

钢纤维混凝土靶板在弹体侵彻作用下的三维数值模拟

吕晓聪¹, 许金余^{1,2}, 吴洪¹

(1. 空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038; 2. 西北工业大学力学与建筑工程系, 陕西西安 710072)

摘要: 针对混凝土力学性能的特殊性, 以及侵彻过程中高速碰撞的特殊性, 合理的选用材料模型及接触算法等参数, 运用 LS-DYNA3D 对弹体侵彻混凝土进行了数值模拟, 再现了弹体侵彻混凝土时, 应力的传播以及混凝土的开裂破坏等现象。数值计算的结果与实验结果具有良好的一致性, 计算误差约为 10%。

关键词: 侵彻; LS-DYNA3D; 率相关性; 状态方程

中图分类号: O385 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2007)02-0092-03

混凝土材料广泛应用于防护工程, 是所有重要军事设施的基本材料。在水泥基材中掺入钢纤维可以有效地改善混凝土的各项性能, 尤其是裂后韧性。研究弹丸对钢纤维混凝土和地质材料的侵彻, 对于防护工程具有十分重要的现实意义。一些学者从理论上分析弹丸对钢纤维混凝土的侵彻机理和侵彻效果^[1], 但由于材料的特殊性, 其力学性能表现出非均质、非线性、时率相关性及脆性破坏等复杂性质, 使理论分析十分困难。现场实验研究必不可少, 但仅靠实验研究, 人力、物力、财力耗费非常大, 而且周期长。当今以先进计算机为基础的计算技术发展极快, 计算机模拟仿真已被广泛应用于许多领域。大力发展计算机模拟技术研究防护工程中武器命中侵彻、冲击、爆炸、弹坑形成、爆炸波传播及与结构的相互作用过程等, 是加强工程科研的重要手段^[2]。在模型建立和材料参数选择合适的前提下, 数值计算在精度与可靠性方面, 都要比近似分析好得多, 而耗资也较少。本文基于这种思路, 对钢纤维混凝土靶板弹体侵彻作用进行了三维数值模拟。

1 动力学基本方程

拉格朗日算法的控制方程包括质量方程, 动量方程, 能量方程, 变形率, 本构关系^[3]。取虚速度为加权系数, 利用加权余量法, 动量方程的弱形式可以写成 $\int_V \delta v_i (\partial \sigma_{ij} / \partial x_j + \rho \dot{u}_i b_i - \ddot{u}_i) dV = 0$ 。式中 $\delta v_i(X) \in R_0$, $R_0 = \{ \delta v_j | \delta v_j \in C^0(X), \delta v_j |_{A_s} = 0 \}$ 为虚速度。利用分部积分, 上式可以写成 $\int_V (\partial(\delta v_i) / \partial x_j) \sigma_{ji} dV - \int_V \delta v_i \rho b_i dV - \int_{A_t} \delta v_i \bar{t}_i dA + \int_V \delta v_i \rho \dot{u}_i dV = 0$ 。此式称之为虚功率方程。

将结构空间离散化, 可以求得单元内任一点的速度、加速度、变形率以及虚速度:

$$\dot{u}_i(X, t) = N_i(X) \dot{u}_{ij}(t); \ddot{u}_i(X, t) = N_i \ddot{u}_{ij}(t); D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) = \frac{1}{2} \left(\dot{u}_{ij} \frac{\partial N_i}{\partial x_j} + \dot{u}_{ji} \frac{\partial N_j}{\partial x_i} \right) = B_j u_j; \delta v_i(x) = N_i(x) \delta v_{ij}$$
。将此式写成矩阵形式并代入虚功率方程中, 整理后得:

$$M \dot{U} + f_{int} = f_{ext}$$
。式中: $M = \int_V \rho N^T N dV = \int_{V_0} \rho_0 N^T N dV_0$, $f_{ext} = \int_V N^T \rho b dV + \int_{A_t} N^T \bar{t} dA$, $f_{int} = \int_V B^T \sigma dV$ 。 M 为系统质量阵, 与时间无关, 只需要在初始时刻计算即可。求解方程, 可得当前时刻下的节点位移 u_j , 进而求得当前

收稿日期: 2005-10-20

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 吕晓聪(1982-), 男, 山西交城人, 博士生, 主要从事防护工程研究;

许金余(1963-), 男, 吉林靖宇人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构工程和防护工程研究。

