

自治体観測点で得られる地震動指標の 地盤増幅度によるサイト特性の推定

西川 隼人¹・宮島 昌克²

¹正会員 舞鶴工業高等専門学校（〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋234）
E-mail: nisikawa@maizuru-ct.ac.jp

²正会員 金沢大学教授 理工研究域環境デザイン学系（〒920-1192 石川県金沢市角間町）
E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

本研究では自治体観測点を対象に地震動予測において重要なサイト特性を推定するために、自治体観測点で得られる最大加速度と計測震度の地盤増幅度とサイト特性の関係を検証した。検証において、最大速度の地盤増幅度の代替指標を最大加速度と計測震度の地盤増幅度から求めた。観測点ごとに地震動指標の地盤増幅度を評価し、サイト特性との相関を調べたところ、地盤増幅度とサイト特性には明瞭な相関が見られた。最大加速度と計測震度の地盤増幅度をパラメータとするサイト特性の平均値を評価する手法を提案し、提案した手法によってサイト特性を精度良く評価できることを示した。本研究で提案した手法を用いれば地震波形記録の収集が難しい自治体観測点のサイト特性を推定することができ、従来に比べて高密度なサイト特性の評価が可能である。

Key Words :local government sites, PGA, JMA seismic intensity, amplification factor, site effect

1. はじめに

各都道府県で運用されている震度情報ネットワークは自治体観測点や気象庁、K-NET観測点から成り立っており、地震発生時の初動体制確立などに利用されている。自治体観測点は気象庁やK-NET観測点に比べて観測点数が多く、高密度に配置されている場合が多い。対象とする都道府県全域で地震動予測を行なう上で、自治体観測点で記録された計測震度などの地震動情報を分析することは極めて重要であり、これまで自治体観測点を対象にして地盤増幅特性の評価などが実施されている^{1)~6)}。著者らも石川県の自治体観測点などを対象に計測震度と最大加速度の地盤増幅度を評価している⁷⁾。これまでの研究^{1)~7)}の多くは最大加速度や計測震度などの単一の地震動指標を対象としたものが多いが、周期または振動数領域の地盤増幅特性(以降、サイト特性と呼ぶ)を評価した研究は多くない。

地震による構造物被害には地震動の周期特性が大きな影響を及ぼしていることから⁸⁾、サイト特性の評価は地震被害予測を行う上でも重要な課題と言える。自治体観測点を対象にサイト特性を評価した研究が少ない要因として、関東地方の都県や横浜市などの一部の自治体を除

いて、サイト特性評価の際に必要な地震波形を収集、管理するシステムが十分に整備されていないこと⁹⁾が考えられる。そもそも、自治体観測点に設置されている震度計は地震発生時に初動体制を整えるために欠かせない震度情報を収集することを主たる目的とするものであるため、学術研究上、極めて重要である地震波形の収集、保存に関しては十分な配慮がなされていないケースが多い⁹⁾。自治体によっては震度計を設置した当初から地震波形を保存しないタイプの計器を使用している場合もある⁴⁾。

一方、全ての都道府県で自治体観測点で観測された計測震度を収集しており、最大加速度もほとんどの都道府県で収集している⁹⁾。なお、最大速度とSI値を収集している都道府県は全体の1割に満たない⁹⁾。既往の研究において最大加速度や計測震度などの地震動指標の地盤増幅度とサイト特性に相関が見られることが指摘されており、最大加速度、計測震度、最大速度の順に、その地盤増幅度とサイト特性において相関の高い振動数帯が低振動数にシフトすることが報告されている¹⁰⁾。

また、著者らは北陸地方の地震観測点を対象に最大加速度や計測震度の地盤増幅度とサイト特性の関係を調べており、1~10Hzでは両者に良好な相関があり、地盤増

幅度からサイト特性を精度良く評価できることを明らかにしている¹¹⁾。自治体観測点を対象に地震動指標の地盤増幅度からサイト特性を評価した研究は文献11)以外になく、著者らが提案した手法を用いれば地震波形のない自治体観測点でもサイト特性を精度良く評価できる可能性がある。

本研究では著者らの研究¹¹⁾を発展させ、石川県の自治体観測点で収集されている最大加速度や計測震度の地盤増幅度からサイト特性を推定する手法を提案する。なお、文献11)では31観測点のサイト特性を解析に用いているが、著者らはこの研究以降に新たに15の地震観測点のサイト特性を評価している¹²⁾。ここでは著者ら¹²⁾がサイト特性を評価した46の地震観測点を解析対象とした。また、文献12)と解析対象地震などの条件を同じにして、再度、自治体や気象庁、K-NET、KiK-net観測点の地盤増幅度を評価した。

先に述べたように最大速度の地盤増幅度は最大加速度や計測震度の地盤増幅度に比べて、低振動数側でサイト特性と相関が良いと考えられるが、今回対象とする石川県の自治体観測点では最大速度のデータを収集していない。著者らは最大加速度や計測震度の地盤増幅度を組み合わせ最大速度の地盤増幅度の代替となる指標を提案している¹¹⁾。本研究でも、この代替指標を用い、低振動数のサイト特性との相関関係を調べた。

これらの地震動指標の地盤増幅度とサイト特性の関係を調べた結果に基づき、最大加速度と計測震度の地盤増幅度をパラメータとするサイト特性の増幅度評価式を求め、これにより自治体観測点や一部の気象庁観測点を対象にサイト特性の増幅度を推定した。また、推定したサイト特性と地盤条件の関係を考察した。

2. 解析データ

この章では解析対象とした地震観測点の分布や対象地震の震央位置、マグニチュードなどの地震の諸元に関する説明を行う。

(1) 解析対象観測点

本研究で対象とした地震観測点の分布を図-1に示す。観測点の内訳は石川県の震度情報ネットワークに属している自治体観測点27点、気象庁観測点5点とK-NET観測点9地点、石川県の震度情報ネットワークに属していないK-NET観測点18点、KiK-net観測点18点であり、合計で77地点である。K-NET観測点、KiK-net観測点についてはサイト特性を評価した研究¹²⁾と同様の観測点である。今回、対象とした観測点では後述の表-1に示す3つ以上の地震で記録が得られている。

