

微動アレイ観測に基づく新潟県中越地震の 震央近傍地盤の速度構造調査

安 井 讓*・野 路 利 幸**・野 口 竜 也***

Soil Velocity Survey of Epicentral Area of the Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004 through Microtremor Array Observation

Yuzuru Yasui, Toshiyuki Noji and Tatsuya Noguchi

We investigated subsurface structures of the sites of schools in Kawaguchi-machi and Horinouchi-machi about one month after the Mid Niigata prefecture Earthquake in 2004 through microtremor array observation method. The observation method is the SPAC method with L-shape array system. Simulating the obtained dispersion curves by theoretical ones, soil velocity structures are proposed. The proposed model has a shallower soft layer on the bedrock than Niigata prefecture model. From the examination on amplification factors of the sites, damage level of the sites is discussed.

1. はじめに

日本建築学会は文部科学省からの依頼を受けて被災地域の文教施設の被害状況調査を実施した。著者らは北魚沼郡川口町周辺担当の調査グループに随行する機会を得たので、調査対象の小・中学校の建物の敷地周辺地盤で常時微動測定を実施することとした。地震計は3台を現地に持ち込み、SPAC法^{1,2)}に基づくL型アレイ観測を行いその速度構造の推定を試みた。なお、本論文は文献³⁾をもとに地盤探査に関する内容を抜粋・整理し必要な修正を加えたものであることをあらかじめ断わっておきたい。

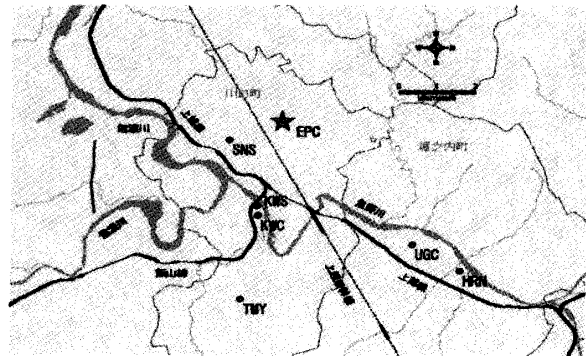


図-1 学校建物の位置

2. 学校建物の位置と概要

調査の対象となった学校は、北魚沼郡川口町の川口小学校(以後KWSとも称する)、川口中学校(KWC)、泉水小学校(SNS)、および田麦山小学校(TMY)と、魚沼市堀之内町の宇賀地小学校(UGC)と堀之内中学校(HRN)の計6校である。地盤調査はTMYとKWSを除く4校について実施した。2004年10月23日の本震では、

* 建設工学科地球環境工学専攻 ** 同建築学専攻 *** 鳥取大学工学部土木工学科

表-1 学校建物の諸元

記号	学校名	所在地	対象建物	構造・階数	平面寸法	築年	改造年
KWS	川口小学校	川口町	管理特別教室棟	RC・3	16.82×46.20	1962	1985
KWC	川口中学校	川口町	普通教室及び管理棟	RC・3	9.80×59.50	1975	1995
SNS	泉水小学校	川口町	管理・教室棟	RC・3	12.85×49.20	1982	-
TMY	田麦山小学校	川口町	管理・教室棟	RC・3	15.40×61.96	1984	-
UGC	宇賀地小学校	堀之内町	校舎棟	RC・3	9.52×74.00	1992	-
HRN	堀之内中学校	堀之内町	管理教室棟	RC・3	9.80×59.50	1972	2001

川口町は震度7で堀之内町は震度6弱であった。図-1に調査対象の学校の位置を示した。同図には震央 (EPS) も書き入れているが、対象とした地域はほぼ震源の真上にあるといえる。参考のため、表-1に、6つの学校建物の諸元を示した。建築基準法の大改訂が行われた1981年以前に建設された川口小学校、川口中学校および堀之内中学校ではその後大幅な改造が行われている。

