

DOI : 10.16285/j.rsm.2015.01.011

大型地下洞室群地震模拟振动台试验研究() : 岩体相似材料配比试验

刘晓敏^{1,2}, 盛 谦¹, 陈 健¹, 柯文汇¹, 杨继华³

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071 ;
2. 中国建筑第六工程局有限公司, 天津 300451 ; 3. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘 要 : 结合大型地下洞室群地震模拟振动台模型试验研究, 根据相似原理, 利用正交试验和二次细化试验相结合的试验方法, 对岩体相似材料进行配比试验。选用铁精粉、重晶石粉和石英砂作为骨料, 石膏为胶凝材料, 甘油为调节剂。正交试验以相似材料的密度、抗压强度和变形模量为控制指标, 通过极差分析得到各影响因素的重要程度, 并在此基础上进行二次细化试验, 二次细化试验增加测试相似材料的抗拉强度。这种组合试验方法可通过较少的试验次数得到符合相似指标要求的材料配比, 大大提高了配比试验的效率。试验得出的相似材料配比与物理力学指标的变化规律及运用组合试验高效确定具体配比的方法, 对类似工程动静力模型试验相似材料模拟具有一定的参考意义。

关 键 词 : 振动台试验 ; 配比试验 ; 相似材料 ; 正交试验 ; 二次细化试验

中图分类号 : TU 457

文献标识码 : A

文章编号 : 1000 - 7598 (2015) 01 - 0083 - 06

Seismic shaking table test for large-scale underground cavern group () : Proportioning test on similar materials of surrounding rock

LIU Xiao-min^{1,2}, SHENG Qian¹, CHEN Jian¹, KE Wen-hui¹, YANG Ji-hua³

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. China Construction Sixth Engineering Division Co., Ltd., Tianjin 300451, China;
3. Yellow River Engineering Planning and Design Co., Ltd., Zhengzhou, Henan 450003, China)

Abstract: This paper is based on the findings of shaking table test of underground caverns and the similarity principle. Proportioning tests of similar materials of surrounding rock are performed by taking advantages of the combination of orthogonal experiment and secondary refinement test. Iron ore powder, barite powder and quartz sand are the main materials. Gypsum powder is glue. Glycerin is regulator. The density, compressive strength and deformation modulus of the similar materials are chosen as the four control indicators in the orthogonal experiment. The importance of each factor is obtained using polar difference analysis method. The design of the secondary refining experiment is decided with the orthogonal experiment results. Tensile strength is additionally tested in the secondary refining experiment. The similar materials that satisfy the similar relationship can be developed efficiently with the combining test methods. The variation between the proportion of similar material and the physical parameters and the efficient method of combination test can offer a reference to model test of the similar project in which proportioning test of similar material is also required.

Key words: shaking table test; proportioning test; similar material; orthogonal experiment; secondary refining experiment

1 引 言

振动台试验可以实时再现真实地震或人工地震作用全过程, 是研究工程抗震的一种有效手段^[1]。但由于振动台台面尺寸、承载能力和经济等原因,

大型建筑物只能根据相似理论采用缩尺模型, 为使模型试验结果能尽量真实地反映原型结构的性状, 必须考虑原型与模型的相似性^[2]。原型与模型相似, 不仅仅要求几何形状相似, 而且要求模型试验中所包含的各项物理量或主要物理量应与原型相似^[3]。

收稿日期: 2013-01-24

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No. 2015CB057905); 国家自然科学基金重大研究计划集成项目(No. 91215301); 云南联合基金重点项目(No. U1402231)。

第一作者简介: 刘晓敏, 男, 1983 年生, 博士, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: hbulxm@126.com

因此,正确选择相似材料并能确定满足相似关系的配比往往是模型试验成功与否的关键^[4]。

在配比试验中骨料成分很少采用单一材料,多采用粗、细骨料相结合的方式以得到较大的密度和较强的摩擦特性。各骨料占总骨料的比例、胶结剂含量、其他辅助材料含量都会影响模型材料的物理力学特性。需要控制的模型材料物理力学特性通常包括材料密度、抗压强度、抗拉强度和变形模量等。针对配比试验中影响因素较多,需要满足的相似控制指标较多,若采用全面试验,试验次数多得惊人。本次试验采用正交试验和二次细化试验相结合的试验方法,由正交试验得到各影响因素的重要程度,在分析正交试验得到规律的基础上进行二次细化试验,即可通过较少的试验次数得到符合相似指标要求的材料配比,大大提高了配比试验的效率。

