

高周波衝撃弾性波法による 岩塊や転石の形状寸法調査

永井 哲夫^{1*}・小泉 和広¹・永野 賢司²・北澤 浩二³

¹株式会社ダイヤコンサルタント 本社技術統括部（〒101-0032 東京都千代田区岩本町1-7-4）

²株式会社ダイヤコンサルタント 四国支店（〒790-0952 愛媛県松山市朝生田町2-8-37）

³株式会社ダイヤコンサルタント 北陸支店（〒950-2001 新潟県新潟市西区浦山4-1-24）

*E-mail: t.nagai@diaconsult.co.jp

岩塊や転石の大よその形状寸法をもとに根入れ長が把握できれば、その結果をもとに安定計算などにより落石危険度を評価することが可能であり、防災という観点から非常に有効である。

本文では、岩塊や転石の形状寸法調査における高周波衝撃弾性波法の有効性について、基礎実験と現場での適用事例をもとに報告する。高周波衝撃弾性波法は、衝撃弾性波の高周波成分を利用することにより、調査対象物内のひび割れ・亀裂の位置や幅、端部の位置などを把握する手法である。岩塊や転石の形状寸法の把握への適用に際しては、本手法の特長の一つである高い指向性が鍵となる。この指向性に影響を及ぼす要因について基礎実験により検討を行い、岩塊や転石の形状寸法調査の高度化を図る。

Key Words : *nondestructive inspection, shape size, rock and boulder, impact-echo, high frequency*

1. はじめに

落石危険箇所においては、岩盤斜面から剥離する恐れのある岩体や岩盤上の浮石、斜面に点在する転石などが落石となる危険性の有無を把握し、必要に応じて落石予防工や落石防護工などの落石対策工を実施することが、防災という観点から非常に重要である。

岩盤内部の亀裂の状況や岩塊・転石の大よその形状寸法をもとに根入れ長を把握できれば、その結果をもとに安定計算などにより落石危険度の評価や落石対策工の検討を行うことが可能である。

亀裂の状態や根入れ長などを把握するためには、ボーリング調査が適しているが、急傾斜地での作業足場の設置に手間を要し費用が高くなるなど、実務への適用に際しては問題点がある。

一方、間接的に亀裂の状態や根入れ長を把握する方法として、物理探査や非破壊検査法などが考えられる。物理探査では、弾性波探査、地下レーダ法、電気探査などの手法、非破壊検査法では超音波法や衝撃弾性波法などの手法があるが、岩盤内部の亀裂や根入れ長については探査の精度や深度に問題がある。

非破壊検査法の一つである高周波衝撃弾性波法¹⁾²⁾は、マスコンクリート供試体によるモデル実験や自然石を対象としたフィールド実験により、転石の根入れ長の把握

にも有効であることが経験的に確認されている³⁾⁴⁾。その後、岩盤斜面の内部亀裂探査や岩塊・転石の形状寸法調査などへの適用が増えている⁵⁾⁶⁾。実務への適用に際しては、高周波衝撃弾性波法の特長の一つである高い指向性を利用して、測定波形を適切に解釈し、地形地質的な考察を合わせて総合的評価を行うことが重要である。

本文では、マスコンクリート供試体を用いた基礎実験により、高周波衝撃弾性波法の指向性に影響を及ぼす要因について詳細に検討し、岩塊や転石の形状寸法調査への適用の高度化を図り、実務への適用事例をもとにその有効性を示す。

2. 高周波衝撃弾性波法

高周波衝撃弾性波法は、主にコンクリート構造物を対象として、内部にある微細な亀裂位置あるいは先端部位置を構造物表面から簡便に探知、また、フーチングなどの他の構造物を介する場合でも、上記の探知が可能な非破壊検査法として開発された技術である¹⁾²⁾。

調査原理は、対象物の表面を鋼製ハンマーで打撃して衝撃弾性波を発信し、対象物の内部に伝播させて、ひび割れ・亀裂や対象物の先端部で反射した波を表面に設置した受信センサで検知するものである（図-1）。反射波

