

高周波波動を用いた孔間弾性波測定による 施工時岩盤の調査とモニタリング

蓮井昭則*・山下 亮**・世一英俊***・
中川浩二****

高周波の弾性波波動を用いた孔間弾性波測定により、施工現場で土木技術者が直面するいくつかの岩盤状態を調査し、その測定結果の施工への利用について検討した。その結果、以下のことが示された。①高周波の弾性波波動を用いることにより、原位置岩盤の弾性波伝播特性を高い再現性で精度良く測定できる。②岩盤分類、掘削の影響やグラウチング効果などを捉えることができる。③測定結果を施工管理情報として利用することが可能である。

Key Words: high frequency, crosshole, seismic wave

1. ま え が き

トンネルやダムなどでは、岩盤は力学的あるいは水理学的な構造体の一部として利用され、その事前調査では屈折波法による地表面からの弾性波探査が古くから用いられている。そして、探査結果と岩盤露頭面やボーリング調査の結果を総合して岩盤の工学的な評価が行われ、構造物の設計や施工計画での情報として利用されている。しかし、事前調査から得られる地質情報と施工中に必要な情報との間にはギャップがあり、事前に得られた地質情報が施工段階で必ずしも有効に利用されているとは言えない。そのため、施工中により詳細な調査がしばしば必要となる。

構造物の施工段階において岩盤内部の情報が必要となる面積的な範囲は、事前調査段階で実施される調査範囲に比較して狭く、たとえば、トンネルでは切羽幅(数m)程度、橋梁では橋梁基礎範囲、ダムでは基礎岩盤で行われるグラウチングのパイロット孔間の十数m程度である。また、施工途中に必要な岩盤情報としては、亀裂の多少や力学的に大きな変化のある領域、グラウチングなどの施工過程における岩盤状態の変化などが挙げられ、これらは事前調査における弾性波調査と室内における岩石供試体の試験の中間に位置する情報であると言える。佐々ら¹⁾は亀裂を模擬した低速度帯の幅と弾性波波長の関係から速度や振幅に影響を与える低速度帯の大きさについて検討しており、波長の波長が低速度帯の幅に比較して十分に大きい場合は、その影響を受けないこと、つまり、規模の小さい速度の異常帯を検出するためには弾性波波長の波長を小さくする必要のあることを指

摘している。したがって、弾性波を用いて実施工へ生かせる岩盤情報を入手するためには、高い測定精度で波長の短い高周波波動を対象とした透過波による測定が必要であると考えられる。しかし、高周波波動は低周波波動に比較して粘性による減衰や亀裂による反射等の影響を強く受けるために、波動の伝播距離が短くなる欠点を有しているのも事実である。

一方、最近では医学分野のCT技術を地盤の分野に応用したジオトモグラフィの研究が行われており、弾性波のP波速度ばかりでなく、S波トモグラフィ²⁾や振幅トモグラフィ³⁾も対象とされている。さらに、弾性波を用いて種々の施工下にある岩盤の状態を推定しようとする研究も行われており、測定方法や対象とする波動の種類は異なるものの、グラウチングによる変化⁴⁾、切羽前方探査^{5),6)}や「ゆるみ領域」の把握⁷⁾などに、弾性波の利用が試みられている。しかし、これらを含めても高周波波動を利用した岩盤の研究は室内における試験が中心であり、原位置岩盤では音波検層を除いて低周波による測定が中心である。

筆者らは施工中に弾性波に関する種々の測定をすることを前提にし、高周波波動の透過波を利用した孔間弾性波測定装置の製作を行い、その装置を用いてトンネルやダムの原位置岩盤で弾性波P波速度、振幅を対象とした孔間弾性波測定を実施した。本研究ではこれまでにやってきた測定結果の施工への利用についての検討結果の代表例をまとめて報告する。

2. 孔間弾性波測定システム

(1) システムの概要

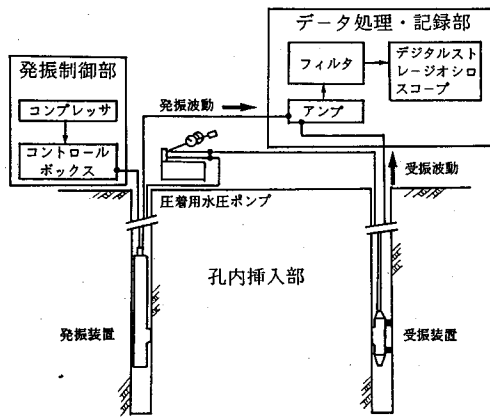
施工中の実現場において土木技術者が直面する岩盤は、トンネル切羽面あるいはダムの基礎岩盤などに代表され、これらを対象とした施工中の調査範囲は数m~十数mまでの大きさであることが多い。このような岩

* 正会員 工修 (株)間組技術研究所 主任研究員
(〒305 茨城県つくば市期間字西向515-1)

** 正会員 工修 (株)間組技術研究所 主任研究員

*** 正会員 工修 (株)間組技術研究所 室長

**** 正会員 工博 山口大学工学部 教授



図一 孔間弾性波測定システムの概要

盤での弾性波の計測には従来の弾性波探査より高精度で、かつ波長の短い波動を用いた測定を行う必要がある。さらに、速度ばかりでなく施工中に課題の1つとなる亀裂と関係のある振幅も測定対象とするためには、発振波動の卓越周波数や発振エネルギーが一定であることが挙げられる。また、施工中という状況下で測定することからボーリング孔周辺岩盤に損傷を与えないこと、鉛直下方のみならず水平方向や上方のボーリング孔での測定が可能なること、現場の穿孔機械を用いたパーカッションボーリング孔を使用しても再現性の高い測定ができること、および孔内水の有無に影響を受けないことなどが望ましい条件となる。

このような条件を満足する測定方法として、ボーリング孔間隔数 $m \sim$ 十数 m 程度の範囲を対象とし、高周波波動を用いた孔間弾性波測定装置⁹⁾を製作した。図一に製作した測定システムの概要を、表一に諸元を示す。測定システムは孔内に挿入される孔内挿入部(発振・受振装置)、発振装置をコントロールする発振制御部、波動データをA/D変換し記録する記録処理部から構成されている。

