

サイト増幅特性と震源スペクトルの震度増分への影響に関する検討*

西川 隼人^{*1}

Investigation on Effect of Site Amplification Effect and Source Spectra on Increment of JMA Seismic Intensity

Hayato NISHIKAWA^{*1}

^{*1} Faculty of Engineering, Department of Architecture and Civil Engineering

In this study, I investigated the influence of site amplification effect and source spectra on increment of seismic intensity for the purpose of obtaining basic information for accurately evaluating the increment of seismic intensity (dI). An evaluation formula for dI was obtained based on the relation between earthquake motion spectrum and amplification factor of earthquake motion index. Using the obtained evaluation formula, dI for crustal earthquake type, various magnitudes, site amplification effects was estimated. As a result of investigating the relation between the fundamental peak frequency of site amplification effects and dI, the frequency of maximum dI was shifted to the lower frequency range as magnitude increased.

Key Words : JMA seismic intensity, Amplification factor, Source spectra, Site amplification effect

1. 緒 言

最大地動加速度などの地震動指標の予測の際に地盤による増幅特性、いわゆる地盤増幅度を的確に評価することが重要であり、評価の方法として表層地盤の平均 S 波速度をパラメータとした経験式^{例えば(1)~(3)}が広く用いられている。一方、著者ら^{(4) (5)}は震源スペクトルやサイト増幅特性が最大地動加速度や最大地動速度の地盤増幅度に及ぼす影響を調べるために、理論的に地盤増幅度評価式を求めているが、計測震度の増幅特性を表す震度増分に対する検討は行っていない。一般的な地震動指標の 1 つである計測震度は地震動予測の対象となることから、その増幅特性である震度増分を正確に評価することは地震防災上極めて重要であり、評価の際に震源特性やサイト増幅特性が震度増分へ及ぼす影響を十分に把握する必要がある。

本論文では正確な震度増分の評価のための基本的な取り組みとして、著者が提案した地震動スペクトルと地盤増幅度の関係式に基づき、地震動スペクトルを構成する震源スペクトルのコーナー振動数やサイト増幅特性のピーク振動数などが震度増分の大小に及ぼす影響を調べた。この際、コーナー振動数と地震モーメントの関係式を介して、地震規模が震度増分に及ぼす影響を調べた。

2. 震度増分の評価式

2.1 震度増分の定義

本論文で検討対象とする震度増分 dI を次のように定義した。

$$dI = I_s - I_b = 2 \log_{10} A_{0s} - 2 \log_{10} A_{0b} \quad (1)$$

$$I_s = 2 \log_{10} A_{0s} + 0.94 \quad (2)$$

$$I_b = 2 \log_{10} A_{0b} + 0.94 \quad (3)$$

* 原稿受付 2019 年 3 月 29 日

^{*1} 工学部 建築土木工学科

E-mail: nishikawa@fukui-ut.ac.jp

I_s は地表の計測震度, I_b は解放地震基盤の計測震度, A_{0s} と A_{0b} は計測震度の計算に用いるフィルター (以降, 震度フィルターと呼ぶ) の処理を行った地表波と基盤波に継続時間 0.3 秒間を考慮した振幅である⁽⁶⁾.

震度フィルターによる処理を行った地震波の最大振幅と継続時間を考慮した振幅の相関が高い⁽⁷⁾ことから, 近似的に次式が成り立つものとする.

$$dI = I_s - I_b = 2 \log_{10} A_{fs} - 2 \log_{10} A_{fb} = 2 \log_{10} \frac{A_{fs}}{A_{fb}} \quad (4)$$

ここに A_{fs} は震度フィルターによる処理を行った地表波の最大振幅, A_{fb} は震度フィルターによる処理を行った解放地震基盤波の最大振幅である.

2.2 地震動スペクトルと震度増分の関係

著者⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾はパーセバルの定理と極値理論に基づき, ある地点の地表面と S 波速度=2~3km/s 程度の解放地震基盤における地震波の最大振幅の比, いわゆる地盤増幅度とフーリエスペクトルなどの関係式を導いている. 本研究でも, 著者ら⁽⁴⁾, ⁽⁵⁾の研究で求めた関係式をもとに, 式 (4) の A_{fs} と A_{fb} の比である地盤増幅度 F が次式で表されるものとする.

$$F = \frac{A_{fs}}{A_{fb}} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 G(f)^2 F_b(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 F_b(f)^2 df}} \quad (5)$$

$H(f)$ は震度フィルター, $G(f)$ は対象地点のサイト増幅特性, $F_b(f)$ は解放地震基盤波のフーリエスペクトル, f は振動数 (Hz) である.

