

## トンネル掘削にともなう山はね現象の計測

Investigations with respect to Rock Burst  
occurred in Excavation of Tunnels

石山 宏二\*  
Koji Ishiyama

平田 篤夫\*\*  
Atsuo Hirata

稲葉 力\*\*\*  
Tsutomu Inaba

### 要 約

硬岩中をトンネル掘削する場合、山はねが発生することは、安全施工管理上重要な問題となる。しかも、その発生機構に関しては不明な点が多い。

掘削時に山なりおよび山はねが観察された関越トンネルと雁坂トンネルにおいて、AE計測および岩盤応力測定が実施された。

AE計測は、岩盤の巨視的破壊に先立ち微小破壊が頻発する現象を測定するものであり、対策工の必要性やその程度に対する検討資料となった。また、潜在割れ目に作用する岩盤応力がすべり破壊基準を満足すれば、土被り圧に拘わらず山はねが発生する可能性があることがわかった。

### 目 次

- §1. はじめに
- §2. 関越トンネルにおける山はね
- §3. 雁坂トンネルにおける山はね
- §4. おわりに

### §1. はじめに

関越トンネルでは、一期線工事で既に山はねを経験しているため、二期線でも発生する可能性が高いと考え、着工当初から山はね対策について検討を重ねてきた。そこで、安全施工管理対策の一環として一期線工事で試験的に実施され、山はねを事前予知する可能性が高いと判断された AE 計測を日常管理に採用した。また雁坂トン

ネルにおいても、山はね発生を確認後、AE計測を実施している。さらに両トンネルでは、山はねが頻発した地点において応力解放法による岩盤応力測定を行った。雁坂トンネルでは、この他に岩石試験、先行ひずみ測定、B計測、坑内弾性波探査を同位置で実施しているが、ここでは主に両トンネルで共通に行った AE 計測および岩盤応力測定結果について考察する。

AE (アコースティックエミッション) とは、材料が微小破壊過程で解放エネルギーの一部を弾性波動エネルギーとして放出する現象である。微小破壊が進行しマクロな主破壊に至るという破壊過程を前提として、AE は各種材料の破壊予知に用いられている。岩盤の破壊様式が地震と同様な破壊過程を有するとすれば、山はねと AE の関係は、地震予知における本震と前震現象のそれと本質的には同等といえ、AE は山はねの予知に有効と考えられる。すなわち、観測される AE は、山はねと同様な発生機構に基づいたものと考えることができ、巨視的な破壊に先立ち発生する AE は、対策工の必要性やその程

\*技術研究所土木技術課  
\*\*技術研究所土木技術課係長  
\*\*\*技術研究所土木技術課副課長

度を検討するための重要な指標となりうる。

トンネル掘削に伴い、山はねあるいはAEが発生するには、壁面近傍における応力集中が必要条件であると考えられる。しかし、土被りを考慮した連続体弾性論に基づく空洞周辺の応力集中のみでは、岩石の破壊基準に対し必ずしも十分とはいえない。そこで、潜在割れ目に作用する岩盤応力を球状孔底ひずみ法により求めた応力値から算定し、切羽を含むトンネル壁面周辺岩盤の安定性を評価する。

## § 2. 関越トンネルにおける山はね

### 2-1 岩盤および山はね状況

関越トンネルは、Fig.1 に示すように谷川岳直下に施工された長さ11kmの道路トンネルであり、土被りは最大1200mに達する。岩盤は主に堅硬な石英閃緑岩から構成され、供試体の一軸圧縮強度は約200MPaである。トンネル掘進に伴う切羽観察から、湧水はほとんど認められず、岩盤は新鮮であることが多い。図中の約2.3km区間に

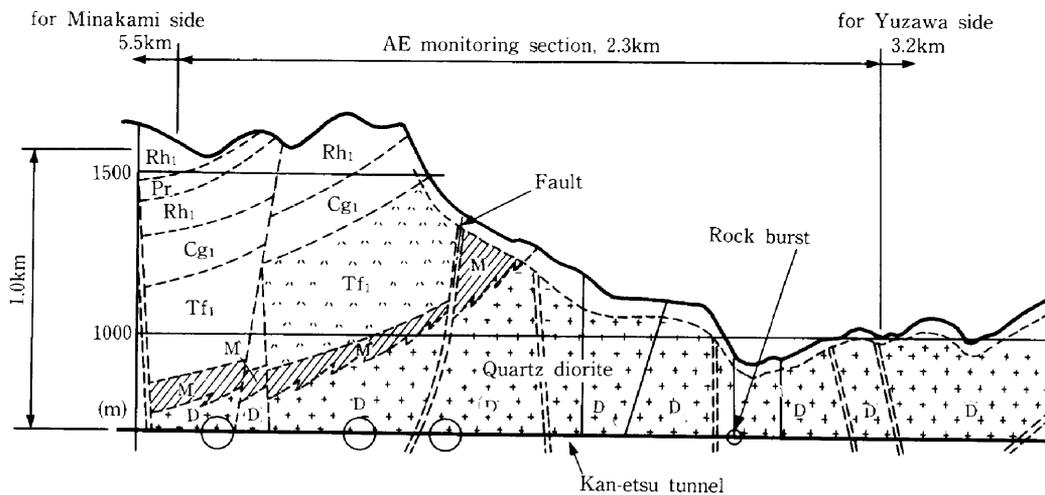


Fig. 1 Geological profile for Yuzawa side in Kan-etsu tunnel, D:Quartz diorite, M:Hornfels, Tf:Tuff, Rh;Rhyolite. Circles show that rock burst occurred at the tunnel face of these points.

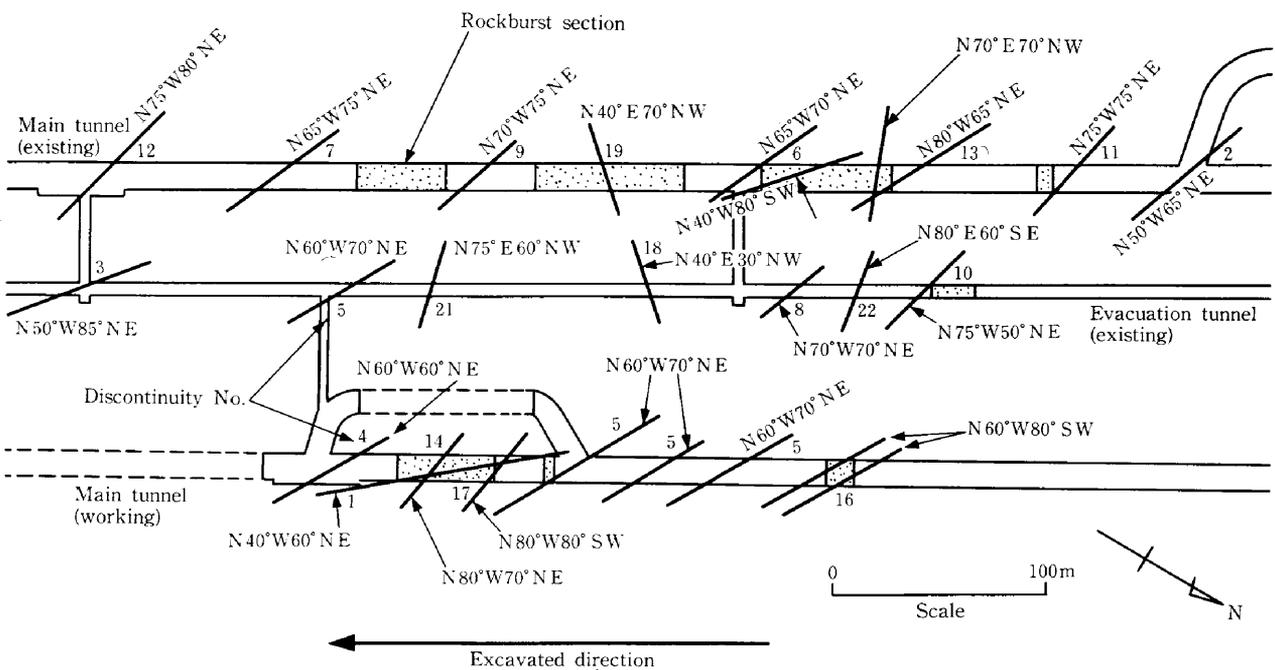


Fig. 2 Zones with the danger of rock burst and plane view of major geological discontinuities.

