

# 高周波衝撃弾性波法による転石根入れ長さ探査

塩月隆久<sup>1</sup>・孫 建生<sup>2</sup>・古川浩平<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 (株)青木建設 研究所 土木研究室 (〒300-2622 茨城県つくば市大字要36-1)

<sup>2</sup>正会員 学博 (株)青木建設 研究所 土木研究室 (〒300-2622 茨城県つくば市大字要36-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 山口大学 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台2丁目16-1)

斜面上の浮き石、岩盤斜面等の崩落事故が発生していることから、浮き石の根入れ寸法、岩盤内部のすべり面深さ等の調査が必要とされている。しかし、これらは地中であることからその調査は容易でないのが現状である。筆者らは高周波数成分を用いた衝撃弾性波探査法<sup>1)</sup>を用い、転石の根入れ長さ探査について検証実験を試みた。この探査システムは、トリガーにハンマーによる打撃を、受振センサは共振型圧電センサを用い、高周波数成分の反射波を得る。このシステムにより高い指向性と表面波の減衰が得られ転石根入れ部からの反射波を明確に得ることができる。本研究はこれらの特徴、探査方法及び探査精度について述べるものである。

**Key Words:** *nondestructive test, penetration of boulder, slope hazards, high frequency waves*

## 1. はじめに

近年、斜面上の転石、岩盤斜面等の崩落事故が発生していることから、転石の根入れ長さ等の調査が必要とされている。しかし、これらは地中のことである上転石の形状は複雑であり、かつ斜面等急峻な所にある等の地形的制約から、探査機器の精度に加えて簡便さが要求されるなど、その調査は容易でないのが現状である。一般に、コンクリート等の人工建造物の損傷度探査あるいは寸法探査においては、経済性あるいは簡便性などの理由から非破壊検査法が用いられる。たとえば、ひび割れなどの微細な亀裂の探査には超音波法が用いられ、基礎杭等の根入れの深い構造物の探査の場合には衝撃弾性波法が用いられている。しかし、超音波法では探査深度が限られる。また、衝撃弾性波法では、単杭の断面欠損など比較的大きな損傷及び杭長の探査に適している反面、微細な亀裂(亀裂幅3~5mm以下)の探査には反射波の解釈が難しい。加えて、フーチングなどの介在物がある場合など構造物の形状が複雑となった場合、表面波と反射波が混在し杭長の判別ができにくくなることも多い。これらの従来の探査方法をそのまま転石、岩盤等の調査に適用するにはその適用範囲が限られてくると考えられる。

筆者らは、高周波数帯域成分を用いた衝撃弾性波探査法<sup>1)・2)・3)</sup>を用い、転石根入れ長さの探査を試み良好な結果を得ることができた。本探査法は、発振側

に従来の衝撃弾性波法と同じハンマーによる打撃を、受振側には高周波数域での共振周波数をもつ圧電センサを用い、さらに受振波形を任意の周波数範囲でフィルター処理することを特徴としている。このシステムにより高い指向性と表面波の減衰が得られ転石根入れ部からの反射波を明確に得ることができる。ここでは、これらの特徴、探査方法及び探査精度について述べるものである。

## 2. 従来の探査法における問題点及びその解決策

### (1) 従来の探査法における問題点

転石根入れ長さ等の形状を探査する場合、次のことが要求されると考えられる。

まず、人工建造物に比べ、表面(あるいは端部)形状が複雑である。たとえば人工建造物の基礎杭と比べ形状が三次元体である。このため立体形状を考慮した探査方向及び測点位置の自由な設定が必要となる。次に、数十cm~数mと外形寸法の範囲が広く、これに対応できる探査深度も必要となる。また、内部結晶体のサイズが小さい硬岩から礫混じりの軟岩まで弾性波速度のばらつきが大きく、岩質に応じた探査精度が必要となる。さらに、斜面及び山中での探査になるため小型・軽量かつ簡便な探査機器が必要となる。

これに対して従来の探査法には以下の問題点がある。

例えば、基礎杭の診断に使われるパイルインテグリティテスト（加速度センサを用いる衝撃弾性波法）が挙げられる。これはハンマー打撃による反射波を受振センサで受振し、反射波の伝播時間と弾性波速度から対象物の寸法あるいは損傷度を探査する方法である。探査方法が簡便であり、機器は携帯型が多く、探査深度も数十mは可能である。しかし、転石の探査では転石端部の反射波の解読が困難となる。この理由として使用する周波数が数kHz以下であることから、表面波の減衰、応力波の指向性が期待できず、この結果、反射波、直接波、表面波及び振動波形が混在するためと考えられる。このため、転石を対象として従来の加速度センサを用いた衝撃弾性波法を適用した事例はあまり見られない。元来、この衝撃弾性波法は新設した場所打ち杭の出来形検査のために開発されたものであり、主として単杭を対象とする。従って、杭の上にフーチングがある場合、そのフーチングの上からの探査ではあらゆる反射波が混在し明確な反射波を得ることができない<sup>4)</sup>。転石の形態もフーチングと同様なマス状であるため上記の理由から探査が困難であると考えられる。

このほかにコンクリート構造物の非破壊検査で用いられる超音波法があるが、この方法は高周波数領域を用いることから分解能が高く、数ミリ単位の精度を持つ。しかし、超音波は波動エネルギーの距離減衰が大きく、探査深度が浅い部分に限られることが多い<sup>5)</sup>。また、地盤調査で用いられる電磁波を放射して電磁波の反射・屈折・透過などを利用し探査する地下レーダ法もあるが、探査深度が埋設物探査では1~2mより浅い部分に限られ<sup>6)</sup>、遺跡調査などの深い位置の探査を行う場合は分解能が低下する。また、アンテナの規模など山中での作業性に問題がある。

このようなことから、転石を対象とした探査にこれらの探査方法を適用した例はあまりないのが現状と言える。

## (2) 解決策

上述の問題点から以下のことが考えられる。つまり、深い探査深度を確保するためにはある程度大きな波動エネルギー（出力）が必要であること、また、探査精度を得るには分解能の高い高周波数成分が必要であることである。

これらのことを踏まえて、トリガーに衝撃弾性波法と同じ打撃ハンマーを用い、超音波領域の高周波数成分を受振する新しい高周波数衝撃弾性波探査法を開発した。これは、打撃ハンマーによって大きな波動エネルギーを得てより深い位置まで応力波を伝播させ、高周波数成分を受振するもので、従来の衝撃弾性波法と超音波法のそれぞれの利点を併せた方法と考えられる。

この探査法によって以下の効果が期待できると考えられる。

### a) 高い指向性による効果

本システムにおいて高い指向性が期待できると考えられる。後に第4章で述べるが、コンクリート供試体を用いて実験によって指向性を検証した。この実験結果によると100kHz以上の周波数帯域通過フィルターで受振した場合、ほぼ対角からの反射波を明確に得ることができた。このように指向性の高い反射波形を受振することができるため複雑な転石の根入れ形状に係わらず視準する任意の探査方向の端部から反射した反射波が得られると考えられる。

### b) 表面波減衰効果

高周波数領域においては表面波成分の減衰が期待できると考えられる。従来の受振側に加速度センサを用いるパイルインテグリティテストの場合、扱う周波数範囲は数kHz以下であり、この周波数領域では表面波の減衰はほとんどなく受振波形に多く混在する。このため、転石端部からの反射波と表面波を分離することができず、転石の形状探査が困難であった。これに対して本探査法は超音波領域の高周波数成分を用いることにより受振波形における表面波成分の大きな減衰効果が期待でき、これによって反射波と表面波の混在が解消されると考えられる。