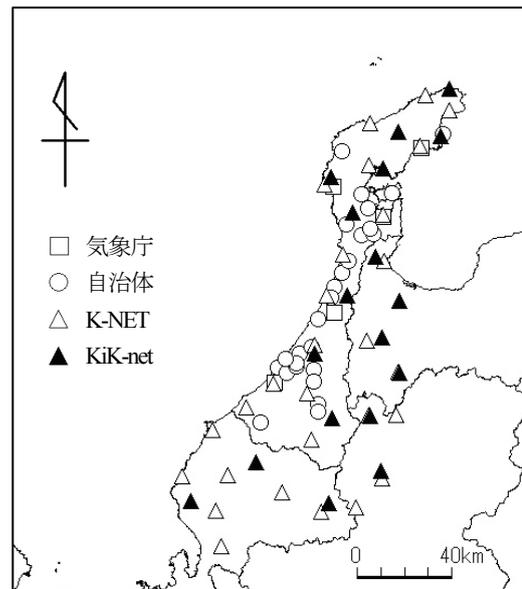


図-1 解析対象とした地震観測点分布

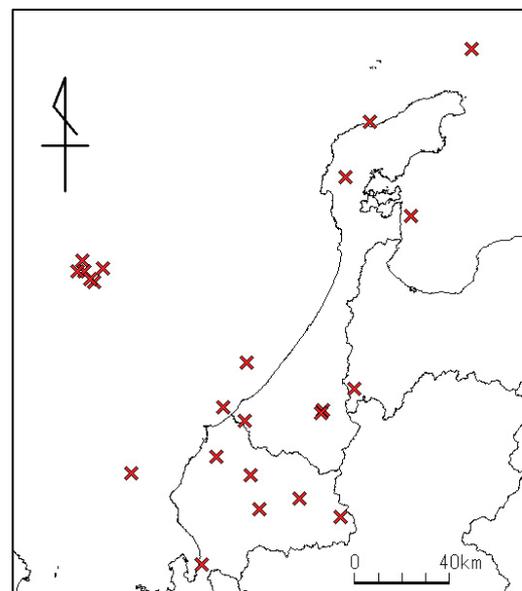


図-2 解析対象とした地震の震央分布

(2) 震央位置と地震諸元

図-2に解析対象とした地震の震央位置、表-1に地震諸元を示す。対象とした地震は観測点と同様に著者らの研究¹²⁾で対象とした23地震であり、記録数は739である。これらの地震の気象庁マグニチュード M_{MM} は3.5~6.2、震源深さは6~24kmである。対象とした地震の約4割は福井県または福井、石川両県の県境付近で発生している。石川県の西方沖で見られる複数の地震は2000年6月7日に発生した地震(気象庁マグニチュード $M_{MM}=6.2$)とその余震である。

表-1 地震の諸元

	発生年月日	M_{MM}	緯度 (°N)	経度 (°E)	深さ (km)	データ数
1	1997/12/19	4.5	36.32	136.22	13	22
2	1998/11/16	4.8	37.67	137.42	12	10
3	1999/11/7	5.0	36.06	135.79	15	31
4	2000/3/24	4.2	35.91	136.75	9	20
5	2000/6/5	4.9	35.72	136.11	9	30
6	2000/6/7	6.2	36.83	135.56	21	64
7	2000/6/13	4.3	36.81	135.59	20	37
8	2000/6/22	4.6	36.83	135.54	13	52
9	2001/1/22	3.7	37.20	136.79	18	21
10	2001/4/6	4.2	36.88	135.54	14	23
11	2001/4/14	3.8	37.05	137.10	19	28
12	2001/6/13	4.5	36.82	135.60	20	61
13	2002/4/22	3.5	36.39	136.83	11	29
14	2002/8/18	4.7	36.13	136.18	11	48
15	2002/9/8	4.2	35.97	136.57	10	21
16	2002/11/15	3.6	36.31	136.68	8	20
17	2002/11/17	4.7	36.30	136.67	8	62
18	2003/2/11	3.9	36.06	136.34	6	26
19	2003/2/22	3.6	36.49	136.32	17	14
20	2003/6/5	4.1	36.27	136.31	12	40
21	2003/10/12	4.7	36.85	135.64	24	19
22	2004/10/5	4.8	35.93	136.38	12	50
23	2005/3/31	3.9	37.41	136.91	11	11

表-2 距離減衰式の回帰係数と標準誤差

	a	b	c
最大加速度	0.65(0.64)	-0.0051(-0.0046)	-0.046(-0.140)
計測震度	1.56(1.54)	-3.13(-2.93)	-0.82(-1.34)
	σ_r	σ_e	σ
最大加速度	0.219(0.198)	0.193(0.267)	0.292(0.332)
計測震度	0.358(0.347)	0.402(0.477)	0.539(0.589)

注: σ_r は地震内誤差, σ_e は地震間誤差, $\sigma = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_e^2}$

$$S_i = aM_{MM} + c \quad (3)$$

PGA_{ij} と I_{ij} はそれぞれ地震における j 観測点の最大加速度と計測震度である。 S_i は地震の震源特性を表す係数(震源係数), R_{ij} は地震における j 観測点の震源距離(km), b は距離減衰を表す係数(距離係数), g_k は k 観測点の地盤増幅特性を表す係数(地盤係数)である。添え字 A , I はそれぞれ, 最大加速度と計測震度に対応している。 δ_{kj} はクロネッカーのデルタであり, $k=j$ の場合は1, それ以外では0である。式(1), (2)の右辺第2項は常用対数である。

解析対象とした地震記録をもとに式(1), (2)の係数を求めた。回帰分析によって係数を求める際に地盤係数を0とした基準観測点は著者ら¹²⁾がサイト特性評価の際に基準としたKiK-net観測点の和泉(FKIH03)である。この観測点は最表層のS波速度が400m/sの堅固な地盤に設置されている。解析の結果, 得られる各観測点の地盤係数はKiK-net和泉を基準とした相対的な値となる。最大加速度の地盤増幅度(最大加速度増幅度) F^A は 10^{g^A} , 計測震度の地盤増幅度(震度増幅度) F^I は g^I で定義される。一段階目で得られた震源係数 S_i を二段階目で式(3)のような気象庁マグニチュード M_{MM} との関係式として求めた。なお, 回帰分析の際, 近距離の地震動データをより反映させるために, 距離に応じてデータに重み付けを行っている研究¹⁴⁾もあるが, 本研究では重み付けを行っていない。

