文章编号:1005-0523(2022)01-0040-10

开裂隧道衬砌有压渗水室内模型试验研究

李建辉[1],李 洁[2,3],王纯皎[1],陈常科[2,3],朱碧堂[2,3]

(1. 中国铁路南宁局集团有限公司工务部,广西 南宁 530029; 2. 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; 3. 华东交通大学土木建筑学院,江西 南昌 330013)

摘要:针对隧道出现的渗漏水及结构破损等问题,为找出高水压渗漏点或即将发生渗漏的位置和定量确定水压大小,开展了开裂混凝土室内模型加压试验,模拟开裂衬砌在不同水压条件下的渗透情况,使用红外热像仪观测混凝土试块渗流面的温度分布情况,研究渗压大小、裂缝尺寸和温度的关系。试验结果表明:渗流量与裂缝宽度及水压大小密切相关,在同一裂缝条件下,水压越大,渗流速度越快;同一水压条件下,裂缝越发展,渗流速度越大;非贯穿裂缝渗水面的渗流面积往往大于贯穿裂缝渗水面的渗流面积;渗流量最大处往往温度最低,可以通过使用红外热像仪扫描找出隧道渗流区域内最小温度点,从而确定最合适的打孔泄压位置。

关键词:铁路隧道;开裂衬砌;红外热像;破碎带

中图分类号:U459.1 **文献标志码**:A

本文引用格式:李建辉,李洁,王纯皎,等. 开裂隧道衬砌有压渗水室内模型试验研究[J]. 华东交通大学学报,2022,39(1):40-49.

Experimental Study on Water Seepage of Cracked Tunnel Lining Under Groundwater Pressure

Li Jianhui[1], Li Jie[2,3], Wang Chunjiao[1], Chen Changke[2,3], Zhu Bitang[2,3]

(1. Department of Engineering Works, China Railway Nanning Group Co., Ltd., Nanning 530029, China; 2. Engineering Research & Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In view of the problems of water leakage and structural damage in the tunnel, to find out the location of high water pressure leakage point or imminent leakage, and to quantify the water pressure, the indoor model pressure test of cracked concrete was carried out to simulate the seepage of cracked lining under different water pressure conditions. The temperature distribution of the seepage surface of concrete block was observed by infrared thermal imaging camera to study the correlation between seepage pressure, the size of the crack and temperature. The experimental results are as follows: the seepage volume is proportional to the width of the crack and the water pressure. Under the same crack conditions, the higher the water pressure is, the faster the seepage velocity is. Under the same water pressure conditions, the more the crack develops, the greater the seepage velocity becomes. The seepage area of the non-penetrating crack seepage surface is often larger than the seepage area of the penetrating crack seepage surface. The temperature is usually the lowest at the maximum seepage flow, so the minimum temperature point in the tunnel seepage area can be found by using infrared thermal imaging camera scanning to determine the most suitable punching and pressure relief position.

收稿日期:2021-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(41972291);江西省交通运输厅科技项目(2021Z0004,2021H0035)

Key words：railway tunnel; cracked lining; infrared thermal image; fracture zone
Citation format：LI J H，LI J，WANG C J，et al. Experimental study on water seepage of cracked tunnel lining under groundwater pressure[J]. Journal of East China Jiaotong University，2022，39(1)：40–49.

统计数据显示，2010—2019 年我国铁路运营里程从 9.12 万 km 增长至 13.99 万 km，铁路客运量 2019 年达 366 002.26 万人次[1]。随着铁路建设规模的扩大及线路的持续增长，隧道工程数量也迅速增加，但在隧道工程快速发展的同时，我国在建隧道发生险情或工程事故也时有发生，由于勘察设计或施工因素造成大量隧道在竣工后不久或运营阶段发生衬砌开裂、漏水、剥落、错台甚至垮塌事故。据调查统计，国内建成 10 年以上的隧道，约 80%存在衬砌开裂、渗漏水病害现象[2]。而对于山岭隧道，常穿过破碎带等不良地质区，在雨季时，强降雨补充了地下水，短时间内会增加地应力的量值，给隧道结构带来额外的承载[3]，隧道要承受巨大的水压和渗水带来的多种危害。目前水压监测多采用预先埋设水压计的方法，但由于隧道发生渗漏水具有一定的随机性，往往无法预先确定最危险的渗漏位置。在隧道维养过程中，如果通过无损检测手段，扫描确定渗漏点和最大水压位置，从而及时采取监测预警和防控措施，对隧道安全运营意义重大。

目前，已有学者对红外热像检测技术在土木工程中的应用进行了研究。Haack 等[4-8]采用红外热像法对隧道衬砌中肉眼难以观察的空隙、空洞、建筑立面上的缺陷进行了检测。Inagaki[9]和 Barreira[10]使用红外热像图诊断隧道、堤岸、大坝、管道及维护结构等表面出现的温差来判定渗漏点。Sun 等[11-15]利用红外热像仪研究砂岩及其他金属材料出现的裂纹及断裂过程。Clark 等[16]将红外热像技术应用于混凝土和砌体桥梁的无损检测中，判定桥体上的渗水区域。张慧慧[17]基于岩石渗水病害的实验研究，验证了利用最小红外辐射温度可以确定石质文物渗水的严重程度。以上文献初步验证了红外热像法运用于定性检测土木结构开裂渗水的可行性。豆海涛等[18]基于室内模型研究，分析了渗水温度、流量及位置等因素对红外辐射特征的影响。吴杭彬等[19]基于红外热成像技术，划定隧道管壁上的渗水区域，并以红外热像图为依据对渗水类型、渗水位置进行判断。总的来看，上述研究主要针对红外热像技术在检测隧道渗漏应用方面进行了初步验证，但并未提出查找最危险渗漏点和最大水压位置的定量方法。

