

氏名	西川 隼人
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第830号
学位授与の日付	平成18年3月22日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第4条第1項)
学位授与の題目	経験的手法による地震動特性の評価と計測震度予測への適用
論文審査委員(主査)	宮島 昌克(自然科学研究科・教授)
論文審査委員(副査)	北浦 勝(自然科学研究科・教授), 松本 樹典(自然科学研究科・教授), 平松 良浩(自然科学研究科・助教授), 神山 眞(東北工業大学・教授)

Summary

In order to understand damage situation just after the earthquake, it is important to estimate an intensity of earthquake motion at an arbitrary site where seismograph is not located.

In this paper the author proposes a method of estimation of the seismic intensity of JMA(Japan meteorological agency) at observation sites and arbitrary sites based on ground conditions, earthquake records and characteristics of earthquake motion evaluated by an empirical method. Earthquake ground motion is estimated in consideration of frequency-dependent of attenuation using Q-value of S wave and site amplification effect of subsurface by multiple reflection theory when waveform data is obtained. Q-value of S wave is evaluated from strong motion records in Hokuriku region. The subsurface structure is estimated by microtremor records. The site effect in frequency domain is evaluated from records of earthquake and microtremor. The author also estimated the amplification factor for peak ground acceleration and JMA seismic intensity at each site. In evaluation of the site amplification at observation sites, the author used the data of K-NET, KiK-net and seismic intensity network that were not used so much in the past research. Finally an equation with ground condition is derived using the records from a high-density strong motion network in order to estimate the amplification factor for JMA seismic intensity at an arbitrary site. If the difference of amplification factor for seismic intensity is evaluated between observation site and an arbitrary site beforehand, it is possible to estimate the seismic intensity at an arbitrary sites from ones observed at observation sites.

学位論文要旨

本論文は「経験的手法による地震動特性の評価と計測震度予測への適用」と題して、以下の7章から構成されている。

第1章 序論

地震発生時即座に被害状況を把握するためには地震計、震度計が設置されていない任意地点の計測震度を推定することの重要性を述べている。また、地震発生時の地震動分布に関する既往の研究を紹介し、それぞれの研究の利点と問題点に関して言及している。続いて、計測震度分布を推定する手法を提案するにあたって、既往の研究における問題点を改善するために考慮する事項を述べている。

第2章 伝播経路特性と震源特性の評価

地震発生時に観測点以外の任意地点の地震動を評価する手法として最大加速度や最大速度の距離減衰式が広く用いられているが、地震動の距離減衰特性は周波数依存性を示すので、地震波形が得られる地点では Q 値（地震動の減衰のしにくさを表すパラメータ）などを考慮して、周波数領域での解析を行なう方が地震動予測の精度が向上すると考えられる。そこで本研究では地震記録から地震波の伝播経路における減衰のしにくさを表す Q 値を評価するとともに、地震動スペクトルを解析して震源パラメータが地震動強さに及ぼす影響を調べた。解析には主に北陸地方で発生した地震のデータを用いた。福井県と石川県加賀地方の観測点のデータから求めた Q 値は既往の研究における値と調和的なものであったが、震源距離が大きい能登地方の観測点の記録を含むデータから求めた Q 値は有意に大きかった。続いて2000年6月に石川県西方沖で発生した地震において、ほとんどの観測点で最大加速度振幅が一般的な値を上回った要因を調べるために地震記録から震源特性を評価した。解析の結果、短周期成分の励起強さと密接に関連する震源での応力降下量の値が内陸地震の平均的な値に比べて有意に大きかったことが分かった。上記のように震源での応力降下量が大きかったことにより、全体的に加速度が大きくなったと考えられる。

第3章 地震観測点における地盤増幅特性の評価

観測点が自治体の中心部にあることが多いことから、対象地域の代表的な地点であると考え、観測点固有の地盤増幅特性を評価した。重複反射理論などの地盤応答解析によって、広い周波数帯域の地盤増幅特性を評価するためには地震基盤までの地盤情報が必要となるが、首都圏などの大都市圏以外の地域では深

