文章编号：1007-2993(2026)04-0559-06

分布式光纤在混凝土筏板基础中的应变监测研究

胡　闵[1]　陈宏波[2]
（1. 昆山旺湖置业有限公司，江苏苏州　215324；2. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院，北京　100083）

【摘要】 为实现对混凝土筏板结构的应变监测，以昆山某住宅项目中的混凝土筏板基础为工程背景，设计并构建了一套基于分布式光纤技术的应变监测系统，开展了室内试验与现场监测研究。室内试验研究表明，5 mm 钢绞线光纤应变传递效率达到了 0.9968，验证了该类型光纤应用于实际工程监测的可靠性。基于室内试验结果，将 5 mm 钢绞线光纤布设在混凝土筏板结构中，精准记录了筏板基础内部的应变演化，监测结果显示：在混凝土浇筑完成后，温度上升阶段应变变化剧烈，最大值达 75 με；降温阶段因温度梯度导致应变进一步增大，峰值约为 125 με；随着温度趋于稳定，应变增长逐渐平缓并在大部分区域开始减小。该应用研究成果为分布式光纤传感技术监测混凝土筏板基础的健康提供了技术支撑。

【关键词】 筏板基础；分布式光纤；应变监测
【中图分类号】 TU476　**【文献标识码】** A　doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0181

Strain monitoring of distributed optical fiber in concrete raft

HU Min[1]　CHEN Hongbo[2]
(1. Kunshan Wanghu Real Estate Co., Ltd., Suzhou 215324, Jiangsu, China; 2. College of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China))

【Abstract】 To realize strain monitoring of concrete raft foundation structures, a strain monitoring system based on distributed optical fiber sensing technology was designed and constructed with the concrete raft foundation of a residential project in Kunshan as the engineering background. Laboratory tests and on site monitoring investigations were carried out. Laboratory test results show that the strain transfer efficiency of 5 mm steel strand cased optical fiber reaches 0.9968, which verifies the reliability of this type of optical fiber in practical engineering. Based on the laboratory test results, 5 mm steel strand cased optical fibers were embedded in the concrete raft foundation, which can accurately record the internal strain evolution law of the raft foundation. After concrete pouring, the strain changes drastically during the temperature rising stage with a maximum value of 75 με. The strain further increases during the cooling stage due to temperature gradient, with a peak value of approximately 125 με. As the temperature tends to stabilize, strain growth gradually slows down and begins to decrease in most regions. The research achievements provide engineering application techniques for monitoring the health condition of concrete raft foundations using distributed optical fiber sensing technology.

【Key words】 raft foundation; distributed optical fiber; strain monitoring

0　引言

混凝土筏板基础是建筑工程中重要的承重结构之一，其健康状态直接关系到整个建筑物的安全性和稳定性[1]。在混凝土筏板基础浇筑的过程中，混凝土水化放热会导致基础内外部产生温度梯度，较大的温度梯度会使混凝土受到拉应力集中，从而产生温度裂缝，影响结构的正常使用。目前常用的裂缝监测方法有人工目视法、超声波法[2−3]、探地雷达法[4−5]、冲击回波法[6−7]、声发射法[8] 和图像检测方法[9−10]，但这些方法都属于点式监测，无法进行分布式测量。通过分布式光纤监测，可以实时跟踪水化热的发展过程及其对应变的影响，为优化施工工艺（如分层浇筑、冷却措施）提供科学依据，降低施工风险[11]。

分布式光纤传感技术作为一种先进的监测手段，相较于传统点式传感器，分布式光纤传感系统展现出显著的技术优势，在混凝土筏板基础的监测中具有重要意义，主要体现在：(1)分布式光纤传感器可以实现对混凝土筏板基础的全生命周期监测，包括施工阶段和运营阶段。通过沿光纤布置的分布式测量点，能够实时获取筏板基础内部的应变、温度等关键参数的

作者简介：胡　闵，男，1980 年生，大学本科，主要从事结构健康监测方面的工作。E-mail: 3578731@qq.com
通信作者：陈宏波，男，2000 年生，硕士研究生，研究方向为混凝土结构健康监测。E-mail: chenhb1229@163.com