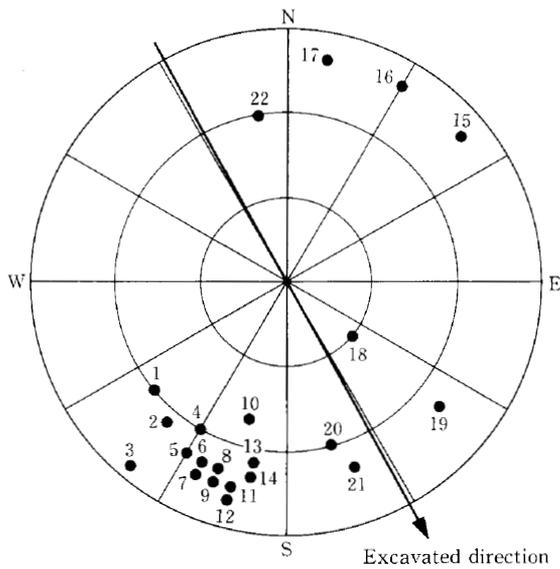


Fig.3 Poles of major geological discontinuities surrounding test site.

亘って AE 計測を実施した<sup>2)</sup>。円は山はねが発生した位置を示す。山なりはこの計測区間において断続的に発生し続けた。山はね・山なりが頻発した危険区間のトンネル平面図および卓越した割れ目を Fig.2 に示す。また、Fig.3 は、Fig.2 の割れ目番号に対応した割れ目の下半球投影図である。トンネル掘進方向に対し 40~50 度の角度で斜交している割れ目系とそれに共役な割れ目系が存在している。両者ともその傾きは 60~90 度であり、共役な水平方向の割れ目系の存在も予想されるが、切羽観察の結果では明瞭でない。

山はねは、発破直後の切羽で頻発している。発破後 30 分程度で終息する小規模なものが多いがほとんどではあるが、合計数 m におよぶ飛石をとめないながら数時間を要して終息する山はねもある。終息したと判断した数時間後に活動が再発する場合もあり、山はね危険区間では十分な支保対策を行ったうえで、作業を進める必要があった。

2-2 AE 計測システムおよび安全管理体制

本坑（二期線）と避難坑は、Fig.2 に示すようにほぼ平行に約 80m 程離れて位置している。AE センサー（圧電型加速度計）は、Fig.4 に示すようにこの避難坑掘工壁面から 1 m 奥の岩盤中にマグネットで 20m 毎に 4 点、本坑切羽を挟むように配置し、切羽の進行にともない再設置作業を行う。センサーからの信号は、Fig.5 に示すように、避難坑内に設置したプリアンプで 60dB 増幅後、電圧信号を光信号に変換し（分解能：10ビット）、約 7km の長さの光ファイバーを経由して現場事務所に伝

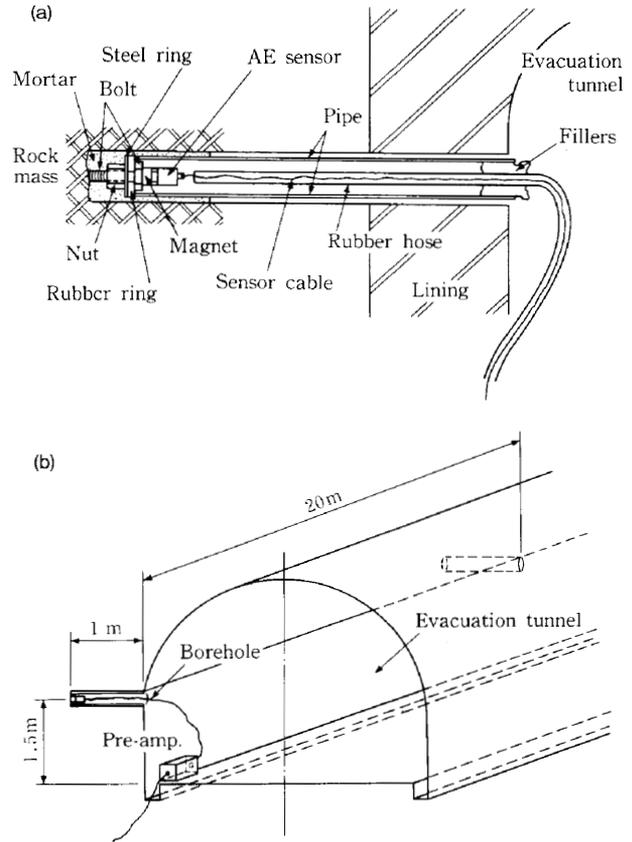


Fig. 4 Condition of AE sensor,(a) installed in borehole, (b) arranged in evacuation tunnel.

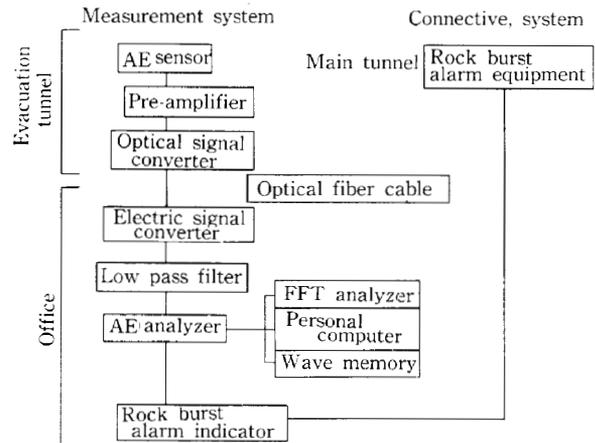


Fig.5 AE measurement system flow.

送される。光信号は、事務所内で電圧信号に再変換された後、AE アナライザーに入力される。AE アナライザーに入力する前に、光変換システムの AD 変換能力からノイズと考えられる 5 kHz 以上の信号は 24dB/oct のフィルターで遮断される。なお、計測システムの総合周波数特性は、100Hz~5 kHz の範囲で平坦である。また、計測は 24 時間監視体制とした。

入力した信号のうち、AE アナライザーによって AE

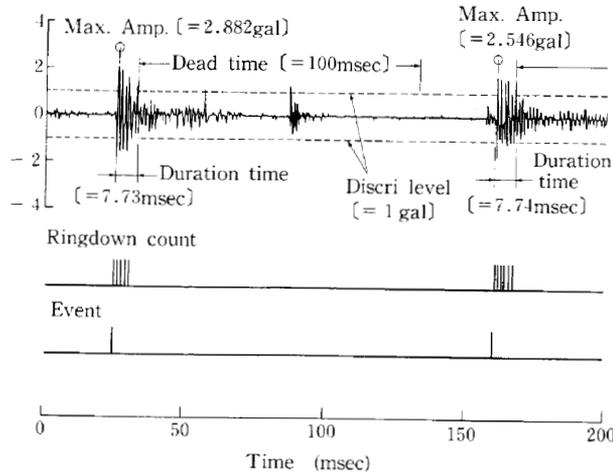


Fig.6 Typical detected AE waveform and AE parameter.

