

郭健, 张鹏, 黄波林, 等. 巫峡岩溶岸坡结构面相似材料试验研究: 以箭穿洞危岩体为例[J]. 水利水电技术, 2020, 51(9): 193-199.

GUO Jian, ZHANG Peng, HUANG Bolin, et al. Experimental study on similar material for structural plane of karst bank-slope of Wuxia Gorge: A case study of Jianchuandong Perilous Rock Mass[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(9): 193-199.

巫峡岩溶岸坡结构面相似材料试验研究 ——以箭穿洞危岩体为例

郭 健^{1,2}, 张 鹏^{1,2}, 黄波林^{1,2}, 秦 臻^{1,2}

(1. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 防灾减灾
湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 我国西南岩溶山区是世界上最大的连片裸露岩溶地区, 地质环境脆弱, 人类工程活动强烈, 群死群伤的灾难性滑坡频发, 巫峡地区的岩溶岸坡发育尤为突出。由于三峡库区蓄水及库水位波动, 部分岩溶岸坡(如箭穿洞)发生了不同程度的变形与失稳, 极大地影响了水库的安全运行。为了确定巫峡岩溶岸坡箭穿洞地质力学模型试验结构面相似材料的最佳配比, 以重晶石粉、石英砂、石膏和水为原料配置结构面相似材料, 基于正交试验设计方法开展相似材料配比试验研究。以骨胶比(骨料/胶结剂)、水膏比(水/石膏)、重骨比(重晶石/骨料)为三个控制因素, 开展三轴压缩试验, 获得不同配比相似材料的力学指标。通过采用模糊综合评判法获得最佳相似材料配比并开展岩体结构面黏结材料相似性模拟试验, 同时, 在不同正交设计水平条件下各控制因素对不同物理力学参数进行敏感性分析。研究结果表明: 不同配比相似材料的力学参数分布范围较大, 劣化效应明显, 能够满足地质力学模型试验结构面相似材料的基本特征要求; 相似材料的密度和内摩擦角主要受骨胶比控制, 黏聚力主要受水膏比控制。此研究成果可为后续地质力学模型试验的顺利进行提供一定的理论依据和实践经验, 为三峡库区防灾减灾与预警评估提供基础理论支撑, 从而提升我国岩溶山区地质灾害防灾减灾的能力。

关键词: 相似材料; 正交设计; 岩溶岸坡; 箭穿洞危岩体

doi: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.09.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-0860(2020)09-0193-07



与作者互动
听语音
聊科研

Experimental study on similar material for structural plane of karst bank-slope of Wuxia Gorge —A case study of Jianchuandong Perilous Rock Mass

GUO Jian^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, HUANG Bolin^{1,2}, QIN Zhen^{1,2}

(1. College of Civil Engineering & Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: The karst mountain region in the Southwest China is the largest contiguous exposed karst area with fragile geological

收稿日期: 2020-03-18

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1504803); 开放基金项目(2018KTL13/2017KJZ05); 国家自然科学基金青年科学基金项目“卡口地形段泥石流的堵溃效应研究”(41701013)

作者简介: 郭 健(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事地质灾害发育特征方面的研究。E-mail: 971996333@qq.com

