

引用本文:梁 婧,刘慧萍,黄 华,等.强冲击荷载下 RC 板失效仿真研究[J].建筑科学与工程学报,2022,39(3):139-145.

LIANG Jing, LIU Hui-ping, HUANG Hua, et al. Simulation Research on Failure of RC Plate Under Strong Impact Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(3): 139-145.

DOI:10.19815/j.jace.2021.07051

强冲击荷载下 RC 板失效仿真研究

梁 婧¹, 刘慧萍¹, 黄 华², 银昱杰¹

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061))

摘要:为了更有效地模拟强冲击荷载作用下混凝土材料的失效行为,采用 LS-DYNA 软件,基于 HJC 模型,建立弹体冲击钢筋混凝土(RC)板有限元模型,研究失效类型、主应变、剪应变和应力等参数对弹体侵彻混凝土并贯穿 RC 板的影响规律。结果表明:当失效控制参数 FS 值取 0 或 1.0~1.5 时,部分模型的弹体未能贯穿 RC 板,与试验现象不符;当 FS 值为 0.1~0.9 时,弹体侵彻贯穿 RC 板后的残余速度随 FS 值的增大而减小,其中 FS 值为 0.3~0.8 时,模拟得到的残余速度与试验值吻合较好;在模型中添加失效准则,当主应变取 0.225~0.275 或剪应变取 0.4~0.5 时,弹体以 606、746、1 058 m·s⁻¹ 的速度冲击贯穿 RC 板的残余速度计算值与试验值更接近;在考虑主应变失效、剪应变失效或二者共同作用时,FS 值为 0.8 时的模拟结果与试验结果的吻合程度较好;拉伸应力失效准则不适用于较薄 RC 板遭受强冲击荷载作用的情况。

关键词:强冲击荷载;RC 板;HJC 模型;失效准则;残余速度

中图分类号:TU528

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2022)03-0139-07

Simulation Research on Failure of RC Plate Under Strong Impact Load

LIANG Jing¹, LIU Hui-ping¹, HUANG Hua², YIN Yu-jie¹

(1. School of Civil & Architecture Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to more effectively simulate the failure behavior of concrete materials under strong impact load, using LS-DYNA software and based on HJC model, the finite element model of projectile impact reinforced concrete (RC) plate was established, and the effects of failure type, principal strain, shear strain and stress on the penetration of projectile into concrete and through RC plate were studied. The results show that when failure control parameter FS value is 0 or 1.0-1.5, the projectile body of some models fails to penetrate the RC plate, which is inconsistent with the test phenomenon. When FS value is 0.1-0.9, the residual velocity of projectile penetrating through RC plate decreases with the increase of FS value. When FS value is 0.3-0.8, the simulated residual velocity is in good agreement with the experimental value. As for adding failure criteria to the model, when the principal strain is 0.225-0.275 or the shear strain is 0.4-0.5, the calculated residual velocity of the projectile penetrating through the RC plate at the speeds of 606, 746, 1 058 m·s⁻¹ is closer to the test value. When considering the principal

收稿日期:2021-07-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51778060)

作者简介:梁 婧(1996-),女,山西忻州人,工学硕士研究生,E-mail:771849958@qq.com。

通信作者:刘慧萍(1968-),女,湖北孝感人,教授,工学硕士,E-mail:lhpl104@163.com。

strain failure or shear strain failure or their combined action, the simulation results with FS value of 0.8 are in good agreement with the test. The tensile stress failure criterion is not suitable for thin RC plates subjected to strong impact load.

