DOI: 10.11883/bzycj-2017-0201
文章编号: 1001-1455(2018)06-1271-07

基于块系构造的大规模地下爆炸不可逆位移计算方法*

李 杰[1],陈 伟[1,2],施存程[1],王明洋[1]
(1.陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,江苏 南京 210007;
2.军委后勤保障部工程质量监督中心,北京 100850)

摘要: 岩体是复杂的等级构造地质体,本文中假设岩体构造符合 Sadovsky 院士块系构造等级学说,即岩体中存在稳定的不变量 λ 和 μ_Δ,从而采用简化的分析模型研究构成岩体的岩块在爆炸地冲击扰动作用下的平动和转动,指出 Kocharyan 激活块体尺度计算式中忽略的条件,重新推导给出了大规模地下爆炸诱发远区局部不可逆位移计算公式。

关键词: 大规模地下爆炸;岩体块系构造;等效平均动能;局部不可逆变形
中图分类号: O383.1 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

大量地下爆炸实验资料表明,基于连续介质力学概念的分析模型不能准确描述实际岩体的变形破坏过程[1-4]:(1)实际的大当量地下爆炸实验数据表明,在岩体的破裂区之外,距离爆心很远的距离上,发生了大的断层面的不可逆位移[5-9],不可逆位移的范围要远远超出按连续介质模型的计算结果(要超出一个数量级);(2)大当量地下爆炸时,岩体变形呈现强烈的变形局部化现象,在地下核爆炸实验中监测到的岩体变形数据,因测点位于岩块内或岩块边缘而导致其应变值相差 2~3 个量级[2-4];(3)在岩体中进行地下核爆炸时,岩体裂隙、节理两侧的位移相差很大,甚至符号(方向)相反[10-13],表明在岩体中由断裂、裂隙、节理所分割的岩块发生了旋转和相互间的滑移,这些现象和规律利用传统的连续介质力学模型无法得到,是目前岩体动力学研究领域所面临的非常重要而实际的研究课题。

钱七虎等[2,12]曾指出,地下爆炸时连续介质力学模型不适用性产生的物理本质主要在于没有考虑岩体作为地质体的非连续构造的块体性,以及没有考虑由岩块块体性所导致的附加自由度。均匀连续介质模型相对于块体集合来说是增加了"约束",其计算结果较之实测数据必然低估了地运动参数。

因此,对于大规模地下爆炸不可逆位移的估算,必须考虑岩体的块体构造特性。实际上,岩体不是连续介质,在长期的地质构造运动作用下,大量的被低强度介质所充填的裂隙将完整的岩体切割成尺度各异的岩块。在地下爆炸作用远区,冲击波的作用不足以破坏强度较高的岩块,局部不可逆现象的产生是块体受限转动以及裂隙间填充物被破坏的结果,岩体的变形主要特征是块体沿结构破裂面的相对位移。正是基于上述思想,Kocharyan 等[4]从力学角度对爆炸扰动条件下构成岩体的岩块受限运动进行受力分析,得到了地下大规模爆炸时激活块体的尺度和不可逆位移范围。本文中在文献[4]的基础上,基于岩体的块系构造理论对 Kocharyan 计算模型进行完善,补充其在激活块体尺度计算式中忽略的条件,重新推导并改进了深部大规模爆炸的不可逆范围表达式。

1 岩体的块系构造理论

众所周知,岩体是由不同层次的构造单元所组成的集合体,单元之间存在裂隙并由比岩石强度弱的材料填充,按照 Sadovsky[14] 块系构造等级学说,以及 Kurlenya 等[15]、戚承志等[16]的观点,从大到大陆

* **收稿日期**: 2017-06-12; **修回日期**: 2017-10-25
基金项目: 国家自然科学基金重大科研仪器研制项目(51527810);国家自然科学基金面上项目(51679249)
第一作者: 李 杰(1981—),男,博士,副教授,lijierf@163.com。

