

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.019

下穿城市道路综合管廊施工超前 支护管棚与小导管参数分析

方诗圣¹, 吴国京¹, 赵志坤²

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 中铁四局集团第四工程有限公司, 安徽 合肥 230011)

摘要:在城市道路下方进行过路管廊施工可能会引起地层不均匀沉降,甚至过度沉降,影响正常交通,甚至引发交通事故。文章为研究浅埋暗挖管廊工程对路面沉降的影响,以合肥宿松路快速化改造工程三标段综合管廊工程为背景,结合现场实测与数值模拟对超前支护中的管棚和小导管参数进行分析。结果表明:管棚的直径对控制地表沉降几乎无影响;管棚环向间距存在最佳值0.4 m;管棚与衬砌距离增大,管棚的支护效果降低;管棚支护可单独使用,小导管只能作为辅助超前支护方式。管棚与小导管的综合支护作用极有可能为两者分别支护作用的叠加;考虑实际施工中的其他不稳定因素,可确定最佳支护方案为:管棚直径69~89 mm、环向间距0.4 m、与衬砌距离0.3 m,小导管外插角45°~60°、环向间距0.3~0.4 m、长度2.5~3.5 m。

关键词:综合管廊;管棚;小导管;台阶法;地表沉降

中图分类号:TU990.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)01-0133-06

Parameter analysis of advanced support pipe shed and small conduit for the construction of integrated pipe gallery under urban roads

FANG Shisheng¹, WU Guojing¹, ZHAO Zhikun²

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. The Fourth Engineering Co., Ltd. of CTCE Group, Hefei 230011, China)

Abstract: The construction of crossing gallery under the urban roads may cause uneven settlement or even excessive settlement, which will affect the normal traffic and even cause traffic accidents. In order to study the influence of shallow buried pipe gallery project on pavement settlement, based on the integrated pipe gallery project of the third section of the rapid transformation project of Susong Road in Hefei City, the parameters of pipe shed and small conduit in advanced support were analyzed by field measurement and numerical simulation. The results show that the diameter of pipe shed has little effect on the control of ground surface settlement. There is an optimal circumferential spacing of 0.4 m for pipe shed. As the distance between pipe shed and lining increases, the supporting effect of pipe shed decreases. The pipe shed support can be used alone, and small conduit can only be used as an auxiliary advanced support method. The comprehensive supporting effect of pipe shed and small conduit is likely to be superposition of their respective supporting effects. Considering other unstable factors in actual construction, the best supporting scheme is as follows: for pipe shed, the diameter is 69-89 mm, the circumferential spacing is 0.4 m, and the distance from the lining is 0.3 m; for small conduit, the external intercalation angle is 45°-60°, the circumferential spacing is 0.3-0.4 m, and the length is 2.5-3.5 m.

Key words: integrated pipe gallery; pipe shed; small conduit; step method; ground surface settlement

收稿日期:2023-08-23;修回日期:2023-11-24

基金项目:安徽省住房城乡建设科学技术计划资助项目(2023-YF018)

作者简介:方诗圣(1962—),男,安徽安庆人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:2899028022@qq.com.

在城市道路下方进行过路管廊施工可能会引起地层不均匀沉降,甚至过度沉降,进而影响正常交通,严重的还会引发交通事故。超前小导管和大管棚超前预支护方式是 2 种地下工程中常用的加固措施。超前小导管有利于开挖后和初始支护时间内围岩的稳定性,防止掌子面松动或坍塌,大管棚支护施工简单、作用效果明显,能有效保护管廊围岩稳定性,2 种支护方式兼备成本低廉、支护距离长和效益高等特点,适合作为综合管廊工程的超前支护方式,且两者也经常搭配使用。

学者们针对暗挖管廊的加固措施,开展了大量关于超前小导管和大管棚支护的研究分析^[1-6]。文献[7]发现,若施工使用超前小导管与大管棚相结合的超前支护方式,则地表和管线的沉降发展趋势将与隧道拱顶的沉降发展过程类似;文献[8]利用 Plaxis 软件对管棚支护参数进行优化模拟分析,发现管棚变形及受力主要呈现出阶梯状、波浪状的变化规律;文献[9]采用改进的围岩隧道分级法对隧道围岩环境进行分级,分析管棚直径、管棚数量、钢筋厚度和布置范围等不同管棚设计参数对其支护效果的影响,确定合适参数值;文献[10]基于温克尔地基模型和刚体极限平衡法,讨论超前小导管的各种参数后,发现超前小导管存在一个最优外插角度;文献[11]研究发现对小导管外插角、长度、环向间距等重要参数的调整可提高围岩的有效支撑力,确保现场施工效率和安全;文献[12]研究发现,超前小导管管径对围岩变形的影响较小,小导管的长度对超前支护效果的影响较大,并且计算得到小导管的最优长度。

