

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.105



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 考虑动应力-动应变关系及剪切波速相似的 模型软岩配制方法

王志佳<sup>1</sup>, 黎洪磊<sup>1</sup>, 李胜民<sup>1</sup>, 吴祚菊<sup>2</sup>, 段书苏<sup>1</sup>, 谢朋<sup>1</sup>

(1. 海南大学 土木建筑工程学院, 海口 570228; 2. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621010)

**摘要:**根据振动台模型试验的相似设计原理,结合某地下工程底部软岩性质,利用重晶石粉、黏土、石膏等材料,研制了一种可以有效模拟原型软岩动力特性的相似材料。开展正交试验,通过对数据进行极差和方差分析,得到重晶石粉、黏土、石膏等原材料含量对相似材料密度、初始剪切模量及参考应变的影响规律,并基于正交试验结果,进行软岩相似材料的最终配比试验。结果表明:相似材料中重晶石粉对相似材料的密度起主要控制作用,参考应变值随石膏含量的增加而增大,随黏土含量的增加而减小,相似材料的初始剪切模量随黏土含量的增加而减小,随重晶石粉和石膏含量的增加而增大。配制的软岩相似材料可以很好地模拟原型软岩动应力-动应变关系和剪切波速特性。

**关键词:**软岩相似材料;动应力-动应变关系;剪切波速;正交试验;初始剪切模量;参考应变

**中图分类号:**TU411.8 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)05-0038-08

## Collocation method of model soft rock with consideration of relationship of dynamic stress-strain and shear wave velocity

WANG Zhijia<sup>1</sup>, LI Honglei<sup>1</sup>, LI Shengmin<sup>1</sup>, WU Zuoju<sup>2</sup>, DUAN Shusu<sup>1</sup>, XIE Peng<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Architecture Engineering, Hainan University, Haikou 570228, P. R. China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, P. R. China)

**Abstract:** Based on the similar principle of model tests and characteristics of soft rock in-situ, a new kind of similar material of soft rock which consists of clay, barite powder and gypsum is developed to simulate dynamic characteristics of prototype soft rock. Orthogonal test is carried out, and influential patterns of ingredients content on density, initial shear modulus  $G_{max}$  and reference strain  $\gamma_r$  are achieved via variance and range analysis method. Based on the results, an ultimate proportioning test is conducted. The test results indicate that the proportion of

**收稿日期:**2020-12-15

**基金项目:**国家自然科学基金(51708163,51808466);海南省科协青年科技英才学术创新计划(QCXM201807);海南省自然科学基金(519QN184)

**作者简介:**王志佳(1987-),男,博士,主要从事岩土地震工程研究,E-mail:344963551@qq.com。

谢朋(通信作者),男,博士,E-mail: Peng\_Xie@hainanu.edu.cn。

**Received:**2020-12-15

**Foundation items:** National Natural Science Foundation of China (No. 51708163, 51808466); Young Talents' Science and Technology Innovation Project of Hainan Association for Science and Technology (No. QCXM201807); Hainan Provincial Natural Science Foundation of China (No. 519QN184)

**Author brief:** WANG Zhijia (1987-), main research interest: geotechnical earthquake engineering, E-mail: 344963551@qq.com.

XIE Peng (corresponding author), PhD, E-mail: Peng\_Xie@hainanu.edu.cn.

blanc fixe imposes primary effect of density of similar material. Reference strain  $\gamma_r$  increases as the content of gypsum increases and decreases as the content of clay increases. Initial shear modulus  $G_{\max}$  of similar material decreases as the proportion of clay increases, while increases as the proportion of barite powder or gypsum increases. The relationship between dynamic stress and dynamic strain and shear wave velocity of the similar material shows great consistence with that of prototype.

