

岩石隧洞掘进过程中松弛区域的声发射评价

李正旺¹, 汤山茂德¹, はた浩二², 吉冈尚也³, 木梨秀雄²

(¹美国物理声学公司(PAC)日本分公司 东京都涉谷区东, ²大林组技术研究所 东京都清濑市下清户, ³大林组东京本社 东京都文京区本郷)

摘要 在神冈地下基岩试验场, 通过计测隧洞掘进爆破后在周围基岩中产生的声发射(AE)信号, 对“松弛现象”做了解释和分析。本文除去泛用的 AE 参数分析和定位分析之外, 还使用了矩张量分析法(Moment Tensor Analysis)。分析结果表明, 爆破后应力再分布的影响随着时间的推移而逐渐出现, 并且一直波及到未掘进区域的山岩。同时还确认了在掘进壁面附近和山岩内部发生的裂纹属于不同的种类。用三维定位法对松弛区域的扩展做了评价。

关键词 松弛区域, 岩体, 声发射, 矩张量分析, 源定位, 振幅分布

分类号 (2001) 增 12

1 前言

开挖岩石隧洞时, 在隧洞周围的山岩中发生应力再分布现象, 对于某些基岩有时会发生“松弛”。不论隧洞大小, 定量评价“松弛区域”对于把握隧洞的安定性和确定支撑保护范围都是非常重要的。吉冈等^[1, 2]通过孔内加载试验和对基岩应变的连续测量, 从隧洞掘进后山岩的物性变化和基岩的局部活动方面阐明了松弛现象。

樱井^[3]和谷本^[4]通过现场检测和理论分析, 认为松弛是由于基岩内的潜在裂纹等不连续面的运动而产生的。于是这些作者们认为通过检测伴随裂纹的

发生、扩展而产生的 AE, 能够解释松弛现象和确定松弛区域。由于 AE 法能够从微观的角度在三维空间捕捉宏观运动, 所以, 近年来在松动区域评价方面的应用研究不断增加, 例如参考文献^[5, 6]。

本文研究旨在通过对神冈地下基岩试验场新设坑道施工时检测爆破后的 AE 信号, 尝试阐明松弛现象。

2 地下基岩试验场概况

本文研究对象的地下基岩试验场位于日本岐阜县神冈矿山, 如图 1 所示, 坑道纵深约 250m, 标高

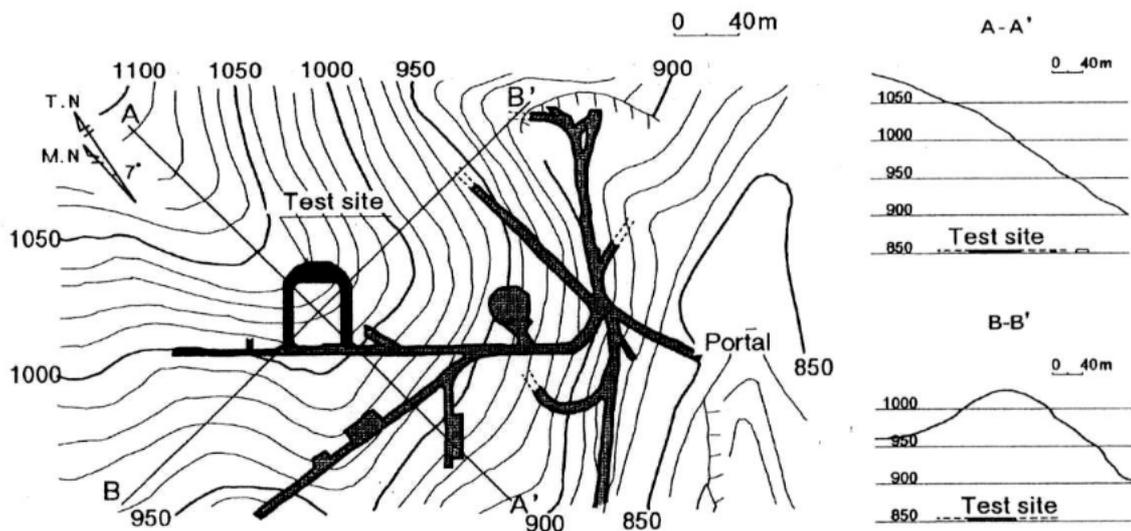


图 1 神冈地下基岩试验场布局示意图

Fig.1 Layout of the underground rock test field in Kamioka

2000 年 10 月 30 日收到初稿, 2000 年 12 月 28 日收到修改稿。

作者 李正旺 简介: 男, 41 岁, 工学博士, 1996 年毕业于东京大学工学研究生院船舶海洋工学系复合材料力学专业, 现为美国物理声学公司日本分公司技术开发研究员, 主要从事声发射技术的应用和研究工作。

