

文章编号: 1005-0523(2021)06-0020-09



抛填饱和软粘土围堰模型试验相似材料研究

章立辰¹, 黄北圻^{2,3}, 黄勇⁴, 祝俊华^{2,3}, 罗伟^{2,3}, 朱碧堂^{2,3}

(1. 江西省港航建设投资集团石虎塘航电枢纽分公司, 江西 南昌 330008; 2. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 3. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013; 4. 江西省路港工程有限公司, 江西 南昌 330299)

摘要: 基于相似理论与正交试验, 以江西信江双港航电枢纽工程上下游围堰工程为背景, 借鉴盾构隧道中渣土改良试验, 根据泡沫能够有效降低相似材料的粘聚力和内摩擦角的原理, 以滑石粉、重晶石粉、粉细砂、钠基膨润土和泡沫为原材料, 配制抛填饱和粉质粘土夹淤泥质土围堰模型试验相似材料。通过密度试验、十字板剪切试验与渗透试验, 获得不同配比相似材料的密度、不排水抗剪强度和渗透系数等指标。试验结果表明: 该材料的不排水抗剪强度较低, 其余参数调节范围较广, 能够满足大部分模型试验对土质相似材料的要求且特别适合用来模拟模型试验中水环境下的软弱土质, 研究成果可为类似土质相似材料的配比提供参考。

关键词: 围堰; 抛填; 粉质粘土夹淤泥质土; 相似材料; 正交试验

中图分类号: U414; TU411 **文献标志码:** A

本文引用格式: 章立辰, 黄北圻, 黄勇, 等. 抛填饱和软粘土围堰模型试验相似材料研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(6): 20-28.
DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.2021.06.004

Study on Similar Materials for Model Test of Dumped Saturated Soft Clay Cofferdam

Zhang Lichen¹, Huang Beige^{2,3}, Huang Yong⁴, Zhu Junhua^{2,3}, Luo Wei^{2,3}, Zhu Bitang^{2,3}

(1. Port and Waterway Construction Investment Group Shihutang Navigation and Power Hub Branch of Jiangxi Province, Nanchang 330008, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. Engineering Research and Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. Road and Port Engineering Co., Ltd. of Jiangxi Province, Nanchang 330299, China)

Abstract: During the construction of Shuanggang navigation and power junction project along the Xinjiang River, the cofferdam filling has the characteristics of low strength and low permeability. Because of the large scale of the cofferdam on site, considering the size of the model slot, the similarity of this model test is large, and the shear strength index and permeability coefficient of the corresponding analogous materials are very low. Talc, barite powder, silty sand, sodium bentonite and foams were used as raw materials. Based on orthogonal test, analogous materials were prepared for model test of the cofferdam. The density, undrained shear strength and permeability coefficient of analogous materials with different ratios were obtained through density test, vane shear test and penetration test. The results show that the undrained shear strength of the material is low, and the other parameters are widely adjusted, which can meet the requirements of most model tests on analogous soil materials and is especially suitable for simulating soft soil under water environment in model tests. The outcome can provide reference for the selection of analogous materials in other model tests.

Key words: cofferdam; dumping; silty clay with muddy soil; analogous materials; orthogonal test

收稿日期: 2021-07-27

基金项目: 江西省交通运输厅重点工程科技项目(2019C0010, 2019C0011); 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室资助项目(20161BCD40010)

Citation format:ZHANG L C,HUANG B G,HUANG Y,et al. Study on similar materials for model test of dumped saturated soft clay cofferdam[J]. Journal of East China Jiaotong University,2021,38(6):20-28.

