

# 钢纤维高强混凝土墙基于 CONWEP 的爆炸响应

李楠<sup>1</sup>, 赵均海<sup>1</sup>, 吴赛<sup>1</sup>, 王娟<sup>1</sup>, 施明君<sup>2</sup>

(1. 长安大学建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 西安建工站改项目建设有限公司, 陕西 西安 710004)

**摘要:** 针对爆炸荷载下的钢纤维高强混凝土墙, 采用显式动力有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA 建立了墙体 1/4 模型, 对墙体在爆炸荷载下的动力响应和破坏形态进行模拟分析. 材料模型采用 J-H-C 模型, 该模型考虑了损伤和应变率效应, 模型参数利用文献试验数据计算得出, 爆炸荷载采用 CONWEP 爆炸模型, 使用 \*LOAD\_BLAST 关键字加载. 利用数值模型分析了不同折合距离下墙体的破坏模式以及墙体厚度、高跨比、边界条件和折合距离等墙体动力响应的影响因素, 结果表明, 折合距离较小时墙体发生剪切破坏, 折合距离较大时墙体发生弯曲破坏, 此外, 墙体厚度、边界条件、高跨比和折合距离均对其动力响应产生明显的影响, 与钢筋混凝土墙体对比分析发现同等条件下钢纤维高强混凝土墙体中心位移值较小, 体现了钢纤维高强混凝土较高的抗拉强度和抗压韧性对其抗爆能力的显著增强作用.

**关键词:** 钢纤维高强混凝土 (SFRHSC); J-H-C 模型; 数值分析; 动力响应; 破坏模式

**中图分类号:** TU377.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2014)06-0833-06

钢纤维高强混凝土 (steel fiber reinforced high strength concrete, 简称 SFRHSC) 是在高强混凝土中掺入乱向分布的短钢纤维而成的一种复合材料. 在爆炸荷载作用下, 乱向分布的短钢纤维阻碍了混凝土内部微裂缝的扩展、宏观裂缝的发生, 从而显著提高了材料的抗拉强度和抗压韧性. 由于钢纤维高强混凝土在防护工程中有广阔的应用前景, 其抗爆性能的研究受到了世界各国的重视<sup>[1-5]</sup>, 对此进行了很多研究, 严少华<sup>[6-7]</sup>对钢纤维高强混凝土进行了单轴压缩试验和一级气体炮平板撞击试验, 给出了高压状态方程; 许金余<sup>[8]</sup>对钢纤维混凝土板抗爆局部破坏作用进行了试验研究, 研究发现钢纤维的加入提高了结构的整体性和抗震塌能力; 焦楚杰<sup>[9-10]</sup>对钢纤维混凝土、聚丙烯纤维高强混凝土等进行了抗震塌试验和抗爆数值模拟研究, 研究表明钢纤维含量的增加可以提高抗爆性能; Lai S.H.<sup>[11]</sup>对在接触爆炸下的钢纤维增强、碳纤维增强、玻璃纤维增强钢筋混凝土板进行了研究, 表明钢纤维增强混凝土抗爆防护能力最好.

爆炸荷载作用下构件的破坏机理十分复杂, 试验方法为主要研究手段, 而爆炸过程因其持时短、瞬时能量巨大并且易受环境影响因素的特点, 使得实验数据的准确采集及分析存在很大的难度, 数值模拟分析方法可以通过较为快速和精确的模拟分析, 直观地展示出构件的变形及应力变化. 钢纤维高强混凝土目前在构件的抗爆动力响应方面的研究还比较欠缺, 本文采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对钢纤维高强混凝土墙在不同折合距离下的抗爆炸动力响应进行数值模拟研究, 并比较分析各影响因素对构件动态响应的的影响, 研究发现不同折合距离下构件呈现不同的破坏形态, 墙体的厚度、高跨比和边界条件均对墙体抗爆能力有较大影响. 研究为钢纤维高强混凝土防护墙的抗爆研究提供一定的参考价值.

## 1 爆炸荷载

数值模拟中爆炸荷载加载方法主要有三种:

(1) 建立炸药、空气和构件的模型, 添加关键字 \*CONCTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID 和 \*ALE 来实现, 流固耦合和建模的复杂性使该方法需要大量的计算时间.

(2) CONWEP 经验爆炸模型, 添加关键字 \*LOAD\_BLAST, 配合 \*LOAD\_SEGMENT\_SET、\*DEFINE\_CURVE 和 \*SET\_SEGMRNT 使用, 加载方便, 无需建立划分爆炸场网格, 模型计算省时.

(3) 时间荷载曲线加载, 查询 TM5-1300<sup>[5]</sup>得到爆炸持时和爆炸压力峰值, 定义数组或曲线进行加载.

