

文章编号:1672-9331(2018)04-0038-07

基于正交设计的石膏砂浆高岭土相似材料试验

黄 戡¹, 李 依¹, 闫志刚², 詹艳云¹, 马启昂¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 中铁十二局集团第二工程有限公司, 山西 太原 030032)

摘 要: 以隧道Ⅳ级软弱围岩主要力学参数为参考标准, 配制出了符合此标准的围岩相似材料——石膏砂浆高岭土相似材料(组成成分: 石英砂、高岭土、石膏、水、洗衣液), 并采用此相似材料进行了试验研究。采用正交试验和极差分析法分析所得力学参数黏聚力、内摩擦角和重度的试验数据, 研究了石膏砂浆高岭土相似材料各组成成分对其力学参数的影响, 优选出了适于Ⅳ级软弱围岩标准的最佳配比; 采用三轴剪切试验和重复试验分析了相似材料在不同围压下的力学特征。试验结果表明, 含水率对石膏砂浆高岭土相似材料的力学参数黏聚力和内摩擦角影响最大, 当含水率适量加大时, 黏聚力快速降低, 内摩擦角缓慢升高; 当高岭土含量加大或石膏含量减少时, 黏聚力明显升高, 内摩擦角降低; 含砂量对试验结果影响不大; 对于相似材料力学参数重度的影响, 石英砂最大, 其次是水, 最后是高岭土和石膏。

关键词: Ⅳ级围岩相似材料; 正交试验; 三轴剪切试验; 极差分析法; 内摩擦角; 黏聚力; 高岭土

中图分类号: TU452

文献标识码: A

Experimental study on gypsum mortar Kaolin similar materials

HUANG Kan¹, LI Yi¹, YAN Zhi-gang², ZHAN Yan-yun¹, MA Qi-ang¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. The 2nd Engineering Co. Ltd. of the 12th Bureau Group of China Railway, Taiyuan 030032, China)

Abstract: This study aimed to prepare similar materials—gypsum mortar Kaolin similar material(components: quartz sand, Kaolin, gypsum, water and laundry detergent) for weak surrounding rocks which can be conformed to standard, the weak surrounding rocks mass of main mechanical parameters in Class IV tunnel has been chosen as the reference standard, and tests were performed for this similar material to research. The methods orthogonal experiments and range analysis were used to analyze experimental data to obtain mechanical parameters including cohesive strength, internal friction angle and weight, study the various components of gypsum mortar Kaolin similar materials influence on their mechanical parameters, and select the best ratio for Grade IV soft rock; the tests triaxial shear experiments and repeated experiments were used to analyze the mechanical characteristics of similar materials under different confining pressures. The research results indicate that, the water content has the greatest influence on the mechanical parameters cohesion and internal friction angle of similar materials of gypsum mortar Kaolin. When the water content is increased the cohesive force decreases rapidly and the internal friction angle increases slowly;

收稿日期: 2018-07-09

基金项目: 长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(18ZDXK05)

通讯作者: 黄 戡(1979—), 男, 湖南永州人, 长沙理工大学副教授, 博士, 主要从事城市轨道交通工程和岩土、隧道工程方面的研究。E-mail: hk_616@sina.com

on the other hand ,either increasing Kaolin content or decreasing gypsum content can lead to an obvious increase in cohesive strength and decrease in internal friction angle; then sand content has little effect on the results. In addition while quartz sand turned out to be the most important factor affecting the weight about the mechanical parameters of similar materials, water second, Kaolin and gypsum last.

