

岩はねに伴うアコースティック・エミッションに関する考察

京都大学工学部 正員 丹羽泰次 正員 小林昭一
" " 福井卓雄 " 〇柳谷 俊
" 学生員 大津政康

1. はじめに

岩はねは、トンネルや地下空洞の開削に伴って、周辺岩盤に発生する急激な破壊現象である。このような破壊現象の発生する機構は、まだ十分明らかにされておらず、爆発的に破壊してエネルギーが開放される点からみて、一種の局部的座屈に近しい現象であると推察されている。したがって、岩はねが発生するための条件としては、地下開削地周辺の地山応力状態、地質状態と岩質、岩盤強度、開削断面の形状、応力集中ならびに変形状態、さらには、発破などによる破壊領域とクラック分布などが考えられる。これらの要因が、実際には複雑にからみあっており、非常に類似した条件であっても、ある場合には極めて急激に破壊し、またある場合には緩やかに破壊するなど、差異が生じることになる。またこれらの要因は、施工方法に影響されるものが多く、もし適切な手法が講じられれば、岩はねを防いだり、小規模なものに抑えることができることも考えられる。しかしながら、現段階では如何にして最適な施工方法を選択するかという事は難しい問題である。これらに関しては、実際の資料に基づいて充分な検討を加え、岩はねの機構を明らかにし、さらに、少なくとも何らかの予知ないし予防方法を確立することが急務であろう。

本報文は、このような見地から、岩はねの機構の解明とその予知を主眼として研究の中のものの一部であり、特に岩はねに伴うアコースティック・エミッションの特性について考察をくわえようとするものである。

2. 岩はねに伴うアコースティック・エミッション

2.1 岩はねの観測: 岩はねは、既に述べたように数多くの条件に支配されると考えられるが、経験的に、高い地圧を受けた硬い堅岩に生じることが知られている。これは、トンネルなどの地下開削を行なうことにより、その周辺に二次的な応力集中が生じ、また、掘削に伴う岩盤の強度低下とも相まって、たとえばFig. 1に模式的に示すようなクラック系が発生し、それらが座屈に近しい現象となって破壊し、岩はねが生じることを示唆している。このような現象は、局部的には、岩質材料の2軸圧縮試験で観られるものと同じものである。岩石の破片は非常に薄く、

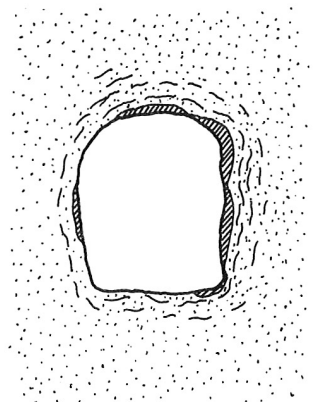


Fig. 1 Peripheral cracks caused by excavation.

Fig. 2(b)に参考のため示してある。

Fig. 2(a)に示すような孔面での剥離破壊もやはり岩はねの一種と考えられよう。このような破壊モードは、孔軸にほぼ等しい2軸圧縮応力を受けた場合に生じる典型的なものである。なおこのような破壊には必ずしも微小破壊が先行し、破壊に伴って応力波が放出される。これは、次のような装置により容易に測定できる。

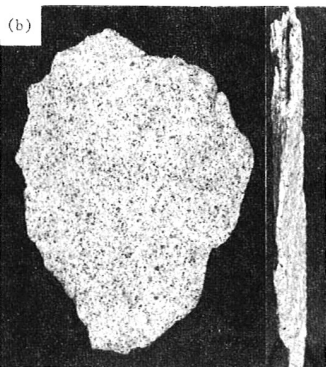
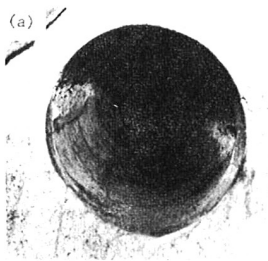


Fig. 2(a) Surface fracture of boring hole.
(b) Example of slabs separated from the tunnel wall.

