

冲击载荷下玄武岩纤维增强混凝土的动态本构关系

范飞林¹, 叶学华², 许金余^{1,3}, 李为民⁴, 陈 勇⁵

(1. 空军工程大学, 西安 710038; 2. 中国人民解放军 66489 部队, 北京 100144; 3. 西北工业大学, 西安 710072;
4. 中南航空港建设公司, 湖南衡阳 421000; 5. 中国航空港建设第九工程总队, 四川新津 611430)

摘 要: 为了研究玄武岩纤维增强混凝土的动态本构关系, 利用 $\Phi 100$ mm 分离式霍普金森压杆装置, 对玄武岩纤维增强混凝土进行冲击压缩试验, 得到了动态应力-应变曲线, 对试验数据进行了分析, 根据试验结果, 通过叠加应变率强化效应和损伤软化效应, 对混凝土静态 Ottosen 非线性弹性本构模型进行修正, 建立了玄武岩纤维增强混凝土损伤型的动态本构模型, 确定参数并将理论模型计算结果与试验结果进行了对比。研究表明, 玄武岩纤维增强混凝土的动态性能存在明显的应变率强化效应, 动态强度增长因子和峰值应变与应变率对数之间存在近似函数关系; 建立模型的方法可行, 理论模型计算结果与试验结果吻合较好, 建立的本构模型可用来描述玄武岩纤维混凝土的动态力学行为, 并能为玄武岩纤维增强混凝土的进一步研究和工程应用提供参考依据。

关键词: 玄武岩纤维增强混凝土; 分离式霍普金森压杆装置; 动态本构模型

中图分类号: O347; TU528.572 **文献标识码:** A

混凝土是一种应用广泛的传统工程材料, 近年来, 国防和重要基础设施的建设需要, 大大推动了混凝土材料动态力学性能的研究。玄武岩纤维混凝土 (Basalt Fiber Reinforced concrete, 简称 BFRC) 是以玄武岩纤维为增强材料, 以混凝土为基体制备的一种混凝土类复合材料, 是 21 世纪极具发展前景的纤维增强复合材料之一^[1,2]。Dias 等^[3]研究了玄武岩纤维掺量对玄武岩纤维增强无机聚合物水泥混凝土断裂韧度的影响, 并将其与玄武岩纤维增强硅酸盐水泥混凝土的试验结果进行了对比; 李为民、沈刘军等^[4-6]研究了玄武岩纤维混凝土的动态力学性能; 廉杰等^[7]进行了短切玄武岩纤维增强混凝土力学性能的试验研究; 吴刚等^[8]对玄武岩纤维及其增强混凝土的力学性能、应用进行了研究; 林智荣等^[9]进行了玄武岩连续纤维混凝土动态性能的试验研究。但目前对玄武岩纤维混凝土在冲击载荷下本构关系的研究较少, 本文利用空军工程大学防护工程试验室的 $\Phi 100$ mm 分离式霍普金森压杆 (Split Hopkinson Pressure Bar, 简称 SHPB) 装置对玄武岩纤维混凝土进行冲击压缩试验, 根据得到的试验结果, 考虑应变率强化效应和损伤软化效应, 在混凝土静态本构模型——Ottosen 非线性弹性模型的基础上构建出基于损伤的玄武岩纤维混凝土率型本构模型, 并通过试验结果进行验证。

1 试验研究

1.1 试验设备和试验原理

$\Phi 100$ mm SHPB 装置主要包括主体设备、气源和量

测设备三大部分。图 1 为试验所用装置。



图 1 $\Phi 100$ mm SHPB 设备

Fig. 1 The $\Phi 100$ mm SHPB apparatus

SHPB 实验的基本原理是细长杆中弹性应力波传播理论, 它建立在两个基本假定的基础上, 即一维假定 (又称平面假定) 和应力均匀假定。一维假定就是认为应力波在细长杆中传播时, 弹性杆中的每个横截面始终保持平面状态; 应力均匀假定认为应力波在试件中反复 2 ~ 3 个来回, 试件中的应力处处相等。通过对压杆上入射、反射和透射应变脉冲 ε_i 、 ε_r 和 ε_t 的测试, 用一维应力波理论分析和计算。

