

地山損傷抑制を目的としたスムーズブラッシングの 設計支援ツールの開発(その1)

山本雅昭*, 金子勝比古**, 平田篤夫***, 松永博文*

ラグランジュ差分法を用いた動的応力解析プログラム“DAYS-2コード”をベースとし、爆薬による震源の表現方法として爆轟特性計算プログラム“KHTコード”より算出される爆轟ガスの等エントロピー状態での状態方程式を組み合わせた、地山損傷抑制を目的とした設計支援ツールの開発を行った。システムは、一般的なパーソナルコンピュータで計算が可能なので、地山の性状に応じて現場で迅速かつ簡便に運用が可能なることを目的とした。本論文では、上記システムの概要について述べ、SB発破に特有のデカップリング装薬を爆轟ガスの等エントロピー状態での状態方程式によって表現する方法、現場で容易に得られる地質調査及び岩石試験結果に基づき設計支援ツールに入力する掘削対象岩盤物性値を算出する方法について論じた。

また、設計支援ツールにより坑内弾性波探査によって求めた損傷領域の実測結果を検証し、損傷領域推定に大きな影響を与える岩盤の動的強度取り扱い方法について考察し、本設計支援ツールでの設定方法を明らかにした。

1. 緒言

発破が用いられることの多い山岳トンネルにおいて、NATM (New Austrian Tunneling Method)は、地山の支保力を最大限活用し、掘削の自由度を高め、建設コストを削減できる経済的で安全性の高い工法として現在ではほぼ標準工法として広く用いられている。地山の支保力を損なわないためには、掘削において平滑な掘削面の形成と地山損傷を極力抑制する必要がある、スムーズブラッシング(SB)がその手段として用いられてきた。SBは、トンネル最外周面に沿って通常より密に配置した装薬孔に小孔径の爆薬などを用いて低密度に装填することにより爆薬の衝撃的破壊力を和

らげ、爆発ガスの膨張力により平滑な掘削面と地山損傷の低減を達成せんとするものである。起爆は、SB装薬孔を精度良く斉発出来る起爆手段が良いとされ、近年では、ICタイマーを内蔵した高秒時精度電気雷管を使用したSBが実用化されつつある¹⁾。

一方、SBの装薬孔配置(孔間隔・抵抗線)、装薬方法(装薬密度、タンピング長)、装薬量、雷管の秒時精度など、SBの設計は、地山の性状・変化に応じて適宜なされるべきものであるが、現実には、個々の現場において試行錯誤的にSB条件を求めている状態である。判断基準も、SBに求められる機能が掘削面の平滑性と余掘の削減に着目されていたことを反映し、のみ跡の状態観察など視覚的・表面的なものがほとんどであった。

しかしながら近年では、トンネル断面の大型化、掘削効率の向上を目的とする長孔発破の社会的要請が強まり、支保構造の効率化、安全性の確保の観点からSBに対しても地山損傷の抑制効果に焦点が当てられるようになってきた²⁾。そして、この点をも含めて、トンネル掘進に伴って変化する地山状況に応じたSBの最適化が要求されてきている。

