

高密度地震計ネットワークの地震記録による計測震度増幅度の評価 —石川県金沢市における計測震度分布推定への適用—

Evaluation of Amplification Factor for JMA Seismic Intensity Using Records Observed at a High-Density Strong Motion Seismograph Network -Application to estimation of a distribution of JMA seismic intensity in Kanazawa city, Ishikawa Prefecture-

西川 隼人¹, 宮島 昌克¹, 池本 敏和¹, 岩端 一貴², 北浦 勝¹

Hayato NISHIKAWA¹, Masakatsu MIYAJIMA¹, Toshikazu IKEMOTO¹
Kazutaka IWAHANA² and Masaru KITAURA

¹ 金沢大学大学院 自然科学研究科

Graduate school of natural science and technology, Kanazawa University

² 石川県

Ishikawa Prefecture

We propose a method to estimate amplification factor at an arbitrary point to obtain the spatial distribution of JMA seismic intensity including nonobservation sites. The amplification factor of JMA seismic intensity is estimated using the records from a high-density strong motion network. We compare the seismic intensities observed at some stations in Kanazawa city during the past earthquakes with those estimated calculated by seismic intensity at a reference station and amplification factor of each site. The predicted values were in good agreement with the observed ones.

Key Words : JMA seismic intensity, amplification factor, a high-density strong motion seismograph network, Kanazawa city, microtremor

1. はじめに

計測震度は地震発生時に即座に気象庁から発表されるものであり、日本では最も一般的な地震動指標である。また、地方自治体にとって、地震による被害状況を迅速に把握する指標として重要である。1995年に発生した兵庫県南部地震を契機に防災科学技術研究所が運用しているK-NET (Kyoshin Net) のような強震観測網が全国各地で整備されるようになり、以前に比べて細かな揺れの分布が分かるようになってきた。

しかし、これまでより地震計が高密度に設置されていると言っても一般的に観測点間距離は数十kmあり、1つの市町村に地震計が1台程度しか設置されていない場合が多い。地震動は表層地盤特性に強く影響されるので、1市町村のような比較的狭い範囲でも大きく変動する可能性がある。2000年鳥取県西部地震における境港市を対象とした調査では、同一市内の地点でも震度6弱と震度5弱の地点があったことが示されている¹⁾。このように比較的狭い範囲でも揺れの強さは大きく異なるため、地震計設置点において計測される震度のみで被害状況を把握することは困難であり、地震計が設置されていない地点においても計測震度の大きさを評価する手法が必要である。

既往の研究で基準観測点1箇所と任意の地点の常時微動記録から兵庫県内での計測震度の空間分布が推定されている²⁾。この研究では基準とする1地点の地震記録から県内の他の市町村における計測震度を評価しているが、

市町村ごとに設置されている地震計の記録を用い、各行政区内ごとに計測震度分布を評価する方が推定精度が高いと考えられる。あらかじめ地震計が設置されている箇所と任意の地点の増幅特性の違いを把握しておけば、地震発生時に強震観測点における計測震度から任意の地点の計測震度を評価することが可能であると考えられる。既存の地震計を有効利用するという観点からもこの方法は有意義なものであると言えよう。

本論文では任意の地点の計測震度増幅度を予測する式を構築する。増幅度予測式として実際に地震防災に関わる実務者が専門的な知識を有さずとも簡単に計算できる式を提案する。また、過去に発生した地震を例に強震観測点の計測震度と増幅度から1市町村のような比較的狭い範囲での計測震度分布を精度良く予測することができるかを検証する。

過去に全国の強震観測点の記録を用いて計測震度や最大加速度などの地震動強さの増幅度を評価する研究が行われており³⁾、平均S波速度などをパラメータとする増幅度予測式が提案されている⁴⁾。これらの研究では地域によらず伝播経路特性を一律とし、各観測点の増幅度を評価している。しかし、実際には地域によって伝播経路特性がかなり変動すると考えられ、伝播経路特性を同じと考えて解析すると、地盤増幅度を評価する際に悪影響を与えると考えられる。なるべく正確に各地点の地盤増幅度を評価するためには、地域ごとの伝播経路特性の違いを考慮したり⁵⁾、対象とする観測点間の距離が小さい高

密度な強震観測網の記録を用いるべきである。

ここでは後者の方法を用いることによって観測点間の伝播経路特性の違いの影響を小さくし、計測震度増幅度の予測式を求める。解析の対象とするのは地震計が高密度に設置されている横浜市地震計ネットワークの記録である。横浜市地震計ネットワークは約400km²の範囲に高い密度で地震計が設置されている。また、観測点ごとにボーリングデータが公開されているので増幅度の予測式を構築するのに適している。

得られた計測震度増幅度の予測式を用いて石川県金沢市での震度増幅度分布を評価する。金沢市の中心部を通る森本・富樫断層帯で地震が発生する確率は全国の主要な活断層の中でも高いグループに分類されており、この地震の規模はマグニチュード7.2と推定されている⁹⁾。仮に地震が発生した場合は甚大な被害を生じる可能性があるため、あらかじめ地点ごとの震度増幅度の違いを予測しておくことは防災上極めて重要である。