3. 地盤の概要

表-2(a)～(f)にボーリングデータを簡略に表現したものを示した。対象4地点のほか参考のためKWSとTMYのデータも示してある。HRNのデータがごく近傍の物流センター地点のものであることを除けば、すべて当該学校の建設時のものである。これらの表から、10m前後の比較的浅い深度から泥岩などの堆積岩が現れていることがわかる。なお、下記の新潟県の報告書の地質概要区分では中部山地丘陵区に属し泥岩に代表される堆積岩類 (軟岩) が厚く分布する地域であるとされている。

新潟県は平成10年3月に新潟県被害想定調査報告書⁴⁾を取り纏めている。同報告書では、浅層ボーリング19000本、深層ボーリング150本を整理して103種類の地盤モデルを作成し、これらを約500mメッシュ毎に振り分けることにより作成した全県地盤モデルを用いて被害想定を実施している。表-3(a)と表-3(b)に対象地点に相当する位置の新潟県の地盤モデルを示した。表-3(a)はKWS, KWC, SNSおよびTMY地点に対応するモデルでS波速度3000m/sの地震基盤の深度はGL-4000mと仮定されており、表-3(b)がUGCとHRN地点に対応するモデルで地震基盤の深度はGL-3000mと想定されてい

表-2 敷地地盤のボーリングデータ

(a) KWS

深度 (m)	層厚 (m)	土質区分	N値
0	1.2	玉石混り砂質シルト	27
1.2	1.8	シルト混り砂礫	>50
3.0	3.8	玉石混り砂礫	>50
6.8	-	泥岩	>50

(b) KWC

深度 (m)	層厚 (m)	土質区分	N値
0	0.5	細砂	
0.5	1.3	粘土質細砂	5
1.8	8.2	砂礫	10,30,50
4.8~10	-	砂礫	>50

(c) SNS

深度 (m)	層厚 (m)	土質区分	N値
0	2.15	砂質粘土	2
2.15	3.25	腐植土	2,3,3,8
5.4	1.2	砂質シルト	9
6.6	3.5	玉石混り砂礫	>50
10.1	-	泥岩	>50*

*41,42を含む

(d) TMY

深度 (m)	層厚 (m)	土質区分	N値
0	0.95	砂混りシルト質粘土	-
0.95	2.05	粘土	1,2
3.0	0.2	中砂	2-22
3.2	2.15	砂礫	22,48,50
5.35	2.11	細砂	>50
7.46	-	砂礫	>50

(e) UGC

深度 (m)	層厚 (m)	土質区分	N値
0	4.9	礫混り粘土	11,3,3,6
4.9	2.6	玉石混り砂礫	39, >50
7.5	0.6	泥岩	>50
8.1	0.6	砂岩	>50
8.7	-	泥岩	>50

(f) HRN

深度 (m)	層厚 (m)	土質区分	N値
0	1.4	埋土	3
1.4	0.7	砂混り砂質シルト	18
2.1	1.6	砂礫	22
3.7	2.15	砂混り砂質シルト	4,9
5.85	0.75	砂礫	20
6.6	5.2	玉石混り砂礫	>50
11.8	-	シルト岩	>50

表-3 新潟県の地盤モデル

(a) KWS,KWC,SNS及びTMY地点対応のモデル				
深度 (m)	層厚 (m)	地層区分	質量 (t/m ³)	S波速度 (m/s)
0	10	段丘堆積物	1.9	340
10	330.8	礫層*	2.15	550
341	992.4	西山層	2.1	1100
1334	1333.2	椎谷・寺泊層	2.2	1400
2666	1333.2	七谷層	2.3	2000
3998	-	基盤	2.65	3000
(b) UGCとHRN地点対応のモデル				
深度 (m)	層厚 (m)	地層区分	質量 (t/m ³)	S波速度 (m/s)
0	10	段丘堆積物	1.9	340
10	247.5	礫層*	2.15	550
258	742.5	西山層	2.1	1100
1002	1000	椎谷・寺泊層	2.2	1400
2001	1000	七谷層	2.3	2000
3000	-	基盤	2.65	3000

