

中国地方の地震観測点における速度 PSI 値 の地盤増幅度評価

西川 隼人¹・野口 竜也²・池本 敏和³・宮島 昌克⁴

¹正会員 福井工業大学教授 工学部建築土木工学科 (〒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 鳥取大学准教授 学術研究院工学系部門 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101番地)
E-mail: noguchit@tottori-u.ac.jp

³正会員 金沢大学講師 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: tikemoto@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴正会員 金沢大学名誉教授
E-mail: masa.421950@gmail.com

本研究では、中国地方の地震観測点を対象に、港湾構造物の地震被害と相関が良いとされる速度の PSI 値の地盤増幅度を求めるとともに、サイト増幅特性のパラメータや表層 30m の平均 S 波速度を用いて、地盤増幅度を予測する経験式を求めた。まず、パーセバルの定理に基づき、経験式の基礎式となる地震動スペクトルと地盤増幅度の関係式を求めた。続いて、中国地方などの地震観測点を対象に PSI 値の地盤増幅度を評価するとともに、地盤増幅度の評価式に用いるパラメータを収集した。最後にサイト増幅特性のパラメータや表層 30m の平均 S 波速度を用いて、地盤増幅度予測式を求めた結果、良好な予測精度で地盤増幅度を評価できることが明らかになった。

Key Words: *PSI value, site amplification factor, site effect, S-wave velocity*

1. 序論

地震動指標には、波形の最大振幅である最大加速度や最大速度などの他に、波形の積分値で表される地震動指標があり、地震時の構造物被害などとの相関が指摘されている。波形の積分値から計算される指標のうち、速度の PSI (Power Spectral Intensity) 値は速度波形の二乗値の時間積分の平方根と定義されており¹⁾、港湾構造物の被害との相関が良いことが報告されている。また、速度波形の二乗値の時間積分にインピーダンス比を乗じた指標として、入射エネルギー密度²⁾と地震波の波動エネルギー³⁾があり、それぞれの指標に対して、構造物をモデル化した 1 自由度系の応答や地震時の斜面滑り変位量との関係が調べられている。入射エネルギー密度の定義で説明されているように、同指標は速度の PSI 値 (以降、PSI 値) の二乗値にインピーダンス比を乗じて計算できる²⁾ことから、PSI 値を評価できれば、入射エネルギー密度なども計算することが可能となる。

以上のように、PSI 値やその二乗値と関連した指標は地震時の構造物被害や斜面滑り変位量と関係する工学的価値の高い地震動指標であり、PSI 値については、経験的グリーン関数法や地震観測記録による評価がなされている^{4)~6)}。一方、地震動指標には地盤よる増幅特性が大きく影響するが、PSI 値を対象とした検討は必ずしも多くない。野津の研究^{4)~6)}では、経験的グリーン関数法や震源スペクトルなどによる簡易な式により、地震基盤での PSI 値が評価されているので、地震基盤を基準とした地盤増幅度を簡便に評価できれば、地表面の PSI 値の予測に活用でき、また、PSI 値と関連する入射エネルギー密度などの予測においても有用であると考えられる。

本研究では、中国地方などの地震観測点を対象に、PSI 値の地盤増幅度予測を目的として、距離減衰式による経験的な手法により、対象とした各地震観測点の地盤増幅度を評価するとともに、サイト増幅特性 (地震基盤を基準としたフーリエスペクトルの増幅度) のパラメータや表層の平均 S 波速度をパラメータとする地盤増幅度

予測式を求めた。なお、中国地方を検討対象とした理由は、著者の一部が、同地方の地震観測点を対象にサイト増幅特性や地盤構造を評価しており、本研究の解析に必要なデータが十分蓄積されているためである。

地盤増幅度予測式の導出に先立ち、パーセバルの定理に基づき、震源スペクトルやサイト増幅特性のパラメータと地盤増幅度の関係を明らかにし、地盤増幅度予測式を求めるための基礎的な検討を行った。

続いて、地震観測記録を用いて、距離減衰式の評価結果をもとに各地震観測点のPSI値の地盤増幅度を求めた。最後に上述の基礎的な検討結果をもとに、サイト増幅特性のパラメータや平均S波速度をパラメータとする地盤増幅度予測式を求め、予測精度を検証した。

2. 地震動スペクトルと地盤増幅度の関係

(1) 地震動スペクトルとPSI値の関係

PSI値¹⁾の定義に基づき、地表面のPSI値を次式で表す。

$$PSI_s = \sqrt{\int_0^{\infty} v_s(t)^2 dt} \quad (1)$$

ここに PSI_s は地表面におけるPSI値 (cm/s^{0.5})、 $v_s(t)$ は時刻 t の地表面における速度 (cm/s) である。

また、パーセバルの定理より、式(1)の PSI_s は式(2)のように表すことが出来る。

$$PSI_s = \sqrt{\int_0^{\infty} F_{v_s}(f)^2 df} \quad (2)$$

$F_{v_s}(f)$ は地表面の振動数 f に対する速度フーリエスペクトル (cm) である。また、地表面の速度フーリエスペクトル $F_{v_s}(f)$ を地震基盤面における速度フーリエスペクトル $F_{v_b}(f)$ とサイト増幅特性 $G(f)$ の積で表されるものとする、式(2)は式(3)で表される。

