

李志龙, 王璟, 李阳, 等. 基于 DIC 技术的碾压混凝土层面裂缝扩展规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 987-996. LI Z L, WANG J, LI Y, et al. Crack propagation law of roller compacted concrete layer based on DIC technology[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 987-996. (in Chinese)

基于 DIC 技术的碾压混凝土层面裂缝扩展规律

李志龙¹, 王璟², 李阳², 柴嘉启²

(1. 国家能源集团西藏电力有限公司, 西藏 林芝 860114; 2. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 为研究碾压混凝土劈裂过程中层面裂缝演化规律, 对不同砂浆处理的碾压混凝土开展劈裂抗拉试验, 分析试件破坏形态和不同龄期的劈裂抗拉强度, 结合数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术观测碾压混凝土劈裂过程中层面裂缝发展规律, 获取裂缝相关参数, 包括裂缝宽度、裂缝扩展速率, 并测定层面附近的显微硬度, 分析裂缝扩展速率与显微硬度的关系。结果表明: 砂浆处理可以有效提高层面结合效果和劈裂抗拉强度, 降低裂缝扩展速率; 层面裂缝发展过程分为初始、萌生、扩展、贯通 4 个阶段, 扩展速率在贯通阶段呈陡增趋势, 未处理试件的裂缝宽度最大; 层面显微硬度明显低于上下层, 砂浆处理能增强层面显微硬度, 层面显微硬度与裂缝扩展速率、劈裂抗拉强度的决定系数 R^2 均在 0.9 以上, 相关性较高。

关键词: 碾压混凝土; 劈裂抗拉; 层面裂缝; 数字图像相关技术; 显微硬度

中图分类号: TV431.9 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2024.0098

碾压混凝土坝具有施工速度快、造价经济等优势, 在我国水利工程建设中发展迅速。然而, 碾压混凝土通常进行分层施工, 在结构中会形成许多层面^[1-3]。碾压混凝土层面属于结构中的薄弱位置, 在持续荷载作用下不可避免地出现裂纹、孔洞等缺陷, 进而危及结构安全^[4-6]。

目前, 对于碾压混凝土层面的力学性能研究已经取得一些成果。碾压混凝土层面的浇筑时间间隔会对其层面断裂韧性具有显著影响, 浇筑间隔时间的增加会导致断裂韧性的降低^[7]。另外, 碾压混凝土内部孔隙率的增加也会导致力学性能的降低, 劈拉强度随着孔隙率增大而减少^[8]。通过在层面设置凹槽可以增加粗糙度, 达到改善层间黏合效果的作用, 进而提高剪切强度^[9]。此外, 刘尚坤等^[10]研究表明随着养护龄期的增加, 碾压混凝土层面劈拉强度尺寸系数呈现平稳增加趋势。李俊杰等^[11]采用应力、抗滑稳定性等指标建立了碾压混凝土坝层面性态区间分析模型。碾压混凝土层面耐久性能也受到学者们研究。在冻融循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下, 层面损伤劣化速率在试验后期急剧增加^[12]。

非饱和水分传输作为层面遭受溶液侵蚀, 导致耐久性降低的重要因素, 研究^[13]表明在浸泡作用下层间对水分横向传输具有促进作用。上述研究主要采用性能指标分析了各类因素对碾压混凝土层面力学性能和耐久性能的影响, 不过有关碾压混凝土层面的破坏特性和层面结构本身的研究仍然不足。在实际工程中, 碾压混凝土层面的破坏往往伴随着裂缝的出现, 因此有必要对破坏过程中碾压混凝土层面裂缝的变化规律开展研究, 以深入揭示层面破坏特性。

数字图像相关(digital image correlation, DIC)技术作为现代高精度光测力学技术, 与高速相机相结合可以捕捉裂缝扩展的整个过程^[14-15]。目前 DIC 技术在混凝土应变及裂缝研究方面已经得到广泛应用^[16-18]。晏班夫等^[19]通过 DIC 技术对混凝土破坏过程中的裂缝进行全局动态识别与重构。杨子涵等^[20]基于 DIC 对钢筋混凝土梁剪切过程中的斜裂缝扩展进行实时追踪, 实现了裂缝的自动化检测。徐毓基等^[21]利用 DIC 对单边劈裂作用下混凝土裂缝开展原位表征, 解析出裂缝的产生和扩展路径。DIC

收稿日期: 2024-05-15 修回日期: 2024-08-26 网络出版时间: 2024-09-05

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240904.1709.004>

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009110)

作者简介: 李志龙(1984—), 男, 甘肃通渭人, 高级工程师, 主要从事水工混凝土性能研究。E-mail: 272819032@qq.com

通信作者: 李阳(1991—), 男, 陕西延安人, 副教授, 博士, 主要从事混凝土耐久性能研究。E-mail: LY1990120311@163.com

技术还可以对裂缝的相关参数进行分析,包括裂缝宽度、裂缝扩展速率、裂缝长度等^[22-23]。罗滔等^[24]结合 DIC 技术探究了 C40 自密实混凝土、C25 自密实混凝土、C40-C25 自密实混凝土在劈裂抗拉破坏过程中的裂缝宽度及扩展速度变化规律。姚洁香等^[25]研究了岩石-混凝土界面拉伸断裂性能,在弯曲断裂试验中结合 DIC 法获得临界裂缝扩展长度。以上研究表明, DIC 技术作为高精度观测仪器,在混凝土破坏过程中的裂缝特征探究方面已得到成熟应用。碾压混凝土层面作为薄弱结构,裂缝是碾压混凝土层面破坏时的显著特征,然而关于结合 DIC 技术对碾压混凝土层面裂缝扩展规律的研究却鲜有报道。

因此,设计层面经不同砂浆处理的碾压混凝土试件,对比劈裂荷载作用下层面的不同表现形式,结合 DIC 技术研究荷载作用下碾压混凝土层面裂缝的不同扩展规律,以此探究碾压混凝土层面裂缝特性,并研究层面显微硬度与裂缝扩展速率、劈裂抗拉强度的线性关系。研究结果可为碾压混凝土坝层面部位的裂缝扩展研究提供参考依据。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

