

長野盆地のやや深い地層構造と常時微動の関係について*

服部 秀人**・国井 隆弘***

The Relation between Microtremors and a Little Deep Underground Structure in the Nagano-basin.

Hideto HATTORI, Takahiro KUNII

The observations of microtremors in the Nagano-basin were carried out at 12 spots along the two profiles of which underground structures were available from the existing data of explosion seismic observation of the area. Microtremors in the directions of NS, EW, and up-down were observed simultaneously by using three microtremometers with a pendulum of 10 sec. period.

From a comparison between the Fourier spectrum of the microtremors and the amplification spectrum calculated by the theory of multiple reflection, it was confirmed that the longest predominant period of the microtremors at most of the spots and the period of the 1-st mode of the amplification spectrum had considerable agreement.

1. はじめに

ある場所で観測される地震動の特性は、大まかな概念的モデルとして、次のように震源から伝達されるものと考えられている。震源で発生した地震動は、観測点付近まで伝播する間にその経路の特性が付加される。そしてさらに、観測点の位置する基盤構造の特性が加わって、その地点の地震動として観測される。したがって、観測される地震動には、震源、伝播経路、そして地盤の、大きく分けて3つの特性が含まれている。

一つの地震でも、観測される場所によって大きくその動きの様相が異なることは、たとえ平面的な広がりか1 km程度であっても、良く経験するところである。長野盆地のような特定の地域を考える場合、その地域の広がり比べてかなり遠距離で発生した地震については伝播してくる地震動の特性は、盆地内各場所ではほぼ一様であると見なすことができるであろう。したがって観測された地震動の特性が場所ごとに異なっている場合には、それはその場所の固有の特性によるものと考えることができよう。この固有の特性は、その場所の地層構造によるものであって、ある程度の深さに想定する基盤より上にある地層構造のモデルにより説明される。この基盤は通常、地震基盤と呼ばれている。当盆地内の地震動強度を論ずるような、

* 平成元年3月 土木学会中部支部 昭和63年度研究発表会において発表

** 土木工学科 助教授

*** 東京都立大学工学部 教授

原稿受付 平成元年9月29日

ある広がりをもった区域を考える場合には、基盤をある程度深い所に設定する必要がある⁽¹⁾。

当盆地で観測される常時微動と地震動には、0.5Hz 程度の比較的low波の卓越成分が含まれている⁽²⁾⁽⁶⁾。微動と震動の両者にこの成分が認められることからみて、これは当盆地固有の特性であろうと考えられる。当盆地の地震動を解析するためには、このlow波成分と対応する地層構造を調べる必要がある。

本報告は、地震探査により推定された当盆地の地下構造⁽³⁾と、そこで観測された常時微動の特性を比較し、地震基盤に関して考察を加えたものである。

2. 長野盆地の推定地下構造

松代地震の震源を調べる基礎資料を得る目的で、1967年、工業技術院地質調査所により地震探査が実施された⁽³⁾。探査断面は、山ノ内町から四賀村に至る Profile A と戸隠村から上田市に至る Profile B である。両断面A、Bのうち当盆地内の部分(AE₂, AE₃, BE₁, BE₂)を図1に示す。

探査データから求められたP波速度による層構造を図2に示す。6km/s層は石英閃緑岩、4km/s層は第三紀中新世の内村・別所相当層であり、2km/s層は豊野層と最上部猿丸層に相当し、1km/s層は扇状地砂れき層であると推定されている⁽⁴⁾。測線BE₁の北端では4km/s層が急激に厚くなっている。

