

中文引用格式:郭延辉,马蕊,毛石林,等.圆砾地层深大基坑开挖支护对临近既有道路的影响[J].中国安全科学学报,2025,35(1):94-102.

英文引用格式:GUO Yanhui, MA Rui, MAO Shilin, et al. Effects of excavation support of deep and large foundation pit on gravel stratum on adjacent existing road[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(1):94-102.

圆砾地层深大基坑开挖支护对临近 既有道路的影响*

郭延辉¹副教授,马蕊¹,毛石林²正高级工程师,钱勇²高级工程师,
丁明忠²工程师,宋琴²高级工程师

(1 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院,云南 昆明 650093;

2 云南建投第六建设有限公司,云南 玉溪 653199)

中图分类号:X948

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.01.0025

资助项目:云南省基础研究计划面上项目(202301AT070454);云南省基础研究计划重点项目(202501AS070107);云南省兴滇英才支持计划青年人才专项项目(KKXX202467043);国家大学生创新创业训练计划项目(2021106740085,2021106740086)。

【摘要】 为防止深大基坑开挖支护引起临近既有道路坍塌等事故灾害的发生,确保深大基坑施工过程中临近道路的安全运行,以昆明市临近城市主干道路某深大基坑工程为例,在现场深入调研的基础上,采用岩土与隧道有限元分析软件(MIDAS GTS NX)仿真计算,并结合现场监测,分析现有开挖支护方案下基坑支护结构的受力与变形特征及临近既有道路的变形特征。研究表明:基坑开挖支护结束后,支护桩、锚索的受力与变形均处于设计允许范围内。临近既有道路的位移随基坑开挖深度的增加而增大,在基坑开挖结束后位移趋于稳定。既有道路的变形最大值出现在距基坑边界2.5倍开挖深度的位置,且该变形量未达到基坑开挖引起的道路位移报警阈值,认为现有支护方案可保障基坑及既有道路的安全。

【关键词】 圆砾地层; 深大基坑; 开挖支护; 既有道路; 变形影响; 现场监测

Effects of excavation support of deep and large foundation pit on gravel stratum on adjacent existing road

GUO Yanhui¹, MA Rui¹, MAO Shilin², QIAN Yong², DING Mingzhong², SONG Qin²

(1 Faculty of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650093, China; 2 Yunnan Construction Investment No. 6 Construction Co., Ltd., Yuxi Yunnan 653199, China)

Abstract: To prevent accidents and disasters, such as the collapse of existing roads nearby, caused by deep and large foundation pit excavation and support, it is necessary to ensure the safe operation of adjacent roads during the construction of deep and large foundation pits. Taking a deep and large foundation pit project near a city trunk road in Kunming as an example, on the basis of in-depth research at the site, the three-dimensional finite element numerical simulation software-new eXperience of

GeoTechnical analysis system(MIDAS GTS NX) is used for simulation and calculation, and combined with on-site monitoring, to analyse the force and deformation characteristics of the foundation pit support structure and the deformation characteristics of the adjacent existing road under the existing excavation and support scheme. The study results indicated that the forces and deformations of the supporting piles and anchor cables were within design limits after the foundation pit excavation and support were complete. The displacement near the existing road increased with the increase of pit excavation depth, and become stable after the excavation was completed. The maximum deformation of the existing road occurred at a position 2.5 times the excavation depth from the foundation pit boundary. Furthermore, the deformation did not reach the alarm threshold for road displacement caused by foundation pit excavation. Thus, the existing support scheme can ensure the safety of both the foundation pit and the adjacent road.

Keywords: rounded gravel stratum; deep and large foundation pit; excavation support; existing road; deformation impact; site monitoring

0 引言

随着城市建设的不断发展,基坑工程面临着越来越多的问题^[1]。为建设高大建(构)筑物或获取更大的利用空间,建筑物只能向地下更深部发展,加上基坑工程周围环境复杂,紧邻主要城市道路,一旦基坑出现道路坍塌工程事故,必将危及周边安全,甚至可能造成严重的财产损失、人员伤亡和不良社会影响^[2-3]。因此,研究深大基坑开挖支护对临近既有道路的变形影响显得尤为重要。

目前,针对基坑开挖支护引起周围环境变形,国内外学者大多通过数值仿真和现场监测等手段开展研究。如汪东林等^[4]结合现场监测和数值模拟,研究既有紧邻高速公路偏压作用下深基坑开挖过程中围护桩位移及其路基沉降特征;焦宁等^[5]开展了土岩复合地层中深基坑开挖的现场监测和数值模拟研究,分析了在土岩复合地层中深基坑开挖对邻近管线变形的影响;郭延辉等^[6]基于三维数值模拟,分析了深基坑施工对邻近既有高压天然气管道安全的影响;叶帅华等^[7]根据基坑周边土体、支护结构、邻近建筑物监测数据,以及借助 Plaxis 3D 软件模拟基坑开挖,分析了基坑变形特性及对邻近建筑物的影响;雷华阳等^[8]利用有限元方法研究了不同基坑开挖深度、不同路基至基坑距离等因素下基坑开挖对路基的影响特征;王培鑫等^[9]基于现场实测数据分析了某紧邻既有铁路线的基坑开挖过程中路基与基坑的变形、沉降原因,并提出治理措施;ZHAO Jinpeng 等^[10]针对以风化花岗岩为基岩的上软下硬土层的基坑工程,通过现场监测和数值模拟研究了明挖法基坑支护结构和基坑周边环境的变形响应;FENG Zheyuan 等^[11]采用有限元软件模拟了苏州某

