

文章编号:1673-9469(2025)06-0065-09

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.06.008

## 基于回归正交试验的隧道支护刚度影响因素分析

齐凯<sup>1,2</sup>,高新强<sup>1,2,3\*</sup>,赵静波<sup>4</sup>,孔超<sup>5</sup>,关岳卓尔<sup>1,2</sup>,樊浩博<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室,河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043;3. 河北省交通工程结构力学行为演变与

控制重点实验室,河北 石家庄 050043;4. 中铁十八局集团有限公司,天津 300222;

5. 西南科技大学 土木工程与建筑学院,四川 绵阳 621000)

**摘要:** 通过正交试验设计与多元线性回归的方法建立回归模型,分析不同支护刚度影响因素的敏感性和对支护刚度起到的利弊作用,得到关于支护刚度的一次回归方程,通过调整支护参数,计算并优化隧道支护刚度。针对喷混凝土厚度、喷混凝土强度、长锚杆长度、锚杆环向间距、锚杆纵向间距、钢架纵向间距对支护刚度的影响,采用 $L_{25}(5^6)$ 正交表展开一次回归正交试验,获得各参数的常数和各项偏相关系数,构建多元线性回归方程,开展极差分析和方差分析,运用SPSS软件对试验结果进行分析,并将剩余的支护刚度影响因素代入回归方程中进行验证分析。研究表明:该多元线性回归分析模型的预测精度较高,平均相对误差为1.14%,因素喷混凝土强度、喷混凝土厚度水平的显著性参数 $F$ 值大于 $F_{0.001}$ ,对支护刚度起到决定性作用;钢拱架的纵向间距的 $F$ 值大于 $F_{0.025}$ ,其对支护刚度影响较为显著;锚杆的环向间距、锚杆的纵向间距的 $F$ 值大于 $F_{0.1}$ ,这两个因素对支护刚度的影响一般显著;长锚杆的长度对支护刚度的值影响不显著。

**关键词:** 隧道支护刚度;正交试验;极差分析;方差分析;回归分析

中图分类号: TG333.17

文献标识码: A

## Analysis of Factors Influencing the Stiffness of Tunnel Support Based on Regression Orthogonal Test

QI Kai<sup>1,2</sup>, GAO Xinqiang<sup>1,2,3\*</sup>, ZHAO Jingbo<sup>4</sup>, KONG Chao<sup>5</sup>, GUAN Yuezhaoer<sup>1,2</sup>, FAN Haobo<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 3. Hebei Key Laboratory of Mechanics Behavior Evolution and Control of Transport Engineering Structures, Shijiazhuang, Hebei 050043, China; 4. China Railway 18th Bureau Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 5. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621000, China)

**Abstract:** A regression model was established through orthogonal experimental design and multiple linear regression methods to analyze the sensitivity of different support stiffness influencing factors and their advantages and disadvantages in terms of supporting stiffness. A first-order regression equation regarding the supporting stiffness was obtained. By adjusting the supporting parameters, the tunnel supporting stiffness was calculated and optimized. Regarding the influence of sprayed concrete thickness, sprayed concrete strength, long anchor rod length, anchor rod circumferential spacing, anchor rod longitudinal spacing, and steel frame longitudinal spacing on supporting stiffness, a first-order orthogonal regression experiment was conducted using the  $L_{25}(5^6)$  orthogonal table, and the constant values of each parameter

收稿日期:2024-02-27

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E202310057);中国铁建股份有限公司2019年度科技重大专项(2019-A05);河北省省级科技计划项目(225676162GH)

第一作者:齐凯(1998—),男,河北石家庄人,硕士,主要从事隧道围岩稳定机理研究工作。

\*通信作者:高新强(1970—),男,河北石家庄人,博士,教授,主要从事隧道围岩稳定机理研究工作。

ter and the partial correlation coefficients were obtained. A multiple linear regression equation was constructed. Through range analysis and variance analysis, the test results were analyzed using SPSS software, and the remaining influencing factors of supporting stiffness were substituted into the regression equation for verification and analysis. The research results show that the prediction accuracy of this multiple linear regression analysis model is high, with an average relative error of 1.14%. The significant parameters F values of factors such as sprayed concrete strength and sprayed concrete thickness level are greater than F0.001, which play a decisive role in supporting stiffness; the F value of the longitudinal spacing of the steel arch frame is greater than F0.025, and its influence on supporting stiffness is relatively significant; the F values of the circumferential spacing and longitudinal spacing of the anchor rod are greater than F0.1, and these two factors have a generally significant impact on supporting stiffness; the length of the long anchor rod has no significant influence on the value of supporting stiffness.

