

推定地震動の差異を常時微動計測に基づき定量的に評価する手法の検証

A Verification on the Quantitative Evaluation Method of the Difference
in Estimated Seismic Ground Motions using Microtremor Measurement

角 礼雄	Reo SUMI	(島根県浜田県土整備事務所)
一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)
秦 吉弥	Yoshiya HATA	(日本工営(株)中央研究所)
森 佑樹	Yuki MORI	(東海旅客鉄道(株))

本研究では、著者らがすでに提案した異なる2地点における推定地震動の差異を定量的に評価する手法について、改良を加えた上で、妥当性の検証を試みた。対象とした提案手法は、2地点の地震動の差異の程度を、当該2地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク振動数のずれにより評価するものである。本研究では、地震動の差異の程度がサイト増幅特性の差異に依存することを踏まえ、どちらか1地点でサイト増幅特性が与えられた場合に、その形状を考慮できるように提案手法に改良を加えた。さらに、提案手法を広島県呉市に適用し、アンケート震度調査結果と比較することで提案手法の妥当性を検証した。

キーワード：常時微動，H/V スペクトル，アンケート震度，地震動，サイト増幅特性
(IGC : E08)

1. はじめに

構造物設置地点の地震観測データを利用した地震動予測手法が提案されている^{例えば, 1)}。しかし、地震観測点の数が限られていたり、構造物設置地点に適切な観測地点を設置できないなどの理由から、構造物設置地点と実際の地震観測地点の位置がずれることもある。そこで、実際の地震観測地点と検討対象位置が異なることによって、推定地震動にどの程度の差異が生じるかを評価することは、設計実務において重要であると考えられる。ここで地震動の差異とは、振幅や位相、振動特性等の違いである。例えば、A地点とB地点の地震動に差異がないことが事前に評価できていると、両地点の構造物の設計入力地震動には同じ地震動を用いても問題がないと判断できる。逆に、A地点とC地点の地震動の差異が大きいことが予想されていると、別々に地震動を設定する必要があることがわかる。

本研究では、常時微動H/V スペクトルのピーク振動数の差異に基づいたサイト増幅特性の補正によって地震動を推定する手法²⁾に着目した。そして、この補正方法が妥当であるという前提の上で提案した、常時微動H/V スペクトルの差異から異なる2地点における推定地震動の差異を定量的に評価する手法³⁾を改良した。また、さらに提案手法の精度の検証を、アンケート震度との比較により試みた。具体的な検証方法としては、2001年芸予地震における広島県呉市内のアンケート震度調査結果⁴⁾を利用した。

2. 既往の研究

2.1 地震動の差異の評価指標

本研究では、地震動の差異を評価する際の定量的指標として、応答スペクトルに着目した指標³⁾を用いることにする。具体的には、例えば地震動Aと、地震動Bのそれぞれの応答スペクトルを求め、各振動数におけるスペクトルの値の比(B/A)をとる。つまり、地震動Bの応答スペクトルを地震動Aの応答スペクトルで除することによって比を求める。もし、これらの2つの地震動が全く同じであれば2つの地震動の応答スペクトルの比率は全振動数域にわたり1.0になるが、実際には若干のずれが生じる。そして、基準となる比率の値(基準比率)を定めて、基準比率からどの程度応答スペクトル比がずれたか、そのずれの面積を求めて差異の指標とする(図-1)。本指標は地震動の破壊力と周期特性の両方について着目した指標である。本研究で

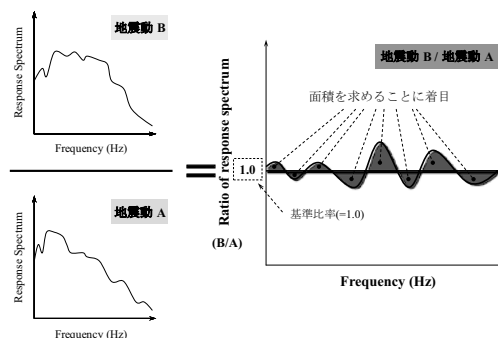


図-1 応答スペクトル比における基準比率からのずれの面積に基づく評価指標(基準比率 1.0 の場合)

は、一般的に、設計基準で規定されていることの多い、減衰定数5%の加速度応答スペクトルを用いて検討した。なお、同一地点における観測波と推定波を対象とする場合には、推定波が観測波と一致することが望ましく、そのスペクトルも一致するという意味で基準比率が1.0となる。異なる2地点の地震動の比較においては、震源からの距離に応じて地震動が減衰する程度が振動数に依存することを考慮し、距離の差異に応じて、振動数毎に異なる値を基準比率として設定することが望ましいと考えられる。ただし、本稿の範囲では、簡単のため振動数毎の違いの考慮は行っていない。

