

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.07.052

复杂工况在安全保护区的叠加影响控制分析

刘 芳

[上海公路桥梁(集团)有限公司, 上海市 200237]

摘 要: 陆翔路—祁连山路贯通工程 II 标段(K2+160.0~K3+265.15)是一项包含了顶管、基坑、桥梁、道路和排水的综合性工程,其北侧的路堤桥、基坑及部分顶管工程在运营轨交 7 号线及在建 15 号线 50 m 安全保护区内,距离 7 号线病害段最近距离 6.1 m,距离 15 号线车站最近距离 1.7 m。针对多个工况对临近轨交可能产生扰动的施工影响因素进行了分析,阐述了施工过程中针对这些影响所采取的保护性措施,并结合监测数据分析,总结施工过程中出现的问题和控制要点,给出了在轨交安全保护区施工的建议。

关键词: 轨交安全保护区;叠加影响;施工控制;施工监测

中图分类号: U455 **文献标志码:** B **文章编号:** 1009-7716(2021)07-0193-05

0 引 言

随着中国城市建设的快速发展,建设用土地资源紧张,大型城市市政工程愈加密集,新建工程在临近轨交安全保护区范围施工的情况愈加频繁。无论采用何种施工方式,施工过程都会对周围地层产生扰动,影响临近既有地铁隧道结构的受力状态,使其产生位移、变形和局部应力集中,影响过大时将会干扰地铁列车正常运行甚至导致地铁隧道结构破坏和运营安全事故^[3]。因此,有必要对邻近地铁的工程进行分析总结,为以后的工程提供有价值的参考。

1 工程概况

工程位于轨交保护区(车站和隧道外边线外侧 50 m 内)主要有以下部分,见图 1。

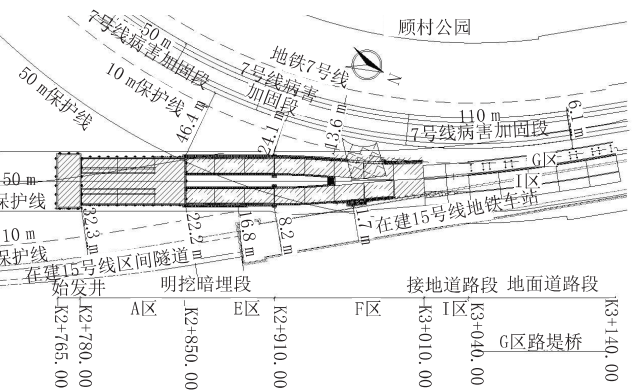


图 1 轨交保护区平面图

(1)K3+010~K3+140 的路堤桥及道路工程,西半幅路堤桥桩基距轨交 7 号线盾构区间边线 6.1~10.9 m,距轨交 15 号线车站结构边线 7.6~10.5 m。桥长 100 m,桩长 45.0 m,共 28 根。东半幅为道路。

(2)K2+765~K3+010 范围内基坑均位于在建 15 号线车站及区间轨交保护区,与在建 15 号线车站最小净距为 1.7 m。K2+850~K3+010 范围内基坑段位于 7 号线轨交保护区,距离 7 号线病害段最小净距为 11 m,见表 1,基坑设计见表 2。

表 1 地道与 7 号线、15 号线距离

地道 桩号	地道基坑 深度 /m	与 7 号线区间 隧道关系		与 15 号线在 建车站及待 建盾构水平 距离 /m	15 号线车站 开挖深度 / 待建盾构 埋深 /m
		水平 距离 /m	竖向 距离 /m		
K2+780	12.9~16.0	80		32	
K2+850	10.7	48	1.3	21	
K2+910	7.3	26	3.9	10.6	16.5~17.5/ 约 8.0
K2+950	4.3	17	5.8	5.9	
K3+010	1.6	11	8.5	15	

本工程施工期间地铁 7 号线正常运营,地铁 15 号线车站结构住体已完成,始发井与 15 号线区间隧道同步施工。

(3)东线顶管出洞 195m 范围(K2+765~K2+567)处于 15 号线 50 m 保护范围内。顶管断面尺寸 9.9 m×8.15 m;设计顶力 12 615 t。顶管以暗埋段(K2+780~K2+850)整体结构作为后靠,始发井与 15 号线区间隧道同步施工,东侧顶管顶进时 15 号线区间隧道已贯通。