$$PSI_s = \sqrt{\int_0^{\infty} F_{v_b}(f)^2 G(f)^2 df} \quad (3)$$

地震基盤面における PSI_b 値は次式で定義されるものとする。

$$PSI_b = \sqrt{\int_0^{\infty} F_{v_b}(f)^2 df} \quad (4)$$

地震基盤面における速度フーリエスペクトル $F_{v_b}(f)$ は次式で表される。

$$F_{v_b}(f) = S_v(f)P(f) \quad (5)$$

$S_v(f)$ は速度震源スペクトル、 $P(f)$ は震源から地震基盤までの伝播経路特性であり、 $S_v(f)$ は次式⁸⁾で表される。

$$S_v(f) = \frac{CM_0(2\pi f)}{1 + f^2/f_c^2} \quad (6)$$

$$C = \frac{R_{\theta\phi}F_sP_{RTITN}}{4\pi\rho V_s^3} \quad (7)$$

C はラディエーションパターンなどからなる定数、 M_0 は地震モーメント、 f_c は震源スペクトルのコーナー振動数である。 $R_{\theta\phi}$ はラディエーションパターン係数、 F_s は自由地表面の増幅効果を表す係数、 P_{RTITN} はエネルギー分配係数である。 ρ と V_s は地震波発生層の密度とS波速度である。

また、伝播経路特性 $P(f)$ は次式で与えられる。

$$P(f) = \frac{1}{X} \exp\left(-\frac{\pi f X}{Q_s V_s}\right) \quad (8)$$

X は震源距離、 Q_s はS波の減衰に関する Q 値である。 $P(f)$ の Q_s が振動数 f に概ね比例する⁹⁾ことから、定数項 Q_0 と振動数 f により、 $Q_s = Q_0 f$ と表して式(8)に代入すると、振動数 f に依存しない次式となる。

$$P_0 = \frac{1}{X} \exp\left(-\frac{\pi X}{Q_0 V_s}\right) \quad (9)$$

サイト増幅特性 $G(f)$ は著者らの研究¹⁰⁾で用いた次式で表される擬似サイト増幅特性 $G_p(f)$ とした。

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

i は擬似サイト増幅特性のモード次数、 N_g は $G_i(f)$ の数である。また、 $G_i(f)$ は次式で表される。

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

ここに、 f_i は擬似サイト増幅特性のピーク振動数、 h_i はピーク振幅を規定する係数である。

(2) 地震動スペクトルとPSI値の地盤増幅度

PSI値の地盤増幅度 F は以下のように、式(3)の PSI_s 値と式(4)の PSI_b 値の比として表される。

$$F = \frac{PSI_s}{PSI_b} = \frac{\sqrt{\int_0^\infty F_{vb}(f)^2 G_p(f)^2 df}}{\sqrt{\int_0^\infty F_{vb}(f)^2 df}} \quad (12)$$

$F_{vb}(f)$ に含まれる $P(f)$ を式(9)の P_0 とすると、式(12)は次式となる。

$$F = \frac{\sqrt{\int_0^\infty S_v(f)^2 G_p(f)^2 df}}{\sqrt{\int_0^\infty S_v(f)^2 df}} \quad (13)$$

式(13)に式(10)、(11)を代入すると次のようになる。

$$F = \frac{\sqrt{\int_0^\infty \{1 + \sum_{i=1}^{N_g} G_i(f)^2\} S_v(f)^2 df}}{\sqrt{\int_0^\infty S_v(f)^2 df}} \\ = \frac{\sqrt{\int_0^\infty \{S_v(f)^2 + \dots + G_{N_g}(f)^2 S_v(f)^2\} df}}{\sqrt{\int_0^\infty S_v(f)^2 df}} \quad (14)$$

ここに $G_i(f)$ に対する地盤増幅度 F_i を次式で表す。

$$F_i = \frac{\sqrt{\int_0^\infty G_i(f)^2 S_v(f)^2 df}}{\sqrt{\int_0^\infty S_v(f)^2 df}} \quad (15)$$

また、式(15)を式(14)に代入すると、次式のようになる。

$$F = \sqrt{1 + F_1^2 + \dots + F_{N_g}^2} \quad (16)$$

式(15)の括弧内の分子、分母の積分値はそれぞれ次式のようになる。

$$\int_0^\infty G_i(f)^2 S_v(f)^2 df = \frac{\pi^3 C^2 M_0^2 f_c^4 f_i^2 (f_c h_i + f_i)}{h_i (f_i^2 + 2f_c f_i h_i + f_c^2)^2} \quad (17)$$

$$\int_0^\infty S_v(f)^2 df = \pi^3 C^2 M_0^2 f_c^3 \quad (18)$$

式(17)、(18)を、式(15)の地盤増幅度 F_i に代入すると次の式が得られる。

$$F_i = \frac{\sqrt{\frac{\pi^3 C^2 M_0^2 f_c^4 f_i^2 (f_c h_i + f_i)}{\pi^3 C^2 M_0^2 f_c^3 h_i (f_i^2 + 2f_c f_i h_i + f_c^2)^2}}}{\sqrt{\frac{f_c f_i^2 (f_c h_i + f_i)}{h_i (f_i^2 + 2f_c f_i h_i + f_c^2)^2}}} \quad (19)$$

以上のように、PSI値の地盤増幅度はサイト増幅特性のパラメータの他に、震源スペクトルのコーナー振動数 f_c の影響を受ける。地震の規模が大きくなると、 f_c が小さくなり、また、 h_i も基本的に0~1の範囲であることから、式(19)に含まれる f_c が h_i のべき指数が2以上の項を含むものを無視すると、式(19)を次式のように近似できる。

$$F_i \approx \sqrt{\frac{f_c}{h_i f_i}} \quad (20)$$

図-1に式(19)、式(20)から計算した地盤増幅度 F_i 、図-2に式(19)、式(20)を式(16)に代入して計算した地盤増幅度 F を示す。擬似サイト増幅特性は1次モードのみとし、 $f_i = 0.5 \sim 20$ Hz、 $h_i = 0.05$ 、 f_c は1Hz、0.5Hz、0.1Hzの順に変化させて地盤増幅度を求めた。

