

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201607075

岩石隧道渗流模型试验相似材料的研制及应用

李 铮^{1,2,3}, 何 川¹, 高 翔¹, 杨赛舟¹, 骆耀文^{1,4}, 杨文波¹

(1.交通隧道工程教育部重点试验室(西南交通大学),成都 610031;2.四川省交通投资集团有限责任公司,成都 610000;
3.四川藏区高速公路有限责任公司,成都 610000;4.中国中铁二院工程集团有限责任公司,成都 610031)

摘 要:为提高岩石隧道渗流场分析的合理性,通过大量以控制渗透系数为核心的配比试验,提出适用于岩石隧道渗流模型试验的围岩、注浆圈及初衬等新型相似材料及其原料配比. 试验以黏土、细砂和玻璃纤维为原料配制围岩相似材料,以水泥和炭渣配制注浆圈相似材料,由多层编织土工布模拟初衬相似材料. 结果表明:随细砂含量加大,围岩相似材料渗透系数呈非线性增长,稳定性逐渐降低,改变玻璃纤维的含量对其渗透系数影响不明显;注浆圈相似材料渗透系数值随炭渣含量增加近于线性增长,2.5 m 水头下的试验值较 1.35 m 水头时更大;随着编织土工布叠加层数增加,初衬相似材料平均渗透系数呈快速减小并逐渐收敛的趋势,且单次渗透系数测试结果也趋于稳定;相同隧道排水量时,二衬外拱底处水压力远大于拱顶,逐步减小隧道排水量后,拱顶水压力值上升幅度大于拱底,调水阀接近闭合时,拱顶和拱底位置的水压力接近初始水压力. 研制的相似材料工作性能稳定,并成功应用于工程渗流试验中.

关键词: 岩石隧道;渗流模型试验;相似材料;水压力;排水量

中图分类号: U454 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)09-0033-07

Development and application of a similar material for
rock tunnel seepage model test

LI Zheng^{1,2,3}, HE Chuan¹, GAO Xiang¹, YANG Saizhou¹, LUO Yaowen^{1,4}, YANG Wenbo¹

(1. Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering (Southwest Jiaotong University), Ministry of Education, Chengdu 610031, China; 2. Sichuan Transportation Investment Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 3. Sichuan Tibetan Area Expressway Co., Ltd., Chengdu 610000, China; 4. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: To improve the rationality of seepage field analysis of rock tunnel, a new type of similar materials and the raw material ratio of surrounding rock, grouting circle and initial lining, etc, applied in rock tunnel seepage model test, have been developed through lots of proportioning tests taking the permeability coefficient as the core control variable. The surrounding rock similar material is compounded with clay, fine sand and glass fiber. The similar material of grouting circle is prepared by cement and carbon dross. And the multi-layer woven earthwork cloth is used to simulate the initial lining. The results indicate that the permeability coefficient of surrounding rock similar material presents nonlinear growth and the stability is gradually reduced with the increase of fine sand content. The permeability coefficient is not obviously influenced by the changes of the glass fiber content. The permeability coefficient of grouting circle similar material presents approximate linear growth with the increase of carbon dross content. The test value of 2.5 m hydraulic head is greater than that of 1.35 m. The average permeability coefficient of the initial lining similar material decreases rapidly as well as showing a trend of gradual convergence with the number of layers increased. The single permeability coefficient test result also tends to be stable. The water pressure of arch bottom outside secondary lining is far higher than vault's with the same tunnel discharge. And the vault's water pressure increases more than arch bottom's when water discharge gradually decreases. When approximately truning off the water valve, the arch bottom and vault's water pressure closes to the initial water pressure. The stable performance of similar material provides a guarantee for the application in the tunnel seepage field testing.

Keywords: rock tunnel; seepage model test; similar material; water pressure; water discharge

隧道工程在提高土地利用率、缓解地面交通、减

少环境污染等方面具有显著的优势,矿山法作为地下工程主流开挖工法被广泛应用于山岭隧道、水下隧道和城市隧道的建设中^[1]. 隧道工程的蓬勃发展也面临着越来越多的问题,据 1997 年中国运营的 5 000 余座铁路隧道技术状态统计,有水害问题的隧道约占 70%左右,随着时间推移,该数据还将增长^[2]. 可见,

收稿日期: 2017-07-19
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0802210);
国家自然科学基金青年基金(51408494, 51678499);
国家高技术研究发展计划(2014AA110401)
作者简介: 李 铮(1987-),男,博士,工程师
通信作者: 李 铮, lizheng872@163.com

解决地下水问题将有助于隧道结构安全并延长其使用寿命. 大型渗流模型试验能够真实地反映地下渗流场与隧道结构的时空关系, 准确地模拟隧道防排水体系, 探索隧道各阶段涌(排)水量与水压力的关系, 是研究隧道工程复杂水问题的一种有效手段.

