

混凝土结构裂缝发展及检测研究进展

张德洋, 李政依, 贾 明, 杜海龙

云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

收稿日期: 2025年4月28日; 录用日期: 2025年5月20日; 发布日期: 2025年5月31日

摘 要

混凝土结构带裂缝工作的情况极为常见,通过研究裂缝的发展过程以及裂缝健康检测是极为重要的内容,反映了结构受力及损伤状态。传统的检测方法时空上覆盖有限,受环境、高空等因素影响较大,检测效率低,且容易出现误检现象。基于计算机、识别算法、MATLAB等先进科技,能够有效地输出裂缝图片,通过MATLAB找出有利裂缝工作的粘结材料及配筋率,通过识别算法的不断迭代进行高效且精准地修复。与此同时,总结出了当前研究内容的不足,智能设备上的安全性能存在不稳定因素,并提出了相应的解决措施。从学习计算机算法、智能化以及计算机探测方向进行了展望。

关键词

裂缝分析, 裂缝长度, 裂缝检测, 发展趋势

Research Progress on Crack Development and Detection of Concrete Structures

Deyang Zhang, Zhengyi Li, Ming Jia, Hailong Du

School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: Apr. 28th, 2025; accepted: May 20th, 2025; published: May 31st, 2025

Abstract

It is very common for concrete structures to work with cracks. It is very important to study the development process of cracks and crack health detection, which reflects the stress and damage state of the structure. The traditional detection method has limited coverage in time and space, and is greatly affected by factors such as the environment and high altitude. The detection efficiency is low, and it is prone to false detection. Based on computer, recognition algorithms, MATLAB and other advanced technologies, it can effectively output crack images, find out the bonding material and reinforcement ratio favorable for crack work through MATLAB, and carry out efficient and accurate repair through continuous iteration of the recognition algorithm. At the same time, the shortcomings of the current

research content are summarized. There are unstable factors in the security performance of intelligent devices, and corresponding solutions are proposed. The direction of learning computer algorithms, intelligence and computer detection is prospected.

Keywords

Crack Analysis, Crack Length, Crack Detection, Development Trend

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

1.1. 研究背景

混凝土中产生裂缝是非常常见的问题，甚至在钢筋混凝土块中允许混凝土带裂缝工作。在水利方面中裂缝的出现使得挡水建筑物直接面临严重的渗流问题，例如美国 Stockton 和 Wiser 大坝，20 世纪 90 年代山东峡山水库[1]均因干旱导致土体开裂而出现不同程度的险情。道桥工程中裂缝的出现主要由荷载、水分收缩、地基下沉等因素产生建筑物的危险系数，如图 1 所示[2]-[5]。



Figure 1. Crack picture
图 1. 裂缝图片

1.2. 研究目的及意义

裂缝作为混凝土建筑物中最普遍、最常见的现象,严重的裂缝不仅会降低建筑物的整体性和稳定性,甚至会导致建筑物的整体坍塌,因此这个危害是十分重大的。因此专家在研究裂缝发展的过程同时,强调了混凝土裂缝的产生形式和裂缝的修复以及提出防裂技术。桥梁方面研究中赵卫平[6]提出在适筋范围内,配筋率越小模型梁延性越好;PVA 纤维体积掺和量为 2.0%时,裂缝整体分布更均匀。由此可以得出,我们可以通过研究混凝土裂缝的成因及发展过程,可以有效地应对和总结出预防严重裂缝的方法。

1.3. 研究方法

在研究混凝土结构裂缝发展方面,研究者们通过进行在混凝土中增加钢筋检测其配筋率、唐文涵等[7]研究 ECC 叠合层对梁抗弯性能的影响,实测数据表明叠合梁基本符合平截面假定,混凝土与 ECC 粘结作用良好,从而得出了在裂缝发展过程中可以通过降低配筋率、使用混凝土与 ECC 粘结的材料能有效地控制裂缝的进一步发展。

在探讨研究混凝土结构裂缝检测方面,采用基于计算机视觉的检测方法,优于传统的检测方法。能有效地解决传统检测方法的覆盖范围有限,受环境、高空等因素影响较大,检测效率及精度相对较低的问题。还有基于 ROS 架构和边缘计算设备,设计了便携式混凝土桥梁裂缝实时检测系统,通过 YOLOv3 算法实现了混凝土桥梁裂缝自动检测识别。如今科学研究出 YOLOX 算法,优化了 YOLOv3 算法,能将迭代次数进行一次扩大到 1000 次,算法更加精确。

