

DOI: 10.7672/sgjs2026030110

城市综合管廊基坑 SMW 工法桩变形影响研究*

韩伟奇

(中铁十八局集团第四工程有限公司,天津 300500)

[摘要] 城市地下综合管廊基坑施工面临土层强度低、变形控制要求严格等难题,为明确基坑围护结构变形调控机制,对 SMW 工法桩+混凝土支撑+钢支撑组合围护结构进行分析,研究围护桩插入比、支撑道数、支撑间距的影响,并提出参数耦合优化+动态控制的施工措施,使桩顶位移控制在限值内。研究表明,管廊基坑围护结构水平和竖向位移呈缓增-陡增-回落趋于稳定的演化特征,围护桩插入比宜控制在 1.1~1.2,支撑间距宜设置为 3m 左右,施作 1 道混凝土支撑+1 道钢支撑可满足安全要求,必要时可增设 2 道钢支撑,以更好地控制围护结构变形。

[关键词] 综合管廊;基坑;桩基;围护结构;变形;控制

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0110-06

Study on the Influence of SMW Pile Deformation in Foundation Excavation of Urban Integrated Pipe Gallery

HAN Weiqi

(China Railway 18th Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Tianjin 300500, China)

Abstract: The construction of urban underground integrated pipe gallery foundation excavation faces challenges such as low soil strength and strict deformation control requirements. To clarify the deformation control mechanism of the foundation excavation enclosure structure, an analysis was conducted on the SMW pile+concrete support+steel support combination enclosure structure. The influence of the insertion ratio of enclosure piles, the number of support channels, and the spacing between supports was studied, and construction measures of parameter coupling optimization and dynamic control were proposed to control the displacement of the pile top within the limit. The research results indicate that the horizontal and vertical displacement of the enclosure structure of the pipe gallery foundation excavation shows a gradual increase, a steep increase, and a stable decline trend. The insertion ratio of enclosure piles should be controlled at 1.1~1.2, and the support spacing should be set at about 3m. The construction of one concrete support and one steel support can meet the safety requirements. If necessary, two steel supports can be added to better control the deformation of the enclosure structure.

Keywords: integrated pipe gallery; foundation excavation; pile foundation; enclosure structure; deformation; control

0 引言

随着我国城市化建设不断发展与更新,城市地下综合管廊作为统筹各类市政管线、破解“马路拉链”难题的基础设施,其建设规模与覆盖范围持续扩大^[1],综合管廊工程正逐步向深层化、复杂化方向发展^[2]。

基坑作为管廊施工的关键环节,其开挖深度多集中在 5~15m,且常面临软土、高地下水位等复杂地质条件,围护结构稳定性直接决定工程安全与周边环境安全^[3]。SMW 工法桩因兼具止水与围护功能,施工效率高^[4]、对环境影响小等优势,已成为管廊基坑围护主要形式,但在城市核心区施工时,基坑与围护结构变形要求严格,对围护参数设计与变形控制技术提出了更高要求^[5]。已有学者针对基坑围护技术开展了大量研究,尤其是在钢支撑结构优化^[6]、智能化监测等方面已有较成熟的技术成

* 中铁十八局集团有限公司科技计划(G20-08)

[作者简介] 韩伟奇,项目经理,高级工程师, E-mail: 923040508@qq.com

[收稿日期] 2025-10-28

果,但前期成果多集中于单一参数对变形的影响分析,对围护结构与支撑体系的耦合作用研究不足。同时,现有研究集中在地铁车站、大型建筑等的基坑工程,对于管廊工程狭长连续的基坑适应性有待验证,且对管廊基坑专项研究较少,缺乏不同城市地区变形规律与围护优化方案系统性验证。

鉴于此,本文以江东大道提升改造工程地下综合管廊基坑为研究对象,围绕 SMW 工法桩围护体系展开分析。通过数值模拟研究围护桩插入比、支撑道数与间距等参数对围护结构变形的影响,明确不同开挖阶段变形特征。