と判断された信号は、AEパラメータ（イベント、リングダウンカウント、最大振幅値など）としてデジタルデータレコーダに収録される。Fig.6は、計測されたAE波形の一例である。AE発生数を表すAEイベントや破壊規模を間接的に示すリングダウンカウントは、図に示すようにパルスとして出力される。初動の到達時刻は、多チャンネルで計測する場合、震源位置を決定するのに重要なデータとなる。また、しきい値1 galを越えたものを便宜的にAEと判定し、日常管理の指標とした。切羽が穿孔等の作業時でない場合は、ノイズレベルは0.5gal程度であり、計測したAEは岩盤破壊に基づくものであると考えられる。なお、AE記録後、再トリガー待ちまでの信号不感時間（デッドタイム）は100msecとした。

時間当りのAE発生数（イベント数）が一定数を越えた場合、リアルタイムでAEアナライザーと連動した山はね警報装置が作動し、事務所およびトンネル切羽周辺に配置してある山はね警報表示盤により、危険を知らせる。また、破壊の規模に応じて大きくなるイベント、リングダウンカウントまたは最大振幅値と現場の状況を照らし合すことによって、経験的に対策工の必要性やその程度を示す管理基準値を設定した。ただし、現場状況が異なれば、山はね発生機構も異なるので、普遍的な管理基準値は存在しないといえる。

2-3 震源位置標定法

AEセンサーが本坑と同一平面上の避難坑に、一直線上に配置してあるため、二次元的な位置標定<sup>3)</sup>とならざるを得ない。しかも、避難坑軸に対しどちら側で発生しているのか特定できない。また、工事作業によるノイズを区別する必要がある。そこで、4チャンネルの記録の内、センサー間距離および岩盤のP波速度を考慮して、

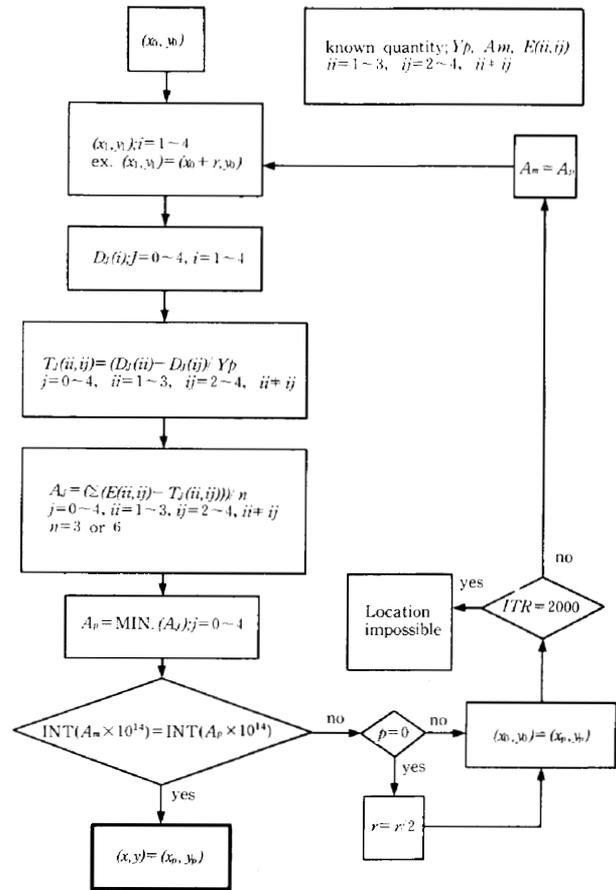


Fig.7 Flow chart of zoning method for AE source locations.

任意の3チャンネル以上が±5 msec以内にしきい値を越えた場合、AEは点震源とし、その発生位置は避難坑から掘削中のトンネル側とする。また、岩盤を等方均一な弾性体と仮定し、発破初動の立上がり時間を波形データから読み取り、発破点と各センサーとの位置関係に基づいてその場における平均的な弾性波伝播速度  $V_p$  を算出する。本標定では本坑発破初動到達時間差から求めた  $V_p=4700\text{m/sec}$  を採用した。 $V_p$  の誤差が±300m/sec とすると、標定位置に4 m程度の誤差が見込まれる。評価誤差をある程度含んだ  $V_p$  と各チャンネル間のAE初動到達時間差により、Fig.7のフローチャートによるゾーニング法を用いて、本坑における山はね危険区間のAEに対して位置標定を行った。

2-4 AE発生状況

Fig.8は装薬、発破および掘り出し作業時のAE発生状況の一例である。図中、イベントは累積数を、リングダウンカウントはイベント当りの数を、装薬開始時点から4時間について示している。AEが発破前から比較的活発に発生し、発破直後の短時間に多発している。その

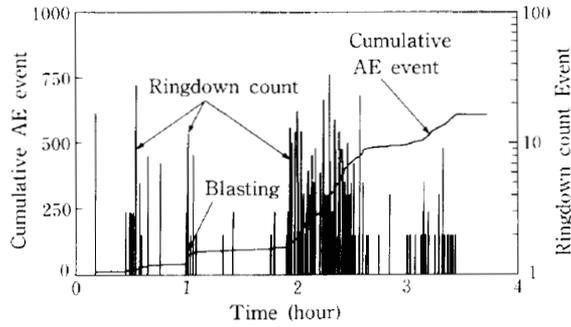


Fig.8 Typical occurrence pattern of AE activities.

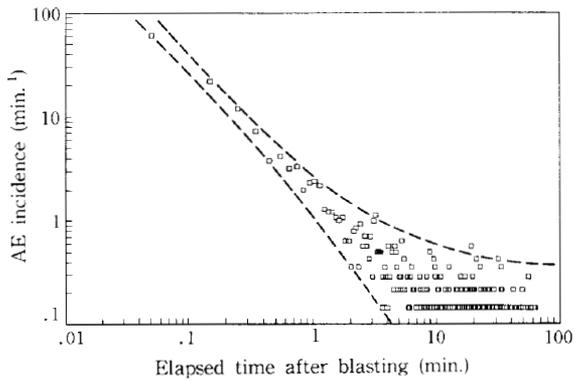


Fig.9 Variation of AE incidence for elapsed time after blasting.

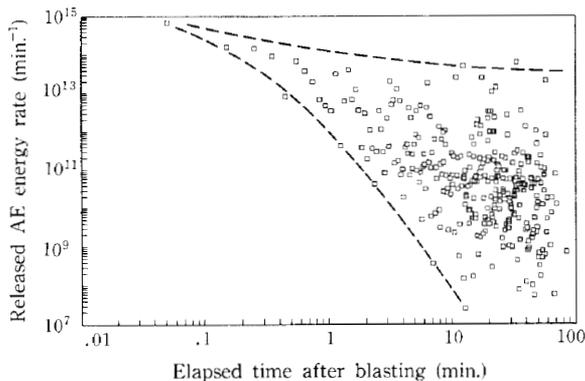


Fig.10 Variation of relative released AE energy rate for elapsed time after blasting.