**Key words:** tunnel support stiffness; orthogonal experiment; range analysis; analysis of variance; regression analysis

刚度与强度是影响隧道初期支护结构支护特性最重要的因素,也是评估隧道支护结构安全性的主要指标。强度反映了支护结构的极限承载力,而刚度反映了支护结构控制围岩变形的能力。支护体系总刚度为喷混凝土、锚杆、钢架的支护刚度之和。结合国内外研究现状,解决高地应力问题主要通过提高支护刚度和合理预留变形量。采取改变钢拱架类型、增大喷射混凝土厚度和添加钢筋网等方法,均有助于增强支护结构的强度。在保证初期支护灵活性的前提下,通过最大限度地发挥围岩的自承载能力,可提高初期支护的刚度<sup>[1]</sup>。

马栋等<sup>[2]</sup>提出双层初期支护均为钢架+喷混凝土,并与长短锚杆共同支护可有效提高初期支护刚度。高明中<sup>[3]</sup>基于锚杆支护与围岩相互作用关系的力学原理开展模型试验,发现短而密的锚杆支护刚度较大,长而稀的锚杆支护刚度较小,易产生拉弯型失稳破坏。邓斌等<sup>[4]</sup>发现减弱锚杆的作用可增强初期支护的强度和刚度,并采用数值模拟和现场监测验证了该方法可行性。杨其新等<sup>[5]</sup>通过分析荷载-位移关系,比较了相同截面形状下不同混凝土用量试件的刚度,发现格栅喷混凝土支护刚度随混凝土厚度的增加而增大。卜庆宝<sup>[6]</sup>认为喷混凝土厚度对保证格栅支撑的支护刚度是十分重要的,必须确保拱部的喷混凝土层厚度。熊明康等<sup>[7]</sup>认为钢拱架纵向间距对初期支护刚度起决定性作用,间距越小,初期支护的刚度越大。苏永华等<sup>[8]</sup>对包含岩石基本参数在内的7个因素进行回归正交试验,建立了考虑多个因素的开挖面位移释放系数拟合公式。张向东等<sup>[9]</sup>利用正交试验研究了弹性模量、摩擦角等土体参数对水平位移的影响,结果表明,土层参数对水平位移具有显著影响。

目前,支护刚度的研究主要集中于对喷混凝土、锚杆、型钢钢架等现有支护结构的刚度参数进行优化,从而提高支护结构刚度,将支护刚度参数作为影响因素开展支护刚度的研究较为少见。本文引入正交试验方法,分析支护刚度参数对支护刚度的影响,并提出了支护体系刚度的回归算法,以期隧道支护刚度的计算提供参考。

## 1 隧道支护刚度设计

本文从隧道支护刚度的本质特征出发,建立了“支护刚度-支护刚度参数”相互作用的回归模型,由此得到支护体系刚度的特征方程。基于支护体系刚度与支护结构参数之间的动态关系,提出了以支护刚度为目标的设计原则,并利用最优化原理对支护刚度目标进行调整。

### 1.1 基于弹性介质的支护刚度计算方法

#### 1.1.1 喷混凝土刚度

在圆形隧道内安装一个封闭圆环的混凝土或喷射混凝土衬砌,封闭圆环衬砌示意图见图1。图中, $r_0$ 为隧道等效外径,m; $t$ 为喷混凝土厚度,m。根据厚壁圆筒理论<sup>[10]</sup>,当 $t > 0.04r_0$ 时,喷混凝土刚度可采用厚壁圆筒方法进行计算,见式(1)<sup>[11]</sup>。

$$K_c = \frac{E_c [r_0^2 - (r_0 - t)^2]}{r_0 \cdot (1 + \mu_c) [(1 - 2\mu_c)r_0^2 + (r_0 - t)^2]} \quad (1)$$

式中: $K_c$ 为喷混凝土刚度,MPa/m; $E_c$ 为喷混凝土弹性模量,MPa; $\mu_c$ 为喷混凝土泊松比。隧道内径 $R_{内}$ 一定时,隧道等效外径 $r_0$ 随喷混凝土的厚度的改变而改变,且 $R_{内} = r_0 - t$ 。

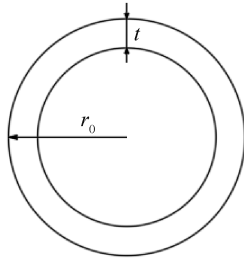


图1 封闭圆环衬砌

Fig. 1 Closed circular ring lining

### 1.1.2 锚杆刚度

锚杆受力比较复杂,锚杆支护的受拉刚度计算公式见式(2)<sup>[12]</sup>。

$$K_{\text{blot}} = \frac{\pi D_{\text{blot}}^2 E_{\text{blot}}}{S_c S_v (4L_{\text{blot}} + Q_{\text{blot}} \pi D_{\text{blot}}^2 E_{\text{blot}})} \quad (2)$$

式中: $K_{\text{blot}}$ 为锚杆支护刚度,MPa/m; $D_{\text{blot}}$ 为锚杆直径,m; $E_{\text{blot}}$ 为锚杆弹性模量,MPa; $S_c$ 、 $S_v$ 分别为锚杆环向间距和纵向间距,m; $L_{\text{blot}}$ 为长锚杆长度,m; $Q_{\text{blot}}$ 为锚杆荷载-变形常数,MN,该值可以通过锚杆的拉拔试验测得,本文取0.042 MN<sup>[13]</sup>。

### 1.1.3 型钢拱架支护刚度

型钢拱架支护刚度可采用Oreste<sup>[14]</sup>提出的理论公式计算,见式(3)。

$$K_{\text{ste}} = \frac{A_{\text{ste}} E_{\text{ste}}}{d_{\text{ste}} (r_0 - h_{\text{ste}}/2)^2} \quad (3)$$

