

文章编号: 1001-1455(2010)02-0178-05

含筋率和弹着点对钢筋混凝土 抗侵彻性能的影响*

楼建锋^{1,2}, 王政¹, 朱建士¹, 张凤国¹, 洪滔¹

(1. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094;

2. 中国工程物理研究院北京研究生部, 北京 100088)

摘要: 阐述了侵彻钢筋混凝土几种常用的建模方法, 选用 AUTODYN 中的 Lagrange 算法, 对已有的动能弹侵彻钢筋混凝土问题进行了计算, 计算结果与试验数据符合较好。使用此方法, 分析了含筋率和配筋方式对钢筋混凝土靶抗侵彻性能的影响, 以及弹着点对动能弹侵彻性能的影响。研究表明, 钢筋越粗或者钢筋编织越密, 即含筋率越高, 钢筋混凝土靶板的抗侵彻能力越强, 尤其对于动能弹直径大于靶板中钢筋间距的情况, 效果明显; 另外, 弹着点对动能弹侵彻能力有较大影响。

关键词: 爆炸力学; 侵彻; Lagrange 算法; 钢筋混凝土; 含筋率; 配筋方式; 弹着点

中图分类号: O385 **国标学科代码:** 130 · 3530 **文献标志码:** A

1 引言

混凝土和钢筋是基础设施建设的主要原料, 钢筋混凝土不仅被广泛地应用于民用领域, 而且也是重要的政治和军事目标的建筑和防护材料。如何利用动能侵彻爆炸战斗部有效打击地下工事, 或者如何提高地下工事的防护能力, 一直是受到广泛关注, 其中, 钢筋对混凝土靶板抗侵彻能力的影响是研究上述问题的重要内容。

对动能弹侵彻钢筋混凝土问题已进行了大量研究, 以往关注较多的是动能弹头部形状对侵彻能力的影响^[1-2]; 或者是对混凝土本构关系的研究^[3-7], 其中数值建模中对钢筋混凝土的处理, 大多采用等效强度的素混凝土替代。近年来, 随着计算机硬件的迅速发展和计算方法的不断创新, 出现了大型可视化软件, 如 LS-DYNA、AUTODYN 等, 为动能弹侵彻钢筋混凝土问题的建模提供了有效的工具。

钢筋混凝土侵彻问题的仿真计算, 不仅是 3 维问题, 而且具有多介质和多滑移边界, 主要技术难度是计算的离散化处理。侵彻钢筋混凝土问题, 常用 LS-DYNA、AUTODYN 等有限元软件建模^[6,8], 对侵彻体通常采用 Lagrange 方法计算, 而钢筋混凝土靶常用 Lagrange 方法或 SPH 方法。计算规模相同时, Lagrange 方法计算速度快, SPH 方法计算速度慢。计算模型中, 对侵彻体常用六面体单元, 对钢筋采用六面体单元或 beam 单元处理, 而对混凝土用六面体单元或 SPH 粒子处理。对钢筋和混凝土都使用六面体单元处理时, 计算模型初始网格的生成较困难。

在此类问题的数值模拟中, 网格单元尺寸的划分对计算结果有较大的影响。门建兵等^[8]在使用 AUTODYN 计算侵彻混凝土类问题的研究工作中指出, 弹丸半径方向应至少具有 3 个网格, 为得到较理想的计算结果, 弹丸半径和靶板网格边长的比值应该在 6.0 左右, 若仅关心侵彻深度, 取值不小于 4.0 即可满足计算精度要求。

在上述讨论的基础上, 本文中选择一个简单可行的计算方法, 并用试验结果进行验证, 分析含筋率和配筋方式对钢筋混凝土靶抗侵彻性能的影响, 以及弹着点对动能弹侵彻钢筋混凝土的影响。

* 收稿日期: 2009-01-15; 修回日期: 2009-09-08

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(61392020101);

中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2007A09002)

作者简介: 楼建锋(1980—), 男, 博士研究生, 助理研究员。

2 数值计算方法的建立及验证

为研究含筋率对动能弹侵彻钢筋混凝土的影响,综合考虑计算效率和生成初始模型的难易,采用非线性动力软件 AUTODYN 中的 Lagrange 算法,对侵彻体和混凝土都使用六面体单元处理,而对钢筋采用 beam 单元处理,侵彻体和混凝土之间设置接触,钢筋和混凝土用共节点连接,计算模型示意图如图 1 所示。