试验采用的碾压混凝土配合比见表 1。选用 3 种砂浆对层面进行处理,分别为水泥砂浆、掺纳米 SiO₂ 砂浆和掺膨胀剂砂浆,砂浆配合比见表 2。

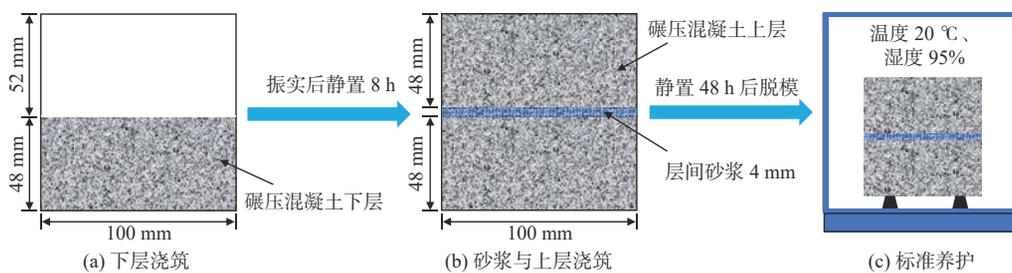


图 1 试件制备与养护

Fig. 1 Preparation and curing of specimens

1.3 试验方法

参照《水工碾压混凝土试验规程》(DL/T 5433—2009)^[26],在试件顶面和底面沿层面放置钢制垫条,确保上下垫条在同一水平面,启动压力试验机进行预加载,使试件和垫条固定于万能试验机压板中间。将 DIC 仪器架设于试件正前方进行校准,启动压力机以 0.04 MPa/s 的加载速率均匀加荷,同时启动 DIC 测试分析系统对试件表面的应变进行采集,记

表 1 碾压混凝土配合比

Tab. 1 Mix ratio of roller compacted concrete

材料	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	石/(kg·m ⁻³) 5~25 mm	减水剂/ %	引气剂/ %
用量	120	120	120	715.5	1 328.8	1	0.1

表 2 砂浆配合比

Tab. 2 Mix ratio of mortar

层间 砂浆	水/ (kg·m ⁻³)	水泥/ (kg·m ⁻³)	粉煤灰/ (kg·m ⁻³)	砂/ (kg·m ⁻³)	减水剂/ %	纳米/ %	膨胀剂/ %
水泥砂浆	225	225	225	1 350	0.7	0	0
掺纳米 SiO ₂ 砂浆	225	225	225	1 350	0.7	2	0
掺膨胀 剂砂浆	225	225	225	1 350	0.7	0	4

1.2 试件成型

参照《水工碾压混凝土试验规程》(DL/T 5433—2009)^[26]制备碾压混凝土,根据规范要求:试模断面最小尺寸为 100 mm 时,湿筛筛除粒径超过 30 mm 的骨料。因此,采用粒径为 5~25 mm 骨料。试件制备与养护见图 1。在振动过程中,采用 5 kg 压重块放置试件表面模拟碾压过程。试件分两层浇筑,每层厚度 48 mm,下层试件在浇筑振实后静置 8 h,随后在层面铺设 4 mm 厚砂浆,并浇筑上层试件。试件浇筑完成并静置 48 h 后拆模,在标准养护室(温度 20 °C,湿度 95 %)中分别养护至 3、7、14、28 d。

录试件劈裂破坏形态和劈裂抗拉强度,计算得到层面裂缝扩展宽度和速率。DIC 测试现场见图 2。为验证 DIC 的准确性,设置一组劈裂试验采用引伸计与 DIC 同时对裂缝进行测量。

硬度可以反映材料抵抗局部塑性变形的能力,硬度测定是把一定形状和尺寸的压头以一定荷载作用在材料表面,根据荷载大小和压痕面积测定材料在变形过程中的抗力。一般认为压力载荷小于

9.81 N 时的硬度为显微硬度。显微硬度具体测试方法如下:采用切割机沿垂直于层面方向将试件切割为 100 mm×100 mm×50 mm 的长方体,然后使用砂纸对层面附近进行打磨抛光。将制备好的试件放置在 HVS-1000 型显微硬度计上,设置荷载 4.90 N,持荷时间 5 s,通过 400 倍显微镜头观测压痕,测量压痕对角线得到显微硬度值。试验试件组数见表 3。

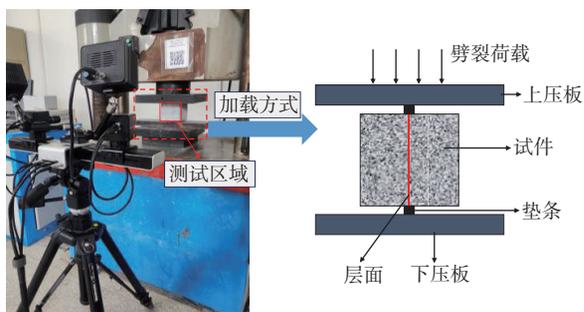


图 2 DIC 测试现场
Fig. 2 DIC testing site

表 3 试验试件组数

Tab. 3 Number of test specimen groups

层面处理方式	劈裂抗拉试验(含DIC)		显微硬度试验	
	组数/组	试件数/个	组数/组	试件数/个
未处理	5	15	3	9
水泥砂浆处理	4	12	3	9
掺纳米 SiO ₂ 砂浆处理	4	12	3	9
掺膨胀剂砂浆处理	4	12	3	9

2 结果与分析

2.1 劈裂破坏形态

碾压混凝土在 28 d 龄期的层面劈裂破坏情况见图 3。破坏形态图片中左侧和右侧分别为碾压混凝土下层和上层。由图 3(a)可知,层面没有经过砂浆处理的试件劈裂破坏面相对平整,相较层面铺设水泥砂浆的试件[图 3(b)],下层面上仅有少量骨料压入的凹坑。这表明水泥砂浆能有效黏附在碾压混凝土下层,使骨料更好地嵌入,进而提供良好的机械咬合力,改善层面结合情况,而在层面铺设掺有纳米 SiO₂ 或膨胀剂的水泥砂浆后[图 3(c)和图 3(d)],碾压混凝土下层破坏面更为粗糙,存在更多骨料压入的凹坑。依据破坏形态,各种砂浆增强层面结合情况的主要原因是浆体能使骨料更好地嵌入,增加机械咬合力,使得碾压混凝土层间的黏结性更强。

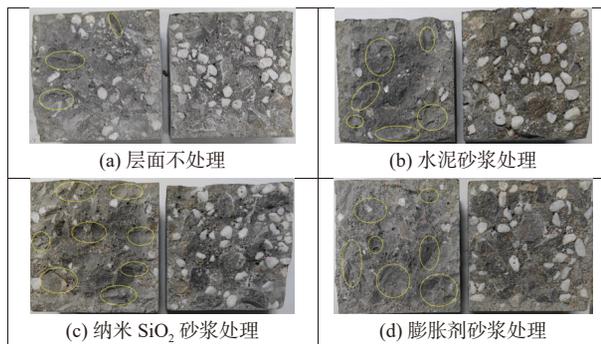
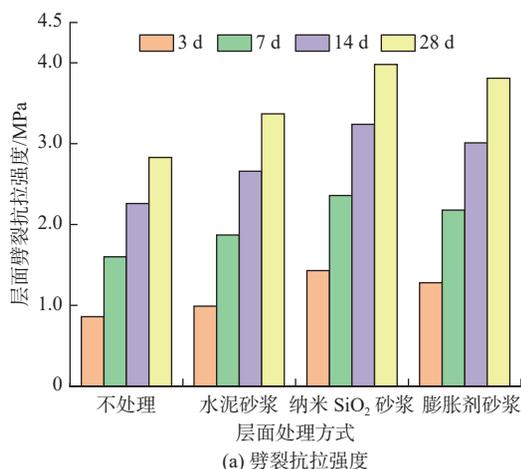


