

# 钢纤维混凝土动态本构模型及其有限元方法

曹吉星, 陈 虬

(西南交通大学 力学与工程学院, 四川 成都 610031)

**摘 要:**利用改进的BP神经网络,以钢纤维混凝土的分离式霍普金森压杆试验数据为训练样本,建立了钢纤维混凝土的隐式动态本构模型。以显式动态有限元软件ABAQUS/Explicit为开发平台,采用FORTRAN语言编写了材料用户子程序VUMAT,将神经网络表达的材料动态本构模型嵌入到有限元计算中,实现了冲击荷载下钢纤维混凝土结构响应的数值模拟。算例显示,建立的本构模型和相应的有限元方法是有效的。

**关键词:**本构模型;神经网络;动态有限元;钢纤维混凝土

**中图分类号:**O347.4;TU528 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2010)04-0131-04

## Dynamic Constitutive Model of Steel Fiber Reinforced Concrete and Its Finite Element Method

CAO Ji-xing, CHEN Qiu

(School of Mechanics and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

**Abstract:** Taking the split Hopkinson pressure bar (SHPB) test data as training samples, an implicit dynamic constitutive model of steel fiber reinforced concrete (SFRC) was proposed with the improved BP neural network program. On the basis of ABAQUS/Explicit, a user-defined material subroutine VUMAT was compiled with FORTRAN language, embedding with the neural network constitutive model into finite element calculation. With SFRC structure's response under impact load as case study, it is shown that the constructed constitutive model and its finite element method are effective.

**Key words:** constitutive model; neural network; dynamic finite element method; steel fiber reinforced concrete

钢纤维混凝土 (steel fiber reinforced concrete, SFRC) 是在普通混凝土中掺入乱向分布的钢纤维后所形成的一种新型多相复合材料。由于钢纤维的存在能够有效阻碍混凝土内部微裂纹的繁衍、扩展,显著提高了混凝土基体的韧性、延性和抗冲击等性能。SFRC已广泛用于防护工程、机场跑道以及道路桥梁等易受冲击、爆炸作用的工程领域,在普通建筑领域中的应用也日渐增多。为研究SFRC在动载作用下的力学性能,以确保工程设计的安全性,国内外学者已进行了一系列的试验研究工作,并取得了许多成果<sup>[1-5]</sup>。然而对SFRC本构模型特别是冲

击荷载作用下的动态本构模型的研究还不多<sup>[6-7]</sup>,一方面的原因是混凝土材质的离散性、成分的多样性和影响因素的众多性等使得普通混凝土的动态本构模型还不能令人满意,而加入了钢纤维后的SFRC使材料的本构模型变得更为复杂。

抛开传统研究材料本构模型的方法,基于SFRC的分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, 简称SHPB) 试验数据,利用人工神经网络 (neural network, 简称NN) 的非线性映射功能,建立了SFRC在冲击荷载作用下的隐式动态本构模型,并将其嵌入到非线性动态有限元软件

收稿日期:2010-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50778154)

作者简介:曹吉星(1981-),男,博士生,从事计算固体力学研究,(E-mail)cjxhqb@163.com。

ABAQUS/Explicit 中,实现了神经网络本构模型与有限元计算的结合。进而通过 SFRC 结构在冲击荷载下响应的算例,说明提出的动态本构模型及相应的有限元方法是可行、有效的。

## 1 神经网络本构模型

### 1.1 概述

将神经网络(neural network,简称 NN)用于材料本构模型的构建,是一种与传统建立本构模型的方法有本质区别的新方法。1990年 Ghaboussi<sup>[8]</sup>首次提出运用神经网络理论构建材料的本构模型。随后,国内外学者陆续将这种方法应用到混凝土、砂和高聚物等复杂材料的本构模型构造中,取得了一些研究成果<sup>[9-12]</sup>。

神经网络本构模型不需要建立本构关系的数学表达式,避免了对材料力学特性的假设和简化。对于不同类别的材料,可以利用相关的试验数据进行样本训练,训练后的神经网络能够反映不同的本构关系;而且当出现现有模型不能反映的新的试验结果时,只需要将新的试验数据作为补充样本和原有的样本一起对网络进行训练,就可以从新的试验结果中学习得到所需要的新信息,从而得到新的神经网络本构模型。已有的研究成果表明,用神经网络来模拟材料的本构关系是非常有前途的,一旦建成一个功能强大的神经网络本构模型,它就可以纳入到有限元程序中,以作为现有材料模型的替代,文献[13-14]对神经网络本构模型与有限元的结合作了一些探讨。