図-1、図-2を見ると、 $f_c = 1$ Hzでは、2つの増幅度が6Hz以上、 $f_c = 0.5$ Hzでは3Hz以上、 $f_c = 0.1$ Hzでは1Hz以上で概ね一致しており、地震規模が大きくなるほど（コーナー振動数 f_c が小さくなるほど）、式(19)、式(20)の対応が良い振動数帯が広がる事が分かる。

3. 解析データ

本章では解析対象とした地震の諸元と地震観測点、解析に用いた地震観測記録の選定条件を説明する。

(1) 解析対象地震と地震観測点

図-3に解析対象地震の震央と地震観測点の分布、表-1に解析対象地震の情報を示す。表-1の M_{JMA} は気象庁¹¹⁾、 M_w はF-net¹²⁾の値である。地震は1997年~2018年に中国地方とその周辺地域で発生した20地震（地殻内地震は14、プレート内地震は6）であり、 M_{JMA} は5.0~7.3、震源深さは7~86kmである。地震観測点の内訳はK-NET105地点、KiK-net71地点の計176地点である。

(2) 地震観測記録の選定条件

地震観測記録の選定にあたり、解析対象とした地震観測点の震源距離の上限を福島・田中の距離減衰式¹³⁾から計算される最大地動加速度が10cm/s²以上となる震源距離

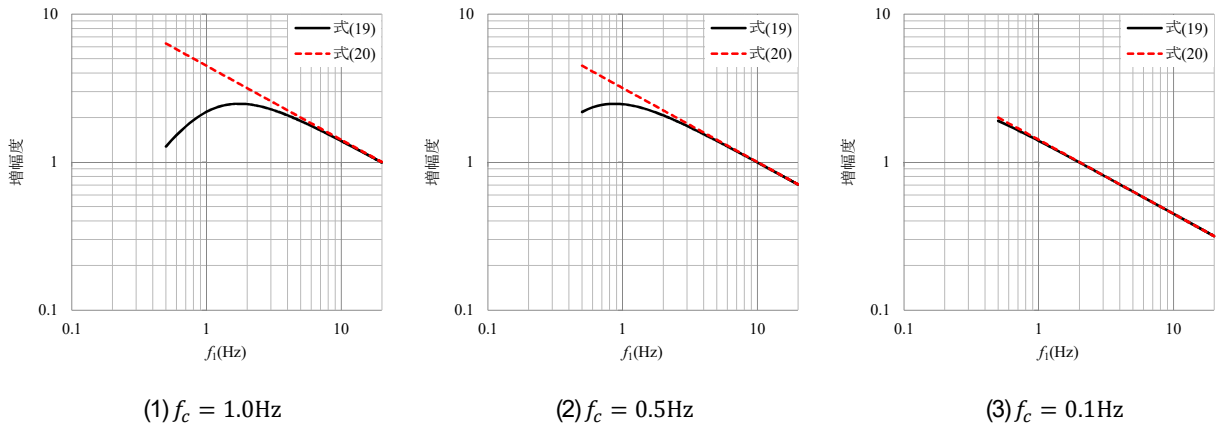


図-1 f_1 と式(19), (20)の地盤増幅度 F_i の関係

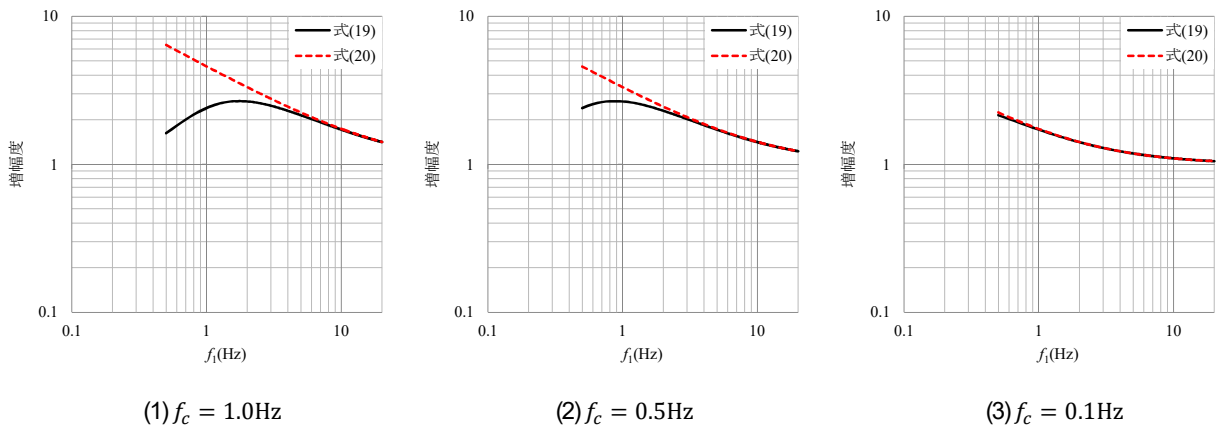


図-2 f_1 と式(16)の地盤増幅度 F の関係

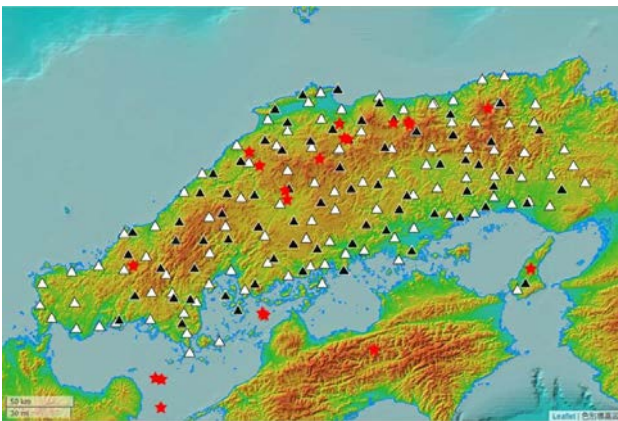


図-3 地震観測点と震央分布 (★: 震央, △: K-NET, ▲: KiK-net)

とした。また、最大地動加速度の範囲は 1cm/s^2 以上 200cm/s^2 未満とした。選定の結果、解析に用いた地震観測記録数は1184となった。

4. 地震観測記録による地盤増幅度の評価

本章では、地震観測記録によるPSI値の地盤増幅度の評価方法と解析結果について説明する。

(1) PSI 値の地盤増幅度の評価方法

PSI値の地盤増幅度は以下の距離減衰式を回帰分析によって求めることにより、評価した。

$$\log_{10}PSI_{ij} = c_{1i} - \log_{10}X_{ij} + \sum_{k=1}^2 c_{2k}X_{ij} + c_{3j} \quad (21)$$

PSI_{ij} は*i*番目の地震における*j*番目の観測点のPSI値であり、水平2成分のうち大きい方の値を用いた。式(21)の c_{1i} は*i*番目の地震の震源に依存する係数、 X_{ij} は*i*番目の地震における*j*番目の地震観測点の震源距離(km)である。 c_{2k} は距離減衰に関する係数であり、 k が1の場合は地殻内地震、2の場合はプレート内地震に対応する。 c_{3j} は*j*番目の地震観測点の地盤増幅に関する係数であり、 PSI_{ij} の地盤増幅度 F_j は $10^{c_{3j}}$ で表される。右辺第2項の幾何減衰項は地殻内地震に対しては、片岡他¹⁴⁾を参考に震源距離80kmを境に変化させて解析を行った。

