打撃加振による大谷石岩盤の振動伝播特性と 動的解析による再現性の検討(その1) ~打撃加振実験の振動伝播特性について~

高村 浩彰1*・蛭子 清二2・清木 隆文3

¹西松建設株式会社 技術研究所(〒105-6407 東京都港区虎ノ門1-17-1)
²村崎建設株式会社(〒108-0014 東京都港区芝5-6-1)
³宇都宮大学 大学院 地域創生科学研究科(〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東7-1-2)
*E-mail: hiroaki_takamura@nishimatsu.co.jp

本研究では、岩盤上に衝撃的な荷重が作用する場合の振動伝播特性を原位置実験から測定し、これらを 検証材料にして動的解析モデルによる測定結果の再現可能性と課題を明らかにすることを目的にしている. 本報は、この内の前半部分である原位置の衝撃的荷重の加振実験について報告する.

原位置加振実験は、栃木県宇都宮市にある大谷石採掘空洞内の平坦な岩盤上で実施した.インパクトハンマーを用いて岩盤を打撃し、打撃荷重と直線上を伝播する加速度波形を同期計測した.ここでは、収録した加速度波形の特徴、スペクトル分析等の結果を示し、大谷石岩盤に特徴的な振動伝播特性を考察する.

Key Words : oya tuff slab, vibration propagation, acceleration waveform, in-situ experiments

1. はじめに

岩盤動力学に関する研究小委員会 実験・シミュレー ションWorking Group 2 (以下, WG2)では、岩盤上に衝撃 的な荷重が作用する場合の振動伝播波形と伝播特性を原 位置実験から測定し,これらを検証材料にして動的解析 による測定結果の再現可能性と課題を明らかにすること を目的にしている.本研究は,この内の前半部分である 原位置の衝撃的な荷重の加振実験について報告する.

原位置加振実験は、栃木県宇都宮市にある大谷石採掘 空洞で実施した.大谷石は、軽石火山礫凝灰岩に分類さ れ、火山灰や砂礫が海水中に沈殿し、それが凝固した岩 石であり、室内試験等から求めた物性値にバラツキがあ ることが知られている^{1,2}.このため、本検討では、物 性値のバラツキが振動伝播に与える影響についても検討 する.ここでは、測定した加速度波形の特徴、スペクト ル分析等の結果を示し、大谷石岩盤に特徴的な振動伝播 特性を考察する.

2. 原位置加振実験の条件

大谷石採掘後にできた3方向を残壁に囲まれた平坦な

岩盤上に直線の水平測線を設け、原位置加振実験を実施 した. 図-1 に示すように、測線上に 0.3m 基準の倍距離 で5つの測点 (St.A~St.E) を設け、これらの位置にコ アドリルで岩盤に直径 50mmの孔を 60mm 程度削孔し加 速度計を3個取付けたアルミ角柱を石膏で固定した.加 速度計の固定は、写真-1に示すように、3個の加速度計 (直径 24mm) を M6 ネジにより 30mm 角, 長さ 100mm のアルミ角柱に固定した.ここで、座標軸の方向は図-1 に示した測線上の St.A から St.E に向かう方向を X 軸, これに直交する水平方向をY軸,上下方向をZ軸とし た. また、測線上のStAから-0.3m離れた位置を加振点 とし、この位置をインパクトハンマーで打撃し、ハンマ ーの加振荷重と5測点の加速度をサンプリング周波数 102,400Hz, 計測時間 1.28sec に設定して同期計測した. 使用した計測器の仕様を表-1に、加振場所の実験前後 の岩盤の表面状態を写真-2に、実験の全体状況を写真-

3に示す.

なお、予備加振の段階から収録した加速度波形には普 通では考えられない高周波成分が現れた.加速度計の設 置方法に起因する固有値などが原因と考えられた.また、 その後の収録データの周波数分析から、当地の大谷石の 振動特性を表す周波数範囲を 500Hz 以下と判断し、以降 の検討ではこの範囲内の収録データを対象とした.



