

弹丸侵彻混凝土靶的数值模拟*

张晶^{1,2}, 贾宏光¹, 丁玲¹, 马伍元¹

(1 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:在数值模拟弹丸侵彻混凝土时,由于混凝土动力学本构模型较多且复杂,使得材料模型及其相关参数的选取成为数值模拟侵彻的难点。鉴于这种情况,在分析对比了 Ls-Dyna 混凝土材料模型的基础上,给出了各种模型的适用领域,又重点对混凝土 Johnson-Homquist 模型进行了研究分析,利用灵敏度分析与试验反演修正确定模型参数,在降低试验成本的同时提高了侵彻结果的准确度,利用此方法确定模型参数,模拟了 Forrestal 的部分侵彻试验。结果表明,此方法简单有效,能够很好的预测侵彻结果。

关键词:侵彻;混凝土;Johnson-Homquist 模型;灵敏度;数值模拟

中图分类号:TJ410.33;O383.2 **文献标志码:**A

The Numerical Simulation of Projectile Penetrating into Concrete Target

ZHANG Jing^{1,2}, JIA Hongguang¹, DING Ling¹, MA Wuyuan¹

(1 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Changchun 130033, China;

2 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: When simulating projectile penetrating into concrete targets, there are many concrete constitutive models and many parameters, but it's difficult for simulating penetration. In view of this, the application field of the model was given based on evaluation of typical concrete material models in Ls-Dyna, and then Johnson-Homquist concrete model was analyzed. The sensitivity analysis and test inversion were used for confirming model parameters with lower costs while improving the accuracy of penetration results. Part of the Forrestal invasion experiments was simulated by this method; the results show it is a simple and effective approach to better forecast the penetration results.

Keywords: penetration; concrete; Johnson-Homquist model; sensitivity; numerical simulation

0 引言

弹丸对混凝土靶体侵彻过程的研究一直是冲击动力学研究的一个活跃的领域,目前针对导弹侵彻问题的研究方法主要有三种^[1]:经验法、理论分析法、数值模拟法。

文献[2]运用了经验法,文献[3-4]则运用了数值模拟法。可以看出,数值模拟法无论在模型的建立、基本方程的求解以及结果的精度和可靠性方面都比解析法好得多,而在耗资、效率上比试验法有着明显的优势,因此倍受国内外学者的青睐。

影响侵彻的作用因素较多,在有限元软件模拟侵彻中,材料特性是最主要的因素,应用动力学软件 Ls-Dyna 数值模拟侵彻混凝土时主要存在以下问题:①几种混凝土材料模型的选择;②模型材料参数的选择。文中在分析对比了 Ls-Dyna 混凝土材料模型的

基础上,给出了各种模型的适用领域,重点对适合侵彻模拟的第 111 号(Johnson-Homquist)混凝土模型进行了研究分析,利用灵敏度分析、试验反演校正及部分参数相关关系选取模型参数,数值模拟了 Forrestal 的部分侵彻试验,并进行了对比分析。

1 Ls-Dyna 中四种典型混凝土模型

1.1 钢筋混凝土材料模型

16 号模型主要用于模拟埋有加强钢筋的混凝土模型在受到冲击载荷时的响应,但不适合用于冲击载荷下发生大应变的情况,该模型拥有两种工作模式:一种为屈服面应力与静水压力的单曲线关系,较为简单;另一种为屈服面应力与静水压力的双曲线关系。模式二还拥有混凝土主要参数的自动生成功能。

1.2 损伤混凝土材料模型

损伤混凝土材料模型 RL3 是原 72 号混凝土材料

* 收稿日期:2011-03-18

作者简介:张晶(1986-),男,陕西西安人,硕士研究生,研究方向:冲击防护、振动隔离结构。

模型的改进版,采用 3 个剪切失效面,同时考虑损伤和应变率的影响。由于材料模型 RL3 的参数众多且复杂,最后又对材料模型添加了参数自动生成功能,该功能一般用于只知道混凝土抗压强度等较少信息时。

该材料模型适合于模拟混凝土在爆炸以及碰撞载荷下的响应,其自动生成功能只能用于普通混凝土结构,并且所生成的参数有着较大的局限性:文献[5]研究表明混凝土的抗剪切强度变化较大尤其当承受大的压力时(大于 50MPa)很明显;自动生成的状态方程参数同样存在较大变动。

1.3 连续帽盖混凝土模型

159 号混凝土模型是针对用于安全设施的混凝土模型而研发设计的,如高速路旁的混凝土护栏、桥梁护栏等在受到碰撞时的变形和破坏能够很好的用该材料模型模拟出来,它是地质帽模型的扩展,包括各向同性连续方程、屈服及硬化强度面、破坏方程,同时也考虑了应变率效应。

