

潮兜1号隧道Ⅳ级围岩相似材料配比试验

臧万军^{1,2}, 夏欢^{1,2}, 梁亚茹^{1,2}

(1. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118;

2. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 为配制可模拟目标围岩的相似材料, 在铁晶砂材料的基础上, 采用石膏和水泥两种胶结材料, 设置骨胶比、 $(m_{\text{铁粉}} + m_{\text{重晶石粉}})/m_{\text{骨料}}$ 、 $m_{\text{铁粉}}/(m_{\text{铁粉}} + m_{\text{重晶石粉}})$ 及 $m_{\text{石膏}}/m_{\text{水泥}}$ 4 个因素, 一个因素设 5 个水平, 共 25 组配比的正交试验方案。通过敏感性和线性回归分析, 研究力学参数对影响因素的显著性及力学参数与各因素之间的定量关系。结果表明: 相似材料力学参数可满足大部分类型岩体模型试验对材料力学参数的要求; 对各因素及重晶石粉在骨料中占比与力学参数之间进行敏感性分析, 其影响效果规律性强, 可确定围岩相似材料配比; 线性回归方程可量化参数与影响因素之间的关系, 通过对比试验结果和回归分析结果, 二者吻合性较强。

关键词: 围岩; 相似材料; 正交设计; 敏感性分析; 线性回归分析; 模型试验

中图分类号: U231.4

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2023)01-0035-09

Proportioning test of similar materials for Grade IV surrounding rock in Chaodou Tunnel No.1

ZANG Wanjun^{1,2}, XIA Huan^{1,2}, LIANG Yaru^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In order to prepare similar materials that can simulate the target surrounding rock, gypsum and cemented materials were used on the basis of iron crystal sand materials. Four factors including bone cement ratio, $(\text{iron powder} + \text{barite powder})/\text{aggregate}$, $\text{iron powder}/(\text{iron powder} + \text{barite powder})$ and gypsum/cement were set. Five levels are set for each factor, and a total of 25 groups of orthogonal test schemes were set. Through sensitivity analysis and linear regression analysis, the significance of mechanical parameters on influencing factors and the quantitative relationship between mechanical parameters and various factors were studied. Results show that the mechanical parameters of similar materials can meet the requirements of most rock mass model tests; the sensitivity analysis between various factors and the proportion of barite powder in aggregate and mechanical parameters shows that the regularity of its effect is strong, and the proportion of similar materials in surrounding rock can be determined; the linear regression equation can quantify the relationship between the parameters and the influencing factors. Comparison of the test results and the regression analysis results show that the two are in good agreement.

Keywords: surrounding rock; similar materials; orthogonal design; sensitivity analysis; linear regression analysis; model test

隧道与地下工程中高陡边坡、采矿工程、隧道抗减震技术, 常采用相似模型实验和数值分析作

为研究手段。但数值分析未能全面考虑现场复杂情况, 常抽象为理想状态, 导致计算结果与现场实

际偏差较大。基于相似原理和量纲分析模型试验,可直接观察结构变形和整个破坏过程,相较于数值分析,模型试验有较强直观性且更具说服力。相似材料配合比对其物理力学性质影响很大,因此,合理确定岩体相似材料的配合比,使其满足力学参数相似比具有重要意义^[1]。

国内外学者对围岩相似材料做了大量研究^[2-6]。张强勇等^[7]在铁晶砂材料的基础上,采用松香与酒精为胶结剂,研制出一种可模拟盐岩、泥岩和岩盐夹层的相似材料。林贤文等^[8]选用性质稳定且无毒的铁粉、重晶石粉、石英砂、石膏,模拟硬质围岩。武伯弢等^[9]选用重晶石粉、石膏、细沙、洗衣液和水模拟软弱围岩,通过试验选出最符合软弱围岩的原材料配比。储昭飞等^[10]采用铁晶砂材料及酒精松香溶液、液压油,试验出一种新型软岩流变相似材料(IBSRO),可模拟软岩的瞬时力学特性与流变力学特征。LI S C 等^[11]以铁粉、砂为材料,开展相似材料的物理力学研究,模拟高容重材料。目前进行的正交试验多是研究单一胶结材料,而对多种胶结材料结合的隧道围岩相似材料的研究较少,在研究骨胶比对相似材料强度变化的影响时,只含一种胶结材料的相似材料不能较为准确得出其规律。基于此,开展多胶结材料的围岩相似材料研究工作显得尤为重要,本研究在传统铁晶砂材料的基础上,采用石膏和水泥两种胶结材料,对相似材料各因素进行敏感性分析。

1 工程原型与相似试验

1.1 工程原型

漳泉肖铁路潮兜 1 号隧道位于福建省泉州市安溪县城境内,属剥蚀丘陵区,出口处为河流上方山坡,全长 258 m,其中Ⅳ级围岩长度 80 m,占比 31.01%。Ⅴ级围岩长度 173 m,占比 67.05%。明洞 5 m,占比 1.94%。潮兜 1 号隧道洞口段为Ⅳ级围岩,属于稍弱围岩。

