

# 软土地区新建盾构隧道近距离上穿对既有地铁隧道影响分析

杨守臻, 谭英明, 王晓男

(杭州市市政工程集团有限公司, 浙江 杭州 310014)

**摘 要:** 以某供水管道工程为背景, 采用数值分析结合现场实测的研究方法, 分析研究了盾构近距离上穿施工对既有隧道的影响, 研究结论对类似工程有一定的指导与借鉴意义。

**关键词:** 地铁; 盾构隧道; 现场实测; 数值分析

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)02-0059-06

**作者简介:** 杨守臻 (1981-), 男, 山东寿光人, 硕士, 高级工程师, 主要从事隧道与地下工程设计工作。E-mail: 93741189@qq.com。

## Influence of newly shield tunneling on lower existing metro tunnel in soft soil

YANG Shou-zhen, TAN Ying-ming, WANG Xiao-nan

(Hangzhou Municipal Engineering Group Co., Ltd. Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Based on a water supply pipeline project, the numerical results combined with the field measurement method are used to analyze the influence of shield tunneling on the existing tunnels. The research conclusions can provide guidance and reference for similar projects.

**Key words:** metro; shield tunnel; field measurement; numerical analysis

## 0 引 言

随着我国城市化进程不断加剧, 由于地面交通运输能力的限制, 使得地上交通压力越来越大, 修建地铁已成为当今解决城市交通拥挤最有效的手段之一, 新建隧道近距离交叉穿越既有运营隧道的情况日剧增多。

目前, 新建隧道采用浅埋暗挖法穿越既有地铁隧道时, 通常采用上穿或下穿的方式, 与下穿相比, 上穿具有施工安全风险低、工程造价低和不受承压水影响等优势。近年来, 针对地铁下穿工程中的相关研究较多, 而对于地铁上穿工程中新建隧道开挖卸荷引起的既有隧道结构隆起的研究较少, 仍处于经验探索阶段, 主要集中在上部基坑开挖卸荷引起下部既有隧道结构隆起特性的研究。本文以大毛坞~仁和大道供水隧道上穿地铁2号线节点为工程背景, 对上穿隧道施工对既有隧道的影响展开分析, 研究结论对相近工程有一定的指导与借鉴意义。

## 1 工程概况

大毛坞~仁和大道供水管道工程上接杭州市第二水源输水通道工程九溪线、城北线共用段输水隧洞, 通过隧洞和管道输水至杭州祥符水厂和余杭仁和水厂。

供水隧道于桩号 K15+350 位置近似正交上穿既有隧道地铁2号线, 地铁2号线为双线隧道、隧道埋深约 20.8 m, 供水隧道埋深约 12.5 m, 地铁2号线区间隧道与供水隧道的净距为 2.2 m。供水隧道与地铁隧道直径均为 6.2 m, 采用厚为 35 cm 厚的 C50 钢筋混凝土管片。新建供水隧道与2号线的平面、断面关系见图1、图2。

根据地勘资料, 工程范围土体以淤泥质粉质黏土、粉质黏土为主, 地层分布、力学参数见图2所示。

基金项目: 杭州市建设科研项目 (2018028)