**Keywords:** soft rock similar material; dynamic stress-strain relationship; shear wave velocity; orthogonal test; initial shear modulus; reference strain

模型试验作为一项有效的研究手段,一直以来被广泛运用到土木工程研究中,通过模型试验,可以对复杂岩土工程抗震问题进行缩尺研究,进而全面、真实地再现复杂岩土工程结构的受力变形特征。为保证复杂岩土工程模型试验的真实可靠性,需研制与原型岩体物理力学特性相似的模型材料。学者们针对相似材料的问题开展了大量研究<sup>[1]</sup>;左保成等<sup>[2]</sup>提出利用石英砂、石膏和水泥对岩体介质的物理力学特性进行模拟,并以灰岩为例进行了模型试验相似材料的配制试验,给出了骨料与胶结物配比(砂胶比)、胶结材料配比及养护方式对相似材料强度的影响规律;王汉鹏等<sup>[3]</sup>经过大量力学试验,以铁矿粉、重晶石粉和石英砂为骨料,石膏粉作为调节剂,酒精溶液和松香作为胶结剂,研制出一种新型岩土工程模型试验相似材料,且该新型相似材料在使用过程中展现出抗压强度与弹性模量低、容重较高、性能稳定等优势,是一种比较理想的相似材料;杜时贵等<sup>[4]</sup>以高强水泥、标准砂、硅粉、水和高强减水剂等为原材料,配制出一种可模拟原岩结构面特性的模型试验相似材料。张定邦等<sup>[5]</sup>通过物理力学性质试验及大量配比试验,以铁矿粉、重晶石粉和石英砂为骨料,不饱和树脂和石膏为胶结材料,研制出超高陡边坡与崩落法地下开采模型试验矿岩相似材料;Burgert 等<sup>[6]</sup>以环氧树脂加3%~5%的硬化剂为原材料研制出一种脆性模型试验相似材料;Fatahi 等<sup>[7]</sup>、Kim 等<sup>[8]</sup>认为岩土体介质的非线性对地震作用下的桩-土相互作用影响明显,并在试验中考虑土体动应力-动应变关系进行相似材料的配制。

以上相似材料配制的研究成果大多基于试样的强度、弹性模量、黏聚力和内摩擦角满足相似比要求的原则,而部分虽然提到了在振动台试验中考虑土体动应力-动应变关系进行相似比配制,但并未针对软岩相似材料考虑动应力-动应变关系的配制过程进行深入研究。基于以上现状,笔者根据模型试验的相似原理,同时考虑岩土体动应力-动应变关系及

剪切波速的相似,利用正交试验,并通过对数据进行极差和方差分析,研究了模型试验相似材料组成成分对其密度、参考应变以及初始剪切模量的影响规律,随后通过配比试验研制出一种新型软岩相似材料。

## 1 模型相似设计特征方程的选择

### 1.1 相似材料的选择

试验目的主要是确定软岩相似材料的配比,为了使模型与原型尽可能相似,选取黏土、重晶石粉和石膏为主要配比材料,黏土选取原场地土样,密度为1.9~2.2 g/cm<sup>3</sup>,重晶石粉密度为3.4~3.8 g/cm<sup>3</sup>,石膏密度为2.3 g/cm<sup>3</sup>。在进行土与地下结构动力相互作用振动台模型试验时,一般要求模型软岩的动应力-动应变关系、动剪切模量衰减特性、阻尼特性、剪切波速、密度、抗压强度等多个参数与原材料相似,但在实际实施过程中,由于相似材料限制,不可能满足上述所有参量的相似要求,故根据地下结构地震响应的实际情况,选择软岩的动应力-动应变特性和波的传播特性为相似控制因素,其余的非关键因素尽可能满足相似要求。

软岩在地震荷载作用下的动应力-动应变关系是反映软岩动力特性的重要参数。研究非破坏条件下动应力-应变关系时,可采用 Hardin 等在往复荷载作用下动应力-动应变间骨干曲线的双曲线形式作为基础,则动应力-动应变关系表示为<sup>[9]</sup>

$$\tau_d = \frac{\gamma_d}{1/G_{\max} + \gamma/\tau_r} \quad (1)$$

由式(1)可得动剪切模量函数的基本表达式

$$G = \frac{G_{\max}}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (2)$$

或写成

$$G/G_{\max} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中: $G$ 为初始剪切模量; $\tau_d$ 为最大动剪应力; $\tau_r$ 为某一剪应变对应的实时剪应力。初

