

管幕和横梁作用下大断面开挖变形响应研究

柏谦¹, 赵文¹, 曹文欣¹, 卢彦军²

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 中铁四局集团第五工程有限公司, 江西 九江 332000)

摘要: 基于管幕与横梁作用下大断面开挖相似模型试验, 研究开挖引起的管幕变形和地表沉降变化规律. 为充分研究参数变化对管幕变形和地表沉降的影响, 运用有限元软件建立三维数值模型, 以此模型为依据, 分析管幕抗弯刚度和横梁抗弯刚度对管幕变形和地表沉降的影响, 并根据模糊数学理论对最优刚度匹配进行研究. 研究表明: 管幕结构整体变形类似于“板”, 且关于中间管幕对称, 管幕跨中断面地表沉降呈“凹槽”型, 符合 Peck 曲线分布; 管幕变形和地表沉降均与横梁刚度和管幕刚度呈指数函数关系, 且对横梁刚度变化更为敏感; 管幕刚度与横梁刚度分别为 $0.5D$ 和 $2K$ 时, 可以兼顾安全性与经济性.

关键词: 管幕; 模型试验; 管幕变形; 地表沉降; 刚度匹配

中图分类号: TU 94 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)01-0129-08

Study on Deformation Response Caused by Large-Section Excavation Under the Support of Pipe-Roof and Beam

BAI Qian¹, ZHAO Wen¹, CAO Wen-xin¹, LU Yan-jun²

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. The Fifth Department of China Railway No.4 Bureau Group Co., Ltd., Jiujiang 332000, China. Corresponding author: ZHAO Wen, E-mail: wenneu@163.com)

Abstract: Based on the similar model test of large-section excavation under the action of pipe-roof and beam, the variation law of pipe-roof deformation and surface settlement caused by excavation was studied. In order to fully study the influence of parameter changes on the pipe-roof deformation and surface settlement, a three-dimensional numerical model was established by using the finite element software. Based on this model, the effects of the flexural stiffness of the pipe-roof and the beam on the pipe-roof deformation and surface settlement were analyzed, and the optimal stiffness matching was studied according to the fuzzy mathematical theory. The results indicate that the overall deformation of the pipe-roof structure resembles a “plate” and exhibits symmetry about the middle pipe-roof. The surface settlement of the cross section of the pipe-roof forms a “grooved” pattern, conforming to the Peck curve distribution. The pipe-roof deformation and surface settlement are exponential functions of the beam stiffness and the pipe-roof stiffness, with greater sensitivity to changes in the beam stiffness. The safety and economy can be taken into account when the beam stiffness and the pipe-roof stiffness are $0.5D$ and $2K$ respectively.

Key words: pipe-roof; model test; pipe-roof deformation; surface settlement; stiffness matching

管幕工法可有效抑制地层扰动, 减弱开挖对周围环境的影响^[1]. 根据钢管直径可以将管幕分为微型管幕(钢管直径 100~300 mm)、小直径管幕(钢管直径 300~600 mm)、中等直径管幕(钢管

直径 600~1 200 mm)、大直径管幕(钢管直径 1 200~2 000 mm)和超大直径管幕(钢管直径大于 2 000 mm). 目前已采用 STS(steel tube slab)^[2]和 NTR(new tubular roof)^[3]等管幕工法在风险较

收稿日期: 2022-08-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878127).

作者简介: 柏谦(1994-), 男, 辽宁铁岭人, 东北大学讲师, 博士; 赵文(1962-), 男, 内蒙古乌兰察布人, 东北大学教授, 博士生导师.

大区域成功修建了浅埋暗挖车站,但上述工法存在钢管占用空间大及施工周期长等问题,迫切需要对现有管幕工法进行改进.

国内外针对管幕工法施工引起的管幕变形和地表沉降开展了很多研究.肖世国等^[4]通过室内相似试验,得到了箱涵顶进过程中管幕与地表的竖向位移及管幕下土压力的变化情况.张超哲等^[5]根据面积等效原则,通过数值模拟研究了开挖管幕下方土体时管幕结构的变形规律.Jia等^[6]通过现场试验和数值模拟,研究了管幕工法在修建地下结构时,开挖引起的管幕变形规律.Aksoy等^[7]得出管幕结构可使地层沉降减小约69%.Hisatake等^[8]通过离心机试验得到管幕支护下产生的最大沉降仅为管幕未支护下的1/4.谭忠盛等^[9]通过模型试验研究了管幕断面形式和管径大小对地表沉降的影响.龚建伍等^[10]通过相似试验研究了管幕布置形式、管幕间距和管幕横向连接方式对地表沉降的影响.Xie等^[11]通过模型试验研究了管幕在限制环境扰动方面的作用,得到管幕结构能使横向沉降槽宽度最大减小11.5%.上述研究主要是针对大直径管幕,钢管间连接方式较复杂,通常需要切割钢管或在钢管间布置螺栓等,增加了施工难度.而采用小直径管幕施工地铁车站具有顶管施工方便、施工扰动较小及节省工期等优点.