は、高周波帯域の共振周波数特性を持つ受信センサで計測し、専用の調査装置（写真-1）に内蔵するフィルタ機能により、卓越して反射する特定の周波数範囲の反射波を選択することで、ひび割れや先端部の反射波を確率よく検知することができる。

本手法は、その特長を活かして、コンクリート構造物のほかに各種基礎杭、鋼構造物、転石・浮石、岩盤、アンカーなどの多様な調査対象物に対して、これまで約800件以上の調査実績がある⁹⁾。

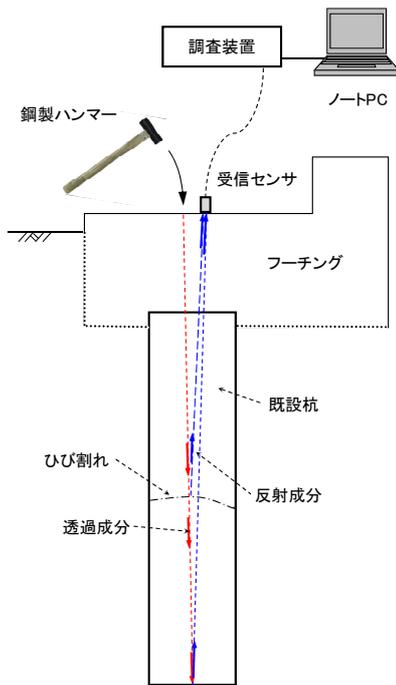


図-1 高周波衝撃弾性波法の概念図



写真-1 高周波衝撃弾性波法の調査装置

3. 基礎実験

(1) 実験目的

高周波衝撃弾性波法の高い指向性は、「鋼製ハンマーの打撃による衝撃弾性波の発信」「共振型AEセンサによる高周波成分の受信」「専用の調査装置によるフィル

タ処理（ハイパスフィルタ：HPF）」の組合せにより実現可能になっていると考えられる。

本実験では、上記の各要因が指向性に及ぼす影響を把握し、高周波衝撃弾性波法による形状寸法調査の高度化を図ることを目的とした。

(2) 実験方法

図-2に示すように、既存の無筋マスコンクリート（矩形：3.1×3.0×1.2m）を供試体として、測点を長辺ABの中点（測点1）と角部A（測点2）に設定した。コンクリートは呼び強度24MPa、スランプ20cm、粗骨材8mmのレディーミクストコンクリートで約18年前に打設されたものである。測点2は矩形供試体の角部AのC面取り部分（C21：3cm幅、45°）に設けた。

本実験では、実際の現場計測と同様に、受信センサを測点にパテ材で固定し、その近傍をハンマーで打撃して衝撃弾性波を発信させた。反射波を受信センサで計測し、専用の調査装置でフィルタ処理を行い、ノートパソコンのディスプレイで測定波形を観察しながら、高い確率で得られるものをハードディスクに逐次保存した。

高い指向性に係る要因として以下の三つを取り上げ、各要因が及ぼす影響を検討するために複数の水準を設定した。本実験では、測点1および測点2において、三つの要因の各水準を組合せて実験ケースを設定した。

