

隧道管棚支护技术方案优化

吴波,周路,刘聪

(东华理工大学 土木与建筑工程学院,江西 南昌 330013)

摘要: 依托大石包隧道进口段工程项目,以管棚支护技术为研究对象,选择外插角、拱顶加固范围、环向间距和拱顶加固距离为影响隧道稳定性的主要评价指标,借助 ABAQUS 数值软件进行正交试验,采用 CRITIC 法求解客观权重,结合 G1 法所求的主观权重在引入博弈论后进行权重组合优化,并基于改进 TOPSIS 法加权后探讨了在多因素同时改变的管棚支护工况下各评价指标的变化情况。最后对各工况结果进行分析,确定最优方案,将最优方案与实测数据进行对比,验证了该方法的可行性,可为类似隧道工程提供参考。

关键词: 公路隧道;管棚支护方案;改进 TOPSIS 法;正交实验;组合赋权

中图分类号: U455.49

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2022)04-0354-08

Optimization of technical solutions for tunnel tube shed support

WU Bo, ZHOU Lu, LIU Cong

(School of Civil & Architecture Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Based on the tunnel project of the inlet section of Dashibao, the tube shed support technology was used as the research object, and the outer insertion angle, vault reinforcement range, circumferential spacing and vault reinforcement distance were selected as the main factors affecting the stability of the tunnel. Orthogonal tests were conducted with the help of ABAQUS numerical software, and the objective weights were solved by the CRITIC method. Combined with the subjective weights obtained by the G1 method, weight combination optimization was carried out after the introduction of game theory. Changes of each evaluation index under the working condition of the tube shed support with multiple factors changed simultaneously are discussed based on the improved TOPSIS method. Finally, results of different working conditions were analyzed, the optimal scheme was determined, and the optimal scheme was compared with the measured data to verify the feasibility of the method, which can provide reference for similar projects in the future.

Keywords: highway tunnel; tube shed support program; improved TOPSIS method; orthogonal experiments; combined weighting

在穿越卵石地层施工时,由于隧道内部空隙大,黏聚力小、渗透性强,极易发生坍塌等安全事故^[1]。采取超前管棚支护,能够提高隧道稳定性。有专家学者采用模型试验、现场监测和数值软件等方法进行了相关研究。阳超^[2]等借助数值软件通过设置不同的管棚长度和拱顶的加固范围对砂卵石地层隧道管棚施工方案进行优化。代

聪^[3]等采用模型试验和数值模拟相结合的方法研究管棚拱顶加固范围对软岩隧道稳定性的影响。方智淳^[4]等运用数值软件对岩溶隧道进行超前加固方案对比分析。仇文革^[5]等通过现场监测结合数值模拟的方法验证了双层大管棚跟踪注浆工法的可行性和创新性,岳洪武^[6]等借助有限元软件研究了管棚注浆技术对围岩稳定性的支

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 国家自然科学基金(52168055);江西省自然科学基金(20212ACB204001)

第一作者简介: 吴波(1971—),男,四川阆中人,教授,博士,研究方向:隧道与地下工程。

护作用。吴波^[7]等通过数值软件进行正交试验,并运用 TOPSIS 法求解出施工最优方案。颜文^[8]运用 TOPSIS 法结合夹角余弦理论优选出铁路线路建设方案。

以上研究建立的模型只有单因素的变化,没有考虑到多因素同时变化的施工效果,基于此,本文把围岩最大应力、地表沉降、拱腰水平位移和初支最大应力作为多因素评价指标进行正交试验^[9],运用灰色理论对传统的 TOPSIS 法进行改进,然后分析计算试验数据,筛选出最优方案。

1 理论分析

1.1 博弈论组合赋权法

1.1.1 G1 法确定主观权重

G1 法^[10]是对 AHP 法进行改进后的一种权重赋值方法,相较于后者,改进的 G1 法不用构造判断矩阵,也避免了一致性检验的繁琐,可以更加简便地确定权重值。计算步骤如下:

(1)假设待评价事件中有 n 个评价指标为 x_1, x_2, \dots, x_n ,专家从中选取最重要一个指标为 x'_1 ;接着在剩下的 $n - 1$ 个指标里选出最重要指标为 x'_2 ;同理,在剩余的 $n - (k - 1)$ 个指标中选出最重要指标为 x'_k 。由以上可以确定唯一序关系 $x'_1 > x'_2 > \dots > x'_n$ 。