文献[12]通过研究验证了 CONWEP 方法的可靠性, 鉴于该算法效率较高, 本文采用 COMWEP 经验爆炸模型加载, 在关键字 \*LOAD\_BLAST 中定义等效 TNT 质量, 起爆点三维坐标值, 爆炸初始时间, 单位制的选择及单位转换系数. 该关键字卡片如表 1, 本文中将单位制统一至 g-mm-ms-N-MPa.

收稿日期: 2014-05-29

修改稿日期: 2014-12-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(41202191); 高等学校博士学科点专项科研项目(20110205130001); 陕西省自然科学基金资助项目(2011JM7002); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2013G2283007)

作者简介: 李楠 (1987-), 女, 博士研究生, 主要研究结构工程抗爆设计理论. E-mail:13488358907@163.com

表 1 关键字\*LOAD\_BLAST 卡片  
Tab.1 The cards of keyword \*LOAD\_BLAST

卡片 1	变量	WGT	XBO	YBO	ZBO	TBO	IUNIT	ISURF
	取值	82.19	6700	0	0	0	5	2
卡片 2	变量	CFM	CFL	CFT	CFP			
	取值	2.21e-3	3.28e-3	1	145			

注: 其中, WGT 为等效 TNT 质量, XBO、YBO、ZBO 为起爆点的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴的三个坐标点, TBO 为起爆时间, IUNIT 为单位制选项, 默认为 2(m·kg·s·Pa), ISURF 为爆炸类型, 默认为 2 (全球型 TNT 空中爆炸), CFM、CFL、CFT 和 CFP 分别为自选单位制的重量、长度、时间和应力单位转换系数<sup>[13]</sup>.

表 2 爆炸荷载  
Tab.2 Blasting load

荷载	BL1	BL2	BL3	BL4	BL5	BL6	BL7	BL8
$Z/m \cdot kg^{-1/3}$	0.5	0.75	0.85	1	1.15	1.25	1.35	1.5
$W/kg$	1000	296	203.5	125	82.19	64	50.8	37.04
$R/m$	5	5	5	5	5	5	5	5

Hopkinson 于 1915 年提出立方根比例相似定律<sup>[14]</sup>, 指出同种炸药若装药几何形状相似, 尺寸不同, 在同样的大气环境中发生爆炸时, 相同的比例距离  $R/\sqrt[3]{W}$  下产生的爆炸波是相似的. TM5-1300<sup>[5]</sup>中将利用该定律引入折合距离  $Z$ :

$$Z = R / W^{1/3}$$

(1)

式中:  $R$  为构件与爆心的距离,  $W$  为等效 TNT 炸药的质量. 在炸药当量较大时, CONWEP 加载适宜于中远距离下结构响应的分析<sup>[12]</sup>, 因此本文选用的爆炸荷载取值详见表 2.

2 材料模型及参数确定

2.1 J-H-C 本构模型

ANSYS/LS-DYNA 中的材料模型 Type111: \*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE, 简称 J-H-C 模型, 由于综合考虑了大应变、高应变率、高压效应, 同时结合损伤理论考虑了材料的拉伸脆断行为, 适合用于描述钢纤维高强混凝土在大应变下的非线性变形及断裂特性.

(1) 屈服面方程以规范化等效应力 (真实应力和静态强度之比) 描述<sup>[15]</sup>:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}](1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*)$$

(2)

式中:  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $N$  均为材料常数;  $\sigma^* = \sigma / f_c$ ,  $p^* = p / f_c$ ,  $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$ ,  $\sigma$  为实际等效应力;  $p$  为实际压力;  $f_c$  为混凝土材料的单轴抗压强度;  $\dot{\varepsilon}^*$  为等效应变率,  $\dot{\varepsilon}$  是真实应变率,  $\dot{\varepsilon}_0$  是参考应变率.

(2) 损伤演化方程以等效塑性应变和塑性体积应变的累积表示为:

$$D = \sum (\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p) / (\varepsilon_p^f + \mu_p^f)$$

(3)

式中:  $\Delta \varepsilon_p$  及  $\Delta \mu_p$  分别为等效塑性应变增量和塑性体积应变增量;  $\varepsilon_p^f$  及  $\mu_p^f$  为常压下破碎的等效塑性应变和塑性体积应变.