$F_b(f)$ は Boore の研究⁽⁸⁾に従い, 次式で表わされるものとする.

$$F_b(f) = CM_0 \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\pi \gamma R}{Q_s V_s}\right) S(f) \quad (6)$$

$F_b(f)$ は S 波のみから成り立つものとする. 式 (6) の C はラディエーションパターンなどをパラメータとする係数, R は震源距離であり, $1/R$ は幾何減衰に対応する. ラディエーションパターンは地表, 基盤ともに全方位の平均値を考えた. M_0 は地震モーメント, 指数項は非弾性減衰に対応し, Q_s は S 波の減衰の程度を表すパラメータ, V_s は地震発生層の S 波伝播速度, $S(f)$ は加速度震源スペクトルである.

同一地点の地表波のスペクトル $H(f)F_b(f)G(f)$ と基盤波のスペクトル $H(f)F_b(f)$ の C , M_0 , R は同じ値であるので, 両スペクトルの比をとることにより, これらはキャンセルされる. また, 式 (6) の指数項の Q_s は一般的に $Q_0 \times f^\gamma$ (Q_0 は定数) と表わされる. 既往研究⁽⁹⁾で指摘されているように, γ が 1 前後の値になることが多いことから, $\gamma=1$ と仮定して, 式 (6) の指数項を振動数によらない定数と考える. これにより, 式 (5) は以下のように表すことができる.

$$F = \frac{A_{fs}}{A_{fb}} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 G(f)^2 S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \quad (7)$$

式 (7) を式 (4) に代入すると次式のようになり, 地震動スペクトルの無限積分値と震度増分の関係が得られる.

$$dI = 2 \log_{10} \frac{A_{fs}}{A_{fb}} = \log_{10} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 G(f)^2 S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df} \right) \quad (8)$$

式 (7), (8) に含まれる加速度震源スペクトルは次の ω^{-2} 則に従う式に高域遮断フィルターを考慮したものとした。

$$S(f) = \frac{4\pi^2 f_c^2 f^2}{f_c^2 + f^2} \frac{f_{max}}{\sqrt{f_{max}^2 + f^2}} \quad (9)$$

右辺第 1 項が ω^{-2} 則モデル, 第 2 項が高域遮断フィルターに対応する。 f_c はコーナー振動数 (Hz), f_{max} は高域遮断振動数 (Hz) である。

サイト増幅特性 $G(f)$ は著者らの研究⁽⁵⁾ で用いた単一のピークを有する関数を合成したものを用いた。合成したサイト増幅特性は次式で表される。

$$G(f) = \sqrt{1 + \sum_{i=1}^{N_g} G_i(f)^2} \quad (10)$$

N_g は $G_i(f)$ の数である。また, $G_i(f)$ は次式で表される。

$$G_i(f) = \sqrt{\frac{4\alpha_i h_i^2 f_i^2 f^2}{(f^2 - f_i^2)^2 + 4h_i^2 f_i^2 f^2}} \quad (11)$$

α_i は振幅を調整する係数, f_i はサイト増幅特性のピーク振動数 (Hz), h_i はピーク振幅の形状を規定する係数である。式 (10), (11) を式 (8) に代入すると震度増分 dI は次式で表すことができる。

$$dI = 2 \log_{10} \frac{A_{fs}}{A_{fb}} = \log_{10} \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} \{H(f)^2 + H(f)^2 G_1(f)^2 + \dots + H(f)^2 G_{N_g}(f)^2\} S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df} \right) \quad (12)$$

ここで $G_i(f)$ に対する地盤増幅度 F_i を次のように定義する。

$$F_i = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 G_i(f)^2 S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \quad (13)$$