図-1 加振点と測点の配置概念図



写真-1 加速度計固定状況 (St.E)

機器名	仕	様
インパクトハンマー	電荷感度 パマー質量 加振部	: 0.23mV/N : 5.5kg : スーッ [^] ーソフトチップ
加速度計	電荷感度 周波数特性	: 40 pC/(m/s²) : 1~3,000 Hz
2chチャージアンプ	感度設定 周波数特性	: 7段階 : 1~15,000 lb
A/D変換器	測定範囲 周波数特性 処理チャン神数 サンプリング周波数	: 30~134 dB : DC~40,000 Hz : 16ch(32ch) : 102,400Hz

表-1 計測器の仕様



(a)実験開始前の状況 (b)実験終了後の状況 写真-2 加振点の岩盤表面の状況



写真-3 加振実験の全体状況

3. 大谷石岩盤の縦波速度 (V_P)の測定

加振実験後に,加振場所に直径6mm,長さ300mmの鉄 棒を50mm深さまで打撃にて貫入し,その鉄棒を水平に 打撃した際に伝播する振動の位相差から縦波速度(VP)を 計測した.計測では,鉄棒を振動伝播方向と反対側に打 撃し,地盤からの反力が振動伝播方向に卓越するように 実施したため,振動伝播方向のX軸とZ軸がほぼ同期し て振動伝播した.なお,振動伝播方向と直交するY軸も 振動したが,伝播方向に比べて初動の振幅が数分の1程 度小さく,位相差を正確に把握することは困難であった. 同一の実験を5回実施し,その平均値から縦波速度VPを 把握することとした.

図-2に計測した加速度の時刻歴波形を示す. 同図の(a) はX軸(測線)方向,(b)はZ軸(鉛直)方向であり,そ れぞれに5測点の波形を示した.X軸方向とZ軸方向の時 刻歴波形から振動が順次伝搬していく様子が読み取れる.

打撃点に一番近い測点StAに振動が到達した時間を0 として、それより遠方の他の4箇所の測点に振動が到達 した走時を距離との関係で整理して図-3に示す.図より、 StBの伝播時間だけばらつきが大きい結果となったが、 5回全ての実験においてStA~StEの時間(位相)はほぼ 等しくなり、縦波速度Vpは2195m/sと算出された.

この速度値は、これまでに報告されている大谷石の縦 波速度に関する結果(2300m/s)⁰に比べて、わずかに低い 値となった.これは、今回の計測が掘削解放による緩み の影響を受けた岩盤表層部の伝播であることが原因と考 えられる.



4. 打撃加振実験

(1) 振動加速度の伝播特性

図-1に示したStAから300mm離れた位置をハンマーで 打撃した際のハンマー荷重の時刻歴と5測点StAからStE における加速度の時刻歴を図-4に示す. 同図から, ハン マーの荷重が作用している時間内に5箇所全ての測点で 高周波数振動が発生していることがわかる. また, その 高周波数成分は、距離減衰が大きいものの測線端部の StEにまで伝播していること、振動伝播方向と直交する Y軸方向にも振動が発生していることがわかる.

ここで、5箇所の測点における周波数特性を調べるた めに、ハンマー荷重ならびにSt.A、St.CおよびSt.Eの加速 度時刻歴波形を周波数領域にフーリエ変換し、フーリエ 振幅スペクトルで整理した結果を図-5に示す. ハンマー 荷重は300Hz程度までの周波数領域にしか振幅が無いが, 5測点の加速度は500Hz以上の高周波数領域にも周波数の 卓越が複数認められ、それらの周波数が測点ごとに異な っていることがわかる. 前述したように、このような高 周波数成分は加速度計の設置方法に依存した固有値と想 定され、大谷石の振動特性では無いと判断した. そのた め、計測した加速度波形に500Hzのローパスフィルター 処理を加えた結果を図-6に示す. ここで, 500Hzのロー パスフィルター処理では、加速度の時刻歴波形を複素フ ーリエ変換にて周波数領域に変換し,500Hz以降の高周 波数成分の加速度を0とし、複素フーリエ逆変換によっ て位相も考慮した状態で加速度時刻歴波形に戻した.