*更新世後期半固結堆積物

る。また、地震基盤以浅の岩盤層は、西山層より浅い地表層、椎谷・寺泊層および七谷層の3層で等分割するように作られている。

4. 測定方法とデータ解析

微動アレイ観測はSPAC法に基づくL型アレイ観測とし、携帯用の加速度計（アカシ製GPL-6A3P）3台をL字の2つの端点と交点に配置し上下方向の微動を記録した。アレイ半径は、3m, 10m, 30mおよび50m（KWC,UGC），あるいは60m（SNS,HRN）とした。倍率は1,000倍、フィルターを50Hzとし、測定時間は10分、サンプリング周波数は500Hzとした。また、別に実施したH/Vスペクトル用の測定ではフィルターを50Hzとし、測定時間を15分、サンプリング周波数を100Hzとした。

L型アレイの観測記録は次のような手順で解析した。まず、雑音が少ない16.384秒の区間の記録10個を選択する。続いて、半径ごとのコヒーレンス、SPAC係数および半径ごとの分散曲線を計算する。その際、スペクトル計算に用いるParzenウィンドウの幅は0.3Hzとした。コヒーレンスにより測定値の相互相関性のチェックを行い、SPAC係数によりベッセル関数近似の妥当性を吟味する。目標とする分散曲線は半径ごとの分散曲線をスムーズに連結することにより求める。

H/Vスペクトルの計算は以下のような要領で行った。まず、雑音が少ない20.48秒の区間の水平2成分、上下1成分の記録10個を選択してそれらのフーリエスペクトルを計算する。これら水平2成分のフーリエスペクトルの自乗和の平方根の平均値の絶対値に0.2HzのParzenウィンドウを施したものを水平成分とし、これと平均した上下スペクトルの絶対値に0.2HzのParzenウィンドウを施したものの比をH/Vスペクトルとした。

表-4 提案地盤モデル

(a) KWS,KWC				
深度 (m)	層厚 (m)	地層区分	質量 (t/m ³)	S波速度 (m/s)
0	18	段丘堆積物	1.9	340
18	75	風化泥岩層	2.15	550
93	57	西山層	2.1	1100
150	150	椎谷・寺泊層	2.2	1400
300	150	七谷層	2.3	2000
450	-	基盤	2.65	3000
(b) SNS				
深度 (m)	層厚 (m)	地層区分	質量 (t/m ³)	S波速度 (m/s)
0	12	段丘堆積物	1.9	280
12	10	風化泥岩層	2.15	550
22	38	西山層	2.1	1100
60	60	椎谷・寺泊層	2.2	1400
120	60	七谷層	2.3	2000
180	-	基盤	2.65	3000
(c) UGC				
深度 (m)	層厚 (m)	地層区分	質量 (t/m ³)	S波速度 (m/s)
0	12	段丘堆積物	1.9	350
12	14	風化泥岩層	2.15	550
26	124	西山層	2.1	1100
150	150	椎谷・寺泊層	2.2	1400
300	150	七谷層	2.3	2000
450	-	基盤	2.65	3000
(d) HRN				
深度 (m)	層厚 (m)	地層区分	質量 (t/m ³)	S波速度 (m/s)
0	10	段丘堆積物	1.9	350
10	5	風化シルト岩層	2.15	550
15	135	西山層	2.1	1100
150	150	椎谷・寺泊層	2.2	1400
300	150	七谷層	2.3	2000
450	-	基盤	2.65	3000

5. 測定結果と速度構造の検討

図2(a)～図2(d)にL型微動アレイの観測をもとに得た分散曲線を示した。同図には後述する提案地盤モデルの理論分散曲線も示してある。図3(a)～図3(d)にH/Vスペクトルを示した。同図には後述する提案地盤モデルの表面波モードのH/Vスペクトル⁶⁾の計算値も示してある。

