文章编号：1001-1455(2014)03-0361-06

工程岩体中多弹重复打击效应的数值模拟分析*

邓国强，杨秀敏
（总参工程兵科研四所，北京 100850）

摘要：根据现场岩体特性，将岩体剖分为结构体和结构面 2 部分，针对结构体构建了均质岩石本构模型，而后依据结构面分布特性，构建了考虑天然岩体非均质性的空间块体模型。采用这一空间块体模型，对重复打击效果进行了大量数值模拟分析，数值模拟与现场实验结果基本一致，两者均表明，因受残余弹片、命中点偏差和岩体非均质性等因素综合影响，多弹重复打击破坏深度存在着一个极限值。

关键词：爆炸力学；钻地武器；重复打击；天然岩体；极限深度
中图分类号：O385　　**国标学科代码**：13035　　**文献标志码**：A

在现代常规战争中，尽管钻地武器性能已大幅提高，但对深埋于地下的坚固工程，单发打击仍极难摧毁，因此考虑对同一目标点实施多弹重复打击[1]。信息技术的广泛应用使制导武器命中精度得到提高、弹头材料增强、弹壁加厚、引信智能化，在技术上对重点目标实施重复打击已成为可能。实战中已出现了重复打击方式，如巴格达“阿米尔”浅埋掩蔽部遭美军 2 枚弹先后打击，第 1 枚弹炸穿通风孔，第 2 枚弹沿炸孔进入地下空间爆炸使掩蔽部内人员伤亡严重，因此本文中重点探讨多弹重复打击对岩体的破坏效果。

针对重复打击破坏效应，已开展了一些数值模拟[1]和实验[2]研究，但这些研究都是针对极端理想情况，既没有考虑岩体非均质特性，也没有考虑前后弹的命中点偏差，有些甚至没有考虑钻地弹弹头自身特性以及前弹对岩体侵爆破坏效应对后弹的影响，因此这些研究是片面的，所得结论也就与实际情况出入很大，甚至是错误的。针对这些情况，文献[3]中详细介绍了现场实弹重复炮击实验，本文中采用数值模拟方法进一步分析。

1　工程岩体的数值描述

对复杂的实验现场工程岩体来说，用单纯的本构关系很难描述其变形特性，而在岩体力学中一般将岩体分为结构体和结构面 2 个部分来考虑。本文中借用这一观点，也将岩体分 2 个方面来描述，一方面根据岩石实验情况，建立一套描述结构体力学行为的均质本构模型，另一方面根据结构面的空间分布特性，采用数学图论方法来建立天然岩体的空间块体模型。

1.1　结构体均质本构模型

结构体完整性好，可采用均质本构模型来描述，而岩石是典型的脆性多孔介质，力学性能与金属差别很大，其本构模型必须能同时兼顾以下情况：状态方程中考虑压实效应，强度方程中全面考虑破坏前后的力学特点、应力角、静水压力、应变率效应、岩体完整性等影响。在数值计算和理论分析中，一般基于流体弹塑性模型采用解耦的方法，即将应力张量分解为球应力张量和偏应力张量 2 部分，分别采用状态方程和强度准则来更新[4]。

岩石是多孔隙介质，描述这类介质比较好的有 P-α[5]和孔隙塌漏模型[6]，其中简化后采用解析形式孔隙塌漏模型[6]计算简便，参数容易确定，本文中采用这种解析形式（见图 1），分线性段（OA）、压密段

* **收稿日期**：2012-11-22；**修回日期**：2013-05-29
基金项目：爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室开放课题项目（DPMEIKF201304）
作者简介：邓国强（1972—　），男，博士，高级工程师。

(*AB*)和密实段(*BCD*)3 段来描述[7],当压力超过点 *A* 处的后,进入压密段,卸载后将不再回到点 *O*,空隙部分被压实,超过点 *B* 处的后,空隙完全被压实,卸载后将下降到点 *D*,阴影部分表示因被压实而消耗的能量,面积越大,耗能越多。

