

低速冲击下钢纤维混凝土梁的动力学行为与三维细观仿真

张 周, 马 钢, 张佳寅, 都思哲, 常雅坤, 李 波

(太原理工大学土木工程学院, 太原 030024)

摘 要: 钢纤维的掺入可有效增强混凝土的整体性与基体韧性, 满足实际工程中对混凝土材料高强度与高韧性的性能要求, 但现阶段对于钢纤维混凝土增强增韧机理与破坏机制的研究主要基于宏观试验, 难以全面揭示材料内部损伤破坏过程及钢纤维增韧机理。通过建立钢纤维增强混凝土梁的三维细观模型, 更为直观地分析钢纤维掺量和冲击速率对于钢纤维混凝土梁抗冲击性能与破坏形态的影响。结果表明: 利用三维钢纤维增强混凝土梁细观模型可有效反映动态冲击条件下梁的力学性能与破坏形式; 在低速冲击下, 钢纤维的掺入可提升混凝土的耗能与抗冲击性能, 且钢纤维存在最优掺量; 当冲击速率低于 10 m/s 时, 钢纤维的增强效果更为显著。该成果可为复杂动力环境中或低速冲击威胁下钢纤维混凝土受弯构件的工程应用与安全评估提供参考。

关键词: 钢纤维混凝土; 细观模型; 落锤冲击; 抗冲击性能

中图分类号: TU375.1 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2024)01-0189-14

网络出版时间: 2023-11-20



现阶段, 混凝土在桥梁工程、地下工程、防护工程、海洋工程等场合的用量的不断增加, 但该类工程结构的使用环境都伴随着低频振动或低速冲击载荷, 如地铁管片、沉管隧道、地下洞库等, 如何提高恶劣环境下混凝土的抗冲击和抗裂性能, 是扩展混凝土应用范围的关键性难题^[1-2]。钢纤维混凝土是以传统混凝土为基体, 以钢纤维为增强材料组成的一种新型混凝土材料, 通过在混凝土中掺入钢纤维并使其均匀分布于混凝土内部, 可在混凝土材料抗拉区起到阻断起裂和桥联传力的作用, 降低受拉区的应力峰值, 有效增强混凝土整体性与基体韧性, 满足实际工程中对混凝土受弯构件高强度与高韧性的性能要求^[3]。

目前, 钢纤维增强混凝土已被广泛应用于高层建筑、大跨度桥梁及军事防护设施等工程结构中。相关学者对钢纤维增强混凝土抗冲击性能进行了许多试验研究, Mohammadi 等^[4]系统研究了不同体积分数与不同长径比的钢纤维混凝土抗落锤冲击性能, 其结果表明, 钢纤维混凝土的抗冲击能力明显高于普通混凝土, 特别是钢纤维体积分数为 2.0% 时混凝土表现出最佳的抗冲击性能; 陈相宇^[5]利用钢纤维混凝土圆饼型试件进行落锤试验, 证明钢纤维

的掺入可以大幅度提高混凝土的抗冲击性能; 以上研究中均采用圆饼试件并将其底面固定于坚实地面, 难以反映受弯构件在低速冲击下的动力学响应与整体变形。武卫等^[6]制作了不同配筋率、不同钢纤维体积分数下的钢纤维-钢筋混凝土板, 用落锤试验机模拟低速动荷载对试件抗冲击性能的影响, 其结果表明钢纤维的掺入明显改善了钢筋混凝土板的韧性并延缓裂缝开展, 增强了试件带裂缝工作能力; 潘慧敏等^[7]采用自制落锤冲击试验装置, 以韧性系数和延性比来评价钢纤维混凝土的韧性, 其结果表明钢纤维的掺入可显著提高混凝土的抗冲击性能; 以上学者采用的试验试件为截面高度较小并掺加钢纤维的钢筋混凝土板, 但钢筋混凝土试件的高韧性导致难以对钢纤维的增强效应进行精确量化。Kurihashi 等^[8]以钢纤维掺混比和落锤高度为变量进行了落锤冲击试验, 其结果表明, 与普通混凝土梁相比, 掺加 2% 体积掺量的钢纤维可大幅度地提高混凝土梁的抗冲击能力, 且混凝土与钢纤维之间的粘结阻力对提高抗冲击性起着重要作用。由此可见, 对钢纤维与混凝土间粘结力进行精确描述, 将有利于对钢纤维增强效应的进一步量化。

收稿日期: 2023-06-30。 修订日期: 2023-08-28。

基金项目: 国家自然科学基金(52178239)。

第一作者: 张 周(1998—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 马 钢(1988—), 博士, 副教授。

Received date: 2023-06-30. Revised date: 2023-08-28.

First author: ZHANG Zhou (1998—), male, Master candidate.

E-mail: 1902128547@qq.com

Correspondent author: MA Gang (1988—), Ph.D., Associate Professor.

E-mail: magang@tyut.edu.cn

试验作为传统的研究手段,从宏观层面出发研究钢纤维增强混凝土的力学性能,但钢纤维增强混凝土是一种多相复合材料,内部材料具有高度随机性,是典型的非均质材料,其力学性能与破坏机理与内部组成材料密切相关。因此,众多学者采用仿真模拟的手段,从细观层次揭示钢纤维增强混凝土组成成分与其力学性能的联系,深入研究细观非均匀性引起的钢纤维增强混凝土材料的损伤破坏机制^[9]。近年来,亦有较多学者通过细观模型研究钢纤维增强混凝土材料的动态力学特征。Xu 等^[10]建立二维钢纤维混凝土细观数值模型,使用 Ls-dyna 进行抗压冲击荷载模拟及动力拉伸试验模拟。焦楚杰等^[11]通过 Ls-dyna 显式动态仿真软件,采用弹塑性动力模型和胡克定律分别描述了混凝土和劈裂 Hopkinson 压杆的本构关系,对钢纤维增强高强度混凝土的劈裂 Hopkinson 压杆冲击试验进行了数值模拟,其结果表明试件内应力在达到应力平衡前先振荡,试件的破坏过程可延迟至其峰值应力时刻。以上学者的研究均基于简化的二维分离式模型进行动力学仿真分析,导致模型计算结果与试验结果偏差高于 10%,难以直接应用于指导实际工程。

工程实际应用中冲击碰撞是最为常见的力学现象,研究建筑物、桥梁及防护工程等冲击荷载下的材料行为与结构响应对工程结构设计具有重要意义。因此,本工作基于三维细观仿真模型深入研究了钢纤维混凝土梁的动态力学特征。建立了钢纤维混凝土梁三维细观模型,通过其仿真结果与试验结

果进行对比分析,验证了该仿真模型的有效性。在此基础上,进一步通过参数分析研究了冲击速率、钢纤维体积分数因素对动态冲击荷载下钢纤维混凝土梁力学性能的影响,为钢纤维增强混凝土宏观动态力学特征研究提供参考。

1 钢纤维混凝土梁的低速冲击试验

低速冲击有利于实现大质量冲击,其冲击速率较低,冲击过程较长,致使受冲击结构能更好发挥其抗冲击性能,吸收更多能量,Sjoblom 等^[12]定义了低速冲击发生的速率范围为 1~10 m/s,本工作研究在冲击速率在 1~10 m/s 下钢纤维混凝土梁的动力学行为。在细观层次上,常将钢纤维混凝土看作由混凝土基体与钢纤维组成的非均质复合材料。混凝土与钢纤维的力学参数是力学行为研究的基础,本工作通过试验与仿真对比分析确保钢纤维混凝土细观尺度力学分析模型中各组分力学参数选定的合理性。

1.1 试验设备与试件

根据试验目的分别制备钢纤维体积分数为 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%和 2.5%的钢纤维混凝土梁(SFRC)进行动态三点弯曲性能试验,试验结果如表 1 所示(样品 SFRC-2-0.5 表示冲击速率为 2 m/s、钢纤维体积分数为 0.5%的 SFRC 试件),混凝土强度为 40 MPa,梁跨度为 350 mm。梁的截面形状为矩形截面,尺寸为 100 mm×100 mm×400 mm,每个工况测试 3 组试件取其平均值。本工作所用的钢纤维增强混凝土配合比见表 2。

表 1 不同体积分数钢纤维混凝土梁试验结果

Table 1 Test results of steel fiber concrete beams with different volume ratios

Sample number	Volume ratio of steel fiber/%	Drop weight quality/kg	Impact speed/(m·s ⁻²)	Peak impact/kN	Trans-medium deflection/mm
SFRC-2-0.0	0	30.52	2	17.89	3.80
SFRC-2-0.5	0.5	30.52	2	19.08	3.36
SFRC-2-1.0	1.0	30.52	2	20.05	3.19
SFRC-2-1.5	1.5	30.52	2	21.87	3.60
SFRC-2-2.0	2.0	30.52	2	21.26	2.73
SFRC-2-2.5	2.5	30.52	2	19.07	2.18

SFRC—Steel fiber reinforced concrete.

