

波形逆解析による浅部・深部地盤の二次元S波速度構造の推定

Estimation of Two-Dimensional S-Wave Velocity Structure of Shallow and Deep Sedimentary Layers based on Waveform Inversion

笠 松 健太郎

要 約

入力地震動評価では、サイト固有の地盤増幅特性の影響を考慮することが重要であり、そのためには地盤のS波速度構造を明らかにする必要がある。本検討では、波形逆解析に基づいて二次元S波速度構造を推定する手法を、過去に大振幅の強震記録が得られたK-NET 築館とK-NET 小千谷近くの測線に適用し、得られた地盤モデルを用いて地盤増幅特性を評価した。K-NET 築館では、深さ約5mまでの浅部地盤のS波速度構造を推定した。サイト周辺は表土のS波速度の不均質性が強いこと、また、表層20mの地盤増幅により周期0.1~0.2秒の地震動が約2倍増幅することが分かった。K-NET 小千谷では、深さ約300mまでの深部地盤のS波速度構造を推定した。サイト付近には局所的にS波速度0.35km/s層が分布しており、その影響により周期0.4~0.5秒の地震動が3~5倍大きくなることが明らかとなった。

目 次

- I. はじめに
- II. 波形逆解析による二次元S波速度構造推定法
- III. K-NET 築館を対象とした浅部地盤の二次元構造推定
- IV. K-NET 小千谷を対象とした深部地盤の二次元構造推定
- V. まとめ

I. はじめに

将来発生が予想される地震に対して、その地震動特性を精度良く予測することは、耐震設計上、重要な検討課題である。サイト固有の地震動特性を予測するためには、震源特性、地殻・マントルでの伝播特性、評価地点の地盤増幅特性を把握する必要がある。中でも広い周波数帯域の地震動に及ぼす地盤増幅特性による影響が大きい。地盤増幅特性に関係する主要なパラメータは地盤のS波速度であり、理論的に地盤増幅特性を評価するためには地盤のS波速度構造モデルを構築する必要がある。そのため、地盤のS波速度構造を推定する試みが古くから行われてきた。

既往のS波速度構造推定法として、ボーリング孔におけるPS 検層や微動を活用した方法、地震観測記録を用いた方法などが検討されてきた。これらの手法の多くは、調査・観測地点の直下の一次元構造を推定するものであり、広域の地盤構造を明らかにするためには、多数地点での調査・観測が必

要となる。また、一次元仮定に基づいた推定結果を繋ぎ合わせて三次元モデルを作成し、地震動シミュレーションを行うと、地震観測記録を十分に再現できず、その差異が建物応答上、有意となる場合があることが報告されている¹⁾。

そこで著者は、波形逆解析により地盤の二次元S波速度構造を推定する手法について研究を進めてきた^{例えば2)}。本報では、この手法を2011年東北地方太平洋沖地震および2004年新潟県中越地震の際に大振幅の強震記録が得られた防災科学技術研究所による強震観測点K-NET 築館(宮城県)とK-NET 小千谷(新潟県)付近の測線に適用し、S波速度構造を推定した結果を報告する。

II. 波形逆解析による二次元S波速度構造推定法

二次元S波速度構造は、Takekoshi and Yamanaka (2009)³⁾と同様に、Fig.1に示すように地盤を複数の層境界と、各層を水平方向に分割して各ブロックに異なるS波速度を与える方法によりモデル化する。

層境界の深度分布は、Aoi et al. (1997)⁴⁾と同様に、(1)式で推定する。

$$\zeta(x) - \zeta_0(x) = \sum_{k=0}^{K+1} p_{n,k} \cdot c_{n,k}(x) \cdots \cdots (1)$$

キーワード : S波速度構造, 地盤, 波形逆解析, 地盤増幅特性

Keywords : S-wave velocity structure, sedimentary layers, waveform inversion, site amplification characteristic