### 1.2 神经网络动态本构模型的构建

构建神经网络本构模型,即用神经网络建立材料的应力与应变之间的隐式映射关系。它是用一系列原始试验数据作为神经网络的输入和输出样本对,训练神经网络。如果训练样本中包含了足够多的材料特性信息,那么经过训练的神经网络就不仅能重现试验现象,而且还可以通过其自身的泛化能力,描述未包含在训练集内的其它加载情况下的本构关系。

BP神经网络是目前应用较为广泛的一种神经网络,其结构包括1个输入层、1个输出层和1个以上的隐含层。BP神经网络本构模型的输出为应力 $\sigma$ (全量型)或应力增量 $\Delta\sigma$ (增量型),网络的输入则取决于具体的实际问题。对于依赖于加载路径与应力历史的材料,神经网络的输入层中必须包含当前时刻及此前1个或多个时刻的应力、应变历史点,并建立增量型神经网络模型。在爆炸、冲击等载荷作用下,材料的本构关系呈现很强的应变率效应,故将应

变率 $\dot{\epsilon}$ 加入到神经网络的输入层中,利用不同应变率下的试验数据训练网络便可得到考虑应变率效应的动态本构模型,如式(1)所示:

$$\Delta\sigma_n = NN(\Delta\epsilon_n, \sigma_n, \epsilon_n, \dot{\epsilon}_n, \sigma_{n-1}, \epsilon_{n-1}, \dot{\epsilon}_{n-1}, \dots) \quad (1)$$

当确定了网络的输入和输出后,神经网络本构模型结构的大小便由隐含层的层数及各隐含层的节点数目决定,通常根据经验或用试凑法选择。

### 1.3 SFRC 的动态本构模型

SFRC的冲击压缩试验是在总参工程兵科研三所的 $\Phi 100$ SHPB装置上进行的,有关试验方面的介绍可参阅文献[15]。试验获得了3种基体混凝土强度(C60、C80、C100)、4种钢纤维体积含量(0%、2%、4%、6%)的SFRC在3种平均应变率(10/s~20/s、35/s~45/s和75/s~85/s)下的应力-应变关系曲线,共36组。

3层BP网络(即只有1个隐含层)模型能够以任意精度逼近任何非线性连续函数<sup>[16]</sup>,故采用3层BP神经网络建立SFRC的动态本构模型。考虑一个应力、应变历史点的影响;并以基体混凝土的静抗压强度 $f_c$ 表征不同的基体混凝土强度;以钢纤维所占的体积分数 $V_f$ 来表征钢纤维对SFRC的影响;另外由于不同研究者所进行的试验中所采用的钢纤维长径比 $l/d$ 可能不同(试验中 $l/d=50$ ),故建立式(2)所示的神经网络动态本构模型:

$$\Delta\sigma_n = NN(\Delta\epsilon_n, \sigma_n, \epsilon_n, \dot{\epsilon}_n, \sigma_{n-1}, \epsilon_{n-1}, \dot{\epsilon}_{n-1}, f_c, l/d, V_f) \quad (2)$$

式(2)所示的神经网络的输入层和输出层节点数目分别为10和1,隐含层的节点数目则预定从10~30之间选择。取出前述36组试验数据中的30组,作为训练样本对神经网络进行训练,不断调节隐含层节点数,直到使网络的实际输出与理想输出之间的均方误差达到预先设定的值(0.001)为止,此时网络的隐含层节点数为18。

利用遗传算法对传统BP神经网络作了改进,将神经网络的权重和阈值编码为染色体基因,然后利用遗传操作不断优化网络权重和阈值,从而提高了神经网络的学习效率。

## 2 显式动态有限元的计算列式

材料本构模型在有限元计算过程中主要起到2个作用:1)根据材料本构模型对应的特性矩阵,形成单元刚度矩阵;2)是每次迭代过程中由应变增量得到相应的应力增量。对于前者,神经网络本构模型由于没有显式的表达式,难以形成相应的特性矩阵。利用显式积分的动态有限元列式计算时,不需要形成刚度矩阵;另外神经网络本构模型可以直接反映

应变增量与应力增量的映射关系,这样神经网络本构模型就可以直接应用。

求解动力学问题的有限元平衡方程为

$$M\ddot{d} + I = P \quad (3)$$

其中,  $M$  为结构的总质量矩阵,  $\ddot{d}$  为质点加速度总矢量,  $I$  为内阻力矢量,  $P$  为外部施加的一致节点力矢量。对式(3)进行时间上的离散化有 2 种方法:显式时间积分法(如中心差分法)和隐式时间积分法(如 Newmark 法和 Wilson- $\theta$  法等)。当采用中心差分法进行积分时,动态有限元的计算过程如下:

1) 在当前增量步开始时( $t$  时刻),计算加速度为、速度和位移:

$$\ddot{d}_t = M^{-1}(P_t - I_t) \quad (4)$$

$$\dot{d}_{t+\Delta t/2} = \dot{d}_{t-\Delta t/2} + \Delta t \ddot{d}_t \quad (5)$$

$$d_{t+\Delta t} = d_t + \Delta t \dot{d}_{t+\Delta t/2} \quad (6)$$

上式中,  $\Delta t$  为时间步长。

2) 根据应变速率  $\dot{\epsilon}$ , 计算单元应变增量  $\Delta\epsilon$ , 并由材料本构模型计算应力:

$$\sigma_{t+\Delta t} = \sigma_t + \sigma(\Delta\epsilon_t) \quad (7)$$

集成节点内力

$$I_{t+\Delta t} = \int_{\Omega} B^T \sigma_{t+\Delta t} d\Omega \quad (8)$$

式(8)中,  $B$  为应变-位移矩阵,  $\Omega$  为积分区域。

3) 设置时间  $t$  为  $t + \Delta t$ , 返回步骤 1)。

于是,求解位移的有限元计算列式为:

$$d_{t+\Delta t} = d_t + \Delta t \left\{ \dot{d}_{t-\Delta t/2} + \Delta t M^{-1} \left( P_t - \int_{\Omega} B^T \sigma_t d\Omega \right) \right\} \quad (9)$$

由式(9)可见,动力学显式有限元的计算过程不需要形成刚度矩阵,故神经网络材料本构模型可以直接使用。

### 3 动态有限元方法的实现

基于神经网络本构模型的显式动态有限元计算是在 ABAQUS/Explicit 软件平台下实施的。首先用 FORTRAN 语言编写定义材料本构模型的用户子程序 VUMAT。当更新单元应力时,从 ABAQUS 与 VUMAT 子程序的接口读入本增量步的应变增量  $\Delta\epsilon$  及增量步开始时的应力  $\sigma_t$ 。VUMAT 调用 1.3 节中训练好的神经网络进行计算,得到应力增量  $\Delta\sigma = NN(\Delta\epsilon)$ , 于是当前应力更新为  $\sigma_{t+\Delta t} = \sigma_t + NN(\Delta\epsilon)$ , 并提供给 ABAQUS 主程序进行下一步的计算。

### 4 算例

利用训练好的神经网络本构模型和上一节开发的材料用户子程序 VUMAT, 对前述 36 组试验数据

中剩余的 6 组非样本数据对应的 SFRC 试验过程进行三维有限元模拟,以检验神经网络本构模型的有效性。有限元模型与文献[15]中真实试验模型的尺寸一致,输入杆、输出杆和吸收杆的长度分别为 4.5 m、2.5 m 和 1.8 m,子弹为圆柱体形状,长度为 0.5 m,钢纤维混凝土试件厚度 49 mm,直径均为 100 mm。取整体的 1/4 部分建模,采用三维 8 节点六面体单元划分网格, SFRC 试件及输入、输出杆的有限元模型如图 1 所示。子弹及压杆材料为 45# 钢,采用线弹性模型。

当子弹以  $v = 16.37$  m/s 的速度撞击入射杆时, C100V2(基体混凝土强度为 100 MPa, 钢纤维含量 2%) 钢纤维混凝土试件 SHPB 试验以及有限元数值模拟得到的入射、反射及透射波形均展示在图 2 中。数值模拟结果与试验结果是吻合的。

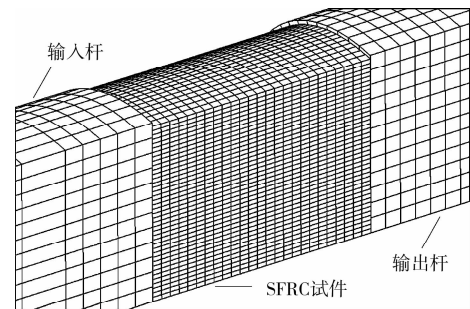


图 1 SHPB 装置在试件处的有限元模型

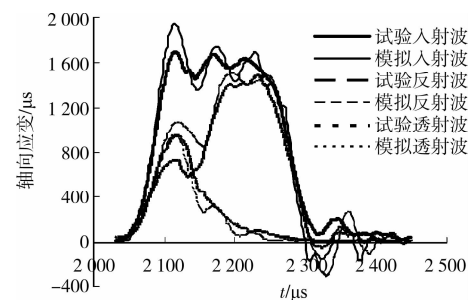


图 2 SHPB 试验的实测与数值模拟波形

因此,该神经网络本构模型描述的钢纤维混凝土的动力学行为是有效、可靠的,将其用于动力学显式有限元计算是可行的。

### 5 结语

建立了钢纤维混凝土的神经网络动态本构模型,并以显式动态有限元软件 ABAQUS/Explicit 为开发平台,将建立的神经网络动态本构模型嵌入到有限元计算中,从而实现了冲击荷载下钢纤维混凝土结构响应的有限元数值模拟。

