

青森県階上町道仏震度観測点の地盤震動特性*

弘前大学 片岡俊一

1. はじめに

青森県が階上町に設置した震度計（観測点名：階上町道仏（ハシカミチョウドウブツ））で観測される震度と最大加速度は、県内各地のそれと比べて大きいことが報告されている。さらに、この観測点では、2001年以降これまでに気象庁震度で5弱あるいはそれ以上の強い揺れを13回も観測している。このように多くの強震動を観測している観測点は日本でも非常に少ない。このようなことは、サイト増幅特性の影響と考えられる。以下、この観測点を道仏観測点と呼び、図表中ではDBTと表す。道仏観測点の位置や地勢などについては文献²⁾に記した。

しかしながら、上述した13回の強震動を含め、この地点の地盤震動特性は十分に調べられていない。唯一、2008年7月24日に岩手県沿岸北部を震源とした地震について、その地震動の紹介が紹介されている³⁾。文献³⁾には、過去に行われた微動アレー探査で推定したS波速度構造も報告されており、その地下構造から得られるSH波の増幅特性で地震動の卓越振動数が説明できるとしている。しかしながら、そこで紹介された微動アレー探査の際に用いた初期モデルの層区分は、地盤調査に基づいておらず、この点に任意性が残る。

つまり、道仏観測点は地震動指標が大きくなることが示され、周辺でも同様になるであろうとの推測がある²⁾ものの、地震動に基づいた地盤震動特性の検討はなされておらず、地盤構造に関する知見も不十分と言えよう。そこで、道仏観測点でボーリング調査を行い、層序を確認して表層付近のS波速度を決め直した。さら、微動観測を行うとともに、地震記録を収集し、微動と地震動から地盤震動特性を検討した。

2. 道仏観測点について

道仏観測点は、青森県が青森県階上町に設置した観測点であり、青森県が管理している。この観測点は1997年に設置され、現在までに庁舎の敷地内で2度移動している。

県が設置した震度観測点であるので、観測点から県庁に設置された県のサーバーには震度が送られるのみであり、加速度時系列データは震度計内部に保存されるのみで送信されない。もっとも、サーバーから震度計にアクセスし、加速度データを回収することは可能であり、必要に応じて行われている。

3. 浅部の地下構造

(1) 地盤調査結果

震度計が設置されている場所から約30m離れた地点において2022年6月にボーリング調査を行った。土質柱状図と標準貫入試験の結果を図1に示す。深さ15.85mで凝灰岩を確認したので、深さ16mで掘削を止めた。凝灰岩の上は砂礫が堆積しており、砂礫より浅い層は火山性の堆積物が堆積している。表層のN値は非常に小さい。この地盤構成は文献³⁾で参照したものとほぼ同じ

* Ground motion response characteristics during earthquakes at Dobutsu station in Hashikami-cho town, Aomori prefecture by Shunichi Kataoka

である。

ボーリングを行った後にその孔を使って地下水位の変動を約6ヶ月間調べた。その結果、地下水位は高い場合でGL-2m、低い場合でGL-4.5mであった。

(2) 表層のS波速度

表層地盤のS波速度分布を知るために、2022年11月に微動アレー観測を行った。1辺の長さを約10mとした正三角形の頂点と重心に上下動センサーを設置し、200Hzサンプリングで微動を収録した。観測位相速度は空間相関法⁴⁾により求め、この観測位相速度を目標速度として、GPL形式の

