

重复荷载下混凝土断裂损伤演化研究

郑 丹¹, 陈永强¹, 秦张晨², 付光川³, 李鑫鑫¹

(1. 重庆交通大学河海学院; 2. 重庆大学土木工程学院; 3. 重庆市水利港航建设集团有限公司)

摘要:为量化表征重复荷载下混凝土内部的断裂损伤演化机理,通过三点弯曲梁试验系统研究了混凝土断裂过程区(FPZ)裂纹长度、位移梯度及残余应变的演化规律,并采用基于Tikhonov正则化的黏聚力反演方法获得了黏聚力分布及其软化曲线。结果表明:在等幅荷载下,裂纹长度呈现先快速上升、后近线性缓增的双阶段特征,FPZ位移梯度则经历陡降与缓降两阶段衰减过程,且低荷载水平衰减幅度显著高于高荷载水平;在包络重复荷载下,裂纹长度随重复次数的增加持续扩展随后趋于稳定,而FPZ位移梯度单调递减;裂纹扩展速率滞后于裂纹口张开位移的增长,导致断裂区宽度增大而长度减小;由于重复荷载作用引发的黏聚力衰退、材料损伤及塑性变形协同发展,FPZ残余应变在加载周期内持续累积且增速加快;基于FPZ张开位移线性分布假设,采用Tikhonov正则化反演黏聚力分布,得到的软化曲线近似呈幂函数形式,反演得到的位移场与试验数据吻合较好,验证了该反演方法的可靠性。

关键词:重复荷载;混凝土;断裂过程区;黏结软化模型;裂缝扩展

中图分类号:TU528.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2026)05-0020-07

Research on fracture damage evolution of concrete under cyclic loading//Zheng Dan¹, Chen Yongqiang¹, Qin Zhangchen², Fu Guangchuan³, Li Xinxin¹ (1. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University; 3. Chongqing Water Conservancy Port and Shipping Construction Group Co., Ltd.)

Abstract: To quantitatively characterize the fracture damage evolution mechanism inside concrete under cyclic loading, this paper systematically investigates the evolution laws of crack length, displacement gradient, and residual strain in the fracture process zone (FPZ) of concrete through three-point bending beam tests. A Tikhonov regularization-based cohesive stress inversion method is employed to invert the cohesive stress distribution, and the cohesive stress softening curve is obtained. The results indicate that under constant-amplitude loading, the crack length exhibits a two-stage characteristic of a rapid increase followed by nearly linear slow growth. The FPZ displacement gradient undergoes a two-stage attenuation process consisting of a steep decline followed by a gradual decline, with the attenuation magnitude at low load levels significantly higher than that at high load levels. Under envelope loading, the crack length continues to increase with the number of loading cycles and then tends to stabilize, whereas the FPZ displacement gradient decreases monotonically. The crack propagation rate lags behind the increase in crack mouth opening displacement, resulting in an increase in the width of the fracture process zone and a decrease in its length. Owing to the synergistic development of cohesive stress degradation, material damage, and plastic deformation induced by cyclic loading, the residual strain in the FPZ accumulates continuously over loading cycles at an accelerating rate. Based on the assumption of a linear distribution of FPZ opening displacement, the Tikhonov regularization method was used to invert the cohesive stress distribution. The resulting softening curve approximately follows a power-law form, and the inverted displacement field agrees well with the experimental data, thereby verifying the reliability of the inversion method.

Key words: cyclic loading; concrete; fracture process zone; adhesive softening model; crack propagation

混凝土因抗压强度高、成本低、耐火性好、维护成本低等特性^[1-4],在诸多领域得到了广泛应用^[5-7],可满足防火、保温、自修复、低碳^[8-11]等多方面要求。混凝土在车辆、风浪等重复荷载作用下的疲劳失效^[12-14],本质是断裂过程区(FPZ)内微损伤的不可逆累积与演化过程^[15]。这会导致FPZ行为

基金项目:国家自然科学基金项目(52479116);重庆市水利科技重点项目(CQSLK-2024008)
作者简介:郑丹(1979—),男,教授,博士,主要从事混凝土断裂力学研究。E-mail:zhengdan@cqjtu.edu.cn
通信作者:李鑫鑫(1985—),男,教授,博士,主要从事混凝土断裂力学研究。E-mail:xinxinli@cqjtu.edu.cn

的动态异化;静力荷载下稳定的能量耗散区,在重复荷载下却因微裂纹反复开闭、骨料咬合作用衰减而丧失损伤控制能力。因此,准确揭示重复荷载下FPZ的演化规律,是解决混凝土结构疲劳失效问题的关键。