ここで図-1における面積の算定方法について述べる。いくつかの方法が考えられるが、本研究では、グラフの縦軸を対数軸で表記し、横軸の振動数(Hz)も対数軸で表記することとした。そして、面積は両対数軸上で算出される値とし、土構造物の被害に大きく影響を及ぼす範囲である、0.5Hz から2.0Hzの範囲⁵⁾の面積とした。

2.2 常時微動H/V スペクトルを用いた地震動の推定手法とその事例

秦ら⁶⁾は、常時微動計測結果を利用して、2007年能登半島地震において被災した能登有料道路の各地点の地震動を推定している。具体的には、まず、常時微動計測結果に基づき能登有料道路を4つのゾーンに分割している。そして、各ゾーンにおいて短期間の地震観測を実施し、地震観測記録からサイト増幅特性を求め、そのサイト増幅特性を各ゾーン内の個々の地点の常時微動計測結果を利用して補正することで、個々の地点の地震動を推定している。

図-2に能登有料道路の盛土崩落地点と常時微動計測位置を、図-3に地震観測地点(地震観測によるサイト増幅特性の算定地点)と常時微動計測記録によりサイト増幅特性が補正された各地点の関係を示す。つまり、まず常時微動計測記録により、地盤震動特性が比較的類似していると考えられる各ゾーンに地震計を1つずつ設置し(具体的には、縦-9、盛-10、縦-10、縦-38と名付けられた地点)、中小地震の観測によって、それぞれの地震観測地点におけるサイト増幅特性を推定している(図-4)。そして、次に、常時微動計測によって得られたH/Vスペクトルに基づき、サイト増幅特性を補正²⁾、個々の地点の地震動を推定している。図-5に補正方法のイメージを示す。地震動のサイト増幅特性の形状と常時微動H/Vスペクトルの形状が、少なくともピーク振動数の位置については定量的に、また、ピークの高さの程度についても定性的には対応していることから、サイト増幅特性の形状を補正する方法である。

2.3 推定地震動の差異と常時微動H/V スペクトル

上述の能登有料道路の事例において、各ゾーンの地震計設置地点に対して推定した地震動の応答スペクトルを基準とし、各地点に対して、常時微動H/Vスペクトルに基づいてサイト増幅特性を補正したうえで推定した地震動

