

山はねの予知とその対策 (雁坂トンネルにおける山はね現象について)

Prediction and Support Systems for the Rockburst in Karisaka Tunnel

桑田 俊男*
Toshio Kumeta

本間 正浩**
Masahiro Honma

手塚 裕紀***
Yuki Tezuka

要 約

一般国道140号雁坂トンネルは、山梨県と埼玉県との県境に位置し、山梨側工区は主として花崗閃緑岩により形成されている。当該トンネル山梨側をNATMにて施工中、坑口より約1,000～2,400mの区間にわたり「山鳴り・山はね」現象に遭遇した。

本工事では、山はね地点の岩盤特性の調査、および山はね現象の予知方法の一つであるAE計測等が実施された。さらに、AE計測の結果を用いて、山はね発生規模と状況を点数評価し、その点数に応じた3種類のトンネル支保パターンを予め設定することができた。また、各施工段階でシステムマティックなパターン変更が実施され、現場運営上非常に良好な結果が得られた。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 地質概要
- §4. 山鳴り・山はねの発生状況
- §5. 山はねの調査
- §6. 山はね対策工
- §7. おわりに

梨・埼玉両県境約10km間は、いまでも通行不可能区間で、俗に「開かずの国道」といわれてきた。このような問題を解消するため、1988年11月、雁坂トンネル山梨側工事が着工され、1999年の供用開始に向けて鋭意掘進中である。

ここでは、比較的薄い土被り(約200m)から発生した山鳴り・山はねと、その調査・対策工について紹介する。

§2. 工事概要

雁坂トンネル工事はFig.1に示すとおり、本坑全長6,625m、避難坑延長6,645mから構成され、両者を17カ所の連絡坑で接続する。当トンネルは、道路トンネルとしては全国で4番目、一般国道としては最長のものとなる。このうち山梨側工事は、本坑掘削3,662m、避難坑掘削3,653m、連絡坑9カ所、集塵機室1カ所、電気室・地下換気所1カ所、換気斜坑1,572m、ポンプ室2カ所を施工するものである。

§1. はじめに

一般国道140号は、山梨県甲府市を起点とし、山梨市、牧丘町、三富村を経て埼玉県に入り、大滝村、秩父村、寄居町などを経て終点熊谷市に至る延長約160kmの幹線道路である。険しい雁坂峠(標高2,082m)をはさんだ山

*横浜(支)山梨雁坂(出)工事係長

**横浜(支)川崎生田(出)

***横浜(支)山梨雁坂(出)

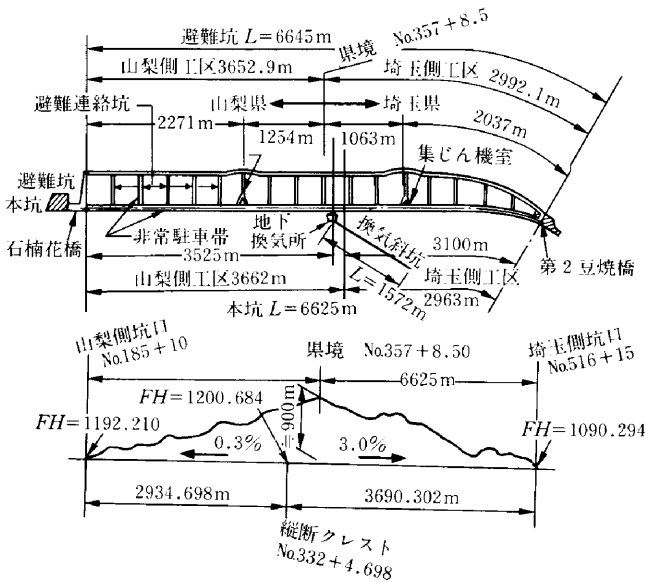


Fig.1 雁坂トンネル工事概要

2-1 本坑の施工

本坑は、タイヤ方式による上下半併進ベンチカット工法 NATM で施工している。掘削は発破工法とし、削岩機は3ブームホイールジャンボを用いている。

ずり出しは、キルナコンビトラックを用いた坑内仮置コンテナ工法による。吹付けコンクリートは湿式とし、ロックボルトは原則としてモルタル注入式を採用し、山鳴り・山はね区間および湧水区間では周面摩擦型（スウェレックスボルト）を使用している。

2-2 避難坑の施工

供用後の坑内で災害が発生した場合に、避難路として使用される避難坑は、掘削時には本坑の調査・パイロットトンネルとして、常に本坑に先行して施工される。避難坑は、レール方式による全断面掘削工法 NATM が採用されている。さらに、吹付けコンクリートは湿式とし、ロックボルトは本坑と同様に、2タイプを状況に応じて使い分けている。

2-3 支保パターン

本坑・避難坑の主な施工支保パターンを Fig. 2 に示す。

§ 3. 地質概要

本トンネルは、Fig. 3 に示すように全長約6.6kmのうち山梨側坑口から2.5~3.0kmは徳和型花崗閃緑岩、埼玉側の約3.5~4.0kmが大滝層群の砂岩・粘板岩の互層である。両層の接触面は比較的明瞭であり、接触部付近の砂岩・粘板岩は500~700mにわたりホルンフェルス化している。当初このホルンフェルス帯は数本の破碎帯が集中する擾乱帯を形成し、そこに多量の水が貯留されているものと予想されていた。そこで、地表からは比抵抗映像法、トンネル坑内からは湧水調査水平先進ボーリングを実施するなど、細心の注意を払いながら施工が進められた。その結果、大きな断層破碎帯や湧水区間もなく無事に通過する事ができた。