通信作者: 张 鹏(1982—), 男, 讲师, 博士, 主要从事地质灾害成灾机理与风险分析方面的研究。E-mail: pzhang@ctgu.edu.cn

environment in the world , especially the development of the karst bank-slope within the area of Wuxia Gorge is quite prominent. Due to the impoundment of Three Gorges Reservoir and the fluctuation of the reservoir water level , the deformations and instabilities with different degrees occur at a part of the karst bank slopes (e. g. Jiangchuandong Rock Mass) therein , and then the safe operation of the reservoir is greatly impacted. In order to determine the optimum mixing ratio of the material that is similar to the structural plane for the geomechanical model experiment on Jiangchuandong Rock Mass of the karst bank-slope within the area of Wuxia Gorge , barite powder , quartz sand , gypsum and water are taken as the raw materials for preparing the similar material for the structural plane; for which the experimental study on the mixing ratio of the similar material is carried out based on the design method of orthogonal experiment. By taking aggregate-cement ratio (aggregate/cementing agent) , water-gypsum ratio (water/gypsum) , barite powder-aggregate ratio (barite powder/aggregate) as three control factors , the relevant triaxial compression experiments are made , and then the mechanical indexes of the similar materials with different mixing ratios are obtained. Through fuzzy comprehensive evaluation method , the optimum mixing ratio of the similar material is obtained , and then the simulative experiment on the similarity of the bonding material for the rock mass structural plane is conducted as well. Meanwhile , the sensitivities of all the control factors under the conditions of different levels to different physical and mechanical parameters are analyzed. The study result shows that the distribution ranges of the mechanical parameters of the similar materials with different mixing ratios are larger with obvious degraded effects , and then can meet the requirements on the basic characteristics of the similar materials of the structural plane for the geomechanical model experiment; for which the density and internal friction angle of the similar material is mainly dominated by the aggregate-cement ratio , while the cohesion is mainly controlled by the water-gypsum ratio. The study result can not only provide a certain theoretical basis and practical experience for the smooth implementation of the follow-up geomechanical model experiment , but can also provide a basic theoretical support for the disaster prevention and mitigation as well as the early warning assessment for the Three Gorges Reservoir Area , thus enhance the disaster prevention and mitigation capacity of karst mountain regions in China.

Keywords: similar material; orthogonal design; karst bank-slope; Jianchuandong Rock Mass

0 引言

三峡工程 175 m 蓄水后, 消落带岩体劣化现象慢慢开始显现。在岩体劣化方面, 对水岩化学相互作用基础研究较多, 对水岩作用造成的力学效应尤其是结构面效应方面研究较少。但是, 库水-地下水波动条件下岸坡岩体劣化研究中, 水位波动下岩体结构变化对库岸滑坡的孕灾过程具有控制作用。在巫峡消落带, 不同岩溶岸坡结构和岩体结构中岩体劣化表现有非常大的差异性, 具体包括机械淘蚀现象、溶蚀/潜蚀现象和裂缝显化/扩展现象^[1]。柱状危岩体由于其基座岩体压裂严重、变形破坏机理复杂、破坏动能大而受到广泛关注。典型的如箭穿洞危岩体, 受水位波动影响, 危岩体变形明显加剧, 一旦失稳极有可能引起超过 30 m 的涌流灾害^[2]。为了研究岩体长期劣化损伤形成的岩体结构变化效应对库区岸坡演化和库岸长期稳定性的影响, 建立基于材料、结构相似的地质力学模型, 研究水位波动条件下塔柱状危岩体失稳机理, 为库区的安全运行提供科学保障, 对库区的防灾减灾具有重要的显示意义。

2003 年, 三峡水库初期蓄水至 135 m 发生千将坪滑坡, 肖诗荣等^[3]通过地质力学模型试验对千将坪滑坡进行滑坡机制和利用微地震监测预报预警岩质滑

坡的可行性研究。罗先启等^[4]以三峡库区石榴树包滑坡模型试验为例, 分析了库岸边坡在不同水位运行工况下的位移规律。贺凯等^[5]依托离心模型试验进行塔柱状岩体崩塌机理研究。还有众多学者通过地质力学模型试验进行试验探究库区岸坡的变形机制和规律。

相似材料是模型试验研究的一个难点, 它要求模型材料具有低弹模、高容重、低黏聚力、较低的内摩擦角及较低的渗透系数, 而且这些参数还需要和目标参数满足一定的相似比^[6]。韩伯鲤等^[7]研制的 MIB 材料是一种大容量、低弹模的地质力学相似材料; 马芳平等^[8]研制了以天然铁矿粉和砂为主体的 NIOS 材料, 还有现在应用较多的纯石膏材料、石膏混合材料以及以重晶石粉为主要材料的相似材料, 大都是模拟边坡、工程的主体材料, 但还未有针对基于岩质边坡劣化的结构面进行模拟的相似材料。