模型试验是根据相似理论将现场工程原型进行缩尺研究的试验方法,相比现场足尺试验,具有成本低、周期短且能真实模拟现场施工过程等优点。相较于数值模拟分析,模型试验能够再现现场破坏过程,真实地模拟复杂工程结构,更加直观地看到模型在各个阶段的试验现象,在岩土工程等领域应用广泛^[1-6]。

相似材料是模型试验成功的前提和保证^[7-15]。国内外专家学者对岩土体相似材料做了大量的研究。张延杰等^[16]通过湿陷试验,采用砂、工业盐等研制了一种与天然黄土相似且容重调节较广的相似材料。李昀等^[17]以越江隧道为背景,配制了一种高容重低弹模特点的土质相似材料。李国梁等^[18]基于深基坑大型物理模型试验,研制出一种能有效模拟深基坑支护中桩锚土钉联合支护变形机制的相似材料。Li^[19]等通过分析 MSB 材料和 NIOS 材料的优点,开发了一种新型的岩土力学类材料,并将其应用于后续的隧道岩土力学模型试验中。缪圆冰等^[20]提出黏土、重晶石粉等为原材料配置土质相似材料,并将其应用到了边坡稳定的振动台模型试验。窦远明等^[21]研制了一种软弱土相似材料,为后续地铁隧道结构的模型试验奠定了基础。

上述材料均采用重晶石粉、滑石粉、膨润土、粉质粘土等传统的相似材料添加剂。初期试配试验表明,这些相似材料无法得到本次模型试验所需要的重度相对较大、强度超低的土质相似材料。本研究借鉴盾构隧道中渣土改良试验,引入泡沫能够有效降低相似材料的粘聚力和内摩擦角,且价格低廉,没有毒副作用。

1 相似材料指标的确定

1.1 工程背景

江西信江双港航电枢纽工程施工建设过程中,为了工期和就地取材,围堰填料采用的是左岸导流

明渠浚挖的饱和粉质粘土夹淤泥质土,且通过抛填方式填筑形成上下游围堰。粉质粘土夹淤泥质土处于饱和状态,具有强度低、渗透性低的特点,同时受水下浚挖和水上抛填双重扰动,强度进一步降低。考虑到采用粉质粘土进行抛填形成的围堰成功案例极少,在围堰使用阶段,除了原位围堰实时监控确保围堰和堰内航电枢纽工程的安全施工外,项目指挥部建议通过室内模型试验研究围堰的抛填施工特性及其在水位升降影响下的安全性能。由于浚挖和抛填的粉质粘土夹淤泥质土强度低,现场形成的围堰规模尺寸大,考虑到室内模型槽尺寸有限,本次模型试验相似比大,相应的相似材料抗剪强度指标和渗透性均很低。

江西信江双港航电枢纽工程上下游围堰设计如图 1 所示。围堰迎水面坡比 1:5,背水面坡比 1:4,断面材料从上到下依次为:①填筑料(包括外购回填土和明渠回填土,土方比为 1:10);②圆砾;③基岩(强风化砂岩)。材料厚度分别取 21,4.5 m 和 3 m。原型材料基本物理力学参数列入表 2。

1.2 相似理论与相似关系

根据模型试验相似理论,要求模型的几何尺寸、边界条件、荷载及相似材料的特性及水理特征均遵循一定的相似规律^[22-23]。综合考虑该围堰工程原型、试验场地条件,拟定模型试验中两个主控因素的相似比为:几何相似比 1/30 和密度相似比 1/1。其余物理量的相似关系可由量纲分析法得到,如表 1 所示。

1.3 相似材料指标

根据表 1 所列相似比,模型试验所需岩土体相似材料物理力学参数也列入表 2。由表可见,相似材料的力学参数粘聚力、内摩擦角和不排水剪强度很低。经过试配试验,采用传统的相似材料,无法获得需要的重度和超低的强度参数。

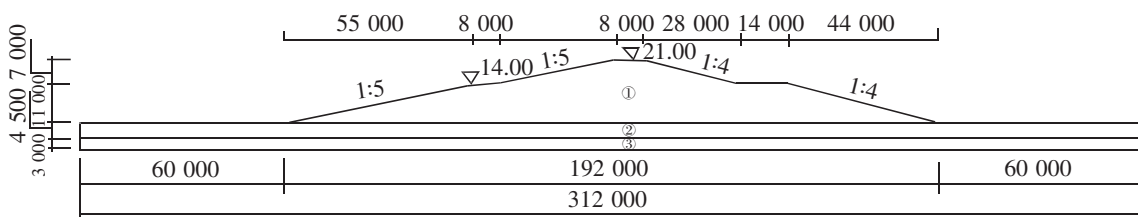


图 1 信江双港某围堰断面设计图(单位:mm)