表-4(a)～(d)に提案地盤モデルのS波速度構造を示した。2層目の地層区分は表-2のボーリングデータから風化岩層と想定している。ここに、P波速度の値は狐崎他⁷⁾の式により定めるものとしている。これらのS波速度構造は以下に示す要領で定めた。まず、測定による分散曲線をもとに1層目のS波速度の値と層厚を定める。このとき、表-2のボーリングデータも参考にする。2層目の風化岩層のS波速度は文献4)にならって550m/sとして分散曲線に適合するようにその厚さを定める。3層目以降のS波速度は表-3の新潟県のモデルと同じであると仮定してそれら各層の厚さを分散曲線に適合するように定める。その際、県の地盤モデルに従って、それぞれ3等分となるように調整する。適合性は分散曲線に対する近似度とH/Vスペクトルの形状に対する相似性で判断した。特に、KWC,UGCおよびHRNのH/Vスペクトルの1Hzのピークに着目した。図-2では分散曲線について、図-3ではH/Vスペクトルについて、それぞれ観測値と理論値を示しているが適合性はよいと言える。

表-4に示すように、段丘堆積物と考えられる最表層のS波速度は280～350m/sで層厚は10～18mと得られている。その下のS波速度550m/sの風化岩層の厚さは5m(HRN),10m(SNS),14m(UGC)と概して薄いKWCのみ75m

