

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

安井譲¹・野路利幸²・野口竜也³

¹福井工業大学建設工学科教授 (〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1)

E-mail: yasui@fukui-ut.ac.jp

²福井工業大学建設工学科教授 (〒910-8505 福井県福井市学園3-6-1)

E-mail: noji@fukui-ut.ac.jp

³鳥取大学工学部土木工学科助手 (〒680-552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: noguchit@cv.tottori-u.ac.jp

新潟県中越地震の約一ヶ月後、著者らは北魚沼郡川口町と魚沼市堀之内町の学校建物（6校）の振動特性とこれら敷地地盤周辺（4校）の地盤構造の調査を行った。建物については、地盤、1階床およびR階あるいはその下階で、スパンおよび桁行き方向の常時微動測定を行い相互作用系と基礎固定系の固有振動数を把握した。一方、地盤調査はSPAC法に基づきL型の微動アレイ観測を行いその結果得られた分散曲線から地盤速度構造を推定した。これらの調査結果は建物の被災度分析や入力地震動の推定に有用な参照データとなるものと考えられる。

Key Words : Niigata-ken Chuetsu earthquake, microtremor observation, school building, soil velocity structure, L-shape array, SPAC method

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・中学校の建物と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台を持ち込み、建物については基礎地盤相互作用系と基礎固定系の固有振動数を得ることを試みるとともに敷地周辺地盤については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⁾を再検討して必要な補強を行ったものであることをあらかじめ断っておきたい。

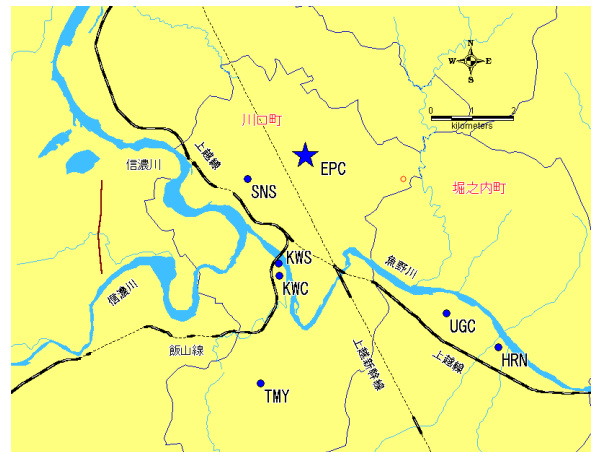


図-1 学校建物の位置

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。

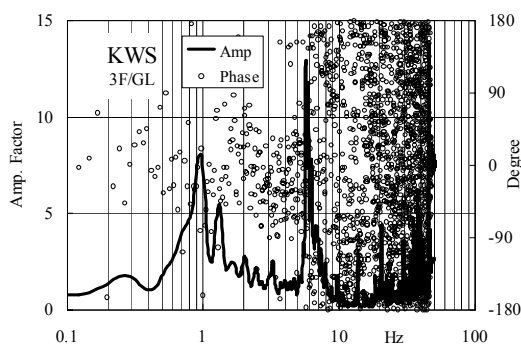
2004年10月23日の本震では、川口町は震度7で堀

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（EPC）も書き入れてあるが、対象とした地域はほぼ震源の真上にあるといえる。

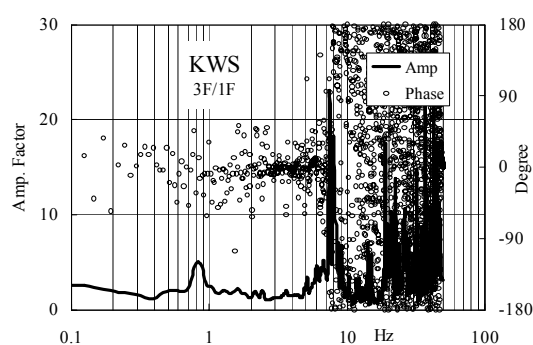
表-1に、6つの学校建物の諸元を示した。建築基準法の大改訂が行われた1981年以前に建設された川口小学校、川口中学校および堀之内中学校ではその後大幅な改造が行われている。