3. 地盤増幅度の評価

本章では各地震観測点の地盤増幅度の評価方法について説明するとともに, 著者らの過去の解析結果と本研究における解析結果を比較した。

(1) 地盤増幅度の評価方法

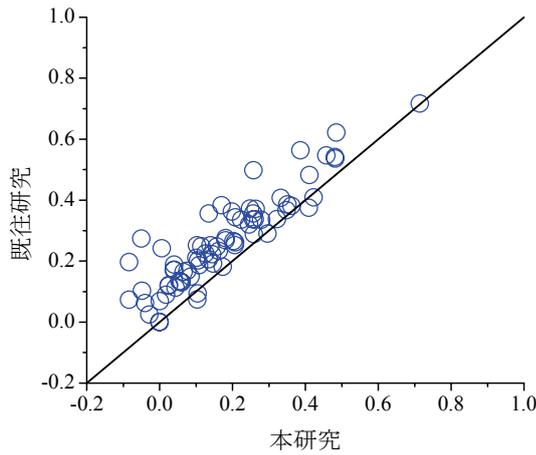
解析対象観測点の最大加速度と計測震度の地盤増幅度を著者らの研究⁷⁾と同様の手順で評価した。最大加速度の常用対数と計測震度が震源項や距離減衰に関する項と地盤増幅特性に関する項の和で表現されるものとし, 各項の係数を二段階回帰分析¹³⁾によって評価した。最大加速度, 計測震度ともに著者ら⁷⁾が用いたモデル式と同様のものを用いた。最大加速度は幾何減衰, 内部減衰を考慮した式であるが, 計測震度はこれらを混同した式である。用いた式を以下に示す。

$$\log PGA_{ij} = S_i^A - \log R_{ij} + b^A R_{ij} + \sum_{k=1} \delta_{kj} g_k^A \quad (1)$$

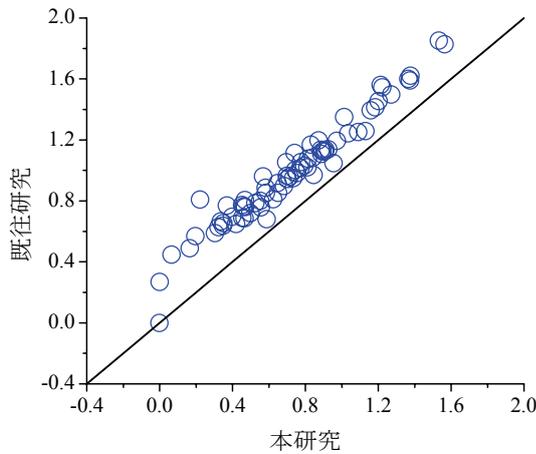
$$I_{ij} = S_i^I + b^I \log R_{ij} + \sum_{k=1} \delta_{kj} g_k^I \quad (2)$$

(2) 本研究と既往研究の解析結果の比較

本研究と既往研究⁷⁾で得られた回帰係数と標準誤差を表-2, 地盤増幅度の対応を図-3に示す。表-2の括弧内の値は既往研究⁷⁾の結果である。両研究の回帰係数の値は若干異なっているが, その要因として, 解析対象地震の相違による震源特性, 伝播経路特性の違い考えられる。標準誤差を比較すると σ_r は若干本研究の値が大きい, σ_e は本研究の結果の方が小さい。既往研究⁷⁾では一段階目で求めた S_i と二段階目で M_{MM} との関係式から求めた S_i の対応が非常に悪い地震(2005年10/3石川県加賀地方で発生, $M_{MM}=4.5$)が解析対象に含まれていたが, 本研究ではこの地震が対象に含まれておらず, そのため σ_e が小さくなったものと考えられる。



(a) 最大加速度の地盤係数 g^A



(b) 震度増幅度 F^I

図-3 本研究と既往研究⁷⁾における地盤増幅度の比較

続いて、図-3の地盤増幅度の対応を見ると最大加速度の地盤係数、震度増幅度ともに既往研究の値が本研究の値より大きくなっている。この要因の一つとして、基準観測点の増幅度が本研究と既往研究⁷⁾で異なることが考えられる。本研究の基準観測点(KiK-net和泉)の g^A と F^I はそれぞれ0であるが、K-NET白峰を基準点とした既往研究⁷⁾ではそれぞれ0.0002、0.2681である。両研究で基準観測点異なることや解析対象地震の違いなどが増幅度の違いに影響を及ぼしていると考えられるが、全体的に見れば両研究の結果は対応していると言える。

4. 地盤増幅度とサイト特性の関係

ここでは、まず地盤増幅度とサイト特性の相関関係を振動数ごとに評価し、サイト特性において地盤増幅度と相関の高い振動数帯を調べる。検証結果に基づいて最大加速度増幅度と震度増幅度からサイト特性を推定する手法を導き、この手法によって自治体観測点におけるサイト特性を推定した。

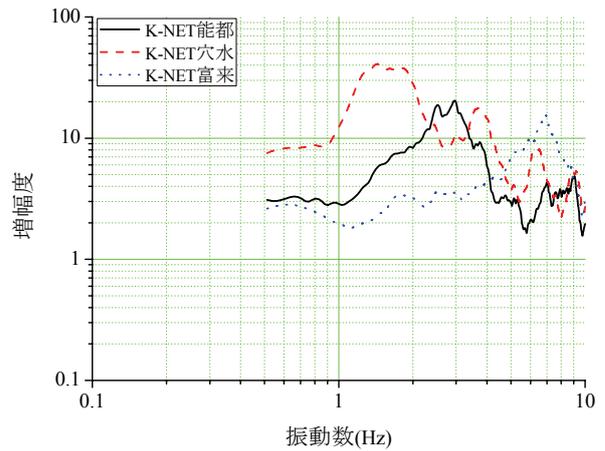


図-4 K-NET観測点のサイト特性¹²⁾

(1) 地盤増幅度とサイト特性の相関関係

地震動指標の地盤増幅度からサイト特性を推定するにあたり、まず、地盤増幅度とサイト特性の相関を調べた。サイト特性は著者らが北陸地方の K-NET, KiK-net 観測点を対象に求めたものである¹²⁾。図-4 にサイト特性の一例を示す。検討対象とした地盤増幅度は最大加速度の地盤係数 g^A ($=\log F^A$)、震度増幅度 F^I と最大速度の地盤増幅度の代替指標として提案した $F^I - g^A$ である¹¹⁾。 $F^I - g^A$ を最大速度の地盤増幅度の代替として用いた理由は以下による。まず、震度増幅度 F^I は次のように定義されるものとする。

