

doi: 10.7690/bgzd.2016.06.021

刚性弹正侵彻随机骨料混凝土靶的弹道偏转规律分析

杨 涛¹, 陈小伟^{1,2}, 邓勇军^{1,2}, 姚 勇¹

(1. 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621000;
2. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对弹体可能受到非对称力作用从而发生弹道偏转的问题, 对刚性弹正侵彻随机骨料混凝土靶的弹道偏转规律进行分析。采用混凝土细观模型, 运用 LS-DYNA 显式动力计算软件, 对刚性弹正侵彻随机骨料混凝土靶进行数值模拟。以弹体偏转角度为指标, 重点考虑混凝土靶的骨料/砂浆强度、弹体侵彻速度等因素, 讨论其对弹体正侵彻条件下弹道偏转的影响规律。结果表明: 根据混凝土的材料特性, 可认为砂浆和骨料共同对正侵彻弹体提供轴向阻力, 而随机非均匀的骨料作用力与砂浆阻力之差则提供导致其偏转的侧向力; 弹道偏转角度随混凝土砂浆强度减小而增大, 相反地, 随骨料强度增加而增大; 当名义抗压强度较小时, 弹体偏转对砂浆强度变化的敏感度显著大于骨料强度变化的影响; 在刚性弹假设下, 弹道随着弹体侵彻速度增加而更加稳定, 即偏转角随着靶速度增加而减小; 但若弹体非刚性假设, 越高速度侵彻, 越容易变形破坏, 则越容易偏转且容易出现“J”弹道。

关键词: 刚性弹; 混凝土; 正侵彻; 弹道偏转; 随机骨料; 砂浆

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Analysis on Ballistic Trajectory Deflexion of Rigid Projectile Normal Penetrating into Random-aggregate Concrete Targets

Yang Tao¹, Chen Xiaowei^{1,2}, Deng Yongjun^{1,2}, Yao Yong¹

(1. School of Civil Engineering & Architecture, Southwest University of Science & Technology, Mianyang 621000, China;
2. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

Abstract: The projectile will be subjected to asymmetric force even if the rigid projectile normal penetrating into the concrete due to the random factor of concrete, which can produce the ballistic trajectory deflexion. In the paper, the meso-scopic model of the concrete is constructed, and by means of the explicit dynamic software of the LS-DYNA, the numerical simulation of a rigid projectile normal penetrating into random-aggregate concrete targets is conducted. Taking the projectile deflexion angle as the index, the influences of the strengths of the aggregate/mortar and the initial striking velocity on the penetration are discussed. The results show that: according to material characteristics of concrete, the mortar and aggregate provide normal penetration projectile with axial resistance, the difference of random non-uniform aggregate acting force and mortar resistance provides projectile with deflexion lateral force. The trajectory deflexion angle will become larger when concrete mortar intensity decreases, on the contrary, the trajectory deflexion angle will become smaller when aggregate intensity increases. Under rigid projectile hypothesis, trajectory will be more stable when projectile penetration speed increases, that is deflexion angle will decrease when target speed increases. If under non rigid projectile hypothesis, the higher speed penetration will cause easier distortion damage, and it will cause deflexion and “J” type trajectory.

Keywords: rigid projectile; concrete; normal penetration; ballistic trajectory deflexion; random-aggregate; mortar

0 引言

侵彻过程是一个弹/靶相互作用的瞬态接触问题。目前国内外研究者在弹/靶侵彻理论、数值计算和试验等做了大量研究, 对混凝土靶侵彻问题有较深刻认识^[1-16]; 但已有文献大多将混凝土视作均匀材料, 无法考虑混凝土组成成分对侵彻过程的影响。

一般而言, 混凝土是典型的多相非均质复合材料, 主要由粗骨料、水泥水化物及骨料与水泥砂浆黏结带等组成^[17], 各相材料性质差异较大。即使是严格的刚性弹正侵彻, 由于混凝土随机因素, 弹体

可能受到非对称力作用从而发生弹道偏转。若计算中将混凝土当作均匀材料分析, 无法反映侵彻过程中弹体与骨料、砂浆的相互作用, 以及弹体弯曲破坏、弹道偏转等典型的物理现象^[15]。

随着计算机性能的提高, 使得从混凝土细观层次角度出发对该类问题进行数值模拟分析成为可能。姚勇等^[18]已建立反应混凝土细观组成的有限元数值模型, 直观分析了侵彻过程中弹体的受力特点及侵彻规律。笔者在此基础上, 以弹体偏转角度为指标, 重点考虑混凝土靶的骨料强度、砂浆强度, 弹体的侵彻速度等因素, 讨论其对弹体正侵彻条件