收稿日期: 2019-07-22

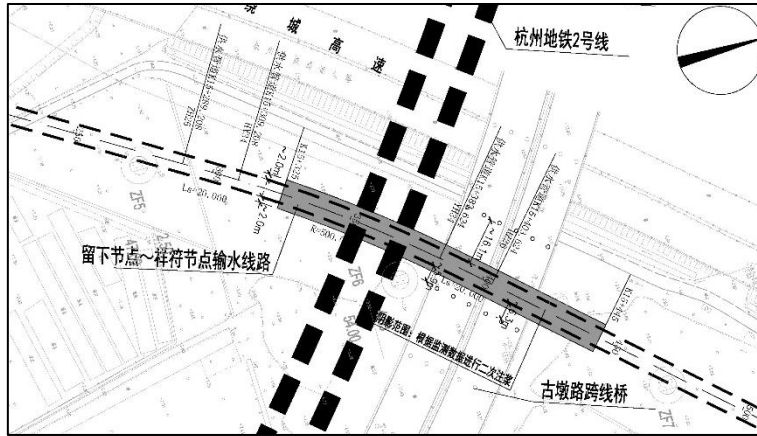


图1 工程平面示意图

Figure 1 Layout plan of the project

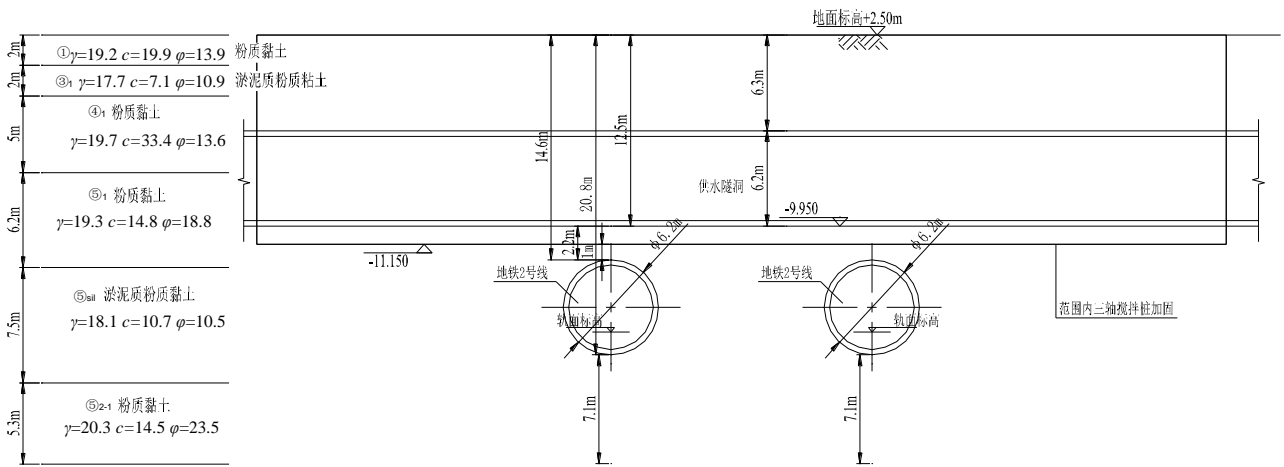


图2 工程横断面图

Figure 2 Horizontal section of the project

## 2 数值分析

### 2.1 模型的建立

#### (1) FLAC 模型的建立

采用 FLAC 3D 5.0 有限差分软件进行建模和分析, 模型尺寸 63 m×50 m×31.8 m (长×宽×高),

共划分 92260 个单元、101110 个节点。模型左右、下部为固定边界, 顶部为自由边界。土体、管片均采用实体单元模拟, 本构模型采用 Mohr-Coulomb 模型, 见图 3。