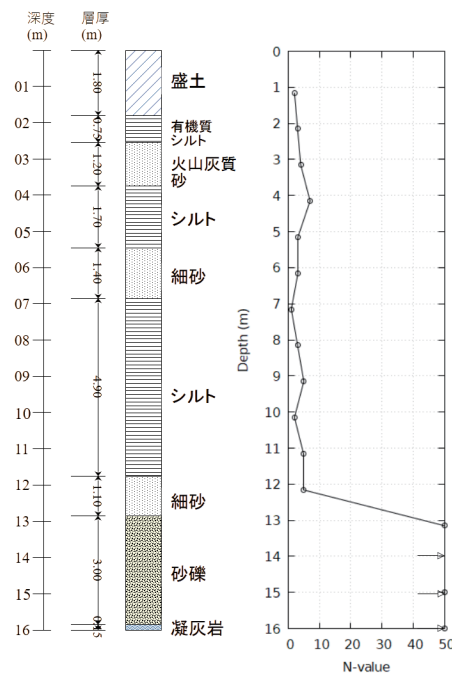


図1 道仏観測点における地盤調査結果. 柱状図とN値分布
フリーソフトウェアであるSWAMI^{5),6)}を用いて、逆解析を行った。逆解析に当たって必要な初期モデルのうち、層厚はボーリング結果を用い、密度は周辺のデータから仮定した。

逆解析により求められたS波速度を図2に示し、層厚と仮定した密度と合わせて地下構造を表1にまとめる。さらに、位相速度を図3に示す。図3中のマークは観測位相速度であり、実線はそれを満たす最適な理論位相速度である。逆解析は初期値を5通りに変えて行っており、図示したものの二乗誤差がもっとも小さかった。図2に示したS波速度を見ると、速度が約90m/sになる層をはさんで、深さ12mまでのS波速度は約120m/sである。砂礫層のS波速度は336m/sであり、凝灰岩のS波速度は454m/sとなった。前述した文献2)では深さ14mまでのS波速度を141m/sと推定している。

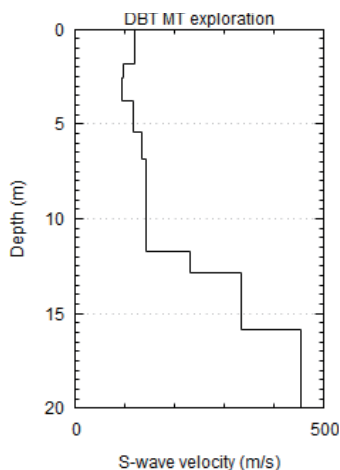


図2 推定したS波速度

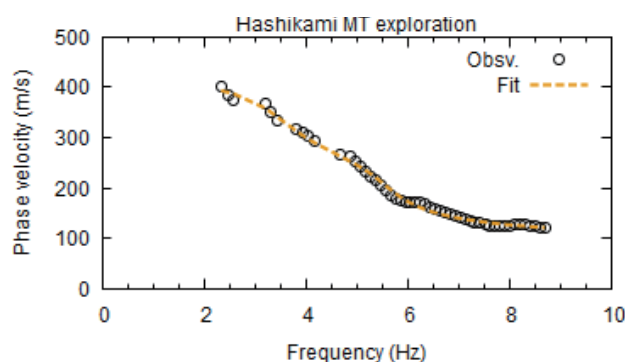


図3 観測位相速度 (○) と推定したS波速度による理論位相速度(破線)

(3) 表層の増幅特性

前項で求めた地下構造で各層の減衰を $h=0.02$ として、重複反射理論によりSH波の増幅特性を

表 1 推定した地下構造

Thick- No. Ness	Thick- Ness (m)	density (kg/m ³)	Poisson's Ratio	Vs (m/s)	Soil type
1	1.80	1.40	0.40	121.9	Bs
2	0.75	1.50	0.35	96.6	Ac
3	1.20	1.60	0.43	94.1	Dvs
4	1.70	1.80	0.43	118.8	Dc1
5	1.40	1.80	0.43	134.0	Ds1
6	4.90	1.80	0.43	144.1	Dc2
7	1.10	1.80	0.43	233.1	Ds2
8	3.00	1.90	0.41	336.3	Dg
9	inf.	2.15	0.38	454.6	