後1時間ほど穏やかな状況が続くが、また40分程度発生し続ける。このように、一般にAEの活動が活発な時間帯と穏やかな時間帯が交互に続き、AEは次第に終息していく。位置標定を行った全てのAEに対する、発破後における1分間当りのAE発生数の経時変化をFig.9に示す。破線は、発生率の上限と下限を示している。発破後時間の経過とともにAE発生数は減少していき、岩盤が安定化していくのが窺える。ただし、その過程は全ての切羽で一様ではなく、発破後すぐに終息する場合も

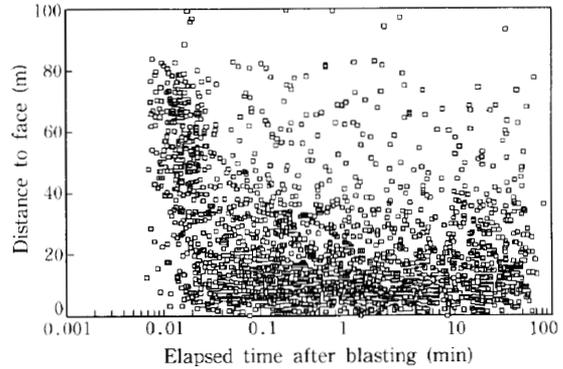


Fig.11 Variation of distance between epicenters and tunnel face centers for elapsed time after blasting.

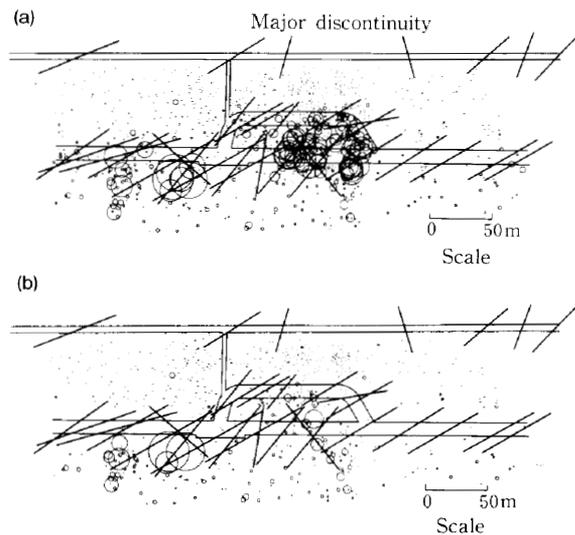


Fig.12 Center of circles is epicenter of AE and area of their circles is their relative released AE energy, (a) using all located AE, (b) excluding with in 20m from tunnel face center.

あれば継続的に数時間発生し続ける場合もある。同じデータによるAEエネルギー放出の時間経過をFig.10に示す。AEの振幅は、経験的に距離の二乗に反比例して減衰していると仮定し、震源における最大振幅を求めた。AEエネルギーは最大振幅の二乗にほぼ比例した量であることから、ここでは便宜的にこれをAEエネルギーと定義する。この単位は、計測システムおよび計測内容に依存する関越トンネル固有のものである。図中の破線もFig.9に対応した終息過程の上下限を示しているといえる。Fig.9と照らし合せば、一見終息したように見えても規模の大きなAEが発生する可能性もあり、終息したかどうかの判断は困難である。

AEもしくは山はねは、発破掘削により、空洞壁面近傍の急激な応力集中のために応力状態が不安定となった結果といえる。したがって、切羽や壁面に近い岩盤ほど影

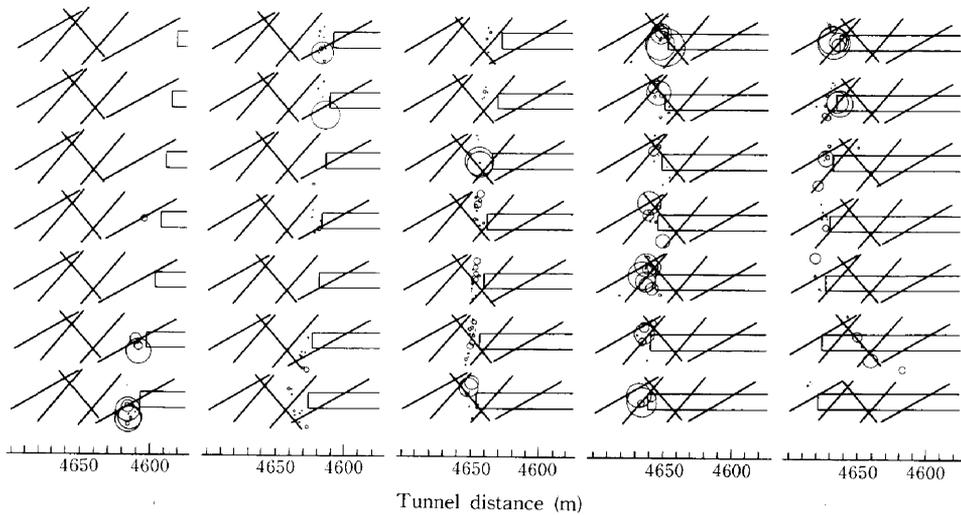


Fig. 13 Continuous variation of epicenters of AE and their relative released AE energy in excavation of the zone with the danger of rock burst.

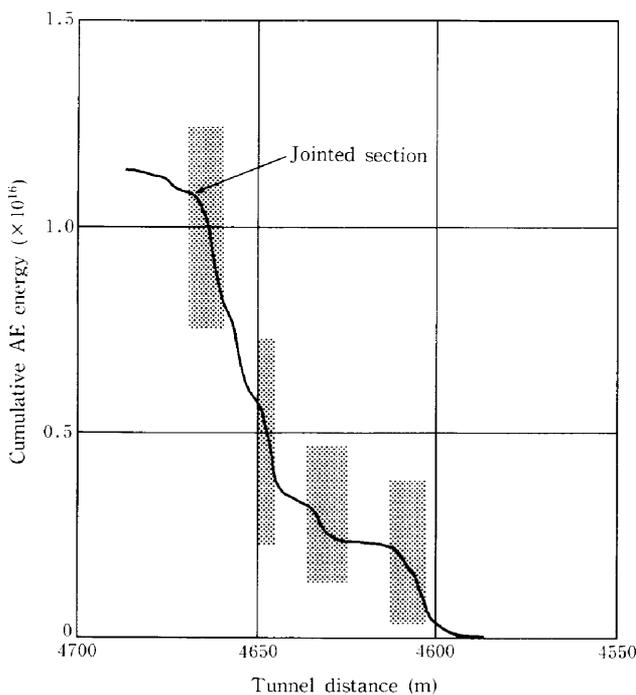


Fig.14 Relation between geological discontinuities and variations of cumulative AE energy in excavation of the zone with the danger of rock burst.

響を強く受けていると考えられる。Fig.11はAE発生位置から切羽中心までの距離を、発破後の経過時間で整理したものである。発破後2秒間ほどで切羽を中心として半径80m程度の範囲でAEがほぼ均一に発生している。この現象は、掘削した岩盤が受持っていた岩盤応力の再配分過程が、この間で行われていることを視わせる。

その後、半径20m程の範囲で特にAEが多発している。これらのAEの相当数が壁面近傍の岩盤に直接影響していると考えられる。

Fig.12(a)は山はね危険区間で発生したAEの発生位置とその規模を示したものである。AEのエネルギーは円の面積で示した。ただし、円の半径はある係数を一律に乗じた相対値であり、実際の破壊領域はこの図で示した領域より相当小さいと考えられる。この図から、AE発生が密な部分とそうでない所があることがわかる。しかも、これらは卓越する割れ目系と関係があるようである。切羽近傍の局所的な応力集中に依存して発生するAEは、Fig.11から、切羽中心から20mの範囲内にあると考えることができる。そのAEを除外するとFig.12(b)のような発生分布を示す。これらのAEは、ある特定の割れ目系に沿って発生しているように見受けられる。

