

山はねを伴うトンネル工事への AE モニタリングの適用

長谷川 温^{1*}・細川嘉一¹・森 孝之²・竹市篤史³・藤井宏和⁴

¹国土交通省 中部地方整備局 紀勢国道事務所（〒519-3671 三重県尾鷲市矢浜4-921-1）

²鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

³鹿島建設株式会社 名古屋支店（〒460-0004 名古屋市中区新栄町2-14）

⁴株式会社LAZOC（〒113-0033 東京都文京区本郷3-40-9）

*E-mail: hasegawa-o85aa@cbr.mlit.go.jp

山はね現象に遭遇する地山のトンネル掘削工事では、山鳴りを伴い岩盤の剥離や小崩落などに悩まされ、作業の安全確保に苦慮する。山はね現象が発生する際には岩盤内で微小破壊音(AE: Acoustic Emission)が発生し、予兆段階からその発生数が増大すると考えられる。そこで微小破壊音に注目し、掘削中に発生するAEを計測して危険度を判定・警報を発するAE自動監視システムを構築した。本論文では、監視システムを紹介するとともに、山はね現象を伴うトンネルとして三重県熊野尾鷲道路の新八鬼山トンネル(熊野尾鷲道路第5トンネル三木里工区)の掘削工事に適用し、危険度の判定方法、トンネル掘削中のAE計測結果の特徴と安全管理について報告する。

Key Words : rock burst, rock noise, tunnel, granite porphyry, acoustic emission, monitoring

1. はじめに

大音響とともに掘削したトンネル壁面から突然岩片が飛び出してくる現象は「山はね」と呼ばれており、岩盤の飛び出しはないものの地山がきしむ音や破壊音などのような音響が聞こえてくる現象は「山鳴り」などと呼ばれている。我が国において過去に山はね現象に遭遇したトンネル掘削工事では、山鳴り現象を伴い岩盤の剥離や小崩落、吹付けコンクリートのひび割れなどに見舞われており、作業の安全に苦慮している¹⁾²⁾³⁾。

山はね現象のメカニズムは十分に解明されている訳ではないが、硬岩で地質が良好な地山において、高地圧・偏圧条件下でトンネル掘削により壁面岩盤周辺に二次応力が形成される過程で岩盤に蓄積される弾性ひずみエネルギーが岩盤の破壊を伴って放出される現象であると推察される。ボーリングにおけるコアディスキング⁴⁾やボアホールブレイクアウト⁵⁾も山はねと関連した現象であると考えられる。

山はねを伴うトンネル工事において特に懸念されることは岩盤の飛び出し等により被災することで、作業の安全確保が施工管理上の課題となっている。したがって、施工中に山はね現象を予知することができれば切羽作業の安全確保に寄与することができる。山はね現象が発生する際には岩盤内で微小破壊音(AE: Acoustic Emission)が発生し、予兆段階からその発生数が増大すると考えられ

ている⁶⁾。なお、海外ではAEの他にMS(Micro seismic)などとも呼ばれている。

そこで微小破壊音に注目し、掘削中に発生するAEを計測して危険度を判定・警報を発するAE自動監視システムを構築した。本論文では、監視システムを紹介するとともに、危険度の判定方法、トンネル掘削中のAE計測結果の特徴と安全管理について報告する。

2. 適用したトンネルの概要

熊野尾鷲道路は三重県熊野市と尾鷲市を結び、近畿自動車道紀勢線と一体となって機能する自動車専用道路である。東紀州地域は全国有数の豪雨地域(年間降雨量約4,000mm)であり、熊野市から尾鷲市に至るほとんどの地域が雨量規制区間となっていることから、台風や自然災害時などの代替路線の確保と定時性の向上が期待されている。熊野尾鷲道路第5トンネル(新八鬼山トンネル)は、この熊野尾鷲道路のうち、尾鷲市街地と三木里町を結ぶ全長約4kmの道路トンネルである。トンネルの地質縦断図を図-1に、坑口の状況を写真-1に示すが、坑口部から急峻な地形となっており、土被は最大400m程度となる。トンネルの地質は熊野酸性岩類のうち花崗斑岩(黒雲母花崗斑岩)が主体で構成されており、この花崗斑岩は新第三紀に酸性マグマの巨大な溶岩湖が冷却・固結