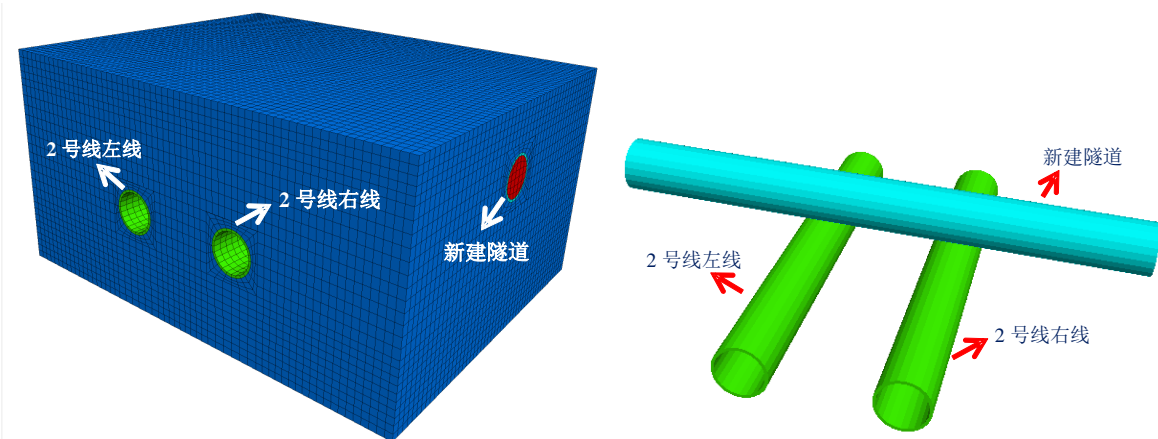


图3 FLAC 3D 数值模型

Figure 3 Numerical model of FLAC 3D

表 1 岩土设计参数表

Table 1 Mechanical properties of soil

土层代号	土层名称	含水量 $\omega/\%$	湿密度 $\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	孔隙比 $e$	液指 $I_L$	固结快剪	
						凝聚力 $c/\text{kPa}$	摩擦角 $\Phi/^\circ$
①	粉质黏土	28.9	1.92	0.817	0.51	19.9	13.9
③ <sub>1</sub>	淤泥质粉质黏土	44.1	1.77	1.243	1.39	7.1	10.9
④ <sub>1</sub>	粉质黏土	27.0	1.97	0.751	0.39	33.4	13.6
⑤ <sub>1</sub>	粉质黏土	30.5	1.93	0.846	0.71	14.8	18.8
⑤ <sub>sil</sub>	淤泥质粉质黏土	42.5	1.81	1.181	1.12	10.7	10.5
⑤ <sub>2-1</sub>	粉质黏土	32.9	2.03	0.910	0.86	14.5	23.5

(2) 监测点布置以及开挖方式

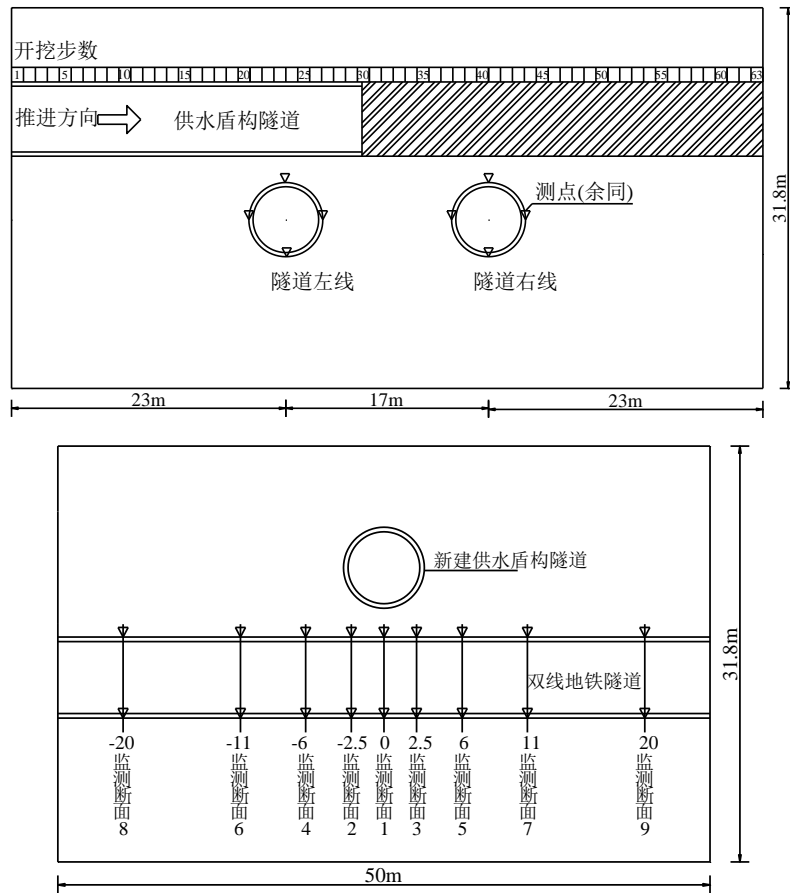


图 4 模型开挖以及监测点布置示意图

Figure 4 Schematic diagram of model excavation and monitoring point arrangement

共设置 9 个监测断面, 监测断面距新建隧道轴线的距离分别为 0 m, -2.5 m, 2.5 m, 6 m, -6 m, -11 m, 11 m, -20 m, 20 m, 每个监测断面在双线隧道的顶部、底部以及两侧设置位移监测点。管片宽度为 1.2 m, 为简化计算、方便建模与分析, 划分每 1 m 为 1 个循环进尺, 见图 4。