本論文では金沢市内の表層地盤構造の情報から任意の地点の計測震度増幅度を評価する。また、過去に金沢市の地震観測点で得られた記録から求めた震度増幅度と増幅度予測式から算出した値を比較し、本論文で提案する増幅度の予測式の精度を確認する。

2. 計測震度増幅度の予測

計測震度の増幅度の予測式は横浜市地震計ネットワークの記録を用いて構築する。横浜市の地震計ネットワークでは約400km²の範囲内の150箇所に地震計が設置されており、その他の観測網に比べて高密度に展開されている。そのため、他の強震観測網に比べて観測点間の距離が短く、観測点ごとの伝播経路特性の違いが小さいと考えられる。また、全観測点でS波速度の情報を含むボーリングデータが公開されている。このように地盤増幅度の予測式を求める好条件が揃っていることから増幅度予測式を求めるのに適していると考えられる。

(1) 横浜市強震計ネットワークの概要

横浜市地震計ネットワークは横浜市が地震発生直後の被害状況などを迅速に把握するために構築したシステムであり、市内150地点に強震計が設置されている。地震が発生した場合、各地震計で観測されたデータは災害時優先通信回線を経由して横浜市庁舎、消防局、横浜市立大学の3つの観測センターに配信される。強震計が設置されている地点は主として消防署であり、それ以外には消防出張所、土木事務所などの公共施設に設置されている。

各観測点においてボーリングは工学的基盤に相当する層が現れるまで行われている。横浜市では工学的基盤に相当する層（最下層と呼ぶ）よりも下に全観測点に共通する基盤としてS波速度が700m/sの上総層群上面が存在すると仮定しており、全観測点のボーリングデータに最下層と上総層群上面の間層として5mの層を設けている。地盤増幅度の予測を行なう研究において地表から深さ30mまでの地盤データが用いられていることが多い⁴⁾。よって、本論文でも深さ30mまでのボーリングデータを用いて解析を行なう。横浜市地震計ネットワークの観測点において30m以上の深さまでの地盤データが得られている地点は図1に示した52箇所である。

(2) 解析対象記録

震度増幅度の算出に用いる記録は図2のように関東地

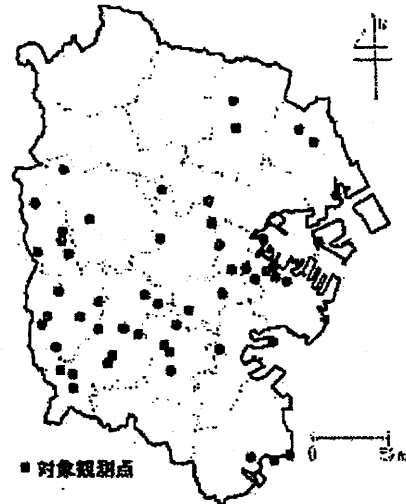


図1 解析対象とした横浜市の観測点（横浜市総務局ホームページ⁷⁾の図に加筆）

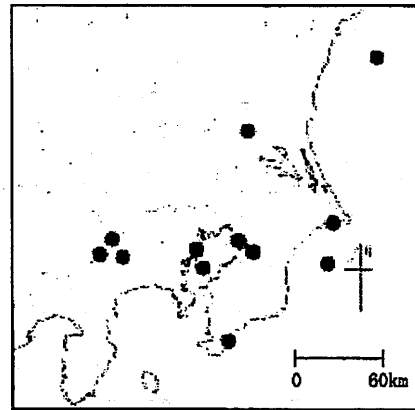


図2 解析対象とした地震の震央

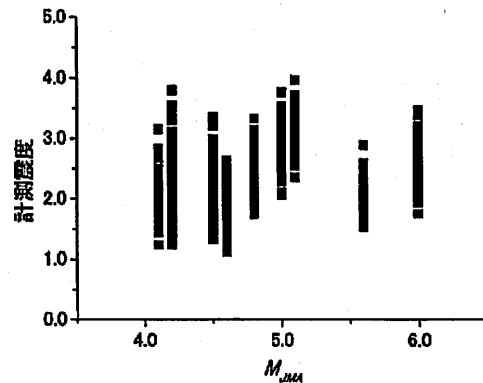


図3 M_{MMA} と計測震度の関係

方で発生した12個の地震で得られたものである。これらの地震の気象庁マグニチュード M_{MMA} は4.1~6.0、震源深さは18~86kmである。図3に解析対象とした地震の M_{MMA} と各地震において対象観測点において観測された計測震度の関係を示す。観測された計測震度は1.0~4.0の範囲内である。なお、本論文は地盤が非線形化してない場合の増幅度予測式を求めることを目的としている。