Fig.1 Cross-sectional view of a cofferdam in Xinjiang Shuanggang Project (Unit: mm)

表1 各物理量相似关系
Tab.1 Similarity relations of physical quantities

Type	Physical quantity	Similarity relationship	Ratio of similitude
Geometric characteristic	Geometric dimensioning l	C_l	1/30
	Density ρ	C_ρ	1
Material characteristics	Cohesive force c	C_c	1/30
	Elasticity modulus E	C_E	1/30
	Strain ε	C_ε	1
	Stress σ	C_σ	1/30
Dynamic characteristics	Osmotic coefficient k	C_k	1/5.477
	Displacement μ	C_μ	1/30
	Flow velocity v	C_v	1/5.477
	Earth acceleration g	C_g	1
	Time t	C_t	1/30
Load	Area load q	$C_q=C_l$	1/30

表2 原型和模型材料参数
Tab.2 Material parameters of prototype and model

Type	Rock soil mass types	Physical parameter				
		Unit weight /(kN/m ³)	Osmotic coefficient /(cm/s)	Cohesive force c /kPa	Internal friction angle/(°)	Undrained shear strength/kPa
Prototype	Outsourcing backfill	18.5	3.20×10^{-5}	44	15	44~80.2
	Open channel backfill soil	18.0	2.91×10^{-6}	19	9	19~41.17
Model	Outsourcing backfill	18.5	5.80×10^{-6}	1.47	15	1.47~2.67
	Open channel backfill soil	18.0	5.30×10^{-7}	0.63	9	0.63~1.25

2 土质相似材料的研制

2.1 原材料的选择

相似材料研制的成功与否决定了后续模型试验数据的价值大小^[24-25]。为了得到一种低强度低渗

透性的相似材料。选取重晶石粉、粉细砂、滑石粉、膨润土、泡沫和水作为相似材料原料,其中重晶石粉、粉细砂为骨料,滑石粉为胶结剂,膨润土和泡沫为添加剂,所选原材料参数如表3所示。

表3 相似材料原料参数
Tab.3 Raw material parameters of similar materials

Materials	Character	Mesh number	Relative density
Barite powder	White powder	325	4.0
Bentonite	Light yellow powder	200	1.4
Talcum powder	White powder	400	2.0
Silty-fine sand	White granules	20~40	2.4
Original liquid of foam agent	Transparency liquid	-	-

2.2 试件制备过程

首先,把重晶石粉、滑石粉、粉细砂、膨润土、水按照规定的配比称量并倒入搅拌机内充分搅拌均匀;其次将配制出的浓度为3%的泡沫液用泡沫机发泡,量取规定量的泡沫倒入搅拌机内与混合土充分搅拌,直至将泡沫完全打入土体;再次取出配制好的土体,装入搪瓷盘内用保鲜膜包好并贴上标签,放在常温下静置一昼夜;最后将土样分层装入装土器和土壤渗透仪,进行不排水抗剪强度试验和渗透实验。

2.3 基本力学参数测试

根据具体项目需要,本次相似材料基本力学参数测试包括材料的密度,不排水抗剪强度和渗透系数。试验过程严格按照《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)和《水电水利工程土工试验规程》(DL/T 5355—2006)的要求进行试验操作,测定方法如下:

1) 密度测试:密度测试按《铁路工程土工试验规程》(TB 10102—2010)中的环刀法测试。

2) 不排水抗剪强度测试:由于本次相似材料的强度目标值很小,有些配比的材料强度小到无法用直接剪切试验测出抗剪强度参数。本次试验采用十字板剪切仪测试配比材料的不排水抗剪强度(图2),十字板剪切仪配备多组十字板头,不同规格的十字板头适用范围见表4。因为本次研究的相似材料强度较低,所以板头采用 $D \times H = 25.4 \text{ mm} \times 50.8 \text{ mm}$,其中 D 为板头直径, H 为板头高度。为消除边界效应,装土器直径需 $\geq 6D$ 。



图2 不排水抗剪强度测试图
Fig.2 Undrained shear strength test

表4 不同规格板头对应扭矩 M -抗剪强度 C_u 换算表
Table 4 Corresponding torque M -shear strength C_u conversion table of different specifications plate head

