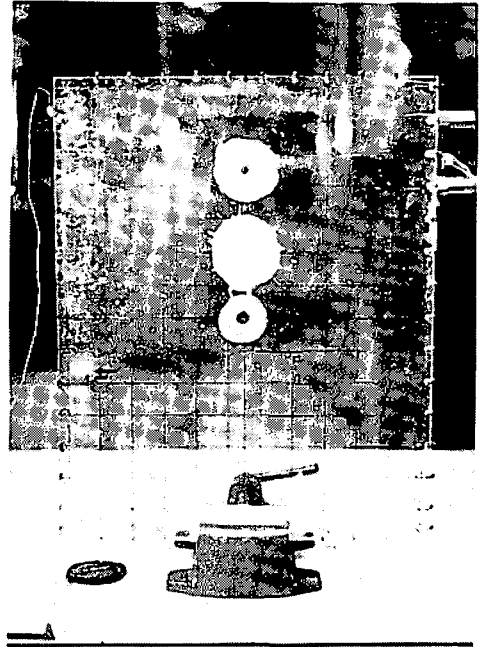


(a) Acrylic resin plate without crack



(b) Acrylic resin plate without crack generated by blasting

Fig. 1 Photograph of acrylic resin plate used in this model experiment

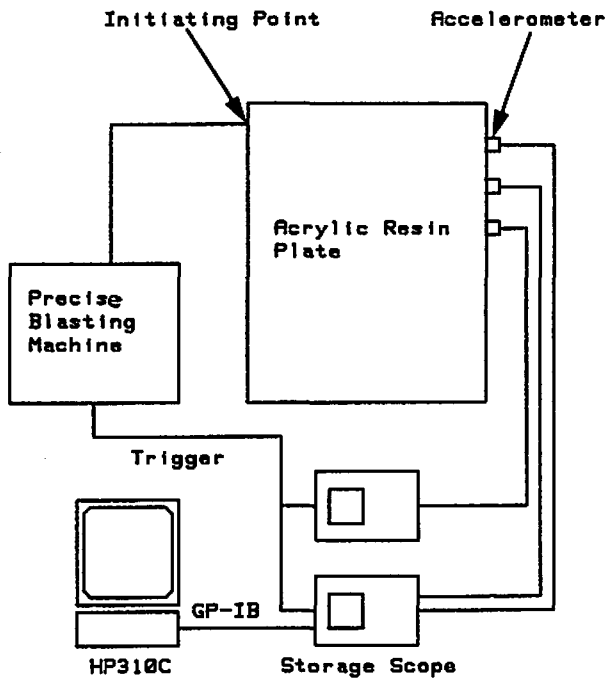


Fig. 2 Measuring system for model experiments