根据均匀假定 ($\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t$), 采用三波法^[10], 由 ε_i 、 ε_r 和 ε_t 求得试件中的平均应力、平均应变和平均应变率分别为:

$$\begin{cases} \sigma_s(t) = \frac{EA_s}{2A_s} [\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) + \varepsilon_t(t)] \\ \dot{\varepsilon}_s(t) = \frac{c}{l_s} [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_r(t) - \varepsilon_t(t)] \\ \varepsilon_s(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_s(\tau) d\tau \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, E 为杆的弹性模量; c 为杆中波速; A 、 A_s 分别

为杆、试件的横截面积; l_s 为试件的初始厚度; ε_i 、 ε_r 、 ε_t 分别为杆中的入射、反射、透射应变;进而可得到材料的动态应力应变关系。

1.2 原料和配比

玄武岩纤维:横店集团上海俄金玄武岩纤维有限公司生产,具体物理、力学性能指标见表 1;水泥:42.5R 级的普通硅酸盐水泥,陕西耀县水泥厂生产;粉煤灰:

韩城第二发电厂生产的一级粉煤灰;骨料:灞河中砂,细度模数为 2.8;泾阳县石灰岩碎石(5 mm~10 mm, 15%;10 mm~20 mm,85%);外加剂:广州建宝新型建材有限公司生产的 FDN 高效减水剂。

本试验中玄武岩纤维混凝土由混凝土基体和玄武岩纤维两部分组成,混凝土基体的配合比如表 2 所示,玄武岩纤维的体积掺量为 0.1%。

表 1 玄武岩纤维具体物理、力学性能指标
Tab.1 Physical and mechanical properties of basalt fiber

指标	单丝直径/ μm	短切长度/mm	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	杨氏模量/GPa	抗拉强度/MPa	断裂伸长率/%
参数	15	18	2650	93~110	4150~4800	3.1

表 2 混凝土基体配比 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
Tab.2 Mixture proportions of C50 concrete ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)

水 泥	粉煤灰	砂	碎石	水	FDN
300	100	518.26	1368.13	144	3

1.3 试验结果与讨论

试验测得玄武岩纤维混凝土的静压强度为 60.3 MPa,图 2 为 SHPB 试验得到的不同应变率下 BFRC 的动态应力应变曲线。由图可见,BFRC 动态性能的应变率效应十分明显。

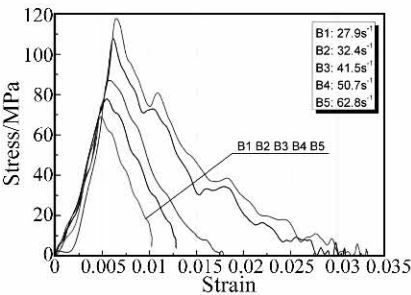


图 2 玄武岩纤维混凝土的动态应力应变曲线
Fig. 2 The dynamic stress versus strain curves of BFRC

表 3 SHPB 试验数据
Tab.3 The SHPB testing data

试验 编号	平均 应变率 $\dot{\varepsilon}/\text{s}^{-1}$	动态抗压 强度 $f_{c,d}$ /MPa	峰值 应变 $\varepsilon_p/10^{-3}$	强度增长 因子 DIF
B1	27.9	68.9	4.85	1.14
B2	32.4	77.8	5.46	1.29
B3	41.5	87.0	5.76	1.44
B4	50.7	107.7	6.14	1.79
B5	62.8	117.8	6.46	1.95

试验数据如表 3 所示,其中平均应变率 $\dot{\varepsilon}$ 为试件达到峰值应力 σ_p 之前应变率的均值,动态抗压强度 $f_{c,d}$ 为试件达到的峰值应力 $f_{c,d}$ 是反映材料强度的指标;峰值应变

ε_p 为试件达到峰值应力时对应的应变,极限应变 ε_{\max} 为试件达到的最大应变, ε_p 和 ε_{\max} 是反映材料变形性能的指标。

动态增长因子(dynamic increase factor,简称 DIF)为试件动态抗压强度和静态抗压强度的比值,是反映冲击荷载下材料抗压强度增幅的指标,用公式表示为:

$$DIF = f_{c,d}/f_{c,s} \tag{2}$$

式中: $f_{c,d}$ 、 $f_{c,s}$ 分别为 BFRC 的动态、静态抗压强度, $f_{c,s}$ 的应变率取值基数为 $10^{-5}/\text{s}$ 。