变化情况，从而全面掌握其健康状态[12]。(2)高空间分辨率和高测量精度是分布式光纤传感技术的两大优势，可以满足现场监测标准，能够准确捕捉筏板基础内部微小的应变或温度变化。同时，光纤传感器支持长距离监测，适用于大面积、复杂形状的筏板基础，突破了传统点式传感器在覆盖范围上的局限性[13]。(3)光纤材料本身具有耐腐蚀、抗电磁干扰和长期稳定的优点，适合在潮湿、高温或强电磁场等恶劣环境下工作[14]。这使得分布式光纤传感技术特别适用于复杂的地下工程环境，如深基坑、地下水丰富的区域等。

侯公羽等[15−16]利用分布式光纤技术对隧道混凝土衬砌结构开展一系列的研究，通过埋入式的布设方法，将传感光纤与混凝土衬砌耦合在一起，实现变形协调，从而实现对监测混凝土衬砌结构的变形监测。宋占璞等[17]利用分布式光纤监测技术对船闸底板的混凝土结构进行温度监测，得出了混凝土浇筑后内部温度场的演化规律。丁 勇等[18]采用分布式光纤传感技术，对地下连续墙在基坑开挖过程中的受力变形过程进行监测，验证了该方法具有良好的现场适应性。朴春德等[19]尝试将分布式光纤监测技术应用于钻孔灌注桩，得到了桩身轴力分布、侧摩阻力分布及桩端阻力等变化规律。

综合上述研究可以发现，分布式光纤监测技术在混凝土结构监测领域已取得了一定的成果。基于此，本文以昆山某住宅项目中的混凝土筏板基础为工程背景，设计并构建了一套基于分布式光纤技术的混凝土筏板应变监测系统，开展了现场监测研究。通过对监测数据的分析，揭示了混凝土筏板基础在浇筑完成后内部应变的演化规律，为深入理解其力学行为及健康状态提供了重要依据。

1 光纤应变监测精度研究

在利用分布式光纤传感器对混凝土结构进行监测时，通常采用直接埋入法以实现对混凝土结构内部状态的实时感知。然而，光纤传感器中真正起到传感作用的是裸光纤，而裸光纤作为一种脆性材料，极易在实际工程环境中因外部因素而受损，难以满足复杂工况下的使用需求。因此，在实际应用中，通常会在裸光纤外部添加一层保护套管对其进行封装，以提高其机械强度和耐久性。然而，保护套管的存在不可避免地导致了从待测混凝土结构传递至裸光纤的应变出现一定程度的衰减，从而引起测量结果的偏差[20]。为确保监测数据的准确性，有必要对应变传递过程中的损失进行理论分析，并对光纤测得的应变值进行修正。

1.1 监测技术与传感光缆的选择

室内试验采用基于布里渊光时域反射(BOTDR)技术的光纤应变监测系统(见图 1)以及 5 mm 金属基索状应变感测光纤(下文简称 5 mm 钢绞线光纤，见图 2)。

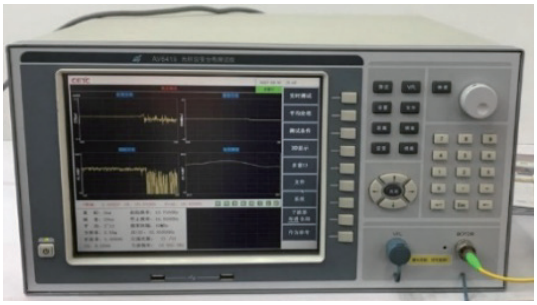


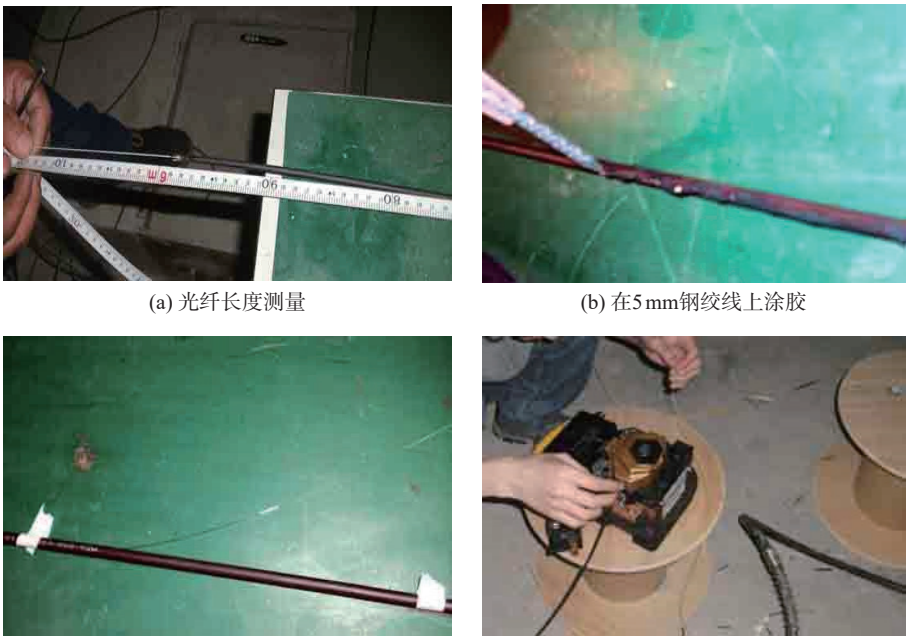
图 1 BOTDR 光纤解调仪
Fig. 1 BOTDR fiber optic demodulator