1.2 相似原理与参数选取

模型上重现的物理现象与原型物理现象相似称之为相似原理,是相似模拟试验的理论基础和模型制作的论据^[12]。 C 为相似比,表示原型(P)与模型(M)中相同的物理量之比。通过相似理论及量纲分析并结合弹塑性理论中的平衡微分方程、物理方程及应力和位移边界条件,推导出应力

相似比、几何相似比和容重相似比之间关系为:
$$C_{\sigma}=C_L C_{\gamma} \tag{1}$$
应力相似比、弹性模量相似比和应变相似比之间关系为:

$$C_{\sigma}=C_E C_{\varepsilon} \tag{2}$$

地质力学模型试验中,要求相同量纲物理量的相似比相等,且无量纲物理量的相似比为 1,因此应变、内摩擦角、泊松比三者相似比关系为:

$$C_{\varepsilon}=C_{\varphi}=C_{\mu}=1 \tag{3}$$

$$C_{\sigma}=C_c \tag{4}$$

根据模型试验所用设备,并能够真实反应工程实际情况,确定几何相似比 $C_L=30$,容重相似比 $C_{\gamma}=1.2$,密度相似比 $C_{\rho}=1.2$,由式(1)~(4)计算得:弹性模量相似比 $C_E=36$,应力相似比 $C_{\sigma}=36$,内摩擦角相似比 $C_{\varphi}=1$,黏聚力相似比 $C_c=36$ 。该工程地勘围岩原型与模型力学参数如表 1。

表 1 围岩原型与模型的力学参数
Tab.1 Mechanical parameters of surrounding rock prototype and model

类型	弹性模量/抗压强度/ MPa	密度/ MPa	内摩擦角/ (kg · m ⁻³)	黏聚力/ (°)	kPa
原型	6 480	72	2 850	38.62	1 674.0
模型	180	2	2 375	38.62	46.5

1.3 材料选择

以重晶石粉、铁粉和石英砂为骨料,石膏和水泥为胶结材料,进行相似材料配比研究。选用高强石膏粉, C42.5 的硅酸盐水泥,重晶石粉规格为 325 目,铁精粉规格为 100 目, $\omega_{\text{铁}} \geq 95\%$,石英砂规格为 40 目。为优化级配和调节相似材料的力学参数,在材料中加入较粗的石英砂。

2 试验过程

2.1 正交设计方案

设置 4 个因素,每个因素有 5 个水平,共 25 组试验, L 代表正交表, n 为试验次数, k 为因素数, t 为水平数。采用正交表,使正交试验的试验点分布均匀,并减少试验次数^[13-15]。

以表 1 中相似关系为依据,配制Ⅳ级围岩相似材料,如表 2 所示,设置 A、B、C、D 4 个影响因素, A 因素为骨胶比,即($m_{\text{铁粉}}+m_{\text{重晶石粉}}+m_{\text{石英砂}}$)/

($m_{\text{石膏}}+m_{\text{水泥}}$),B 因素为 ($m_{\text{铁粉}}+m_{\text{重晶石粉}}$)/ $m_{\text{骨料}}$,
C 因素为 $m_{\text{铁粉}}/(m_{\text{铁粉}}+m_{\text{重晶石粉}})$,D 因素为 $m_{\text{石膏}}/$
 $m_{\text{水泥}}$,一个因素设 5 个水平。为 $L_{25}(5^4)$ 的正交
表,配比方案如表 3。

表 2 相似材料正交设计水平

Tab.2 Orthogonal design level of similar materials

水平组数	因素			
	A	B/%	C/%	D
1	7:1	60	0	0.0:1
2	8:1	70	10	1.5:1
3	9:1	80	20	2.5:1
4	10:1	90	30	3.5:1
5	11:1	100	40	1.0:0

注:用水量为每组试样质量的 16%。

2.2 试样制作

以表 3 中的 25 组配比,每组配比分别制备单
轴压缩试样和直剪试样,其中单轴压缩试样采用
直径 50 mm、高 100 mm 的圆形双开钢模制作,直
剪试样采用直径 61.8 mm、高 20 mm 的薄圆柱状
试件制作。单轴压缩试样每组配比制作 3 个,直
剪试样每组配比制作 4 个,共 175 个。

表 3 相似正交试验配比方案

Tab.3 Proportioning scheme of similar orthogonal test

试验	因素			
	A	B/%	C/%	D
1	7:1	60	0	0:1
2	7:1	70	10	1.5:1
3	7:1	80	20	2.5:1
4	7:1	90	30	3.5:1
5	7:1	100	40	1.0:0
6	8:1	60	10	2.5:1
7	8:1	70	20	3.5:1
8	8:1	80	30	1.0:0
9	8:1	90	40	0.0:1
10	8:1	100	0	1.5:1
11	9:1	60	20	1.0:0

续表

试验	因素			
	A	B/%	C/%	D
12	9:1	70	30	0.0:1
13	9:1	80	40	1.5:1
14	9:1	90	0	2.5:1
15	9:1	100	10	3.5:1
16	10:1	60	30	1.5:1
17	10:1	70	40	2.5:1
18	10:1	80	0	3.5:1
19	10:1	90	10	1.0:0
20	10:1	100	20	0.0:1
21	11:1	60	40	3.5:1
22	11:1	70	0	1.0:0
23	11:1	80	10	0.0:1
24	11:1	90	20	1.5:1
25	11:1	100	30	2.5:1