(3) 状态方程分别在弹性区、破碎区和压实区将材料的压力体积关系描述为:

$$P = \begin{cases} K_a \mu & (0 \leq \mu \leq \mu_{crush}) \\ P_{lock} + (P_{lock} - P_{crush})(\mu - \mu_{lock}) / (\mu_{lock} - \mu_{crush}) & (\mu_{crush} \leq \mu \leq \mu_{lock}) \\ K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 & (\mu > \mu_{lock}) \end{cases}$$

(4)

式中:  $\mu$  为体积应变,  $P_{crush}$ 、 $\mu_{crush}$  分别为压溃点的压力和体积应变;  $P_{lock}$  和  $\mu_{lock}$  分别为材料压实点的压力和体积应变;  $\bar{\mu}$  为修正的体积应变;  $K_a$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  为材料参数. 且有:

$$\mu_{lock} = \rho_{grain} / \rho_0 - 1$$

(5)

$$\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_{lock}}{1 + \mu_{lock}}$$

(6)

2.2 参数确定

由于高应变率下材料实验数据的缺乏, 大部分学者在使用 J-H-C 本构时采用了 Holmquist 的原始参数, 限制了该模型在动载情况下的使用, 文献[6]采用内径 57 mm 的一级气体炮对钢纤维体积率为  $V_f$  为 3% 的钢纤维高强混凝土试件进行了平板撞击试验, 应变率高达  $10^5 \text{ s}^{-1}$ , 试验中钢纤维高强混凝土材料的实测密度

$\rho_0=2\,560\text{ kg/m}^3$ , 密实密度  $\rho_{\text{grain}}=2\,753\text{ kg/m}^3$ , 杨氏模量  $E=45.67\text{ GPa}$ , 泊松比  $\nu=0.22$ , 强度  $Y=105\text{ MPa}$ , 钢纤维长径比  $l_f/d_f=20$ , 剪切模量  $G=E/2(1+\nu)=18.7\text{ GPa}$ . 由试验数据拟合得到的三阶段高压状态方程为:

$$P=\begin{cases} 27.2\mu \\ 44\mu-214\mu^2+487\mu^3 \\ 46(\mu-\mu_{\text{lock}})-243(\mu-\mu_{\text{lock}})^2+3086(\mu-\mu_{\text{lock}})^3 \end{cases} \tag{7}$$

将材料参数代入式(5), 可得  $\mu_{\text{lock}}=0.070$ , 此外  $P_{\text{lock}}=3.87\text{ GPa}$ ,  $\mu_{\text{crush}}=0.0028$ ,  $P_{\text{crush}}=0.076\text{ GPa}$ , 由式(4)、(6)、(7)计算可得参数  $K_1=49\text{ GPa}$ ,  $K_2=-278\text{ GPa}$ ,  $K_3=3\,780.5\text{ GPa}$ . 根据钢纤维高强混凝土单轴压缩下应力应变曲线, 取最小断裂应变  $\varepsilon_{f\text{min}}=0.004$ . 钢纤维高强混凝土抗拉强度<sup>[16-17]</sup>  $T=0.9f_s(1+\alpha_s\lambda_t)$ , 而  $f_s=0.35f_{\text{cu}}^{0.61}$ ,  $f_c/f_{\text{cu}}=0.8$ ,  $\alpha_s=0.9$ ,  $\lambda_t=V_f\times l_f/d_f$ , 将材料参数代入计算可得到  $T=9.5\text{ MPa}$ .  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $N$  四个参数参考文献[18]中高强混凝土 J-H-C 模型参数的取值,  $S_{\text{max}}$ 、 $D_1$ 、 $D_2$  三个参数影响较小, 取原文参数值, 最终所有的 J-H-C 模型卡片参数如表 3 所示.

表 3 SFRHSC 的\*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE 参数

Tab.3 Parameters of \*MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE for SFRHSC

卡片 1	变量	RO	G	A	B	C	N	FC
	取值	2.56E-03	1.87E+04	0.93	1.6	0.008	0.79	105
卡片 2	变量	T	EPSO	EFMIN	PC	UC	PL	UL
	取值	9.5	0.001	0.004	76	0.0028	3 870	0.07
卡片 3	变量	SFMAX	D1	D2	K1	K2	K3	
	取值	7	0.4	1	4.90E+04	-2.78E+05	3.78E+06	

注: 关键字卡片中无单位, 各变量的意义和单位在文中均有释义, 此外  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $N$ 、 $D$ 、 $K$  及各应变均为无量纲变量.

由于 J-H-C 模型本身的失效类型参数 FS 与单元失效无相关性, 单元的失效控制需要另外引入 \*MAT\_ADD\_EROSION 销蚀失效准则, 使用材料拉应变失效值控制.

3 数值模型

为与普通钢筋混凝土墙抗爆性能进行对比研究, 参考文献[19]和文献[20]中抗爆墙的尺寸设计方法, 本文所建立起来的模型几何尺寸详见表 4, 高度  $h\times$  跨度  $l\times$  厚度  $d$ , 墙体选用三维实体单元 SOLID 164 并采用映射法对模型划分网格, 网格大小为 20 mm. 利用对称性建立 1/4 模型, 墙体四边固支, 约束边界节点所有自由度, 炸药起爆点设置在墙体右侧距离  $R$  处, 即  $x$  轴正方向上, 模型如图 1 所示.

