

混凝土界面过渡区细观尺度力学性能的 应变率相关性研究

李金祥¹, 雷冬^{1,2}, 何锦涛¹, 高子淇¹, 宋辉³

(1. 河海大学 力学与工程科学学院, 南京 211100; 2. 河海大学 苏州研究院, 江苏 苏州 215132;

3. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 长沙 410011)

摘要: 为系统探究混凝土界面过渡区(ITZ)在细观尺度下力学性能的率相关性行为,本文结合光学显微镜与数字图像相关(DIC)技术,对细观混凝土试件开展不同应变率条件下的单轴压缩试验,重点分析ITZ厚度、弹性模量及泊松比等关键力学参数在应变率范围为 10^{-4} ~ 10^{-2} s⁻¹条件下的变化规律。试验结果表明,在所研究的应变率范围内,ITZ厚度随应变率变化不显著,表现出较好的几何稳定性;相比之下,ITZ弹性模量随应变率的提高呈现明显上升趋势,体现出显著的率强化特征,而其泊松比则随应变率增加而逐渐降低,显示出与弹性模量相反的率相关响应。进一步对比发现,ITZ力学参数对应变率的敏感性明显高于砂浆和骨料相区,表明界面区域在加载速率变化下对混凝土整体力学响应应具有更为突出的调控作用。随着应变率的提高,ITZ与相邻砂浆、骨料之间的力学性能差异逐渐减小,较高应变率可在一定程度上抑制界面过渡区的局部弱化效应,促使混凝土在细观尺度上的力学响应趋于均质化。研究结果可为混凝土在不同加载速率条件下的细观力学建模与本构关系构建提供试验依据。

关键词: 界面过渡区; 率相关性; 数字图像相关; 弹性模量; 泊松比

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)01-0118-08

Study on the Strain Rate Dependence of Meso-Scale Mechanical Properties of the Concrete Interfacial Transition Zone

LI Jinxiang¹, LEI Dong^{1,2}, HE Jintao¹, GAO Ziqi¹, SONG Hui³

(1. College of Mechanical and Engineering Sciences, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Suzhou Research Institute of Hohai University, Suzhou 215132, Jiangsu China; 3. Hunan Provincial Water Transport Construction & Investment Group Co. Ltd., Changsha 410011, China)

Abstract: To systematically investigate the strain rate dependent mechanical behavior of the concrete interfacial transition zone (ITZ) at the mesoscale, uniaxial compression tests were conducted on mesoscopic concrete specimens under different strain rate conditions by combining optical microscopy and digital image correlation (DIC) techniques. The variations in key mechanical parameters of the ITZ, including thickness, elastic modulus, and Poisson's ratio, were analyzed over a strain rate range of 10^{-4} to 10^{-2} s⁻¹. The experimental results indicate that, within the investigated strain rate range, the thickness of the ITZ shows no significant variation with strain rate, exhibiting good geometric stability. In contrast, the elastic modulus of the ITZ increases markedly with increasing

收稿日期: 2025-08-15

修回日期: 2025-11-30

接受日期: 2025-12-22

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(240201101);国家自然科学基金(52408255);中国博士后科学基金资助项目(2024M750734);苏州市科技发展计划(SYC2022080);湖南省科技项目(202316)

作者简介: 李金祥(2001-),男,硕士研究生,主要研究方向为混凝土界面过渡区

通信作者: 雷冬(1978-),男,教授,博士,主要研究方向为混凝土细观力学行为,Email:leidong@hhu.edu.cn

引用格式: 李金祥,雷冬,何锦涛,等. 混凝土界面过渡区细观尺度力学性能的应变率相关性研究[J]. 河南科学,2026,44(1):118-125.

Li J X, Lei D, He J T, et al. Study on the strain rate dependence of meso-scale mechanical properties of the concrete interfacial transition zone[J]. Henan Science, 2026, 44(1): 118-125.

strain rate, demonstrating a pronounced strain rate strengthening effect, while the Poisson's ratio gradually decreases as the strain rate increases, showing an opposite strain rate dependent response to that of the elastic modulus. Further comparative analysis reveals that the strain rate sensitivity of the mechanical parameters of the ITZ is significantly higher than that of the mortar and aggregate phases, indicating that the interfacial region plays a more prominent regulating role in the overall mechanical response of concrete under varying loading rates. With increasing strain rate, the differences in mechanical properties between the ITZ and the adjacent mortar and aggregate phases gradually diminish. Higher strain rates can effectively suppress the localized weakening effect of the ITZ, thereby promoting a more homogeneous mechanical response of concrete at the mesoscale. The results of this study provide experimental support for mesoscale mechanical modeling and constitutive relationship development of concrete under different loading rate conditions.