为研究混凝土断裂行为,学者们提出了多种理论模型,如虚拟裂纹模型(FCM)^[16]、有效裂纹模型(ECM)^[17]、双参数断裂模型(TPFM)^[18]、尺寸效应模型(SEM)^[19]等。这些模型为理解静力荷载下混凝土断裂机理提供了框架:FCM在真实裂纹尖端引入FPZ,认为该区域内材料未完全分离,通过黏聚力传递应力;ECM将真实裂纹长度与FPZ等效为虚拟裂纹长度,使线弹性断裂力学(LEFM)仍适用;TPFM引入应力强度因子和 T 应力(平行于裂纹面的非奇异应力)共同控制断裂;SEM反映准脆性材料断裂从强度准则到LEFM的过渡。然而,这些模型应用于重复荷载场景时具有固有的局限性:①ECM无法反映荷载循环带来的裂纹扩展增量,且其等效裂纹长度依赖于单调荷载标定;②TPFM的起裂韧度呈动态变化特性,同时需重新定义失稳韧度;③SEM未能考虑荷载历史的影响,仅能描述静力峰值荷载下的尺寸效应^[16-19]。这些局限性表明,直接套用静力荷载理论模型难以准确刻画疲劳荷载下的断裂过程。

众多学者基于FCM框架对重复荷载下混凝土的断裂行为进行了深入探索,主要通过数值模拟^[20-21]、试验观测^[22-23]和本构建模^[24-25]等方法,揭示了疲劳裂纹扩展规律与FPZ的某些宏观特征。一个普遍采用的研究范式是“正向方法”,即预先假定一个软化本构模型(如线性^[26]、双线性^[27]、三线性^[28]或幂函数模型^[29]),再通过宏观试验数据对模型参数进行反推标定。然而,这种“从宏观试验现象反推细观力学行为”的策略存在一个根本性的“尺度失配”问题^[30]。FPZ的软化关系本质上是细观尺度(微裂纹、界面脱黏等)损伤机制的体现,而宏观试验数据是各种复杂机制的混合响应,难以唯一且准确地反演其物理本质,导致所得模型参数的

物理意义不明确,其预测精度和普适性因此受限。

综上所述,当前FPZ软化关系的获取主要依赖需要预设软化模型的正向方法,目前研究缺乏能够直接从试验数据中揭示FPZ细观损伤机制且物理意义明确的本构模型。为此,本文旨在突破正向方法的局限,通过三点弯曲梁试验,并结合数字图像相关(DIC)技术,量化重复荷载下裂纹长度、位移梯度及残余应变的演化规律。在此基础上,创新性地提出了基于Tikhonov正则化的黏聚力反演方法,通过直接分析黏聚力分布来反演获取FPZ的软化关系,并将反演所得软化关系与传统模型进行对比验证,以期重复荷载下混凝土断裂过程的精细化模拟提供新的理论依据和技术途径。

1 试验方案

1.1 试件制备

试验采用11组三点弯曲试样,加载装置见图1,厚度 B 取40 mm,高度 H 取80 mm,跨高比 S/H 取4,跨长 L 取420 mm,预制裂纹高度 a_0 取24 mm。位于试件中部的V形切口预制裂纹由2 mm厚的钢板形成,裂纹尖端的角度为 30° 。

混凝土的设计抗压强度为40 MPa,水泥、水、砂、粗骨料按质量配比为1:0.41:1.03:2.30。粗骨料为粒径5~10 mm的石子,水泥为42.5 R级普通硅酸盐水泥。

1.2 试验装置和流程

试验采用MTS E45万能压力机进行三点弯曲断裂试验(图2),并配合DIC系统与分辨率为 2048×2048 像素的CCD摄像机(拍摄速率2张/s)记录裂纹扩展,同时使用引伸计和卡尺测量裂纹口张开位移(CMOD)。

为系统研究混凝土在静力与复杂重复荷载下的断裂性能与损伤演化,采用单调、等幅重复和包络重复3种加载方式:单调荷载用于获取基准断裂参数;等幅重复荷载用于分析典型疲劳损伤规律;包络重复荷载则用于模拟实际超载工况对后续损伤路径的影响。三者共同构建从静态到复杂动态服役条件的

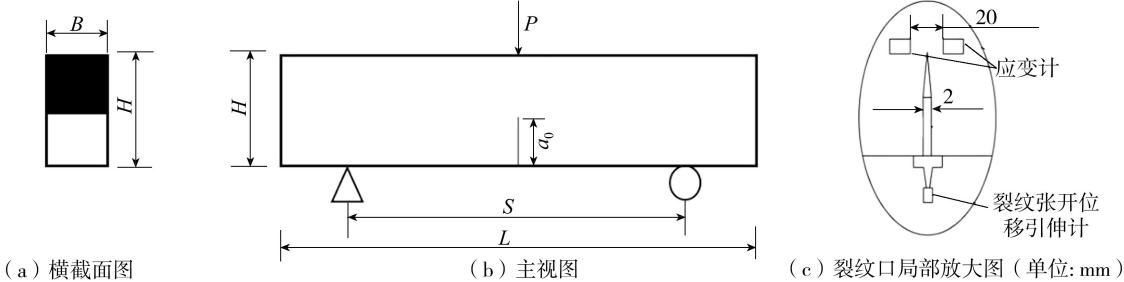


图1 三点弯曲试样加载装置示意图

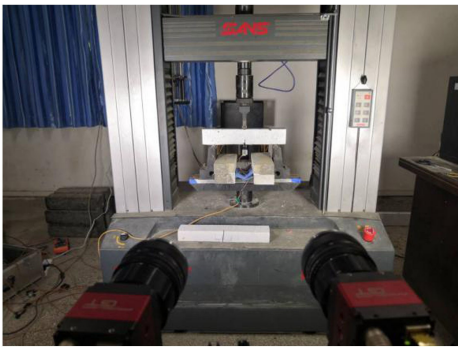


图2 三点弯曲断裂试验

完整研究体系。

试验工况设置详见表1,为兼顾混凝土材料离散性与测量可靠性,对单调及关键重复荷载工况设置2个或3个平行试件,对破坏性强的高荷载工况则设置1个试件,并辅以DIC全场测量技术,通过单试件高密度数据补偿数量上的不足,从而在揭示物理机制的同时确保观测趋势的一致性与可靠性。

