

复杂环境下围岩相似材料配合比及渗透性研究

Research on the Mix Proportion and Permeability of Similar Materials in Surrounding Rocks in Complex Environments

荣耀¹, 江训仲², 喻义天³, 孙洋¹丁海滨³, 童立红³

(1. 江西省交投养护科技集团有限公司, 南昌 330052; 2. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 南昌 330032;
3. 华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013)

摘要: 随着地下工程技术的快速发展, 在复杂围压及水压环境条件下的流固耦合模型试验对相似材料提出了更高要求。为研究适用于模型试验的相似材料, 选用铁粉、重晶石粉、硅油、石英砂和白水泥作原材料, 采用 $L_9(3^4)$ 正交试验法设计 9 组不同材料配比方案, 揭示其渗透性的变化规律, 并建立渗透系数与骨料比、白水泥及硅油掺量之间的定量关系。结果表明: 围压的增加会使材料内部孔隙被压缩, 结构变得更加密实, 从而降低渗透系数; 而水压的增大则会使孔隙压力增加, 进而提高渗透性; 骨料在材料中的占比对渗透系数起着决定性的作用, 在围压和水压一定时, 随着硅油掺量和白水泥掺量的增大, 试件渗透系数呈现减小的趋势。研究成果为复杂环境条件下的流固耦合模型试验提供可靠的相似材料选择依据。

关键词: 围压及水压; 隧道工程; 围岩相似材料; 渗透系数

中图分类号: TU458

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 04-0035-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.04.007

RONG Yao¹, JIANG Xunzhong², YU Yitian³, SUN Yang¹, DING Haibin³, TONG Lihong³

(1. Jiangxi Jiaotou Maintenance Technology Group Co., Ltd., Nanchang 330052, China;

2. School of Civil and Architectural Engineering, Donghua University of Technology, Nanchang 330032, China;

3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: With the rapid development of underground engineering technology, higher requirements have been placed on similar materials for fluid structure coupling model tests under complex confining pressure and water pressure environmental conditions. To study similar materials suitable for model experiments, iron powder, barite powder, quartz sand, silicone oil, and white cement were selected as raw materials. The $L_9(3^4)$ orthogonal experimental method was used to design 9 different material ratio schemes, revealing the variation law of their permeability, and establishing a quantitative relationship between permeability coefficient and aggregate ratio, white cement, and silicone oil content. The results indicate that an increase in confining pressure will compress the internal pores of the material, making the structure denser and thus reducing the permeability coefficient; The increase in water pressure will lead to an increase in pore pressure, thereby improving permeability; The

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2023YFC3009400); 2022 年江西省交通运输厅重大研发专项项目 (2022Z0001, 2022Z0002); 江西省重点研发揭榜挂帅项目 (20223BBG71018)。

作者简介: 荣耀 (1979—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 隧道工程。

通信作者: 孙洋 (1988—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 岩土与地下工程。

收稿日期: 2024-07-25

材料科学

proportion of aggregate in the material plays a decisive role in the permeability coefficient. When the confining pressure and water pressure are constant, the permeability coefficient of the specimen shows a decreasing trend with the increase of silicone oil content and white cement content. The research results provide a reliable basis for selecting similar materials for fluid structure coupling model experiments under complex environmental conditions.

Key words: confining pressure and water pressure; tunnel engineering; similar materials of surrounding rock; permeability coefficient

0 引言

随着我国交通运输需求的不断增加,许多隧道建设向地下深部发展^[1]。深部隧道工程往往具有高应力、高水压等地质特性,在建设过程中极易出现涌水突泥、岩爆等地质灾害现象,其中涌水突泥所带来的经济和人员损失位于各类地质灾害前列^[2-4]。要开展复杂环境下流固耦合模型试验,必须具备相应的模型相似材料。因此,复杂环境条件下隧道围岩相似材料研究具有重要的工程意义。