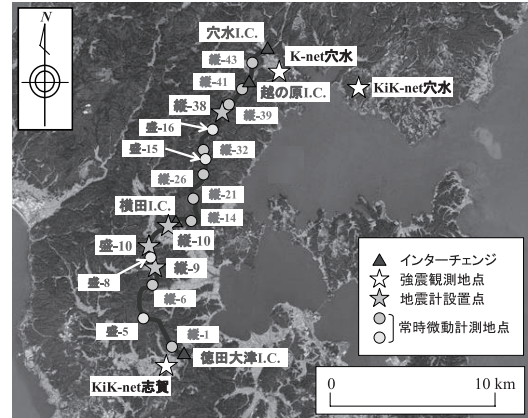


図-2 盛土崩落地点とその周辺における常時微動の計測位置⁶⁾に加筆

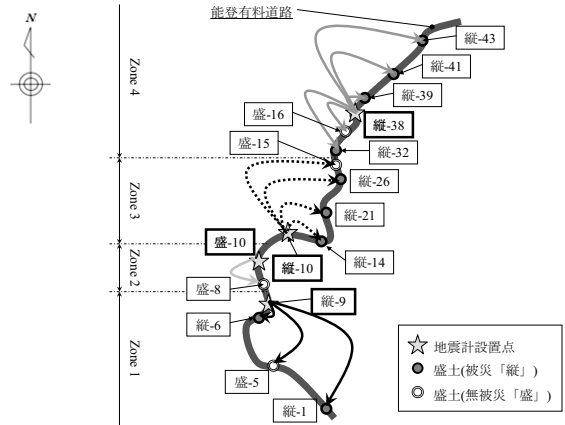


図-3 地震計設置地点と地震動推定地点の関係

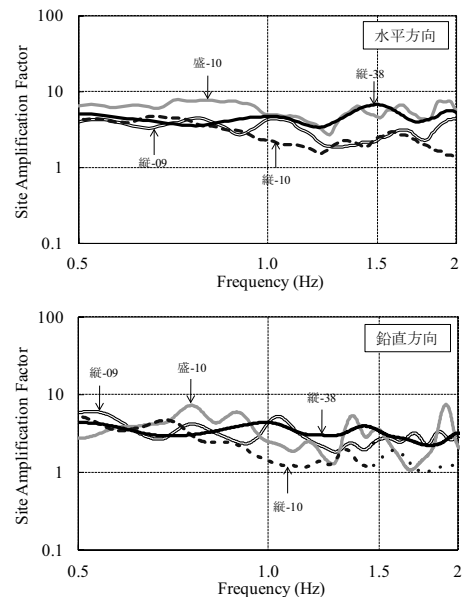


図-4 能登有料道路における地震計設置地点のサイト増幅特性⁶⁾

の応答スペクトルの比を考える。このことにより、常時微動 H/V スペクトルの差異と推定された地震動の応答スペクトルの差異の関係が評価できる。ただし、常時微動 H/V スペクトルの差異は、上述の補正により地震動を推定していることから、ピーク振動数の差異のみで評価する。また、簡単のため、ずれの値の正負は無視して絶対値とした。ここで、Zone1 では、地震計を設置した地点が縦-9 であるので、(縦-1/縦-9)、(縦-6/縦-9)、(盛-5/縦-9)のように計3通りの応答スペクトルの比がとれる。同様に Zone2 においては、盛-10 に地震計を設置しているので、(盛-8/盛-10)の1通り、Zone3 は(縦-14/縦-10)、(縦-21/縦-10)、(縦-26/縦-10)、(盛-15/縦-10)の計4通り、Zone4 は(縦-32/縦-38)、(盛-16/縦-38)、(縦-39/縦-38)、(縦-41/縦-38)、(縦-43/縦-38)の計5通りとなる。なお、上下動は対象としていないが、水平2成分あるので、実際はその倍の点が評価できる。また、地点毎に震源距離が異なるため基準比率は1.0にはならないが、簡単のため、ここでは全地点に対し基準比率を1.0として評価した。なお、実際には距離に応じて振動数毎の減衰が違うので、基準比率を1.0として評価することが妥当ではなく、検討結果のばらつきの原因となっている可能性はある。図-6 に、各ゾーンにおける、応答スペクトル比のずれの面積と、補正時に考慮された2地点

における常時微動H/V スペクトルのピーク時の振動数のずれの関係³⁾を示す。

なお横軸は、各ゾーンにおいて、地震観測地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク振動数を基に、他地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク振動数のずれを除いたものとして評価した。

なお、2地点間の H/V スペクトルのピーク時の振動数のずれが0のときは、応答スペクトル比の面積も理論上0になる。これは、振動数のずれが0のとき、サイト増幅特性を補正しないためである。そこで、図-6の結果を原点を通る直線で近似することとした。ただし、理論上原点を通ることは確かであるが、直線となる保証はない。データ数が少ないため、あくまでも単純化のための仮定である。ここで、地震観測地点のサイト増幅特性と個々の常時微動計測地点に対して補正により求めたサイト増幅特性の比をとり、2.1節の基準比率からのずれの面積に基づく評価指標と同様に、サイト特性の比の基準比率1.0からのずれを面積で評価した。図-7にその計算結果を示す。なお、図-7の横軸は図-6と合わせるために、地震観測地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク振動数で他地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク振動数のずれを除いたものである。図-7は図-6とほぼ同様の関係を示しており、Zone