本文以益湛铁路线卿家巷隧道为研究背景，设计了一套模拟隧道衬砌裂缝有压渗水的室内模型，试验制作了 4 种典型裂缝条件的试块，研究不同水压作用下，裂缝周边的温度场情况。通过试验装置测定的渗水大小和由红外热像仪得到的温度场，研究不同裂缝条件下渗水量、水压与红外热像图之间的定量关系，从而提出确定最大渗水压力位置的方法。

1　项目概况

益湛铁路线卿家巷隧道位于湖南省永州市双牌村，为单线隧道，隧道中心里程为 K393+542，全长 2 046 m，衬砌结构为复合式衬砌，隧道于 2009年建成通车。

图 1 为 V 级围岩中易发生隧道结构破损的隧道支护结构，不加宽时，隧道开挖跨度为 6.5 m，高 9.08 m。初衬采用锚喷支护结构，锚杆长度 3 m 且设置环向间距 0.8 m，设计喷射 C20 混凝土厚度为 20 cm，同时在拱墙及仰拱处设置格栅钢架；初衬与二衬之间设置防水层并预留 7 cm 变形量；拱部、边

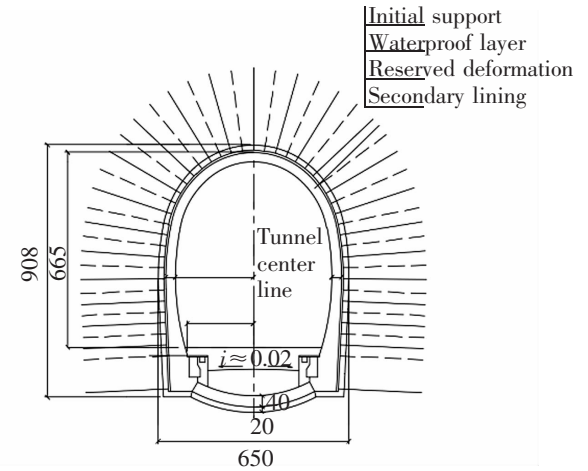


图 1　卿家巷隧道 V 级围岩复合衬砌断面图(单位：cm)
Fig.1　Tunnel support in Grade V rock of the Qingjiaxiang Tunnel(Unit：cm)

墙处设计二衬厚度为35 cm，仰拱处设计二衬厚度为40 cm，均为C25混凝土。

图2为卿家巷隧道纵断面图。隧道所在地貌为低山丘陵，地层主要由上覆第四系全新统坡洪积粉质黏土、坡积粉质黏土夹角砾土或坡残积粉质黏土夹黏土和下伏基岩组成，基岩为跳马涧组石英砂岩和砂岩夹页岩。除洞口外，隧道主要穿越基岩。在施工中发现隧道在里程D3K69+890和D3K69+910处穿越两条破碎带，在里程D1K69+331和D3K69+816处分别穿越一处落水洞和一条沟谷，属于Ⅴ级围岩。断层带位于D3K69+816处沟谷附近，上覆岩土层厚约62 m，在降雨时水会向沟谷汇集。地下水为第四系土层孔隙潜水及基岩裂隙水，在沟谷地段，常年有较大水流。

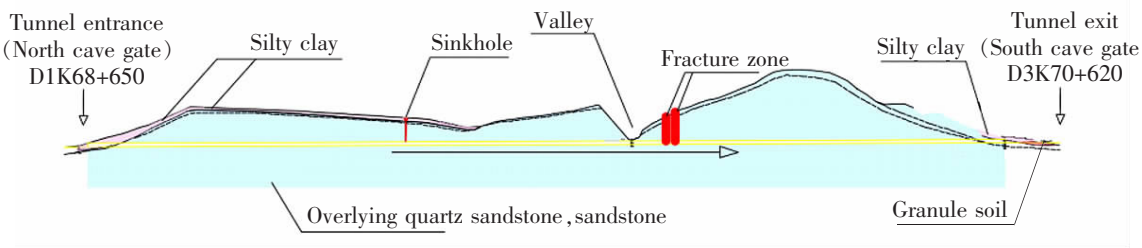


图2 卿家巷隧道中线纵断面图

Fig.2 Longitudinal section of the Qingjiaxiang Tunnel axis

卿家巷隧道运营10年后，在靠近上述Ⅴ级不良围岩处的拱顶部位渗水严重，同时边墙处也有渗水情况。凿开后发现，隧道顶部存在多处空洞、防水板切割二衬等问题，导致二衬厚度严重不足，最薄仅有7 mm，隧道病害进一步发展还可能产生隧道掉块砸上客车，严重危及行车和旅客安全。另外，隧道有3处开裂严重纵向裂缝，其中2处位于D1K69+207至D1K69+225段左右两侧起拱线处，宽度分别为0.1~11 mm和0.1~5 mm，长度分别为18.2 m和13.4 m；另外1处位于D1K69+267至D1K69+285拱腰至拱顶处，为贯通裂缝，裂缝宽度为0.1~4 mm，长度为18 m。3条裂缝宽度范围较大，根据我国《铁路桥隧建筑物状态评定标准》中隧道衬砌裂缝分级(表1)，3条裂缝等级属AA~B。