したもの⁷⁾、あるいはコールドロン構造内のシート状貫入岩体⁸⁾とされ、三重県南部～和歌山県東部の紀伊半島南端部東側に分布している。その規模は約60km×20kmに及ぶ。トンネル坑口部付近には風化した花崗斑岩が分布するが、全体的に地山区分B～C I級の比較的堅硬な花崗斑岩が主体である。また、同地域に過去に建設された311号線八鬼山トンネルでは、施工時に山はね現象に見舞われており、これと同じ地質の当トンネルの掘削工事においても山はね発生の可能性が示唆されていた。

当トンネルは本坑に加え避難坑が併設され、本坑は掘削断面積が85～106m²、掘削幅が13～15mと大断面である(図-2)。工事は避難坑を先行して掘削したが、避難坑の掘削において山鳴り現象が認められた。本坑は避難坑より断面規模が格段に大きく、山はね発生時の被害が懸念された。そこで、AE計測による山はね監視は本坑を対象として、山はねが多く発生すると予想される本坑切羽を対象に計画した。

3. 予備計測

予備計測では本計測での測定条件の設定値を決めるた

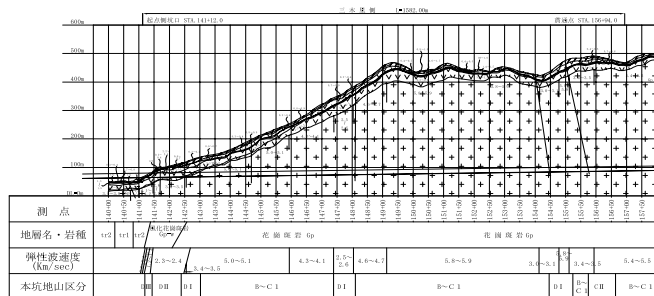


図-1 地質縦断面図(三木里側)



写真-1 新八鬼山トンネル坑口(三木里側)

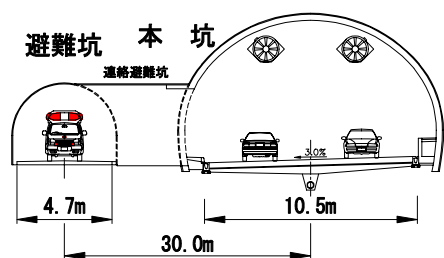


図-2 新八鬼山トンネル断面図

め、岩盤内から発生するAE、掘削作業による振動等の現場環境ノイズ状況を調査した。AEを捉えるためのセンサ(測定周波数帯3Hz～10kHzの加速度計)は、トンネル切羽近傍に設置することが最も有効であるが、その反面、発破に伴うセンサやケーブルの破損に対する対策も必要となる。そこで、センサは避難坑の本坑側側壁から本坑切羽側に向けて20m間隔に4個で配置した(図-3下の配置図参照)。

予備計測の結果、本坑切羽発破後にAEが発生することが確認された。図-4は本坑切羽発破後に観測されたAE波形の例で、同図の上に示した波形が比較的周波数の高い例、下が比較的低い例である。各波形のFFT結果をみると、同図上の波形は2000～3500Hz程度の成分が主であり、同図下の波形は数百Hz程度の成分が主である。また、これらのAEは発破後5分以内にはほとんど沈静化することが確認された。一方、トンネル切羽で行われる削孔、コソク等の作業により大量のノイズ振動もセンサに受振されるが、これらの振動は、図-5に示すように周波数は数100Hz程度であり岩盤内から発生するAEと類似していることが分かった。このため、周波数フィルターで両者を分離することや、波形の形状から両者を自動判別⁹⁾することは難しいと判断された。したがって、AEモニタリングは本坑切羽での作業振動がほとんど発生せず、かつ、山はねの発生する可能性が最も高い発破直後を集中的に行うのが効率的であると判断した。

