

(株) 間組 技術研究所 ○蓮井 昭則

同 上 山下 亮

同 上 世一 英俊

1. まえがき

近年、トンネルや地下発電所に加えて、地下備蓄、放射性廃棄物処理施設など地下空洞の利用が多くなる傾向がある。このような地下空洞の周辺岩盤では、掘削前の状態に比べ岩盤の力学的、物理的特性は変化する。この変化の程度・範囲を把握することは、構造物（地下空洞）の安定性、あるいは機能を評価する上で重要である。

岩盤の特性を計測するには、各種の方法¹⁾があり、そのうち岩盤の非破壊法によるものとして、弾性波測定がよく用いられている。最近では、弾性波速度ばかりでなく、たとえば、佐々ら²⁾は採掘跡の鉱柱の安全性を監視するために、Paulssonら³⁾は熱による岩盤の挙動を把握するために、振幅の減衰にも注目し、評価している。

著者らは、以前に、ある地下空洞の掘削に伴って雷管爆破を用い、発振孔～受振孔の距離を2～25mとして孔間弾性波測定を実施した⁴⁾。その結果、速度変化については十分な精度の測定結果が得られたが、振幅についてはバラツキが5～20%と大きかった。また、岩盤の挙動を十分に把握するためには、1mあるいはそれ以下の短区間での測定も必要となることがわかった。

そこで、短区間（4m以下）での孔間弾性波法による弾性波速度と振幅の測定を目的とした発振、受振装置を開発した。本報告では、その測定システムと2、3の適用例について述べる。

2. 測定システム

(1) 発振装置および受振装置

発振装置および受振装置の概要を図-1、写真-1に示す。これら発振および受振装置は、通常の岩盤調査によく用いられるφ66mmのボーリング孔用として製作されており、2つの装置の違いは中央に組み込まれたケース内に弾性波を発振する発振子が入れているか、波動を受け取る受振子が入れているかの違いである。発振子（φ30mmの圧電素子）はパルスジェネレータ（最大電圧 560～1700v）により電気パルスを与えられると振動し、この振動が岩盤中で弾性波となって伝播する。発振周波数範囲は数kHz～数十kHzで、5～100ms 間隔での繰返し発振が可能である。また、受振子はプリアンプを内蔵した圧電型加速度計（感度：10mv/G、共振周波数：65kHz）を用いている。発振装置および受振装置は、ボーリング内に挿入され、所定の位置に達すると、水圧シリンダによって発振子あるいは受振子が入ったケースを、ボーリング孔壁に圧着し固定する。水圧を除去すると、装置は内蔵バネによって収縮し、孔壁から容易に離れ、移動させることができる。図-2に装置の圧着時、

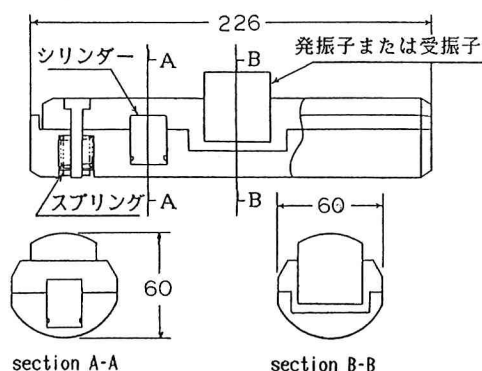


図-1 発振・受振装置の概要



写真-1 発振・受振装置

移動時の形状を示す。

これらの装置による弾性波到達距離は、硬岩で4m、軟岩で2m程度であることが実験的に確かめられている。

(2) 測定システム

発振・受振装置を用いた測定システムのダイアグラムを図-3に示す。受振された波の信号は、アンプで増幅され、50kHzのローパスフィルタを通して、デジタルストレージオシロスコープ(最小サンプリングタイム 0.05 μ s)に送られ、A/D変換を行ってデジタルメモリーに記録される。また発振・受振間の距離が長い、岩盤に亀裂が多いなどの理由により、測定される波の振幅が小さく不明瞭な場合、スタッキング処理により、S/N比を改善することが可能である。

得られた波形データからは、トリガからの到達時間差および振幅をその場で読み取ることができる。さらに波形データはマイクロコンピュータへGP-IBインターフェイスを通じて転送され、各種ソフトウェアを用いて再読み取りを行ったり、周波数解析、相互相関関数による波の到達時間差の自動決定を行うことができる。

