

柴少峰,王平,郭海涛,等.大型振动台试验土质边坡模型材料相似性及评价[J].地震工程学报,2019,41(5):1308-1315.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1308

CHAI Shaofeng, WANG Ping, GUO Haitao, et al. Model Material Similarity and Associated Evaluation for Soil Slopes in a Large-scale Shaking Table Test[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1308-1315. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1308

大型振动台试验土质边坡模型材料相似性及评价

柴少峰^{1,2}, 王平², 郭海涛², 蒲小武², 车高凤², 王丽丽²,
马金莲², 许世阳², 王会娟², 常文斌²

(1. 中国地震局工程力学研究所 中国地震局地震工程与工程振动重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080;
2. 中国地震局 甘肃省黄土地震工程重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 大型振动台模型试验是边坡动力响应和破坏模式研究的重要手段,其中相似材料的选择是决定试验能否成功的关键。以黄土地区2类典型边坡为研究对象,在对滑坡体原状土样开展室内土动力学测试的基础上,提出6种相似比条件下振动台模型试验相似材料的配比方法;对2种相似比条件下相似材料的参数进行量纲分析,依据相似判据、相似准则的约束,以模糊数学理论进行优化,并提出大型土质边坡振动台试验的材料相似性评价体系。

关键词: 大型振动台试验;黄土边坡;模型试验;材料相似性评价

中图分类号: TU411.93

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1308-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1308

Model Material Similarity and Associated Evaluation for Soil Slopes in a Large-scale Shaking Table Test

CHAI Shaofeng^{1,2}, WANG Ping², GUO Haitao², PU Xiaowu², CHE Gaofeng²,
WANG Lili², MA Jinlian², XU Shiyang², WANG Huijuan², CHANG Wenbin²

(1. Key Laboratory of Earthquake Engineering and Engineering Vibration of China Earthquake Agency, Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Agency, Harbin 150080, Heilongjiang, China;

2. Key Laboratory of Loess Earthquake Engineering, China Earthquake Agency & Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: The large-scale shaking table model test is an important means to study the dynamic response and failure mode of slopes; selection of similar materials is the key to the success of the test. Two types of representative slopes in the loess region were taken as research objects, based on laboratory soil dynamics tests conducted on undisturbed soils of loess landslides. Different mixture ratio methods of similar materials with six different similar ratios are proposed. Parameters of similar materials under the condition of two similar ratios were analyzed by quantitative outline. According to the constraint of similar criteria, an evaluation system for material similarity of soil slopes in large-scale shaking table tests is proposed and then optimized by fuzzy mathematical theory.

收稿日期: 2019-05-01

基金项目: 中国地震局地震预测研究所基本科研业务费专项(2018IESLZ08); 中国地震局地震科技星火计划(XH20058Y); 甘肃省重点研发计划(18YF1FA101)

第一作者简介: 柴少峰(1986-), 男, 博士, 主要从事岩土地震工程及地震模拟振动台试验研究。E-mail: chaishaofeng520@163.com。

通信作者: 王平(1977-), 男, 副研究员, 主要从事土动力学与黄土地震灾害研究。E-mail: lanzhouwang_p@126.com。

Keywords: large-scale shaking table test; loess slope; model test; material similarity evaluation

0 引言

在边坡动力响应和破坏模式的研究中,大型振动台物理模拟是一种行之有效的方法。该方法不受随机地震事件发生的时空限制,可实现各种幅值、频谱、持时的地震波加载,模拟地震现象的主震、余震全过程,了解试验模型在不同阶段的动力响应特征,并可直观地观测地震力作用下边坡的变形和破坏特征,用以验证数值分析的研究成果^[1]。受振动台尺寸和承载能力的限制,绝大多数的振动台试验都是采用缩尺试验,即将原型等比例缩小,因此在进行大型振动台试验的过程中首先要对边坡模型进行相似关系设计,使模型和原型结构的几何尺寸、材料性能保持一定比例^[2],而正确模拟原型的难点和关键是合理地选择相似材料,因此对模型材料相似性的研究是关系到模型试验能否真实反映实际工程问题的关键。目前相似材料的研究主要集中于弹性范围内静力学问题研究,而考虑弹塑性相似和破坏时土体性状相似的研究却很少^[3]。同时国内外许多学者对相似材料的研制进行了大量的研究工作,取得了很多研究成果,但关于大型振动台试验土质边坡相似材料试验及材料相似性相关的研究却鲜有报道。