鉴于此, 基于前人的研究成果, 设计巫峡岩溶岸坡-箭穿洞危岩体结构面相似材料的正交试验, 确定相似材料的最佳配比, 展开相似材料敏感性分析研究, 以便后续箭穿洞地质力学模型试验的顺利开展, 并为三峡库区岩溶地区灰岩相似材料研究提供一定的理论依据及参考价值。

1 研究区概况

箭穿洞危岩位于长江左岸的神女峰西侧坡脚, 距巫

山县城约 12 km, 仅航运可达危岩位置, 危岩中心的地理坐标为东经 110°00'01", 北纬 31°01'35" (见图 1)。

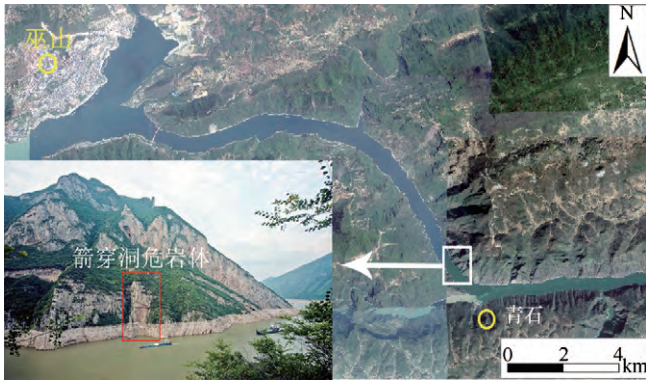


图 1 研究区地理位置

危岩体构成主体为大冶组四段灰色、肉红色的中-厚层状致密的泥质灰岩、灰岩; 顶部为灰白色的薄-中厚层状白云岩、泥质灰岩; 基座为大冶组四段的砾屑、砂屑灰岩, 为接触式胶结, 胶结物为泥钙质, 具条带状构造, 该层厚度约 10 m, 强度较低, 且层间具条带状构造, 为软弱夹层, 极易被水淘蚀。上软下硬的岩性组合, 提供了危岩的物质基础。箭穿洞危岩体的变形与三峡库区水位波动有密切关系, 变形破坏主要发生在危岩体的基座, 基座岩体受重力、水库水冲刷及周期性暴露-浸泡周期性影响下, 裂隙岩体的软化和上浮压力增加会导致新的断裂, 断裂速率的增加增加了岩体的含水量, 大大降低了其强度和导致进一步恶化^[9-10] (见图 2), 导致基座泥质条带灰岩层面和构造裂隙结构面的结合程度差, 本次试验主要以基座泥质条带灰岩层面和构造裂隙结构面为模拟对象, 密度取 2.704 g/cm³, 天然黏聚力 60 kPa, 天然内摩擦角取 22°^[11]。

