

竹中技術研究所 ○上田貴夫 中崎英彦 高橋三津彦
竹中土木 技術本部 鈴木志朗 神崎靖

1. まえがき

土・岩盤を対象とした工事では、近年、安全管理、施工品質の向上の立場から、計測管理手法を取り入れて、より合理的に工事を進めていこうという傾向が増大している。特に、変状を事前にキャッチし、致命的な事故を未然に防止することは、掘削工事等では必須の要件であるし、応力～変形を常にモニタリングしつつ、そのデータを施工にフィードバックさせて安全に工事を進めていく考え方は、トンネルにおいてはNATMの普及とともに定着しつつある。ダム工事においても、近年、良好なダム基礎岩盤が少なくなってきたことから、注入工事の比重がたかまっており、それとともに、注入に伴う岩盤変位の防止に対する有効な計測管理手法の開発が求められている。

このように、岩盤を対象にした場合、変状のモニタリング、予測等は施工管理上重要度が増大しつつあるにもかかわらず、現行の計測法では次のような問題点を包含している。

- 1) 岩盤をマスとしてとらえた場合、内部で生じている変状の程度、位置等を直接測定することが困難である。
- 2) 変状を微小レベルでとらえて、危険度を事前に予測するに足りるデータを得にくい。特に脆性破壊等が生じやすい岩盤に対しては、突発的変状に対する事前予知技術を確保する必要がある。
- 3) 多点計測が施工性、コストの面で困難な場合が多く、より効率のよい計測手段が求められている。

このような問題点に対して、AE（アコースティック・エミッション）計測は、岩盤の変状部分自体から生ずる信号をもとにしているため、微小レベルでとらえることが可能であり、上述の問題点の多岐にわたり有効な解決手段となり得るものと考えられる。

筆者らは、AE計測を実際の工事の施工管理手段として適用するべく、今まで数回にわたり、原地盤に計器を設置して工事中の計測を実施してきた¹⁾。本報告では、このうち代表的な計測事例である、トンネル坑口部でのゆるみ域のモニタリングと、ダム基礎グラウチングの注入時におけるモニタリングを取り挙げて、AE計測の有効性、問題点について述べてみたい。

2. 測定システム

AE計測システムは、図-1に示すように、基本的にはセンサー群、プリアンプ、シグナルプロセッサ、データ収集処理装置から構成されている。AE情報としては、波形に関する種々のパラメーターがあり、本システムではこれらのパラメーターの取り込みが可能であるが、通常は最も基本的なパラメーターであるイベントカウント計測を中心に行っている。センサーは、被測定対象によって使いわけられており、原位置の岩盤を対象にした場合、せいぜい20～30 kHzまでのものが測定に適していると考えられる。センサーの設置にあたっては、いわゆるウェーブガイドを用いて地表面に設置する方法と、地中に埋設する方法の2種類用いている。ウェーブガイドとしては、φ22mmの鉄筋棒を用い、その先端にAEセンサーを密着させ、防音、防水のためにゴムカバーをかぶせた。また、地中埋設型センサー

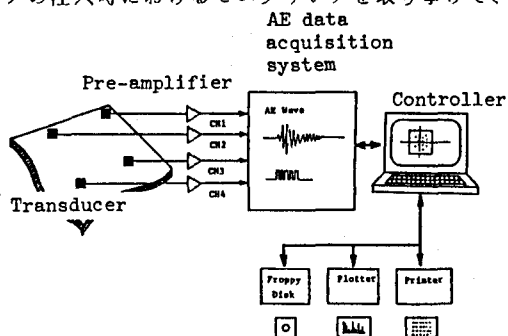


図-1 AE計測システム

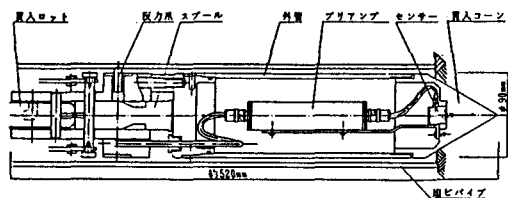


図-2 地中埋設型センサー

は、図-2に示すごとくブリアンプ内蔵型としてボーリング孔底に設置するタイプを新たに試作した。同図に示すごとく、このタイプは先端がコーン状になっており、地表面よりロッドで圧入して固定させることができるようになっている。したがって岩盤等の硬質地盤には適していないが、比較的軟らかい地盤では容易に設置できるし、移設も可能である。コストの面を除けば、地中埋設型はセンサー設置法としてすぐれた方法であり、特に外部雑音の防止の観点からは有効である。