表 4 墙体数值模型几何尺寸

Tab.4 Geometric dimension of numerical wall models

构件	$h/\text{m}$	$l/\text{m}$	$d/\text{m}$	$h/l$
W1	3	5.1	0.2	0.59
W2	4	5.1	0.2	0.789
W3	5	5.1	0.2	0.989
W4	3	5.1	0.3	0.59
W5	3	5.1	0.4	0.59

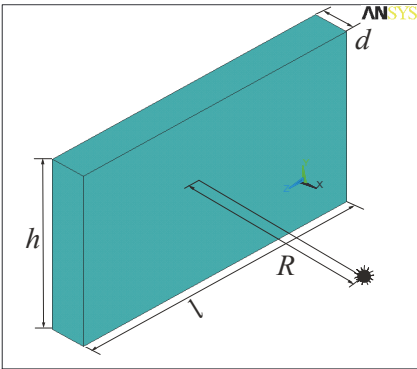


图 1 有限元模型示意图

Fig.1 Sketch map of finite element mode

4 模拟结果分析

计算 W1 构件在 BL1~BL8 八种爆炸荷载作用下的动力响应, 其中折合距离分别为  $0.5\text{ m/kg}^{1/3}$ 、 $0.85\text{ m/kg}^{1/3}$  和  $1.0\text{ m/kg}^{1/3}$  的  $X$  向位移云图如图 2.

观察各个构件的破坏形态发现, 当折合距离  $Z\leq 0.5\text{ m/kg}^{1/3}$  时, 从位移云图中可以看到构件在支座处瞬间脱离飞出, 发生直剪破坏, 固定约束未能有效对构件进行约束, 构件中心虽然也在强大的爆炸荷载下发生的弯曲形式的破坏, 但支座处的失效的发生先于弯曲破坏, 因此属于剪切破坏; 当折合距离满足  $0.5\text{ m/kg}^{1/3}<Z\leq 0.85\text{ m/kg}^{1/3}$  时, 构件在支座处发生部分单元失效, 产生横向裂缝, 并且裂缝向构件中心延伸, 此外在构件跨中也发生弯曲出现了大变形, 最终挠度过大导致中心出现横向的大裂缝, 因此属于弯剪破坏; 当折合距离满足  $0.85\text{ m/kg}^{1/3}<Z\leq 1.0\text{ m/kg}^{1/3}$  时, 构件在爆炸荷载作用下跨中发生了弯曲变形, 并且在上下支座处产生了横向裂缝, 向构件中心斜向延伸, 支座处和跨中少数单元失效, 但构件还未发生整体破坏,

随着跨中位移的不断增大,最终导致构件破坏,属于弯曲破坏.当折合距离满足  $Z > 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$  时,未见单元失效,构件跨中发生的  $X$  轴向位移量均小于 10 mm,属于弹性变形.

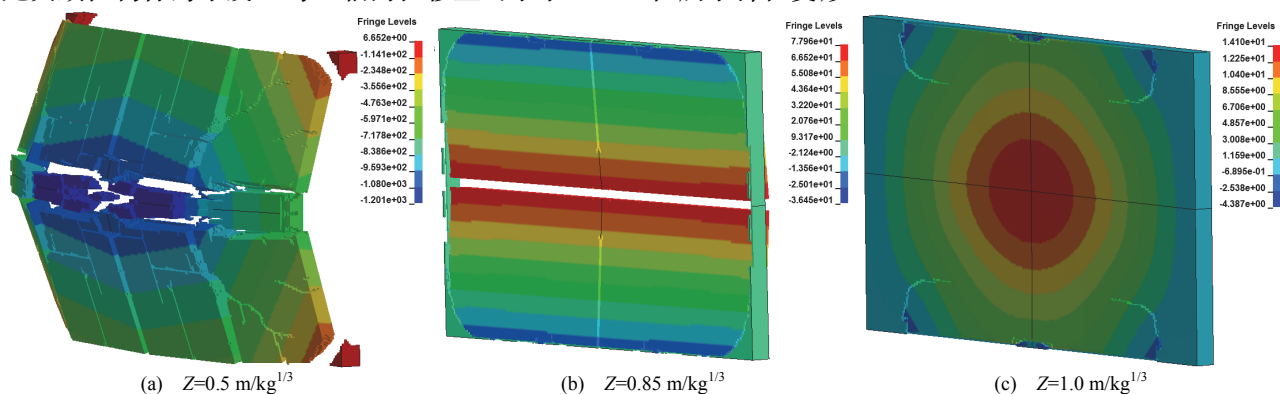


图2 墙中心节点  $X$  方向位移云图

Fig.2  $X$  direction displacement contour of the center node of the wall

建立与文献[20]同样爆炸荷载条件和模型尺寸的钢纤维高强混凝土墙模型,比较普通钢筋混凝土墙的抗爆动力性能,模拟发现墙体跨中位移为普通混凝土墙的 50%,因此较之普通混凝土墙,钢纤维高强混凝土墙具有明显的抗爆优势.