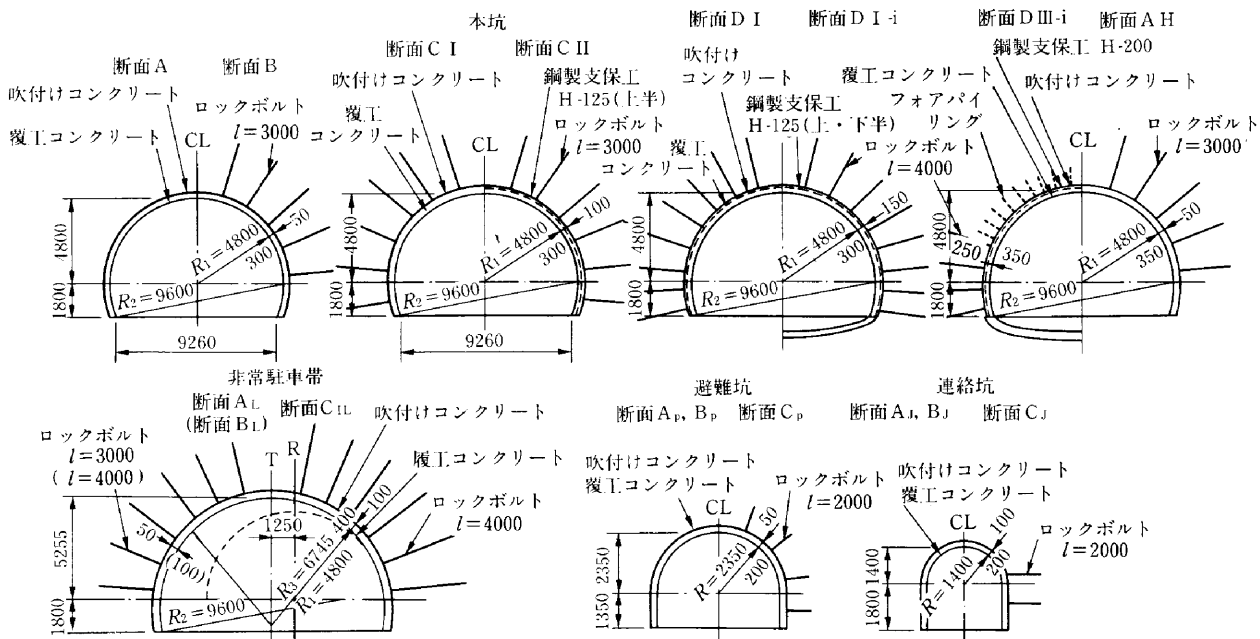


Fig.2 支保パターン図

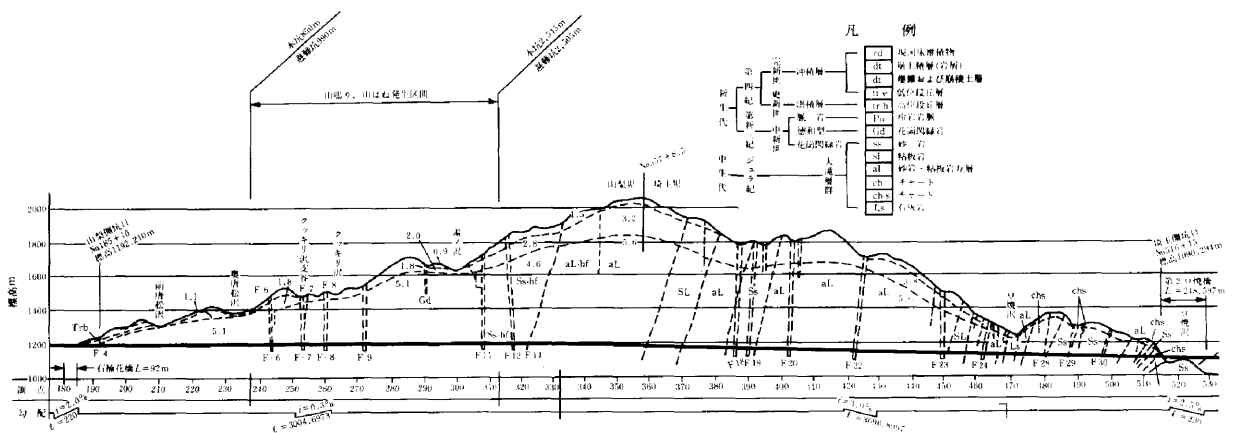


Fig.3 地質縦断面図

§ 4 . 山鳴り・山はねの発生状況

「山はね」は、トンネル用語辞典によれば、「トンネル掘削において、掘削周辺（切羽の鏡、天端、側壁など）の岩盤の一部が大きな音響を伴って内空に突然飛び出す現象」と定義されている。

当工事では、山梨側坑口より避難坑を掘進中のところ、No.236+4.2 (TD.坑口からの距離) 991.1m) で最初の山はね現象に遭遇した。発破後、ずり出し作業中に、大音響（山鳴り）とともに切羽天端部左肩より薄片状の岩塊（屋根瓦大）約1～2m²が剥落した。作業を中断して待避し観察を行ったところ、5～8分ごとに山鳴りとともに剥落が生じ、1時間でさらに約1m²が剥落した。その後、剥落部分が切羽後方の既設吹付け部にまで広がって、累計3～4m²の剥落となった。以後約70m区間にわたり、山鳴り・山はねが断続的に発生し、亀裂湧水帯（小断層、L=19m）に突入後やっと小康状態となった。