为确保铁路运输安全，卿家巷隧道临时在渗漏水部位采取打泄水孔降压，然后进行封堵，从而防止水压过大引起隧道结构性破坏，并同时对列车进行限速运行。但由于目前技术无法找到准确的渗漏点和最大水压部位，以至于有些打孔位置并不在渗水点上，排水效果较差。如何准确找出渗水点，对隧道衬砌外水压进行实时监测预警，并及时采取防控措施是保障隧道安全的重要一环。

表1 我国《铁路桥隧建筑物状态评定标准》中隧道衬砌裂缝分级

Tab.1 Classification of tunnel lining cracks in *Railway Bridge and Tunnel Building State Evaluation Standards* in China

Damage level	Crack width characteristic
AA (Very serious)	$L_1 > 10$ m, $L_2 > 5$ mm, the crack continues to expand rapidly
A(Serious)	5 m $< L_1 <$ 10 m, $L_2 > 5$ mm, may collapse under external force
B(Slightly serious)	$L_1 < 5$ m, 3 mm $L_2 < 5$ mm, the cracks continue to grow slowly
C(Medium)	$L_1 < 5$ m, $L_2 \leqslant 3$ mm
D(Slight)	$L_2 < 1$ mm, no development changes

2 室内模型试验装置

2.1 试验装置设计

目前对于隧道水压的监测，常采用预埋水压计的方式，但由于隧道发生渗漏水具有一定的随机性，往往无法预先确定最危险的渗漏位置。本文拟通过红外热像图探索裂缝尺寸、水压大小、渗流面积、渗流量与温度场之间的定量关系，从而提出确定危险渗漏点和最大水压的位置。为此，设计了衬砌裂缝有压渗流装置，如图3所示。装置主体由红外热像仪、带裂缝的混凝土试块、水箱和空压机组成。红外热像仪用来拍摄试块渗漏的热像图，通过热像图确定试块表面的温度场变化及渗透面积等；

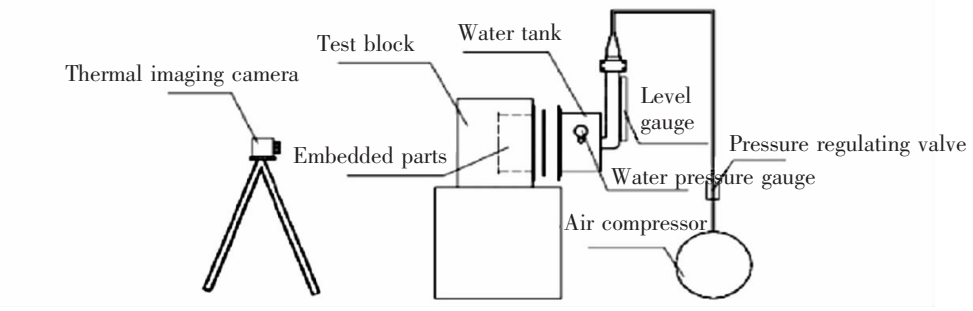


图 3　带裂缝砼试块水力渗透试验装置

Fig.3　Diagram of the experimental setup for hydraulic test through a cracked concrete block

带裂缝的混凝土试块通过埋设预埋件与装满水的水箱紧密相连,用于模拟衬砌外侧水压作用;空压机通过输气管和阀门与水箱一侧透明液位计相连,从而对水箱施加空气压力。整个混凝土试块一侧与大气接触模拟隧道衬砌内表面,外侧与压力水体接触模拟衬砌外侧。

试验采用日本 Avio R550 红外热像仪,拍照时能记录 32 000 个温度数据,再由温度数据绘制红外热像图。仪器测温范围在–40~650 ℃,灵敏度为 0.025 ℃。仪器出厂前,曾送往上海计量测试技术研究院进行检测,测量误差均在±2 ℃。此外,在实验前,使用测温枪和红外热像仪同时对人体手腕部指定区域进行温度测试,以验证红外热像仪精度。试验进行时室温为 28 ℃,使用测温枪对腕部指定区域测量 10 次,最终平均值为 36.06 ℃;红外热像图显示腕部指定区域平均温度为 34.34 ℃。两设备测温差异在±2 ℃,测量结果较可靠。