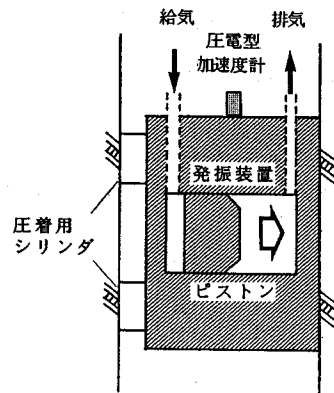
(2) 発振・受振装置

a) 発振装置

弾性波の発振方法には種々の方法があり、ボーリング孔中で高周波波動を発生する代表的な振動源としては、雷管を含む爆薬、圧電素子などが挙げられる。しかし、雷管等による起振方法では発振波動の再現性に問題があり、圧電素子では発振エネルギーが小さく調査範囲が限定されることから、本システムでは金属間の衝突を振動源とする方法を採用した。この方法は孔内に挿入する発振装置(ステンレス製)内部でステンレス製のピストンを装置本体に衝突させ、その衝撃波を振動源とするものである。図二にピストンによる発振の概要を示すが、装置内部でのピストンの移動は 5 kgf/cm^2 (0.49 MPa) 程度の圧縮空気を孔外から供給して行い、給気・排気の

表一 測定システムの諸元

名称	型式	備考
孔内挿入部	発振装置	外径60mm×長さ1m、重量11kg 孔壁圧着式、ピストン打撃起振 起振卓越周波数10~15kHz 圧電型加速度計(TEAC708、共振25kHz)
	受振装置	外径60mm×長さ30cm、重量4kg 孔壁圧着式 圧電型加速度計(TEAC707直交3成分、 共振周波数20kHz)
発振制御部	コントロールボックス	重量7kg 発振制御、発振間隔 0.5~5秒
	小型コンプレッサ	イワタ 重量18kg 吐出能力 20ℓ/min/毎分 発振時吐出圧力 5 kgf/cm ²
データ処理・記録部	アンプ	TEAC SA-16 通用周波数1Hz~50kHz 倍率×1~×1000 重量6kg
	フィルタ	NF回路 ブロック DVシリーズ 周波数固定型20kHzローパスフィルタ 減衰特性36dB 重量2.5kg
	デジタルストレージオシロスコープ	日立電子 VC7040 4ch×2kw 最小サンプリングタイム1μS 重量16kg

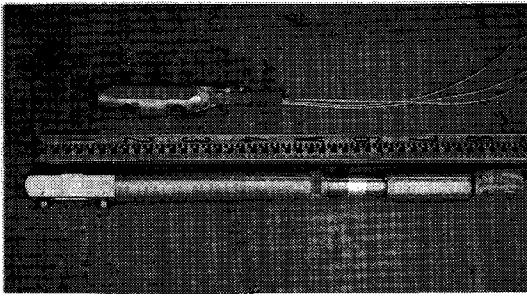


図二 ピストンによる発振の概念

間隔をコントロールすることにより発振間隔を任意に設定できる。また、発振装置には圧電型加速度計が内蔵されており、発振波動の加速度を記録する。発振装置内で発生した波動の孔壁岩盤への伝達条件を一定にするため、水圧作動の圧着用シリンダで発振装置を孔壁岩盤に 10 kgf/cm^2 (0.98 MPa) の一定圧力で圧着し、これにより孔内水の有無に関わらず波動を岩盤に伝達することができる。

b) 受振装置

弾性波の高周波波動を振幅をも含めて正確に測定するためには、受振装置が高周波波動を一定感度で受振することが必要である。本装置は、低周波数から高周波数の波動を一定感度で測定し、さらに波動の3方向成分が受振できるように直交3方向成分の圧電型加速度計を内蔵している。また、受振装置は発振装置と同様に孔壁岩



写真一 発振装置 (下)・受振装置 (上)

盤に圧着できる形式のもので孔内水の有無に関わらず同一条件下での受振が可能となっている。写真一に発振、受振装置を示す。両装置内の圧電型加速度計は 3 Hz~15 KHz 程度の広い周波数域で波動を一定感度で測定することができる。

c) データ処理・記録部

発振 1 回の測定で得られる波動データは発振装置内蔵センサーからの波動 (近似的に発振装置から孔壁岩盤へ伝達される波動と考え、以後発振波と呼ぶ)、および受振装置で得られる受振波動の 2 種類である。測定された波動は、アンプ、フィルターを通してデジタルストレージオシロスコープに送られ、フロッピーディスクを介してコンピュータ処理が行われる。

(3) 波動の処理方法

a) 走行時間、振幅比

受振装置では直交 3 方向成分の波動を受振することが可能であるが、本研究では 2 本のボーリング孔で作られる平面上でボーリング孔に直交した圧電型加速度計によって得られた波動を整理対象とした。発振波動と受振波動の波形例 (後述するトンネル側壁岩盤での測定波動) を図-3 示す。この 2 つの波動の初動の立ち上がり時間を判別し、式 (1) に示すように両者の時間差によって発振点~受振点間を伝播した見かけ上の P 波速度 V_p (以後、P 波速度と呼ぶ) を算定する。

一方、発振波動は発振装置内に内蔵したセンサによって測定されたものであり、発振装置から岩盤に伝達される波動とは厳密には異なる。しかし、発振装置を孔壁岩盤に圧着することにより、装置から岩盤へ波動の伝播を同一条件にしているため、得られた発振波を見かけ上の基準としてみる事が可能である。したがって、発振波と受振波の振幅の大きさを比較することにより、見かけ上の振幅比 C_0 (以後、振幅比と呼ぶ) として整理する。また、振幅の幾何減衰を考慮せず、振幅減衰が岩盤の粘性によるもののみと仮定すると、振幅比は式 (2) のように振幅減衰定数 α を用いて表すことができる。ここで、波動の単位伝播距離当たりの振幅比 C を式 (3) のように表し、単位振幅比と定義する。

