

2019年山形県沖地震で被災した小岩川地区の表層地盤構造の詳細評価

長岡技術科学大学 蓮岡 大我
長岡技術科学大学 正会員 池田 隆明
基礎地盤コンサルタンツ株式会社 吉川 猛

1. はじめに

2019年6月18日22時22分に山形県沖でMj6.7の地震が発生した。震源近傍の新潟県村上市府屋で最大震度6強、最大加速度 1191.3cm/s^2 が観測¹⁾された。主な被害は木造住宅の屋根瓦の損傷であり、山形県鶴岡市小岩川地区ではその発生数が特に多かった。しかし、小岩川地区に隣接している大岩川地区や早田地区は、屋根瓦の被害は少なかった。小島ら²⁾の空中写真から屋根瓦の損傷率の算出に加えて、小岩川自治会が算出した家屋の損傷状態マップを参照した結果、屋根瓦の損傷率は大岩川地区で1.0%、小岩川地区で34.7%、早田地区で2.6%という結果であった。また、3地区の震央距離はとも概ね8km程度であり、基盤への入力地震動レベルは同じである。

図1-1に小岩川地区の被害の大きさと周辺環境について示す。小岩川地区は全長500m程度の狭い地区でありながら、被害を詳細に観察すると図のように被害が集中している範囲と、被害が少ない範囲があることが分かった。この地区の建物の構造、築年数等に大きな変化が見られなかった。また、狭い地区であ

るため、入力地震動レベルはほぼ等しいと考えると、被害の状況に差があることは地盤構造の変化によって、地表面地震動に差異があったと想定される。昨年度研究室で、図1-2で示すように、小岩川地区を縦断するように表面波探査の実施(側線A~C)と、常時微動測定(K1, K2)等により小岩川地区の地盤構造が検討された。その結果を図1-3に示す。ここで、地盤構造の基盤深度が変化していることが明らかにされた。この解析結果では、赤枠のようにS波速度が不自然に突起し地盤構造の連続性が担保されていないエリアや、被害大エリアと中エリアで基盤深さにほとんど差が存在していなかった。このような実際の地盤構造では考えにくい地点がいくつか存在し、地盤構造として他の解析に用いる精度が確保されていない。

そのため本研究では、計測データの再評価を行い、地盤構造推定の精度に大きく影響を与える分散曲線を再評価し、地盤構造の推定精度向上のために再解析を実施した。



図1-1 小岩川地区被害と周辺環境

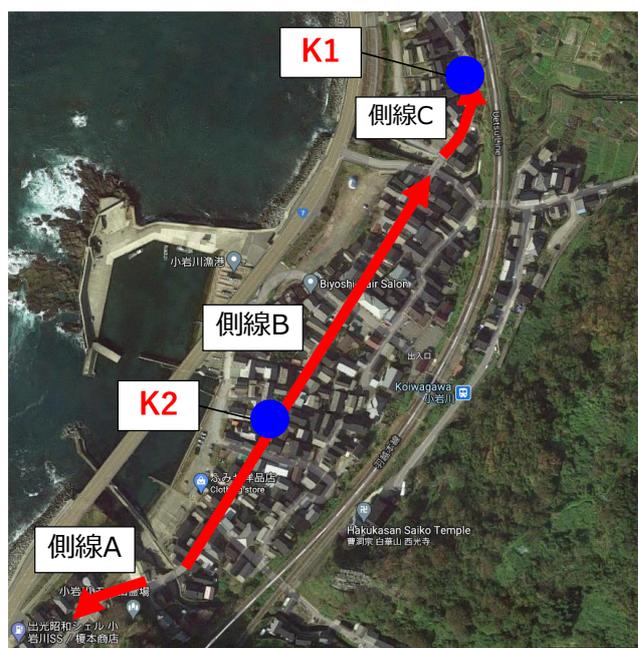


図1-2 各物理探査測定位置

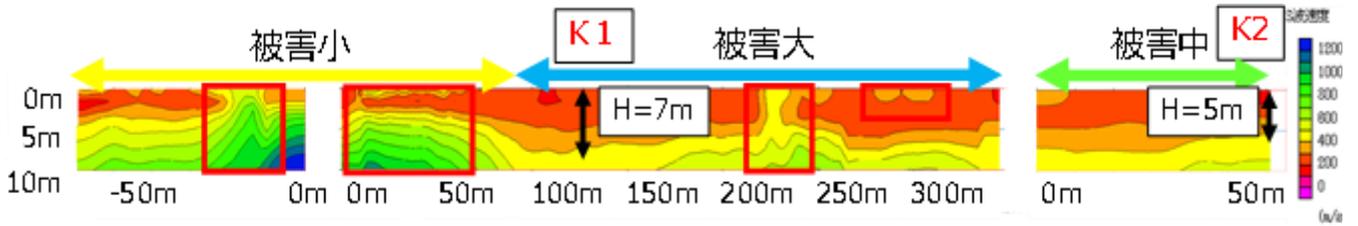


図 1-3 前回の表面波探査結果

2. 表面波探査と既往の推定結果

1) 表面波と表面波探査

表面波は地表に沿って伝播する波であり、レイリー波とラブ波に分られる。表面波探査で観測するレイリー波は振幅が地表付近で最大となり深度方向に急速に減少する波動である。図 2-1 にレイリー波の伝播イメージを示す。一般的に、楕円軌道を描くように伝播し、高周波数は浅層を伝播し、伝播速度が遅く、低周波数ほど深層を伝播し、伝播速度が速いと考えられている。そのため表面波は、周波数によって伝播速度が異なるという分散性を示す。

