

学 位 論 文 題 名

強震記録に基づく深部地盤構造の検証手法に関する研究

(Verification of Deep Subsurface Structure Based on Strong Motion Records)

学位論文内容の要旨

近年、強震動予測手法の高度化に伴い、構造物の耐震設計や地震防災行政において予測地震動が活用され始めている。高精度な強震動予測には、地震動を決定づける、震源特性、伝播経路特性およびサイト特性の適切な評価が不可欠である。特に、大都市が位置する大規模堆積盆地では、地震基盤の上面形状およびそれ以浅の堆積層が地震動に与える影響が大きく、広周波数帯域の強震動予測を可能とする高精度な3次元深部地盤構造モデルの構築が必須となる。その上で重要となる深部地盤構造モデルの妥当性の検証は、観測された強震記録と既往のモデルに基づく理論波形の比較を以てなされるべきであり、この際、高密度な強震記録が必要となる。しかし、強震記録のデータセットは限られるため、その手法は、対象領域で強震記録が観測されている地震に依存せざるを得ない。実施例の多い、遠地震を用いた深部地盤構造モデルの検証では、震源から堆積層へ入射するまでの伝播経路の影響が含まれるため、伝播経路の減衰性状は十分に吟味される必要があるが、地盤構造の検証に大きく影響する長周期帯域における伝播経路の減衰性状に関する研究例は少なく、また、既往研究結果の多くは、長周期帯域での震源のS波放射特性に関して考慮していない。一方、近地地震を用いる事で、堆積盆地内での波動伝播性状を詳細に評価する事が可能であり、深部地盤構造モデルの検証に非常に有用であるが、地震の発生頻度が低く、研究例は少ない。

本研究は、堆積層へ入射する地震波の精度良い評価のために、長周期帯域における伝播経路の減衰性状を定量的に検討する手法を提案した上で、石狩平野をテストフィールドとし、高密度な強震観測記録を用いて、深部地盤構造モデルの定量的な検証を実施するものである。

本論文は6章から構成され、以下に各章の要約を述べる。

第1章は、序論であり、関連する既往の研究について俯瞰し、その問題点を指摘し、本研究の目的と意義について述べた。

第2章では、堆積層へ入射する地震波の定量的検討を目的に、震源のS波放射特性を考慮して、長周期帯域におけるS波伝播経路の減衰性状を表す Q_s 値を推定する新たな方法を提案した。やや深発のスラブ内地震の強震記録を用いて、提案手法の適用性の検証を行った。その結果、推定された長周期帯域における Q_s 値は、既往の短周期帯域での推定結果を外挿した値と調和的であり、長周期帯域において前弧側と背弧側の伝播経路の Q_s 値は同程度であることを示すことで、提案手法の有効性を確認した。

第3章では、深部地盤構造モデルの検証のテストフィールドとする石狩平野において、高密度に設置されている強震観測点、地形および地質の概要について述べ、既往の地下構造探査結果と、それに基づいて作成された深部地盤構造モデルについて整理した。産業技術総合研究所と防災科学技術研究所による、当該地域で最新の二つの深部地盤構造モデルを比較し、両モデルで地震基盤上面の形状は類似するが、その深度が大きく異なることを指摘して、4章以降の深部地盤構造モデルの検証では両モデルを検討対象とすることとした。

第4章では、やや深発スラブ内地震の強震記録を対象に、離散化波数法を用いた理論波形と観測波形のS波部分の比較から、観測点直下における深部地盤の1次元S波速度構造の妥当性を検証した。まず、長周期帯域における、浅部地盤の増幅特性が、S波理論波形に及ぼす影響について検討し、再現性を評価する際の指標とした。また、2章の検討を参考に、伝播経路の Q_s 値は背弧側に位置する石狩平野に対しても、前弧側と同じ値を設定した。次に、観測点直下の1次元S波速度構造に対する妥当性を検証した結果、既往の両モデルそれぞれで概ね再現性が良いことがわかった。この解析方法では、一方のモデルの優位性を示す結果は得られず、複数の手法を用いて、妥当性を検証する必要性を指摘した。