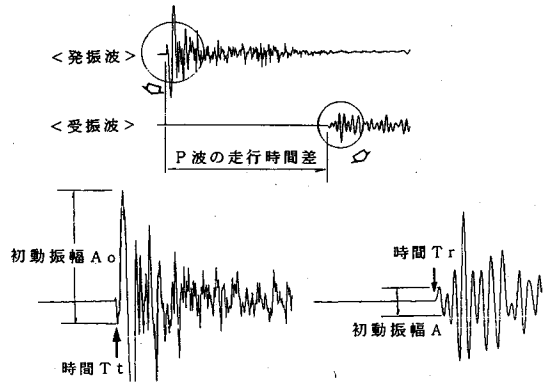


図-3 測定波動の整理方法

$$V_p = L / (T_r - T_t) \dots \dots \dots (1)$$

$$C_0 = A/A_0 = \exp(-\alpha L) \dots \dots \dots (2)$$

$$C = \exp(-\alpha) \dots \dots \dots (3)$$

- ここに、 L : 発振点・受振点間の直線距離
- T_r : 受振波の立ち上がり時間
- T_t : 発振波の立ち上がり時間
- A : 受振波の初動振幅
- A_0 : 発振波の初動振幅
- α : 振幅減衰定数

b) トモグラフィ解析

弾性波トモグラフィは弾性波測定結果から調査範囲内の弾性波速度などの弾性波伝播特性の分布状況を再構築、推定する手法であり、本システムによるトモグラフィでは振幅減衰も対象とし、トモグラフィ解析手法としては弾性波速度、振幅減衰ともに繰り返し計算による方法⁹⁾を用いている。なお、調査範囲が最大十数 m と比較的狭く、解析結果を 1 次近似として施工へ迅速に利用することを考慮し、岩盤中の弾性波の伝播経路は直線波線と仮定して解析を行っている。

3. 測定システムの特徴

(1) 発振波動の周波数特性

原位置岩盤での測定で得られた発振波の波形例と数波のスペクトル分析結果を図-4 に示す。発振波の初動振幅の大きさは約 30 G (1 G=980 gal) 程度で、5 KHz と 15 KHz 付近に卓越周波数をもつ高周波数の波動を発生していることが分かる。また、スペクトル分析結果には大きなバラツキがなく、ほぼ一定した発振波が得られている。

(2) 原位置岩盤における測定の再現性

施工中の原位置岩盤では理想的な測定条件下で測定できることは希であり、また、施工過程に伴う弾性波伝播特性の変化を測定する場合には同位置で複数回の測定を実施し、その変化を把握するために再現性の高い測定が必要となる。原位置岩盤 (トンネル側壁) で実施した測

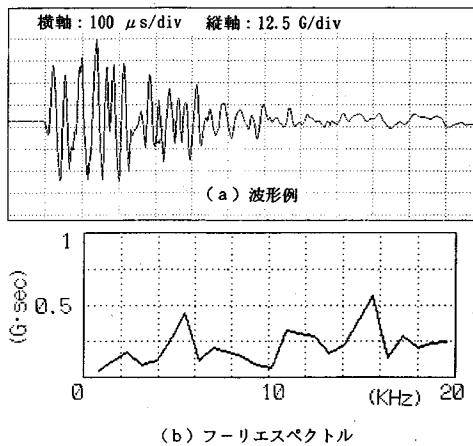


図-4 発振波の波形およびスペクトル分析結果

定⁹⁾から同じ測定波線で測定時期の異なる結果(走行時間)をサンプルとして選び、測定誤差を示すと図-5のようになる。サンプル総数の7割以上は測定誤差が3%以内であり、測定の再現性の高いことがわかる。なお、この測定誤差は約1ヶ月間に行った数回の測定結果をまとめたものであり、その間にトンネル側壁岩盤に変化は、特に認められなかった。また、測定に使用したボーリング孔は現場の穿孔機を用いた水平なパーカッションボーリング孔で、孔内には穿孔ズリが残っている状態であり測定条件としては良好ではなかった。

(3) 測定システムの特徴

上記の孔間弾性波測定システムは以下のような特徴を有している。

- ① 卓越周波数 5 ~ 15 KHz 程度の高周波波動を発振する。
- ② 測定の再現性が高く、原位置岩盤での P 波速度の測定誤差は 3% 程度以内である。
- ③ 孔内水の有無やボーリング孔の方向に関わらず一定条件下での発振・受振が可能である。
- ④ ロータリボーリングはもちろんのこと、パーカッションボーリング孔でも測定が可能である。

一方、問題点としては、岩盤中においては高周波波動の減衰が激しく、測定可能範囲(孔間距離)が短いことが挙げられる。本システムの場合、実用上の波動の到達距離は新鮮な硬岩の場合で約 20 数 m、風化作用を受けている軟岩では数 m 程度と考えられ、地質状況によって測定範囲に影響を受ける。

4. 岩盤状況の調査

前章で述べた特徴を有する測定システムを用いて行った原位置調査の事例のうち、本章では岩盤構造と掘削の影響推定の事例について報告する。

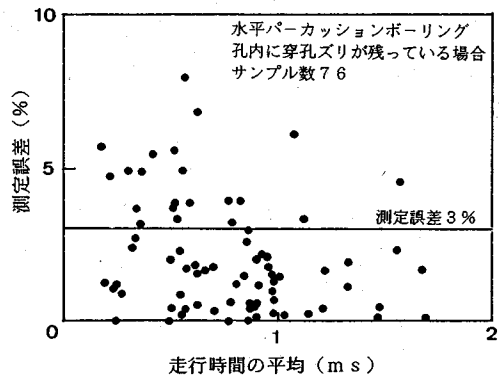


図-5 原位置岩盤での測定誤差

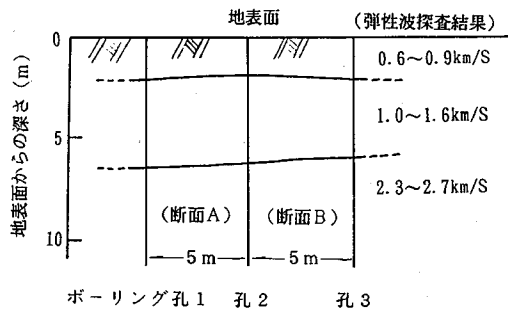


図-6 調査概要および弾性波探査結果

(1) 岩盤構造の推定

a) 調査概要

調査場所は表土が取り除かれた状態にある採石場で、地質は中生代三畳系美祿層群に分類される薄層砂岩と頁岩の互層で構成されており、主要節理は層理に沿うもの、斜交、直交するものと多岐にわたっている。また、地下水位は地表面から深さ約 1m で一定であった。