また、回帰分析の際は既往研究¹⁵⁾でも基準観測点としたKiK-net神石(HRSH11)とKiK-net建部(OKYH05)を基準観測点とし、これら2地点の c_{3j} を0として、拘束条件とし、基準観測点に対する相対的な地盤増幅度を求めた。2地点の PSI_{ij} は既往研究¹⁵⁾で求めた地盤情報に基づく重複反射理論により、地表面の地震波形から求めた

表-1 地震の諸元

No	発生日時	震央地名	緯度 (°)	経度 (°)	深さ (km)	M_{JMA}	M_w	地震タイプ
1	1997/6/25 18:50:13	山口県中部	34.4400	131.6650	8	6.6	5.8	地殻内
2	1997/9/4 5:15:43	鳥取県西部	35.2617	133.3767	9	5.5	5.2	地殻内
3	1998/5/23 4:49:35	伊予灘	33.7033	131.8417	86	5.4	5.5	プレート内
4	2000/10/6 13:30:18	鳥取県西部	35.2733	133.3483	9	7.3	6.6	地殻内
5	2000/10/8 13:17:55	島根県東部	35.1383	133.1500	7	5.6	5.1	地殻内
6	2000/10/8 20:51:17	島根県東部	35.3683	133.3100	8	5.2	5.0	地殻内
7	2001/1/12 8:00:04	兵庫県北部	35.4650	134.4900	11	5.6	5.2	地殻内
8	2001/3/24 15:27:54	安芸灘	34.1317	132.6933	46	6.7	6.8	プレート内
9	2001/3/26 5:40:53	安芸灘	34.1167	132.7083	46	5.2	5.1	プレート内
10	2002/9/16 10:10:50	鳥取県中部	35.3700	133.7383	10	5.5	5.1	地殻内
11	2006/9/26 7:03:48	伊予灘	33.5050	131.8833	70	5.3	5.3	プレート内
12	2007/4/26 9:02:57	愛媛県東予	33.8883	133.5833	39	5.3	5.0	プレート内
13	2011/6/4 1:57:31	島根県東部	35.0950	132.6700	11	5.2	4.9	地殻内
14	2011/11/21 19:16:29	広島県北部	34.8717	132.8933	12	5.4	5.2	地殻内
15	2013/4/13 5:33:18	淡路島付近	34.4183	134.8283	15	6.3	5.8	地殻内
16	2014/3/14 2:06:51	伊予灘	33.6917	131.8900	78	6.2	6.3	プレート内
17	2016/10/21 14:07:23	鳥取県中部	35.3800	133.8550	11	6.6	6.2	地殻内
18	2016/10/21 14:53:17	鳥取県中部	35.3600	133.8667	9	5.0	4.7	地殻内
19	2018/4/9 1:32:31	島根県西部	35.1833	132.5867	12	6.1	5.6	地殻内
20	2018/6/26 17:00:10	広島県北部	34.9300	132.8717	12	5.0	4.6	地殻内