时刻的结构应变和应力。

2 材料模型

混凝土模型通常是以宏观水平的现象学行为为基础。静水压力和偏应力通过张量不变量分离和表达。在冲击荷载作用下,静水压力通过特定的状态方程(EOS)来描述,剪切强度定义为三维主应力空间中的屈服、失效和残余强度面。通常,混凝土材料模型中内在温度的变化忽略不计。

混凝土结构性能的复杂性主要是由于材料的各向异性。一般情况,混凝土的本构方程是相当复杂的。材料参数的敏感性常常也是不清楚的,这使得测试步骤以及混凝土模型的参数计算成为一个很重要的问题。因此,要成功地模拟受瞬时动力荷载作用的混凝土结构,需要通过合理的实验,得到经过验证可靠的材料参数。对于侵彻模拟,选用 SOIL_CONCRETE 材料模型,它适合于模拟本问题的侵蚀现象。

本文采用 T. J. Holmquist 模型描述混凝土材料的压力-体积应变关系^[4]。该模型分3个区:

第1个区是线弹性区($P \leq P_{crush}$ 或 $\mu \leq \mu_{crush}$): $P = (P_{crush}/\mu_{crush})\mu = K\mu$, 其中 K 为弹性体积模量, $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ 为标准体积应变,用现时密度 ρ 和初始密度 ρ_0 表示。

第2个区域内 $P_{crush} < P \leq P_{lock}$, $\mu_{crush} < \mu \leq \mu_{lock}$, 此时混凝土内的空洞逐渐被压缩从而产生塑性变形,该区域的路径由相邻区域插值得到: $(P - P_{crush})/(P_{lock} - P_{crush}) = (\mu - \mu_{crush})/(\mu_{lock} - \mu_{crush})$ 。

第3个区域内 $P \geq P_{lock}$, $\mu \geq \mu_{lock}$, 混凝土满足凝聚态材料的 Hugoniot 关系: $P = k_1\bar{\mu} + k_2\bar{\mu}^2 + k_3\bar{\mu}^3$, 其中 $\bar{\mu} = (\mu - \mu_{lock})/(1 + \mu_{lock})$ 为修正的体积应变,相对于密实材料密度的体积应变。 μ_{lock} 是空隙闭合时的体积应变。 k_1, k_2 和 k_3 是密实混凝土材料常数。

钢纤维混凝土材料采用如下的屈服准则: $\phi = \sqrt{3J_2} - F(P) = \sigma_y - F(P)$ 。其中, $J_2 = (s_{ij}s_{ij})/2$, $F(P)$ 屈服应力与压力的关系函数, J_2 是第二应力不变量, s_{ij} 是偏斜应力张量分量。

SOIL_CONCRETE 模型中的塑性应变-压力曲线 $\epsilon_1 - P$ 和 $\epsilon_2 - P$ 用于模拟混凝土开裂、破坏,其中 ϵ_1 是混凝土开裂时候的塑性应变, ϵ_2 是混凝土开裂后达到残余强度时的塑性应变。

弹体采用 plastic_kinematic 材料模型。该模型没有考虑单元的侵蚀以及温度的影响。

3 侵彻实验及侵彻的数值模拟

A. DARRIGADE 等人对混凝土在高速弹丸冲击作用下的侵彻及穿孔进行了实验研究^[2]。靶板材料选用两种不同强度的掺钢纤维的高性能混凝土: BPR200 和 BPR600。弹体采用卵形弹头,弹头长度 41.5 mm,弹体总长 109.9 mm,直径 25 mm。

取混凝土模型为圆柱体,半径 30 cm,厚度为 10.5 cm;弹体垂直入射。鉴于研究问题的对称性,取 1/4 模型建模。单位制采用 cm-g- μ s。

弹体材料为:密度 7 830 kg/m³;弹性模量 210 GPa;泊松比 0.33;屈服应力 0.4 GPa;切线模量 2.1 GPa;硬化参数 0.3。混凝土的基本材料为:密度 2 730 kg·m⁻³;剪切模量 32.76 GPa;体积模量 37.3 GPa;拉裂压强 -0.009 GPa;开裂后残余强度因子 0.3。