孔間弾性波測定は孔間距離 5m で穿孔された 3 本のボーリング孔(φ66 mm、深さ 15 m)を用いて、ボーリング孔 1 と孔 2 間を調査断面 A、孔 2 と孔 3 間を調査断面 B として行った。孔間弾性波測定を行った。なお、ボーリング孔の位置と地表面からの弾性波探査結果(応用地質(株)製 McSEIS-1600 使用)を図-6 に示す。

b) 測定結果および評価

弾性波測定結果のうち、発振点と受振点と同じ深さ(等深度波線)での弾性波 P 波速度を図-7 に、トモグラフィ解析結果を図-8 に示す。

等深度波線およびトモグラフィ結果では地表面から深さ 6 ~ 7 m 付近を境にして上層部は 2500 m/s 以下、下層部は 4000 m/s 程度ではほぼ一定した P 波速度を有する岩盤であることがわかる。速度の分布状況から考えると、6 ~ 7 m 以深では基盤的な岩盤、6 ~ 7 m 以浅では地表面の風化の影響により力学特性が低下している岩盤と推定された。一方、地表面からの弾性波探査(図-6 参照)でも 6 m 付近を境にして弾性波速度が異なっている。

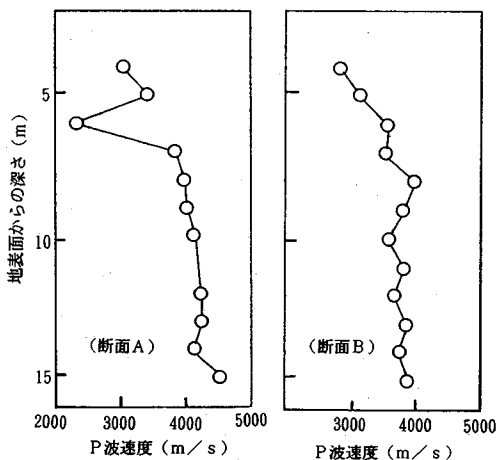


図-7 深さ別 P 波速度分布

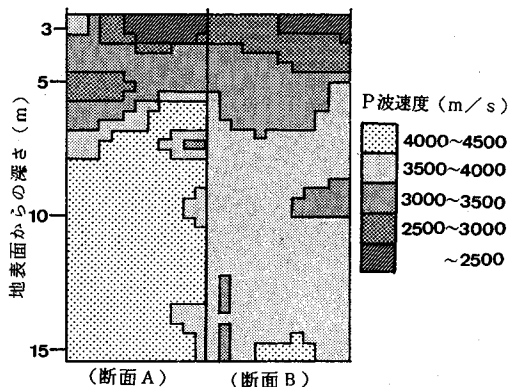


図-8 P 波速度トモグラフィ結果

しかし、孔間弾性波測定と地表面からの弾性波探査の速度値そのものには相違があり、波長が短い場合（周波数が高い）では、速度値が大きく観測されているようであり、その理由等については今後の検討が必要である。したがって、両者の速度の絶対値を直接比較することには問題があるが、調査断面内の相対的分布としてみると両者の結果は一致する。また、佐々らの実験結果¹⁾を参考にすると、弾性波の波長の1/16~1/32以下の幅を持つ亀裂あるいは異常速度帯ではP波速度に影響を与えないことが報告されている。本調査事例では地表面から6m以深でのP波速度は約4000m/s、受振波初動の平均周波数は約4kHzであることから、平均波長は1m程度になる。前出の報告結果¹⁾をこれにあてはめると、幅3~6cm以下の岩盤構造の細部までは捉えることができていないと考えられる。亀裂性状などの極細部の情報を知るためには、より高周波の波動が必要となるが、このように概略把握された岩盤構造の情報でも、施工あるいは施工中の種々の計画に利用できると考えられる。

従来の弾性波探査では屈折波法による解析（はぎ取り

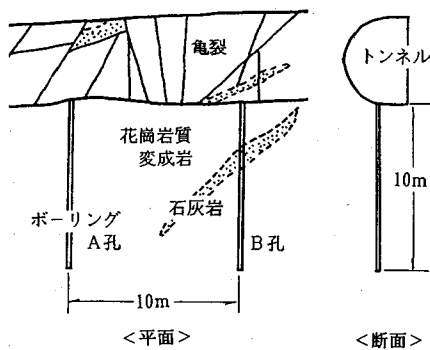


図-9 調査概要および地質観察結果

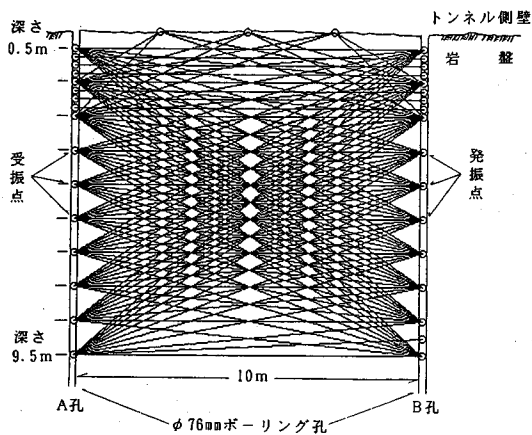


図-10 測定波線

法)によって弾性波速度の算定が行われるため、高速層の下部に低速層が存在する場合には正確な速度構造を捉えることは難しい。一方、孔間弾性波測定では透過波を利用した測定であり、ボーリング孔の穿孔された位置まで確実に弾性波速度構造を推定することが可能である。そのため、たとえば橋梁の基礎、トンネルの交差部や分岐部など特異な部分での岩盤構造を推定し、その結果を施工に生かすことが可能である。