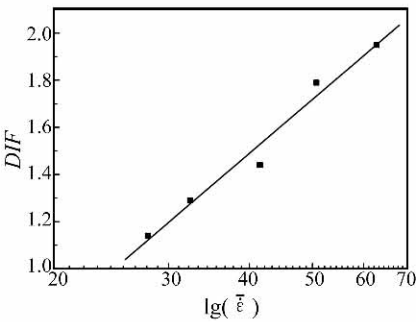


图 3 DIF 与应变率对数的近似线性拟合
Fig.3 The approximate linear fit of DIF and $\lg(\dot{\varepsilon})$

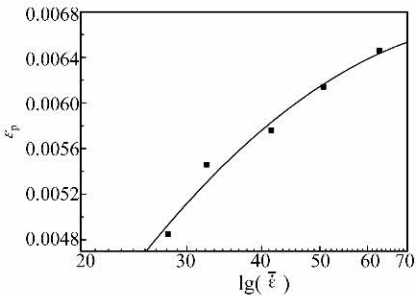


图 4 峰值应变与应变率对数的近似多项式拟合
Fig.4 The approximate polynomial fit of ε_p and $\lg(\dot{\varepsilon})$

国内外学者在研究混凝土材料的动力特性时,为了深入研究各力学性能参数的变化规律,以便为更深入的研究及应用提供参考,多基于试验数据回归、分析建立动态应力强度、峰值应变等与应变率之间的关系,

如欧洲国际混凝土委员会 (CEB)^[11]、Tedesco 和 Ross^[12]、董毓利^[13]等。本文在试验结果的基础上,参考 Tedesco 和 Ross 的做法,对动态强度增长因子与应变率对数之间的关系进行近似线性函数拟合,拟合曲线见图 3;参考董毓利等人的做法,对峰值应变与应变率对数之间的关系进行近似多项式函数拟合,拟合曲线见图 4。

由图 3 和图 4 可见,拟合效果较好,拟合得到的函数关系表达式为:

$$DIF = f_{c,d}/f_{c,s} = -2.281 + 2.354 \lg \dot{\varepsilon} \quad (3)$$

$$\varepsilon_p = -0.0151 + 0.0215 \lg \dot{\varepsilon} - 0.0053 (\lg \dot{\varepsilon})^2 \quad (4)$$

2 动态本构模型研究

采用基于试验结果,在静态本构模型的基础上考虑应变率强化效应和损伤软化效应进行修正的方法来建立 BFRC 经验型的动态本构模型。拟建立的动态本构模型用方程可表示为

$$\sigma = f(\sigma_s, R_{rate}, D) = (1 - D) R_{rate} \sigma_s \quad (5)$$

式中, σ 为 BFRC 的动态抗压强度, D 为损伤弱化因子, R_{rate} 为应变率强化因子, σ_s 为静态抗压强度。

2.1 用于修正的静态本构模型

目前适于在工程中普遍应用的混凝土本构模型以非线性弹性类模型为宜,其形式简单,应用方便,且具有一定的准确性。本文用于修正的静态本构模型采用在混凝土有限元分析中应用很广的 *Ottosen* 非线性弹性本构模型^[14]。图 5 为 *Ottosen* 非线性弹性本构模型的应力应变关系全曲线。

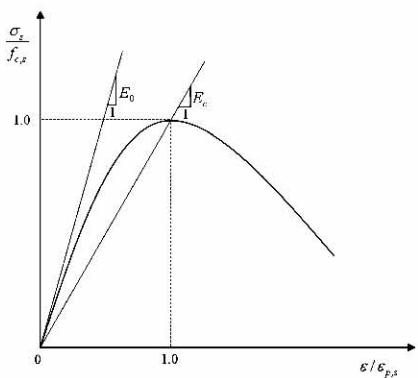


图 5 Ottosen 模型应力-应变全曲线

Fig. 5 The stress-strain curves of Ottosen model

$$\sigma_s = f_{c,s} \frac{A_1 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p,s}} + (A_2 - 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p,s}} \right)^2}{1 + (A_1 - 2) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p,s}} + A_2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p,s}} \right)^2} \quad (6)$$

