

预留并行盾构穿越条件的深基坑设计与分析

林楠

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要: 伴随城市地下空间开发进程,新建隧道基坑设计需充分预留远期盾构穿越条件。聚焦上海市外青松公路地道工程,针对新建隧道与远期轨道交通并行的情况,对施工期临时交通受限情况下的基坑设计展开研究。运用有限元软件MIDAS GTS/NX建立计算模型,得到由短地下连续墙与长工法桩组合而成的围护结构的内力分配模式,并结合现场监测数据验证该理论的受力合理性。结果表明,由短地下连续墙与长工法桩组合而成的围护结构的内力分配基本符合刚度分配理论,由短地下连续墙承担大部分弯矩内力,由长工法桩控制整体基坑的稳定性。栈桥体系采用第一道混凝土支撑兼作栈桥梁,在桩基布置空间受限的情况下,基坑格构柱可埋于隧道中墙内,栈桥体系受力可满足基坑内力变形要求和施工期间社会车辆的通行需求,可为该地区类似的深基坑工程提供有益参考。

关键词: 基坑开挖;短墙长桩;远期下卧盾构隧道并行;栈桥体系

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)03-0316-06

Design and Analysis of Deep Foundation Pits with Reserved Conditions for Parallel Shield Tunneling

LIN Nan

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the advancement of urban underground space development, the design of the foundation pit for newly-built tunnels should fully reserve the conditions for the long-term shield tunneling at the lower level. Focusing on the Shanghai Waiqingsong Highway Tunnel Project, and for the parallel development of new tunnels and long-term rail transit, the research is carried out on the design of foundation pits under the circumstances of temporary traffic restrictions during the construction period. A calculation model is established using the finite element software MIDAS GTS/NX to obtain the internal force distribution mode of the retaining structure composed of short underground diaphragm walls and long construction piles. And combined with the field monitoring data, the force rationality of this theory is verified. The result shows that the internal force distribution of the retaining structure composed of short underground diaphragm walls and long construction piles basically conforms to the stiffness distribution theory. The most of the bending moment internal forces are borne by the short underground diaphragm wall, and the overall stability of the foundation pit is controlled by the long construction pit method. A trestle system is used of the first concrete strut as a trestle beam. In the case where the space for pile foundation layout is limited, the lattice columns of the pit can be embedded within the central wall of the tunnel, the force-bearing capacity of the trestle system can meet the internal force deformation requirements of the foundation pit and the traffic needs of social vehicles during construction, which can provide a useful reference for similar deep foundation pit projects in this area.

Keywords: excavation of foundation pit; short-wall long-pile; long-term shield tunneling in parallel at lower level; trestle system

0 引言

随着我国城镇化进程的快速推进,城市地下空间的开挖工程逐渐向集约化的方向发展。轨道交通或市域铁路的建设引导着城市向多中心格局发展,

以支撑区域一体化,这在一定程度上缓解了城市的拥堵情况。当前,部分城市已出现早期基坑工程未预留后续盾构穿越条件而导致盾构项目建设成本剧增甚至线路线位改线等问题。在此背景下,新建隧道基坑设计需充分预留远期盾构穿越条件的意义显得愈发重要^[1]。

目前,常规的隧道基坑工程预留远期盾构穿越条件的措施主要有3种。

收稿日期: 2025-04-14

作者简介: 林楠(1993—),男,硕士,工程师,从事隧道工程设计工作。

(1)新建隧道工程与远期规划轨道交通线位采用结构共建方式。这导致新建项目的投资需大幅增加,且由于远期地铁线位受限,项目实施阶段需具备高度的前瞻性。

(2)规划地铁线路在竖向标高上完全避开既有围护结构下穿。这导致规划轨道交通线路埋深增大,大幅增加规划线路的造价,削弱远期规划轨道交通项目的经济性。

(3)规划轨道交通线路穿越处采用无障碍围护结构。例如,采用SMW工法桩,在新建项目施工完成后拔除型钢,或采用由低标号混凝土和玻璃纤维筋构成的地下连续墙,在盾构穿越时,以盾构机切削混凝土和玻璃纤维筋完成穿越^[2]。但这种措施仍可能在现场实施过程中对盾构穿越造成阻碍。