a) ハンマーの材質と打撃面の形状

高周波衝撃弾性波法では、鋼製ハンマーとして打撃面が平面である両口玄能を用いた打撃により、低周波から

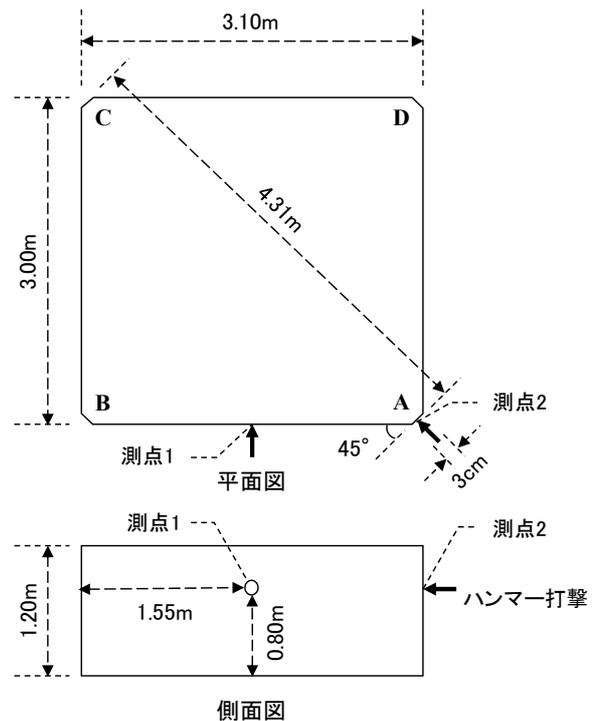


図-2 マスコンクリート供試体概要と測点位置図

高周波まで広い周波数かつ高エネルギーを持つ衝撃弾性波を発信させている。本実験では、打撃面が丸頭になっている鋼製の片手ハンマー（#1/2, 250g）および打撃面が平面となっているプラスチックハンマー（#1/2）を用いて打撃を行い（写真-2），ほぼ同様のサイズの両口玄能（225g）による測定結果と比較し、ハンマーの材質と打撃面の形状に関する考察を行った。



写真-2 実験に用いたハンマー

b) 受信センサの周波数特性

高周波衝撃弾性波法では、高周波帯域に共振周波数特性を有するAEセンサ（共振周波数140kHz）を用いている。本実験では、広帯域の周波数特性を有するAEセンサ（100k～1MHz）を用いて反射波を計測し、共振型AEセンサによる測定結果と比較し、受信センサの周波数特性に関する考察を行った。

c) フィルタ処理

高周波衝撃弾性波法では、専用の調査装置のフィルタ機能を用いて、特定の周波数範囲の反射波を選択している。本実験では、このフィルタ処理を行わない場合とフィルタ処理を行った場合（HPF設定値 70kHz, 100kHz, 150kHz）の計測を行い、それぞれの測定結果を比較し、フィルタ処理に関する考察を行った。

(3) 実験結果と考察

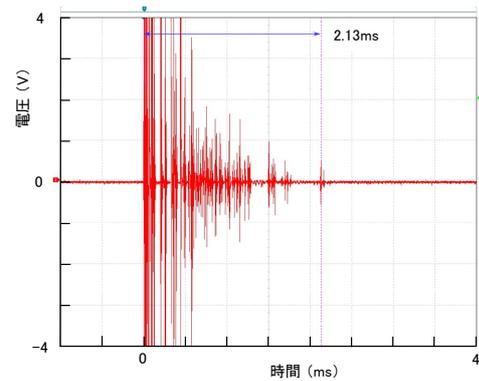
実験ケースごとに、測定波形を10個保存して反射波の平均伝播時間を求め、波形の分析などを行った。

a) ハンマーの材質と打撃面の形状

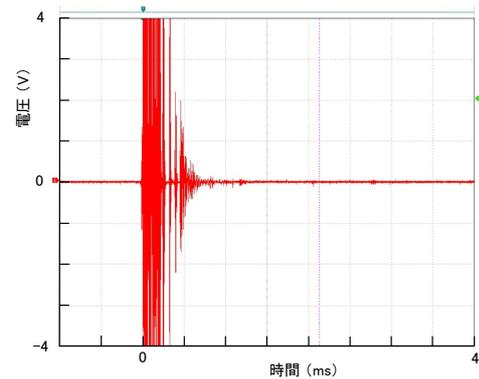
写真-2に示した三種類のハンマーにより得られた代表的な測定波形を図-3に示す。測点1に共振型AEセンサを設置し、HPFを100kHzに固定して、図-3(a)は両口玄能、(b)は片手ハンマー、(c)はプラスチックハンマーで打撃した場合の測定波形である。

両口玄能の場合、平均伝播時間2.13msの位置に鋭い立ち上がりの明確な反射波が高い確率で観測されたが、片手ハンマーおよびプラスチックハンマーの場合、同様の位置に反射波は全く観測されなかった。