3. 適用例

(1) トンネル周辺岩盤における測定例

本システムを用いて、花崗岩よりなるトンネルの底盤において、測定を行った。当地点の岩盤はボーリングコアの一軸圧縮強度約1500kgf/cm²、RQD=90~100で代表されるような、新鮮かつ堅硬な岩盤であり、グム基礎岩盤分類(田中による)でB~CH級に属している。ルジオンテストによる代表的な岩盤の透水係数は、 3×10^{-5} 程度である。2本の $\phi 66$ mmボーリング孔が、孔間隔43cmで平行して、鉛直下方7.5mまで穿孔されており、このボーリング孔間の岩盤を測定した。測定においては、発振装置と受振装置を同時にそれぞれ50cmずつ移動させていく方法により、深さ1m~7mまでの岩盤の50cm毎の弾性波伝播特性を求めた。図-4はボーリングコアから推定される岩盤状況の断面図であり、図-5には各深さで得られた波のデジタル処理波形を伝播時間をそろえて並べた。図-6は読み取られた伝播時間とスペクトル値の深度分布を示している。また、図-7に示すように発振装置および受振装置を $\pm 45^\circ$ 回転させ、得られたそれぞれの波を合成することによりS波の分離をも試みた。このように、測定の結果は、孔曲りによる孔間距離の変動もあって直接評価することはできないが、岩盤状況の変化によ

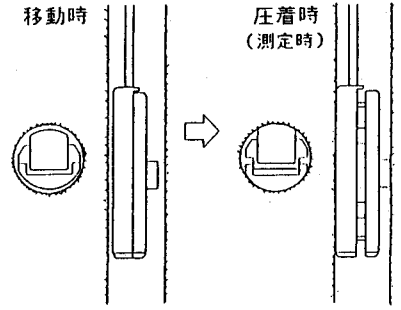


図-2 装置の移動・圧着時

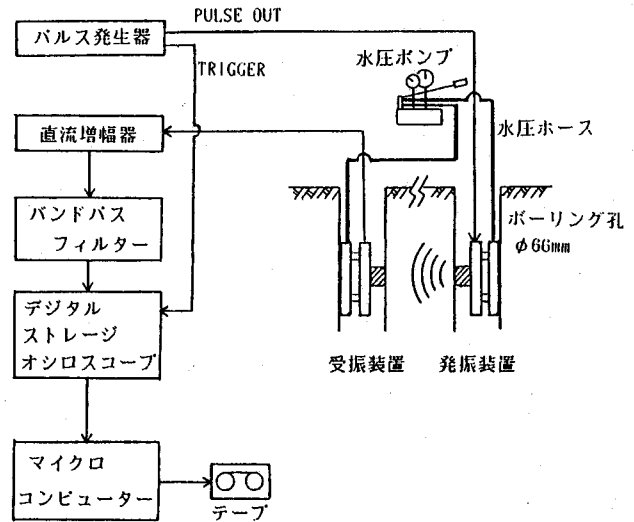


図-3 測定システムのダイアグラム

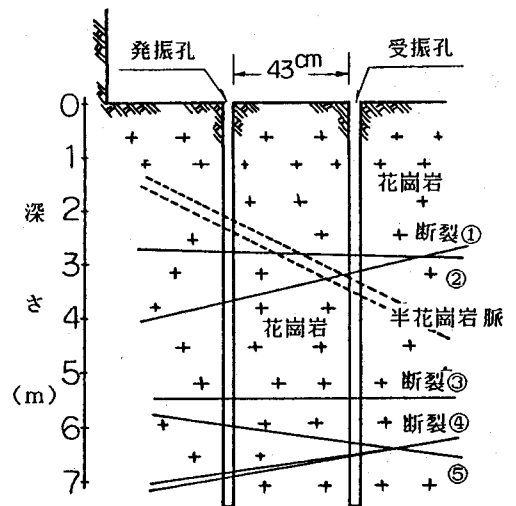


図-4 推定岩盤状況

る測定結果の変化量により岩盤を評価することができる。
 なお、本測定を数回繰返したところ、読み取られた伝播時間のバラツキは $\pm 1 \mu s$ 、約1%の範囲に収まった。