最下層の解放面の地震波形から計算した値を用いた。

(2) 地盤増幅度の評価結果

図-4 に PSI 値の地盤増幅度 F_j の分布図を示す。 F_j の分布図を見ると、増幅度が 2~5 の地点が最も多く、全体の約 60% を占めている。次に多いのは増幅度が 2 未満の地点であり、全体の約 21% であった。増幅度が 8 以上の地点は全体の約 4% であり、鳥取県で最も多かった。 F_j が最も大きい地点は KiK-net 溝口 (TTRH03) であり、 F_j が 14.25、次に大きかった K-NET 米子 (TTR008) の F_j は 11.43 であった。また、基準観測点以外の地震観測点で下位 1 位の K-NET 波賀 (HYG007) の F_j は 1.10、2 位の K-NET 若桜 (TTR001) は 1.17 であった。

5. サイト増幅特性と平均 S 波速度による地盤増幅度の評価

本章では、2章で得られた地盤増幅度評価式をもとにサイト増幅特性のパラメータと、表層30mの平均S波速度からPSI値の地盤増幅度を評価する式を求めた。

(1) サイト増幅特性による地盤増幅度の評価

2章で求めた式(20)の地盤増幅度評価式をもとに、サイト増幅特性のパラメータを用いた、経験的な地盤増幅度予測式を求めた。

まず、式(20)の両辺の対数をとると、次式が得られる。

$$\log_{10} F_i = 0.5(\log_{10} f_c - \log_{10} h_i - \log_{10} f_i) \quad (22)$$

サイト増幅特性 $G_i(f)$ のピーク値 $1/(2h_i)$ を G_{\max} と表記し、式(22)に代入すると、

$$\log_{10} F_i = 0.5(\log_{10} f_c + \log_{10}(2G_{\max}) - \log_{10} f_i) \quad (23)$$

1次モードのみ考え、この式(23)を回帰式の形で表すと次式が得られる。

$$\log_{10} F = c_1 + c_2 \log_{10} G_{\max} + c_3 \log_{10} f_1 \quad (24)$$

c_1 , c_2 , c_3 は回帰係数である。

式(24)のパラメータのサイト増幅特性の1次ピーク振動数 f_1 とその増幅度 G_{\max} は著者らの研究成果¹⁶⁾を利用した。図-5、図-6に今回、地盤増幅度の評価に用いたサイト増幅特性の1次ピーク振動数分布と1次ピークの増幅度分布を示す。図-5、図-6を見ると、1次ピーク振動数 f_1 が 1Hz 未満の地点の半分程度は、鳥取県西部や島根県東部に見られるが、増幅度 G_{\max} は特定の地域に偏らず、満遍なく分布している。

図-7に地震観測記録から評価した地盤増幅度(観測値)と式(24)で求めた地盤増幅度(予測値)、表-2に式(24)の回帰係数と回帰分析の際に得られた観測値と予測値に対する相関係数、標準誤差を示す。ばらつきはあるものの、相関係数は 0.859 という高い値になった。また、回帰係数 c_2 , c_3 に対応する式(23)右辺の第2項、第3項の係数を比較すると、近い値になっていることが分かる。

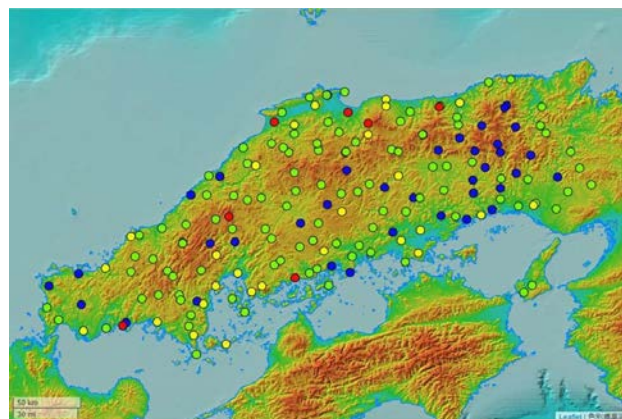


図-4 F_j の分布 (●2~, ●2~5, ●5~8, ●8~)

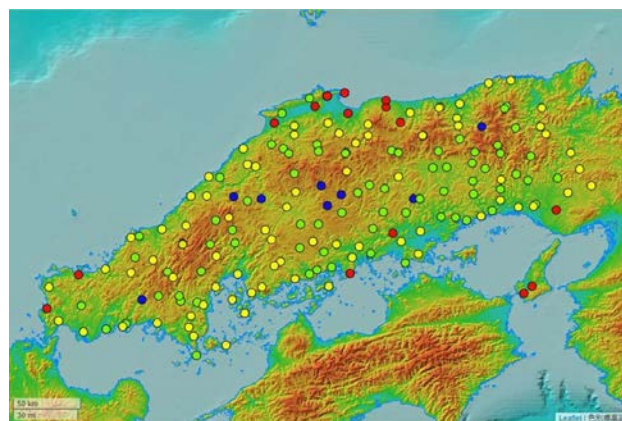


図-5 f_1 の分布 (●10Hz~, ●5~10Hz, ●1~5Hz, ●~1Hz)

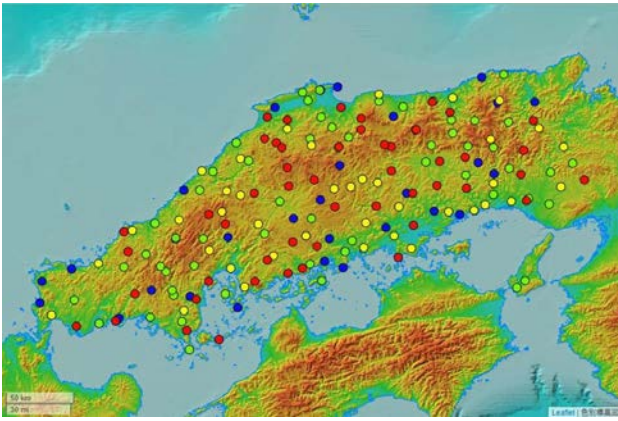


図-6 G_{max} の分布 (●～5, ●5～10, ●10～15, ●15～)

