

拡散波動場理論に基づく地表の上下地震動から地震基盤での水平地震動を推定する試み
 Estimation of horizontal seismic bedrock motion from vertical surface motion based on diffuse field theory

○長嶋史明・川瀬博・松島信一

○Fumiaki NAGASHIMA, Hiroshi KAWASE, Shinichi MATSUSHIMA

The damage caused by future earthquakes, especially Nankai trough earthquake, is a big concern and it is useful to know the future earthquakes and the damage for the disaster prevention. One of the methods to estimate ground motion is amplifying bedrock motion by the site amplification factor. We have developed a method to estimate the horizontal seismic bedrock motion from the surface vertical motion based on the Horizontal-to-Vertical spectral ratio of earthquakes derived assuming a diffuse field. Our proposed method does not need nonlinear characteristics, so we can calculate bedrock motions under the elastic assumption. We compared the proposed method with equivalent linear analysis, and the spectra of bedrock motions were similar.

1. はじめに

プレート境界に位置している日本ではこれまで数多くの地震が発生し、1995年兵庫県南部地震や2011年東北地方太平洋沖地震など多くの被害を被ってきた。今後も南海トラフ周辺を震源とする大地震の発生が危惧されており、地震による被害を最小限に抑えることが必要となっている。

地震被害予測および地震動予測の高精度化は防災計画の策定に寄与すると考えられ、多くの研究が行われている。地震動予測手法の一つに観測記録から地中での地震動を推定し、その地震動を入力として観測点近傍の地表地震動を推定するものがある。この手法では実際の地盤の震動特性を反映した地盤構造と、強震時の非線形特性が重要なパラメーターとなる。地盤構造の推定は多様な手法が提案されており、水平上下スペクトル比 (HVR) は1950年代にその特性が見出され2000年代後半には新解釈である拡散波動場理論が提唱された。非線形特性に関してはいくつかの代表的な室内実験結果があり、ボーリング柱状図等を参考に各層にそれを仮定、等価線形解析等で地震動予測を行うことが多い。強震時の地盤の非線形化に伴う減衰の増大やせん断弾性係数の低下など反映できるのでより現実的な地震動を推定できるが、非線形特性の深度依存性やサイト依存性をどの程度反映させるべきなのかが不確定で、また等価線形解析において適用範囲外の値が得られたり計算が発散してしまう場合があるなど問題点も存在する。

拡散波動場理論を地震動に適用すると、HVRは地震基盤で浅の伝達関数の水平上下比と対応する。我々はこの関係式を用いて、地表で観測された上下地震動から地震基盤面での水平入射動の推定を試みた。初めに拡散波動場理論に基づき地震動HVRを用いて地盤構造を同定した。得られた地盤構造を用いて提案手法による地震基盤波の推定と等価線形解析による地震基盤波の逆算を行い、両者の比較を行った。

2. 地震動に対する拡散波動場理論からの展開

拡散波動場理論に基づく地震動 HVR の解釈は(1)式となる。

$$HVR = \frac{Spectra_{horizontal}^{surface}}{Spectra_{vertical}^{surface}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \frac{TF_{horizontal}}{TF_{vertical}} \quad (1)$$

α は地震基盤の P 波速度、 β は地震基盤の S 波速度、TF は地震基盤で浅の伝達関数である。地表面で観測された地震動スペクトルの水平上下比は地震基盤で浅の伝達関数の水平上下比と対応する。(1)式を変形すると(2)式となる。

$$\frac{Spectra_{horizontal}^{surface}}{TF_{horizontal}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta}} \frac{Spectra_{vertical}^{surface}}{TF_{vertical}} \quad (2)$$

地表面の地震動スペクトルを伝達関数で除したものは基盤面の入射波スペクトルであり、(2)式は基盤での水平入射スペクトルは上下入射スペクトルと対応することを示している。ここで、上下動伝

達関数は強震時に非線形化しないとすると、上下入射スペクトルは弾性範囲で計算され(2)式から水平入射スペクトルも振幅補正のみで計算される。提案手法では地表面での観測記録があればよく、非線形特性の選択や割り当ての必要がない。また弾性で計算しているため、非線形および等価線形解析時のように計算結果が発散することもない。

3. 地盤構造同定

K-NET 古川 (MYG006) で観測された地震動を用いて HVR を計算しそれを再現するような地盤構造を同定した。2011 年 6 月～12 月に観測された地震動 (PGA10～50gal) の方位別平均 HVR を図 1 に示す。広い範囲で方位差はほぼ見られず、MYG006 直下は 1 次元構造であると推測される。我々が設置した臨時余震観測網での解析結果も含めて考察すると、0.2Hz のピークは地域共通の深部地盤構造を反映し、それ以降のなだらかで細かいピークを各観測点の浅部構造が表していると考えられる。