近年来,由短地下连续墙和长SMW工法桩相结合的围护结构,因不影响远期盾构穿越,在新建外滩通道和上海迎宾三路隧道等项目中得到成功应用^[2-4]。

目前相关研究或工程实例多聚焦新建隧道工程与远期轨道交通线位小角度或垂直相交的情况^[5-7],缺乏对新建隧道与远期轨道交通线位并行情况下的基坑设计和并行后交通导改受限情况下的基坑栈桥体系的研究。

本文以上海市外青松公路地道工程为例,对新建隧道上跨并行的规划市域铁路盾构区间节点进行分析,总结临时交通导改受限情况下并行基坑设计的关键要点,为类似工程提供参考。

1 工程概况和地质条件

1.1 工程概况

外青松公路功能提升改造研究范围南起G50沪渝高速,北至S26沪常高速,全长约10 km。近期实施范围南起城中东路,北至新科路,全长约4 km。其中,上海市青浦区外青松公路地道全长3 185 m,暗埋段约513 m利用市域铁路示范区线青浦新城站站体上层空间作为通行孔;车站段以外暗埋段长约2 337 m,采用单层或双层箱型结构,两端敞开段总长度为335 m,采用U形槽结构。

外青松公路地道线位与远期市域铁路示范区线、市域铁路嘉青松金线高度重叠,全线地道均与远期市域铁路示范区线或嘉青松金线并行。由于外青松公路地道采用明挖法施工,隧道基坑设计需充分考虑预留远期盾构穿越条件。隧道与远期盾构平面相对位置关系如图1所示。

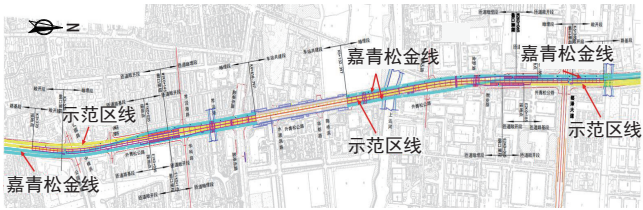


图1 外青松公路地道平面

外青松公路地道项目先行段基坑因临时交通导改受限分两期实施。一期施工隧道主线基坑,主线隧道与规划市域铁路示范区线并行,最大基坑深度约为18.1 m;一期基坑距离规划市域铁路示范区线盾构顶约4.6 m;一期基坑施工期间,需在基坑内部两侧各设置6 m宽栈桥,以保障临时社会交通纵向通行。二期施工两侧车行通道基坑,最大基坑深度约为10.6 m;二期基坑距离规划市域铁路嘉青松金线盾构顶约10.5 m,基坑平面如图2所示。

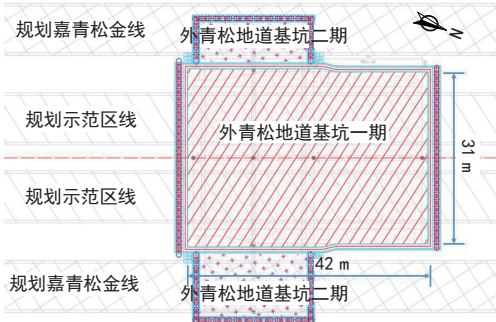


图2 外青松公路地道先行段基坑平面(单位:m)

1.2 地质条件

根据勘探资料,拟建场地主要为正常沉积区。在95 m勘察深度范围内,拟建场地各土层的一般特征和基坑设计参数如表1所示。

根据勘察成果,在勘察期间,拟建场地的潜水稳定水位埋深为地面下1.1~3.9 m,标高为1.8~3.31 m。根据上海地区的经验,潜水水位埋深一般为0.3~1.5 m,年平均高水位埋深为0.5 m,年平均低水位埋深为1.5 m,年变化幅度约为1 m。

本场地微承压水主要赋存于⑥₂₁和⑥₂₂层粉(砂)性土中,承压水主要赋存于⑦₁和⑦₂层、⑧₂₂层,以及⑨₁和⑨₂层粉(砂)性土中。根据上海地区的工程经验,承压水水位低于潜水位,呈周期性变化,水位埋深约为3~12 m。