1 相似试验

振动台模型试验是以模型和原型之间的物理相似为基础的试验方法。该方法假设模型和原型之间的所有同名物理量都是相似的,即所有的矢量在方向上一致,在数值上相应成比例。模型试验的实质是:用与原型力学性质相似的材料按照一定比例缩制成模型,观测模型的变形、位移、应力和破坏等情况,据此推测原型的实际状况。土质材料相似模型试验中,除了几何相似之外,还要求土质相似材料的物理力学相似。实际上,实验中土质类模型试验材料相似是非常复杂的问题,要做到完全相似几乎不可能^[3]。在实际试验中,只能根据研究问题的主要矛盾确定相似的主要参数,正确地选择相似参数和物理量,力求尽可能成功地模拟实际工程现象。

1.1 几何相似

几何相似是指模型与原型的几何尺寸成比例、角度相等。考虑到模型箱尺寸、振动台台面尺寸及加载能力,选择振动台模型试验几何相似比为 $C_L = 10、20、25、30、50、100$ ^[1]。

1.2 材料物理学相似

材料相似是模型试验研究的难点之一,它要求模型材料具有低弹模、高容重、低黏聚力、低剪切模量、低应力状态,且这些参数还需和目标参数之间满足一定的相似比。

在材料相似方面,应满足利用 Π 定理量纲分析法推导所得的模型材料与原型材料相似比,除此之外还需满足应力-应变相似性、重力相似性和抗力相似性的条件。运用量纲分析法求解相似关系时,试验过程涉及到的物理量为:尺寸 L 、材料密度 ρ 、重力加速度 g 、内聚力 c 、内摩擦角 φ 、弹性模量 E 、剪切模量 G 、泊松比 μ 、应力 σ 、应变 ϵ 、坡体加速度 a 、输入地震动加速度时程时长 t 、输入地震动加速度时程幅值 A 。试验物理现象可表示为^[4-5]:

$$f(L, \rho, g, c, \varphi, E, G, \mu, \sigma, \epsilon, a, t, A) = 0 \quad (1)$$

使用长度 $[L]$ 、时间 $[T]$ 及质量 $[M]$ 作为基本量纲的 $[MLT]$ 量纲系统,则其他物理量量纲可由这三个基本量纲表示:

$$[\rho] = [M][L]^{-3} \quad (2)$$

$$[g] = [L][T]^{-2} \quad (3)$$

$$[c] = [M][L]^{-1}[T]^{-2} \quad (4)$$

$$[E] = [G] = [M][L]^{-1}[T]^{-2} \quad (5)$$

$$[\sigma] = [M][L]^{-1}[T]^{-2} \quad (6)$$

$$[a] = [A] = [L][T]^{-2} \quad (7)$$

$$[\varphi] = [\epsilon] = [\mu] = [1] \quad (8)$$

将式(1)改写成无量纲方程,则其任意无量纲项可以表示为:

$$\pi = [L]^{\alpha_1} [\rho]^{\alpha_2} [g]^{\alpha_3} [c]^{\alpha_4} [\varphi]^{\alpha_5} [E]^{\alpha_6} [G]^{\alpha_7} [\mu]^{\alpha_8} [\sigma]^{\alpha_9} [\epsilon]^{\alpha_{10}} [a]^{\alpha_{11}} [t]^{\alpha_{12}} [A]^{\alpha_{13}} \quad (9)$$

式中: $\alpha_1 \sim \alpha_{13}$ 为各物理量的因次。将各物理量量纲表达式代入式(9),并根据量纲齐次原则整理得量纲分析情况表(表 1)。

表 1 量纲分析情况表

Table 1 Dimensional analysis table

基本量纲	ρ	g	c	E	G	σ	a	t	A
M	1	0	1	1	1	1	0	0	0
L	-3	1	-1	-1	-1	-1	1	0	1
T	0	-2	-2	-2	-2	-2	2	1	-2

设相似比参数为 C 。在模型试验中,自重荷载不能由施加集中力来模拟,需由材料本身自重来实现,因此取密度相似比 $C_\rho = 1$ 是比较理想的模拟条件,这也决定了相似材料必须具有低强度、低弹模、高容重的特性。

