

基于体应变的水泥基材料修复区粘结效果可视化分析

董必钦, 彭少成, 张健超, 翁建武, 洪舒贤

(深圳大学土木与交通工程学院, 广东省滨海土木工程耐久性重点实验室, 广东 深圳 518000)

摘 要: 界面的粘结效果对水泥基材料的修复至关重要, 但是目前没有合适的方法评估粘结材料是否在界面建立有效粘结。本工作提出一种方法对水泥基样品修复区的粘结效果进行可视化分析。对 3 个具有不同粘结面积的砂浆样品开展 X 射线计算机断层扫描原位轴压试验并获取加载过程中的体图像, 然后采用数字体相关法(DVC)对变形前后的体图像进行相关计算。未粘结区域不受粘结剂约束, 加载过程中会产生较粘结区域更大的变形, 通过 DVC 应变图中出现的应变突变可以检测出样品中未建立有效粘结的区域。结果表明, 应变图中检测出的未建立有效粘结区域与实际的未粘结区域对应良好, 说明该方法能检测定位出修复后的样品中的无粘结区域。

关键词: 水泥基材料修复; X 射线断层扫描; 数字体相关; 粘结效果可视化分析

中图分类号: TU528 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)08-2078-09

网络出版时间: 2022-07-04



Visualization Analysis on Bonding Effect of Cementitious Material Repaired Zone Based on Volumetric Strain

DONG Biqin, PENG Shaocheng, ZHANG Jianchao, WENG Jianwu, HONG Shuxian

(College of Civil and Transportation Engineering Shenzhen University, Guangdong Province Key Laboratory of Durability for Marine Civil Engineering, Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: The interface bonding quality is critical to the repair effect of repaired cementitious materials. In present, there is no proper method to accurately evaluate whether the interface can establish the effective mechanical connection. This work proposed a method to visualize the interface bonding effect of cementitious materials repaired zone. The volume images on three repaired mortars with different bonding areas during loading process were obtained via *in-situ* X-ray computed tomography. The digital volume correlation (DVC) was employed to analyze the volumetric strain distribution of samples based on the obtained images. As there is no constraining in de-bonding area, a greater deformation occurs in the loading process than in the bonded area. Therefore, the area without a mechanical bond in the repaired mortar can be visualized through the strain mutation in the DVC strain contour. The results show that the strain mutation area detected in the DVC results corresponds well with the artificial de-bonding area, indicating that this method can detect the de-bonding area in the repaired mortar.

Keywords: repaired cementitious materials; X-ray computed tomography; digital volume correlation; visualized evaluation of the bonding property

混凝土构件在养护及服役过程中因受温度、湿度变化以及外部荷载等因素影响, 极易产生裂缝。这些裂缝会导致构件强度及刚度的损失、结构整体的耐久性下降甚至因此埋下安全隐患。所以对存在既有缺陷混凝土结构维修加固的一个关键问题就是

胶粘剂与混凝土基体界面的粘结效果表征。目前针对界面粘结效果测试已经做过许多研究^[1-3], 主要集中于强度指标的测试, 例如三点弯、四点弯和劈裂实验用来测量粘结界面的抗拉强度^[4-5], 直剪实验、双面剪切实验和斜剪实验用来测试粘结界面的

收稿日期: 2021-08-05。 修订日期: 2021-12-09。

基金项目: 国家自然科学基金(52078298, U1801254, 51925805)。

第一作者: 董必钦(1975—), 男, 博士, 教授。

通信作者: 洪舒贤(1982—), 女, 博士, 教授。

Received date: 2021-08-05. Revised date: 2021-12-09.

First author: DONG Biqin (1975—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: dongbq@gmail.com

Correspondent author: HONG Shuxian (1982—), female, Ph.D., Professor.

E-mail: sxhong@szu.edu.cn

抗剪强度^[6-7]。然后对破坏模式定性: 如果沿材料(基体材料、修复材料)破坏则说明修复效果最佳; 如果沿界面发生粘结失效则说明修复效果最差; 介于两者之间的是复合破坏模式, 表现为破坏界面会残留一定面积的修复材料或是基体材料, 说明修复效果良好^[8]。但是这类方法只能对修复情况进行整体评判, 忽略了界面上可能存在的薄弱区, 也因此无法定位薄弱区的位置。另一方面, X 射线计算机断层扫描(XCT)、超声检测和探地雷达等无损检测方法在混凝土结构缺陷检测方面得到广泛关注^[9-11]。也有研究会以粘结界面的电子显微镜(SEM)观察来衡量粘结效果^[8]。但是这类方法只能判断裂缝是否被粘结剂填充, 而不能确定是否在界面建立了有效的粘结。所以, 建立一种新的方法来检测评价材料修复界面的粘结效果很有必要。

界面的粘结效果可以由界面的应变情况来表征。若已建立有效粘结, 粘结剂与基体变形协调, 则界面处应变连续; 若未建立有效粘结, 该区域受荷载时会产生显著变形, 该处应变会存在突变。传统方法中, 多采用接触式方法测量材料受力引起的变形, 如应变片法和引伸计法^[12]。但是这类方法只能获得材料表面特定区域的应变情况, 难以对材料内部尤其是粘结界面的应变情况进行全局分析。数字体相关法(DVC)是一种非接触式测量方法, 可通过对变形前后体图像划分子集、相关计算获得变形图像中各子集的位移阵列和应变分布。此方法最早由 Bay 等^[12]提出, 之后逐渐应用于各种复合材料的变形测量。在水泥基材料领域, 由于其对样品干扰小、可获取全局应变等优点, DVC 在混凝土开裂行为及应变演化研究中取得了一定的发展^[13]。