对称基坑,并通过现场实测资料验证其可靠性,探讨了软土基坑开挖过程中围护结构及周围土体的变形机制。综上所述,虽然众多学者对基坑开挖支护引起周边环境的变形开展了大量的研究,但因地层条件、工程类型、支护方式、周边环境的复杂性,深大基坑开挖支护对临近既有道路变形影响方面的研究还不足。

鉴于此,笔者以昆明市某圆砾地层深大基坑工程为研究对象,采用岩土与隧道有限元分析软件(MIDAS New eXperience of GeoTechnical analysis System, MIDAS GTS NX)模拟和现场实测,研究深大基坑开挖对临近既有道路的变形影响及支护结构的可靠性;对比分析施工过程中监测数据及数值模拟结果,验证计算方法和参数选取的可靠性,以期同类深大基坑的设计、施工提供参考依据。

1 临近既有道路深大基坑工程实例

1.1 基坑工程概况及地理位置

以昆明市某基坑为例,该基坑平面形状近似矩形,东西方向长约 465 m,南北方向宽 198 m,周边长度约 1 340 m,平面面积约 70 000 m²,开挖深度约 18 m,属深大基坑。基坑与既有道路位置如图 1 所示,基坑西侧道路为沔源路,长度约 206 m,宽为 48 m,基坑距用地红线 8 m,距沔源路约 12 m,距基坑边界 1.5H₀(H₀为开挖深度)。沔源路边缘埋设电缆管道、排污管、交通信号、燃气管道、给水管、雨水管和城市照明等线路管道,埋深不尽相同,对变形较敏感。

1.2 基坑工程地质及水文地质条件

项目场地位于昆明滇池断陷盆地北端,盆地地形



图1 基坑与既有道路位置

Fig. 1 Location of pit and existing road

状呈不规则状,但总体上南北较长,东西较窄,地面标高介于 1 901.89~1 907.57 m,最大高差约 5.68 m。场地的地基土主要为第四系人工堆积层:人工填土;第四系冲洪积层:黏土、圆砾、粉土;第四系沼泽相沉积层:泥炭质土、有机质土。其中,圆砾地层是支护结构穿越的主要地层区域,占揭露面积 85%以上。

基坑场地内观测到的静止水位埋深介于 1.6~

5.2 m,水位标高介于 1 899.03~1 903.48 m,整个场地水位东高西低,向盘龙江径流排泄,地下水水面有一定的坡降。含水层主要有圆砾地层③、圆砾地层④、圆砾地层⑤、圆砾地层⑥等,以上地层均属强透水地层,富含水层,基坑地下水补给范围广,水量极为丰富,水位埋藏浅。基底开挖揭露至圆砾地层(单元层号④)。

1.3 基坑支护设计方案

该基坑西侧洋源路 AB 剖面的支护结构剖面如图 2 所示。基坑主要支护形式为支护桩+压密注浆+锚索+坑内高压旋喷地基加固。支护桩采用旋挖钻孔灌注桩,桩径 1.2 m,桩间距为 1.5 m,桩身混凝土等级为水下 C35,保护层厚度为 50 mm。洋源路侧基坑支护桩桩长 45 m,桩数量为 72。锚索采用可回收压力分散型锚索,锚索竖向布置为 8 道,锚索水平间距为 1.5~3 m,竖向间距为 2~4 m,锚索自由端和锚固段长度各不相同(图 2),与水平面呈 20°。预应力锚索极限抗拔承载力设计值为 423.5 kN。注浆孔间距为 1.5 m,位于灌注桩之间。