### c) 反射波波形

従来のパイルインテグリティテストの反射波波形と比較し本法により得られる反射波は周波数が高く波長が短いことになる。このため、反射波の立ち上がりが鋭敏で明確な反射波が得られ、反射波位置の判読と伝播時間の読み取りが容易になる効果が期待できると考えられる。例えば、既製杭（RC杭、長さ5.0m、直径0.3m）を対象に杭頭部にセンサを設置して杭先端部を探査した本法の反射波形と従来のパイルインテグリティテストで用いる加速度センサで受振した反射波形を比較した結果を図-1に示す。図-1(a)は本法の結果であり、受振センサの共振周波数は150kHzで100kHz以上の周波数範囲で受振するフィルター処理を施している。図-1(b)は加速度ピックアップ（振動数範囲は1~7000Hz）を用いた結果である。図中の横軸は時間で、縦軸は電圧である。また、杭長を表す杭の図を波形図に併せて示している。二つの波形図を比較すると図-1(a)の反射波は図-1(b)の従来の加速度ピックアップと比べより明確に杭先端部を示していることが分かる。

### d) 打撃ハンマーを用いた衝撃弾性波による起振

一般に高周波数成分は波動エネルギーの減衰が大きい。本法ではハンマーの打撃による起振を行うため、同様な周波数領域を扱う超音波法の起振子等と比較し

て大きな衝撃波動エネルギーを持つことができる。このため、深い探査深度からの大きな反射波動エネルギーと広範囲領域の高周波数成分を得ることが期待できると考えられる。これによって従来、探査深度が浅い深度に限られていた超音波領域の高周波数成分を深い位置まで伝播させその反射波を受振することが可能になると考えられる。これまでの事例では、コンクリート構造物の底盤（厚さ 1.0m）上から手ハンマー（重量 500g）を用いて基礎杭（PHC 杭）を探索したとき探査深度 69m の杭先端部からの反射波を得ることができている。また、地中に埋設された鋼管の探査では鋼管の頭部を直接、手ハンマー（重量 3.6kg）で打撃し探査深度 160m の鋼管先端部の位置から反射波を得ることができている。

### e) 探査機器システムの軽量化

転石の探査の場合、ほとんどが山中にありしかも急傾斜地等の転石が問題となる場合が多いため、システムの小型軽量化が不可欠である。地下レーダ法等ではある程度の大きさの装置が必要になるのに対して、衝撃弾性波法は受振センサ、ハンマー及び波形処理部分でシステムは構成される。本法も同じ構成であり、この簡単な構成によって軽量化を図ることが可能となる。

## 3. 探査システムの概要

### (1) 探査の概念

構造物の表面をハンマーで打撃して発生させた応力波が、構造物内部の不連続面（亀裂等）あるいは構造物端部で反射し、その反射波を受振センサが受振する。得られた波形図中の反射波の伝播時間（ $\Delta t$ ）と弾性波速度（ $V_p$ ）を掛け合わせることによって往復距離が求まり、これを 2 で割ることで片道の距離（ $L$ ）、つまり亀裂あるいは構造物端部の表面からの位置が求まる。式 (1) に距離（ $L$ ）を求める式を示す。また、図-2 に探査概念図を示す。

本システムの特徴は高周波成分を受振し、さらに周波数フィルター処理するところにある。本システムでは受振センサは例えば共振周波数 150kHz の共振型圧電センサを用いている。また、本体部にはある設定周波数以上の周波数成分のみを受振するハイパスフィルター（以下、HPF と称す）機能を有している。これらのシステム機能等によって前章(2)で述べた転石根入れ長さ、形状の探査における効果が期待できると考えられる。

尚、転石根入れ長さ・形状の探査の他に HPF 機能を用いて岩盤・転石の内部亀裂を検知することもできる。亀裂部における応力波の通過成分あるいは反射成

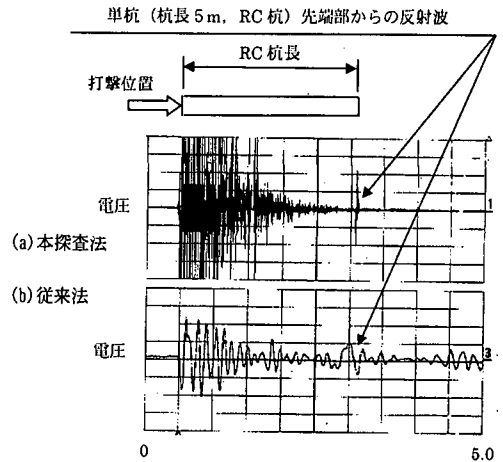


図-1 本法及び加速度ピックアップによる反射波形の比較

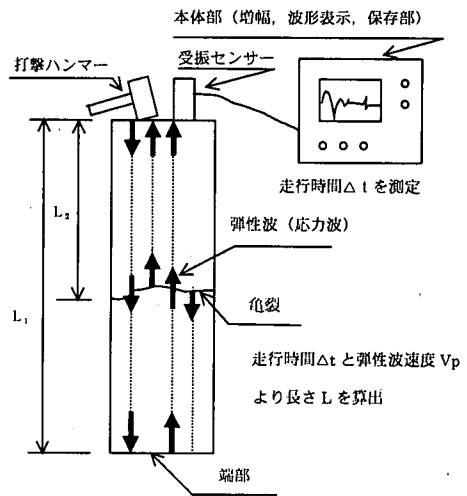


図-2 探査概念図

$$L = \Delta t \times V_p / 2 \quad (1)$$

分は亀裂の幅・剛性と応力波の周波数に依存する特性を有していると考えられ<sup>2)</sup>、亀裂幅に応じた周波数の選択が必要と考えられる。本探査システムでは上述の HPF 機能を用いて周波数の選択を行うことができる。転石中に亀裂を有することは数多く見られ、転石の安定性にかかわる大きな亀裂幅が存在することもある。この場合、実際の探査においては転石根入れ端部の検知と併せて上記 HPF 機能を用いた亀裂のチェックが

重要になると考えられる。この内部亀裂の探査については別の機会にて報告したい。

## (2) 機器構成

開発した衝撃弾性波探査機器のシステム概要を述べる。探査装置は起振部のハンマーと検出部の受振センサ及び本体部の3部から構成される。ハンマーは主に重量 225g~1.3kg の手ハンマーであり、受振センサは直径 1cm、高さ 3cm の小型なものである。波形表示部などが備えつけられた本体部は形状寸法 450mm×300mm×120mm、重量約 6kg のポータブル型になっている。上述した周波数を選択するフィルター機能はHPFとして本体部に内蔵されている。以下にその仕様を記述する。

- ・受振部：受振センサ（共振型圧電センサ）  
直径 1 cm、高さ 4 cm、例えば、共振周波数 150kHz
- ・起振部：手ハンマー（主に、重量 225g~1.3kg）
- ・本体部：増幅部、フィルター部、波形表示部、FD保存部、形状寸法（450×300×120 mm）、重量（約 6kg）