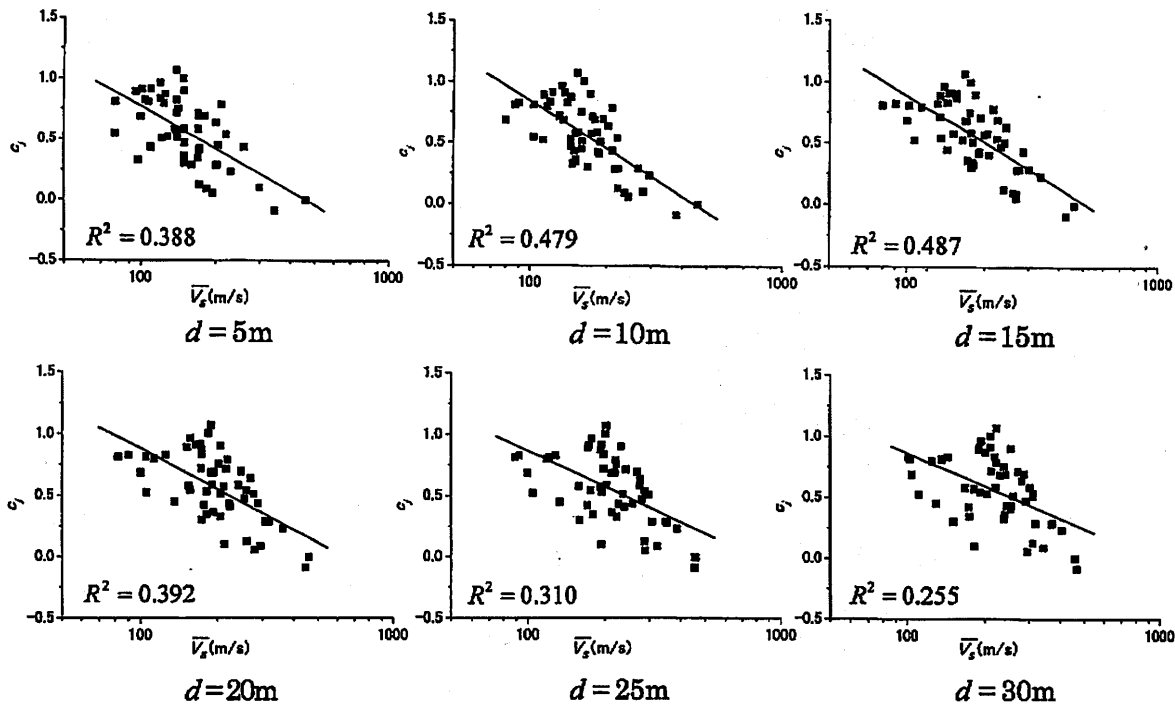


図4 平均S波速度と震度増幅度の関係

佐藤・巽⁶⁾は全国の強震記録を用いてスペクトルインバージョンにより震源特性などを評価する際に最大加速度が200 cm/s²以上の地震記録では地盤の非線形化などの影響が生じるものとして、これらの記録は独立に扱っている。本論文においても最大加速度が200 cm/s²の場合に地盤の非線形化が生じるものとする。解析に用いた地震記録の最大加速度は100cm/s²未満であるので上述の条件を満たしている。

(3) 震度増幅度の算出方法

各地点の計測震度は次式によって表されるものとする。

$$I_{ij} = S_i - b \log R_{ij} + \sum_{k=1}^j \delta_{jk} c_j \quad [1]$$

I_{ij} は i 地震における j 観測点の計測震度、 S_i は i 地震の震源項、 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、 c_j は j 観測点の増幅度である。 δ_{jk} はクロネッカーのデルタであり、 $j = k$ の場合は1、それ以外では0である。式[1]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基に二段階回帰分析⁹⁾によって式[1]の係数を求める。係数を求める際に工学的基盤に相当すると考えられるS波速度460m/sの層が露頭している南区の六ツ川消防出張所の観測点(観測点コードmi04s)での c_j を0に固定する。よって、得られる各地点の増幅度 c_j は工学的基盤に対する値となる。回帰分析によって得られる各観測点の係数 c_j と平均S波速度の関係調べることによって増幅度予測式を求める。二段階回帰分析によって得られた b は4.49であった。

また、各地震の震源項 S_i と M_{JMA} との関係は次式のようにになった。

$$S_i = 1.18 M_{JMA} + 5.23 \quad [2]$$

各観測点の平均S波速度を深さ30mまで5mピッチで計算し、地盤増幅度と最も相関が高いケースを調べる。なお、平均S波速度を次式によって求める。

$$\bar{V}_s(d) = d / \sum_i h_i / V_{si} \quad [3]$$

$\bar{V}_s(d)$ は深さ d までの平均S波速度 (m/s)、 d は地表から任意の深さ (m)、 h_i は地表から i 番目の層の層厚 (m)、 V_{si} は i 番目の層のS波速度 (m/s) である。各地点のそれぞれの深さの平均S波速度と増幅度 c_j は図4に示すようになり、 $d = 15$ mの場合に観測値と回帰式による予測値の相関が最も高くなる。東北地方のK-NET、KiK-net観測記録を用いて、地盤増幅度を評価した片岡・山本の研究⁹⁾においても同様の結果が得られている。各観測点における $d = 15$ mの平均S波速度の常用対数をパラメータとした場合の震度増幅度 c_j との関係式を回帰分析によって求めた結果、次式が得られた。

$$F_j = 3.39 - 1.25 \log \bar{V}_s(15) \quad [4]$$

式[4]の F_j は平均S波速度から推定される震度増幅度である。末富ら¹⁰⁾はShabestari and Yamazaki⁹⁾が求めた震度増幅度を用い、深さ20mまでの平均S波速度をパラメータとした計測震度増幅度の予測式を評価している。なお、実測値と回帰式による予測値の相関の程度を表す決定係数 R^2 は片岡・山本の研究では約0.97、末富らでは約0.35であるのに対し、本論文では約0.49と他の研究に比べて高かった。

