

# 基坑开挖对在建道路的影响及加固措施

孙雅珍<sup>1</sup>,尹方东<sup>1,2</sup>,叶翔<sup>3</sup>,杨胜彬<sup>4</sup>,王金昌<sup>2,5</sup>

(1. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 浙江大学平衡建筑研究中心, 浙江 杭州 310058;  
3. 杭州上城区城市建设发展集团有限公司, 浙江 杭州 310027; 4. 沈阳地球物理勘察院有限责任公司,  
辽宁 沈阳 110121; 5. 浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要** 目的 分析基坑开挖对围护结构和在建道路的影响, 探究保证基坑和道路结构稳定的加固措施。方法 以杭州市某基坑与在建道路交叉施工为工程背景, 进行三维有限元建模, 对基坑开挖和道路振动施工全过程进行模拟。结果 在道路振动施工作用下, 基坑围护结构最大水平位移为 5.26 mm; 基坑开挖完成后, 基坑围护结构的水平变形和道路的竖向变形均较大, 须采用加固措施控制围护结构和道路的变形。结论 在基坑全部卸荷后, 采用斜撑和增加支撑预应力综合加固措施与未采用加固措施相比, CX20 监测点的最大水平位移和道路最大沉降分别减小了 28.97% 和 35.34%, 变形控制效果显著。

**关键词** 在建道路; 振动施工; 基坑开挖; 数值分析; 基坑加固

中图分类号 TU47

文献标志码 A

引用格式: 孙雅珍, 尹方东, 叶翔, 等. 基坑开挖对在建道路的影响及加固措施[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(1): 114-122. (SUN Yazhen, YIN Fangdong, YE Xiang, et al. Study on influence of foundation pit excavation on road under construction and reinforcement measures[J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2024, 40(1): 114-122.)

## Study on Influence of Foundation Pit Excavation on Road under Construction and Reinforcement Measures

SUN Yazhen<sup>1</sup>, YIN Fangdong<sup>1,2</sup>, YE Xiang<sup>3</sup>, YANG Shengbin<sup>4</sup>, WANG Jinchang<sup>2,5</sup>

(1. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168;  
2. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, China, 310058; 3. Hangzhou Shangcheng District  
Urban Construction Development Group Co. Ltd., Hangzhou, China, 310027; 4. Shenyang Geophysical Exploration  
Institute Limited Liability Company, Shenyang, China, 110121; 5. School of Architecture and Engineering, Zhejiang  
University, Hangzhou, China, 310058)

**Abstract:** In order to analyze and explore the influence of foundation pit excavation on the road under construction and the reinforcement measures that can ensure the stability of foundation pit

收稿日期: 2022-12-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52278454); 浙江省建设厅科技项目(2022K169, 2022K073); 辽宁省教育厅基本科研课题项目(LJKZZ20220080, LJKM20220934); 浙江省科技厅科研项目(2022C03180)

作者简介: 孙雅珍(1970—), 女, 教授, 博士, 博士研究生导师, 主要从事路面损伤及地下工程等方面研究。

and road structure, a 3-D FE model was established based on the practice of the simultaneous construction of a foundation pit and a road in Hangzhou. Under the action of road vibration, the maximum horizontal displacement of foundation pit envelope is 5.26 mm. After the foundation pit excavation, the horizontal deformation of the envelope and the vertical deformation of the road are large, and the reinforcement measures should be adopted. The results show that the maximum horizontal displacement of CX20 monitoring point and the maximum settlement of the road are reduced by 28.97% and 35.34% for the comprehensive strengthening measures of diagonal bracing and increasing brace prestress are adopted, respectively, when compared to without strengthening measures. The deformation control effect is remarkable.

**Key words:** road under construction; vibration construction; foundation pit excavation; numerical analysis; foundation pit reinforcement

随着我国基础设施建设的迅速发展和地下空间的开发,其对周边建筑物的安全影响越来越受到重视<sup>[1-4]</sup>。在基坑与现有建筑物相邻的情况下,基坑开挖势必会使原有的应力和位移发生变化,进而使相邻建筑物产生额外的变形和内力<sup>[5]</sup>;因此,合理地预测基坑周围的道路和结构的影响以及加强防护是非常必要的。

