

DOI: 10.7672/sgjs2025200148

海洋环境服役混凝土局部裂缝识别技术*

徐志祥¹, 丁冬生², 蔡晓男¹

(1. 中交第三航务工程局有限公司, 上海 200032;

2. 中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315299)

[摘要] 针对海洋环境下混凝土结构长期服役过程中裂缝的产生与扩展的定量监测问题, 开展裂缝识别方法研究。基于数字图像相关技术及局部裂缝运动学原理, 提出一种可获取混凝土试件全场变形信息并自动识别局部裂缝的测试技术。利用该技术对不同卵石掺量的海工混凝土裂缝萌生及扩展过程进行测量, 并定量评价其抗压强度。结果表明: 该方法可准确捕捉局部裂缝, 并通过裂缝参数及时判断扩展趋势; 随着卵石掺量增加, 混凝土抗压强度下降, 但裂缝形态由贯通型逐渐转为分散型。上述方法可为海洋环境下混凝土裂缝的定量评估及耐久性预测提供有效技术支撑。

[关键词] 混凝土; 海洋环境; 裂缝; 识别; 数字图像; 变形; 测量; 抗压强度

[中图分类号] U654

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)20-0148-05

Local Crack Identification Technology of Concrete in Marine Environment Service

XU Zhixiang¹, DING Dongsheng², CAI Xiaonan¹

(1. CCCC Third Harbor Engineering Bureau Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. Ningbo Branch of CCCC Third Harbor Engineering Bureau Co., Ltd.,
Ningbo, Zhejiang 315299, China)

Abstract: Aiming at the problem of quantitative monitoring of crack generation and propagation during long-term service of concrete structures in marine environment, the crack identification method is studied. Based on the digital image correlation technology and the principle of local crack kinematics, a test technology that can obtain the full-field deformation information of concrete specimens and automatically identify local cracks is proposed. The crack initiation and propagation process of hydraulic concrete with different pebble content were measured by this technology, and the compressive strength was quantitatively evaluated. The results show that this method can accurately capture local cracks and judge the expansion trend in time through crack parameters. With the increase of marine content, the compressive strength of concrete decreases, but the crack morphology gradually changes from the through type to the dispersed type. The above method can provide effective technical support for the quantitative evaluation and durability life prediction of concrete cracks in the marine environment.

Keywords: concrete; marine environment; cracks; identification; digital image; deformation; measuring; compressive strength

0 引言

服役于海洋环境的混凝土因腐蚀性离子侵蚀、

温差及干湿循环等作用而产生局部应力, 进而产生微裂缝^[1-5]。同时, 混凝土结构作为主要承力构件, 长期承受结构自重、固定设备自重和土压力等固定荷载, 同时还受到船舶系缆力、撞击力等随机荷载的作用。这些荷载使混凝土内部产生微裂缝, 并在持续作用下扩展为宏观裂缝。海洋腐蚀环境与外荷载的耦合效应将改变裂缝扩展路径, 显著影响结

* 上海市网络化制造与企业信息化重点实验室开放课题: 基于数字图像相关技术的复杂曲面三维全场变形测量方法研究 (KT20190601)

[作者简介] 徐志祥, 高级工程师, E-mail: 18036609111@ccccltd.cn

[收稿日期] 2025-04-20

构内力分布;当裂缝扩展至一定程度时,会直接危及结构的安全性与耐久性。近年来,相关部门相继发布了 GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》、JTS/T 202-1—2022《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范》等标准规范,以保障混凝土结构中裂缝的有效控制。

然而,服役于海洋环境的混凝土类型各异,所产生的裂缝随机分布、形式多样。在工程应用中,仅依据裂缝形状即可将其划分为纵向裂缝、横向裂缝、网状裂缝、X 形裂缝、八字形裂缝等类型^[6]。但上述分类无法满足定量评估裂缝的需求,因此无法采取有效措施控制裂缝的进一步发展,亟需开展裂缝识别及定量评估方法研究。非接触式数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术又称数字散斑法,是通过对混凝土构件变形前后对应的数字散斑图像进行数值匹配以定量测量其任意位置的局部变形和运动信息。近年来,DIC 技术已经被广泛用于位移和应变的全过程实时监测。例如,韩依颖等^[7]采用 DIC 技术研究分析了混凝土试件表面受力变形直至破坏的全过程位移场分布数据,计算获得准确的裂缝形态、长度及位置信息。孙伟等^[8]采用 DIC 技术开展建筑膜材双轴拉伸试验,测量其应变随荷载的变化关系。