Key words: IV grade rock similar material; orthogonal experiment; triaxial compression test; range analysis; internal friction angle; cohesive strength; Kaolin

由于我国地质地形复杂多样以及城镇化建设规模的持续扩大,隧道、地铁和地下工程建设施工有时会不可避免地处于软弱破碎带等不良地质段。为确保隧道施工安全,需对隧道围岩特性进行研究分析。在研究隧道工程问题上,物理模型试验能更直观地展现模型试样在外荷载作用下从弹性到塑形再至破坏的所有变化状态。模型试验基于相似原理,使用力学性能与原型岩体力学参数相似的相似材料建立地质力学模型^[1],对隧道工程原型进行缩尺研究^[2]。因此,相似材料的研究数据可为隧道工程问题提供很好的理论依据。

近些年,对于相似材料的试验研究,国内很多学者取得了一定的成果。窦远明等^[3]配置出模型试验中的软弱土质相似材料,材料组成成分为重晶石粉、石膏、石英砂、洗衣液、膨润土和水。王鹏等^[4]、刘亮亮等^[5]和史小萌等^[6]对砂胶比、含水率、外填料等各因素进行研究,得出相似材料对泊松比、弹性模量、单轴抗压强度等物理力学特性的影响作用规律。武伯弢等^[7]以原材料重晶石粉、石膏、细砂和水研制出可用于隧道工程的Ⅳ级围岩相似材料。在相似材料的研究中,大部分学者是采用水泥、石膏或者石灰作为胶结材料,极少有使用高岭土作为胶结材料进行试验研究的。高岭土虽然强度极低(10 d);但是其 $R_c=0.073$ MPa, $R_t=0.011$ MPa,拉压比为1/5.6,塑性大,有其研

究的价值,因此选用高岭土作为胶结材料进行相似材料的研究。作者以高岭土、石英砂、石膏、水和洗衣液为原材料,在分析研究前人研究成果的基础上,通过“四因素,三水平”的正交试验^[8]、三轴压缩试验以及重复试验,测定相似材料在不同围压下的抗压强度、内摩擦角、黏聚力和重度,从而优选出符合Ⅳ级软弱围岩力学标准的各组成成分配比。

1 石膏砂浆高岭土相似材料试验

1.1 试验理论

一般情况下,地质力学模型试验要求所有没有因次的物理量的相似比例尺为1,而具有相同因次的物理量的相似比例尺相等。本试验采用和原型力学性质相似的材料,取适宜的配比制作模型进行试验,分析试验所得数据和结论,推测原型可能产生的实际状况^[8]。

模型选取适宜的相似材料,达到变形和强度方面的要求。本试验采用石膏砂浆高岭土材料,配制出符合Ⅳ级围岩力学性能的土体。试验材料物理力学参数见表1。依照《公路隧道设计规范》^[9],本试验装置的几何相似比^[10-11]为:

$$C_\gamma = 1; C_\mu = 1; C_\epsilon = 1;$$

$$C_\varphi = 1; C_\sigma = C_E = 30。$$

表 1 原型围岩和模型围岩的物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of prototype rock and model rock mass

类型	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	泊松比	重度/ (kN · m ⁻³)	弹性模量/ MPa
Ⅳ级围岩	200~700	27~39	0.3~0.35	20~23	1 300~6 000
Ⅳ级模岩	6.67~23.33	27~39	0.3~0.35	20~23	43.33~200