图 2 5 mm 钢绞线光纤结构示意图
Fig. 2 5 mm steel strand optical fiber structure diagram

1.2 试验过程

通过在 5 mm 钢绞线护套外侧粘贴一条裸光纤，研究在钢绞线被拉伸产生应变时，护套与内部光纤之间的应变传递效率及其差异。在实际开展结构变形监测时，5 mm 钢绞线光纤通常被植入结构内部或粘贴于结构物表面。当结构物发生形变时，其变形会通过护套传递至内部光纤，从而使光纤纤芯产生相应的应变。因此，确保 5 mm 钢绞线光纤护套的应变与纤芯应变之间的一致性，是实现准确应变测试的基本前提条件。试验过程见图 3。

在测试准备阶段，将光缆穿过管构拉伸装置，如图 4 所示。并使用特制夹具将两端露出的 5 mm 钢绞线光纤拉紧，固定于管构装置的两侧面上。同时，将百分表探针紧贴夹片外缘，用于测量光缆在拉伸过程中的变形量。试验开始前，对预拉伸后的 5 mm 钢绞线光纤长度进行多次测量并取其平均值，作为光纤的初始长度基准。拉伸过程中，通过百分表实时监测光纤的变形量，并采用手动液压泵施加拉力。本次应变传递试验钢绞线光纤的拉伸步距为 1 mm，每次拉伸后，静置 10 min，用百分表测量光纤拉伸量，多次测量，待拉伸量稳定后使用毫米刻度尺进行手工测量以确认拉伸量的准确性，随后固定手动液压泵的阀门以保持拉伸状态，利用专用仪器对光纤应变进行测量。由于测试中两段光纤已被串联为一条连续光纤，因此一次测试即可同时获取两者在拉伸条件下的应变变



(a) 光纤长度测量　(b) 在5 mm钢绞线上涂胶

(c) 把裸纤粘贴到5 mm钢绞线上　(d) 跳线熔接

图 3　试验过程图

Fig. 3　Test process diagram

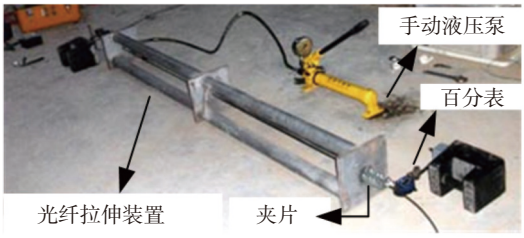


图 4　拉伸装置

Fig. 4　Stretching device

化数据, 从而实现对比分析。

1.3　试验结果分析

测试数据结果如图 5 所示, 从图中可以观察到, 裸光纤的应变段长度略短于钢绞线光纤, 但两者在应变变化上表现出高度的一致性。由于钢绞线光纤在粘贴裸光纤之前需要进行预拉伸处理, 这导致钢绞线光纤的初始应变值比裸光纤高出约 1500 με。根据原始应变数据可以看出, 在粘贴及拉伸范围内, 两种光纤的应变均随着拉伸量的增加而持续增大, 并且应变的变化基本呈现线性增长趋势。这一结果表明, 光纤应变与拉伸变形之间存在良好的正比例关系。