在管棚有限元模型分析领域已经有了较多的成果,但在实际中对于管棚设计和施工参数的合理性还存在诸多疑问,需要通过实际工程和相关数值分析做进一步讨论和研究。本文以合肥宿松路快速化改造工程三标段综合管廊工程为依托,通过现场实测地表沉降数据与有限元模拟数据进行对比验证有限元模型的准确性,改变管棚和小导管的参数分析管廊地表沉降的变化规律,同时给出合理的超前支护设计参数,为浅埋暗挖管廊超前支护设计与施工提供参考。

1 工程概况

综合管廊工程位于锦绣大道 K2+075~K2+085 区段,施工范围内的土层从上至下依次为素填土、淤泥质土、粉质黏土、黏土和砂岩,暗挖施工所在土层为黏土层,硬塑状态为主,下部局部

呈坚硬状态,地表水系较为发达。南北向过路管廊暗埋方案长 47.9 m,采用拱顶直墙马蹄形断面,初支净高约 6.1 m、净跨约 5.1 m,通道拱顶覆土厚度约为 9.0 m。超前支护采用 $\phi 89$ mm 管棚与 $\phi 42$ mm 超前小导管注浆,初期支护采用喷砼+工 18 型钢拱架复合式衬砌,开挖方式为上下台阶预留核心土法开挖,台阶长 3.0 m,进尺为 0.5 m,标准暗挖横断面如图 1 所示。

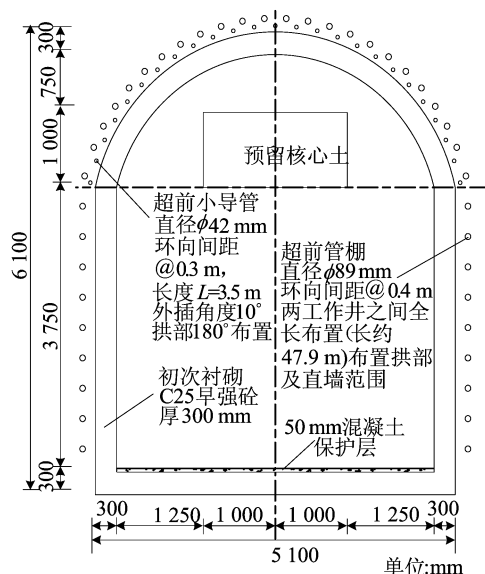


图 1 标准暗挖横断面

2 数值模拟

2.1 计算模型

根据圣维南原理,模型边界取 3~5 倍管廊净跨即可消除边界效应的影响,确定模型尺寸为长 48 m(沿管廊纵向),宽为 40 m(沿管廊横向),自地表向下 36 m,假定隧道围岩为均质、连续的各项同性材料。根据实际工程中地质勘察报告以及经验成果,将一定深度范围内岩土类别相近的土体进行合并,建立从地表以下 0~<3.9 m 为杂填土层、3.9~<6.9 m 为黏土层 1、6.9~<36.0 m 为黏土层 2 的数值模型,共有 110 208 个网格,计算模型如图 2 所示。锦绣大道地面车辆荷载假定为均布荷载,土层参数见表 1 所列。

采用 FLAC3D 有限差分分析软件建立地层结构三维模型,土体的本构关系采取摩尔-库伦模型。土体采用实体单元,不同的土层采用不同的材料模拟,初次衬砌采用结构单元 liner 进行模拟,管棚支护采用二维线性 beam 梁单元模拟,共设置 42 根,小导管和锁脚锚管支护通过二维线性 cable 锚杆单

元模拟,小导管外插角为 10°,纵向间距为 1.0 m,锁脚锚管外插角为 25°,纵向间距为 0.5 m。

表 1 土层参数

土层	E/MPa	ν	$\varphi/(\circ)$	c/kPa	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$
杂填土	8.8	0.38	8.0	7.0	1 939
黏土 1	48.7	0.31	13.4	5.7	2 031
黏土 2	55.1	0.30	14.4	6.5	2 051