始动剪切模量  $G_{\max}$  和参考应变  $\gamma_r$  值确定以后,就可以得到土的动应力-应变关系曲线。所以,控制动剪切模量比  $G/G_{\max}$  和参考应变  $\gamma_r$  满足相似比关系就能得到满足要求的动应力-应变关系,且根据文献[9],初始剪切模量  $G_{\max}$  可以采用波速法确定,即

$$G_{\max} = \rho v_s^2 \quad (4)$$

由式(4)可知,当初始剪切模量  $G_{\max}$  和密度  $\rho$  满足相似关系时,剪切波速  $v_s$  同样满足要求,这样配制出来的相似材料才能较好地反应原型软岩的动力特性。

## 1.2 正交试验设计

相似材料配比试验中,对相似材料物理力学性质产生影响的因素和各因素水平数较多,因此,采用正交试验方法对试验次数进行优化。采用的正交试验具体设计过程和试验步骤如下:

第 1 次正交试验:选用 3 因素 4 水平的正交试验方案,以黏土、重晶石粉、石膏含量作为正交设计的 3 个因素,根据现场勘察资料,含水率控制在 14%,根据试验需要,制作标准试块进行动三轴试验,主要测试动剪切模量比  $G/G_{\max}$  和参考应变  $\gamma$  等参数,并对正交试验结果进行评估,以此作为第 2 次正交试验的依据。

第 2 次配比试验:为精准获取振动台模型试验相似材料的最终配比,根据第 1 次正交试验的结果,与需满足的模型材料要求进行对比,缩小试验因素的取值范围,并以此为基础开展第 2 次配比试验,得到基岩相似材料的最终配比。

以黏土、重晶石粉、石膏含量作为正交设计的 3 个因素,每个因素设置 4 个水平,相应的材料配比方案见表 1,表中列出了各相似材料的质量比。

表 1 相似材料配比试验方案

Table 1 Proportioning test program of similar material

试验组数	黏土	重晶石粉	石膏
1	7	2	2
2	7	3	3
3	7	4	4
4	7	5	5
5	8	2	3
6	8	3	4
7	8	4	5
8	8	5	2
9	9	2	4

续表 1

试验组数	黏土	重晶石粉	石膏
10	9	3	5
11	9	4	2
12	9	5	3
13	10	2	5
15	10	4	3
16	10	5	4

注:在试验开始前,对各材料进行含水率测试,从而确定拌合加入的水量。初步预计各组配比材料的含量为黏土风干含水率的 2%,最终相似材料含水率为 14%。

## 2 试验过程

对于模型试验,软岩施工开始距试验模型振动数据采集之间约有 7 d 时间,所以,事先制备好圆柱状试样,然后放入保鲜袋保存 7 d,随后进行试样动三轴试验,试验设备及试验过程分别如图 1、图 2 所示。试验为单向激振动三轴试验,主要模拟动力荷载的波型、方向、频率和持时。对于地震来说,可将地震荷载简化为等效谐波作用,谐波幅值剪应力  $\tau_c$  取为  $0.65\tau_{\max}$ ,加载幅值为 40 N,等效循环次数选择 8 级地震对应的 30 次,频率为 1 Hz,地震方向按水平剪切波考虑。

试样施加围压由土层实际应力状态确定,根据原场地的土层分布情况,可确定其基岩实际应力状态,因此,试验应力状态应尽可能真实地反应基岩在地震荷载作用下的状态。基岩的容重为  $24 \text{ kN/m}^3$ ,地震前作用的竖向应力为 363 kPa,水平应力为 290.9 kPa,所以,试验围压确定为 300 kPa。

