

新潟県中越地域における表層地盤に着目した地震動増幅特性の検討

長岡技術科学大学大学院 地震工学研究室 西尾 陽丸

指導教員：池田 隆明

志賀 正崇

1. 序論

日本は地震発生が極めて多い地域に位置しており、近年でも人命および社会基盤に甚大な被害をもたらす地震が相次いで発生しており、これらの地震による被害要因の解明は災害軽減の観点から極めて重要である。

2024年1月1日に発生した能登半島地震（以下、本地震とする）においても、道路盛土の崩壊や液状化およびそれに伴う側方流動など、多くの被害が発生した。図-1に本地震の震度分布図を示す。図内の断層面は、浅野・岩田(2024)¹⁾をもとに作成した。震度分布に着目すると、震源が位置する石川県内では最大震度7を観測した一方で、震源から離れた新潟県内で最大震度6弱を観測したのは長岡市中之島の1地点であり、震源距離が近い周辺の強震観測点と比較しても大きい震度が観測されている。さらに、当該地点では、過去の複数地震においても、同様に近傍の観測地点より大きな震度が観測されている。このような現象は、震源からサイトまでの距離減衰による傾向から単純には説明できないことから、当該地点固有の地盤条件が地震動を増幅させた可能性が高いと考えられる。

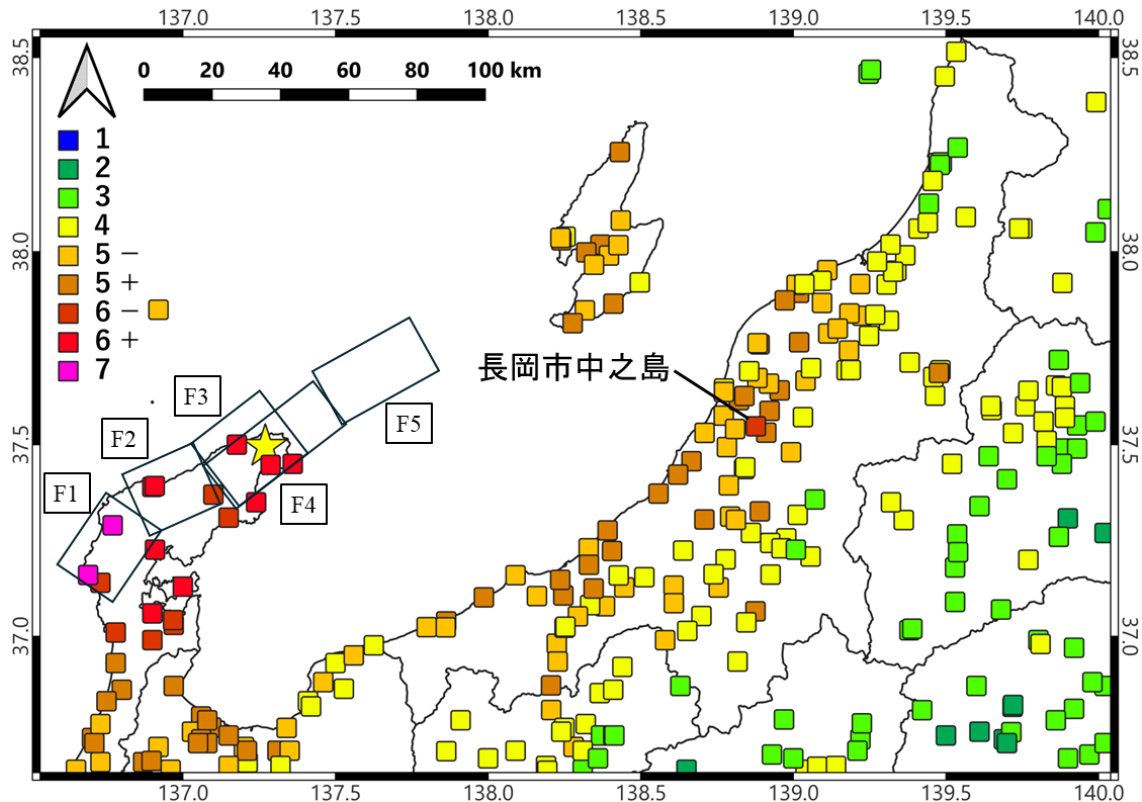


図-1 本地震における新潟県付近の震度分布図

そのため、長岡市中之島で観測された地震動の背景には表層地盤構造や局所的な地震動応答特性が関係している可能性がある。以上を踏まえ本研究では、新潟県内最大震度を観測した長岡市中之島において、本地震時に周囲とは異なる特徴的な地震動が観測されていることから、当該地点の表層地盤構造の把握を行う。