$$F^I = I - I_{bed} \tag{4}$$

ここで I は地表での計測震度、 I_{bed} は同一地点の基盤における計測震度である。翠川他¹⁵⁾によると計測震度は最大加速度と最大速度の積との相関が高いことが指摘されている。同一地点でも、地表と基盤では地震動の卓越振動数が異なる可能性があるが、最大加速度と最大速度の積を用いれば、震度に対する卓越振動数の影響を考慮できることが指摘されている¹⁶⁾。ここでは、 I と I_{bed} を次のように最大加速度と最大速度の積で表した。

$$\begin{aligned} I &= a \log(PGA \cdot PGV) + b \\ &= a \log(PGA_{bed} \cdot F^A \cdot PGV_{bed} \cdot F^V) + b \end{aligned} \tag{5}$$

$$I_{bed} = a \log(PGA_{bed} \cdot PGV_{bed}) + b \tag{6}$$

PGA と PGV はそれぞれ、地表での最大加速度、最大速度、 PGA_{bed} と PGV_{bed} は基盤における最大加速度と最大速度である。また、 F^V は最大速度の地盤増幅度、 a 、 b は係数である。式(5)、(6)を式(4)に代入すると次のようになる。

$$F^I = a \log(F^A \cdot F^V) = a(\log F^A + \log F^V) \tag{7}$$

文献 15), 16)によると a は 1 に近い値であるので, 式 (7) を次式に近似する.

$$F^I = \log F^A + \log F^V \quad (8)$$

$g^A = \log F^A$ であるから, $F^I - g^A$ は近似的に $\log F^V$ に対応する指標であると言える.

続いて, 先に得られた地盤増幅度と文献12)で求めた46観測点のサイト特性に基づき, 振動数ごとに両者の相関関係を調べた. 相関係数は次のような地盤増幅度とある振動数のサイト特性増幅度との関係式を求めることによって評価した.

$$\log G(f) = C_1(f)F + C_2(f) \quad (9)$$

$G(f)$ は振動数 f のサイト特性増幅度, F は最大加速度の地盤係数 g^A , 震度増幅度 F^I , または $F^I - g^A$ である. $C_1(f)$, $C_2(f)$ は回帰係数である. 図-5に地盤増幅度と $\log G(f)$ の関係の一例を, 図-6に振動数0.5~10Hzにおける両者の相関係数を示す.

図-6を見ると, F が g^A の場合, 6Hz付近よりも高振動数では概ね相関係数が0.7を超えているが, 6Hzよりも低振動数になると相関が低下し, 1~3Hz付近では相関係数が0.2を下回っている. 震度増幅度 F^I では相関係数が0.7を超えている振動数は g^A に比べて低振動数にあり, 5.5~7Hz付近で相関係数が0.7より高くなっている. これよりも低振動数では相関係数が0.7より低いものの, g^A ほど急激な相関係数の低下は見られない. 計測震度は最大加速度と最大速度の中間的な性質を示すことが指摘されており¹⁵⁾, 最大加速度に比べて低振動数の地震動と相関が良い. このような特性によって最大加速度増幅度に比べて低振動数で相関が高くなったものと考えられる.

一方, $F^I - g^A$ は高振動数ではサイト特性との相関が低い, 4.4Hzよりも低振動数では F^I よりも相関が高い. 以上の検討から明らかなように, 最大加速度の地盤係数, 震度増幅度, 最大速度の地盤増幅度の代替として用いている $F^I - g^A$ の順にサイト特性との相関が高い振動数が低振動数側にシフトしている. この傾向は既往研究¹⁰⁾と同様のものである.

(2) 地盤増幅度とサイト特性の関係式

前節の検討から明らかなように, 最大加速度の地盤係数, 震度増幅度, これらを組み合わせた $F^I - g^A$ とサイト特性の間には相関があり, 地盤増幅度によって相関の高い振動数が異なっている. ここでは振動数 f に対して以下のような g^A や F^I とサイト特性増幅度との関係式を求める.