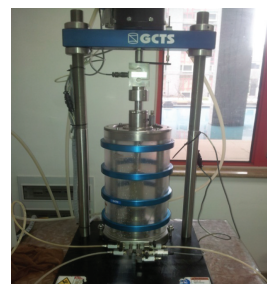


图 1 动三轴仪

Fig. 1 Dynamic triaxial apparatus

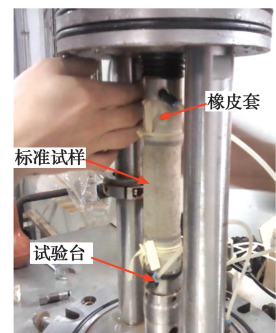


图 2 试样制备

Fig. 2 Sample preparation

### 3 试验结果分析

试验目的主要是配制动应力-动应变关系和剪切波速满足相似比的模型材料,其中,应力-应变关系采用 Hardin-Drnevich 模型,具体表达式如式(3)所示,即配制模型材料的  $G/G_{max} \sim \gamma$  关系曲线与原型材料  $G/G_{max} \sim \gamma$  关系曲线的相关性为评价模型试验配比的重要指标。

第 1 次相似材料正交试验主要是明确黏土、重晶石粉、石膏对曲线变化的影响趋势,故选取参考应变  $\gamma_r$  与统计分析所得到的岩石的初始剪切模量  $G_{max}$ ,引入相关函数  $Correl(X, Y)$ , 计算式如式(5)所示<sup>[10]</sup>。

$$Correl(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

式中: $\bar{x}$ 、 $\bar{y}$  分别为  $x$  和  $y$  的样本均值。

原型材料  $G/G_{max} \sim \gamma$  关系曲线的参数采用王志佳<sup>[11]</sup>经过统计分析得到的软岩  $G/G_{max} \sim \gamma$  关系曲线,具体如图 3 所示,根据相似准则,将软岩原型和相似材料相关参数列于表 2。

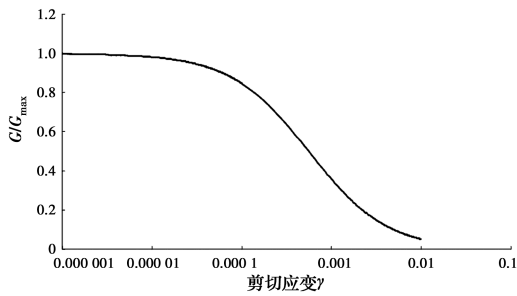


图 3 动应力-动应变关系曲线

Fig. 3 Curve of dynamic stress versus dynamic strain

表 2 软岩原型和相似材料相关参数

Table 2 Relevant parameters of prototype and similar material of soft rock

参数	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	初始剪切模量 $G_{max}/\text{MPa}$	参考应变 $\gamma_r$	剪切波速 $\nu_s/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
相似常数	1	70	1	$\sqrt{70}$
原型	2 400	1 332	0.001 802	744.98
相似材料	2 400	19.03	0.001 802	89.04

由于振动台试验选择密度  $\rho$ 、长度  $L$  以及重力加速度  $g$  作为基本量纲,密度相似常数  $C_\rho$  取为 1,尺寸相似常数  $C_L$  取为 70,重力加速度相似常数  $C_g$  取为 1,由上述 3 参量相似常数可导出其余物理量的相似常数,如表 2 所示。

通过试验得到 16 组不同配比相似材料的试验结果,列于表 3。

表 3 相似材料配比第 1 次正交试验结果

Table 3 First orthogonal test results of similar material proportion

试验组数	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\gamma_r$	$G_{max}/$ MPa	Correl
1	2.355	0.001 833	18.5	0.925
2	2.423	0.001 873	22.5	0.898
3	2.473	0.001 953	24.2	0.822
4	2.512	0.002 071	28.6	0.787
5	2.371	0.001 793	18.7	0.972
6	2.393	0.001 845	23.9	0.921
7	2.441	0.001 925	21.3	0.858
8	2.527	0.001 79	22.7	0.863
9	2.313	0.001 773	20.4	0.914
10	2.371	0.001 853	21.8	0.877
11	2.447	0.001 662	19.4	0.924
12	2.488	0.001 91	20.9	0.868
13	2.300	0.001 83	20.2	0.935
14	2.367	0.001 707	17.6	0.882
15	2.417	0.001 819	19.7	0.926
16	2.458	0.001 868	23.2	0.891

