

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2020.03.005

# 隧道围岩相似材料配比试验及其敏感性分析

林贤文<sup>1,2</sup>, 杨杰<sup>1,2</sup>, 臧万军<sup>1,2</sup>

(1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;  
2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 基于正交设计方法, 以铁粉、重晶石粉、石英砂为骨料, 石膏为胶结剂进行拌和, 研究福州某双洞隧道围岩相似材料的极限抗压强度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角。结果表明, 不同配比的相似材料其物理力学参数值跨度较广, 可以作为大部分岩体的相似材料进行物理模型试验。通过大量试验, 确定相似材料物理力学参数的影响因素并进行敏感性分析, 最终确定材料的合理配比, 较好地模拟出目标岩体的物理力学参数。

**关键词:** 隧道工程; 围岩; 相似理论; 敏感性分析

**中图分类号:** U452.2+8      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-4348(2020)03-0228-07

## Proportion test and sensitivity analysis of similar materials in tunnel surrounding rocks

LIN Xianwen<sup>1,2</sup>, YANG Jie<sup>1,2</sup>, ZANG Wanjun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;  
2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** Based on the orthogonal design method, with iron powder, barite powder, quartz sand as aggregate, and gypsum as cementing agent, the ultimate compressive strength, elastic modulus, cohesion and internal friction of similar materials in the surrounding rocks of a double-hole tunnel in Fuzhou were studied. Results show that similar materials with different ratios have a wide range of physical and mechanical parameter values, and can be used as physical model tests for similar materials in most rock masses. Through a large number of experiments, the influencing factors of physical and mechanical parameters of similar materials were determined and sensitivity analysis was performed. Finally, the reasonable ratio of materials was determined, and the physical and mechanical parameters of target rock mass were well simulated.

**Keywords:** tunnel engineering; surrounding rock; similarity theory; sensitivity analysis

## 引言

如何保持围岩稳定是隧道工程中最重要最基本的问题之一<sup>[1]</sup>。目前围岩稳定性研究方法主要有理论研究、数值模拟、物理模拟(模型试验)、现场试验<sup>[2-6]</sup>。与数值模拟计算方法相比,物理模型试验可较真实的对施工方法、荷载加载方式及作用时间等进行模拟<sup>[10]</sup>,能直接反映研究对象

从弹性变形到塑性变形直至破坏的全过程<sup>[7-11]</sup>。

目前针对围岩相似材料的研究成果颇丰,如: F P Glushikh in 等<sup>[12]</sup>研制了用于各种不同试验的相似材料,但相似材料制作过程中释放的有毒气体会危害试验人员的生命安全;韩伯鲤等<sup>[13]</sup>通过拌和重晶石粉、铁粉、酒精、松香等材料,配制出模拟岩土体的相似材料,具有低强度、低弹模的特性,但原材料胶膜对人体有毒害作用;李仲奎等<sup>[14]</sup>等

收稿日期: 2020-03-19  
第一作者简介: 林贤文(1994—),男,福建漳州人,硕士研究生,研究方向:隧道工程。  
通信作者: 臧万军(1975—),男,吉林农安人,教授,博士,高级工程师,研究方向:隧道抗震减震、隧道施工、地下工程风险评估。

研制了由铁矿粉、石英砂、石膏、水泥组成的地质力学模型材料,具有性质稳定、价格低廉等特点;邹成路等<sup>[15]</sup>用粉煤灰、干河砂、机油作为原材料拌和制成相似材料,能较好的模拟 V 级围岩;关振长等<sup>[16]</sup>以铁矿粉、重晶石粉、石英砂为骨料,松香、酒精为黏结剂,石膏粉为调节剂配制岩性相似材料,结果表明不同配比相似材料的物理力学参数取值范围较广。

目前,围岩相似材料的研究大多聚焦于软弱围岩的模拟,硬质围岩相似材料的研究较少,且粗细骨料、胶结剂、调节剂种类繁多操作复杂,部分材料有毒副性,危害试验人员健康。本文在参考前人研究成果的基础上,通过大量配比试验,选用无毒且性质稳定的重晶石粉、铁粉、石英砂作为骨料,石膏作为胶结剂,对硬质围岩进行模拟。以福州某隧道围岩的主要物理力学参数为目标,采用正交设计方法<sup>[17]</sup>,对岩质相似材料进行配比试验,并对相似材料中各因素进行极差方差等敏感性分析<sup>[18]</sup>。

