

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.09.010

桥梁拼接缝混凝土渗透性及与裂缝宽度关系研究

杨 扬¹, 韩建坤², 张国荣¹, 陈 伟³, 韩依璇¹

(1. 在役长大桥梁安全与健康国家重点实验室, 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 211112;

2. 河海大学, 江苏 南京 210098; 3. 湖北工业大学, 湖北 武汉 430068)

摘要:采用气体渗透技术对桥梁拼接缝混凝土的抗渗性进行测试和评价,并对气体渗透系数与裂缝宽度闭合关系开展室内材料层面和现场结构层面的研究。室内试验中,基于对混凝土材料基本性能的测量和分析,对带贯穿裂缝的混凝土试件开展了气体抗渗性测试。结合回归分析,以相对气体渗透率 k/k_0 为因变量,以裂缝宽度闭合相对变化量 a_c 为自变量,建立了拟合曲线方程,说明当 a_c 增大 1.125×10^{-2} mm时,气体渗透系数较初始状态增大10倍左右。现场结构层面的试验中,通过在拼接缝混凝土的跨中和梁端3个关键部位预埋传感器,在桥梁运营期开展了抗渗性能测试,并比较了荷载对混凝土气体渗透系数的影响。结果显示,所研究桥梁拼接缝混凝土的气体渗透系数处于 $10^{-16} \sim 10^{-19}$ m²量级范围,混凝土密实性能整体较好;1个月龄期时,拼接缝跨中传感器的气体渗透系数较两端高两个数量级,说明此处混凝土可能存在初始施工质量缺陷。而8个月龄期时,此处的气体渗透系数较1个月时降低了一个数量级,密实性能的提升可能来自于膨胀剂的膨胀效应;加卸载状况下3支传感器的气体渗透系数对比说明,剪力对混凝土宏观缺陷或微观裂缝的闭合效果有限;近桥墩处3#梁端传感器的混凝土气体渗透系数在不同龄期下提高了一个数量级,而其他两处则呈现降低趋势,说明桥墩处混凝土的原始微裂缝有发展为宏观裂缝的可能,且裂缝宽度增大了约0.01 mm。

关键词:桥梁工程;裂缝宽度闭合;气体渗透;拼接缝混凝土;密实性能

中图分类号: U448.33

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2020)09-0073-09

Study on Permeability of Bridge Joint Concrete and Its Correlation with Crack Width

YANG Yang¹, HAN Jian-kun², ZHANG Guo-rong¹, CHEN Wei³, HAN Yi-xuan¹

(1. State Key Laboratory of Safety and Health for In-service Long Span Bridges, JSTI Group Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 211112, China;

2. Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098, China; 3. Hubei University of Technology, Wuhan Hubei 430068, China)

Abstract: The impermeability performance of bridge joint concrete is tested and evaluated by using gas permeability technology, and the relationship between gas permeability coefficient and crack width closure is carried out both on indoor material and field structure levels. In laboratory test, gas anti-permeability tests on the concrete specimens with penetrating cracks is carried out based on the measurement and analysis of the basic properties of concrete materials. Combining with regression analysis, taking the relative gas permeability k/k_0 as the dependent variable, and the relative variation of crack width closure a_c as the independent variable, the fitting curve equation is established. It shows that when a_c increases by 1.125×10^{-2} mm, the gas permeability coefficient increases by about 10 times compared with the initial state. In the field test at the structural level, sensors are embedded in 3 key parts of the joint concrete at the mid-span and the beam end. The anti-permeability test is carried out during the bridge operation period, and the influences of load on the

收稿日期: 2020-02-04

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20160144); 湖北省自然科学基金项目(2017CFB604)

作者简介: 杨扬(1977-), 男, 江苏南京人, 高级工程师。(yangyang@jsti.com)

gas permeability coefficient of concrete are compared. The result shows that (1) The gas permeability coefficient of the studied bridge joint concrete is in the range of $10^{-16} - 10^{-19} \text{ m}^2$, and the compaction of the concrete is generally good. (2) At the age of 1 month, the gas permeability coefficient of the sensor in the mid-span of the joint is 2 orders of magnitude higher than that at the 2 ends, indicating that the concrete here may have defects in the initial construction quality. While at the age of 8 months, the gas permeability coefficient here is an order of magnitude lower than that at 1 month, and the improvement in compaction performance may due to the expansion effect of the expansion agent. (3) The comparison of the gas permeability coefficients of the 3 sensors under loading and unloading shows that the effect of shearing force on the closure of concrete macroscopic defects or microscopic cracks is limited. (4) The concrete gas permeability coefficient of the beam end sensor No. 3 near the bridge pier increased by an order of magnitude at different ages, while the other 2 sensors show decreasing trends, indicating that the original micro cracks in the concrete at the pier may develop into macro cracks, and the crack width increased by about 0.01 mm.

Key words: bridge engineering; crack width closure; gas permeability; joint concrete; compaction

0 引言

随着我国交通运输行业的蓬勃发展,众多老旧桥梁无法满足日益增长的交通量需求,桥梁拓宽改造因而成为高速公路改扩建工程的重要环节,多数桥梁采用拼宽加固法进行拓宽改造^[1-2]。拼接缝属于典型的新旧混凝土连接部位构造。调研发现,拼接缝病害量大面广,主要表现为混凝土开裂、脱落和渗水等问题^[3]。裂缝不仅为外界侵蚀介质渗透提供了通道,导致混凝土密实性能降低,进一步加速结构耐久性性能劣化;还可能造成单板受力现象,存在重大结构安全隐患^[4]。因此,拼接缝混凝土的性能和质量对拓宽改造桥梁的运营安全至关重要,十分有必要对其耐久性和裂缝状态进行长期跟踪评价。然而由于表面铺装的存在,等病害发展到铺装层时往往已达严重程度。常规的裂缝观测仪、超声波等表层检测手段不适用,或其精度受裂缝深度和构件形状影响,不能满足混凝土内部或不可见裂缝状态检评的需求,更无法为预防性养护提供有效支撑。

