



嵌岩桩模型试验基岩相似材料的配比试验研究

许锡宾^{1,2}, 张春¹, 涂忠仁¹, 利亮¹, 洪文强¹

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆建筑工程职业学院, 重庆 400039)

摘要: 室内模型试验时, 材料的相似模拟对于试验过程和实测数据分析具有重要影响。在前人基岩相似材料研究的基础上, 采用正交设计方法, 以(重晶石粉+砂)/石膏、重晶石粉/砂, 水/石膏等3种组合, 每组合设置3个水平, 共设计了9组材料配比方案, 进行优化匹配, 并最终得到能够在嵌岩桩模型试验中性能优良的模型材料配比建议值。试验结果表明: 采用普通粉刷石膏作为胶结材料时在满足相似材料密度要求的前提下, 材料抗压强度和弹性模量的可变范围较窄, 不能满足大部分岩体材料模型试验对相似材料的要求; 采用 α -高强石膏粉替代普通粉刷石膏粉可以有效提高材料抗压强度和弹性模量, 使重晶石粉、砂子、石膏和甘油为原料的相似材料可以较好地模拟出大部分岩体材料基本特性。

关键词: 正交设计方法; 相似材料; 嵌岩桩; 配比试验; α -高强石膏粉; 敏感性分析

中图分类号: TD 315.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0026-05

Experimental research on similar material of bedrock proportioning test for rock-socketed pile model test

XU Xi-bin^{1,2}, ZHANG Chun¹, TU Zhong-ren¹, LI Liang¹, HONG Wen-qiang¹

(1. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Vocation College of Architectural Engineering, Chongqing 400039, China)

Abstract: The test process and data analysis has a important influence to similar material on the indoor model tests. On the basis of previous research of bedrock similar material, the weight ratio of barite powder plus sand to gypsum powder, the weight ratio of barite powder to sand, the weight ratio of water to gypsum powder are selected as three kinds of combination, and each combination set three levels, a total of nine groups of material proportioning is designed by the orthogonal design method, by optimizing the matching we finally get the recommended value of the excellent performance of the model material ratio which can be used in rock-socketed pile model test. The tests results show that when similar material density meets the requirements, using ordinary plastering gypsum as cementitious materials, the variable range of compressive strength and elastic modulus of the material is small and can't meet the needs for rock similar material in different physical model test; using the alpha high-strength gypsum powder instead of the ordinary plastering gypsum powder can improve the material strength and elasticity modulus of the material and it makes the similar material which made by barite powder, sand, plaster and glycerin can simulate most of the basic characteristics of rock materials.

Keywords: orthogonal design method; similar material; rock-socketed pile; mix proportion test; alpha high-strength gypsum powder; sensitivity analysis

室内模型试验时, 为研究嵌岩桩嵌入不同基岩的承载特性, 需要试配出相应的基岩模型(软

岩、硬岩), 而为保证试验的可比性和准确性, 基岩模拟应根据相似理论选择同一种相似材料的不

收稿日期: 2014-10-19

作者简介: 许锡宾(1955—), 男, 教授, 从事结构工程、港口工程研究工作。

同配比来模拟不同强度的基岩。相似材料的选择和对比对材料的物理力学性质具有较大的影响,且对模型试验的结果起着决定性的作用。

科研机构及刘亮亮等^[1-12]对相似材料进行了大量的研究工作。其中长江水利水电科学研究院结构材料室(简称长江科学院)经过试验研制了由石膏、重晶石粉、砂和甘油为原料的模型材料。笔者在其研究基础上,采用正交试验方法设计相似材料的试验方案,并以 α -高强石膏粉替代了原普通粉刷石膏粉进行不同配比的室内物理力学指标试验,得到不同配比相似材料的物理力学参数,同时分析各因素对材料物理力学参数的敏感性和影响规律。

1 相似材料配比正交设计方案

正交试验法是研究多因素多水平的一种方法,它根据正交性从全面试验中挑选出部分有代表性的点进行试验,这些代表点有均匀分散和整齐可比的特点。正交试验设计是分式析因设计的主要方法。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称为因素,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 m 个因子,做 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)每个因子的不同水平在试验中出现相同次数(均衡性);2)任意2个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^[5]。正交试验法采用正交表安排试验。

本试验采用重晶石粉、砂子为骨料,石膏为胶结材料,甘油为调节材料。其中重晶石粉目格为400目,密度为 4.3 t/m^3 ;砂为重庆河砂;石膏为325目普通粉刷石膏粉;甘油为分析纯工业级。试验以(重晶石粉+砂)/石膏、重晶石粉/砂,水/石膏为正交设计的3个因素(A、B、C),每个因素设置3个水平(表1)。