2.2 地铁隧道位移空间分布分析

新建盾构隧道推进 63 m 后, 地铁隧道的垂直位移云图、水平位移云图分别如图 5 (a)、(b) 所示。由图可见, 地铁隧道的最大垂直位移、水平位

移均发生在新建隧道的正下方, 在远离新建隧道的方向, 地铁隧道的垂直位移和水平位移逐渐衰减。地铁隧道的垂直位移表现为整体浮起, 最大垂直位移达到 3.12 mm, 发生在地铁隧道的顶部; 地铁隧道的水平位移主要体现为结构的向内挤压变形, 最大正向水平位移为 0.215 mm, 最大负向水平位移为 0.170 mm, 发生在地铁隧道的两腰部。从位移云图来看, 隧道的水平位移远小于垂直位移, 以下对地铁隧道的垂直位移作图分析。

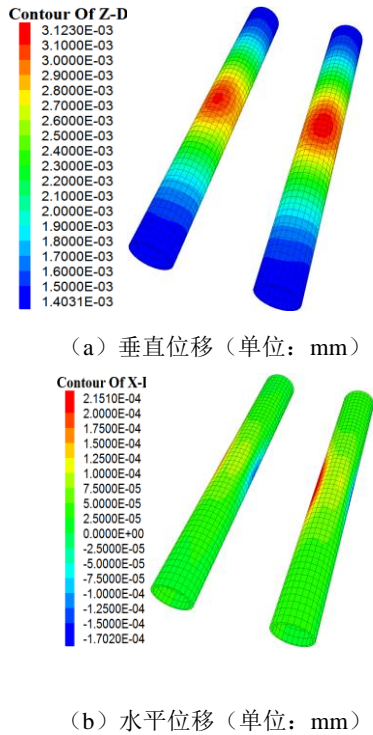


图 5 地铁隧道位移云图

Figure 5 Nephogram of displacement of metro tunnel

图 6 为新建盾构隧道推进 63 m 后，隧道 9 个监测断面的顶部测点的位移曲线图，坐标横轴代表监测断面距离新建隧道轴心的距离。由图可见，右线隧道的整体位移略小于左线隧道，是因为受模型尺寸限制，右线隧道更靠近新建隧道推进终点处的模型边界，位移还不足以达到完全稳定状态。对于被新建隧道正交上穿的既有隧道，垂直位移以新建隧道为轴对称分布，位移曲线形状近似为两条直线，对左线隧道的数据散点进行拟合后得下式：