3. トンネル坑口における測定例

計測対象に選定したトンネルは、富山県高岡市で施工された掘削断面約88m²、延長約75mの農道トンネルである。トンネル部の地質は、新第三紀鮮新世最末期の中粒砂岩、砂質シルトおよびこれらの互層からなっており、固結度は低い。トンネル掘削規模に対し、土被りが最大14m程度と非常に小さく、地上に県埋蔵文化財に指定されている遺跡があるため、トンネル掘進にあたっては充分慎重な施工管理が要求された。このため、変形、沈下を防止することを目的として種々の計測が実施された。その一部として、AE計測が採用され、地山の変状の検知が可能かどうかの検討が行われた。図-3に本現場における計器配置断面を示す。AEセンサーは、4個1組とし、図に示すように断面①、②、③について切羽の進行とともに逐次センサーを移設しながらモニタリングを行った。4個1組としてセンサーを配置したのは、見かけ上2次元的位置標定が可能となるからである。なお、センサーは5m間隔の正方形配置とし、図-2に示すような地中埋設型を用いている。また、他の計測法としては、坑口部より水平パイプひずみ計、地表面より傾斜計、沈下板等を併設している。

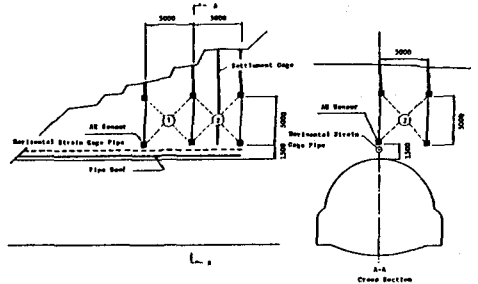


図-3 計器配置断面

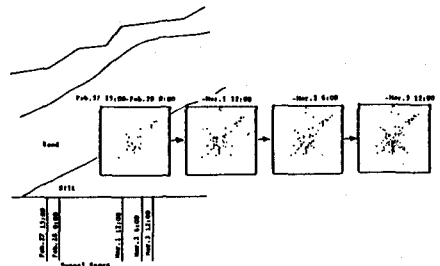


図-4 位置標定（トンネル縦断面）

図-4にトンネル縦断方向（計測断面②）に対するAE位置標定結果を示す。図に示す時間は測定期間を示しており、図中のスポットは測定を開始してからのAE発生位置を示す。ここで一般的傾向としては、切羽が近づいてくるとともに発生域が中央部から上部の方へ移行する傾向がある。これより、砂層とシルト層の境界沿いが比較的ゆるみやすかったと考えられる。また、標定領域の端部で生じた変形は一番離れたセンサーに感知されにくいため、どうしても位置標定の発生源は中央にかたまりやすい。

図-5にチャンネル1およびチャンネル3の計測点における切羽到達前後にわたる掘削時のAE（1時間当りの発生率）の傾向を示す。同図で、横軸は計測点と切羽の距離を示す。すなわち、この値が零の場合は、計測点直下に切羽が到達したことを意味する。この図より、いずれのチャンネルでも切羽が計測点を1.5~2.5m程度通過した時点でAE発生率が最も大きくなることがわかる。AE計測点と同一地点における変形量が求められていないので、完全に同一地点における比較は困難であるが、No-5の計測位置に埋設された傾斜計のデータ（図-6）と比較してみよう。この図では、切羽が計測点を通過した直後から地中変位が増大し始め、1.5m程度通過した時点でやや急激な変形量が発生している。このような傾向はAE特性ともよく一致している。

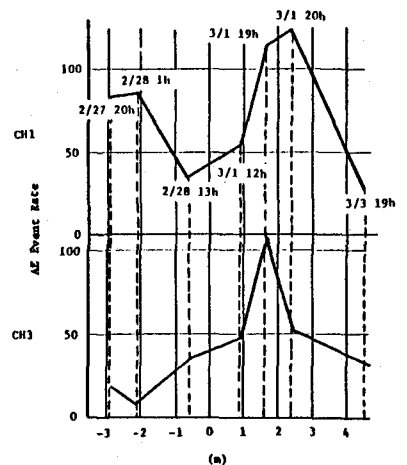


図-5 切羽位置とAE発生率の関係

一般にトンネル掘削時における沈下発生率は、切羽通過直後が最も大きくなるといわれているが、このデータはそのような傾向を裏付けるものであり、掘削時に発生するA Eに着目すれば、切羽進行に伴う地山の挙動が比較的に確に把握されるものと考えられる。

以上の測定結果より、主な指摘事項をまとめると次のようである。

1) 今回用いたA E計測システムおよび地中埋設型センサーによってトンネル掘削時の地山の挙動がモニターできることが判明した。特に、地中埋設型センサーは、外部雑音の影響が極めて小さく測定法としては良好である。