第5章では、札幌都市直下のごく浅い所で発生した2010年石狩地方中部の地震による高密度な強震観測記録を解析した。まず、近地観測記録の解析から震源パラメータの再決定を行った。震源近傍に分布する観測点の変位波形には近地項・中間項が顕著に見える。その振幅、形状および極性は震源パラメータに極めて敏感に反応し、観測波形と離散化波数法を用いた理論波形との比較から、その詳細な推定が可能であることを示した。推定値に基づく理論変位波形ではその特徴を良く再現できている。また、震源のほぼ直上に位置する観測点の強震記録を対象とした、S-P時間の解析から、震源深さを再決定した。既往の二つの深部地盤構造モデルに対して解析を行い、その結果、防災科学技術研究所のモデルを用いた場合では、地震発生層よりも浅部に震源が位置し、当該領域においてこのモデルが適当ではないことがわかった。以降、産業技術総合研究所のモデルを検証した。次に、遠地観測記録の解析から盆地内での地震波の伝播性状を把握した。盆地内部のN30W方向に位置する観測点の速度波形のRecord sectionに、直達波と反射波が同じ見かけ速度で伝播し、かつ反射波の振幅が直達波のそれを上回る、という特異な傾向を有する波の存在が確認できる。離散化波数法による1次元シミュレーションから、この波は地震基盤上面と震源の距離が近いことにより発生したDiffracted waveであることを明らかにした。さらに、Diffracted waveの発生過程と性質について、数値シミュレーションにより理論的に検討した。振幅が震央距離の自乗に従って減衰する傾向を示し、かつ直達波と反射波が同じ見かけ速度で地震基盤相当の速度で伝播する。地震基盤上面と震源の距離に依存して励起効率が変化し、両者の距離が近い場合、直達波よりも振幅が大きな反射波が観測され、波線理論ではその波を説明できない。これらの結果は、観測記録に見られる特徴と一致する。このように、Diffracted waveの特性は深部地盤構造モデルの妥当性の検証に有用であり、浅発地震の強震動評価においては、Diffracted waveの発生を考慮しないとその精度に影響することがわかった。最後に、2010年石狩地方中部の地震の3次元差分法による強震動シミュレーションを実施し、高密度な強震観測記録と計算波形の比較から、石狩平野における深部地盤構造モデルの妥当性の検証を行った。観測記録の再現性を確認した結果、大局的には妥当であることが示された。同時に、数地点では再現性が低く、特に、Diffracted waveの伝播に着目して検証すると、観測点間の構造においてチューニングを要することが明らかになった。Diffracted waveが地震基盤上面の形状の微妙な変化に強く影響を受けることを示し、その再現性を評価することにより、地震基盤上面の形状の検証を行うことが可能であることがわかった。尚、高密度に分布する強震観測記録からDiffracted waveの存在を確認し、その波の特性について定量的に評価した例は本研究が初めてである。

第6章は、総括であり、各章における成果とさらなる精度向上への課題を述べてまとめとしている。

学位論文審査の要旨

主 査	准教授	高 井 伸 雄
副 査	教 授	菊 地 優
副 査	教 授	後 藤 康 明

学 位 論 文 題 名

強震記録に基づく深部地盤構造の検証手法に関する研究

(Verification of Deep Subsurface Structure Based on Strong Motion Records)