本文依托沈阳市府大路站地铁车站项目,该工程在小直径管幕下方架设横梁,然后在管幕和横梁共同作用下施工.鉴于此,本文研究在管幕与横梁支护下大断面开挖引起的管幕变形与地表沉降规律,然后基于模型试验建立数值计算模型,研究管幕与横梁的刚度匹配,为该工法的后续研究提供借鉴和参考.

1 试验设计

1.1 模型试验装置

依托工程位于南京北街与市府大路交汇处,车站上覆管线较多.车站断面宽25 m,高15 m,埋深约为5 m.管幕外径为402 mm,壁厚为16 mm.施工前采用坑外管井降水,在施工期间未受到地下水的影响.车站东南角为26层的华银大厦,距离车站主体约22.7 m,西北角为在建的盛京金融广场,距车站1号风道约24.8 m,西侧为30层的年华国际大厦,距车站B出入口约5.13 m.图1是市府大路站平面图.

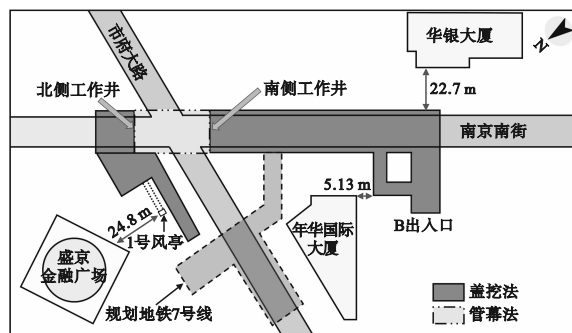


图1 市府大路站平面图

Fig. 1 Plan view of Shifu Road station

模型试验几何相似比定为50,模型箱尺寸为2 000 mm×800 mm×1 000 mm,四周采用壁厚15 mm的有机玻璃板,底板上焊接支架用来固定边桩,外侧采用钢架进行固定.模型箱前侧留有尺寸500 mm×300 mm的开挖孔,试验装置如图2所示.模型边桩距两侧750 mm,开挖面距底部300 mm.为了避免在开挖过程中发生坍塌,将2块有机玻璃板用螺栓连接起来用于挡土.有机玻璃刚度足够大,在开挖过程中不会发生变形,尺寸为500 mm×320 mm×10 mm.

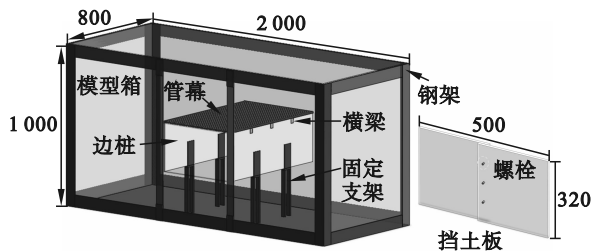


图2 模型试验装置图(单位:mm)

Fig. 2 Model test device diagram (unit: mm)

1.2 相似材料选取及制备

根据相似理论,弹性模量、压缩模量和黏聚力的相似比为50,重度(单位体积物质的质量)和内摩擦角的相似比为1.采用等效抗弯刚度的方法来模拟原型管幕^[12],计算公式为

$$E_{cq} I_{cq} = E_s I_s + \alpha E_c I_c. \quad (1)$$

其中: $E_{cq} I_{cq}$ 表示等效后的管幕抗弯刚度; $E_s I_s$ 表示钢管的抗弯刚度; $E_c I_c$ 表示管内混凝土的抗弯刚度; α 表示混凝土弹性模量与钢管弹性模量的比值,本文取 $30/206=0.14$.通过式(1)计算出等效后的管幕抗弯刚度为78 429.94 kN·m².采用直径10 mm的LDPE(low density polyethylene)棒来模拟管幕,通过拉伸试验(图3)得出LDPE材料的弹性模量约为0.511 GPa,其抗弯刚度与等效后的管幕基本满足相似关系.