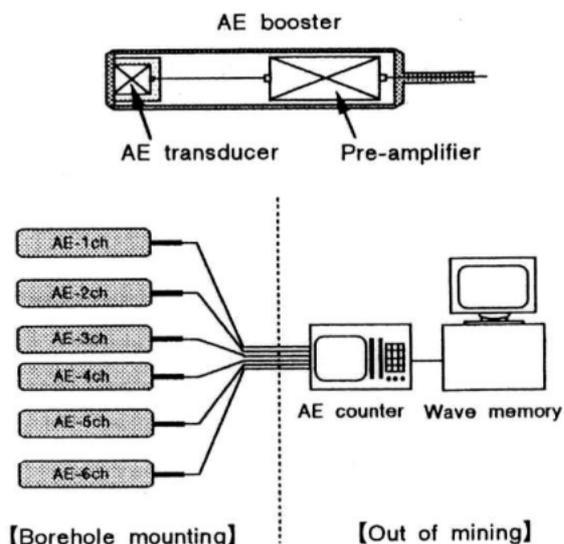


图 2 AE 检测系统

Fig.2 AE measuring system

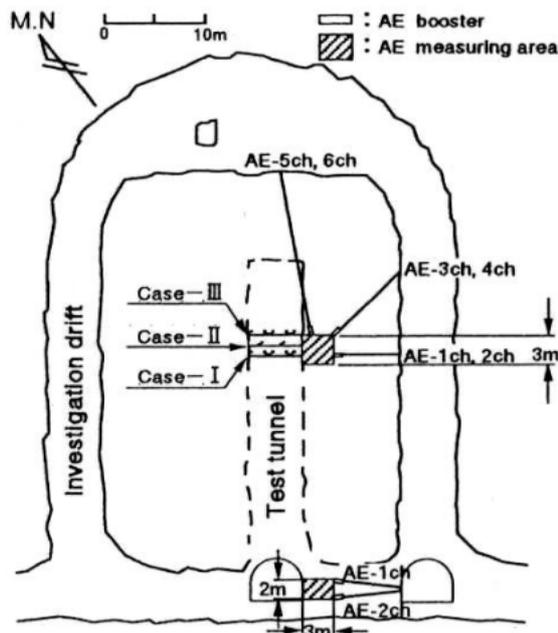


图 3 AE 检测区域

Fig.3 AE measuring area

850m 的山脊型地形的下方，土石覆盖厚度约 180m。基岩试验场周围的构成以花岗岩为主，夹杂有片麻岩类和石灰岩等。钻孔岩芯试验结果表明，单向压缩强度和弹性系数平均值分别为 91.7MPa 和 50.5GPa。实地弹性波试验测得 P 波和 S 波的平均波速分别为 5.6km/s 和 3.0km/s，这表明基岩由相当硬质的岩石所构成。另外，尽管附近没有大面积的断层，该试验场属于裂纹和不连续面较多的山岩结构。掘进中的采掘面、掘进后的坑道侧壁以及钻孔内的裂纹分布调查结果表明：显著的裂纹包括走向沿 NS 方向，斜度接近垂直的裂纹群以及几乎和这一裂纹相垂直的另一大倾斜度裂纹群。

3 现场 AE 检测系统

AE 检测系统包括 AE 传感器、前置放大器、计数器和波形记录装置。根据用模拟 AE 波得到的实地基岩弹性波传播衰减特性，选用了 PAC 公司的 R6AE 传感器，共振频率为 60kHz。AE 检测装置和波形记录装置分别采用了同公司的 LOCAN-AT 检测系统和 TRA-2.5 波形分析系统。前者用于检测物体中所发生的 AE 信号个数、能量和振幅值。后者以每通道 2.5MB 的内存记录波形。

