

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.05.015

郑州市域粉质黏土相似材料配比试验研究

杜家庆¹, 杨捷², 杨振兴³, 张继超³, 李永鑫⁴

(1. 郑州地铁集团有限公司, 河南 郑州 450000; 2. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003; 3. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 河南 郑州 450001; 4. 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章结合郑州市轨道交通10号线盾构下穿南水北调干渠工程, 针对盾构掘进的粉质黏土地层工况, 根据相似理论计算相似材料的相似比尺, 通过大量的相似材料配比试验, 配制出一种新的粉质黏土相似材料, 相比于原状粉质黏土, 该相似材料呈现出“高密度、高摩擦角、低黏聚力、低压缩模量”的性质特点; 通过对铁粉质量、锯末质量比、膨润土质量比、水质量4个因素的敏感性分析, 获得铁粉、锯末等基础材料对相似材料物理力学性质指标的敏感性, 并提出严控含水量的重要性。研究成果可为开展粉质黏土相似模型试验提供相似材料配比方案, 为郑州市域该土层内的相关工程建设提供参考。

关键词:粉质黏土; 相似材料配比; 敏感性分析

中图分类号: TU411.93 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)05-0665-06

Experimental study on the proportioning of similar materials for silty clay in Zhengzhou City

DU Jiaqing¹, YANG Jie², YANG Zhenxing³, ZHANG Jichao³, LI Yongxin⁴

(1. Zhengzhou Metro Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 2. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China; 3. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, Zhengzhou 450001, China; 4. School of Automobile and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Based on the shield tunneling project of Line 10 of Zhengzhou Rail Transit crossing underneath the trunk canal of South-to-North Water Diversion Project, according to the working condition of silty clay stratum in shield tunneling and the similar ratio of similar material calculated by the similar theory, a new similar material of silty clay with high capacity, high friction angle, low cohesion and low compression modulus was formulated through a large number of tests on the proportioning of similar material. Then, the sensitivity analysis of four factors including quality of iron powder, quality of water, content of sawdust and content of bentonite was conducted to obtain the sensitivity of the bases such as iron powder and sawdust to similar material property indexes, and the importance of strict control of water content was proposed. The research results provide a proportioning scheme of similar material for conducting similar model tests on silty clay, which are valuable for the construction of related projects of this soil stratum in Zhengzhou City.

Key words: silty clay; similar material proportioning; sensitivity analysis

基于相似原理构建缩尺物理模型, 开展室内相似模型试验, 进而解决实际工程中遇到的问题或研究其发生机理、特征及规律等, 是工程科研的重要方法之一^[1-3]。该方法通过相似理论实现实

际工程与试验模型的相关变量相似, 其优点是环境真实, 可人为控制和改变试验条件, 从而可研究多变量或单变量作用下的工程问题。

相似理论计算和相似材料配比是实现相似模

收稿日期: 2022-07-22; 修回日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52108312); 安徽省自然科学基金资助项目(2108085QE250)和郑州地铁集团有限公司科技创新计划资助项目(ZDKY2019A005)

作者简介: 杜家庆(1985—), 男, 河南鹤壁人, 郑州地铁集团有限公司工程师。

型试验结果准确反馈至实际工程的基础。根据相似理论,通过量纲分析或方程分析得到相似判据,计算相似比尺。目前,国内外对相似理论的研究已经相当深入,研究成果可直接用于相似模型试验参数计算。对于工程中岩土相似材料配比研究,在岩体相似材料配比和物理力学特性等方面的研究成果较丰富^[4-6]。文献[7]选用铁粉、石英砂、黏土配制岩体磁性相似材料,研究材料含量与物理力学性质变化之间的规律;文献[8]详细研究以重晶石、粉煤灰、石英砂、河砂和机油构成的Ⅳ级围岩相似材料的配制过程;文献[9]采用石英砂、重晶石粉、石膏、水泥等材料成功配制低强度、高脆性的岩爆模型材料,进而分析各因素与岩爆倾向性、脆性之间的相互关系;文献[10]采用 α -半水石膏、重晶石粉、石英砂和水为原材料设计正交试验,对不同配比条件下相似材料的物理力学参数进行测定,并开展敏感性分析。由此可见,不同性质岩石的相似配比相对成熟,可以根据模型试验需求,配制不同岩石相似材料。

