

水泥石膏相似材料配比试验研究

肖 杰¹ 刘保国²

(1. 中兵勘察设计研究院,北京 100053;2. 北京交通大学,北京 100044)

【摘 要】 采用水泥石膏相似材料制作标准试件模型,应用正交试验设计方法,以砂胶比、水泥石膏比、重晶石/骨料为 3 个因素,每个因素设置 5 个水平,设计了 25 组材料配比试验,进行了称重、单轴压缩、劈裂试验,获得了不同配比相似材料的密度、抗压强度、抗拉强度等物理力学性质指标。试验结果表明:不同配比的相似材料物理力学指标分布的范围较大,能够满足不同性质岩体模型试验对岩体相似材料的要求。基于 MATLAB 计算软件编制了用于正交试验设计和回归分析的软件,得到由水泥石膏相似材料密度、抗压强度和抗拉强度指标推算材料配比的经验公式。在以后的水泥石膏相似材料配比试验中可以用上述经验方程根据欲得到的材料物理力学指标进行配比设计。

【关键词】 模型试验;水泥石膏相似材料;正交试验设计;配比设计;MATLAB

【中图分类号】 TU 458.4

【文献标识码】 A

doi:10.3969/j.issn.1007-2993.2015.02.003

Research on Cement & Plaster Similar Materials Proportioning Test

Xiao Jie¹ Liu Baoguo²

(1. China Ordnance Industry Survey, Design & Research Institute, Beijing 100053, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

【Abstract】 The sand-cement ratio, the ratio of cement to gypsum and barite percentage of the total aggregate were selected as three factors, and every factor had five variable levels. According to twenty five schemes of material mixture ratio designed by orthogonal design method, shape volume testing, weighing, moisture content rate test, laboratory uniaxial compression test and split test were conducted. The tests results show that physical and mechanical indexes of similar material vary in a large range and can meet the needs for rock similar material in different physical model test of rock slope. Write a procedure for regression analysis based on MATLAB. Set the sand-cement ratio as X_1 , the ratio of cement to gypsum as X_2 , barite percentage of the total aggregate as X_3 , density indicators as Y_1 , compressive strength indicators as Y_2 , tensile strength indicators as Y_3 . Do regression analysis for the relationship between X_1, X_2, X_3 and Y_1, Y_2, Y_3 by using the procedure, and obtained the empirical formula of the cement & plaster similar material density, compressive strength and tensile strength. We can calculate the material ratio by physical and mechanical indicators of similar material with the empirical equation based on the mix design.

【Key words】 model test; cement & plaster similar material; orthogonal experimental design method; proportioning test; MATLAB

0 引言

物理模型试验是一种发展较早、应用广泛、直观形象的岩体介质物理力学特性研究方法^[1]。长期以来,模型试验一直是解决复杂工程课题的重要手段,在岩土工程研究中已得到广泛应用^[2]。模型试验的基础是相似理论,即要求模型和原型相似,模型能够反映原型的情况。根据相似理论,在模型试验中应采用相似材料来制作模型^[3]。

本文以国家科技支撑计划项目“盾构施工煤矿长距离斜井关键技术研究”——课题六“煤层开采对斜井管片结构稳定性影响规律研究”为背景,就课题研究中采用相似材料模型试验、选择什么原料以及如何确定原材料之间的比例关系进行试验研究。

1 试验过程

配比试验中关键的一步就是要找到一种合适的

基金项目: 国家科技支撑计划项目“盾构施工煤矿长距离斜井关键技术研究”——课题六“煤层开采对斜井管片结构稳定性影响规律研究”(编号:2103BA10B06)

作者简介: 肖 杰,1986 年生,男,汉族,河北西柏坡人,硕士研究生,助理工程师,从事工程检测工作及岩石力学理论与试验方面研究。E-mail: qingbixian@me.com

相似材料来进行模型的设计和制作。正确选择相似材料往往是模型试验成功的关键,相似材料选取正确了,模型试验的成功就有了一大半的把握^[4]。相似材料原料配比一般是通过参考前人研究基础,然后按照试配的方式得到的。

1.1 相似材料原料选择

在岩性模型试验中,以石膏为胶结物相似材料由于其脆性与岩石比较接近,弹性模量和抗压强度的调节范围较大,且制作工艺简单,材料来源方便,是国内外应用最广泛的一种岩性相似材料。

本次试验所模拟的原岩为灰岩,结合相似材料原料选择的一般原则及水泥石膏胶结材料的优点,选用如下原料:

石膏 高强石膏粉;

水泥 “钻”牌 425 早强型硅酸盐水泥;

石英砂 黄白相间,粒径 0.5~1 mm,石英质量分数>95%,密度 2.6 g/cm³;

重晶石 灰黑色,粒径 0.5~1 mm,重晶石质量分数>95%,密度 4.0 g/cm³;

硼砂 无色硬质结晶颗粒或白色结晶性粉末,四硼酸钠(Na₂B₄O₇·10H₂O)质量分数>99.5%。

1.2 试件制作^[5]

参考前人相似材料配比试验强度测试的经验,本次试验试件采用高度为 10 cm、直径 5 cm 的标准圆柱体试件,为了得到高精度的试件,本次试验用 SolidWorks 设计了用于制作直径为 50 mm、高度为 100 mm 的圆柱体标准试件的模具。

按照配比方案计算的各试验编号中各原料的配比备置原料。称量精度为:骨料±1%,硼砂为±0.5%。经过试模准备、原料拌合、装料、压制、脱模、养护等工序制作成标准试件,用于测定不同配比相似材料的物理力学参数。

1.3 试验过程

按照国家规范及试验室操作规程,对各编号试件进行测量、称重、单轴压缩、劈裂试验以及烘干试验,获得不同配比下相似材料的试件高度、试件直径、试件烘干前质量、试件烘干后质量、试件单轴压缩破坏荷载、试件劈裂试验破坏荷载等物理力学参数。

1.4 正交试验设计

正交试验法是用多因素试验的一种方法,它是从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些代表点具有均匀和整齐的特点^[6]。正交试验设计是部分因子设计的主要方法,效率很高,试验

中把所要考察的结果称为指标,把要考察的对试验指标可能有影响的因素简称为因子,把每个因素在试验中要比较的具体条件称为水平。假定设计一个试验,安排 k 个因子,作 n 次试验,因子的水平数分别为 t_1, t_2, \dots, t_n 。若此试验满足 2 个条件:①每一因子的不同水平在试验中出现相同次数(均衡性);②任意两因子的不同水平组合在试验中出现相同次数(正交性),则这个试验称为正交试验^[7]。

在试验设计中,以砂胶比(A)、水泥石膏比(即水泥占胶结材料的百分比)(B)、重晶石粉/骨料(C)作为正交设计的三个因素,每个因素设置 5 个水平,具体设置见表 1。

表 1 相似材料正交设计水平

因素水平	A-砂胶质量比	B-水泥石膏质量比	C-(重晶石粉/骨料)/%
1	4:1	3:7(0.3)	0
2	5:1	4:6(0.4)	10
3	6:1	5:5(0.5)	20
4	7:1	6:4(0.6)	30
5	8:1	7:3(0.7)	40

注:用水量为试件质量的 1/10;水中硼砂的浓度为 1%;括号中数字为水泥百分含量

本次试验选用 6 因素、5 水平的正交设计方案 L₂₅(5⁶),其按照正交设计的材料配比方案见表 2。试验中,取骨料的质量为 2000 g,按照相似材料配比方案计算各试验号对应的原料质量。

表 2 相似材料配比方案

试验编号	A-砂胶质量比	B-水泥石膏质量比	C-(重晶石粉/骨料)/%	D	E	F
1	4:1	3:7	0	1	1	1
2	4:1	4:6	10	2	2	2
3	4:1	5:5	20	3	3	3
4	4:1	6:4	30	4	4	4
5	4:1	7:3	40	5	5	5
6	5:1	3:7	10	3	4	5
7	5:1	4:6	20	4	5	1
8	5:1	5:5	30	5	1	2
9	5:1	6:4	40	1	2	3
10	5:1	7:3	0	2	3	4
11	6:1	3:7	20	5	2	4
12	6:1	4:6	30	1	3	5
13	6:1	5:5	40	2	4	1
14	6:1	6:4	0	3	5	2
15	6:1	7:3	10	4	1	3

续表

试验 编号	A-砂胶 质量比	B-水泥石膏 质量比	C-(重晶石粉/ 骨料)/%	D	E	F
16	7:1	3:7	30	2	5	3
17	7:1	4:6	40	3	1	4
18	7:1	5:5	0	4	2	5
19	7:1	6:4	10	5	3	1
20	7:1	7:3	20	1	4	2
21	8:1	3:7	40	4	3	2
22	8:1	4:6	0	5	4	3
23	8:1	5:5	10	1	5	4
24	8:1	6:4	20	2	1	5
25	8:1	7:3	30	3	2	1