原型钢管间通过锁扣连接,但锁扣抗弯刚度



图5 模型试验
Fig. 5 Model test

呈现出一定的连续性,整体变形类似于“板”,且关于中间管幕对称. 本文认为这是由于管间胶水的存在,发挥了实际工程中钢管间锁扣的作用,协调了各管的变形,使管幕成为一个整体结构. 2个断面上的管幕变形从中间向两侧逐渐减小. 跨度0和500 mm对应的管幕是固定在模型边桩上的,开挖结束后管幕变形几乎为0,这说明在开挖过程中边桩顶部没有发生沉降,模型边桩没有发生弯曲,也进一步验证了本文模型边桩选取的合理性.

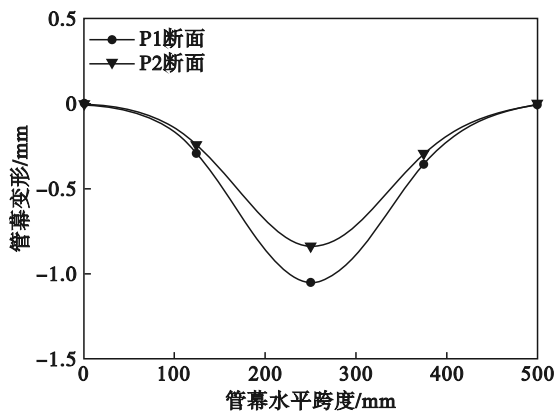


图6 开挖结束后P1和P2断面的管幕变形
Fig. 6 Pipe-roof deformation at section P1 and P2 after excavation

提取2个断面上的最大管幕变形结果见图7, L 表示开挖长度, S 表示管幕跨度. 管幕变形主要分为三个阶段:首先是“平缓”阶段,当开挖面在监测点之前时,由于管幕下方土体的支撑,管幕结构几乎不发生受力变形,管幕变形随开挖长度的增加变化幅度很小;然后是“迅速增加”阶段,当开挖面经过监测点之后,管幕结构开始受力产生变形,管幕变形随开挖长度的增加迅速增大;最后是“缓慢增加”阶段,当开挖长度与管幕跨度比在1.0或更大时,管幕变形随开挖长度的增加缓慢增大.

2.2 地表沉降试验结果及分析

图8是开挖结束后G3断面的地表沉降结果.

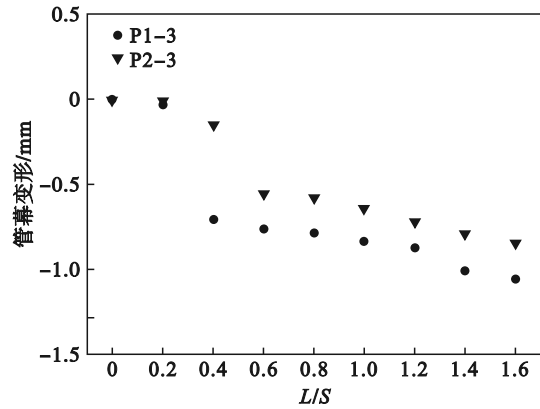


图7 P1-3和P2-3处管幕变形随开挖长度变化图
Fig. 7 Variation of pipe-roof deformation with excavation length at P1-3 and P2-3

由图可知,开挖结束后G3断面地表沉降曲线呈“凹槽”型分布. 管幕上方地表沉降变化幅度较大,边墙外侧地表沉降变化幅度较小,在中间管幕正上方出现最大地表沉降,最大值为0.48 mm. G3-1和G3-11位于距模型箱边界200 mm的位置,开挖结束后G3-1和G3-11处的地表沉降值均为0,可见这个位置的土体不受开挖影响,因此可以认为本次试验模型箱的尺寸是足够的. 这说明在两侧有足够支护情况下进行开挖试验,模型箱的边界取开挖跨度的1.5倍可以满足试验要求.