Key words: strong impact load; RC plate; HJC model; failure criterion; residual velocity

0 引言

近年来,由于恐怖袭击、局部战争等,混凝土结构常常遭受爆炸等袭击,LS-DYNA 软件常用来处理此类问题的非线性分析^[1-2]。在进行炮弹侵彻^[3-5]贯穿混凝土材料仿真分析时,常用 JOHNSON_HOLMQUIST_CONCRETE(HJC)模型来描述混凝土材料,并添加失效准则控制材料失效。LS-DYNA 关键字用户手册^[6]中 HJC 模型包含一个失效控制参数 FS 值。文献[7]从理论层面对 FS 值进行了分析,通过对 Hanchak 等^[8]的试验数值模拟得出 FS 值大于等于 0.67,进而定量分析得到 FS 值的假设值为 1.34。文献[9]对 FS 值给出了更简单直白的解释,量化计算出 FS 值为 1.3。文献[10]采用 DOE 分析参数灵敏度,在 0.3~0.7 之间调试 FS 值。ADD_EROSION 为 HJC 模型提供了考虑单一因素或多种因素共同控制材料失效的方法。文献[11]、[12]采用单一失效准则控制材料失效,文献[13]、[14]采用最大静水压力和最大剪应变失效准则,文献[15]主要研究了主应变、剪应变、应力失效准则参数以及它们之间相互耦合作用对侵彻能力的影响。LS-DYNA 软件提供了控制失效的多种方式,但如何更为合理地进行混凝土材料失效控制,目前还没有定论。

本文基于 LS-DYNA,构建单个弹体垂直冲击 RC 板的有限元模型,采用 HJC 模型和失效准则描述混凝土材料,通过对比分析弹体残余速度的计算结果和试验结果,得到 FS 值、主应变、剪应变和应力等参数对侵彻贯穿效应的影响规律,为 HJC 材料模型在强冲击荷载问题中的应用提供参考。

1 LS-DYNA 建模

本文以 Hanchak 等^[8]对混凝土强度为 48 MPa 的 RC 板的侵彻试验为对照,数值模拟直径为 25.4 mm、长径比为 5.657 的实心弹体侵彻贯穿尺寸为 610 mm×510 mm×178 mm、强度为 48 MP 的布有 3 层钢筋的混凝土板,研究参数 FS 值对侵彻贯穿效应的影响,有限元模型^[16-19]如图 1 所示,钢筋网及弹体位置如图 2 所示。试验中钢筋网间距为 76 mm,

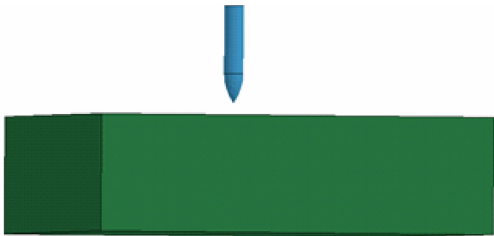


图 1 有限元模型

Fig. 1 Finite Element Model

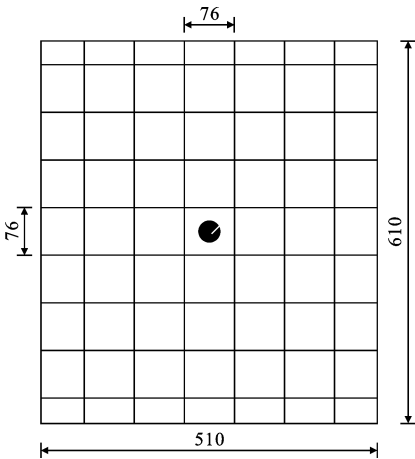


图 2 钢筋平面布置及弹体冲击位置(单位:mm)

Fig. 2 Rebar Layout and Impact Position of Projectile (Unit:mm)

大于弹体直径,弹体击中钢筋的概率较低,本文主要模拟弹体穿过 RC 板钢筋网眼的工况。

2 HJC 模型

2.1 HJC 本构

HJC^[20-22]本构模型可用于描述大应变、高应变率和高压力下的混凝土材料,其屈服应力表达式为 $\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}][1 + C \ln(\dot{\epsilon}^*)]$ (1) 式中: σ^* 为正则化的等效应力, $\sigma^* = \sigma/f_c$, σ 为实际等效应力, f_c 为准静态单轴抗压强度; $\dot{\epsilon}^*$ 为量纲一的应变率, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}$ 为实际应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率; P^* 为正则化的压力, $P^* = P/f_c$, P 为实际压力; A 为归一化内聚强度; B 为归一化压力硬化系数, C 为应变率影响系数; N 为压力硬化指数; D 为损伤因子。

