

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.01.015

基坑开挖与邻近地铁结构变形相关性的 实测分析*

尚国文¹, 李 飒¹, 翟 超², 邢卫民²

(1. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072; 2. 天津市勘察院, 天津 300191)

摘要: 探究开挖卸载下基坑与邻近“上浮型”地铁结构的变形机制, 以天津某邻近既有地铁的基坑开挖为例, 通过实测手段分析基坑多期开挖条件下既有地铁结构的变形特点。基于基坑围护结构竖向变形, 考虑基坑与地铁的水平相对位置 L 和开挖时间 t , 定义表示基坑围护结构竖向变形与地铁结构竖向变形相互关系的关联系数 R , 并对邻近地铁结构的竖向变形进行拟合与预测。探究三维空间下基坑与地铁水平变形的关系。研究表明: 地铁结构整体表现为上浮, 开挖期间累计竖向位移与累计水平位移的比值在 0.5~1.5 变化; 基坑围护结构竖向位移乘以系数 $1000R/L$ 可很好地拟合邻近地铁的竖向位移, 关联系数 R 在基坑开挖过程中变化不大; 三维空间下地铁结构纵向水平变形呈正态分布, 与近地铁侧基坑围护结构同深度处的水平变形趋势一致。

关键词: 基坑开挖; 邻近地铁; 变形相关性; 预测方法; 实测分析

中图分类号: TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)01-0107-09

Monitoring Data Analysis on Deformation Correlation between Foundation Pit and Adjacent Metro Structure

SHANG Guowen¹, LI Sa¹, ZHAI Chao², XING Weimin²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjing Institute of Geotechnical Investigation Survey, Tianjing 300191, China)

Abstract: Study aims at deformation mechanism of foundation pit and adjacent "upward floating" metro structure under excavation and unloading. Taking a foundation pit near the metro tunnel in Tianjin as an example, the deformation characteristics of the metro structure under multi-stage excavation of foundation pit are analyzed through measurement. Based on the vertical displacement of foundation pit retaining structure, considering the relative horizontal position of foundation pit and metro L and excavation time t , defining the correlation coefficient R that represents the vertical deformation relationship between retaining structure of foundation pit and adjacent metro structure, the vertical displacement of the adjacent metro is fitted and predicted. The relationship between horizontal deformation of foundation pit and that of the adjacent metro structure under three-dimensional space was also studied. The results show that the adjacent metro structure is all uplifted, and the ratio of cumulative vertical displacement to cumulative horizontal displacement varies from 0.5 to 1.5 during the pit excavation. The

* 收稿日期: 2018-11-30; 修回日期: 2019-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51478313)资助

作者简介: 尚国文(1994-), 男, 硕士。主要从事岩土工程科学研究。Email: tjusgw@163.com

vertical displacement of pit retaining structure multiplied by coefficient 1000R/L can well fit the vertical displacement of the adjacent metro, and the correlation coefficient R has little change during excavation. It was also found that the horizontal displacement curve of the metro structure was observed in a normal distribution, which is consistent with the horizontal deformation trend of retaining structure with the same depth. The method and conclusion can provide a reference for the design and optimization of similar projects.

Keywords: foundation pit excavation; adjacent metro; deformation correlation; prediction method; measurement analysis

引言

随着城市的发展和地铁交通网络的逐渐密集,在地铁隧道上方或一侧开挖基坑的案例越来越多。基坑开挖造成地层原有应力场的改变,使邻近既有地铁车站和隧道产生附加内力和变形,从而影响地铁列车的运行安全^[1],因此基坑工程开挖对既有地铁结构的影响研究广受关注。目前,邻近基坑的地铁结构的研究主要集中在地铁的变形及内力计算、变形规律与预测、影响因素和控制方法等方面,主要有理论推导、数值模拟和实测分析三种方法。

基坑开挖对邻近隧道影响的理论研究,一般分两阶段进行。A.Klar等^[2]基于Winkler地基梁模型推导了无限长梁的地下管道在附加荷载作用下的最大弯矩解析表达式。T.E.B.Vorster等^[3]采用弹性理论法将土体自由位移施加到管道上进行求解。姜兆华等^[4]和张治国等^[5]都根据Mindlin解积分得到坑壁和坑底卸载引起的隧道轴向附加应力,然后基于Winkler模型求解了隧道的变形性状。魏纲等^[6]对姜兆华等^[4]和张治国等^[5]的力学模型进行修正,考虑了基坑侧壁与坑底卸荷应力以及基坑围护结构的影响,提出近地铁隧道的附加荷载计算方法。

还有很多研究者采用数值分析的方法研究这一问题,C.Yoo等^[7]针对深基坑开挖引起邻近管线上的附加应力,采用有限元法将附加应力施加到管道上进行求解。戚科骏等^[8]以上海某邻近隧道的基坑为背景,采用M-C弹塑性模型模拟不同开挖阶段邻近隧道的变形情况,提出采取合理的开挖方式能显著减少对邻近隧道的影响。伍尚勇等^[9]运用Midas/GTS建立三维数值模型研究双侧深基坑开挖对既有弯曲隧道的影响,通过分析得到双基坑对称