2.2　试验方案

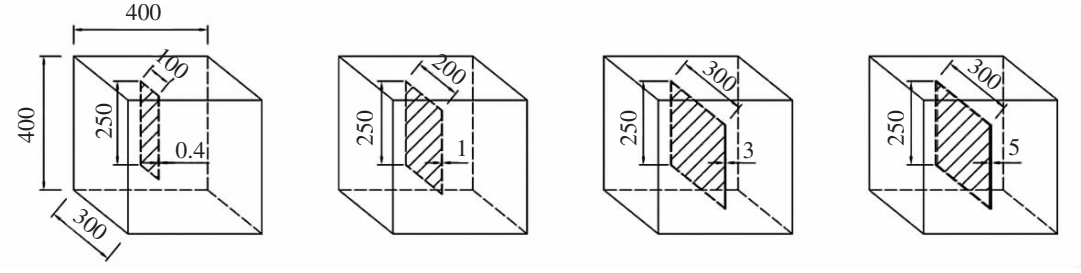
根据卿家巷隧道现场统计分析,在渗水严重混凝土区域,裂缝宽度在 0.1~11 mm,多数集中于 0.1~5 mm。吴斌[20]基于对云南省普通国道干线公路隧道渗漏水病害的调查,总结出小于等于 1 mm 的小裂缝数量远多于 1 ~3 mm 的中裂缝,而大于 3 mm 的大裂缝最少,但大裂缝几乎全部渗水,中裂缝大多渗水,小裂缝只有小半渗水,由此可知,裂缝宽度对隧道渗漏水病害存在一定影响。参考《铁路桥隧建筑物状态评定标准》中隧道衬砌裂缝分级所给出的几个分级临界值,本次试验设计了 4 种带有不同尺寸裂缝的混凝土试块,如图 4 所示,砼试块强度为 C30,试块尺寸为 400 mm×400 mm×300 mm。裂缝尺寸设计如表 2 所示。

根据隧道埋深和现场水文条件,预估隧道现场水压不超过 600 kPa,考虑到实验安全,本次实验采用逐级加压法,水压从常压状态增加至 50,100,200 kPa 和 400 kPa,每级荷载持续时间为 30 min。

表 2　裂缝尺寸

Tab.2　Crack dimensions

Test block	Crack width/mm	Crack length/mm	Crack depth/mm
1	0.4	250	100(not through)
2	1	250	200(not through)
3	3	250	300(through)
4	5	250	300(through)



(a) Test block 1　(b) Test block 2　(c) Test block 3　(d) Test block 4

图 4　试块和裂缝尺寸(单位:mm)

Fig.4　Concrete blocks and various crack dimensions (Unit: mm)

2.3 试验过程

本试验分为两个步骤，首先室内制备不同裂缝规格的混凝土试块，待试块达到28 d养护强度后，连接水箱及空压机，然后开展水力渗透试验。

试块混凝土标号为C30，1 m^3 混凝土配比为水泥∶水∶砂∶石=410∶205∶642.25∶1 192.75。试样制备过程如下：

1）提前制好用以模拟裂缝不同规格尺寸厚度的棉布、钢筋、预埋件及定制的混凝土试块模具；

2）用定制好的模具制作混凝土试块，在试块浇筑前套入预埋件，预埋件连接好底部铁盘，防止混凝土在未成型前漏出，再提前固定住用来模拟裂缝的棉布及钢筋；

3）向模具内浇筑混凝土，浇筑时确保棉布没有移位，在浇筑至距离表面25 mm时放入钢筋，防止加压时混凝土试块开裂；

4）浇筑完成后，1~2 d后拆除模板，随后养护28 d。

制作混凝土试块时，浇注了3个150 mm×150 mm×150 mm的立方体试块用来检验试块强度，待试块养护完成后，使用混凝土压力试验机对本次试验制作的混凝土抗压强度进行了检测，结果如表3。混凝土强度平均值为48.9 MPa，标准偏差为0.5 MPa。混凝土试块制作且养护完成后，即可开始进行水力渗透试验，试验过程如下：

1）将预埋件突出部分连接密封圈及水箱，水箱再依次连接调压阀及空压机，连接部分均为法兰连接，连接方式如图5所示；

2）连接完成后将水箱内的水注满并且静置12 h，尽量使试块在常压下达到饱和状态；

3）试验前在试块正前方架设好红外热像仪，通过水平仪保证仪器水平放置，随后打开红外热像仪准备记录拍照；

4）向连接好的水箱中加满水，水位加至液位计可见的最上方刻度处，同时打开压力表，记录此时液位计刻度和气体压力；

5）先将调压阀调至零刻度，再打开空压机，通过扭转调压阀控制压力，每次加压过后都恒压30 min，每单位时间读一次玻璃管刻度记录渗流量，并使用红外热像仪拍照；

6）整理渗流量数据及红外热像图，分析红外热像图中温度数据与水压、裂缝尺寸之间的关系。

表3 立方体试块抗压强度

Tab.3 Compressive strength of concrete blocks

Test block	Stress/kN	Compressive strength/MPa
1	1 105.8	49.1
2	1 108.7	49.3
3	1 084.8	48.2
Average value	1 099.8	48.9
Standard deviation	10.6	0.5