一方、本坑はNo.229+5 (TD.850m) 付近から山鳴り・山はねが発生し、その後一時沈静したが、No.236+0 (TD.985m) で最初の大規模な山はねが発生した。この山はねは、発破後に突然山鳴りと同時に薄片状の岩塊が飛び出し、切羽天端部左肩が約2m²剥落した。その後、山はねを伴う山鳴りが収まらず、2日間で約5m²にまで拡大した。

本坑・避難坑ともにこの区間での土被りは約200mで、従来よりも非常に土被りの薄い区間で山はね現象が発生している。また、避難坑・本坑ともに山鳴り・山はねの発生区間は花崗閃緑岩区間であり、ホルンフェルス帯へ切羽が掘進するとともに沈静化する傾向が見られた。代表的な山はねの発生状況を Photo 1～3 に示す。

§ 5 . 山はねの調査

5-1 基礎的調査

(1) 調査項目

山はね岩盤の性状を知り、その初期応力状態やトンネル掘進に伴う応力変化を測定する目的で、本坑を対象とした計測を実施した。避難坑の山はね発生地点 (No. 238+13, TD.1,039.9m) から Fig. 4 に示すように、本坑掘削予定地点に向けて計測機を配置し、本坑切羽がこの地点に到達後、Fig. 5 に示す計測を実施した。

また、山はねに関する基礎的調査としてこのほかに、岩石試験、初期応力測定、応力経時変化測定、先行地中ひずみ測定を実施した。

(2) 調査結果

① 岩石試験

花崗閃緑岩の岩石試験結果を Table 1 に示す。なお同表には、坑内弾性波探査による結果および後述の初期応力、応力変化の解析に用いる弾性定数も示してある。

② 初期応力測定

初期応力測定の結果をまとめて Fig. 6 に示す。この結果から、初期応力状態は第3主応力 σ_3 が0に近く、二軸応力状態となっているのが特徴といえる。さらに、第1主応力 σ_1 は、トンネル進行方向に直角でほぼ水平方向となった。鉛直応力成分 σ_z は、土被り H と単位体積重量 γ から推定される値 ($\sigma_z = \gamma \cdot H = 2.68 \times 200 = 54 \text{ kgf/cm}^2$ (5.3MPa)) より小さく、32kgf/cm² (3.1MPa) を示した。

③ 応力経時変化測定

Fig. 7 は切羽通過前、通過時、通過後のトンネル天端および側壁部の主応力状態を示したものである。いずれの場合もトンネル側壁からの水平土圧が卓越しており、

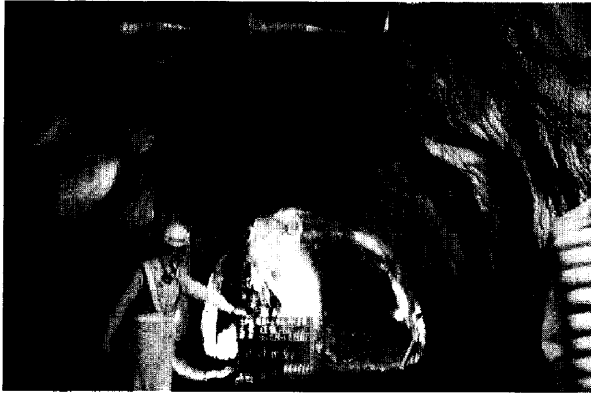


Photo 1 山はねの瞬間(避難坑)



Photo 3 本坑山はね全景



Photo 2 剥落岩塊片(避難坑)

第3主応力がほとんど0に近く、二軸応力状態であることが分かる。

④ 先行地中ひずみ測定

Fig. 8に先行地中ひずみ測定結果を示す。これによれば、本坑切羽が測定ポイントの手前0.5mに近づくまでひずみはほとんど0であり、切羽通過後に急激に増加することが分かる。したがって、先行変位はほとんど発生しておらず、切羽前方のゆるみ範囲も約1m以内であると推察できる。

Fig. 9は本坑壁面から11m奥を不動点とし、本坑左側壁から各地中ひずみ計までの距離とパイプ軸方向のひずみとの関係を、測定断面と本坑切羽との相対距離ごとに示したものである。ここでも、壁面から0.5m奥のひずみが他のひずみに比べて非常に大きく、ゆるみ範囲が約1m以内であることが分かる。これは、本坑内で実施した弾性波探査によるゆるみ領域と一致した結果となっている。