板块或区域性岩体，小到细砂的结构组成甚或晶体的结构单元，岩体的结构具有嵌入特性或者层次重复性，在大的部分中嵌入小的部分，而后者又有更小的部分嵌入，如图 1 所示。根据岩体中已有的构造破坏对介质构造单元按大小进行排序，每一等级的岩块都由其对应等级的断层或者裂隙所构成的网所划分，最大的等级 $i=0$ 对应于我们所需要研究的爆炸扰动范围，1 级岩块由 0 级岩块范围内最大的断层或者裂缝来区分，逐次类推，这样弱扰动范围内的每一构造单元都可以被赋予等级 $i=1,2,3,\cdots$，并且相同等级的岩块具有相同的特征尺寸 L_i。第 i 级构造单元的变形特性由其组成部分（块体及其间隙）的变形及强度参数决定[10-11]，当由于爆炸所产生的应力幅值低于块体之间填充物的强度时，整个岩体结构并不会发生破坏，此时可将整个岩体视为均质连续体并且其运动及变形行为可由经典的弹性理论描述。当爆炸应力提高但又不超过岩块强度时，构成岩体的岩块将在爆炸和高地应力的双重作用下发生受限平动或转动，从而导致岩块间填充物发生形变，在此过程中块体的形状和体积可能并不发生明显的形变，完整岩体分解为大量块体的原因可认为是一个或者若干个软弱面在某一空间区域达到填充体的极限应力状态，致使岩体发生分裂进而形成块体单元，此时所形成的构造单元的尺度应当由施加于介质的作用的尺度及强度所决定，并随时间和空间分布而发生变化。

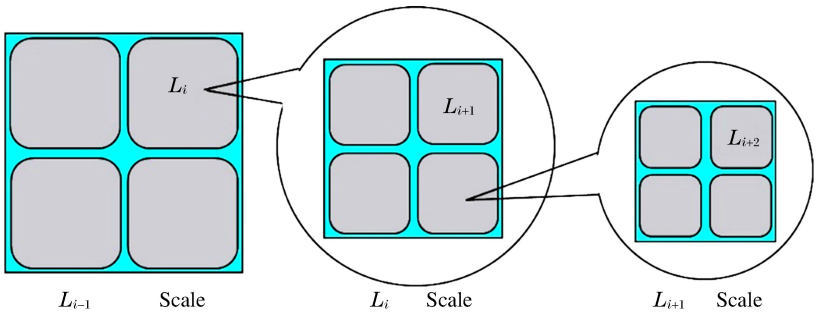


图 1 岩体的构造等级示意图

Fig. 1 Scheme of block hierarchical structures of rock mass

假设在爆炸扰动波的传播过程中，尺度为 L_* 的块体能够被激活，L_* 与自然岩块系的块体尺度 L_i 相对应，关于 L_i 尺度的确定，需要提及的是 Sadovsky 块系构造等级学说的一个重要发现，即构成岩体的岩块的尺寸存在着成簇效应。Sadovsky 等[17]通过对于泥炭的破碎、石英的侵蚀、土壤颗粒的分析，以及地下爆炸中岩石的破碎分析、露天采石场的岩石破碎分析、在建设水电站时利用地震地质方法对于岩石非均匀性的分析、利用地质方法对于地壳非均匀性的分析、地壳板块的分析、天体尺寸的分析等，发现了块体数随块体尺寸的分布中存在着优势尺寸，而且相邻的 2 个优势尺寸之比 $\lambda=L_i/L_{i+1}$ 相对稳定，主要的变化范围为 $\lambda=2.0\sim5.5$，λ 被称为岩石的嵌入系数[16-17]。