本文以海洋环境中服役的常用海工混凝土为研究对象,建立基于 DIC 技术的非接触式全场测量系统,获取混凝土全场变形信息,建立混凝土裂缝识别方法,研究其力学性能,为混凝土裂缝监测及耐久性寿命研究提供技术手段。

1 DIC 技术

DIC 技术最早由 Yamaguchi^[9] 及 Peters 等^[10] 提出,该技术被广泛应用于测量物体表面变形,获得全场位移和应变信息。其是一种非接触式全场测量技术,原理为:将相机捕获的变形前后数字图像输入算法,经图像配准在变形后图中搜索与变形前子区匹配度最高的区域,进而追踪该区域的运动并计算其位移矢量。

如图 1 所示,为计算待测点 P (X₀,Y₀) 位移,从参考图像中取该点为中心的 (2M+1) × (2M+1) 像素的正方形区域作为参考子区,在变形后的图像中进行相关计算。为评估子区间的相似度,定义互相关准则如式(1)所示。

$$C = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m] \cdot [g(x',y') - g_m]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m]^2 \cdot \sum_{x'=-M}^M \sum_{y'=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}}$$

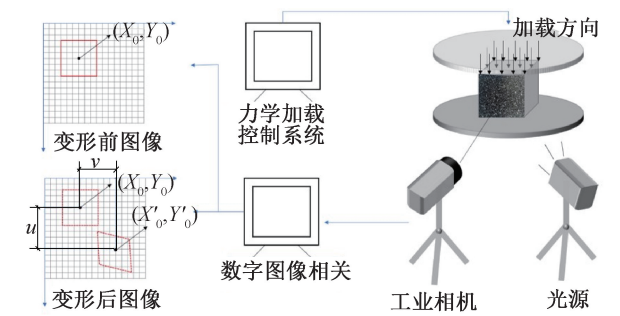


图 1 数字图像相关技术基本原理
Fig. 1 Basic principle of digital image correlation technology

$$C = \frac{g(x',y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}}$$

(1)

式中: $f(x,y)$, $g(x',y')$ 分别为变形前后图像上任意一点 (X₀,Y₀), (X'₀,Y'₀) 的灰度值; f_m , g_m 分别为变形前后在散斑图像中所选 (2M+1) × (2M+1) 像素的子区内灰度平均值。

基于式(1)比较变形前后图像中所选区域的灰度值,并在变形后的图像中遍历搜索子区,通过寻找式(1)中相关函数的最小值确定待测点变形后的位置。

2 试验材料与步骤

2.1 原材料

根据 JTS 202—2011《水运工程混凝土施工规范》,海工混凝土原材料为粗骨料、细骨料、水泥、拌合水,混凝土强度等级为 C40,水灰比设置为 0.425。为全面评估包含不同粗骨料的海工混凝土力学性能,分别采用碎石、卵石及不同比例碎石与卵石的混合物作为粗骨料。碎石与卵石的混合物中卵石质量占比设置为 33%,67%,100%。

混凝土配合比如表 1 所示,根据 JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》配制混凝土试块。用筛子筛取粒径 5~25mm 碎石;将卵石按粒径 6~9mm:10~15mm:15~20mm:20~25mm=10%:20%:65%:5%的质量比例分别筛分后混合,作为卵石粗骨料。

表 1 混凝土配合比

Table 1 Concrete mix proportion						kg·m ⁻³
水泥	河砂	5~10mm 粒径 碎石或卵石	10~25mm 粒径 碎石或卵石	水	减水剂	
500	569	346.8	809.2	212.5	现场确定	