2. 研究手法

本研究では、表層地盤による影響を評価するため、長岡市中之島およびその周辺に位置する強震観測点を対象に、1次元の地震応答解析を実施した。各観測点におけるサイト特性の影響を低減することを目的として、観測記録から工学的基盤（耐震設計上の基盤面）における波形を推定し、地点間での比較を行った。長岡市中之島を中心として観測された局地的な震度階級の差がサイト特性の影響によって生じたものであるならば、近接した地点の工学的基盤には同一の地震波が伝播しており、工学的基盤における推定地震動波形は、近接した地点では概ね類似することが期待される。工学的基盤波形の比較対象地点としては、図-2に示す長岡市中之島付近に位置する強震観測点のうち、最も近い見附市昭和町を選定した。両地点は約3.5km離れている。なお、図-2内に示している微地形区分は防災科学技術研究所が公開しているJ-SHIS Map²⁾より引用した。長岡市中之島と見附市昭和町の両地点における微地形区分は、ともに後背湿地である。また、地盤の非線形特性は等価線形化法にて考慮しており、解析プログラムは等価線形解析SHAKEを改良したDyneq³⁾を用いた。

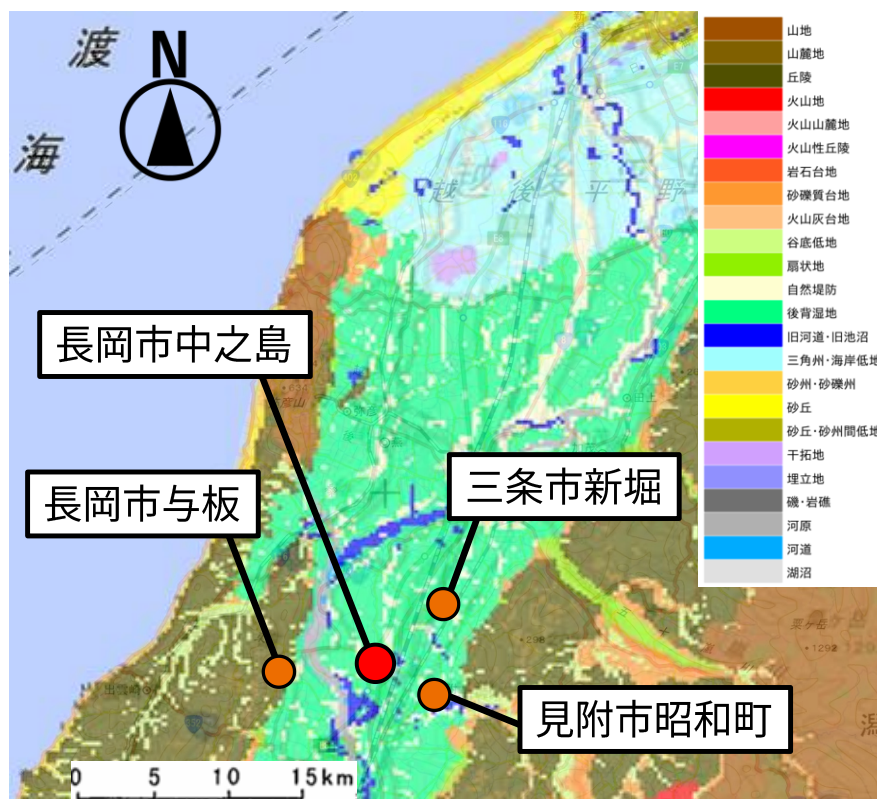


図-2 工学的基盤波形の比較対象地点

3. 解析パラメータ

地震応答解析を実施するにあたり、実地盤の挙動を数値解析的に再現可能な地盤モデルを構築する必要がある。ボーリング調査は地盤構造を直接把握できる調査手法であり、モデルの層厚や層数、層順序および各層の地質を設定する上で極めて重要な指標である。そのため、本研究における地盤モデルの構築は、ボーリング調査結果に基づいて行う。しかし、今回着目した2地点はいずれも地方公共団体設置の強震観測点であり、観測点直下のボーリング調査結果は公開されていない。そのため、北陸地盤情報システム⁴⁾により公開されている周辺地点のボーリング調査結果を参照し、地盤モデルを構築した。

両地点において構築した推定地盤モデルを、表-1に示す。また、地盤モデルのパラメータと、その設定方針については、表-2に一覧として示す。なお、解析を行う際には層厚を1.0m以下として