同时实验还发现，裂纹的张开尺寸 a_i 与被其所切割的相应等级的岩块尺度 L_i 之间存在着统计的岩石力学不变量[16-17] $\mu_\Delta=a_i/L_i=(0.5\sim2)\times10^{-2}$，对于理解岩体在爆炸作用下的不可逆变形来说，岩石力学不变量 μ_Δ 可能具有重要的意义，μ_Δ 的发现不仅证明了广泛应用于岩体应力应变理论计算中圣文南变形协调原理的不再适用[15]，同时利用 μ_Δ 可以给出实际岩体中岩块可能“自由度”的量值。

2 地下大规模爆炸诱发岩块不可逆位移的推导

在上述岩体的块系构造理论基础上，采用如图 1 所示的理想化计算模型，则可从力学的角度建立块体的运动学方程，从而针对具体的爆炸波分析构造介质的变形。

假设在给定爆炸当量 Q 作用下，在距离爆炸中心 r 处，尺度为 L_* 的块体能够被激活，激活块体的尺度 L_* 与岩体中的自然岩块尺寸 L_i 对应，如图 2 所示。在计算过程中首先做如下假设：

(1)由于岩块的刚度远大于块系间填充物的刚度，因此在岩块的受限运动过程中，假设岩块为刚体；

(2)对于远场弱扰动环境，应力波的作用不足以破坏强度较高的岩块，局部不可逆现象的产生主要是块体受限运动导致块体间裂隙充填物被破坏的结果；

(3)由于爆炸扰动所激活的块体尺寸是均匀的，并且是标准的刚性立方体，所形成的块体单元的运动是独立的；

(4)相邻块体尺度之间满足关系：

$$L_i/L_{i+1}=k_2 \qquad k_2>1 \tag{1}$$

(5)块体之间的间隙与块体尺度之间满足关系：

$$a_i/L_i=k_1 \tag{2}$$

式中：k_1、k_2 为岩体不变量值，按照 Sadovsky[14] 块系构造理论：

$$\begin{cases} k_2=\lambda\approx 2.0\sim 5.5 \\ k_1=\mu_\Delta\approx (0.5\sim 2)\times 10^{-2} \end{cases} \tag{3}$$

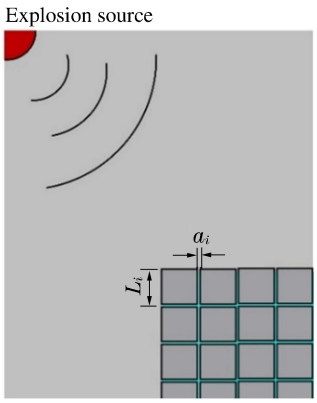


图 2　远处块体在冲击波作用下受限运动

Fig. 2　Space-limited movement of the blocks under blast wave

假设爆炸前，岩块间的初始相对位移、速度为零。在岩体中发生地下爆炸时，实际测试表明，在岩体中由断裂、裂隙、节理所分割的岩块发生了旋转和相互间的滑移(见图 3)，从而使岩块与岩块间的软弱夹层产生剪切应变：

$$\varepsilon=U_i/a_i \tag{4}$$

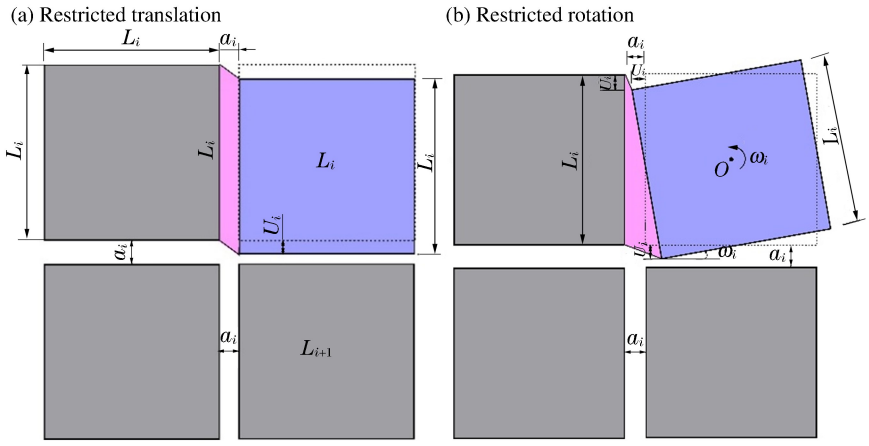


图 3　扰动作用下岩块间软弱夹层的局部变形

Fig. 3　Local deformation of filling material between neighbouring blocks under disturbance

