

文章编号: 1007-2993(2024)01-0052-06

土岩组合地层异形深基坑支护体系优化研究

吉艳雷

(陕西省铁道及地下交通工程重点实验室(中铁一院), 陕西西安 710043)

【摘要】 某明挖隧道基坑位于土岩组合地层, 基坑大面深度约 17.1 m, 深挖部位约 27.9 m, 原设计整体基坑采用地下连续墙+4 道钢筋混凝土支撑, 坑中坑内侧壁采用钻孔灌注桩作为竖向支护结构, 深坑部位加设 2 道钢管支撑。为节约工期和工程造价, 综合考虑地层分布及地质条件, 对原设计方案进行了系列优化。运用数值模拟对比分析了优化前后基坑支护体系和周边环境的变形特性, 结果表明优化后的支护方案满足设计和规范要求。基坑按优化方案施工, 并开展了现场监测工作, 基坑监测结果表明: (1) 基坑连续墙水平位移、地表沉降、支撑轴力、周边建筑物变形及坑底隆起等指标均小于控制要求; (2) 连续墙最大水平位移发生在土岩分界面以上一定高度, 最大值约为浅基坑深度的 0.025%; (3) 异形基坑两侧变形不对称, 最大地表沉降发生在浅基坑侧, 基坑外地表影响范围约为 1.0H; (4) 下部基岩段基坑开挖侧向变形量小, 且对地表沉降槽范围影响不大。优化方案节约了工期和造价, 可为类似基坑工程提供参考。

【关键词】 土岩组合; 异形; 基坑支护; 方案优化; 喷锚; 数值模拟

【中图分类号】 TU473

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.01.009

Optimization of Support System for Deep Foundation Pit with Special-shaped Soil-rock Combination Strata

Ji Yanlei

(Shaanxi Railway and Underground Traffic Engineering Key Laboratory (FSDI), Xi'an 710043, Shaanxi, China)

【Abstract】 The foundation pit of a certain open-cut tunnel is located in a soil-rock combination layer, with a large depth of about 17.1 m and a deep excavation area of about 27.9 m. The original design of the overall foundation pit used underground continuous walls and 4 reinforced concrete supports, and the inner wall of the pit used drilled cast-in-place piles as vertical support structures. Two steel pipe supports were added to the deep pit area. To save construction period and project cost, a series of optimizations have been made to the original design scheme, taking into account the distribution of strata and geological conditions. Numerical simulation was used to compare and analyze the deformation characteristics of the foundation pit support system and surrounding environment before and after optimization. The results showed that the optimized support scheme met the design and regulatory requirements. The foundation pit was constructed according to the optimized plan and on-site monitoring work was carried out. The monitoring results of the foundation pit showed that: (1) The horizontal displacement of the continuous wall of the foundation pit, surface settlement, support axial force, deformation of surrounding buildings, and uplift at the bottom of the pit were all below the control requirements; (2) The maximum horizontal displacement of the continuous wall occurs at a certain height above the soil rock interface, with a maximum value of approximately 0.025% of the shallow foundation pit depth; (3) The deformation on both sides of the irregular foundation pit is asymmetric, and the maximum surface settlement occurs on the shallow foundation pit side. The impact range of the outer surface of the foundation pit is about 1.0H; (4) The lateral deformation of the foundation pit excavation in the lower bedrock section is small, and it has little impact on the range of surface settlement grooves. The optimization plan saves time and cost and can provide a reference for similar foundation pit projects.

【Key words】 soil-rock combination; special-shaped; foundation pit support; scheme optimization; spray anchoring; numerical simulation

基金项目: 中铁第一勘察设计院科研项目(院科 20-01)

作者简介: 吉艳雷, 男, 1982 年生, 汉族, 山西运城人, 硕士, 高级工程师, 注册土木工程师(岩土), 从事地下工程设计研究工作。

E-mail: 365941113@qq.com

0 引言

随着城市的开发建设, 基坑工程规模不断变大, 周边环境也日益复杂, 对支护结构自身安全及周边环境的保护要求越来越高^[1]。基坑支护的费用在地下空间开发费用的占比较大, 基坑支护的经济性、施工便捷性同样十分重要, 因此基坑支护的优化一直是学者研究的热点。