2 相似原理

模型试验的理论基础是相似理论,只有掌握并正确运用相似理论的基本原理,才能保证模型试验取得预期的结果^[4]。在动力问题中,可以通过弹性力学动力基本方程或量纲分析来确定各物理量之间的关系^[5]。定义 C 为原型与模型之间物理量的相似比,由平衡、几何、物理三大基本方程及边界条件可以推出在线弹性范围内基本动力相似判据为: $C_\varepsilon C_E C_l^{-1} = C_\rho C_g = C_\rho C_a$ 。这里, C_ε 、 C_E 、 C_l 、 C_ρ 、 C_g 、 C_a 分别为应变、变形模量、长度、密度、重力加速度和加速度相似常数。在振动台试验方案设计中应尽量保证应变、加速度不失真,即 $C_a = C_g = C_\varepsilon = 1$,则长度相似常数 C_l 、变形模量相似常数 C_E 和密度相似常数 C_ρ 应满足 $C_E = C_l C_\rho$ 。通常试验中,密度相似常数 $C_\rho \approx 1$,则长度相似常数 C_l 和变形模量相似常数 C_E 数值近似相等。以密度相似常数 C_ρ 和长度相似常数 C_l (或变形模量相似常数 C_E) 为基本未知量,可推导出其余物理量相似常数需要满足的具体条件: $C_\sigma = C_E C_\varepsilon = C_E$, $C_X = C_l C_\varepsilon = C_l$, $C_t = C_l C_E^{-0.5} C_\rho^{0.5} \approx C_l^{0.5}$ 等。这里, C_σ 、 C_X 、 C_t 分别为应力、位移、时间相似常数。

3 振动台试验需要的模型材料指标

3.1 依托工程概况

振动台试验以在建的大渡河流域大岗山水电站大型地下洞室群为依托工程。大岗山水电站坝址位于四川省大渡河中游上段雅安市石棉县挖角乡境内,为大渡河干流规划的 22 个梯级中的第 14 个梯级电站。地下洞室群处在地震活动强烈的高山峡谷

地区,地震基本烈度为 Ⅵ 度,工程区域地形地貌复杂。水电站所在地区断裂构造发育,地震活动频繁。地下厂房系统采用主副厂房、主变室、尾水调压室三大洞室平行布置,岩柱厚度均为 47.50 m。主厂房开挖尺寸为 226.00 m×30.80 m×73.78 m,主变室开挖尺寸为 144.00 m×18.80 m×25.10 m,尾水调压室长为 130.00 m,净跨度为 20.50~24.00 m,室高为 75.08 m。

3.2 模型尺寸与几何相似常数

根据需模拟工程范围、振动台的台面尺寸和承载能力等控制因素,确定几何相似常数 $C_l = 150$,则模型的大小为 2.60 m×1.40 m×1.60 m (长×宽×高)。鉴于篇幅问题,具体确定方法在本次试验系列论文()中给出。

3.3 相似材料的指标

在地下洞室群振动台模型试验中,首先根据实际配比材料的密度,确定密度相似常数 $C_\rho \approx 1$,几何相似常数 $C_l = 150$,为满足 $C_E = C_l C_\rho$ 关系,取变形模量相似常数 $C_E \approx 150$,应力及强度相似常数 $C_\sigma \approx 150$ 。原型物理力学指标和由相似关系求得的模型材料应满足的物理力学指标见表 1。

表 1 原型和模型材料物理力学参数
Table 1 Physico-mechanical parameters of prototype and model materials

材料	密度 /(g/cm ³)	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	变形模量 /GPa
原型	2.65	80.000	8.000	24.00
模型	2.65	0.533	0.053	0.16