層地盤構造に関する情報が蓄積されていない。そのため、多くの地域では地盤情報に基づいた地盤応答解析を広い周波数帯域を対象として行うことは困難である。そこで既往の研究で提案された手法によって、地震観測記録と常時微動記録に基づいて地盤特性を評価した。周波数領域での地盤特性をS波の周波数伝達関数に対応するサイト増幅スペクトルと常時微動のH/Vスペクトル比から検討した。また、地震動強さ指標の増幅度の評価も合わせて行った。ただし、本研究で対象とする石川県内の自治体の震度計では最大速度のデータは収集されていないので、最大加速度と計測震度の地盤増幅度を評価した。初めにK-NET, KiK-net 観測点を対象にサイト増幅スペクトルを評価し、地域ごとに増幅スペクトルと地盤条件の関係を考察した。能登地方の観測点の多くは地質分類では新第三紀に位置しており、サイト増幅スペクトルに明瞭なピークが現れた地点が多かった。海岸部に近い観測点では軟弱な表層地盤の影響によって、ピーク振幅が大きくなったと考えられる。加賀地方では平野部の観測点においてサイト増幅スペクトルの振幅が1~2Hz付近で大きく、山間部の観測点では、増幅率が全体的に小さいか高周波数側にピークが見られた。福井県嶺北地方の観測点のサイト増幅スペクトルは地質年代によって定まった傾向は見られず、また、公開されている地盤情報だけではスペクトル特性をうまく説明できない地点が多かった。

本研究で対象とした石川県内の大半の観測点で常時微動観測を実施し、微動のH/Vスペクトル比から地盤の卓越周期を評価した。山間部の観測点では微動H/Vスペクトル比の振幅がフラット、または山や谷が複数ある地点が多く、逆に海岸部に近い観測点の微動H/Vスペクトル比のピークが長周期側にある傾向が見られた。

最後に石川県の震度情報ネットワークに接続する観測点、及び、K-NET, KiK-net 観測点を対象にして、最大加速度と計測震度の地盤増幅度を評価した。その結果、微動H/Vスペクトル比のピークが明瞭に現れていなかった地点の多くは最大加速度、計測震度いずれの地盤増幅度も小さかった。H/Vスペクトル比のピークが明瞭でない地点はピークが明瞭であった地点に比べて、山間部に位置する地点が多いため、地盤増幅度が小さくなったと考えられる。また、最大加速度の地盤増幅度が同じ値である場合、地盤の卓越周期が長いほど、震度増幅度が大きい傾向にあることを明らかにした。

第4章 常時微動記録による表層地盤構造の推定

本研究の解析対象地域の一つである石川県の県庁所在地の金沢市では過去に地盤調査やボーリングデータの収集が行なわれており、深さ数十mまでの地盤構造が明らかになっている。しかし、過去の調査でN値が明らかになっているものの、強震動予測において不可欠な速度構造は不明である。

金沢市を南北に縦断する森本・富樫断層に起因とするマグニチュード7クラス

の地震の起こる確率が全国的にみて高いことが指摘されており、独立行政法人防災科学技術研究所はこの断層を想定した強震動予測を行った。その一環として常時微動観測などに基づく深部地下構造の推定が行なわれ、金沢平野の地震基盤までの地盤情報が得られた。しかし、これらの調査では地震動の高周波数成分に大きく寄与する表層地盤の情報は十分に得られていない。そこで、過去に金沢市内 100 数箇所で行われた常時微動観測によって得られた波形データから地盤構造を推定した。地盤構造を推定する前に微動 H/V スペクトル比の卓越周期と沖積層基底深度の変化の対応を調べたところ、卓越周期と沖積層の厚さの変化に相関が見られた。続いて解析を行う上で常時微動が主にレイリー波から構成されていると仮定し、微動 H/V スペクトル比とレイリー波の理論 H/V スペクトル比が対応する地盤構造を逆解析によって求めた。各観測地点における工学的基盤の深度は沖積層深度に比べて深くなったが、沖積層の深さと工学的基盤深度の変化はよく対応した。