また、予備計測では、岩盤の波動の距離減衰状況を調べるために、切羽進行とともに数回のハンマー打撃発振を行った。図-3上はそのときの受振波形の振幅値を示したものであり、同図下は発振位置とセンサ配置の一例を示したものである。同図によると、受振距離が30m離れるに従い振幅値は約1/30に減衰する。今回の計測では微小なAEの取りこぼしを極力少なくするために、アンプの増幅、しきい値の設定等を勘案し、切羽から約40m程度の領域をカバーするセンサ配置にすることとした。

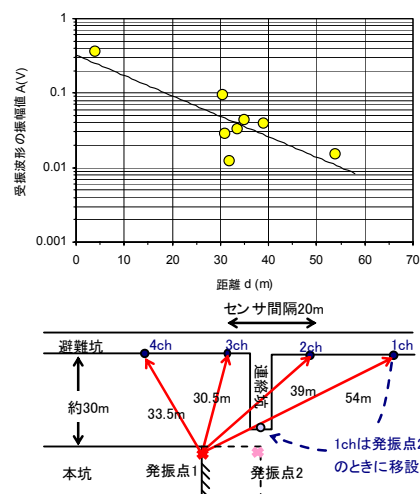


図-3 受振波形の減衰状況およびセンサ配置

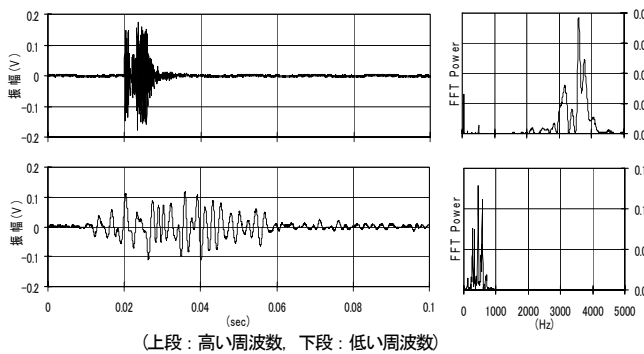


図-4 AE波形例

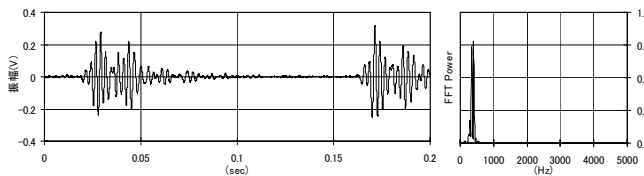


図-5 作業振動波形例(コソク作業)

4. 山はねAEモニタリング

(1) AEによる安全管理

過去の事例や予備計測の結果からAEモニタリングは発破直後5分を対象に集中的に監視する「発破後計測」を行うことにした。加えて、「発破後計測」以外も計測することとし、この計測は「発破後計測」と識別させるために「常時計測」と呼ぶことにした。

「発破後計測」と「常時計測」の山はねに対する安全管理レベルを表-1に示す。レベルは危険度に応じて3つに分けて設定し、各安全管理レベルに応じた安全対策をあらかじめ決定しておき、判定結果に応じて実施した。

「発破後計測」では、各レベルは単位時間当たりのAE発生数(イベント計数法)から設定した管理基準値から判定するようにしている。この管理基準値はAEの発生状況と山はね(山鳴り)の発生状況で決めるべきであるが、その相関関係が不明であるため、まずは暫定的に管理基準値を決定し、その後AEデータと山はねの発生状況の収集に伴い、適宜見直していくことにした。「常時計測」では、作業音などのノイズ振動とAEの識別が容易でないことから、常時計測される作業音以上のAEが計数された場合を危険とみなし、その発生数を管理基準値とした。すなわち、AEの大量異常発生を感知した場合にのみ警報を出すこととした。このため、常時計測の管

理基準値は作業振動の感知分を上乘せしたものとし、またAEイベントカウントではなく、AEリングダウンカウントを用いた。AEモニタリングによる山はねに対する安全管理の流れを図-6に示した。