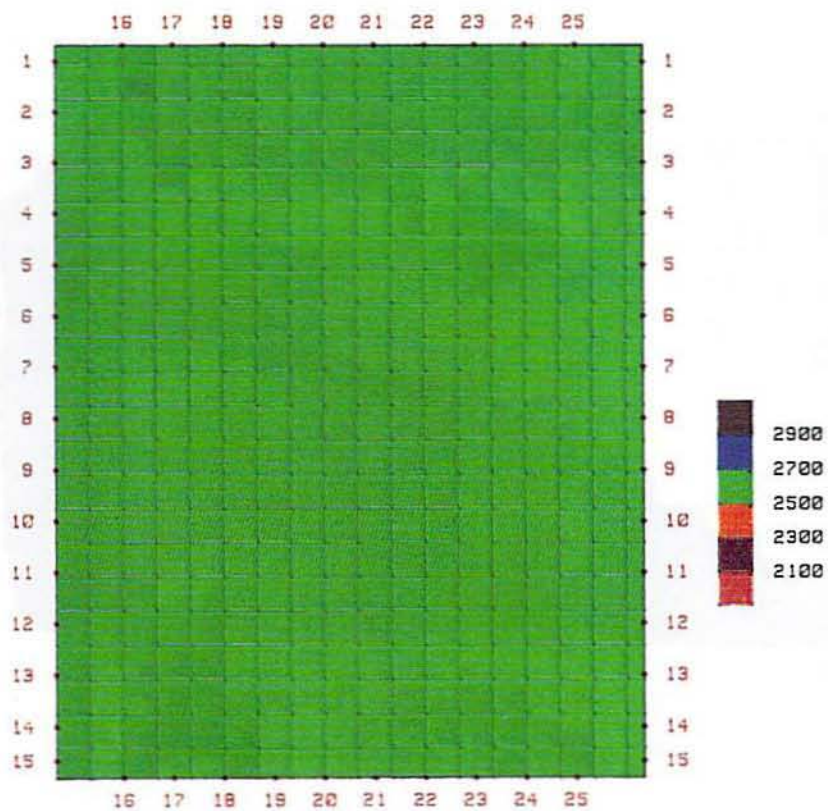


Fig. 3 Result of seismic tomography analysis for acrylic resin plate without crack

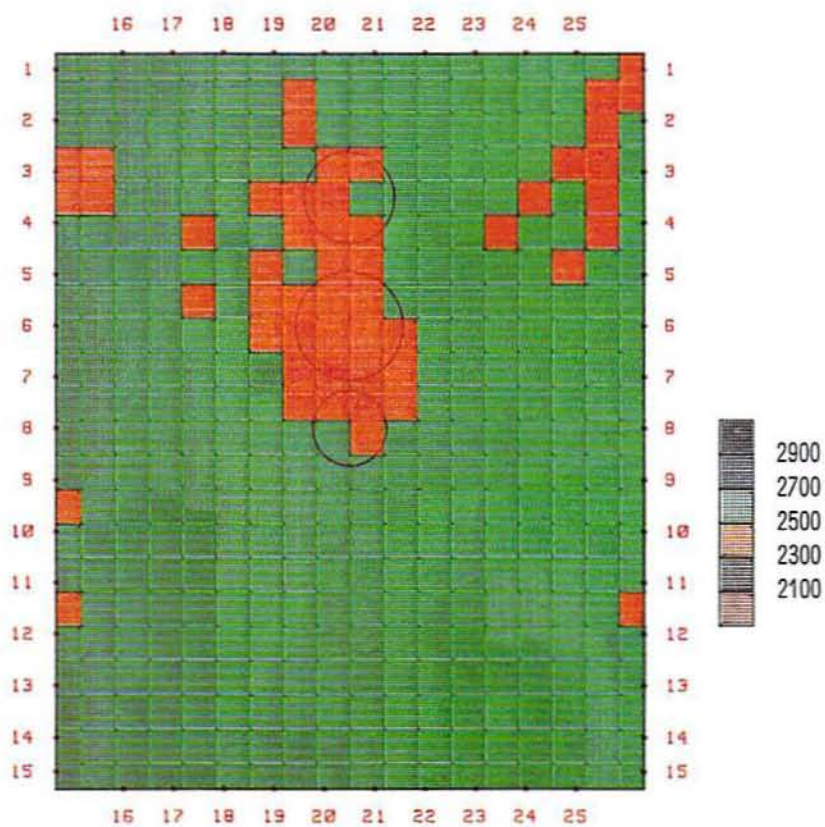


Fig. 4 Result of seismic tomography analysis for acrylic resin plate with crack generated by blasting