Key words: interfacial transition zone; strain rate dependence; digital image correlation; elastic modulus; Poisson's ratio

0 引言

混凝土是由砂浆、骨料以及两者之间的界面过渡区(ITZ)组成的三相复合材料^[1-2]。其中,ITZ作为水化产物定向富集的微米级薄层(厚度约10~100 μm)^[3],因其微观结构中存在更为密集的内部缺陷(如微裂纹、孔隙等),导致ITZ弹性模量较砂浆基体降低30%~50%,断裂韧性下降约40%。因此,界面过渡区通常被认为是混凝土结构的最薄弱环节^[4]。此外,混凝土工程结构在服役期间常会承受不同应变率的复杂荷载作用,而混凝土本身是典型的应变率敏感材料,其强度、刚度和延展性都受到加载速率的影响^[5-6]。鉴于ITZ的关键地位及其性能对混凝土整体力学性能与耐久性的显著影响^[7],深入探究ITZ力学性能的应变率效应,成为揭示混凝土结构在动态荷载下力学行为与破坏模式的关键切入点。

目前,针对界面过渡区力学性能的率相关性研究主要聚焦于宏观强度和破坏模式两方面。例如Pan等^[8]利用DIC技术发现,随着加载速率的增大,混凝土断裂能和初始断裂韧性也随之增加;杨霞等^[9]发展了界面过渡区的对数型黏滞本构模型,对不同应变率下混凝土单轴拉伸和压缩过程进行了模拟;江伟等^[10]探究了不同应变率对砂浆-花岗岩ITZ动态拉伸性能的影响规律。当前研究普遍将界面过渡区简化为力学性能均匀的薄层,但在细观层面上,ITZ实际上是一个具有显著梯度特征和非均质性的区域。然而,针对这种内在非均质性如何调控ITZ力学行为对应变率的敏感性,特别是对其细观尺度应变率效应的定量表征与机理研究,目前仍相对匮乏。

数字图像相关(DIC)是一种用于精确分析全场

变形的光学测量技术^[11-13],因其具有非接触式、精度高、环境适应性强及测试方法简单等特点,已成为现代工程材料变形分析的重要工具。近年来学者们通过DIC技术对混凝土破坏过程开展了系统性研究。Skarżyński和Suchorzewski^[14]通过DIC方法真实地捕捉到混凝土断裂试件的断裂过程区的形状;Li等^[15]使用DIC技术观测了混凝土断裂和疲劳试件,从裂纹萌生、扩展到破坏的裂纹扩展的全过程;He等^[16]将DIC技术与SEM相结合,定量分析了ITZ的力学性能和厚度,从而精确地确定了ITZ区域的变形,实现了在微观层面上对加载实验的变形分析。尽管DIC技术已在混凝土细观变形分析中取得显著成果,但将其直接应用于细观尺度的原位、实时观测,尤其是在常规加载设备环境下,仍面临空间分辨率与环境兼容性的挑战。

为此,本文采用了一种结合光学显微镜(OM)与DIC的观测方法,能够在常规力学试验机上实现对ITZ力学行为的实时、原位观测。相较于传统测量ITZ力学行为的方法,具有操作流程简单,设备通用性强等优势。此外,本文设计了一种半骨料半砂浆的长方体试件便于ITZ的直接加载与细观结构观测,并在细观层面上研究不同应变率下界面过渡区力学性能的率相关性,研究结果可为界面过渡区率相关性质的细观研究提供实验参考。

1 样品制备及实验方法

1.1 材料和样品制备

本研究选用P·O52.5号水泥,其抗压强度和抗折强度分别为55.0 MPa和10.6 MPa;骨料为玄武岩,其表观密度为2940 kg/m^3 ;减水剂为聚羧酸系高效减水剂;硅灰为高活性微硅粉,其主要参数见表1。

表1 硅灰化学成分表

Tab.1 Chemical composition of silica fume

单位: %

SiO ₂	Cl ⁻	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	NaCl	KCl
96.1	0.07	0.12	0.19	0.02	0.01

试件的制备过程如图1所示,尺寸为10 mm×10 mm×16 mm的半骨料-半砂浆(表2)试样。为了在OM下更清晰地观察混凝土界面过渡区,先在干燥条件下,采用粗糙度为P500、P1000、P1500的三种砂纸对观察面进行打磨,随后在金相磨抛机上进行3~5 min的抛光处理。试件的应变率设置详见表3。

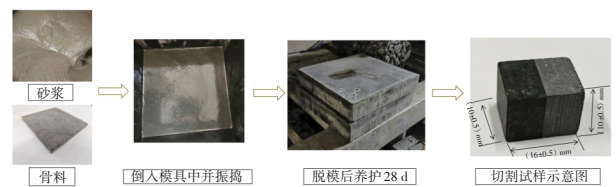


Fig.1 Schematic diagram of the casting process

表2 砂浆的材料组分

Tab.2 Material composition of mortar

组分	水泥	硅灰	水	减水剂
质量比	1	0.15	0.23	0.03

1.2 实验和测量方法

本实验采用OM与DIC结合的方法,对ITZ的力学行为进行实时观测与定量分析。实验装置如图2所示,其组成结构分为图像采集系统和万能试验机。光学显微镜可以观察到ITZ区域的变形情况,其分辨率为1920×1080,图像的放大倍数为50倍,足以满足界面过渡区细观结构的观测需求,万能试验机上安装有位移传感器和力传感器,其量程为0~30 t,加载速率的变化范围为0~510 mm/min。