表-1 両地点で構築した推定地盤モデル

長岡市中之島						見附市昭和町					
No	土質	層厚 (m)	せん断波速度 V_s (m/s)	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	層上端 深度 (m)	No	土質	層厚 (m)	せん断波速度 V_s (m/s)	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	層上端 深度 (m)
1	砂質土	1.70	100	17.5	0.0	1	粘性土	5.10	100	16.8	0.00
2	粘性土	2.30	100	15.6	1.7	2	砂質土	1.60	160	17.0	5.10
3	砂質土	0.60	110	17.0	4.0	3	粘性土	6.10	140	16.6	6.70
4	粘性土	2.80	160	14.0	4.6	4	粘性土	2.70	160	14.0	12.80
5	砂質土	1.00	150	17.0	7.4	5	砂質土	2.20	130	17.0	15.50
6	細砂	1.60	190	18.0	8.4	6	砂質土	4.30	140	17.0	17.70
7	砂礫	4.50	260	20.0	10.0	7	砂質土	1.50	180	17.0	22.00
8	砂質土	1.50	190	18.0	14.5	8	粘性土	7.60	210	18.0	23.50
9	細砂	1.00	150	17.0	16.0		工学的基盤	-	300	20.0	31.10
10	粘性土	1.20	210	18.0	17.0						
11	細砂	4.00	300	20.0	18.2						
12	細砂	1.00	230	18.0	22.2						
13	細砂	1.60	280	20.0	23.2						
	工学的基盤	-	300	20.0	24.8						

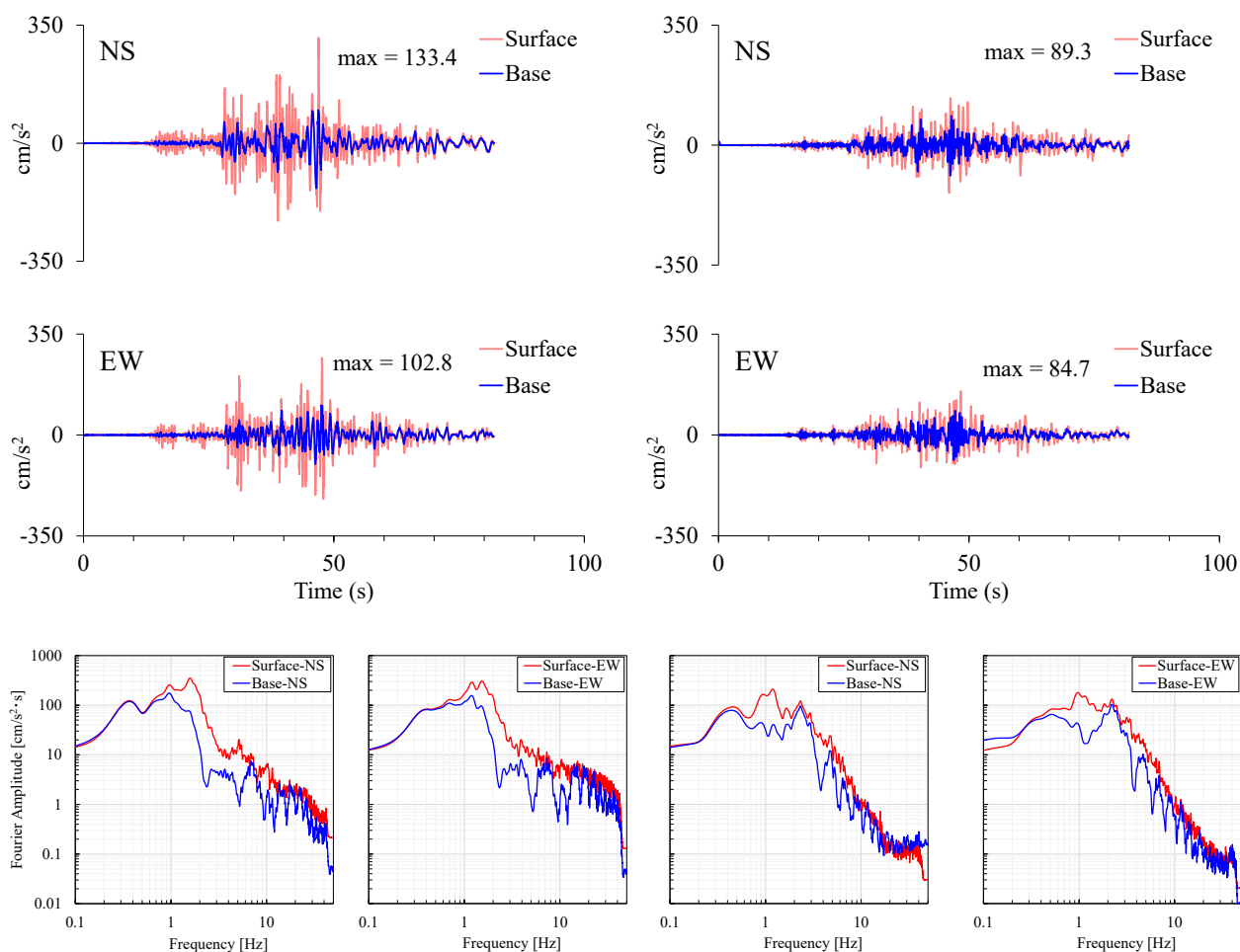
表-2 解析パラメータと設定方針

パラメータ	設定方針
地盤構造・土質区分	周辺地点のボーリング調査結果
せん断波速度	標準貫入試験 N 値から道路橋示方書 ⁵⁾ に記載の経験式を用いて換算
単位体積重量	道路橋示方書 ⁵⁾ に記載されている一般値
地盤の非線形特性	古山田ら(2003) ⁶⁾ による実験値
入力地震動	各強震観測地点における 2024年能登半島地震の観測記録 ⁷⁾