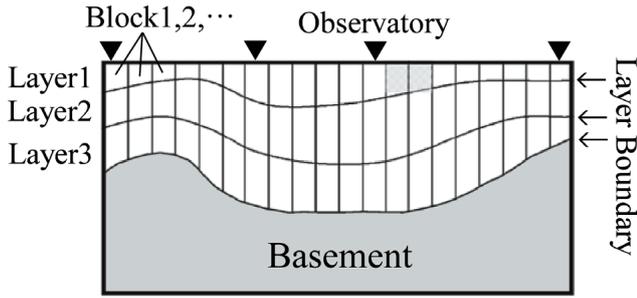


Fig.1 二次元 S 波速度構造のモデル化の方法
(Method for Modeling a 2D S-wave Velocity Structure)

x は水平距離を表す。 $\zeta(x)$ は推定する層境界深度, $\zeta_0(x)$ はその初期モデルであり, 両者の差を $K+2$ 個の三角関数に基づいた基底関数 $c_{n,k}$ とその大きさ $p_{n,k}$ で表す。サフィックス n は層境界であり縮約の規則を用いる。 k は基底関数の番号である。板たたき加振などの制御振源や地震観測により得られる観測記録の再現性に基づいた逆解析を行い, $p_{n,k}$ と各ブロックの S 波速度を推定する。

逆解析は(2)式で表されるガウス・ニュートン法により行う。

$$\Delta p = (\tilde{A}\tilde{A})^{-1} \tilde{A}e \dots \dots \dots (2)$$

\tilde{A} , Δp , e はそれぞれヤコビアン行列, 修正行列, 誤差行列である。 \tilde{A} と e の要素として, 観測と計算による波形の残差 $r_{i,j}$ を(3)式で評価する。

$$r_{i,j} = \left\{ o_i(t_j) - s_i(t_j) / o_i(t_{max}) \right\}^2 \dots \dots \dots (3)$$

$o_i(t_j)$ は, 測点 i , 時間サンプル j の観測波形を表す。 $s_i(t_j)$ は, 地盤モデルを用いた地盤応答解析により得られる計算波形である。各測点の観測波形の最大値 $o_i(t_{max})$ で基準化した波形残差を最小化することにより, 未知数としたモデルパラメタを同定する。

地盤応答解析は 2.5 次元の SH 波動場を対象に, 空間 4 次, 時間 2 次精度とした差分法により行う。観測データの外力に相当する格子点に Source Box による点加振を与え, 速度と応力の時間発展を陽的に解く。観測と計算による加振力の違いを補正するために, 加振点近くの測点を基準としたコンボリューションまたはデコンボリューションを行う。本手法の詳細な説明は文献 2 を参照されたい。

Ⅲ. K-NET 築館を対象とした浅部地盤の二次元構造推定

1. 逆解析のデータ

K-NET 築館は, 2011 年東北地方太平洋沖地震の際に最大

加速度約 2700Gal の強震記録が得られた地震観測点である。この記録に対する地盤増幅特性の影響を明らかにするために余震観測や微動探査が行われ, 観測点周囲 20m 程度の狭範囲で増幅特性が局所的に異なること等が明らかにされている⁵⁾。本検討では, K-NET 築館近くで行われた屈折法地震探査の波形データ^{6),7)}に本手法を適用し, 深さ約 5m までの浅部地盤の二次元 S 波速度構造を推定した。屈折法地震探査は Fig.2 (Amrouche et al. (2014)⁶⁾に加筆) に示す K-NET 築館からやや西に離れた歩道で行われた。測線長は 14m である。板たたき加振による測線直交成分の速度波形のデータが 1m 間隔で得られている。南西側の A を加振して得られた波形を逆解析に用いた。板の左右両側をそれぞれ 10 回加振した計 20 波形が得られているため, S/N の向上のために右側加振時の波形の極性を反転させた上で, 左側加振時の波形と併せてスタッキングした。20~50Hz を対象周波数とし, 各測点の最大振幅で波形を基準化した。