模型试验还要求原型和模型满足相似学第二定律,即原型中包含的实质问题应在模型中满足模拟的相似条件。考虑到原型和模型处于相同的重力场,故取重力加速度相似比 $C_g = 1$ 。

基于以上分析可确定 L 、 ρ 、 g 为控制量,故选取此三个物理量为其他参量的相似判据,如式(10)~(16)所示:

$$\pi_4 = \frac{c}{L\rho g} \quad (10)$$

$$\pi_6 = \frac{E}{L\rho g} \quad (11)$$

$$\pi_7 = \frac{G}{L\rho g} \quad (12)$$

$$\pi_9 = \frac{\sigma}{L\rho g} \quad (13)$$

$$\pi_{11} = \frac{a}{g} \quad (14)$$

$$\pi_{12} = \frac{t}{L^{1/2}g^{-1/2}} \quad (15)$$

$$\pi_{13} = \frac{A}{g} \quad (16)$$

在量纲分析法中,因无量纲量的相似比为 1,所以 $C_\varphi = C_\mu = C_\epsilon = 1$ 。据以上推导的相似判据,其他物理量与三个基本物理量的相似比具有如式(17)~(23)所示关系。

$$\frac{C_c}{C_L C_\rho C_g} = 1 \quad (17)$$

$$\frac{C_E}{C_L C_\rho C_g} = 1 \quad (18)$$

$$\frac{C_G}{C_L C_\rho C_g} = 1 \quad (19)$$

$$\frac{C_\sigma}{C_L C_\rho C_g} = 1 \quad (20)$$

$$\frac{C_a}{C_g} = 1 \quad (21)$$

$$\frac{C_t}{C_L^{1/2} C_g^{-1/2}} = 1 \quad (22)$$

$$\frac{C_A}{C_g} = 1 \quad (23)$$

可知 $C_c = C_E = C_G = C_\sigma = C$, $C_t = C_L^{1/2} C_g^{-1/2}$, $C_a = C_A = 1$ 。

2 相似参数判定

依据上述准则推导计算 1:10、1:20、1:25、1:30、1:50、1:100 相似比条件下 C_σ 、 C_L 、 C_E 、 C_μ 、 C_c 、 C_φ 的值,并列于表 2。

表 2 不同相似比条件下的相似参数

Table 2 Similarity parameters under different similarity ratios

相似比	相似参数												
	C_L	C_ρ	C_g	C_φ	C_μ	C_ϵ	C_c	C_E	C_G	C_σ	C_a	C_t	C_A
15	10	1	1	1	1	1	10	10	10	10	1	$\sqrt{10}$	1
20	20	1	1	1	1	1	20	20	20	20	1	$\sqrt{20}$	1
25	25	1	1	1	1	1	25	25	25	25	1	$\sqrt{25}$	1
30	30	1	1	1	1	1	30	30	30	30	1	$\sqrt{30}$	1
50	50	1	1	1	1	1	50	50	50	50	1	$\sqrt{50}$	1
100	100	1	1	1	1	1	100	100	100	100	1	$\sqrt{100}$	1

3 室内试验

室内试验测定静宁孙家沟和兰州新区山字墩原状黄土的主要物理力学参数,并列于表 3~5。其中静力学参数作为相似配比试验时的相似参数,动力学参数作为判断直剪试验结果是否准确的参考。

根据室内试验结果分析可知,静宁孙家沟滑坡土体的黏聚力值较小,据此推断是由于该滑坡在滑动过程中致土体松散,虽经历后期沉积,但初始黏聚力仍小于天然堆积黄土。实验表明初始黏聚力越小,相似材料模拟越不容易实现,故后期相似材料配置中以兰州新区山字墩土体材料作为目标值进行相

表 3 孙家沟和山字墩黄土静强度试验结果

Table 3 Static strength test results of loess in Sunjiagou and Shanxidun

取样地点	取土深度/m	$\gamma/(g \cdot cm^{-3})$	$\gamma_d/(g \cdot cm^{-3})$	$\omega/\%$	C/kPa	$\varphi/(^\circ)$
孙家沟	4.0	1.47	1.31	11.8	30.38	29.54
山字墩	5.0	1.34	1.28	5.04	43.45	32.53
山字墩	10.0	1.36	1.30	4.25	45.46	34.62