Fig.13は、山はね危険区間を切羽が進行し、それともなうAE発生分布を各発破毎に示したものである。切羽が進むにともない切羽前方でAEが発生している様子が視える。しかもAEは特定な割れ目に沿って発生しており、割れ目を切羽が通過するとその割れ目に沿ったAEは終息する。割れ目および切羽が相互に重なり合い、複雑な応力状態になっていると推定される地点では、AEが頻発している。また切羽通過後に、切羽からかなり離れた後方でAEが発生している場合もある。何れも割れ目に関連した発生様式を示している。Fig.14は、その区間における累積AEエネルギーと割れ目との関係を示したものである。割れ目を切羽が横切るような地点で

規模の大きなAEが発生している。

2-5 岩盤初期応力測定と考察

山はね危険区間において Fig.15 に示す土被り820mの地点で、集塵機室が掘削される前に本坑壁面から応力解放法の一つである球状孔底ひずみ法を用い、岩盤応力を測定した。この結果を基に割れ目に作用している応力を算定した。測定は図に示すように坑壁から4.6m~14.5mの範囲で8点実施した。Fig.16(a)にボアホール軸に沿って得られた主応力分布を立体表示する。ただし図中の座標原点は、ボアホール孔口を示す。トンネル側壁周辺部ではほぼ鉛直方向に最大主応力が作用しており、トンネル掘削のために応力集中していることが視

える。一方、孔口から10m以上の深部岩盤応力は、トンネル寸法を考慮すると初期応力状態にあると考えられる。そこで10m以上深部の4測点から得られた全てのひずみから、Fig.16(b)の下半球投影図に示すように、この場における岩盤初期応力( $P_1, P_2, P_3$ )とその方向を求めた。第2、第3主応力は第1主応力に比べてかなり小さく、その比はそれぞれ1/4、1/5である。また、第2主応力方向はトンネル軸方向にはほぼ一致する。

Fig.3に示す観察された割れ目に作用しているせん断応力および垂直応力の関係を Fig.17に示す。図中、○

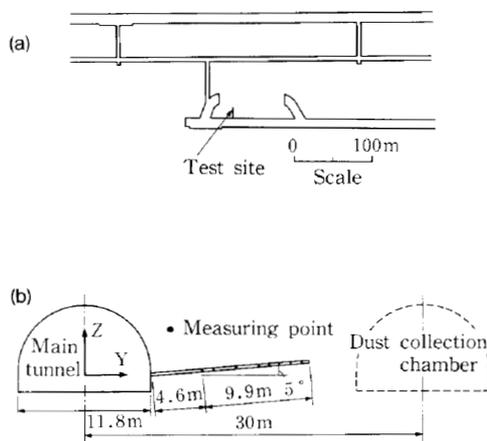


Fig.15 Test site of rock stress measurements in Kan-etsu tunnel, (a) plane view, (b) cross sectional view.

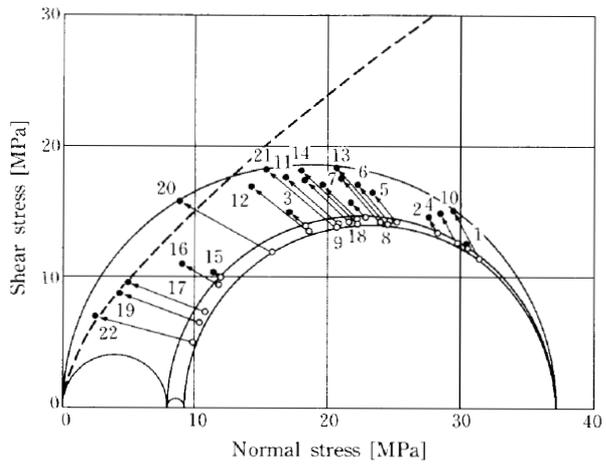


Fig.17 Stress variations acting on actual discontinuities show in Fig.3. The open circles are the state of stress acting on the major discontinuities calculated from the initial rock stress and closed circles are the state of stress on the tunnel face. Broken line represents sliding criterion by Barton (1973).

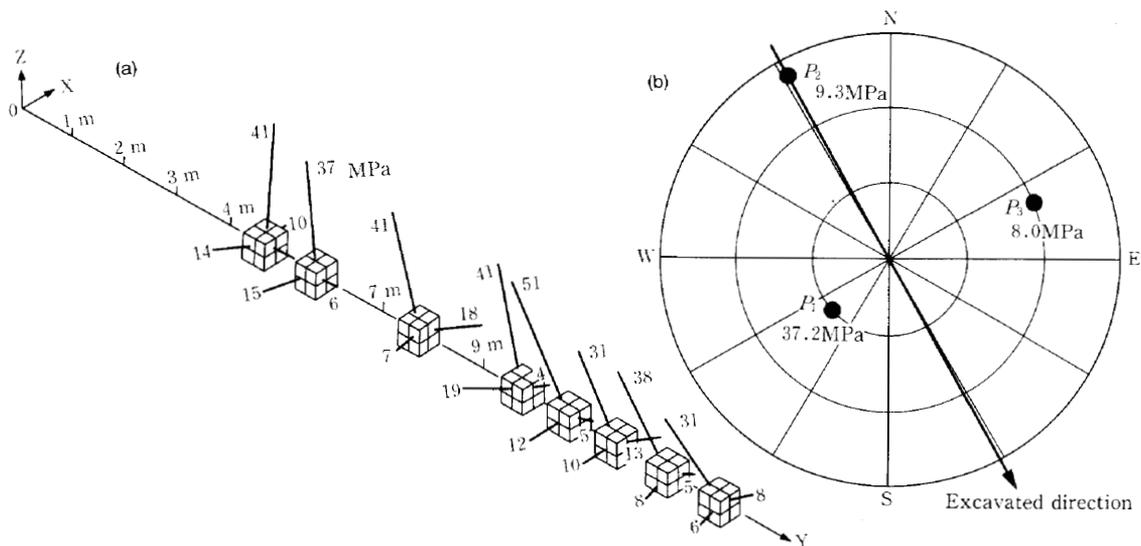


Fig.16 State of rock stress in Kan-etsu tunnel determined, (a) distribution of stress, (b) initial stress state of this site.

