

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24310131

研究課題名(和文) 孔内用精密制御振源とトモグラフィ解析による表層地盤のS波速度構造の高精度決定

研究課題名(英文) Development of a controlled borehole seismic source and estimation of shallow S-wave velocity structure by use of tomography analysis

研究代表者

渡辺 俊樹 (WATANABE, TOSHIKI)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：50210935

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：モータ制御の偏心錘によって振動を発生させる原理に基づいた孔内用の振源装置を開発した。装置の外径80mm、本体長1.8m程度であり、土木建築分野の一般的な調査孔で使用できる。野外での性能試験により、周波数50Hzまで安定して信号を発生でき、50～200m程度まで信号が到達していることがわかった。また、2個のモーターを逆回転させることにより直線加振が可能であり、P波、S波それぞれを効率よく発振できることが確認できた。一方で技術的課題や今後の改良点も明らかとなった。連続発振された振動を観測装置で取得した連続データからS波トモグラフィによって速度構造を求めるまでの一連の解析が可能となった。

研究成果の概要(英文)：We developed a borehole seismic source for shallow structure survey. The source generates seismic waves by rotating eccentric masses controlled by motors. The radius of the source is 80 millimeters so that we can use it in standard boreholes for engineering survey. From the result of the field experiment, we concluded that the source generates controlled signals up to 50 Hz, and that the signal is observed at the seismic stations located at 50-200 meters from the source with good S/N ratio. A linear vibration in horizontal direction is achieved by rotating two motors in opposite directions, resulting in verification that the efficient transmission of P-wave and S-wave is possible. On the other hand, we found some technical problems for further improvement. We developed a series of data processing flow from the continuous seismic signal observed at the seismic stations to the S-wave velocity structure using S-wave travelttime tomography.

研究分野：物理探査、波動伝播

キーワード：浅部構造 孔内振源 機器開発 制御震源 S波速度

## 1. 研究開始当初の背景

地震発生の際に、建造物やライフラインなどに被害を及ぼす大きな要因は、工学的基盤より浅部の地盤（以下、表層地盤）での地震動の増幅である。表層地盤の地震動特性は S 波速度で定量的に評価できる。したがって、表層地盤の S 波速度構造を高精度かつ高分解能に決定できれば、地震防災に資するところが大きい。

都市域では、建造物の存在や社会活動の制約から、地表を広範囲に占有する屈折法や反射法の探査には制約がある。微動探査法は、広範囲を安価に実施する概査として利用されるが、原理的に分解能が低い。地盤調査のボーリング孔を利用すれば PS 検層などの調査によりその地点での S 波速度の深度分布が求められるが、面的な情報は得られない。

地質構造が複雑な表層地盤の 2 次元・3 次元の高分解能な S 波速度構造を得る手法に S 波速度トモグラフィがある。地盤調査用のボーリング孔を利用できるため適用範囲は広いと考えられるが、一般的な調査手法として定着するには至っていない。

この手法は大量のデータを扱う逆解析手法であり、その成否はデータの品質に大きく左右される。そのため、高品質すなわち高い信号/雑音比 (S/N 比) を持つ高周波数の S 波波形記録の取得が不可欠である。これには以下に述べる課題がある。

- 高分解能を得るためには高周波数の波動を発生させる必要がある。
- 表層地盤では波動の減衰が著しく、高周波数の波動ほど減衰が大きい。
- 都市域においては人間活動に伴う雑音 (ノイズ) が著しく大きい。
- 十分な信号強度と到達距離を得るには、振源のエネルギーを大きくする必要がある。
- しかし、都市域において大エネルギーの振源を使用することは困難である。
- したがって、都市域では S 波の到達距離が限定され、得られた波形記録の品質が非常に低い。
- これらの課題は、サイズと設置条件の制約から、孔内用の振源においてより重要な問題となる。

孔内用の S 波振源として、非制御回転式 (1980 年代)、電磁式や超磁歪素子式 (小島ほか, 2009) などが開発されているものの、世界的に見ても、都市域の表層地盤の探査に有効な孔内用 S 波振源はほとんど実用化されていない。

有効な孔内用 S 波振源がないことがトモグラフィ解析の適用を大きく妨げているが、この問題のブレークスルーは、精密に制御した波形を安定して発生させる振源にあると考えられた。

## 2. 研究の目的

研究分担者 (国松) は、建物の振動特性の計測を目的として、建物近傍の地表面を水平

に加振する振動装置を開発した。この装置 (以下、地表加振装置) は、小型で高精度な制御性を有するパルスモータを使用し、2 つの偏心錘を互いに逆方向に回転させる機構を有している。装置は小型・軽量化しても正確な制御性と十分な加振能力を有しており、さらなる小型化が可能である。

