

界面弹性模量对混凝土梁影响的三维动态研究*

张亚芳¹, 章凯¹, 刘浩^{1,2}, 甘伟¹

1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006
2. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029

摘要: 采用 Weibull 统计学理论模拟混凝土材料的非均匀分布, 对钢筋混凝土梁界面弹性模量变化对梁裂纹扩展的影响进行研究, 得到了试件从裂纹萌生、扩展直至贯通的破坏全过程图和峰值荷载曲线、声发射曲线。结果表明: 钢筋混凝土梁界面弹性模量的变化对梁的裂纹扩展模式有着较为显著的影响; 随着试件界面弹性模量的增加, 试件的破坏模式从以弯曲裂纹为主的弯曲拉裂破坏逐步变化为以斜裂纹为主的剪切破坏。试件的峰值荷载以及累积声发射次数随界面弹性模量的增大均呈现先增大后减小的规律; 其中试件的累积声发射次数曲线有三个明显的“突变点”; 同时不同试件在破坏过程中的加载步-声发射数柱状图都存在着 4 个极值点, 它们分别对应试件不同的破坏阶段。

关键词: 三维动态; 破坏过程; 界面弹性模量; 声发射

中图分类号: TU311 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2021) 04-0121-08

Three-dimensional dynamic study on the influence of interfacial elastic modulus on concrete beam

ZHANG Yafang¹, ZHANG Kai¹, LIU Hao^{1,2}, GAN Wei¹

1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China
2. Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co. Ltd., Shenzhen 518029, China

Abstract: The influence of interfacial elastic modulus of reinforced concrete beams on crack propagation has been simulated in this paper. Non-uniform distribution of Weibull statistical theory has been adopted when setting concrete model. The failure process diagrams of crack initiation, propagation and penetration, peak load curve and acoustic emission (AE) curve have been obtained. The results show that variation of interfacial modulus has a significant influence on the crack propagation pattern, with increase of the interface elastic modulus of specimens, failure pattern of the specimen gradually changes from bending tensile failure dominated by bending cracks to shear failure dominated by oblique cracks. Both peak load of tested beams and accumulative AE events increase first and then decrease with the increase of interfacial modulus. There are three obvious “jump points” in the cumulative AE curve and four extreme points in the histogram of AE events of each specimen, respectively, which correspond to different failure stages, respectively.

Key words: three dimension dynamic; failure process; interfacial modulus; acoustic emission

* 收稿日期: 2020-05-07

录用日期: 2020-06-05

网络首发日期: 2020-09-15

基金项目: 国家自然科学基金 (51878190, 51678170)

作者简介: 张亚芳 (1966年生), 女; 研究方向: 混凝土破裂机理的细观力学; E-mail: zhangyafang2004@163.com

混凝土梁是工程中使用最广泛的构件之一,在梁构件内部混凝土和筋材之间的界面是结构应力的过渡区域,是决定能否实现筋材与混凝土基体共同工作的关键因素,因此研究界面性质对梁破坏过程的影响具有重要意义。

20 世纪开始,国内外有关学者开始研究界面材料性能的影响^[1-6],取得了许多成绩。一些学者利用各种物理实验方法研究了纤维的某些性能,例如利用拉拔实验^[7-10]去研究纤维的拉拔特性及界面剪切强度。然而,由于界面存在于材料的内部、性质特殊并且尺寸微小,因此在全面揭示界面性质对材料开裂破坏机理影响的研究方面,物理实验方法存在一定的局限性。随着计算机的迅速发展,近年来许多学者开始采用有限元仿真方法研究界面强度^[11-14]和界面弹性模量等力学性质对材料性能的影响。在界面弹性模量影响材料性能的研究中,杜敏等^[15]利用基于单位分解法及水平集理论的新型数值模拟方法模拟裂纹在材料体内的扩展过程,研究了单轴拉伸数值实验下混凝土的界面弹性模量对混凝土力学性能和破坏模式的影响;Lee 等^[16]提出了一种三相模型和材料不连续有限元相结合的混凝土数值模型,对具有复杂界面的混凝土进行了三维分析。