(2) トンネル掘削の影響によるゆるみ域の推定

a) 調査概要

調査地点は土被り深さ約1000mに位置するトンネル側壁岩盤で、トンネルの大きさは幅約5m、高さ約4m、周辺岩盤は一軸圧縮強度1000kgf/cm²(98MPa)以上の花崗岩質変成岩で構成されている。トンネル壁面での地質観察結果を図-9に示す。2本の水平ボーリングコア(φ76mm、孔長10m)のRQDはボーリング孔Aの壁面付近で10%程度の部分が見られるほかは、平均80%以上の良好なコア状態であり、透水係数は10⁻¹⁰~10⁻⁹cm/sと非常に小さい。このため、調査断面内の岩盤は亀裂が少なくダム基礎岩盤分類でのC_H~B級岩盤に相当すると考えられた。調査ではトンネル周辺岩盤のP波速度および振幅からトンネルの掘削の影響域を推

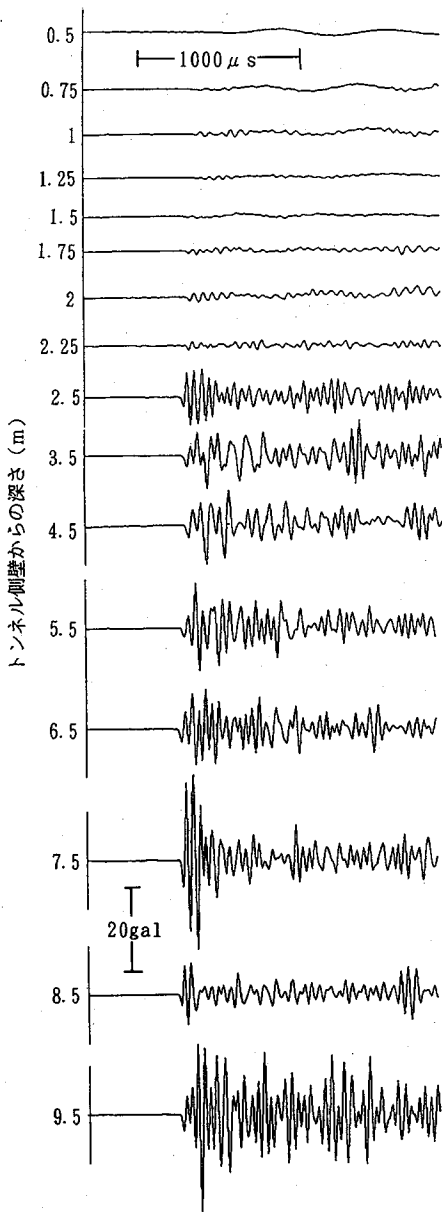


図-11 トンネル側壁からの深さごとの測定波動

定した。測定波線を図-10に示す。なお、ここでは便宜上、P波速度が低下した部分をいわゆる「ゆるみ領域」として話を進める。

b) 測定結果および評価

① 等深度波線結果

発振点と受振点をトンネル側壁面から同じ深さで測定した等深度波線での測定波形を図-11に示す。図中、深さ2.25 m地点までは受振された波動が小さく、トンネルの側壁面近くでは弾性波の初動波動の減衰が激しいことが明確である。この等深度波線での深さ別P波速度、振幅比の分布を図-12に示す。

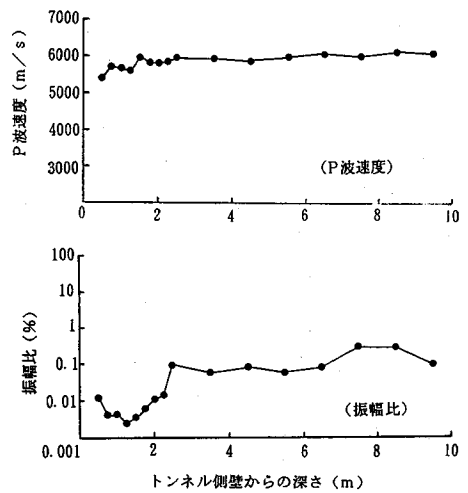


図-12 深さ別P波速度、振幅比分布

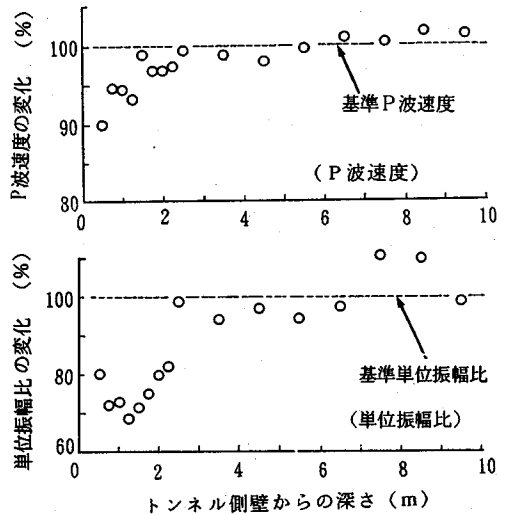


図-13 掘削による弾性波伝播特性の変化

ここで、図-9からも判断されるように調査断面内の地質は一部に石灰岩層が見られるもののほとんど花崗岩質変成岩で、地質の大きく異なる層や断層がみられず、一定状態の岩盤が分布していると推定される。したがって、トンネル掘削前では弾性波伝播特性もほぼ一定状況にあり、図-12に示したP波速度、振幅比の分布状況はトンネルの掘削による影響を反映したものと考えられる。P波速度、振幅比の分布状況をトンネルの掘削による影響と捉え、深さ3.5 m以深で測定された弾性波伝播特性の平均値(基準P波速度、基準単位振幅比)を掘削前の岩盤の特性であると仮定すると、図-12は図-13のように表すことができる。これによると、P波速度はトンネル壁面で基準P波速度から約10%程度の低下を、単位振幅比は基準単位振幅比から30%程度の低下を示している。なお、これらのP波速度、単位