随着模型试验技术的不断发展, 越来越多的原料按照不同配比制作成各类相似材料, 正确地选择相似材料是模型试验成功的前提和保证^[3]. 对隧道渗流试验而言, 其实质是模拟隧道施工前后地下渗流场的演变过程及隧道防排水体系, 合理地研制符合围岩及隧道各个结构渗透系数的相似材料成为试验重点. 国内外有大量学者对于隧道渗流试验的相似材料进行了研究, 文献[4]通过对骨料、胶凝剂和添加剂等材料的选择和配比, 研制了“固-液”两相模型材料, 解决了固体模型材料遇水崩解的问题; 文献[5]通过强度、塑形和水理性的配比试验, 研究隔水层的应力-应变全程相似和水理性相似的“固-液”耦合材料; 文献[6]应用地质力学模型试验的流-固耦合相似理论, 研制了一种由砂、重晶石粉、水泥、凡士林等组成的新型流-固耦合相似材料; 文献[7]在水泥混凝土中掺入聚丙烯纤维、膨润土、粉煤灰等制成弹性模量低、强度高的隧道模型相似材料; 文献[8]利用泡沫混凝土和可渗性混凝土等材料建立隧道模型, 对既有隧道排水系统的沉淀物治理进行研究; 文献[9]采用砂、水泥和硅酸钠等材料模拟隧道围岩及注浆圈等结构, 研究高水位隧道的衬砌外水压力. 以上研究普遍具有两个问题, 一是忽略了对材料渗透系数的有效控制, 不适用于以地下水渗流理论为出发点的隧道渗流及防排水问题; 二是未对诸如注浆圈、初衬、二衬等隧道防排水体系进行合理渗透系数的相似材料研究, 试验模型整体相似度较差.

本文以工程现场实际围岩及隧道结构的渗透系数为控制标准, 分别利用变水头试验仪对由黏土、细砂和玻璃纤维配制成的围岩, 自制恒水头渗透仪对由水泥和炭渣配制成的注浆加固圈, 自制多层土工布垂直渗透系数试验装置对由土工编织布模拟的初衬结构等进行渗透系数测试, 成功研制出适用于岩石隧道工程渗流试验的新型相似材料, 并在深圳东部某高速公路连接线工程中成功应用.

1 工程概况及模型试验相似理论

1.1 工程基本概况

深圳市东部某高速公路连接线工程位于深圳市罗湖区, 于深圳水库大坝下游穿越东湖公园, 以隧道形式与东部高速近期实施段相接. 线路由主隧道(南线、北线)及匝道组成, 双线并列布置, 全线总长

约 8.6 km, 按城市快速路标准设计(见图 1). 隧址区整体位于罗湖断裂带或其影响带内, 隧道埋深为 9.9 m~117.6 m, 富含 III~VI 级围岩, 围岩性质上下差异较大, 具有明显的上软下硬特征, 且由于毗邻深圳水库(北线距水库大坝仅 260 m), 地下水含量丰富, 隧道整体位于地下水位以下, 部分地质软弱破碎, 裂隙发育, 隧道开挖易形成新的泄水通道导致地下水聚集, 其工程规模、复杂程度及设计施工难度均属国内在建隧道之首, 可供借鉴的工程实例较少. 本次试验模拟莲塘山地区 NXK2+980 附近渗流状态, 其埋深 40.4 m, 水头位于地表以下 10.6 m, 地质条件以微风化变质砂岩为主, 渗透系数 0.135 m/d. 设计隧道为三车道, 加固圈厚度 4.5 m, 马蹄形断面内轮廓宽 14.216 m, 高 9.813 m.

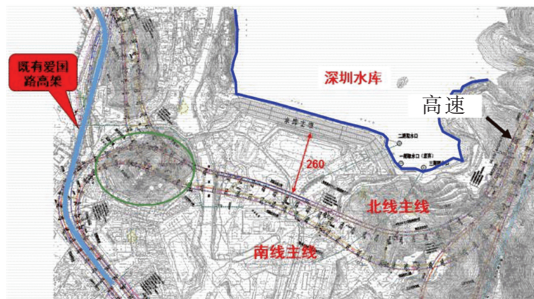


图 1 深圳市某高速公路连接线工程概况图

Fig.1 Synoptic graph of Shenzhen eastern expressway connecting line project

1.2 模型试验相似理论

模型试验应遵循一定的相似规律, 而对于本岩石隧道渗流试验, 忽略围岩——支护体系的物理力学特性和变形稳定性^[10], 以控制相似材料的渗透系数为核心, 认为二衬为不透水结构, 渗进初衬的水通过二衬背后的排水系统导出并收集, 因此主要考虑隧道排水量 Q 和二衬外水压力 P .

