

深基坑开挖诱发邻近运营地铁隧道变形响应特征研究

马勤, 张玉山

(武汉地质勘察基础工程有限公司, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了研究深基坑开挖过程中基坑变形及对既有邻近运营地铁隧道变形的响应特征, 本文结合深基坑案例现场监测数据, 研究了深基坑开挖过程中支护结构、坑外地表以及地铁隧道变形的时程规律, 探讨了支护结构变形与坑外地表变形、地铁隧道变形之间的相关性和响应特征, 进一步揭示了深基坑卸荷作用下的地铁隧道变形特性机制。研究表明, 支护结构变形与坑外地表变形、隧道变形速率具有明显的阶段性特征, 三阶段的速率关系为: $v_{II} > v_{III} > v_I$, 与基坑施工工况具有较好的对应关系, 并且坑外地表变形和隧道变形规律相对于支护结构变形有明显的滞后性; 支护结构变形与周围土体、地铁隧道变形存在线性相关性, 置信区间值为 75%~90%, 且沉降位移的相关性高于水平位移。研究结果可为类似深基坑安全、高效施工提供理论依据。

关键词: 基坑开挖; 邻近地铁; 支护结构; 坑外变形; 时序规律; 响应特征

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2023)05-0434-10

Research on deformation response characteristics of adjacent operation subway tunnels induced by deep excavation

MA Qin, ZHANG Yu-shan

(Wuhan Geological Prospecting Foundation Engineering Co., Ltd., Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: This work aims to investigate the deformation of a foundation pit during the excavation and its response of the adjacent operational subway tunnels. Combined with the on-site monitoring data of deep foundation pit cases, the time history of supporting structure, pit surface and subway tunnel deformation during the excavation was studied. The correlation and response characteristics between the deformation of the supporting structure, the deformation of the surface of the pit, and the deformation of the subway tunnel were discussed. Furthermore, the deformation mechanism of subway tunnel induced by the excavation unloading was revealed. The research indicate that the deformation of the support structure has obvious phased characteristics with the deformation rate of the surface outside the pit and tunnel. The rate relationship of the three stages is: $v_{II} > v_{III} > v_I$, and have a good correspondence with the construction conditions of the foundation pit. Additionally, the deformation of the surface of the pit and the deformation of the tunnel have obvious hysteresis characteristics relative to the deformation of the supporting structure. The support structure deformation has a linear correlation with the surrounding soil and subway tunnel deformation. The confidence interval is 75%-90%. The correlation of settlement displacement is higher than that of horizontal displacement. These results may serve as a theoretical basis for ensuring the safe and efficient construction of similar deep foundation pits.

Key words: foundation pit excavation; adjacent subway; support structure; deformation outside the pit; time series law; response characteristics

0 引言

随着城市的快速发展以及地下空间规模的日

益增大, 城市轨道交通在城市建设中起着重要的作用, 在既有地铁隧道区间或者地铁车站周边进行深基坑开挖变得越来越频繁^[1-2]。深基坑开挖过程中,

收稿日期: 2023-02-09

基金项目: 湖北省地质局科技项目 (KJ2019-35)。

作者简介: 马勤 (1984—), 男, 湖北云梦人, 高级工程师, 主要从事地基与基础施工方面的工作。E-mail: 19835418@qq.com。

基坑支护结构变形及周围土体变形以及对地铁隧道变形的响应特征,是该方向探讨的热点课题。

近些年来,学者对基坑开挖对邻近既有地铁隧道的影响分析进行了大量的研究。理论方面,深基坑开挖过程中必然会使得周围岩土体的原始应力场和位移场发生改变,进而致使邻近既有地铁隧道结构产生附加应力和变形^[3]。徐日庆等^[4]、周泽林等^[5]分别采用随机森林算法和弹性地基梁理论,提出了软土地区深基坑对邻近盾构隧道水平位移影响的经验公式,并且运用两阶段分析方法评估基坑开挖过程中对地铁隧道的影响。王康任等^[6]针对超深基坑(38.95~42.25 m)旁隧道,采用了基岩注浆技术施做截水帷幕进行地铁保护。模型试验研究方面,HUANG 等^[7]、陈仁朋等^[8-9]通过离心模型试验,研究了深基坑开挖对下卧隧道和邻近地铁隧道的影响。综上,学者从理论和试验方面大量研究了深基坑开挖对既有邻近地铁隧道的影响。

随着监测技术的丰富和发展,监测数据用于分析施工过程中结构和土体的应力和变形特性越来越广泛。王建望等^[10]、章红兵等^[11]利用数值模拟手段,结合现场监测数据,研究了基坑开挖过程中周围土体和支护结构的变形特征和受力特性,以及群桩施工对邻近地铁隧道的作用机制。殷一弘^[12]在深厚软土地层的地质环境下,采用“分区顺作”+“板式支护”+“多道支撑”方案对紧邻地铁深大基坑进行支护设计,监测数据表明,该支护方案取得了良好的支护效果。徐中华等^[13]、丁智等^[14]结合施工现场实时监测数据,研究了基坑开挖全过程中周边沉降及地铁结构变形特性。基于上述,深基坑在开挖过程中支护结构的变形与周边地上、地下结构的变形的研究,主要以监测数据、数值分析等手段为主,研究内容主要是支护结构变形、周围土体的变形以及相邻结构变形为主。国内外学者针对深基坑开挖过程中支护结构变形与周围土体变形、邻近运营地铁隧道变形之间的响应关系研究较少。

本文结合既有邻近运营地铁隧道深基坑案例现场监测数据,研究深基坑开挖过程中支护结构、坑外地表以及地铁隧道变形时程规律,探讨支护结构变形与坑外地表变形、隧道变形之间的相关性及其响应特征。进一步揭示该深基坑卸荷作用下地铁隧道变形特性机制,以确保深基坑和地铁隧道在开挖过程中的稳定性和安全性。研究结果可为类似深基坑安全、高效施工提供理论依据。

1 工程概况

某深基坑工程邻近既有武汉 4 号、6 号运营地铁

区间隧道,平面形状呈不规则形状,基坑周长 398.90 m,面积 9 660 m²,基坑挖深为 12.70~15.70 m。西侧为 6 号线,基坑内边线距地铁区间隧道最近为 23.65 m,区间隧道顶板埋深 18.0~21.0 m。东北侧为 4 号线,基坑内边线距地铁区间隧道最近为 16.26 m,区间隧道顶板埋深 10.0~11.30 m。基坑与轨道交通线的平面位置关系如图 1 所示。本基坑工程主要采用钻孔灌注桩+二道钢筋混凝土内支撑+桩后止水帷幕(单轴搅拌桩)的支护体系。基坑范围内各土层的物理力学参数见表 1。深基坑邻近既有 4 号、6 号地铁线典型支护剖面图见图 2~3。