2 试验结果与分析

2.1 裂纹长度演化规律

将CCD相机拍摄的三点弯曲梁试件表面散斑图像序列导入VIC-2D分析软件,计算得到重复荷载下三点弯曲梁的裂纹长度 a 。

由FPZ内的能量耗散所主导,混凝土在等幅重复荷载下的疲劳变形呈现与应力比无关的三阶段规律,依次对应微裂纹的萌生、稳定扩展和失稳扩展:第一阶段为初始缺陷活化引起的快速变形;第二阶段能量释放率与断裂韧度达到动态平衡,裂纹稳定扩展;第三阶段因有效承载面积减少和损伤连通,导致能量释放率超过材料阻力,发生失稳断裂。等幅重复荷载重复次数设为50次,旨在高效捕捉混凝土疲劳损伤演化的关键阶段,同时兼顾试验可控性与数据可靠性。该设计覆盖了材料刚度显著退化与裂缝稳态扩展的核心区间,为损伤演化分析提供了充足的数据密度。此外,50次重复避免了高周次试验导致的试件意外破坏风险,在保证数据完整性的前提下显著优化了试验成本与效率^[31]。

当荷载为峰值荷载的40%时,荷载等级较小,此时荷载略高于疲劳裂纹扩展门槛值,但不足以使

FPZ充分发展,结构整体处于弹性变形状态,仅裂纹尖端存在有限微裂区。每个循环做功部分转化为耗散能,用于克服摩擦和扩展FPZ,由于可用于裂纹扩展的能量有限,归一化裂纹长度 a_{nor} 随重复次数 n 呈准线性匀速增长。当荷载分别为峰值荷载的60%和80%时,荷载等级处于中上水平,进而使得50次等幅重复荷载处于第二阶段。此时荷载使得梁处于塑性变形阶段,而与之相对应的 $a_{nor}-n$ 曲线呈现两阶段特征:初始阶段的快速扩展源于过载效应,即首次循环高荷载在裂纹尖端形成较大残余塑性区,加速了微损伤汇集;随后的速率减缓与平台期则反映了该区产生的裂纹闭合等屏蔽机制,其发展需消耗更多能量以驱动裂纹扩展,从而表现为扩展阻力增加。荷载越高,该屏蔽效应越显著,因此需要更多循环周次突破,导致平台期出现在更高 a_{nor} 值处。图3为不同荷载水平下的 $a_{nor}-n$ 曲线。可以看出,荷载水平与对应的 a_{nor} 值呈正相关关系,这与上述力学机制的分析一致。

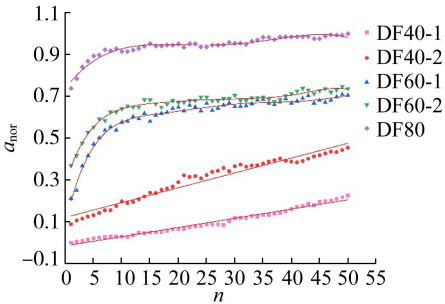


图3 等幅重复荷载下三点弯曲梁归一化裂纹长度的演化规律

包络重复荷载重复次数应大于5次^[32],本文设为6次或7次,进而精准捕捉过载效应的完整演化路径:首次过载引发裂缝尖端塑性区扩展与瞬时刚度退化;第2~4次重复记录迟滞效应主导的裂缝扩展停滞;第5~7次重复则观测累积损伤突破阈值后的加速扩展拐点。该设计有效分离了过载特有的“迟滞-加速”双阶段响应,避免了更高重复次数下包络疲劳损伤的干扰。由图4可知,在包络重复荷载作用下,裂纹扩展受“损伤累积-弛豫-再激活”过程控制,呈现动态平衡。首次过载形成的残余塑性区引致裂纹闭合,造成短期扩展停滞;随着后续损伤累

表1 试验工况设置

试件编号	荷载类型	试件数量	荷载控制	位移控制
DD-1、DD-2、DD-3	单调荷载	3		0.1 mm/min
DF40-1、DF40-2	等幅重复荷载	2	0.4 P_{max}	加载:0.06 mm/min;卸载:0.03 mm/min
DF60-1、DF60-2	等幅重复荷载	2	0.6 P_{max}	加载:0.06 mm/min;卸载:0.03 mm/min
DF80	等幅重复荷载	1	0.8 P_{max}	加载:0.06 mm/min;卸载:0.03 mm/min
BL-1、BL-2	包络重复荷载	2		加载:0.01 mm/min;卸载:0.03 mm/min

