

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.04.028

基于正交设计的岩石相似材料配比试验研究

李童悦, 赵佳美, 周洪正

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 为研究岩石类材料的力学性质,以实验室物理模拟试验为背景,选用石英砂、重晶石粉、石膏等为原料,基于正交试验设计方法开展相似材料配比试验研究。以骨料/胶结剂、石膏比、重晶石/骨料为3个控制因素,开展单轴压缩试验,获得不同配比相似材料力学指标。实验结果表明:不同配比相似材料的力学参数分布范围较大,能满足不同配比模拟试验对其的要求;材料抗压强度和弹性模量主要受石膏比影响;重晶石粉与骨料的比例对材料抗压强度影响较小,对弹性模量无明显控制作用。研究成果可为类似模型试验岩石类相似材料的配比选取提供参考。

关键词: 正交试验;相似材料;抗压强度;弹性模量;极差分析

中图分类号: TU458

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)04—0143—05

Mixture Proportioning Tests of Rock Similar Materials Based on the Orthogonal Methods

LI Tongyue, ZHAO Jiamei, ZHOU Hongzheng

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110819, China)

Abstract: Based on the orthogonal method, the proportioning tests of similar rock materials were carried out by taking the physical simulation as the background with the quartz, barite and gypsum as raw materials. The ratio of aggregate to cement, the ratio of water to gypsum, and the ratio of barite to aggregate were acting as three key factors in these tests. The uniaxial compression tests were carried out with a total of 16 groups of material mixture proportions to obtain the mechanical modulus of rock similar materials. The results showed that the distribution range of mechanical parameters of rock similar materials with different mixture proportions was dispersing enough to reach the requirements of proportioning tests; in which the ratio of water to gypsum was found had a major role in controlling the compressive strength and elastic modulus of materials; while the ratio of barite powder to aggregate has little effect on compressive strength and has no obvious effect on elastic modulus of materials.

Keywords: orthogonal methods; rock similar materials; compressive strength; elastic modulus; range analysis

随着国民经济的快速发展,基础设施建设与资源开采开始向深部进军。在采矿工程、水利水电工程及交通工程方面均有体现,另外在核废料处置及国防建设领域,也越来越多地涉及到一些新的深部岩石力学工程问题^[1-3]。

由于赋存条件的改变,深部岩体在开采扰动下的力学性质与浅部岩体有很大不同^[4-5]。另外,一些基于浅部工程的岩石力学理论在深部工程中的适用与否,也需要得到验证,如下洞室群的相互作用规

律,深部开采地表沉陷规律等。在目前的研究手段中,室内小尺寸岩石力学试验仅能研究简单应力路径下岩石的力学行为,无法考虑复杂的地质结构及真实开采扰动对天然岩体的影响;数值模拟技术也局限于其对初始条件、边界条件、破坏过程等的数学简化,对于地质条件复杂,破坏机理尚不明确的深部岩石力学问题的解决,也无法取得令人满意的结果。大型地质力学物理模型试验可以通过相似理论,将各种地质因素反映到模型之中,并可以在试件中预

先埋设监测设备,获取开挖过程中的应力、应变、声发射等信息,是一种解决深部岩石力学工程问题的可靠科学方法^[6-7]。早期对相似材料的研究主要集中在欧洲,如 Fumagalli 等^[8]研制的铅氧化物类相似材料。Glushikhin F P 等^[9]也研究出了相关的用于各种不同试验的相似材料。而国内较早对相似材料的研究有韩伯鲤等^[10]研制的组合材料 MIB 模型材料。相似试验所得成果,均被广泛用于相关实际工程或相关试验。

综上所述,岩土相似材料的研究是开展物理模拟试验的基础。相似材料则是基于相似理论,利用若干价廉易得的原材料,根据研究目标的不同,配制出性质(物理、力学、水理、热物理等)与原型材料相似的新型岩土材料。保证物理模型试验有意义的重要条件,即是保证原型材料的性质与物理模型试验材料相类似。因此开展岩石相似材料的配比试验意义重大^[11]。

本试验以实验室物理模拟试验为背景,基于正交试验设计方法,选取石英砂、重晶石粉、石膏等为原材料^[12-13],以骨料/胶结剂(骨胶比)、水膏比、重晶石/骨料为控制因素,开展岩石相似材料配比试验研究。

