骨料对刚性弹正侵彻混凝土过程的影响机理

张杰^{1,2}, 王志华^{1,2*}, 王志勇^{1,2}, 树学峰^{1,2}

1. 太原理工大学机械与运载工程学院应用力学研究所, 太原 030024;

2. 太原理工大学材料强度与结构冲击山西省重点实验室, 太原 030024

* E-mail: wangzh077@163.com

收稿日期: 2020-12-06; 接受日期: 2021-01-11; 网络版发表日期: 2021-02-25

国家自然科学基金(批准号: 11390362, 11702186)资助项目

摘要 混凝土的细观侵彻破坏机理已成为工程防护领域的重要研究方向. 本文以三维混凝土细观模型为基础, 系统分析了刚性弹正侵彻混凝土过程中, 骨料强度、粒径、体积分数等主要细观参量对弹体偏转及侵彻阻力的影响规律. 明确了深侵彻过程中弹体偏转的四个阶段, 并以静止后弹体偏离原运动姿态的角度为衡量指标, 获得了各变量作用下的弹道偏转规律及相应临界值; 定量研究了骨料特征变量对靶体侵彻阻力的影响, 并以此得到了混凝土均质化假设的适用条件、界定了骨料体积分数及骨料最大粒径对靶体侵彻阻力的影响上限. 通过本文研究, 系统阐述了混凝土中细观骨料对刚性弹正侵彻过程的影响机理, 相关结论可为工程防护结构优化及安全评估提供理论依据.

关键词 混凝土, 细观模型, 骨料, 侵彻阻力, 弹体偏转

1 引言

作为提升工事防护能力的重要举措之一, 粗骨料在弹体侵彻混凝土过程中的作用机理已成为一大研究热点. 混凝土作为典型的非均质材料, 主要由砂浆、骨料及二者之间的界面层组成. 尽管大量粗骨料的加入会降低混凝土的整体抗压性能, 然而, 穆朝民等人^[1]研究发现, 混凝土中适量的块石可以改变弹体在侵彻过程中的运动方向, 进而使弹体侵彻深度明显减小, 即块石的增加提升了混凝土的抗侵彻能力; 逢高伟等人^[2]用强度更高的刚玉骨料代替普通块石遮弹层后发现, 侵彻过程中的弹体偏转程度更加明显, 弹体攻击效

率也被进一步削弱; 通过分析硬质球形颗粒遮弹层对弹体运动过程的影响, 郭虎等人^[3]发现, 随着球形颗粒粒径的增大, 遮弹层对弹体的影响由弹道偏转为主渐变为弹道偏转与侵彻阻力增加的耦合. 此外, 较多实验研究发现, 骨料的含量、粒径及骨料强度均会对混凝土抗侵彻能力产生不同程度的正向作用^[4-9]. 可见, 尽管粗骨料的增加使混凝土强度受到了一定程度的影响, 但其对混凝土抗侵彻能力的提升也不容忽略. 这种提升途径主要体现在两个方面^[10]: (1) 扰动弹体初始运动方向; (2) 增加弹体侵彻阻力.

大规模的混凝土侵彻实验往往成本较高, 用于对比的试件数量也相对有限. 尽管已有较多实验考虑了

引用格式: 张杰, 王志华, 王志勇, 等. 骨料对刚性弹正侵彻混凝土过程的影响机理. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 272–280

Zhang J, Wang Z H, Wang Z Y, et al. Impact mechanisms of aggregate on rigid projectile normal penetration into concrete target (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 272–280, doi: 10.1360/SST-2020-0483

骨料特征量对混凝土抗侵入能力的影响, 但各实验中采用的弹体结构及混凝土配置并不一致, 无法直接进行比较. 因此, 目前对骨料的侵入机理研究大多仍处于定性阶段. 近年来, 数值计算逐渐成为混凝土侵入研究的重要手段之一^[11~14], 混凝土三维细观模型的快速发展^[15~17]也使数值模拟成为研究骨料在侵入过程中作用机理的有效方法.