D/mm	H/mm	$M/(\text{N}\cdot\text{m})$	C_u/kPa
16	32	1	66.61
20	40	1	34.1
25.4	50.8	1	16.65
50.8	101.6	1	2.08

3) 渗透系数测试:由于本次试验所制备的材料渗透性较小,水的流量较小,水位控制困难,故采用变水头渗透仪进行测试,又因试验组数多,为了提高效率,所以采用五联变水头管,如图3所示。试验时(以第1根变水头管为例),首先将供水装置注满水,打开阀门1、阀门2和阀门3,进行排气处理,然后关闭阀门3,使变水头管的水头到达一定高度后关闭阀门1和阀门2,打开阀门3,待土壤渗透仪出水口出水稳定时,开始计时。

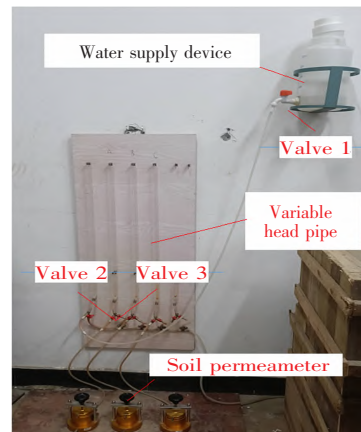


图3 渗透试验图
Fig.3 Setup for permeability test

2.4 正交试验设计

本次试验主要考量指标为相似材料的密度、不排水抗剪强度和渗透系数。基于正交实验,设计以下5种因素:因素A((滑石粉+粉细砂)质量/(重晶石粉+滑石粉+粉细砂)质量);因素B((粉细砂质量/(滑石粉+粉细砂)质量));因素C(膨润土质量/材料总质量);因素D含水量(水的质量/材料总质量);因素E泡沫掺量(泡沫体积/材料总体积)。正交试验中各因素的水平设计如表5。不同配比的试验结果见表6。

表5 相似材料正交设计水平
Tab.5 Orthogonal design level of similar materials

Horizontal groups	A	B	C	D	E
1	20	30	0	20	0
2	30	40	5	30	50
3	40	50	10	40	100
4	50	60	15	50	150
5	60	70	20	60	200

表6 正交试验方案及结果
Tab.6 Orthogonal test scheme and result

Experiment	Factor of influence					Measure indicators		
	A	B	C	D	E	$\rho/(g/cm^3)$	c/kPa	$k/(cm/s)$
Experiment 1	20	20	0	25	0	2.05	7.3	7.10×10^{-5}
Experiment 2	20	30	5	30	50	1.94	6.3	4.80×10^{-5}
Experiment 3	20	40	10	35	100	1.83	5.1	5.67×10^{-6}
Experiment 4	20	50	15	40	150	1.77	4.1	1.60×10^{-6}
Experiment 5	20	60	20	45	200	1.66	2.9	3.34×10^{-7}
Experiment 6	30	20	5	35	150	1.78	2.3	2.19×10^{-5}
Experiment 7	30	30	10	40	200	1.63	1.3	4.60×10^{-6}
Experiment 8	30	40	15	45	0	1.75	4.3	8.40×10^{-7}
Experiment 9	30	50	20	25	50	1.93	7.8	6.50×10^{-8}
Experiment 10	30	60	0	30	100	1.79	0.8	4.99×10^{-3}
Experiment 11	40	20	10	45	50	1.79	2.5	7.34×10^{-6}
Experiment 12	40	30	15	25	100	1.85	5.3	5.50×10^{-7}
Experiment 13	40	40	20	30	150	1.74	5.1	6.50×10^{-8}
Experiment 14	40	50	0	35	200	1.68	1.5	1.29×10^{-3}
Experiment 15	40	60	5	40	0	1.81	1.8	4.14×10^{-5}
Experiment 16	50	20	15	30	200	1.74	3.1	4.20×10^{-6}
Experiment 17	50	30	20	35	0	1.83	10.4	7.70×10^{-8}
Experiment 18	50	40	0	40	50	1.65	2.3	1.29×10^{-3}
Experiment 19	50	50	5	45	100	1.72	0.8	3.60×10^{-5}
Experiment 20	50	60	10	25	150	1.91	7.8	2.40×10^{-6}
Experiment 21	60	20	20	40	100	1.71	3.1	8.50×10^{-8}
Experiment 22	60	30	0	45	150	1.55	0	1.29×10^{-2}
Experiment 23	60	40	5	25	200	1.78	4.1	2.50×10^{-5}
Experiment 24	60	50	10	30	0	1.93	4.5	1.54×10^{-6}
Experiment 25	60	60	15	35	50	1.81	4.0	7.04×10^{-7}