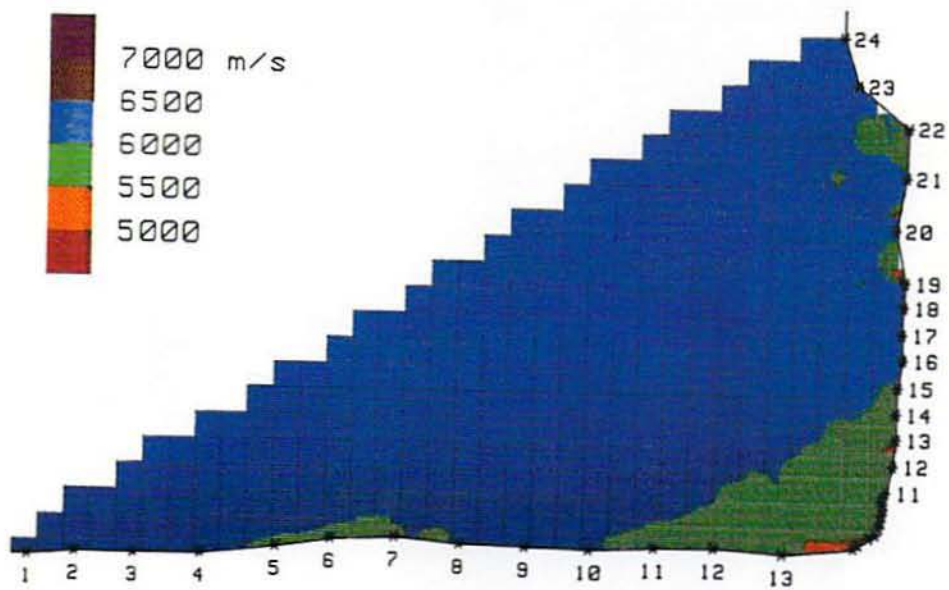


Fig. 10 Result of seismic tomography analysis for field test

信号として、3個の加速度計で弾性波を計測した。加速度計は、ティアック社製圧電型加速度計(707型、感度100mV/G、応答周波数3~14,000Hz、使用最大加速度15G)を使用し、アクリル板にボルトで固定した。

モデル実験では、雷管に使用される電橋線部を発振点に張付け、この電橋線を精密起爆器で起爆して、弾性波の発振点とした。弾性波の計測では、発振点から受振点までの時間を正確に計測するために、精密起爆器からの起爆信号をトリガー信号として、プリアンプ(ティアック製SA16)を介して2台のストレージスコープを用いてサンプリングレート10MHz(100ns)で計測した。計測した波形データは、GPIBを介してコンピュータ(HP310C)に取り込み到達時間を計測した。計測の概略をFig.2に示す。

### 3. 解析方法

弾性波トモグラフィーの解析方法としては、波線追跡によって得られた計算走時と観測走時の誤差をこの波線が関与するすべての要素に分配することで要素の速度分布を更新し、この誤差が小さくなった時点で解析を終了するSIRT法を用いて解析した。<sup>4)</sup>

解析では解析区間を $2 \times 2$  cmの要素に分割して、それぞれの要素の速度を計算して破壊領域を推定する。

### 3.4 解析結果

亀裂のないアクリル板の解析では、各要素の弾性波速度が2,500~2,700m/sを示し、アクリル板のP波伝播速度に等しくほぼ均一であることが判明した。これに対して亀裂を発生させたアクリル板は亀裂領域付近で弾性波速度が2,300~2,500m/sの遅い領域が現れる。このことから雷管によって発生した亀裂の影響が現れ、亀裂を把握できたものと思われる。

これらの解析結果からアクリル板の用いた小規模のモデル実験でも起爆時間を正確に計測することで十分に破壊領域を計測できることが判明した。解析結果をFig.3とFig.4に示す。

### 3.5 アクリル板を伝播する弾性波の観測

アクリル板を伝播する弾性波を光弾性装置と高速度カメラで観測した。実験で使用した高速度カメラはCordin社製フレーミングカメラモデル124である。撮影条件は、撮影速度: $2 \times 10^5$  駒/秒、撮影駒数:26、フラッシュ:クセノンランプ、フィルム:35mmカラーASA100で行った。実験ではモデル実験の発振で使用した電橋線の線爆発により圧力波を入力し、伝播する弾性波を観測した。観測の結果をFig.5に示す。

高速度カメラによる観測結果から、弾性波は伝橋線による起爆点から波道が放射線に広がり、伝播することを確認した。また、観測した弾性波の伝播速度が

約2,600m/sになりアクリル板を伝播するP波の伝播速度に等しく、P波の伝播を観測したことが判明した。

### 3.6 弾性波の伝播シミュレーション結果

アクリル板を伝播する弾性波を数値シミュレーションし、高速度カメラの観測結果と比較検討した。数値シミュレーションでは、解析区間を $1 \times 1 \times 1$  cmの要素に分割して3次元運動方程式をラグランジェ座標を用いて差分表により解きシミュレーションしたものである。<sup>5)</sup> 数値解析用のコンピューターにはHP730CRXを使用した。数値シミュレーションによる解析結果をFig.6に示す。解析結果から高速度カメラによる観測結果と同様に圧力波の入力後に弾性波が放射状に広がり、観測波形と比較的に良く一致した。これらの結果から、アクリル板を伝播する弾性波を十分に数値シミュレーションできることが判明した。