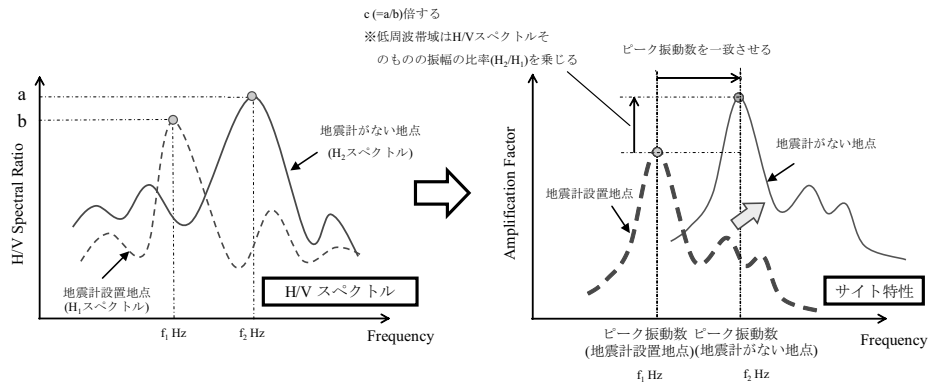


図-5 補正方法のイメージ²⁾

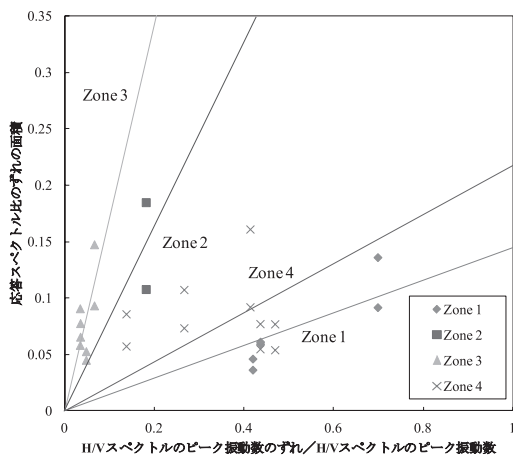


図-6 推定地震動の差異と H/V スペクトルのピーク振動数の差異との比較

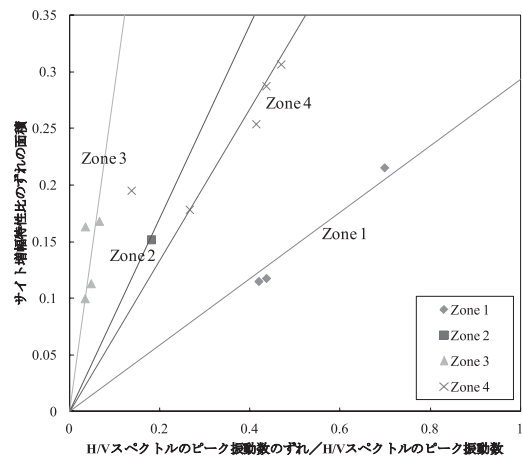


図-7 サイト増幅特性の差異と H/V スペクトルのピーク振動数の差異との比較

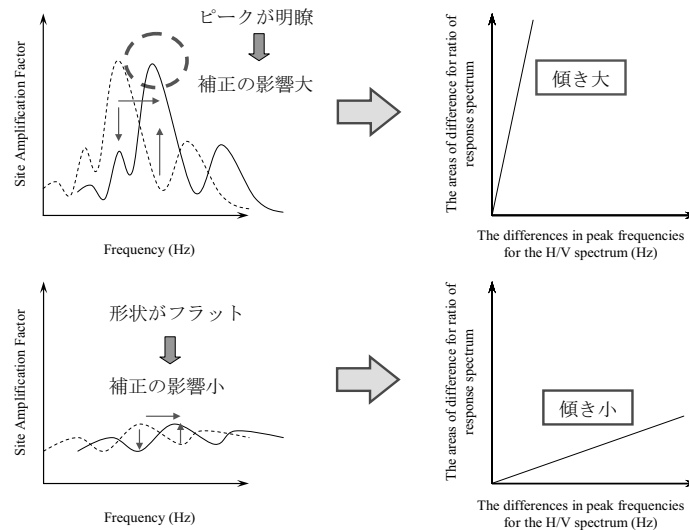


図-8 直線の傾きとサイト増幅特性の形状の関係

1, Zone 4, Zone2, Zone 3 の順番で差異の程度が大きくなりやすい(傾きが大きい)ことがわかる. このように図-6, 図-7における直線近似の傾きがゾーン毎に異なる理由は, 定性的には, サイト増幅特性の補正の際の補正量がサイト増幅特性の形状に依存するためであると考えられる. すなわち, 図-8 に示すように, サイト増幅特性のピークが明瞭な形状を示していれば, 近似直線の傾きが大きくなる. 逆にサイト増幅特性の形状がフラットであれば, 近似直線の傾きが小さくなると思われる.

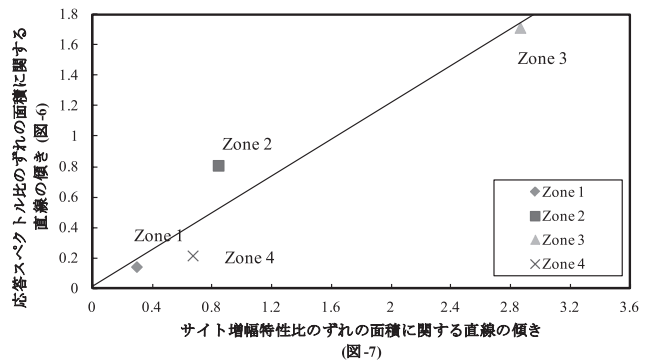


図-9 図-6 の直線の傾きと図-7 の直線の傾きの関係

3. 推定地震動の差異の評価手法の改良

図-6 で示した直線を用いると, 検討地域における常時微動H/V スペクトルのピーク振動数のずれを求めることにより, 推定地震動の差異を評価できる. なお, 図-6 は著者らがすでに提案した図表³⁾に対し, 横軸を修正して改良したものである. しかし, 直線は4つあり, どの直線が最も適切なのかの評価は困難である. そこで, 図-6 と図-7 が対応していることに着目し, 検討地域のサイト増幅特性に着目することで, 下記のように一般化を図る.

具体的には, 図-7における各直線の傾きと, 図-6における各直線の傾きを比較したものを, 図-9 に示す. これはほぼ直線になっていることから, 検討地域のサイト増幅特性に応じて, 適切な直線の傾き(図-6における直線の傾きで, 常時微動 H/V スペクトルの差異に応じた地震動の差異の程度)を算出する. 以下に評価の手順を示す.

1. 検討地域におけるサイト増幅特性を求める.
2. サイト増幅特性のピーク振動数を少しずつずらすように補正し, サイト増幅特性比のずれを面積として求める.

