

DOI: 10.7672/sgjs2025080092

富水砂层大直径双顶管下穿对既有箱涵变形的影响^{*}

任亮¹, 叶雄明², 黄超¹, 周书东², 杜涛², 陈小丹³

(1. 中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司, 湖南 长沙 410014;

2. 东莞市建筑科学研究院有限公司, 广东 东莞 523809;

3. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510610)

[摘要] 为研究富水砂层大直径双顶管下穿对既有箱涵变形的影响,以东莞市石马河-小海河水体连通工程为背景,采用有限元软件 MIDAS GTS/NX 建立三维数值模型,分析沉井及顶管施工全过程对既有箱涵的变形影响。通过总结既有箱涵变形特征,并将模拟分析结果与工程监测数据进行对比,验证了数值模型的可靠性。结果表明,在沉井及顶管施工过程中,箱涵结构最大水平位移为 1.38mm,最大竖向位移为-2.19mm,均满足控制标准;最大水平位移和最大竖向位移均发生在顶管下穿箱涵的横断面处,且距离顶管越远,箱涵结构变形越小;三期箱涵变形比二期箱涵小。

[关键词] 地下工程;富水砂层;顶管;箱涵;数值模拟;监测

[中图分类号] TU992.05

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)08-0092-05

Influence of Large-diameter Double Pipe Jacking Undercrossing in Water-rich Sand Layer on Deformation of Existing Box Culvert

REN Liang¹, YE Xiongming², HUANG Chao¹, ZHOU Shudong², DU Tao², CHEN Xiaodan³

(1. Zhongnan Engineering Co., Ltd. of PowerChina Co., Changsha, Hunan 410014, China;

2. Dongguan Academy of Building Sciences Co., Ltd., Dongguan, Guangdong 523809, China;

3. Guangdong Institute of Water Resources and Hydropower Science, Guangzhou, Guangdong 510610, China)

Abstract: In order to study the influence of large-diameter double pipe jacking undercrossing in water-rich sand layer on the deformation of existing box culvert, taking Dongguan Shima River-Xiaohai River water connection project as the background, a three-dimensional numerical model was established by using the finite element software MIDAS GTS/NX to analyze the influence of the whole process of caisson and pipe jacking construction on the deformation of existing box culvert. By summarizing the deformation characteristics of the existing box culvert, and comparing the simulation analysis results with the engineering monitoring data, the reliability of the numerical model is verified. The results show that during the construction of caisson and pipe jacking, the maximum horizontal displacement of box culvert structure is 1.38mm, and the maximum vertical displacement is -2.19mm, both of which meet the control standards. The maximum horizontal displacement and the maximum vertical displacement occur at the cross section of the box culvert under the pipe jacking, and the farther away from the pipe jacking, the smaller the deformation of the box culvert structure. The deformation of the third-stage box culvert is smaller than that of the second-stage box culvert.

Keywords: underground engineering; water-rich sand layer; pipe jacking; box culvert; simulation; monitoring

0 引言

随着城市化建设的不断推进,顶管技术因其施工速度快、安全性高、成本低、对周边环境影响小等

^{*} 广东省住房和城乡建设厅科技创新计划项目(2021-K35-301789)

[作者简介] 任亮,高级工程师,E-mail: come_renliang@126.com

[收稿日期] 2024-09-26

优点,在施工中得到了广泛应用^[1]。目前,城市顶管尺寸和单次顶进距离逐渐增大,且常需下穿重要构筑物。顶管下穿构筑物时,可能导致周围土体出现不同程度的变形,特别是在富水砂层中,甚至可能引发流砂,危及周围构筑物的结构安全。因此,开展富水砂层大直径双顶管下穿对既有箱涵的变形影响研究,是非常必要的。