### 4 影响因素敏感性分析

极差是用于衡量各因素取值变化对相似材料物理力学性质影响的参量,极差大的因素即为对相似材料性质影响显著的关键因素<sup>[12]</sup>。各因素的极差  $R$  可通过式(6)计算。

$$R = \max\{K_{ij}\} - \min\{K_{ij}\} \quad (6)$$

式中: $i$  为正交试验水平数; $j$  为正交试验因素数; $K_{ij}$  为在  $i$  水平下的  $j$  因素试验结果之和。

多指标正交试验的方差分析主要是通过对试验数据偏差平方和和误差平方和进行计算检验的统计量,从而可以准确地判断各个影响因素之间相互作用的效果是否明显<sup>[13]</sup>。

为了反映试验结果的总差异,引入总离差平方和  $SS_T$ ,总离差平方和越大,则说明试验结果之间的差异越大,总离差平方和为

$$SS_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2 \quad (7)$$

各因素的偏差平方和  $SS_j$  为

$$SS_j = \frac{t}{n} \sum_{i=1}^t K_{ij}^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^t K_{ij} \right)^2 \quad (8)$$

式中： $t$  为各试验因素的水平数； $n$  为各因素  $j$  在  $i$  水平下的试验次数。

试验误差的离差平方和可由式(9)求出。

$$SS_e = SS_T - \sum_{A=1}^j SS_A \quad (9)$$

任一列离差平方和对应的自由度

$$df_j = \text{因素水平数} - 1 = r - 1 \quad (10)$$

各因素的均方为

$$MS_j = SS_j / df_j \quad (11)$$

试验误差的均方为

$$MS_e = SS_e / df_e \quad (12)$$

各影响因素对应的统计量  $F$  为

$$F_j = MS_j / MS_e \quad (13)$$

### 4.1 密度敏感性分析

分别计算黏土、重晶石粉和石膏在 4 种不同水平下对应试验样品的密度平均值、3 种因素对试样密度影响的极差和方差，如表 4、表 5 所示。

表 4 密度极差分析

Table 4 Range analysis of density  $g/cm^3$

水平组数	黏土	重晶石粉	石膏
1	2.441	2.335	2.424
2	2.43	2.388	2.425
3	2.405	2.445	2.409
4	2.386	2.496	2.405
极差	0.044	0.161	0.002 0

表 5 密度方差分析

Table 5 Variance analysis of density

材料	离差平方和	平均离差平方和	试验误差的均方	$F$ 值
黏土	0.001 95	0.000 65		0.347
重晶石粉	0.014 62	0.004 87	0.001 87	2.602
石膏	0.000 28	0.000 094		0.050

通过以上分析可以发现，各影响因素对相似材料的密度敏感性由大到小依次为：重晶石粉、黏土、石膏。相较于黏土和石膏，重晶石粉的极差和方差较大，说明重晶石粉含量是影响相似材料密度的主要因素。为了更加直观地分析重晶石粉、黏土和石膏对相似材料密度的影响，根据表 5 作出密度敏感性因素分析图，如图 4 所示。可以看出，材料密度随着黏土和石膏含量的增加略微减小，随着重晶石粉含量的增加而呈增大的趋势。