岩石在爆炸冲击载荷下的动态响应是一个非常复杂的过程,目前描述比较好的是损伤模型,认为动态破坏是连续的微损伤累积造成的。从细观上看,微裂纹的扩展和相互作用释放了包围这些损伤材料的应力,从而降低了材料的承载能力;从宏观上看,这种效应降低了材料的刚度与强度。由于岩石拉压差异非常大,因此将二者分开考虑,当处于拉伸状态时采用 TCK 模型,而处于压缩状态时采用 JHR (Johnson-Holmquist-Rock)模型。

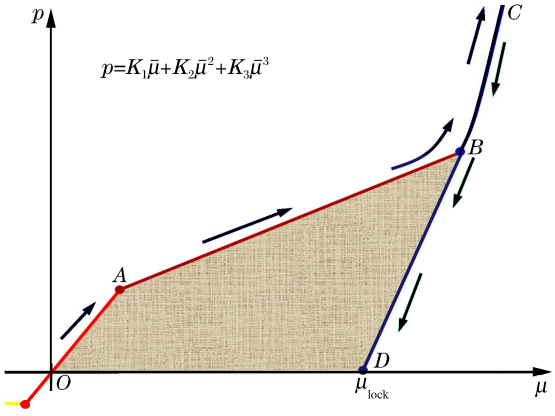


图 1 考虑压实效应的状态方程

Fig. 1 Equation of state with crushed effect

TCK 模型在 D. E. Grady 等[8]、杨军等[9]、王志亮等[10]的文献中已有详细介绍,这里仅列出主要计算式:

$$\sigma_{ij}=3K(1-D_t)\varepsilon_V\delta_{ij}+2G(1-D_t)e_{ij} \quad (1)$$

$$D_t=(16/9)(1-\bar{\nu}^2)/(1-2\bar{\nu})C_d \quad (2)$$

式中:σ_{ij} 为柯西应力,ε_V 为体积应变,e_{ij} 为偏应变,δ_{ij} 为 Kroneker 符号,K、G 为未损伤材料的体积、剪切模量,D_t 为拉伸损伤变量,C_d 是裂纹密度,$\bar{\nu}$ 为损伤泊松比。

JHR 模型(见图 2)是在 JH 材料模型的基础上,考虑岩石的压缩强度、拉伸强度、损伤演化、应变率、应力角等特性修改而成,其形式为:

$$\sigma_{eq}^*=\begin{cases}F_1(P^*,D_c)F_2(\dot{\varepsilon}_{eq}^*)F_3(\theta,e)\leqslant S_{max} & P^*+T^*(1-D)\geqslant 0\\ 0 & P^*+T^*(1-D)<0\end{cases} \quad (3)$$

式中:σ_{eq}^* 为归一化等效应力,F_1 为强度影响项,F_2 为动力提高项,F_3 为拉压差异影响项,P^* 为归一化压力,D_c 为压缩损伤变量,$\dot{\varepsilon}_{eq}^*$ 归一化等效应变率,θ 为 Lode 角,e 是拉伸子午线与压缩子午线比值,S_{max} 为最大应力截止值,T^* 为归一化拉伸截止力,D 为综合损伤变量。相比 JHC 模型,JHR 模型更进一步考虑了岩石的强动力影响,更全面,也更简洁。该公式进一步的描述见文献[11]。