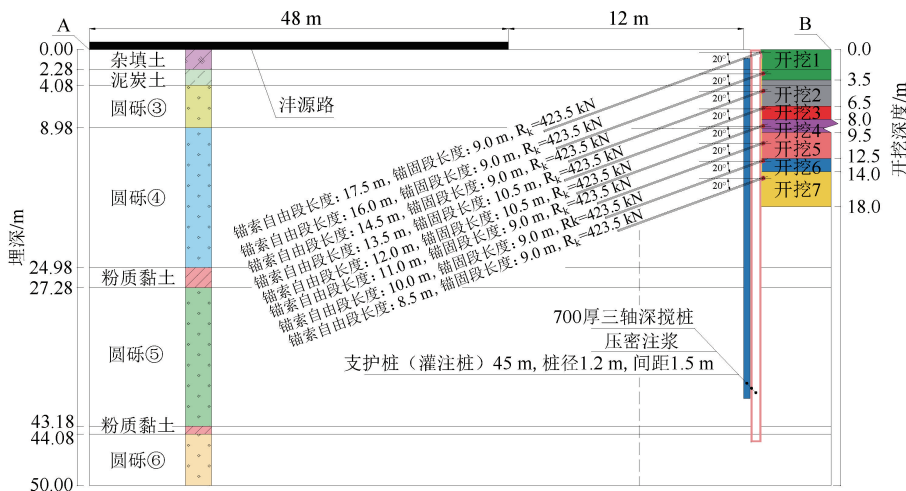


图2 基坑支护结构剖面

Fig. 2 Section of pit support structure

2 基坑开挖支护对道路的影响分析

2.1 基坑计算模型

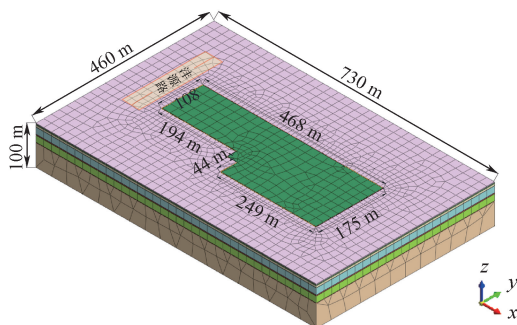
基坑模型边界的长度、宽度、深度分别为 730、460、100 m。基坑周长 1 286 m,开挖深度 18 m。模型节点总数为 128 601,单元个数为 228 602,基坑整体形状如图 3a 所示,支护结构模型如图 3b 所示。

假设土层厚度均匀,土层分布如下:杂填土为 2.28 m,泥炭土为 1.80 m,圆砾地层③为 4.90 m,圆砾地层④为 16.00 m,粉质黏土为 2.30 m,圆砾地层

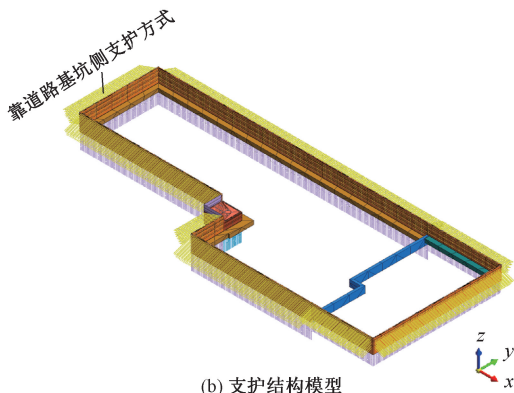
⑤为 15.90 m,粉质黏土为 0.90 m,圆砾地层⑥为 55.92 m。岩土体采用 Hardening-Soil (HS) 模型,支护结构采用各向同性的弹性本构模型。建立模型时支护桩采用 1 D 梁单元来模拟,锚索采用 1 D 植入式桁架单元来模拟,混凝土板采用 2 D 板单元,高压旋喷加固、压密注浆、挡土墙采用 3 D 实体单元。模型的边界条件采用自动约束的地基边界,自重载荷。

2.2 计算参数选取

在岩土工程数值仿真中,土的本构模型是一个



(a) 基坑整体模型



(b) 支护结构模型

图 3 计算模型

Fig. 3 Computational model

重要的因素,选取 HS 模型,该模型基于莫尔-库伦准则的同时考虑土体加卸载应力路径以及非线性应力应变关系,能够较好模拟基坑开挖卸荷引起的地层变形^[12]。采用 HS 模型模拟时相关参数取经验值,圆砾取 $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} = 3E_{oed}^{ref}$,杂填土、泥炭土与粉质黏土取 $E_{ur}^{ref} = 2E_{50}^{ref} = 2E_{oed}^{ref}$ ^[13],其中,参考压强 p_{ref} 为 100 kPa, E_{50}^{ref} 为三轴试验中参考压强下极限强度 50%时的割线刚度, E_{oed}^{ref} 为主压密试验中参考压强下的切线刚度, E_{ur}^{ref} 为卸载/加载刚度。破坏比 R_f 取 0.9,孔隙率取 0.6,应力水平相关幂指数 m 的取值范围为 $0.5 \leq m \leq 1$ (硬土取 0.5,软土取 1)。

根据地质勘测资料,各地层的物理力学参数见表 1,结构物理力学参数见表 2。

表 1 地层物理力学参数

Table 1 Physical-mechanical parameters of soils

地层	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	三轴割线刚度/(kN·m ⁻²)
杂填土	7.0	0.28	18.7	19.5	8.5	3 850
泥炭土	12.1	0.40	13.2	20.0	6.0	6 655
圆砾土	196.7	0.46	19.4	9.4	41.0	108 185
粉质黏土	16.0	0.30	19.0	40.0	12.0	8 800

表 2 结构物理力学参数

Table 2 Structural physical and mechanical parameters

结构形式	弹性模量/MPa	泊松比	容重/(kN·m ⁻³)
锚索	195 000	0.30	78.5
支护桩	31 500	0.20	25.0
压密注浆	25 000	0.30	23.0
高压旋喷加固、挡土墙	31 500	0.20	25.0