目前,隧道涌水突泥的研究方法主要有数值模拟、理论推导和模型试验3种方法。深部隧道围岩的物理力学性质和水理性质复杂多变,仅依靠理论分析和数值计算难以对复杂条件下隧道突水过程进行准确分析,而模型试验具有较高的灵活性,可以进行多次试验和调整,是研究不同应力及水压作用下隧道涌水突泥的一种有效方法。由于相似材料在模型试验中的重要性,且不同模型试验中所需要的相似材料不同,因此,国内外学者对相似材料展开了研究。韩伯鲤等^[5]研制了以铁粉、重晶石粉、红丹粉、松香、石蜡、酒精及氯丁胶黏结剂为原料的新型地质力学模型材料;马芳平等^[6]确定了以磁铁矿精矿粉、河砂、石膏或水泥、水及添加剂为原料配比的相似材料;胡晶^[7]以石英砂、白水泥、重晶石粉、滑石粉、硅油、凡士林、石膏为原材料,开展了含软弱隧道围岩渗流破坏试验;尹相杰^[8]推导出考虑高应力和高水压耦合作用的流固耦合相似模型;刘欣宇等^[9]利用自主研发的三轴试验仪器进行高围压、高水压环境下岩石渗透性研究;Xu等^[10]以石英砂为粗骨料、重晶石为细骨料,油、凡士林和石蜡为粘结剂得到了力学参数稳定、制作方便的围岩相似材料;袁荣宏等^[11]利用改进的三轴仪压力室进行渗透试验研究,研究表明渗透系数与围压的变化关系可以用幂函数表示;张改玲等^[12]利用高压三轴渗

透试验系统进行了高围压条件下的渗透试验,拟合出了两种砂样渗透系数与围压关系的数学表达式;Yang等^[13]以石英砂、42.5普通硅酸盐水泥及水为试验材料,模拟了砾岩力学性能;Liang等^[14]以标准砂、藿香、水泥和水为原料,研制了一种模拟小容重、中低强度岩体材料的流固耦合相似材料。

基于此,采用隧道围岩的相似材料,设计配比,利用自主研发的三轴试验仪器模拟不同应力及水压条件,研究围岩相似材料渗透性的变化规律,分析渗透系数与骨料比、白水泥及硅油含量之间的定量关系。

1 材料的选取及配比试验

1.1 原材料

相似材料原材料由骨料、胶结剂和调节剂组成。骨料作为主要原材料,对试件起到骨架和支撑作用。试件制作时通常会采用细骨料(指直径在0.16~5 mm的材料),因铁粉比重大、质地坚硬,其含量大小对试件的强度和弹性模量的影响很大;重晶石粉粒径小、密度低,压实性较高,能有效调节试件的比重;石英砂能调节材料的黏聚力和内摩擦角,对试件的强度的影响较大,所以,采用粒径为0.425 mm的石英砂(主要成分为 SiO_2)、0.074 mm的重晶石粉(主要成分为 BaSO_4)和0.150 mm的铁粉(主要成分为 Fe_3O_4)作为制作骨料材料。

松香、白水泥、黏土、石蜡等都是常用的胶结剂,而白水泥能够较好地调节材料强度,使用也方便,受外界影响比较小,因此,选择型号为AL-88的白水泥(主要成分为 Al_2O_3)作为试验的胶结剂。

调节剂可以微调材料的物理性能,使之达到预期的强度,例如硅油、滑石粉、凡士林等。由于硅油具有保湿和减少干裂的作用,选用1000 CS的二甲基硅油作为试验的调节剂。

1.2 试验方案

采用正交试验法，在前人开展流固耦合相似材料研究^[10]的经验基础上，设置4因素3水平，4因素为铁粉：石英砂：重晶石粉之比（A）、水灰比（B）、硅油掺量（C）、水（D）。正交设计见表1。

表1 正交设计表
Table 1 Orthogonal design table

试验号	因素			
	A	B	C/%	D/%
1	1:1:1	3:10	2	1
2	2:1:1	3:10	5	5
3	1:2:1	3:10	8	5
4	1:1:1	2:5	5	1
5	2:1:1	2:5	2	3
6	1:2:1	2:5	8	1
7	1:1:1	1:2	8	3
8	2:1:1	1:2	5	3
9	1:2:1	1:2	2	5

1.3 试件制备

按试验方案称取铁粉、石英砂、重晶石粉、白水泥、水和试验所需的硅油，依次倒入搅拌机内，搅拌5 min使其均匀搅拌，把搅拌好的材料倒入模具内，采用分层压实的方法成型；2 h后进行脱模，放在室温条下养护14 d。