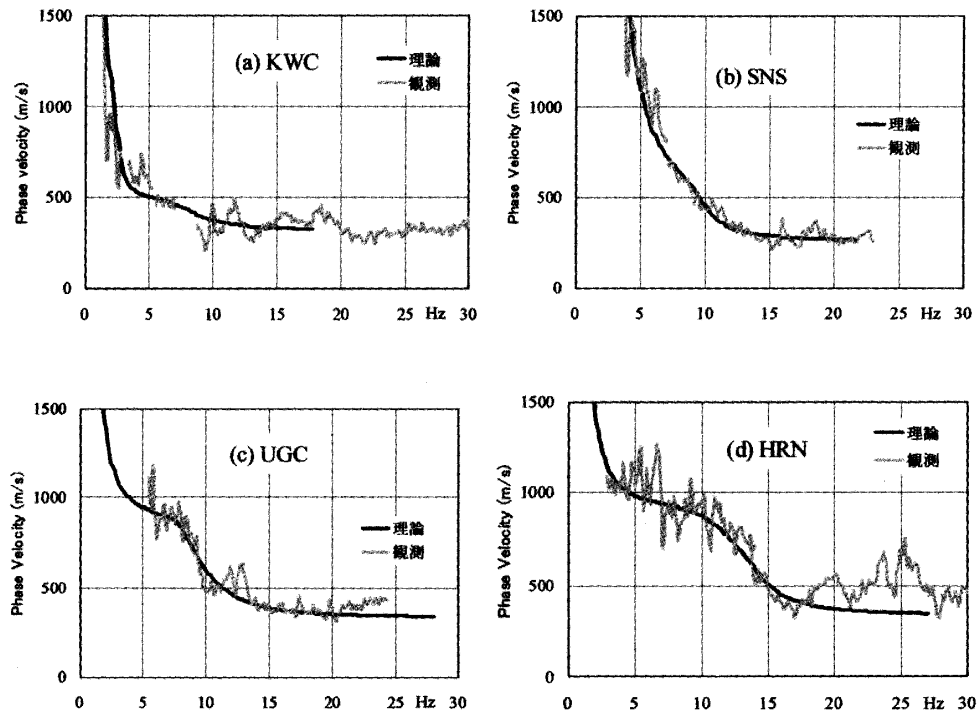


図-2 分散曲線

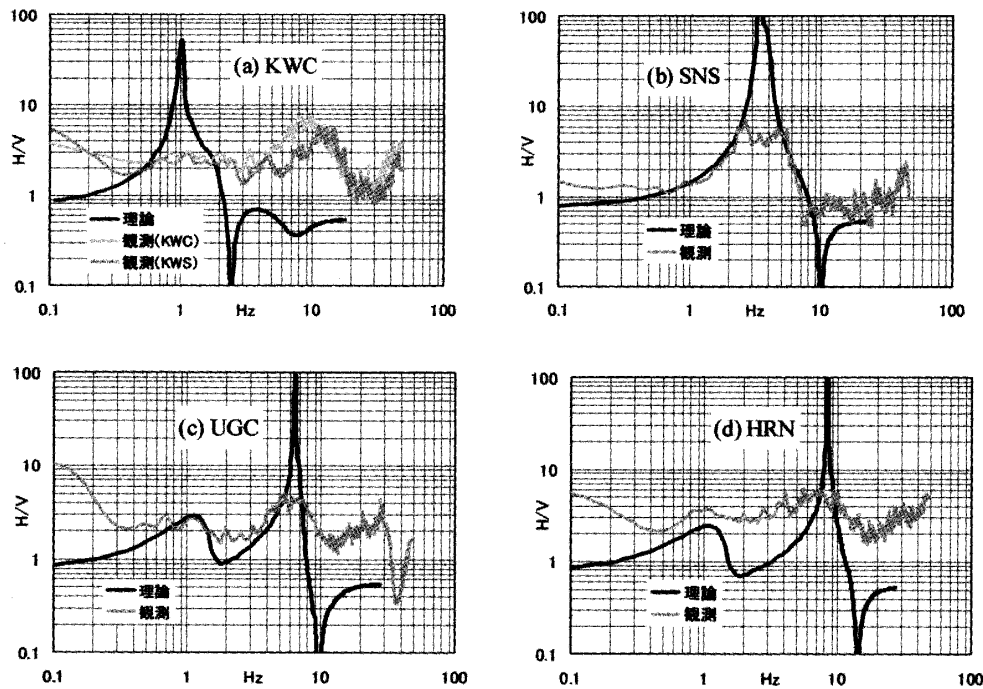


図-3 H/V スペクトル

とやや厚く得られている。従って、KWCを除けば、地表面からの深度15m～26mでS波速度1100mの西山層が現れる構造となっている。

表-3と表-4とを比べると、地震基盤の深さはKWCで450m、SNSで180mと得られたが新潟県のモデルでは4000mと仮定されている。また、UGCとHRNは450mと得られているが新潟県のモデルでは3000mとされており、いずれもかなり浅い結果となっている。なお、表-4の薄墨をかけた部分はそれらの数値が理論分散曲線の変化に反応する部分であることを示しており、地震基盤の深度は概してH/Vスペクトルのピーク振動数により定まっていることが窺える。地震基盤は新潟県のモデルと同程度の深さにあるとする研究⁸⁾もあることから、今後も引き続き検討する必要がある。

図-4に、表-3および表-4をもとにmicroSHAKE（地震工学研究所）を用いて計算した地盤増幅特性を示した。同図の新潟県(a)と新潟県(b)はそれぞれ表-3の(a)と(b)に対応する。また、KWC、SNSおよびUGCはそれぞれ表-4の(a)、(b)および(c)に対応する。ここに、HRNはUGCと同様な傾向を示すものと考え割愛した。なお、Q値はS波速度を

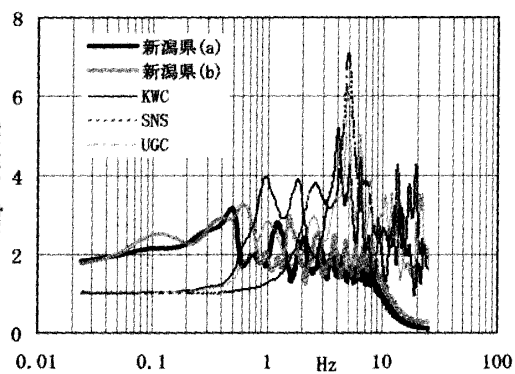


図-4 地盤増幅特性

VsとしてVs/15と仮定し、増幅特性には0.2HzのParzenウィンドウを施してある。同図から、新潟県のモデルは0.5Hzおよび0.6Hzで倍率3程度のピークを示し振動数が高くなるにつれてピーク値は減少する傾向を示すが、提案モデルでは5Hz付近で増幅率が最大7程度の高いピークを示すことがわかる。また、地震動の建物への破

