DOI: 10.11883/bzycj-2017-0123
文章编号: 1001-1455(2018)06-1364-08

# 细观混凝土靶抗侵彻数值模拟及侵彻深度模型*

吴 成,沈晓军,王晓鸣,姚文进
(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室,江苏 南京 210094)

**摘要**: 为研究细观混凝土靶的侵彻规律,采用 LS-DYNA 软件对刚性弹丸侵彻两相混凝土靶进行了数值模拟。结果表明,影响靶板抗侵彻能力的主要因素是砂浆种类、粗骨料种类和粗骨料体积分数;混凝土靶中的砂浆与对应的砂浆靶中的砂浆产生的阻力接近;混凝土靶中的粗骨料产生的阻力远低于对应的岩石靶中的岩石。通过扩展 Forrestal 阻力方程,建立了细观混凝土侵彻深度模型,模型和数值模拟一致性很好。

**关键词**: 侵彻;细观;混凝土;LS-DYNA;侵彻深度
**中图分类号**: O385 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

弹丸对混凝土的侵彻深度一直是军事领域的热点问题[1-3]。对于大坝混凝土[4],粗骨料通常为天然骨料,这意味着不同地方大坝中的粗骨料力学性能差异很大,粗骨料最大粒径普遍达到 150mm,且粗骨料最大粒径离散大(例如胡佛水坝为 229 mm, 青铜峡拦河大坝为 80 mm),粗骨料的体积分数差异也很大。所以,研究粗骨料对弹丸侵彻混凝土靶的影响具有重要意义。

关于粗骨料对混凝土靶的抗侵彻能力问题,A. N. Dancygier 等[5]和 S. Wang 等[6]实验证明了含有粗骨料的混凝土比无粗骨料混凝土的抗侵彻能力强;张伟等[7]实验研究了粗骨料粒径对破片侵彻深度、成坑体积和开坑剥落碎片的尺寸的影响;张凤国等[8]通过数值模拟比较了侵彻细观混凝土模型与均质混凝土模型的差异;Q. Fang 等[9]建立了碎石粗骨料混凝土的有限元模型,模拟了变形弹体的侵彻规律;张兆军等[10]通过数值模拟研究了粗骨料种类对贯穿混凝土靶剩余速度的影响。当前的研究以实验和数值模拟方法为主,对于最大粗骨料尺寸 $d_a$ 与弹丸直径 $d$ 的比值 $d_a/d\leqslant 1.5$ 时的数值模拟,缺乏侵彻深度影响因素分析和砂浆与粗骨料的受力分析。为深刻理解混凝土抗侵彻机理,节约经费和计算时间,需要发展细观尺度侵彻深度理论。

本文中将混凝土简化为砂浆和粗骨料两相复合材料,通过数值模拟得到细观尺度混凝土靶对侵彻深度的影响规律,并进行混凝土中砂浆和粗骨料的受力分析。建立考虑粗骨料种类、砂浆种类和粗骨料体积分数的弹丸侵彻细观混凝土靶的侵彻深度理论模型。

## 1 粗骨料对刚性弹侵彻深度影响的数值模拟

通过数值模拟来系统研究粗骨料对正侵彻刚性弹侵彻深度的影响规律,从而找到影响侵彻深度的主要因素以及砂浆和粗骨料的受力特点,为理论模型的建立奠定基础。

### 1.1 细观有限元模型建立

将混凝土简化为粗骨料和砂浆两相复合材料。在冲击载荷下,混凝土的破坏通常会穿过粗骨料,因此忽略复杂的界面过渡区,将粗骨料和砂浆材料间的接触简化为共节点。基于背景网格的材料识别方法[10],将粗骨料投放在靶板中,即使用编程软件随机生成粗骨料的位置和半径,并输出为网格生成软件 TrueGrid 的命令流,将一部分基体材料替换为骨料材料,从而生成两相网格。将弹丸初速和靶板本构等物理量赋予网格文件,并使用动力学数值模拟软件 LS-DYNA 进行求解。

* **收稿日期**: 2017-04-14; **修回日期**: 2017-05-22
**基金项目**: 国家自然科学基金项目(11602111)
**第一作者**: 吴 成(1989— ),男,博士研究生,qqqwucheng@163.com。

为了降低数值模拟计算量，只加密混凝土靶中心区域，并且只对中心区域投放粗骨料。外围区域的局部冲击效应较弱，砂浆的力学性能可大体表征混凝土整体的力学性能，所以外围区域简化为砂浆。对比一组中心加密区尺寸为 3 倍弹径和 5 倍弹径的混凝土调试算例，其侵彻深度差异为 1.6%，说明加密区尺寸不小于 3 倍弹径时，中心区域尺寸和外围区域简化合理。混凝土的有限元网格如图 1 所示。

