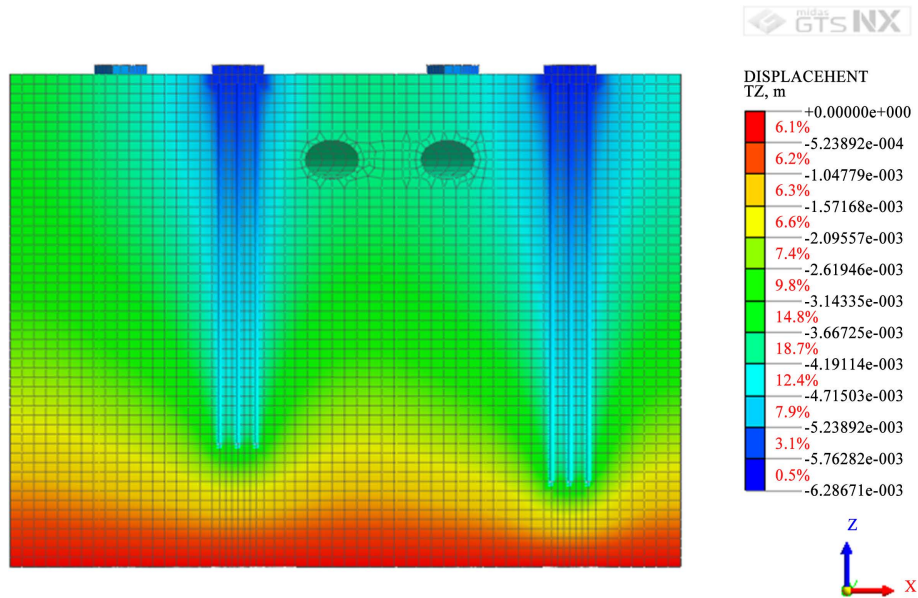


Figure 6. Vertical displacement cloud of tunnel at the end of case No.3 (south section profile)
 图 6. 工况 3 结束时隧道竖向位移云图(南幅桥剖面)

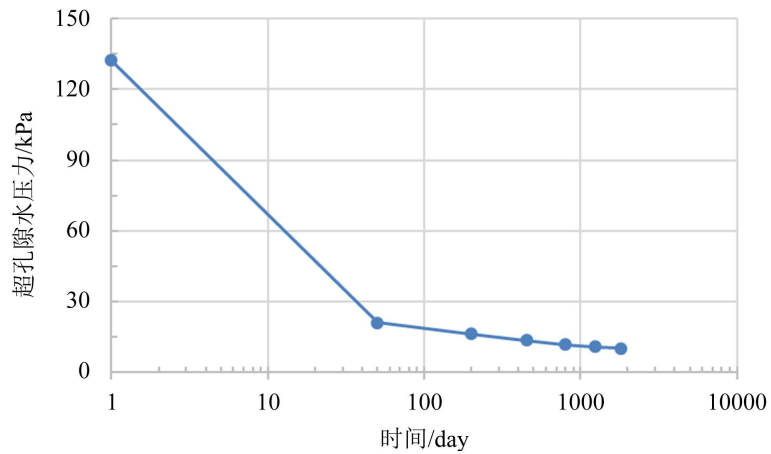


Figure 7. Curve of excess pore water pressure vs. time
 图 7. 超孔隙水压力随时间变化曲线

架桥完成后，桥墩在土体固结过程中将永久荷载传递至周围土层，由此产生周围土层的固结沉降。进而导致区间隧道沉降。表 6 为永久荷载施加瞬时及土体固结 5 年时隧道沉降计算结果。图 8 为土体固结 5 年时，隧道竖向位移云图(南幅桥剖面)。

3.5.3. 架桥阶段隧道安全性评价

计算表明，在短期荷载作用下，隧道最大沉降为 4.3 mm；永久荷载下考虑土体固结 5 年时，隧道最大沉降为 5.8 mm。说明架桥阶段虽然部分桥墩的短期荷载超过永久荷载，但架桥荷载导致的隧道沉降小于永久荷载的最终沉降。

根据《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)，为了确保地铁运营安全，城市轨道交通既有有线隧道结构竖向变形控制要求为：沉降最大限值 10 mm，结构上浮限值 5 mm。计算表明，本工程架桥荷载作用下和永久荷载作用下，隧道结构最大沉降值均能够满足变形控制要求。

