

計測震度の地盤増幅度の評価と地形分類との関係

西川隼人¹・宮島昌克²

要旨：本論文では石川県の震度情報ネットワークなどの記録を用いて、石川県と石川県に近接する県の一部を対象に観測点ごとに計測震度の地盤増幅度を評価した。その結果、地盤増幅度が1.5以上の地点の多くは能登地方の海岸部に存在しており、また、地盤増幅度が0.5前後の地点は福井県や岐阜県の県境付近で多く見られた。続いて、日本全国を対象に整備された地形・地盤分類のメッシュマップのデータを用いて、地形分類ごとに観測点をまとめ、各地形分類の平均的な地盤増幅度を検証した。三角州・海岸低地に分類された観測点の地盤増幅度の平均値が最も大きく、山地や扇状地の観測点では震度増幅度が小さい傾向にあった。

キーワード：震度情報ネットワーク、計測震度、地盤増幅度、地形分類

1. 序論

気象庁震度階級（以降、震度）は日本で最も一般的な地震動指標の一つであるだけでなく、行政・自治体が地震発生時の被害状況把握や地震防災計画策定の際の基本的かつ重要な情報となるものである。1996年に導入された計測震度¹⁾によって震度情報収集の迅速化が図られるとともに、気象庁によって既存の地震計設置地点以外にも震度計が設置されたことにより、以前に比べて密度の高い震度分布が把握できるようになった。平成7～8年度にかけて自治省（当時）によっても震度計の整備が進められ、各市町村に震度計が設置された。各都道府県において、市町村の震度観測点は気象庁観測点や独立行政法人防災科学技術研究所のK-NET(強震観測網)²⁾などとともに震度情報ネットワークを構成しており、ネットワークで収集された地震動情報は被害状況の把握などに利用されている。自治体に設置されている計器が各都道府県に設置されている計器の大半を占めることが多いことから、対象とする都道府県全域の地震動予測や早期被害把握を行なう上で、市町村の計器が設置されている地点での地震動特性の評価が欠かせない。これまで、市町村の震度観測点を対象に地盤特性の評価などに関する研究が実施されている³⁾が、気象庁やK-NETなどの地震記録を対象にした研究^{4), 5)}に比べて検討事例は少ない。事例が少ない要因として次のことが考えられる。すなわち、自治体に設置されている計器はK-NETなどと異なり、初動体制の確立などで重要な情報となる計測震度のデータ収集を主たる目的としていたため、研究用としての配慮はなされていない場合が多く、そのため

に、地震波形データを保存するシステムが確立されていない、あるいは回収に煩雑な手続きを要するという問題点がある⁶⁾。近年はSK-NET(首都圏強震動総合ネットワーク)⁷⁾のように、首都圏などの大都市圏で自治体や他機関の計器で記録された地震波形を収集するシステムが構築されており、観測された記録に基づいて地震動特性の評価が行われている⁸⁾。しかし、地方ではそのようなシステムの整備が十分に進んでいない。2004年新潟県中越地震に代表されるように、首都圏などの大都市圏以外の地域で大きな被害地震が発生していることを考えると、地方部の自治体でも各市町村で得られた地震データを可能な限り収集し、検討を行うことによって、地震防災に有効活用する必要があると考えられる。先に述べたように計測震度は、地震時に自治体が初動体制の迅速化を図る上で重要な指標となることから、計測震度を対象にした各観測点の地震動特性の把握が必要である。

本論文では石川県とその周辺地域を対象に石川県の震度情報ネットワークや独立行政法人防災科学技術研究所のK-NET、KiK-net(基盤強震観測網)⁹⁾で観測された記録を用いて各観測点の計測震度の地盤増幅度を評価した。対象地域には森本・富樫断層帯¹⁰⁾や砺波平野断層帯・呉羽山断層帯¹¹⁾のように全国的に見て地震発生確率の高い断層帯が多く存在することから、これらの断層帯による地震動予測を行う上でも、計測震度の地盤増幅度の評価は有効な資料になると考えられる。

また、観測点以外の地点において地盤条件から計測震度の地盤増幅度を推定するための基礎的資料を得るために、地盤条件と計測震度の地盤増幅度との関係を検証した。ここでは若松他¹²⁾が日本全国を対象に整理した地形・地盤分類メッシュマップで得ら