但是,对于土体相似材料配比的成果很少,特别是对于黏土、粉质黏土等软土。文献[11]研究出一种适用于黄土边坡模型试验的相似材料,用于模拟解释兰州报恩寺滑坡的破坏过程,配制过程中采用常规三轴试验确定其力学参数,其配比为 $\omega_{\text{黄土}}:\omega_{\text{河砂}}:\omega_{\text{石蜡油}}:\omega_{\text{水}}=4:1:0.7:0.627$;文献[12]采用重晶石粉、石英砂、石膏、甘油、水作为原材料,以密度、抗压强度、弹性模量等作为参数指标,探讨不同配比下的因素与参数指标的关系,用于边坡模型试验。上述研究采用相似材料模拟滑坡工况,但配制的相似试样为胶结状固体,且采用抗压强度作为试样的力学参数指标,并非真正的土体相似材料。文献[13]采用石英砂、河砂、粉煤灰、机油 4 种材料作为相似土的

原材料,研究不同配比下的相似土内摩擦角与黏聚力的函数关系,对相似土配制可起到参考作用;文献[14-15]基于正交试验设计方法,以骨料比($m_{\text{骨料}}/m_{\text{胶凝材料}}$)、洗膏比($m_{\text{洗衣液}}/m_{\text{石膏粉}}$)、重晶石掺量、含水率等为控制因素,配制软弱土质相似材料;文献[16]以中央电视台主楼深基坑工程为背景,采用淤泥质黏土、粉细砂和铁粉配制一种高密度、低弹性模量的土质相似材料;文献[17]以重晶石粉、工程现场黏土、粉细砂和膨润土为基材,配制边坡动力稳定分析试验中的黏土和粉质黏土;文献[18]采用标准砂、滑体土、膨润土和水溶液混合,研制出同时模拟物理力学性能相似和渗流作用相似的水库型滑坡相似材料,用于模拟水位升降过程中坡内孔隙水压力、渗流作用、滑面形态及裂缝形成发展过程。

综上所述,国内外对于岩石相似材料的配比研究已经十分丰富,对于土体相似材料的配比研究成果较少。分析其原因,主要是由于根据相似理论,土体的力学性质参数经过缩尺后表现为强度更低的相似材料,较难实现满足其要求的配比。本文依托郑州市轨道交通 10 号线盾构下穿南水北调干渠工程,对盾构穿越的粉土、黏土地层进行相似配比室内试验,为模拟分析盾构掘进下穿南水北调干渠对渠底扰动影响规律提供相关室内试验的地层相似材料。

1 工程概况

郑州市轨道交通 10 号线一期工程起于上街机场站,止于郑州火车站,线路全长约 42.505 km,设站 22 座,均为地下站,平均站间距为 2 029 m。其中,须水站—市委党校站区间采用盾构法施工,全长 2 960.466 m,左右线间距为 13.0~17.2 m,下穿中线南水北调干渠,如图 1 所示(单位为 m)。