(2)专家根据赋值表对相邻指标进行量化。设 x'_k 和 x'_{k-1} 重要度比值为 r_k ,则有:

$$r_k = \frac{W_{k-1}}{W_k} \quad (k = n, n - 1, \dots, 2) \tag{1}$$

其中, W_k 表示第 k 个指标的权重值, r_k 取值参考表 1^[10]。

表 1 r_k 赋值表
Tab.1 r_k assignment table

r_k	说明
1.0	指标 r_{k-1} 与指标 r_k 同等重要
1.2	指标 r_{k-1} 比指标 r_k 稍微重要
1.4	指标 r_{k-1} 比指标 r_k 明显重要
1.6	指标 r_{k-1} 比指标 r_k 非常重要
1.8	指标 r_{k-1} 比指标 r_k 极端重要

(3)根据对 r_k 的赋值,可计算其他各个指标的权重,公式为:

$$W_k = \left(1 + \sum_{k=2}^n \prod_{i=k}^n r_i\right) - 1 \tag{2}$$

$$W_{k-1} = r_k W_k \quad (k = n, n - 1, \dots, 2) \tag{3}$$

1.1.2 基于 CRITIC 法的客观赋权

单一的主观赋权法所求解的指标权重缺少科学性,本文引入 CRITIC 客观赋权法^[11]在提高赋权客观性的基础上对所评估指标内部的关联性和差异性充分发掘。将地表沉降、围岩应力、拱腰水平位移以及初支最大应力作为评价指标。假设存在 m 个样本, n 个指标, a_{ij} 表示第 i 个样本的第 j 个指标的取值,则指标矩阵 A 为:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \tag{4}$$

(1)对第 i 个样本的第 j 个指标进行归一化处理,效益型指标为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_j(x_{ij})}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \tag{5}$$

成本型指标为:

$$y_{ij} = \frac{\max_j(x_{ij}) - x_{ij}}{\max_j(x_{ij}) - \min_j(x_{ij})} \tag{6}$$

(2)平均值和标准差计算:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \tag{7}$$

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j)^2} \tag{8}$$

式中, \bar{x}_j 和 S_j 分别表示第 j 个指标的平均值和标准差。

(3)指标差异系数:

$$v_j = \frac{S_j}{\bar{x}_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \tag{9}$$

式中, v_j 表示第 j 个指标的差异系数,可反映指标间的差异性。

(4)相关系数计算:

$$\rho_{ij} = \frac{\text{cov}(y_k, y_u)}{S_k S_j} \quad (k = 1, 2, \dots, n; u = 1, 2, \dots, n) \tag{10}$$

式中, ρ_{ij} 为第 i 个指标和第 j 个指标间的相关系数,越接近 1 说明两个指标的相关性越大, $\text{cov}(y_k, y_u)$ 表示第 k 个指标和第 u 个指标间的协方差。

(5)信息量计算:

$$E_j = v_j \sum_{i=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

式中, E_j 表示指标 j 蕴含信息量的大小, $\sum_{i=1}^n (1 - \rho_{ij})$ 表示第 j 个指标与其他 n 个因素的差异性。

(6) 确定客观权重:

$$\omega_j = \frac{E_j}{\sum_{j=1}^m E_j} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (12)$$

式中, ω_j 为指标 j 的权重值。

1.1.1.3 基于博弈论综合权重的计算

假设对评价指标用的赋权方法有 L 种, 则权重向量集合为:

$$\omega_l = \{e_{l1}, e_{l2}, \dots, e_{ln}\} \quad (l = 1, 2, \dots, L) \quad (13)$$

式中, ω_l 表示第 l 种方法确定的权重值。

则有 L 个权重向量构成的线性组合为:

$$\omega^T = \sum_{l=1}^L a_l \omega_l^T \quad (a_l > 0, \sum_{l=1}^L a_l = 1) \quad (14)$$

式中, a_l 为线性组合系数, ω^T 为所有的权重向量集的转置。

由博弈集合思想进行优化组合系数, 以极差最小化为目标, 函数表达式为:

$$\min \left\| \sum_{l=1}^L a_l \omega_l^T - \omega_l \right\|_2 \quad (l = 1, 2, \dots, L) \quad (15)$$

根据微分性质, 其所对应的线性方程归一化处理后可得:

$$a_l^* = \frac{|a_l|}{\sum_{l=1}^L |a_l|} \quad (l = 1, 2, \dots, L) \quad (16)$$