近年来,国内外学者对此进行了一些研究,R. A. Mangushev等<sup>[6]</sup>利用有限元软件分析了基坑开挖使邻近建筑物产生沉降的原因。K. Westermann等<sup>[7]</sup>应用自动化程序和数字化方法分析了基坑开挖对邻近建筑物的影响。高广运等<sup>[8]</sup>将FLAC-3D技术应用于基坑工程,并采取了二次加固措施,以保护相邻隧道。王定军等<sup>[9]</sup>利用有限元分析软件对采用不同类型的旋喷灌注桩基进行了基坑施工的比较研究。温淑荔<sup>[10]</sup>以某地铁站深基坑施工为例,利用数值模拟的方法,对该工程的加固方案进行优化,并对加固深度、加固部位等因素的影响进行了分析。宋福贵<sup>[11]</sup>通过对沪杭高速铁路附近的无砟铁路桩板地基的变形进行仿真分析,并给出了相应的加固措施。

目前研究重点集中在基坑开挖过程对既有道路及建筑物变形的影响<sup>[12-20]</sup>,鲜有研究基坑开挖对在道路的研究;同时关于道路振动施工对基坑的影响研究也较少。基于此,笔者依托杭州市某实际工程,通过

PLAXIS有限元软件,分析不同道路结构层施工压路机振动荷载对基坑围护结构的影响;分析在不同开挖深度情况下,基坑的围护结构及邻近道路的变形情况;最后采用合理的加固措施对基坑进行加固;研究成果为地下空间开发安全以及对市政道路的保护提供了工程示范。

## 1 工程概况

### 1.1 周边环境

本工程为杭州市某基坑与道路交叉施工,基坑与邻近道路、地铁车站的相对位置关系如图1所示。

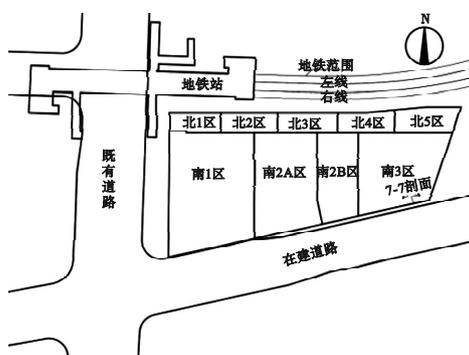


图1 场地平面布置图

Fig. 1 The site layout plan

为了保护地铁已建完工程,采用分坑开挖。南侧离地铁较远,可划分为三个较大的基坑,分别为南1、南2和南3基坑。基坑南侧为已经完成道路基层施工的东城路。当南3基坑完成第二道钢支撑且施工开挖深度最大值达到9 m时,南3区基坑监测达到报警值,水

稳路面出现多条纵向裂缝,最宽处2 cm,裂缝长达50 m。这是基坑施工与道路施工相互影响的典型案例,主要问题体现在基坑围护结构变形过大,周边道路的水泥稳定碎石基层表面开裂。因此需要开展二者相互影响机理的研究,对南3后继开挖以及南1和南2的施工具有重要的指导意义。

表1 土体物理力学参数

Table 1 The physical and mechanical parameters of soils

土层名称	层厚/m	孔隙比	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	摩擦角/(°)
杂填土	1.7	0.500	3.0	2.0	26.0
黏质粉土	2.3	0.850	8.5	5.0	28.0
砂质粉土	3.7	0.735	10.0	6.0	29.0
砂质粉土夹粉砂	6.4	0.691	11.0	6.0	30.0
淤泥质粉质黏土夹粉土	3.6	1.095	3.0	2.0	23.0
砂质粉土类(淤泥质)粉质黏土	2.0	0.869	5.5	4.0	26.0
淤泥质粉质黏土	14.0	1.134	3.0	2.0	23.0
粉质黏土	5.0	0.927	4.2	5.0	24.0
圆砾	4.0	0.500	25.0	1.0	33.0

### 1.3 基坑支护与道路设计方案

本项目基坑开挖深度约9.7~14.1 m,靠近地铁侧采用钻孔灌注桩+TRD水泥土连续墙作围护桩;其余侧采用TRD工法桩内插型钢。临近道路的围护结构主要涉及7-7剖面,如图2所示。

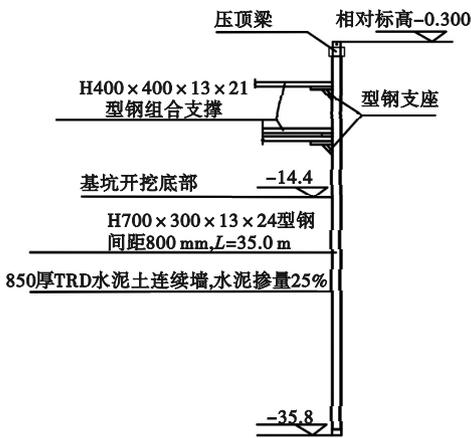


图2 剖面7-7(南区基坑临近道路)

