

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

西川 隼人¹・池本 敏和²・宮島 昌克³

¹ 正会員 福井工業大学工学部建築土木工学科 准教授 (〒910-8505 福井県福井市学園3丁目6番1号)
E-mail: nishikawa@fukui-ut.ac.jp

² 正会員 金沢大学理工研究域地球社会基盤学類 講師 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: tikemoto@se.kanazawa-u.ac.jp

³ 正会員 金沢大学理工研究域地球社会基盤学類 教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

本研究では震度増分を精度良く評価するための基礎的な情報を得ることを目的として、震源スペクトルやサイト増幅特性の震度増分への影響を調べた。まず、地震動スペクトルと地盤増幅度の関係式に基づき、震度増分の評価式を求めた。続いて、得られた評価式を用いて、3つの地震タイプ、様々なマグニチュード、 f_{max} 、サイト増幅特性に対する震度増分を計算した。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を調べた結果、3つの地震タイプとも 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した。また、いずれの地震タイプでも M_w の増大につれて dI が一定の値に収束する傾向が見られた。

Key Words: JMA seismic intensity, amplification factor, source spectrum, site effect

1. 序論

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)~6)}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が多いことから、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と考える。

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、著者らが提案してき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高域遮断振動数 f_{max} 、および、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。また、地震のタイプによって同じ地震規模でもコーナー振動数が異なることから、地震タイプの違いが震度増分に及ぼす影響を考察した。

2. 震度増分評価式

(1) 震度増分の定義

本論文で検討対象とする震度増分 dI を次のように定義する。

$$dI = I_s - I_b = 2\log A_{s0} - 2\log A_{b0} \quad (1)$$

$$I_s = 2\log A_{s0} + 0.94 \quad (2)$$

$$I_b = 2\log A_{b0} + 0.94 \quad (3)$$

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_0 と A_{b0} 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。

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考えられる。

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

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基盤波の最大振幅である。

(2) 地震動スペクトルと震度増分の関係

著者ら⁴⁾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が次式で表わされることを導くとともに, 模擬地震波や観測地震波においても関係式が概ね成り立つことを示している。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⁷⁾に従い, 次式で表わされるものとする。

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

$F_b(f)$ 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, 指数項は内部減衰に対応し, 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 $Q_0 \times f(Q_0$ は定数)と表わされるが, ここでは $\gamma=1$ と仮定することにより, 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。

$$\begin{aligned} dI &= 2\log \frac{A_{fs}}{A_{fb}} = 2\log F \\ &= \log \left(\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 G(f)^2 S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

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。

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

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, f_{max} は高域遮断振動数である。

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。

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

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

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

ここに 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, h_i はピーク振幅の形状を規定する係数である。

式(7)に式(10)を代入すると次のようになる。

$$\begin{aligned} F &= \frac{A_{fs}}{A_{fb}} = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 \{1 + \sum_{i=1}^{N_g} G_i^2(f)\} S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \\ &= \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 \{1 + G_1^2(f) + \dots + G_{N_g}^2(f)\} S(f)^2 df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \\ &= \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 \{S(f)^2 + \dots + G_{N_g}^2(f) S(f)^2\} df}{\int_{-\infty}^{\infty} H(f)^2 S(f)^2 df}} \end{aligned} \quad (12)$$

ここに $G(f)$ に対する地盤増幅度 F_i を次のように定義する。

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

また、式(13)を式(12)に代入すると、以下のようになる。

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

(3) 震度フィルターの近似

計測震度の算出に用いる震度フィルター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⁹⁾複雑なものである。本論文では篠⁹⁾と同じく、震度フィルターを以下の速度応答の伝達関数で近似して検討を行う。

$$H(f) = \sqrt{\frac{\beta f^2}{(f_p^2 - f^2)^2 + 4h^2 f_p^2 f^2}} \quad (15)$$

h は減衰定数、 f_p は速度応答伝達関数のピーク振動数、 β は振幅調整のための定数である。 $h=1$ とすると次式のように、 $\omega=2$ 則に従う速度震源スペクトルと相似の形となる。

$$H(f) = \frac{\sqrt{\beta} f}{f_p^2 + f^2} \quad (16)$$

f_p を震度フィルターのピーク振動数=0.62Hz とし、地震観測記録を用いて、気象庁の計測震度と式(16)を震度フィルターとした場合の計測震度（速度応答震度）の誤差二乗和が最小となる β を求めた。図-1に震度フィルターと誤差二乗和が最小だった場合（ $\beta=2.4$ ）の式(16)、図-2に気象庁計測震度と速度応答震度の比較結果を示す。図-2は $M_{JMA}=6\sim9$ の15（地殻内地震7、プレート境界地震1、プレート内地震7）の地震で得られた K-NET、KiK-net の地震観測記録 10573 個から計算した。計測震度の値は水平動2成分から計算したものである。図-2を見るとばらつきがあるものの、気象庁計測震度と速度応答震度がよく対応していることが分かる。

3. 震度増分の計算

2章で求めた震度増分の評価式を用い、マグニチュードや f_{max} 、サイト増幅特性、地震タイプなどが震度増分に及ぼす影響を調べた。なお、式(8)の無限積分の計算

