

地すべり地における常時微動特性—新潟県

高場山トンネル崩壊地

島 坦*・野村 文生**

(昭和46年10月30日受理)

1. ま え が き

常時微動の測定からその波形を地震波形と比較してみると、その観測点の地盤の性質を反映しているのではないかという考えをもった石本(1939)の研究にはじまり、以後詳しい研究および観測がおこなわれている。金井ら(1954)は常時微動の周波数に対する度数分布からその最大値に対する周期をその地盤の卓越周期とみなし、それによって地盤を物理的あるいは地質的にいくつかの種別に分類し、耐震工学の応用に寄与している。彼等の研究の考え方には地盤にそれぞれの固有振動周期というものが存在するという含みが前提となっている。一方常時微動を発生原因はともかくとして波の伝播性によって説明しようとするのが赤松(1956, 1958)野越・五十嵐(1970)らの研究で、実体波より表面波の伝播によるものとして議論している。

地すべり地における常時微動については玉城(1967)が測定し、破壊のあったところとないところで常時微動のスペクトルの変化をしらべているが、これは地すべり地に対する微動の応用の最初であろう。

本論文では新潟県高場山トンネル(国鉄飯山線)が1970年1月に地すべりにより崩壊したので、その地帯周辺の常時微動を崩壊のあった約1ヶ月後に観測したのでその結果について述べる。常時微動の特性をみるためにフーリエ解析によりスペクトルを求め、それより卓越周期のほかにスペクトルの形について各観測点間の差異を議論し、理論的考察もあわせておこなっている。

2. 観 測

1970年1月22日新潟県高場山トンネル(国鉄飯山線岩沢駅東北東3.6km)が地すべりによって崩壊した。それについては山田、小橋、草野(1970, 1971)の詳しい報告があるが、トンネル付近の地形は図1に示すように信濃川の蛇行が大きく彎曲して、山地の脚部を洗っている。トンネルは信濃川の水面より約20mの高さで背部は30~40度の急斜面となっている。地質的には第3紀中新世から鮮新世に形成された粘土質頁岩と砂岩の互層となっている。