评价指标综合权重向量:

$$\omega^* = \sum_{l=1}^L a_l^* \omega_l^T \quad (17)$$

1.2 TOPSIS 法计算 D^+ 和 D^-

传统的 TOPSIS 法^[12] 中评估指标的数据, 进行归一化处理通过式 (13) 进行赋权。

$$G = (g_{ij})_{m \times n} = (\omega_j b_{ij})_{m \times n} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

式中, G 表示原始数据集合; b_{ij} 表示第 i 个样本的第 j 个原始数据。

确定 G 的正、负理想解:

$$G_j^+ =$$

$$[\max_{1 \leq i \leq n} [\{g_{ij}\}_{i=1}^n] j \in J^+, \min_{1 \leq i \leq n} [\{g_{ij}\}_{i=1}^n] j \in J^-] \quad (19)$$

$$G_j^- =$$

$$[\min_{1 \leq i \leq n} [\{g_{ij}\}_{i=1}^n] j \in J^+, \max_{1 \leq i \leq n} [\{g_{ij}\}_{i=1}^n] j \in J^-] \quad (20)$$

式中, G_j^+ 、 G_j^- 分别表示正理想解和负理想解; J^+ 、 J^- 分别表示正、负向指标。

确定欧式距离:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m [G_{ij} - G_j^+]^2} \quad (21)$$

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m [G_{ij} - G_j^-]^2} \quad (22)$$

式中, D_i^+ 和 D_j^- 分别表示指标到正负理想解的欧式距离。

1.3 灰色关联度法计算 R^+ 、 R^- 和 λ

灰色关联度系数计算公式可表示为:

$$r_{ij}^\nabla = \frac{\min_i \min_j |g_j^\nabla - g| + \rho \max_i \max_j |g_j^\nabla - g_{ij}|}{|g_j^\nabla - g_{ij}| + \rho \max_i \max_j |g_j^\nabla - g_{ij}|} \quad (23)$$

$$R_i^\nabla = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m r_{ij}^\nabla \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (24)$$

式中, r_{ij}^∇ 为关联度系数; R_i^∇ 表示“+”“-”, 即表示求得与正负理想方案的灰色矩阵。

引入灰色关联度进行加权, k 表示偏好程度, 本文取值 0.5。

$$S_i^+ = k \times D_i^- + (1 - k) \times R_i^+ \quad (25)$$

$$S_i^- = k \times D_i^+ + (1 - k) \times R_i^- \quad (26)$$

式中, R_i^+ 和 R_i^- 分别表示正负理想解方案, S_i^+ 和 S_i^- 分别表示正负理想解方案距离。

相对贴近度计算:

$$\lambda_i = \frac{S_i^+}{S_i^- + S_i^+} \quad (27)$$

式中, $\lambda \in [0, 1]$, 值越大方案越优, 反之则越差。

2 案例分析

大石包隧道位于云贵高原西北, 起止里程为 K127+530~K128+125, 隧道全长 595 m, 隧址区内沟壑发育, 地形陡峻, 整体地质条件较差, 围岩级别多为 IV 级和 V 级围岩, 本文选取进口浅埋段 30 m 进行研究。

2.1 数值模型计算

采用 ABAQUS 对隧道进口段进行数值模拟, 其

跨度为 13 m,高度为 9.095 m,埋深 6 m。构建模型 X、Y、Z 方向分别为 100、100 和 30 m,如图 1 所示。

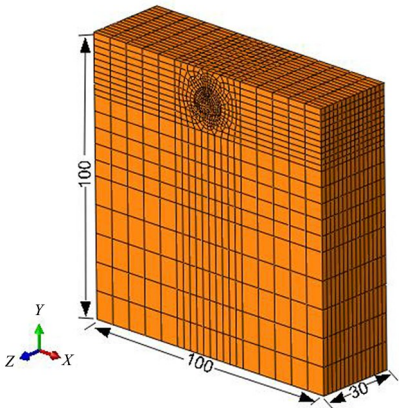


图 1 数值计算模型图 (单位:m)

Fig.1 Numerical calculation model(unit: m)

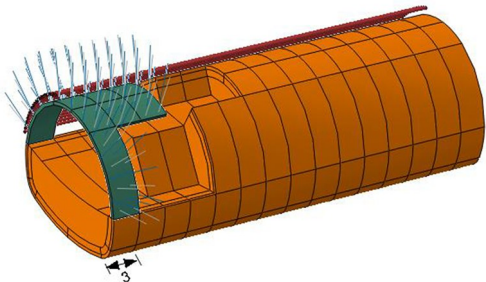


图 2 开挖步骤及支护措施(单位:m)

