

软弱夹层相似材料配比试验研究

邹政^{1,2}

(1. 重庆交通大学国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要:结合软弱夹层的物理力学性质,根据相似原理进行配比试验,研制适用于室内试验的软弱夹层相似材料,使用单因素试验和正交试验相结合的方法进行研究,以因素A(石蜡/(骨料+膨润土))、B(石膏/(骨料+膨润土))和C(骨料/膨润土)为控制因素,以密度、抗压强度和弹性模量作为不同配比的评价指标.单因素试验以石英砂或重晶石粉作为骨料研究材料物理力学性质的变化.正交试验通过因素水平变化分析其敏感度,结果表明密度、抗压强度和弹性模量随因素水平变化规律性明显.

关键词:软弱夹层;正交试验;配比;因素水平

中图分类号:P315.9

文献标识码:A

文章编号:1004-4701(2018)02-0106-05

0 引言

软弱夹层是指岩层中岩性软弱、厚度相对较薄的岩层^[1],根据成因将其划分为3种类型:①原生软弱夹层;②次生软弱夹层;③构造软弱夹层^[2].软弱夹层是在地质历史时期不同成岩条件、构造活动以及地下水综合作用下形成.我国西南地区处于青藏高原东缘,强烈的构造活动下软弱夹层极为发育,对边坡工程地质稳定性有很大危害,因此对不同条件下软弱夹层物理力学性质的研究有十分重要的意义,然而软弱夹层通常范围很大,不同位置的层厚、结构和性质具有差异^[3],在室内进行物理原型模拟往往难度较大.

进行软弱夹层相似材料配比试验对室内模型试验研究具有重要意义,软弱夹层具有低模量、低强度、不同地区重度变化较大的特点^[4-8];前人研究的低模量、低强度相似材料价格较为昂贵、配制复杂.本文根据软弱夹层的物理力学性质选择合适的相似材料,采用正交试验方法设计相似配比试验,研究相似材料密度、抗压强度和弹性模量参数变化特征.

1 相似理论和试验基本情况

1.1 模型试验相似理论

物理模型试验一般要求室内模型与原型满足物理

相似性,模型大小、密度和强度、变形需要遵循一定的规律^[9],相似比尺表示原型和模型之间具有相同量纲的物理量之比,用字母 C 表示.使用平衡、几何、物理、边界条件推导出原型和模型的模型试验相似关系:

$$C_\sigma = C_\gamma C_L$$

$$C_\delta = C_\epsilon C_L$$

$$C_\sigma = C_\epsilon C_E$$

这里 $C_\gamma, C_\epsilon, C_\sigma, C_L, C_\delta, C_E$ 分别表示容重、应变、应力、几何、位移、弹性模量相似比尺.模型试验要求无量纲物理量的相似比尺等于1,同量纲物理量的相似比尺相等^[10],即:

$$C_\epsilon = C_L = C_\phi = 1$$

$$C_\sigma = C_\epsilon = C_c$$

其中, C_ϕ, C_c 分别是内摩擦角、粘聚力相似比尺.

1.2 相似材料选取

相似材料的选择对样品力学性能有重要影响,考虑到软弱夹层的物理力学性质,本次正交试验在确定使用液体石蜡和石膏作为胶结剂、膨润土(主要成分是高岭石)作为主要填充材料情况下,在正交试验之前进行单因素试验,研究石英砂(60目)和重晶石粉(300目)分别作为骨料对样品性质的影响,根据试验结果选用其中一种材料作为骨料进行正交试验,各材料有以下特点:

石蜡为粘结剂的相似材料在液体状态有较大的塑性,模型易压实,材料物理力学性质稳定.

石膏属于气硬性矿物胶结材料,在水化作用下产生

化学反应,该材料成型方便、性能稳定。

石英砂粒径相对较大,在添加胶结剂压实成型后可以增大弹性模量和抗压强度,并且在密度较小的相似材料中可以作为配重材料调节试样密度。

重晶石粉粒径相对较小,强度较低,加入会明显提高试样的重度,作为骨料重晶石粉也具有一定的粘结性。

膨润土的主要特点:①具有较强的粘接力;②膨润土密度较低,可以作为配重材料适当降低试样密度;③颗粒以粘粒和粉粒为主,这与软弱夹层的颗粒组成相似。

1.3 试验方案

首先进行单因素变量试验为后续工作选择恰当的骨料,在石膏、石蜡含量确定的情况下,改变骨料来研究试样密度、抗压强度和弹性模量的变化。为使数据观察方便,使用因素 A 代表石蜡/(骨料 + 膨润土),因素 B 代表石膏/(骨料 + 膨润土),因素 C_1 代表石英砂与膨润土的质量之比,因素 C_2 代表重晶石粉与膨润土的质量之比(详见表 1)。