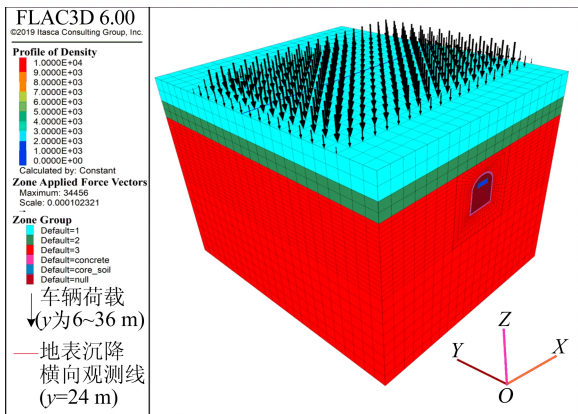


图 2 计算模型网格图

台阶法开挖主要分为 4 步,具体施工步骤如图 3 所示,先开挖①上台阶,在支护和衬砌施工完成后,开挖②下台阶并支护,随后重复该流程直至管廊开挖完毕。

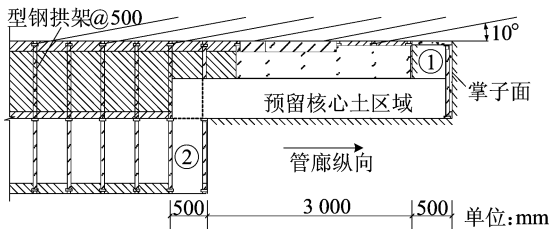


图 3 台阶法施工步骤图

2.2 监测数据与模拟结果对比

现场监测方案包括地表沉降、拱顶沉降、净空收敛等,地表沉降共设 5 道东西向监测线,间距 12 m,每个断面布置 7 个测点,具体位置如图 4 所示。选取管廊横向中心线地表 DBC3 测点系作为代表分析,对应图 2 中地表沉降观测线,2023 年各测点施工过程中的沉降变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,地表各测点的沉降随时间增长呈现逐渐增大的趋势,且越靠近管廊中轴线的测点沉降值也越大,根据分析,其他测点系也符合这一沉降规律。管廊开挖完成后,该测点系的最大沉降值为 -22.1 mm,对应测点为 DBC3-4;最小值为 -11.3 mm,对应测点为 DBC3-7;各测