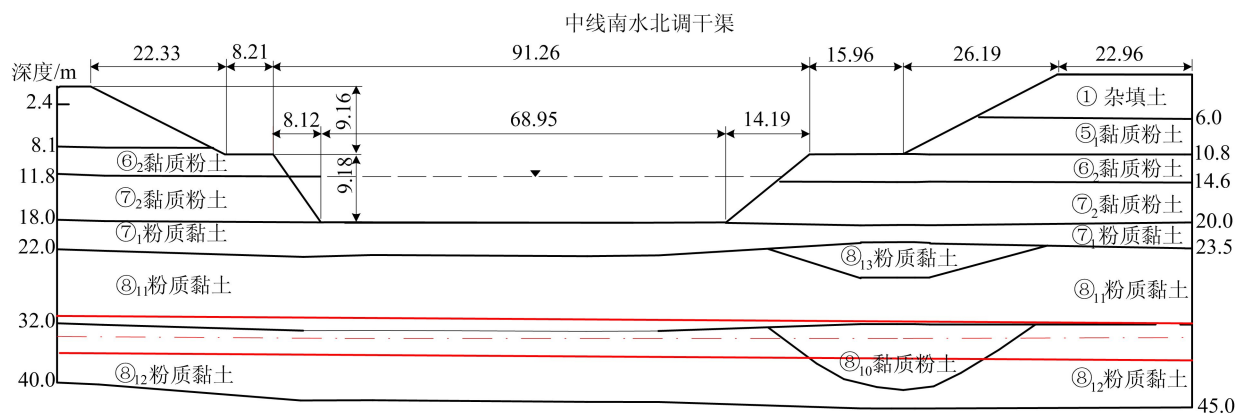


图 1 郑州市轨道交通 10 号线下穿南水北调干渠剖面图

干渠采用全断面衬砌,渠坡厚度为 10 cm,渠底厚度为 8 cm,一级坡坡度为 1:2.0,渠底宽约 17.5 m,渠深约 17.7 m。

中线南水北调干渠渠底至隧道顶之间的主要地层为⑦₁粉质黏土、⑧₁₁粉质黏土、⑧₁₂粉质黏土,干渠边坡主要地层为①杂填土、⑤₁黏质粉土、

⑥₂黏质粉土、⑦₂黏质粉土、⑧₁₃粉质黏土。根据各土层的物理力学参数,渠底 3 种土层各项指标的极差远小于平均值,可概化为一种粉质黏土层;渠坡 3 种土层各项指标的极差远小于平均值,可概化为一种黏质粉土层,2 种土物理力学参数取值见表 1 所列。

表 1 地层物理力学参数取值

类型	天然密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
粉质黏土	1.93(1.85~2.00)	21.2(18.2~24.2)	10.5(9.5~13.1)	29.6(29.4~29.9)	15.9(15.8~16.0)
黏质粉土	1.93(1.85~1.99)	18.5(16.0~22.5)	10.5(7.8~12.5)	15.1(14.9~15.6)	21.6(21.4~21.8)

注:括号内数值为取值范围。

由于渠底和渠坡概化土层的物理力学参数相近,在满足相似理论容许配比误差前提下,可统一为同一土层。

2 相似常数

相似理论以数理方程和定解条件为基础,以数理方程固有的量纲齐次性以及正确性不受单位制选择的影响为前提,通过线性变换等得到相似结论。相似常数(也称为相似比、比尺等)是模型物理量与原型物理量之比,主要有几何、应力、应变、位移、弹性模量、泊松比、边界应力、体积力、材料密度、容重等相似比,其中,长度、时间、力所对应的相似常数称为基本相似常数。

地下工程在自重作用下的弹性力学模型需要确定的相似常数,有几何相似比 C_l 、容重相似比 C_γ 、应力相似比 C_σ 、应变相似比 C_ϵ 、弹性模量相似比 C_E 、泊松比相似比 C_μ 和位移相似比 C_δ 。以 C_l 、 C_γ 、重力加速度相似比尺 C_g 为基础比尺,根据 Buckingham- π 定理推导各相似比之间的关系如下:

$$\begin{aligned} C_\sigma / (C_l C_\gamma) &= 1, & C_E &= C_\sigma, \\ C_\epsilon &= C_\mu = 1, & C_\delta &= C_l \end{aligned} \quad (1)$$

根据后续盾构下穿中线南水北调干渠室内模型试验要求,设计 $C_l = 1/10$, $C_\gamma = 1$, $C_g = 1$, 根据(1)式,有

$$\begin{aligned} C_\sigma &= C_c = C_l C_\gamma = 1/10, \\ C_E &= 1/10, & C_\mu &= C_\epsilon = 1, \end{aligned}$$

