

声发射监测隧道围岩活动性^{*}

窦林名 何学秋

(中国矿业大学 徐州 221008)

2001年4月25日收到

摘要 目的是确定隧道围岩变形破裂的活动性,保证上方近距离高层大楼的安全使用。采用EAE-04声电测试系统,以测试大楼及隧道围岩的活动性。采用声发射(AE)和电磁辐射(EME)信号上升沿时间和持续时间的关系,排除噪音等的影响,确定有效信号;采用AE频度和能量率的变化规律,EME脉冲数的变化规律,来分析隧道周围岩体的活动性并进行实时检测。为大楼及隧道的稳定性评价提供了依据。

关键词 隧道,大楼,声发射(AE),电磁辐射(EME),围岩活动性

Monitoring the rock activity around a tunnel with AE

DOU Linming HE Xueqiu

(China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008)

Abstract The purpose of this paper is to determine the activities of rock deformation and failure around a tunnel, and to gauge the safety of a high building over the tunnel. The activities of building and rock around the tunnel were measured by using the EAE-04 acoustic and electromagnetic system. The effective AE (acoustic emission) & EME (electromagnetic emission) signals are determined, and the noises eliminated by referring to the relationship between the risetime and duration of the signal. The rock activity around the tunnel is analyzed by the AE count rate and the energy rate, and by EME pulse number. These results are used to evaluate the stability of the tunnel and the high building over it.

Key words Tunnel, Building, Acoustic emission (AE), Electromagnetic emission (EME), Rock activity

1 隧道概况

该隧道为双洞四车道,两洞相隔20m。断面形状为曲墙半圆拱。毛洞高度8.26m,跨度

12.20m。左洞长约100m段上覆有大正大楼,主楼高36层,二者轴线夹角约20°,见大楼与隧道左洞位置示意图1。标准毛洞顶板距大楼负2层地坪10.90m,距桩底7.0m。

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50074030, 50174055);国家博士后基金资助项目

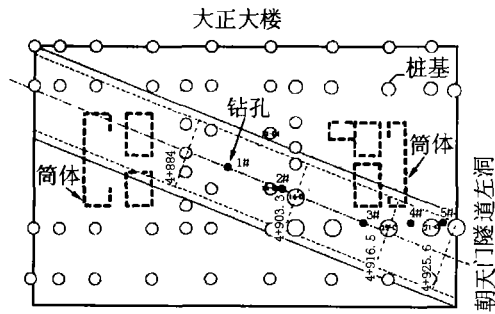


图 1 大正大楼与隧道位置示意图

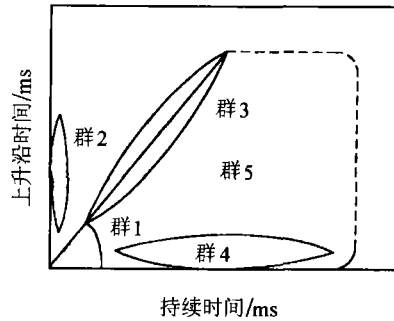


图 2 AE 和 EME 信号群的分布图

隧道左洞大楼段围岩为缓倾斜岩层。顶板围岩可分为三大段，第一段（4+925.6m-4+916.5m）为砂岩，第二段（4+916.5m-4+903.3m）为粉砂质泥岩，第三段（4+903.3m以外）为砂岩。岩石裂隙较为发育，有渗水现象。

隧道左洞大楼段在大楼已建至 18 层后，成洞通过。之后，大楼开始由 18 层上升。竣工后不久，隧道发现众多裂缝，裂缝多集中在筒体，荷载大的桩基及桩间距较小的部位。据雷达探测，裂缝纵横交错发育，且存在多处不密实和衬砌与围岩接触不好的异常体。

2 测试原理

声发射（简称 AE）是指岩石及混凝土等材料在载荷作用下，内部产生塑性变形或裂纹形成和扩展时，瞬态释放应变能而产生弹性波的现象^[1,2]。岩石及混凝土材料在其内部裂纹的产生、扩展及断裂过程中，均会产生声发射。