3 正交试验结果分析

极差分析法又称 R 法,第 j 列因素的极差为 $R_j, R_j = \max(\bar{k}_{j1}, \bar{k}_{j2}, \dots, \bar{k}_{jm}) - \min(\bar{k}_{j1}, \bar{k}_{j2}, \dots, \bar{k}_{jm})$, 表示第 j 列因素各水平参数指标平均值的最大值与最小值的差。 R_j 越大,表明该因素对参数指标的影响越大,说明该因素起主导作用。根据 R_j 的大小就可确定因素的主次。下面采用 R 法对各因素进行敏感性分析。

3.1 密度影响因素的敏感性分析

根据表 6, 求出密度的各影响因素水平的均值和极差,结果见表 7。由表 7 可知,含水量的极差最大,其次是泡沫掺量,说明含水量对密度参数起主导作用。各因素对密度的敏感性由大到小为: $D > E > A > C > B$,由此可知,含水量和泡沫掺量是密度参数

的主要控制因素。

为进一步研究密度在各因素不同水平下的规律,制作图 4。由图 4 可知,相似材料密度随含水量和泡沫掺量的增大而减小,其余 3 个因素的极差比较小,说明 A, B, C 3 种因素对密度影响不大。

对照表 2, 大部分组配比都满足信江枢纽围堰的模型试验材料所要求的明渠回填土与外购回填土的密度。

3.2 不排水抗剪强度影响因素的敏感性分析

根据表 6, 求出不排水抗剪强度的各影响因素水平的均值和极差,结果见表 8。由表 8 可知,含水量的极差最大,其次是膨润土掺量,各因素对不排水抗剪强度敏感性由大到小为: $D > C > E > A > B$,说明含水量对相似材料不排水抗剪强度起控制作用。

表 7 密度极差分析
Tab.7 Analysis of density range

Horizontal groups	g/cm ³				
	A	B	C	D	E
1	1.850	1.814	1.744	1.904	1.874
2	1.776	1.760	1.806	1.828	1.824
3	1.774	1.750	1.818	1.786	1.780
4	1.770	1.806	1.784	1.714	1.750
5	1.756	1.796	1.774	1.694	1.698
Range	0.094	0.064	0.074	0.210	0.176

表 8 不排水抗剪强度极差分析
Tab.8 Range analysis of undrained shear strength

Horizontal groups	kPa				
	A	B	C	D	E
1	5.14	3.66	2.39	6.46	5.67
2	3.31	4.66	3.07	4.0	4.58
3	4.89	4.18	4.24	4.66	3.03
4	4.89	3.75	4.16	2.53	3.86
5	3.14	3.47	5.86	2.11	2.58
Range	2	1.19	3.47	4.35	3.09