表 2 混凝土配合比

Table 2 Mixture ratios of concrete

Water	Cement	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water reducer
225.10	381.50	648.50	1 144.50	0.76

钢纤维采用中德新亚建筑技术有限公司生产的长直型超细钢纤维(图 1),长度为 12.5 mm,等效直

径为 0.6 mm,抗拉强度为 1 100 MPa。胶凝材料采用太原市小店区诺顿建材有限公司生产的 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥;细骨料与粗骨料均由太原市小店区诺顿建材有限公司生产,其中细骨料为最大粒径不大于 2 mm 河砂;粗骨料采用碎石,粒径范围为 4.75~9.50 mm;试验使用聚羧酸减水剂为实验室自制的高效减水剂,减水率为 36%。

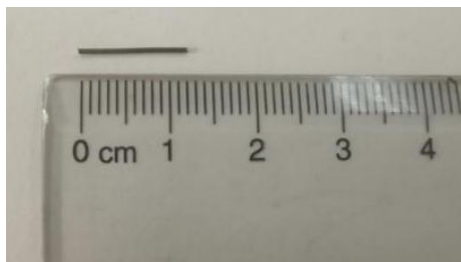


图 1 长直型超细钢纤维
Fig. 1 Superfine steel fiber

采用 INSTRON-9530 落锤冲击试验机(北京冠测精电仪器设备有限公司)进行三点弯曲冲击试验,装置示意图如图 2 所示,试验机锤头具有电力传感器,可直接输出接触力时程曲线。试验中利用高速相机记录冲击荷载下混凝土梁的破坏过程,采

样频率为 $10\,000\text{ fps}\cdot\text{s}^{-1}$ 。在混凝土梁侧面喷涂散斑,以便获取梁跨中挠度时程曲线。试验中落锤选用球形锤头,锤头质量为 0.52 kg ,落锤配重为 30 kg ,落锤预设高度为 0.24 m 。为缩减计算时间,根据 $v=\sqrt{2gh}$ (其中: V 为锤头初速率; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; h 为落锤预设高度),细观仿真中通过预定义场设定锤头初速率为 2 m/s 。由于锤头为钢锤头,既为保证在重锤质量和高度一定的情况下冲击结果稳定,又为了得到与设置加载速率更匹配的应变率,在对钢纤维混凝土梁进行冲击试验中,在梁顶面落锤冲击点部位放置铝垫块,同时,为了保证相同的冲击条件,每次冲击均放置新的铝垫块,厚度为 20 mm 。

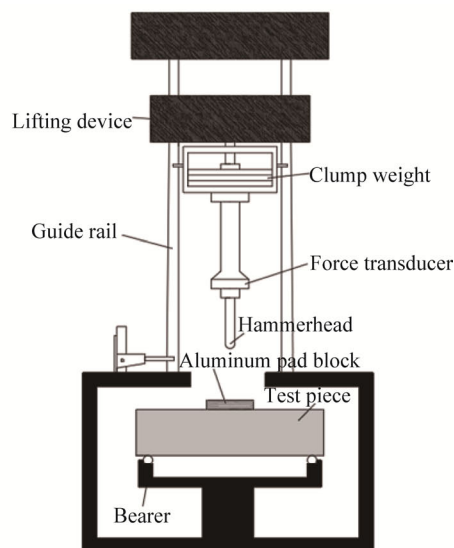
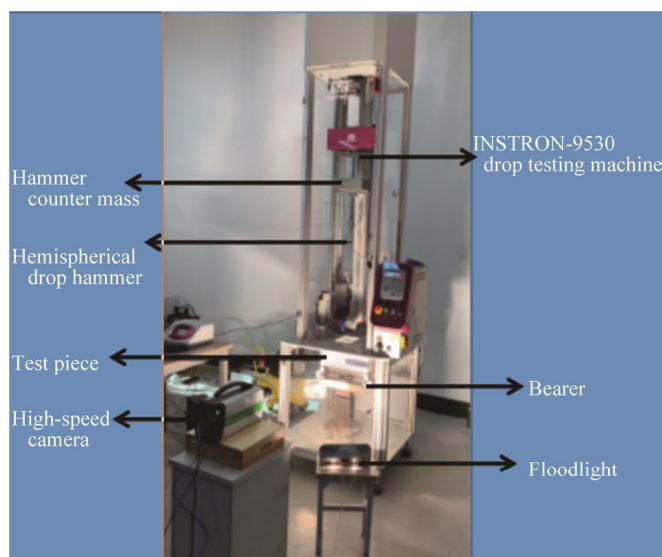


图 2 落锤冲击试验装置
Fig. 2 Setup of drop hammer impact testing machine

1.2 试验结果

1.2.1 破坏形态 图 3 为落锤冲击试验照片,落锤冲击试验后,不同纤维体积分数的钢纤维混凝土梁的破坏形态如图 4 所示。在落锤冲击作用下,各纤维体积分数的混凝土梁均形成一条近乎竖直的主裂缝,其中,普通混凝土梁的裂缝最接近竖直方向,随着钢纤维的加入,主裂缝发展方向逐渐向两侧偏移,当钢纤维体积分数为 1.5% 和 2.5% 时,梁裂缝从跨中两侧开始向上发展。随着钢纤维体积分数的增大,钢纤维在梁断裂处桥连作用显著,钢纤维阻裂效果较好,且掺量较大时,对于梁抗冲击性有明显的提升。

1.2.2 锤头冲击力及跨中挠度曲线 通过落锤

冲击试验,分别获取了钢纤维混凝土梁的冲击力时程曲线与跨中挠度时程曲线。

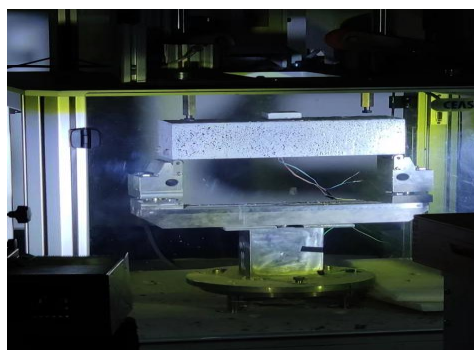


图 3 冲击试验图
Fig. 3 Impact test diagram

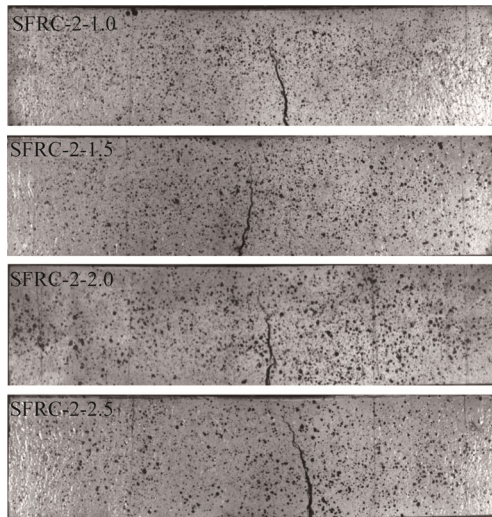
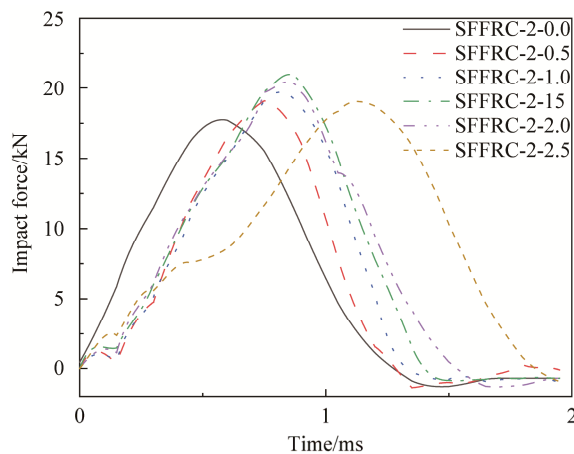


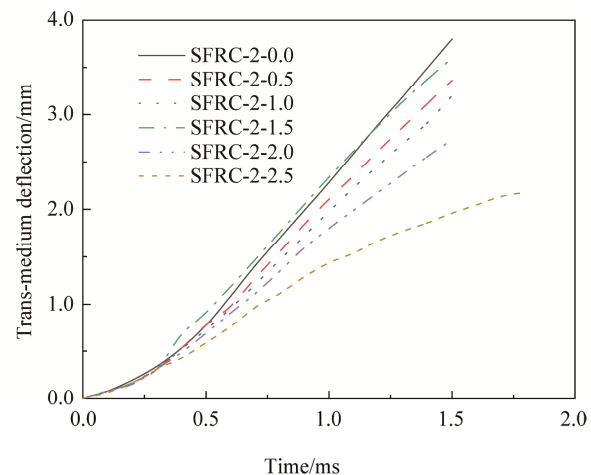
图4 钢纤维混凝土破坏形态

Fig. 4 Failure form of steel fiber concrete

图5为动态冲击下不同体积分数钢纤维梁的冲击力和跨中位移时程曲线。由图5可见，每个曲线在达到最大值前都有1个小波峰，这是由于在梁顶



(a) Impact force time history curves



(b) Time history curves across medium deflection

图5 不同体积分数钢纤维混凝土梁冲击力时程与挠度时程曲线

Fig. 5 Impact time history and deflection time history curves of steel fiber concrete beams with different volume ratios

2 钢纤维混凝土细观数值模型

2.1 细观数值模型的建立

由于粗骨料对钢纤维在基体中的空间分布位置会起到一定的影响作用。为提高计算效率，对混凝土中的粗骨料进行了细观简化，即未考虑粗骨料对纤维空间几何位置的影响作用，只将素混凝土基体简化为均质体。同时，在对比试验中采用了小粒径骨料以降低该简化效应的影响。因此本工作建立的钢纤维混凝土梁模型分别由混凝土基体与钢纤维增强体2部分组成^[13-14]，如图6所示。与试验工况一