各層を再分割している。表-1 に示す長岡市中之島のモデルを以降「初期モデル」と呼称する。工学的基盤層については、N 値 50 以上が 5 回以上連続して観測された層とした。

4. 解析結果

地震応答解析の結果を基に、加速度時刻歴波形と加速度フーリエスペクトルの比較を行う。図-3 には、長岡市中之島および見附市昭和町において地震応答解析により推定した工学的基盤面における波形と地表面における観測波形との比較を示す。図内赤色のプロットは地表面における、青色のプロットは工学的基盤における推定波形を示している。なお、加速度波形内の max は工学的基盤波形の最大加速度を示しており、フーリエスペクトルは 0.2 Hz の Parzen ウィンドウによる平滑化処理を行っている。また、本研究で用いた等価線形解析は、地震動は主として鉛直下方から入射するせん断波によって構成されていると仮定している。そのため、地震応答解析に用いる際の波形には表面波成分が含まれる以前の区間として、地震動の計測開始時刻から 81.92 秒を切り出して入力地震動として使用している。



長岡市中之島

見附市昭和町

図-3 長岡市中之島・見附市昭和町の工学的基盤における時刻歴波形と加速度フーリエスペクトル

時刻歴波形に着目すると、いずれの地点においても工学的基盤から地表面に至る過程で地震動が増幅していることが確認できる。両地点の地表面における波形と比較すると、工学的基盤面においては、両地点の波形スケールの差が小さくなっていることがわかる。一方で加速度フーリエスペクトルに着目すると、長岡市中之島では約 2.3 Hz (0.43 秒) に増幅のピークが表れているのに対し、見附市昭和町では約 1.2 Hz (0.83 秒) と比較的短振動数側に増幅のピーク振動数が位置している。さらに、両地点の工学的基盤波形同士を比較すると、主に 0.6~3 Hz の振動数帯において、振動数ごとの振幅スケールが大きく異なっており、フーリエスペクトルの概形そのものに差異が生じた。このことから、今回設定した解析条件の下では、両地点の工学的基盤に同一の地震波が伝播したとする仮定を十分に説明できていない可能性が示唆される。

5. 常時微動探査による地盤モデルの妥当性検証

前項にて構築した地盤モデルは、強震観測点直下ではなく周辺地点の既往調査結果に基づいている。そこで、構築した地盤モデルの妥当性を検証するため、観測点直下の地盤情報を推定可能な常時微動探査を実施した。常時微動探査の結果を用いて求められる H/V スペクトル (水平動と上下動のスペクトル比) は、一般に地盤の卓越振動数と増幅率を推定できる⁸⁹⁾とされており、H/V スペクトルのピーク振動数が表層地盤の卓越振動数を示していると言われている。しかし、増幅倍率を評価するためには卓越振動数が高い精度で推定されている必要があることに加え、卓越振動数の特定に比べて増幅率の推定には多くの不明点が残されている⁹⁾。そのため、本研究では常時微動探査の結果を卓越振動数の把握に限定して用いる。