点的沉降值均小于允许值 -30.0 mm,符合现场施工要求。该测点系的最终沉降模拟值与监测值对比如图 6 所示。

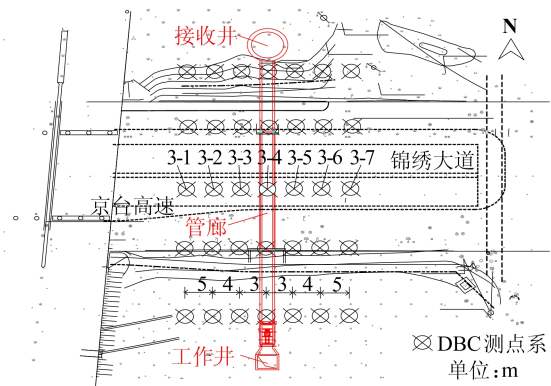


图 4 地表沉降监测点布置图

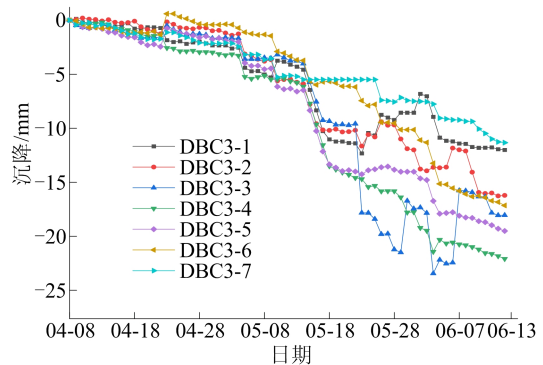


图 5 DBC3 测点系累计沉降

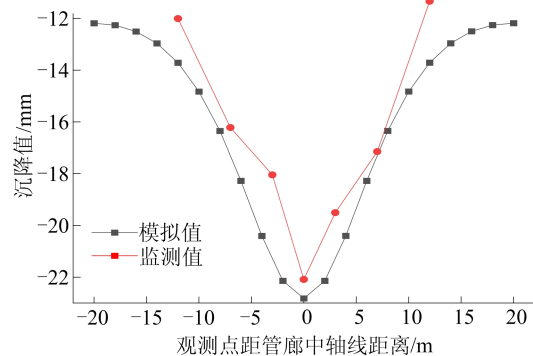


图 6 地表横向累计沉降对比

由图 6 可知,地表监测数据和数值模拟得到的数据变化趋势基本一致。因为实际地形下管廊地表地质情况复杂多变,所以监测值与模拟值存在一定差距,监测值略小于模拟值。总体来说,数值模拟结果与现场监测结果吻合良好,说明本模型是可靠的,实际采用的管棚与小导管的超前支护方案满足现场施工的需求。

2.3 管棚参数影响分析

管棚超前支护方式可以在管廊周围形成加固

带,承受大部分围岩荷载,有效改善地层承载能力,控制地表沉降。

为研究管棚对地表沉降的影响,探究管棚支

护的效果,选择不使用小导管,对管棚的直径、环向间距、与衬砌距离进行模拟分析,模拟结果如图 7 所示。

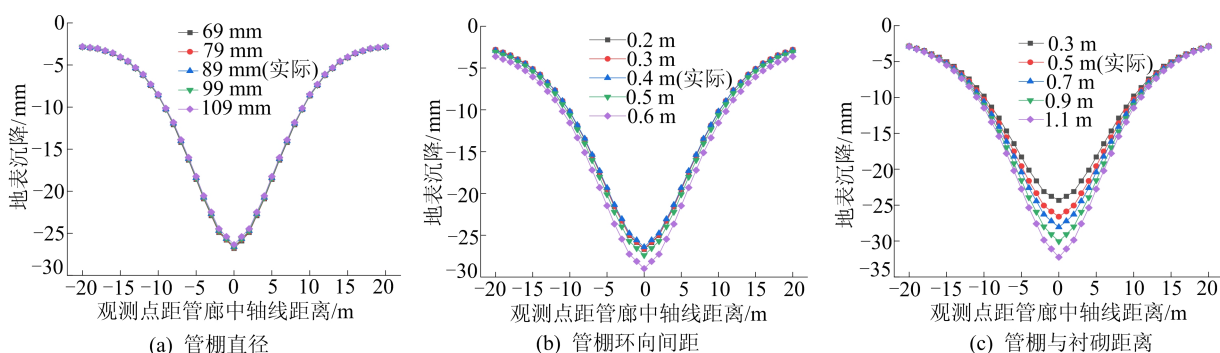


图 7 管棚参数与观测线地表沉降关系

管棚的不同参数对地表沉降的影响各有不同。由图 7 可知:在模拟的管棚直径区间内,观测线上的地表沉降几乎没有变化,说明管棚直径对控制地表沉降影响甚微;管棚的环向间距从 0.2 m 增加至 0.6 m 时,观测线上的地表沉降呈先减小后增大的趋势,其中,环向间距为 0.4 m(实际设计)时,地表沉降最小,说明管棚的环向间距与地表沉降呈非线性关系;随着管棚与衬砌距离的增加,地表沉降也随之不断增大。为更加清晰地了解管棚参数对地表沉降的作用,将观测线上的最大地表沉降与管棚参数建立联系,关系图如图 8 所示。

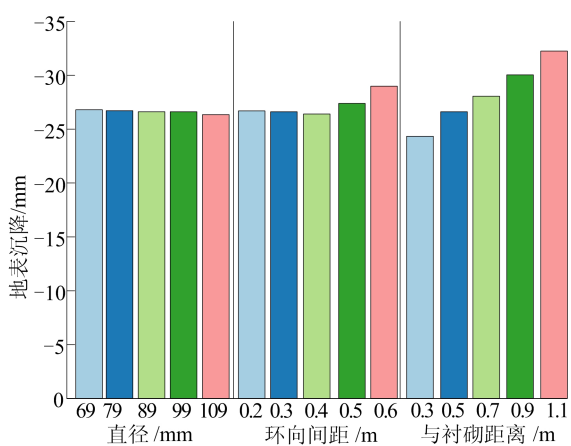


图 8 管棚参数与地表最大沉降关系

管棚直径对地表沉降影响甚微,因此本文不做分析。环向间距为 0.4 m 时,地表最大沉降为 -26.4 mm,此时管棚支护达到最佳支护效果;环向间距减小至 0.2 m 时,地表最大沉降变化至 -26.7 mm,增大了 1.1%,环向间距减小虽然会一定程度上干扰管棚的支护效果,但干扰程度较小;环向间距增加至 0.6 m 时,地表最大沉降变

