

CS-33 ACROSS を利用した地盤構造推定システムに関する基礎的研究

○ 東京大学 学生会員 山下 頼行
 鉄建公団 正 員 倉川 哲志
 東京大学 正 員 堀 宗朗

1. はじめに

強震動の予測には地盤の増幅特性の評価が不可欠である。特に、直下地震に関しては震源からの距離が小さく、単周期の波も減衰していないため、より正確な評価が望まれる。地盤の増幅特性は地盤構造によって決定される。したがって、地盤構造を測定し各構造の地震波伝播特性が明らかになれば、入射された地震波に対する地盤の応答は数値計算によって予測することが可能である。

通常、地盤構造の測定には人工地震を用いた計測が行われる。パイロサイスの開発により、都市部でも人工地震による計測が可能であるが、局所的な増幅特性を推定するために1~10[m]のオーダーで地盤構造を測定することは難しい。また反射・透過を利用した逆解析にも改良の余地がある。ACROSSは「ノイズよりも小さいレベルのシグナルを送信しながらも、正しくシグナルを受信する」ことに最大の特徴がある。後述するように、この特徴は精密制御送信と長時間タイムスタッキングによる。地盤構造推定システムの開発を念頭に、本研究は、ACROSSを利用した逆解析手法を提案し、妥当性・有効性を検証するための室内実験の現状を報告する。

2. ACROSS とは

ACROSSは新しい地殻構造探査法として地球物理の分野で開発されつつある。断層や断層付近の地殻の詳細な常時モニタリングを目的としており、送信・受信・データ解析から構成される。ACROSSの送信と受信の原理は、単周期調和振動の精密制御入力と長時間スタッキングによるノイズ除去である。ACROSSの妥当性は原理的には明らかである¹⁾。

残された課題は技術的なものであり、周期・位相・振幅が精密制御された正弦波を発信する装置と、同程度の精度で長時間スタッキングを可能とする受信装置の開発である。現在、地殻構造探査用のACROSSでは、精密モータとGPS時計を用いたプロトタイプが試験されている。すでに数kmのオーダーでのACROSSのシグナルの受信が可能であることが検証されている。

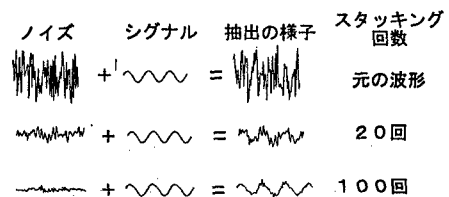


図1 ACROSSの原理

3. 地盤構造推定システムの概要

図-2に示すように、ACROSSを用いた地盤構造推定システムは送信装置と受信装置のネットワークを作り、地盤構造を推定する。このシステムでは、「シグナルが伝播した媒体の構造を送信波と受信波から推定する」という典型的な逆問題を解くことになる。通常、この種の逆問題は数学的に非適切である。精度の良い計測しても解析手法が悪ければ目的とする推定精度は得られない。またその逆も成り立つ。そこで、要求される構造推定の精度に応じて、計測と解析のバランスを取る必要がある。

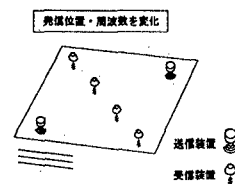


図2 ACROSSを利用した地盤構造推定システム

現時点において、ACROSSではノイズレベルの1/100程度のシグナルを観測することに成功している。したがってそれに見合った精度の逆解析手法を構築しなければならない。ACROSSの入射波はスパイク波とは異なるため、反射波や走時を利用して内部構造を推定することは容易ではない。代わりに、不均一体を伝播する波動の特性を考慮し、受信

キーワード：ACROSS(Accurately Controlled Routinely Operated Signal-Source System)

〒113 東京都文京区弥生1-1-1 地震研究所

波の振幅や位相から内部の構造を推定することになる。ネットワーク計測が容易であり、入射波の周期の変更も自由な ACROSS の特徴を活かした逆解析手法が必要である。