図-6の波形から、ハンマー荷重のピーク以降に測点 の初動のピークが順次に現れており、フィルター処理が 適切であったことがわかる.さらに、同図の波形が実験 場所の大谷石の振動伝播特性を表していると判断し、続 報の動的解析³では、図-6に示した500Hzのローパスフィ ルターで処理した波形を検証の対象にすることとした. なお、Y軸方向の振幅は加振点に近いStA~StCでは他の 2方向に比べて小さかったが、これらの測点よりも遠方 のStDとStEでは他の2方向に近い大きさになっていた. ただし、波形を分析した0.02secの時間内に残壁等からの 有意な反射波成分は認められなかった.

次に、ハンマー荷重の入力に対する測点の加速度応答 を詳しく見るために、StA、StCおよびStEについて伝達 関数⁴とコヒーレンス⁴を求めた結果を図-7に示す.同図 の上側は伝達関数、下側はコヒーレンスであり、横軸は ともに周波数である.伝達関数は、1kNの規則波で周波 数成分ごとに加振した場合の測点の加速度応答を示して いる.コヒーレンスは、入力と応答の因果関係の度合い を0~1の値で示し、1の場合にその周波数における応答が すべて入力に起因していることを示している.

同図から、30Hz未満の低周波数帯のコヒーレンスが 小さく、この周波数帯においてハンマー荷重が加速度応 答に寄与していなかった.また、Y軸方向ではコヒーレ ンスの小さな周波数帯がさらに高周波側にまで広がって いた.伝達関数に関しては、300~420Hz付近の加振に対 して卓越が現れたが、卓越する周波数成分は測点ごとに ずれていた.

上記した伝達関数の卓越周波数成分のずれの原因として,測点ごとに大谷石の応答特性が異なっていたことが

考えられた.そこで、StCおよびStEについても、測点 から300mm離れた位置をハンマーで加振する実験を追加 し、これまでのSt.Aから300mm離れた位置を加振した場 合の同測点の応答と比較した. St.CおよびSt.Eから 300mm離れた位置を加振した場合の応答を図-8および図 -9に示す.3測点の応答の比較から、加速度時刻歴(生 波形と500Hzのローパスフィルター処理波形)およびフ ーリエスペクトルに明確な差は認められなかった.しか し、伝達関数には明らかな差が現れた、X軸方向を見る と、St.Aに現れた400Hz付近のピークはSt.CとSt.Eには現 れなかった. Z軸方向では、St.Aに現れた350Hz付近のピ ークはSt.CとSt.Eにも同じような周波数に現れたが伝達 関数は小さくなった.このように、異なる3箇所を加振 しそれぞれの加振点から300mm離れた測点の応答を比較 したところ、伝達関数がそれぞれに異なっていた. 測点 ごとの大谷石の応答特性の相違が原因として考えられる. その他に、ハンマーを人力で加振したので、岩盤を垂直 に打撃できていないこと、打撃の際の岩盤の塑性化の影 響も考えられる. このため、本検討の目的である動的解 析による再現性の検討では、岩盤物性のばらつきが動的 解析の再現性に与える影響の把握が重要であるものと考 えた.

(2) 距離減衰特性

倍距離に設置した 3 軸の加速度計時刻歴波形から,ス カラー量を算出し,最大値をプロットすることで距離減 衰を求めた結果を図-10 に示す.ここで,両軸とも対数 で表示し,横軸に離隔距離(伝播距離)を,縦軸にスカ ラー量で表示した最大加速度で整理した.同図の黒色プ ロットは計測した生波形の結果,赤色のプロットは 500Hz ローパスフィルター処理した波形の結果であり, 図中にこれらの近似線と相関係数を併記した.また,打 撃した場所ごとに(a)~(d)に分けて整理した.