如图 2 所示,先将所有材料搅拌均匀,再装入 100mm×100mm×100mm 模具。装模至 1/3 高度时,用铲刀插捣,随后置于振捣台充分振捣。24h 后脱

模,转入淡水养护 28d。为统一表述,以卵石替代率(卵石质量占粗骨料总质量的比例)为变量:纯碎石混凝土记为 0,纯卵石混凝土记为 100%。碎石混凝土试块标号为 PC-0,碎石-卵石混凝土试块标号为 PC-33,PC-67,卵石混凝土试块标号为 PC-100,共 4 组,每组 10 个试块。

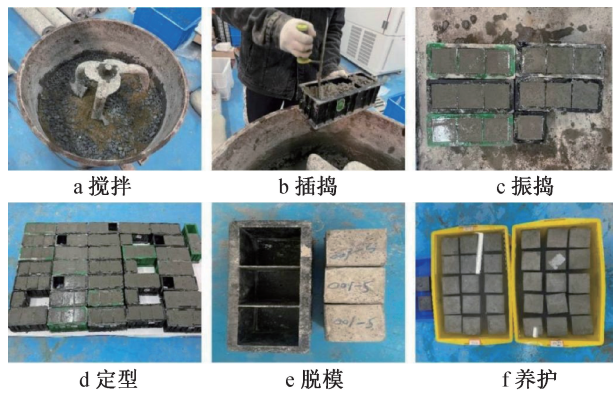


图 2 混凝土试块制作流程

Fig. 2 Production process of concrete test blocks

试块养护完成后取出,用砂纸打磨受压面及数字图像相关测量需拍摄、观测的 2 个侧面。随后在待测表面喷涂散斑:先整体覆盖黑色哑光底漆,再随机点喷白色哑光漆颗粒,供后续数字图像采集。

2.2 试验装置与步骤

基于 DIC 技术,对 4 组典型海工混凝土试块的全场变形特性和裂缝扩展规律进行研究。通过比较其抗压强度及全场位移、应变数据,并分析 4 种混凝土试块在压力荷载下的裂缝扩展规律,评估不同粗骨料海工混凝土受压损伤行为。

如图 3 所示,混凝土抗压变形测量的二维数字图像相关测量装置由压力试验机、CCD 摄像机、照明灯、三脚架等设备构成,试验机加载速率控制在 0.8MPa/s,按 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》对试块进行抗压变形试验。将散斑标记好的试块放置于压力机下压板正中心,通过光学坐标确定试块位置,防止偏心加载,在试块正前方架设数字图像相关测量装置,对其加载过程进行图像采集。调节镜头焦距及图像采集参数,确保镜头光轴与待测面垂直,调节光源确保试块表面光照充分、均匀,图像采集帧率设为 9 帧/s。同时启动数字图像相关设备和压力试验机,开始加载并采集试块表面图像,直至混凝土达到峰值荷载产生裂缝,同时记录试块破坏荷载及应力-应变数据。

3 结果与讨论

3.1 裂缝识别

基于 DIC 技术计算得到试块全场应变信息,提



图 3 试验装置
Fig. 3 Test equipment

取试块位移场,计算全场主应变,进而采用裂缝检测和裂缝运动学方法(ACDM)^[11]得到裂缝分布和发展情况,最终实现混凝土受压裂缝可视化定量识别,流程如图 4 所示。采用 ACDM 分析应变数值,得到裂纹分布位置,再通过裂纹运动学分析裂纹发展情况,可得出裂纹平移或旋转动态信息,这对判断不同类型混凝土在受压荷载下的变形损伤特点具有重要作用。对于海工混凝土,该方法不仅可展示受压荷载下混凝土结构任意位置变形信息及发展规律,还可定量测量构件产生的随机裂缝,并分析裂缝时空发展规律,这对保证海工结构长期服役安全具有重要的工程应用价值。