本研究提出一种根据受荷载时修复界面的应变分布来可视化界面未粘结区域并计算未粘结区域面积的方法, 以此来评价修复后水泥基材料中粘结材料的粘结效果。修复后水泥基材料受荷载时的体应变可通过 XCT 和 DVC 法获取。为了验证提出的方法的适用性, 应用此方法研究了 3 种粘结面积(100 mm^2 、 70 mm^2 、 50 mm^2)的修复后水泥基材料受轴向压缩荷载时的应变分布情况, 通过各样品的体应变分布对 3 种样品修复界面的无粘结区域进行成像, 并量化计算无粘结区域面积。最后, 应用有限元方法(FEM)分析对应样品的应变分布, 以验证 DVC 结果的合理性。

1 实验

1.1 样品制备

取用 P.O. 42.5 水泥、砂、去离子水作为原材料。水泥、砂和去离子水的质量比为 2:2:1。修复剂选用湖南德益牌 E-44 型环氧树脂胶, 固化剂与黏结剂比例为 1:1。首先用钢模具浇筑出 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 的立方体砂浆试块, 室温内硬化 24 h 后拆模。在水中养护 7 d 后, 用金属切割机沿拆模后的样品 2 个侧面的中线切割, 以避免可能出现的振捣分层对实验结果产生影响。之后, 按 100 mm^2 粘结面积(S100), 70 mm^2 粘结面积(S70)和 50 mm^2 粘结面积(S50)用环氧树脂胶对切割后的砂浆样品按原来的位置进行修复(如图 1 所示)。环氧树脂层的厚度为 0.2 mm 。在室温中固化 24 h 后, 将样品加载面打磨平整, 便于上下面均匀的承受压力。另外, 为了避免环箍效应的影响, 加载前在所有试件上下表面涂有凡士林作为润滑剂。

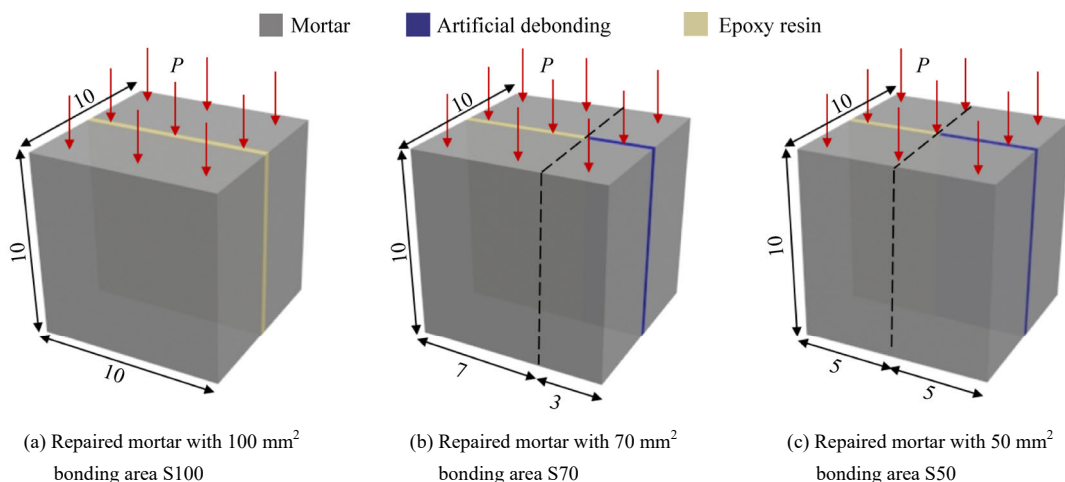


图 1 3 种修复后砂浆样品
Fig. 1 Three kinds of repaired mortars

1.2 原位加载 XCT 试验

为了选取合适的荷载,制备了 S100、S70 和 S50 的砂浆样品各 3 个,在 0.2 mm/min 加载速率下进行轴压实验,得到样品的破坏荷载,如表 1 所示。S100、S70 和 S50 样品的平均极限荷载分别为 2 657.3 N、2 714.6 N 和 2 648.4 N。然后选取破坏荷载的 40% 左右(1 000 N)作为本次实验的加载力,使得样品产生适当的变形但不至于破坏。

表 1 修复后砂浆试件极限强度

Table 1 Ultimate strength of repaired mortars			
Sample serial	Sample No.	Ultimate strength/N	Average/N
S100	Sample 1	2 579.6	2 657.3
	Sample 2	2 678.4	
	Sample 3	2 713.8	
S70	Sample 1	2 631.0	2 714.6
	Sample 2	2 644.3	
	Sample 3	2 868.5	
S50	Sample 1	2 579.2	2 648.4
	Sample 2	2 645.1	
	Sample 3	2 721.0	

原位加载试验在 XCT 仪器(Xradia Micro XCT-400, USA)内的加载装置(DEBEN, Mechanical Operation V1.0, UK)上进行。全部试样的加载速率为 0.2 mm/min, 采样速率 500 ms。为了进行 DVC 误差分析及参数优化,在未加载时刻用相同扫描参数(表 2)圆周扫描、重构 2 次得到 2 组 XCT 图像;之后,用 0.2 mm/min 的加载速率对试件施加 1 000 N 轴压荷载并保持荷载,进行第 3 次圆周扫描并重构。每次圆周扫描共采集 801 幅投影图像,重构出 1 014 幅图像,成像的体素尺寸为 14.273 5 μm ×14.273 5 μm ×14.273 5 μm 。

1.3 应变分析

DVC 是一种基于图像处理技术检测物体位移和应变的方法^[13–14]。其基本原理为:先将目标图像

分割为若干子集,且子集图像中需具有分布独特、高对比度的散斑,这种散斑将用来追踪、匹配变形后与变形前相同实体所对应的三维图像;对匹配好的成对子集的位置函数进行坐标变换即可得到所有计算点的位移阵列,其中计算点一般指子集中心体素点,之后对位移阵列插值并求导,即可得到所有子集内亚体素精度下的应变场。