混凝土的密实性能,通常用渗透性或抗渗性指标表征,反映了侵蚀介质进入并在混凝土内部传输的难易程度,同时也反映混凝土的抗腐蚀、抗冻融和抗裂性能^[5]。因此,测量并研究拼接缝混凝土的抗渗性,一方面可以评估其密实性能,另一方面能够及时发现内部裂缝的产生和发展,进行早期干预,为预防性养护决策提供技术支撑。国内外通常采用的混凝土渗透性试验方法总体可以分为水渗透法、离子渗透法和气体渗透法3类^[6-14],水渗透法存在渗透过程难达到稳态、精度低、不适于强度较高混凝土等不足;离子渗透法需要现场留样或对实体结

构有损取样,且为表层检测;气体渗透法则具有测量精度高、结构现场无损测试等优势,且对混凝土的化学组分和微观结构无影响。该方法已经过室内试验的反复验证^[15-16],并完成了在核反应堆和桥梁墩柱等实体结构中的应用可行性试验^[13,17]。

于此,本研究采用基于气压差值法的新型气体渗透技术,通过现场测试结合室内试验和回归分析等方式,对实体桥梁拼接缝混凝土的气体渗透系数进行测量,同步研究并建立该混凝土的气体渗透系数与裂缝宽度的相关性,最终实现对依托工程拼接缝混凝土密实性能和施工质量的评估,对混凝土内部或不可见裂缝的产生和状态进行评价。

1 试验方案

试验方案主要分为室内材料层面和现场结构层面研究两部分。实验室工作包含拼接缝混凝土基本物理性能测量、带贯穿裂缝的混凝土试件的气体渗透测试及数值模拟,通过标定试验和回归分析确定气体渗透系数与裂缝宽度闭合的定量关系。现场试验则通过施工期在桥梁拼接缝内预埋传感器,在运营期开展“脉冲试验”测量气压随时间的变化,利用室内试验结果推导实体桥梁拼接缝混凝土的开裂状况。

1.1 拼接缝混凝土制备与基本性能测量

1.1.1 原材料与配合比

原材料

(1) 水泥:某公司生产的P·II 52.5硅酸盐水泥;(2) 粗集料:江西赣江生产的大(16~25 mm)小(5~16 mm)粒径按照4:6比例混合;(3) 细集料:中砂,细度模数为2.68;(4) 减水剂:上海某

公司生产的高性能聚羧酸高效减水剂, 减水率为 27%; (5) 膨胀剂: 江苏某公司生产的 HME-IV 混凝土高效膨胀剂。(6) 纤维: 江苏博特生产的润强丝 (III) 粗聚丙烯纤维。

混凝土配合比

根据依托工程对拼接缝混凝土的要求和配合比, 混凝土设计强度为 C50, 坍落度为 140 ~ 180 mm。室内试验混凝土水胶比为 0.30, 砂率为 39%, 粗聚丙烯纤维体积掺量 0.75%, 膨胀剂掺量为 10%。具体材料用量如表 1 所示, 按照此配合比进行混凝土试件成型和养护。

表 1 每方混凝土材料用量

Tab. 1 Material amounts per square concrete

原材料	水泥	膨胀剂	砂	石子	水	减水剂	聚丙烯纤维
质量/kg	485	55	704	1 101	160	3.51	12

1.1.2 基本物理性能测量

(1) 抗压强度: 参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081) 相关规定进行混凝土抗压强度测试。

(2) 限制膨胀率: 采用 DZBY-355 型补偿式混凝土收缩膨胀仪, 参照《混凝土外加剂应用技术规范》(GB 50119) 中附录 B 相关规定进行混凝土限制膨胀率测试。

1.1.3 气体渗透性与水饱和度测量

(1) 基于气压差值法的气体渗透性室内试验

实验室内测量混凝土试件的气体渗透性, 是将试件置于一端以恒定进气压 P_i 注气, 另一端连接大气压 P_0 自由排气的气压差条件下。在测试时间 Δt 内, 足够小的进气压降 ΔP_i 和加载于试件上的围压使得通过试件的气流为稳态层流, 符合达西定律要求。由于混凝土材料的高抗渗性、低渗透性使得通过的气体流量非常小, 一般商用流量传感器很难满足精度要求, 因此使用气压降间接测量气体渗透系数 K_x , 达西定律改写如下^[15]:

$$k_x = \frac{\mu Q_m}{A} \frac{2hP_m}{(P_m^2 - P_0^2)}, \quad (1)$$

式中, k_x 为在 x 方向上的气体渗透系数; μ 为氩气的黏滞系数, 在 20 °C 时为 2.2×10^{-5} ; 气体流量 $Q_m = \frac{V_r \Delta P_i}{\Delta t P_m}$, 一般选择 $\Delta t = 300$ s, V_r 为稳定传输气体体积, 试验仪器自带参数; $P_m = P_i - (\Delta P_i / 2)$; A 和 h 为混凝土试件的截面积和高。

(2) 初始状态下混凝土试件的水饱和度测量

水饱和度指试件在某一状态下, 含水孔隙体积占联通孔隙总体积的比率, 是表征混凝土孔隙水饱和和程度的指标。初始状态下混凝土水饱和度的测量步骤为: 测量并记录试件初始质量 m_0 , 随后将试件置于 105 °C 干燥箱中干燥至恒重, 记录干燥质量 m_{dry} 。随后将试件进行真空水饱和处理, 待质量恒定后记录饱和质量 $m_{saturated}$ 。计算公式如下:

$$S_w = \frac{V_{water}}{V_{void}} = \frac{\frac{m_0 - m_{dry}}{\rho_{water}}}{\frac{m_{saturated} - m_{dry}}{\rho_{water}}} \times 100\% = \frac{m_0 - m_{dry}}{m_{saturated} - m_{dry}} \times 100\%, \quad (2)$$

