

応答スペクトルの距離減衰式の地点補正項を利用した地盤増幅特性の広域的評価

Evaluation of regional site amplifications using station correction factors of attenuation relationship of response spectrum

11TM0324 酒本 真先
Masaki Sakemoto

指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

In this study, the site amplification characteristics at seismic observation stations were estimated based on the attenuation relationship of response spectrum using ground motion records observed during the 32 earthquake events. The station correction factors were compared with the transfer function at KiK-net stations to investigate the periodical amplification characteristics. The station correction factors were also compiled with respect to the geomorphologic classifications and average S-wave velocities to evaluate the site response characteristics throughout Japan.

1. はじめに

現在までに、表層地盤の増幅特性について、国土数値情報の土地分類データ等を利用して、日本全国や特定地域の表層地盤の増幅度を推定する研究が行われており¹⁾、工学基盤に対する地盤種別ごとの増幅率が提案されている。しかし、PGVなどの指標の増幅率のみでは、地震動の周期特性を十分に考慮することは難しいこともある。山内ら²⁾は、気象庁の87型地震計で1988年から1996年までに観測された1020地震記録を用いて応答スペクトルの距離減衰式を構築し、その地点補正項³⁾を地形・表層地質ごとに整理し、揺れやすさの周期特性を評価している。研究当時、気象庁87型地震計の総数は77箇所と多くなく、平均的な傾向を把握するのに充分ではなかったが、現在では、K-NETやKiK-netが整備され、2011年東北地方太平洋沖地震でも稠密に地震動が観測された。

表1 本研究で観測記録を使用した地震

	発生日時	震源地	Mw	深さ (km)
前震	2011/3/9	三陸沖	7.3	8
本震	2011/3/11	三陸沖	9.0	24
地震1	2011/4/11	福島県浜通り	6.6	6
地震2	2011/4/12	千葉県東方沖	6.4	26

そこで、本研究では表1に示す東北地方太平洋沖地震の本震、その前震および東北地方太平洋沖地震によって誘発された地震の計4地震と、K-NETやKiK-netが配備されてから発生したマグニチュードの比較的大きな32地震による観測記録を用いて、応答スペクトルの距離減衰式を構築し、これによって推定される地点補正スペクトルが、各地点の震動特性を表すものとして妥当であるか検討を行う。

東北地方太平洋沖地震は、モーメントマグニチュード

(Mw) 9.0の巨大地震であり、この地震記録を考慮することで強震時の震動特性をより強く反映した地点補正スペクトルが得られるものと考えられる。また、統計分析に用いる母集団の偏りを減らすことを目的として、使用する地震記録を増やして推定した地点補正スペクトルを使用して全国を対象とした周期ごとの地盤増幅率のゾーニングを行う。

2. 地点補正に関する検討

(1) 4地震の記録を用いた速度応答スペクトルの距離減衰式

表1に示す4地震について、最大加速度が5cm/s²以上を記録した計941地点のK-NET、KiK-net観測点で得られた1870個の地震記録を以下の関数形を用いて回帰分析した。

$$\log_{10} y(T) = b_0(T) + b_1(T)Mw + b_2(T)r + b_3(T)\log_{10} r + b_4(T)H + c_i(T) \quad (1)$$

ここで、 $y(T)$ は速度応答スペクトルの水平2成分の合成値 (cm/s)、 r は断層最短距離 (km)、 H は震源深さ (km)、 $b_i(T)$ は周期 T ごとの回帰係数である。ただし、 b_3 は-1に固定する³⁾。また、 $c_i(T)$ は観測点 i の地点補正項であり、その観測点における地盤条件、地形効果、地震計の設置条件などの影響が重なったものと考えられる³⁾。なお、地点補正の平均値は0となる。

(2) 地点補正と伝達関数の比較

式(1)の地点補正 $c_i(T)$ は、その観測点における地盤条件、地形効果、地震計の設置条件などの影響が重なったものと考えることができ、距離減衰式における観測地点の相対的な揺れやすさを表すと考えられる^{2),3)}。なお、全観測点の地点補正の平均値は0となる。Yamazaki and Ansary⁴⁾は、水平成分と鉛直成分の応答スペクトルの地点補正から地震動

表2 岩盤サイトの深さ30mの平均S波速度と表層のS波速度および層厚

観測点コード	AVS30 (m/s)	第一層 S波速度(m/s)	第一層厚 (m)	第二層 S波速度(m/s)
CHBH20	1909.1	1800	18	2100
TCGH17	1432.8	700	6	1450
IWTH27	1269.8	240	2	1500
SZOH24	1126.2	360	4	1200
TKYH13	1110.1	130	1	1500