通过对 5 mm 钢绞线光纤的应变数据减去因初始预拉伸产生的应变, 并将其与裸光纤的应变进行对比可以发现, 在相同的拉伸步距下, 两者应变值相差甚微。经计算, 其应变比的平均值为 0.9968, 这表明钢绞线光纤具有极高的应变传递效率, 光纤护套引起的护套效应影响非常有限。总体来看, 两种光纤的应变基本一致。进一步分析可知, 当钢绞线光纤与被测结构体耦合时, 其应变能够精确反映结构体的实际变形量。因此, 5 mm 钢绞线光纤的应变传递效率完全满足工程测试的要求, 可为结构健康监测提供可靠的数据支持。

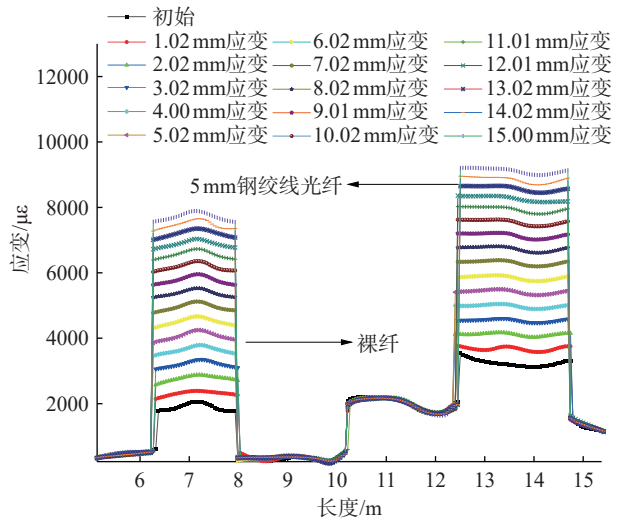


图 5　裸纤与 5 mm 钢绞线光纤的应变曲线图

Fig. 5　Strain curves of bare fiber and 5 mm steel strand fiber

2　现场监测研究

现场监测依托工程为昆山锦溪镇锦东路南侧、邵甸港路东侧地块住宅项目, 监测对象为该住宅项目中的 16#混凝土筏板基础。

2.1　光纤布设

光纤按照两层进行布设, 分别位于距筏板顶部

和距筏板底部 0.05 m 位置处。这样的布设方式能够有效监测混凝土筏板基础顶面和底面的应变分布情况，结合两个面的监测数据，可以全面获取整个筏板基础的应变分布特征，具体光纤线路布置如图 6 所示。

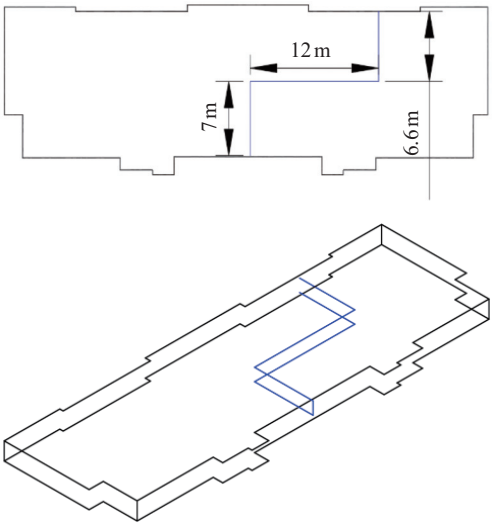


图 6 光纤布设示意图

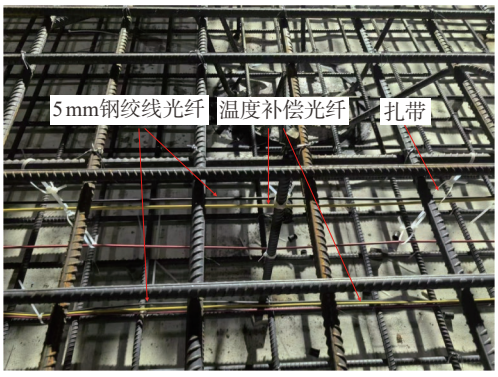
Fig. 6 Optical fiber layout schematic diagram

在现场实施过程中，采用高强度扎带将光纤按照上述布设方案固定在钢筋笼的竖向筋和横向筋上，扎带的间隔控制在 50 ~ 60 cm，以确保光纤的稳固性。为消除混凝土浇筑过程中水化热产生的温度变化对光纤应变测量结果的影响，在布设 5 mm 钢绞线光纤的同时，于其相邻位置布设温度补偿光纤。通过温度补偿光纤的测量数据，可有效扣除温度因素对钢绞线光纤应变监测结果的干扰，从而提高应变测量的准确性与可靠性。监测站设置于地面，在分布式光纤完成在钢筋笼中的安装后，需将光纤紧贴基坑壁引出至监测室。具体操作为：先将多余的光纤盘成一圈，并用扎带绑扎固定；然后从地面上放下麻绳，将麻绳绑扎在光纤上，利用麻绳将光纤沿着基坑壁平稳引出至监测室。在整个走线过程中，需使用扎带对光纤进行沿途固定，以防止其松脱或损坏。现场实施过程见图 7。