2.2 失效类型

FS 值可表示失效类型,FS 值小于 0 表示模拟

计算中选择了用损伤因子 D 控制材料模型失效;FS 值等于 0 表示模拟计算中选择了拉伸破坏控制材料模型失效;FS 值大于 0 表示模拟计算中选择了受压破坏控制材料的失效^[7,9]。本文在 0~1.5 之间调整 FS 值,计算得到的残余速度如表 1 所示,计算值与试验值的对比如图 3 所示。

表 1 不同 FS 值的残余速度

Table 1 Residual Velocity of Different FS Values						
初始速度/(m·s ⁻¹)		360	434	606	746	1 059
残余速度试验值/ (m·s ⁻¹)		63	214	449	605	947
不同 FS 值的残 余速度/ (m·s ⁻¹)	0.0	0	0	0	400	924
	0.1	317	400	578	711	1 018
	0.2	294	377	546	678	982
	0.3	270	348	518	650	930
	0.4	240	318	491	622	870
	0.5	215	296	451	579	837
	0.6	191	265	380	493	817
	0.7	172	220	333	450	803
	0.8	77	149	299	404	940
	0.9	18	55	262	367	939
	1.0	0	0	227	331	797
	1.1	0	0	77	315	938
	1.2	0	0	0	260	938
	1.3	0	0	0	230	939
	1.4	0	0	0	223	939
1.5	0	0	0	204	935	

根据 Hanchak 等^[8]的试验,弹体极限贯穿速度在 301~360 m·s⁻¹之间。从表 1 可以看出,当 FS 值取 0 或 1.0~1.5 时,部分模型的弹体未能贯穿 RC 板,与试验现象不符。当 FS 值为 0.1~0.9 时,残余速度计算值随 FS 值增大而减小。当 FS 值为 0.3~0.5 时,弹体以 606、746、1 059 m·s⁻¹的速度侵彻贯穿 RC 板时计算值与试验值的吻合程度较好。当 FS 值为 0.7~0.8 时,弹体以 360、434 m·s⁻¹的速度侵彻贯穿 RC 板时计算值与试验值吻合程度较好。

从图 3 可以看出,当 FS 值为 0.1~0.5 时,残余速度计算值高于试验值,计算值曲线可近似看成是相互平行的,在速度一定的条件下,计算结果呈现出等差递减的趋势,但 FS 值为 0.3~0.5 时的计算值曲线与试验值曲线吻合较好。当 FS 值为 0.6~0.9 时,计算值低于试验值,初始冲击速度为 606、746、1 058 m·s⁻¹的计算结果误差较大,初始冲击速度为 360、434 m·s⁻¹的计算结果吻合较好。当 FS 值为 0 或 1.0~1.5 时,模拟计算结果与试验值

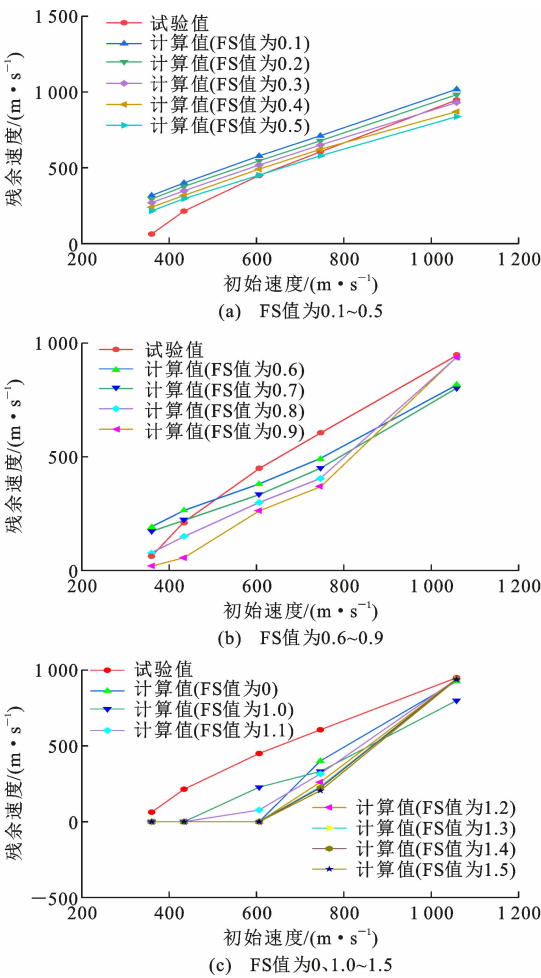


图 3 不同 FS 值时的残余速度计算值和试验值对比

Fig. 3 Comparison Between Residual Velocity Calculated Value and Test Value of Different FS Values