注: P_{max} 为单调荷载下3组试件的平均峰值荷载。

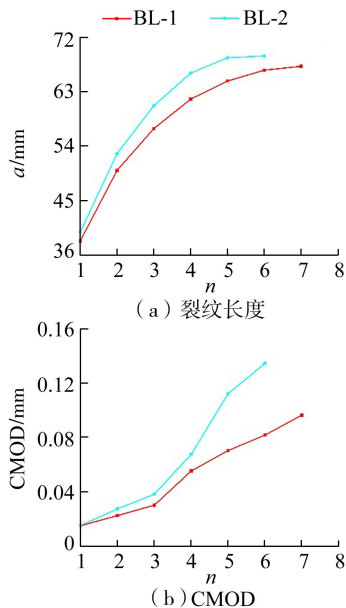


图4 包络重复荷载下三点弯曲梁裂纹长度与CMOD随 n 的演化规律

积突破闭合应力屏蔽,裂纹重新稳定扩展。整个过程表现为 a 随 n 持续增长,而扩展速率则在加卸载过程中逐渐减缓至稳定。CMOD随 n 的演化与 a 类似,关键差异在于其未表现出收敛趋势,这一现象的本质是材料内部能量耗散方式的转变。高应力循环下,裂纹面张开导致应力三轴度降低,使驱动能优先用于FPZ的横向膨胀而非纵向扩展,导致主裂纹扩展让位于周边损伤区的弥散化发展,进而实现应力重分布。

2.2 位移分布梯度演化规律

图5为等幅重复荷载下三点弯曲梁归一化位移分布梯度的演化规律。由图5可知,在等幅重复荷载作用下,三点弯曲梁的归一化位移分布梯度 k_{nor} 随重复次数 n 的增加呈逐渐减小的两阶段趋势:近似线性下降阶段和平稳下降阶段。除此之外,随着荷载的增大, k_{nor} 进入第二阶段所需次数显著减少:当荷载为峰值荷载的40%、60%、80%时,分别需要约40、15、5次。同时, k_{nor} 具有荷载依赖性,其随荷载水平的提升而减小。40%峰值荷载下的 k_{nor} 值及

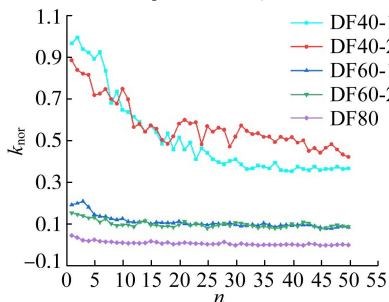


图5 等幅重复荷载下三点弯曲梁归一化位移分布梯度的演化规律

其下降幅度均显著高于60%和80%峰值荷载下的 k_{nor} 。

图6为包络重复荷载下三点弯曲梁位移分布梯度的演化规律。由图5和图6可知,位移分布梯度 k 与重复次数 n 成反比,这表明在加卸载过程中,尽管 a 与CMOD都呈增长态势,但前者增长速率小于后者,说明FPZ的宽度与长度成反比。

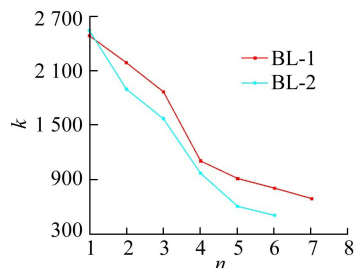


图6 包络重复荷载下三点弯曲梁位移分布梯度的演化规律

2.3 残余应变演化规律

图7与图8的残余应变结果与卫军等^[33]提出的三阶段模型总体一致,均呈初始快速增长、随后稳定线性增长和最终加速破坏的特征。荷载水平越高,材料越早由初始快速增长阶段过渡到稳定线性增长阶段,如80%峰值荷载下,该阶段转变在10次循环内完成。差异在于,如图7所示,高荷载下曲线更平滑、残余应变幅值更大,这是因为低荷载时FPZ尺寸小,残余应变量级低,VIC-2D软件计算会受周围弹性区干扰,导致数据波动;而中高荷载下FPZ充分发展,信号更强,结果更稳定。这表明三阶段规律具有普适性,但阶段转变点和曲线形态受荷载水平、加载历史与局部行为共同影响。

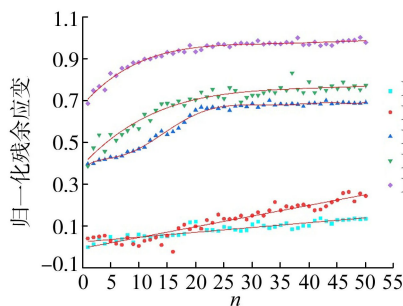


图7 等幅重复荷载下三点弯曲梁残余应变的演化规律

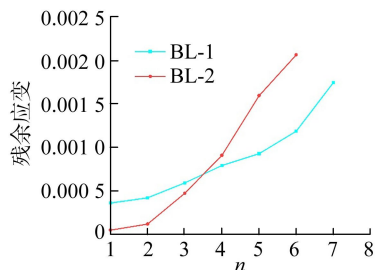


图8 包络重复荷载下三点弯曲梁残余应变的演化规律

如图 8 所示,包络重复荷载下 n 与残余应变成正比,随着 n 的增加,残余应变的增速经历了一个由慢至快的过程。残余应变可表征该材料的塑性变形与损伤程度。FPZ 内黏聚力驱动裂纹尖端产生闭合的趋势,从而抵抗裂纹的扩展,但随着 n 的增加,FPZ 长度收缩并伴随黏聚力衰减,致使材料抵抗开裂的能力弱化,损伤与塑性变形协同加剧。