2.2 数据分析

将测得的应变数据和温度补偿数据进行处理，剔除温度影响后，得到真实的应变情况。整体监测结果如图 8 所示。

在 2024 年 12 月 27 日混凝土浇筑完成后，应变变化表现出剧烈波动，最大值达到 75 με，出现在 4 m 处。这一现象的主要原因是，在施工进度和结构设计的要求下，混凝土浇筑通常需要连续进行，这导



(a) 光纤现场布设图

(b) 现场监测数据

图 7 现场监测系统的建立

Fig. 7 Establishment of on-site monitoring system

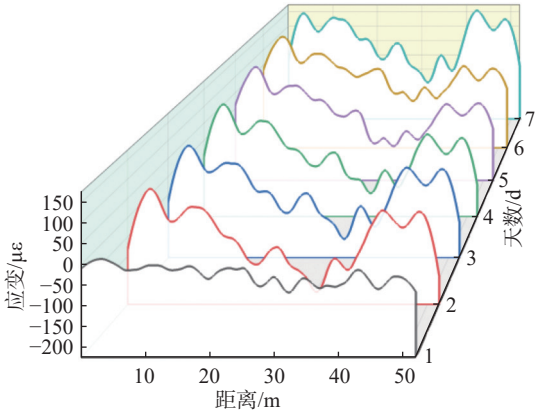


图 8 混凝土筏板基础整体应变变化

Fig. 8 The overall strain change of concrete raft foundation

致其在硬化过程中产生大量水化热。同时，较高的环境温度会进一步促进水化热的生成，即温度越高，水化速率越快。因此，在浇筑初期，大部分水化热集中释放，造成混凝土内外部温差显著增大，从而引发较大的应变变化(见图 9)。

当混凝土温度达到峰值后开始下降。混凝土是由粗骨料和细骨料组成的复合材料，在搅拌过程中内部会产生大量的孔隙，使得混凝土的导热性较差，水泥水化热产生的热量难以从内部有效排出，内部温度会维持在较高水平。而混凝土外表面直接与空气接

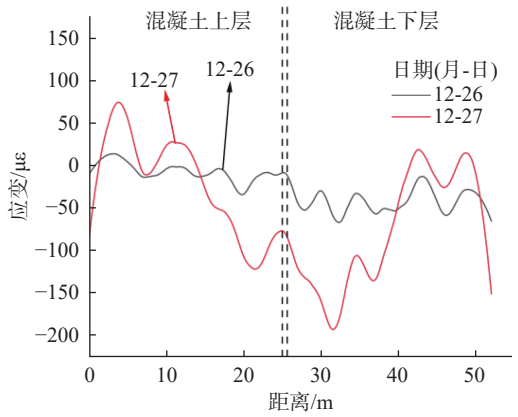


图 9　混凝土筏板基础温度上升期间应变
Fig. 9　Strain of concrete raft foundation during temperature rise

触发生对流散热，靠近表面的混凝土降温速度较快，从而在混凝土内部与外部之间形成了显著的温度梯度。12 月 28 日至 12 月 30 日为混凝土筏板基础的降温阶段，温度梯度在此阶段尤为明显，导致混凝土内部应变呈现增大的趋势，最大值约为 125 με(见图 10)。

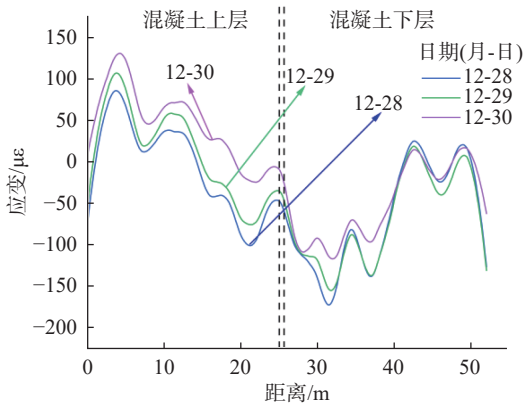


图 10　混凝土筏板基础温度下降期间应变
Fig. 10　Strain of concrete raft foundation during temperature drop