2. 混凝土裂缝的分类

2.1. 裂缝成因分类

2.1.1. 干缩裂缝

干缩裂缝又称收缩裂缝,收缩裂缝对混凝土结构的长期耐久性构成了重大挑战[8]。干缩裂缝是比较常见的裂缝类型,近年来我国极端旱涝事件呈加剧态势[9] [10],长时间的干旱导致土体失水收缩产生裂缝,尤其在全球变暖、城市热岛效应和旱涝灾害日渐频繁发生的背景下,土体开裂现象更为普遍[11]。土体的干缩裂缝也可称之为不均匀收缩裂缝,当土体内部的收缩应力大于土体的抗拉强度时会产生裂缝[12]-[18]。因此为进一步了解干缩裂缝的原因,有学者发现初始含水率越大,径向收缩对最终体积收缩的贡献越大[19]。

2.1.2. 温度裂缝

大体积混凝土中的水泥加水拌和过程中,水泥被混凝土中的集料所包裹导致热量存于内部,散热较慢,产生的热量不容易散发,使大体积混凝土内外形成较大的产生温差,从而导致混凝土内部受热膨胀,外部受冷而紧缩,而产生温度的梯度差而引起相当大的张拉应力。当混凝土张拉应力随内外温度梯度持续增大而增大同时大于混凝土极限抗拉强度时,由此诱发的裂纹即为温度裂纹。外部受冷而紧缩,而产生温度的梯度差而引起相当大的张拉应力。当混凝土张拉应力随内外温度梯度持续增大而增大同时大于混凝土极限抗拉强度时,由此诱发的裂纹即为温度裂纹[20]。如图 2 所示。

2.1.3. 荷载裂缝

荷载裂缝产生的主要原因是混凝土结构设计缺乏合理性荷载裂缝产生的主要原因是混凝土结构设计缺乏合理性,其一,结构设计的受力分析与工程实际的受力分析存在较大偏差。其二,结构模型的计算缺乏合理性,部分计算数据缺失,施工模型的构建缺乏科学性。在隧道工程中有学者研究回填荷载一般沿纵向分布,当隧底基础差异较大或者回填纵向分布不均匀时会出现横向裂缝[21]。

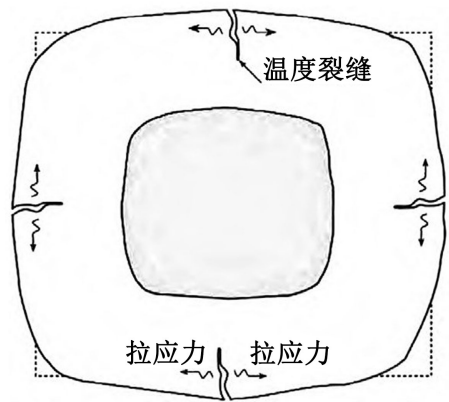


Figure 2. Temperature crack development diagram [20]
图 2. 温度裂缝发展图[20]

2.1.4. 沉降裂缝

沉降裂缝主要因为存在地基土质不均匀的情况，例如冬季，模板的地基为冻土，如若气温升高，冻土出现解冻现象，此时土层会出现不均匀沉降，进而产生失稳现象最后导致混凝土结构出现裂缝[22]。在研究垂直沉降作用下的混凝土开裂发展文献中，作者采用声发射技术(AE) [23]，对砌体加载过程中进行实时监测，最终得出，在两侧沉降小中间沉降大时，墙体两侧出现两条主要裂缝，由下向上倾斜。

2.2. 裂缝特征分类

表面裂缝

主要成因有上文所提到的干缩影响、温度影响、荷载影响及沉降影响等，表面裂缝的宽度通常较小，深度较浅。孙林远等[24]利用 R 波与表面裂缝相互作用，检测混凝土表面裂缝的深度。如图 3 所示。

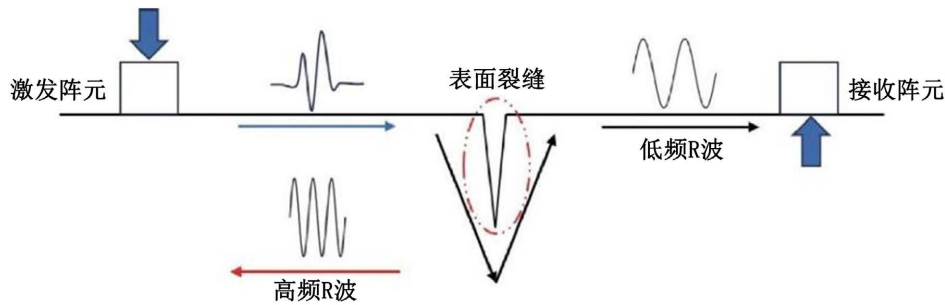


Figure 3. Interaction between R wave and surface crack [24]
图 3. R 波与表面裂缝相互作用[24]