1.2 试验材料的选取

通常许多材料可以用作相似材料,但大部分

材料可能不是最适合的,需要通过调配得到最优配方。采用“四因素、三水平”的正交试验,可以检

验石膏砂浆高岭土各个组成成分对模型试验的影响程度,从而调配出符合Ⅳ级围岩力学性能的最优占比。石膏砂浆高岭土组成成分为:石英砂(因

素 A)、高岭土(因素 B)、石膏(因素 C)、水(因素 D)、洗衣液(2%)。正交试验结果见表 2。

表 2 混合砂浆正交试验结果

Table 2 Orthogonal test result of mixed mortar

Ⅳ级围岩	因素 A/ g	因素 B/ g	因素 C/ g	因素 D/ mL	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	黏聚力 c/kPa	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$
1	100	45	45	25	34.3	41.3	20.7
2	100	50	55	30	35.9	20.9	20.6
3	100	55	65	35	32.4	52.1	20.8
4	110	45	55	35	27.1	82.1	20.3
5	110	50	65	25	32.7	50.2	20.1
6	110	55	45	30	35.1	20.7	20.2
7	120	45	65	30	33.7	46.1	20.9
8	120	50	45	35	34.9	32.9	20.7
9	120	55	55	25	32.6	52.4	19.9
	K_{φ_1}		34.2	31.7	34.8	33.2	
	K_{φ_2}		31.6	34.5	31.9	34.9	
	K_{φ_3}		33.7	33.4	32.9	31.5	
	R_{φ}		2.6	2.8	2.9	3.4	
	主次顺序			D > C > B > A			
	K_{c_1}		38.1	56.5	31.6	48.0	
	K_{c_2}		51.0	34.7	51.8	29.2	
	K_{c_3}		43.8	41.7	49.5	55.7	
	R_c		12.9	21.8	20.2	26.5	
	主次顺序			D > B > C > A			
	K_{γ_1}		20.7	20.6	20.5	20.2	
	K_{γ_2}		20.2	20.5	20.3	20.6	
	K_{γ_3}		20.5	20.3	20.6	20.6	
	R_{γ}		0.5	0.3	0.3	0.4	
	主次顺序			A > D > B = C			

注:考虑黏聚力和内摩擦角作为试验结果, K_{φ_1} 、 K_{φ_2} 、 K_{φ_3} 、 K_{c_1} 、 K_{c_2} 、 K_{c_3} 、 K_{γ_1} 、 K_{γ_2} 和 K_{γ_3} 分别表示某因子在各水平下黏聚力、内摩擦角和重度的综合平均值; R_{φ} 、 R_c 和 R_{γ} 表示某因子的极差。

1.3 试验研究

本试验使用的装置为三轴仪和常规室内试验仪器。由于试验时间和试验条件的限制,本试验采取不固结不排水剪(UU)。另外,在试样制作过程中使用的器材有:击实仪、抹刀、量杯、三瓣模、承膜筒、橡皮膜、止水橡皮圈、不透水板、电子秤和保鲜膜等。

本试验中,采用 3 件试样为一组,共 108 组。试样制作步骤为:①确定各组成元素的配比和用量;②称量用量,将高岭土、石英砂和石膏搅拌均

匀;③组装试模架;④将水和洗衣液迅速搅拌均匀,搅拌后的土体试样分 4 次(每次 35~37 g)倒入试模架,在加入时略加插捣后再夯击 5 下,待试样土与试模架齐平即可;⑤静置 30 min 后脱模,称重贴标,留待取用。

本次试验三轴仪使用步骤为:①打开阀门,当水冒出底座时关阀门,依次放不透水板、试样和不透水板;②将橡皮膜套入试样,然后将试样放入压力室并套紧橡皮圈;③注水关阀,调整围压;④收集数据,整理废料。

2 各原材料含量的影响

根据正交试验方案,极差为所有成分在其水平的综合平均值中用最大值减最小值所得的数据。当知道极差数据时,试验中可据此分析组成成分对相似材料参数的影响。若极差更大,则此组成成分含量变动时最后试验结果的改变就更大,组成成分就更重要。由极差分析法(见表 2)可知,对于内摩擦角和黏聚力力学参数指标,因素影响主次顺序分别为 D—C—B—A 和 D—B—C—A,即 D 因素水影响最大,为主要因素;A 因素石英砂影响最小,故是不重要因素;而 B 因素高岭土和 C 因素石膏的影响顺次相对于试验指标的不同而正好相反,都是次要因素。而对于重度力学参数指标,因素影响主次顺序为 A—D—B—C,即石英砂的影响最大,其次是水,而高岭土和石膏的影响最小。