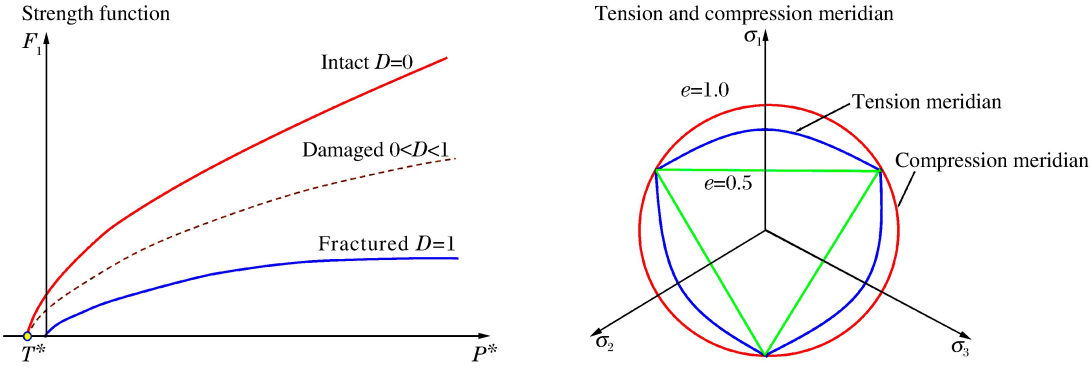


图 2 JHR 本构模型

Fig. 2 JHR constitutive model

上述均质本构模型综合考虑了岩体在侵彻爆炸下的破坏特征,包括拉伸模型控制的冲击开坑现象、状态方程控制的弹头近区岩石的压实效应、中远区屈服强度控制的剪切破坏,远区的环向拉伸破坏等。

1.2 天然岩体空间块体模型

岩体结构面在空间分布一般是不规则的,难以寻找到有序的规律,若采用常规手段,如 Voronoi 构

造[12]或分形方法建立岩体模型，则一方面工作量大，难以大规模实现，另一方面也难以建立起能保证计算精度的离散网格。因此对于块体模型，最关键的问题是在能描述岩体特征的前提下，实现自动空间划分。数学图论为这方面提供了方法，如贪婪算法（见图 3(a)），效果就很不错。该算法只需单元间的连接信息，每个子区域从先前计算的界面上的一个单元开始，然后逐渐“咬”进网格中，该算法的执行时间短，能产生合理的子区域纵横比和较少的界面节点，是一种简单有效的区域分裂算法，适合划分空间不规则块体，如现场实验中的白云岩体（见图 3(b)），因此本文中采用贪婪算法，进行自动空间建模，最终建立起天然岩体的空间块体模型（见图 3(c)）。

利用这种模型进行数值模拟，计算结果与实验现象取得了很好的一致，垂直入射岩体的弹头弹道轨迹都发生了偏转，损伤图像充分体现了岩体软弱结构面引起的非均质特性（见图 4）。这一模型和传统本构模型相比，更注重的是岩体的自然非均质特性，用常规手段建模，计算程序自动设置不规则软弱面，工作量极小，且满足岩体的特征尺寸。