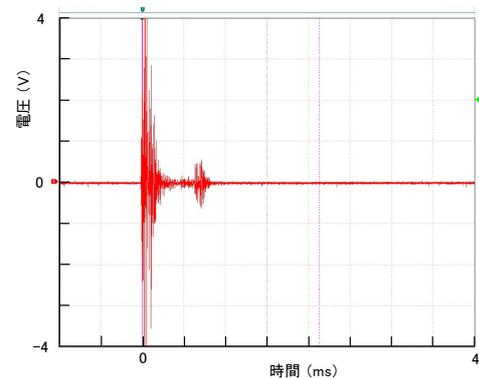
両口玄能の打撃により、反射波は長辺CDの側面から測点1に戻ってきたとみなし、往復の距離6.0m（垂線の



(a) 両口玄能



(b) 片手ハンマー



(c) プラスチックハンマー

図-3 ハンマーによる測定波形の比較
(測点1, 共振型AEセンサ, HPF-100kHz)

長さの2倍)を平均伝播時間2.13msで除して、供試体の弾性波速度を求めると2.82km/sが得られる。一般的なコンクリートの弾性波速度は3.0～4.5km/sであり、若干低めの値であるが、供試体は打設後約18年が経過していることを考慮すると、妥当な値であると考えられる。

測点2において、図-3と同一条件で計測を行った場合の両口玄能の代表的測定波形を図-4に示す。

両口玄能の場合、平均伝播時間2.95msの位置辺りに振幅の小さい複数の反射波が群として高い確率で観測された。反射波群は伝播時間2.87～3.05msの範囲にあった。前述の弾性波速度2.82km/sと平均伝播時間2.95km/sから反射波が確認された距離は4.16m（範囲は4.05～4.30m）と

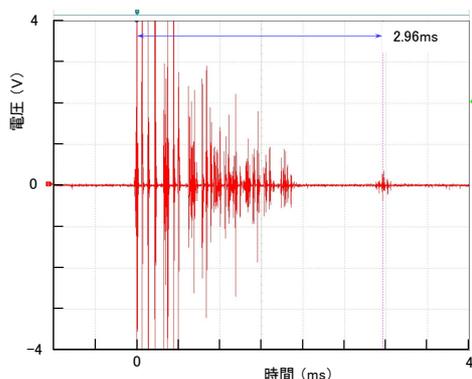


図-4 両口玄能による代表的測定波形
(測点2, 共振型AEセンサ, HPF-100kHz)

なり, 角部Aとその対角に位置する角部Cの距離4.31mと良い対応を示した。

角部Aから直線距離で最小値は角部Dの約3.0mであり, 弾性波速度2.82km/sに対する伝播時間は2.13msとなる。

しかし, 図-4に示すように測定波形において1.85ms以降には端部以外の反射波は全く観測されなかった。

以上のことから, 角部Aから発信した衝撃弾性波が角部C辺りで反射して, 受信センサで検知されたと推測でき, 指向性を有すると考えられる。

短辺BCおよび長辺CD上の点で, 角部Aとの線分の長さが反射波群の最小距離4.05mと等しいものを点Eおよび点Fとすると, 幾何学的に $\angle EAF$ は 7.7° と求まる。この角度は指向角に相当し, 高い指向性を示すと見なせる。

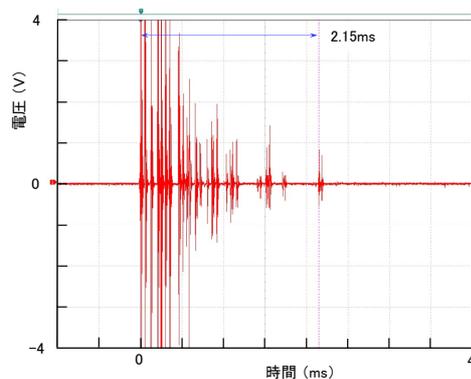
一方, 片手ハンマーおよびプラスチックハンマーの場合, 図-3の場合と同様の測定波形となり, 反射波は全く観測されなかった(図は省略)。片手ハンマーの場合, 繰り返し打撃によりコンクリート表面が容易に剥離し, 両測点ともに衝撃弾性波の発信にばらつきが生じた。

鋼製ハンマーで高周波成分をより多く含む衝撃弾性波を発生させ, 平面の打撃面で高いエネルギーの波動を調査対象物のより深部まで, 打撃面垂直方向に伝播させていることが, 高い指向性に強い影響を及ぼしていると考えられる。