收稿日期: 2016-02-05; 修回日期: 2016-03-12

基金项目: 国家杰出青年基金(11225213); NSF 重大项目(11390361, 11390362); NSF 面上项目(11172282)及中国工程物理研究院重点学科项目“计算固体力学”的支持

作者简介: 杨 涛(1991—), 男, 四川人, 硕士研究生, 从事防护工程方面研究。

下弹道偏转的影响规律。

1 有限元建模

基于混凝土随机骨料模型^[18-20]，将混凝土视作由骨料和水泥砂浆组成的两相非均质复合材料，不考虑骨料和水泥砂浆之间的黏结带，采用骨料随机投放的思路实现混凝土的细观数值建模^[20]。为了观察弹体侵彻的弹道偏转姿态，并减少计算规模，计算采用 1/2 对称模型，约束弹靶在垂直于对称面方向上的位移及转动自由度，即人工假定：若有弹道偏转，仅发生在 1/2 对称模型的对称面上。

参考姚勇等^[18]的工作，笔者建立 $\phi 800 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ 素混凝土靶体的细观模型，如图 1。其中骨料级配为二级配，即：小石(5~20 mm):中石(20~40 mm)=5.5:4.5，最大骨料粒径为 40 mm。混凝土骨料和水泥砂浆材料本构均采用 HJC 模型。靶体按刚性模型采用 3 mm 厚度的钢板箍紧，钢板与靶体之间采用接触处理。靶径与弹径之比大于 30，可忽略靶体边界的影响^[11]。

表 1 给出 C40 混凝土各相材料的 HJC^[21]参数基准值，其中骨料参数参考文献[22]。Goble CF^[23]、

Gopalaratnam VS^[24]、Harsh S^[25]和 Hsu TC 等^[26]分析了大量的试验数据，总结了依据砂浆水灰比的值来计算其基本材料参数的经验公式，见式 (1)~(3)。依据式 (1)~(3) 可由混凝土水灰比推算砂浆的基本力学参数，进而推导出砂浆的 HJC 模型其他参数。

$$c/w = 0.047 f_{cm} + 0.5; \quad (1)$$

$$E_m = 1000 \{7.7 \ln(f_{cm}) - 5.5\}; \quad (2)$$

$$f_{tp} = 1.4 \ln(f_{cm}) - 1.5. \quad (3)$$

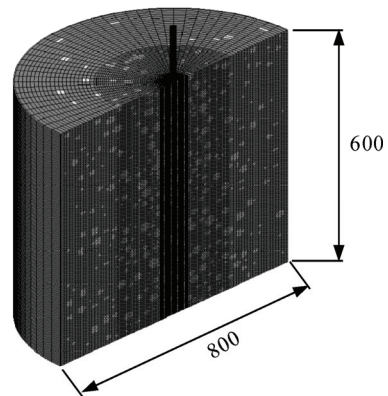


图 1 计算模型

表 1 C40 混凝土 HJC 材料参数

材料	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	f_c/MPa	G/GPa	K_1/GPa	K_2/GPa	K_3/GPa	p_c/MPa	μ_c	p_t/MPa	μ_t
砂浆	2 100	25	7.9	85	171	2.08	8.3	7.0×10^{-4}	800	0.1
骨料	2 660	150	28.7	14	20	25	51.0	1.6×10^{-3}	1 200	0.012

弹体采用刚性模型，弹体几何形状取 Hanchak 试验^[27]所用弹体： $L=101.6 \text{ mm}$ ， $d=25.4 \text{ mm}$ ， $H=42.1 \text{ mm}$ 。弹头曲径比 $\phi=3$ 。几何示意图如图 2。

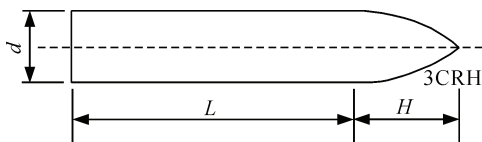


图 2 弹体示意图

弹体与砂浆及骨料之间的接触均采用侵蚀面-面接触，LS-Dyna971 中关键词为 *CONTACT_ERODIN G SUR -FACE_TO SURFACE，采用程序默认接触参数，不考虑弹体与砂浆/骨料之间的摩擦力作用及黏滞阻尼作用。