图 3 碾压混凝土层面劈裂破坏形态

Fig. 3 Splitting failure modes of roller compacted concrete layers

2.2 劈裂抗拉强度

碾压混凝土在各龄期的层面劈裂抗拉强度及其增量百分比见图 4。由图 4(a)可知:随着养护龄期的增加,碾压混凝土层面劈裂抗拉强度逐渐增大;经过砂浆处理的层面在各龄期的劈裂抗拉强度始终高于未处理层面。因此,砂浆可以改善层面黏结性能,进而提高试件劈裂抗拉强度。相比水泥砂浆处理,试件经掺纳米 SiO₂ 砂浆处理后,在 28 d 龄期时的劈裂抗拉强度增加 18.10%,掺膨胀剂砂浆次之,劈裂抗拉强度增加 13.06%。故在砂浆中掺入纳米 SiO₂ 或者膨胀剂后,改善效果会进一步增加。结合图 4(b)可知,纳米 SiO₂ 和膨胀剂砂浆在提升劈裂抗拉强度时,具有优异的早期性能。层面不处理和水泥石砂浆处理的试件,在 0~3 d 的强度增量分别为 28 d 的 30.33% 和 29.51%。但纳米 SiO₂ 和膨胀剂砂浆处理的试件,强度增量分别达到 35.88% 和 33.60%,早期强度明显增加。这是由于纳米 SiO₂ 在水泥水化早期即可与氢氧化钙生成水化硅酸钙凝胶,促进水化反应进行。膨胀剂可以使砂浆在水化初期产生大量膨胀性水化产物,增强上下层的黏附力和摩擦力,提升碾压混凝土层面劈裂抗拉强度。



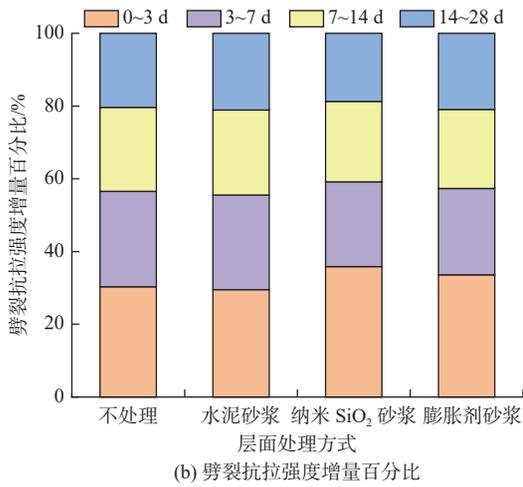


图 4 碾压混凝土劈裂抗拉强度及其增量百分比

Fig. 4 Splitting tensile strength and incremental percentage of roller compacted concrete

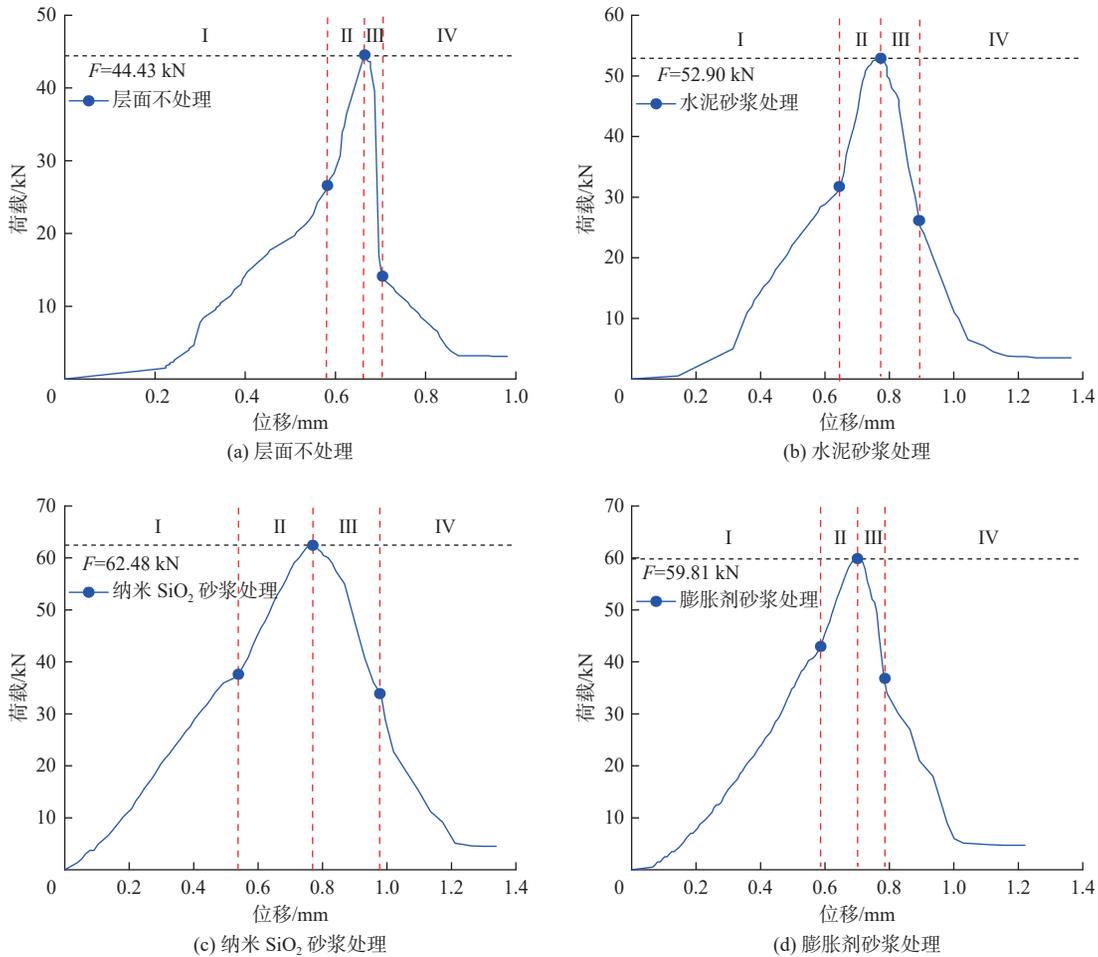


图 5 碾压混凝土劈裂过程荷载位移曲线

Fig. 5 Load displacement curve during the splitting process of roller compacted concrete

通过 DIC 技术对劈裂过程中的试件进行观测得到应变云图, 根据应变云图中碾压混凝土层面色彩梯度变化规律, 将层面裂缝发展过程分为阶段 I (初始阶段)、阶段 II (萌生阶段)、阶段 III (扩展阶段)