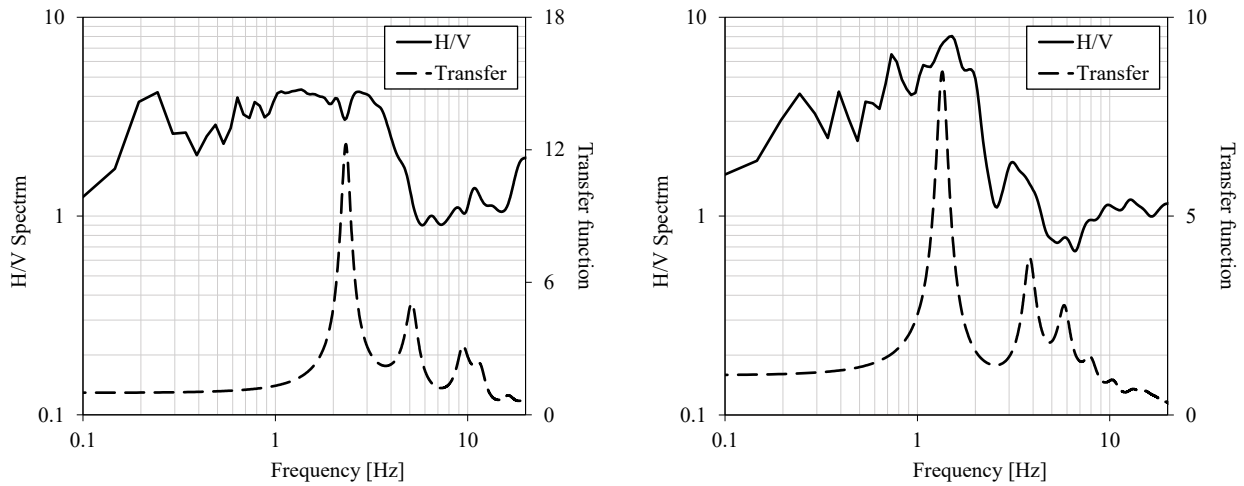
H/V スペクトルは以下の式 (5-1) に示す定義を用いて算出した。また、H/V スペクトルに対しても平滑化処理を施した上で利用しており、平滑化には式 (5-2) に示す、紺野・大町(1995)¹⁰⁾が提案した対数正規化ウィンドウを用いた手法を適用した。平滑化の強さを規定するパラメータである B 値 (式中の係数 b) は 40 を採用した。

$$\text{H/V Spectrum} = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad (5-1)$$

$$W(f, f_c) = \left[\frac{\sin(b \log_{10}(f/f_c))}{b \log_{10}(f/f_c)} \right]^4 \quad (5-2)$$

実際の観測記録である H/V スペクトルと、構築した地盤モデルに基づき算出される成層地盤の伝達関数との比較を行うことで妥当性の検証を行う。成層地盤の伝達関数は、等価線形解析プログラム SHAKE においても用いられており、地盤モデルを線形状態と仮定した条件における入力地震動に対する振動数ごとの応答特性を表すものである。本検討では、この伝達関数の 1 次モードにおけるピーク振動数と H/V スペクトルのピーク振動数を比較することで、地盤構造の再現性を評価する。

図-4 に両地点における成層地盤の伝達関数と H/V スペクトルとの比較結果を示す。見附市昭和町の結果に着目すると、両者のピーク振動数が、完全ではないが概ね同一の振動数帯に位置して



長岡市中之島

見附市昭和町

図-4 両地点における H/V スペクトルと伝達関数の比較

いる．それに対して長岡市中之島では，H/V スペクトルが最大値を示す振動数帯と比較して，伝達関数の 1 次モードのピーク振動数がより高振動数側に位置していることがわかる．このことから，見附市昭和町の地盤モデルは実地盤をある程度再現できており，長岡市中之島の地盤モデルは実地盤を再現できていないと考え，長岡市中之島の地盤モデルの層構成や物性値等の再検討を行い，モデルの修正を行う必要があると考えられる．

6. 地盤モデルの修正

前項の結果より，長岡市中之島において構築した地盤モデルの修正を行う．本来であれば，H/V スペクトルを用いて行うことが望ましいが，図-4 に示すように長岡市中之島における H/V スペクトルには明瞭なピークが確認できない．そこで，本検討では本地震でえられた強震観測記録を用いて修正を行う．以下に，本検討における仮定を示す．

同一地震に対する 2 地点，今回は長岡市中之島（地点 N）と見附市昭和町（地点 M）における地表面での強震観測記録（ R_N, R_M ）を振動数領域で表すと，線形場を仮定すると震源特性 $O(f)$ ，伝播経路特性 $P(f)$ ，サイト特性（表層地盤の増幅特性） $G(f)$ の積であり，式(6-1)および式(6-2)で表される．

$$R_N(f) = O_N(f) \times P_N(f) \times G_N(f) \quad (6-1)$$

$$R_M(f) = O_M(f) \times P_M(f) \times G_M(f) \quad (6-2)$$

このとき，震源から見た 2 地点の距離および方位がほぼ等しく，かつ震源距離に対して 2 地点間の距離が十分に近い場合，両地点における震源特性および伝播経路特性は等しいと仮定する．この仮定のもと，2 地点の強震観測記録の比は，以下の式(6-3)と表される．

$$\frac{R_N(f)}{R_M(f)} = \frac{O_N(f) \times P_N(f) \times G_N(f)}{O_M(f) \times P_M(f) \times G_M(f)} \quad (6-3)$$