将所有材料按方案配比量取后倒入搅拌机搅
拌,加 $\omega_{\text{水}}=16\%$,并在每份搅拌的材料中加入 2.5
g 减水剂,增强拌和料的流动性,便于模型浇筑。
试样浇筑、振捣并加压完成,常温下放置 30 min
后即可拆模。试件表面贴上标签,装样前在模具
内表面涂一层凡士林方便脱模。

2.3 参数测试

测试试样的弹性模量、单轴抗压强度、密度、
内摩擦角和黏聚力,根据相关规程^[16] 分别对试样
进行称量、单轴压缩和直接剪切试验。

单轴压缩试验采用万能试验机,自动测量分
级荷载作用下试样的极限抗压强度,得到其应力-
应变曲线,求出弹性模量。

直剪试验采用自动直剪仪,每组取 4 个试样,
分别在垂直压力 100、200、300 和 400 kPa 下剪切
试样。记录各垂直压力剪坏时的剪力,通过直线
拟合绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线,即可求
得目标试样的 c 、 φ 值。

3 试验结果与分析

3.1 试验结果

由表 4 结果可知,所配制模型材料的弹性模量

分布在 145.1~295.5 MPa,单轴抗压强度分布在 0.35~16.79 MPa,密度分布在 2 244~2 641 kg/m³,内摩擦角分布在 4.04°~46.71°,黏聚力分布在 24.09~942.59 kPa。该试验方案得出的模型材料力学参数可满足大部分类型岩体模型试验对材料物理力学参数的要求。根据目标围岩与相似材料之间力学参数要求,第 3 组试验的材料配比可较好模拟目标围岩,其材料配比为 $m_{\text{铁粉}}:m_{\text{重晶石粉}}:m_{\text{石英砂}}:m_{\text{石膏}}:m_{\text{水泥}}=14:58:18:7:3$,对应的弹性模量为 183.4 MPa,单轴抗压强度为 3.06 MPa,密度为 2 372 kg/m³,内摩擦角为 38.37°,黏聚力为 46.89 kPa。

3.2 极差分析

在岩体相似材料正交配比试验中,常采用极差分析法进行各因素对目标力学参数的敏感性分析。极差分析法是通过计算因素 A、B、C、D 各水平平均值,影响因素不同水平平均值最大值与最小值之差,即为该因素极差,比较极差大小,即可得到影响该物理参数最敏感因素。

表 4 岩体相似材料的正交试验结果

Tab.4 Orthogonal test results of similar rock mass materials

试验	弹性模量/ MPa	单轴抗压 强度/MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
1	290.4	16.79	2 419	37.89	695.61
2	173.2	2.87	2 397	24.89	247.19
3	183.4	3.06	2 372	38.37	46.89
4	167.6	5.08	2 540	33.88	447.33
5	245.4	12.58	2 491	38.40	709.75
6	202.1	4.92	2 433	46.24	245.94
7	174.2	5.02	2 438	33.16	368.80
8	205.3	8.23	2 454	27.79	593.03
9	253.4	13.85	2 608	7.78	841.31
10	162.1	1.88	2 321	22.23	396.04
11	218.3	5.83	2 465	37.19	942.59
12	295.5	15.87	2 641	43.71	604.27
13	188.8	6.70	2 533	23.81	400.34
14	155.7	0.35	2 271	21.25	24.09
15	147.1	0.44	2 364	13.84	195.96
16	204.4	4.82	2 580	25.77	583.63

续表

试验	弹性模量/ MPa	单轴抗压 强度/MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa
17	226.8	8.94	2 589	35.08	361.77
18	164.6	1.42	2 250	33.57	64.33
19	175.3	4.55	2 294	22.87	369.53
20	178.8	7.64	2 557	4.04	378.53
21	199.1	4.10	2 490	23.89	340.31
22	169.6	5.13	2 244	46.71	409.01
23	205.4	7.63	2 607	9.63	413.28
24	145.1	3.64	2 477	15.03	137.27
25	172.2	3.78	2 482	17.11	328.85

因重晶石粉在骨料中占比较大且单独分析重晶石粉对参数影响规律较困难,现对重晶石粉在骨料中占比与材料力学参数进行极差计算,并与影响模型材料力学参数 4 个因素一起进行敏感性分析。重晶石粉在骨料中占比与模型材料力学参数关系如表 5 所示。

表 5 重晶石粉在骨料中占比与材料力学参数关系

Tab.5 Relationship between the proportion of barite powder in aggregate and material mechanical parameters

重晶石 粉:骨 料/%	弹性模 量/MPa	单轴抗 压强度/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	内摩擦 角/(°)	黏聚 力/ kPa
40	210.10	5.95	2 553.00	28.25	428.57
50	231.62	9.43	2 536.00	31.75	606.89
60	205.64	7.66	2 444.43	33.48	444.09
70	173.08	5.05	2 452.50	22.12	322.10
80	172.90	4.54	2 367.00	20.16	270.80
90	151.40	0.40	2 317.50	17.55	110.03
100	162.10	1.88	2 321.00	22.23	396.04
极差	80.22	9.04	235.50	15.94	496.87