Fig. 2 Section 7-7 (South area foundation pit adjacent to the road)

杭州市某道路是区块内东西向重要的城市次干道。道路红线全长约338 m,实际实施范围全长约414 m,标准段宽36 m,采用双

### 1.2 工程地质概况

本工程场区属于平原地貌单元,现状为拆迁空地,四周砌筑有围墙,整体较为平整,地面高程在6.2~6.8 m,多为临近居民农作物、蔬菜等种植,自上而下可分为9个大层,具体土层物理力学指标如表1所示。

向六车道,三块板形式。道路结构设计如图3所示。

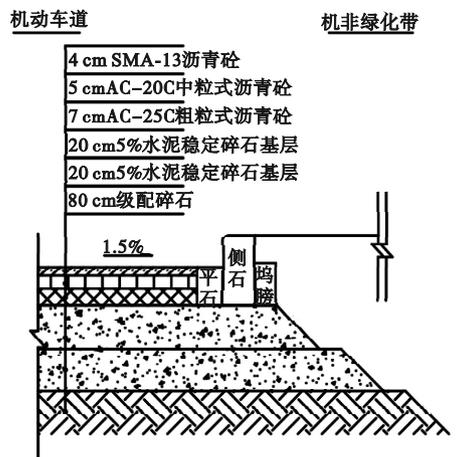


图3 道路立面结构示意图

Fig. 3 The schematic diagram of road elevation structure

## 2 数值模拟研究

### 2.1 数值计算模型

采用PLAXIS模拟基坑与道路交叉施工的相互影响,根据建模经验,结合基坑和道路施工方案,三维模型X方向长度为390 m,Y方向长度为220 m,Z方向长度为53 m,计算

模型如图 4 所示。

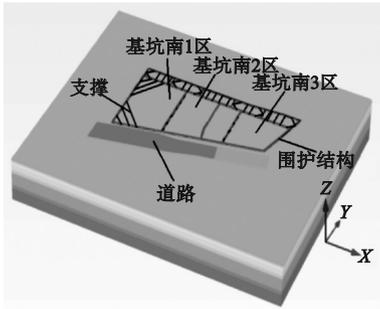


图 4 三维模型整体图

Fig. 4 The overall diagram of 3D model

笔者采用 HSS 本构模型<sup>[21]</sup>对岩土体的应力-应变行为进行描述,道路结构采用线弹性本构进行模拟。基坑的围护结构、内支撑和道路分别采用板单元、杆单元和实体单元模拟。土层分布及参数见表 1,其他结构的计算参数如表 2 所示。

表 2 其他结构计算参数

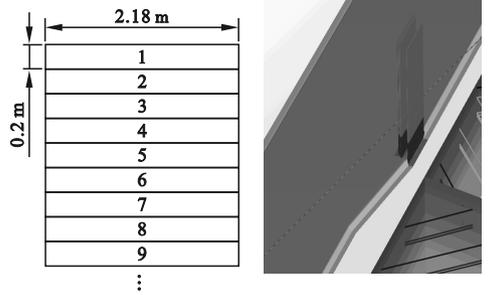
Table 2 The structural calculation parameters

结构名称	天然重力密度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ MPa	泊松比
钻孔灌注桩	25.00	$3.00 \times 10^4$	0.20
高压旋喷桩	20.00	$2.20 \times 10^4$	0.20
TRD(内插 H 型钢)	16.00	$2.10 \times 10^5$	0.20
型钢支撑	25.00	$2.10 \times 10^5$	0.20
水泥稳定碎石层	23.21	1 100	0.25
级配碎石层	21.90	315	0.35
塘渣层	21.60	54	0.25

采用 PLAXIS 3D 模拟压路机的振动荷载时,将压路机的运动荷载按运行方向分解为一组长约 0.2 m、宽 2.15 m 的矩形荷载,并在车轮运动方向上连续排列,以构成一种类似于图 5 的荷载分布区域,并通过添加多个分析步来实现荷载移动,在分析的初始阶段,先激活第一个面荷载,第二步时冻结荷载 1 同时激活荷载 2,以此类推,这样便完成了振动荷载向前移动的过程。

路面结构的压实采用 YZ18 型振动压路机<sup>[22]</sup>,计算参数如下:振动频率为 28 Hz,振动轮静线荷载为 390 N/cm,行驶速度为 0 ~ 9.7 km/h,振动轮宽度为 2 178 mm,激振力为