电磁辐射（简称 EME）是岩石混凝土等材料受载变形破裂时向外以电磁能的形式释放能量的现象^[3,4]。电磁辐射主要有两种形式：一种是当岩体受载应力越大时，电磁辐射幅值越大；另一种是当岩体变形破裂过程越强烈，电磁辐射的脉冲数越大。

2.1 有效信号的确定

在进行 AE 和 EME 测量时，需要排除环境或噪音的影响。一般情况下，AE 和 EME

信号可根据上升沿时间和持续时间的关系分为 5 个群^[2]，如图 2 所示。群 1，上升沿时间和持续时间均非常短；群 2，上升沿时间比持续时间长。这两个群均反映了电、机械噪音的影响。群 3，上升沿时间和持续时间呈线性关系，是 AE 和 EME 或噪音重叠的结果；群 4，上升沿时间比持续时间短，这是 AE 和 EME 探头附近噪音影响的结果；群 5，AE 和 EME 信号处于群 3 和群 4 之间，这是岩体或结构为主发生的 AE 和 EME。因此，当信号点位于群 4 和群 5 区域时，可以判定是有效的 AE 和 EME 信号。

2.2 活动性分析

在岩体或结构载荷发生变化的过程中，AE 频度也要发生相应的变化。EME 有同样的规律。根据这个原理，可对岩体或结构的活性进行分析 and 评价。

(1) 根据载荷增加（升压）过程中 AE 和 EME 信号频度评价，分为 A、B、C 三级。

(2) 根据载荷相对稳定（保压）划分 AE 和 EME 活度等级，可分为无活动性、弱活动性、活动性和强活动性。

2.3 测试仪器的布置

根据隧道中出现的众多裂缝，裂缝多集中在筒体、荷载大的桩基及桩间距较小的部位，且主要出现在 4+901.5-4+916.5m 的砂岩围岩段左侧的拱顶及拱腰部位等事实，声发射测试主要以隧道的最不利地点和最大桩基的位置为主，兼顾其他部分。测试地点为大正大楼地下室五个探测钻孔内的基岩、地板和桩

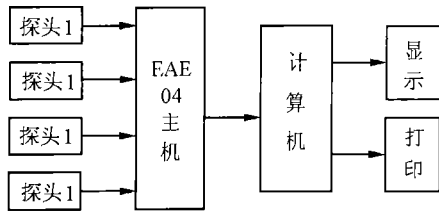


图3 测试系统示意图

基，大楼下方的朝天门隧道探测钻孔内的基岩和混凝土浇注层等。测试采用EAE-04声发射电磁辐射测试系统，计算机实时监测，多项数据处理软件。仪器的布置见示意图3。

3 测试结果及分析 [5]

3.1 岩体的活动性概述

一般来说，岩体的变形破裂是非平衡应力作用的结果。岩体及混凝土是非均质的，从宏观上看，岩体或岩体的变形是连续的。但从细微结构看，各部位（或岩体单元）结构的力学特性有显著差异。单从微观上看，岩体在载荷作用下，变形及破裂是不连续的、非均匀的。

当岩体中某处的作用力超过该处岩体单元强度时，产生破裂并释放能量。破裂后部分应力向周围转移，周围岩体就处于能量的聚积阶段。这样，最终形成两种趋势：一是当岩体中的应力趋于平衡，岩体结构趋于稳定；一是当载荷超过岩体结构中岩体的长时强度时，变形后微破裂呈增长趋势，向危险活动方向发展，最终导致结构失稳破坏。

3.2 测试结果

对大楼桩基声发射观测结果反映了大楼桩基载荷的变化规律。图4是17日18时46分开始对19-C桩基实时监测的结果。从图中可以看出，在24时至早上5时，声发射的振铃计数率有明显的变化和增高，AE具有一定的活性。