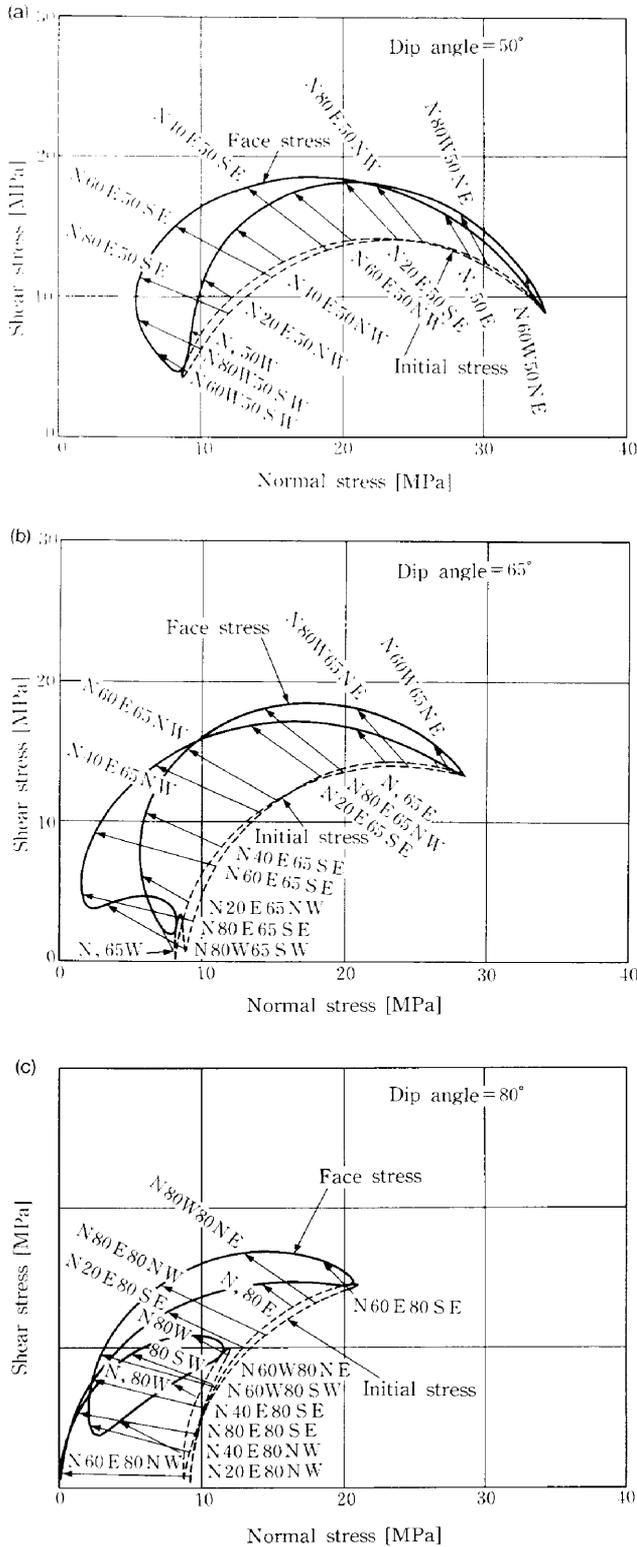


Fig. 18 Calculated stresses acting on discontinuity, (a) dip angle = 50 degrees, (b) 65, (c) 80. Broken and solid line represent the state of the initial stress and the face stress respectively. Arrow is vector under the same orientation of assumed discontinuity.

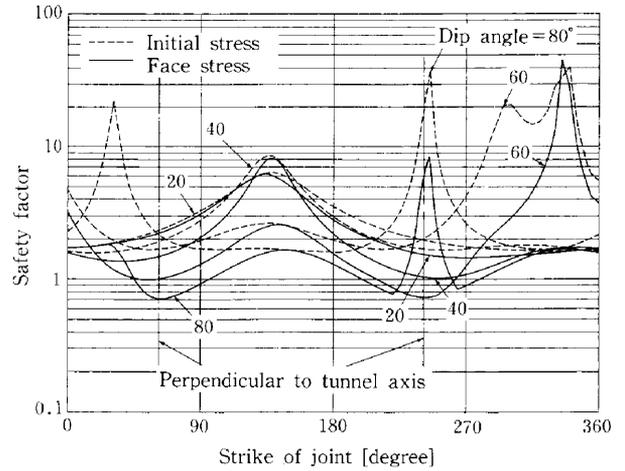


Fig.19 Safety factor changes according to discontinuity orientation.

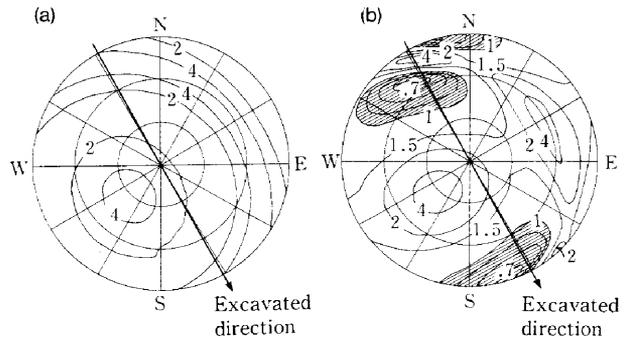


Fig.20 Contour maps of safety factor on the stereographic projection, (a) in the state of the initial stress, (b) in that of the face stress.

は岩盤初期応力を基に算出された割れ目に作用する応力状態を示し、●はトンネル切羽上で作用している応力状態である。切羽上での応力を算出するに際して、第1、第3主応力は初期応力に等しく、第2主応力は零と仮定した。この仮定は、第2主応力が切羽に対しほぼ垂直に作用していることから妥当であると考えられる。さらに、破線で示す Barton (1973) <sup>4)</sup>によるすべり基準が当岩盤にも適用できると仮定すれば、No.17, 19, 20, 22の割れ目に作用している応力状態は、トンネル掘削によってすべり基準に近づく。

初期応力状態および切羽面応力状態のもとで傾斜が50, 65および80度を示す割れ目に対して、その走行が連続的に変化した場合、割れ目面に作用する応力は、Fig. 18 のようである。破線は初期応力状態、実線は切羽面応力状態である。図中のベクトルは、トンネル掘削による同一走行傾斜の仮想割れ目に作用する応力変化量である。急勾配の割れ目であるほど、その面に作用する応力はす

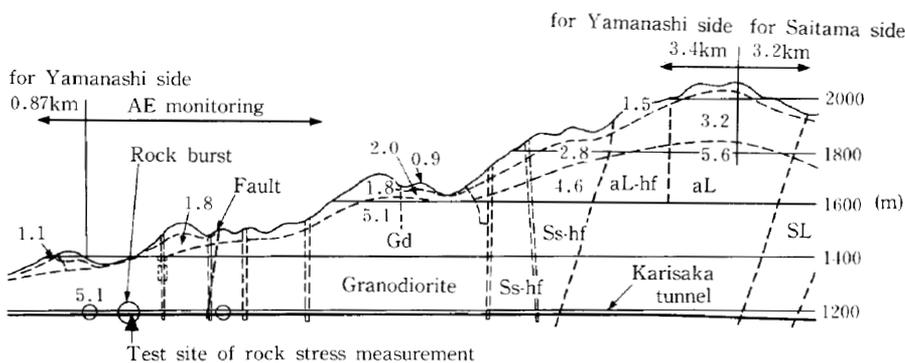


Fig. 21 Geological profile for Yamanashi side in Karisaka tunnel, Gd:Granodiorite, Ss,Sandstone, SL; Slate, aL,Sandstone-slate alternation, Circles show that rock burst occurred at these points.

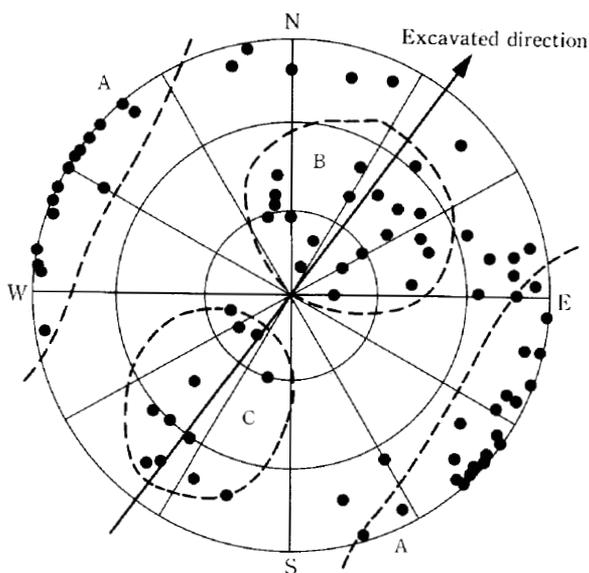


Fig.22 Poles of major geological discontinuities in Karisaka tunnel. Discontinuities is classified (a) parallel to tunnel axis, (b) downgrade, (c) upgrade toward tunnel entrance on cutting face.