## 1 理论基础

### 1.1 相似原理

一般情况下,利用模型重现原型的物理现象即为相似模型试验。试验要求模型的几何形状、材料参数以及应力变化等需符合一定的相似规律。开展隧道模型试验需假定隧道围岩材料为连续、均匀、各向同性。并且隧道围岩原型和模型都要满足下列平衡微分方程。

原型:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sigma_x)_p}{\partial x_p} + \frac{\partial(T_{xy})_p}{\partial y_p} + X_p = 0 \\ \frac{\partial(T_{yx})_p}{\partial x_p} + \frac{\partial(\sigma_y)_p}{\partial y_p} + Y_p = 0 \end{cases} \quad (1)$$

模型:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\sigma_x)_m}{\partial x_m} + \frac{\partial(T_{xy})_m}{\partial y_m} + X_m = 0 \\ \frac{\partial(T_{yx})_m}{\partial x_m} + \frac{\partial(\sigma_y)_m}{\partial y_m} + Y_m = 0 \end{cases} \quad (2)$$

假定几何相似比为  $C_l = \frac{x_p}{x_m} = \frac{y_p}{y_m}$ , 弹模相似比为  $C_E = \frac{E_p}{E_m}$ , 体积力相似比为  $C_x = \frac{x_p}{x_m} = \frac{y_p}{y_m}$ , 应力相

似比为  $C_\sigma = \frac{(\sigma_x)_p}{(\sigma_x)_m} = \frac{(\sigma_y)_p}{(\sigma_y)_m} = \frac{(\sigma_{xy})_p}{(\sigma_{xy})_m}$ , 容重相似比  $C_r$ , 应力相似比为  $C_\varepsilon$ , 泊松比相似比  $C_\nu$ , 摩擦角相似比  $C_\varphi$ 。将以上相似比代入公式(2)中,并在等式两边分别乘上  $C_x$  可得:

$$\begin{cases} \left\{ \frac{C_x C_l}{C_\sigma} \left[ \frac{\partial(\sigma_x)_p}{\partial x_p} + \frac{\partial(T_{xy})_p}{\partial y_p} \right] + X_p = 0 \right. \\ \left. \frac{C_x C_l}{C_\sigma} \left[ \frac{\partial(\sigma_y)_p}{\partial x_p} + \frac{\partial(T_{yx})_p}{\partial y_p} \right] + Y_p = 0 \right. \end{cases} \quad (3)$$

为了让模型的应力状态能反映出原型的应力状态,要求公式(3)与公式(1)必须一致,即  $\frac{C_\sigma}{C_l C_x} = 1$ , 将定义好的相似比带入相容方程、几何方程以及物理方程中,同理可得:  $\frac{C_\sigma}{C_E C_\varepsilon} = 1, C_\nu = C_\varphi = C_\varepsilon = 1$ 。

## 2 隧道围岩相似材料正交试验方案

根据地勘报告可知,目标岩体主要由微风化花岗岩构成,通过配比试验,确定围岩相似材料的物理力学参数并满足相似比要求。根据实际配比材料的密度,确定了密度相似常数  $C_\rho = 1$ , 几何相似常数  $C_l = 60$ , 由式  $C_E = C_l C_\rho$ , 取变形模量相似常数  $C_E = 60$ , 应力及强度相似常数  $C_\sigma = 60$ , 详见表 1。

表 1 原型和模型材料的主要力学参数  
Tab.1 Main mechanical parameters of the materials of the prototype and the model

微风化花岗岩	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	极限抗压 强度/MPa	弹模/ GPa	内摩擦 角/( $^\circ$ )	黏聚力/ MPa
原型	2.26	159.00	16.80	54.84	9.630
模型	2.26	2.65	0.28	54.84	0.161
相似比	1 : 1	60 : 1	60 : 1	60 : 1	1 : 1

