

地震動のH/Vスペクトル比の地点依存性に関する解釈

山崎文雄¹・Mehedi A. Ansary²

¹ 正会員 工博 東京大学 生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1)

² Ph. D. Department of Civil Engineering, BUET (Dhaka 1000, Bangladesh)

常時微動の水平／上下(H/V)スペクトル比を用いて地盤特性を評価する方法を地震動記録について拡張した。気象庁87型地震計の記録についてのH/Vスペクトル比は地震によらず地点ごとに一定の範囲に収まった。この比が安定する解釈を行うために、気象庁による地震動データを用いて、速度応答スペクトルの距離減衰式を構築した。その結果、マグニチュード、最短距離、震源深さに関する係数は、水平成分および上下成分で近似した値であることが分かり、H/Vスペクトル比をとると、周期に依存する地点係数と定数項のみで近似できることが示され、スペクトル比が地震によらず安定することが確認された。

Key Words: Velocity response spectrum, Fourier spectrum, attenuation relation, horizontal-to-vertical spectrum ratio, site characterization, JMA-87-type accelerometer.

1. はじめに

地盤の増幅特性を評価する手法として、常時微動の水平／上下(H/V)のフーリエスペクトル比を用いる方法¹⁾が広く日本および最近海外でも使われている。常時微動においてH/Vスペクトル比が地点固有なものとなる理由については、レイリー波が卓越するとよく説明できることが、最近の多くの研究者により示されている。この方法は、最近、地震動についても使われており、H/Vスペクトル比はマグニチュードや震源位置によらず地点ごとに安定するという結果が得られている。しかし、その物理的解釈は示されておらず、H/Vスペクトル比の地震動への適用については議論が残されている。このような観点から本研究では、地震動のH/Vスペクトル比が地点に固有となる理由について、地震動スペクトルの距離減衰特性より説明を試みる。

2. 地震動データとフーリエスペクトル比

本研究では、Molas and Yamazaki^{2), 3)}により提案された最大加速度、最大速度、加速度応答スペクトル、速度応答スペクトルについての距離減衰モデルを使用する。地震動データは、日本全国76箇所に配備された気象庁87型地震計により1988年8月1日から1993年12月31日までに得られた加速度波形を使用した。選択した地震動データは、水平2成分がともに1.0Gal以上の、マグニチュード4.0以上の387地震による

2,166組の3成分である。距離は、マグニチュードの大きい釧路沖地震と北海道南西沖地震については断層面への最短距離を用い、その他の地震については震源距離で代用した。

最初に、観測記録数の多い4地点（八戸、釧路、水戸、東京）について10個の大きな地震動記録を選択し、水平と上下のフーリエスペクトル振幅およびそれらの比(H/V)を計算した。八戸の例を図-1に示すが、水平および上下のフーリエ振幅は地震ごとにより異なるが、形状は比較的近似しており、それらの比(H/V)は地震によらず非常に狭い範囲に入っている。すなわち、フーリエ振幅比は、地点固有の揺れ易さの特性を表わしていると思われる。

3. 速度応答スペクトルの距離減衰式

距離減衰式の関数型は、震源からの幾何学的減衰と地殻材料の非弾性減衰を考慮する次式を採用した。

$$\log S = b_0 + b_1 M + b_2 r + b_3 \log r + b_4 h + c \quad (1)$$

ここで、 S は水平または上下成分に対する相対速度応答スペクトルであり、水平に関しては2方向に対して求めた大きい方の値を用いる。 M はマグニチュード、 r は断層面への最短距離、 h は震源深さである。 b_k は回帰分析により求める係数、 c は地点ごとの揺れやすさを表わす係数で、観測点の地盤条件、地形効果、地震計の設置条件などの影響が重なったもの

である。これらの係数は、周期ごとに求められる。

回帰分析は、地震ごとのダミー変数を用いて、第1段階目で距離に関する係数(b_2, b_3, b_4)を求め、第2段階目でマグニチュードに関する係数(b_0, b_1)を求める、2段階回帰を採用した。 b_3 は、点震源からの球面波の幾何学的減衰を表わす $b_3=-1.0$ で拘束した。