面的落锤冲击点部位放置了铝垫块，降低了加载速率。由图5a可见，当钢纤维体积分数为0.5%~1.5%时，随着掺量的增大，冲击力峰值不断增加，达到峰值冲击力的时间增大，且体积分数为1.5%的梁峰值冲击力峰值最大；而体积分数为2.0%与2.5%的梁，峰值冲击力减小，体积分数为2.5%的梁达到峰值冲击力的时间最长。结合破坏形态可知，掺量较小时，钢纤维的掺入有效地发挥了桥连作用，增强了梁的抗冲击性能，阻止了裂缝的发展；在动态冲击过程中混凝土基体强度和钢纤维与混凝土基体的粘结力2部分共同决定SFRC的峰值冲击力，当钢纤维体积分数过高时，在一定程度上增强了钢纤维与混凝土基体的粘结力，但混凝土基体整体性却大大下降，基体强度减弱，最终表现为峰值冲击力的下降。

由图5b可见，跨中位移并不随着钢纤维体积分数的增大而单调增大，但添加钢纤维后，钢纤维混凝土的跨中位移相较普通混凝土的跨中位移均有减少。

致，试件上部建立带连接杆的半球形锤头和落锤配重，为减少计算，试件在预定义场中对落锤施加初速度；下部建立支撑部件。锤头上端连接杆与落锤配重采用绑定接触，使之成为一个整体，梁试件、锤头和支撑部件之间均设定为面与面接触，该接触能够处理各种非线性问题，计算高效且耗时较小。于细观数值仿真主要分析钢纤维对混凝土梁的动态响应的影响，且为节省计算时间，在仿真模拟时将上部锤头与下部支座设定为刚体模型，不考虑其在动态冲击荷载下的变形情况。接触力、跨中挠度以及钢纤维应变输出响应的时间为4 μs，计算时间为撞击开始至2 ms。

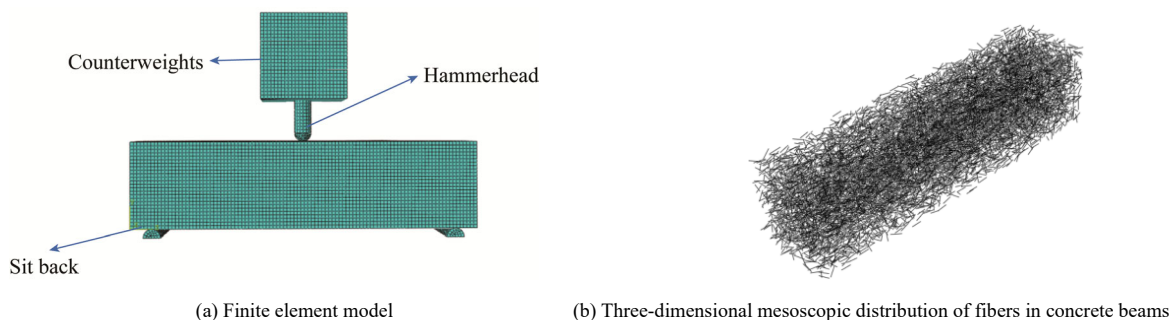


图 6 钢纤维混凝土梁仿真模型
Fig. 6 Finite element models of steel fiber concrete beam

混凝土基体、落锤、支撑部件、落锤配重均采用为三维八节点缩减积分单元, 网格尺寸为 2 mm, 该单元位移求解计算结果较为精确, 能够适用于单元大变形及扭曲等复杂情况。钢纤维采用弹簧单元进行模拟, 该单元不仅能很好的模拟出钢纤维本构, 还能明显的表现钢纤维增强基体和混凝土基体之间的粘结力, 更贴近试验。

2.2 本构模型

混凝土使用塑性损伤模型, 该模型是一个基于塑性的连续介质损伤模型, 此模型将混凝土受拉开裂和压溃作为模拟混凝土破坏的原则, 同时考虑混凝土在断裂过程中的损伤是不可逆的, 适用于单向加载、动态加载、循环加载等情况。采用《混凝土结构设计规范》^[15] (GB50010—2010) 附录 C 提供的混凝土应力-应变曲线, 参数如表 3 所示。钢纤维为金属材料, 采用双线性随动强化模型^[16], 参数如表 4 所示。

2.3 三维钢纤维仿真模型建立

2.3.1 钢纤维模型构建

现阶段, 钢纤维混凝土

细观模型的构建方法大致可分为 2 类, 1) 构建整体式模型, 该方法的基本假定是纤维在混凝土内是均匀分散的, 采用修正普通混凝土的本构关系来建立纤维混凝土的特定本构模型, 从而进行有关纤维混凝土的数值模拟分析。这种方法的缺点是, 对纤维与基体之间的相互作用进行了简化, 与实际结果往往偏差较大。2) 构建分离式模型, 建立独立的纤维模型, 在仿真软件中采用的 truss 单元或 beam 单元显示细观纤维模型, 模拟纤维与混凝土基体之间的相互作用。由于分离式细观模型可对材料属性与界面参数进行精细化调控, 逐步成为对非匀质材料物理力学性能进行仿真分析的重要方式。基于此, 采用构建分离式模型的方法来模拟钢纤维混凝土和钢纤维之间的粘结力。以试验为基础, 简化宏观试验中的影响因素, 创建相对简单有效的三维数值模型。假定钢纤维均为长直型纤维, 且横截面为圆形。

表 3 混凝土模型参数
Table 3 Properties of concrete

Parameter	Dilation angle/(°)	Flow potential offset/mm	Ultimate strength ratio of biaxial compression to uniaxial compression	Invariable stress ratio	Coefficient of viscosity	Density/(kg·m ⁻³)	Young's modulus/GPa	Poisson ratio
Numerical	38	0.1	1.16	0.667	0.000 01	2 400	32.5	0.2

表 4 钢纤维物理力学性质
Table 4 Physical and mechanical properties of steel fiber

Fiber type	Density/(g·cm ⁻³)	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Elongation/%
Steel fiber	7.9	1 100	206	3.6

由于钢纤维混凝土中的钢纤维主要通过其与混凝土基体之间的粘结力来影响整个钢纤维混凝土的力学性能, 因此众多学者对钢纤维的粘结力进行了诸多研究。Peng 等^[17-20]认为钢纤维的加入方式与钢筋的加入是相似的, 将混凝土中的钢纤维采用嵌入至基体模型中以构建仿真模型, 在杆单元与

实体单元之间建立相互作用关系, 建立了纤维杆单元与混凝土实体单元间的联系。但是钢纤维线节点和混凝土网格节点之间是重合固定的, 相互间不会产生滑移, 基于此, 采用嵌入的方式偏差较大。Huang 等^[21-24]采用内聚力模型的方式来模拟钢纤维的粘结滑移, 但是内聚力的模型需要通过设定接

触面来完成,如钢纤维采用桁架模型,钢纤维为三维线段,混凝土基体为三维实体,钢纤维与混凝土基体接触面为一个点,与实际情况不符合。如果采用钢纤维三位实体模型,但由于钢纤维数量的庞大,导致其网格数量巨大,极大的增加了运算工作。由于弹簧单元刚度的可确定性,Al-Jelawy 等^[25–26]通过在界面间添加非线性弹簧的方法来模拟物体间的粘结滑移,根据两物体间实际的粘结滑移曲线来设定非线性弹簧的刚度,以非线性弹簧单元为介质,一物体通过与非线性弹簧单元的相互作用来作用于另一物体,从而达到模拟物体界面间粘结滑移的效果。非线性弹簧单元具有三维径向和扭转方向的自由度^[27],能较好程度的模拟物体间的粘结滑移,同时由于弹簧单元刚度的可设定性和弹簧单元的直观性,可直接在非线性弹簧单元中导入钢纤维单丝拉拔试验中钢纤维的粘结滑移曲线,使得仿真过程中钢纤维与混凝土基体间的粘结力更为接近真实状况。

采用在混凝土基体中直接添加非线性弹簧的方法来模拟钢纤维与混凝土基体的粘结滑移,利用非线性弹簧的物理力学特征以描述钢纤维与混凝土界面间的细观力学作用机制,非线性弹簧单元的作用机制示意图如图 7 所示。在钢纤维混凝土的工程应用中,由于钢纤维高于混凝土基体的弹性模量,使得钢纤维在混凝土基体发生开裂时很难被拉断,大多数钢纤维都是由于和混凝土脱黏而被拔出。同时由于钢纤维和混凝土基体间的粘结滑移方向和钢纤维纵轴方向基本一致,则通过在弹簧单元上添加钢纤维的粘结滑移曲线来模拟出其与混凝土基体的粘结滑移可获得较好的力学简化效果。相较于在钢纤维两端分别添加非线性弹簧与混凝土基体连接的方法,此方法不仅减少了弹簧单元的数量,精简了本构模型,提高了运算效率,还避免了部分软件在功能方面不支持该弹簧设定的限制。

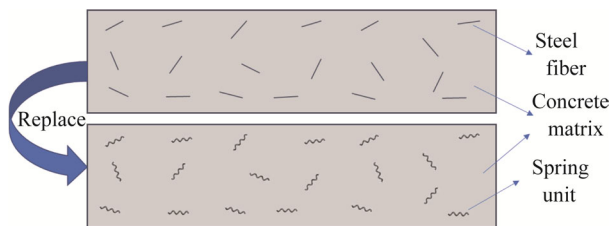


图 7 簧单元模拟钢纤维示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the spring unit instead of the steel fiber