のH/Vスペクトル比を予測し、ボーリングデータに基づく1次元地盤モデルによって推定される伝達関数と比較するなどしてその整合性を検証している。本研究では、地点補正が各地点の震動特性を表わすものとして妥当であるか、KiK-net観測点における地中-地表間の地震動伝達関数と比較することで検討を行う。

地点補正スペクトルの基準となる層を物理的に明確に規定することは難しい。そこで、表2に示す5地点の地点補正の平均値(図1の赤線)を岩盤サイトの地点補正 $c_r(T)$ とし、以下の式で基準化した各観測点の地点補正 $c'(T)$ と地震動伝達関数の比較を行う。

$$c'(T) = c_i(T) - c_r(T) \quad (2)$$

なお、岩盤サイトは、本研究で使用した4地震全てで地震動を観測した観測点のうち、微地形区分⁵⁾が山地に属し、地表から深さ30mまでの地盤の平均S波速度(AVS30)の値が1000m/s以上、かつ第一層が非常に硬いと推定されるか、第一層が充分薄く第二層が非常に硬いと推定される観測点を選定した(表2)。AVS30については各観測点のボーリングデータから松岡ら⁶⁾の算出方法に従い、以下の式(4)⁷⁾を用いて算出した。

$$AVS30 = 30 / \sum_{i=1}^n (H_i / V_{Si}) \quad (3)$$

ここで、 H_i は第*i*層の層厚(m)、 V_{Si} は第*i*層の平均S波速度(m/s)である。また、伝達関数 $H(f)$ は、以下の式で記録された加速度波形の全継続時間について算出した⁸⁾。

$$H(f) = \frac{S_{xy}(f)}{S_{xx}(f)} \quad (4)$$

ここで、 $S_{xx}(f)$ は地中における加速度波形のパワースペクトル、 $S_{xy}(f)$ は地中と地表加速度のクロススペクトルであり、バンド幅0.2HzのParzenウィンドウ⁹⁾で平滑化している。

KiK-net芳賀(TCGH16)は、本震で最大加速度(3成分合成値)1196.7cm/s²、計測震度6.5を観測した地点である。図2に示す通り、地点補正と伝達関数の周期特性は概ね一致している。このことから、周期特性を考慮した地盤増幅特性の推定に地点補正スペクトルは有効であると考えられる。

3. 全国を対象とした周期ごとの地盤増幅率のゾーニング

(1) 32地震の記録を用いた速度応答スペクトルの距離減衰式

前節の検討により、周期特性を考慮した地盤増幅特性の推定に地点補正スペクトルは有効であることが示された。

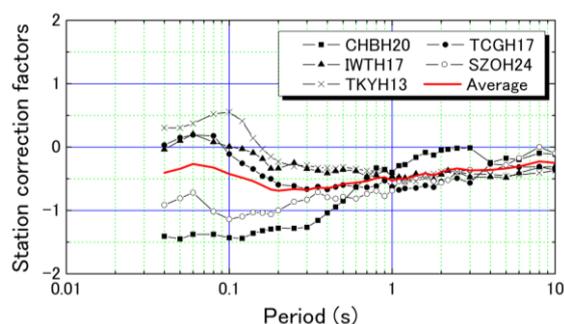


図1 岩盤サイトの平均地点補正スペクトル(赤線)

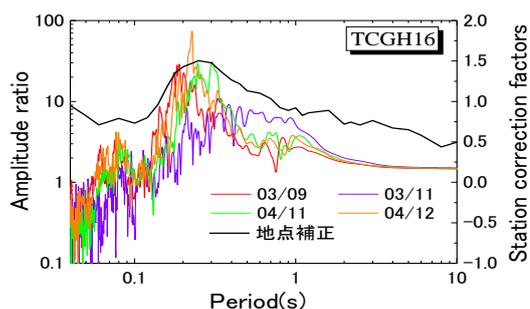


図2 KiK-net 芳賀における地点補正と伝達関数の比較

しかし、使用した地震記録は4地震のみであり、全国を対象とした周期ごとの地盤増幅率のゾーニングを行うには充分でないと考えられる。そこで、表3に示す32地震の地震記録を使用し、地点補正スペクトルを用いた地盤増幅特性の推定精度向上を目指す。

4地震での検証と同様に、最大加速度が5cm/s²以上を記録した計1699地点のK-NET、KiK-net観測点で得られた9734個の地震記録を以下の関数形を用いて回帰分析した。

$$\log_{10} y(T) = b_0(T) + b_1(T)M_w + b_2(T)r + b_3(T) \log_{10}(r + k(T)) + b_4(T)H + c_i(T) \quad (5)$$