式(6)为 *Ottosen* 非线性弹性本构模型的表达式。

式(6)中: σ_s 与 ε 均以受压为正; $f_{c,s}$ 为混凝土静态单轴抗压强度; $A_1 = E_0/E_c$, E_0 为混凝土初始弹性模量, E_c 为混凝土应力达 $f_{c,s}$ 时的割线模量; $\varepsilon_{p,s}$ 为静态峰值应

变,表示在静态条件下应力达峰值时的应变; A_2 为系数,对 $\sigma - \varepsilon$ 曲线的上升段影响不大,而对下降段影响很大。 A_2 越大,则曲线下落愈平缓。这一曲线基本上可以反映混凝土应力应变关系全曲线关系的主要特征,因而在混凝土有限元分析中应用很广。本文就以混凝土材料静态的 *Ottosen* 非线性弹性本构模型为基础,通过修正来建立 BFRC 冲击压缩的本构模型。

2.2 应变率强化效应

试验结果表明, BFRC 的动态性能存在明显的应变率强化效应,冲击压缩强度和峰值应变均受应变率的影响,随应变率的增长而增大,且存在某种函数关系。基于试验结果,采用两种方式通过经验公式来考虑应变率对材料力学性能的影响,

(1) 应变率对冲击压缩强度的影响

试验结果显示, BFRC 的动态强度增长因子与应变率对数之间存在一种线性的函数关系,用方程可表述为:

$$DIF = f_{c,d}/f_{c,s} = B_1 + B_2 \lg \dot{\varepsilon} \quad (7)$$

如果以应变率强化因子 R_{rate} 表示 BFRC 动态抗压强度的动态增强效果,则有:

$$f_{c,d} = R_{rate} f_{c,s} \quad (8)$$

即

$$R_{rate} = (B_1 + B_2 \lg \dot{\varepsilon}) \quad (9)$$

式(9)中: B_1 和 B_2 是应变率强化系数, $\dot{\varepsilon}$ 是材料开始破坏之前应变率的均值,可近似认为是恒应变率。

式(9)与 H-J-C 模型^[15]等所用的应变率强化因子经验式相似, H-J-C 模采用的应变率强化因子经验式为:

$$R_{rate} = (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (10)$$

式(10)中: C 是应变率系数, $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$, 为实际应变率与参考应变率之比,是量纲应变率。

(2) 应变率对 BFRC 峰值应变的影响

试验结果显示, BFRC 的峰值应变与应变率对数之间存在一种二次多项式函数关系,用方程可表述为:

$$\varepsilon_p = E_1 + E_2 \lg \dot{\varepsilon} + E_3 (\lg \dot{\varepsilon})^2 \quad (11)$$

式中 E_1 、 E_2 和 E_3 是峰值应变影响系数, $\dot{\varepsilon}$ 意义同式(9)。

2.3 损伤弱化效应

混凝土的损伤是由于材料内部和表面的微空隙、微裂纹等缺陷的形成和发展导致的宏观力学性能的劣化过程,这种弱化效应用损伤因子表示。本文以在岩石、混凝土等材料中应用最多的 *Loland* 损伤模型^[16]为基础,参考文献[17]的研究成果,将 *Loland* 损伤模型中峰值应力前的损伤演化规律推广应用至下降段,即认为混凝土在整个变形范围内有相同的损伤演化规律,具体见式(12)。

$$D_\varepsilon = D_0 + m \varepsilon^n \quad (12)$$

式中, D_{ε} 为混凝土损伤演化过程中的损伤因子, 它是个变量, 受初始损伤、应变和材料的影响, D_0 表示混凝土材料的初始损伤, ε 为应变, m, n 是材料常数。由于 Loland 损伤模型是基于混凝土拉伸应力—应变曲线得到的研究结果, 而混凝土拉、压状态下损伤演化规律有所不同, 因而受拉状态的损伤模型不能简单地应用于受压状态。为了将研究较多的受拉损伤模型应用于受压状态, 参考文献[17]中关于引入裂纹闭合系数 h 的方式, 使拉、压损伤模型共用一个损伤因子的表达式 hD_{ε} , 由此得到的损伤因子见式(13)。

$$D = hD_{\varepsilon} = h(D_0 + m\varepsilon^n)$$

(13)

式中: h 为裂纹闭合系数, 取决于微缺陷的形状等, 可认为是个材料常数, 它考虑了混凝土材料拉、压损伤的不同, 当 $\sigma > 0$ (即受拉) 时, $h = 1$; 当 $\sigma \leq 0$ (即受压) 时, $0 \leq h \leq 1$, 其它参数含义同式(12)。