开挖比不对称开挖能更好地控制隧道的水平位移。G.Zheng等^[10]通过有限元分析,研究了开挖深度、围护结构的水平位移和隧道距基坑的相对位置对既有隧道变形影响,建立评估隧道侧向变形的简化模型,并用多个案例进行验证。

开挖卸载条件下,邻近地铁结构沿轴线的水平向、竖向变形往往是施工控制的重点,许多学者对此进行了研究。贾夫子等^[11]通过对实测数据的分析,量化了表征隧道不均匀变形的参数,并利用此参数对地铁站引发的区间隧道不均匀变形进行预测研究。艾鸿涛^[12]通过数值方法,用三次曲线拟合了隧道的纵向变形趋势,拟合相关程度较高,并总结了地连墙水平位移和坑外地面沉降规律。另外,也有学者从基坑自身变形角度出发,研究邻近既有地铁车站的基坑变形特点。朱炎兵等^[13]通过多组二维有限元数值模拟,研究了基坑与地铁车站距离和基坑开挖深度这两个因素组合下,邻近既有地铁车站的基坑变形性状。结果表明:当邻近地铁车站时,靠近车站一侧的地下连续墙最大侧移量减小,而另一侧的地下连续墙最大侧移量增加。

目前对于开挖过程中邻近地铁的变形的研究手段以数值分析为主,大多是将地铁结构变形和基坑变形分开进行研究,对两者变形之间的关系研究较少。本文以邻近地铁的天津某基坑工程为背景,基于基坑和地铁保护区的三维监测数据,分析了开挖卸载条件下基坑与地铁的变形联动机制以及地铁结构的变形特征,探讨多期基坑开挖过程中基坑变形与地铁变形之间的相关关系,并基于基坑围护结构竖向变形提出邻近地铁竖向变形的预测方法,为此类邻近基坑的地铁监测方案设计和优化提供有效依据,同时作为一种方法可对地铁结构的监测结果进行验证和补充。

1 工程概况及监测方案

天津某基坑项目工程地下室基坑周长约为 1 280 m, 占地面积约为 88 000 m²。基坑分三期开挖, 东、西两侧基坑深为 15.75 m, 采用钻孔灌注桩加两道水平钢筋混凝土支撑进行支护, 钻孔桩桩径为 1 200 mm, 桩长为 27.0 m, 嵌固深度为 12.75 m。北侧基坑靠近地铁, 坑深为 15.75 m, 采用地下连续墙加三道水平钢筋混凝土支撑进行支护, 地连墙墙厚为 1 000 mm, 墙高为 34.5 m, 嵌固深度为 20.2 m。南侧基坑深为 11.35 m, 采用钻孔灌注桩加一道水平钢筋混凝土支撑进行支护, 钻孔桩桩径为 1 000 mm, 桩长为 19.0 m, 嵌固深度为 9.15 m。另外, 三期地块之间采用地下连续墙进行分隔, 地连墙墙厚为 1 000 mm, 墙高为 27 m, 嵌固深度为 12.7 m。

基坑北侧为已运营的地铁线路与车站, 地铁隧道直径为 6.7 m, 其底部埋深约为 17 m。基坑北侧边与地铁隧道轴线大致平行, 其中二期地下室距车站主体结构为 17.8 m, 三期地下室西侧距离区间地铁隧道为 14.0 m、东侧距离区间隧道为 9.0 m。基坑与地铁结构的平面、剖面关系如图 1、图 2 所示。

地铁结构变形监测范围为向基坑两侧各延伸 3 倍基坑深度的距离, 在上行和下行进行双线监测, 共布置 112 个监测断面, 上行 Z1~Z56, 下行 Y1~Y56, 监测断面间距为 5 m, 其中断面 1~4 和断面 53~56 由于距基坑较远, 监测距离为 15 m。为方便分析监测结果, 取地铁监测断面 1 为地铁轴向位置起始点, 监测断面 56 为地铁轴向位置终点, 监测范围全长为 335 m。监测点平面布置如图 1 所示。

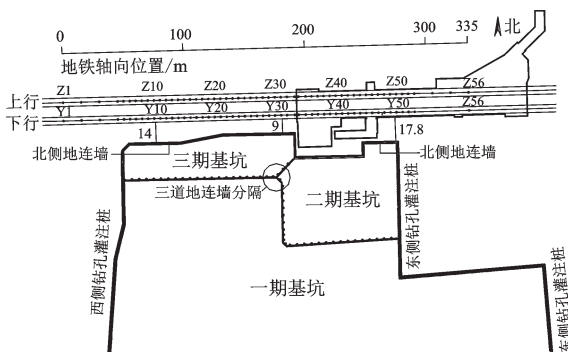


图 1 基坑与地铁位置关系及监测点布置平面
Fig. 1 Plane relation between foundation pit and metro and plan of monitoring point arrangement