2.3.2 弹簧单元模拟粘结滑移 拟将钢纤维与混凝土之间的粘结滑移全过程简化为“双阶段”计算模型,即假定从钢纤维混凝土初始受力至混凝土开裂之间,钢纤维与混凝土基体未发生脱黏,二者协同受力且变形量一致;当某根钢纤维周侧混凝土基体开裂后,该根钢纤维与混凝土基体间发生脱黏与滑移,二者转而依靠界面间粘结力来抑制混凝土进一步开裂。设定的弹簧单元刚度采用“双阶段”刚度,以混凝土基体开裂为界限,即混凝土的极限拉应变 ε_t 作为临界值。第 1 阶段,钢纤维与混凝土协同变形,弹簧单元的刚度为钢纤维本构刚度,弹簧单元的刚度由式(1)可得:

$$K = \frac{E \cdot S}{L} \quad (1)$$

其中: E 为钢纤维的弹性模量; S 为钢纤维的截面积; L 为钢纤维长度。

第 2 阶段,钢纤维与混凝土脱粘滑移,当混凝土达到其极限拉应变 ε_t 时,弹簧单元的刚度为钢纤维与混凝土基体的粘结滑移曲线。其粘结滑移曲线通过钢纤维的单丝拉拔试验得出,如图 8 所示,其中 S-H20S05、S-H15S010、S-H10S15、S-H05S020、S-H00S025 分别代表钢纤维混凝土纤维体积分数分别为 0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%时钢纤维拉拔荷载位移曲线。

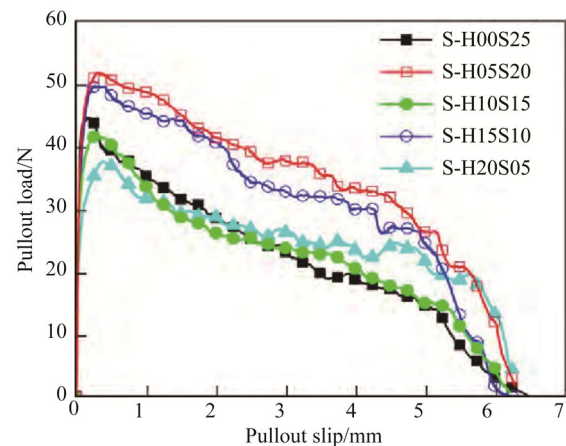


图 8 荷载位移曲线^[28]

Fig. 8 Load displacement curves

2.3.3 构建非均质细观模型 提出的考虑粘结滑移关系的钢纤维三维细观仿真方法简述如下: 1) 生成三维随机钢纤维模型; 2) 将生成的三维随机钢纤维模型转化为非线性弹簧。

在钢纤维混凝土梁中钢纤维是随机乱向分布的,为了使建立的钢纤维混凝土模型更为接近真实

的钢纤维混凝土, 采用 Monte Carlo 法^[29]来实现钢纤维在钢纤维混凝土梁的中随机乱向分布。

利用递推公式来获取随机数是目前最常用的数学方法。一般情况下, 递推公式为 $\xi_{n+1} = \lambda(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$, 其中: λ 是递归的函数。给定的初始值 $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)$ 通过 λ 函数的运算, 便可以得到一个新的随机数 ξ_{n+1} 。这种方法生成的新的随机数 ξ_{n+1} 被称为伪随机数。此种方法虽然存在一定的局限性, 当生成的随机数足够多时, 生成的随机数列会出现周期性循环。但对于常规情况而言, 解决问题所需要的随机数数量远远没有达到其出现周期性循环的范畴, 基于此, 本工作通过选择合适的递推函数来模拟钢纤维随机分布的效果。选用混合同余法^[30]作为递推公式获取随机数, 一般形式如式(2)所示:

$$X_{n+1} = N \cdot X_n + C(\text{mod}M) \quad (2)$$

其中: N 和 C 是常数; M 是模数运算。

根据单根钢纤维的体积与钢纤维混凝土中钢纤维的体积含量 V_f , 计算出需要投放的钢纤维数目。因此三维钢纤维混凝土细观模型的生成算法主要内容为:

- 1) 运用混合同余法生成随机数列;
- 2) 计算出试样中纤维的总数 N ;

$$N = \frac{4D^2V \cdot V_f}{\pi L} \quad (3)$$

其中: V 为混凝土的体积; D 为钢纤维的直径; L 为钢纤维的长度。若基体中纤维的总数量介于 N 与 $N+1$ 之间, 则取较小值 N 。

3) 在 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 区域内投放钢纤维, 保证投放的钢纤维的位置与方向都是随机的, 投放步骤如下: a) 确定试件中乱向钢纤维的随机方向, 通过钢纤维与 X 轴、 Z 轴的夹角 α 、 β 来确定钢纤维的方向, 如图 9 所示, 2 个夹角通过 Random 函数生成, 之后利用数组格式进行保存。b) 其次, 确定试件中乱向钢纤维的随机位置, 以钢纤维两端点为其特征点, 利用下式投放准则进行钢纤维投放:

$$\begin{cases} x_2 = p_1 = \text{rand}(1,1) \cdot L_1 \\ y_2 = p_2 = \text{rand}(1,1) \cdot L_2 \\ z_2 = p_3 = \text{rand}(1,1) \cdot L_3 \\ x_1 = p_1 + R \cdot \sin \beta \cdot \cos \alpha \\ y_1 = p_2 + R \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta \\ z_1 = p_3 + R \cdot \cos \beta \end{cases} \quad (4)$$

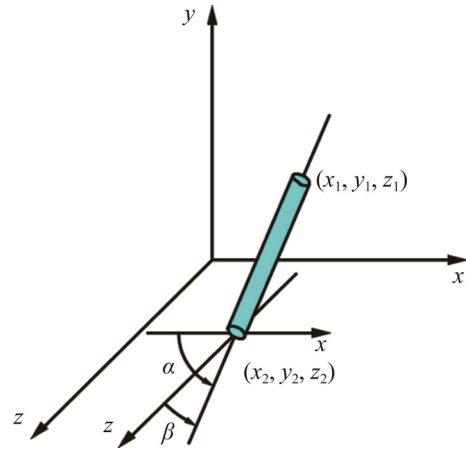


图 9 纤维方向示意图

Fig. 9 Schematic diagram of fiber orientation

其中: (x_1, y_1, z_1) 与 (x_2, y_2, z_2) 分别为钢纤维的两特征点的坐标; α 、 β 为每根钢纤维的随机空间方向; L_1 、 L_2 、 L_3 为指定区域的尺寸。

4) 钢纤维在混凝土基体中随机均匀投放时, 为了保证投放纤维有效性, 必须满足以下判定条件:

a) 任意 2 根钢纤维不可以相交, 即投放时 2 根纤维中轴线间的距离至少为纤维直径; b) 任意 2 根纤维不重合; c) 钢纤维不能超出混凝土基体的边界范围, 一旦超出便需重新投放, 直至满足要求; d) 钢纤维投放数目要满足预定要求, 以保证钢纤维的体积含量。

其中, 纤维相交或重合判定规则: 任意 2 根纤维之间均可构成一个四面体, 利用钢纤维 2 端点的特征点, 计算四面体的体积。如果四面体体积不为 0, 则 2 根纤维不相交、不重合; 若四面体体积为 0, 进行根据纤维方向信息与端点信息进一步判断, 若两者方向一致且端点信息不一致, 则两者不相交、不重合, 否则两者重合或相交, 删除生成纤维, 重新生成新的纤维。参照上述生成与判定方法, 便可实现在指定区域内的随机乱向钢纤维的投放。

钢纤维随机模型是由一定数量钢纤维组成, 每根钢纤维根据其随机的位置与空间方向信息生成。在钢纤维投放过程中要进行位置判定、相交判定和数量判定, 分别保证钢纤维生成在指定的位置、相互不发生相交或重合和生成指定数量的钢纤维, 将符合要求的钢纤维信息依次储存。采用 Matlab 软件生成三维随机分布钢纤维。具体过程如图 10 所示。