式中: $K_{\text{ste}}$ 为型钢拱架支护刚度,MPa/m; $A_{\text{ste}}$ 为型钢拱架横截面积,m<sup>2</sup>; $E_{\text{ste}}$ 为型钢拱架弹性模量,MPa; $d_{\text{ste}}$ 为型钢拱架隧道纵向间距,m; $h_{\text{ste}}$ 为型钢拱架横截面高度,m。

### 1.1.4 支护体系刚度

Carranza-Torres等<sup>[15]</sup>认为在计算2种或3种以上支护结构组成的支护体系时,其刚度 $K_T$ 与各个支护结构刚度之和相等。

$$K_T = K_c + K_{\text{blot}} + K_{\text{ste}} \quad (4)$$

式中: $K_T$ 为支护体系总刚度,MPa/m。

## 1.2 影响支护刚度的因素及其参数选择

支护刚度的影响因素主要包括喷混凝土强度 $\sigma_c$ 、喷混凝土厚度 $t$ 、长锚杆长度 $L_{\text{blot}}$ 、锚杆环向间距 $S_c$ 、锚杆纵向间距 $S_v$ 和钢架纵向间距 $d$ 。喷混凝土的强度等级应不低于C20,考虑到材料的成本,喷混凝土的强度等级一般不超过C35;在IV—V级围岩条件下,喷混凝土的厚度 $t$ 的最小值、最大值分别设置为0.20、0.35 m;锚杆采用长、短锚杆相结合的方式,长锚杆的长度可选取4、6、8、10、12 m,短锚杆长度为4 m;锚杆的环、纵向间距设置为0.6~1.5 m;钢架的纵向间距 $d$ 设置为0.5~1.4 m。支护参数选择范围见表1。

## 2 正交试验设计

### 2.1 正交试验原理

正交试验设计是一种适用于多因素研究的试验构建方法<sup>[16-17]</sup>,该方法通过筛选具有代表性的等级组合进行试验,并利用试验结果分析试验的状态,从而得出影响试验结果的关键因素,有助于精准调整试验因素。

正交试验的评价方法包括极差分析和方差分析。与方差分析相比,极差分析具有简单、易懂、计算量少等优点,是一种适合在实际工程中推广的方法。极差 $R_j$ 用于表征第 $j$ 列因素的波动度,反映了各因素在第 $j$ 列变化过程中的波动程度。

### 2.2 正交试验方案设计

选取影响支护刚度的6个因素,即喷混凝土强度、喷混凝土厚度、长锚杆长度、锚杆环向间距、锚杆纵向间距和钢架纵向间距,分别记为A、B、C、D、E和F,开展6因素正交试验。因素B、C、D、E、F为5水平,因素A为4水平。由于缺乏与之匹配的混合水平正交表,结合实际经验,从因素A的4个水平

表1 支护刚度参数

Tab. 1 Support stiffness parameters

喷混凝土		锚杆			型钢钢架
强度 $\sigma_c$ /MPa	厚度 $t$ /m	长锚杆长度 $L_{\text{blot}}$ /m	环向间距 $S_c$ /m	纵向间距 $S_v$ /m	纵向间距 $d$ /m
C20	0.20	4	0.6	0.6	0.50
C25	0.25	6	0.8	0.8	0.75
C30	0.28	8	1.0	1.0	1.00
C35	0.30	10	1.2	1.2	1.20
C35	0.35	12	1.5	1.5	1.40

中选取一个较优水平进行重复,称为“虚拟水平”。各因素之间不存在交互作用,经查询, $L_{25}(5^6)$ 正交表可满足试验的要求,即每个因素选取5个水平,具体见表2。按照各因素水平设计正交试验,支护刚度的分析结果如表3所示。

### 3 正交试验结果分析

#### 3.1 极差分析

极差分析<sup>[18]</sup>的流程见图2,其中 $K_{jm}$ 代表第 $m$ 列与 $j$ 水平相关的试验数据的总数; $k_{jm}$ 为 $K_{jm}$ 的平均数,代表在正交表格中第 $m$ 列的因素 $j$ 水平下试验数据的平均数; $R_j$ 代表第 $j$ 列的最大偏差,表

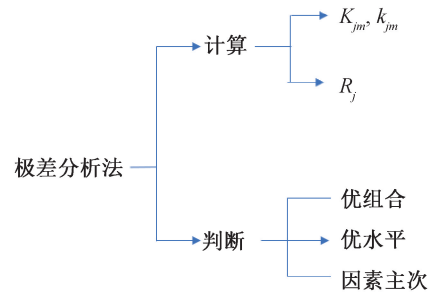


图2 极差分析流程图

Fig. 2 Flowchart of the range analysis

示在第 $j$ 列的因素水平发生波动的情况下,试验数据的变化幅度。 $R_j$ 值越大意味着该元素对试验结果的影响越显著。根据 $R_j$ 值,推断出各因素对

表2 各因素水平表(6因素5水平)

Tab. 2 Table of factor levels (6 factors with 5 levels)

水平	A/MPa	B/m	C/m	D/m	E/m	F/m
1	20	0.20	4	0.6	0.6	0.50
2	25	0.25	6	0.8	0.8	0.75
3	30	0.28	8	1.0	1.0	1.00
4	35	0.30	10	1.2	1.2	1.20
5	35	0.35	12	1.5	1.5	1.40