1 试验方案和相似材料制备、测试方法

1.1 试验方案

本试验选取石英砂、重晶石粉为骨料;以石膏作为胶结剂。

在正交设计试验中,选取 A、B、C 三个主要的因素作为正交设计的依据。通过此试验法,不仅试验点分布均匀,且减少了工作量^[16-18]。

其中,A 因素为骨料与胶结剂的比例,B 因素为水膏比,C 因素为重晶石与骨料的比例。因素 A 设计 4 个水平,分别为 1、2、3、4;因素 B 设置 4 个水平分别为 100.0%、87.5%、75.0%、62.5%;对因素 C 同样设置 4 个水平分别为 10%、15%、20%、25%,见表 1。

表 1 相似材料正交设计水平

水平	骨胶比 A	水膏比 B	重晶石/骨料 C
1	1	1.000	0.10
2	2	0.875	0.15
3	3	0.750	0.20
4	4	0.625	0.25

通过正交设计法,选用 3 因素 4 水平的正交设

计方案,L16(4³),共 16 组不同配比,如表 2。每组配比对应 3 个试件,共 48 个试件。表中骨胶比为骨料与胶结剂的比例。

表 2 相似材料配比方案

NO.	骨胶比 A	水膏比 B	重晶石/骨料 C
1	1	1.000	0.10
2	1	0.875	0.15
3	1	0.750	0.20
4	1	0.625	0.25
5	2	1.000	0.15
6	2	0.875	0.10
7	2	0.750	0.25
8	2	0.625	0.20
9	3	1.000	0.20
10	3	0.875	0.25
11	3	0.750	0.10
12	3	0.625	0.15
13	4	1.000	0.25
14	4	0.875	0.20
15	4	0.750	0.15
16	4	0.625	0.10

1.2 制备方案

本试验采用标准铸铁试模制作 $\Phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的圆柱形标准试件。单轴压缩试验使用 HUMBOLDT 试验设备。

在试样制作过程中,需加入适量缓凝剂以调控凝结时间。经多次试验表明,缓凝剂含量为 0.8%~1.2% 时,相似材料凝结时间最佳。制备相似材料试件可按下列步骤进行:

(1) 准备原材料,并清洗铸铁试件模型,待干燥后,涂抹润滑剂(石膏选用特级精品石膏,硫酸钙含量 $\geq 96\%$,石英砂选择 40 目~70 目)。

(2) 以上述试验方案的 3 个因素所确定的各种材料的质量比例为依据,依次称取所需的石膏、石英砂、重晶石粉、硼砂及水。

(3) 将石膏、石英砂、重晶石粉搅拌充分后,制备硼砂的水溶液。

(4) 将水溶液缓慢倒入混合物中,并再次搅拌均匀。

(5) 将混合溶液倒入提前准备好的铸铁试模中,捣实防止产生气泡影响试验效果,待试样完全成型后脱模。

(6) 在自然状态下(夏季)养护 15 d(冬季温度较低,可相应延长养护时间),即制成标准试件,每组

3 个试件。

1.3 测试方法

将试样打磨至接近标准圆柱体后,用游标卡尺测量其几何尺寸,之后开展单轴压缩试验,获得试件的应力-应变曲线,并得出不同配比下相似材料试样的抗压强度和弹性模量等力学参数。

图 1 给出了相似材料试样破坏时的典型形态。

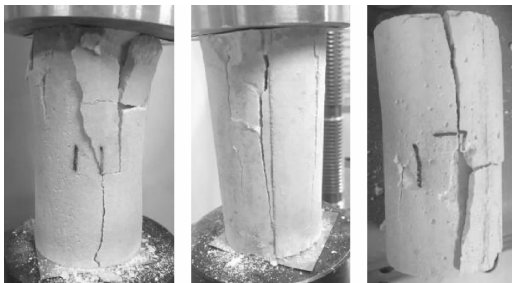


图 1 试样破坏后的典型形态

2 试验结果与分析

2.1 单轴压缩试验结果

图 2 给出了当骨胶比为 1 时,4 组试件的应力-应变曲线。

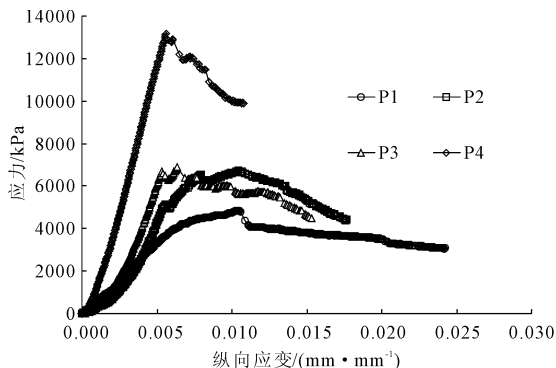


图 2 骨胶比为 1 时应力-应变曲线

由图 2 可见,每一条曲线均包括上升和下降两个部分。而其中上升段又可分为三部分,第一阶段为应力-应变曲线接近直线的弹性阶段,当应力达到比例极限,进入第二阶段。该阶段裂纹稳定发展,直到达到临界点。在此之后的第三阶段裂缝快速发展直至峰值点,该阶段不稳定,此阶段的峰值则作为每组试件单轴抗压试验的抗压强度。而达到峰值后,便开始进入下降阶段。