そこで筆者らは、SBにおける岩石破壊プロセスとそのメカニズムに関する基礎研究とともに地山の性状

1997年3月24日受理

*旭化成工業株式会社化薬研究所

〒100千代田区内幸町1-1-1

TEL 03-3507-7812

FAX 03-3507-2670

**熊本大学工学部環境システム工学科

〒860 熊本市黒髪2-39-1

TEL 096-342-3694

FAX 096-342-3694

***熊本工業大学土木工学科

〒860 熊本市池田4-22-1

TEL 096-326-3111

FAX 096-326-3000

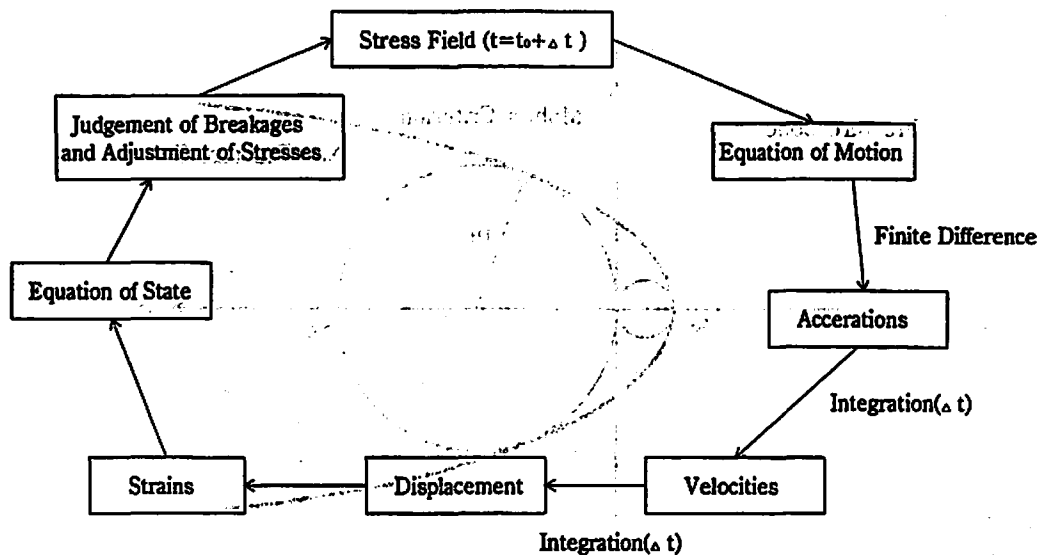


Fig. 1 Feedback loop for calculation of stress wave and fragmentation process

に応じたSB最適設計のための設計支援ツールに関する研究を実施してきている。前者の基礎研究の成果^{3,4)}は別に報告しているが、そこで用いられている数値シミュレーション手法は比較的高性能なコンピュータを必要とし、現状では、解析対象・領域も限られている。すなわち、現時点では、この数値シミュレーション手法を現場レベルでの設計支援ツールとして使用することは困難な場合が多いと言わざるを得ない。そこで、上記の手法と別に、現場で迅速にかつ簡便に使用可能な設計支援ツールとして、一般的なパーソナルコンピュータで計算が可能なシステムの開発を試みた。すなわち、目的とする設計支援ツールは、佐々らによって開発されたラグランジュ差分法を用いた動的応力解析プログラム“DAYS-2コード”⁵⁾をベースとし、爆薬による震源の表現方法として、田中らによって開発された爆轟特性計算プログラム“KHTコード”⁶⁾より算出される爆轟ガスの等エントロピー状態での状態方程式を用いるものである。

ここでは、本設計支援ツールの概要を示した後、過去に得られたトンネルでの地山損傷領域測定結果をもとに本手法の有効性を検証するとともに、解析条件設定時の留意点を示した。

2. 設計支援ツールの概要

設計支援ツールは、佐々らによって開発されたラグランジュ差分法を用いた動的応力解析プログラム“DAYS-2コード”をベースとし、爆薬による震源の表現方法として、田中らによって開発された爆轟特性計算プログラム“KHTコード”より算出される爆轟ガスの等エントロピー状態での状態方程式を用いたものである。以下にその概要を示す。

2.1 DAYS-2コードについて

このプログラムは、G. ManchenとS. Sackによって1964年に発表された“Tensor-code”とほぼ同じ考え方で、京都大学佐々らによって開発されたもので、爆薬などの爆轟によって投射される応力波の伝播に伴って発生する材料内の応力状態及び破壊状態をシミュレートするものである。

Fig. 1は、本プログラムの計算方法の概念を説明したものである。計算は、Fig. 1の各ステップを微小時間の進行とともに繰り返すことにより行われる。以下に箇条書きで各ステップの概要を示す。

- ①ある時間に発生している応力場に対し、ラグランジュ座標系で表示された運動量保存則を適用し、変位加速度を求める。
- ②これを微小時間で積分することにより変位速度を求め、再度この変位速度を積分することにより変位を求める。
- ③この変位より材料のひずみを求め、これを材料の状態方程式に適用することにより次の時間における材料内の応力状態を求める。
- ④ここで、この応力状態が材料の強度以上でないかを判断し、強度を越えていれば、その部分は破壊したものとし、発生している応力を破壊に見合うように修正する。
- ⑤修正された応力状態を現在より微小時間進んだ次の時間における応力状態とし、再度運動量保存則を適用して、変位加速度を求める。
- ⑥以後同様に、定められた時間になるまで各ステップを繰り返す。

続いて、採用した破壊の判定方法及び修正方法について示す。

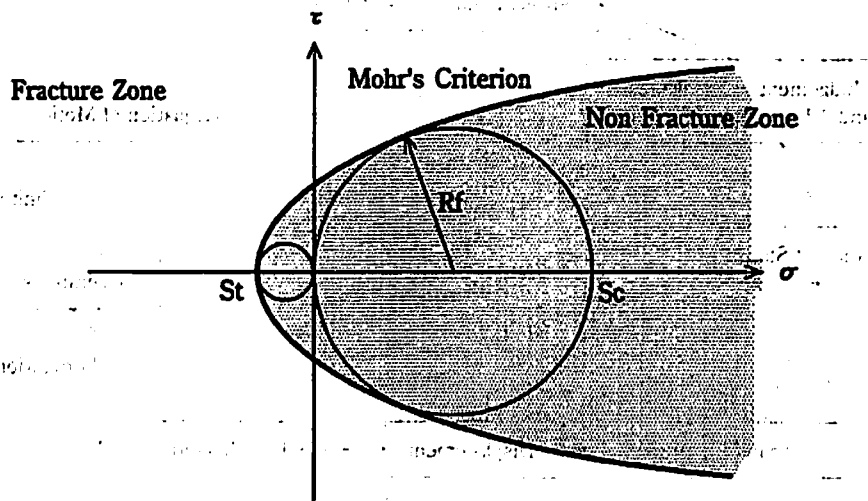


Fig. 2 Fracture criteria

破壊の判定には、Fig. 2に示すものを用いた。すなわち、直応力 σ とせん断応力 τ で表現される σ - τ 平面において、動的一軸引張強度(St)を通り、材料内の応力状態が動的一軸圧縮強度(Sc)となったときの応力円(中心が $\sigma = Sc/2$, $\tau = 0$ で、半径が $Sc/2$)に接する放物線の外側とした。

