

盆地構造モデル修正のための計算波動場解析

Analysis of the Simulated Wavefield for Basin Structure Model Refinement

関口 春子

Haruko SEKIGUCHI

Synopsis

I developed a method to correct basement depth and inclination of sedimentary basins by analyzing misfits between observed and simulated waveforms. Focusing on direct and multiply reflected phases near 1-s period, three-dimensional semblance analysis was used to trace propagation paths. Polarization and arrival-time differences were interpreted as deviations in basement geometry, and an algorithm using corrected incidence directions and ray tracing was constructed. Numerical tests showed the method can recover geometry, though a trade-off with velocity remains. Application to the 2018 Northern Osaka earthquake indicated a refraction point ~150 m southeast at 1450 m depth with strike ~20° and dip ~10°. Here I established the framework, validated it, and confirmed feasibility; future work will extend to more stations for spatial corrections.

キーワード: 堆積盆地構造モデル, 強震動, 多重反射

Keywords: sedimentary basin structure model, strong motion, multiple reflection

1. はじめに

地震動の形成には、地盤構造の影響が大きく関与する。特に、厚い堆積層が広がる堆積平野や堆積盆地では、堆積層-基盤岩の境界で多重反射や回折に伴う表面波の発生が生じ、地下の三次元的な構造変化によって地震動応答は複雑化する。将来発生する地震に対する地震動予測の精度を高めるため、堆積盆地の三次元地盤構造モデルの改良が進められており、実際の地震を対象とした再現シミュレーションと観測波形との比較を通じてモデルの検証が行われている。しかし、観測波形と計算波形の差異を直接的かつ客観的にモデル改良へフィードバックする、効率的な手法はこれまで存在しなかった。

本研究の目的は、自然地震の観測波形と再現計算波形との残差を活用し、堆積盆地の三次元地盤構造モデルを修正する手法を開発することである。特に、直達波や多重反射によって形成される顕著な後続波の残差に着目し、それが生じる堆積層-基盤岩境界の深さおよび形状を修正することを目指す。本研究で

は、一般家屋の被害に大きく影響する1秒前後の周期帯を対象とする。

2. 手法の概要

2.1 計算波動場における伝播経路の追跡

注目する波束の伝播経路を特定するために、直接的に伝播方向を推定できるセンブランス解析を採用した。通常、センブランス解析は地表のアレイ観測に適用されるが、本研究では堆積層内の三次元的な経路を求めるため、計算格子点を用いて三次元アレイを構成し、三次元センブランス解析を実施した。

具体的には、対象観測点近傍の解析周波数帯の上限周波数に対応する一波長程度の直方体領域を取り、その中の計算点群をアレイとして用いた。ここで得られる伝播速度ベクトルを基に、半波長程度進んだ位置を新たな中心とし、同様の解析を繰り返すことで波束の経路を逐次的に追跡した。なお、地表直下の浅部や基盤直上の深部では入射波と反射波が時間的に接近し、誤差の要因となるため、一部の計算点

をセンブルランス解析から除外した。

2.2 伝播経路と基盤岩上面の傾斜との関係

得られた直達波および多重反射波の伝播経路について、基盤岩上面を通過する際の伝播ベクトルの変化を解析し、基盤傾斜との関係を調べた。その結果、反射の法則およびスネルの法則に整合する関係が確認された。

2.3 観測波形と計算波形の差異の利用

大阪盆地の三次元モデルに基づくシミュレーションでは、観測波形と同じ時刻に直達波や多重反射波が到達する。しかし、詳細に比較すると到来方向や到来時刻に差異が見られる。

振動の卓越方向は入射方向に依存するため、卓越方向の差は入射方向の違いを反映する。一方、到来時刻の差異は伝播経路の違いを表している。対象地域の速度構造が既存モデルと大きく異ならないと仮定できる場合、これらの差異は基盤岩上面の深さ・傾斜の違いによるものと解釈できる。