渗透是液体在多孔介质中运动的现象, 而渗透系数是表达介质渗透能力的定量指标, 故选定渗透系数相似比 C_k 、几何相似比 C_l 和重度相似比 C_γ 为基础相似比, 以相似第二定理为理论基础, 采用量纲分析法推导出其余相似关系^[9-12]: 几何相似比 $C_l = l_m/l_p$, 渗透系数相似比 $C_k = k_m/k_p$, 重度相似比 $C_\gamma = \gamma_m/\gamma_p$, 水头高度相似比 $C_h = C_l$, 时间相似比 $C_t = C_h/C_k$, 水压力相似比 $C_p = C_\gamma C_h$, 排水量相似比 $C_Q = C_h^3/C_l$, m 、 p 分别为模型和现场相关参数.

2 工程概况及模型试验相似理论

2.1 围岩相似材料

本工程中的围岩主要由粉质黏土、变质砂岩、花岗片麻岩、混合花岗岩等构成, 经过现场注水与抽水试验, 测得其渗透系数集中在 0.06~0.25 m/d 之间,

波动范围较大,故试验中围岩相似材料拟采用渗透系数较小的黏土和渗透系数较大的细砂进行配比,并适当添加弹性系数和抗拉强度较高而吸水性小的玻璃纤维以增强其粘聚力,以避免配制的围岩遇水形成贯通裂缝,使渗透更为均匀(见图 2)。

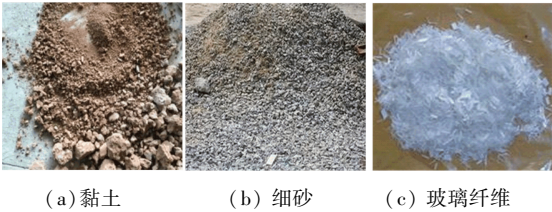


图 2 相似材料的基本成分

Fig.2 Basic components of similar material

考虑本次试验材料以细粒土为主且渗透系数总体较小,采用变水头试验仪,试样配制过程及渗透系数测试主要步骤如下(见图 3):1)将黏土和细砂筛分成不同粒径的颗粒,放入干燥箱 8 h 后测试其密度、含水率和干密度;2)按试验需求将不同配比的黏土、细砂和玻璃纤维严格按照比例称取,并加水混合搅拌均匀,配制完成后用隔离膜密封 24 h,放置于常温室室内使试样充分饱和;3)渗流试验前在变水头试验仪的套筒内壁涂一层凡士林,将装有试样的环刀装入仪器中并压紧止水垫圈,对黏土比例较大且不易透水的试样,进行抽气饱和;4)改变变水头管中的水位高度,待水位稳定后再记录水头变化值、时间和温度,重复试验 3~5 次,至不同初始水头下测试的渗透系数在允许的误差范围之内,试验终止。

温度修正可查阅土工试验规程^[13],变水头计算渗透系数计算公式为

$$k_r = 2.3 \frac{aL}{A(t_2 - t_1)} \lg \frac{h_1}{h_2} \quad (1)$$

式中: k_r 为计算渗透系数, a 为变水头管的断面面积, 2.3 为变换因数, L 为渗流路径(试样高度), t_1 , t_2 为测读水头的起始和终止时间,为起始和终止水头, A 为试样过水面积。

通过对单一原料在不同粒径下的多次渗透系数测试可知,黏土粒径 ≤ 0.075 mm 的平均渗透系数为 0.001 9 m/d, 粒径 ≤ 0.15 mm 的平均渗透系数为 0.002 3 m/d, 粒径 ≤ 0.3 mm 的平均渗透系数为 0.003 2 m/d;细砂:粒径 ≤ 0.15 mm 的平均渗透系数为 0.205 6 m/d, 粒径 ≤ 0.3 mm 的平均渗透系数为 0.548 2 m/d, 粒径 ≤ 0.6 mm 的平均渗透系数为 0.757 4 m/d。可见,试样粒径对渗透系数的影响较大,而细砂在相同级配变化下的渗透系数增长幅度远大于黏土,即可以通过配比不同级配的黏土和细砂研制出满足工程实际需求的围岩相似材料^[14-15]。

图 4 中所用黏土粒径 ≤ 0.075 mm,细砂粒径 ≤ 0.3 mm,由试验结果可知,随着细砂含量加大,相似材料的渗透系数呈非线性增长,初始增速较快,表明细砂会大幅削弱黏土的致密性以提高其渗透能力。当黏土和细砂质量比超过 1 : 1.8 时,渗透系数增速逐渐减缓,但单次渗透系数离散性增大,表明过大的细砂比例会减弱相似材料的稳定性。当黏土和细砂比例达到 1 : 3 时,平均渗透系数变化趋于收敛,此时渗透系数为 0.236 6 m/d。此外,试验在相同配比的相似材料中增加玻璃纤维的含量,其渗透系数并无明显改变,黏土、细砂、玻璃纤维的质量比为 1 : 3 : 0.05 时,平均渗透系数为 0.233 4 m/d。



