

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.024

钢纤维高强混凝土板抗爆细观 数值模拟及实验研究*

蔡路军^{1a,2}, 刘 令^{1a,2}, 陈少杰^{1a,2}, 吴立过^{1a,2}, 许 凯^{1b}

(1. 武汉科技大学 a. 理学院; b. 城市建设学院, 武汉 430065; 2. 湖北省智能爆破工程技术研究中心, 武汉 430065)

摘要: 基于纤维随机分布特征,对钢纤维交叉判重做出改进,设计出一种不交叉重叠的随机投放方法,借助 MATLAB 和 ANSYS/LS-DYNA 联合建立包含钢纤维、钢筋和混凝土的三维细观数值模型,通过纤维体积含量为 0.6%、1.2% 和 1.8% SFRC 板接触爆炸实验验证了细观有限元模型的正确性和有效性,从实验和数值模拟两方面对钢纤维高强混凝土板抗爆进行了研究。进一步分析长径比和板厚变化对结构抗爆性能的影响,结果表明:所建立的钢纤维高强混凝土细观数值模型较好地反映结构在承受爆炸超动态荷载作用时的损伤破坏行为,随着纤维体积含量的增加,SFRC 板局部抗震塌效应显著增强,且纤维体积含量和爆炸形式相同条件下,结构整体抗爆性能随着长径比和板厚度的增加而增大,损伤程度逐渐减小,各工况迎面漏斗坑体积变化微小,但背部剥落坑体积减小较明显,研究表明纤维体积含量为 1.8%、长径比为 60、板厚为 11 cm 时,结构抗爆性能较优。

关键词: 钢纤维高强混凝土板; 细观数值模型; 接触爆炸; 纤维体积含量; 长径比

中图分类号: TU375.02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0145-10

Mesoscale Numerical Simulation and Experimental Study on Anti-explosion Steel Fiber Reinforced Concrete Slab

CAI Lu-jun^{1a,2}, LIU Ling^{1a,2}, CHEN Shao-jie^{1a,2}, WU Li-guo^{1a,2}, XU Kai^{1b}

(1. a. College of Science, b. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. Engineering Technology Research Center in Intelligent Blasting of Hubei Province, Wuhan 430065, China)

Abstract: Based on the random distribution characteristics of fibers, the cross-weighting of steel fibers was improved, and a non-overlapping random delivery method was designed. Besides, a three-dimensional mesoscale model containing steel fibers, steel bars, and concrete was established by MATLAB and ANSYS/LS-DYNA. Meanwhile, the correctness and validity of the mesoscopic finite element model was verified by the SFRC explosion experiments as the fiber volume contents is 0.6%, 1.2% and 1.8% respectively. Furthermore, the effect of different length-diameter ratios and thicknesses of the slab on the performance of the anti-blast structures was studied. The results show that the established model of the steel fiber reinforced concrete can reflect the structure damage and destruction behavior well when it withstands the super dynamic load from the explosion. With the increase of the fiber volume content, the local anti-seismic collapse effect of the SFRC slab is significantly enhanced. Under the same conditions of fiber volume content and explosion form, the overall anti-explosion performance of the structure increases with the increase of the length-diameter ratio and the thickness of the slab, and with the decrease of the damage degree. The volume of blasting crater on the blast-receiving surface is little changed. However, the crater on the back of the blasting surface is decreased obviously. Finally, the anti-blast performance of the structure is optimized with the volume content of 1.8%, the length-diameter ratio of 60, and the slab thickness of 11 cm.

Key words: steel fiber reinforced concrete slab; mesoscopic numerical model; contact explosion; fiber volume content; length-diameter ratio

钢纤维高强混凝土既有高强混凝土抗压、耐腐蚀性强等优点,又有钢纤维抗拉、抗剪和抗弯性能好等特点,常作为建筑结构的主要材料。随着工业发展迅速,地域冲突加剧,爆炸事故或恐怖袭击时有发生,建筑结构在受到爆炸冲击作用时常损伤严重,因此,对钢纤维高强混凝土的抗爆性能进行研究十分必要。Luccioni B 等开展了端勾状钢纤维抗压强度为 100 MPa 以上的增强混凝土板以及高强混凝土板于 TNT 当量分别为 0.049 kg, 0.244 kg 和 0.488 kg 下接触爆炸和非接触爆炸实验^[1]。Zhang Y 等对体积含量为 0%~6% 的 SFRC 试件进行了准静态实验以及对 20g RDX 接触爆炸下尺寸为 $\phi 40 \text{ cm} \times 6 \text{ cm}$ SFRC 圆形板破坏形态进行研究,修正并建立了预测损伤区厚度的新公式^[2]。Foglar M 等人运用实验和数值方法建立全尺度超高性能钢纤维和玄武岩纤维混凝土桥梁爆炸模型,分析了离桥面 45 cm 高度药量为 25 kg 下结构破坏程度^[3]。Li J 等采用有限元和光滑粒子流体动力学耦合方式对钢纤维层布加固混凝土板进行了冲击数值模拟,模拟结果与试验相吻合^[4]。龙源采用 Lagrangian-Eulerian 耦合方法对混凝土及钢纤维混凝土材料的抗爆炸性能进行对比研究,并确定了压缩破坏系数 K_{α} 值^[5]。李楠借助 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立了 1/4 钢纤维高强混凝土墙数值模型,分析了不同折合距离下墙的破坏模式^[6]。姜天华采用模型试验和数值模拟相结合的方法,研究了混凝土和钢纤维混凝土箱梁在爆炸荷载作用下的动态响应^[7]。

钢纤维混凝土抗爆性能研究大都基于实验和数值模拟,受限于实际条件,实验模型一般是经过缩尺、简化或近似处理的,为符合实际情况必然要进行大量试验和反复验证。数值模拟方法是解决工程问题的强有力手段,通过对边界条件和初始条件精细设定,建立与实际模型比例为 1:1 的数值模型,可弥补试验的重复性问题,故运用数值模拟来分析结构抗爆性能,指导参数选取,优化结构设计十分必要,但对于钢纤维混凝土细观有限元模型,纤维投放在几何空间局部位置容易产生结团和重叠,在数值模拟中较难实现。