4. 逆解析法

地盤構造推定の逆問題を解く最大の問題点は、3 次元的地盤構造を逆解析するために 3 次元の解析データが必要とされる点である。ACROSS では地表面のネットワーク計測と、周波数を変えた波を送信することから、各受信装置で計測された波を地表面と周波数領域で内挿・外挿すると、離散的な計測データから 3 次元に連続した解析データを作成することができる。なお、解析データの内挿・外挿にある程度幅を持たせることで、それに対応した幅をもって地盤構造が逆解析される。地盤構造の幅から内挿・外挿の効果を見ることができる。

地盤構造推定の例として弾性係数が不均一な場合を考える。受信波の解析データ $\bar{u}_i(x, \omega)$ と地盤構造 $C_{ijkl}(y)$ は 1 対 1 の関係があることが予想される。等価介在物法を利用すると、 $\overline{u_i}$ と C_{ijkl} の間に次の式を導くことができる。

$$\bar{u}_i(x, \omega) = \int_V g_{ip}^o(x, y, \omega) (C_{ijkl}(y) - C_{ijkl}^o) u_{k,l}(y, \omega) dy \quad (1)$$

ここで V は地盤であり、 C_{ijkl}^o は (一様な) 基準弾性、 g^o は基準弾性を持つ無限体の基本解、そして $u_i(y, \omega)$ は周波数 ω の ACROSS 波が入射された時の V 内の波である。この式を C_{ijkl} から $\bar{u}_i$ への積分変換とみると、 $g_{ip}^o u_{k,l}$ の逆が与えられれば、この積分変換の逆変換を簡単に計算することができる。地盤を 1 次元半無限体としてモデル化した場合、この積分変換の逆積分変換を求めることには成功しているが²⁾、3 次元半無限体で逆を解析的に計算することは容易ではない。

5. 室内実験

ACROSS を利用した構造推定の妥当性を検証するため、銅盤に ACROSS 送信・受信装置を設置し、室内実験を行っている。送信装置は DC モータ、受信装置は AD 変換ボードでパーソナルコンピュータに接続された加速度計である。最も簡単な例として、銅盤におもりを付けた場合と付けない場合に、受信される ACROSS 波にどの程度の差が生じるかを検討してみた。

周波数 21Hz の ACROSS を入射し 10[sec] スタッキングしたところ、ノイズレベルのおよそ 1/2 のシグナルを受信することができる。図-3が受信された変位、図-4がスタッキングの結果抽出されたシグナルである。観測点付近の試験体表面に約 3[kg] のおもりを置いた時と、外したときのシグナルを図-5に示す。振幅に差があり、おもりの影響による ACROSS 波の変化を観測することができた。

入射波の制御の精度を上げて、更に S/N 比の悪い ACROSS 波を計測できるシステムを構築する必要がある。DC モータの代わりにサーボモータを用いたところ、バックグラウンドノイズのスタッキングでは、ノイズの標準偏差がスタッキング回数の平方根に反比例して減少することが確認された (図-6参照)。これは理論と一致し、入射波の制御を向上させスタッキング時間を増加させることで、シグナルの抽出が可能であることを示唆している。

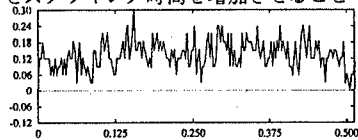


図 3 計測された波形

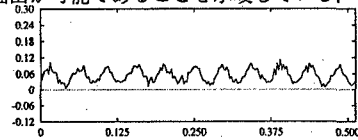


図 4 スタッキング後の波形

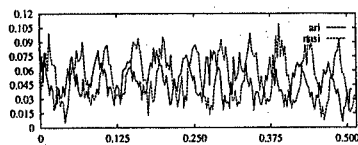


図 5 おもりの有無による波形の変化

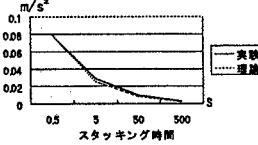


図 6 スタッキングの増加に伴うノイズの低減

参考文献

- 1) ACROSS TECHNOLOGY を応用した非破壊検査法プロトタイプの提案山下、堀、第 1 回都市直下地震災害総合シンポジウム 論文集、pp.121-122,1996
- 2) 倉川 哲志：ACROSS を利用した地盤構造推定システムの提案、東京大学卒業論文 (1997)。