

ボアホール記録の解析による堆積層の地震波減衰特性の推定

中原 恒・福嶋林太郎（東北大学大学院理学研究科）

1. はじめに

表層地盤における地震波減衰特性を精度よく推定することは、地震動予測の精度向上にとって重要である。本研究では、防災科学技術研究所のKiK-net鉛直ボアホールアレイ記録のデコンボリューション解析により、堆積層の地震波減衰特性を推定する。特に地中記録を地表記録でデコンボリューションすることにより、入射波と反射波を時間的に分離することを試みる。さらに、両者のスペクトルから伝達関数を求め、堆積層の減衰特性Q値を推定する。この手法に基づき、トランスバース成分からQs値を、上下動成分からQp値を推定することができたので、それらの結果について報告する。

2. データと解析手法

鉛直ボアホールの地表と地中で観測記録が得られた場合、従来の多くの研究では、地中記録を入力、地表記録を出力とし、地表記録を地中記録によりデコンボリューションしている。これに対し、地中記録を地表記録でデコンボリューションすることを提唱している論文もある（例えば、Trampert et al., 1993）。これにより、デコンボリューションの負のラグ側に入射波が、正のラグ側に反射波が時間的に分離して出現する。また、地震波が地中と地表との間を1往復する間の浅部地盤での減衰効果により、反射波は入射波に比べて振幅が減衰し、卓越周期が少し長くなる。下（地中）の記録を上（地表）の記録でデコンボリューションする手法は、9階建ての鉄筋コンクリート造のビル内を上下に伝播する波を分離抽出し、ビル内の地震波のQ値を推定する研究に使われた例（Snieder and Safak, 2006）がある。また、鉛直地震計アレイのデータに適用した研究（Mehta et al., 2007）もあるが、Q値の推定までには至っていない。そこで本研究では、この手法を用いてQ値の推定を行う。Q値の推定には以下の式（Fukushima et al., 1992）を用いる：

$$Q^{-1} = \frac{-\log \left[\frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \right]}{\pi ft}. \quad (1)$$

ここで、 f は周波数、 t は地表と地中の往復走時、 $S_{xx}(f)$ は入射波のパワースペクトル、 $S_{xy}(f)$ は入射波と反射波とのクロススペクトルであり、 $S_{xy}(f)/S_{xx}(f)$ は伝達関数である。ここで求める値は地表と地中との間を均質媒質と仮定した場合のQ値ということになる。

解析に使用するデータとして、日本全国のKiK-net観測点のうち、深さ300m以深、理論S波往復走時が0.5秒以上、ボアホール底部でのS波速度が3000 [m/s] 以内の条件を満たす48観測点を選ぶ。近地地震の地中観測波形のトランスバース成分（1-10Hz）から目視でS波初動を読み取り、その1秒前から長さ20秒間の時間窓をとって、周波数領域で地中記録を地表記録でデコンボリューションする。時間窓には、直達波のみならずコーダ波も含まれている。波形の相関とS/N比を考慮してデコンボリューション波形から入射波と反射波を抽出した後、両者が明瞭に見えるイベントを選別して、入射波と反射波のスペクトルを用いて伝達関数を計算した。さらにこの伝達関数をスタックしたものを(1)式に代入し、Qs値を推定する。またP波に対しては、深さ500m以深、理論P波往復走時が0.5秒以上、ボアホール底部でのP波速度が5000 [m/s] 以内の条件を満たす観測点を選び、上下動成分の波形を用いてデコンボリューション解析を行い、Qp値の推定を行う。

3. 結果とまとめ

規模が大きい地震では卓越周波数が低く継続時間が長くなるため、観測記録において入射波と反射波を認識することは難しい。しかし、地中/地表のデコンボリューションを利用することにより、入射波と反射波を明瞭に抽出できる。解析の結果、伝達関数のスタックにより、全国の16観測点に

において平均的な Q_s 値を推定することができた。図1のように Q_s^{-1} 値の周波数依存性は、低周波側では周波数のべき乗で減少し、2-3Hz以上で傾きが緩やかになる傾向を示した。この周波数依存性は16観測点すべてで共通する安定したものである。低周波数側においてべき乗則を仮定してあてはめたところ、1Hzにおける Q_s^{-1} 値は0.02 から0.2、周波数のべき乗は-0.12から-1.00となった。また観測点が深いほど Q_s^{-1} 値が小さくなるという深さ依存性を確認できる。

一方、上下動成分を用いた解析により、深さ800m以深のボアホール観測点のうち15点で、P波の入射波と反射波を時間的に分離して抽出することができた。ただし、P波走時はS波走時よりも小さくなるため、P波の入射波と反射波を時間的にきれいに分離するためにはより深い観測点を使う必要がある。P波デコンボリューション波形上では、S波よりも明瞭に入射波と反射波が見える場合が多かった。伝達関数の計算より Q_p^{-1} 値を推定した結果を図2に示す。低周波側では周波数のべき乗で減少し、2-3Hz以上で傾きが緩やかになる傾向はS波と同様である。また深い井戸ほど Q_p^{-1} 値が小さくなる傾向もみられる。S波、P波両方に対してQ値が求められた5つの観測点について、 Q_p^{-1}/Q_s^{-1} 値を計算した。その結果、周波数1-10Hzの範囲で1から4の値となり、今回解析した観測点では、S波よりもP波の減衰が強いものとなった。 Q_p^{-1}/Q_s^{-1} 値は減衰のメカニズムに依存するため、同様の解析事例を蓄積し、堆積層における地震波減衰のメカニズムの理解を進めていくことが重要である。

謝辞

防災科学技術研究所のKiK-netのデータを利用させていただきました。記して感謝いたします。

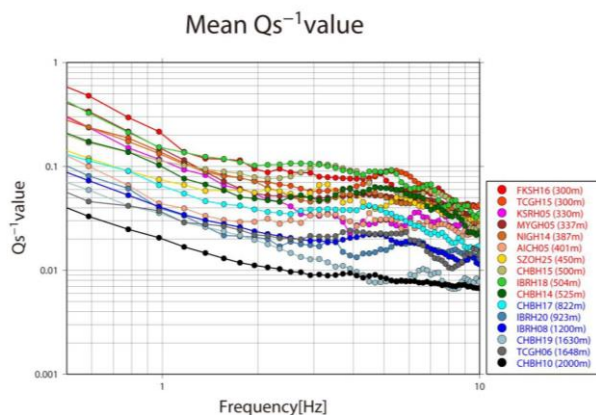


図1 推定された Q_s^{-1} 値

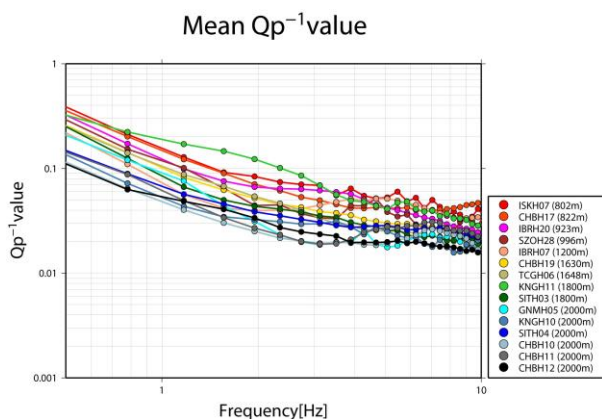


図2 推定された Q_p^{-1} 値