$$\log G(f) = C_3(f)g^A + C_4(f)F^I + C_5(f) \quad (10)$$

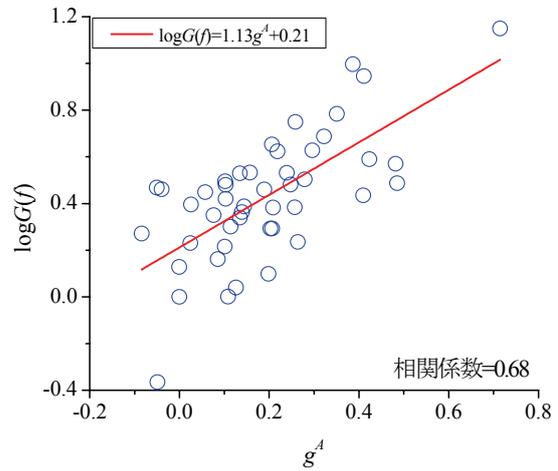


図-5 g^A と10Hzのサイト特性増幅度の関係

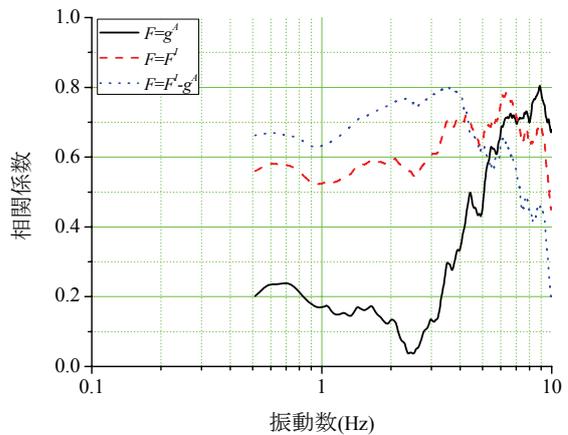


図-6 地盤増幅度とサイト特性の相関係数

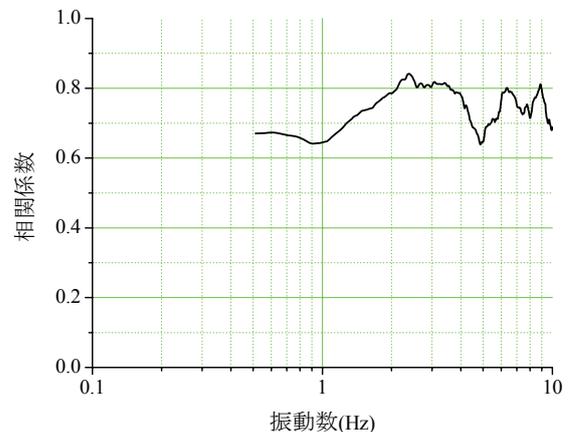


図-7 式(10)を用いた場合の観測値と予測値の相関係数

ここで $C_3(f) \sim C_5(f)$ は回帰係数である. 図-7に $\log G(f)$ の観測値と式(10)による予測値の相関係数, 図-8に $C_3(f) \sim C_5(f)$ を示す. 図-7から明らかなように, 式(10)によってサイト特性を評価した場合, いずれの振動数でも式(9)で単一の地盤増幅度から評価した場合よりも相関係数が高くなっており, 2.1~3.5Hzあたりでは相関係数が0.8を超えている.

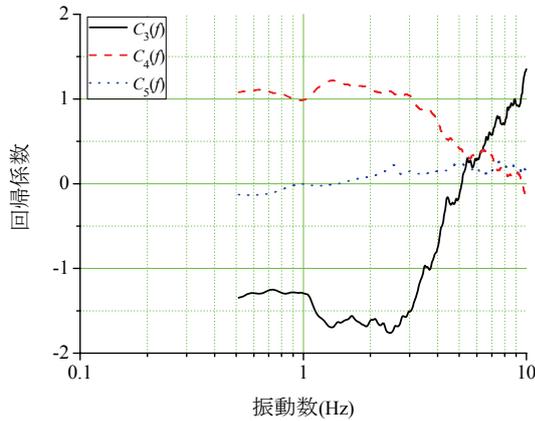


図-8 式(10)の回帰係数

図-8を見ると g^A の係数 $C_3(f)$ は振動数が低くなるにつれて小さくなり、1~3Hzの間では-1.5前後となっている。逆に F^I の係数 $C_4(f)$ は低振動数側で大きくなっており、3Hzよりも低振動数で概ね1以上となっている。 $C_3(f)$ と $C_4(f)$ の値はサイト特性への寄与の高い振動数と対応していることが分かる。

図-9に式(10)によってサイト特性を評価した一例を示す。サイト特性の観測値と式(10)による予測値では増幅度が最大となる振動数は概ね一致しているが、予測値では観測値で見られる山や谷を再現できていない。他の観測点のサイト特性でも同様の傾向が見られた。回帰式による予測値は複数の観測点のサイト特性から求めた平均的なものであるため、ある観測点の増幅度が平均値から離れている場合は、観測値と予測値の対応が悪くなるものと考えられる。

続いて、地震動指標の地盤増幅度とある振動数帯のサイト特性の増幅度平均値 \bar{G} との関係式を求める。ここでは既往研究¹⁷⁾を参考に対象とする振動数帯を決めた。内山・翠川¹⁷⁾は周期0.5秒(2Hz)を境に短周期と長周期の増幅度を定義している。これにならい2Hzを対象振動数の境とした。また、2~10Hzでは5Hzを境として、3つの振動数帯(0.5~2Hz, 2~5Hz, 5~10Hz)の \bar{G} と地盤増幅度の関係式を求めた。関係式として次の式を用いた。

$$\log \bar{G}_{f_1-f_2} = C_6 g^A + C_7 F^I + C_8 \quad (11)$$

f_1 , f_2 はそれぞれサイト特性の増幅度平均値を求める際に対象とする振動数の下限と上限である。図-10に観測記録によるサイト特性の増幅度平均値 $\bar{G}_{f_1-f_2}$ と式(11)による予測値の対応、表-3に $\bar{G}_{f_1-f_2}$ の観測値と予測値の相関係数と標準誤差、式(11)の回帰係数 $C_6 \sim C_8$ を示す。

図-10を見ると2~5Hz, 5~10Hzでは $\bar{G}_{f_1-f_2}$ の予測値と観測値の比(予測値/観測値)が0.5~2の間に収まっており、全体的に見て両者の対応が良い。0.5~2Hzでは予測値/観測値が0.5より小さいものや、2以上になっているものが

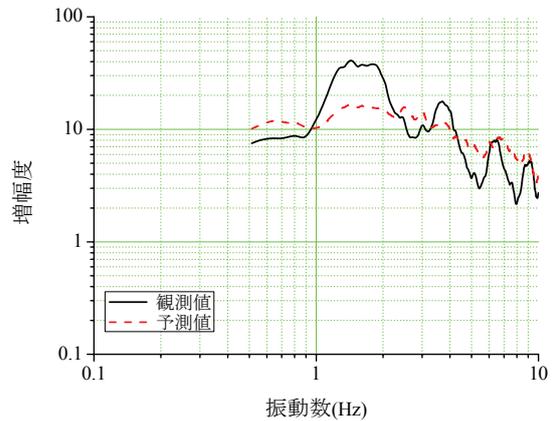
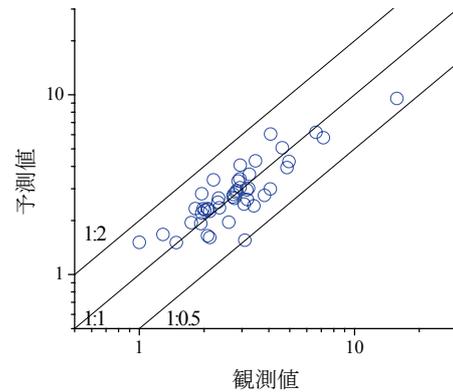
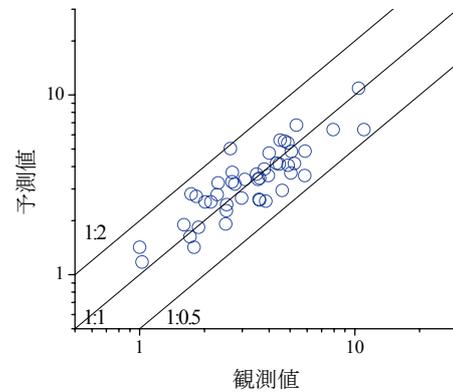


