文章编号:1000-5773(2010)03-0175-06

岩石、混凝土和土抗侵彻能力数值计算与分析*

王 政,楼建锋,勇 珩,梁龙河

(北京应用物理与计算数学研究所,北京 100094)

摘要:利用 LS-DYNA3D 软件数值计算了弹体侵彻岩石、混凝土和土问题,分析在不同碰撞速度条件下的弹体响应和靶体抗侵彻能力。碰撞速度小于 900 m/s 时,弹体侵彻岩石的减加速度峰值约是侵彻混凝土的 2 倍,而侵彻混凝土的减加速度峰值约是侵彻土的 6 倍。减加速度峰值高则稳态侵彻过程短,弹体能量消耗很快。碰撞速度超过 1.5 km/s 时,随靶体材料的强度、密度逐渐减小,侵彻深度和孔径逐渐缓慢增加,岩石、混凝土和土 3 种靶体材料相比,最大侵彻深度增加 41%~62%,最大扩孔口径增加 16%~25%。

关键词:冲击动力学;侵彻;混凝土;岩石;本构模型;

中图分类号:O383.3 **文献标识码**:A

1 引 言

在防护工程设计和武器威力研究中,弹体侵彻岩石、混凝土和土时的动态响应以及这 3 类材料的抗侵彻能力研究非常重要。美国 Sandia 实验室进行了大量试验研究,在此基础上拟合了侵彻岩石、混凝土和土的经验公式。Sandia 侵彻经验公式最早发表于 1967 年,最近的修改工作是在 1997 年,期间不断修改完善。对于符合试验条件的模型,经验公式能很方便地给出结果,但往外推广时其准确度大大下降。岩石、混凝土和土的特性极其复杂,侵彻试验难以穷举各种工况,因此理论和数值分析仍然是试验研究之外的重要手段。由于涉及材料模型的复杂性,传统的侵彻分析方法难以有效应用到该类问题的研究中来。对于实际工程问题,基于连续介质力学建模的数值模拟分析仍然是目前最为有效的。然而,目前相关文献资料众多,但关注点比较分散,少有集中对岩石、混凝土和土 3 种材料进行系统的比较分析。本研究利用 LS-DYNA3D 软件对此问题进行数值计算研究,给出较为系统的结果。

在碰撞速度小于 900 m/s 的中等碰撞速度的侵彻问题中,靶体材料强度对侵彻过程影响较大。在碰撞速度超过 1.5 km/s 后的高速碰撞侵彻问题中,靶体的密度和抗压缩性能影响较大,而强度效应减弱。另外,在高速弹体碰撞侵彻的工程问题中,除关注侵彻深度外,往往也关注靶体中扩孔口径的大小。本文第 2 节和第 3 节分别比较中等碰撞速度时岩石和混凝土、混凝土和土对弹体响应的影响,第 4 节分析碰撞速度超过 1.5 km/s 时岩石、混凝土和土的材料参数对侵彻深度和侵彻孔径的影响。

2 侵彻混凝土和岩石的计算比较

岩石、混凝土和土被看作宏观均匀的连续介质,只是根据不同需要在材料模型中尽量体现有重要影

* **收稿日期**:2009-05-10;**修回日期**:2009-11-09

基金项目:国家自然科学基金(10901021);中国工程物理研究院科学技术发展基金(2007A09002);国家安全重大基础研究项目(973)子专题(61392020101)

作者简介:王 政(1972—),男,博士,副研究员,主要从事高速碰撞研究. E-mail:wang_zheng@iapcm.ac.cn

通讯作者:梁龙河(1967—),男,硕士,研究员,主要从事高速碰撞研究. E-mail:lhliang@iapcm.ac.cn

响的因素，如材料强度的围压增强效应、应变率强化以及损伤软化等。从这几个方面来看，岩石、混凝土和土的材料力学性能基本相似，与常见金属材料有显著区别，因此在力学问题分析中一致采用 HJC 混凝土本构模型[1]，但根据侵彻过程特点和材料性能的试验数据对关键参数进行相应调整。

张德志等人用实验方法研究钢弹侵彻花岗岩问题[2]，本研究据此建立岩石侵彻问题的数值计算模型，同时考虑靶材料是强度为 50 MPa 的混凝土，比较在中等碰撞速度下两种材料的抗侵彻能力。