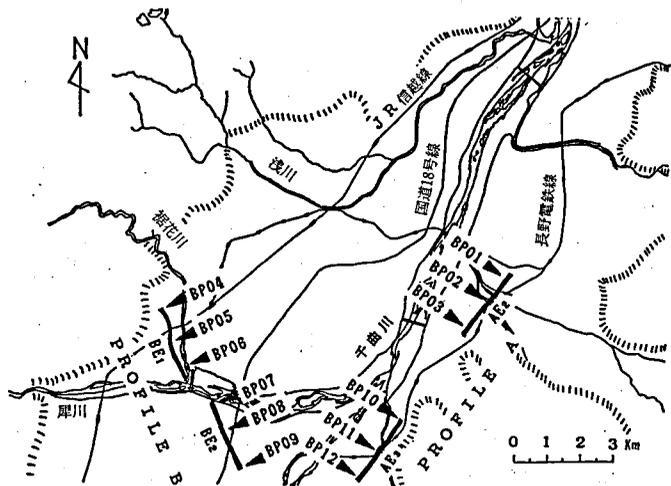


図1 観測点

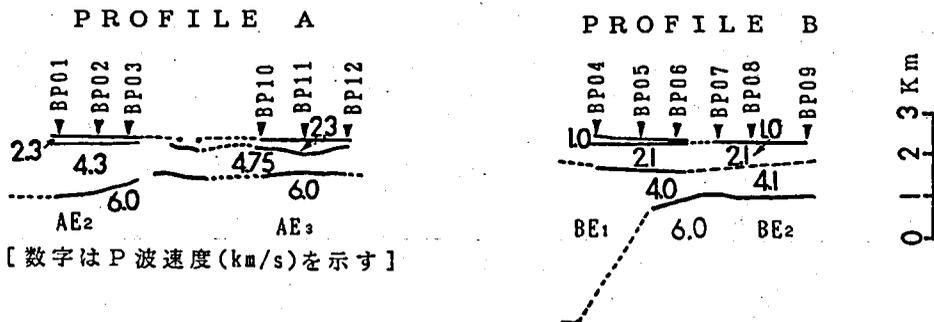


図2 地震探査による推定地下構造

3. 常時微動観測

地下構造の推定されている Profile A, B の地表面で常時微動を観測した。観測点 (PB01 ~BP12) を図 1 に示す。固有周期10秒の微動計により、水平 2 成分 (NS, EW), 上下動 1 成分の 3 成分同時観測により変位波形を記録した。

解析は、0.02秒刻みでデジタル化して、約40秒間についてフーリエ振幅スペクトルを求めた。

4. 地盤の増幅特性

4-1 SH 波の増幅スペクトル

基盤上の地盤を、図 3 のような多層弾性体と考える。第 k 層内の深さ z_k における時刻 t での変位を $x_k(z_k, t)$ とすると、上下方向に伝播する SH 波の運動方程式は次式で与えられる⁽¹⁾。

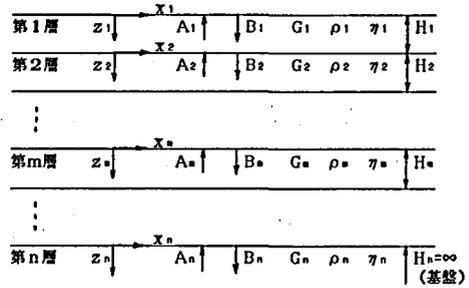


図 3 SH 波の伝播する多層地盤

$$\rho_k \frac{\partial^2 x_k(z_k, t)}{\partial t^2} = \left(G_k + \eta_k \frac{\partial}{\partial t} \right) \frac{\partial^2 x_k(z_k, t)}{\partial z_k^2} \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 ρ_k, G_k, η_k はそれぞれ第 k 層の密度、せん断弾性係数、粘性係数である。円振動数 ω の SH 波が伝播する場合には、粘性係数を次式のように表わすことができる。