$$y = -0.085|x| + 3.19 \quad R^2 = 0.992$$

式中：y 为既有隧道结构顶部的垂直位移，以浮起为正，单位为 mm；x 为既有隧道某位移测点距新建隧道轴心的水平投影距离，单位为 m。

根据上式计算可得，y=0 时，|x|≈37.5，即新建隧道对地铁隧道的的影响范围为两侧各 37.5 m。

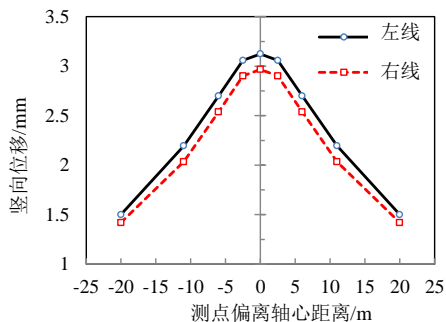


图 6 地铁隧道垂直位移曲线

Figure 6 Vertical displacement curve of metro tunnel

### 2.3 地铁隧道截面位移分析

绘制新建盾构隧道推进 63 m 后地铁隧道 1 号监测断面的垂直位移、水平位移分别如图 7 (a)、(b) 所示。

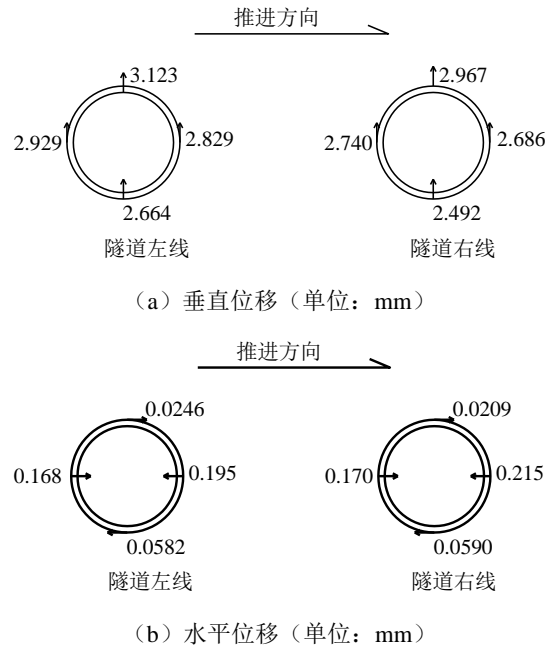
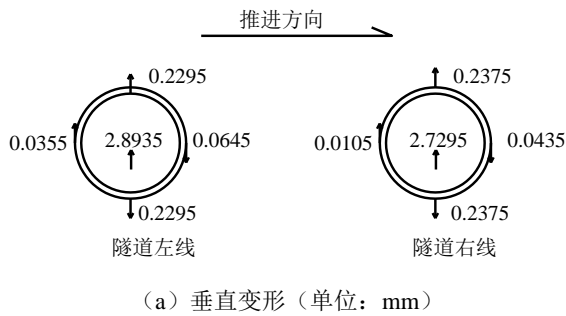


图 7 1 号监测断面位移图

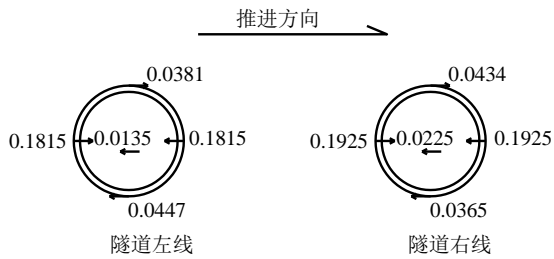
Figure 7 Displacement diagram of monitoring section No.1

由图 7 (a) 可知，地铁隧道的顶部位移垂直最大，底部垂直位移最小，两肩部近似为顶、底部的中值。由图 7 (b) 可知，地铁隧道的水平位移主要发生在隧道的两肩部，顶、底部的水平位移水平相比肩部较为微弱，且顶部与底部的水平位移方向相反、左肩部与右肩部的水平位移方向相反。

随着新建隧道的推进，既有隧道上方卸载，一方面既有隧道在底部土压力的作用下产生整体上浮并在非对称卸载作用下伴生轻微的水平移动，另一方面，随着周围土体应力重分布，隧道结构的形变也发生一定变化。将图 7 中地铁隧道的位移拆解成整体位移和结构变形两部分，如图 8 所示，本工程中，地铁左线隧道、右线隧道整体浮起位移水平分别为 2.89 mm、2.73 mm，整体水平位移水平为 0.0135 mm、0.0225 mm，后者不足前者的 1%。地铁隧道水平位移的方向与新建隧道的推进方向相背，原因在于，新建隧道的单向逐步推进对于下方的既有正交隧道是非对称卸载过程，既有隧道在新建隧道推进的水平方向上受到的土压力亦是而非对称的，固既有隧道会被推向先卸载的方向。



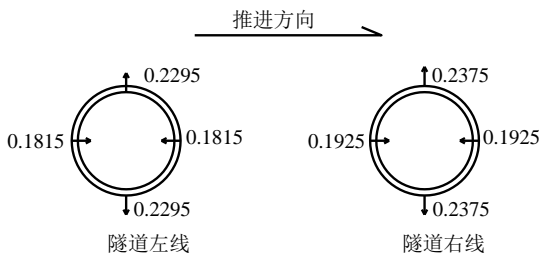
(a) 垂直变形 (单位: mm)



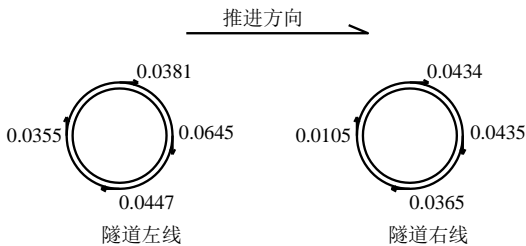
(b) 水平变形 (单位: mm)

图 8 1 号监测断面位移分解图

Figure 8 Displacement decomposition diagram of monitoring section No.1



(a) 径向拉伸变形 (单位: mm)