1 舞鶴工業高等専門学校、学生課 教育研究支援センター、技術職員

2 金沢大学大学院、自然科学研究科、教授

れる地形分類データなどを地盤条件として採用し、地盤増幅度との関係を調べた。

2. 解析データ

2.1 対象観測点

本論文で対象とした観測点の概要を述べるにあたり、まず、震度情報ネットワークについて説明する。1995年の兵庫県南部地震を契機として、地震発生時の初動体制を整えるために震度情報を迅速に収集する必要性が指摘され、当時の自治省消防庁によって全国の市町村単位で設置した震度計から成り立っているネットワークシステム(震度情報ネットワーク)が構築された。ネットワークの構築の際に、計測震度計、加速度計が設置されていない市町村においては消防庁によって新たに計測震度計が設置された。地震時に市町村、気象庁、K-NET観測点で記録された計測震度や最大加速度などの情報は各都道府県庁に収集されるとともに、各都道府県で収集されたデータは消防庁に送られ、さらに他の都道府県にフィードバックされるシステムとなっている¹³⁾。

石川県の震度情報ネットワークは平成9年5月から運用されており、各市町村に設置されている計測震度計27台、気象庁地震計5台、K-NET地震計9台から得られた計測震度、最大加速度(時刻歴波形上で3成分をベクトル合成した際の最大値)を収集している。ただし、市町村に設置されている震度計の台数は市町村合併が行われる以前の段階の数字である。解析には石川県の震度情報ネットワークの観測点で得られた記録以外にもネットワークに属していないK-NET観測点やKiK-net観測点の記録を用いた。また、石川県以外の地域で発生した地震も解析の対象としたので、福井、富山、岐阜県にある一部の観測点の記録も用いた。対象とした地点は震度情報ネットワークで利用されている38地点と、K-NET、KiK-net観測点からなる72地点である(Fig.1)。これらの観測点では3つ以上の地震で記録が得られている。なお、対象観測で得られた計測震度は0.1~4.7であった。観測記録のなかには地盤の非線形化が生じる可能性がある大きな振幅の記録が含まれていたが、そのような記録の数は少なかったため、その際の地盤増幅度を独立に扱わなかった。

2.2 対象とした地震記録

対象とした地震は2000~2005年に石川県付近で発生した地震である。地震を選定する際には地震のタイプによる震源特性、伝播経路特性の違いを可能な限り避けるために、震源深さが概ね20km以内の地殻内地震の記録を用いた。なお、上述の条件に該当する地震で記録が得られている場合でも、今回対象とする観測点の大半で震源距離が200kmを超えており、地震記録において表面波が卓越している可能

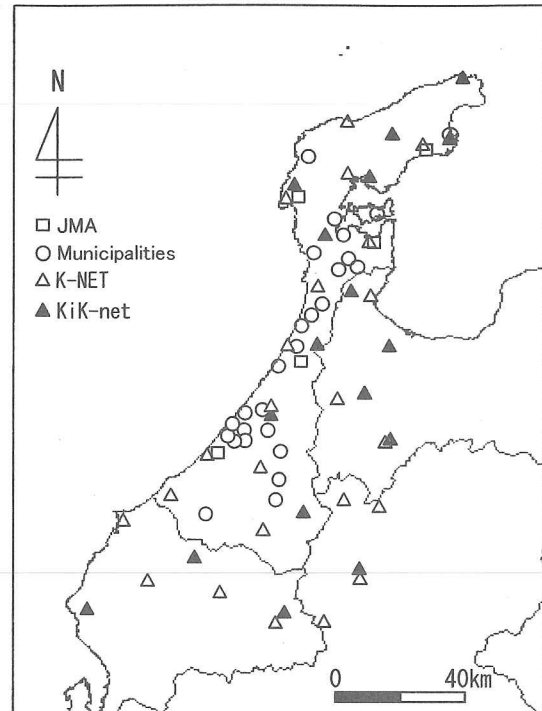


Fig.1 Distribution of observation sites.

Table.1 Parameters of earthquakes.