ここで、 $O_N(f) = O_M(f), P_N(f) = P_M(f)$ と仮定を行ったので、式(6-3)は次式のように簡略化される。

$$\frac{R_N(f)}{R_M(f)} = \frac{G_N(f)}{G_M(f)} \quad (6-4)$$

すなわち、2地点間における強震観測記録のフーリエスペクトル比は、両地点のサイト特性の比を反映していると解釈できる。ただし、サイト特性の比を厳密に定量化することは容易ではないため、本検討ではサイト特性を、成層地盤の伝達関数($T_N(f), T_M(f)$)に置き換えて考える。このとき、式(6-4)は次に示す式(6-5)として表される。

$$\frac{R_N(f)}{R_M(f)} = \frac{T_N(f)}{T_M(f)} \quad (6-5)$$

上記の仮定に基づき、強震観測記録のフーリエスペクトル比におけるピーク振動数と、伝達関数比におけるピーク振動数が一致するよう地盤モデルの修正を行う。

図-5 左側には、初期モデルに基づいて算出した両地点の伝達関数比と、本地震におけるフーリエスペクトル比を示す。いずれの比においても、長岡市中之島の値を見附市昭和町で除することにより算出している。両者のピーク振動数に着目すると、フーリエスペクトル比と比較して、伝達関数比ではピークが高振動数側に位置している。そこで、本検討では観測フーリエスペクトル比におけるピーク振動数との整合を図るため、伝達関数比のピークが低振動数側へ移動するよう、地盤モデルの修正を行う。

伝達関数にピーク振動数を低振動数側へ移動させる方法の1つとして、工学的基盤深度をより深部に設定することが考えられる。そこで、工学的基盤深度を段階的に深くさせた地盤モデルを用いて検討を行った。その結果、基盤深度を57.8mに設定した場合に、図-5 右側に示すように、フーリエスペクトル比と伝達関数比のピーク振動数をおおよそ対応させることができた。

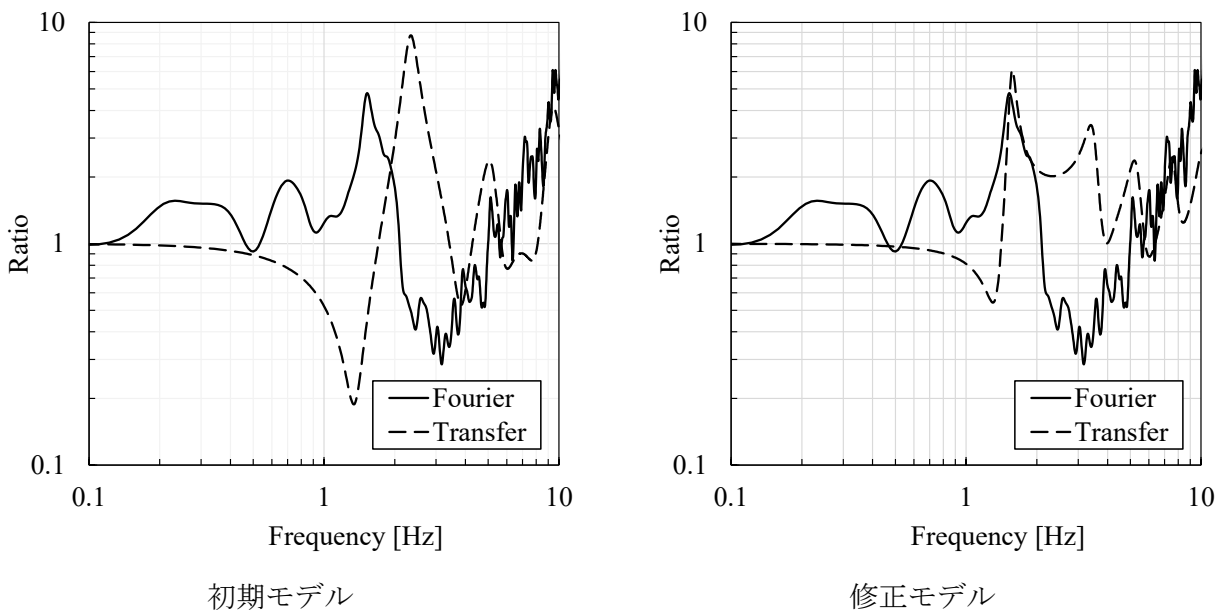


図-5 観測フーリエスペクトル比と伝達関数比の比較

工学的基盤深度を変更したモデルの妥当性を検討するため、既往文献において中越地域に広く分布し、共通の支持基盤層として扱われる沖積層の下位に位置する砂礫主体の埋没段丘礫層¹¹⁾の上面深度（以下、沖積層下面深度）との比較を行った。その結果、長岡市中之島周辺における沖積層下面深度は、表-3に示す値として整理した。

既往文献との比較の結果、新たに構築した地盤モデルにおける工学的基盤深度は、初期モデルに比べて既往文献の記載により近い値を示していることがわかった。また、比較対象とした見附市昭和町においても、本研究で設定した工学的基盤深度は、既往文献に示されている支持基盤層の深度と概ね整合している。この点を踏まえると、工学的基盤深度をより深く設定したモデルは、地質構造の観点からも合理的な設定であると考えられる。