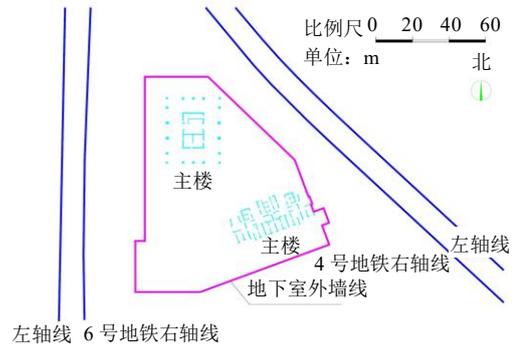


图 1 基坑与地铁隧道平面位置关系图

Fig. 1 Plane position relationship diagram of foundation pit and subway tunnel

表 1 各土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层	泊松比 ν	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	压缩模量 E_s/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
①填土	0.28	18.0	10.0	10.0	10.0
①a 淤泥质黏土	0.30	16.7	2.5	10.5	4.5
② ₁ 粉质黏土	0.25	18.3	12.0	22.0	12.0
② ₂ 粉质黏土	0.25	19.0	12.0	34.0	16.0
③粉质黏土	0.25	19.3	16.0	38.0	16.5
③a 粉质黏土	0.25	18.8	16.0	31.0	15.5
强风化泥岩	0.25	21.0	46.0	30.0	16.0
中风化泥岩	0.20	24.0	100.0	70.0	25.0

注:尺寸单位均为mm

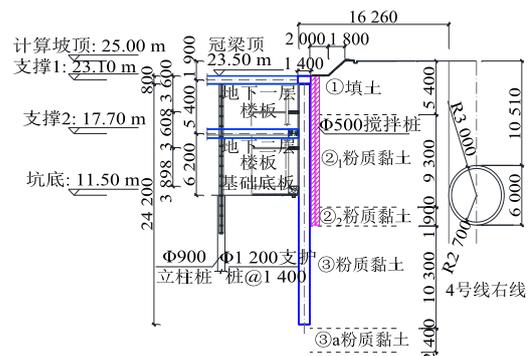


图 2 邻近 4 号地铁线典型支护剖面图

Fig. 2 Typical support profile of adjacent metro line 4

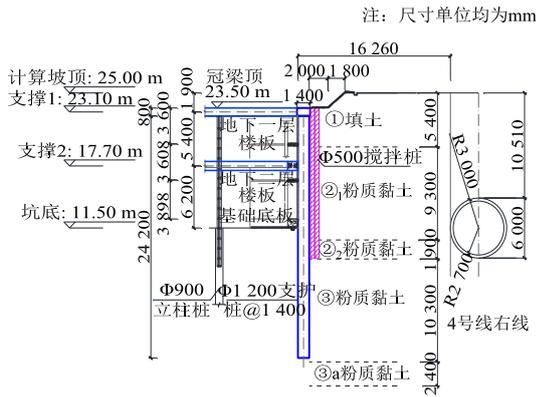


图3 邻近6号地铁线典型支护剖面图
Fig. 3 Typical support profile of adjacent metro line 6

2 基坑监测方案和监测结果分析

2.1 基坑监测方案

基坑监测平面图如图4所示,图中监测点布置只显示支护结构顶部水平/沉降位移监测点(用ZJi表示,共22个监测点)、坑外地表水平/沉降位移监测点(用KJi表示,共20个监测点)以及地铁隧道监测点(4号、6号地铁线各布置20个监测点)。为了便于讨论分析,将本深基坑施工分为5个工序,如表2所示。将深基坑平面划分为3个剖面,分别为1-1'剖面、2-2'剖面和3-3'剖面(见图4),各监测点编号从1-1'剖面右侧起,3-3'剖面止。

位移方向规定:(1)水平位移曲线增加量为负即位移向基坑内发展,为正即向基坑外发展;(2)沉降位移曲线沉降量为负即为向下发展,为正即为向上发展;(3)隧道水平收敛曲线增加量为负即为向基坑内发展,增加量为正即为向基坑外发展,即向隧道临空面扩张。

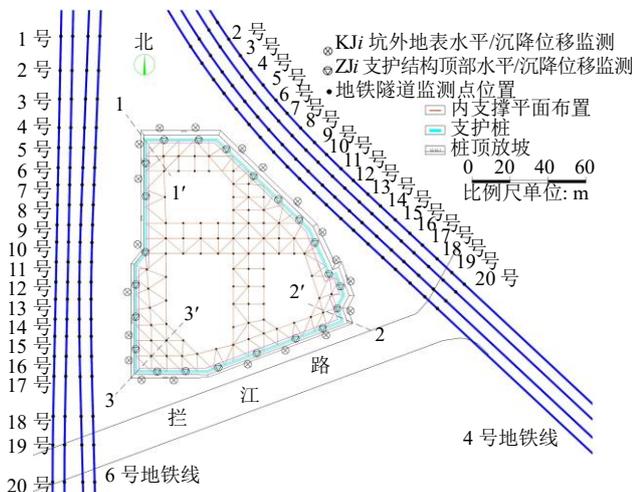


图4 监测点平面布置图
Fig. 4 Layout of monitoring points

表2 深基坑工程施工工序

Table 2 Construction procedures for deep foundation pit engineering	
施工工况	施工节点
工况 1	钻孔灌注桩施工
工况 2	基坑开挖至绝对标高 22.70 m, 冠梁及第一道内支撑施工
工况 3	基坑开挖至绝对标高 17.30 m, 第二道内支撑施工
工况 4	基坑开挖至绝对标高 11.50 m, 承台及底板施工
工况 5	地下室外墙线施工, 依次拆除内支撑并及时回填