表3 试验方案及试验结果

Tab. 3 Test program and test results

试验号	A	B	C	D	E	F	支护刚度/(MPa·m <sup>-1</sup> )	
1	1(20)	1	1(0.20)	1(4)	1(0.6)	1(0.6)	1(0.50)	168.80
2	1	1	2(0.25)	2(6)	2(0.8)	2(0.8)	2(0.75)	170.21
3	1	1	3(0.28)	3(8)	3(1.0)	3(1.0)	3(1.00)	175.44
4	1	1	4(0.30)	4(10)	4(1.2)	4(1.2)	4(1.20)	180.91
5	1	1	5(0.35)	5(12)	5(1.5)	5(1.5)	5(1.40)	201.97
6	2(25)	2	1	2	3	4	5	134.53
7	2	2	2	3	4	5	1	181.20
8	2	2	3	4	5	1	2	195.36
9	2	2	4	5	1	2	3	211.08
10	2	2	5	1	2	3	4	228.41
11	3(30)	3	1	3	5	2	4	144.89
12	3	3	2	4	1	3	5	181.90
13	3	3	3	5	2	4	1	220.04
14	3	3	4	1	3	5	2	221.02
15	3	3	5	2	4	1	3	252.23
16	4(35)	4	1	4	2	5	3	156.05
17	4	4	2	5	3	1	4	194.56
18	4	4	3	1	4	2	5	210.79
19	4	4	4	2	5	3	1	248.74
20	4	4	5	3	1	4	2	275.19
21	5(35)	4	1	5	4	3	2	160.52
22	5	4	2	1	5	4	3	188.64
23	5	4	3	2	1	5	4	212.64
24	5	4	4	3	2	1	5	233.98
25	5	4	5	4	3	2	1	289.93

注:( )内数据表示该因素的实际值。

试验结果的影响顺序。 $k_{jm}$ 、极差  $R_j$  的计算见式 (5) (6)。

$$k_{jm} = K_{jm}/s \quad (5)$$

$$R_j = \max\{k_{jm}\} - \min\{k_{jm}\} \quad (6)$$

式中: $s$  为因素的水平数。

极差分析通常分为三步:第一步,计算每个因素对应的同一水平下的支护刚度值之和,记为  $K_i$  ( $i=1,2,3,4,5$ );第二步,计算  $K_i$  的平均值  $k_i$ ,  $k_i$  可以反映一个因素的最优水平;第三步,计算极值,把  $k_i$  最大值与最小值相减即得到极值  $R$ ,极值的大小直接反映了该因素对支护刚度的影响程度, $R$  越大,该因素对支护刚度的影响越大。以支护刚度作为分析指标的极差分析结果见表 4。

从表 4 可以看出:各因素  $k_i$  表现出不同水平的优先级,在喷混凝土强度(A)的不同水平下, $k_4 >$

$k_3 > k_2 > k_1$ ,说明水平 4 对支护刚度的影响是最大的;在喷混凝土厚度(B)的不同水平下, $k_5 > k_4 > k_3 > k_2 > k_1$ ,说明水平 5 对支护刚度的影响是最大的;在长锚杆长度(C)的不同水平下, $k_2 > k_1 > k_3 > k_4 > k_5$ ,水平 2 对支护刚度的影响是最大的;在锚杆环向间距(D)的不同水平下, $k_1 > k_3 > k_2 > k_4 > k_5$ ,水平 1 对支护刚度的影响是最大的;在锚杆纵向间距(E)的不同水平下, $k_1 > k_2 > k_4 > k_3 > k_5$ ,水平 1 对支护刚度的影响是最大的;在钢拱架纵向间距(F)的不同水平下, $k_1 > k_2 > k_3 > k_5 > k_4$ ,水平 1 对支护刚度的影响是最大的。影响正交试验中支护刚度结果的因素顺序为喷混凝土厚度  $B >$  喷混凝土强度  $A >$  钢拱架纵向间距  $F >$  锚杆纵向间距  $E >$  锚杆环向间距  $D >$  长锚杆长度  $C$ 。以支护刚度为指标的各因素变化趋势如图 3 所示。

表 4 支护刚度极差分析

Tab. 4 Analysis of extremely poor support stiffness

因素	A	B	C	D	E	F
$K_1$	-102.67	-235.21	17.66	49.61	44.93	108.71
$K_2$	-49.42	-83.49	18.35	8.69	26.90	22.30
$K_3$	20.08	14.27	10.70	15.48	-4.99	-16.56
$K_4$	171.04	95.73	4.15	-14.35	-0.69	-38.59
$K_5$	—	247.73	-11.83	-20.40	-27.12	-36.83
$k_1$	-20.53	-47.04	3.53	9.92	8.99	21.74
$k_2$	-9.88	-16.70	3.67	1.74	5.38	4.46
$k_3$	4.02	2.85	2.14	3.10	-0.10	-3.31
$k_4$	17.10	19.15	0.83	-2.87	-0.14	-7.72
$k_5$	—	49.55	-2.37	-4.08	-5.42	-7.37
极差 $R_j$	37.63	96.59	6.04	14.00	14.41	29.46