基于前期以Voronoi技术为基础建立的三维混凝土细观模型, 本文以混凝土中粗骨料的三个主要特征量——骨料强度 f_{agg} , 体积含量 P_{agg} 及骨料粒径 D 为研究对象, 从扰动弹体偏转、增加侵入阻力两方面出发, 定量分析骨料对弹体正侵入混凝土过程的影响, 给出骨料特征量对弹体偏转的影响程度及相应临界值. 最后确定骨料特征量与弹体侵入阻力的定量关系, 并给出混凝土均质化假设的适用条件.

2 有限元模型

2.1 三维混凝土细观模型

Voronoi技术是以空间内分布的点集(形核点)为基础, 将空间划分为有限个彼此相连的区域. 几何上, 各区域内任意点到相应形核点的距离小于到其他任意形核点的距离. 所有封闭区域(胞元)均为凸多面体且彼此互不相交, 因此三维Voronoi图形可以看作是许多彼此相接的骨料, 如图1所示.

以三维Voronoi图形为基础, 通过以下步骤得到混凝土的三维细观模型^[18].

- (1) 胞元离散: 胞元的平均直径为 $\delta_0 = \frac{\sqrt{6}}{2} \left(\frac{V}{\sqrt{2}N} \right)^{1/3}$,

其中 N 为形核点的数量, V 为试件的空间总体积. 以相应形核点为中心对各胞元进行不同程度的缩放, 得到满足预定级配的三维随机骨料模型.

- (2) 骨料密实: 对骨料施加重力, 通过自由下落获得满足体积分数的骨料模型.

- (3) 砂浆填充及网格划分: 对骨料依次进行2D, 3D网格划分, 其面网格可同时作为骨料与砂浆间的接触单元. 该面网格与混凝土外边界区域网格组成的封闭空间, 即为砂浆区域, 对该区域进行3D网格划分, 即为砂浆网格. 整体混凝土有限元模型如图2所示.

骨料与砂浆的界面过滤层对混凝土的准静态力学

图1 (网络版彩图)三维Voronoi图形

Figure 1 (Color online) Three-dimensional (3D) Voronoi diagram.

图2 (网络版彩图)三维混凝土细观模型

Figure 2 (Color online) 3D meso-scale concrete model.

性能具有至关重要的影响. 然而, 与准静态载荷作用下界面层的破坏机理不同, 弹体侵入作为一个高速的动态冲击过程, 其持续时间较短, 强度较低的界面层在短时间内对弹体侵入阻力及运动方向均不会产生明显影响. 因此, 本文模型中仅包含砂浆与骨料, 未考虑两者之间的界面层.

2.2 弹体模型

前期工作中^[18], 通过与经典实验^[19]进行对比, 验证了混凝土细观模型在弹体侵入模拟中的有效性. 本文采用的弹体仍与文献^[19]保持一致: 弹头曲率半径 S_t 与弹体直径 d 的比值(CRH)为3, 质量为0.5 kg, 弹体直径 d 为25.4 mm, 总长 L 为143.7 mm. 弹体有限元模型如图3所示.

3 骨料对弹体侵入过程的影响

3.1 弹体偏转角

选取弹体中轴线上弹尖 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 与弹尾圆面中点 $B(X_B, Y_B, Z_B)$ 两点, 将 AB 连线与 X 轴负方向(弹体初始运动方向 v)的夹角定义为弹体偏转角度, 如图4所示, 则偏转角 θ 可表示为

$$\theta = \arcsin\left(\sqrt{(\Delta Y)^2 + (\Delta Z)^2} / L\right) \times \frac{180}{\pi}, \quad (1)$$

式中, $\Delta Y = Y_A - Y_B$, $\Delta Z = Z_A - Z_B$.