化至 -29.0 mm,增大了 9.8%。环向间距代表着管棚排列的疏密程度,可以看出,管棚的疏密程度有一个最佳值(环向间距为 0.4 m),密集排列(环向间距减小)或疏散排列(环向间距增大)都会降低管棚的支护效果,但疏散排列对支护效果的影响远大于密集排列。管棚与衬砌距离从 0.3 m 增加至 1.1 m 时,地表最大沉降从 -24.3 mm 变化至 -32.2 mm,超出了地表沉降的控制标准 -30.0 mm,增长幅度达到 35.2%,管棚与衬砌距离取 0.3 m 可以得到比实际设计的 0.5 m 更佳的支护效果,从控制地表沉降的角度来看,管棚与衬砌的距离对地表沉降的影响比管棚的直径和环向间距更加显著。

图 8 中仅有少部分管棚参数下的地表沉降超过限值,且都为管棚与衬砌距离大于 0.7 m 时,实际施工中可以避免这一情形,单独使用管棚作为预支护手段。

2.4 小导管参数影响分析

小导管超前支护可以通过锚杆本身及注浆形成围岩加固区,承担上部土层压力,减小地表沉降。现排除管棚支护和拱顶可能存在障碍物等因素的干扰,探究小导管外插角、环向间距和长度这 3 个参数的支护效果,小导管参数与观测线地表沉降关系如图 9、图 10 所示。

从图 9、图 10 可以看出:地表沉降随着小导管外插角和长度的增加而减小,当外插角大于 30° 或者长度大于 2.5 m 时,地表最大沉降的减小幅度较小;相反,小导管环向间距越大,小导管越稀疏,地表沉降也越大,当环向间距大于 0.4 m 时,地表最大沉降的增长幅度较大。

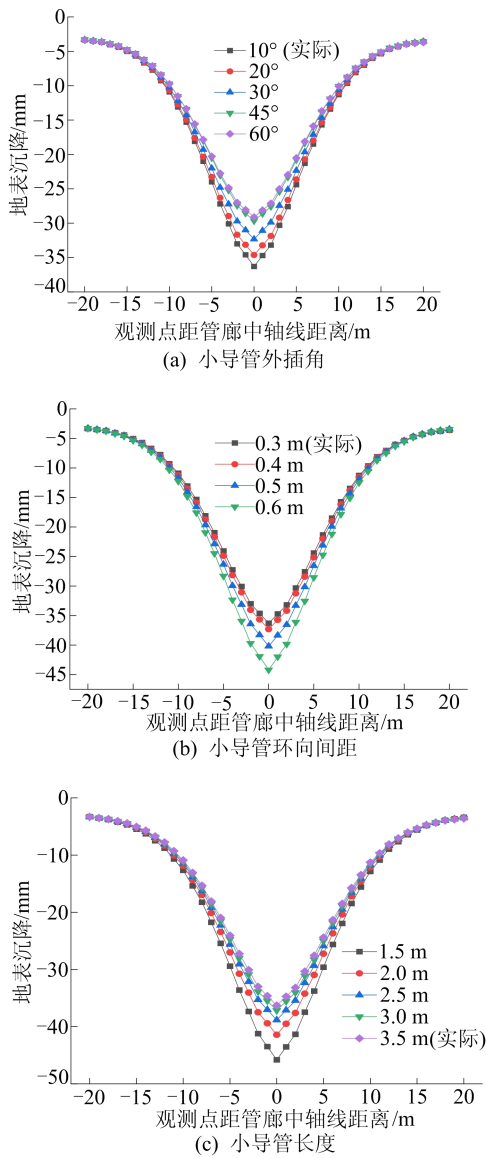


图 9 小导管参数与观测线地表沉降关系

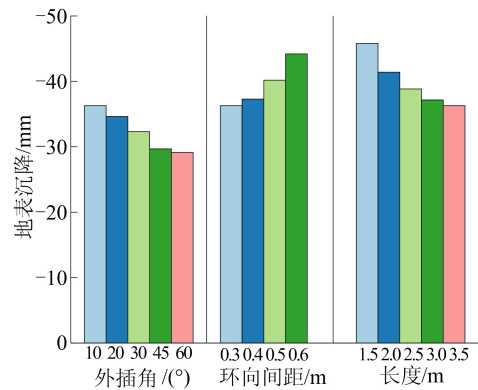


图 10 小导管参数与地表最大沉降关系

由于没有管棚支护,地表沉降随小导管参数变化有明显波动,且各种小导管参数下地表沉降均超过-30.0 mm,说明在管廊施工时,主要由管棚承受地层压力,控制地表沉降,小导管起辅助作用,需要配合其他超前支护共同使用。

