

新建顶管近距离上跨运营隧道控制技术研究

申文明¹, 朱侠达¹, 王小刚^{1*}, 杨金刚², 胡琦³, 陈赞⁴

(1. 中铁二院华东勘察设计院有限责任公司, 浙江 杭州 310004; 2. 宁波市轨道交通集团有限公司, 浙江 宁波 315010;
3. 东通岩土科技股份有限公司, 浙江 杭州 310000; 4. 浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310028)

摘要: 随着浅层地下空间的开发不断完善, 不同地下结构间的穿越问题时有发生, 在跨越施工过程中保证新建结构的正常施工及既有结构的安全和正常运营是关键。本文结合宁波轨道交通3号线一期工程四明中路站暗挖施工, 分析了顶管近距离上跨运营隧道风险源及施工过程中的控制措施, 并对工后隧道上浮进行了数值反分析。结果表明: 修正摩尔-库伦本构模型能较好的反映顶管上跨隧道施工过程中, 由于卸荷造成的下方隧道上浮; 通过多种施工控制措施, 能较好的控制运营隧道的上浮。

关键词: 顶管; 上跨; 运营隧道; 变形控制; 数值模拟

中图分类号: TU997

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2020)05-0419-05

Control technology of newly-built pipe jacking closely over crossing operating tunnel

SHEN Wen-ming¹, ZHU Xia-da¹, WANG Xiao-gang^{1*}, YANG Jin-gang², HU Qi³, CHEN Yun⁴

(1. CREETC East China Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou 310004, China;

2. Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., Ningbo 315010, China;

3. Dongtong Geotechnical Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;

4. Architectural Design and Research Institute of Zhejiang University Co., Ltd., Hangzhou 310028, China)

Abstract: With the development of underground space, the crossing problem between different underground structures often occurs. It is important to ensure the normal construction of new structure and the safety and operation of existing structure in the process of crossing. Based on the construction of the Siming Middle Road Station of Ningbo Rail Transit Line 3, the risk sources and control measures in the construction process of the pipe jacking closely over crossing operating tunnel are analyzed, and the numerical simulation of the tunnel lifting is also analyzed. The results show that the modified Mohr-Coulomb constitutive model can better reflect the uplift of the shield tunnel caused by unloading during the construction process of the pipe jacking and the deformation of the existing structure can be better controlled through a variety of control measures.

Key words: pipe jacking; overcrossing; operating tunnel; deformation control; numerical simulation

0 引言

为缓解日益严重的城市空间压力, 地下空间建设规模不断扩大。相比于明挖法, 暗挖法在交通疏解和工期上具有一定优势, 极大的缓解了城市地下空间施工的压力。而随着浅层地下空间的开发不断完善, 不同地下结构间的穿越问题不断出现, 上跨

和下穿既有结构的机理分析和施工控制成为研究热点。

房倩等^[1]对柱洞法、中洞法、侧洞法下穿运营隧道进行了数值模拟, 结果表明在地层沉降控制要求比较严格时, 首选柱洞法; 韩焯等^[2]基于刚度修正法, 考虑既有隧道埋深、结构刚度对其变形特征的影响, 提出适于预测隧道下穿既有线时产生沉降的

收稿日期: 2020-09-17

基金项目: 浙江省建设科研项目(2019K029)。

作者简介: 申文明(1983—), 男, 山西长治人, 博士, 高级工程师, 从事地下和隧道方面的科研和咨询工作, E-mail: 119328373@qq.com。

*通讯作者: 王小刚(1992—), 男, 浙江衢州人, 硕士, 工程师, 从事地下工程设计工作, E-mail: 1406883726@qq.com。

简便分析方法;李倩倩等^[3]通过地表沉降及既有盾构隧道变形实测统计,分析隧道下穿既有结构的影响。杨志勇等^[4]对盾构上跨运营隧道的控制措施进行了分析,认为在盾壳周围注浆能有效减少扰动。申文明等^[5]分析了近距离隧道上跨既有结构的作用机理,并结合数值模拟提出了变形控制措施。毕成双^[6]对综合管廊上跨既有地铁隧道进行了理论分析,认为采用“顶进穿越、卸一还一、土体加固”的处理技术,能有效减弱了上方土体开挖产生的卸载效应。

而对顶管上跨运营隧道的研究相对较少,本文依托宁波轨道交通3号线一期工程四明中路站暗挖施工过程,对新建顶管近距离上跨运营隧道的上浮控制措施展开研究。

1 工程概况

宁波市轨道交通3号线一期工程四明中路站北接锦寓路站,南抵鄞州区政府站,站位位于四明中路和天童北路交叉口西北角。四明中路站A1顶管出入口始发井位于四明中路南侧,接收井位于天童北路东侧,如图1所示。