(2) 平均S波速度による地盤増幅度の評価

本節では、前節の地盤増幅度予測式をもとに、地盤特性を表す一般的な指標である平均S波速度をパラメータとする地盤増幅度予測式を求めた。

神野他¹⁷⁾は中国地方の地震観測点を対象に表層30mの平均S波速度と地盤の固有周期の関係を調べており、平均S波速度の常用対数を、地盤の固有周期の常用対数の1次式で表している。地盤の固有振動数と式(24)の1次ピーク振動数 f_1 が等しいと仮定し、また、サイト増幅特性 $G_i(f)$ のピーク増幅度 G_{max} が表層と基盤のインピーダンス比で表されるものとする、式(24)を次のように表すことが出来る。

$$\log_{10} F = c_1 + c_2 \log_{10} \frac{\rho_b V_{sb}}{\rho_0 V_{s0}} + c_3 \log_{10} V_{s30} \quad (25)$$

$(\rho_b V_{sb})/(\rho_0 V_{s0})$ はインピーダンス比であり、 ρ_b は基盤の密度、 V_{sb} はS波速度、 ρ_0 、 V_{s0} は表層の密度とS波速度である。 V_{s0} が分かっている地点は少ないので、 V_{s30} を V_{s0} の代替指標とした。また、S波速度に比べて、密度の値の差が小さいことから、 ρ_b/ρ_0 を定数とし、式(25)を回帰式で表すと次式となる。

$$\log_{10} F = c_4 + c_5 \log_{10} V_{s30} \quad (26)$$

c_4 と c_5 は回帰係数である。

式(26)の評価に必要な V_{s30} の計算には、深さ30mまでのS波速度構造が必要だが、今回、解析対象としたK-NET観測点の大半では、地表から深さ10～20mまでしかS波速度の情報が公開されていないため、式(27)の経験式¹⁸⁾によって、 V_{s30} を求めた。

$$\log_{10} V_{s30} = a \log_{10} V_{sz} + b \log_{10} z V_s + c \quad (27)$$

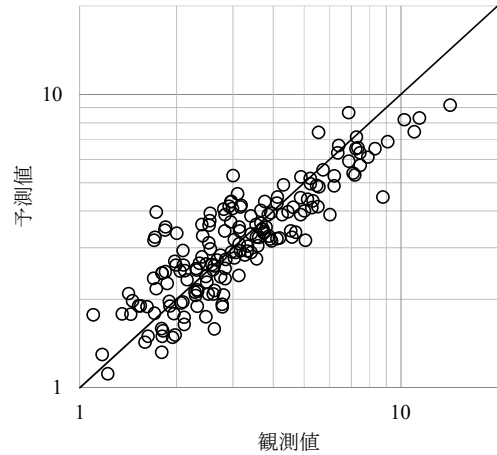


図-7 F の観測値と式(24)による予測値の関係

表-2 式(24)の回帰係数と相関係数、標準誤差

c_1	c_2	c_3	相関係数	標準誤差
0.201	0.523	-0.407	0.859	0.112

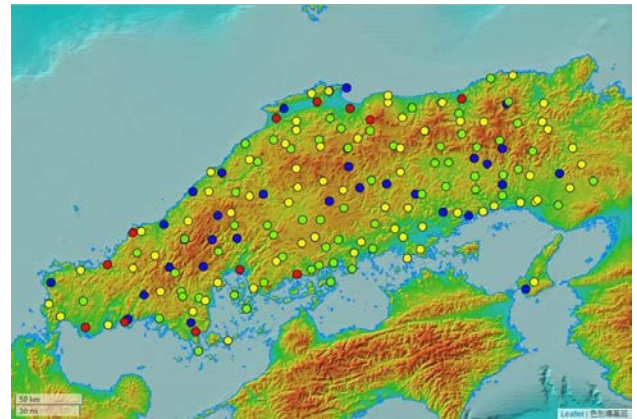


図-8 V_{s30} の分布 (●600m/s以上, ●400～600m/s, ●200～400m/s, ●200m/s未満)

V_{sz} は深さ Z までの地盤の平均S波速度、 $z V_s$ はデータの最深部 Z でのS波速度、 a 、 b 、 c は回帰係数である。 V_{sz} は式(28)で求めた。

$$V_{sz} = \frac{Z}{\sum \frac{H_i}{V_{si}}} \quad (28)$$

H_i は i 番目の層の層厚、 V_{si} は i 番目の層のS波速度である。一部の鳥取県内のK-NET観測点は微動アレイ観測から推定したS波速度構造¹⁷⁾から V_{s30} を計算し、KiK-net観測点の V_{s30} は公開されているS波速度構造の情報を用いて計算した。

図-8の表層30mの平均S波速度 V_{s30} の分布図から明らかなように、 V_{s30} が200m/s未満の観測点のほとんどが平野部や沿岸部に位置している。一方、 V_{s30} が200m/s以上