但总体来说,探索界面弹性模量对材料性能影响的研究相对极少,并且目前现有的文献也多是建立在材料均匀假设和静态条件下开展的研究。众所周知,实际的混凝土材料是非均匀分布的,且大量的混凝土梁是在动载工况下工作的。针对这种现状,本文在考虑钢筋混凝土梁各相材料细观非均匀分布的前提下,利用 RFPA3D-Dynamic 程序模拟了三点弯曲梁在三维动载情形下的物理力学性能,实现了试件从裂纹萌生、扩展直至失稳破坏的全过程模拟,开展了界面弹性模量变化对钢筋混凝土梁相关性能影响的分析。

1 数值模拟模型

混凝土是一种典型的非均匀材料,本研究利用 RFPA3D-Dynamic 分析软件^[17],采用 Weibull 双函数曲线对试件单元的强度、泊松比、弹性模量和密度等进行随机非均匀性赋值,其曲线函数为

$$\varphi(x) = \frac{m}{x_0} \cdot \left(\frac{x}{x_0}\right)^{m-1} \cdot \exp\left(-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m\right), \quad (1)$$

其中 x 为单元的某一力学参数; x_0 表示该参数对应的平均值; m 为均质度系数, m 越大时,材料越

均匀。

细观单元的损伤主要是拉伸和剪切破坏造成的,本文采用拉伸截断的摩尔库伦准则作为损伤判断依据^[18]。当单元满足最大拉应力准则时,认为该单元发生拉伸损伤,如式(2)所示。

$$\sigma_1 \geq \sigma_t, \quad (2)$$

其中 σ_1 为最大主应力, σ_t 为单向应力状态下的极限应力。

当细观单元的应力状态满足摩尔库伦准则时,则该单元发生剪切损伤,如式(3)所示。其中,最大拉应力准则具有优先权。

$$F = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \geq \sigma_c, \quad (3)$$

式中 ϕ 为内摩擦角, σ_c 为单轴抗压强度; σ_1 和 σ_3 分别为最大和最小主应力。

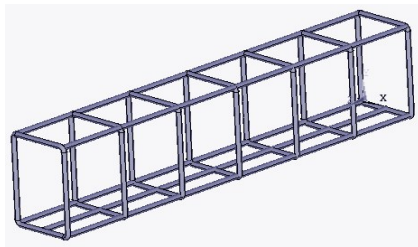
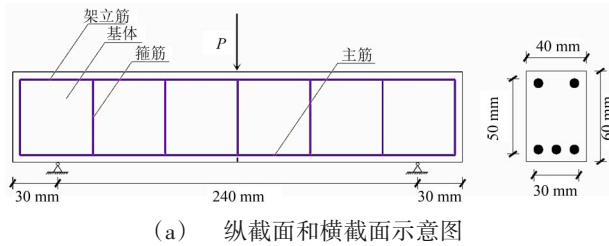
按照勒梅特(Lemaitre)应变等价原理,可以建立损伤变量和应变之间的关系,本构关系中的损伤变量可以描述为

$$D = \begin{cases} 0, & \varepsilon < \varepsilon_t, \\ 1 - \frac{\sigma_r}{E_0 \varepsilon}, & \varepsilon_t \leq \varepsilon < \varepsilon_{\max t}, \\ 1, & \varepsilon \geq \varepsilon_{\max t}, \end{cases} \quad (4)$$

其中 σ_r 是材料单元的残余强度, E_0 是材料的初始弹性模量, ε_t 是弹性极限所对应的拉伸损伤应变阈值, $\varepsilon_{\max t}$ 是材料单元的极限拉伸应变。 D 为损伤变量,当材料处于完全损伤状态时, $D = 1$;当材料处于完全没有损伤的状态时, $D = 0$;当材料处于不同程度的损伤状态时, $0 < D < 1$ 。

图1为钢筋混凝土梁的数值模型示意图,其尺寸为 60 mm×40 mm×300 mm,是在梁下部的正中间位置设置预留缝的简支梁,预留缝宽度为 2 mm,高 3 mm,长 40 mm,梁的保护层厚度为 5 mm。模型的纵向钢筋包括上部两个架立筋和下部三根主筋。假设下部的三根主筋包裹着界面,界面厚度为 1 mm。本文研究了界面弹性模量分别为 0.1、1.0、3.5、5.5、7.5 GPa 的五个模型。为方便描述,将其分别表示为 E1、E2、E3、E4、E5,其中 E1 为低界面弹性模量试件,E2 和 E3 为中界面弹性模量试件,E4 和 E5 为高界面弹性模量试件。表 1 为试件各相材料力学参数及均质度值。