回帰分析により求めた速度応答スペクトル(減衰比0%, 2%, 5%)の回帰係数を図-2に示す。減衰比によって係数は多少変化するが傾向は同じである。速度応答スペクトルと加速度フーリエスペクトルの近似関係は、厳密には無減衰の場合にのみ成り立つが、無減衰の場合、応答スペクトルの変動が激しい。そこで、以下、2%減衰の係数を用いて議論を進める。

b_0 については、水平成分に対するものが上下成分のものより多少大きい、周期軸に対する変動の傾向はよく似ている。マグニチュードの係数 b_1 については、2成分で非常に近い値となっている。非弾性減衰係数 b_2 は、両成分ともに、周期の増加とともに絶対値が小さくなり、周期の短い成分が減衰しやすいことと符合している。深さの影響を表わす係数 b_4 は、両成分ともに周期の増加とともに小さくなる。

4. 応答スペクトル比と地点特性

速度応答スペクトルのH/V比における、マグニチュード、距離、震源深さの影響を図-3に示す。マグニチュードの影響はややあるが小さく、スペクトル比の形は安定している。また(ここには含んでいない震源近傍の記録を除くと)距離の影響もほとんど無視できる程度である。震源深さの影響も無視できる程度である。以上より、速度応答スペクトル比は、周期の関数ではあるが、マグニチュード、距離、震源深さの影響をほとんど受けないといえよう。

八戸における水平および上下速度応答スペクトルに対する地点係数 q を図-4に示す。地点係数の周期変化は、地点ごとに異なっているが、同じ地点の水平と上下成分に関するものは似た形をしており、上下動に対するピーク周期の方が水平動に対するものよりやや短周期側になっている。水平応答スペクトルについての地点係数のピーク周期はS波の卓越周期に、また上下応答スペクトルのそれはP波の卓越周期と対応すると考えられる。

以上の検討より、応答スペクトル比において、マグニチュード、距離、震源深さの影響は小さいので、地点 i における応答スペクトル比は、地震によらず地点固有周期のみの関数として次式で近似できる。

$$\log \frac{S_v^H(T)}{S_v^V(T)} \approx [b_0^H(T) - b_0^V(T)] + [c_i^H(T) - c_i^V(T)] \quad (2)$$

式(2)の右辺第1項は平均地盤における応答スペクトル比であり、第2項は地点特性を表わしている。

八戸について、距離減衰式から推定した速度応答スペクトル比と観測された平均フーリエスペクトル比を図-5に比較するが、良く近似している。したがって、速度応答スペクトルの距離減衰式を用いて、フーリエ振幅比が地点固有となる理由を説明できた。

5. H/Vスペクトル比と伝達関数の関係

H/Vスペクトル比の物理的解釈を行ってみる。例題として、地盤調査⁹⁾の行われている東京ガスの草加と小平の観測記録を用いる。1次元波動理論により、解放基盤表面に対する地表面の水平伝達関数(A_H)と上下伝達関数(A_V)を求め図-6に示す。これらは、地盤表面における振幅($2E_s$)を解放基盤表面での振幅($2E_r$)で除したもので、S波およびP波の鉛直入射を考えている。図中には、 $A_H (=E_s^H/E_r^H)$ と $A_V (=E_s^V/E_r^V)$ の比 $r_T = A_H/A_V$ についても示している。

草加においては、上下伝達関数が図の周期範囲でほぼ一定なので、水平伝達関数と伝達関数比はほぼ近い値となっている。小平においても、水平伝達関数と伝達関数比は近似しているが、水平伝達関数の2次ピークは、上下伝達関数の1次ピークと近いために、伝達関数比において低くなっている。これらの観察より、通常的地盤条件では、水平伝達関数とH/V伝達関数比は、S波の1次卓越周期の付近では近似していると見なせるであろう。

H/V応答スペクトル比に見られるピークは、式(2)の地点特性の項($c_i^H - c_i^V$)の寄与が大きいと思われるが、平均地盤のスペクトル比を表わす項($b_0^H - b_0^V$)の影響も無視できないであろう。草加や小平では、地盤条件は分かっているが、距離減衰式を構築したデータではないため、地点係数は求められていない。そこで、次の関係式を考えてみる

$$r_T = \frac{A_H}{A_V} = \frac{E_s^H/E_r^H}{E_s^V/E_r^V} = \frac{(E_s^H/E_s^V)}{(E_r^H/E_r^V)} = \frac{R_{surface}}{R_{reference}} \quad (3)$$

これより、地表面におけるH/V応答スペクトル比は

$$\frac{R_{surface}}{R_{reference}} = r_T \quad (4)$$

で表わされる。ここで、 r_T は伝達関数比、 $R_{reference}$ は解放基盤表面におけるH/V応答スペクトル比である。式(2)より $R_{reference} = 10^{(b_0^H - b_0^V)}$ と仮定するのはほぼ妥当であろう。しかし、係数(b_0^H, b_0^V)は、気象庁観測点の平均的地盤表面($c_i^H = c_i^V = 0$)に対するもので、草加や小平の解放基盤表面の方がこれより硬いものと考えられる。