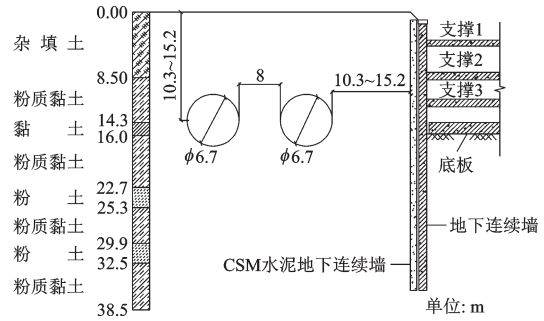


图 2 基坑、地铁及土层分布剖面
Fig. 2 Cross-sectional view of foundation pit, metro and the soil

2 多期开挖下邻近地铁变形特征及基坑与地铁变形联动机制

2.1 多期开挖下邻近地铁的位移变化特征

基坑开挖施工一方面对坑底及附近土体产生竖向卸荷作用, 另一方面对基坑四周土体产生侧向卸荷作用。侧向和竖向的卸荷首先会引起基坑围护结构的变形, 同时产生的地层损失会向地铁周围的土体和结构传递, 从而使地铁结构的应力和位移发生改变^[14]。

如图 1 所示, 一期基坑距离地铁较远, 开挖时间跨度较大, 且根据监测数据显示, 在一期开挖过程中, 邻近地铁变形很小。本文重点针对二、三期基坑开挖作相关分析。用 Δd_1 和 Δd_2 表示不同开挖时间点之间邻近下行地铁竖向和水平向的位移增量, 其随地铁轴向的分布情况如图 3、4 所示 (“+”代表向上和向基坑侧位移, “-”代表向下和向远离基坑侧位移)。

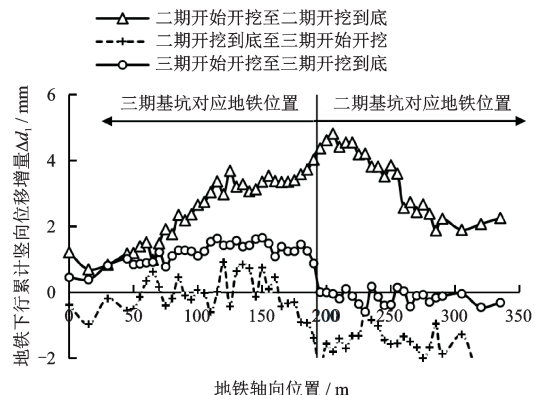


图 3 地铁下行累计竖向位移增量分布
Fig. 3 Cumulative vertical displacement increment distribution of metro downlink

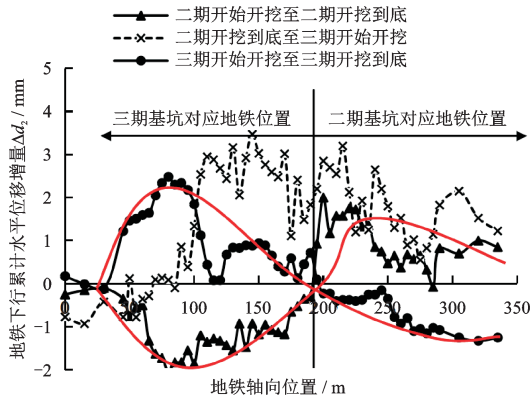


图4 地铁下行累计水平位移增量分布

Fig. 4 Cumulative horizontal displacement increment distribution of metro downlink

由图3、4可见,二三期开挖过程中,整个监测范围内地铁结构沿轴线都发生了不同程度的变形,影响范围为基坑两侧3倍基坑深度。这与陈仁朋等^[15]基于工程实例和计算分析发现的结果相同。

由图3可见,二、三期开挖期间, Δd_1 都大于0,邻近地铁表现为持续“上浮”型。二期开挖期间,地铁结构累计竖向位移增量呈现“中间大,两头小”的趋势,最大达4.82 mm。三期开挖期间,地铁结构最大累计竖向位移增量为1.66 mm,且二期基坑对应地铁结构竖向位移增量几乎为0,说明三期基坑的开挖主要影响了其相对应地铁结构的竖向变形。二、三期对比发现,二期开挖对整个地铁结构竖向变形的影响更大。