表面波探査はこの分散性を利用して、かけやなどの起振で発生したレイリー波から深度約 10m 程度の地盤における二次元的なせん断波速度分布を推定する物理探査手法である。また、測定手法には一連して調査を実施することができない場合など側線長が短い場合に行う固定展開と、側線が道路など非常に長い場合に有効な測定方法のオフセットの 2 種類存在する。

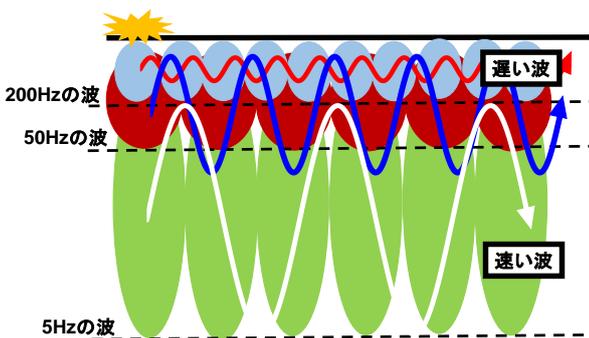


図 2-1 レイリー波の伝播イメージ

2) 表面波探査解析理論

表面波探査は実際の地盤から観測した分散曲線を元に、地盤構造を推定していく方法である。周波数は深度と関係するので、分散曲線を深度と位相速度の関係に置き換えることが出来る。初期地盤モデルの分散曲線を、実際の地盤から求めた分散曲線にイン

バージョン解析を行う。これより、実際の分散曲線を満足した初期地盤構造が求まり、せん断波速度構造が決定される。よって、元の分散曲線を詳細に評価することが、実際の地盤構造を精度のよい再現に繋がる。

本解析では初期地盤モデルを観測波の分散曲線から 1/3 波長則を用いて求めている。これによって、実際の地盤構造に比較的近い初期地盤モデルを設定することができ、インバージョン解析の繰り返し計算を少なくすることが出来る。

3) 分散曲線

2.2) より分散曲線は地盤構造を求める上で非常に重要になってくることが分かる。ここで、分散曲線とは表面波探査より求めた観測波形から、レイリー波における周波数ごとの位相速度の関係を表したものである。そのため、各センサーが起振による波を順番に計測することで、センサー距離と波の伝わる時間差より、各周波数の位相速度が求まる。位相速度イメージを図 3-1 に示す。位相速度イメージ図の色は振幅の強さを表し、青色が振幅の強い部分である。次いで、緑、黄、赤と振幅の強さが表されている。原点から伸びている 2 本の青線（以降青線とする。）で挟まれた範囲は 1/3 波長則より精度が高いとされている。そのため、青線で挟まれた範囲のみで解析を行う。分散曲線を青線で挟まれた範囲で自動または手動で振幅の強い部分をプロットする。これより、精度の高い分散曲線を設定することが出来る。

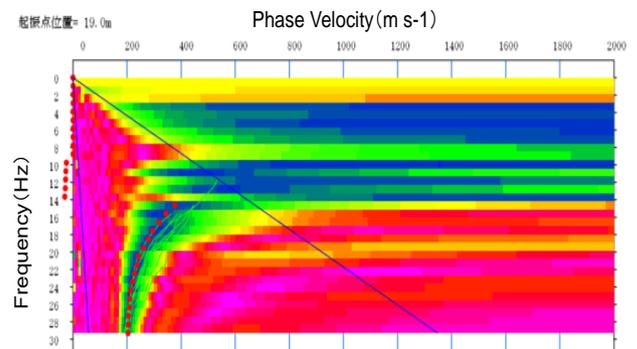


図 3-1 位相速度イメージ

4) 既往の分散曲線の評価

鈴木ら³⁾の結果では、分散曲線を青色の領域のみにプロットを行い前後の分散曲線の関係を考慮せず地盤構造の推定が行われた。また、ここでは逆分散になっている箇所も採用され、周波数領域を 30Hz で検討された。これにより、地盤構造の連続性が担保されていないと考えられる。