式中, S_w 为试件的初始水饱和度; V_{water} 为试件孔隙含水体积; V_{void} 为试件孔隙总体积; m_0 指试件初始质量; $m_{saturated}$ 为试件饱和质量; m_{dry} 为试件干燥质量; ρ_w 指水的密度。

1.2 带贯穿裂缝的拼接缝混凝土试件的气体渗透性测试

本试验主要研究围压加卸载过程中, 宏观裂缝的闭合对混凝土气体渗透性的影响。采用巴西劈裂法制备带贯穿裂缝的试件, 如图 1 所示。在气体渗透性试验过程中利用 LVDT 位移计同步跟踪裂缝的开闭随围压的变化, 如图 2 所示。同时测量对应状态下的气体渗透系数^[18]。采用裂缝开合度 cc 表征裂缝宽度开闭的变化, 如果 cc 为正且增大, 意味着裂缝两个表面间距变小, 处于合并状态中; 反之, 裂缝处于打开状态。

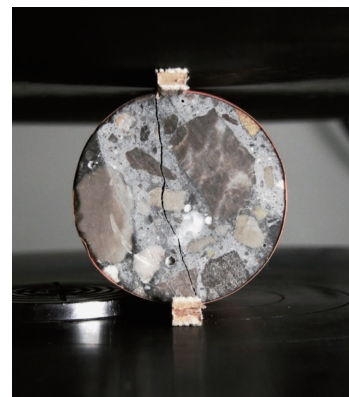


图 1 巴西劈裂制备裂缝

Fig. 1 Crack produced by Brazilian split method

1.3 数据处理与回归分析

考虑到裂缝初始宽度各异, 且工程应用中重点关注裂缝状态随时间的变化, 为了使长期跟踪观测的结果更直观、更具可比性, 将气体渗透系数和裂

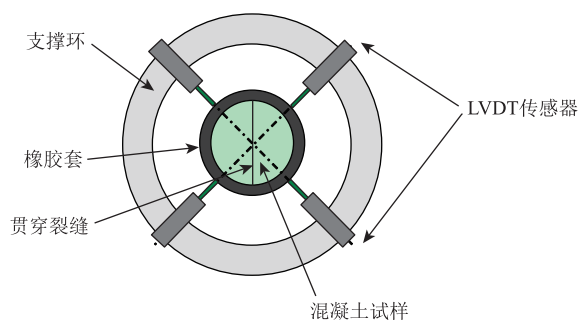


图2 LVDT 位移计测量裂缝开闭情况示意图

Fig. 2 Schematic diagram of measuring crack closure by LVDT displacement meter

缝开合度进行标准化处理,采用相对气体渗透率 k/k_0 和裂缝宽度相对变化量 a_c 进行分析。前者是气体渗透系数与围压卸载段初始气体渗透系数的比值;后者指裂缝开合度与围压卸载段初始裂缝开合度的差值。由于卸载段裂缝处于打开状态,裂缝开合度 cc 随围压降低而减小。为了使自变量值始终为正,取二者差值的相反数,即最终 a_c 每增大 $1/100$ mm 表示裂缝宽度相对卸载初始阶段增大了 $1/100$ mm。 a_c 按照式(3)计算:

$$a_c = -(cc_n - cc_0), \quad (3)$$

式中, cc_n 为卸载段某一围压值下的裂缝开合度; cc_0 指卸载初始阶段裂缝开合度。

以 k/k_0 为应变量, a_c 为自变量,选择合适的函数进行拟合,建立两者之间的定量关系。

1.4 现场测试

1.4.1 依托工程概况

本研究以江苏省江都至广陵高速公路改扩建工程的松桥河桥为依托工程,采用同跨径、同结构两侧分别拼宽,拼宽桥与原桥上部构造横向连接下部不连接的扩建方式。原桥共5跨,采用 5×16 m 预应力混凝土空心板,全长 85.48 m (16.04 m + 16 m + 16 m + 16 m + 16.04 m),桥宽 26 m。左右半幅各拼宽 8 m,扩建后桥梁全宽 42 m。拼接缝混凝土为 C50 补偿收缩超钢纤维混凝土,配合比见表1。

1.4.2 脉冲传感器预埋

为方便设备安装和后期测量,选择松桥河桥北半幅边跨作为试验对象。在拼接缝跨中及靠近两端支座位置各埋设1支微孔隙不锈钢脉冲传感器,如图3所示,共埋入3支。用钢丝固定于拼接缝钢筋笼内、距底部钢筋 10 cm。位于桥台处的传感器编号为1#,跨中位置处为2#,桥墩处为3#。鉴于测量区域为以传感器为轴的椭圆形,因此将传感器平行于

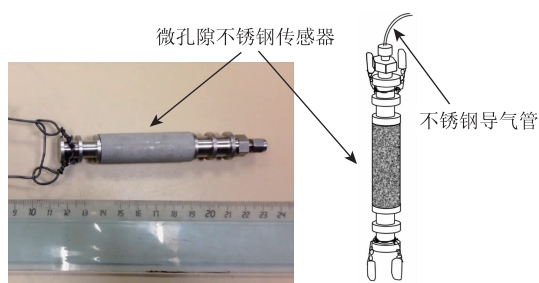


图3 脉冲传感器照片及示意图

Fig. 3 Photo and schematic diagram of pulse sensor

拼接缝方向放置,如图4所示。

1.4.3 现场“脉冲试验”