⑤ 本坑での計測工 A・B

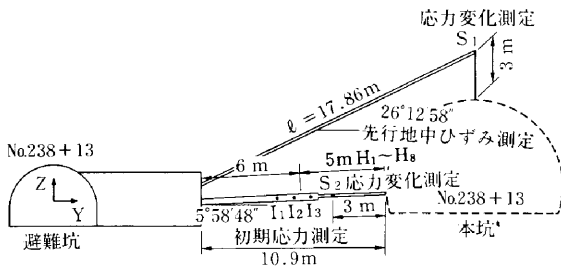


Fig.4 避難坑から設置した各種計測機器の配置

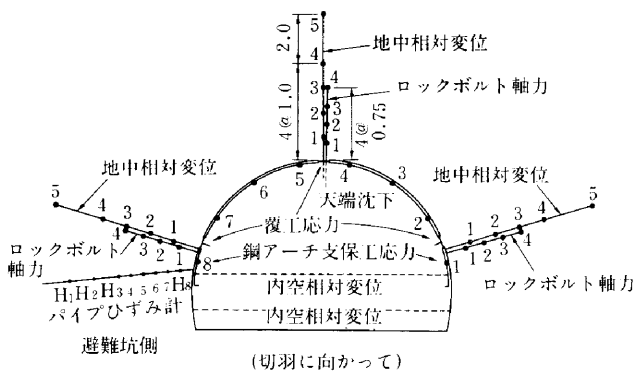
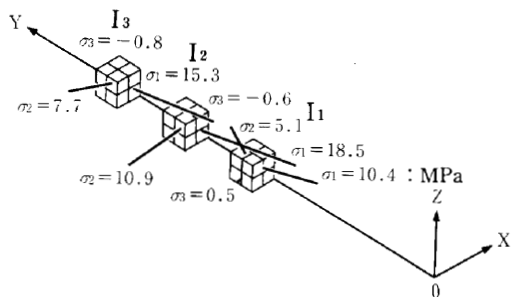


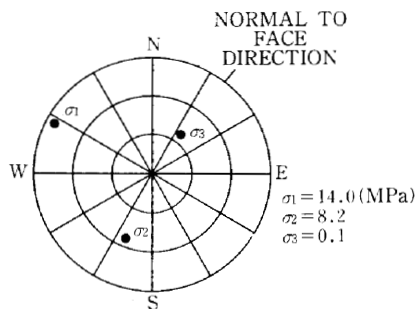
Fig.5 本坑における各種計測機器の配置

Table 1 花崗閃緑岩の岩石および岩盤物性

項目	結果
単位体積重量	2.68g/cm ³
一軸圧縮強度	214 MPa
圧裂引張強度	9.3 MPa
ヤング率	51.7 GPa
静ポアソン比	0.19
P波速度	4.14km/s
S波速度	2.37km/s
動ヤング率	38.7 GPa
動ポアソン比	0.26
(初期応力、応力変化測定のための弾性定数)	
ヤング率	42.1 GPa
ポアソン比	0.15
(坑内弾性波探査による)	
地山弾性波速度	4.1 km/s
亀裂係数	0.98



(a) 各測定地点における主応力の3次元表示



(b) 平均主応力の下半球投影

Fig.6 岩盤初期応力測定結果 ($E=42.1\text{GPa}$, $\nu=0.15$)

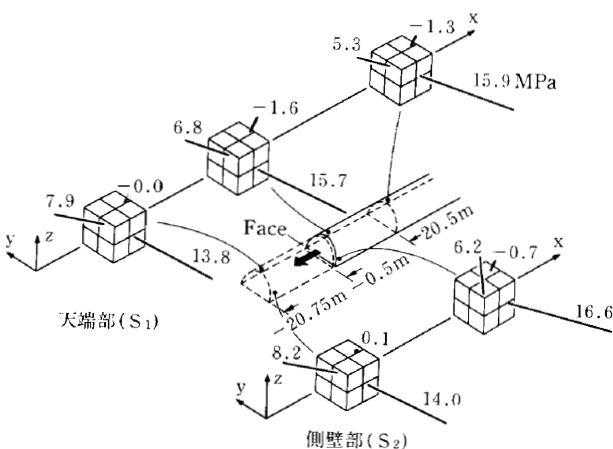


Fig.7 切羽の通過に伴う3次元主応力の変化

Fig. 10はトンネル本坑側壁部の壁面から避難坑側への深度を横軸に、岩盤ひずみを縦軸にとり、先行ひずみ測定(パイプひずみ計)、地中相対変位測定、およびロックボルト軸力測定で得られるロックボルト換算ひずみを比較したものである。図より、三者が概ね一致していることがわかる。これは、前述のとおり先行ひずみがほとんど発生せず、地中変位計あるいはロックボルト軸力計の設置時点(切羽通過直後)から岩盤が大きく変形したためと考えられる。

5-2 AE計測

(1) AE (Acoustic Emission)