研究代表者らのグループ (渡辺、山岡) は、精密制御定常信号システム (以下、ACROSS) を開発し、地下の状態の長期連続モニタリングの研究を 10 年にわたり行っている。サーボモータにより偏心錘を回転させる機械機構を持つ振源を用い、長期間安定した高度な制御と独自の信号設計およびデータ処理により、画期的な利点を生み出している。

そこで、孔内用に小型化したモータ制御の偏心錘による振源に、ACROSS によって確立された高度な信号設計とデータ処理手法を組み合わせるという着想に至り、これにより、従来の問題点を克服する画期的な孔内用 S 波振源の実現を目指す。

## 3. 研究の方法

(1) 孔内用のモータ制御の偏心錘による振源の開発を行った。基本的な装置の仕様は以下の通りである。土木建築分野で使用される調査ボーリング孔 (孔径 86 mm) での使用を考え、

- 装置の外径を 80 mm 程度、本体の長さを 1 m 程度とする。
- 作業員 1~2 名で扱える重量とする。
- 設計耐用深度は 50 m を想定する。
- 地中での信号到達距離 20~30 m を確保する。
- 周波数帯域は 10~50 Hz とする。

図 1 に孔内用振源装置 (Controlled Rotational Borehole Vibrator : CRBV) の概念を示した。上下 2 個のサーボモータによって上下部 2 個の偏心錘と中心の偏心錘を独立に回転可能である。特に、両者を同一周波数で同方向、および互いに逆方向に回転させることを、以下それぞれ回転加振、直線加振と呼ぶ。直線加振では加振方向と直交方向に卓越する S 波を発生させることができる。

震源装置の電源と制御信号は地上にあるコントローラからケーブルを使って送られる。また、振源装置には振源の振動をモニターする 3 成分のジオフォンが内蔵されているほか、装置の安定と信号の地盤への伝達効率の向上のために、孔壁への固着機構を備えている。

(2) 開発した装置の性能試験を実施した。まず、回転機構部の性能試験では、上下部と中心の両錘とも 100 Hz まで安定して回転可能であり、両方の錘を逆方向に回転させる直線加振が可能であることを確認した。次に、室内における吊り下げ試験において、回転性が安定していること、固着機構が正常に動作することを確認した。長時間の連続回転により発熱

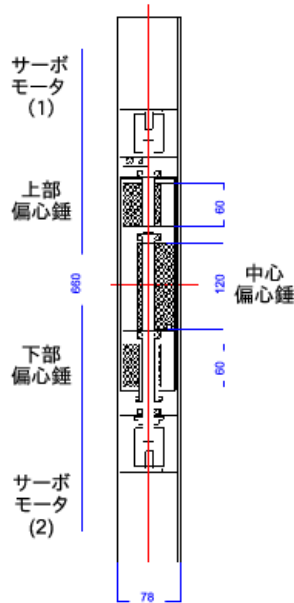


図 1 孔内用振源装置 (Controlled Rotational Borehole Vibrator : CRBV) の概念

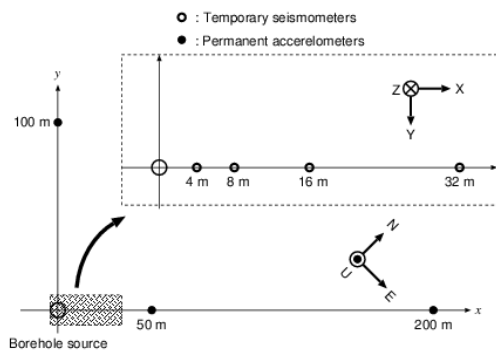


図 2 実験場における振源、臨時観測点 (速度型地震計) と既設観測点 (加速度型地震計) の配置

を生じることが判明した。また、室内及び孔内における実証試験では、振源に長さ 30 m のケーブルを取り付けて試験を行ったところ、動作が不安定であった。レゾルバ信号の減衰とノイズの混入による制御信号の劣化が原因と考えられたため、信号系と電源系とを別ケーブルに分離した。この改良によって、ケーブル長 30 m で 60 Hz までの発振が可能であることを確認した。

#### 4. 研究成果

(1) 2014 年 12 月 2 日～4 日にかけて、茨城県つくば市の応用地質 (株) 敷地内のボーリング孔を使用し、性能試験を実施した。図 2 に実験場における振源と観測点の配置を示した。臨時観測点に 4.5 Hz 速度型地震計を設置し、200 Hz サンプリングで連続記録を取得した。既設の固定観測点に設置されている加速度計の記録も使用した。観測点はいずれ