配比试验的骨料选用重晶石粉、铁粉、石英砂,胶结剂选用石膏。根据后期隧道扩挖模型试验的具体情况,确定以极限抗压强度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角为主要考核指标,综合考虑每种材料的物理力学性能后,设置 A、B、C 3 个影响因素。其中 A 因素为骨胶比,即  $(m_{\text{铁粉}} + m_{\text{重晶石粉}} + m_{\text{石英砂}})/m_{\text{石膏}}$ ; B 因素为  $(m_{\text{铁粉}} + m_{\text{重晶石粉}})/(m_{\text{骨胶}})$ ; C 因素为  $m_{\text{铁粉}}/(m_{\text{铁粉}} + m_{\text{重晶石粉}})$ 。因素 A 设计 4 个

水平,分别为:7/1、8/1、9/1、10/1;因素  $B$  设置 4 个水平,分别为 20%、40%、60%、80%;因素  $C$  设置 4 个水平,分别为 20%、40%、60%、80%,详见表 2。

表 2 岩质相似材料正交设计水平

Tab.2 Orthogonal design level of similar materials

水平数	因素 $A$	因素 $B/\%$	因素 $C/\%$
1	7 : 1	20	20
2	8 : 1	40	40
3	9 : 1	60	60
4	10 : 1	80	80

选取正交设计方案  $L_{16}(4^3)$ ,该方案包括 3 个因素 4 个水平,总共 16 组配比,详见表 3。

表 3 基于正交设计的配比方案

Tab.3 Proportioning scheme based on orthogonal design

试验编号	$A$	$B/\%$	$C/\%$
试验 1	7 : 1	20	20
试验 2	7 : 1	40	40
试验 3	7 : 1	60	60
试验 4	7 : 1	80	80
试验 5	8 : 1	20	40
试验 6	8 : 1	40	20
试验 7	8 : 1	60	80
试验 8	8 : 1	80	60
试验 9	9 : 1	20	60
试验 10	9 : 1	40	80
试验 11	9 : 1	60	20
试验 12	9 : 1	80	40
试验 13	10 : 1	20	80
试验 14	10 : 1	40	60
试验 15	10 : 1	60	40
试验 16	10 : 1	80	20

3 围岩相似材料力学参数测定

试样制作过程如下:首先将铁粉、重晶石粉、石英砂、石膏粉按照表 3 的配比称量拌匀,再倒入材料总质量 10%纯净水继续拌匀,混合充分后倒入模具,并夯实。常温干燥 2~3 d 后分别将实验

组进行直剪试验和单轴压缩试验,并准确记录试验数值。

3.1 直接剪切试验

试样采用内径 6.18 cm,高 2.0 cm 的环刀进行制备。每组试验取 3 个试样,分别在垂直压力为 100、200、300、400 kPa 时,用 0.8 mm/min 的速率剪切试样,整个剪切破坏过程控制在 3~5 min 以内。将各级垂直荷载所对应的最大剪力记录下来,根据库仑定律用直线拟合便可得到目标试样的  $c$ 、 $\varphi$  值(见表 4),以第 1 组试样为例,其典型  $\sigma-\tau$  曲线如图 1 所示。

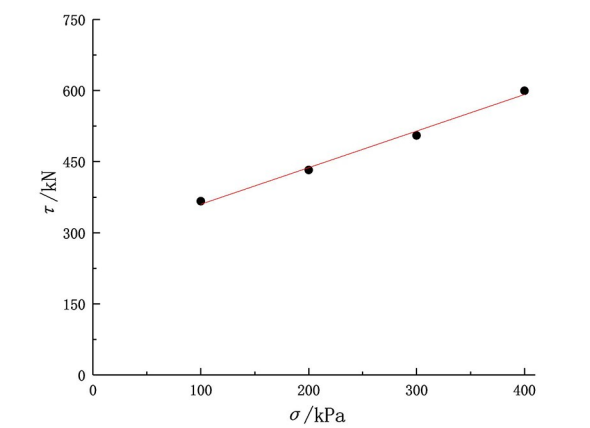


图 1 典型  $\sigma-\tau$  关系曲线

Fig.1 Typical  $\sigma-\tau$  relationship curve

3.2 单轴压缩试验

采用万能试验机,直径为 50 mm、高为 100 mm 的圆柱形模具,自动测量分级荷载作用下试样的轴向位移,并求出其弹性模量。

4 试验结果分析

经过对 16 组不同配比相似材料进行直接剪切实验以及单轴压缩试验,得到对应的抗压强度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角(详见表 5)。