由于假设岩块是刚性的，即岩块不可压缩，因此第 i 级岩块的转动(或者平动)极限 U_{i*} 取决于刚性岩块接触面之间的间隙宽度 a_i 及其充填层的极限应变 $\varepsilon_{\max}$，即：

$$U_{i*}=\zeta a_i \tag{5}$$

式中：ζ 为充填层物质的极限压缩比

$$\zeta=\varepsilon_{\max}<1 \tag{6}$$

假设岩体的构造符合如图 1、4 所示的构造层次及分布形式，在大规模爆炸扰动的作用下 $L_*=L_i$ 层次以上的岩块(L_{i+1}，L_{i+2}，…)均发生转动或者平动。

首先，对于平动模型(见图 4(a))，L_i，L_{i+1}，L_{i+2}，… 之间的层次结构决定了这 n 者有一个公共边界 x_jx_{j+1}，那么该边界的宏观位移将是以上各尺度块体的位移之和：

$$U=U_i+U_{i+1}+U_{i+2}+\cdots \tag{7}$$

假设各尺度岩块均达到运动极限状态，可得到受限平动条件下激活岩块的宏观极限位移：

$$U_*=U_{i*}+U_{i+1*}+U_{i+2*}+\cdots=\zeta(a_i+a_{i+1}+a_{i+2}+\cdots) \tag{8}$$

对于受限转动模型，由于块体的位移 U_i 与转角 ω_i 之间存在下列关系：

$$|U_i|=(L_i/2)|\omega_i| \tag{9}$$

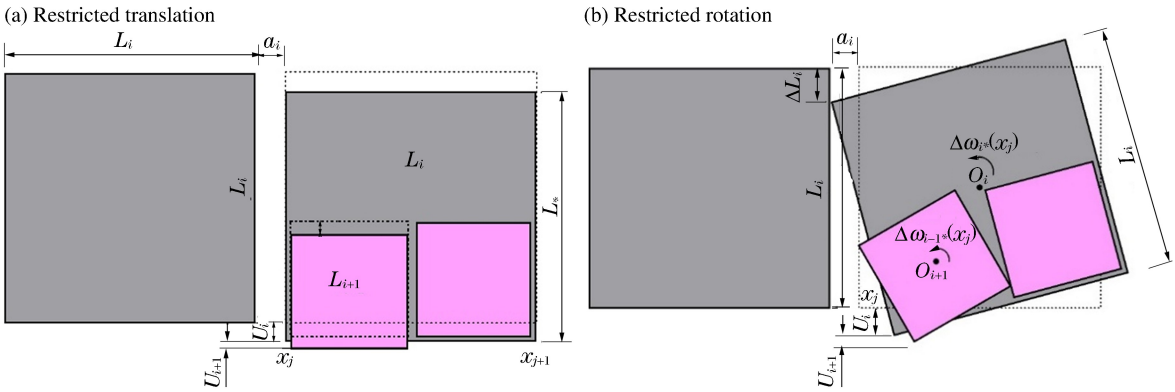


图 4 具有层次构造块体激活以后的宏观位移组成

Fig. 4 Composition of the macro-displacement

因此极限转角：

$$\Delta\omega_{i*}=U_{i*}/(L_i/2)=2\zeta a_i/L_i \tag{10}$$

同样，L_i，L_{i+1}，L_{i+2}，… 之间的层次结构决定了这 n 者有一个公共端点 x_j，研究 x_j 端点的位移，那么该端点的宏观位移将是以上各尺度块体的宏观位移之和：