式 (13) を式 (12) に代入すると, 震度増分 dI は以下のように表すことができる。

$$dI = 2 \log_{10} F = \log_{10} (1 + F_1^2 + \dots + F_{N_g}^2) \quad (14)$$

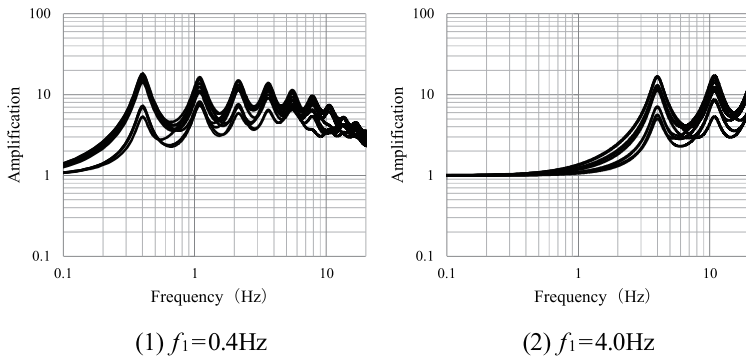


Fig. 1 Site amplification effect

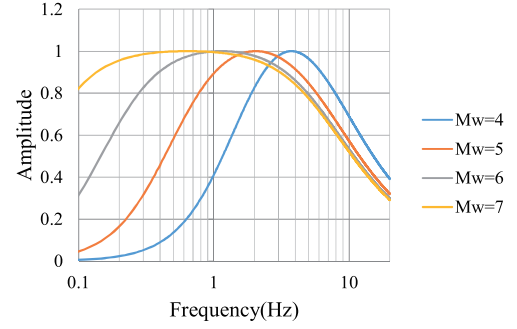


Fig. 2 Normalized acceleration source spectrum

計測震度の算出に用いる震度フィルター $H(f)$ はハイパスフィルター、ローパスフィルター、振動数の平方根に反比例する関数の積で表される⁶⁾複雑なものである。震度増分を計算する式(14)の解を解析的に求めるために、震度フィルターを速度応答の伝達関数をもとに求めた次式で近似した。

$$H(f) = \frac{\beta f}{f_p^2 + f^2} \quad (15)$$

f_p は速度応答伝達関数のピーク振動数で0.62Hz、 β は振幅調整のための定数であり、既往研究⁽¹⁰⁾と同じく1.55Hzとした。式(15)は ω^{-2} 則に従う速度震源スペクトルと相似の形となる。

震度フィルターを式(15)によって近似することにより、式(14)を解析的に求めることが可能であるが、それでも途中計算が非常に煩雑となるため、今回は地震の規模が大きい場合を想定することにより、簡便に式(14)の解析解を求めることとする。まず、地震の規模が大きい場合、式(9)で表される震源スペクトルの第1項は概ねフラットになる。また、第2項の高域遮断フィルターによる高振動数の振幅低減効果は地震規模が大きくなると小さくなることから、式(9)の震源スペクトルを定数と考える。この場合の式(13)の解は次式のようにシンプルな式となる。

$$F_i = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 G_i(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 df}} = \sqrt{\frac{4\alpha_i f_p h_i f_i^2 (f_i + f_c h_i)}{(f_i^2 + 2f_p h_i f_i + f_p^2)^2}} \quad (16)$$

式(16)を式(14)に代入することにより、震度増分の解析解が得られる。

3. 震度増分の計算条件

3.1 サイト増幅特性の計算条件

サイト増幅特性の震度増分への影響を調べるために、式(10)、(11)によって計算した1次から20次までピークを有するサイト増幅特性 $G(f)$ を震度増分の計算に用いた。

サイト増幅特性のパラメータの h_i は0.1に固定し、 α_i は以下の式により求めた。

$$\alpha_i = r_i \exp\left(-\frac{\pi f_i}{4Q_0 f_1}\right) \quad (17)$$

i はモード次数、 r_i は $20/i \sim 400/i$ の範囲で変動する一様乱数である。 Q_0 は減衰の程度を表すパラメータであり、20とした。

また、サイト増幅特性の f_i は次式により計算した.

$$f_i = \exp\left\{(i-1)^{-0.5-0.03(i-1)}\right\} f_{i-1} \quad (18)$$

Fig. 1 に震度増分の評価に用いたサイト増幅特性 $G(f)$ の例 (1 次ピーク振動数 $f_1=0.4\text{Hz}$, 4.0Hz) を示す.

続いて、 $G(f)$ による震度増分の違いを調べるために、 $G(f)$ の 1 次ピーク振動数 f_1 と増幅率 α_i を変化させて計算を行った. f_1 は $0.1\sim 20\text{Hz}$ を対象に対数軸で等分して 501 個求めるとともに、 α_i を 10 ケース変えて $G(f)$ を計算することにより、合計で 5010 個の震度増分を求めた.