具体实验过程如下:首先,将样品按图2所示固定在试验装置上,确保加载方向与试件的接触面垂直的同时,调整显微镜的拍摄角度,使之正对于试件的观察面。通过光学显微镜获取的试件表面形貌如图3所示,左侧区域为骨料,右侧区域为砂浆,两者间存在清晰可辨的ITZ。然后,对试件以10⁻²、10⁻³、10⁻⁴ s⁻¹三种不同的应变率进行加载,每组应变率下均重复实验8次。在试件加载开始时,光学显微镜同步开始连续拍摄界面过渡区的变形图像序列,由于10⁻²、10⁻³ s⁻¹两种应变率较大导致试样的加载时间较短,为保证DIC分析有足够多的照片,故调整拍摄时间间隔,如表3所示。随后,将拍摄的图像导入

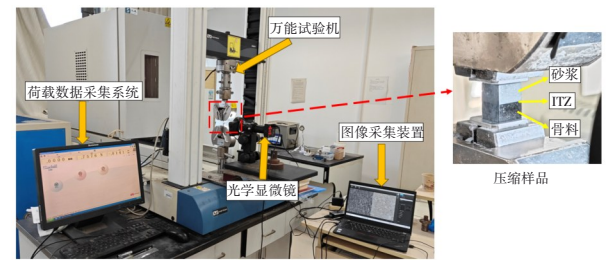


图2 实验整体环境以及试块摆放位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the overall experimental environment and the placement of test blocks

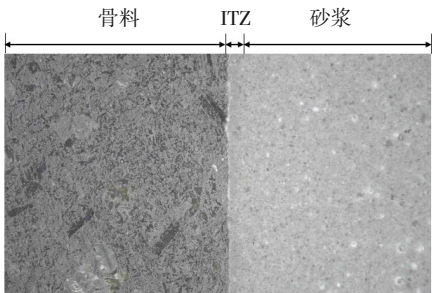


图3 OM显微镜拍摄的界面过渡区图像

Fig.3 ITZ image captured by OM microscope

表3 试件的加载速率及图像数据采集的设置

Tab.3 Loading rate of specimen and setting of image data acquisition

应变率/(s ⁻¹)	组别	加载速率/(mm·min ⁻¹)	拍摄设置	试验机1 s采集荷载数据个数/个
10 ⁻⁴	A1~A8	0.096	5 帧	2
10 ⁻³	B1~B8	0.96	1 帧	10
10 ⁻²	C1~C8	9.6	20 帧	40

VIC-2D软件进行分析,获得不同时刻的平面应变分布云图。基于万能试验机记录的荷载数据计算试件应力,并利用表3中图像拍摄的频率和试验机采集荷载数据的对应关系,同步匹配出应力和应变数据,最终计算获得界面过渡区的弹性模量。

VIC-2D通过高精度匹配参考图像与目标图像中特征点的几何映射关系,实现非接触式全场应变分析^[17-18]。其基本原理是通过对比变形前后图像中局部子区域的位移变化,量化全场应变分布。如图4所示,具体流程为:首先选定参考图像(变形前状态)中的目标分析区域,将其划分为若干子区,并基于灰度分布特征提取各子区的特征点;随后,在目标图像(变形后状态)中,通过灰度匹配算法追踪特征点的空间位置偏移,进而计算各子区的位移矢量场;最终对位移场微分得到应变分布。

在DIC分析中,通常需对样品表面进行人工散斑制备以提供可追踪的随机灰度特征^[19]。然而,实

验所用样品表面天然存在的纹理特征具备足够的随机性与对比度,能够满足DIC算法对灰度分布匹配的要求,故未进行额外散斑处理。

2 结果分析

2.1 不同应变率下的应变云图分析

将光学显微镜拍摄的序列图像导入VIC-2D软件中进行数字图像相关分析,获取试件在荷载作用

下的时序平面应变场分布。软件参数设置为:计算子区域大小为55,分析步长为5,以确保计算结果的精度与稳定性。在外力作用下,微裂纹主要沿着强度较弱的混凝土界面过渡区扩展,纵向应变云图中表现为骨料与砂浆之间呈现出一条明显的深色条带,这与周围区域的应变分布显著不同,此区域即为界面过渡区,如图5所示。图6展示了各应变率在压缩荷载为1、5、12 kN下的纵向应变云图,其中压应变