* 土木工学教室 教授

** 土木工学教室 助手

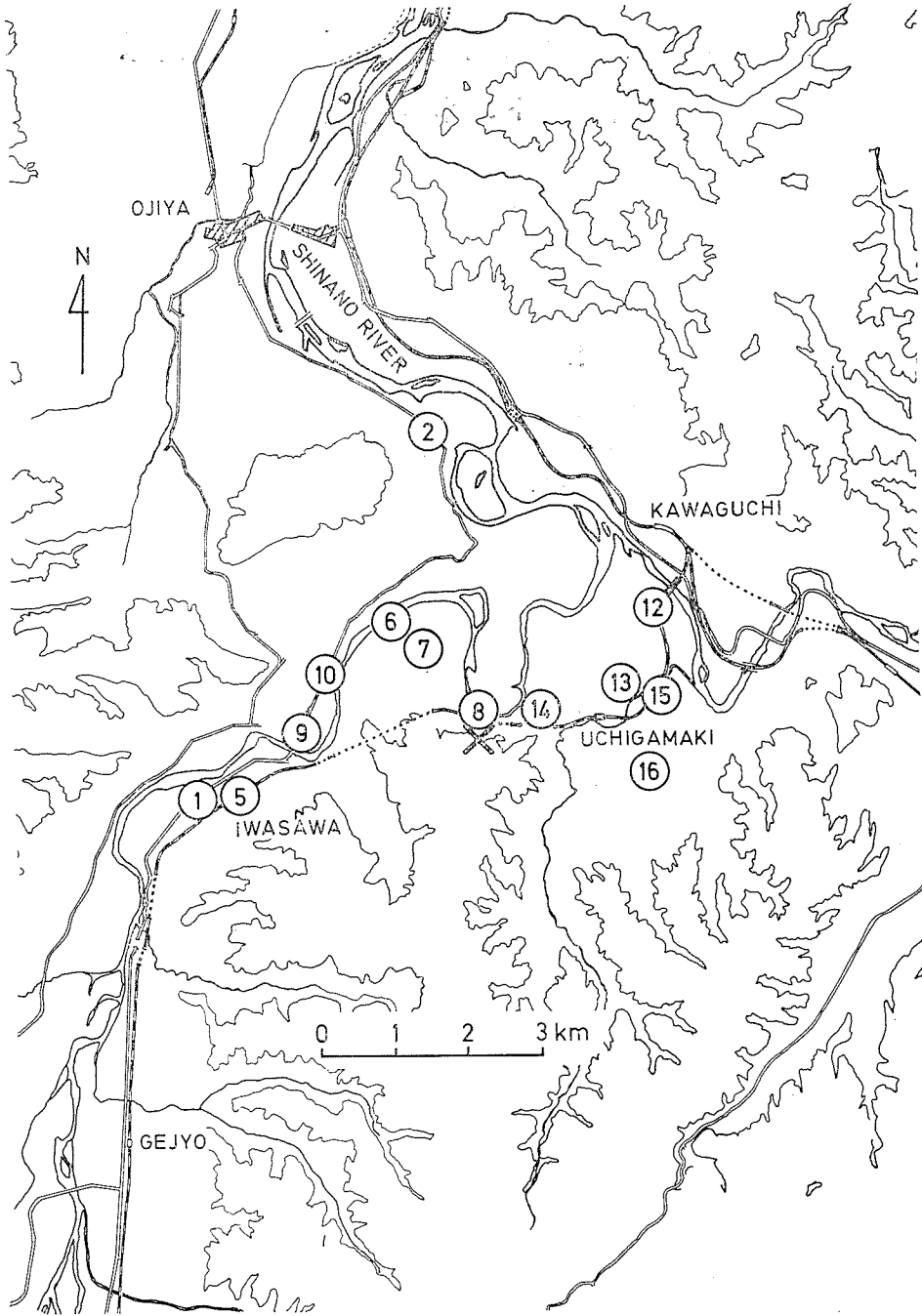


図1 地すべり地点(×印)と観測点の分布

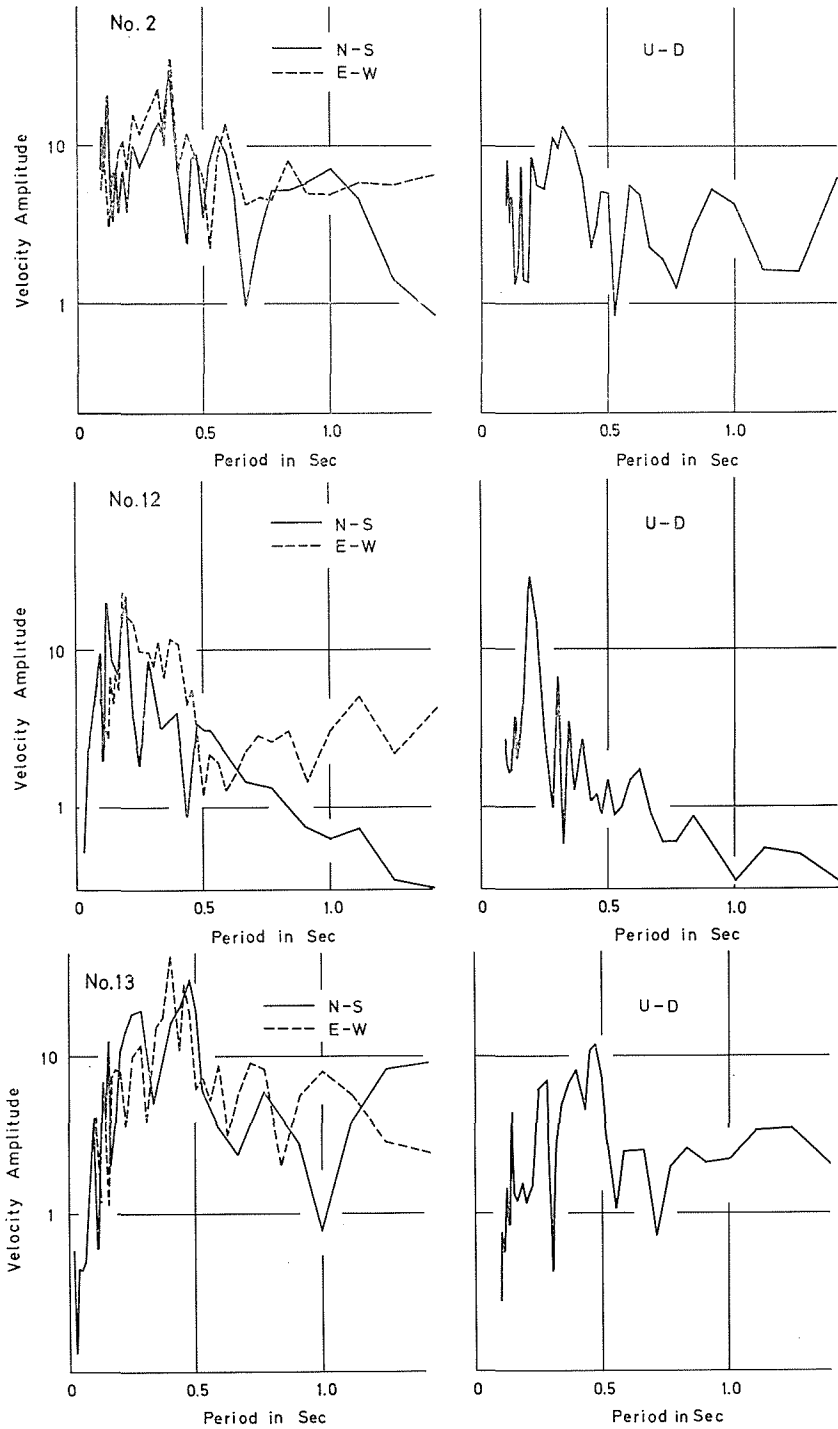


図 2(a) 常時微動のスペクトル a型 (続く)

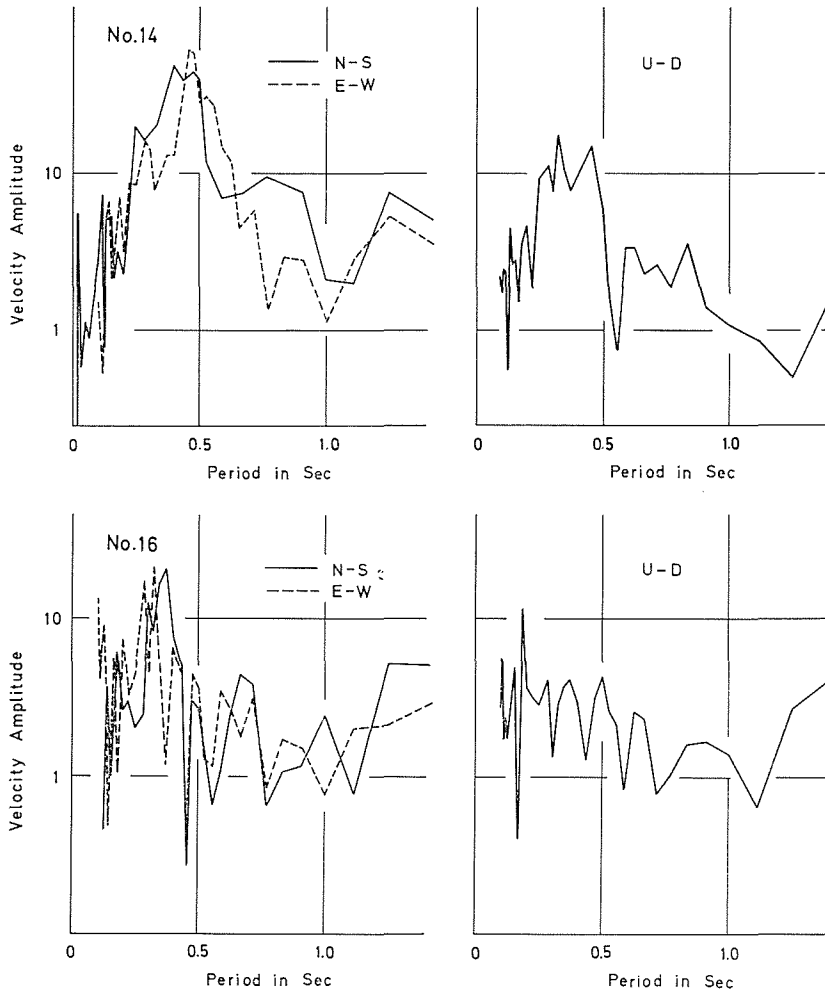


図2(a) 常時微動のスペクトル a型

地すべりの約1ヶ月あと、図1に示すように崩壊地(図中の×印地点)の周辺13ヶ所で常時微動の測定をおこなった。用いた地震計は周期1秒の水平および上下動成分のもので、磁気テープにより速度記録を各地点で約15分間とった。解析に用いた記録はその中より5秒間をえらび、0.01秒ごとに読みとり、その波形のスペクトルを得た。その結果を図2に示す。横軸は周期にとり、縦軸は arbitrary unit であるが、図2全体では同じ割合で図示している。