表 2 XCT 测试扫描参数

Table 2 Scanning parameters of the XCT <i>in-situ</i> test			
Voltage/kV	Current/ μA	Exposure time/s	Matrix size (voxel)
80	8	8	1 024×1 024×1 014

子集尺寸和步长大小会影响到 DVC 计算的精度,需要在计算之前对这两个参数进行优化^[15–16]。而子集大小的选取与散斑粒径关系密切,需要采用未加载状态下两组 XCT 数据进行相关计算,得到各参数组合下的应变矩阵;该应变矩阵与零矩阵的标准差可用于评估误差。

1.4 数值模拟

为了验证提出方法的合理性,利用 ABAQUS 软件建立 3 种粘结面积修复后砂浆样品的单轴受压有限元模型,如图 2 所示。其中,砂浆定义为塑性材料,会随着受压或受拉发生软化,采用混凝土塑性损伤模型描述砂浆基体的应力应变关系;为了简化,环氧树脂层定义为线弹性材料。因为加载力远小于试件破坏力,所以在有限元模型中将环氧树脂层与砂浆基体的结合方式设置为绑定约束;为了与 DVC 应变结果相对应,模拟无粘结处的变形情况,将无粘结区定义为材料性能极低的材料。无粘结区与环氧树脂层和砂浆基体的交界面不受约束,设置为无摩擦的接触。模型中材料参数如表 3 所示^[17]。其中, f_b/f_c 为双向轴压强度比, K_c 为形状系数, K 为粘度参数。

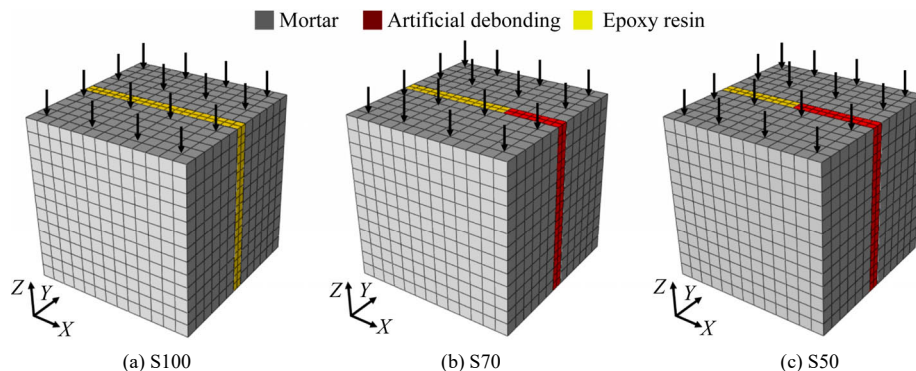


图 2 3 种粘结面积修复后砂浆样品有限元模型
Fig. 2 Simulation models of three kinds of repaired mortar

表 3 有限元模型中各材料力学性能
Table 3 Material properties in the FE models

Sample No.	Elasticity		Plasticity				
	Young's modulus/MPa	Poisson's ratio	Dilation angle $\theta/(^{\circ})$	Eccentricity	f_b/f_c	K_c	K
Mortar	32.0	0.20	0.2	32	0.1	0.667	0.005
Epoxy resin	0.2	0.25					
Artificial debonding	5.0	0.30					

2 结果与讨论

2.1 XCT 结果

图 3 显示了 S100, S70 和 S50 样品中孔隙及无粘结区域的提取结果。图 3 中蓝色部分为孔隙, 红色部分为无粘结区域。S70 和 S50 样品的无粘结区域在 XZ 平面的投影面积分别为 22.31 mm^2 和 44.58 mm^2 。

图 4 显示了 S50 样品在未加载时刻的 XCT 重构结果, 通过图 4a 和图 4b 可以直观地得到骨料, 环氧树脂胶和孔隙的空间分布信息。图 4c 为通过阈值分割方法得到的骨料分布, 经过数据统计, 得到骨料平均粒径为 $190.61 \mu\text{m}$ (13.4 voxel)。

因为各样品出自同一批, 所以仅对 S50 样品做粒径分析并仅依据此结果做 DVC 计算参数优化。选取散斑平均粒径的 1 至 4 倍(15、25、35、43、49 voxel)进行参数优化。各参数组合之下的误差计算结果如图 5 所示。根据图 5, 选取子集大小为 43 体素, 步长大小为 7 体素。选取的子集尺寸大

于未粘结区域厚度, 可以预见 DVC 应变结果将在未粘结区域出现较大应变值。值得说明的是, 此处应变值并不是真实应变, 而应视作此处发生较大相对变形的判据。

2.2 DVC 应变分析

采用商用 DVC 分析软件 vic-volume 对 3 种粘结面积的样品的应变情况进行了分析。以 0 N 荷载下的 XCT 体图像作为参考图像, 1 000 N 荷载下的 XCT 体图像作为变形图像计算试件的体应变。

图 6 显示了 3 种粘结面积样品承受 1 000 N 单轴压缩荷载时 Z 方向的压应变(ε_{ZZ})云图和对应的体应变切片图。实际受压过程中, 在试件顶部和底部砂浆基体与环氧树脂的 ε_{ZZ} 应变值可能会有微弱的差别。但是试件顶部和底部的部分 CT 图像因靠近钢制加载台会受射束硬化影响, 而不适于进行 DVC 计算, 在计算前已将其剔除。所以 DVC 结果中, 无粘结区, 有粘结区和砂浆基体的 ε_{ZZ} 应变分布均匀。另外, 因为竖向的压缩会导致试样横向膨胀, 所以在 X 和 Y 方向存在拉应力。未粘结区域的砂浆