由图4可知,二期基坑开挖期间地铁结构水平位移变化量 Δd_2 在0~200 m为负,>200 m为正,而三期基坑开挖期间则正好相反,在0~200 m为正,>200为负,且都在二期、三期基坑分界对应的位置发生符号变化,可见二、三期基坑开挖卸载分别引起其相对应的地铁段向基坑侧移动,同时使剩余地铁段则往远离基坑一侧移动,原因在于每一期次开挖期间,上一期次基坑都在进行地下及地上结构的施工工作,相当于加载过程,会相应地补偿一部分已产生的水平位移。另外,二、三期基坑开挖前后地铁结构水平位移变化量沿地铁轴线的分布大致关于x轴对称,近似呈“∞”型(如图4红色曲线所示),说明二、三期开挖期间对邻近地铁结构水平变形的影响可以近似抵消。而二期开挖到底至三期开挖这段时间,地铁结构水平位移急剧增加,主要是由二期基坑开挖至坑底未及及时封闭底板及后期支撑的过早拆除造成。

用 μ 来表示整个监测范围地铁结构最大累计竖向位移与最大累计水平位移的比值,从二期开挖开始到三期开挖到坑底整个过程的 μ 值分布如图5所示。在整个二、三期基坑开挖过程中, μ 值在0.5~1.5变化,其中二期开挖后半段, μ 接近1.5,三期期间 μ 主要分布在1附近,且上行地铁和下行地铁的 μ 值几乎相同。可见二、三期开挖过程中,地铁的竖向变形和水平变形量大致维持在同一水平,说明此基坑受侧壁卸载与坑底卸载的程度相当。

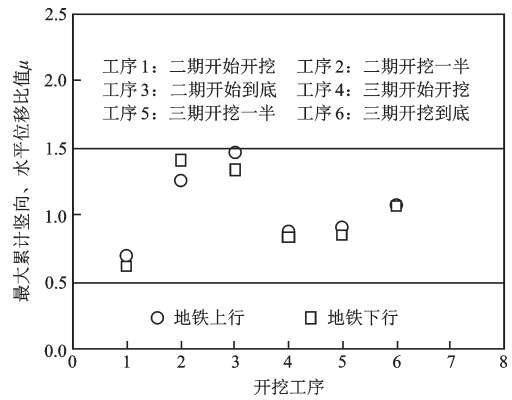


图5 基坑开挖期间 μ 值分布

Fig. 5 The distribution of values μ during the excavation

通过上述分析可知,开挖过程中地铁的竖向位移和水平位移相当,都可能对地铁结构的稳定性起控制性作用。

2.2 开挖条件下基坑与邻近地铁变形联动机制

位于基坑一侧地铁在竖向上有可能下沉^[16-19],也有可能上浮^[20-21],这与基坑与地铁的相对位置有很大关系。由前面分析可知,邻近基坑的地铁结构表现为持续上浮,原因在于此地铁结构与一侧基坑的水平距离很近,受坑底及附近隆起土体影响很大。同时,由于基坑围护结构底部也位于坑底的隆起区,隆起的土体会对围护结构产生向上的抬升力,如果抬升力大于围护结构的自重及周围土体的摩阻力,则围护结构整体也表现为上浮。而侧向卸载会使基坑坑壁和地铁结构都产生向开挖一侧的位移,如图6所示。基坑围护结构变形与临近地铁的变形相互联动,都是土体应力场与位移场发生改变的外在表现,两者有密切的联系,本文将通过实测数据进行说明。

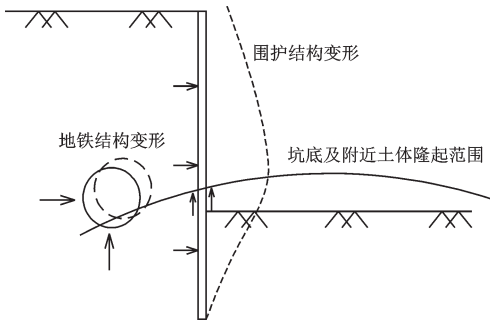


图6 基坑及邻近地铁变形联动机制示意

Fig. 6 Sketch of deformation linkage mechanism of foundation pit and adjacent metro

3 基坑围护结构与邻近地铁的变形相关性

邻近基坑地铁结构的附加应力与附加变形,是由基坑开挖卸荷引起,并由坑侧和坑底土体传递和连接。考虑建立地铁结构变形与地铁一侧的基坑侧壁变形之间的关系,由此提出地铁结构竖向位移的预测方法,同时基于三维空间对两者水平向变形进行分析。

3.1 基于围护结构变形的地铁结构竖向位移预测

基坑实测数据显示,受坑底土体卸荷回弹的影响,基坑开挖期间邻近地铁一侧(北侧)的地下连续墙也表现为持续抬升,地连墙的抬升和地铁结构的上浮都与坑底及附近土体的隆起有密切关系。图7为基坑北侧地下连续墙竖向位移监测点平面布置,由于现场有效的实测数据有限,本文只对140~280 m对应的地铁结构和基坑围护结构竖向位移进行研究。