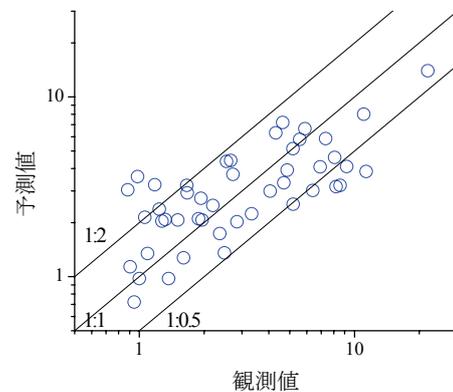
図-9 K-NET穴水におけるサイト特性の観測値と予測値



(a) $f_1=5\text{Hz}$, $f_2=10\text{Hz}$



(b) $f_1=2\text{Hz}$, $f_2=5\text{Hz}$



(c) $f_1=0.5\text{Hz}$, $f_2=2\text{Hz}$

図-10 観測記録と式(11)によるサイト特性増幅度平均値の対応

表-3 式(11)の回帰係数および相関係数と標準誤差

	$f_1=0.5\text{Hz}, f_2=2\text{Hz}$	$f_1=2\text{Hz}, f_2=5\text{Hz}$	$f_1=5\text{Hz}, f_2=10\text{Hz}$
相関係数	0.73	0.86	0.86
標準誤差	0.25	0.12	0.11
C_6	-1.52	-1.02	0.67
C_7	1.14	0.83	0.21
C_8	-0.01	0.15	0.18

いくつか見られ、先の2つの振動数帯域に比べてばらつきが大きい。

次に表-3を見ると、0.5~2Hzでは観測値と予測値の対応が悪い分、やや相関が低いですが、2~5Hz, 5~10Hzでは0.8を超えている。

以上の検討から、地震動指標の地盤増幅度によってサイト特性の形状は大まかにしか評価できないが、ある振動数帯におけるサイト特性の増幅度平均値であれば、ある程度の精度で評価できることが明らかになった。

(3) 自治体観測点におけるサイト特性の増幅度平均値の推定

前節で評価した g^A , F^I と $\log \bar{G}_{f_1-f_2}$ の関係式により、石川県内の自治体と一部の気象庁観測点の増幅度平均値を推定した。図-11に石川県内の地震観測点のサイト特性の増幅度平均値分布を示す。増幅度平均値は自治体および一部の気象庁観測点では式(11)によって推定した値であり(図-11中の●)、その他の石川県内の観測点の値は既往研究¹²⁾で評価したものである(図-11中の▲)。また、図-12にサイト特性のある振動数帯域の平均増幅度の度数分布を示す。図-12の凡例のその他は石川県以外の県の観測点に対応している。

5~10Hzでは全観測点の約80%で $\bar{G}_{f_1-f_2}$ が1~4の範囲にあり、全体的に見て $\bar{G}_{f_1-f_2}$ が小さい。2~5Hzでは5~10Hzに比べて、 $\bar{G}_{f_1-f_2}$ が4以上の観測点が多く、4~7は全体の35%程度を占めている。7以上の観測点は約12%であり、その全てが能登地方の観測点である。0.5~2Hzは2~5Hzよりもさらに $\bar{G}_{f_1-f_2}$ が7以上の観測点が多く、全体の約20%であり、8つの観測点で $\bar{G}_{f_1-f_2}$ が10以上である。10以上の観測点のうち5観測点が自治体または気象庁の地震観測点である。なお、前節で述べたように0.5~2Hzでは $\bar{G}_{f_1-f_2}$ の観測値と予測値の相関が少し低いので、2~5Hz, 5~10Hzに比べて予測精度が落ちるものと考えられる。

0.5~2Hzの $\bar{G}_{f_1-f_2}$ の予測値が10以上である5観測点の中で七尾市田鶴浜町の増幅度は14で最も大きく、他の4観測点は10~11程度であった。周期1秒程度の地震動が構造物被害に大きく影響を及ぼすとされている⁸⁾ことから、0.5~2Hzの増幅度の評価は2007年能登半島地震における

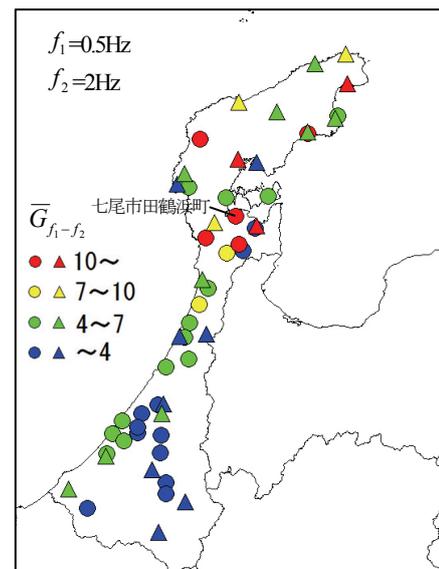
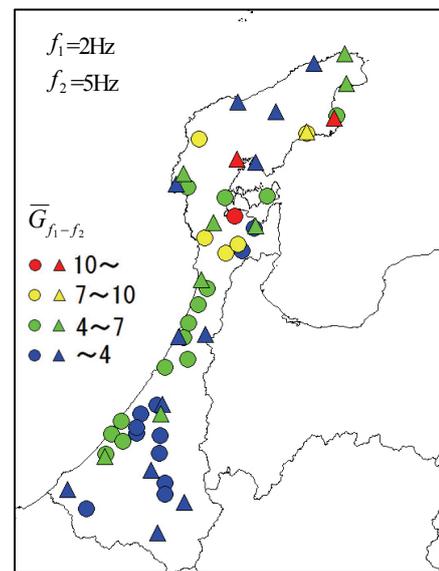
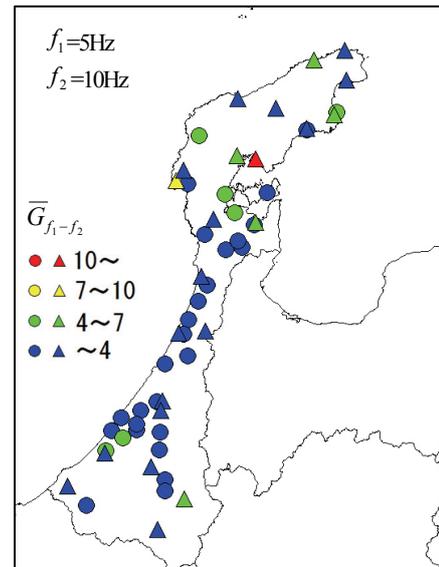