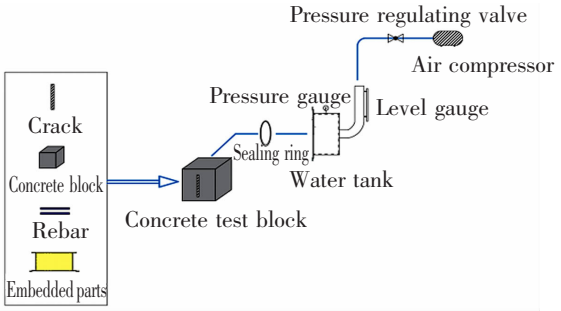


图5 装置连接示意图

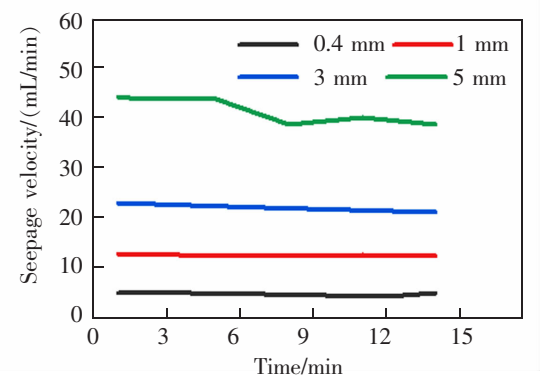
Fig.5 Diagram of device connection

3 结果与讨论

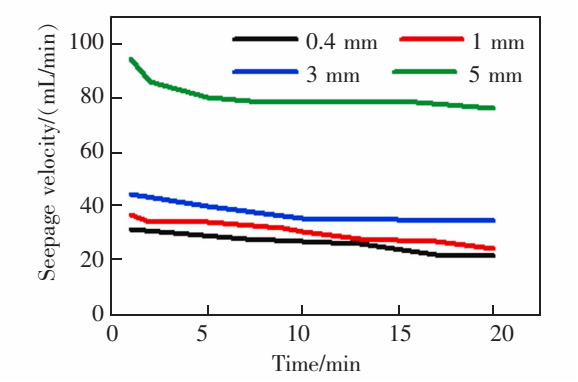
3.1 渗流速度的影响因素

3.1.1 裂缝宽度对渗流速度的影响

图6为渗透压力分别为100 kPa和400 kPa条件下不同裂缝宽度混凝土试块的渗流速度。由图可知，裂缝宽度越大的试块，渗流速度越快。并且在刚开始加压时，渗流速度较大，特别是裂缝宽度大（如5 mm裂缝）的试块，随后渗流速度逐渐降低并趋于稳定值，主要原因在于：① 刚开始加压时，气压会将水箱内的水压缩，在试验中渗流速度是通过液位计的液位变化进行计算的，而液位计安装于较为细长的管道中。初始加压时，气压作用会导致液位一定程度的下降；② 在压力增大时，混凝土内部的渗流范围会增大，在恒压的前一段时间，增加的区域开始“吸收水分”，在恒压一定时间后，范围内的混凝土达到“饱和状态”，此后渗流速度有所降低且趋于稳定。



(a) Water pressure p=100 kPa



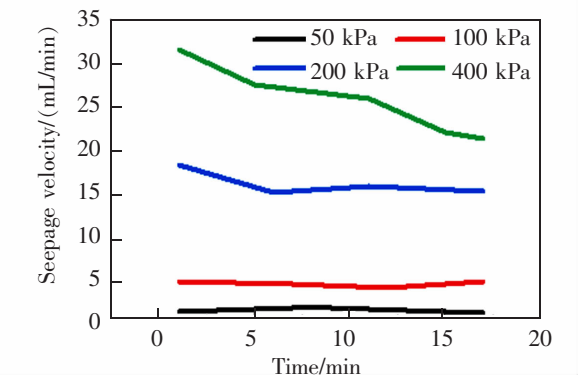
(b) Water pressure p=400 kPa

图 6　相同渗压、不同裂缝条件下的渗流速度比较

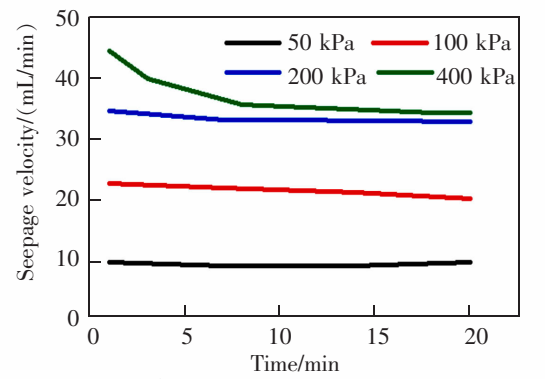
Fig.6　Seepage velocities under different crack widths with identical water pressure

3.1.2　渗透水压对渗流速度的影响

图 7 为裂缝宽度分别为 0.4 mm 和 3 mm 条件下渗流速度与渗压大小的关系。由图 7 可知,对于相同裂缝宽度的试块,渗流速度随压力的增加而增大,并且在裂缝宽度和压力一定时,渗水区周围混凝土逐渐“吸饱水分”,渗流速度随时间缓慢降低,并趋于稳定值。



(a) 0.4 mm non-through crack



(b) 3 mm through crack

图 7　相同裂缝宽度、不同渗压条件下的渗流速度

Fig.7　Seepage velocities under different pressure with identical crack widths

3.2　试块表面渗流面积的影响因素

3.2.1　裂缝条件对渗流面积的影响

图 8 为不同裂缝条件下的渗流面积，其中 0.4 mm 和 1 mm 宽的裂缝未贯穿混凝土试块,而 3 mm 和 5 mm 宽的裂缝则贯穿了混凝土试块。实验结果表明，贯穿裂缝由于有直接的渗流通道,水会直接从渗流通道渗出,表面观察到的渗流处往往就是裂缝处,而非贯穿裂缝没有直接的渗流通道,水要渗透大面积的混凝土,而后慢慢从内部向外表面渗出,所以非贯穿裂缝往往观察到较大的渗流面积。



(a) 0.4 mm non-through crack　(b) 1 mm non-through crack



(c) 3 mm through crack　(d) 5 mm through crack

图 8　不同裂缝条件下的渗流面积

Fig.8　Leakage areas under various cracks

3.2.2 水压对渗流面积的影响

图9为宽3 mm和5 mm贯穿裂缝混凝土试块在不同水压条件下观察面的渗流面积随渗透压力变化的曲线,图10和图11分别为两试块在不同压力下的照片和红外热像图(上方为照片,下方为红外热像图)。由图可知:

1) 3 mm和5 mm贯穿裂缝均属于较大裂缝,由于已经存在较宽渗流通道,试块背后的水可在常压状态下渗流至试块观察面,裂缝宽度越大则常压下观察面的渗流面积越大;

2) 试块背后水压从常压加至200 kPa过程中,3 mm贯穿裂缝混凝土试块观察面渗流面积增幅较大,而5 mm贯穿裂缝混凝土试块观察面渗流面积增幅较小,说明在贯穿条件下,裂缝越宽,观察面的渗流面积受水压的影响越小;

3) 3 mm贯穿裂缝混凝土试块背后水压从常压增至100 kPa过程中,观察面渗流面积增大较明显,而背后水压从100 kPa增至400 kPa过程中,观察面渗流面积增幅大大减少。说明当水压到达一定值后,再增大背后水压,试块观察面的渗流面积也不会有明显增加。

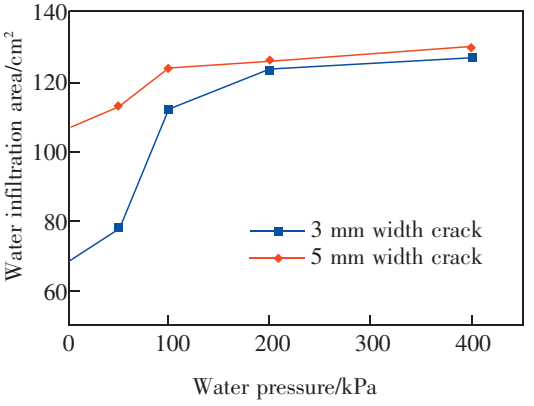
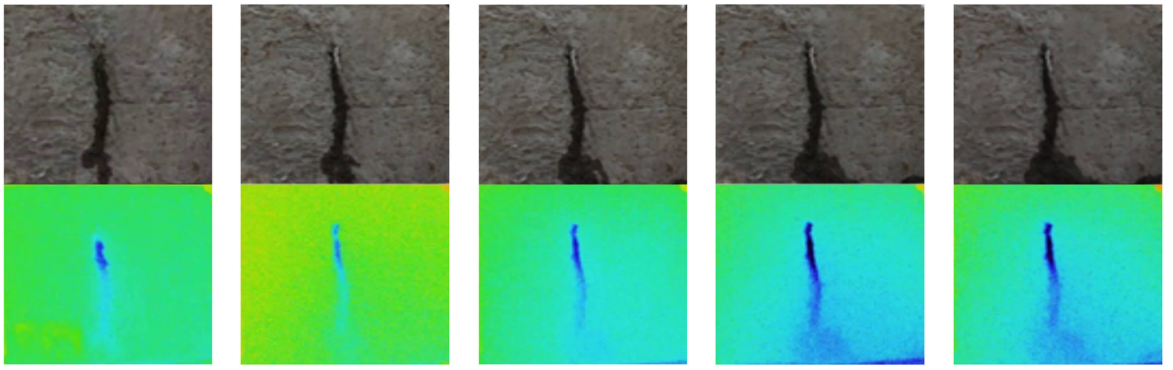


图9 不同水压下3 mm贯穿裂缝试块、5 mm贯穿裂缝试块表面渗流面积

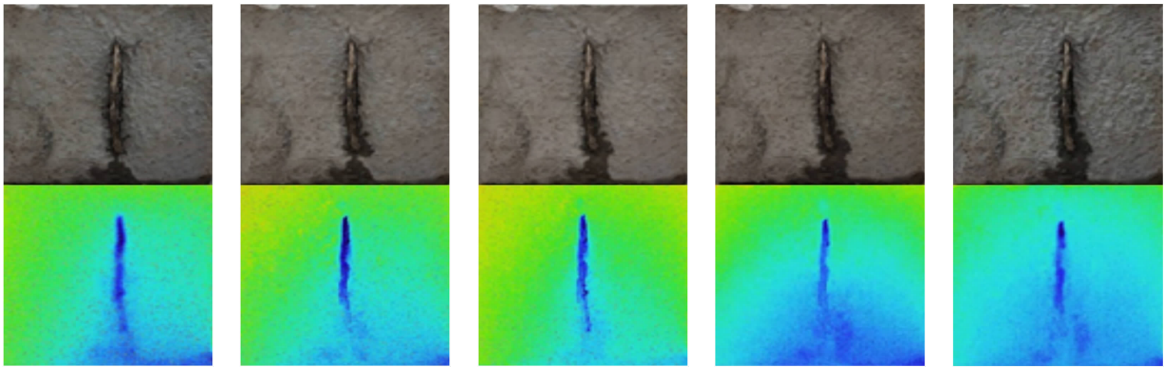
Fig.9 Surface seepage area of 3 mm penetrating crack test block and 5 mm penetrating crack test block under different water pressure



(a) 0 kPa,68 cm² (b) 50 kPa,78 cm² (c) 100 kPa,112 cm² (d) 200 kPa,124 cm² (e) 400 kPa,127 cm²