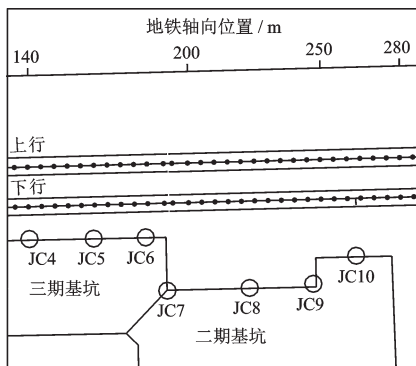


图7 基坑北侧围护结构竖向位移监测点布置

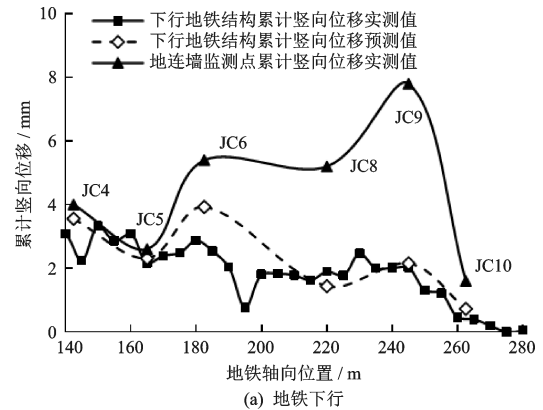
Fig. 7 Vertical displacement monitoring point arrangement of retaining structure on the north side of foundation pit

由图7可知,基坑北侧壁形状不规则,围护结构各监测点与地铁的水平距离各不相同。已知测点JC4-JC6距下行线9 m、距上行线24 m,测点JC7-JC9距下行线29 m、距上行线44 m,测点JC10距下行线17.8 m、距上行线32.8 m。距离坑壁越远,受开挖卸荷的影响就越小,本文尝试基于围护结构各监测点累计竖向位移 d_w ,考虑围护结构监测点与地铁之间距离 L ,做如下计算得到地铁结构沿轴向的累计竖向位移计算值 d'_t :

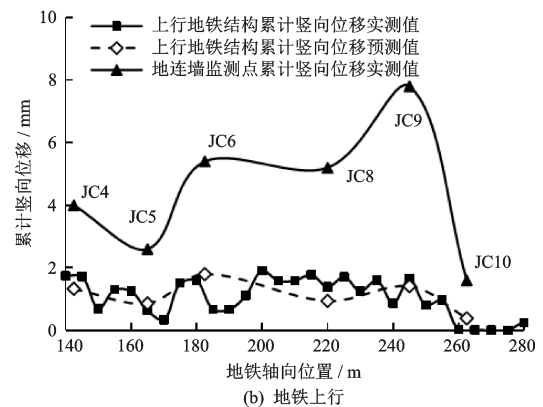
$$d'_t = \frac{1000R}{L} d_w \quad (1)$$

式中, R 为围护结构和地铁结构竖向位移关联系数,为无量纲参数,与除 L 之外的诸多因素有关,例如地铁隧道埋深、地铁结构强度、基坑周边土质条件、基坑围护结构类型及埋深等。

为保持基坑围护结构变形和地铁结构变形的时间一致性,取基坑北侧地连墙位移监测开始的时间点为位移累计零点。利用式(1)对不同开挖阶段地铁结构累计竖向位移预测值进行计算,并将预测值与实测值比较,如图8、9所示。



(a) 地铁下行



(b) 地铁上行

图8 三期开挖一半地铁累计竖向位移实测值与预测值对比
Fig. 8 Comparison between measured and predicted values of cumulative vertical displacement of metro in the first half of the third phase excavation

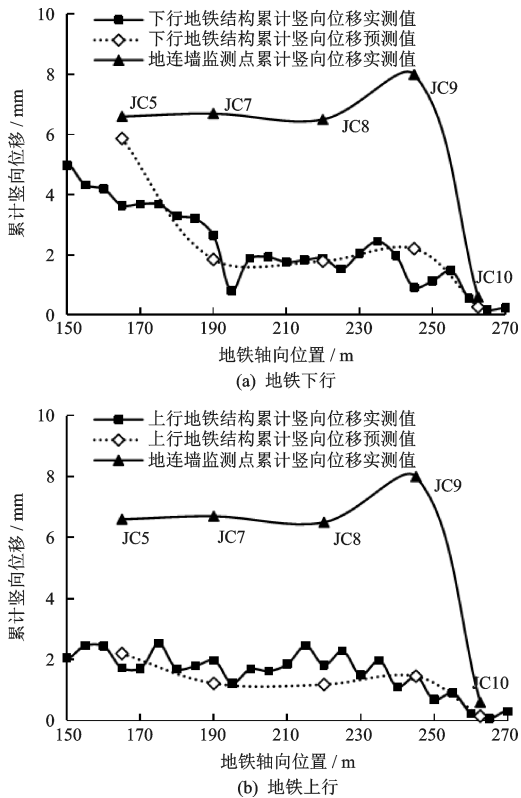


图9 三期开挖到底地铁累计竖向位移实测值与预测值对比
Fig. 9 Comparison between measured and predicted values of cumulative vertical displacement of metro after the third stage excavation