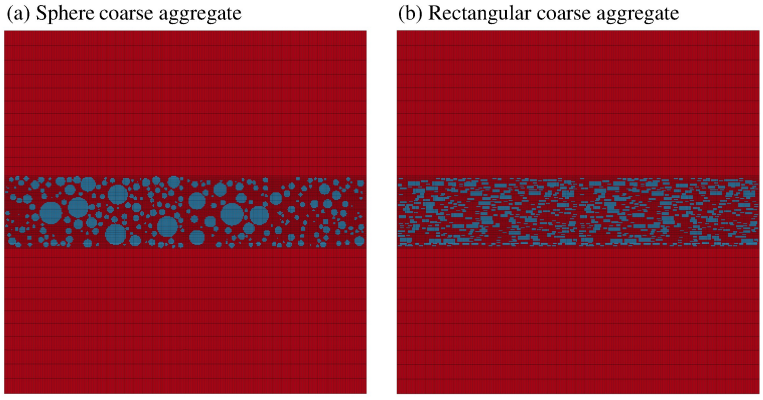



图 1　三维混凝土靶网格的截面

Fig. 1　Cross section of 3D concrete target grid

HJC 本构模型适用于描述大应变、高应变率和高压下的混凝土类材料[11]。粗骨料材料参数使用方秦等[12]给出的 Salem 石灰岩 HJC 本构参数，如表 1 所示。砂浆材料参数使用 C. S. Meyer 等[13]给出的 S 型砂浆 HJC 本构参数，如表 2 所示。由于中心区域外对侵彻深度影响很小，中心区域外采用和砂浆相同的本构参数来简化。

**表 1　Salem 石灰岩 HJC 本构参数**

**Table 1　HJC model parameters of Salem limestone**

| $\rho_0/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$ | $G$/GPa | $A$ | $B$ | $C$ | $N$ | $f_c'$/MPa | T/MPa | $\dot{\varepsilon}_0/\mathrm{s^{-1}}$ | $E_{f,\min}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2.3 | 10 | 0.55 | 1.23 | 0.009 7 | 0.89 | 60 | 4 | 1 | 0.01 |
| $S_{\max}$ | $P_{\mathrm{crush}}$/MPa | $\mu_{\mathrm{crush}}$ | $P_{\mathrm{lock}}$/GPa | $\mu_{\mathrm{lock}}$ | $D_1$ | $D_2$ | $K_1$/GPa | $K_2$/GPa | $K_3$/GPa |
| 20 | 20 | 0.001 25 | 2 | 0.174 | 0.04 | 1.0 | 39 | −223 | 550 |

**表 2　S 型砂浆 HJC 本构参数**

**Table 2　HJC model parameters of type S mortar**

| $\rho_0/(\mathrm{g\cdot cm^{-3}})$ | $G$/MPa | $A$ | $B$ | $C$ | $N$ | $f_c'$/MPa | T/MPa | $\dot{\varepsilon}_0/\mathrm{s^{-1}}$ | $E_{f,\min}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1.604 | 1 150 | 0.66 | 1.335 | 0.001 8 | 0.845 | 12.3 | 1.8 | 1 | 0.01 |
| $S_{\max}$ | $P_{\mathrm{crush}}$/MPa | $\mu_{\mathrm{crush}}$ | $P_{\mathrm{lock}}$/MPa | $\mu_{\mathrm{lock}}$ | $D_1$ | $D_2$ | $K_1$/MPa | $K_2$/GPa | $K_3$/GPa |
| 80.24 | 13.8 | 0.007 5 | 109.6 | 0.15 | 0.006 629 | 1.0 | 300 | −2 | 19 |

## 1.2　侵彻方案及结果

由于全尺寸细观网格模型过于庞大，采用直径 $d=40$ mm 的缩比弹丸进行数值模拟。弹丸头部曲径比 $\Psi=2.0$，质量 $m=1\,733$ g。Salem 石灰岩密度 $\rho_g=2.3$ g/cm$^3$，S 型砂浆密度 $\rho_s=1.6$ g/cm$^3$。

数值模拟方案及数值模拟得到的侵彻深度 $P$ 如表 3 所示。由于混凝土的屈服强度与围压和应变率相关，所以需要考虑入射速度 $v_0$ 的影响，为确保弹丸为刚性弹，入射速度 $v_0$ 最大为 800 m/s，为覆盖常见的入射速度，最小为 300 m/s。球体和各种形状长方体粗骨料能够大体表征各种形状的粗骨料。缩比弹丸直径 $d=40$ mm，最大粗骨料尺寸 $d_a$ 达到 60 mm，$d/d_a$ 覆盖多数实际钻地弹工况。实际混凝土为连续级配，为研究级配对侵彻深度 $P$ 的影响，增加了相同粗骨料尺寸的级配形式。由于随机方向长方体粗骨料的有限元网格建模工作量大，这里采用最短边与弹轴平行和垂直两个算例的侵彻深度 $P$ 的平均值，来近似代表随机方向长方体粗骨料方案。粗骨料体积分数 $\varphi$ 对侵彻深度 $P$ 影响较大，$\varphi$ 超过