2.3 基坑开挖支护施工工况

基坑开挖前设置工况初始应力平衡及位移清零,随后钝化开挖,激活各个工况下的支护结构。模拟开挖、支护具体施工步骤如图 4 所示。

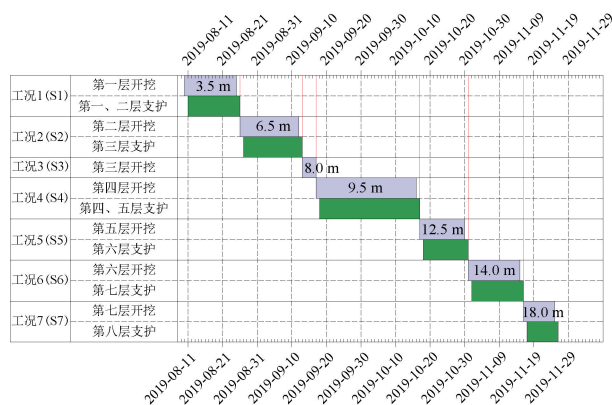


图 4 施工工况

Fig. 4 Construction conditions

2.4 基坑开挖支护桩顶受力分析

从受力情况来看,开挖结束后,支护桩最终轴力中间大,两端小,桩结构单元所受最大轴力为 593 kN(图 5)。数值模拟表明:桩结构单元轴向承载力设计值满足工程要求。

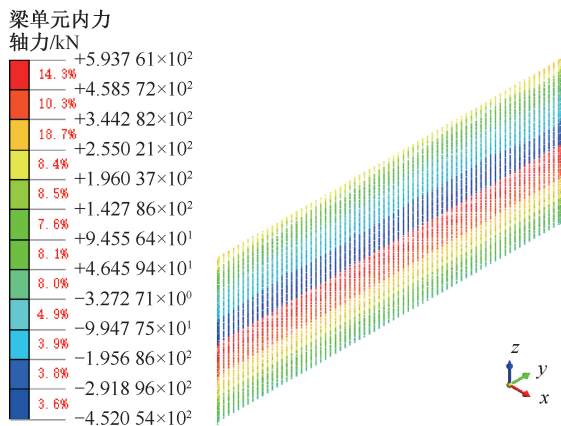


图 5 支护桩轴力分布

Fig. 5 Axial force distribution of supporting piles

2.5 基坑开挖锚索受力分析

锚索轴力分布如图 6 所示,由图 6 可知:每层锚索自由端轴力均大于锚固端,且呈现由自由端向锚固端逐渐减小的趋势,同时,随着埋深的增加,锚索所受轴力均呈先增大后减小。锚索所受最大轴力为 300 kN,位于第 4、5 道锚索自由端,轴力值在安全范围以内,支护效果良好。

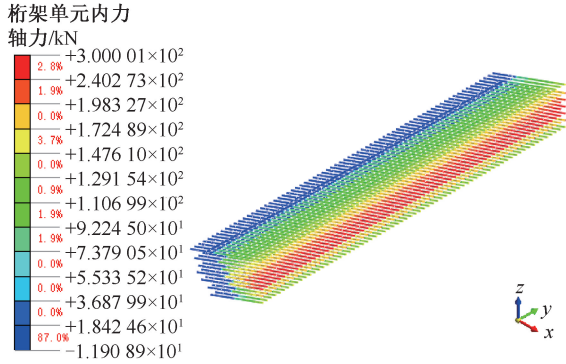


图 6 锚索轴力分布

Fig. 6 Anchor cable axial force distribution

2.6 基坑开挖支护临近道路变形分析

基坑开挖是卸荷的过程,开挖导致初始应力平衡场被破坏,应力重分布,加上土体自重,基坑外土体向临空面移动,从而产生位移^[14]。基坑开挖至坑底时临近道路位移分布如图 7 所示。其中,最大水平位移值为 11.78 mm,最大竖向位移为 7.51 mm。从总体上看,道路位移值都很小,说明支护设计具有一定的合理性,基坑开挖支护过程对道路影响较小。

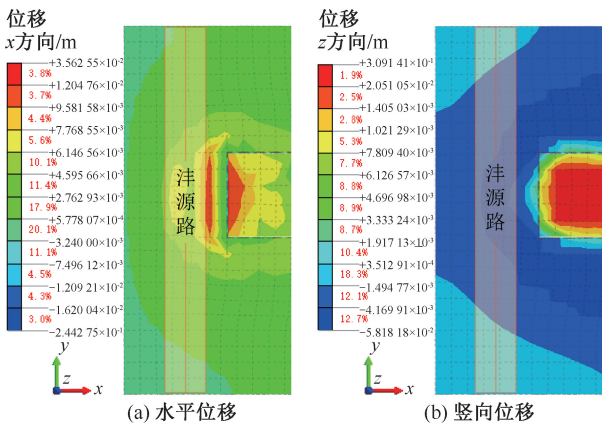


图 7 临近道路位移分布

Fig. 7 Displacement distribution of adjacent road

基于模拟结果研究基坑不同开挖深度对道路变形的影响特征,不同开挖深度下道路竖向位移如图 8 所示,以道路监测点 F1-6—F10-6 为例。由图 8 可知:随基坑开挖深度增加道路竖向位移也增大;道路水平位移的变化特征同竖向位移,随基坑开