内摩擦角相似比为 $C_\phi = 1$ 。

根据各参数相似比,计算渠底和渠坡概化土层的相似材料参数,结果见表 2 所列。由表 2 可知,相比于原状土体,相似材料具有“高密度、高摩擦角、低黏聚力、低压缩模量”的性质特点。

表 2 相似材料物理力学参数取值

类型	天然密度/(g·cm ⁻³)	含水率/%	压缩模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
概化	1.85~	16.0~	7.8~	15.1~	15.9~
地层	2.00	24.2	13.1	29.6	21.6
相似	1.85~	16.0~	0.78~	1.51~	15.8~
材料	2.00	24.2	1.31	2.96	17.6

3 正交试验设计

3.1 材料选择

配制相似材料的基础材料选择十分重要,关系到相似材料本身能否正确反映原状土体的特性。相似材料一般由骨料、胶结材料和辅助材料 3 类材料组成。根据相关文献研究可知,配制“高密度、高摩擦角、低黏聚力、低压缩模量”相似材料,可选用黏性土、粉细砂、重晶石粉、膨润土等作为基础材料。文献 [14-15] 研究表明:膨润土掺量对相似材料密度、泊松比起主要控制作用,对压缩模量影响极不显著;黏聚力随膨润土掺量增大而增大,相对密度、内摩擦角、泊松比随膨润土掺量增大而减小;骨胶比对黏聚力影响最大,膨润土掺量和含水量次之,内摩擦角随含水量增大而减小。因此,本研究对粉质黏土的相似材料配制采用膨润土、铁粉、锯末、水等作为基础材料,前 3 种基础材料的粒度与密度见表 3 所列。

表 3 3 种基础材料的粒度与密度

参数	膨润土	锯末	铁粉
粒度/目	200	80~100	200
密度/(g·cm ⁻³)	0.67	0.20	1.40

3.2 相似参数

在配制相似材料时,所有物理力学参数均满足相似比尺和相似判据几乎是不可能的,因此应满足主要相似比尺。本试验相似材料为高密度、低压缩模量相似材料,因此选择容重 γ 、压缩模量 E_s 、黏聚力 c 为主控变量,选择内摩擦角 φ 、泊松比 μ 为辅助变量。由常规固结仪测出相似材料的压缩模量 E_s ,再计算变形模量 E_0 ;采用直剪仪快剪试验法测取相似材料的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

3.3 正交试验

采用正交试验设计方法,设计影响因素 A 铁粉质量($m_{铁粉}$)、因素 B 锯末质量比($m_{锯末}/m_{总}$)、因素 C 膨润土质量比($m_{膨润土}/m_{总}$)、因素 D 水质

量($m_{水}$)共 4 个因素。正交试验采用正交表 $L_{25}(5^4)$,5 个水平下的设计变量取值见表 4 所列,相似土配比方案见表 5 所列。

表 4 相似土配比正交试验设计变量取值

水平	铁粉 质量/g	锯末 质量比	膨润土 质量比	水质量/g
1	80	0.15	0.06	40
2	85	0.16	0.07	41
3	90	0.17	0.08	42
4	95	0.18	0.09	43
5	100	0.19	0.10	44

表 5 相似土配比正交试验设计方案

试验 编号	影响因素				试验 编号	影响因素			
	铁粉质量/g	锯末质量比	膨润土质量比	水质量/g		铁粉质量/g	锯末质量比	膨润土质量比	水质量/g
A1	80	0.15	0.06	40	A14	90	0.18	0.06	42
A2	80	0.16	0.07	41	A15	90	0.19	0.07	43
A3	80	0.17	0.08	42	A16	95	0.15	0.09	41
A4	80	0.18	0.09	43	A17	95	0.16	0.10	42
A5	80	0.19	0.10	44	A18	95	0.17	0.06	43
A6	85	0.15	0.07	42	A19	95	0.18	0.07	44
A7	85	0.16	0.08	43	A20	95	0.19	0.08	40
A8	85	0.17	0.09	44	A21	100	0.15	0.10	43
A9	85	0.18	0.10	40	A22	100	0.16	0.06	44
A10	85	0.19	0.06	41	A23	100	0.17	0.07	40
A11	90	0.15	0.08	44	A24	100	0.18	0.08	41
A12	90	0.16	0.09	40	A25	100	0.19	0.09	42
A13	90	0.17	0.10	41					