使用した関数形は式(1)と同様であるが、 $k(T)$ については断層近傍での地震動強さの飽和現象を表す係数である¹⁰⁾。また、式(5)の通り、本研究ではモーメントマグニチュード(M_w)を使用して距離減衰式を構築している。そこで、本研究で使用した32地震のうち、 M_w が公表されていない地震に関しては以下の式(6)¹¹⁾で気象庁マグニチュード(M_J)から M_w に換算している。

$$M_w = 0.78M_J + 1.08 \quad (6)$$

(2) 地点補正とAVS30の関係

強震観測記録の地盤増幅特性がAVS30と相関が高い^{12),13)}ことが示されており、地点補正スペクトルとAVS30に相関が見られれば、地点補正を用いた周期ごとの地盤増幅率のゾーニングを行う上で、AVS30が説明変数となり得るものと考えられる。そこで、本研究では地点補正スペクトルと各観測点のAVS30の関係を検討した。その結果を図3に示す。なお、AVS30は各観測点のボーリングデータから、松岡ら⁷⁾の算出方法に従い、前述の式(4)を用いて算出している。

図3に示す通り、地点補正項の値とAVS30の関係についてはいずれの周期でもAVS30の値が大きくなるにつれて地点

表 3 本研究で用いた 32 地震の震源位置とモーメント
マグニチュード (*は換算値)

No	Date	Earthquake event	Mw
1	1997.03.26	鹿児島県北西部地震	6.0*
2	1997.05.13	鹿児島県北西部地震	5.9 *
3	2000.10.06	鳥取県西部地震	6.6
4	2000.10.31	三重県中部地震	5.4*
5	2001.03.24	芸予地震	6.9
6	2001.04.25	日向灘	5.4*
7	2003.05.26	宮城県沖の地震	7.0
8	2003.07.26	宮城県北部地震	6.2
9	2003.09.26	十勝沖地震	8.0
10	2004.09.05	紀伊半島南東沖地震	7.4 *
11	2004.10.23	新潟県中越地震・本震	6.5
12	2004.10.27	新潟県中越地震・余震	5.8
13	2004.11.29	釧路沖の地震	6.8
14	2004.12.14	留萌市庁南部の地震	5.9
15	2005.03.20	福岡県西方沖地震	6.6
16	2005.07.23	千葉県北西地震	5.8*
17	2005.08.16	宮城県沖の地震	7.1
18	2006.04.21	伊豆半島東方沖地震	5.6 *
19	2006.05.02	伊豆半島東方沖地震	5.1 *
20	2006.06.12	大分県西部	5.9 *
21	2006.08.31	東京湾	4.8 *
22	2007.03.25	能登半島地震	6.7
23	2007.07.16	新潟県中越沖地震	6.7
24	2008.05.08	茨城県沖の地震	6.9
25	2008.06.14	岩手・宮城内陸地震	6.9
26	2008.09.11	十勝沖地震	6.8
27	2009.08.11	駿河湾の地震	6.2
28	2010.02.27	沖縄本島近海	6.7 *
29	2011.03.09	東北地方太平洋沖地震・前震	7.3
30	2011.03.11	東北地方太平洋沖地震・本震	9.0
31	2011.04.11	東北地方太平洋沖地震誘発地震1	6.6
32	2011.04.12	東北地方太平洋沖地震誘発地震2	6.4

補正の値が小さくなっている。また、地点ごとの補正は±σの範囲に概ね収まっている。さらに、本研究の距離減衰式の標準偏差(地震間+地震内)を周期ごとに評価すると、周期が長くなるのに従って小さな値を示した。速度応答スペクトルの長周期成分はPGVに漸近する⁹⁾が、PGVの距離減衰式の標準偏差¹⁴⁾とほぼ同程度の値を示すことが分かった。これらのことから、地点補正を用いて周期ごとの地盤増幅率のゾーニングを行っていく上で、AVS30が説明変数となり得ることを示唆しているものと考えられる。

(3) 周期ごとの地盤増幅率のゾーニング

前節の結果を踏まえ、AVS30を説明変数として、地点補正を用いた周期ごとの地盤増幅率のゾーニングを行う。そこで本研究では、藤本・翠川¹⁴⁾を参考に、以下の関数形を使用して回帰分析した。

$$c_i(T) = a_0(T) - a_1(T) \cdot \log(AVS30) \quad (7)$$

地震ハザードステーション (J-SHIS) では、工学的基盤 (S波速度が400m/s) に対する最大速度の地盤増幅率を公開している¹¹⁾。そこで、本研究でもこれに従い、地盤増幅