(2) モニタリングシステム

システムは4チャンネル用で、チャージアンプ内蔵加速度センサ(測定周波数帯3Hz～10kHz)、アンプ・フィルタユニットおよびトリガーユニットから構成されている。加速度センサで検知した信号は、伝送線を経由してアンプ・フィルタユニットで整形された後、トリガーユニットへ送られる。そして、トリガーレベルを超えたAE信号はパソコンに転送され解析される。この計測結果に基づいて自動で管理レベルが判定され、判定に応じてスピーカを内蔵した回転灯から警報が発せられる(図-7)。警報については、各管理レベルに応じて、音量、回転灯の色を変えるようにしている。写真-2にモニタリングシステムの外観を示した。モニタリング中は図-8に示すように、通常時は常時計測用の管理基準を用いてレベルを判定する「常時計測」を行っており、発破振動による大振幅信号をセンサが感知した場合に、発破後計測用の管理基準を用いてレベルを判定する「発破後計測」に自動で移行するようになっている。そして、AEの発生が所定の時間内に収まった場合には、再び自動で常時計測に移行する。

(3) モニタリングシステムの設置方法

モニタリングシステムは図-9に示すように掘削作業の

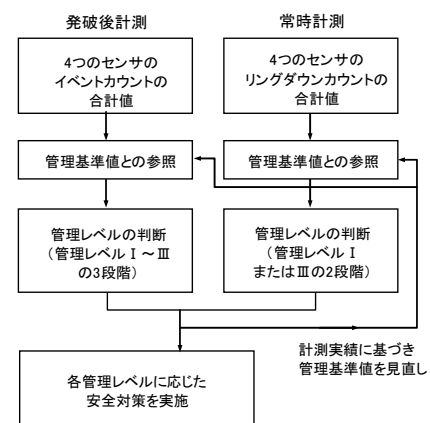


図-6 AEモニタリングによる山はね監視フロー

表-1 管理レベル一覧

管理レベル	AE発生状況および切羽の状態	警報装置の動作	安全対策	発破後計測の管理基準値	常時計測の管理基準値
レベルⅠ	AEの発生が少ない。また、山鳴りおよび山はねが観察されない。	青色点灯 (安全サイン)	—	—	—
レベルⅡ	AEが発生し、山鳴りおよび山はねが観察されるが、その程度は軽微である。	黄色点灯 (注意警報)	地山の監視を強化し、掘削作業を進める。	イベントカウント: 5分間で25以上	—
レベルⅢ	AEが顕著に発生し続け、収束傾向がみられない。また、山鳴りおよび山はねが観察される。	赤色点灯+警報音 (退避警報)	掘削作業を中断し、退避を行う。長時間続く場合は、甲乙協議の上、対策工を検討する。	イベントカウント: 5分間で100以上	リングダウンカウント: 1分間で440000以上

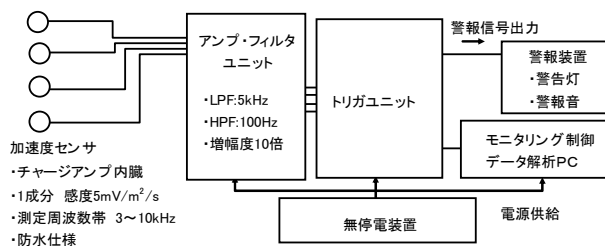


図-7 モニタリングシステムの構成



写真-2 モニタリングシステムの外観

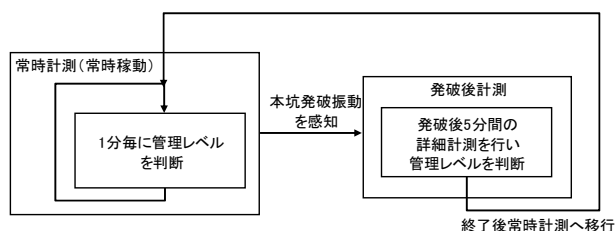


図-8 計測ルーチンの概要

妨げにならない連絡坑に設置し、警報装置は発破点火所付近に設置し、切羽作業員が判定結果をすぐに確認できるようにした。加速度センサは同図に示したように避難坑の本坑側壁面にアンカーおよびボルトを使用して設置した。加速度センサの取り付け面は磁石になっており、盛り替え時の着脱が容易である。センサの盛り替えは作業員1名ででき、要する時間は信号線の延長、ハンマードリルによる削孔、アンカー打設、センサ取付けまで10分程度である。加速度センサは予備計測結果を参考にして、切羽から約40m程度の領域をカバーするために、センサ間隔を10mとして4箇所配置し、常に本坑の切羽が4つのセンサ列の概ね中心に来るよう、切羽の進捗に伴い、順次盛替えて移設した。