3. 補正時のピーク振動数のずれとサイト増幅特性比のずれの面積の関係から, 図-7の直線の傾きにあたる指標(ピーク振動数の差異に応じたサイト増幅特性比の差異の増加傾向)を得る. この値を, 図-9の横軸の値とする.
4. 図-9を用いて, 応答スペクトル比のずれの面積に関する, 適切な直線の傾き(図-6における直線の傾きで, 常時微動 H/V スペクトルの差異に応じた地震動の差異の程度)を算出する.
5. 図-6の関係において, 当該地域のサイト増幅特性に応じた適切な直線が得られるので, 検討対象地点のそれぞれに対し, 常時微動 H/V スペクトルを求め, ピーク振動数の差異に応じた地震動の差異を評価する.

ここでサイト増幅特性には, 地震基盤～地表と, 地震基盤～工学的基盤の2種類の定義があり得るが, 評価対象となる地震動が地表であれば, 地震基盤～地表のサイト増幅特性を, 工学的基盤であれば, 地震基盤～工学的基盤を用いればよい. 本研究では, 地表面の地震動を対象としており, 地震基盤～地表のサイト増幅特性を用いている.

4. 提案手法の適用事例と妥当性の検証の試み

4.1 常時微動計測結果

アンケート震度調査⁴⁾が実施されている呉市(図-10)に対して、提案手法を適用し、提案手法の妥当性の検証を試みた。表-1に呉市の町別の常時微動計測位置を、図-11に常時微動計測結果をそれぞれ示す。

常時微動計測では、物探サービス(株)製の速度計(GEONET283D)を用いてサンプリング周波数 100Hz で 660 秒間計測した。そして、常時微動の時刻歴データから 163.84 秒間のデータを 3 区間選択し、この 3 区間のデータを解析対象とした。選択した 3 区間のデータを高速フーリエ変換(FFT)し、水平 2 成分、上下 1 成分のフーリエスペクトルを求め、バンド幅 0.05Hz の Parzen Window で平滑化を行った。そして、水平二乗和した水平動フーリエスペクトルを上下動フーリエスペクトルで除して H/V スペクトルを算出した。そして、3 区間の H/V スペクトルを平均化した H/V スペクトルのピーク時の振動数を固有振動数とした。なお計器の性能から、0.2Hz 以上のみを図示した。

図-11 より呉市の常時微動 H/V スペクトルのピーク振動数は全体的に高振動数であることがわかる。ただし、焼山の地点はピーク振動数が不明瞭であり、本検討では分析対象外とした。

4.2 提案手法の適用結果

上述の常時微動計測結果を基に、実際に提案手法を適用した。すなわち、常時微動計測から常時微動H/V スペクトルのピーク振動数を求め、強震観測地点であるK-NET 呉のサイト増幅特性(図-11)⁷⁾を基準に、各常時微動計測地点のH/V スペクトルのピーク振動数を少しづつすように補正し、呉市の常時微動計測地点のサイト増幅特性を推定する。そして、3 章で述べた評価手順により、常時微動H/V スペクトルのピーク振動数の差異に応じた地震動の差異を評価する。評価結果を能登におけるZone 1~4 の例と合わせて図-12 に示す。図-12 より呉市の検討における図-10の呉市の等価アンケート震度の直線の傾きは 0.23 であり、図-9 から応答スペクトル比のずれの面積の傾きでは 0.16 に相当する(図-13 参照)。この傾き(0.16)を用いて、呉市の推定地震動の差異を評価することができる。ただし、呉市のケースは能登有料道路のケースと異なり、図-12 からわかるように、ばらつきが大きい。これは、図-11 に示すように、検討に用いたサイト増幅特性に明瞭な山と谷が複数存在していることが原因の一つとして考えられる。したがって、直線近似できるピーク振動数のずれの範囲にある程度の上限があるなど、サイト増幅特性の形状に

応じて、直線近似の妥当性について検討する必要があることが示唆される。この点については今後の課題である。



図-10 呉市の等価アンケート震度

表-1 呉市の常時微動計測地点一覧 (緯度・経度)