この仮定は手法の前提条件であり、既存モデルで速度がある程度制約されている地域に本手法を適用可能と考えられる。

2.4 基盤岩上面の深さ・傾斜の推定

直達波の伝播経路を推定するにあたり、まず観測点での正しい入射方向を推定する。観測と計算の震動卓越方向のずれが入射方向のずれを表すと仮定し、

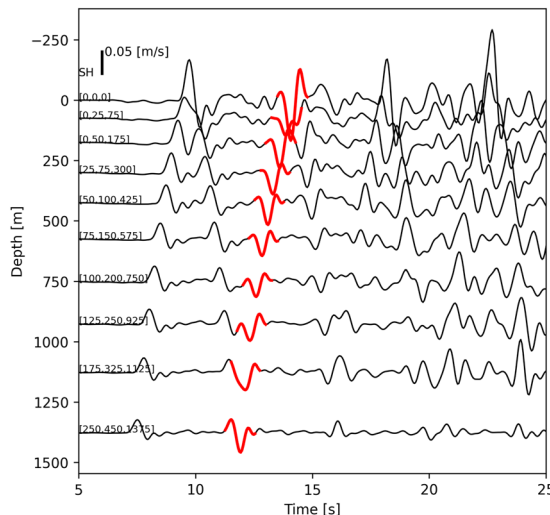


Fig. 1 Simulated waveforms of the first reflected wave packet arriving at OSKP45, along the downward path retraced in reverse from the surface to the basement. Traces are shifted by depth, and red traces indicate the target wave packet used for semblance analysis.

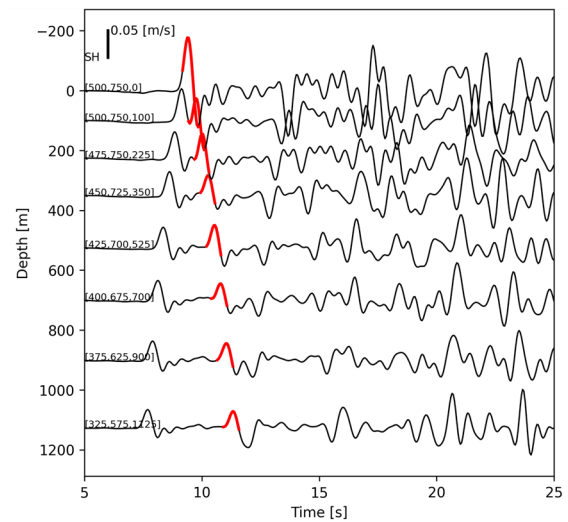


Fig. 2 Simulated waveforms of the first reflected wave packet arriving at OSKP45, along the upward path retraced in reverse from the basement back to the surface.

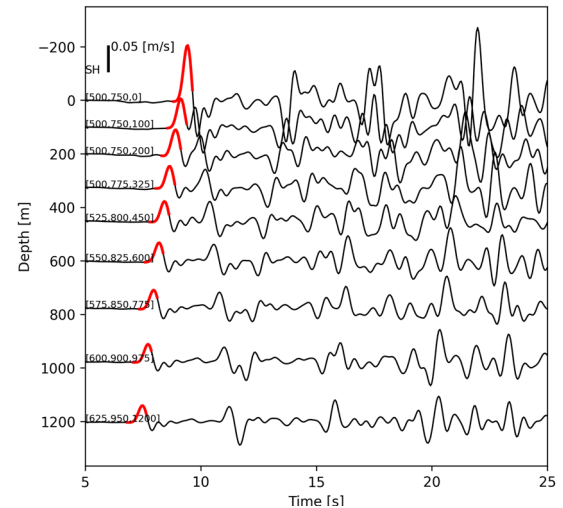


Fig. 3 Simulated waveforms of the first reflected wave packet arriving at OSKP45, along the subsequent downward path retraced in reverse from the surface to the basement.

計算での入射方向に補正を加えて正しい入射方向を導出する。

その後、推定入射方向に仮想的な屈折点を多数設定し、それぞれについてレイトレーシングを行う。得られる経路の伝播時間を観測波形の到来時刻と比較し、最も整合するものを最適解とする。このとき、堆積層経路から得られる射出方向と基盤直下での入射方向を対応させることで、基盤上面の傾斜をスネルの法則に基づき推定できる。

反射波の場合は、直達波解析で得た基盤深度・傾斜を延長した面に仮想反射点を設定する。反射点か

らの上方経路や地表反射後の屈折点経路を逆伝播的に求め、各屈折点での入射・射出方向を用いて傾斜方向を導出する。反射点・屈折点は任意性を持つため、適切な範囲で探索し、観測の到来時刻と最も一致する経路を採用する。

3. 適用例

3.1 数値実験による確認

上記アルゴリズムを単純化した盆地モデルに適用した結果、基盤岩の深度および傾斜をおおむね正しく推定できることを確認した。一方、屈折点や反射点の決定において伝播時間のみを指標とするため、堆積層の速度値が真値と異なる場合には速度と経路の間にトレードオフが生じることが明らかとなった。今後は、このトレードオフを低減する手法を導入することが課題である。