收稿日期: 2021-03-11
作者简介: 刘芳(1984—),女,学士,工程师,从事市政工程项目技术管理工作。

表 2 地道设计情况

	始发井区 K2+765~K2+780	A 区 K2+780~K2+850	E 区 K2+850~K2+910	F 区 K2+910~K3+010
区段 / 长度	始发井 /15	北侧暗埋段 /70		北侧敞开段 /100
开挖深度 / 围护深度	16/34 m	10.7~12.9 m 局部落深 16 m/34 m~32 m	7.3~10.7 m/24(地墙 32)	1.6~7.3 m/8~17m
围护形式	1 000 mm 地下连续墙, 靠 15 号线侧单排 $\Phi 850@600$ 三轴搅拌桩加固。	靠 15 号线侧 1 000 mm 地下连续墙, 其余 800 mm 厚地下墙,	外侧 $\Phi 900@1000$ 钻孔灌注桩, 内侧 $\Phi 850@600$ SMW 工法桩, 北侧封堵墙 $\Phi 850@600$ SMW 工法桩, 南侧 800 mm 厚地下墙	外侧 $\Phi 850@600$ SMW 工法桩, 内侧 $\Phi 650@450$ SMW 工法桩, 西侧河道处 IV 型拉森钢板桩, 中间封堵墙 $\Phi 850@600$ SMW 工法桩; 南侧封堵墙 $\Phi 850@600$ SMW 工法桩,
止水处理	十字钢板锁扣地墙接缝止水; $\Phi 2400$ MJS 止水; 连墙与三轴之间充填; 高压旋喷加固;	接缝 $\Phi 2400$ MJS 止水; 靠 15 号线侧增加三轴搅拌桩止水, 始发井接缝处 3 根 $\Phi 2400$ 全圆“品”字形搭接 MJS 止水; 北侧暗埋段接缝处 $\Phi 850@600$ 三轴搅拌桩止水, 交叉长度约 3.4 m;	地墙接缝 $\Phi 2400$ MJS 止水, 西侧双排 $\Phi 850@600$ 三轴搅拌止水桩, 东侧双排 $\Phi 850@600$ 三轴搅拌止水桩, 局部单排。	西侧局部单排 $\Phi 850@600$ 三轴搅拌止水桩,; 中间局部单排 $\Phi 850@600$ 三轴搅拌止水桩。
支撑形式	第一道钢筋混凝土支撑 + 第二 ~ 四道 $\Phi 609$ 钢支撑 + 一道换撑, 伺服系统。	第一道钢筋混凝土支撑 + 第二 ~ 四道 $\Phi 609$ 钢支撑; 伺服系统。	第一道钢筋混凝土支撑 + 第二、三道 $\Phi 609$ 钢支撑 + 一道换撑; 局部段只有一道钢支撑。伺服系统。	第一道钢筋混凝土支撑 + 第二道 $\Phi 609$ 钢支撑 + 一道换撑; 局部段一道混凝土支撑。伺服系统。
加固形式及深度	$\Phi 850@600$ 三轴搅拌桩, 设置抗浮桩 $\Phi 800$ 钻孔灌注桩	$\Phi 850@600$ 三轴搅拌桩满堂加固, 加固深度坑底以下 5 m, 设置格构柱, 抗浮桩: $\Phi 600$ 钻孔灌注桩	$\Phi 850@600$ 三轴搅拌桩满堂加固, 加固深度坑底以下 4 m。抗浮桩: $\Phi 600$ 钻孔灌注桩	南侧及明浜区域 $\Phi 850@600$ 三轴搅拌桩满堂加固, 加固深度坑底以下 3 m; 其余 $\Phi 850@600$ 三轴搅拌桩裙边加固深度坑底以下 3 m 抗浮桩 $\Phi 600$ 钻孔灌注桩。

1.2 工程地质及水文条件

本工程基坑开挖范围内土层主要为:①₁ 杂填土层、②₁ 粉质黏土层、③ 淤泥质粉质黏层、③_T 黏质粉土层、④ 淤泥质黏土层。

潜水赋存于浅部黏性土层和浅部粉性土层中, 水位埋深一般在 0.3 ~ 1.5 m, 年变幅可达 1 m 左右。勘察期间, 实测潜水位埋深为 0.6 ~ 3.6 m 之间, 高程为 2.06 ~ 4.02 m。