図2のスペクトルより各地点の卓越周期を求めることが必要であるが、そのまえにスペクトルの形、すなわちスペクトル振巾と周期との関係をしらべてみる。13ヶ所の観測結果を整理してみると図3のように3つのスペクトル型に分類することができる。a型は一つ

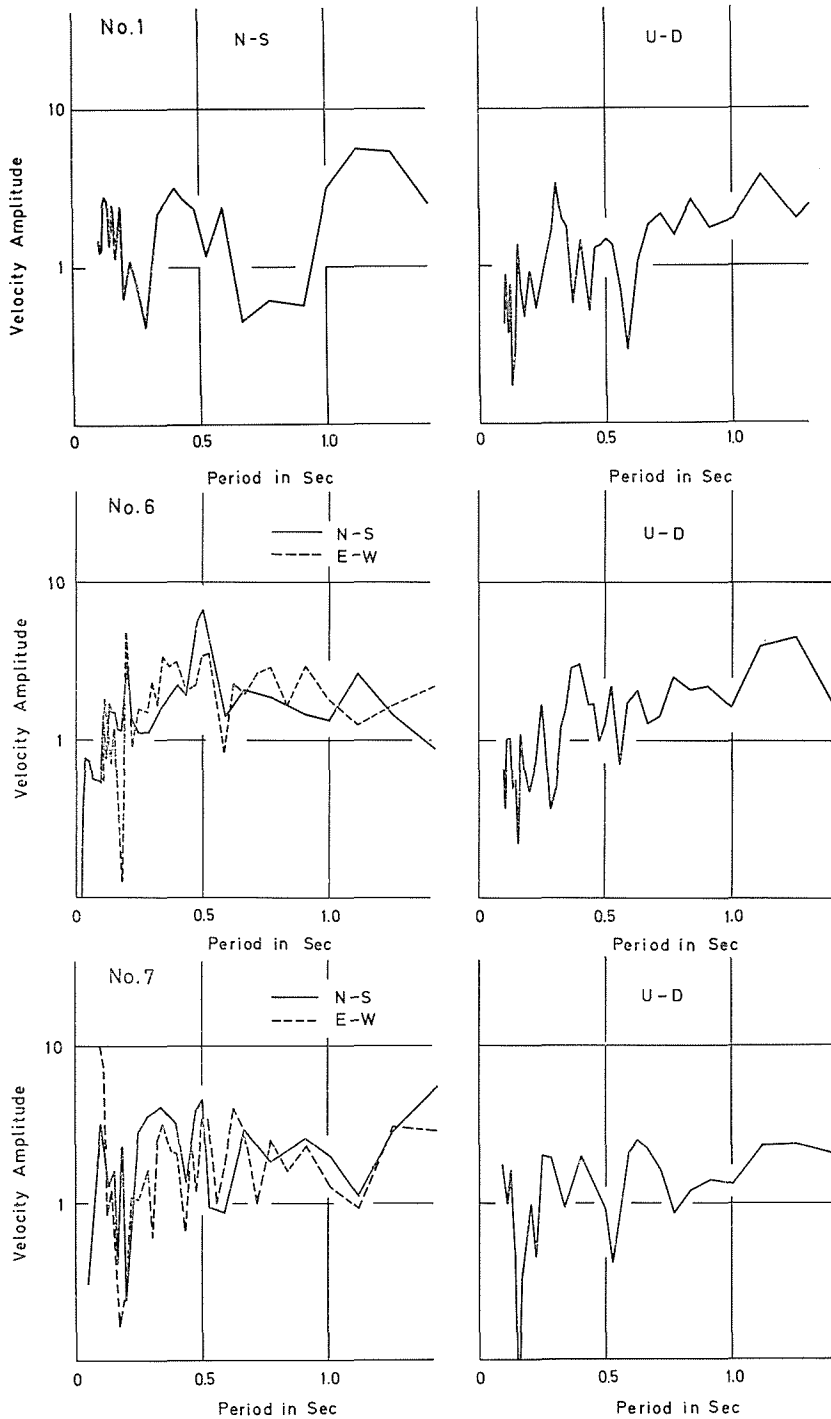


図2(b) 常時微動のスペクトル b型(続く)