3 软化关系反问题求解

3.1 计算原理

由于材料随机性、损伤复杂性及技术限制,混凝土软化关系难以准确获取。目前广泛应用的正向方法需预先假设软化曲线形式(如线性、双线性),并通过试算拟合宏观试验数据(如 P -CMOD 曲线)。但该方法存在两大局限:①曲线形式的预设基于数值拟合需求,缺乏物理依据;②通过宏观数据反推细观行为存在“尺度失配”问题,导致参数物理意义模糊,难以真实表征 FPZ 内的细观损伤过程。

为克服既有局限,本文提出基于 Tikhonov 正则化的反问题求解策略。该方法具备三重优势:①将软化关系离散为待求黏聚力值并直接反演,避免预设数学形式,从而揭示材料本征响应;②利用 DIC 全场位移数据作为输入,建立从细观损伤到宏观黏聚力分布的逆映射,解决尺度失配问题^[34];③引入 Tikhonov 正则化抑制噪声干扰,确保反演结果具有物理合理性。

FPZ 黏聚力分布情况大致可分为 4 个阶段:①初始阶段,FPZ 尚未形成,裂纹尖端的黏聚力等于未损伤混凝土的抗拉强度;②形成阶段,在施加外荷载后,预制裂纹尖端开始发展 FPZ,其长度和黏聚力分布随荷载增加而不断变化;③线性上升阶段,随着荷载增大,CMOD 相应提升,当位移超过最大允许值时,裂纹发生宏观扩展,此过程持续至荷载达到峰值;④下降破坏阶段,荷载达到峰值后,随 CMOD 继续增加,荷载逐渐减小,宏观裂缝持续发展直至试件完全破坏。

按照 FCM 的假设,为使裂缝应力奇异性消失,应满足 3 个条件:①黏聚力可表征为裂纹张开位移的函数;②裂纹张开位移可表征为外部荷载、黏聚力和裂纹几何形态的函数;③应力奇异性应在裂纹尖端消失。

FPZ 上任意点的张开位移可由外部荷载和黏聚力共同引起的裂纹张开位移叠加得到。按照 Paris 公式^[35],裂纹张开位移可进一步由外部荷载和黏聚力提供的应力强度因子表示,由外部荷载和黏聚力引起的张开位移可分别计算,并基于叠加原理得到

总张开位移。

根据 FPZ 裂纹张开位移线性分布的假设,若外部荷载及其对应的全场位移 $\delta(x)$ 已知,则可分离出黏聚力产生的位移贡献,从而求解 FPZ 黏聚力分布。该求解过程构成一个反问题。

为解决反问题,需要用到 Tikhonov 正则化方法。已知矩阵 A 和向量 b ,求解向量 σ ,使其满足下式:

$$A\sigma = b \tag{1}$$

式中: A 为影响系数矩阵,通过权函数法计算得到; b 为黏聚力等效位移向量,由实际总裂纹张开位移减去外部荷载 P 对应的裂纹张开位移得到。当向量 σ 的解不唯一时,就可以利用 Tikhonov 正则化方法来解决该问题。为求解向量 σ ,利用普通最小二乘法寻求最小化残差平方和,即使 $\|A\sigma - b\|^2$ 的值最小,为筛选特定解,将其进行转换,使其包含正则化项 $\|A\sigma - b\|^2 + \|\Gamma\sigma\|^2$ 。

显式解 σ 为:

$$\sigma = (A^T A + \Gamma^T \Gamma)^{-1} A^T b \tag{2}$$

正则化程度由正则化矩阵 Γ 的尺度控制,考虑 $\Gamma = \alpha I$ 的特例,当正则化参数 $\alpha = 0$ 且 $A^T A$ 可逆时,对应的 Tikhonov 正则化解收敛至标准最小二乘解。

3.2 计算流程

计算流程如下:①依据单调荷载三点弯曲试验数据(峰值荷载 $P_{\max}$ 、对应 CMOD 与裂纹长度 a),结合 FPZ 张开位移线性分布假设,计算位移梯度 k ;②采用 Paris 公式和权函数法计算外荷载应力强度因子及裂纹张开位移,将断裂过程区的总张开位移扣除上述外荷载引起的张开位移分量,即可插值得到黏聚力所贡献的张开位移分量;③引入 Tikhonov 正则化方法,联合 Paris 公式与黏聚力位移分量构建反问题控制方程,通过奇异值分解(CSVD)求解;④基于所得黏聚力分布及位移线性假设,反演 FPZ 软化曲线与张开位移分布。

3.3 计算结果

FPZ 张开位移计算结果如图 9 所示。单调荷载下裂纹张开位移的分布与反演得到的黏聚力趋势总体一致,验证了该方法捕捉静力荷载断裂行为的有效性。但试验值均略高于反演值,出现系统性偏差,这源于反演所依据的 LEFM 理论在描述混凝土大范围 FPZ 时存在局限,导致 α 估值偏低,影响了反演精度。此外,DD-3 试件表现出的显著差异主要源于混凝土材料固有的离散性,属正常波动。