R 波的穿透深度约为一个波长，主要能量集中在前 1/3 波长，该截止频率对应 R 波波长的 1/3 即为裂缝深度。研究表明，裂缝深度 d ，截止频率 f_{cut} ，R 波波速 V_R 之间的理论关系可以定义为：

$$d = V_R / (3f_{cut})$$

3. 混凝土裂缝检测及监测技术

3.1. 混凝土裂缝检测

近年来，混凝土结构裂缝的智能检测与算法分析领域吸引了国内外众多学者的广泛关注与研究。在

这一背景下,小波变换(WT)与小波包变换(WPT)作为强大的信号处理技术,被广泛应用于多个领域。Vy等[25]巧妙地运用连续小波变换技术,将裂缝特征转化为时频域图像,进而借助卷积神经网络实现损伤的精确定位。Chen等[26]则引入小波包率指数(WPERI)作为桥梁裂缝检测的关键指标,进一步拓展了小波变换的应用范围。蒋宇静等[27]则另辟蹊径,采用激光多普勒测振系统测量结构基频的变化,通过量化分析基频的变动来评估混凝土结构的强度等级与损伤程度。尽管小波包变换在信号表示上更为丰富,但其计算复杂度也相应提升,对计算资源和建模时间提出了更高要求。针对水体浑浊及遮挡条件下的混凝土裂缝监测,预埋式裂缝监测仪成为常用手段。传统方法如电阻式传感器以及新型的光纤光栅、压电陶瓷等传感器均有所应用。陈江等[28]通过预埋光纤光栅温度传感器与加热管,结合温度时程曲线的形态变化,实现了对裂缝产生的有效判断。Sun等[29]则基于压电波传播原理,利用智能压电模块(SPM)测量波信号能量值,将其作为评价裂纹损伤的有效特征参数。

3.2. 混凝土裂缝监测技术

3.2.1. 图像采集

然而,这些方法仍存在检测范围受限、需提前预埋等局限性。随着计算机视觉技术的飞速发展,图像处理和计算机视觉技术为混凝土结构裂缝的快速、准确检测提供了新的解决方案。这些技术能够自动量化裂缝特征,并通过量化数据对结构状态进行预测,为结构的维护与修复提供了可靠依据。这一领域的研究不仅推动了混凝土结构裂缝检测技术的革新,也为结构健康监测与安全管理提供了有力支持[30]。上述所存在的人为检测范围受限,于是有学者将采取无人机平台、智能机器人,通过人工使用无人机及机器人进行图片收集,在完成飞行后将采集到的图片输入DNN进行检测[31][32]。通过收集到前两者上传的平面图片后,不少学者尝试用三维重建技术构建全面的成像模型和三维场景。Liu等[33]利用无人机获取桥墩现场检测的图像数据,进行基于DIP和桥墩三维场景重建的裂缝检测。为了保证识别精度,采集的图像主要聚焦于结构局部。秦海伟等[34]利用超声测距模块赋予每张图像位置信息,基于这些信息,系统能够智能地裁剪掉图像中重叠的部分,并最终借助SIFT算法拼接生成桥梁全景图像,如图4所示。

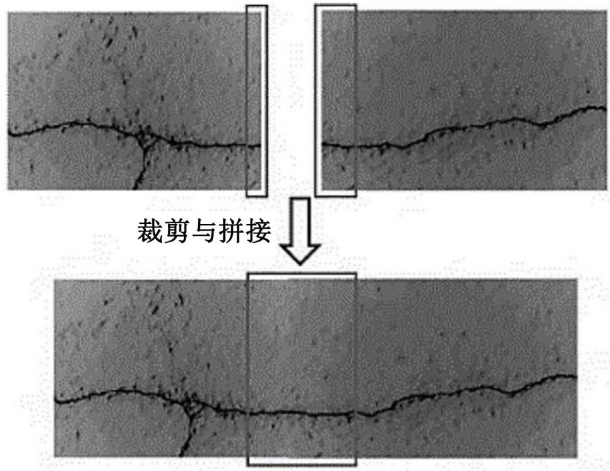


Figure 4. Image cutting and stitching [34]

图4. 图像裁剪与拼接[34]

3.2.2. 识别算法

传统识别算法结构简单,运行迅速,但因为精度较低,很容易将非裂缝误检为裂缝。近几年的研究中,学者总结出图形分类算法、目标检测算法、语义分割算法、像素标定算法。其一图形分类算法中,周