以前为了简化传感器部分，现场 AE 检测大多采用前置放大器内置型的 AE 传感器。但是，本文试验要求在爆破后立即进行 AE 检测，这样在爆破的瞬间 AE 传感器预计将要承受至少数千个 G 的冲击加速度。为了保护 AE 传感器，采用了把分离式的 AE 传

感器和前置放大器放入内径 76mm 的钢管（以后称为 AE 引导器）中的方法。AE 检测系统布置见图 2。

4 传感器安放位置和 AE 检测方法

如图 3 所示，在地下基岩试验场内宽 5m、高 4m 的现存坑道围出了一个大约 30×40m 的基岩块，在虚线所示的新坑道掘进时进行 AE 检测。根据用模拟 AE 波得到的实地基岩弹性波传播衰减特性以及参考新坑道掘进影响的 FEM 分析结果，决定检测对象领域大约在 3×3×2m 左右（图中的斜线部分）。6 套 AE 引导器（AE-1ch~6ch）埋设于图 3 所示的位置，AE 传感器的感受面朝向检测对象区域。

新坑道通过爆破工艺将每次掘进的切削深度控制在 1m 左右。图 3 以 AE-5ch 的安放位置为基准，与掘进方向相反沿新坑道轴线绘出了 3m（Case-I）、2m（Case-II）和 1m（Case-III）的 3 个采掘面。AE 检测分别在这 3 个采掘面爆破后立即开始，一直进行到清理浮动石块工序开始，大约 1 个小时。

5 检测数据的分析方法

本文研究在对检测数据实施 AE 撞击数、AE 振铃数等常规参数分析和定位分析的同时，尝试了以弹性波动理论为基础的矩张量分析法^[7]。AE 波是在弹性体内由于裂纹等变形错位的发生而释放的一种

弹性波。根据弹性波动理论 AE 波可以表示为公式(1)和公式(2):

$$u_i(x,t) = \int_F G_{ip,q}(x,y,t)m_{pq}(y)S(t)dS \quad (1)$$

$$m_{pq}(y) = C_{pqkj}b(y)l_k n_j \quad (2)$$

式中, $u_i(x,t)$ 为 AE 波的变形成分; $G_{ip,q}(x,y,t)$ 是 Green 函数的空间微分; $m_{pq}(y)$ 是矩张量; $S(t)$ 代表发生时间函数; $b(y)$ 为运动的大小; l_k 表示运动方向。 C_{pqkj} 是弹性常数; 最后 n_j 是在面 S 上定义的裂纹表面法线向量。

由公式(2)所定义的矩张量 $m_{pq}(y)$ 由弹性常数、裂纹表面法线方向和裂纹运动方向所组成。所以, 应用矩张量分析法可以计算出隧洞掘进时在周围基岩内产生的裂纹种类和运动方向。

6 检测结果及讨论

6.1 参数分析结果和讨论

基于从爆破后开始检测的 AE 信号, 图 4 给出了 AE 撞击数、AE 振铃数和最大振幅值与发生时间的关系。由于从 Case-I、II、II 得出的结果具有相同的趋势, 这里仅以 Case-I 为例进行说明。从图(a)和图(b)可以看出爆破后十几分是一个分界线, 在这之前和之后 AE 的发生次数有着明显的不同。到爆破后的十几分为止 AE 发生得非常频繁, 可以认为这是裂纹产生和扩展的活跃阶段。另一方面, 随着时间的推移 AE 活动(发生数)有趋于平静的倾向, 从而可以认为伴随掘进而发生的应力再分配开始趋于收敛。另外, 如图(c)所示, 到爆破后的十几分为止可以看到许多 60~80dB 的 AE 信号; 随着时间的推移最大振幅值逐渐减小, 超过 60dB 的 AE 信号已经很少出现。结合图(a)和图(b)的结果综合考虑, 可以发现直到爆破后十几分钟为止 AE 的发生非常活跃而且规模较大。之后随着 AE 活动(发生数)的减少, AE 的发生规模(振幅)也呈现出减小的趋势。