M_{JMA}	3.6~6.1
Depth(km)	1~24
Number	617
date	2000/1/10~2005/10/3

性がある場合は検討対象から除外した。対象とした地震の概要を Table.1, 震央位置を Fig.2 に示す。

3. 解析手法と結果

これまでの地盤増幅度評価に関する研究では工学的基盤のような揺れの小さい地点を基準として評価することが多い。例えば、翠川他は第三紀あるいは、それ以前の丘陵地を基準に観測点ごとの地盤増幅度を評価している¹⁴⁾。また、大西他は山地に対する相対的な増幅度を地盤増幅度と定義している¹⁵⁾。今回、対象とした観測点では、K-NET観測点の白峰(観測点コードISK013)の揺れが相対的に小さいことが明らかになっている¹⁶⁾。そこで本論文では白峰を地盤増幅度算出の際の基準点として解析を行なった。ただし、白峰観測点のボーリングデータによると表層数mに軟弱な層が堆積している。ここでは重複反射理論によって工学的基盤相当の層(S波速度 V_S が670m/sの層)における加速度波形を求め、その波形に基づき計測震度を計算した。解析の際に地盤材料による減衰はS波に関する Q 値(Q_S)によって考慮

した。周波数依存性を考えず $Q_s=V_s/15$ という関係式から Q_s を求めた。得られた波形から最大加速度と計測震度を求め、この地点を基準とした相対的な地盤増幅度を評価した。ただし、重複反射理論で求めた加速度波形は水平 2 成分であるので、計測震度を 3 成分から求めた値に補正する必要がある。そこで、観測された記録から最大加速度の水平成分合成値と 3 成分合成値の関係式を求め、水平 2 成分から評価した計測震度を 3 成分から評価した値に換算した。得られた計測震度の水平 2 成分合成値と 3 成分合成値の関係は次式のようにになった。

$$I_{JMA} = 1.016I_2 \quad (1)$$

I_2 は水平 2 成分から計算した計測震度、 I_{JMA} は 3 成分から計算した気象庁計測震度である。

各地点の計測震度の地盤増幅度は距離減衰式を二段階回帰分析¹⁷⁾によって求めることによって算出した。解析の際には距離減衰式のモデルとして次式を用い、各係数を評価した。

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

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

I_{ij} は i 地震における j 観測点の計測震度である。 S_i は i 地震の震源特性を表す係数(震源係数)、 R_{ij} は i 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。 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(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(2)の係数を求めた。係数を求める際に基準観測点である白峰の g_k を 0 に固定した。よって、得られる各地点の地盤係数 g_k は工学的基盤を基準とした値となる。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_{JMA} との関係式として求めた。なお、回帰分析の二段階目においてデータ数に応じた重み付けを行っている研究もあるが、本研究では重み付けを行わなかった。回帰分析で得られた地盤係数以外の回帰係数と標準誤差を Table.2 に示す。本論文で得られた距離減衰式の回帰係数を同タイプの計測震度の距離減衰式¹⁸⁾の係数と比較する。Fig.3 に示すように本研究の震源係数は既往研究の結果に比べて小さい。逆に距離係数(既往研究¹⁸⁾では-4.70)は本論文の値の方が大きくなっている。このような回帰係数の違いはそれぞれの研究で対象とした地震のタイプの相違によるものと推測される。

各観測点の計測震度の地盤増幅度(以降、震度増

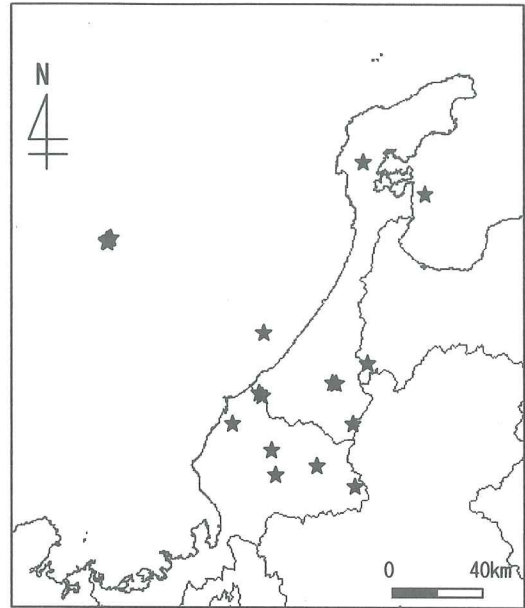


Fig.2 Distribution of epicenter.