2 基坑设计方案

2.1 基坑围护结构设计

本工程先行段一期基坑开挖深度较深,最大开挖深度达到18.1 m。基坑底距离规划市域铁路示范

表1 土层部分物理力学参数

层号	土层名称	重度	抗剪强度峰值(固快)		渗透系数	压缩模量
		$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	C_k/kPa	$\varphi_k/(^{\circ})$	建议值/ $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	E_s/MPa
①	填土	*18.0	*10	*12	5.0E-4	2.0
② ₁	褐黄~灰黄色粉质黏土	18.8	19.4	16.6	8.0E-6	5.0
② ₂	灰黑色淤泥(有机质土)	16.1	8.9	10.9	3.0E-7	2.0
③	灰色粉质黏土	18.3	14.2	15.1	1.0E-6	4.0
③ _T	灰色黏质粉土	*18.5	*5.0	*28.0	1.0E-4	4.0
⑥ ₁₁	暗绿~草黄色粉质黏土	19.6	46.4	16.0	5.0E-6	8.0
⑥ _{1T}	草黄~灰黄色砂质粉土	18.8	4.1	29.7	2.0E-4	9.5
⑥ ₁₂	草黄~灰黄色黏土	18.6	29.5	16.2	2.0E-6	5.3
⑥ ₂₁	草黄~灰色砂质粉土	18.8	3.4	30.6	5.0E-4	10.9
⑥ ₂₂	草黄~灰色砂质粉土夹粉砂	19.0	3.0	31.0	7.0E-4	11.6
⑥ _{2T}	草黄~灰色粉质黏土	18.7	18.9	20.8	9.0E-6	5.4
⑥ ₄	暗绿~草黄色粉质黏土	19.7	46.8	16.5	8.0E-6	7.9
⑦ ₁	草黄~灰黄色砂质粉土	18.9	3.7	30.3	4.0E-4	10.0
⑦ ₂	灰黄~灰色粉砂	19.2	3.0	31.6	8.0E-4	12.1

注:*为经验值。

区线盾构顶约4.6 m,基坑支护若采用常规的地下连续墙或灌注桩等围护结构,在满足基坑安全的前提下,桩底标高须进入盾构区间标高范围;若采用工法桩支护并在后期拔除,可不影响远期盾构施工。但对于上海地区类似的基坑深度,工法桩几乎无法应用。

综合考虑工程对远期下卧盾构的影响,以及项目自身的基坑安全,一期主线隧道基坑纵向两侧围护结构采用厚800 mm短地下连续墙(桩长为18.5~19.8 m)结合 $\phi 850@600\text{SMW}$ 长工法桩密插(桩长为30~32 m)的形式。其中,地下连续墙底与远期市域铁路示范区盾构顶部的距离不小于3 m,基坑施工完成后拔除工法桩型钢。基坑横向两侧基坑采用厚800 mm地下连续墙,在远期市域铁路示范区线与嘉青松金线盾构区间净距中布置地墙,地墙与远期盾构区间的水平净距不小于1.5 m。

一期基坑采用4道支撑:第一道为800 mm×1 300 mm混凝土支撑,兼做栈桥梁;第二道为 $\phi 800\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 钢支撑;第三道为1 000 mm×1 000 mm混凝土支撑;第四道为 $\phi 800\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 钢支撑。支撑竖向间距为3.3~4.8 m,基坑纵断面如图3所示。

二期基坑深度为10.6 m,基坑底距离规划市域铁路示范区线盾构顶约10.6 m,采用常规的 $\phi 850@600\text{SMW}$ 工法桩“隔一插二”形式,基坑施工完成后拔除工法桩型钢。

2.2 栈桥体系设计

一期基坑两侧需各设置6 m宽栈桥板,隧道整体

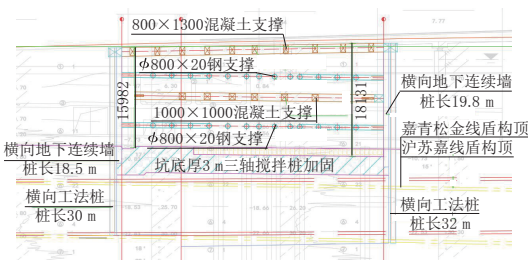


图3 外青松公路地道先行段一期基坑纵断面(单位:mm)