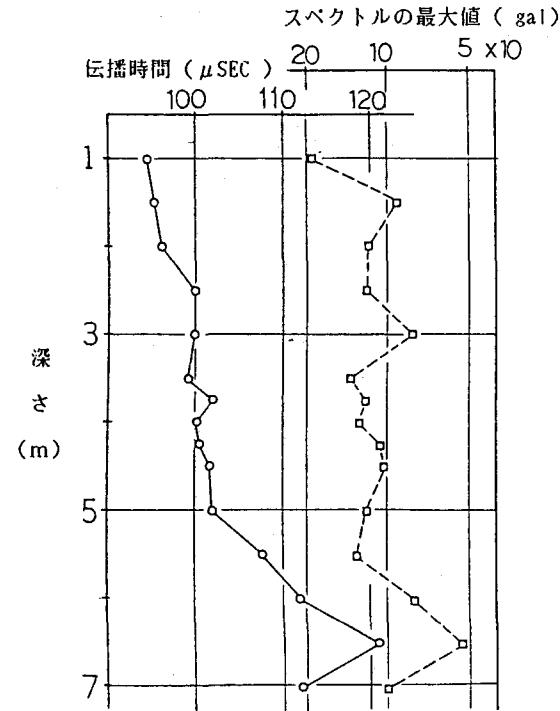


図-6 伝播時間とスペクトル分析

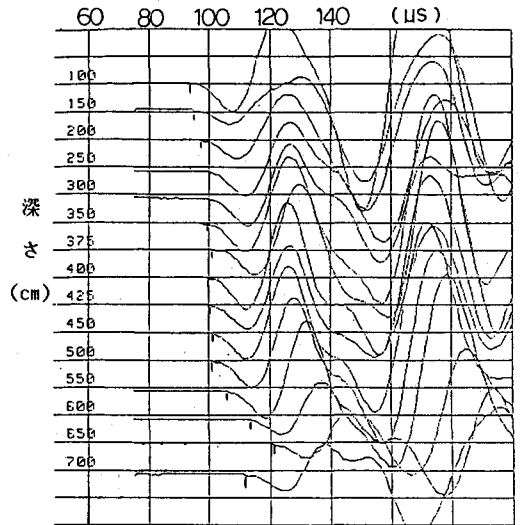


図-5 測定波形

発振子・受振子の方向

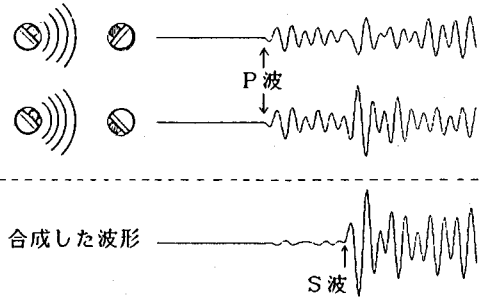


図-7 S波の分離・検出

(2) ダム基礎岩盤における測定例

ダム基礎岩盤において、カーテングラウトによる岩盤の改良効果を確認するために、本システムを用いて試験的に測定を行った。当地点の岩盤は新第三紀の泥岩を主体とし、凝灰岩を挟んでいる。泥岩は風化が進み、比較的クラッキーなCM～CL級の岩盤であり、凝灰岩は著しく粘土化が進んだD級岩盤で、層厚は0.2～1.5 m程度である。2本のボーリング孔は孔間隔93.5cmで、鉛直下方18mの深さまで穿孔されており、地表面から約4mはコンクリートである。(1)と同様の方法で、深さ5m～18mまでの岩盤について、グラウト前・後で測定を実施した。図-8は、ボーリングコアから得られた岩盤推定図であり、図-9はグラウト前後で得られた伝播時間についての深度分布である。図-8、9より、泥岩においてはグラウト前の測定に比較して、グラウト後には伝播時間が5～25 μs 短縮されていることから、グラウトによる岩盤の改良効果が現れたと判断できよう。また、深さ11m付近岩盤においてはグラウト前では波動の減衰が激しく、読み取りが不可能であったが、グラウト後では明確に読み取ることができていることから同様の判断ができよう。一方、深さ9～10mの凝灰岩層部分ではグラウトによる岩盤改良効果は見られず、粘土化していることがグラウト材の侵入を阻んだと類推できる。なお、本地点での伝播時間のバラツキは $\pm 2.5 \mu s$ 、約0.8%の範囲に収まっていた。

4. 展望

前章で、本測定システムを用いた短区間の孔間弾性波測定について、孔間隔40cmの花崗岩における測定と、ダ

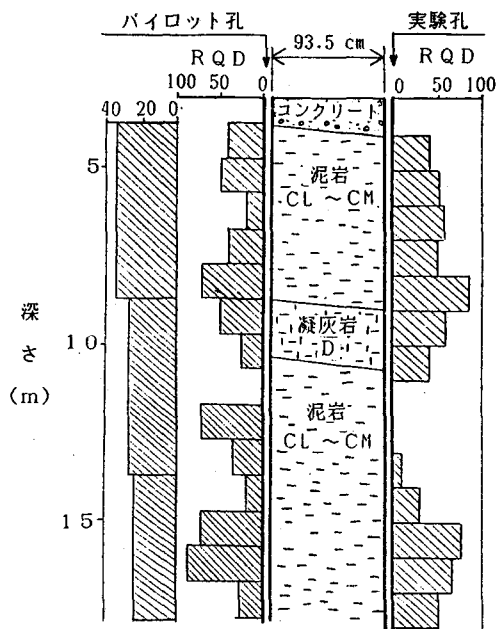


図-8 岩盤状況
(岩質、RQD、ルジオン値)