表 4 静宁孙家沟黄土动强度试验结果

Table 4 Dynamic strength test results of loess in Sunjiagou, Jingning

取土深度 /m	γ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	γ_d /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	ω /%	σ_{1c} /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	σ_{3c} /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	土性参数		初始动弹性模量 E_0 /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)
						$a \times 10^{-3}$	b	
4.0	1.47	1.31	11.8	0.576	0.340	1.72	1.061	581.4

表 5 兰州新区黄土动强度试验结果

Table 5 Dynamic strength test results of loess in Lanzhou new district

取土深度 /m	γ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	γ_d /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	ω /%	σ_{1c} /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	σ_{3c} /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	土性参数		初始动弹性模量 E_0 /($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$)
						$a \times 10^{-3}$	b	
4.0	1.47	1.31	11.8	0.576	0.340	1.72	1.061	581.4

似模拟,选取相似比为 1 : 10 和 1 : 20 依次研究。其主要材料指标列于表 6 和表 7。

表 6 模型土及原型土主要材料指标(相似比 1 : 10)

Table 6 Main material indexes of model soil and prototype soil (similarity ratio: 1 : 10)

材料	密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
原型值	1.35(平均值)	44.45	33.58
目标值	1.35	4.445	33.58
实际值	1.32	-	-

表 7 模型土及原型土主要材料指标(相似比 1 : 20)

Table 7 Main material indexes of model soil and prototype soil (similarity ratio: 1 : 20)

材料	密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /($^\circ$)
原型值	1.35(平均值)	44.45	33.58
目标值	1.35	2.22	33.58
实际值	1.32	-	-

由于振动台试验是模拟边坡达到土体峰值强度时发生破坏,土的破坏主要是剪切破坏,其强度主要表现为黏聚力和摩擦力,亦即其抗剪强度主要由颗粒间的黏聚力和摩擦力决定。故室内重塑土的强度试验用排水快剪试验。试验使用 SDJ-IBC 应变式

电动手摇直剪仪。每组试验制备 4 个试样,分别在 100、200、300、400 kPa 的法向压力下以 0.8 mm/min 的速率进行剪切,使试样在 3~5 min 内剪坏,求出该相似材料的黏聚力与内摩擦角。

4 相似模型材料配比方法

在土质类相似试验中,弹性范围内的试验其主要物理参数为弹性模量和容重,破坏性试验还要重视决定材料强度的内摩擦角和黏聚力等。根据支配物理现象的方程和量纲分析可以分别推导出各自的相似指标,并将其作为设计模型的相似条件依据^[3]。

4.1 相似模型材料原料的选择

模型土的参数选择需要考虑上述相似判据的约束,同时还要考虑土体和添加剂的性质。总结国内外学者对各类边坡模型相似材料的研究,模型坡体可以使用的材料有黏性土、黄土、石英砂、粉末、重晶石粉、粉煤灰、滑石粉、锯末、石膏、水泥、地板蜡、机油、甘油、水等^[6]。

根据不同材料的种类、性能及振动台试验模型破坏特点,我们对将上述材料进行分类,根据各自的性能特点将其分为骨料、外加料、外加剂、胶结料共四类,并将其特性列于表 8。

表 8 原材料名称及性能

Table 8 Raw material name and performance

材料类别	名称	作用	性能
骨料	黄土	配比材料的主要成分,保持与原型材料的一致性	保持黄土原有的结构性及渗透性
	黏性土		模拟黏性土模型的主要配比材料
	石英砂		模拟岩质边坡模型的主要配比材料
外加料	Fe ₃ O ₄ 粉	调节材料重度及颜色	模拟红层泥岩及软岩
	重晶石粉	高重度,调节材料的重度,作为调节材	增加材料重度
	粉煤灰	低重度,低内摩擦角,调节材料的重度及摩擦力,作为调节材料	降低材料重度
	锯末	低重度、低黏聚力,降低黏聚力。	降低重度,减小黏聚力
	滑石粉	降低内摩擦角。	减小内摩擦角
外加剂	机油	保湿,降低材料的力学性能	保持含水率,较小内摩擦角
	甘油	保湿,降低材料的力学性能	保持含水率
胶结料	石膏	胶结作用,不同配比可以模拟不同的参数	调高黏聚力,降低重度
	水泥	胶结作用,不同配比可以模拟不同的参数	调高黏聚力,提高重度