为验证计算方法的可行性,对 S.J. Hanchak 等^[9]关于小直径动能弹(初速为 743 m/s)贯穿高强度钢筋混凝土的试验进行了数值计算。动能弹长 143.7 mm,直径为 25.4mm,头部形状 CRH=3。钢筋混凝土靶尺寸为 610 mm × 610 mm × 178 mm,混凝土中间布置 3 排钢筋网,排间距离为 76.2 mm,每排钢筋以 76.2 mm × 76.2 mm 形式编织,钢筋直径为 5.7 mm,几何模型如图 2 所示。对于网格尺寸的选取,弹体半径方向划分 6 个网格,混凝土靶板的网格边长是弹体半径的 1/4。

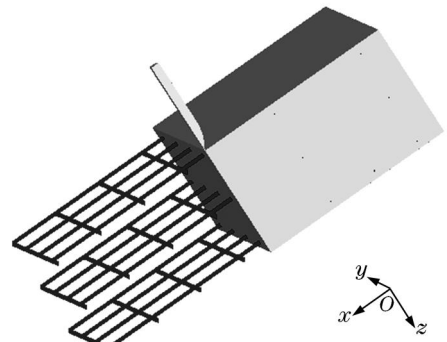


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Schematic of the computational model

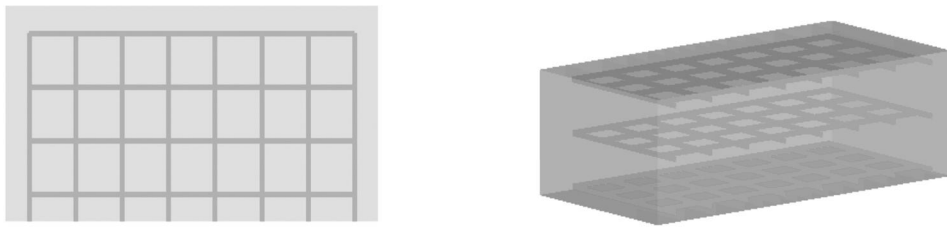


图 2 钢筋混凝土几何模型

Fig. 2 Reinforced concrete geometry

计算中,材料模型主要包括材料的状态方程、强度模型、失效准则和侵蚀判据^[10]。表 1 中列出了弹靶选用的材料模型,在 Steinberg 模型^[11]中,考虑了压力效应、温度和塑性延展率,结合 Shock 状态方程,是动能弹侵彻问题中金属材料常用的计算模型之一;RHT 模型^[12]中对极限面的描述较细致,假设有 3 个极限面,即初始屈服极限面、最大极限面和残余强度极限面。N. Heider 等^[13]用此模型进行了射流及动能弹对混凝土靶侵彻问题的数值计算。对材料参数采用 AUTODYN 软件自带的参数,动能弹材料为 T-250 钢,密度 $\rho = 8.0 \text{ t/m}^3$,弹性模量 $E = 207 \text{ GPa}$,屈服强度 $\sigma_y = 1.724 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.3$ 。混凝土靶强度为 140 MPa,钢筋密度 $\rho = 7.5 \text{ t/m}^3$,弹性模量 $E = 210 \text{ GPa}$,屈服强度 $\sigma_y = 0.389 \text{ GPa}$,泊松比 $\nu = 0.284$ 。