6) アコウスティック・エミッション測定装置：微小破壊に伴って発生した弾性波（一般にアコウスティック・エミッション、略してAEとも呼ぶ）を、Fig.3に示す装置によって測定した。本研究では、室内実験においてはトランスデューサーとしてチタン酸ジルコン酸鉛磁器（PZT-5，村田製作所製）をAEの検出に用い、アリアンプに40dB増幅し、そのあとフィルタで低周波雑音を切り捨て、さらに10dB増幅し、ディスクリミネーターを用いて、電圧波高が50mV～100mVを越えるAEを一定時間間隔でカウントした。この時間間隔は、種々の予備実験の結果により、一つの微小破壊によるAEが一つのカウンタ数に一对一に対応するように定められている。

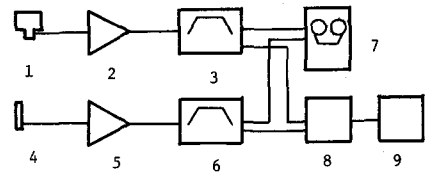


Fig.3 Apparatus for AE observation.
 1. Accelerometer 2. Charge-Amp
 3. Filter-Discriminator-Counter
 4. Transducer (PZT-5or7)
 5. Pre-Amp
 6. Filter-Discriminator
 7. Data-Recorder
 8. Transient-Recorder 9. CRT

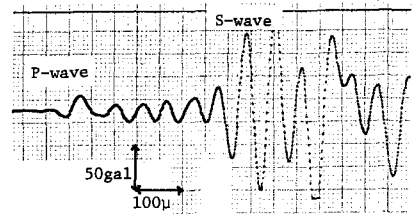


Fig.4 Typical acceleration record of AE in-situ.

現地計測では室内実験と同じ装置に加えて、さらに、トランスデューサーとして、加速度計（B&K社4344）を用い、チャージアンプにより増幅して、一定の波高を越えるものをカウントした。この際にも、適当な時定数をもうけて、一つのカウンタが一つのAEに対応するようにした。なお加速度計を用いているので、検出される波動は軌正で、AE波動の振幅をgal単位で表示することが可能である。以上のような装置により検出できる周波数帯域は、PZT-5トランスデューサーを用いたものでは、10kHz～2MHz、加速度計を用いたものでは1kHz～20kHzである。

c) 岩はねに伴うアコウスティック・エミッション
 現場計測の例として、上越新幹線の大清水トンネルの側壁で得られたAEの加速度波形の一例をFig.4に示す。波形の特性は、検出位置周辺の幾何学的形状ならびにトランスデューサーの固定の良否によって多少の差が生じるが、P波とS波の区別は明瞭であり継続時間は数msecである。この例では、卓越周波数は約7kHzであった。

この際に放出される弾性エネルギーを、破壊源より放射状に均等に伝播すると仮定して Cook (1964) の式、すなわち

$$E = 4\pi r^2 \rho c \int_0^T v^2 dt$$

より求めた。すなわち

$E = 2\pi r^2 \rho c v^2 T$ 、 r 、 ρ 、 c 、 v 、 T は、それぞれ、破壊源と観測点との距離、岩石の密度、P波速度、粒子速度、および積分時間間隔である。この際 v_{peak} は $1.6 \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 、 T はP波とS波の到着時間差により約3mと考へ、岩石密度 ρ は2.7、P波速度 c は約5000 m/secとし、(コマンビル)室内測定によ

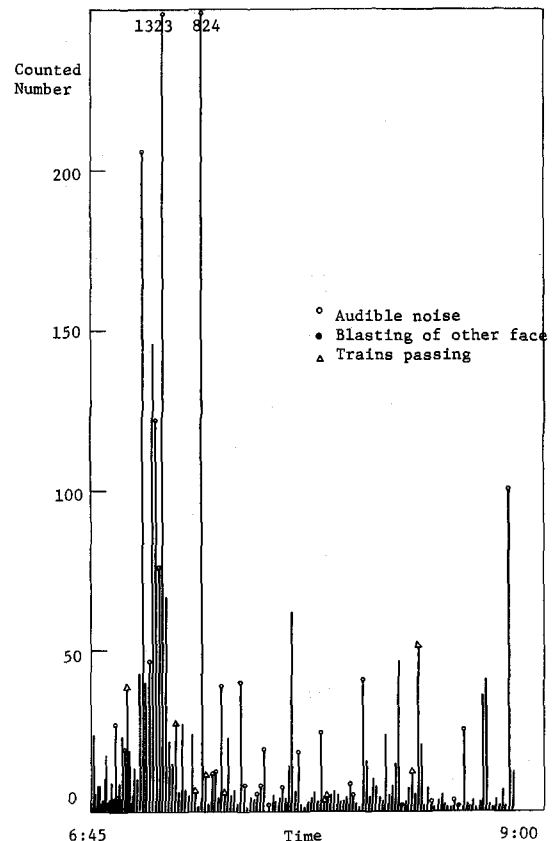


Fig.5 The counted events of AE in 30sec observed from 30min to 180min after blasting.