一般に、物体は力を受けると、破壊点に達する以前から微小破壊に伴う微小振動(AE)を発生することが知られている。本工事では山はねという大規模な岩盤破壊の

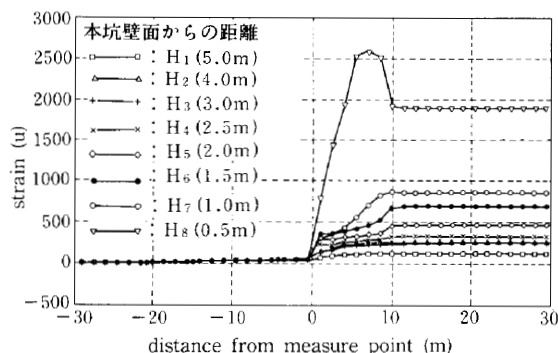


Fig.8 切羽の進行に伴うパイプひずみ計の平均ひずみの変化

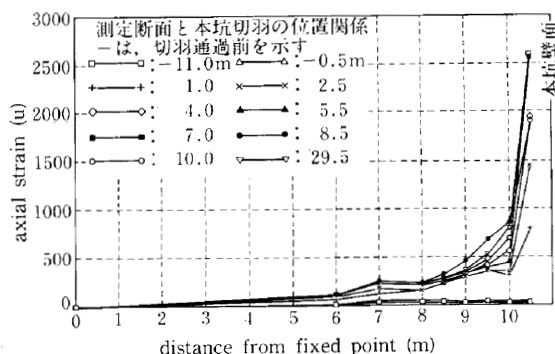


Fig.9 切羽の進行に伴うパイプひずみ計の軸ひずみ分布の変化

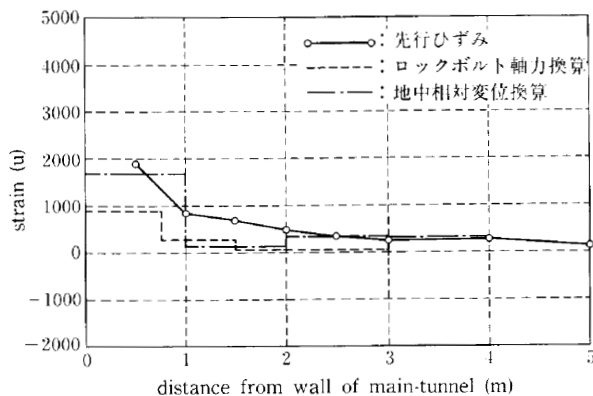


Fig.10 本坑の左側壁における先行ひずみ分布と、地中変位計及びロックボルト軸力から換算したひずみ分布の関係

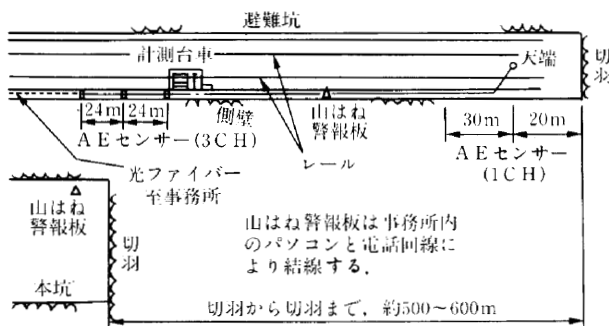


Fig.11 AE計測概要図(全体平面図)

前に発生すると考えられる AE を計測し、その発生状況から山はねの予知を試みた。

(2) AE 計測体制

Fig. 11 に示すような測定機器をトンネル坑内に配置し、山はねが発生する危険性の高い本坑、避難坑の両切羽周辺を独立に24時間監視できるようにした。

センサーにより検知された信号は、プリアンプにより増幅され、シグナルコンディショナーにより再度増幅した後、電圧・光信号変換装置にて光信号に変換する。光信号は、全長約5kmの光ファイバーケーブルを経由して、減衰すること無しに現場事務所内の計測機器に送られる。

事務所内の計測室で、信号はバンドパスフィルターによりノイズを除去後、本坑、避難坑用の2台の AE アナライザーにより、Fig. 12 に示す AE パラメータ（イベント数、リングダウンカウント、最大振幅値等）が抽出され、別々に記録される。また、これと同時に AE イベントカウンターにより、AE パラメータの数値が任意の時間内にある基準値を越えた場合、「注意・待避」の警報信号を本坑・避難坑に設置した警報表示板に送り、危険を通報する設備を備えている。AE パラメータの詳細については後述する。

(3) AE 計測による日常管理

① AE 計測の評価点数制

山鳴り・山はねの危険度について、切羽観察と AE パラメータとを点数化し、その総合点により評価することにした。Table 2 は、それぞれを点数評価してまとめた AE 計測日報の例（本坑用）である。

発破後に観察された切羽観察結果を、山鳴り・山はねの度合いにより0～50点の5段階に分類し、これと同程度の重みとなるよう AE パラメータ各々の評価点数の重みの配分を行った。重み付けに当たっては、本坑 No. 235+14 から No. 246+3 (L=209m) のデータを統計処理し、重み係数を決定した。

② AE パラメータ

- 1) AE イベント数：発生した AE の数であり、山鳴り（岩盤の破壊）の発生頻度を示す指標となる。AE とノイズを判別するために設定したある振幅値（しきい値：本坑に対しては5gal、避難坑に対しては2.8gal）を越えてから再び下まわるまでを1個のイベントとしている。点数化においては、所定の測定時間（5分間）内のイベントの累計数を AE イベント数としている。
- 2) リングダウンカウント：1個のイベントの中でしきい値よりも大きい振幅の数であり、山鳴りの規模を示す指標となる。点数化においては、1) と同様に累

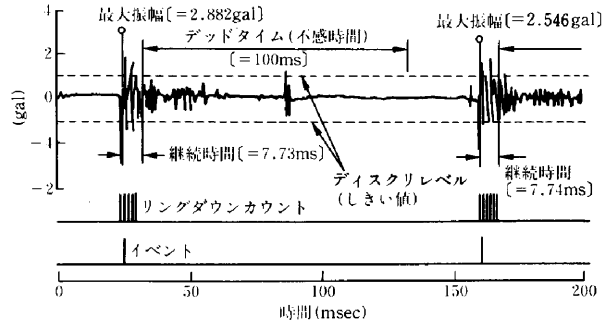


Fig.12 AEパラメータ

積数をリングダウンカウントとしている。

3) AE 最大振幅値：リングダウンカウントと同様、山鳴りの規模を示す指標の一つである。リングダウンカウントが累積数であるのに対して、最大振幅値そのものを加速度値 (gal) で表す。