3.2 侵入阻力参数 R

基于动态空腔膨胀理论, Li和Chen^[20]提出了刚性弹侵入混凝土的侵入预测公式:

$$\begin{cases} \frac{X}{d} = \sqrt{\frac{(1+k\pi/4N)4k}{(1+I/N)}\pi} I, & \frac{X}{d} \leq k, \\ \frac{X}{d} = \frac{2}{\pi} N \ln\left[\frac{(1+I/N)}{(1+k\pi/4N)}\right] + k, & \frac{X}{d} > k, \end{cases} \quad (2)$$

$$I = \frac{mv^2}{d^3 S f_c}, \quad N = \frac{m}{\rho d^3 N^*}, \quad (3)$$

图3 (网络版彩图)弹体有限元模型

Figure 3 (Color online) Finite element model of projectile.

图4 (网络版彩图)弹体偏转角定义

Figure 4 (Color online) Definition of the deflection angle of projectile.

式中, X 为弹体侵入深度, I 为弹体冲击函数, k 为经验常数(一般取为2), N^* 与 N 分别为弹头形状因子与形状函数, S 是与 f_c (单位MPa)相关的经验常数(一般 $S=82.6f_c^{-0.544}$ 或 $S=72.0f_c^{-0.5}$). 为研究骨料参数对侵入阻力的影响, 用阻力参数 R 替代 Sf_c 表征弹体侵入阻力, 则有

$$R = \frac{mv^2}{d^3 I}, \quad (4)$$

式中, I 可通过将模拟计算得到的侵入深度 X 代入式(2)而得到(对于深侵入, $X > kd$):

$$I = N \left\{ \exp\left[\left(\frac{2X-dk}{2d}\right)\frac{\pi}{2N}\right] - 1 \right\}. \quad (5)$$

4 骨料对弹体侵入过程的影响

4.1 弹体速度

设定混凝土中骨料与砂浆的强度分别为120和30 MPa, 骨料体积分数 P_{agg} 为45%, 骨料粒径 D 与弹体直径 d 的比值为2. 弹体分别以400, 500, 600, 700和800 m/s的初速度正侵入细观混凝土靶体, 侵入过程中弹体偏转角度随位移变化如图5所示. 随着初始速度的提升, 弹体侵入深度相应增加, 偏转角度也随着弹体与更多骨料发生碰撞而逐渐累积. 运动过程中, 弹体所受力矩方向可能会因骨料的随机分布而发生改变, 使偏转角度产生回弹, 但从模拟结果来看, 整体上, 弹体偏转角随着侵入深度的增加而增大.

图6(a)与(b)分别是速度为800 m/s时, 弹体的位移-时间曲线及弹头和弹尾沿侧向(即 Y, Z 方向)的运动速度时程曲线. 弹体运动过程中, 其偏转角度的变化大致分为四个阶段: ① 偏转起始(位移从0至15 cm). 该阶段, 弹体穿破靶体表面, 当撞击到骨料时, 开始发生偏转. 由于未全部入靶(弹体长度为14.37 cm), 弹体运动仍受靶体表面约束, 偏转角累积较为缓慢. 由图5可知, 速度大的弹体起始偏转角累积较慢, 这是由于弹体惯性越大, 更不易发生偏转. ② 偏转累积加速(以800 m/s的工况为例: 位移从15至39.3 cm). 该阶段, 弹体完全进入靶体, 由于骨料与砂浆性能差异较大, 弹头受非对称侧向阻力明显. 弹体行进过程中撞击更多骨料, 偏转累积加速. 从图6(b)可以看出, Z 方向上, 弹头速度一直大于弹尾, 因此偏转角不断累积; 至 $t=760 \mu s$ ($X=39.3$ cm), 二者速度一致, 偏转累积到最大程度. 从

图 5 (网络版彩图)不同侵彻速度下的弹体位移-偏转角曲线

Figure 5 (Color online) Displacement-deflection angle curves of projectile with different velocities.