冯阵图等^[2]针对砂卵石地层基于限定位移和安全系数对支护嵌入比作了优化分析; 陈江等^[3]对软土地区基坑内支撑水平、竖向间距的调整进行了优化分析; 陈金铭等^[4]对液压伺服钢支撑与普通钢支撑的支撑效果进行了监测及数值模拟对比分析; 丰土根等^[5]研究了悬挂式基坑连续墙的厚度、埋深对受力的影响, 寻求合理值优化施工方案; 朱纯等^[6]通过数值模拟分析既有建筑两侧非对称基坑开挖顺序对建筑结构的影响; 贺振昭等^[7]针对不同支撑数量对基坑系统支护结构的刚度和变形影响进行了数值模拟和监测验证; 杨欢欢等^[8]针对富砂地层围护结构对地表沉降影响因素进行分析, 提出合理支护桩插入比和间距; 陶勇等^[9]针对深度、面积差别较大的两相邻基坑进行开挖数值模拟研究, 提出合理开挖顺序; 李文广^[10]采用数值模拟对某地铁基坑围护桩间距、直径、配筋进行了优化验证。

土岩组合基坑地层上软下硬, 上部土层地下水丰富, 下部岩石开挖困难, 关于其支护体系变形特性的研究尚不成熟。宫志群等^[11]采用数值模拟探究不同刚度放大系数和施工顺序下土岩二元地层基坑变形的空间效应; 白晓宇等^[12]通过有限元模拟和现场监测相结合的方法探讨土岩组合深基坑中围护桩、钢支撑与锚索组合支护体系的协同作用及基坑变形规律; 雷刚等^[13]对土岩组合地层明挖基坑桩撑体系位置、间距进行优化分析; 张楠^[14]结合两个车站基坑监测数据对土岩组合基坑侧向变形特性规律进行了分析; 李克先等^[15]采用监测+数值分析研究了青岛地铁某上软下硬地层规则基坑开挖土体受力及变形分布规律和桩撑体系变形规律。

目前研究多集中在基坑支护体系布置和开挖工法的优化, 或者土岩组合地层规则基坑的支护受力分析, 针对敏感环境下土岩组合不等深基坑的支护型式及力学特性研究不多。为此, 本文针对某土岩组合地层深大异形基坑工程面临的实际难题, 对支护体系提出优化方案, 并通过三维数值分析和现场监测验证了方案的可行性, 节约了工期和投资。研究成果可为类似工程提供参考。

1 工程概况

某明挖隧道位于佛山市顺德区, 隧道基坑长 3620 m, 基坑最大宽度 36.1 m, 基坑大面深度约 17.1 m, 局部深度约 27.9 m。隧道基坑周边环境复杂, 两侧分布有 3~5 层旧民房、河涌、鱼塘及管线等。工程总平面布置见图 1。

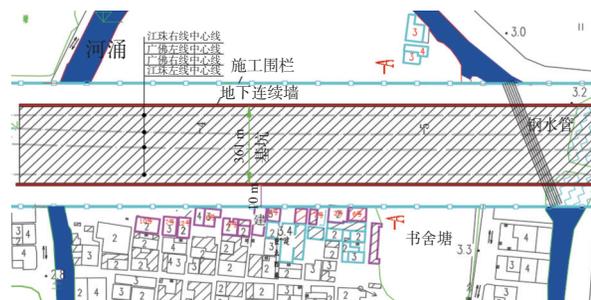


图 1 工程总平面图

场地地层自地表向下依次为杂填土①₂层, 平均厚度 3.9 m; 细砂③₁层, 平均厚度 5.8 m; 粗砂③₄层, 平均厚度 5.6 m; 强风化泥质砂岩⑦₂层, 平均层厚 2.95 m; 下部为弱风化泥质砂岩⑦₃层。场地地下水埋深平均约为 1.9 m。

2 异形基坑支护方案优化

2.1 原设计方案

本文选取一段异形基坑进行支护体系研究, 本段基坑长度约 150 m, 基坑宽度 36.1 m, 大面深度约 17.1 m, 局部深度约 27.9 m。基坑开挖范围存在深厚砂层, 地下水位较高且水量丰富, 基坑周边有大量民房和地下管线等。综合考虑, 基坑侧壁安全等级为一级。