Fig.2 Excavation steps and support measures(unit: m)

将围岩视为理想弹塑性体并采用预留核心土法开挖隧道,管棚和锚杆分别采用壳单元和植入式梁单元模拟。开挖顺序和支护措施如图 2 所示。模型的材料参数取值如表 2 所示。

表 2 材料参数
Tab.2 Material parameters

材料	弹性模量/ GPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	摩擦角/ (°)	容重/ (kN·m ⁻³)
围岩	0.1	0.3	8	30	1 850
初期支护	26.0	0.2	—	—	2 400
喷射混凝土	28.0	0.2	—	—	2 500
钢材	210.0	0.2	—	—	7 800

2.2 正交试验设计

通过广泛查阅文献并结合实地调研发现在同一地质、相同隧道埋深和同种类型管棚支护条件下,影

响管棚支护作用的因素主要有 4 种,如表 3 所示,通过 T₁₆(4×4)正交试验表进行正交试验的设计。

表 3 主要影响因素及水平
Tab.3 Main influencing factors and levels

外插角 d/ (°)	环向间距 L/cm	拱顶加固范围 c/(°)	拱顶加固距离 D/cm
1	30	90	50
2	40	120	100
3	50	150	150
4	60	180	200

2.3 试验方案与结果

根据表 4 可知工况 10 的围岩最大应力、地表沉降以及拱腰水平位移都为最小值,分别为 2.079 kPa、12.16 mm 和 6.543 mm;工况 9 的初值最大应力为 3.644 MPa。外插角相较于其他 3 种因素对管棚的作用影响较小。拱顶加固范围较大时,计算结果均较小,其他加固范围计算结果均较大。可知拱顶加固范围对管棚所起的支护作用影响很大。

表 4 正交实验方案和结果
Tab.4 Orthogonal experimental plan and results

工 况	d/ (°)	L/ cm	c/ (°)	D/ cm	σ/ Pa	δ/ mm	τ/ mm	γ/ MPa
1	1	30	90	50	2 390	17.79	7.089	4.258
2	1	40	120	100	2 326	14.98	6.745	3.883
3	1	50	150	200	2 215	14.42	6.717	3.758
4	1	60	180	150	2 194	15.62	6.859	3.702
5	2	30	120	200	2 213	14.87	6.796	3.740
6	2	40	90	150	2 363	17.25	6.910	4.243
7	2	50	180	50	2 309	13.57	6.726	3.985
8	2	60	150	100	2 273	15.32	6.794	3.849
9	3	30	150	150	2 198	12.21	6.572	3.644
10	3	40	180	200	2 079	12.16	6.543	3.646
11	3	50	90	100	2 346	18.09	7.071	4.267
12	3	60	120	50	2 358	17.74	6.930	4.083
13	4	30	180	100	2 208	12.96	6.703	3.713
14	4	40	150	50	2 274	14.43	6.798	3.848
15	4	50	120	150	2 258	15.56	6.822	3.773
16	4	60	90	200	2 375	18.32	7.050	4.227

注:表中δ为最大地表沉降,σ为围岩最大应力,τ为拱腰水平位移,γ为初支剪应力。

2.4 施工方案稳定性评估

通过职称级别、学历以及工作年限对专家进行遴选,以保障专家组质量,然后由选出的 10 位专家根据自身工作经历对指标进行重要度排序,依次计算出权重值,将专家的意见视为同等重要,由公式(1)~(4)求解得到主观权重为:

$\omega_1 = (0.348, 0.296, 0.158, 0.198)$

由表 4 建立的评价矩阵通过式(5)~(6)归一化处理得到:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} 0 & 0.086 & 0 & 0.014 \\ 0.206 & 0.542 & 0.630 & 0.616 \\ 0.563 & 0.633 & 0.681 & 0.817 \\ 0.630 & 0.438 & 0.421 & 0.907 \\ 0.569 & 0.560 & 0.537 & 0.846 \\ 0.087 & 0.174 & 0.328 & 0.039 \\ 0.261 & 0.771 & 0.665 & 0.453 \\ 0.376 & 0.487 & 0.540 & 0.671 \\ 0.617 & 0.992 & 0.947 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0.997 \\ 0.142 & 0.037 & 0.033 & 0 \\ 0.103 & 0.094 & 0.291 & 0.295 \\ 0.585 & 0.870 & 0.707 & 0.889 \\ 0.373 & 0.632 & 0.533 & 0.673 \\ 0.424 & 0.448 & 0.489 & 0.793 \\ 0.048 & 0 & 0.071 & 0.064 \end{pmatrix}$$