また、引張破壊とせん断破壊に場合分けし、破壊したと判定された場合には、次の修正を発生応力に加え、次ステップにおける応力状態とした。

①引張破壊の場合(最大主応力 σ_3 が引張強度をこえた場合)

最大主応力 σ_3 が動的一軸引張強度をこえた場合、 σ_3 と直行する亀裂が発生したと考え、即座に、(1)式で示される修正を加え、 σ_3 方向の引張強度を零とする。なお、 σ_1' 、 σ_2' 、 σ_3' は、修正後の応力、 λ 、 μ はラーメの定数である。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1' &= \sigma_1 - \lambda\sigma_3 / (\lambda + 2\mu) \\ \sigma_2' &= \sigma_2 - \lambda\sigma_3 / (\lambda + 2\mu) \\ \sigma_3' &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

②せん断破壊の場合

最小主応力 σ_1 と最大主応力 σ_3 の平均 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 、 $\tau = 0$ を中心とし、 σ_3 と σ_1 の差 $\sigma_3 - \sigma_1$ を半径とする応力円の半径(Rs)と、同一点を中心とし、破壊の判定線に接する応力円の半径(Rf)を比較し、 $Rs > Rf$ ならば、 $Rs = Rf$ となるように各主応力を修正し、全ての方向の引張強度を零とする。また、ヤング率及びポアソン比についても破壊した場合の材料特性に変更する。

2.2 爆源の表現方法(爆轟ガス圧の時間履歴表現)

爆発現象の理論計算及びシミュレーションにおいて

は、爆源の表現が不可欠である。Sharpeや伊藤、佐々木らの研究により得られた(2)式は、従来より空洞の内壁に作用する爆轟ガス圧の時間履歴を表現する一手法として用いられてきたが、火薬の種類、デカップリングの状態により変化する各パラメータを決定する必要がある。

$$P(t) = P_0 \xi [\exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t)] \quad (2)$$

ただし、 P_0 は、最大作用圧力、 ξ は、 $\text{Max}(P(t)) = P_0$ とする正規化定数、 α 、 β は、 $\alpha < \beta$ なる関係を有し、装薬条件や爆薬種類に関する正定数である。

そこで、いくつかの仮定は伴うが、近年主流となってきた爆轟ガスの状態方程式を用いて爆轟ガス圧の時間履歴を表現する手法を用いることとした。田中らによって開発された“KHTコード”では、爆薬の組成等を決定すれば、爆轟特性計算がなされ、(3)式で示されるC-J爆轟特性から爆轟ガスが等エントロピー膨張したときの体積変化毎の圧力を求めることができる。

$$\ln P = A + B \ln V + C \ln V^2 + D \ln V^3 + E \ln V^4 \quad (3)$$

ただし、 A 、 B 、 C 、 D 、 E は、爆薬によって定まる定数、 V は、爆轟ガスの比容(爆轟ガス密度の逆数)である。

本設計ツールでは下記の仮定の下に、爆薬として指定した要素に上記状態方程式を適用し、各ステップ毎に算出される爆薬要素の比容から圧力を求めた。

- ①爆薬は瞬時に爆轟ガスに変化する。
- ②装薬孔壁には、爆轟ガスが装薬孔内に充満した状態から圧力が作用し始め、その時の圧力は、装薬孔一杯に爆轟ガスが充満したと仮定した時の比容に相当する圧力である。