试验选用4因素3水平的正交设计方案 $L_9(3^4)$,其材料配合比见表2。

表1 正交设计因素及水平

组数	(重晶石粉+砂)/石膏	重晶石粉/砂	水/石膏
1	10:1	2.5:1	2:1
2	9:1	2:1	1.75:1
3	8:1	1.5:1	1.5:1

注:甘油的作用主要为改善拌合物的和易性,其对相似材料的物理力学特性影响不大,因此不考虑甘油对相似材料的影响。

表2 相似材料试验配合比(质量比)

组数	重晶石粉	砂子	石膏	水
1	6.00	4.00	1	1.75
2	6.67	3.33	1	2.00
3	7.14	2.86	1	1.50
4	5.40	3.60	1	2.00
5	6.00	3.00	1	1.50
6	6.43	2.57	1	1.75
7	4.80	3.20	1	1.50
8	5.33	2.67	1	1.75
9	5.71	2.29	1	2.00

注:每立方米相似材料甘油用量为40 kg,石膏为325目普通粉刷石膏粉。

2 配比试验结果与长江科学院试验成果对比分析

2.1 配比试验结果和长江科学院实验成果

按照以上9组不同配比制作试件(抗压强度试件为边长100 mm的立方体;静力受压弹性模量试件为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的棱柱体),养护完成后参照GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[13]采用RMT-150C岩石力学试验系统进行试件的抗压强度试验和弹性模量试验,试验前测得试件的密度。本试验结果和长江科学院实验成果分别见表3和表4。

表3 本试验相似材料试配试验结果

组数	密度/ $(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
1	2.31	0.33	9.0
2	2.38	0.30	13.0
3	2.40	0.42	12.3
4	2.28	0.21	16.0
5	2.35	0.37	24.3
6	2.39	0.31	10.0
7	2.27	0.29	9.5
8	2.33	0.24	21.3
9	2.38	0.21	17.3

表4 长江科学院相似材料试验成果

组数	配合比(质量比)					密度/(t·m ⁻³)	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
	重晶石粉	砂子	石膏	水	甘油			
1	11.13	11.13	1	3.07	0.44	2.20	0.17	34
2	13.37	8.90	1	3.07	0.44	2.30	0.19	35
3	14.82	7.45	1	3.07	0.44	2.37	0.20	36
4	15.95	6.35	1	3.07	0.44	2.40	0.23	38
5	16.72	5.57	1	3.07	0.44	2.41	0.23	38
6	7.45	14.82	1	3.68	0.44	1.94	0.10	38
7	5.57	16.72	1	3.68	0.44	1.90	0.10	25
8	8.90	13.35	1	3.27	0.44	2.07	0.13	29

对本次试验结果及长江科学院试验成果进行分析可知：以重晶石粉、砂（河砂）、石膏（普通粉刷石膏粉）、水和甘油为原料的相似材料密度分布在 1.9 ~ 2.41 t/m³，抗压强度分布在 0.10 ~ 0.42 MPa，弹性模量分布在 9 ~ 38 MPa，其抗压强度和弹性模量变化范围较窄，不能满足大部分基岩材料模型试验对相似材料的要求。

2.2 各因素敏感性分析

对相似材料配比试验结果和长江科学院试验成果采用直观分析法进行分析。直观分析法即为分析每一因素的极差，极差大小反映该因素选取不同水平变动对试验指标的影响大小。根据正交试验理论，将各因素相同水平下的指标取平均值，极差是指标在各水平中由最大值减去最小值求得，极差越大说明此因素的不同水平产生的差异越大，对试验结果影响越大，是重要因素。下面采用直观分析法对各因素对相似材料密度、抗压强度、弹性模量的影响进行敏感性分析。

2.2.1 密度

对配比试验结果中影响试件密度的各因素每个水平求均值和极差（表5）。从表5可看出B因素（重晶石粉/砂）的极差最大，其次是A因素（（重晶石粉+砂）/石膏），再次是C因素（水/石膏），各因素对密度的敏感性从大到小为B-A-C，说明B因素（重晶石粉/砂）对控制相似材料的密度起主要作用。和长江科学院试验成果对比后发现，材料的密度随着重晶石粉/砂的增大而增大，随着（重晶石粉+砂）/石膏的增大而增大，水/石膏对材料密度的影响很小。

表5 密度极差分析

组数	t/m ³		
	（重晶石粉+砂）/石膏	重晶石粉/砂	水/石膏
1	2.363	2.390	2.347
2	2.340	2.353	2.343
3	2.327	2.287	2.340
极差	0.360	1.030	0.007