图8为三期基坑开挖一半且 R 值取8时,上、下行地铁竖向位移的实测值及预测值;图9为三期基坑开挖到底且 R 值取8.2时,上、下行地铁竖向位移的实测值及预测值。由此可见,地连墙竖向位移乘以系数 $1000R/L$ 可以比较好的拟合邻近地铁结构的竖向变形,且在这两种工况下 R 值取值十分接近,说明在本案例中同一期基坑不同的开挖阶段 R 值变化不大。另外,相比地铁下行,地铁上行的拟

合效果稍差,主要因为考虑地铁与基坑距离时,没有考虑夹在中间的下行地铁结构对上行预测值的影响。

3.2 三维空间下的基坑与邻近地铁结构水平向变形关系分析

通邻近地铁结构受基坑开挖卸荷的影响会向基坑侧发生位移,本文尝试建立基坑围护结构水平位移与地铁结构水平向位移之间的空间三维关系,对两者之间的变形协调性关系进行更加直观的分析。

图10为基坑北侧围护结构深层水平位移和邻近地铁结构水平位移监测点布置,为探究基坑开挖完后基坑变形与地铁变形之间的关系,以地铁轴向位置为 x 轴,水平位移为 y 轴(最后一期开挖完成之后地铁和围护结构的累计水平位移),深度方向为 z 轴,建立三维空间下的基坑围护结构深部水平向变形与地铁水平变形关系(“+”代表向基坑侧位移,“-”代表向远离基坑侧位移),如图11所示。

就围护结构变形而言,龚晓南等^[22]通过大量实测数据,将内支撑支护基坑开挖引起的围护结构变形总结为悬臂、踢脚、内凸和复合4种模式,郑刚等^[23]研究表明不同围护结构变形模式对坑外既有隧道变形影响也不同。由图11(a)可以看出,基坑北侧地连墙变形模式主要有两种: CX1、CX2主要受三期开挖影响,变形模式表现为内凸型,最大侧移量分别为16.06 mm和22.86 mm,都发生在坑底偏上位置。CX4、CX5则主要受二期开挖影响,近似表现为复合型,坑底附近有一反弯点,反弯点以上正向弯曲,反弯点以下反向弯曲。图11(b)显示,邻近地铁整体水平向变形呈“弓”型,朝向基坑一侧弯曲,最大位移量出现在基坑中心位置,两侧基本对称,呈正态分布,北侧基坑围护结构不同的变形模

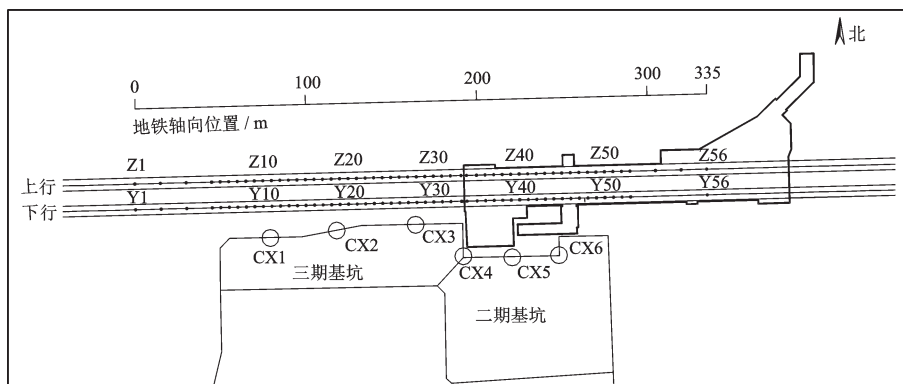
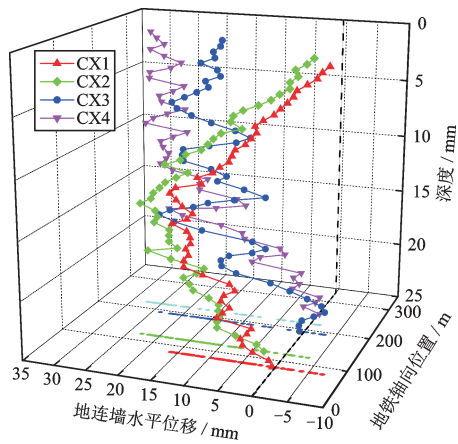
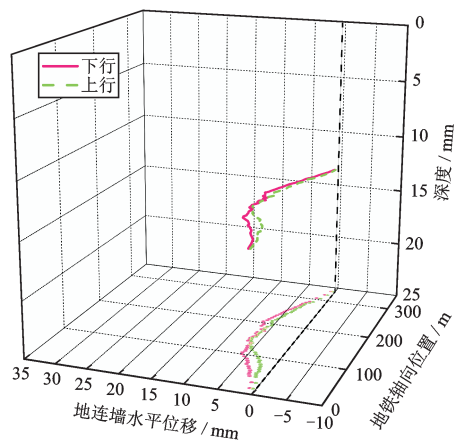


