

铁晶砂胶结类岩石材料的参数敏感性分析

刘攀^{1,2}, 马戎荣^{1,2}, 滕志强^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: 为了得到高重度、低强度、低模量的岩石相似材料模型, 采用正交试验设计的方法对铁晶砂胶结类岩石试样材料参数进行敏感性分析。以骨料含量, 铁粉: 重晶石粉, (铁粉+重晶石粉): 粗石英: 细石英以及水泥: 石膏为4因素3水平, 相应设计了9组不同材料的配比方案对胶结试样进行研究。通过单轴压缩试验得到不同配合比材料岩样的单轴抗压强度、弹性模量和峰值应变等力学参数。利用极差分析, 得到以下结果: (铁粉+重晶石粉): 粗石英: 细石英对人工制备岩样的密度和弹性模量有较显著影响; 骨料含量对岩样的单轴抗压强度有较显著影响; 铁粉: 重晶石粉对岩样的峰值应变有较显著影响; 其他因素的影响不是很明显。

关键词: 铁晶砂; 相似材料; 正交试验设计; 敏感性; 极差分析

中图分类号: TU5

文献标识码: A

Material Parameters Sensitivity analysis of Rock-Like sample With Iron Crystal Sand

LIU Pan^{1,2}, MA Rongrong^{1,2}, TENG Zhiqiang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, JiangSu NanJing 210098, China; 2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, JiangSu Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to get the similar material rock model with high gravity, low strength and low modulus, the method of orthogonal experimental is used to analyze the material parameters sensitivity of rock-like sample with iron crystal sand. The percentage of aggregate content, the weight ratio of iron powder to barite powder, the weight ratio of iron powder plus barite powder to quartz sand with coarse particle and fine particle and the weight ratio of cement to plaster are selected as four-factor, three-level. Nine sets of material proportion plans are designed. Through weight, measure and uniaxial compression test, the parameters of density, compressive strength, elastic modulus and peak strain are obtained. The range analysis is used to analyze the sensitivity of various factors. The results show that: the weight ratio of iron powder plus barite powder to quartz sand with coarse particle and fine particle mainly influences density and elastic modulus; the percentage of aggregate content mainly influences compressive strength; the weight ratio of iron to barite powder mainly influences peak strain; The influence of other factors is not obvious.

Key words: iron crystal sand, similar material, orthogonal test design; sensitivity; extreme difference method

工程建设需要进行大量的试验, 模型试验作为一种试验研究方法, 可以严格控制试验对象的主要参数, 外界条件和自然条件对其影响有限, 并且有利于在复杂的试验过程中突出主要矛盾, 模型试验一般制造加工方便, 节省资金、人力和时间, 因而

优势较大。某水电站建设过程中, 现场环境复杂, 并且现场岩体岩石具有重度高、强度低、变形模量低等特点。为了解决现场原位试验的困难, 有必要开展模型试验研究, 找出能够模拟现场岩石的相似材料。相似材料模型试验的原理: 对于原型物理

投稿日期: 2016-10-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11172090)

作者简介: 刘攀 (1992-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 从事岩石力学与工程方面的研究。

表 1 相似材料影响因素
Tab.1 The influence factors of similar material

水平	骨料含量 (A)/%	铁粉：重晶石粉 (B)	(铁粉 + 重晶石粉)：粗石英：细石英 (C)	水泥：石膏 (D)	掺水率 /%
1	70	1:1	1:0.42:0.21	1:1	17
2	80	1:2	1:0.3:0.15	2:1	17
3	90	1:3	1:0.2:0.1	3:1	17