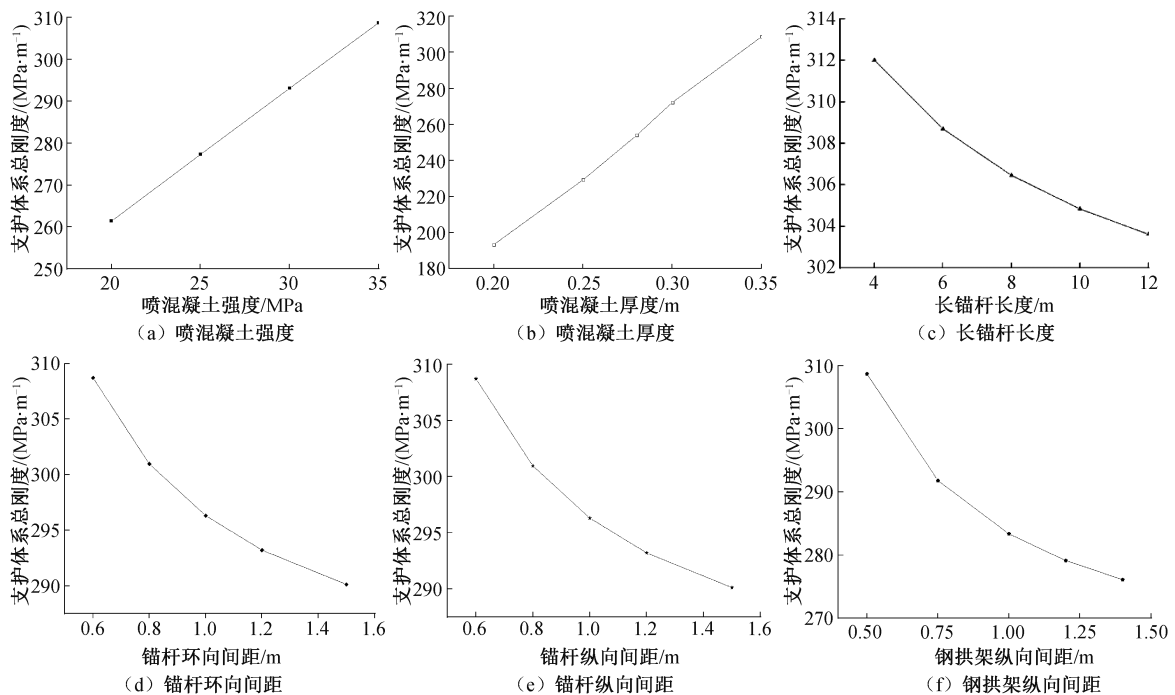


图 3 支护体系总刚度为指标的因素趋势图

Fig. 3 Trend chart of the factors influencing the total stiffness of the support system

由图3可知,随着喷混凝土强度与喷混凝土厚度的增加,支护体系总刚度相应增大。喷混凝土强度、喷混凝土厚度与支护体系总刚度基本呈线性正相关关系,对支护体系总刚度的影响较大。钢拱架纵向间距与支护体系总刚度呈非线性关系,当钢拱架纵向间距在0.50~0.75 m的范围内时,支护体系总刚度变化较为显著;当钢拱架纵向间距在1.0~1.5 m范围内时,变化相对平缓。长锚杆长度、锚杆环向间距与锚杆纵向间距、钢拱架纵向间距与支护体系总刚度呈负相关关系,其中,支护体系总刚度随锚杆环向间距与锚杆纵向间距的变化趋势一致。

### 3.2 方差分析

方差分析<sup>[19-20]</sup>是对极差分析的补充,主要用于分析组内水平的差异性,判断因素水平变化是否对评价指标产生显著影响。通过方差分析计算得到 $F$ 值, $F$ 值越大(与给定显著水平的标准 $F$ 值比较),表明因素水平之间的差异越显著。根据显著性假设检验可判定因素的显著性,设定显著性水平 $\alpha=0.05$ ,若检验 $p$ 值 $\leq 0.05$ ,认为该因素对试验结果具有显著影响。

#### (1) 总离差平方和 $S_T$

总离差平方和 $S_T$ 反映试验结果间的差异,其值越大,表明试验结果之间差距越大。计算过程见式(7)一式(10)。

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k \quad (7)$$

$$S_T = \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2 = \sum_{k=1}^n y_k^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{k=1}^n y_k \right)^2 \quad (8)$$

式(8)可以记为

$$S_T = Q_T - p \quad (9)$$

其中

$$Q_T = \sum_{k=1}^n y_k^2 \quad (10)$$

$$p = \frac{1}{n} \left( \sum_{k=1}^n y_k \right)^2 \quad (11)$$

式中: $\bar{y}$ 为变量, $y_k$ 为第 $k$ 个自变量, $Q_T$ 为偏差平方和。

#### (2) 各因素离差的平方和

以因素 $A$ 的离差平方和 $S_A$ 为例,用 $y_{ij}$ 表示因素 $A$ 的第 $i$ 个水平的第 $j$ 次试验结果(其中 $i=1, 2, \dots, n_a; j=1, 2, \dots, a$ )。

$$S_A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_a} \left( \sum_{j=1}^a y_{ij} \right)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^{n_a} \sum_{j=1}^a y_{ij} \right)^2 = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{n_a} K_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{k=1}^n y_k \right)^2 \quad (12)$$