图5可知, 弹体偏转角累积速度随弹体速度的增加而减缓, 当速度达到600 m/s以后, 基本保持不变. ③ 偏转累积速度减缓或回弹(以800 m/s工况为例: 位移从39.3至47.4 cm). 这一阶段, 由于速度减缓, 弹头所受惯性阻力减小, 侧向合力也随之减弱, 弹体前部偏转累积速度减慢, 而弹尾沿着弹头轨迹运动, 偏转速度相对较大, 因此, 偏转角累积速度减缓(如400 m/s)甚至回弹(如500, 600, 700和800 m/s); 以800 m/s工况为例, 如图6(b)所示, 当 $t=760 \mu\text{s}$ ($X=39.3 \text{ cm}$)时, 在Z方向, 弹尾速度大于弹头速度, 因此偏转角开始减小, 至 $t=1170 \mu\text{s}$ 时, 二者速度再次相同, 偏转角不再下降. ④ 偏转急剧变化. 这一阶段, 弹体速度逐渐减小为0, 弹头在弹道空腔中率先停滞, 弹尾摆动使偏转角短时间内发生较大变化, 且偏转方向较为随机(如图5所示, 弹体速度为700 m/s时, 偏转角明显减小, 而其他工况偏转角明显增大).

综上, 受混凝土中粗骨料影响, 在研究范围内, 弹体偏转主要经历四个阶段: 偏转起始、偏转累积加速、偏转累积速度减缓或回弹、偏转急剧变化. 且在前两个阶段中, 弹体初始速度越大, 偏转角累积速率越慢, 至600 m/s后, 累积速度基本保持不变.

4.2 骨料强度 f_{agg}

为研究骨料强度对侵彻过程的影响, 保持砂浆强度为30 MPa不变, 骨料强度分别取80, 100, 120, 150和180 MPa, 骨料体积分数 $P_{\text{agg}}=45\%$ 与 $D/d=2$ 保持不变.

图 6 (网络版彩图)弹体速度为800 m/s时弹体位移-时间曲线(a), 以及弹头和弹尾沿侧向的速度时程曲线(b)

Figure 6 (Color online) (a) Displacement-time curves of projectile and (b) velocity-time curves on both ends of the projectile with initial velocity of 800 m/s.

弹体以800 m/s的初始速度侵彻混凝土靶体.

4.2.1 对弹体偏转的影响

图7是砂浆强度为30 MPa时, 不同骨料强度下的弹体偏转角-位移曲线. 随着骨料强度的提升, 弹体侵彻过程中所受阻力增加, 骨料破碎将消耗更多的弹体动能, 因此弹体侵彻深度也随之减小. 另一方面, 骨料强度越高, 混凝土整体非均质性增强, 弹体所受横向合力越大, 弹道稳定性更差. 由图可知, 在偏转角累积加速阶段, 偏转角累积速度随着骨料强度的增强而加快, 当骨料强度增至150 MPa时, 偏转角累积速率基本保持不变; 弹体速度随着侵彻深度的增加而减小, 且骨料强度越高, 弹体动能损耗越快, 弹体偏转角也较快进入减缓和急剧变化阶段. 因此, 最终来看, 弹体累积

图 7 (网络版彩图)弹体侵彻不同强度骨料混凝土的位移-偏转角曲线

Figure 7 (Color online) Displacement-deflection angle curves of projectile penetration into concrete with different aggregate strengths.