砂浆和骨料的失效模型均为最大主应变失效，根据大量数值试验取得失效值分别为 0.10 和 0.12。

2 工况设计

姚勇等^[18]选取 Hanchak^[27]实验为验证分析对象，建立混凝土的细观数值模型。计算中弹体形状及靶板尺寸与文献保持一致，不考虑钢筋作用。计

算结果如图 3，即使刚性弹正侵彻混凝土靶，都可能存在弹道偏转现象。这是由于骨料、砂浆的力学特性差异及随机分布等因素对刚性弹体产生了不平衡力作用，导致弹体侵彻方向变化。

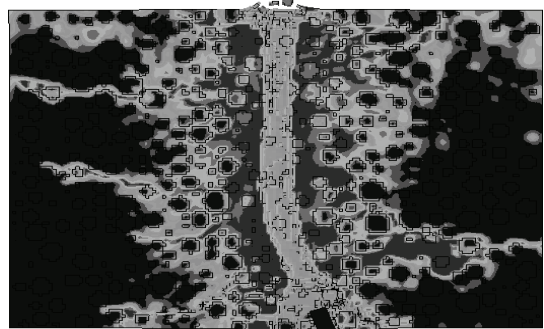


图 3 刚性弹正侵彻混凝土靶时发生弹道偏转

根据刚体运动学可知，刚性弹的运动可以视作弹体质心的平动和绕质心的转动(如图 4(a)所示)。弹体的偏转角度定义为弹体绕质心的转动角度，则弹体侵彻过程中的位移及姿态可以用质心坐标(X_c , Y_c)和绕质心的偏转角度 ϕ 来确定。提取弹体对称面

中轴线上 A、B 2 个节点 X 坐标数据，两者 X 方向坐标值之差为 ΔX ，弹体偏转角度可以表示为 $\varphi = \arcsin(\frac{\Delta X}{L})$ (L 表示弹体长度)，如图 4(b)所示。

基于混凝土细观建模的刚性弹正侵彻分析，姚勇等^[18]认为，影响弹体弹道偏转的主要因素有：混凝土各相材料(骨料、砂浆)力学性能(如强度、模量、断裂能等)、骨料几何及位置分布、弹体初始撞击速度、弹体头部形状、弹体长径比及弹体直径与骨料最大粒径的比值等。

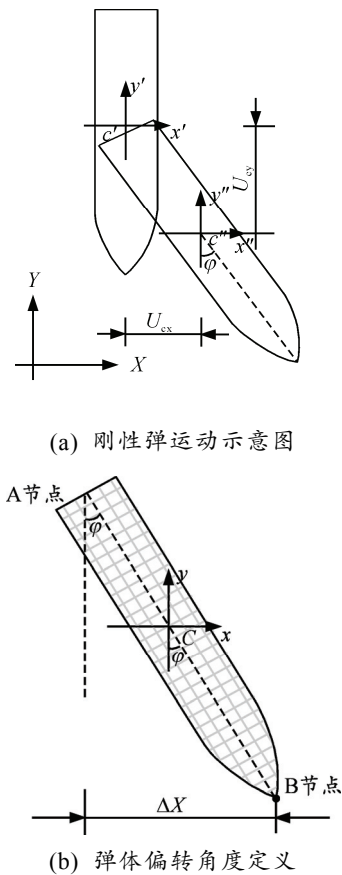


图 4 侵彻过程中弹体运动及偏转角度定义

以下分析中，笔者主要考虑将 3 个物理参量(即砂浆强度、骨料强度及弹体侵彻速度)作为分析对象，分别讨论其弹道偏转的影响规律。表 2 给出了各参数的取值范围，骨料及砂浆的基准强度见表 1。其中，讨论极限状态的骨料/砂浆强度，可分别对应于金属骨料或超高强度混凝土。探究骨料/砂浆强度对弹道偏转影响工况时，侵彻速度取 800 m/s。分析采用单变量方式，即所有工况都以表 1 给出的骨料和砂浆材料参数为基准值，仅在分别讨论砂浆和骨料对弹道偏转的影响时，才使用表 2 的相关材料的强度变化。

表 2 各物理参量取值

物理参量	取值范围	物理参量	取值范围
骨料强度/MPa	50~300	撞击速度/(m/s)	400~1 200
砂浆强/MPa	5~50		

3 混凝土材料强度影响

3.1 砂浆强度

取骨料强度为 150 MPa，砂浆强度取值范围见表 2，本节讨论砂浆强度变化对弹道偏转的影响规律。弹体侵彻不同砂浆强度混凝土靶过程中，弹体偏转角度和侵彻位移间的关系如图 5 所示。图 6 给出弹体最大偏转角随砂浆强度的变化关系。显然，当砂浆强度较小时，弹体偏转严重，特别地当砂浆强度为 5 MPa 时，最大偏转角为 10.5°。随着砂浆强度增大，弹体偏转角趋于减小，当砂浆强度达到一定值(本次工况为 45 MPa 以上)后，弹体偏转不再明显。