データ数の違いなどもあるので単純に比較するのは難しいが、このように本論文で提案した予測式の方が観測値との対応がよかった要因として、高密度な地震観測網の記録を用いることによって各観測点の伝播経路特性の違いを小さくするようにしたことが考えられる。

ただし、増幅度を評価する際に用いた地震は長周期成分が卓越するような大規模な地震を含んでいない。周期の長い成分を含む地震記録と含まない地震記録では地震動の増幅度に差異が見られるという指摘がある¹¹⁾。式[4]が大規模地震においても適用できるかどうかについては今後、検証する必要がある。

3. 金沢市の表層地盤構造の推定

著者らは先に金沢市の表層地盤構造を評価するために数十箇所で常時微動観測を行った¹²⁾。なお、本論文で定義する表層地盤とは洪積層上面を基底とする沖積層のことである。ここでは微動観測や得られた地盤構造に関して説明する。

(1) 微動観測の概要

金沢市ではこれまで地質調査が行われており、図5に示す地質構造が分かっている。また、過去にボーリング調査が行われており、複数の地点の地盤情報が得られている。しかし、得られているのは N 値などであり、地盤による地震動への影響を評価する際に重要な指標となる S 波速度は不明である。

著者らは先に金沢市の表層地盤の卓越周期を把握するために携帯用振動計（東京測振 SPC-35N）とサーボ型速度計（東京測振 VSE-15D）を用いて常時微動観測を行った。携帯用振動計はA/D変換部とノート型パソコンより成っている。A/D変換部ではハイパスフィルターにより0.1Hz以下の信号成分を取り除いている。サンプリング周波数は100Hzとした。サーボ型速度計は最大測定範囲が10kineである。周波数特性は0.2Hzまでは振幅が100%であるが、0.1Hzになると50%に低下する。

観測は1地点につき10分間行った。観測波形のノイズが少ない部分から20.48秒間を1組として10組抽出した。抽出したデータを高速フーリエ変換し、フーリエスペクトルを求めた。得られた10組のフーリエスペクトルを加算平均したものに0.3 HzのParzen windowを施して平滑化した。平滑化したフーリエスペクトルの水平成分はEW、NSの2成分を相乗平均して求め、得られた水平成分のフーリエスペクトルを上下成分のフーリエスペクトルで除することにより、両者のスペクトル比（以降、微動H/Vと略す）を求めた。

(2) 地盤構造の推定

得られた微動H/Vの中でピークが比較的明瞭に現れている42地点の記録を用いて地盤構造の推定を行う。既往の研究¹³⁾より常時微動が主としてレイリー波から成り立っていると仮定し、レイリー波理論H/Vが微動H/Vにフィッティングする地盤構造を推定する。レイリー波理論H/VはHaskellの方法¹⁴⁾によって計算する。

レイリー波の理論H/Vを計算する際にはP波速度、S波速度、密度、層厚の値が必要となるが、推定するパラメータ数を減らすため、P波速度と密度はS波速度との関係式を用いて推定する。よって、推定するパラメータはS波速度、層厚の2つである。P波速度 V_p とS波速度 V_s については狐崎らによって次に示す関係式が提案されている¹⁵⁾。

$$V_p = 1.11V_s + 1.29 \quad [6]$$

金沢市内にあるK-NET, KiK-netのボーリングデータ

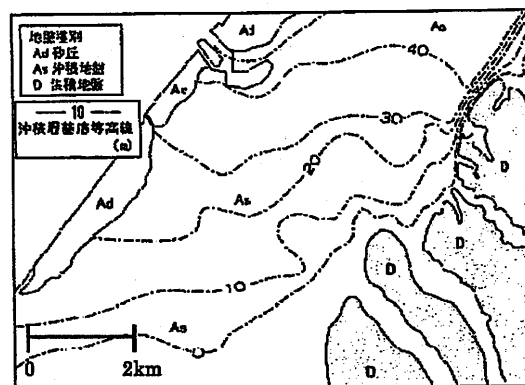


図5 金沢市の地質図

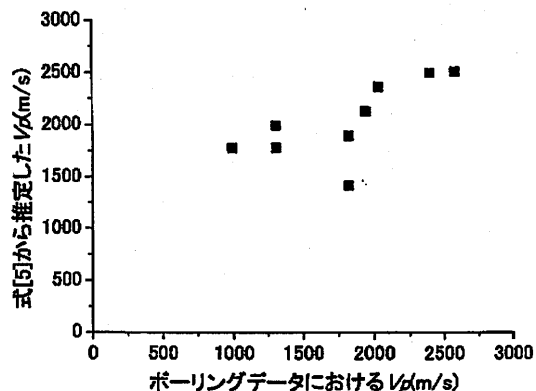


図6 ボーリングデータの V_p と推定した V_p の比較

の S 波速度を用いて式[5]から推定した V_p とボーリングデータの V_p の関係を図6に示す。式[5]による推定値とボーリングデータの V_p との相関係数は0.69であり、概ね対応している。これより、P波速度を推定する式として式[5]が妥当であると言える。