基坑横向宽度约为31 m,栈桥立柱桩需避让下卧市域铁路示范区线盾构区间。由于市域铁路示范区线左、右线盾构的水平净距为4.5 m,且隧道桩基设置需确保其与盾构区间的水平净距不小于1.5 m,隧道基坑立柱桩采用1 m直径钻孔灌注桩,布置在隧道结构的中墙下,基坑格构柱埋设于隧道结构的中墙内。

基坑栈桥梁结合第一道混凝土支撑设置,以800 mm×1 300 mm横向混凝土支撑为栈桥主梁,在栈桥边设置800 mm×800 mm混凝土封边梁,栈桥板为厚300 mm的混凝土板,钢筋锚入地下连续墙冠梁和栈桥梁中。

2.3 地基加固设计

由于本工程基坑开挖深度较大,且全线与后期实施的市域铁路示范区线和嘉青松金线盾构长距离并行,为保证基坑开挖阶段的施工安全,减小基坑围护结构的变形,降低盾构机掘进穿越时对地道的影响,基坑坑底土体采用三轴水泥土搅拌桩进行满堂加固,加固深度为3 m。在水泥土搅拌桩加固体的配比中,水泥掺量不小于20%。

3 短墙长桩围护墙分析

3.1 短墙长桩有限元模型

采用岩土专用有限元计算软件 MIDAS GTS,对短地墙长工法桩支护体系受力情况进行分析。在数值计算过程中,模型尺寸充分考虑基坑开挖的影响范围,建立二维空间计算模型,取模型宽度 x 方向为 160 m,深度 y 方向为 80 m,基坑开挖深度为 18 m,模型如图 4 所示。模型四周边界施加水平方向位移约束,底部施加竖向位移约束。

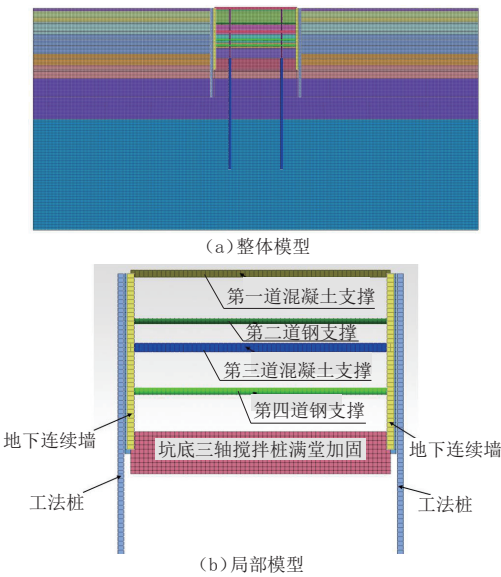


图 4 短墙长桩计算模型

模型土体采用修正摩尔—库伦本构模型,根据工程经验,本构模型中卸载弹性模量取 3 倍三轴试验割线刚度,主压密加载试验切向刚度取三轴试验割线刚度。地墙和工法桩采用弹性本构模型,围护墙和支撑等构件尺寸根据实际设计方案等效刚度代换计算得到。在模型中,通过改变单元属性模拟地基加固,激活钝化单元模拟基坑开挖。

3.2 短墙长桩模拟施工工况

模拟施工工况如表 2 所示。

表 2 模拟施工工况

施工步骤	施工内容
工况 1: 初始地应力	自重下土体地应力平衡
工况 2: 围护结构施工	激活围护结构和立柱桩
工况 3: 开挖 1	开挖第一步,激活第一道混凝土支撑
工况 4: 开挖 2	开挖第二步,激活第二道钢支撑
工况 5: 开挖 3	开挖第三步,激活第三道混凝土支撑
工况 6: 开挖 4	开挖第四步,激活第四道钢支撑
工况 7: 开挖 5	开挖至坑底
工况 8: 换撑 1	激活结构底板换撑,钝化第四道钢支撑

