

doi:10.12068/j.issn.1005-3026.2024.11.016

# 新型管幕工法修建地铁车站地层变形特性及参数优化

邱建<sup>1</sup>, 赵文<sup>1</sup>, 路博<sup>1</sup>, 孙旭<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中铁第九集团第四工程有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

**摘要:** 针对传统管幕工法承载力低及施工工序复杂等难题, 提出了一种新型管幕工法—小直径管幕顶板工法, 并应用于沈阳地铁和平南大街站工程。首先, 参照实际工程构建了三维有限差分模型, 对施工过程中地层变形特性进行研究; 然后, 阐明了管幕参数对车站施工结束后跨中最大地表沉降、管幕施工造成的地层扰动、管幕刚度以及造价4个指标的影响规律; 最后, 结合模糊数学理论优化了管幕参数。研究表明: 小直径管幕顶板工法修建地铁车站时, 拆除导洞壁施作顶板阶段是施工过程中控制地层变形的关键阶段, 影响上述4个指标的最关键参数为钢管直径, 优化后的最佳参数组合: 钢管直径为400 mm、钢管间距为800 mm、钢管壁厚为10 mm、管内混凝土为C40、钢管采用Q390钢。

**关键词:** 小直径管幕工法; 变形特性; 参数优化; 地铁车站; 模糊数学

中图分类号: TU 93 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)11-1645-11

## Ground Deformation Characteristics and Parameter Optimization of Metro Stations Constructed by Novel Pipe Roofing Method

QIU Jian<sup>1</sup>, ZHAO Wen<sup>1</sup>, LU Bo<sup>1</sup>, SUN Xu<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. The Fourth Engineering Co., Ltd. of China Railway Ninth Bureau Group, Shenyang 110000, China. Corresponding author: ZHAO Wen, E-mail: wenneu@163.com)

**Abstract:** In response to the challenges of low bearing capacity and complex construction procedures in traditional pipe roofing method, a novel pipe roofing method, namely small-diameter pipe roofing method is proposed, which is applied in the construction of the Heping South Street Station of Shenyang Metro. A three-dimensional finite difference model for this project is established, to investigate the ground deformation characteristics during the construction. The influence of pipe-roof parameters on four indicators: maximum surface settlement at the mid-span after the station construction, ground disturbance caused by pipe roofing construction, pipe roofing stiffness, and cost is clarified. Finally, the pipe-roof parameters are optimized using fuzzy mathematics theory. The research results show that when constructing a subway station using the small-diameter pipe roofing method, the stage of removing the pilot tunnel wall and constructing the roof is the critical for controlling ground deformation. The most critical parameter affecting the above four indicators is the steel tube diameter. The optimized combination of parameters is steel tube diameter of 400 mm, steel tube center distance of 800 mm, steel tube wall thickness of 10 mm, concrete strength grade inside the tube is C40, and the steel tube strength grade is Q390.

**Key words:** small diameter pipe roofing method; deformation characteristics; parameter optimization; subway station; fuzzy mathematics

收稿日期: 2023-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878127).

作者简介: 邱建(1998-), 男, 江西赣州人, 东北大学硕士研究生; 赵文(1962-), 男, 辽宁沈阳人, 东北大学教授, 博士生导师.

随着我国城市轨道交通的快速发展,越来越多的城市开始修建地铁,地铁网线在不断地扩张与完善,地铁建设进入新的发展阶段.目前地铁多处于城市中心繁华地段,地下管线与现有结构错综复杂,这使得地铁建设面临着越来越严峻的考验.对于一些不适合明挖法施工且对周围环境影响要求严格的地段,管幕工法能够很好地进行施工.管幕工法是一种地下暗挖超前支护施工方法,一般是通过顶管机将多根钢管顶进土体,然后通过相邻管间的连接形成封闭或半封闭的管幕结构,其施工工艺较为简单,能够有效控制沉降,是当下地铁建设的主流方式.管幕工法兴起于国外,最早在比利时、日本进行运用,后引入到新加坡、马来西亚和韩国等<sup>[1-3]</sup>,于20世纪末引进到我国并得到快速发展.

目前关于管幕结构的研究,主要在管幕结构形式的创新方面,传统的管幕结构施工工序繁杂、安全性低,针对该问题部分学者对传统管幕工法的施工工艺和结构形式进行了优化和改进,形成了例如管幕箱涵法<sup>[4]</sup>、PPM (pipe-roof pre-construction method)<sup>[5]</sup>和小直径管幕横梁工法<sup>[6]</sup>等各式各样的管幕工法,同时由于传统管幕的锁扣连接会造成管幕的横向刚度和承载力较低,导致主体施工时需要布设更多临时支护,施工变得更加繁琐,因此还有学者对管幕结构的钢管间的横向连接进行了优化,提出各种不同的管间连接方式,如采用钢管连接、螺栓和翼缘板连接、钢管相互切割焊接和钢弧咬合搭接等,形成了管幕预筑法、咬合型管幕工法、STS (steel tube slab), SSCP (steel support cutting pipe) 等各种新型管幕工法<sup>[7-10]</sup>.在管幕结构的受力与变形方面,学者们主要是通过数值模拟和模型试验等手段对管幕结构进行研究,管幕结构的变形与管幕的承载力和刚度等息息相关,因此部分学者对管幕结构的整体抗弯刚度、破坏模式及承载力等展开了研究<sup>[11-13]</sup>,同时还通过理论分析的方法建立了各种管幕变形的计算模型<sup>[14-15]</sup>.在计算管幕结构的变形时,往往需要知道管幕的受力情况才能进行分析计算,因此部分学者对管幕开挖的力学行为和管幕结构的受力机理等进行了研究<sup>[16-17]</sup>.在管幕参数分析的研究方面,学者们主要研究的内容有3方面:一是管幕结构自身参数的研究<sup>[18-19]</sup>,例如钢管直径、钢管间距、布置范围和翼缘板厚度等参数对管幕变形和地表变形的影响;二是管幕的注浆参数的研究<sup>[20]</sup>,例如注浆区半径、注浆

体弹性模量和注浆厚度等对支护效果的影响规律;三是对管幕结构参数的优化选取研究<sup>[21-22]</sup>,部分学者在管幕参数对于支护性能的影响规律的基础上,通过模糊数学、数值模拟和最小二乘法等方法对参数进行优化研究,以沉降控制值为标准得出各参数的合理取值范围.