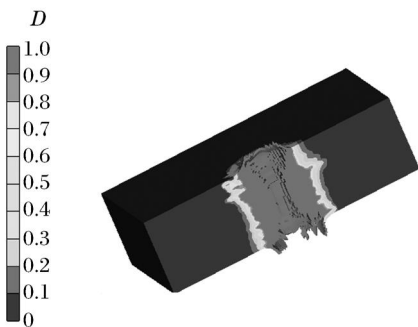


图 3 弹丸穿靶后靶板的毁伤情况

Fig. 3 Result for damage of the concrete target

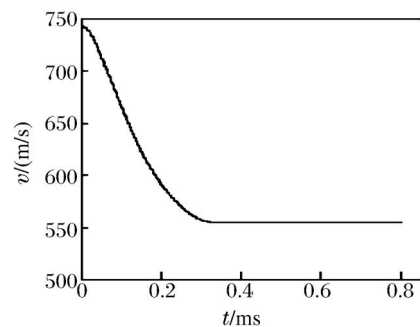


图 4 穿靶过程动能弹的速度历史曲线

Fig. 4 Velocity-history curve of the projectile

表1 对弹靶选用的材料模型
Table 1 Material models for the projectile and target

材料	状态方程	强度模型	失效准则	侵蚀判据
弹体	Shock	Steinberg Guinan	None	None
混凝土	P alpha	RHT Concrete	RHT concrete	Plastic strain (0.7)
钢筋	Linear	von-Mises	None	Plastic strain (0.8)

弹丸穿靶后靶板的毁伤情况如图3所示,图4是穿靶过程动能弹的速度历史曲线,计算得到的弹体剩余速度为555 m/s,与试验测试结果544 m/s符合较好,表明上述计算方法可以用来数值模拟动能弹侵彻钢筋混凝土类问题。

3 含筋率对钢筋混凝土靶抗侵彻性能的影响

含筋率是影响钢筋混凝土靶板抗侵彻能力的重要因素。实际工程建设中,钢筋的粗细与钢筋编织的疏密程度,是影响体积含筋率的2个主要方面。在数值模拟中,假设弹着点在钢筋框架的中心,通过调整钢筋的直径与钢筋的疏密改变体积含筋率(见图5),来分析含筋率对靶板抗侵彻能力的影响。

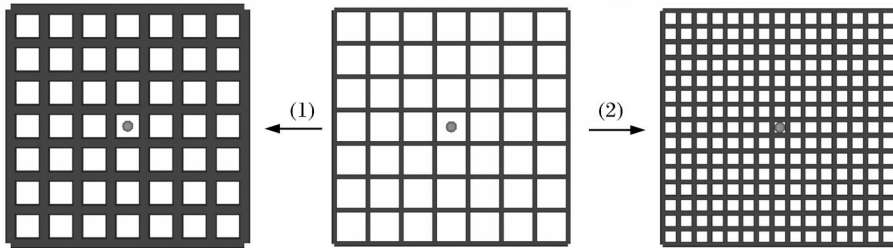


图5 改变体积含筋率的2种方式

Fig. 5 Two methods to change reinforcement ratio

3.1 调整钢筋直径的大小改变体积含筋率

固定钢筋的排列方式,通过改变钢筋的直径 d ,对动能弹侵彻钢筋混凝土靶进行了一系列数值模拟。针对下列2类模型:(1)动能弹直径小于钢筋间距,采用J. S. Hanchak等^[9]的试验模型,动能弹直径为25.4 mm,钢筋间距为76.2 mm;(2)动能弹直径大于钢筋间距,动能弹直径为25.4 mm,钢筋间距为23.2 mm;分别计算了含筋率从1%~5%的各种侵彻过程(着速为743 m/s)。

表2给出了不同含筋率下动能弹穿过靶板后的剩余速度 v_r 、剩余动能 E_r 和初始动能 E_0 之比。对于模型2,不同含筋率下弹丸侵彻速度的历史曲线如图6所示。结果表明,动能弹在钢筋框架中心穿过时,若动能弹直径大于钢筋间距,提高含筋率增强了钢筋混凝土靶的抗侵彻能力,体积含筋率从1%提高到2%时,多消耗弹丸动能4.5%,当含筋率提高到5%的时候,多消耗10.7%;而动能弹直径小于钢筋间距,改变含筋率对钢筋混凝土靶板抗侵彻能力的影响很小。

表2 不同含筋率下弹丸的剩余速度、剩余动能

Table 2 Residual velocity and kinetic energy for various reinforcement ratios

/ %	模型1			模型2		
	d /mm	v_r /(m/s)	(E_r/E_0) /%	d /mm	v_r /(m/s)	(E_r/E_0) /%
1	5.7	554.8	55.8	3.3	474.5	40.8
2	8.1	554.6	55.7	4.7	447.6	36.3
3	9.9	554.5	55.7	5.7	436.2	34.5
4	11.4	554.3	55.7	6.6	424.9	32.7
5	12.8	554.2	55.6	7.4	407.4	30.1