$$\eta_k = \frac{2h_k G_k}{\omega} \dots\dots\dots (2)$$

ただし h_k は第 k 層の減衰定数で、微小ひずみ領域では 2% 程度の値である。

いま、変位 $x_k(z_k, t)$ を

$$x_k(z_k, t) = u(z_k) e^{i\omega t} \dots\dots\dots (3)$$

とおくと、式(1)の一般解は次式で与えられる。ただし、 i は虚数単位である。

$$u(z_k) = A_k e^{i p_k z_k} + B_k e^{-i p_k z_k} \dots\dots\dots (4)$$

$u(z_k)$ は、地盤が円振動数 ω で振動しているときの、第 k 層の振動形である。なお、 p_k は次式のようにおかれた定数である。

$$p_k^2 = \frac{\rho_k \omega^2}{G_k (1 + 2h_k i)} \dots\dots\dots (5)$$

したがって、調和 SH 波の伝播にともなう変位 $x_k(z_k, t)$ は、式(3), (4)より、

$$x_k(z_k, t) = A_k e^{i(\omega t + p_k z_k)} + B_k e^{i(\omega t - p_k z_k)} \dots\dots\dots (6)$$

となる。第 1 項は上昇波を、第 2 項は下降波を表わす。 A_k, B_k は各々の振幅であり、各層

の境界条件により決定される積分定数である。地表面において、せん断応力が0となることから、次式が導かれる。

$$A_1 = B_1 \dots\dots\dots (7)$$

各層の境界 ($z_k = H_k, z_{k+1} = 0$) において、変位の適合とせん断応力のつり合いを考えると次式のような漸化式が導かれる。

$$\left. \begin{aligned} A_{k+1} &= \frac{1}{2} \left[A_k(1 + \alpha_k) e^{i p_k H_k} + B_k(1 - \alpha_k) e^{-i p_k H_k} \right] \\ B_{k+1} &= \frac{1}{2} \left[A_k(1 - \alpha_k) e^{i p_k H_k} + B_k(1 + \alpha_k) e^{-i p_k H_k} \right] \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 α_k は複素インピーダンス比と呼ばれ、次式で表わされる。また、 $G_k(1 + 2h_k i)$ は複素剛性と呼ばれる。

$$\alpha_k = \sqrt{\frac{\rho_k G_k(1 + 2h_k i)}{\rho_{k+1} G_{k+1}(1 + 2h_{k+1} i)}} \dots\dots\dots (9)$$

式(8)において、仮に $A_1 = B_1 = 1$ とすれば、各層の $A_k, B_k, (k=2, 3, \dots, n)$ を順に求めることができる。

第 m 層と第 n 層において $z_m = 0, z_n = 0$ とすると、式(6)より、両層上面の変位の振幅比は

$$H(\omega) = \frac{A_m + B_m}{A_n + B_n} \dots\dots\dots (10)$$

となる。これは、第 n 層に対する第 m 層の周波数伝達関数である。式(10)の絶対値を取ることにより、第 n 層から第 m 層までの増幅率、すなわち増幅スペクトル $AS(\omega)$ が得られる。

$$AS(\omega) = |H(\omega)| \dots\dots\dots (11)$$

図3に示すように、第 n 層上面を基盤とすると、地表面の基盤に対する増幅スペクトルは式(10)において $m = 1$ とすることにより求めることができる。

4-2 常時微動観測点の地層構造

前述の推定地下構造より、常時微動観測地点の地層構造を求めると表1のようになる。表1の地層構造について増幅スペクトルを求めるために、各層の物理定数を経験にもとづいて次のように仮定した。

- (1) ポアソン比はすべての層において0.35とする。
- (2) 単位体積重量はP波速度 1 km/s, 2 km/s, 4 km/s, 6 km/s の各層について、それぞれ、1.8 t/m³, 2.0 t/m³, 2.3 t/m³, 2.4 t/m³ とする。
- (3) 減衰定数はすべての層において2%とする。