計測地点名	計測位置		
	N	E	緯度・経度
郷原	N 34 ° 18 ' 7.8 "	E 132 ° 38 ' 8.39 "	
	N 34 ° 13 ' 24.8 "	E 132 ° 39 ' 13 "	
仁方	N 34 ° 13 ' 51.9 "	E 132 ° 37 ' 30.1 "	
	N 34 ° 14 ' 55.5 "	E 132 ° 35 ' 42.4 "	
東畑	N 34 ° 15 ' 8.92 "	E 132 ° 35 ' 6.44 "	
	N 34 ° 14 ' 52 "	E 132 ° 34 ' 41.3 "	
歌原	N 34 ° 15 ' 14.2 "	E 132 ° 34 ' 16.3 "	
	N 34 ° 14 ' 45.6 "	E 132 ° 34 ' 17.8 "	
中央	N 34 ° 14 ' 54.9 "	E 132 ° 33 ' 52.5 "	
	N 34 ° 15 ' 0.88 "	E 132 ° 34 ' 17.8 "	
本通	N 34 ° 14 ' 40.9 "	E 132 ° 33 ' 46.1 "	
	N 34 ° 14 ' 7.96 "	E 132 ° 33 ' 51.5 "	
二河町	N 34 ° 15 ' 10.1 "	E 132 ° 33 ' 43 "	
	N 34 ° 15 ' 0.13 "	E 132 ° 33 ' 12.6 "	
愛宕町	N 34 ° 14 ' 37.8 "	E 132 ° 33 ' 28.3 "	
	N 34 ° 14 ' 56.2 "	E 132 ° 33 ' 23.6 "	
三島町	N 34 ° 12 ' 41.3 "	E 132 ° 32 ' 38.5 "	
	N 34 ° 17 ' 6.1 "	E 132 ° 34 ' 5.79 "	
神山	N 34 ° 17 ' 51.7 "	E 132 ° 33 ' 11.5 "	
	N 34 ° 17 ' 14.4 "	E 132 ° 31 ' 4.07 "	
天庇	N 34 ° 15 ' 39.1 "	E 132 ° 31 ' 53.5 "	
吉浦			

ここで、強震観測地点(K-NET 呉)における常時微動 H/V スペクトルのピーク振動数と、各計測地点の常時微動 H/V スペクトルのピーク振動数のずれのコンター図を描いた結果を図-14 に示す。K-NET 呉は中央として表記している。また、(a)で全体を、(b)では K-NET 呉(図では中央と表記)周辺の拡大図を示す。そして、このずれに、呉市の応答スペクトル比のずれの面積の傾き(0.16)を掛けて、呉市の応答スペクトルの差異を評価した。図-15 にその試算結果を示す。両者とも、宮原の地点周辺が大きく異なる値を示している。