实验中钢弹体直径分为 1.5 cm 和 2 cm 两种，长径比为 10，CRH 为 3.0。实验的靶体为花岗岩，直径为 44 cm，靶厚为 60 cm。花岗岩的密度约为 2.66 g/cm^3，弹性模量为 66 GPa，泊松比为 0.15，抗压强度为 154 MPa，空隙度为 1.2%。

数值计算的弹体直径为 2 cm，材料用理想弹塑性模型，弹性模量 202 GPa，泊松比为 0.3，屈服强度为 1.8 GPa。靶体用 HJC 混凝土本构模型，其基本参数如密度、模量和强度都由实验模型确定。岩石的状态方程要反映其空隙度较小的现象，确定 μ_{plock} 为 0.012，p_{crush} 由单轴抗压强度的 1/3 确定为 51 MPa，再根据岩石的弹性模量参数确定 μ_{crush}。状态方程其它参数 K_1、K_2、K_3 和 p_{lock} 根据花岗岩冲击实验参数 C_0、S(2.1 km/s、1.63)拟合确定。表 1 为计算时采用的岩石和混凝土的材料参数，图 1 是表 1 中参数确定的岩石和混凝土状态方程曲线，其中也有与岩石 C_0、S 确定的冲击曲线的比较。

表 1 本构模型参数

Table 1 Parameters for concrete constitutive model

Mater	ρ /(kg/m^3)	f_c /(MPa)	G /(GPa)	K_1 /(GPa)	K_2 /(GPa)	K_3 /(GPa)	p_{crush} /(GPa)	μ_{crush}	p_{lock} /(GPa)	μ_{plock}
Rock	2660	154	28.7	14.0	20.0	25.0	0.051	0.00162	1.2	0.012
Concrete	2440	50	14.8	17.4	38.8	29.8	0.01	0.001	0.709	0.1

侵彻计算中靶体单元失效最大主应变值是侵蚀算法的计算参数，对计算结果影响较大。计算时取为 0.24，这是根据碰撞速度为 515 m/s 条件下的计算与实验结果迭代比较确定的。图 2 是碰撞速度为 515 m/s 时弹体侵彻深度达到最大时的计算图像，侵彻深度为 20 cm，与实验值 20.5 cm 基本一致。

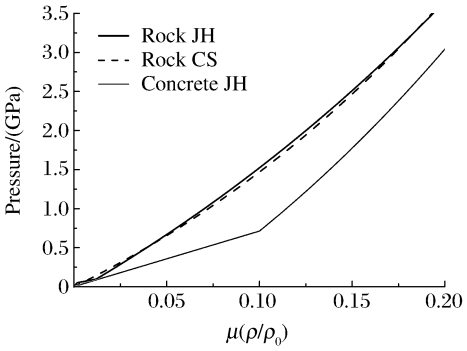


图 1 岩石状态方程曲线(其中 Rock CS 为岩石冲击曲线)

Fig. 1 Pressure with volumetric strain of rock (Rock CS is impact test data of rock)



图 2 岩石侵彻图像(v_i=515 m/s)

Fig. 2 Penetrating pattern into rock(v_i=515 m/s)

确定所用计算参数后即可计算不同碰撞速度侵彻岩石问题以及进行岩石和混凝土抗侵彻能力的比较。图 3、图 4 和图 5 分别是弹体碰撞速度为 515 m/s 的位移、速度和减加速度随时间变化曲线，实线表示靶材料为岩石，虚线为混凝土。图 3、图 4 和图 5 表明，在此碰撞速度下，岩石比混凝土的抗侵彻能力明显强，弹体能量消耗很快，阻力峰值比混凝土高约一倍。对岩石靶的稳态侵彻过程较短，约 900 μs 时侵彻深度已经达到最大，弹体开始回弹。

图 6 是用弹体直径无量纲化的侵彻深度随碰撞速度变化曲线，实线和虚线分别表示靶材料为岩石和混凝土的数值计算结果。图 6 中也给出文献[2]中岩石侵彻试验结果，实验结果分两种弹体直径。由图 6 可见计算与实验基本相符。靶材料为混凝土时的侵彻深度明显增加，约是 2 倍关系。