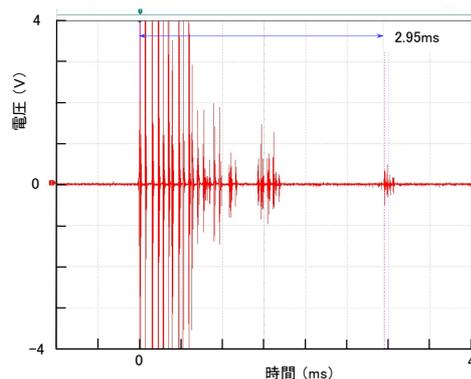
測点1および2における供試体端部からの反射波の形状を見ると, 前者では鋭い立ち上がりの明確な反射波, 後者では振幅の小さい複数の反射波の群と相違がある。このことは, 反射波の形状により, 反射面の幾何学性状を推測できることを示唆している。

b) 受信センサの周波数特性

広帯域型AEセンサを用いて得られた代表的な測定波形を図-5に示す。両口玄能により打撃を行い, HPFを100kHzに固定して, 図-5(a)は測点1, (b)は測点2において計測した場合の測定波形である。同様の条件で共振型AEセンサを用いた場合の測定波形は, 図-3(a)および図-4のようであった。



(a) 測点1



(b) 測点2

図-5 広帯域型AEセンサによる代表的測定波形
(両口玄能, HPF-100kHz)

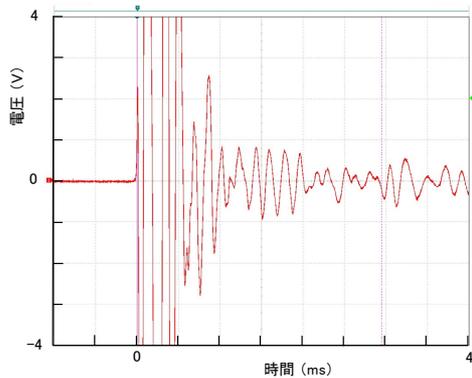
広帯域型の場合, 平均伝播時間は2.15msおよび2.95ms, 反射波群の範囲は2.88~3.06msとなり, 共振型の場合とほぼ同じ結果であった。測定波形もほぼ同様であるが, 端部からの反射波の振幅は広帯域型の方がより大きく, 検知性能はより高いと考えられる。

c) フィルタ処理

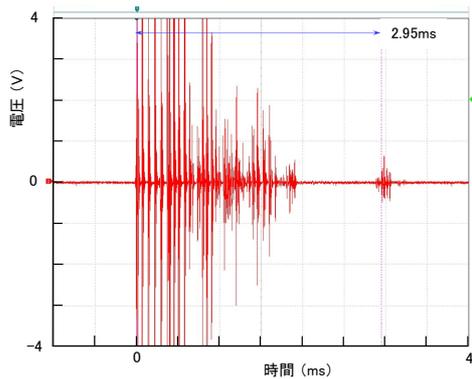
フィルタ処理を行わない場合とフィルタ処理を行った場合(HPF設定値 70kHz, 150kHz)の代表的な測定波形を図-6に示す。

測点2に共振型AEセンサを設置し, 両口玄能で打撃して, 図-6(a)はフィルタ処理なし, (b)はHPFを70kHz, (c)はHPFを150kHzとした場合の測定波形である。同様の条件でHPFを100kHzとした場合の測定波形は, 図-3(a)のようであった。

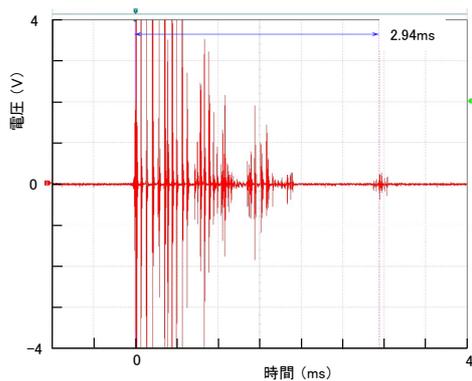
フィルタ処理なしの場合, 明確な反射は観測されず, 端部の検知はできなかった。フィルタ処理あり(HPF設定値 70kHz, 150kHz)の場合, 平均伝播時間はともに2.95ms, 反射波の群の範囲は2.89~3.07msおよび2.88~3.06msとなり, 100kHzの場合とほぼ同じ結果であった。測定波形もほぼ同様であるが, 端部からの反射波の振幅は70kHzから150kHzになるにつれて小さくなり, 検知性能は70kHzの場合が一番高いと考えられる。