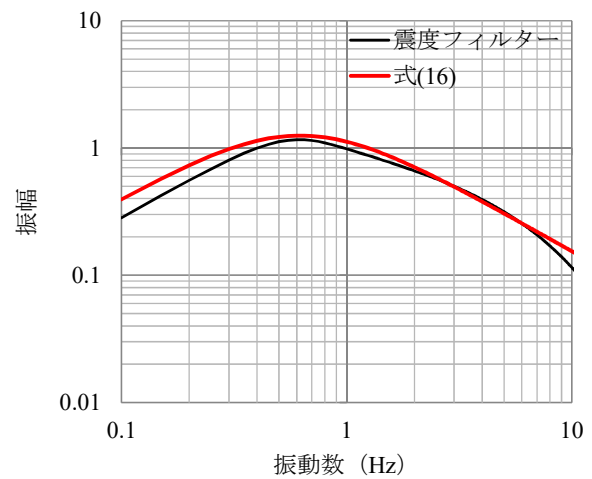


図-1 震度フィルターと式(16)の対応

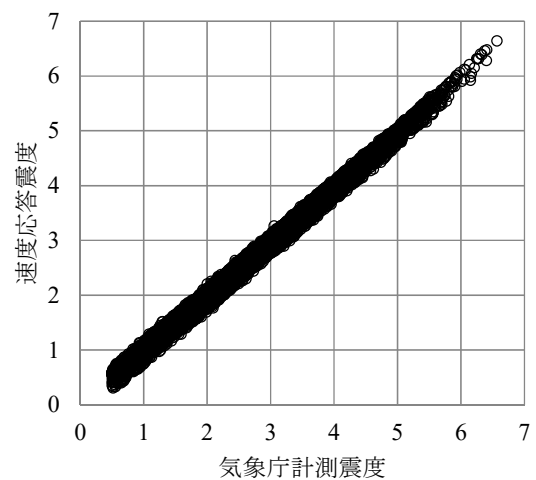


図-2 気象庁計測震度と速度応答震度の対応

には二重指数関数型数値積分のプログラム¹⁰⁾を利用した。

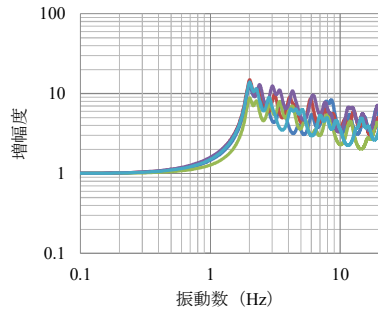
(1) サイト増幅特性の計算条件

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 $G(f)$ に対する震度増分を式(8)により求めた。図-3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 $f_1=2\text{Hz}$, 5Hz ）を示す。サイト増幅特性のパラメータの α_i は以下の式により求めた。

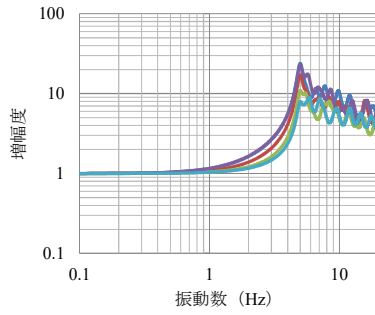
$$\alpha_i = \alpha_0 i \quad (17)$$

i はモード次数、 α_0 は 80~800 の範囲で変動する乱数である。

$G(f)$ 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 を変化させて計算を行った。 f_1 は 0.1~20Hz を対象に対数軸で等分して 501 個求めるとともに、 α を 5 ケース変えて震度増分を計算すること



(1) $f_1=2\text{Hz}$



(2) $f_1=5\text{Hz}$

図-3 サイト増幅特性

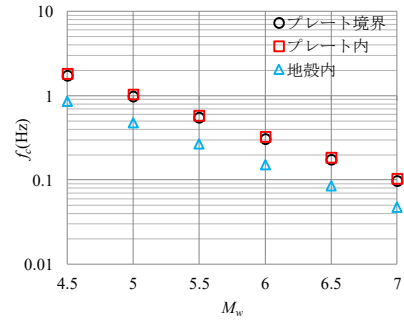


図-4 M_w とコーナー振動数 f_c

により、合計で2505個の震度増分を求めた。

(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 dl の変化を調べるために、 M_w を4.5～7.0まで0.5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 dl 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), 12), 13)}ことから、プレート境界、プレート内地震、地殻内地震に対する 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。

$$\log M_0 = 1.5 M_w + 16.1 \quad (18)$$

$$A = 4\pi^2 f_c^2 M_0 \quad (19)$$

$$A = 2.05 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (20)$$

$$A = 2.29 \times 10^{17} \times M_0^{1/3} \quad (21)$$

$$A = 4.87 \times 10^{16} \times M_0^{1/3} \quad (22)$$

式(20)がプレート境界地震、式(21)がプレート内地震、式(22)が地殻内地震の短周期レベルの関係式¹⁵⁾に対応する。計算に必要な f_{max} は6Hz、10Hzの2ケースを考えた。図-4に式(20)～(22)によって求めた M_w と f_c の関係を示す。図-4から明らかなように、プレート境界地震とプレート内地震では f_c に大きな違いがなく、また、地殻内地震の f_c が他の2つのタイプの地震に比べて小さい。