330 kN/190 kN,名义振幅为 2.1 mm/1.1 mm。



(a)分布示意图

(b)有限元模型

图 5 行进振动荷载

Fig. 5 The traveling vibration load

## 2.2 施工工况

为模拟基坑与道路交叉施工的实际情况,对施工全过程进行模拟。首先进行地应力平衡,随后安装地下连续墙,之后模拟基坑降水开挖与道路交叉施工,具体施工工况如表 3 所示。

表 3 有限元施工工况

Table 3 The finite element construction condition

施工工况	道路施工	基坑施工
1	初始地应力平衡	初始地应力平衡
2	—	围护结构施工
3	—	北 2、4 区挖一撑一
4	道路场地整平	北 2、4 区挖二撑二
5	塘渣层施工	北 2、4 区挖底
6	级配碎石层施工	北 1、3、5 区挖一撑一
7	水稳底基层、基层施工	北 1、3、5 区挖二撑二
8	—	北 1、3、5 区挖底
9	—	南 3 区挖一撑一
10	—	南 3 区挖二撑二
11	—	南 3 区挖底
12	—	南 1 区挖一撑一
13	—	南 1 区挖二撑二
14	—	南 1 区挖底
15	—	南 2B 区挖一撑一
16	—	南 2B 区挖二撑二、南 2A 区挖一撑一
17	—	南 2B 区挖底、南 2A 区挖二撑二
18	—	南 2A 区挖底

### 2.3 数值计算模型的验证

本研究将水泥稳定碎石基层和南3区挖底施工完成后邻近道路侧监测点的变形与数值模拟计算结果进行对比,以验证数值模拟计算模型的合理性。基坑临近道路侧的监测点布置如图6所示,南3区邻近道路侧分别为CX19监测点和CX20监测点。

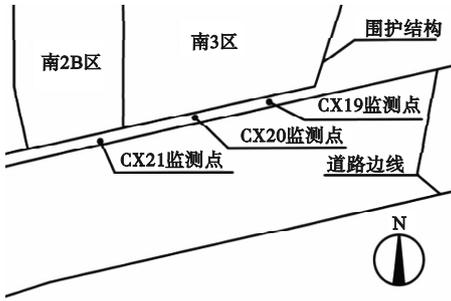


图6 邻近施工道路监测点平面布置图  
Fig.6 The layout plan of monitoring points adjacent to construction roads

取现场监测变形最大值所在的CX20点进行验证,水平位移曲线如图7所示。在南3区基坑开挖完成后,CX20监测点处数值计算得到的水平位移与实际监测得到的数据的规律和大小大致吻合,说明笔者采用的数值模型对基坑和邻近道路变形的模拟较为准确,模型参数的选取比较合理。

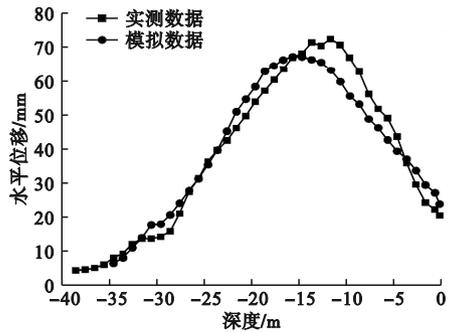


图7 CX20监测点水平位移曲线  
Fig.7 The horizontal displacement curves of CX20 monitoring point

## 3 计算结果及分析

### 3.1 道路振动施工对围护结构的影响

道路振动施工工况下,取南3区CX20

监测点所在的断面,其围护结构累计水平位移曲线如图8所示。

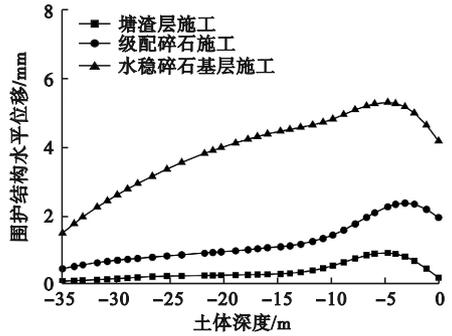


图8 道路施工工况下围护结构累计水平位移曲线  
Fig.8 The cumulative horizontal displacement curves of enclosure under road construction conditions

由图8可知,道路塘渣层施工和级配碎石层施工过程中,围护结构主要变形体现在0~10m;水泥稳定碎石基层施工时,塘渣层和级配碎石层已经形成形状稳定和密度较大的实体结构,力的传递更直接,因此围护结构产生的变形会更大一些,其累计最大位移值为5.26mm,远低于规范规定的报警值30mm。在振动荷载作用下,围护结构产生的变形很小,符合安全性标准。