目前,国内外学者对顶管下穿对构筑物变形的影响已开展大量研究。例如,马险峰等^[2]采用试验结合有限元模拟的方法,对顶管电缆隧道施工对邻近构筑物和地下管线的扰动影响展开研究;孙磊等^[3]以咸阳国际机场三期工程为例,结合现场监测数据并建立三维计算模型,研究邻近构筑物受沉井及顶管施工的影响;杜明芳等^[4]以郑州市金水路(西三环至东四环)项目东明路行人非机动车下穿通道工程为例,结合三维数值模型,研究下穿通道施工全过程对既有地铁隧道变形的影响;邢慧堂等^[5]以济南轨道交通 R2 线长途汽车站出入口顶管工程为例,对大断面顶管工程穿越城市道路时对地层的沉降影响及沉降控制措施进行研究;李勇智等^[6]以深圳地铁 6 号线支线圳美站 A 出入口矩形顶管工程为背景,通过监测数据分析、有限元分析及经典公式预测分析,对矩形顶管下穿过程中地表变形规律进行了研究;张峰等^[7]以成都锦江再生水主干穿越河流顶管施工为研究背景,利用 FLAC3D 软件模拟掘进,研究顶管顶进对周边土体变形的影响;张姝晨^[8]针对顶管穿越高速公路路基引起的土水损失进行研究并提供相应对策。然而,当前研究多集中于单根顶管下穿构筑物引起的变形分析,对富水砂层大直径双顶管下穿既有箱涵的变形影响研究相对较少。

本文以东莞市石马河-小海河水体连通工程为背景,采用有限元软件模拟沉井及顶管施工全过程对既有箱涵的变形影响,并将模拟分析计算结果与监测数据进行对比分析,为今后类似工程项目提供一定的参考与借鉴。

1 工程概况

1.1 顶管工程

东莞市石马河-小海河水体连通工程位于广东省东莞市桥头镇,位置及周边环境如图 1 所示。利用 $\phi 1\,500$ 钢筋混凝土管及外套 $\phi 2\,000$ 钢管从中粗砂层下穿东深供水工程的箱涵结构,从而实现石马河-小海河水体连通。采用泥水平衡顶管施工工艺进行施工,顶管施工长度为 67m。

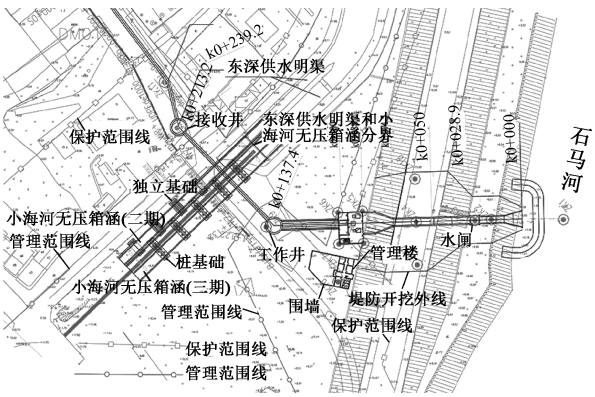


图 1 工程位置及周边环境

Fig. 1 Position and surrounding environment of the project

1.2 东深供水工程

东深供水工程包括二期工程 and 三期扩建工程,二期箱涵建于 1986 年,三期扩建箱涵建于 1990 年。二期箱涵为单孔钢筋混凝土框架结构,净截面尺寸为 $4.2\text{m} \times 4.2\text{m}$,顶板及侧墙均厚 0.5m ,底板厚 0.6m ,基底采用独立基础。三期箱涵为双孔钢筋混凝土框架结构,每孔净截面尺寸为 $4.9\text{m} \times 4.2\text{m}$,顶板及侧墙厚度均为 0.5m ,底板厚 0.6m ,基底为桩基础,挖孔灌注桩直径为 0.8m ,桩长为 14.7m 。二期和三期箱涵净距为 1m ,两者基础错开布置。

