

コード規格化法により推定した気象庁震度観測点のサイト増幅率の特徴

青木 重樹・干場 充之 (気象研究所地震火山研究部)

1. はじめに

気象庁の緊急地震速報における震度予測では、距離減衰式から求めた工学的基盤上の最大速度に、微地形区分に基づく地盤増幅率をかけて地表の最大速度とし、それを震度へ変換する手法が用いられている。Iwakiri *et al.*¹⁾ は、この地盤増幅率を、蓄積された観測震度から経験的に導出した観測点補正值に置き換えたほうが、震度予測誤差が小さくなることを示した。しかし、これらはいずれもスカラー量としての補正值を用いた手法である。岩切・干場²⁾は、KiK-net の地表・地中記録を用いて、スカラー量としてのサイト増幅率である平均震度差よりも、周波数依存した増幅率（スペクトル比）を補正に用いた方が震度予測誤差が小さくなることを示した。また、青木・干場³⁾は、地中記録が無い気象庁の震度観測点の周波数依存した増幅率をコード規格化法⁴⁾により推定し、これらを用いて震度予測を試みた。本研究では、周波数依存した増幅率を用いた震度予測を行うための第一歩として、多数の気象庁震度観測点のサイト増幅率をコード規格化法により系統的に導出したので、その空間分布や観測点補正值¹⁾との比較について報告する。

2. 手法

本解析では、十分時間が経過すると、コード波振幅の減少の仕方は震源距離に依存しなくなるという性質を利用して、観測点間の相対的なサイト増幅率を推定する。まず、観測波形（加速度記録）に中心周波数 f （括弧内は帯域幅）が 0.75(±0.25)Hz, 1.0(±0.25)Hz, 1.5(±0.5)Hz, 2.0(±0.5)Hz, 3.0(±1.0)Hz, 4.0(±1.0)Hz, 6.0(±1.0)Hz, 8.0(±2.0)Hz, 10.0(±2.0)Hz, 12.0(±3.0)Hz, 15.0(±3.0)Hz の 11 個の帯域のバンドパスフィルタを掛け、それぞれで 3 成分合成の自乗和波形を作成した。時間窓（幅 5 秒）は先頭時刻 t を震源時の 60 秒後から 2.5 秒ずつ移動しながら 15 個設定し、それぞれで RMS 振幅 A を計算した。このとき、この振幅は、

$$A_{ijk}(f, t_k) = S_i(f) \cdot G_j(f) \cdot C_k(f, t_k) \quad (1)$$

と表すことができる。(1)式は、観測点 i における j 番目の地震に関する震源時から t_k だけ経過した時間窓の振幅に関する式で、 S はサイト増幅率、 G は震源項、 C は波動伝播の影響を表す項である。なお、 S 波走時の 2 倍以上経過したコード波部分では、 C は震源と観測点の配置に依存しなくなる⁴⁾。本解析

では、線形化のために(1)式の対数を取り、

$$\begin{aligned} \log A_{ijk} &= \log S_i + \log(G_j C_k) \\ &= \log S_i + \log N_{jk} \end{aligned} \quad (2)$$

として、(2)式のパラメタ $\log S_i$ と $\log N_{jk}$ を中心周波数ごとに最小自乗法で同時に推定した。なお、このとき、利用した振幅データが最多の観測点をサイト増幅率の基準点として用いることとし、その増幅率を 1 に固定して解析を行った。

3. データ

データは、1996-2010 年までに発行された強震観測報告に掲載された気象庁震度観測点の波形記録を用いた。解析には、日本およびその周辺で発生したマグニチュード 4.0~7.4 の範囲にある 90km 以浅で発生した計 370 個の地震を用いた。また、振幅データは、震央距離 200km 以内の観測点のものを用いることとし、 S 波走時の 2 倍以上経過していない時間窓や、 S/N が 2 以下の時間窓のデータは利用しなかった。また、ある地震のある時間窓(N_{jk} に対応)に関して、8 個以上振幅データがないものは、推定に利用しなかった。中心周波数ごとに推定したサイト増幅率 S は 544~566 個で、震源と波動伝播の効果の積である N は約 3300-5000 個であった。なお、推定数の変動は、主として高周波数側での S/N の悪化に伴う利用可能振幅データの減少のためである。また、1Hz 前後より低周波数側においては、同一地震でも観測点間のコードの減少の仕方が必ずしも同様ではない場合もあり、推定精度が悪いことも考えられるが、この点については今後の課題としたい。