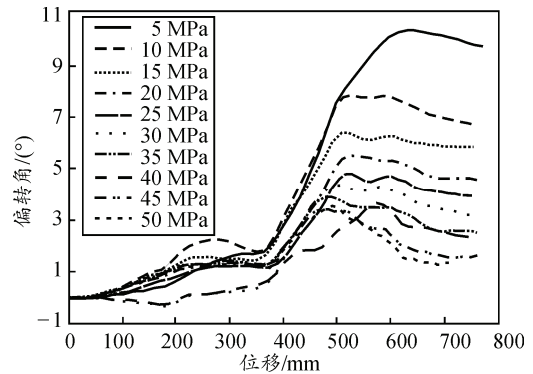


图 5 不同砂浆强度下弹体偏转角度

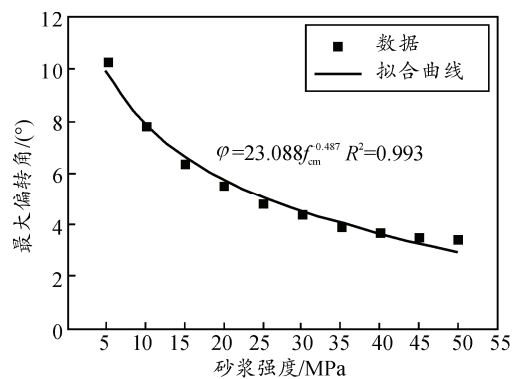


图 6 偏转角度峰值-砂浆强度的关系

混凝土中骨料的力学性能通常优于砂浆。当砂浆强度较低时，砂浆与骨料的强度差异将相当明显，将导致混凝土的随机因素增强，进而激发侵彻过程中弹体受到侧向力作用，引起显著的弹道偏转。随着砂浆强度的增大，混凝土中各相材料力学性能的差异性逐渐减小，可认为混凝土趋于均匀，这时弹体侵彻过程中受力相对均匀，不易偏转。

根据图 6, 可以给出弹体最大偏转角随砂浆强度变化的经验公式为:

$$\varphi = 23.088 f_{cm}^{-0.487} \quad (4)$$

3.2 骨料强度

取砂浆强度为 25 MPa, 骨料强度取值范围见表 2, 本节讨论骨料强度变化对弹道偏转的影响规律。弹体侵彻不同骨料强度混凝土靶过程中, 弹体偏转角度和侵彻位移间的关系如图 7 所示。图 8 给出弹体最大偏转角随骨料强度的变化关系。显然, 随着骨料强度增大, 弹体最大偏转角近似线性增加。仍然可从骨料与砂浆的性能差异进行分析。骨料强度增大导致两者之间力学性能差异不断加剧, 靶材越显非匀质, 其随机性增强, 激发弹体不对称侧向力增大, 最大偏转角逐渐增大。

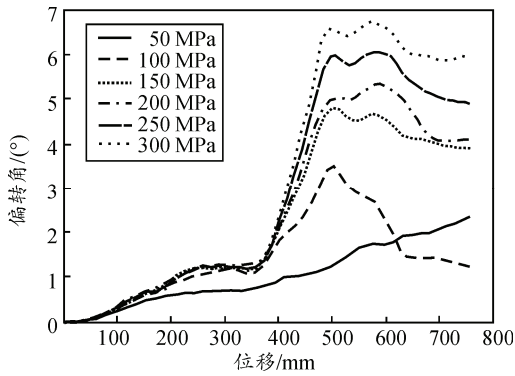


图 7 不同骨料强度下弹体偏转角度

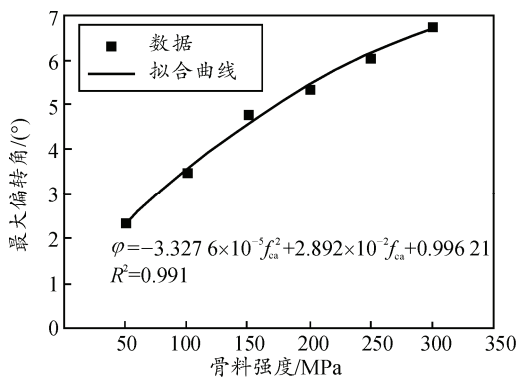


图 8 偏转角度峰值随骨料强度变化

根据图 6, 可以给出最大弹体偏转角随骨料强度变化的经验公式为:

$$\varphi = -3.3276 \times 10^{-5} f_{ca}^2 + 2.892 \times 10^{-2} f_{ca} + 0.996 \quad (5)$$