1.5 成果整理

对试验所得原始数据进行处理得到试件的密度、含水率、单轴抗压强度、单轴抗拉强度以及拉压比等基本参数,并按照试验设计中的舍弃方法进行初步整理得到相似材料配比正交试验结果表(见表3)。

表3 相似材料配比正交试验结果(部分)

试验 编号	密度 /(g·cm ⁻³)	含水率 /%	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	拉压 比
1	1.697	3.11	3.271	0.250	1/13
2	1.874	3.12	2.870	0.309	1/9
3	1.877	3.50	2.763	0.313	1/9
4	1.919	1.90	3.264	0.302	1/11
5	2.005	2.20	3.545	0.348	1/10
6	1.733	2.39	3.021	0.352	1/9
7	1.746	2.29	2.182	0.264	1/8
8	1.847	2.10	2.833	0.258	1/11
9	1.895	1.87	3.293	0.222	1/15
10	1.839	1.56	2.598	0.160	1/16
11	1.737	1.95	1.183	0.148	1/8
12	1.764	1.83	1.120	0.186	1/6
13	1.829	1.84	2.182	0.169	1/13
14	1.745	1.59	1.746	0.151	1/12
15	1.779	1.43	1.746	0.140	1/12
16	1.741	1.36	1.097	0.076	1/14

2 讨论

对试验结果进行总体分析,发现相似材料的密度分布在1.67~2.01 g/cm³,抗压强度分布在1.07~3.55 MPa,抗拉强度分布在0.07~0.35 MPa,通过对比可知相似材料的试验结果基本可以覆盖欲模拟岩体对相似材料的要求范围。

2.1 各因素敏感性分析

1) 密度影响因素敏感性分析

对正交试验结果中的对试件密度影响的各因素每个水平求均值和极差,结果见表4。根据表4作各因素对密度影响的直观分析图(见图1)。由图可知,试件的密度随着砂胶比的增加而减小较明显;随着重晶石在骨料含量的增加而增加。如果增加重晶石在骨料中的含量能够提高材料的密度,假设将密度为 ρ_1 的纯石英砂试件石英砂全部置换为重晶石,根据砂胶比可以计算骨料质量百分比记为 G ,由石英砂密度为2.6 g/cm³,重晶石密度为4.0 g/cm³,单个试件体积为 V 则等体积代换后密度为:

$$\rho_2 = \frac{(V \times \rho_1 \times G \times \frac{4.0}{2.6})}{V} / G = \rho_1 \times \frac{4.0}{2.6} = 1.54\rho_1$$

若取 $\rho_1 = 2.0$ g/cm³,则 $\rho_2 = 3.08$ g/cm³。由于砂岩的密度一般均小于3.0 g/cm³,可见将相似材料密度相似比做到1:1是可以实现的。

表4 密度极差分析

水平组数	A	B	C
1	1.874	1.719	1.733
2	1.812	1.768	1.759
3	1.771	1.800	1.777
4	1.723	1.801	1.790
5	1.731	1.824	1.852
极差	0.152	0.105	0.119

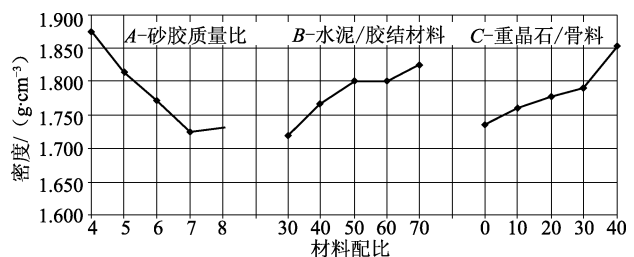


图1 密度敏感性因素分析

2) 抗压强度影响因素敏感性分析

对正交试验结果中的对试件抗压强度影响的各因素每个水平求均值和极差,结果见表5。根据表5作各因素对试件抗压强度影响的直观分析图(见图2)。由图可知,试件的抗压强度随着砂胶比的减小(即胶结材料含量的增加)而增大,且其对抗压强度大小的影响十分明显,其他影响因素和试件抗压强度的关系不是十分明显。

表5 抗压强度极差分析 MPa

水平组数	A	B	C
1	3.143	1.947	2.128
2	2.785	1.881	2.072
3	1.595	2.174	1.875
4	1.564	2.208	1.900
5	1.280	2.158	2.393
极差	1.862	0.328	0.518