文章基于 Matlab 软件,对钢纤维交叉判重做出

改进,设计出一种不交叉重叠的随机投放方法,编程建立钢纤维随机投放模型,将其导入到非线性动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 中,考虑纤维与基体之间的摩擦效应,进行接触爆炸数值计算,并通过与钢纤维高强混凝土板爆炸实验结果对比,验证所建立三维细观数值模型的正确性。在此基础上,分析了钢纤维含量和长径比对结构抗爆性能的影响,为工程实际应用提供的计算依据,得出优化后的钢纤维高强混凝土板参数。

1 钢纤维混凝土三维细观数值模型实现

1.1 钢纤维混凝土三维数值建模

钢纤维三维数值建模主要分为两个模块:第一模块为计算纤维在混凝土几何空间中的投放数目,通过 Matlab 对纤维空间角度、坐标进行定位,生成指定数量的纤维。第二模块为编写有限元软件程序接口,将第一模块生成的纤维模型导入到有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 中,合理评估模型并进行网格划分,添加相关边界条件并生成 DYNA 求解器所识别的关键字 K 文件。

根据公式计算出纤维投放数量 $N^{[8]}$

$$N = \frac{V \cdot \rho_f}{\frac{\pi}{4} D^2 L} \quad (1)$$

式中: V 为纤维投放空间体积; ρ_f 为纤维体积含量; D 为纤维直径; L 为纤维长度。若计算纤维数量介于 N 与 $N+1$ 之间,则取 $N+1$ 根纤维。首先进行第一根钢纤维随机生成,单根纤维在基体中的空间位置可以由以下几个要素确定,即单根纤维两 endpoint 空间坐标、纤维 ij 方向与 X 轴和 Z 轴之间的夹角 $\alpha(0, 2\pi)$ 、 $\beta(0, \pi)$,如图 1 所示。

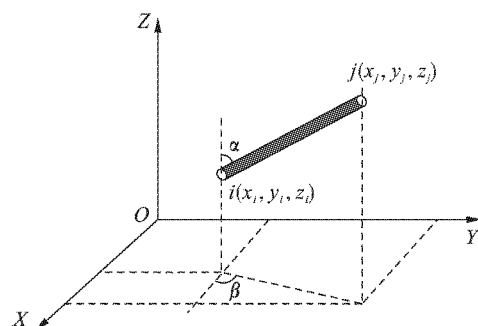


图 1 钢纤维空间坐标位置

Fig. 1 Spatial coordinate position of steel fiber

假设纤维基体投放空间为 (wx, wy, wz) , wx 、 wy 、 wz 分别代表空间长宽高,利用 Matlab 随机生成第一根纤维第一个 endpoint 坐标 POINT1 (x_1, y_1, z_1) ,根据第

收稿日期:2020-07-03

作者简介:蔡路军(1975-),男,副教授,从事岩石动力学与爆炸力学研究工作,(E-mail)cailujun@wust.edu.cn。

通讯作者:刘 令(1992-),男,硕士研究生,从事岩石动力学与爆炸力学研究,(E-mail)984694780@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(51574184);湖北省教育厅科学研究计划重点项目(D20151105)

一个端点坐标值并联合随机角度 α, β 判定出纤维第二个端点坐标 POINT2(x_2, y_2, z_2) 如下

$$\begin{cases} x_2 = x_1 + L \cdot \sin \beta \cos \alpha \\ y_2 = y_1 + L \cdot \sin \beta \sin \alpha \\ z_2 = z_1 + L \cdot \cos \beta \end{cases} \quad (2)$$

需要对 POINT2(x_2, y_2, z_2) 进行判定是否在基体空间范围内, 若不在, 则重新循环再次生成 POINT2, 直至第二个端点在混凝土基体内。而后按照同样的方式进行后续纤维的投放, 后续纤维的生成主要一个环节就是交叉重叠判定, 在物理工况下, 纤维实际以实体模型嵌入到混凝土中, 之间不会产生交叉重叠现象, 而在数学上对随机函数生成的一系列伪随机点直接进行连线而不对其交叉重叠进行判定, 会使大量纤维交叉成团集中出现在空间某部位, 从而导致纤维投放失败。为了避免此现象发生, 本文设计出一种新的致使纤维不交叉重叠方法, 即利用空间两坐标点之间距离公式分别求得生成的第二根纤维第一个端点坐标值 POINT3(x_3, y_3, z_3) 与第一根纤维两端点坐标之间的距离为 d_1 和 d_2 , 并取两距离中最小值为 m_1 , 运用同样的方式分别求得第二根纤维第二个端点 POINT4(x_4, y_4, z_4) 与第一根纤维两端点之间的距离为 d_3 和 d_4 , 并取两者之间最小值为 n_1 , 以上用数学表达式呈现如下。

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 + (z_1 - z_3)^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 + (z_2 - z_3)^2} \\ d_3 = \sqrt{(x_1 - x_4)^2 + (y_1 - y_4)^2 + (z_1 - z_4)^2} \\ d_4 = \sqrt{(x_2 - x_4)^2 + (y_2 - y_4)^2 + (z_2 - z_4)^2} \end{cases} \quad (3)$$

表 1 C60 混凝土参数^[11,12]

Table 1 C60 concrete material parameters

$RO/(kg \cdot m^{-3})$	G/GPa	A	B	C	N	F_c/MPa
2500	20.8	0.93	1.6	0.008	0.79	61
T/MPa	$EPS0$	$EFMIN$	$SFMAX/MPa$	PC/MPa	UC	PL/GPa
4.84	1	0.004	7	20.3	$6.6E-4$	1
UL	D_1	D_2	K_1/MPa	K_2/MPa	K_3/MPa	FS
0.072	0.04	1	85	-171	208	0

注: RO 为密度; G 为剪切模量; A, B, C, N 为材料强度参数; f_c 为静态单轴抗压强度; T 为最大拉伸静水压力; $EFMIN$ 为最小开裂塑性应变; PC 和 PL 分别为压实压力和完全压碎压力; UC 和 UL 分别为与其对应的体积应变; D_1 和 D_2 为损伤系数; K_1, K_2, K_3 为材料压力常数。

表 2 钢筋及钢纤维材料参数

Table 2 Material parameters of rebar and steel fiber

材料类型	$RO/(kg \cdot m^{-3})$	E/GPa	PR /无量纲	FY/MPa	G/GPa	β	C /无量纲	P /无量纲	FS /无量纲
钢筋	7850	210	0.3	235	2.1	0	40	5	0.40
钢纤维	7850	210	0.3	235	2.1	0	40	5	0.01