1 工程概况

1.1 管廊概况

本工程为江东大道提升改造工程(地下综合管廊工程),位于杭州市钱塘区江东大道,西起滨江二路,东至河庄大道,全长约 1 860m,主要布置于道路北侧非机动车道、人行道及红线外绿化带内。地下综合管廊结构采用三舱结构,分别为水缆舱、燃气舱及高压电力舱,如图 1 所示。水缆舱内收纳通信管、给水管,高压电力舱作为预留舱室使用。管廊结构外尺寸为 10.95m×4.4m(宽×高),其中水缆舱净尺寸为 4.35m×3.4m(宽×高),燃气舱净尺寸为 2.1m×3.4m(宽×高),高压电力舱净尺寸为 2.9m×3.4m(宽×高)。

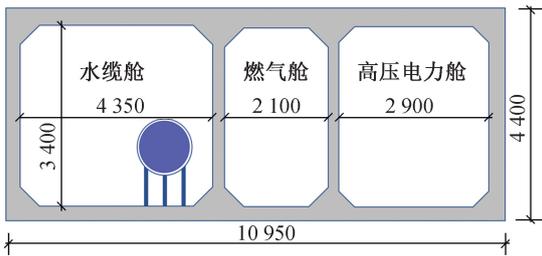


图 1 综合管廊三舱标准断面

Fig. 1 Standard cross-section of three-chamber integrated pipe gallery

施工缝结合现场条件布置,按照变形缝划分舱段,除特殊节点处,标准段沿纵向每间隔 50m 设置 1 道变形缝。本工程管廊共有 37 个舱段,标准断面底板、侧墙及顶板厚度均为 50cm,中隔墙厚度为 30cm,底板与墙设置 30cm×30cm 加腋角。

1.2 基坑围护概况

整个管廊基坑开挖埋深主要为 8, 10, 12m, 对应的围护桩深度分别为 14.5, 20.5, 24.5m, 本文仅展示 20.5m 深基坑地质情况,如图 2 所示。管廊基坑围护结构采用 SMW 工法桩,标准段使用 $\phi 850@600$ 水泥土搅拌桩,水泥采用 P·O 42.5 级普通硅酸盐

水泥,掺入量 $\geq 25\%$,水灰比控制为 1.5~2.0。水泥土搅拌桩喷搅完成,隔一插一布设 H 型钢,相邻两桩施工间隔 ≤ 12 h,管廊主体施工完成并进行土方回填后即可拔除型钢。

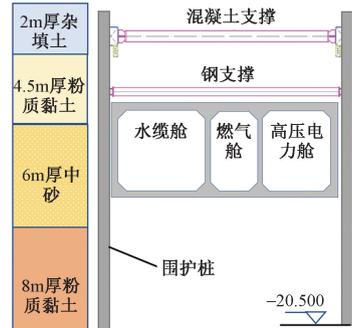


图 2 管廊基坑断面

Fig. 2 Pipe gallery foundation excavation cross-section

2 管廊基坑实测变形分析

2.1 现场监测方案

监测对象选为围护桩深度 20.5m 基坑处 50m 长标准舱段。基坑开挖卸荷会使土体应力场发生变化,开挖面以上围护结构后侧土压力由静止土压力转化为被动土压力,开挖面以下围护结构后侧土压力由静止土压力转化为主动土压力,这会造成周边土层发生变形^[7]。如果变形量超出特定阈值,将危及围护结构稳定性,需实时监测基坑开挖卸荷过程中围护结构变形状态。

综合考虑工程概况、地质条件及环境情况,本工程监测内容为围护桩桩顶水平位移与竖向位移等,基坑开挖阶段各项观测频率为 1 次/d。选取代表性监测断面附近的 4 个测点进行分析,测点布设间距为 20m,编号分别为 ZQC/S-1~ZQC/S-4,分别分布在基坑两侧,如图 3 所示。

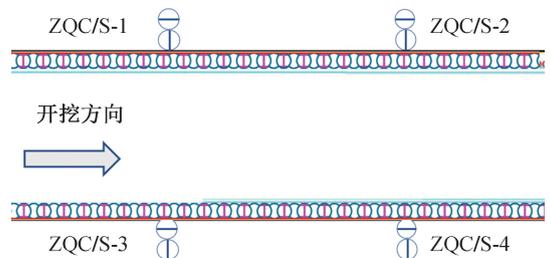


图 3 测点布置

Fig. 3 Layout of monitoring points

2.2 围护结构实测变形

1) 桩顶水平位移

围护桩水平变形是评判基坑开挖稳定性的重要指标之一,实测围护桩桩顶水平位移如图 4 所示。由于测点 ZQC/S-1, ZQC/S-2 与测点 ZQC/S-3, ZQC/S-4