3.2.1 弹性模量极差分析

以弹性模量为研究对象,分析表 6 和图 1,并对比表 5,重晶石粉在骨料中占比极差最大,即弹性模量主要由重晶石粉在骨料中占比控制,各因素对弹性模量的敏感性由大到小依次为重晶石粉/骨料>因素 D>因素 B>因素 C>因素

A。由图 1 可知,随着重晶石粉在骨料中占比的增大,模型材料的弹性模量先增大后急剧减小,弹性模量在重晶石粉/骨料为 90% 时最低,为 151.4 MPa。因为重晶石粉含量较高时,其余骨料含量较低,骨料间分子的胶结能力变弱,从而导致模型材料的弹性模量较低,而当重晶石粉在骨料中占比为 50% 时,重晶石粉含量适中,弹性模量较高。

表 6 弹性模量极差分析

Tab.6 Range analysis of elastic modulus

	MPa			
水平数	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
水平 1	212.00	222.86	188.48	244.70
水平 2	199.42	207.86	180.62	174.72
水平 3	201.08	189.50	179.96	188.04
水平 4	189.98	179.42	209.00	170.52
水平 5	178.28	181.12	222.70	202.78
极差	33.72	43.44	42.74	74.18

大体上看,弹性模量与胶结材料在混合料中的占比近似呈正相关,且胶结材料石膏与水泥比为 0:1 时,弹性模量最大。与铁粉及重晶石粉在骨料中占比呈负相关,与石英砂在骨料中占比呈正相关,与重晶石粉在骨料中占比近似呈负相关。

3.2.2 单轴抗压强度极差分析

以单轴抗压强度为研究对象,分析见表 7 和图 2,并对比表 5,因素 D 的极差最大,则模型材料单轴抗压强度由石膏水泥比起主要控制作用,各因素对单轴抗压强度的敏感性由大到小依次为因素 D>重晶石粉/骨料>因素 C>因素 A>因素 B。由图 2 可知,随着骨料增加,单轴抗压强度逐渐减小,这是因为当胶结材料占比增多时,材料分子间胶结力增强,致使单轴抗压强度呈上升趋势,且在图 2 中可以看出,当胶结材料全为石膏时,模型材料的单轴抗压强度较大,而当胶结材料全为水泥时,单轴抗压强度最大。

大体上看,模型材料的单轴抗压强度与骨料在混合料中的占比呈负相关,与铁粉及重晶石粉在骨料中占比近似呈负相关,单轴抗压强度随铁粉在铁粉与重晶石粉中含量占比的增大先减小后增大,与重晶石粉在骨料中占比关系

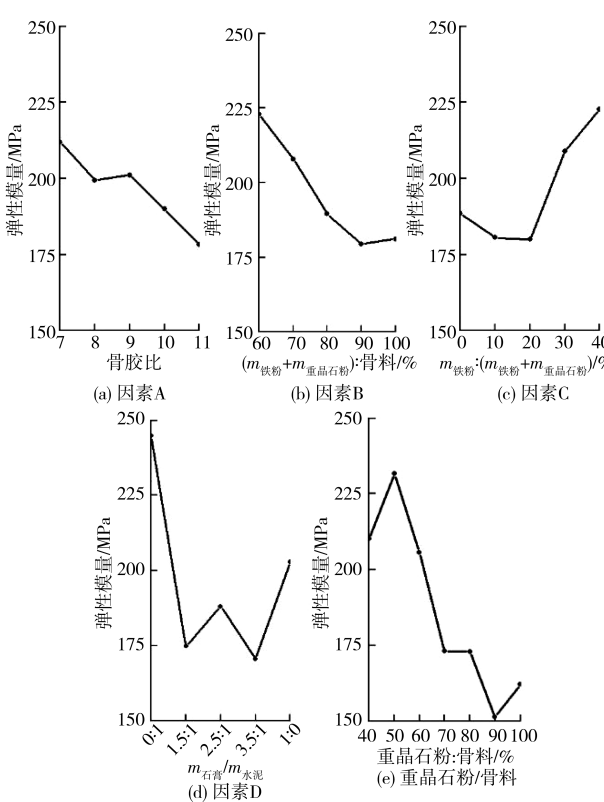


图 1 弹性模量敏感性因素分析

Fig.1 Analysis of sensitivity factors of elastic modulus

不明显。

表 7 单轴抗压强度极差分析

Tab.7 Range analysis of uniaxial compressive strength

	MPa			
水平数	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
水平 1	8.08	7.29	5.11	12.36
水平 2	6.78	7.57	4.08	3.98
水平 3	5.84	5.41	5.04	4.21
水平 4	5.47	5.49	7.56	3.21
水平 5	4.86	5.26	9.23	7.26
极差	3.22	2.30	5.15	9.14