Fig. 13, 14 は、本坑・避難坑の AE 計測の総合点数の推移を示したものである。計測当初は、関越トンネルの山はね管理用に採用された点数評価表を使用した。良好な結果を得るには至らなかった。しかし、計測が進み、蓄積したデータから提案された現行の点数評価法を採用した後は、AE 計測で得られた支保パターン評価と実施支保パターンが概ね一致しており、評価方法としては良好な結果が得られたと考えられる。

(4) AE 計測による山はねの予知

Fig. 15 は本坑の AE パラメータの各々の評価点数と総合得点を比較したものである。切羽点数50点の位置が山はね発生地点である。切羽点数でみるかぎり、TD. 1,750m 付近のみ大きな山鳴りが発生（切羽点数=40点）してから山はねに至っているものの、他の山はね地点では、大きな山鳴りの無いところで突然に発生していることがわかる。しかし、山はね発生区間は総合得点が大きくなっているため、山はねの発生地点を特定することは難しいが、要注意区間であるか否かは推測できるそうである。

また、避難坑で発生した山はねと AE パラメータの関連についても、本坑と同様な傾向が得られた。しかし、切羽点数の高い区間では、総合得点との差に当たる AE パラメータの総合評価点も高くなっており、AE 計測情報が切羽で得られる情報と合致していることがわかる。これは、山はね区間における自動施工管理上非常に有効な情報が得られているものと考えられる。

§ 6. 山はね対策工

山はねの対策工の考え方には、

Table 2 A E計測日報の例

A E発生状況				A E計測日報(本坑)			
発破回数	1回	2回		平成 年 月 日	監督職員	現場代理人	計測者
(1)A Eイベント数				立体TD. _____			
(2)リングダウンカウント				A E発生状況と切羽状況による支保パターン点数評価			
(3)A E最大振幅値(gal)				点数	A E発生状況		
支保パターン点数評価			A E発生状況		(1)A E イベント数(発破直後5分間で5gal以上のもの) A E イベント数×1.0×0.5=評価点数 (2)リングダウンカウント (リングダウンカウント÷10)×0.5×0.5=評価点数 (3)A E最大振幅値 A E最大振幅値×0.5×0.5=評価点数 (ただし200gal以上は200galとする)		
A E発生状況			(1)	評価	切羽状況		
切羽状況			(2)		(4)発破直後の山鳴り・山はね発生状況 ・爆発的な山鳴りが発生し、剥離や崩落が見られる……………50点 ・断続的に大規模な山鳴りが発生する……………40 ・断続的に小規模な山鳴りが発生し数回大規模に山鳴りする……………30 ・断続的に小規模だけの山鳴りが発生する……………20 ・ほとんど山鳴りが発生しない……………0		
総合点数			(3)				
支保パターン			(4)	平均=		支保パターン	
補強工の実施					本坑		総合点数
補強工	仕様	摘要			A, B, C, D		※0~19
増吹き					A1		20~49
先受けボルト					A2		50~79
増ボルト					A3		80以上
					摘要		※切羽観察表による支保パターン ・山はね対策工の詳細は別図参照 ・なお鏡対策についても別図のとおりとする