注: RO 为材料密度; PR 为泊松比; E 和 G 分别为弹性模量和剪切模量; FY 为材料屈服强度; C, P 为考虑应变率效应的 Cowper-Symonds 模型参数; FS 为材料失效时最大塑性应变。

最后定取两纤维之间最小距离为 $R = \frac{m_1 + n_1}{2}$,

考虑到纤维之间混凝土界面泥浆存在, 所以一般取 R 大于其纤维直径的两倍(本模型取 2 mm) 则纤维投放成功, 否则失败, 则重新进行投放, 距离达标则进行下一根纤维判定, 利用 Matlab 编写函数方式实现上述各纤维之间距离最小判据并借助于循环功能实现后续第 N 根纤维与之前 $N-1$ 根纤维之间判重与交叉问题。

三维纤维随机投放模型生成后, 利用 FORTRAN 编译器进行 ANSYS 程序接口编程, 将生成的纤维模型导入到 ANSYS/LS-DYNA 软件中赋予相关材料属性及有限元网格尺寸划分。

1.2 材料本构模型

混凝土材料选用 HJC 损伤本构模型, 其构建模型计算参数相对容易, 不需要单独建立状态方程且可以精确模拟脆性材料在大应变、高应变率、高围压下材料屈服以及混凝土抗侵彻、高速碰撞下破片等力学行为^[9,10], 材料根据任根茂及林琛研究结果简化确定参数具体取值如表 1。

钢筋和纤维采用塑性随动材料模型^[11-13] MAT-03(* MAT_PLASTIC_KINEMATIC), 该模型适合计算各向同性非线性硬化、随动硬化材料, 同时可考虑钢筋的应变率对屈服强度的增强效应和通过塑性应变来控制其在受载下的失效情况, 具体取值如表 2。

钢纤维高强混凝土板爆炸计算采用的 ALE 流固耦合算法, 其中所涉及到的炸药、流体材料以及对应的状态方程取值如表 3 和表 4。

表 3 炸药及状态方程参数

Table 3 Explosive and equation of state parameters

炸药类型	密度 $\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	爆速 $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$C-J$ 爆压/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	$E_0/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$
TNT	1630	6930	21	373	3.747	4.15	0.9	0.35	6e9

注: A, B, R_1, R_2, ω 为炸药性能参数; E_0 为单位体积炸药的初始内能; V 为相对体积。

表 4 空气及状态方程参数

Table 4 Air and equation of state parameters

$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_0	V_0
1.25	0	0	0	0	0.4	0.4	0	2.5000E-6	1

注: $C_0 \sim C_6$ 为状态方程系数, E_0 为初始内能, V_0 为初始相对体积。

1.3 单元类型及失效法则

进行数值计算的高强混凝土选用八节点六面体常应力实体单元,为防止数值震荡,需添加沙漏粘性阻尼为 0.03,接触爆炸计算所涉及到的空气网格、炸药采用任意的拉格朗日-欧拉多物质单元(ALE 单元),钢筋和纤维都采用 LS-DYNA 中默认的 Hughes-Liu 积分梁单元,此单元计算规则既考虑梁单元中段的横截面上轴应力,同时考虑了梁单元的剪切状态,且不会耗费大量的计算资源,值得注意的是,在对纤维进行非圆截面梁单元划分过程中必须指定第三个节点以确定梁单元的受力方向,而纤维在混凝土基体中杂而无规律分布,难以定点确定单元的第三个节点,而圆截面梁单元由于其截面惯性矩都一样,可以任意指定其受力方向,这也正是为什么将不同种类纤维简化为圆形截面的重要原因。

为了模拟混凝土在受载后宏观破坏状态以及裂纹分布,LS-DYNA 通过添加关键字 *MAT_ADD_EROSION 进行多种混凝土失效准则控制,其以应力和应变失效为主,实验高强钢纤维混凝土板在接触爆炸下以冲剪破坏、背爆面拉伸破坏为主,故采用最大拉应力和最大等效应变联合控制单元失效,当单元计算对应的相关选项值达到阈值时(取最大拉应力为 4.84 MPa,最大等效塑性应变为 0.001),单元删除不再参与后续过程的计算。纤维与基体间的接触采用 LS-DYNA 提供的关键字 *CONSTRAINED_BEAM_IN_SOLID 进行控制,设置关键字中的 AXFOR 为负数,进行自定义粘接滑移曲线编程,实现对两者之间的滑移位移进行控制。

2 数值模型有效性验证

为验证所建三维细观数值模型的正确性,需通过钢纤维高强混凝土板的爆破实验,对其动态响应和破坏规律进行对比分析。

2.1 实验概况

考虑模型相似、几何相似和边界条件相似,按照《钢纤维混凝土标准规范》^[14]设计并制作了钢纤维体积含量分别为 0.6%、1.2% 和 1.8% 的钢纤维高强混凝土无腹筋简支正方形板,基体强度等级为 C60,配比为:水泥 57.6 kg(采用 P. I42.5 级硅酸盐水泥),砂 48 kg,直径在 18 ~ 22 mm 的硬骨料为 72.5 kg,水 16.8 kg,减水剂 0.742 kg,增强体材料为细长直钢纤维,长为 40 mm,直径为 1 mm,重量分别为 2.4 kg、4.8 kg 和 7.2 kg,钢筋型号采用 Q235 $\phi 8@130$ 单面双向配筋,保护层厚度为 30 mm,模型尺寸为 750 mm \times 750 mm \times 90 mm,净跨为 690 mm,模型在自然条件下养护 28 d。实验模型尺寸、测试应变片及加速度传感器布置如图 2 所示。

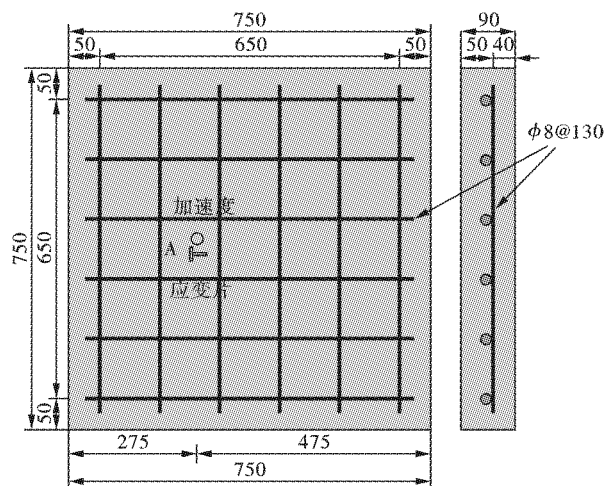


图 2 模型设计及传感器布置(单位:mm)