4. 計算結果と考察

図-5～図-10に地震タイプ、 M_w ごとの1次ピーク振動数 f_1 と震度増分 dl の対応を示す。まず、 f_1 と dl の関係の特徴を見ると、いずれの地震タイプでも M_w が大きくなるほど dl が最大となる振動数が低振動数側にシフトしている。これは 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。地殻内地震では $M_w=4.5$ の場合、1～2Hzで dl が相対的に大きく、プレート境界、プレート内地震では f_1 が2～3Hzで dl が大きい傾向が見られるが、 $M_w=7.0$ の場合はいずれの地震タイプでも1Hz付近で dl が最大となる。また、1Hz付近を境に M_w と dl の関係に違いがあり、1Hzよりも高振動数側では M_w の増大に伴い dl が低下する傾向にあるが、1Hzよりも低振動数側では dl が大きくなる傾向が見られた。

次に地震タイプごとに M_w による dl の変化を見るために、 $M_w=7.0$ の dl と $M_w=4.5\sim 6.5$ の dl の対応を調べた(図-11)。図-11を見ると地震タイプにより傾向が異なるものの、 M_w が大きくなるほど $M_w=7.0$ の dl との対応が良くなっており、ほぼ1対1で対応している。

続いて、 f_{max} が dl に及ぼす影響を調べるために、 f_{max} が6Hz、10Hzで M_w が同じ場合の dl の差 (ddl)を求めた結果を図-12に示す。同図を見ると f_1 が1Hzよりも低振動数側では ddl がフラットな傾向を示しているが、1～10Hzでは f_1 が大きいほど ddl が小さくなっている。これは高振動数側では高域遮断フィルターの影響により、地震動スペクトルの振幅が低減されるためと考えられる。

M_w による ddl の変化を見ると、 f_1 によっては M_w が大きくなるほど ddl が小さくなっている。これは M_w が大きくなると地震動スペクトルの低振動数成分が相対的に大きくなり、高域遮断フィルターの影響が大きい高振動数成分の ddl への寄与が小さくなるためと推測される。

5. まとめ

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率の関係式に基づき、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高域遮断振動数 f_{max} 、および、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。以下に本研究で得られた知見

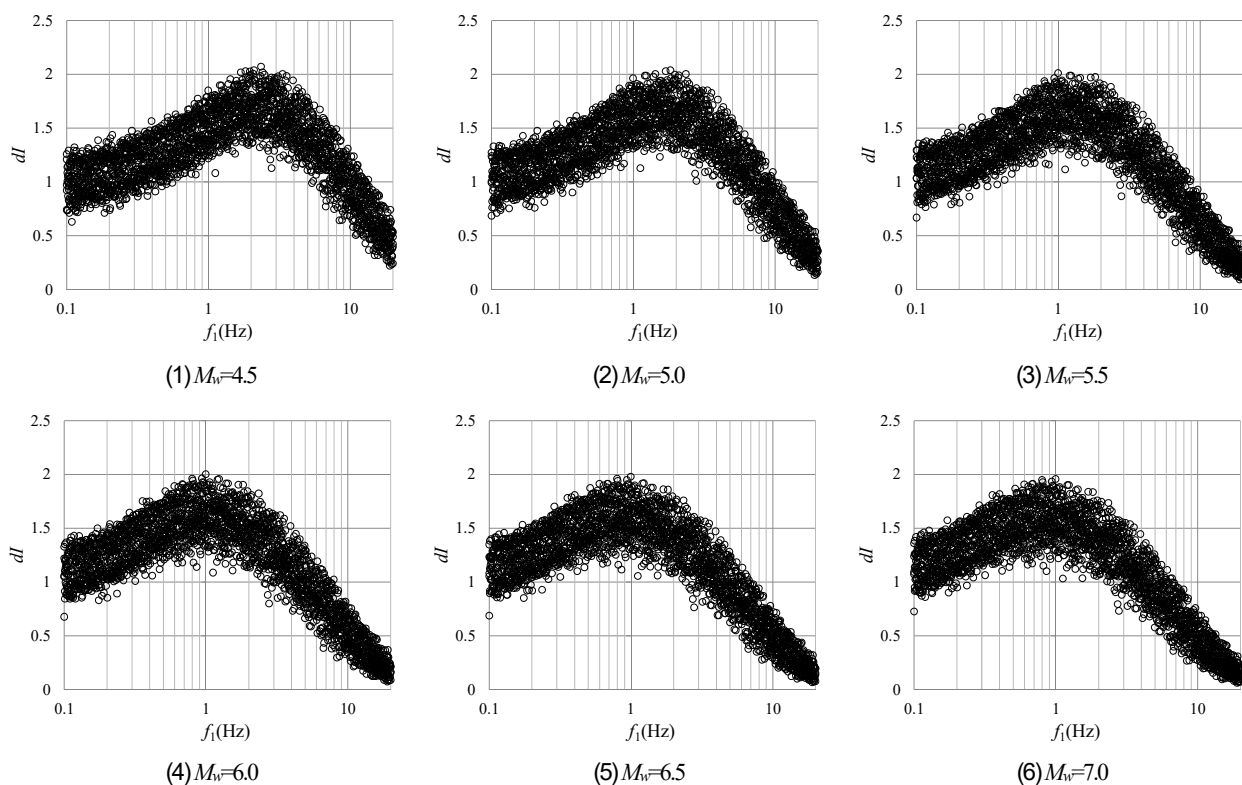


図-5 1次ピーク振動数 f_1 と式(8)による震度増分 dI の対応 (プレート境界地震, $f_{max}=6\text{Hz}$)