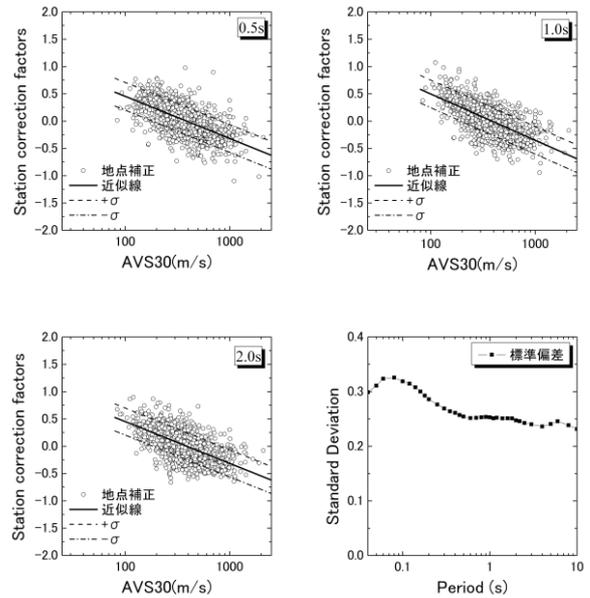


図 3 地点補正スペクトルと AVS30 の関係と
距離減衰式の標準偏差

率の基準層を工学的基盤とした。具体的には AVS30 が 400m/s のとき、地盤増幅率が 1 ($c_i(T) = 0$) となるように、式(7)の切片 $a_0(T)$ を調整した。

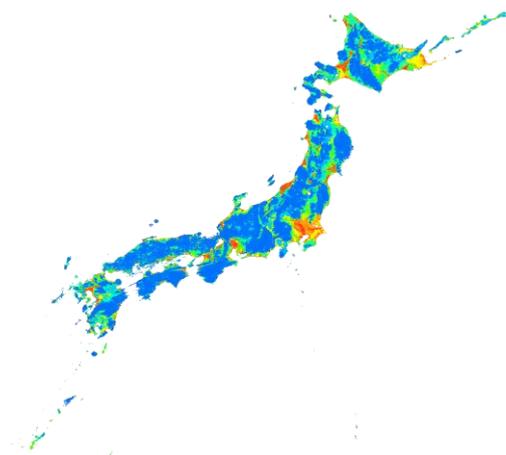
図4に、日本全国の周期ごとの地盤増幅率を、図5に周期ごとに式(7)の回帰線の比較を示す。なお、図4の地盤増幅率は、日本全国を約250m四方のメッシュで示している。図4によると、AVS30の値が小さい関東平野などでは周期1.0秒のときに揺れやすいことがわかる。一方、山地などの AVS30の値が大きい地点では、周期0.5秒のとき相対的に揺れやすい。また、周期2.0秒の回帰線が、PGVの回帰線¹⁴⁾と非常に近いことが分かる。これは最大速度には、周期2.0秒程度の成分が最も影響することを示唆しているものと思われる。

4. まとめ

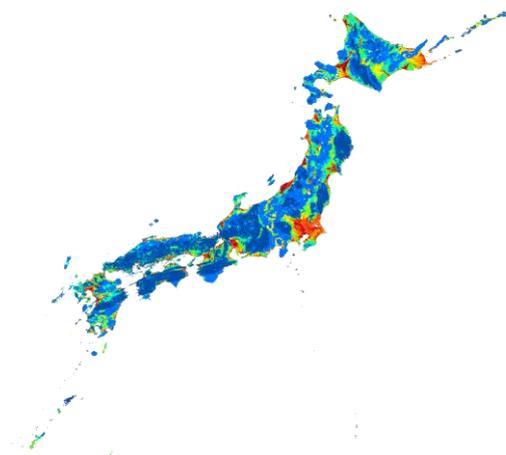
本研究では東北地方太平洋沖地震の本震、前震およびそれによって誘発されたといわれる 2 地震における K-NET, KiK-net 観測点の地震記録を使用して速度応答スペクトルの距離減衰式を構築し、それによって得られる地点補正スペクトルの検討を行った。

本研究で得られた地点補正を KiK-net 観測点の地中-地表間の伝達関数と比較したところ、概ね周期特性は一致していた。このことから、地点補正スペクトルは地震観測点の増幅特性を周期ごとに評価するのに有用であるものと考えられる。