2) 掘削時の発生A Eに着目すれば、切羽が通過した直後にA Eが最も多く発生し、従来から指摘されている切羽通過時の地山の挙動とよい対応が認められた。

3) 位置標定は基本的には可能であるが、モニター領域の適切な選定が必要であろう。今回の試みは不十分なものでありさらに検討を要するが、定性的には地層内の弱部が層境界に沿って発生しやすいことが明らかになった。

4) 施工時の状況から判断して、特に掘削による大きな変状が発生した傾向は認められていない。したがって、危険な徴候となるA E特性は確認することができなかったが、今後、モデルテスト、事例等をさらにふやして、定量的判断が下せるように検討を加えたい。

4. グラウト注入における測定例

ダム基礎岩盤を対象としたグラウチングでは、一般に、ルジオンテストによって岩盤の透水性を確認し、注入圧(P)～注入量(Q)曲線により注入管理を行っている。また、重要な箇所に対しては、岩盤変位計を設置して、変状に対するモニタリングを実施される。しかし、いわゆるP～Q曲線だけの管理では、複雑な岩盤の注入時の挙動を判断するのに十分なデータを提供してくれない。たとえば、注入量の急激な増加が岩盤内の亀裂の拡大、進展に伴う現象なのか、岩盤内空隙に存在する狭雑物の洗い出し等の現象によるのかは、従来のP～Q管理だけでは明確でなかった。特に、注入限界圧の確認は、グラウトの漏出、上部構造物に対する有害変位の防止等の観点から重要な事項である。そこで、筆者らは、い

わゆる岩盤のハイドロフラクチャーの検知にA Eが有効であるとの概念のもとに、A Eを適用して注入時の挙動をモニターし、注入管理をより合理的に行う方法を検討してきた。ここでは、その例と注入管理の一手法について報告する。図-7に、グラウト注入に用いたA E計測システムの概念図を示す。グラウト注入に対しては、計測の簡便性という点を重視して、ウェーブガイド法によりセンサーを設置して測定を実施した。同図は、グラウトトンネル内で実施した例であり、他の現場で実施したものも基本的には大差はない。図-8はその時の位置標定の結果であり、グラウトが進行して行く方向がよく表されている。

図-9に圧力～流量～A E発生率の経時変化を示す。(a)の注入対象地盤は第四紀軽石質凝灰岩に属する軟岩であり、注入限界圧はひじょうに低く、2~3 kg/cm²と考えられていた。同図より、注入開始後約2800秒経過した時点で著しいA Eの増加および流量増加が認められ、岩盤がハイドロフラクチャーしたことを示

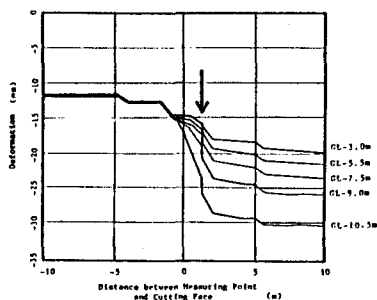


図-6 切羽位置と地中変位の関係

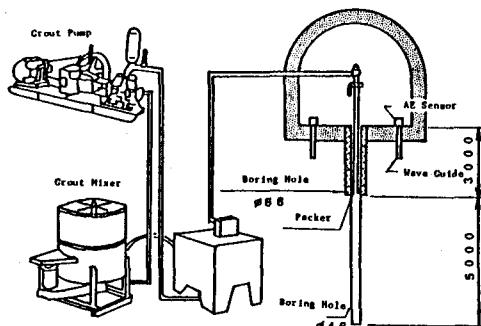


図-7 グラウト注入におけるA E測定概念図

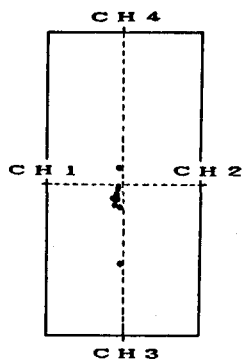


図-8 グラウト注入における位置標定

している。また、(b)に示す例は、第三紀の凝灰質角礫岩から成るかなり亀裂の多い岩盤に対する測定結果を示した。この場合、注入限界圧は 10kg/cm^2 以上と考えられているが、40分前後（注入圧を 3kg/cm^2 から 5kg/cm^2 に加圧した時点）で流量の増加が認められる。しかし、AEの発生は、20分前後、40分前後に認められ、流量増加とはっきりした相関性を示していない。そして、この例はいわゆる狭雑物の洗い流しに近い例だと判断された。これらの典型的な2ケースを、無次元化したP～Q～AE曲線上で比較するとその差をよりはっきり示すことができる。すなわち、P～Q曲線上である圧力で急激に流量増加を示し、同時にAE発生率も増加する場合は、ハイドロフラクチャーに近い現象が生じている場合である（図-10(a)）。一方、流量が増加しているにもかかわらず、AEの増加が顕著に測定されない場合は、狭雑物の洗い流しに近い現象が生じていると判断される（図-10(b)）。このような概念のもとに、筆者らは岩盤の注入特性の分類を試みた（表-1）。