该材料模型主要用于模拟埋有钢筋的加强混凝土,可用钢筋、混凝土耦合算法共同模拟钢筋混凝土,常用来数值模拟路旁、桥旁的钢筋混凝土护栏。

1.4 混凝土累积损伤模型

111 号 JH 混凝土模型适合模拟混凝土在大变形、高应变率、高压下的响应。该模型考虑了高压、高应变率以及损伤效应。

JH 模型的归一化等效应力 σ^* 定义为:

$$\sigma^* = \sigma/f' \quad (1)$$

式中: σ 为实际等效应力; f' 为无限制抗压强度。

其具体表达式为:

$$\sigma^* = \begin{cases} [A(1-D) + BP^{*N}][1 - c \ln(\varepsilon^*)] & \sigma^* \leq S_{\max} \\ \sigma^* = S_{\max} & \sigma^* > S_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为归一化内聚强度; D 为内损伤系数; B 为归一化压力硬化系数; $P^* = P/f'$ 为归一化压力(P 为实际压力); N 为压力硬化指数; c 为应变率系数; $\varepsilon^* = \varepsilon/\varepsilon_0$ 为无量纲应变率(ε 为实际应变率, ε_0 为参考应变率)。

JH 模型的损伤系数 D 为:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta u_p}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}} \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 和 Δu_p 分别表示等效塑性应变和等效塑性体积应变的增量; D_1 和 D_2 为破坏常数; $T^* = T/f'$ (T 为混凝土最大抗拉强度)。

JH 模型的状态方程根据加载和卸载两种情况分

为 3 个区域:线弹性区域、塑性过渡区以及完全密实材料区,如图 1 所示。

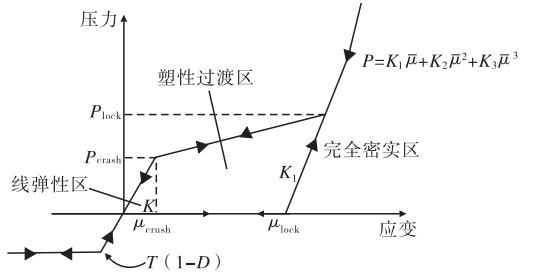


图 1 JH 模型压力应变响应曲线

JH 混凝土模型压力应变关系式为:

$$P = \begin{cases} Ku & u \leq u_{\text{lock}} \\ P_{\text{crush}} + \frac{(P_{\text{lock}} - P_{\text{crush}})(u - u_{\text{crush}})}{(u_{\text{lock}} - u_{\text{crush}})} & u_{\text{crush}} < u < u_{\text{lock}} \\ K_1 \bar{u} + K_2 \bar{u}^2 + K_3 \bar{u}^3 & P \geq P_{\text{lock}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: P_{crush} 为压碎压力; u_{crush} 为压碎体应变; P_{lock} 为压实压力; u_{lock} 为压实体应变; \bar{u} 为修正体应变; K_1 、 K_2 、 K_3 为材料常数。

$$u_{\text{lock}} = \frac{\rho_g}{\rho_0} - 1 \quad (5)$$

式中: ρ_g 、 ρ_0 分别为材料压实密度和材料初始密度。

$$\bar{u} = \frac{u - u_{\text{lock}}}{1 + u_{\text{lock}}} \quad (6)$$

2 JH 混凝土材料模型参数的确定

2.1 JH 混凝土模型参数灵敏度分析

由前面可知,JH 模型适合用于侵彻、爆炸等强动载荷问题的数值模拟。该模型共有 20 个参数,其中 19 个作为模拟试验的灵敏度因素(见表 1),以表 1 给出的混凝土模型参数为基准,由文献[6]得到混凝土 JH 模型参数对压力的灵敏度如表 2 所示。

表 1 混凝土 JH 模型参数灵敏度因素

$R_0/(g/cm^3)$	F_c/MPa	G/MPa	T/MPa	D_1	D_2	ε_f^{\min}
2.44	48	14860	4	0.04	1.0	0.01
A	B	N	S_{\max}	C	P_c/MPa	U_c
0.79	1.60	0.61	7	0.007	16	0.001
P_L/MPa	U_L	K_1/MPa	K_2/MPa	K_3/MPa		
800	0.1	85000	-171000	208000		

表 2 中压力对高压状态方程系数 K_1 灵敏度为 0.140, K_2 、 K_3 皆为 0,原因是高压状态方程适用于力超过屈服强度量级以上时混凝土呈高压流体状态时的本构关系,文献[6]对数值模拟实验中的压力范围并不敏感,而文中涉及到了大变形、高应变率和高静