根据混凝土的材料特性, 可认为砂浆均匀分布, 而骨料掺杂其中并随机分布。一定程度上, 可认为砂浆和骨料共同对正侵彻弹体提供轴向阻力, 而随机非均匀的骨料作用力与砂浆阻力之差则提供导致其偏转的侧向力。因此若按空腔膨胀理论^[28]分析,

弹头在混凝土侵彻中所受侧向阻力可表示为:

$$F_L = \iint (f_{agg} - f_{mor}) dA \quad (6)$$

其中 dA 是混凝土中与弹头表面接触的骨料表面微元面积。进而可积分得到使弹头偏转的侧向力矩。可认为, 式 (4) 清晰地表达了刚性弹正侵彻混凝土过程中, 由于骨料随机分布导致的侧向力产生原因, 也可为类似分析提供数学思路。

3.3 弹道偏转敏感度分析

为了定量描述弹体偏转对骨料及砂浆强度的敏感性, 可定义弹体最大偏转角对砂浆及骨料强度的敏感程度(用 S 表示)为:

$$S = \left| \frac{\Delta\theta / \theta^*}{\Delta f_c / f_c^*} \right| \quad (7)$$

式中: Δf_c 为砂浆或骨料实际单轴抗压强度与其强度参考值的差值; f_c^* 为强度参考值, 砂浆取值 25 MPa, 骨料取值 150 MPa; $\Delta\theta$ 为弹体最大偏转角与参考峰值偏转角度的差值; θ^* 为参考峰值偏转角度, 即强度参考值下, 弹体的最大偏转角。

对于式 (7), 需要作出说明的是: 弹体最大偏转角随砂浆强度呈反相关关系, 而与骨料强度呈正相关关系, 为了直观地比较最大偏转角对二者的敏感性, 对敏感度系数取正值。由此计算得到弹体最大偏转角对砂浆及骨料强度的敏感度系数值(见表 3~表 4)。强度逼近强度参考值时, 敏感度系数 S 无解, 这时可按极限思想进行定义, 即式 (7) 变换为

$$S_{\theta^*, f_c^*} = \frac{f_c^*}{\theta^*} \cdot \lim_{\Delta\theta \rightarrow 0, \Delta f_c \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta\theta}{\Delta f_c} \right| = \frac{f_c^*}{\theta^*} \cdot \left| \frac{d\theta}{df_c} \right| \quad (8)$$

根据数值拟合获得的最大偏转角与砂浆和骨料强度的经验关系, 即式 (4) 和式 (5), 可计算得到不同砂浆和骨料强度参考值时对应的敏感度系数 S 。

表 3 弹体最大偏转角对骨料强度的灵敏度系数

强度/MPa	灵敏度系数 S	强度/MPa	灵敏度系数 S
50	0.767	200	0.350
100	0.813	250	0.388
150	0.592	300	0.408

表 4 弹体最大偏转角对砂浆强度的灵敏度系数

强度/MPa	灵敏度系数 S	强度/MPa	灵敏度系数 S
5	1.442	30	0.437
10	1.051	35	0.470
15	0.826	40	0.396
20	0.755	45	0.327
25	0.489	50	0.287