### 3.2 基坑开挖对围护结构的影响

基坑降水施工过程中,南3区CX20监测点处深层土体的水平位移曲线如图9所示。

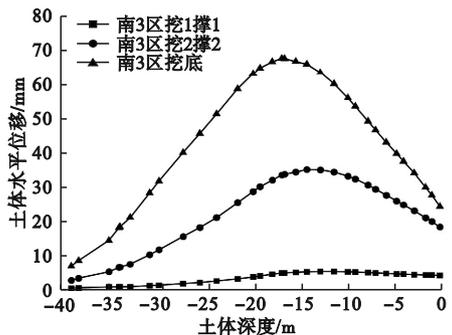


图9 南3区开挖工况下CX20点水平位移曲线  
Fig.9 The horizontal displacement curves of CX20 point under excavation condition in south 3 area

由图9可知,在开挖过程中,地下连续墙的变形向基坑内侧移动,水平位移最大值对应的点逐渐向右下方移动。工况南3区挖一

撑一的开挖深度较小,因此地下连续墙的水平位移较小;在工况南3区挖二撑二和挖底中,墙体的变形随着开挖深度的增加逐渐变大,到达最大值后,又逐渐减小,呈抛物线形。挖底时,地下连续墙旁的深层土体最大水平位移为67.66 mm,位于地表下17 m处。由此可见,水平位移大小随开挖深度的变化而变化。

### 3.3 基坑开挖对道路变形特性的影响

由于基坑采用分区开挖的原因,北区开挖对道路结构的影响较小,笔者主要针对南区特别是道路结构出现沉降和裂缝问题的南3区和南2B区开挖过程中,道路的竖向位移情况、变坡率及应力状态进行分析。取南3区近侧道路沉降最大处所在的横断面,其水平方向沉降曲线如图10所示。

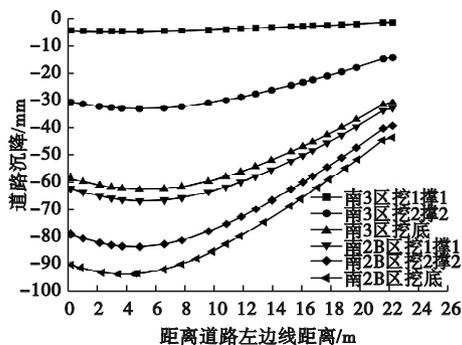


图10 道路水平方向沉降曲线

Fig. 10 The horizontal settlement curves of road

由图10可以看出,道路在南3区挖2撑2、挖底和南2B区挖2撑2工况下道路竖向位移的增量较大;其中,南3区挖底工况下道路沉降增量最大值为29.53 mm,在南2B区挖底工况下道路沉降最大值为93.94 mm。

道路横向变坡率计算方法可参见图11所示简化模型。  $x_1$  为原路面中心距道路边线的距离,  $x_2$  为最大沉降点距道路边线的距离,而  $y_1$  为原路面对应的沉降量,  $y_2$  为最大沉降量,即  $y_2 = S_{\max}$ 。因此,最大沉降横向变坡率为

$$\Delta_{\max} = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1};$$

$$\text{为 } \Delta_{\text{normal}} = \frac{y_2 - y_0}{x_2 - x_0}.$$

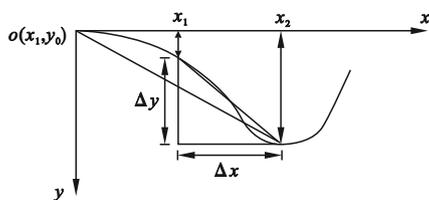


图11 差异沉降简化模型图

Fig. 11 The simplified model diagram of differential settlement

综上所述,最大变坡率处为距离道路中线左侧5 m处,该处沉降约92.26 mm,由横向变坡率公式可知,该处变坡率为0.32%,大于规定值0.3%<sup>[23]</sup>。南3区近侧道路水泥稳定碎石在不同工况下的应力状态如图12所示。

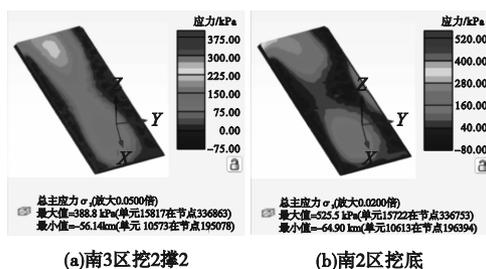


图12 南区不同工况下道路水稳层应力状态云图  
Fig. 12 The stress state cloud maps of the road water stabilization layer under different working conditions in the south area