3.2.3 密度极差分析

以密度为研究对象,分析表 8 和图 3,并对比表 5,因素 C 的极差最大,模型材料密度由铁粉在铁晶材料中占比起主要控制作用,各因素对密度的敏感性由大到小依次为因素 C>重晶石粉/骨料>因素 D>因素 B>因素 A。由图 4 可知,胶结材料中随着水泥比例减少,模型材料的密

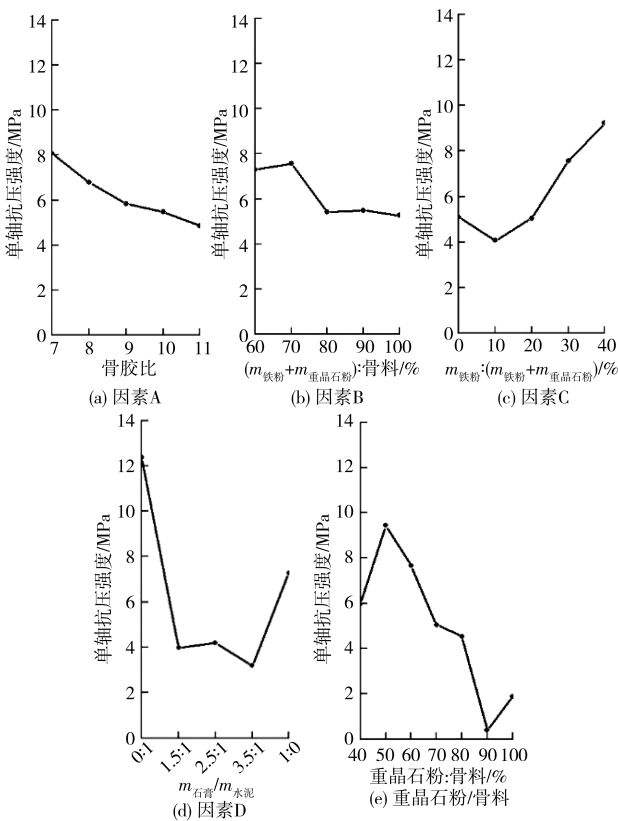


图 2 单轴抗压强度敏感性因素分析

Fig.2 Analysis of sensitivity factors of uniaxial compressive strength

度也相应减小,这与水泥和石膏的密度特性规律一致。

大体上看,模型材料的密度与骨料在混合料中的占比近似呈正相关,与铁粉及重晶石粉在骨料中占比近似呈负相关,与铁粉在铁晶材料中占比及水泥在胶结材料中占比呈正相关,与重晶石粉在骨料中占比近似呈负相关。

表 8 密度极差分析

Tab.8 Range analysis of density

	kg/m ³			
水平数	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
水平 1	2 443.80	2 477.40	2 301.00	2 566.40
水平 2	2 450.80	2 461.80	2 419.00	2 461.60
水平 3	2 454.80	2 443.20	2 461.80	2 429.40
水平 4	2 454.00	2 438.00	2 539.40	2 416.40
水平 5	2 460.00	2 443.00	2 542.20	2 389.60
极差	16.20	39.40	241.20	176.80

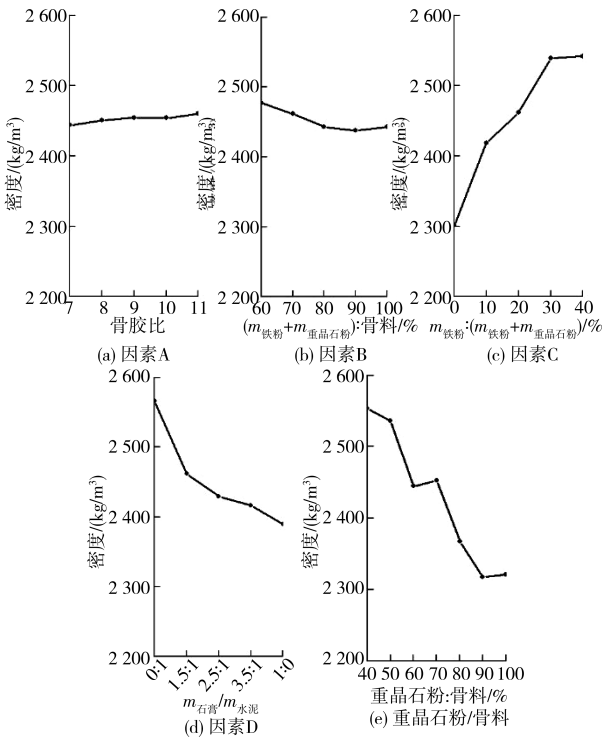


图 3 密度敏感性因素分析

Fig.3 Sensitivity factor analysis of density

3.2.4 内摩擦角极差分析

以内摩擦角为研究对象,分析表 9 和图 4,并对比表 5,因素 B 的极差最大,内摩擦角由铁晶材料在骨料中占比起主要控制作用,各因素对黏聚力的敏感性由大到小依次为因素 B>重晶石粉/骨料>因素 D>因素 A>因素 C。由图 4 可知,当铁粉和重晶石粉在骨料中为 70%时,内摩擦角最大,而当铁粉和重晶石粉在骨料中占比超过 70%时,内摩擦角呈下降趋势,因为当铁粉与重晶石粉增多时,石英砂含量便会降低,而石英砂是影响内摩擦角的关键因素,材料配比不均匀,内摩擦角值降低。