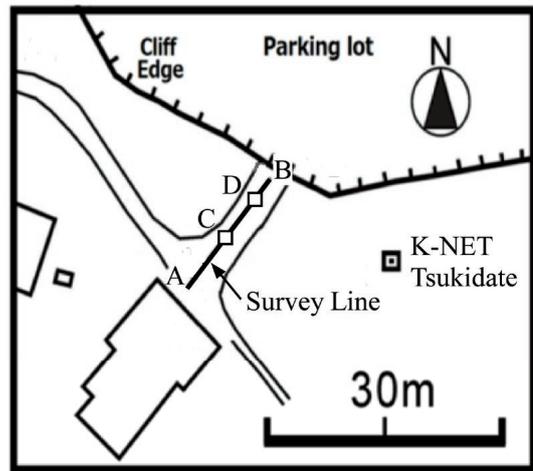


Fig.2 対象測線の位置

2. 逆解析の条件

表土の S 波速度構造を推定対象とし, 5 つの基底関数を用いて下面深度の分布を推定した。また, 測線長 14m の範囲を 10 分割し, 各ブロックの S 波速度を推定した。K-NET 築館の PS 検層結果と既往研究^{6),7)}を参考に, 表土の下部に S 波速度 248m/s と 330m/s の 2 層 (境界深度 10m) を加えた 3 層構造で地盤をモデル化した。差分計算は格子間隔 0.1m の正方形格子を用いて行った。板たたき加振位置に相当する格子点に点加振を与え, 加振位置から 1m 離れた測点を基準としたコンボリューションを行った。

3. 逆解析の結果

逆解析結果の速度波形を Fig.3a に, 二次元 S 波速度構造の推定結果を Fig.4 に示す。どちらも加振位置を距離の基準と

している。例えば距離5mの測点のように、波形の細かな特徴を十分に再現できていない場合もあるが、S波と考えられる振幅の大きいフェーズの再現性は全体的に良好である。推定したS波速度構造を見ると、表土の下面深度は概ね4mであり、崖側（北東側）に向かい緩やかに深くなる。表土のS波速度は、加振位置に比べて崖側で50m/s程度小さくなっており、不均質性が強いことを表している。

推定結果の妥当性を確認するために、崖側のBを板たたき加振して得られた波形のシミュレーションを行った。速度波形の比較をFig.3bに示す。距離の基準はFig.3aと同じにした。加振位置は距離13mであり、距離12mの測点をコンボリューションの基準点とした。距離3mの測点では観測に比べてS波到達がやや遅くなっているが、これを除けば全体的な波形の再現性は概ね良好である。

4. 地盤増幅特性の評価

推定した二次元S波速度構造を用いて、鉛直入射の一次元波動論によりC（距離6m）とD（距離11.5m）の位置にお

ける表層20mの地盤増幅特性(2E/2E)を評価した。Q値はS波速度の1/15とした。S波速度330m/s層の半無限媒質を仮定した。評価結果をFig.5に示す。CとDは5.5mしか離れていないが、表土のS波速度構造が異なることにより、卓越周期に違いがある。Fig.5には、参考として、PS検層結果に基づいたK-NET築館における同様の地盤増幅特性を重ねた。K-NET築館で得られる観測記録の卓越周期は0.1~0.2秒であり、PS検層結果ではこの卓越を再現できないことが明らかにされている⁹⁾。本検討によるCの地盤増幅特性は、K-NET築館の周期0.1~0.2秒の卓越と調和的であり、表層20mの地盤によりこの周期の地震動は約2倍増幅されることが分かった。

IV. K-NET 小千谷を対象とした深部地盤の二次元構造推定

1. 逆解析のデータ

2004年新潟県中越地震M_j6.8では、震源直上のK-NET小千谷で最大加速度約1300Galの強震記録が得られた。震源域は地盤構造が複雑であり、小千谷市では地盤増幅の影響により本震時の地震動特性が局所的に異なっていたことが指摘されている⁸⁾。本検討では、小千谷市で4日間の連続微動観測を行い、得られた記録から評価した相互相関関数⁹⁾に本手法を適用し、深さ約300mまでの深部地盤の二次元S波速度