基坑支护整体上采用 1000 mm 厚连续墙+4 道钢筋混凝土内支撑, 坑中坑内侧竖向支护结构采用 $\phi 1000@1200$ mm 支护桩, 深坑段加设 2 道钢管支撑, 地下连续墙底嵌入坑底以下砂岩不少于 $0.2H$ (H 为基坑深度)。混凝土支撑截面尺寸为 $800 \text{ mm} \times 800 \text{ mm}$, 水平间距 6.0 m, 沿基坑走向设两排临时钢立柱; 钢管支撑均采用 $\phi 609 \times 16$ mm 钢管, 水平间距 3.0 m。基坑支护剖面见图 2。

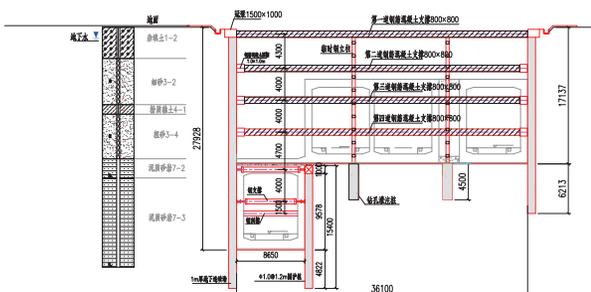


图 2 原方案基坑 A-A 剖面图(单位:mm)

由于隧道明挖段地面征地拆迁滞后,导致工期紧张,同时基于以下原因需对原支护体系进行优化。

(1)坑中坑内侧竖向支护钻孔灌注桩成孔速度慢,上部存在大量空钻,成桩质量难以控制,工期长且施工成本高;

(2)上部大基坑全部采用混凝土支撑,养护时间长,影响下部基坑开挖,且后期拆除不方便;

(3)补充勘察显示基坑深坑段地层以弱风化泥质砂岩为主,地质条件较好。

2.2 基坑优化方案

本段基坑下部弱风化岩层呈中厚层状分布,饱和单轴抗压强度标准值约 10 MPa,综合考虑,拟对本段基坑采取以下优化措施:

(1)减小地下连续墙嵌岩深度。

(2)将第 3、4 道砼支撑调整为 $\phi 609 \times 16$ mm 钢管支撑,钢管支撑间距为 3 m。

(3)取消坑中坑内侧支护桩,侧壁改用锚喷支护,深坑段设一道 $\phi 609 \times 16$ mm 钢支撑及一道钢倒换撑。锚喷支护采用 22a 工字钢架+单层钢筋网+280 mm 厚 C25 喷射砼,钢架纵向间距 1 m,设 $\phi 22$ mm 纵向连接筋,锚杆直径 22 mm,长度 3.5 m,间距 1.5 m \times 1.5 m。

(4)锚喷支护段如遇有渗水,采取钢花管静压注浆止水。

优化后基坑支护剖面见图 3。

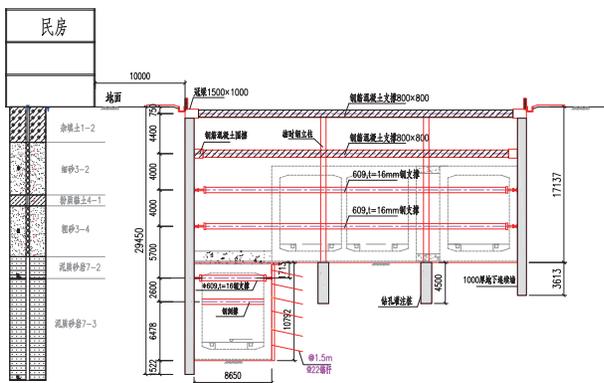


图 3 优化后基坑 A-A 剖面图 (单位: mm)

3 三维有限元模拟分析

3.1 模型建立及参数选取

为获得基坑的力学特性,分析基坑开挖对既有建筑的安全影响,验证优化方案的可行性,采用 Midas GTS NX 有限元软件对基坑开挖过程进行数值模拟。土体采用修正莫尔-库仑本构模型,基坑冠(腰)梁、混凝土支撑、建筑物梁柱、中立柱均采用梁单元模拟,钢支撑、锚杆采用桁架单元模拟,连续墙采用