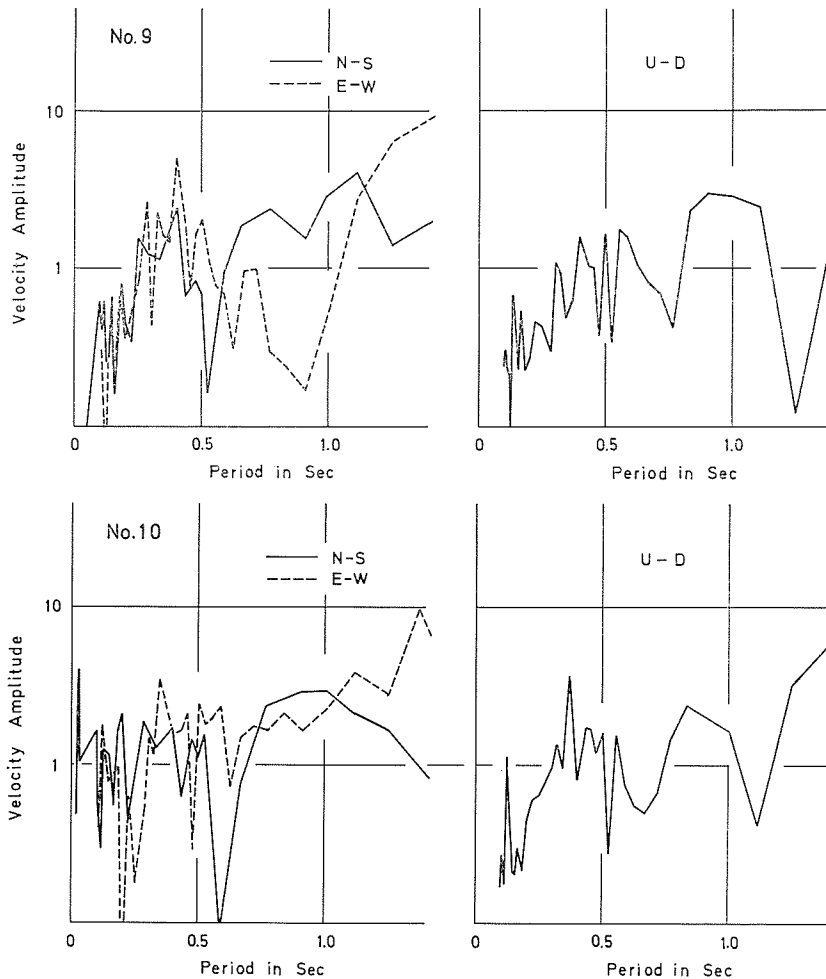


図 2(b) 常時微動のスペクトル b型

の卓越周期が顕著にあらわれる場合であり、b型はスペクトルの形が扁平に近くなり、はっきりした卓越周期がやや求めにくい場合である。さらにc型としては卓越周期がいくつかわれる場合で、現在の場合には2つ程度に意味があるとみている。直感的にはa型とb型では1質点系における強制振動の倍率曲線と似ており、減衰係数の値によりa型からb型に移る状態を思わせる。またc型は多質点系の1次、2次のモードに対応するとみることができるかも知れない。これらのスペクトルの形についての理論的考察は後述する。

上記の分類にしたがって図2のスペクトルを整理すると、a型はNo. 2, 12, 13, 14, 16地点、b型はNo. 1, 6, 7, 9, 10地点、c型はNo. 8, 15地点である。No. 5地点は水平動成分の長周期の部分がよく分らないので、a型かc型か決めかねるが上下動よりみるとc