图 3 试样配制及试验步骤

Fig.3 Sample preparation and test procedure

2.2 注浆圈相似材料

以围岩、加固圈等为渗流路径,地下水集中于二衬背后,对结构形成长期水压力,从而引发渗漏水等病害。隧道加固圈是通过在岩土体注浆,有效改善围岩的物理力学性质和渗流特性,减小其渗透系数并增强了阻水性能。当注浆圈厚度一定时,隧道排(涌)水量随注浆圈渗透系数降低而减小,但注浆圈与围岩的渗透系数比小于 1/50 时,隧道排(涌)水

量不再明显减小^[16-17]. 依据前述研究成果及国内隧道注浆工艺, 确定本工程注浆圈渗透系数控制值为 0.006~0.05 m/d, 试验拟采用普通硅酸盐水泥(强度等级 32.5R)和炭渣(粒径≤2 mm)进行配比.

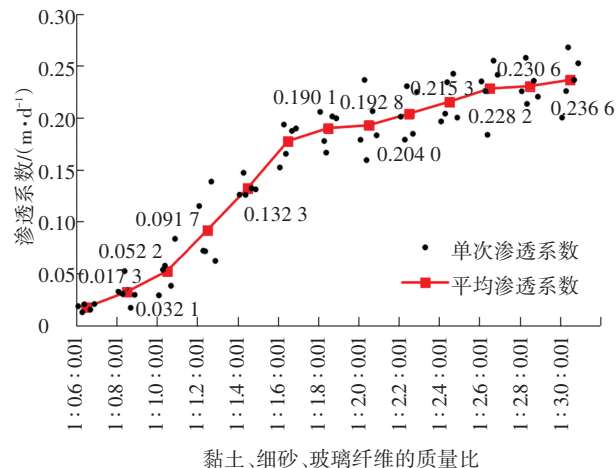


图 4 围岩相似材料渗透系数影响曲线

Fig.4 Influence curve of permeability coefficient of surrounding rock
加固圈渗透系数试验采用自制恒水头渗透仪, 主要由渗透容器、循环水箱、测压管、测压板、透水石等组成(见图 5), 试样配制过程及渗透系数测试主要步骤如下: 1) 将水泥、过筛的炭渣和水按不同配比搅拌均匀, 组装并调试恒水头渗透仪, 检查其密封性; 2) 容器底部铺 2 cm 砾石作为缓冲层, 以防止原料颗粒堵塞进水孔, 同时使水流全断面均匀渗透. 将配制的相似材料装入容器中, 分层铺设测压管并连接透水石, 出管孔涂抹玻璃胶密封; 3) 开启循环水箱供水, 养护试样至饱和后进行恒水头渗透试验, 并记录水头、渗水量、测压管水位差、时间、温度等参数; 4) 对相同配比的试样重复测试渗水量和水温, 当不同水力坡降下测定的数据接近时, 结束试验.

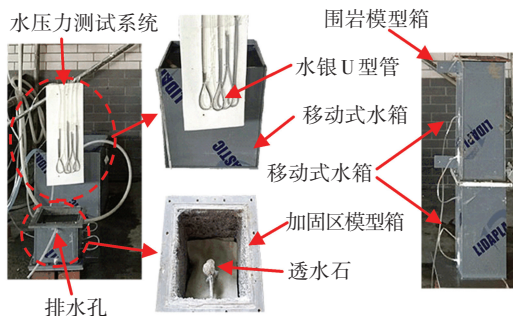


图 5 恒水头渗透仪

Fig.5 Constant head permeability testing machine

温度修正可查阅土工试验规程^[13], 恒水头计算渗透系数计算公式为

$$k_T = \frac{QL}{AHt} \quad (2)$$

式中: k_T 为水温 T 摄氏度时的渗透系数; A 为试样断面面积; Q 为渗水量; L 为两测压管间的距离; t

为测读水头的起始和终止时间; H 为平均水位差.

水泥和炭渣配制的注浆圈相似材料渗透系数试验结果如图 6 所示, 其值随着炭渣含量增加近于线性增长. 水泥和炭渣质量比为 1:4~1:12 时, 试验渗透系数为 0.005 5~0.031 4 m/d, 且在 1.35 m 和 2.5 m 水头下的测试值较为接近. 当水泥和炭渣比例超过 1:12 时, 随炭渣含量增加渗透系数增速加快, 2.5 m 水头下的试验值较 1.35 m 水头时更大, 最大相差 21.19% (水泥、炭渣的质量比为 1:18). 试验结果表明, 当相似材料中的炭渣含量超过一定比例时, 结构整体性开始下降, 较大的水压使炭渣内原本闭合的孔道逐渐疏通, 从而导致其渗透系数增大.