由于实体混凝土结构构件体积庞大,气体扩散需要很长时间才能达到稳态,无法满足便捷、高效的现场测量要求,因而改良气体渗透实验室方法采用非稳态气流。一方面采用埋入式传感器控制气体扩散范围;另一方面测量时仅以低压缓冲罐供气,直至压力下降至既定数值。测量结束后,比较实测气压降与数值模拟气压降曲线,推导出现场实测的有效气体渗透系数 K_e 和混凝土水饱和度 S_w 数值^[17]。对于同次测量的不同传感器在相同时间内的气压降 ΔP 值,可将某一传感器所测混凝土的气体渗透系数作为基准值,换算出其余传感器的气体渗透系数。

自依托工程拼接缝混凝土浇注完毕起,分别在1个月和8个月两个龄期开展了现场测试。其中1个月龄期考虑了荷载作用,分为偏载和对称加载两种工况。偏载方式是指加载车只在原桥侧布置,对称加载是指加载车在拼缝两侧分别布置,详见图5和6。每种工况分别在加载前、加载完成和卸载后开展桥梁拼缝混凝土气体渗透性测试。而8个月龄期时开展了桥梁正常运营状态下的气体渗透性测试。

2 结果与分析

2.1 拼接缝混凝土的基本性能

2.1.1 基本物理性能

拼接缝混凝土试件 28 d 平均抗压强度为 77.3 MPa,满足 C50 混凝土强度设计要求。混凝土试件水中 3 d, 7 d 和 14 d 的限制膨胀率为 0.032%, 0.040% 和 0.048%, 水中 14 d 转空气中 28 d 的限制膨胀率为 0.017%,亦满足限制膨胀率设计要求。