由图12可知,道路水稳碎石层在南3区挖2撑2工况下应力值最大值为0.39 MPa,在南2区挖底最终工况下应力最大值为0.53 MPa,两个工况下道路水稳碎石层的最大拉应力值均大于其允许强度0.33 MPa<sup>[23]</sup>,且南2区挖底工况下应力值大于劈裂强度0.5 MPa<sup>[23]</sup>,则从道路沉降值、变坡率和应力值可以看出,如不采取其他加固措施,道路结构在南区施工过程中可能会出现裂缝等道路病害。

## 4 基坑加固措施

### 4.1 基坑加固设计方案

根据现场实际施工情况和施工经验,针对南3区开挖已经产生的围护结构和道路结

构的变形,对于基坑拟采用增加预应力和斜撑的方法进行加固,以减小基坑开挖导致的围护结构的变形和对道路沉降的影响。斜撑设计图纸如图 13 所示,由冠梁、斜支撑和搅拌桩墩体组成,其中斜撑间距 4.75 m,沿南区地连墙连续排列,搅拌桩加固墩体顶面深度为 14.4 m,其有限元材料参数见表 4。

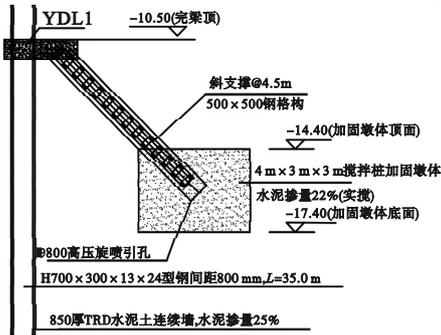


图 13 斜撑设计图

Fig. 13 The design drawing of diagonal bracing

表 4 斜撑结构计算参数

Table 4 The calculation parameters of slant support

结构名称	天然重力	弹性模	泊松比
	密度/(kN·m <sup>-3</sup> )	量/10 <sup>5</sup> MPa	
冠梁	25.0	300	0.2
斜支撑	78.5	2 100	0.2
墩体	18.2	2.35	0.2

型钢支撑预应力调整方案:第一道支撑由原设计预应力值 5 000 kN 增加到 8 000 kN,第二道支撑由原设计预应力值 7 000 kN增加到 10 000 kN。

根据加固方案对比 4 种情况下围护结构的水平位移和道路沉降的变化规律,分析不同加固措施对基坑和道路的控制效果。

#### 4.2 基坑围护结构变形控制效果

基坑开挖完成后,采用加固措施前后维护结构监测点 CX20 的深层土体水平位移曲线如图 14 所示。由图可知,单独采用斜撑加固、预应力加固、未加固时 CX20 监测点的水平位移最大值分别为 52.48 mm、60.24 mm、67.66 mm;采用斜撑和增加预应力两种加固措施后,围护结构 CX20 监测点的变形最小,

此时土体水平位移最大值为 48.06 mm, CX20 监测点的水平位移最大值比单独采用斜撑加固、预应力加固和未加固时分别减小了 4.42 mm、12.18 mm、19.6 mm,与未采取加固措施相比,水平位移最大值减小了 28.97%,加固效果明显,满足《建筑基坑工程监测技术标准》中基坑设计安全等级二级预警值 50~60 mm。

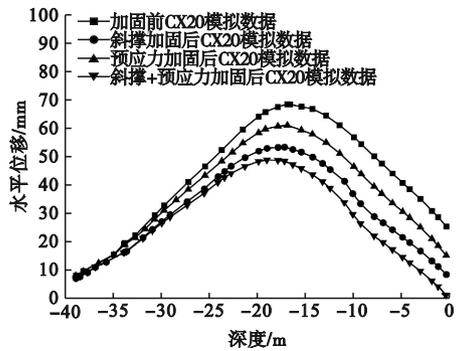


图 14 CX20 监测点加固前后土体水平位移曲线

Fig. 14 The horizontal displacement curves of soil mass before and after reinforcement at CX20 monitoring

#### 4.3 道路变形控制效果

沿道路纵向在南 2B 区挖底工况下道路沉降最大值所在的纵断面取一条测线,研究加固措施对道路竖向位移的影响。基坑开挖完成后采用加固措施前后在建道路的竖向位移曲线如图 15 所示。其中,x 轴为道路位置距离起点的距离,桩号 170~260 m 为南 3 区邻近道路。