図-7には、草加および小平で観測された7つの地

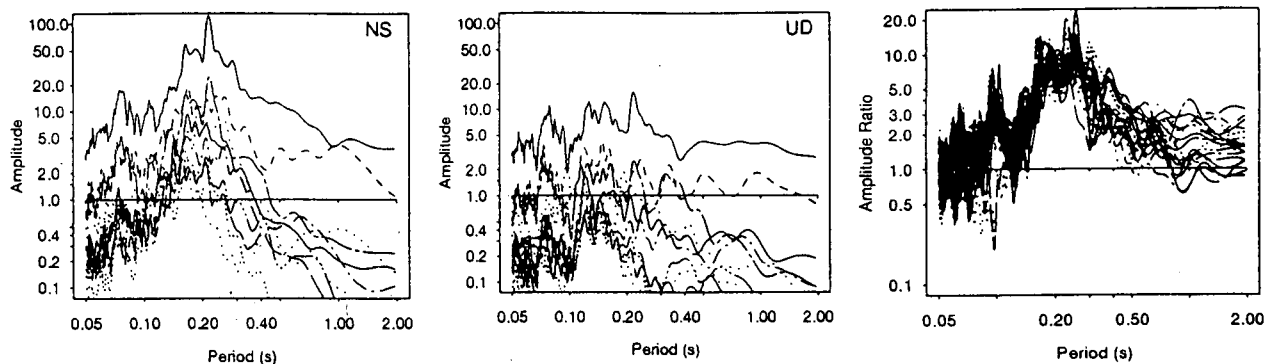


図-1 八戸における水平と上下のフーリエスペクトルおよび水平(NS,EW)/上下スペクトル比(H/V)