因素 $A$ 偏差平方和记为

$$Q_A = \frac{1}{a} \sum_{i=1}^{n_a} K_i^2 \quad (13)$$

$$K_i = \sum_{j=1}^a y_{ij} \quad (14)$$

$K_i$ 是各因素第 $i$ 个水平 $a$ 次测试的总和, $S_A$ 表示 $A$ 因素不同导致的测试结果不同,也就是 $A$ 因素对测试结果的影响,其他因素也可以用相同的方法来计算。

#### (3) 试验误差的离差平方和 $S_E$

$$S_E = S_T - S_{\text{因}+\text{交}} \quad (15)$$

式中: $S_{\text{因}+\text{交}}$ 为所有考虑交互作用因素的离差平方和。

#### (4) 计算自由度

自由度的计算公式见式(16)一式(17)。

$$f_{\text{总}} = n - 1 \quad (16)$$

$$f_{\text{因}} = n_a - 1 \quad (17)$$

式中: $f_{\text{总}}$ 为试验的总自由度; $f_{\text{因}}$ 为各因素的自由度。

#### (5) 计算平均离差平方和

$$\text{因素的平均离差平方和} = \frac{S_{\text{因}}}{f_{\text{因}}} \quad (18)$$

#### (6) 求 $F$ 值

$F$ 值为各因素平均离差平方和与误差离差平方和之比,该数值反映了各因素对测试结果的影响程度。

#### (7) 对因素进行显著性检验

根据 $F$ 分布表找出关键值 $F_a(f_{\text{因}}, f_E)$ ,将其与 $F$ 值进行对比。如果 $F > F_a(f_{\text{因}}, f_E)$ ,则表示该因素对测试结果有明显的影 响,且 $F$ 和 $F_a$ 差距越大,影响越显著。以支护刚度作为指标的方差分析见表5。

由表5可知, $F_{0.01}(4, 1) = 5\ 625$ , $F_{0.005}(4, 1) = 22\ 500$ , $F_{0.001}(4, 1) = 562\ 500$ 。由 $F$ 值可知,长锚杆长度的作用最小,其他因素的作用都比较明显。将影响最小的长锚杆长度 $C$ 加入到误差中,这样新的误差方和 $S_E' = S_E + S_C$ 。方差分析见表6。

表 5 支护刚度方差分析表

**Tab. 5 Analysis table of variance for support stiffness**

方差来源	离差平方和	自由度	平均离差平方和	F 值
A	5 541. 87	3	1 847. 29	184 729
B	26 545. 53	4	6 636. 38	663 638
C	123. 12	4	30. 78	3 078
D	618. 74	4	154. 69	15 469
E	639. 70	4	159. 93	15 993
F	3 026. 07	4	756. 52	75 652
误差	0. 01	1	0. 01	—

表 6 方差分析表

**Tab. 6 Analysis of variance**

方差来源	离差平方和	自由度	平均离差平方和	F 值	显著性
A	5 541. 87	3	1 847. 29	75. 00	***
B	26 545. 53	4	6 636. 38	269. 44	***
D	618. 74	4	154. 69	6. 28	*
E	639. 70	4	159. 93	6. 49	*
F	3 026. 07	4	756. 52	30. 72	**
误差	123. 13	5	24. 63	—	—

注:\*\*\*表示非常显著;\*\*表示较为显著;\*表示一般显著。

从表 6 可知, $F_{0.1}(4,5) = 3.52, F_{0.025}(4,5) = 7.39, F_{0.001}(4,5) = 31.09, F_{0.1}(3,5) = 3.62, F_{0.025}(3,5) = 7.76, F_{0.001}(3,5) = 33.20$ 。喷混凝土强度 A、喷混凝土厚度 B 的 F 值大于  $F_{0.001}$ , 该因素对支护体系刚度的影响非常显著;钢拱架的纵向间距 F 的 F 值大于  $F_{0.025}$ , 该因素影响较为显著;锚杆的环向间距 D、锚杆的纵向间距 E 的 F 值大于  $F_{0.1}$ , 这两个因素影响一般显著。

### 4 支护体系刚度值预测模型

利用 SPSS 软件对试验结果和各影响因素进行多元线性回归分析,得到未标准化系数 B、标准化系数 Beta、方差膨胀系数(Variance Inflation Factor, VIF)、德宾·沃森(Durbin-Watson, D-W)检验、显著性检验 t 和拟合曲线的决定系数  $R^2$  等数据。

决定系数  $R^2$  在回归分析中用于评定回归模型对试验结果产生变化的解释程度,  $R^2$  越接近 1, 模型拟合效果越好, 当  $R^2$  小于 0.5 时, 表明模型拟合不足。在进行回归分析时, 通过 VIF 检验排除具有多重共线性问题的因素, 当 VIF 大于 10 时, 表明存在多重共线性问题。当显著性检验  $t > 0.05$  时, 认为该因素在多元线性回归模型中不显著。D-W 统计量的取值范围为  $[0, 4]$ , 当值位于  $[0, 2]$