1.3 顶管与东深供水工程位置关系

顶管与东深供水工程二、三期箱涵平面呈正交关系,如图 2 所示。工作井距离三期箱涵 26.2m ,接收井距离二期箱涵 23.2m 。顶管下穿三期箱涵分缝段中部,外轮廓与桩基础边缘间距为 4.5m ,且距离箱涵分缝 6.0m 。顶管外轮廓距二期箱涵分缝最小净距为 2.0m 。箱涵底板底高程为 3.300m ,顶管顶高程为 -5.500m ,顶管距箱涵底板最小净距为 8.8m ,如图 3 所示。

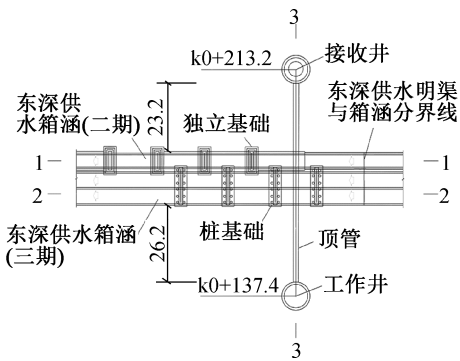


图 2 顶管与东深供水工程二、三期箱涵平面关系(单位:m)
Fig. 2 Plan position relationship between pipe jacking and box culverts for the second and third phases of Dongjiang-Shenzhen water supply project(unit:m)

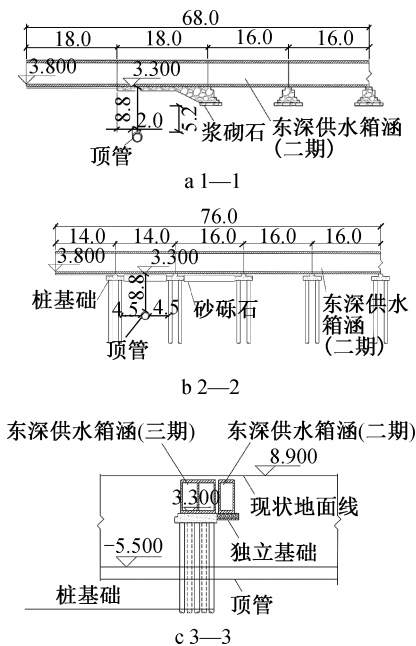


图 3 整体剖面(单位:m)
Fig. 3 Overall section(unit:m)

1.4 施工保护措施

根据勘察资料显示,场地自上而下分别为素填土、粉质黏土、中粗砂和全风化泥质粉砂岩,地下水类型主要为赋存于中粗砂层中的空隙承压水。为保障沉井施工安全,工作井及接收井四周均设置 2 排高压旋喷桩止水。为保障顶管进、出口安全,在进、出口处增加处理宽度,均布置 3 排高压旋喷桩。为防止顶管施工过程中管周砂层流动影响箱涵结构安全,对顶管周围进行全封闭管棚注浆加固,如图 4 所示。管棚采用 $\phi 108 \times 8$ 热轧无缝钢管,注浆液采用水泥、水玻璃双液快凝浆液,双液浆中水泥浆水灰比为 1:1,水泥浆与水玻璃浆液体积比为 1:0.5。待顶管施工完成后,在顶管内布置内径为 1 500mm 的Ⅲ级钢筋混凝土管,钢管与混凝土管间空隙采用灌浆料进行填充^[9-10]。

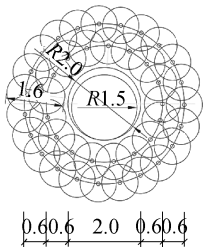


图 4 管周管棚支护及灌浆剖面(单位:m)
Fig. 4 Section of pipe roof support and grouting
around pipe(unit:m)

2 模型建立及计算参数

2.1 模型建立

采用有限元软件 MIDAS GTS/NX 建立三维地

层-结构模型。根据顶管与箱涵交叉关系、顶管及箱涵尺寸、地质条件等,模型宽度取 110m,高度取 40m,长度取 200m。模型 x 方向为顺顶管方向, y 方向为顺箱涵方向, z 方向为竖直方向。模型顶面为自由面,无约束;底面为每个方向均约束;4 个侧面均只约束法向,其余方向自由无约束。为兼顾计算精度和效率,将邻近结构土体及结构本身网格尺寸设为 0.5m,其余部位土体网格尺寸设为 3m。有限元模型如图 5 所示。