このように、注入時の挙動のモニタリングとしてAEを用いれば、岩盤に有害な破壊を生ぜしめるハイドロフラクチャーの防止、岩盤の注入特性の把握が可能となる。実際のグラウト注入フローの中でAEの適用性に関して、現在考えられる方法は、いわゆる本注入に先立って実施される透水試験時にAE測定を実施して、上述したような注入限界や注入特性に対して適正な判断を下せるようにすること、および、実際のグラウト注入段階でのモニタリング手法として用いる等施工条件、重要度に応じて対応が可能となろう。

5. おわりに

原地盤におけるAEの適用性に関しては、今まで示した例でわかるように、その有効性はひ

じょうに大きい。しかし、現在の時点でさらに検討を要すると思われる事項は、変状計測として、より定量的な判断が下せるようにする点である。例えば、トンネルの場合、どの程度のAE発生率がほんとうの危険な状態なのかを明らかにすることであろう。このためには、雑音とAE信号の分離をより明確にし、発生レベルのランク付けを行う等の管理規準の概念が必要となる。今後さらにデータの集積を行いたい。

参考文献 1) 例えば T.Ueda et.al., 7th Int. AE Sympo. PP.706-714, 1984
 2) 上田他, 第20回土質工学研究発表会 PP.113-116, 1985

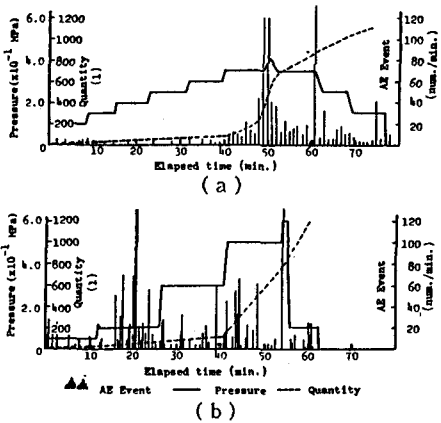


図-9 圧力～流量～AE発生率の経時特性

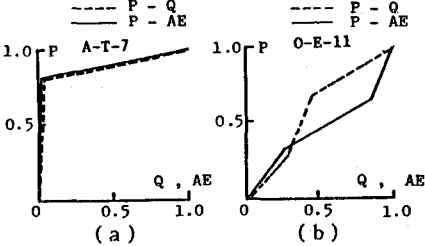


図-10 無次元化したP～Q～AE曲線

表-1 注入特性の分類

タイプ	無次元化したP～Q～AE関係	特徴	例	岩質
1		安定な注人 注人圧力、注人量、AEカウントレートが増加する。 岩盤は安定である。		中硬岩
2		永圧破壊 ある圧力レベルに達すると注人量、AEカウントレートともに急激に増加する。		軟弱岩 亀裂の多い岩盤、部分的に開口亀裂が存在する。
3		洗い流しまたは破砕 注人圧力が増加するにつれて注人量は増加するがAEカウントレートはそれほど変化しない。		狭雑物を有し
4		閉塞 注人圧力が増加するにつれて注人量、AEカウントレートともに減少する。		亀裂に富む岩

注 釈 : ----- 注人圧力-時間注人量
 ———— 注人圧力-AEカウントレート

(16) Application of acoustic emission to the monitoring of rock mass behavior

by

T. Ueda, H. Naksaki, M. Takahashi
(Takenaka Technical Research Laboratory)

S. Suzuki, Y. Kanzaki
(Takenaka Doboku Co., Ltd.)

Abstract

In this paper, acoustic emission monitoring system and its application technique in the field are stated which have been developed by authors in a couple of years. First, an example of monitoring which was carried out at the site of tunnel excavation was presented. In this site, newly developed buried type transducers were installed and acoustic emission due to tunnel excavation was monitored. Through monitoring, source location detection and the relationship between event count rate emitted during excavation and position of cutting face are studied. From this trial, it is pointed out that the acoustic emission tends to occur along the boundary layers which is mobilized by excavation and also, event count rate increases when cutting face just passes through the position where the AE transducers are installed. Secondly, monitoring results which are carried out during pressure grouting in rock masses at the dam sites are shown. Through these trials, hydraulic fracture which takes place during pressure grouting is found to be detected by acoustic emission characteristics and injection pressure-injected volume curve (P-Q curve) obtained by water pressure tests.