Fig. 2 Model design and sensor layout(unit:mm)

爆破实验于武汉科技大学校内中铁广州工程局-武科大爆破技术研究中心的空气爆炸罐中进行,将模型运送于爆炸罐中简支悬空固定在钢架上,采用猛炸药太安并转换为对应的 TNT 当量为 160 g,使炸药接触放置在板迎爆面正中心位置,并采用一

段毫秒导爆管雷管引爆,爆破装置如图3所示。

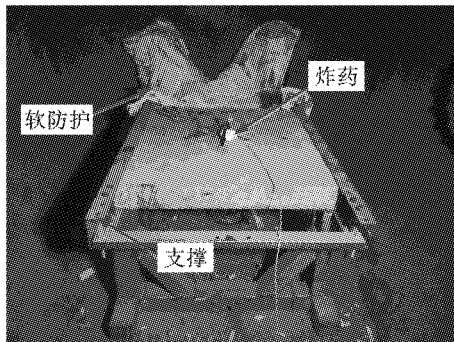


图3 爆破装置
Fig. 3 Blasting test

2.2 数值计算概况

以钢纤维体积含量为0.6% SFRC板为对象,因钢纤维随机分布于板结构中,不能简化为1/4模型计算,故建立与实验比例为1:1的数值模型,钢纤维投放数量为9673根,投放模型如图4所示,几何模型、材料模型都采用国际单位制(kg-m-s),实验板以简支形式固定在钢架上,模拟边界条件以垂直于板面施加固定约束,左右各约束3 cm,实际药包为球形药包,为了便于优化网格,避免畸形单元产生,模型以相似比例简化为矩形体,药量为160 g,由于采用ALE流固耦合方式对板进行抗爆分析,需建立包含SFRC板、炸药、钢筋在内的空气域,三维细观数值模型如图5所示,模型单元总数量为597 229,其中实体单元有511 496个,梁单元有20 126个。

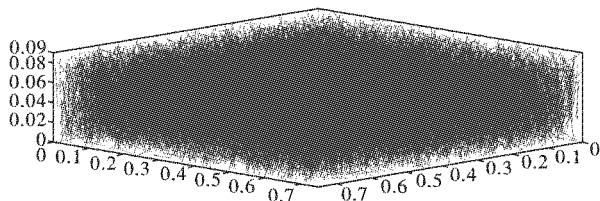


图4 钢纤维投放模型
Fig. 4 Steel fiber random drop model

2.3 SFRC板爆破实验与数值模拟对比分析

2.3.1 宏观破坏现状对比分析

数值计算与SFRC板宏观破坏现象相比较,如图6所示。二者迎爆面和背爆面裂纹分布走向基本相似,板中部裂纹贯通构成宏观裂缝,支撑附近形成剪切裂纹,多以环状形式展开,且在未支撑两端部由于应力波的反射及叠加效应,产生了弧状拉伸裂纹,离药包最近板中部局部冲切形成贯穿空洞,背爆面裂纹呈放射状分布,迎爆面形成锥形漏斗坑,计算爆坑直径16 cm,以爆坑与剥落坑交界面测其爆坑深

度为3.8 cm,背爆面层裂直径范围在30~33 cm之间,剥落厚度为5.2 cm,计算爆炸坑和剥落坑直径较实际结果稍偏大,计算相对误差最大为7.3%,证明三维细观数值模型可以较好的模拟SFRC板在爆破时的宏观破坏。观察计算破坏模型可以发现模拟板支座端单元删除较多,原因是建立有限元添加边界条件时将此处节点进行约无法产生变形,应力波在边缘棱角处叠加严重,集中效应强,致使此处单元超过最大拉伸强度而产生破坏。

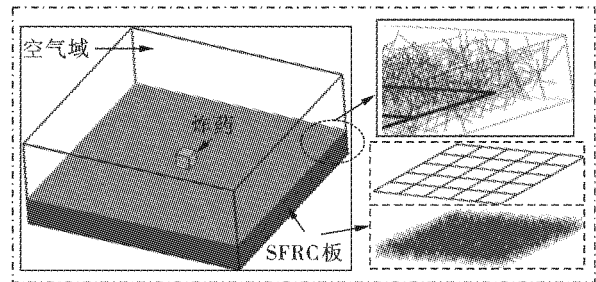


图5 SFRC板计算模型
Fig. 5 SFRC slab calculation model

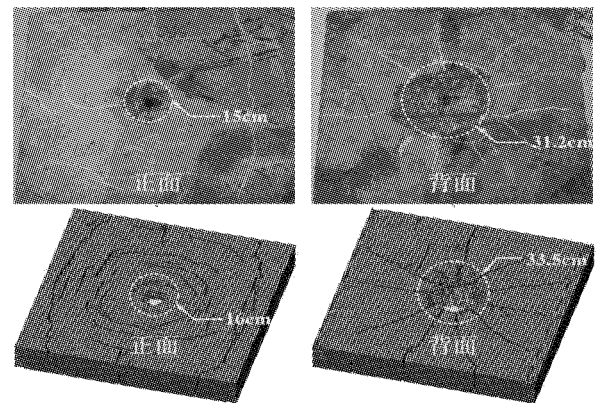


图6 SFRC板实验和模拟宏观破坏图
Fig. 6 SFRC slab test and simulation comparison

2.3.2 加速度及应变数值对比分析

实验在钢纤维体积含量为0.6% SFRC板背面粘贴加速度和应变片来获取爆炸荷载冲击下结构的动态响应情况,对测得的信号进行去杂降噪获取真实反应,从而分析板的抗爆能力。对板A位置加速度及应变数值计算结果进行提取,将实验同位置加速度和应变动力响应曲线与数值计算的曲线进行对比,实验采样率为128 kHz,模拟以7.8 μs提取一个数据点,绘制100 ms内的数据如图7所示。

加速度主要反应结构振动机制,由图7可知,可观察到炸药爆炸作用结构时,加速度传感器以其较强的灵敏性迅速捕捉到模型的动态响应,由于爆炸大部分能量集中在初始爆炸波波阵面上,且爆炸产