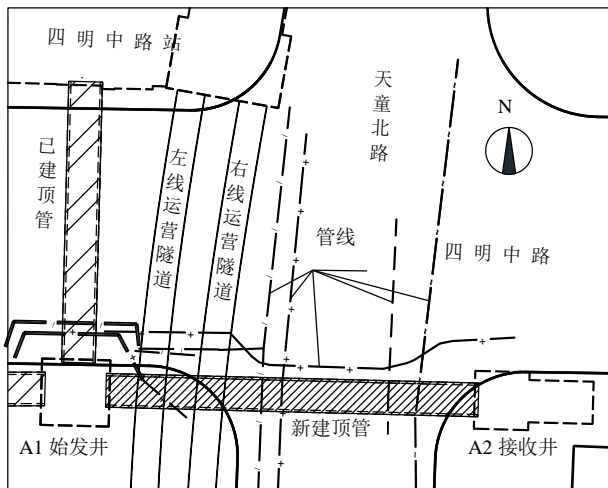


图1 顶管近距离上跨运营隧道平面图

Fig. 1 Plan of pipe jacking closely over crossing operating tunnel

A1始发井至A2接收井采用顶管法施工,施工距离总长84.1 m,其中顶进设备为土压平衡式顶管机,尺寸为7 528 mm×4 328 mm×4 550 mm,整机约重155 t,矩形顶管管片截面尺寸为7.5 m×4.3 m,标准管片宽1.5 m,特殊管片宽0.6 m,共计56节管片。由于前期工筹因素,顶管施工需上穿天童北路上的运营隧道,顶管通道顶覆土3.739~4.37 m,设计下坡坡度为0.64%,自西向东顶进。

根据岩土工程勘察报告,场地地貌属冲湖积平原,地貌类型单一,场地第四纪地层发育,厚度较大,地下水位埋深约0.8~2.2 m。顶进区域和隧道所在区域土层主要为淤泥质黏土,具有高含水率、高压缩性、高灵敏度等特点。土层主要物理力学参数如表1所示。

表1 土体主要物理力学参数

Tab. 1 Main physical parameters of soil

土层	重度/ (kN/m ³)	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/°	压缩模量 /MPa
① ₁ 杂填土	19	8	10	3.5
① ₃ 淤泥质黏土	17.6	5.1	25	2.36
② _{2b} 淤泥质黏土	17.4	4.1	23.5	2.23
④ ₁ 淤泥质黏土	17.5	5.2	26.6	2.38
⑤ ₁ 粉质黏土	19.6	25	25.5	6.18

2 风险源辨识

四明中路站A1至A2井顶管法施工的主要风险源如图2所示。

《城市轨道交通结构安全保护规程》(DB 33/T 1139-2017)规定:外部作业穿越盾构隧道净距控制值 ≥ 2 m;隧道穿越既有盾构隧道时,二者的竖向净距不宜小于 $0.5D$ (D 为结构外径或宽度较大值)。而根据区间隧道实测数据,左线隧道距顶管管底净距1 062 mm,右线隧道距顶管管底净距977 mm,远小于控制值,是最重要的风险源。

此外,顶管上部存在雨污水、电力、通信等管线,其中污水管线距顶管净距最小约360 mm,且不具备迁改条件,需要重点保护。

3 控制措施

3.1 自动监测

针对顶管通过区域30 m范围内的运营隧道进行自动化监测,有效克服了传统监测反馈不及时、运营期间无法运作的缺点。实际监测时间从顶管机始发至顶管机接收后3个月,顶进过程中监测频率为30 min/次,顶管机接收后调整为2~6 h/次。