将来起こりうる大地震に対して、ある地点・地域の地震動を適切に評価することは、建築設計活動、都市防災政策立案等にとって、非常に重要である。近年では、強震動予測手法が高度化され、構造物の耐震設計や地震防災行政において予測地震動が活用され始めている。高精度な強震動予測には、震源特性・伝播経路特性・サイト特性の適切な評価が不可欠であり、大都市が位置する大規模堆積盆地では、広周波数帯域の強震動予測を可能とする高精度な3次元深部地盤構造モデルの構築が必須である。この深部地盤構造モデルは観測された強震記録によって十分に検証されるべきであり、実施例の多い遠地地震を用いた深部地盤構造モデルの検証では、震源から堆積層へ入射するまでの伝播経路の影響が含まれるため、伝播経路の減衰性状は十分に吟味される必要がある。一方、直下の内陸地殻内地震を用いる事で、堆積盆地内での波動伝播性状を詳細に評価する事が可能であり、深部地盤構造モデルの検証に非常に有用であるが、地震の発生頻度が低く、研究例は少ない。

本論文は、堆積層へ入射する地震波の精度良い評価のために、伝播経路の減衰性状を定量的に検討する新たな手法を提案した上で、石狩平野をテストフィールドとし、高密度な強震観測記録を用いて、やや深発スラブ内地震と内陸地殻内地震を用いた深部地盤構造モデルの定量的な検証手法に関して議論しており、全6章で構成されている。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、関連する既往の研究について俯瞰し、その問題点を指摘し、本研究の目的と意義について述べている。

第2章では、やや深発スラブ内地震を用いた深部地盤構造モデルの検証のために必要な、地震波伝播経路特性の定量的検討を目的に、地震波放射特性を考慮した、長周期帯域における伝播経路の減衰性状を評価する新たな方法を提案している。

第3章では、深部地盤構造モデルの検証のテストフィールドとする石狩平野の強震観測点、地形および地質の概要について述べ、既往の地下構造探査結果と、それに基づいて作成された深部地盤構造モデルについて整理している。

第4章では、第2章を踏まえ、適切な伝播経路特性の設定を基に、やや深発スラブ内地震

の強震記録を対象に、離散化波数法を用いた理論波形と観測波形の比較から、観測点直下における既往の深部地盤構造モデルの1次元での妥当性を検証している。

第5章では、内陸地殻内地震を用いた深部地盤構造モデルの検証を目的として、札幌都市直下のごく浅くで発生した2010年石狩地方中部の地震による高密度な強震観測記録を解析している。まず、震源パラメータの再決定を行い、次に、既往の深部地盤構造モデルに対して解析を行い、盆地内での地震波の伝播性状を把握している。盆地内部の特定の方向に位置する観測点の速度波形記録に、直達波と反射波が同じ見かけ速度で伝播し、かつ反射波の振幅が直達波のそれを上回る、という特異な傾向を有する波の存在を確認し、離散化波数法による1次元シミュレーションから、この波が地震基盤上面と震源の距離が近いことにより発生した *Diffraction wave* であることを明らかにしている。高密度に分布する強震観測記録からこの地震波の存在を確認し、定量的に評価した例は本研究が初めてであり、さらに地震基盤上面と震源の距離に依存して励起効率が変化し、両者の距離が近い場合、直達波よりも振幅が大きな反射波が観測され、一般に用いられる波線理論ではその波を説明できない事を明らかにしている。このように *Diffraction wave* は深部地盤構造モデルの検証に有用であることを指摘しているが、既存の強震動予測では考慮されていない地震波であり、今後の強震動予測の高精度化においても本研究成果は重要となる。

第6章は、深部地盤構造モデルの検証手法に関しての研究をおこなった本研究の総括であり、各章における成果と強震動予測のさらなる精度向上への課題に関して言及している。

これを要するに、著者は堆積盆地の深部地盤構造を強震記録を用いて検証するための、伝播経路の減衰性状を定量的に検討する新たな手法を提案し、やや深発スラブ内地震と内陸地殻内地震を用いた深部地盤構造モデルの検証を通し、地震基盤上面直下に震源が位置する場合に発生する特徴的な地震波を定量的に評価しており、これら知見は地震工学の発展に貢献するところ大なるものがある。よって著者は北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。