根据前人的研究成果^[6-7],结合相似配比试验和振动台试验用量大的特点,在研制相似材料时应满足如下原则:

- (1) 原料安全、对人体无伤害。
- (2) 原料普通易于购买,价格低廉。
- (3) 原料化学、力学、物理性质稳定,不受时间、湿度、温度等外界条件的限制。
- (4) 作为辅料的配比材料(除保湿剂外),含水率应尽可能为零。
- (5) 相似材料制作工艺简单,操作方便。
- (6) 相似材料的配比可以在较大范围改变材料的力学性质。

4.2 相似指标及相似判据

模型土的参数选择存在几何尺寸与容重、模量和黏聚力的相互约束关系。在土体破坏试验中,根据选定的几何相似比,可以选择容重相似比为1和模量相似比为1作为先决条件,推导其他相似条件。对于振动台试验,因控制容重操作简单方便,容易实现,在相似条件的确定过程中,取容重相似比为1,推导其他相似条件,具体如表9所列。

表9 破坏试验中相似比的选择方案

方案	$a_\gamma = 1$
已知材料参数	$a_L = m$
	$a_\gamma = 1$
	$a_\mu = 1$
	$a_\varphi = 1$
导出材料参数条件	$a_E = a_L a_\gamma = m$
	$a_C = a_E = m$
应力	$a_\sigma = a_E a_\mu = m$
位移	$a_\delta = a_L = m$
面载荷	$a_P = a_E a_L = mm = m^2$
集中载荷	$a_F = a_E a_L^2 = mm = m^2$

从表9可知,试验中土质材料应满足多个物理参数的相似,同时各个参数应尽可能达到完全相似。根据上述原则,以密度为控制量,以黏聚力、内摩擦角和弹性模量为相似参数,进行相似模型材料的试验。相似土质边坡模型相似材料的原材料选择原则为:为使模型黄土保持原型黄土的结构性和工程特性,制作模型土体时以原型黄土为配合材料的主要成分;为使模型土体的黏聚力满足相似设计后的要求,加入一定量的无黏性材料重晶石粉(提高重度,控制密度)和粉煤灰以降低其黏聚力^[3],锯末起调节黏聚力作用,甘油起保水作用。最终确定配比材料成分为:黄土(考虑振动台试验用量大,过2 mm筛)、重晶石粉(细度规格为0.036 mm)、粉煤灰(细度规格为0.05 mm)、锯末

(考虑易成样,用0.5 mm筛)、水。以上述材料为配料,调整不同材料的含量进行试验。

正交试验具有“均衡分散、整齐可比”的特点。该方法如不考虑整体可比性,完全保证试验点在试验范围内充分地均匀分散,就可以减少试验点,且仍能得到反映试验体系主要特征的试验结果^[8]。均匀设计正是基于这种思想出发。对于相似材料试验研究,均匀设计在试验初期可以节省大量的时间^[9]。

相似模型材料配比试验以控制密度和含水率为原则,故水和甘油的含量为定值,依据原状土的含水率将其设定为5%。为得到满足预估值范围的材料配合比,在进行配比试验时设计出4种影响因素,其中因素A为:黄土+重晶石粉的质量/(黄土+重晶石粉+粉煤灰+锯末+甘油+水质量)的百分比、因素B为:重晶石粉质量/(黄土+重晶石粉质量)的百分比、因素C为:锯末质量/材料总质量的百分比、因素D为:(甘油+水质量)/材料总质量的百分比。每个因素设置5个水平,根据影响因素水平,依照四因素五水平正交表做配比试验,需要25次试验。如不按正交设计表则需要 $5^4 = 625$ 次试验。四因素五水平正交设计试验方案初设表见表10。

表10 基于正交设计的配比试验方案初设

试验编号	因素 A/%	因素 B/%	因素 C/%	因素 D/%
试验 1	55	0	0	5
试验 2	55	5	5	5
试验 3	55	10	10	5
试验 4	55	15	15	5
试验 5	55	20	20	5
试验 6	65	0	5	5
试验 7	65	5	10	5
试验 8	65	10	15	5
试验 9	65	15	20	5
试验 10	65	20	0	5
试验 11	75	0	10	5
试验 12	75	5	15	5
试验 13	75	10	20	5
试验 14	75	15	0	5
试验 15	75	20	5	5
试验 16	85	0	15	5
试验 17	85	5	20	5
试验 18	85	10	0	5
试验 19	85	15	5	5
试验 20	85	20	10	5
试验 21	75	0	20	5
试验 22	95	5	0	5
试验 23	90	10	5	5
试验 24	85	15	10	5
试验 25	80	20	15	5