2.3 应变及横向位移分析

图 5 为碾压混凝土试件在劈裂过程中的荷载位移曲线。曲线整体上呈现出先上升后下降的趋势, 依据曲线上升或下降速度将其分为 4 个阶段。在阶段 I 和阶段 II, 各组碾压混凝土试件的荷载与位移变化关系基本一致, 随着荷载的增加, 位移逐渐增大, 并且阶段 II 中曲线上升速度高于阶段 I。在达到峰值荷载时, 即阶段 II 和阶段 III 交界处, 层面铺设纳米 SiO₂ 砂浆的试件荷载最大为 62.48 kN, 掺膨胀剂砂浆次之为 59.81 kN。在阶段 III, 经过各种砂浆处理的试件荷载位移曲线出现短暂的平缓阶段, 而层面不处理的试件则由阶段 II 的上升阶段迅速转为下降阶段, 此时处于层面裂缝形成与快速发展的临界点。在阶段 IV, 层面不处理的试件相比经过处理的试件荷载下降速度变缓, 表明裂缝已经发生贯通并破坏。

和阶段 IV (贯通阶段)。在各阶段裂缝开裂的起始位置, 沿水平方向选取连续点, 采用 DIC 计算得到各点横向位移。图 6 为试件各阶段的应变云图及裂缝发展过程, 图 7 为水平方向各点横向位移。