注：骨料（铁粉，重晶石粉，粗石英，细石英）、水泥、石膏三者的总重量为 100%，其他按骨料的基数计算。

力学性质相似的材料按一定比例缩制而成的模型进行室内试验，分析其变形、位移、应力和破坏等情况，从而推测原型的实际状况^[1-2]。关于特殊岩石相似材料的研究，国内外学者进行了大量的研究工作。董金玉^[3]等用铁粉、重晶石粉、石英砂、松香、酒精和石膏等组成的混合物制作岩石相似材料，分析了（铁粉 + 重晶石粉）/ 骨料，铁粉 /（铁粉 + 重晶石粉），黏结剂浓度，石膏含量 4 个因素对模型物理和力学性质各参数的影响规律；李长冬^[4]等研究了加入重晶石粉、细砂、碳酸锰的相似材料不同配比与变形和强度参数之间的相互关系；王雅雯^[5]等用石英砂、重晶石粉、铁精粉和松香酒精溶液制作的相似材料模拟品质玄武岩，通过改变配比来考察相似材料抗压强度及抗剪强度参数并找出最优配比；马芳平^[6]等以加膜铁粉和重晶石粉为骨料，以松香为胶结剂研制出 NIOS(Nature Iron Ore-Sand)相似材料，其弹性模量和抗压强度等主要力学指标可以在比较大的范围内进行调整；韩伯鲤^[7]等在对颗粒骨料进行加膜处理的基础上，用重晶石粉和松香等材料研制出具有高绝缘等特征的新型地质材料（MIB）；张绪涛^[8]等研究了成型压力的增大对铁晶砂混合相似材料各项物理力学参数的影响。本文在总结前人对特殊岩石相似材料大量研究成果的基础上，在骨料中添加细铁粉和重晶石粉提高相似材料模型的重度，利用正交试验方法，分析骨料种类，骨料成分比例，胶结物与胶结而成的岩样物理力学性质的关系，研究每个因素对相似材料力学性质的影响程度，对铁晶砂胶结相似材料的配比选择以模拟特殊岩石材料具有一定的参考意义。

每个因素设置 3 个水平，见表 1。试验选用 4 因素 3 水平的水平正交设计方案 L9（34），为了简化试验，选取了其中 9 组代表性试验结果，在一定意义上代表 81 次试验，其材料配比具体方案见表 2。

表 2 正交试验方案（4 因素 3 水平）

Tab.2 Orthogonal test scheme (four-factor three-level)

方案号	因素			
	A	B	C	D
1	A1	B1	C1	D1
2	A1	B2	C2	D2
3	A1	B3	C3	D3
4	A2	B1	C2	D3
5	A2	B2	C3	D1
6	A2	B3	C1	D2
7	A3	B1	C2	D3
8	A3	B2	C3	D1
9	A3	B3	C1	D2

1.2 实验材料的选取

本实验选取的材料以铁粉、重晶石粉和石英砂为骨料，水泥、石膏为胶结材料。铁粉细度为 400 目，纯度为 99.6%。重晶石粉的细度为 800 目，白度达到 92 以上。选用的石英砂分为细石英，粒径范围为 0.025 ~ 0.05 mm；粗石英，粒径范围为 0.05 ~ 0.075 mm。搅拌时混合材料的掺水率均为 17%。

1.3 试样制作

试验使用 Φ50 mm × 100 mm 的圆柱形标准模具制备试样，将两个半片树脂模具涂抹好凡士林后拼接，按要求将配好的骨料和胶结材料搅拌均匀，添加规定剂量的水继续搅拌，待混合物搅拌均匀后将其注入模具并捣实，待其凝固，拆卸后将制好的试件在恒温恒湿的条件下养护 7 d。

1.4 试样加载

单轴压缩试验在岩石三轴渗流流变系统上进行，该设备由压力室、高压泵伺服系统、轴向应变测量系统、水压系统以及微机处理系统组成。试验过程

1 室内实验

1.1 正交试验方案的设计

在本次正交试验方案设计中，以骨料含量（A）、铁粉和重晶石粉比例（B）、各骨料成分的比例（（铁粉 + 重晶石粉）：粗石英：细石英）（C）和胶结比（D）作为正交设计的 4 个因素（A，B，C，D），