试验结果表明,所调配的围岩相似材料密度分布在 16.88~21.13 g/cm<sup>3</sup>;极限抗压强度分布在 0.614~3.738 kN;弹性模量分布在 71~388 MPa;黏聚力分布在 197.40~430.05 kPa 之间;内摩擦角分布在 37.65°~58.15°之间。因试验所得物理力学参数数值范围较大,故此相似配比可适用于大多数围岩相似材料的模拟试验。根据目标隧道围岩的物理力学参数要求,第 4 试验组的配比可较好的模拟微风化花岗岩。其质量配比为  $m_{\text{铁粉}}$  :

$m_{\text{重晶石粉}} : m_{\text{石英砂}} : m_{\text{石膏}} = 32 : 128 : 15 : 25$ 。该配比的围岩相似材料的密度为  $22.20\text{ g/cm}^3$ , 极限

抗压强度为  $2.514\text{ kN}$ , 弹性模量为  $294\text{ MPa}$ , 黏聚力为  $198.74\text{ kPa}$ , 内摩擦角为  $56.29^\circ$ 。

表 4 围岩相似材料剪切实验数值结果

Tab.4 Numerical results of shear tests on similar materials in surrounding rocks

组数	最大剪力/kN				黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$
	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa		
1	366.61	432.43	505.25	599.52	283.05	37.65
2	420.65	535.81	679.15	909.45	233.82	58.15
3	486.43	600.25	723.87	773.13	397.48	44.67
4	352.56	502.43	636.85	806.05	198.74	56.29
5	345.45	512.34	587.51	723.82	239.70	50.43
6	394.84	547.55	679.15	742.64	297.20	49.60
7	533.45	759.05	883.62	965.85	430.05	54.87
8	474.71	576.24	693.25	742.62	391.11	42.66
9	340.73	434.75	527.96	620.45	247.90	42.97
10	446.52	643.90	730.85	888.33	324.33	54.69
11	346.14	493.56	641.55	789.85	197.40	55.95
12	453.55	580.45	639.20	743.28	372.08	42.87
13	305.53	399.57	481.75	592.21	209.15	42.30
14	432.46	568.73	692.37	817.84	307.85	51.98
15	401.89	465.34	522.02	580.45	344.27	30.64
16	385.44	493.52	660.35	754.35	254.97	51.86

表 5 基于正交试验的围岩相似材料结果

Tab.5 Results of similar materials for surrounding rocks based on orthogonal tests

试验编号	A	B/%	C/%	试块质量/g	密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	极限抗压强度/kN	弹性模量/MPa
试验 1	7 : 1	20	20	331.5	16.88	0.818	71
试验 2	7 : 1	40	40	351.1	17.88	1.444	255
试验 3	7 : 1	60	60	412.5	21.01	3.267	348
试验 4	7 : 1	80	80	437.0	22.20	2.514	294
试验 5	8 : 1	20	20	357.2	18.19	2.307	213
试验 6	8 : 1	40	40	432.8	22.04	3.738	388
试验 7	8 : 1	60	60	418.2	21.30	1.704	215
试验 8	8 : 1	80	80	367.1	18.70	2.283	238
试验 9	9 : 1	20	20	363.9	18.53	2.855	244
试验 10	9 : 1	40	40	414.8	21.13	3.422	223
试验 11	9 : 1	60	60	365.7	18.62	1.631	154
试验 12	9 : 1	80	80	358.6	18.26	1.160	95
试验 13	10 : 1	20	20	352.1	17.93	1.233	93
试验 14	10 : 1	40	40	378.5	19.28	1.759	147
试验 15	10 : 1	60	60	380.6	19.38	1.229	119
试验 16	10 : 1	80	80	353.2	17.99	0.614	126

4.1 极限抗压强度极差分析

极差是正交试验的数值结果中各因素水平平均值的最大值与最小值之差,反映出不同因素水平的变化对目标指标的影响。通过对 16 组相似材料所测得的极限抗压强度值进行统计分析,并计算出极差值,进而绘制出各个因素对极限抗压强度的影响直观分析图(见表 6、图 2)。