密度 ρ (g/cm^3)はS波速度 V_s (km/s)より次式¹⁶⁾によって求める。

$$\rho = 0.67\sqrt{V_s} + 1.40 \quad [6]$$

求める地盤構造は最下層を含めた3層から成る地盤とした。最下層は先ほど述べたように洪積層上面に対応する。この最下層のS波速度はK-NET金沢観測点のボーリングデータを基に仮定した。K-NET金沢観測点は洪積台地上に位置しており、S波速度が540m/sの層の上に110m/sの層が3m堆積している。この軟弱な3mの層は段丘堆積物と考えられ、基底の540 m/sの層が洪積層に対応していると考えられる。よって、本論文では基底のS波速度540 m/sを丸め、500 m/sを洪積層上面のS波速度として用いる。

地盤構造の推定には準ニュートン法を用いる。次式で与える目的関数が最小になる場合、最適解が得られるものとする。

$$S = \sum_{i=T_{\min}}^{T_{\max}} \{A_{\text{obs}}(i) - A_{\text{the}}(i)\}^2 \quad [7]$$

ここで $A_{\text{obs}}(i)$ は微動 H/V, $A_{\text{the}}(i)$ はレイリー波の理論

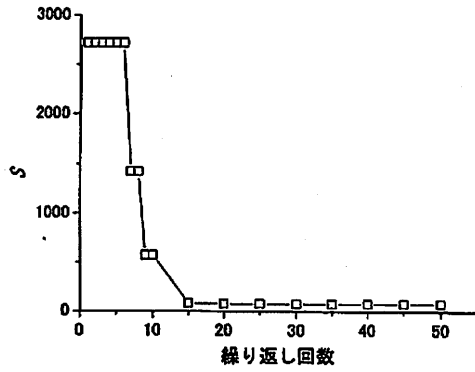


図7 計算の繰り返し回数と目的関数の関係

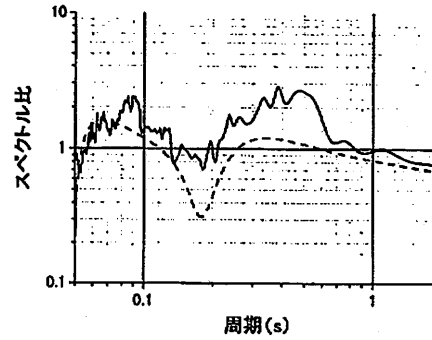


図8 微動H/Vと理論H/Vの一例

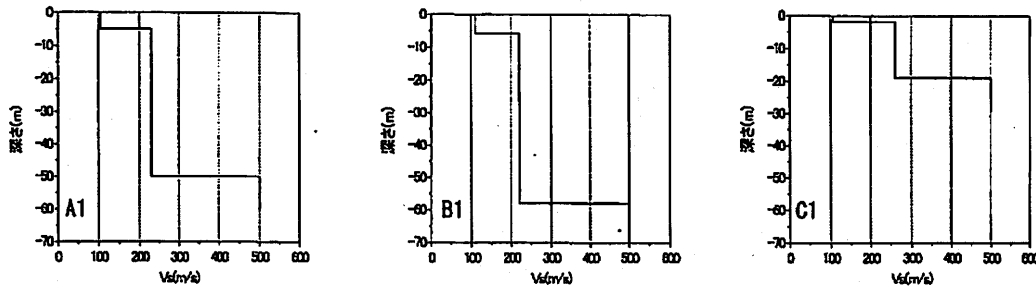


図9 推定した表層地盤構造

H/Vである。 T_{min} , T_{max} はH/Vにおいて解析対象とする下限と上限の周期であり、それぞれ 0.05 秒、2.0 秒とする。最適解を求めるにあたり次のような拘束条件を与えた。 V_s の1層目は 100~200m/s, 2層目は 200~350m/s の間で探索した。また層厚は係数 r と層厚 D をパラメータとして1層目を rD , 2層目を $(1-r)D$ とする。 r は 0~1, D は 0~70m の間で推定した。

ここで表層地盤構造を推定した1地点(後述する図8のC1)における地盤構造を推定する際の計算の繰り返し回数と式[7]の S の関係を図7に示す。なお、準ニュートン法では初期値によって解析結果が大きく異なるため、S波速度 V_s や層厚 D を何通りか設定して解析を行った。この地点の最適解が得られた際のレイリー波の理論 H/V と微動 H/V は図8のようになった。