表 3 单轴压缩实验结果

Tab.3 The experimental results of uniaxial compression

方案号	单轴抗压强度 /MPa	弹性模量 /MPa	峰值应变 / $\times 10^{-3}$	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
1	6.920	561.253	12.330	2.058
2	3.008	482.809	6.230	2.091
3	7.608	631.379	9.030	2.108
4	2.817	316.827	11.720	2.229
5	3.912	427.980	10.410	2.123
6	4.047	587.827	15.420	2.054
7	1.764	228.899	12.270	2.359
8	2.616	594.297	8.310	2.137
9	3.053	605.152	7.480	2.141

中加载速度保持在 0.05 mm/min。

1.5 试验结果

将制备好的圆柱试样称重测量，并对其进行单轴压缩实验，最后可以测知试样密度 ρ 、单轴抗压强度 σ 、弹性模量 E 以及峰值应变等各项数据(表 3)。试件的破坏，岩样在轴向有许多劈裂面，并且存在一个贯穿整个试样的剪切破坏面，破坏面主要以张拉破坏为主，符合岩石抗拉强度低的特征。图 1 为各试样应力应变曲线，由图可知，各应力应变曲线近似，试样单轴压缩过程中压密阶段、弹性阶段、塑性阶段和应变软化阶段均比较明显，说明本次实验制备的岩样效果较好。

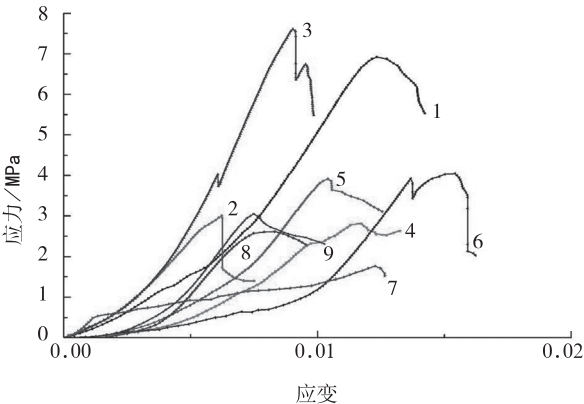


图 1 各试样的应力应变曲线

Fig.1 The stress-strain curve of each sample

2 各因素敏感性分析

对于正交试验结果分析，直观分析法是通过对比每一因素的极差来分析问题，选取的各因素不同水平变动对指标的影响通过极差大小来反映。由正交试验理论可知，将各个因素相同水平平均，极差为各水平之和中的最大值与最小值之差，极差大则说明该因素的不同水平产生的差异较大，该因素是重

要因素，其对试验结果影响显著^[9-10]。使用极差分析法分析各因素对岩样材料物理力学性质影响程度的具体过程如下。

2.1 密度敏感性分析

根据正交试验直观分析法，对影响岩样密度的各因素每个水平求均值和极差，表 4 为计算结果。从表中可知，各因素对岩样密度的影响程度由大到小为 C、D、B、A，并且各因素的极差相差较小，这说明 C 因素对于岩样密度起主要控制作用，其它因素也具有贡献效应。

图 2 为各因素对岩样密度的影响趋势图，横坐标为各因素对应的 3 个水平值，纵坐标表示岩样密度的大小。由图可知，随着骨料含量的增加，岩样

表 4 密度正交试验设计极差分析

Tab.4 Range analysis of density in orthogonal experimental design

方差	影响因素			
	A	B	C	D
K1	2.086	2.215	2.084	2.106
K2	2.135	2.117	2.226	2.095
K3	2.212	2.084	2.123	2.232
极差 R	0.126	0.131	0.142	0.137

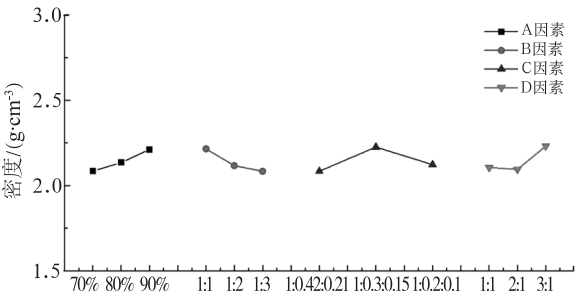


图 2 各因素对密度的影响趋势图

Fig.2 The trend diagram about influence of various factors on density

密度越来越大；而随着铁粉比例的降低，即铁粉和重晶石粉总含量中随铁粉含量的减少，岩样密度越来越小。这说明岩样密度对这两个参数的变化比较敏感，相反，其余两个因素与岩样密度的关系不是很明显。