表 6 极限抗压强度极差均值表  
Tab.6 Range means of extreme compressive strengths

水平数	因素 A	因素 B	因素 C
水平 1	2.011	1.803	1.700
水平 2	2.508	2.591	1.535
水平 3	2.267	1.958	2.541
水平 4	1.209	1.643	2.218
极差	1.299	0.948	1.006

由表 6、图 2 可知,各因素对相似材料极限抗压强度值的敏感性由大到小依次为  $A > C > B$ 。总体上看,极限抗压强度随着重晶石粉含量的增加而减小,随着铁粉含量的增大而增大。

随着石膏含量的增加,材料的抗压强度明显增大,这与选择石膏作为胶结剂的力学参数规律是一致,因此在调配相似材料的过程中可以控制石膏的含量来调节相似材料的抗压强度。

4.2 弹性模量极差分析

根据弹性模量的极差分析表可知,各因素对弹性模量的敏感性影响的次序为  $A > B > C$ 。总体上弹性模量值随着石膏、重晶石粉质量的增大而增大。

由表 7、图 3 可知,石膏含量对于相似材料的弹性模量影响最大。随着重晶石粉含量的增加,材料的弹性模量也会相应提高,这是因为重晶石粉本身具有一定的黏结性。因此在试验过程中可通过控制石膏及重晶石粉的含量来调节相似材料的弹性模量。

表 7 弹性模量的极差分析  
Tab.7 Range analysis of the elastic modulus

水平数	因素 A	因素 B	因素 C
水平 1	242.000	155.250	184.750
水平 2	263.500	253.250	170.500
水平 3	179.000	209.000	244.250
水平 4	121.250	188.250	206.250
极差	142.250	98.000	73.750

4.3 黏聚力极差分析

根据黏聚力的极差均值分析表可知,各因素对黏聚力敏感性影响的次序为  $C > A > B$ 。总体上黏聚力随着石英砂含量的降低而增大,随着铁粉、石膏含量的增加而增大。

综合分析表 8 及图 4 可知,相似材料的黏聚力随胶结剂含量的增加而增长,当铁粉的含量占铁粉与重晶石质量之和的 60%、铁粉与重晶石质量和占骨胶质量之和的 80%时,相似材料的黏聚力达到最大。

表 8 黏聚力极差均值表  
Tab.8 Cohesion range means

水平数	因素 A	因素 B	因素 C
水平 1	278.273	239.493	218.908
水平 2	323.795	280.538	249.025
水平 3	256.442	270.330	336.085
水平 4	236.075	304.225	290.567
极差	87.720	64.732	117.177

4.4 内摩擦角极差分析

根据内摩擦角的极差均值分析表可知,各因素对内摩擦角敏感性影响次序为  $B > C > A$ 。总体上,内摩擦角的值与铁粉、重晶石粉的含量呈正相关性,随着石膏含量的减小而增大。

综合表 9、图 5 可得,相似材料中铁粉与重晶石粉的含量对于内摩擦角的影响最大,但当铁粉与重晶石粉的质量和超过 60%时,内摩擦角的值却减小。原因是石英砂也是影响内摩擦角的关键因素,当石英砂含量降低到一定程度时,相似材料的级配不良,导致内摩擦角降低。

表 9 内摩擦角极差均值表  
Tab.9 Range means of internal friction angles

水平数	因素 A	因素 B	因素 C
水平 1	49.190	43.588	51.705
水平 2	50.947	54.925	53.610
水平 3	50.740	55.978	45.570
水平 4	52.032	48.420	52.025
极差	2.842	12.390	8.040



4.5 方差分析

在置信水平  $\alpha = 0.1$  条件下,查表可知临界值  $F$  为 2.81, 进而由方差分析可知,各因素对极限抗压强度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角的影响均不显著且各因素的影响大小的次序与极差分析的结果是一致的,如表 10。