承压水主要赋存于浅部⑤_{IT} 层中的微承压水、中部⑦层及下部⑧₂、⑨层等粉(砂)性土层中承压水, 根据地区经验, 微承压水埋深为 3 ~ 11 m, 承压水埋深一般为 3 ~ 12 m, 并随季节有所变化。经观测承压水头埋深 3.84 m。

1.3 地铁变形控制要求

施工严格遵守“上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定”对有关地铁沿线工程相关要求:

- (1) 地铁结构设施绝对沉降量及水平位移量 20 mm (包括各种加载和卸载的最终沉降量);
- (2) 在地铁工程(外边线)两侧的邻近 3 m 范围内不能进行任何工程;
- (3) 隧道变形曲线的曲率半径 $R \geq 15\,000\text{ m}$;
- (4) 相对变曲不大于 1/2 500;

(5) 由于建筑物垂直荷载(包括基础地下室)及降水、注浆等施工因素而引起的地铁隧道外壁附加荷载不大于 20 kPa;

(6) 由于打桩振动、爆炸产生的震动对隧道引起的峰值速度不大于 2.5 cm/s^[1];

(7) 需满足设计院之围护设计总说明内的相关要求及地铁审批部门的要求;

(8) 各分部分项工程施工质量验收规范;
本工程轨道交通对 7 号线及 15 号线沉降监测报警值设置为 5 mm。

2 扰动工况分析及采取的针对性施工措施

2.1 路堤桥桩基施工机械扰动和塌孔风险影响

路堤桥桩基距离 7 号线病害段仅 8 m, 且作业空间狭小, 施工风险等级较高。处于运营中的 7 号线地铁区间隧道虽然其土层沉降已基本稳定, 但其隧道结构体系为预应力管片拼装而成, 整体强度刚度相对较低, 会对周边岩土体的扰动变形较为敏感, 其病害段已经使用了注浆和钢套环加固, 对周边施工扰动更为敏感。七号线病害加固情况见图 2、图 3。

采取措施: 为防止塌孔, 采用内径 20 m 长, 880 mm 型钢套管跟进施工, 打入至 5_① 或 6 层土, 深度穿过地铁结构底标高 3 m 以上。



图2 7号线区间隧道钢套环加固

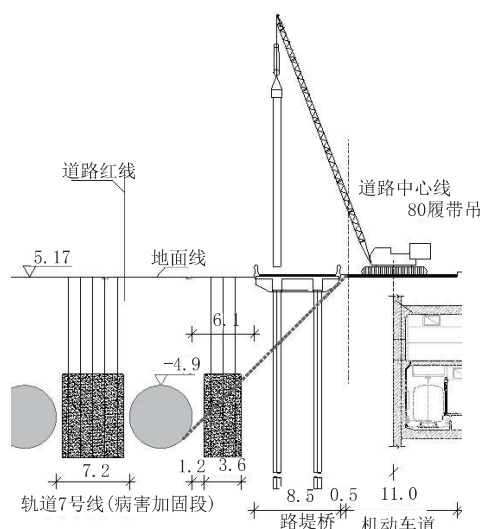


图3 7号线区间隧道注浆加固(单位:m)

选用28RF免共振液压振动锤(配备600series动力站)进行套筒施工,高频液压振动锤28RF型配置可变偏心力矩,它的工作频率可以从0直接到2 300 rpm,跃过土壤的固有频率(一般在800~1 000 rpm),消除在开启和关闭时刻的振动影响。在经过土壤频率区域后,偏心块自动调节,偏心块同步后产生偏心力矩形成振动频率。

钢套管施工在地铁停运期间进行,单桩施工总时间1 h左右,每日成桩5根左右。工期短,扰动小。

套筒施工时候,履带吊站在7号线45°影响线以外,刚套筒上部做牛腿,刚套筒之间用40工字钢连接成平面桁架,GPS10钻机站在桁架上进行钻孔灌注桩施工,将施工荷载从桩基传到地下,有效减少了对7号线的加载。每日1~2根桩,施工周期20 d。