3). P波の放出エネルギーを計算すると、約0.8ergを得た。また地震学では、P波のエネルギーとS波のエネルギーとの比 E_p/E_s は0.05~0.2と見積られてゐるので、大略のところ、このAEに相当する運動の全エネルギーは約5~16ergと推察される。

Fig. 5はトンネル側壁において、坑道と直角方向に数枚掘進した際、発破終了後30分たつてからの約2時間30分はわたり、周辺岩盤より発生するAEを加速度計でピックアップし、増幅して、時間の経過に伴う頻度の移りかわりを記録したものである。この際加速度10galをしゅれショルドとし、それを超える現象をカウントした。なお図中には可聴音の発生した時刻、切羽の発破の時刻、トロッキの通過時刻なども記入してあった。この図より、AEの発生頻度は、大きく眺めてみると、発破後指数関数的に減少してゐることがわかる。少しながくみると、可聴音発生前にAEの頻度は次第に高くなり、後は漸次減少してゐるかに見える。この傾向は、Fig. 6を見ればさらにはっきりする。またこれは室内でのテストピースの圧縮試験で得られる傾向と類似してゐる。これは確率的には、可聴音を伴うような大きな破壊が生じる以前は、微小破壊が既にいくつも発生し続けていることを意味してゐる。なお、この計測では検出した周波数が比較的高いので、切羽の発破の影響とか、トロッキの通過に伴うノイズに影響されてゐないことがわかる。

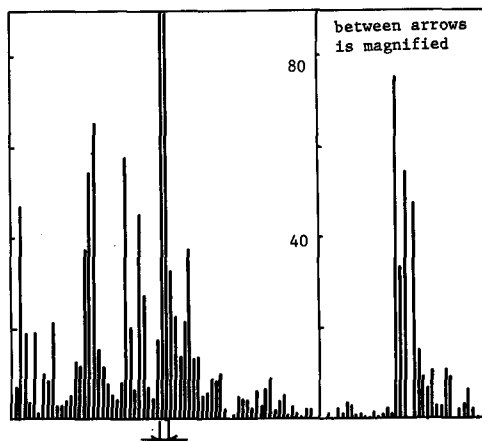


Fig. 6 Details of Fig. 5 (counted events-time curve) at max. counted rate every 10sec and 1sec.

3. 岩はねのモデル実験

岩はねを支配する主要因子としては、環境的には高い地山、

応力の存在、また地質的には脆性的な堅岩の存在があげられる。これらの条件を満たすようなモデル実験を行えば、室内においても、小規模ではあるが、岩はね現象を生じるにせよと推定される。

(2) モデル: 本研究では、このような考えに基づいて、力学的に岩はねの発生機構をシミュレートする目的で、モデルによる室内実験を行なった。実験材料としては、セメントモルタルを用い、種々の配合比を定め、ことにより異なる強度ならびに脆性を有するものを得た。また、モデルとしては、応力集中を生じせしめるように、直方体側面に半円形切り欠きのある一軸圧縮用モデル、および立方体中央に円孔を有する多軸圧縮用モデル

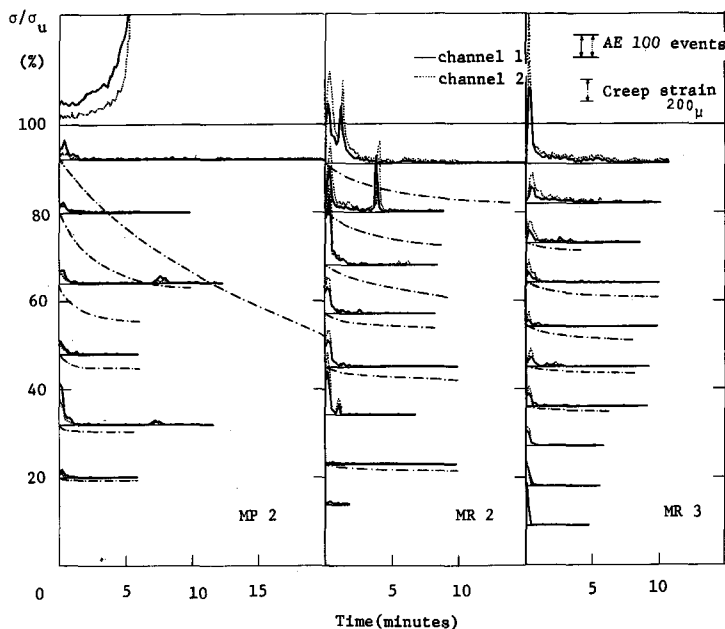


Fig. 7 The counted events of AE with a continually increasing load

モデルを作製した。

b) 試験方法：モデルへの載荷は、主として、荷重レベルを数段階にわけ、各々のレベルで10～15分間、一定値は保持するようにながら全体的な破壊に至るまで漸増した。またAEの計測はモデルの2カ所、可なり応力集中の最も高いと思われる付近と平均的な場所でのPZT-7により検出し、40～50dB増幅の検度をカウントした。なお同時に、応力集中部の平均的ひずみも記録した。