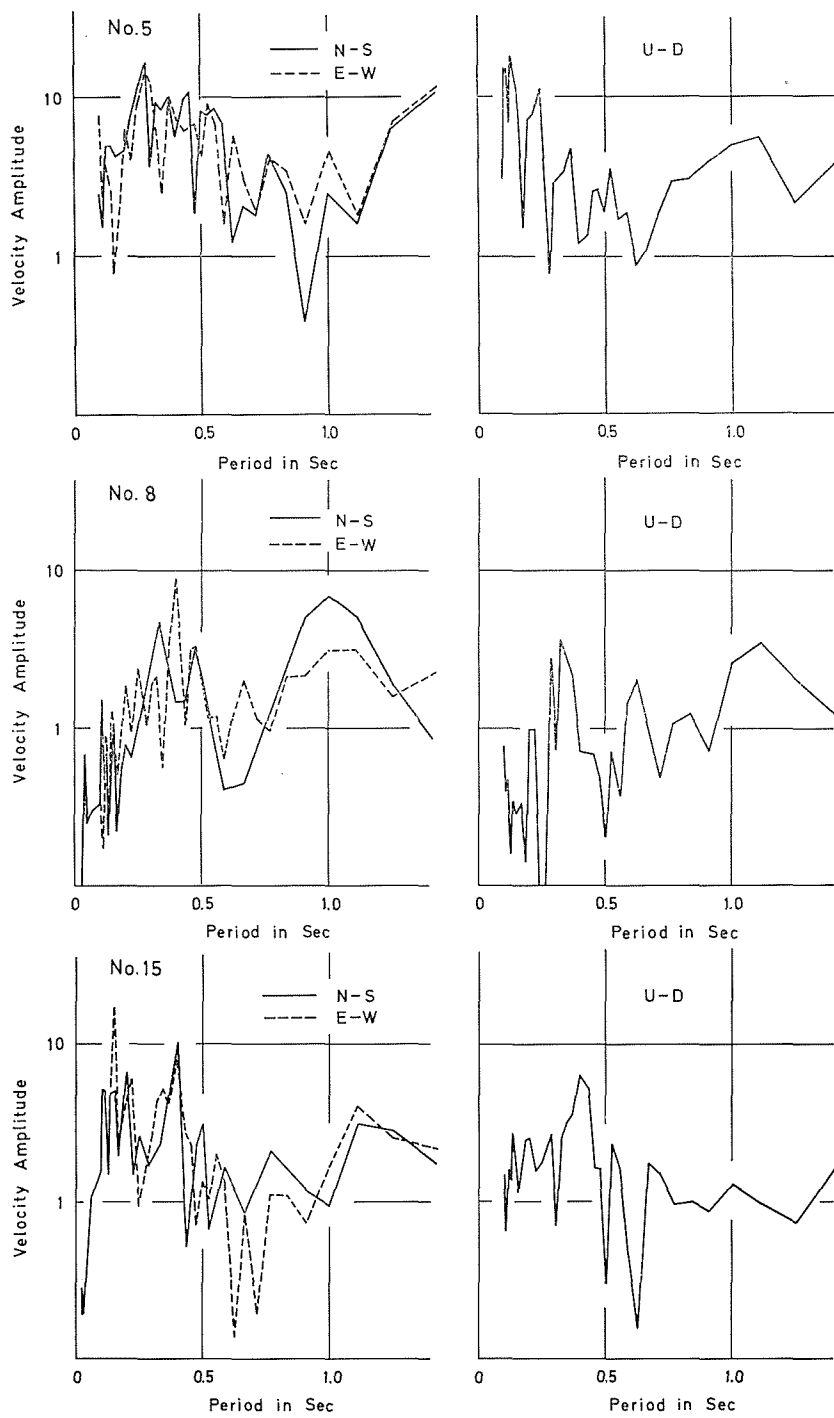


図 2 (C) 常時微動のスペクトル c 型

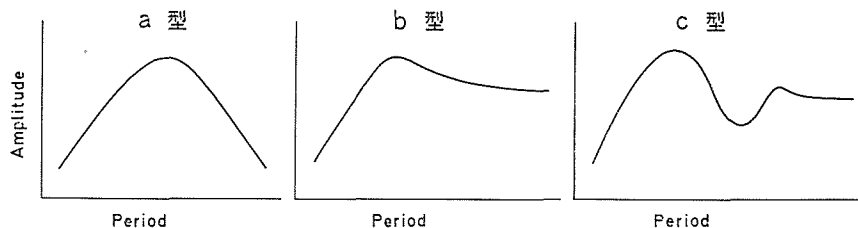


図3 スペクトル型の分類

型である。このように各地点の観測結果を3つの型に分けたが、スペクトルの成分 (N, E, Z) によってはやや差異はある。

つぎに各地点における卓越周期をスペクトルから求めてみたが、その結果は表1にスペクトル形とともに示されている。No. 12 地点を除いて卓越周期は0.30~0.50秒の範囲におさまっており、大体表層の厚い、あるいは速度のおそい層でおおわれている山間部の卓