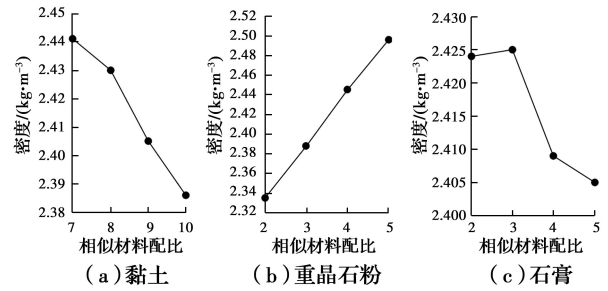


图 4 相似材料的密度敏感性分析图

Fig. 4 Sensitivity analysis of affecting density

### 4.2 $\gamma_r$ 敏感性分析

分别计算黏土、重晶石粉和石膏在 4 种不同水平下对应试验样品的参考应变平均值、3 种因素对参考应变影响的极差和方差，如表 6 和表 7 所示。

表 6  $\gamma_r$  极差分析

Table 6 Range analysis of reference strain

水平组数	黏土	重晶石粉	石膏
1	0.001 933	0.001 808	0.001 748
2	0.001 838	0.001 82	0.001 849
3	0.001 8	0.001 84	0.001 86
4	0.001 806	0.001 91	0.001 92
极差	0.000 133	0.000 102	0.000 172

表 7  $\gamma_r$  方差分析

Table 7 Variance analysis of reference strain

材料	离差平方和/ $10^{-8}$	平均离差平方和/ $10^{-9}$	试验误差的均方/ $10^{-9}$	$F$ 值
黏土	1.129	3.765		1.034
重晶石粉	0.626 6	2.089	3.640	0.574
石膏	1.520	5.065		1.392

通过以上分析可以发现，石膏和黏土的极差和方差明显较大，故石膏和黏土对相似材料的参考应变  $\gamma_r$  影响较为明显。为了更加直观地分析各因素对相似材料  $\gamma_r$  的影响，根据表 7 作出  $\gamma_r$  的敏感性因素分析图，如图 5 所示。可以看出，相似材料的参考应变  $\gamma_r$  随着黏土含量的增加而呈减小的趋势，随着石膏和重晶石粉含量的增加而呈增大的趋势。

### 4.3 $G_{max}$ 敏感性分析

分别计算黏土、重晶石粉和石膏在 4 种不同水平下对应试验样品的初始动剪切模量平均值、3 种因素对初始动剪切模量影响的极差和方差，如表 8 和表 9 所示。

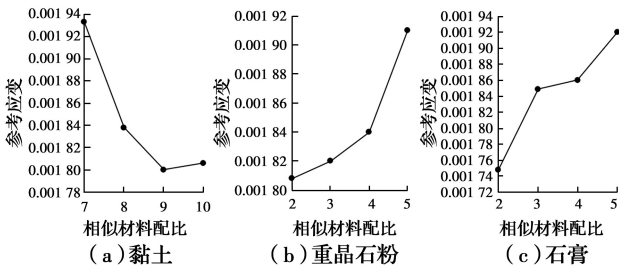


图 5 相似材料的参考应变  $\gamma_r$  敏感性分析图

Fig. 5 Sensitivity analysis of reference strain of similar material

表 8  $G_{max}$  极差分析

Table 8 Range analysis of initial shear modulus MPa

水平组数	黏土	重晶石粉	石膏
1	23.45	19.45	19.55
2	21.9	21.7	20.45
3	20.62	21.15	22.68
4	19.63	23.35	22.95
极差	3.82	3.9	3.4

表 9  $G_{max}$  方差分析

Table 9 Variance analysis of initial shear modulus

材料	离差平方和	平均离差平方和	试验误差的均方	F 值
黏土	8.115 5	2.705 2		1.000 9
重晶石粉	7.855 5	2.618 5	2.702 7	0.968 9
石膏	8.353 0	2.784 3		1.030 2

通过以上分析,黏土、重晶石粉和石膏的含量对相似材料的初始动剪切模量  $G_{max}$  的影响都较为明显。为了更加直观地分析各因素对相似材料初始动剪切模量  $G_{max}$  的影响,根据表 9 作出  $G_{max}$  敏感性因素分析图,如图 6 所示。可以看出,相似材料的初始动剪切模量  $G_{max}$  随着黏土含量的增加而呈减小的趋势,随着重晶石粉和石膏含量的增加而呈增大的趋势。

## 5 最终配比试验

基于第 1 次正交试验所确定的各配比材料对参考应变  $\gamma_r$  与统计分析所得软岩的初始剪切模量  $G_{max}$  的影响趋势,选取第 1 次正交试验中配比结果与目标配比材料参数相近的配比作为起始配比。根据振动台试验的要求,软岩原型的材料参数:密度为