颖和刘彤[35]通过阈值分割、形态学处理以及孤立点消除来降低图像中的噪音，提高裂缝的识别率。其二 YOLO 系列算法作为目标检测领域中的佼佼者，众多学者在其基础上进行了诸多改进，使其更好的适应裂缝检测任务，黄贲等[36]针对混凝土大坝裂缝，在 YOLOX 网络的基础上添加了 CBAM 模块，实现通道注意力和空间注意力，与单独添加一种注意力机制和不添加进行了消融实验，结果表明 CBAM 能在保持较快速度的前提下有效提高网络的精度[37]。其三相较于目标检测算法，语义分割算法则更进一步，它能自动学习和提取图像中的特征，并对像素进行精确分类，通过对每个像素的检测与判断，能描绘出裂缝的走势和宽度等几何特征，进而实现裂缝精确识别。Li 等[38]提出了一种基于编码器 - 解码器的桥梁裂缝检测神经网络，其中编码器基于 resnet-101 和扩张卷积构建，解码器则直接采用 DeepLabv3+ 的解码器。其四孙晓贺等[39]基于种子填充的处理方法，用已知大小的 A4 纸进行标定，通过 freeman 编码来得到裂缝骨架长度，然后用裂缝面积除以骨架长度即可得到裂缝的平均宽度，不过对于网状裂缝则需对其进行打断使其变为多条单一裂缝后再进行计算。如图 5 所示。

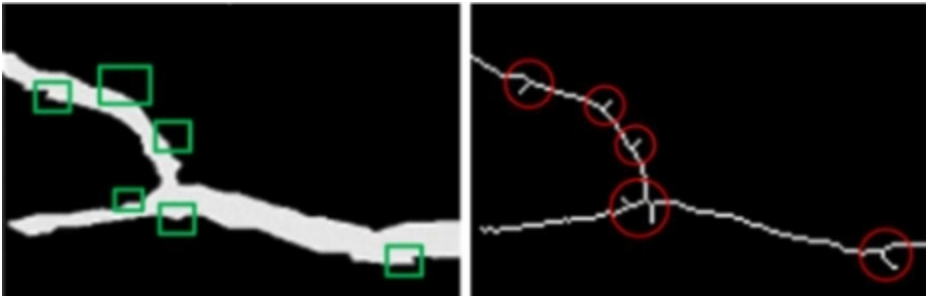


Figure 5. Burr generated by skeleton extraction [40]
图 5. 骨架提取产生的毛刺[40]

除了裂缝最大宽度信息，裂缝长度也是裂缝检测的重点。Bae 等[41]通过语义分割、膨胀算法和骨架化得到裂缝骨架，进而基于骨架图计算目标裂缝的长度和宽度，如图 6(a)所示。相比之下，Xu 等[42]并未直接将中心点 P 的连线作为裂缝长度，而是采用最小二乘法拟合一条对微元内所有像素点距离最短的直线，如图 6(b)所示。

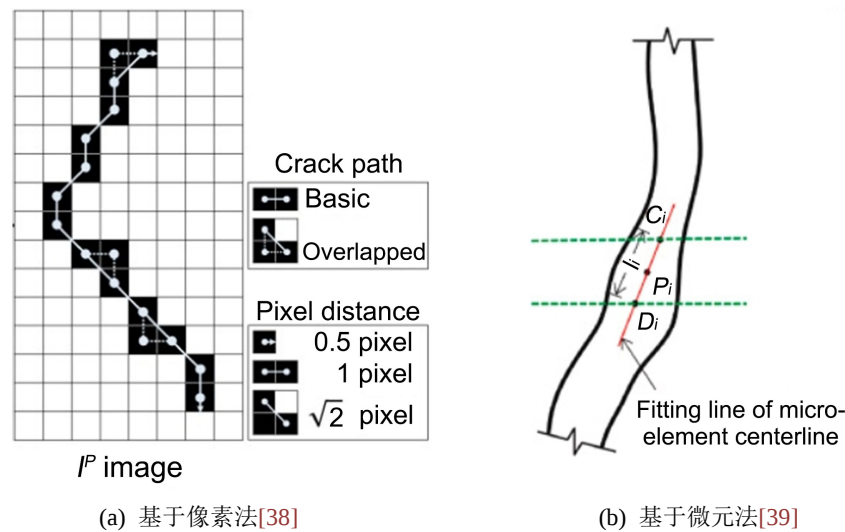


Figure 6. Two crack width measurement methods
图 6. 两种裂缝宽度测量方法

3.2.3. ROS 架构

机器人操作系统(robot operating system, ROS)是用于编写机器人软件程序的开源操作系统软件架构, 具有高度的灵活性。基于 ROS 架构设计裂缝实时检测系统时, 可以将复杂的系统功能拆解为相对简单的子功能分别进行设计。图 7 为基于 ROS 架构的裂缝实时检测系统示意图。该系统由 USB 摄像头、边缘计算设备、电源、4G 模块和移动工作站组成。系统运作时, 由 USB 摄像头获取结构的图像信息; 在边缘计算设备中运行 YOLOv3 算法, 实现裂缝检测; 4G 模块用于边缘计算设备和移动工作站之间的通讯, 使移动端可以实时观察裂缝的识别结果。