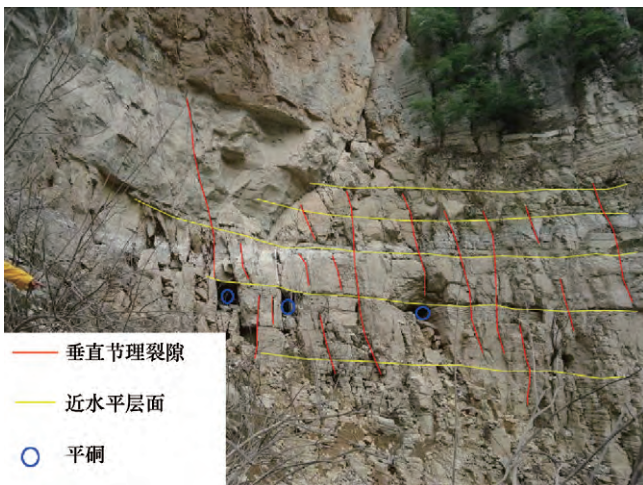


图 2 箭穿洞危岩体结构面发育特征

2 相似材料试验设计

2.1 试验原理

地质力学模型要求满足原型与模型的相似, 相似理论是模型试验的理论基础。此次地质力学模型模拟试验采用框架式, 通过对原型地质资料及试验场地等因素综合考虑, 采用 $n = 100$ 作为其几何相似比, 同时结合相似理论, 主要选用的参数为长度 l 、密度 ρ 、重力加速度 g 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 、渗透系数 k 、应力 σ 、应变 ε 和位移 u 。采用量纲分析法确定相似判据, 模型采用密度相似常数 $C_\rho = 1$, 几何相似常数 $C_l = n$, 黏聚力相似常数 $C_c = n$, 内摩擦角相似常数 $C_\varphi = 1$ 。根据勘察资料和相似常数可以确定物理模型结构面相似材料参数如表 1 所列。

表 1 物理模型结构面相似材料力学参数

力学参数	原位结构面参数	模型结构面参数
密度 / g · cm ⁻³	2.704	2.704
黏聚力 c / kPa	60.000	0.600
内摩擦角 φ / (°)	22.000	22.000

2.2 材料的选取

相似材料是模型试验研究的一个难点, 要求模型材料具有低弹模、高容重、低黏聚力、较低的内摩擦角、较低的渗透系数, 而且这些参数还需要和目标参数满足一定的相似比。相似材料是用来模拟原型的, 为了尽可能精确地模拟原型, 模型试验相似材料在选取时应尽量满足下列要求: 相似材料组成应满足原型材料有关特征, 制作工艺力求简化, 其物理力学指标容易控制, 无毒无污染、来源广泛、成本廉价和原料质量稳定且容易检测^[12]。由上述选材要求结合文献资料, 选用石膏混合材料, 最终确定此次试验的相似材料为: 骨料——重晶石粉、石英砂; 黏结剂——石膏; 溶液——水 (见图 3)。

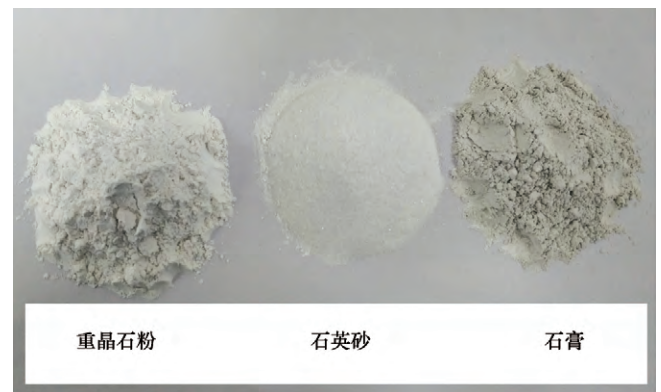


图 3 相似材料

2.3 试验设计

正交试验方法是用于多因素试验的一种方法,即从全面试验中根据正交性来挑选和布置具有代表性的点进行试验,使这些点能够反应试验方位内各因素和试验指标间的关系。本次相似材料试验选用三种因素:①骨胶比——骨料质量/胶结材料质量;②水膏比——水质量/石膏质量;③重骨比——重晶石粉质量/骨料质量。综合先前试验的最优配比区间和相关文献,选取4个水平数,正交设计水平如表2所列。

表2 正交试验设计的实验因素和水平等级

水平	骨胶比	水膏比	重骨比
1	5	0.55	0.5
2	6	0.70	0.6
3	7	0.85	0.7
4	8	1.00	0.8

正交表的选取采用独立向量方法确定,因素水平数 $P=4$, 维数 $m=2$, 向量总数 $K=P^m=16$, 独立向量个数 $J=5$, 选用正交表 $L_{16}(4^5)$, 相似配比方案如表3所列。