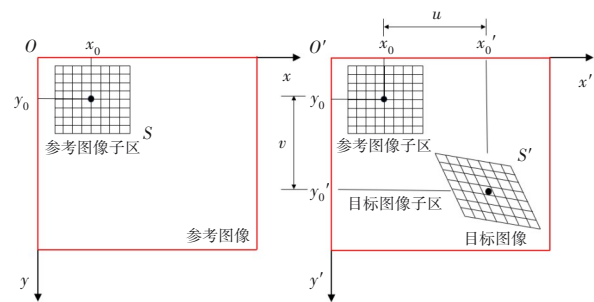


图4 参考图像与目标图像示意图

Fig.4 Schematic diagram of reference image and target image

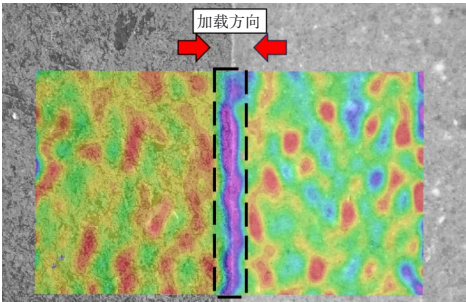


图5 ITZ在应变云图中的位置示意图

Fig.5 Schematic diagram of ITZ location in strain contour map

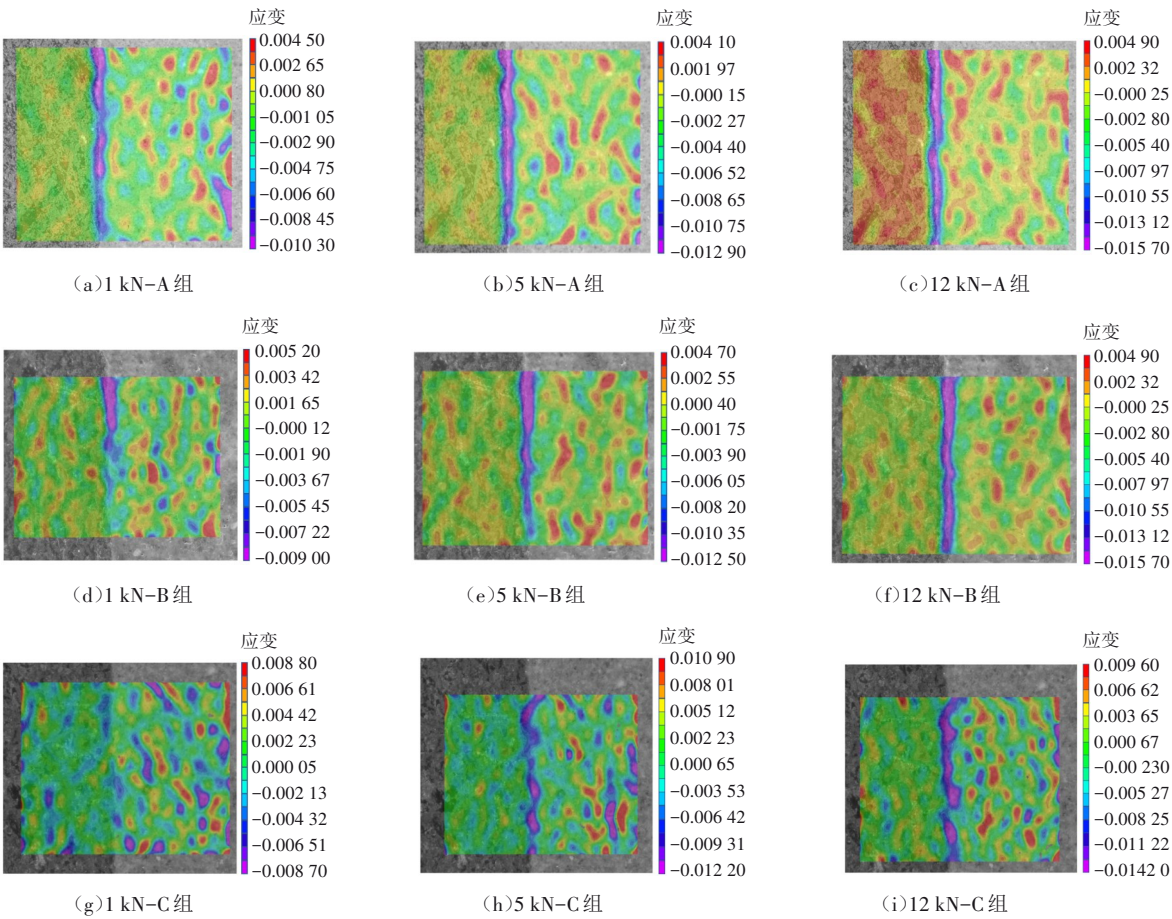


图6 不同应变率下各组试件的纵向应变云图

Fig.6 Longitudinal strain contour maps of specimen groups at various strain rates