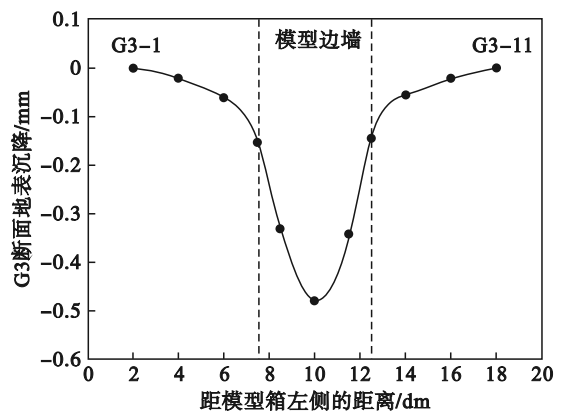


图8 开挖结束后G3断面的地表沉降

Fig. 8 Surface settlement at section G3 after excavation

图9是G3-6和G4-1处的地表沉降随开挖过程变化规律图. 在整个开挖过程中, G3-6的地表沉降主要分为两个阶段. 第一个阶段是“平缓”阶段,当开挖面在监测点之前时,由于管幕下方土体的支撑,地表沉降随开挖长度的增加变化幅度很小;第二个阶段是“迅速增加”阶段,当开挖面经过监测点之后,管幕下方土体卸载,地表沉降随开挖长度的增加迅速增大,直到开挖结束.

G4-1 的地表沉降在整个开挖过程中处于“缓慢增加”阶段,增加幅度比较均匀。

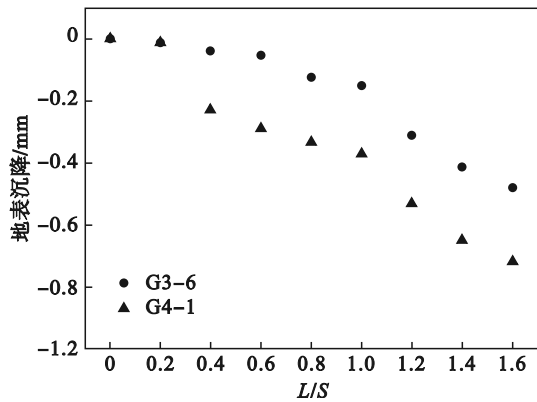


图9 G3-6和G4-1处地表沉降随开挖长度变化
Fig. 9 Variation of surface settlement with excavation length at G3-6 and G4-1

3 数值模拟

3.1 计算模型建立及验证

管幕和横梁的抗弯刚度是影响管幕变形和地表沉降的重要因素,刚度太大会造成材料浪费,刚度不足则会增加施工危险. 鉴于室内试验研究的局限性,本文通过 Midas GTS NX 有限元软件建立 16 组三维数值模型,研究管幕刚度 ($0.5D, D, 1.5D$ 和 $2D$) 和横梁刚度 ($0.5K, K, 1.5K$ 和 $2K$) 变化对管幕变形和地表沉降最大值的影响 (D 为在内部灌注 C30 混凝土的直径 402 mm,壁厚 16 mm 的钢管混凝土的抗弯刚度; K 为截面尺寸为 $1.6\text{m}\times 1.3\text{m}$ 的钢筋混凝土的抗弯刚度),并对管幕刚度和横梁刚度的匹配关系进行研究,具体参数组合见表 2.

图 10 是计算模型图. 模型尺寸和开挖步骤与室内试验一致,管幕采用梁单元建模,土体、边桩及横梁均采用实体单元建模. 土体采用修正摩尔库仑本构,参数取值通过前文的试验获取,管幕、边桩、横梁采用弹性本构. 模型底部固定,上部为自由边界,四周约束为法向位移,模型共有 202 383 个单元.

提取 P1-3 的模拟值与试验值进行对比,对比结果如图 11 所示. 由图可知, P1-3 处管幕变形的模拟值和试验值的整体变化趋势相同,都随开挖长度的增加逐渐增大. 在开挖过程中,模拟值与试验值的误差均在 20% 以内,当开挖结束后,管幕变形最大值的误差在 1% 以内,由此可见本文的数值模型具有一定的准确性,可以为后续的分析提供参考.

表 2 参数组合
Table 2 Parameter combinations

编号	管幕刚度	横梁刚度
1	$0.5D$	$0.5K$
2	$0.5D$	K
3	$0.5D$	$1.5K$
4	$0.5D$	$2K$
5	D	$0.5K$
6	D	K
7	D	$1.5K$
8	D	$2K$
9	$1.5D$	$0.5K$
10	$1.5D$	K
11	$1.5D$	$1.5K$
12	$1.5D$	$2K$
13	$2D$	$0.5K$
14	$2D$	K
15	$2D$	$1.5K$
16	$2D$	$2K$