図-11 サイト特性増幅度平均値 $\bar{G}_{f_1-f_2}$ 分布 (●自治体, 気象庁観測点, ▲K-NET, KiK-net観測点)

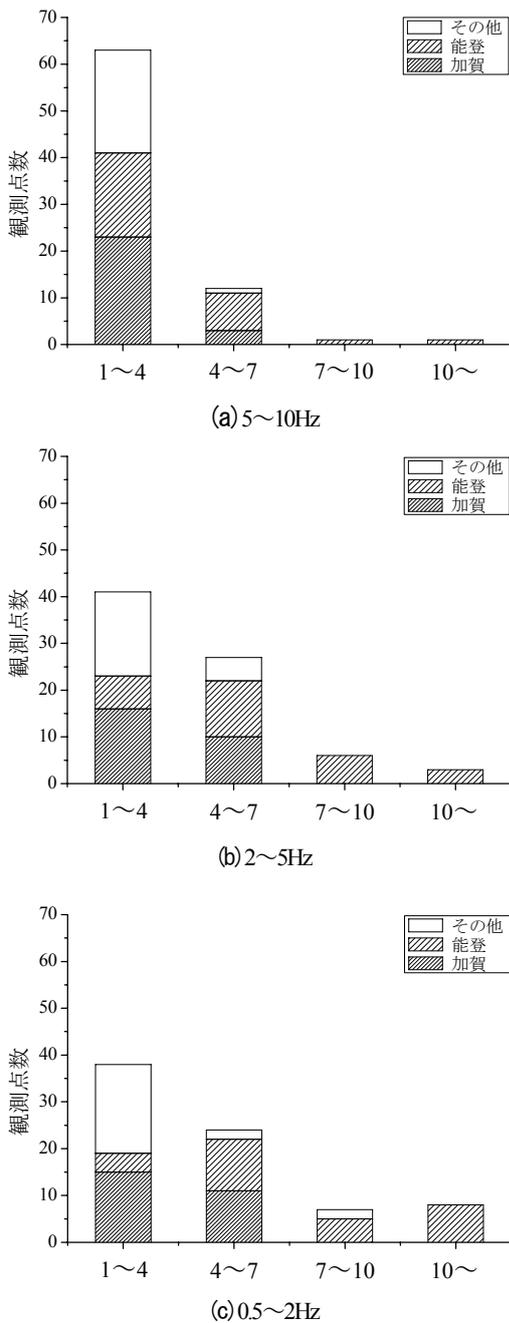


図-12 サイト特性増幅度平均値 $\bar{G}_{f_1-f_2}$ の度数分布

構造物被害の要因を探る上で重要な手掛かりになるものと考えられる。増幅度と構造物被害との関係の評価は今後の検討課題としたい。

以上の $\bar{G}_{f_1-f_2}$ の分布の特徴をまとめると、計算対象とする振動数帯が低くなるほど、能登地方で $\bar{G}_{f_1-f_2}$ の大きな観測点が増える傾向にあり、この地域の観測点では低振動数で地震動が増幅されやすいことが分かる。

能登地方で0.5~2Hzの増幅度が10を超える8観測点の地盤条件を表層地盤のS波速度構造や地形区分から検証する。K-NETの3観測点は公開されているS波速度構造に基づき、表層の平均S波速度を計算した。K-NETでは表層20mまでしか地盤構造が公開されていないので、表層

20mの平均S波速度($AVS20$)を求めたところ、 $AVS20$ は100~150m/s程度であった。また、表層30mの平均S波速度($AVS30$)と $AVS20$ の経験式¹⁸⁾によって、 $AVS30$ を求めたところ、その値は130~190m/s程度であった。

山中他¹⁹⁾は輪島市門前町地域を対象に微動のアレイ観測を実施し、その観測結果に基づきS波速度構造を推定している。この研究では門前支所にある震度観測点付近の地盤構造を推定しており、推定結果によると地表から深さ25mまでの層のS波速度は150m/s以下である。また、25mから30mの層のS波速度が200m/s以下であることから、この観測点の $AVS30$ はかなり小さいものと考えられる。

S波速度構造が不明である他の4観測点の地形区分を地盤・地形デジタルマップ²⁰⁾に基づき調べると、3観測点の地形区分は三角州・海岸低地であり、残りの1観測点は丘陵であった。松岡他²¹⁾が地形区分ごとに $AVS30$ の平均値を調べた結果によれば、三角州・海岸低地は低地では2番目に $AVS30$ が小さく、その平均値は200m/s未満である。一方、丘陵の $AVS30$ の平均値は400m/s以上である。

既往の研究で表層30mの平均S波速度が小さいほど、周期0.5~1.5秒の増幅度が大きくなることが指摘されている³⁾。0.5~2Hzの増幅度が10を超える観測点のうち、 $AVS30$ が小さいと考えられる7観測点では軟弱な表層地盤の影響で0.5~2Hzの増幅度が大きくなったものと考えられる。また、丘陵に位置する観測点では30mよりも深い地盤構造の影響で0.5~2Hzのサイト特性が増幅されたものと推測される。