表1 観測点における卓越周期とスペクトル型

地点番号	1	2	5	6	7	8	9
地名	岩沢中	上片貝	岩沢駅	川井	屋敷村	地すべり 地点下部	時の島
N	1.19	0.95	:	:	1.43?	1.00	0.95
	0.47	0.37	0.35	0.50	0.48?	0.40	0.33
E	:	:	1.44	:	1.37	1.03	:
	:	0.37	0.33	:	0.63	0.40	0.40
Z	:	0.95	:	1.20	:	1.14	0.97
	0.30	0.33	:	0.40	:	0.32	0.48
スペクトル型	b	a	c?	b	b	c	b
地点番号	10	12	13	14	15	16	
地名	細島	川口荒屋	荒屋内ヶ巻 間県道	内ヶ巻	相川町	前原	
N	1.00	:	1.36	:	1.38	1.23	
	0.33	0.20	0.45	0.43	0.35	0.40	
E	:	:	1.03	1.25	:	1.23	
	0.48	0.21	0.43	0.47	0.30	0.37	
Z	0.90	:	1.09	:	:	:	
	0.37	0.20	0.43	0.38	:	0.40	
スペクトル型	b	a	a	a	c	a	

卓越周期となっている。図2のスペクトルをみると、この卓越周期の他にやや周期の大きいところに卓越した山がみられる観測がある。スペクトル振巾は必ずしも上記の短い方の卓越周期に対応する振巾より大きくはないが、スペクトル全体の形からみて無視することができない程明瞭である。したがってその周期も決められたものについて表1にあわせて記した。結果として長い方の卓越周期は約1.0～1.5秒の範囲にみられる。

No. 12 地点は川口市南部の平地にあたるが、その地点のスペクトルをみると卓越周期は0.16～0.20秒と他の観測点にくらべてとくに短かく、かつ長い周期の部分には卓越した山はみられず、これは都市部の比較的よい地盤特性をもった例である。したがってスペクトル型のa型に属する中でも No. 12 地点は地すべり地周辺の他の点とははっきり区別される。

在来地盤の卓越周期の議論では文字どおり振巾の大きいところのみに対する周期をとるのであるが、表1に示された長い周期のものについても注意してみて、短かい方の卓越周期 T_2 と長い方の卓越周期 T_1 の相関をとると図4のようになる。観測点はそれぞれ特有の構造をもっているため同一視して同一グラフ上にプロットするのは問題があるが、それにしても傾向としてはほぼ一つの直線上にのっていると思ふことができる。ただここで図中に1:3の比にあたる直線を書いてあるが、相関の傾向はその直線よりやや上にあるとみてよいことは注意すべきである。もし T_2/T_1 が $\frac{1}{3}$ に等しいか、それに近いとするならば長い方の卓越周期のある地下構造における1次の固有振動周期とみなし、かつ短い方の卓越周期を2次の振動周期に対応するとみることができる。もちろん実際には地下構造は複雑であろうが、平均的な意味で2層構造として説明できるのではないかと思われる。

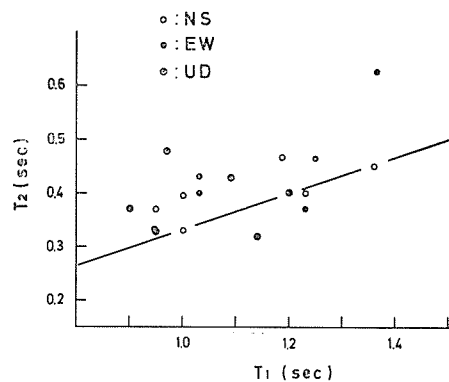


図4 卓越周期 T_1 と T_2 の相関

3. 理論的考察

地下構造においてある厚さの表層が存在したとき、その厚さは1/4波長則を満足するような表面波の伝播を考えてもよいし、あるいは固有振動を考えることもできる。ここではスペクトルの形の分類および卓越周期 T_1 、 T_2 の比よりみて、表層の弾性的性質の他に粘性を考慮して表層のフィルター特性を求めて実際の図2にあるようなスペクトルを説明できるかどうかを試みてみよう。常時微動の振動源については解明されていない現在、白色雑音（考えている周波数範囲において）と考えこれが表層の下から弾性波として到着し、表層のフィルター特性によってそれぞれ地盤特有の振動をすると考える。

金井(1950)が図5のような2層構造の場合、表層をVoigtモデルの媒質とし、下の半無限体を弾性体として、SH波が垂直下方より入射したとき表層上で振巾が周期に対し