50%后,会导致粗骨料投放时间过长,所以这里投放的粗骨料体积分数 $\varphi$ 只达到 50%。使用侵彻不同靶板位置的算例来模拟随机投放粗骨料对侵彻深度 $P$ 离散的影响。

**表 3 侵彻数值模拟方案及侵彻深度 $P$**

**Table 3 Numerical simulation scheme and penetration depth $P$**

| 方案 | $v_0$/(m·s$^{-1}$) | 粗骨料形状 | $d_a$/mm | 粗骨料级配 | 粗骨料方向 | $\varphi$/% | 附加说明 | $P$/cm |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 500 | 球体 | ∅25 | Fuller 连续级配 | — | 33 | — | 73.9 |
| 2 | 500 | 球体 | ∅40 | Fuller 连续级配 | — | 33 | — | 74.6 |
| 3 | 500 | 球体 | ∅60 | Fuller 连续级配 | — | 33 | 撞击位置 1(轴线) | 73.5 |
| 4 | 500 | 球体 | ∅60 | Fuller 连续级配 | — | 33 | 撞击位置 2(横向偏移 2 cm) | 73.3 |
| 5 | 500 | 球体 | ∅60 | Fuller 连续级配 | — | 33 | 撞击位置 3(横向偏移−2 cm) | 73.7 |
| 6 | 500 | 长方体 | 30×30×10 | 3 种粗骨料尺寸 | 最短边与弹轴平行 | 33 | — | 69.2 |
| 7 | 500 | 长方体 | 30×30×10 | 3 种粗骨料尺寸 | 最短边与弹轴垂直 | 33 | — | 75.8 |
| 8 | 500 | 长方体 | 30×20×10 | 3 种粗骨料尺寸 | 最短边与弹轴平行 | 33 | — | 70.8 |
| 9 | 500 | 长方体 | 30×20×10 | 3 种粗骨料尺寸 | 最短边与弹轴垂直 | 33 | — | 75.7 |
| 10 | 500 | 长方体 | 30×10×10 | 3 种粗骨料尺寸 | 最短边与弹轴平行 | 33 | — | 69.9 |
| 11 | 500 | 长方体 | 30×10×10 | 3 种粗骨料尺寸 | 最短边与弹轴垂直 | 33 | — | 75.8 |
| 12 | 500 | 球体 | ∅40 | Fuller 连续级配 | — | 20 | — | 85.0 |
| 13 | 500 | 球体 | ∅40 | 粗骨料尺寸相同 | — | 20 | — | 88.3 |
| 14 | 500 | 球体 | ∅40 | Fuller 连续级配 | — | 50 | — | 66.1 |
| 15 | 500 | — | — | — | — | 100 | 靶板为岩石 | 27.0 |
| 16 | 500 | — | — | — | — | 0 | 靶板为砂浆 | 97.6 |
| 17 | 800 | 球体 | ∅40 | Fuller 连续级配 | — | 33 | — | 153.3 |
| 18 | 300 | 球体 | ∅40 | Fuller 连续级配 | — | 33 | — | 33.8 |

### 1.3 结果分析

#### 1.3.1 侵彻深度影响因素

对于方案 6～11,粗骨料最短边与弹轴平行或垂直,实际情况中,粗骨料方向是随机的,这里,侵彻深度 $P$ 取两个方向的平均值。其中,方案 6～7 的平均侵彻深度 $P$=72.5 cm,方案 8～9 的平均侵彻深度 $P$=73.3 cm,方案 10～11 的平均侵彻深度 $P$=72.9 cm。

由图 2(a)～(d)可知,最大粗骨料尺寸 $d_a$、撞击位置、粗骨料形状和粗骨料级配方式对侵彻深度 $P$ 的影响均小于 3.7%,可忽略不计。由图 2(e)可知,随着粗骨料体积分数 $\varphi$ 的提高,侵彻深度 $P$ 显著降低。可见,当弹丸以相同入射速度 $v_0$ 侵彻同种类粗骨料和砂浆的混凝土靶时,对于多数钻地弹工况(最大粗骨料直径/弹丸直径 $d_a/d\leqslant 1.5$),影响侵彻深度 $P$ 的主要因素是粗骨料体积分数 $\varphi$。

#### 1.3.2 粗骨料受力分析

为对比砂浆靶、混凝土靶和岩石靶中相同部分砂浆和岩石对弹丸产生的阻力,建立了图 3 所示的砂浆靶、混凝土靶和岩石靶的细观有限元网格。砂浆靶通过将混凝土靶中的岩石本构参数替换为砂浆本构参数而得到,岩石靶通过将混凝土靶中砂浆本构参数替换为岩石本构参数得到。