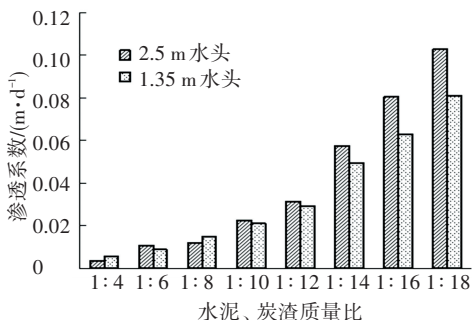


图 6 注浆圈相似材料渗透系数影响关系

Fig.6 Influence of permeability coefficient of similar material in grouting circle

2.3 初衬相似材料

初衬是隧道防排水体系中的重要组成部分, 本试验拟采用具有一定渗透能力的编织土工布(丙纶扁丝原料)模拟初衬相似材料. 考虑到实际初衬渗透系数约为 8.64×10^{-3} m/d, 而单层土工编制布出厂渗透系数为 0.303~0.371 m/d, 故采取多层叠放的形式测试其综合渗透系数以满足需求.

试验采用自制的多层土工布垂直渗透系数试验装置, 其构造见图 7 所示, 主要由进水管、储水量筒、渗流室和连通管构成. 渗流室内依次紧贴放置多个相同的圆环状土工布台架, 台架上、下部固定编织土工布以达到不同层数的测试效果. 仪器设有水头差控制仪, 可根据试验土工布类型调节适宜的水头差 Δh , 在同一组试验中, 也可利用多组试验水头差进行测试并分析结果. 本装置能够准确地测试单层或多层土工布的渗透系数, 并减少水压作用和边界渗水效应对试验精度的影响.

试样配制过程及渗透系数测试主要步骤如下(见图 8): 1) 将编织土工布按土工布台架尺寸裁剪, 测试不同层数编织土工布的厚度并浸泡水中至少 12 h, 保证试样充分湿润以隔离空气; 2) 将浸泡后的试样取出, 逐层安置于土工布台架上下侧, 并用橡胶密封圈压实; 3) 从上部开口向装置内持续注水

至溢流孔有均匀水体流出,待排水孔流量稳定时,测试出水量和时间,若水头在 5 min 内不能平衡,应检查仪器中是否有隐藏空气,并重新实施本程序;4) 调整水头差,重新进行步骤 3,并记录数据,精确到 1 mm,时间精确到秒;5) 每组试样均在不同水头差下进行多次试验,求取综合渗透系数平均值。

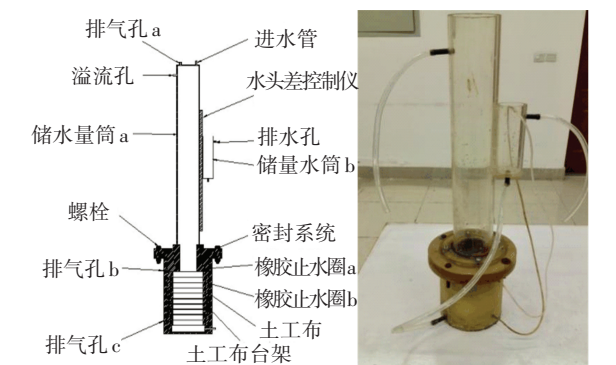


图 7 多层土工布垂直渗透系数试验装置

Fig.7 Test device for vertical permeability coefficient of multi-layered earthwork cloth

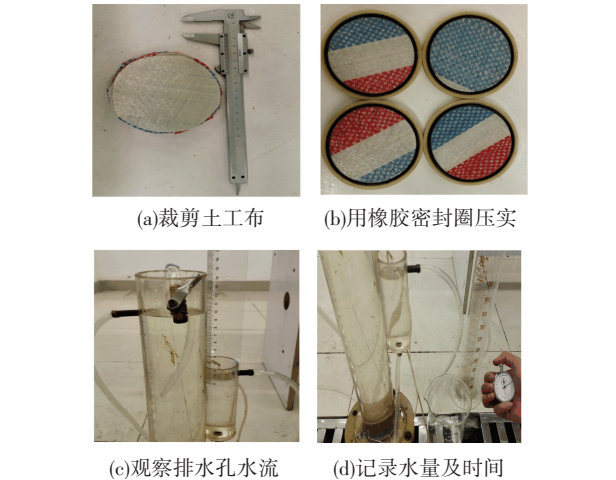


图 8 多层编织土工布渗透系数试验过程

Fig.8 Test process of the permeability coefficient of multi-woven earthwork cloth