偏转角反而会随骨料强度的增加而减小。

4.2.2 对侵彻阻力的影响

通过统计5种不同强度骨料混凝土的弹体侵彻深度,由式(2)~(5)计算得到各自的侵彻阻力,如图8所示。

以强度为80 MPa的骨料为基准,对骨料强度 f_{agg} 与阻力值 R 的关系进行拟合,发现二者关系可以表示为

$$R_{f_{agg}} = (0.003f_{agg} + 0.735)R_{80}, \quad (6)$$

式中, R_{80} 是骨料强度为80 MPa时的混凝土靶体阻力值。可以看出, R 随着骨料强度的增长线性增加。

4.3 骨料粒径与弹体直径比值 D/d

4.3.1 对弹体偏转的影响

弹体撞击骨料时,骨料粒径的大小影响了弹头受力面中与骨料的接触面积。控制骨料、砂浆强度及骨料体积比保持不变,骨料粒径与弹体直径的比值 D/d 分别为0.5, 1, 2, 3和4。弹体以800 m/s的速度正侵彻混凝土靶体,偏转角结果如图9所示。

侵彻过程中,由于各靶体骨料粒径值相差较大,弹体偏转角从起始阶段便显示出较大差异。从图中结果来看,起始阶段,弹体偏转角累积速度随着骨料粒径的增加而加快,随着弹体侵彻深度越深,各弹体偏转角未严格按照此规律发展。但整体上,弹体偏转角随着骨料粒径的增加而增大;当 D/d 上升至2时,骨料粒

图 8 (网络版彩图)骨料强度 f_{agg} 与侵彻阻力 R 之间的关系
Figure 8 (Color online) Relationships between f_{agg} and R .

图 9 (网络版彩图)弹体侵彻不同骨料粒径混凝土的位移-偏转角曲线

Figure 9 (Color online) Displacement-deflection angle curves of projectile penetration into concrete with different D/d .

径对最终弹体偏转角的影响不明显,对于 D/d 为2, 3, 4的混凝土靶体,弹体最大偏转角度分别为 8.43° , 8.22° , 8.87° ,可认为,当 D/d 超过2时,继续增加骨料粒径对弹体偏转角度的影响不大。当 D/d 为0.5时,弹体最终偏转角为 1.18° ,认为弹体运动方向基本未发生变化,此时可用均质混凝土模型进行计算,提高模拟效率。

4.3.2 对侵彻阻力的影响

对含5种不同骨料粒径混凝土的侵彻深度进行统计,可计算得到各靶对弹体的侵彻阻力如图10所示。通

图 10 (网络版彩图)骨料粒径与弹体直径比 D/d 与侵彻阻力 R 之间的关系

Figure 10 (Color online) Relationships between D/d and R .

过数据拟合,发现侵彻阻力 R 与 D/d 满足以下关系:

$$R_{D/d} = 2.01 \times (D/d)^{0.28} R_0, \quad (7)$$

式中, $R_0 = 239.27$ MPa为均质混凝土的侵彻阻力值,通过模拟弹体侵彻强度为30 MPa的均质混凝土而得到.

当细观模型混凝土侵彻阻力值 R 大于均质混凝土侵彻阻力值 R_0 (即239.27 MPa)的10%时,将此时骨料粒径与弹体直径的比值定义为均质化假设适用的 D/d 临界值,即当 D/d 超过该临界值时,应使用细观模型来预测混凝土靶体的侵彻阻力.该工况下的 D/d 临界值为

$$2.01 \times [D/d]_{\text{临界}}^{0.28} \times R_0 = (1+10\%) \times R_0,$$

即 $[D/d]_{\text{临界}} = 0.12$.通过对实验数据进行统计, Rosenberg和Kositski^[21]认为,当弹体直径为骨料最大粒径的7.5~10倍(即 $D/d=0.10$ 和 0.13)时,混凝土可以被认为是均质材料,与本文结果基本一致.

此外, Frew等人^[22]研究发现,当圆柱形混凝土靶体直径大于12倍弹体直径时,进一步增加靶体尺寸对侵彻深度的影响可以忽略.因此,我们假设 $D/d=12$ 时,侵彻阻力不再随 D/d 的增加而增加.当混凝土阻力值 R 小于 R_{12} ($D/d=12$ 对应的侵彻阻力值)的10%时,认为此时对应的 D/d 为骨料粒径影响侵彻阻力的上限值.由式(7)可得,该上限值为

$$2.01 \times [D/d]_{\text{上限}}^{0.28} \times R_0 = (1-10\%) \times R_{12},$$

即 $[D/d]_{\text{上限}} = 8.24$.