挖深度的增加而增大。

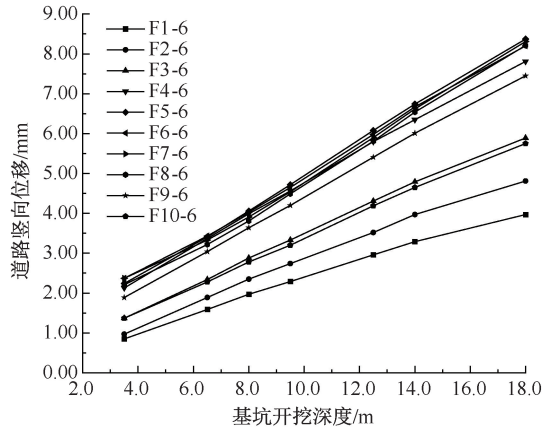


图 8 不同开挖深度下道路竖向位移

Fig. 8 Vertical displacement of road at different excavation depths

不同道路位置位移如图 9 所示。从图 9a、图 9b 可以看出,当距离 $0 < L < 0.8H_e$ (L 为距基坑边界距离)时,地层发生隆起;当距离 $0.8H_e < L < 2.5H_e$ 时,道路竖向位移和向坑内水平位移逐渐增大,最大位移值位于距基坑边界 $2.5H_e$ 处。当距离 $2.5H_e < L < 5.0H_e$ 时,道路竖向位移和向坑内水平位移逐渐减小;当距离 $L > 5.0H_e$ 时,道路竖向位移和向坑内水平位移受基坑开挖影响可忽略不计。由图 9c、图 9d 可知:沿道路方向越靠近基坑边界的道路位置位移越大,向两端逐渐减小。

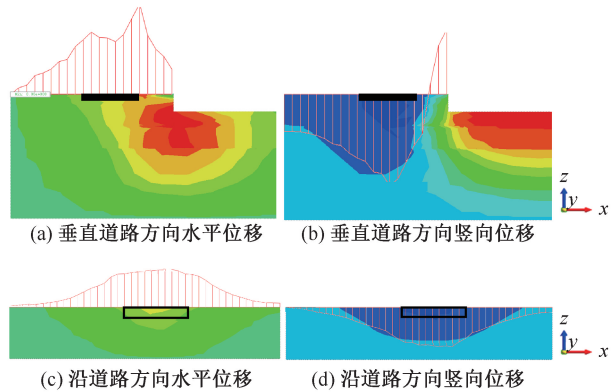


图 9 不同道路位置位移

Fig. 9 Displacement of different road positions

3 临近道路深大基坑监测与分析

3.1 监测项目及方法

根据《建筑基坑工程监测技术标准》^[15],为保证基坑开挖后临近既有道路的安全使用,监测基坑临近道路、支护桩及锚索。编号 F 系列为基坑西侧道路泮源路的监测点编号。支护桩顶竖向位移监测

点位置同水平位移。沔源路侧锚索编号从上到下依次为 M* -001—M* -070,该侧锚索内力监测点布置在 M* -032。基坑现场监测布设方法及数量见表 3。

表 3 现场监测布设方法及数量

Table 3 On-site monitoring deployment method and quantity

现场监测项目	布设方法	数量	监测点编号
道路竖向位移	间距为 6m,布设 10 排测点,每排共布设 8 个	80	F1-1—F1-8、F2-1—F2-8、F3-1—F3-8、F4-1—F4-8、F5-1—F5-8、F6-1—F6-8、F7-1—F7-8、F8-1—F8-8、F9-1—F9-8、F10-1—F10-8
桩顶水平位移	每隔 15~20 m 布设一个	5	WY63、WY64、WY65、WY66、WY67
桩顶竖向位移	每隔 15~20 m 布设一个	5	W63、W64、W65、W66、W67
锚索内力	布设在具有代表性部位,数量为总数的 1%~3%,每层竖向保持一致	6	M1-032—M6-032

基坑临近道路及道路侧支护结构现场监测点布置如图 10 所示。

3.2 道路侧支护桩顶位移监测分析

基坑开挖时坑内卸荷,支护桩后土体产生主动压力,导致支护桩向坑内的位移,基坑稳定性会受到影 响,周边既有道路可能因基坑坍塌而无法使用。因此,需监测分析支护桩顶位移。

图 11 为支护桩顶监测点水平、竖向位移累积曲线,其中,水平位移累积曲线纵坐标正值表示向坑内位移,负值表示向坑外位移。由图 11 可知:基坑开挖过程中,桩顶水平位移最大值为 17.00 mm,桩顶最大水平位移介于基坑开挖深度的 0.06%~0.10%,整体上呈现阶梯状变化,能够反映出在基坑开挖支护完成后存在一段时间位移不发生变化;支护桩顶竖向位移各监测点变化趋势相似,随基坑的开挖不断增大。W66、W65、W64 竖向位移高于 W63、W67,说明基坑中部支护桩顶竖向位移较两端大,其最大值为 17.28 mm,未达到报警值。