2.2.2 抗压强度影响因素的敏感性分析

对配比试验结果中对试件抗压强度影响的各因素每个水平求均值和极差（表6）。从表6可以看出C因素（水/石膏）的极差最大，其次是A因素（（重晶石粉+砂）/石膏），再次是B因素（重晶石粉/砂），各因素对抗压强度的敏感性从大到小为C-A-B，说明C因素对控制相似材料的抗压强度起主要作用。和长江科学院试验成果对比后发现，材料的抗压强度随水/石膏的增大而减小，随（重晶石粉+砂）/石膏的增大而增大，重晶石粉/砂对材料的抗压强度影响很小。

表6 抗压强度极差分析

组数	MPa		
	（重晶石粉+砂）/石膏	重晶石粉/砂	水/石膏
1	0.35	0.31	0.24
2	0.30	0.30	0.29
3	0.25	0.28	0.36
极差	0.10	0.03	0.12

2.2.3 弹性模量

对配比试验结果中对试件弹性模量影响的各因素每个水平求均值和极差（表7）。从表7可以看出B因素（重晶石粉/砂）的极差最大，其次是A因素（（重晶石粉+砂）/石膏），再次是C因素（水/石膏），各因素对弹性模量的敏感性从大到小

为 B-A-C,说明 B 因素对控制相似材料的弹性模量起主要作用。和长江科学院试验成果对比后发现,虽然由极差分析法分析说明重晶石粉/砂对控制材料的弹性模量起主要作用,但其对弹性模量的影响却没有明显的规律性,(重晶石粉+砂)/石膏和水/石膏对材料的弹性模量也有一定的影响,但其影响亦没有规律性。

表7 弹性模量极差分析 MPa

组数	(重晶石粉+砂)/石膏	重晶石粉/砂	水/石膏
1	11.40	13.20	15.43
2	16.77	19.53	13.43
3	16.03	11.50	15.37
极差	5.37	8.03	2.00

3 α -高强石膏粉替代原普通粉刷石膏粉配比试验分析

普通粉刷石膏粉为二水石膏用炒锅或回转窑敞开装置锻炼细磨而成的 β 型半水石膏,石膏晶粒为杂乱针状,调成石膏浆体可塑需水量较大,硬化后孔隙率大,强度及弹性模量均较低,其初凝时间 ≥ 1 h,终凝时间 ≤ 8 h,抗折强度 3 MPa,抗压强度 5 MPa; α -高强石膏粉为二水石膏在蒸压釜 1.3 倍大气压下,124 $^{\circ}\text{C}$ 的饱和水蒸气下一定时间蒸练,生成的 α 型半水石膏,由于在较高压力下分解而形成,高强石膏晶粒较粗为短柱状,比表面积较小,调成石膏浆体的可塑需水量很小,因而硬化后孔隙率小,强度及弹性模量均较高,其初凝时间 ≥ 8 min,终凝时间 ≤ 30 min,2 h 抗折强度 7 MPa,抗压强度 15 MPa。

由以上相似材料配比的正交试验结果和长江科学院试验成果总结对比分析,可以看出采用普通粉刷石膏粉作为胶结材料,在满足相似材料密度要求的前提下,其抗压强度和弹性模量的可变范围较窄,不能满足大部分岩体材料模型试验对相似材料的要求。为扩大相似材料抗压强度和弹性模量的可变范围,笔者采用 α -高强石膏粉替代普通粉刷石膏粉先后进行了 4 组配比试验。

按照表 8 中配比制作试件,养护完成后对试件进行称重、抗压强度试验、弹性模量试验,

得到各配比材料的密度、抗压强度、弹性模量(表 9)。

表8 α -高强石膏粉为胶结材料的试验配合比(质量比)

组数	重晶石粉	砂子	α -高强石膏粉	水
1	4.89	2.45	1	1.57
2	2.17	1.09	1	0.75
3	3.65	1.83	1	1.02
4	12.29	4.10	1	3.15

表9 试配试验结果

组数	密度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度/MPa	弹性模量/MPa
1	2.00	1.10	113
2	2.61	3.67	369
3	2.35	1.37	254
4	2.32	0.24	12

从表 8、9 中可以看出:以 α -高强石膏粉作为胶结材料的相似材料其抗压强度和弹性模量比以普通粉刷石膏粉为胶结材料的相似材料有较大的提高。使以重晶石粉、砂子、石膏和甘油为原料的相似材料密度分布在 1.90 ~ 2.61 t/m^3 ,抗压强度分布在 0.10 ~ 3.67 MPa,弹性模量分布在 9 ~ 369 MPa,基本可以满足大部分基岩材料模型试验对相似材料的要求范围^[1-2]。