5. AEモニタリングの実施結果

(1) AE計測と山はね現象の実績

AEモニタリングは山はね現象の発生が想定された被

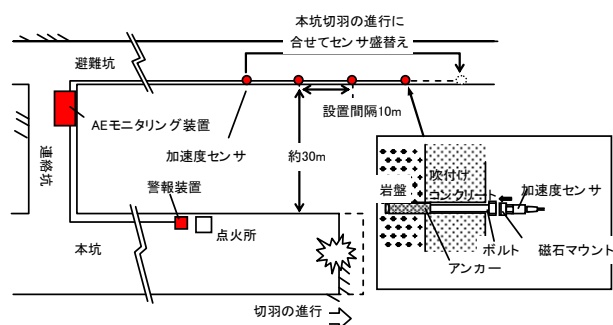


図-9 モニタリングシステムおよびセンサの設置

り深さが370mと大きい測点150+45.1~154+15.1の間で行なった。図-10に2006年7月20日~2006年10月12日の計測期間中の各日において、その日に行われた2~3回程の発破後計測のうち、最大のAE発生数をイベント計数法で示した。このAE発生数は発破後5分間の4つのセンサの累計値を棒グラフで表わしており、同グラフには、切羽において測定員や作業員が山はねを確認した場合を棒グラフの頭に丸印で示している。また、切羽評価点による岩盤状態の推移を合せて図示した。

山はねの発生状況を見ると、測点151+07.1~152+21.1と測点152+73.1~153+61.1の2つ区間では、山はね現象が多く確認されているが、岩塊が爆発的に飛び出すなどの大規模な山はね現象ではなく、図-11の切羽観察表の文章のように、山鳴りや大きな音とともに岩塊が抜け落ちる等の軽微な山はね現象である。これらの区間の管理レベルの判定およびAE発生数を見ると、レベルⅡまたはレベルⅢと判定された切羽が大半であり、AE発生数は概ね25個/5分~90個/5分を示し、160個/5分以上を示す場合も認められた。このように、山鳴り・山はねが認められた切羽ではAE発生数が増加する傾向が認められ、AE発生数と山はね現象とは良い相関性を持っている。次に、切羽評価点の推移を見ると、山鳴り・山はねが認められた区間では切羽評価点が良好である。すなわち、比較的堅硬で亀裂の少ない岩盤においてAEおよび山はね現象が多く発生する傾向がある。

(2) 発破後に発生するAEの経時変化

図-12に発破後計測および常時計測により得られたAE発生状況の経時変化を示した。同図の左は測点151+51.1(2006年8月9日)の切羽発破後の計測結果を示したものである。この記録では発破後0~5分間のAE累計値は91個であり管理レベルⅡと判定されたが、発破後5分以降は発生数が急激に減少している。また、同図の右側は測点152+87.1(2006年9月16日)の切羽発破後の計測結果を示したものである。この切羽は最もAEが発生した箇所の一つであるが、同図に示すように、発破後0~5分間のAE累計値は161個で管理レベルⅢを超過し