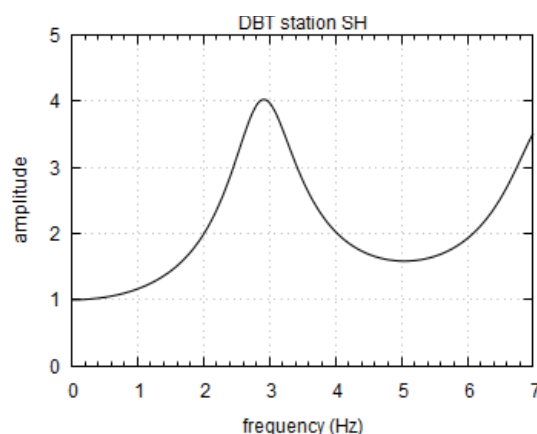


図 4 推定した地下構造から算出した SH 波の増幅特性

求めた。結果を図 4 に示す。3Hz 程度が一次ピークであることが分かる。一方、2022 年 11 月に計測した微動の水平動と上下動とのスペクトル比（以下、HV 比）を求めたものが図 5 である。この微動は、アレー観測と並行して、東京測振社製の CV-374AV で計測したものである。HV 比を求める際には、3 分間のデータ 3 組の各々のスペクトルを求め、それを平均している。スペクトルは自己相関関数から求めている。微動の HV 比を示す図では、2~3Hz の振幅が大きい。表層の増幅特性のピーク振動数は約 3Hz であるので、それよりはやや低い振動数である。よって、微動の震動特性には浅部構造だけではなく、深部構造の影響が含まれていると想像される。

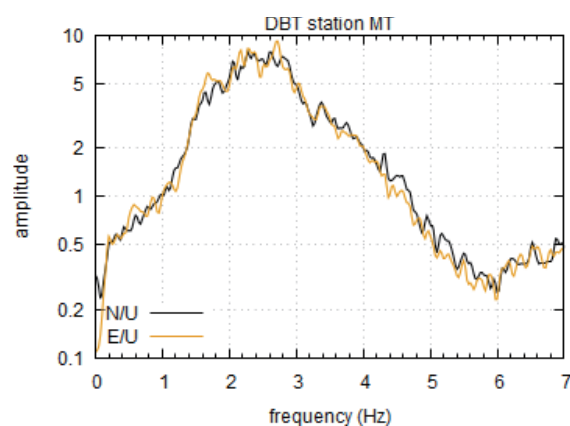


図 5 微動の水平動と上下動とのスペクトル比

4. 地震動の卓越振動数

地震動の増幅特性を確認するために、表 2 に示す 7 地震の際の強震動と 10 地震の際の弱震動記録を集めた⁷⁾。強震動記録は気象庁を通して入手し、弱震動記録は青森県庁から提供を受けた。以下では、弱震動記録を利用して卓越振動数等を議論する。

地震動そのもののスペクトルは震源特性と際と増幅特性の両者の影響が含まれているので、そのままではサイト特性が分かり難い。そこで、S 波初動から約 20 秒を対象にスペクトルを求め、そこから水平動と上下動とのスペクトル比を求めた。結果を図 6 に示す。図中の灰色の線は各々の弱震のスペクトル比であり、青線がその幾何学的平均である。赤線は強震動のうち、もっとも震度が大きかった S2 event の結果を示している。弱震の平均スペクトル比は、水平 2 成分で形状はやや異なるものの、ピーク振動数は 1.6Hz で同じである。一方、赤線で示した S2 event ではピーク振動数は 1.4Hz となっており、弱震のスペクトル比の平均に比べて低い。

地震動の HV 比はサイト増幅特性そのものではない⁸⁾が、地震時にはこの振動数が卓越することは間違いない。一方で、震度は 1Hz 付近に重みを置いている⁹⁾。このことにより、道仏観測点の震度が周辺観測点よりも大きくなるのであろう。また、表層の S 波速度構造により 3Hz 付近の地震動成分を増幅させることから、加速度も大きくなるものと推察される。強震時には表層の剛性が

低下し、凝灰岩層とのインピーダンス比がより小さくなるので、弱震時よりも卓越振動数が低下するとともに、地表での振幅が大きくなる。このこと、より震度が大きくなり易いと考えられる。