壊力の大きさは1Hz～2Hz付近の振動レベルによるといわれていることから⁹⁾、仮に地震基盤における入力レベルが同じであるとするKWC, UGC, SNSの順に被害が大きくなるものと推察される。

6. まとめ

- 1) 北魚沼郡川口町と魚沼市堀之内町の4つの学校の敷地周辺地盤でSPAC法に基づくL型の微動アレイ観測を実施し良好な分散曲線を得た。
- 2) 調査地点の浅層ボーリングや新潟県の深層地盤モデルを参考にして上記の分散曲線に適合するような地盤速度構造を提案した。
- 3) 段丘堆積物からなる最表層のS波速度は280～350m/sで層厚は10～18mと得られた。2層目にはS波速度550m/sの風化岩層があると考えられ、その厚さは1地点の75mを除けば5～14mと概して薄く、続いてS波速度1100m/sの西山層が深度15m～26m程度から現れる構造となっているものと推察された。
- 4) 地震基盤の深さはH/Vスペクトルのピーク値を参照しながらを定めたが新潟県のモデルの3000～4000mに対して180～450mとかなり浅く得られた。
- 5) 提案モデルの地盤増幅率は新潟県のモデルに比べて高振動数領域で大きな値を示した。また、1Hz～2Hz付近の増幅率の比較から、KWC, UGC, SNSの順に被害が大きくなる可能性があることが示唆された。

謝辞

微動測定は学校施設被害調査団に随行して行われたものである。団長の小李克巳博士（福井大学）と団員の辻岡静雄博士（福井工業大学）をはじめとする方々に大変お世話になりました。新潟県の地盤情報とボーリングデータの収集にあたり、新潟県危機管理防災課、川口町教育委員会、魚沼市（旧北魚沼郡堀之内町）教育委員会、㈱興和中越支店および㈱パスコの方々の労を煩わせました。また、データ解析は大学院生の植本安彦君と森本鉄郎君の助勢を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Aki, K. : Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to microtremor, Bulletin, Earthquake Research Institute, 35, pp. 415-456, 1957.
- 2) 岡田廣, 松島健, 森本武男, 笹谷努: 広域・深層地盤調査のための長周期微動探査法, 物理探査, 第43巻第6号, pp402-417, 1990.
- 3) 安井謙, 野路利幸, 野口竜也: 新潟県北魚沼郡川口町等の学校建物の振動特性と地盤速度構造の調査結果について, 第28回土木学会地震工学研究発表会報告集, No. 198, 2005.
- 4) 新潟県: 新潟県地震被害想定調査報告書, pp. 2. 29-2. 57, 1998.
- 5) 中村豊, 上野真: 地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み, 第7回日本地震工学シンポジウム講演集, pp. 265-270, 1986.
- 6) 時松孝次, 宮寺泰生: 短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文集, 第439号, pp. 81-87, 1992.
- 7) 狐崎長琅, 後藤典俊, 小林芳正, 井川猛, 堀家正則, 斎藤徳美, 黒田徹, 山根一修, 奥住宏一: 地震動予測のための深層地盤P・S波速度の推定, 自然災害科学, 9-3, pp1-17, 1990.
- 8) 山中浩明, 福元俊一, 元木健太郎, 山田伸之, 岩田知孝: 2004年新潟県中越地震の震源域での微動アレイ観測, 建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造II, pp561-562, 2005.
- 9) 川瀬博: 断層近傍強震動の地下構造による増幅プロセスと構造破壊能, 第10回日本地震工学シンポジウム, パネルディスカッション資料集, pp29-34, 1998.

(平成17年12月19日受理)