推定した地盤構造の一部を図9に示す。図中の記号は図10に示す工学的基盤の深度分布図の地点と対応している。図9の地盤は1層目の厚さが全層厚の1~2割、2層目は8~9割となっている。図9に示していない他の地点でも同様の傾向が見られた。

図10に推定した金沢市内における工学的基盤の深度分布を示す。全体的に見て推定した工学的基盤の深度は沖積層厚さよりも大きくなる傾向にあるが、工学的基盤の深度の変化と沖積層厚さの分布の変化は概ね対応している。

4. 金沢市の計測震度増幅度分布の評価

構築した計測震度の増幅度予測式と常時微動記録より推定した地盤構造に基づいて、金沢市の震度増幅度分布を評価する。また、過去に金沢市の地震観測点で得られた記録から求めた震度増幅度と本論文で提案する予測式

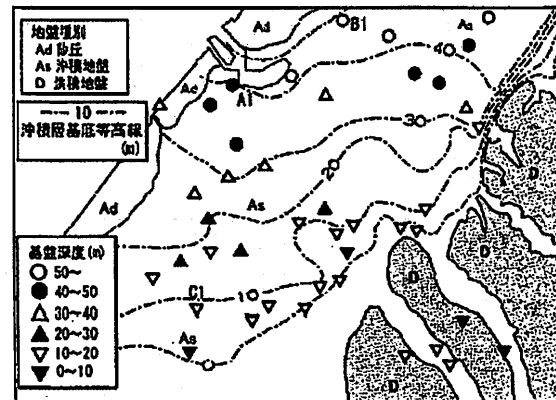


図10 金沢市の沖積層厚さと推定基盤深度分布

から評価した増幅度を比較する。

(1) 金沢市の地盤構造推定地点の平均S波速度

震度増幅度を予測する際のパラメータとなる深さ15mまでの平均S波速度 $\overline{V_s}(15)$ を地盤構造推定地点ごとに計算した(図11)。最下層までの深さが15mよりも浅い地点においては最下層の上面から深さ15mまでがS波速度500m/sの層になっていると仮定した。

$\overline{V_s}(15)$ は沖積層が厚い金沢市北部ほど小さい傾向にある。

(2) 観測記録から求めた震度増幅度と増幅度予測式によって推定した震度増幅度の比較

推定した地盤構造を基に計算した各地点の計測震度増

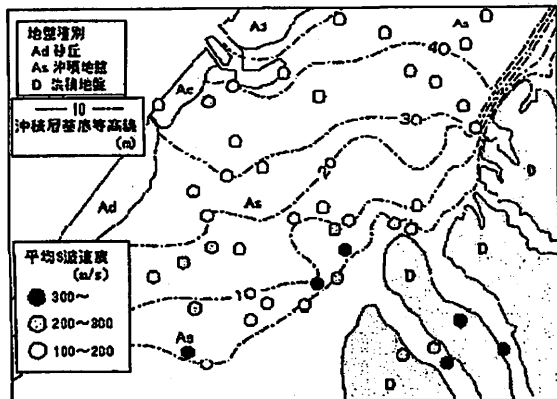


図11 地盤構造推定地点における $\bar{V}_s(15)$

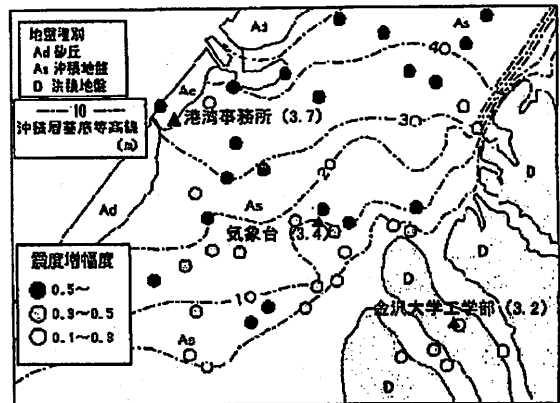


図12 式[4]から計算した震度増幅度分布

幅度を図12に示す。40mの沖積層基底等高線の付近では震度増幅度は増幅度が0.5以上と大きくなっている。これらの地域よりも南部の地域の方が全体的に見れば増幅度は小さくなっているが、地点によって値にばらつきが見られる。

本論文で提案した予測式が金沢市に適用できるかどうかを調べるため、式[4]から求めた増幅度と過去の地震で観測された記録から評価した増幅度を比較する。また、式[4]から評価した増幅度を著者が先に表層地盤構造と地震波形を用いて重複反射理論から評価した震度増幅度¹⁷⁾と比較する。地震記録から増幅度を評価するために2000年に石川県の西方沖で発生した地震 ($M_{JMA}=6.1$) の記録を用いた。比較の対象とするのは金沢地方気象台、金沢港湾・空港整備事務所（以下、港湾事務所と略す）、K-NETとKiK-netの金沢観測点、金沢大学工学部（以下、金大工と略す）の5地点である。この地震における気象台、港湾事務所、金大工の計測震度は図12に示すとおりである。K-NETとKiK-net観測点は図12よりも南部に位置する。なお、K-NETでは計器の故障のため、記録が得られていない。