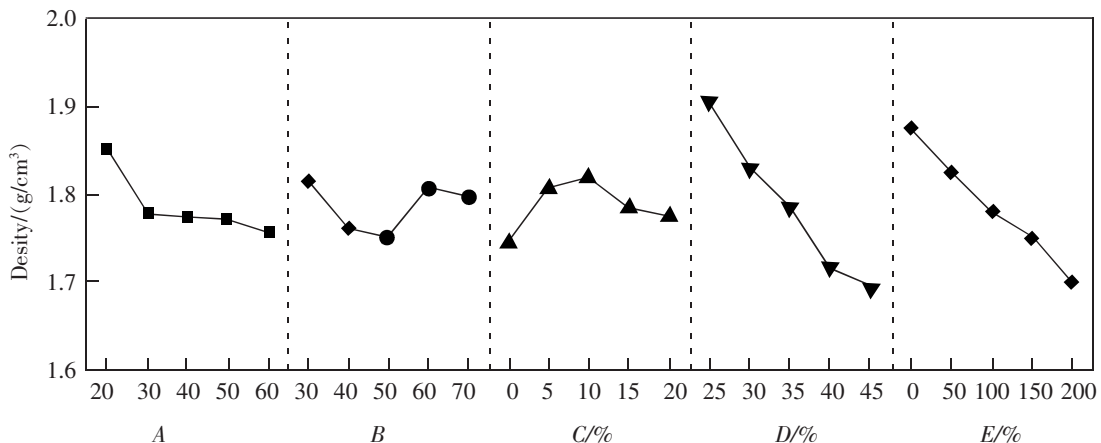


图 4 密度敏感性因素分析
Fig.4 Sensitivity analysis on density

为进一步研究不排水抗剪强度在各因素不同水平下的规律,制作图5。由图5可知不排水抗剪强度随因素C的增大而增大,随因素D和因素E的增大总体趋势减小,因素A,B影响不大。

对照表2,第10组和第19组配比可得到信江枢纽围堰的模型试验材料所要求的明渠回填土不排水抗剪强度,第6、11、14、15组和18组均满足外购回填土不排水抗剪强度。

3.3 渗透系数影响因素的敏感性分析

根据表6,求出渗透系数的各影响因素水平的均值和极差,结果见表9。由表9可知,因素((滑石粉+粉细砂质量)/(重晶石粉+滑石粉+粉细砂质量

和))的极差最大,其次是膨润土掺量。各因素对黏聚力敏感性由大到小为: $A>C>D=B>E$ 。由极差分析说明因素A对渗透系数起控制作用,但因素A中的渗透系数皆为 10^{-5} 级以上,其影响范围并不大,膨润土掺量对渗透系数的影响范围为 $1.25\times 10^{-7}\sim 4.11\times 10^{-3}$ cm/s,说明膨润土才是渗透系数的主要控制因素,且渗透系数随膨润土掺量的增大而减小。这也间接说明,当对比数据不在同一个量级时,极差分析法并不适用。