(a) フィルタ処理なし



(b) フィルタ処理あり (HPF-70kHz)



(c) フィルタ処理あり (HPF-150kHz)

図-6 フィルタ処理による測定波形の比較
(測点2, 両口玄能, 共振型AEセンサ)

法を推定した。本調査では、転石の露頭形状を考慮し、地中部分の形状寸法の推定精度を上げるため、測点は露頭の長軸・短軸直交2方向に合計7点を配置した。

図-7に形状寸法調査結果を示す。形状寸法の推定値を用いて、体積は約0.53m³で重量は1.5tonと予測した。調査後の転石の掘削状況を写真-4に示す。掘削した転石の形状寸法は図-7の調査結果とほぼ同様であり、体積・重量についても予測値とよく整合していた。

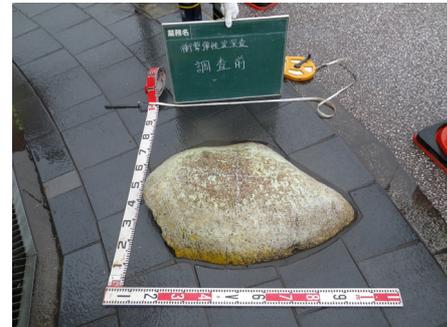


写真-3 歩道に残置された転石の状況

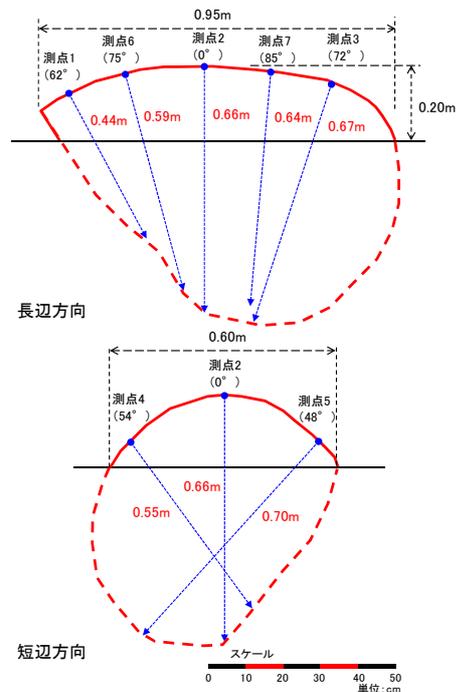


図-7 転石の形状寸法調査結果

4. 現場での適用事例

(1) 転石の形状寸法調査

歩道部に残置された転石(写真-3)を撤去・移設するため、事前に地中部の形状寸法および大よその体積や重量を把握する必要があった。形状寸法に関する資料が何もなく、非常に大きな転石の可能性もあったことから、高周波衝撃弾性波法を適用して調査を行った。

本手法の高い指向性を利用して、鋼製ハンマーの打撃面垂直方向の端部位置を把握し、各測点からの端部位置を包絡するような線を引くことにより、転石の形状寸



写真-4 掘削後の転石の状況

(2) 巨岩塊の形状寸法調査

大規模地すべり地に包括される斜面において、転落が危険視される巨岩塊（写真-5）の奥行および根入れを含む全体形状寸法を把握するため、高周波衝撃弾性波法を適用して調査を行った。