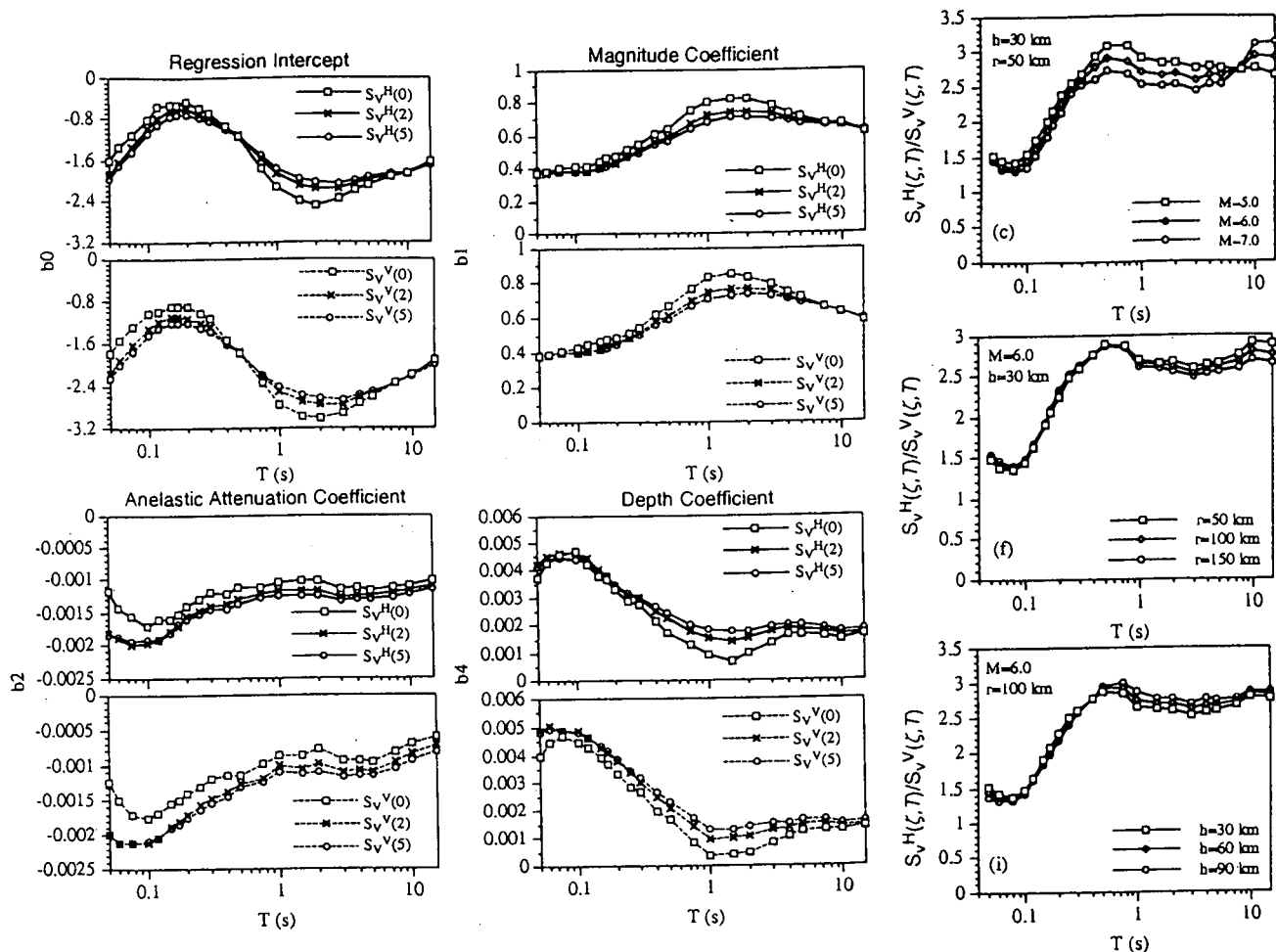


図-2 速度応答スペクトルの距離減衰式の水平成分 $S_v^H(z, T)$ と上下成分 $S_v^V(z, T)$ の係数に関する比較 (減衰比0%, 2%, 5%)

図-3 基準地点($c_f=0.0$)に関するH/Vスペクトル比 (減衰比2%)

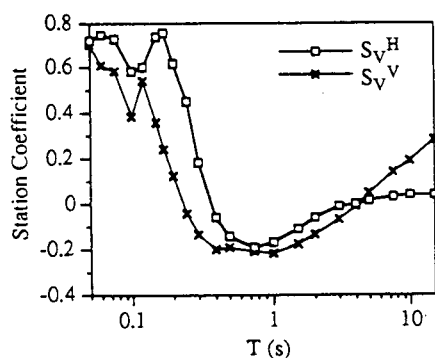


図-4 速度応答スペクトルの地点係数(八戸, 減衰比2%)

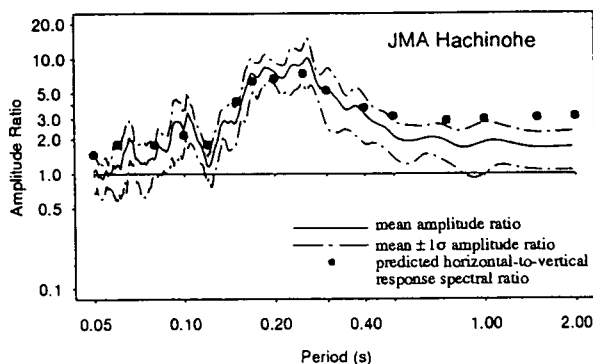


図-5 H/V速度応答スペクトル比(黒丸), 観測H/Vフーリエスペクトル比の平均値(実線)と標準偏差(1点鎖線)

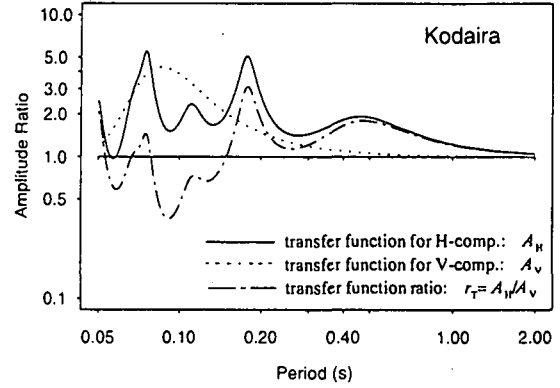
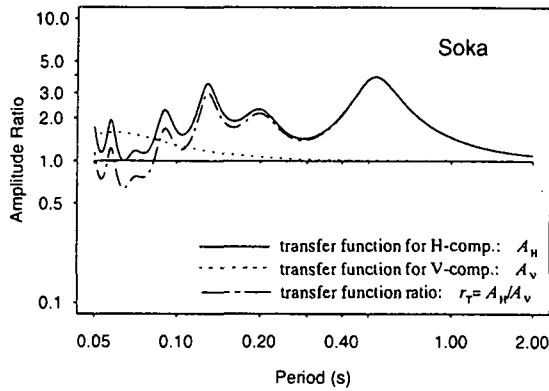