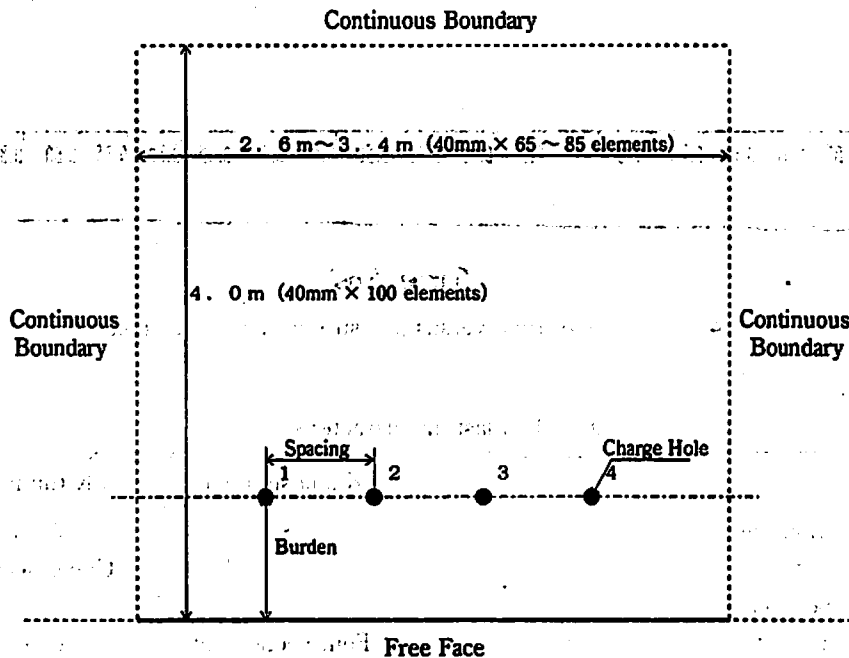


Fig. 3 Model for the computation

2.3 設計ツールの条件設定

2.3.1 解析モデル

SBは、装薬孔に対して出来るだけ全長にわたって均一に装薬する発破方法のため、解析モデルは平面歪問題とし、Fig. 3に示すような、下面を自由面とした半無限媒体内に自由面に平行な4つの装薬孔を配置したものとした。ただし、数値計算の上では、2.6~3.4 m × 4.0 mのブロックで半無限媒体を表現するため、下面を除く3面は波動が擬似的に透過するような連続境界を与えた。要素の大きさ・形状は、全て40 mm × 40 mmの方形とした。要素分割数は、65 × 100ないしは85 × 100で、総要素数は、6500ないしは8500である。装薬孔は、一要素により表現した。なお、その面積は45 mmφの円とほぼ同等である。

計算時間増分は、差分法での安定条件である(4)式を満たすように設定した。従って、計算時間増分は解析するモデルの縦波伝播速度によって異なるが、今回用いたそれは、2.5 μsから4.0 μsである。全計算時間は何れも起爆後1 msとした。

$$\Delta t < 0.5 \times \Delta L / C \quad (4)$$

ただし、 ΔL は、最小要素辺の長さ、 C は縦波伝播速度である。

計算に用いたパーソナルコンピュータはIntel社製CPU Pentium 133 MHzを搭載するノート型のもので、計算時間は、200ステップ当たり約1時間である。従って今回の計算に要した時間は、約1時間から2時間である。現在のプログラムは16ビットコードであり、

32ビットコードへの改良とより高速なパーソナルコンピュータの使用により、30分程度での計算は十分に可能である。

2.3.2 岩盤物性

岩盤物性を表現するため、Days-2コードでは、物性値として、比重、ポアソン比、弾性定数、動的一軸圧縮強度及び動的一軸引張強度を入力する。比重は、岩石供試体の試験結果から得られたものを用いた。動ポアソン比および動弾性定数については、現場にて容易に入手可能な、地質調査より得られた対象トンネル掘削岩盤の縦波及び横波弾性波伝播速度より波動理論から得られる(5)式にて算出した。

$$\nu = \frac{Vp^2 - 2Vs^2}{2(Vp^2 - Vs^2)} \quad (5)$$

$$E = 2(1 + \nu) Vs^2 \rho$$

ただし、 ν は動ポアソン比、 E は動弾性定数、 Vp は縦波弾性波伝播速度、 Vs は横波弾性波伝播速度、 ρ は密度である。

動的一軸圧縮強度及び動的一軸引張強度は、発破による損傷領域の推定に最も影響するものと考えられ、佐々によれば、岩石供試体試験で求められた静的強度の3倍とすると、Days-2コードによる計算結果と実測結果が良く一致すると報告されている⁹⁾。

今回は次章において、硬岩及び中硬岩で得られたスムースプラスティングによる損傷領域の実測結果と本設計ツールの計算結果を比較し、動的強度の静的強度に対する妥当な倍率を再検討した。