3.3 短墙长桩计算结果分析

根据计算结果,最危险工况(工况 8)下,地下连续墙与工法桩弯矩图如图 5 所示。

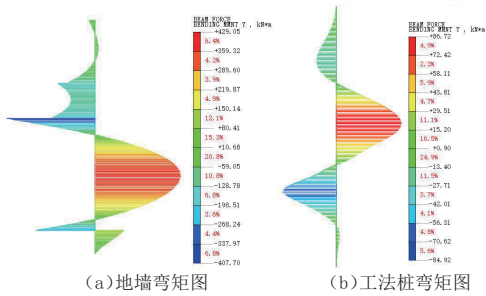


图 5 地墙和工法桩有限元计算结果

通过结果可以看出,在底板换撑工况(工况 8)下,地墙弯矩出现最大值,为 429 kN·m。此时,工法桩最大弯矩为 87 kN·m,仅为地下连续墙的 0.2 倍。

对地墙和工法桩围护进行每延米刚度换算,厚 800 mm 地墙的刚度为 1 280 000 kN·m²,工法桩仅计算 H 型钢刚度,每延米 H 型钢刚度为 394 000 kN·m²,工法桩刚度仅为地下连续墙刚度的 0.3 倍。这与有限元计算结果相近,可以验证,在短地墙长工法桩围护结构中,围护墙体承受弯矩的情况近似服从按刚度分配的原则,工法桩仅承受整体弯矩的 24%,地下连续墙承受大部分整体弯矩,约为 76%。

根据有限元计算结果,本文对采用启明星软件获得的计算结果进行复核。启明星软件在只考虑地墙受力而不考虑工法桩参与的工况下,计算得到的地下连续墙墙身最大弯矩为 1 507 kN·m,可作为地下连续墙配筋的依据。在只考虑工法桩而不考虑地墙参与的工况下,复核基坑的稳定性。启明星软件变形内力计算结果如图 6 所示。

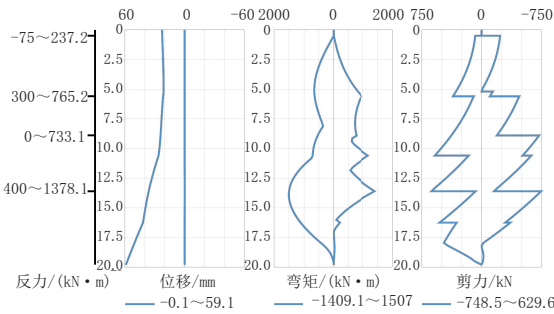


图 6 短地墙内力启明星变形计算包络结果

3.4 型钢拔除技术要求

由于长工法桩深度已进入下卧盾构标高,在项目施工完成后,应对工法桩型钢进行 100% 拔除。同时,为减少施工对周边环境的影响,在施工过程中应注意以下 2 点技术要求。

一是 H 型钢需要拔出时,应事先采取减阻措施

及与主体结构的隔离措施,防止损伤主体结构和防水措施,拔出后注浆填实桩孔。

二是工法桩型钢拔除时可采用静力拔桩,并用跳拔方式间隔拔桩^[8]。

4 栈桥体系计算分析

4.1 栈桥体系有限元模型

采用有限元计算软件MIDAS GTS建立二维有限元模型,对栈桥体系进行平面分析(见图7)。其中,栈桥板和梁采用C30混凝土,栈桥主梁尺寸为800 mm×1 300 mm,栈桥次梁尺寸为800 mm×800 mm,角部区域斜撑尺寸为800 mm×800 mm,混凝土系梁尺寸为700 mm×700 mm。根据肖彦杰等^[9]的研究,等效荷载双向板跨度在6.0~8.0 m范围变化时,等效荷载取20.0~30.0 kN/m²。本项目栈桥为社会车辆使用,根据工程经验,保守取30 kPa。