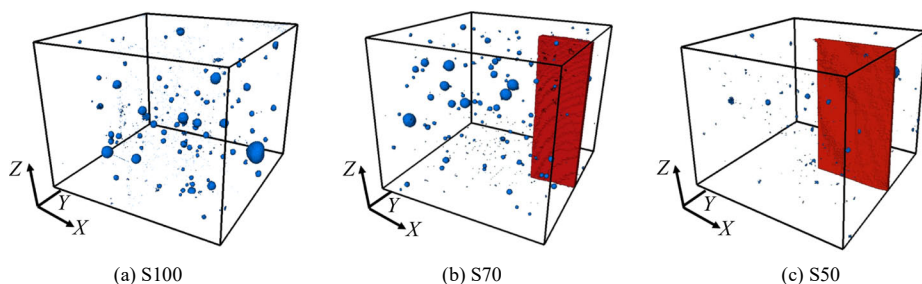


图 3 样品孔隙及无粘结区域提取结果
Fig. 3 Extraction results of pores and debonding areas

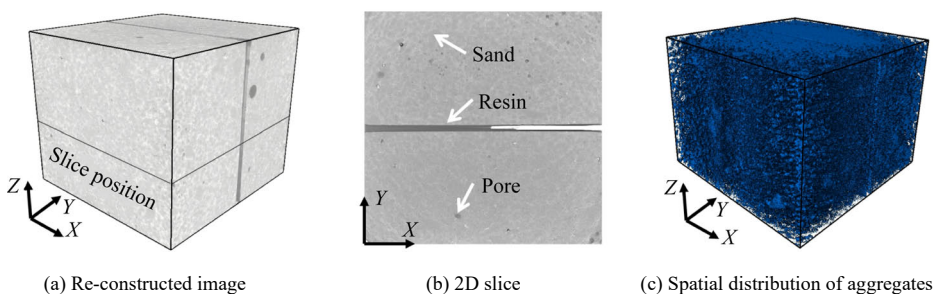
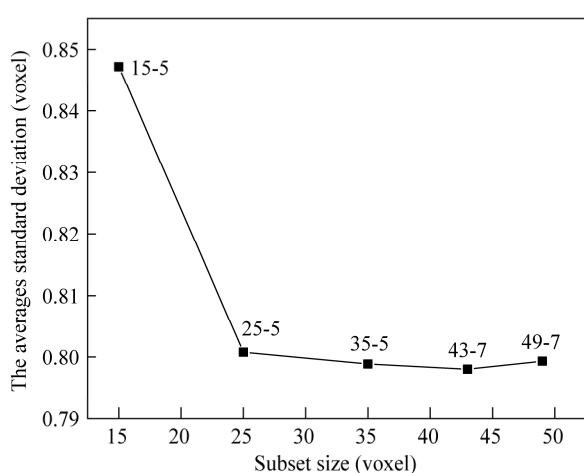
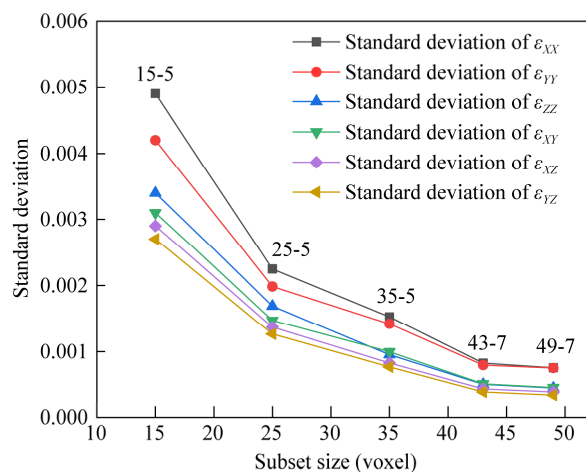