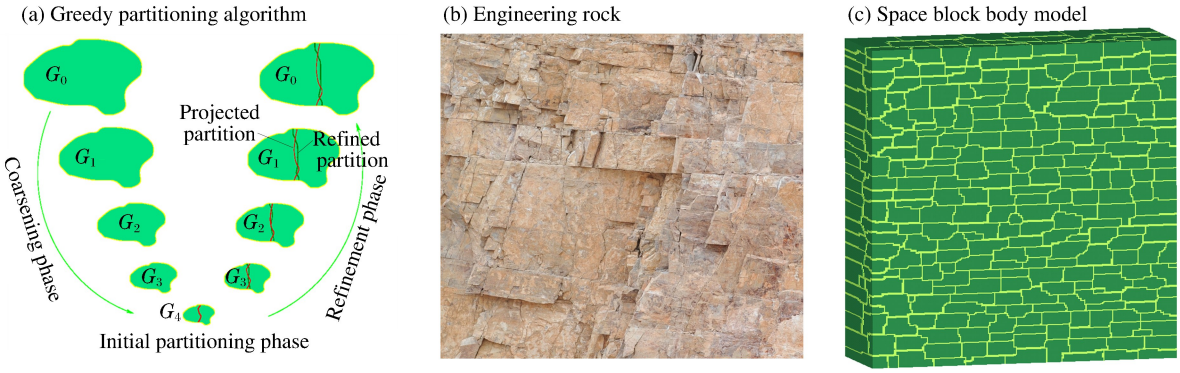


图 3　空间块体模型构造

Fig. 3　Constructor of space block body model

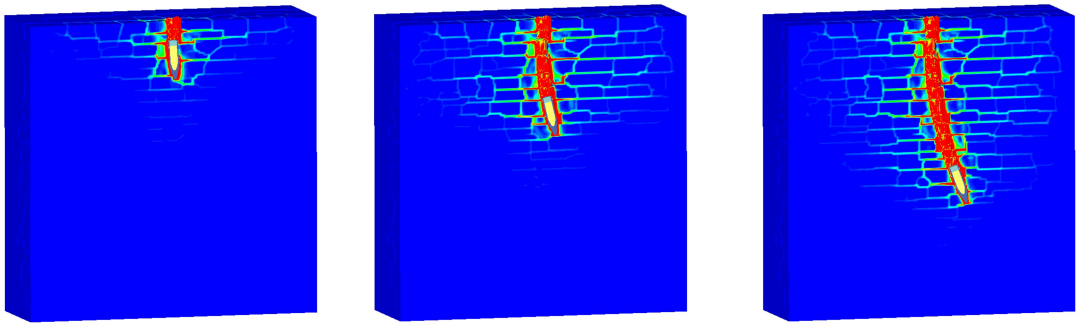


图 4　空间块体模型的数值模拟结果

Fig. 4　Numerical simulation results by space block body model

2　数值模拟分析

2.1　侵爆效应的快速估算与模型嵌入

钻地弹侵彻到达一定深度时装药发生爆炸，使弹壳破碎，同时强烈压缩周围岩体，形成爆炸空腔和破坏区域。如果采用数值模拟方法对爆炸效应进行分析，尽管技术上不存在问题，但耗费时间多、转换繁琐，而文献[13]提供了一套半经验半理论的爆炸效应估算方法，可以比较准确地评估爆炸效应，本文中采用这一方法对爆炸效应进行快速估算，计算爆炸空腔、破坏区域的定量值，然后将这些数值嵌入到计算模型中，并将爆炸空腔部分剔除，破坏区域转换为相应的岩石损伤区域（见图 5）。根据现场实验和模拟分析，弹壳破片绝大部分质量仅几克，而且速度很高，嵌入周围岩体中后只有厚实头部比较完整，因此模型中忽略弹身部分而仅留下厚实头部。