2.1 含水率的影响

图 1 显示了 100 kPa 围压下不同含水材料的三轴试验的应力—应变关系曲线。由图 1 可见,试样土体含水率渐渐变大时,压应变随之逐步变大;当试样土体的含水率为 15% 时,开始阶段压应变变大,其值是 2.3%。这是因为含水率太高时,试样土体在受到压力时体积会快速减小,从而造成试验时的稳定性较差。当试样土体的含水率为 9% 时,试样出现应变软化现象。当试样含水率低于 9% 时,会导致试样土体搅拌不便。因此,相似材料含水率在 9%~15% 之间时最为适合。

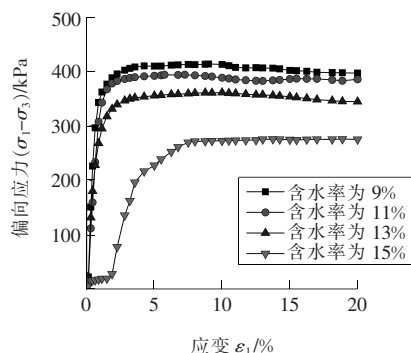


图 1 $\sigma_3 = 100$ kPa 时不同含水率下三轴试验应力—应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curves of triaxial test under various water contents when $\sigma_3 = 100$ kPa

图 2 为相似材料在不同含水率时测得的内摩擦角、黏聚力和重度的数值。由图 2 可知,当相似材料试样土体含水率逐渐加大时,黏聚力显著降低,内摩擦角缓慢升高,重度有较小升高。

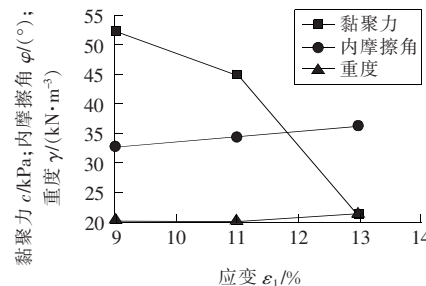


图 2 含水率与强度指标的关系

Fig. 2 Relationships between water contents and strength parameter

综上,D 因素水对内摩擦角的作用较小,对黏聚力的作用大,对重度的作用较大。

2.2 高岭土含量的影响

图 3 显示了 100 kPa 围压下相似材料中不同高岭土含量的三轴试验应力—应变关系曲线。由图 3 可见,随着轴向压力的不断加大,试样土体的裂隙被逐渐压实;当高岭土含量为 17% 时,初始阶段的偏向应力增量比较小,应变的增量比较大,然后由线弹性变形阶段转变为塑性变形阶段;当高岭土含量为 29% 时,在塑性变形阶段后明显表现为:当应变逐渐增大时,偏向应力不断减小,此阶段出现应变软化现象。因此,高岭土含量在 17%~29% 之间最为适合。

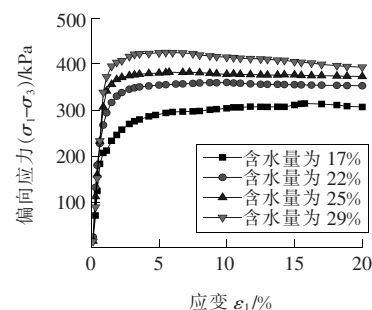


图 3 $\sigma_3 = 100$ kPa 时不同含土量下三轴试验应力—应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curves of triaxial test under various Kaolin contents when $\sigma_3 = 100$ kPa