区间时, 表明存在显著的正相关; 当位于  $[2, 4]$  区间时, 则存在显著的负相关; 当值在 2 附近时, 说明没有明显的残差相关性。

#### 4.1 多元线性回归分析

本文通过对试验指标和影响因素进行多元线性回归, 得出对应的经验公式, 从而实现对有关因子的有效预测<sup>[21]</sup>。多元线性回归分析模型见式(19)。

$$y = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_{m-1}x_{i,m-1} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (19)$$

一般用最小二乘法求出模型中的系数和常数。

$$\text{令 } Y = \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{Bmatrix}_{n \times 1}, X = \begin{Bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1,m-1} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2,m-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{n,m-1} \end{Bmatrix},$$

$$\beta = \begin{Bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{m-1} \end{Bmatrix}_{m \times 1} \quad (20)$$

其中  $Y = X\beta$ ,  $\beta$  的点估计<sup>[22]</sup>为

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (21)$$

#### 4.2 多元回归分析支护体系刚度值预测模型

设预测模型 A 的支护体系总刚度为 y, 喷混凝土强度为  $x_1$ , 喷混凝土厚度  $x_2$ , 长锚杆长度  $x_3$ , 锚杆环向间距  $x_4$ , 锚杆纵向间距  $x_5$ , 钢拱架纵向间距  $x_6$ 。在 SPSS 22.0 软件中将表 3 中前 20 组正交试验数据代入式(19)一式(21)中, 进行回归分析。模型 A 的回归系数及显著性检验见表 7, 得到的经验方程式见式(22)<sup>[23]</sup>。

$$y = 18.080 + 2.629x_1 + 610.375x_2 - 0.037x_3 - 13.660x_4 - 13.892x_5 - 32.981x_6 \quad (22)$$

表 7 模型 A 的回归系数及显著性检验

**Tab. 7 Regression coefficients and significance tests of model A**

因素	未标准化系数 B	标准化系数 Beta	显著性检验 t	方差膨胀系数 VIF
常数项	18.080	—	1.558	—
喷混凝土强度	2.629	0.429	11.954	1.038
喷混凝土厚度	610.375	0.814	22.819	1.026
长锚杆长度	-0.037	-0.003	-0.079	1.044
锚杆环向间距	-13.660	-0.114	-3.165	1.048
锚杆纵向间距	-13.892	-0.128	-3.610	1.012
钢拱架纵向间距	-32.981	-0.295	-8.244	1.032

通过残差分析、强影响点判断和共线性检验,结合表7对所建的经验方程的有效性进行验证。利用SPSS软件对各影响因素进行多元回归分析,模型A的 $R^2$ 为0.976,表明该回归模型对预测结果的可解释程度为97.6%,回归模型的拟合程度良好。回归分析的D-W值为1.191,回归残差具有独立性。表7中模型的方差膨胀因子VIF均小于2,表明变量之间不存在严重的多重共线问题。

根据标准化系数Beta比较各因素对支护体系刚度结果的影响程度,从大到小依次为喷混凝土厚度>喷混凝土强度>钢拱架纵向间距>锚杆纵向间距>锚杆环向间距>长锚杆长度,其结果与极差分析相吻合。

### 4.3 预测模型的试验验证

本文选取25个样本进行正交试验,抽取5个样本进行实证分析,以验证所建模型的可靠性,结果见表8。由表8可知,该模型对支护体系刚度的预测结果中,最大相对误差为8.67%,平均相对误差为1.14%,整体预测精度较高,表明模型具有良好的泛化能力。

表8 测试数据预测情况

Tab. 8 Prediction of test data

样本	试验值	预测值	相对误差/%
21	230.54	228.66	-0.81
22	182.87	180.99	-1.03
23	158.09	171.80	8.67
24	134.15	132.94	-0.90
25	214.88	214.40	-0.22

## 5 结论

1)通过极差分析得出,各因素对支护体系刚度的影响程度顺序为喷混凝土厚度>喷混凝土强度>钢拱架纵向间距>锚杆纵向间距>锚杆环向间距>长锚杆长度。

2)通过方差分析得出对支护体系总刚度影响规律:喷混凝土强度等级、喷混凝土厚度影响非常显著,钢拱架纵向间距影响较为显著,锚杆环向间距、锚杆纵向间距影响一般显著,长锚杆长度影响不显著。