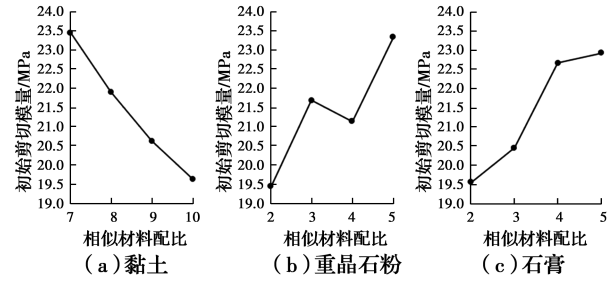


图 6 相似材料的初始动剪切模量  $G_{max}$  敏感性分析图

Fig. 6 Sensitivity analysis of initial shear modulus of similar material

2 400 kg/m<sup>3</sup>,初始剪切模量  $G_{max}$  为 1 332 MPa,参考应变  $\gamma_r$  为 0.001 802。结合第 1 次正交试验的结果,选择第 5 组配比作为第 2 次配比试验的起始配比,随后可以通过微调重晶石粉、黏土、石膏的含量来进行相似材料的精确配比。各配比材料质量比情况如表 10 所示。

表 10 配比试验

Table 10 Proportioning test

试验组数	黏土	重晶石粉	石膏
1	7.6	1.9	2.95
2	7.6	2.0	3.0
3	7.6	2.1	3.05
4	7.6	2.2	3.1
5	7.7	1.92	3.0
6	7.7	2.0	3.05
7	7.7	2.1	3.1
8	7.7	2.2	2.95
9	7.8	1.9	3.05
10	7.8	2.0	3.1
11	7.8	2.1	2.95
12	7.8	2.2	3.0
13	7.9	1.9	3.1
14	7.9	2.0	2.95
15	7.9	2.1	3.0
16	7.9	2.2	3.05

第 2 次配比试验结果如表 11 所示,可以看出,第 15 组试验的结果与软岩相似材料的参数比较接近,其动应力-动应变关系曲线与文献[9]推荐的软岩动应力-动应变曲线的相关性较好,故可将第 15 组试验的配比作为软岩相似材料的最终配比,软岩

相似材料和软岩原型的动应力-动应变曲线如图7所示。

表 11 配比试验结果

Table 11 Proportioning test results

试验组数	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$\gamma_r$	$G_{\max}/\text{MPa}$	Correl
1	2.389	0.001 854	18.8	0.953
2	2.395	0.001 848	19.1	0.960
3	2.413	0.001 868	19.7	0.942
4	2.424	0.001 873	20.4	0.937
5	2.384	0.001 826	18.5	0.972
6	2.393	0.001 851	19.3	0.956
7	2.407	0.001 848	20.1	0.960
8	2.418	0.001 84	19.4	0.965
9	2.381	0.001 806	18.7	0.994
10	2.390	0.001 82	19.6	0.988
11	2.405	0.001 809	18.9	0.991
12	2.412	0.001 817	19.3	0.990
13	2.377	0.001 806	18.8	0.993
14	2.386	0.001 798	18.1	0.983
15	2.401	0.001 814	19.2	0.993
16	2.407	0.001 823	19.6	0.985

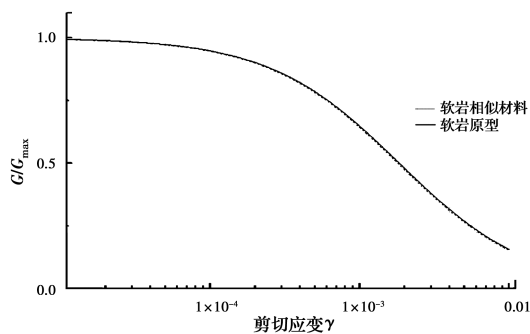


图 7 软岩相似材料和软岩原型动应力-动应变曲线

Fig. 7 Curves of dynamic stress-strain of soft rock prototype and similar material