图 1 和图 2 显示了弹体侵彻的等效应力图和破坏形态,图 3 为弹体侵彻过程的速度时程曲线。

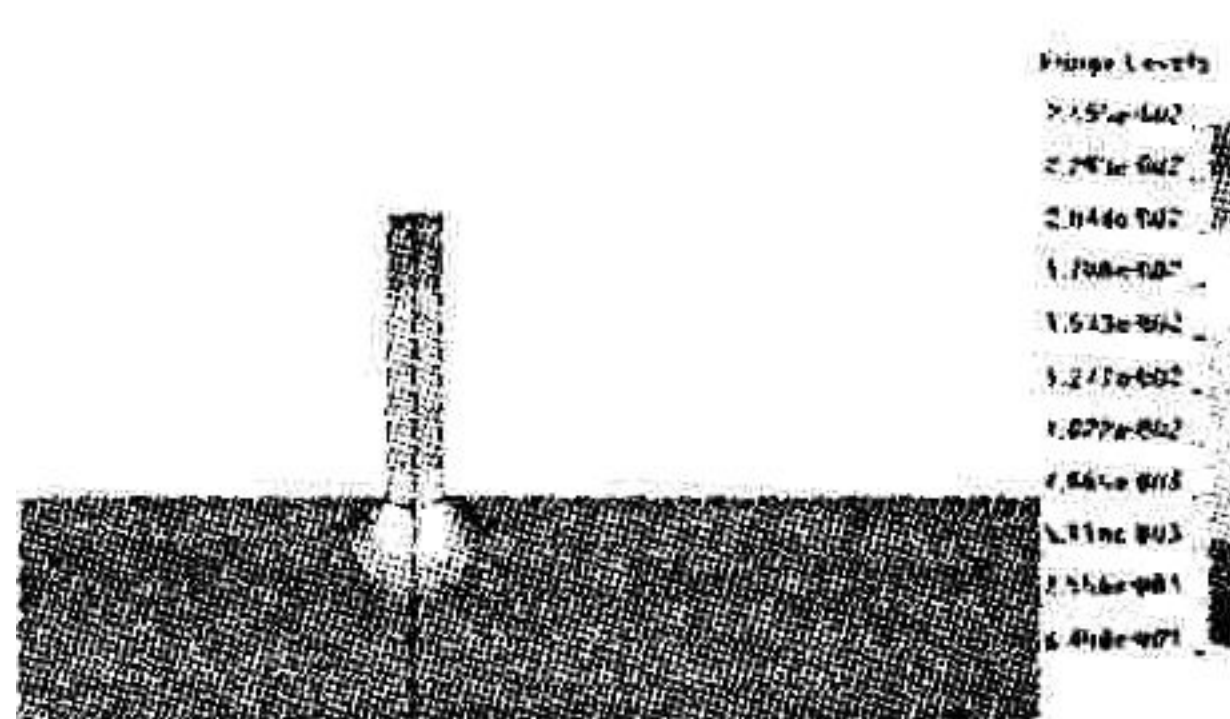


图1 等效应力云图

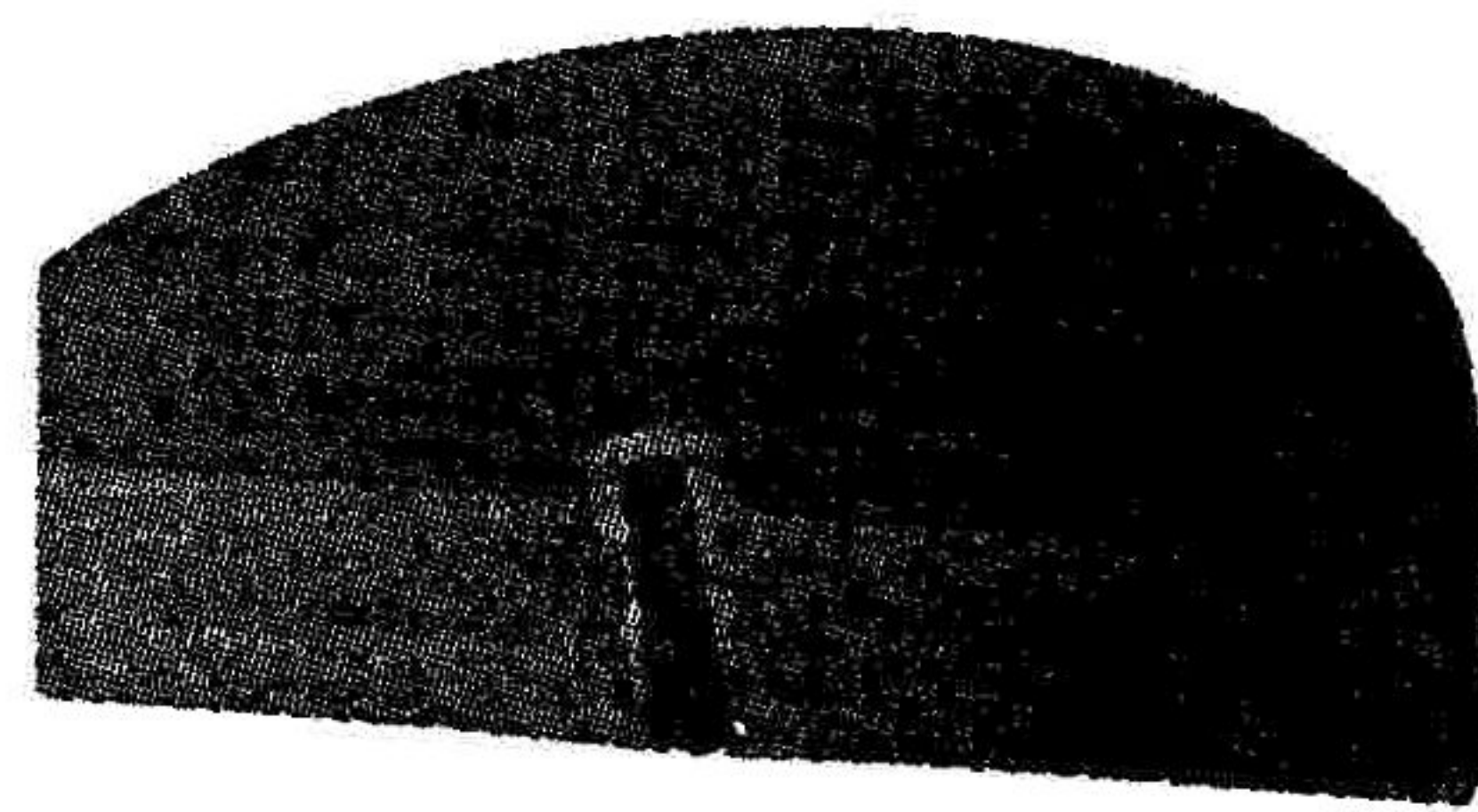


图2 弹体侵彻的数值模拟结果

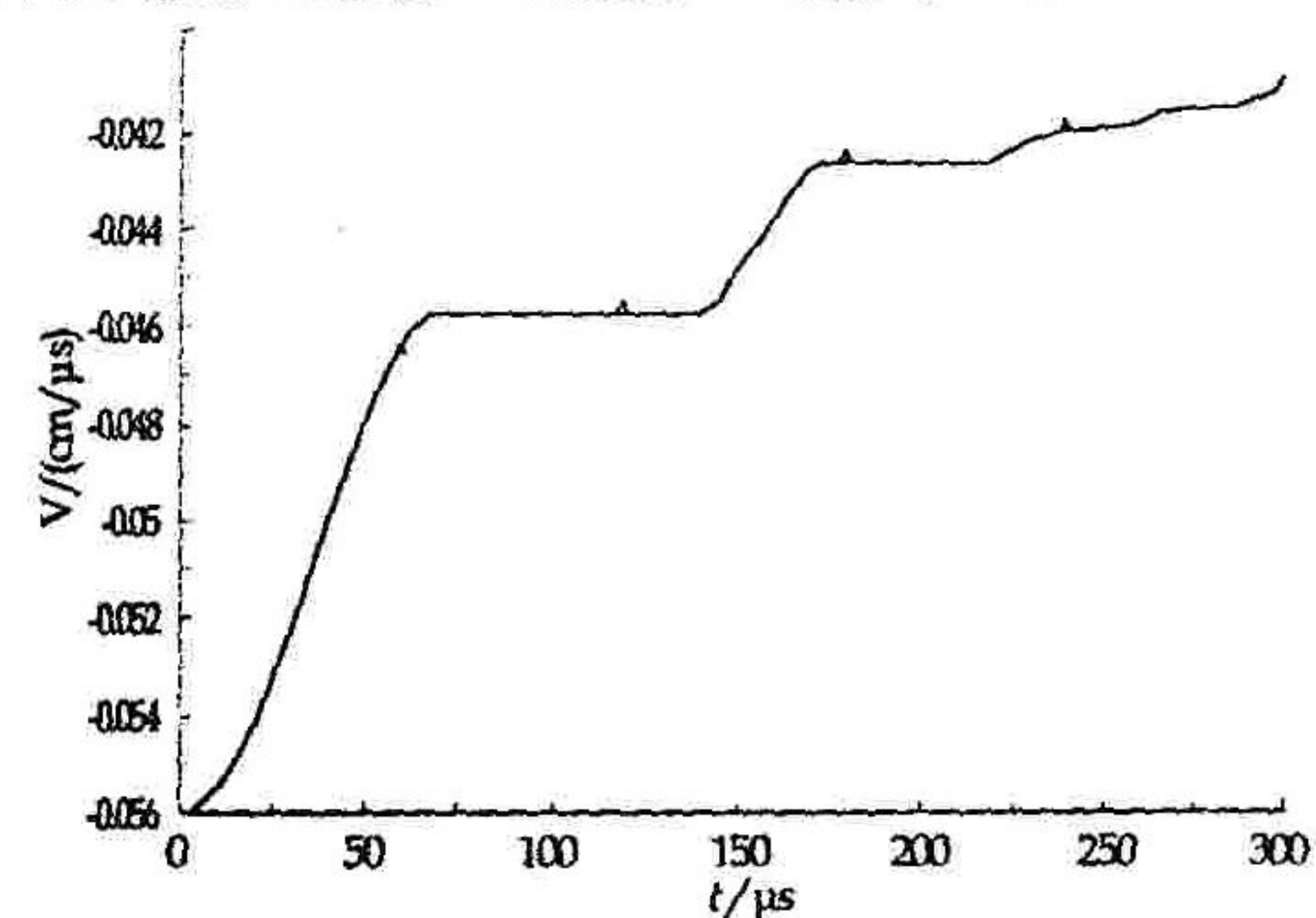


图3 BPR600 靶材弹体速度时程曲线

实验结果及模拟结果见表1。

从表1可以看出:数值模拟的结果与实验值相接近,但是普遍比实验值偏大;而且从图3所示速度时程曲线可以发现,在一些时间域内弹丸的速度几乎保持不变。导致上述情况出现的原因有两点:①弹丸材料选用随动硬化弹塑性模型。弹丸在实验过程中质量是不断减少

的;而在数值模拟过程中,由于模型的选用,弹丸只有形状的改变,质量保持不变,这势必增加了弹体的动能,从而使残余速度的模拟值偏大。②、在数值模拟时,对失效单元进行了控制。实验中,达到屈服的混凝土仍然存在,并对弹体的后续侵彻提供一定的阻力作用;而在模拟时,设定混凝土单元一旦达到屈服,立即退出工作并删除。应力波的传播速度比弹体的侵彻速度快(见图1),一部分未与弹体作用的混凝土由于应力波的作用,事先达到屈服并被删除,因此,在一定的时间段内,弹体将不受到任何阻力作用,保持恒定的速度直至再次接触没有被应力波破坏的混凝土单元。这也是速度时程曲线中出现“平台”的原因。最终使得残余速度的数值模拟结果比实验值偏大。

4 结论

数值模拟清楚的展现了弹体侵彻混凝土时,应力的传播以及混凝土的开裂破坏等现象,与实际情况相吻合。从计算结果与实验值的对比可以看出,模型的选择以及材料参数和算法的定义是比较合理的。数值模拟的结果偏于安全。