根据式(7)~(12)求得客观权重:

$\omega_2 = (0.451, 0.216, 0.148, 0.186)$

根据式(13)~(17)求得综合权重:

$\omega^* = (0.375, 0.275, 0.155, 0.195)$

通过公式(18)对指标矩阵进行赋权得到 G 矩阵,再由公式(21)~(22),确定欧氏距离 D^+ 和 D^- ,归一化后结果如表 5 所示。

通过公式(23)~(24)对 TOPSIS 加权后求得的矩阵进行计算,求得正负理想解方案 R^+ 和 R^- ,经归一化处理并根据公式(25)~(27)可得正负理想解方案距离 S^+ 和 S^- 以及相对贴进度 λ ,如表 6 所示。贴进度越大方案越优,管棚施工技术越好,反之则越差。由表 6 可知:工况 10 的贴进度最大为 0.674 8,其次为工况 9,贴进度为 0.618 5;工况 1 的贴进度为 0.203 7,为最小值,故工况 1 的管棚施工方案最差。

表 5 TOPSIS 数据处理
Tab.5 TOPSIS data processing

方案	G	D^+	D^-
1	(0.000 0,0.023 7,0.000 0,0.002 8)	0.999 9	0.045 8
2	(0.077 2,0.149 1,0.080 4,0.120 2)	0.757 9	0.045 8
3	(0.211 0,0.174 1,0.087 0,0.159 3)	0.653 9	0.426 2
4	(0.236 3,0.120 5,0.053 8,0.176 8)	0.729 7	0.631 5
5	(0.213 4,0.154 0,0.068 5,0.165 0)	0.694 2	0.621 9
6	(0.032 6,0.047 8,0.041 8,0.007 5)	0.904 6	0.611 8
7	(0.097 7,0.212 1,0.084 9,0.088 3)	0.706 0	0.138 0
8	(0.141 1,0.133 9,0.069 0,0.130 8)	0.741 9	0.507 1
9	(0.231 5,0.272 8,0.120 9,0.195 0)	0.542 0	0.470 0
10	(0.375 0,0.275 0,0.127 6,0.194 4)	0.492 7	0.817 5
11	(0.053 1,0.010 3,0.004 2,0.000 0)	0.968 6	1.000 1
12	(0.038 6,0.025 9,0.037 2,0.057 6)	0.921 7	0.104 3
13	(0.219 5,0.239 3,0.090 2,0.173 4)	0.612 8	0.159 3
14	(0.139 9,0.173 7,0.068 0,0.131 1)	0.722 0	0.729 0
15	(0.159 2,0.123 2,0.062 4,0.154 6)	0.748 3	0.514 5
16	(0.018 1,0.000 0,0.009 1,0.012 5)	0.991 1	0.502 8

表 6 相对贴进度计算
Tab.6 Relative posting progress calculation

方案	R^+	R^-	S^+	S^-	λ	排名
1	0.465 7	1.000 0	0.255 8	1.000 0	0.203 7	16
2	0.624 1	0.664 7	0.525 2	0.711 3	0.424 7	10
3	0.712 7	0.571 3	0.672 1	0.612 6	0.523 2	4
4	0.693 8	0.604 9	0.657 8	0.667 3	0.496 4	6
5	0.695 5	0.588 9	0.653 7	0.641 6	0.504 7	5
6	0.498 7	0.885 1	0.318 4	0.894 9	0.262 4	13
7	0.650 5	0.644 2	0.578 8	0.675 1	0.461 6	8
8	0.632 2	0.638 8	0.551 1	0.690 3	0.443 9	9
9	0.878 9	0.504 3	0.848 2	0.523 1	0.618 5	2
10	1.000 0	0.471 1	1.000 0	0.481 9	0.674 8	1
11	0.472 2	0.956 7	0.288 2	0.962 7	0.230 4	15
12	0.511 3	0.854 0	0.335 3	0.887 8	0.274 1	12
13	0.782 2	0.540 8	0.755 6	0.576 8	0.567 1	3
14	0.651 8	0.623 3	0.583 1	0.672 6	0.464 4	7
15	0.648 7	0.877 0	0.575 7	0.812 7	0.414 7	11
16	0.470 1	0.564 3	0.258 0	0.777 7	0.249 1	14