生作用于结构持时极短,故加速度接收信号瞬间达到最大值,峰值较一般荷载更大,而后缓慢进行衰减至平衡状态,数值计算结果和实测结果基本一致,最大峰值呈现在时间轴的下方,即板背爆面法线方向,且实测加速度峰值为 6014 m/s^2 ,模拟加速度峰值为 6232 m/s^2 ,二者相对误差为 3.4%,说明三维细观数值模型可以较好的反映结构受载的振动情况。

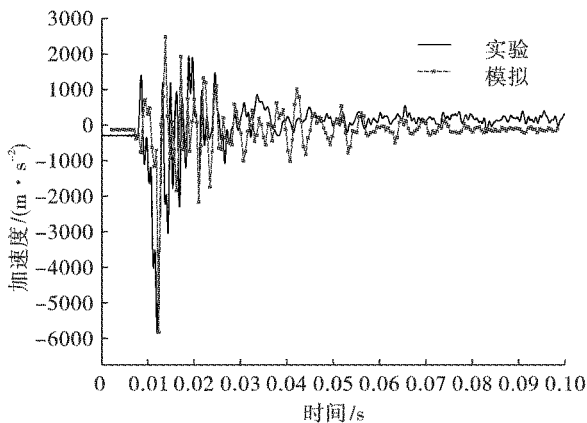


图 7 A 位置实验与模拟加速度对比图

Fig. 7 SFRC slab test and simulation acceleration comparison

应变主要反应结构变形程度,由图 8 可知,数值计算在 A 位置处的应变在 100 ms 内响应不完全,原因是爆炸计算时,此位置处的最大塑性应变已超过规定的最大等效塑性应变阈值 0.001,致使单元删除,后续应变无法获得,只获得 0.052 ms 以内的应变响应,但二者应变响应变化趋势基本相似,都是在接收到爆炸信号变形瞬间上升到最大值,而后缓慢衰减,从应变峰值大小分析,实测峰值为 $1785 \mu\epsilon$,模拟峰值为 $1883 \mu\epsilon$,二者相对误差为 5.4%,进一步说明所建立的三维细观数值模型可以在一定程度上反映结构变形情况。上述产生误差的主要原因是钢纤维混凝土本身是人工合成物,浇筑混凝土工艺和养护条件的差异使混凝土内部介质分布不同,形成含缺陷的不连续体,爆炸应力波能量传播至缺陷位置产生反射和透射发生衰减,而数值计算是将模型简化为有限元,有限元的本质是用连续均匀物体替代现实中的不连续介质,内部不存在微裂纹、孔洞等明显缺陷,爆炸应力波在介质内传播不会发生显著衰减,计算的加速度和应变以及破坏范围较实测值偏大,但整体趋势不变。

为进一步验证模型的正确性与可靠性,通过建立钢纤维体积率分别为 1.2%、1.8% 的 SFRC 高强板有限元模型并与实验宏观破坏形态进行对比,如图 9 所示,结合钢纤维体积含量为 0.6% 的 SFRC 板结果,可知结构破坏主要呈现两种形式,即爆炸贯穿

和局部震塌效应。体积率为 0.6% 的 SFRC 板冲剪破坏十分严重,药包中心周围环向裂纹居多,爆炸震塌现象显著,背部剥落面积较大,且多以径向形式展开,裂纹密度较大;纤维体积率为 1.2% 的 SFRC 板破坏稍缓,迎爆面裂纹密度较 0.6% 相当,爆坑直径为 14.2 cm,背爆面层裂范围在 25 ~ 28 cm 之间,计算直径分别为 15.5 cm 与 28.5 cm,相对误差为 8.5% 和 11.2%;纤维体积率 1.8% 的 SFRC 板裂纹密度整体分布较 0.6% 含量明显减少,背部表现为震塌效应,层裂直径减小到 23 cm 左右,剥落厚度为 4.8 cm,且产生的碎块扔残留在纤维之间,碎渣分布较集中,模拟背爆面破坏形式与实验基本一致,裂纹条数及长度减小明显,边缘弧状条裂纹消失,说明纤维含量的增大使得板临空面抗拉强度增大,增强了结构抗裂性。从整体迎爆面爆坑直径和背爆面直径变化趋势分析,随着纤维含量的增加,对迎爆面爆坑破坏直径增强不显著,爆坑深度逐渐减小,但纤维对混凝土基体材料的拉伸增强作用越显著,背爆面抗层裂强度提高,局部抗冲切性能增强,整体抗爆性能增大,计算结果与实验结果吻合程度较高。

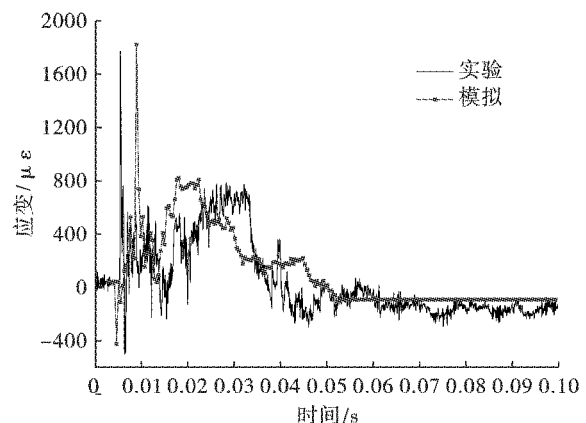


图 8 A 位置实验与模拟应变对比图

Fig. 8 SFRC slab test and simulation strain comparison

3 SFRC 板参数分析

通过纤维体积率分别为 0.6%、1.2% 和 1.8% 的 SFRC 板的爆炸实验,从宏观裂纹分布状态、加速度和应变时程曲线进行测试和分析,将其与数值模拟结果进行对比,发现两者结果吻合度较高,一方面研究了不同纤维体积率 SFRC 板的抗爆性能,另一方面,也验证了所提出的三维数值细观有限元模型的正确性和可靠性强,并可利用此有限元模型进一步开展钢纤维混凝土参数变化对结构抗爆性能影响研究。