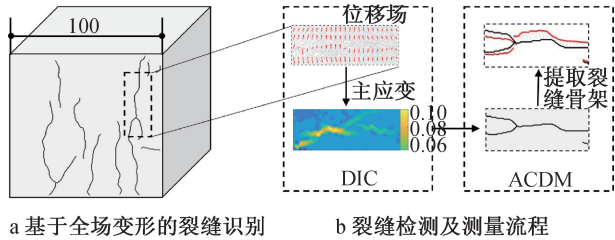


图 4 裂缝检测和裂缝运动学测量
Fig. 4 Crack detection and crack kinematic measurement

3.2 混凝土抗压强度

4 组混凝土试块抗压强度如图 5 所示。总体来说,混凝土抗压强度随粗骨料中卵石比例的增加而降低。与碎石混凝土相比,卵石混凝土在 33%, 67%, 100% 含量条件下抗压强度分别降低了 5.5%, 30.2%, 38.3%。其原因在于,卵石表面相对光滑,作为粗骨料与水泥砂浆的黏结性较弱,在外力作用下易与水泥砂浆脱离;而碎石表面多棱角,与水泥砂浆的锚固作用较强,从而表现出更高的抗压强度。

3.3 混凝土变形特性

为定量分析 4 组混凝土试块在受压荷载作用下的抗压变形能力,评估混凝土应变延性系数 β , 如图 6 所示,其计算如式(2)所示。

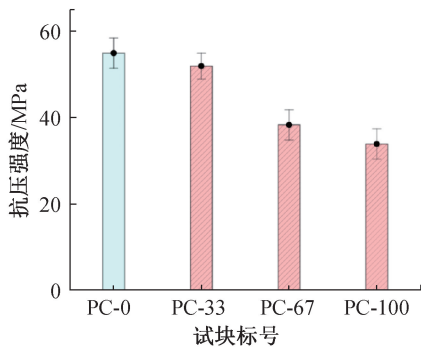


图5 4组混凝土试块抗压强度

Fig. 5 Compressive strength of four groups of concrete test blocks

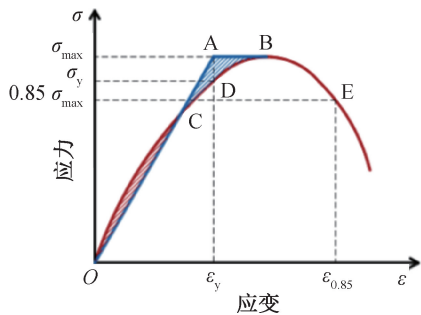


图6 应变延性系数计算

Fig. 6 Calculation of strain ductility coefficient

$$\beta = \frac{\epsilon_{0.85}}{\epsilon_y} \tag{2}$$

式中: $\epsilon_{0.85}$ 为极限应变,即峰值应力降低至 85% 时混凝土的应变值; ϵ_y 为初始屈服应变,通过采用能量等效面积法确定初始屈服点。

计算 4 组混凝土试块应变延性系数,如图 7 所示。由此可知,对于卵石作为粗骨料主要成分的混凝土,其应变延性系数显著减小。尤其对于卵石含量为 33% 的卵石混凝土,其应变延性系数降低 16.4%。随着粗骨料中卵石比例增加,应变延性系数略有增大。对于 67%,100% 卵石含量的混凝土,其应变延性系数分别增大 3.6%,7.8%。由此可知,采用卵石替代部分或全部粗骨料,极大地降低了混凝土抗延性破坏的能力,不利于混凝土的安全稳定

服役。

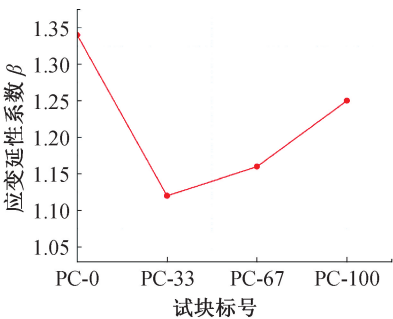


图7 4组混凝土试块应变延性系数

Fig. 7 Strain ductility coefficient of four groups of concrete test blocks

3.4 裂缝形态识别及分析

3.4.1 基于 DIC 技术的混凝土全场应变及裂缝分布

4 组混凝土试块应变场如图 8 所示。图 8 对应于每组试块在极限荷载时对应的应变信息。可以发现,该应变场不仅详细反映了混凝土试块任意位置在压力荷载作用下的应变信息,而且可通过应变确定裂缝出现位置及其空间分布规律,这对混凝土结构在实际服役时受压变形的安全评估具有重要的指导意义。