式(4)给出了初始剪切模量  $G_{\max}$  和剪切波速的关系式,根据第 15 组试验配比材料的初始剪切模量  $G_{\max}$  为 19.2 MPa,可以推算出剪切波速  $v_s$  为 89.44 m/s,则在试验开始前可通过剪切波速的测试验证基岩配比的初始剪切模量的合理性。

## 6 结论

1)根据模型试验的相似原理,通过正交试验及物理力学性质试验,研制出一种新型软岩相似材料,

新型模型材料考虑了地震作用下基岩动力特性及剪切波速的相似问题,适合用于振动台试验软岩相似材料的模拟。

2)软岩相似材料中各影响因素对相似材料密度的敏感性由大到小依次为:重晶石粉、黏土、石膏。石膏和黏土对相似材料的参考应变影响较为明显,相似材料的参考应变随着黏土含量的增加而减小,随着石膏和重晶石粉含量的增加而增大;相似材料的初始剪切模量  $G_{\max}$  随着黏土含量的增加而减小,随着石膏和重晶石粉含量的增加而增大。

3)以两次正交试验结果为依据,以动应力-动应变特性和波传播特性相似为控制指标,确定模型试验软岩相似材料的最终质量比为黏土:重晶石粉:石膏=7.9:2.1:3,此配比可充分保证地下结构地震响应振动台模型试验对基岩相似材料的要求。

## 参考文献:

- [1] 林韵梅. 实验岩石力学:模拟研究[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1984.  
LIN Y M. Similar study of experimental rock mechanics [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984. (in Chinese)
- [2] 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 B C, CHEN C X, LIU C H, et al. Research on similar material of slope simulation experiment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1805-1808. (in Chinese)
- [3] 王汉鹏, 李术才, 张强勇, 等. 新型地质力学模型试验相似材料的研制[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(9): 1842-1847.  
WANG H P, LI S C, ZHANG Q Y, et al. Development of a new geomechanical similar material [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1842-1847. (in Chinese)
- [4] 杜时贵, 黄曼, 罗战友, 等. 岩石结构面力学原型试验相似材料研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2263-2270.  
DU S G, HUANG M, LUO Z Y, et al. Similar material study of mechanical prototype test of rock structural plane [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2263-2270. (in Chinese)
- [5] 张定邦, 周传波, 贺丹, 等. 超高陡边坡与崩落法地下开采物理模型相似材料研制[J]. 中南大学学报(自然

- 科学版), 2013, 44(10): 4221-4227.
- ZHANG D B, ZHOU C B, HE D, et al. Similar material preparation of underground caving mining model with super high-steep slope [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(10): 4221-4227. (in Chinese)
- [6] BURGERT W, LIPPMANN H. Models of translatory rock bursting in coal [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1981, 18(4): 285-294.
- [7] FATAHI B, TABATABAIEFAR S H R. Fully nonlinear versus equivalent linear computation method for seismic analysis of midrise buildings on soft soils [J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(4): 04014016.
- [8] KIM Y S, ROESSET J M. Effect of nonlinear soil behavior on inelastic seismic response of a structure [J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(2): 104-114.
- [9] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- XIE D Y. Soil dynamics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011. (in Chinese)
- [10] 王志佳, 张建经, 闫孔明, 等. 考虑动本构关系相似的模型土设计及相似判定体系研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(5): 1328-1332, 1338.
- WANG Z J, ZHANG J J, YAN K M, et al. Model soil design considering similitude of dynamic constitutive model and evaluation of similarity level [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5): 1328-1332, 1338. (in Chinese)
- [11] 王志佳. 土及岩石动力学参数的统计与分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- WANG Z J. The statistical and analysis of dynamic parameters of soils and rocks [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [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.
- DONG J Y, YANG J H, YANG G X, et al. Research on similar material proportioning test of model test based on orthogonal design [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 44-49. (in Chinese)
- [13] 李云燕, 胡传荣. 实验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- LI Y Y, HU C R. Experiment design and data processing [M]. Beijing: Chemistry Industry Press, 2005. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)