2.1.2 初始状态下的试件水饱和度和气体渗透系数

初始状态下,拼接缝混凝土试件的平均气体渗

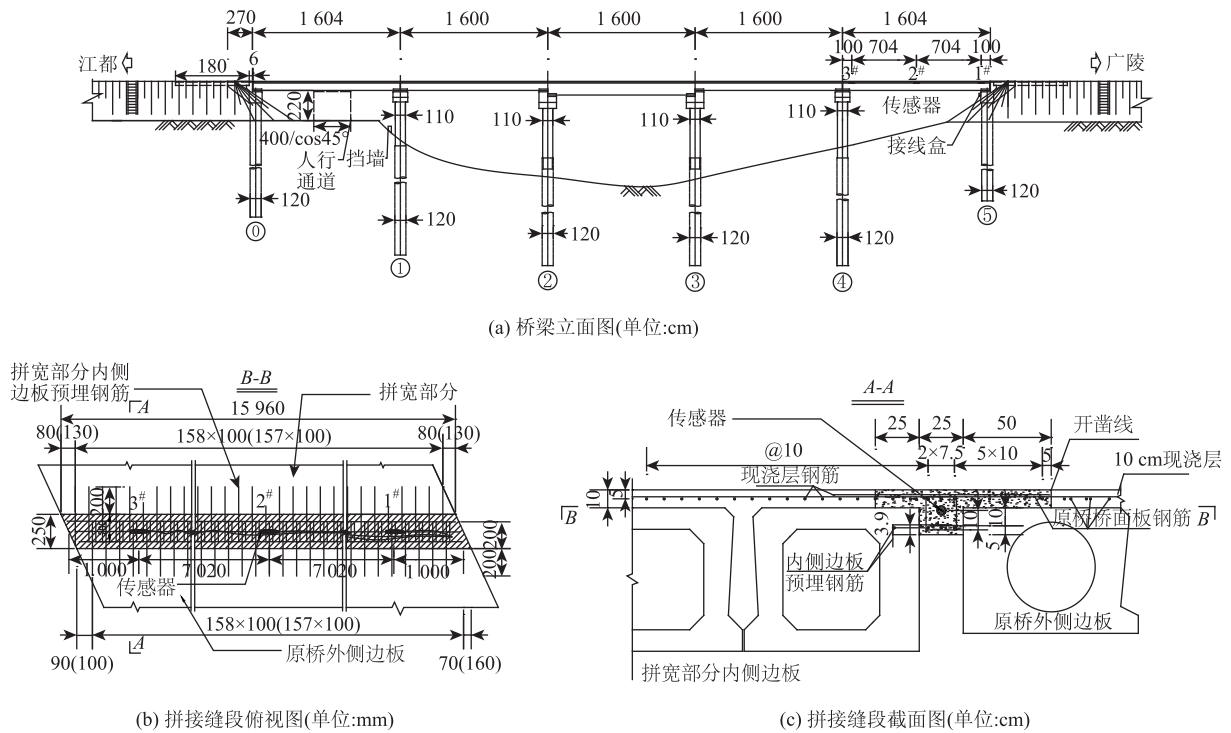


图4 脉冲传感器预埋位置

Fig. 4 Location of embedded pulse sensor

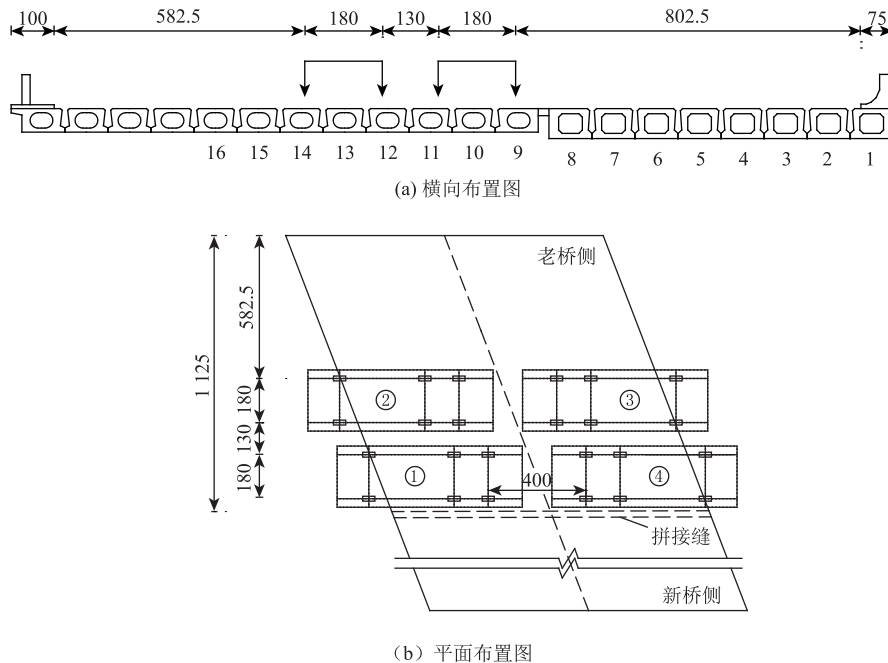


图5 偏载加载工况 (单位: cm)

Fig. 5 Unbalanced loading condition (unit: cm)

透系数为 $3.65 \times 10^{-18} \text{ m}^2$, 平均水饱和度为 92.6%, 标准差分别为 $0.1 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 和 0.69%, 同批次混凝土试件在相同养护条件下密实性能变化浮动小。

由于依托工程桥梁拼接缝采用 C50 补偿收缩纤维混凝土, 整体强度高, 密实性能较好, 初始状态

下内部含水量较高。预埋在拼接缝内部中心位置的传感器, 可认为其周围混凝土在初始状态接近完全饱和, 处于完好状态, 因此取混凝土试件初始状态下的平均气体渗透系数 ($k_0 = 3.65 \times 10^{-18} \text{ m}^2$) 作为实体桥梁拼接缝混凝土的初始气体渗透系数值。

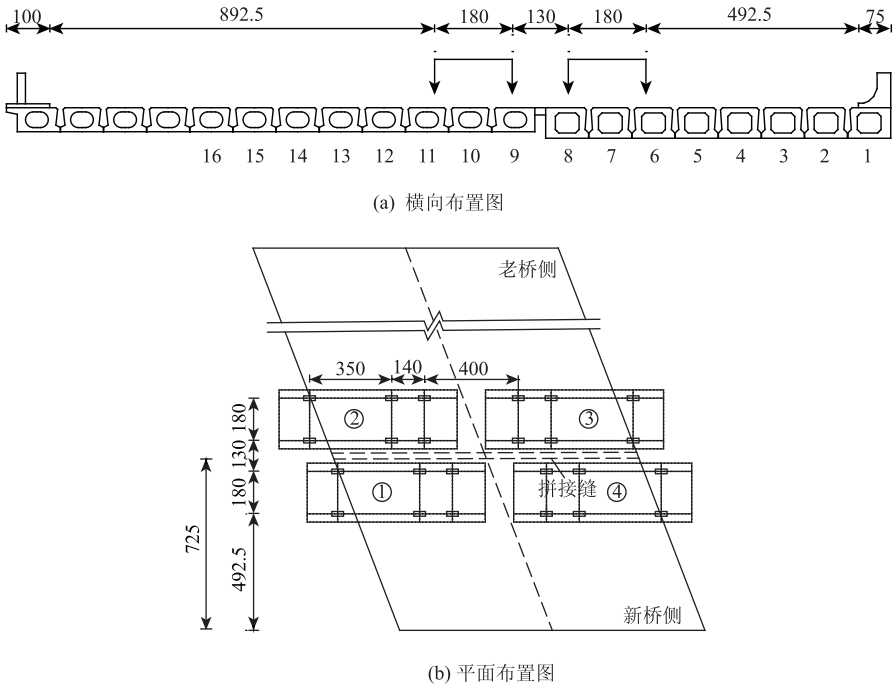


图 6 对称加载工况 (单位: cm)
Fig. 6 Symmetrical loading condition (unit: cm)

表 2 试件初始气体渗透系数和水饱和度
Tab. 2 Initial gas permeability coefficient and water saturation of samples

试件编号	气体渗透系数/($\times 10^{-18} \text{ m}^2$)	水饱和度/%
18 [#]	3.51	91.44
19 [#]	3.79	92.94
20 [#]	3.63	93.15
21 [#]	3.67	92.98
平均值	3.65	92.6
标准差	0.10	0.69

2.2 气体渗透系数与裂缝宽度闭合的关系

以裂缝宽度相对变化量 a_c 为自变量, 相对气体渗透率 k/k_0 为应变量绘制散点图, 见图 7。鉴于相对气体渗透率与裂缝宽度相对变化量散点图符合幂函数曲线特征, 因此选用带有常数项的幂函数模型 $y = a + bx^c$ 进行曲线拟合。且因曲线必经过点 $(0, 1)$, 因此参数 a 的值取 1, 拟合结果如图 8 所示。非线性回归分析建立的二者定量关系即拟合方程为 $\frac{k}{k_0} = 1 + 2.71 \times a_c^{10.18}$, 其中拟合曲线决定系数 $R^2 = 0.95889$, 调整后的值为 0.95752, 拟合效果较好。

拟合方程说明, 当 $a_c = 0$ 时, 试件气体渗透系数为初始值, 相对气体渗透率为 1; 当 a_c 增大时, 表明裂缝打开, 裂缝宽度变大, 气体渗透系数也随之增大; 当 a_c 增大 $1.125 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 时, 气体渗透系

数较初始状态增大 10 倍左右。换言之, 当裂缝宽度增大 0.01 mm 时, 气体渗透系数相应地有一个数量级的变化。这一重要结论应用于实体桥梁结构的裂缝状态评估, 通过测量并比较构件两次及以上的气体渗透系数, 可定量判断裂缝宽度发展状况。