$$U=U_i+U_{i+1}+U_{i+2}+\cdots \tag{11}$$

最不利的情况为所有层次的岩块均达到了转动极限，则根据公式(10)～(11)可得到受限平动条件下激活岩块的宏观位移为：

$$U_*=\frac{\Delta\omega_{i*}(x_j)}{2}L_i+\frac{\Delta\omega_{i+1*}(x_j)}{2}L_{i+1}+\frac{\Delta\omega_{i+2*}(x_j)}{2}L_{i+2}+\cdots=\zeta(a_i+a_{i+1}+a_{i+2}+\cdots) \tag{12}$$

式中：$\Delta\omega_{i*}(x_j)$，$\Delta\omega_{i+1*}(x_j)$，… 分别表示端点 x_j（图 4(b) 中两种尺度块体的公共端点）因为尺度分别为 L_i，L_{i+1}，…的块体的转动而引起的转角位移。

由式(8)、(12)可知，对于受限平动和转动，所引起的宏观极限位移表达式相同。

考虑到岩体的块系构造等级关系，即将公式(1)～(2)代入公式(12)可以得到：

$$U_*=\zeta(a_i+a_{i+1}+a_{i+2}+\cdots)=\zeta(k_1L_i+k_1L_{i+1}+k_1L_{i+2}+\cdots)=\zeta\left(k_1L_*+k_1\frac{L_*}{k_2}+k_1\frac{L_*}{k_2^2}+\cdots\right) \tag{13}$$

因此从公式(13)可以看出，尺寸为 L_* 的岩块的运动对岩体的变形具有极大的影响，而更高层次等级岩块（较小岩块）的运动则具有较小数量级的影响，如果忽略更高层次等级岩块运动的影响，公式(13)可以写成：

$$U_*\approx\zeta(k_1L_*+k_1(L_*/k_2)) \tag{14}$$

对上式进行计算可得到激活块体的尺度计算式为：

$$L_*\approx k_2U_*/\zeta(1+k_2)\,k_1 \tag{15}$$

现根据上面所述的概念，针对具体的爆炸波形式评价激活块体的尺度和构造介质的变形，对于给定爆炸当量的地下大规模爆炸，实验测得的爆炸扰动波的形式为：

$$v(r,t)=v_0(r)\sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right)\qquad 0\leqslant t\leqslant\tau \tag{16}$$

式中：$v_0(r)=A(r/Q^{1/3})^{-n}$ 为距离爆心为 r 处的粒子最大运动速度，$\tau=\dfrac{B}{c_{\mathrm{P}}}Q^{1/3}(r/Q^{1/3})^{m}$ 为爆炸扰动波的持续时间，A、B、m、n 为通过实验确定的参数，c_{P} 为纵波速度。

通过速度对时间积分得到爆炸扰动条件下岩体运动的位移表达式：

$$U=\int_0^{\tau}v(r,t)\,\mathrm{d}\tau=\int_0^{\tau}v_0\sin\left(\frac{\pi t}{\tau}\right)\mathrm{d}\tau=\frac{v_0\tau}{\pi}\left(1-\cos\frac{\pi t}{\tau}\right) \tag{17}$$

当 $t=\tau$ 时，上述位移达到最大值：

$$U_{\max}=2v_0\tau/\pi \tag{18}$$

式中：$U_{\max}$ 为通过实验测得的距离爆心 r 处的岩体最大位移，而 U_* 为尺度为 L_* 的最大激活岩块发生受限运动所能够获得的最大位移，如果令 $U_*=U_{\max}$，并将公式(18)代入(15)，得到激活块体的尺度与爆炸当量及爆心距之间的关系：

$$L_*=\frac{2v_0\tau k_2}{\pi\zeta k_1(1+k_2)} \quad \text{or} \quad L_*=\frac{2ABk_2}{\pi c_P\zeta k_1(1+k_2)}r^{m-n}Q^{(n-m+1)/3} \tag{19}$$