4. 解析結果と議論

4.1 サイト増幅率の空間分布

図 1 にサイト増幅率の空間分布と頻度分布の一例として、0.75Hz と 8Hz の場合を示す。得られたサイト増幅率は、全周波数帯にわたって、そのほとんどが基準観測点と比較して -30~10dB の間にあった。基準観測点は全ての周波数帯域で茨城県石岡市柿岡であったが、基準点はその決め方から揺れやすい観測点となっており、0dB は分布の右側に位置している。

0.75~2Hz の低周波数側では、関東地方や大阪、名古屋、新潟など堆積層が厚い平野部などで増幅率が大きくなっていることがわかる。また、高周波数側では東北地方の太平洋側から関東にかけて比較的增加増幅率が高いなどの地域性は見えるものの、低周波数側と比べてそのコントラストは弱くなる。また、図

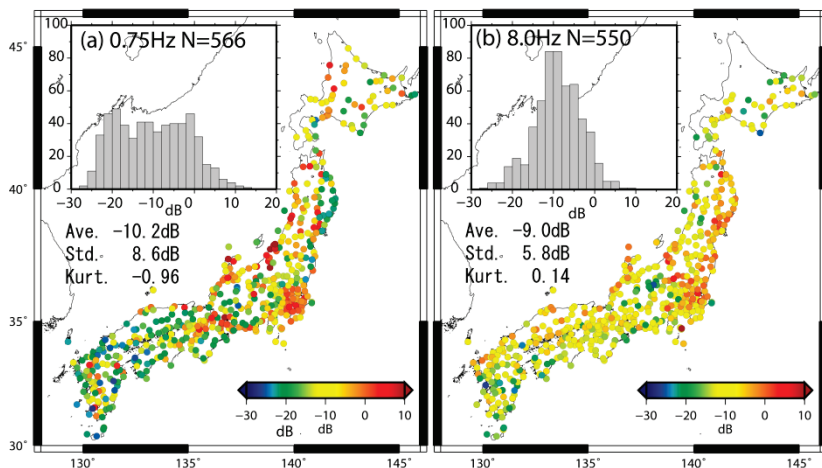


図 1. (a)0.75Hz と(b)8.0Hz のサイト増幅率の空間分布と頻度分布.

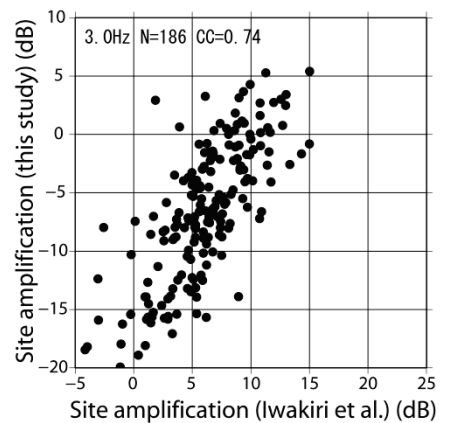


図 2. 3.0Hz の増幅率と観測点補正值.

中に示した頻度分布やその突度(Kurt.: 一様分布であれば-1.2, 正規分布であれば 0 となる)からもわかるように, 低周波数側では各観測点の増幅率は-24~0dB 程度の広い範囲でほぼ一様に分布しているが, 高周波数になるにつれ正規分布に近い分布となっていく. なお, 深部構造の影響を見るため深さ 50km 以浅の地震のみを使った解析も実施したが, サイト増幅率の空間分布に大きな違いはなかった.

これらの空間分布や頻度分布での特徴は防災科学技術研究所の K-NET や KiK-net の地表点などで同様の解析を行った Takemoto *et al.*⁵⁾においても類似の指摘がなされており, 異なるデータセットを利用しているにも関わらず同様の傾向が見えたことは, 本解析の信頼性を表していると考えられる.