表3 相似配比方案

试验组次	骨胶比	水膏比	重骨比
1	8	0.55	0.8
2	8	0.7	0.7
3	8	0.85	0.6
4	8	1.0	0.5
5	7	0.55	0.7
6	7	0.7	0.8
7	7	0.85	0.5
8	7	1.0	0.6
9	6	0.55	0.6
10	6	0.7	0.5
11	6	0.85	0.8
12	6	1.0	0.7
13	5	0.55	0.5
14	5	0.7	0.6
15	5	0.85	0.7
16	5	1.0	0.8

本次相似材料试验主要对试样进行力学参数密度 ρ 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 等参数的研究,选择的试验仪器为应变控制式三轴仪。试验过程主要包括试样的制备和测试,试验采取不固结不排水剪法(UU)进行试样测试。

3 试验结果和分析

3.1 基于正交设计的不同相似材料配比试验结果

根据相材料配比方案和测试方法测得具体结果如表4所列,其中密度的分布范围为 $1.55 \sim 1.79 \text{ g/cm}^3$, 黏聚力的分布范围为 $0.6 \sim 65.53 \text{ kPa}$, 内摩擦角的



图4 正交试验制样

表4 正交试验结果

试验组次	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	c/kPa	$\varphi/(\text{°})$
1	1.49	17.20	9.00
2	1.58	77.0	4.4
3	1.63	60.40	2.90
4	1.66	38.80	9.40
5	1.55	38.8	7.03
6	1.59	40.86	6.38
7	1.67	51.47	5.78
8	1.71	61.20	4.90
9	1.63	35.0	16.8
10	1.67	65.93	4.06
11	1.66	17.28	15.90
12	1.67	42.02	8.53
13	1.68	0.6	20.8
14	1.70	1.6	20.9
15	1.69	65.53	6.31
16	1.79	55.28	14.06

分布范围为 $2.90^\circ \sim 15.90^\circ$ 。不同配比相似材料的物理力学参数取值范围较广,能够满足结构面相似材料要求。

3.2 试验结果分析

3.2.1 最佳配比的选取及相似性模拟试验

对于相似材料来说,需要在各指标相似程度不同的相似材料中选择一种最佳材料,采用了模糊综合评判法来进行研究^[13-14]。设有 M 种相似材料配比,表征每种配比材料特性的指标有 N 个,则 M 种配比材料的所有指标组成一个 $N \times M$ 矩阵 X 。矩阵中的元素 X_{ij} 表示第 j 种相似材料的第 i 个指标值。相似材料和给定原状土关系可通过隶属函数 u_{ij} 来表示,相似材料和原状土的相似性越好,则相似材料隶属于原状土的程度越高。相似准则如下

$$u_{ij} = 1 - \left| \frac{x_i - c_i x_{ij}}{x_i} \right| \quad (1)$$

式中, x_i 为原状土第 i 个指标值; x_{ij} 为第 j 种相似材料的第 i 个指标值; c_i 为按相似准则要求第 i 个指标的相似系数。

隶属函数的取值范围为: $u_{ij} \in [0, 1]$ 。

由于各指标值并非等权值, 因而存在各个指标值的权值分配问题, 设权值的模糊向量为

$$w = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (2)$$

式(2)中的 (w_1, w_2, \dots, w_n) 为各个指标值的

权值, 并满足归一化, 有 $\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \in [0, 1]$, 按模糊线性加权变换方法, 即得

$$z_j = \sum_{i=1}^n w_i u_{ij}, \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

加权变换后, (z_1, z_2, \dots, z_m) 中最大者即为最佳相似材料, 根据危岩体分析中的实际情况选择黏聚力和内摩擦角两个材料特征指标, 确定 $w = (0.5, 0.5)$, 代入计算得到第 13 组配比材料的隶属度最大, $\max z_i = 0.975$, 即其配比为相似材料最佳配比。