图 4 对比了不同瞬时侵彻深度下混凝土靶中的砂浆和对应的砂浆靶中相同部分砂浆对弹丸施加的轴向阻力,混凝土靶中的砂浆产生的阻力与对应的砂浆靶中的砂浆产生的阻力近似相等。图 5 对比了不同瞬时侵彻深度下混凝土靶中的岩石和对应的岩石靶中相同部分的岩石对弹丸施加的轴向阻力,混凝土靶中的粗骨料产生的阻力远低于对应的岩石靶中的岩石产生的阻力。图 6 为侵彻过程中体应变、网格截面及等效剪应变,砂浆的应变大于粗骨料的应变。

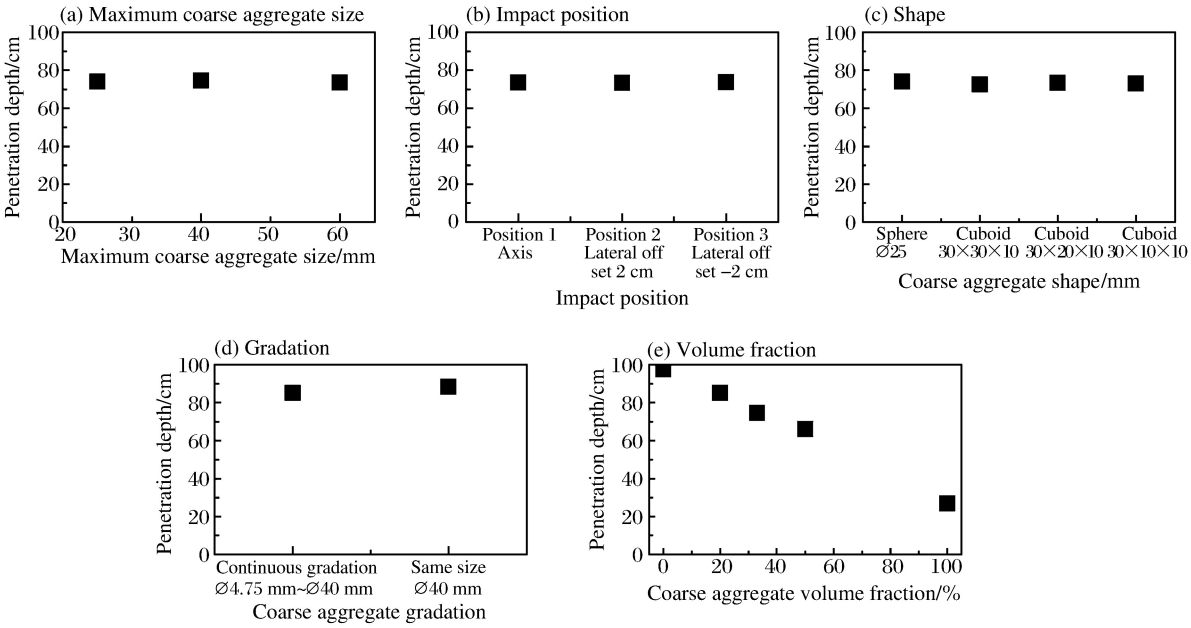



图 2　最大粗骨料尺寸 $d_a$、撞击位置、粗骨料形状、粗骨料级配方式、粗骨料体积分数 $\varphi$ 对侵彻深度 $P$ 的影响

Fig. 2　Influence of maximum coarse aggregate size $d_a$, impact position, coarse aggregate shape, coarse aggregate gradation, coarse aggregate volume fraction $\varphi$ on penetration depth $P$

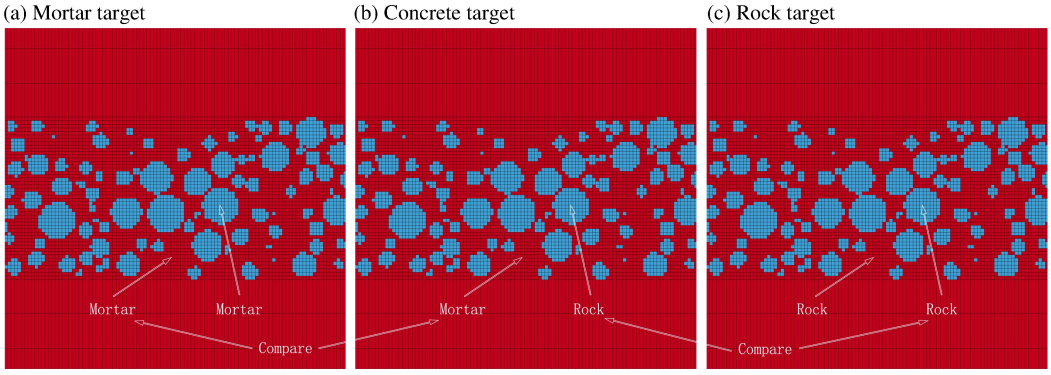



图 3　砂浆靶、混凝土靶和岩石靶的细观有限元网格

Fig. 3　Mesoscopic finite element grid of mortar target, concrete target and rock target