S-4 监测数据基本呈整体对称分布,所反映的变形趋势基本一致,因此本文仅给出测点 ZQC/S-1, ZQC/S-2 监测结果。由图 4 可知,桩顶水平位移基本为 5~16mm,最大实测值为 16.5mm,计算得到变形系数(δ/H =变形量/基坑深度)为 0.165%,这表明桩顶水平位移满足 GB 50497—2019《建筑基坑工程监测技术标准》一级基坑(0.1%~0.3%) H 限值要求。

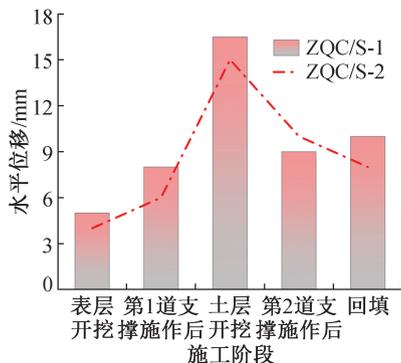


图 4 实测围护桩桩顶水平位移

Fig. 4 Actual measurement of horizontal displacement at the top of the enclosure pile

表层开挖至 2m,冠梁+第 1 道混凝土支撑施工前,土体卸荷集中于浅层,桩体嵌固作用明显,围护桩桩顶以弹性变形为主;第 1 道混凝土支撑施作后,混凝土支撑刚度大、预加轴力效果稳定,有效约束桩顶水平位移,使其增长平缓,坑外表层土体水平位移控制在 4mm 以内;第 2 道钢支撑施作前,主动土压力随着开挖深度的增加快速增大,桩体挠曲变形加剧,进入位移陡增期,此阶段位移贡献占总位移的 50%~60%,为全程位移控制核心;第 2 道钢支撑安装后,钢支撑时效性强、轴力可动态调整,有效抑制了位移持续增长,通过水平轴力控制,桩顶水平位移控制在 9mm 左右;回填期桩顶水平位移趋于稳定。

2 道支撑体系下,桩顶水平位移仍呈缓增-陡增-回落趋于稳定的非线性增长特征,陡增阶段集中于 6~10m 开挖深度。支撑约束效应呈差异化特征,第 1 道混凝土支撑凭借高刚度承担初期的侧向土压力,第 2 道钢支撑虽刚度略低于混凝土支撑,但安装便捷,适配 6~10m 深度快速开挖需求,通过实时轴力补偿使变形速率下降,成为控制变形的主导。

2) 桩顶竖向位移

实测围护桩桩顶竖向位移如图 5 所示。由图 5 可知,围护桩桩顶竖向位移整体变化趋势与水平位移相似,遵循缓增-陡增-回落趋于稳定的阶段性规

律。表层开挖至第 1 道混凝土支撑施作后,桩顶竖向位移缓慢增加;进入土层开挖阶段,桩顶竖向位移快速增大,最大值达 12mm,此阶段为桩顶竖向位移增长最显著阶段;第 2 道钢支撑施作及后期施工过程中,桩顶竖向位移逐步回落至 4mm 左右并趋于稳定。

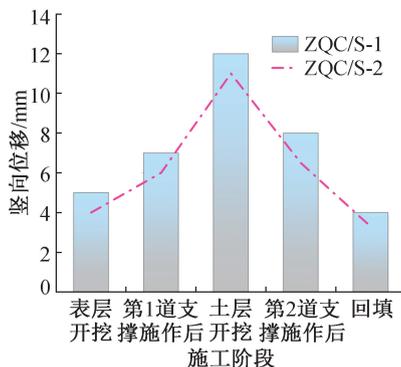


图 5 实测围护桩桩顶竖向位移

Fig. 5 Actual measurement of vertical displacement at the top of the enclosure pile

各阶段桩顶竖向位移变化与施工工序、土体-围护结构受力协同作用直接相关,表层开挖阶段卸荷量小,且第 1 道混凝土支撑约束了桩顶竖向位移,桩周变形缓慢;土层开挖阶段深层土体应力大量释放,而第 2 道钢支撑尚未形成约束,土体应力释放加剧,导致桩顶竖向位移陡增;后期第 2 道钢支撑与 SMW 工法桩形成整体受力体系,叠加主体结构的约束作用,土体持续变形被抑制,桩顶竖向位移逐步收敛,最终恢复至近初始开挖的稳定状态。