これらの図より、計測した生波形は、加速度計の設置 方法に起因したなどの高周波数成分を含んでいるため、 500Hz ローパスフィルター処理をした波形に比べて減衰 が大きなことが読み取れる.また、加振荷重が加振ごと に異なるため、近似式の定数は異なるものの、距離減衰 の勾配を示す変数 x の係数はほぼ一定の値を示した.こ れらの結果から、4箇所の加振における距離と加速度の 減衰の関係を平均した式(1)を用いて距離減衰を表すこ とにした.ただし、hog は計測した生波形の減衰を、hna は 500Hz のローパスフィルター処理した波形の減衰を、 x は距離(m)を示している.

$$\begin{split} h_{Org} &= e^{(-1.34\ln x)} : 生波形 \\ h_{Flt} &= e^{(-0.89\ln x)} :500 \text{Hzローパスフィルター}^{(1)} \end{split}$$



図-4 StA近傍打撃時のハンマー荷重と測点の加速度時刻歴









5. まとめ

本研究では、大谷石の岩盤上にインパクトハンマーを 用いて衝撃的な荷重を作用させた場合の振動伝播特性を 検討した.測定した加速度波形にハンマー荷重には含ま れていない高周波成分が現れたが、その原因が軟岩の特 性を乱さずに加速度計を固定することの難しさにあると 判断した.そのため、測定した加速度波形にローパスフ ィルター処理した波形を大谷石の特性とし、伝播波形、 周波数特性、距離減衰を明らかにし、後続する動的解析 の検証材料として提供した.また、ハンマー荷重と加速 度応答の関係を伝達関数から分析し、加振位置によって伝 達関数が異なることを見出した.その原因として岩盤物性 のばらつきを否定できないとし、これに関しては後続の動 的解析から検証が可能であると指摘した.

謝辞:本報告は、土木学会岩盤力学委員会岩盤動力学に 関する研究小委員会の実験・シミュレーションWG2の 活動を取りまとめたものである.原位置実験の実施に当 たり、奥村組、西松建設および土木学会から助成をして 頂いた.ここに記して謝意を表す.

参考文献

- 岩盤力学委員会岩盤の熱環境に関する研究小委員会編, 熱環境下の地下岩盤施設の開発をめざして一熱物性と解析 -, 土木学会, 2006.
- 2) 松枝真吾,清木隆文,堆積軟岩(大谷石)の粘土鉱物の 含有率と力学特性の関連性について,第 11 回岩の力学 国内シンポジウム講演論文集,6ps, CD-ROM, 2002.
- 3) 清木隆文,高村浩彰,蛭子清二,楠祐規,打撃加振による大谷石岩盤の振動伝播特性と動的解析による再現性の検討(その2)~動的解析による打撃加振実験の再現性について~,第48回岩盤力学に関するシンポジウム講演集,2022.1.(投稿中)
- 4) 日野幹雄, スペクトル解析, p.300, 朝倉書店, 1977.

STUDY OF WAVE PROPAGATION BY VIBRATION EXCITATION ON OYA TUFF SLAB AND ITS DYNAMIC ANALYSIS (PART 1) - CHARACTERISTICS OF EMPLICAL WAVE PROPAGATION OF VIBRATION EXCITATION-

Hiroaki TAKAMURA, Seiji EBISU and Takafumi SEIKI

In this study, the authors consider emplical waveform and its propagation by impact excitation on Oya tuff slab in a underground quarry. And we try to estimate material properties and to predict its waveform blindly by dynamic analysis. In this paper, The authors introduce the vibration experiments excited by impact hammer in detail and report those results.

We generate vibration wave by an impact hammer and measure impact load and wave accelerations along the measuing line synchronously. This paper forcused to introduce waveform characteristics at 5 jig poinsts and show the results, i.e. distance atnuation and acclaration specram. Finally we discusses characteristics of vibration wave and its propagation in the field.