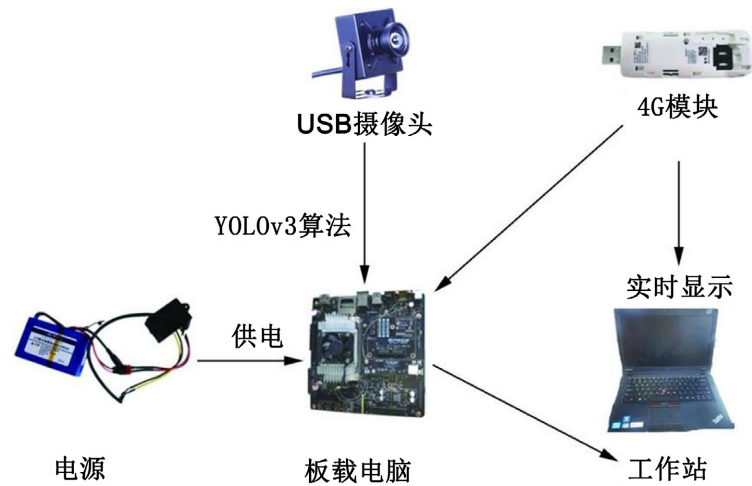


Figure 7. ROS equipment [41]
图 7. ROS 设备[41]

3.2.4. YOLOX 算法

针对混凝土构件裂缝检测面临的实际问题, 本文中提出一种兼具识别快、运行效率高、准确率较高等特性[43]的基于深度学习 YOLOX 算法的混凝土构件裂缝智能化检测方法。图 8 所示为 YOLOX 算法与其他最先进的物体探测算法的速度与精度均值对比[43]。由图可知, 相对于作为工业应用最广泛的探测器之一的 YOLOv3 算法, YOLOX 算法在 COCO 数据集上的精度均值(average precision)更高, 在图像处理器(GPU) Tesla V100 上以每秒 68.9 帧的速率实现精度均值 50%, 识别效果优于同期发布的 YOLOv5 算法[43]。

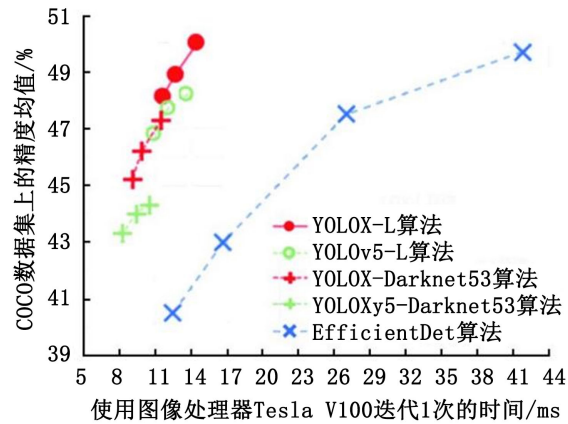
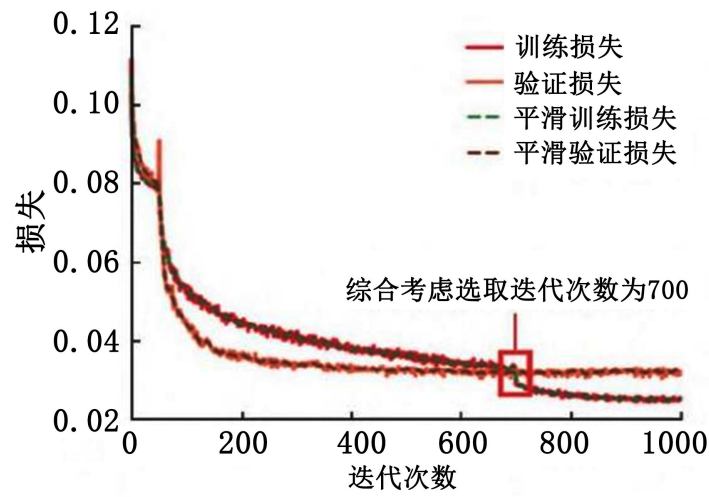
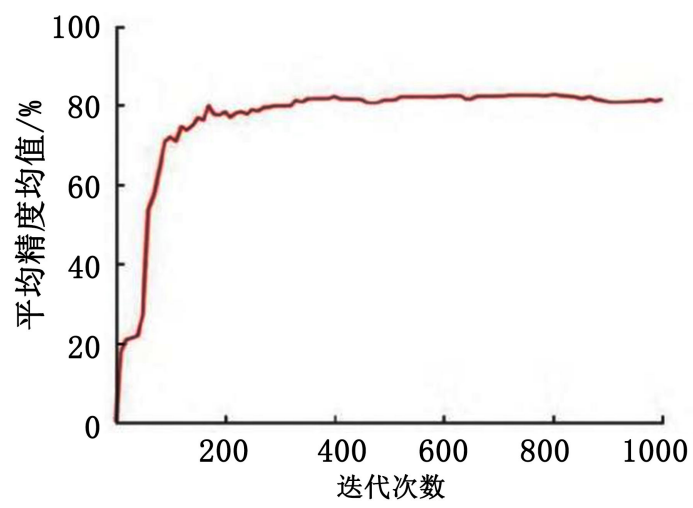