AE上升沿时间和持续时间的关系如图5所示。发生的AE为三类。一类的上升沿时间和持续时间均非常短。这是由于电和机械噪音引起的，即群1。第二类是AE和噪音重叠的

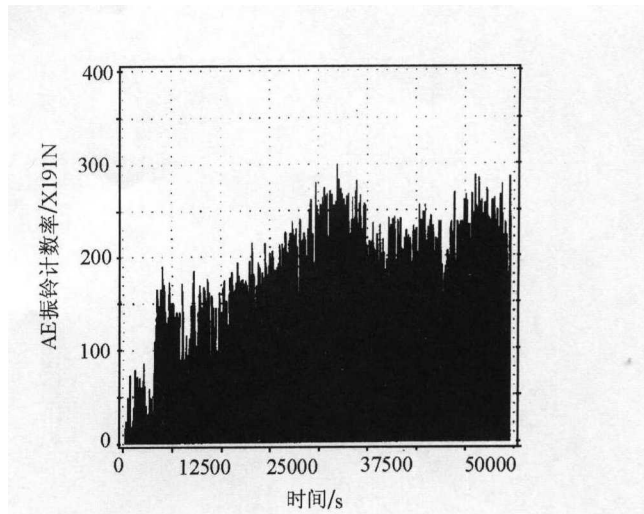


图4 19-C桩基AE振铃计数率变化

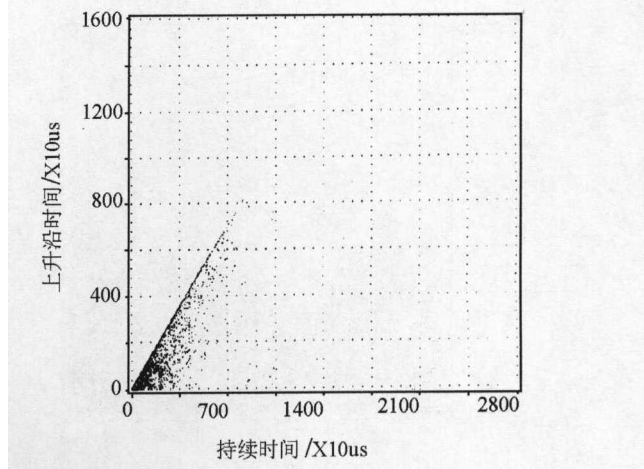


图5 21-C桩AE上升沿时间和持续时间的关系

应用声学

结果，即群3，而第三类则是以岩体或结构为主发生的AE，即群5，说明岩体或结构处于活动状态。

钻孔内的测试结果见图6所示。从图6可以看出，3#钻孔附近的岩体在18日17时30分至23时的近5个小时内AE的能量率变化较大，说明围岩的活动较大，而且这种活动是间歇性的，是非连续的，持续时间最长为3.5个小时，说明钻孔内岩体的AE具有一定的活性。

