

BFRP 筋混凝土深梁动态剪切破坏尺寸效应模拟

金 浏, 雷宇霜, 杜修力

(北京工业大学城市减灾与防灾防护教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 为研究玄武岩纤维增强聚合物(BFRP)筋混凝土深梁动态剪切破坏机制及其尺寸效应规律,考虑混凝土非均质性、混凝土/BFRP 筋相互作用以及混凝土和 BFRP 筋在材料层面的应变率效应,建立了 BFRP 筋混凝土深梁细观尺度三维数值模型。利用已有的试验数据验证了该数值模拟方法的合理性和准确性,采用该方法研究了不同尺寸但几何相似的 BFRP 筋混凝土深梁在不同应变率下的剪切破坏模式及失效机制。分析了截面尺寸、配箍率、应变率对 BFRP 筋混凝土深梁剪切破坏及相应尺寸效应规律的影响。结果表明:动载下梁的破坏模式与静载时存在较大差异,但均表现出尺寸效应;增大应变率及配箍率均能有效提高梁承载力且削弱剪切尺寸效应,但应变率的作用程度明显大于配箍率。

关键词: BFRP 筋混凝土深梁; 应变率; 配箍率; 剪切破坏; 尺寸效应; 细观模拟

中图分类号: TU375.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)01-0196-11

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.01.021

引 言

钢筋混凝土深梁($l_0/h \leq 4$ 或 $\lambda \leq 2^{[1]}$, l_0 为梁净跨, h 为梁高, λ 为剪跨比)由于其自身受力合理及刚度较大等优点广泛应用于建筑结构中。但当其服役于恶劣环境中时,梁内钢筋易发生锈蚀。纤维增强筋(FRP 筋)由于其高强和耐腐蚀特性,被提出作为梁中钢筋的替代材料^[2-3]。然而,由于 FRP 筋的弹性模量较小、极限强度较大且破坏时脆性明显,因此 FRP 筋混凝土深梁与钢筋混凝土深梁的力学行为会存在差异。而且,混凝土结构在其工作寿命内,除了受到静载荷作用外,还可能受到冲击、爆炸荷载和地震作用荷载等动荷载的作用。另外,混凝土和 FRP 筋材料的都是应变率敏感性材料^[4-6],将会造成 FRP 筋混凝土深梁在大应变率作用下力学性能与准静态荷载作用下存在差异。此外,随着混凝土结构尺寸的增加,其力学特性可能不再保持不变,即混凝土结构中可能存在尺寸效应^[7]。由于 FRP 筋混凝土深梁构件的斜截面应力分布不连续、破坏时脆性明显,并且在动荷载作用下受力将更复杂,因此,其剪切尺寸效应可能会更明显。

部分学者通过试验^[8-11]发现深梁在静载时存在较明显的剪切尺寸效应。值得注意的是, Syroka-Korol 等^[8]发现当无腹筋 BFRP 筋混凝土深梁的截

面高度从 200 mm 增加至 800 mm 时,其名义抗剪强度会降低 60%。

由于 FRP 筋发展时间较短且受到试验设备的限制,目前关于混凝土梁动态剪切行为的研究主要还是集中在小尺寸的钢筋混凝土浅梁上。部分学者发现在动态加载条件下,钢筋混凝土梁的力学行为和静载时存在很大差异。Mutsuyoshi 等^[12]和 Kulkarni 等^[13]对钢筋混凝土梁分别开展最大速度为 0.76 m/s 和 0.38 m/s 的快速加载试验,结果都表明,快速荷载作用下梁的承载能力和耗能能力均增大且梁的破坏模式均发生变化。Adhikary 等^[14-15]采用四种不同的速率($4.0 \times 10^{-4} \sim 2.0$ m/s)分别对深梁和浅梁进行加载,其试验结果表明,两种梁的极限承载力、刚度和耗能能力均随着加载速率的增大而提高。李敏^[16]和肖诗云等^[17]同样通过物理试验发现,钢筋混凝土梁的各个力学性能受加载速度影响较大。

综上,目前对于 FRP 筋混凝土深梁静态剪切尺寸效应的研究仍然较为缺乏。另外,快速加载条件下梁的剪切力学行为的研究主要集中在小尺寸的钢筋混凝土浅梁。对于 FRP 筋混凝土深梁在快速加载条件下的剪切行为的研究较为匮乏,因此相应的剪切尺寸效应研究基本上为空白。

为了推广 BFRP 筋混凝土深梁在实际工程中的应用,有必要对其在不同加载速度下的剪切行

为及尺寸效应规律进行系统的研究。本研究考虑混凝土的非均质性和各材料的应变率效应,建立了模拟不同配箍率下BFRP筋混凝土深梁动态剪切行为的细观数值模型。在和现有试验结果吻合良好的基础之上,分析应变率、配箍率及截面尺寸对BFRP筋混凝土深梁剪切破坏的影响,并探究了应变率及配箍率对其剪切强度尺寸效应的影响规律。

1 BFRP筋混凝土深梁三维细观模型

1.1 模型的建立

目前,有很多细观力学模型研究混凝土宏观力学特性,他们均认为混凝土是多相介质组成的复合材料,且以材料空间分布的非均质性来体现混凝土材料的非线性^[18]。其中,随机骨料模型被广泛用于混凝土动态分析^[19-20]。鉴于此,本文采用随机骨料模型,并将混凝土看作由骨料、砂浆基质及粘结界面(ITZ)所组成的三相复合材料。

Naderi等^[21]研究表明骨料形状对混凝土的宏观应力-应变曲线影响并不显著。因此结合骨料的实际形状及综合考虑计算效率,本研究将其简化为球形。采用二级配混凝土(粒径为5~20 mm和20~40 mm的粗骨料颗粒分别等效成粒径为12 mm和30 mm的球体),粗骨料体积分数为35%^[21],并随机投放在砂浆基质中。通常将骨料周围的薄层设为粘结界面(ITZ),且Song等^[22]和Jin等^[23]研究表明,当ITZ的厚度为0.1~2 mm时,其只会影响混凝土应力-应变曲线的下降段,而对上升段以及峰值应力影响很小。综合考虑,本研究将ITZ的厚度假定为2 mm。因粗骨料以及ITZ通常被认为是细观力学模型的主要特征,大量的细骨料、相对较小的粗骨料和水泥浆一起被认为是具有均匀力学性质的砂浆基质。采用上述方法建立了素混凝土三维细观数值模型,将有限元网格投影到三维模型中,根据各相在网格中的位置分别赋予材料的力学属性。随后将BFRP筋笼插入素混凝土中,形成BFRP筋混凝土梁的三维细观数值模型,并且混凝土各相采用八节点六面体单元离散,BFRP筋采用梁单元离散。此外,构件的网格平均尺寸设为2 mm。这里,采用位移法进行加载控制,即根据所设计的加载速度在一定的时间间隔内使位移从零加载至100 mm。模型示意图如图1所示。结合学者对隐式和显式求解器异同的详细分析^[24],本文借助ABAQUS软件采用动态显式求解方法对试件的动态力学性能进行分析