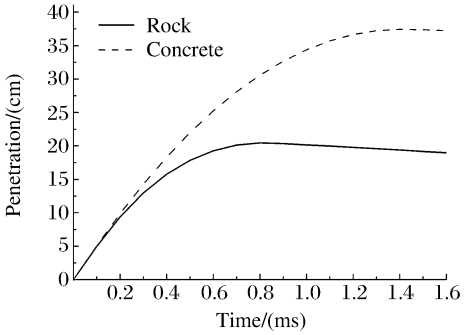


图 3　弹体位移变化曲线(v_i=515 m/s)

Fig. 3　Projectile displacement with time (v_i=515 m/s)

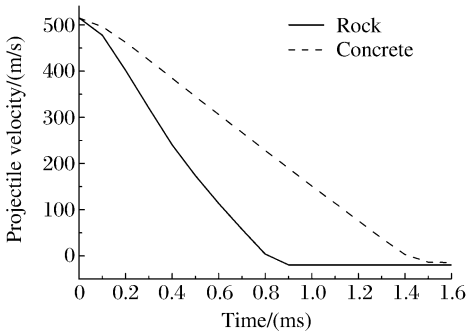


图 4　弹体速度变化曲线(v_i=515 m/s)

Fig. 4　Projectile velocity with time(v_i=515 m/s)

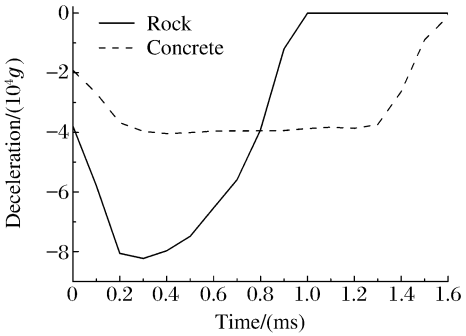


图 5　弹体减加速度变化曲线(v_i=515 m/s)

Fig. 5　Projectile deceleration with time(v_i=515 m/s)

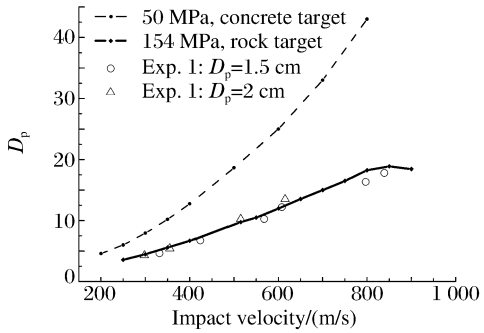


图 6　岩石和混凝土抗侵彻能力比较

Fig. 6　Comparison of anti-penetration capability between rock and concrete

另外,当碰撞速度较高如 700 m/s 后,对岩石的侵彻深度随碰撞速度变化的曲率有变化。图 7 为 800 m/s 碰撞速度侵彻过程结束时应变图像,弹体的卵形头部已经发生较大变形。碰撞速度达到 700 m/s 左右时实心的钢弹体已经产生磨损及消耗,因而影响了侵彻能力。而对混凝土靶体,碰撞速度达 900 m/s 时弹体的磨损还很少,弹体侵彻能力随其速度增加还能增强。计算分析表明,在 200～900 m/s 的中等碰撞速度条件下,岩石材料有较强的抗侵彻能力。



图 7　800 m/s 速度侵彻岩石时弹体头部变形

Fig. 7　Deformation of projectile tip penetrating into rock at 800 m/s

图 5 中侵彻岩石的弹体减加速度峰值约为 80 000 g,侵彻混凝土的弹体减加速度峰值约为 40 000g。侵彻过程中弹体减加速度的峰值与弹体的长度也有很大关系,以上算例没有减加速度的实验结果进行对比,故下面再给出一个算例进行比较分析。Forrest 等人进行了弹体侵彻混凝土时减加速度试验研究[3],其弹体长度为 53 cm,与上文算例中 20 cm 相比较大。图 8 是文献[3]中 Forrest 侵彻试验模型的数值计算结果,图 8 表明对岩石和混凝土侵彻的减加速度峰值分别是 30 000g 和 13 000g,相比也是高约一倍。与图 5 结果比较,表明模型尺度增大后弹体减加速度峰值明显减小。图 9 中数据是侵彻混凝土靶的减加速度试验测量结果[3],其减加速度标度单位为 g,时间标度单位为 ms,同图 8 对比可见混凝土靶情形的数值计算和试验的结果基本一致。