另一方面, 道广等^[8]通过各种岩石试验发现火成岩、堆积岩、变成岩有着不同的 AE 发生模式和规模(振幅)频率分布(以下称为 m 值)。这里的 m 值是一个代表破坏过程的参数, 定义为把地震总数和最大振幅值在双对数坐标中表示时, 所得近似直线的斜率。检测现场山岩主要岩石成分是花岗岩, 图 5 给出了花岗岩的 AE 发生模式和 m 值分布特性。花岗岩在超过破坏强度的 80%之后 AE 频繁发生, 而且许多 AE 信号具有 70~80dB 的较大振幅值。把这一

现象和 Bieniawski^[9]所阐述的岩石脆性破坏发展过

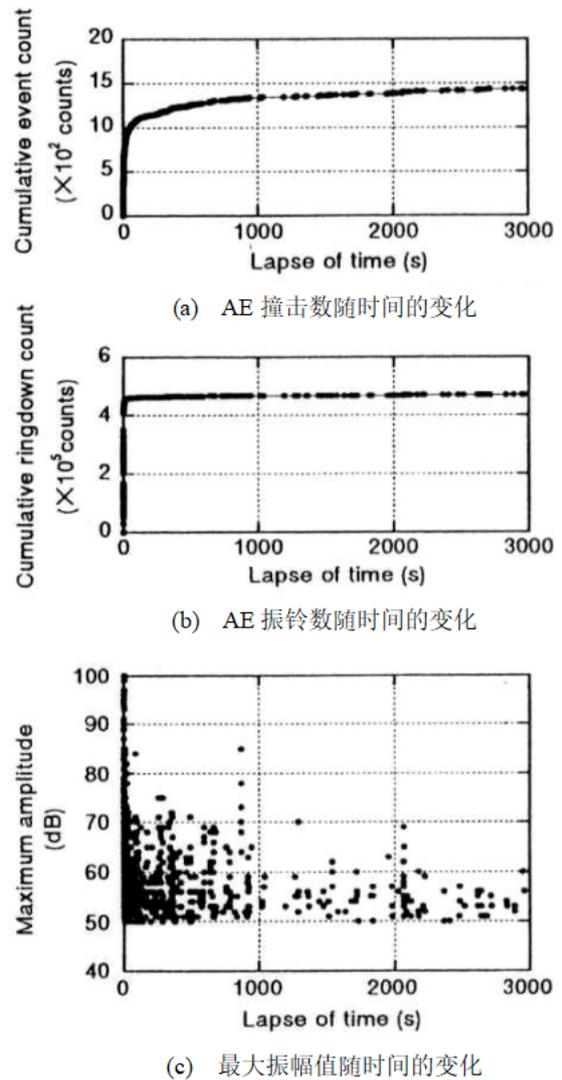


图 4 参数分析结果一例

Fig.4 One example of parameter analysis results

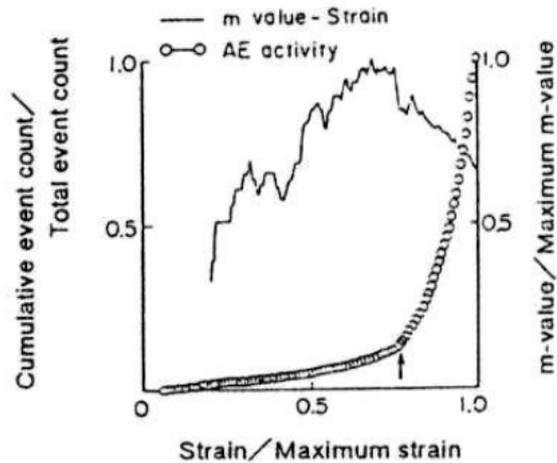
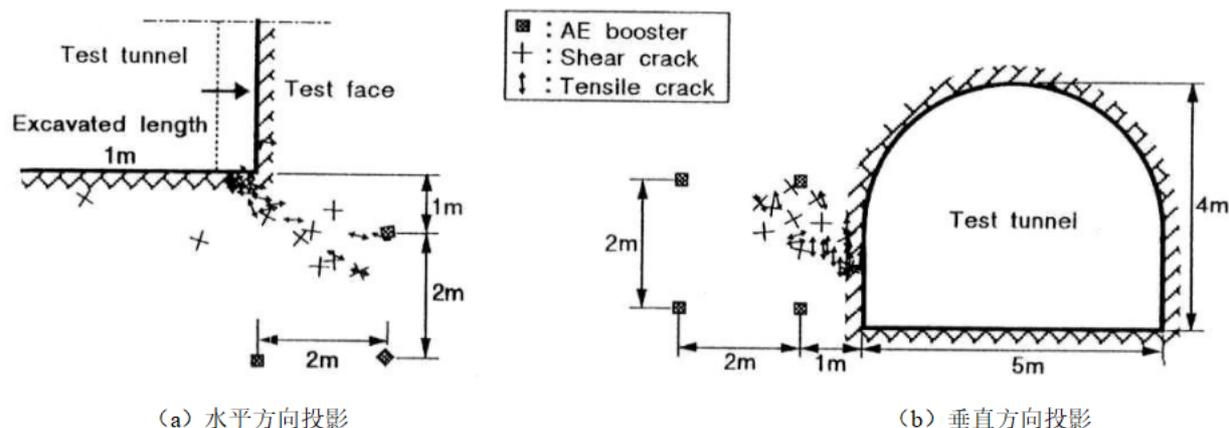