表 1 单因素试验				%
因素水平	因素 A	因素 B	因素 C	
			C_1	C_2
1	2	1	21	21
2	2	1	39	39
3	2	1	62	62
4	2	1	94	94
5	2	1	143	143

表 2 相似材料正交设计方案				%
因素水平	因素 A	因素 B	因素 C	
1	1	0.4	40	
2	2	0.6	45	
3	3	0.8	50	
4	4	1	55	

根据因素 C_1 、 C_2 不同水平对密度、抗压强度和弹性模量的敏感程度,选用其中一种作为试样骨料进行正交试验。正交试验是在不同因素和因素水平下研究材料性质的一种试验方法。根据正交性从所有试验中挑选出部分代表性的点进行试验,这些点均匀整齐,正交试验能快速确定不同因素水平对试验结果影响程度。本次试验取三因素四水平,若要进行全面试验,则需要进行 $4^3=64$ 种组合的试验。而按表 2 正交表进行试验,则只需进行 $4^2=16$ 种组合的试验,并且可以代表全面

试验的结果。

1.4 试样制备

试验使用高 100 mm,直径 50 mm 的圆柱体样品。首先根据配比称取一定质量的材料充分搅拌均匀,然后加入石蜡和水进一步拌和,将拌好的混合料倒入标准钢制模具中,用落锤击实,应注意为防止在模具拆离过程中发生试样的脱落或损坏,在模具使用前将侧壁和底面涂抹甘油,并在表面贴层保鲜膜。待试样干燥 3 d 后拆开模具,在天然气候条件下干燥 15 d 试样完全固结,使用游标卡尺在多个位置测量试样的直径和高度,求出平均值。称量样品质量后可以算得试样密度。

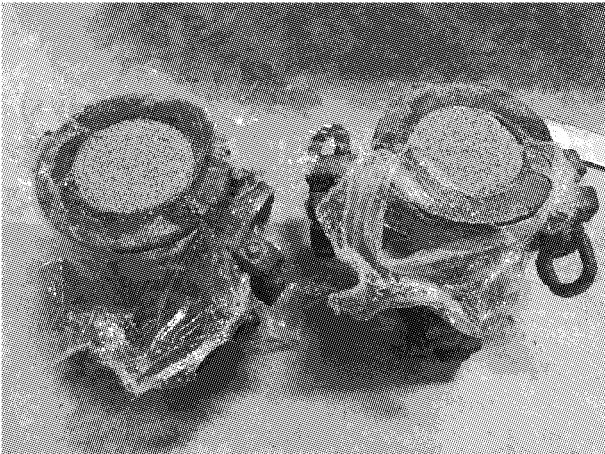


图 1 试验样品

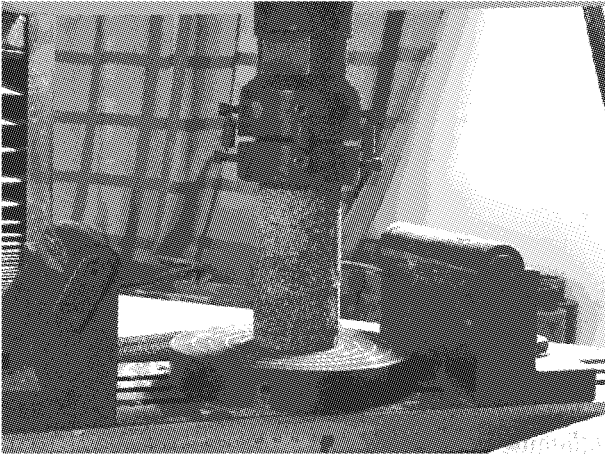


图 2 试验过程

为保证单轴压缩试验过程中试样含水率相同,所有试验在同一天完成,加载过程使用位移控制,速率为 1 mm/min;为使测得的指标值准确可靠,试验中同一配比制作 3 个试样,在结果中取 3 个试样的平均值进行分析。

2 试验结果

2.1 单因素试验

2.1.1 密度

图 3 所示是不同因素和因素水平下试样密度变化的曲线图,可以看出 C_1 、 C_2 试样密度随着因素水平的增大均以较快的速率增长。在因素水平相同时, C_2 试样密度大于 C_1 。