图 3 给出了当骨胶比为 2 时,4 组试件的应力-应变曲线。横向观察每一条曲线,可发现其变化趋势与骨胶比为 1 时相类似。再对这 8 组曲线进行纵向比较,可发现随着各个因素变化,对曲线上升

段、下降段的形状均有较大影响。

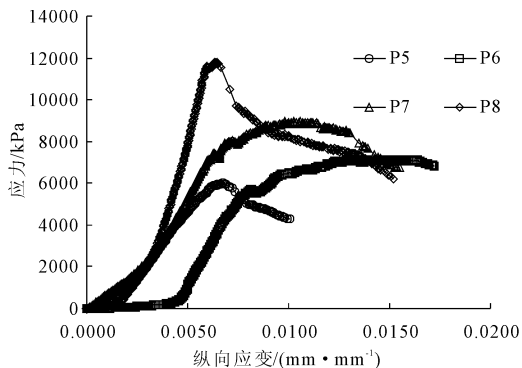


图 3 骨胶比为 2 时应力-应变曲线

当重晶石含量较低时(重晶石与骨料比小于 0.2),上升时的第三阶段及下降段,坡度较缓。即应力变化相同幅度时,变形较大,故延性较好;反之,则延性较差。

试件的抗压强度随水膏比的减小而呈增大趋势,仅通过应力-应变曲线无法直观分析,之后会对该影响进行敏感性极差分析。

通过对比 16 组数据可知,单轴抗压强度分布范围较大,在 4.83 MPa ~ 11.92 MPa 之间,弹性模量在 645.3 MPa ~ 3 034.5 MPa 之间。能够满足不同岩体模拟试验对岩体相似材料的要求,也可为后期相似材料配制试验提供依据。

2.2 物理参数敏感性分析

根据正交试验理论,将各个因素相同水平结果平均,由平均水平中的最大值减去最小值求得极差。若该因素极差值大,则此因素下的不同水平导致的试验结果差异较大,说明该因素为重要因素,对试验控制指标影响明显。

2.2.1 抗压强度敏感性极差分析

研究各因素对抗压强度的影响时,根据对三个因素的极差分析,绘制出各因素对抗压强度影响的直观分析图,如图 4 所示。

从图 4 中可分析得:(1) 三个因素 A、B、C 的极差分别为 1 960、5 012 和 1 463,对抗压强度影响的重要性依次为 $R_B > R_A > R_C$;(2) 抗压强度主要受因素 B(水膏比)的影响,受因素 A(骨料/胶结剂)的影响次之,几乎不受因素 C 的影响。