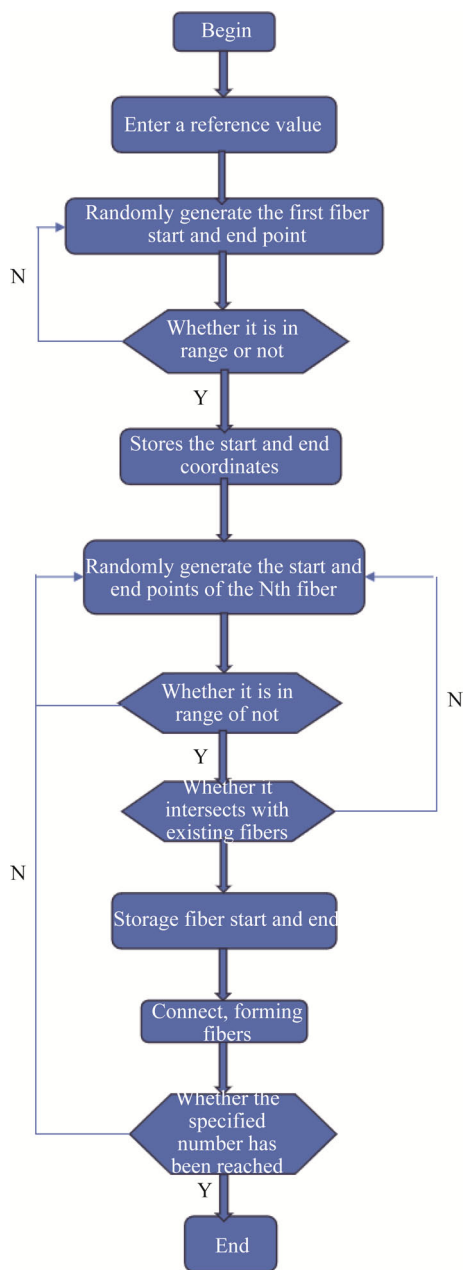


图 10 随机钢纤维生成流程图

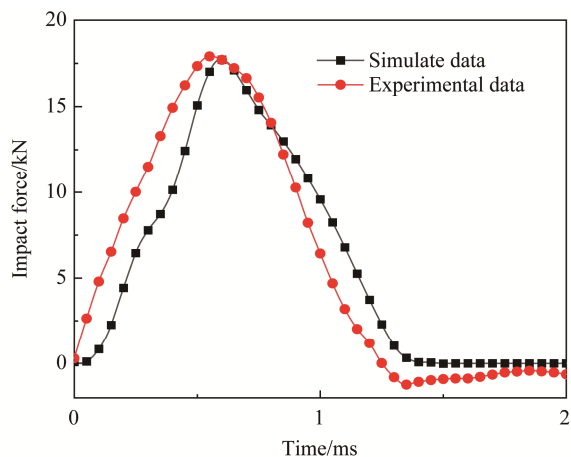
Fig. 10 Random steel fiber generation flowchart

3 细观数值仿真

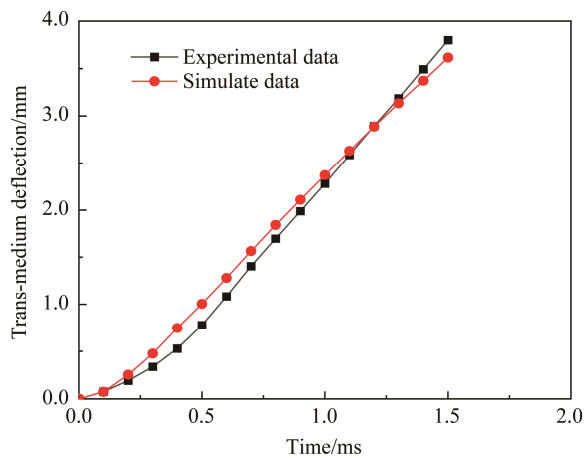
3.1 仿真结果与试验结果对比

为验证细观模型的有效性,将数值仿真结果与试验结果的主要特征参数以及破坏形式进行对比分析。

如图 11 所示,普通混凝土梁模拟曲线与试验曲线吻合较好。可以看出,普通混凝土梁试验测得冲击力最大值为 17.89 kN,模拟获取得冲击力最大值为 17.57 kN,模拟值与试验值误差为 1.82%;试验测得跨中挠度最大值 3.80 mm,模拟获取得跨中挠度最大值为 3.62 mm,模拟值与试验值误差为 4.97%。



(a) Impact force time history curves



(b) Time history curves across medium deflection

图 11 普通混凝土梁试验与仿真结果对比图

Fig. 11 Comparison chart of ordinary concrete beam test and simulation results

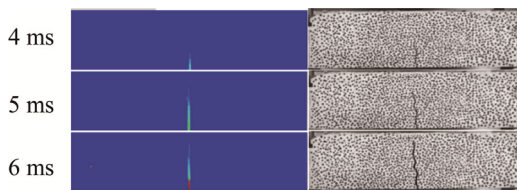


图 12 普通混凝土梁仿真结果与试验结果损伤

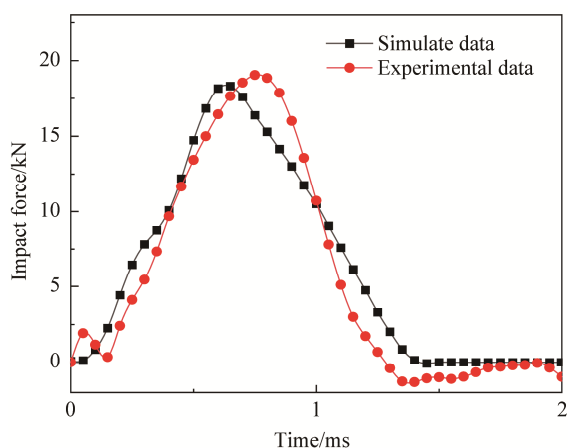
Fig. 12 Damage of ordinary concrete beam simulation results and test results

普通混凝土梁在落锤冲击下的试验结果如图 12 所示,裂缝从梁跨中底部开始形成,竖直向上发展,最终贯穿整个混凝土梁,是典型的脆性弯曲破坏。仿真结果可以看出在混凝土梁跨中底部出现明显的等效塑性拉应变,基本竖直向上发展,这与试验结果一致。综上所述,数值模拟中对于混凝土材料力学参数的选取是合理的。

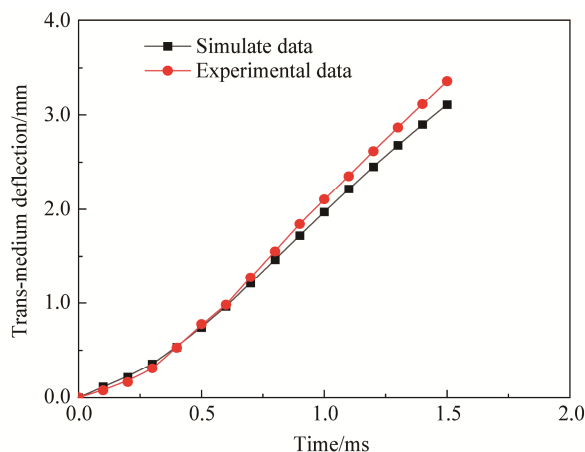
如图 13 所示,钢纤维体积分数为 0.5% 的混凝土梁的模拟曲线与试验结果曲线吻合良好。钢纤维混凝土梁试验测得冲击力最大值为 19.08 kN,模拟

获得冲击力最大值为 18.49 kN, 模拟值与试验值误差为 3.19%; 试验测得跨中挠度最大值 3.36 mm,

模拟获得跨中挠度最大值为 3.11 mm, 模拟值与试验值误差为 8.04%。



(a) Impact force time history curves



(b) Time history curves across medium deflection

图 13 钢纤维混凝土梁试验与仿真结果对比图

Fig. 13 Comparison chart of test and simulation results of steel fiber concrete beam

由图 14 可见, 落锤冲击试验结果显示钢纤维体积分数为 0.5% 的混凝土梁仅可见一条裂缝起裂于梁跨中底部, 竖直向上发展, 发展到梁中部时方向有所倾斜, 梁呈现脆性弯曲破坏特征。混凝土梁的等效塑性拉应变云图显示主裂缝出现在跨中底部, 向顶部竖直发展, 在向上发展过程中略微向右侧偏移, 主裂缝发展趋势与试验基本一致, 与试验结果符合较好。

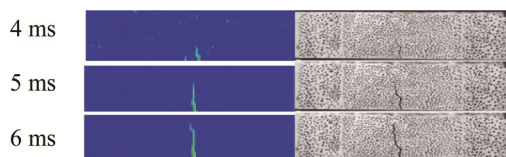


图 14 钢纤维混凝土梁仿真结果与试验结果损伤

Fig. 14 Simulation results and test results of steel fiber concrete beams damage

由于在动态冲击作用下梁跨中承受主要的冲击力, 在荷载作用下梁跨中下部受到拉应力, 混凝土与钢纤维紧密相连, 载荷被这两部分共同承担; 混凝土抗拉性能较弱, 梁中下部基体首先出

现裂缝, 钢纤维相对于基体具有较大的弹性模量, 钢纤维变形量相对较小, 抵抗基体开裂; 随着荷载增加, 钢纤维主要受力范围由梁中下部向梁上部及两侧扩大, 分担更大的载荷, 而基体裂缝扩展受到钢纤维的阻挡, 裂缝发展方向发生变化或者停止扩展形成微裂缝。而在实际动态试验中裂缝变化过程较快, 且部分裂缝发展微小, 试验结果的记录有一定的局限性; 而细观仿真基于细观层次, 能通过整体及细观各组分变化全面准确反映了破坏过程。

由于上述素混凝土梁与钢纤维混凝土梁的试验结果与仿真结果吻合较好, 因此建立的三维细观模型有效, 各组分力学参数选定合理。

3.2 钢纤维体积分数对混凝土梁抗冲击性能的影响

基于提出的三维细观模型, 进一步利用仿真分析了冲击荷载下不同体积分数的钢纤维混凝土梁的动力学特征, 仿真分组如表 5 所示, SFCS (Steel Fiber Concrete Simulation) 表示钢纤维混凝土仿真。

表 5 不同体积分数的钢纤维混凝土梁仿真结果

Table 5 Simulation results of steel fiber concrete beams with different volume ratio