2.4 模型的建立

拟建立的动态本构方程为:

$$\sigma = f(\sigma_s, R_{rate}, D) = (1 - D)R_{rate}\sigma_s$$

(14)

式中

$$\sigma_s = f_{c,s} \frac{A_1 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p,s}} + (A_2 - 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p,s}} \right)^2}{1 + (A_1 - 2) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p,s}} + A_2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{p,s}} \right)^2}$$

(15)

利用 BFRC 冲击压缩时的峰值应变 ε_p 代替静态峰值应变 $\varepsilon_{p,s}$ 后, 式(15)变为

$$\sigma_s = f_{c,s} \frac{A_1 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} + (A_2 - 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2}{1 + (A_1 - 2) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} + A_2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2}$$

(16)

又有:

$$\varepsilon_p = E_1 + E_2 \lg \dot{\varepsilon} + E_3 (\lg \dot{\varepsilon})^2$$

(17)

$$R_{rate} = (B_1 + B_2 \lg \dot{\varepsilon})$$

(18)

$$D = hD_{\varepsilon} = h(D_0 + m\varepsilon^n)$$

(19)

将式(16) - 式(19)代入式(14)可得到 BFRC 冲击压缩的动态本构方程为:

$$\sigma = [1 - h(D_0 + m\varepsilon^n)] (B_1 + B_2 \lg \dot{\varepsilon}) f_{c,s} \frac{A_1 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} + (A_2 - 1) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2}{1 + (A_1 - 2) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} + A_2 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_p} \right)^2}$$

(20)

其中

$$\varepsilon_p = E_1 + E_2 \lg \dot{\varepsilon} + E_3 (\lg \dot{\varepsilon})^2$$

式(20)即为构建的 BFRC 冲击压缩的本构模型方程, $h, D_0, m, n, B_1, B_2, A_1, A_2, E_1, E_2$ 和 E_3 共 11 个参数, 各参数含义同前。

2.5 参数确定和验证

公式(20)中, B_1, B_2, E_1, E_2 和 E_3 这 5 个参数的取值可通过对试验数据进行函数拟合得到, 根据式(3)和式

(4) 得到这 5 个参数的取值如表 4 所示。 h, D_0, m, n, A_1 和 A_2 这 6 个参数可通过对试验得到的本构关系曲线进行拟合得到。采用最小二乘法进行拟合得到的参数取值如表 5 所示。

表 4 函数拟合得到的参数值

Tab. 4 Parameters confirmed by function fit

B_1	B_2	E_1	E_2	E_3
-2.281	2.354	-0.015 1	0.021 5	-0.005 3

表 5 利用最小二乘法拟合试验曲线得到的参数值

Tab. 5 Parameters confirmed by curves fit

h	D_0	m	n	A_1	A_2
0.012 3	0.025	3 474 434	3.03	0.35	1.1

至此, 本构方程中所有参数得到确定, 可运用该本构模型来计算 BFRC 的应力—应变关系, 并通过试验结果进行对比验证。图 6 为理论模型计算结果与试验结果的对比。

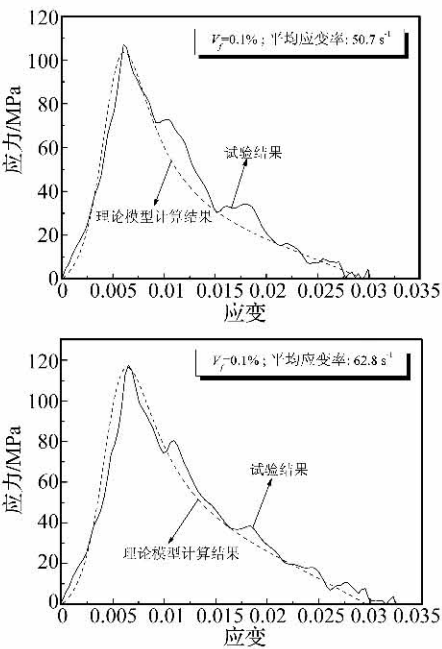


图 6 理论模型与试验结果的对比
Fig. 6 The comparison of theoretic model and tested data

从图 6 中曲线的对比可见, 理论模型计算结果与试验结果比较吻合, 说明本文基于静态的 Ottosen 本构模型, 通过考虑应变率敏感效应和损伤软化效应建立 BFRC 冲击压缩本构模型的方法是可行的, 构建的模型是合理的, 能够准确反映 BFRC 冲击压缩的力学性能, 可用来描述 BFRC 冲击压缩的力学行为。