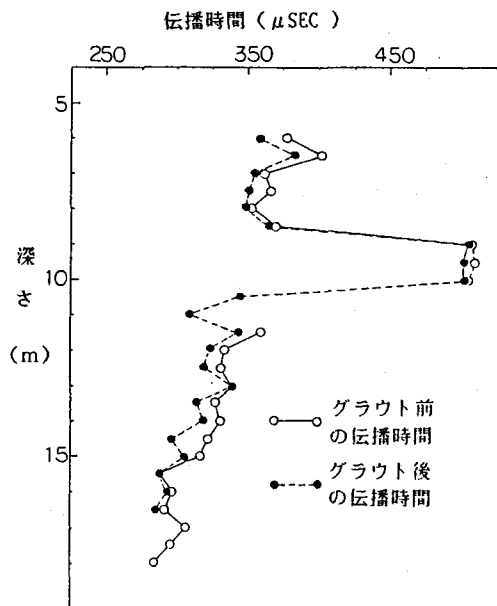


図-9 伝播時間の深度分布

ム基礎のグラウト前後における測定の実例を紹介した。孔間弾性波法では、孔間に存在する岩盤の内部構造が推定できるため、前述した以外にも、岩盤のゆるみ、熱による変化、あるいはトンネル切羽前方の予知などにも適用できると考えられる。

また、得られた結果から簡単なジオトモグラフィ（スキャニング）も可能である。図-10は中央部に直径20cmのボーリング孔を持つ1m×1m×1mの花崗岩ブロックの弾性波速度のスキャニングによって得た速度分布である。このような方法を用いると、地層の形態や断層の位置などが推定できると考えられる。

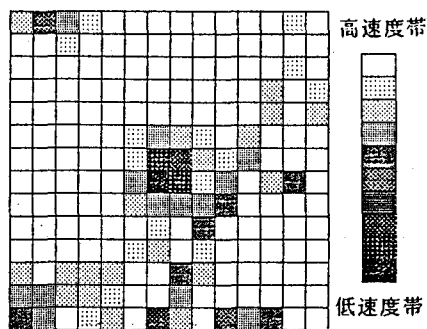


図-10 スキャニングの一例

5. あとがき

本報告で述べた発振装置はその波動の到達距離が4m程度までである。しかし、それを12~15m程度の地点まで到達できるように発振エネルギーを持つ装置に変更すれば、たとえば、ダム基礎のグラウトパイロット孔を用いて測定することにより、弱層部（弾性波速度の低い部分）の位置、最適グラウト位置の推定といった範囲の広い測定にも適用が拡大すると思われ、こういった点が今後の課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネル掘削によるゆるみ領域の調査報告書、1982.3.
- 2) 佐々、南光、洪江：弾性波を利用する岩盤監視、日本鉱業会、1982.9.
- 3) B.N.P. Paulsson・M.S. King: Seismic velocities and attenuation in an underground granite waste depository subjected to heating, ISRM, 1984, Cambridge
- 4) 世一、蓮井、山下：地下空洞掘削時における周辺岩盤の物性変化に関する計測結果とその評価について、第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1984.12

(88) Cross-hole seismic measurement for assessing rock mass

A.Hasui, R.Yamashita & H.Yoichi
Hazama-Gumi, Ltd.

Abstract

In assessing in-situ rock mass, seismic measurements are often executed. Authors developed a cross-hole seismic measuring apparatus for investigating and/or assessing the rock mass. This apparatus consists of a transmitter and a receiver, and the measuring system is made up with a pulse generator, amplifier, digital-storage oscilloscope and a microcomputer. Characteristics of this measuring system are as follows:

- (1) very small deviation of travel time ($\pm 1 \sim 2$ micro sec.)
- (2) using high frequency waves (20~60kHz)
- (3) high S/N ratio by using digital stacking

Applying the above-mentioned system, cross-hole seismic measurements were carried out experimentally at two sites; one was an experimental granitic rock tunnel, and the other was a dam foundation of soft sedimentary rock.

In the result, followings were turned out.

- (1) The quality of the rock mass between boreholes could be investigated at each depth.
- (2) The improvement of rock condition due to grouting could be estimated.
- (3) S-wave velocity as well as P-wave velocity could be measured in good rock condition.

From the above-mentioned results, such cross-hole seismic measuring system can be expected to be applied to investigate the depth of the relaxed zone caused by tunnel excavation and the behavior of rock mass subjected to heating and so on.

Moreover, local mapping of the quality of the rock mass between boreholes, what is called, scanning technique, can be expected to develop.