板单元模拟,支护桩采用等效厚度板单元模拟^[3,11],型钢喷混采用等效抗弯刚度板单元模拟。基坑超载按 20 kPa 考虑。

有限元模型如图 4 所示,物理力学参数见表 1。

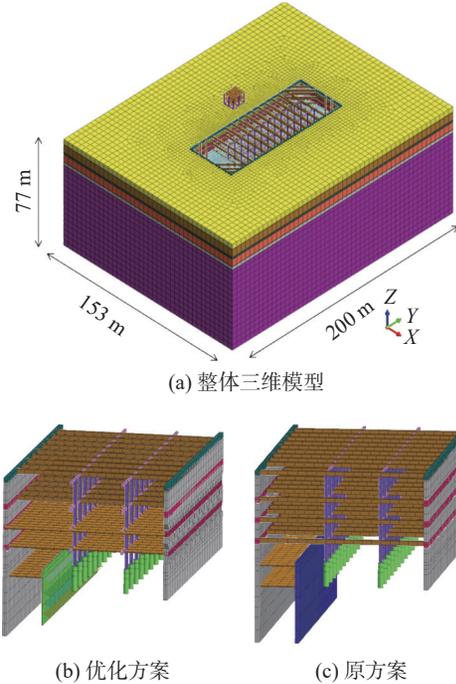


图 4 计算模型

表 1 主要物理力学参数

岩土名称	天然密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	模量 $E_{50\text{ref}}/\text{MPa}$	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
素填土	1.80	5	15	12
细砂	1.85	12		32
粉质黏土	2.00	10	24	22
粗砂	1.95	16		33
强风化岩	2.43	80	60	26
弱风化岩	2.55	150	200	50

3.2 计算工况

模拟实际施工顺序,分层进行土石方开挖、支撑架设。主要施工工况见表 2。

3.3 计算结果分析

(1)连续墙变形

地下连续墙体的水平位移分布及最大值能够直观反映基坑安全性,图 5 为开挖至坑底时连续墙水平位移随埋深的变化曲线。由于异形基坑开挖的不对称性,围护结构的位移并不呈现对称性,基坑左侧(深坑侧)开挖后墙体水平变形最大值发生在第四道支撑附近,最大值 4.2 mm,连续墙身最大水平位移发生在土岩分界面上约 5 m 处,最大值为浅基坑深度

的 0.025%; 基坑右侧(浅坑侧)连续墙最大位移 2.5 mm, 发生在第二道支撑附近。优化方案因采用加密的钢支撑使得上部大基坑段浅基坑侧的墙身位移有所减少, 下部小基坑段采用喷锚+支撑围护后对围护墙约束变弱, 下部墙身变形有所增加, 但整体值较小, 小于报警值 20 mm, 表明基坑下部岩层对基坑变形的约束明显。

表 2 主要施工工况

工况	原方案	优化方案
1	初始应力	初始应力
2	连续墙、围护桩、格构柱施工	连续墙、格构柱施工
3	第一层土开挖, 架设第一道混凝土支撑	第一层土开挖, 架设第一道混凝土支撑
4	第二层土开挖, 架设第二道混凝土支撑	第二层土开挖, 架设第二道混凝土支撑
5	第三层土开挖, 架设第三道混凝土支撑	第三层土开挖, 架设第三道钢支撑
6	第四层土开挖, 架设第四道混凝土支撑	第四层土开挖, 架设第四道钢支撑
7	第五层土开挖, 完成大基坑开挖	第五层土开挖, 完成大基坑开挖
8	第六层土开挖, 架设第五道支撑(小基坑第一道钢支撑)	第六层开挖, 第一段喷锚支护, 架设小基坑钢支撑
9	第七层开挖, 架设第六道支撑(小基坑第二道钢支撑)	第七层开挖, 第二段喷锚支护
10	第八层开挖, 至坑底	第八层开挖, 第三段喷锚支护