3.2 震源スペクトルの計算条件

地震の規模による震度増分 dI の変化を調べるために、 M_w を $4.0\sim 7.0$ まで 1.0 刻みで変化させ、対応するコーナー振動数 f_c を用いて震度増分 dI を計算した. ただし、同じ M_w でも地震のタイプによって M_w と f_c の関係が異なる^{(11)~(13)}ことから、本研究では地殻内地震を想定して f_c を求め、震度増分を計算した. f_c の計算には以下に示す地震モーメント M_0 とモーメントマグニチュード M_w の関係式⁽¹⁴⁾、および短周期レベル A ⁽¹⁵⁾と地震モーメント M_0 、コーナー振動数 f_c との関係式を用いた.

$$\log_{10} M_0 = 1.5M_w + 16.1 \quad (19)$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{A}{M_0}} \quad (20)$$

$$A = 4.87 \times 10^{16} \times M_0^{1/3} \quad (21)$$

また、式 (14) の計算に必要な f_{\max} は既往研究⁽¹⁶⁾を参考に 6Hz とした. 解析に用いた加速度震源スペクトルを最大値で正規化したものは Fig. 2 のとおりである.

4. 計算結果と考察

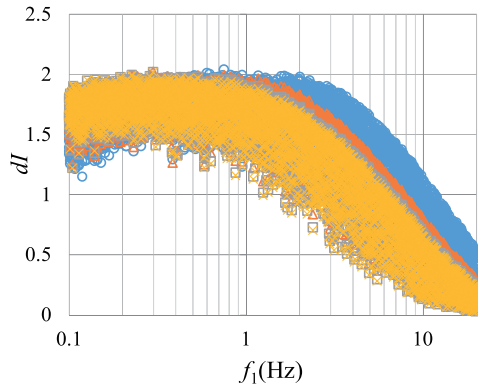
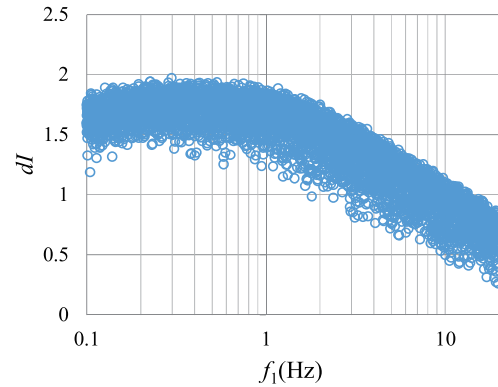
2 章で求めた震度増分の評価式を用い、3 章で設定したマグニチュードやサイト増幅特性が震度増分に及ぼす影響を調べた. 式 (14) の無限積分の計算には二重指数関数型数値積分のプログラム⁽¹⁷⁾を利用した.

Fig. 3 に M_w ごとの 1 次ピーク振動数 f_1 と震度増分 dI の対応を示す. f_1 と dI の対応を見ると M_w が大きくなるほど dI が全体的に低振動数側に移動しており、 dI が最大となる振動数も低振動数側にシフトしているが、 $M_w=6$ と 7 の場合には両者の f_1 と dI の関係に大きな違いが見られない. M_w が大きくなるほど dI が全体的に低振動数側にシフトするのは、Fig. 2 のように M_w の増大に伴い、加速度震源スペクトルのコーナー振動数が低振動数側にシフトして、低振動数側の振幅が相対的に大きくなるためである. また、 $M_w=6$ と 7 の場合に f_1 と dI の関係に大きな違いがない要因として、加速度震源スペクトルの低振動数成分が震度フィルターによって低減されることが考えられる.

次に地震の規模が大きい場合を想定して導いた式 (16) を地盤増幅度 F_i と定義し、式 (14) に代入して求めた dI と f_1 の対応を Fig. 4 に示す. Fig. 3 の $M_w=6, 7$ の f_1 と dI の関係と比較すると、 1Hz よりも高振動数の dI の低下は緩やかであるが、 1Hz よりも低振動数の dI が大きな領域では両者に大きな違いは見られなかった. 以上の結果から、規模の大きな地震を想定して震源スペクトルを一定値として式を簡略化した場合も、 1Hz よりも低振動数の dI を精度良く評価できることが明らかになった.