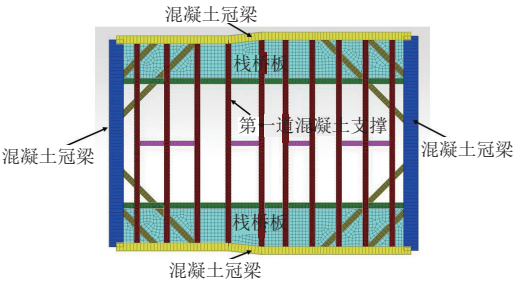


图7 栈桥体系有限元模型

4.2 栈桥体系计算结果分析

4.2.1 栈桥板内力结果

通过对栈桥板进行包络设计,板内最大弯矩标准组合为62 kN·m,可用于混凝土栈桥板配筋(见图8)。

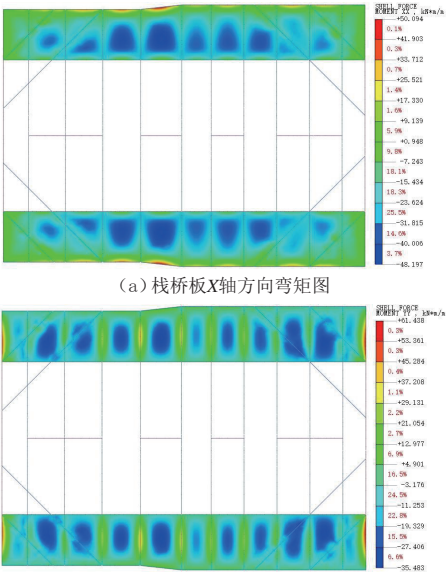


图8 栈桥板计算结果

4.2.2 栈桥梁内力结果

根据计算结果,栈桥横向主梁内最大弯矩为2 918 kN·m,栈桥纵向次梁内最大弯矩为399 kN·m,可用于混凝土栈桥梁配筋(见图9)。

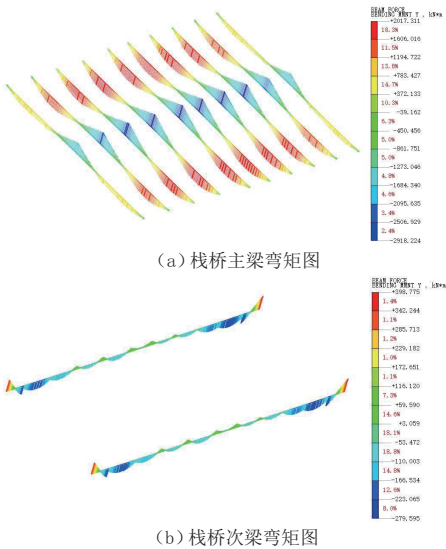


图9 栈桥梁弯矩计算结果

4.2.3 立柱桩内力结果

根据计算结果,栈桥体系对格构柱顶部产生1 316 kN的轴力,立柱桩采用长40 m、直径1 m的钻孔灌注桩,以满足要求(见图10)。

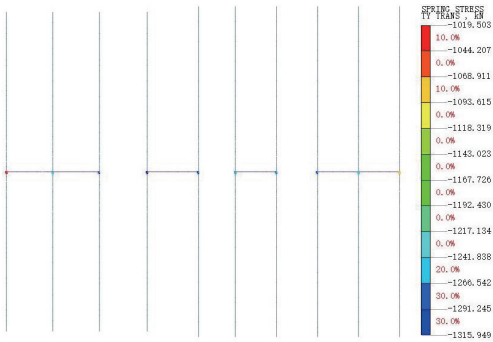


图10 格构柱顶部轴力计算结果

5 现场监测结果

在围护结构施工前,施工人员在地下连续墙内同步埋设测斜管,用于监测围护桩的深层水平位移。短地墙深层水平位移数据如图11所示。根据现场监测数据反馈,在基坑施工过程中,短地墙变形情况整体稳定,短地墙最大深层水平位移约为39.4 mm,小于设计阶段仅考虑短地墙的变形计算结果59.1 mm,这主要归因于以下2点。