Figure 8. YOLOX algorithm [43]
图 8. YOLOX 算法[43]

YOLOX 算法共进行 1000 次训练，算法训练的迭代次数与损失、平均精度均值的关系如图 9 所示。



训练损失、验证损失-YOLOX算法在
训练用数据集、验证用数据集中的损失。
(a) 损失



(b) 平均精度均值

Figure 9. The relationship between the number of iterations trained by YOLOX algorithm and the mean of loss and average accuracy [43]
图 9. YOLOX 算法训练的迭代次数与损失、平均精度均值的关系[43]

为了进一步验证算法精度，选取其他混凝土构件图像，裂缝识别效果测试结果见图 9。由图 10(a)、图 10(b)可知，训练完成后的 YOLOX 算法能够较好地地区分裂缝和人工笔迹等其他干扰项，识别出测试图中存在的裂缝；由图 10(c)可知，在表面粗糙的构件基础上，复杂背景中的细小裂缝仍能被正确识别；由图 10(d)可知，未存有裂缝的图像不进行标注。综上所述，训练后的 YOLOX 算法整体标注效果与传统人工标注水平相近[43]。

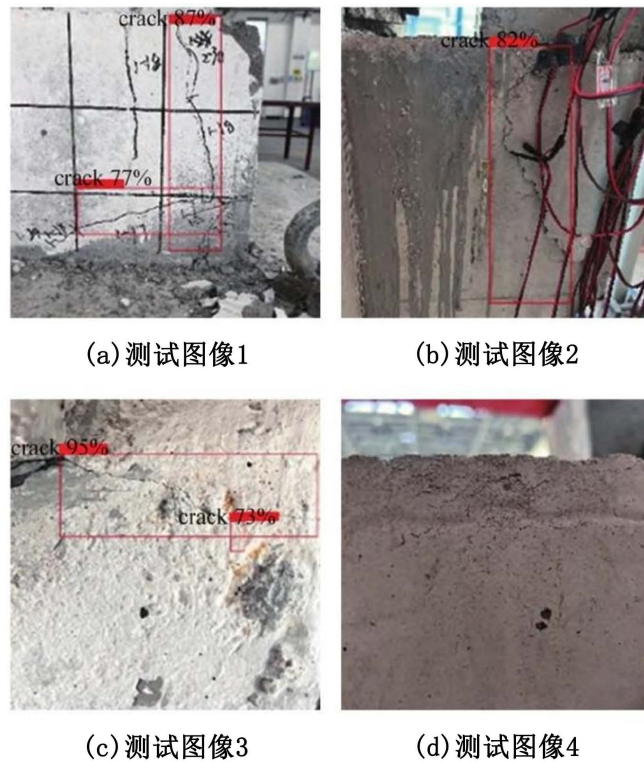


Figure 10. Crack recognition effect test results [43]

图 10. 裂缝识别效果测试结果[43]

4. 结论与展望

本文从裂缝的成因、裂缝的特征、图像采集、识别算法、YOLOv3 更新到 YOLOX 这六个小板块对混凝土结构裂缝的发展及检测进行了综述。随着信息技术的不断发展、AI 技术的不断推广，裂缝的发展机理和检测方法越来越多样化。与传统的检测方法相比对研究裂缝发展和检测具有以下优势：

(1) 无人机、机器人等智能检测平台具有较高便捷性与安全性，能够在短时间内覆盖大面积的混凝土结构，提高了检测效率。同时无人机可以在高空进行检测，避免了人员在高处作业的危险。

(2) 使用训练后的 YOLOX 算法能够精确解决人工检测时易因记录者主观原因错检、误检和漏检等技术难题，在试验和工程中兼具广泛应用前景和实际工程价值。

(3) 结合 MATLAB 图像灰度处理技术，计算分形维数得到的 ECC-混凝土叠合梁纯弯段裂缝分布具有自相似性，能够从根源上观测出裂缝的发展情况。

(4) 今后的大量研究将会注重于开发新的计算模型，使用机器人等设备对人工无法踏足的领域进行探测。

混凝土结构裂缝智能检测研究虽取得了一定成果，但仍面临一些挑战，在目前的研究基础上，后续研究可从以下几个方面展开：

(1) 检测设备更加智能化，研发集自主规划巡检路线、识别裂缝类型以及裂缝长、宽和深度的轻型智能装备，能够在裂缝出现时立即发出警报，以便及时采取维修措施，防止裂缝扩大导致结构安全问题。

(2) 结构评估对系统的准确性要求较高，目前面对复杂结构时仍需人工参与。现阶段基于裂缝进行结构评估的研究较少，未来可以探索将计算机视觉技术与其他无损检测技术相结合，实现对混凝土结构更全面、准确地评估。