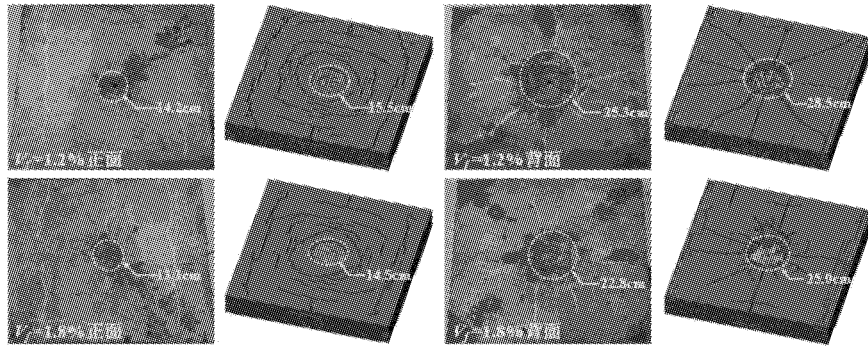


图9 1.2%与1.8%SFRC板实验与模拟结果对比图

Fig. 9 Comparison of SFRC slab test and simulation results of 1.2% and 1.8%

3.1 钢纤维长径比不同的影响

大量研究表明钢纤维长径比 l/d 变化对混凝土结构抗压、抗折、抗拉性能有较大影响而纤维长径比对强冲击荷载下结构的损伤破坏特性研究稍欠缺^[15,16],故以 C60 混凝土为基体,钢纤维体积含量为 0.6% 下考察长径比分别为 30、40、50、60、70 对 SFRC 板在 160 g TNT 当量下抗爆性能的强弱,图 10 给出了各种工况下 SFRC 板破坏裂纹分布详图,同时统计出爆坑和剥落坑直径、深度并计算体积(迎爆面爆坑体积为 V_a ,背爆面剥落坑体积为 V_b)。可以看出随着纤维长径比的增大,爆坑和剥落坑体积减小,两者减小程度不一样,迎爆面锥形坑体积变化程度较小,体积变化几乎表现为直线形式,长径比 70 较 30 最大减小量为 22.3%;背爆面剥落体积变化差异显著,体积最大减小量为 50%,剥落体积与纤维长径比变化并不成线性关系,表现为水平-下降-水平形式,长径比 40 较 30 变化量为 2.6%,60 较 40 变化量为 49%,70 较 60 减小仅仅为 6.7%,说明纤维长径比的增大对 SFRC 板层裂有一定抑制作用,但当长径比超过 60 后,增强作用缓慢降低,抑制效果不明显。

从实验和计算知接触爆炸下结构响应在毫秒时间内基本完成,最大峰值呈现时间在微秒级,故截取 2 ms 时间内加速度响应曲线,并取其峰值绘图如 11 所示,可知各 SFRC 板振动趋势基本一致,随着长径比的增大,位移下降形式与剥落坑体积下降形式相同,长径比为 40 较 30 减少 9%,50 较 40 减少 9%,60 较 50 减少 16.5%,70 较 60 下降 6%,造成上述现象原因是钢纤维长度的增加,混凝土与纤维之间的锚固效应增大,爆炸应力波传播至混凝土与纤维之间由于波阻抗的不同产生反射和透射,反射波和投射波能一部分被纤维与混凝土之间的滑移摩擦而消耗掉,而纤维的增长,克服静摩擦阻力做功需要能量较大,摩擦耗能越显著,直接作用混凝土基体上的

能量减小,引起结构脆性开裂部位减小,从而提高钢纤维对混凝土的增强效果,但随着钢纤维的长度进一步增大,单根纤维所占用混凝土体积空间就越大,投放判定重叠机制就越困难,循环次数加大,纤维在基体中分布不均匀,对爆炸应力波的衰减作用降低,相对的抑制结构变形能力减弱。综合经济效益和施工成本考虑,本文研究钢纤维长径比控制在 60 以内最适宜。

l/d	迎爆面	背爆面	V_a/cm^3	V_b/cm^3
30			233.48	1941.51
40			214.36	1891.15
50			198.58	1305.84
60			173.73	987.32
70			181.37	920.90

图 10 长径比变化 SFRC 板破坏形态

Fig. 10 SFRC slab aspect ratio effect

3.2 板厚变化对抗爆性能的影响

由《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)规范可知,我国现行钢筋混凝土楼板厚度大都在 80~160 mm 之间,一般民用建筑楼板在 60 mm 以上,工业建筑楼板和车型道下楼板最低分别为 70 mm、80 mm,双向板厚度都在 80 mm 以上,故本节保持其他参数不变的情况下,针对楼板厚度变化为 9 cm、10 cm、11 cm、12 cm、13 cm 下结构抗爆性能优劣进行模拟研究,给出各板宏观破坏裂纹分布如图 12。宏观裂纹分布图直观展现了 SFRC 板厚度

变化对结构整体抗爆性能的影响,板厚较小时,背部层裂范围较大,应力波反射引起的拉伸裂纹较多,贯穿孔洞较大,正面剪切裂纹宽而密,随着板厚度的增加,正面裂纹逐渐减少,爆坑体积减小,背爆面表现为从贯穿转化为震塌,震塌程度逐渐变轻,裂纹由密集发散转为少而稀疏。从爆坑体积和剥落坑体积变化知,9 cm 和 10 cm 厚度迎爆面体积不变,但背爆面显著降低,下降了 20%,11 cm 较 10 cm 分别下降 5.6% 和 23.6%,12 cm 较 11 cm 分别下降 -0.34% 和 20%,13 cm 较 12 cm 分别下降 9.5% 和 14.6%,

随着板厚度的增大,结构抗爆能力逐渐增强,但增强幅度成先高后低的形式,解释其现象是随着结构厚度的增大,爆炸应力波传播路径增大,到达临空面的时间增长,应力波强度降低,在结构内循环反射叠加减弱效应增大,进而使临空面破坏程度较小,由于产生爆炸冲击波总药量相同,总能量不变,超压持时和冲量不变,随着板厚度的增大,引起结构背部破坏的能量变为爆炸应力波首峰峰值,因此剥落坑体积变化量缓慢减小。