2.2.2 弹性模量敏感性极差分析

研究各因素对弹性模量的影响时,根据对三个因素的极差分析,绘制出各因素对弹性模量影响的直观分析图,如图 5 所示。

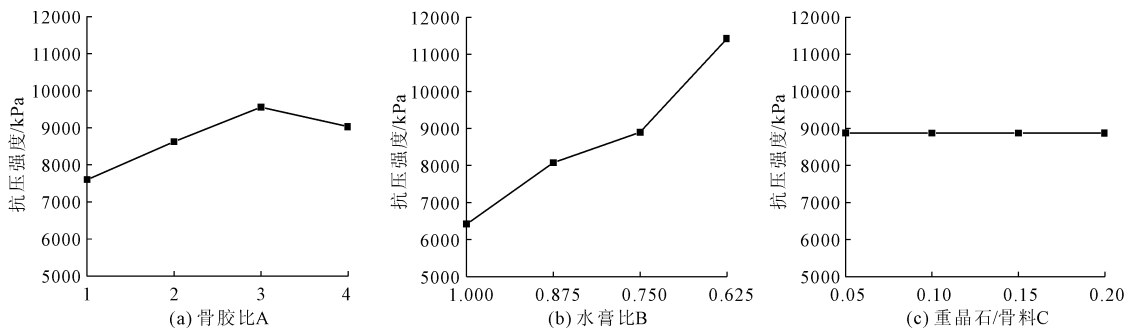


图 4 抗压强度敏感性因素分析

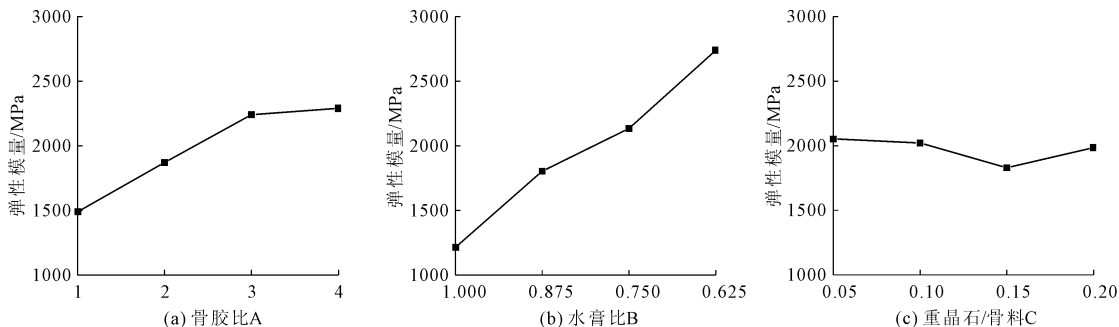


图 5 弹性模量敏感性因素分析

从图 5 中可以分析出:(1) 三个因素 A、B、C 的极差分别为 801 271、1 525 780 和 223 216,对弹性模量影响的重要性依次为 $R_B > R_A > R_C$,所以弹性模量对于因素 B 的变化最敏感;(2) 弹性模量主要受因素 B 的影响,受因素 A 的影响次之,几乎不受因素 C 的影响。

2.3 骨胶比与石膏比对各力学指标的影响

通过极差分析法对各因素影响材料性质的敏感性进行分析后可发现,重晶石与骨料的比例与抗压强度及弹性模量无明显关系。故在此进一步分析,骨料与胶结剂的比例及石膏比对各力学指标的影响。

2.3.1 骨料/胶结剂对各力学指标的影响

图 6 中四条折线分别表示当石膏比为 1:1、7:8、3:4、5:8 时,相似材料的抗压强度随骨胶比的变化规律。

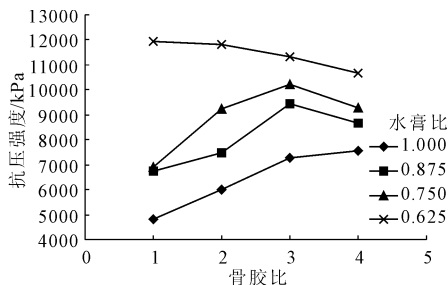


图 6 骨料/胶结剂对抗压强度的影响

骨胶比不大于 3 时,石膏比为 1:1、7:8、3:4 的三组试件其抗压强度随着骨胶比的增大而增大,可

近似认为呈线性关系,而石膏比 5:8 的曲线却随着骨胶比的增大而减小;当骨料与胶结剂比例大于 3 时,骨胶比对抗压强度起明显抑制作用,除石膏比为 1:1 的曲线上升幅度变缓外,其他三组均呈现下降趋势。

图 7 表示当石膏比为 1:1、7:8、3:4、5:8 时,相似材料的弹性模量随骨胶比的变化规律。从图 7 中可以分析出,石膏比为 1:1、7:8、3:4 的三组曲线,试件的弹性模量随着骨胶比的增大而增大;而石膏比为 5:8 的曲线,试件的弹性模量随着骨胶比的变化影响不明显。若具体讨论,还需设置多组配比再次进行研究试验。

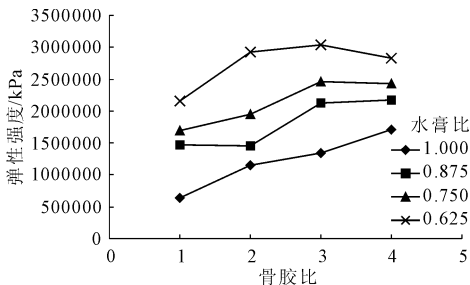


图 7 骨料/胶结剂对弹性模量的影响

2.3.2 石膏比对各力学指标的影响

图 8 表示当骨料与胶结剂比例为 1:1、2:1、3:1、4:1 时,相似材料的抗压强度随石膏比的变化规律。从图 8 中可以分析出:当骨料与胶结剂的比值一定

时,相似材料试件的抗压强度随着水膏比增加而不断降低。

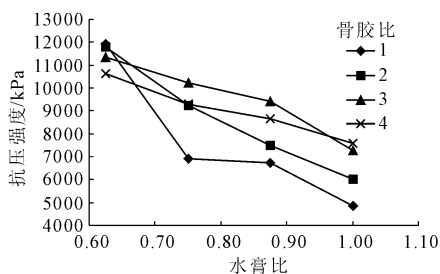


图8 水膏比对抗压强度的影响

通过四条曲线的纵向对比不难发现,当骨胶比越小时,水膏比的变化对抗压强度的变化更明显;反之亦然。

图9表示当骨料与胶结剂比例为1:1、2:1、3:1、4:1时,相似材料的弹性模量随水膏比的变化规律。从图9中可以分析出:当骨料与胶结剂的比值一定时,相似材料试件的弹性模量随着水膏比增加而不断降低。