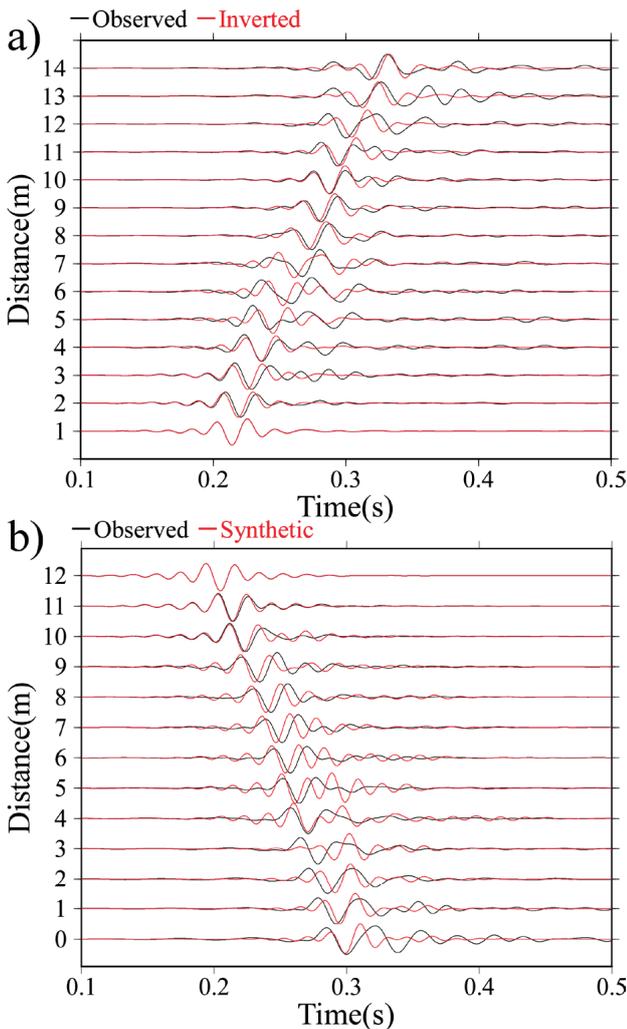


Fig.3 速度波形の比較
(Comparison of Velocity Waveforms)

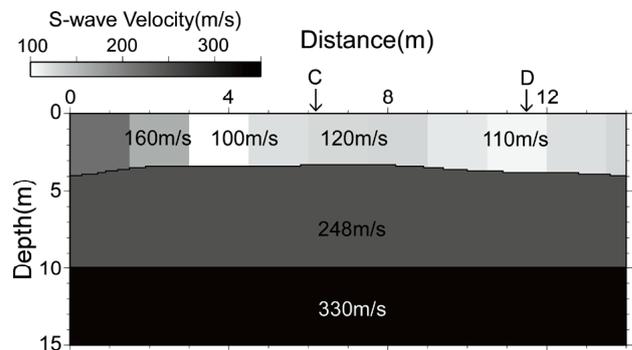


Fig.4 二次元S波速度構造の推定結果
(Inverted 2D S-wave Velocity Structure)

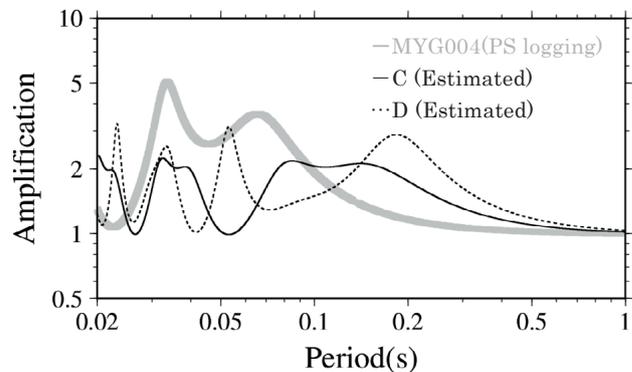


Fig.5 地盤増幅特性
(Site Amplifications)