2.2 基坑支护结构、坑外地表和地铁隧道变形特征

针对基坑支护结构、坑外地表和地铁隧道变形特征,主要从水平位移时程变化特征和沉降位移时程变化特征两个方面进行分析,详见下述。

(1) 基坑支护结构变形特征

图5、图6分别为基坑支护结构水平位移和沉降位移时程变化关系图。根据基坑支护结构水平位移和沉降位移时程曲线在施工工况2、3、4、5中体现出来的明显阶段性特征,将其时程曲线划分为阶段I(基坑施工到第二道内支撑施工完成(工况3))、阶段II(阶段I到承台底板施工完成(工况4))和阶段III(阶段II到承台及拆撑施工完成(工况5))。本深基坑工程由于底板完成浇筑到第二道内支撑拆除完成之间相隔10d,该段时间变形变化就整个开挖过程而言较小,将第二道内支撑拆除与第一道内支撑拆除共同划分到阶段III进行分析。基于深基坑开挖过程中支护结构变形时程曲线,三阶段具体特征如下:

a) 阶段I: 由图5、图6可得,第二道内支撑施工完成前,支护结构顶部水平位移和沉降位移变化幅度小,水平位移变化幅度为2mm,沉降位移变化幅度为4mm。支护结构顶部水平位移发生方向为坑内发展的主要集中在2-2'~3-3'剖面和3-3'~1-1'剖面,坑外发展的主要集中在1-1'~2-2'剖面。沉降位移在基坑各边具有波动现象,在阶段I表现出的规律性不强。由于基坑第二道内支撑施工完成之前,基坑开挖深度在8m以内,且支护桩顶放坡以及第一道内支撑对支护结构变形有很好的约束作用,故在此阶段支护结构顶部位移变化幅度较小。但部分测点位移在同一阶段内表现出先正后负或先负后正的变化特征。这是由于基坑在开挖过程中不对称开挖,致使基坑支撑两侧受力不平衡,支撑一侧的位移向坑内发展,支撑另一侧的位移向坑外发展的结果。

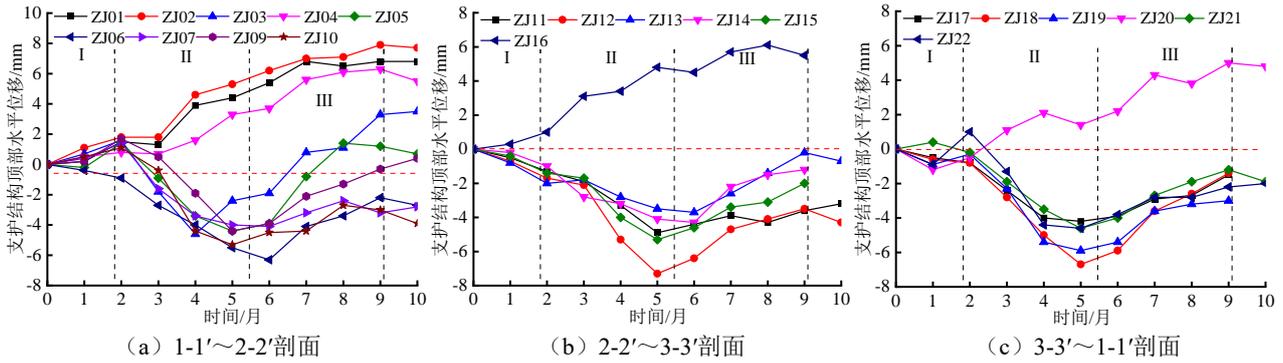


图5 基坑支护结构水平位移时程变化关系图

Fig. 5 Time-history curves of horizontal displacement of foundation pit supporting structure

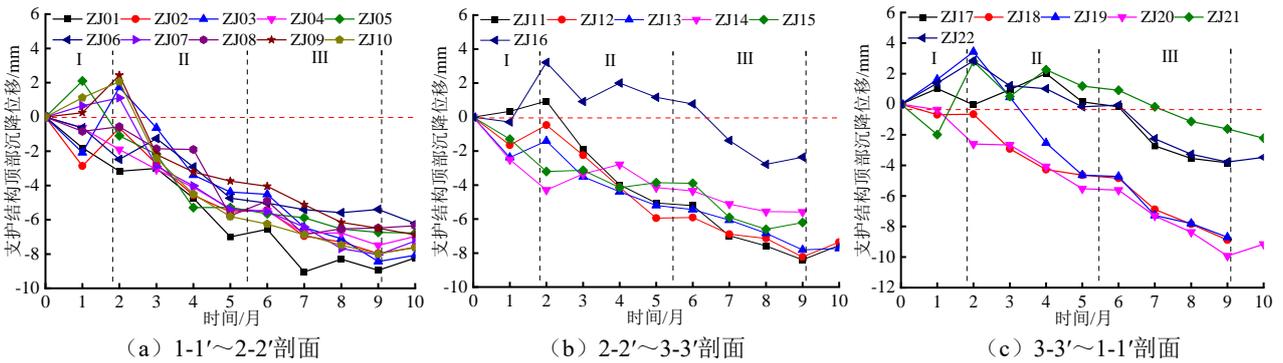


图6 基坑支护结构沉降位移时程变化关系图

Fig. 6 Time-history curves of settlement displacement of foundation pit supporting structure

b) 阶段II: 第二道内支撑施工完成到承台底板施工完成期间, 基坑开挖施工在4个月左右时间在竖直方向向下开挖施工6.2 m。支护结构顶部部分监测点水平位移出现异常, 向坑外发展。支护结构顶部大部分监测点水平位移向坑外发展, 产生的原因有: ①监测点水平位移向坑外发展的监测点出现支撑轴力叠加效应; ②先开挖主楼范围土方对支护结构形成不平衡高差, 开挖一侧的土压力通过支撑传递到另一侧, 致使支撑发挥作用时轴力叠合处产生较大的向基坑外侧发展的力。支护结构顶部水平位移不论是向坑内还是向坑外方向发展, 都表现出较大的变化幅度, 各监测点的变化速率较一致。1-1'~2-2'剖面、2-2'~3-3'剖面 and 3-3'~1-1'剖面支护结构顶部水平位移向坑内发展最大值所在的监测点为: ZJ06 (6.10 mm)、ZJ12 (6.70 mm)、ZJ18 (6.30 mm), 且各最大值所在的监测点都在基坑各边接近中点位置, 表明支护结构顶部水平位移是从基坑阴角向中间逐渐增大。各监测点位移变化规律保持一致, 但累积位移值有明显的差异, 这是由于基坑在开挖过程中的空间效应所致。

支护结构顶部各监测点沉降位移在阶段II沉降均表现出明显增大趋势, 这是由于随着基坑开挖深度的增加, 支护结构坑内侧临空面面积增大, 导致支护结构承受的土压力增大, 最终致使地面沉降变

形增加。1-1'~2-2'剖面、2-2'~3-3'剖面 and 3-3'~1-1'剖面支护结构顶部沉降位移向坑内发展最大值所在的监测点为 ZJ01 (6.64 mm, 基坑北侧边中点)、ZJ12 (5.98 mm)、ZJ20 (5.74 mm), 且各最大值所在的监测点都在基坑各边接近中点位置, 此规律与支护结构顶部水平位移表现出的规律一致。进一步结合图5、图6, 可发现支护结构顶部水平和沉降位移在底板施工完成前后各一个月时间内, 监测数据趋于平缓或者向坑外方向发展。这是由于整体支护结构与底板在同时存在的情况下, 二者共同发挥作用, 促成深基坑形成稳定支护结构。

c) 阶段III: 该阶段主要进行地下室外墙线施工, 依次拆除第二道内支撑、第一道内支撑, 并对基坑进行及时回填。由图5可得, 随着基坑工程的施工, 阶段III支护结构顶部各监测点水平位移均表现出向坑外方向发展。由图6可得, 随着基坑工程的施工, 阶段III支护结构顶部各监测点沉降位移沉降速率均表现出减缓趋势。结合图5、图6, 在基坑拆撑、回填后期支护结构顶部水平和沉降位移均趋于稳定。