为负值。图7基于应变云图分析,展示了各组试件界面过渡区(ITZ)在加载过程中最大压应变的演变规律。

基于应变云图和图7可以看出,ITZ表现出显著的压应变集中现象,同一应变率下,随着荷载的增加,ITZ区域的压应变幅值持续累积,且出现明显的紫色条带,如在应变率为 10^{-4} s^{-1} 时,随着荷载的增加,ITZ区域的压应变最大值从 $-0.010\ 33$ 增加到 $-0.015\ 63$ 。而骨料和砂浆的拉应变分布呈现非对称特征,随着荷载的不断增大,砂浆基体内形成大量离散的拉应变块状区域。同一荷载下,应变率越高,ITZ区域的压应变越小,这间接揭示了随着应变率的升高,ITZ弹性模量也随之增大的规律,如当荷载为 5 kN 时,随着应变率的增加,ITZ区域的最大压应变由 $-0.012\ 87$ 降至 $-0.012\ 30$ 。

2.2 不同应变率对界面过渡区厚度的影响

基于相邻像素点之间的应变分布是均匀的假设,通过建立垂直于界面过渡区(ITZ)方向的测量基线(图8),实现对ITZ厚度的定量分析。图9展示了沿基线分布的应变演化特征:骨料-砂浆界面两侧呈

现显著应变梯度差异,其中骨料侧因刚性约束作用维持较低压缩应变($-0.001\ 9$),而砂浆侧的平均应变则为 $-0.002\ 5$ 。据此定义ITZ范围为从骨料侧 $-0.001\ 9$ 应变点至砂浆侧 $-0.002\ 5$ 应变点的过渡区域,其空间跨度即为ITZ厚度。基于上述实验数据绘制了不同应变率下混凝土试件ITZ厚度分布的箱线图,如图10所示。

图10的实验数据表明,界面过渡区厚度在所测应变率范围内($10^{-4}\sim 10^{-2}\text{ s}^{-1}$)波动较小。对应的ITZ平均厚度分别为 115.69 、 113.42 、 $110.58\ \mu\text{m}$ 。根据材料学的理论,ITZ厚度是材料的固有属性,基本不受应变率的影响。

2.3 不同应变率对界面过渡区弹性模量的影响

由压缩试验机导出的荷载数据得到ITZ区域的压缩应力,最后绘制了不同应变率下ITZ的应力-应变曲线(弹性阶段),如图11所示。通过对不同应变率下界面过渡区的应力-应变曲线进行系统分析,可以看出随着应变率的增加,界面过渡区应力-应变曲线的斜率有明显增大的趋势,即界面过渡区的弹性模量显著增加,该现象是因为随着加载速率增加,试件的压应变无法充分累积,从而表现出弹性模量的增加,这和前文中应变云图的变化是一致的;其次,各个应变率下的应力-应变曲线,在应变为 $0.001\ 5$ 之

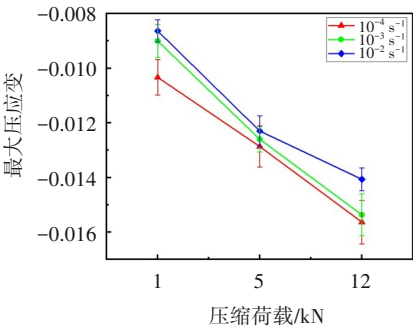


图7 不同压缩荷载下各组试件ITZ最大压应变演化规律

Fig.7 Evolution law of maximum compressive strain of ITZ in each group of specimens under different compressive loads

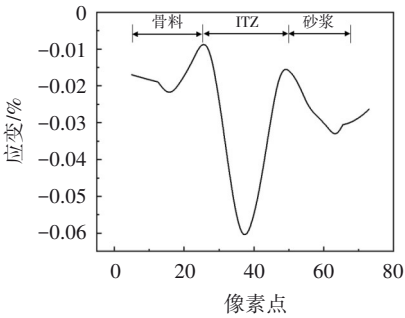


图9 沿着直线方向的应变与像素点的关系

Fig.9 The relationship between strain along a straight line and pixel points

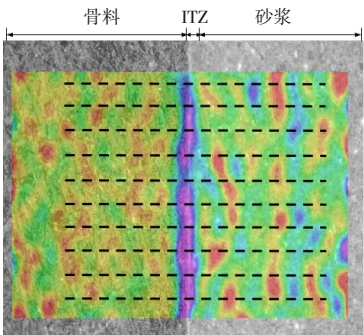


图8 使用VIC-2D软件在样品的应变云图中绘制直线

Fig.8 Draw straight lines in the strain cloud map of the sample using VIC-2D software