構造を推定した。

連続微動観測の位置の分布を Fig.6 に示す。K-NET 小千谷を跨ぐ測線長約 4.5km の範囲に 7 測点を配置した。Fig.7 に示す B7 を基準とした NS 成分の相互相関関数を逆解析に用いた。

2. 逆解析の条件

Fig.7 の各測点の相互相関関数を見ると、プラス側とマイナス側で波形が反転しておらず、相反定理が成り立っていないことが分かる。そこで、Fig.7 の相互相関関数に対して通過帯域を周期 2 秒, 1 秒, 0.7~0.9 秒, 0.5~0.6 秒としたバンドパスフィルター処理を行い、各周期についてプラス側とマイナス側の波形の対応を確認した。4 周期についてプラス側とマイナス側の相互相関関数を重ねて Fig.8 に黒で示す。プラス側の波形は極性を反転させている。周期 2 秒と 1 秒では両者の波形は概ね重なるが、周期 0.7~0.9 秒と 0.5~0.6 秒では重ならない区間が多数見られる。周期 1 秒未満の相互相関関数の安定化が今後の課題であり、改めて長期間の微動観測を行い、スタッキング数を増やすことを検討したい。プラス側とマイナス側で位相ずれが顕著な灰色枠で囲った区間 (Fig.8 の out of target の区間) を逆解析の対象から除外した。逆解析はマイナス側の相互相関関数を用いて行った。

既往研究^{8),10)}を参考に、S 波速度 0.35, 0.6, 1.3km/s の 3

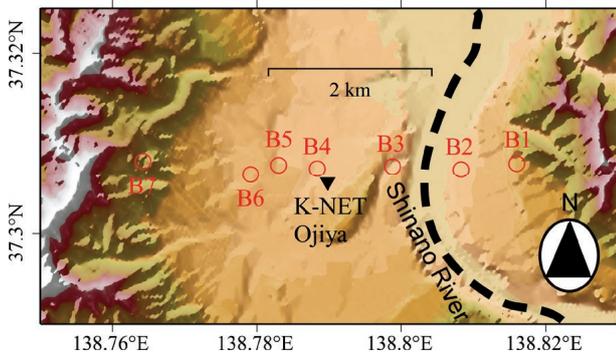


Fig.6 連続微動観測の測点位置 (Locations of Stations for Continuous Microtremor Observations)

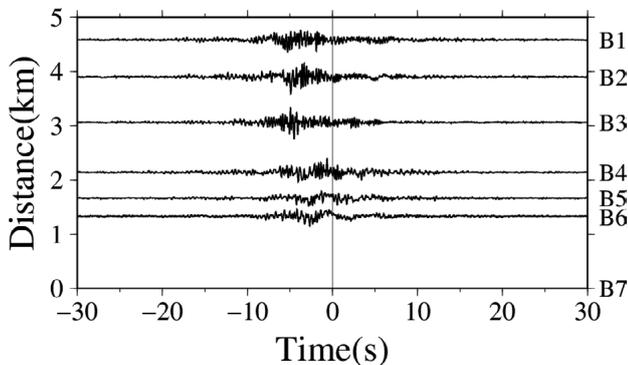


Fig.7 相互相関関数 (Cross-correlation Functions)

層で地盤をモデル化し、0.35km/s 層と 0.6km/s 層の下面深度の分布を推定した。解の安定化のために層内のブロック分割は行わなかった。6 測点, 4 周期から成る計 24 波形を用いて (3) 式の誤差行列を評価した。差分計算は、格子間隔を水平 4m, 上下 2m として行った。B7 に相当する格子点に点加振を与え、B7 を基準としたデコンボリューションにより、相互相関関数を評価した。

3. 逆解析の結果

逆解析結果の相互相関関数を Fig.8 に赤で示す。周期 2 秒と 1 秒については、周期 2 秒の B6 を除いて、観測による各測点の相互相関関数を良く再現する結果が得られている。こ