1.4 试验方法

选用GDS三轴试验系统中的渗透模块进行受荷渗透试验。将制备好的试件在水中浸泡24 h，用乳胶膜包裹住试件，按照试验要求固定试件，向腔内加满水，施加围压和渗透反压，等到一定时间内涌水量稳定后，记录60 s内通过试件的水量；改变围压和水压，重复以上步骤；采用达西定律计算试件的渗透系数。

2 试验结果及分析

2.1 围压及水压对相似材料渗透系数影响

采用GDS三轴试验系统对试件进行不同围压及水压的渗透系数测定，选取试验过程中具有代表性的1号及5号试件进行研究。

1号、5号试件渗透系数在不同水压和围压下的变化曲线如图1所示。在固定水压、不同围压下，试件的渗透系数会随围压的增大呈现减小的趋势。当1号试件围压加载到600 kPa，水压为100、300、500 kPa，渗透系数分别为 7.49×10^{-6} 、 9.28×10^{-6}

和 10.21×10^{-6} cm/s。可知围岩试件的渗透系数与水压及围压的大小有关。试件在不同围压下的渗透系数随着水压的增大而增大，在低围压时，不同水压试件渗透系数降低速度较快；而随着围压的增大，渗透系数的降低速度减缓并趋于稳定。

由图2可知，在1 MPa围压情况下，试件渗透系数随着水压的增大而增大，是因为在水压作用下，增大了试件的孔隙压力，进而增大了试件的渗透性。

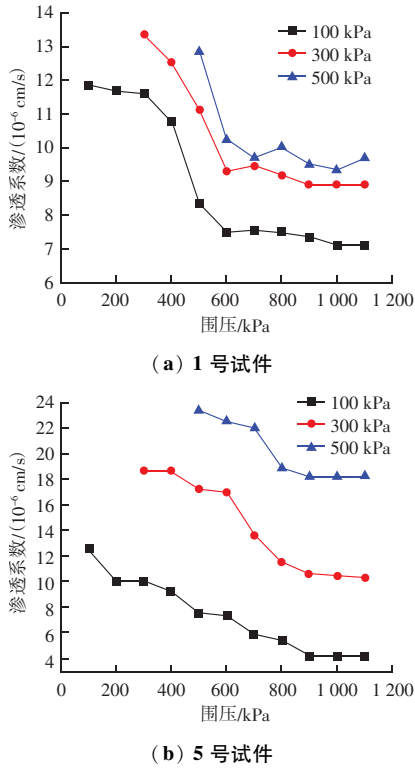


图1 1、5号试件不同围压及水压下渗透系数变化曲线
Fig. 1 Variation curves of permeability coefficient of samples 1 and 5 under different confining pressures and water pressures

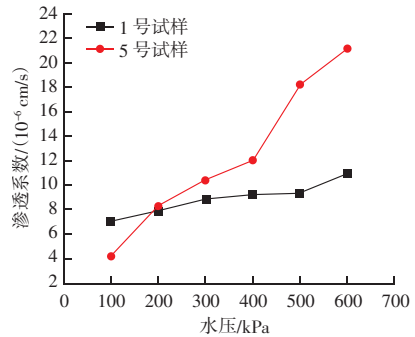


图2 1 MPa围压条件下试件随着水压变化曲线
Fig. 2 Change curve of sample with water pressure under 1 MPa confining pressure

材料科学

2.2 不同水压下骨料对渗透系数的影响

图3为在1 MPa围压、不同水压条件下,骨料掺量对渗透系数的变化曲线。在骨料掺量一定时,随着水压的增大,渗透系数也随之增大;在同一水压下随着骨料掺量的增大,渗透系数先减后增,在0.87时出现拐点,之后开始减小。增大是因为骨料会形成更多的孔隙,使水更容易渗透。当骨料比例继续增大时,渗透系数会达到一个临界点,超过这个临界点后,骨料之间的连接变得更加紧密,导致孔隙结构逐渐减少,从而减小渗透系数。因此,在一定范围内,骨料掺量的增大可能会导致渗透系数先减小后增大再减小的趋势。

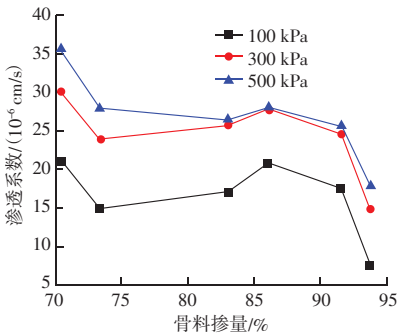


图3 不同水压下骨料掺量对渗透系数影响
Fig.3 Influence of aggregate dosage on permeability coefficient under different water pressure