加载采用三角形压缩应力波,加载曲线如图 2 所示,总加载时长 700 μ s,每步 1 μ s,总共 700 步,应力幅值 6.5 MPa,应力波抬升时间 180 μ s。



(a) 纵截面和横截面示意图
(b) 钢筋分布示意图
图 1 钢筋混凝土梁数值模拟模型

Fig. 1 Numerical simulation model of reinforced concrete beams

表 1 数值模型力学参数¹⁾

Table 1 Mechanical parameters of numerical model

材料相	弹性模量/MPa	极限抗拉强度/MPa	泊松比
基体	30 000(3)	5(3)	0.20(100)
钢筋	200 000(50)	300(50)	0.25(100)
界面	—	9(10)	0.3(100)

1) 括号内数值代表材料的均质度, 基体的拉压比为 1/10, 钢筋的拉压比为 1; 界面的弹性模量对应试件 E1~E5 的弹性模量值。

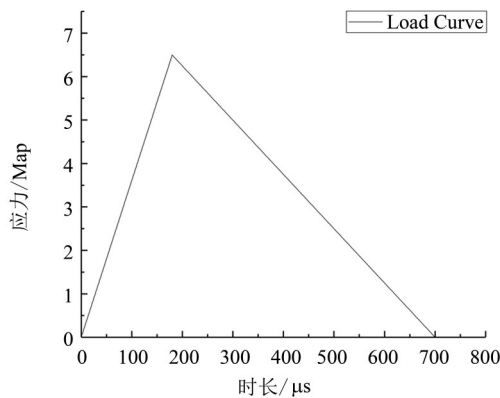


图 2 动态加载曲线
Fig. 2 Dynamic loading curve

2 计算结果分析

随着界面弹性模量的变化, 钢筋混凝土梁在三点弯曲作用下的破坏模式发生显著变化。篇幅所限, 本文仅对 E1、E2、E4 三个梁试件的破坏过程进行描述。

在加载前期, 由于预留缝处的拉应力集中, E1、E2、E4 的破坏均是从此处开始。随着加载的继续, 预留缝萌发的裂纹到达主筋的界面处, 同时由于材料的非均匀性, 基体中出现了许多随机破坏的单元。

试件 E1 的裂纹尖端遇到钢筋后发生偏折, 钢筋的上下界面开始脱粘。随后, 由于梁下部拉应力的作用, 箍筋与主筋连接处开始萌生出微裂纹, 预留缝处的裂纹以垂直主筋的顺筋方向向上进一步扩展, 如图 3 (a) 的 Step-242 所示。当加载到 274 步时, 箍筋与主筋连接处萌生出的微裂纹由于拉应力的作用发展为沿箍筋的宏观裂纹。由于 E1 的界面较柔, 破坏状态图上以弯曲拉应力引起的弯曲裂纹和顺筋裂纹占主导地位, 如图 3 (a) 的 Step-274 所示。随后在箍筋与主筋的连接处, 由于应力集中的作用, 沿着箍筋开始萌生裂纹并向上扩展。当扩展至梁高的约 1/2 处时, 在剪应力的作用下以大致 45° 角的方向继续向上扩展至上部架立筋处。然后, 由于钢筋阻止了裂纹继续向上扩展, 裂纹便沿着架立筋与混凝土的界面扩展, 直至左右两条裂纹在梁上部的中间汇合, 最终在混凝土中形成了沿箍筋和架立筋扩展的宏观“拱”形裂纹, 如图 3 (a) 的 Step-420 所示。最后梁上部和内部混凝土逐渐被压碎, 如图 3 (a) 的 Step-670 所示。钢筋混凝土梁的上部混凝土被压碎, 标志着梁彻底破坏。

试件 E2 的主筋界面随加载开始脱粘, 由于界面弹性模量的增大, 跨中由弯曲拉应力引起的沿箍筋垂直向上的弯曲裂纹比试件 E1 短, 并且主筋上部由于剪切应力的作用开始萌发斜裂纹。与此同时, 主筋与箍筋的连接处由于弯曲拉应力的作用, 开始萌发沿箍筋向上的弯曲裂纹, 如图 3 (b) 的 Step-242 所示。当加载到 274 步时, 主筋上部的斜裂纹和沿箍筋向上的弯曲裂纹同时向上扩展, 如图 3 (b) 的 Step-274 所示, 破坏状态图上以弯曲裂纹、斜裂纹占主导地位。然后, 弯曲裂纹、斜裂纹继续发展, 最终如图 3 (b) 的 Step-420 所示。相较 E1 试件而言, 无论是沿箍筋向上的弯曲裂纹, 还是沿主筋产生的由于界面破坏导致的裂纹, 其长度都明显比 E1 试件短。最后梁上部和内部混凝土被压碎, 如图 3 (b) 的 Step-670 所示。