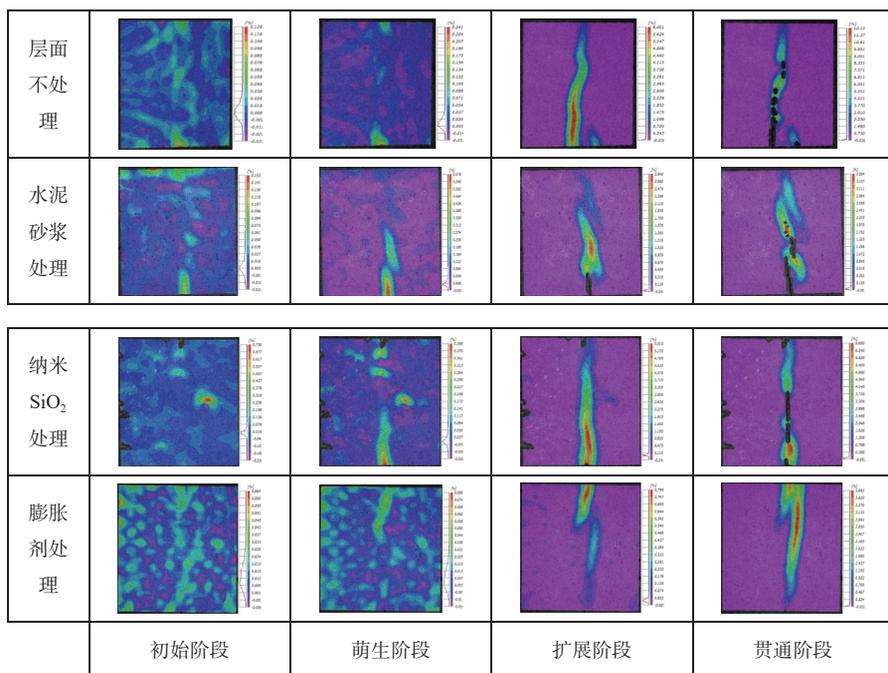


图6 碾压混凝土劈裂过程应变云图

Fig. 6 Strain cloud map of the splitting process of roller compacted concrete

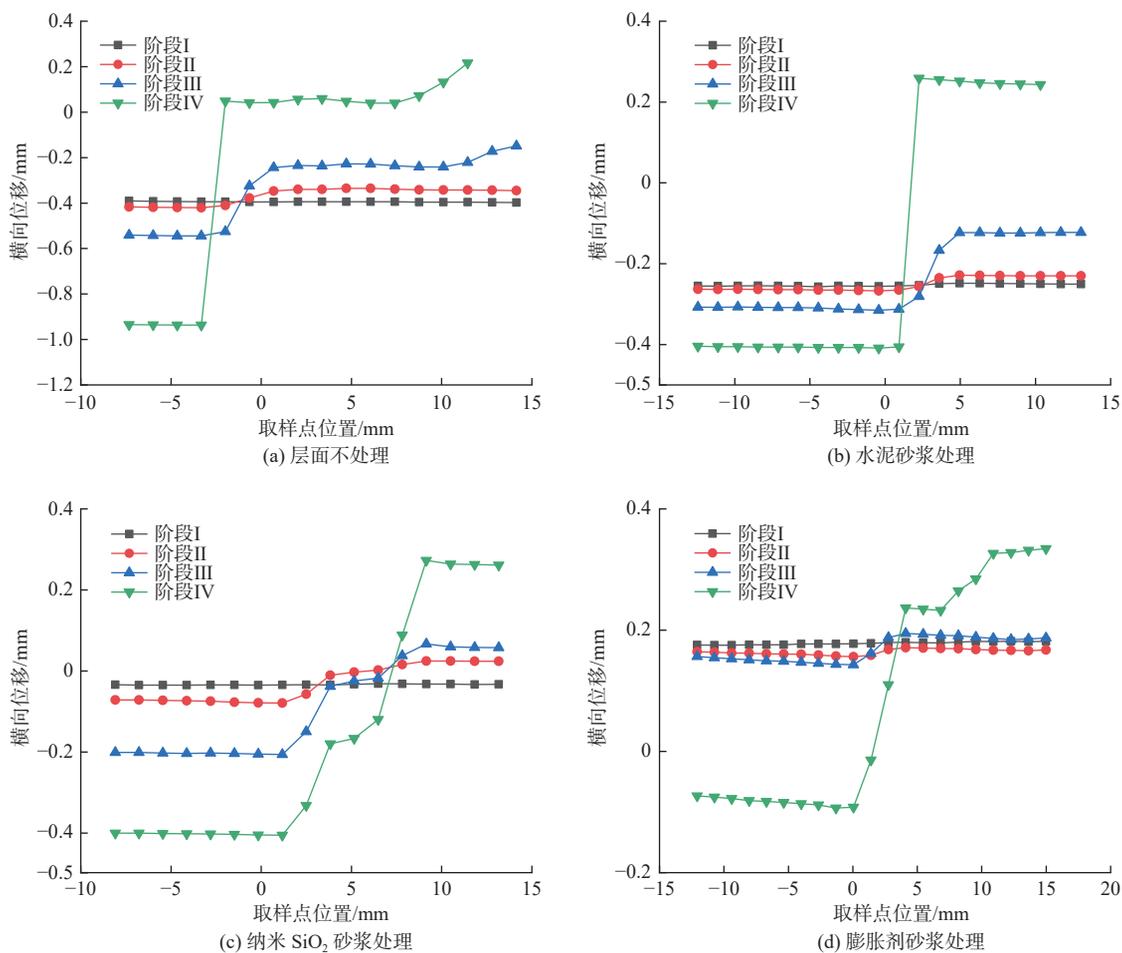


图7 劈裂过程中各点的横向位移

Fig. 7 Lateral displacement of each point during the splitting process

由图6、7可知:在阶段I,试件上下侧开始出现应变区域,但应变云图色彩梯度变化并不明显,

水平方向各点横向位移曲线平整,表明在此阶段层面还未产生裂缝。在阶段II,可以观察到应变云图

色彩梯度变化区域主要集中在层面处,图 7 中的横向位移曲线发生曲折,距离层面最近两点出现横向位移差,说明层面裂缝已经出现。随着荷载的增加,裂缝变化进入阶段 III,应变云图中试件层面出现明显的应变集中带,距离层面最近两点出现明显位移差,表明裂缝已经逐渐开始扩展。在阶段 IV,层面裂缝已经相互贯通形成一条主裂缝,此时离层面最近的两点位移差大幅增加,导致 DIC 已无法准确分析观测区域,因此部分应变云图层面区域出现缺失部位。由图 7 可知,层面未处理、铺设水泥砂浆、铺设纳米 SiO₂ 砂浆、铺设膨胀剂砂浆的各组试件在阶段 III 中,距离层面裂缝附近两点的横向位移差分别为 0.300 6、0.189 5、0.095 6、0.051 8 mm,表明砂浆处理能够延缓裂缝的发展。

2.4 裂缝扩展分析

在 DIC 拍摄区域内的劈裂破坏裂缝上分别选取 3 条参考截线 a_1b_1 、 a_2b_2 、 a_3b_3 (图 8)用于裂缝计算。在进行裂缝计算前,采用引伸计与 DIC 同时对进行劈裂试验的碾压混凝土试件进行数据采集以验证 DIC 数据的准确性。在劈裂试验进行的前 60 s 以每 2 s 取样 1 次的间隔计算裂缝宽度,由于裂缝发展速度过快,之后则每 0.1 s 取样 1 次。选取靠近引伸计的参考截线 a_1b_1 进行裂缝计算。图 9 为通过引伸计与 DIC 分别分析计算得到的裂缝宽度变化规律可以看出,通过引伸计与 DIC 分析计算得到的裂缝宽度变化规律一致,且裂缝宽度数值接近相同。这表明通过 DIC 技术采集计算碾压混凝土在劈裂过程中的裂缝变化具有可靠性。

针对层面经不同处理的碾压混凝土试件,从荷载施加开始以每 2 s 取样 1 张的间隔计算阶段 I 和阶段 II 的层面裂缝宽度,在阶段 III 和 IV 则每 0.1 s 取样 1 张进行计算。层面裂缝宽度随时间变化曲线见图 10。在阶段 I,层面裂缝宽度变化曲线基本呈水平直线状态,裂缝宽度为 0,说明此时试件层面裂缝还未产生;在阶段 II,裂缝宽度出现轻微上升趋势,表明裂缝开始萌生;随着荷载的持续,裂缝宽度变化进入阶段 III,增长速度进一步加快;在阶段 IV,裂缝宽度几乎呈指数形式迅速增长,这说明试件层面裂缝已经贯通,从上端或下端向另一端发生劈裂破坏。以阶段 IV 结束时根据截线 a_1b_1 所测得裂缝宽度作为裂缝最大宽度,层面未处理、铺设水泥砂浆、铺设纳米 SiO₂ 砂浆、铺设膨胀剂砂浆的裂缝最大宽

度分别为 0.98、0.66、0.39、0.33 mm。纳米 SiO₂ 和膨胀剂砂浆可增强层面附近的密实性和黏结性,因此裂缝开口宽度较小。

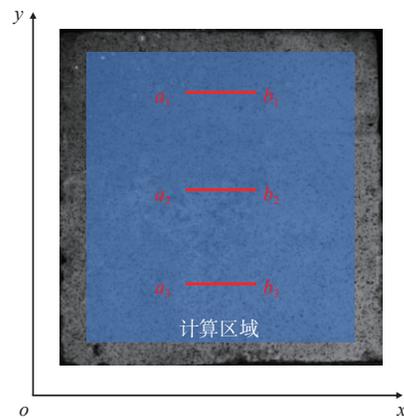


图 8 裂缝计算参考截线

Fig. 8 Reference cross section for crack calculation

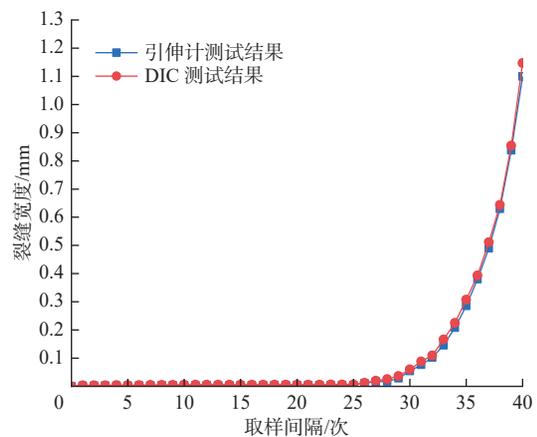


图 9 DIC 与引伸计测试裂缝宽度结果对比

Fig. 9 Comparison of crack width test results between DIC and extensometer

根据每个取样间隔所测得的裂缝宽度,并结合取样间隔时间计算,得到试件破坏过程中的裂缝扩展速度,见图 11。裂缝扩展总是先以接近于 0 的速度开始,并持续一段时间,然后出现轻微波动,经过短暂上升后迅速增大。在阶段 I,试件受劈裂荷载发生变形但未出现层面裂缝;在阶段 II,裂缝开始萌生,并出现轻微裂缝;当裂缝出现后,在持续的荷载下,裂缝宽度将迅速扩展并形成贯通裂缝,因此在阶段 III,裂缝扩展速度明显升高;在阶段 IV,裂缝扩展速率出现陡增现象。以阶段 IV 中速率最大值作为裂缝最大扩展速率,层面未处理、铺设水泥砂浆、铺设纳米 SiO₂ 砂浆、铺设膨胀剂砂浆的裂缝最大扩展速率分别为 1.94、1.60、1.13 和 1.37 mm/s,经砂浆处理的试件裂缝扩展速率均小于未处理试件。