综上所述,目前对于管幕结构方面的研究已经较为成熟,但研究对象多为传统管幕结构,在结构的创新方面大多数是把钢管直径往大的方向选取,以此来保证安全性,同时把钢管之间的横向连接做得更加复杂牢固,但是较大直径的钢管往往代表着较大的经济成本,且复杂的横向连接也会导致施工流程复杂,增加了施工周期.因此本文提出了一种新型的暗挖工法——小直径管幕顶板工法,该工法的钢管直径在300~600 mm之间,同时管间无锁扣等横向连接,而是采用在管幕结构下方施作顶板的方式,让管幕和顶板形成一个共同的受力结构.同时,目前管幕结构参数研究方面大多数是单因素对于结构作用的影响规律,未考虑多个因素耦合在一起的共同作用规律,而且对于多参数一起作用的参数优化研究也较少,更是缺乏对于新型的小直径管幕工法方面的研究,这造成了小直径管幕工法在设计方面理论研究落后,管幕参数多凭经验选取,进而导致结构的不合理与材料浪费,极大地约束了小直径管幕顶板工法的推广与应用.

## 1 工程背景

### 1.1 小直径管幕顶板工法简介

小直径管幕顶板工法是一种新型的浅埋暗挖工法,采用的钢管直径范围一般在300~600 mm之间,其中相邻管之间不设置横向连接,在管与管之间浇灌水泥砂浆,管内浇筑高流动性自密实混凝土,而在管幕下方施作顶板,管幕与顶板共同受力.小直径管幕结构示意图见图1.

### 1.2 小直径管幕顶板工法优点

小直径管幕顶板工法与常见的新型管幕工法例如NTR法(new tubular roof method)和STS管幕工法相比,由于钢管直径较小且管间没有锁扣(见图2),因此施工变得更加灵活简便,同时对顶管的要求也低,从而减少了顶管时间、缩短了工期;而与传统的管幕工法相比,小直径管幕结构下方施作了顶板,顶板与管幕结构共同作用,整体承载能力增强,能够很好地适用于具有高标

准沉降控制要求的工程项目,而且也极大地增加了施工安全性,因此具有良好且广泛的应用前景.

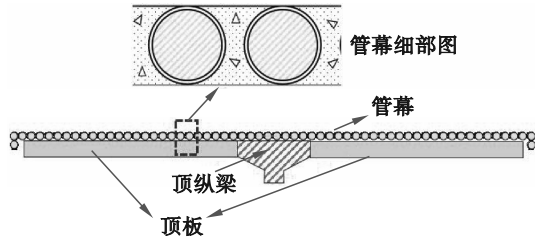


图 1 小直径管幕结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of small diameter pipe roofing structure

### 1.3 工程概况

和平南大街站地处南八马路与和平南大街相交路段,沿着和平南大街进行布置,其周围环境复杂、地下管线密布,地下存在着众多的燃气管和排水管,最深的燃气管约为 3.5 m,与管幕位置非常接近,因此有着极高的沉降控制要求.暗挖段车站是一个双跨三层结构,上覆土厚度为 5 m,长度为 38 m,宽度约为 24.8 m,底板埋深为 23.59 m.

本工程管幕采用的是直径为 457 mm,壁厚为 16 mm 的 Q235 无缝钢管,相邻管中心距 500 mm,

管内浇灌 C30 混凝土.

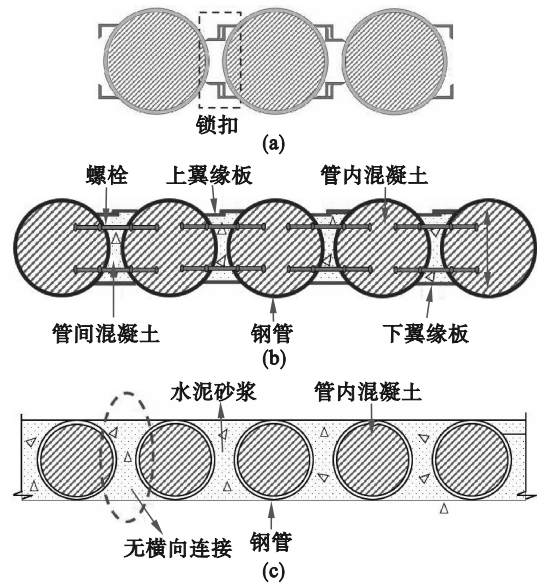


图 2 管幕连接示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pipe roofing connection

- (a) — 管幕锁扣连接;
- (b) — STS 管幕螺栓与翼缘板连接;
- (c) — 小直径管幕结构管间无横向连接.

### 1.4 施工步骤

小直径管幕顶板工法施工工序如图 3 所示,主要可分为 8 个施工步骤.

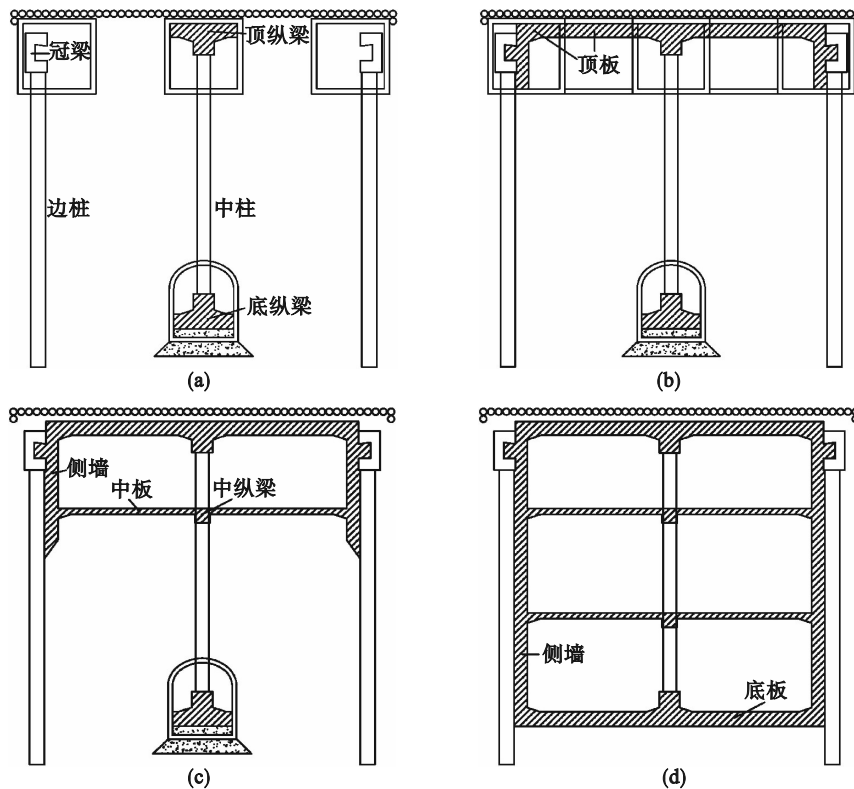


图 3 施工步骤

Fig. 3 Construction steps

- (a) — 施工步骤 1)、2)、3);
- (b) — 施工步骤 4);
- (c) — 施工步骤 5);
- (d) — 施工步骤 6)、7)、8).