图 4 为相似材料在不同含土量时所测得的内摩擦角、黏聚力和重度的数值。由图 4 可见,当相

似材料试样土体高岭土含量不断加大时,黏聚力快速升高,而内摩擦角缓慢降低,重度也有较小的降低。

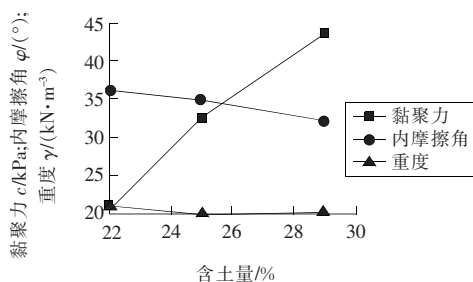


图4 含土量与强度指标的关系

Fig. 4 Relations between Kaolin content and strength parameters

综上, B 因素高岭土对内摩擦角的作用比较小,对黏聚力的作用较大,对重度的作用较小。

2.3 石膏含量的影响

图5显示了100 kPa围压下不同石膏含量的三轴压缩试验应力—应变关系曲线。如图5所示,相似材料石膏的含量为27%时,开始出现应变软化现象;当石膏含量为12%时,在应变增量逐渐变大的同时,偏向应力也在不断加大。因此,相似材料石膏含量在12%~27%之间最为适合。

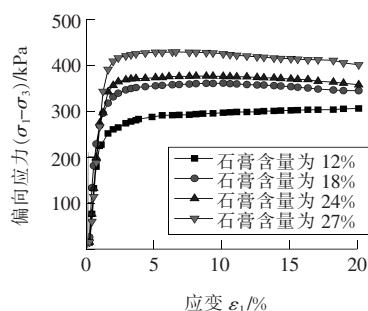


图5 $\sigma_3 = 100$ kPa 时不同石膏含量下三轴试验应力—应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of triaxial test under various gypsum contents when $\sigma_3 = 100$ kPa

图6为相似材料在不同石膏含量时测得的内摩擦角、黏聚力和重度的参数。由图6可见,当相似材料试样土体石膏含量逐渐加大时,黏聚力降低,内摩擦角则有较小升高,而重度仅有很小的升高。

综上, C 因素石膏对内摩擦角的作用小,对黏聚力的作用较大,对重度的作用很小。

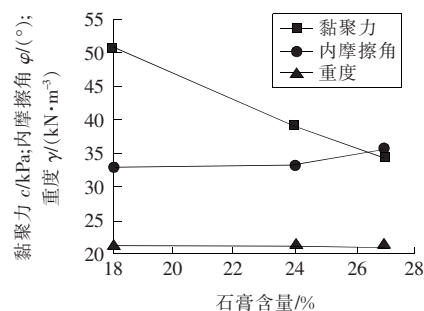


图6 石膏含量与强度指标的关系

Fig. 6 Relation between gypsum content and strength parameter

2.4 含砂量的影响

图7是相似材料在不同石英砂含量时所测得的内摩擦角、黏聚力和重度的数值。由图7可见,当含砂量增加时,黏聚力降低,内摩擦角升高,重度有较大升高;石英砂作为相似材料骨料,其对内摩擦角和重度的作用会更大。这是因为石英砂的孔隙率较大,当含砂量越大时,相似材料试样土体在受压时会产生越大的体积压缩,从而造成试验时的不稳定。同时,若石英砂的含量太低,也会导致相似材料的抗压强度过低。据此,相似材料含砂量取在35%~60%之间最为适宜。据此可得,石英砂的含量对相似材料的内摩擦角和黏聚力影响作用都很小,对重度的影响较其他因素则最大。

综上, A 因素石英砂对内摩擦角和黏聚力的影响都比较小,对重度的影响也不是很大。

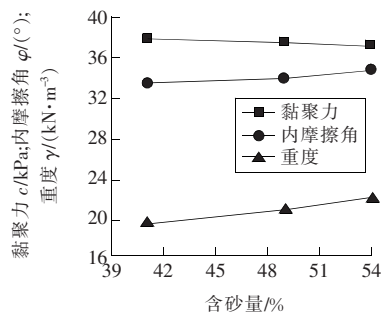


图7 含砂量与强度指标关系

Fig. 7 Relations between sand content and strength parameters

3 相似材料试验结果与分析

本试验通过“四因素、三水平”的正交试验、重复试验和三轴压缩试验,测得相似材料分别在

100,200,300 kPa 围压下的应力—应变关系曲线和强度参数内摩擦角、黏聚力和重度。通过分析不同含水率、高岭土含量、石膏含量和石英砂含量对高岭土石膏胶结材料强度参数的影响和力学性能变化规律,从而配制出符合Ⅳ级围岩力学性能的最佳配比。