## 5 参数分析

### 5.1 墙体厚度

取构件 W1、W4、W5 并将四周固定约束,在 BL5 荷载条件下各构件跨中节点  $X$  方向位移时程曲线如图 3.

随着墙体厚度的增加,增大了构件的抗弯能力,从图 3 中可以看出跨中位移有着明显的减小,从 10.76 mm, 4.26 mm, 到 2.30 mm,并且随着厚度的增大,墙体达到最大响应的时间缩短,响应周期也相应地减小.因此,墙体厚度的增大有效地增强了抗爆能力.

### 5.2 边界条件

对 W1 构件,取三种不同的边界条件,即 T1:四边固支;T2:上下两对边固支其余两边简支;T3:底边固支其余三边简支约束.在 BL5 荷载条件下跨中及制作附近节点  $X$  方向位移时程曲线如图 4.

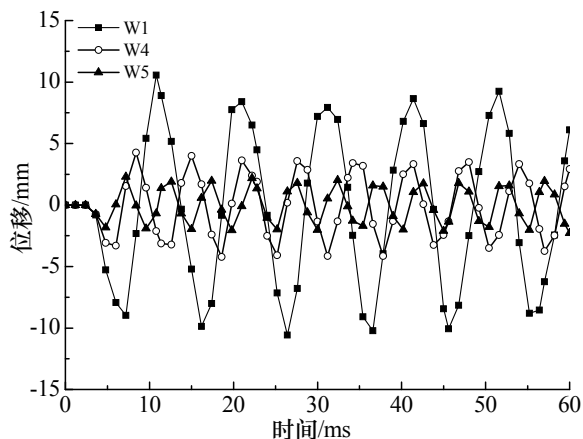


图3 不同墙体厚度时的位移时程曲线

Fig.3 Displacement time history curve of different thickness

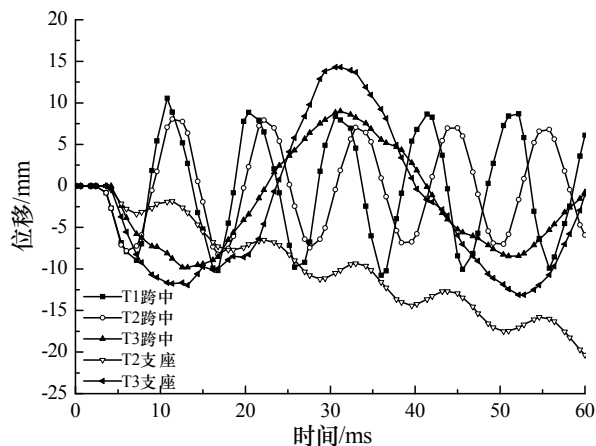


图4 不同边界条件时的位移时程曲线

Fig.4 Displacement time history curve of different boundary conditions

约束为 T1 时,最大位移峰值出现在跨中节点,位移值为 10.76 mm,构件的动力响应处于弹性变化范围内;约束为 T2 时,最大位移峰值偏向支座附近,并且支座附近一小部分单元发生了销蚀,跨中最大位移为 7.60 mm,小于 T1 约束条件下的跨中位移峰值,因为此条件下支座处约束情况的变化,支座附近单元的破坏消耗了一部分爆炸冲击能量;约束为 T3 时,支座处位移峰值达到 14.86 mm,跨中位移为 10.02 mm,底边固支处无单元销蚀现象,其余三边简支处均出现少量的单元销蚀.当约束改变时,可发现有简支约束时靠近简支边的支座附近位移总是稍大于固支边,虽然从耗能角度看,支座附近一小部分单元的销蚀对爆炸能量的吸收起了一定的作用,使得跨中位移减小,但从安全角度而言,固定约束对于构件在爆炸荷载作用下的动力响应更为有利.

### 5.3 高跨比

取构件 W1、W2、W3, 在 BL5 荷载条件下各构件拥有不同的高跨比, 其跨中节点  $X$  方向位移时程曲线如图 5。

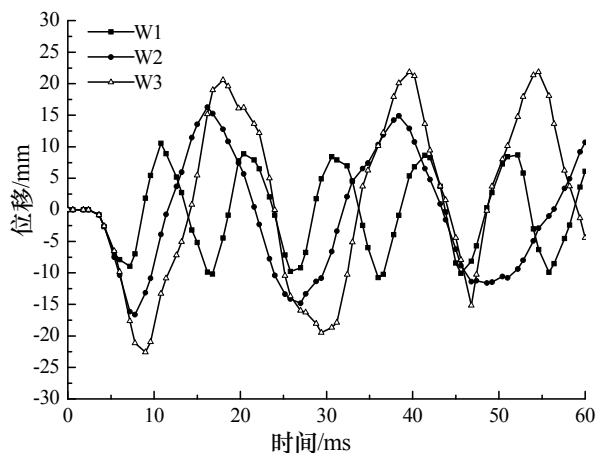


图5 不同高跨比时的位移时程曲线

Fig.5 Displacement time history curve of different depth-span ratio

随着构件高跨比的增大, 跨中位移峰值增大, 从 10.76 mm, 16.63 mm, 到 22.58 mm. 高跨比越大, 动力响应衰减速度越快, 到达最大响应的时间越久, 响应周期也增大. 从高跨比对构件峰值位移及动态响应的影响来看, 该影响因素在墙体抗爆设计时是不可忽视的。