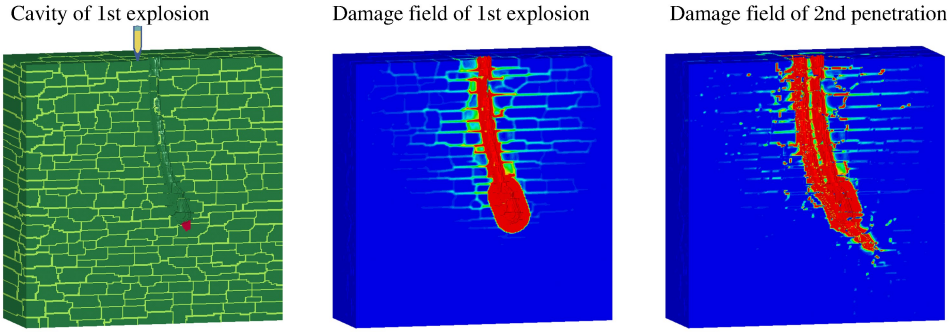


图 5 嵌入爆炸效应的计算模型

Fig. 5 Simulation model with explosion effect

2.2 不同弹头先后重复打击效果

影响多弹重复打击效应的主要因素有弹壳残余金属、岩体非均质性和命中偏差 3 个方面。残余金属已经通过快速估算嵌入模型中，岩体非均质性通过采用空间块体模型已经得到充分体现，而命中点偏差是随机的，只能概率统计，在经过大量的计算分析后，我们得到了 6 发弹重复打击的典型效果（见图 6）。第 1 弹垂直入射后，在岩体中弹道轨迹发生了一定程度的偏转；第 2 发弹与第 1 发相距 2 倍弹径，弹道偏向第 1 发，但不与第 1 发重合，最终侵彻深度仅比第 1 发略深，增幅很小；第 3 发弹与第 2 发相距 2 倍弹径，弹道偏向第 2 发，后穿过第 2 发弹道和第 1 发的爆炸空腔，最终侵彻深度与第 2 发基本持平；第 4 发弹与第 3 发落点完全相同，弹道前一部分与第 3 发基本相同，后逐渐偏转，最后弹头处于水平状态，侵彻深度仅略增；第 5 发弹与第 1 发弹相距 1 倍弹径，其侵彻轨迹穿越了前 4 发的弹道，但反向偏转，侵彻深度反而减小；第 6 发弹与第 5 发弹相距 2 倍弹径，偏转方向与第 5 发相同，最终侵彻深度比第 5 发大，与前 4 发大致相当。

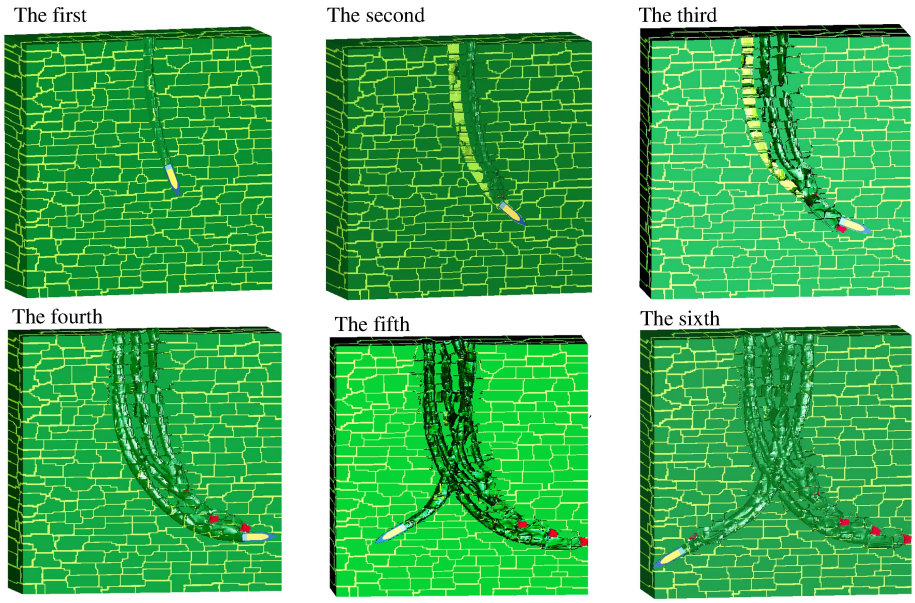


图 6 6 发弹典型重复打击效果

Fig. 6 Typical effect of repeated attack by six SAP

2.3 同一弹头命中不同位置时的效果

前面对不同弹头先后打击效果进行了分析，这里对同一弹头命中不同位置的效果进行分析，以第 4 发弹为例，当与第 3 发完全同命中点时或左移 2 倍弹径时，弹道均向右偏转，侵彻深度相差不大，同弹道时还略小；而右移 1 倍弹径时，弹道向左偏转，侵彻深度反而减小（见图 7）。第 5 发弹命中不同位置时情况类似（见图 8），图中 D 为弹径。