せん断弾性係数 G は次式により計算される⁽⁴⁾。

$$G = \rho V_s^2 = \frac{\gamma}{g} V_s^2 \dots\dots\dots (12)$$

表1 常時微動観測地点の地層構造

Profile A						
地点	BP 01	BP 02	BP 03	BP 10	BP 11	BP 12
H ₁	160 (2.3)	160 (2.3)	160 (2.3)	290 (2.3)	290 (2.3)	160 (2.3)
H ₂	1340 (4.3)	1190 (4.3)	1000 (4.3)	900 (4.75)	550 (4.75)	680 (4.75)
H ₃	? (6.0)	? (6.0)	? (6.0)	? (6.0)	? (6.0)	? (6.0)

Profile B						
地点	BP 04	BP 05	BP 06	BP 07	BP 08	BP 09
H ₁	240 (1.0)	210 (1.0)	180 (1.0)	690 (2.1)	620 (2.1)	20 (1.0)
H ₂	490 (2.1)	530 (2.1)	560 (2.1)	600 (4.1)	800 (4.1)	480 (2.1)
H ₃	3200 (4.0)	1200 (4.0)	740 (4.0)	? (6.0)	? (6.0)	900 (4.1)
H ₄	? (6.0)	? (6.0)	? (6.0)			

上段は層厚 (m), 下段 () 内はP波速度 (km/s).

ここで r, g, V_s はそれぞれ単位体積重量, 重力加速度, S波速度である. V_s は次式により計算される. ただし, ν はポアソン比, V_p はP波速度である.

$$V_s = \sqrt{\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)}} \cdot V_p \dots\dots\dots (13)$$

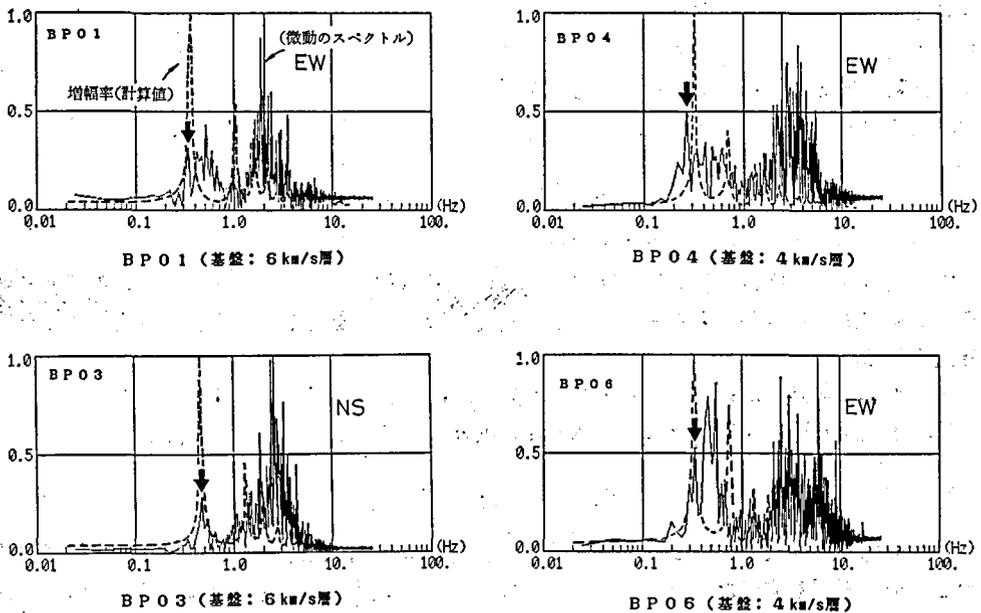


図4 常時微動の卓越低振動数と増幅スペクトルの対比

表2 対応する卓越低振動数と基盤層

Profile A					Profile B				
地点	常時微動		計算値		地点	常時微動		計算値	
	NS成分	EW成分	1次振動数	基盤		NS成分	EW成分	1次振動数	基盤
BP 01	0.33 Hz	0.34 Hz	0.36 Hz	6km/s 層	BP 04	0.20 Hz	0.28 Hz	0.32 Hz	4km/s 層
BP 02	0.47	0.42	0.40	〃	BP 05	0.42	0.27	0.32	〃
BP 03	0.46	0.45	0.46	〃	BP 06	0.44	0.34	0.33	〃
BP 10	0.47	0.42	0.48	〃	BP 07	0.32	0.39	0.30	6km/s 層
BP 11	0.37	0.44	0.63	〃	BP 08	0.25	0.25	0.30	〃
BP 12	0.40	0.50	0.69	〃	BP 09	0.39	0.32	0.33	〃