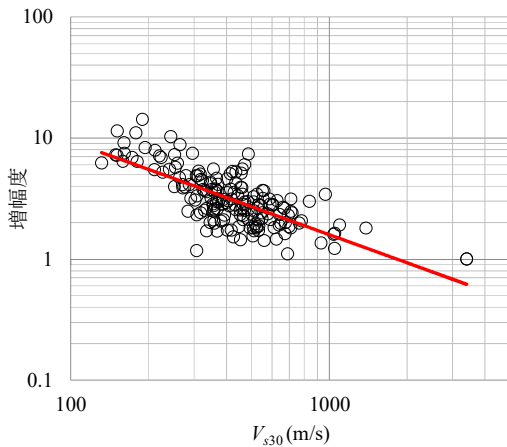


図-9 平均S波速度 V_{s30} と F の関係

表-3 式(26)の回帰係数と相関係数, 標準誤差

c_4	c_5	相関係数	標準誤差
2.515	-0.771	0.722	0.154

の地点は、内陸部にも多く見られる。

図-9に平均S波速度 V_{s3} と F の関係、表-3に式(26)の回帰係数と回帰分析の結果、得られた相関係数と標準誤差を示す。図-9の赤い実線は、式(26)から計算した回帰直線である。前節のサイト増幅特性のパラメータから地盤増幅度を評価した場合に比べると、精度が低いものの、式(26)の相関係数は0.7以上となり、ますますの精度で地盤増幅度を評価できることが明らかになった。

6. 結論

本研究では、地震時の港湾構造物被害と相関が良いとされる速度のPSI値の地盤増幅度を中国地方などの地震観測点を対象に評価するとともに、サイト増幅特性のパラメータや表層30mの平均S波速度から地盤増幅度を評価する式を求めた。

まず、パーセバルの定理に基づき、サイト増幅特性と震源スペクトルなどからなる地震動スペクトルと地盤増幅度の関係式を求めた。検討の結果、地震の規模が大きい場合、すなわち、震源スペクトルのコーナー振動数が小さい場合、PSI値の地盤増幅度をコーナー振動数などから、簡易な式で計算できることを明らかにした。

続いて、中国地方と兵庫県のK-NET, KiK-net観測点を対象に、地震観測記録からPSI値の地盤増幅度を評価した結果、KiK-net溝口やK-NET米子では、10倍を超える大きな増幅が見られた。

最後に先に求めた地震動スペクトルと地盤増幅度の関係式に基づき、サイト増幅特性のパラメータや平均S波

速度をパラメータとする地盤増幅度予測式を回帰分析により求めた。その結果、サイト増幅特性のパラメータによる予測式の相関係数は0.859という高い値になった。平均S波速度の場合は、相関係数が0.722となり、ますますの相関が得られた。

今回はK-NET, KiK-net観測点を対象としたが、今後は気象庁や自治体観測点も解析対象として、同様の検討を行い、PSI値の地盤増幅度予測式の精度を検証する予定である。

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の地震観測記録を使用させていただきました。一部の図の作成において、国土地理院の地理院タイル¹⁹⁾を利用させていただきました。標高図の海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成しました。本研究はJSPS 科研費JP20K05028 (研究代表者：野口竜也)の助成を受けた。記して御礼申し上げます。

REFERENCES

- 1) 野津 厚, 井合 進：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 平成12年度土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 第28巻, 2001. [Nozu, A. and Iai, S.: A study on strong motion indices for quick damage estimation of quay wall, *Proceedings of 28th Technical meeting of Kanto Branch of Japan Society of Civil Engineers*, pp.18-19, 2001.]
- 2) 平井俊之, 澤田純男：地震動のエネルギー指標の構造物被害推定への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第68巻, 第4号, pp. I_1036-I_1043, 2012. [Hirai, T. and Sawada, S.: Application of the energy index of seismic wave to the prediction of earthquake damage, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, Vol.68, Issue 4, pp. I_1036-I_1043, 2012.]
- 3) 國生剛治：エネルギーNewmark法による地震時斜面滑り発生と滑り変位量の簡易評価, 地盤工学ジャーナル, 第14巻, 第1号, pp.1-16, 2019. [Kokusho, T.: Evaluation of slope stability and displacement by energy-based Newmark method using earthquake energy, *Japanese Geotechnical Journal*, Vol.14, Issue 1, pp.1-16, 2019.]
- 4) 野津 厚：南海トラフの地震(Mw9.0)を対象としたSPGAモデルによる強震動評価事例, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第69巻, 第4号, pp. I_872-I_888, 2013. [Nozu, A.: An example of strong motion evaluation for a scenario earthquake with Mw9.0 along the Nankai Trough with the SPGA model, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, Vol.69, Issue 4, pp. I_872-I_888, 2013.]
- 5) 大矢陽介, 小濱英司, 野津 厚, 菅野高弘：地震動評価指標としてPSI値に着目した防波堤の模型振動実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 第69巻, 第2号, pp. I_167-I_172, 2013. [Ohya, Y., Kohama, E., Nozu, A. and Sugano, T.: A shake table test of breakwater which paid its attention to power spectrum intensity as an