误差很大且部分计算结果不合理,FS 值取值越大,这种不合理结果出现越多。总体上,FS 值为 0.3~0.8 时,残余速度计算值曲线与试验值曲线吻合良好。

结合表 1 和图 3 可知:当 FS 值为 0.5 时得到的残余速度曲线吻合较好,但两端吻合较差;FS 值为 0.8 的计算结果两端吻合良好。本文尝试在 FS 值为 0.8 的条件下研究失效参数对弹体冲击 RC 板侵彻贯穿效应的影响。

3 失效准则对侵彻贯穿能力的影响

3.1 ADD_EROSION 模型

LS-DYNA 中的许多本构模型不允许失效和侵蚀。ADD_EROSION 模型提供了一种在这些模型中包含失效的方法。关于混凝土材料失效准则的研究主要集中于主应变、剪应变、应力失效准则参数以及它们之间相互耦合作用对侵彻能力的影响。对应

到最新失效模型^[23]中,即控制最小破坏压力(MN-PRES)、最大破坏主应变(MXEPS)和最大破坏剪应变(EPSSH)来研究混凝土材料的失效。

3.2 MXEPS 值对侵彻贯穿效应的影响

在 FS 值为 0.8 的情况下,MXEPS 值取 0.2~0.3,每隔 0.025 递增,计算结果如图 4 所示。

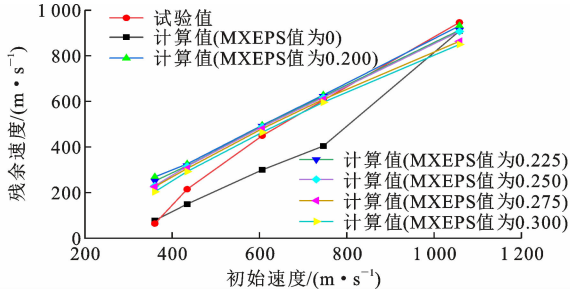


图 4 不同 MXEPS 值的残余速度曲线(FS 值为 0.8)

Fig. 4 Residual Velocity Curves of Different MXEPS Values (FS Value Is 0.8)

给混凝土材料添加主应变失效准则得到的计算结果明显优于仅通过 HJC 模型参数 FS 值为 0.8 时控制材料失效的结果,与试验值曲线更为吻合。残余速度计算值随着 MXEPS 值增大而减小,初始速度为 434、606、746 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的计算值下降幅度不大;初始速度为 360 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的计算值降幅相对较大,降低了 65 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;初始速度为 1 058 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的计算相对误差从-2%增加到-10%。MXEPS 值为 0.25 时残余速度的计算值曲线与试验值曲线吻合程度更好。

设置 MXEPS 值为 0.3,取 FS 值为 0.5、0.8、1.3 分别进行模拟,计算结果如图 5 所示。MXEPS 取值一定,3 条残余速度曲线仅有微小的差别。FS 值为 0.8 的曲线和 FS 值为 1.3 的曲线近乎重合。通过比较初始速度为 360 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 1 058 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的计算结果,发现 FS 值为 0.8 的曲线拟合优于 FS 值为 0.5 的曲线。

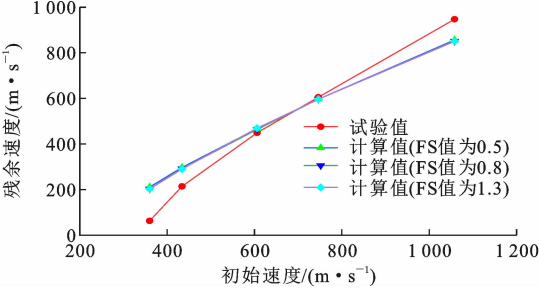


图 5 不同 FS 值的残余速度曲线(MXEPS 值为 0.3)