第 5 章 推定地盤構造に基づく計測震度分布の推定

地震計、震度計が高密度に展開されていない自治体でも、任意地点における計測震度分布を把握するために、地震波形と観測記録から経験的に評価した地震動特性に基づいて計測震度を予測する手法を提案した。既往の研究では対象とする領域が狭いため地震動の距離減衰の補正を行わないか、あるいは単純な距離減衰式による補正を行っている。地震動は周波数によって地震動特性が異なるので、より精度の高い地震動評価を行うためには周波数領域で距離減衰と地盤増幅に関する補正を行うことが望ましいと考えられる。

本研究では過去に石川県西方沖で発生した地震を対象に地震動の距離減衰特性と関係する Q 値を用いて、地点ごとの距離減衰特性の違いを考慮して任意地点の計測震度を予測した。また、表層地盤による増幅特性の影響は、第 4 章で推定した S 波速度構造の情報を用いて、重複反射理論によって考慮した。

金沢大学工学部を基準地点として、この地点で得られた地震記録と表層地盤構造、 Q 値によって距離減衰特性を考慮して各地点の計測震度を評価したところ、観測点で記録された震度と概ね等しい値となった。また、 $1\text{km} \times 1\text{km}$ の範囲でアンケート収集枚数がある枚数以上の地点の計測震度とアンケート震度の関係を比較したところ、一定の相関が見られた。計器のない地点においてアンケート震度を計測震度とアンケート震度の差の平均値によって補正することによって計測震度を推定する手法を提案した。

第 6 章 平均 S 波速度による震度増幅度の推定

任意地点の計測震度を推定するために、あらかじめ地震計が設置されている箇所と任意地点の増幅特性の違いを把握し、地震発生時に迅速に地震観測点に

における計測震度から任意地点の計測震度を評価した。この方法は地震計や震度計で記録された計測震度を用いることから、地震波形が得られにくい震度情報ネットワークの観測点にも適用することができると考えられる。任意地点の計測震度増幅度を予測するために地盤パラメータと震度増幅度の関係式を構築した。提案する増幅度予測式は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ものとした。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した。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、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における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が分かった。この解析結果は既往の研究結果と調和的なものであった。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。なお、予測式のパラメータである平均S波速度は第4章で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。次に本研究で提案した震度増幅度予測式から評価した増幅度と観測記録から求めた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に震度増幅度予測式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分布を比較したところ、一部の地点で対応が悪かったものの全体的に両者は対応した。

第7章 結論

第7章ではこれまでの章ごとの結論をまとめるとともに、章ごとに今後、解決すべき課題を述べた。

学位論文審査結果の要旨

本学位論文に関し、平成18年2月3日に第1回審査委員会を開催し、審査方法を決定するとともに、論文の内容について検討した。さらに、2月6日に行なわれた口頭発表後に第2回審査委員会を開き慎重に審議した結果、以下のように判定した。

本論文は、地震直後の被害把握や緊急対応に活用されている計測震度に注目し、地震動の距離減衰特性、地盤増幅特性を考慮して、地震観測点以外の任意の地点における計測震度を予測する方法を提案している。地震動は比較的狭い範囲で変動することから被害状況も狭い範囲で変化することが知られており、これに対応するためには地震計、震度計を高密度に配置するしか手立てがなかったが、本研究成果によりこの課題を克服することができ、本研究は既に高い評価を得ている。また、地震観測点で地震記録が得られた場合に、それを用いて即座に計測震度の詳細分布を明らかにしようとしている点に独創性が認められる。さらに、地震観測点では地震波形が得られる場合と、最大加速度あるいは計測震度のみにはしか得られない場合があるが、それぞれに対応する手法を提案している点は極めて有用性が高い。

以上の研究成果は地震防災工学の発展に大いに貢献しており、工学的価値が大きいと認められることから、本審査委員会は本論文が博士（工学）に値すると判定した。