Table 6. Calculation results of tunnel settlement during service
表 6. 运营阶段隧道沉降计算值(单位: mm)

隧道	永久荷载施加瞬时(工况 4)	土体固结 5 年时(工况 5)
上行线	4.2	5.6
下行线	4.3	5.8

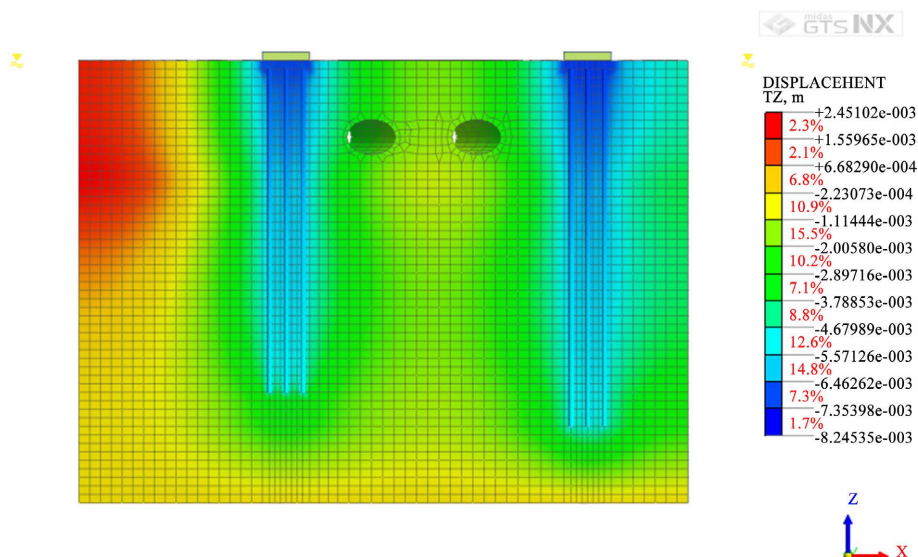


Figure 8. Vertical displacement cloud of tunnel at the 5th year of soil consolidation (south section profile)

图 8. 土体固结 5 年时隧道竖向位移云图(南幅桥剖面)

4. 现场监测结果与计算结果比较

在采用顶推法架桥期间，地铁维护部门委托测绘单位对区间隧道进行了变形监测。测点布置如图 9 所示。

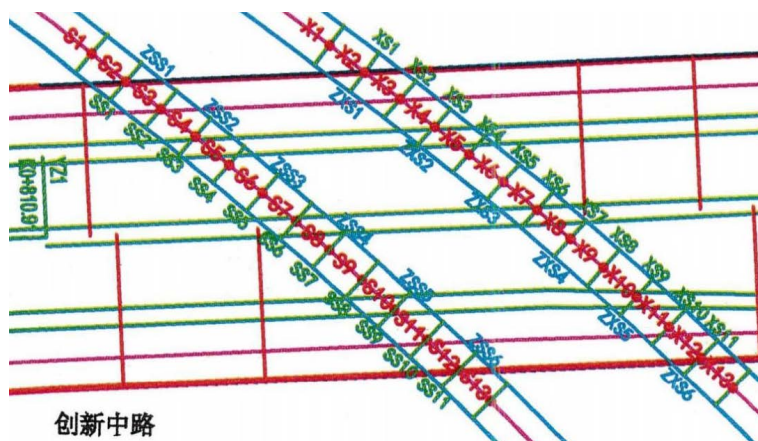


Figure 9. Layout of monitoring points for the deformation of tunnel structure

图 9. 隧道结构变形测点布置

测得架桥期间上行线(S1-S13)和下行线(X1-X13)隧道结构轨道垂直位移，如表 7 和表 8 所示。

Table 7. Monitoring results of tunnel settlement of going-upline during bridge installation

表 7. 上行线隧道结构垂直位移监测结果(mm)