图10 基坑围护结构与邻近地铁结构水平位移监测点布置

Fig. 10 Layout of horizontal displacement monitoring points of retaining structure of foundation pit and adjacent metro structure



(a) 基坑围护结构



(b) 地铁结构

图 11 三维空间下的基坑围护结构与地铁结构水平向变形关系

Fig. 11 Deformation coordination between retaining structure of foundation pit and metro structure in three-dimensional space

式并没有对邻近地铁产生影响,或者说内凸型和复合型对邻近地铁的影响大致相同,与文献[23]的数值计算结果一致。

为进一步探究地铁结构和围护结构水平变形的相关性,取Z为隧道埋深,做图11的二维剖面,得到围护结构与地铁同深度处的累计水平位移曲线,如图12所示。由图可知,地连墙与地铁结构同深度处的累计水平位移也呈现“中间大,两头小”的趋势,除CX4监测值偏小之外,整体与地铁结构的变形趋势基本一致,此现象体现了基坑与地铁之间的土体应力与变形的传递性。监测点CX4由于位于两期基坑交界的角点处,受到三个方向地连墙的支持作用,估其水平位移值偏小,可见支护结构的布置会影响基坑与邻近地铁结构的变形相关性。类似工程中,这种变形协调关系的定量化可以对此类

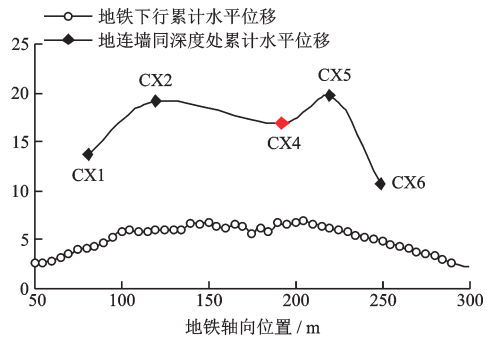


图 12 地铁结构及基坑围护结构同深度处累计水平位移曲线

Fig. 12 Cumulative horizontal displacement curve of metro structure and retaining structure of foundation pit with the same depth

工程中地铁的监测方案与结果进行优化与验证。

4 结论

(1)本案例基坑开挖期间,地铁结构整体上浮,多期开挖条件下呈现不同变形特点,地铁结构水平方向向基坑侧移动,但相邻期次基坑地下和地上结构施工会补偿一部分水平位移。

(2)基坑开挖各个阶段,地铁结构最大累计竖向位移与最大累计水平位移比 μ 为0.5~1.5,基坑开挖侧向卸荷和底部卸荷对邻近地铁变形影响程度相当。

(3)通过考虑基坑与地铁距离,并定义变形关联系数,建立基坑围护结构竖向位移与不同开挖阶段及地铁上行和下行竖向位移的联系,该方法可以实现对邻近地铁结构竖向位移的预测,为探究不规则坑壁的多期基坑对邻近双向地铁结构的变形影响提供了新的方法和思路。关联系数R在同一基坑不同开挖阶段变化不大,但对于不同工程背景其取值有待进一步研究。

(4)邻近地铁侧基坑围护结构不同的变形模式对地铁结构水平向变形影响不大,地铁结构沿轴向上的水平变形与基坑北侧围护结构同深度水平变形趋势具有一致性。

参考文献:

[1] 孙 钧. 城市地下工程活动的环境土工学问题(上) [J]. 地下工程与隧道, 1999, 9(3): 2-6.
Sun J. Research on environment soil engineering works