- earthquake motion evaluation index, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.69, Issue 2, pp.I_167-I_172, 2013.]
- 6) 野津 厚：多重非線形効果を考慮した簡便な強震動シミュレーション手法の検証とその予測問題への応用方法, 日本地震工学会論文集, 第 16 巻, 第 4 号, pp. 4_106-4_125, 2016. [Nozu, A.: Strong motion simulation with considerations of multiple nonlinear effects - its validation and application to prediction problems -, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.16, Issue 4, pp.4_106-4_125, 2016.]
 - 7) 野口竜也, 西川隼人, 吉田昌平, 香川敬生：鳥取県内の地震観測点における地盤構造の把握とサイト特性の評価, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 第 72 巻, 第 4 号, pp. I_646-I_658, 2016. [Noguchi, T., Nishikawa, H., Yoshida, S. and Kagawa, T.: Subsurface structure and evaluation of site effects at strong ground motion observation sites in Tottori Prefecture, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, Vol.72, Issue 4, pp.I_646-I_658, 2016.]
 - 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, pp. 1865-1894, 1983.
 - 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, pp. 23-32, 2010. [Nakamura, R.: Path effect of 3-D attenuation structure on seismic ground motion, *The 38th Symposium of Earthquake Ground Motion*, pp.23-32, 2010.]
 - 10) 西川隼人, 野口竜也, 宮島昌克, 香川敬生：微動 H/V の 1 次ピークの振動数と振幅に基づいた地盤増幅度評価式の検討, 日本地震工学会論文集, 第 19 巻, 第 7 号, pp. 7_41-7_55, 2019. [Nishikawa, H., Noguchi, T., Miyajima, M. and Kagawa, T.: A study on an empirical formula for amplification factor based on fundamental peak frequency and amplitude of microtremor H/V, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.19, Issue 7, pp.7_41-7_55, 2019.]
 - 11) 気象庁：地震月報(カタログ編), <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html> (2020 年 9 月 6 日閲覧) [Japan Meteorological Agency : *The Seismological Bulletin of Japan*, <https://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/index.html>.]
 - 12) 防災科学技術研究所 広帯域地震観測網 F-net : <https://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja> (2021 年 8 月 1 日閲覧) [NIED Broadband seismograph network F-net : <https://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja>.]
 - 13) 福島美光, 田中貞二：新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂, 日本地震学会講演予稿集, No.2, p.116, 1992. [Fukushima, Y. and Tanaka, T.: Revised attenuation relation of peak horizontal acceleration by using a new data base, *Programme and abstracts, the Seismological Society of Japan*, No.2, p.116, 1992.]
 - 14) 片岡正次郎, 佐藤智美, 松本俊輔, 日下部毅明：短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式, 土木学会論文集 A, 第 62 巻, 第 4 号, pp. 740-757, 2006. [Kataoka, S., Satoh, T., Matsumoto, S. and Kusakabe, T.: Attenuation relationships of ground motion intensity using short period level as a variable, *Doboku Gakkai Ronbunshuu A*, Vol.62, Issue 4, pp.740-757, 2006.]
 - 15) 西川隼人, 野口竜也, 宮島昌克, 香川敬生：自治体観測点を含む中国地方の地震観測点のサイト増幅特性評価, 土木学会第 74 回年次学術講演会講演概要集, CS12-12, 2019. [Nishikawa, H., Noguchi, T., Miyajima, M. and Kagawa, T.: Evaluation of site amplification effects of seismic observation sites in Chugoku region including municipal sites, *Proceedings of the 74th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, CS12-12, 2019.]
 - 16) 西川隼人, 野口竜也, 池本敏和, 宮島昌克：Arias Intensity の地盤増幅度とサイト増幅特性の関係, 第 41 回地震工学研究発表会, D14-2348, 2021. [Nishikawa, H., Noguchi, T., Ikemoto, T. and Miyajima, M.: Relationship between site amplification factors for Arias intensity and site effects, *Proceedings of the 41th JSCE Earthquake Engineering Symposium*, D14-2348, 2021.]
 - 17) 神野達夫, 三浦賢治, 熊谷千代志：中国地方の地震観測点を対象とした地盤卓越周期の推定方法の精度検証, 物理探査, 第 61 巻, 第 6 号, pp.533-543, 2008. [Kanno, T., Miura, K. and Kumagai, C.: Accuracy verification of estimation method for predominant period of ground at earthquake observation points in Chugoku district, *BUTSURI-TANSA*, Vol.61, Issue 6, pp.533-543, 2008.]
 - 18) 翠川三郎, 野木淑裕：深さ 30m までの地盤の平均 S 波速度を深さの浅いデータから推定する方法について, 日本地震工学会論文集, 第 15 巻, 第 2 号, pp. 2_91-2_96, 2015. [Midorikawa, S. and Nogi, Y.: Estimation of Vs30 from shallow velocity profile, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.15, Issue 2, pp.2_91-2_96, 2015.]
 - 19) 国土地理院ホームページ：地理院タイル一覧, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2022 年 8 月 26 日閲覧) [Geospatial Information Authority of Japan : GSI Tiles, <https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>.]

INVESTIGATION OF SITE AMPLIFICATION FACTORS OF VELOCITY PSI VALUE AT SEISMIC OBSERVATION SITES IN CHUGOKU REGION

Hayato NISHIKAWA, Tatsuya NOGUCHI, Toshikazu IKEMOTO
and Masakatsu MIYAJIMA

In this study, we evaluated the site amplification factors of velocity PSI values that correlated with earthquake damage to port structures in seismic observation sites in Chugoku region, an empirical formula for prediction of site amplification factor was obtained using the parameters of the site amplification effect and the average S-wave velocity from the ground surface to 30 m depth. At first, the relation between the seismic motion spectrum and the site amplification factor was obtained based on Parseval's theorem. We also evaluated the site amplification factors at site observation sites in Chugoku region and collected the parameters used for the prediction formula of the site amplification factors. As a result of evaluating the prediction formulas using the parameters of site amplification effect and the average S-wave velocity, it was clarified that the site amplification factors can be evaluated with good accuracy.