试件 E4 的主筋界面混凝土失稳破坏后, 随着脱粘部分继续进行, 破坏单元大量的出现, 除了跨中由于弯曲拉应力作用产生的沿箍筋向上的裂

纹外, 其他地方没有宏观裂纹出现, 如图 3 (c) 的 Step-242 所示。在 274 加载步, 由于主筋上下界面的破坏, 在剪切应力的作用下主筋界面处萌发出了斜裂纹, 随后在钢筋混凝土梁腹内形成了由剪切破坏产生的“八”字形裂纹, 如图 3 (c) 的 Step-274 所示。在“八”字形裂纹形成后, 由于拉

应力的作用在箍筋与主筋的连接处萌发了顺着箍筋向上的弯曲裂纹, 保护层混凝土也多处被拉裂, 如图 3 (c) 的 Step-420 所示, 此时破坏状态图中的裂纹与变形主要出现在跨中部位, 且为斜裂纹。之后, 梁上部和内部混凝土被压碎, 如图 3 (c) 的 Step-670。

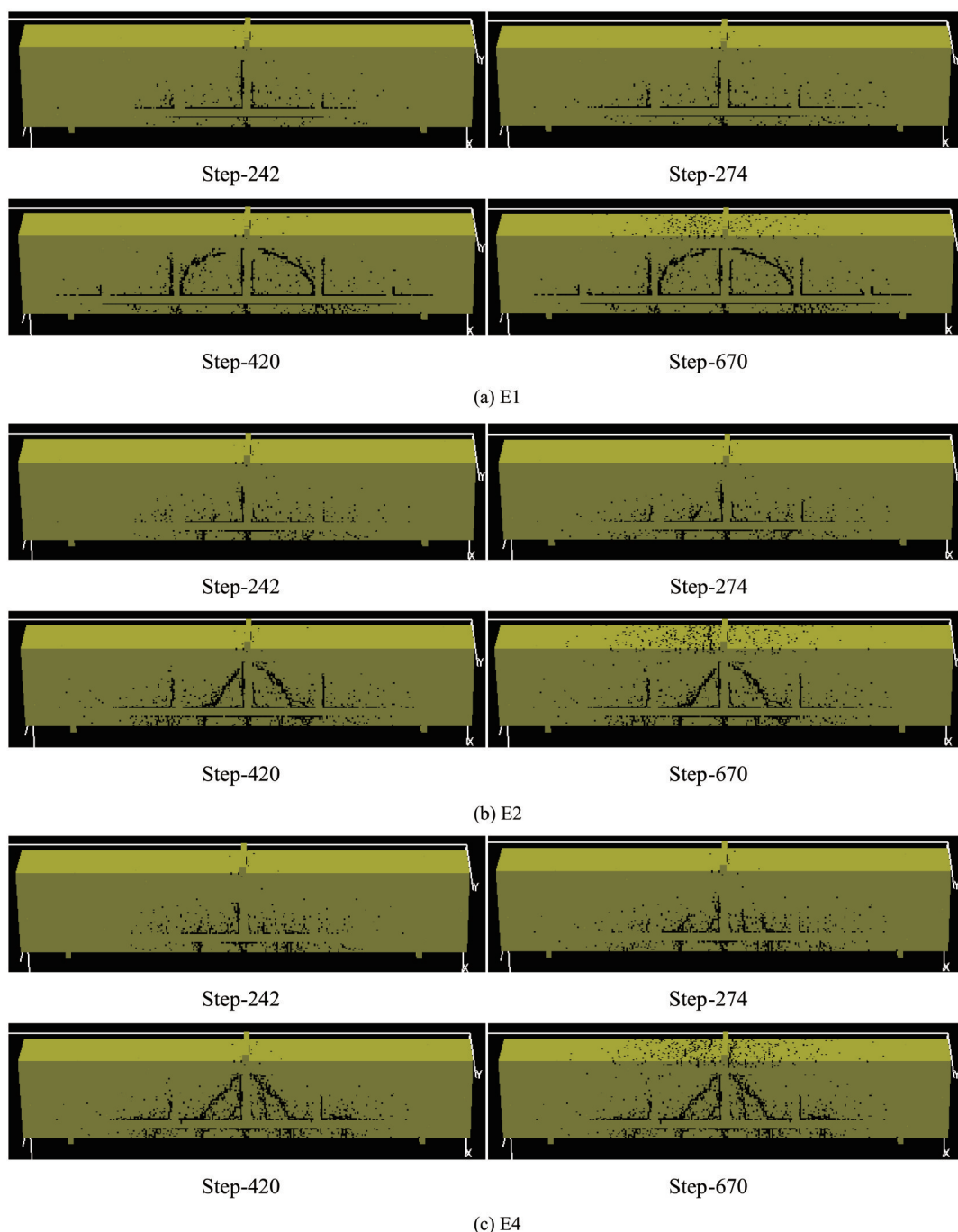


图 3 不同界面弹性模量的钢筋混凝土梁试件的破坏过程图

Fig. 3 Failure process of reinforced concrete beams with different interface elastic modulus

文献 [19] 在静载作用下, 利用二维数值模拟软件对不同界面弹性模量的钢筋混凝土梁在三点弯曲作用下的破坏过程进行了数值模拟研究。文献 [19] 中分析了界面弹性模量分别为 0.1 GPa、1 GPa、7.5 GPa 的试件, 依次表示为 L-0.1、L-1、L-7.5, 它们最终的破坏模式如图 4 所示。研究表明, 界面弹性模量较低时, 破坏模式以弯曲裂纹、顺筋裂纹占主导地位; 界面弹性模量适中时, 破坏模式以弯曲裂纹、斜裂纹占主导