按照高岭土石膏胶结材料试验步骤进行试验,测得的结果如表 2 所示。根据各原材料含量对试验结果的影响分析和表 1 中的数据,最后选择符合Ⅳ级软弱围岩力学性能要求的是试验第二组和第六组配比。第二组配比为,石英砂:高岭土:石膏:水:洗衣液=20:10:11:6:0.96;第六组配比为,石英砂:高岭土:石膏:水:洗衣液=22:11:9:6:0.98。

图 8 体现的是第二组三轴试验摩尔应力包络线。在不同围压下测得的内摩擦角为 35.9° ,黏聚力为 20.9 kPa。

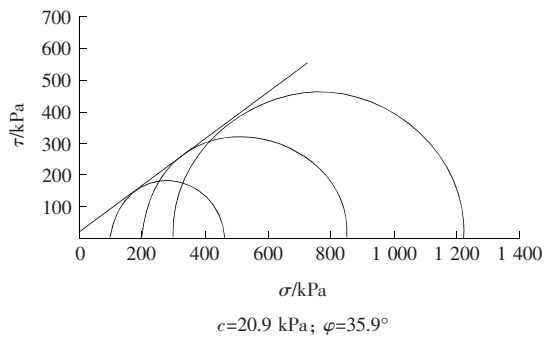


图 8 第二组试验摩尔应力包络线
Fig. 8 Mohr's circle envelope of No. 2

图 9 体现的是第六组三轴试验摩尔应力包络线。在不同围压下测得的内摩擦角为 35.1° ,黏聚力为 20.7 kPa。

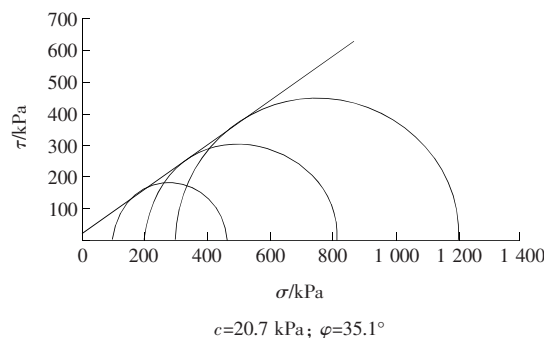


图 9 第六组试验摩尔应力包络线
Fig. 9 Mohr's circle envelope of No. 6

在试验现场,由于人工、设备或环境的影响,可能会造成试验结果的不真实,因此通常会进行重复试验。本试验对表 2 第 6 组的相似材料配比进行重复试验,试验结果如表 3 所示。由表 3 数据可知,3 次重复试验均符合Ⅳ级模型围岩的力学参数标准。

表 3 Ⅳ级围岩相似材料重复试验
Table 3 Grade Ⅳ surrounding rock similar material repeat test

力学参数	内摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ kPa	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
Ⅳ级模岩	27~39	6.67~23.33	20~23
第一次重复试验	34.8	19.4	21.2
第二次重复试验	33.7	20.2	20.5
第三次重复试验	34.2	19.9	20.9

4 结论

1) 作者以石英砂、高岭土、石膏、水和洗衣液为原材料,按适宜的比例配制成符合Ⅳ级软弱围岩力学性能标准的相似材料。符合Ⅳ级软弱围岩力学性能标准的原材料配制比如下。

石英砂:高岭土:石膏:水:洗衣液=
20:10:11:6:0.96;

石英砂:高岭土:石膏:水:洗衣液=
22:11:9:6:0.98。

2) 根据三轴剪切试验数据、正交试验数据和极差分析法,分析得到相似材料各组成成分含量对其影响程度和作用趋势。含水率对内摩擦角和黏聚力参数影响最大,其次是高岭土含量和石膏含量,含砂量对其影响最小;含砂量对重度的影响最大,然后是含水率,高岭土含量和石膏含量均影响较小。对内摩擦角的作用趋势主要呈现在随含水率的加大而缓慢升高,对黏聚力的作用趋势主要呈现在随含水率的加大而显著降低对重度的作用趋势主要呈现在随含砂量的增加而缓步上升。