## (3) 探査方法

探査ではまず転石表面の受振センサ接着面と打撃面に必要な範囲（最小で 5 cm×10 cm程度）をグラインダー等にて平坦に研磨する。目的は、受振センサ設置方向及び打撃方向を同じ方向に保つことと転石表面の苔や風化した部分の除去である。次に受振センサを設置面に固定する。固定方法は、エレクトロニクスワックスによる融着の他にセンサホルダー、パテ材（例えば、ブチルゴム系充てん材）、両面テープあるいは接着剤等による固定があるが、転石の探査では主にエレクトロニクスワックスを用いている。次ぎに手ハンマーを用いて受振センサから 5~10 cm離れた転石表面位置を打撃する。このとき想定される根入れ長さに応じた打撃力及びハンマー重量を選定することが必要となる。本体部には波形表示板があり、2つの波形を表示することができる。ひとつの波形表示板（1ch）には打撃して受振した毎回の波形を表示させる。もうひとつの波形表示板（2ch）には5つの波形を重畳させた平均波形を表示させている。平均波形は反射波形の再現性を確認する機能として用いる。表示画面は本体部に内蔵された 3.5 インチフロッピーディスクに保存することができる。表示画面上でインプットした弾性波速度（ $V_p$ ）を用いて任意の反射波位置の距離（ $L$ ）を計算・表示する機能も備えている。

写真-1 に本システムを構成する本体と受振センサ及び手ハンマーを示す。

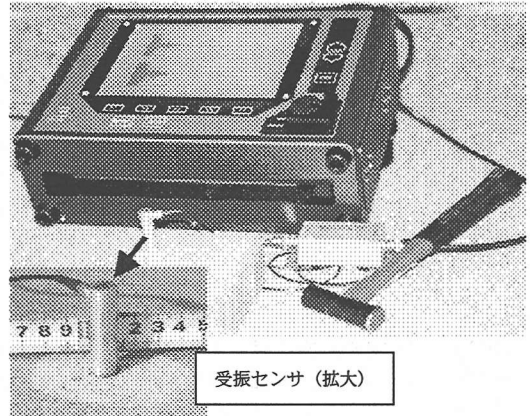


写真-1 システム構成（本体、受振センサ及びハンマー）

## 4. マス・コンクリートを用いた指向性に関する検証実験

本法は、本システムの有するより高い指向性に基づき転石等の根入れ長さ、形状を求めるようにするものである。本法が用いている超音波領域の指向性について、これまで研究がなされ、これらは以下の条件等のもとに理論が成り立っている。

- i) サイズが小さい供試体（実験の場合）を対象
  - ii) スチールあるいは空気等の均質な媒体を対象
- しかし、転石、コンクリートのような複合材料等を対象とし、探査深度が数十mである場合、これらの研究がそのまま適用できないと考えられる。そこで、本章で示すように、転石を模擬したサイズの矩形マス・コンクリートの供試体を用いた実験的アプローチによって本システムにおける指向性を検証することにした。この供試体の隅部から対角線の隅部方向に向けて探査を行い、高い指向性があれば対角線の隅部から反射波が得られるであろうという仮定のもとに検証実験を行うものである。

### (1) 実験概要

#### a) 供試体

図-3 に示す矩形のマス・コンクリートを探査対象の供試体として実験を行った。供試体は無筋のマス・コンクリートで、幅 3.10m×奥行き 3.00m×高さ 1.20mの矩形型の形状である。コンクリートは呼び強度 24 (MPa) -スランプ 20 (cm) -粗骨材 8 (mm) のレディーミクストコンクリートを使用した。

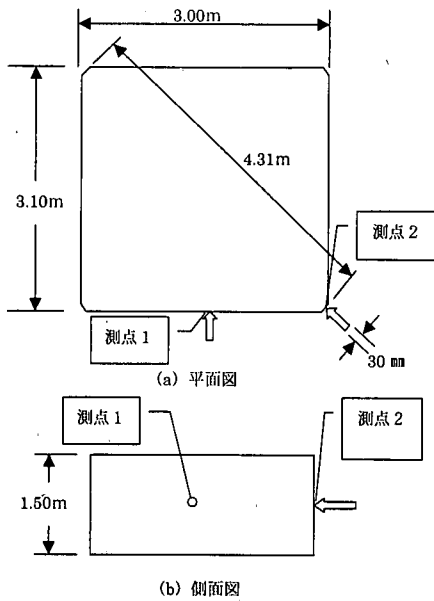


図-3 マスコンクリート形状及び測点位置図

#### b) 測点

供試体の側面と隅部に測点1及び測点2を設けた。測点1は供試体の弾性波速度を求めるために設けたものである。測点2で指向性に関する実験を行った。測点位置を先の図-3に併せて示す。

#### c) 探査手順

探査手順は前章(3)で述べた方法と同じであるが、受振センサの固定はワックスによる融着の方法を用いた。また、手ハンマーは重量225gのものを選択した。

#### (2) 供試体コンクリート弾性波速度の推定

供試体側面の測点1において供試体の弾性波速度の測定を行った。測点1の供試体の奥行き実測寸法は3.00mである。測点1に受振センサを設置し、受振センサから8cm程度離れた同じ側面を供試体奥行き方向にハンマーで打撃した。

図-4に得られた探査結果波形図を示す。HPFは100kHzに設定した。図中に示す反射波は数度の打撃に対して再現性があり、供試体奥行き方向反対側の側面からの反射波と思われる。波形初期から反射波の立ち上がりまでの伝播時間を読みとると1.640msであった。前章(1)で述べた関係式(1)に得られた反射波の伝播時間1.640msと探査方向の供試体の奥行きは実測寸法3.00m(L)を代入して、弾性波伝播速度( $V_p$ )を計算すると3.66km/secが求まる。

この値( $V_p=3.66\text{km/sec}$ )が一般的なコンクリートの弾性波速度3.0~4.5km/secの範疇にあることから、本

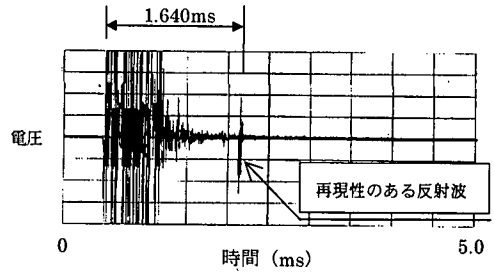


図-4 供試体側面・測点1の探査結果波形図

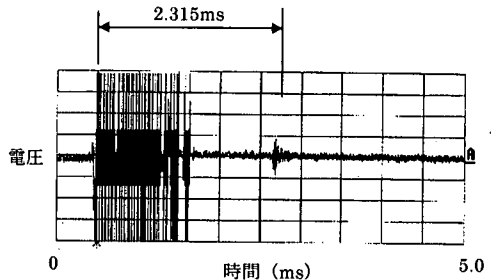


図-5 供試体隅部・測点2のHPFを用いた探査結果波形

供試体のコンクリートの弾性波速度と判断しても妥当と考えられる。以降、この値を供試体の推定弾性波速度として以下の解析を行う。

#### (3) 指向性に関する実験

供試体隅部に設けた測点2において指向性に関する実験を行った。供試体の隅部は幅3cmの面取りがなされている。受振センサをこの供試体隅部の面に設置し、受振センサから8cm程度離れた同じ面の部分を供試体対角線方向にハンマーで打撃した。

##### a) HPF機能を用いた探査結果

HPFを100kHzに設定して探査を行った。得られた波形図の一例を図-5に示す。図中对角する供試体隅部と思われる反射波を得ている。これらは数度の打撃の都度現われるため、対角の隅部と判断した。この反射波の伝播時間は2.315msecである。これに測点1で求めた推定弾性波速度 $V_p=3.66\text{km/sec}$ を用い式