Table.2 Regression coefficients and standard errors.

a	1.63	σ_r	0.347
b	-2.93	σ_e	0.421
c	-1.68	σ	0.546

σ_r : Intra-event error

σ_e : Inter-event error

σ : Total error($\sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_e^2}$)

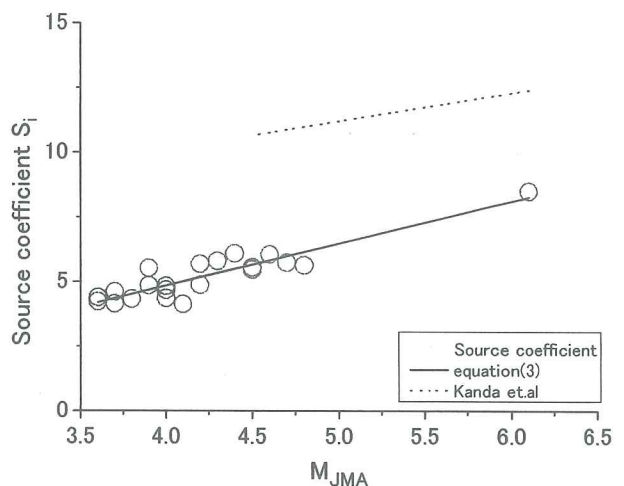


Fig.3 Source coefficients against M_{JMA} .

幅度)は 0.27~1.85 であった。なお、最大加速度や最大速度の場合、地盤増幅度は一般的に任意地点と基準地点の振幅比として表されるが、震度増幅度の場合は任意地点と基準地点の差として表される。よって、震度増幅度は g_k で表される。対象とした観測点の震度増幅度の分布を Fig.4 に示す。増幅度分布

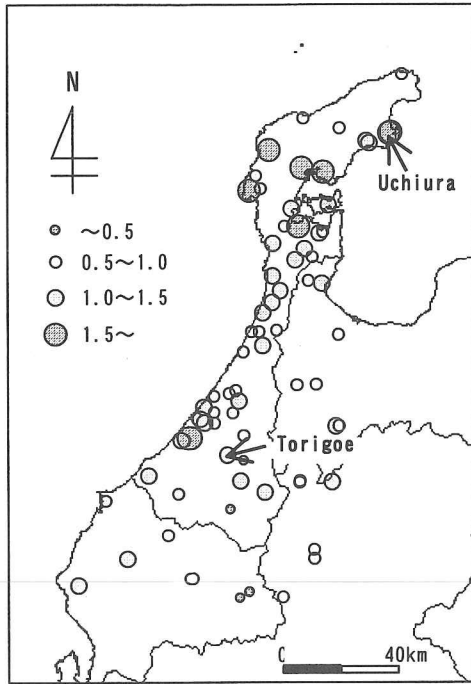


Fig.4 Distribution of site amplification factors for JMA seismic intensity at each station.

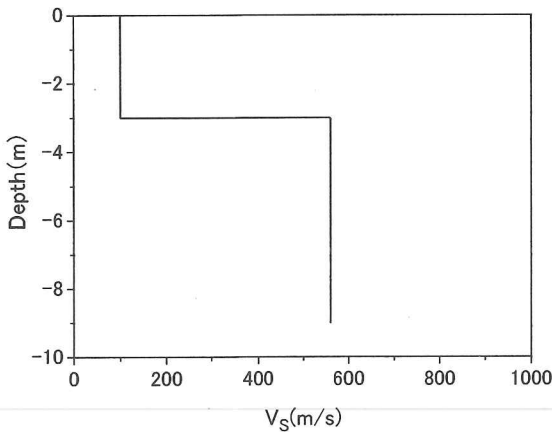


Fig.5 Subsurface structure of Torigoe(ISK012).

を見ると、震度増幅度が大きい地点(1.5以上の地点)は能登地方の平野部に多く見られ、加賀地方では増幅度が1.5以上の地点は1箇所のみであった(Fig.4)。震度増幅度が0.5よりも小さい地点は各県の県境に近い山間部に多く見られる。山間部は一般的に表層から基盤までの深度が小さいことから、上記のように震度増幅度が小さいと考えられる。ただし、震度増幅度が0.5未満の観測点が存在する地域でも、震度増幅度が1.0を上回る地点がある。例えば、Fig.4に示すK-NET観測点の鳥越(観測点コードISK012)は震度増幅度が1.1程度であり、近接する観測点に比べて増幅度が大きい。鳥越のボーリングデータ(Fig.5)によると地表から深さ3mまでにS波速度が100m/sの層が堆積している。この観測点ではこのよ

Table.3 Averaged value of site amplification factors and standard deviations with respect to the classification.