比较 4 组混凝土试块可发现:混凝土最大应变随卵石比例的增加而增大。比较裂缝分布情况发现,PC-0 试块在压力荷载作用下仅在加载方向产生了 1 条贯穿试块的明显裂缝;而对于 PC-33 试块,除了产生贯穿试块的主裂缝外,还产生了 2 条贯穿试块的次裂缝;PC-67,PC-100 试块中裂缝呈局部分散的特点,不再能区分主裂缝和次裂缝,且数量明显增多。

3.4.2 混凝土裂缝可视化分析

通过裂纹检测和局部裂纹的运动学测量可对裂缝分布和时空发展规律进行定量评估。以 PC-67 为例,混凝土裂缝可视化及运动学测量结果如图 9 所示,选取 5 个典型位置对其运动扩展进行跟踪。

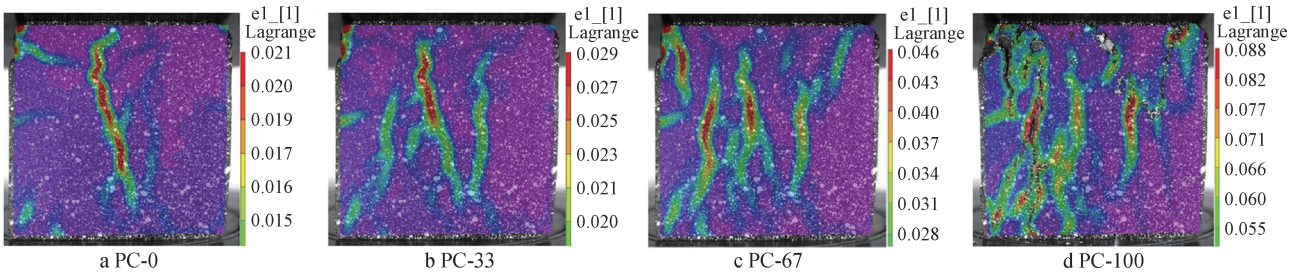


图8 基于 DIC 技术测量的混凝土应变场

Fig. 8 Strain field of concrete measured by DIC technology

可以发现,①,②,⑤处裂缝基本为平行扩展,而③,④处涉及多个裂缝交汇,因此裂缝扩展表现为多方向发展。而该混凝土试块粗骨料含有部分卵石,卵石与水泥砂浆间的黏结性能较差,导致试块在受压作用下不仅出现断裂,还表现为骨料与砂浆间的相对滑移运动,这可通过裂缝可视化及运动学测量方法准确评估。

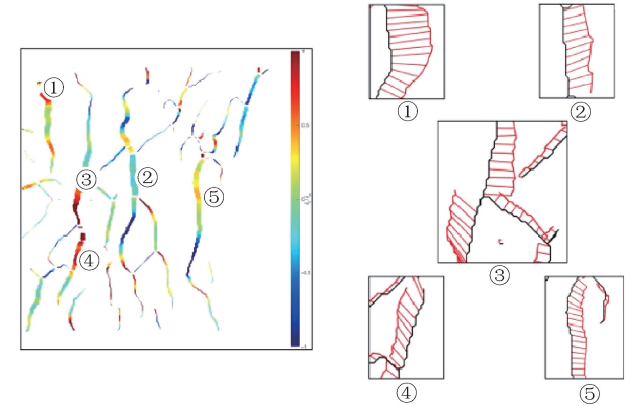


图 9 混凝土裂缝可视化及局部运动学测量
Fig. 9 Visualization of concrete cracks and local kinematic measurement

在实际工程中,架设图像采集设备并获取码头待测区域数字散斑图像序列,通过变形信息测量及局部运动学测量方法,获得待监测区域局部裂缝及其时变发展信息,该技术为实时获取海工混凝土结构变形及裂缝信息提供了技术手段,为维护海工混凝土结构运行安全提供技术保障。