为了研究最佳配比相似材料的劣化效应, 进行岩体结构面黏结材料相似性模拟试验, 选用最佳配比做 10 cm^3 的试块, 半水浸泡, 观察表面积的变化率 S (见图 5)。由图 5 可见, $0 \sim 40 \text{ min}$ 的变化率较小, 40 min 的表面变化率 $S_{40 \text{ min}} = 24.72\%$, $S_{45 \text{ min}} = 27.26\%$, $S_{46 \text{ min}} = 38.84\%$ 。结果表明, 最佳配比相似材料劣化明显。

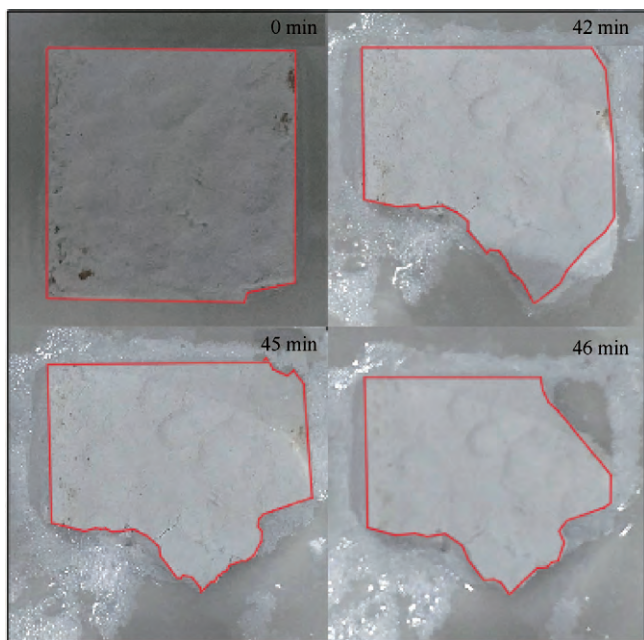


图 5 相似性模拟试验

3.2.2 敏感性分析

通过设计正交试验测得相似材料试样各种物理力

学参数, 通过极差法分析试验因素在不同水平下对不同物理力学参数结果的影响, 以及分别对密度、黏聚力、内摩擦角进行敏感性分析。

3.2.2.1 密度敏感性分析

相似材料密度敏感性分析结果如表 5 所列, 极差从大到小为: 骨胶比、水膏比、重骨比, 即重骨比对相似材料密度的影响最大。

表 5 相似材料密度极差分析

$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	骨胶比	水膏比	重骨比
均值 1	1.715 842 014	1.586 901 042	1.668 776 042
均值 2	1.654 765 625	1.632 517 361	1.665 824 653
均值 3	1.629 079 861	1.661 770 834	1.622 256 945
均值 4	1.589 418 403	1.707 916 667	1.632 248 264
极差	0.126 423 611	0.121 015 625	0.046 519 097

绘制出各因素对密度影响的直观分析图如图 6 所示, 从图 6 可分析得: 随着骨胶比的增大密度也增大; 随着水膏比的增大密度逐渐减小; 而重骨比与密度并无明显的线性关系。

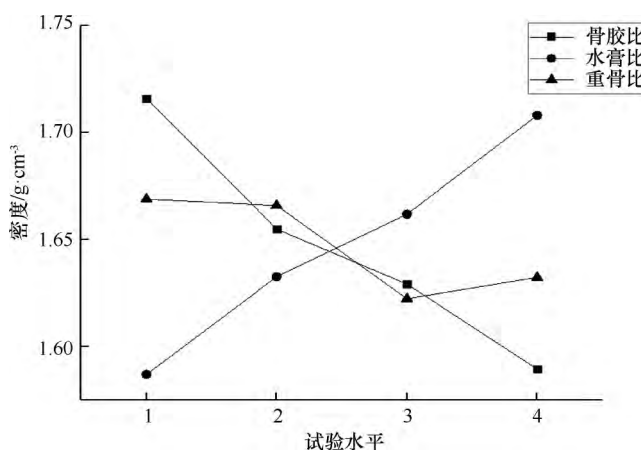


图 6 密度敏感性分析

3.2.2.2 黏聚力敏感性分析

相似材料黏聚力敏感性分析结果如表 6 所列, 极差从大到小为: 水膏比、重骨比、骨胶比, 即水膏比对相似材料黏聚力的影响最大。根据各水平均值可以发现随着水膏比的增大黏聚力增大, 随着骨胶比的增大黏聚力增大。

