高周波衝撃弾性波法による 岩盤内の不連続面分布の把握

永井 哲夫1*・中村 敏明2・岡田 哲実3・中村 大史4

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 GE事業本部 (〒331-0811 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)
³ (一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子1646)
⁴関西電力株式会社 土木建築室 技術グループ (〒530-8270 大阪府大阪市北区中之島3-6-16)
*E-mail: t.nagai@diaconsult.co.jp

高周波衝撃弾性波法は、衝撃弾性波の高周波成分の伝播特性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.実績による適用範囲の上限はコンクリート構造物の場合は約70m、鋼管の場合は約160mであり、下限は約1mとなっている.一方、原位置試験を行う場合、試験体の寸法は1m以下であり、試験体となる岩盤内において卓越した不連続面の存在の有無やその分布状況を事前に把握できれば、試験の効率化・高度化を図ることができる.

著者らは、1m以下の寸法の岩盤試験体に対して、高周波衝撃弾性波法による不連続面分布の推測方法 を考案し、原位置試験への適用を通して有効性を確認した.本文では、その推測方法と適用事例を述べる.

Key Words : nondestructive inspection, discontinuity, rock mass, impact-echo, high frequency

1. はじめに

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が可能で、また、フーチングなどの他の構造物を介在する場合でも、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^{1,3}

「調査対象物内のひび割れ・亀裂や端部における衝撃 弾性波の高周波成分の伝播特性」と「高い指向性」とい う特長を利用して、岩塊・転石の形状寸法や岩盤内部の 亀裂の状況などの把握にも適用されている^{3,4}.

歩道部に残置された転石で、測線長が0.5~0.7mというう調査事例があるものの³、岩塊・転石の形状寸法や岩盤内部の亀裂の状況などを把握する場合、これまでの実績では適用範囲は1.0~15.0m程度となっている⁴.

一方,岩盤の引張り強さを岩盤の抵抗力として適切に 評価することで,より合理的な耐震設計を可能とするた め,原位置における岩盤引張り試験について種々の検討 が行われている⁹.岩盤引張り試験結果に大きな影響を 及ぼすと考えられる試験体の不連続面について,それら の存在の有無や位置を事前に把握できれば,試験結果を より適切に評価することが可能となる.試験体の寸法は 大きいものでも1m以下であるため,高周波衝撃弾性波 法をこれまでと同様の方法で適用しても、不連続面分布 を把握することは難しい.

本文では、高周波衝撃弾性波法を用いて、1m以下の 寸法の岩盤試験体内の不連続面分布を推測する方法につ いて述べ、原位置における岩盤引張り試験への適用を通 してその有効性を示す.

2. 高周波衝撃弾性波法による状態評価

(1) 既設杭の状態評価

著者らは、高周波衝撃弾性波法(反射法)により得られた測定波形をもとに既設杭(単体)の状態評価を行い、各杭の状態分類に対応させて杭の健全性を評価する 方法を考案し、杭基礎の健全性評価へ適用している⁹. 既設杭の状態評価の調査概念図を図-1に示す⁷.

既設杭の状態評価では、「杭先端までの領域に反射 波が観測されるかどうか」「反射波が観測される場合は、 杭先端まで衝撃弾性波が到達するかどうか」「杭先端に 衝撃弾性波が到達する場合は、杭先端に反射波が観測さ れる確率が高いか低いか」という観点から、図-2に示す ように、測定波形をもとに杭の状態を4つ(タイプ I ~ IV)に分類して取り扱っている⁶. 杭先端以浅に生じているひび割れの状態に応じて、ひ び割れ位置での反射成分が増減し、杭先端まで到達する 成分が変化する.ここでは、ひび割れの影響をひび割れ 位置での反射の度合いと対比させている.



図-1 既設杭の状態評価の調査概念図⁷⁾



図-2 既設杭の状態評価の考え方⁹

(2) コンクリート構造物の内部状態評価

杭基礎において各杭(単体)は線状構造物であること から、各杭の状態評価は個別に実施することができる.