3 围护结构变形影响因素分析

3.1 模型建立与材料参数

1) 模型建立

采用有限元分析软件进行数值模拟计算,综合考虑土体分层及支撑施作等因素,等效板墙(SMW 工法桩墙)、钢支撑、冠梁等围护结构选用弹性本构模型模拟,土层选用修正莫尔-库仑本构模型模拟,建立的模型如图 6 所示。模型边界条件使用自动约束设置,土体侧面施加水平约束,底部在 x, y, z 均向添加约束,顶部作为自由面^[8]。

选取 50m 长管廊标准舱段进行分析,一般的,基坑开挖在水平向影响距离为基坑深度的 3~4 倍,在竖向影响距离为基坑深度的 2~4 倍^[9],为此将模型尺寸设置为 80m×40m×30m(长×宽×高)。基坑开挖通过施工步骤钝化及激活单元等实现,平衡初始应力场后,按照基坑施工顺序依次激活围护结构和支撑施工,钝化开挖土体模拟开挖过程。

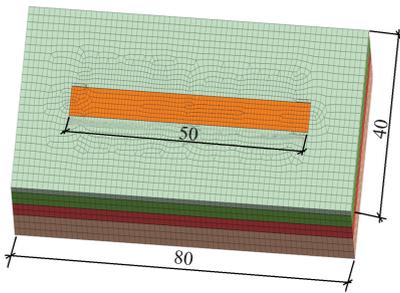


图6 有限元模型(单位:m)

Fig. 6 Finite element model (unit: m)

根据等效刚度理论计算方法,将 SMW 工法桩墙转换为具有一定厚度的板墙单元计算,如图 7 所示,图中 t 表示型钢翼缘宽度, ω 表示型钢净距, h 表示等效板墙厚度, $(t+\omega)$ 表示 1 个等效区间长度^[10]。等效刚度理论计算如下:

$$2E_c I_c + E_s I_s = E(t + \omega) h^3 / 12 \quad (1)$$

式中: E_c, I_c 分别为水泥石弹性模量、惯性矩; E_s, I_s 分别为型钢弹性模量、惯性矩; E 为板墙混凝土弹性模量。

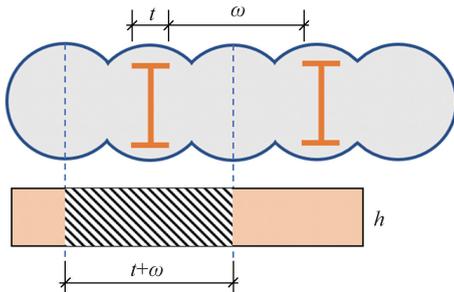


图7 SMW 桩体刚度折算

Fig. 7 SMW pile stiffness conversion

2) 材料参数

以本工程管廊基坑地质勘察报告和室内土工试验数据为依据,对各项参数进行取值。将管廊基坑土层划分为 4 层,各土层物理力学参数如表 1 所示。

表 1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松 比	静止土压力 系数
杂填土	13.0	17.8	0.38	0.75
粉质黏土	25.0	20.0	0.30	0.42
中砂	4.2	33.2	0.31	0.37
粉质黏土	26.0	22.0	0.32	0.45

对于基坑的结构部分,等效板墙、钢支撑、冠梁等围护结构物理力学参数如表 2 所示。

表 2 围护结构物理力学参数

Table 2 Physical and mechanical parameters of enclosure structure

名称	材料	弹性模量/MPa	重度/(kN·m ⁻³)
等效板墙	C30 混凝土	30 000	25.0
钢支撑	Q235B 钢	206 000	78.5
腰梁	Q235B 钢	206 000	78.5
冠梁	C30 混凝土	28 000	23.0

3.2 围护桩插入比的影响

围护桩插入比指当围护结构与地面平齐时,基坑底以下围护结构深度与基坑底以上围护结构深度的比值,其为影响基坑抗隆起稳定性的重要指标之一,在同一围护方案下,适当增大插入比可提高基坑抗隆起稳定性。