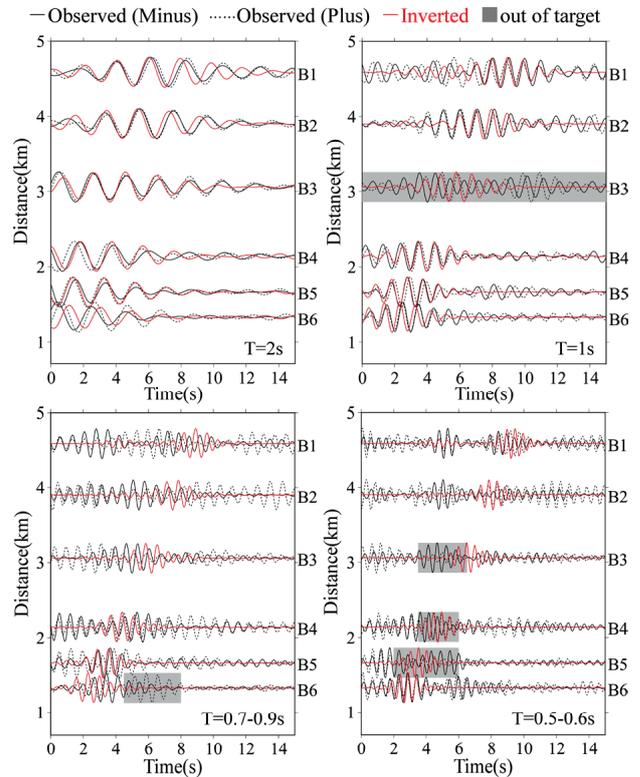


Fig.8 相互相関関数の比較 (Comparison of Cross-correlation Functions)

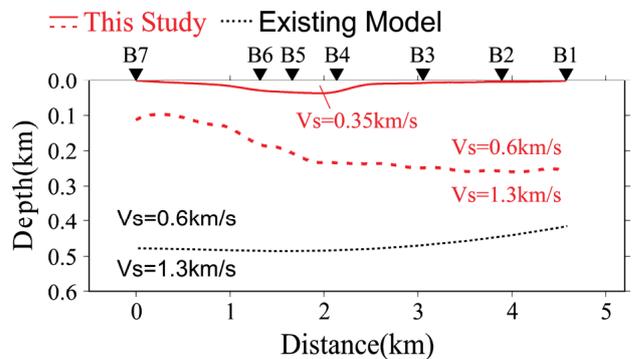


Fig.9 二次元 S 波速度構造の推定結果 (Inverted 2D S-wave Velocity Structure)

れらに比べて再現性は劣るが、周期 0.7~0.9 秒と 0.5~0.6 秒についても逆解析で対象とした波形区間については特徴的なフェーズは概ね再現されている。

推定した二次元 S 波速度構造を Fig.9 に赤実線と赤破線で示す。S 波速度 0.6km/s 層の下面は、黒破線で示した既往研究¹⁰⁾のものに比べて最大約 0.4km 浅く求まった。また、既往研究¹⁰⁾とは違い、東に向かい深くなる分布となっており、B7 では深さ約 100m であるのに対して、B4 よりも東側では深さ約 250m となっている。S 波速度 0.35km/s 層は、B4 から B6 にかけて局所的に分布しており、最大 35m 程度の厚さである。

4. 地盤増幅特性の評価

推定した二次元 S 波速度構造を用いて、SH 波動場を対象とした二次元差分法により、鉛直平面波入射の二次元地盤応答解析を行った。計算結果を用いて B1 を分母とした各測点のフーリエ振幅スペクトル比を求めて、地盤増幅特性の相対値を評価した。二次元差分法による地盤応答解析の基本的な方法は、逆解析のフォワード計算に用いた 2.5 次元差分法によるものと同じである。Q 値は S 波速度の 1/20 とした。