进一步, 为同时给出弹体最大偏转角对骨料和砂浆强度的敏感度系数曲线, 定义名义抗压强度

f^{**} 为实际单轴抗压强度与强度参考值之比；因此，对于骨料：

$$f_{agg}^{**} = \frac{f_{ca}}{f_{ca}^*} \quad (9)$$

式中： f_{ca} 为骨料实际单轴抗压强度； $f_{ca}^* = 150 \text{ MPa}$ 为骨料强度参考值。对于砂浆：

$$f_{mor}^{**} = \frac{f_{cm}}{f_{cm}^*} \quad (10)$$

式中： f_{cm} 为砂浆实际单轴抗压强度； $f_{cm}^* = 25 \text{ MPa}$ 为砂浆强度参考值。

这样，以名义抗压强度 f^{**} 为横坐标，敏感系数 S 作为纵坐标，可同时给出弹体偏转对砂浆和骨料强度的敏感关系，如图 9 所示。

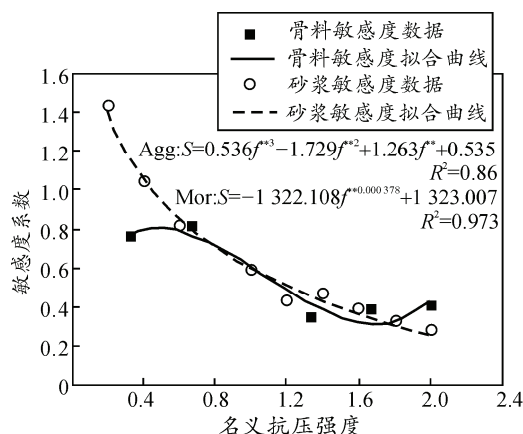


图 9 弹体偏转角度敏感度曲线

从图 9 可知：弹体偏转角度对骨料强度的敏感系数基本符合 3 次曲线变化走势，未呈现明显的单调趋势。骨料强度较低时，偏转角度对骨料强度变化的敏感程度较高；随着名义抗压强度 f^{**} 增加，敏感系数 S 在较低幅值水平波动。不同的是，弹体偏转角度强烈依赖于砂浆强度变化，其敏感系数与砂浆名义抗压强度呈单调变化关系，随着砂浆强度升高，敏感系数逐渐减小；当砂浆强度达到一定值后，敏感程度保持较低水平。当名义抗压强度较小时，弹体偏转对砂浆强度变化的敏感程度显著大于骨料强度变化的影响。

4 弹体着靶速度影响

按表 1 设定混凝土砂浆和骨料参数，假设弹体侵彻速度在 400~1 200 m/s 范围内变化，探究刚性弹着靶速度对弹道偏转的影响。

不同着靶速度条件下，图 10 给出弹体侵彻混凝土靶板过程中的偏转角度随侵彻位移变化。随着着靶速度的增大，弹体偏转角度逐渐变小，弹体原有姿态即惯性保持较好。需指出的是：当着靶速度为 400 m/s 和 500 m/s 时，弹体没有穿透靶板，隧道区较短，不能反应弹体穿透靶板全程的受力环境。所以，分析着靶速度对弹道偏转角度影响时，考虑着靶速度范围为 600~1 200 m/s。

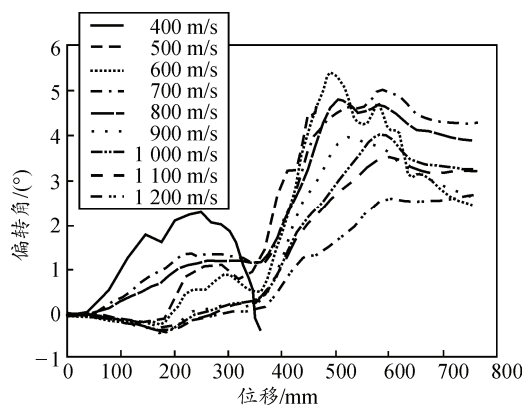


图 10 不同撞击速度条件下弹体偏转角度

从能量角度出发，刚性弹正侵彻混凝土靶可以看作是弹体动能转化为砂浆及骨料破坏损伤形成隧道的内能变化过程，其中大部分内能转化为砂浆及骨料的侵蚀能，而弹体剩余动能用以保持其侵彻能力(见图 11)。提高着靶速度，则弹体初始动能增加，假设侵彻过程中用于靶材的内能转化不变，则弹体剩余动能(剩余速度)增加，因此可保持较好惯性。

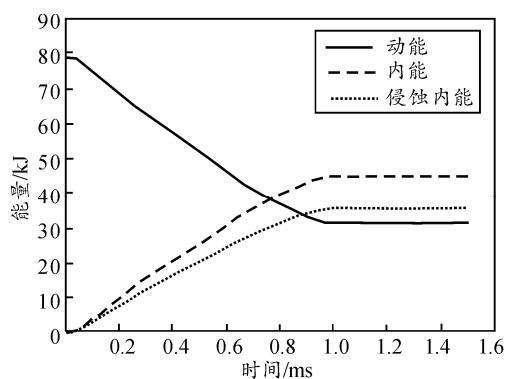


图 11 侵彻过程中能量的变化

图 12 给出侵彻过程中弹体最大偏转角与着靶速度之间的关系。相对而言，当刚性弹以 600 m/s 速度侵彻混凝土靶时，弹道偏转严重，偏转角变大；随着弹速增加，偏转角变小，其弹道趋于平稳，较好地验证了上述分析。显然，在本次工况计算中，弹体最大偏转角与着靶速度满足二次幂函数关系：

$$\varphi = -2.238 \times 10^{-5} V_0^2 - 2.446 \times 10^{-4} V_0 + 6.334 \quad (11)$$