2.5 管棚与小导管综合效应分析

由上述分析可知,实际施工中应使用管棚与小导管结合的超前支护方式,因此需要考虑两者的综合支护作用。选择将上述分析的管棚与小导管参数进行组合,取最终的观测线地表最大沉降作为评价标准,数值模拟结果见表 2 所列。表 2 中,数据均为固定管棚与小导管各个参数,其余参数为实际尺寸时所得,如:模拟管棚直径为 69 mm、小导管外插角为 20°时,管棚其他参数为实际设计的环向间距 0.4 m、与衬砌距离 0.5 m,小导管其他参数为实际设计的环向间距 0.3 m、长度 3.5 m。

表 2 管棚和小导管参数与观测线地表最大沉降关系

单位:mm

管棚参数	外插角/(°)					环向间距/m				长度/m					
	10	20	30	45	60	0.3	0.4	0.5	0.6	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	
直径/mm	69	-21.9	-20.9	-19.5	-17.9	-17.6	-21.9	-22.5	-24.3	-26.7	-27.7	-25.0	-23.5	-22.5	-21.9
	79	-22.0	-21.0	-19.6	-18.0	-17.7	-22.0	-22.6	-24.4	-26.8	-27.8	-25.1	-23.6	-22.5	-22.0
	89	-22.1	-21.1	-19.7	-18.1	-17.7	-22.1	-22.7	-24.5	-26.9	-27.9	-25.2	-23.6	-22.6	-22.1
	99	-22.2	-21.2	-19.8	-18.2	-17.8	-22.2	-22.8	-24.6	-27.0	-28.0	-25.3	-23.8	-22.7	-22.2
	109	-22.3	-21.3	-19.9	-18.3	-17.9	-22.3	-22.9	-24.7	-27.2	-28.2	-25.5	-23.9	-22.9	-22.3
环向间距/m	0.2	-22.3	-21.3	-19.9	-18.3	-17.9	-22.3	-23.0	-24.7	-27.2	-28.2	-25.5	-23.9	-22.9	-22.3
	0.3	-22.3	-21.3	-19.8	-18.2	-17.9	-22.3	-22.9	-24.7	-27.1	-28.1	-25.4	-23.8	-22.8	-22.3
	0.4	-22.1	-21.1	-19.7	-18.1	-17.7	-22.1	-22.7	-24.5	-26.9	-27.9	-25.2	-23.6	-22.6	-22.1
	0.5	-22.9	-21.9	-20.4	-18.7	-18.4	-22.9	-23.6	-25.4	-27.9	-28.9	-26.2	-24.5	-23.5	-22.9
	0.6	-24.3	-23.1	-21.6	-19.8	-19.5	-24.3	-24.9	-26.9	-29.5	-30.6	-27.7	-26.0	-24.8	-24.3
与衬砌距离/m	0.3	-20.2	-19.3	-18.0	-16.5	-16.2	-20.2	-20.8	-22.4	-24.6	-25.5	-23.1	-21.6	-20.7	-20.2
	0.5	-22.1	-21.1	-19.7	-18.1	-17.7	-22.1	-22.7	-24.5	-26.9	-27.9	-25.2	-23.6	-22.6	-22.1
	0.7	-23.3	-22.2	-20.8	-19.1	-18.7	-23.3	-23.9	-25.8	-28.4	-29.4	-26.6	-24.9	-23.9	-23.3
	0.9	-24.9	-23.8	-22.2	-20.4	-20.0	-24.9	-25.6	-27.6	-30.4	-31.5	-28.5	-26.7	-25.5	-24.9
	1.1	-26.8	-25.5	-23.8	-21.9	-21.5	-26.8	-27.5	-29.6	-32.6	-33.8	-30.6	-28.7	-27.4	-26.8