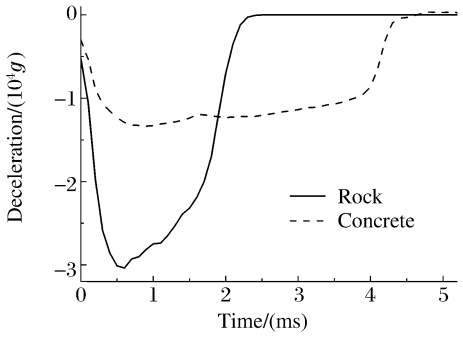


图 8 Forest 模型侵彻减加速度变化及比较(v_i=456 m/s)

Fig. 8 Comparison of deceleration history between rock and concrete predicted by Forest model(v_i=456 m/s)

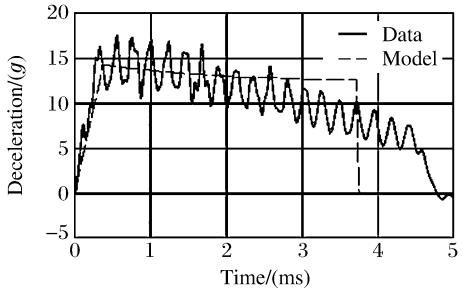


图 9 减加速度时间历程试验结果(v_i=456 m/s)[3]

Fig. 9 Test data of deceleration with time(v_i=456 m/s) [3]

3 土壤和混凝土混合介质侵彻计算

为对比土壤和混凝土的抗侵彻能力,选择了蒋建伟等人进行试验研究的土壤和混凝土的混合介质侵彻模型[4]。其动能弹直径为 5 cm,长为 30.2 cm,头部圆弧半径为 30 cm,圆柱部分长为 18.7 cm,弹体内部以惰性物代替实际装药。弹体材料 30CrMnSiNiA,全弹质量为 2.4 kg。土壤与混凝土复合靶直径为 120 cm,第 1 层为土壤靶,第 2 层为混凝土靶,土壤靶厚度为 87.5 cm,混凝土靶厚度为 50 cm。

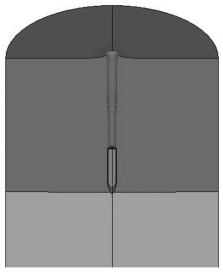


图 10 弹体侵彻土壤和混凝土复合靶图像(2.1 ms)

Fig. 10 Projectile penetrating pattern into soil and concrete composite target (2.1 ms)

土壤和混凝土靶体同样用 HJC 混凝土本构模型,其基本参数如密度、模量和强度都由实验模型确定。如土壤密度 1.6 g/cm^3,弹性模量 120 MPa,泊松比 0.38,抗压强度 10 MPa。混凝土密度 2.6 g/cm^3,弹性模量 30 GPa,抗压强度 32 MPa,抗拉强度 6 MPa。其它参数取表 1 中混凝土材料参数。

计算了 398 m/s 和 456 m/s 两种碰撞速度情形,其侵彻深度分别是 103 cm 和 110 cm,对应的实验结果分别是 112.9 cm 和 120.5 cm,计算误差约为 8.7%。图 10 是 456 m/s 碰撞速度模型的 2.1 ms 时侵彻计算图像,此时弹头部穿透土壤层到达混凝土层。图 11、图 12 和图 13 分别是计算的侵彻深度、弹体速度和弹体减加速度随时间变化的图像。图 14 为文献[4]中实验测量碰撞速度 456 m/s 的减加速度图像,与图 13 的计算结果相比,其峰值大小及随不同靶介质变化的时间点都基本相符。另外,图 13 表明混凝土中的侵彻减加速度峰值约是土中峰值的 6 倍。