Fig. 5 Residual Velocity Curves of Different FS Values (MXEPS Value Is 0.3)

3.3 EPSSH 值对侵彻贯穿效应的影响

在 FS 值为 0.8 的情况下,EPSSH 值取 0.35~0.55,每隔 0.05 递增,计算结果如图 6 所示。

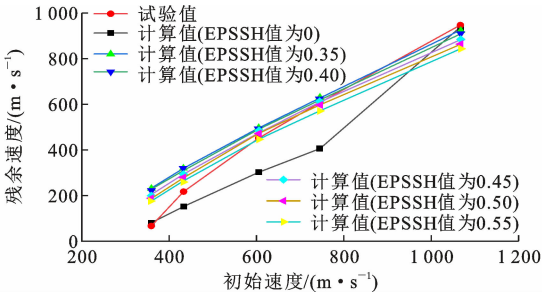


图 6 不同 EPSSH 值的残余速度曲线(FS 值为 0.8)

Fig. 6 Residual Velocity Curves of Different EPSSH Values (FS Value Is 0.8)

添加剪应变失效准则得到的计算结果优于仅通过 HJC 模型参数 FS 值为 0.8 时控制材料失效的计算结果,与试验值更为吻合。残余速度计算值随 EPSSH 值的增大而减小,初始速度为 434、606、746 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的计算值下降幅度不大;初始速度为 360 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的计算值下降幅度相对较大,降低了 54 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,初始速度为 1 058 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的计算相对误差从-2%增到-11%。EPSSH 值为 0.45 时残余速度的计算结果曲线与试验值曲线吻合程度更好。

EPSSH 值为 0.45 时,取 FS 值为 0.5、0.8、1.3 分别进行模拟计算,结果如图 7 所示。EPSSH 取值一定时,3 条残余速度曲线仅有微小的差别。FS 值为 0.8 的曲线和 FS 值为 1.3 的曲线近乎重合。通过比较曲线两端,发现 FS 值为 0.8 的曲线与试验曲线吻合更好。

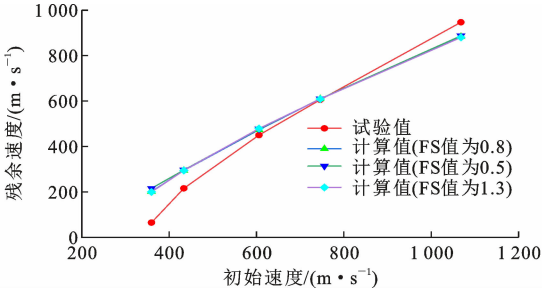


图 7 不同 FS 值的残余速度曲线(EPSSH 值为 0.45)

Fig. 7 Residual Velocity Curves of Different FS Values (EPSSH Value Is 0.45)

3.4 MNPRES 值对侵彻贯穿效应的影响

根据 Hanchak 等^[8]的研究,强度为 48 MP 的混凝土材料最小破坏压应力为-4 MPa。在 MN-PRES 等于-4 MPa 的条件下,调整参数 FS 值研究弹体冲击 RC 板侵彻贯穿效应,计算结果如表 2 所

表 2 不同 FS 值的残余速度(MNRES 值为-4 MPa)

Table 2 Residual Velocity of Different FS Values

(MNRES Value Is -4 MPa)

初始速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	残余速度 试验值/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	不同 FS 值时的残余速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)				
		0.3	0.5	0.8	1.0	1.3
360	63	342	342	340	340	341
434	214	419	419	420	421	422
606	449	599	599	600	421	599
746	605	740	740	740	739	739
1 058	947	1 053	1 053	1 053	1 053	1 053

示。MNPRES 值不变时,参数 FS 值的大小不影响计算结果。考虑拉伸失效计算得到的残余速度近乎等于初始冲击速度,即模拟中用该失效准则描述的混凝土材料破坏太早,这与试验现象不符,说明仅采用拉伸失效准则描述混凝土材料并不合适。