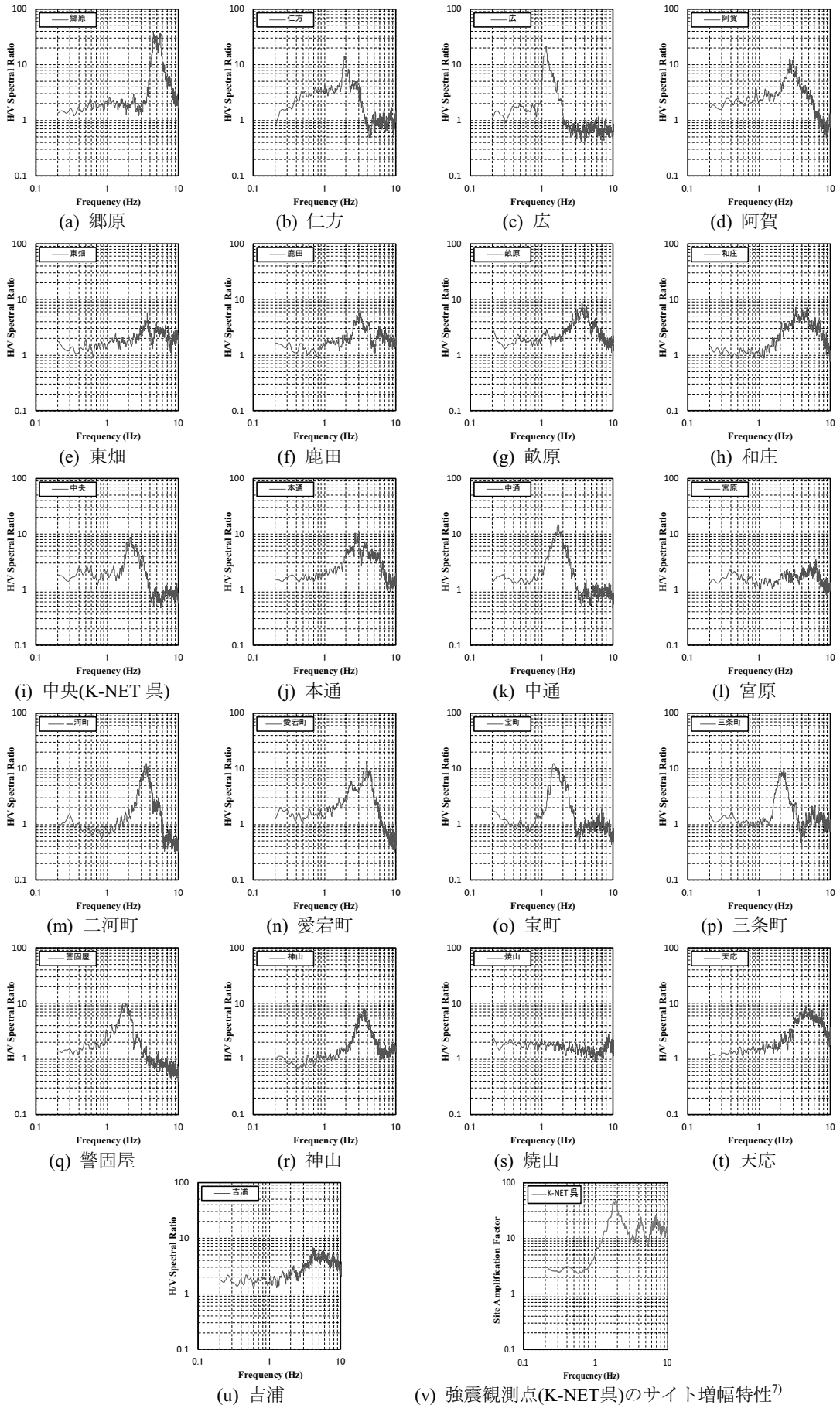


図-11 呉市及びK-NET呉(中央)における常時微動H/V スペクトル及びK-NET 呉のサイト増幅特性⁷⁾

4.3 提案手法の妥当性の検証

提案した推定法の妥当性を検証するために、広島県呉市内のアンケート震度調査結果⁴⁾を利用した。アンケート震度調査は被災者にアンケート調査票を高密度に配布し、体感・体感場所・事物の変化・被害に関する回答を震度算定方法にしたがい、震度を気象庁により定められている震度階級で算定するものである。ここで用いた呉市のアンケート震度は、2001年芸予地震における町別の震度分布を推定したものであり、面的な広がりを持つ町毎に震度を推定したものである。これに対し、常時微動計測は町毎に任意に設定した1地点での実施であり、必ずしも町毎の代表的な地点の地盤震動特性が把握できているとは限らない。この点については、町毎に高密度で常時微動計測を実施したり、アンケート回答者の居住地の分布を分析したりするアプローチが考えられ、今後の課題である。図-16に呉市のアンケート震度のコンター図を、図-17にアンケート震度の差異(K-NET 呉(中央)と各地点の震度の差)と応答スペクトル比のずれの関係を示す。

なお本稿におけるアンケート震度とは、アンケートの結果を、気象庁震度に変換した等価アンケート震度のこと

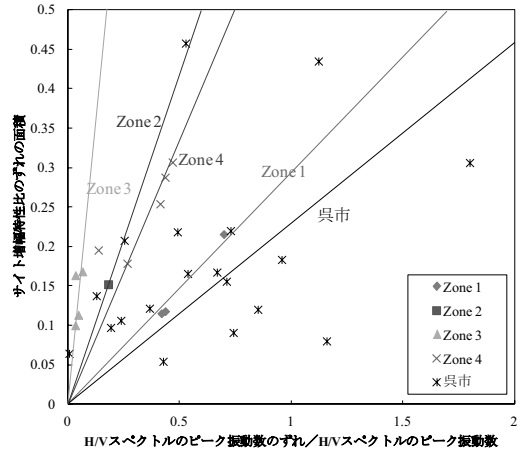


図-12 呉市の結果を考慮したサイト増幅特性の差異と H/V スペクトルのピーク振動数の差異との比較

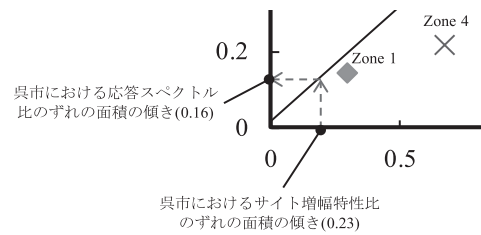


図-13 呉市における応答スペクトル比のずれの面積の傾きの推定(図-9の一部拡大)



(a) 呉市全体



(b) K-NET 呉(中央)の周辺 (拡大図)

図-14 H/V スペクトルのピーク振動数のずれの分布



(a) 呉市全体



(b) K-NET 呉(中央)の周辺 (拡大図)