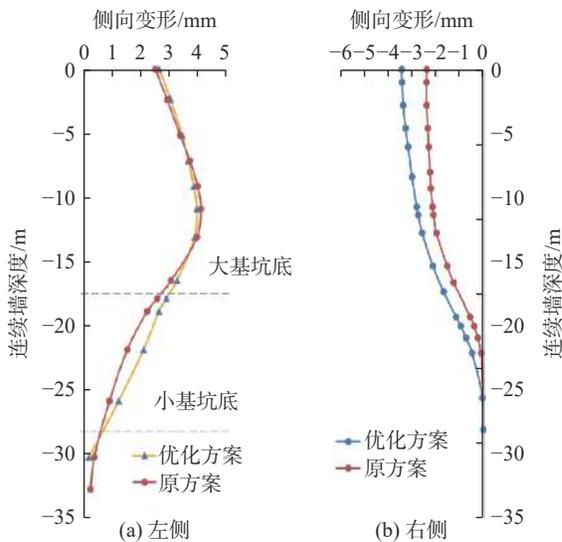


图 5 左右侧连续墙身变形随深度变化曲线

(2) 地表沉降

基坑开挖至底部时坑外地表沉降槽分布曲线见图 6。由图 6 可知, 优化前后地表沉降曲线形态变化不大, 地表沉降最大值约 16 mm, 最大值发生在基坑

右侧(浅坑侧), 最大值距离基坑边约 3 m, 左侧沉降主要影响范围为基坑外侧约 30 m, 右侧基坑沉降影响范围为基坑外侧 26 m, 沉降值均小于报警值 30 mm。说明岩层段基坑支护的调整对地表软土层的沉降分布影响不大。

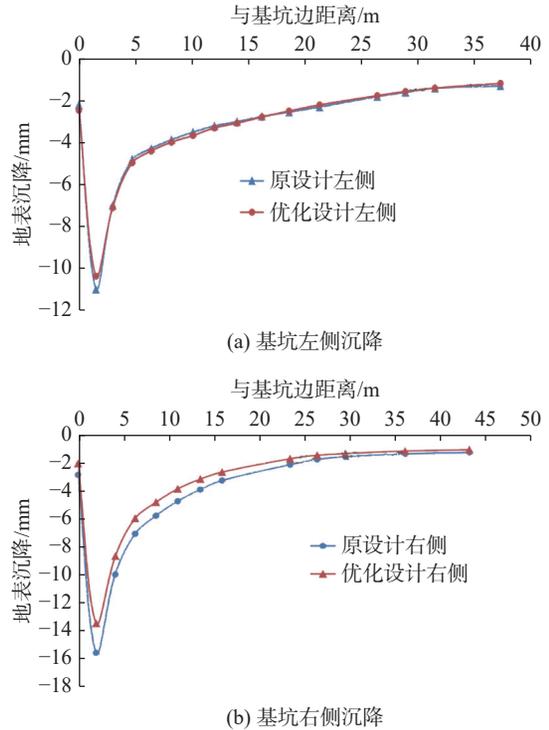


图 6 坑外地表沉降曲线

(3) 支撑轴力

优化前后两方案的支撑轴力见表 3。由表 3 可知, 各支撑在开挖过程中的最大轴力均未超过其控制值的 80%, 支撑轴力均在安全范围内。

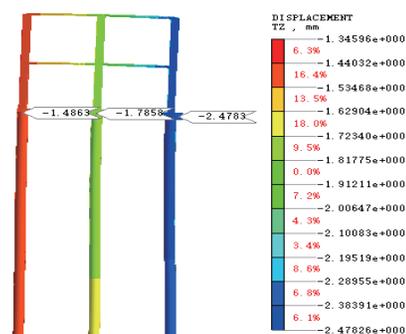
表 3 支撑轴力

支撑	原方案支撑轴力/kN	优化方案支撑轴力/kN	支撑轴力控制值/kN
第1道	-535	-479	1160.8
第2道	-1216	-1329	4729.1
第3道	-1271	-413	2156.8
第4道	-1458	-505	2019.2
第5道	-560	-394	1390
第6道	-456		