3.5 MXEPS 和 EPSSH 共同作用

在 FS 值为 0.8 的条件下,考虑主应变失效准则和剪应变失效准则共同作用,研究弹体冲击 RC 板侵彻贯穿效应的影响。MXEPS 值取 0.225、0.250和 0.275,EPSSH 值取 0.4、0.45 和 0.5 时,计算结果如图 8 所示。

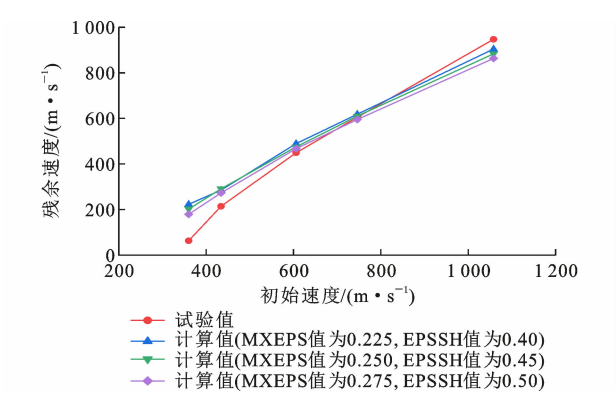


图 8 MXEPS 和 EPSSH 共同作用下的残余速度曲线

(FS 值为 0.8)

Fig. 8 Residual Velocity Curves Under Combined Action of MXEPS and EPSSH (FS Value Is 0.8)

从图 8 可以看出,MXEPS 和 EPSSH 的取值越大,残余速度计算结果越小。总体上看 FS 值为 0.8、MXEPS 值为 0.25、EPSSH 值为 0.45 的计算值曲线与试验值曲线吻合更好。当设置参数 MXEPS 值为 0.25、EPSSH 值为 0.45 时,取 FS 值为 0.5、0.8、1.3 分别进行模拟计算,结果如图 9 所示,FS 值为 0.8 的计算值曲线拟合优于 FS 值为 0.5 的计算值曲线。

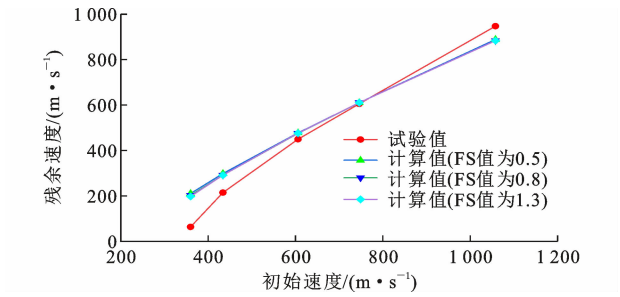


图 9 不同 FS 值的残余速度曲线(MXEPS 值为 0.25, EPSSH 值为 0.45)

Fig. 9 Residual Velocity Curves of Different FS Values

(MXEPS Value Is 0.25,EPSSH Value Is 0.45)

3.6 考虑包含 MNPRES 的多参数共同作用

MNPRES 值为-4 MPa 时,考虑主应变失效、剪应变失效作用,研究弹体冲击 RC 板侵彻贯穿效应,计算结果如表 3 所示。

考虑拉应力失效和剪应变失效、拉应力失效和主应变失效与拉应力失效、主应变失效、剪应变失效这 3 种情况下计算得到的残余速度几乎相同,且与仅考虑参数 FS 值作用的计算结果保持一致。该计算结果与试验值相差很多,但比仅考虑 MNPRES 作用的计算结果要好。在弹体侵彻贯穿较薄 RC 板的模拟计算中考虑拉伸失效作用并不合适。这也反映了在强冲击荷载作用下,混凝土材料拉伸断裂占比很小,HJC 模型不能很好地反映出材料的动态拉伸失效现象。

4 结 语

(1)当 FS 值取 0 或在 1.0~1.5 范围内时,部分模型的弹体未能贯穿 RC 板,与试验现象不符。

(2)当 FS 值为 0.1~0.9 时,残余速度计算值随 FS 值增大而减小,其中当 FS 值为 0.3~0.8 时,残余速度计算值与试验值吻合程度较好。

(3)当 MXEPS 值为 0.225~0.275 或 EPSSH 值为 0.4~0.5 时,弹体以 606、746、1 058 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的速度冲击并贯穿 RC 板后的残余速度计算值与试验值更接近。