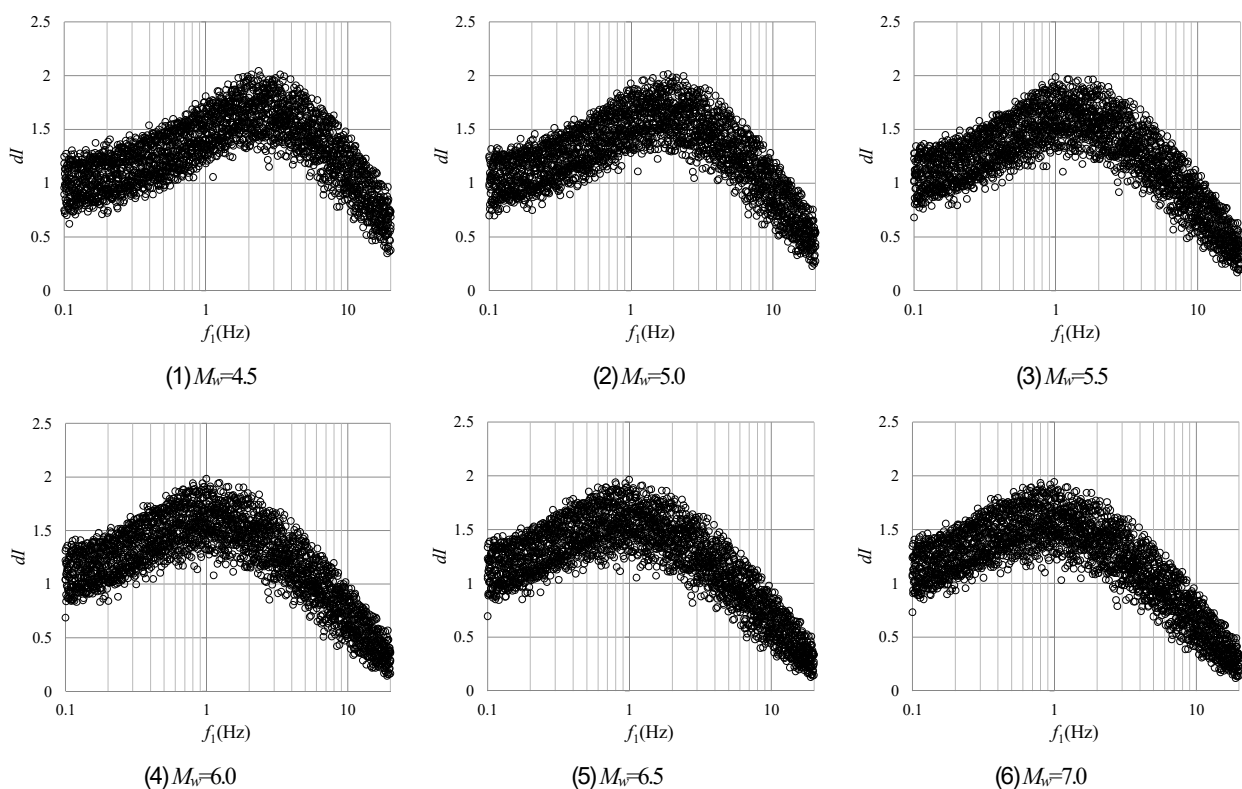


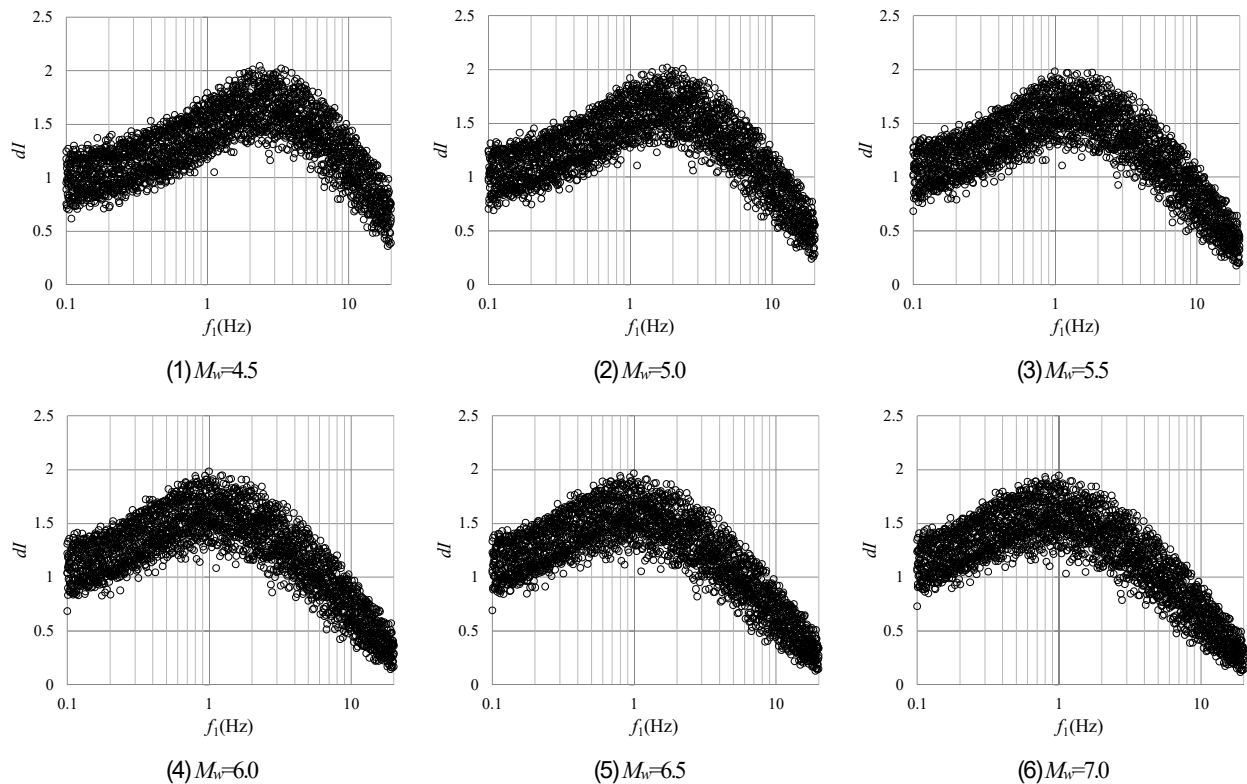