上述公式还可以写成：

$$(L_*/\sqrt[3]{Q})=A'\left(r/\sqrt[3]{Q}\right)^{m-n} \tag{20}$$

式中：$A'=\dfrac{2ABk_2}{\pi c_P\zeta k_1(1+k_2)}$ 为常数。

从公式(19)～(20)中可以看出，激活块体的尺度由爆炸当量和距离爆心的比例距离决定，爆炸当量越大，则激活的块体尺度越大。

对公式(19)进行变换得到地下爆炸不可逆范围的计算公式：

$$r^{n-m}=\frac{2ABk_2}{\pi c_P\zeta k_1(1+k_2)L_*}Q^{(n-m+1)/3} \quad \text{or} \quad \frac{r}{Q^{1/3}}=\left(\frac{2ABk_2}{\pi c_P\zeta L_* k_1(1+k_2)}\right)^{\frac{1}{n-m}}Q^{\frac{1}{3(n-m)}} \tag{21}$$

为获得不可逆范围的具体数字，需要给出 ζ 的数值，目前还未有相关的资料。文献[4]利用岩体的等效平均极限应变 $\varepsilon_*=\dfrac{U_{\max}}{L_*+a}\approx\dfrac{U_*}{L_*}$ 作为岩体不可逆运动的评价，根据潮汐运动及其他构造运动中累积的众多资料，ε_* 的最小值可取为 $(1\sim2)\times10^{-5}$。

根据公式(14)，ε_* 与 ζ 存在下列关系：

$$\varepsilon_*=(U_*/L_*)\approx k_1\zeta(1+(1/k_2)) \tag{22}$$

对于具体的软弱充填物质，ζ 为定值，同时考虑到 k_1、k_2 的取值，则从公式(22)可以看出 ε_* 的取值主要取决于 k_1，即岩石力学不变量 μ_Δ 对岩体的局部不可逆变形做出了积极贡献。

将式(22)代入式(21)可得到，以 ε_* 评价的不可逆位移范围计算公式：

$$\frac{r}{Q^{1/3}}=\left(\frac{2AB}{\pi\varepsilon_* c_P L_*}\right)^{\frac{1}{n-m}}Q^{\frac{1}{3(n-m)}} \tag{23}$$

3　讨　论

利用式(23)评估地下爆炸不可逆位移范围，需要确定方程中的 4 个未知参数 A、B、n、m。其中 A、n 可以利用地下爆炸实验的监测数据得到，Radionov 等[18] 统计了涵盖采矿爆破和地下核爆炸的大量地下爆炸实验，给出了 A 和 n 的统计值，如表 1 所示。

表 1　不同岩石的常数值[18]

Table 1　Parameters of different rocks

岩石类型	花岗岩	盐岩	凝灰岩
A	$(1.0\sim1.3)\times10^4$	$(0.8\sim1.0)\times10^4$	$(0.3\sim0.4)\times10^4$
n	1.60～1.75	1.60	1.60

B 和 m 的直接监测成果较少，可通过其他实验数据间接获得。对地下大当量爆炸的实验处理结果表明[18]：当 $r=R_{\text{cavity}}=(7\sim12)Q^{1/3}$ 时，$\tau\approx10^{-3}Q^{1/3}$；$r=R_{\text{crush}}=(30\sim40)Q^{1/3}$ 时，$\tau\approx20\times10^{-3}Q^{1/3}$，这里 R_{cavity} 和 R_{crush} 分别为爆炸的空腔半径和破碎区半径。通过上述数据得到：$R_{\text{crush}}\approx(3\sim5)R_{\text{cavity}}$，从而有：$m\approx1.86\sim2.72$。如果令 $m\approx2.3$，$R_{\text{crack}}\approx7Q^{1/3}$，可以得到：$B\approx1.14\times10^{-5}$。