(1)から計算すると距離 $L=4.24\text{m}$ が求まる。供試体対角線長の実測値は $L=4.31\text{m}$ であり、求めた距離の方が少し短い。ほぼ対角の隅部までの距離が得られている。測点2横の打撃点から出た波がどのような経路を伝播して戻ってきたかは不明であるが、本システムにより得られた値は実測値とほぼ等しいことからこの波動の指向性はかなり高いものと考えられる。仮に測点2を打撃した時、対角する側面全域(測点2からの

距離 3.00m~4.31mの範囲)から反射波を得たとすると、反射波の継続時間は距離の差 1.31m (=4.31-3.00 m) と弾性波速度  $V_p = 3.66\text{km/sec}$  から計算すると 0.716ms になる。しかし、実際に得られた反射波の継続時間は図-5 の時間軸スケールを変えた波形図を用いて読み取ると 0.035ms であった。先の 0.716ms の約 1/20 である。この結果も合わせて考えると図-5 の波形はある程度高い指向性を有した反射波を受振したものと考えても妥当ではないかと推察している。

この実験結果については、高周波領域の指向性の他に受振センサの指向性も寄与しているものと考えている。例えば、周波数領域は異なるが音響で用いる高指向性マイクロホンが指向角と周波数によって相対感度が異なり、マイクロホンの種類によってもその特性は異なる。いわゆる指向性は、計測システムに依存するものであり、本法の高い指向性も、打撃ハンマー、高周波数共振型圧電センサおよび高周波成分の H P F 機能をもつ本システムによって得られたものと考えられる。但し、本法の指向性について理論的な説明はなされてなく今後の研究に拠りたい。本法の大きな特徴である高い指向性の根拠は実験による結果に基づいたものである。

#### b) H P F 機能を用いない探索結果

入力波形にフィルターを全くかけないスルーの状態に設定して測定を行った。但し、プリアンプの時点で 30kHz の H P F がかった状態にある。図-6 に探索結果の波形図を示す。供試体表面を伝播する表面波と端部から反射する反射波が混在していると考えられ、反射波位置の特定ができないことは明らかである。

#### c) 加速度ピックアップを用いた探索結果

次に、測定周波数範囲が 1~7000Hz の加速度ピックアップを用いた探索した結果を図-7 に示す。上記図-6 と同様に明確な反射波は得られなかった。

#### d) 実験結果のまとめ

実験の結果を以下にまとめる。

- 1) フィルターなしの状態及び加速度ピックアップを用いた状態では端部からの明確な反射波を得ることができなかった。
- 2) 本システムにおいて高周波数成分でフィルターをかけた場合、端部からの明確な反射波を得ることができ、高い指向性を有することが実験結果から分かった。

### 5. 転石根入れ長探索に関するフィールド実験

前章では、転石を模擬した矩形マス・コンクリートを対象に本法の指向性について検証を行った。本章で

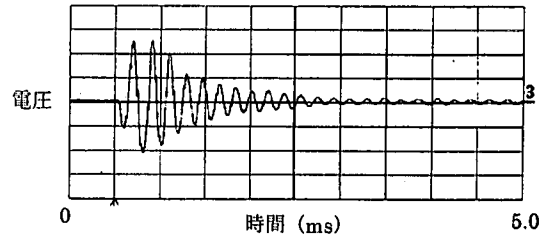


図-6 供試体隅部・測点 2 の H P F を用いない探索結果波形図

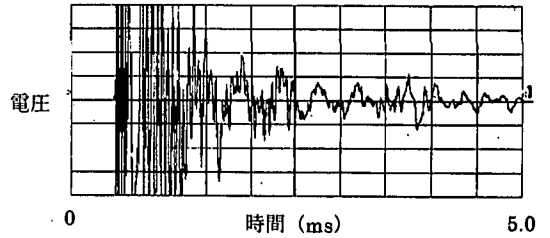


図-7 供試体隅部・測点 2 の加速度ピックアップを用いた探索結果波形図

は、実際の自然石を対象にしたフィールド実験を行う。まず、自然石の 2/3 程を地中に埋設し地上に露頭した部分から地中部分の自然石の形状を探索し、事前に実測した形状と比較し探索精度について検証する。次に斜面に露頭した転石を対象に実際の探索方法に即した根入れ長探索を実施する。また、探索方法に関する課題、問題点について考察を述べる。

#### (1) 埋設した自然石を用いた根入れ形状の探索精度に関する実験

##### a) 実験概要

1つの自然石(転石①と称す)を探索の対象とした。転石①は緑色凝灰岩で約 7 t 程の大きさである。その形状を写真-2 及び図-8 に示す。この転石①を対象として埋設部分の自然石根入れ形状の探索精度に関する検証実験を行った。

まず、この転石①を図-9 (1-1 方向断面) 及び図-10 (2-2 方向断面) の断面図に示すように長辺方向長さの 2/3 程度を地中に埋設した。転石に設けた測点名、測線の方向及び事前に測定した実測寸法を表-1 に示す。また、図-9 及び図-10 に測点位置を示している。

##### b) 弾性波速度の推定

地上部に露出している部分で寸法の実測が容易で端面が平坦かつ平行している転石厚み方向の測点 B を用

表-1 転石①の測点名, 測線方向及び実測寸法

転石名	測点名	測線方向	実測寸法
①	A	長辺方向	2.50m
①	B	厚さ方向	1.05m
①	C	長辺方向	2.30m
①	D	短辺方向	1.70m

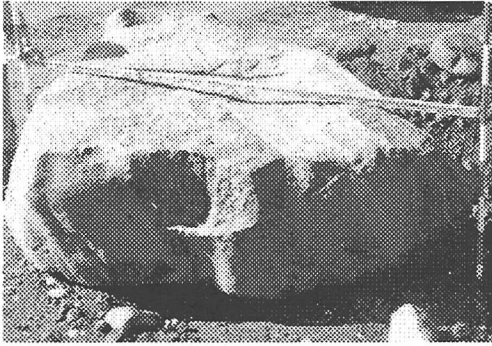


写真-2 実験に用いた転石①(緑色凝灰岩, 約7 t)

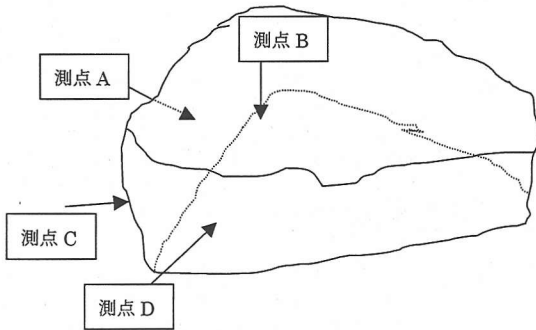


図-8 測点A~D位置(写真-2に対応する転石①形状)

い, 端部からの反射波の伝播時間と実測寸法から転石の弾性波速度を推定した. 実測寸法は 1.05mである. 探査で得られた波形図を図-11に示す. 図中に転石厚み方向の端部と思われる反射波が得られた. 尚, このときのHPFは100kHzで, 受振センサの固定にはパテ材を用いた.