神经网络为建立复杂材料的本构模型提供了 1 条新的途径,由于没有引入假设和简化,使得获得的

本构模型更接近于实际。

基于神经网络本构模型的有限元计算方法,少了因选择材料模型及相关参数不当而引起的计算误差,从而降低了有限元开发和使用的难度,更好地满足了工程实际的需要。

#### 参考文献:

- [1] 严少华,李志成,王明洋,等. 高强钢纤维混凝土冲击压缩特性试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(3):237-241.  
YAN SHAO-HUA, LI ZHI-CHENG, WANG MING-YANG, et al. Dynamic compressive behaviour of high-strength steel fiber reinforced concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3):237-241.
- [2] 焦楚杰,孙伟,高培正. 钢纤维超高强混凝土抗爆炸研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3):158-166.  
JIAO CHU-JIE, SUN WEI, GAO PEI-ZHENG. Study on steel fiber reinforced high strength concrete subject to blast loading[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3):158-166.
- [3] 黄政宇,秦联伟,肖岩,等. 级配钢纤维活性粉末混凝土的动态拉伸性能的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2007, 4(4):34-40  
HUANG ZHENG-YU, QIN LIAN-WEI, XIAO YAN, et al. Experimental investigation on the dynamic tensile behavior of graded steel-fiber RPC [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2007, 4(4):34-40.
- [4] LOC T S, ASCE M, ZHAO P J. Impact response of steel fiber-reinforced concrete using a split hopkinson pressure bar [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(1): 54-59.
- [5] LUO X, SUN W, SAMMY Y N. Characteristics of high-performance steel fiber-reinforced concrete subject to high velocity impact [J]. Cement and Concrete Research, 2000, 30:907-914.
- [6] 刘永胜,王肖钧,金挺,等. 钢纤维混凝土力学性能和本构关系研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(7):717-723.  
LIU YONG-SHENG, WANG XIAO-JUN, JIN TING, et al. Study on the mechanical properties and constitutive relation of steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2007, 37(7):717-723.
- [7] 焦楚杰,孙伟,高培正. 钢纤维高强混凝土的中应变率本构关系[J]. 东南大学学报, 2007, 37(5):892-897.  
JIAO CHU-JIE, SUN WEI, GAO PEI-ZHENG. Constitutive relation of SFRHSC at medium strain rate [J]. Journal of Southeast University, 2007, 37(5): 892-897.
- [8] GHABOUSSI J, GARRETT J J, WU X. Material modeling with neural networks[C]//Proceedings of the International Conference on Numerical Methods in Engineering: Theory and Applications, Swansea, U. K., 1990:701-717.
- [9] GHABOUSSI J, GARRETT J J, WU X. Knowledge-based modeling of material behavior with neural networks[J]. J Eng Mech—ASCE 1991, 117(1):132-53.
- [10] SUNGMOON J, GHABOUSSI J. Neural network constitutive model for rate-dependent materials [J]. Computers and Structures, 2006, 84(15):955-963.
- [11] 张光永,徐辉,王靖涛,等. 等 p 路径下砂土本构关系的归一化特性及数值建模方法[J]. 固体力学学报, 2008, 29(1): 85-90.  
ZHANG GUANG-YONG, XU HUI, WANG JING-TAO, et al. Normalization characteristic of sand under the stress path of constant p and the corresponding numerical modeling method [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(1): 85-90.
- [12] 何勇,张红钢,刘雪峰,等. NiTi 合金高温变形本构关系的神经网络模型[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(1):19-23.  
HE YONG, ZHANG HONG-GANG, LIU XUE-FENG, et al. A constitutive model of high temperature deformation of Ni Ti alloy based on neural network[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(1):19-23.
- [13] 冯夏庭. 智能岩石力学导论[M]. 北京:科学出版社, 2000: 136-148.
- [14] 李继良,任天贵,高谦,等. 研制基于神经网络隐式材料本构模型的智能有限元的问题探讨[J]. 河北理工大学学报, 2000, 22(1):6-12.  
LI JI-LIANG, REN TIAN-GUI, GAO QIAN, et al. The discussion of the research on intelligent FEM based on implicit neural constitutive modeling and its implementation issues[J]. Journal of Hebei Institute of Technology, 2000, 22(1):6-12.
- [15] 巫绪涛,胡时胜,陈德兴,等. 钢纤维高强混凝土冲击压缩的试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(2):125-131.  
WU XU-TAO, HU SHI-SHENG, CHEN DE-XING, et al. Impact compression experiment of steel fiber reinforced high strength concrete [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2):125-131.
- [16] Robert H N. Theory of the back propagation neural network[J]. IJCNN, 1989(D): 583-604.

(编辑 胡玲)