(4)在考虑主应变失效、剪应变失效或二者共同作用时,当 FS 值为 0.8 时计算结果与试验结果吻合程度较好。

(5)拉伸应力失效准则不适用于较薄 RC 板遭受强冲击荷载作用的情况。

参考文献:

References:

[1] 谷长春,石明全.基于 ANSYS/LS-DYNA 的高速碰

表 3 多个参数共同作用下模拟得到的残余速度

Table 3 Residual Velocity Simulated by Combined Action of Multiple Factors

FS 值	初始速度/ (m·s ⁻¹)	残余速度/ (m·s ⁻¹)	MNPRES 值为-4 MPa 时的残余速度/(m·s ⁻¹)				
			EPSSH 值为 0.35	EPSSH 值为 0.55	MXEPS 值为 0.2	MXEPS 值为 0.3	MEPS 值为 0.25 EPSSH 值为 0.45
0.5	360	215	208	208	211	209	208
	434	296	297	302	297	295	296
	606	451	453	452	453	452	448
	746	579	577	578	576	576	564
	1 058	837	840	941	836	838	837
0.8	360	77	92	89	88	89	97
	434	149	145	145	147	146	139
	606	299	299	291	295	299	306
	746	404	404	409	408	408	406
	1 058	941	941	937	939	938	937
1.3	360	0	0	0	0	0	0
	434	0	0	0	0	0	0
	606	0	0	0	0	0	0
	746	230	237	233	235	235	232
	1 058	1 056	937	939	939	936	939

撞过程的数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (15):4621-4624.

GU Chang-chun,SHI Ming-quan. Numerical Simulation of High-velocity Impact with ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of System Simulation,2009,21(15): 4621-4624.

[2] 许庆新,黄建中,沈荣瀛. 装甲材料侵彻试验仿真[J]. 振动与冲击,2006,25(2):117-119,124,189.

XU Qing-xin, HUANG Jian-zhong, SHEN Rong-ying. Simulation of Penetration Test of Armoured Plate[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(2):117-119,124,189.

[3] 虞吉林,余同希,周风华. 材料和结构的动态吸能[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,2015.

YU Ji-lin, YU Tong-xi, ZHOU Feng-hua. Dynamic Energy Absorption of Materials and Structures[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press,2015.

[4] XIE Q H, JING L, WANG Z H, et al. Deformation and Failure of Clamped Shallow Sandwich Arches with Foam Core Subjected to Projectile Impact[J]. Composites Part B: Engineering, 2013, 44 (1): 330-338.

[5] JING L, WANG Z H, NING J G, et al. The Mechanical Response of Metallic Sandwich Beams Under Foam Projectile Impact Loading[J]. Latin American Journal of Solids and Structures, 2011, 8 (1): 107-120.

[6] Livermore; Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Keyword User's Manual (Version 971/Rev5) [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation,2003.

[7] 孙其然,李芮宇,赵亚运,等. HJC 模型模拟钢筋混凝土侵彻实验的参数研究[J]. 工程力学,2016,33(8): 248-256.

SUN Qi-ran, LI Rui-yu, ZHAO Ya-yun, et al. Investigation on Parameters of HJC Model Applied to Simulate Perforation Experiments of Reinforced Concrete[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33 (8): 248-256.

[8] HANCHAK S J, FORRESTAL M J, YOUNG E R, et al. Perforation of Concrete Slabs with 48 MPa (7 ksi) and 140 MPa (20 ksi) Unconfined Compressive Strengths[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992, 12(1):1-7.

[9] 林琛,徐建军,杨晋伟,等. 基于 HJC 模型的钢筋混凝土侵彻仿真失效准则与参数[J]. 探测与控制学报, 2017, 39(2):100-105.

LIN Chen, XU Jian-jun, YANG Jin-wei, et al. The Failure Criteria and Parameters of HJC Model Based Perforation Simulation[J]. Journal of Detection & Control, 2017, 39(2):100-105.