図-11を見ると波形の中に2つの反射波がある. 波形初期の立ち上がりから初めの反射波までの伝播時間 $\Delta t_1$ と2つ目の反射波間の伝播時間 $\Delta t_2$ を波形図横軸(フルスケール=2.0ms)から読み取ると $\Delta t_1=0.615\text{ms}$ と $\Delta t_2=0.641\text{ms}$ となる. 測点Bは転石の露頭している部分でありかつ転石厚さが薄いため, 波動エネルギー

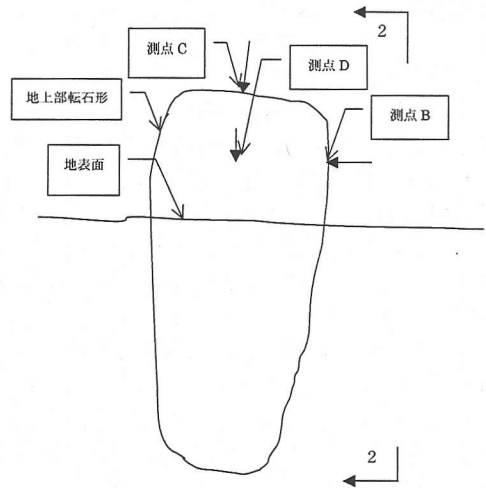


図-9 埋設した転石①の(1-1方向)断面図

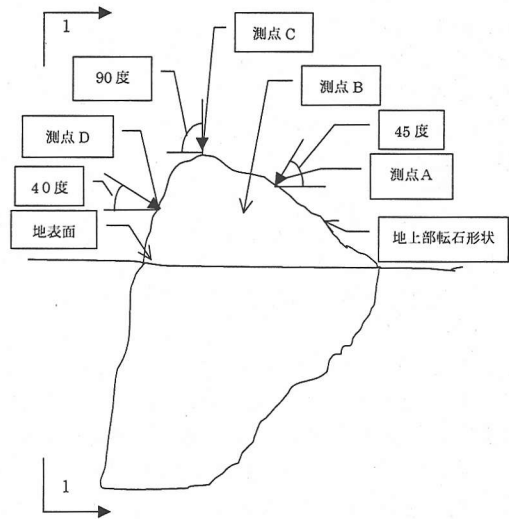


図-10 埋設した転石①の(2-2方向)断面図

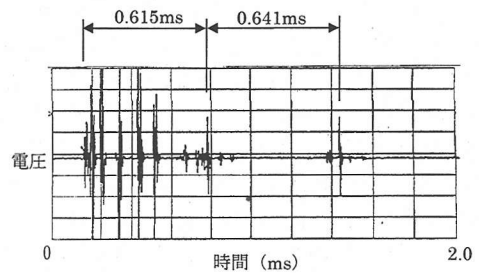


図-11 弾性波速度推定・測点Bの探査結果波形図

が逃げることなく繰り返し反射し、2往復分の反射波を得たものと考えられる。ここでは1回目の反射波の伝播時間 $\Delta t=0.615\text{ms}$ を用い、上述の実測寸法 $L=1.05\text{m}$ と先に示した式(1)から弾性波速度 $V_p$ を求めると $V_p=3.413\text{km/sec}$ となる。一般的に凝灰岩の弾性波速度は $1500\sim 2800\text{m/sec}$ 、凝灰角礫岩は $2000\sim 3800\text{m/sec}$ 、緑色凝灰岩は $2100\sim 4800\text{m/sec}$ と言われている。転石①は現場で観察した岩質から判断すると緑色凝灰岩と推察され、かつ、計算した弾性波速度 $V_p=3.413\text{km/sec}$ が上記一般的な弾性波速度の範疇に入ることから、伝播時間 $\Delta t$ の反射波が転石厚み方向の端部であると推定しても概ね妥当と考えられる。以後、この転石の弾性波速度を $V_p=3.413\approx 3.40\text{km/sec}$ として根入れ長さ探査解析を行った。尚、弾性波速度の推定に今回のような転石の地上に露頭する部分を用いた方法のほかに転石の小片があれば後日室内の超音波試験で測定する方法もある。

### c)各測点の探査結果

転石根入れ形状を知るために、複数の測点を設けそれぞれの転石端部の反射波位置を求め、それらの位置を結ぶことによって根入れ形状を推定する。転石の大きさによって測点数は変わるが、今回は、測点A、C及び測点Dの3測点を設けた。HPFは $100\text{kHz}$ で、受振センサの固定にはパテ材を用いた。このとき、センサ及び打撃方向は指向性に関わるため、センサの角度(方向)の設定が重要となる。今回、水平となす角度で測点Aが $45$ 度、測点Cが $90$ 度、測点Dが $40$ 度であった。先の図-10に測点位置と角度を示している。

#### 1)測点Aの探査結果

測点Aのセンサは水平と $45$ 度の角度をなし、ほぼ転石の長辺方向に沿った測線を持つ。探査結果の波形図を図-12及び図-13に示す。図-12中の伝播時間 $1.410\text{ms}$ の位置に端部と思われる反射波を得ている。先の推定弾性波速度 $V_p=3.40\text{km/sec}$ と式(1)を用いて計算すると距離 $L=2.397\text{m}$ が求まる。また、横軸のスケールを変えた波形図(図-13)にも伝播時間 $1.41\text{ms}$ 、距離 $L=2.399\text{m}$ の位置に根入れ端部と思われる反射波を得ている。別の測定結果では $L=2.385\text{m}$ であった。これらの結果から測点Aにおける転石根入れ端部までの深度を $2.385\sim 2.399\text{m}$ と推定する。実測長さ $2.50\text{m}$ と比較すると推定値との誤差率は $-4.04\sim -4.60\%$ ( $=(2.385\sim 2.399\text{m}-2.50\text{m})/2.50\text{m}$ )である。ほぼ満足できる精度と思われる。測点Aの対角は図-10を見ても分かるようにかなり鋭角な部分であるが、そのような形状でも上述のようにほぼ満足できる精度で寸法を求めており、この結果からも本システムの波の指向性はかなり高いものと考えられる。尚、波形図中、初期のオーバーレンジに近い振幅の反射波は受振センサに

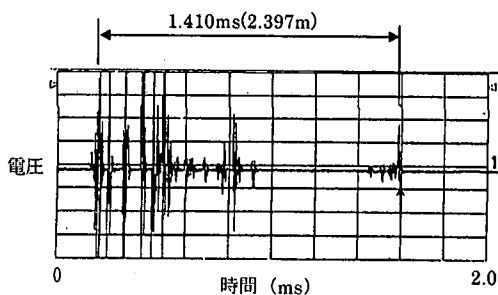


図-12 転石①・測点Aの探査結果波形図(その1)

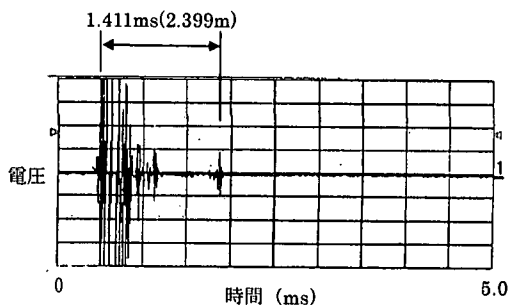


図-13 転石①・測点Aの探査結果波形図(その2)