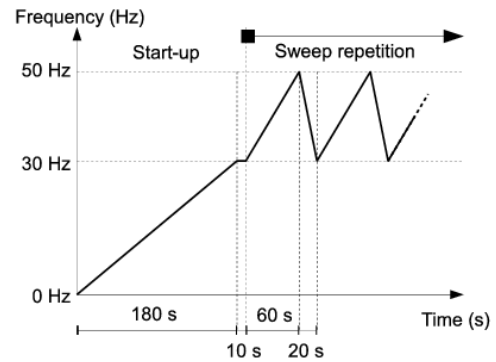
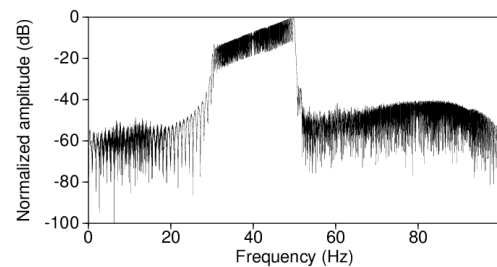
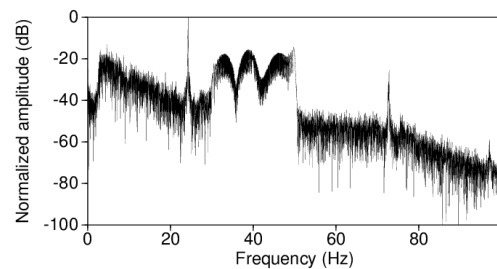


図 3 振源の繰り返しスイープ発振における時間一周波数の設計



(a) 0 m



(b) 32 m

図 4 回転加振の繰り返しスイープ発振 1 回の速度波形の水平成分のスペクトル

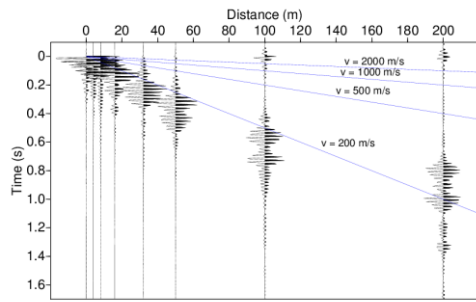
も地表に設置されている。

図 3 は実験に使用した加振パターンの一例であり、スイープ周波数 30～50 Hz として計測開始から 10 rpm/s で加速し、所定の周波数で 10 s 間の一定回転の後、20 rpm/s で加速、60 rpm/s で減速する鋸波状の直線スイープを繰り返す。図 4 に観測波形のスペクトルの一例を示す。高調波はほとんど観測されていない。1 回のスイープでも距離 50 m 程度まで十分に信号が視認できた。

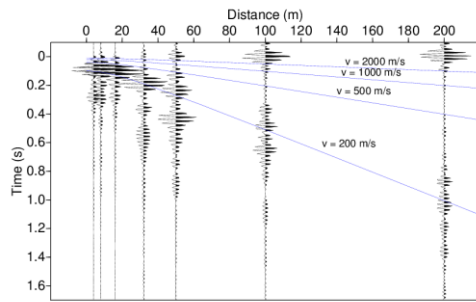
データ処理の手順を以下に示す。

- データをセグメントに分割し、
- 加速度計記録はバイアス除去後積分して速度記録に変換し、
- バンドパスフィルタを適用し、
- 観測記録を振源モニター記録でデコンボリューションして伝達関数を算出し、
- 各セグメントの伝達関数を重ねた。

図 5 に水平成分の伝達関数を距離ごとに並べて示す。波群の分離は明瞭でないが、振



(a) 0 m



(b) 20 m

図 5 回転加振における各観測点での伝達関数の radial (R) 成分。図中の線は均質構造を仮定した場合の走時を表す。(a)の 0 m はモニター用ジオフォンの記録。各波形はそれぞれの波形の RMS 振幅で規格化した。

源深度 0 m の場合ではほとんど表面波として伝達していると考えられる。

図 6 に示す観測点配置で観測した伝達関数の水平方向の軌跡を図 7 に示す。(a)の回転加振では楕円状の軌跡を描くのに対し、(b)の直線加振では直線状の軌跡となっており、x 軸方向に P 波、y 軸方向に S 波が放射されていることが期待される。観測点によって振動方向にばらつきが生じている原因については検討が必要である。

(2) 制御した発振が可能な孔内 S 波振源の開発を目指し、振源装置を製作した (図 8)。フィールドにおける性能試験により、振源装置は、当初の設計仕様をおおむね満たした上で、期待以上の発振能力を有することを確認した。一方で、技術的課題も明らかとなった。