表 6 相似材料黏聚力极差分析

c/kPa	骨胶比	水膏比	重骨比
均值 1	30.752 5	22.9	39.2
均值 2	40.057 5	46.347 5	39.55
均值 3	48.082 5	48.67	55.837 5
均值 4	48.35	49.325	32.655
极差	17.597 5	26.425	23.182 5

各因素对黏聚力影响的直观分析如图 7 所示, 从图 7 可分析得: 随着骨胶比增大黏聚力也增大, 当骨胶比增大到 7 后, 黏聚力的增速变慢; 随着石膏比的增大黏聚力也逐渐增大, 当石膏比增大到 0.7 后, 黏聚力的增速变慢; 而重骨比与黏聚力并无明显的线性关系。

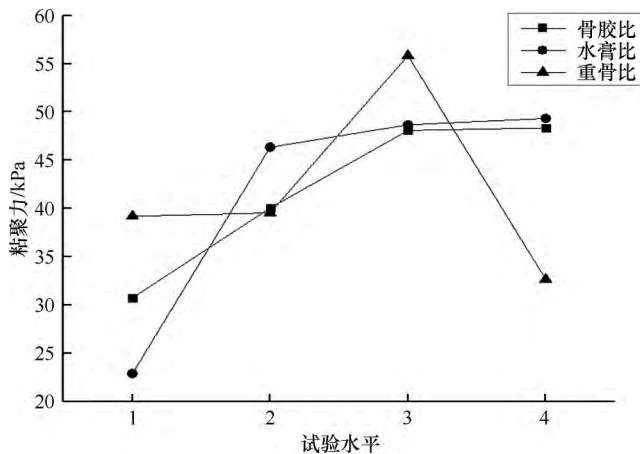


图 7 黏聚力敏感性分析

3.2.2.3 内摩擦角敏感性分析

相似材料内摩擦角敏感性分析结果如表 8 所列, 极差从大到小为: 骨胶比、石膏比、重骨比, 即骨胶比对相似材料黏聚力的影响最大。

表 7 相似材料内摩擦角极差分析

$\varphi / (^{\circ})$	骨胶比	石膏比	重骨比
均值 1	15.517 5	13.407 5	10.01
均值 2	11.322 5	8.935	11.375
均值 3	6.022 5	7.722 5	6.567 5
均值 4	6.425	9.222 5	11.335
极 差	9.495	5.685	4.807 5

各因素对内摩擦角影响的直观分析如图 8 所示, 从图 8 可分析得: 当骨胶比从 5 到 7, 黏聚力逐渐增大, 而当骨胶比从 7 到 8 黏聚力逐渐变大; 当骨胶比从 0.55 到 0.85, 黏聚力逐渐增大, 而当骨胶比从 0.85 到 1 黏聚力逐渐变大; 而重骨比与黏聚力并无明显的线性关系。

4 结 论

以重晶石粉、石英砂为骨料, 石膏为黏结材料, 应用正交设计方法, 设计骨胶比、石膏比和重骨比 3 个因素, 每个因素设计四个水平, 设计了 16 组相似材料配比试验, 对每组配比试块进行三轴压缩实验, 通过模糊综合评判法确定第 13 组实验能够很好地模拟箭穿洞结构面泥质条带灰岩, 对影响相似材料