通过表 10 可知采用正交设计至少需要 25 次试验,并且每次试验要测试黏聚力、内摩擦角及弹性模量,试验工作量大。利用均匀设计的特点,只测试编号为试验 3、8、13、18、23 的五组试验结果,若其黏聚

力和内摩擦角远大于目标值则不需要测试其他相邻试验组。

根据试验结果(表 11)可知,试验组 13 黏聚力和内摩擦角接近目标值。

表 11 采用正交设计的相似材料配比方案及抗剪强度

Table 11 Similar material ratio schemes and shear strength with orthogonal design

试验编号	黄土/%	重晶石粉/%	粉煤灰/%	锯末/%	水+甘油/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(g·cm ⁻³)
试验 3	49.5	5.5	35	5	5(2%甘油)	21.41	24.59	1.35
试验 8	58.5	6.5	15	15	5(2%甘油)	9.92	37.24	1.30
试验 13	50	25	0	20	5(2%甘油)	6.59	34.80	1.19
试验 18	76.5	8.5	10	0	5(2%甘油)	7.53	27.99	1.39
试验 23	81	9	0	5	5(2%甘油)	9.59	31.98	1.35

对比试验 3 和试验 8 结果可以看出,增加 10% 锯末含量的同时减少 20% 粉煤灰含量可以极大地减小黏聚力,同时内摩擦角也会增大。对比试验 8 和试验 13 可知,随粉煤灰含量持续减少,以及重晶石粉和锯末的增加,黏聚力会继续降低,同时内摩擦角也在减小,说明锯末和重晶石粉在降低黏聚力的同时会减小颗粒之间的摩擦力。由于锯末的大幅度增加,导致试样的密度降低。但试验 13 的黏聚力和内摩擦角比较接近于相似比为 1:10 的目标值,因此根据试验结果,将试验 13 结果再进行正交设计。为在获得更小黏聚力的同时,保证相似材料密度为 1.35,保持各配比材料的主要成分为黄土,确定配比材料中黄土的含量为 50%,调整其他材料的含量,

主要是粉煤灰和锯末的含量,使得黏聚力和内摩擦角接近于目标值,得出如表 12 所列的相似配比,并将室内直剪试验结果列于表 13。

通过配比 1、2、3 对比可以看出,锯末含量不变

表 12 相似材料配比(单位:%)

Table 12 Similar material ratios (unit:%)

试验编号	黄土 (2 mm 筛)	重晶石粉	粉煤灰	锯末 (0.5 mm 筛)	水+甘油
配比 1	50	20	5	20	5
配比 2	50	15	10	20	5
配比 3	50	10	15	20	5
配比 4	50	15	15	15	5
配比 5	50	15	20	10	5
配比 6	50	15	10	15	10

表 13 相似材料直剪试验结果

Table 13 Direct shear test results of similar materials

试验编号	黄土/%	重晶石粉/%	粉煤灰/%	锯末/%	水+甘油/%	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(g·cm ⁻³)
配比 1	50	20	5	20	5(2%甘油)	8.44	44.98	1.32
配比 2	50	15	10	20	5(2%甘油)	6.23	36.70	1.31
配比 3	50	10	15	20	5(2%甘油)	6.28	37.68	1.31
配比 4	50	15	15	15	5(2%甘油)	2.99	35.72	1.35
配比 5	50	15	20	10	5(2%甘油)	7.95	34.75	1.35
配比 6	50	15	10	15	5(2%甘油)	3.70	32.63	1.35

的情况下,增加粉煤灰含量的同时减少重晶石粉含量可以小幅度地减小黏聚力,但内摩擦角随粉煤灰含量的小幅度增加有较大幅度的变化。配比 3 的黏聚力和内摩擦角稍大于配比 2,是因为配比 3 重晶石粉含量较少,为尽可能达到 1.35 的密度目标值,对试样进行多次夯击,其密实度大于配比 2。对比配比 2、4、5 的结果可以看出,重晶石粉含量不变的情况下,等比例减少锯末含量的同时增加粉煤灰,黏聚力先减小后增大。主要原因是配比 2 因为锯末含量高,为达到高密度的目标值,试样击实程度高,导致黏聚力增大。对比配比 6 和配比 4 的结果发现,在其他含量不变的情况下,减小粉煤灰含量并增加