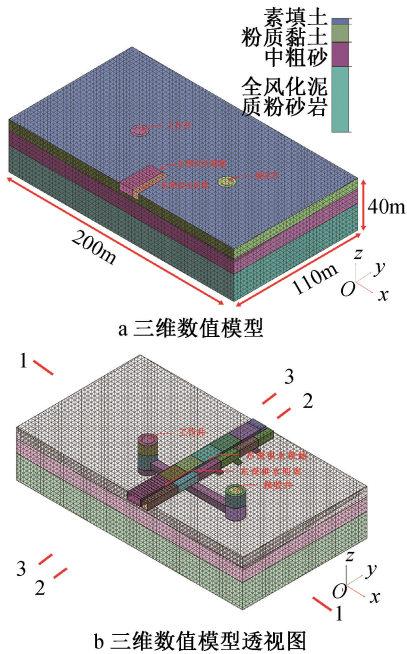


图 5 有限元模型
Fig. 5 Finite element model

2.2 计算参数

采用的本构模型及单元类型为:①岩土层、旋喷桩加固、注浆加固、地层损失采用修正莫尔-库仑弹塑性模型,以三维实体单元模拟;②沉井、顶管及东深供水工程结构采用修正莫尔-库仑弹性模型,以三维实体单元模拟;③桩基础采用修正莫尔-库仑弹性模型,以一维植入式梁单元模拟。根据相关研究可知,注浆加固后变形模量为原来的 5~25 倍,泊松比变化很小,内摩擦角为原来的 1.7 倍,黏聚力为原来的 12 倍。本研究适当弱化注浆效果,注浆加固后变形模量取 200MPa,内摩擦角取 30°,黏聚力取 100kPa,如表 1 所示。根据 SDJ 20—78《水工钢筋混凝土结构设计规范》可知^[11],混凝土弹性模量为 26 000MPa,轴心抗拉强度设计值为 1.3MPa,轴心抗压强度设计值为 11.0MPa,相当于 C25 混凝土,相关材料参数如表 2 所示。

由于工程施工步骤较多,选取其中具有代表性的工况:初始地应力平衡阶段(工况 1)、沉井阶段

表 1 岩土层主要参数

Table 1 Main parameters of rock and soil layers					
地层名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模 量/MPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
素填土	18	13	0.35	15	10
粉质黏土	19	18	0.32	25	20
中粗砂	19	30	0.28	0	25
全风化泥质粉砂岩	20	60	0.25	28	25

表 2 材料主要参数

Table 2 Main parameters of materials			
材料名称	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比
200 号混凝土 (C25)	25	26 000	0.2
C20 混凝土	25	25 500	0.2
C30 混凝土	25	30 000	0.2
C35 混凝土	25	31 500	0.2
钢管	78	206 000	0.3

(工况 2)、顶管阶段(工况 3)、管内通水阶段(工况 4)。

3 计算结果分析

在各工况条件下,分别对箱涵结构进行计算分析。箱涵水平位移如图 6 所示,竖向位移如图 7 所示。

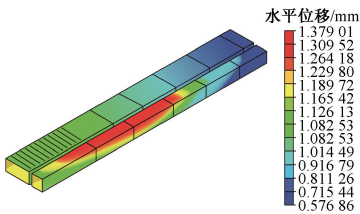


图 6 水平位移云图

Fig. 6 The horizontal displacement

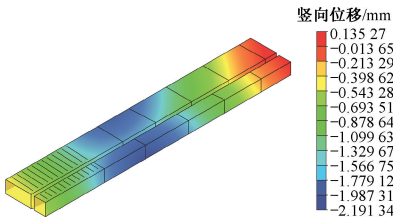


图 7 竖向位移云图

Fig. 7 The vertical displacement

1)由图 6 可知,最大水平位移为 1.38mm。在沉井阶段,箱涵基本不受沉井施工影响,最大水平位移为 0.35mm;在顶管阶段,随着顶管推进,在掌子面推力及顶管与地层反摩擦力等作用下,箱涵发生与顶管方向一致的水平位移,最大水平位移为 1.38mm;在管内通水阶段,箱涵基本不受影响,最大水平位移仍然是 1.38mm。