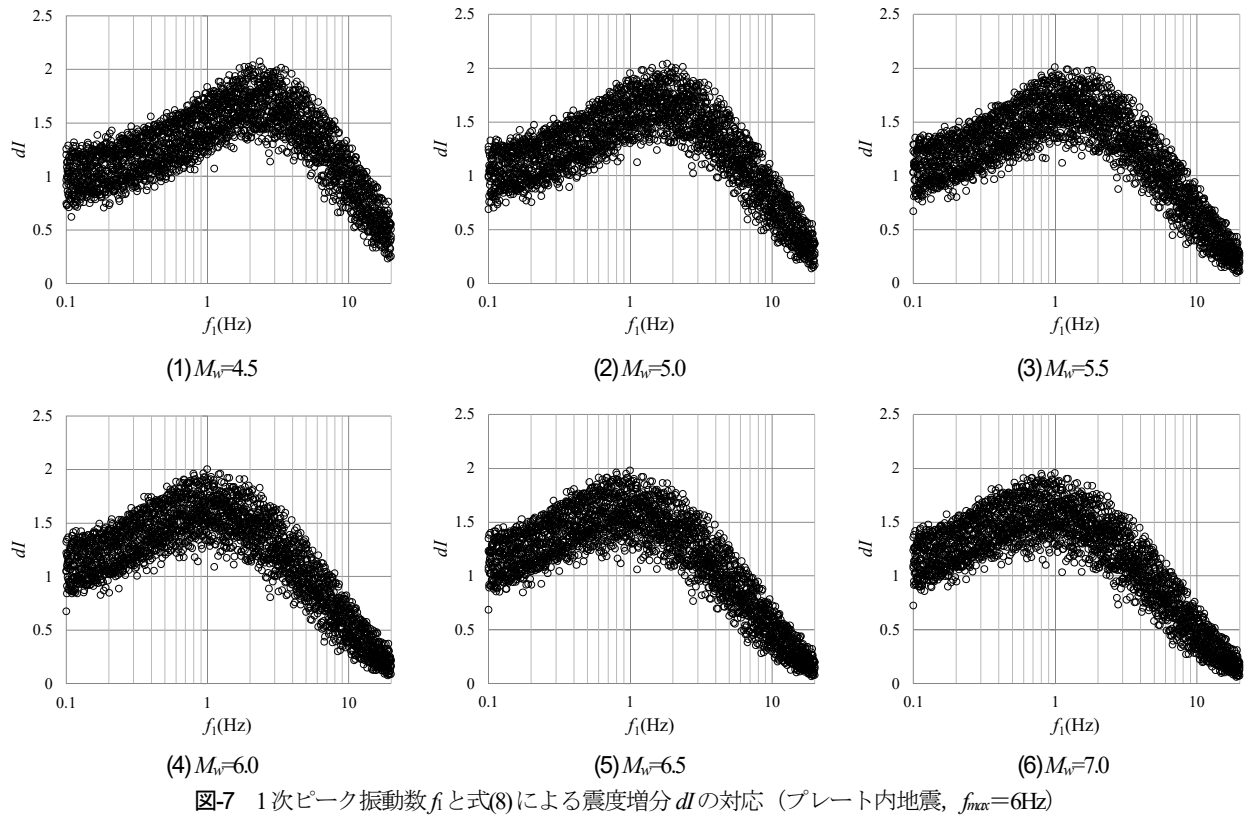
図-6 1次ピーク振動数 f_1 と式(8)による震度増分 dI の対応 (プレート境界地震, $f_{max}=10\text{Hz}$)