含水量,黏聚力反而增大,内摩擦角减小。

综上所述,根据表 6 相似比计算的目标值(黏聚力为 4.445 kPa,内摩擦角为 33.58°)可以看出,对相似比为 1:10 的模型材料使用配比 4 方案的材料及含量进行制备可以获得比较理想的物理力学参数。对于 1:20、1:25、1:30、1:50、1:100 等相似比条件下的材料,如果继续以山字墩坡体材料参数为原型值,其相似后的黏聚力依次为:2.72 kPa、2.18 kPa、1.815 kPa、1.089 kPa、0.544 5 kPa。相似比越小,其目标值越小,在制备相似模型材料时就越难试验。在现有条件下,以天然坡体为原型,以其土体材料为骨料进行相同密度、相同内摩擦角的相似材料

制备时,过低的黏聚力很难或者说几乎不可能实现。因此进行更小相似比的模型制备时,不应以土体抗剪强度作为主要的相似参数进行控制,而应根据试验的主要目标,在能实现的最低抗剪强度下,以坡体的宏观变形和结构破坏形式研究为主,揭示坡体变形破坏过程。具体试验数据的大小和量级应作为试验控制的途径而不应作为定量评价指标。

5 相似结果评价体系

对于相似材料来说,要做到试验中各个参量同时达到完全相似几乎不可能,有的配方某几个参数非常相似,但其他参数却相差太大。为了使相似材料的相似性可以比较,采用模糊数学 Fuzzy 综合评判来进行。具体方法是采用综合评判指数 Z 考虑土质类相似材料多因素隶属函数的综合相似度,从而在有限次的相似材料配置试验中寻找相对最优的配比方案。这种方法考虑了各个物理参数综合的相似程度,通过提高某些比较重要的物理参数的权重,以提高该参数在综合评判指数中的重要性。基本方法如下^[10]:

假设需要配置的相似材料有 N 个物理指标,共有 M 种相似材料,则 M 种材料的所有指标组成一个 $N \times M$ 维矩阵。矩阵中的元素 x_{ij} 表示第 j 种相似材料的第 i 个指标。相似材料和给定原状土关系可以通过隶属函数 u_{ij} 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。根据相似准则,每种相似材料的隶属函数可以表示为:

$$u_{ij} = 1 - \left| \frac{x_i - c_i x_{ij}}{x_i} \right| \quad (24)$$

式中: x_i 为原状土第 i 个指标; 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 个相似指标的相似系数。

隶属函数 u_{ij} 的取值范围为 $u_{ij} \in [0,1]$ 。在计算矩阵的各元素后,根据相似准则计算出隶属函数,其全体组成隶属函数矩阵 \tilde{u} 是一个 $N \times M$ 模糊关系矩阵。矩阵的任一元素用 u_{ij} 表示。由于各个指标并非等权重值,存在各个指标值重要性不同的权值分配问题,设权值的模糊向量为

$$\tilde{w} = (w_1, w_2, \dots, w_n) \quad (25)$$

式中: (w_1, w_2, \dots, w_n) 为因素的权值,并满足归一化:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \in [0,1] \quad (26)$$

按模糊线性加权变换方法,即得:

$$\tilde{z} = \tilde{w}\tilde{u} = (z_1, z_2, \dots, z_m) \quad (27)$$

$$z_j = \sum_{i=1}^n w_i u_{ij}, u_{ij} = 1, 2, \dots, m \quad (28)$$

(z_1, z_2, \dots, z_m) 中经过加权平均计算后最大者即为最佳相似材料。根据 Fuzzy 综合评判法,计算获得相似材料的评判指数。

在本文研究中共有 6 种相似配比材料,分别为配比 1~6。每种材料有 3 个相似指标,分别为密度、黏聚力、内摩擦角。其中密度相似系数取 1,黏聚力系数取 0.95,内摩擦角相似系数取 1。根据上述原则得到隶属函数矩阵:

$$u_{ij} = \begin{bmatrix} 0.977 & 0.025 & 0.661 \\ 0.973 & 0.498 & 0.907 \\ 0.963 & 0.495 & 0.877 \\ 1.000 & 0.717 & 0.936 \\ 1.000 & 0.007 & 0.965 \\ 1.000 & 0.887 & 0.972 \end{bmatrix} \quad (29)$$