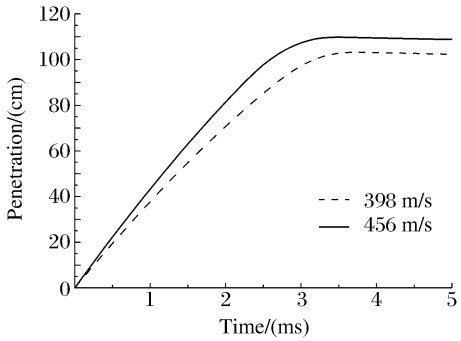


图 11 弹体位移随时间变化关系

Fig. 11 Projectile displacement with time

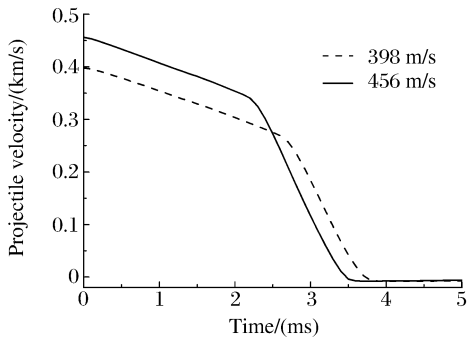


图 12 弹体速度随时间变化关系

Fig. 12 Projectile velocity with time

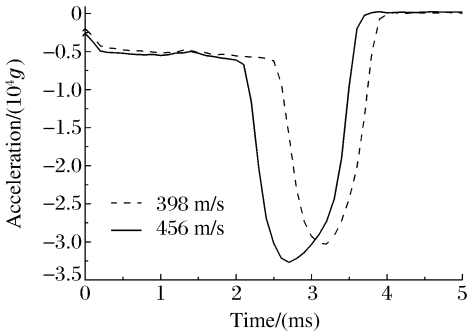


图 13　弹体侵彻减加速度随时间变化关系

Fig. 13　Projectile deceleration with time

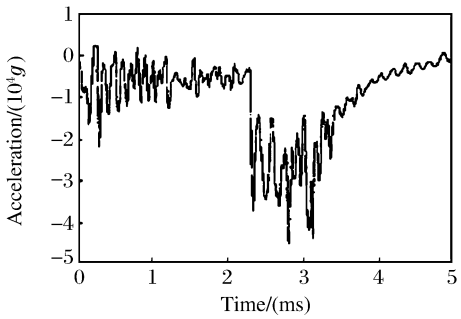


图 14　减加速度时间历程试验结果(v_i=456 m/s)[4]

Fig. 14　Test data of deceleration with time(v_i=456 m/s)[4]

4　高速碰撞侵彻问题

通常认为,当碰撞速度超过 1.0 km/s 甚至更高后,靶体材料的密度和抗压缩性能对侵彻过程的影响开始变得越来越强,靶体材料强度的影响效应开始减弱。当碰撞速度增加后,弹体变形也逐渐增大,并且开始发生侵彻磨损以至于逐渐消耗。为有效模拟弹体在高速碰撞和侵彻过程中的大变形和侵彻磨损现象,数值计算中选用了流固耦合的计算方法,即弹体选用多物质 ALE 算法,靶体用 Lagrange 算法。

计算模型的弹体为球形头部铜长杆弹,直径为 1.3 cm,弹长为 19 cm。靶体材料分别为土、混凝土和岩石,计算时都用 HJC 混凝土本构模型,所用材料参数见表 1。

表 2 是不同模型的计算结果,其中 v_i是弹体碰撞速度,分 1 836 m/s 和 4 000 m/s 两种情形。P_d 是靶体中的侵彻深度,R_{max}是靶体中的侵彻最大孔半径。在靶体材料为土的算例中,抗压强度都取为 10 MPa,只是调整其密度变化以反映不同土的密实度有差别。同时,这些算例相互比较也能更好地总结对计算结果的影响因素。与此类似,分析混凝土靶体材料情形时,密度不变,仅仅考虑不同强度带来的影响。对岩石靶体,只给出一个算例,其强度为 150 MPa,与高性能混凝土强度相同,密度为 2.66 g/cm^3。当然,岩石的状态方程参数与混凝土也是不同的。