表 9 内摩擦角极差分析

Tab.9 Range analysis of internal friction angle

	(°)			
水平数	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
水平 1	34.69	34.20	32.33	20.61
水平 2	27.44	36.71	23.49	22.35
水平 3	27.96	26.63	25.56	31.61
水平 4	24.27	20.16	29.65	27.67
水平 5	22.47	19.12	25.79	34.59
极差	12.21	17.59	8.84	13.98

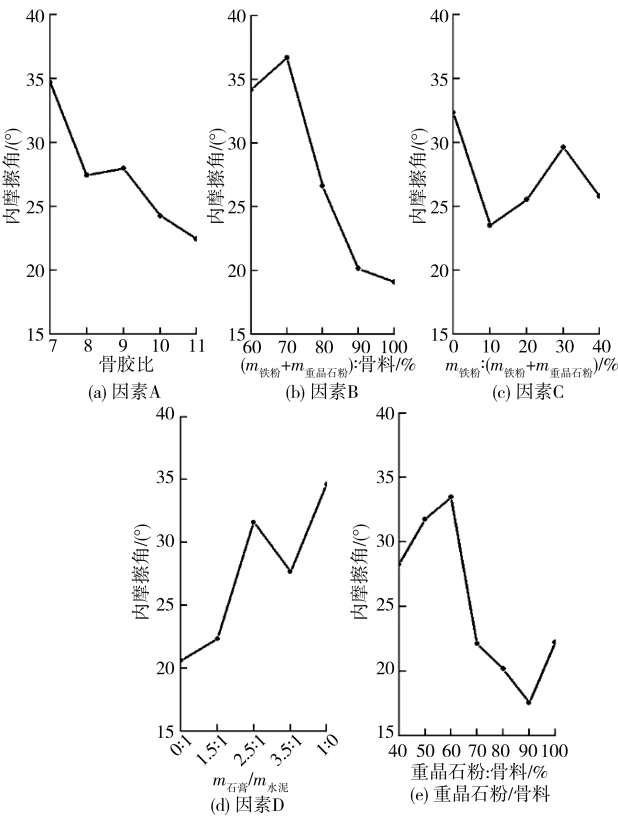


图 4 内摩擦角敏感性因素分析

Fig.4 Analysis of sensitive factors of internal friction angle

大体上看,内摩擦角与骨料在混合料中的占比呈负相关,随铁粉和重晶石粉在骨料中占比的增大先增大后减小,与石膏在胶结材料中的占比近似呈正相关。

3.2.5 黏聚力极差分析

以黏聚力为研究对象,分析表 10 和图 5,并对比表 5,重晶石粉在骨料中占比极差最大,即黏聚力主要由重晶石粉在骨料所占比例控制,各因素对黏聚力敏感性影响由大到小依次为重晶石粉/骨料>因素 D>因素 B>因素 C>因素 A。由图 5 可知,重晶石粉在骨料中占比 90% 时,黏聚力最小;胶结材料全为石膏或水泥时,黏聚力较大,而当两种胶结材料混合时,黏聚力变低。因此在试验过程中,黏聚力可通过控制重晶石粉在骨料中的含量及胶结材料中石膏与水泥比来调节。

从大体上看,黏聚力与骨料在混合料中的占比及重晶石粉在骨料中占比近似呈负相关,与铁粉在铁晶材料中占比近似呈正相关,与铁粉和重晶石粉在骨料中占比关系不明显。

表 10 黏聚力极差分析

Tab.10 Range analysis of cohesion

	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D
水平 1	429.35	561.62	317.82	586.60
水平 2	489.02	398.21	294.38	352.89
水平 3	433.45	303.57	374.82	201.51
水平 4	351.56	363.91	511.42	283.35
水平 5	325.74	401.83	530.70	604.78
极差	163.28	258.04	236.32	403.27