不同插入比下围护桩桩顶水平位移如图 8 所示。由图 8 可知,不同插入比下,围护桩桩顶水平位移曲线均呈缓增趋势,但各阶段水平位移差异随开挖进程逐步放大。桩顶水平位移存在差异的本质是插入比对围护结构嵌固约束与被动区支撑能力的影响。表层开挖与第 1 道混凝土支撑施作后阶段,不同插入比下桩顶水平位移均较小且差异微弱,最大差值仅约 1mm。进入基坑开挖卸荷关键期,桩顶水平位移差异明显扩大,当插入比偏小时,基坑底以下围护结构嵌固深度不足,被动区土体对桩体的侧向约束随开挖深度的增加持续弱化;当插入比较大时,更大的插入比强化了被动区土体的嵌固作用,提升了桩体侧向刚度,使桩顶水平位移差异进一步缩小。土层开挖阶段插入比为 0.8, 1.0, 1.2 时桩顶水平位移分别陡增至 12, 11.2, 9.2mm; 插入比为 0.8 时桩顶最终水平位移为 14.3mm, 较插入比为 1.0 时的 13.3mm 增大 7.5%, 较插入比为 1.2 时的 10.2mm 增大 40.2%。

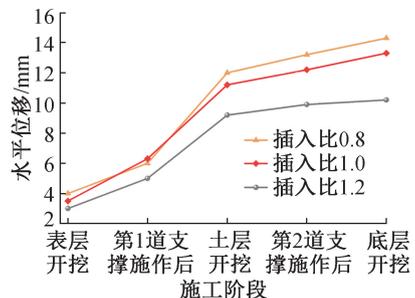


图8 不同插入比下围护桩桩顶水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement at the top of the enclosure pile under different insertion ratios

围护桩插入比与桩身变形呈负相关关系,且对开挖后期的影响更显著。插入比为 0.8 时虽压缩了围护成本,但开挖后期桩身变形增幅较大;插入比

为1.2时虽有效控制了桩身变形,但开挖前期的变形优化边际效益较小,过度增大插入比会造成成本冗余。因此偏于保守考虑,对于开挖深度9~11m狭长型管廊基坑SMW工法桩围护工艺,建议将围护桩插入比控制在1.1~1.2,尤其是围护桩设计深度在20m左右,既能通过适度增大插入比抑制开挖后期桩身水平位移,又可平衡工程经济性与安全性。

3.3 支撑道数的影响

在管廊基坑施工过程中,开挖卸荷打破了土应力平衡,主动土压力经围护桩传至支撑结构,因此支撑结构稳定是围护结构安全的关键。单道钢支撑刚度一致时,道数与侧向刚度呈正相关关系,增加钢支撑道数可增强对应开挖深度的变形约束,分散土压力并提升抗侧变形能力。为此设置3个工况进行分析,工况2与实际工程一致(见图9)。

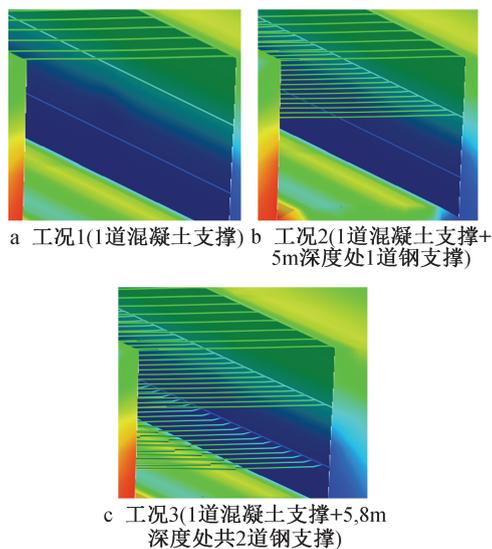


图9 支撑工况

Fig. 9 Supporting conditions

不同支撑道数下各开挖阶段围护桩桩顶水平位移曲线如图10所示。由图10可知,表层开挖后3种工况下桩顶水平位移约为3mm;开挖2m施作第1道混凝土支撑后,3种工况下桩顶水平位移约为5mm;开挖6m后工况1下未施作钢支撑,桩顶水平位移陡增至18mm,而工况2,3下施作了钢支撑,受钢支撑作用,桩顶水平位移仅增加5~7mm;基坑开挖完成时,工况1,2,3下桩顶水平位移最大值分别达22,14.3,12.2mm。

