

2024 年能登半島地震における高密度地震観測記録に基づく新潟市の表層地盤特性の分析

長岡技術科学大学 ○松橋 典子
長岡技術科学大学 正会員 池田 隆明
東京都立大学 正会員 志賀 正崇

1. はじめに

2024 年能登半島地震では、震源から約 150km 離れた新潟市内においても液状化などの地震被害が見られた¹⁾。新潟市では民間事業者が高密度地震観測を実施しており²⁾、本震および余震の地震動記録が得られた。この記録を用いて地震動特性を分析し、考察することは地域の詳細な地震ハザード評価に資する。

著者らの先行研究³⁾では、本震および余震時の新潟市における最大速度の表層地盤増幅率分布について、局所的な増幅や変動が確認された。このような地震動増幅がどのような周波数特性を有する地盤応答と関係しているのかは明らかになっていない。そこで本研究では、新潟市内で観測された局所的な地震動増幅に着目し、帯域平均 H/V スペクトルを算出するとともに、周波数帯を逐次移動させながら表層地盤増幅率との対応関係を分析することで、増幅に寄与した周波数帯を調べる。

2. 2024 年能登半島地震と高密度地震観測網

新潟市の北区、東区、中央区、西区および江南区では、民間事業者により高密度な地震観測が行われている。この観測点をすべて含む範囲を解析対象地域とする。また、解析対象地域には気象庁⁴⁾および防災科学技術研究所 (NIED)⁵⁾の地震観測点も複数設置されており、分析対象に加えた。

本研究では本震に加え、1 月 9 日 17 時 59 分頃に佐渡付近で発生した M6.1 の余震での観測記録を分析対象とする。本震では 159 点、余震では 145 点で有効な記録が得られ、両地震で共通して記録が得られた観測点は 139 点であった。図-1 に解析対象地域、対象観測点、対象地震震央の位置を示す。

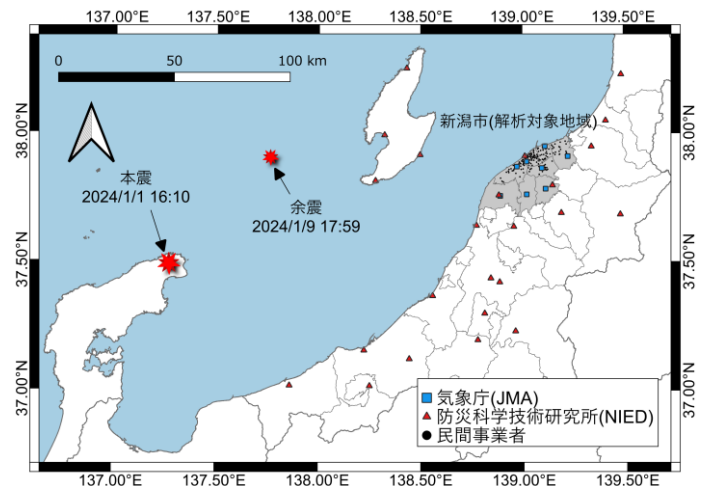


図-1 2024 年能登半島地震の本震，1 月 9 日に発生した M6.1 の余震の震央位置，および新潟市の位置

3. 表層地盤増幅率

著者らの先行研究で整理された表層地盤増幅率 (AR: Amplification Ratio) は、基盤における推定最大速度に対する地表最大速度の比として定義される。AR は地表で観測された最大速度を、距離減衰式から推定した基盤最大速度で除した値として算出した。基盤最大速度は司・翠川(1999)⁶⁾の距離減衰式を用いて推定したが、距離減衰式の粘性減衰項係数を新潟市の観測記録に基づき補正している。図-2 に本震および余震における AR の空間分布を示す。なお、本研究では粘性減衰項係数の補正方法を一部変更したため、AR の絶対値は先行研究と異なる。しかし、観測点間の相対的な大小関係に変化はなく、本研究で実施する相関解析への影響はない。図中のプロットは対象とした観測点位置を示しており、三角形のプロットは AR の値が全観測点中の上位 20%を示す観測点を示している。分布は、各観測点の AR に対して普遍クリギングによる空間補間を適用した結果である。本震および余震ともに西区を中心とした局所的に増