2.2 单轴抗压强度敏感性分析

根据正交试验直观分析法，对影响岩样单轴抗压强度的各因素每个水平求均值和极差，表 5 为计算结果。从表中可知各因素对岩样单轴抗压强度的影响程度由大到小为 A、C、B、D，这说明 A 因素对于岩样单轴抗压强度起主要控制作用。

图 3 为各因素对岩样单轴抗压强度的影响趋势图，横坐标为各因素对应的 3 个水平值，纵坐标表示岩样单轴抗压强度的大小。由图可知，随着骨料含量的增加，岩样单轴抗压强度越来越小。这说明岩样单轴抗压强度对骨料含量的变化比较敏感，相反，其余三个影响因素与岩样单轴抗压强度的关系不是很明显。

表 5 单轴抗压强度正交试验设计极差分析

Tab.5 Range analysis of compressive strength in orthogonal experimental design

方差	影响因素			
	A	B	C	D
K1	5.845	3.834	4.763	4.483
K2	3.592	3.179	2.530	3.369
K3	2.478	4.903	4.712	4.063
极差 R	3.367	1.724	2.233	1.114

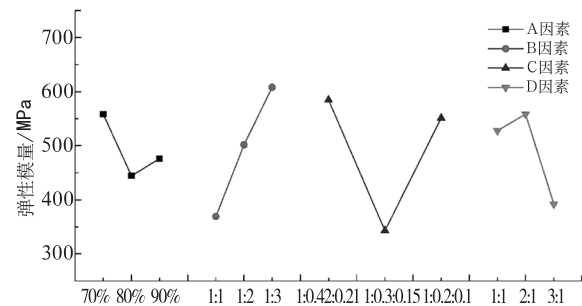


图 3 各因素对单轴抗压强度的影响趋势图

Fig.3 The trend diagram about influence of various factors on uniaxial compressive strength

2.3 弹性模量敏感性分析

根据正交试验直观分析法，对影响岩样弹性模量的各因素每个水平求均值和极差，表 6 为计算结果。从表中可知各因素对岩样弹性模量的影响程度

由大到小为 C、D、B、A，并且 C 因素和 B 因素的极差相差不大。这说明骨料中 C 因素对于岩样弹性模量起主要控制作用，B 因素的贡献效应也比较大。

图 4 为各因素对岩样弹性模量的影响趋势图，横坐标为各因素对应的 3 个水平值，纵坐标表示岩样弹性模量大小。由图可知，随着重晶石粉比例的增加，即铁粉和重晶石粉总含量中重晶石粉含量的增加，岩样弹性模量越来越大。这说明岩样弹性模量对骨料中重晶石粉含量的变化比较敏感，相反，其余三个影响因素与岩样弹性模量的关系不是很明显。

表 6 弹性模量正交试验设计极差分析

Tab.6 Range analysis of elastic modulus in orthogonal experimental design

方差	影响因素			
	A	B	C	D
K1	558.480	368.993	584.744	527.843
K2	444.211	501.695	342.845	558.596
K3	476.116	608.119	551.219	392.368
极差 R	114.269	239.126	241.899	166.228

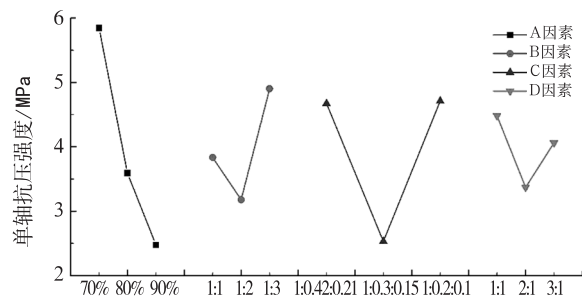


图 4 各因素对弹性模量的影响趋势图

Fig.4 The trend diagram about influence of various factors on elastic modulus

2.4 峰值应变敏感性分析

根据正交试验直观分析法，对影响岩样峰值应变的各因素每个水平求均值和极差，表 7 为计算结果。从表中可知各因素对岩样峰值应变的影响程度由大到小为 B、A、C、D，这说明 B 因素对于岩样峰值应变起主要控制作用。