表-1 学校建物の概要

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



(a) 基礎地盤相互作用系



(b) 基礎固定系

図-2 建物の伝達関数

3. 建物の振動特性

(1) 測定方法

地震計は水平上下3成分一体型の携帯用の加速度計（アカシ製GPL-6A3P）3台の同時測定とした。測点は、地盤、1階床およびR階（あるいはその下階）とした。倍率を1,000倍、フィルターを50Hzとし、測定時間は15分、サンプリング周波数は100Hzとした。

(2) データ解析の方法

伝達関数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。続いて、地盤に対する1階とR階に対する複素フーリエスペクトル比を計算しこれらの比の絶対値の平均値に0.2HzのParzenウィンドウを施したものを伝達関数の振幅値とした。一方、位相差については、複素フーリエスペクトル比の平均値の位相差を伝達関数の位相差とすることとした。以上の計算方法は基礎地盤相互作用系の伝達関数についてのものであるが、基礎固定系に関する伝達関数は1階の記録でR階のものを除することにより求めた。

(3) 伝達関数と固有振動数

図-2(a)と図-2(b)に例としてKWSの伝達関数を示した。図-2(a)が地盤に対する3階床の基礎地盤相互作用系の伝達関数であり、図-2(b)が1階床に対する3階

表-2 建物の固有振動数

(a) スパン方向

記号	相互作用系 (G) (Hz)	基礎固定系 (F) (Hz)	G/F
KWS	5.7	7.5	0.76
KWC	4.7	6.3	0.75
SNS	3.1	5.3	0.58
TMY	4.9	6.7	0.73
UGC	3.4	5.6	0.61
HRN	4.4	5.8	0.76

(b) 桁行き方向

記号	相互作用系 (G) (Hz)	基礎固定系 (F) (Hz)	G/F
KWS	4.7	6.8	0.69
KWC	4.3	6	0.72
SNS	3	5.5	0.55
TMY	3.8	5.9	0.64
UGC	4.2	5.6	0.75
HRN	4.5	5.4	0.83

床の基礎固定系の伝達関数である。いずれもスパン方向のものである。図-2(a)から、位相差が急激に変化する5.7Hzのピークが相互作用系の固有振動数であると考えられる。また、図-2(b)から同様に7.5Hzが基礎固定系の固有振動数と推定される。なお、図-2(a)の相互作用系の伝達関数にみられる1Hzの明瞭なピークは表面波により励起された可能性⁴⁾があることを付記しておきたい。

表-2(a)と表-2(b)に同様に求めたスパン方向と

表-3 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	玉石混じり砂礫	>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	玉石混じり砂礫	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

桁行き方向の固有振動数をそれぞれまとめて示した。基礎固定系に対する相互作用系の比は0.55~0.83の広い範囲に分布している。これらのデータは被災度分析のための建物の解析モデルの作成にあたって有用な参照データ⁵⁾になるものと考えられる。

なお、本論で定義した基礎固定系には基礎の回転

表-4 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

の影響が含まれており厳密な意味で基礎固定系ではないことを付記しておく。

4. 地盤の概要

(1) 対象とした地点

地盤の速度構造の検討のための微動測定はKWC,SNS,UGCおよびHRNの4校の地点について行った。現地の状況などからTMYについては断念した。また、KWSは図-1にみられるごとくKWCと近接しており類似の地盤構造を有しているものと推察されたためその測定を割愛した。

(2) ボーリングデータ

表-3(a)~(f)に対象地点の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の位置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部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。

(3) 新潟県の地盤モデル

新潟県は平成10年3月に新潟県被害想定調査報告書⁶⁾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-4(a)と表-4(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-4(a)はKWS,KWC,SNS