监测采用徕卡小棱镜,如图3所示,其中道床沉降监测点埋设在轨枕中心,隧道结构沉降监测点埋设在与道床衔接处的轨道,水平收敛和水平位移监测点布置在隧道两侧。

同时,根据相关工程经验确定了隧道变形的预警值、报警值及控制值,如表2所示。

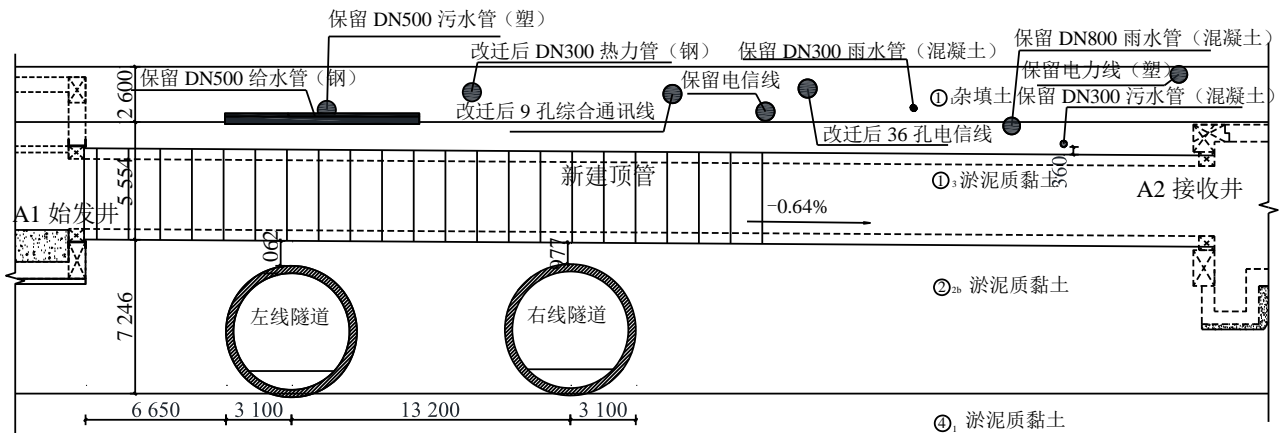


图 2 上跨运营隧道风险源 (单位: mm)
Fig. 2 Construction risk source (Unit: mm)



图 3 运营隧道变形自动监测

Fig. 3 Automatic monitoring of operating tunnel deformation

表 2 隧道变形控制指标

Tab. 2 Deformation control indexes of tunnel

隧道监测	预警值	报警值		控制值/ mm
	累计值/ mm	变形速率/ (mm/d)	累计值/ mm	
道床沉降	±5	±1	±7	±10
结构沉降	±5	±1	±7	±10
水平收敛	±5	±1	±7	±10
水平位移	±5	±1	±7	±10

3.2 顶进速率控制

四明中路站 A1 至 A2 井顶管始发接收共历时 26 d, 其中前 10 d (顶进初期) 顶进区域处于盾构隧道的主要影响范围内, 顶管顶进速度与隧道上浮量随顶进时间变化如图 4 所示。

在顶进初期较高的顶进速度下, 隧道上浮量呈快速增长趋势。在第 7 天和第 14 天 (遭遇台风连续降雨天气) 下调顶进速率后, 隧道上浮量趋于稳定, 表明近距离上跨运营隧道过程中下调顶进速度能有效降低土体扰动, 限制隧道上浮。

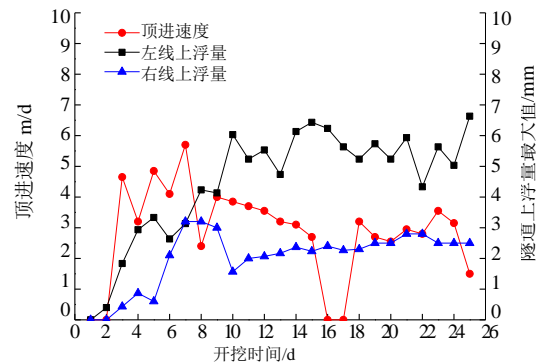


图 4 顶管顶进速率与隧道上浮量
Fig. 4 Jacking speed and tunnel lifting

3.3 压重与分步卸荷

在顶管顶进过程中, 对隧道上方影响范围内的 20 节顶管管片进行铅块压重措施, 如图 5 所示, 并根据自动监测数据实时调整铅块的重量和位置。

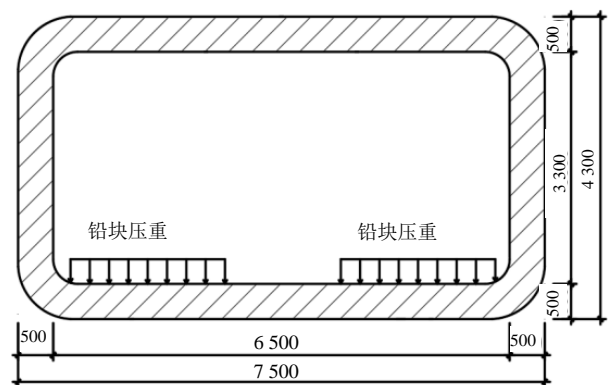


图 5 隧道上方顶管铅块压重 (单位: mm)
Fig. 5 Weight increasing of pipe jacking (Unit: mm)