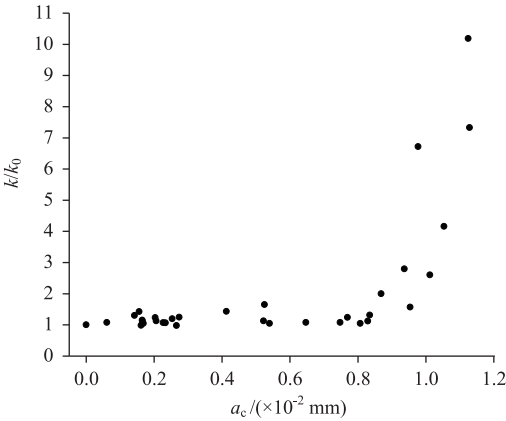
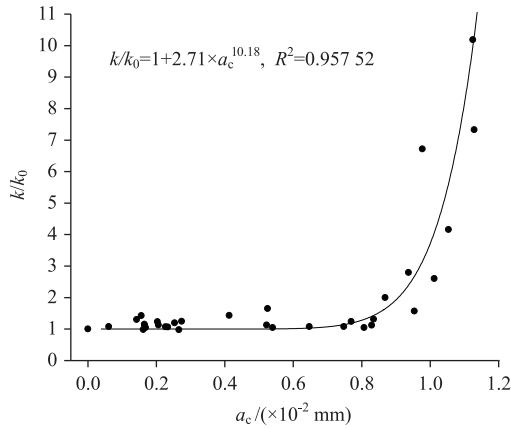


图 7 k/k_0 与 a_c 散点图
Fig. 7 Scatter diagram of k/k_0 vs. a_c

2.3 实桥拼接缝混凝土的相对气压降

鉴于“脉冲试验”现场直接采集的数据为传感器气压值, 所以先采用最为直观的相对气压降分析气体扩散行为, 以初步判断混凝土的密实性能。相对气压 P_r 指试验时的传感器气压 P_{if} 与初始进气压 P_0 的比值, 如式 (4) 所示。

图8 k/k_0 与 a_c 曲线拟合结果Fig. 8 Fitting result of $k/k_0 - a_c$ curve

$$P_r = \frac{P_{if}}{P_{i0}} \quad (4)$$

在不同龄期 and 不同荷载工况下, 3 支传感器的相对气压随时间变化曲线如图 9 所示。由图可知: (1) 1[#]传感器的相对气压降介于 1 ~ 0.996 之间, 接近于 1 且变化非常小, 说明周围混凝土质量良好。荷载作用下相对气压下降速率略有减缓, 说明传感器周围混凝土趋于密实, 受荷载影响较小; (2) 2[#]传感器 1 个月龄期的相对气压变化值显著大于 1[#]和 3[#], 降幅较大, 说明拼接缝跨中混凝土的初始缺陷大于两端。施加荷载后相对气压下降速率和幅度均加剧, 说明存在初始缺陷情况下荷载对混凝土的密实性能和渗透性影响明显; (3) 3[#]传感器 1 个月龄期的相对气压变化规律与 1[#]相似, 说明混凝土浇注质量良好。但 8 个月龄期的相对气压出现明显下降, 初步判断该处混凝土内部可能出现裂缝。

2.4 实桥拼接缝混凝土的气体渗透系数

由相对气压降分析结果可知, 1[#]传感器的相对气压降稳定在 1 ~ 0.996 之间, 波动极小。鉴于该处混凝土浇筑质量良好, 因此可将其视为初始完好状态 (气体渗透系数取试件初始状态下的气体渗透系数值 k_0), 通过式 (5) 换算其余传感器的气体渗透系数。

$$k_{其他} = k_{1\#} \times \frac{\Delta P_{其他}}{\Delta P_{1\#}}, \quad (5)$$

式中, $k_{其他}$ 指其他传感器周围混凝土气体渗透系数; $k_{1\#}$ 指 1[#]传感器混凝土气体渗透系数, $k_{1\#} = k_0 = 3.65 \times 10^{-18} \text{ m}^2$; $\Delta P_{其他}$ 和 $\Delta P_{1\#}$ 分别为其他传感器和 1[#]传感器的气压降 (取正值)。通过换算, 松桥河桥的拼接缝混凝土传感器在不同荷载作用下、不同龄期 (1 个月和 8 个月)、相同时间段内 ($\Delta t = 300 \text{ s}$)

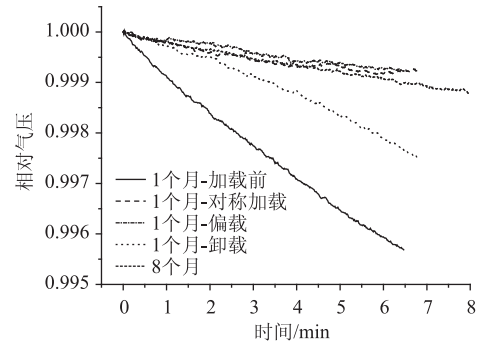
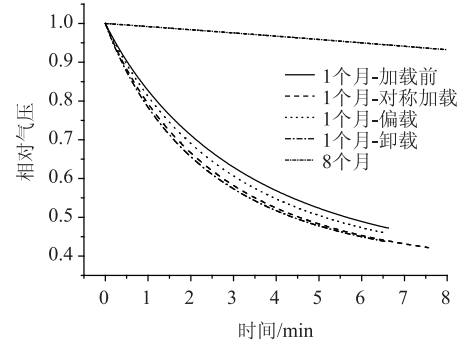
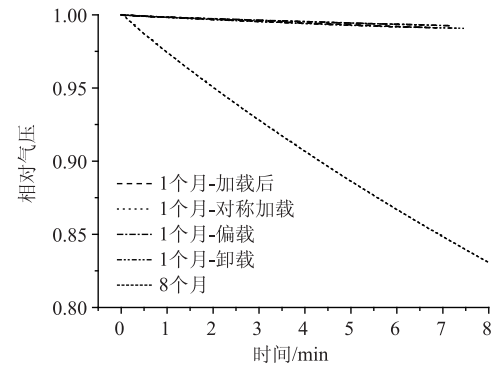
(a) 1[#]传感器相对气压变化曲线(b) 2[#]传感器相对气压变化曲线(c) 3[#]传感器相对气压变化曲线