以花岗岩中爆炸为例进行计算，令纵波速度 $c_P\approx5$ km/s，则对于给定的爆炸当量(计算取单位爆炸当量 $Q\approx1$ kt)，则利用公式可以得到不可逆位移的范围，计算结果列于表 2 中，表中 R_d 为计算所得的不可逆位移范围，v_* 为相应的位移速度。

表 2 利用公式(23)计算得到的不可逆位移范围

Table 2 Irreversible displacement region radius calculated by Eq. (23)

花岗岩参数				计算结果	
A	n	B	m	R_d	$v_*/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$
1.0×10^4	1.65	1.14×10^{-5}	2.3	1 128	0.09
1.3×10^4	1.65	1.14×10^{-5}	2.3	753	0.20
1.3×10^4	1.70	1.14×10^{-5}	2.3	1 308	0.07

通过计算可以看出,计算结果与俄罗斯学者的实测实验数据[2,13,18]基本吻合,即:$R_d/Q^{1/3}\approx(650\sim1\,400)$ m/kt$^{1/3}$,$v_*=0.05\sim0.15$ m/s。这一计算结果远远超出按连续介质力学计算所得到的结果[12,19-21]:$R_d/Q^{1/3}\approx(80\sim120)$ m/kt$^{1/3}$。

4 结 论

主要基于岩体块系构造理论,对 Kocharyan 等[4]的工作进行完善和改进,推得了大规模地下爆炸激活块体尺寸和诱发远区局部不可逆位移计算公式,主要结论如下:(1)本文工作与 Kocharyan 等[4]的推导过程的主要区别在于,Kocharyan 的计算公式只考虑了岩块在爆炸扰动作用下的受限转动,而本文中则考虑了平动和转动;此外,本文中引入了充填层物质的极限压缩应变 ζ,重新定义了岩体的等效特征应变 ε_*。(2)由 ε_* 的定义公式可以看出,岩石力学不变量 μ_Δ(或者 k_1)对于岩体的局部不可逆变形做出了积极贡献,它给出了实际岩体中岩块运动的可能"自由度"的量值。(3)由于岩体中节理裂隙(或者说多余自由度)的存在,使得实际岩体中不可逆位移的范围远远大于按连续介质力学所得的岩体不可逆位移范围。(4)本文推导公式的计算结果与实测结果基本一致。

参考文献:

[1] BERGKVIST N O, Ferm R. Nuclear explosions 1945-1998[R]. 2000:14-15.

[2] 钱七虎. 战略防护工程面临的核钻地弹威胁及连续介质力学模型的不适用性[M]//钱七虎院士论文选集. 北京:科学出版社,2007:374-380.

[3] KOCHARYAN G G, SPIVAK A A. Movement of rock blocks during large-scale underground explosions. Part I: Experimental data[J]. Journal of Mining Science, 2001,37(1):64-76.

[4] KOCHARYAN G G, SPIVAK A A. Budkov movement of rock blocks during large-scale underground explosion. Part Ⅱ: Estimates by analytical models, numerical calculations, and comparative analysis of theoretical and experimental data[J]. Journal of Mining Science, 2001,37(2):149-168.

[5] 王明洋,李杰,邱艳宇,等. 基于能量原理的大规模地下爆炸不可逆位移计算方法[J]. 爆炸与冲击,2017,37(4):685-691.
WANG Mingyang, LI Jie, QIU Yanyu, et al. A calculation method for irreversible deformation region radius under large-scale underground explosion based on law of energy[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(4):685-691.

[6] MCKEOWN F A, DICKEY D D. Fault displacements and motion related to nuclear explosions[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1969,59(6):2253-2269.

[7] GLASSTONE S, DOLAN P J. The effects of nuclear weapons[M]. 3rd ed. United States Department of Defense and the Energy Research and Development Administration. Washington: US Government Printing Office, 1977: 231-275.

[8] HAMILTON R M, MCKEOWN F A, HEALY J H. Seismic activity and faulting associated with a large underground nuclear explosion[J]. Science, 1969,166(3905):601-604.