图 5 花岗岩单向压缩试验结果 (撞击数累计-应变-m 值)

Fig.5 Uniaxial compressive test result of granite (Cumulative hit count - Strain - m value)

程相比较,可以看出大振幅信号的频繁发生领域对在掘进壁面附近,并且一直影响到隧洞内部斜前方



(a) 水平方向投影

(b) 垂直方向投影

图6 定位分析和矩张量分析结果之一例 (Case-I)

Fig.6 One example of source location and moment tensor analysis results (Case-I)

应于剪切裂纹的不稳定成长过程。将以上结果和图4(c)相对照,可以推断爆破后的十几分钟之内剪切裂纹明显地处于不稳定成长的阶段。

6.2 定位分析、矩张量分析结果和讨论

为了进行定位分析和矩张量分析,必须正确地掌握检测区域的弹性波传播速度。本论文研究综合考虑在新坑道开挖前后分别做的孔内PS钻井记录(掘进前:5.16km/s,掘进后:5.04km/s)和简易弹性波测试结果,确定波速为5.10km/s。此外,假设基岩为均质各向同性材料,不考虑弹性波传播的各向异性。参考在各种混凝土、基岩试验中所采用的标准值,矩张量分析时的裂纹分类标准为:拉伸裂纹(剪切率 $\leq 40\%$)、剪切裂纹(剪切率 $\geq 60\%$)以及中间型裂纹($40 < \text{剪切率} < 60\%$)。图6为Case-I的分析结果,(a)和(b)分别给出了在水平面方向和垂直方向(背向采掘方向)的投影。图中箭头(\longleftrightarrow)代表拉伸裂纹,箭头方向和裂纹开口方向相同。剪切裂纹用+表示,十字的一个方向代表裂纹滑动方向。箭头或十字符号的中心为裂纹的发生位置。

从图(a)可以看出AE发生位置呈现出从离掘进壁面很远的地方向斜前方延伸的趋势。图(b)给出的AE发生位置是以S.L.为起点向斜上方伸展。由于这里得到的AE发生位置分布状况和从Case-II以及Case-III得到的结果基本相同,并且裂纹的开口方向都不是在AE集中发生的N80°E方向,可以认为AE发生的位置分布反映了应力再分布的一个特征。另外,在离掘进壁面非常近的地方大量发生了拉伸型裂纹。这是因为新坑道的掘进采用了无支撑的施工方法,壁面附近约束力较小,在接近单向应力的状态下产生了大量的拉伸裂纹。拉伸裂纹集中发生

的上侧。相反,在基岩内部则是以剪切裂纹为主,这反映了在三维应力下的裂纹发生状态。

如果把潜在裂纹的扩展和新生裂纹的发生区域假设为松弛区域,那么由于AE信号集中发生在离新坑道壁面1.5~2m的区域内,可以认为这一区域就是隧洞掘进的影响范围。此外,金田等^[10]使用断层X光照相的方法,对振幅数据的衰减做了分析,结果表明松弛区域为从隧洞壁面开始2m的范围。还有,玉井等^[11]通过PS钻井记录和孔内水平加载试验得到的松弛区域大约在0.8~1.6m的范围。本次由现场AE试验估算的松弛区域和上述各种试验方法得到的结果基本相同。