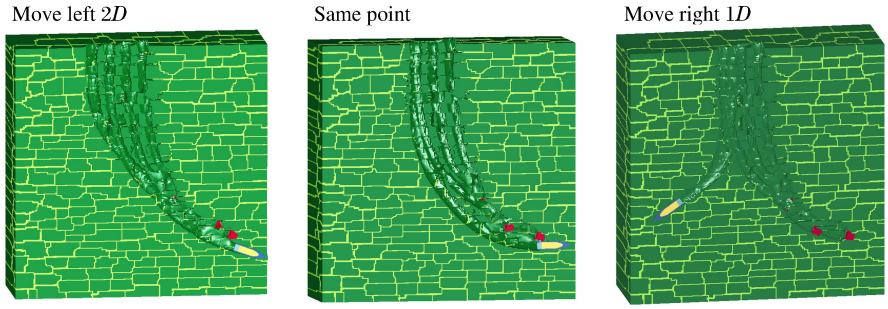


图 7　第 4 发弹命中不同位置的效果

Fig. 7　Penetration effect of the fourth SAP in various location

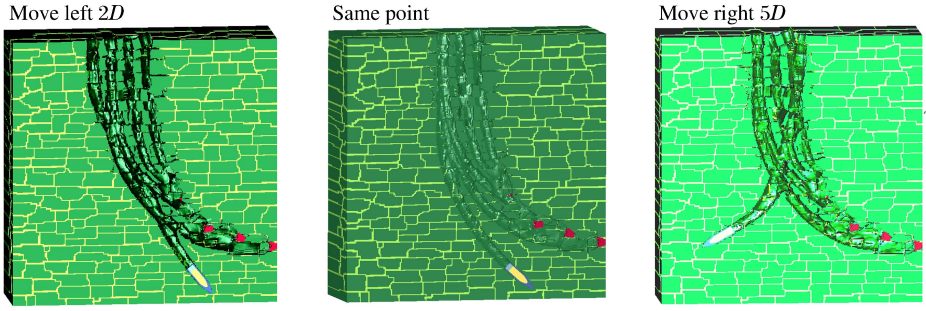


图 8　第 5 发弹命中不同位置的效果

Fig. 8　Penetration effect of the fifth SAP in various location

3　结　论

现场天然岩体实弹重复炮击实验中，所有垂直入射的炮弹侵入岩体后弹道都发生了偏转，而且后弹破坏深度增幅总是递减的，而已有均质岩体模型均无法解释这一现象。为此，将岩体分为结构体和结构面 2 部分，分开考虑。一方面，对于完整性好的结构体，在大量静动态实验基础上，建立考虑在冲击爆炸载荷作用下破坏特性的均质本构模型；另一方面根据结构面的空间分布特性，采用数学图论方法建立了天然岩体的空间块体模型。构建的空间块体模型，结构面呈自然不规则分布，反映了天然岩体节理、裂隙而呈现的非均质特性。利用这种天然岩体模型进行数值模拟，计算结果与实验结果[3]一致性较好。

数值模拟与现场实验[3]均表明：垂直入射弹头在岩体中都会发生偏转；当前弹弹道发生偏转后，即使后弹与前弹落点相同，其弹道轨迹因与前弹洞壁发生多次碰撞而偏转越来越严重，侵彻深度增幅总是递减的；钻地弹侵入岩层深处封闭爆炸后，弹片不是像空气中一样飞走，而是散布在空腔内壁，对后弹侵彻起到阻碍作用；前后弹命中点偏差影响巨大，当前后弹偏差较大时，后弹趋向于前弹破碎区，从而大大降低破坏深度。这些因素综合在一起，导致多弹重复打击最终弹头能到达的深度存在极限值。

参考文献：

[1]　Antoun T H, Lomov I N, Glenn L A. Simulation of the penetration of a sequence of bombs into granitic rock[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003,29(1):81-94.