## 4. 弾性波トモグラフィーの現場実験

### 4.1 計測現場の概要

計測現場はL字型の構造になっており、深部にあるトンネル部と連絡坑道の岩盤を調査対象として精密起爆による弾性波トモグラフィーの現場実験を実施した。Fig.7に計測現場の概略を示す。深部トンネル部は長さ約35m、高さ約4m、幅約4mの空間を形成しており、広大な地下空間になっている。Fig.8に計測現場を示す。

計測現場の地質状態は、坑道入口から約25m付近は坑道の掘削前のボーリング調査からRQD値(0~19)の最も悪い部分が存在することが判明していた。また、トンネル部の掘削後の地質調査からも粘土・方解石を伴う顕著な割れ目が数本存在することが確認された。いずれの割れ目も連続性が良く、これらの顕著な割れ目には同系統のジョイントが10cm間隔で発達しており、小規模の断層になっていると推定される。これらの観測結果から坑道入口から約25m付近にある断層は計測対象の岩盤の深部まで発達していることが予想される。

### 4.2 計測方法

精密雷管による発振点は坑道入口から連絡坑道の側面に沿って、トンネル部入口から2mまでを20cm間隔、2~10mまでを1m間隔、10~20mまでを2m間隔で計24箇所に設定した。受振点はトンネル入口から2.5m間隔で14箇所に設定した。弾性波計測用の加速度計は鉄製の杭を岩盤に埋め込みモルタル固定し、その上にティアック社製圧電型加速度計(707型)をネジで固定した。

計測では、精密起爆器からの起爆信号をトリガー信号として、加速時計の信号をプリアンプ(ティアック製SA-6)を介してデータレコーダ(ティアック製DRX-1)にデジタルに取り込み、フロッピーディス