Classification	Number	\bar{g}_k^*	S.D.**
Mountain	15	0.715	0.316
Hill	8	1.144	0.222
Gravelly terrace	10	1.027	0.368
Valley bottom lowland	7	1.027	0.381
Fan	9	0.862	0.266
Sand dune	4	0.936	0.152
Natural levee	1	0.786	0.000
Delta and coastal lowland	15	1.235	0.268
Back marsh	3	1.060	0.086

* : Averaged value of g_k , ** : Standard deviation

うな表層数 m の軟弱層の影響で短周期での地震動が増幅され、そのために周辺の観測点に比べて震度増幅度が大きくなったものと推測される。このように、山間部でも表層数 m に軟弱層が堆積している場合は震度増幅度が大きくなると考えられる。上記のような地形と震度増幅度の対応に関する詳細な検証は次章で行なう。

4. 地形分類と震度増幅度の対応

従来の地盤増幅度に関する研究において、地盤条件と増幅度の関係が調べられており、表層地盤の平均S波速度や地盤種別、地形分類、地質年代などが地盤条件を表わす指標として用いられてきた^{14), 15)}。これらの指標の中で地形分類や地質年代などのデータは国土数値情報などから容易に収集することが可能である。翠川他¹⁴⁾や大西他¹⁵⁾の研究によると、地質年代と地盤増幅度には明確な相関は見られないが、地形分類と地盤増幅度には、ばらつきがやや大きいものの一定の相関関係が見られることが指摘されている。そこで、ここでは地形分類ごとに観測点をまとめ、震度増幅度との対応を調べた。地形分類データは若松他¹²⁾が日本全国を対象に整理した地形・地盤分類のメッシュマップから収集した。このメッシュマップは地形分類、表層地質、地表面傾斜などのデータから構成されているものである。本論文で対象とした観測点の微地形分類ごとの観測点数、平均値と標準偏差をTable.3、分類ごとの震度増幅度をFig.6に示す。三角州・海岸低地に分類された観測点の震度増幅度の平均値が最も大きく、山地や扇状地の観測点では震度増幅度が小さい傾向にあり、丘陵や砂礫質台地の観測点における増幅度は全体の中で中間的な値であった。上述の本研究で検証した地形分類と震度増幅度の対応は大西他¹⁵⁾の研究結果と同

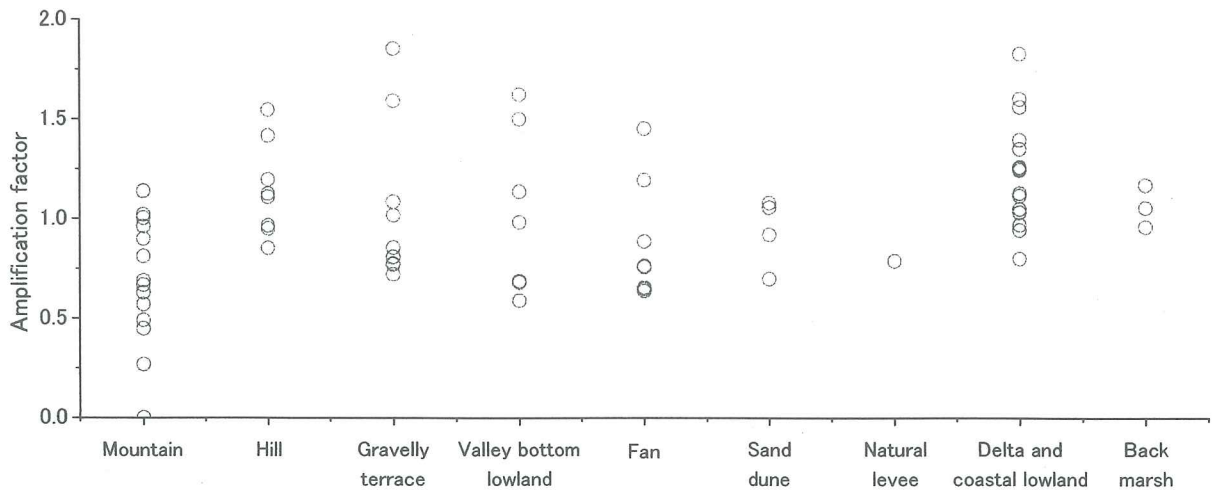


Fig.6 Site amplification factors for JMA seismic intensity with respect to the classification.