表 10 极限抗压强度的方差分析			
Tab.10 Analysis of variance of ultimate compressive strength			
因素	方差	自由度	单因素显著性
$A$	$S_{A^2} : 3.822$	$f_A : 3$	$F_A : 1.353$ 不显著
$B$	$S_{B^2} : 3.822$	$f_B : 3$	$F_B : 0.732$ 不显著
$C$	$S_{C^2} : 2.586$	$f_C : 3$	$F_C : 0.915$ 不显著

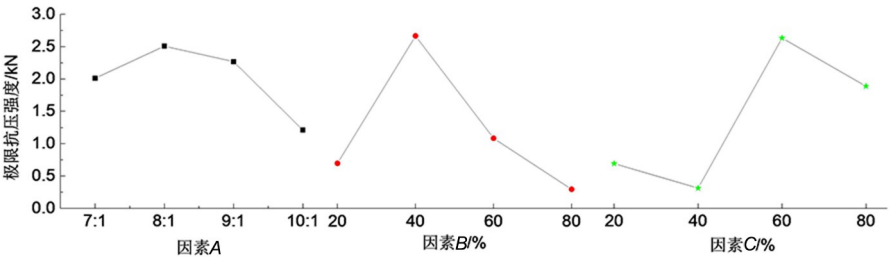


图 2 各因素影响极限抗压强度直观分析图

Fig.2 Visual analysis of various factors affecting ultimate compressive strength

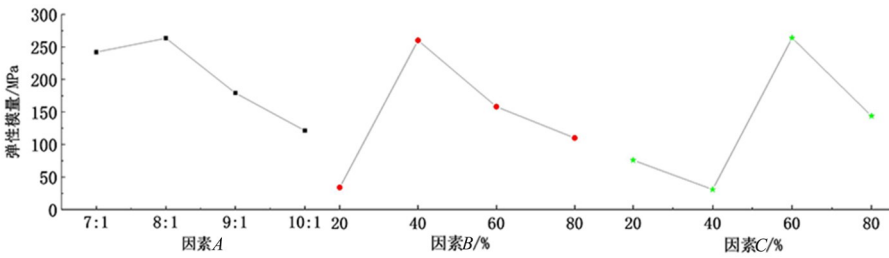


图 3 各因素对弹性模量的影响直观分析图

Fig.3 Visual analysis of the influence of various factors on the elastic modulus

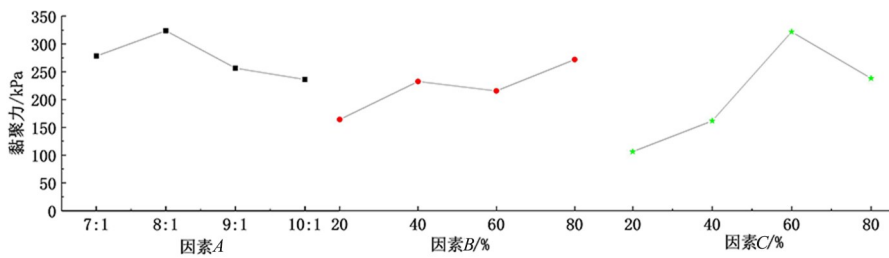


图 4 各因素对黏聚力的影响直观分析图

Fig.4 Visual analysis of the influence of various factors on cohesion

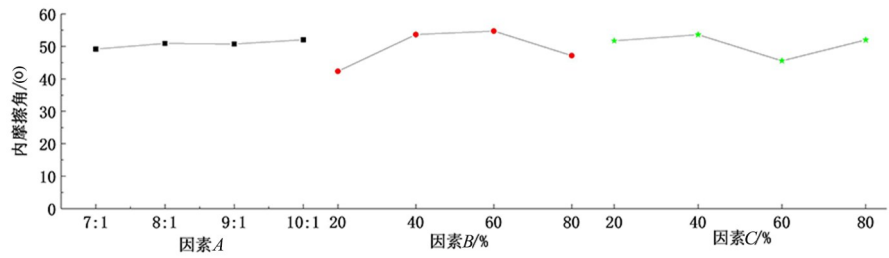


图 5 各因素对内摩擦角的影响直观分析图

Fig.5 Visual analysis of the influence of various factors on the internal friction angle