5. 結 言

本論文では正確な震度増分の予測のための基本的な検討として、著者らが提案した地震動スペクトルと地盤増幅度の関係式に基づき、地震動スペクトルを構成する震源スペクトルのコーナー振動数やサイト増幅特性の 1 次ピーク振動数が震度増分に及ぼす影響を考察した. サイト増幅特性の 1 次ピーク振動数と震度増分の関係の特徴


 Fig. 3 Relation between f_1 and dI evaluated from formula (14)

 Fig. 4 Relation between f_1 and dI for large earthquake

を見ると M_w が大きくなるほど dI が最大となる振動数が低振動数側にシフトする傾向が見られたが、 $M_w=6$ と 7 では f_1 と dI の関係に大きな違いが見られなかった。 M_w の増大に伴い、加速度震源スペクトルのコーナー振動数が低振動数側にシフトするため、 f_1 が低振動数の場合に dI が大きくなるものの、 M_w がある値に達すると加速度震源スペクトルの低振動数成分が震度フィルターによって低減されるため、 f_1 と dI の関係に変化がなくなると考えられる。

謝 辞

本研究の遂行にあたって、金沢大学の宮島昌克先生、池本敏和先生、早稲田大学の安井譲先生に貴重なご意見を頂きました。また、本研究は JSPS 科研費 JP18H01677（研究代表者：宮島昌克）の助成を受けたものです。記して、御礼申し上げます。

文 献

- (1) 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度と地盤の平均 S 波速度の関係”, 日本地震工学会論文集, 第 6 巻, 第 1 号(2006), pp.11-22.
- (2) 末富岩雄, 石田栄介, 磯山龍二, 後藤洋三, “地盤の平均 S 波速度による地震動強度指標の非線形増幅度評価法について”, 土木学会地震工学論文集, Vol.27(2003), pp.122-129.
- (3) 紺野克昭, 鈴木貴博, 鎌田泰広, 長尾 毅, “横浜市高密度強震ネットワーク観測点における微動を用いた地盤の平均 S 波速度の推定”, 土木学会論文集 A, 第 63 巻, 第 4 号(2007), pp.639-654.
- (4) 西川隼人, 宮島昌克, “地震動スペクトルのパラメータによる地盤増幅度の表現と地震規模依存性の評価”, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第 66 巻, 第 1 号(2010), pp.20-29.
- (5) 西川隼人, 宮島昌克, “合成したサイト増幅特性による地盤増幅度評価式の検討”, 日本地震工学会論文集, 第 15 巻, 第 7 号(2015), pp.7_180-7_193.
- (6) 気象庁, “計測震度の算出方法, http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/kaisetsu/calc_sindo.htm”, (参照日 2018 年 8 月 14 日).
- (7) 西川隼人, 宮島昌克, “2011 年東北地方太平洋沖地震における最大加速度, 計測震度と地震動スペクトルの関係”, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号(2012), pp.4_94-4_103.
- (8) Boore, D. M., “Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra”, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.73(1983), pp.1865-1894.
- (9) 中村亮一, “伝播経路の 3 次元減衰構造と強震動”, 第 38 回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会(2010), pp.23-32.
- (10) 西川隼人, 池本敏和, 宮島昌克, “震度増分に及ぼすサイト増幅特性と震源スペクトルの影響に関する基本的考察”, 第 38 回土木学会地震工学研究発表会, 講演番号 A22-1363(2018).
- (11) 川瀬 博, 松尾秀典, “K-NET, KiK-net, JMA 震度計観測網による強震記録から分離したサイト増幅特性と S 波速度構造との対応”, 日本地震工学会論文集, 第 4 巻, 第 4 号(2004), pp.126-145.
- (12) 佐藤智美, “中小地震の応力降下量の断層タイプ・震源深さ依存性及び地域性に関する研究”, 土木学会地震工

学論文集, 論文番号 No. 48(2003).

- (13) 仲野健一, 川瀬 博, 松島信一, “スペクトルインバージョン手法に基づく強震動特性の統計的性質に関する研究 その2 分離した特性に対する詳細分析”, 日本地震工学会論文集, 第15巻, 第1号(2015), pp. 38-59.
- (14) Hanks, T., and Kanamori, H., “*A moment magnitude scale*”, *J. Geophys. Res.*, Vol.84, No. B5(1979), pp.2348-2350.
- (15) 壇 一男, 佐藤俊明, “断層の非一様すべり破壊を考慮した半経験的波形合成法による強震動予測”, 日本建築学会構造系論文集, 第63巻, 第509号(1998), pp.49-60.
- (16) 鶴来雅人, 香川敬生, 岡崎 敦, 羽田浩二, 入倉孝次郎, “強震動予測のための高域遮断フィルターに関する研究 1995年兵庫県南部地震の観測記録に基づく検討”, 日本地震工学会論文集, 第6巻, 第4号(2006), pp.94-112.
- (17) Ooura's Mathematical Software Packages, “<http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~ooura/index-j.html>, (参照日 2018年8月16日).

(2019年4月26日受理)