图 4 S50 样品 XCT 结果
Fig. 4 XCT results of S50

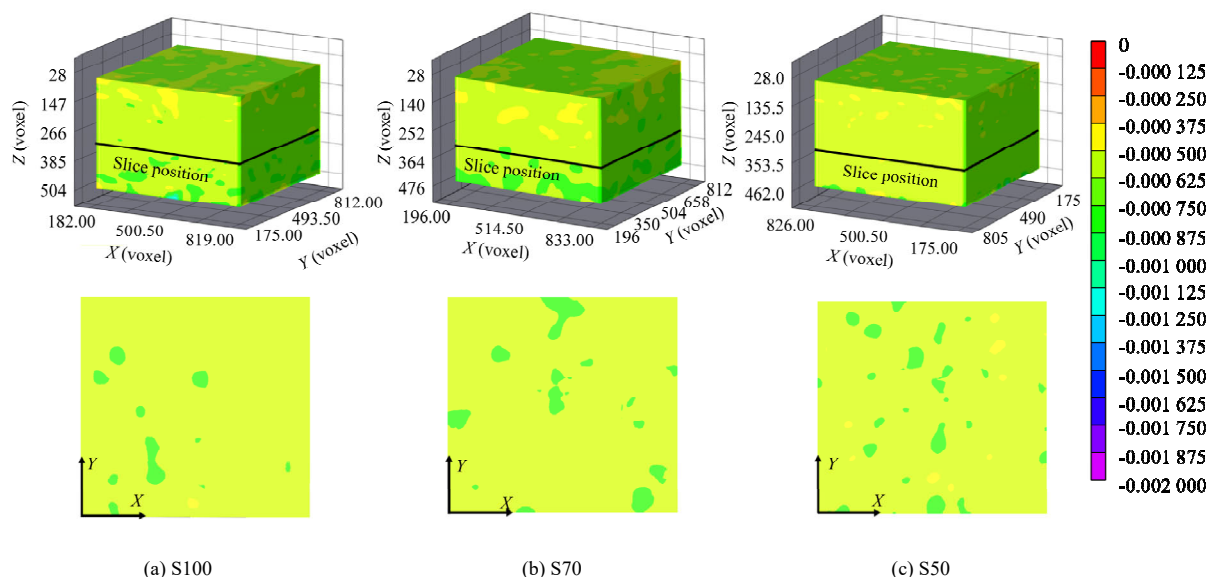


(a) Average standard deviation of all of the displacement components



(b) Standard deviation of the strain components

图5 不同子集和步长下标准差
Fig. 5 Standard deviation with different subset size

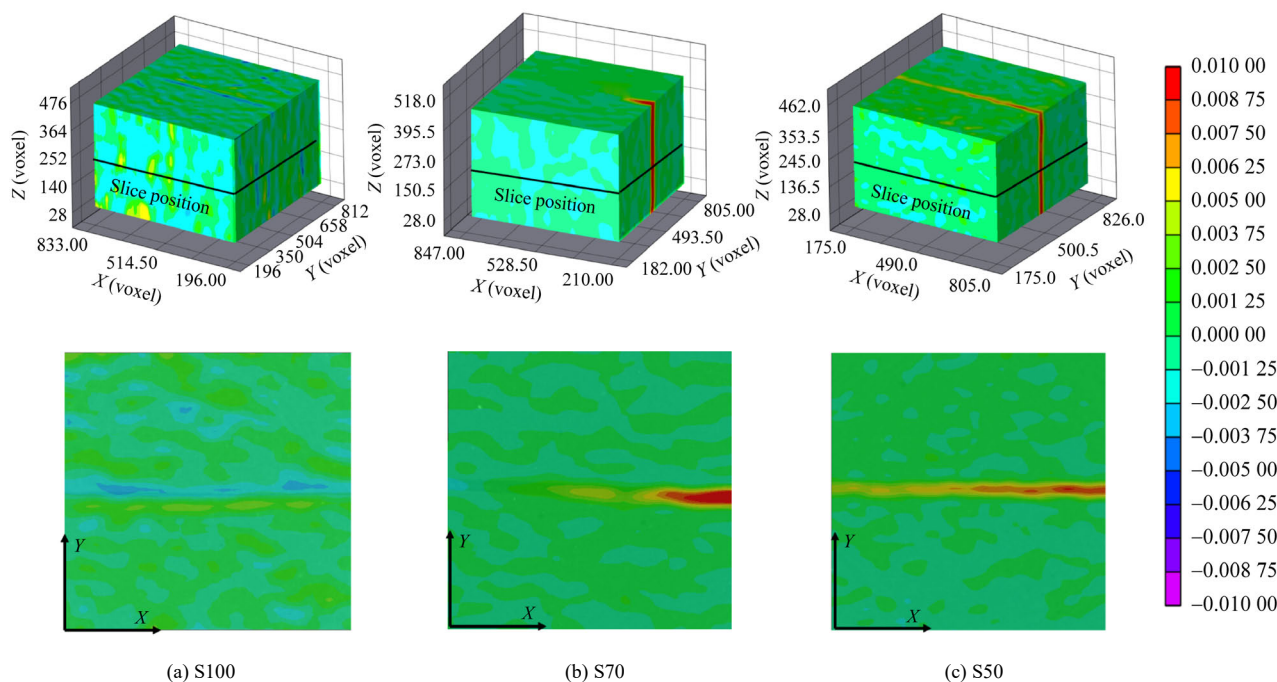
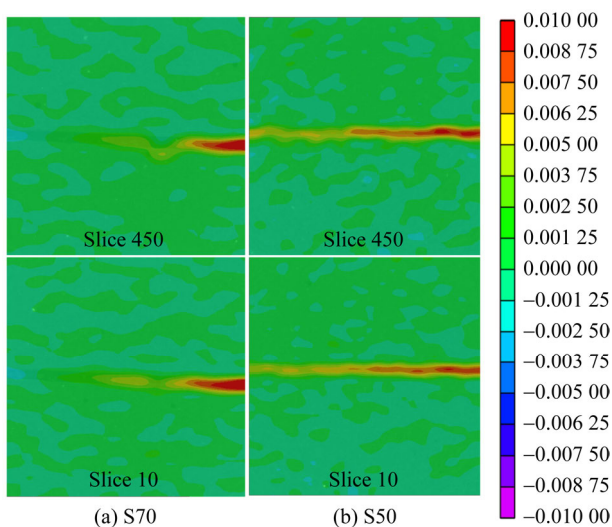
图6 修复后砂浆样品Z方向压应变 ε_{zz} 和对应的应变切片图Fig. 6 Volumetric strain component ε_{zz} of repaired mortar samples and corresponding slice contour in Z direction

基体不受环氧树脂胶的约束,更易发生垂直于粘结面方向(Y方向)上的横向变形。

图7显示了3种粘结面积样品受荷载时垂直于粘结面方向(Y方向)的拉应变(ε_{yy})云图和对应的体应变切片图。通过对比可以发现,S100样品的拉应变最均匀,未出现应变突变现象,反映出S100样品中无粘结缺陷,粘结剂与砂浆基体在整个粘结面建立了良好的粘结;S70样品和S50样品应变云图中观察到未粘结区域处的应变突变,即使未粘结区域并无实际应变。这是因为预制缺陷处砂浆基体间无有效粘结,在荷载作用下产生较有粘结处更显著的

相对位移,同时因为DVC子集尺寸大于预制缺陷厚度,这种显著变形便被平滑至整个子集并造成未粘结区域出现应变集中。另外,通过对比图7b及图7c的应变切片图可以发现,在样品内部,应变值突变区域也与粘结缺陷区域对应良好,这说明DVC方法可以检测水泥基材料修复区中未粘结区域的位置和大小。