Sample number	Steel fiber volume fraction/%	Peak impact/kN	Trans-medium deflection/mm
SFCS-2-0.0	0	17.57	3.61
SFCS-2-0.5	0.5	18.49	3.11
SFCS-2-1.0	1.0	19.47	2.79
SFCS-2-1.5	1.5	20.51	2.86
SFCS-2-2.0	2.0	20.37	2.75

如表 5 所示,钢纤维体积分数在 0~2%范围内时,混凝土梁峰值冲击力随着钢纤维体积分数的变化而变化,当纤维体积分数为 0.5%、1.0%、1.5%时,峰值冲击力随着钢纤维体积分数的增大而增大,但当钢纤维体积分数为 2.0%时,峰值冲击力减小,但钢纤维混凝土梁的峰值冲击力相较于普通混凝土梁的峰值冲击力均有所提高。其中,在相同工况下样品 SFCS-2-1.5 梁的峰值冲击力较样品 SFCS-2-0.0 梁增幅达 16.71%。可以看出,钢纤维的掺入增强了混凝土梁的承载能力,显著提高了混凝土梁的抗冲击性能。

如图 15 所示,不同钢纤维体积分数的钢纤维混

凝土梁的冲击力时程曲线趋势基本一致。当钢纤维体积分数在一定范围内时,峰值冲击力大小随着钢纤维体积分数的增大而增大,但当纤维体积分数超过一定限值,峰值冲击力的大小随着钢纤维体积分数的增大而减小,但冲击力到达峰值的时间均随着钢纤维体积分数的增大而增大。随着钢纤维体积分数的增加,混凝土梁的跨中挠度相对于普通混凝土梁均有所减小,但其跨中挠度并不完全随着钢纤维体积分数的增大而减小。其中,普通混凝土梁的跨中挠度时程曲线基本为直线,当钢纤维体积分数增大后,跨中挠度时程曲线斜率均有所降低。

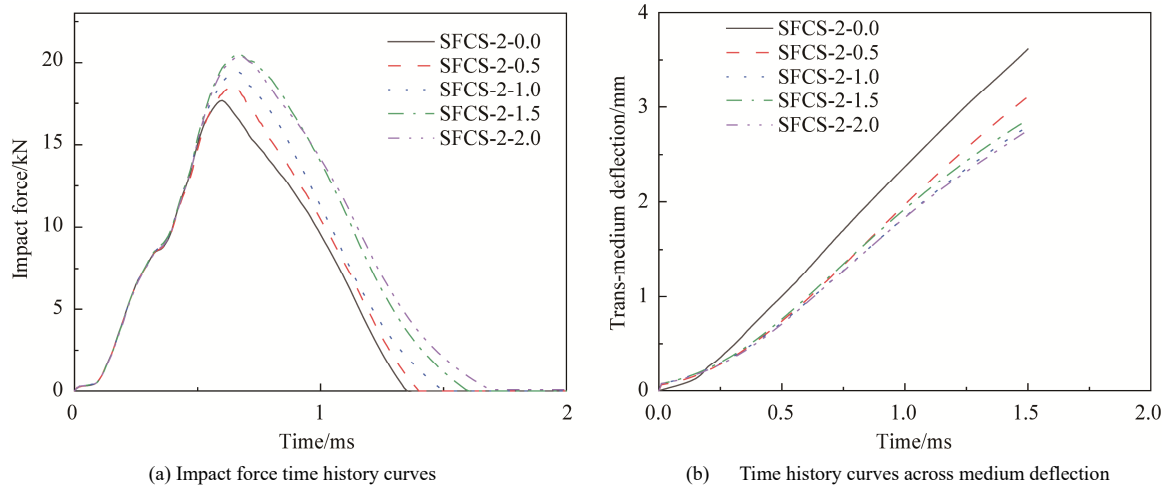


图 15 不同体积分数钢纤维混凝土梁冲击力时程与挠度时程曲线

Fig. 15 Time course of deflection and contact force of concrete beams with different volume ratios of steel fiber

图 16 为样品 SFCS-2-0.5、样品 SFCS-2-1.0、样品 SFCS-2-1.5、样品 SFCS-2-2.0 梁在承载力达到最大时的等效塑性拉应变云图。由图 16 可见,在动态冲击荷载下钢纤维混凝土梁的开裂位置基本处于梁跨中下部。样品 SFCS-2-0.5 梁裂缝单一,开裂沿垂直方向发展,在靠近上端处略向右偏移,呈现出较为明显的脆性弯曲破坏;样品 SFCS-2-1.0 梁裂缝整体从跨中向上发展,但由于钢纤维的桥联作用,裂缝向两侧倾斜,裂缝呈弯曲状向上发展,混凝土梁的脆性有所提高;样品 SFCS-2-1.5 梁的裂缝整体向竖直方向发展,但由于钢纤维对基体发挥的抗裂作用,梁底部生出 2 条裂缝,其中一条发展成主裂缝,又由于钢纤维与基体的桥连作用,主裂缝向上发展时向左略微偏移;样品 SFCS-2-2.0 梁相对于样品 SFCS-2-1.5 梁,均从底部生成了 2 条裂缝,以其中一条裂缝发展为裂缝,但由于钢纤维体积分数的增加,钢纤维发挥出更大的抗裂作用,底部发展的两条裂缝相距更远,同时由于钢纤维与基体的桥连作用,其主裂缝和次裂缝均呈弯曲状向上发展。由

此可见,随着钢纤维体积分数的增大,混凝土梁中下部裂缝数量逐渐增多,主裂缝发展方向出现倾斜,说明混凝土梁的脆性有一定改善。

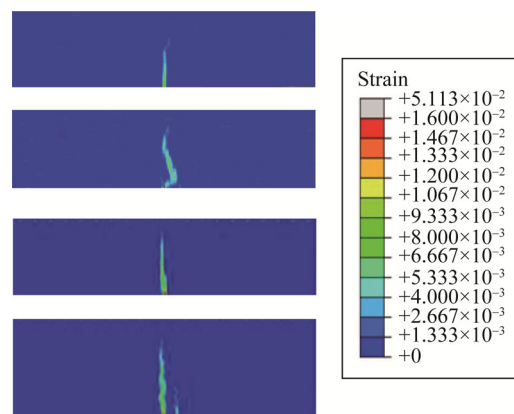


图 16 钢纤维混凝土梁等效塑性拉应变云图比较

Fig. 16 Comparison of equivalent plastic tensile strain of steel fiber reinforced concrete beams

3.3 冲击速率对钢纤维混凝土梁抗冲击性能影响

基于提出的三维细观模型,利用仿真分析了不同冲击速率下相同体积分数的钢纤维混凝土梁的动态力学特征,仿真结果如表 6 所示。

表 6 不同冲击速率下钢纤维混凝土梁仿真结果

Table 6 Simulation results of steel fiber concrete beams under different impact speeds

Sample number	Impact speed/(m·s ⁻¹)	Peak impact/kN	Trans-medium deflection/mm
SFCS-1-1.5	1	12.42	1.26
SFCS-2-1.5	2	19.47	2.77
SFCS-3-1.5	3	20.91	3.92
SFCS-4-1.5	4	24.52	5.07
SFCS-5-1.5	5	26.40	6.15
SFCS-10-1.5	10	30.28	8.30
SFCS-20-1.5	20	46.55	13.62

图 17 为相同钢纤维体积分数的混凝土梁在不同冲击速率下的冲击力时程与挠度时程曲线。由图

17 可见,随着冲击速率的增大,曲线上升段的斜率增大,混凝土梁动态响应时间延长。峰值冲击力随冲击速率的增大而变大,且达到峰值冲击力的时间变小。跨中挠度时程曲线受冲击速率影响较大。速率越小,跨中挠度响应越慢;跨中最大挠度随着冲击速率的增大而增大。可以看出,当速率不断增大时,其跨中挠度响应越快,跨中挠度时程曲线更为接近直线,钢纤维的增韧效果逐渐减弱。

图 18 为样品 SFCS-3-1.5、样品 SFCS-5-1.5、样品 SFCS-10-1.5、样品 SFCS-20-1.5 梁和相同速率下的普通混凝土梁达到最大冲击力时的塑性应变,对比相同冲击速率作用下钢纤维混凝土与普通混凝土

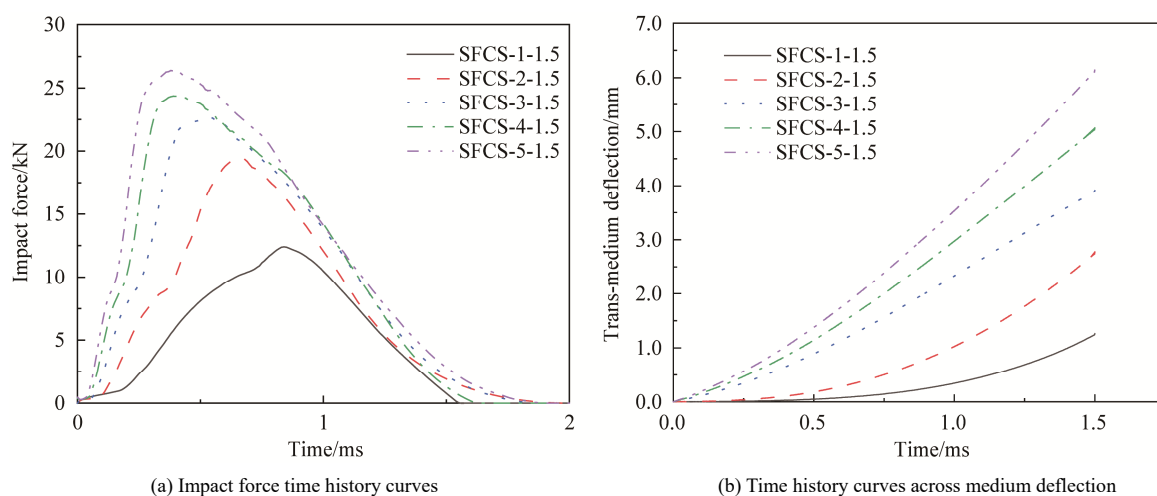


图 17 不同冲击速率下钢纤维混凝土梁冲击力时程与挠度时程曲线

Fig. 17 Duration curves of impact force and deflection of steel fiber concrete beams at different impact speeds