7 结论和今后的课题

本文研究通过计测地下基岩试验场隧洞掘进时在周围基岩中发生的AE信号,对阐明由于应力再分布而产生的松弛现象和估测松弛域做了一次尝试。所得结果概括如下:

- 1) 爆破后应力再分布的影响随着时间的推移而逐渐出现,并且一直波及到未掘进区域山岩的前方。
- 2) 大振幅AE信号频繁发生的时间带与剪切裂纹的不稳定成长相对应。
- 3) 拉伸裂纹主要发生在隧洞壁面附近,而剪切裂纹大多发生在基岩内部。
- 4) 基岩内潜在裂纹方向和AE信号的集中发生方向不一致。

现阶段在进行定位分析和矩张量分析时,都使用了AE波是在各向同性介质中传播的假定。实际上对于明显存在裂纹的山岩有必要考虑传播速度的各向异性。此外,本文把AE集中发生的区域视为由于

隧洞掘进而产生的松动区域，但是在评价松动区域时，也应该把裂纹的规模、特别是在裂纹不稳定发生过程中所形成的裂纹群做为重要考察对象。今后的目标是在考虑这些因素的基础上，建立松弛区域的 AE 评价方法。

参 考 文 献

- 1 冈尚也, 杉原弘造, 谷本親伯, 木山英郎. 第 9 届国内岩石力学研讨会演讲论文集, 1994, 617 (日语)
- 2 吉冈尚也, 杉原弘造, 木梨秀雄, はた浩二, 丸山誠. 材料, 1993, 42, 324 (日语)
- 3 櫻井春輔. 第 23 届基岩力学研讨会演讲论文集, 1991, 378 (日语)
- 4 谷本親伯. 第 23 届基岩力学研讨会演讲论文集, 1991, 380 (日语)
- 5 石田毅, 金川忠, 土山茂希, 百瀬洋一. 第 24 届基岩力学研讨会演讲论文集, 1992, 311 (日语)
- 6 はた浩二, 吉冈尚也, 木梨秀雄, 藤原纪夫. 第 26 届基岩力学研讨会演讲论文集, 1995, 306 (日语)
- 7 大津政康. 平成 4 年度科学研究经费基金研究成果报告, 1993, 03805040 (日语)
- 8 道廣一利, はた浩二, 藤原纪夫, 吉冈尚也. 材料, 1990, 39, 1019 (日语)
- 9 Bieniawski Z T. Engineering and Geology, 1967, 2
- 10 金田義行, 桑原徹. 物理检测学会第 91 届学术讲演会演讲论文集, 1994, 96 (日语)
- 11 玉井昭雄, 白旗秀纪, 永久和正. 隧洞工学研究发表会论文报告集, 1992, 2, 209 (日语)

STUDY ON ESTIMATION OF LOOSENED REGION AROUND ROCK CARVERN BY ACOUSTIC EMISSION TECHNIQUE

Li Zhengwang¹, Shigenori Yuyama¹, Koji Hata², Hisaya Yoshioka³ and Hideo Kinashi²

(¹ Nippon Physical Acoustic Ltd., Tokyo Japan ² Tech. Res. Inst., Obayashi Co., Tokyo Japan ³ Civil Eng. Tech. Div., Obayashi Co., Tokyo Japan)

Abstract At Kamioka bedrock test field, AE signals generated from bedrock was measured immediately after blasting. Attempt was made to interpret "looseness" through the detected AE. In addition to conventional parameter analysis and source location, moment tensor analysis was applied to the recorded AE waveform sets. It was found that stress redistribution occurred gradually near the tunnel wall after the blasting, which spread to the inner area slowly. The cracks produced near the cavern were different from those produced at the inner bedrock. Loosening process was evaluated by 3-dimensional source location of the detected AE signals.

Key words loosened area, rock mass, acoustic emission, moment tensor analysis, source location, amplitude distribution