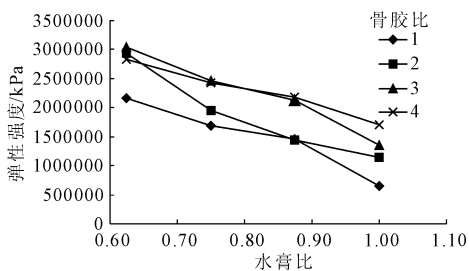


图9 水膏比对弹性模量的影响

综合以上分析可以得出:(1)当骨胶比一定时,相似材料试件的抗压强度和弹性模量随着水膏比的增大而不断降低;(2)当骨胶比越小时,水膏比的变化对抗压强度的变化越明显,反之亦然;(3)当水膏比为1:1、7:8、3:4时,相似材料试件的抗压强度和弹性模量随着骨料与胶结剂的比值增大而不断增加;当水膏比为5:8时,试件的抗压强度和弹性模量随骨胶比的增大而逐渐减小。

3 结论

应用正交设计方法,以骨料/胶结剂、水膏比、重晶石/骨料为3个因素,每个因素设置4个水平,设计了16组材料配比试验,对每组试件进行尺寸测量,并进行单轴压缩试样。得到不同配比下,相似材料的抗压强度及弹性模量,再对相似材料物理力学参数的各配比因素进行敏感性分析,得到相应的结论。

参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(16):2803-2813.
- [2] 吴世勇,王 鸽.锦屏二级水电站深埋长隧洞群的建设工程中的挑战性问题[J].岩石力学与工程学报,2010,29(11):2161-2171.
- [3] Husen S, Kissling E, von Deschanden A. Induced seismicity during the construction of the Gotthard Base Tunnel, Switzerland: hypoce-nter locations and source dimensions[J]. Journal of Seismology, 2012,16(2):195-213.
- [4] 谢和平,高峰,鞠 杨.深部岩体力学研究探索[J].岩石力学与工程学报,2015,34(11):2161-2178.
- [5] 冯夏庭,吴世勇,李邵军,等.中国锦屏地下实验室二期工程安全原位综合监测与分析[J].岩石力学与工程学报,2016,35(4):649-657.
- [6] 朱维申,张乾兵,李 勇,等.真三轴荷载条件下大型地质力学模型试验系统的研制及其应用[J].岩石力学与工程学报,2010,29(1):1-7.
- [7] 董丛新,廖崇高,潘 凯,等.岩体结构面力学模型制作新方法试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(4):19-23.
- [8] 黄秋枫.地质力学模型试验的相似材料[J].现代矿业,2009,25(3):50-53.
- [9] Glushikhin F P, Kutsnetsov G N, Shklyarsky M F, et al. Modeling in Geomechanics[M]. Moscow: A A Balkema Publishers, 1993:1-50.
- [10] 韩伯鲤,陈霞龄.岩体相似材料的研究[J].武汉大学学报(工学版),1997,30(2):6-9.
- [11] 史小萌,刘保国,肖 杰.水泥和石膏胶结相似材料配比的确定方法[J].岩土力学,2015,36(5):1357-1362.
- [12] 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.
- [13] 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,2012:1-10.
- [14] 张强勇,李术才,李 勇,等.地下工程模型实验新方法新技术及工程应用[M].北京:科学出版社,2012.
- [15] 郑 涛.岩土工程模型试验的理论与方法[J].矿业快报,2008,24(3):18-21.
- [16] 高富强,王兴库.岩体力学参数敏感性正交数值模拟试验[J].采矿安全与工程学报,2008,25(1):95-98.
- [17] 王益萍,周荣超.基于正交试验的边坡稳定性参数敏感性分析[J].盐城工学院学报(自然科学版),2007,20(4):67-69.
- [18] 刘福东,李 毅,刘 焯.单因素法和正交试验法在参数敏感性分析中的应用[J].水利与建筑工程学报,2015,13(6):85-88.