1) 顶进顶部及侧向管幕,钢管内浇筑高流动性自密实混凝土,管间采用水泥砂浆进行加固.

2) 管幕施工完成后,先开挖下中导洞,待其贯通后,上部的2个边导洞先行开挖,然后再开挖中间导洞,采用台阶法开挖并随着开挖进行初支.

3) 在下中导洞施工底纵梁,上边导洞内施工机械成孔桩,桩顶施工冠梁,上中导洞施工钢管混凝土柱及顶纵梁.

4) 开挖上边导洞和上中导洞之间土体,贯通后根据监测情况分段拆除导洞壁和立模浇筑顶板(每6~12 m).

5) 继续开挖土体至车站上层中板处,施工车站上层结构及侧墙.

6) 按顺序向下施工至车站中层中板处,施工中板、中纵梁及侧墙.

7) 继续开挖下部土体,然后浇筑底板和下层侧墙.

8) 施工剩余侧墙及结构.

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立及基本假定

本文通过 Flac 3D 进行数值模拟计算,按照和平南大街实际工程建模,模拟过程按照实际施工过程进行模拟,模型尺寸定为长 150 m,宽 38 m,高 50 m.模型荷载主要考虑路面荷载和土体自重,路面荷载根据《地铁设计规范》(GB 50157—2013)取 20 kPa,固定模型周围 4 个面及底面,只留上表面作为自由面,见图 4.模型计算采用实体单元和结构单元交叉计算的方式.其中车站的管幕为多个直线段构成,具有相同的对称截面,故采用梁结构单元,中柱和边桩同样使用梁结构单元.土体则采用 Mohr Coulomb 本构.地下水默认处理完毕,同时也不考虑顶管施工引起的地层变形,忽略钢管顶进对地层的扰动.

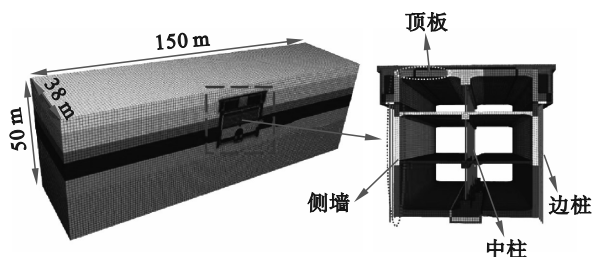


图 4 数值模型示意图

Fig. 4 Numerical model schematic

### 2.2 材料参数

地层参数方面根据工程实际勘察报告所得,而结构参数方面,由于本工程与沈阳地铁市府大路站较为相似,而市府大路站的三维数值模型准确性已经成功通过了工程实例验证<sup>[23]</sup>,应用效果良好.故本文数值模型以市府大路站模型为基础进行建立,参考其部分结构参数进行赋值,具体参数见表 1.

表 1 地层及车站结构主要参数

Table 1 Main parameters of soil and station structures

名称	密度 kg·m <sup>-3</sup>	弹性模量 MPa	泊松比	黏聚力 <i>c</i> kPa	内摩擦角 $\phi$ (°)
杂填土	1 900	15.0	0.28	4.0	26.0
中粗砂	1 930	15.5	0.28	2.0	35.0
圆砾	2 050	27.0	0.25	2.0	34.0
砾砂	1 960	26.6	0.29	2.0	36.7
管幕	2 800	55 200	0.25	—	—
顶板	2 500	30 000	0.20	—	—
边桩	2 500	30 000	0.25	—	—
中柱	2 500	38 000	0.25	—	—
初期支护	2 300	28 000	0.20	—	—
二衬	2 400	30 000	0.20	—	—

## 3 数值结果分析

### 3.1 地表沉降阶段分析

提取各个施工阶段的地表沉降,得到地表沉降历程曲线,如图 5 所示.

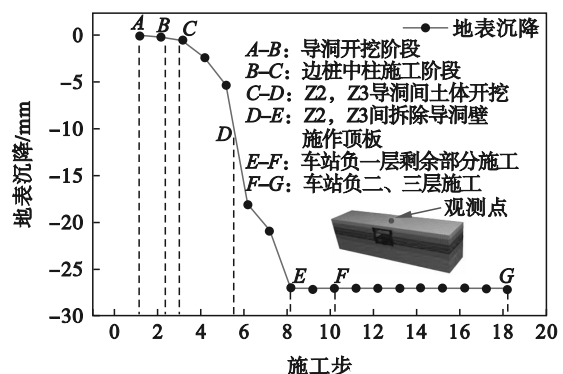


图 5 地表变形曲线

Fig. 5 Surface deformation curve

由图 5 可以看出,整个施工过程中的地层变形具有明显的阶段性,整体地表沉降趋势是先缓慢增加,然后急剧增大,最后趋于平缓,其中 Z2, Z3 导洞间土体开挖阶段和拆除导洞壁施作顶板

阶段地表沉降发生突变,地表沉降总值 27.12 mm, 小于沉降控制值(30 mm).

Z2, Z3 导洞间土体开挖阶段(C-D 阶段)地表沉降变化 9.92 mm, 占总沉降的 36.58%. 考虑产生的原因是:土体开挖引起了结构受力变形, 同时较大的开挖断面引起了更大的地层损失, 且监测点位于纵导洞开挖后的二次扰动状态, 土体变形加剧.

D-E 阶段的沉降变化值为 16.18 mm, 占总沉降的 59.66%, 变化非常剧烈, 可知该阶段是控制地表沉降的关键阶段. 考虑产生的原因是:该阶段车站结构从一部分导洞壁受力逐渐转换为顶板受力, 结构的受力方式发生了改变, 同时顶板受力可能具有滞后性, 结构发生变形后顶板才开始受力, 故引发了剧烈的地表沉降.

E-G 阶段沉降变化不大, 主要原因是此时车站形成了完整的受力体系, 成了一个协调变形的

整体结构, 车站上部所受荷载与车站整体的支撑力逐渐变得平衡, 地层变形变化较小.