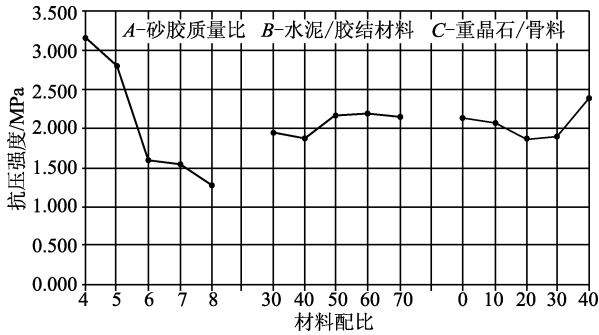


图2 抗压强度敏感性因素分析

3) 抗拉强度影响因素敏感性分析

对正交试验结果中对试件抗拉强度影响的各因素每个水平平均值和极差,结果见表6。根据表6各因素对试件抗拉强度影响的直观分析图(见图3)。由图可知,试件的抗拉强度受各因素的影响同试件的抗压强度相似,随着砂胶比的减小(即胶结材料含量的增加)而增大,且其对抗压强度大小的影响十分明显,其他影响因素和试件抗压强度的关系不是十分明显。

表6 抗拉强度极差分析 MPa

水平组数	A	B	C
1	0.304	0.193	0.152
2	0.251	0.195	0.197
3	0.159	0.184	0.204
4	0.126	0.175	0.191
5	0.090	0.183	0.186
极差	0.214	0.020	0.052

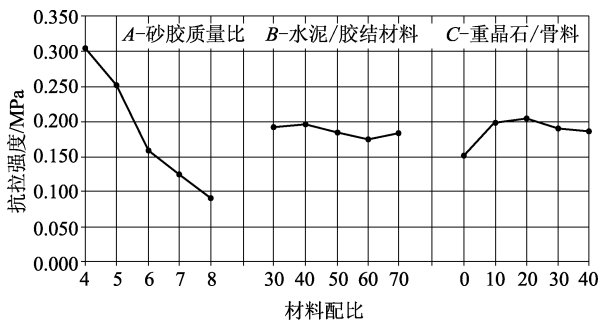


图3 抗拉强度敏感性因素分析

2.2 试验数据回归分析

利用 MATLAB 编制小程序,对密度、抗压及抗拉强度进行回归分析。以相似材料配比因素指标为自变量,求其与密度、单轴抗压强度及单轴抗拉强度指标之间的关系^[8]。

在回归分析中,设砂胶比为 X_1 、水泥占胶结材料百分比为 X_2 、重晶石占骨料百分比为 X_3 、密度指标为 Y_1 、抗压强度指标为 Y_2 和抗拉强度指标为 Y_3 。

1) 对密度进行回归分析

由多元线性回归及逐步回归分析得到的经验方程是相同的,为:

$$Y_1 = 1.832 - 0.038X_1 + 0.244X_2 + 0.270X_3 \quad (1)$$

2) 对抗压、抗拉强度进行回归分析

由对强度敏感性分析可知,因素 C-重晶石与石英砂比值(即重晶石/骨料百分比 X_3)对强度基本没有影响,故只将砂胶比 X_1 和水泥占胶结材料百分比 X_2 作为自变量,对抗压强度 Y_2 和抗拉强度 Y_3 进行线性回归分析。得到经验方程分别为:

抗压强度经验方程

$$Y_2 = 4.667 - 0.495X_1 + 0.749X_2 \quad (2)$$

抗拉强度经验方程

$$Y_3 = 0.538 - 0.056X_1 - 0.039X_2 \quad (3)$$

将正交试验中各试验号原料配比指标值代入回归方程计算各指标回归值,并将其与试验值比较。可见,密度回归值与试验值的偏差均小于 5%,能够达到模型试验的要求。同时在分析中可以得到试验数据与回归方程的相关系数达到 90% 以上,这说明对于相似材料密度选用的线性回归模型在本次试验中能够达到很高的回归精度。

但是对于抗压及抗拉强度,通过多元线性回归方程计算得到的回归值很难与试验值很好地拟合。尽管根据规范,同一组建筑砂浆之间,最大值或最小值与平均值之间的差异不能超过 20%,因此将回归值与试验值之间的差异最大为 20% 作为衡量回归方程是否能够与试验值很好拟合的标准。表中大多数都能够满足要求,但仍有 2 组试验的抗压强度值偏差在 50% 以上,有 3 组试验的抗拉强度值偏差在 30% 以上。分析造成这种结果的原因主要是由于在制作试件的过程中由于相似材料本身的强度很低,在脱模后有些试验组的试件会形成一条竖直的微裂缝,这样就在很大程度上降低了试件的强度。虽然抗压、抗拉强度的线性回归方程不能够完全与试验结果拟合,但其结果还是可以满足工程要求的。

(下转第 108 页)

$=14\text{m}, d=400\text{mm}, m=0.05, \beta=0.8$, 矩形布桩, 沉降经验系数 $\psi_s=0.7$, 最大迭代次数 N 的值为 10 000,

迭代终止条件为 $\frac{V_{i+1}-V_i}{V_i} \leq 5\%$.