卸载土体每延米浮重:

$$7.5 \text{ m} \times 4.3 \text{ m} \times 17.4 \text{ kN/m}^3 = 561.2 \text{ kN/m}$$

顶管管片每延米重量:

$$21.6 \text{ m (周长)} \times 0.5 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3 = 270 \text{ kN/m}$$

每节管片卸土重量:

$$(561.2 \text{ kN/m} - 270 \text{ kN/m}) \times 1.5 \text{ m} = 436.8 \text{ kN}$$

根据理论计算结果,每节管片卸土重量约为44.6 t。在实际顶进过程中,配合相应措施,每节管片压重8 t,即可保持隧道上浮量增长趋势稳定。

在顶进完成后,待扰动的土体重新固结蠕变再对压重的顶管进行分步卸荷。自顶管机接收完成至卸荷完毕,左线隧道上浮量未增加,右线隧道上浮量增加0.2 mm,表明分步卸荷对隧道变形起到一定限制作用。

3.4 固化注浆

常用的注浆材料有膨润土泥浆、聚合物、泡沫等,其中膨润土泥浆由膨润土、CMC、纯碱和水按照一定比例配合而成,是应用最广的注浆材料^[7]。膨润土泥浆具有触变性,静止时形成凝胶体支撑地层,在搅拌、振动或泵送情况下转变成具有黏性和流动性的胶状液体,利于减小顶管顶进时对土体扰动^[8-10]。

在常规注浆浆液配比的基础上,根据现场试验优化了浆液配比,增加了膨润土的占比,最终确定浆液配比为水泥 300 kg/m³、粉煤灰 420 kg/m³、膨润土 64 kg/m³、水 660 L/m³。

4 数值模拟

在基坑开挖等卸荷环境下,采用修正摩尔-库伦(Modified Mohr-Coulomb)本构模型能够更好的模拟土体卸荷发生的变形^[11]。

在施工前,根据地勘资料、设计图纸、施工方案等相关资料,采用修正摩尔-库伦本构模型及地区经验参数,对顶管近距离上跨运营隧道过程进行了数值模拟。Midas GTS NX 模型如图6所示,其中模型尺寸 130 m×110 m×48 m,单元数量 13.6 万,节点数量 6.5 万,边界采取位移约束,结构刚度均采用相应混凝土刚度。

将工后实测上浮量与数值模拟结果进行反分析对比,其结果如图7所示。随开挖时间增加,隧道实测上浮量与模拟上浮量均呈先增长后稳定趋势。其中右线实测上浮量最大值 3.2 mm,与模拟最大值 4.1 mm 相近,表明数值模拟的结果具有一定的指导意义。

左线实测上浮量最大值为 6.8 mm,在控制值范围内。由于初始顶进速度较快,顶进对左线隧道附近土体造成的较大的扰动,在后续的开挖中扰动持续叠加,导致左线上浮大于右线。

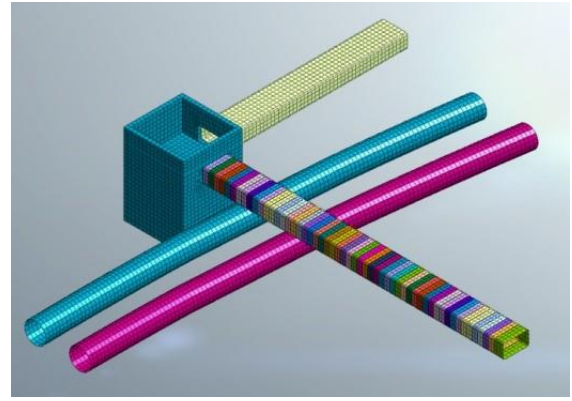


图6 顶管近距离上跨运营隧道数值模型

Fig. 6 Numerical simulation model of pipe jacking closely over crossing operating tunnel