2.3 不同水压下白水泥对渗透系数的影响

图4为在1 MPa围压、不同水压条件下,白水泥掺量对渗透系数的变化曲线。在白水泥掺量一定时,随着水压的增大,渗透系数也随之增大;在同一水压下,随着白水泥掺量的增加,渗透系数快速减小;在白水泥掺量超过3%后开始缓慢减小。是因为胶凝材料会填充在土体颗粒之间的空隙,使材料之间更加致密。

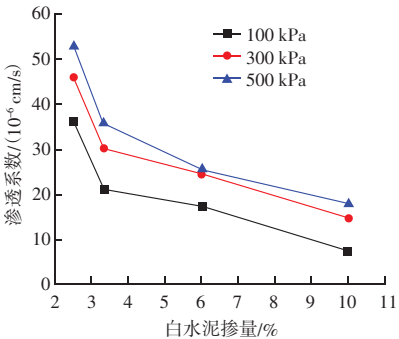


图4 不同水压下白水泥掺量对渗透系数影响
Fig.4 Influence of white cement dosage on permeability coefficient under different water pressure

2.4 不同水压下硅油对渗透系数的影响

图5为在1 MPa围压不同水压条件下硅油对渗透系数的变化曲线。在硅油掺量一定时,随着水压的增大,渗透系数也随之增大;在同一水压下,随着硅油掺量的增加,渗透系数大幅度减小。原因为硅油掺量的增加填充土壤空隙,形成润滑膜和物理屏障以及可能产生的化学反应,有效地降低了渗透系数,使得水分通过土壤的难度大幅度增加。

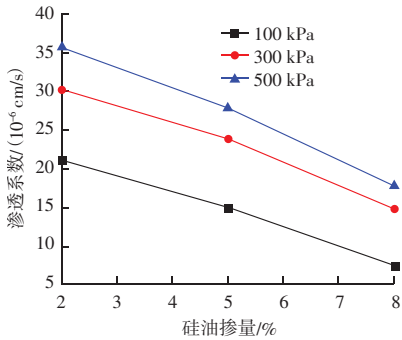


图5 不同水压下硅油掺量对渗透系数影响
Fig.5 Influence of silicone oil dosage on permeability coefficient under different water pressure

3 结论

选用铁粉、石英砂、重晶石粉、白水泥和硅油作为模拟隧道围岩相似材料,采用GDS三轴试验系统分析其不同围压及水压条件下渗透性变化规律,得到以下主要结论:

- (1) 在固定水压、不同围压下,试件的渗透系数会随围压的增大呈现减小的趋势;当围压固定时,试件的渗透系数会随水压的增大而增大。
- (2) 在水压和围压一定时,骨料掺量的增大会导致渗透系数呈现先减小后增大再减小的趋势;试件渗透系数随着硅油掺量的增加而大幅度减小;渗透系数随着白水泥掺量的增加而减小。

参考文献

[1] 张振杰, 张强勇, 向文, 等. 复杂环境下新型流固耦合相似材料的研制及应用 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2021, 52 (11): 4168-4180.

[2] ZHAO Y, LI P F, TIAN S M. Prevention and treatment technologies of railway tunnel water inrush and mud gushing in China [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2013, 5 (6): 468-477.

材料科学

次或者冻融循环 80 次后复合材料的强度损失率和质量损失率均比较低，能够满足雨水较多以及寒冷地区高速公路路基工程施工的需求。

(3) 改性磷石膏掺量为 15% 的复合材料环保性能较好，重金属镉、砷和镍未检出，铬、锰、锌、铜检测结果均低于污水排放限值和Ⅲ类地下水排放限值，不会对高速公路周围土壤或者地下水造成污染威胁。

参 考 文 献

[1] 乐群力. 磷石膏对水泥稳定碎石基层性能影响研究 [J]. 合成材料老化与应用, 2019, 48 (5): 91-95, 106.

[2] 吴泳霖, 陈建军, 张伟, 等. 不同气氛下磷石膏热脱水特性及动力学比较研究 [J]. 化学工程师, 2022, 36 (3): 16-20.