926m断面附近岩体内观测结果见图7所示。在20日晚上20时10分左右，AE振铃计数率出现一个峰值，说明此处的岩体有一定

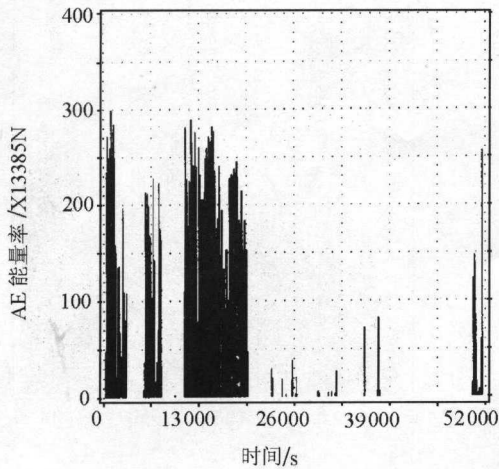


图 6 3# 钻孔内发生的 AE 能量率

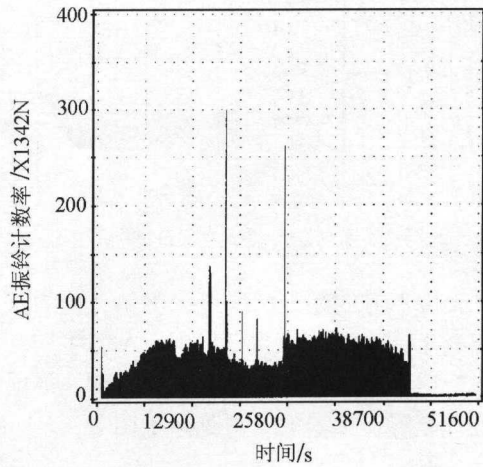


图 8 916.5m 断面拱角 AE 能量率变化

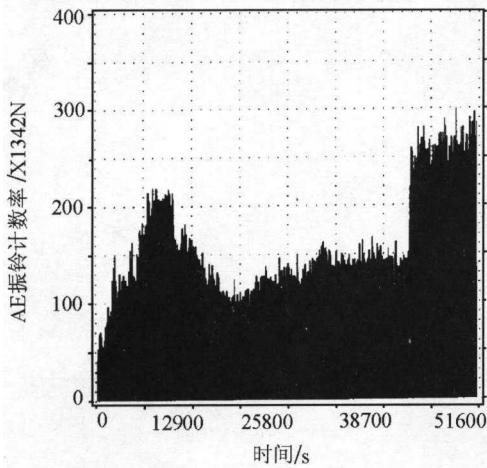


图 7 926m 断面 AE 振铃计数率变化

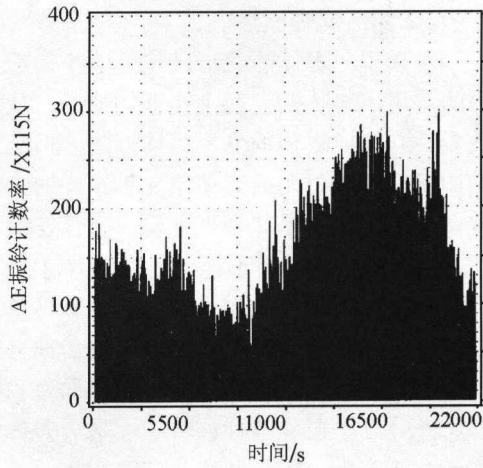


图 9 903m 断面拱墙岩体内 AE 振铃计数率变化

的活动。在 21 日早上将近 5 时，大楼开始营业时，岩体内的 AE 有一个突然的上升，这说明了大楼的动载荷对隧道周围岩体的作用。

916.5m 断面附近岩体内观测结果表明，隧道墙的 AE 与 926m 断面的变化规律一致，但隧道拱角的 AE 变化与拱墙的变化规律不一致。在 20 日晚上 20 时 10 分左右，拱角附近岩体的 AE 振铃计数率出现较大的峰值，而且 AE 能量率也出现一个高数值，如图 8 所示。说明此处的岩体有一定的活动。

903m 断面拱墙岩体内观测结果表明，其 AE 的活动较强烈。图 9 表示了 25 日（01 时 43 分开始观测）大楼开始营业前后隧道拱墙岩

体内的 AE 振铃计数率变化。

884m 断面拱墙岩体内观测结果为，大楼营业结束前后隧道拱墙和拱角岩体内的 AE 变化显著，拱墙内的岩体处于活动之中。而隧道衬砌也有一定的活动。

电磁辐射监测结果也表明，隧道周围岩体都有一定的活动性，而且各断面的活动是间歇性，活动是不连续的，是不同步的。电磁辐射监测的活动性与声发射监测的结果是一致的。图 10 为 903 断面 25 日（01 时 43 分开始观测）监测的电磁辐射结果，与图 9 是一致的。