2.2 路堤桥上上部结构及道路排水工程的加卸载影响

采取措施:上部结构每15 m设置1道沉降缝,大部分位于现状地面以下,施工时采用逐跨现浇施工,减少施工产生的加卸载效应;钢筋进行模块化制作,现场吊装绑扎,减少开挖面暴露时间;混凝土浇筑采用分段分层同步浇筑。总体施工顺序:先北后南,先西后东(即先近后远)。

机动车道结构层共分为6层,总厚度78.8 cm,分段、分层施工,对周边土体不会出现明显的加、卸载效应。开槽埋管采用横列板支护施工,与道路同期施工。施工时分槽分段施工。轨交15号线顶板上管道,直接铺设素混凝土混凝土垫层,以防止换填分层碾压对顶板结构的不利影响。

2.3 基坑围护结构的施工扰动影响,围护接头处漏水风险

采取措施:围护结构施工时,合理跳打,先西后东,并由北向南进行(总体原则:先近后远)。各专业施工时,施工机械始终站在远离轨交一侧。单幅地墙施工时间控制在24 h内。

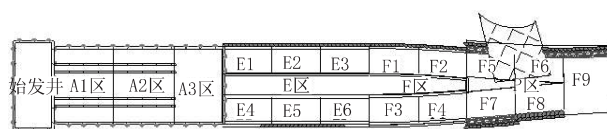
优化设备选型。F区明浜处距离7号线病害段12 m,拉森钢板桩选用静压植桩机,减少了扰动风险。

保障围护结构施工质量,避免因质量问题造成围护坍塌或渗漏。

一旦渗水口要及时封堵,紧急情况下可采取坑内灌水平衡内外水土压力,施工过程中出现过轻微漏水现象,采用坑外引流和及时封堵处理,未产生大的影响。

2.4 基坑开挖及结构回筑时的加卸载影响,基坑变形采取措施:

(1)优化围护方案:通过增大围护尺寸,减小支撑间距,加强坑底加固,增设隔离桩等形式,提高围护的安全系数,同时把大基坑化为小基坑,方便分块开挖^[3]。本项目在K2+910、K2+950位置增设封堵墙将敞开段和暗埋段分隔开来,加上不同围护结构,将整块区域分为7个小的条形基坑,见图4。



施工顺序:始发井→A→E→F

图4 基坑水平分区分块图

(2)分层分块开挖,及时支撑:土方开挖按照距轨交由远及近,先深后浅的次序依次施工,遵循“竖向分层,水平分段,随撑随挖”的原则^[1],控制合理的开挖速度,把握加设横撑时间。采取该方法可缩短轨交一侧基坑开挖暴露时间,减小同时开挖基坑的面积,有效地降低了深基坑施工对临近轨交的影响。以E区开挖的分层分块情况为例,单块土方量在200~250 m³,单块挖土时间控制在3 h内,开挖后6 h内安装好支撑。

(3)采用伺服系统:基坑K2+780~K2+930区段

的钢支撑均采用伺服系统钢支撑,随时对支撑预应力进行监测,当预应力损失时,补加预应力至设计值。

2.5 不良地质潜水因素,及坑底管涌等风险

在开挖土层范围内存在③④淤泥质粉质黏土,开挖易受扰动,开挖卸荷后会产生较大回弹。③_T黏质粉土当开挖揭露时在一定水头动水压力作用下易产生流砂现象。开挖过程中加强坑底隆起监测,地基加固、井点降水等措施严格按照要求施工,坑内布置降压备用井,对⑦层承压水进行抗突涌验算,根据开挖工况,计算降压工况,做到按需降压,严禁超降。

本基坑开挖期间未启用承压降水。

3 监测数据分析

施工前委托专业监护单位对邻近运营地铁进行了沉降和收敛变形监测布点。数据处理说明:7号线共设132个沉降个监测点,386个收敛监测点。15号线共设58个沉降个监测点,48个收敛监测点。轨道沉降及收敛数据会根据现场工况每3~7d采集一次,每次采集单次变量及累计变量。以下表格中给出的数值范围,为累计变量高值的高频范围。