恒定水头作用下,测定水流垂直通过多层且无法向负荷的编织土工布时,流速指数及渗透系数分别为

$$v_{20} = \frac{VR_T}{At}, \quad (3)$$

$$k = \frac{v}{i} = \frac{v\delta}{h}. \quad (4)$$

式中: V 为水的体积; R_T 为 20℃ 水文校正系数; A 为试样过水面积; t 为达到水的体积 V 对应的时间; k 为土工布垂直渗透系数; v 垂直于土工布平面的水流速; i 为土工布试样两侧的水力梯度; δ 为土工布试样厚度; h 为土工布试样两侧的水头差。

初衬相似材料的渗透系数影响曲线如图 9 所示,结果表明采用多层编织土工布模拟隧道初衬结构是可行的。随着叠加层数增加,其平均渗透系数

呈现快速减小并逐渐收敛的趋势,且单次渗透系数测试结果也趋于稳定,当叠加超过 6 层时,试验平均渗透系数值为 0.012 5~0.007 35 m/d。

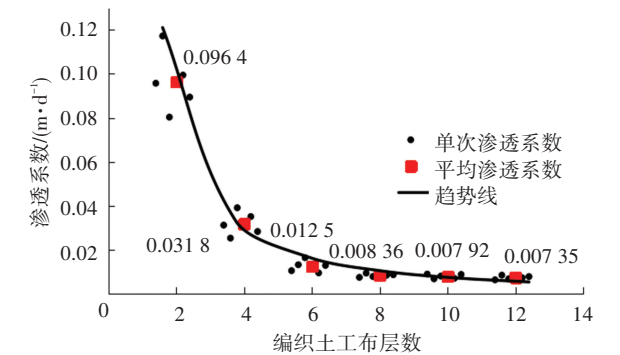


图 9 初衬相似材料渗透系数影响曲线

Fig.9 Influence curve of the permeability coefficient of the initial lining

通过大量配比试验,以控制渗透系数为核心,研制出适用于岩石隧道渗流试验的围岩、注浆圈、初衬等新型相似材料及其原料配比(图 4、6、9)。3 种相似材料渗透系数随原料配比的变化规律是不同的,围岩和注浆圈相似材料配比与其渗透系数值成正比,而用以模拟初衬的编织土工布层数与其渗透系数值成反比,其根本在于所用原材料渗透性能的差异,加之不同试验原理和测量仪器,但其精度均可满足工程试验需求。

3 深圳东部某高速公路连接线工程应用

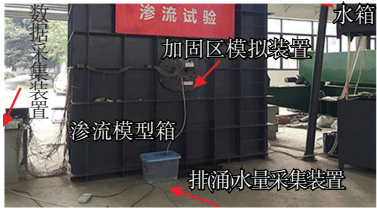
3.1 试验概况

试验采用自制的施工及运营期隧道渗流场模型试验系统(见图 10),模型箱尺寸为 3 m×3 m×2 m (2 m 方向为隧道轴向),主要包括渗流模型箱、加固区模拟装置、移动式循环水箱装置、数据采集装置等。其中,加固区模拟装置通过双层法兰盘连接在渗流模型箱洞口处,初衬、二衬等隧道结构依次安置于模型箱内,移动式循环水箱装置与带有数据采集装置的渗流模型箱连接为试验提供作用水头,形成一套结构齐备、功能完善的岩石隧道渗流系统。

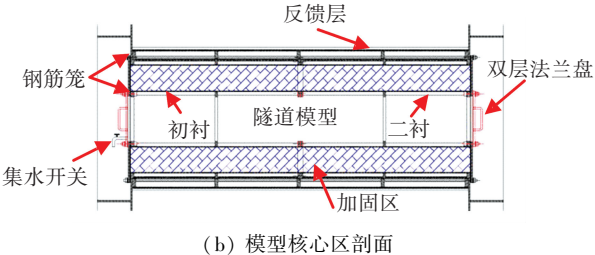
3.2 相似材料配比

根据模型试验系统,确定几何相似比 $C_l = 1/30$,渗透系数相似比 $C_k = 1$,重度相似比 $C_\gamma = 1$,由表 1 可以计算出 $C_h = 1/30$, $C_t = 1/30$, $C_p = 1/30$, $C_Q = 1/900$ 。隧道实际渗透系数:围岩 0.135 m/d,加固圈 0.016 m/d,初衬 8.64×10^{-3} m/d,二衬为不透水结构。通过前述相似材料研制及试验结果进行配比,采用黏土、细砂、玻璃纤维质量比为 1 : 1.4 : 0.01 模拟围岩,水泥、炭渣质量比为 1 : 10 模拟加固圈(厚度 150 mm),8 层编织土工布模拟初衬(厚度 5.924 mm),所用黏土粒径 ≤ 0.075 mm,细砂粒径 ≤ 0.3 mm,炭渣粒径 ≤ 2 mm。此

外,由于设计二衬密不透水,试验中采用1:1.3的特种石膏外涂3 mm防水清漆进行配制,特种石膏内铺设钢筋网以增强其整体性和抗压能力.