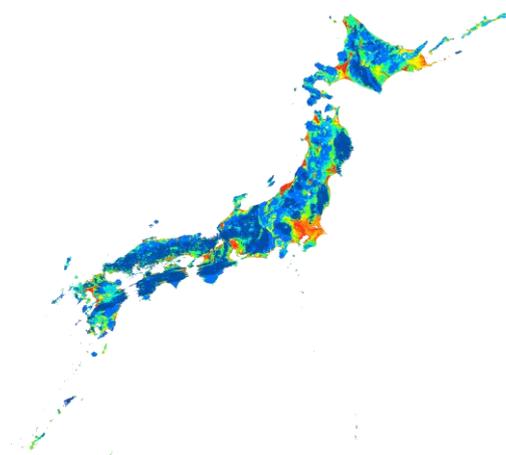
また、地点補正スペクトルと AVS30 の関係の評価したところ、いずれの周期でも AVS30 の値が大きくなるにつれて地点補正の値が小さくなる傾向が見られた。そこで AVS30 を説明変数として周期ごとの地盤増幅率のゾーニングを行った。その結果、AVS30 の値が小さい関東平野などでは、周期1.0秒のとき最も揺れやすいことがわかる。周期2.0秒の回帰線が、PGVの回帰線と良く一致していることが分かる。これは最大速度には、地震動の周期2.0秒程度の成分が最も影響することを示唆しているものと思われる。



(a) 周期 0.5 秒



(b) 周期 1.0 秒



(c) 周期 2.0 秒



図 4 日本全国の周期ごとの地盤増幅率

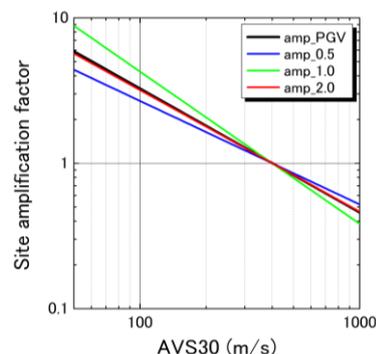


図 5 周期ごとの AVS30 に対する地盤増幅率の回帰線の比較

- 2) 山内洋志, 山崎文雄, 若松加寿江, K.T.Shabestari : 応答スペクトルの距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形・表層地質分類との関係, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.195-205, 2001.
- 3) Molas, G.L. and Yamazaki, F.: Attenuation of earthquake ground motion indices in Japan including deep focus event, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 85, pp. 1343-1358, 1995.
- 4) Yamazaki, F. and Ansary, M.A.: Horizontal-to-Vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 26, No. 7, pp. 671- 689, 1997.
- 5) 若松加寿江, 松岡昌志, 久保純子, 長谷川浩一, 杉浦正美 : 日本全国地形・地盤分類メッシュマップの構築, 土木学会論文集, No.759/I-67, pp.213-232,2004.
- 6) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎 : 日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均 S 波速度分布の推定, 土木学会論文集, No.794/I-72, pp.239-251, 2005.
- 7) 藤本一雄, 翠川三郎 : 日本全国を対象とした国土数値情報に基づく地盤の平均 S 波速度分布の推定, 日本地震工学会論文集, Vol.3, No.3, pp.13-27, 2003.
- 8) Lu, L., Yamazaki, F. and Katayama, T.: Soil amplification based on seismometer array and microtremor observations in Chiba, Japan, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 21, pp. 95-108, 1992.
- 9) 大崎順彦 : 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1996.
- 10) 司宏俊・翠川三郎 : 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第 523 号, pp.63-70, 1999.
- 11) 防災科学技術研究所:No.336 号「全国地震動予測地図」作成手法の検討 本編, 2009.
- 12) Joyner, W. B. and Fumal, T. E.: Use of Measured Shearwave Velocity for Predicting Geologic and Site Effects on Strong Ground Motion, Proc. 8th World Conference on Earthquake Engineering, Vol.2, pp.777-783, 1984.
- 13) Midorikawa, S., Matsuoka, M. and Sakugawa, K.: Site Effects on Strong-motion Records Observed during the 1987 Chiba-Ken-Toho-Ok, Japan Earthquake, Proc. 9th Japan Earthquake Engineering Symposium, Vol.3, pp.85-90, 1994.
- 14) 藤本一雄, 翠川三郎 : 近接観測点ペアの強震記録に基づく地盤増幅率と地盤の平均 S 波速度の関係, 日本地震工学会論文集, Vol. 6, No. 1, pp. 11-22, 2006.

参考文献

- 1) 松岡昌志, 翠川三郎 : 国土数値情報を利用した広域震度分布予測, 日本建築学会構造系報告集, No. 447, pp. 51-56, 1993.