3.1 路堤桥施工阶段

此阶段15号线尚未布置监测点,七号线监测数据见表3。

表3 路堤桥施工过程监测数据

监测时间 及工况	7号线上行 /mm-远	7号线下行 /mm-近		
	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛
19.4.23~5.21				
桩基施工	-2.45~-2.0	1.2	-2.18~-1.73	-3.4~1.2
上部结构 现浇梁浇筑	-1.52	1.8	-1.54	-2.7

备注:垂直位移正值表示隧道抬升,负值表示隧道沉降,收敛正值表示横直径增长,收敛负值表示横直径缩短。下同。

表4 始发井基坑施工过程监测数据

监测时间及工况	西侧测斜	东侧测斜	7号线上行 /mm-远		7号线下行 /mm-近		15号线上行 /mm-近		15号线上行 /mm-远	
	/mm	/mm	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛
2019.5.31~2019.7										
基坑开挖前			-1.52	1.8	-1.54	-2.7	/	/		
底板浇筑后	13	14	-2.83	3.1	-2.38	2.5	-1.17	0.9	-0.93	1.1
结构完成时	16	18	-2.7	2.9	-3.91	3.3	3.74	-3.05	/	/

备注: <0.14%H,有效测点小于5mm报警值

表5 A区基坑施工过程监测数据

监测时间及工况	7号线上行 /mm-远		7号线下行 /mm-近		15号线上行 /mm-近		15号线下行 /mm-远	
	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛
2019.5~2019.11								
A区施工(同时始发井结构施工)	-1.9~-3.25	1.5~3.3	-1.54~-4.4	-2.7~4	-4.35~4.7	3.6~10.9	-7.83~-2.03	3.2~8.9

根据监测数据显示,路堤桥施工期间,7号线累计最大沉降值为2.45mm,累计最大抬升值为2.00mm,均小于报警值±5.0mm。

7号线下行线结构收敛值在-3.4~1.2mm之间,上行线收敛值在1.2~1.8mm之间,均小于报警值±5.0mm。

3.2 始发井施工阶段

监测数据见表4,7号线累积最大沉降2.83mm,最大收敛3.3mm,15号线累积最大抬升3.3mm,最大收敛3.74mm始发井距离轨交距离较远,施工时未启用降压井,同时基坑自身变形控制较好,所以虽然挖深相对较深,但未对轨交产生明显影响。

3.3 A区施工阶段

监测数据见表5,A区土方开挖量最大,但因分块分层开挖,基坑控制较好,未对轨交产生明显影响。沉降未达到报警值。

3.4 EF区施工阶段

此段期间工况较为复杂,监测数据见表6。A,E,F区基坑分区开挖回筑,期间伴随顶管顶进施工,及重载车辆经路堤桥进出,出现频繁报警情况。

其中EF区围护施工及E区西侧开挖期间,出现最大报警值-7.33~-8.68。该段距离7号线11~17m,其中距离11m处有SMW工法桩施工,E区西侧开挖深度10.53~7.23m。

E区东侧及F区的施工未对7号线产生较强影响。期间15号线最大沉降接近10mm,最大收敛接近20mm,因15号线区间隧道在安全保护区范围之外监测数据显示沉降5~10mm,收敛15~20mm,考虑这一数值为其贯通之后的有一定的工后自然沉降收敛。去除这部分影响后,粗略推算本工程实施对其产生的影响,大致为沉降0~5mm,收敛0~5mm。