图9 实桥拼接缝混凝土的相对气压变化曲线

Fig. 9 Relative gas pressure curve of joint concrete of real bridge

的气体渗透系数如表 3 和图 10 所示。为了便于分析, 图 10 中将气体渗透系数取对数 (即 $\lg k$) 作为纵坐标。

由测试结果可知, 3 支传感器的气体渗透系数均处于 $10^{-16} \sim 10^{-19}$ 量级, 渗透性较低, 说明拼接缝混凝土的密实性能整体良好。对比 1 个月龄期时 3 支传感器的气体渗透系数可知, 2[#]传感器数值比 1[#]和 3[#]高 2 个数量级, 差异显著, 说明边跨拼接缝跨中位置施工完毕后即存在初始缺陷的可能性非常大。而 8 个月龄期时, 该传感器周围混凝土的气体渗透系数从 $4.14 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ 减小到 $4.73 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 降低了一个数量级, 气体扩散难度的增加说明混凝土的

表 3 现场拼接缝混凝土气体渗透系数 K 换算结果

Tab. 3 Conversion result of gas permeability coefficient K of in-situ joint concrete

传感器 编号	龄期 1 个月								龄期 8 个月	
	加载前		对称加载		偏载		卸载		$\Delta P/\text{bar}$	k/m^2
	$\Delta P/\text{bar}$	k/m^2	$\Delta P/\text{bar}$	k/m^2	$\Delta P/\text{bar}$	k/m^2	$\Delta P/\text{bar}$	k/m^2		
1 [#]	0.012 9	3.65E-18	0.002 2	6.32E-19	0.002 2	6.38E-19	0.006 7	1.89E-18	0.003 1	8.76E-19
2 [#]	1.458 4	4.14E-16	1.546 7	4.39E-16	1.468 0	4.17E-16	1.530 0	4.34E-16	0.166 7	4.73E-17
3 [#]	0.023 3	6.61E-18	0.018 8	5.33E-18	0.018 5	5.24E-18	0.023 5	6.66E-18	0.327 1	9.28E-17

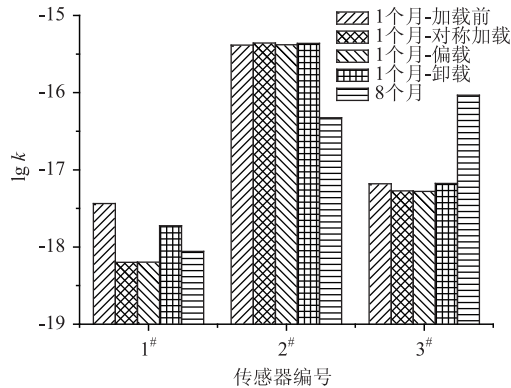


图 10 拼接缝混凝土气体渗透系数

Fig. 10 Gas permeability coefficient of joint concrete

密实性提升，这可能是由于膨胀剂的膨胀效应改善了该处混凝土的初始缺陷。

加卸载状况下，3 支传感器的气体渗透系数出现小幅波动。鉴于空心板梁拼接缝主要以承受剪力为主、扭矩为辅，说明剪力对拼接缝混凝土宏观缺陷或微观裂缝、微观孔隙的闭合效果有限。此外，3 支传感器的气体渗透系数在对称加载和偏载两种加载方式下差异极小，同时证明了拼接缝混凝土的施工质量和工作性能。

对比同一传感器周围混凝土在不同龄期下（1 个月和 8 个月）的气体渗透系数，1[#]和 2[#]均呈现降低趋势，再次说明了膨胀剂对混凝土密实性能的改善作用。而 3[#]传感器的气体渗透系数从 $6.61 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 增大到 $9.28 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ ，升高了一个数量级，结合室内试验和数值模拟的结果，推测该传感器周围混凝土的原始微裂缝有发展为宏观裂缝的可能，且裂缝宽度增大了约 0.01 mm。

3 结论与展望

3.1 结论

本研究结合材料层面和结构层面的室内外气体渗透试验，建立了一套用于桥梁拼接缝混凝土裂缝状态无损跟踪评估的技术。

（1）对带有劈裂贯穿裂缝的混凝土试件开展气体渗透系数与裂缝宽度相关性试验，并采用回归分析法建立了相对气体渗透率 k/k_0 与裂缝宽度相对变化量 a_c 的定量关系，发现当 a_c 增大 $1.125 \times 10^{-2} \text{ mm}$ 时，气体渗透系数较初始状态增大 10 倍左右，为混凝土裂缝状态的现场评估提供了理论依据。

（2）在依托工程拼接缝内部预埋传感器，分别在混凝土不同龄期和不同荷载条件下开展“脉冲试验”现场测试，结合室内试验和回归分析结果，对拼接缝混凝土的施工质量和密实性能进行评估。