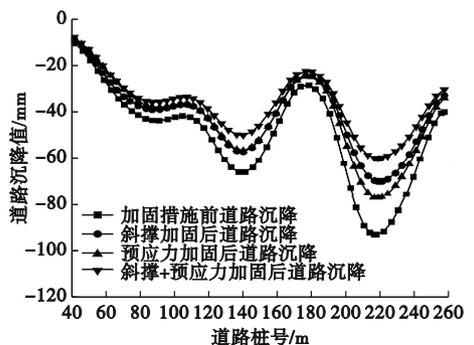


图 15 采取加固措施前后道路沉降曲线

Fig. 15 The road settlement curves before and after reinforcement measures

由图 15 可知,加固措施主要对南 2 区、南 3 区道路沉降的影响较大;南 2 区和南 3 区单独采用斜撑加固、预应力加固和未加固时,道路的沉降最大值分别为 57.94 mm、57.51 mm、66.90 mm 和 70.82 mm、78.03 mm、93.94 mm。南 2 区、南 3 区采用综合加固措施下道路的竖向位移最大值分别为 50.86 mm、60.79 mm,比单独采用斜撑加固、预应力加固和未加固时,道路的沉降分别减小了 7.08 mm、6.65 mm、16.04 mm 和 10.03 mm、17.24 mm、33.2 mm。与未采用加固措施相比,道路沉降最大值减小了 35.34%。综上所述,仅采用预应力和斜撑加固措施对道路沉降的控制均不明显,建议采用综合加固措施。

## 5 结 论

(1)道路振动施工对围护结构产生的变形最大值为 5.26 mm,围护结构产生的变形很小,符合安全性标准;随着基坑工程的进行,基坑内围护结构的变形呈逐步增大趋势;南 3 区 CX20 监测点在开挖到基坑底部时的最大水平位移为 67.66 mm,在地面以下 17m 处,土体水平位移大小随开挖深度的变化而变化。

(2)基坑开挖到坑底时,道路所受影响最大,道路最大沉降值为 93.94 mm,最大应力为 0.53 MPa;最大变坡率处为距离道路中线左侧 5 m 处,该处沉降值约为 92.26 mm,变坡率为 0.32%。从道路沉降值、变坡率和应力值可以看出,如不采取其他加固措施,道路结构从南 3 区挖二撑二开始就可能开始出现裂缝等道路病害。

(3)单独采用斜撑或者采用预应力的加固措施对基坑进行加固后,道路的竖向位移改变较小,对于控制基坑围护结构水平位移则效果较好。单独采用斜撑的加固效果要优于单独采用预应力;采用斜撑和预应力综合加固措施后,围护结构处 CX20 监测点的最大水平位移和道路沉降最大值为分别减小了

28.97% 和 35.34%,加固效果明显。

## 参考文献

- [1] 宋福贵.深基坑开挖对邻近高速铁路基变形的影响及隔离桩加固效果分析[J].城市轨道交通研究,2022,25(6):112-117.  
(SONG Fugui. Influence of deep foundation pit excavation on adjacent high-speed railway subgrade deformation and analysis of isolation pile reinforcement effect [J]. Urban rail transit research, 2022, 25(6): 112-117.)
- [2] 杨东雷,李杰,曹生辉,等.深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响分析[J].建筑结构,2022,52(增刊1):2554-2560.  
(YANG Donglei, LI Jie, CAO Shenghui, et al. Analysis of the influence of deep foundation pit excavation on the deformation of adjacent subway tunnels [J]. Building structure, 2022, 52(S1): 2554-2560.)
- [3] 杨忠平,刘浩宇,周小涵,等.深厚淤泥土深长基坑开挖对邻近建筑的影响[J].地下空间与工程学报,2022,18(3):1015-1024.  
(YANG Zhongping, LIU Haoyu, ZHOU Xiaohan, et al. The impact of deep and long foundation pit excavation with deep silt on adjacent buildings [J]. Journal of underground space and engineering, 2022, 18(3): 1015-1024.)
- [4] 冉启仁,王旭,王博林,等.基坑开挖对邻近建筑桩基弯矩和变形影响的模型试验[J].岩土工程学报,2021,43(增刊1):132-137.  
(RAN Qiren, WANG Xu, WANG Bolin, et al. Model test of the influence of foundation pit excavation on the bending moment and deformation of pile foundation of adjacent buildings [J]. Journal of geotechnical engineering, 2021, 43(S1): 132-137.)
- [5] 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 Fayun, et al. Research and prospect on the impact of soft soil foundation pit excavation on adjacent existing tunnels [J]. Journal of China highway engineering, 2021, 34(3): 50-70.)
- [6] MANGUSHEV R A, OSOKIN A I, GARNYK L V. Experience in preserving adjacent buildings during excavation of large foundation pits under conditions of dense development [J]. Soil mechanics and foundation engineering, 2016, 53: 291-297.
- [7] WESTERMANN K, MEIER J, PITTELOU L. Excavation pit and foundation of a research center [J]. Bautechnik, 2020, 97(12): 878-885.
- [8] 高广运,高盟,杨成斌,等.基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J].岩土工程学报,2010,32(3):453-459.