4 相似材料的选取

前人对模型试验岩体相似材料的选取进行了大量研究,主要包括:采用重晶石粉作为骨料,以石膏、机油或液体石蜡油作为胶结剂,其他材料如石英砂、石灰石粉、氧化锌粉、立德粉、铁粉、膨润土粉、甘油等作为调节重度和变形模量的辅助材料^[6-7];以石膏、水泥和水为黏结剂,以不同粒径级配的石英砂为主填充料的材料^[8];以加膜铁粉和重晶石粉为骨料,以松香为胶结剂^[9];以磁铁精矿粉和河砂为主料,以石膏或水泥为黏结剂^[10];以铁矿粉、重晶石粉、石英砂为骨料,松香、酒精溶液作为胶结剂,石膏作为调节剂^[11]。

根据相似原理可知,在几何相似常数 C_l 一定时,模型材料密度比原型小,会导致模型材料变形模量、应力和强度等参数降低的倍数超过几何相似常数所确定的缩小倍数,使得满足相似关系的模型

材料的强度、变形等参数变得更低，会加大后续振动台试验模型制作和应变测量的困难。鉴于此，相似材料的密度应尽量大于原型。通过文献调研，要得到密度大于 2.4 g/cm^3 的相似材料，多是加入高密度的骨料^[110-12]，如铁精粉、加膜铁粉等。本次配比试验亦采用加入铁精粉来提高模型材料密度。

以石膏为胶结物的相似材料，其强度指标和变形指标的调节范围大，且制作工艺简单，是应用较为广泛的一种相似材料^[6]。本次试验选用市场上常见且价格低廉的铁精粉、重晶石粉为细骨料、石英砂为粗骨料，石膏为胶凝材料，甘油为调节剂。其中，铁精粉粒径为 $74 \mu\text{m}$ ，重晶石粉粒径为 $44 \mu\text{m}$ ，石英砂粒径为 $420 \sim 840 \mu\text{m}$ ，3 种骨料具有物理、化学性质稳定，重度较大等特点。

5 正交试验设计及结果分析

正交试验设计是研究多因素、多水平的一种设计方法，它是根据正交性从全面试验中挑选出部分具有代表性的点进行试验，这些点具有均匀和整齐的特点。正交试验设计是基于方差分析模型的部分因子设计方法，经常用来对试验进行统筹安排，以便尽快找出试验中各因素对试验结果的影响程度，是一种高效率、快速、经济的试验设计方法^[13]。

5.1 试验设计

本次试验取四因素三水平，若要进行全面试验，则需要进行 $3^4 = 81$ 种组合的试验。按 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验，则只需进行 $3^2 = 9$ 种组合的试验，并且还能很好地代表全面试验的结果。

在进行相似材料配比时，根据振动台模型试验的具体情况确定以单轴抗压强度、变形模量与试件密度作为主要考核指标。选取的 4 个影响因素如下：

因素 A：铁精粉和重晶石粉的质量之比；因素 B：石英砂的质量与铁精粉、重晶石粉质量和之比，即粗骨料与细骨料质量比；因素 C：石膏与总骨料的质量之比；因素 D：甘油与总骨料的质量之比。4 种因素的 3 个具体水平值见表 2。

表 2 4 种影响因素水平值
Table 2 Level values of four influential factors

水平	因素			
	A	B	C	D
1	1:1.0	15:100	2:100	0:100
2	1:1.5	20:100	7:100	2:100
3	1:2.0	25:100	12:100	4:100

根据四因素三水平正交表和相似材料配比试验方案因素水平表确定的正交试验点列于表 3。

5.2 试验方法

在初选正交试验阶段，只制作抗压试件，即可测定试件的密度、抗压强度和变形模量。抗压试件为直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体。按 $L_9(3^4)$ 正交表进行试验需进行 9 种组合的试验，每种组合制作 4 个试件，共计 36 个抗压试件。在结果分析中取每组 4 个试件测得结果的平均值作为这一试验号的结果值。

表 3 相似材料配比 $L_9(3^4)$ 正交试验及结果
Table 3 $L_9(3^4)$ orthogonal tests and results of proportioning for similar materials