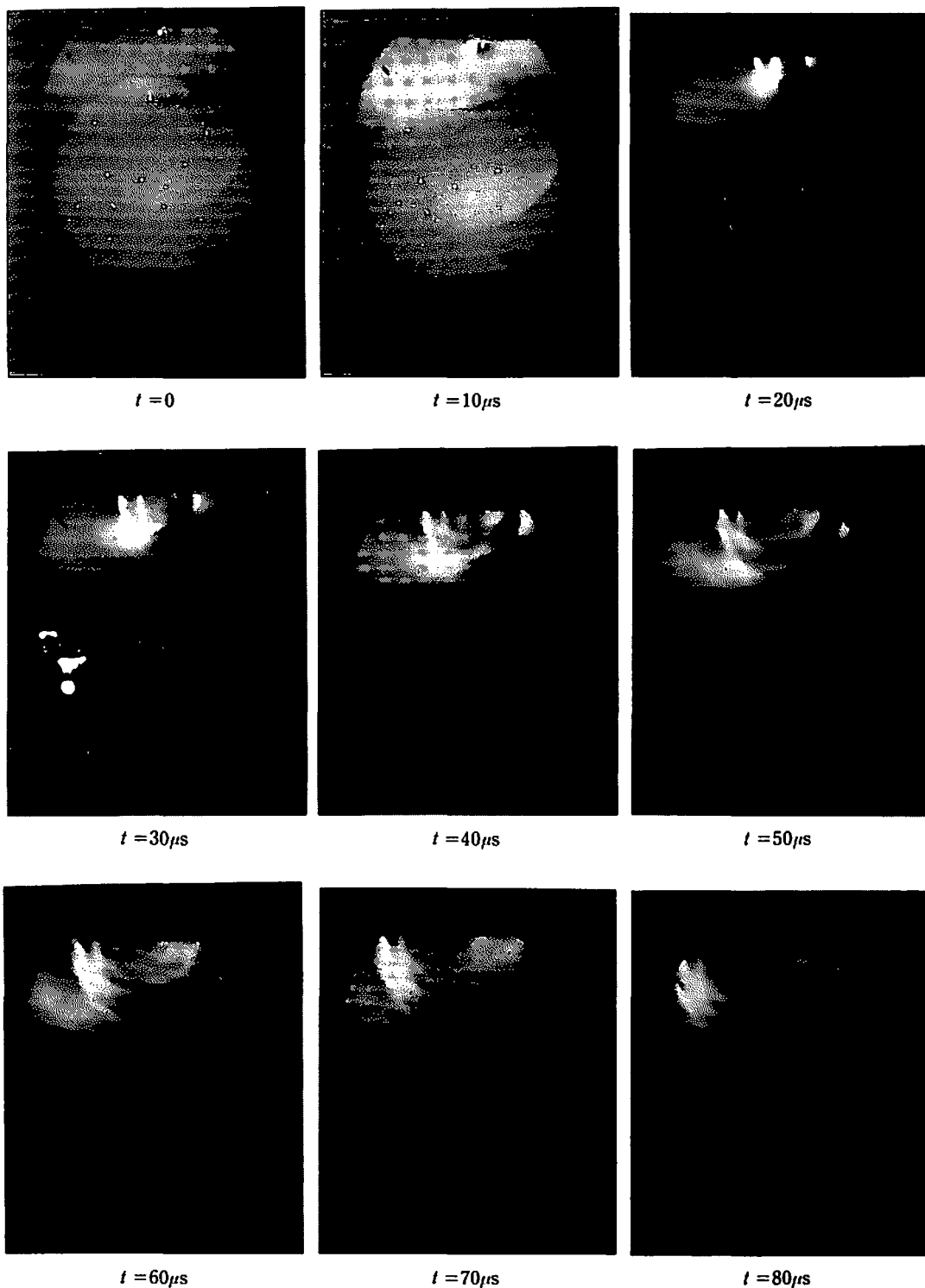


Fig. 5 The photograph of seismic wave propagation in the acrylic resin plate by high speed camera

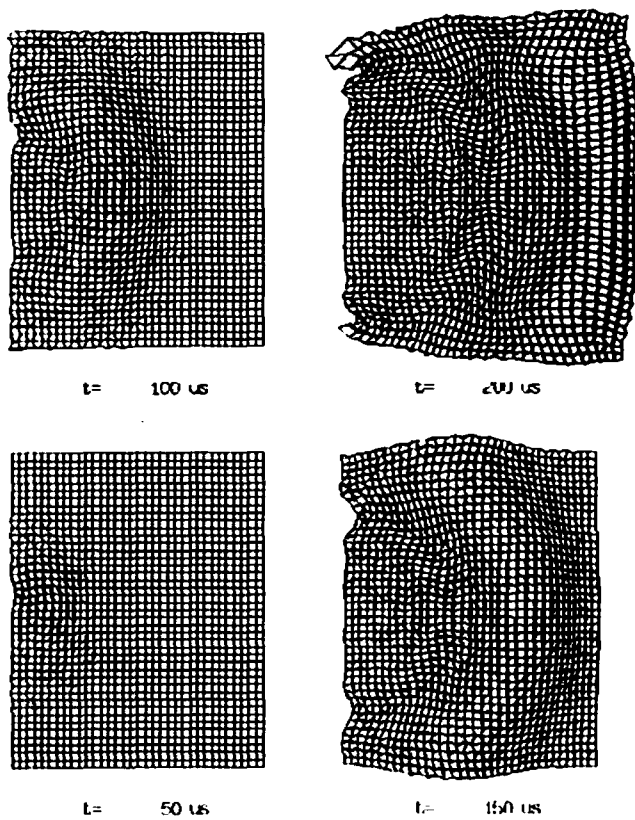


Fig. 6 Result of numerical simulation for seismic wave propagation in the acrylic resin plate