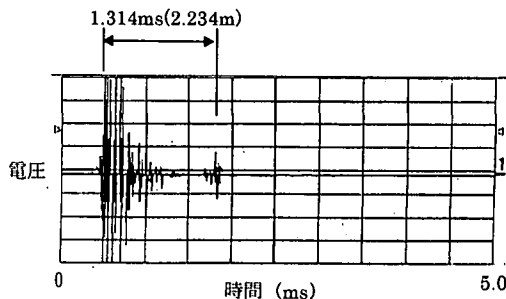


図-14 転石①・測点Cの探査結果波形図

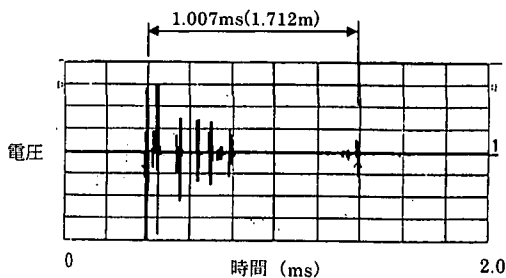


図-15 転石①・測点Dの探査結果波形図

直接入力した打撃ハンマーの表面波と考え、これら付近の反射波は解析上、無視している。



表-2 転石①のセンサ設置位置及び端部の表面形状

転石名	測点名	センサ位置の形状	端部の形状
①	A	平坦	角
①	B	平坦	平坦
①	C	角	斜め
①	D	平坦	丸み

表-3 転石②, ③のセンサ設置位置及び端部の表面形状

転石名	測点名	センサ位置の形状	端部の形状
②	E	丸み	丸み
③	F	丸み	平坦

2) 測点Cの探査結果

測点Cのセンサは水平と90度の角度をなし、転石の垂直方向の測線を持つ。探査結果の一例を図-14に示す。図-14では伝播時間1.314msの位置に端部と思われる反射波を得ている。前例と同様に計算すると距離 $L=2.234\text{m}$ が求まる。図には示していないが別の例では伝播時間1.346ms、距離 $L=2.288\text{m}$ を得た。よって測点Cからの転石根入れ端部までの深度を $2.234\sim 2.288\text{m}$ と推定する。実測長さ2.30mと比較すると推定値との誤差率は $-0.52\sim -2.87\%$ である。

3) 測点Dの探査結果

測点Dのセンサは水平と40度の角度をなし、ほぼ転石の長辺方向と直交する短辺方向の測線を持つ。探査結果の波形図の一例を図-15に示す。図-15中では伝播時間1.007msの位置に端部と思われる反射波が得られ、これより距離 $L=1.712\text{m}$ が求まる。他の例の場合では伝播時間1.007ms、距離 $L=1.712\text{m}$ であった。よって測点Dからの転石根入れ端部までの深度を $1.712\text{m}$ と推定する。実測長さ1.70mと比較すると推定値との誤差率は $+0.71\%$ である。いずれも十分満足できる精度と思われる。

d) 根入れ形状の推定

測点A、C及び測点Dの3測点から得られた転石根入れ端部の位置を断面図にプロットし、転石の根入れ形状を推定した。図-16にその断面図を示す。この3測点によってほぼ転石根入れ形状が推定できたと考えられる。今回は試験的な探査であったが、実際は、転石の規模、探査目的に応じて測点数を決めることにより任意に根入れ形状を推定することになる。また、これら一次データに基づき根入れ形状を多次元の画像で表現することも可能になる。

e) 転石形状の違いによる探査精度への影響

転石の形状は様々であり、転石形状の違いによる探査精度への影響があっては困る。転石①のセンサ設置位置の転石表面形状と端部の表面形状を表-2にまと

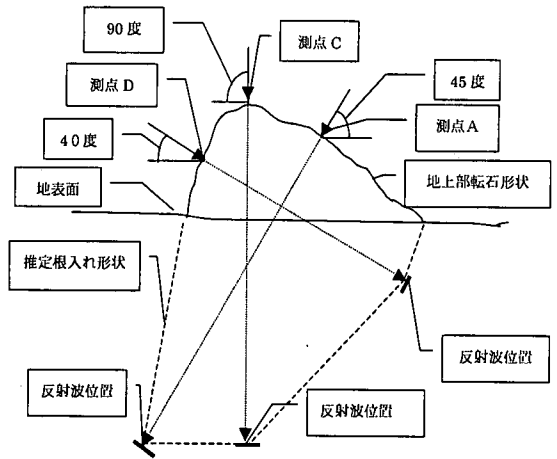


図-16 転石①の推定根入れ形状

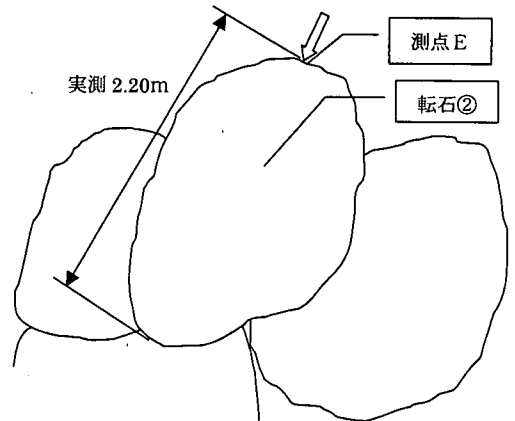


図-17 転石②形状と測点Eの位置

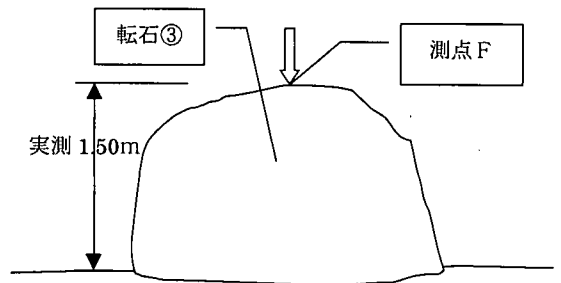


図-18 転石③形状と測点Fの位置

めたが、先に示した探査精度を確認した結果にあるように転石形状の違いによる探査精度への影響はないと考えられる。

確認のために転石①とは形状の異なった2つの自然石(転石②, 転石③と称する)を用いた転石の大きさを探査する実験を行った。転石②は緑色凝灰岩で重量約5t, 全体に卵型の丸みのある形状をしており, 他の積み重なった石の上に置かれた状態にある。転石③も同じく緑色凝灰岩で重量約3t, 半球型の形状をしており, 地表面に置かれた状態である。各転石のセンサ設置位置の転石表面形状と端部の表面形状を表-3にまとめた。図-17, 18に各転石の形状と測点位置の概略図を示した。

### 1) 転石②測点Eの探査結果

受振センサを転石②のE点に設置し, 転石長辺方向の長さ(実測 2.20m)を探査した。センサ取り付け箇所及び探査方向の転石先端部共に丸みのある形状である。HPFは100kHzに設定した。結果を図-19に示す。複数の反射波がありその番号を図中に記入している。1番目及び2番目の反射波のトリガーからの伝播時間は $\Delta t=1.250\text{ms}$ ,  $\Delta t=2.566\text{ms}$ である。先に求めた推定弾性波速度 $V_p=3.40\text{km/sec}$ と式(1)から距離を求めると2.125mと4.362mになる。これは転石先端部からの反射が2往復したものと推察される。転石②はいくつか積み重ねられている転石の上であり, 不安定な浮き石状態にある。このため, 波動エネルギーは転石②の中で余り減衰せず繰り返し往復し易い状態にあったため生じた現象と考えられる。このような繰り返し現象は転石①でハンマーの打撃力を強くした時にも生じている。但し, 転石①では, 埋設後にはこの現象は生じなかった。転石②では測点Eの端部までの実測長さが2.20mであり, 1番目の推定距離2.125mとの誤差率は-3.41%である。この場合も精度よく探査できていると考えられる。センサ位置及び端部とも丸みを帯びた形状だが, この場合も転石形状の違いによる探査精度への影響はないと考えられる。