① 气体渗透系数基本在 $10^{-16} \sim 10^{-19}$ 的量级，渗透性较低，说明拼接缝混凝土密实性能整体较好。

② 1 个月龄期时，2[#]传感器周围混凝土气体渗透系数显著高于 1[#]和 3[#]，说明此处可能存在初始施工质量缺陷，如宏观裂缝或孔洞。

③ 对比 1 个月和 8 个月不同龄期下的混凝土气体渗透系数，1[#]和 2[#]传感器均呈现显著降低趋势，这可能是由于膨胀剂的膨胀效应改善了该位置混凝土的初始缺陷；而不同的是，3[#]传感器气体渗透系数提高了一个数量级，此处混凝土的原始微裂缝有发展为宏观裂缝的可能，且裂缝宽度增大了约 0.01 mm。

3.2 展望

本研究初步验证了基于气压差值法的气体渗透测试技术对补偿收缩混凝土的裂缝宽度变化评估的可行性。但由于所采集数据量有限，且混凝土性能变化总体较为缓慢，因此还需通过采集和分析更多数据进一步提升该方法的精确度。此外，可开展该项新技术与裂缝图像、超声波和地质雷达等已有检测技术的横向对比研究。

参考文献：

References:

[1] 霍文棠. 公路桥梁拼宽设计 [J]. 公路, 2019 (5): 131-134.
HUO Wen-tang. Spliced widen Design of Highway Bridges [J]. Highway, 2019 (5): 131-134.

- [2] 李黎明. 混凝土桥梁拓宽加固利用研究 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.
LI Li-ming. Research of Broadening and Reinforcing Existing Concrete Bridge [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015.
- [3] 王法雨. 高速公路桥梁加宽拼接技术 [J]. 公路, 2011 (7): 128-131.
WANG Fa-yu. Broadening and Splicing Technology of Expressway Bridges [J]. Highway, 2011 (7): 128-131.
- [4] 钟国东, 许恒. 新基田跨线桥病害原因分析 [J]. 广东公路交通, 2013 (5): 30-32.
ZHONG Guo-dong, XU Heng. Cause Analysis on Diseases of Xinjitian Overpass Bridge [J]. Guangdong Highway Communications, 2013 (5): 30-32.
- [5] MEHTA P K, MONTEIRO P J M. Concrete, Microstructure, Properties and Materials [M]. New York: The McGraw-Hill Companies Inc., 2006: 328-332.
- [6] ZHANG M H, GJORV O. Permeability of High-strength Lightweight Concrete [J]. ACI Materials Journal, 1991, 88 (5): 463-469.
- [7] 张宏建, 孔燕, 赵启林, 等. 混凝土裂缝监测与检测技术发展动态综述 [J]. 现代交通技术, 2019, 16 (4): 42-48.
ZHANG Hong-jian, KONG Yan, ZHAO Qi-lin, et al. Development of Crack Monitoring and Detection Technologies of Concrete Bridges [J]. Modern Transportation Technology, 2019, 16 (4): 42-48.
- [8] 冷发光, 田冠飞. 混凝土抗氯离子渗透性试验方法 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2006, 36 (增2): 32-38.
LENG Fa-guang, TIAN Guan-fei. Development of Crack Monitoring and Detection Technologies of Concrete Bridges [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2006, 36 (S2): 32-38.
- [9] 蒋林华, 李娟. 混凝土抗氯离子渗透性试验方法比较研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32 (1): 55-58.
JIANG Lin-hua, LI Juan. Investigation of Test Methods for Concrete Resistance to Chloride Ion Permeability [J]. Journal of Hohai University: Natural Science Edition, 2004, 32 (1): 55-58.
- [10] DANA E, SKOCZYLAS F. Gas Relative Permeability and Pore Structure of Sandstones [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 1999, 36 (5): 613-625.
- [11] KOLLE J J. The Determination of the Permeability of Concrete to Oxygen by the Cembureau Method: A Recommendation [J]. Materials and Structures, 1989, 22 (3): 225-230.
- [12] 王新明, 杨迪, 韩依璇. 混凝土耐久性无损检 (监) 测技术研究与应用 [J]. 现代交通技术, 2016, 13 (2): 46-49.
WANG Xin-ming, YANG Di, HAN Yi-xuan. Research and Application of Nondestructive Testing Technique for Concrete Durability [J]. Modern Transportation Technology, 2016, 13 (2): 46-49.
- [13] 张国荣, 韩依璇, SKOCZYLAS F, et al. 混凝土气体渗透性测试技术研究 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34 (增1): 116-122.
ZHANG Guo-rong, HAN Yi-xuan, SKOCZYLAS F, et al. Test Technology of Gas Permeability of Concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34 (S1): 116-122.
- [14] 王中平, 吴科如, 张青云, 等. 混凝土气体渗透系数测试方法的研究 [J]. 建筑材料学报, 2001, 4 (4): 317-321.
WANG Zhong-ping, WU Ke-ru, ZHANG Qing-yun, et al. Study of Test Method for Coefficient of Gas Permeability of Concrete [J]. Journal of Building Materials, 2001, 4 (4): 317-321.
- [15] LOOSVELDT H, LAFHAJ Z, SKOCZYLAS F. Experimental Study of Gas and Liquid Permeability of a Mortar [J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32 (9): 1357-1363.
- [16] CHEN W, SKOCZYLAS F, DUBOIS T. Gas Relative Permeability of High-performance Concrete: Effect of Water Saturation under Phase Desorption and Sorption [C] //International RILEM Conference on Advances in Construction Materials through Science and Engineering. Hong Kong: RILEM Publications, 2011: 777-784.
- [17] LIU J, AGOSTINI F, SKOCZYLAS F. From Relative Gas Permeability to in-situ Saturation Measurements [J]. Construction & Building Materials, 2013, 40 (40): 882-890.
- [18] DAVY C A, SKOCZYLAS F, BARNICHON J D, et al. Permeability of Macro-cracked Argillite under Confinement: Gas and Water Testing [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2007, 32 (8/9/10/11/12/13/14): 667-680.