对照表2,大部分组配比均可满足信江枢纽围堰的模型试验材料所要求明渠回填土与外购回填土的渗透系数。

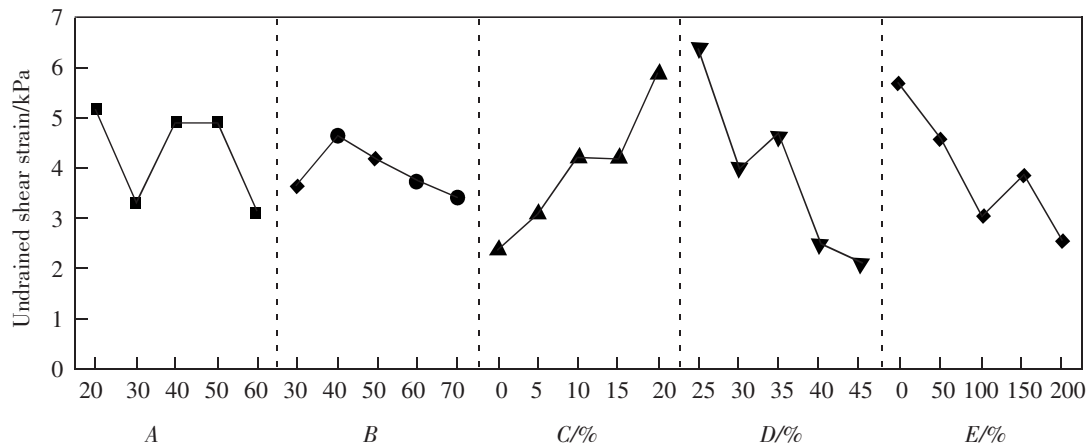


图5 不排水抗剪强度敏感性因素分析
Fig.5 Sensitivity analysis on undrained shear strength

表9 渗透系数极差分析
Tab.9 Analysis of permeability coefficient range

Horizontal groups	A	B	C	D	E
1	2.53×10^{-5}	2.09×10^{-5}	4.11×10^{-3}	1.98×10^{-5}	2.30×10^{-5}
2	4.99×10^{-3}	2.59×10^{-3}	3.45×10^{-5}	1.01×10^{-3}	2.69×10^{-4}
3	3.59×10^{-5}	2.64×10^{-4}	4.31×10^{-6}	2.64×10^{-4}	1.01×10^{-3}
4	2.68×10^{-4}	2.66×10^{-4}	1.58×10^{-6}	2.68×10^{-4}	2.59×10^{-3}
5	2.58×10^{-3}	1.01×10^{-3}	1.25×10^{-7}	2.59×10^{-3}	2.65×10^{-4}
Range	4.96×10^{-3}	2.57×10^{-3}	4.11×10^{-3}	2.57×10^{-3}	2.56×10^{-3}

4 结论

以滑石粉、重晶石粉、粉细砂、膨润土、泡沫和水为原材料,配制抛填饱和粉质粘土夹淤泥质土围堰模型试验相似材料,并基于正交设计方法,通过密度试验、十字板剪切试验与渗透试验,对影响土

质相似材料物理力学参数的各配比因素进行敏感性分析,得到如下主要结论:

1) 不同配比相似材料的不排水抗剪强度较低,其余参数调节范围较广,其密度分布范围为 $1.57\sim 2.05$ g/cm³,不排水抗剪强度分布范围为 $0\sim 10.4$ kPa,渗

透系数变化分布范围为 $6.5 \times 10^{-8} \sim 1.29 \times 10^{-2}$ cm/s, 特别适合用来模拟模型试验中水环境下的软弱土质。

2) 在土质相似材料配比中,含水量对材料密度和不排水抗剪强度起主要控制作用,而泡沫掺量对密度和不排水抗剪强度影响仅次于含水量,密度随含水量和泡沫掺量的增大而减小,不排水抗剪强度随膨润土掺量的增大而增大,随含水量和泡沫掺量的增大总体趋势减小。极差分析法不适用于分析本次试验中的渗透系数,膨润土掺量为渗透系数的主要控制因素且渗透系数随膨润土掺量的增大而减小。

3) 试验 15# 和试验 19# 的配比可满足模拟信江双港航运枢纽中某围堰原型中外购回填土和明渠回填土的相似要求。

4) 试验结果不仅满足本次模型试验的要求,对工程项目具有一定的指导意义,也可为类似工程提供借鉴参考。

参考文献:

- [1] 李仲奎,卢达溶,中山元,等. 三维模型试验新技术及其在大型地下洞群研究中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003,22(9):1430-1436.
LI Z K, LU D R, ZHONG S Y, et al. Development and application of new technology for 3D geo-mechanics model test of large underground houses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(9): 1430-1436.
- [2] 黄式浩,狄宏规,王友文,等. 管片厚度对大直径盾构隧道受力及变形的影响[J]. 华东交通大学学报, 2020, 37(1): 15-22.
HUANG S H, DI H G, WANG Y W, et al. Influence of segment thickness on the force and deformation of large-diameter shield tunnel[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020, 37(1): 15-22.
- [3] 沈泰. 地质力学模型试验技术的进展[J]. 长江科学院院报, 2001(5): 32-36.
SHEN T. Development of geomechanic model experiment techniques[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2001(5): 32-36.
- [4] 陈安敏,顾金才,沈俊,等. 地质力学模型试验技术应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3785-3789.
CHEN A M, GU J C, SHEN J, et al. Application study on the geomechanical model experiment techniques[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3785-3789.
- [5] 罗先启. 滑坡模型试验理论及其应用[D]. 宜昌:三峡大学, 2007.
LUO X Q. Landslide model test theory and its application [D]. Yichang: Three Gorges University, 2007.
- [6] 陈陆望. 物理模型试验技术研究以及在岩土工程中的应用[D]. 武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所, 2006.
CHEN L W. Research on physical model test technology and its application in geotechnical engineering[D]. Wuhan: Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [7] 李术才,周毅,李利平,等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128-1137.
LI S C, ZHOU Y, LI L P, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid coupling modest test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1128-1137.
- [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(1): 48-51.
MA F P, LI Z K, LUO G F. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004(1): 48-51.
- [9] 韩伯鲤,陈霞龄,宋一乐,等. 岩体相似材料的研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997(2): 7-10.
HAN B L, CHEN X L, SONG Y L, et al. Research on similar material of rockmass[J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997(2): 7-10.
- [10] 姚国强,言志信. 岩体相似材料正交设计试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(4): 902-910.
YAO G Q, YAN Z X. Experimental study on orthogonal design of rock mass similar material[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(4): 902-910.
- [11] 李元海,林志斌,秦先林,等. 透明岩体相似材料物理力学特性研究[J]. 中国矿业大学学报, 2015, 44(6): 977-982.
LI Y H, LIN Z B, QIN X L, et al. Study of development of transparent rock mass for physical similarity experiment and its mechanical properties[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2015, 44(6): 977-982.
- [12] LIU J Y, ISKANDER M. Spatial deformation measurement using transparent soil[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, 33(4): 16-23.
- [13] JACOBY W R, SCHMELING H. Convection experiments and the driving mechanism[J]. Geologische Rundschau, 1981, 70(1): 207-230.
- [14] KIM S H, BURD H J. Model testing of closely spaced tun-