写真-5 調査対象の巨岩塊の状況

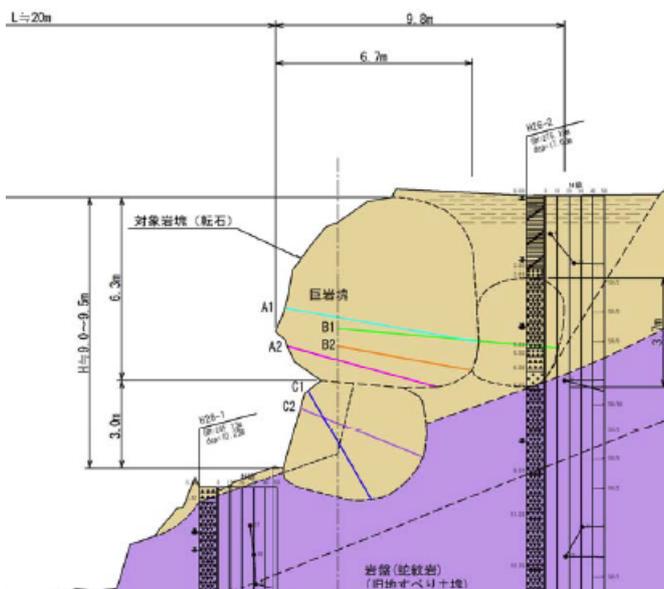


図-8 巨岩塊の形状寸法調査結果

巨岩塊を支えている基部の岩についても、崩落岩塊であるか岩盤であるかを同様に調査した。本調査では、本手法の高い指向性を考慮して測定断面を2断面、測点を合計7点の配置とした。測点配置計画が重要となる。

図-8に形状寸法調査結果を示す。既存資料の収集・現地調査、ボーリング調査、標準貫入試験の結果と本調査結果を総合解析することにより、巨岩塊は沢上流域からもたらされた転石であり、6m級のほぼ球形に近い岩塊であることが判明した。さらに、基部の岩は奥行4.5m程度の岩塊であること、巨岩塊の背面にもう一つ岩塊が密着して存在することが分かった。これらの結果を踏まえて、危険度判定および対策工の検討を行うことができた。

岩塊や転石の形状寸法調査は15m程度まで実績があるが、内部亀裂の分布・開口状態により適用限界が異なる。

参考文献

- 1) 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、1997。
- 2) 塩月隆久，孫 建生，永井哲夫，池尻 健：コンクリート構造物非破壊探査システムの開発，土木学会耐震補強・補修技術及び耐震診断技術に関するシンポジウム，pp.211-216，1997。
- 3) 永井哲夫，孫 建生，塩月隆久，池尻 健：非破壊探査法によるキーブロックの安定性評価システムに関する基礎的研究，土木学会トンネル工学研究論文・報告書，第6巻，pp.117-122，1996。
- 4) 塩月隆久，孫 建生，古川浩平：高周波衝撃弾性波法による転石根入れ長さ探査，土木学会論文集，No.680/III-55，pp.141-153，2001。
- 5) 坂本浩之，吉川正浩，川北 稔，山田結城，孫 建生，櫻井春輔：高周波衝撃弾性波法による岩盤斜面の内部亀裂調査，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.117-122，2005。
- 6) 永野賢司，春口孝之，永井哲夫：高周波衝撃弾性波調査の活用例，全地連「技術フォーラム2012」新潟，No.99，2012。
- 7) 坂本浩之，吉川正浩：高周波衝撃弾性波法（オーリス）を用いた調査事例，電力土木，No.343，pp.112-114，2009。
- 8) 永井哲夫，中村敏明，永野賢司：高周波衝撃弾性波法による杭基礎の健全性評価，地盤工学会誌，Vol.61，No.8，pp.26-29，2013。

ESTIMATION OF SHAPE AND SIZE FOR ENBEDDED ROCK AND BOULDER BY USING HIGH FREQUENCY IMPACT-ECHO

Tetsuo NAGAI, Kazuhiro KOIZUMI, Kenji NAGANO and Koji KITAZAWA

It is quite important for engineers to estimate the shape and size for embedded rock and boulder and then assess rockfall hazard and risk from the disaster prevention point of view.

In this paper, the validation of high frequency impact-echo is demonstrated by means of a fundamental model test and site applications. High frequency impact-echo is the unique method to detect the position and width of crack/fissure and edge profile by using high frequency component of impact wave. The key point of this shape and size estimation is directionality of this method. The effects of three main factors on the directionality are examined on the test in detail and applied in engineering practice.