### 2) 転石③測点Fの探査結果

受振センサを転石③のF点に設置し端部の長さ(実測 1.50m)を探査した。センサ取り付け箇所は丸みがあり, 測線方向先端部は平坦な形状である。HPFは100kHzに設定した。結果を図-20に示す。図中の反射波までの伝播時間は $\Delta t=0.877\text{ms}$ であり,  $L=1.490\text{m}$ になる。転石③測点Fの端部までの実測長さが1.50mであり, 推定距離1.490mとの誤差率は-0.60%である。これも精度よく探査できていると考えられる。この転石③の場合も転石形状の違いによる探査精度への影響はないと考えられる。

### f) 加速度ピックアップセンサとの比較

加速度ピックアップ(振動数範囲1~25000Hz)を用いた結果との比較を行った。測点は転石①の測点Aである。その結果を図-21に示す。図中, 上の波形は本

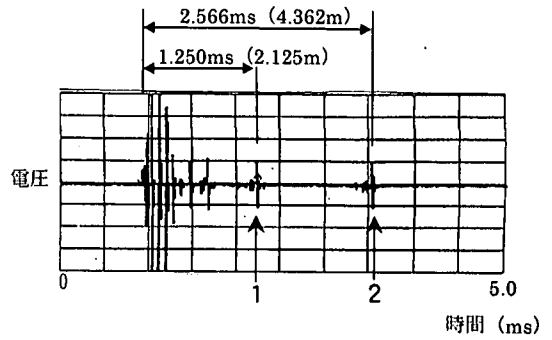


図-19 転石②・測点Eの探査結果波形図

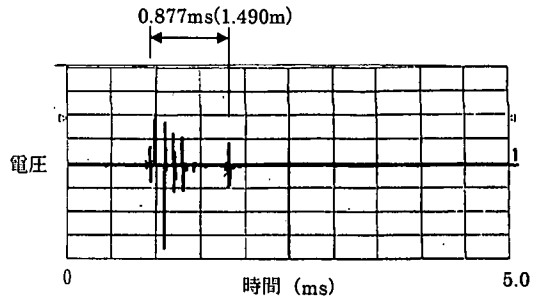


図-20 転石③・測点Fの探査結果波形図

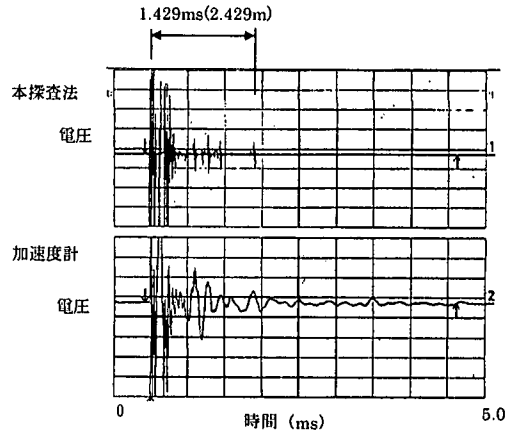


図-21 転石①加速度計との比較

法の結果であり, 伝播時間1.429msに端部と思われる反射波を得ている。よって推定距離2.429m(実測値2.50mとの誤差率-2.84%)になる。これに対して, 図中, 下の波形が加速度ピックアップの結果である。上の波形にある反射波の位置と対応する位置に端部と思われる大きな振幅をもった反射波があるがあまり明確ではない。

### g) 反射波のばらつき

探査結果より得られた推測値と実測値を比較しばらつきを把握を行った。上記のデータについて転石寸法

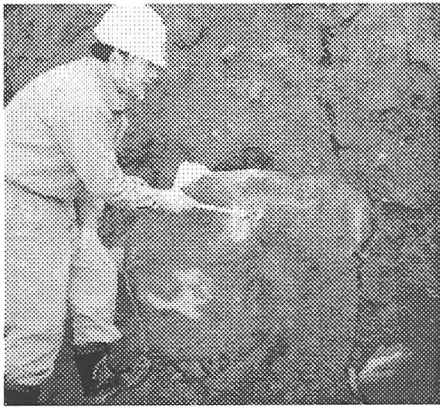


写真-3 露頭した転石 (4)

の推測値と実寸法の差の実測値に対する誤差率を計算するとその範囲は $-4.60 \sim +0.71\%$ になり、その絶対値の平均は $2.44\%$ になる。これまでの本探査法を用いたコンクリート構造物での探査実績ではおおむね誤差率は $\pm 5\%$ 内であったが、今回実験対象とした転石において上記結果のとおり、その範囲内にあることが分かった。

## (2) 斜面に露頭した転石根入れ長探査

実験ヤード付近にある写真-3及び図-22に示すような実際に斜面に露頭した転石(転石④)の根入れ長探査を試みた。

まず、露頭した部分(実測幅 $0.80\text{m}$ )で探査し弾性波伝播速度を $V_p=3.45\text{km/sec}$ と推定した。岩種は目視による観察から転石①と同じく緑色凝灰岩と推測された。先に述べた一般的な弾性波速度の範囲にあることから、以下の解析にこの弾性波速度 $V_p=3.45\text{km/sec}$ を用いた。

次に露頭部分の側面(測点G)から水平に斜面奥行き方向の探査を行ったところ、図-23のような結果を得た。根入れ先端部からと思われる反射波が伝播時間 $1.410\text{msec}$ に見られたことから、 $L=2.433\text{m}$ と推定した。

同様に露頭部分の上部(測点H)から鉛直方向に探査を行ったところ図-24のような結果を得た。根入れ先端部からと思われる反射波が伝播時間 $0.821\text{msec}$ に見られ、これより $L=1.415\text{m}$ となった。

このことから、前述の誤差率 $\pm 5\%$ を用いて水平方向の根入れ長を $2.43\text{m} \pm 0.12\text{m}$ 、鉛直方向の根入れ長を $1.42\text{m} \pm 0.07\text{m}$ と推定した。尚、この岩石の周囲は斜面崩壊の跡があり危険であると判断したため、探査後の掘り出しは行わなかったため、転石根入れ長の確認はできなかったため推定値の正誤の確認はできていない。