地位; 界面弹性模量较高时, 破坏模式以斜裂纹占主导地位。

将 L-0.1、L-1、L-7.5 的最终破坏模式分别与本文试件 E1 的第 274 步、试件 E2 的第 274 步、试件 E4 的第 420 步的破坏模式相比较, 可以发现它们极为相似, 这说明动载作用下界面弹性模量变化对三点弯曲梁试件的影响和在静载作用下的影响规律是相似的。

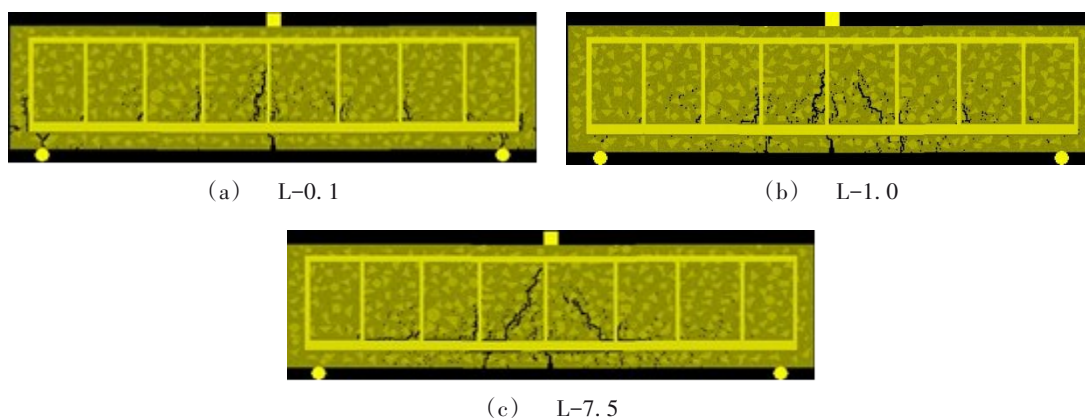


图4 静载下不同界面弹性模量梁的破坏状态 [19]

Fig. 4 Failure modes of numerical simulation beams with different interface elastic modulus under static loading [19]

混凝土材料破坏时会产生声发射 (Acoustic Emission, 简称 AE), 从微观机制看, 声发射是脆性 (准脆性) 材料微裂纹以及结构面在破坏过程中能量的释放。混凝土的单元损伤数与声发射次数成正比, 图 5 所示为梁试件 E1、E2、E4 的声发射数-加载步柱状图。E1、E2、E4 的 AE 图均存在着 4 个极值点。1 号极值点是由于梁试件 E1、E2、E4 预留裂缝处的应力集中使得钢筋混凝土下部开