试验号	因素 A	因素 B	因素 C	因素 D	ρ /(g/cm^3)	σ_c /MPa	E /MPa
1	1:1.0	15:100	2:100	0:100	3.16	0.27	95.18
2	1:1.0	20:100	7:100	2:100	3.11	0.40	38.96
3	1:1.0	25:100	12:100	4:100	3.09	0.45	56.17
4	1:1.5	15:100	7:100	4:100	3.10	0.40	48.90
5	1:1.5	20:100	12:100	0:100	2.83	0.45	189.10
6	1:1.5	25:100	2:100	2:100	3.08	0.28	53.10
7	1:2.0	15:100	12:100	2:100	2.88	0.40	72.64
8	1:2.0	20:100	2:100	4:100	3.08	0.36	41.07
9	1:2.0	25:100	7:100	0:100	2.87	0.39	110.19

模型材料抗压试验在土工三轴剪力仪上完成的，本次试验为单轴抗压试验，试验中只在试件轴向加压，记录加压过程中试件轴向应力值、轴向变形值和试件破坏时的应力值，进而求得试件的变形模量 E 和抗压强度 σ_c 。试验设备与抗压试件典型破坏形态见图 1。

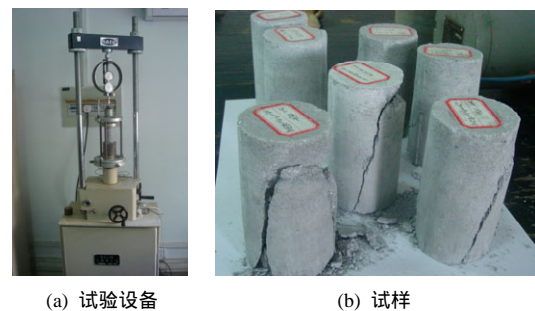


图 1 单轴抗压试验

Fig.1 Uniaxial compressive test set up and tested samples

把试验测得相似材料的密度、抗压强度和变形模量一同计入 $L_9(3^4)$ 正交表中（见表 3）。

5.3 试验结果分析

5.3.1 密度的正交试验结果分析

通过对模型试件的密度正交设计分析，得到了如图 2 的影响材料密度的趋势图，横坐标分别表示各影响因素对应的 3 个水平值。由图 2 可以看出，

因素 A、因素 C 以及因素 D 对模型试件的密度都有明显影响，而因素 B 影响较小。在正交表 4 中，同样可以求得各因素的极差 R ，通过对比极差大小，可以看出各因素对模型试件密度影响的主次顺序为： $A > C > D > B$ 。

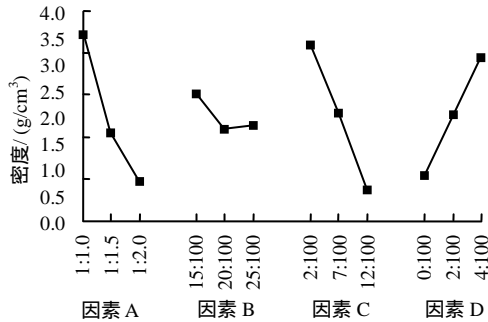


图2 各影响因素对密度的贡献效果图
Fig.2 Effect of four factors on density

表4 正交试验中材料密度结果分析
Table 4 Results of material density in orthogonal tests

影响因素	材料密度/(g/cm³)			极差 R
	K_1	K_2	K_3	
A	3.12	3.00	2.94	0.18
B	3.05	3.01	3.01	0.04
C	3.11	3.03	2.93	0.18
D	2.95	3.02	3.09	0.14

注： K_1 、 K_2 、 K_3 表示水平组数。

随着铁精粉含量的减少，材料的密度明显减小，这是因为铁精粉的密度远大于其他骨料，铁精粉在材料配比中主要起加大材料密度的作用；随着石膏含量的增加，材料的密度明显减小，这是因为石膏含量增加后，用水量明显增加，材料干燥后内部空隙变多，密度就会减小；类似的加入甘油后用水量会减少，材料干燥后密度就会增大。