软化曲线如图 10 所示,混凝土 FPZ 内黏聚力随张开位移增大而衰减,当黏聚力为 0 时对应的张开位移为宏观裂纹尖端位置。

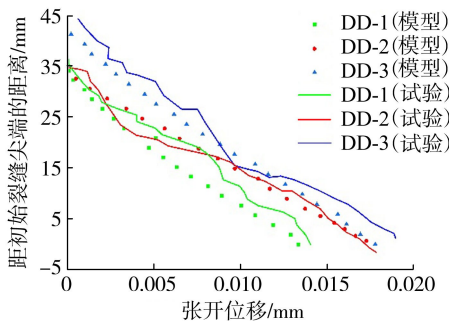


图9 单调荷载下FPZ 张开位移分布对比

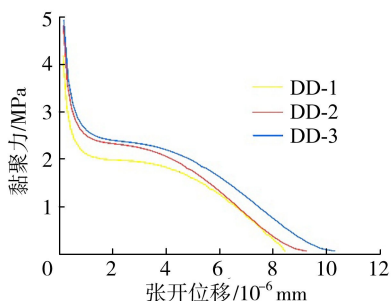


图10 黏聚力反问题计算所得FPZ 软化曲线

3.4 方法对比

为评估反演方法与传统方法在FPZ黏聚力分布计算中的性能差异,选取幂函数模型与双线性模型两种典型软化曲线进行对比。为进一步量化曲线吻合程度,引入均方根误差(RMSE)与决定系数(R^2)作为评价指标。图11对比了本文方法、幂函数模型及双线性模型所得的软化曲线。本文方法所得曲线光滑连续,初始尾部呈现渐近拖尾特征,符合断裂能完全耗散的物理过程。尤为关键的是,在软化起始阶段,反演曲线展现出更大的初始下降梯度,这真实揭示了峰值应力后FPZ内损伤快速演化的物理本质,突破了传统模型因预设数学形式而无法准确再现材料真实损伤速率的局限。幂函数模型在非线性软化阶段与之吻合良好,但初始斜率与尾部衰减存在系统性偏差。双线性模型则因人为预设拐点而导致形态僵化,在拐点处出现应力突变,与材料连续损伤的本质相悖。因此,本文方法在刻画从损伤起始到最终破坏的全过程中均展现出更强的物理合理性。

在非线性软化阶段(张开位移超过 4×10^{-6} mm),幂函数模型与反演结果基准的 R^2 为0.936, RMSE为0.164 MPa,二者高度吻合,前者恰为正向求解中广泛采用的FPZ软化关系假设形式,由此证实了反问题求解模型的可靠性。

图11的定性对比与上述定量分析共同表明:基于经验假设的传统模型在描述材料复杂的非线性软化行为时存在固有局限性。本文的无预设反演方法所获得的软化曲线不仅能够揭示如初始下降梯度更大这类传统方法无法捕捉的物理细节,而且因其严

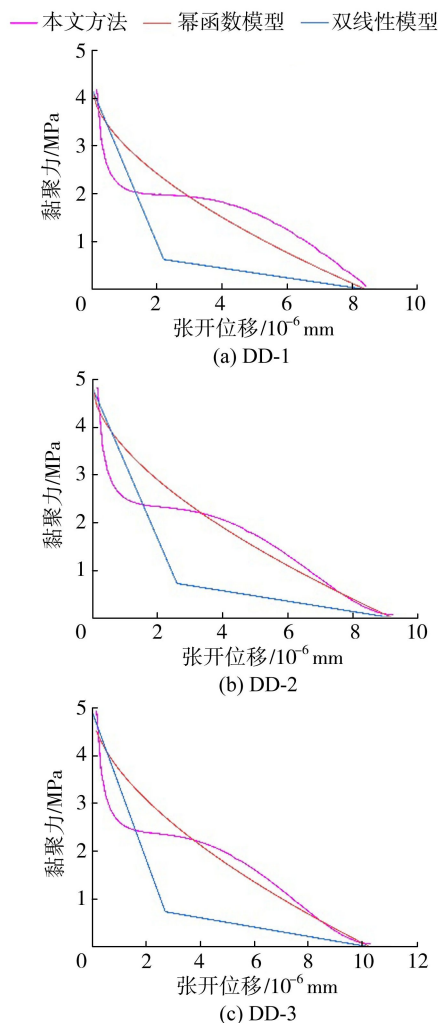


图11 不同模型所得FPZ黏聚力-张开位移软化曲线对比
格依赖于材料的物理响应,故而能更真实、连续地反映FPZ内黏聚力的分布与演化规律,其物理机制更为明确,从而为建立与细观机制直接关联的损伤模型提供了新途径。