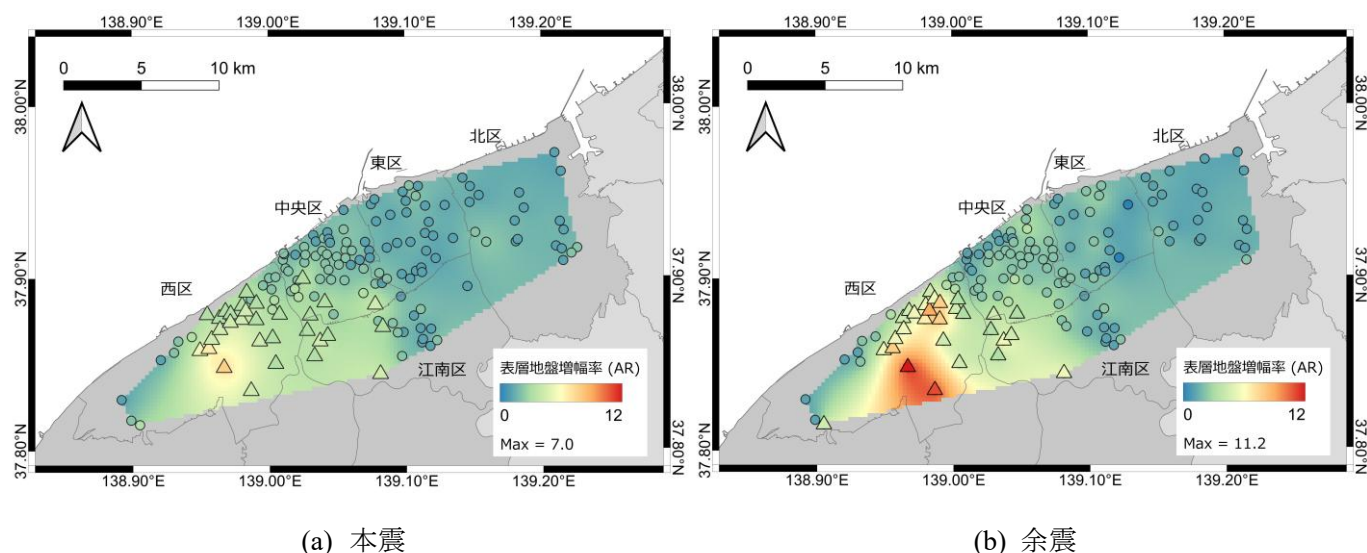


図-2 表層地盤増幅率(AR)の分布

幅が大きい領域が認められた。また、両地震で類似した空間分布が確認された。このことは、観測された地震動増幅が地盤条件に起因する可能性を示唆している。一方で、どの周波数帯の地盤応答がこの空間分布の形成に寄与しているかは明らかでない。

4. 地盤の振動数特性を表す指標

強震記録を用いたサイト周波数特性の検討指標としては H/V スペクトルのピーク周波数が用いられることがある^{7),8)}。前検討では AR 分布とピーク周波数の対応関係を確認したが明確な対応関係が見られなかった(図-3)。これは H/V スペクトル形状の複雑性、多峰性などが影響した可能性がある。そこで H/V スペクトル形状のエネルギーを保持するために周波数帯域平均を指標として検討を行った。H/V スペクトルの振幅値そのものの物理的意味付けは必ずしも明確ではないため解釈には注意を要するが、スペクトル形状は地盤応答をある程度反映すると考えられる。

観測波形の加速度ランニングスペクトルより表面波が卓越し始める時刻を判読し、それ以前の区間を実体波区間として解析に用いた。これは、新潟市と震源の位置関係から、表面波の影響が後続波において顕著に現れると考えられるためである。表面波が卓越する区間を除外することで、実体波によるサイト特性の寄与をより純粋に抽出することを目的とした。