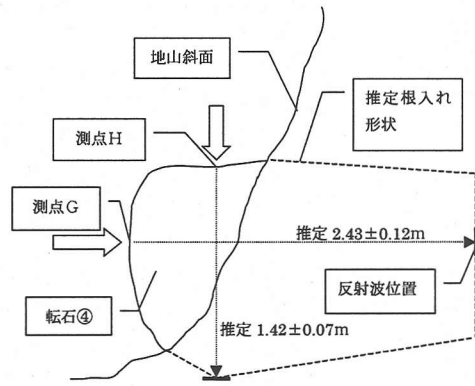


図-22 斜面に露頭した転石④概念図

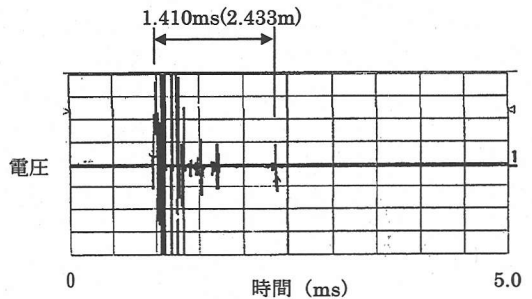


図-23 転石④側面・測点Gの探査結果波形図

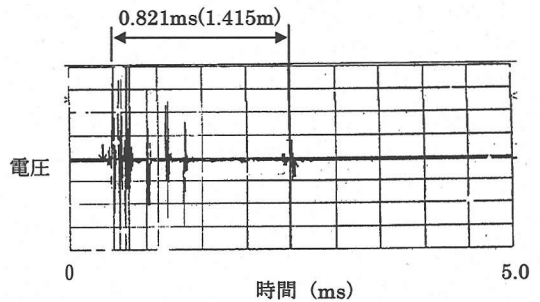


図-24 転石④側面・測点Hの探査結果波形図

## (3) 探査方法について

### a) 反射波の再現性について

本法の信頼性を高めるために反射波の再現性を確保することが必要である。

本法は高い指向性を有するため、受振センサの据付方向、打撃方向の精度が厳しく要求される。また、高周波数波の高い減衰特性のため、打撃力、受振センサの据付密着度、アンプ増幅倍率の設定が厳しく要求される。特に対象物の表面特性である表面の強度、研磨状態なども大きく影響する。従って、受振センサ取り付け面及び打撃面の整形、研磨を丁寧にすることが重

要である。これらの条件を満たすことによりかなり良い再現性を確保することができている。

再現性にかかわる要因は上述のほかには手ハンマー打撃の人為的なばらつきがある。初めての探査の場合、手ハンマーの打撃が不慣れであり、打撃力が強すぎるなどノイズを多く伴った波形になり実測値との誤差も多くなる。今回の実験では全くの初心者での探査も試みた。初めの方の探査では明瞭かつ再現性のある反射波は現われなかったが、何回かデータを取るにつれほぼ半日後には他の探査に慣れたものと同じ波形をとることができている。但し、より信頼性を高めるためには一定の力で打撃ができる打撃装置の開発が必要と考えている。

#### b) 受振センサ固定方法について

受振センサの固定方法にはエレクトロニクスワックスによる融着、両面テープ及びパテ材による固定等のいくつかの方法がある。転石の探査の場合、エレクトロニクスワックスを用いている。今回は、試験的にエレクトロニクスワックスによる融着、両面テープ及びパテ材の3種類を用いたが、伝播時間の違い等の探査精度へ及ぼす影響はほとんど見られなかった。

## 6. まとめ

転石や岩盤斜面の調査にはボーリング調査あるいは目視調査が行われるが、作業性、工期または経済性を考慮した場合、超音波、弾性波、電磁波等を用いた非破壊探査法が有効と思われる。しかし、従来の技術では探査精度、探査深度あるいは探査機器の大型化などの課題点があり、たとえば転石の根入れ長さ等の調査に用いられることはあまりなかった。

今回開発したシステムは従来の衝撃弾性波法と同じであるが、超音波領域の高周波数成分を受振する新しい探査法を使って、小規模ではあるが表面形状の複雑な自然石を対象とした試験探査を行ったところ、良好な結果を得ることができた。その結果と考察をまとめる。

- 1) 転石を模擬したマスコンクリートを用い実験を行った結果、本法の指向性はかなり高く、対角の3 cm幅の隅部からの反射波を明確に読み取ることができた。
- 2) 実際の自然石（緑色凝灰岩）を埋設して行ったフィールド実験において露頭する転石表面に設けた測点から転石根入れ端部の反射波を得ることができた。また、複数の測点結果からおおよその転石根入れ形状を推定することができた。これらは事前に実測した寸法との比較からほぼ

満足できる結果であることが確認できた。

- 3) いくつかの自然石を用い転石形状の違いによる探査精度への影響の有無を検証したが、受振センサ及び転石端部の形状の違いに係わらず探査精度へ影響のないことが分かった。
- 4) 探査精度については、転石寸法の実測値と推定値の誤差率は $-4.60 \sim +0.71\%$ であり、その絶対値の平均は2.44%であった。実務レベルで考えた場合十分満足できる精度であることが分かった。
- 5) この推定値の精度は反射波のばらつきの他に弾性波速度の推定が探査精度に大きく係わるが、今回は露頭している部分を用いて、寸法の実測と反射波の伝播時間から弾性波速度を計算して推定した。このほかの方法として転石の小片を室内で超音波試験にて測定する方法もある。
- 6) 尚、自然石の異方性のため弾性波速度が探査方向によって大きく異なる場合も考えられる。今回の実験で用いた緑色凝灰岩においては探査方法による顕著な弾性波速度の違いはなかったが、岩質及び探査精度の必要性等に応じて慎重に弾性波速度を決める必要があると考えられる。
- 7) 反射波の再現性を確保するためには、受振センサの据付け方向、打撃方向または表面の研磨状態が厳しく要求される。また、手ハンマーの打撃に半日程度の慣れが必要であるため今後の課題として一定の力で打撃ができる打撃装置等の開発が必要と考えられる。

謝辞：本システムの研究開発を共同で行った永井哲夫氏（現㈱ダイアコンサルタント、当時㈱青木建設 研究所主任研究員）、池尻 健氏（現㈱セントラル技研、当時㈱青木建設 研究所研究員）に謝辞を表す。また、現場実験ヤードの提供及び協力を頂いた建設省北陸地方建設局新井出張所及び当時㈱青木建設関川作業所長 田邊満氏に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 特許庁：特許第 2877759 号、杭または構造物の動的診断方法（特許権者：株式会社青木建設）、1999年1月22日取得。
- 2) 特許庁：特許第 2944515 号、自然構造物の形状診断方法（特許権者：株式会社青木建設）、1999年6月25日。
- 3) 財団法人先端建設技術センター：オーリス（非破壊探査システム）、先端建設技術・技術審査証明報告書（審査証明依頼者：株式会社青木建設）、1997年

3月17日.

- 4) たとえば, 榎本雅夫, 土谷尚, 森田悠紀雄, 田中勉: 非破壊試験 (Pile Integrity Tests) を用いた杭の損傷度調査, 第31回地盤工学研究発表会, pp. 443~444, 1996年7月.
- 5) たとえば, 魚本健人, 加藤潔, 広野進: コンクリート構造物の非破壊検査, 森北出版, p. 5, 1993年.
- 6) たとえば, 地盤調査ハンドブック編集委員会編: 最新地盤調査ハンドブック, (株)建設産業調査会, pp. 293~298, 1995年.

(2000. 5. 1 受付)

## HIGH-FREQUENCY IMPACT STRESS-WAVE METHOD FOR NON-DESTRUCTIVE TEST SYSTEM TO DETECTING PENETRATION OF BOULDERS

Takahisa SHIOTSUKI, Jian-Sheng SUN and Kohei FURUKAWA

In engineering, to prevent damage of boulders due to their rolling down from slope, it is necessary to know that the rock is part of rock masses or a boulder and how deep it penetrates into the ground. According to authors' experiments, some interesting facts are found. The high frequency waves propagate with a very good directivity and the corresponding surface wave sharply decays. Based on above facts, a new portable nondestructive test system is made. Just using a steel hammer to hit the rock surface, the size of boulder in sensor's direction can be directly calculated in situ from reflection wave. Aim of this article is to present some results of indoor experiments and field tests obtained by this new system.