参考文献

- [1] 杨正华, 刘嘉忻. 峡山水库大坝渗流安全评价[J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(2): 40-44.
- [2] 安景峰, 刘礼威, 郭赵元, 等. 钢混组合钢板梁桥混凝土开裂影响因素及裂缝控制措施[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 389-398.
- [3] Zhao, S., Kang, F. and Li, J. (2024) Intelligent Segmentation Method for Blurred Cracks and 3D Mapping of Width Nephograms in Concrete Dams Using UAV Photogrammetry. *Automation in Construction*, **157**, Article 105145. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105145>
- [4] Zhou, Z., Zhang, J. and Gong, C. (2023) Hybrid Semantic Segmentation for Tunnel Lining Cracks Based on Swin Transformer and Convolutional Neural Network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **38**, 2491-2510. <https://doi.org/10.1111/mice.13003>
- [5] Liang, K. and Su, R.K.L. (2024) Seismic Behavior of Non-Seismically Designed Shear Walls with Moderate Shear Span under High Axial Loads. *Engineering Structures*, **300**, Article 117223. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117223>
- [6] 赵卫平, 王磊, 项荣军, 等. ECC-混凝土叠合梁弯曲试验及裂缝发展的分形表征[J]. 桥梁建设, 2024, 54(4): 37-45.
- [7] 唐文涵, 何渐渐. 工程水泥基复合材料叠合层对梁受弯性能的影响[J]. 建筑结构, 2022, 52(6): 76-80+43.
- [8] Gamage, N., Patrisia, Y., Gunasekara, C., Law, D.W., Houshyar, S. and Setunge, S. (2024) Shrinkage Induced Crack Control of Concrete Integrating Synthetic Textile and Natural Cellulosic Fibres: Comparative Review Analysis. *Construction and Building Materials*, **427**, Article 136275. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136275>
- [9] 张建云, 王国庆. 气候变化与水库大坝安全[J]. 中国水利, 2008(20): 17-19+9.
- [10] 张建云, 王国庆, 刘九夫, 等. 国内外关于气候变化对水的影响的研究进展[J]. 人民长江, 2009, 40(8): 39-41.
- [11] 叶伟, 马福恒, 胡江, 等. 压实黏土干缩裂缝扩展规律试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(1): 102-109.
- [12] 曾浩, 唐朝生, 刘昌黎, 等. 膨胀土干燥过程中收缩应力的测试与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 717-725.
- [13] Hu, L.B., Péron, H., Hueckel, T. and Laloui, L. (2012) Desiccation Shrinkage of Non-Clayey Soils: Multiphysics Mechanisms and a Microstructural Model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, **37**, 1761-1781. <https://doi.org/10.1002/nag.2108>
- [14] Peng, X. and Horn, R. (2005) Modeling Soil Shrinkage Curve across a Wide Range of Soil Types. *Soil Science Society of America Journal*, **69**, 584-592. <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.0146>
- [15] Alonso, E.E., Romero, E., Hoffmann, C. and García-Escudero, E. (2005) Expansive Bentonite-Sand Mixtures in Cyclic Controlled-Suction Drying and Wetting. *Engineering Geology*, **81**, 213-226. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.06.009>
- [16] Braudeau, E., Costantini, J.M., Bellier, G. and Colleuille, H. (1999) New Device and Method for Soil Shrinkage Curve Measurement and Characterization. *Soil Science Society of America Journal*, **63**, 525-535. <https://doi.org/10.2136/sssaj1999.03615995006300030015x>
- [17] Tripathy, S. and Subba Rao, K.S. (2009) Cyclic Swell-Shrink Behaviour of a Compacted Expansive Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, **27**, 89-103. <https://doi.org/10.1007/s10706-008-9214-3>
- [18] Abou Najm, M., Mohtar, R.H., Weiss, J. and Braudeau, E. (2009) Assessing Internal Stress Evolution in Unsaturated Soils. *Water Resources Research*, **45**, 1-18. <https://doi.org/10.1029/2007wr006484>
- [19] 唐朝生, 崔玉军, Anh-Minh Tang, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1271-1279.
- [20] 李凌旭, 王帅宝, 马明昌, 等. 大体积混凝土的特点及其温度裂缝产生机理[J]. 施工技术, 2017, 46(S2): 567-569.
- [21] 岳岭, 刘建友, 田园, 等. 明挖隧道回填荷载裂缝特征及其控制技术[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(S1): 122-128.
- [22] Grazzini, A., Accomero, F., Lacidogna, G. and Valente, S. (2020) Acoustic Emission and Numerical Analysis of the Delamination Process in Repair Plasters Applied to Historical Walls. *Construction and Building Materials*, **236**, Article 117798. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117798>
- [23] Wang, J., Hu, W., Wang, X. and Liang, Y. (2021) Experimental Investigation of Crack Initiation and Propagation in the Unreinforced Masonry Specimen Subjected to Vertical Settlement. *Advances in Materials Science and Engineering*, **2021**, Article 6672037. <https://doi.org/10.1155/2021/6672037>
- [24] 孙林远, 黄昊, 陈康, 等. 细观尺度下表面波法检测混凝土表面裂缝深度研究[J]. 水利学报, 2024, 55(8): 942-954.
- [25] Vy, V., Lee, Y., Bak, J., Park, S., Park, S. and Yoon, H. (2023) Damage Localization Using Acoustic Emission Sensors