裂导致。2 号极值点是因为梁试件 E1、E2、E4 下部纵筋界面混凝土破坏导致。而对于 3 号极值点, 试件 E1 主要是由于在混凝土中产生了弯曲裂纹所导致, 试件 E2 主要是由于在混凝土中产生了弯曲裂纹和斜裂纹共同作用所导致的, 试件 E4 则是由于在混凝土中产生了斜裂纹所导致。4 号极值点的出现则是因为试件 E1、E2、E4 的上部混凝土被压碎而导致大量声发射的发生。

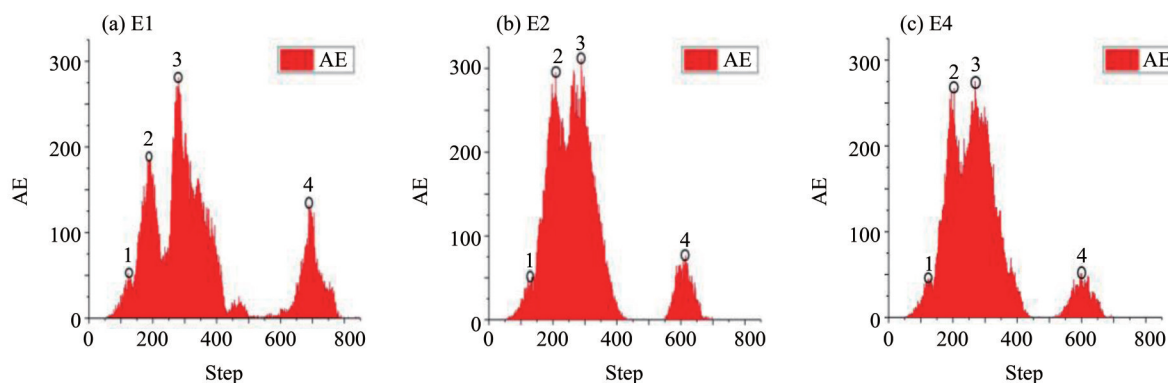


图5 加载步-声发射数柱状图

Fig. 5 Loading step-AE histogram

声发射累计数 (Accumulative Acoustic Emission, 简称 AAE) 能反映材料在破坏过程中能量的耗散情况, 并且声发射累积数与材料的能量释放值成正比, 可以从能量角度反映材料在破坏过程中所表现出来的延性。由图 6 可知, E4 的 AAE 数最大, 破坏过程中能量的释放量主要跟试件损伤破坏的单元数量有关, 故而 E4 的单元损伤破坏最严重。在图 6 中, 从试件 E1 至试件 E5, 梁的界面弹性模量由小到大。各梁所对应曲线的最大值, 代表梁的耗能能力的强弱。随着界面弹性模量的逐渐增大, 梁的耗能能力也随之逐步增强, 试件 E4 处耗能能力达到最强。之后随着弹性模量继续增加, 耗能能力有所减小。说明梁的耗能能力随着界面弹性模量的增大, 总体上呈现先增大后减小的趋势, 梁的弹性模量存在着一个最优值, 使得梁在破坏过程中的耗能能力达到最强。

由图 6 中 E1 的曲线图可观察到 3 个明显的“跳跃点”, 分别对应的是图 5 的第 2、3、4 个极值点, 与文献 [20-21] 中实验梁破坏过程的能量累计曲线中的突变点较为相似。图 6 中, 突变点 JP1 对应梁下部混凝土在拉力作用下的开裂, 此时钢筋和混凝土之间出现了相对滑动的趋势; 突变点 JP2 对应着界面混凝土的失稳破坏; 突变点 JP3 对应着钢筋肋间混凝土不断被压碎, 同时受压区的混凝土也开始被压碎, 最终导致梁的破坏。

图 7 为本文数值模拟的界面弹性模量-峰值荷载曲线。由图 7 可知, 峰值荷载随界面弹性模量的变化呈现出中间高两边低的趋势, 其中试件 E1 最低。由于文献 [6] 得到了钢筋纤维混凝土界面弹性模量随水灰比的增大而减小的结论, 因此文献 [22] 的物理实验结果实际上反映的是界面弹性模量对试件承载力的影响, 文献 [22] 的研究结论认为材料的弯曲强度随着水灰比的变化也呈现中间高两边低的现象, 与本文的研究结论一致。梁的承载力最小值在最低界面弹性模量时取得, 梁的承载力随界面弹性模量的增大而增大, 但当界面弹性模量增大到一个最优值后, 梁的承载力随着界面弹性模量的继续增大反而开始减小, 即梁的承载力具有随着界面弹性模量的增大而先增大后减小的趋势, 说明界面弹性模量存在着一个最优值, 此时梁的承载力达到最大。