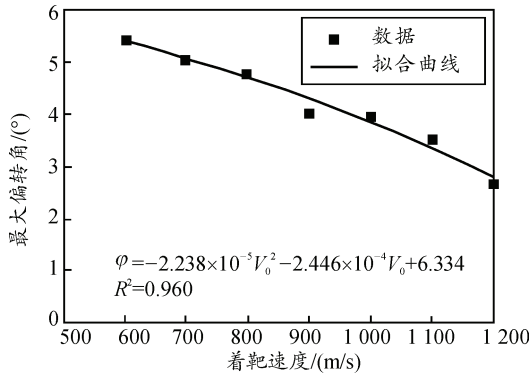


图 12 着靶速度对弹道偏转峰值的影响

需同时指出的是：若弹体非刚性假设，越高速侵彻，越容易变形破坏，则越容易偏转且容易出现“J”弹道。

5 结论

笔者采用混凝土细观模型，通过对刚性弹正侵彻随机骨料混凝土靶进行数值模拟并开展参数讨论，分析得到混凝土砂浆/骨料强度及侵彻速度对弹体侵彻弹道偏转的影响规律，并得出以下结论：

1) 根据混凝土的材料特性，可认为砂浆和骨料共同对正侵彻弹体提供轴向阻力，而随机非均匀的骨料作用力与砂浆阻力之差则提供导致其偏转的侧向力。

2) 弹道偏转角度随混凝土砂浆强度减小而增大，相反地，随骨料强度增加而增大；当名义抗压强度较小时，弹体偏转对砂浆强度变化的敏感度显著大于骨料强度变化的影响。

3) 在刚性弹假设下，弹道随着弹体侵彻速度增加而更加稳定，即偏转角随着靶速度增加而减小；但若弹体非刚性假设，越高速侵彻，越容易变形破坏，则越容易偏转且容易出现“J”弹道。

参考文献：

[1] Gold VM, Vradis GC, Pearson JC. Concrete penetration by eroding projectiles: experiments and analysis[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1996, 122(2): 145-152.

[2] Forrestal MJ, Frew DJ, Hanchak SJ, et al. Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1996, 18(5): 465-476.

[3] Frew DJ, Hanchak SJ, Green ML, et al. Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods[J]. International Journal of Impact Engineering, 1998, 21(6): 489-497.

[4] Forrestal MJ, Altman BS, Cargile JD, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets[J]. International Journal of Impact

Engineering, 1994, 15(4): 395-405.

[5] Forrestal MJ, Frew DJ, Hickerson JP, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(5): 479-497.

[6] Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth[J]. International journal of impact engineering, 2006, 32(10): 1584-1594.

[7] Chen XW, Li QM. Deep penetration of a non-deformable projectile with different geometrical characteristics[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(6): 619-637.

[8] Li QM, Chen XW. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(1): 93-116.

[9] Chen XW. Dynamics of metallic and reinforced concrete targets subjected to projectile impact[D]. Singapore: Nanyang Technological University, 2003: 1-62.

[10] Chen XW, Fan SC, Li QM. Oblique and normal perforation of concrete targets by a rigid projectile[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(6): 617-637.

[11] 马爱娥, 黄风雷. 弹体斜侵彻钢筋混凝土的试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(6): 482-486.

[12] 赵晓宁, 何勇, 张先锋, 等. 杆弹侵彻碳纤维混凝土实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(2): 216-220.

[13] 梁斌, 陈小伟, 姬永强, 等. 先进钻地弹概念弹的次口径高速深侵彻实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(1): 1-9.

[14] 吕中杰, 徐钰魏, 黄风雷. 弹体斜侵彻混凝土过程中的方向偏转[J]. 兵工学报, 2009, 32(S2): 301-304.

[15] 何翔, 徐翔云, 孙桂娟, 等. 弹体高速侵彻混凝土的效应实验[J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(001): 1-6.

[16] 杨建超, 左新建, 何翔, 等. 弹体高速侵彻混凝土质量侵蚀实验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(001): 122-127.

[17] 内维尔 AM. 混凝土的性能[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983: 12-56.

[18] 姚勇, 邓勇军, 陈代果, 等. 混凝土细观组成对弹体正侵彻过程影响的数值模拟研究[J]. 应用力学学报, 2015, 32(1): 69-75.

[19] 曾毅. 基于细观力学的碎石混凝土侵彻数值模拟[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2012: 10-28.

[20] 赵睿. 界面对混凝土靶板侵彻影响的数值模拟研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2013: 11-21.