4.4 骨料体积分数 P_{agg}

4.4.1 对弹体偏转的影响

控制砂浆、骨料强度分别为30和120 MPa且保持不变, $D/d=2$.靶体中所含骨料体积含量分别为20%, 30%, 45%, 60%和75%, 弹体以800 m/s速度正侵彻混凝土靶体,结果如图11所示.

一般来说,混凝土中较高的骨料含量会提升弹体在侵彻过程中与骨料的撞击概率,从而使弹体累积更大的偏转角度.由图11可知,骨料体积分数从20%上升至45%时,弹体最大偏转角由 2.65° 增加至 8.43° ,然而,随着骨料体积分数的持续增加,弹体累积偏转角反而明显下降:当体积分数增至75%时,弹体最大偏转角由45%时的 8.43° 降为 3.29° ,与预期结果不符.这是因为随着骨料数量的增多,弹头受不平衡侧向力的频率增加,弹杆及弹尾也随之产生偏转趋势,然而弹杆受周围更多骨料的约束,对整个弹体的偏转起到了限制作用.因此,当骨料体积含量增至一定程度时,继续增加骨料含量反而会降低弹体的偏转程度.根据计算结果,骨料体积含量约为45%时,弹体偏转累积角度达到最高;当骨料体积含量增至60%时,继续增加骨料数量对弹体偏转角的影响不明显.

4.4.2 对侵彻阻力的影响

图12为含不同骨料体积分数的混凝土靶体侵彻阻

图 11 (网络版彩图)弹体侵彻不同骨料含量混凝土的位移-偏转角曲线

Figure 11 (Color online) Displacement-deflection angle curves of projectile penetration into concrete with different aggregate volume fractions.

图 12 (网络版彩图) 骨料体积含量 P_{agg} 与侵彻阻力 R 之间的关系

Figure 12 (Color online) Relationships between P_{agg} and R .

力值. R 与 P_{agg} 满足以下指数关系:

$$R_{P_{agg}} = (0.81 \times e^{1.33P_{agg}} + 1)R_0. \quad (8)$$

当混凝土阻力值小于 $P_{agg}=100\%$ 对应阻力值的 10% 时, 相应的体积分数被定义为影响侵彻阻力的 P_{agg} 上限值; 当细观模型混凝土的阻力值大于 $P_{agg}=0$ 对应阻力值的 10% 时, 将相应的骨料体积分数定义为混凝土均质化假设成立的 P_{agg} 临界值. 值得注意的是, 在此, 未以均质混凝土的阻力值作为参考基准, 而是采用了 $P_{agg}=0$, 这是因为在该工况中 $D/d=2$ 保持不变, 则体积分数趋于 0 的极限情况为混凝土中仅有一颗骨料. 因

此式(8)拟合过程中的参量 a 可理解为单个骨料对弹体侵彻的阻力作用. 由式(8)可得, P_{agg} 临界值为 15.16%, P_{agg} 上限值为 89.29%.

5 结论

以刚性弹正侵彻细观混凝土为研究背景, 从弹体偏转及侵彻阻力两个方面出发, 系统阐述了骨料强度、体积分数及骨料粒径对弹体深侵彻过程的影响机理. 主要结论如下.

(1) 深侵彻过程中, 弹体偏转主要经历四个阶段: 偏转起始、偏转累积加速、偏转累积速度减缓或回弹、偏转急剧变化. 前两个阶段, 弹体初速度越大, 偏转角累积速率越慢, 至 600 m/s 后, 累积速率基本保持不变.