图10 3 mm贯穿裂缝混凝土试块在逐步加压后观察面的渗流面积变化

Fig.10 Water seepage behavior of test block 3 mm after gradual pressurization



(a) 0 kPa,107 cm² (b) 50 kPa,113 cm² (c) 100 kPa,124 cm² (d) 200 kPa,126 cm² (e) 400 kPa,130 cm²

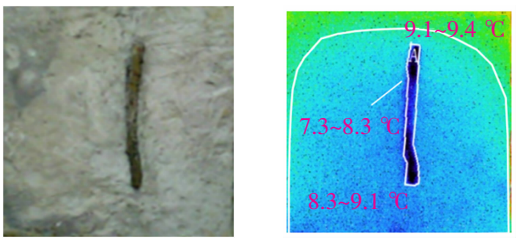
图11 5 mm贯穿裂缝混凝土试块在逐步加压后观察面的渗流面积变化

Fig.11 Water seepage behavior of test block 5 mm after gradual pressurization

3.3　渗漏点及其周边温度场

3.3.1　红外热像温度场

图 12 为 3 mm 贯穿裂缝在常压作用下的普通照片和红外热像温度场。两张照片均由 Avio R550 红外热像仪拍摄并经过数据处理得到。对比两张图可见，普通照片表面并没有肉眼可见的渗水情况,而红外热像图却可以看到明显的温度差。从绿色的 9.4 ℃到深蓝色的 7.3 ℃,温度逐渐降低。试块周边不受渗漏水影响，温度为 9.1~9.4 ℃(绿色),温度相对较高;而试块中间受渗漏水影响较大,由外向内,温度由 9.1 ℃逐渐降低至 8.3 ℃(从浅蓝逐渐变深),温度较周边低,而且越靠近裂缝,温度越低;裂缝处温度范围最低,7.3~8.3 ℃。多组实验数据显示，中间区域平均温度相较总平均温度低 0.1~0.2 ℃。



(a) Normal photo　　(b) Infrared thermal image

图12　3 mm 裂缝在常压下的普通照片及红外热像图形成的温度场

Fig.12　Photo and temperature field obtained by Avio R550 thermal imaging camera of 3 mm crack under normal pressure

3.3.2　渗水点的识别

图 13(a)和图 13(b)均为 Avio R550 拍摄出的 3 mm 贯穿裂缝混凝土试块在 50 kPa 作用下的普通照片和红外热像温度场。单看普通照片裂缝及裂缝下方表面均有渗水,而红外热像温度场在裂缝上方表现出深蓝色,温度为 8.5~9.0 ℃,裂缝下方由上至下则逐渐由深蓝变为浅蓝，温度由 9.0 ℃增加至 10.2 ℃。可以推断主要渗水位置为裂缝上方。

3.3.3　温度的影响因素

试验过程中发现,同一试块水压越大,红外热像仪器观察出的渗漏处与周边的温差就越大,红外热像温度场上的颜色差异就越明显。究其原因是水压越大,渗水量越多,渗流速度越快,渗水位置与周边混凝土的温差就越大。所以影响温度的主要因素是渗水量。



(a) Normal photo　　(b) Infrared thermal image

图 13　3 mm 裂缝在 50 kPa 渗压下的普通照片及红外热像图形成的温度场

Fig.13　Photo and temperature field obtained by Avio R550 thermal imaging camera of 3 mm crack under 50 kPa osmotic pressure

试验中,尝试过降低水箱内的水温,并观测渗水处的红外热像温度场与周边差异是否会更明显。向水箱内灌水之前,将准备好的冰块放入水中,使水温降至−1~0 ℃,再灌入水箱,观察渗水处与周边混凝土温差是否会增大。但效果并不明显,原因是试验在冬天进行,水的一般温度在 6~8 ℃,加冰后水的温度在−1~ 0 ℃,加入水箱后,水温因为接触混凝土试块而逐渐升高,水的温度并不能维持在−1~0 ℃,温度升高后与冬天的常温水温差不大，观察出的温差不明显。

4　结论

为了探究裂缝条件、渗压与红外热像图之间的关系,使红外热像技术发挥更大作用,设计了用以模拟隧道衬砌裂缝有压渗水的室内模型。在每种不同裂缝条件的试块背后从常压开始逐步加大水压,使用红外热像仪进行观察记录温度数据,同时记录渗流量,得出以下结论:

1) 渗流量与裂缝宽度及水压大小密切相关,并且渗流量最大处往往温度最低。采用红外热像仪能够准确扫描隧道内最小温度点,从而确定最合适的打孔泄压位置。

2) 在相同裂缝条件下,水压越大,渗流速度越快;相同水压下,裂缝越发展,渗流速度越大。

3) 与贯穿裂缝相比,非贯穿裂缝的表面渗流区域往往更大;贯穿裂缝有直接的渗流通道,水通过渗流通道遇到较小阻力,在常压时也会渗出;非贯穿裂缝没有直接的渗流通道,水需要渗透过混凝土层，在混凝土中大面积渗透后才会在表面渗出,所以表面渗出面积较大;水渗出混凝土表面后,存在稳定的渗流通道,表面的渗流面积增幅会减小。

4）实验中，试块的中心区域温度往往会低于四周0.2 ℃左右；水压越大，裂缝越宽，试块表面渗水就越多，渗水处与周边混凝土红外热像温度场差异越明显；同时，红外热像仪能够较准确的找出主要渗水点，因为渗水处温度更低。

参考文献：

[1] 中华人民共和国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京：中国统计出版社，2019.
STATISTICS BUREAU OF THE BUREAU OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHIAN. China Statistical Yearbook [M]. Beijing：China Statistics Press，2019.