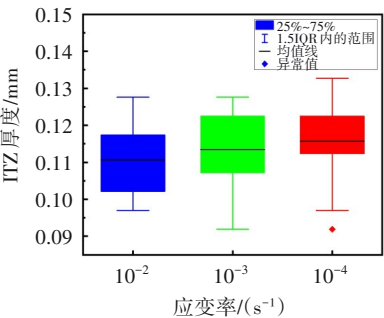


图10 不同应变率下的ITZ厚度箱线图

Fig.10 ITZ thickness box plots at different strain rates

前都较为平缓,随后出现斜率增加的现象,这是由于当应变小于0.001 5时,ITZ孔隙和试验机机械间隙的影响,导致加载的最初阶段试件还未压实,所以在此之前曲线增长较为平缓。

基于上述ITZ区域的应力与应变数据,可得出其弹性模量分布(图12)。进一步,根据图12所示的弹模分布计算出ITZ区域的平均弹性模量,如图13所示。

基于图12、13可知,在不同应变率(10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} s $^{-1}$)下,ITZ区域的平均弹性模量分别为12.49、

17.44、21.87 GPa,表现出显著的率相关性。随着应变率的增加,ITZ的弹性模量显著提升,其在 10^{-2} s $^{-1}$ 下的平均弹性模量较 10^{-4} s $^{-1}$ 应变率下增大了约75.10%。砂浆和骨料的弹性模量同样随应变率的增加而增大,砂浆区域的平均弹性模量依次是18.41、21.6、24.56 GPa。应变率为 10^{-2} s $^{-1}$ 时,砂浆的平均弹性模量较 10^{-4} s $^{-1}$ 时提升了约33.41%,其率敏感性低于ITZ。骨料的平均弹性模量依次是32.21、35.42、37.84 GPa。骨料受应变率的影响相对于砂浆、ITZ最小,应变率为 10^{-2} s $^{-1}$ 时,骨料的平均弹性模量较 10^{-4} s $^{-1}$ 时提升了约17.48%。

界面过渡区弹性模量表现出最显著的应变率敏感性,其核心机理源于ITZ高孔隙结构与细观惯性效应的协同作用。ITZ作为混凝土中初始微裂纹最密集的区域,在较低应变率下(如 10^{-4} s $^{-1}$),孔隙受载缓慢,微裂纹有充足时间沿着薄弱界面优先萌生和扩展^[7],随着应变率提高至 10^{-2} s $^{-1}$ 量级,微裂纹扩展时间不足,长度和分叉减少,显著增大ITZ的有效承载刚度。同时,应变率提高导致骨料与砂浆的惯性效应增强,ITZ承受的局部应力重新分布^[20]。裂纹需更高能量才能绕过骨料(原弱路径为ITZ),迫使更多裂纹穿透骨料,间接提升ITZ的表观刚度。这两种机制共同提升ITZ的局部刚度,使其弹性模量增幅达75.10%,远高于砂浆(33.41%)和骨料(17.48%)。此外,动态强度放大因子(DIF)理论^[7]进一步佐证:初始强度较低的材料(如ITZ)在高应变率下的模量和强度增幅更大。

值得注意的是,随着应变率的逐渐增加,ITZ、砂浆与骨料之间的弹性模量差异逐渐减小。这一现象源于惯性力约束效应:较高应变率加载时,产生的惯性力倾向于抑制微裂纹在局部薄弱区(如ITZ)的萌生和扩展^[20-21],迫使应力更均匀地分布于砂浆基体和骨料间。该效应显著削弱了ITZ局部薄弱性的影响,促使混凝土的破坏模式从界面控制型向基体控制型转变。

2.4 不同应变率对界面过渡区泊松比的影响

基于ITZ区域的纵向应变和横向应变数据,由泊松比的计算公式得到ITZ区域的泊松比分布,如图14所示。基于此分布,计算得出ITZ区域的泊松比(图15)。

由图15可知,界面过渡区(ITZ)、砂浆及骨料的泊松比均表现出显著的应变率依赖性,且随应变率升高呈下降趋势。具体而言,ITZ在应变率 10^{-4} 、 10^{-3} 、 10^{-2} s $^{-1}$ 下的平均泊松比分别为0.190 7、0.155 3、

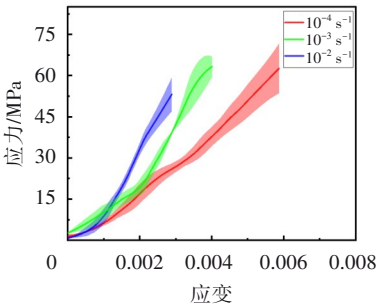


图 11 不同应变率下ITZ的应力-应变曲线
Fig.11 Stress-strain curves of ITZ at different strain rates