3 优化方案

3.1 优化设计

利用主效应分析观察隧道管棚施工过程中不

同影响参数对围岩应力(σ),地表沉降(δ),拱腰水平位移(τ)以及初支应力(γ)的影响规律。图 3 中 X 轴表示因素 d, L, c 和 D 改变时的变化趋势, Y 轴表示评估指标所对应的数值。

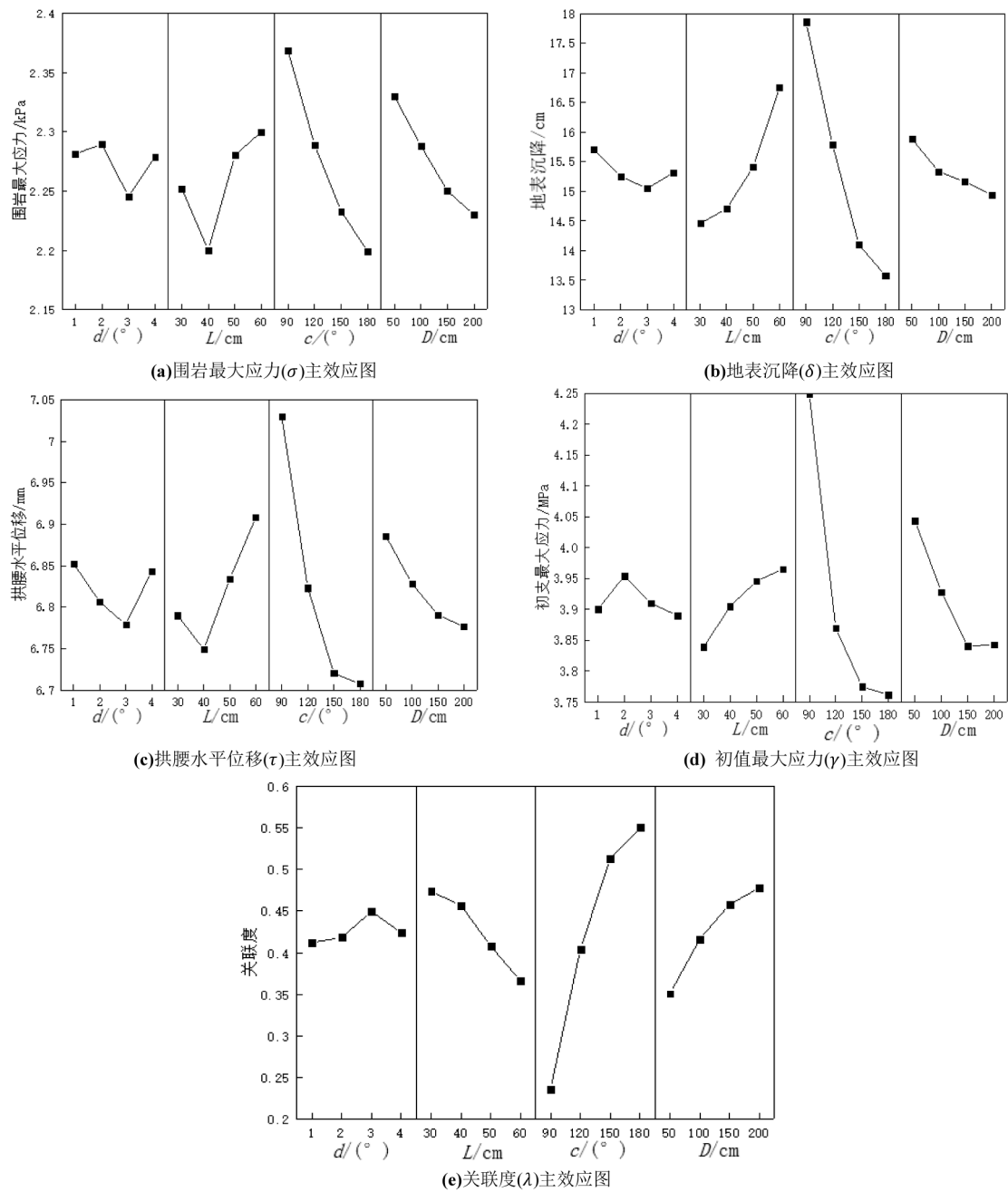


图 3 主效应分析结果
Fig.3 Results of main effects analysis

由图 3(a)可知,拱顶加固范围 c 对围岩最大应力 σ 影响最大,其次是拱顶加固距离 D ,而 d 和 L 的影响最小,其中 σ 随着 c 和 D 的增大而减小,随着 L 的增大而增大。要使围岩最大应力 σ 最