石膏砂浆高岭土胶结材料的原材料均价格低廉,无毒副作用,试验模型简单且便于制作,原材料各项物理力学性能符合试验要求。本研究为隧道地质的软弱破碎围岩试验研究以及相关地质力学模型的建立提供了理论依据。

〔参考文献〕

- [1] 陈彦璋,彭方俊,李亮,等. 浅谈地质力学模型试验理论与技术:以水利工程为例[J]. 水利规划与设计, 2017(10):118-120.
CHEN Yan-zhang, PENG Fang-jun, LI Liang, et al. Discussion on theory and technology of geomechanical model test; take water conservancy projects as an example[J]. Water Resources Planning and Design, 2017(10):118-120.
- [2] 王凯,李术才,张庆松,等. 流-固耦合模型试验用的新型相似材料研制及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(9):2521-2533.
WANG Kai, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Development and application of new similar materials of surrounding rock for a fluid-solid coupling model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9):2521-2533.
- [3] 窦远明,王建宁,田贵州,等. 软弱土质相似材料配比的正交试验研究[J]. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2018, 37(4):65-71.
DOU Yuan-ming, WANG Jian-ning, TIAN Guizhou, et al. Orthogonal test study on the ratio of soft soil similar materials[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science Edition, 2018, 37(4):65-71.
- [4] 王鹏,舒才,施峰,等. 不同砂胶比、密度和含水性相似材料力学性质正交试验研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(S2):229-235.
WANG Peng, SHU Cai, SHI Feng, et al. Orthogonal experimental study of similar materials properties of different densities, sand-binder ratios and residual moisture contents [J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(S2):229-235.
- [5] 刘亮亮,王海龙,刘江波,等. 低强度相似材料正交配比试验[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2014, 33(2):188-192.
LIU Liang-liang, WANG Hai-long, LIU Jiang-bo, et al. Low strength similar material proportioning test based on orthogonal design[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science Edition, 2014, 33(2):188-192.
- [6] 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, 36(5):1357-1362.
SHI Xiao-meng, LIU Bao-guo, XIAO Jie. A method for determining the ratio of similar materials with cement and plaster as bonding agents[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(5):1357-1362.
- [7] 武伯弢,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, 34(S1):109-116.
WU Bo-biao, ZHU He-hua, XU Qian-wei, et al. Experimental study of similar material for weak surrounding rock mass of class IV[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1):109-116.
- [8] 李文杰,葛毅鹏,张芳芳. 基于相似理论的相似材料配比试验研究[J]. 洛阳理工学院学报:自然科学版, 2013, 23(1):7-12.
LI Wen-jie, GE Yi-peng, ZHANG Fang-fang. Experimental research on proportioning of similar materials based on similarity theory[J]. Luoyang Institute of Science and Technology: Natural Science Edition, 2013, 23(1):7-12.
- [9] JTG D70—2004,公路隧道设计规范[S]. 北京:人民交通出版社,2004.
JTG D70-2004, Highway tunnel design code[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [10] 李铮,何川,高翔,等. 岩石隧道渗流模型试验相似材料的研制及应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(9):33-39.
LI Zheng, HE Chuan, GAO Xiang, et al. Development and application of similar materials for rock tunnel seepage model test[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(9):33-39.
- [11] 杨军平,周立新,赵卫洁. 基于正交设计的IV级弱膨胀性围岩相似材料试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16(35):294-298, 309.
YANG Jun-ping, ZHOU Li-xin, ZHAO Wei-jie. Experimental study on similar materials of grade IV weak expansive surrounding rock based on orthogonal design[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(35):294-298, 309.