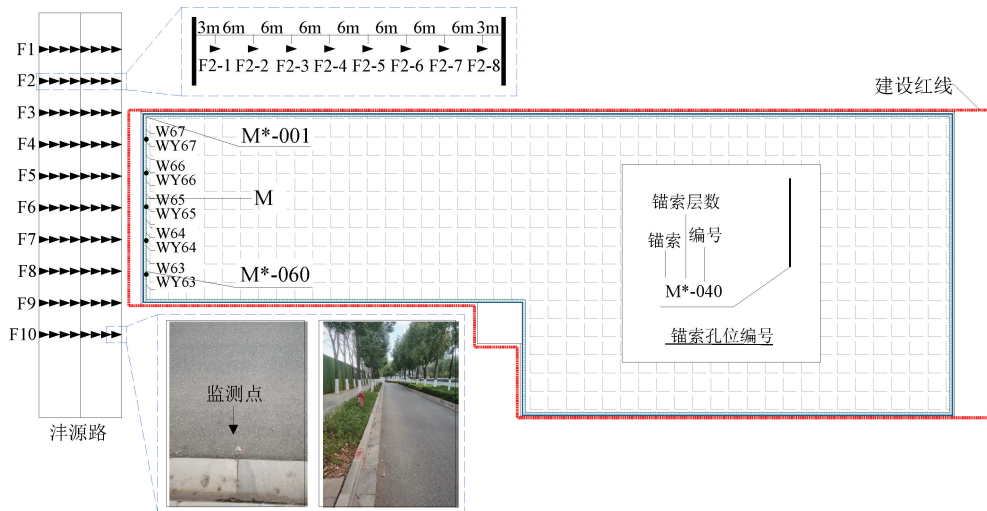


图 10 临近道路及道路侧支护结构现场监测点布置

Fig. 10 On-site monitoring point layout of neighboring roads and roadside support structures

3.3 道路侧锚索内力监测分析

取监测点 M1-032、M2-032、M3-032、M4-032、M5-032、M6-032 来分析锚索内力变化特征,如图 12 所示。由图 12 可知:基坑开挖阶段(2019 年 12 月 20 日之前)预应力锚索内力波动相对较大,基坑开挖结束后内力波动在一个相对稳定的数值范围内。锚索极限抗拔承载力设计值为 423.5 kN,锚索利用率为 14%~50%,内力值未超过设计允许范围,可保证基坑的安全。同时,锚索内力随埋深先增大

后减小,与数值模拟特征相符。

3.4 既有道路位移监测分析

选取监测点 F8-1、F8-2、F8-3、F8-4、F8-5、F8-6、F8-7、F8-8 绘制变形曲线,分析距基坑开挖边缘不同距离下道路沉降的变化情况,它们分别距基坑开挖边缘 72、66、60、54、48、42、36、30 m;选取与基坑侧平行且最近的监测点 F1-8、F2-8、F3-8、F4-8、F5-8、F6-8、F7-8、F8-8、F9-8、F10-8 来分析基坑开挖边缘平行线上道路不同监测点位置的变形情

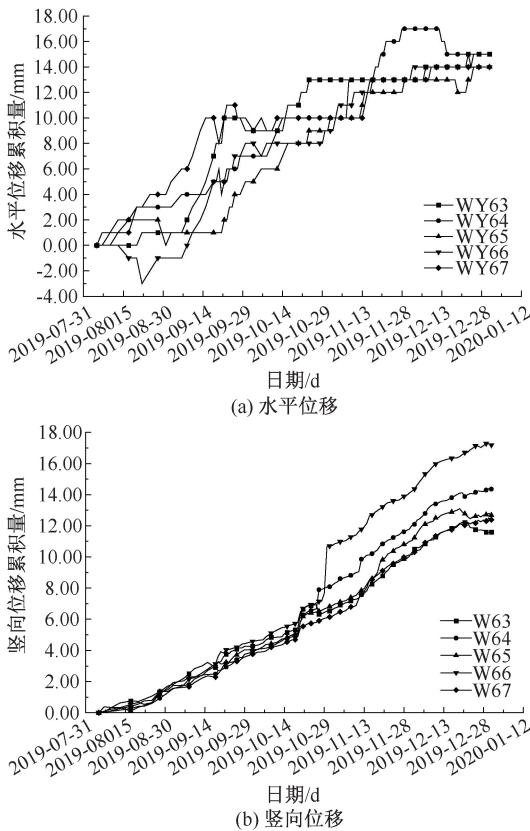


图 11 支护桩顶位移

Fig. 11 Displacement of support pile tops

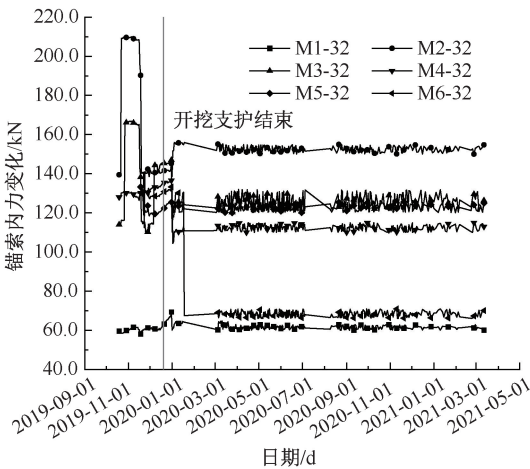


图 12 锚索内力监测

Fig. 12 Anchor cables internal forces monitoring

况,如图 13 所示。

从图 13 可以看出,基坑开始监测时间为 2019 年 4 月 26 日,沔源路侧基坑现场开挖时间为 2019 年 8 月 10 日,在此之前沔源路已发生位移,主要由于前期支护桩、止水帷幕、压密注浆及地下连续墙施工,对土体变形有一定的影响。2019 年 12 月 20 日之后,道路侧基坑开挖结束,道路沉降逐渐趋于平