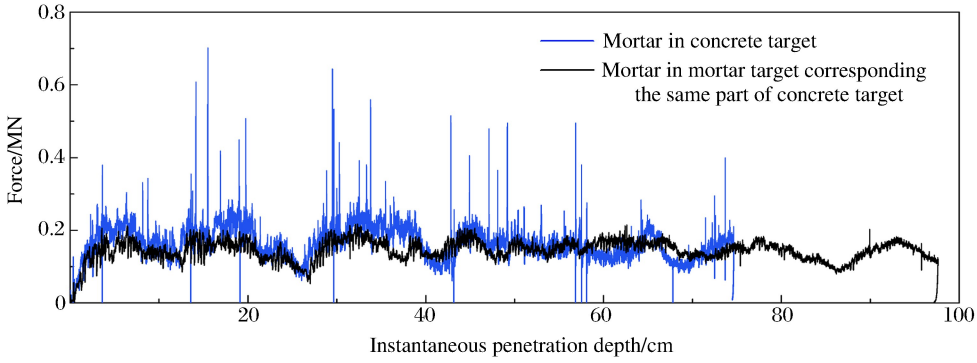



图 4　混凝土靶和砂浆靶中相同部分砂浆对弹丸施加的轴向阻力对比

Fig. 4　Comparison of the axial resistance to projectile from the mortar in the same part of concrete target and mortar target

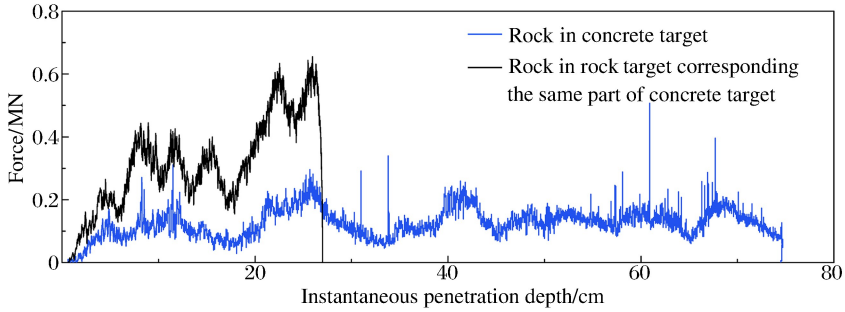



图 5 混凝土靶和岩石靶中相同部分岩石对弹丸施加的轴向阻力对比

Fig. 5 Comparison of the axial resistance to projectile from the rock in the same part of concrete target and rock target

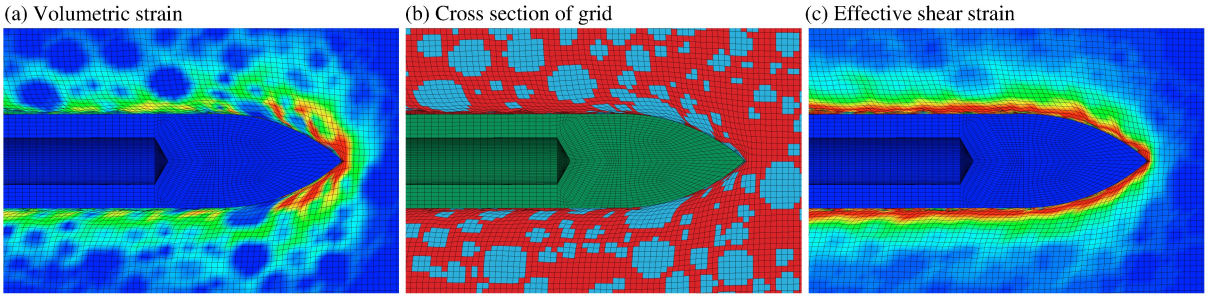



图 6 体应变、网格截面及等效剪应变

Fig. 6 Volumetric strain, cross section of grid and effective shear strain

由于混凝土靶中粗骨料强度远大于砂浆强度,粗骨料可压缩性远小于砂浆压缩性,所以当弹丸撞击到粗骨料时,砂浆的存在降低了粗骨料与弹丸的接触力。第一,砂浆的平均主应变大于粗骨料的,即砂浆的体积压缩大于粗骨料,使得粗骨料在砂浆中移动;第二,砂浆的等效剪应变大于粗骨料的,说明砂浆围绕粗骨料剪切流动,进一步促进粗骨料在砂浆中移动;第三,砂浆提供粗骨料的围压较低并且粗骨料的强度随静水压力的降低而减小,使得粗骨料易产生横向变形。所以混凝土靶中的粗骨料产生的阻力远低于对应的岩石靶中的岩石产生的阻力。反之,由于较软砂浆材料相互连通,粗骨料介质对砂浆的阻力性能影响较小,所以混凝土靶中的砂浆产生的阻力与对应的砂浆靶中的砂浆接近。