べり基準に近づく。また、緩傾斜の割れ目であってもある特定の走行を示す場合には、すべり基準に接近する。

すべりに対する割れ目の安定性を示す安全率<sup>5)</sup>を、垂直応力が等しい場合のすべり基準と割れ目に作用しているせん断応力の比で定義すれば、Fig.19に示すように、安全率は割れ目の走行と傾斜に強く影響を受ける。割れ目の安全率が低くなる方向は、トンネル軸に対し垂直な方向にある。Fig.20は、初期応力および切羽上における応力状態において求めた割れ目の安全率をコンター表現したものである。斜線部は安全率が1以下の不安定領域であり、トンネル軸方向に一致している。この結果は、AE計測で得られたトンネル切羽が特定の割れ目に接近すると不安定になるという結果と調和的である。従って、

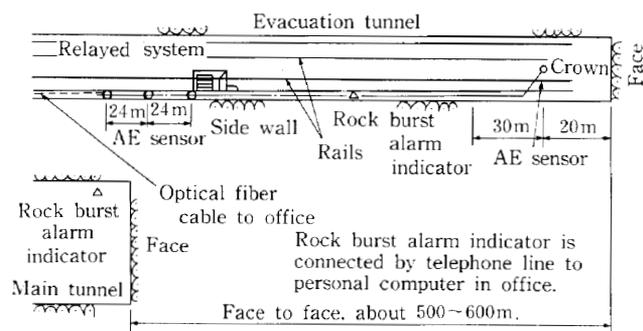


Fig.23 Schematic view of AE measurement circumstances.

関越トンネル掘削にともなう山はね現象あるいはAEの発生条件は、主に割れ目に作用している垂直応力が減少し、割れ目を含む岩盤が不安定状態になった結果であるといえる。

### § 3. 雁坂トンネルにおける山はね

#### 3-1 岩盤状況およびAE計測システム

雁坂トンネルは、本坑と避難坑を並行して掘削しており、Fig.21に示す区間で山はね現象が発生し、安全施工管理の一環としてAE計測および岩盤応力測定等を実施した<sup>6)</sup>。岩盤は花崗閃緑岩から成り、一軸圧縮強度は214MPaである。所々で湧水は認められるが、山はねは湧水の無い堅硬な切羽近傍、特に天端が発生している。トンネル周辺岩盤には、Fig.22に示すような割れ目が卓越しており、大きく3群の割れ目系に区分することができる。しかも、トンネル軸に対しほぼ平行なA群の割れ目系が顕著である。

AE計測は、Fig.23に示すように本坑および避難坑切羽周辺にセンサーを配置し、各々独立に24時間計測監視体制としている。

3-2 岩盤初期応力測定

Fig.24 に示すように、土被り約200mの山はね頻発地点で関越トンネルと同じ方法により岩盤応力測定を実施した。ボーリングは本坑掘削前に避難坑側から本坑に向けて行い、避難坑掘削の影響外と考えられる3地点(I<sub>1</sub>~I<sub>3</sub>)で測定した。Fig.25 (a) に各測点における主応力の三次元表示を行い、Fig.25 (b) に3測点の平均値を初期応力として下半球に投影する。この場の初期応力状態は、第3主応力がほぼ零で二軸応力状態であり、第1主応力は、トンネル軸に対して水平直交方向に作用している。初期応力場では、Fig.22 の割れ目に作用しているせん断応力および垂直応力の関係は、Fig.26 のようである。A群の割れ目系は、割れ目に対しほぼ垂直な方

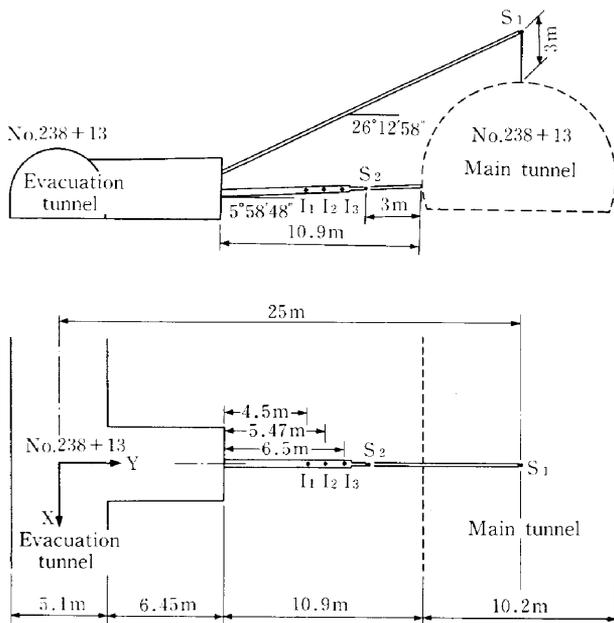


Fig.24 Test site of rock stress measurements in Karisaka tunnel, (a) cross sectional view, (b) plane view.

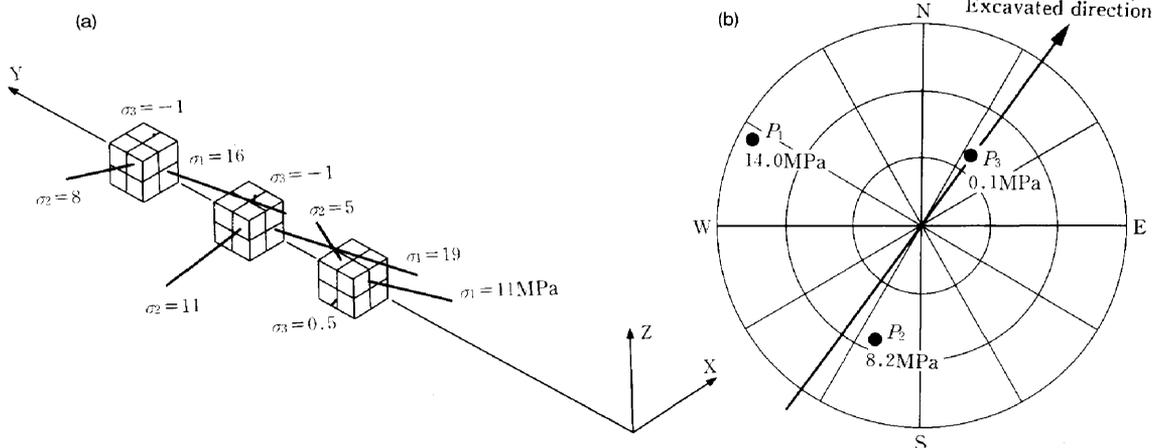


Fig.25 State of rock stress in Karisaka tunnel determined, (a) distribution of stress, (b) initial stress state of this site.

向に第1主応力が作用しているため、垂直応力に比べて相対的にせん断応力は小さく、岩盤の安定性を損う可能性は低い。一方、トンネル切羽に対し流れ盤となる、B群の割れ目系に作用しているせん断応力は相対的に大きい。従って、B群の割れ目系がすべり基準に達し、岩盤が不安定になる可能性が高い。

3-3 トンネル掘進にともなう応力変化測定と考察

初期応力を測定した断面内で、本坑掘進にともなう応力集中による岩盤応力変化も測定した。Fig.27 に天端(S<sub>1</sub>)および側壁(S<sub>2</sub>)における切羽到達前(-20.75m)、切羽到達時(-0.5m)、および切羽通過後(20.5m)の二次元面内応力状態を示す。Fig.28 は主応力の立体表示である。側壁では、切羽到達前に比べ、到達時には主応力方向が回転している。一方、天端では測定断面に切羽が接近することにより第3主応力が圧縮から引張りに変化している。また、測点が緩み領域内にあるとすれば、測定断面を切羽が通過する前後で著しい応力変化を示す

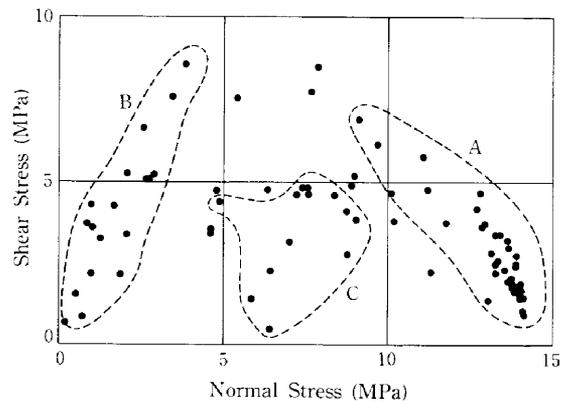


Fig.26 States of stress acting on actual discontinuities in the state of the initial stress.