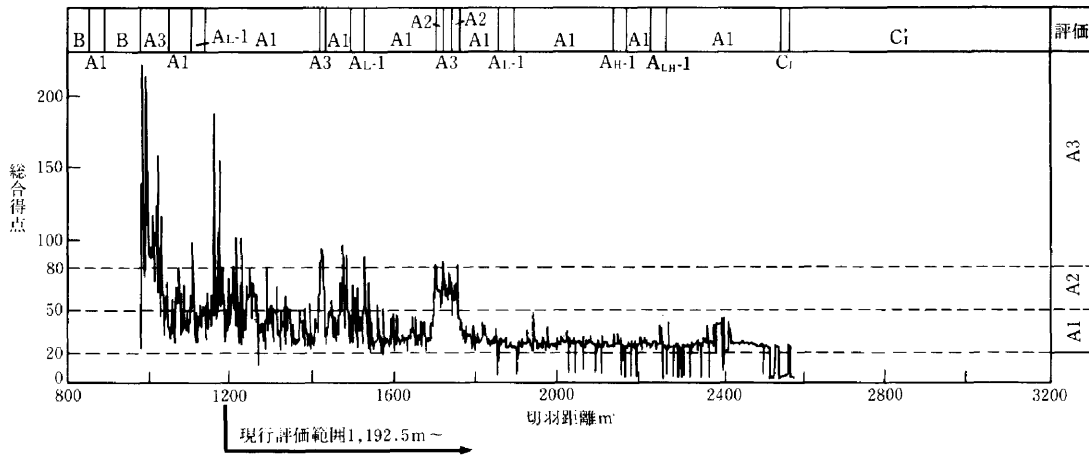


Fig.13 本坑A E点数推移表

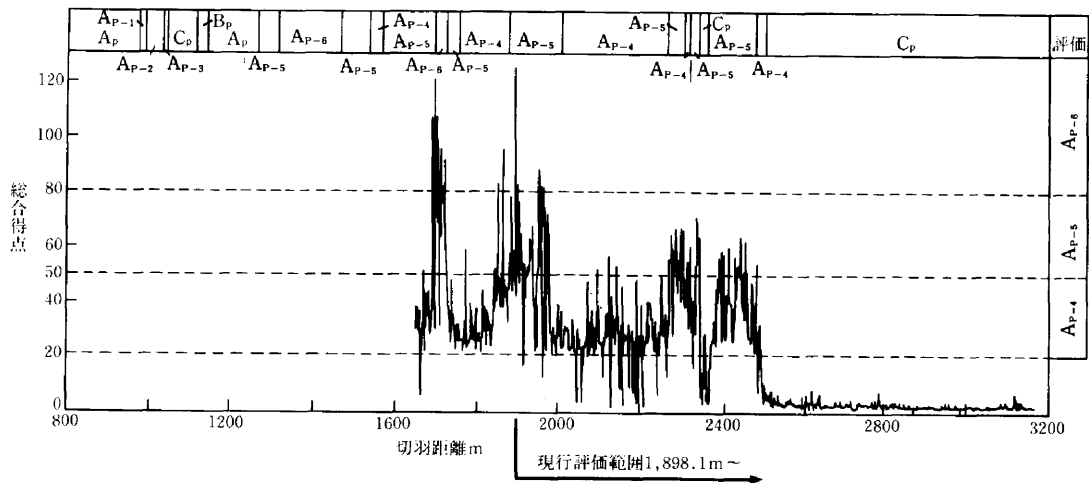


Fig.14 避難坑A E点数推移表

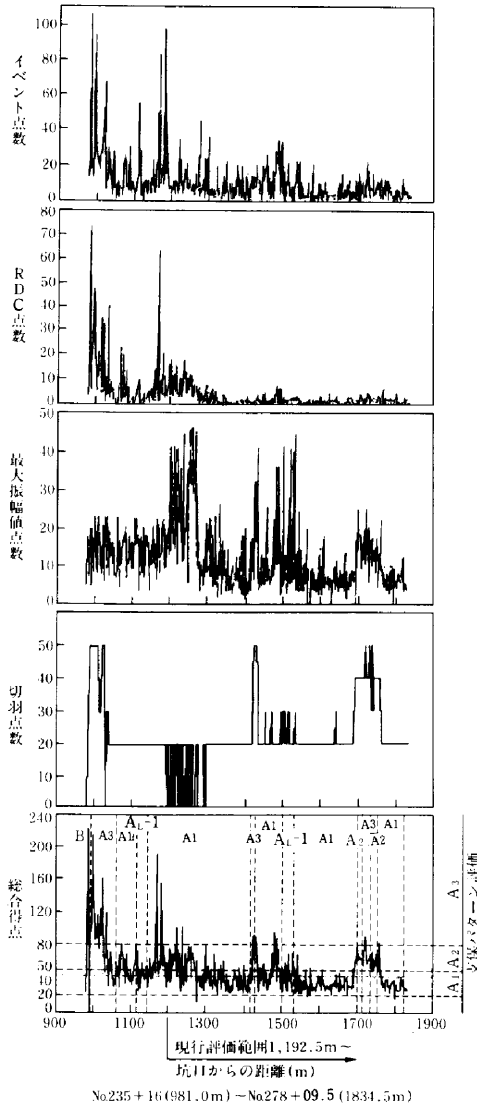


Fig.15 AEの各測定の数と総合評価(本坑)

- ① 山はねそのものを防止（抑制）する方法
- ② 山はねの発生に対し、作業の安全性を確保する方法がある。山はねの発生機構が十分に解明できていない現状では、山はねの発生そのものを防止する方法は特定できない。そこで、②のトンネル掘削作業の安全性に主眼をおいた対策を実施した。

6-1 山はね対策工

雁坂トンネルにおける山はね現象は、発生箇所がほとんど切羽天端部であることに特徴がある。このため、対策工も以下の点に留意した。

- ① 待避・待機の徹底
山はね発生時は待避・待機を徹底し、その間の切羽観察を1～2時間間隔にするなど、山はね・山鳴りの情報を充実させた。
- ② 入念なコソク作業
コソク作業を、切羽・側壁・アーチ部とも入念に実施

した。
③ 周面摩擦型ロックボルト
打設直後から100%の定着効果を発揮する周面摩擦型ロックボルトを採用した。

④ スチールファイバー補強コンクリート (SFRC) 吹付け
SFRCは、吹付けコンクリートの靱性を増加させるので、既に吹付けを完了したアーチ部で山はねが発生した場合でも、通常の吹付けコンクリートに比べて剥落の危険性が少ない。

6-2 山はね対策工と運用基準

山鳴り・山はねの程度に応じて段階的に支保パターンを選定し、移行することができるよう、Fig. 16およびFig. 17に示す対策支保パターンを予め用意しておき、山鳴り・山はねの発生状況に応じて対策工の現場運用を実施している。なお、切羽面の山はねに対しても、鏡吹付け・鏡ロックボルトなど発生状況に応じて使い分けられるよう段階的対策工を準備している。

以上のようなことを総合的に検討した結果、山鳴り・山はねの程度に応じた支保パターン選定のための運用基準は、切羽観察とAE計測の総合点数評価により決定することとした。総合点数評価は、前出のTable 2の右下の支保パターン評価欄に示すとおりである。