## 2 刚性弹丸侵彻细观混凝土靶的侵彻深度模型

通常使用混凝土的无约束单轴抗压强度来衡量素混凝土的抗侵彻能力。但是,对于普通强度混凝土,无约束单轴抗压强度主要取决于砂浆强度,不能反映出粗骨料含量及种类,造成抗侵彻能力的差异很大,而传统的侵彻阻力预估方法无法反映这种差异。将混凝土的粗骨料状况引入传统的侵彻阻力理论中,从而得到更可靠的侵彻深度模型。

M. J. Forrestal 等[14]基于球形空腔膨胀理论,并简化开坑阶段,得到了卵形弹丸侵彻均质混凝土的阻力:

$$F=\begin{cases} Cz & 0<z<4a \\ \pi a^2(\sigma+N\rho v^2) & z>4a \end{cases} \tag{1}$$

式中:$z$ 为瞬时侵彻深度,$C$ 为常数系数,可通过 $z=4a$ 时两个阻力方程相等求出,$a$ 为弹丸半径,$\sigma$ 为混凝土的静阻应力,$N$ 为头部形状系数,$N=(8\Psi-1)/(24\Psi^2)$,$\Psi$ 为卵形弹丸头部曲径比,$\rho=\varphi\rho_g+(1-\varphi)\rho_s$ 为混凝土密度,$v$ 为弹丸瞬时速度。

由式(1)可知,弹丸侵彻进入混凝土后,阻力由两部分组成:一部分是静阻力 $\pi a^2\sigma$,即弹丸的一部分

动能转换为混凝土的变形能；另一部分是惯性阻力 $\pi a^2 N\rho v^2$，即弹丸的另一部分动能转换为混凝土的动能。惯性阻力中，与混凝土细观特征有关的是密度 $\rho$，通过砂浆与粗骨料的密度与体积分数计算。静阻力中，与混凝土细观特征有关的是静阻应力 $\sigma$。由数值模拟侵彻深度分析可知，粗骨料形状、撞击位置、最大粗骨料尺寸和粗骨料级配方式对混凝土侵彻深度的影响可忽略，所以其对混凝土静阻应力 $\sigma$ 的影响可忽略。

弹丸头部的阻力由砂浆和粗骨料叠加而成，不同时刻头部接触砂浆或粗骨料的比例不同。但是，对于深侵彻，弹丸头部穿过大量砂浆和粗骨料，统计上，弹丸头部与砂浆或粗骨料接触的比例与各组分的体积分数相同。同时，由数值模拟可知，文中使用的粗骨料大小和级配方式对侵彻深度的影响可忽略，即，不同时刻接触不同大小的粗骨料的阻应力特性是相同的。所以，简化细观混凝土为等效均质材料，其平均力学性能通过细观组分的阻应力线性叠加而成，即，通过线性叠加的方式修正 Forrestal 阻力方程中的 $\sigma$，从而将 Forrestal 阻力方程扩展应用到了细观混凝土上，得到等效静阻应力：

$$\sigma=\varphi\sigma_{\mathrm{g}}+(1-\varphi)\sigma_{\mathrm{s}} \tag{2}$$

式中：$\sigma_{\mathrm{g}}$ 为粗骨料静阻应力，$\sigma_{\mathrm{s}}$ 为砂浆静阻应力。$\varphi\sigma_{\mathrm{g}}$ 代表混凝土静阻应力的粗骨料部分，$(1-\varphi)\sigma_{\mathrm{s}}$ 代表混凝土静阻应力的砂浆部分。

由图 4 可知，混凝土中粗骨料的加入不影响砂浆部分的静阻应力 $\sigma_{\mathrm{s}}$，即 $\sigma_{\mathrm{s}}$ 是砂浆的固有特性，与粗骨料的体积分数 $\varphi$ 无关。不同种类砂浆对粗骨料的弱化作用不同，从而影响粗骨料静阻应力 $\sigma_{\mathrm{g}}$，即 $\sigma_{\mathrm{g}}$ 不仅与岩石的特性有关，还取决于砂浆种类。由于粗骨料体积分数 $\varphi$ 的改变不影响砂浆对粗骨料的弱化程度，可假设不同粗骨料体积分数 $\varphi$ 下 $\sigma_{\mathrm{g}}$ 大小不变。

由公式(1)～(2)得出细观混凝土靶的侵彻深度：

$$P=\frac{m}{2\pi Na^2[\varphi\rho_{\mathrm{g}}+(1-\varphi)\rho_{\mathrm{s}}]}\ln\left(1+\frac{N\{mv_0^2-4\pi a^3[\varphi\sigma_{\mathrm{g}}+(1-\varphi)\sigma_{\mathrm{s}}]\}[\varphi\rho_{\mathrm{g}}+(1-\varphi)\rho_{\mathrm{s}}]}{\{m+4\pi a^3N[\varphi\rho_{\mathrm{g}}+(1-\varphi)\rho_{\mathrm{s}}]\}[\varphi\sigma_{\mathrm{g}}+(1-\varphi)\sigma_{\mathrm{s}}]}\right)+4a \tag{3}$$