不同支撑道数下围护桩桩顶水平位移存在差异的本质是支撑体系约束能力与土压力分担效率不同,工况1下无钢支撑,5m以下开挖段土压力仅由布设在2m处的混凝土支撑承担,围护结构侧向刚度不足,导致深层土体开挖时桩顶水平位移快速

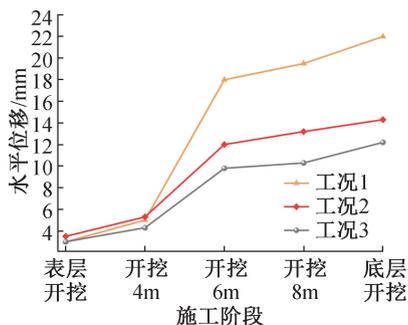


图10 不同支撑道数下围护桩桩顶水平位移

Fig. 10 Horizontal displacement at the top of the enclosure pile under different numbers of support channels

增大;工况2下1道钢支撑在5m深度处形成约束,分担了约30%的地层土压力,使桩顶水平位移得到有效控制;工况3下2道钢支撑在5,8m深度处形成多级约束,进一步分散了土压力,体系整体刚度较工况2有所提升,因此桩顶水平位移进一步减小,可知多道钢支撑通过提前介入、分级约束的方式,有效削弱了深层土体开挖导致的围护桩变形积累。开挖深度9~11m狭长型管廊基坑中,仅保留混凝土支撑存在接近位移限值风险,设置1道钢支撑可满足安全要求,增设2道钢支撑可更好地控制围护结构变形,需结合施工空间与成本合理选择支撑道数。

3.4 支撑间距的影响

根据前文分析,以工况2为基准,设置3种支撑间距工况,工况1混凝土支撑与钢支撑间距2m,即钢支撑施作于4m深度处;工况2混凝土支撑与钢支撑间距3m,即钢支撑施作于5m深度处;工况3混凝土支撑与钢支撑间距4m,即钢支撑施作于6m深度处。分析结果表明,表层开挖后3种工况下围护桩桩顶水平位移约为3mm;混凝土支撑与钢支撑间距越小,围护桩桩顶水平位移增长越平缓,间距为2,4m时钢支撑施作后围护桩桩顶水平位移分别为6,10mm。

混凝土支撑与钢支撑间距越小,钢支撑施作位置越浅,其对围护结构的侧向约束介入越早,可提前分担表层土体开挖时混凝土支撑承担的土压力,从而减小后期开挖导致的变形积累;混凝土支撑与钢支撑间距越大时,钢支撑介入约束时机越晚,前期土压力集中作用于混凝土支撑,围护结构侧向刚度不足,桩顶变形增长速率明显提升。需要注意的是,混凝土支撑与钢支撑间距过小会压缩开挖作业空间,降低施工效率,因此对于开挖深度9~11m狭长型管廊基坑设置3m左右的支撑间距较合理。

4 施工优化措施

在围护结构方面,根据基坑等级与地质条件确

定核心参数,SMW 工法桩插入比宜控制为 1.1~1.2,砂土地区优先采用 1.1 的插入比,既保证被动区土体嵌固约束能力,使桩顶水平位移控制在安全范围内,又避免过度插入导致的成本冗余。当插入比需调整至 0.8 以下时,须配套基坑被动区加固措施,采用三轴水泥土搅拌桩抽条加固,加固深度至开挖面以下 4m,也可增设锚杆加固地层,提升被动区土体抗力,以补偿嵌固深度不足的缺陷。

混凝土支撑与钢支撑间距宜控制在 3m 左右,如果周边环境变形控制要求严格,可增设钢支撑,使体系整体刚度提升。钢支撑施作时需施加预加轴力,建议为设计轴力的 50%~70%,并采用动态调整技术,根据开挖阶段变形数据实时补加轴力,确保支撑约束持续有效。

5 结语

1) 实测管廊基坑围护结构水平和竖向位移呈缓增-陡增-回落趋于稳定的三阶段演化特征,6~10m 开挖段为变形控制关键期,该阶段变形占比较大,是围护结构设计与施工管控的核心环节。

2) 围护桩插入比与桩身变形呈负相关关系,插入比较低时虽压缩了围护成本,但开挖后期桩身变形增幅较大;插入比较高时虽有效控制了桩身变形,但会造成成本冗余。对于开挖深度 9~11m 狭长型管廊基坑 SMW 工法桩围护工艺,建议将围护桩插入比控制在 1.1~1.2。