试样制备时,依次加入铁粉、锯末、膨润土,搅拌均匀,再加入规定质量的水进行二次搅拌,达到无生团结块,将拌合好的混合料装入环刀,每组制备 4 个试样。

采用量积法测试相似材料密度,试验图片如图 2 所示。

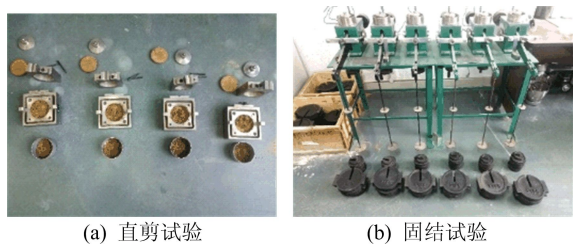


图 2 相似材料力学参数测试试验图片

4 试验结果与因素敏感性分析

通过对 25 组不同试验配比材料开展力学性质试验,得到各组相似材料的密度、内摩擦角、黏聚力和压缩模量,见表 6 所列。

由表 6 可知,A21 组配比的相似材料物理力学性质满足表 2 中对相似材料的要求,由此可得基础材料质量配比为:

$$m_{铁粉} : m_{锯末} : m_{膨润土} : m_{水} = 1.00 : 0.15 : 0.10 : 0.43。$$

采用极差分析法对试验结果进行分析。极差为对某个因素同一水平取均值,在不同水平下均值的最大值、最小值之差,计算公式为:

$$X_{ij} = \bar{X}_{i\max} - \bar{X}_{i\min} \quad (1)$$

其中: X_{ij} 为影响因素 j 对指标 i 的极差; $\bar{X}_{i\max}$ 、 $\bar{X}_{i\min}$ 分别为影响因素 j 各水平对应指标 i 平均值的最大值、最小值。

表 6 相似土物理力学参数测量结果

试验编号	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	压缩模量/ MPa
A1	1.10	20.30	0.80	0.780
A2	1.27	21.64	5.60	0.850
A3	1.17	18.20	6.24	0.930
A4	0.83	24.90	8.07	1.033
A5	1.95	25.77	13.20	1.150
A6	1.40	18.87	1.69	0.810
A7	1.42	17.60	7.22	0.890
A8	1.88	22.96	12.50	1.010
A9	1.76	24.03	5.60	1.600
A10	1.89	33.23	0.06	1.850
A11	2.00	16.30	10.50	0.670
A12	1.95	19.25	4.50	0.850
A13	1.78	20.63	8.50	1.020
A14	1.99	22.68	3.60	1.032
A15	1.92	27.88	3.50	1.380
A16	1.95	17.25	7.20	1.020
A17	1.97	18.82	11.01	1.210
A18	1.97	21.15	0.96	1.280
A19	1.98	19.20	9.27	1.320
A20	1.98	17.80	6.80	1.330
A21	1.91	17.37	2.17	1.150
A22	1.93	19.37	0.05	0.870
A23	1.88	18.76	1.18	0.920
A24	1.83	18.82	8.80	1.033
A25	1.93	18.82	4.20	1.150

极差的大小反映各因素对材料性质影响力的大小,极差越大,对相似材料性质的影响越大。采用极差分析法分析各影响因素对力学参数的影响规律。各影响因素对参数指标的极差计算结果见表 7 所列。

表 7 4 种因素对 4 个物理力学参数指标的极差

因素	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ kPa	压缩模量/ MPa
铁粉质量	0.706	4.710	3.768 2	0.283 4
锯末质量比	0.262	6.682	2.596 0	0.486 0
膨润土质量比	0.194	5.602	7.002 2	0.255 4
水质量	0.338	2.836	5.327 8	0.150 6