计算。

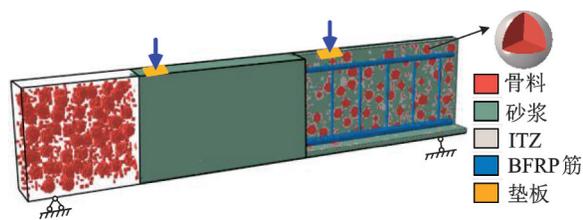


图1 BFRP筋混凝土深梁细观数值模型图

Fig.1 Meso-scale numerical model of BFRP-reinforced concrete deep beam

1.2 材料本构及其应变率效应

骨料在高应变率加载条件下会产生裂缝甚至破坏^[25],但其强度明显高于砂浆基质与ITZ^[26]。鉴于此,参考文献[7]的工作,本研究采用塑性损伤本构模型^[27]来描述骨料、砂浆基质及ITZ的力学性能。值得注意的是,为有效减缓网格敏感性,本文采用基于断裂能量的线性准则来近似混凝土的拉伸软化行为,即使用应力-位移曲线代替应力-应变曲线来描述混凝土的软化行为^[28]。BFRP筋为弹脆性材料,其在破坏前无屈服阶段且其应力应变曲线近似为线性,本构表达为:

$$\sigma_f = \epsilon_f E_{fB}, 0 \leq \epsilon_f \leq \epsilon_{fu} \quad (1)$$

式中 E_{fB} 和 ϵ_{fu} 分别为BFRP筋的弹性模量和极限应变,达到极限应变时,终止计算。

混凝土与BFRP筋均为应变率敏感材料^[4-6],因此在数值模型中需考虑材料的应变率效应。尽管应变率效应会影响混凝土的诸多力学参数,但应变率对混凝土的拉压强度影响最为显著^[29]。参考文献[7,30]的工作,将不同动荷载作用时混凝土本构曲线设置为一致,只需对骨料、砂浆基质和ITZ引入强度的动力增强系数(DIF)。关于混凝土的动力增强系数计算,本文采用fib Model Code 2010^[31]中推荐的计算模型:

$$CDIF = \frac{f_{c,dyn}}{f_{c0}} = \begin{cases} (\dot{\epsilon}_c / \dot{\epsilon}_{c0})^{0.014}, & \dot{\epsilon}_c \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ 0.012(\dot{\epsilon}_c / \dot{\epsilon}_{c0})^{1/3}, & \dot{\epsilon}_c > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

$$TDIF = \frac{f_{t,dyn}}{f_{t0}} = \begin{cases} (\dot{\epsilon}_t / \dot{\epsilon}_{t0})^{0.018}, & \dot{\epsilon}_t \leq 30 \text{ s}^{-1} \\ 0.0062(\dot{\epsilon}_t / \dot{\epsilon}_{t0})^{1/3}, & \dot{\epsilon}_t > 30 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

式中 CDIF 和 TDIF 分别为混凝土的压缩和拉伸动力增强系数; $f_{c,dyn}$ 为动压缩强度,对应的应变率 $\dot{\epsilon}_c$ 范围为 $30 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$; $f_{t,dyn}$ 为动拉伸强度,对应的应变率 $\dot{\epsilon}_t$ 范围为 $1 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^2 \text{ s}^{-1}$; f_{c0} 和 f_{t0} 分别为混凝土的静态压缩和拉伸强度; $\dot{\epsilon}_{c0}$ 和 $\dot{\epsilon}_{t0}$ 分别为混凝土的静态压缩和拉伸应变率,分别取值为 $30 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 和 $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 。

关于BFRP筋,Zhu等^[6]和Zhou等^[4]建议其应变率效应为:

$$\sigma_{fu,dyn} = \sigma_{fu} \left[1.881 - 0.8814 \cdot \exp\left(-\frac{\dot{\epsilon}_f}{8419.09}\right) \right] \quad (4)$$

$$E_{fb,dyn} = E_{fb} \left[1.7089 - 0.7089 \cdot \exp\left(-\frac{\dot{\epsilon}_f}{2283.10}\right) \right] \quad (5)$$

上式在 $\dot{\epsilon}_f \leq 50 \text{ s}^{-1}$ 时适用,其中, $\sigma_{fu,dyn}$ 和 σ_{fu} 分别为BFRP筋的动态和静态拉伸强度; $E_{fb,dyn}$ 和 E_{fb} 分别为BFRP筋的动态和静态拉伸弹性模量。

由于BFRP筋与混凝土之间相互作用力学行为的高度复杂性,且动态作用机制复杂,目前尚无得到广泛认可的理论与力学模型。另外,由于BFRP筋的发展时间过短与试验条件的限制,对BFRP筋与混凝土之间的动态粘结滑移所开展的研究极少。因此,为简化两者相互作用力学行为及提高计算效率,参考文献[14-15,32]的工作,假定BFRP筋与混凝土粘结完好。针对BFRP筋与混凝土之间动态粘结滑移的研究,将会在后续开展。

1.3 模型的验证

1.3.1 钢筋混凝土深梁动态加载模型验证

本研究选择Adhikary等^[15]开展的试验中配筋率为0.42%、加载速度为 $v = 0.04 \text{ m/s}$ 和 2 m/s 的钢筋混凝土深梁来验证上述所提出的细观数值模拟方法。表1表示各材料的力学参数,其中砂浆基质和ITZ的抗拉、抗压强度值为标准立方体的强度

值。表1中砂浆基质抗压强度(50 MPa)是依据fib Model Code^[31],从混凝土标准圆柱体实测抗压强度^[15](40 MPa)换算而来的。此时标准立方体的抗压强度值为50 MPa,对应的混凝土强度等级为C50^[37]。由于试验^[15]中没有给出混凝土的抗拉强度和弹性模量。因此,表1砂浆基体弹性模量选取GB 50010—2010^[37]中C50混凝土的建议值。GB 50010—2010中C50混凝土的轴向抗拉强度约为轴向抗压强度的8.2%。因此,假设该强度混凝土的标准立方体抗拉强度为其抗压强度的8.2%。由于试验^[15]中没有提供骨料的材料参数,表1中骨料的材料参数为Jin等^[33]的实测值。ITZ参数是通过将砂浆基质力学参数折减70%~85%^[38]并不断试算得到的。另外,混凝土各细观构件的剪胀角设为30°^[36],混凝土中各细观组分的断裂能取值参考文献[34-35]的工作。当各参数取值如表1所示时,混凝土标准圆柱体的轴心应力-应变曲线及破坏图如图2(a)所示,此时不同网格尺寸模拟获得的混凝土轴心抗压强度与试验测值40 MPa很接近,说明此时混凝土的各力学参数设置合理,图2(b)和2(c)分别为试验与模拟获得的荷载-跨中位移($P-\Delta$)曲线和破坏模式图的对比情况。可以看出,在不同的加载速度下模拟获得的破坏模式与试验测得的结果基本一致,且模拟获得的 $P-\Delta$ 曲线与试验结果同样吻合良好。因此,说明上述的细观模拟方法可以很好地描述RC深梁在动态加载条件下的破坏行为。