水压力的情况,所以对状态方程系数 K_2 、 K_3 另作灵敏度分析。

表2 混凝土 JH 模型参数灵敏度

R_0	F_c	G	T	D_1	D_2	ϵ_f^{\min}
0.440	0.240	0.070	0.001	0.030	0.040	0.002
A	B	N	S_{\max}	C	P_c	U_c
0.020	0.260	0.340	0.650	0.036	0.040	0.070
P_L	U_L	K_1	K_2	K_3		
0.780	0.770	0.140	0.000	0.000		

建立中、低速侵彻模型,输出结果为弹丸的侵彻深度, K_2 、 K_3 分别变化 $\pm 20\%$ 和 $\pm 40\%$, 根据数值模拟计算得到各因素水平下弹丸的侵彻深度, 转化为参数变化率

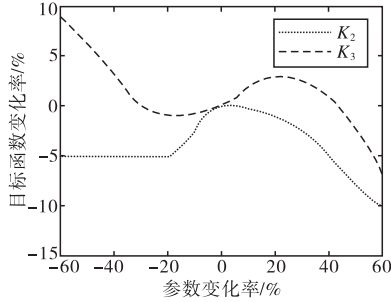


图2 侵彻深度与 K_2 、 K_3 的变化关系

对应输出结果变化率的关系,如图2所示。

结合图2选取参数变化区间内绝对值最大的灵敏度来反映该参数的灵敏度,则:

$$s_{k_2} = 0.200, s_{k_3} = 0.075$$

K_2 、 K_3 对侵彻深度的灵敏度不为零,但还是较低的,因为模拟的侵彻试验属于中低速侵彻。

2.2 基于 Forrestral 试验的主要参数反演校正

混凝土 JH 模型参数中对侵彻结果计算影响较大的参数有: R_0 、 F_c 、 B 、 N 、 S_{\max} 、 P_L 、 U_L , 其余参数灵敏度较低。文中采用固定灵敏度较低的参数,部分易测参数取实测值,部分参数可导出,其余高灵敏度参数或难测的可由试验反演校正。

根据上述方案,数值模拟文献[7]中编号 SNL-00-02 的侵彻试验,建立轴对称四分之一模型(见图3),侵彻速度 250m/s。

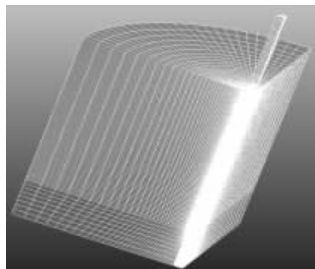


图3 弹体与靶体有限元模型

长度、质量、时间单位分别为 cm、g、 μs , 弹体材料选择 *MAT_RIGID; 靶材料 JH 模型,其原始参数见表1,由文献[7]得:密度 $R_0 = 2.04g/cm^3$, 无限制抗压强度 $F_c = 23MPa$, $\rho_g = 2.65g/cm^3$, 混凝土一般有 $P_L \geq 600MPa$, S_{\max} 、 B 、 N 都暂取原始值,有待模拟反演校正。 $u_{lock} = \rho_g/R_0 = 0.299$, $T \approx F_c/10 = 2.3MPa$, $P_c \approx F_c/3 = 7.67MPa$, $u_c \approx F_c(1 - 2\nu)/E$

$\approx 5.0e - 4$ (ν 为泊松比,约为 0.2; $E = 11700(F_c)^{0.3}$), $G = E/2(1 + \nu) \approx 12488MPa$, 其余低灵敏度参数均取表1中的原始值。

就此初步确定了 Forrestral 侵彻试验中 23MPa 混凝土靶 JH 模型的所有参数,将参数转化为基本单位制(g - cm - μs),如表3所示。

表3 混凝土 JH 模型参数 ($F_c = 23MPa$)

R_0	F_c	G	T	D_1	D_2	ϵ_f^{\min}
2.04	$2.3e - 4$	0.12488	$2.3e - 5$	0.04	1.0	0.01
A	B	N	S_{\max}	C	P_c	U_c
0.79	1.60	0.61	7	0.007	$7.67e - 5$	$5e - 4$
P_L	U_L	K_1	K_2	K_3		
0.800	0.299	0.85	-1.71	2.08		

数值模拟结果如图4、图5所示。

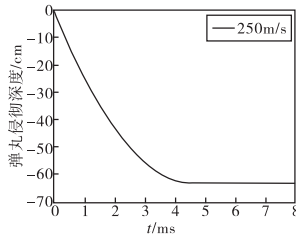


图4 弹丸位移变化模拟曲线

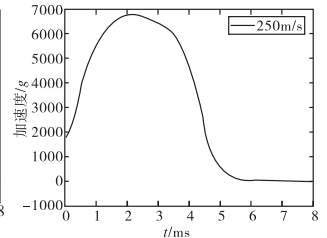


图5 弹丸加速度变化模拟曲线

图4中侵彻深度约 63cm, Forrestral 试验结果为 62cm, 两者相对误差仅为: 1.61%; 图5中弹丸侵彻加速度曲线与 Forrestral 试验所测曲线(见图6)相当吻合。