- nels in clay[J]. *Geotechnique*, 1998, 48(3):375-388.
- [15] 史小萌,刘保国,元轶. 水泥石膏胶结相似材料在固-流耦合试验中的适用性[J]. *岩土力学*, 2015, 36(9):2624-2630.
- SHI X M, LIU B G, QI Y. Applicability of similar materials bonded by cement and plaster in solid-liquid coupling tests[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(9):2624-2630.
- [16] 张延杰,王旭,梁庆国,等. 湿陷性黄土模型试验相似材料的研制[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(S2):4019-4024.
- ZHANG Y J, WANG X, LIANG Q G, et al. Development of model test similar material of collapsible loess[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(S2):4019-4024.
- [17] 李昀, 张子新. 相似模型试验中土质相似材料的试验研究[C]//上海:中国土木工程学会第十二届年会暨隧道及地下工程分会第十四届年会论文集, 2006.
- LI J, ZHANG Z X. Experimental research on soil similar materials in similar model test[C]//Shanghai: Proceedings of the 12th annual meeting of China society of civil engineering and the 14th annual meeting of tunnel and underground engineering branch, 2006.
- [18] 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(10):184-188.
- LI G L, KANG H J, HAN C, et al. A study on soil similar material of large-scale physical model test of deep pit[J]. *Highway*, 2011(10):184-188.
- [19] LI S C, WANG H P, ZHANG Q Y, et al. New type geo-mechanical similar material experiments research and its application [J]. *Key Engineering Materials*, 2006, 45 (326/328):1801-1804.
- [20] 缪圆冰,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.
- MIAO Y B, WEI W, CHEN R C, et al. Orthogonal experiment on the of soil similar material[J]. *Journal of Fuzhou University(Natural Science Edition)*, 2016, 44(4):570-576.
- [21] 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.
- DOU Y M, WANG J M, TIAN G Z, et al. Orthogonal test study on the mixture ratio of soft soil similar material[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(3):480-487.
- [22] 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, 29(8):2126-2130.
- ZHANG Q Y, LI S C, GUO X H, et al. Research and development of new typed cementitious geotechnical similar material for iron crystal sand and its application[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(8):2126-2130.
- [23] 李树忱,冯现大,李术才,等. 新型固流耦合相似材料的研制及其应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(2):281-288.
- LI S C, FENG X D, LI S C, et al. Research and development of a new similar material for solid-fluid coupling and its application[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(2):281-288.
- [24] 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.
- CAO L, LUO X Q, CHENG S G. Research on similar material of physical model for Qianjiangping landslide[J]. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 2007(1):37-39.
- [25] 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(4):21-22.
- CHENG S G, LUO X Q, FANG K H. The test and design theory of the similar materials of soil-type landslide and the study on its assessment method[J]. *Water Power*, 2002(4):21-22.



第一作者:章立辰(1988—),男,工程师,研究方向为土木工程,水运工程。E-mail:228970876@qq.com。



通信作者:祝俊华(1990—),男,讲师,博士,研究方向为岩土工程,边坡工程。E-mail:675504299@qq.com。

(责任编辑:吴海燕 姜红贵)