3.3 测试结果分析

通过大楼内桩基、地质钻孔等以及隧道声

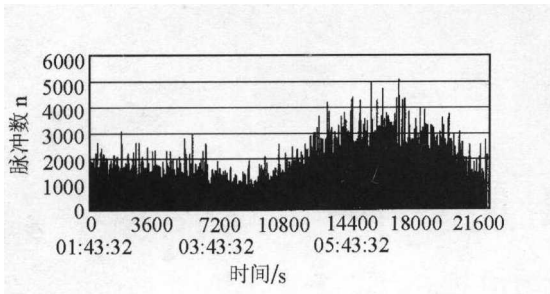


图 10 903m 断面拱墙岩体电磁辐射脉冲数的变化规律

发射 AE 动态测试表明, 所有测点都有一定程度的活动性(微裂隙产生), 而且活动是间歇性的。AE 和 EME 同时测定, 大楼在开始营业时, 隧道周围岩体内的 AE 和 EME 开始上升, 说明大楼内载荷的增加对隧道围岩活动性的影响。这对大正大楼的长期稳定性和安全性是不利的, 需要对隧道围岩进行加固, 以消除这种安全隐患。

需要说明一点, 在这次隧道围岩稳定性监测中, 采用了 AE 和 EME 两种动态监测手段。本文中以 AE 为主, EME 仅作为验证和补充。EME 监测的情况另有文章介绍。

4 主要结论及建议

通过对大楼内的桩基、地质钻孔内的岩体、地下室地板, 隧道中的 926m 断面、916.5m

断面、903m 断面和 884m 断面衬砌及拱墙和拱角钻孔内岩体的声发射和电磁辐射观测, 可以得出如下主要结论:

(1) 大楼的桩基和地质钻孔中的岩体处于弱活动之中。而且活动是间歇性的。

(2) 隧道各断面的岩体和隧道衬砌均处于弱活动之中。衬砌的活动强于隧道周围岩体的活动。

(3) 从观测断面来看, 903m 断面的岩体活动性最强, 其次是 884m 断面、916.5m 断面(其 AE 能量率较高)和 926m 断面。

(4) 为保证大楼的安全及隧道正常通车, 建议对大楼及隧道采用声发射法和电磁辐射法进行连续长期监测。

参 考 文 献

- 1 袁振明, 马羽宽, 何泽云. 声发射技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985. 203-210.
- 2 腾山邦久. 声发射 (AE) 技术的应用 [M]. 冯夏庭译. 北京: 冶金工业出版社, 1996. 165-186.
- 3 中国矿业大学. 重庆市朝天门隧道大正段左线稳定性综合测试报告. 2000, 2.
- 4 Dou Linming, He Xueqiu, Wang Enyuan, et al. *Zeszyt Naukowy Politechniki Slaskiey*, Gornictwo, 2000, (246): 377-384.
- 5 窦林名, 何学秋, 王恩元等. 隧道围岩活动性监测. 2000 年中国博士后学术大会论文, 2000 年 10 月: 16-20.

L.L.Beranek 教授访问我国

世界著名声学家 L.L.Beranek 教授应魏荣爵院士邀请, 在南京大学百年校庆学术报告会 (2002 年 5 月 22 日) 上作了“音乐厅和歌剧院”的报告。白瑞纳克教授在会前和会后访问了北京和上海, 分别在中国科学院声学研究所和同济大学作了“音乐厅音质的客观参量”和“音乐厅和歌剧院”等学术报告。介绍了他的丰富设计经验和卓越研究成果。并在同济大学举行他的名著《音乐厅和歌剧院》中文版首发式 (王季卿、戴根华、项端析、郑敏华等译, 同济大学出版社出版)。该书从音乐、声学和建筑三个方面探讨大厅音质最新进展, 书中还收列 76 座世界著名大厅的详细资料和精美应用声学

图片, 极具参考和收藏价值。作者又为中译本问世, 补充了一些最新资料, 这是他为即将出版的英文第二版所写, 因此中文版成为提前于原著的升级版。中译本还刊登了 Beranek 同窗好友、马大猷院士所写的出版前言, 详述了作者的多方面成就和经历。马教授对本书称之为建筑声学史中的里程碑式著作。该书赢得了国内外建筑界、声学界和音乐界的很高评价。贝聿铭、冯纪忠、谭抒真、橘秀树 (日) 等许多名家的评语一并刊载在本书封底。

(同济大学 王季卿)