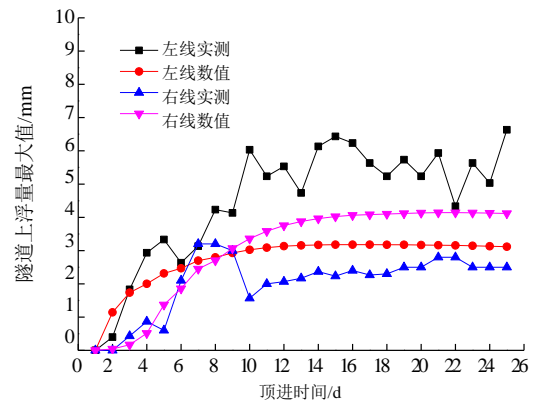


图7 隧道上浮反分析结果

Fig. 7 Back analysis results of tunnel lifting

5 结论

在地下工程中,现有地下结构的建设施工往往受到已有地下设施的制约,给正常施工带来困难,城市中心区复杂的施工条件对地下结构近距离穿越的施工技术提出了更高的要求。本文结合宁波市轨道交通工程建设实践,介绍了顶管近距离上跨运营隧道的变形控制措施,为类似工程的上跨设计、施工提供借鉴。得到的主要结论有:

(1) 应尽量避免近距离上跨运营隧道的施工,在无法避免时,应对风险源进行辨识,并采取多种控制措施。

(2) 采用修正摩尔-库伦模型及其经验参数的数值模拟,能较好模拟宁波地区地下结构的施工扰动,指导施工方案编制。

(3) 顶管近距离上跨运营隧道过程中,通过自动化监测、控制顶进速度等措施,可以将隧道上浮限制在 10 mm 内。

参考文献

- [1] 房倩, 张顶立. 浅埋暗挖地铁车站下穿既有线结构施工方法研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(5): 71-77.
FANG Qian, ZHANG Ding-li. Research on construction method of shallow underground excavation metro station underpassing existing line structure[J]. China Railway Science, 2007, 28(5): 71-77.
- [2] 韩焯, 刘赫炜, Jamie RStanding. 隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J]. 土木工程学报, 2012, 45(1): 134-141.
HAN Xuan, LIU Cheng-wei, Jamie RStanding. Case analysis and settlement analysis method of tunnel underpassing existing line[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(1):134-141.
- [3] 李倩倩, 张顶立, 房倩, 等. 浅埋暗挖法下穿既有盾构隧道的变形特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(S2): 3911-3918.
LI Qian-qian, ZHANG Ding-li, FANG Qian, et al. Analysis of deformation characteristics of existing shield tunnel through shallow buried and undercut[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3911-3918.
- [4] 杨志勇, 杨星, 江玉生, 等. 盾构近距离上跨既有运营隧道施工控制技术[J]. 隧道建设, 2019, 39(11): 1898-1904.
YANG Zhi-yong, YANG Xing, JIANG Yu-sheng, et al. The construction control technology of shield tunneling over the existing operating tunnel at close distance[J]. Tunnel construction, 2019, 39(11): 1898-1904.
- [5] 申文明, 赖世华, 刘新科, 等. 新建地铁隧道上跨既有地铁隧道的影响分析[J]. 路基工程, 2018(4): 217-221.
SHEN Wen-ming, LAI Shi-hua, LIU Xin-ke, et al. Analysis on the influence of new subway tunnel crossing existing subway tunnel[J]. The subgrade engineering, 2018(4):217-221.
- [6] 毕成双. 综合管廊上跨既有地铁隧道顶进技术研究[J]. 施工技术, 2019, 48(17): 89-92.
BI Cheng-shuang. Research on the technique of jacking over the existing subway tunnel of integrated pipe gallery[J]. The Construction Technology, 2019, 48(17): 89-92.
- [7] 魏纲, 徐日庆, 邵剑明, 等. 顶管施工中注浆减摩作用机理的研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 930-934.
WEI Gang, XU Ri-qing, SHAO Jian-ming, et al. Study on anti-friction mechanism of Grouting in pipe jacking construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(6): 930-934.
- [8] MILLIGAN G W E, NORRIS P. Sited-based research in pipe jacking-objectives, procedures and a case history[J]. Trenchless Technology Research, 1998, 11(1): 3-24.
- [9] CHAPMAN D N. Graphical method for predicting ground movements from pipe jacking[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Geotechnical Engineering, 1999, 137(2): 87-96.
- [10] 任连伟, 肖扬, 孔纲强, 等. 化学电渗法加固软黏土地基对比室内试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(7): 1247-1256.
REN Lian-wei, XIAO Yang, KONG Gang-qiang, et al. Laboratory experimental study on strengthening soft clay foundation by chemical electroosmosis[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(7):1247-1256.
- [11] 刘钊, 李子春, 刘国楠, 等. 花岗岩残积土的修正摩尔库伦模型参数取值研究[J]. 铁道建筑, 2017(3): 89-92.
LIU Zhao, LI Zi-chun, LIU Guo-nan, et al. Study on parameters of modified Moorcoumb model for granite residual soil[J]. Railway Construction, 2017(3): 89-92.