ダム堤体などの3次元構造物を対象として内部状態評価を行う場合,高周波衝撃弾性波法の高い指向性³を利用する.例えば,図-3に示すように堤体の天端に測点を規則的に配置して(図中の赤丸),測定面の垂直下方に衝撃弾性波を鋼製ハンマーの打撃により発信し,打撃点近傍に設置した受信センサで堤体内部からの反射波の測定波形を取得する.測点ごとの不連続面の状態評価結果と相互の関連性を考慮して,堤体内部にあるひび割れ・ 亀裂などの欠陥部や打継目などの不連続面の状態を3次元的に把握する.打継目を対象とした測点ごとの不連続面の状態評価フローを図-4に示す⁷.この場合は打継目の位置を評価深度として評価を行う.



図-3 構造物天端への測点配置例(天端上方から撮影)⁷



図-4 測点ごとの不連続面の状態評価フロー(打継目)⁷



図-5 測定波形と不連続面の状態区分の概念図⁷

高周波衝撃弾性波法では指向角が約10°であり,側面 からの反射や屈折波の影響が小さいことから³,各測点 がカバーする調査領域(衝撃弾性波の伝播方向に直交す る面内)を図-5に示すように考え,その領域における不 連続面の状態評価を図-4に従って行う.不連続面におけ る衝撃弾性波の高周波成分の反射・透過特性やその再現 性が状態評価に際して重要な判断要素となる.測定波形 と不連続面の状態区分の概念図を図-5に示す.

(3) 試験体内の不連続面分布の状態評価

ここでは、図-6に示すような原位置岩盤引張り試験装置⁵⁾に用いる岩盤試験体を対象に、不連続面分布の評価 方法について述べる.

中空厚肉円筒形に切り出した岩盤試験体の上面に測点 を規則的に配置して(**写真-1**),高周波衝撃弾性波法に より各測点の測定波形を取得する.測点ごとに深度方向 で観測された反射波に対して,それぞれ振幅の大きさを もとに相対的に順位付けする.各測点で振幅が一番大き かった位置を結ぶようにして面を作成し,その面が潜在 的な弱面(不連続面)に対応すると考える.

3. 原位置における岩盤引張り試験への適用事例

(1) 調査方法

a)測点配置

地表から2m程度掘り下げた掘削ビット内に作製され た岩盤試験体(直径60cm,高さ60cm)を対象として, 試験体上面の直交2方向の位置でセンター孔(直径 8cm)と外周のスリットの中間となる箇所に測点を合計 4点設けた(写真-1).

b)調査装置

調査装置としては、高精度でひび割れの探査が可能 な高周波衝撃弾性波探査システム(オーリス)¹⁾を用い



図-6 原位置における岩盤引張り試験装置⁹



写真-1 岩盤試験体への測点配置例



写真-2 高周波衝撃弾性波法による調査状況

て測定波形の取得・処理を行った(写真-2).

c)鋼製ハンマー

鋼製ハンマーとして両口玄能で頭重量が225gや300gの ものを用いるのが一般的である³.本事例では,打撃面 から1m以下の範囲にに存在する不連続面の検知を行う ため,頭重量が115gの両口玄能を用いた(写真-2).

d)フィルタ処理

調査装置の専用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する際、HPF設定値を100kHz程度 にするのが一般的である³.本事例では、岩盤試験体内 の微細な不連続面の検知を行うため、HPFを200kHzに設 定した.

e) 伝播速度(弾性波速度)

測定波形により求められるのは、不連続面からの反 射波を受信した時間であることから、反射波の位置を推 定するためには伝播速度(弾性波速度に等しいと見な す)を別途設定する必要がある.本事例では、岩盤試験 体の直交2方向(測点1-3方向と測点2-4方向)に関して、 透過法(端面2点法)により伝播速度を求めた.発信 側・受信側のセンサはそれぞれ岩盤試験体のセンター孔 と外周孔の壁面、試験体上面から15cm下方に設置した.