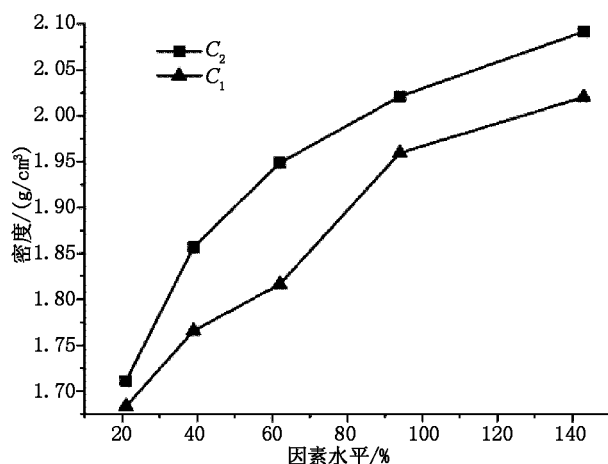


图 3 密度敏感性分析

2.1.2 抗压强度

不同因素水平下试样抗压强度变化曲线如图 4 所示,可以看出:(1) C_1 随因素水平的增加抗压强度先增大后减小,因素水平在 94% 时抗压强度达到峰值,约 0.68 MPa。 C_2 试样抗压强度随因素水平的增加只在小范围波动,表明因素水平变化对 C_2 影响较小。(2) 在一定范围内, C_2 抗压强度始终小于 C_1 。

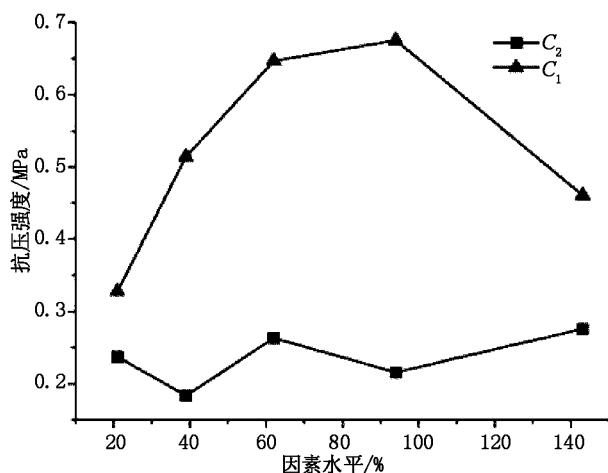


图 4 抗压强度敏感性分析

2.1.3 弹性模量

C_1 、 C_2 试样弹性模量随因素水平的变化规律与抗压强度相似,如图 5 中所示, C_1 试样随因素水平增加先增大后减小,峰值出现在因素水平约 94% 时,达到 56.7 MPa, C_2 试样弹性模量随因素水平增加缓慢增长,在因素水平约 140% 处达到最大,约 24.61 MPa。

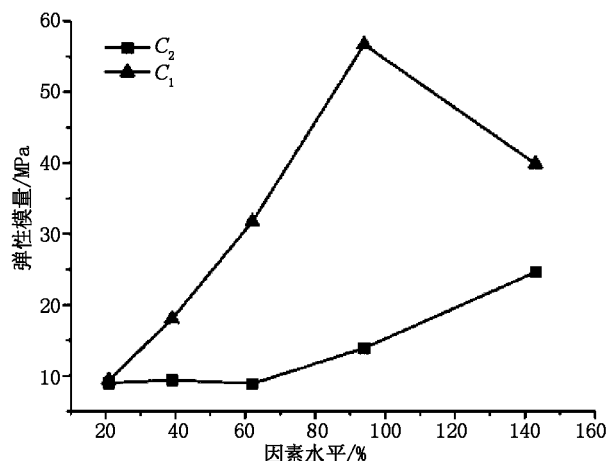


图 5 弹性模量敏感性分析

通过对比 C_1 、 C_2 不同水平下试样密度、抗压强度和弹性模量的变化规律发现, C_1 在不同因素水平下抗压强度、弹性模量变化范围较大,而 C_2 抗压强度、弹性模量变化较小,同时因素水平变化对 C_1 、 C_2 密度均有较大影响。基于上述试验结果综合考虑,选用石英砂作为试样骨料进行正交试验。

2.2 正交试验结果及分析

通过极差分析法对正交试验的每一因素进行极差分析,根据正交试验理论,极差是各因素水平之和中由最大值减去最小值求得,极差大说明此因素的不同水平产生的差异较大,该因素对试验结果影响明显,不同因素水平变动对密度、抗压强度和弹性模量的影响可通过极差值清晰地反映。

2.2.1 密度

图 6 是样品在天然条件下干燥 15 d 后得到的不同因素水平下试样的密度变化效果图,横坐标表示不同因素的水平变化,可以看出 A、B 因素对密度影响较小,因素水平增加密度有波动,但变化范围较小,而 C 因素水平增加试样密度明显增大,呈近似线性增长。