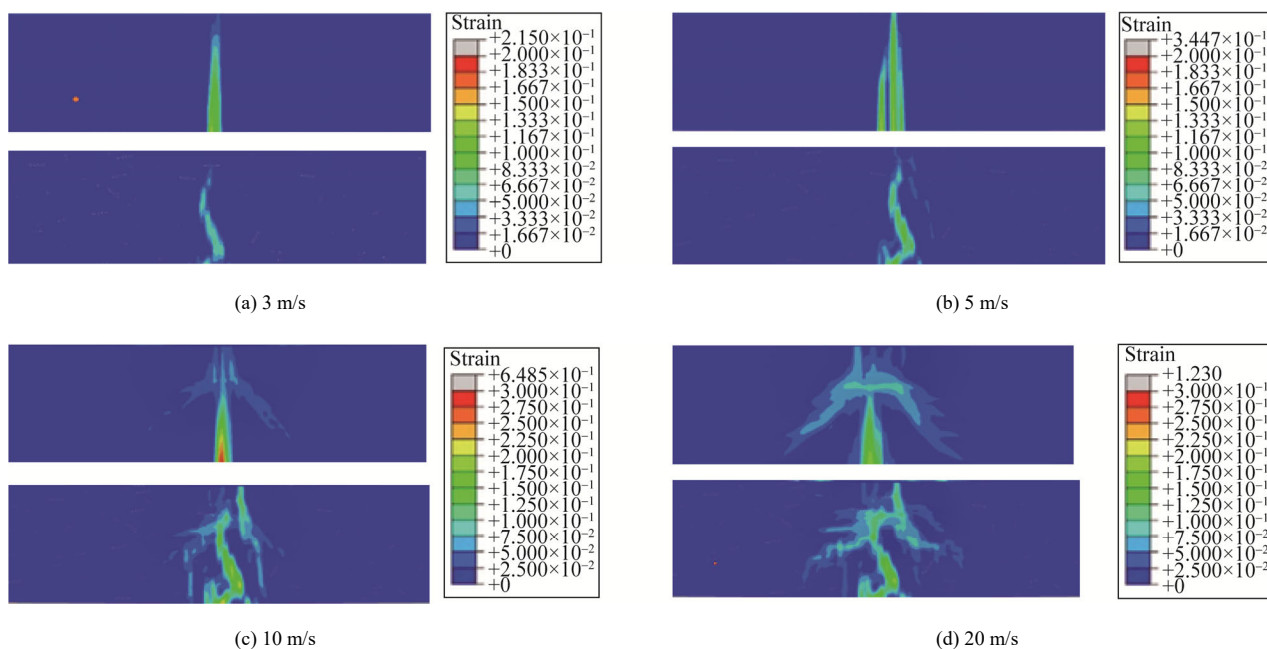


图 18 相同冲击速率下钢纤维混凝土梁和普通混凝土梁的塑性应变图比较

Fig. 18 Comparison of plastic strain diagram of steel fiber concrete beam and plain concrete beam at the same impact speed

之间的破坏形态,当冲击速率为 3 m/s 和 5 m/s 时,钢纤维的增强作用显著,普通混凝土裂缝从下部竖直向上发展,结构破坏为明显的脆性破坏,掺加钢纤维后,混凝土梁下部出现更多裂缝,主裂缝向两边倾斜明显,整体呈弯曲向上发展;如图 18c 所示,当速率达到 10 m/s 时,普通混凝土跨中裂缝垂直向上发展,梁上部出现“八”字形裂缝,掺加钢纤维后,跨中形成多条细小裂缝,主裂缝略有所倾斜,梁跨中上部出现“八”字形裂缝,“八”字形裂缝略向下偏移,钢纤维的增强作用减弱;如图 18d 所示,当速率达到 20 m/s 时,普通混凝土形成的裂缝和掺加钢纤维的混凝土所形成的裂缝相似,均在跨中形成大裂缝,竖直向上发展,梁中部出现“八”字形裂缝,发展趋势相近,说明当速率达到 20 m/s 时,钢纤维增强效应微弱。可以看出,低速冲击下,钢纤维对于梁增强效显著,但当速率过高时,此时钢纤维增强效应明显减弱,梁发生自起始点的局部冲切。

钢纤维的掺加是为了增强混凝土基体承载能力,而钢纤维是通过与混凝土基体协同变形,共同分担混凝土基体的载荷达到对于整体的增强效果。高速冲击下,基体受力迅速达到破坏阈值,整体发生失效,钢纤维与基体之间相互作用减弱,导致钢纤维对于载荷的分担与分散作用下降,钢纤维的增强效应不明显。而在低速冲击下,情况与高速恰恰相反,在基体破坏过程中钢纤维充分受力,为基体分担载荷,阻挡裂缝发展,从而增强了混凝土基体的整体性。

4 结论

基于粘结滑移关系建立了钢纤维混凝土三维细观精细化计算模型,分别模拟不同体积分数(0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%)和不同冲击速率(1、2、3、4、5、10、20 m/s)下钢纤维混凝土的动态响应和破坏形式,仿真结果与试验结果吻合良好。现有结论如下。

1) 以弹簧单元模拟钢纤维本构及其粘结滑移建立三维钢纤维混凝土梁细观模型,对低速冲击下钢纤维混凝土的动态力学响应与损伤进行仿真分析,通过对不同钢纤维体积分数与不同冲击速度的仿真与试验结果对比分析得到,基于粘结滑移弹簧单元的三维钢纤维混凝土梁的仿真结果与试验结果吻合较好,二者的冲击力峰值结果偏差小于 5%,跨中挠度结果偏差小于 10%,通过细观仿真结果可有效反映混凝土在动态冲击下混凝土基体与钢纤维

间的受力变形情况。

2) 试验与仿真结果表明,在纤维体积分数较小时,随着钢纤维体积分数的增大钢纤维混凝土梁承载力与耗能能力有所增强;当钢纤维达到 1.5%的最优掺量时,混凝土梁的峰值冲击力增幅为 16.71%;但随着钢纤维体积分数的继续增加,钢纤维混凝土梁的耗能能力与抗冲击性能将有所下降。

3) 仿真结果表明,当冲击速率在 1 m/s 到 20 m/s 范围内时,钢纤维混凝土梁的承载能力与速率呈正相关。随着速率的不断增大,钢纤维混凝土梁峰值冲击力随之增大,但钢纤维对钢纤维混凝土的增强效应逐渐减弱,当速率增大至 20 m/s 后,钢纤维增强效应不明显。因此,对于长度 12.5 mm、长径比约为 20 的钢纤维,其对混凝土梁的动态力学性能增强效果在小于 10 m/s 的低速冲击区间内效果更为显著。

参考文献:

- [1] BIBORA P, DRDLOVÁ M, PRACHAŘ V, et al. The impact of various types of steel fibres on the strength parameters and blast resistance of high-performance concrete[J]. IOP Conf Ser: Mater Sci Eng, 2019, 596(1): 012018.
- [2] YOO D Y, BANTHIA N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete—A review[J]. Cem Concr Compos, 2019, 104: 103389.
- [3] 刘玲玲. 碳纤维织物增强混凝土薄板力学性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
LIU Lingling. Research on the mechanical properties of carbon textile reinforced concrete thin plates[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [4] MOHAMMADI Y, CARKON-AZAD R, SINGH S P, et al. Impact resistance of steel fibrous concrete containing fibres of mixed aspect ratio[J]. Constr Build Mater, 2009, 23(1): 183–189.
- [5] 陈相宇. 纤维混凝土抗冲击性能的试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
CHEN Xiangyu. Experimental research on impact resistance of fibre reinforced concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.
- [6] 武卫, 秦菱, 张超, 等. 钢纤维掺量对钢纤维-钢筋混凝土板抗低速冲击性能影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2016(1): 54–57.
WU Wei, QIN Ling, ZHANG Chao, et al. China Concr Cem Prod, 2016(1): 54–57.
- [7] 潘慧敏, 马云朝. 钢纤维混凝土抗冲击性能及其阻裂增韧机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(6): 956–961.
PAN Huimin, MA Yunzhao. J Build Mater, 2017, 20(6): 956–961.
- [8] KURIHASHI Y, KONO K, KOMURO M. Response characteristics of a steel fiber-reinforced porosity-free concrete beam under an impact load[J]. Int J Civ Eng, 2020, 18(6): 673–684.
- [9] 马钢, 郭栋才, 李国强, 等. 落锤冲击下碳纤维增强混凝土梁的动态响应与损伤[J]. 复合材料学报, 2022, 39(11): 5436–5452.
MA Gang, GUO Dongcai, LI Guoqiang, et al. Acta Mater Compos Sin, 2022, 39(11): 5436–5452.
- [10] XU Z, HAO H, LI H N. Mesoscale modelling of fibre reinforced concrete material under compressive impact loading[J]. Constr Build