4 结论

a. 等幅重复荷载下,裂纹长度与CMOD变化模式相似,两者均在快速上升后进入近线性缓增阶段;FPZ位移梯度则呈先陡降再缓降的两阶段衰减特征,且低荷载水平下的衰减程度高于高荷载水平。

b. 对于包络重复荷载,裂纹长度随重复次数的增加而持续增长,最终趋于稳定。伴随此过程,位移梯度单调递减,揭示出裂纹扩展滞后于CMOD增长,致使断裂区宽度增加而长度减小。

c. 重复荷载下FPZ残余应变在加载周期内持续增长且加速累积。此现象归因于重复作用导致的FPZ黏聚力衰退、材料损伤和塑性变形的持续发展。

d. 基于FPZ张开位移线性分布假设,采用基于Tikhonov正则化的黏聚力反演方法反演FPZ黏聚力分布,得到的软化关系呈近似幂函数的特征,与常见

假设形式相符。其预测的位移场与试验结果一致,验证了该反演方法的可靠性与准确性。

参考文献:

[1] Wang Zhen, Li Huajian, Huang Fali, et al. Mechanical properties of railway high-strength manufactured sand concrete: typical lithology, stone powder content and strength grade [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2025, 40 (1): 194-203.

[2] 詹韵泓,钱文勋,石勇刚,等. 拉应力作用下水工混凝土抗盐冻性能试验研究 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026, 54 (3): 125-133. (Zhan Yunhong, Qian Wenxun, Shi Yonggang, et al. Experimental study on salt-freeze resistance of hydraulic concrete under tensile stress [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54 (3): 125-133. (in Chinese))

[3] Vedrtnam A, Palou M T, Varela H, et al. Experimental and numerical study on post-fire self-healing concrete for enhanced durability [J]. Scientific Reports, 2025, 15 (1): 9731.

[4] Lee T, Kim D, Cho S, et al. Advancements in surface coatings and inspection technologies for extending the service life of concrete structures in marine environments; a critical review [J]. Buildings, 2025, 15 (3): 304.

[5] 蒋林华,闫菁怡,杨国辉,等. 复杂条件下水工混凝土研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2025, 45 (5): 81-88. (Jiang Linhua, Yan Jingyi, Yang Guohui, et al. Research progress on hydraulic concrete under complex conditions [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45 (5): 81-88. (in Chinese))

[6] 刘国豪,甘磊,刘玉,等. 不同砂率及骨料粒径对塑性混凝土断裂韧度的影响 [J]. 水利水电科技进展, 2024, 44 (3): 39-44. (Liu Guohao, Gan Lei, Liu Yu, et al. Effects of different sand rates and aggregate sizes on fracture toughness of plastic concrete [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44 (3): 39-44. (in Chinese))

[7] Wang Wei, Le Ping, Liu Shifan, et al. Experimental study on mechanical properties and brittleness of sandstone-concrete combined body under triaxial seepage-stress coupling [J]. Construction and Building Materials, 2025, 465: 140016.

[8] Khan S, Al-Deen S, Lee C K. Mechanical and durability behaviours of low carbon concrete: a systematic review [J]. Journal of Building Engineering, 2025, 100: 111633.

[9] Chen Zixuan, Xiao Jianzhuang. Fire-insulation properties of recycled aggregate concrete, its application in composite concrete structures, and concrete-concrete interface effects: a review [J]. Journal of Building Engineering,

2025, 107: 112681.

[10] Guven H, Inel M. The effect of travertine waste on the strength and insulation properties of foam concrete [J]. Materials Research Express, 2025, 12 (1): 015509.

[11] He Shan, Sayadi S, Patel R A, et al. Perspectives on the incorporation of self-healing in the design practice of reinforced concrete structures [J]. Structural Concrete, 2025, 26 (6): 7284-7311.

[12] Gomaa E, Ghenni A, Elgawady M A. Repair of ordinary Portland cement concrete using ambient-cured alkali-activated concrete: interfacial behavior [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 129: 105968.

[13] Tayeh B A, Bakar B H A, Johari M A M, et al. Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation: a review [J]. Procedia Engineering, 2013, 54: 525-538.

[14] Wang Yanshuai, Peng Kaidi, Alrefaei Y, et al. The bond between geopolymer repair mortars and OPC concrete substrate: strength and microscopic interactions [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 119: 103991.

[15] 苗佩. 低周循环轴压荷载下结构型纤维混凝土损伤演化试验研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2024.

[16] Bažant Z P, Oh B H. Crack band theory for fracture of concrete [J]. Matériaux et Construction, 1983, 16 (3): 155-177.

[17] Karihaloo B L, Nallathambi P. An improved effective crack model for the determination of fracture toughness of concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1989, 19 (4): 603-610.

[18] Jenq Y, Shah S P. Two parameter fracture model for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1985, 111 (10): 1227-1241.

[19] Nallathambi P, Karihaloo B L. Determination of specimen-size independent fracture toughness of plain concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1986, 38 (135): 67-76.

[20] Sain T, Kishen J M C. Energy-based equivalence between damage and fracture in concrete under fatigue [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2007, 74 (15): 2320-2333.

[21] Slowik V, Plizzari G A, Saouma V E. Fracture of concrete under variable amplitude fatigue loading [J]. Materials Journal, 1996, 93 (3): 272-283.