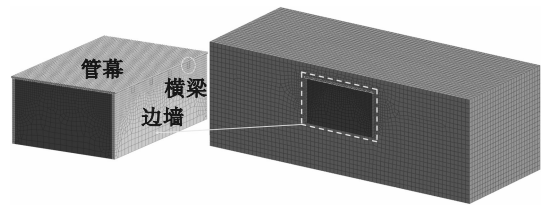


图 10 计算模型图
Fig. 10 Calculation model

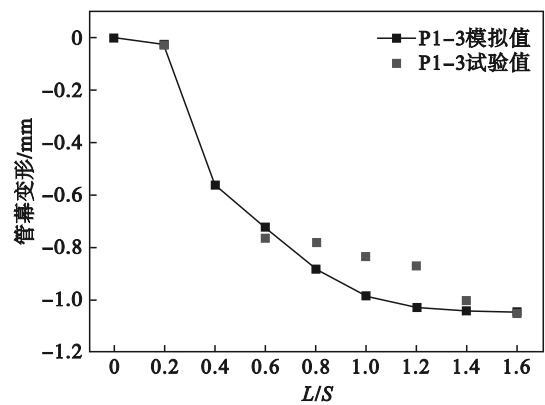


图 11 试验值与模拟值对比图
Fig. 11 Comparison between test values and simulated values

3.2 数值模拟结果分析

根据数值模拟得到管幕变形与横梁抗弯刚度和管幕抗弯刚度的关系曲线,见图 12(虚线为拟合曲线). 可以看出,管幕刚度和横梁刚度的增

加,均会减小开挖引起的管幕变形.当横梁刚度从 $0.5K$ 增加至 $2K$ 时,不同管幕刚度条件下管幕变形分别减小了 28.39%, 27.93%, 28.33% 和 27.01%, 减小幅度比较均匀,平均减小约 27.91%;当管幕刚度从 $0.5D$ 增加至 $2D$ 时,不同横梁刚度条件下管幕变形分别减小了 10.44%, 8.90%, 9.60% 和 8.70%, 平均减小约 9.41%. 由此可见管幕变形对横梁抗弯刚度变化更为敏感.对管幕变形数据进行拟合,拟合公式见式(2)和式(3),管幕变形与横梁抗弯刚度和管幕抗弯刚度均呈指数函数关系.

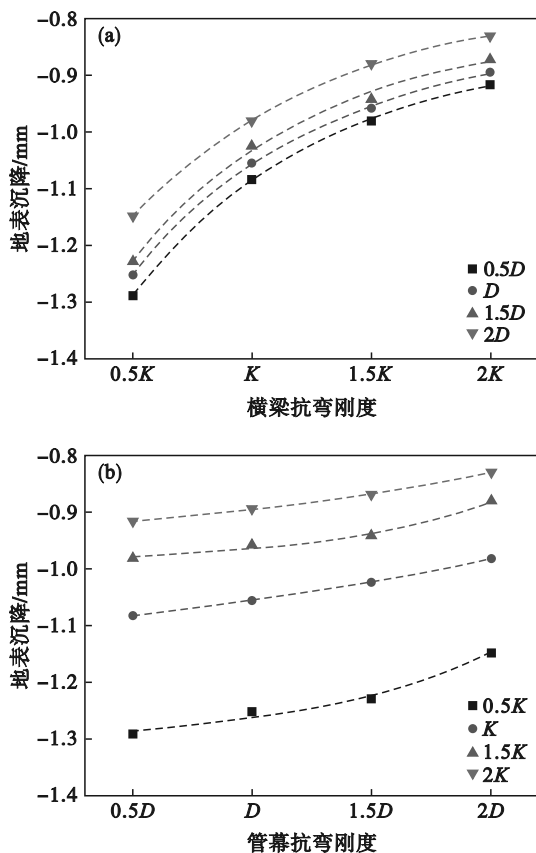


图 12 管幕变形随管幕抗弯刚度和横梁抗弯刚度变化图
Fig. 12 Variation of pipe-roof deformation with stiffness of pipe-roof and beam
(a)—管幕变形随横梁刚度变化图;
(b)—管幕变形随管幕刚度变化图.