様な傾向であった。分類ごとの震度増幅度のばらつきを表わす標準偏差(表中の S.D.)を見ると、山地、砂礫質台地、谷底低地で大きい。これらの地形分類では地盤増幅特性と相関が高いとされる表層30mの平均S波速度は大きい傾向にあることが指摘されている¹⁹⁾。しかし、これらの地形分類に対応する観測点の中にはK-NET観測点の鳥越やKiK-net観測点の内浦(ISKH03)のように、地表から深さ10mまでにS波速度の小さな層が堆積している地点がある(Fig.5とFig.7参照)。この2つの観測点は同一の地形分類(それぞれ砂礫質台地、谷底低地)の中で震度増幅度が大きい。これらの観測点では表層地盤の影響によって、震度増幅度と相関が高い短周期の地震動²⁰⁾が増幅された可能性がある。表層地盤構造が震度増幅度に及ぼす影響を検証するために、K-NETやKiK-netホームページ^{2), 9)}で公開されている表層地盤のS波速度構造に基づき、重複反射理論によって各観測点のS波の伝達関数を求め、伝達関数における短周期での増幅特性と震度増幅度との対応を調べた。伝達関数は工学的基盤相当の層(S波速度500~600m/s程度)を最下層に設定し、計算した。ただし、ボーリングデータが公開されていない観測点やS波速度が500~600m/s程度の層が存在しない観測点は検討対象から除外した。震度増幅度と伝達関数の対応を調べる際には、震度増幅度と相関が高い周期帯(0.125~0.167秒)²⁰⁾の増幅度平均値を検討に用いた。各分類のS波伝達関数をFig.8、震度増幅度 g_k と伝達関数の増幅度平均値(今後、 \bar{G} と略す)の関係をFig.9に示す。Fig.9から明らかのように鳥越(ISK012)と内浦(ISKH03)の震度増幅度 g_k と \bar{G} はそれぞれの属する分類で最も大きい。以上の検討から明らかのように、表層30mの平均S波速度が大きい地形分類に属する観測点でも、表層数mに軟弱層が存在する観測点では短周期の地震動が増幅され、震度増幅度が大きくなる可能性がある。上記のような表層数mに軟弱層

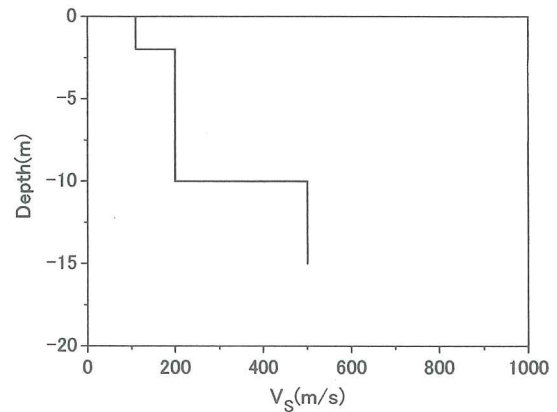


Fig.7 Subsurface structure of Uchiura(ISKH03).

が堆積している観測点での大きな震度増幅度が砂礫質台地、谷底低地などの地形分類で見られた増幅度のばらつきに影響を及ぼしたと推測される。

5. 結語

本論文では従来の研究において気象庁などの観測点に比べて対象となることが少なかった自治体の観測点を主たる解析対象とし、地点ごとに計測震度の地盤増幅度を評価した。対象地域として石川県の震度情報ネットワークに属する観測点や石川県に近接する県に展開されているK-NET, KiK-net観測点を選んだ。自治体にとって地震発生時の初動体制の確立や地震防災計画策定の際に重要な指標となる計測震度を対象にして、距離減衰式の回帰係数を求めることにより、各観測点の地震増幅度を評価した。評価した各観測点の震度増幅度は0.27~1.85であった。増幅度分布の特徴を見ると、震度増幅度が大きい地点(1.5以上の地点)は能登地方の平野部に複数、存在するのに対して、加賀地方では増幅度が1.5以上の地点は1箇所のみであった。震度増幅度が0.5よりも小さい地点は各県の県境に近い山間部に多く見