[2] 薛晓辉，张军，宿钟鸣，等. 山西省运营隧道渗漏水病害调研及成因分析[J]. 中外公路，2015，35(1)：211-215.
XUE X H，ZHANG J，SU Z M，et al. Investigation and cause analysis of water leakage diseases in operating tunnels in Shanxi Province[J]. China and Foreign Highways，2015，35(1)：211-215.

[3] 李杨，杨新安. 降雨入渗作用下溶洞区域隧道变形规律研究[J]. 华东交通大学学报，2020，37(6)：36-45.
LI Y，YANG X A. Research on deformation of tunnel in karst cave area under rainfall infiltration[J]. Journal of East China Jiaotong University，2020，37(6)：36-45.

[4] HAACK A，SCHREYER J，JACKEL G. State-of-the-art of non-destructive testing methods for determining the state of a tunnel lining[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts，1996，33(4)：172.

[5] KONISHI S，KAWAKAMI K，TAGUCHI M. Inspection method with infrared thermometry for detect void in subway tunnel lining[J]. Procedia Engineering，2016，165：474-483.

[6] HUANG Y，SHIH P，HSU K T，et al. To identify the defects illustrated on building facades by employing infrared thermography under shadow[J]. NDT and E International，2020，111：102240.

[7] CHULKOV A O，COMMOIER A，PRADERE C，et al. Analyzing efficiency of optical and the infrared thermography in nondestructive testing of GFRPs by using the Tanimoto criterion[J]. NDT and E International，2021，117：102383.

[8] SANG CKA，A ICP，CHAN GKA，et al. Evaluation of the characteristics of the reflection plate to measure defects in the invisible area using infrared thermography[J]. Nuclear Engineering and Technology，2020，52(4)：856-862.

[9] INAGAKI T，OKAMOTO Y. Diagnosis of the leakage point on a structure surface using infrared thermography in near ambient conditions[J]. NDT and E International，1997，30(3)：135-142.

[10] BARREIRA E，ALMEIDA，RICARDI M S F，et al. An infrared thermography passive approach to assess the effect of leakage points in buildings[J]. Energy and Buildings，2017，140：224-235.

[11] SUN H，LIU X L，ZHANG S G，et al. Experimental investigation of acoustic emission and infrared radiation thermography of dynamic fracturing process of hard-rock pillar in extremely steep and thick coal seams[J]. Engineering Fracture Mechanics，2020，226：106845.

[12] SONG J R，GAO B，WOO W L，et al. Ensemble tensor decomposition for infrared thermography cracks detection system[J]. Infrared Physics and Technology，2020，105：103203.

[13] DONG L H，WANG B Z，WANG H D，et al. Effects of crack surface roughness on crack heat generation characteristics of ultrasonic infrared thermography[J]. Infrared Physics and Technology，2020，106：103262.

[14] PUTHIYAVEETTIL N，RENIL T K，UNNIKRISHNAKURUP S，et al. Laser line scanning thermography for surface breaking crack detection：Modeling and experimental study [J]. Infrared Physics and Technology，2020，104(C)：103141.

[15] THATCHER J E，CRUMP D A，DEVIVIER C，et al. Low cost infrared thermography for automated crack monitoring in fatigue testing[J]. Optics and Lasers in Engineering，2020，126(C)：105914.

[16] CLARK M R，MCCANN D M，FORDE M C. Application of infrared thermography to the non-destructive testing of concrete and masonry bridges[J]. NDT and E International，2003，36(4)：265-275.

[17] 张慧慧. 红外热成像法检测岩石渗水病害的实验研究[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版)，2014，30(1)：71-74.
ZHANG H H. Experimental study on the detection of rock seepage diseases by infrared thermal imaging[J]. Journal of Qiqihar University(Natural Science Edition)，2014，30(1)：71-74.

[18] 豆海涛，黄宏伟，薛亚东. 隧道衬砌渗漏水红外辐射特征影响因素试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2011，30(12)：2426-2434.
DOU H T，HUANG H W，XUE Y D. Experimental study on influencing factors of infrared radiation characteristics of tunnel lining water leakage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering，2011，30(12)：2426-2434.

[19] 吴杭彬，于鹏飞，刘春，等. 基于红外热成像的地铁隧道渗漏水提取[J]. 工程勘察，2019，47(2)：44-49.
WU H B，YU P F，LIU C，et al. Leakage extraction of subway tunnel based on infrared thermal imaging[J]. Engineering Investigation，2019，47(2)：44-49.

[20] 吴斌. 云南省普通国省道干线公路隧道渗漏水病害调查及成因分析[J]. 科技创新与应用，2017(27)：164-167.
WU B. Investigation and cause analysis of water leakage diseases in tunnels of general national and provincial highways in Yunnan province[J]. Science and Technology Innovation and Application，2017(27)：164-167.



第一作者：李建辉(1977—)，男，高级工程师。研究方向为铁道公务。E-mail:13877132032@163.com。



通信作者：朱碧堂(1974—)，男，教授，博士生导师，研究方向为岩土工程。E-mail: btangzh@hotmail.com。

(责任编辑：吴海燕　刘棉玲)