[3] 孟文慧, 宋少民. 无熟料胶凝材料胶砂与混凝土性能的试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (1): 32-38.

[4] 戴取秀, 胡瑶, 马丽萍, 等. 改性磷石膏对污泥重金属迁移变化的影响机制 [J]. 中国环境科学, 2024, 44 (9): 5063-5076.

[5] 桑安, 曹俊雅, 张莉昕, 等. 磷石膏固废资源化利用技术及应用前景 [J]. 现代化工, 2025, 45 (1): 34-41.

[6] 邹庆余, 周理, 胡松, 等. 纤维增强磷石膏轴心受拉应力-应变曲线研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (4): 53-58.

[7] 王飞, 马明全, 王鹏. 冻融循环作用下水泥+磷石膏改良湿陷性黄土力学特性试验 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (3): 93-98.

[8] 冷曼希, 朱钰, 严继康, 等. 工业废料磷石膏结晶特征与矿物浮选性能研究 [J]. 无机盐工业, 2025, 57 (3): 108-115.

[9] 龙崎钧, 吴琴, 陶佳, 等. 高掺量改性半水磷石膏墙体材料力学性能研究 [J]. 无机盐工业, 2025, 57 (4): 89-96.

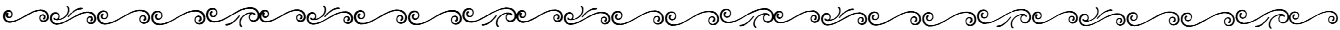
[10] 张家豪, 赵丽华, 高奥东, 等. 水泥稳定大掺量改性磷石膏的制备与性能研究 [J]. 公路, 2024, 69 (8): 107-113.

[11] 胡彪, 吴赤球, 吕伟, 等. 改性磷石膏矿渣水泥在混凝土和路基材料中的应用研究 [J]. 混凝土与水泥制品, 2022 (4): 94-99.

[12] 肖心, 李敬伟, 侯祥山, 等. 固废基硫铝系高活性材料改性磷石膏制备路面基层材料试验研究 [J]. 环境卫生工程, 2023, 31 (4): 63-69.

[13] 黄绪泉, 蔡家伟, 赵小蓉, 等. 硅酸钠改性磷石膏道路稳定材料性能及固化机理 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (12): 4471-4479.

[14] 赵丽华, 张家豪, 高奥东, 等. 基于硅酸钠与熟石灰改性的水泥稳定磷石膏性能研究 [J]. 四川水泥, 2025 (2): 4-7.



(上接第 38 页)

[3] 李朝阳, 王迎超, 刘洋, 等. 侵入接触型隧道突泥涌水危险性评估的变权-靶心贴适度模型 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2019, 50 (11): 2773-2782.

[4] LI L P, TU W F, SHI S H, et al. Mechanism of water inrush in tunnel construction in karst area [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016, 7 (sup1): 35-46.

[5] 韩伯鲤, 张文昌, 杨存奋. 新型地质力学模型材料 (MIB) [J]. 武汉水利电力学院学报, 1983 (1): 11-17.

[6] 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.

[7] 胡晶. 含软弱夹层隧道围岩渗流破坏机理及围岩压力计算方法研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2022.

[8] 尹相杰. 复杂环境条件下新型流固耦合模型相似材料的研制及其应用 [D]. 济南: 山东大学, 2020.

[9] 刘欣宇, 刘爱华, 李夕兵. 高围压条件下含充填裂隙类岩石水渗流试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (7):

1390-1398.

[10] XU Z L, LUO Y B, CHEN J X, et al. Mechanical properties and reasonable proportioning of similar materials in physical model test of tunnel lining cracking [J]. Construction and Building Materials, 2021, 300, 123960.

[11] 袁荣宏, 白杰, 吴桂芬. 水泥土渗透系数随围压变化的试验研究 [J]. 水利水电工程学报, 2012 (5): 13-17.

[12] 张改玲, 王雅敏. 高围压下砂土的渗透特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2014, 35 (10): 2748-2754, 2786.

[13] YANG M Z, YANG Y, ZHAO B. Study on the proportion of conglomerate similar materials based on the orthogonal test [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021.

[14] LIANG D X, JIANG Z Q, ZHU S Y, et al. Experimental research on water inrush in tunnel construction [J]. Natural Hazards, 2016, 81 (1): 467-480.