[10] 汪衡,董静,顾振中,等. HJC 模型参数对侵彻效应影响度的数值研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(3):200-204.

WANG Heng, DONG Jing, GU Zhen-zhong, et al.

- Numerical Study on the Effect of HJC Model Parameters on Penetration[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(3): 200-204.
- [11] 林华令,丁育青,汤文辉. 混凝土侵彻数值模拟的影响因素[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(4): 425-429.
LIN Hua-ling, DING Yu-qing, TANG Wen-hui. Factors Influencing Numerical Simulation of Concrete Penetration[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(4): 425-429.
- [12] 姜 华,王君杰. 弹体侵彻混凝土数值模拟失效指标研究[J]. 振动与冲击, 2009, 28(8): 30-34, 197.
JIANG Hua, WANG Jun-jie. Investigation on Failure Index of Concrete in the Projectile Perforation Simulation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(8): 30-34, 197.
- [13] 王建刚. 子弹侵彻钢筋混凝土的数值模拟研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
WANG Jian-gang. Numerical Simulation on the Penetration of Reinforced Concrete Targets[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [14] 胡怀春. 侵彻混凝土目标贯穿特性分析及靶后炸点精度控制研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.
HU Huai-chun. Analysis of Penetration Characteristics of Penetrating Concrete Target and Research on Accuracy Control of Explosion Point Behind the Target[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [15] 汪 衡,汪于程,蔡金良,等. HJC 模型失效参数对侵彻能力影响的数值研究[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(10): 150-155.
WANG Heng, WANG Yu-cheng, CAI Jin-liang, et al. Numerical Study on Effect of Failure Parameters of HJC Model on Penetration Effect[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(10): 150-155.
- [16] 张斌伟,舒健生,李亚雄,等. 穿爆弹侵彻多层间隔混凝土靶数值模拟分析[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(9): 88-91, 97.
ZHANG Bin-wei, SHU Jian-sheng, LI Ya-xiong, et al. Numerical Simulation Analysis of Multi-layered Concrete Target[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(9): 88-91, 97.
- [17] 王玉华,黄凯明. 基于 ANSYS/LS-DYNA 高速弹头冲击仿真[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(10): 112-115.
WANG Yu-hua, HUANG Kai-ming. Simulation of High-speed Warhead Impact Based on ANSYS/LS-DYNA [J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(10): 112-115.
- [18] 钟大鹏,焦志刚,董 兴. 穿甲爆破弹对钢筋混凝土靶极限贯穿速度分析[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(6): 53-56, 61.
ZHONG Da-peng, JIAO Zhi-gang, DONG Xing. Limit Perforation Velocity Analysis of Armor-piercing High-explosive Projectile Penetrating Reinforced Concrete[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2015, 35(6): 53-56, 61.
- [19] 屈 明,陈小伟. 钢筋混凝土穿甲的数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(4): 341-349.
QU Ming, CHEN Xiao-wei. Numerical Simulations on Perforation of Reinforced Concrete Targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(4): 341-349.
- [20] 熊益波,陈剑杰,胡永乐,等. 混凝土 Johnson-Holmquist 本构模型关键参数研究[J]. 工程力学, 2012, 29(1): 121-127.
XIONG Yi-bo, CHEN Jian-jie, HU Yong-le, et al. Study on the Key Parameters of the Johnson-Holmquist Constitutive Model for Concrete[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(1): 121-127.
- [21] 商 霖,宁建国,孙远翔. 强冲击载荷作用下钢筋混凝土本构关系的研究[J]. 固体力学学报, 2005, 26(2): 175-181.
SHANG Lin, NING Jian-guo, SUN Yuan-xiang. The Constitutive Relationship of Reinforced Concrete Subjected to Shock Loading[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2005, 26(2): 175-181.
- [22] 周 旭. 导弹毁伤效能试验与评估[M]. 北京:国防工业出版社, 2014.
ZHOU Xu. Missile Damage Effectiveness Test and Evaluation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014.
- [23] LSTC. LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. Livermore: LSTC, 2018.