[21] 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]//Jackson N, Dickert S. The 14th International symposium on Ballistics, USA: American Defense Preparedness Association, 1993: 591-600.

- [22] 章根德. 岩石对冲击载荷的动态响应[J]. 爆炸与冲击, 1982, 2(2): 1-9.
- [23] Goble CF, Cohen MD. Influence of aggregate surface area on mechanical properties of mortar[J]. ACI Materials Journal, 1999, 96(6): 657-662.
- [24] Gopalratnam VS, Shah SP. Softening response of plain concrete in direct tension[J]. ACI Materials Journal, 1985: 82(3): 310-323.
- [25] Harsh S, Shen Z, Darwin D. Strain-rate sensitive behavior of cement paste and mortar in compression[J]. ACI Materials Journal, 1990, 87(5): 508-516.
- [26] Hsu TC, Slate FO. Tensile bond strength between aggregate and cement paste or mortar[J]. ACI Materials Journal, 1963, 60(4): 465-485.
- [27] Hanchak SJ, Forrestal MJ. Perforation of concrete slabs with 48 MPa (7ksi) and 140 MPa (20ksi) unconfined compressive strengths[J]. Int J Impact Engng, 1992, 12(1): 1-7.
- [28] Forrestal MJ, Frew DJ, Hanchak SJ. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete[J]. International Journal of Impact Engineering, 1994(15): 395-405.

(上接第 79 页)

3 结束语

空军后勤作战实验是空军作战实验体系的重要组成部分, 而空军后勤作战实验模型是有效进行作战实验的前提和基础。笔者初步探讨了空军后勤作战实验模型体系构建问题, 并运用 UML 建立了飞行保障指挥控制模型, 为下一步整个模型体系的构建进行了探索。

参考文献:

[1] 钱学森, 等. 论系统工程[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988: 40-50.

[2] 宋学先, 刘仁亮. 现代军事后勤科学总论[M]. 北京: 金盾出版社, 2001: 122-137.

[3] 江敬灼. 作战实验若干问题研究[M]. 北京: 军事科学出版社, 2010: 37-58.

[4] 任鑫, 刘明政, 陈小虎, 等. “智慧后勤装备保障体系”构建探析[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(8): 78-81.

[5] Grady Booch, James Rumbaugh, Ivar Jacobson. UML 用户指南[M]. 2版. 北京: 人民邮电出版社, 2013: 1-99.

[6] Martin Fowler. UML 精粹: 标准对象建模语言简明指南[M]. 3版. 北京: 电子工业出版社, 2012: 46-133.

[7] 张国防, 包凡彪. 熵权值模糊综合评判法在物流选址中的应用[J]. 武汉理工大学学报, 2005, 27(7): 91-93.

[8] 周爱莲. 基于模糊物元可拓的物流中心选址方案综合评价方法[J]. 中国公路学报, 2009, 22(6): 111-115.

[9] 王军武, 刘淑娟. 基于模糊物元的大型建设项目绩效评价[J]. 华中科技大学学报, 2010, 27(1): 22-26.

[10] 阎善郁, 陈雪娇. 物元可拓法在地铁突发事件应急能力评价中的应用[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(3): 18-20.

[11] 宋永军, 陈春良. 一种基于物元分析的保障系统效能评估方法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(12): 16-19.

[12] 高艺珊, 何国杰, 张康. 模糊物元分析法和组合赋权在野营保障能力评估中的应用[J]. 兵工自动化, 2015, 34(2): 49-53.

(上接第 83 页)

参考文献:

[1] 万玉成, 胡勇, 徐启丰. 基于模糊物元分析的航材仓库选址决策[J]. 价值工程, 2008(1): 90-93.

[2] 何满辉. 基于信息熵多属性决策的物流供应商选择评价[J]. 工程设计学报, 2013, 20(1): 6-10.

[3] 蒋美仙, 徐畅, 禹美凤, 等. 基于 AHP 和目标规划的物流配送中心集成选址模型研究[J]. 浙江工业大学学报, 2012, 40(5): 562-566.

[4] Young-Chan Leea, Nguyen-Hanh Tangb, Vijayan Sugumarand. Open Source CRM Software Selection using the Analytic Hierarchy Process[J]. Information Systems Management, 2014, 31(1): 2-20.

[5] 曹庆奎, 李现美. 基于灰色-DEA 的物流配送中心选址研究[J]. 河北工程大学学报, 2013, 30(4): 7-10.

[6] 徐斌, 诸葛承祥, 高健. 基于信息熵-灰色关联法的物