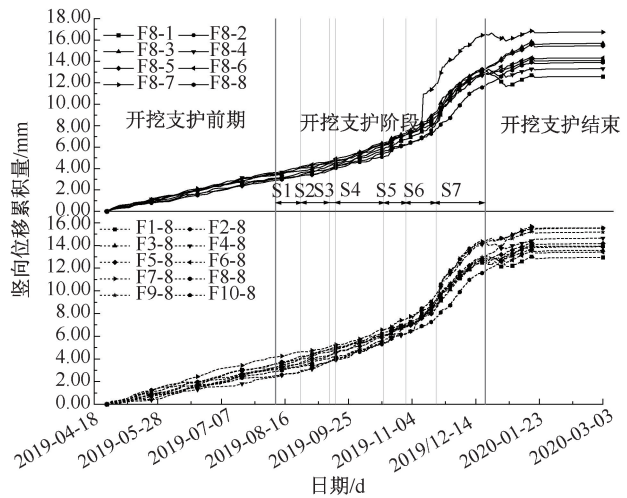


图 13 临近道路竖向位移

Fig. 13 Vertical displacement of adjacent roads

稳。18 个监测点的沉降曲线变化趋势基本一致,均随着基坑开挖深度的加大,沉降变形逐步增大,开挖至基底时沉降为最大值。同一列的监测点数据之间无明显特征。由图 13 上部分可知:监测点 F8-7 的沉降曲线变化趋势最大,其沉降值为 13.84 mm,说明距基坑开挖边缘较近区域的沉降值较大。由图 13 下部分可知:10 个测点沉降变化曲线中,总体上 F7-8 测点的沉降值最大,在工况 7 下的沉降值为 11.43 mm,小于警戒值。

根据全部监测点的沉降速率来看,S1、S2、S3、S4 阶段,道路平均沉降速率缓慢增加,分别为 0.03、0.03、0.04、0.04 mm/d;S5、S6 阶段平均沉降速率开始上升到 0.08、0.10 mm/d;S7 阶段即基坑开挖至坑底,道路平均沉降速率加快到 0.14 mm/d。施工后期 S5—S7 阶段,基坑开挖深度的增加引起了道路沉降速率的增加。

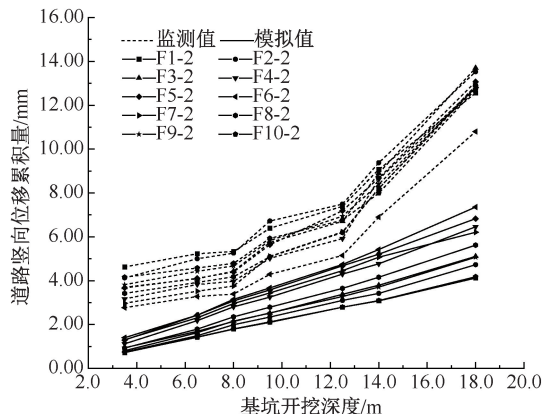


图 14 临近道路竖向位移监测值与模拟值对比

Fig. 14 Comparison between measurement and simulation of vertical displacement of adjacent roads

3.5 道路位移模拟与实测对比分析

选取沔源路侧监测点 F1-2—F10-2 的模拟值与监测值进行比较分析,结果如图 14 所示。由图 14 可知:模拟各工况后道路沉降的最大值为 7.36 mm,与现场监测值的 13.70 mm 相差不大,模拟值与监测值的沉降差均在 0~7 mm 以内。基坑监测点的模拟值均小于监测值,主要由于数值模拟没有考虑现场不确定因素:车辆行驶、机械荷载等,但模拟值与监测值变化曲线的基本趋势是一致的。

4 结 论

1) 圆砾地层深大基坑开挖支护结束后,支护

桩、锚索结构的受力与变形均满足要求。支护桩顶水平位移呈现随开挖深度的增加水平位移阶梯状增大,基坑开挖结束后趋于稳定的变化特征;锚索内力呈现基坑开挖阶段大范围波动,开挖结束后趋于稳定波动的变化特征。

2) 不同道路位置受基坑开挖引起的位移不同。当距离 $0.8H_0 < L < 2.5H_0$ 时,道路位移逐渐增大,最大位移值位于距基坑边界 $2.5H_0$ 处。当距离 $2.5H_0 < L < 5.0H_0$ 时,道路位移逐渐减小;当距离 $L > 5.0H_0$ 时,道路位移受基坑开挖影响可忽略不计。