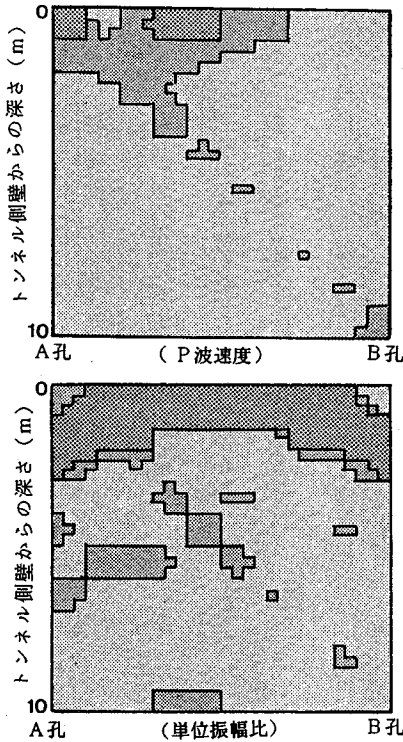


図-14 トモグラフィ結果(変化として)

P波速度の変化	10%以上低下	5~10%低下	変化なし
単位振幅比の変化	30~50%低下	10~30%低下	変化なし

振幅比の低下は筆者らの実施した地下発電所空洞における計測¹⁰⁾や他のトンネル^{9),11)}でも観測されている。

② トモグラフィ

図-10に示した全波線を用いたP波速度および振幅減衰(単位振幅比)のトモグラフィ結果を図-14に示す。図からみられるように、トンネル壁面近くでP波速度、単位振幅比が変化しており、特に、調査断面のうちボーリングA孔の孔口付近ではP波速度の低下域が存在し、単位振幅比は側壁に並行な層構造で、側壁に近づくほど低下が激しくなっている。

このように、等深度波線で整理した場合にはボーリング孔間内の深さ別の岩盤内部の平均的な弾性波伝播特性が、トモグラフィで整理した場合には面的な広がりや位置関係が明確になる。また、掘削の影響を推定するためには掘削前と掘削後に同じ位置で弾性波測定を行い、両者間の変化を捉えることが理想的であるが、通常のトンネル掘削でそれを実施することは難しく、本調査事例のようにトンネル壁面から十分な深部の位置まで測定することによって掘削前の状況を推定し、「ゆるみ領域」を含めた掘削の影響を把握することが可能である。さらに、

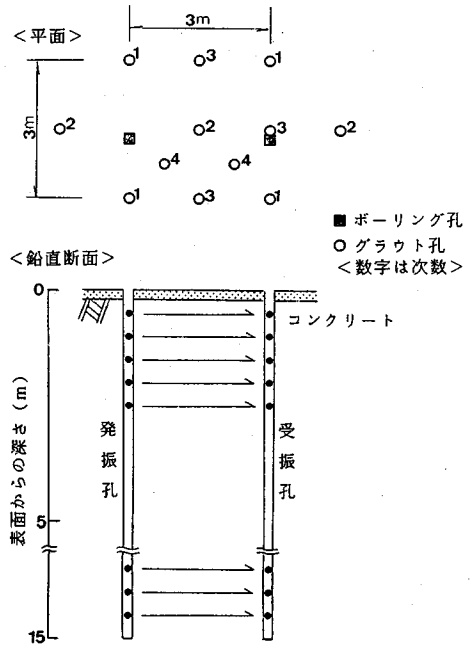


図-15 調査概要およびグラウチング位置

この方法をトンネル切羽前方に適用すれば、測定結果を切羽前方予知に応用することもできるであろう。

5. 施工過程のモニタリング

本報告の孔間弾性波測定システムの1つの特徴は、施工中の岩盤状況のモニタリングに有効に用いることが可能なことである。ここでは施工の進捗に伴って実施した複数回のモニタリング結果から、グラウチングによる岩盤変化と発破による岩盤破碎を推定した事例について報告する。

(1) グ라우チングによる岩盤状況の変化

a) 調査概要

孔間弾性波の測定はダム基礎岩盤にコンソリデーショングラウチングを行うための試験グラウチングの調査項目の1つとして行われた。図-15に調査概要を示すが、調査地点の地質は流紋岩で、ダム基礎岩盤分類でC_M級と判定され、岩石コアの超音波速度は平均4.07 km/sであった。また、グラウチングはグラウト孔を用いて深さ0 m~10 mの区間に1次から4次まで行われ、測定は孔間距離3 mで穿孔された2本のボーリング孔(φ66 mm, 長さ15 m)を用い、50 cm 間隔の等深度波線で実施した。なお、測定はグラウチング前の初期測定も実施しているが、1次グラウチングによりボーリング孔が閉塞したため、近傍に新たなボーリング孔を穿孔して測定を続けた。そのため、ここでは同じボーリング孔を用いた1次グラウチング後~4次グラウチング後の結果をまとめた。

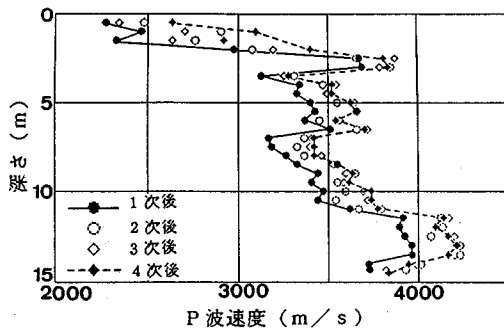


図-16 グラウチングによるP波速度の変化

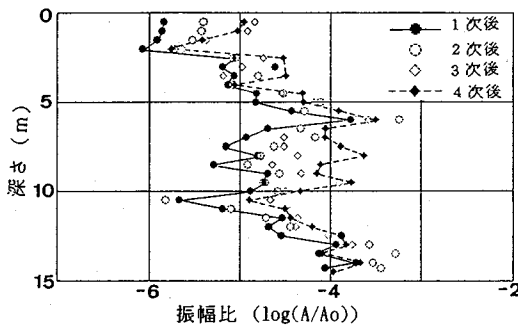


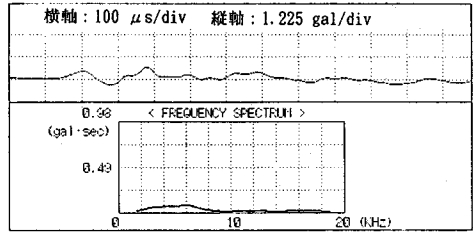
図-17 グラウチングによる振幅減衰率の変化

b) 測定結果および評価

グラウチングの施工過程に伴うP波速度の測定結果を図-16に、振幅比を図-17に、1次グラウチング後と4次グラウチング後の同じ位置での受振波とスペクトル分析結果を図-18に示す。図からグラウチングによりP波速度や受振波の振幅が増加し、周波数が高くなっているのが明確である。このように弾性波でみた場合、岩盤が良好になっており、グラウチングによって岩盤中の亀裂内にグラウト材が充填・固化することで亀裂等の影響が小さくなり、岩盤の一体化が進んでいることが推定される。