5.3.2 抗压强度的正交试验结果分析

通过对模型试件的单轴抗压强度正交设计分析，得到了如图 3 所示的影响材料抗压强度的趋势图，横坐标分别表示各影响因素对应的 3 个水平值。由图可以看出，因素 C 对模型试件的单轴抗压强度有明显影响，而因素 A、因素 B 以及因素 D 影响均较小。同样，在正交表 5 中，可以求得各因素的极差 R ，通过对比极差大小，可以看出各因素对模型试件单轴抗压强度影响的主次顺序为： $C > B > D > A$ 。

随着石膏含量的增加，材料的抗压强度明显增大，这与选择石膏为胶结剂的一般规律一致。其他 3 个因素的影响都不显著。

5.3.3 变形模量的正交试验结果分析

通过对模型试件的变形模量正交设计分析，得

到了如图 4 的影响材料变形模量的趋势图，横坐标分别表示各影响因素对应的 3 个水平值。由图可以看出，因素 D、因素 A 以及因素 C 对模型试件的变形模量均有明显影响，而因素 B 影响较小。在正交表 6 中，同样可以求得各因素的极差 R ，通过对比极差大小，可以看出各因素对模型试件变形模量影响的主次顺序为： $D > C > A > B$ 。

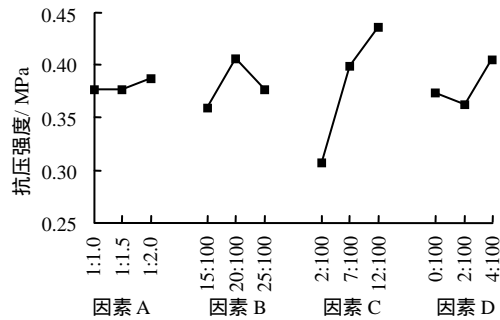


图3 各影响因素对单轴抗压强度的效果图
Fig.3 Effect of four factors on uniaxial compressive strength

表5 正交试验中材料单轴抗压强度结果分析
Table 5 Results of uniaxial compressive strength in the orthogonal tests

影响因素	抗压强度/MPa			极差 R
	K_1	K_2	K_3	
A	0.374	0.375	0.386	0.012
B	0.357	0.404	0.374	0.047
C	0.305	0.397	0.434	0.129
D	0.372	0.361	0.403	0.042

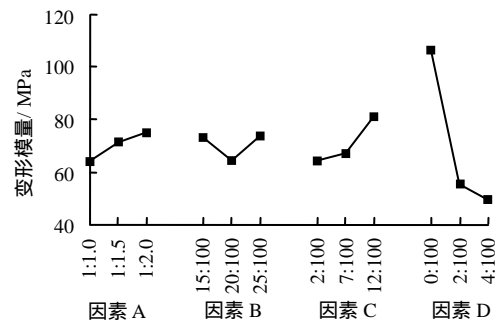


图4 各影响因素对变形模量的贡献效果图
Fig.4 Effect of four factors on deformation modulus

表6 正交试验中材料变形模量结果分析
Table 6 Results of deformation modulus in orthogonal tests

影响因素	变形模量/MPa			极差 R
	K_1	K_2	K_3	
A	63.44	97.03	74.63	33.59
B	72.24	89.71	73.15	17.47
C	63.12	66.02	105.97	42.85
D	131.49	54.90	48.71	82.78

甘油从无到有，材料的变形模量明显减小，且

随着甘油含量的增多，材料的变形模量继续减小，这与很多文献中提到甘油降低变形模量的作用是一致的；随着石膏含量的增加，材料的变形模量有所提高，石膏作为胶结剂，增加其含量，变形模量也会随强度的增加而相应增加；随着重晶石粉含量的增加，材料的变形模量有所提高，相对于其他骨料，重晶石粉具有一定的黏结性，在改变材料变形模量中所起的作用类似于胶结剂石膏。二次细化试验中，石膏含量为 0 时，模型材料还具有一定的单轴抗压强度，正是因为重晶石粉起到了弱胶结剂的作用。