为了辨明环箍效应是否对实验结果产生影响,截取了S70和S50样品加载方向(Z方向)两端的应变切片。图8a为S70样品在Slice 10和Slice 450位置处的拉应变(ε_{yy})切片图,图8b为S50样品在Slice 10

图 7 修复后砂浆样品应变分量 ε_{YY} Fig. 7 Volumetric strain component ε_{YY} of repaired mortar samples图 8 修复后砂浆样品拉应变 ε_{YY} 切片Fig. 8 Slice contour of ε_{YY} of repaired mortar

和 Slice 450 位置处的拉应变(ε_{YY})切片图。容易发现, 在 S70 和 S50 样品中, 未粘结区域都发生了与图 7 切片图中相似的应变突变, 表明 S70 和 S50 样品的未粘结区域在加载方向(Z 方向)两端能够发生和中间高度一致的横向扩展。这也表明了研究中采用凡士林作为润滑剂, 可以有效减小环箍效应的影响。

2.3 数值模拟应变分析

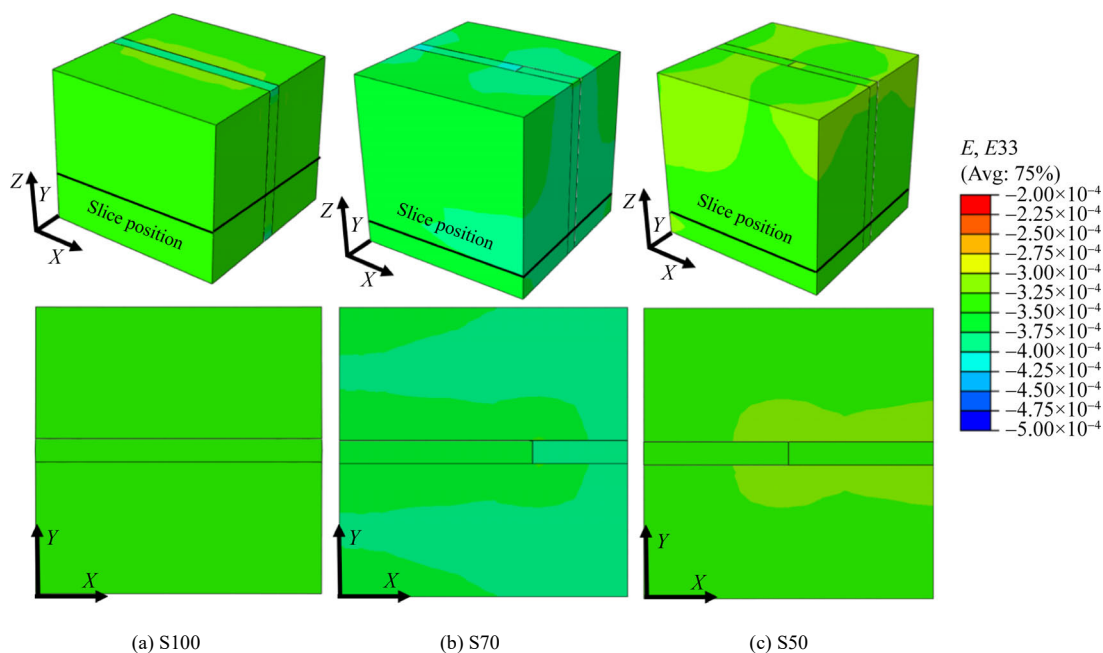
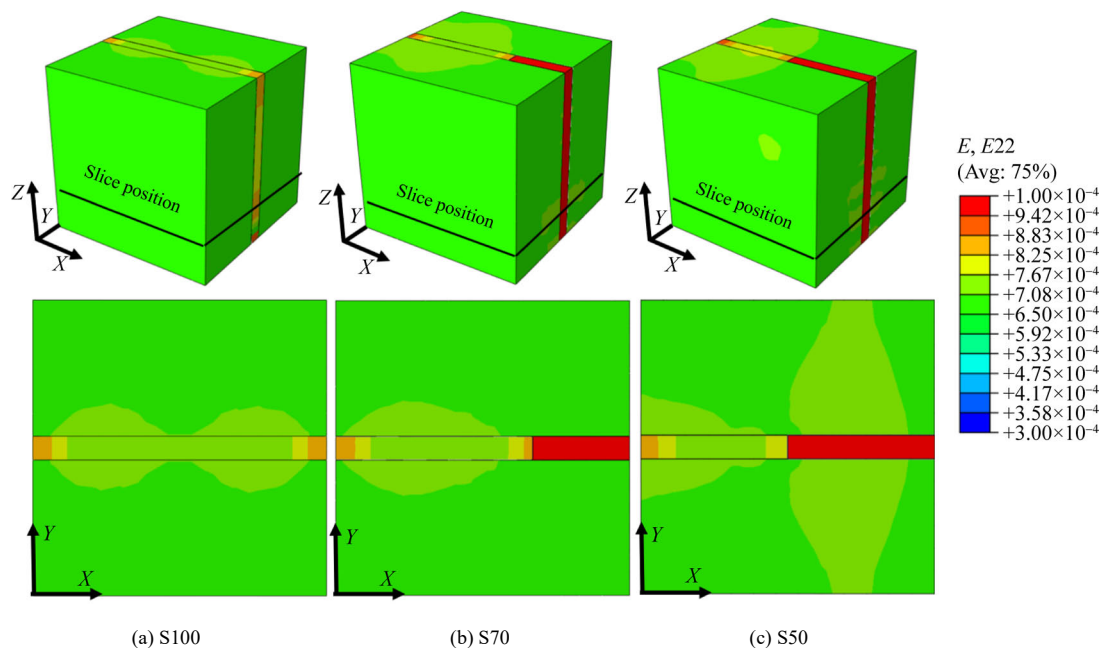
使用 Abaqus 软件对砂浆、环氧树脂和预制缺陷