評価結果を Fig.10 に示す。信濃川付近の B2 と B3 では、比は概ね 1 となっており、B1 とほぼ同じ地盤増幅特性が評

価されている。信濃川からやや西に離れた B4~B6 では周期 0.4~0.5 秒と 0.3 秒が卓越しており、この地域に局所的に分布する S 波速度 0.35km/s 層の影響が考えられる。これらの周期の倍率は 3~5 倍もあり、2004 年新潟県中越地震の際に K-NET 小千谷で大振幅の強震記録が得られた一因であると考えられる。

この本震の 4 日後に、小千谷市の約 30km 東で Mj6.1 の余震が発生し、臨時余震観測⁸⁾により B1, B2, B3, B5 とほぼ同じ場所で観測記録が得られている。この余震記録について B1 を基準としたフーリエ振幅スペクトル比を Fig.11 に示す。B2 と B3 の比はほぼ 1 となっており、推定した地盤構造を用いた評価結果と対応する。また、B5 では周期約 0.4 秒が卓越しており、本検討による評価結果とやや周期は異なるが、B2 および B3 と比べて周期 0.5 秒以下の地盤増幅率が大きい点は調和的である。

V. まとめ

入力地震動評価では、サイト固有の地盤増幅特性の影響を考慮することが重要であり、そのためには地盤構造を明らかにする必要がある。本検討では、K-NET 築館と K-NET 小千谷付近の測線を対象に二次元 S 波速度構造を推定し、得られた地盤モデルを用いて地盤増幅特性を評価した。

K-NET 築館付近は表土の S 波速度の不均質性が強く、地盤増幅特性が局所的に異なる要因となっていること、また、表層 20m の地盤増幅により周期 0.1~0.2 秒の地震動が 2 倍程度増幅することが分かった。K-NET 小千谷付近には S 波速度 0.35km/s 層が局所的に分布しており、その影響により周期 0.4~0.5 秒の地震動が 3~5 倍増幅されることが分かった。

謝 辞

本報は、東京工業大学山中研究室のご協力の基に実施した既往の検討結果^{11),12)}をとり纏めたものです。山中浩明教授とご協力いただいた関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 上林宏敏; 堆積平野における不整形地盤構造のモデル化精度が強震動予測に及ぼす影響の評価, 科学研究費助成事業研究成果報告書, 2018.
- 2) 笠松健太郎ほか; ラブ波を用いた波形逆解析による深部地盤の二次元 S 波速度構造の推定, 物理探査, 第 68 巻, 第 4 号, 2015, pp.265-275.
- 3) Takekoshi et al.; Waveform inversion of shallow seismic refraction data using hybrid heuristic search method, Exploration Geophysics, 40, 2009, pp.99-104.
- 4) Aoi et al.; Boundary shape waveform inversion for two-dimensional basin structure using three-component array

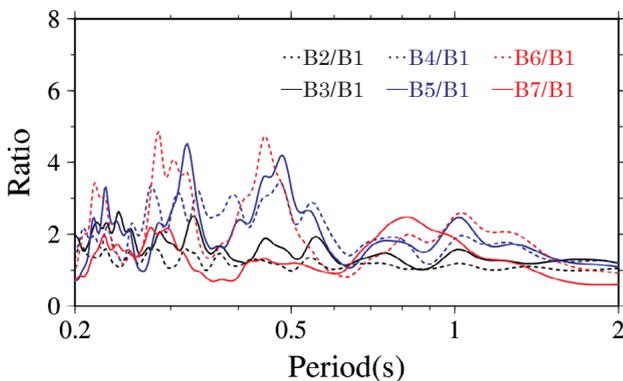


Fig.10 地盤増幅特性の比
(Ratios of Site Amplifications)