通过比较发现,只考虑管棚或者只考虑小导管得到的观测线地表最大沉降的规律对综合考虑管棚和小导管依然适用,这说明两者的支护作用类似于叠加的结果,因此可以单独分析管棚和小导管的支护效果,再将两者的最佳支护参数进行结合得到最佳的支护组合。2.3节和2.4节分析得到,管棚与衬砌距离为0.3 m、小导管外插角为60°时,观测线地表沉降达到最小值。从表2可以看出,管棚直径89 mm、环向间距0.4 m、与衬砌距离0.3 m,小导管外插角60°,环向间距0.3 m、长3.5 m时,观测线最大沉降为最小值-16.2 mm,即为最佳支护方案。但考虑到管棚直径对控制沉降影响不大,实际施工中还需保证掌子面的稳定性和经济性等因素,因此最佳支护方案调整为管棚直径69~89 mm、环向间距0.4 m、与衬砌距离0.3 m,小导管外插角45°~60°、环向间距0.3~0.4 m、长度2.5~3.5 m。

3 结 论

本文依托合肥宿松路快速化改造三标段综合管廊工程,通过对实测地表沉降数据与数值模拟数据的对比,验证数值模型的准确性。在此基础上,对超前支护进行参数影响分析,得到了管棚与小导管参数对地表沉降的影响规律和最佳支护方案,最终得出以下结论。

1) 数值模拟结果与现场监测结果吻合良好,实际监测值略小于模拟值,实际采用的管棚与小导管超前支护方案满足现场施工的需求。

2) 在模拟区段内,管棚的直径对控制地表沉降几乎无影响;管棚环向间距存在最佳值0.4 m,环向间距减小或增大都会降低管棚的支护效果,但环向间距增大对支护效果的影响远大于环向间距减小的影响;随着管棚与衬砌距离增大,管棚的支护效果随之降低,两者距离取0.3 m时,支护效果最佳;管棚支护可以单独作为一种超前支护运用到实际施工中。

3) 管廊施工时,主要由管棚承受地层压力,控制地表沉降,小导管只起辅助作用,需要配合其

他超前支护措施共同使用。

4) 管棚与小导管的综合支护作用极有可能为两者分别支护作用的叠加;考虑实际施工中的其他不稳定因素,最佳支护方案为管棚直径69~89 mm、环向间距0.4 m、与衬砌距离0.3 m,小导管外插角45°~60°、环向间距0.3~0.4 m、长度2.5~3.5 m。

[参 考 文 献]

- [1] 张小波,张雕,姚池,等.考虑微拱效应的隧道洞口段管棚合理间距确定方法及参数分析[J].岩土力学,2023,44(6):1625-1635.
- [2] 王文,雷啸天,李德武.管棚受力和变形的分析预测方法及工程应用[J].岩土工程学报,2022,44(2):352-359.
- [3] 丁祖德,付江,刘新峰,等.考虑空间效应的岩堆体隧道管棚力学模型研究[J].铁道学报,2018,40(7):121-127.
- [4] 陈峥,何平颜,杜民,等.超前支护下隧道掌子面稳定性极限上限分析[J].岩土力学,2019,40(6):2154-2162.
- [5] 张顶立,孙振宇,侯艳娟.隧道支护结构体系及其协同作用[J].力学学报,2019,51(2):577-593.
- [6] 王海波,徐明,宋二祥.超前支护的均一化横观各向同性弹性模型[J].华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(12):127-131,139.
- [7] 黄俊,黄彬.合肥轨道交通2号线科学大道站暗挖通道施工技术[J].城市轨道交通研究,2019,22(11):9-13.
- [8] 姬云鹏,房灵国,唐昊天,等.隧道开挖全过程管棚支护受力研究[J].现代隧道技术,2023,60(3):123-138.
- [9] MEI Y, KE X, ZHOU D B, et al. Study on the whole process application of advanced grouting pipe shed support under urban complex stratum conditions[J]. Geomechanics for Energy and the Environment, 2023, 33: 100432.
- [10] 安永林,周进,欧阳鹏博,等.超前支护隧道掌子面的稳定性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2021,28(2):604-617.
- [11] 李金奎,任恒.城市地下通道交叉中隔墙法超前支护小导管的参数优化分析[J].城市轨道交通研究,2023,26(7):76-81.
- [12] 刘运生,董敏.超前小导管参数对超前支护的影响分析[J].都市快轨交通,2013,26(1):97-99.

(责任编辑 吴 亮)