[22] Maitra S R, Reddy K S, Ramachandra L S. Stress intensity factor based damage prediction model for plain concrete under cyclic loading [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2018, 30 (7): 04018118.

[23] Bhowmik S, Ray S. An experimental approach for characterization of fracture process zone in concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2019, 211: 401-419.

(下转第 101 页)

- progress of aeration cavitation reduction technology and aeration devices[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(2): 86-94. (in Chinese))
- [8] Fuhrhop H, Schulz H E, Wittenberg H. Solution for spillway chute aeration through bottom aerators [J]. International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, 2014, 2(3): 298-312.
- [9] 周赤, 何勇, 廖仁强. 三峡工程泄洪深孔突扩跌坎式掺气的试验研究[J]. 长江科学院院报, 1997, 14(2): 2-6. (Zhou Chi, He Yong, Liao Yongqiang. Experimental studies on aerator with vertical drop and lateral sudden enlargement form for Three Gorges Project's outlets[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1997, 14(2): 2-6. (in Chinese))
- [10] 王伟, 邓军, 卫望汝. 高水头弧形闸门出口侧墙空化特性及掺气减蚀研究 [J]. 工程科学与技术, 2025, 57(2): 84-92. (Wang Wei, Deng Jun, Wei Wangru. Cavitation characteristics and aeration mitigation for the sidewall of a radial gate in a high-head tunnel [J]. Advanced Engineering Sciences, 2025, 57(2): 84-92. (in Chinese))
- [11] Zhang Jianmin, Chen Jiangang, Xu Weilin, et al. Three-dimensional numerical simulation of aerated flows downstream sudden fall aerator expansion-in a tunnel[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2011, 23(1): 71-80.
- [12] 张建民, 许唯临, 王伟, 等. 高水头冲沙放空洞边墙空蚀破坏原因探讨 [J]. 水力发电学报, 2010, 29(5): 197-201. (Zhang Jianmin, Xu Weilin, Wang Wei, et al. Cavitation damage to sidewalls in a sand flushing tunnel under high head [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(5): 197-201. (in Chinese))
- [13] 肖兴斌, 王才欢, 王业红. 弧形闸门突扩跌坎式通气减蚀研究进展综述[J]. 长江科学院院报, 2000(5): 1-4. (Xiao Xingbin, Wang Caihuan, Wang Yehong. Review on study of aerators with sudden lateral enlargement and bottom drop at taintor gate region[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2000(5): 1-4. (in Chinese))
- [14] Ma Xudong, Dai Guangqing, Yang Qing, et al. Analysis of influence factors of cavity length in the spillway tunnel downstream of middle gate chamber outlet with sudden lateral enlargement and vertical drop aerator[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2010, 22(5): 680-686.
- [15] 李宏娟, 薛玉林. 弧形闸门突扩跌坎泄洪放空洞受损修复研究[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(4): 95-97. (Li Hongjuan, Xue Yulin. Study on damage repair of radial gate sluice discharge cavity with sudden enlargement and falling bucket [J]. Mechanical & Electrical Technique of Hydropower Station, 2023, 46(4): 95-97. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-05-13 编辑: 俞云利)

(上接第 26 页)

- [24] Gylltoft K. Fracture mechanics models for fatigue in concrete structures [D]. Luleå: Luleå Tekniska Universitet, 1983.
- [25] Horii H, Shin H C, Pallewatta T M. Mechanism of fatigue crack growth in concrete [J]. Cement and Concrete Composites, 1992, 14(2): 83-89.
- [26] Hillerborg A, Modéer M, Petersson P E. Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-781.
- [27] Petersson P E. Crack Growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials [R]. TVBM 1006, Lund: Division of Building Materials, University of Lund, 1981.
- [28] Liaw B M, Jeang F, Du J J, et al. Improved nonlinear model for concrete fracture [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1990, 116(2): 429-445.
- [29] Foote R M L, Mai Y W, Cotterell B. Crack growth resistance curves in strain-softening materials [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1986, 34(6): 593-607.
- [30] Ottosen N S, Ristinmaa M. Enhanced fictitious crack model accounting for material drawn into the cohesive zone: physically based crack closure criterion [J]. International Journal of Fracture, 2016, 199(2): 199-211.
- [31] 傅剑平, 慕遂峰, 白绍良. 高应变状态下混凝土的非等应变幅重复受压性能试验研究 [J]. 工程力学, 2006, 23(11): 145-152. (Fu Jianping, Mu Suifeng, Bai Shaoliang. Cyclic loading tests on behavior of concrete subjected to large compressive strains of different amplitude [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 145-152. (in Chinese))
- [32] GB/T 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S].
- [33] 卫军, 李松林, 董荣珍, 等. 考虑残余变形影响的混凝土疲劳损伤本构模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 57-61. (Wei Jun, Li Songlin, Dong Rongzhen, et al. Fatigue damage constitutive model of concrete considering the effect of residual deformation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 57-61. (in Chinese))
- [34] Wang Limin, Xu Shilang, Zhao Xiqiang. Analysis on cohesive crack opening displacement considering the strain softening effect [J]. Science in China Series G, 2006, 49(1): 88-101.
- [35] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws [J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.

(收稿日期: 2025-07-05 编辑: 俞云利)