c) 実験結果：以上のようにして得られた結果の例をFig.7に示す。この図より、荷重レベルが高くなると、AEの発生頻度が高くなり、また一定荷重に保持しているときAEの発生頻度は経過時間とともに減少することから、またAEの発生頻度とクリープひずみ（レベルの線から下向きは増加を示してある）との傾向とはよく符合していることもわかる。なお、A-の例はクリープ破壊が生じたことを示していることに注意されたい。また同じ例で、ある程度時間が経過してから再びAEの発生頻度が高くなった例（下から2つ目および4つ目）があるが、これはこの時点で積た向から載荷を加えたことによる増大によるものである。室内のモデル実験で得られたFig.7と現場計測によるFig.5とを比較してみると、全体的にはよく似た傾向が見られる。この結果から、実際の岩はななれ杭壁の破壊は、AEの発生頻度から推察して、非常に局部的な微小破壊であり、これらが頻発して次第に全体的には安定な状態は移行して行くこととなる。AEの発生頻度をさらに詳しく調べてみると、時間当りの頻度が一定ではなく、ほぼ周期的な変動があることがわかる。これは現場計測結果ともよくあい、微小破壊が断続的に進行していることを示唆している。この点に関しては、なお一層詳細に調べる必要がある。

4. 岩はねの予測と制御の可能性

岩はねに関する予備的な実験から得られた知識を総合してみると、岩はねは高い初期地山応力を受けた堅い岩盤中に開削した空洞周辺の応力集中域に生じ、その引き金には、空洞周辺の幾何学的な不規則性とか岩盤の非均質性、発破等による微小局所破壊などを考えられる。応力集中に関しては、例えばトンネルについて考えると、切羽周辺は3次元の応力となっており、その側壁の応力集中はどれ程の高くなるが、切羽からトンネルの直径程度手前では、切羽の効果は殆んど消失し、いわゆる2次元の（平面ひずみの）な状態になっており、側壁の応力は3次元のものより相当高くなっている。その大まきには、切羽の形状とかトンネルの断面形状によっても異なるであろうが、いずれにしても、トンネル切羽から漸増し、直径程度手前では2次元の応力ない変形状態となるであろう。したがって応力的にはこの付近が岩はねを生じる可能性が最も大きいと言える。危険性があれば、早や日に切羽に近いところで何らかの処置を講じておくことが必要である。岩はねの予測に関しては現段階で言及することは難しいが、AEの発生頻度から見て、岩はねの前段階である微小破壊音(AE)を検出することによってそれが可能性のあるだろう。

5. おわりに

本研究は岩はねの機構を解明し、それを施工管理に役立てることを目的として、日本鉄道建設公団新潟新幹線建設局の要請により行なった基礎研究の一部である。研究の遂行にあたっては、同建設局ならびに大清水トンネル新潟建設所ならびに大成建設の御援助を得た。記して感謝の意を表したい。

SOME CONSIDERATIONS ON ACOUSTIC EMISSIONS DUE TO ROCK BURST

by Yoshiji NIWA† Shoichi KOBAYASHI*
Takuo FUKUI‡ Takashi YANAGIDANI**
and Masayasu OTSU*

The present paper is concerned with the characteristics of acoustic emissions due to rock burst, which is a part of the study being carried on in order to investigate the mechanism of rock burst and to predict it. Although the mechanism of rock burst is not yet clearly understood, it may be recognized as a kind of local buckling of the thin surface layer around heavy stressed cavity wall which is somehow damaged by blasting or inhomogeneously stressed due to geological complexity. Thus acoustic or stress waves are always emitted and observed before a rock burst occurs.

In the first half of this paper, some features of acoustic emissions of in-situ observation are described. The energy of an observed rock burst is estimated, for example, about 10 erg, which is calculated based on the primary wave and then enlarged to involve that of the secondary wave. The counted events of acoustic emissions in 30 sec observed from 30 min to 180 min after blasting show almost exponential decay with an increase of time. During the observation more than ten times of burst audible noise are heard. By the close investigation of the results, it is observed that the counted events of acoustic emissions gradually increase just before the audible noise and gradually decay after it.

In the second half of the paper, characteristics of the acoustic emissions of laboratory model tests are described. The counted events of acoustic emissions increase with a continual increase with several pauses of load. During the pause, i.e. constant load kept, counted events of acoustic emissions decrease with some periodical fluctuations with an increase of time. Roughly speaking, these results coincide with those of in-situ observations.

Judging from the results observed, it may be concluded that rock burst can be predicted if continuous monitoring of acoustic emissions is possible.

* Department of Civil Engineering, Kyoto University

** Department of Mineral science and Technology, Kyoto University