2)由图 7 可知,箱涵最大竖向位移为

-2.19mm。在沉井阶段,箱涵受沉井施工影响发生下沉,最大竖向位移为-1.10mm。在顶管阶段,随着顶管推进,在掌子面推力、顶管与地层反摩擦力、地层损失等多因素综合作用下,顶管下穿箱涵前,箱涵发生上浮。顶管下穿箱涵时,箱涵发生下沉;顶管下穿箱涵后,箱涵竖向位移逐渐趋于稳定。在管内通水阶段,因管道自重增大而发生下沉,箱涵随之下沉。

4 监测数据分析及控制指标

4.1 监测数据分析

为监测石马河-小海河水体连通工程沉井及顶管施工全过程对既有箱涵变形的影响,选取各工况中最大水平和最大竖向位移进行分析,监测值与模拟值对比如图 8,9 所示^[12-13]。由图 8 可知,监测断面最大水平位移为 1.60mm,模拟分析最大水平位移为 1.38mm;由图 9 可知,监测断面最大竖向位移为-2.38mm,模拟分析最大竖向位移为-2.19mm。监测值与模拟分析计算结果趋势基本一致,说明模型准确性较好。

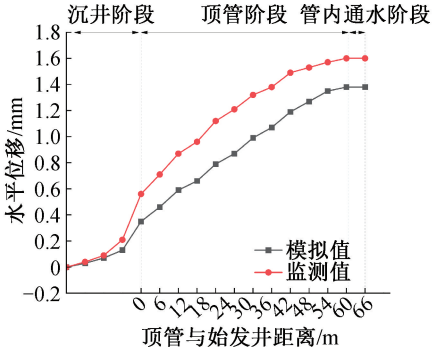


图 8 水平位移模拟值与监测值对比

Fig. 8 Comparison between simulated and monitored values of horizontal displacement

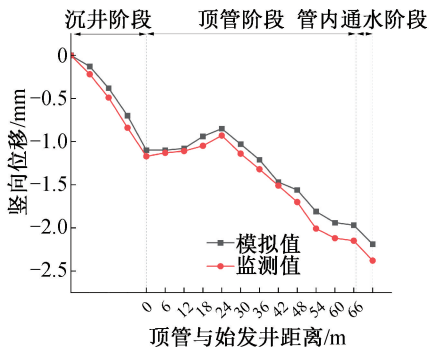


图 9 竖向位移模拟值与监测值对比

Fig. 9 Comparison between simulated and monitored values of vertical displacement

4.2 控制指标

根据 JGJ 8—2016《建筑变形测量规程》^[14]等现

行标准规范及工程项目资料等要求,结合数值模拟分析和工程实际特点,综合变形预测结果和东深供水渠运营管理要求,确定顶管工程施工期间既有箱涵变形控制标准,如表 3 所示。

表 3 变形控制标准		
Table 3	Deformation control standard	mm
方向	预警值	控制值
水平	<4	<6
竖向	<4	<6

5 结语

本研究以东莞市石马河-小海河水体连通工程为背景,利用有限元软件 MIDAS GTS/NX 模拟分析沉井及顶管施工全过程对既有箱涵变形的影响,并将计算结果与监测数据进行对比,结论如下。

1)数值模拟计算结果显示,东莞市石马河-小海河水体连通工程沉井及顶管施工全过程中诱发东深供水渠箱涵结构的最大水平位移为 1.38mm,最大竖向位移为-2.19mm,均满足控制标准。