### 3.2 地表沉降槽分析

地表沉降槽如图 6 所示, 对于横向的地表沉降槽, 其中纵导洞开挖和边桩中柱施工阶段引起的地表变形呈波浪形, 主要是由于车站埋深较浅, 地表变形与管幕变形趋势保持一致, 而管幕在该过程中的受力状态类似于连续多跨梁, 纵导洞开挖部分管幕悬空上部受到土压力作用产生较大变形, 而导洞间土体未被开挖, 对管幕起支撑作用导致变形较小, 从而产生波浪状变形. 其余部分地表沉降槽形状类似于高斯分布, 而在拆除导洞壁施作顶板阶段由于车站结构的受力形式发生了改变, 导致地表沉降变化得较为剧烈, 沉降槽形状变得陡峭, 在跨中位置产生了地表沉降最大值.

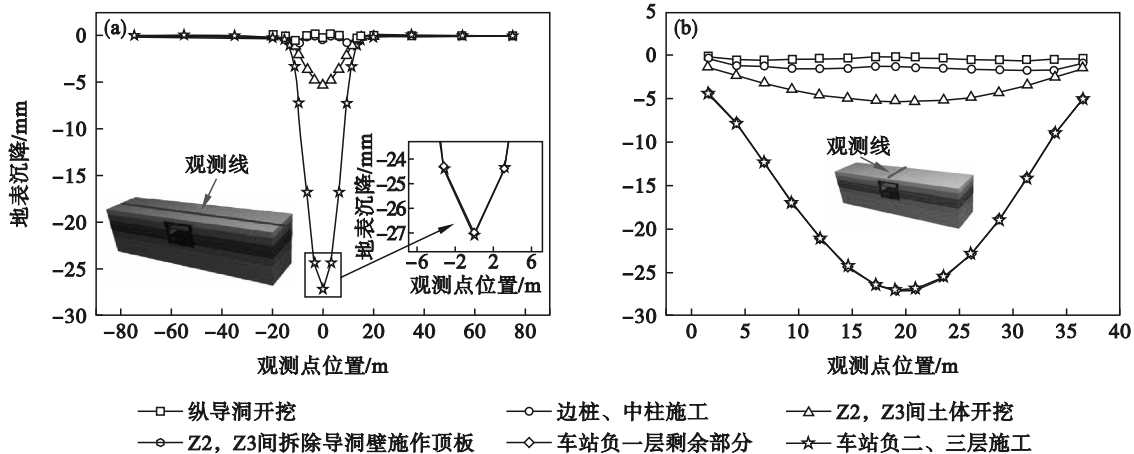


图 6 地表沉降槽

Fig. 6 Surface sedimentation tank

(a)—横向; (b)—纵向.

对于纵向地表沉降槽, 其形状都是“单凹槽”, 纵导洞开挖、边桩中柱施工以及导洞间土体开挖阶段产生的沉降槽曲线都较为扁平, 符合高斯分布. 拆除导洞壁施作顶板阶段为施工的关键阶段, 产生了较大变形, 故沉降槽深度急剧加深.

沉降槽影响区域均控制在车站上方位置, 并未向两侧扩散, 说明管幕结构的预支护有效地降低了车站施工对于周围环境的影响.

### 3.3 管幕变形分析

管幕变形图及管幕变形和地表沉降对比见图 7.

由图 7 可知, 管幕变形和地表沉降在整体上

变化形式相似, 在横向观测面上, 在纵导洞施工和边桩、中柱施工阶段, 管幕变形呈波浪状. 这是由于导洞间土体还未被开挖, 对上方管幕起了支撑作用, 使得管幕在横向上类似于连续多跨梁, 故而产生波浪状变形, 其余部分则符合高斯分布. 在纵向观测面上, 管幕变形类似于钢管混凝土纵向受力产生的变形, 变化最大的位置都出现在跨中. 管幕最大变形量为 30.39 mm, 而地表沉降为 27.12 mm. 同时由地表沉降与管幕变形对比图可知管幕变形始终大于地表沉降, 考虑产生的原因可能是管幕结构上方的土体在开挖的过程中产生的沉降不均匀, 导致产生了微弱的土拱效应.

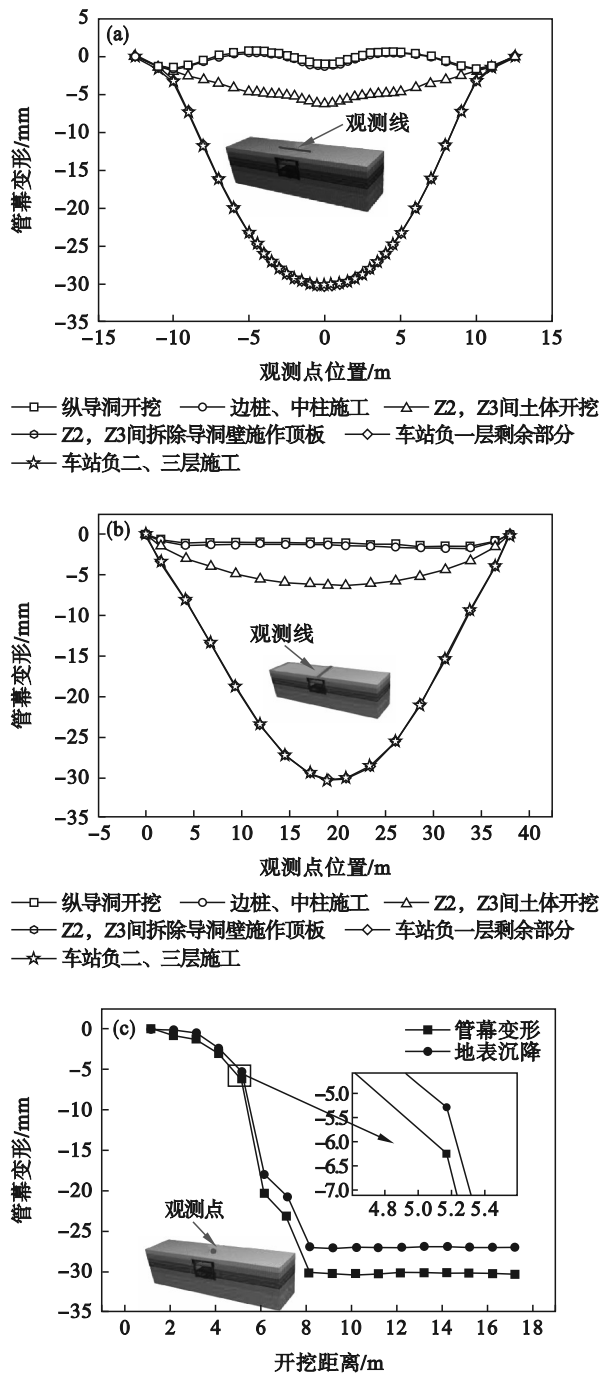


图7 管幕变形及对比图

Fig. 7 Pipe curtain deformation and comparison chart  
(a)—横向观测断面; (b)—纵向观测断面;  
(c)—管幕变形与地表沉降对比图.