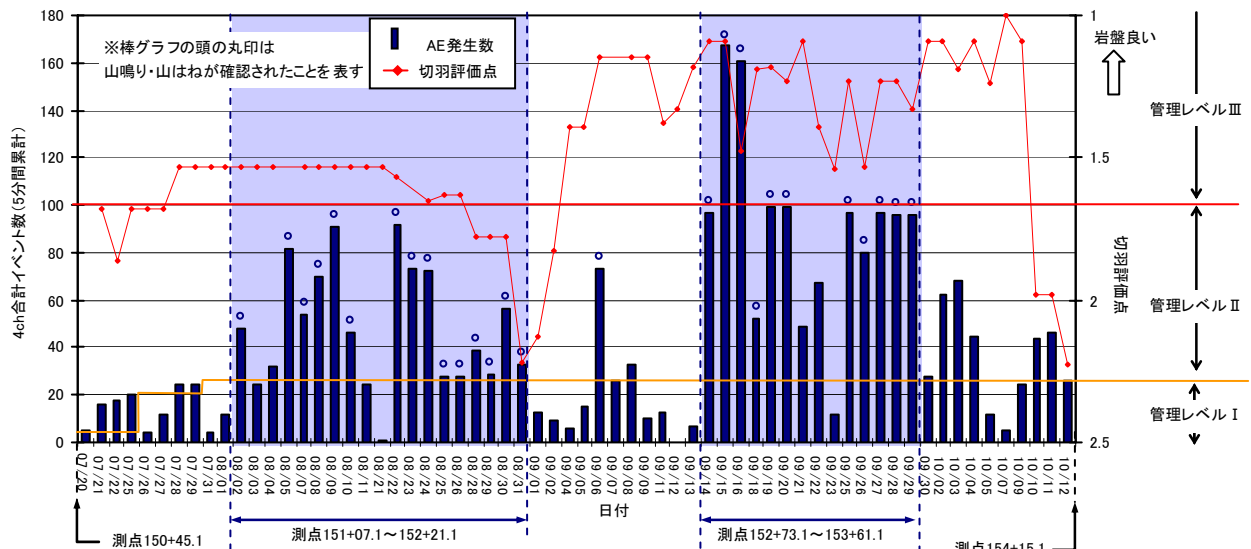
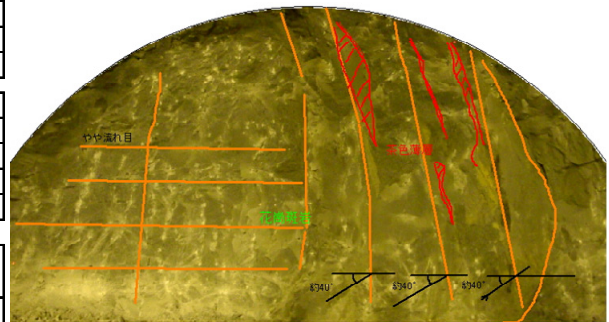


図-10 AE モニタリング結果

工 事 名					平成16年度 熊野尾鷲道路第5トンネル三木里工区建設工事					
掘削年月日		平成18年8月25日			Fri					
支保工 No.		716		測点 No.		151+93		坑口からの距離(m)		1081.05
土 被 り (m)		365		総合判断		地 山 区 分		C I		
岩 種		深成岩				支 保 パ タ ー ン		B-a		
岩 石 名		花崗斑岩		形成地質時代		新第三紀				
特 殊 条 件		膨圧・偏圧・流動性・土被り小・重要構造物接近・谷の直下・その他(下段に文章で記載)								
状 態										

掘削地点の地山の状態と挙動						
A	切羽の状態	①安定	2.鏡面から岩塊が抜け落ちる	3.鏡面の押出しを生じる	4.鏡面は自立せず崩れあるいは流出	5.その他
B	素掘面の状態	①自立	2.時間がたつと緩み肌落ちする	3.自立困難、掘削後早期に支保する	4.掘削に先行して山を受けておく必要がある	5.その他
C	圧縮強度	① $\sigma_c \geq 1000 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃は返る	2. $1000 > \sigma_c \geq 200 \text{ kgf/cm}^2$ ハンマー打撃で砕ける	3. $200 > \sigma_c \geq 50 \text{ kgf/cm}^2$ 軽い打撃で砕ける	4. $50 \text{ kgf/cm}^2 < \sigma_c$ ハンマー刃先くいこむ	5.その他
D	風化変質	①なし・健全	②割目に沿って着色、強度やや低下	3.全体に着色、強度相当低下	4.土砂状、粘土状破砕当初より未面結	5.その他
E	割れ目の頻度	①開隔 $d \geq 1 \text{ m}$ なし	② $1 \text{ m} > d \geq 20 \text{ cm}$	3. $20 \text{ cm} > d \geq 5 \text{ cm}$	4. $5 \text{ cm} > d$ または破砕当初より未面結	5.その他
F	割れ目の状態	①密着	②部分的に開口	3.開口	4.粘土を挟むまたは当初より未面結	5.その他
G	割れ目の形態	①なし、ランダム	②柱状	③層状、片状、板状	4.土砂状、細片状、当初より未面結	5.その他
H	湧 水	①なし、滲水程度(1l/min)	2.滴水程度(1~20l/min)	3.集中湧水(20~100l/min)	4.全面湧水(100l/min以上)	5.その他
I	水による劣化	①なし	2.ゆるみを生じる	3.数軟弱	4.崩壊・流出	5.その他
J	地山強度比(換算)	1. $1.0 > K$	② $2.0 > K \geq 1.0$	3. $3.0 > K \geq 2.0$	4. $4.0 > K \geq 3.0$	5. $K \geq 4.0$
K	土被り(小)	1. $20 \text{ m} > D$	② $50 > D \geq 20$	3. $100 > D \geq 50$	4. $200 > D \geq 100$	⑤ $D \geq 200$