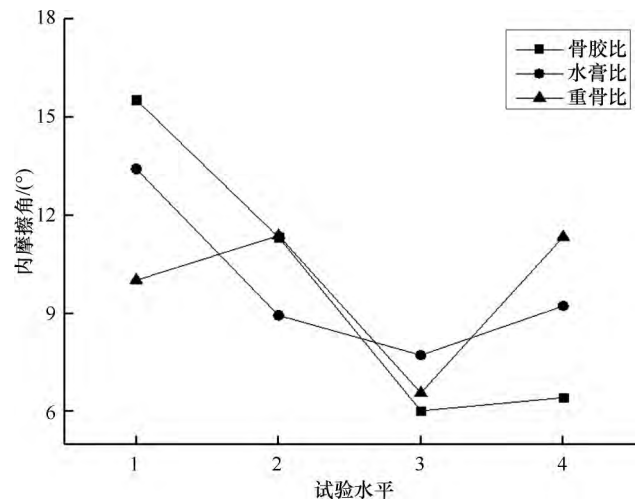


图 8 内摩擦角敏感性分析

物理力学参数的各配比因素进行了敏感性分析, 得到主要结论如:

(1) 不同配比相似材料的物理力学参数取值范围较广, 密度的分布范围为 $1.55 \sim 1.79 \text{ g/cm}^3$, 黏聚力的分布范围为 $0.6 \sim 65.53 \text{ kPa}$, 内摩擦角的分布范围为 $2.90^{\circ} \sim 15.90^{\circ}$, 劣化效应明显, 能够满足结构面相似材料要求。

(2) 相似材料的密度和内摩擦角主要受骨胶比控制, 黏聚力主要受石膏比控制; 随着石膏比的增大, 密度和内摩擦角都有减小趋势, 黏聚力逐渐增大; 随着石膏比的增大, 密度和黏聚力都逐渐增大, 内摩擦角有逐渐减小的趋势; 重骨比与密度、黏聚力和摩擦角并无明显的线性关系。

参考文献:

- [1] 黄波林, 殷跃平, 张枝华, 等. 三峡工程库区岩溶岸坡消落带岩体劣化特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(9): 1786-1796.
- [2] 刘广宁, 黄波林, 王世昌, 等. 三峡库区箭穿洞危岩体涌浪数值模拟分析[J]. 长江科学院院报, 2013, 30(10): 37-41.
- [3] 肖诗荣, 刘德富, 姜福兴, 等. 三峡库区干将坪滑坡地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(5): 1023-1030.
- [4] 罗先启, 刘德富, 吴剑, 等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2476-2483.
- [5] 贺凯. 塔柱状岩体崩塌机理研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [6] 罗先启. 滑坡模型试验理论及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [7] 韩伯鲤, 张文昌, 杨存奋. 地质力学模型材料(MIB)的研究[J]. 西北水电技术, 1983(3): 49-54.
- [8] 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.
- [9] HUANG B, ZHANG Z, YIN Y, et al. A case study of pillar-shaped

rock mass failure in the Three Gorges Reservoir Area , China [J]. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology , 2016 , 49 (3) : 195-202.

- [10] YIN Y , HUANG B , LIU G , et al. Potential risk analysis on a Jian-chuandong dangerous rockmass-generated impulse wave in the Three Gorges Reservoir , China [J]. Environmental Earth Sciences , 2015 , 74(3) : 2595-2607.
- [11] 重庆市地质灾害防治工程勘察设计院. 重庆市三峡库区巫山县箭穿洞危岩应急抢险勘(调)查及治理工程初步设计[R]. 重庆:

重庆市地质灾害防治工程勘察设计院, 2014.

- [12] 杜彬, 相似模拟及其在盾构施工煤矿斜井中的应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- [13] 曹玲, 罗先启, 程圣国. 千将坪滑坡物理模型试验相似材料研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007(1): 37-39.
- [14] 徐楚, 胡新丽, 何春灿, 等. 水库型滑坡模型试验相似材料的研制及应用[J]. 岩土力学, 2018, 39(11): 4287-4293.

(责任编辑 陈小敏)