### 5.4 折合距离

取构件 W1 在 BL3、BL4、BL5、BL6 四种不同折合距离的条件下构件跨中节点  $X$  方向位移时程曲线如图 6。

在 BL3 荷载下, 构件产生弯剪破坏, 跨中节点先在  $X$  轴负方向上产生了 25.11 mm 的位移, 而后在  $X$  轴正方向上位移呈线性增长, 这是因为 CONWEP 加载方式是完全模拟炸药爆炸的模型, 当炸药在  $X$  轴正方向距离构件  $R$  发生爆炸时, 冲击波到达构件时跨中向  $X$  轴负方向产生位移, 继而冲击波绕过构件在后方产生绕射超压, 造成朝向  $X$  轴正方向的位移, 并且此时支座处已经发生破坏, 跨中位移不再来回反弹, 而是在构件两个面上超压的作用下, 持续线性地在  $X$  正方向上增长. BL4、BL5、BL6 爆炸荷载下, 随着折合距离的增大, 构件跨中位移逐渐减小, 并且构件在弹性范围内反复振动. 因此折合距离对于墙体在爆炸荷载作用下的动力响应有极为明显的影响。

### 5.5 数值方法的验证

文献[9]对混凝土等级为 C100, 钢纤维体积率为 3% 的钢纤维高强混凝土板进行了爆炸试验, 建立与文中 31 号试件尺寸相同的模型, 并采用本文中的 CONWEP 加载模型及 J-H-C 材料模型对其进行了数值模拟. 模拟结果与试验结果对比发现:

(1) 数值模型中爆炸应力波在钢纤维高强混凝土中的衰减特性与试验中相符, 从构件顶部到背爆面爆炸波强度衰减了 99% 左右。

(2) 构件背爆面的加速度特性与试验相符, 试验测得的加速度为  $7\,213\text{ m/s}^2$ , 本文数值模拟得出的加速度为  $8\,506\text{ m/s}^2$ 。

(3) 试验构件与数值模型的破坏特性相符, 该试验中爆炸发生在构件顶部中心, 与构件相接触, 爆坑大小为  $\phi 38\text{ cm} \times 13\text{ cm}$ , 构件没有整体破坏, 而数值模型的顶部接触部位发生了直径为 400 mm, 深为 200 mm 的销蚀, 并且构件在弹性变形范围内发生了振动, 并未发生整体破坏。

可见本文的数值模型对于混凝土强度等级为 C100, 钢纤维体积率为 3% 的钢纤维高强混凝土构件是正确可靠的。

## 6 结论

本文建立了钢纤维高强混凝土墙 1/4 三维有限元整体式模型, 采用 J-H-C 材料模型, 利用试验结果计算出适合钢纤维高强混凝土的材料参数, 用 CONWEP 爆炸模型进行加载, 并引入销蚀失效准则模拟材料

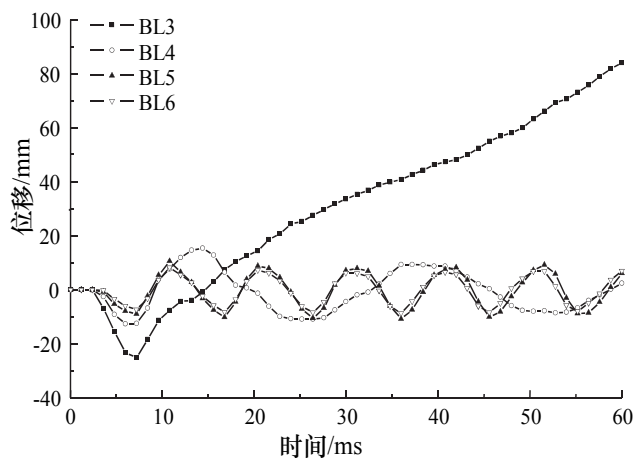


图6 不同折合距离时的时程位移曲线

Fig.6 Displacement time history curve of different scaled distance



的失效,计算了不同尺寸构件在不同爆炸荷载下的动态响应。

(1) 文献中多用 SHPB 试验得出的参数代入数值分析进行模拟,但这些参数属于中应变率范围,本文依据试验计算出的 J-H-C 模型参数适合于高应变率的动态分析,应用于爆炸分析中更为合理。