[2]　左魁，张继春，曾宪明，等. 重复爆炸条件下岩石介质破坏效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(增刊 1):2675-2680.
Zuo Kui, Zhang Ji-chun, Zeng Xian-ming, et al. Experimental research on rock breakage effect under repeated explosions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(suppl 1):2675-2680.

[3]　邓国强，杨秀敏. 钻地弹重复打击效应现场试验研究[J]. 防护工程，2012，34(5):1-5.
Deng Guo-qiang, Yang Xiu-min. Experimental investigation into damage effect of repeat attack of precision-guided penetration weapon[J]. Protective Engineering, 2012,34(5):1-5.

[4]　杨秀敏. 爆炸冲击现象数值模拟[M]. 合肥：中国科技大学出版社，2010.

[5] Century Dynamics Inc. Ansys autodyn user manual[M]. Version 11.0. USA California, 2007.

[6] Livermore Software Technology Corporation. Ls-dyna keyword user's manual[M]. Version 971. Rev5. USA California, 2010.

[7] Polanco-Loria M, Hopperstad O S, Børvik T, et al. Numerical predictions of ballistic limits for concrete slabs using a modified version of the HJC concrete model[J]. International Journal of Impact Engineering, 2008,35(5): 290-303.

[8] Grady D E, Kipp M E. The micromechanics of impact fracture of rock[J]// International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979,16(5):293-302.

[9] 杨军,金乾坤.应力波衰减基础上的爆破损伤模型[J].爆炸与冲击,2000,20(3):241-246.
Yang Jun, Jin Qian-kun. Blast damage model based on stress wave attenuation[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(3):241-246.

[10] 王志亮,郑明新.基于 TCK 损伤本构的岩石爆破效应数值模拟[J].岩土力学,2008,29(1):230-234.
Wang Zhi-liang, Zheng Ming-xin. Numerical simulation of effect of rock blasting based on TCK damage constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008,29(1):230-234.

[11] 邓国强,杨秀敏,金乾坤.侵彻爆炸效应数值计算新型岩石本构模型[J].兵工学报,2012,33(增刊 2):375-380.
Deng Guo-qiang, Yang Xiu-min, Jin Qian-kun. A computational constitutive model for rock subjected to penetration and explosion loading[J]. Acta Armamentarii, 2012,33(suppl 2):375-380.

[12] Atkinson B K. Fracture mechanics of rock[M]. London: Academic Press, 1987.

[13] 吴亮,卢文波,宗琦.岩石中柱状装药爆炸能量分布[J].岩石力学,2006,27(5):735-739.
Wu Liang, Lu Wen-bo, Zong Qi. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(5):735-739.

Numerical simulation of the effect of multiply EPW into engineering rock*

Deng Guo-qiang, Yang Xiu-min

(*No.* 4 *Engineering Research Institute*, *GSHQ*, *Beijing* 100850, *China*)

Abstract: This numerical simulation study was undertaken to investigate the penetration and explosion efficiency of a sequence of precision-guided earth penetrating weapon (EPW) into hard rock target. The main objective of the study was to ascertain the damage depth of using much more EPW, the relative depth would decreases with bomb number decreasing, the ultimate depth was limited. The simulations were performed using EP3D—a 3D explosion and penetration efficiency hydrocode. To describe the engineering rock body on the test site, it was divided into two parts, which were structure body and structure interface. A new rock constitutive model was built up for homogeneous structure body, and moreover, a space block model was brought out, which takes into account the non-homogeneousness of nature rock based on structure interface. Through this model, lots of numerical simulation works were done on repeat attack effect, and the numerical results agreed well with those of experiments, all of them made it clear that the ultimate damage depth of repeated attack was a limited value because of residual fragment, impact deviance and non-homogeneousness of nature rock.

Key words: mechanics of explosion; earth penetration weapon; repeat attack; nature rock; limited depth

* Received 22 November 2012; Revised 29 May 2013
Corresponding author: Deng Guo-qiang, hnjia@sina.com

(责任编辑 曾月蓉)