遵照确保安全、便于施工的原则, 设计参数取优化结果临近值。最终确定为桩长 $l=14.0\text{m}$ 、桩径 $d=400\text{mm}$ 、面积置换率 $m=4.2\%$ 。混合料方量 $V=1088.36\text{m}^3$, 单桩承载力 $R_a=586.95\text{kN}$, 复合地基承载力 303.47kPa , 桩数 $n=543$ 根, 桩间距 $S=1.70\text{m}$, 褥垫层厚度 $\nu_h=200\text{mm}$, 复合地基变形量 $s=36.75\text{mm}$, 满足相关规范及设计要求。

5 结论

1) HPSO 算法用于 CFG 桩复合地基优化设计是有效的, 该算法具有很强的全局搜索能力, 既有较高的收敛速率又能充分保证搜索的精度。从迭代计算过程可以看出, 面积置换率 m 越大, 桩长 l 越小, 复合地基总沉降量 s 越大; 桩长 l 越大, 复合地基总沉降量 s 越小。

2) 通过工程实例检验了 CFG 桩复合地基优化设计程序的合理性和正确性, 研究结果表明优化设计可以大大降低工程成本, 提高设计方案的合理性、经济性。

3) 优化计算中将设计参数看作连续变量, 实际应用中设计参数的取值是离散的, 在最终确定方案

时应根据具体施工条件选取最为接近优化结果的离散值, 确保设计方案的可操作性。

4) CFG 桩复合地基的设计方法有多种, 本文就先根据复合地基承载力来初选各项参数, 再依据变形要求来调整参数的设计方法作了初步探讨, 工程中常用的反算法还有待于做进一步深入研究。

5) 根据优化计算结果选取 CFG 桩复合地基设计参数时, 还应从施工难易程度、钻具尺寸规格、利于质量控制等方面进行综合考虑。

参考文献

- [1] JGJ 79—2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [2] 刘文彬. 基于 HPSO 算法的岩石非定常蠕变本构模型辨识[J]. 岩土工程技术, 2011, 25(4): 168-172.
- [3] 刘文彬, 刘保国, 等. 基于改进 PSO 算法的岩石蠕变模型参数辨识[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(4): 140-143.
- [4] 吴志刚, 刘景生. CFG 桩地基处理及最优化设计[J]. 山西建筑, 2008, 34(1): 124-126.
- [5] GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

收稿日期: 2014-09-22

(上接第 68 页)

将方程(2)、(3)联立后得:

$$X_1 = 9.621 - 0.637Y_2 - 12.362Y_3 \quad (4)$$

$$X_2 = 0.123 + 0.915Y_2 - 8.165Y_3 \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代入方程(1)得:

$$X_3 = -5.561 + 3.706Y_1 - 0.915Y_2 + 5.658Y_3。$$

由于 X_2 、 X_3 为百分含量指标, 其值域为 $(0.0 \sim 1.0)$ 。因此, 在实际配比中要根据计算值做相应的调整。

3 结语

研究中采用了正交试验设计法进行设计。实践证明采用正交试验设计法研究混料配比设计是正确的并且能够凸显其优越性。水泥石膏是一种较好的模拟岩石的相似材料, 并且对水泥石膏相似材料的物理力学指标规律有了更进一步的认识。

参考文献

- [1] 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.

- [2] 林韵梅. 试验岩石力学——模拟研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [3] 彭海明, 彭振斌, 韩金田, 等. 岩性相似材料研究[J]. 广东土木与建筑, 2002, 12(12): 13-17.
- [4] 李勇. 新型岩土相似材料的研制及在八字岭分岔式隧道模型试验中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [5] 赵选民. 试验设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 李晓红, 等. 岩石力学试验模拟技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [7] 白宪臣. 土木工程材料试验[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [8] 王岩, 隋思莲. 试验设计与 MATLAB 数据分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.

收稿日期: 2014-08-11