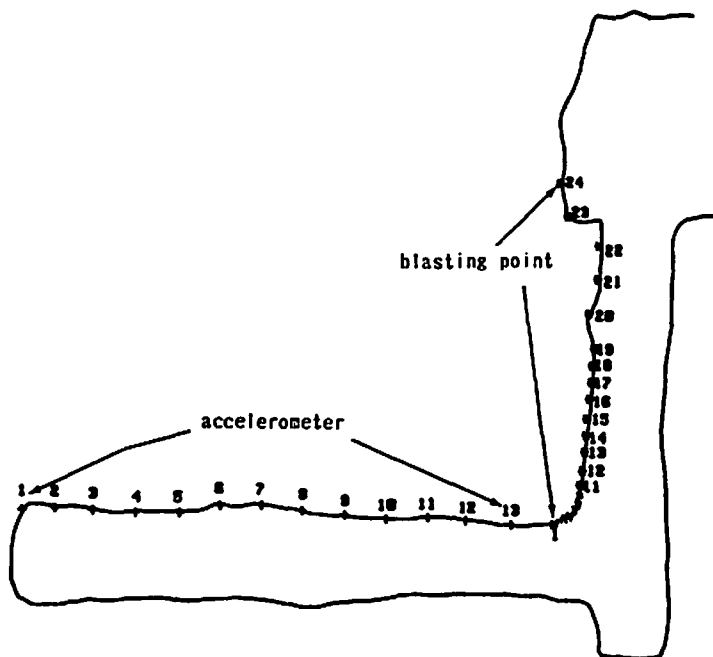


Fig. 7 Figure of test field for seismic tomograph

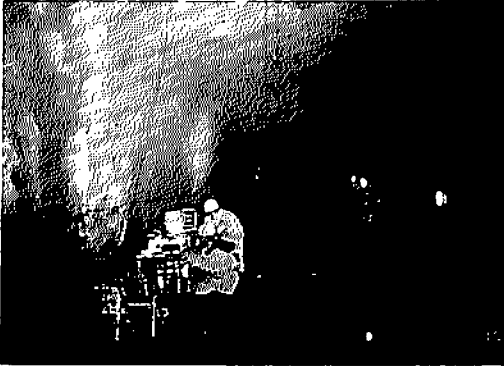


Fig. 8 Photograph of test field for seismic tomograph

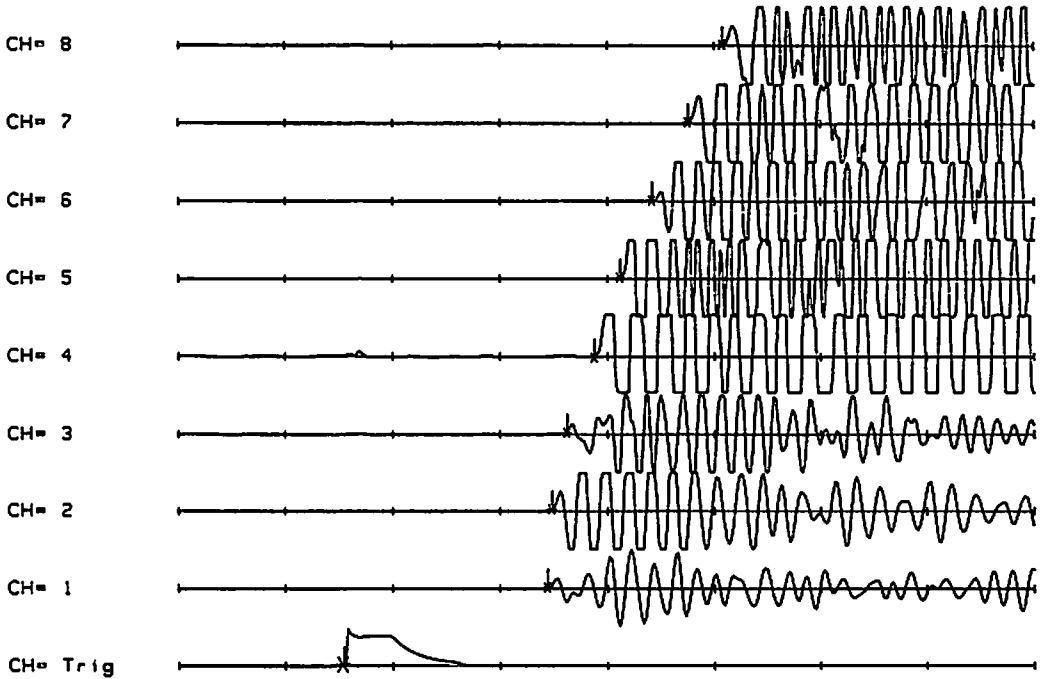


Fig. 9 Typical waveforms of seismic wave measured by accelerometer

解析方法は、アクリル板のモデル実験で使用した SIRT法を用いて、解析領域  $1 \times 1 \text{ m}$  の要素に分割して解析処理した。弾性波トモグラフィーの解析結果を Fig. 10 に示す。解析結果から、計測した岩盤はかなり良好な状態にあり、多くの要素が  $6,000 \sim 6,500 \text{ m/s}$  の弾性波速度の領域にあることが判明した。しかし、トンネル部の入口から  $20 \sim 25 \text{ m}$  付近に弾性波速度の遅い部分が存在する。これは、トンネル掘削前後の地質調査の関係から断層による弾性波速度の遅い領域を捉えたものと思われる。しかし、弾性波速度の計測が計