3.2 调整钢筋排列的疏密改变体积含筋率

固定钢筋直径为5.7 mm,通过改变钢筋排列的疏密,即调整钢筋间距 l 从76.2 mm到13.7 mm,进行了一系列数值计算。表3给出了调整钢筋排列疏密改变含筋率得到的计算结果,可以看到,钢筋编织越密,含筋率越高,弹丸剩余动能越小,表明钢筋混凝土靶的抗侵彻能力越强。

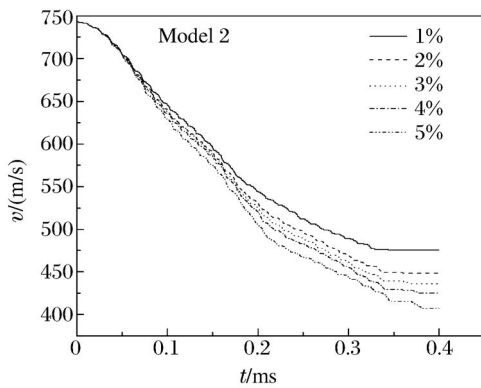


图 6 在不同含筋率下弹丸侵彻速度的历史曲线
Fig. 6 Velocity-history curves of the projectile for various reinforcement ratios

表 3 调整钢筋排列疏密改变含筋率得到的计算结果

Table 3 Residual velocity and kinetic energy for various closeness

/ %	l/ mm	$v_r/ (m/ s)$	$(E_r/ E_0)/ \%$
1	76.2	554.8	55.8
2	35.6	473.9	40.7
3	23.2	436.2	34.5
4	17.2	420.8	32.1
5	13.7	376.4	25.7

表 4 3 类典型命中位置的计算结果

Table 4 Residual velocity and kinetic energy for 3 impact positions

弹着点	$v_r/ (m/ s)$	$(E_r/ E_0)/ \%$
位置 1	490.5	49.1
位置 2	391.2	31.2
位置 3	221.5	10.0

4 弹着点对动能弹侵彻钢筋混凝土的影响

钢筋在混凝土中不连续、呈网格状排列，因此动能弹命中靶板的不同位置会对侵彻结果产生影响。一般说来，弹着点的影响很难试验验证，实际上弹着点存在滑移，数值模拟中假定弹着点不变，概括起来，有 3 类典型位置（见图 7）：（1）弹丸没有击中钢筋；（2）弹丸击中 1 排钢筋；（3）击中钢筋交叉点。

对弹靶仍采用 S.J. Hanchak 等^[9]的试验模型，着靶速度取 700 m/s，分别对上述 3 类命中位置进行了侵彻计算，结果如表 4 所示。可以看到，弹着点对侵彻能力的影响较大。图 8 显示了不同弹着点下钢筋混凝土靶的破坏情况，为了显示钢筋的破坏情况，图中略去了表面混凝土层。

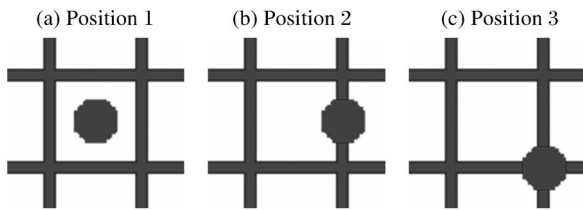


图 7 弹着点的 3 类典型位置
Fig. 7 Three typical impact positions

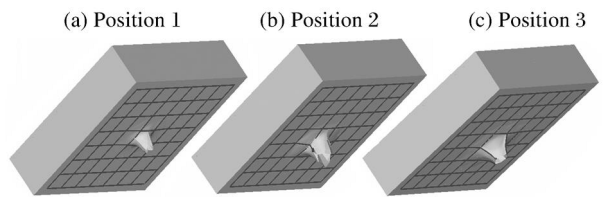


图 8 不同弹着点下钢筋混凝土靶的破坏情况
Fig. 8 Target destruction at different impact positions

5 小 结

首先阐述了侵彻钢筋混凝土的几种常用的建模方法，比较优缺点后，选用 AUTODYN 中的 Lagrange 算法，对已有的动能弹侵彻钢筋混凝土问题进行计算，计算结果与试验数据符合较好。然后使用此方法，分析了含筋率和配筋方式对钢筋混凝土靶抗侵彻性能的影响，以及弹着点对动能弹侵彻性能的影响。研究表明，钢筋越粗或者钢筋编织越密，即含筋率越高，钢筋混凝土靶板的抗侵彻能力越强，尤其对于动能弹直径大于靶板中钢筋间距的情况；另外，弹着点对动能弹侵彻能力有较大影响。