(2) 弹体偏转角随骨料强度、骨料粒径的增大而增大. 当骨料强度大于 150 MPa 时, 弹体偏转角不再增加; 当 D/d 达到 2 时, 继续增加骨料粒径对偏转角度的影响不明显; 弹体偏转角随骨料含量的增加先增大后减小, 当骨料体积分数约为 45% 时, 弹体偏转角达到最大值.

(3) 明确了骨料强度 f_{agg} , 骨料体积比 P_{agg} 及骨料粒径与弹体直径比值 D/d 与侵彻阻力 R 的定量关系, 得到了特定工况下混凝土均质化假设成立的 D/d 临界值及 P_{agg} 临界值, 并获得 D/d 及 P_{agg} 对弹体侵彻阻力的影响上限.

参考文献

- Mu C M, Shi P, Xin K. Numerical simulation on rock anti-penetration layer against penetrating (in Chinese). *Ordnance Mat Sci Eng*, 2012, 35: 4–8 [穆朝民, 施鹏, 辛凯. 射弹侵彻块石遮弹层的数值模拟. *兵器材料科学与工程*, 2012, 35: 4–8]
- Pang G W, Fang Q, Kong X Z, et al. Numerical simulation of WDU-34/B warhead penetrating into rubble burster layer (in Chinese). *Protect Eng*, 2020, 42: 15–22 [逢高伟, 方秦, 孔祥振, 等. WDU-34/B 钻地弹侵彻块石遮弹层的数值模拟研究. *防护工程*, 2020, 42: 15–22]
- Guo H, He L L, Chen X W, et al. Penetration mechanism of a high-speed projectile into a shelter made of spherical aggregates (in Chinese). *Explo Shock Waves*, 2020, 40: 74–86 [郭虎, 何丽灵, 陈小伟, 等. 球形颗粒遮弹层对高速侵彻弹体的作用机理. *爆炸与冲击*, 2020, 40: 74–86]
- Wang J Q, Zheng K, Ning J G. Numerical and experimental study on projectiles' high-velocity penetration into concrete targets (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2016, 46: 349–356 [王剑青, 郑楷, 宁建国. 弹体高速侵彻混凝土的数值模拟及实验研究. *中国科学: 技术科学*, 2016, 46: 349–356]
- Wu C, Li W, Shen X. Study of the anti-penetration performance of concrete with different coarse aggregate content. *Lat Am J Solids Struct*, 2018, 15
- Wu H, Fang Q, Gong J, et al. Projectile impact resistance of corundum aggregated UHP-SFRC. *Int J Impact Eng*, 2015, 84: 38–53
- Wu H J, Huang F L, Wang Y N, et al. Experimental investigation on projectile nose eroding effect of high-velocity penetration into concrete (in Chinese). *Acta Armamentarii*, 2012, 33: 48–55 [武海军, 黄风雷, 王一楠, 等. 高速侵彻混凝土弹体头部侵蚀终点效应实验研究. *兵工学报*,