## 4 小直径管幕结构参数分析

### 4.1 正交试验设计及评价指标

正交试验评价指标:车站施工结束后跨中最大地表沉降值 $y_1$ ,管幕施工结束造成的扰动程度 $y_2$ (用该阶段施工结束后跨中最大地表沉降值表示),管幕刚度 $y_3$ ,钢材总费用 $y_4$ .

正交试验选定因素:钢管直径 $x_1$ 、钢管间距(中心距) $x_2$ 、钢管壁厚 $x_3$ 、管内混凝土强度 $x_4$ 和钢管强度 $x_5$ .

五因素五水平见表2.  $y_1$ 和 $y_2$ 可由数值模拟计算所得, $y_3$ 由式(2)计算所得, $y_4$ 则由式(4)计算得到,最终试验结果见表3.

表2 五因素五水平  
Table 2 Five factors and five levels

水平	$x_1/\text{mm}$	$x_2/\text{mm}$	$x_3/\text{mm}$	$x_4$	$x_5$
1	300	600	10	C30	Q235
2	400	650	12	C35	Q335
3	457	700	14	C40	Q345
4	500	750	16	C50	Q390
5	600	800	18	C55	Q420

$$n = \frac{E_c}{E_s} \quad (1)$$

$$y_3 = E_p I_p = E_s I_s + n E_c I_c \quad (2)$$

$$I_p = \frac{\pi D^4}{64} \quad (3)$$

式中: $E_s, E_c, E_p$ 分别代表钢管、管内混凝土和管幕的弹性模量; $I_s, I_c, I_p$ 分别代表钢管、管内混凝土和管幕截面惯性矩; $D$ 表示钢管外径.

$$y_4 = m_1 s_1 + V_2 s_2 \quad (4)$$

式中: $m_1, V_2$ 分别代表钢管总质量(t)和混凝土总体积( $\text{m}^3$ ); $s_1, s_2$ 分别代表每吨钢管和每立方米混凝土的单价.

由表3可知,本次25组正交试验中当钢管直径为300 mm时, $y_1$ 均不满足地表沉降控制值30 mm的要求.

### 4.2 正交试验极差分析

各个因素在正交试验组中的极差用式(5)进行计算, $Q_{k,j}$ 表示 $x_j$ 因素的 $y_k$ 指标的极差,1个因素所占总极差内的比例越大,代表该因素对某指标影响越大.

$$Q_{k,j} = \left[ \max_{l=1}^n \left( \sum_i y_{ik,j}^{(l)} \right) - \min_{l=1}^n \left( \sum_i y_{ik,j}^{(l)} \right) \right] / L \quad (5)$$

式中: $\sum_i y_{ik,j}^{(l)}$ 表示 $j$ 因素的第 $l$ 水平下评价指标的总和; $i$ 表示正交表中 $j$ 因素的第 $l$ 水平的试验序号; $L$ 表示参加试验的因素水平数,本试验中 $L$ 为5.

小直径管幕结构的车站施工结束后跨中最大地表沉降值 $y_1$ 对应的极差分析见表4.可以看出钢管直径对 $y_1$ 的影响程度最大,极差占比达到了71.45%, $y_1$ 的变化趋势是随着钢管直径的增加而减小;其余因素的影响程度从大到小依次是钢

管强度(极差占比 8.44%)、钢管间距(极差占比 8.10%)、管内混凝土强度(极差占比 7.31%)和钢管壁厚(极差占比 4.70%);其中对  $y_1$  影响最小的是钢管壁厚.在不考虑其他指标的前提下适当减

小  $y_1$  来保证安全性,则小直径管幕的结构参数可以取钢管直径 600 mm、钢管间距 800 mm、钢管壁厚 14 mm,混管内采用 C40 级混凝土以及钢管采用 Q390 钢.

表 3 正交试验计算结果及评价指标  
Table 3 Calculation results of orthogonal test and evaluation index

序号	$x_1$ /mm	$x_2$ /mm	$x_3$ /mm	$x_4$	$x_5$	$y_1$ /mm	$y_2$ /mm	$y_3$ /(MN·m <sup>2</sup> )	$y_4$ /万元
1	300	600	10	C30	Q235	36.74	6.90	21.07	8.43
2	300	650	12	C35	Q335	35.37	6.92	24.60	8.89
3	300	700	14	C40	Q345	33.64	6.56	28.42	9.34
4	300	750	16	C50	Q390	34.94	6.32	32.58	10.77
5	300	800	18	C55	Q420	33.81	6.28	36.38	11.38
6	400	600	12	C40	Q390	29.53	7.51	64.31	12.51
7	400	650	14	C50	Q420	28.63	7.43	74.74	14.43
8	400	700	16	C55	Q235	27.89	7.29	78.92	14.98
9	400	750	18	C30	Q335	29.49	7.76	85.11	11.42
10	400	800	10	C35	Q345	29.51	6.95	53.79	11.77
11	457	600	14	C55	Q335	29.09	8.39	108.73	17.17
12	457	650	16	C30	Q345	26.38	8.70	120.18	13.09
13	457	700	18	C35	Q390	25.69	7.92	136.48	13.79
14	457	750	10	C40	Q420	26.86	7.55	85.80	14.19
15	457	800	12	C50	Q235	26.94	6.90	95.58	16.22
16	500	600	16	C50	Q420	23.83	8.64	169.64	18.13
17	500	650	18	C55	Q235	24.47	8.47	177.20	18.77
18	500	700	10	C30	Q335	23.73	8.03	106.60	14.03
19	500	750	12	C35	Q345	24.84	8.48	126.98	14.80
20	500	800	14	C40	Q390	24.72	7.49	148.34	15.59
21	600	600	18	C35	Q345	19.46	10.05	316.38	18.15
22	600	650	10	C40	Q390	19.52	8.96	201.42	18.64
23	600	700	12	C50	Q420	19.32	9.21	240.08	21.54
24	600	750	14	C55	Q235	19.34	9.06	260.18	22.44
25	600	800	16	C30	Q335	20.31	8.78	280.32	17.02