表 3 反映了各因素的极差值,与图 6 中反映的结果相似, C 因素的极差值大于 A、B 因素。各因素对试样密度的影响程度: $C > B > A$ 。

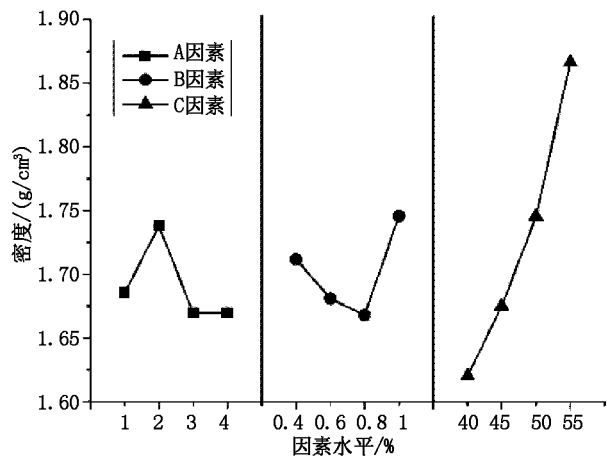


图 6 不同因素水平下密度变化效果图

表 3 密度极差分析 10^3 kg/m^3			
水平组数	因素		
	A	B	C
K1	1.685 5	1.712 0	1.620 0
K2	1.738 0	1.681 0	1.675 0
K3	1.669 5	1.667 8	1.745 3
K4	1.723 5	1.745 8	1.866 3
极差 R	0.052 5	0.078 0	0.246 3

2.2.2 抗压强度

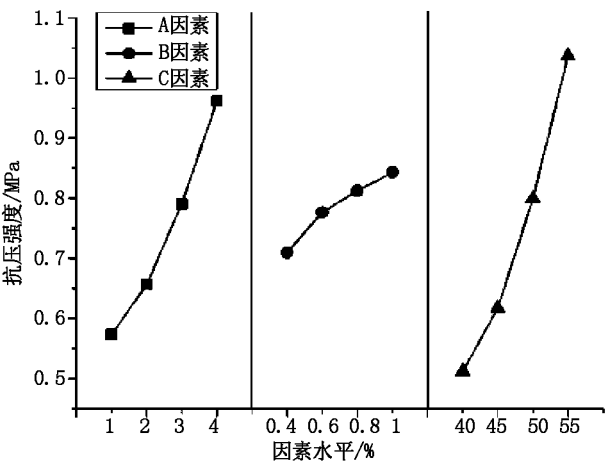


图 7 不同因素水平下单轴抗压强度变化效果图

通过对试样单轴抗压强度正交设计分析,得到了图 7 所示的在不同因素和水平下单轴抗压强度变化的效果图,横坐标表示因素及因素水平,从图中可看出,因素 A、B、C 的变化对试件抗压强度均有影响,抗压强度随因素 A、B、C 水平的增加呈增长趋势。

对正交试验结果中各因素抗压强度求极差值得到表 4,对比极差大小发现各因素对试样的抗压强度影响程度: $C > A > B$ 。

表 4 抗压强度极差分析 MPa			
水平组数	因素		
	A	B	C
K1	0.57	0.71	0.59
K2	0.66	0.78	0.71
K3	0.79	0.81	0.85
K4	0.96	0.84	1.06
极差 R	0.39	0.13	0.47

2.2.3 弹性模量

图 8 是通过正交试验得到的不同因素水平下试样弹性模量变化的效果图,横坐标表示因素及因素水平,可以看出 A、B、C 因素水平的变化对弹性模量均有较大影响,弹性模量随因素水平的增加明显增长。