不同管幕抗弯刚度下管幕变形和横梁抗弯刚度的关系式:

$$y_1 = \begin{cases} -0.82e^{-x_1/0.81} - 0.88, R^2 = 0.99; \\ -0.78e^{-x_1/0.83} - 0.86, R^2 = 0.99; \\ -0.78e^{-x_1/0.78} - 0.85, R^2 = 0.99; \\ -0.69e^{-x_1/0.88} - 0.79, R^2 = 0.99. \end{cases} \quad (2)$$

式中: y_1 表示管幕变形; x_1 表示横梁抗弯刚度($0.5K \sim 2K$ 之间).从上至下管幕刚度依次为 $0.5D$, D , $1.5D$ 和 $2D$.

$$y_2 = \begin{cases} 0.01e^{x_2/0.76} - 1.34, R^2 = 0.98; \\ 0.04e^{x_2/1.49} - 1.17, R^2 = 0.99; \\ 0.003e^{x_2/0.57} - 1.02, R^2 = 0.98; \\ 0.01e^{x_2/1.03} - 0.97, R^2 = 0.99. \end{cases} \quad (3)$$

式中: y_2 表示管幕变形; x_2 表示管幕抗弯刚度($0.5D \sim 2D$ 之间).从上至下横梁刚度依次为 $0.5K$, K , $1.5K$ 和 $2K$.

图 13 是地表沉降随横梁抗弯刚度和管幕抗弯刚度变化图(虚线为拟合曲线).由图可知,地表沉降与管幕变形的变化趋势相似,均随管幕刚度和横梁刚度的增加而减小.当横梁刚度从 $0.5K$ 增加至 $2K$ 时,不同管幕刚度条件下地表沉降平均减小约 28.62%;当管幕刚度从 $0.5D$ 增加至 $2D$ 时,不同横梁刚度条件下地表沉降平均减小约 10%.由此可见地表沉降同样对横梁刚度变化更为敏感,而且地表沉降的减小幅度大于管幕变形,但不明显.对地表沉降数据进行拟合,拟合公式见式(4)和式(5),地表沉降(管幕变形)与横梁抗弯刚度和管幕抗弯刚度也呈指数函数关系.

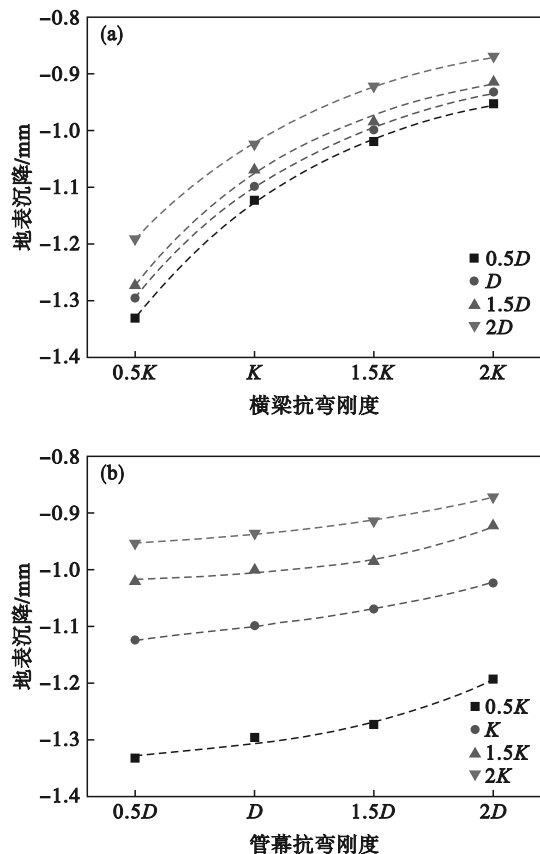


图 13 地表沉降随管幕抗弯刚度和横梁抗弯刚度变化图
Fig. 13 Variation of surface settlement with stiffness of pipe-roof and beam
(a)—地表沉降随横梁刚度变化图;
(b)—地表沉降随管幕刚度变化图.

$$y_3 = \begin{cases} -0.81e^{-x_3/0.80} - 0.84, R^2 = 0.99; \\ -0.77e^{-x_3/0.81} - 0.82, R^2 = 0.99; \\ -0.78e^{-x_3/0.78} - 0.81, R^2 = 0.98; \\ -0.69e^{-x_3/0.87} - 0.75, R^2 = 0.99. \end{cases} \quad (4)$$

式中: y_3 表示地表沉降; x_3 表示横梁抗弯刚度(0.5 K~2 K之间). 从上至下管幕刚度依次为0.5 D, D, 1.5 D和2 D.

$$y_4 = \begin{cases} 0.01e^{x_4/0.83} - 1.31, R^2 = 0.98; \\ 0.08e^{x_4/2.18} - 1.18, R^2 = 0.99; \\ 0.005e^{x_4/0.66} - 0.98, R^2 = 0.98; \\ 0.03e^{x_4/1.59} - 0.96, R^2 = 0.99. \end{cases} \quad (5)$$

式中: y_4 表示地表沉降; x_4 表示管幕抗弯刚度(0.5 D~2 D之间). 从上至下横梁刚度依次为0.5 K, K, 1.5 K和2 K.