进行建模, 如图 2 所示。根据原位加载试验实际情况对模型顶端限制 Z 方向位移, X 和 Y 方向转角; 从底端向上施加 1 000 N 均布压力。

图 9 和图 10 展示了荷载下 S100, S70 和 S50 模型的数值模拟结果。图 9 为 3 种修复程度样品的有限元压应变模拟结果。可以观察到, 虽然粘结面积不同, 但是压应变分布和 DVC 应变结果一样, 不会在无粘结处出现应变集中。

图 10 为 3 种粘结面积样品与粘结面垂直方向的应变分量 ε_{YY} 的数值模拟结果。可以发现, 与 DVC 结果一样, 通过有限元法得到的 ε_{YY} 应变分布也在预制缺陷处出现应变集中。同时, 因为环氧树脂胶弹性模量低于砂浆基体, 导致环氧树脂层 ε_{YY} 应变分量稍大于砂浆基体的 ε_{YY} 应变分量。此现象也与 DVC 计算的应变结果吻合, 说明 DVC 方法对不同粘结面积的修复砂浆的应变计算结果是合理的。

图 11a 和图 11b 分别为 S70 和 S50 样品粘结界面的 ε_{YY} 应变在 XZ 平面的切片图。图 11c 和图 11d 为利用边缘检测算法获取的应变突变的边界^[18], 然后计算得到 S70 样品应变突变区域的面积为 20.84 mm², 相比于 XCT 投影结果小 6.59%; S50 样品应变突变区域的面积为 42.68 mm², 相比 XCT 投影结果小 4.26%。表明未粘结区域与应变突变的良好对应。如果评估时粘结面积未知, 亦可以沿用本文方法测

图9 应变分量 ε_{zz} 数值模拟结果Fig. 9 Strain component ε_{zz} of numerical simulation results图10 应变分量 ε_{yy} 数值模拟结果Fig. 10 Strain component ε_{yy} of numerical simulation results

试。通过 XCT 图像分析获得修复界面位置及面积, 然后进行 DVC 计算, 分析修复界面位置的应变分布, 再基于修复界面应变矩阵的梯度计算出突变区域的边缘位置, 进而获得无粘结区域的面积。

图 12 示出了 3 种样品(S100-sample 3, S70-sample 2, S50-sample 2)的 XCT 裂缝提取结果, 发现试件的破坏模式为在砂浆基体破坏, 且宏观裂缝倾向于垂直粘结面。这是因为环氧层为垂直于粘结面的方

向提供了更大的变形能力, 所以在轴压荷载下样品更倾向于垂直粘结面破坏。这也解释了为什么不同粘结面积的样品具有相近的极限强度。

另外, 本研究受限于 XCT 设备射线能量较低, 只能穿透较小尺寸的样品。如果采用更高能量的 XCT 设备测试较大尺寸的样品, 也可以结合此方法分析。此方法亦可用于剪切实验或拉拔试验的研究, 只需在 XCT 原位加载装置配备相应的设备即可。