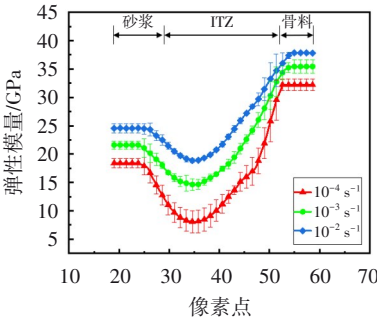


图 12 混凝土各组分沿基线方向的弹性模量分布图
Fig.12 Elastic moduli distribution of each component of concrete along the baseline

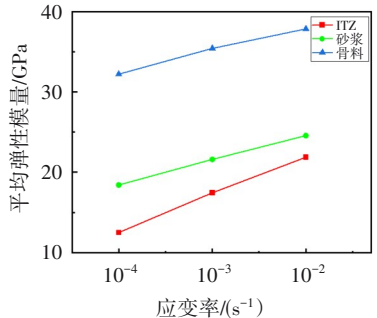


图 13 混凝土各组分弹性模量随应变率变化图
Fig.13 Variation of elastic moduli of each component of concrete with strain rate

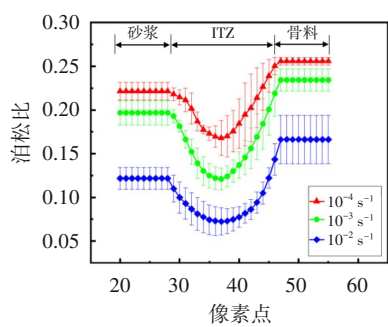


图14 混凝土各组分沿基线方向的泊松比分布图

Fig.14 Distribution of Poisson's ratios along the baseline for each component of concrete

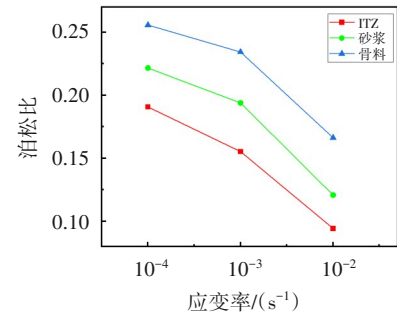


图15 混凝土各组分泊松比随应变率变化图

Fig.15 Variation of Poisson's ratios of each component of concrete with strain rate

0.094 3,由应变率 10^{-4} s^{-1} 到 10^{-2} s^{-1} 时,ITZ 平均泊松比降幅达到了 50.55%,表明在较高应变率下 ITZ 的横向变形能力受到显著抑制;砂浆的平均泊松比分别 0.221 6、0.193 9、0.120 8,泊松比降幅为 45.49%,低于界面过渡区的率敏感性;骨料的平均泊松比分别 0.255 7、0.234 3、0.166 3,泊松比变化范围相对于 ITZ、砂浆最小,降幅仅为 34.96%。

这种泊松比的率相关性主要源于微裂纹与孔隙的惯性效应:在较高应变率下,混凝土细观组分(ITZ、砂浆、骨料)内部微裂纹和孔隙来不及充分扩展或闭合,产生惯性约束效应^[21]。该效应增大了裂纹扩展的惯性阻力,促使裂纹路径趋于平直并减少分支^[22],从而抑制横向变形,导致泊松比下降。其中,ITZ 因其高孔隙率结构,在较高应变率下更易受惯性约束的影响,故横向变形抑制最为显著;砂浆孔隙率较低,泊松比降幅相对较小,骨料几乎不含微裂纹,变形以弹性压缩主导,因此泊松比降幅最小。

3 结论

本文采用光学显微镜(OM)与数字图像相关(DIC)相结合的测量技术,从细观层面深入研究了

不同应变率对界面过渡区(ITZ)厚度、弹性模量以及泊松比的影响规律,得出以下结论:

- 1)在该应变率($10^{-4} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$)范围内,ITZ 厚度并无显著改变,即 ITZ 厚度对应变率的变化不敏感。
- 2)混凝土各组分的弹性模量随应变率的增加而显著增大,而泊松比则呈现下降趋势,相对于骨料和砂浆,界面过渡区力学参数的应变率依赖性更为突出。
- 3)随着加载应变率的提高,界面过渡区与砂浆、骨料之间的弹性模量和泊松比差异逐渐减小。这一变化规律表明,混凝土材料的力学响应逐渐从多相异质性主导转向基体相(砂浆)性能主导。

参考文献:

[1] Nežerka V, Bílý P, Hrbek V, et al. Impact of silica fume, fly ash, and metakaolin on the thickness and strength of the ITZ in concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 103: 252–262.

[2] Chen H S, Zhu Z G, Lin J J, et al. Numerical modeling on the influence of particle shape on ITZ's microstructure and macro-properties of cementitious composites: A critical review[J]. Journal of Sustainable Cement-Based Materials, 2018, 7(4): 248–269.