因此在试验时可以根据模型试验对相似材料物理力学参数的要求,从表 2 ~ 4 和表 8 ~ 9 中选择满足或近似满足相似要求的材料配比,或者以上述试验数据为基础进行更为精细的配合比试验,以确定满足相似要求的材料配比。

4 结论

1) 以长江科学院对重晶石粉、砂子、石膏(普通粉刷石膏)和甘油为原料的相似材料试验成果为基础,采用正交试验设计方法进行进一步的配比试验研究,发现相似材料的密度分布在 1.9 ~ 2.41 t/m^3 ,抗压强度分布在 0.10 ~ 0.42 MPa,弹性模量分布在 9 ~ 38 MPa,其抗压强度和弹性模量变化范围较窄,不能满足大部分基岩材料模型试验对相似材料的要求。

2) 对相似材料配比的正交试验成果采用极差分析法进行分析,分析各因素对相似材料密度、

抗压强度和弹性模量的敏感性,发现重晶石粉/砂对相似材料的密度起主要控制作用;水/石膏对相似材料的抗压强度起主要控制作用;重晶石粉/砂对相似材料的弹性模量起主要控制作用。同时,分析各因素对相似材料密度、抗压强度和弹性模量的影响规律。

3) 采用 α -高强石膏粉替代普通粉刷石膏粉作为胶结材料可以较大地提高相似材料的抗压强度和弹性模量,使以重晶石粉、砂子、石膏和甘油为原料的相似材料密度分布在 $1.9 \sim 2.61 \text{ t/m}^3$,抗压强度分布在 $0.10 \sim 3.67 \text{ MPa}$,弹性模量分布在 $9 \sim 369 \text{ MPa}$,基本可以满足大部分基岩材料模型试验对相似材料的要求。

参考文献:

- [1] 李晓红,卢义玉,康勇,等.岩石力学实验模拟技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [2] 林韵梅.实验岩石力学-模拟研究[M].北京:煤炭工业出版社,1984.
- [3] 刘亮亮,王海龙,刘江波,等.低强度相似材料正交配比试验[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2014,33(2):188-192.
- [4] 黄星星.锦屏一级水电站岩体相似材料的配比试验及回归分析[D].成都:成都理工大学,2012.
- [5] 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.
- [6] 杨仁树,张宇菲,杨立云,等.石膏类相似材料的配比试验研究[J].中国矿业,2013,22(10):125-130.
- [7] 栗东平,王谦源,张增祥,等.模拟岩性的相似试验研究[J].河北工程大学学报:自然科学版,2007,24(2):12-14.
- [8] 王慧敏.大口径钻进软质岩层相似材料模拟研究[D].长沙:中南大学,2009.
- [9] 徐敏,杨振宇,王山山.模型材料力学性能参数试验研究[J].工程与试验,2011,51(4):28-30.
- [10] 刘陆峰.软岩模拟及其大直径钻进技术研究[D].长沙:中南大学,2010.
- [11] 董金玉,刘召善,杨继红,等.均匀设计在物理模型试验相似材料配比试验中的应用[J].华北水利水电学院学报,2013,34(5):39-41.
- [12] 袁宗盼,陈新民,袁媛,等.地质力学模型相似材料配比的正交试验研究[J].防灾减灾工程学报,2014,34(2):197-202.
- [13] GB/T 50081—2002 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].

(本文编辑 郭雪珍)

· 消 息 ·

国家发改委出台补助办法力推长江经济带综合立体交通走廊建设

5月28日,国家发改委印发了《长江经济带综合立体交通走廊建设中央预算内投资安排工作方案》。

《方案》指出,为发挥中央资金对地方和社会资金的引导和带动作用,国家发改委从中央预算内投资中设立专项,用于补助长江经济带综合立体交通走廊相关项目建设。该专项实施年限为2015—2020年。

《方案》明确将采取投资补助方式安排中央预算内投资,支持范围为推动长江经济带发展的长江干支线路、铁路、公路、航空等重大交通建设项目以及弥补发展短板的长江干支线路港口“最后一公里”集疏运建设项目和长江经济带的全国性综合交通枢纽建设项目等。今年重点安排长江干支线路港口的铁路连接线、长江干支线路港口的道路连接线和长江经济带的全国性综合交通枢纽(节点城市)的综合交通枢纽建设项目。

《方案》还明确了今年的补助标准,将以总投资扣除征地拆迁费用为计算基数,东部地区项目按15%、中部地区项目按20%、西部地区项目按25%的标准予以补助,且补助单个项目的资金不超过2亿元。

(来源:中国交通建设集团有限公司)