(b) 环向扭转变形 (单位: mm)

图 9 1 号监测断面隧道结构变形图

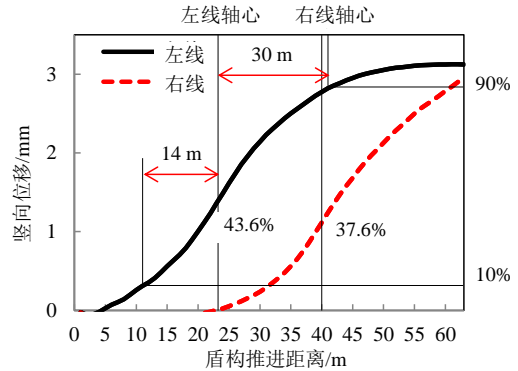
Figure 9 Deformation diagram of tunnel structure of monitoring section No.1

为方便研究地铁隧道结构的变形规律,将图 8 中隧道的径向变形、环向变形分别绘制在一起后,得到图 9。如图 9 (a) 所示,地铁隧道结构在水平方向上被挤扁、在垂直方向被拉长了,左线隧道的水平净空减少了 0.363 mm、垂直净空增大了 0.459 mm,右线隧道的水平净空减小了 0.385 mm、垂直净空增大了 0.475 mm,与隧道的整体位移对比可得,隧道的垂直位移以整体位移为主,水平位移

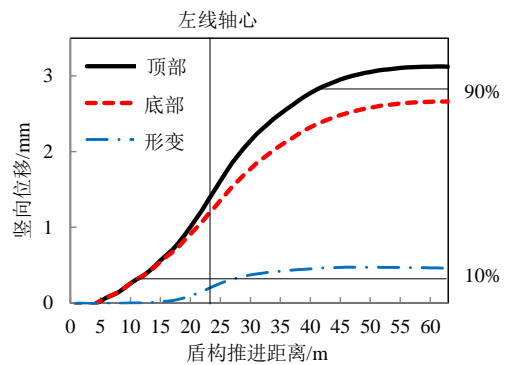
以结构变形为主。如图 9 (b) 所示,地铁左线、右线隧道均发生了整体扭转,扭转角度分别约为  $1.5E-5$ 、 $1.1E-5$ ,在从新建隧道推进方向为向右的视角观看时,地铁隧道的扭转方向为顺时针方向。

### 2.4 地铁隧道位移演变分析

图 10 (a) 为地铁左线隧道、右线隧道的顶部测点的垂直位移变化曲线,图 10 (b) 为左线隧道结构的顶部、底部测点的垂直位移变化曲线。



(a) 左线、右线隧道顶部位移



(b) 左线隧道顶部、底部位移

图 10 地铁隧道垂直位移变化曲线

Figure 10 Vertical displacement curve of metro tunnel

由上图所示,随着新建隧道从远处推过既有隧道,地铁隧道位移经历了先缓后快又缓的过程。对比图 10 (a) 中左线、右线隧道的变化曲线,可以发现,左线隧道的垂直位移曲线相比右线在前期陡,右线隧道的垂直位移曲线相比左线在后期陡,这是因为受模型尺寸限制,左线隧道靠近左侧模型边界、右线隧道靠近右侧模型边界,边界处的土体在垂直位移上失去了侧向约束、使得既有隧道抗浮起的能力偏弱、浮起速度加快。

以图 10 (a)、(b) 中左线隧道的垂直位移为分析对象,根据地铁隧道上浮的变化速度,可将浮起过程分为缓慢累积、急剧增长、残余位移三个阶段,三个阶段分别以结构顶累积浮起量的 10%、90% 为界。三阶段特征如下:

(1) 缓慢累积阶段: 新建盾构隧道尚未推过既有隧道、且距既有隧道一定距离, 前方新建盾构已推过处土体的隆起带动后方既有盾构的上浮。该阶段虽有一定的浮起量, 但向上浮起速度较慢、累计浮起量尚不明显, 且阶段早期伴随微小的沉降位移, 结构变形几乎为零, 该阶段一致持续到新建隧道推至距既有隧道轴心水平投影距离约 14 m 时。