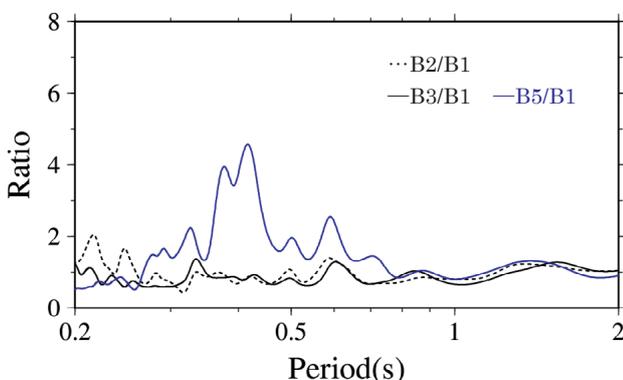


Fig.11 地震観測記録のフーリエ振幅スペクトル比
(Ratios of Fourier Amplitude Spectra from Seismograms)

- data of plane incident wave with an arbitrary azimuth, Bull Seismol Soc Am, 87(1), 1997, pp.222-233.
- 5) Yamanaka et al. ; Estimation of S-Wave Velocity Profiles and Site Amplification Around the K-NET Tsukidate Station, Miyagi Prefecture, with Reference to Large PGA During the 2011 off Pacific Coast of Tohoku Earthquake, Japan, Journal of Disaster Research, Vol.7, No.6, 2012, pp.682-692.
- 6) Amrouche et al. ; Near-Surface Geophysical Profiling Near Former Location of K-NET Tsukidate Strong Motion Station in Miyagi Prefecture, Japan, Journal of Disaster Research, Vol.9, 2014, pp.709-718.
- 7) Amrouche et al. ; Two-dimensional shallow soil profiling using time-domain waveform inversion, GEOPHYSICS, Vol.80, No.1, 2015, pp.EN27-EN41.
- 8) Yamanaka et al. ; Estimation of local site effects in Ojiya city using aftershock records of the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake and microtremors, Earth, planets and space, 57, 6, 2005, pp.539-544.
- 9) 地元孝輔ほか;新潟県小千谷市における微動アレイと連続微動観測によるS波速度構造モデルの推定,物理探査学会第138回学術講演会,2018.
- 10) 笠松健太郎ほか;中小地震の地震動シミュレーションによる2004年新潟県中越地震震源域の深部地盤構造モデルの構築,物理探査,第59巻,第5号,2006,pp.475-484.
- 11) 笠松健太郎ほか;屈折法地震探査データを用いた波形逆解析による表層地盤の2次元S波速度構造の推定,物理探査学会第137回学術講演会,2017.
- 12) 笠松健太郎ほか;地震波干渉法で得られた相互相関関数を用いた波形インバージョンによる2次元S波速度構造推定—新潟県小千谷市を対象とした検討—,物理探査学会第141回学術講演会,2019.

Estimation of Two-Dimensional S-Wave Velocity Structure of Shallow and Deep Sedimentary Layers based on Waveform Inversion

Kentaro Kasamatsu

It is important to take site-specific amplification characteristics into account when evaluating an input ground motion, and so it is necessary to clarify the S-wave velocity structure at the site. In this study, I used a method for estimating the 2D S-wave velocity structure from a waveform inversion to survey lines along the K-NET stations of Tsukidate and Ojiya, where ground motions with large amplitudes were recorded during huge earthquakes, and then evaluated the site amplification characteristics using the obtained 2D profiles.

At the Tsukidate station, I estimated the 2D S-wave velocity structure of shallow sedimentary layers up to a depth of approximately 5 m using waveforms from a seismic refraction exploration. It was found that topsoil had high heterogeneity of S-wave velocities, and the variation of near-surface S-wave velocities causes the difference in amplification characteristics. The site characteristics near the Tsukidate station due to near-surface layers at depths from 0 to 20 m have peaks at periods of 0.1 to 0.2 s with approximately two-times amplification.

At the Ojiya station, the 2D S-wave velocity profile of deep sedimentary layers up to a depth of approximately 300 m was deduced using cross-correlation functions evaluated by a seismic interferometry analysis. We clarified that the layer with an S-wave velocity of 0.35 km/s was locally distributed around the Ojiya station and amplifies ground motions at periods of 0.4 to 0.5 s by 3 to 5 times.