为了进一步分析3个阶段基坑支护结构各监测点位移在对应阶段内速率的变化规律, 绘制各监测点水平和沉降位移变化速率曲线图(见图7), 变化速率为各监测点变化速率平均值, 各阶段位移变化速率计算如式(1)。

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (1)$$

式中： v 为各阶段位移变化速率，mm/月； Δs 为各阶段位移变化值，mm； Δt 为各阶段经历时间，月。

结合图7对各阶段位移变化速率的拟合($R^2=0.7962$)，以及三阶段与基坑开挖工况的对应关系，阶段I支护结构水平和沉降位移变化速率平稳，这是由于阶段I的变形对应基坑开挖到第二道内支撑施工完成阶段的变形，该阶段基坑开挖过程中桩顶放坡高度小，桩顶土体的临空面面积小。第一、二道撑对基坑开挖过程中支护桩的变形有较好的限制作用。阶段II结构水平和沉降位移变化速率几乎一致，且出现变化速率激增现象；阶段III支护结构水平和沉降位移变化速率相对于阶段II更为缓和，这与位移累积曲线表现出的变化趋势保持一致。支护结构水平和沉降位移变化速率在基坑开挖过程中表现出 $v_{II} > v_{III} > v_I$ 的变化规律。

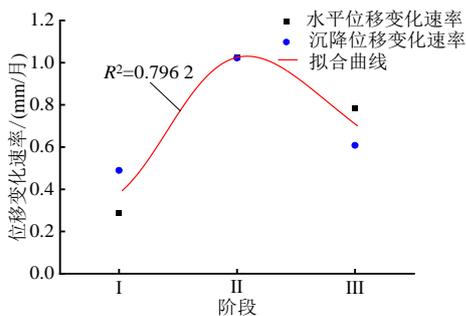


图7 支护结构顶部位移各阶段变化速率图

Fig. 7 Diagram of change rate of top displacement of support structure at various stages

(2) 基坑外地表变形特征

图8、图9是基坑外地表水平位移和沉降位移时程变化关系图，由图8和图9可明显看出基坑外地表水平位移和沉降位移时程曲线具有明显的阶段性特征。基于此阶段性特征，基坑外地表变形特征仍按照3个阶段进行分析。在1-1'~2-2'剖面、2-2'~3-3'剖面、3-3'剖面范围内所存在的监测点除KJ01(水平和沉降位移)、KJ05(水平和沉降位移)和KJ14沉降位移出现反常外，其他各监测点均表现出一致的变化规律。进一步结合图8、图9，分析各监测点基坑外地表变形规律与支护结构顶部位移之间的共性，详见下述。

a) 基坑外地表水平和沉降位移阶段I的变化幅度很小，除个别监测点外，变化幅度均在1mm以内。这是由于阶段I，基坑开挖深度较小，支护结构的刚度和强度足以承受支护桩背侧的土压力。在此阶段支护结构与桩背侧土之间没有发展破坏，支护结构位移和坑外土体位移是协调变形。因此，阶段

I基坑外地表各监测点位移表现出变化幅度的共性特征。阶段II基坑外地表水平位移表现出向坑内发展，阶段III基坑外地表水平位移表现出向坑外发展的趋势，这一规律与支护结构水平位移规律具有较好的一致性。基坑外地表沉降位移变化速率 v 表现出的变化规律为： $v_{II} > v_{III}$ 。原因主要有：①阶段II是第二道撑施工完成到承台底板施工完成阶段，此阶段基坑开挖深度为6.2m，基坑支护桩及桩后土体处在卸荷过程中。随着开挖深度的增加，基坑的支护结构水平位移变形速率呈现增大趋势，基坑外地表沉降变化速率也随之增大。②阶段III是承台底板施工完成到拆撑施工完成阶段，此阶段基坑经历肥槽回填、拆撑工序，肥槽回填、混凝土换撑短柱能有效地抑制基坑支护结构的变形、减小变形速率，进而减小基坑外地表沉降位移变化速率。

b) 除个别监测点外，其他各监测点水平和沉降位移速率均表现出 $v_{II} > v_{III} > v_I$ 的变化规律(见图8~9)。基于此趋势得出坑外地表水平位移在发展方向上均表现出先向基坑内发展，再向基坑外发展，沉降位移均沉降的一致规律。因此，坑外地表位移与支护结构位移具有相同的时程变化趋势。

(3) 既有邻近地铁隧道变形特性分析

文中各选取4号、6号线上4个断面进行隧道拱顶沉降和水平收敛分析。图10、图11为4号、6号线拱顶水平收敛位移时程曲线。图12、图13为4号、6号线拱顶沉降位移时程曲线。由于本基坑桩顶标高低于地面，支护结构监测数据要晚于地铁隧道监测数据。因此，为了研究支护结构与地铁隧道变形之间的响应关系，文中地铁隧道的监测数据选取时间段为：基坑第二道内支撑施工完成前一个月到基坑回填结束。由图10~13可得，4号、6号地铁隧道在变化趋势上有较为明显的一致性，水平收敛位移和沉降位移整体上都表现出向负值增大的趋势，这是由于基坑开挖卸载，致使地铁隧道两帮收缩、拱顶下沉。

结合基坑施工工况，细究各阶段地铁隧道监测点水平收敛表现出来的阶段性特征。随着基坑施工的推进，水平收敛位移和沉降位移变化速率在阶段II和阶段III变形变化率表现出先正后负，累积位移先正向增大再向负向增大的趋势，即先变形小后变形大的变化规律。针对此规律，进一步进行解释。阶段II是在第二道内支撑完成的前提下进行土方开挖施工，随着开挖深度的增大，支护结构承受的主动土压力增大，地铁隧道受到土方卸载的附加变形是由土体变形造成的，且支护结构和地铁隧道之间在空间位置上存在一定的距离，所以土体的变形不能立即传递给隧道^[15-16]。这是基坑支护结构与隧道

变形存在时空效应所致^[17-18]。因此,地铁隧道在阶段II前期变化速率为正是由于第二道内支撑发挥作用,在阶段II后期变化速率为负是由于开挖深度的影响程度大于支护结构承受土压力的影响程度。阶

段III是在承台及底板施工完成前提下拆撑和基坑回填工作,此时基坑形成一个稳定的支护体系。水平收敛位移沉降位移变化速率在阶段III呈现出的规律的原由与阶段II类似,不再赘述。