3 结论

本文建立了三点弯曲梁的三维动态数值模型,

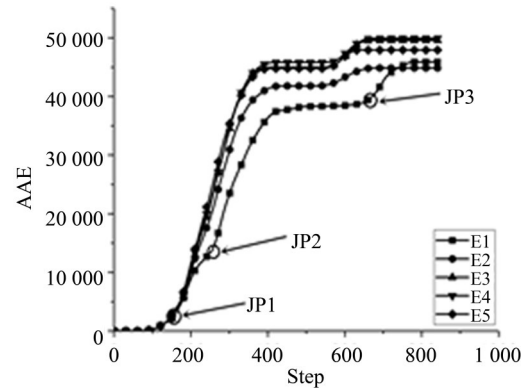


图 6 声发射能量累积曲线

Fig. 6 Acoustic emission energy accumulation curve

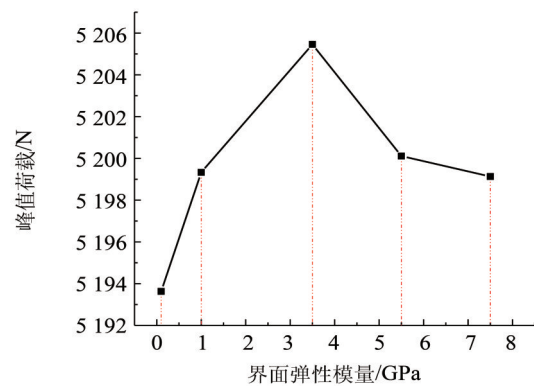


图 7 不同界面弹性模量下峰值荷载图

Fig. 7 Peak load diagram under different interface elastic modulus

采用 Weibull 统计学理论考虑混凝土材料的细观非均匀分布, 研究了界面弹性模量对钢筋混凝土梁破坏过程的影响, 得到了以下结论:

1) 当梁的界面弹性模量较低时, 梁的破坏模式以弯曲拉裂破坏为主, 沿着梁的跨度方向扩展出了多条弯曲裂缝, 这些弯曲裂缝的开始位置一般为主筋与箍筋的连接处, 并且通过不断扩展在梁的腹部出现了宏观“拱”形裂缝。随着界面弹性模量的增加, 弯曲裂缝不断减少, 同时在梁的腹部形成“八”字形斜裂缝。

2) 随着界面弹性模量的增加, 梁的承载力也随之增加, 当界面弹性模量达到某个最优值时, 梁的承载力达到最大, 之后随着弹性模量的继续增加, 承载能力反而会减小。

3) 随着界面弹性模量的增加, 梁的耗能能力呈现先增大后减小的趋势, 并存在一个最优值使得梁在破坏过程中的耗能能力达到最强, 当界面的弹性模量超过最佳耗能能力所对应的最优值后, 继续增加弹性模量会使材料的耗能能力有所降低。

参考文献:

- [1] BANDELT M J, FRANK T E, LEPECH M D, et al. Bond behavior and interface modeling of reinforced high-performance fiber-reinforced cementitious composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 83: 188-201.
- [2] SAEZ DEL BOSQUE I F, ZHU W, HOWIND T, et al. Properties of interfacial transition zones (ITZs) in concrete containing recycled mixed aggregate [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 81: 25-34.
- [3] ANGST U M, GEIKER M R, MICHEL A, et al. The steel-concrete interface [J]. *Materials and Structures*, 2017, 50(2): 143-143.
- [4] TRAN Q T, TOUMI A, GRANJU J L. Experimental and numerical investigation of the debonding interface between an old concrete and an overlay [J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(3): 379-389.
- [5] ANGST U M, GEIKER M R, ALONSO M C, et al. The effect of the steel-concrete interface on chloride-induced corrosion initiation in concrete: a critical review by RILEM TC 262-SCI [J]. *Materials and Structures*, 2019, 52(4): 1-25.
- [6] 徐礼华, 余红芸, 池寅, 等. 钢纤维-水泥基界面过渡区纳米力学性能 [J]. *硅酸盐学报*, 2016, 44(8): 1134-1146.
- XU L H, YU H H, CHI Y, et al. Nano-indentation character of interfacial transition zone between steel fiber and cement paste [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 44(8): 1134-1146.
- [7] TAI Y, EL-TAWIL S. High loading-rate pullout behavior of inclined deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 148: 204-218.
- [8] MAIDA P D, RADI E, SCIANCALEPORE C, et al. Pullout behavior of polypropylene macro-synthetic fibers treated with nano-silica [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 82: 39-44.
- [9] 李建, 唐朝生, 王德银, 等. 基于单根纤维拉拔试验的波形纤维加筋土界面强度研究 [J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(9): 1696-1704.
- LI J, TANG C S, WANG D Y, et al. Single fiber pullout tests on interfacial shear strength of wave-shape fiber-reinforced soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(9): 1696-1704.
- [10] TAI Y S, EL-TAWIL S, CHUNG T H. Performance of deformed steel fibers embedded in ultra-high performance concrete subjected to various pullout rates [J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 89: 1-13.
- [11] 杨文龙, 张亚芳, 刘浩, 等. 界面强度对CFRP-混凝土组合梁弯曲性能的影响 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2012, 51(6): 68-72.
- YANG W L, ZHANG Y F, LIU H, et al. Influence of interface strength on bending properties of CFRP-Concrete composite beam [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2012, 51(6): 68-72.
- [12] 于庆磊, 杨天鸿, 唐春安, 等. 界面强度对混凝土拉伸断裂影响的数值模拟 [J]. *建筑材料学报*, 2009, 12(6): 643-649.
- YU Q L, YANG T H, TANG C A, et al. Digital simulation of influence of tensile strength of interfacial transition zone on tensile fracturing process of concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2009, 12(6): 643-649.
- [13] 张亚芳, 唐春安, 陈树坚. 界面强度对柔颗粒增强复合材料破裂特性的影响 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2007, 46(1): 36-39.
- ZHANG Y F, TANG C A, CHEN S J. Influence of interface characteristic on failure process and mechanical properties of brittle composite matrix with soft particle reinforcement [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007, 46(1): 36-39.
- [14] 张亚芳, 唐春安, 陈树坚. 界面性质对颗粒增强复合材料力学性能和破裂过程的影响 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2006, 45(3): 31-34.
- ZHANG Y F, TANG C A, CHEN S J. Influence of interface characteristic on failure process and mechanical properties of brittle composite matrix with particle reinforcement [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2006, 45(3): 31-34.
- [15] 杜敏, 杜修力, 金浏. 混凝土界面特性与力学性能的细观数值分析 [J]. *土木建筑与环境工程*, 2012, 34(S1): 235-238.
- DU M, DU X L, JIN L. A mesoscopic simulation analysis of interface transition zone characteristics effect on mechanical properties of concrete [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2012, 34(S1): 235-238.
- [16] LEE K M, PARK J H. A numerical model for elastic modulus of concrete considering interfacial transition zone [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 38(3): 396-402.
- [17] QIAN X K, LIANG Z Z, LIAO Z Y. A three-dimensional numerical investigation of dynamic fracture characteristics of rock specimens with preexisting surface flaws [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018, 18: 1-18.

- [18] 唐春安,朱万成. 混凝土损伤与断裂数值试验[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [19] 杨文龙. 界面强度和弹性模量变化对梁弯曲性能的影响[D]. 广州:广州大学,2013.
YANG W L. Influence of interfacial strength and elastic modulus on the flexural behavior of beam [D]. Guangzhou:Guangzhou University,2013.
- [20] 范向前,胡少伟,陆俊. 钢筋混凝土断裂全过程声发射特征辨识及相关参量影响[J]. 中国科学:技术科学,2015,45(8):849-856.
FAN X Q, HU S W, LU J. Acoustic emission characteristics identification and related parameters influence of reinforced concrete fracture process[J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(8):849-856.
- [21] 葛若东,刘茂军,吕海波. 钢筋混凝土梁破坏过程的声发射特征试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2011,36(1):160-165.
GE R D, LIU M J, LU H B. Experimental research on acoustic emission characteristics of reinforced concrete beams during failure process [J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2011, 36 (1) : 160-165.
- [22] 左迎峰,肖俊华,李萍,等. 水灰比对镁系无机轻质材料性能的影响规律[J]. 材料导报,2018,32(14):2370-2375.
ZUO Y F, XIAO J H, LI P, et al. Effect of water cement ratio on properties of magnesium inorganic light materials[J]. Materials Review, 2018, 32(14):2370-2375.

(责任编辑 王海蓉)