表 4  $y_1$  极差分析结果  
Table 4 Results of the range analysis of  $y_1$

水平	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	174.49	138.70	136.16	136.64	136.34
2	145.05	134.16	135.89	134.80	137.98
3	134.96	130.27	131.12	128.81	133.75
4	121.57	136.32	133.34	133.67	128.95
5	97.95	130.03	132.97	135.56	132.45
$Q$	15.31	1.74	1.01	1.57	1.81
占比/%	71.45	8.10	4.70	7.31	8.44

小直径管幕结构管幕施工结束造成的扰动程度  $y_2$  对应的极差分析见表 5. 由表 5 可以看出, 钢管直径对  $y_2$  的影响程度最大, 极差占比达到了 52.16%,  $y_2$  的变化趋势是随着钢管直径的增大而

增大; 其余因素的影响程度从大到小依次是钢管间距(极差占比 20.34%)、钢管强度(极差占比 10.13%)、管内混凝土强度(极差占比 8.98%)和钢管壁厚(极差占比 8.40%); 其中对  $y_2$  影响最小的是钢管壁厚. 在考虑经济性指标的前提下可适当减小  $y_2$  来保证安全性, 同时  $y_1$  要满足沉降控制指标, 则小直径管幕的结构参数可以取钢管直径 400 mm、钢管间距 800 mm、钢管壁厚 10 mm, 管内采用 C40 级别混凝土以及钢管采用 Q390 钢.

小直径管幕结构的管幕刚度  $y_3$  对应的极差分析表见表 6. 由表 6 可以看出, 钢管直径对  $y_3$  的影响程度最大, 极差占比达到了 67.03%,  $y_3$  的变化趋势是随着钢管直径的增大而增大; 剩余因素的影响程度从大到小依次是钢管壁厚(极差占比

16.41%)、管内混凝土强度(极差占比 7.72%)、钢管间距(极差占比 5.20%)和钢管强度(极差占比 3.63%);其中对  $y_3$  影响最小的是钢管强度.在不考虑其他指标的前提下适当增大  $y_3$  来保证安全性,则小直径管幕的结构参数可以取钢管直径 600 mm、钢管间距 600 mm、钢管壁厚 18 mm,管内采用 C35 级混凝土以及钢管采用 Q345 钢.

表 5  $y_2$  极差分析结果  
Table 5 Results of the range analysis of  $y_2$

水平	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	32.98	41.49	38.38	40.17	38.61
2	36.93	40.48	39.03	40.32	39.88
3	39.46	39.02	38.93	38.07	40.75
4	41.11	39.17	39.73	38.50	38.21
5	46.05	36.39	40.48	39.48	39.10
$Q$	2.62	1.02	0.42	0.45	0.51
占比/%	52.16	20.34	8.40	8.98	10.13

表 6  $y_3$  极差分析结果  
Table 6 Results of the range analysis of  $y_3$

水平	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	143.06	680.13	468.67	613.28	632.96
2	356.87	598.15	551.55	658.23	605.36
3	546.76	590.51	620.42	528.30	645.75
4	728.76	590.65	681.64	612.62	583.13
5	1 298.38	614.41	751.56	661.42	606.64
$Q$	231.06	17.92	56.58	26.62	12.52
占比/%	67.03	5.20	16.41	7.72	3.63

小直径管幕结构的经济指标  $y_4$  对应的极差分析见表 7.由表 7 可以看出,钢管直径对  $y_4$  的影响程度最大,极差占比为 50.10%, $y_4$  的变化趋势是随着钢管直径的增大而增大;剩余因素的影响程度从大到小依次是管内混凝土强度(极差占比 21.23%)、钢管强度(极差占比 14.02%)、钢管壁厚(极差占比 12.18%)和钢管间距(极差占比 2.47%);其中对  $y_4$  影响最小的是钢管间距.在只考虑经济性指标和地表沉降控制值的情况下小直径管幕结构参数可以取钢管直径 400 mm、钢管间距 800 mm、钢管壁厚 10 mm,管内采用 C35 级混凝土以及钢管采用 Q345 钢,即第 10 组试验方案组合.

### 4.3 正交试验结果分析

由 4.2 节可知,根据 25 组正交试验的极差分析得出了 4 个评价指标分别对应的小直径管幕结构最优参数组合,具体赋值如表 8 所示.

表 7  $y_4$  极差分析结果  
Table 7 Results of the range analysis of  $y_4$

水平	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
1	48.81	74.40	67.07	63.99	80.85
2	65.12	73.82	73.96	67.40	68.55
3	74.46	73.69	78.98	70.28	67.14
4	81.32	73.63	74.00	81.09	71.31
5	97.79	71.98	73.51	84.75	79.67
$Q$	9.80	0.48	2.38	4.15	2.74
占比/%	50.10	2.47	12.18	21.23	14.02

表 8 仅考虑各自指标时的最优组合  
Table 8 Best parameter combination of each indicator

评价指标	$x_1$ /mm	$x_2$ /mm	$x_3$ /mm	$x_4$	$x_5$
$y_1$	600	800	14	C40	Q390
$y_2$	400	800	10	C40	Q390
$y_3$	600	600	18	C35	Q345
$y_4$	400	800	10	C30	Q345

由表 8 可知,在选取最优参数时,各个评价指标所对应的选取数值会互相矛盾,而在实际工程中往往需要考虑结构安全性和经济性等多个方面,因此为了协调平衡各指标间的关系,特引入模糊数学理论来解决该问题.

## 5 多指标参数优化分析

### 5.1 综合评价参数确定

本文采用模糊数学来定义  $y_1, y_2, y_3$  和  $y_4$  4 个评价指标的隶属度函数,其中  $y_1, y_2, y_4$  3 个属于偏小型指标(即越小越好),而  $y_3$  则属于偏大型指标(越大越好).

对于  $y_1, y_2, y_4$  3 个评价指标的隶属度函数通过式(6)计算, $y_3$  则通过式(7)计算.

$$g_{y1} = \frac{\max_{i=1}^n (y_j^i) - y_j^i}{\max_{i=1}^n (y_j^i) - \min_{i=1}^n (y_j^i)}, \quad (6)$$

$$g_{y2} = \frac{y_j^i - \min_{i=1}^n (y_j^i)}{\max_{i=1}^n (y_j^i) - \min_{i=1}^n (y_j^i)}. \quad (7)$$

式中: $y_j^i$  为第  $i$  次试验中  $y_j$  评价指标; $\max_{i=1}^n (y_j^i)$  为试验中第  $j$  个评价指标的最大值; $\min_{i=1}^n (y_j^i)$  为试验中第  $j$  个评价指标的最小值.其中  $i=1, 2, \dots, 25, n=25, j=1, 2, 3, 4$ .