在 12 月 31 日至 1 月 1 日，随着混凝土降温过程逐渐完成，应变增长的趋势趋于平缓，并在大部分区域开始出现逐渐减小的现象。值得注意的是，在 30 m 处观察到明显的应变突变现象。结合现场实际情况分析，此处位于混凝土筏板基础底部光纤线路的第一个转弯处附近，随着水化放热的进程，光纤弯折的程度会随之加大，导致该点光纤自身应变突然变化，被 BOTDR 识别为混凝土应变突变(见图 11)。

3　结论

(1)5 mm 钢绞线光纤的应变测试精度试验结果表明，5 mm 钢绞线光纤与裸光纤的应变值差异极小，其应变比高达 0.9968。这一结果充分说明，钢绞线光纤具备优异的应变传递效率，而光纤护套所带来的护套效应影响微乎其微。

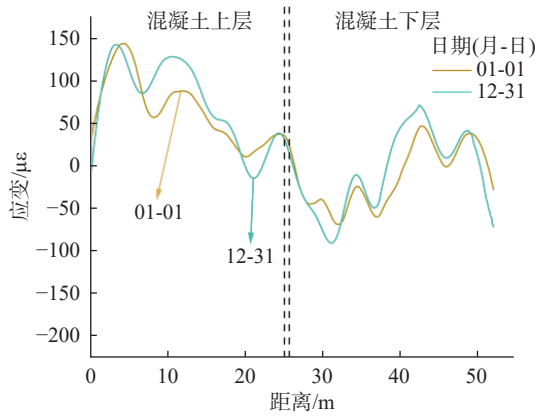


图 11　混凝土筏板基础温度稳定后应变
Fig. 11　Strain of concrete raft foundation after temperature stabilization

(2)监测结果显示，在混凝土浇筑完成后，温度上升阶段应变变化较为剧烈，最大值达到 75 με；在降温阶段，应变再次呈现增长趋势，峰值应变约为 125 με。但随着降温过程的完成，应变变化趋于稳定，增长趋势逐渐平缓，且在大部分区域开始出现应变逐渐减小的现象。

(3)现场应用研究证明，采用分布式光纤传感技术能够对混凝土筏板基础浇筑后的应变演化过程进行监测；监测数据清晰地反映了混凝土浇筑后应变的变化规律，充分说明分布式光纤传感技术在混凝土结构应变监测中具有显著的实际应用价值和广阔的应用前景。

参　考　文　献

[1] 侯公羽, 张世欧, 崔　迪, 等. 分布式光纤传感器在大体积混凝土筏板基础中的耦合性能研究 [J]. 岩土力学, 2025, 46(4): 1310-1322. (HOU G Y, ZHANG S O, CUI D, et al. Research on coupling performance of distributed fiber optic sensor in massive concrete raft foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2025, 46(4): 1310-1322. (in Chinese))

[2] 张明华, 凯　乐, 赵海红, 等. 超声波检测混凝土构件缺陷的研究进展 [J]. 江西建材, 2021(10): 12-15. (ZHANG M H, KAI L, ZHAO H H, et al. Research progress of ultrasonic detection of concrete defect[J]. Jiangxi Building Materials, 2021(10): 12-15. (in Chinese))

[3] 董保利, 俞小虎, 任丹伟, 等. 超声法检测建筑工程中钢管混凝土缺陷的试验研究 [J]. 工程技术研究, 2019, 4(22): 4-5. (DONG B L, YU X H, REN D W, et al. Experimental study on ultrasonic detection of concrete filled steel tube defects in construction engineering[J].

Engineering and Technological Research, 2019, 4(22): 4-5. (in Chinese))

[4] HUGENSCHMIDT J, MASTRANGELO R. GPR inspection of concrete bridges[J]. Cement and Concrete Composites, 2006, 28(4): 384-392.

[5] RHIM H C. Condition monitoring of deteriorating concrete dams using radar[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(3): 363-373.

[6] ÇAM E, ORHAN S, LÜY M. An analysis of cracked beam structure using impact echo method[J]. NDT & E International, 2005, 38(5): 368-373.