地震動のHV比のピーク振動数は1.6Hzであり、微動のHV比のピーク振動数よりも低くなっている。このことは、深部地下地盤が地震動に影響を及ぼしていることを示している。そこで、表1に示した、最深部の凝灰岩の下にS波速度が3400m/sの層（地震基盤）があるとし、弱振動のHV比のピーク振動数を満たすように、凝灰岩の層厚を試行錯誤的に求めた。その結果、凝灰岩層の厚さは55mと求めた。このようにして求めた地下構造で地震基盤からのS波、P波速度の増幅倍率および以下の式で定義されるEHVRを求めて

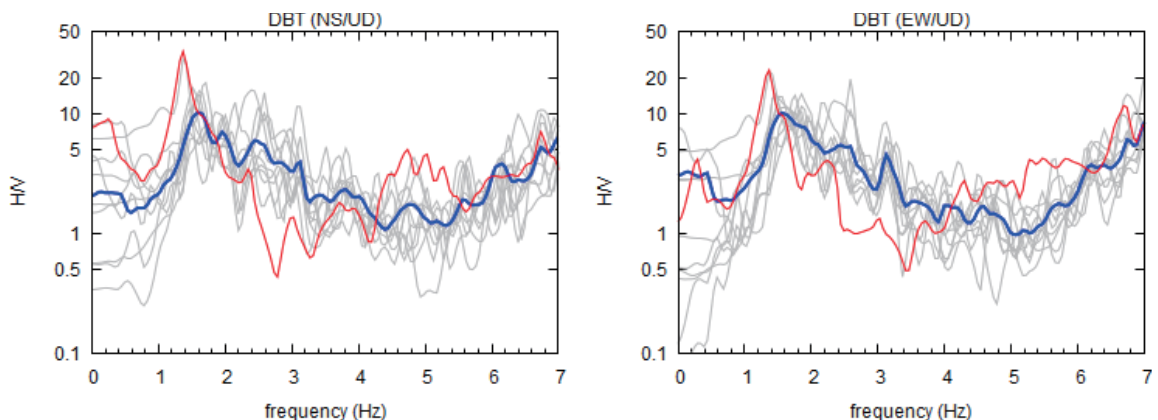


図6 地震動の水平動と上下動とのスペクトル比。灰色：各弱震動、青色：弱震動の平均値、赤：強震動（S2）

図7に示す。

$$EHVR = \sqrt{\frac{\alpha}{\beta} \frac{F_{HH}}{F_{VV}}} \quad (1)$$

ここで、 α 、 β は地震基盤のP波速度とS波速度であり、 F_{HH} 、 F_{VV} は地震基盤と表層間のS波、P波の伝達関数である。

4. おわりに

階上町道仏震度観測点の震度が極局所的なものであるか、町内における臨時地震観測と微動観測を通して検討した。その結果、対象地点の震度は海岸沿いの地域に比べると大きいものの、同等と思われる地点があることが分かった。

表2 用いた地震動をもたらした地震諸元と地震動指標

(a) strong ground motion									
EQ id	date	Long.	Latti.	M	Depth (km)	PGA (cm/s/s)			
						SI_jma	NS	EW	UD
S1	20110407	141.920	38.203	7.2	66	4.9	178	244	104
S2	20150217	142.067	40.051	5.7	50	5.2	255	265	99
S3	20191219	142.107	40.307	5.5	50	4.9	266	308	108
S4	20201212	142.108	40.093	5.6	48	4.9	255	274	98
S5	20210501	141.740	38.173	6.8	51	4.5	107	107	45
S6	20211006	142.253	40.007	5.9	56	5.1	299	247	100
S7	20220316	141.622	37.697	7.4	57	4.7	173	219	59