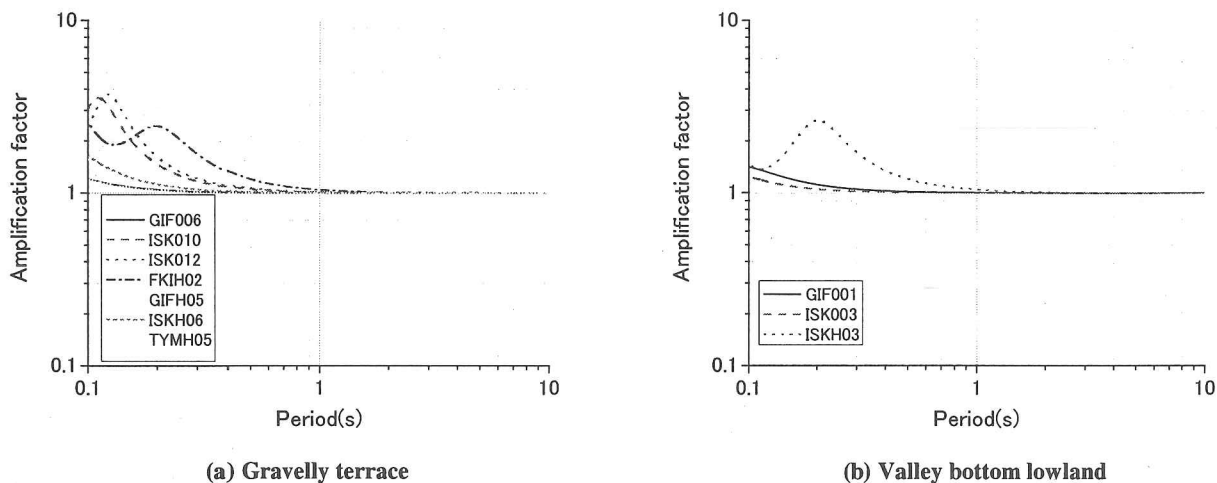


Fig.8 Transfer function of S-wave.

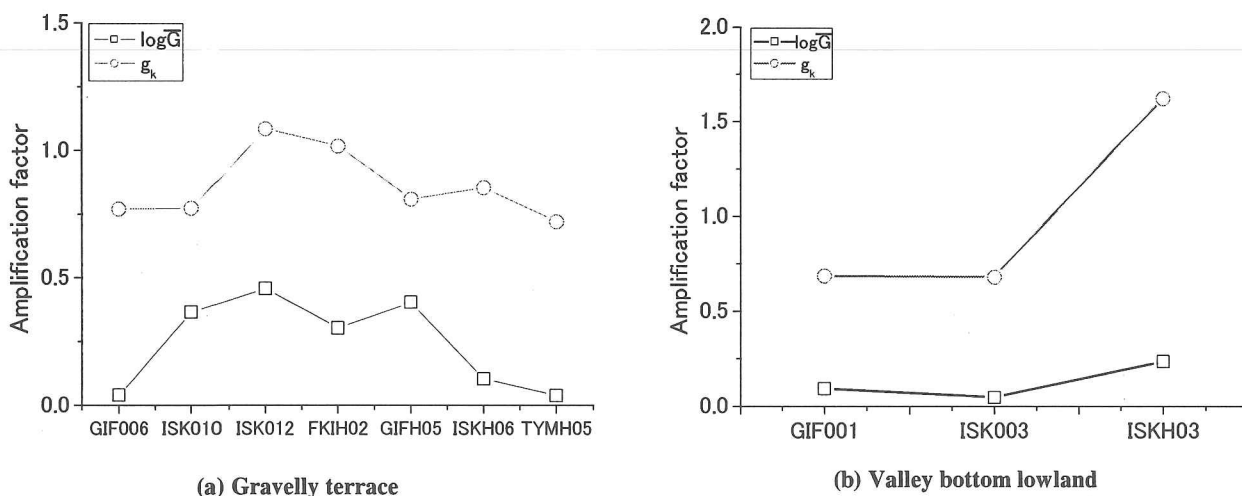


Fig.9 Relationship between $\log \bar{G}$ and g_k .