- during underground construction activities in urban area [J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 1999, 9(3): 2-6. (in Chinese)
- [2] Klar A, Vorster T E B, Soga K, et al. Soil-pipe interaction due to tunnelling: comparison between Winkler and elastic continuum solutions [J]. *Geotechnique*, 2005, 55(6): 461-466.
- [3] Vorster T E B, Klar A, Soga K, et al. Estimating the effects of tunneling on existing pipelines [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(11): 1 399-1 410.
- [4] 姜兆华, 张永兴. 基坑开挖对邻近隧道纵向位移影响的计算方法[J]. *土木建筑与环境工程*, 2013, 35(1): 7-11, 39.
Jiang Zh H, Zhang Y X. Calculation of influence on longitudinal deformation of adjacent tunnels due to excavation [J]. *Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering*, 2013, 35(1): 7-11, 39. (in Chinese)
- [5] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. *岩土力学*, 2011, 32(7): 2 085-2 092.
Zhang Zh G, Zhang M X, Wang W D. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(7): 2 085-2 092. (in Chinese)
- [6] 魏 纲, 赵城丽. 基坑开挖引起临近地铁隧道的附加荷载计算方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(增1): 3 408-3 417.
Wei G, Zhao Ch L. Calculation method of additional load of adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(Sup1): 3 408-3 417. (in Chinese)
- [7] Yoo C, Choi B C. Excavation-induced buried pipeline failure—a case study [J]. *Solid State Phenomena*, 2006, 110: 23-30.
- [8] 戚科骏, 王旭东, 蒋 刚, 等. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(增2): 5 485-5 489.
Qi K J, Wang X D, Jiang G, et al. Analysis of deep pit excavation adjacent to tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24, (Sup 2): 5 485-5 489. (in Chinese)
- [9] 伍尚勇, 杨小平, 刘庭金. 双侧深基坑施工对紧邻地铁隧道变形影响的分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(增1): 3 452-3 458.
Wu Sh Y, Yang X P, Liu T J. Analysis of influence on deformation of adjacent subway tunnel due to bilateral deep excavation [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(Sup 1): 3 452-3 458. (in Chinese)
- [10] Zheng G, Yang X Y, Zhou H Z, et al. A simplified prediction method for evaluating tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations [J]. *Computers and Geotechnic*, 2018, 95: 119-128.
- [11] 贾夫子, 王立峰, 逯武全, 等. 基坑开挖对邻近地铁站和隧道的影响[J]. *岩土力学*, 2016, 37(增2): 673-678, 714.
Jia F Z, Wang L F, Lu W Q, et al. Influence of foundation pit excavation on adjacent metro station and tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(Sup 2): 673-678, 714. (in Chinese)
- [12] 艾鸿涛. 临近地铁隧道的深基坑开挖分析[D]. 上海: 同济大学, 2008.
Ai H T. Analysis of deep excavation adjacent to subway tunnels [D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [13] 朱炎兵, 周小华, 魏仕锋, 等. 临近既有地铁车站的基坑变形性状研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 2 997-3 002.
Zhu Y B, Zhou X H, Wei Sh F, et al. Investigation on deformation behaviors of foundation pit adjacent to existing metro stations [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 2 997-3 002. (in Chinese)
- [14] 李志高, 刘国彬, 曾 远, 等. 基坑开挖引起下方隧道的变形控制[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(3): 430-432.
Li Zh G, Liu G B, Zeng Y, et al. Control measures of tunnel displacement by over-excavation unloading [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(3): 430-432. (in Chinese)
- [15] 陈仁朋, 王诚杰, 鲁 立, 等. 开挖对地铁盾构隧道影响及控制措施[J]. *工程力学*, 2017, 34(12): 1-13.
Chen R P, Wang Ch J, Lu L, et al. Influence of excavation on exist metro shield tunnel and control measures [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(12): 1-13. (in Chinese)
- [16] Hwang R N, Duann S W, Cheng K H, et al. Damages to metro tunnels due to adjacent Excavations [C]//Proceeding of TC302 Symposium Osaka 2011: International Symposium on Backwards Problem in Geotechnical Engineering and Monitoring of Geo-Construction. Tokyo: Japanese Geotechnical Society, 2011: 83-88.
- [17] 闫静雅. 邻近运营地铁隧道的深基坑设计施工浅谈 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(增1): 234-237.
Yan J Y. Design and construction of deep foundation

- pits near metro tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup 1): 234-237. (in Chinese)
- [18] 张治国,张谢东,王卫东. 临近基坑施工对地铁隧道影响的数值模拟分析[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(11): 93-97.
Zhang Zh G, Zhang X D, Wang W D. Numerical modeling analysis on deformation effects of metro tunnels due to adjacent excavation of foundation pit[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 29(11): 93-97. (in Chinese)
- [19] Chang C T, Sun C W, Duann S W, et al. Response of a Taipei Rapid Transit System (TRTS) Tunnel to Adjacent Excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 151-158.
- [20] 杨德春,刘建国. 地铁隧道附近软土深基坑设计与施工关键技术分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(7): 109-114, 67.
Yang D Ch, Liu J G. Key technology analysis of soft soil deep foundation pit design and construction near the subway tunnel[J]. Building Structure, 2012, 42(7): 109-114, 67. (in Chinese)
- [21] 丁勇春,戴 斌,王建华,等. 某邻近地铁隧道深基坑施工监测分析[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(5): 492-497.
Ding Y Ch, Dai B, Wang J H, et al. Field observation of a deep excavation adjacent to subway tunnels [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(5): 492-497. (in Chinese)
- [22] 龚晓南,高有潮. 深基坑工程施工设计手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
Gong X N, Gao Y Ch. Construction and design manual of deep excavation engineering[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese)
- [23] 郑 刚,王 琦,邓 旭,等. 不同围护结构变形模式对坑外既有隧道变形影响的对比分析[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(7): 1 181-1 194.
Zheng G, Wang Q, Deng X, et al. Comparative analysis of different deformation modes of retaining structures on deformation of existing tunnels outside excavations [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(7): 1 181-1 194. (in Chinese)

(本文责编:周小潭)