表 2　高速碰撞侵彻问题计算模型及结果

Table 2　Computational penetration model and results of high velocity impact

Targets			v_i=1 836 m/s		v_i=4 000 m/s	
Material	Strength/(MPa)	Density/(g/cm^3)	P_d/(cm)	R_{max}/(cm)	P_d/(cm)	R_{max}/(cm)
Soil	10	1.60	34	2.2	34	3.0
Soil	10	1.84	32	2.2	30	3.0
Soil	10	2.34	29	2.2	27	3.0
Concrete	37	2.34	25	2.2	28	2.9
Concrete	100	2.34	24	2.2	27	2.8
Concrete	150	2.34	23	2.2	27	2.7
Concrete	200	2.34	22	2.1	26	2.8
Rock	150	2.66	21	1.9	24	2.4

分析表 2 的计算结果,以下几个方面与中等碰撞速度情形有明显区别:

(1) 对同一模型,碰撞速度提高后侵彻孔径增大,但侵彻深度变化较小。

(2) 靶体强度对侵彻深度与孔径的影响明显减弱,而压缩性能影响增强。

(3) 随靶体强度、密度及压缩性能参数的逐渐减小,侵彻深度和孔径逐渐缓慢增加,最大侵彻深度增加 41%～62%,最大扩孔口径增加 16%～25%。

5 结 论

以上数值计算表明,在 200～900 m/s 的中等碰撞速度条件下,靶体材料强度对抗侵彻性能的影响较大,岩石的减加速度峰值比混凝土高约一倍,而混凝土的减加速度峰值约是土的 6 倍,侵彻深度也有类似的差别。对于超过 1.5 km/s 以上碰撞速度的侵彻过程,靶体强度对侵彻深度与孔径的影响明显减弱,对岩石、混凝土和土壤材料,随靶体强度、密度及压缩性能参数的逐渐减小,侵彻深度和孔径逐渐缓慢增加,最大侵彻深度增加 41%～62%,最大扩孔口径增加 16%～25%。

References:

[1] Holmquist T J, Johnson G R. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates, and Hgh Pressures [A]//Michael J M, Joseph E B. 14th International Symposium on Ballistics [C]. Quebec, Canada, 1993: 591-600.

[2] Zhang D Z, Zhang X R, Lin J D, et al. Penetration Experiments for Normal Impact into Granite Targets with High-Strength Steel Projectile [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(9): 1613-1618. (in Chinese)
张德志,张向荣,林俊德,等. 高强钢弹对花岗岩正侵彻的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(9): 1613-1618.

[3] Forrestal M J, Frew D J, Hickerson J P, et al. Penetration of Concrete Targets with Deceleration-Time Measurements [J]. Int J Impact Eng, 2003, 28: 479-497.

[4] Jiang J W, Men J B, Wan L Z, et al. Experimental Study on a Kinetic Energy Penetrator Penetrating a Soil-and-Concrete Multi-Layer Target [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 21(4): 420-423. (in Chinese)
蒋建伟,门建兵,万丽珍,等. 动能弹侵彻土壤混凝土复合介质的试验研究 [J]. 北京理工大学学报, 2001, 21(4): 420-423.

[5] Forrestal M J, Luk V K, Watts H A. Penetration of Reinforced Concrete with Ogive-Nose Penetrators [J]. Int J Solids Structures, 1988, 24(1): 77-87.

Numerical Computation and Analysis on Anti-Penetration Capability of Rock, Concrete and Soil

WANG Zheng, LOU Jian-Feng, YONG Heng, LIANG Long-He

(*Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing* 100094, *China*)

Abstract: Using LS-DYNA3D to compute the problem of projectile penetrating into rock, concrete and soil targets, we analyze anti-penetration capability of these three materials. We choose HJC concrete constitutive model for target materials in numerical computations. Under the lower and intermediate impact velocities such as from 200 m/s to 900 m/s, rock is evidently more stronger than concrete for anti-penetration. The peak value of deceleration of the projectile penetration into rock is as twice as into concrete. And it is 6 times into concrete than soil. The energy of the projectile dissipated rapidly when the projectile has greater peak value of the deceleration and the steady penetration process is shorter. When the impact velocity is above 1.5 km/s, the effect of material strength on depth or diameter of the penetration becomes gradually decreased. For rock, concrete and soil targets, with gradual decrease of strength, density and compressibility, the depth or diameter of the penetration slowly increased. The maximum of penetration depth increases by 41%～62%, and that of penetration diameter increases by 16%～25%.

Key words: impact dynamics; penetration; concrete; rock; constitutive model