をまとめる。

- (1) 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を見ると3つの地震タイプとも 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した。これは 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である。

- (2) サイト増幅特性の1次ピーク振動数が1Hz付近を境に M_w と dI の対応に違いがあり、1Hzよりも高振動数側では M_w の増大に伴い dI が低下する傾向にある



が、1Hz よりも低振動数では dl が大きくなる傾向が見られた。

- (3) いずれの地震タイプでも M_w が大きくなるほど dl の変化が小さくなり、一定の値に収束する傾向が見られた。これは計測震度の算出に用いるフィルターに

よる地震動振幅の低減効果に起因すると考えられる。

- (4) f_{max} が dl に及ぼす影響を調べるために、 f_{max} が 6Hz, 10Hz を対象に M_w が同じ場合の dl の差 (ddl) を求めた。その結果、1Hz よりも低振動数では ddl がフラットな傾向が見られるが、1~10Hz では f_1 が大き

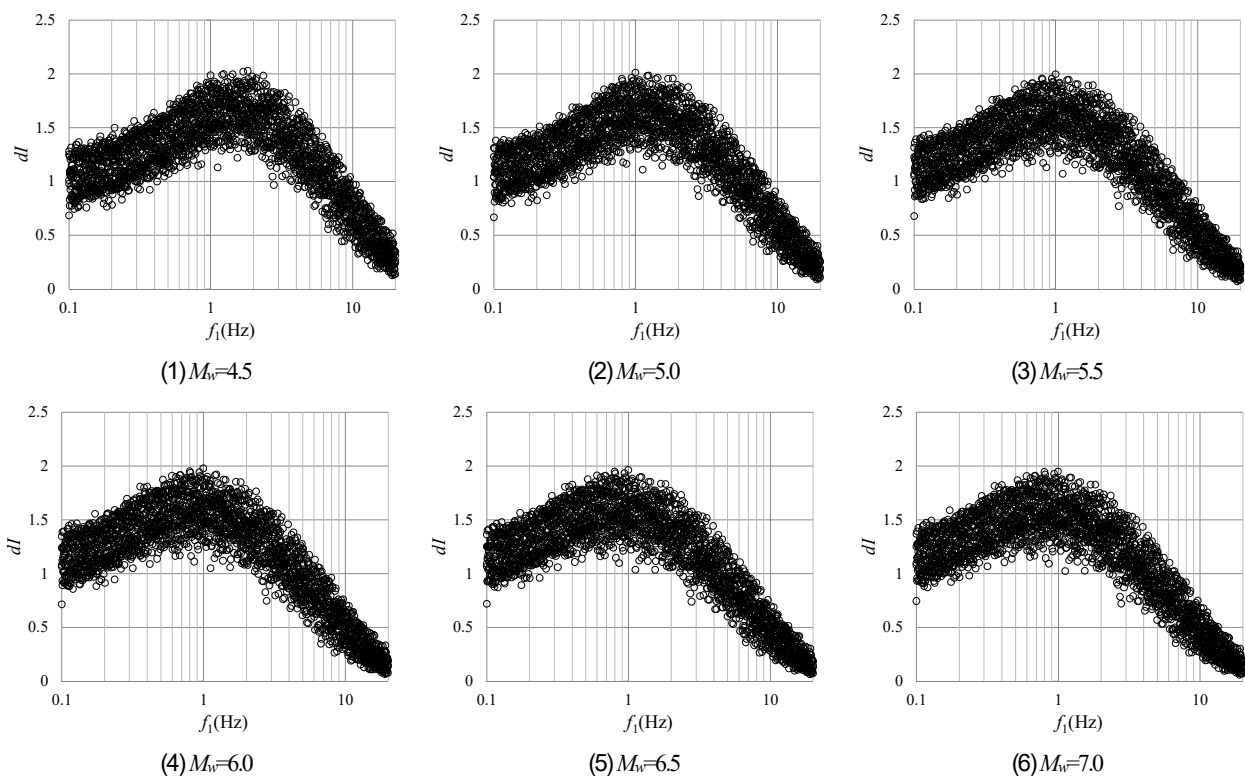


図-9 1次ピーク振動数 f_1 と式(8)による震度増分 dI の対応（地殻内地震， $f_{max}=6\text{Hz}$ ）

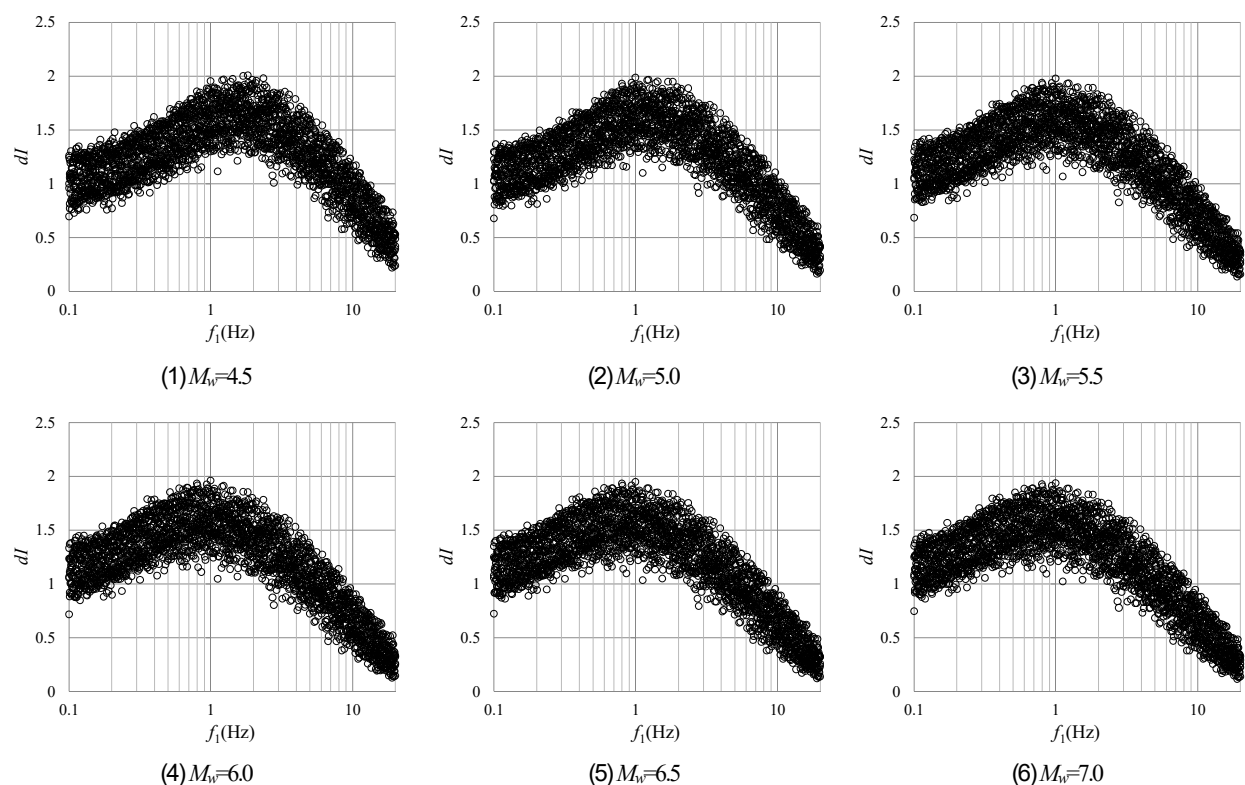


図-10 1次ピーク振動数 f_1 と式(8)による震度増分 dI の対応（地殻内地震， $f_{max}=10\text{Hz}$ ）

いほど ddl が小さくなった。また， M_w による ddl の変化を見ると， f_1 によっては M_w が大きくなるほど ddl が小さくなる特徴が見られた。