3) 根据模拟与实测结果,临近道路变形未达基坑开挖引起道路位移的报警值,认为现有支护方案能满足基坑安全及道路保护的要求。

参 考 文 献

- [1] 陈江, 阳军生, 张学民, 等. 共用连续墙结构的现场测试与安全性评价[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(7): 108-112.
CHEN Jiang, YANG Junsheng, ZHANG Xuemin, et al. Field measurement and safety evaluation of shared diaphragm wall structure[J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(7): 108-112.
- [2] 韩健勇, 赵文, 李天亮, 等. 深基坑与邻近建筑物相互影响的实测及数值分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(4): 149-156.
HAN Jianyong, ZHAO Wen, LI Tianliang, et al. Field measurement and numerical analysis of the influence between the deep excavation and adjacent buildings[J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(4): 149-156.
- [3] 张仲宇, 李兆平, 杨航, 等. 并行基坑施工对邻近桥梁影响及保护措施[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(3): 68-74.
ZHANG Zhongyu, LI Zhaoping, YANG Hang, et al. Study on influence of parallel foundation pit construction on adjacent bridge and protection measures[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(3): 68-74.
- [4] 汪东林, 汪磊. 紧邻既有高速公路偏压地铁深基坑围护结构变形监测与数值模拟研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(11): 91-95.
WANG Donglin, WANG Lei. Study on field monitoring and numerical simulation of deformation of deep foundation pit retaining structure under unsymmetrical load condition adjacent to existing highway[J]. Building Structure, 2015, 45(11): 91-95.
- [5] 焦宁, 丁建文, 吉锋, 等. 土岩复合地层中深基坑开挖对邻近管线变形影响分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2022, 52(2): 229-236.
JIAO Ning, DING Jianwen, JI Feng, et al. Analysis on influence of deep foundation pit excavation in soil-rock composite stratum on deformation of adjacent pipelines[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2022, 52(2): 229-236.
- [6] 郭延辉, 严明, 宋琴, 等. 深基坑开挖对临近既有高压天然气管道的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(增2): 840-847.
GUO Yanhui, YAN Ming, SONG Qin, et al. The influence of deep foundation pit excavation on the adjacent existing high pressure natural gas pipeline[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S2): 840-847.
- [7] 叶帅华, 李德鹏. 复杂环境下深大基坑开挖监测与数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2019, 52(增2): 117-126.
YE Shuaihua, LI Depeng. Monitoring and simulation analysis of deep and large foundation pit excavation in complex

- environment[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(S2): 117-126.
- [8] 雷华阳, 冯双喜, 万勇峰, 等. 基坑开挖对既有临近滩涂铁路路基影响规律及安全措施研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2019, 52(9): 969-978.
LEI Huayang, FENG Shuangxi, WAN Yongfeng, et al. Influence law and safety measures of foundation pit excavation on existing railway subgrade in tidal flat areas[J]. Journal of Tianjin University: Science and Technology, 2019, 52(9): 969-978.
- [9] 王培鑫, 周顺华, 狄宏规, 等. 基坑开挖对邻近铁路路基变形影响与控制[J]. 岩土力学, 2016, 37(增1): 469-476.
WANG Peixin, ZHOU Shunhua, DI Honggui, et al. Impacts of foundation pit excavation on adjacent railway subgrade and control[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(S1): 469-476.
- [10] ZHAO Jinpeng, TAN Zhongsheng, YU Rongsen, et al. Deformation responses of the foundation pit construction of the urban metro station: a case study in Xiamen[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 128: DOI: 10.1016/j.tust.2022.104662.
- [11] FENG Zheyuan, XU Qi, XU Xiangyang, et al. Deformation characteristics of soil layers and diaphragm walls during deep foundation pit excavation: simulation verification and parameter analysis[J]. Symmetry, 2022, 14(2): DOI: 10.3390/sym14020254.
- [12] 谭鑫, 金永乐, 黄明华, 等. 桩锚支护基坑对邻近建筑影响实测及三维数值分析[J]. 土木工程学报, 2023, 56(7): 126-136.
TAN Xin, JIN Yongle, HUANG Minghua, et al. Numerical analysis and filed monitoring on deformation characteristics of deep excavation adjacent to building with shallow foundation[J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(7): 126-136.
- [13] 韩健勇, 赵文, 关永平, 等. 近接浅基础建筑物深基坑变形特性及关键参数[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2018, 39(10): 1463-1468.
HAN Jianyong, ZHAO Wen, GUAN Yongping, et al. Deformation characteristics and key parameters of deep excavation adjacent to buildings with shallow foundations[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2018, 39(10): 1463-1468.
- [14] 王思懿. 陆海域复杂基坑施工对邻近桩基影响的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
WANG Siyi. Study on the influence of complex excavation on piles in land and seabed using numerical simulation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [15] GB 50497—2019, 建筑基坑工程监测技术标准[S].
GB 50497—2019, Technical standard for monitoring of building excavation engineering[S].



作者简介: 郭延辉 (1985—),男,陕西延安人,博士,副教授,主要从事岩土与地下工程方面的研究。E-mail:guoyanhui0818@kust.edu.cn。