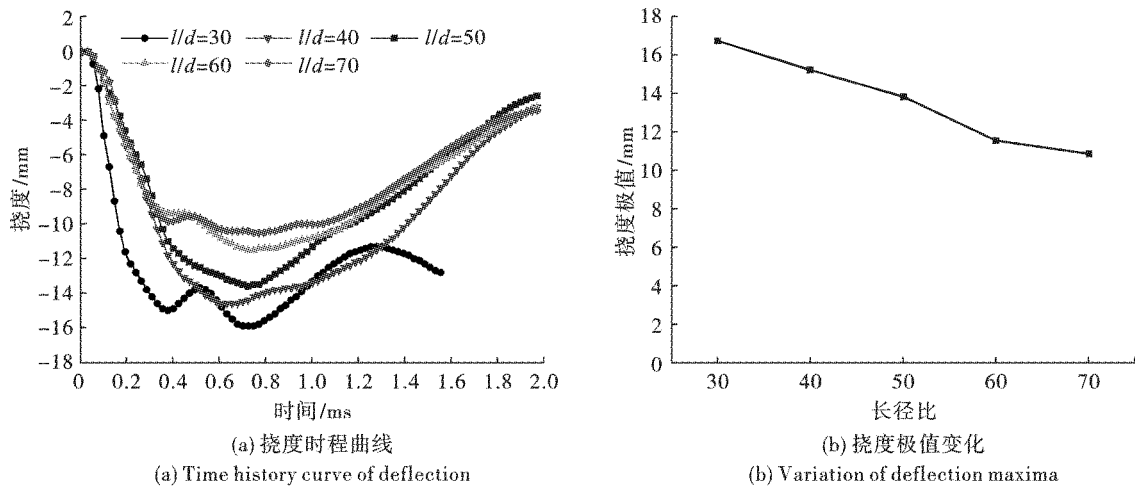


图 11 不同长径比下 SFRC 板 A 位置挠度时程曲线

Fig. 11 Time-history curve of position deflection of SFRC slab A with different aspect ratios

板厚/cm	迎爆面	背爆面	V_a/cm^3	V_b/cm^3
9			214.36	1891.15
10			214.36	1520.16
11			205.50	1160.74
12			209.03	922.09
13			189.44	787.90

图 12 厚度变化 SFRC 板破坏形态

Fig. 12 Failure pattern of SFRC slab with thickness variation

截取 SFRC 板在 2 ms 以内 A 位置挠度变化时程图,取其极限值用折线图绘制如图 13。

从挠度时程曲线知,各板挠度响应变化基本一致,9 cm 板厚在 2 ms 内位移回弹过程延迟于其他

板,原因是板在此位置产生了严重的塑形永久变形,结构振动短时间内无法回到平衡位置,不会引起结果的整体偏差。随着厚度的增大,结构位移极值点越来越向左偏移,是因为厚度增加使纤维投放空间变大,纤维投放均匀程度越高,不易成团,易于爆炸应力波能量传播和叠加,质点产生振动时间就越短。从挠度极值变化曲线知,挠度随厚度增大而越来越小,但减小幅度越来越缓慢,10 cm 较 9 cm 减小 20%,11 cm 较 10 cm 减小 40%,12 cm 较 11 cm 减小 19%,13 cm 较 12 cm 减小 14%,结构变形程度趋于平缓,产生此原因是板厚的增加使得结构整体刚度增强,结构抗变形能力增大,但边界条件影响使混凝土厚度变化对结构抗爆增强程度一定限制。综合考虑结构重量和抗爆性能,研究结构控制在 11 cm 左右最适宜。

综合以上两种参数变化对 SFRC 板抗爆性能的影响,纤维体积分量和爆炸形式相同下,结构抗爆性能随着长径比、板厚度的增加而增大,损伤程度逐渐减小,迎爆面漏斗坑体积变化微小,背部剥落坑体积变化较明显,最大减小程度分别为 52%、58%,说明

板厚度变化对 SFRC 板抗爆性能影响较大,其次为长径比变化。在实际防护工程的抗爆考虑中,应在考虑经济效益的基础上,合理选取参数,使得结构抗

爆性能最佳,根据研究,钢纤维长径比为 60、板厚为 11 cm 时,钢纤维高强混凝土板抗爆性能最优。

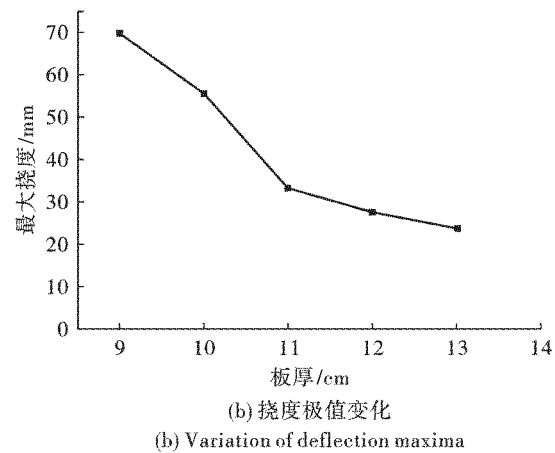
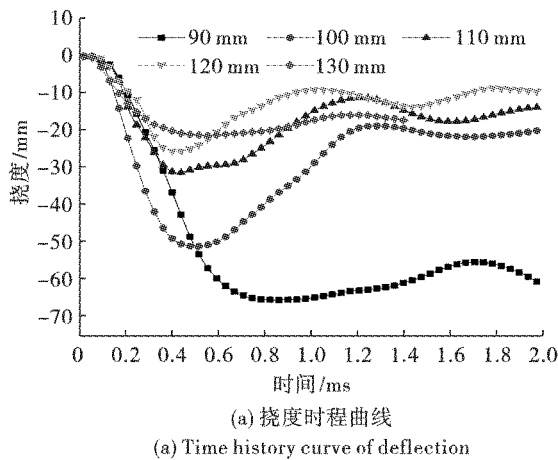


图 13 不同厚度下 SFRC 板 A 位置挠度时程曲线

Fig. 13 Deflection time history curve of A position of SFRC slab under different thickness

4 结论

借助数值软件 MATLAB 编程实现钢纤维在混凝土基体中的随机投放,将生成的几何模型导入到非线性有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 中建立了包含钢纤维、钢筋和混凝土的三维细观数值模型,对不同钢纤维体积分量的 SFRC 板进行接触爆炸计算,并与不同钢纤维体积分量 SFRC 板爆破实验结果进行对比分析,验证了三维细观数值模型的有效性和可靠性,在此基础上,进一步分析了纤维长径比、板厚变化对 SFRC 板抗爆性能的影响,得到如下结论:

(1) 运用改进的交叉判重方法可高效快速的实现纤维在混凝土基体中的随机分布,避免纤维在几何空间局部位置产生结团和重叠现象,使得模型更加接近工程实际。

(2) 采用本文所建立的三维钢纤维混凝土细观数值模型并考虑两者之间的摩擦效应,可以较好的反映爆炸荷载作用下 SFRC 板损伤破坏行为,与实验结果吻合度较高,也表明一定体积分量的纤维掺入可显著减轻结构背部震塌破坏程度,1.8%震塌直径较 0.6%降低 36%,以工程爆破漏斗体积衡量,相对减少 55%。

