

論文内容要旨

(NO. 1)

氏名	澤崎 郁	提出年	平成 21 年
学位論文の 題名	前方散乱近似に基づく理論エンベロープを用いた 2003 年十勝沖地震の短周期強震動の解析		

論文目次

謝辞	i
概要	iii
第 1 章 序論	1
1.1 短周期強震動解析に関する従来の研究.....	1
1.2 ランダム不均質媒質中における地震波伝播に関する従来の研究.....	3
1.3 震源過程に関する従来の研究.....	4
1.4 本研究の目的と構成.....	6
第 2 章 前方散乱近似に基づくランダム不均質媒質中を伝わる地震波エンベロープ合成	11
2.1 von-Karman 型ランダム不均質媒質.....	11
2.2 多重前方散乱過程の数理的導出.....	12
2.3 Stochastic ray path method に基づくエンベロープ合成.....	16
2.4 合成エンベロープの方位依存性および多重等方散乱に基づく理論エンベロープとの比較.....	19
2.5 エンベロープ幅および最大振幅の距離減衰勾配のパラメータ依存性.....	20
2.6 まとめ.....	22
第 3 章 2003 年十勝沖地震の震源周辺域における内部減衰および不均質パラメータ推定	35
3.1 データ, 解析手法.....	35
3.2 内部減衰と不均質パラメータの推定結果.....	37
3.3 理論エンベロープと観測エンベロープの比較.....	38
3.4 パラメータ推定値とエンベロープ合成結果の解釈.....	39
3.5 まとめ.....	41
第 4 章 短周期エンベロープインバージョン法に基づく 2003 年十勝沖地震の強震動解析	57

4.1	2003年十勝沖地震.....	57
4.2	短周期エンベロープインバージョン法.....	57
4.3	インバージョン結果.....	60
4.4	インバージョン結果の信頼性.....	62
	4.4.1 シンセティックテスト.....	62
	4.4.2 東北地方の観測点を加えた場合の結果.....	63
4.5	まとめ.....	65
第5章 強震時における地盤増幅特性の特徴		85
5.1	コーダ規格化法による地盤増幅率を用いた場合のエンベロープインバージョン結果.....	85
5.2	2003年十勝沖地震における地表-地中パワースペクトル比の特徴.....	86
5.3	コーダ波デコンボリューション法に基づく地盤浅部の剛性率変化の推定.....	87
5.4	まとめ.....	89
第6章 議論		105
6.1	周波数帯ごとのエネルギー輻射量の考察.....	105
6.2	最大振幅到達時刻から推定した震央と高周波エネルギー輻射位置の比較.....	106
6.3	1Hz以下の帯域を用いた震源インバージョン結果および余震分布との比較.....	106
6.4	今後の課題と展望.....	108
第7章 結論		115
参考文献		119
Appendix.		127

概要

強震動予測において、約1sよりも長周期側では、仮定した速度構造のもとで理論的に合成したグリーン関数を用いた観測波形のインバージョンによるすべり量分布の推定が大きな成功を収めてきた。一方、約1sよりも短周期側では、地震波が地殻の短波長不均質構造による散乱や回折現象を強く受けるため、短波長の速度構造を仮定し決定論的に波形を合成することは現実的に困難である。そのため短周期側では、小地震記録を経験的グリーン関数として用い、スケーリング則に基づき足し合わせて大地震の強震動波形を再現し、震源解析に用いるという手法がとられてきた。この手法を適用するためには、震源の位置やメカニズム解などが大地震のそれとほぼ同じであるような小地震の記録を得る必要がある。また、使用する小地震よりも小さいスケールの震源過程を分解できないという問題もある。一方、多重等方散乱理論に基づき理論的に合成されたエンベロープをグリーン関数として

用いて高周波帯域での震源過程を推定する方法も開発されてきた。しかし、この手法で用いられるグリーン関数は数理的には扱いやすいものの、波動伝播の素過程を忠実に反映していないという問題点が指摘されていた。

近年の高周波地震波エンベロープ研究の進展に伴い、リソスフェア内部における速度揺らぎのパワースペクトル密度が短波長側においてべき乗則にしたがうことや、そのような媒質中を伝わってきた直達S波のエンベロープは主に多重前方散乱を経た波群により構成され、周波数依存性を持つという観測事実が発見されてきた。多重前方散乱を経た直達波エンベロープは、震源距離とともに継続時間が長くなり、ピーク遅延時間が増大する。これらの特徴は、従来高周波震源解析のために用いられてきた多重等方散乱理論に基づく理論エンベロープでは再現できない。そのため、高周波震源過程を精度良く推定するために、グリーン関数として用いるエンベロープを不均質媒質中の多重前方散乱理論に基づき合成した現実に即したものに置き換える必要が生じてきた。この状況を踏まえて、本研究では、ダブルカップル型震源の効果を組み込んだ多重前方散乱近似に基づく理論エンベロープ合成法を開発し、合成したエンベロープを用いて2003年十勝沖地震の高周波エネルギー輻射過程および地盤増幅率を推定した。