## 5 结论

采用以铁粉、重晶石粉、石英砂为骨料,石膏为胶结剂配制隧道围岩相似材料,并基于正交设计的方法,通过直接剪切试验和单轴压缩试验,第 4 组配比能较好的模拟某隧道围岩,并对影响岩性围岩相似岩质材料的物理力学参数的各个因素进行极差方差等敏感性分析,主要结论如下:

1) 不同配比的围岩相似材料物理力学参数取值范围较广,密度分布在  $16.88 \sim 21.13 \text{ kg/m}^3$ ; 极限抗压强度分布在  $0.614 \sim 3.738 \text{ kN}$ ; 弹性模量分布在  $71 \sim 388 \text{ MPa}$ ; 黏聚力分布在  $197.40 \sim 430.05 \text{ kPa}$  之间; 内摩擦角分布在  $37.65^\circ \sim 58.15^\circ$  之间。

2) 相似材料的极限抗压强度值受因素 A 的影响最大,受因素 B 的影响最小,随重晶石粉含量

的增加而减小,随铁粉含量的增大而增大; 弹性模量值受因素 A 的影响最大,受因素 C 的影响最小,随石膏、重晶石粉质量的增大而增大,石膏含量对于相似材料的弹性模量影响最大; 黏聚力的值受因素 C 的影响最大,受因素 B 的影响最小,黏聚力随石英砂含量的降低而增大,随铁粉、石膏含量的增加而增大; 内摩擦角的值受因素 B 的影响最大,受因素 A 的影响最小,内摩擦角与石膏的含量呈负相关,随着重晶石粉、铁粉含量的增加而增大,其中铁粉与重晶石粉的含量对于内摩擦角的影响最大,当  $m_{\text{铁粉}} + m_{\text{重晶石粉}} > 0.6m_{\text{骨料}}$  时,内摩擦角的值会减少。

3) 因素 A、B、C 对极限抗压强度、弹性模量、黏聚力、内摩擦角的影响均不显著,各因素影响次序与极差分析的结果一致。

## 参考文献:

- [1] 宁奕冰,唐辉明,张勃成,等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J/OL]. 岩土力学, 2020(6): 1-11[2020-05-14]. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2019.1552>.
- [2] 陈政律,吴洁,张俊儒. 地下工程模型试验中围岩相似材料的配制研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 102-107.
- [3] 杨洪增,赵章,李玉宝. 高强度相似材料配比试验研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(9): 59-62, 67.
- [4] 姚国强,言志信. 岩体相似材料正交设计试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(4): 902-910.
- [5] 詹艳云. 基于正交设计的 IV、V 级隧道围岩相似材料试验研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- [6] 陈志敏,冯亚松,刘德学. 软岩隧道 IV~VI 级围岩相似材料正交试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2015, 34(1): 12-16.
- [7] 李童悦,赵佳美,周洪正. 基于正交设计的岩石相似材料配比试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 143-147.
- [8] 杨军平,周立新,赵卫洁. 基于正交设计的 IV 级弱膨胀性围岩相似材料试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(35): 294-298, 309.
- [9] 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.
- [10] 蔡正,潘文. 基于正交设计模型相似材料配比试验研究[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(11): 1-4.
- [11] 肖杰. 相似材料模型试验原料选择及配比试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [12] GLUSHIKHIN F P, KUTSNETSOV G N, SHKLYARSKY M F, et al. Modeling in geomechanics[M]. Moscow: A A Balkema Publishers, 1993: 1-50.
- [13] 韩伯鲤,陈霞龄,宋一乐,等. 岩体相似材料的研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2): 6-9.
- [14] 马芳平,李仲奎,罗光福. NIOS 模型材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J]. 水力发电学报, 2004, 23(1): 48-51.
- [15] 邹成路,申玉生,靳宗振. 基于正交设计的隧道 V 级围岩相似材料配比试验研究[J]. 路基工程, 2013(3): 6-9.
- [16] 关振长,龚振峰,陈仁春,等. 基于正交设计的岩质相似材料配比试验研究[J]. 公路交通科技, 2016, 33(9): 92-98, 111.
- [17] 罗定伦. 隧道抗减震模型试验围岩相似材料研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [18] 董金玉,杨继红,杨国香,等. 基于正交设计的模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 44-49.