- via Convolutional Neural Network and Continuous Wavelet Transform. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **204**, Article 110831. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2023.110831>
- [26] Chen, L., Lu, X., Deng, D., Kouhdarag, M. and Mao, Y. (2023) Optimized Wavelet and Wavelet Packet Transform Techniques for Assessing Crack Behavior in Curved Segments of Arched Beam Bridges Spanning Rivers. *Water*, **15**, Article 3977. <https://doi.org/10.3390/w15223977>
- [27] 蒋宇静, 吴法博, 张学朋, 等. 基于激光多普勒测振的混凝土损伤量化评价研究[J]. 中国矿业大学学报, 2023, 52(5): 889-903.
- [28] 陈江, 熊杰, 李宇驰, 等. 基于热效应的涉水混凝土工程裂缝监测方法[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(1): 296-303.
- [29] Sun, W., Du, J., Qiao, P., Qi, B., Yan, S. and Tan, H. (2023) Smart Piezoelectric Module-Based Wave Energy Measurement for Crack Damage Evaluation of Concrete Beams. *Measurement*, **221**, Article 113463. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113463>
- [30] 谢明志, 樊丁萌, 蒋志鹏, 等. 基于计算机视觉的混凝土结构裂缝检测研究现状与展望[J/OL]. 西南交通大学学报, 1-20. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.u.20240913.1853.002.html>, 2024-11-06.
- [31] 钟新谷, 彭雄, 沈明燕. 基于无人机成像的桥梁裂缝宽度识别可行性研究[J]. 土木工程学报, 2019, 52(4): 52-61.
- [32] Sanchez-Cuevas, P.J., Ramon-Soria, P., Arrue, B., Ollero, A. and Heredia, G. (2019) Robotic System for Inspection by Contact of Bridge Beams Using UAVs. *Sensors*, **19**, Article 305. <https://doi.org/10.3390/s19020305>
- [33] Liu, Y., Nie, X., Fan, J. and Liu, X. (2019) Image-Based Crack Assessment of Bridge Piers Using Unmanned Aerial Vehicles and Three-Dimensional Scene Reconstruction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, **35**, 511-529. <https://doi.org/10.1111/mice.12501>
- [34] 秦海伟, 陆从飞, 蒋永生, 等. 轨道式攀爬机器人系统设计与图像处理[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(7): 117-122.
- [35] 周颖, 刘彤. 基于计算机视觉的混凝土裂缝识别[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 1277-1285.
- [36] 黄贲, 康飞, 唐玉. 基于目标检测的混凝土坝裂缝实时检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2023, 63(7): 1078-1086.
- [37] 刘联海, 黎汇业, 毛冬晖. 基于图像凸包特征的 CBAM-CNN 网络入侵检测方法[J]. 信息安全, 2024, 24(9): 1422-1431.
- [38] Li, G., Fang, Z., Mohammed, A.M., Liu, T. and Deng, Z. (2023) Automated Bridge Crack Detection Based on Improving Encoder-Decoder Network and Strip Pooling. *Journal of Infrastructure Systems*, **29**. <https://doi.org/10.1061/jitse4.iseng-2218>
- [39] 孙晓贺, 施成华, 刘凌晖, 等. 基于改进的种子填充算法的混凝土裂缝图像识别系统[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 127-136+146.
- [40] Meng, Q., Hu, L., Wan, D., Li, M., Wu, H., Qi, X., et al. (2023) Image-Based Concrete Cracks Identification under Complex Background with Lightweight Convolutional Neural Network. *KSCE Journal of Civil Engineering*, **27**, 5231-5242. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-0923-1>
- [41] Bae, H. and An, Y. (2023) Computer Vision-Based Statistical Crack Quantification for Concrete Structures. *Measurement*, **211**, Article 112632. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112632>
- [42] Xu, G., Yue, Q. and Liu, X. (2023) Deep Learning Algorithm for Real-Time Automatic Crack Detection, Segmentation, Qualification. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **126**, Article 107085. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107085>
- [43] 刘珂铖, 谢群, 李雁军. 基于深度学习 YOLOX 算法的混凝土构件裂缝智能化检测方法[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2024, 38(3): 341-349.