7. 修正地盤モデルを用いた地震応答解析

長岡市中之島の工学的基盤深度を変更したモデルを用いて地震応答解析を行い、推定した工学的基盤波形を図-6に示す。その結果、初期モデルと比較して、時刻歴波形およびフーリエスペクトルのいずれにおいても見附市昭和町と近い形状が得られた。

また、地点間で推定した工学的基盤波形の一致度を定量的に評価するため、長岡市中之島とその他の各地点との間で推定した工学的基盤波形の残差 R を算出した。残差 R は西本ら (2012) による式(7-6)に示すものを用いた。式内の $Nkn(t, f)$ は長岡市中之島の工学的基盤面における時刻歴波形の包絡形、またはフーリエスペクトルである。一方、 $Tar(t, f)$ は比較対象とした3地点のいずれか1地点における工学的基盤面の時刻歴波形の包絡形、もしくはフーリエスペクトルである。なお、時刻歴波形の包絡形は加速度の絶対値を取ることによって算出した。

$$R = \frac{\sum (Nkn(t, f) - Tar(t, f))^2}{\{(\sum Nkn(t, f)^2) \cdot (\sum Tar(t, f)^2)\}^{1/2}} \quad (7-6)$$

式内の分子は両波形の差の二乗和を表しており、残差 R が0に近いほど波形の一致率が高いことを意味する。一方、分母は比較対象とする波形のエネルギーの幾何平均を用いて正規化を行っており、これにより振幅規模の異なる地震動に対しても一貫した基準で比較が可能な指標としている。

表-4に算出した残差 R の一覧を示す。いずれの比較地点においても、初期モデルと修正モデルの残差 R を比較すると、修正モデルの方が小さな値を示している。この結果は、長岡市中之島において近接地点と共通の基盤として考えられる層が、既往ボーリングによる支持層よりも深部に位置していると考えられる。

表-3 既往文献における沖積層下面深度と工学的基盤深度の比較

地点名	三条地域の 地質図幅 ¹²⁾	船引ら (2011) ¹³⁾	設定した 工学的基盤深度
長岡市中之島 (初期モデル)			24.8 m
長岡市中之島 (基盤深度変更)	40 ~ 50 m	40 ~ 50 m	57.8 m
見附市昭和町	20 ~ 30 m	20 ~ 30 m	31.1 m