静阻应力 $\sigma_{\mathrm{s}}$ 和 $\sigma_{\mathrm{g}}$ 的标定。公式(3)中只有 $\sigma_{\mathrm{s}}$ 和 $\sigma_{\mathrm{g}}$ 不可直接获得，可通过侵彻深度 $P$ 反向标定 $\sigma_{\mathrm{s}}$ 和 $\sigma_{\mathrm{g}}$。数值模拟方案 16 给出了砂浆靶的侵彻深度，此时粗骨料体积分数 $\varphi=0$，由公式(3)可反求出砂浆静阻应力 $\sigma_{\mathrm{s}}=155$ MPa。混凝土靶中的粗骨料体积分数 $\varphi$ 较小时，侵彻深度对粗骨料静阻应力 $\sigma_{\mathrm{g}}$ 的变化不敏感，估算的 $\sigma_{\mathrm{g}}$ 精度低。所以，为得到准确的 $\sigma_{\mathrm{g}}$，选择数值模拟方案 14，其粗骨料体积分数 $\varphi=50\%$，将 $\sigma_{\mathrm{s}}=155$ MPa 代入公式(3)，求出 $\sigma_{\mathrm{g}}=328$ MPa。

图 7(a)对比了常用的刚性弹丸入射速度 $v_0$(300～800 m/s)下，公式(3)和数值模拟预测的侵彻深度 $P$，结果显示，公式(3)和数值模拟一致性很好，这说明此工况范围内砂浆和粗骨料强度的应变率效应弱。图 7(b)对比了不同粗骨料体积分数 $\varphi$ 下，公式(3)和数值模拟预测的侵彻深度 $P$。对于真实的混凝土级配，粗骨料体积分数 $\varphi$ 很难超过 65%[15]，粗骨料体积分数 $\varphi$ 超过 65%可以通过块石砌体实现，粗骨料体积分数 $\varphi=100\%$代表岩石。对于混凝土，公式(3)和数值模拟一致性很好，这验证了混凝土中

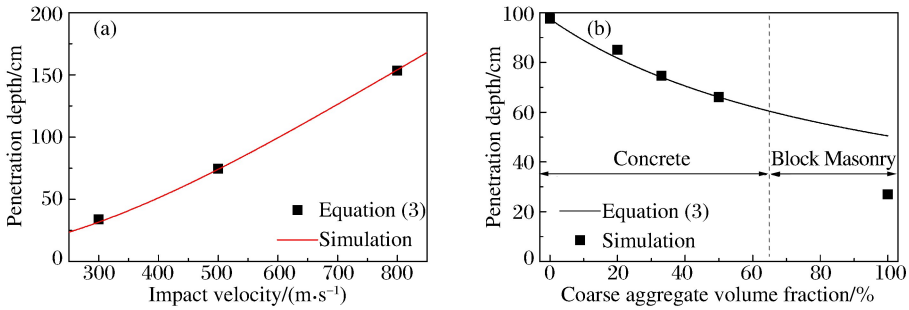



图 7　不同入射速度 $v_0$ 和不同粗骨料体积分数 $\varphi$ 下侵彻深度的理论和数值模拟对比

Fig. 7　Comparison of penetration depth between theory and simulation at different impact velocity $v_0$ and different coarse aggregate volume fraction $\varphi$

粗骨料的静阻应力与粗骨料的体积分数无关这个基本假设。

对于块石砌体,超出了本文的研究范围,公式(3)的适用性还需进一步验证。对于岩石,由于没有砂浆对其弱化,使得岩石静阻应力远大于混凝土中的粗骨料,所以,使用混凝土中粗骨料的静阻应力 $\sigma_g$ 计算得出的侵彻深度较大。本文中最大粗骨料尺寸与弹丸直径的比值 $d_a/d\leqslant 1.5$,对于 $d_a/d>1.5$ 的情况,可以推测,弹丸与粗骨料的局部作用逐渐增强,使得粗骨料静阻应力 $\sigma_g$ 逐渐趋近岩石,侵彻的尺寸效应将变得显著,该部分内容需要在今后的工作中进一步研究。

## 3 结 论

在刚性弹侵彻常用入射速度 $v_0$(300～800 m/s)下,最大粗骨料尺寸与弹丸直径的比值 $d_a/d\leqslant 1.5$ 时,细观混凝土的抗侵彻规律如下:

(1)对于同一弹丸以相同入射速度 $v_0$ 侵彻同种类骨料和砂浆的混凝土靶,粗骨料形状、撞击位置、最大粗骨料尺寸 $d_a$ 和粗骨料级配方式对侵彻深度 $P$ 的影响可忽略,影响侵彻深度的主要因素是粗骨料体积分数 $\varphi$。