小, d 取水平 2, L 取水平 1, c 和 D 取水平 4,即 $d = 2^\circ$, $L = 30\text{ cm}$, $c = 180^\circ$, $D = 200\text{ cm}$,称为 $\text{min}_-\sigma$ 组合。

由图 3(b)可知,地表沉降 δ 受拱顶加固范围

c 的影响最大,其次是环向间距 L , d 和 D 对 δ 的影响最小。由 c 和 L 的斜率可以看出,当 c 达到 150° 左右时,对 δ 的影响明显减小,而当 L 超过 50 cm 时, δ 值有迅速增大的趋势。要使地表沉降 δ 最小, d 和 L 分别取水平 3 和水平 1, c 和 D 取水平 4, 即 $d = 3^\circ$, $L = 30\text{ cm}$, $c = 180^\circ$, $D = 200\text{ cm}$, 称为 \min_δ 组合。

由图 3(c) 可知,拱腰水平位移 τ 受 c 的影响最大,受 L 的影响次之,而 d 和 D 对 τ 的影响最小。 τ 随着 d 和 L 的增大,先增大后减小;随着 c 和 D 的变化逐渐减小。由 c 和 D 的斜率可以看出, τ 受二者的影响程度随着二者的增大而显著降低。要使拱腰水平位移 τ 最小, d 取水平 3, L 取水平 2, c 和 D 取水平 4, 即 $d = 3^\circ$, $L = 40\text{ cm}$, $c = 180^\circ$, $D = 200\text{ cm}$, 称为 \min_τ 组合。

由图 3(d) 可知,初支最大应力 γ 受拱顶加固范围 c 的影响最大,受 D 的影响次之,而 d 和 c 对 γ 的影响最小。 γ 随着 d 先增大后减小,随着 c 和 D 逐渐减小,随着 L 的增大而增大。由 c 、 D 和 L 的斜率可以明显看出, γ 随着三者值的增大而显著减小。要使初支最大应力 γ 最小, d 和 c 取水平 4, L 取水平 1, D 取水平 3, 即 $d = 4^\circ$, $c = 180^\circ$, $L = 30\text{ cm}$, $D = 150\text{ cm}$, 称为 \min_γ 组合。

由图 3(e) 可知,对于相对贴进度 λ , 受 c 影响最大;其次为 D 和 L , 而 d 对 λ 的影响最小。 λ 随 c 和 D 的增大而增大;随 L 的增大而减小;随 d 先增大后减小。要使贴进度最大, c 和 D 取水平 4, L 取水平 1, d 取水平 3, 即 $c = 180^\circ$, $D = 200\text{ cm}$, $L = 30\text{ cm}$, $d = 3^\circ$, 称为 \min_λ 组合。

根据上述分析,虽然工况 10 的贴进度相较于工况 9 的贴进度更高一点,但可以看出拱顶加固范围和拱顶加固的距离分别在 150° 和 150 cm 时,其斜率有明显的降低,说明二者对 4 种隧道评价指标的影响作用已大大减小,故综合考虑管棚的支护效果以及施工费用后,选用工况 9 为最优施工方案。

3.2 多种方法结果比较

选用熵值法-传统灰色关联度法与本文方法比较,结果如图 4 所示。

从图 4 可知,熵值法-传统灰色关联度法和本文所用方法两者无明显差异,且关联度最优的皆为工况 10 和工况 9,说明本文的方法是可行的,并且两种方法的计算结果具有相似性,分析其

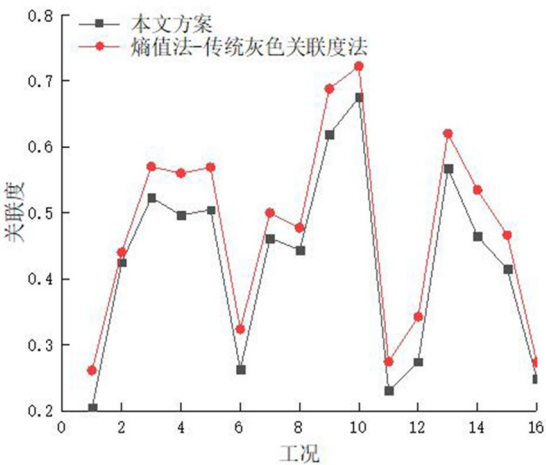


图 4 两种方法对比分析

Fig.4 Comparative analysis of the two methods

原因主要是因为计算各个指标时将其权重视为大致相同。在各方案差距不大的情况下,本文方法可以更容易凸显出最优方案,提高结果科学性和准确性,并且更加适用于评价指标种类繁多、数据复杂的情况。