(1)启明星软件在短地墙工况下仅考虑短地墙的刚度,而忽略了长工法桩的刚度。但在实际情况下,围护结构由短地墙和长工法桩联合发挥作用,长

工法桩也提供部分变形刚度。因此,实际围护结构刚度大于设计软件的短地墙工况。

(2)在基坑设计时,坑外地下水位取埋深0.5 m。但根据上海地区的经验,潜水水位埋深一般为0.3~1.5 m,年平均高水位埋深为0.5 m,年平均低水位埋深为1.5 m,年变化幅度约为1 m。在勘察期间,潜水稳定水位埋深为地面下1.1~3.9 m。基坑设计时采用水土分算,水位下降将直接减小侧向水土压力分布。

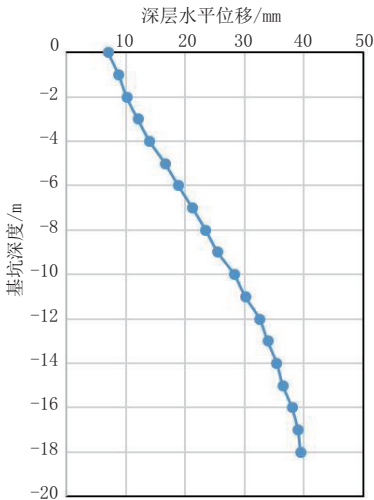


图 11 现场监测数据

6 结 论

本文基于实际工程情况,系统梳理设计方案,同时结合现场监测数据,得出以下结论。

(1)本文系统地分析了由短地下连续墙与长工法桩组合而成的围护结构的受力模式。结果表明,

短地下连续墙承担了大部分弯矩内力,长工法桩控制整体基坑的稳定性,现场实施效果可满足设计要求。

(2)在基坑栈桥桩基布置受限于远期并行盾构区间的情况下,栈桥体系采用第一道混凝土支撑,并将其作为栈桥梁;基坑桩基可在盾构净距中布置;基坑格构柱埋于隧道的中墙内。栈桥体系受力可满足基坑内力变形要求和施工期社会车辆的通行需求。

(3)由短地下连续墙与长工法桩组合而成的围护结构,可预留远期并行盾构穿越条件。施工期间可提高2种不同围护结构的施工质量,避免不同围护类型结构间渗水。

参考文献:

[1] 李庭平.考虑盾构下穿的隧道结构设计与影响分析[J].中国市政工程,2015(3):56-59;69.
[2] 陈鸿,冯云,季应伟.预留盾构穿越超短地下墙工法桩的围护结构[J].中国市政工程,2010(增刊1):8-9.
[3] 高卫平.隧道预留超近距离地铁盾构穿越条件研究[J].城市道桥与防洪,2011(7):189-191.
[4] 臧小龙.预留盾构穿越条件的特殊围护形式比选及应用[J].建筑结构,2010(增刊1):317-318;247.
[5] 田海波,姜弘,宁佐利,等.新建隧道下方预留盾构穿越条件的结构设计[J].中国市政工程,2011(2):30-33;89.
[6] 郑虹,宋昭煌,刘金涛,等.坑下预留地铁盾构区间的大型深基坑支护工程实践[J].工程勘察,2014(增刊1):552-559.
[7] 张飞鹏.北翟路地道上穿规划地铁隧道的节点设计[J].城市道桥与防洪,2015(5):17-19;54.
[8] 周云峰,吴跃东,丁磊,等.SMW工法中型钢起拔对土体变形的影响研究[J].能源与环保,2018,40(2):156-161.
[9] 肖彦杰,韩建刚.基坑栈桥面板土方车等效荷载取值研究[J].结构工程师,2017,33(5):179-184.

(上接第310页)

[7] 王宝存.下穿高铁桥段箱涵基坑支护数值模拟与分析[J].水利科技与经济,2020,26(5):29-31;36.
[8] 张帆.南水北调防洪工程箱涵基坑开挖支护方案[J].河南水利与南水北调,2019,48(6):38-40.
[9] 王伟,马泉,李敬,等.地铁与下穿立交通道交汇处同槽施工技术研究[C]//第四届全国地基基础与地下工程技术交流会议论文集.北京:《施工技术》杂志社,2015.
[10] DB42/T 159—2024 基坑工程技術規程[S].