(2)混凝土靶中的粗骨料产生的阻力远低于对应的岩石靶中的岩石产生的阻力,混凝土靶中的砂浆产生的阻力与对应的砂浆靶中的砂浆产生的阻力接近。

(3)通过扩展 Forrestal 阻力方程,得到了刚性弹丸侵彻细观混凝土靶的侵彻深度理论模型,模型与数值模拟一致性很好。

(4)影响混凝土静阻应力 $\sigma$ 的主要因素是砂浆种类、粗骨料种类和粗骨料体积分数 $\varphi$。砂浆静阻应力 $\sigma_s$ 与粗骨料体积分数 $\varphi$ 无关。

## 参考文献:


[1] LI Q M, REID S R, WEN H M, et al. Local impact effects of hard missiles on concrete targets[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005,32(1):224-284.

[2] 程怡豪,王明洋,施存程,等.大范围着速下混凝土靶抗冲击试验研究综述[J].浙江大学学报(工学版),2015(4):616-625.
CHENG Yihao, WANG Mingyang, SHI Cuncheng, et al. Review of experimental investigation of concrete target to resist missile impact in large velocity range[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2015(4):616-625.

[3] FORRESTAL M J, TZOU D Y. A spherical cavity-expansion penetration model for concrete targets[J]. International Journal of Solids and Structures, 1997,34(31):4127-4146.

[4] 水利水电科学研究院结构材料研究所.大体积混凝土[M].北京:水利电力出版社,1990:76-79.

[5] DANCYGIER A N, YANKELEVSKY D Z, JAEGERMANN C. Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 2007,34(11):1768-1779.

[6] WANG S, LE H T N, POH L H, et al. Resistance of high-performance fiber-reinforced cement composites against high-velocity projectile impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2016,95:89-104.

[7] 张伟,慕忠成,肖新科.骨料粒径对混凝土靶抗高速破片侵彻影响的实验研究[J].兵工学报,2012,33(8):1009-1015.
ZHANG Wei, MU Zhongcheng, XIAO Xinke. Experimental study on effect of aggregate size to anti-penetration ability of concrete targets subjected to high-velocity fragments[J]. Acta Armamentarii, 2012,33(8):1009-1015.

[8] 张凤国,刘军,梁龙河,等.数值建模时骨料对混凝土侵彻及毁伤问题的影响[J].爆炸与冲击,2013,33(2):217-220.
ZHANG Fengguo, LIU jun, LIANG Longhe, et al. Influence of aggregate on penetration process of concrete target when numerical modeling[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(2):217-220.

[9] FANG Q, ZHANG J. 3D numerical modeling of projectile penetration into rock-rubble overlays accounting for random distribution of rock-rubble[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014,63(1):118-128.

[10] 张兆军,王晓鸣,李文彬.粗骨料种类对刚性弹贯穿混凝土靶剩余速度的影响[J].振动与冲击,2014,33(7):170-

173.
ZHANG Zhaojun, WANG Xiaoming, LI Wenbin. Effect of coarse aggregate type on residual velocity of rigid-projectiles-perforating concrete targets[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33(7):170-173.
[11] HOLQMUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rate, and high pressures[C]// Proceedings of 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada, 1993:591-600.
[12] 方秦,孔祥振,吴昊,等.岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J].工程力学,2014,31(3):197-204.
FANG Qin, KONG Xiangzhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cookconsitiutive model parameters of rock[J]. Engineering Mechanics, 2014,31(3):197-204.
[13] MEYER C S. Development of geomaterial parameters for numerical simulations using the Holmquist-Johnson-Cook constitutive model for concrete: ARL-TR-5556[R]. Army Research Laboratory Aberdeen Proving Ground md Weapons and Materials Research Directorate, 2011.
[14] FORRESTAL M J, FREW D J, HICKERSON J P, et al. Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,28(5):479-497.
[15] 徐飞.普通混凝土骨料最小空隙率的探讨[J].混凝土,2004(3):17-18.
XU Fei. The research of minimal fraction void of concrete aggregate[J]. Concrete, 2004(3):17-18.

# Numerical simulation on anti-penetration and penetration depth model of mesoscale concrete target

WU Cheng, SHEN Xiaojun, WANG Xiaoming, YAO Wenjin
(*Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China* )

**Abstract**: In order to study the penetration law of the mesoscale concrete target, The LS-DYNA software is used to simulate the penetration of rigid projectiles into two-phase concrete target. The results show that the main factors affecting the penetration resistance of the target are mortar type, coarse aggregate type and coarse aggregate volume fraction. The resistance of mortar in concrete target is close to the same part of mortar in mortar target. The resistance of coarse aggregate in concrete target is much lower than the same part of rock in rock target. By extending the Forrestal resistance equation, the penetration depth model of mesoscale concrete is established, which is in good agreement with the numerical simulation.

**Keywords**: penetration; mesoscale; concrete; LS-DYNA; penetration depth

(责任编辑　曾月蓉)