(2) 模拟构件在爆炸荷载作用下的破坏形态发现,当折合距离  $Z \leq 0.5 \text{ m/kg}^{1/3}$  时,属于剪切破坏;当折合距离  $0.5 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 0.85 \text{ m/kg}^{1/3}$  时,属于弯剪破坏;当折合距离满足  $0.85 \text{ m/kg}^{1/3} < Z \leq 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$  时,属于弯曲破坏;当折合距离满足  $Z > 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$  时,属于弹性变形。

(3) 对墙体厚度、边界条件、高跨比及折合距离四个影响因素进行了分析,增加厚度、减小高跨比、对墙体采用固支约束及确保较小的折合距离都是能使构件在爆炸荷载作用下依然安全的有效方法。

(4) 与同样爆炸荷载条件和模型尺寸的钢筋混凝土墙体对比分析发现,钢纤维高强混凝土墙体中心位移值较小,仅为普通混凝土墙的 50%,具有明显的抗爆优势。

## 参考文献 References

- [1] BONG Youl Bahn, CHENG-TZU Thomas Hsu. Properties of steel fiber reinforced concrete under cyclic loading[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95(2): 178-193.
- [2] MANGAT P S, GURUSAMY K. Long-term properties of steel fiber reinforced marine concrete[J]. Materials and Structures, 1987, 20(118): 273-282.
- [3] SUN W, LUO X, YAN H D, et al. Penetration and blast resistance of high performance stool fiber reinforced concrete[C]// Proceeding of 2nd Asia-Pacific Specialty Conference on Fiber Reinforced Concrete, Singapore, 1999: 197-203.
- [4] LOK T S, XIAO J R. Steel-fiber-reinforced concrete panels exposed to air blast loading proceedings of the institution of civil engineers[J]. Structures and Buildings, 1999, 134(9): 319-331.
- [5] U. S. Department of the Army Technical Manual, TM5- 1300[S]. Washington DC, 1990.
- [6] 严少华, 钱七虎, 周早生, 等. 高强混凝土及钢纤维高强混凝土高压状态方程的实验研究[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(6): 49-53.  
YAN Shaohua, QIAN Qihu, ZHOU Zaosheng, et al. Experimental study of equation of high-strength concrete and high-strength fiber concrete[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000, 1(6): 49-53.
- [7] 严少华, 钱七虎, 孙伟, 等. 钢纤维高强混凝土单轴压缩下应力-应变关系[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(2): 77-80.  
YAN Shaohua, QIAN Qihu, SUN Wei, et al. Stress-strain relationship of high-strength steel fiber reinforced concrete in compression[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2001, 31(2): 77-80.
- [8] 许金余, 迟维胜, 邵式亮, 等. 爆炸荷载作用下钢纤维混凝土构件试验研究[J]. 工程力学, 2000(S1): 716-721.  
XU Jinyu, CHI Weisheng, SHAO Shiliang, et al. Experimental study of steel fiber reinforced concrete members under blasting load[J]. Engineering Mechanics, 2000(S1): 716-721.
- [9] 焦楚杰, 孙伟, 高培正. 钢纤维高强混凝土抗爆炸研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3): 158-166.  
JIAO Chujie, SUN Wei, GAO Peizheng. Study on steel fiber reinforced high strength concrete subject to blast loading[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3): 158-166.
- [10] 焦楚杰, 孙伟, 高培正, 等. 钢纤维高强混凝土在抗爆工程中的应用[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(5): 168-172.  
JIAO Chujie, SUN Wei, GAO Peizheng, et al. Application of SFRHSC in blast-resistant engineering[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(5): 168-172.
- [11] LAI S H, CHU H C, CHENG D S. Effect of steel, CFRP and GFRP-retrofitted plate on crater of reinforced concrete subjected to contact explosion[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 2009: 363-370.
- [12] 倪晋峰. 单层球面网壳基于 CONWEP 外爆响应分析及试验设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
NI Jinfeng. Response analysis of single-layer reticulated domes subjected to external blast loading using CONWEP and experimental design[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [13] LS-DYNA Version 971 Keyword User's Manual[M]. Livermore Software Technology Corporation(LSTC), USA, 2007, 5.
- [14] HOPKINSON B. British ordnance board minutes, 13565[R]. British Ordnance Office, London, UK, 1915.
- [15] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjective to large strains, high strain rates, and high pressures[C]//The 14th International Symposium on Ballistics, USA: American Defense Preparedness Association, 1993: 591-600.
- [16] 朱海棠, 高丹盈, 汤寄予. 钢纤维高强混凝土的强度指标及其相互关系[J]. 建筑材料学报, 2009, 12(3): 323-327.  
ZHU Haitang, GAO Danying, TANG Jiyu. et al. Strength indexes of steel fiber reinforced high strength concrete and their interrelations[J]. Journal of Building Materials, 2009, 12(3): 323-327.
- [17] 杨萌. 钢纤维高强混凝土增强、增韧机理及基于韧性的设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.  
YANG Meng. Strengthening and toughening mechanism of steel fiber reinforced high-strength concrete and design method based on toughness[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [18] 巫绪涛, 李耀, 李和平. 混凝土 HJC 本构模型参数的研究[J]. 应用力学学报, 2010, 27(2): 340-344.  
WU Xutao, LI Yao, LI Heping. Research on the material constants of the HJC dynamic constitutive model for concrete[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(2): 340-344.