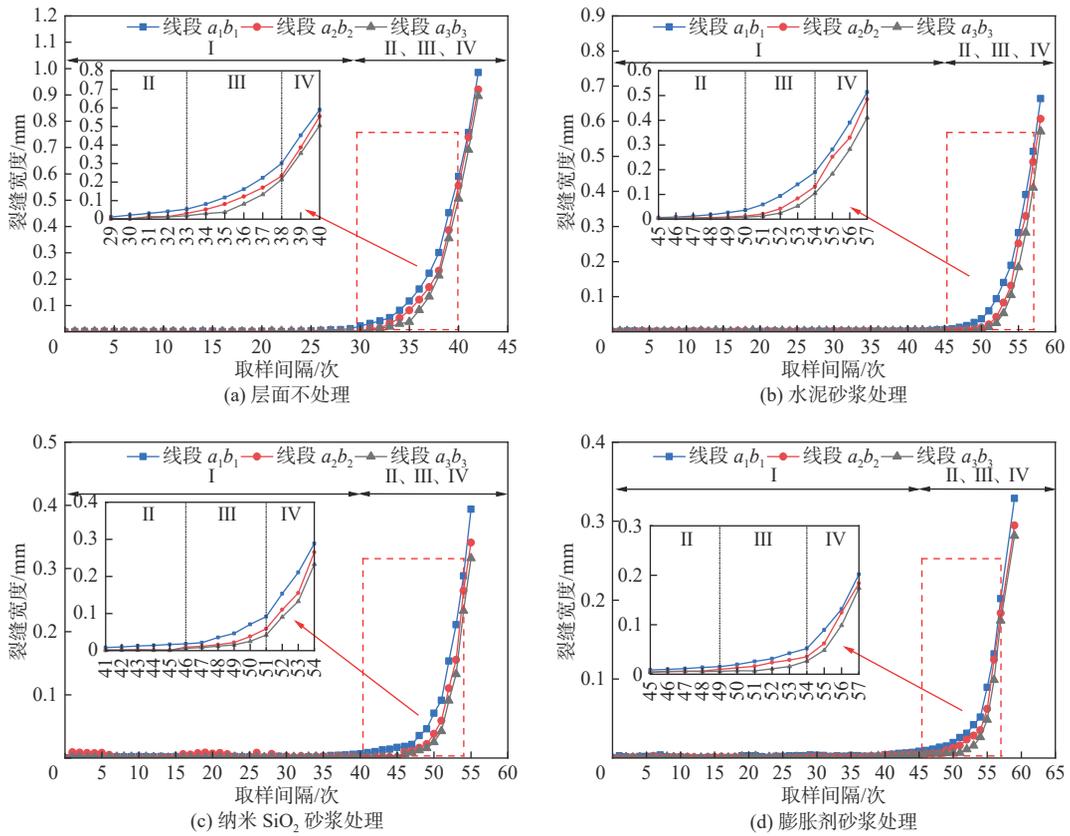


图 10 层面裂缝宽度变化过程
Fig. 10 The process of changing the width of layer cracks

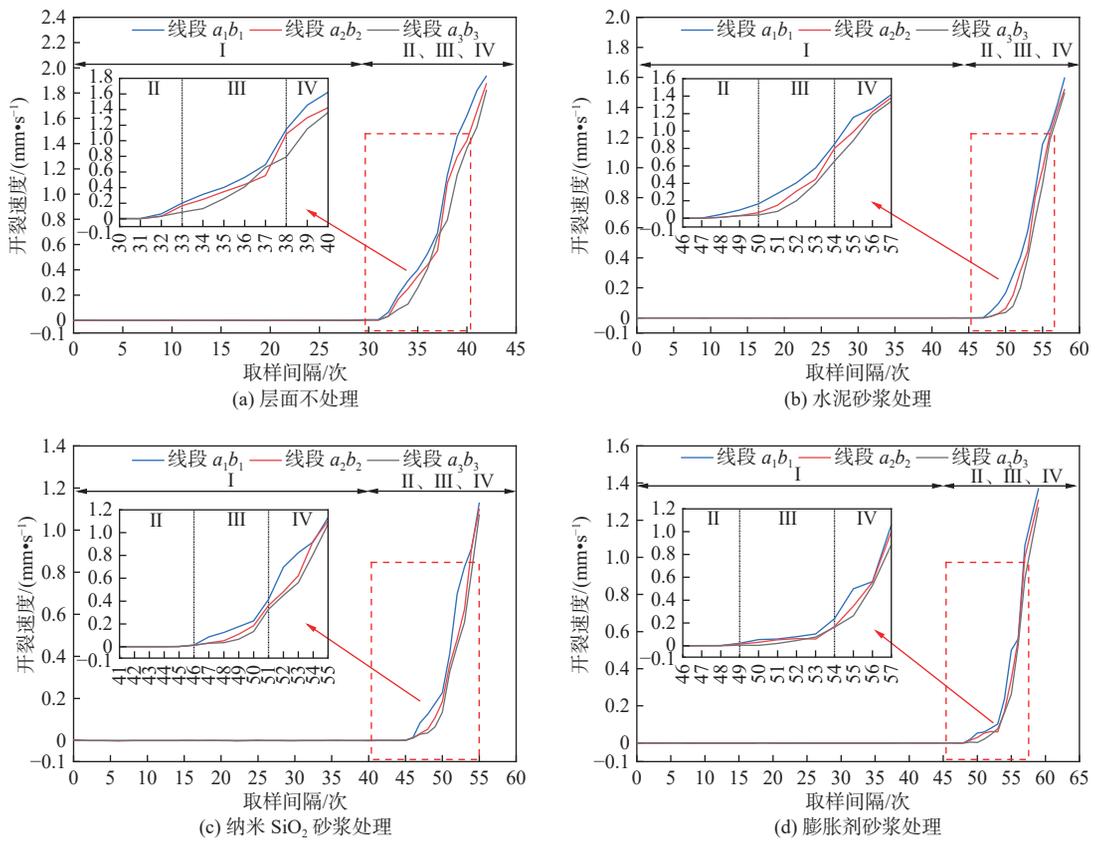


图 11 层面裂缝扩展速率
Fig. 11 Layer crack propagation rate

2.5 界面显微硬度

碾压混凝土试件层面附近的显微硬度见图 12, 其中, 测点位置 1、2、3 为碾压混凝土下层, 测点位置 4、5、6 为层面, 测点位置 7、8、9、10 为上层。由图可知, 显微硬度值从左到右表现为: 由稳定值突然减小, 随后又增加至平稳数值。首先测量的是试件下层浆体, 其显微硬度稳定在 43 MPa 左右。层面位置黏结效果差, 显微硬度会有明显的降低。试件上下层性能基本一致, 因此显微硬度又增加至 43 MPa 左右。试验数据表明, 碾压混凝土层面的显微硬度明显低于上下层, 层面是整体试件最薄弱的位置。与不处理相比, 经各种砂浆处理的层面显微硬度分别增加了 10.63%、33.93%、29.11%。将试件层面显微硬度与裂缝扩展速率和劈裂抗拉强度进行线性拟合, 结果见图 13。层面显微硬度与裂缝扩展速率和劈裂抗拉强度具有很高的相关性, 决定系数 R^2 分