3) 开挖深度 9~11m 狭长型管廊基坑中,施作 1 道混凝土支撑+1 道钢支撑可满足安全要求,增设 2 道钢支撑可更好地控制围护结构变形,需结合施工空间与成本合理选择支撑道数。

4) 混凝土支撑与钢支撑间距较大时,围护结构侧向刚度不足,桩顶变形增长速率较大。混凝土支撑与钢支撑间距过小时,压缩开挖作业空间,降低施工效率,开挖深度 9~11m 狭长型管廊基坑支撑间距设置 3m 左右较合理。

参考文献:

- [1] 潘有旺,王楠,张宗盛,等. 复杂地层中深大基坑开挖变形特征和优化设计[J]. 建筑结构,2024,54(13):141-148.
PAN Y W, WANG N, ZHANG Z S, et al. Excavation deformation characteristics and optimization design of deep and large foundation pit in complex strata[J]. Building structure, 2024, 54(13):141-148.
- [2] 周浩飞,王德飞,陈家康,等. 邻近地铁规划控制区超深超大基坑快速施工关键技术[J]. 施工技术(中英文),2025,54(18):107-112.
ZHOU H F, WANG D F, CHEN J K, et al. Key technologies for rapid construction of ultra-deep and ultra-large foundation

excavation adjacent to subway planning control area [J]. Construction technology, 2025, 54(18):107-112.

- [3] 刘守花,王兆亮,阳军生,等. 广州软土地区狭长型深基坑变形性状及影响因素分析[J]. 建筑科学,2025,41(3):140-148.
LIU S H, WANG Z L, YANG J S, et al. Study on deformation mechanism and influence factors of long and narrow deep excavation in Guangzhou soft soil area [J]. Building science, 2025, 41(3):140-148.
- [4] 蔡惠华. EPC 模式下综合管廊设计优化与施工关键技术研究[J]. 施工技术(中英文),2024,53(12):107-112.
CAI H H. Key technologies of design optimization and construction of utility tunnel under EPC mode [J]. Construction technology, 2024, 53(12):107-112.
- [5] 宋许根,甄洁,朱孟君,等. 不同坑底加固方式对管廊基坑变形影响研究[J]. 建筑科学与工程学报,2025,42(1):179-190.
SONG X G, ZHEN J, ZHU M J, et al. Research on influence of different bottom reinforcement forms on deformation of pipe gallery excavation [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2025, 42(1):179-190.
- [6] 庞欢,浮朝晖,陈奎,等. 深基坑开挖过程中既有管线保护措施及变形机理分析[J]. 施工技术(中英文),2025,54(13):44-50.
PANG H, FU Z H, CHEN K, et al. Protection measures of deep foundation excavation to existing pipeline and deformation mechanism analysis [J]. Construction technology, 2025, 54(13):44-50.
- [7] 王纯岩,黄惟. 基于矿山法的综合管廊与隧道共建技术[J]. 施工技术(中英文),2024,53(24):91-100.
WANG C Y, HUANG W. Co-construction technology of utility tunnel and tunnel based on mining method [J]. Construction technology, 2024, 53(24):91-100.
- [8] 安永增. 城市地下综合管廊工程中的基坑支护施工技术[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024(6):132-134.
AN Y Z. Construction technology of foundation pit support in urban underground utility tunnel project [J]. Theoretical research in urban construction, 2024(6):132-134.
- [9] 贾连辉,闫扬义,薛广记,等. 绿色装配式综合管廊 U 盾架管机设计及其施工技术研究[J]. 现代隧道技术,2025,62(1):275-284.
JIA L H, YAN Y Y, XUE G J, et al. Design and construction technology of U-shaped shield pipe erecting machine for green prefabricated integrated utility tunnels [J]. Modern tunnelling technology, 2025, 62(1):275-284.
- [10] 刘池,于潇,随红全,等. 承压水地层管廊基坑开挖变形特征及抗突涌稳定性分析[J]. 科学技术与工程,2023,23(36):15617-15626.
LIU C, YU X, SUI H Q, et al. Analysis of deformation characteristics and stability against water inrush during excavation of foundation pit for utility tunnel in confined water stratum [J]. Science technology and engineering, 2023, 23(36):15617-15626.