(2) 調査結果

a)測定波形

本事例で得られた代表的な測定波形を図-7に示す.全 ての測点において,深度方向に4箇所で明確な反射波が 観測された.最も卓越した反射波が,図-7(a)では試験 体上面から4番目,(b)では2番目で確認された.

測定に際しては、各測点において反射波の再現性を 十分に確認しながら、再現性の高い測定波形を10個取得 した.1個のデータ取得のために5~10回程度の打撃・確 認を行い、測定波形の信頼性を確保している.

高周波衝撃弾性波法の一般的な調査で得られる測定 波形例を図-8に示す³⁾.測線長3mのマスコンクリート供 試体を対象として,基礎実験を行った際の代表的な測定



波形である. 225gの鋼製ハンマーを用い, HPFを100kHz に設定して測定を行っている. 図-8では打撃面から 0.6ms程度までの時間領域で測定波形がオーバーフロー して,その範囲においては反射波を識別することができ ない. この事例では,伝播速度が約3km/sであることか ら,オーバーフローしている範囲は打撃面から約0.9mに 相当することが分かる. このことは,高周波衝撃弾性波 法の適用範囲の下限が1mとされていることとよい対応 を示している.

一方,図-7ではオーバーフローする領域が全く見られ ず,打撃面近傍でも反射波を明確に確認できている.本 事例で用いた軽量の鋼製ハンマーによる非常に小さいエ ネルギーの打撃とより高周波側のフィルタ処理に加え, 調査装置のトリガーレベルの調整などを行うことにより, これまでは適用限界とされていた小さい寸法の調査対象 物に対しても,不連続面の存在の有無やその状態を把握 することが可能になると考えられる.

b) 伝播速度(弾性波速度)

伝播速度は、測点1-3方向が5.23km/s、測点2-4方向が 4.79km/sとなり、水平面内の直交2方向の伝播速度に異方 性が見られた.本事例で対象とした岩盤試験体は頁岩で、 ほぼ水平方向に発達する層理構造が見られたことから、 深度方向(鉛直方向)と水平面内の伝播速度にも異方性 があり、深度方向の伝播速度はやや小さくなると推測さ れる.本事例では、水平面内の直交2方向の伝播速度の 平均値5.01km/sを用いて、試験体上面から反射波が観測 された位置までの距離を推定した.

c) 試験体内の調査領域

高周波衝撃弾性波法の特長の一つに高い指向性がある³. 受信センサの直径が1.2cmであり,指向角は約10度とされていることから,本事例の試験体内の調査領域を求めると図-9のようになる. 図-9(a)では上面から60cmの深度における調査領域,(b)では上面から30cmの深度における調査領域をそれぞれ示している.



図-8 一般的な測定波形例3



(a) 上面から60cmの深度
(b) 上面から30cmの深度
図-9 試験体内の代表的水平面内における調査領域



図-10 測点ごとの不連続面の状態区分結果



図-11 試験体内の不連続面分布状態の推定結果

d)試験体内の不連続面分布状態の推定

各測点で得られた10個の測定波形では、それぞれ反射 波が観測された位置や反射波の振幅の相対的な大きさに はばらつきがほとんど見られなかった.測線長が短いこ とから、各測点において4箇所の反射波は全ての測定波 形で同時に観測されており、図-4や図-5に示した方法で 不連続面の状態評価を行うことができない.そこで、 2(3)で示したように、反射波の振幅の大きさをもとに相 対的に順位付けを行って不連続面の状態を区分した.



(a) 破断面を上から見た状況



(b) 破断面を斜め上から見た状況 写真-3 引張り試験後の試験体(破断面より上側)の破断面

各測点の測定波形から求めた不連続面の位置と振幅 より求めた状態区分結果をまとめて図-10に示す.ここ では、不連続面の密着の度合いが状態区分のA~Dに対 応する(A→Dの順に密着度が高くなる)と考える.