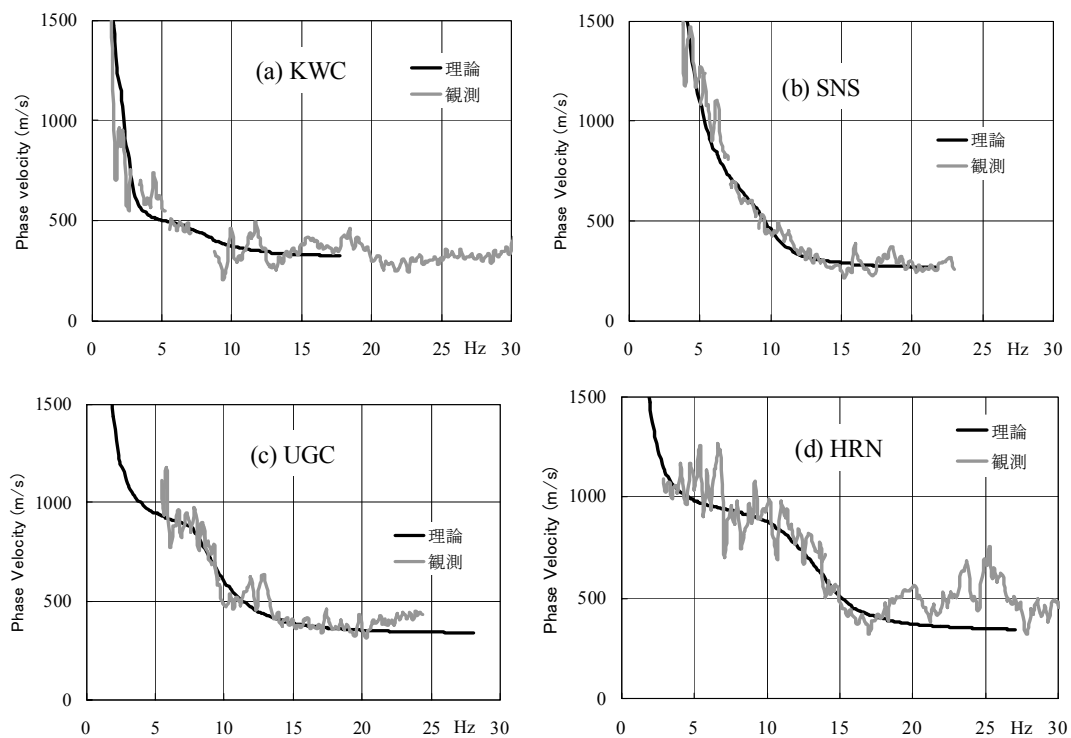


図-3 分散曲線

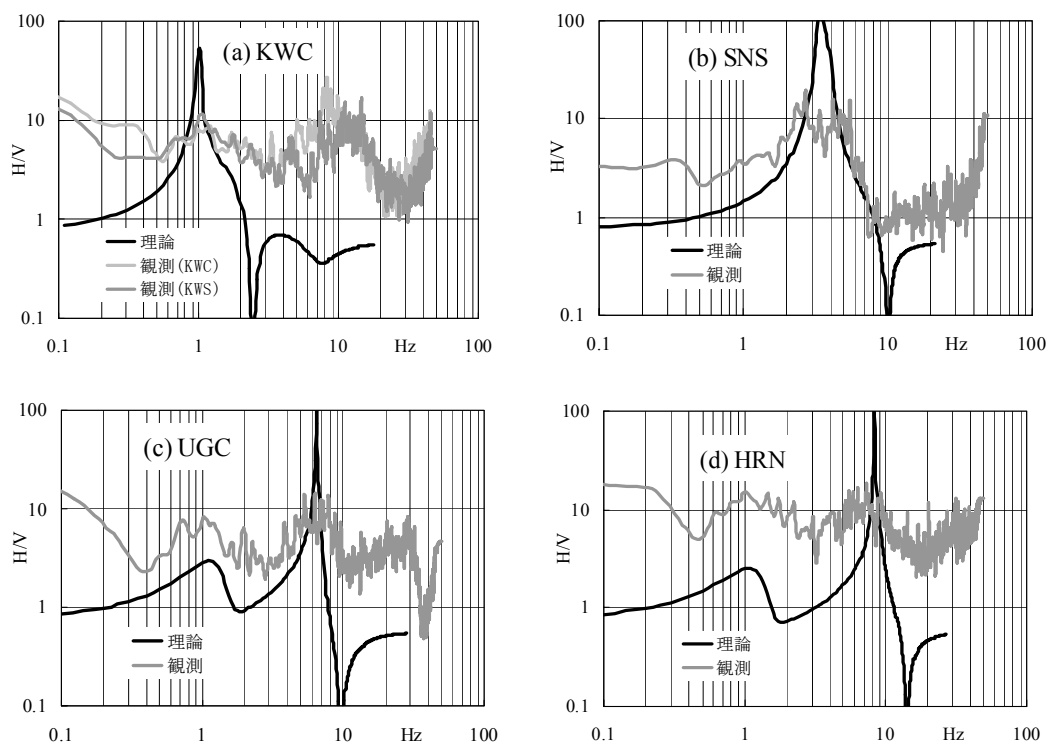


図-4 H/V スペクトル

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-4(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。

5. 地盤の速度構造の検討

微動アレイ観測はSPAC法に基づくL型アレイ観測とした。また、建物の振動特性を把握する際に測定した地盤の常時微動記録からH/Vスペクトル⁷⁾を求め、これらのピーク振動数も速度構造検討の参考資料とした。

(1) 測定方法

携帯用の加速度計（アカシ製GPL-6A3P）3台を用いて上下方向の微動を記録する。L型アレイの半径は、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。

(2) データ解析の方法

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複素フーリエスペクトルを計算する。これら水平2成分の複素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、これと平均した複素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。

(3) 分散曲線とH/Vスペクトル

図3(a)～図3(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4(a)～図4(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⁸⁾の計算値も示してある。

(4) 速度構造の検討

表-5(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-3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⁹⁾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-3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6)にならって550m/sとして分散曲線に適合する

表-5 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

ようにその厚さを定める。3層目以降のS波速度は表-4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、4の(3)で述べた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-3では分散曲線について、図-4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-5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、地表面からの深度で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-4と表-5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-5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。地震基盤の深度については今後引き続き検討する必要がある。

6. まとめ

- 1) 微動測定により北魚沼郡川口町と魚沼市堀之内町の6校の学校建物の振動特性と4校の敷地地盤周辺の地盤構造の調査を行った。
- 2) 学校建物について, 基礎地盤相互作用系の固有振動数と基礎固定系の固有振動数を得た。
- 3) 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。