これらの観測点の中でK-NET、KiK-netではS波速度を含むボーリングデータが公開されており、金大工では常時微動から表層地盤構造を推定している。気象台、港湾事務所では地盤構造が不明であるが、これらの観測点から数100mの地点で常時微動から地盤構造を推定しているので、これらの地点に近接する箇所での地盤情報を解析に用いる。

この地震の震源から金沢市までの距離は約100kmであるので、観測点ごとの伝播経路特性の違いは小さいと考えられる。よって、基準観測点と任意の観測点における計測震度の差異を計測震度増幅度と考える。著者は先にこの地震を対象として金大工での工学的基盤の計測震度を推定しており、その結果3.1という値を得た。ここではこの地点での計測震度を基準値として各観測点の震度増幅度を求める。観測された記録から求めた震度増幅度と式[4]から計算した震度増幅度を図13に示す。式[4]により増幅度を計算をする際に任意地点の工学的基盤までの深度が15mより浅い場合は最下層が深さ15mまで続いていると仮定した。なお、2000年に石川県西方沖で起きた地震で記録が得られなかったK-NET金沢観測点については過去に発生した地震のなかで震源距離が100km程度の地震の記録（表1）でのKiK-net観測点との計測震

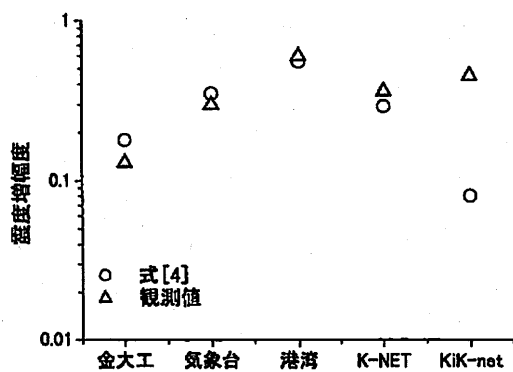


図13 地震観測点における震度増幅度

表1 K-NETの増幅度評価の対象とした地震の諸元

発生年月日	M_{JMA}	緯度 (° N)	経度 (° E)	深さ (km)
1999/11/7	4.8	36.07	135.78	14
2000/6/22	4.6	36.84	135.52	13
2001/6/13	4.4	36.80	135.60	20

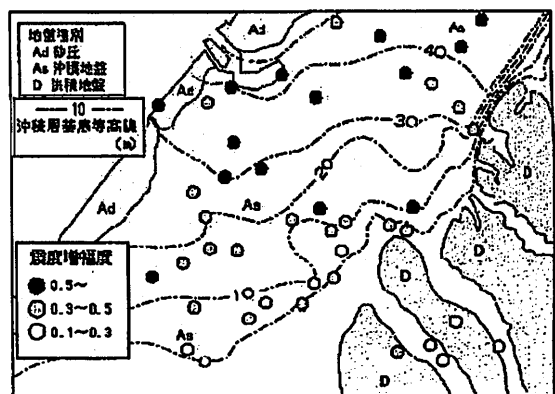


図14 重複反射理論から計算した震度増幅度分布

度の差異（平均値-0.09）をKiK-netの震度増幅度（0.45）に足し合わせて増幅度を求めた。

KiK-netの観測値から求めた増幅度は式[4]から計算した増幅度よりも大きい、その他の観測点では両者は概ね一致している。KiK-net観測点は高台に位置しているため地形効果の影響で増幅度が大きくなった可能性がある。

続いて、式[4]から計算した震度増幅度と重複反射理論から計算した増幅度を比較する。図14に重複反射理論から推定した増幅度を示す。図12, 14から分かるように数地点で重複反射理論から計算した増幅度が式[4]による値よりも小さくなっているが、全体的にはよく対応している。

以上のように金沢市で得られた地震記録を対象として、式[4]から評価した震度増幅度を観測記録から計算した増幅度や地盤構造推定地点において重複反射理論から求めた増幅度と比較した結果、概ね対応していた。

しかし、比較の対象にした地震や観測点数は少ないので、十分に式[4]の精度を検証したとは言えない。今後、地震が発生した場合に同様の検討を行い、提案した手法の精度を確認する予定である。また、式[4]の算出の際には中、小地震の記録を用いており、マグニチュード7, 8クラスの地震は含まれていないので式[4]を大規模地震に適用する際には注意を要する。

5. まとめ

本論文では地震による被害状況を把握する指標としてよく用いられている計測震度の詳細な分布を迅速に把握するために、あらかじめ震度増幅度分布を評価することが重要であると考えた。その上で地震動に関する高い専門性を有していない場合でも簡単に震度増幅度を予測する手法を提案した。増幅度の予測式の構築には観測点ごとの伝播経路特性の違いを小さくするために、高密度に地震計が展開されている横浜市地震計ネットワークの記録を解析に用いた。