[7] 耿豪劼, 刘荣桂, 蔡东升, 等. 冲击回波法检测混凝土构件内部缺陷大小研究 [J]. 混凝土, 2021(11): 150-154,160. (GENG H J, LIU R G, CAI D S, et al. Study on quantitative detection of defects of concrete members by impact-echo method[J]. Concrete, 2021(11): 150-154,160. (in Chinese))

[8] 门进杰, 郭琳颖, 兰 涛, 等. 钢筋混凝土板裂缝对声发射波传播特征影响 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(8): 88-95. (MEN J J, GUO L Y, LAN T, et al. Influence of cracks in RC slabs on propagation properties of acoustic emission[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(8): 88-95. (in Chinese))

[9] 耿 飞, 钱春香. 图像分析技术在混凝土塑性收缩裂缝定量测试与评价中的应用研究 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2003, 33(6): 773-776. (GENG F, QIAN C X. Image analysis technique for quantitative testing and evaluation of plastic shrinkage cracks in concrete[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(6): 773-776. (in Chinese))

[10] 王 静, 李鸿琦, 刑冬梅, 等. 数字图像相关方法在桥梁裂缝变形监测中的应用 [J]. 力学季刊, 2003, 24(4): 512-516. (WANG J, LI H Q, XING D M, et al. Application of digital image correlation method in bridge cracks measurement[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2003, 24(4): 512-516. (in Chinese))

[11] 汪 辛, 丁志凯, 刘胜春. 基于 BOTDA 的混凝土结构裂缝识别试验研究及工程应用 [J]. 公路交通科技, 2023, 40(9): 151-157. (WANG X, DING Z K, LIU S C. Experimental study and engineering application on identifying cracks in concrete structure based on BOTDA[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2023, 40(9): 151-157. (in Chinese))

[12] 侯公羽, 谢冰冰, 胡 涛, 等. 使用 BOTDR 技术进行隧道监测的光纤护套效应 [J]. 岩土力学, 2017, 38(8): 2441-2447. (HOU G Y, XIE B B, HU T, et al. Fiber sheath effect in tunneling monitoring based on BOTDR technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(8): 2441-2447. (in Chinese))

[13] 饶云江. 长距离分布式光纤传感技术研究进展 [J]. 物理学报, 2017, 66(7): 074207. (RAO Y J. Recent progress in ultra-long distributed fiber-optic sensing[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 074207. (in Chinese))

[14] 刘元雪, 郑颖人. 光纤检测技术及其应用于岩土工程的关键问题研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 585-587. (LIU Y X, ZHENG Y R. Fiber optics detection technology and the key problems of its application in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 585-587. (in Chinese))

[15] 侯公羽, 李子祥, 胡 涛, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的隧道沉降监测研究 [J]. 岩土力学, 2020, 41(9): 3148-3158. (HOU G Y, LI Z X, HU T, et al. Study of tunnel settlement monitoring based on distributed optic fiber strain sensing technology[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(9): 3148-3158. (in Chinese))

[16] 侯公羽, 谢冰冰, 韩育琛, 等. 分布埋入式光纤与隧道衬砌耦合性能试验及应用 [J]. 岩土力学, 2020, 41(2): 714-726. (HOU G Y, XIE B B, HAN Y C, et al. Experimental study and engineering application of coupling performance between distributed embedded optical fiber and tunnel lining[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 714-726. (in Chinese))

[17] 宋占璞, 张 丹, 方海东, 等. 大体积混凝土水化热温度变化光纤监测技术研究 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(2): 244-249. (SONG Z P, ZHANG D, FANG H D, et al. Fiber optic monitoring of temperature during hydration heat release process of large slab concreting for ship lock[J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(2): 244-249. (in Chinese))

[18] 丁 勇, 王 平, 李鹏飞, 等. 基于 BOTDA 的地下连续墙分布式变形监测技术研究 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(S2): 500-503. (DING Y, WANG P, LI P F, et al. Monitoring technology of deformation of continuous concrete wall based on BOTDA[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 500-503. (in Chinese))

[19] 朴春德, 施 斌, 魏广庆, 等. 分布式光纤传感技术在钻孔灌注桩检测中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2008, 30(7): 976-981. (PIAO C D, SHI B, WEI G Q, et al. Application of distributed fiber optic sensing techniques in bored pile detection[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(7): 976-981. (in Chinese))

[20] 王花平. 分布式光纤传感器与被测结构的界面效应影响分析 [J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0206004. (WANG H P. Influence of interfacial effect between distributed optical fiber sensors and monitored structures[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0206004. (in Chinese))

收稿日期: 2025-04-17