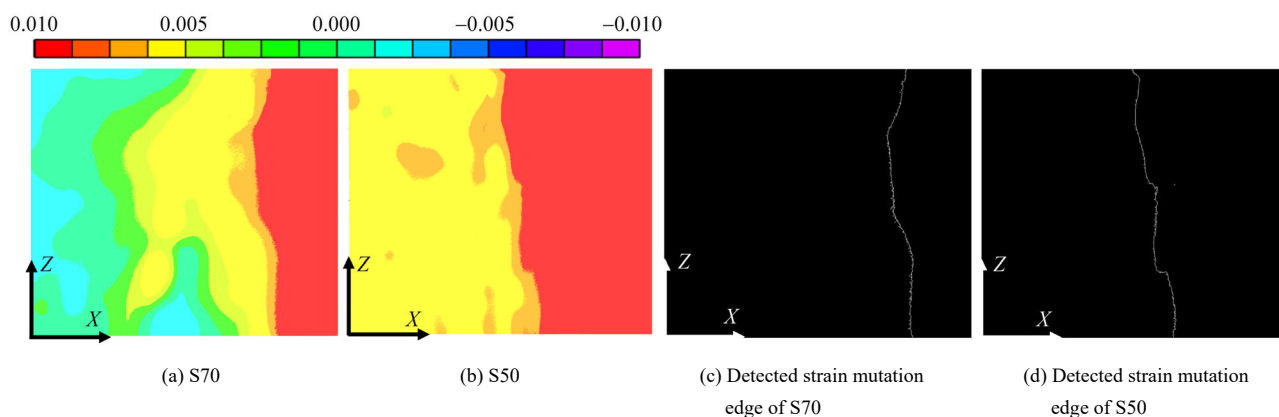


图 11 应变分量 ε_{YY} 切片图及检测的边界
Fig. 11 2D slices of the strain component ε_{YY}

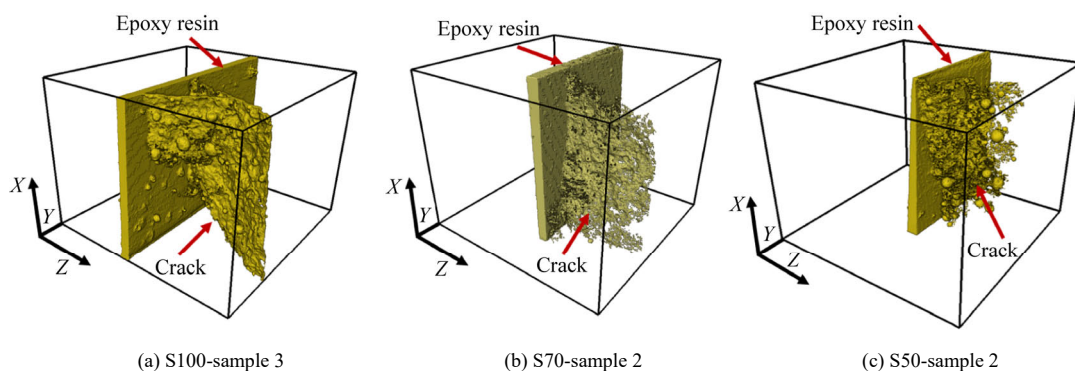


图 12 开裂模式 XCT 提取结果
Fig. 12 XCT extraction results of crack modes

3 结论

提出了一种基于 DVC 应变分析对水泥基材料修复界面未粘结区域进行检测和定量计算其面积的方法。应用此方法研究了单轴压缩荷载下 100 mm^2 、 70 mm^2 和 50 mm^2 环氧粘结面积的砂浆样品的应变分布, 并建立了相应的有限元模型进行模拟验证。无粘结缺陷样品(S100)的 ε_{YY} 应变分布均匀, 无应变突变; 有预制缺陷样品(S70, S50)的 ε_{YY} 应变图中出现与缺陷位置对应良好的应变突变。计算了有预制缺陷样品(S70, S50)的 ε_{YY} 应变突变区域面积, 结果与预设无粘结区域面积吻合良好, 说明此方法可以实现粘结界面不良区域的可视化。

参考文献:

- [1] 钱春香, 任立夫, 罗勉. 基于微生物诱导矿化的混凝土表面缺陷及裂缝修复技术研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(5): 619–631.
QIAN Chunxiang, REN Lifu, LUO Mian. J Chin Ceram Soc, 2015, 43(5): 619–631.
- [2] SNOECK D, WANG J, BENTZ D P, et al. Applying a bio-deposition layer to increase the bond of a repair mortar on a mortar substrate[J].

Cem Concr Comp, 2018, 86: 30–39.

- [3] 吕忠, 陈惠苏. 水泥基材料裂缝自主愈合研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(2): 156–168.
LV Zhong, CHEN Huifang. J Chin Ceram Soc, 2014, 42(2): 156–168.
- [4] KHURAM Rashid, MADIHA Ahmad, TAMON Ueda, et al. Experimental investigation of the bond strength between new to old concrete using different adhesive layers[J]. Constr Build Mater, 2020, 249: 118798.
- [5] KAN Yucheng, LEE Minggin, LEE Hungwei. Experimental investigation of mode-I fracture toughness of real-cracked concrete repaired by epoxy[J]. Constr Build Mater, 2021, 293: 123490.
- [6] GUO Siyao, ZHANG Xu, CHEN Jizhou, et al. Mechanical and interface bonding properties of epoxy resin reinforced Portland cement repairing mortar[J]. Constr Build Mater, 2020, 264: 120715.
- [7] YU Liang, ZHANG Lei, LEI Dong, et al. Shear test of the rectangular beam on the new to old concrete interface based on digital image correlation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 267(3): 032058.
- [8] JO Youngkug. Adhesion in tension of polymer cement mortar by curing conditions using polymer dispersions as cement modifier[J]. Constr Build Mater, 2020, 242: 118134.
- [9] HONG Shuxian, KUANG Chuan, ZHANG Jianchao, et al. Visual analysis for microscopic cracking propagation of rubberized concrete[J]. Constr Build Mater, 2020, 265: 120599.
- [10] WALLACE Wailok Lai, XAVIER Dérobert, PETER Annan. A review of Ground Penetrating Radar application in civil engineering: A

- 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis[J]. *NDT E Int*, 2018, 96: 58–78.
- [11] 褚洪岩, 孙伟, 蒋金洋. 高温作用下牺牲混凝土的损伤演化[J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(2): 211–217.
CHU Hongyan, SUN Wei, JIANG Jinyang. *J Chin Ceram Soc*, 2016, 44(2): 211–217.
- [12] 韩方玉, 刘建忠, 刘加平, 等. 超高性能混凝土钢桥面铺装层收缩约束应力分析[J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(11): 1700–1705.
HAN Fangyu, LIU Jianzhong, LIU Jiaping, et al. *J Chin Ceram Soc*, 2020, 48(11): 1700–1705.
- [13] BAY B K, SMITH T S, FYHRIE D P, et al. Digital volume correlation: Three-dimensional strain mapping using X-ray tomography[J]. *Exp Mec*, 1999, 39(3): 217–226.
- [14] ZHANG Jianchao, KUANG Chuan, LIN Chen, et al. Evolutionary trace for ductile fracture performance of rubber-cement composites[J]. *Cem Conc Comp*, 2021, 121: 104080.
- [15] 潘兵, 吴大方, 郭保桥. 数字体图像相关方法中基于迭代最小二乘法的物体内部变形测量[J]. *实验力学*, 2011, 26(6): 665–673.
PAN Bing, WU Dafang, GUO Baoqiao. *J Exp Mech (in Chinese)*, 2011, 26(6): 665–673.
- [16] HONG Shuxian, LIU Peng, ZHANG Jianchao, et al. Interior fracture analysis of rubber-cement composites based on X-ray computed tomography and digital volume correlation[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 259(30): 119833.
- [17] GANESH P, RAMACHANDRA M A. Simulation of surface preparations to predict the bond behaviour between normal strength concrete and ultra-high performance concrete[J]. *Constr Build Mater*, 2020, 250: 118871.
- [18] RÍOS J D, LEIVA C, ARIZA M P, et al. Analysis of the tensile fracture properties of ultra-high-strength fiber-reinforced concrete with different types of steel fibers by X-ray tomography[J]. *Mater Design*, 2019, 165: 107582.