根据式(6)、式(7)计算各组试验的隶属度,然后构成模糊关系矩阵  $G=(g_{ij})_{25 \times 4}$ ,如表 9 所示.

表9 模糊关系矩阵  
Table 9 Fuzzy relationship matrix

序号	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$
1	0.000	0.836	0.000	1.000
2	0.079	0.830	0.012	0.967
3	0.178	0.924	0.025	0.935
4	0.103	0.988	0.039	0.833
5	0.168	1.000	0.052	0.790
6	0.414	0.673	0.146	0.709
7	0.466	0.696	0.182	0.572
8	0.508	0.733	0.196	0.532
9	0.416	0.606	0.217	0.787
10	0.415	0.823	0.111	0.762
11	0.439	0.440	0.297	0.376
12	0.595	0.356	0.336	0.668
13	0.634	0.564	0.391	0.617
14	0.567	0.664	0.219	0.589
15	0.563	0.836	0.252	0.444
16	0.741	0.373	0.503	0.308
17	0.705	0.419	0.529	0.262
18	0.747	0.536	0.290	0.600
19	0.683	0.415	0.359	0.546
20	0.690	0.678	0.431	0.489
21	0.992	0.000	1.000	0.307
22	0.989	0.289	0.611	0.271
23	1.000	0.221	0.742	0.065
24	0.999	0.263	0.810	0.000
25	0.943	0.338	0.878	0.387

根据各指标的相对重要程度,采用层次分析法构造判断矩阵,从而给出一组和为1的评价指标权重值,经计算得其结果为

表11 模糊综合评价隶属度极差分析

Table 11 Analysis of the range of membership in fuzzy comprehensive evaluation

隶属度之和	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$
$\Sigma g_{i1}$	2.711	2.470	2.803	2.784	2.597
$\Sigma g_{i2}$	2.740	2.604	2.659	2.757	2.687
$\Sigma g_{i3}$	2.634	2.789	2.605	2.825	2.745
$\Sigma g_{i4}$	2.702	2.680	2.708	2.625	2.814
$\Sigma g_{i5}$	2.685	2.930	2.698	2.482	2.629
$\max \Sigma g_{ij}$	$\Sigma g_{i2}$	$\Sigma g_{i5}$	$\Sigma g_{i3}$	$\Sigma g_{i4}$	$\Sigma g_{i5}$
$Q$	0.021	0.092	0.040	0.069	0.043
占比/%	7.94	34.76	14.98	25.94	16.37

由表11可知,对综合评价影响程度最大的因素是钢管间距,极差占比34.76%,其次则是管内混凝土强度(25.94%)、钢管强度(16.37%)、钢管壁厚(14.98%)和钢管直径(7.94%)。小直径管幕

$$w = [0.33 \quad 0.28 \quad 0.12 \quad 0.28]^T \quad (8)$$

模糊综合评价隶属度可由式(9)计算:

$$T = w \cdot G \quad (9)$$

式中,  $T = [t_1, t_2, \dots, t_{25}]^T$ , 其中  $t_i$  最大的即为正交试验中的最优组合。

### 5.2 模糊综合评价计算及分析

由式(9)计算所得的25组模糊综合评价隶属度值  $t_i$  见表10。

表10 模糊综合评价隶属度  $t_i$   
Table 10 Membership  $t_i$  of fuzzy comprehensive evaluation

$i$	$t_i$	$i$	$t_i$
1	0.509	14	0.559
2	0.525	15	0.569
3	0.577	16	0.491
4	0.543	17	0.482
5	0.557	18	0.595
6	0.536	19	0.533
7	0.526	20	0.601
8	0.541	21	0.528
9	0.548	22	0.552
10	0.589	23	0.495
11	0.405	24	0.496
12	0.519	25	0.614
13	0.582		

由表10可知,第25组正交试验的模糊综合评价隶属度最大,所以第25组为25组正交试验中的最佳组合。同时为了找出25组正交试验外的最佳参数组合,需要对模糊综合评价隶属度作极差分析,结果见表11。

结构参数采用各因素模糊综合评价隶属度极差最大的参数水平,这样就得到了小直径管幕结构的最优参数组合,即钢管直径为400 mm、钢管间距为800 mm、钢管壁厚为10 mm、管内混凝土使

用C40级别混凝土、钢管采用Q390钢。

### 5.3 优化后参数组合结果分析

#### 5.3.1 优化组合计算结果

第25组正交试验参数组合计算结果(组合1)、和平南大街实际工程参数组合计算结果(组合2)和最优参数组合计算结果(组合3)见表12。

表12 优化组合计算结果

Table 12 Calculation results of optimal combination

评价指标	$y_1/\text{mm}$	$y_2/\text{mm}$	$y_3/(\text{MN}\cdot\text{m}^2)$	$y_4/\text{万元}$
组合1	20.309	8.775	280.317	17.023
组合2	27.116	8.597	118.153	13.161
组合3	29.386	6.249	55.354	12.369

#### 5.3.2 优化组合的综合隶属度计算

最优参数组合的评价指标 $y_2$ 为6.249 mm,为 $y_2$ 中的最小值,因此 $y_2$ 的隶属度和模糊综合评价隶属度 $t_i$ 均需进行重新计算,结果见表13。

表13 模糊综合评价隶属度 $t_i$

Table 13 Membership  $t_i$  of fuzzy comprehensive evaluation

$i$	$t_i$	$i$	$t_i$
1	0.507	14	0.558
2	0.523	15	0.567
3	0.575	16	0.491
4	0.541	17	0.481
5	0.555	18	0.593
6	0.535	19	0.532
7	0.524	20	0.600
8	0.539	21	0.528
9	0.547	22	0.551
10	0.587	23	0.495
11	0.404	24	0.496
12	0.518	25	0.613
13	0.581	组合3	0.629

通过隶属度函数式(6),式(7)计算得到最优参数组合评价指标的隶属度为

$$\mathbf{g} = [0.422 \quad 1.000 \quad 0.116 \quad 0.719]. \quad (10)$$

由表13可知,最优参数组合(组合3)的模糊综合评价隶属度为0.629,为最大的模糊综合评价隶属度,因此该参数优化组合是合理的。

由表12可知,组合3相比于组合2, $y_1$ 虽然增大了8.37%,但是仍然小于地表沉降控制指标(30 mm),且管幕施工造成的扰动影响 $y_2$ 减小了27.31%,同时经济指标 $y_4$ 也降低了6.02%,对于一些大体量的工程而言,该指标的优化程度是可观的。