另外,从试验和实验的结果可以得出相符的结论:靶板的强度直接影响着侵彻速度的改变;在强度等级相同的情况下,钢纤维的掺量对于侵彻速度的改变没有太大的影响,同时,由于钢纤维增强了混凝土的延性,弹坑的半径随着纤维含量的提高而减小。

参考文献:

- [1] 蔺建勋,蒋浩征. 弹丸垂直侵彻混凝土介质的理论分析模型[J]. 弹箭与制导学报, 1998,(3): 7-14.
- [2] Darrigade A, Buzaud E. High Performance Concrete: A Numerical and Experimental Study[A]. 许金余,孙济南. 防护工程结构理论与试验研究译文集[C]. 空军工程大学工程学院, 2001. 123-129.
- [3] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [4] Holmquist T J, Johnson G R. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and High Pressures[A]. 14th International Symposium on Ballistics, 1993.
- [5] Agardh L, Laine L. 3D FE - simulation of high - velocity fragment perforation of reinforced concrete slabs[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999, 22(9): 911-922.

(编辑:姚树峰)

Three - dimension Numerical Simulation of Projectile Penetration of SFRC

LV Xiao - tong¹, XU Jin - yu^{1,2}, WU Hong¹

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, Shaanxi, China; 2. College of Mechanics and Civil Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, Shaanxi, China)

Abstract: For the peculiarity of the concrete mechanical performance and high - speed impaction, this work chooses the parameters rationally, e.g. material model and contact arithmetic, uses LS - DYNA3D to simulate the penetration. Compared with the experimental results, the whole penetration process and the simulation results are reasonable and accurate.

Key words: penetration; LS - DYNA3D; rate - dependence; equation of state