表1 混凝土细观组分及钢筋力学参数

Tab. 1 Mechanical parameters of the meso-components of concrete and steel bars

组分	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	断裂能/ ($\text{J} \cdot \text{m}^{-2}$)	剪胀角/(°)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	有效强度/ MPa	配筋率/%
砂浆基质	2750 ^e	32.5 ^a	0.2	50 ^e	30 ^f	50.0 ^a	4.0 ^a		
界面过渡区	2060 ^d	24.4 ^d	0.2	30 ^e	30 ^f	37.5 ^d	3.0 ^d		
粗骨料	2880 ^e	70 ^b	0.16 ^b	60 ^e	30 ^f	80.0 ^b	8.0 ^b		
纵筋	7850	200 ^a	0.3					371 ^a	342 ^a
箍筋	7850	200 ^a	0.3					342 ^a	0.42 ^a

注:上标“a”表示取自试验^[15];上标“b”表示取自试验^[33];上标“c”表示取自试验^[19];上标“d”表示为反复试算选值;上标“e”表示取自文献[34-35];上标“f”表示取自文献[36]。

1.3.2 BFRP筋混凝土梁静态加载模型验证

毕巧巍^[39]开展了一系列BFRP筋混凝土梁弯切试验,本文选择其中一根配筋率为0.34%的试验梁验证数值模拟方法的准确性。表2为数值模拟中各材料的相关力学参数取值,混凝土各相参数的取值与1.3.1节相同。BFRP箍筋的弯折处通常会因为出现应力集中而变成薄弱区,从而导致其在未

达到极限应变时发生断裂。本文通过试算最终确定BFRP筋的极限应变 ϵ_{fu} 取0.005(与加拿大规范CSA S806-12^[40]建议值一致),对应的有效应力在表2表示为上标“e”。

图3为模拟与试验结果的对比情况,可以发现模拟获得的破坏图和试验吻合良好,并且通过不同网格尺寸模拟得到的曲线均与试验曲线吻合良好。

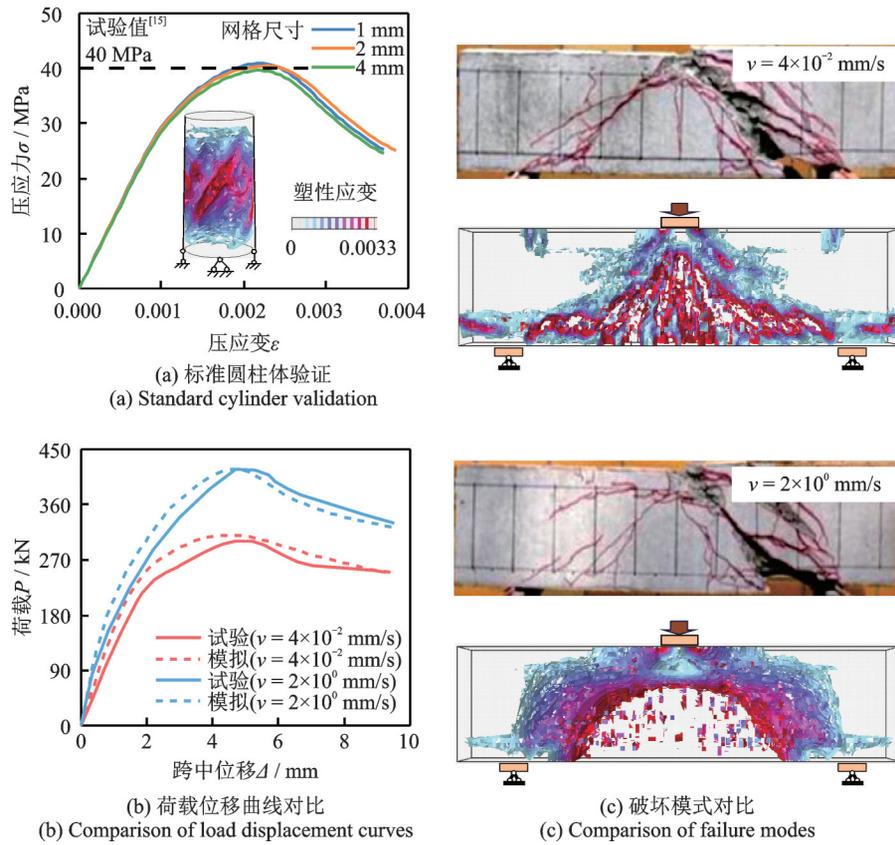


图 2 模拟与试验^[15]破坏模式及荷载-跨中位移曲线对比(钢筋混凝土深梁)

Fig. 2 Comparison of failure patterns and load-midspan deflection curves between simulation results and test^[15](RC deep beams)

表 2 混凝土细观组分及 BFRP 筋力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of the meso-components of concrete and BFRP bars

组分	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	断裂能/ ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)	剪胀角/ $(^\circ)$	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MP	有效强度/ MPa	配筋率/ $\%$
砂浆基质	2750 ^d	31.4 ^a	0.2	50 ^f	30 ^g	40.5 ^a	4.2 ^a		
界面过渡区	2060 ^c	23.55 ^c	0.2	30 ^f	30 ^g	30.38 ^c	3.15 ^c		
粗骨料	2880 ^d	70 ^b	0.16 ^b	60 ^f	30 ^g	80.0 ^b	8.0 ^b		
纵筋	1940 ^a	62.2 ^a	0.3					540 ^a	1.27 ^a
箍筋	1940 ^a	52.8 ^a	0.3					250 ^e	0.335 ^a

注:上标“a”表示取自试验^[39];上标“b”表示取自试验^[33];上标“c”表示为反复试算选值;上标“d”表示取自试验^[19];上标“e”表示取自规范^[40];上标“f”表示取自文献^[34-35];上标“g”表示取自文献^[36]。

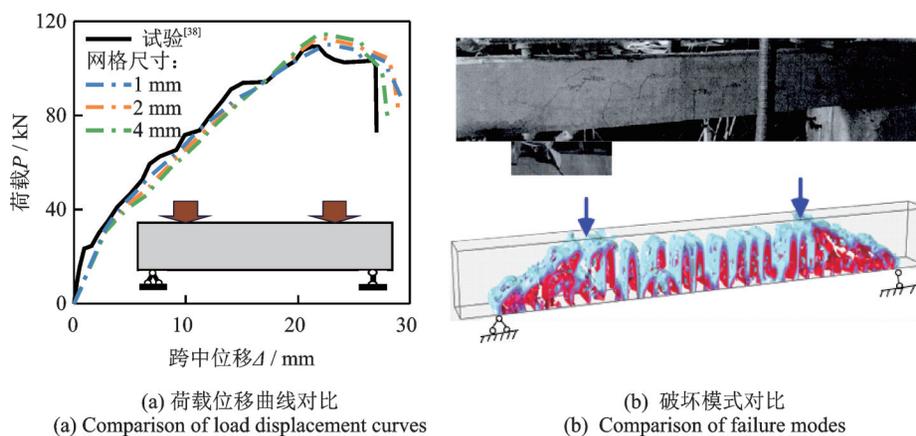


图 3 模拟与试验^[38]破坏模式及荷载-跨中位移曲线对比(BFRP 筋混凝土梁)

Fig. 3 Comparison of failure patterns and load-midspan deflection curves between simulation results and test^[38](BFRP-reinforced concrete beams)