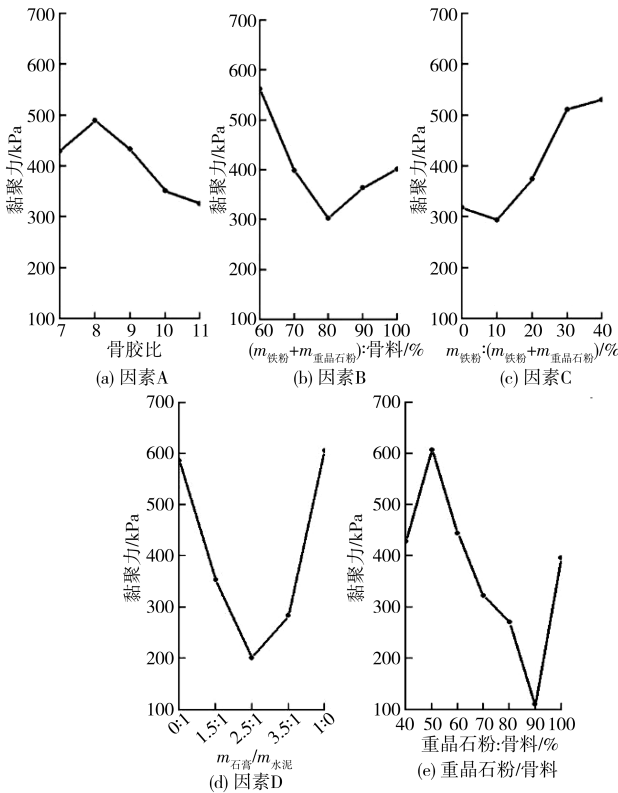


图 5 黏聚力敏感性因素分析

Fig.5 Analysis of sensitive factors of cohesion

3.3 方差分析

通过方差分析可判断出对参数有显著影响的因素,并得到显著影响因素的最佳水平^[17]。在置信水平 $\alpha = 0.1$ 条件下,查得因素显著性临界值 $F(4,20) = 2.25$,计算各因素统计量,如表 11 所示。

由表 11 可看出,因素 D 和重晶石粉在骨料中含量对弹性模量影响显著,其他因素对弹性模量影响均不显著。因素 D 对单轴抗压强度影响显著,其他因素对单轴抗压强度影响均不显著。因素 C 和重晶石粉在骨料中含量对密度影响显著,其他因素对密度影响均不显著。因素 B 对内

摩擦角影响显著,其他因素对内摩擦角影响均不显著。因素 D 和重晶石粉在骨料中含量对黏聚力影响显著,其他因素对黏聚力影响均不显著。对表 11 中各参数统计量排序,各因素对力学参数的影响次序与极差分析结果一致。

表 11 各力学参数方差分析

Tab.11 Variance analysis of mechanical parameters

影响因素	弹性模量/MPa	单轴抗压强度/MPa	密度/(kg·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa
A	0.449	0.354	0.509	0.733	0.353
B	1.292	0.280	0.491	2.957	1.232
C	1.124	1.165	7.754	0.399	1.092
D	4.243	7.340	2.025	1.299	4.870
$m_{\text{重晶石粉}}$	4.378	1.614	2.283	1.486	4.928
$m_{\text{骨料}}$					

3.4 因素与参数间定量关系

运用 SPSS 软件建立多元线性回归模型,分析影响因素与参数之间的定量关系。多元线性回归模型为:

$$y=\alpha+\beta_1x_1+\beta_2x_2+\beta_3x_3+\cdots+\beta_mx_m \tag{5}$$

式中: y 为需要回归分析的力学参数; α 为常数项; $\beta_1,\beta_2,\beta_3,\cdots,\beta_m$ 为回归系数。

定义本实验自变量:骨胶比为 x_1 , $(m_{\text{铁粉}}+m_{\text{重晶石粉}})/m_{\text{骨料}}$ 为 x_2 , $m_{\text{铁粉}}/(m_{\text{铁粉}}+m_{\text{石英砂}})$ 为 x_3 , $m_{\text{石膏}}/m_{\text{水泥}}$ 为 x_4 。

将表 4 中正交试验结果的弹性模量值运用式 (5),得到弹性模量与各因素之间的线性回归方程:

$$y=370.63-7.69x_1-111.92x_2+96.82x_3-56.77x_4$$

单轴抗压强度与各因素之间的线性回归方程:

$$y=20.159-0.775x_1-6.128x_2+11.714x_3-7.153x_4$$

密度与各因素之间的线性回归方程:

$$y=2\,486.84+3.56x_1-92.60x_2+602.80x_3-182.20x_4$$

内摩擦角与各因素之间的线性回归方程:

$$y=82.721-2.760x_1-46.692x_2-6.918x_3+13.292x_4$$

黏聚力与各因素之间的线性回归方程:

$$y=951.89-34.47x_1-353.88x_2+642.80x_3-131.46x_4$$

将表 3 中相似材料配比方案各因素值代入上述线性回归方程,可得到相应相似材料力学参数,绘制试验结果与回归结果数据对比分析图,如图 7,可直观清晰观察二者的接近程度,验证通过线性回归分析得到的参数可靠性。

从图 6 中可以看出,试验结果和回归结果的变化趋势大体一致,具有良好吻合性,表明通过线性回归法构建的各因素与参数之间的定量关系可行,也证明线性回归得到的数据可靠。