(3) 长径比在 30 ~ 70 范围变化时,迎爆面爆坑直径几乎不变,爆坑深度稍有减小,爆坑体积最大变化为 22.3%,背爆面层裂范围逐渐减小,长径比为 60 时对结构抗爆性能增强作用较明显。混凝土板厚度在 9 ~ 13 cm 时,迎爆面变化趋势和长径比变化较一致,锥形坑体积最大减小 11.8%,剥落坑体积

变化也较显著,综合考虑板厚为 11 cm 最适宜。

参考文献 (References)

- [1] LUCCIONI B, ISLA F, CODINA R, et al. Effect of steel fibers on static and blast response of high strength concrete [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017; S0734743X16300562.
- [2] ZHANG Y, ZHAO, LI Y, et al. Study on the local damage of SFRC with different fraction under contact blast loading [J]. *Computers & Concrete*, 2018, 22(1): 63-70.
- [3] FOGIAR M, HAJEK R, FLADR J, et al. Full-scale experimental testing of the blast resistance of HPC and UHPC bridge decks [J]. *Construction & Building Materials*, 2017, 145: 588-601.
- [4] LI J, WU C, HAO H, et al. Experimental and numerical study on steel wire mesh reinforced concrete slab under contact explosion [J]. *Materials & Design*, 2017, 116: 77-91.
- [5] 龙 源, 纪 冲, 万文乾, 等. SFRC 及混凝土遮弹板接触爆炸性能的数值分析 [J]. *弹道学报*, 2006, 18(2): 64-68.
- [5] LONG Yuan, JI Chong, WAN Wen-qian, et al. Numerical analysis of anti-explosion ability of SFRC and concrete slabs [J]. *Journal of Ballistics*, 2006, 18(2): 64-68. (in Chinese)
- [6] 李 楠, 赵均海, 吴 赛, 等. 钢纤维高强混凝土墙基于 CONWEP 的爆炸响应 [J]. *西安建筑科技大学学报 (自然科学版)*, 2014, 46(6): 833-838, 855.
- [6] LI Nan, ZHAO Jun-hai, WU Sai, et al. Blast response of steel fiber reinforced high strength concrete walls based

- on CONWEP[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2014, 46(6) :833-838,855. (in Chinese)
- [7] 姜天华,王 威,杨云锋,等. 钢纤维混凝土箱梁在爆炸荷载作用下的动态响应[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(9) :50-53.
- [7] JIANG Tian-hua,WANG Wei,YANG Yun-feng,et al. Dynamic response of steel fiber reinforced concrete box girder under explosion load[J]. China Concrete and Cement Products,2019(9) :50-53. (in Chinese)
- [8] 薛 兵. 基于细观尺度的钢纤维混凝土损伤破坏数值模拟研究[D]. 北京:中国矿业大学,2017.
- [8] XUE Bing. Numerical simulation of damage and failure of steel fiber reinforced concrete based on meso-scale[D]. Beijing:China University of Mining and Technology 2017. (in Chinese)
- [9] 张凤国. 动荷载作用下混凝土靶板损伤破坏的数值分析[J]. 兵工学报,2009,30(9) :1177-1180.
- [9] ZHANG Feng-guo. Numerical analysis of damage and failure of concrete target plate under dynamic load[J]. Acta Armamentarii,2009,30(9) :1177-1180. (in Chinese)
- [10] 张文华,张云升,陈振宇. 超高性能混凝土抗缩比钻地弹侵彻试验及数值仿真[J]. 工程力学,2018, 35(7) :167-175,186.
- [10] ZHANG Wen-Hua,ZHANG Yun-shen,CHEN Zhen-yu. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete [J]. Engineering Mechanics, 2018(7) :167-175,186. (in Chinese)
- [11] 任根茂,吴 昊,方 秦,等. 普通混凝土 HJC 本构模型参数确定[J]. 振动与冲击,2016,35(18) :9-16.
- [11] REN Gen-mao,WU Hao,FANG Qin. Determinations of HJC constitutive model parameters for normal strength concrete [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(18) :9-16. (in Chinese)
- [12] 林 琛,徐建军,杨晋伟. 基于 HJC 模型的钢筋混凝土侵彻仿真失效准则与参数[J]. 探测与控制学报, 2017,39(2) :100-105.
- [12] LIN Chen,XU Jian-jun,YANG Jin-wei. et al. The failure criterions and parameters of HJC model based perforation simulation [J]. Journal of Detection & Control, 2017, 39(2) :100-105. (in Chinese)
- [13] GAO S,WANG Y B,LI X F. Numerical analysis of deformation and failure of penetration into concrete target by projectile [J]. Advanced Materials Research, 2013, 804:292-297. (in Chinese)
- [14] 中国工程建设协会标准. JGT 472—2015 钢纤维混凝土标准规范[S].
- [14] China Engineering Construction Association Standard. JGT 472—2015 Standard Specification of Steel Fiber Reinforced Concrete[S]. (in Chinese)
- [15] 梁少阳,金宝宏,姚宇峰,等. 钢纤维长径比对 C60 混凝土抗裂性能的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版),2018,43(2) :641-647.
- [15] LIANG Shao-yang,JIN Bao-hong,YAO Yu-feng. et al. Effect of steel fiber's length-diameter ratio on anti-cracking property of C60 concrete [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2018, 43(2) :641-647. (in Chinese)
- [16] 李传习,石家宽,聂 洁,等. 平直型钢纤维掺量与长径比对超高性能混凝土性能的影响[J]. 硅酸盐通报,2019,38(9) :2947-2954.
- [16] LI Chuan-xi,SHI Jia-kuan,NIE Jie, et al. Effect of straight steel fiber volume content and length-diameter ratio on properties of ultra-high performance concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(9) :2947-2954. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认,自2019年12月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目,即《中国学术期刊(网络版)》(简称CAJ-N),统一连续出版物号ISSN 2096-418、CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后,将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”,其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象,凡已投《爆破》的稿件,在未确认录用或退稿前,请勿再投他刊!

《爆破》为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中文科技期刊数据库》、“万方数据——数字化期刊群”、维普网和超星学术期刊“域出版”平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。