别为 0.941、0.960, 即较高的显微硬度对应于较小的裂缝扩展速率以及较大的劈裂抗拉强度, 因此碾压混凝土层面显微硬度与层面黏结性具有很好的一致性。

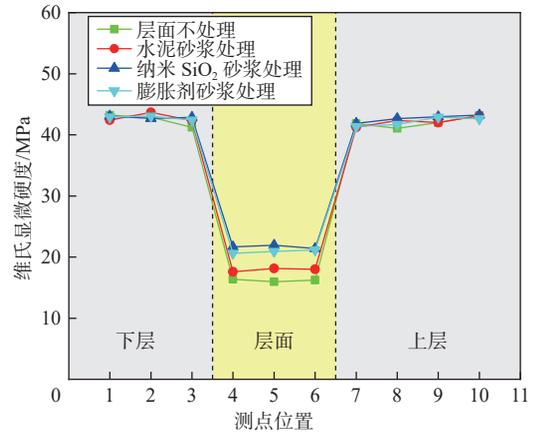
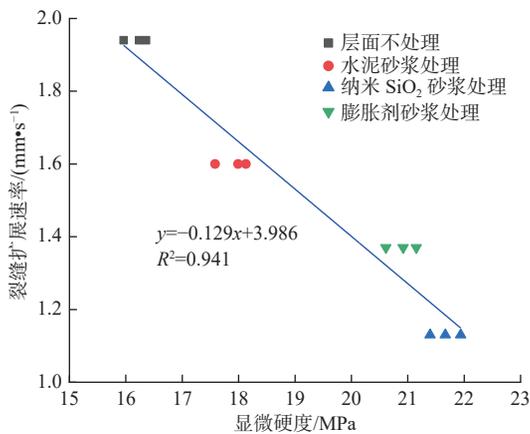
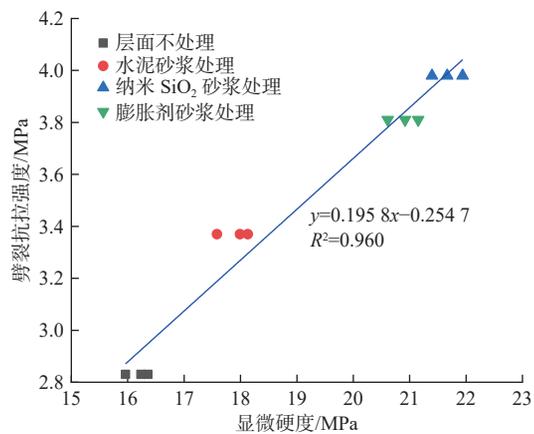


图 12 碾压混凝土显微硬度

Fig. 12 Microhardness of roller compacted concrete



(a) 裂缝扩展速率与层面显微硬度



(b) 劈裂抗拉强度与层面显微硬度

图 13 裂缝扩展速率和劈裂抗拉强度与层面显微硬度关系

Fig. 13 Relationship between crack propagation rate and microhardness of bedding planes

3 结论

采用 DIC 技术研究碾压混凝土在劈裂作用下的层面裂缝扩展规律。DIC 系统采集了整个加载过程中试件应变图像, 通过计算得到层面裂缝扩展宽度和速率, 分析层面显微硬度与裂缝扩展速率和劈裂抗拉强度的关系, 得到以下结论:

砂浆对层面处理后, 可以使骨料更好地嵌入, 以此改善碾压混凝土层面结合情况, 增加层面劈裂抗拉强度, 改善效果依次为 SiO_2 砂浆 > 膨胀剂砂浆 > 水泥砂浆。纳米 SiO_2 和膨胀剂砂浆在早期可以为层面提供更高的劈裂抗拉强度。

依据应变云图中层面色彩梯度变化, 将层面裂缝发展过程分为 4 个阶段: 初始阶段、萌生阶段、扩

展阶段和贯通阶段。由于砂浆能够延缓裂缝的发展, 在扩展阶段, 未处理的层面附近两点横向位移差最大, 为 0.300 6 mm。

通过 DIC 技术计算加载过程中层面裂缝宽度和扩展速率。在前两个阶段裂缝宽度和扩展速率呈平缓上升, 在扩展阶段出现陡增, 铺设纳米 SiO_2 砂浆的层面裂缝扩展速率最小为 1.13 mm/s。层面显微硬度与裂缝扩展速率和劈裂抗拉强度具有明显的线性关系, 决定系数 R^2 分别为 0.941、0.960。

参考文献:

[1] 彭文明. 生长单元在碾压混凝土结构仿真计算中的应用技巧 [J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(4): 164-

170. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2022.04.22](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2022.04.22).
- [2] 郑祥, 米元桃. 碾压混凝土坝精细数字化施工质量控制 [J]. *人民黄河*, 2021, 43(3): 140-144. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2021.03.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2021.03.027).
- [3] 徐存东, 李欣达, 高懿伟, 等. 早期受冻对混凝土力学性能的影响研究 [J]. *水利水电技术 (中英文)*, 2022 (7): 154-161. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2022.07.014](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2022.07.014).
- [4] 蒋荣清, 刘伟佳, 牛旭婧, 等. 碾压混凝土坝分层浇筑施工风险及其控制措施研究 [J]. *混凝土*, 2023(4): 176-179. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3550.2023.04.036](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3550.2023.04.036).
- [5] 邢岳, 田正宏, 杜辉. 碾压混凝土坝层间结合质量智能评价方法 [J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(8): 142-149. DOI: [10.11988/ckyyb.20190644](https://doi.org/10.11988/ckyyb.20190644).
- [6] 洪燕, 田正宏, 孙啸, 等. 碾压混凝土薄弱区域压实质量精细评价方法 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(4): 80-83.
- [7] LUO D N, LU S H, HU C, et al. Experimental and numerical investigation on interlayer fracture process of roller compacted concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 342: 127998. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2022.127998](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127998).
- [8] 张晓飞, 盛瑶, 施润, 等. 不同孔隙率的碾压混凝土力学性能试验研究 [J]. *应用力学学报*, 2023, 40(4): 840-847. DOI: [10.11776/j.issn.1000-4939.2023.04.013](https://doi.org/10.11776/j.issn.1000-4939.2023.04.013).
- [9] SHEN M X, ZHAO Y, BI J, et al. In situ experimental study on mechanical properties of interlayer in roller compacted concrete (RCC) dam [J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 379: 131268. DOI: [10.1016/j.conbuildmat.2023.131268](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131268).
- [10] 刘尚坤, 何金龙, 刘紫玫, 等. 辉长岩骨料全级配碾压混凝土力学特性研究 [J]. *人民长江*, 2024, 55(3): 190-198. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.03.026](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.03.026).
- [11] 李俊杰, 陈旭东, 张轩. 基于区间数理论的碾压混凝土坝层面性态综合评价 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37(11): 92-95.
- [12] 薛国斌, 卢晓春, 熊勃勃, 等. 冻融循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下碾压混凝土性能研究 [J]. *水电能源科学*, 2021, 39(2): 123-126.
- [13] 李明超, 冯达, 张梦溪, 等. 碾压混凝土层间水分非饱和传输试验与数值分析 [J]. *水利学报*, 2022, 53(1): 86-97. DOI: [10.13243/j.cnki.slxb.20210721](https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxb.20210721).
- [14] 许颖, 樊悦, 王青原, 等. 基于 DIC 的聚丙烯纤维增强混凝土断裂过程分析 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2024, 52(2): 103-111. DOI: [10.13245/j.hust.240610](https://doi.org/10.13245/j.hust.240610).
- [15] 徐阳晨, 邢国华, 黄娇, 等. 聚乙烯醇纤维和碳纳米管改性对混凝土力学性能的影响 [J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(7): 809-815. DOI: [10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2023.07.014).
- [16] 孙文昊, 安风娇, 谢俊, 等. 基于 DIC 技术分析钢纤维对混凝土轴压性能的影响 [J]. *混凝土*, 2023 (12): 35-38. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3550.2023.12.009](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3550.2023.12.009).
- [17] 胡良鹏, 孙阳阳, 岳松林, 等. 基于高速 DIC 的近场冲击下高强混凝土动态压缩性能研究 [J]. *振动与冲击*, 2023, 42(12): 77-87. DOI: [10.13465/j.cnki.jvs.2023.012.009](https://doi.org/10.13465/j.cnki.jvs.2023.012.009).
- [18] 赵燕茹, 张杰, 宋博, 等. 基于 DIC 方法的高温后混凝土应变局部化研究 [J]. *混凝土*, 2022(4): 37-43. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3550.2022.04.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3550.2022.04.008).
- [19] 晏班夫, 寇宇航, 秦筵越, 等. 基于 DIC 方法的混凝土结构裂缝开展全局识别与重构 [J]. *中国公路学报*, 2024, 37(3): 283-297. DOI: [10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.03.017](https://doi.org/10.19721/j.cnki.1001-7372.2024.03.017).
- [20] 杨子涵, 舒江鹏, 杨静滢, 等. 基于 DIC 技术的钢筋混凝土梁剪切裂缝自动提取与量化方法 [J]. *工程力学*, 2024, 41(增刊 1): 187-196. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2023.05.S021](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2023.05.S021).
- [21] 徐铖基, 王小虎, 戴雨晴, 等. 混凝土劈裂损伤和毛细传输过程的原位表征 [J]. *土木工程学报*, 2023, 56(8): 27-36. DOI: [10.15951/j.tmgxcb.22030276](https://doi.org/10.15951/j.tmgxcb.22030276).
- [22] 任会兰, 杜一宁, 宋水舟. 基于 DIC 方法研究混凝土劈裂的变形和破坏 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(4): 91-100. DOI: [10.11858/gywlxb.20220509](https://doi.org/10.11858/gywlxb.20220509).
- [23] 吴恺云, 罗素蓉, 郑建岚. 基于非接触式观测技术的再生骨料混凝土断裂性能分析 [J]. *工程力学*, 2022, 39(3): 147-157. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0067](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.01.0067).
- [24] 罗滔, 李骄洋, 张天祺, 等. 基于 DIC 技术的自密实混凝土界面裂缝扩展规律研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2024, 35(1): 143-153. DOI: [10.11705/j.issn.1672-643X.2024.01.17](https://doi.org/10.11705/j.issn.1672-643X.2024.01.17).
- [25] 姚洁香, 董伟, 钟红. 岩石-混凝土界面拉伸断裂性能的率相关性研究 [J]. *工程力学*, 2022, 39(12): 108-119. DOI: [10.6052/j.issn.1000-4750.2021.07.0532](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2021.07.0532).
- [26] 中华人民共和国国家能源局. 水工碾压混凝土试验规程: DL/T 5433—2009[S]. 北京: 中国电力出版社.

Crack propagation law of roller compacted concrete layer based on DIC technology

LI Zhilong¹, WANG Jing², LI Yang², CHAI Jiaqi²

(1. National Energy Group Xizang Electric Power Co., Ltd., Linzhi 860114, China; 2. Faculty of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Roller compacted concrete has the characteristics of low hydration heat, zero slump, high application speed, and low cost, making it suitable for constructing large concrete structures. The roller compacted concrete dam is constructed layer by layer using the roller compacted construction method with dry and hard concrete. However, layered construction often forms many layers, and the interlayer joints of rolled concrete are the weak link in engineering. Under continuous loads, cracks, holes and other defects will inevitably appear, endangering the anti-skid stability of the layer and posing a threat to the safety and durability of the dam. Layer cracks are a significant sign of structural failure. Therefore, it is necessary to conduct research on the crack propagation law of roller compacted concrete under load.

Three different types of mortars (cement mortar, nano SiO₂ mortar, and expansion agent mortar) were designed to treat the layer of roller compacted concrete specimens, and a universal testing machine was used to apply splitting load for splitting tensile test. The splitting tensile strength and surface morphology of different specimens were recorded. During the splitting tensile test, the DIC analysis system was used to collect the strain of the specimen during the splitting process, in order to obtain a strain cloud map of the entire process of crack formation and propagation in the roller compacted concrete layer. The variation patterns of crack width and propagation rate were calculated and analyzed through system software. The cutting machine was used to extract the layer of roller compacted concrete, and the microhardness of different mortar treatments was tested using a microhardness tester. The microhardness has a high linear relationship with crack propagation rate and splitting tensile strength.

The experimental results indicated that: (1) The mortar treatment could better embed aggregates and provide mechanical interlocking force for layer bonding. Therefore, the splitting tensile strength of the compacted concrete layer was improved after mortar treatment. Nano SiO₂ and expansion agents could promote cement hydration and fill pores, and the improvement effect of the three types of mortar was based on the following: nano SiO₂ mortar > expansion agent mortar > cement mortar. (2) Under the action of splitting load, strain concentration zones gradually appeared on the layer of roller compacted concrete. Based on the change of strain color gradient, the crack development process was divided into initial stage, initiation stage, expansion stage, and penetration stage. Mortar treatment could improve the stability of the layer structure and delay the development of layer cracks. The load displacement curve shown that the peak loads of the specimen layer treated with cement mortar, nano SiO₂ mortar, and expansion agent mortar were 44.43 kN, 52.90 kN, 62.48 kN, and 59.81 kN, respectively. (3) The width and propagation rate of cracks were basically 0 in the initial stage, and then began to rise, with a sharp increase in the expansion stage. The crack propagation rate of the layer treated with nano SiO₂ mortar were the smallest. (4) The microhardness of layer was lower than that of the upper and lower layers of rolled compacted concrete, and the determination coefficients between microhardness, crack propagation rate, and splitting tensile strength are 0.941 and 0.960, respectively.

When carrying out roller compacted concrete construction, the layer as a weak structure, the occurrence of cracking needs to be considered. The expansion law of cracks on the layer of roller compacted concrete was studied through DIC technology, which could provide reference value for improving the bonding quality of roller compacted concrete dam layer and reducing the occurrence of cracks.

Key words: roller compacted concrete; splitting tensile; layer crack; digital image correlation; microhardness