3 结 论

本文通过 SHPB 试验对 BFRC 的动态本构关系进行了研究, 在混凝土静态 Ottosen 模型的基础上, 通过

叠加应变率敏感效应和损伤软化效应成功建立了 BFRC 冲击压缩的动态本构模型,并利用试验结果进行了验证,得到以下结论:

(1) BFRC 的动态力学性能存在明显的应变率强化效应,动态强度增长因子与应变率对数之间具有近似线性函数关系,峰值应变与应变率对数之间具有近似二次多项式函数关系;

(2) 用于修正的静态本构模型可选用 Ottosen 非线性弹性本构模型,应变率强化效应可在试验基础上通过两种方式体现,一种为引入应变率强化因子 R_{rate} ,另一种为引入峰值应变与应变率之间关系的函数表达式,损伤软化效应可以采用修正后的 Loland 损伤模型描述;

(3)以 Ottosen 模型为基础,通过叠加应变率敏感效应和损伤软化效应可成功建立 BFRC 冲击压缩的本构模型,模型物理意义基本明确,形式灵活,方程含有 11 个参数,均可由试验确定,理论模型计算结果与试验结果吻合较好;

(4)本文构建的本构模型的方法是可行的,构建的本构模型是合理的,可用来描述 BFRC 的冲击力学行为,并能为其进一步研究和工程应用提供重要的参考依据。

参 考 文 献

[1] 胡显奇,申屠年. 连续玄武岩纤维在军工及民用领域的应用[J]. 高科技纤维与应用,2005,30(6):7-13.
[2] 雷 静,党新安,李建军. 玄武岩纤维的性能应用及最新进展[J]. 化工新型材料,2007,35(3):9-11.
[3] Dias D P, Thaumaturgo C. Fracture toughness of geopolymeric concretes reinforced with basalt fibers [J]. Cement and concrete composites,2005,(27):49-54.
[4] 李为民,许金余,沈刘军,等. 玄武岩纤维混凝土的动态力学性能[J]. 复合材料学报,2008,25(2):134-142.

[5] 李为民,许金余. 玄武岩纤维对混凝土的增强和增韧效应[J]. 硅酸盐学报,2008,36(4):476-481.
[6] 沈刘军,许金余,李为民,等. 玄武岩纤维增强混凝土静、动力性能的试验研究[J]. 混凝土,2008,222(4):66-69.
[7] 廉 杰,杨勇新,杨 萌,等. 短切玄武岩纤维增强混凝土力学性能的试验研究[J]. 工业建筑,2007,37(6):8-10.
[8] 吴 刚,胡显奇,蒋剑彪,等. 玄武岩纤维及其增强混凝土力学性能研究与应用[C]// 第十一届全国纤维混凝土学术会议论文集. 大连:大连理工大学出版社,2006:42-47.
[9] 林智荣,姚立宁,施 斌,等. 玄武岩连续纤维混凝土动力性能的试验研究[C]// 第十一届全国纤维混凝土学术会议论文集. 大连:大连理工大学出版社,2006:37-41.
[10] 王礼立. 应力波基础[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
[11] CEB. Concrete structures under impact and implosive loading. Synthesis Report. Lausanne: Committee Euro-international du Beton, 1998.187.
[12] Tedasco J W, Ross C A. Strain-rate-dependent constitutive equation for concrete. Journal of pressive Vessel Technology, 1998,120:398-405.
[13] 董毓利,谢和平,赵 鹏. 不同应变率下混凝土受压全过程的试验研究及其本构模型[J]. 水利学报,1997,7:72-77.
[14] 江见鲸,陆新征,叶列平. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
[15] Holmquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures. In: Fishler E, ed. 14th international Symposium on Ballistics, Quebec, Canada. 1993-09.26-29. Canada: IEEE Press, 1993, 591-600.
[16] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京:科学出版社,2002.
[17] 崔新壮,金 青,李卫民,等. 含初始损伤的水泥砂浆材料的动态本构关系研究[J]. 工程爆破,2001,7(2):1-4.