一般に、コンソリデーショングラウチングの注入効果の確認は主にルジオンテストによるルジオン値および注入量の減少の状況をもとに専従主任技術者の判断によってなされているが、グラウチングの目的と確認方法の特性が一致しているとは言い難い。一方、弾性波伝播特性は比較的力学特性に近い岩盤の情報を反映し、高周波波動を用いた精度が高く再現性の良い測定から得られた結果は、グラウチングによる伝播特性の変化が数%と小さい場合でも捉えることが可能であり、グラウチングの注入効果の判定に有用な情報を与えるものと考えられる。また、本調査事例では等深度波線による結果を報告したが、トモグラフィ手法を適用し、面的な情報を得ることも可能である。

< 1次グラウチング後 >



< 4次グラウチング後 >

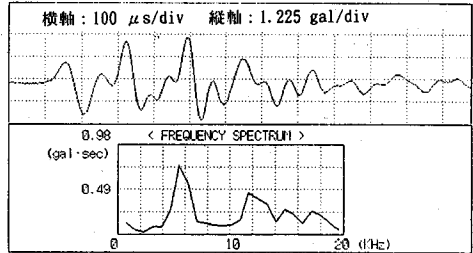


図-18 波動の変化例 (深さ9m)

(2) 盤下げ発破による岩盤破碎状況の推定

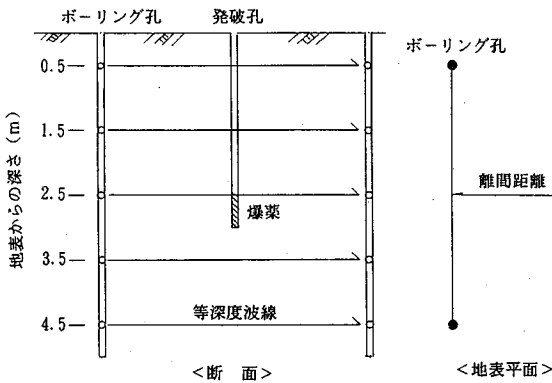
a) 調査概要

調査地点は広範囲に切りとられた平坦な岩盤で、火山レキ凝灰岩で構成されており、孔間弾性波測定は盤下げ発破による岩盤の破碎状況を推定することを目的として実施した。盤下げ発破は地表面から深さ3mの位置に装薬、発破して行われた。これに対して孔間弾性波測定は図-19に示すように発破孔を挟むような等深度波線での測定を発破前後に、さらに、別の発破孔を対象に、地表面から2.5mと4mの深さの水平面で発破孔を囲むような測定(図-21参照)を発破後に実施した。なお、測定に使用したボーリング孔はパーカッションボーリング孔(φ76mm、深さ5m)で、発破により岩盤が飛散し発破後にクレータができる状態にはならなかったが、ボーリング孔壁が損傷を受け、発破後に測定が不可能になった測定点も発生した。

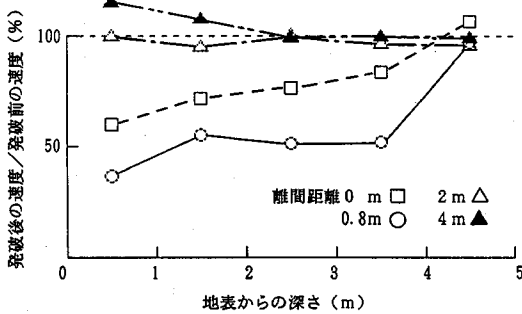
b) 測定結果および評価

等深度波線による発破前後の孔間弾性波測定結果から、発破孔位置(離間距離0m)と離間距離0.8m~4mでの発破前のP波速度を基準とした発破後のP波速度の比率を図-20に示す。離間距離0mおよび0.8mでは発破後に地表から深さ3.5mまでの範囲でP波速度が20~60%低下しているが、深さ4.5mでは発破前後での変化はほとんどなく、岩盤が破碎された深さは4m程度であると判断できる。また、離間距離2mと4mではP波速度は発破前後でほとんど変化しておらず、発破孔から2m以上離れた岩盤は破碎されていないと推定される。

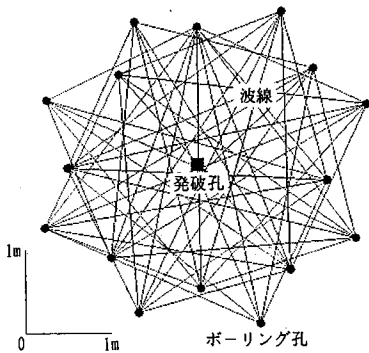
一方、図-21に示した波線で実施した発破後のP波速度トモグラフィ結果を図-22に示す。深さ2.5m平



図一19 等深度波線による測定 (発破前後)



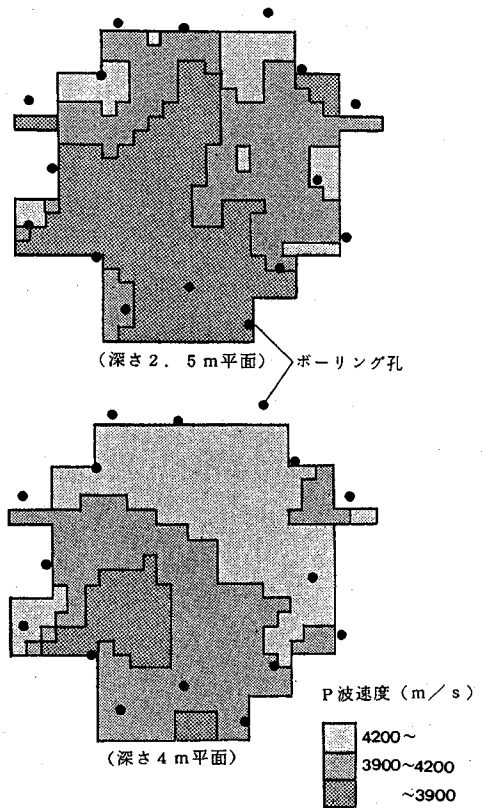
図一20 発破前後のP波速度の変化



図一21 水平面における測定 (発破後)