因此,综合考虑计算效率与结果的准确性,全文模型采用 2 mm 网格进行计算。

综上,经过验证的细观数值模拟方法随后被用于探索 BFRP 筋混凝土深梁的动态剪切尺寸效应。

2 应变率对抗剪强度及其尺寸效应的影响

Dey 等^[41]提出了计算四点弯梁的名义应变率 $\dot{\epsilon}$ 计算方法:

$$\dot{\epsilon} = \frac{6hv}{(L-a)(L+2a)} \quad (6)$$

式中 h 为梁高; L 和 a 分别为净跨和加载点间距; v 为加载速度。

为了研究应变率对 BFRP 筋混凝土深梁抗剪性能及尺寸效应的影响,本章采用前文所提的数值模拟方法,设计了 0.5% 箍筋率的四组尺寸的 BFRP 筋混凝土深梁。每组梁共包含了五种应变率。本文将应变率 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 设为准静态^[42]。试件的命名规则为:第一个字母为尺寸信息 (Small: 100 mm × 300 mm, Medium: 200 mm × 600 mm, Large: 300 mm × 900 mm, Ultra-large: 400 mm × 1200 mm); 第二个字母为应变率 (Static: $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, Low: $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, Medium: $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$, High: 1 s^{-1} , Ultra-high: 10 s^{-1}); 最后一个数字表示试件的配箍率 (0.5: 配箍率为 0.5%)。

2.1 破坏模式

不同尺寸不同应变率的 BFRP 筋混凝土深梁的破坏模式及对应的箍筋应变情况如图 4 所示。图 4 (a) 展示了不同尺寸梁在应变率为 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的最终破坏模式。可以发现,不同尺寸试件的破坏模式基本相同,为剪压破坏。梁中与斜裂缝相交的箍筋部位大多都达到其失效应变,这主要是因为此处的箍筋会抑制斜裂缝的发展并且在混凝土开裂之后还会直接承担剪力。此外,随着试件尺寸的增加,箍筋达到失效应变的区域逐渐增大,说明箍筋将在大尺寸梁发挥更充分的作用。图 4 (b) 为梁高 300 mm 的梁在四种应变率作用下的最终破坏模式。从图中可以发现,随着应变率增加,梁破坏逐渐严重且损伤区域增大。此外,在高应变率时,骨料中会产生破坏。这是因为应变率大时,梁内应变迅速增加,导致裂缝没有充分的时间沿最小阻力路径拓展而是选择了最短路径。因此,随着应变率增加,试件的损伤区域增大必会引起其在承载过程中耗散的能量增加,从而导致承载能力提高^[7,13-16,24]。并且可以注意到随

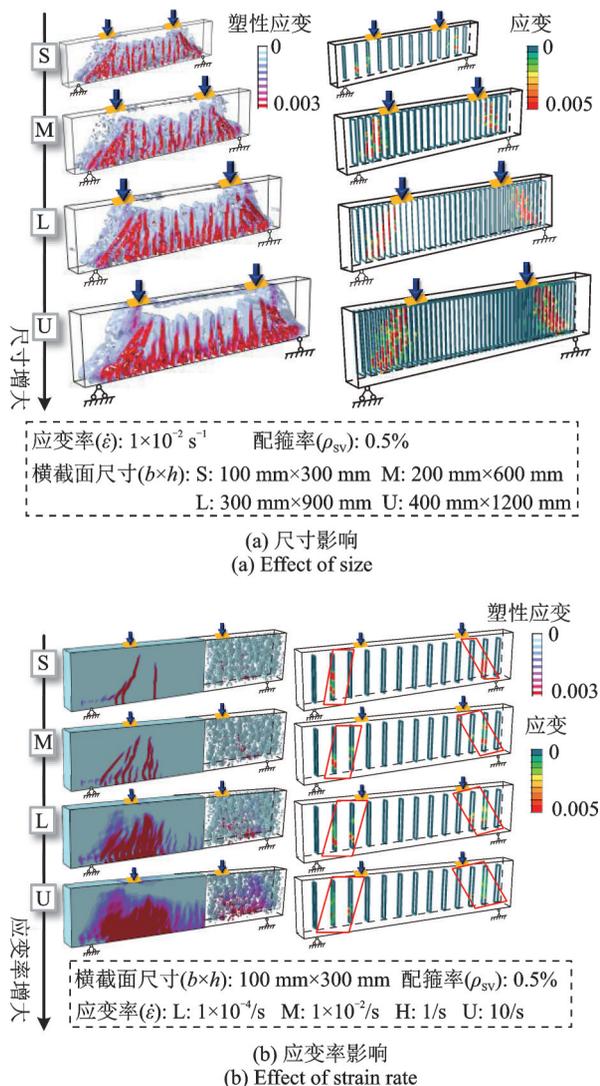


图 4 BFRP 混凝土深梁的破坏模式

Fig. 4 Failure modes of BFRP-reinforced deep beams

着应变率增大,箍筋的应变分布范围增大,但是达到失效应变的箍筋区域减小。结合骨料的损伤情况,总结出大应变率时,更多的能量被混凝土所吸收,从而导致箍筋在梁中的抗剪作用减弱。

2.2 名义抗剪强度及尺寸效应分析

图 5 为不同应变率下各尺寸梁的荷载-跨中位移 ($P-\Delta$) 曲线。可知,应变率增大会使梁的承载力显著提高,且峰值荷载对应的跨中位移也逐渐增大。另外,随着应变率增大,曲线下降段逐渐平缓,即梁延性提高。这与研究工作^[7,14]的结论基本一致。

图 6 为搜集的一些试验数据^[14-17,24,43-44]及 fib Model Code^[30]规范中适用于混凝土材料动态拉压的推荐公式和模拟获得的 DIF 比较。这里, DIF 认为是动载时梁的承载力与准静载时梁的承载力的比值^[15],且假定准静载 ($\dot{\epsilon} = 1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) 时的 DIF 为 1.0。可以注意到,模拟测得的 DIF 的数值与现有的试验数据有很好的 consistency,进一步验证了该数值模

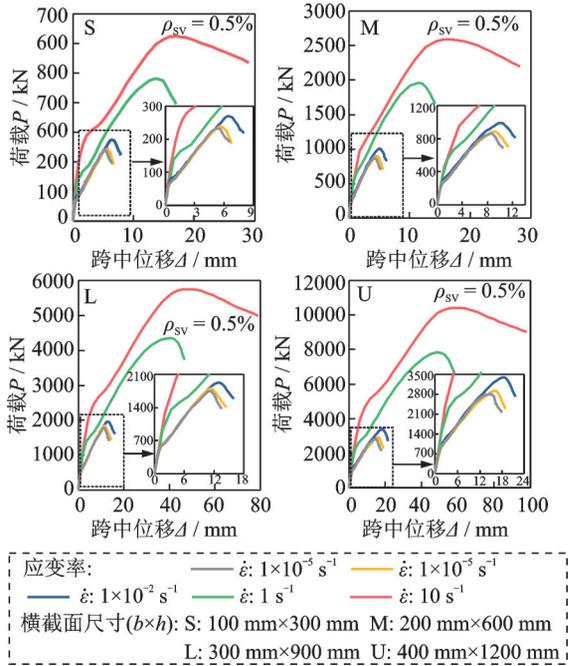


图 5 不同应变率下配箍率为 0.5% 各尺寸 BFRP 筋混凝土深梁的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 5 $P-\Delta$ curves of BFRP-reinforced concrete deep beams with stirrup rate of 0.5% under different strain rates