图 5 为各因素对岩样峰值应变的影响趋势图，横坐标为各因素对应的 3 个水平值，纵坐标表示岩样峰值应变的大小。由图可知，随着铁粉和重晶石粉总含量的增加和粗、细石英砂含量的减少，岩样峰值应变越来越小。这说明岩样峰值应变对骨料中（铁粉 + 重晶石粉）与粗、细石英砂的比例的变化比较敏感，相反，其余三个影响因素与岩样峰值应变的关系不是很明显。

表 7 峰值应变正交试验设计极差分析
Tab.7 Range analysis of peak strain in orthogonal
experimental design

方差	影响因素			
	A	B	C	D
K1	9.197	12.107	11.743	10.350
K2	12.517	8.317	10.073	9.710
K3	9.353	10.643	9.250	11.007
极差 R	3.320	3.790	2.493	1.297

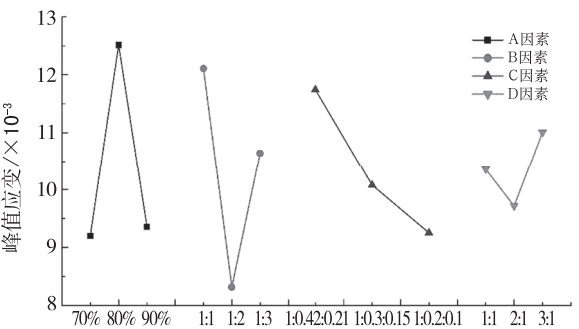


图 5 各因素对峰值应变的影响趋势图

Fig.5 The trend diagram about influence of various factors on peak strain

3 结论

1) 通过正交试验设计,得到了不同配比相似岩样的密度、单轴抗压强度、弹性模量和峰值应变等物理力学参数指标。

2) 对预制好的岩样进行单轴压缩试验,通过极差分析方法分析了各因素对岩样物理力学参数的敏感性,得出通过改变骨料中(铁粉+重晶石粉)、粗石英和细石英的比例可以调整人工制备岩样的密度和弹性模量;改变混合物的骨料含量可以调整岩

样试件的单轴抗压强度;改变骨料中铁粉与重晶石粉的比例可以调整岩样试件的峰值应变。

参考文献:

[1]FUMAGALLIE.Statical and Geomechanical Model[M].New York: Springer, Wien, 1973.

[2]KIM S H, BURD H J.Model testing of closely spaced tunnels in clay[J].Geotechnique, 1998, 48(3): 375-388.

[3]董金玉,杨继红,杨国香,等.基于正交设计的模型试验材料的配比试验研究[J].煤炭学报, 2012, 37(1): 44-49.

[4]李长冬,唐辉明,胡新丽,等.岩石相似材料变形与强度特性及数值模拟研究[J].地质科技情报, 2008(6): 98-101.

[5]王雅雯,裴向军,丁梓涵.铁精砂相似材料力学性质试验研究[J].科学技术与工程, 2014(34): 283-288.

[6]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.

[7]韩伯鲤,陈霞龄,宋一乐.岩体相似材料的研究[J].武汉水利水电大学学报, 1997, 30(2): 6-9.

[8]张绪涛,张强勇,曹冠华,等.成型压力对铁-晶-砂混合相似材料性质的影响[J].山东大学学报: 工学版, 2013, 43(2): 89-95.

[9]苏均和.试验设计[M].上海:上海财经大学出版社, 2005.

[10]徐超,叶观宝.应用正交试验设计进行数值模拟参数的敏感性分析[J].水文地质工程地质, 2004(1): 95-97.

(责任编辑 王利君)