第1章では、強震動予測法と高周波数地震波の生成と伝播に関する従来の研究とその問題点をまとめ、本論文の目的と構成を記した。

第2章では、速度揺らぎのパワースペクトルが短波長側でべき乗則にしたがうvon-Karman型ランダム不均質媒質の特徴と、その中を伝わる高周波数地震波の多重前方散乱過程の数理的導出、およびモンテカルロ法に基づくダブルカップル型震源の効果を組み込んだエンベロープ合成法を記述した。多重前方散乱過程は、波動方程式の放物近似と波動伝播過程をアンサンブル平均の概念を用いて統計的に扱うマルコフ近似を用いて記述することができる。合成された理論エンベロープには方位依存性と周波数依存性が現れ、震源距離とともにピーク遅延時間の増大とエンベロープ幅の拡大が生じる。本章では、これらのエンベロープの特徴が媒質の速度揺らぎのRMS値 ε 、速度揺らぎのパワースペクトル密度の短波長側の勾配を決める κ 、および内部減衰 Q_i^{-1} などのパラメータに支配されることを示した。

第3章では、北海道と東北地域で発生した $M_w 5-6$ の地震について、防災科学技術研究所の基盤強震観測網KiK-netの地中観測点で取得された記録を用い、2003年十勝沖地震の震源域周辺における内部減衰と不均質パラメータとを推定した。速度揺らぎの相関距離 a を5kmに固定し、観測エンベロープの最大振幅の距離減衰勾配とエンベロープ幅から Q_i^{-1} 、 ε 、および κ を推定した結果、北海道地域における内部減衰は2-4Hzで $Q_i^{-1}=1.1 \times 10^{-3}$ 、4-8Hzで $Q_i^{-1}=1.0 \times 10^{-3}$ 、8-16Hzで $Q_i^{-1}=0.8 \times 10^{-3}$ と推定され、 ε は0.07、 κ は0.9と推定された。これらのパラメータのもとで合成した前方散乱近似に基づく理論エンベロープは、多重等方散乱理論に基づく理論エンベロープでは再現できないS波エンベロープの拡大やピーク遅延などの観測事実をよく再現した。

第4章では、推定したパラメータのもとで合成した理論エンベロープをグリーン関数として用いて、2003年十勝沖地震の2-16Hz帯域における高周波エネルギー輻射過程および地盤増幅率を未知パラメータとするエンベロープインバージョン解析を行った。KiK-net地中観測点で取得された強震動記録を用いてインバージョンを行った結果、十勝沖地震に

における高周波エネルギー輻射域は破壊開始点の北西側 120km 以内の領域で最も強く、全エネルギーの 60–80% を放出していることがわかった。また、破壊開始点から 150km 程度離れた釧路–根室地域でも全体の 10% 程度のエネルギーを放出していた。平均破壊伝播速度は 3.4km/s と求められ、周波数帯ごとの全エネルギー輻射量は 2–4Hz 帯域で 3.0×10^{14} J, 4–8Hz 帯域で 7.4×10^{13} J, 8–16Hz 帯域で 7.2×10^{12} J と見積もられた。インバージョンで求められた地盤増幅率はコーダ規格化法を用いて得られた地盤増幅率とおおむね一致したものの、数倍の差を生じる観測点も見られた。

第 5 章では地表における強震動予測が重要との認識に基づき、地表における地盤増幅率の非線形応答に着目した解析を行った。2003 年十勝沖地震の直達 S 波と余震のコーダ波部分について、KiK-net の地表と地中で観測されたパワースペクトルの比を調べた結果、十勝沖地震で 20cm/s 以上の最大速度を記録した地表観測点の多くで本震時に非線形応答が生じたことがわかった。また、非線形応答を示した観測点の一つである KiK-net 厚真観測点において、地表と地中記録のスペクトル比が最長で約 20 分かけて回復したことを明らかにした。同様の回復現象は 2000 年鳥取県西部地震の際にも観測された。KiK-net 伯太観測点における地表と地中記録にコーダ波デコンボリューション解析を適用し、変化が生じる深さを地表から 0–11m に限定して鳥取県西部地震前後の地盤剛性率の時間変化を調べた結果、本震直後に剛性率が 50% 弱低下し、その後本震からの経過時間の対数に比例しながら 1 年以上かけて回復したことを明らかにした。

第 6 章では、第 4 章の高周波震源解析結果について過去の研究事例を踏まえながら考察し、2003 年十勝沖地震でのエネルギー輻射量が M_w 8.0 相当の地震としては標準的であること、エネルギー輻射域は 1Hz 以下の波形インバージョンにより求められた大すべり域とおおむね一致すること、余震活動の活発な領域では高周波エネルギー輻射量が少ないこと、最もエネルギーが強く輻射される位置は最大振幅の到来時刻から通常の震源決定法で推定した震央よりも破壊開始点近くに求められることなどを明らかにした。最後に、前方散乱近似に基づく理論エンベロープを用いた短周期強震動解析の利点と問題点をまとめ、理論エンベロープをさらに改良するための提案と、どのような問題にこのエンベロープを適用すべきかについての今後の展望を述べた。

本研究では、前方散乱近似に基づく理論エンベロープの合成をダブルカップル型震源のもとで初めて行った。この理論エンベロープをグリーン関数として用いることで、エンベロープインバージョン解析により 2003 年十勝沖地震の高周波エネルギー輻射過程を精度良く推定することができた。この理論エンベロープは、強震動予測において重要な直達 S 波部分の観測エンベロープを再現するのに適したものであるため、特に破壊の初期段階の解析に有用であると考えられる。今後、一次元速度構造の影響などを理論エンベロープに取り入れ、高周波帯域での強震動予測の精度をさらに高めることにより、地震防災に貢献することが期待される。