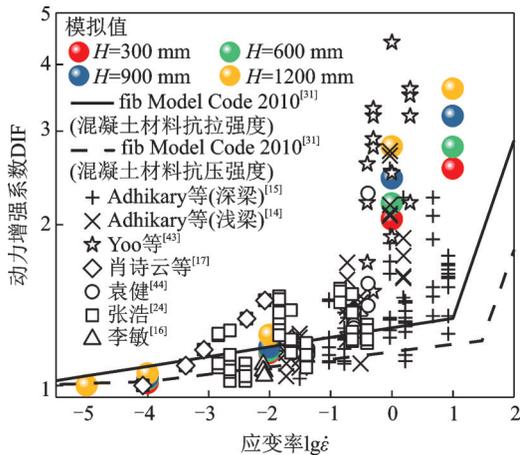


图 6 DIF 的模拟值与相关试验结果的对比

Fig. 6 Comparison of DIF between numerical results and existing experimental results

拟的合理性与准确性。此外,可以注意到,当应变率相同时,梁的 DIF 值会随着截面尺寸的增大而增大,这是尺寸效应与应变率效应共同作用的结果。另外,随着应变率的增加,不同尺寸梁之间的 DIF 值差异性逐渐显著,说明梁的抗剪尺寸效应存在应变率敏感性。与文献[7,25]的结论一致。

关于 BFRP 筋混凝土深梁的名义抗剪强度 τ_u 的计算方法参考文献[45],表达如下:

$$\tau_u = \frac{V_s}{bh_0} \quad (7)$$

式中 V_s 为梁的极限抗剪承载力; b 和 h_0 分别为梁的宽度和截面有效高度。

不同加载速度下的 BFRP 筋混凝土梁的名义抗剪强度随尺寸的变化情况如图 7 所示。可以发现,梁的名义抗剪强度随着应变率的增大而增大,即 BFRP 筋混凝土深梁的抗剪强度存在明显的应变率效应。当应变率较小时,混凝土微裂缝中自由水的黏度随着应变率的增大会有较大的提高。并且水的黏度对裂纹开裂产生反向作用力,阻碍裂纹的发展。部分学者通过物理试验^[46]和理论分析^[47]得到了类似的结论。另外,当应变率较大时,泊松效应会引起侧向约束效应即惯性效应。这种效应是加载过程中横向膨胀(即与荷载方向正交)的直接结果^[48]。可以认为横向惯性力能给试件提供一定的约束,从而进一步减缓了试件裂纹的发展。综上,试件在破坏时需要更多的能量,直观的表现方式就是试件的抗剪强度提高。此外,在所有的加载速度情况下,梁的名义抗剪强度都会随着梁截面尺寸的增大而呈直线趋势下降。这说明,无论是动载还是静载,BFRP 筋混凝土深梁的抗剪强度都会表现出明显的尺寸效应。其中,数据点的下降速率可以用线性拟合得到的趋势线的斜率 k 来描述。发现应变率增大,曲线下落趋势明显变缓,即应变率增大会削弱梁的尺寸效应。当应变率达到 10 s^{-1} 时,尽管直线斜率 k 已经很小但仍然是负值,说明在本次模拟中的应变率范围内,应变率增大会削弱梁的尺寸效应但不会完全抑制尺寸效应。这是因为,梁产生尺寸效应主要是由于混凝土的非均质性引起的。当加载速度变大,试件内部应变迅速增加,混凝土内部微裂缝会选择最短路径快速拓展,甚至直接穿过强度较高的骨料颗粒,这将导致混凝土材料的非均质性逐渐变得不明显。

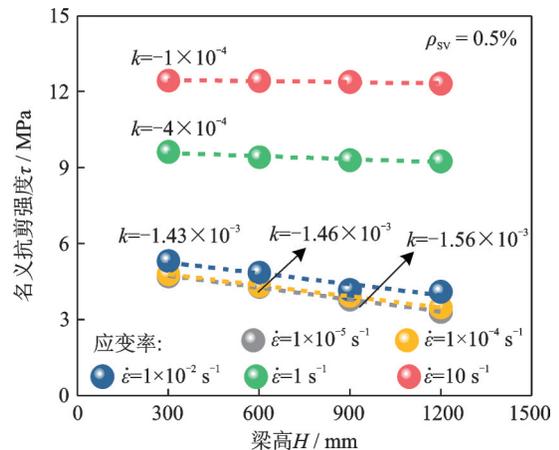


图 7 不同应变率 BFRP 筋混凝土深梁的名义抗剪强度
Fig. 7 Nominal shear strength of BFRP-reinforced concrete deep beams under different strain rates

目前已有一些经典的尺寸效应理论,其中基于线弹性断裂力学的 Bažant Type-2 SEL^[49]能够较好地描述静载下混凝土梁的剪切尺寸效应^[8]:

$$\tau_u = \frac{v_0}{\sqrt{1 + D/d_0}} \quad (8)$$

式中 τ_u 为试件真实的静态名义抗剪强度; D 为试件的特征尺寸(这里指梁高 H); v_0 和 d_0 为通过对足够大范围内的强度数据回归分析得到的经验系数。

不同应变率的各尺寸梁的双对数拟合曲线如图 8 所示, 并且采用 Strength Criterion 曲线描述没有尺

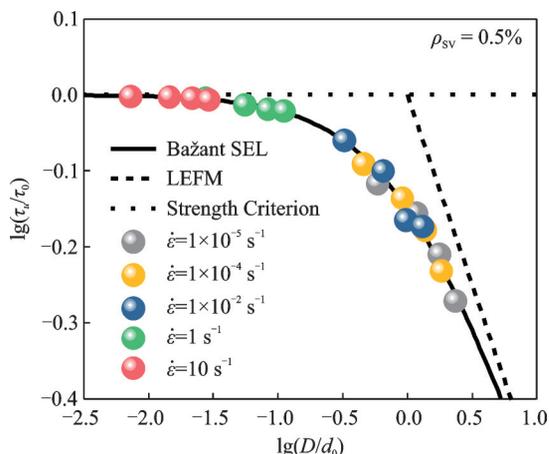


图 8 不同应变率下模拟结果与 Bažant 尺寸效应律比较
Fig. 8 Comparison between the simulation results of specimens with different strain rates and Bažant's SEL

寸效应的弹性材料, 脆性材料用斜率为 $-1/2$ 的 LEFM 曲线描述。可以发现, 模拟点均匀分布在 Bažant SEL 曲线两侧, 说明 Bažant 尺寸效应律能较好地描述梁的尺寸效应规律。并且, 随着应变率增加, 数据点逐渐趋向 Strength Criterion 曲线, 即增大应变率可以削弱梁的尺寸效应。

3 配箍率对抗剪强度及其尺寸效应的影响

为了研究配箍率对 BFRP 筋混凝土深梁动态剪切性能及尺寸效应的影响, 本章采用前文所提的数值模拟方法。设计了准静态及应变率为 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 的四组尺寸的梁, 每组包含了三种配箍率: 0%, 0.5% 和 1.0%。

3.1 破坏模式

图 9 为不同配箍率的梁在应变率为 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时的最终破坏模式图及对应的箍筋应变分布图。从图中发现, 不同配箍率梁的破坏形态差别很小, 但随着配箍率的增加, 斜裂缝发展更为充分。并且与斜裂缝相交的箍筋会达到其失效应变。