支保工変状	①なし	2.変形	3.座屈	
収付クラック	①なし	2.クラックあり	3.顕著なクラック	4.せん断クラック
ボルト異常	①なし	2.押し出し発生	6.コンクリート剥落	7.脱落
インパート部異常	①なし	2.破損	3.顕著なクラック	4.せん断クラック
二次覆工の変状	1.なし	2.クラック発生	3.顕著なクラック	4.せん断クラック
	5.破損			

記事

切羽は上半全断面が花崗斑岩で占められている。大部分はハンマーの打撃では返るほどの健岩である。
柱状の節理は鏡面との角度 $30^\circ \sim 45^\circ$ で右方向に入射するものが左半部に4条確認できる。これらは茶色の粘土層をはさんでおり、やや湿潤状態である。
時折「山はね」が観測され、大きな音とともに岩塊が抜け落ちる。特に粘土層が挟まれた右半部で顕著にみられる。

図-11 切羽観察結果例

ているが、その後の AE 発生数は漸減し、1 時間以内でレベル I 未満のレベルまで沈静化している。これらの例のように、当トンネルの AE 計測では、多くの場合、発破後 5 分以内に AE の発生は収束し、長くて 1 時間以内には沈静化している。また、作業を中止して退避となるレベル III を超過したのは 2 回であったが、これらの場合でも AE が多く発生したのは発破直後の 5 分間であり、発破後 10~15 分で管理レベル III は解除されるに至った。なお、発破時以外の時間帯の常時計測においても AE が爆発的に発生することは無く、退避が必要な管理レベル III と判定されるケースはなかった。

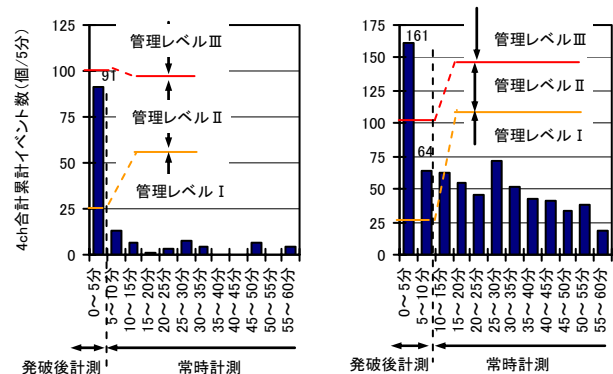


図-12 AE発生状況の経時変化

6. まとめ

山はね現象が生じる恐れのあるトンネル掘削工事において、岩盤の微小破壊音であるAEに着目し、掘削中に発生するAEの発生数を計測して、危険度に応じた警報を発するAE自動監視システムを構築し、掘削中の安全管理を行った。その結果を以下にまとめた。

①AE発生数を管理基準として、山はねに対する安全管理レベルを設定した。この管理レベルの判定結果は、モニタリングシステムから警報装置で切羽付近の作業員に通報された。

②AEは発破直後に多く発生するが、多くの場合は5～10分、長くても発破後1時間程度で沈静化した。また、発破を行わない時間帯の常時計測においてもAEが爆発的に発生することはなかった。実際の切羽では、山鳴りは多く発生したものの、山はねは小岩塊が抜け落ちる程度の軽微なもので、岩塊が飛び出すような現象は見られなかった。