6 二次细化试验

6.1 试验设计

根据正交配比试验得到的结果，并借鉴其他配比试验经验，进行二次细化试验的方案设计。铁精粉与重晶石粉含量比值主要影响配比材料的密度，对材料的抗压强度与变形模量影响很小，故在二次试验中，固定铁精粉与重晶石粉含量比值，取铁精粉与重晶石粉质量比为 1:1.5；石英砂的含量对配比材料的密度，抗压强度与变形模量影响均很小，但振动台试验中，需要用粘贴应变片的应变测量围岩内部应变，考虑到应变片的粘贴效果，应尽量减少粗骨料的含量，即取石英砂与细骨料质量比为 0.15:1；甘油的含量主要影响配比材料的变形模量，利用变形模量与抗压强度比值 E/σ_c 确定甘油含量。从表 1 中可知，原型中 $E/\sigma_c \approx 300$ 。由正交试验得：甘油含量为 0 时， $E/\sigma_c \approx 355$ ；甘油占总骨料质量 2% 时， $E/\sigma_c \approx 153$ ，故二次试验中去除甘油成分。

由正交试验可知：石膏含量对配比材料密度、变形模量和抗压强度都有较大影响，二次细化试验主要考虑石膏变化对材料特性的影响，石膏从 0 增加到 60 g，每 10 g 一级，共 7 个等级，检验材料物理参数的变化范围是否覆盖住由相似关系得到的材料物理参数。二次细化试验增加测量配比材料的抗拉强度。

6.2 试验方法

二次细化试验除制作抗压试件外需要制作抗拉试件。由于直接进行拉伸试验在准备试件方面需要花费大量的人力、物力和时间，所以选用劈裂试验代替直接抗拉试验。抗拉试件为直径 60 mm、高 60 mm 圆柱体。

二次细化试验与正交试验一致，每一组制作 4 个试件，抗压、抗拉试件均做 7 组，共计 28 个抗压试件和 28 个抗拉试件。劈裂试验同样是在土工三轴

剪力仪上完成的。抗拉试验试件的典型破坏形态见图 5。



图 5 劈裂试验

Fig.5 Indirect tension test

6.3 试验结果分析

通过试验测得相似材料的密度、抗压强度、抗拉强度和变形模量等结果汇总于表 7。

表 7 相似材料的力学指标

Table 7 Mechanical indices of similar materials

铁精粉:重晶石粉: 石英砂:石膏:水/g	密度 /(g/cm ³)	抗压强度 /kPa	抗拉强度 /kPa	变形模量 /MPa
176:264:66:0:50	3.081	210	23	71.8
176:264:66:10:50	2.940	360	38	83.1
176:264:66:20:55	2.895	440	49	92.3
176:264:66:30:55	2.872	480	57	125.2
176:264:66:40:60	2.839	520	65	142.6
176:264:66:50:60	2.794	560	77	172.4
176:264:66:60:60	2.771	610	85	182.7

通过表 7 可以得出：固定各骨料成分不变，石膏从 0 增加到 60 g，抗压强度由 210 kPa 增加到 610 kPa，增大 2.90 倍；抗拉强度由 23 kPa 增加到 85 kPa，增大 3.70 倍；变形模量由 71.8 MPa 增加到 182.7 MPa，增大 2.54 倍。随着石膏含量的增加，配比材料的密度由 3.081 g/cm³ 下降到 2.771 g/cm³。

对比二次细化试验所得的模型力学特性参数与模型材料需满足的力学特性参数，选择铁精粉:重晶石粉:石英砂:石膏:水=176:264:66:50:60 的配比作为地下洞室群振动台模型试验模型材料的配比。由相似关系导出的相似材料参数和确定配比得到的相似材料参数列于表 8。

表 8 两种方法得到的相似材料参数对比

Table 8 Comparisons of similar material parameters derived with two different methods

材料参数	密度 /(g/cm ³)	抗压强度 /kPa	抗拉强度 /kPa	变形模量 /MPa
原型	2.650	80 000	8 000	24.0
相似关系	2.650	533	53	160.0
配比试验	2.794	560	77	172.4