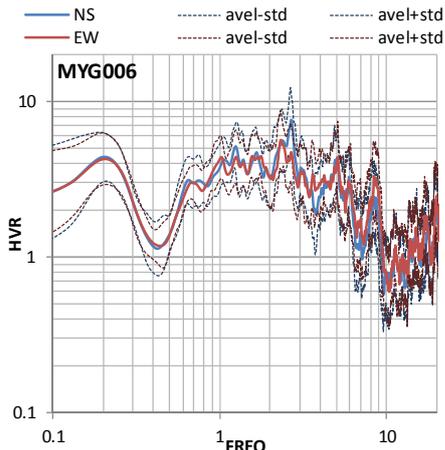


図 1 観測地震動 HVR

得られた観測 HVR を再現する地盤構造をハイブリッドヒューリスティック法 (HHS) を用いて同定した。初めに地域共通の深部地盤構造を同定し、その後各観測点固有の浅部構造を同定した。結果を図 2 に示す。観測 HVR を広い周波数範囲でよく再現する構造が得られた。

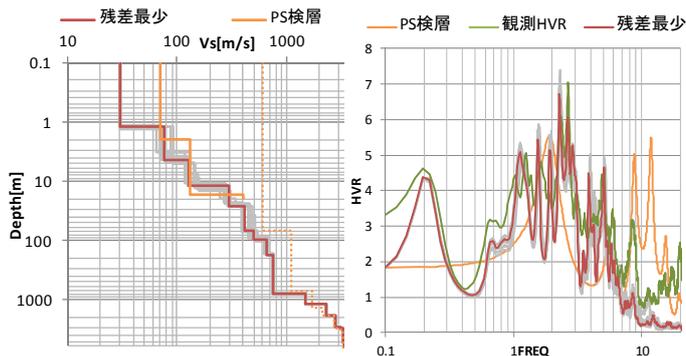


図 2 同定地盤構造と観測および理論 HVR

4. 地震基盤波の推定

3 章で同定した地盤構造を用いて、DYNEQ を用いた等価線形解析および提案手法により地震基盤面での水平入射波を推定・比較を行った。等価線形解析では非線形特性をボーリング柱状図の土質に対応させて割り当てて解析を行った。提案手法では同定した地盤構造から求められる弾性上下動伝達関数を用いて(2)式にしたがって解析を行った。最大加速度が 100cm/s^2 ほどの非線形が考えられる地震動を用いて推定基盤地震動を比較した。

解析結果のスペクトルを図 3 に示す。5Hz まではよく一致しており、5Hz 以上では EW 方向の DYNEQ による剥ぎ取り波が大きくなっている。これは非線形の影響で高振動数の伝達関数が 1 以下となり、割り込む過程でスペクトルを増幅したためである。

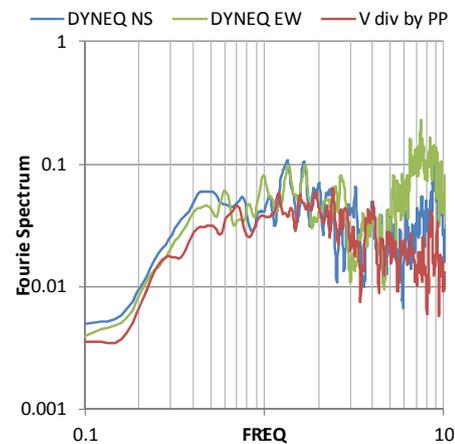


図 3 推定した地震基盤スペクトル

PGA が小さく弾性と思われる地震や東北地方太平洋沖地震本震でも同様の比較を行った。小地震でも提案手法と等価線形解析は一致を示し、本震の解析では等価線形解析は解が収束せず提案手法でのみ地震基盤波が逆算できた。

5. まとめ

我々は拡散波動場理論に基づく地震動 HVR の解釈を展開させ、地表上下動から地震基盤水平動の推定を行った。既往手法である等価線形解析の解析結果と比較を行い、両者は良い一致を示した。また等価線形解析では解が収束しないような地震動に対しても、提案手法を用いれば地震基盤波を逆算できることが示された。今後は提案手法を他の観測点にも適用させていくとともに、S 波速度から P 波速度の換算方法の見直しや強震時上下動伝達関数の非線形化の有無についても詳細に検討していく必要がある。