た。また，科学研究費補助金（研究種目：基盤研究 B，課題番号：18H01677，研究代表者：宮島昌克）の補助を受けて実施しました。記してお礼申し上げます。

謝辞：本研究では国立研究開発法人 防災科学技術研究所の K-NET，KiK-net 観測記録を使用させて頂きまし

参考文献

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

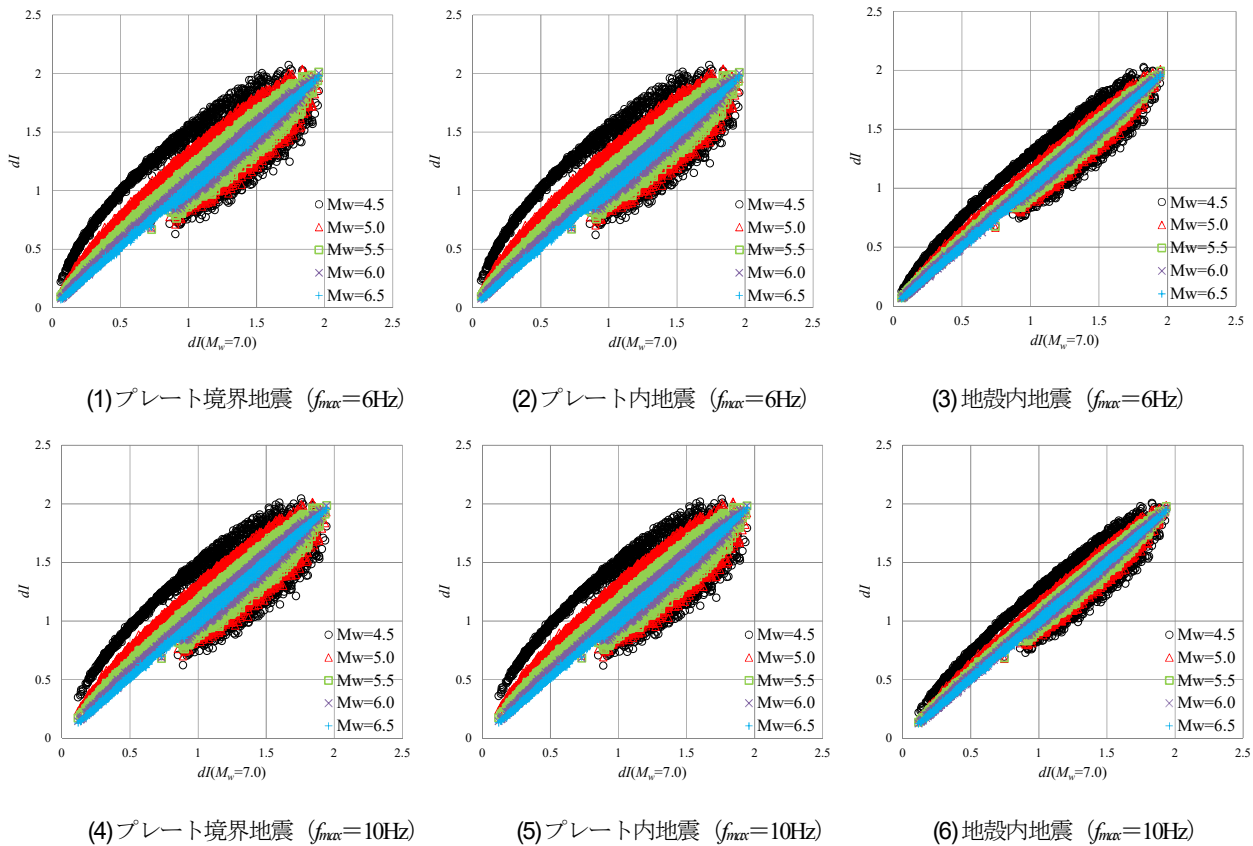


図-11 $M_w=7$ の震度増分 dl と $M_w=4.5\sim 6.5$ の震度増分 dl の対応

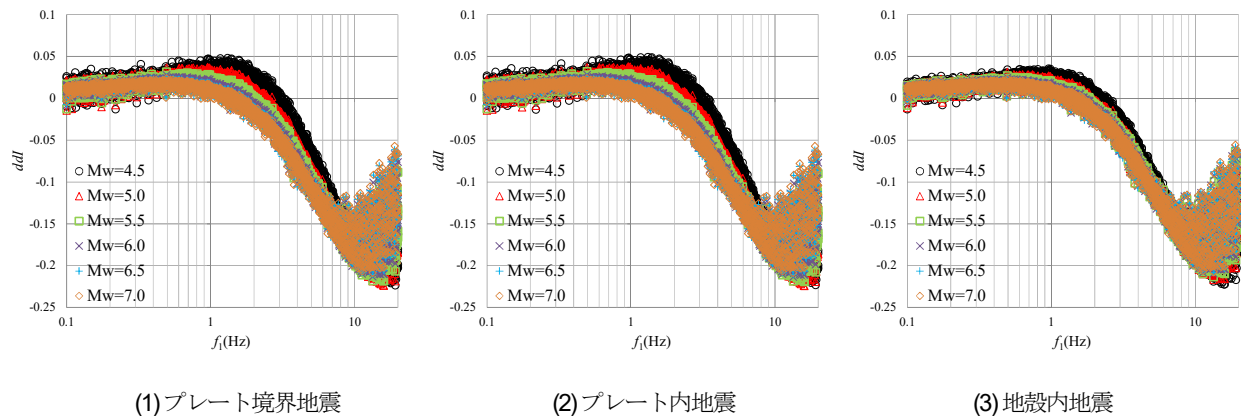


図-12 f_1 と dI の対応

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, Vol.6, No.1, pp.11-22, 2006.

- 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, pp.122-129, 2003.
- 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, 第63巻, 第4号, pp.639-654, 2007.
- 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), Vol.66, No.1, pp.20-29, 2010.
- 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, Vol.15, No.7, pp.7_180-7_193, 2015.

- 6) 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, 第12巻, 第4号, pp.4_94-4_103, 2012.
- 7) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.* Vol.73, pp.1865-1894, 1983.
- 8) 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, 2018/8/14 閲覧.
- 9) 篠泉: 1 自由度系の速度応答に基づく震度の提案, 土木学

会論文集 A, 第 66 巻, 第 4 号, pp.863-873, 2010.

- 10) Ooura's Mathematical Software Packages : <http://www.kurims.kyoto-u.ac.jp/~ooura/index-j.html>, 2018/8/16 閲覧.
- 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, pp.126-145, 2004.
- 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, 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, pp.38-59, 2015.

- 14) Hanks, T., and Kanamori, H. : A moment magnitude scale, J. Geophys. Res., Vol.84, No. B5, pp.2348-2350, 1979.
- 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, pp.49-60, 1998.

(. 受付)

A FUNDAMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF SITE AMPLIFICATION EFFECT AND SOURCE SPECTRA FOR AMPLIFICATION OF SEISMIC INTENSITY

Hayato NISHIKAWA, Toshikazu IKEMOTO and Masakatsu MIYAJIMA

In this study, we investigated the influence of source spectra and site amplification effect on the amplification of seismic intensity for the purpose of obtaining basic information for accurately evaluating the amplification of seismic intensity(dI). Firstly, the evaluation formula for dI was obtained based on the relation between the earthquake motion spectrum and the amplification factor of earthquake motion index. Using the obtained evaluation formula, dI for three earthquake types, various magnitudes, f_{max} , site amplification effects was estimated. As a result of investigating the characteristics of the relationship between the fundamental peak frequency of the site amplification effects and dI, the frequency of maximum dI was shifted to the lower frequency range as magnitude increased for all earthquake types. In all earthquake types, dI tended to converge to a certain value as magnitude increased.