表 6 EF 区基坑施工过程监测数据

监测时间及工况	7 号线上行 /mm- 远		7 号线下行 /mm- 近		15 号线上行 /mm- 近		15 号线下行 /mm- 远	
	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛	垂直位移	结构收敛
2019.5~2019.11 A 区施工 (同时始发井结构施工, 东线顶管顶进之前)	-1.9~-3.25	1.5~3.3	-1.54~-4.4	-2.7~4	-4.35~4.7	3.6~10.9	-7.83~-2.03	3.2~8.9
2019.12 ~ 2020.3 东线顶管 施工中,E 区三轴施工	-3.84~-5.89	-3.3~3.6	-6.87~-4.5	3.7~4.5	-4.35	16.4~17.1	-7.83	14.1~14.5
2020.4.东线顶管施工, EF 区围护施工	-6.2	3.3	-7.33	3.9	-5.09	19.6	-8.48	16.5
2020.4 ~ 2020.5 东线顶管施工 中,E 区西侧开挖	-5.11~-7.32	3~4.9	-8.68~-5.58	3.7~4.7	-5.75~-5.09	17.1~19.6	-9.11~-7.57	14.1~16.5
2020.5 ~ 2020.6 东线顶管贯通, E 区东开挖	-5.4~-4.53	-4.9~-3.8	-5.99~-5.75	3.7~4.4	-5.37~-5.94	17.4~18.1	-9.01~-8.64	15.3~16.4
2020.6. ~ .2020.7 西线顶管顶进 中,贯通 E 区西侧下部结构 施工,东侧开挖	-5.34~-3.79	-4.2~4	-5.84~-4.65	3.7~4.1	-6.43	17.9	-9.1	15.8
2020.8. ~ 2020.9 西线顶管顶进 中,E 区东侧结构回筑, F 区西侧冠梁及混凝土支撑	-3.79	4~4.8	-4.65	4.1	-6.75~-6.29	19.1~19	-7.82~-8.03	16.2~17.1
2020.9 ~ 2020.12 西线顶管顶进 并贯通,F 区西侧基坑土方开挖	-3.79	4.8	-4.65	4.1	-6.77~-7.37	18.6~19.5	-9.38~-9.93	18.0~17.6
2020.12 ~ 2021.1 F5F6F7 开挖及结构回筑	-3.55	5.4	-4.04	4.8				

从监测数据中未发现东线顶管顶进对 15 号线有明显影响。

4 结 语

监测数据表明,项目施工过程中,7 号线沉降和收敛变形监测指标未超出 20 mm,满足地铁技术管理要求。15 号线沉降及收敛变形数据去除其自身工后自然沉降收敛后在合理范围。经验总结如下:

- (1)当多个工程同期在轨交保护区范围施工时,应考虑每个工程对轨交变形的叠加影响。注意控制单个工程的变形影响量,尤其要注意减少后续工程的影响。
- (2)轨交病害段比正常轨交更加脆弱,虽有注浆及钢套环加固,但对扰动更为敏感,一旦产生损害修复也更加困难,即便工程距离病害轨交在 10 m 之外,也要注意减少扰动,控制加载卸载量。本项目 E 区西侧基坑距离 7 号线 26 ~ 48 m,开挖深度 7.3 ~ 10.7 m,叠加了前阶段施工影响后,在基坑开挖过程中因产生一定的卸载,导致 7 号线沉降最高达到 8.68 mm。
- (3)如不能改变桩基形式,那么设备选型和优化非常重要。本项目距离 7 号线病害段较近的路堤桥桩基,因采用了较先进的免共振液压振动锤进行钢套筒跟进施工,轨交产生的沉降仅为 2.45 mm,称得上是微扰动施工。EF 区西侧围护采用常规 smw 工法桩,

距离号线病害段 11 ~ 17 m,因叠加了前阶段施工的影响及自身存在一定施工扰动,造成最高 7.33 mm 沉降。

(4)基坑支护采用的伺服系统对控制基坑变形有良好效果。基坑遵循时空效应进行分区分层分块开挖有效避免了大规模加卸载对临近轨交的影响,是轨交安全保护区基坑施工的黄金法则。

(5)重载车辆应尽量远离轨交。如不能避免,应在靠近轨交侧增加围护隔离,或增设栈桥,通过桩基将车辆荷载和震动传到地下。本项目进出通道在靠近 7 号线侧,最近距离 8 m,重载车辆及大型顶管机及管节运输。通道通过路堤桥桩基、栈桥桩基、地道敞开段抗拔桩基及围护结构,将车辆荷载有效和 7 号线隔离,减少了扰动。

工程前期与轨交管理部门做好沟通,在设计方案和施工筹划上做好优化,施工过程中加强监控,精细化管理,动态调整施工措施,可以有效保障工程安全。

参考文献:

[1] 王如路,贾坚,廖少明.上海地铁监护实践[M].上海:同济大学出版社,2013.

[2] 彭涛.临近地铁线路的深基坑施工风险调查与评估[J].土木工程与管理学报,2020(12):37-42.

[3] 朱凯波.临近轨交的深基坑工程施工技术[J].上海建设科技,2012(3):20.

[4] 张兵兵.基坑开挖对临近既有地铁隧道影响分析[J].科学技术与工程,2010,10(23).