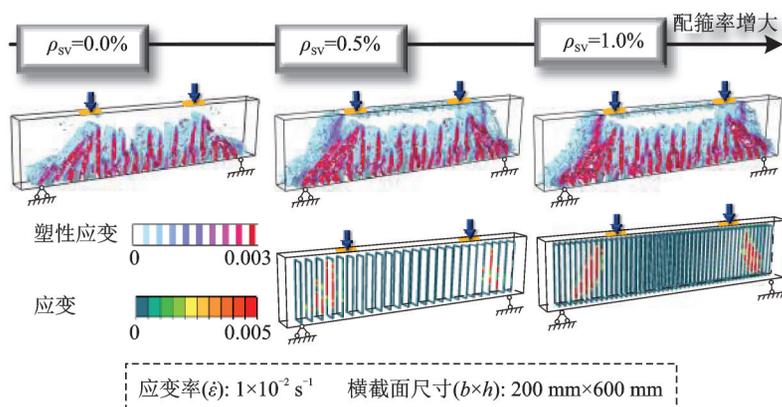


图 9 不同配箍率的 BFRP 混凝土深梁的破坏模式

Fig. 9 Failure modes of BFRP-reinforced deep beams with different stirrup ratio

3.2 名义抗剪强度及尺寸效应分析

图 10 为不同配箍率各尺寸梁在两种应变率 ($1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$) 情况下的 $P-\Delta$ 曲线。从图 10 中可以发现, 无论是在动载还是静载条件下, 增加配箍率均能提高梁的抗剪承载力且减缓曲线的下降段, 即箍筋不仅能提高梁的承载力还可以改善梁的变形延性。这是因为, 箍筋不仅能直接承担部分剪力, 还可以抑制斜裂缝的发展及对核心区混凝土起到一定的约束作用, 间接提升梁的抗剪承载力且改善梁的延性。另外, 结合图 5 中曲线的变化, 可

以发现, 增加配箍率对提高梁抗剪承载力及延性的作用没有增加应变率的效果明显。

图 11 展示了不同配箍率的各尺寸梁在应变率 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时的 DIF 值。可以发现, 由于尺寸效应与应变率效应共同作用的结果导致当梁配箍率相同时其 DIF 值会随着截面尺寸的增大而增大。另外, 当梁尺寸都相同时, 随着配箍率的增加, 梁的 DIF 值略有降低。然而, 由于箍筋会阻止斜裂缝的拓展, 以及会对核心混凝土起到一定的约束作用。因此尽管箍筋对 DIF 影响不大但其会提高梁的抗剪承载力并

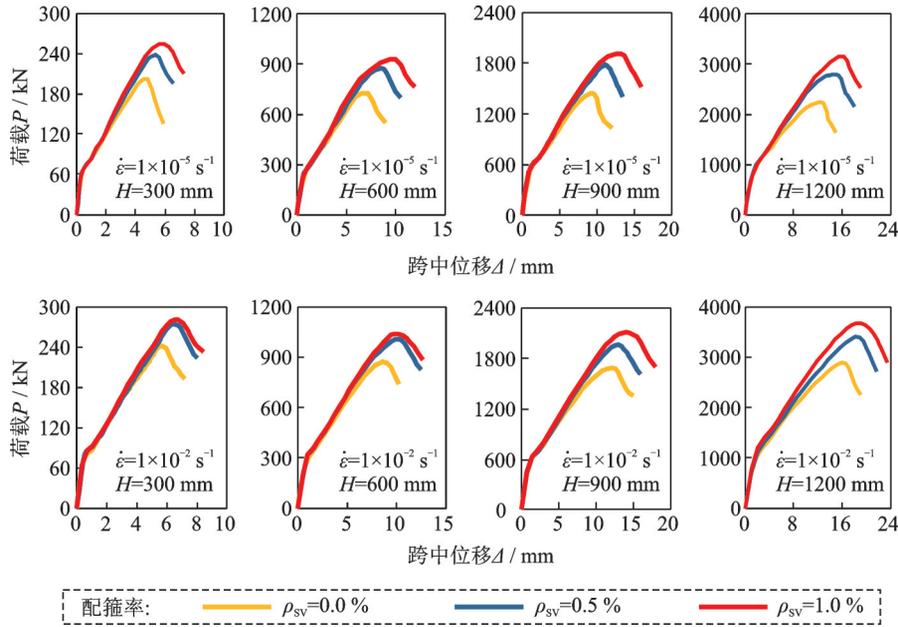


图 10 不同配箍率下 BFRP 钢筋混凝土深梁的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 10 $P-\Delta$ curves of BFRP-reinforced concrete deep beams under different stirrup rates

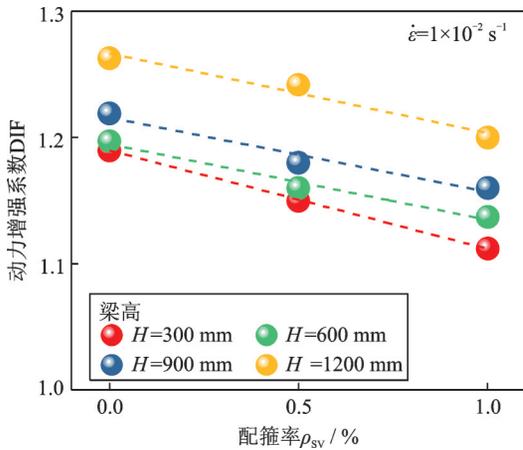


图 11 不同配箍率下应变率为 10^{-2} s^{-1} 各尺寸 BFRP 钢筋混凝土深梁的 DIF

Fig. 11 DIF of BFRP-reinforced concrete deep beams with strain rate of 10^{-2} s^{-1} under different stirrup rates

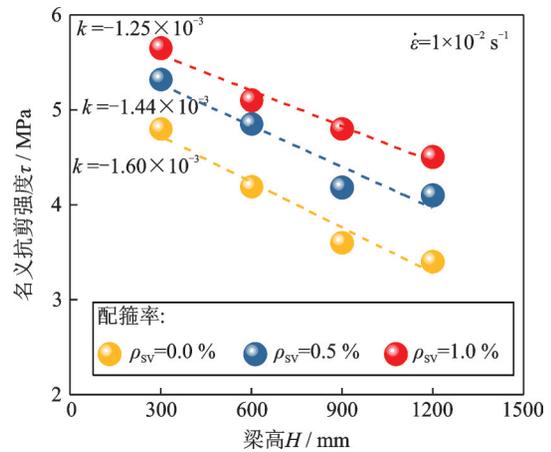


图 12 不同配箍率 BFRP 钢筋混凝土深梁的名义抗剪强度
Fig. 12 Nominal shear strength of BFRP-reinforced concrete deep beams under different stirrup rates

且改善梁的变形延性。这一发现与钢筋混凝土梁动态试验^[14-15,24]所观测到的类似。

不同配箍率梁在应变率为 $1 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 时,其名义抗剪强度随尺寸的变化规律如图 12 所示。随着配箍率增大,各尺寸梁的名义抗剪强度均提高,即箍筋能有效提升梁的抗剪承载力。另外,各配箍率梁的名义抗剪强度都会随着梁高的增加而呈直线下降,说明梁的抗剪承载力存在明显的尺寸效应。并且数据点的下降趋势随着配箍率的增加而逐渐减缓,即箍筋会削弱梁的动态剪切尺寸效应,但其并不会完全抑制梁的剪切尺寸效应。这与试验^[28]的结论一致。需要注意的是,通过和图 7 中曲线变化的对比,得出梁的剪切尺寸效应对应变率的敏感性要明