不同参数组合下转换成实际工况下的地表沉降值见图 14. 本文的分析是建立在无中柱情况下, 因此得出的地表沉降结果要比有中柱情况下的结果偏大, 也更为保守. 按市府大路站地表沉降控制标准 50 mm, 筛选出符合要求的参数组合有以下 9 组: 编号分别为 3, 4, 7, 8, 11, 12, 14, 15 和 16.

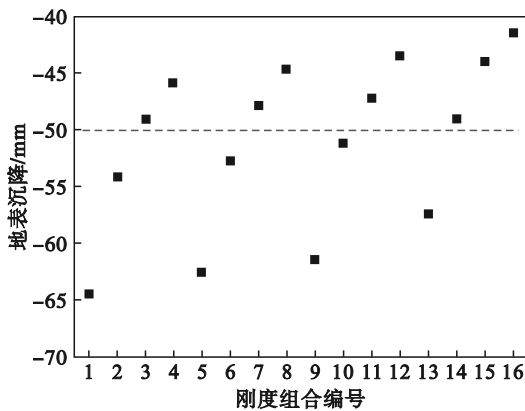


图 14 不同参数组合下地表沉降值

Fig. 14 Surface settlement values under different parameter combinations

为得出既满足施工要求又节省成本的最优刚度匹配组合, 结合模糊数学理论对上述组合进行对比筛选. 定义地表沉降为安全性评价指标, 记为 y_{11} , 材料价格为经济性评价指标, 记为 y_{12} , 经济性评价指标采用式(6)计算:

$$y_{12} = m_1 s_1 + v_2 s_2 + v_3 s_3. \quad (6)$$

式中: m_1 为钢管质量(t); s_1 为钢管每吨单价(万元/t); v_2 为钢管内混凝土体积(m^3); s_2 为每立方米混凝土单价(万元/ m^3); v_3 为横梁体积(m^3); s_3 为每立方米横梁单价(万元/ m^3). 通过控制截面惯性矩得

出不同刚度下的管幕和横梁体积, 进而得出 y_{12} 值, 计算结果见表 3.

评价指标的隶属度分为偏大型指标与偏小型指标, 本文中安全性评价指标 y_{11} 与经济性评价指标 y_{12} 均为偏小型评价指标, 其隶属度 f_{ik} 定义为

$$f_{ik} = \frac{\max(y_k) - y_k^i}{\max(y_k) - \min(y_k)}. \quad (7)$$

式中: y_k^i 为第 i 组参数组合的评价指标 y_k , 其中 $k=11, 12, i=1, 2, \dots, 9$; $\max(y_k)$ 为 9 组参数组合所得评价指标 y_k 的最大值; $\min(y_k)$ 为 9 组参数组合所得评价指标 y_k 的最小值.

表 3 参数组合及评价指标计算结果
Table 3 Parameters of the specimens and calculation results

编号	y_{11}/mm	$y_{12}/万元$
3	49.05	29.86
4	45.8	31.12
7	47.9	35.82
8	44.7	37.08
11	47.1	40.12
12	43.45	41.38
14	49.05	42.32
15	44	43.58
16	41.5	44.85

由式(7)计算得出由各组合评价指标隶属度组成的模糊关系矩阵 $G=(f_{ik})_{9 \times 2}$ 为

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0.43 & \dots & 1.00 \\ 1.00 & 0.92 & \dots & 0 \end{bmatrix}^T.$$

本文采用层次分析法^[15]计算评价指标的权重向量 w , 在进行模糊数学评价时指标 y_1 与 y_2 同等重要, 构造判断矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} 11 & 11 \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

根据构造矩阵求出权重向量 w 为

$$w = [0.5 \quad 0.5]^T.$$

模糊综合评价隶属度 t 计算公式为

$$t = G \cdot w. \quad (9)$$

由式(9)求得 9 组参数组合的模糊综合评价隶属度 t , 结果见表 4. 可以看到第 2 组的模糊综合评价隶属度最大, 因此认为这组参数组合为兼顾安全性与经济性的最优参数组合, 此时管幕刚度为 0.5 D, 横梁刚度为 2 K.