現在明らかになっている課題を以下にあげる。

- 長時間安定加振可能な達成：リゾルバ信号のノイズ対策。
- 振源モニター用のジオフォン記録の安定化：センサー感度の再検討、ケーブルの処理、加速度計の採用など。
- 孔壁への固着方法の検討：ツールの振動に耐えるとともに、振動を効率よく地盤に伝達することが必要である。固着しないことも検討する。

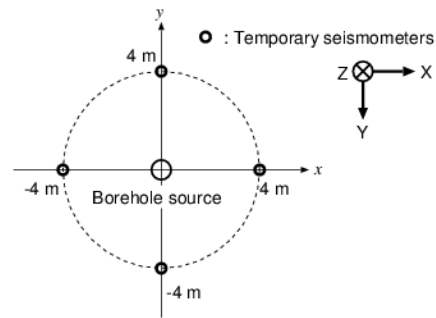
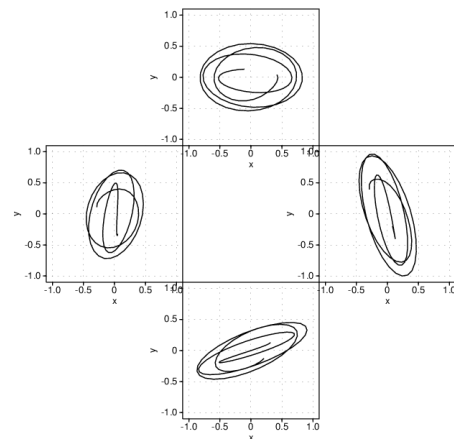
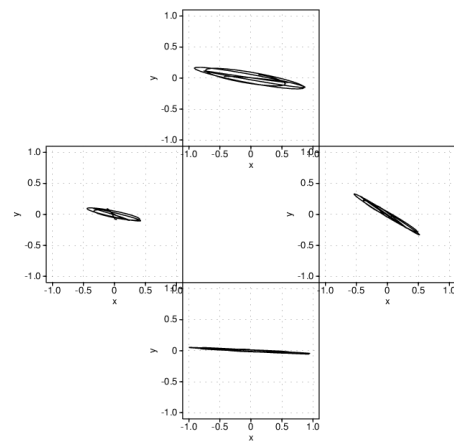


図 6 振源の周りに等距離に観測点を配置した観測点配置 2



(a) Rotation



(b) Linear

図 7 観測点配置 2 における伝達関数の水平方向 2 成分(x-y)の軌跡。(a) 回転加振、(b) 直線加振。図 6 の観測点と対応する位置に配置した。

(3) 将来的な開発課題としては以下があげられる。

- 耐用深度の増加：ケーブルによる信号劣化が問題とならないように、コントローラを基板化してツールに内蔵し、ケーブルは電源供給とモニタジオフォン信号の転送のみとする。
- 方向センサーの搭載：浅部においては設置



(a) 振源装置



(b) コントローラと PC

図 8 孔内用振源装置 (Controlled Rotational Borehole Vibrator : CRBV)

時に治具を用いることによりツールの方向を固定できるが、より深い孔内において直線加振方向を知るために、ジャイロ等の絶対方向センサーを搭載することを検討する。

(4) 振源から連続発振され観測点で観測された波形信号から、S 波トモグラフィの解析を行い、S 波速度構造を推定するまでの解析手法とソフトウェアを整備した。また、振源からの伝達関数が非常に安定していることから、S 波初動走時を読み取って速度構造を求める方法以外に、S 波の波形そのものを入力として速度構造を求める波形解析の方法を適用できる可能性が高いことが明らかになった。

本装置の設計にあたり、名古屋大学全学技術センター（装置開発技術系）にアドバイスをいただいた。フィールド試験にあたっては応用地質（株）計測システム事業部のご協力を得た。ここに記して謝意を表す。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 1 件)

渡辺俊樹, 国松直, 山岡耕春, 太田賢治, 飯沼博幸, 葛尾拓也, 梶原透, 孔内用回転型精密制御振源の開発と性能試験, 物理探査学会第 132 回学術講演会, 2015 年 5 月 11 日, 早稲田大学 (東京都) .

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

特になし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

渡辺 俊樹 (WATANABE, Toshiki)  
東京大学・地震研究所・教授  
研究者番号 : 50210935

### (2) 研究分担者

国松 直 (KUNIMATSU, Sunao)  
産業技術総合研究所・地圏資源環境研究部門・上級主任研究員  
研究者番号 : 70356921

山岡 耕春 (YAMAOKA, Koshun)

名古屋大学・環境学研究所・教授  
研究者番号 : 70183118