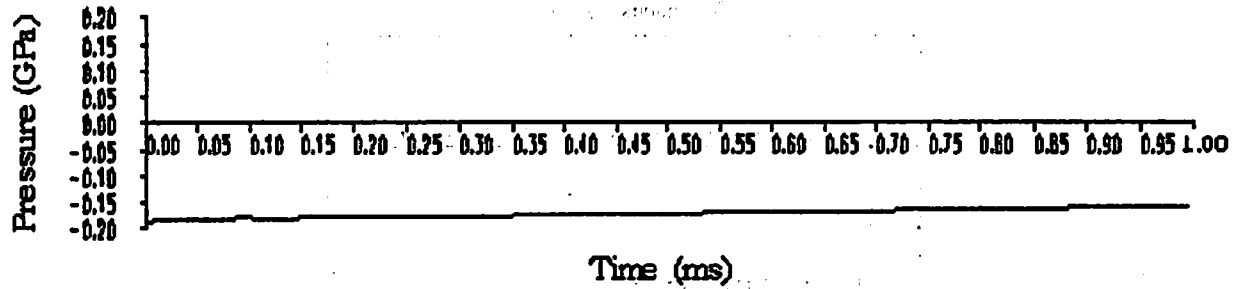


Fig. 4 A sample of time versus pressure in the charge hole

Table 1 Blasting characteristics

	Kamaishi mine	K tunnel
Cross-section area (m ²)	8.0	65.3 (Upper section)
Advance per round (m)	2.5	1.2
Type of cut	Four section cut	V cut
Borehole diameter (mm)	42	42
Number of boreholes	59	120
Explosives consumption per round (kg)	105.0	53.2
Specific charge (kg/m ³)	5.23	0.68
Specific number of boreholes (holes/m ²)	7.38	1.83

2.3.3 スムースプラスティング爆薬

爆薬は、SB用含水爆薬(旭化成工業(株)製サンベッククス400S、薬径20mm、比重1000kg/m³)とし、本組成よりKHTコードを用いて得られた等エントロピーでの状態方程式を用いた。得られた各パラメータは、 $A = -3.49$ 、 $B = -2.55$ 、 $C = 0.412$ 、 $D = -0.047$ 、 $E = 0.00210$ である。なお、45mmφの装薬孔にデカップリング装薬したものと仮定し、初期密度を260kg/m³で与えた。Fig. 4は、装薬孔内圧力時間履歴の一例で、最大圧力は186MPaであった。

2.3.4 起爆方法

起爆は、DS段発電気雷管と電子遅延式雷管を想定した。表現方法は、DS段発電気雷管が単孔による爆発、電子遅延式雷管が、4孔の同時斉発(起爆遅れ零)とした。

DS段発電気雷管を単孔の爆発と表現したのは、総計算時間1msに対し、SBに多用される10段程度の起爆ばらつき(標準偏差)が約120msあり¹⁰⁾、隣接の4孔が1ms以内に爆発する可能性はきわめて低いと判断したためである。なお、この時に残る3孔は周囲の岩盤に比べ密度の低い状態で存在するため、実際のSBと同様に空孔的役割を示す。電子遅延式雷管については、標準偏差60μsの秒時精度(旭化成工業(株)製EDD[®])を考慮し、起爆誤差を持たせたシミュレーション

を数ケース実施して統計的に平均的損傷領域寸法を求めることも可能であったが、この程度の起爆誤差であれば、起爆誤差零として求めた損傷領域寸法と平均的な大きさは変わらないとの結論が得られていたため⁴⁾、複数回の計算と統計処理を必要とせず、1度の計算で短時間に結論の得られる起爆遅れ零での計算とした。

3. 現場実績の評価

DS段発電気雷管と高秒時精度電気雷管を用いてSBを実施し、トンネル側壁の損傷領域を坑内弾性波探査によって求めた実績を今回開発したSB設計支援ツールにて検証した。

検証に際し、岩盤の動的強度と静的強度の比をパラメータとし、実測結果とSB設計支援ツールによる計算結果が一致するときの傾向を捉えた。なお、実測結果には、硬岩に属する釜石鉱山¹¹⁾と、軟岩に近い中硬岩に属するKトンネルでのものを用いた。

3.1 損傷領域実測現場の概要と結果

3.1.1 実測現場の概要

Table 1に実測現場の掘削諸元、Table 2に、SBの諸元、Table 3に、岩盤物性値を示す。Table 3に示す通り、釜石鉱山は、弾性波速度が約6000m/s、一軸圧縮強度が約300MPaを示す非常に緻密で硬質

Table 2 SB characteristics

	Kamaishi mine		K tunnel	
	EDD	DSD	EDD	DSD
Number of SB holes	14	14	19	23
Hole length (m)	2.7	2.7	1.4	1.4
Burden (m)	0.45	0.45	0.8	0.8
Spacing (m)	0.45	0.45	0.8	0.6
Explosive type	Sunvex-400S	Sunvex-400S	Sunvex-400S	Sunvex-400S
Charge weight per hole (kg/hole)	1.20	1.20	0.40	0.40
Decoupling coefficient	2.1	2.1	2.1	2.1

Table 3 Rock properties

	Kamaishi mine	K tunnel
Rock type	Grandiorite	Sandstone/Shale (Alternation of strata)
Rock quality	Hard rock	Medium hard rock
Density (kg/m ³)	2.66	2.65
Young's modulus (dynamic, GPa)	75.5	33.3
Poisson's ratio (dynamic)	0.24	0.28
P wave velocity (m/s)	5780	4010
S wave velocity (m/s)	3380	2220
Uniaxial compressive strength (static, MPa)	294.0	22.0
Uniaxial tensile strength (static, MPa)	12.0	1.5