[9] 褚玉成. 地下核爆炸引起不稳定性岩体的探测[J]. 爆炸与冲击,1986,6(3):261-267.
CHU Yucheng. Observation of the unstable rock mass under an underground nuclear explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 1986,6(3):261-267.

[10] ADUSHKIN V V, OPARIN V N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves

in stressed geomedia. Part Ⅰ[J]. Journal of Mining Science, 2012,48(2):203-222.

[11] ADUSHKIN V V, OPARIN V N. From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomedia. Part Ⅲ[J]. Journal of Mining Science, 2014,50(4):623-645.

[12] 钱七虎,王明洋. 岩土中的爆炸冲击效应[M]. 北京:国防工业出版社,2010:85-89.

[13] ADUSHKIN V V, SPIVAK A A. Underground explosions, chapter 8: the influence of faults, joints, and fractures, on mechanical effects of underground nuclear explosions[M]. Translated from Russian to English by Anastasia Stroujkova and Paul Richards, Washington: Weston Geophysical Corp, 2015:431-479.

[14] SADOVSKY M A. Natural lumpiness of rocks[J]. Doklady AN SSSR, 1979,247(4):829-832.

[15] KURLENYA M V, OPARIN V N. Problems of nonlinear geomechanics. Part Ⅰ[J]. Journal of Mining Science, 1999,35(3):216-230.

[16] 戚承志,钱七虎,王明洋,等. 岩体的构造层次及其成因[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(16):2838-2846.
QI Chengzhi, QIAN Qihu, WANG Mingyang, et al. Structural hierarchy of rock massif and mechanism of its formation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(16):2838-2846.

[17] SADOVSKY M A, VOLKHOVITINOV L G, PISAPENKO V F. Deformation of geophysical medium and seismic process[M]. Moscow: Science Press, 1987.

[18] RADIONOV V N, ADUSHKIN V V, ROMASHEV. Mechanical effect of an underground explosion[M]. Moscow: Nedra, 1971.

[19] 周钟,王肖钧,肖卫国,等. 花岗岩介质中地下爆炸震源函数研究[J]. 爆炸与冲击,2007,27(1):18-25.
ZHOU Zhong, WANG Xiaojun, XIAO Weiguo, et al. Study on the main characteristics of underground explosion seismic source function in granite[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(1):18-25.

[21] 刘文韬,王肖钧,周钟,等. 一种岩石损伤本构模型在地下强爆炸中的应用[J]. 爆炸与冲击,2003,23(3):207-213.
LIU Wentao, WANG Xiaojun, ZHOU Zhong, et al. A damage constitutive model of rocks and its applications in underground explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(3):207-213.

[21] 钱七虎. 岩石爆炸动力学的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(10):1945-1968.
QIAN Qihu. Some advances in rock blasting dynamics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009,28(10):1945-1968.

Calculation method of irreversible displacement region radius based on block hierarchical structure under large-scale underground explosion

LI Jie[1], CHEN Wei[1,2], SHI Cuncheng[1], WANG Mingyang[1]

(1. *State Key Laboratory of Explosion & Impact and Disaster Prevention & Mitigation, Army Engineering University of PLA, Nanjing* 210007, *Jiangsu, China*;
2. *Engineering Quality Supervision Center of Logistics Support Department of the Military Commission, Beijing* 100850, *China*)

Abstract: Rock mass is a geological body with a complex hierarchical structure. Based on Sadovsky's concept of block hierarchy, and considering that there are two stable invariants of λ and μ_Δ existing in rock mass, a simplified analytical model is established to study the space-limited rotation and translation under the effect of blast shock waves. With the neglected conditions of Kocharyan's works in calculating scales of activated blocks, the calculation formula of irreversible deformation region radius under large-scale underground explosion is re-derived.

Keywords: large-scale underground explosion; block hierarchy structure; equivalent average kinetic energy; local irreversible deformation

（责任编辑　曾月蓉）