由此可见,该优化组合在管幕刚度和地表沉降得到保证的前提下,不仅能减小管幕施工对地层的扰动影响,还能有效地降低经济成本,因此本文所得到的结论对于小直径管幕结构的施工和推广具有一定的参考意义。

## 6 结 论

1) 依托沈阳地铁和平南大街站建立了小直径管幕结构的三维数值模型,小直径管幕顶板工法修建地铁车站造成的地表沉降是分阶段的,与各个施工阶段相对应,其中拆除导洞壁施作顶板阶段是施工过程中控制地表沉降的关键阶段,应及时加强支护。

2) 对于跨中最大地表沉降、管幕施工造成的扰动、管幕刚度和经济指标而言,钢管直径对它们的影响最大,而综合考虑钢管间距影响最大。

3) 取钢管直径400 mm、钢管间距800 mm、钢管壁厚10 mm、管内混凝土使用C40级别混凝土、钢管采用Q390钢的方案为最优组合方案,此时可兼顾安全性与经济性。

### 参考文献:

- [1] Ire H. Tubular trust jacking for underground roof construction on the Antwerp Metro[J]. *Tunnelling*, 1985, 5: 13-15.
- [2] Coller P J, Abbott D G. Microtunnelling techniques to form an insitu barrier around existing structures [C]//American Society of Civil Engineers. Las Vegas, 1994: 386-394.
- [3] Yasuhisa B. Construction methods of the structures passing through under railway lines [J]. *Japanese Railway Engineering*, 1987, 4: 6-9.
- [4] Cheng C H, Liao S M, Chen L S, et al. Jacking precision control of pipe roof and large box culvert below urban expressway: a case study of a large underpass in Shanghai [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 703(1): 012050.
- [5] Yang X, Li Y S. Research of surface settlement for a single arch long-span subway station using the pipe-roof pre-construction method [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 72: 210-217.
- [6] Bai Q, Zhang Y D, Zhao W, et al. Construction of subway station using the small pipe roof-beam method: a case study of Shifu Road Station in Shenyang [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*, 2023, 135: 105000.
- [7] Lu B, Dong J C, Zhao W, et al. Novel pipe-roof method for a super shallow buried and large-span metro underground station [J]. *Underground Space*, 2022, 7(1): 134-150.
- [8] Jia P J, Zhao W, Chen Y, et al. A case study on the application of the steel tube slab structure in construction of a subway station [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(9): 1437.
- [9] Lu B, Sheil, B B, Zhao, W, et al. Laboratory testing of settlement propagation induced by pipe-roof pre-support deformation in sandy soils [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 146: 105645.

- [10] Li S, Xiao J, Lu B, et al. Experimental and numerical investigation of flexural behaviour of secant pipe roofing structure[J]. *Structures*, 2022, 41: 181-835.
- [11] Lu B, Zhao W, Wang W, et al. Design and optimization of secant pipe roofing structure applied in subway stations[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 135: 105026.
- [12] Zhang C, Zhao W, Liu S, et al. Experimental investigation of the flexural mechanism and performance of channel steel tube slab structure under concentrated loads[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2020, 23(11): 2471-2485.
- [13] 贾鹏蛟, 赵文, 关永平, 等. 新管幕结构受力模式及关键技术分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 891-895.  
(Jia Peng-jiao, Zhao Wen, Guan Yong-ping, et al. Analysis of mechanical characteristic and key technique of steel tube slab structure [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2019, 40(6): 891-895.)
- [14] 肖世国, 夏才初, 李向阳, 等. 管幕内顶进箱涵顶部管幕挠度分析[J]. 土木工程学报, 2005, 38(12): 109-114.  
(Xiao Shi-guo, Xia Cai-chu, Li Xiang-yang, et al. An analysis of the deflection of a pipe-roof for box culvert jacking[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2005, 38(12): 109-114.)
- [15] 张宇, 陶连金, 董立朋, 等. 密排横向管幕理论分析研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(2): 365-374.  
(Zhang Yu, Tao Lian-jin, Dong Li-peng, et al. Theoretical analysis of horizontal pipe curtains with tight rows [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(2): 365-374.)
- [16] 王海涛, 贾金青, 郁胜. 隧道管棚预支护的力学行为及参数优化[J]. 中国公路学报, 2010, 23(4): 78-83.  
(Wang Hai-tao, Jia Jin-qing, Yu Sheng. Mechanical behavior and parameter optimization of pipe roof reinforcement applied in tunnel [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(4): 78-83.)
- [17] Lu B, Sheil B B, Zhao W, et al. Earth pressure in sandy soils above the pipe-roof structure: experimental and theoretical investigation [J]. *Computers and Geotechnics*, 2024, 173: 106565.
- [18] Tan W L, Pathegama R G. Numerical analysis of pipe roof reinforcement in soft ground tunnelling [C]//Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Mechanics, ASCE. Seattle, 2003: 1-10.
- [19] Oke J, Vlachopoulos N, Diederichs M S. Sensitivity numerical analysis of orientations and sizes of forepoles for underground excavations in weak rock [C]//46th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Illinois, 2012: 406.
- [20] 台启民, 张顶立, 房倩, 等. 软弱破碎围岩隧道超前支护确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 109-118.  
(Tai Qi-min, Zhang Ding-li, Fang Qian, et al. Determination of advance supports in tunnel construction under unfavourable rock conditions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(1): 109-118.)
- [21] Jia P J, Guan Y P, Lu B, et al. Flexural performance of steel tube roof slab and parameter optimization [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 18: e01726.
- [22] 曹文欣, 赵文, 路博, 等. 基于模糊数学的STS管幕结构的连接参数优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(2): 258-265, 273.  
(Cao Wen-xin, Zhao Wen, Lu Bo, et al. Optimization of connection parameters of steel tube slab structures based on fuzzy mathematics [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(2): 258-265, 273.)
- [23] 王子君, 赵文, 程诚, 等. 地铁车站小直径管幕工法开挖变形规律[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(11): 1630-1637.  
(Wang Zi-jun, Zhao Wen, Cheng Cheng, et al. Deformation law of subway station constructed by small diameter tube curtain method [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2022, 43(11): 1630-1637.)