図-15 応答スペクトル比のずれの分布

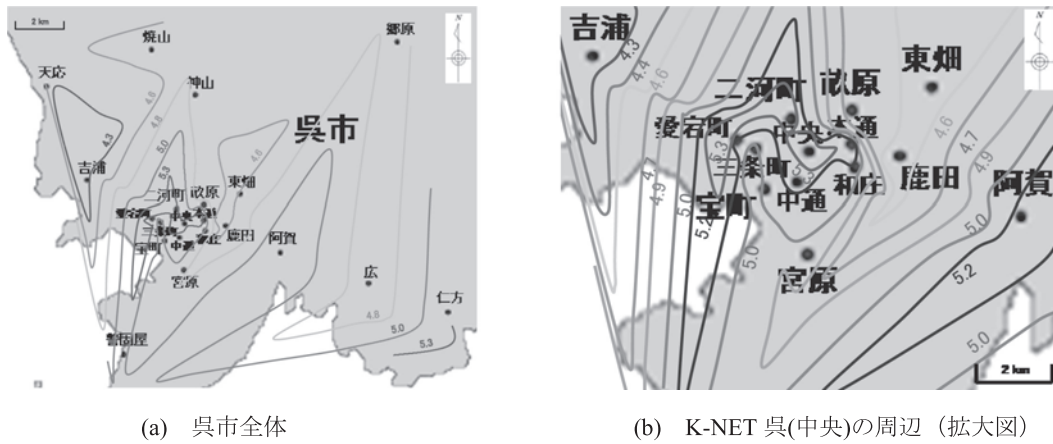


図-16 等価アンケート震度の分布

を指す。図-16 のコンターは、図-14 もしくは図-15 のコンターと阿賀から広にかけての形状や、K-NET 呉 (中央) 付近の形状に対応関係がある。しかし、図-17 のように推定した地震動の差異の程度とアンケート震度の差異の程度との関係性は小さい。このことから、提案手法により、概略的に地震動の差異の程度の分布を把握することはできるが、個別のケースのばらつきは大きく、個々の地点に適用することは難しい点もあるといえる。ただし、今回の検討は、対象地域のアンケート震度の分布を考慮して、強震観測点としてはK-NET 呉のみを比較対象として選んでいる。他の強震観測点を比較対象とした場合や、アンケート震度以外の指標を用いた場合には、対象とした地点のサイト特性や、指標ごとの特性によって今回と異なる結果がえられる可能性があり、今後検討していく必要がある。

5. 結論

本研究では、実際の地震観測地点と検討対象位置のずれに応じた地震動の差異の程度を定量的に評価する手法を改良し、さらに、呉市の等価アンケート震度を用いて妥当性を検証した。その結果、以下の結論が得られた。

- 1) 常時微動 H/V スペクトルのピーク振動数のずれに応じた推定地震動の差異の程度を、対象地点のサイト増幅特性の形状に応じて評価する手法を提案した。この提案手法の妥当性は、能登有料道路における4つのゾーンの検討事例により確認した。
- 2) 呉市で常時微動計測を行い、K-NET 呉(中央)の地点を基準に、地震動の差異の程度の分布を評価した。また、評価結果を等価アンケート震度の分布と比較し、提案手法により、概略的に地震動の差異の分布を把握することができることが分かった。

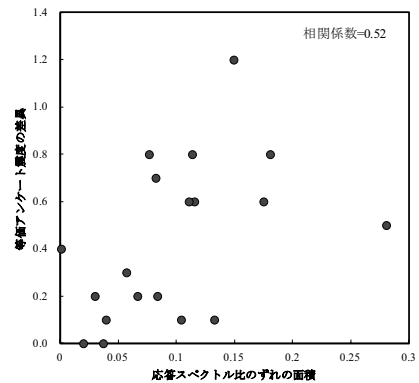


図-17 等価アンケート震度の差異と推定した地震動の差異の程度との比較

謝辞

(独)防災科学技術研究所 K-NET の地震観測記録を使用させていただきました。また呉市における常時微動計測では、広島大学の学生の皆様(小野氏、生頼氏、角田氏)にご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説(上巻), 国土交通省港湾局監修, pp.336-341, 2007.
- 2) 長尾毅, 山田雅行, 野津厚：常時微動 H/V スペクトルを用いたサイト増幅特性の経験的補正方法に関する研究, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.56A, pp.324-333, 2010.
- 3) 一井康二, 角礼雄, 秦吉弥, 保利修：常時微動による地震動の差異の定量的評価の試み, 地盤工学会中国支部論文報告集地盤と建設, Vol.29, No.1, pp.55-62, 2012.
- 4) 重松尚久, 森伸一郎, 河村進一, 俵司：2001年芸予地震における広島県内のアンケート震度調査および呉市の被害について, 土木学会第57回年次学術講演会, 1-752, pp.1503-1504, 2002.
- 5) 野津厚, 井合進, 一井康二, 沼田淳紀：ケーソン式岸壁の変形に寄与する地震動の振動数成分, レベル2地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.311-318, 2000.
- 6) 秦吉弥, 一井康二, 村田晶, 野津厚, 宮島昌克：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した線状構造物における地震動の推定とその応用—2007年能登半島地震での道路被災を例に—, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.799-815, 2010.
- 7) 野津厚, 長尾毅：スペクトルインバージョンに基づく全国の港湾等の強震観測地点におけるサイト増幅特性, 港湾空港技術研究所資料 No.1112, 2005.

(2012年6月27日 受付)