显大于对配箍率的。

不同配箍率各尺寸梁模拟得到的名义抗剪强度通过回归分析之后和 Bažant SEL^[49] 的双对数曲线进行对比如图 13 所示。从图中发现模拟点均匀分布在 Bažant 尺寸效应律曲线两侧,即 Bažant 尺寸效应律能较好地描述 BFRP 钢筋混凝土深梁的剪切尺寸效应规律。并且,随着配箍率的增大模拟点向 Strength Criterion 曲线靠近,说明增大配箍率会削弱梁的尺寸效应。

综合不同应变率及不同配箍率所有工况对应的参数 v_0 和 d_0 的大小如表 3 所示。从表中数据发现不同配箍率及应变率的 v_0 和 d_0 差异很大且无法找到合适的方式来定量描述它们的关系。因此,式(8)无法定量描述应变率及配箍率对 BFRP 钢筋混凝土深梁尺寸效应的影响。并且,BFRP 钢筋混凝土深梁的动

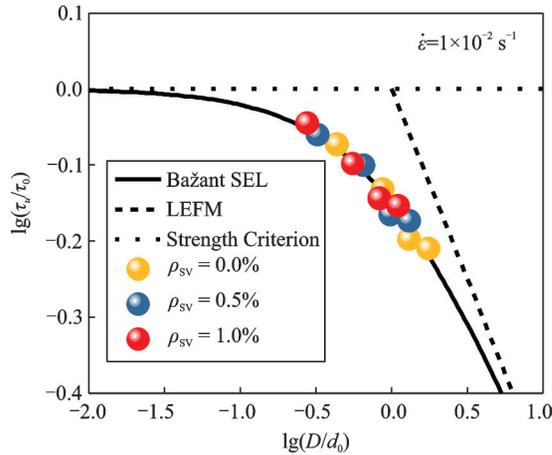


图 13 不同配箍率下模拟结果与 Bazant 尺寸效应律的比较
Fig. 13 Comparison between the simulation results of specimens with different stirrup rates and Bažant's SEL

表 3 所有试件所对应的参数 v_0 和 d_0

Tab. 3 Parameters of v_0 and d_0 corresponding to all specimens

配箍率 $\rho_{sv}/\%$	应变率 $\dot{\epsilon}/s^{-1}$	v_0	d_0
0.0	10^{-5}	6.06	285
	10^{-2}	5.67	690
0.5	10^{-5}	6.15	511
	10^{-4}	5.92	657
	10^{-2}	6.10	923
	1	9.71	10,820
1.0	10	12.51	41,426
	10^{-5}	6.17	698
	10^{-2}	6.26	1,087

态破坏机理比 RC 梁静态剪切复杂。综上,在后续工作中需提出一个可以定量描述多因素对 BFRP 筋混凝土深梁静态剪切尺寸效应影响的统一预测公式。

4 结 论

本文采用考虑混凝土非均质性以及各相应变率效应的细观数值模拟方法,探究了不同配箍率及不同应变率的 BFRP 筋混凝土深梁剪切尺寸效应规律。主要的结论如下:

(1) 动态加载时梁的破坏模式与静态加载时存在较大差异,且随着应变率增大,梁破坏程度增大。

(2) 梁在动态加载时仍存在尺寸效应(即梁的名义抗剪强度随截面高度的增加而减小),但随着应变率增大,尺寸效应逐渐减弱。

(3) 含腹筋梁仍存在明显的尺寸效应,但随着配箍率增大,尺寸效应逐渐减弱但不会完全消失。

(4) 应变率及配箍率增大均能有效提高梁的抗

剪承载力,改善梁的延性,但是应变率作用程度更明显。

值得注意的是,本研究主要借助数值模拟手段对梁动态剪切性能进行了初步的研究,并且未考虑 BFRP 筋与混凝土之间的动态粘结滑移关系、初始荷载、剪跨比、混凝土强度、FRP 筋类型等因素影响。因此后续需开展相关的物理试验进行深入研究。另外,应对含腹筋 BFRP 筋混凝土深梁的动态剪切尺寸效应规律的预测公式进行研究。

参考文献:

- [1] Building code requirements for structural concrete: ACI 318—19[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2019.
- [2] Abed F, EL-Chabib H, AI Hamaydeh M. Shear characteristics of GFRP-reinforced concrete deep beams without web reinforcement [J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, 31(16): 1063-1073.
- [3] 叶列平, 冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
Ye L P, Feng P. Applications and development of fiber-reinforced polymer in engineering structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(3): 24-36.
- [4] Zhou Y, Liu S, Feng J, et al. Improved finite difference analysis of dynamic responses of concrete members reinforced with FRP bars under explosion [J]. Composite Structures, 2019, 230:111518.
- [5] Carta G, Stochino F. Theoretical models to predict the flexural failure of reinforced concrete beams under blast loads [J]. Engineering Structures, 2013, 49: 306-315.
- [6] Zhu L, Sun B, Hu H, et al. Constitutive equations of basalt filament tows under quasi-static and high strain rate tension [J]. Materials Science & Engineering A, 2010, 527: 3245-3252.
- [7] Jin L, Yu W, Du X, et al. Dynamic size effect of concrete under tension: a numerical study [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, 132: 103318.
- [8] Syroka-Korol E, Tejchman J. Experimental investigations of size effect in reinforced concrete beams failing by shear [J]. Engineering Structures, 2014, 58: 63-78.
- [9] Zhang N, Tan K H. Size effect in RC deep beams: experimental investigation and STM verification [J]. Engineering Structures, 2007, 29(12): 3241-3254.
- [10] Birrcher D B, Tuchscherer R G, Huizinga M, et al. Depth effect in deep beams [J]. ACI Structural Journal, 2014, 111: 731-740.
- [11] Zhang J H, Li S, Xie W, et al. Experimental study on shear capacity of high strength reinforcement concrete deep beams with small shear span-depth ratio [J]. Materials, 2020, 13(5): 1218.