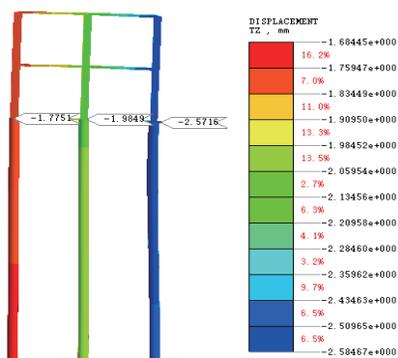
注: 支撑轴力负值表示受压。

(4) 周边建筑物变形

优化前后两方案基坑施工至坑底时引起的周边建筑物沉降见图 7, 优化后方案建筑的沉降有所增加, 但总体量值较小, 最大沉降值 2.5 mm, 小于 30 mm, 同时不均匀沉降小于允许值 4 mm。



(a) 原方案



(b) 优化方案

图7 周边建筑物竖向沉降

(5) 坑底隆起

经计算,原方案坑底隆起最大值为2.9 mm,发生在大基坑底部中部位置,大基坑底隆起主要影响深度约9 m,小基坑底隆起主要影响范围约2.4 m;优化方案坑底隆起最大值为4.6 mm,发生在靠近小基坑顶,坑底隆起主要影响范围约17 m,小基坑底隆起主要影响范围约4.8 m,影响区呈现连通态势,隆起值均小于控制值30 mm,主要影响区外的隆起值均小于1 mm。

坑外沉降沿深度呈漏斗状,下部小基坑位于岩层地段,沉降槽宽度明显衰减。原方案因坑中坑基坑右侧设置了围护桩对坑底隆起有一定隔断缓解作用,限制了大小基坑隆起的连通。

(6) 锚杆轴力

优化方案下部小基坑喷锚支护侧锚杆轴力计算值为48.4~50.2 kN,小于控制值100 kN,锚杆对控制基坑水平位移起到了积极作用。

(7) 冠梁顶部水平位移

优化前后冠梁侧向变形曲线形态变化不大,基坑两侧冠梁水平位移不对称,最大水平位移值为4 mm,发生在基坑右侧(浅坑侧),小于控制值15 mm。冠梁侧向水平位移随开挖工况变化曲线见图8。

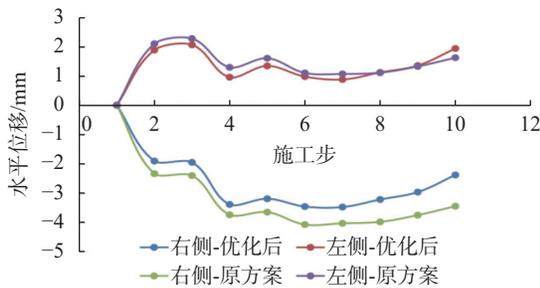


图8 冠梁水平位移曲线

4 现场施工效果

4.1 现场监测

基坑按优化后的设计方案实施,2016年10月基坑开始开挖,2017年4月施工至坑底,监测数据显示各项监测指标均小于控制值,满足设计要求。基坑地表沉降观测曲线如图9所示,该段基坑周边地表沉降最大值发生在基坑右边,最大沉降量12 mm,基坑左侧最大沉降量7.8 mm,与数值模拟量值基本一致。

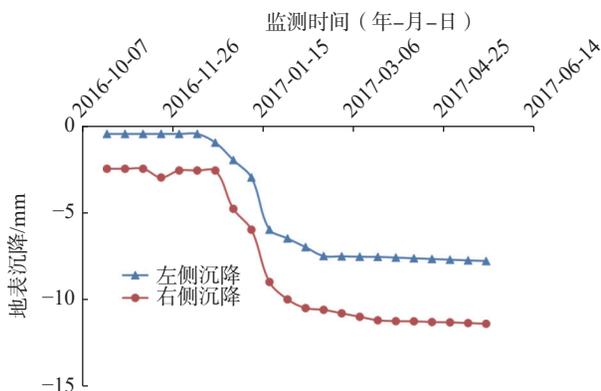


图9 基坑边地表最大沉降观测曲线

该段基坑支撑轴力测点的观测数据见图10。由图10可知,第一道混凝土支撑的最大轴力为610 kN,小于轴力控制值1160.8 kN;第二道混凝土支撑的最大轴力为2504 kN,小于轴力控制值4729.1 kN;第三道钢支撑的最大轴力为420 kN,小于控制值2156.8 kN;第四道钢支撑最大轴力为594 kN,小于控制值2019.2 kN。与数值模拟相比,第二道混凝土支撑轴力差异略大,其余轴力观测值与计算值接近。