[3] 何小芳, 缪昌文, 张云升, 等. 水泥基材料界面过渡区结构及其性能的分析方法综述[J]. 混凝土, 2009(10): 19–23.

He X F, Miao C W, Zhang Y S, et al. Analysis methods about structure and its performance of interfacial transition zone(ITZ)[J]. Concrete, 2009(10): 19–23.

[4] Ramesh G, Sotelino E D, Chen W F. Effect of transition zone on elastic moduli of concrete materials[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(4): 611–622.

[5] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behaviour of concrete at high strain rates [J]. Materials and Structures, 1991, 24(6): 425–450.

[6] Cusatis G. Strain-rate effects on concrete behavior [J]. International Journal of Impact Engineering, 2011, 38(4): 162–170.

[7] 杜修力, 揭鹏力, 金浏. 不同加载速率下界面过渡区对混凝土破坏模式的影响[J]. 水利学报, 2014, 45(增刊 1): 19–23.

Du X L, Jie P L, Jin L. Influence of the interfacial transition zone on concrete failure mode under different loading-rates [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(S1): 19–23.

[8] Pan K M, Wu Z M, Yu R C, et al. Study on the dynamic fracturing characteristics of aggregate-mortar interface

- under various loading rates using DIC [J]. Construction and Building Materials, 2023, 403: 133069.
- [9] 杨霞,顾鑫,夏晓舟. 应变率效应下混凝土界面过渡区本构建模及其动力性能研究[J]. 河南科学, 2025, 43(4): 494–504.
Yang X, Gu X, Xia X Z. Modeling of the interfacial transition zone in concrete under strain rate effects and its dynamic performance [J]. Henan Science, 2025, 43 (4) : 494–504.
- [10] 江伟,卢玉斌,姜锡权,等. 砂浆-花岗岩 ITZ 动态直接拉伸力学性能的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(8): 1905–1915.
Jiang W, Lu Y B, Jiang X Q, et al. Experimental study on dynamic direct tensile mechanical properties of mortar-granite ITZ [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(8): 1905–1915.
- [11] Dong W, Wu Z M, Zhou X M, et al. An experimental study on crack propagation at rock-concrete interface using digital image correlation technique [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 171: 50–63.
- [12] 潘兵,谢惠民,李艳杰. 用于物体表面形貌和变形测量的三维数字图像相关方法[J]. 实验力学, 2007, 22(6): 556–567.
Pan B, Xie H M, Li Y J. Three-dimensional digital image correlation method for shape and deformation measurement of an object surface [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(6): 556–567.
- [13] 胡利丰,洪淼,何锦涛,等. 基于数字图像相关技术的新老混凝土劈裂试验研究[J]. 河南科学, 2025, 43(12): 1759–1767.
Hu L F, Hong M, He J T, et al. Experimental study on splitting tensile behavior of new-to-old concrete Based on digital image correlation (DIC) technology [J]. Henan Science, 2025, 43(12): 1759–1767.
- [14] Skarżyński Ł, Suchorzewski J. Mechanical and fracture properties of concrete reinforced with recycled and industrial steel fibers using digital image correlation technique and X-ray micro computed tomography [J]. Construction and Building Materials, 2018, 183: 283–299.
- [15] Li D Y, Huang P Y, Chen Z B, et al. Experimental study on fracture and fatigue crack propagation processes in concrete based on DIC technology [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 235: 107166.
- [16] He J T, Lei D, Xu W X. *In-situ* measurement of nominal compressive elastic modulus of interfacial transition zone in concrete by SEM-DIC coupled method [J]. Cement and Concrete Composites, 2020, 114: 103779.
- [17] Lei D, Huang Z T, Bai P X, et al. Experimental research on impact damage of Xiaowan arch dam model by digital image correlation [J]. Construction and Building Materials, 2017, 147: 168–173.
- [18] Du W K, Lei D, Bai P X, et al. Dynamic measurement of stay-cable force using digital image techniques [J]. Measurement, 2020, 151: 107211.
- [19] Thériault F, Noël M, Sanchez L. Simplified approach for quantitative inspections of concrete structures using digital image correlation [J]. Engineering Structures, 2022, 252: 113725.
- [20] 金浏,杜修力. 加载速率及其突变对混凝土压缩破坏影响的数值研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(19): 187–193.
Jin L, Du X L. Effects of loading rate and its sudden change on concrete compressive failure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(19): 187–193.
- [21] 杜修力,金浏. 界面过渡区对混凝土动态力学行为影响分析[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 11–19.
Du X L, Jin L. Effect of the interfacial transition zone on the dynamic macroscopic mechanical behavior of concrete [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(1): 11–19.
- [22] Chen Z F, Luo Q C, Jin D, et al. Numerical study of fractal analysis of crack propagation in concrete under different strain rates by meso-scale particle element modeling [J]. International Journal of Impact Engineering, 2023, 173: 104440.

(编辑 许军策)