3)支护体系总刚度与各影响因素可用多元线性回归关系公式表达,各因素对试验结果的影响程度与极差分析法结果相吻合。

4)影响支护体系总刚度的主导因素为喷混凝土厚度。

## 参考文献:

- [1] CUI L, SHENG Q, DONG Y, et al. A quantitative analysis of the effect of end plate of fully-grouted bolts on the global stability of tunnel [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 114: 104010.
- [2] 马栋, 孙毅, 王武现, 等. 高地应力软岩隧道大变形控制关键技术[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(10): 1634-1643.  
MA D, SUN Y, WANG W X, et al. Key technologies for controlling large deformation of soft rock tunnels with high geostress [J]. *Tunnel Constructio*, 2021, 41(10): 1634-1643.
- [3] 高明中. 煤巷锚杆锚索支护体刚度分析[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007(4): 396-400.  
GAO M Z. Stiffness analysis of bolt and anchor cable supporting for coal roadway [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007(4): 396-400.
- [4] 邓斌, 饶和根, 廖卫平, 等. 软岩隧道支护结构优化研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(10): 2203-2213.  
DENG B, RAO H G, LIAO W P, et al. Optimization of the soft rock tunnel support structure [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(10): 2203-2213.
- [5] 杨其新, 仇文革, 关宝树. 格栅钢架的特征曲线分析[J]. *铁道标准设计*, 1995(Z1): 45-47.  
YANG Q X, QIU W G, GUAN B S. Characteristic curve analysis of grille steel frame [J]. *Railway Standard Design*, 1995(Z1): 45-47.
- [6] 卜庆宝. 用“眼镜法”修建大跨度隧道洞室的探讨[J]. *铁道工程学报*, 1993(3): 96-101.  
BU Q B. Discussion on the construction of large-span tunnel chambers using the "glasses method" [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 1993(3): 96-101.
- [7] 熊明康, 王宗学, 张航, 等. 松散堆积体隧道洞口段钢拱架间距对隧道稳定性影响研究[J]. *四川建筑*, 2020, 40(5): 247-249.  
XIONG M K, WANG Z X, ZHANG H, et al. Study on the influence of steel arch spacing on the stability of tunnel in the portal section of loose accumulation tunnel [J]. *Sichuan Architecture*, 2020, 40(5): 247-249.
- [8] 苏永华, 孙旺, 方砚兵. 基于正交试验的隧道开挖面位移释放分析[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(11): 156-163.  
SU Y H, SUN W, FANG Y B. Analysis on displacement release of tunnel face based on orthogonal tests [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2017, 44(11): 156-163.
- [9] 张向东, 岳嫣, 田亚光, 等. 正交试验设计在基坑工程数值模拟中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2007

- (14): 3457-3460+3464.  
ZHANG X D, YUE Y, TIAN Y G, et al. Application of orthogonal experimental design in numerical simulation of one foundation pit[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007(14): 3457-3460+3464.
- [10] ROBERTA S. Analytical elastic solutions for pressurized hollow cylinders with internal functionally graded coatings[J]. *Composite Structures*, 2012, 5(18): 3592-3600.
- [11] 陈峰宾. 隧道初期支护与软弱围岩作用机理及应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
CHEN F B. Application and mechanism of initial support and surrounding rock in weak rock tunnel[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [12] BROWN E T, HOEK E. *Underground excavations in rock*[M]. Florida: CRC Press, 1980.
- [13] 涂孝波. 隧道围岩与支护结构相互作用机理及其应用研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2019.  
TU X B. Study on interaction mechanism and application of tunnel surrounding rock and supporting structure[D]. Nanchang: East China University of Technology, 2019.
- [14] ORESTE P P. Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence-confinement approach [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2003, 18(4): 347-363.
- [15] CARRANZA-TORRES C, FAIRHURST C. The elastoplastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(6): 777-809.
- [16] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(9): 52-55.  
LIU R J, ZHANG Y W, WEN C W, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(9): 52-55.
- [17] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.  
FANG K T, MA C X. *Orthogonal and uniform design* [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [18] 周伟, 郑蓉军, 汪涛, 等. 基于正交试验的溶洞对隧道稳定性影响分析[J]. *施工技术(中英文)*, 2021, 50(17): 106-111+129.  
ZHOU W, ZHENG R J, WANG T, et al. Influencing analysis of karst cave on tunnel stability based on orthogonal test[J]. *Construction Technology*, 2021, 50(17): 106-111+129.
- [19] 王祖贤, 施成华, 陈刚. 基于正交试验的隧道近接施工隔离桩优化设计[J]. *铁道科学与工程学报*, 2020, 17(7): 1785-1791.  
WANG Z X, SHI C H, CHEN G. Optimum design of isolation pile in tunnel close-spaced construction based on orthogonal test[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2020, 17(7): 1785-1791.
- [20] 焦凯, 陈晨, 李磊, 等. 基于正交试验设计的透水混凝土关键性能研究[J]. *硅酸盐通报*, 2019, 38(6): 1839-1844.  
JIAO K, CHEN C, LI L, et al. Performance of pervious concrete based on orthogonal experimental design [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 38(6): 1839-1844.
- [21] LIANG K Y, ZEGER S L. Regression analysis for correlated data[J]. *Annual Review of Public Health*, 1993, 14(6): 43-68.
- [22] MOHAMED O, MASOOD S, BHOWMIK J. Analytical modelling and optimization of the temperature-dependent dynamic mechanical properties of fused deposition fabricated parts made of PC-ABS[J]. *Materials*, 2016, 9(11): 895-913.
- [23] 贾进章, 柯丁琳, 陈怡诺. 基于正交试验-多元回归的煤矿瓦斯涌出量预测[J]. *安全与环境学报*, 2021, 21(5): 2037-2044.  
JIA J Z, KE D L, CHEN Y N. Prediction and forecast of the coal mining gas emission based on the orthogonal test and multiple regression [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2021, 21(5): 2037-2044.

(责任编辑 张爱丽)