配比试验实际得到配比材料的参数与原型岩体参数对比得：变形模量相似常数 $C_E = 139.2$ ，抗压强度相似常数 $C_\sigma = 142.9$ ，密度相似常数 $C_\rho = 0.948$ 。由几何相似常数 $C_l = 150$ 和密度相似常数 $C_\rho = 0.948$ ，计算得 $C_E = C_\sigma = C_l C_\rho = 142.2$ ，变形模量相似常数误差率约为 2%，抗压强度相似常数误差率约为 0.5%，满足试验精度要求。

7 结 论

本文在前人研究的基础上，选取了铁精粉、重晶石粉、石英砂、石膏、甘油和水作为相似材料成分，利用正交试验和二次细化试验相结合的试验方法，确定了试验所需的配比为：铁精粉：重晶石粉：石英砂：石膏：水 = 176:264:66:50:60。其中正交试验得到的基本结论如下：

(1) 铁精粉和重晶石粉的质量之比以及石膏与总骨料的质量之比是影响配比材料密度的主要因素。

(2) 石膏与总骨料的质量之比是影响配比材料抗压强度的主要因素。

(3) 甘油与总骨料的质量之比是影响配比材料变形模量的主要因素。

由二次细化试验得知，通过变化石膏含量，模型材料的抗压、抗拉强度和变形模量等力学参数变化范围较大，完全可以覆盖到模型材料所需的参数，且抗压强度和变形模量主要相似指标的相似常数误差很小，为后续振动台模型试验相似模拟提供了强有力的支持。

总之，本文采用的正交试验和二次细化试验相结合的试验方法是一种高效且可行的配比试验方法，能较快地得到满足模型试验要求的材料配比。

参 考 文 献

- [1] 蔡新江, 田石柱. 振动台试验方法的研究进展[J]. 结构工程师, 2011, (增刊 1): 42 - 46.
CAI Xin-jiang, TIAN Shi-zhu. Research advances of shaking table testing method[J]. **Structural Engineers**, 2011, (Supp.1): 42 - 46.
- [2] 张敏政. 地震模拟实验中相似律应用的若干问题[J]. 地震工程与工程振动, 1997, (2): 52 - 58.
ZHANG Min-zheng. Study on similitude laws for shaking table tests[J]. **Earthquake Engineering and Engineering Vibration**, 1997, 17(2): 52 - 58.
- [3] 陈兴华. 脆性材料结构模型试验[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [4] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998.
- [5] 中国水利水电科学研究院. SL539 - 2011 水工建筑物抗震试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [6] 龚召熊, 陈进. 岩石力学模型试验及其在三峡工程中的应用与发展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [7] 姜小兰, 陈进, 孙绍文, 等. 锦屏工程地质力学模型坝基岩体新型材料研究[J]. 长江科学院院报, 2009, (6): 40 - 43.
JIANG Xiao-lan, CHEN Jin, SUN Shao-wen, et al. Jinping dam engineering geological rock mass mechanical model of the new material research[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2009, (6): 40 - 43.
- [8] 左保成, 陈从新, 刘才华, 等. 相似材料试验研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1805 - 1808.
ZUO Bao-cheng, CHEN Cong-xin, LIU Cai-hua, et al. Research on similar material experiment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(11): 1805 - 1808.
- [9] 韩伯鲤, 陈霞龄, 宋一乐, 等. 岩体相似材料的研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(2): 6 - 9.
HAN Bo-li, CHEN Xia-ling, SONG Yi-le. Research on similar material of rockmass[J]. **Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering**, 1997, 30(2): 6 - 9.
- [10] 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.
MA Fang-ping, LI Zhong-kui, LUO Guang-fu. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2004, 23(1): 48 - 52.
- [11] 张强勇, 李术才, 郭小红, 等. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2126 - 2130.
ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, GUO Xiao-hong, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2126 - 2130.
- [12] 陈陆望, 白世伟. 脆性岩体岩爆倾向性的相似材料配比试验研究[J]. 岩土力学, 2006, (增刊 2): 1050 - 1054.
CHEN Lu-wang, BAI Shi-wei. Proportioning test study on similar material of rockburst tendency of brittle rockmass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Supp2.): 1050 - 1054.
- [13] 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.