各測点で状態区分がAまたはBとなった位置を結ぶような面を考えて、試験体内の潜在的な弱面(不連続面)の分布状態を3通り(I~Ⅲ)推定した(図-11).

(3) 岩盤引張り試験後の試験体との対比

岩盤引張り試験後,回収した試験体側の破断面の状況を**写真-3**に示す.破断面より上側の試験体を回収して 天地を逆に設置し,破断面の状況を観察できるようにしたものである.

写真-3(b)に示すように破断面は試験体上面から約 30cmの位置で生じており、破断面全体は北落ち傾斜で あり,岩盤引張り試験実施箇所の層理方向とほぼ一致し ていた.この破断面の位置は図-11に示した推定不連続 面Ⅱの位置とよい整合を示している.

写真-4には、試験体上面から30cmの位置における高 周波衝撃弾性波法による調査領域、試験時に発生した破 断面と推測される領域および既存不連続面に該当する領 域を写真-3(a)に合わせてプロットしている.測点ごと に目視観察された破断面の状態と測定波形による反射波 の状態を対比して整合性を検討した結果を以下に示す.



写真-4 岩盤引張り試験後の試験体との対比

a) 測点1

測点1は試験時に発生したと推測される領域の境界付近に位置し、基本的には新たに発生した破断面に該当する.不連続面の状態区分はBとなったが、図-7(a)に示すように上面から4番目で状態区分がAとなる反射波と振幅には大差がない.

b) 測点2

測点2は試験時に発生したと推測される領域と既存不 連続面が共存している箇所に位置する.不連続面の状態 区分は上面から4番目の反射波と同様にAとなった.

c) 測点3

測点3は既存不連続面の境界付近に位置し,基本的に は既存不連続面に該当する.不連続面の状態区分は上面 から3番目と反射波と同様にBとなった.

d) 測点4

測点4は既存不連続面に位置する.不連続面の状態区 分はBとなった.

以上のように全ての測点でよい相関が見られた.

4. おわりに

高周波衝撃弾性波法を用いて、1m以下の寸法の岩盤 試験体内の不連続面分布を推定する方法を考案し、原位 置試験における岩盤引張り試験への適用を通してその有 効性を確認した. 今後、同様の調査によりデータの蓄積 を行い、本手法の検証を行うことが望ましい.

謝辞:本研究は北海道電力,東北電力,中部電力,北陸 電力,関西電力,中国電力,四国電力,九州電力,日本 原子力発電,電源開発,日本原燃による共同研究の一部 として実施しました.

参考文献

- 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,小泉和広,永野賢司,北澤浩二:高周波衝撃弾 性波法による岩塊や転石の形状寸法調査,第43回岩盤力学 に関するシンポジウム講演論文集, pp.140-145, 2015.
- 4) 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.
- 5) 白鷺 卓,谷 和夫,岡田哲実:岩盤の原位置一軸引張り 試験に関する文献調査,第43回岩盤力学に関するシンポジ ウム講演論文集, pp.71-76, 2015.
- 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.
- 7) 永井哲夫,小泉和広,土本浩二:高周波衝撃弾性波法によるコンクリート構造物の内部状態評価,全地連「技術フォ ーラム 2015」名古屋,No.35, 2015.

ESTIMATION OF DISCONTINUITY DISTRIBUTION IN ROCK MASS SPECIMEN BY USING HIGH FREQUENCY IMPACT-ECHO

Tetsuo NAGAI, Toshiaki NAKAMURA, Tetsuji OKADA

It is important and useful to estimate the discontinuity distribution in rock mass specimen beforehead from the field test point of view.

In this paper, an estimation method of discontinuity distribution in rock mass specimen is described by using high frequency impact-echo. The measurement size of high frequency impact-echo method for rock mass application is about 1-15m. The authors porposed a new method to apply the high frequency impact-echo for small size rock mass specimen (less than 1m). Its validation is demonstrated by means of an application for in-situ direct tenstion test.