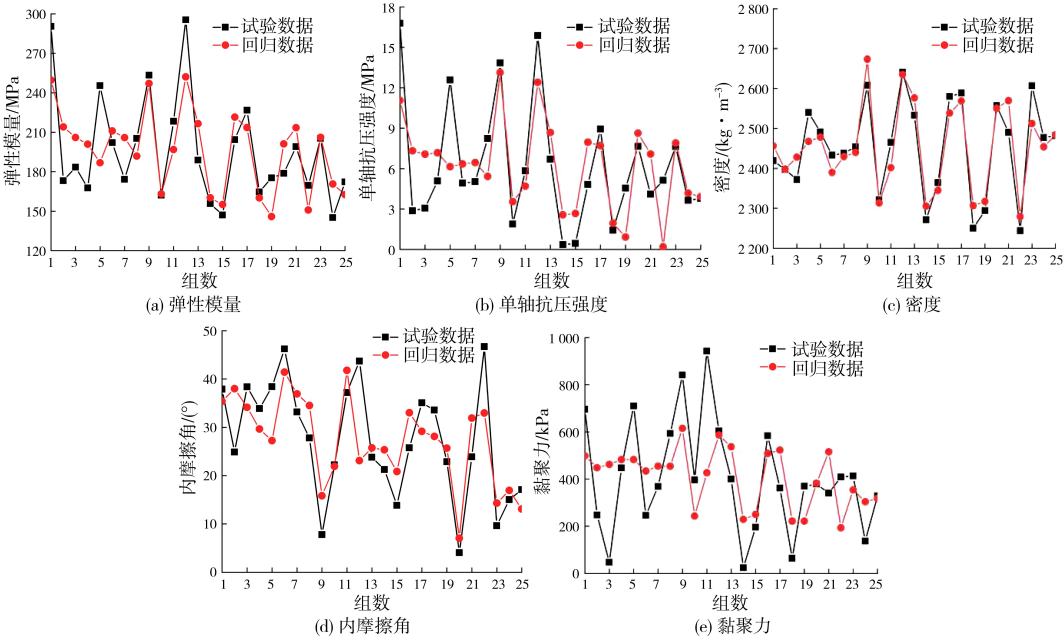


图 6 试验结果与回归结果数据对比图

Fig.6 Comparison of test results and regression results

4 结论

1)采用石膏和水泥双胶结材料,以骨胶比、 $(m_{\text{铁粉}} + m_{\text{重晶石粉}})/m_{\text{骨料}}$ 、 $m_{\text{铁粉}}/(m_{\text{铁粉}} + m_{\text{重晶石粉}})$ 及 $m_{\text{石膏}}/m_{\text{水泥}}$ 为正交方案 4 个因素进行正交试验,每个因素设置 5 个水平,共 25 组配比方案。模型材料力学参数可满足大部分类型岩体模型试验对材料物理力学参数的要求。

2)对比试验结果与目标围岩的力学参数,第 3 组配比可较好模拟目标围岩,其材料配比为 $m_{\text{铁粉}}:m_{\text{重晶石粉}}:m_{\text{石英砂}}:m_{\text{石膏}}:m_{\text{水泥}}=14:58:18:7:3$ 。

3)采用极差分析和方差分析法进行各因素对参数的敏感性研究,结果表明:重晶石粉在骨料中含量对材料的弹性模量和黏聚力影响程度最高,因素 D 对材料的单轴抗压强度影响程度最高,因素 C 对材料的密度影响程度最高,因素 A 对材料的内摩擦角影响程度最高。

4)通过线性回归量化分析力学参数与影响因素之间的关系,对力学参数的试验结果和回归结果比较,二者吻合程度较高,该回归分析方案量化二者之间关系可行。

参考文献:

- [1] 王鸿儒,赵密,钟紫蓝,等. 跨断层隧洞拟静力缩尺试验相似材料研究[J]. 工程力学,2022,39(6):21-30,145.
- [2] 陈冲,吕华永,高海南,等. 软弱基底排土场边坡破坏模式模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(9):2093-2109.
- [3] DENG X N,JIANG Y H,WANG Z J,et al. Similitude material confecting of tunnel model in shaking table test[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,501-504:1774-1778.
- [4] SUITS L D,SHEAHAN T C,ISKANDER M,et al. Spatial deformation measurement using transparent soil[J]. Geotechnical Testing Journal,2010,33(4):102745.
- [5] 窦远明,王建宁,朱旭曦,等. 软弱土质类相似材料的配比试验结果分析[J]. 水利水电技术,2017,48(5):128-135.
- [6] 雷中岱,闫治国. 工程岩体Ⅲ级围岩相似材料配比试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(3):832-839,848.
- [7] 张强勇,刘德军,贾超,等. 盐岩油气储库介质地质力学模型相似材料的研制[J]. 岩土力学,2009,30(12):3581-3586.
- [8] 林贤文,杨杰,臧万军. 隧道围岩相似材料配比试验及其敏感性分析[J]. 福建工程学院学报,2020,18(3):228-234.
- [9] 武伯璽,朱合华,徐前卫,等. Ⅳ级软弱围岩相似材料的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(S1):109-116.
- [10] 储昭飞,刘保国,孙景来,等. 基于 Burgers 模型的软岩流变相似材料的研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(5):1185-1198.
- [11] LI S C,WANG H P,ZHANG Q Y,et al. New type geo-mechanical similar material experiments research and its application[J]. Key Engineering Materials,2006,326-328:1801-1804.
- [12] 顾大钊. 相似材料和相似模型[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1995.
- [13] 杨旭,苏定立,周斌,等. 红层软岩模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 岩土力学,2016,37(8):2231-2237.
- [14] 王鹏,舒才,施峰,等. 不同砂胶比、密度和含水性相似材料力学性质正交试验研究[J]. 岩土力学,2017,38(S2):229-235.
- [15] 吴锦华,袁智洪,周泳峰. 古滑坡泥灰岩模拟相似材料试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(10):81-86.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [17] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 3 版. 北京:化学工业出版社,2017.

(责任编辑:陈雯)