③作業員が体験した山はね・山鳴りの発生箇所では多くのAEカウント数が計測され、両者には良い相関性がみられた。また、山はね・山鳴り現象と切羽評価点と関連を見ると、岩盤性状としては堅硬で亀裂の少ない箇所にAEは多く発生している傾向があった。

④当該トンネルにおいて山はねの発生する原因は明らかではない。土被りは最大400mであるが特段に高土被りと言う訳ではなく、土被り200m程度でも山鳴りが発生した。当該トンネルの地質は熊野酸性岩をなす花崗斑岩であるが、熊野酸性岩は堆積岩層を貫いて形成されており、岩体形成時の残留応力と山はね現象との関係が推察される。

⑤AEモニタリングによる山はね発生時刻の予測は困難である。しかし、AE計測により予兆的な段階を把握し作業員側に情報を伝達することで、作業の安全性向上に

寄与でき、モニタリング手法としては有用である。なお、今回実施したモニタリングでは、大規模な山はね現象の発生がみられなかったこともあり、AE発生数と山はね発生関係を定量化するまでには至っていない。確度の高い危険度の判定のためには、定量化に基づいた管理基準を設定することが望ましく、今後は、現場での実現象を蓄積し、これらを総合的に勘案して判定基準を設ける必要がある。

参考文献

- 1) 畠山重治：大清水トンネルの施工，土木施工，第23巻5号，pp.27-38，1982.4.
- 2) 山本市治，多賀直大：3年間で谷川連邦を貫く，関越自動車道関越トンネル(Ⅱ期線)，トンネルと地下，第21巻2号，pp.29-37，1990.2.
- 3) 望月常好，穂刈利夫，斉藤義信，桑田俊男：土かぶり200mで山はね現象に遭遇，国道140号雁坂トンネル，トンネルと地下，第21巻9号，pp.28-36，1990.9.
- 4) 菅原勝彦，亀岡美友，斎藤敏明，岡行俊，平松良雄：コアディスキング現象に関する研究，日本鉱業会誌，第94号，pp.797-803，1978.11.
- 5) R.S.Read, C.D.Martin : Technical Summary of AECL's Mine-by Experiment Phase I: Excavation Response, *AECL-11311, COG-95-171, Whiteshell Laboratories, Pinawa, Manitoba*, 1996.
- 6) R.P.Young, D.S.Collins: Seismic studies of rock fracture at the Underground Research Laboratory, Canada, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. Vol.38*, pp. 787-799, 2001.
- 7) 荒巻重雄：熊野酸性火成岩類の噴出様式，地質学雑誌，第71巻842号，pp.525-540, 1965.11.
- 8) 川上裕，星博幸：火山—深成複合岩体にみられる環状岩脈とシート状貫入岩：紀伊半島，尾鷲—熊野地域の熊野酸性火成岩類の地質，地質学雑誌，第113巻7号，pp.296-309, 2007.7.
- 9) 田仲正弘，金川忠，森孝之，福田真，杉村亮二，丹野剛男：岩盤斜面安全監視のためのAE自動化システムと岩盤破壊判定法，地すべり学会，第39巻1号 pp.70-76, 2002.6.

APPLICATION OF AE MONITORING FOR ROCK BURST AND ROCK NOISE PHENOMENON UNDER TUNNEL CONSTRUCTION

On HASEGAWA, Yoshikazu HOSOKAWA, Takayuki MORI,
Atsushi TAKEICHI and Hirokazu FUJII

In a tunnel construction which causes rock burst occasionally, a safety is threatened by exfoliation and small collapse of rocks. It is presumed that a rock-burst generates AE (i.e. Acoustic Emission) predictively from an early stage with a gradual increase in AE events in excavation progress. The authors group developed the automatic AE monitoring system which is: 1) To detect and analyze AE signal, 2) To log and categorize a level of danger in accordance with pre-examined program, 3) To give an immediate warning to workers. In this paper, we report on the application of the said system to the construction of Sin-yakiyama tunnel, the result of safety control, and the summary of AE measurement and its analysis.