しかし、現地調査から図 1-3 の赤枠のように地盤構造が急に変化する地盤であることは考えにくかった。また、小岩川地区は海岸沿いに位置しており、砂地盤が堆積していることから S 波速度が大きくなることは少なく逆分散になる要素は考えられない。さらに、30Hz では十分に浅層を表現できず、より高周波数の解析から浅層を詳細に検討する。これらを踏まえて、分散曲線再設定を行う。

3. 地盤構造の再評価

1) 分散曲線の評価方針

地盤構造の連続性、周波数領域、逆分散に注意して分散曲線の見直しを行う。以下で分散曲線の再評価方法について説明する。

① 地盤構造の連続性を考慮して分散曲線を設定

図 4-1 に連続した地盤の分散曲線を示す。各点は連続した地盤の分散曲線と仮定する。実際の地盤構造の連続性を考慮すると、急な地盤構造の変化は考えにくいことから、緑点 (0m) と青点 (1m) ように分散曲線が大きくずれることはない。これにより、地盤構造の連続性が考慮されず分散曲線が決定されると起伏の大きい地盤構造になる。そのため、地盤構造の連続性を考慮して、緑点 (0m) と黒点 (2m) のように連続的に分散曲線を設定する。

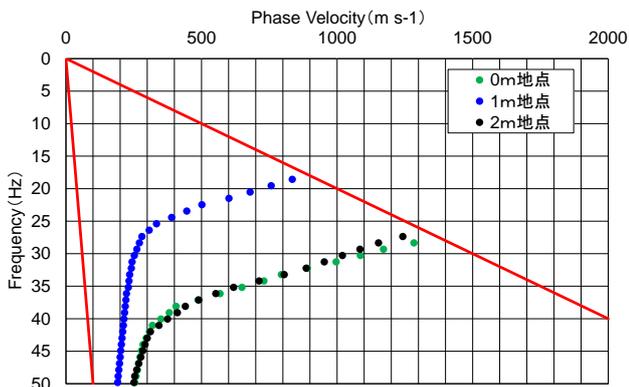


図 4-1 連続した地盤の分散曲線

② 逆分散の除去

図 4-2 に逆分散のイメージ図を示す。逆分散は青円の示すように、浅層を表す高周波数で位相速度が大きくなる現象である。これによって、浅い層に S 波速度が大きくなってしまふ。一般的に地下 0~10m で逆分散は起こりにくいとされている。そのため、逆分散の発生は観測時の起振に原因があると考え、逆分散を用いらないよう分散曲線を設定する。

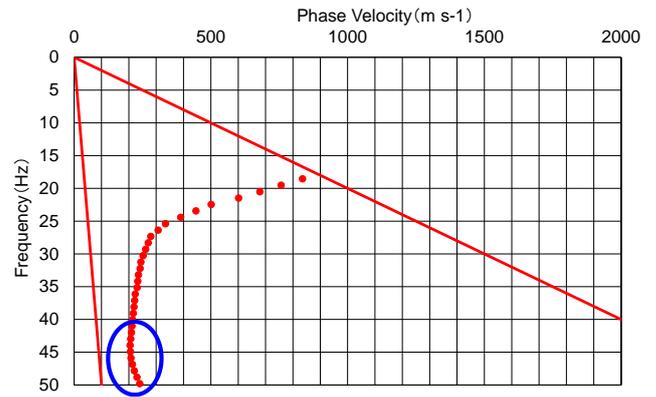
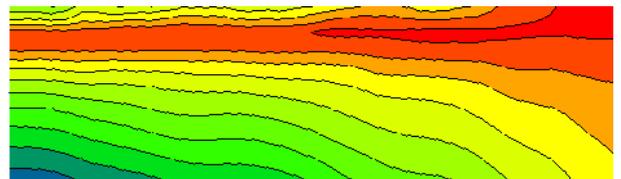


図 4-2 逆分散のイメージ図

③ 周波数領域を 0~50Hz まで検討

周波数の設定を 50Hz までとして、浅層の地盤構造を詳細に解析する。これによって図 4-3 に示すように 30Hz と 50Hz 解析結果を比較すると、50Hz の方が浅層の精度に向上が見られた。しかし、100Hz まで広げ解析を行ったが、50Hz 時と差がほとんど見られなかった。そのため、50Hz で解析を行う。

50Hz まで解析



30Hz まで解析

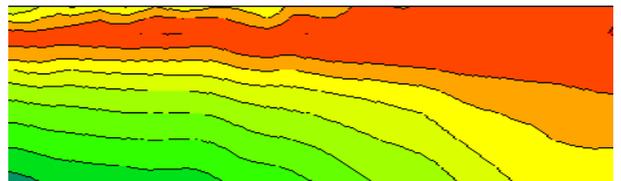


図 4-3 周波数領域の変更による地盤構造の比較

2) 評価結果と考察

図 4-4 に地盤構造の比較を示す。S 波速度が不自然に突起している地点が無くなり、各側線の連続性の確保される結果になった。しかし、側線 A と側線