Table 4 Outlines of in-situ seismic survey

	Kamaishi mine	K tunnel
Length of traverse line (m)	2.0~4.0	27.6
Pickup interval (m)	0.1~0.5	1.2
Type of source	Hammer	Hammer
Type of pickup	Piezoelectric	Moving coil, $f_0=28\text{Hz}$
Specification of recorder (frequency response, sampling rate)	Digital storage oscilloscope (20MHz sampling)	Digital data logger (5~1536Hz)

な岩盤である。これに対しKトンネルは、弾性波速度は約4000 m/sを示したが、一軸圧縮強度が約20 MPaの脆弱な岩盤で、対照的なものである。SBは、Table 2に示す諸元で実施した。釜石鉱山では、高秒時精度雷管(EDD)及びDS段発電気雷管(DSD)ともに孔間隔/抵抗線を0.45 m/0.45 mとしたが、Kトンネルでは、予備試験にてEDDの方が平滑性が高かったことから、孔間隔/抵抗線を0.8 m/0.8 mにし、DSDの孔間隔/抵抗線0.6 m/0.8 mよりも孔間隔を拡大した孔配置で掘削を行った。ただし、装薬量・装薬方法は同一としている。

3.1.2 損傷領域実測結果

損傷領域は、トンネルの側壁部にて坑内弾性波探査試験を実施することにより求めた。測線はトンネル長手方向にとり、釜石鉱山では検出器の間隔を0.1から0.5 m、Kトンネルでは1.2 mとした。両トンネルで実施した坑内弾性波探査試験の概要をTable 4に示す¹²⁾。

損傷領域の実測結果をFig. 5に示す。釜石鉱山では、EDDで0.1から0.2 m、DSDで1.0から1.2 mの損傷領域が確認された。またKトンネルでは、EDDで0.8から1.5 m、DSDで1.3から2.2 mの損傷領域

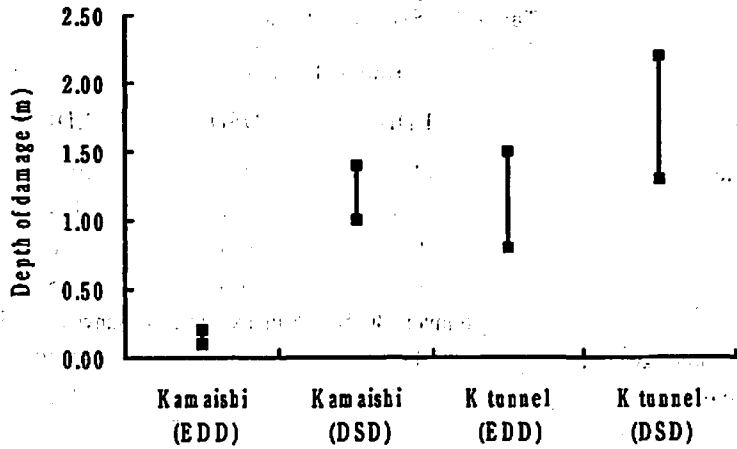


Fig. 5 Results of measured depth of damage in Kamaishi mine and K tunnel

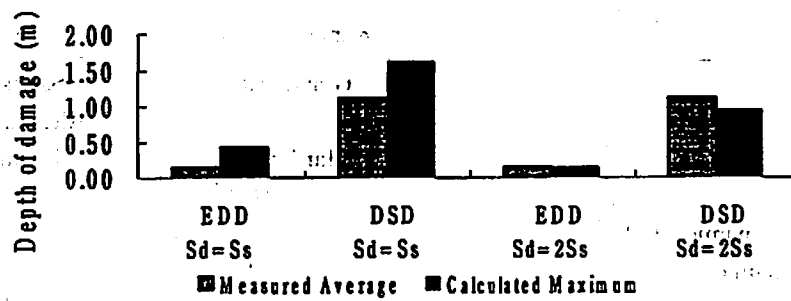


Fig. 6 Comparison of measured average depth of damage versus calculated maximum depth of damage (Kamaishi case)

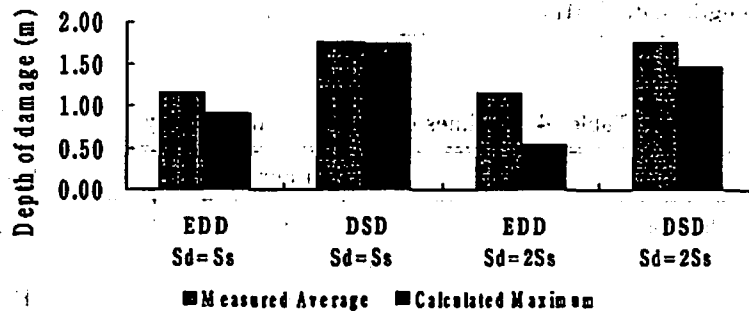


Fig. 7 Comparison of measured average depth of damage versus calculated maximum depth of damage (K tunnel case)