2)数值模拟计算结果显示,最大水平和最大竖向位移均发生在顶管下穿箱涵的横断面处,距离顶管越远,箱涵结构变形越小;三期箱涵的变形比二期箱涵小。

3)数值模拟计算结果与监测数据基本一致。如果数值模型的边界条件和参数选取正确,数值模拟是解决岩土工程问题的有效方法。

4)周边环境存在重要构筑物时,对工程进行监测是非常必要的,监测结果能验证数值模拟分析结果是否合理,且可动态保证构筑物的安全。

参考文献:

[1] 袁贝,陈卫忠.城市市区地下空间暗挖工法适应性研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(4):1172-1182.
YUAN B, CHEN W Z. Study on the adaptability of underground excavation methods in urban areas [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2020, 16(4): 1172-1182.

[2] 马险峰,陈飞,吴冰,等.软土地区顶管电缆隧道施工过程对邻近结构影响研究[J].土木工程与管理学报,2021,38(6):51-57.
MA X F, CHEN F, WU B, et al. Study on the impact of pipe jacking cable tunnel construction process on adjacent structures in soft soil areas [J]. Journal of civil engineering and management, 2021, 38(6): 51-57.

[3] 孙磊,孙凯,李兆吉,等.湿陷性黄土地区大型圆形沉井及顶管施工对周围环境的影响[J].施工技术(中英文),2023,52(4):19-23,43.
SUN L, SUN K, LI Z J, et al. Impact of large circular sinking well and pipe jacking construction on the surrounding environment in collapsible loess regions [J]. Construction technology, 2023, 52(4): 19-23, 43.

[4] 杜明芳,张燕,陈家豪,等.下穿通道施工全过程对既有地铁隧道变形的影响[J].工程建设,2024,56(4):20-24.
DU M F, ZHANG Y, CHEN J H, et al. Impact of the entire underpass construction process on the deformation of existing subway tunnels [J]. Engineering construction, 2024, 56(4): 20-24.

[5] 邢慧堂,刘浩,王栋,等.城市轨道交通车站出入口大断面顶管工程穿越城市道路的沉降控制技术[J].城市轨道交通研究,2024,27(4):177-180,185.
XING H T, LIU H, WANG D, et al. Settlement control technology for large-section pipe jacking projects at entrances and exits of urban rail transit stations as they cross urban roads [J]. Urban mass transit, 2024, 27(4): 177-180, 185.

[6] 李勇智,曾德星,杨钊,等.大断面矩形顶管下穿市政道路地表变形规律研究[J].施工技术(中英文),2023,52(24):48-54,113.
LI Y Z, ZENG D X, YANG Z, et al. Study on the surface deformation patterns of large-section rectangular pipe jacking underpassing municipal roads [J]. Construction technology, 2023, 52(24): 48-54, 113.

[7] 张峰,罗利,陈奇.机械顶管下穿河流时土体变形特征研究[J].科技和产业,2024,24(4):254-261.
ZHANG F, LUO L, CHEN Q. Study on soil deformation characteristics during mechanical pipe jacking undercrossing rivers [J]. Science technology and industry, 2024, 24(4): 254-261.

[8] 张妹晨.高速公路路基下顶管穿越土水损失响应机制及对策[D].南京:东南大学,2021.
ZHANG S C. Response mechanism and countermeasures for soil and water loss due to pipe jacking under highway subgrade [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.

[9] 东莞市石马河流域综合治理项目 EPC+O 桥头镇石马河-小海河水体联通工程对东深供水工程安全影响分析报告(报批稿)[R].广州:广东省水利水电科学研究院,2022.
Analysis report on the impact of the Shima River - Xiaohai River water connection project in Qiaotou Town, Dongguan City, under the comprehensive management project of the Shima River Basin (EPC + O), on the safety of the Dongjiang-Shenzhen water supply project (approval draft) [R]. Guangzhou: Guangdong Provincial Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022.