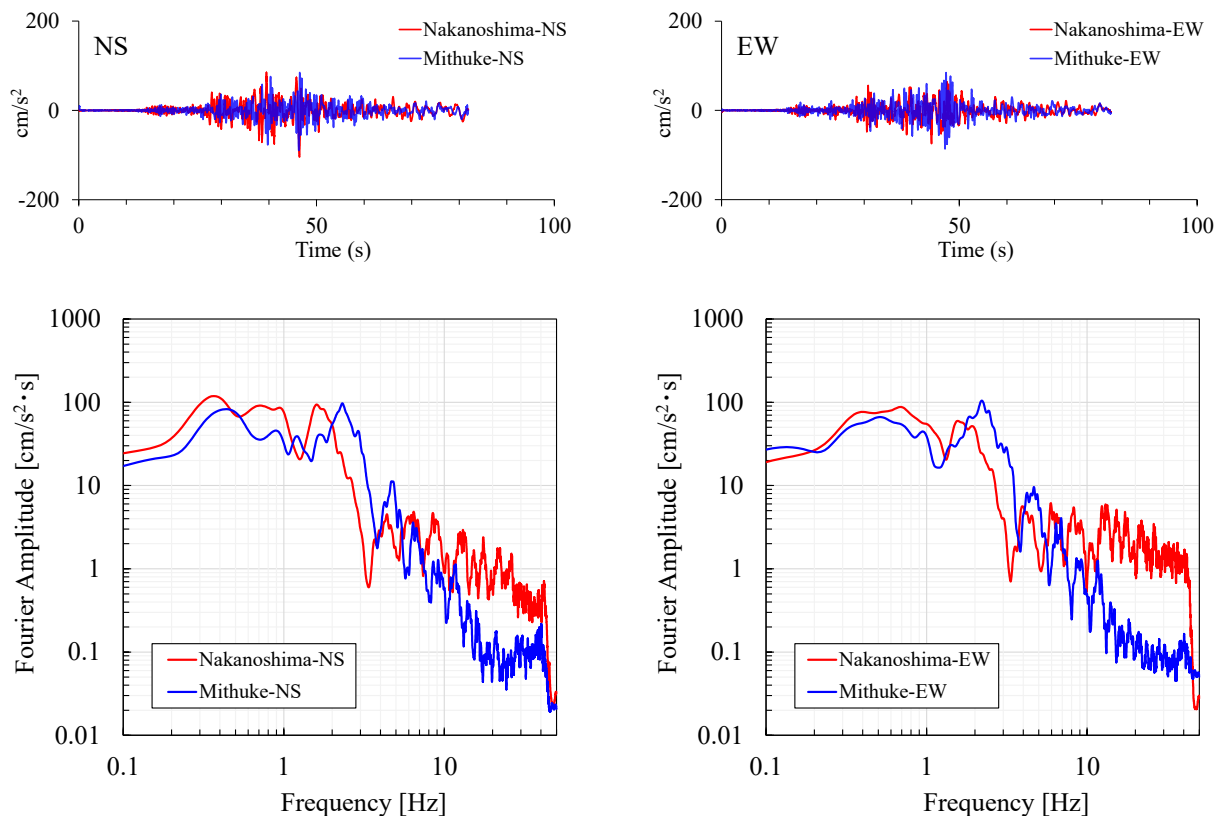


図-6 長岡市中之島と見附市昭和町における工学的基盤波形の比較

以上より、長岡市中之島における工学的基盤深度の再設定は、見附市昭和町との地震動特性の比較において、より整合的な結果をもたらすものであり、本地域における地盤構造の表現として一定の妥当性を有していると考えられる。したがって、長岡市中之島において、周囲地域と比較して大きな震度が観測される要因の1つとして、既往ボーリング調査結果では十分に把握されていない深部に工学的基盤が位置しており、表層地盤が厚く堆積していることが関与している可能性が高いと考えられる。

表-4 長岡市中之島と周辺地点の工学的基盤波形の一致度を示す残差 R

		NS	EW
加速度時刻歴波形	初期モデル	0.738	0.745
	修正モデル	0.674	0.726
加速度フーリエスペクトル	初期モデル	1.131	1.201
	修正モデル	0.817	0.739

8. まとめ

2024年能登半島地震において、長岡市中之島では局地的に地震応答解析および常時微動探査、強震観測記録を用いて工学的基盤波形の比較、工学的基盤深度の推定を行った。その結果、長岡市中之島では、既往ボーリングデータで示されている支持基盤の深度よりも、深部に他地点との共通する工学的基盤層が位置しており、これが周囲と比較して大きい地震動が観測される要因の1つとなっている可能性が考えられる。

今後は観測点直下のせん断波速度構造を推定することができる微動アレイ探査を実施することにより、より実地盤に即した地盤モデルの構築を行うことが必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 浅野公之・岩田知孝：強震波形による 2024 年能登半島地震の震源破壊過程, Japan Geoscience Union Meeting, 2024
- 2) 防災科学技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS, <https://www.jshis.bosai.go.jp/>, (閲覧日：2026年1月19日)
- 3) 吉田望：DYNEQ A computer program for DYNamic response analysis of level ground by EQuivalent liner method, Version 4.01 2021, 関東学院大学
- 4) 北陸地盤情報活用協議会：ほくりく地盤情報システム, <https://www.hokuriku-jiban.info/>, (2026年1月19日閲覧)
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2017年11月
- 6) 古山田耕司・宮本裕司・三浦賢治：他地点での原位置採取資料から評価した表層地盤の非線形特性, 第38回地盤工学研究発表会, E-08, pp.2077-2078, 2003
- 7) 気象庁：令和6年(2024年)1月1日16時10分 石川県能登地方の地震, https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/kyoshin/jishin/2401011610_noto/index.html, (2026年1月19日閲覧)
- 8) Allam, A. and Shima, E. : An investigation into the nature of microtremors, Bull. ERI, Vol.45, pp43~59, 1967
- 9) 大町達夫, 紺野克昭, 遠藤達哉, 年縄巧：常時微動の水平動と上下動のスペクトル比を用いる地盤周期推定方法の改良と適用, 土木学会論文集 No.489 / I-27, pp.251-260 1994.
- 10) 紺野克昭・大町達夫：常時微動の水平/上下スペクトル比を用いる増幅倍率の推定に適した平滑化とその適用例, 土木学会論文集, No.525, I-33, pp.247-259, 1995
- 11) 建設省北陸地方建設局 北陸技術事務所：新潟県平野部の地盤図集.新潟平野編, 北陸建設弘済会, 1981
- 12) 産業技術総合研究所 地質調査センター：三条地域の地質, 地域地質研究報告 5万分の1地質図幅 新潟(7) 第27号, 2000
- 13) 船引彩子・宮地良典・木村克己：ボーリングデータベースに基づく越後平野の沖積層モデル, 海陸シームレス地質情報集, 新潟沿岸域, 数値地質図 S-2, 2011