- 2012, 33: 48–55]
- 8 Werner S, Thienel K C, Kustermann A. Study of fractured surfaces of concrete caused by projectile impact. *Int J Impact Eng*, 2013, 52: 23–27
 - 9 Zhang M H, Shim V P W, Lu G, et al. Resistance of high-strength concrete to projectile impact. *Int J Impact Eng*, 2005, 31: 825–841
 - 10 Ning J G, Zhou F H, Wang Z H, et al. Constitutive model, failure mechanism and numerical method for reinforced concrete under intensive impact loading (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2016, 46: 323–331 [宁建国, 周风华, 王志华, 等. 强冲击载荷下钢筋混凝土的本构关系、破坏机理与数值方法. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 323–331]
 - 11 Yuan X, Ning J, Ma T, et al. Stability of Newton TVD Runge–Kutta scheme for one-dimensional Euler equations with adaptive mesh. *Appl Math Computation*, 2016, 282: 1–16
 - 12 Ning J, Ma T, Fei G. Multi-material Eulerian method and parallel computation for 3D explosion and impact problems. *Int J Comput Methods*, 2014, 11: 1350079
 - 13 Zhang J, Yang H, Zhang Y, et al. Numerical investigations on the effect of reinforcement on penetration resistance of concrete slabs using a 3D meso-scale method. *Constr Build Mater*, 2018, 188: 793–808
 - 14 Xu X, Ma T, Liu H, et al. A three-dimensional coupled Euler-PIC method for penetration problems. *Int J Numer Methods Eng*, 2019, 119: 737–756
 - 15 Deng Y J, Chen X W, Yao Y, et al. On ballistic trajectory of rigid projectile normal penetration based on a meso-scope concrete model (in Chinese). *Explo Shock Waves*, 2017, 37: 377–386 [邓勇军, 陈小伟, 姚勇, 等. 基于细观混凝土模型的刚性弹体正侵彻弹道偏转分析. 爆炸与冲击, 2017, 37: 377–386]
 - 16 Zhang Y H, Chen Q Q, Zhang J, et al. 3D mesoscale modeling method and dynamic mechanical properties investigation of concrete (in Chinese). *Explo Shock Waves*, 2019, 39: 110–117 [张煜航, 陈青青, 张杰, 等. 混凝土三维细观模型的建模方法与力学特性分析. 爆炸与冲击, 2019, 39: 110–117]
 - 17 Fang Q, Zhang J H, Huan Y, et al. The investigation into three-dimensional mesoscale modelling of fully-graded concrete (in Chinese). *Eng Mech*, 2013, 30: 14–21 [方秦, 张锦华, 还毅, 等. 全级配混凝土三维细观模型的建模方法研究. 工程力学, 2013, 30: 14–21]
 - 18 Zhang J, Wang Z, Yang H, et al. 3D meso-scale modeling of reinforcement concrete with high volume fraction of randomly distributed aggregates. *Constr Build Mater*, 2018, 164: 350–361
 - 19 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. *Int J Impact Eng*, 1992, 12: 1–7
 - 20 Li Q M, Chen X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile. *Int J Impact Eng*, 2003, 28: 93–116
 - 21 Rosenberg Z, Kositski R. Modeling the penetration and perforation of concrete targets by rigid projectiles. *Int J Prot Struct*, 2016, 7: 157–178
 - 22 Frew D J, Forrestal M J, Cargile J D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. *Int J Impact Eng*, 2006, 32: 1584–1594

Impact mechanisms of aggregate on rigid projectile normal penetration into concrete target

ZHANG Jie^{1,2}, WANG ZhiHua^{1,2}, WANG ZhiYong^{1,2} & SHU XueFeng^{1,2}

¹ *Institute of Applied Mechanics, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;*

² *Shanxi Key Laboratory of Material Strength and Structural Impact, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China*

Concrete failure mechanisms under projectile penetration at a mesoscale level have recently attracted researchers' attention. Based on the three-dimensional (3D) mesoscale concrete model, the influences of aggregate strength, size, and volume fraction on deflection angle and penetration resistance of projectile were analyzed during the process of rigid projectile penetration into the concrete. Four stages of projectile deflected during the process of depth penetration were described. The measurement of the deflection angle of the projectile during the penetration process revealed the factors affecting ballistic stability. These factors were investigated quantitatively, and their critical values affecting the deflection angle of projectile were obtained. The effects of the key variables of coarse aggregate on penetration resistance were quantitatively studied. Then, the applicable conditions to satisfy the homogeneous assumption and the upper bounds of aggregate size and volume fraction were identified. The latter influenced the penetration resistance and were dependent on the aggregate configurations. Finally, the influencing mechanisms of coarse aggregate on the rigid projectile normal penetration into mesoscale concrete were described. The results reported here provide a theoretical and practical background for design optimization and safety assessment for protective engineering structures.

concrete, meso-scale model, aggregate, penetration resistance, deflection of projectile

doi: [10.1360/SST-2020-0483](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0483)