4 结语

- 1)将海工混凝土中的粗骨料全部替换为卵石,会明显降低其抗压强度;若仅掺入少量卵石,则对抗压强度的影响较小。
- 2)与碎石作为粗骨料相比,卵石作为粗骨料会削弱混凝土抵抗变形的能力,但卵石混凝土抗变形能力会随卵石比例的增加而增强。
- 3)基于 DIC 技术可测量混凝土在受压作用下的全场变形信息,并可在在此基础上获得裂缝时空分布数据。
- 4)基于 DIC 技术可获得混凝土受压变形产生的全场应变信息,由此可对混凝土裂缝进行监测及运动学测量,有助于确定裂缝时空分布规律,并评估裂缝运动及发展特征。

参考文献:

[1] 王海龙,董宜森,孙晓燕,等. 干湿交替环境下混凝土受硫酸盐侵蚀劣化机理[J]. 浙江大学学报(工学版),2012,46(7): 1255-1261.

WANG H L,DONG Y S,SUN X Y,et al. Damage mechanism of concrete deteriorated by sulfate attack in wet-dry cycle environment [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science),2012,46(7): 1255-1261.

[2] 金伟良,金立兵,延永东,等. 海水干湿交替区氯离子对混凝土侵入作用的现场检测和分析[J]. 水利学报,2009,40(3): 364-371.

JIN W L,JIN L B,YAN Y D,et al. Field inspection on chloride ion-intrusion effect of seawater in dry-wet cycling zone of concrete structures [J]. Journal of hydraulic engineering, 2009, 40 (3) : 364-371.

[3] SAHMARAN M,ERDEM T K,YAMAN I O. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting-drying and heating-cooling environments [J]. Construction and building materials, 2007,21(8): 1771-1778.

[4] 杨帅. 干湿循环和氯离子腐蚀环境下钢筋混凝土桥墩的抗侧向冲击性能研究[D]. 上海:上海交通大学,2016.

YANG S. Study on lateral anti-impact properties of the reinforced concrete pier in drying-wetting cycles and chloride ion corrosion environment [D]. Shanghai :Shanghai Jiao Tong University,2016.

[5] 涂启华,黄君哲,熊建波,等. 港口水工建筑物混凝土裂缝分级评估[J]. 水运工程,2015(3): 109-112.

TU Q H,HUANG J Z,XIONG J B,et al. Crack classification and assessment in harbor hydraulic structures [J]. Port & waterway engineering,2015(3): 109-112.

[6] 肖维,王迎飞. 重力式码头胸墙面层混凝土裂缝形态及控制措施[J]. 水运工程,2015(10): 196-200.

XIAO W,WANG Y F. Crack form and crack control measures for surface concrete of crest wall in gravity quay [J]. Port & waterway engineering,2015(10): 196-200.

[7] 韩依颖,刘乃盛,蔡永昌. 基于 DIC 方法的混凝土压缩试件裂纹识别[J]. 土木建筑与环境工程,2015,37(S2): 51-55.

HAN Y Y,LIU N S,CAI Y C. Application of digital image correlation (DIC) method in experimental research on compression damage of concrete [J]. Journal of civil and environmental engineering,2015,37(S2) : 51-55.

[8] 孙伟,何小元. 数字图像相关方法在土木测试领域中的实验研究[J]. 南京航空航天大学学报,2009,41(2): 271-275.

SUN W,HE X Y. Experimental studies on application of digital image correlation in measuring field of civil engineering [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2009,41(2): 271-275.

[9] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gauge [J]. Journal of physics E:scientific Instruments,1981,14(11): 1270-1273.

[10] PETERS W H,RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. Optical engineering, 1982, 21(3): 427-431.

[11] GEHRI N, MATA-FALCÓN J, KAUFMANN W. Refined extraction of crack characteristics in large-scale concrete experiments based on digital image correlation [J]. Engineering structures,2022,251: 113486.