因为密度为控制量,故选取权重值为 0.5,黏聚力和内摩擦角权重取 0.25,则权值的模糊向量为 $\tilde{w} = (0.5, 0.25, 0.25)$ 。

经加权平均计算, $Z_1 = 0.65875$; $Z_2 = 0.83775$; $Z_3 = 0.8245$; $Z_4 = 0.91325$; $Z_5 = 0.743$; $Z_6 = 0.9605$ 。理论上来说, Z_6 数值最接近 1,应该是最佳配比材料。但由于配比 6 的含水率是 10%,大于目标材料的含水率,因此排除配比 6,选配比 4 为相似比条件 1:10 的最佳配比。

6 结论

本文主要结论如下:

(1) 在模型试验中,取密度相似比 $C_\rho = 1$ 是比较理想的模拟条件,这也同时决定了相似材料必须具有低强度、低弹模、高容重的特性。

(2) 因黄土边坡滑坡土体的初始黏聚力越小,相似材料模拟越不容易实现。在相似材料配置中应以初始黏聚力较大的滑坡体材料作为目标值的原型进行相似模拟。

(3) 在现有条件下,以天然坡体为原型,以其土体材料为骨料进行相同密度、相同内摩擦角的相似材料制备时,过低的黏聚力很难或者说几乎不可能实现。

(4) 进行更小相似比的模型制备时,不应以土体抗剪强度作为主要的相似参数进行控制,而应根据试验的主要目标,在能实现的最低抗剪强度下以

坡体的宏观变形和结构破坏形式研究为主,揭示坡体变形破坏过程。具体试验数据的大小和量级应作为试验控制的途径而不应作为定量评价指标。

(5) 模糊数学综合评判指数 Z 可以考虑土质类相似材料多因素隶属函数的综合相似度,从而可以用来在有限次的相似材料配置试验中寻找相对最优的配比方案。

参考文献(References)

- [1] 周颖,吕西林.建筑结构振动台模型试验方法与技术[M].北京:科学出版社,2012.
ZHOU Ying, LÜ Xilin. Shaking Table Model Test Method and Technique for Building Structures[M]. Beijing: Science Press, 2012.
- [2] 赵文琛.强震作用下黄土斜坡动力响应特征与稳定性分析[D].兰州:中国地震局兰州地震研究所,2016.
ZHAO Wenchen. Dynamic Response Characteristics and Stability Analysis of Loess Slope under Strong Earthquake[D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, CEA, 2016.
- [3] 李昀,张子新.相似模型试验中土质相似材料的试验研究[J].现代隧道,2006(增刊):684-688.
LI Yun, ZHANG Zixin. Experimental Study on Soil Similar Materials in Similar Model Tests[J]. Modern Tunnel, 2006(Supp): 684-688.
- [4] BRIDGMAN P W. Dimensional Analysis[M]. New York: Classics Press, 2013: 24-31.
- [5] 谈庆明.量纲分析[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2005: 48-59.
- TAN Qingming. Dimensional Analysis[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2005: 48-59.
- [6] 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 Hanpeng, LI Shucan, ZHANG Qiangyong, et al. Development of a New Geomechanical Similar Material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(9): 1842-1847.
- [7] 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 Baocheng, CHEN Congxin, LIU Caihua, et al. Research on Similar Material of Slope Simulation Experiment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1805-1808.
- [8] 赵选民.试验设计方法[M].北京:科学出版社,2006.
ZHAO Xuanmin. Experimental Design Method[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [9] 方开泰.均匀设计——数论方法在试验设计的应用[J].应用数学学报,1980,3(4):363-372.
FANG Kaitai. Uniform Design: Application of Number Theory Method in Test Design[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1980, 3(4): 363-372.
- [10] 程圣国,罗先启,方坤河.土质滑坡相似材料试验设计理论及评价方法研究[J].水力发电,2002,28(4):21-22,29.
CHENG Shengguo, LUO Xianqi, FANG Kunhe. The Test and Design Theory of the Similar Materials of Soil-type Landslide and the Study on Its Assessment Method[J]. Water Power, 2002, 28(4): 21-22, 29.