(b) weak ground motion									
EQ id	date	Long.	Latti.	M	Depth (km)	PGA (cm/s/s)			
						SI_jma	NS	EW	UD
W1	20210127	142.012	42.426	5.4	128	2.7	29	20	14
W2	20210129	141.437	40.023	4.2	68	1.9	13	27	8
W3	20210314	142.245	40.080	4.6	40	1.5	5	9	5
W4	20210415	142.036	41.346	4.3	61	1.8	10	15	10
W5	20210526	142.075	40.205	3.7	49	1.7	14	12	10
W6	20210609	142.167	39.518	4.9	33	2.6	23	31	15
W7	20210609	142.257	40.054	5.0	38	3.0	41	55	21
W8	20210620	142.410	43.286	5.4	158	2.5	19	18	12
W9	20211009	142.147	39.592	4.7	54	2.7	28	29	19
W10	20211201	140.534	40.146	4.2	10	2.0	11	15	6

SI_jma: Seismic intensity by JMA scale

謝辞

微動アレー観測およびそのデータ整理は、令和4年度の4年生に手伝って貰った。道仏観測点の地震記録は青森県から提供を受けた。階上町役場にはボーリング調査や微動アレー観測に当たって便宜を図っていただいた。地図はGMT¹⁰⁾を用いて作成した。本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画(第2次)」の支援を受けた。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 片岡俊一・山本博昭：地震動記録に基づく青森県内の強震観測点のサイト増幅度，日本地震工学会論文集，第7巻，第2号(特集号)，110-129，2007.
- 2) 片岡俊一：青森県階上町道仏震度観測点の特異性確認のための町内各地の地盤震動特性調査，東北地域災害科学研究，第58巻，13-17，2022.
- 3) 片岡俊一：2008年7月24日に発生した岩手県沿岸北部の地震の際に震度6弱を観測した青森県内の観測点の震動特性，岩手・宮城内陸地震被害調査研究グループ，平成20年北東北国立3大学連携推進研究プロジェクト岩手・宮城内陸地震被害調査研究報告書，106-110，2009.
- 4) Aki K.: Space and time spectra of stationary stochastic waves, with special reference to Microtremor, Bulletin of Earthquake Research Institute, XXXV, pp.415-457, 1957.
- 5) Lai, C. G. and Rix, G. J.: Simultaneous Inversion of Rayleigh Phase Velocity and Attenuation for Near-Surface Site Characterization, Report No. GIT-CEE/GEO-98-2, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, pp. 258, 1998,.
- 6) Lai C. G., and Krzysztof Wilmanski : Surface waves in geomechanics: direct and inverse modeling for soils and rocks, International center for mechanical sciences courses and lectures No.481, Springer Wien New York, 2005.
- 7) Kataoka, S. : Site response at the Bobutsu station in Aomori prefecture, Japan during strong and weak earthquake ground motion, submitted to 8th International conference on geotechnical earthquake engineering, Osaka, Japan, 2023.
- 8) Kawase H., F. Nagashimaa, K. Nakanob, Y. Mori : Direct evaluation of S-wave amplification factors from microtremor H/V ratios: Double empirical corrections to “Nakamura” method, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 126, 105067, 2019.
- 9) 気象庁：震度を知る：基礎知識とその活用、ぎょうせい、238p、1996年.
- 10) Wessel, P., Luis, J. F., Uieda, L., Scharroo, R., Wobbe, F., Smith, W. H. F., & Tian, D. : The Generic Mapping Tools version 6. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20, 5556–5564, 2019.
<https://doi.org/10.1029/2019GC008515>

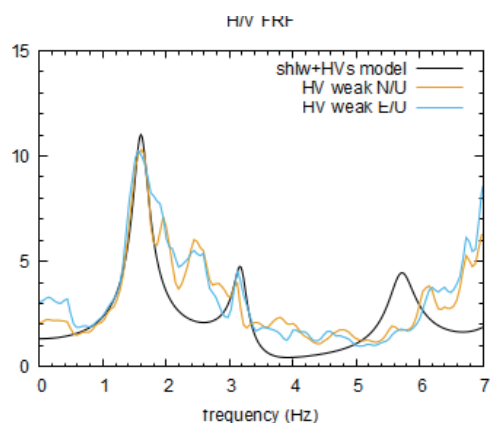


図7 地震基盤までのモデルによるEHVRと地震動の水平動と上下動とのスペクトル比