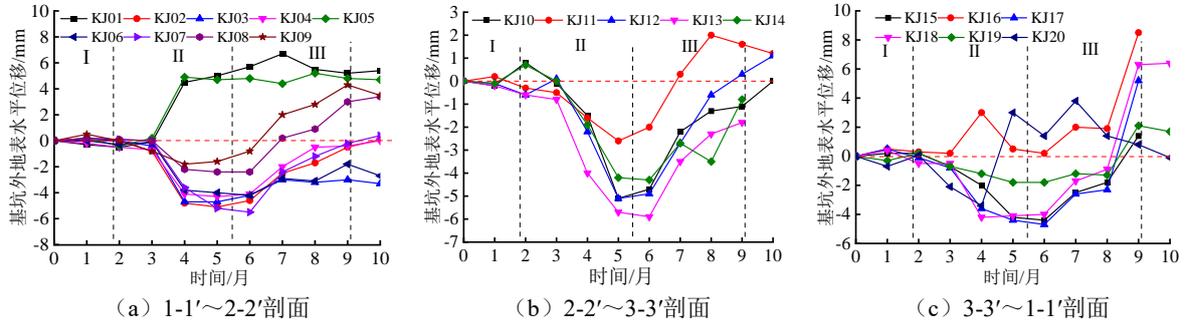


图 8 基坑外地表水平位移时程变化关系图

Fig. 8 Time-history curves of surface horizontal displacement outside the foundation pit

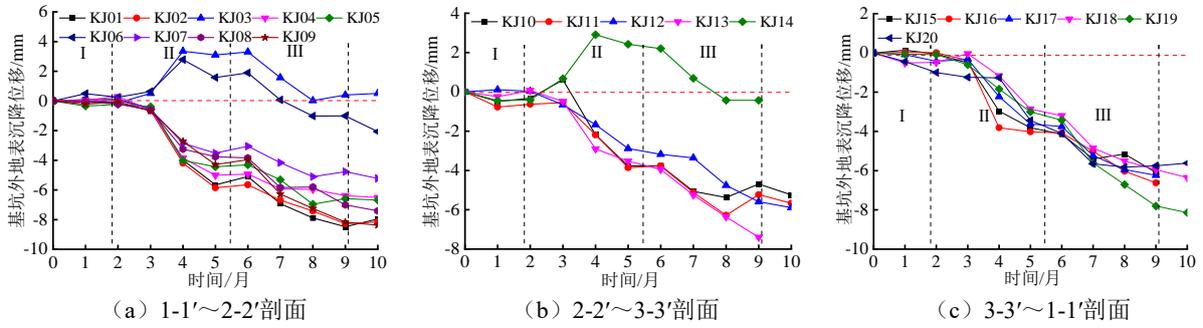


图 9 基坑外地表沉降位移时程变化关系图

Fig. 9 Time-history curves of surface settlement displacement outside the foundation pit

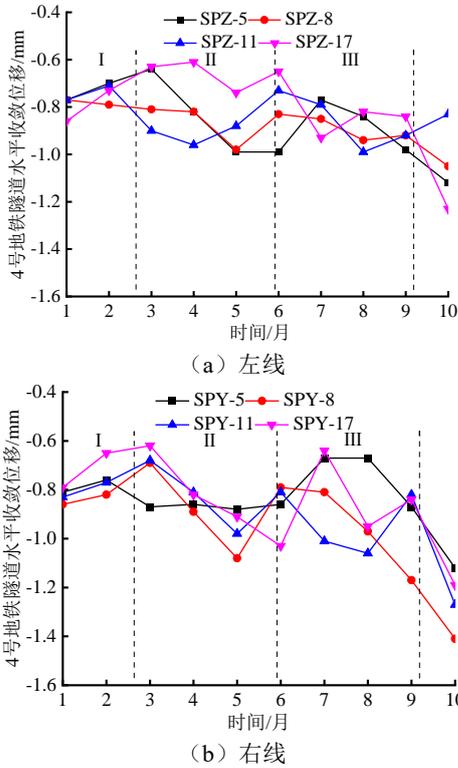


图 10 4 号线水平收敛位移时程曲线

Fig. 10 Time-history curves of horizontal convergence displacement of metro line 4

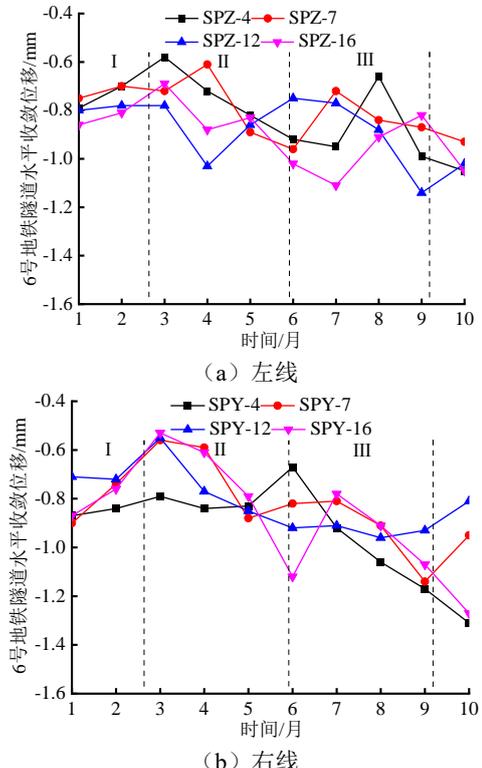


图 11 6 号线水平收敛位移时程曲线

Fig. 11 Time-history curves of horizontal convergence displacement of metro line 6