参考文献：

[1] Luk V K, Forrestal M J. Penetration into semi-infinite reinforced-concrete targets with spherical and ogive-nose projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1987, 6:291-301.
 [2] Luk V K, Forrestal M J. Comment on "Penetration into semi-infinite reinforced-concrete targets with spherical and ogive-nose projectiles"[J]. International Journal of Impact Engineering, 1989, 8:83-84.
 [3] 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[C]. Proceedings of the 14th International Symposium on Ballistics.

- Quebec City, Canada, 1993:591-600.
- [4] Chen E P. Simulation of concrete perforation based on a continuum damage model[R]. DE 95000544, 1994.
- [5] 张凤国,李恩征.大应变、高应变率及高压强条件下混凝土的计算模型[J].爆炸与冲击,2002,22(3):198-202.
ZHANG Feng-guo, LI En-zheng. A computational model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressures[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,22(3):198-202.
- [6] 武海军,黄风雷,金乾坤,等.弹体贯穿钢筋混凝土数值模拟[J].爆炸与冲击,2003,23(6):545-550.
WU Hai-jun, HUANG Feng-lei, JIN Qian-kun, et al. Numerical simulation on perforation of reinforced concrete targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(6):545-550.
- [7] 王政,倪玉山,曹菊珍,等.冲击载荷下混凝土本构模型构建研究[J].高压物理学报,2006,20(4):337-344.
WANG Zheng, NI Yu-shan, CAO Ju-zhen, et al. Building of constitutive model for concrete under dynamic impact[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2006,20(4):337-344.
- [8] 门建兵,隋树元,蒋建伟,等.网格对混凝土侵彻数值模拟的影响[J].北京理工大学学报,2005,25(8):559-662.
MEN Jian-bing, SUI Shu-yuan, JIANG Jian-wei, et al. Mesh dependency for numerical simulation of concrete penetration[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2005,25(8):559-662.
- [9] Hanchak SJ, Forrestal MJ, Young ER, et al. Perforation of concrete slabs with 48 MPa and 140 MPa unconfined compressive strengths[J]. International Journal of Impact Engineering, 1992,12(1):1-7.
- [10] Interactive Non-linear Dynamic Analysis Software AUTODYN TM User Manual[M]. Revision 3. Century Dynamics Inc, 1997.
- [11] Steinberg DJ. Equation of State and Strength Properties of Selected Materials[M]. LLNL,1991.
- [12] Riedel W. Beton unter dynamischen Lasten: Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter[D]. Freiburg, Germany: Phd Thesis, Ernst-Mach Institut, 2000.
- [13] Heider N, Hiermaier S. Numerical simulation of tandem warheads[C] Crewther IR. Proceeding of The 19th International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland: IBS2001 Symposium Office, 2001:1493-1499.

Effects of reinforcement ratio and impact position on anti-penetration properties of reinforced concrete *

LOU Jian-feng^{1,2}, WANG Zheng¹, ZHU Jian-shi¹, ZHANG Feng-guo¹, HONG Tao¹

(1. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;

2. Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China)

Abstract: Several common methods to simulate the problem of penetrating reinforced concrete were presented. Lagrange algorithm in AUTODYN was used to calculate the experiment of kinetic energy projectile penetrating reinforced concrete from the reference, the results were agreed well. With this method, the influence of reinforcement ratio, rebar schemes and impact position were analyzed. It is indicated, from the numerical results, increasing reinforcement ratio can enhance the anti-penetration property of reinforced concrete, especially in the case, where the diameter of projectile exceeds the distance of rebar. In addition, the influence of impact position is obvious.

Key words: mechanics of explosion; penetration; Lagrange algorithm; reinforced concrete; percentage of reinforcement; rebar schemes; impact position

* Received 15 January 2009; Revised 8 September 2009

Supported by the National Basic Research Program (973 Program) (61392020101)

Corresponding author: LOU Jian-feng, jflou@iapcm.ac.cn

(责任编辑 张凌云)