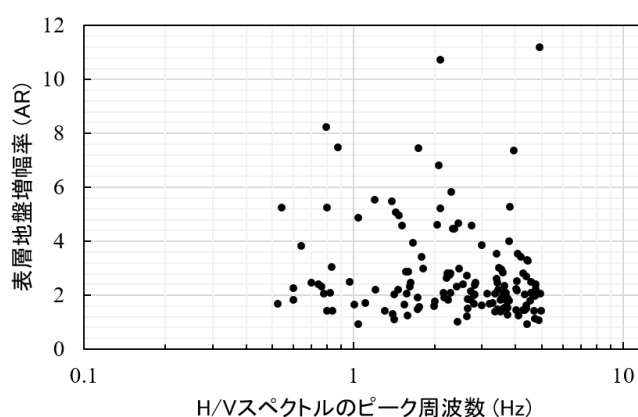


図-3 各観測点における表層地盤増幅率 (AR) と H/V スペクトルのピーク周波数の対応

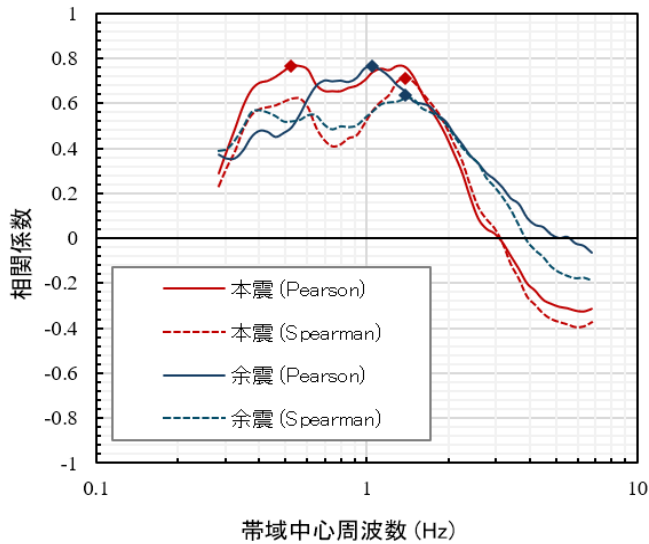
H/V スペクトル $eHVS(f)$ は、NS 成分及び EW 成分の加速度フーリエスペクトルから水平動スペクトルを合成し、UD 成分の加速度フーリエスペクトルを除することにより算出した。(式(1))

$$eHVS(f) = \frac{\sqrt{NS(f)^2 + EW(f)^2}}{V(f)} \quad (1)$$

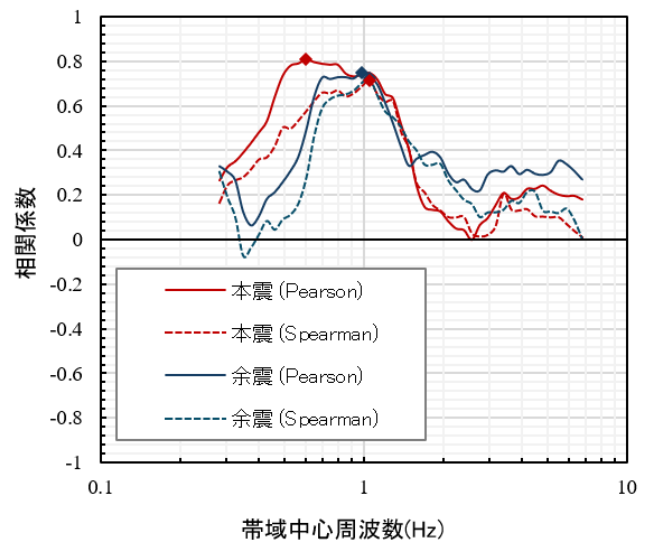
得られたスペクトルには Parzen 窓による平滑化を施し、窓幅は 0.2 Hz とした。周波数帯域内のスペクトル形状を評価するため、H/V スペクトルについて対数周波数軸上で一定幅の解析帯域 b を式(2)のように設定した。帯域幅 b は 0.3 とした。

$$b = \log_{10} f_2 - \log_{10} f_1 \quad (2)$$

ここで f_1 および f_2 はそれぞれ帯域の下限周波数および上限周波数である。各帯域における代表値として



(a) 全観測点



(b) 上位 20%観測点

図-4 帯域中心周波数に対する AR と帯域平均 H/V スペクトルの相関係数スペクトル

H/V スペクトルの幾何平均を採用し、帯域平均 H/V スペクトル $\overline{eHVS}(f_1, f_2)$ を式(3)により算出した。

$$\overline{eHVS}(f_1, f_2) = \exp \left(\frac{1}{N} \sum_{f_i \in [f_1, f_2]} \ln eHVS(f_i) \right) \quad (3)$$