が確認された。

3.2 設計支援ツールによる実測結果の検証

Table 2 及び Table 3 に示した SB パターンと岩盤物性値を用いて、釜石鉱山及び K トンネルの損傷領域を設計支援ツールにより計算した。なお、動的強度については、それぞれについて静的強度の 1 倍 ($S_d=S_s$) 及び 2 倍 ($S_d=2S_s$) のケースを実施した。釜石鉱山の結果を Fig. 6 に、K トンネルの結果を Fig. 7 に示す。何れにおいても、実測結果の平均損傷領域深度と計算結果の最大損傷領域深度を比較した。なお計算結果の最大損傷領域深度は、モデルの中央 2 孔近傍で発生した最深部破壊要素の、装薬孔中心からの距離とした。また結果出力の一例として、釜石鉱山をモ

デルとし、動的強度を静的強度の 2 倍とした EDD 及び DSD の損傷領域予測結果を Fig. 8 及び Fig. 9 に示す。図中の■は装薬孔、メッシュ内の一印は、破壊時の最小主応力方向を表す。

釜石鉱山のケースでは、動的強度を静的強度の 2 倍と仮定した場合が EDD、DSD とともに良く一致しており、K トンネルのケースでは、動的強度が静的強度に等しいと仮定した場合が EDD、DSD とともに良く一致している。これは、一般に動的強度が静的強度に比較して大きいとする考え方に寸法効果の影響が加わったものと解釈できる。すなわち、緻密で欠陥の少ない硬質な岩盤では、岩盤の示す強度と岩石試験片の示す強度差は小さく、岩石試験片から得られた静的強度が

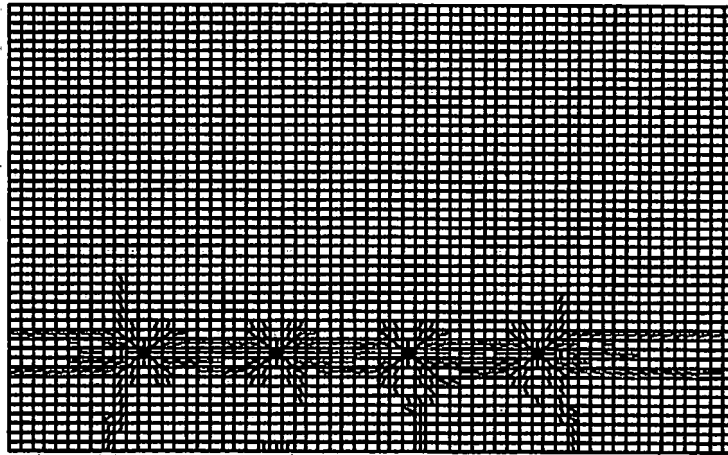


Fig. 8 Example of damage area calculation result for Kamaishi mine EDD SB model ($S_d=2S_s$)

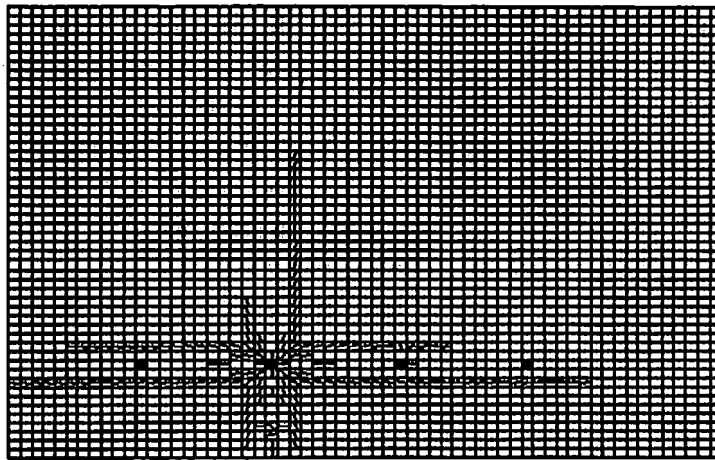


Fig. 9 Example of damage area calculation result for Kamaishi mine DSD SB model ($S_d=2S_s$)

ら岩盤の動的強度を推定する場合、岩石試験片の示す静的強度に比べ動的強度を大きく見積る必要があるが、亀裂の発達した脆弱な軟質の岩盤では、岩盤の示す強度は岩石試験片の示す強度より小さく、岩石試験片から得られた静的強度から岩盤の動的強度を推定する場合、静的強度はすでに岩盤の突状よりも高く見積られる傾向があるため、岩盤の動的強度は岩石試験片の静的強度に比較して大きく見積る必要が少ないことを示していると考えられる。

従って、本設計支援ツールは、損傷領域の推定に大きく影響を与える動的強度の取り扱いに関し、上記の留意点に基づき運用を行えば、かなり精度良く損傷領域の推定が可能であることがわかった。