工况	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	最大值
1	2.8	3.2	3.2	3.2	3.0	2.8	3.0	2.3	3.1	3.4	2.7	2.8	2.9	3.4
2	1.5	1.5	1.2	1.3	1.2	1.4	1.8	1.6	2.1	2.2	2.2	2.1	2.0	2.2
3	2.4	2.5	2.2	2.6	2.5	2.5	2.8	2.0	2.7	2.2	2.7	2.8	3.0	3.0
4	1.6	1.4	1.1	1.0	1.0	1.1	1.6	1.4	1.8	1.8	2.4	2.3	2.5	2.5

注：沉降为正，隆起为负。

Table 8. Monitoring results of tunnel settlement of going-down line during bridge installation

表 8. 下行线隧道结构垂直位移监测结果(mm)

工况	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12	X13	最大值
1	1.5	1.6	1.6	1.9	1.7	2.1	1.6	1.3	1.6	1.1	0.9	1.1	1.3	2.1
2	0.2	-0.1	-0.3	0.1	0.2	0.5	0.6	0.4	0.8	0.3	1.3	1.2	1.6	1.6
3	0.9	0.4	1.0	1.2	1.1	1.2	0.9	0.8	0.8	0.4	2.2	2.3	2.0	2.3
4	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.3	0.3	0.4	-0.2	2.3	2.2	1.8	2.3

注：沉降为正，隆起为负。

从表 7 和表 8 可以看出，架桥阶段上行线的竖向变形比下行线来得大，这是因为主梁是自西向东顶推的，靠近上行线的桥墩受荷加大。

表 9 为隧道计算值(最大值)和实测值(最大值)的对照表。

Table 9. Comparison between calculation and measurement of tunnel settlement

表 9. 隧道计算值(最大值)和实测值(最大值)的对照表

		工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
计算值	上行线	3.5	3.7	4.0	4.2
	下行线	2.2	2.8	4.2	4.3
实测值	上行线	3.4	2.2	3.0	2.5
	下行线	2.1	1.6	2.3	2.3

从表 9 可以看出，实测值比计算值略小。实测结果表明，在架桥期间，区间隧道的竖向变形满足《城市轨道交通工程监测技术规范》(GB 50911-2013)的变形控制要求，隧道可正常运行。

5. 结论

1) 顶推法架桥阶段各工况下桥墩受荷载是不同的，会出现短期荷载大于永久荷载情况，应评估不利工况下邻近区间隧道的安全。

2) 架桥荷载是短期荷载，其对隧道的影响只按瞬时荷载作用考虑；永久荷载作用需要考虑土体固结的影响。

3) 本工程架桥阶段隧道沉降的计算值小于永久荷载下隧道 5 年后的固结沉降值。

4) 计算值和实测值都表明，在顶推法架桥阶段，邻近隧道的沉降变形满足规范的变形控制要求。

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] 刘宗辉, 何嘉齐, 陈宏飞. 桩基施工对邻近既有地铁隧道影响的研究综述[J]. 建筑技术, 2022, 53(2): 132-135.
- [2] 叶永富, 曾卫. 新建人行桥桩基对已有地铁隧道位移影响的数值分析[J]. 武汉工程大学学报, 2022, 44(6): 700-705.
- [3] 张霄. 桥桩施工对邻近地铁隧道变形及管片力学性能影响研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 安徽理工大学, 2021.
- [4] 闫静雅, 张子新, 黄宏伟, 等. 桩基础荷载对邻近既有隧道影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2508-2514.
- [5] 路平, 郑刚. 立交桥桩基础施工及运营期对既有隧道影响的研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增): 923-927.
- [6] 邢凯, 周中, 张彬然. 新建桩基础对既有隧道影响的三维变形分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(10): 2170-2176.
- [7] 吕宝伟. 超临界桥桩基施工对既有隧道影响数值与实测分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(3): 103-107.
- [8] 沙晓丹, 汤新春, 吴志刚. 钢箱梁顶推法顶推反力对桥墩桩基的影响分析[J]. 土木工程, 2021, 10(8): 758-766.
<https://doi.org/10.12677/hjce.2021.108086>
- [9] 周立波, 罗伟锦, 夏雯, 杨兰强, 边开放. 钻孔灌注桩施工对邻近电力顶管隧道的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(9): 265-281.
- [10] 刘朝明, 高彦斌. 深古河道区地铁车站 基坑坑底隆起机理研究[J]. 土木工程, 2022, 11(12), 1326-1333.
<https://doi.org/10.12677/hjce.2022.1112149>