- 4) 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。
- 5) 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。
- 6) 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。

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。団長の小林克巳博士(福井大学)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) 安井譲, 野路利幸, 野口竜也: 微動測定に基づく川口町と堀之内町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, 建築学会大会学術講演梗概集, B-2, 構造Ⅱ, 2005 (投稿中)
- 4) 八木茂治, 福和伸夫, 飛田潤: 常時微動計測に基づく低層RC造建物の伝達関数推定にレーリー波による回転入力を与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第552号, pp. 77-84, 2002.
- 5) 包那仁満都拉, 川瀬博: 常時微動計測に基づく中低層RC造建物の振動特性とその耐震性評価, 日本建築学会構造系論文集, 第577号, pp. 29-36, 2002.
- 6) 新潟県: 新潟県地震被害想定調査報告書, pp. 2.29-2.57, 1998.
- 7) 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
- 8) 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.
- 9) 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.

(2005. 6. 16 受付)

EXAMINATION ON VIBRATION CHARACTERISTICS OF SCHOOL BUILDINGS OF KAWAGUCHI-MACHI AND HORINOUCI-MACHI IN NIIGATA PREFECTURE AND SOIL VELOCITY STRUCTURES OF THE SITES THROUGH MICROTREMOR OBSERVATION

Yuzuru YASUI, Toshiyuki NOJI and Tatsuya NOGUCHI

We investigated vibration characteristics of school buildings of Kawaguchi-machi and Horinouchi-machi about one month after the Niigata-ken Chuetsu earthquake using microtremor observation methods. The natural frequencies on soil structure interaction system and on base fixed system of the buildings were obtained. The subsurface structures of the sites were surveyed using the SPAC method through microtremor L-shape array observation. It is thought that these investigation results become useful reference data for the earthquake damage analysis in the buildings and the presumption of the input earthquake level.