と考えられるが<sup>3</sup>, そのような変化は見られない. 従って, 本測点は弾性領域内にあり山はねをとまなうような急激な応力変化が生じる領域外に位置すると推察される.

トンネル掘進にともなう応力変化により, 天端測点に作用する第1主応力は, 測定断面を切羽が通過後2.5mの時最大17MPaを示す. 壁面近傍では測定位置より大きい応力集中が生じていると考えられるが, 一軸圧縮強度を越える応力変化の可能性は低い. しかし, 第1主応力と第2, 3主応力との差が大きく, 第3主応力が零に近いので応力場は二軸応力状態になっていると考えられる. また, Fig.27 (b) に示すように, 第1主応力方向はB群の割れ目面内にあり, 直交する方向の応力は切羽が通過する際に引張りを示す. 従って, 雁坂トンネル掘進にともない天端付近では, 切羽に対して流れ盤となるB群割れ目面内に第1主応力が作用し, 垂直応力が引張り側になることにより, 岩盤が破壊したものと考えられる.

#### §4. おわりに

実際に山はねが発生して岩盤が破碎した関越トンネルおよび雁坂トンネルにおいて, AE計測および岩盤応力測定を実施した. その結果, 岩盤中に存在する潜在割れ目に作用する応力が, トンネル掘削によって変化し, しかも, その応力状態が土被り厚さに拘らず, すべり破壊基準を満足する危険性があることを示した.

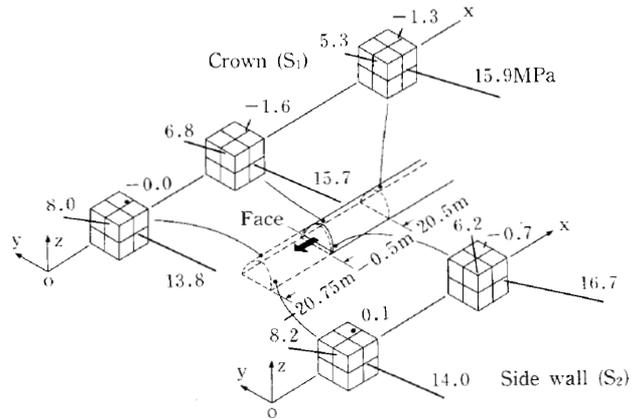


Fig. 28 Principal stresses at  $S_1$  and  $S_2$  point in excavation of this tunnel.

特定な割れ目にトンネル切羽が接近すると切羽が不安定になり, 山はねおよびAEが発生した. これは, 主に割れ目に作用している垂直応力の減少に起因するものであると推定される. さらに, 雁坂トンネルでは, トンネル掘削にともなって切羽に対し流れ盤となる割れ目面内に第1主応力が作用し, 面に対し垂直な方向に引張り応力が作用している.

また, AEは切羽中心から半径約80mの範囲でほとんど発生しており, 特に20mの範囲で多数発生し, その内の多くがトンネル壁面近傍に影響を与えていると考えられる. 従って, 山はね管理基準の指標として切羽観察状況およびAEを使用することは, 有効であるといえる.

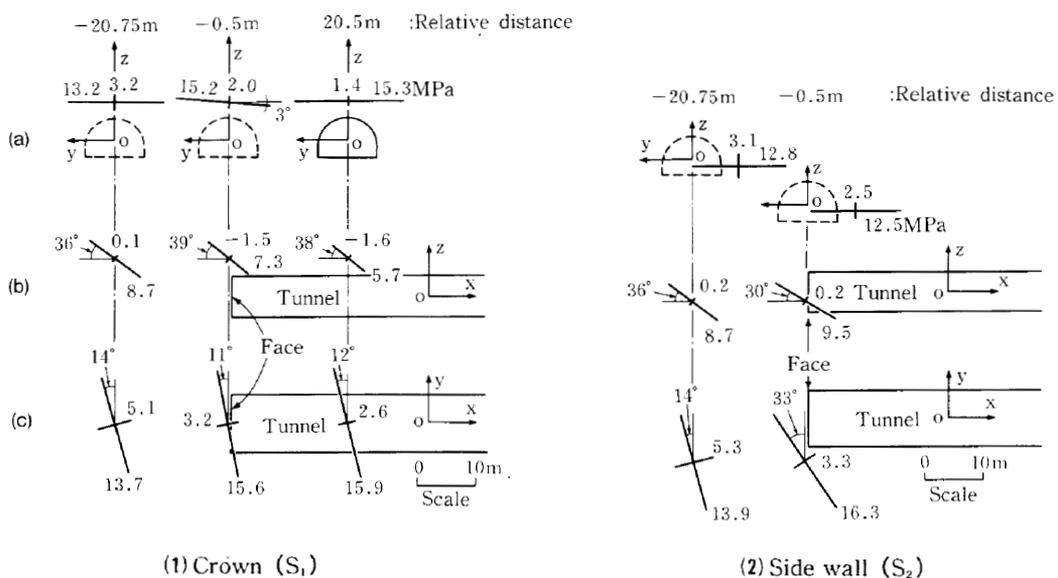


Fig.27 Plane stresses, (1) at crown ( $S_1$  point), (2) at side wall ( $S_2$  point) on (a) transverse cross section, (b) longitudinal cross section, (c) plane view in excavation of this tunnel. Distance is from face to measured point.

トンネル掘削にともない、山はねあるいは AE が発生するには、壁面近傍における応力集中が必要条件であるが、それによって岩盤が塑性変形すれば脆性破壊の典型である山はねは発生しない。また、岩盤強度が十分に大きければやはり山はねは発生しない。従って山はね発生には、割れ目を含む岩盤に適度な強度が必要である。

また、山はね発生の可能性を定量的に判断するには、割れ目分布、岩盤強度および三次元岩盤応力を把握することが不可欠である。

なお、AE 計測に御協力頂いた関越トンネルおよび雁坂トンネル共同企業体の方々には心から感謝致します。

#### 参考文献

- 1) Sugawara,K., Obara,Y., Okamura,H. and Wang, Y. : The determination of the complete state of stress in rock by the measurement of strains on a hemispherical borehole-bottom. Journal of the mining and metallurgical institute of Japan. 1167, pp. 277-282, 1985.
- 2) 多賀 他：関越トンネル掘削にともなう AE 活動，第21回岩盤力学に関するシンポジウム，1989.
- 3) 多賀 他：関越トンネルにおける AE 特性，第22回岩盤力学に関するシンポジウム，1990.
- 4) Barton,N. : Review of a new shear strength criterion for rock joints, Eng. Geol. 7, pp. 287-332, 1973.
- 5) Hirata,A., Ishiyama,K., Taga,N. and Kameoka,Y. : AE monitoring and rock stress measurement in rock burst site. 7th ISRM, 1991.
- 6) 望月 他：雁坂トンネルにおける山はね現象，第8回岩の力学国内シンポジウム，1990.