られた。ただし、震度増幅度が 0.5 未満の観測点が存在する山間部の地域でも、震度増幅度が 1.0 を上回る地点があった。それらの地点では極表層の軟弱な層の影響によって短周期の地震動が増幅されたために震度増幅度が他の山間部の地点に比べて大きくなったと推測される。

続いて、日本全国を対象に整理された地形・地盤分類メッシュマップから地形分類データを収集し、地盤条件を表す指標として用いて、震度増幅度との関係を検証した。その結果、三角州・海岸低地に分類された観測点の震度増幅度の平均値が最も大きく、山地や扇状地の観測点では震度増幅度が小さい傾向にあった。また、丘陵や砂礫質台地の観測点における増幅度は全体の中で中間的な値であった。この地形分類と震度増幅度の対応は既往の研究で報告された結果と調和的なものであった。また、砂礫質台地などの表層30mの平均S波速度が大きい地形分類において、震度増幅度のばらつきが大きかった。これらの地形分類に属する観測点の中には表層数mに存在する軟弱層の影響で震度増幅度が大きくなった観

測点が見られた。砂礫質台地などの地形分類では、全体的には地盤が良好であるものの、震度増幅度の大きな観測点が一部含まれているために、各分類における震度増幅度のばらつきが大きくなったものと推測される。

謝辞

解析には石川県の震度情報ネットワーク、独立行政法人 防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測記録を使用させて頂きました。一部の図の作成の際に福山大学の鎌田輝男先生作成のソフト白地図 KenMap Ver.8.0 を使用させて頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：ホームページ, <http://www.kishou.go.jp/know/shindo/shindokai.html>.
- 2) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク (K-NET) ホームページ, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>.
- 3) 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.
- 4) 中村亮一, 植竹富一: 地震動における三次元減衰構造の影響(3) 強震速報・気象庁 87 型強震計・K-net データによる減衰構造の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.57-58, 1997.
 - 5) 川瀬 博, 松島信一, 佐藤智美, 伏見 実, 巽 誉樹: JMA87型強震計の観測記録に基づいた震源・伝播経路・サイトの各特性の分離(その1) 内陸浅発地震の場合, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.201-202, 1999.
 - 6) 座間信作: 次世代震度情報ネットワークに関する検討状況, 日本地震工学会-2005梗概集, pp.6-7, 2005.
 - 7) 首都圏強震動総合ネットワーク: <http://www.sknet.eri.u-tokyo.ac.jp/>.
 - 8) 川上洋介, 額額一起, 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.
 - 9) 防災科学技術研究所: 基盤強震観測網 (KiK-net) ホームページ, <http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>.
 - 10) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 森本・富樫断層帯の評価, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01dec_morimoto/index.htm, 2001.
 - 11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: 砺波平野断層帯・呉羽山断層帯の評価, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/02dec_tonami/index.htm, 2002.
 - 12) 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.
 - 13) 日本地震学会: ホームページ, 強震観測の最新情報, (5) 震度情報ネットワークシステムの整備, <http://www.soc.nii.ac.jp/ssj/>.
 - 14) 翠川三郎, 松岡昌志, 作川孝一: 1987年千葉県東方沖地震の最大加速度・最大速度にみられる地盤特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, No.442, pp.71-78, 1992.
 - 15) 大西淳一, 山崎文雄, 若松加寿江: 気象庁地震記録の距離減衰式に基づく地点増幅特性と地形分類との関係, 土木学会論文集, No.626, pp.79-91, 1999.
 - 16) 宮島昌克, 堂下翔平, 北浦 勝: 石川県内の地震観測点の特徴が計測震度に及ぼす影響, 第59回土木学会年次学術講演会講演概要集, I -772 (CD-ROM), 2004.
 - 17) 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.
 - 18) 神田克久, 武村雅之, 諸井孝文: 1923年関東大地震の震度インバージョン解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.503-504, 2004.
 - 19) 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.794, pp.239-251, 2005.
 - 20) 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活用高度化に関するシンポジウム論文集, 2007(投稿中).

(2006.11.10 受付)

Evaluation of Site Amplification Factor for JMA Seismic Intensity and Its Relationship to the Topographical Classification

Hayato NISHIKAWA and Masakatsu MIYAJIMA

ABSTRACT: The site amplification factors for JMA seismic intensity at each observation site were evaluated from earthquake motion records of seismograph network in Ishikawa Prefecture, K-NET and KiK-net. The observation sites with the site amplification factor more than 1.5 were almost located at coastal area in Noto region, and those with the site amplification factor about 0.5 were mostly near the boundary between Fukui and Gifu prefectures. Next, we examined the average value of the site amplification factors in each topographical classification based on nationwide GIS-based digital engineering topographical map. The average value of the site amplification factor for delta and coastal lowland was the largest and those for mountain and fan were relatively small.

Key Words: seismograph network, JMA seismic intensity, site amplification factor, topographical classification