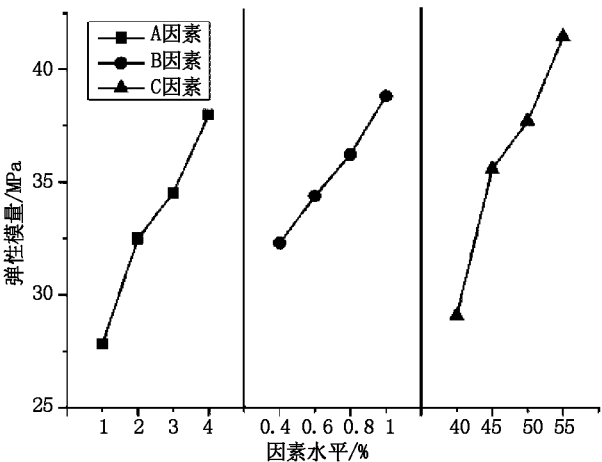


图 8 不同因素水平下弹性模量变化效果图

对正交试验结果中各因素弹性模量求极差值得到表 5,对比极差大小发现各因素对试样弹性模量的影响主次序列是: $C > A > B$ 。

根据上述正交试验结果,不同因素水平对相似材料物理力学性质影响很大,A、B 因素水平增加抗压强度和弹性模量会明显增大,而对试样密度影响不明显。密度、抗压强度和弹性模量随 C 因素水平的增加而增大。综合极差值计算结果,C 因素对相似材料密度、抗压强度和弹性模量影响最大。A 因素对抗压强度和弹性模量的影响要大于 B 因素。

表 5 弹性模量极差分析

MPa

水平组数	因素		
	A	B	C
K1	27.80	32.30	29.08
K2	32.49	34.38	34.58
K3	33.52	36.23	37.70
K4	37.98	38.81	41.43
极差 R	10.18	6.51	12.35

3 结 论

(1) 控制因素 A、B 水平一定, 分别选用重晶石粉和石英砂作为骨料制样进行密度、抗压强度和弹性模量试验, 石英砂对试样密度、抗压强度和弹性模量有明显影响, 重晶石粉对抗压强度和弹性模量影响不明显, 综合试验效果选择石英砂作为正交试验试样骨料。

(2) 使用正交试验设计方法, 以因素 A(石蜡/(骨料 + 膨润土))、B(石膏/(骨料 + 膨润土)) 和 C(骨料/膨润土) 为控制因素, 每个因素设置 4 个水平, 设计了 16 组配比试验进行密度、抗压强度和弹性模量的测试。

(3) 通过极差分析法分析了不同因素对试样密度、抗压强度和弹性模量的敏感程度, 因素 C 对试样密度影响最大, 因素 A、B 影响不明显, 因素 A、B、C 对抗压强度和弹性模量均有一定的影响, 其中 C 因素影响最

大, A 因素次之, B 因素最小。结合不同因素水平对试样物理力学性质变化效果图看出: 试样密度随 C 因素水平的增加而显著上升, 抗压强度和弹性模量随 A、B、C 因素的增加而增大。

参考文献:

- [1] 冯夏庭, 王泳嘉. 泥化夹层错动带残余强度的人工神经网络[J]. 中国有色金属学报, 1995(03): 17 ~ 21.
- [2] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [3] 徐鼎平, 冯夏庭, 崔玉军, 等. 白鹤滩水电站层间错动带的剪切特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2012(S1): 2692 ~ 2703.
- [4] 武伯猷, 朱合华, 徐前卫, 等. IV 级软弱围岩相似材料的试验研究[J]. 岩土力学, 2013(S1): 109 ~ 116.
- [5] 刘晓敏, 盛谦, 陈健, 等. 大型地下洞室群地震模拟振动台试验研究(I): 岩体相似材料配比试验[J]. 岩土力学, 2015(01): 83 ~ 88.
- [6] 邹威, 许强, 刘汉香. 大型振动台试验相似材料研究[J]. 山地学报, 2012(04): 497 ~ 501.
- [7] 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(05): 1357 ~ 1362.
- [8] 王幼麟, 肖振舜. 软弱夹层泥化错动带的结构和特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1982(01): 37 ~ 44.
- [9] 杜应吉. 地质力学模型试验的研究现状与发展趋势[J]. 西北水资源与水工程, 1996(02): 67 ~ 70.
- [10] 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(08): 2126 ~ 2130.

编辑: 张绍付

Experiment study on similarity ratio of similar material for model test on weak intercalation

ZOU Zheng^{1,2}

(1. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Combined with physical and mechanical properties of weak intercalation. The proportioning test is conducted according to the principle of similarity. This study aimed to develop an appropriate similar material for weak intercalation which can be used in physical model test in laboratory. The single factor test and orthogonal test is combined to research. Three controlling factors including A(paraffin - aggregate and bentonite), B(gypsum - aggregate and bentonite), C(aggregate - bentonite ratio) are chosen to perform the orthogonal tests. A series of tests is carried out to determine the density, compression strength and elasticity modulus of different similar materials. The physical and mechanical properties of similar material which use quartz and barite powder as the aggregate is studied. The sensibilities of three factors level change are analyzed by orthogonal test. The results show that the density, compressive and elasticity vary with the factor level.

Key words: Weak intercalation; Orthogonal test; Proportion; Factor level

翻译: 邹 政