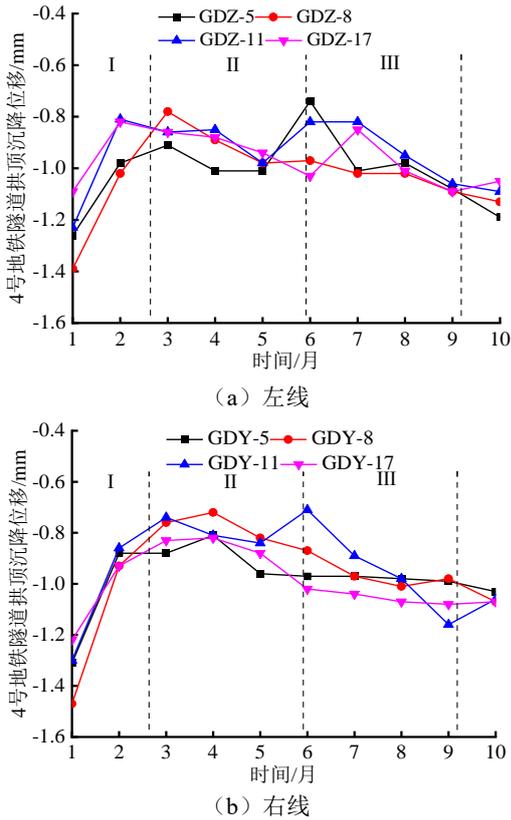


图 12 4 号线拱顶沉降位移时程曲线

Fig. 12 Time-history curves of vault settlement displacement of metro line 4

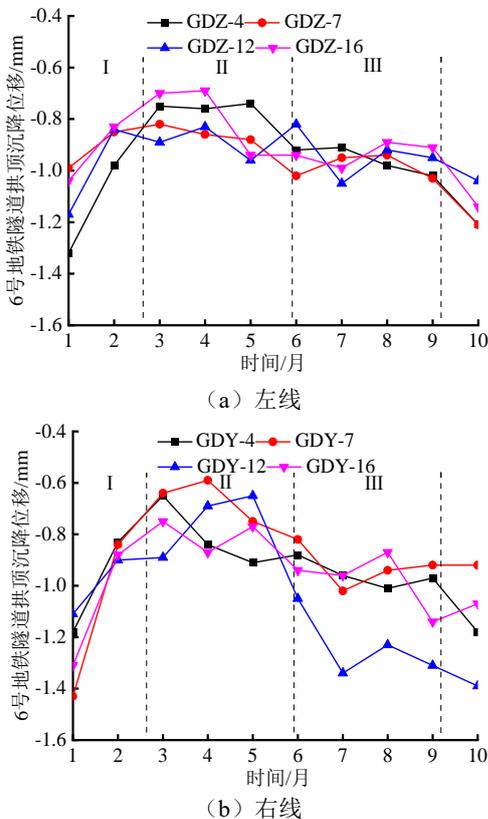


图 13 6 号线拱顶沉降位移时程曲线

Fig. 13 Time-history curves of vault settlement displacement of metro line 6

3 基坑开挖变形与隧道变形之间的响应关系

在第 2.2 节中可得支护结构、坑外地表和地铁隧道各监测点变形具有明显的共性特征，为了研究三者之间变形的响应特征，选取变化规律相同的部分监测数据进行分析。根据 4 号、6 号线共选取两组监测点，支护结构 ZJ09 监测点分别对应坑外土体 KJ08、4 号线地铁隧道 16 号监测面，支护结构 ZJ19 监测点分别对应坑外土体 KJ17、6 号线地铁隧道 12 号监测面。

图 14、图 15 分别为支护结构、坑外地表和地铁隧道水平、沉降位移时程曲线关系图，图 16、图 17 分别为基坑开挖过程中支护结构与坑外土体、地铁隧道变形关系图。根据图 14~17，分析总结可得基坑开挖变形与隧道变形之间的响应关系可通过以下三方面讨论。

(1) 变形时程发展趋势具有明显共性和阶段性特征。支护结构和坑外地表水平位移在第 I 阶段上均表现出平稳发展，在第 II 阶段（除个别监测点外）均表现出向坑内发展，第 III 阶段（除个别监测点外）均表现出向坑外发展。支护结构和坑外地表沉降位移（除个别监测点外）均表现出沉降特征，且沉降速率具有阶段性，二者沉降位移变化速率的发展趋势均表现出 $v_{II} > v_{III} > v_I$ 的变化规律。地铁隧道在阶段 II 和阶段 III 水平方向上均表现出先向坑内发展再向坑外发展，沉降位移均表现出先竖向向上发展再竖向向下发展，具有明显的阶段性。

(2) 坑外地表与地铁隧道变形相对于支护结构变形有滞后性。进一步剖析基坑施工工况 4 和工况 5 前后 2 个月施工时间内变形规律。在施工第三个月内，坑外地表的变形速率明显小于之后的结构，这是由于应力在土体中的传播具有时间效应。地铁隧道在阶段 II 和阶段 III 均表现出阶段性特征，这是地铁隧道变形相对于支护结构变形具有滞后性所致。主要原因是地铁隧道距离支护结构较远，基坑开挖致使地铁隧道变形影响具有较长的时间差，施工工况影响地铁隧道变形在第 II、III 阶段体现为位移向反方向发展。结合图 14、图 15，基坑施工工况 4 和工况 5 引起地铁隧道变形的时间差为 2~3 个月。因此，地铁隧道相对于支护结构变形的滞后性较坑外地表变形明显。

(3) 支护结构与坑外地表、地铁隧道变形具有线性相关性。图 16、图 17 是为了进一步表征基坑

开挖过程中支护结构变形与坑外地表变形、地铁隧道变形之间的内在联系。由图 16 可得,坑外地表变形随着支护结构变形的增大而增大,水平位移、沉降位移置信水平分别为 75%、80%,具有明显的线性相关性。由图 17 可得,地铁隧道变形随着支护结

构变形的增大而增大,增长幅度较缓,水平位移、沉降位移置信水平分别为 85%、90%,具有明显的线性相关性。结合图 16、图 17,水平位移置信区间值小于沉降位移置信区间值,地铁隧道变形随着支护结构变形的幅度较坑外土体缓慢。

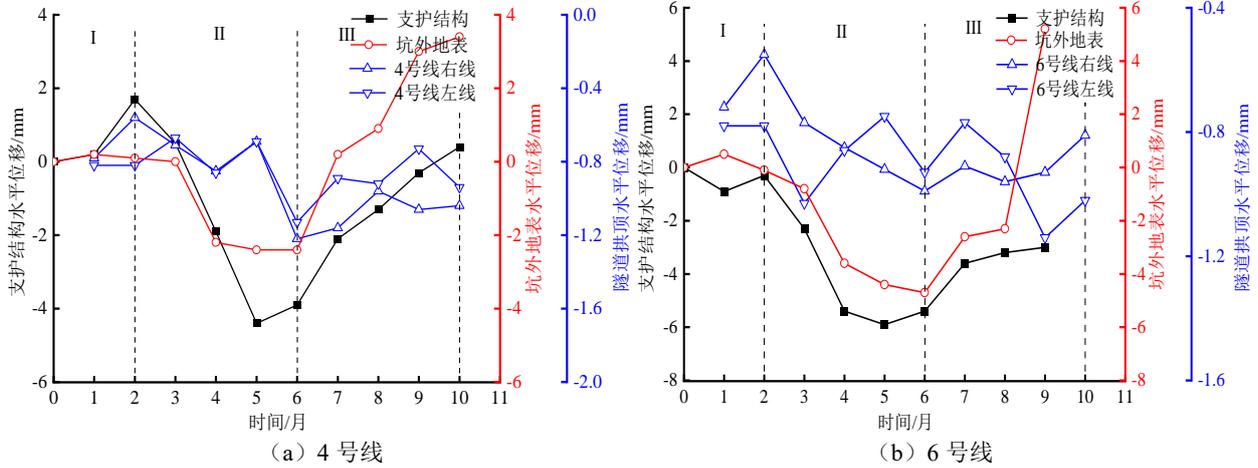


图 14 支护结构、坑外地表与地铁隧道水平位移时程曲线关系图

Fig. 14 Time-history curves of horizontal displacement between support structure, surface outside the pit, and subway tunnel