また、実質的運用方法はFig. 18のフローのとおりで

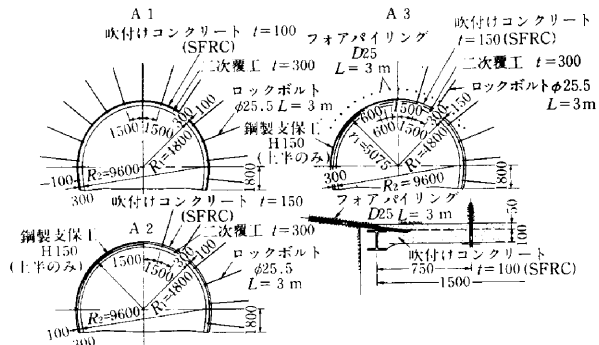


Fig.16 本坑山はね対策工

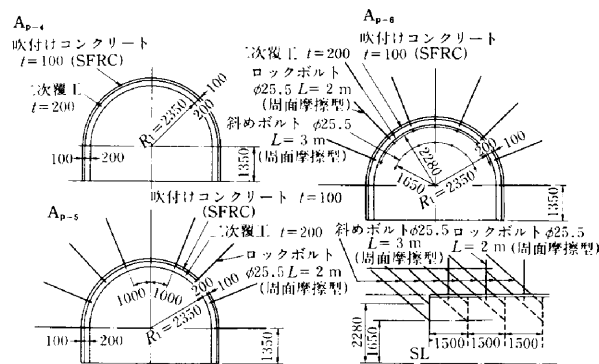


Fig.17 避難坑山はね対策工

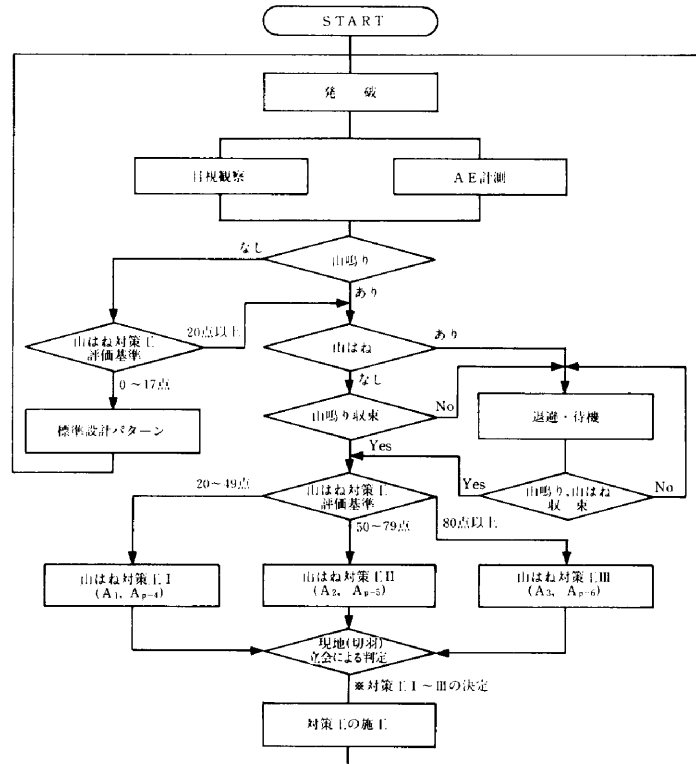


Fig.18 山はね対策工運用フロー

ある。これにより、山はね対策工の選定・移行がスムーズに行われ、いたずらにトンネル掘進作業を中断することもなく施工できた。したがって、本手法は現場運用上非常に有効な方法であると考えられる。

§7. おわりに

雁坂トンネル山梨側工事は、途中、山鳴り・山はね現象に遭遇したにも関わらず無事に施工を継続している。本トンネルは、技術的課題と併せ、安全かつ合理的な施工を行うことを目的に設立した「雁坂トンネル施工技術検討委員会（委員長：三谷健、(社)日本建設機械化協会副会長）」から適切なご指導・助言を賜り、山はね対策工を実施している。委員長をはじめ委員の方々に厚く御礼を申し上げます。また、AE計測を初め、数値解析等に関しては、技術研究所の平田篤夫、石山宏二両氏の研究を掲載させていただいたことをおことわりし、謝辞にかえさせていただきます。

参考文献

- 1) 竹林征三・長岡英雄：雁坂峠のルーツと超長大トンネル計画，国道140号雁坂トンネル，トンネルと地下，Vol.19, No.1, 1988.
- 2) 「トンネル用語辞典」編集グループ：トンネル用語辞典，土木学会，1987.
- 3) 山梨県地質図編纂委員会：10万分の1図副，山梨県地質誌，山梨県，1970.
- 4) 多賀直大・宮本英朗・小林征治：大型機械を駆使した急速施工，関越自動車道 関越トンネル，トンネルと地下，Vol.19, No.6, pp.427～433, 1988.
- 5) 多賀直大：谷川岳に5本目のトンネルを掘る，関越自動車道 関越トンネル（II期線）の施工，トンネルと地下，Vol.18, No.2, pp.129～135, 1987.
- 6) 大森湧・竹内昭三：本格化した関越トンネル工事(2)，北工区の現状，トンネルと地下，Vol.10, No.2, pp.99～103, 1979.
- 7) 望月常好・斉藤義信・石山宏二・亀岡美友：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講演論文集，pp.139～144, 1990.
- 8) 望月常好・穂刈利夫・斉藤義信・糸田俊男：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，Vol.21, No.9, pp.699～708, 1990.
- 9) 多賀直大・石山宏二・平田篤夫・稲葉力：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講演論文集，pp.71～75, 1990.