(a) 模型试验系统照片



(b) 模型核心区剖面

图 10 施工及运营期隧道渗流场模型试验系统

Fig.10 Model test system for the tunnel seepage field under construction and operation

3.3 试验过程与结果分析

试验可对隧道围岩中特征点的水压力、注浆圈外水压力、二衬外水压力、运营期隧道排水量、施工期隧道涌水量等多元信息进行监测. 模型中隧道洞径宽430 mm,高330 mm,距边壁均约4倍洞径以消除渗流边界影响,试验采用作用水头约1 m. 按表1中相似材料配比分别配制围岩、加固圈、初衬和二衬,其中注浆圈采用自制的模具成型(见图11). 将围岩相似材料分层铺设于渗流模型箱内,并用环刀取样再次测试其渗透系数以确定压实度,水压力计(TST型孔隙水压力传感器,量程30 kPa,精度0.1 kPa)埋设于各个特征点位. 围岩四周铺设一层50 mm厚碎石层以形成均匀渗流场并加快渗流速度,加固区模拟装置外侧钢筋笼上绑扎由无纺布和塑料网组成的反滤层,用以防止围岩相似材料的颗粒进入加固区. 注浆圈接缝涂抹高标号防水水泥,二衬和注浆圈外布置有水压力计,外接静态应变测试分析仪(TST3826F)读取水压力值.

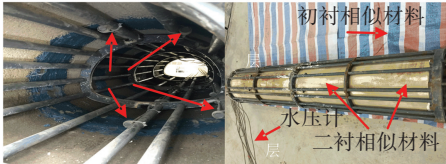
由于篇幅限制,仅对二衬背后拱顶、拱底处的水压力与排水量的关系进行分析. 试验通过主动控制排水孔的出水量达到限排的目的,以调节二衬外水压力值,数值模拟采用FLAC3D软件进行计算.

二衬外水压力与排水量关系的试验和数值分析结果基本吻合(依据水压力相似比将模型试验所得量值换算为原型值). 相同排水量时拱底处水压力远大于拱顶,逐步控制隧道排水量(主动关闭调水阀)后,拱顶和拱底的水压力均呈现增大的趋势,且拱顶水压力值的上升幅度大于拱底,表明二衬外拱

顶位置受水压力-排水量的调控更加敏感. 试验排水量为 $0.308\text{ m}^3 \cdot (\text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$ 时(调水阀接近闭合),拱顶和拱底位置的水压力接近初始水压力,分别为270.33 kPa和369.52 kPa.



(a) 注浆圈制作 (b) 铺设围岩及水压力计



(c) 安放注浆圈 (d) 初衬及二衬制作



(e) 传感器连接 (f) 数据采集



(g) 观察渗流状态 (h) 水量采集

图 11 深圳东部某高速公路连接线工程模型试验

Fig.11 Model test of Shenzhen eastern expressway connecting line project

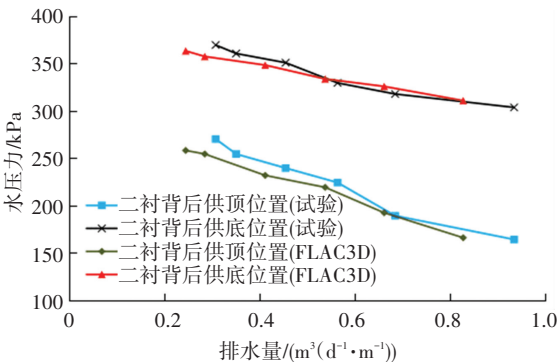


图 12 二衬外水压力与排水量的关系

Fig.12 The relationship between secondary lining external water pressure and water discharge

试验表明研制的围岩、注浆圈、初衬等相似材料均可较好的应用于岩石隧道工程的渗流模型试验中,且工作性能稳定,为成功进行更深入的隧道渗流场分析提供了保障.

4 结 论

1)以黏土、细砂和玻璃纤维为原料配制的围岩

相似材料,利用变水头试验仪进行渗透系数试验,随着细砂含量加大,相似材料的渗透系数呈非线性增长,稳定性逐渐降低,黏土和细砂比例超过 1 : 1.8 时,渗透系数增速缓慢,而改变相似材料中玻璃纤维的含量对渗透系数影响不明显。

2)利用自制恒水头渗透仪对由水泥和炭渣配制的注浆圈相似材料进行试验,其渗透系数值随炭渣含量增加近于线性增长。当水泥和炭渣质量比超过 1 : 12 时,渗透系数增速加快,2.5 m 水头下的试验值较 1.35 m 水头时更大。

3)利用自制的多层编织土工布渗透系数试验装置对初衬相似材料进行测试,随着叠加层数增加,其平均渗透系数呈现快速减小并逐渐收敛的趋势,且单次渗透系数测试结果也趋于稳定。