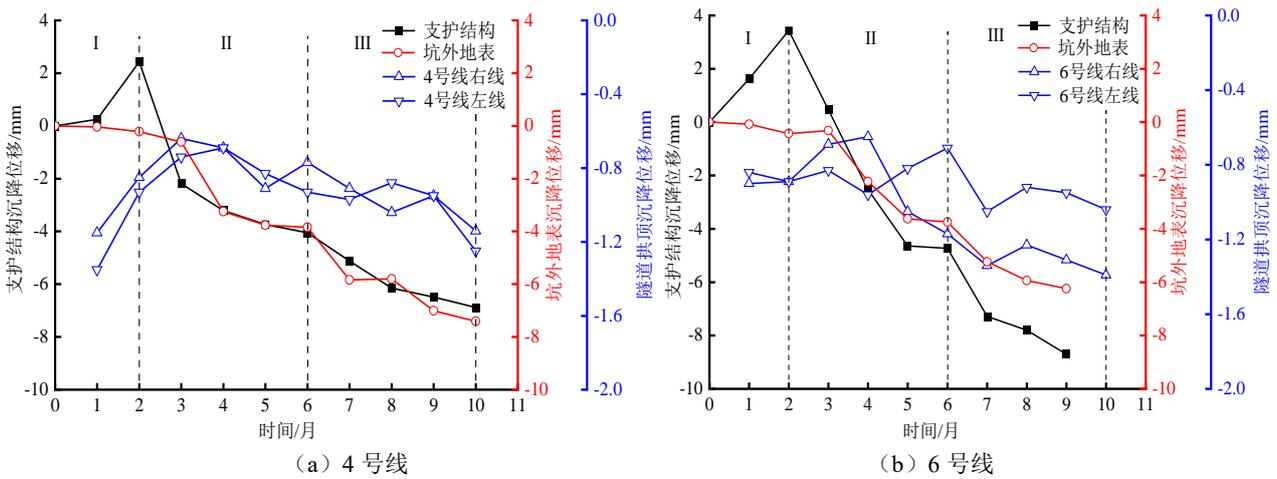


图 15 支护结构、坑外地表与地铁隧道沉降位移时程曲线关系图

Fig. 15 Time-history curves of settlement displacement between support structure, surface outside the pit, and subway tunnel

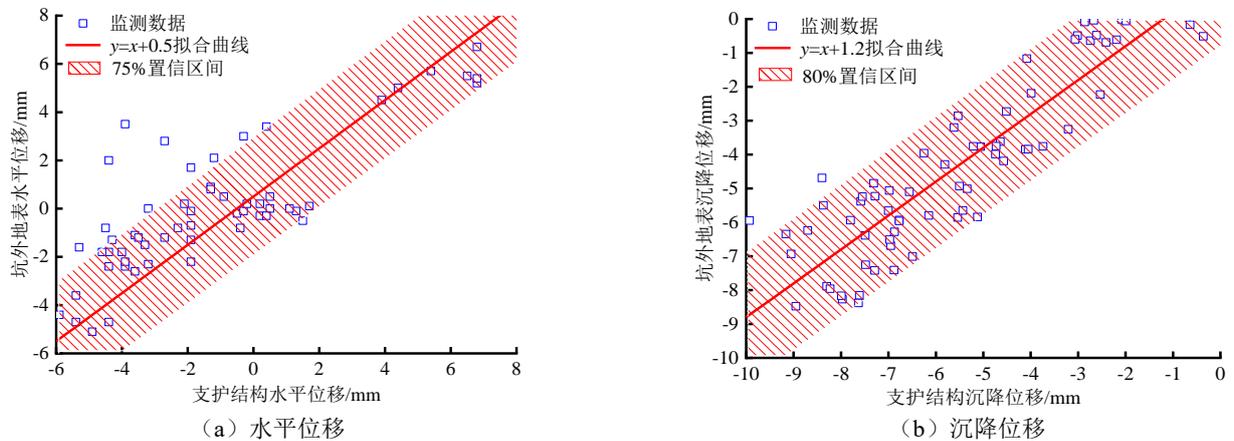


图 16 基坑开挖过程中支护结构顶部-坑外地表位移关系图

Fig. 16 Diagram of displacement relationship between the top of the support structure and the surface outside the pit during the excavation of the foundation pit

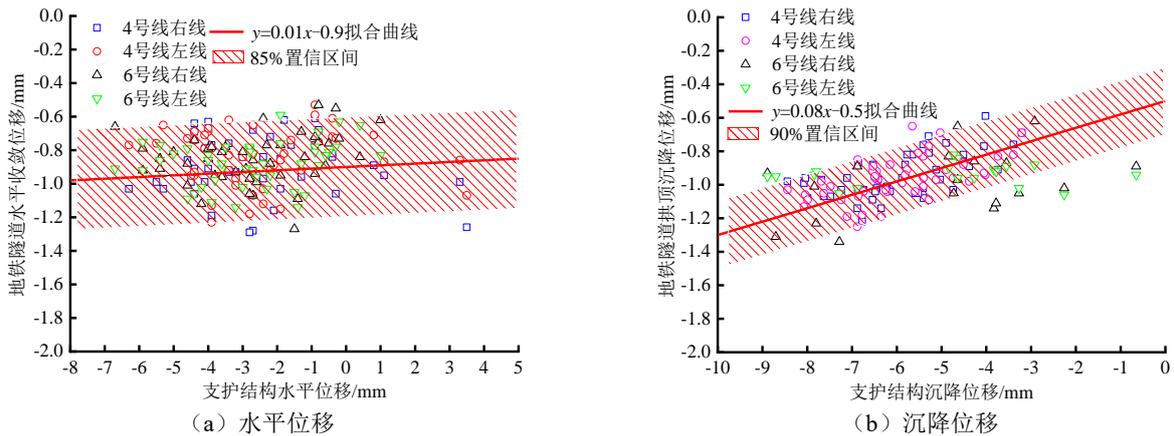


图 17 基坑开挖过程中支护结构顶部-地铁隧道拱顶位移关系图

Fig. 17 Diagram of displacement relationship between the top of the support structure and the vault of the subway tunnel during the excavation of the foundation pit