(1) 密度敏感性。密度表征物质在单位体积下的质量,模型试验需要基于相似原理求出相似材料的密度。由表 7 可知,各因素中,铁粉质量极差最大,膨润土质量比极差最小,中间依次是水质量、锯末质量比。由此可见,对于相似材料的密度,铁粉质量起到主要调节作用。

(2) 内摩擦角敏感性。土的内摩擦角反映土的摩擦特性,包括土颗粒之间产生相互滑动时需

要克服由于颗粒表面粗糙不平而引起的滑动摩擦,以及由于颗粒物的嵌入、连锁和脱离咬合状态而移动所产生的咬合摩擦。由于相似比为 1,模型试验需要相似材料的内摩擦角接近原材料数值范围。由表 7 可知,各因素中,锯末质量比对内摩擦角极差最大,水质量极差最小,中间依次是膨润土质量比、铁粉质量。由此可见,对于相似材料的内摩擦角,锯末质量比起到主要调节作用。

(3) 黏聚力敏感性。土的黏聚力是内部相邻各部分之间的相互吸引力,是物质分子之间存在分子力的表现。由表 7 可知,各因素中,膨润土质量比对黏聚力极差最大,锯末质量比极差最小,中间依次是水质量、铁粉质量,且水质量对黏聚力极差也较大。由此可见,对于相似材料的黏聚力,膨润土质量比和水质量都起到主要调节作用。

(4) 压缩模量敏感性。土的压缩模量是衡量土的压缩性高低的一个重要指标,可以反映相似材料在盾构掘进扰动下土体变形特征。由表 7 可知,各因素中,锯末质量比对压缩模量极差最大,水质量极差最小,中间依次是铁粉质量、膨润土质量比,且两者较为接近。由此可见,对于相似材料的压缩模量,锯末质量比起到主要调节作用。

综上所述,对于相似材料的密度、内摩擦角、黏聚力、压缩模量等,4 个影响因素中,铁粉质量对密度的影响程度最大,锯末质量比对内摩擦角和压缩模量的影响程度最大,膨润土质量比对黏聚力的影响程度最大。值得注意的是,水质量对黏聚力指标的影响较显著,由于水和膨润土的相互作用,在微观上对相似材料内部分子黏性的作用效果明显,应注意控制。

5 结 论

本文依托郑州市轨道交通 10 号线盾构下穿南水北调干渠工程,对盾构穿越的粉土、黏土地层进行相似配比室内试验,得到结论如下:

(1) 根据相似理论,相比于粉质黏土原状土,相似材料具有“高密度、高摩擦角、低黏聚力、低压缩模量”的性质特点。

(2) 郑州市域粉质黏土相似材料的基础材料可选用铁粉、锯末、膨润土和水,质量配比为:

$$m_{\text{铁粉}} : m_{\text{锯末}} : m_{\text{膨润土}} : m_{\text{水}} = 1.00 : 0.15 : 0.10 : 0.43.$$

(3) 通过对各因素的敏感性分析可知,铁粉质量对密度的影响程度最大,锯末质量比对内摩

(下转第 720 页)