4. 結 論

本論文では、地山の性状に応じて現場で迅速かつ簡単に一般的なパーソナルコンピュータで計算が可能な、

地山損傷抑制を目的とした設計支援ツールについて概要を示した後、過去に得られたトンネルでの地山損傷領域測定結果をもとに本手法の有効性を検証するとともに、解析条件設定時の留意点を示した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) SB発破に特有のデカップリング装薬を、爆轟特性計算プログラム“KHTコード”より算出される爆轟ガスの等エントロピー状態での状態方程式によって表現する方法として、装薬孔要素の初期密度を爆轟ガスが装薬孔一杯に充満したと仮定したときの密度とした。
- (2) 現場で容易に入手可能な地質調査及び岩石試験結果より得られる岩盤の比重と、縦波弾性波速度及び横波弾性波速度を用いて算出した動ポアソン比及び動弾性定数を設計支援ツールの掘削対象岩盤物性値として用いた。

- (3) 今回開発した設計支援ツールにより、坑内弾性波探査によって求めた損傷領域の実測結果を検証し、損傷領域推定に大きな影響を与える岩盤の動的強度取り扱い方法について考察した。この結果、岩盤の強度と岩石試験片の強度差が小さい緻密な硬岩については、岩盤の強度を岩石試験片強度の2倍程度、岩盤の強度と岩石試験片の強度差がある亀裂性の脆弱な岩盤については、岩盤の強度を岩石試験片強度とほぼ同程度に見積ればよいことを明らかにした。
- 今後は、本設計支援ツールを用いて、想定した岩盤に対して損傷領域を最小限に抑制できるSB設計を実施し、SBの主要因子である、孔間隔、抵抗線、薬種、起爆方法の各種岩質に対する設定基準を明らかにする予定である。

謝 辞

本研究の実施に当たって、Days-2コードの使用許諾並びに有益なご助言をいただいた京都大学佐々宏一教授と、KHTコードに関するご指導をいただいた通産省工業技術院田中克己博士に謝意を表します。

文 献

- 1) 三浦正信, 赤松英文, 広野進, 松永博文: トンネルと地下, 26, 9 (1995)
- 2) 田中義晴, 平田篤夫, 山本雅昭, 松永博文: 火薬学会誌, 56, 1, p2~8 (1995)
- 3) 金子勝比古, 松永幸徳, 山本雅昭: 火薬学会誌, 56, 5, p207~215 (1995)
- 4) 金子勝比古, 山本雅昭, 諸岡敬太, 田中義晴, スペースブラッキングにおける起爆秒時誤差の影響, 火薬学会誌に投稿中
- 5) 佐々宏一, 伊藤一郎: 材料, 21, 221, p123~129 (1972)
- 6) 火薬学会編: 火薬ハンドブック, p200~204 (1987)
- 7) Sharpe, J. A.: Geophysics, 18, p144~154 (1942)
- 8) 伊藤一郎, 佐々宏一: 水曜会誌, 16, 2, p75~78 (1966)
- 9) K. Sassa and I. Ito: Advances in Rock Mechanics (Proc. of 3rd. ISRM Congress), 2B, p1501~1505 (1974)
- 10) 宮地明彦, 横田茂昭, 古川浩平, 中川浩二: 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 24, p400 (1992)
- 11) 文献2
- 12) 文献2

Development of smooth blasting design support system based on computer simulation (I)

by Masaaki YAMAMOTO*, Katsuhiko KANEKO**, Atsuo HIRATA***
and Hirofumi MATSUNAGA*

We have been developing a computer simulation system which can aid to design optimum smooth blasting according to rock quality and structure. This system is based on "Days-2 Code" which involved the finite difference approximation to the momentum equations described with Lagrangian coordinate. A equation of state of explosion gas in isentropie condition which is calculated from "KHT-Code" is used to express explosion gas expansion in a charge hole.

We set the target of this system on following.

- (1) It can work on a common personal computer.
- (2) It can use quickly and simply according to rock quality and structure at a site office.

First, the outline of this system, the expression technique of decoupled charge which is typical in smooth blasting with equation of state of explosion gas in isentropie condition and the calculation method of input parameters for rock properties from geological survey and rock sample test results were explained.

Next, we examined the accuracy of this system by comparing the damage zone estimation results from this system with measured results from in-situ seismic survey. In this process, the estimation technique of dynamic strengths, which most effective on a region of damage zone, from static ones was discussed.

(*Explosives Laboratory, Asahi Chemical Industry Co., Ltd., 1-1-1
Uchisaiwai-cho, Chiyoda-ku, Tokyo 100, JAPAN.

**Department of Civil Engineering & Architecture, Kumamoto University, 2-
39-1 Kurokami, Kumamoto 860, JAPAN.

***Department of Civil Engineering, Kumamoto Institute of Technology, 4-22
-1 Ikeda, Kumamoto 860, JAPAN.)