4 结 论

对深基坑开挖过程中支护结构、坑外地表、邻近运营地铁隧道变形监测数据进行了研究,探讨了深基坑支护结构与坑外地表、地铁隧道变形之间的相关性和响应特征,得到以下结论:

(1) 支护结构、坑外地表、邻近运营地铁隧道变形在基坑开挖过程中均表现出明显的阶段性特征,阶段性特征与基坑开挖各施工工况密切对应。

(2) 坑外地表变形和邻近运营地铁隧道变形规律相对于支护结构变形有明显的滞后性特征,这是由于三者之间存在的空间位置关系所致。

(3) 支护结构变形与周围土体、地铁隧道变形之间的响应关系表现为:三者之间存在线性相关性,置信区间值为 75%~90%,沉降位移的相关性高于水平位移。

参考文献

- [1] 刘念武, 陈奕天, 龚晓南, 等. 软土深开挖致地铁车站基坑及邻近建筑变形特性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(4): 1515-1525, 1576.
LIU Nian-wu, CHEN Yi-tian, GONG Xiao-nan, et al. Analysis of deformation characteristics of foundation pit of metro station and adjacent buildings induced by deep excavation in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(4): 1515-1525, 1576.
- [2] 王立峰, 庞晋, 徐云福, 等. 基坑开挖对邻近运营地铁隧道影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2004-2010.
WANG Li-feng, PANG Jin, XU Yun-fu, et al. Influence of foundation pit excavation on adjacent metro tunnels[J].

Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2004-2010.

- [3] 丁智, 张霄, 梁发云, 等. 软土基坑开挖对邻近既有隧道影响研究及展望[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 50-70.
DING Zhi, ZHANG Xiao, LIANG Fa-yun, et al. Research and prospects regarding the effect of foundation pit excavation on an adjacent existing tunnel in soft soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(3): 50-70.
- [4] 徐日庆, 申硕, 董梅, 等. 软土地区基坑开挖诱发邻近盾构隧道水平位移的简化算法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2021, 48(3): 153-163.
XU Ri-qing, SHEN Shuo, DONG Mei, et al. A simplified calculation method for horizontal displacement of adjacent shield tunnel caused by excavation in soft soil area[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2021, 48(3): 153-163.
- [5] 周泽林, 陈寿根, 涂鹏, 等. 基坑开挖对邻近隧道影响的耦合分析方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1440-1449.
ZHOU Ze-lin, CHEN Shou-gen, TU Peng, et al. Coupling method for analyzing the influence on existing tunnel due to adjacent foundations pit excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(4): 1440-1449.
- [6] 王康任, 庞小朝, 顾问天, 等. 基岩注浆截水帷幕在城市 40 m 超深基坑工程及紧邻地铁保护中的应用[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊 1): 220-225.
WANG Kang-ren, PANG Xiao-chao, GU Wen-tian, et al. Application of bedrock grouting curtain for cutting off water in the protection of a 40 m foundation pit and shield tunnels nearby[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(S1): 220-225.
- [7] HUANG X, HUANG H W, ZHANG D M. Centrifuge

- modelling of deep excavation over existing tunnels[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2014, 167(1): 3-18.
- [8] 陈仁朋, AL-MADHAGI ASHRAF, 孟凡衍. 基坑开挖对旁侧隧道影响及隔断墙作用离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(增刊 2): 6-11.
- CHEN Ren-peng, AL-MADHAGI ASHRAF, MENG Fan-yan. Three-dimensional centrifuge modeling of influence of nearby excavations on existing tunnels and effects of cut-off walls[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 6-11.
- [9] 陈仁朋, 刘书伦, 孟凡衍, 等. 软黏土地层基坑开挖对旁侧隧道影响离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(6): 1132-1138.
- CHEN Ren-peng, LIU Shu-lun, MENG Fan-yan, et al. Centrifuge modeling of excavation effects on a nearby tunnel in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(6): 1132-1138.
- [10] 王建望, 苏成, 宁啸青, 等. 两端临空开挖深基坑支护结构受力特征研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(5): 1-6.
- WANG Jian-wang, SU Cheng, NING Xiao-qing, et al. Research on the stress characteristics of bracing structure system of open-pit excavation at both ends[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(5): 1-6.
- [11] 章红兵, 范凡, 胡昊. 基坑群施工对邻近隧道影响与隧道保护[J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(5): 803-809.
- ZHANG Hong-bing, FAN Fan, HU Hao. Study on the effect of excavation groups construction on adjacent tunnels and tunnel protection[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(5): 803-809.
- [12] 殷一弘. 深厚软土地层紧邻地铁深大基坑分区设计与实践[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 129-132.
- YIN Yi-hong. Design and practice of partitioning of deep large foundation pits close to subway in thick soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 129-132.
- [13] 徐中华, 宗露丹, 沈健, 等. 邻近地铁隧道的软土深基坑变形实测分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 1): 41-44.
- XU Zhong-hua, ZONG Lu-dan, SHEN Jian, et al. Deformation of a deep excavation adjacent to metro tunnels in soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(S1): 41-44.
- [14] 丁智, 张霄, 金杰克, 等. 基坑全过程开挖及邻近地铁隧道变形实测分析[J]. 岩土力学, 2019, 40(增刊 1): 415-423.
- DING Zhi, ZHANG Xiao, JIN Jie-ke, et al. Measurement analysis on whole excavation of foundation pit and deformation of adjacent metro tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(S1): 415-423.
- [15] 范东方, 孙文昊, 胡威东. 复杂环境条件下地铁隧道保护方案探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊 2): 861-870, 899.
- FAN Dong-fang, SUN Wen-hao, HU Wei-dong. Discussion on protecting scheme of shield tunnel under complicated surrounding circumstance[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S2): 861-870, 899.
- [16] 尚国文, 李飒, 翟超, 等. 基坑开挖与邻近地铁结构变形相关性的实测分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(1): 107-115.
- SHANG Guo-wen, LI Sa, ZHAI Chao, et al. Monitoring data analysis on deformation correlation between foundation pit and adjacent metro structure[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(1): 107-115.
- [17] 吴才德, 曾婕, 成怡冲, 等. 深基坑开挖空间效应对周围土体及邻近隧道的的影响研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(2): 91-95.
- WU Cai-de, ZENG Jie, CHENG Yi-chong, et al. Influence study of spatial effect of deep foundation pit excavation on around soil and adjacent tunnel[J]. Building Structure, 2016, 46(2): 91-95.
- [18] 姚宏波, 李冰河, 童磊, 等. 考虑空间效应的软土隧道上方卸荷变形分析[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2453-2460.
- YAO Hong-bo, LI Bing-he, TONG Lei, et al. Analysis of metro tunnel deformation by upper excavation unloading considering spatial effect in soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2453-2460.