该段基坑冠梁顶水平位移监测最大值6 mm,位于浅基坑一侧,邻近建筑物最大沉降观测值5.9 mm,与数值模拟结果量值基本一致,均在控制值范围内。

4.2 经济性及实施效果

经测算,本段基坑优化方案共节约工程造价约770万元,经济效果显著。同时,优化方案取消了坑中坑内侧支护桩,下部基坑施工作业空间加大,便于土石方外运,节约工期约3个月,工期效益明显。连

续墙+喷锚+内撑体系起到了良好的挡土止水效果。基坑开挖实施效果见图 11。

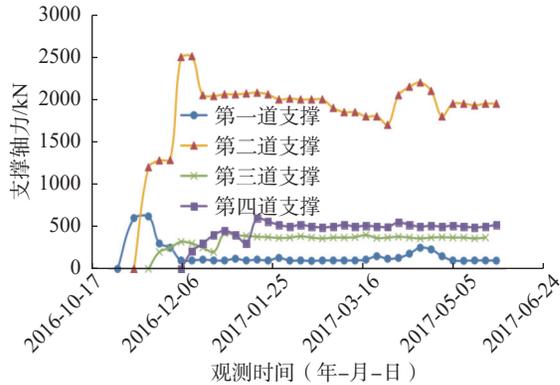


图 10 支撑轴力观测曲线



(a) 钢筋混凝土支撑现场图 (b) 喷锚钢支撑现场图

图 11 现场实施效果图

5 结论

(1) 土岩组合地层基坑, 下部岩层对围护结构侧向变形和坑外地表沉降槽影响范围的约束作用明显。

(2) 土岩组合地层不等深异形基坑整体变形不对称, 地表最大沉降和冠梁最大水平位移发生在浅基坑侧。连续墙最大水平位移发生在土岩分界面以上一定高度。

(3) 工程实践与基坑监测表明, 本基坑支护体系优化方案合理, 节约了工期和造价, 可为类似基坑工程提供参考。

参 考 文 献

[1] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制[J]. 土木工程学报, 2016, 49(6): 2-17.

[2] 冯阵图, 李达. 砂卵石深基坑支护嵌入比安全优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 126-130.

[3] 陈江, 孙志浩, 徐长节. 软土地区深大基坑支护方案优化三维数值模拟分析[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(31): 319-325.

[4] 陈金铭, 狄宏规, 宣炜, 等. 宁波市轨道交通海晏北路换乘站基坑支撑优化与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, (3): 22-25.

[5] 丰土根, 乔广轩, 刘江涛, 等. 悬挂式深基坑地下连续墙支护数值模拟及工程优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(29): 12679-12687.

[6] 朱纯, 任亚坤, 谭鑫, 等. 近邻基坑非对称开挖对既有建筑影响及优化分析[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(6): 400-405.

[7] 贺振昭, 杨新, 叶超, 等. 地铁深基坑内支撑结构优化分析[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(1): 69-77.

[8] 杨欢欢, 于红, 高建栋. 富砂地层基坑设计优化及经济性分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(S1): 1923-1927.

[9] 陶勇, 吕所章, 杨平, 等. 南京江北新区相邻深浅基坑开挖时序优化研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2021, 38(6): 109-117.

[10] 李文广. 某地铁车站基坑围护结构优化设计[J]. 城市轨道交通研究, 2019, (12): 65-69.

[11] 宫志群, 丁北斗, 李阳, 等. 基于空间效应的土岩二元地层深基坑变形规律研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2021, 40(5): 88-96.

[12] 白晓宇, 张明义, 闫楠, 等. 土岩深基坑桩-撑-锚组合支护体系变形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(2): 455-461.

[13] 雷刚, 贺彦卫, 张晓霞, 等. 土岩组合地层明挖基坑桩撑体系设计优化[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 1150-1156.

[14] 张楠. 土岩组合地层深基坑变形规律研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(7): 2-5.

[15] 李克先, 雷刚, 李健, 等. 土岩组合地层深基坑桩撑体系变形及受力分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(1): 310-317.

收稿日期: 2022-02-15