- [12] Mutsuyoshi H, Machida A. Properties and failure of reinforced concrete members subjected to dynamic loading [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 1984, 6: 521-528.
- [13] Kulkarni S M, Shah S P. Response of reinforced concrete beams at high rates [J]. ACI Structural Journal, 1998, 95(6): 705-715.
- [14] Adhikary S D, Li B, Fujikake K. Dynamic behavior of reinforced concrete beams under varying rates of concentrated loading [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 47:24-38.
- [15] Adhikary S D, Li B, Fujikake K. Strength and behavior in shear of reinforced concrete deep beams under dynamic loading conditions [J]. Nuclear Engineering and Design, 2013, 259: 14-28.
- [16] 李敏. 材料的率相关性对钢筋混凝土结构动力性能的影响 [D]. 大连: 大连理工大学, 2011.
Li M. Effects of rate-dependent properties of material on dynamic properties of reinforced concrete structural [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [17] 肖诗云, 曹闻博, 潘浩浩. 不同加载速率下钢筋混凝土梁力学性能试验研究 [J]. 建筑结构学报, 2012, 33(12): 142-146.
Xiao S Y, Cao W B, Pan H H. Experimental study on mechanical behavior of reinforced concrete beams at different loading rates [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(12): 142-146.
- [18] 杜修力, 金浏. 混凝土静态力学性能的细观力学方法述评 [J]. 力学进展, 2011, 41(4): 411-426.
Du X, Jin L. Review of meso-mechanical methods for static mechanical properties of concrete [J]. Advances in Mechanics, 2011, 41(4): 411-426.
- [19] Zhou X Q, Hao H. Modelling of compressive behavior of concrete-like materials at high strain rate [J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(17): 4648-4661.
- [20] Wriggers P, Moftah S O. Mesoscale models for concrete: homogenization and damage behavior [J]. Finite Elements in Analysis & Design, 2006, 42(7): 623-636.
- [21] Naderi S, Tu W, Zhang M. Meso-scale modelling of compressive fracture in concrete with irregularly shaped aggregates [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 140: 106317.
- [22] Song Z, Lu Y. Mesoscopic analysis of concrete under excessively high strain rate compression and implications on interpretation of test data [J]. International Journal of Impact Engineering, 2012, 46(6): 41-55.
- [23] Jin L, Wang T, Jiang X A, et al. Size effect in shear failure of RC beams with stirrups: simulation and formulation [J]. Engineering Structures, 2019, 199: 109573.
- [24] 张浩. 钢筋混凝土梁动态剪切破坏数值模拟研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
Zhang H. Numerical simulation of dynamic shear failure of reinforced concrete beams [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [25] Wang X, Zhang S, Wang C, et al. Experimental investigation of the size effect of layered roller compacted concrete (RCC) under high-strain-rate loading [J]. Construction and Building Materials, 2018, 165: 45-57.
- [26] Snozzi L, Caballero A, Molinari J F. Influence of the meso-structure in dynamic fracture simulation of concrete under tensile loading [J]. Cement & Concrete Research, 2011, 41(11): 1130-1142.
- [27] Lee J, Fenves G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures [J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1998, 124(8): 892-900.
- [28] Rasoolinejad M, Dönmez A A, Bazant Z P. Fracture and size effect suppression by mesh reinforcement of concrete and justification of empirical shrinkage and temperature reinforcement in design codes [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2020, 146(10):04020120.
- [29] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behavior of concrete at high strain rates [J]. Materials and Structures, 1991, 24(6): 425-450.
- [30] Hao Y, Hao H, Li Z X. Influence of end friction confinement on impact tests of concrete material at high strain rate [J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 60(60): 82-106.
- [31] fib Model code for concrete structures: fib Model Code 2010 [S]. Lausanne: International Federation for Structural Concrete, 2010.
- [32] Yu Y, Lee S, Cho J Y. Deflection of reinforced concrete beam under low-velocity impact loads [J]. International Journal of Impact Engineering, 2021, 154: 103878.
- [33] Jin L, Zhang S, Li D, et al. A combined experimental and numerical analysis on the seismic behavior of short reinforced concrete columns with different structural sizes and axial compression ratios [J]. International Journal of Damage Mechanics, 2018, 27(9):1416-1447.
- [34] Naderi S, Tu W, Zhang M. Meso-scale modelling of compressive fracture in concrete with irregularly shaped aggregates [J]. Cement and Concrete Research, 2020, 140: 106317.
- [35] Yilmaz O, Molinari J F. A mesoscale fracture model for concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 97:84-94.
- [36] Zhong T, Wang Z B, Yu Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89:121-131.
- [37] Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures:

- GB50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2010.
- [38] Jin L, Jiang X A, Xia H, et al. Size effect in shear failure of lightweight concrete beams wrapped with CFRP without stirrups: influence of fiber ratio[J]. *Composites Part B*, 2020, 199:108257.
- [39] 毕巧巍. 玄武岩纤维混凝土的微结构及BFRP筋纤维混凝土梁斜截面承载力试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- Bi Q W. Experimental research on the micro-structure of basalt fiber reinforced concrete and the oblique section bearing capacity of the BFRP bars reinforced fiber concrete beams[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [40] Design and construction of building structures with fiber-reinforced polymers: CSA S806—12[S]. Rexdale: Canadian Standards Association, 2012.
- [41] Dey V, Bonakdar A, Mobasher B. Low-velocity flexural impact response of fiber-reinforced aerated concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2014, 49: 100-110.
- [42] Bischoff P H, Perry S H. Compressive behavior of concrete at high strain rates[J]. *Materials and Structures*, 1991, 24(6): 425-450.
- [43] Yoo D Y, Yoon Y S, Banthia N. Flexural response of steel-fiber-reinforced concrete beams: effects of strength, fiber content, and strain-rate[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2015, 64(2): 84-92.
- [44] 袁健. 钢筋混凝土梁受剪承载力及其可靠度研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- Yuan J. Research on shear capacity and reliability of RC beams[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [45] Luo W, Le J L, Rasoolinejad M, et al. Coefficient of variation of shear strength of RC beams and size effect [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2021, 147(2): 04020144.
- [46] 王海龙, 李庆斌. 不同加载速率下干燥与饱和混凝土抗压性能试验研究分析[J]. *水力发电学报*, 2007, 26(1):84-89.
- Wang H L, Li Q B. Experiments of the compressive properties of dry and saturated concrete under different loading rates[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(1):84-89.
- [47] Zheng D, Li Q B. An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71(16):2319-2327.
- [48] Cusatis G. Strain-rate effects on concrete behavior[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(4):162-170.
- [49] Bažant Z P, Kim J K. Size effect in shear failure of longitudinally reinforced beams[J]. *ACI Journal Proceedings*, 1984, 81: 456-468.

Simulations of size effect on dynamic shear failure of BFRP-reinforced concrete deep beam

JIN Liu, LEI Yu-shuang, DU Xiu-li

(The Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to investigate the dynamic shear failure mechanism and size effect law of deep concrete beams with Basalt Fiber Reinforced Polymer (BFRP) bars, a three-dimensional meso-scale numerical model of BFRP reinforced concrete deep beams was established considering concrete heterogeneity, concrete /BFRP reinforcement interaction, and strain rate effect of concrete and BFRP bars in material level. Firstly, the rationality and accuracy of the numerical simulation method are verified by the existing experimental data. Then, the shear failure modes and failure mechanisms of the geometrical-similar BFRP-reinforced concrete deep beams with different sizes under different strain rates were studied by the numerical simulation method. The influence of beam depth, stirrup ratio and strain rate on the shear failure of BFRP-reinforced concrete deep beams and the corresponding size effect law were analyzed. The results indicate that: The failure modes of beams under dynamic loading are different from those under static loading, but they all show size effect; Both the strain rate and the stirrup rate can effectively improve the bearing capacity of the beam and weaken the shear size effect, but the effect of strain rate is significantly greater than that of stirrup rate.

Key words: BFRP-reinforced concrete deep beam; strain rate; stirrup ratio; shear failure; size effect; meso-scale simulation

作者简介: 金 浏(1985—),男,教授。电话:(010)67396875; E-mail: jinliu@bjut.edu.cn。

通讯作者: 杜修力(1962—),男,教授。电话:(010)67396875; E-mail: duxiuli@bjut.edu.cn。