4-3 増幅スペクトルと常時微動のフーリエスペクトル

以上の地層構造について、各観測点ごとに基盤を適当に定めて、地表面の増幅スペクトルを計算し、常時微動のフーリエスペクトルと比較した。一例を図4に示す。基盤をP波速度4 km/s 層あるいは6 km/s 層に仮定すると、低周波の卓越振動数と増幅スペクトルの1次振動数が比較的良好に一致する。すべての観測点についての観測結果と計算結果を表2に示す。プロフィールAにおける基盤は6 km/s 層であり、プロフィールBの基盤は、犀川より北側の4 km/s 層より南側の6 km/s 層へと傾斜しているようである。表2の値をもとに、常時微動と計算値の低振動数の対応関係を図5に示す。両者はかなり良く一致している。

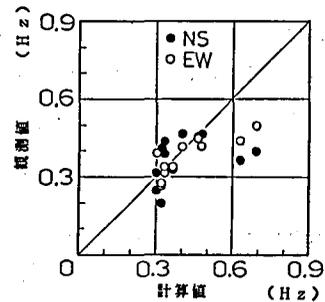


図5 低振動数の対応

5. 結 論

以上の結果より、次のようなことが結論される。

- (1) 長野盆地で観測される0.5Hz程度の低周波成分は、深さ1,300~1,400mのP波速度6 km/s 層あるいは深さ700m辺りのP波速度4 km/s 層を基盤とする増幅特性であろうと考えられる。
- (2) 6 km/s 層の基盤は犀川・千曲川の河東地域に広がっていると考えられる。
- (3) 4 km/s 層の基盤は盆地の西側山地の裾野に広がっていると考えられる。

6. あとがき

常時微動を実体波とみなして、SH波の重複反射により、長野盆地で観測される低周波成分と基盤の関係を調べた。島らは、当盆地における実地震の伝播速度を調べている⁽⁶⁾。それによると、地震の前半では4 km/s、後半では1.5 km/sであり、前者は深い地層構造の表面

波速度に、後者は浅い構造のそれに対応しているとしている。また伝播方向は盆地の短手方向、すなわち北西-南東方向が卓越しているようである。

筆者らの実体波としての考察と島らの表面波としてのそれとを踏まえて、今後は F. E. M 等による解析と観測データとを対比して、当盆地の地震動強度を求めたいと考えている。

謝 辞

本研究を進めるに当り、微動計を貸与して下さった神奈川大学工学部の荻本孝久氏と、終始有益な助言をして下さった大林組技術研究所の菊地敏男氏に感謝申し上げます。また、卒業研究で協力いただいた、大畑雅之（長野県）、北沢健二（東京電力）、鈴木正幸（守谷商会）の各氏にお礼申し上げます。

参 考 文 献

- (1) 土木学会耐震工学委員会，動的解析の方法，土木学会，1989
- (2) 島，盆地構造における地震動について—長野盆地の場合，地震学会秋季大会，1987
- (3) Geological Survey of Japan, Explosion seismic studies of the Matsushiro earthquake swarm area, Special Report No. 5, 1969
- (4) 宮村撰三，地震・火山・岩石物性，共立出版，1976
- (5) 島他，地震波伝播の方向性と盆地構造について，土木学会中部支部研究発表会，1989
- (6) 服部・国井，長野盆地の地盤の振動特性（その2），土木学会中部支部研究発表会，1981