図-6 解放基盤表面に対する地表面の水平伝達関数(A_H)と上下伝達関数(A_V)および伝達関数比($r_T = A_H/A_V$)

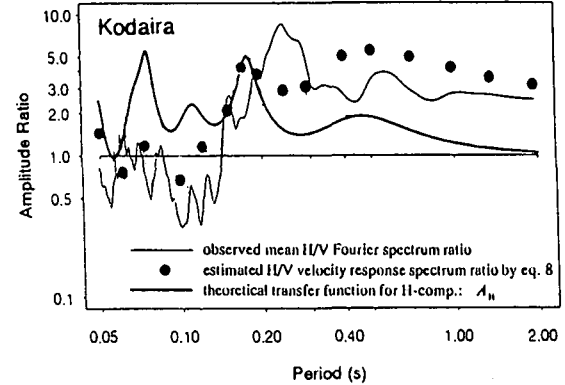
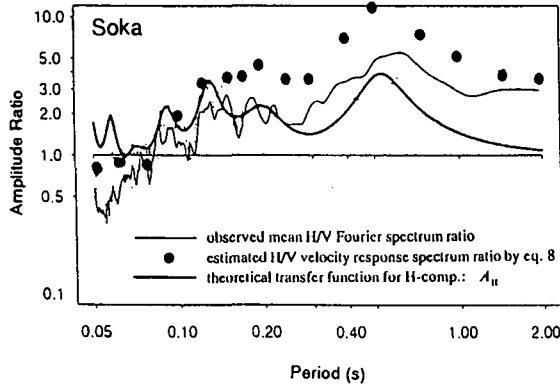


図-7 観測H/Vフーリエスペクトル比の平均値(細実線), 式(4)より推定したH/V速度応答スペクトル比(黒丸印), および水平成分の伝達関数(解放基盤表面に対する地表面, 太実線)の比較

震動のフーリエスペクトル比の平均値, 式(4)より推定した速度応答スペクトル比, および水平成分の伝達関数 A_H を比較して示す。これらの曲線は, 振幅はやや異なるものの, 全体的な傾向は非常に似ている。観測フーリエ振幅比および推定速度応答スペクトル比とともに, S波伝達関数の1次卓越周期と明瞭な符合が見られる。2つのスペクトル比は形状もよく似ている。振幅に多少の差が見られるのは, 前述したように, 解放基盤表面の地震動を気象庁観測点の平均地盤のもので代用したためと思われる。

S波の伝達関数とH/V伝達関数比が近似していることより, 地表におけるフーリエ振幅比はS波の1次卓越周期付近で, $R_{surface} \approx A_H \cdot 10^{(b_0^H - b_0^V)}$ と近似できる。ここで $10^{(b_0^H - b_0^V)}$ は, 周期0.5秒から7.5秒付近の間ではほぼ一定値であることから, S波の1次卓越周期と $R_{surface}$ のピーク周期は近い値となる。

以上の検討によって, 地表面での地震動のフーリエ振幅比が, S波の解放基盤に対する伝達関数に近似する理由を説明できたと考える。

6. まとめ

地震動の水平/上下(H/V)フーリエスペクトル比の安定性について検討した。87型地震計による地震動データを用いて, 速度応答スペクトルの距離減衰

式を構築した結果, マグニチュード, 最短距離, 震源深さに関する係数は, 水平成分および上下成分で近似した値であることが分かった。したがって, スペクトル比をとると, 周期に依存する地点係数と定数項のみで近似できることが示され, フーリエスペクトルと速度応答スペクトルの近似関係を利用して, フーリエスペクトル比が地震によらず安定することが確認された。さらに, スペクトル比の意味するところを, 鉛直入射のS波とP波に対する伝達関数を用いて説明した。これらの結果は, 地表における水平と上下成分の地震記録を用いて, その地点の地盤特性の評価が可能なことを示している。

参考文献

1. Nakamura, Y.: A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, *QR of RTRI* 30, 25-33, 1989.
2. Molas, G. L. and Yamazaki, F.: Attenuation of earthquake ground motion in Japan including deep focus events, *BSSA*, 85, 1343-1358, 1995.
3. Molas, G. L. and Yamazaki, F.: The effect of source depth and local site to the attenuation characteristics of response spectra, *Proc. 23rd JSCE earthq. eng. sym.*, 69-72, 1995.
4. Ansary, M. A., Fuse, M., Yamazaki, F. and Katayama, T.: Use of microtremors for the estimation of ground vibration characteristics, *Proc. 3rd int. conf. on recent advances in geotechnical earthq. eng. and soil dyn.* II, 571-574, 1995.