(2) 急剧增长阶段: 新建盾构隧道从距既有隧道轴心前 14 m, 到推过既有隧道后距既有隧道轴心 30 m 的过程为急剧增大阶段, 该阶段隧道位移突增, 快速实现隧道累计位移量的 10% 到 90% 过程, 同时, 结构的结构变形急速从 0% 增长到接近 100% 的程度。

(3) 残余位移阶段: 新建隧道推过既有隧道较远距离后 (约 30 m), 既有隧道的上浮仍然继续增长, 但增速已明显放缓并趋于稳定, 最终该阶段的累计浮起量约占总量的 10% 左右。

### 3 工程实测

地铁 2 号线已建好通车运营, 新建供水盾构施工过程应保障地铁 2 号线安全、将对 2 号线的影响尽量控制到最小程度, 现场施工采取技术方案如下: 地铁穿越期间加强监测, 监测数据每 1~2 h 返回 1 次, 并根据监测数据变化情况采取以下措施控制地铁隧道上浮: (1) 新建隧道内钢锭压重; (2) 地表对新建隧道上半圆进行二次注浆; (3) 地表压重。

获得 576 环至 621 环施工期间地铁 2 号线道床沉降测点监测数据, 以 576 环位置为横坐标原点, 绘制曲线如图 11 所示:

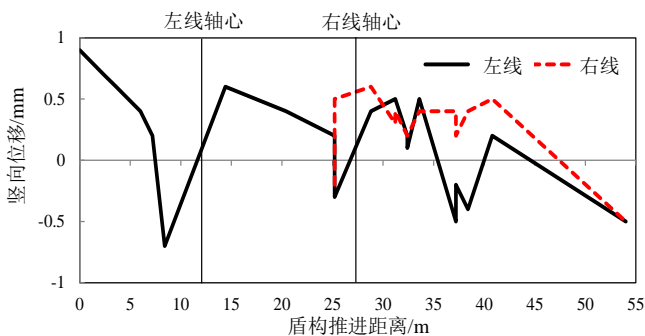


图 11 地铁隧道实测垂直位移变化曲线

Figure 11 Measured vertical displacement curve of metro tunnel

由上图可知, 新建隧道的压重、注浆措施对控

制地铁隧道的隆起效果显著, 现场实测 2 号线垂直位移在  $-0.7 \sim 0.9$  mm 之间、且无明显变化规律, 由于数值计算并未将压重、注浆等现场措施考虑在内, 所以计算结果与实际偏差较大, 但数值计算与既有研究揭示的一般规律相符合。

### 4 结 论

(1) 上穿施工过程, 既有隧道的位移由整体位移、结构变形两部分组成。隧道的整体位移主要体现为整体上浮并伴生轻微的与新建隧道穿越方向相背的水平位移。隧道的结构变形体现为水平净空的减小和垂直净空的增大, 以及轻微的整体扭转。

(2) 随着新建隧道从远处推过既有隧道, 既有地铁隧道的浮起过程经历了缓慢累积、急剧增长、残余位移三个阶段, 其中新建隧道距既有隧道中轴水平距离 14 m 起、到推过 30 m 止为急剧增长阶段, 该阶段范围应作为现场施工为加强监控量测段。

(3) 穿越施工期间通过加密监测, 并视监测数据采取隧内压重、地表注浆、地表压重等措施控制既有隧道隆沉的效果显著, 该措施可将上穿施工对既有隧道的影响控制在较为轻微的程度。

#### 参考文献:

- [1] 张晓清, 张孟喜, 李林, 李武祥, 王有成. 多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1133-1140.
- [2] 梁荣柱, 夏唐代, 胡军华, 罗岚. 新建隧道近距离上穿对既有地铁隧道纵向变形影响分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 391-399.
- [3] 许有俊, 陶连金, 文中坤, 刘忻梅, 张玥. 新建地铁隧道上穿既有隧道引起的结构隆起变形[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(6): 48-54.
- [4] 李磊, 张孟喜, 吴惠明, 王永佳. 近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1036-1043.
- [5] 刘树佳, 张孟喜, 吴惠明, 李林. 新建盾构隧道上穿对既有隧道的变形影响分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(S1): 399-405.
- [6] 朱蕾, 黄宏伟. 盾构近距离上穿运营隧道的实测数据分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2010, 44(10): 1962-1966+2004.