3.3 施工沉降分析

由优化分析的结果可知,工况 9 为最优施工方案,并应用于隧道洞口施工。监测数据显示最大沉降值为 14.1 cm ,比数值模拟结果大 15.56% ,主要原因是施工现场可能出现超挖等不够规范的施工作业。根据图 5 可看出,监测数据与工况 9 的数值模拟结果相差较小,说明本文方法具有一定的可行性。

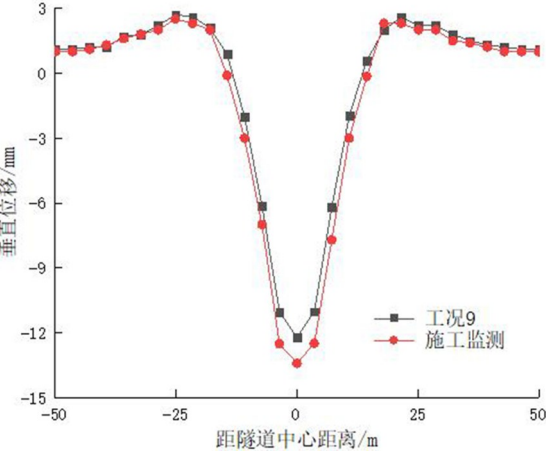


图 5 施工监测和工况 9 地表沉降对比分析

Fig.5 Comparative analysis of surface settlement between construction monitoring and working condition 9

4 结论

1) 基于正交试验、组合赋权-TOPSIS 法对隧道管棚施工技术进行分析讨论,从 $\min \lambda$ 可知;隧道稳定性受拱顶加固范围的影响最大,尤其表现在 90° 至 150° ,当从 150° 继续扩大范围时,其影响程度有明显降低的趋势;环向间距的影响主要表现在超过 40 cm 的间距时,对隧道的破坏影响有明显增大,拱顶加固距离超过 150 cm 时,对隧道稳定性的作用程度明显降低;外插角对隧道稳

定性的影响较小。

2) 运用 CRITIC 法求解客观权重,运用 G1 法求解出主观权重,并引入博弈论进行组合赋权,将数值模拟的结果加权后运用 TOPSIS 法对管棚施工方案进行最优求解,得出的评价结果更加客观真实。

3) 将数值模拟结果与监测数据对比,验证了本文所用方法的合理性,可为今后类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 滕丽, 张桓. 盾构穿越砂卵石地层地表沉降特征细宏观分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1141-1150, 1160.

[2] 阳超, 王玉锁, 张雪松, 等. 砂卵石地层暗挖隧道超前管棚支护技术研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2): 299-307.

[3] 代聪, 何川, 刘川昆, 等. 管棚布设范围对软岩隧道围岩稳定性影响研究[J]. 隧道建设:中英文, 2019, 39(9): 1437-1444.

[4] 方智淳, 朱正国, 马超义, 等. 岩溶隧道超前加固方案比选[J]. 铁道建筑, 2020, 60(10): 65-67.

[5] 仇文革, 万世付, 高刚刚, 等. 砂卵石地层盾构隧道下穿铁路咽喉区地表沉降控制研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 37-45.

[6] 岳洪武, 苗苗. 浅埋暗挖软岩隧道管棚预注浆加固效果分析[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 111-117, 134.

[7] 吴波, 路明, 雷领, 等. 基于改进 TOPSIS 法研究隧道施工方案优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(6): 1471-1479.

[8] 颜文. 基于改进 TOPSIS 决策方法的铁路线路方案优选研究[J]. 铁道建筑, 2021, 61(6): 147-150, 157.

[9] 吴波, 路明, 吴昱芳, 等. 基于改进 TOPSIS 法研究隧道施工时空效应[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(5): 42-46, 64.

[10] 何乐平, 徐应东, 胡启军, 等. 基于博弈论-云模型的软岩隧道大变形风险评估[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(6): 85-94.

[11] 侯克鹏, 王黎蝶. 基于改进的 FAHP-CRITIC 法与云理论的露天矿边坡危险性评估模型[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(6): 2443-2451.

[12] SUN W H, LI D, LIU P. A decision-making method for Sponge City design based on grey correlation degree and TOPSIS method[J]. Journal of Interdisciplinary Mathematics, 2018, 21(4): 1031-1042.

(责任编辑:陈雯)