- (GAO Guangyun, GAO Meng, YANG Chengbin, et al. Research on the influence of foundation pit construction on the deformation of operating subway tunnels and its control [J]. Journal of geotechnical engineering, 2010, 32(3): 453 - 459.)
- [9] 王定军, 王尉行, 刘俊景, 等. 基坑开挖对下卧隧道变形影响分析及合理加固范围研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(4): 43 - 47.  
(WANG Dingjun, WANG Weixing, LIU Junjing, et al. Analysis of the influence of foundation pit excavation on the deformation of the underlying tunnel and study on the reasonable reinforcement range [J]. Urban rail transit research, 2018, 21(4): 43 - 47.)
- [10] 温淑荔. 深基坑开挖对紧邻建筑物影响分析及加固措施优化研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(4): 98 - 103.  
(WEN Shuli. Impact analysis of deep foundation pit excavation on adjacent buildings and optimization of reinforcement measures [J]. Modern tunnel technology, 2020, 57(4): 98 - 103.)
- [11] 宋福贵. 深基坑开挖对邻近高速铁路基变形的影响及隔离桩加固效果分析[J]. 城市轨道交通研究, 2022, 25(6): 112 - 117.  
(SONG Fugui. Influence of deep foundation pit excavation on adjacent high-speed railway subgrade deformation and analysis of isolation pile reinforcement effect [J]. Urban rail transit research, 2022, 25(6): 112 - 117.)
- [12] XU W Z, LIU B H, LIU J S, et al. Interactions of foundation pit on the underlying adjacent existing underground structures [J]. Geofluids, 2022, 2022: 5675173(8).
- [13] ZHAO X, LI Z W, DAI G L, et al. Numerical study on the effect of large deep foundation excavation on underlying complex intersecting tunnels [J]. Applied sciences, 2022, 12(9): 4530(18).
- [14] LI H, TANG Y J, LIAO S M, et al. Structural response and preservation of historic buildings adjacent to oversized deep excavation [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2021, 35(6): 04021095(15).
- [15] SHI H, JIA Z L, WANG T, et al. Deformation characteristics and optimization design for large-scale deep and circular foundation pit partitioned excavation in a complex environment [J]. Buildings, 2022, 12(9): 1292 (28).
- [16] WEI G, QI Y J, CHEN C L, et al. Analysis of the protective effect of setting isolation piles outside the foundation pit on the underpass tunnel side [J]. Transportation geotechnics, 2022, 35: 100791.
- [17] YANG T, XIONG S Y, LIU S L, et al. Numerical analysis of the influence of deep foundation pit construction on adjacent subway stations in soft soil areas [J]. Advances in civil engineering, 2022, 2022: 6071868(14).
- [18] LIU B, SHAO C M, XU W. Influenced zone of deep excavation on adjacent tunnel displacement and control effect of ground improvement in soft soil [J]. Applied sciences, 2022, 12: 9047(18).
- [19] ZHENG Y W, GONG Q M, ZHENG Y Z. Influence of foundation pit excavation on adjacent railways and strengthening measures [J]. Advanced materials research, 2013, 838/839/840/841: 1256 - 1262.
- [20] KANG L, WANG Y W, CAO J H, et al. Optimization design of deep foundation pit support scheme under traffic dynamic load [C]//IOP conference series: earth and environmental science. Kamakura, Japan: IOP publishing, 2021: 022006.
- [21] 赵保, 田雷, 赵伟阳, 等. 杭州富水粉砂水泥土HSS模型参数实验研究[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(1): 53 - 59.  
(ZHAO Bao, TIAN Lei, ZHAO Weiyang, et al. Experimental study on HSS model parameters of water rich silty sand cement soil in Hangzhou [J]. Journal of Zhejiang university of technology, 2021, 49(1): 53 - 59.)
- [22] 刘鑫. 粗粒料填筑高路堤稳定性分析及施工关键技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
(LIU Xin. Stability analysis of high embankment filled with coarse aggregate and research on key construction technologies [D]. Changchun: Jilin University, 2019.)
- [23] 裴宏宇. 基于粉砂土道路振动施工与近接基坑施工相互影响分析[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2018.  
(PEI Hongyu. Analysis on interaction between silty sand road vibration construction and close to foundation pit construction [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2018.)

(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)