表層地盤の平均S波速度と計測震度の増幅度の関係を調べた結果、深さ15mまでの平均S波速度と計測震度増幅度の相関が最も高いことを明らかにした。この解析結果は既往の研究結果と調和的なものである。

提案した計測震度増幅度の予測式を用いて、石川県金沢市の震度増幅度分布を推定した。予測式のパラメータである平均S波速度は常時微動記録に基づいて推定した地盤構造から計算した。震度増幅度を評価した結果、軟弱な層が厚く堆積している金沢市北部では増幅度が大きくなった。

式[4]から評価した増幅度と観測記録から求めた震度増幅度を比較したところ、KiK-net観測点以外の地点では両者はよく対応した。また、表層地盤構造を推定した地点を対象として式[4]から計算した増幅度と重複反射理論から計算した増幅度を比較したところ、全体的に見て両者は対応している。しかし、震度増幅度の精度を検証する際に対象とした観測点数や地震の数は十分とは言えないので、新たに地震記録が得られた場合は同様の検討を行なう予定である。

以上のように本論文で提案した予測式から求めた値と地震観測点の計測震度から求めた増幅度がよく対応することが分かった。基準とする地震観測点の計測震度と提案した増幅度予測式を用いて予め対象地域の震度増幅度

分布を推定しておけば、地震発生直後にも詳細な震度分布が分かるので、地震による被害状況を迅速に把握する際に有効であると考えられる。

ただし、横浜市と震度増幅度分布を求めた金沢市では地震基盤までの地盤構造や発生する可能性のある地震の震源から観測点までの伝播経路特性が異なるため、入力地震動の特性も異なると考えられる。入力地震動の周期特性の違いが地震動の増幅特性に影響する可能性があるため、今回対象とした金沢市以外の箇所でも本論文で提案した予測式が適用できるかどうか調べる必要がある。

また、本論文で提案した計測震度の増幅度予測式は地盤のひずみが小さい場合のみを対象としており、ひずみが大きく地盤の非線形化が顕著な場合には適用できないと考えられる。今後は地盤が非線形化しているような強震時においても適用可能な予測式を求める予定である。

謝辞

本論文では横浜市地震計ネットワーク、気象庁、港湾地域強震観測システムの地震記録を使用させて頂きました。また、横浜市地震計ネットワーク、及び、防災科学技術研究所のK-NET、KiK-netのボーリングデータ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) 森伸一郎, 圓井洋介, 盛川 仁, 河原莊一郎, 向谷光彦: 2000年鳥取県西部地震におけるアンケート震度調査, 第26回地震工学研究発表会講演論文集, pp.361-364, 2001.
- 2) 齋田 淳, 松岡昌志, Shabestari, K, 山崎文雄: 兵庫県内の強震観測点における地震記録と常時微動を用いた計測震度分布の推定, 土木学会論文集, No.731, pp. 159-168, 2003.
- 3) Shabestari, K. and Yamazaki, F.: Attenuation relation of strong ground motion indices using K-NET records, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.137-140, 1999.
- 4) 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.
- 5) 佐藤智美, 舘 蒼樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
- 6) 地震調査研究推進本部地震調査委員会: http://www.jishin.go.jp/main/chousa/01dec_morimoto/, 2001.
- 7) 横浜市総務局危機管理対策室ホームページ: <http://www.city.yokohama.jp/me/bousai/index.html>
- 8) 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.
- 9) 片岡俊一, 山本博昭: 青森県周辺における地震動指標の距離減衰特性とサイト増幅特性, 第11回地震工学シンポジウム, pp.35-38, 2002 (CD-ROM).
- 10) 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, 2003 (CD-ROM).
- 11) 末富岩雄, 吉田 望, 清水喜久, 中山 涉, 山崎文雄, 阿部 進, 鈴木 誠: 横浜市強震記録を用いた地盤増幅度の検討-卓越周期との関係-, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.157-160, 1999.
- 12) 池本敏和, 山下順也, 長井俊樹, 西川隼人, 宮島昌克, 北

- 浦 勝：短周期微動に基づく金沢市域における地盤構造の推定，日本海域研究，第 35 号，pp.109-116，2004.
- 13) 時松孝次，官寺泰生：短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の推定，日本建築学会構造系論文報告集，No.439，pp.81-87，1992.
- 14) Haskell, N. A. : The dispersion of surface waves on multi-layered media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.43, pp.17-34, 1953.
- 15) 狐崎長琅，後藤典俊，小林芳正，井川 猛，堀家正則，斉藤徳美，黒田 徹，山根一修，奥住宏一：地震動予測のための深層地盤 P・S 波速度の推定，自然災害科学，第 9 巻，pp.1-17，1990.
- 16) 小林喜久二，阿部康彦，植竹富一，真下 賢，小林啓美：地震動初期微動部の上下動・水平動スペクトル振幅比の逆解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.307-308，1995.
- 17) 西川隼人，池本敏和，宮島昌克，北浦 勝：微動観測記録から推定した表層地盤構造に基づく計測震度分布の推定とアンケート震度との比較，自然災害科学，第 23 巻，2004 (掲載予定) .

(原稿受付 2004.5.20)