- [2] 赵国裕,姚瑛. 自然、历史、自我——多元背景下塑造城市特色之间[J]. 城市规划, 2006(3):85-88.  
ZHAO Guoyu, YAO Ying. Nature, History and Selfhood: The Strategy for Developing Urban Identity in Current Pluralistic Cultures [J]. City Planning Review, 2006(3):85-88.
- [3] 司马晓,杨华. 城市设计的地方化、整体化与规范化、法制化[J]. 城市规划, 2003(3):63-66.  
SIMA Xiao, YANG Hua. Localization, Integration, Standardization and Legitimation of Urban Design [J]. City Planning Review, 2003(3):63-66.
- [4] 冯贵申,于欣波. 鞍山城市发展空间战略构想[J]. 辽宁建材, 2009(2):53-55.  
FEN Guishen, YU Xinbo. The Strategic Conception of the Development of Anshan City [J]. Liaoning Building Materials, 2009(2):53-55.
- [5] 饶映雪,戴德艺. 自然环境约束下的城市天际线景观组织研究——以南安市为例[J]. 城市问题, 2012(12):12-16.  
RAO Yingxue, DAI Deyi. Landscape organization of city skyline of natural environment—taking Nanan city as an example [J]. Urban Problems, 2012(12):12-16.

## Harmonious but different ——The conception of the urban design in Anshan hi-tech industries development zone

HUANG Minghua, ZHAO Tingting, ZHENG Xiaowei

(School of Architecture, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Anshan high-tech zone, as a national hi-tech industries development zone, are currently faced with severe problems. Firstly, industry development doesn't correspond with the urban function. Secondly, there's no relation between the artificial environment and the natural environment. Lastly, the city spaces fail to inherit the texture. The article takes Anshan hi-tech industries development zone for example, and tries to design a "Harmonious but different" environment. By building bridges between partial and the whole function nations macroscopically. The artificial environment and the natural environment should be highly interrelated at the medium level. Anshan city texture should be inherited at the microscopic level. Thus a harmonious and distinctive urban space environment can be created finally.

**Key words:** harmonious but different; urban design; functional optimization; landscape pattern; space fabric

(本文编辑 沈波)

(上接第 838 页)

- [19] 张风华. 爆炸冲击荷载作用下钢筋混凝土墙的动力响应分析[D]. 西安: 长安大学, 2007.  
ZHANG Fenghua. Dynamic response analysis of reinforced concrete wall under explosive and impact loads[D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [20] 夏志成, 许多, 王静, 等. 结构内爆炸荷载作用下钢筋钢纤维混凝土抗爆墙设计探讨[J]. 工程爆破, 2008, 14(2): 8-11.  
XIA Zhicheng, XU Duo, WANH Jing, et al. Study of blasting wall design under explosion load from its internal structure[J]. Engineering Blasting, 2008, 14(2): 8-11.

## Blast response of steel fiber reinforced high strength concrete walls based on CONWEP

LI Nan<sup>1</sup>, ZHAO Junhai<sup>1</sup>, WU Sai<sup>1</sup>, WANG Juan<sup>1</sup>, SHI Mingjun<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China;

(2. Station Renovation Project Construction co., LTD. of Xi'an Construction Group, Xi'an 710004, China)

**Abstract:** The dynamic response and failure pattern of the SFRHSC wall under explosion load was simulated and was analyzed by using explicit dynamic finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA. The 1/4 wall model is established, and the J-H-C model was used as material model which considered damage and strain rate effect. Model parameters were calculated by using the test of literature data, explosion loaded by CONWEP explosion model by using \*LOAD\_BLAST keyword. Different failure modes under different scaled distance were analyzed and factors like thickness of the wall, depth-span ratio, boundary conditions and scaled distance were considered. The results showed that when the scaled distance was small, shear failure occurred, or when the scaled distance was large, bending failure happens. In addition, thickness of the wall, boundary conditions, depth-span ratio and scaled distance have obvious influence on the dynamic response of SFRHSC walls, and compared with reinforced concrete wall, the displacement in the center of the SFRHSC wall is much smaller under the same condition, which shows the high tensile strength and compressive toughness of SFRHSC wall is significantly enhanced the anti-explosion ability of the wall. The research results of this article can provide certain reference to the design of fender wall.

**Key words:** steel fiber reinforced high strength concrete(SFRHSC); J-H-C model; numerical simulation; dynamic response; failure mode

(本文编辑 桂智刚)