- Mater, 2012, 26(1): 274–288.
- [11] 焦楚杰, 蒋国平, 高乐. 钢纤维高强混凝土抗冲击性能的数值仿真[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 350–353.
JIAO Chujie, JIANG Guoping, GAO Le. J Jiangsu Univ Nat Sci Ed, 2012, 33(3): 350–353.
- [12] SJOBLÖM P O, HARTNESS J T, CORDELL T M. On low-velocity impact testing of composite materials[J]. J Compos Mater, 1988, 22(1): 30–52.
- [13] XU Z, HAO H, LI H N. Dynamic tensile behaviour of fibre reinforced concrete with spiral fibres[J]. Mater Des, 2012, 42: 72–88.
- [14] 赵秋山, 徐慎春, 刘中宪. 钢纤维增强超高性能混凝土抗压性能的细观数值模拟[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1661–1673.
ZHAO Qiushan, XU Shenchun, LIU Zhongxian. Acta Mater Compos Sin, 2018, 35(6): 1661–1673.
- [15] GB 50010–2010. 混凝土结构设计规范[M]. 中国建筑工业出版社, 2002.
- [16] 张胜利. 钢纤维混凝土纤维分布与力学性能关系试验研究及数值仿真[D]. 太原: 太原理工大学, 2018.
ZHANG Shengli. Experimental and numerical study on the relationship between fibre distribution and mechanical properties of SFRC[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2018.
- [17] VANALLI L, PACCOLA R R, CODA H B. A simple way to introduce fibers into FEM models[J]. Commun Numer Meth Engng, 2007, 24(7): 585–603.
- [18] PENG Y, WU C Q, LI J, et al. Mesoscale analysis on ultra-high performance steel fibre reinforced concrete slabs under contact explosions[J]. Compos Struct, 2019, 228: 111322.
- [19] SU Y, LI J, WU C Q, et al. Mesoscale study of steel fibre-reinforced ultra-high performance concrete under static and dynamic loads[J]. Mater Des, 2017, 116: 340–351.
- [20] LI J, WU C Q, HAO H. An experimental and numerical study of reinforced ultra-high performance concrete slabs under blast loads[J]. Mater Des, 2015, 82: 64–76.
- [21] HUANG Y Q, HUANG J S, ZHANG W, et al. Experimental and numerical study of hooked-end steel fiber-reinforced concrete based on the meso- and macro-models[J]. Compos Struct, 2023, 309: 116750.
- [22] WU G Z, WANG H M. Numerical simulation of steel fiber pull-out process based on cohesive zone model and unified phase-field theory[J]. Sustainability, 2023, 15(5): 4015.
- [23] NADERI S, ZHANG M Z. 3D meso-scale modelling of tensile and compressive fracture behaviour of steel fibre reinforced concrete[J]. Compos Struct, 2022, 291: 115690.
- [24] ABBAS Y M. Microscale cohesive-friction-based finite element model for the crack opening mechanism of hooked-end steel fiber-reinforced concrete[J]. Materials, 2021, 14(3): 669.
- [25] AL-JELAWY H M, MACKIE K R. Three-dimensional fiber-based models of precast and cast-in-place reinforced concrete columns[J]. J Struct Eng, 2022, 148(3): 04021287.
- [26] SHAHBAZPANAH S, ABANG ALI A A, KAMGAR A, et al. Fracture mechanic modeling of fiber reinforced polymer shear-strengthened reinforced concrete beam[J]. Compos Part B Eng, 2015, 68: 113–120.
- [27] 徐礼华, 池寅, 李荣渝, 等. 钢纤维混凝土深梁非线性有限元分析在 ANSYS 中的实现[J]. 岩土力学, 2008, 29(9): 2577–2582.
XU Lihua, CHI Yin, LI Rongyu, et al. Rock Soil Mech, 2008, 29(9): 2577–2582.
- [28] 朱平, 池颜海, 易笃韬, 等. 混杂钢纤维对钢纤维-超高性能混凝土界面黏结性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2020, 48(10): 1669–1681.
ZHU Ping, CHI Yanhai, YI Dutao, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(10): 1669–1681.
- [29] 徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985.
- [30] GREENBERGER M. An *a priori* determination of serial correlation in computer generated random numbers[J]. Math Comp, 1961, 15(76): 383–389.

Dynamic Behavior and Three-Dimensional Microscopic Simulation of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams under Low-Speed Impact

ZHANG Zhou, MA Gang, ZHANG Jiayin, DU Sizhe, CHANG Yakun, LI Bo
(School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Extended Abstract

Introduction Ordinary concrete rapidly loses its bearing capacity under impact, while the addition of steel fibers effectively enhances the overall integrity and matrix toughness of concrete, thus meeting the concrete performance requirements of high strength, high durability, and high toughness in practical engineering. The existing work on the strengthening and toughening mechanism and failure mechanism of steel fiber reinforced concrete is mainly based on the macroscopic experiments. It is thus difficult to reflect the randomness and non-uniformity of concrete. In this paper, the dynamic response of steel fiber reinforced concrete beam specimens at a low-speed impact was investigated by a drop hammer testing machine to comprehensively reveal the internal damage and failure process of concrete and the toughening mechanism of steel fibers. A three-dimensional microscopic model of steel fiber reinforced concrete beams was proposed, and the mechanical properties and crack development of steel fiber reinforced concrete beams under dynamic impact were analyzed. In addition, the effects of steel fiber volume fraction and impact velocity on the impact resistance and failure morphology of steel fiber reinforced concrete beams were also discussed.

Methods Steel fiber reinforced concrete beams with different steel fiber volume fractions (*i.e.*, 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%, and 2.5%) were prepared based on the experimental mix proportion. The effect of steel fiber volume fraction on the impact performance of steel fiber reinforced concrete beams was analyzed *via* dynamic three-point bending performance in a model INSTRON-9530 drop

hammer impact testing machine.

A steel fiber model was randomly proposed based on the Monte Carlo method, and a spring element was used to simulate the bond slip between steel fibers and concrete matrix. Based on its bond slip relationship, a three-dimensional fine calculation model for steel fiber concrete was established. The dynamic response and failure forms of steel fiber concrete were simulated at different volume fractions (*i.e.*, 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0%) and different impact rates (*i.e.*, 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20 m/s), respectively. The effects of steel fiber content and impact rate on the impact resistance and failure morphology of steel fiber reinforced concrete beams were analyzed.

Results and discussion The drop hammer impact test is widely used to test the dynamic bending performance of concrete beams, but the hammer impact force measured by a hammer force sensor is not an actual impact force due to its inclusion of structural inertia force. In the low-speed impact test of steel fiber reinforced concrete beams, this study integrated some force sensors with roller bearings to accurately obtain the support reaction force of the beam during the impact process and reduce the influence of inertial force, thereby revealing the true dynamic response of the tested specimens.

The key to improving the mechanical properties of fiber reinforced materials lies in the micro bridging effect of fibers on the concrete matrix. Steel fiber exhibit a large number and random distribution in the concrete matrix, making it difficult to quantitatively evaluate the fiber reinforcement effect at an impact load. This study used the Monte Carlo method to propose a fiber microscopic model and determine the range based on the unique three-dimensional position and direction information of each fiber. The numerical analysis methods were used to more intuitively clarify the deformation and damage situation of steel fibers and concrete matrix during the impact process to obtain the accurate energy quantification evaluation.

The key to improving the mechanical properties of steel fiber reinforced concrete lies in the bond slip between steel fibers and concrete matrix. Simulating the bond slip between concrete matrix and steel fibers accurately becomes a key to simulating steel fiber reinforced concrete. In this paper, spring elements were used to simulate steel fibers. The stiffness of the spring element adopts a "two-stage" model. The simulation data by the model are in reasonable agreement with the experimental results.

Conclusions The simulation data of three-dimensional steel fiber reinforced concrete beams based on bonded slip spring elements were in reasonable agreement with the experimental results.

The bearing capacity and energy dissipation capacity of steel fiber reinforced concrete beams increased with the increase of steel fiber volume fraction when the fiber volume fraction was small. The peak impact force of the concrete beam was increased by 16.71% at the optimal dosage of steel fiber of 1.5%. However, the energy dissipation capacity and impact resistance of steel fiber reinforced concrete beams decreased as the volume fraction of steel fibers further increased.

The bearing capacity of steel fiber reinforced concrete beams was positively correlated to the rate when the impact rate was in the range of 1 m/s to 20 m/s. The peak impact force of steel fiber reinforced concrete beams increased, but the reinforcement effect of steel fiber on the steel fiber reinforced concrete gradually weakened as the rate continues to increased. The reinforcement effect of steel fiber was slight when the rate increased to 20 m/s. Therefore, for steel fibers with a length of 12.5 mm and an aspect ratio of 20, their enhancement effect on the dynamic mechanical properties of concrete beams was more significant in a low-speed impact range of less than 10 m/s.

Keywords steel fiber reinforced concrete; mesoscopic model; drop hammer impact; impact resistance