- tational Statistics, 2010, 2(2): 128-149.
- [24] AGARWAL R, LI Y K, NGHIEM L. A regression technique with dynamic-parameter selection for phase behavior matching[C]//SPE California Regional Meeting. Ventura: Society of Petroleum Engineers, 1987: 207-214.
- [25] MOODY J, DARKEN C J. Fast learning in networks of locally-tuned processing units [J]. Neural Computation, 1989, 1(2): 281-294.
- [26] GUO Z, REYNOLDS A C. Robust life-cycle production optimization with a support vector regression proxy[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 2018, 23(6): 2409-2427.
- [27] THOMAS L K, HELLUMS L J, REHEIS G M. A nonlinear automatic history matching technique for reservoir simulation models [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1972, 12(6): 508-514.
- [28] RODRIGUES J, WAECHTER A, CONN A R, et al. Combining adjoint calculations and Quasi-Newton methods for automatic history matching [J]. Computational Geosciences, 2006, 10(1): 119-136.
- [29] GAVALAS G R, SHAH P C, SEINFELD J H. Reservoir history matching by Bayesian estimation [J]. Old SPE Journal, 1976, 16(6): 337-350.
- [30] KOLDA T G, OLEARY D P, NAZARETH L. BFGS with update skipping and varying memory[J]. SIAM Journal on Optimization, 1998, 8(4): 1060-1083.
- [31] MASCHIO C, SCHIOZER D J. A new methodology for history matching combining iterative discrete Latin Hypercube with multi-start simulated annealing[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2018, 169: 560-577.
- [32] FOROUD T, SEIFI A, AMINSHAHIDI B. Assisted history matching using artificial neural network based global optimization method—applications to Brugge field and a fractured Iranian reservoir[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2014, 123: 46-61.
- [33] MOHAMED L, CHRISTIE M, DEMYANOV V. Comparison of stochastic sampling algorithms for uncertainty quantification[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 2010, 15(1): 31-38.
- [34] XAVIER C R, SANTOS E P D, VIEIRA V D F, et al. Genetic algorithm for the history matching problem[J]. Procedia Computer Science, 2013, 18(1): 946-955.
- [35] LI D L, YANG J, LU D T. Thief zone identification based on transient pressure analysis; a field case study[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2016, 1(6): 63-72.

(责任编辑 朱晓临)

(上接第 669 页)

擦角和压缩模量的影响程度最大, 膨润土质量比对黏聚力的影响程度最大。

(4) 配制土体相似材料过程中, 含水量对黏聚力指标的影响较显著, 且水与膨润土相互作用, 应严格控制其含水量。

[参 考 文 献]

- [1] 张云鹏, 王浩, 魏新宇. 爆破地震作用下边坡稳定性分析与振动相似模型试验[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(4): 86-91.
- [2] 万露, 辛保泉, 郭明东, 等. 基于模型相似理论的尾矿库溃坝试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(12): 66-71.
- [3] 王风云, 袁继坤, 杨传亮. 隧道模型试验中软弱围岩相似材料配合比试验研究[J]. 安徽建筑大学学报(自然科学版), 2020, 28(4): 8-13.
- [4] 王志佳, 揭基红, 李胜民, 等. 独龙江隧道岩爆相似材料配比试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(2): 279-285.
- [5] 王维强, 刘耀儒. 基于地质力学模型试验的岩体相似材料配比研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2020, 38(1): 44-52.
- [6] 宁弈冰, 唐辉明, 张勃成, 等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理试验应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2009-2020.
- [7] 阮博, 罗先启. 磁性岩土相似材料物理力学性能试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(1): 45-51.
- [8] 陈政律, 吴洁, 张俊儒. 地下工程模型试验中围岩相似材料的配制研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(增刊 2): 102-107.
- [9] 周辉, 陈珺, 张传庆, 等. 低强度高脆岩爆模型材料试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(6): 2039-2049.
- [10] 周慧颖, 李树忱, 段壮, 等. 玄武岩相似材料配制及其物理力学参数研究[J]. 人民长江, 2021, 52(6): 130-135.
- [11] 崔雪婷, 张子东, 范珊. 基于相似理论的力学模型试验材料研究[J]. 人民珠江, 2019, 40(5): 82-86.
- [12] 詹志发, 贺建先, 郑博文, 等. 边坡模型相似材料配比试验研究[J]. 地球物理学报, 2019, 34(3): 1236-1243.
- [13] 杨何, 张振波, 侯宏韬, 等. 相似土体原材料配比试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 1): 1905-1909.
- [14] 窦远明, 王建宁, 田贵州, 等. 基于正交试验的软弱土质相似材料配比研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(3): 480-487.
- [15] 窦远明, 王建宁, 朱旭曦, 等. 软弱土质类相似材料的配比试验结果分析[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 128-135.
- [16] 李国梁, 康后金, 韩超, 等. 深基坑大型物理模拟试验土质相似材料的研究[J]. 公路, 2011, 56(10): 184-187.
- [17] 廖圆冰, 魏雯, 陈仁春, 等. 基于正交设计的土质相似材料配比试验研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 570-576.
- [18] 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 张淑艳)