4. 2 サイト増幅率と観測点補正值

本節では, Iwakiri *et al.*¹⁾が距離減衰式に基づく予測震度と観測震度の差の傾向から経験的に導出した観測点補正值と本解析での周波数依存したサイト増幅率を比較する. 図 2 に 3Hz の場合の例を示す. また, 図 3 に周波数ごとの相関係数を示す. これから, 観測点補正值とサイト増幅率の間に正の相関があり, 特に 3~4Hz 程度で相関が高いことがわかった. なお, この関係に関しては, 使用している地震の規模(卓越周期)の影響を受けている可能性があり, 大地震の場合はより低周波数側の増幅率が震度の補正に効果的になることもあり得るため, 周波数依存する増幅率の検討は重要である.

4. 3 震源項とマグニチュード

本節では(2)式の $\log N$ と気象庁マグニチュード (M_J)を比較する. N は震源と波動伝播の効果の積であるが, 波動伝播の効果が同様であれば, この値は震源の効果(放射エネルギーの平方根)に比例すると考えられる. 図 4 に $\log N$ と M_J の相関係数を全時間窓に渡って平均したものを周波数ごとに示すが, いずれも正の相関があり, Takemoto *et al.*⁵⁾の結果と調和的である. これは本解析の妥当性を示す結果で

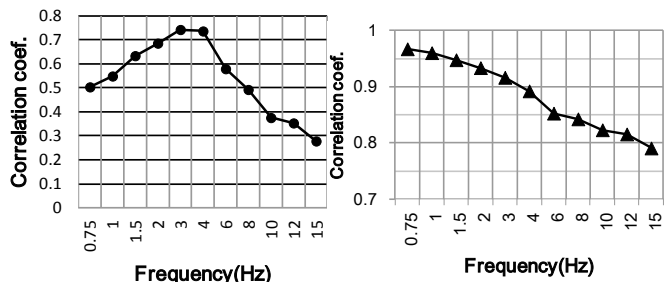


図 3. 各周波数帯域の増幅率と観測点補正值¹⁾の相関係数.

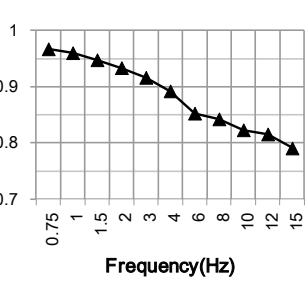


図 4. 各周波数帯域の $\log N$ と M_J の相関係数(全時間窓で平均).

ある. また, 低周波数側の方がより相関が高い. これは M_J が固有周期 6 秒の変位地震計相当の振幅によって決められていることを考えれば妥当な結果である.

5. まとめ

気象庁震度観測点に関してコーダ規格化法でサイト増幅率を推定した結果, 0.75~2Hz の低周波数側では, 堆積層が厚い平野部などで増幅率が大きくなり, 高周波数側では地域的なコントラストが弱くなることがわかった. また, 経験的な観測点補正值と増幅率を比較した結果, 両者には正の相関があり, 特に 3~4Hz 程度で相関が高いことがわかった.

謝辞 本報告では, 「強震観測報告」に掲載されている気象庁の震度観測点の記録を利用しました. また, 岩切一宏氏からは観測点補正值の提供を受けました. 竹本帝人氏からは論文のプレプリントを頂きました. 勝間田明男氏と林元直樹氏との議論は有益でした.

参考文献

- 1) Iwakiri, K. *et al.*: Improvement in the accuracy of expected seismic intensities for earthquake early warning in Japan using empirically estimated site amplification factors, *EPS*, **63**, 57-69, 2011.
- 2) 岩切一宏・干場充之: 深井戸の強震データによる震度予測: 震度差による方法とスペクトル比による方法, *日本地震学会秋季大会*, P2-41, 2011.
- 3) 青木重樹・干場充之: 実時間地震動予測のためのサイト補正の検討—コーダ規格化法により推定されたサイト増幅率を用いた試み—, *日本地震学会秋季大会*, 2012.
- 4) Sato, H. & M. C. Fehler: Seismic wave propagation and scattering in the heterogeneous earth, Spring-Verlag, New York, 308pp, 1998.
- 5) Takemoto, T. *et al.*: Spatial- and frequency-dependent properties of site amplification factors in Japan derived by the coda normalization method, *BSSA*, **102**, 1462-1476, 2012.