4)相同排水量时拱底处水压力远大于拱顶,逐步减小隧道排水量后,拱顶和拱底的水压力均呈现增大的趋势,且拱顶水压力值的上升幅度大于拱底,调水阀接近闭合时,拱顶和拱底位置的水压力接近初始水压力。

参考文献

- [1] HE Chuan, WANG Bo. Research progress and development trends of highway tunnels in China [J]. Journal of Modern Transportation, 2013, 21(4): 209-223.
- [2] 邹育麟,何川,周艺,等.重庆高速公路现役营运隧道渗漏水病害统计及成因分析[J].公路交通科技,2013,30(1): 86-101. ZOU Yulin, HE Chuan, ZHOU Yi, et al. Statistics and cause analysis of leakage diseases in operating expressway tunnels in chongqing [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(1): 86-101. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2013.01.016
- [3] 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 Xiaomeng, LIU Baoguo, 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. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.05.017
- [4] 张杰,侯忠杰.固-液耦合试验材料的研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(18): 3157-3161. ZHANG Jie, HOU Zhongjie. Experimental study on simulation materials for solid-liquid coupling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3157-3161.
- [5] 黄庆享,张文忠,侯志成.固液耦合试验隔水层相似材料的研究[J].岩石力学与工程学报,2010,29(增刊1): 2813-2818. HUANG Qingxiang, ZHANG Wenzhong, HOU Zhicheng. Study of simulation materials of aquifuge for solid-liquid coupling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup1): 2813-2818.
- [6] 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 Shucai, ZHOU Yi, LI Liping, et al. Development and application of a new similar material for underground engineering fluid-solid

coupling model test [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1128-1137.

- [7] 胡指南,谢永利,来弘鹏.大型沉管隧道模型试验相似材料研究[J].现代隧道技术,2015,52(1): 114-118. HU Zhinan, XIE Yongli, LAI Hongpeng. Research on similar materials for a large immersed tunnel model test [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1): 114-118. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2015.01.016.
- [8] HYUK Sangjung, YUN Suhan, SUNG Raechung, et al. Evaluation of advanced drainage treatment for old tunnel drainage system in Korea [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 476-486.
- [9] WANG Xiuying, TAN Zhongsheng, WANG Mengshu, et al. Theoretical and experimental study of external water pressure on tunnel lining in controlled drainage under high water level [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 552-560.
- [10] 高新强,仇文革,孔超.高水压隧道修建过程中渗流场变化规律试验研究[J].中国铁道科学,2013,34(1): 50-58. GAO Xinqiang, QIU Wenge, KONG Chao. Test study on the variation law of seepage field during the construction process of high water pressure tunnel [J]. China Railway Science, 2013, 34(1): 50-58. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4632.2013.01.08.
- [11] 卓越.钻爆法浅埋水下隧道防排水理论及应用研究[D].北京:北京交通大学,2013. ZHUO Yue. Research on Theory and Application of Waterproof and Drainage System of Shallow Tunnels with Drilling and Blasting Method [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [12] 王育奎,徐帮树,李术才,等.海底隧道涌水量模型试验研究[J].岩土工程学报,2011,33(9): 1477-1482. WANG Yukui, XU Bangshu, LI Shucai, et al. Laboratory model tests on water flow rate of submarine tunnel [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1477-1482.
- [13] 杨梅.土力学实验教程[M].成都:西南交通大学,2012.
- [14] 刘维正,石名磊,缪林昌.天然沉积饱和黏土渗透系数试验研究与预测模型[J].岩土力学,2013,34(9): 2501-2507. LIU Weizheng, SHI Minglei, MIAO Linchang. Experimental study of permeability coefficient of natural saturated clay and its prediction model [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2501-2507.
- [15] 曾玲玲,洪振舜,陈福全.压缩过程中重塑黏土渗透系数的变化规律[J].岩土力学,2012,33(5): 1286-1292. ZENG Lingling, HONG Zhenshun, CHEN Fuquan. A law of change in permeability coefficient during compression of remolded clays [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(5): 1286-1292.
- [16] 王秀英,王梦恕,张弥.山岭隧道堵水限排衬砌外水压力研究[J].岩土工程学报,2005,27(1): 125-127. WANG Xiuying, WANG Mengshu, ZHANG Mi. Research on regulating water pressure acting on mountain tunnels by blocking ground water and limiting discharge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1): 125-127.
- [17] 张成平,张顶立,王梦恕,等.高水压富水区隧道限排衬砌注浆圈合理参数研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(11): 2270-2276. ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WANG Mengshu, et al. Study on appropriate parameters of grouting circle for tunnels with limiting discharge lining in high water pressure and water-enriched region [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 26(11): 2270-2276.

(编辑 魏希柱)