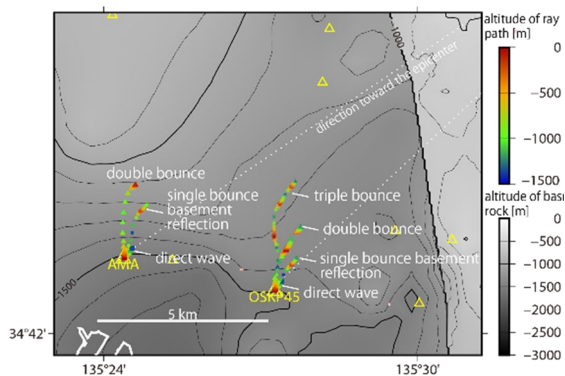


Fig. 4 Figure 4. Ground-surface projection of the propagation paths of the direct and reflected wave packets arriving at stations AMA and OSKP45 in the simulated wavefield.

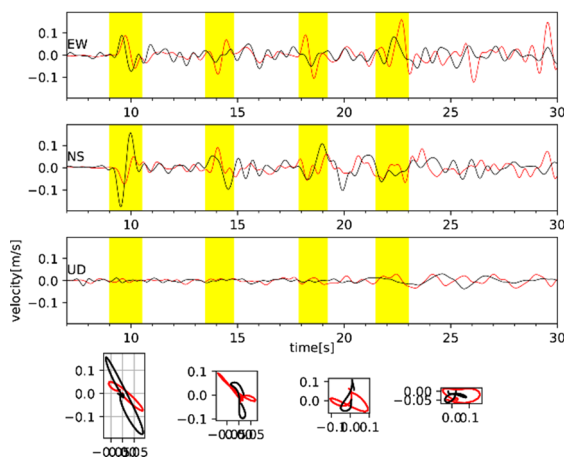


Fig. 5 Comparison of observed (black) and simulated (red) velocity waveforms and particle motion at station OSKP45.

3.2 大阪盆地への適用

本手法を大阪盆地の既往三次元モデル (Sekiguchi et al., 2016) に基づく2018年大阪府北部地震の再現シミュレーション (Sekiguchi et al., 2020) に適用した。対象はAMA (関西地震観測研究協議会 尼崎) およびOSKP45 (大阪府の震度情報ネットワークシステム 大阪市西淀川区) の観測点である。

Fig. 1~3には、OSKP45地点に到達する1回反射波について、波束追跡により得られた伝播経路上の波形を示す。Fig. 4には、その伝播経路の地表面への投影を示す。

OSKP45では、計算波形の直達波は方位41度から到来し、卓越方向はほぼ直交する方位角130度であった。これに対して観測波形では、直達波の卓越方向が時計回りに24度回転していた (Fig. 5)。この差を補正して伝播経路を再推定した結果、基盤岩上面での屈折点は、計算モデルでの位置から南東に約150 m離れた深さ約1450 mの地点に存在すると推定された。また、同地点での基盤岩の傾斜は、走向約20度・傾斜角約10度であった。

4. おわりに

観測波形と計算波形の差異から基盤岩上面の深さ・傾斜を修正する具体的手法を開発した。数値実験によりアルゴリズムの妥当性を確認し、大阪盆地の2018年地震への適用で有効性を実証した。

本研究では、手法の構築と初期的な適用を行い、成果を得ることができた。今後は、多数の観測記録へ適用し面的な修正を進め、既往モデルの改良を進めていく予定である。

謝 辞

大阪府の震度情報ネットワークシステム、および、関西地震観測研究協議会の強震観測網のデータを使用した。記して感謝する。本研究はJSPS科研費JP20K04083の助成を受けた。

参考文献

- Sekiguchi, H., Asano, K., Iwata, T., Yoshimi, M., Horikawa, H., Saomoto, H. and Hayashida, T. (2016): Construction of a 3D velocity structure model of Osaka sedimentary basin. Abstracts of 5th IASPEI / IAEE International Symposium: Effects of Surface Geology on Seismic Motion, P103B.
- Sekiguchi, H., Asano, K., Iwata, T. (2020): Strong

ground motion simulation Osaka basin, Japan, for
the 2018 Northern Osaka prefecture earthquake,
17th WCEE, C001162.

(論文受理日：2025年8月29日)