ここで、 f_i は帯域 $[f_1, f_2]$ に含まれる周波数点、 N はその総数を表す。次に、解析帯域を対数周波数軸上で移動させながら、各観測点における帯域平均 H/V スペクトルを算出した。移動幅は帯域幅の 1/10 とした。各帯域について、各観測点における帯域平均 H/V スペクトルと AR の組を用いて、両者の相関係数を算出した。相関係数には Pearson 相関係数および Spearman 順位相関係数を用いた。Pearson 相関係数は両変数間の線形関係の強さを評価する指標であり、Spearman 順位相関係数はデータの順位関係に基づいて関係性を評価する指標である。この操作を解析対象周波数範囲全体に対して繰り返し、得られた相関係数を帯域中心周波数に対応付けて相関係数スペクトルとして整理した。

図-4 に本震および余震における相関係数スペクトルを示す。なお、菱形のプロットは各相関係数が最大となる周波数帯の帯域中心を示す。本震では、Pearson 相関係数が帯域中心周波数 0.52 Hz (帯域幅 0.37-0.74 Hz) において最大となり、その値は 0.77 であった。

しかし、0.5 Hz 付近のみならず 1 Hz 付近まで比較的高い相関係数が認められた。これに対し、余震では帯域中心周波数 1.04 Hz (帯域幅 0.74-1.48 Hz) において Pearson 相関係数が最大となり、その値は 0.76 であった。また、余震では 1 Hz 付近に明瞭な単峰性のピークが確認された。

AR 上位 20% の観測点に限定した場合も、同様の周波数帯において高い相関が確認された。本震では 0.5~1 Hz の広い周波数帯で高い相関を示した一方、余震では 1 Hz 前後に単峰性のピークが認められた。