5. まとめ

本研究では地震波形が得られていない自治体観測点のサイト特性を推定するために、過去の著者らの研究成果を発展させ、最大加速度と計測震度の地盤増幅度から振動数領域の地盤増幅特性(サイト特性)を推定する手法を提案した。まず、既往研究のデータを整理して再度、石川県内の自治体や気象庁、K-NET、KiK-netの地震観測点の地盤増幅度を評価した。続いて、最大加速度の地盤係数 g^A や震度増幅度 F^I および最大速度の地盤増幅度の代替指標($F^I - g^A$)とサイト特性の相関関係を調べた。その結果、 g^A 、 F^I 、 $F^I - g^A$ の順にサイト特性と相関の高い振動数が低振動数側にシフトすることが明らかになった。

検証結果に基づき、地盤増幅度とサイト特性増幅度平均値の関係式を求め、得られた関係式により石川県内の自治体と一部の気象庁観測点の増幅度平均値を推定した。推定した結果、能登地方においてサイト特性の低振動数で増幅度が大きい観測点が多く見られた。

本研究のように計測震度と最大加速度のデータのみか

ら自治体観測点のサイト特性を推定した研究はこれまでになく、自治体観測点の震度データを有効利用する上で本研究の成果は意義のあるものだと考えられる。また、自治体観測点は他の地震観測網に比べて、観測点数が多いことから、K-NETや気象庁だけを対象とする場合に比べて、高密度な地震動評価や被害予測が可能になると考えられる。

なお、本研究では主に北陸地方の地震観測点を対象に検討を行ったが、今後は提案した手法が他の地域の観測点でも適用できるかどうか検証する必要がある。また、本研究では2007年能登半島地震以前の地震を解析対象としているが、今後、能登半島地震の観測記録を解析データに加えて解析を行い、本研究の結果と比較検討する予定である。

謝辞：本研究では石川県の震度情報ネットワークの震度データおよび独立行政法人 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た。3名の査読者の方々から貴重なご意見を頂きました。記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大熊裕輝, 松岡昌志, 山崎雄, 原田隆典: 宮崎県における常時微動HVスペクトル比を用いた地震動の推定, 土木学会論文集, No.696I-58, pp.261-272, 2002.
- 2) 泉谷恭男, 金子雅子: 長野県の震度計設置点における相対的な揺れ易さ, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.39-42, 2002.
- 3) 川上洋介, 瀧川一, 久田嘉章: 地震観測記録より推定した関東平野におけるサイト特性と地形分類との関係, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.687-688, 2004.
- 4) 能島暢呂, 杉戸真太, 太田 裕: 2000~2004年に岐阜県内で観測された計測震度の分析, 土木学会地震工学論文集, 第28巻, No.54, 2005(CD-ROM).
- 5) 片岡俊一, 山本博昭: 地震動記録に基づく青森県内の強震観測点のサイト増幅度, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号(特集号), pp.110-129, 2007.
- 6) 野口竜也, 西原正典, 西田良平: 計測震度の分析による鳥取県の地盤震動特性と地盤構造の関係, 土木学会地震工学論文集, 第29巻, pp.206-213, 2007(CD-ROM).
- 7) 西川隼人, 宮島昌克, 堂下翔平, 北浦 勝: 石川県内の観測点における地盤増幅度の評価, 日本地震工学会論文集, 第7巻, 第2号(特集号), pp.96-109, 2007.
- 8) 境 有紀, 吉岡伸悟, 瀧川一, 壁谷澤寿海: 1999年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集, No.549, pp.43-50, 2001.
- 9) 消防庁: 次世代震度ネットワークのあり方検討委員会中間報告書, 2005.
- 10) 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.
- 11) 西川隼人, 宮島昌克: 地震動強度の地盤増幅度とサイト特性の関係, 震度計の設置促進と震度データの利便性に関するシンポジウム論文集, pp.41-45, 2007.
- 12) 西川隼人, 宮島昌克: 北陸地方のK-NET, KiK-net観測点におけるサイト特性と地形分類, 標高との対応, 土木学会地震工学論文集, 第29巻, pp.214-219, 2007(CD-ROM).
- 13) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.84, pp.757-783, 1990.
- 14) 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, No.523, pp.63-70, 1999.
- 15) 翠川三郎, 藤本一雄, 村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, No.1, pp.51-56, 1999.
- 16) 藤本一雄, 翠川三郎: 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集, No.7, pp.241-246, 2005.
- 17) 内山泰生, 翠川三郎: 地震記録および非線形応答解析を用いた地盤分類別の地盤増幅率の評価, 日本建築学会構造系論文集, No.571, pp.87-93, 2003.
- 18) Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., and Fukushima, Y.: A new attenuation relation for strong ground motion in Japan based on recorded data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.96, pp.879-897, 2006.
- 19) 山中浩明, 元木健太郎, 菅原達哉, 内山知道, 瀬尾和夫, 福元俊一, 山田悦子: 輪島市門前町における微動アレイ観測, 日本地震工学会・大会-2007梗概集, pp.440-441, 2007.
- 20) 若松加寿江, 久保純子, 松岡昌志, 長谷川浩一, 杉浦正美: 日本の地盤・地形デジタルマップ(CD-ROM付), 東京大学出版会, 2005(製品シリアル番号: JEGM1725).
- 21) 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. 794I-72, pp.239-251, 2005.

(2008. 5. 19 受付)

EVALUATION OF SPECTRAL SITE EFFECT FROM AMPLIFICATION FACTOR FOR INDICES OF EARTHQUAKE GROUND MOTION OBTAINED AT LOCAL GOVERNMENT SITES

Hayato NISHIKAWA and Masakatsu MIYAJIMA

In order to estimate spectral site effect that is essential to prediction of strong motion for local government sites, we examined a relationship between site effect and amplification factor for *PGA* and *JMA* seismic intensity obtained at local government sites. A substitute for amplification factor for *PGV* was evaluated from amplification factor for *PGA* and *JMA* seismic intensity. Amplification factors for indices of earthquake ground motion at each observation site were evaluated and relationship between amplification factor and site effect was examined, these have a clear correlation. We proposed a formula in terms of amplification factor for *PGA* and *JMA* seismic intensity and clarified that the proposed method can precisely evaluate the site effect. The proposed method make it possible to evaluate the site effect of local government sites that is difficult to obtain the ground motion records and to evaluate the site effect more densely compared with that in the past.