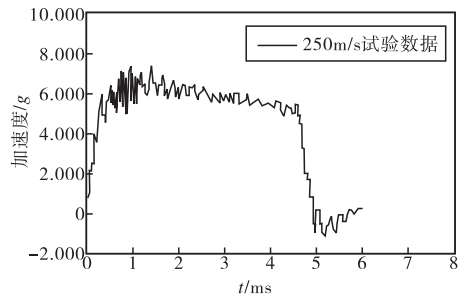


图6 弹丸加速度试验所测曲线

初步确定的混凝土 JH 模型参数,校正时用于数值模拟文献[7]中编号 SNL-00-02 的侵彻试验,预测结果相当的精确。

3 Forrestral 其他试验的数值模拟

应用表3中的混凝土 JH 模型参数,数值模拟了文献[7]中其他速度的侵彻试验($CRH = 3.0$),侵彻深度如图7所示。

由图7可看出,数值模拟与试验所得数据吻合的较好,证明了用该方法确定参数的有效性。

根据以上结论,实际应用中,先计算双轴模式下定高修正值对应的倾角计算值,后与 61° 比较,比较结果作为定高修正模式选择的依据,小于等于 61° 选用双轴修正模式;大于 61° 选用单轴修正模式。

5 结论

文中提出一种利用弹体倾角对激光定高引信进行定高修正的方法。建立了单、双轴两种修正模式,为减小定高修正值相对误差,通过对两种模式特点的分析,得出小倾角时选择双轴模式、大倾角时选择单轴模式的结论,实验结果表明,分段采用单、双轴两种修正模式的修正方法,可以校准传感器与弹体轴的安

装角度误差,并能够以较高的精度修正因弹体倾斜所造成的激光引信定高误差。

参考文献:

[1] 袁平,张合,陈炳林. 实现软杀伤弹药指令引信技术的途径[J]. 南京理工大学学报,2004,12(6):571-574.
 [2] 崔占忠,宋世和,徐立新. 近炸引信原理[M]. 3版. 北京:北京理工大学出版社,2009.
 [3] 乐开端,曹建安. 高精度激光倾角测量技术研究[J]. 光子学报,2004,33(9):1108-1110.
 [4] 林洪桦. 动态测试数据处理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1995.

(上接第 91 页)

4 结论

1) 利用灵敏度分析与试验反演修正确定模型参数,模拟了 Forrestal 的侵彻试验,所得结果与试验结果有着较高的一致性,证明了该种方法的可行性;

2) Ls-Dyna 中混凝土模型较多,各自有着其擅长的应用领域(如 MAT_159 适合模拟路旁水泥护栏),选择合适的模型,有利于提高准确度;

3) 参数灵敏度是在一定条件下测得的,同样模型的参数也对应着一定适用范围,绝不是用一组参数就能模拟任何速度下的侵彻问题,文中灵敏度分析及模型参数值,适用于中、低速侵彻。

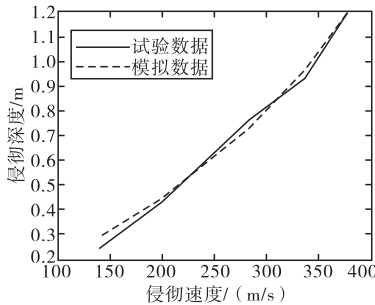


图 7 不同侵彻速度下的侵彻深度

参考文献:

[1] 王峰. 有限元方法及其在高速碰撞中的应用[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.
 [2] 刘少坤,李赞成,史天成. 高速侵彻体对各种介质侵彻深度的工程计算[J]. 弹箭与制导学报,2005,25(2):56-58.
 [3] 杨榕,徐文崢. 弹药侵彻混凝土过载性能的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2009,29(4):129-132.
 [4] 冷冰林,许金余,陈勇. 弹丸在不同速率下斜侵彻混凝土的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报,2008,28(3):123-125.
 [5] Vu X H, Malecot Y, Daudeville L, et al. Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: Effect of the saturation ratio[J]. International Journal of Solids and Structures,2009, 46(5):1105-1120.
 [6] 熊益波,陈剑杰,胡永乐. 混凝土 Johnson-Homquist 本构模型灵敏度参数的初步确认[J]. 兵工学报,2009,30(增刊2):145-148.
 [7] M J Forrestal, D J Frew, J P Hickerson, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International Journal of Impact Engineering,2003, 28(5):479-497.