図-5 に余震における Pearson 相関係数を最大化し

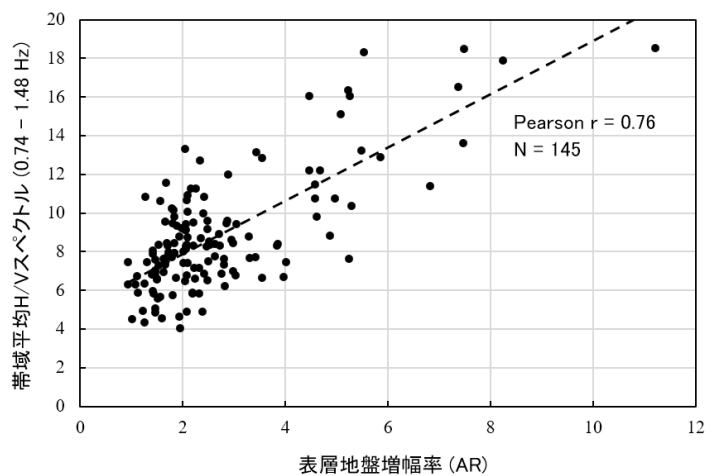


図-5 余震において最大相関(Pearson)を示した周波数帯の帯域平均 H/V スペクトルと AR の対応

た 0.74-1.48 Hz 帯域における各観測点の帯域平均 H/V スペクトルと、AR の対応を示す。

5. 考察

余震では AR と帯域平均 H/V スペクトルとの相関が 1 Hz 付近の帯域で最大となり、新潟市で確認された局所的な表層地盤増幅は 1 Hz 前後の地盤応答を強く反映している可能性が示された。AR 上位 20% の観測点に限定した場合、1 Hz 付近のピークが鋭くなり、新潟市で見られた顕著な地震動増幅が、1 Hz 前後の周波数帯の地盤応答によってより強く支配されている可能性を示した。一方、本震では余震と比較して相関係数が低い傾向が認められた。また、本震では 0.5 Hz 付近から 1 Hz 付近まで高い相関が継続しており、明瞭な単峰性ピークは確認されず、複数のピークが認められた。このことは、AR が単一の周波数帯だけでなく複数の周波数帯の地盤応答を反映している可能性を示唆する。帯域幅を $b=0.2$ として同様の解析を行った場合にも同様の傾向が確認されており、多峰性の特徴は解析条件によらず比較的安定して認められた。さらに本震では 4~7 Hz 付近において弱い負の相関が認められた。この結果は、本震時の AR が大きい地点ほど高周波成分が相対的に小さくなる傾向を示唆している。要因の一つとして、強震動に伴う地盤の非線形化による高周波成分の減衰が考えられる。以上より、本震時の地震動増幅には余震で支配的であった 1 Hz 前後の地盤応答だけでは説明できない要因が含まれている可能性がある。しかし、本研究のみではその成因を十分に説明することはできず、多峰性や高周波帯における負相関の要因については追加検討が必要である。なお、本研究で用いた H/V スペクトル振幅値の物理的意味は必ずしも明確でなく、帯域平均 H/V スペクトルの大きさをサイト増幅率として解釈することには注意を要する。

6. 結論

本稿では、2024 年能登半島地震の本震および 1 月 9 日の余震において新潟市で見られた表層地盤増幅特性に寄与する地盤応答の周波数特性の特定を目的とし、AR と帯域平均 H/V スペクトルとの相関が最大となる周波数帯の探索を行った。その結果、余震では 1 Hz 付近の周波数帯において AR との相関が最大となり、新潟市で見られた局所的な表層地盤増幅はこの周波数帯の地盤応答を強く反映している可能性が示された。一方、本震では余震と比較して相関係数が低く、多峰性の相関スペクトルや高周波帯における負の相関が確認され、より複雑な地盤応答が生じていた可能性が示された。しかし、本研究で用いた帯域平均 H/V スペクトルの物理的意味は必ずしも明確ではなく、サイト増幅特性として解釈することには注意を要する。今後は、今回用いた強震観測記録からサイトの周波数増幅特性を抽出する手法の検討を進め、周波数との対応関係を検証していく予定である。

参考文献

- 1) 清田隆, 栗間淳, 池田隆明, 志賀正崇: 令和 6 年能登半島地震 新潟県内の地震被害調査 (速報), 土木学会地震工学委員会, 2024. [Kiyota, T., Kurima, J., Ikeda, T. and Shiga, M.: Preliminary Report on Earthquake Damage Survey in Niigata Prefecture for the 2024 Noto Peninsula Earthquake, Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2024.]
- 2) 後藤浩之, 志賀正崇, 栗間淳, 吉田望: 令和 6 年能登半島地震における地震動および地盤震動特性, 地盤工学会災害調査論文報告集, Vol. 3, No. 1, pp. 2-19, 2025.
- 3) 松橋典子, 池田隆明, 志賀正崇: 高密度地震観測記録を用いた新潟市の表層地盤増幅率評価と地震ハザード評価の妥当性検証, 第 17 回日本地震工学シンポジウム論文集, 投稿中.
- 4) 気象庁: 強震観測データ, <https://www.data.jma.go.jp/eqcv/data/kyoshin/jishin/index.html>
- 5) 防災科学技術研究所: 強震観測網 K-NET, KiK-net, <https://www.doi.org/10.17598/NIED.0004>
- 6) 司 宏俊, 翠川三郎: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第 523 号, pp. 63-70, 1999.
- 7) 堀家正則, 趙伯明, 竹内吉弘: 微動から推定された地盤特性の信頼性の観測的検討, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 989-994, 1998.
- 8) 大熊裕輝, 山崎文雄, 松岡昌志, 原田隆典: 宮崎県の強震観測点における地盤特性, 第 4 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp. 459-462, 1999.