表 4 模糊综合评价隶属度 t_i 计算结果
Table 4 Calculation results of membership t_i of fuzzy comprehensive evaluation

i	t_i	i	t_i
1	0.50	6	0.49
2	0.67	7	0.08
3	0.38	8	0.38
4	0.55	9	0.50
5	0.29		

4 结 论

1) 开挖过程中管幕变形呈现出一定的连续性,类似于“板”,且关于中间管幕对称.管幕变形主要分为平缓、迅速增加和缓慢增加三个阶段,且当开挖长度与管幕跨度比在 1.0 时,管幕变形随开挖长度的增加缓慢增大.跨中地表沉降主要分为平缓和迅速增加两个阶段,开挖结束后跨中断面地表沉降呈“凹槽”型分布,符合 Peck 曲线.

2) 管幕变形和地表沉降均与横梁抗弯刚度和管幕抗弯刚度呈指数函数关系,且管幕变形和地表沉降对横梁刚度变化更为敏感.

3) 当横梁刚度从 0.5K 增加至 2K 时,管幕变形和地表沉降分别减小约 27.91% 和 28.62%. 当管幕刚度从 0.5D 增加至 2D 时,管幕变形和地表沉降分别减小约 9.41% 和 10%.

4) 管幕刚度与横梁刚度分别为 0.5D 和 2K 时,可以兼顾安全性与经济性.

参考文献:

- [1] Jia P J, Zhao W, Khoshghalb A, et al. A new model to predict ground surface settlement induced by jacked pipes with flanges[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 98: 103330.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 肖世国,李向阳,夏才初,等.管幕内顶进箱涵时顶部管幕力学作用的试验研究[J]. *现代隧道技术*, 2006, 43(1): 22-27, 31.
(Xiao Shi-guo, Li Xiang-yang, Xia Cai-chu, et al. Study on the behavior of the upper pipe-curtain during the advance of a box culvert within pipe - curtains by a model test [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2006, 43(1): 22-27, 31.)
- [5] 张超哲,赵文,刘松玉,等.地下支护新型管幕结构横向刚度的等效方法与实例验证[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2019, 27(6): 1321-1332.
(Zhang Chao-zhe, Zhao Wen, Liu Song-yu, et al. Equivalent lateral stiffness method and verification of new pipe roofing structure for underground supporting. [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2019, 27(6): 1321-1332.)
- [6] Jia P J, Zhao W, Du X, et al. Study on ground settlement and structural deformation for large span subway station using a new pre-supporting system[J]. *Royal Society Open Science*, 2019, 6(2): 181035.
- [7] Aksoy C O, Onargan T. The role of umbrella arch and face bolt as deformation preventing support system in preventing building damages [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2010, 25(5): 553-559.
- [8] Hisatake M, Ohno S. Effects of pipe roof supports and the excavation method on the displacements above a tunnel face [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2008, 23(2): 120-127.
- [9] 谭忠盛,孙晓静,马栋,等.浅埋大跨隧道管幕预支护技术试验研究[J]. *土木工程学报*, 2015, 48(sup1): 429-434.
(Tan Zhong-sheng, Sun Xiao-jing, Ma Dong, et al. Experimental research of pipe-roof pre-supporting technology for the shallow large-span tunnel [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(sup1): 429-434.)
- [10] 龚建伍,盛浩,齐培林.管幕预支护隧道施工变形特性相似模型试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(23): 83-88.
(Gong Jian-wu, Sheng Hao, Qi Pei-lin. Similar model study on deformation characteristics of tunnel with pipe-roof reinforcement during construction [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(23): 83-88.)
- [11] Xie X Y, Zhao M R, Shahroui I. Face stability model for rectangular large excavations reinforced by pipe roofing [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 94: 103132.
- [12] 郭璇,张鸿儒,蒙蛟,等.软弱围岩隧道管棚预支护开挖土压分布模型试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1214-1224.
(Guo Xuan, Zhang Hong-ru, Meng Jiao, et al. Model test to earth pressure distribution on pipe roof of tunnels as pre-supporting system in weak surrounding rock [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6): 1214-1224.)
- [13] Guo X Y, Wang Z Z, Geng P, et al. Ground surface settlement response to subway station construction activities using pile-beam-arch method [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 108: 103729.
- [14] 缪圆冰,魏雯,陈仁春,等.基于正交设计的土质相似材料配比试验研究[J]. *福州大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(4): 570-576.
(Miao Yuan-bing, Wei Wen, Chen Ren-chun, et al. Orthogonal experiment on the of soil similar material [J]. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 2016, 44(4): 570-576.)
- [15] 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.