[10] 东莞市石马河流域综合治理项目 EPC+O 桥头镇石马河-小海河水体联通工程顶管专项施工方案[R].广州:中国水利水电第十四工程局有限公司,2022.
Special construction scheme for pipe jacking of the Shima River - Xiaohai River water connection project in Qiaotou Town, under the comprehensive management project of the Shima River Basin (EPC + O), Dongguan City [R]. Guangzhou: China Water Resources and Hydropower 14th Engineering Bureau Co., Ltd., 2022.

[11] 水利电力部第四工程局.水工钢筋混凝土结构设计规范:SDJ 20—78[S].北京:水利电力出版社,1978.

DOI: 10.7672/sgjs2025080103

既有结构钢管斜撑基坑加固施工技术*

王士董,杨广德,徐青露,卓世华,杨永福
(中建三局集团有限公司,江苏 苏州 215100)

[摘要] 为在保护地下室外墙及底板的同时对基坑支护体系进行加固,提出了一种在既有结构上采用钢管斜撑配合外墙内侧混凝土腰梁的新型基坑加固施工技术。其原理是在地下室外墙内侧施工与传力带同宽的腰梁,既保证了基坑支护加固的效果,又有效保护了地下室外墙,防止其因承受水平侧压力而产生开裂或变形,从而避免了后期外墙渗漏的风险。同时,在既有底板上施工混凝土抗剪槽,以承受基坑支护通过钢管斜撑传递的水平力,从而使基坑支护承载力满足设计要求。相比于传统基坑支护加固技术,该技术具有施工速度快、操作方便、造价低等优点,且不会影响后续地下室结构施工。

[关键词] 基坑;加固;斜撑;外墙;渗漏;施工技术

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)08-0103-05

Construction Technology of Existing Steel Pipe Diagonal Bracing Foundation Excavation Strengthening

WANG Shidong, YANG Guangde, XU Qinglu, ZHUO Shihua, YANG Yongfu
(China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215100, China)

Abstract: In order to strengthen the foundation excavation support system while protecting the outer wall and bottom plate of the basement, a new foundation excavation strengthening construction technology is proposed, which adopts steel pipe diagonal bracing and concrete waist beam inside the outer wall on the existing structure. The principle is to construct a waist beam with the same width as the force transmission belt on the inner side of the basement exterior wall, which not only ensures the effect of foundation excavation support strengthening, but also effectively protects the basement exterior wall and prevents it from cracking or deformation due to horizontal lateral pressure, thus avoiding the risk of later exterior wall leakage. At the same time, the concrete shear groove is constructed on the existing floor to withstand the horizontal force transmitted by the foundation excavation support through the steel pipe diagonal brace, so that the bearing capacity of the foundation excavation support meets the design requirements. Compared with the traditional foundation excavation support strengthening technology, this technology has the advantages of fast construction speed, convenient operation and low cost, and will not affect the subsequent basement structure construction.

Keywords: foundation excavation; strengthening; diagonal bracing; external wall; leakage; construction

0 引言

在当前众多项目建设过程中,由于前期设计不合理、业态调整、结构加固、城市更新政策导向等各种原因,需拆改既有地下室结构。传统基坑支护体系加固方式有增加内支撑、施工混凝土挡土墙等,

但这些做法均存在造价高、施工工期长、影响后续施工等缺点。因此,总结了一种钢管斜撑与混凝土腰梁相结合的支护体系,拆除作为基坑支撑传力体系的地下室梁板,保留外墙及底板,同时在外墙内侧施工混凝土腰梁、配合 $\phi 609 \times 16$ 钢管斜撑及牛腿对基坑支护体系进行加固,此做法不仅造价低、工期短,而且对后续结构施工影响很小。

1 方案比较

1) 与采用混凝土内支撑相比,钢管斜撑在基坑

* 中建三局集团华东建设有限公司科研课题:城市有机更新中的工业遗存改扩建设计与建造技术(CSCEC3BSH-2023-04)

[作者简介] 王士董,助理工程师,E-mail:735077430@qq.com

[收稿日期] 2024-10-20