面では深さ4m平面に比べP波速度の低い領域が広く分布しており、岩盤の破碎領域が地表面に向かって広がっていると推定された。

発破後の岩盤は発破により破碎を受け、弾性波波動の伝播は発振点と受振点を直線的に結んだ経路ではなく、屈折などにより複雑な伝播経路をたどると考えられる。しかし、本調査事例から判断すると、弾性波の伝播経路を直線と仮定した見かけ上のP波速度で整理した結果でも、岩盤状態の変化を捉え発破の影響を判断することが可能であると考えられる。



図一22 発破後のP波速度トモグラフィ結果

6. まとめ

岩盤構造物の施工に行う弾性波測定の結果を施工に利用するための研究として、施工中の各種状況下でも測定が可能な測定装置を製作し、実施工の現場を含む原位置岩盤で高周波の弾性波を用いた測定を実施した。そして、施工現場が遭遇する岩盤内部の状態を推定し、得られた結果を施工にフィードバックする可能性について検討した。その結果、以下のことが判明した。

- ①高周波の弾性波波動を使用することにより、施工現場で測定の対象となる比較的狭い範囲の原位置岩盤において、施工状況に合わせた測定条件(たとえば、パークッションボーリング孔、水平孔など)のもとで、弾性波伝播特性を高い再現性、精度で測定できることが確認された。
- ②施工現場で必要となる比較的狭い範囲の原位置岩盤において、P波速度により岩盤分類的な特性の分布を推定できるが確認された。また、トンネルの掘削によりP波速度のみならず振幅も明確な影響を受け、掘削の影響を推定できることが明かとなった。
- ③施工過程の前後で測定を行うことにより、グラウチングや発破による弾性波伝播特性の変化を捉えるこ

とができ、岩盤の改良や破砕範囲などの岩盤状態の変化を推定できることが明らかになった。

- ④したがって、高周波波動を用いて得られた測定結果は、施工中の管理や計画の参考となる岩盤状態を表現しており、施工にフィードバックできる情報として有効であることが判明した。

7. あとがき

岩盤構造物の施工中に土木技術者が直面する岩盤の状態を適切に推定した結果は、施工の合理化、品質の向上やコストダウンを図る上で有益な情報となる。その推定方法の1つとして、本報告で述べたように、高周波波動を用いた孔間弾性波測定は有効であると考えられる。この孔間弾性波測定は岩盤の弾性波速度や振幅減衰の状況を知るための方法(手段)であり、その使い方によって、あるいは適用場所によって得られる情報の内容が異なってくると考えられる。また、亀裂性状などの極細部の岩盤状況を捉えるためには、より高周波波動による測定が必要であると思われる。

本報告では測定システムの概要とそれを適用した調査事例について報告したが、これらの測定結果をより定量的に有用な生きた情報にするためには、弾性波伝播特性と岩盤状態とを結びつける基礎データの蓄積が必要である。また、測定システム面では発振波動の指向性などの課題を検討する必要がある。

最後に本研究に際しご協力を頂いた三井金属鉱業(株)竹村友之氏、(株)青木建設塩月隆久氏に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 渡辺俊樹・佐々宏一・芦田譲・岸本宗丸：多数の薄層か

らなる低速度帯がP波に及ぼす影響について、物理探査第42巻第2号，pp.75～81，1989。

- 2) 岩谷文方・小松明・和田洋輔：関西国際空港の岩砕埋立地盤でのS波速度測定を試み、物理探査学会第82回學術講演会論文集，pp.33～36，1990。
- 3) 渡辺俊樹・佐々宏一：弾性波の初動振幅を利用した減衰トモグラフィ，物理探査第45巻第1号，pp.10～21，1992。
- 4) 服部邦男・河村精一・川上純・服部弘通・板倉武好・坂下晋：ジオトモグラフィによるグラウト注入範囲の調査，土木学会第45回年次學術講演会概要集第Ⅲ部，pp.1120～1121，1990。
- 5) 笠博義・大賀一秀：地中前方探査システム，センサ技術Vol.11，No.11，pp.25～30，1991。
- 6) 稲崎富士・千田敬二：坑内HSP法によるトンネル切羽前方弱層評価，第25回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.271～275，1993。
- 7) 二宮康郎・杉原弘造・伊東克夫・亀村勝美・青木智幸：ジオトモグラフィによる地下空洞周囲緩み領域の評価について，第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.476～480，1990。
- 8) 小倉公雄・大橋武一郎・吉村正義：メカニカルな打撃力を利用した孔中振源，物理探査学会第86回學術講演会論文集，pp.18～21，1992。
- 9) 蓮井昭則・世一英俊・平井光之：岩盤における孔間弾性波測定システムとその適用について－(その3)中区間用システムとジオトモグラフィ結果－，間組研究年報1988年版，pp.79～87，1988。
- 10) 世一英俊・蓮井昭則・山下亮：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，pp.193～198，1988。
- 11) Kelsall P. C., Case J. B., Chabannes C. R.: A Preliminary Evaluation of the Rock-Mass Disturbance Resulting from Shaft, Tunnel, or Borehole Excavation, Technical Report, ONWI-411, Office of Nuclear Waste Isolation, 1982. (1993.8.11 受付)

UTILIZATION OF CROSSHOLE EXPLORATION USING HIGH FREQUENCY SEISMIC WAVE

Akinori HASUI, Ryo YAMASHITA, Hidetoshi YOICHI and Koji NAKAGAWA

To investigate the utilization of crosshole exploration using high frequency seismic wave, several in-situ measurements were carried out to clarify the rock conditions that civil engineers face in underground construction sites. As the results, the followings were concluded. ①Measurements using high frequency seismic wave revealed good reappearance and precision. ②Rock classification, estimation of rock damage by excavation and rock improvement by grouting were evaluated by measuring the primary wave velocity and attenuation. ③Informations from the repeatedly measured wave velocity and attenuation were used effectively to monitor the construction process.