測に記憶した。計測のサンプリングレートは、 $50 \text{ KHz}$  ( $20 \mu$ ) で加速度計 8 ch, トリガー信号 1 ch の計 9 ch で同時計測した。また、計測波形は、現場に設置したモニターで確認しながら実験を行った。計測した振動波形は、雑音が少なく良好な波形が得られた。計測波形の一例を Fig. 9 に示す。

波形計測のトリガー信号に精密起爆器からの起爆信号を用いることで発振点から受振点までの到達時間を正確に計測できた。また精密起爆器から直接トリガー信号を計測できるので、巻線法等による起爆前の击管への処理が不要で、短期間での計測が可能となり、現場計測に適しているものと思われる。

#### 4.3 解析結果の検討

測対象領域を取り囲む様に、設定できなかったので深部に存在すると考えられる断層を十分に把握できなかったものと思われる。また、トンネル部入口に弾性波速度の遅い部分が存在し、掘削による坑道の緩み領域を捉えたものと思われる。

#### 5. まとめ

精密起爆による弾性波トモグラフィーのモデル実験と現場計測の結果から以下のことが判明した。

1. アクリル板を用いた小規模のモデル実験で、精密起爆器を用いることで破壊領域を計測できるこ



とが判明し、高精度の弾性波トモグラフィーの実施が可能となった。

2. 高精度カメラによる観測結果と差分法による数値解析結果から、アクリル板を伝播する波動を十分に数値シミュレーションできることが判明した。
3. 弾性波トモグラフィーの現場計測実験では、トンネル部入口から20~25m付近に弾性波速度の遅い領域があり、断層による影響によるものと思われる。また、坑道入口付近に存在する緩み領域を捉えることができた。

精密起爆器による弾性波トモグラフィーは、従来の方法と比較して起爆点の起爆信号を容易にトリガー信

号として用いることができるので、現場計測に適しているものと思われる。

#### 文 献

- 1) 山下亮, 北村晴夫, 西田薫, 中川浩二, 蓮井昭則, 第23回岩盤力学に関するシンポジウム(1991).
- 2) 佐々宏一, 芦田旗, 内山成和, 五江湖通, 物理探査学会第84回学術講演会論文集(1991).
- 3) たえば, 発破ハンドブック, 工業火薬協会編.
- 4) 六川修一, 物理探査Vol. 42 No. 6(1989).
- 5) 勝山邦久, 佐藤嘉見, 探鉱と保安Vol. 29 No. 2(1983).

---

## Study on the seismic tomograph using precise blasting

by Yuji OGATA\*, Kunihisa KATSUYAMA\*, Kazuki SHINGU\*\*  
Kenji HORINOBUCHI\*\*

It is necessary to foresee the geological condition of rock in order to develop the underground space safely and efficiently. In this study precise blasting machine was used for seismic tomograph, so it was possible to measure exact blasting time compared with ordinary method. In this study the model experiment using acrylic resin plate and the field test in the underground space was carried out to estimate the seismic tomograph using precise blasting machine. Conclusions are briefly summarized as follows;

- 1) It was clear to measure the broken area using precise blasting machine in small scale model experiment on acrylic resin plate.
- 2) The propagation of seismic wave on the acrylic resin plate was observed using high-speed camera. The numerical simulation for the propagation of seismic wave was similar to observed results.
- 3) In the field test slow area for seismic velocity near the entrance of tunnel and 20~25 m from entrance was observed. The seismic tomograph using precise blasting machine is applied the field enough.

(\*Fracture Mechanics and Explosives Lab. Safety Engineering Dep. National Institute for Resources and Environment, AIST, MITI, 16-3 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki, 305

\*\* Mitsui Mineral Development Engineering Co. LTD, 1-23-1 Ohi Shinagawa-ku Tokyo 140