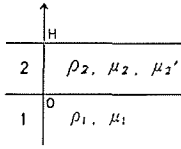


図5 地下構造の変数

てどのように変化するかを表層の粘性係数の影響を入れて計算している．表層上の変化振巾を U_H ，境界面上の振巾を U_0 とするとその比は次のようになる．

$$\frac{U_H}{U_0} = \frac{2}{\sqrt{\Phi_1^2 + \Phi_2^2}}$$

そこで

$$\Phi_1 = \cos P \cosh Q + \sqrt{\frac{\mu_2 \rho_2}{\mu_1 \rho_1}} (R \cos P \sinh Q - S \sin P \cosh Q)$$

$$\Phi_2 = \sin P \sinh Q + \sqrt{\frac{\mu_2 \rho_2}{\mu_1 \rho_1}} (R \sin P \cosh Q + S \cos P \sinh Q)$$

$$P = \frac{pH \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_2}}}{\left\{1 + \left(\frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right)^2\right\}^{1/4}} \cos\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right)$$

$$Q = \frac{pH \sqrt{\frac{\rho_2}{\mu_2}}}{\left\{1 + \left(\frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right)^2\right\}^{1/4}} \sin\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right)$$

$$R = \frac{\cos\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right) + \frac{\mu_2'}{\mu_2} P \cdot \sin\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right)}{\left\{1 + \left(\frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right)^2\right\}^{1/4}}$$

$$S = \frac{\frac{\mu_2'}{\mu_2} p \cdot \cos\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right) - \sin\left(\frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right)}{\left\{1 + \left(\frac{\mu_2'}{\mu_2} p\right)^2\right\}^{1/4}}$$

$$p = \frac{2\pi}{T}, \quad T: \text{周期}$$

H : 表層の厚さ

ρ_1, ρ_2 : 下層および表層の密度

μ_1, μ_2 : 下層および表層の剛性率

μ_2' : 表層の粘性係数

金井の理論式にしたがって図6の2つのモデルについて計算をおこなった結果を図7, 図8に示す．この場合の定数については図中に記してある．図7, 図8にそれぞれモデル1, モデル2の場合について表層の粘性係数 $\mu_2' = 10^6$ CGS とし, 表層の厚さを変化させ

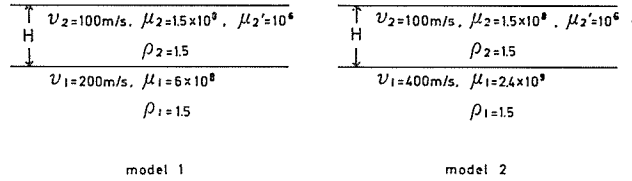


図6 地下構造のモデル

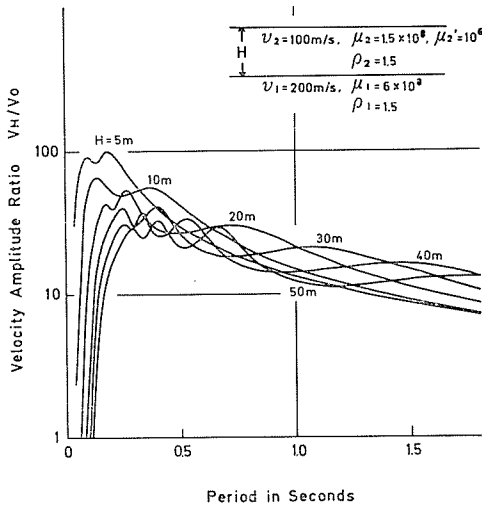


図7 表層の上と下における振巾比と周期の関係における表層の厚さの影響
速度比 $v_1/v_2 = 2$

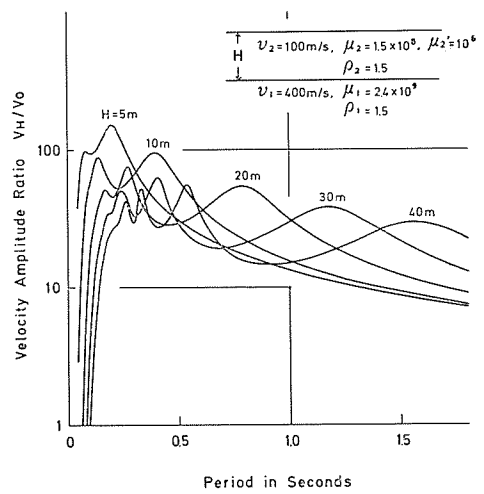
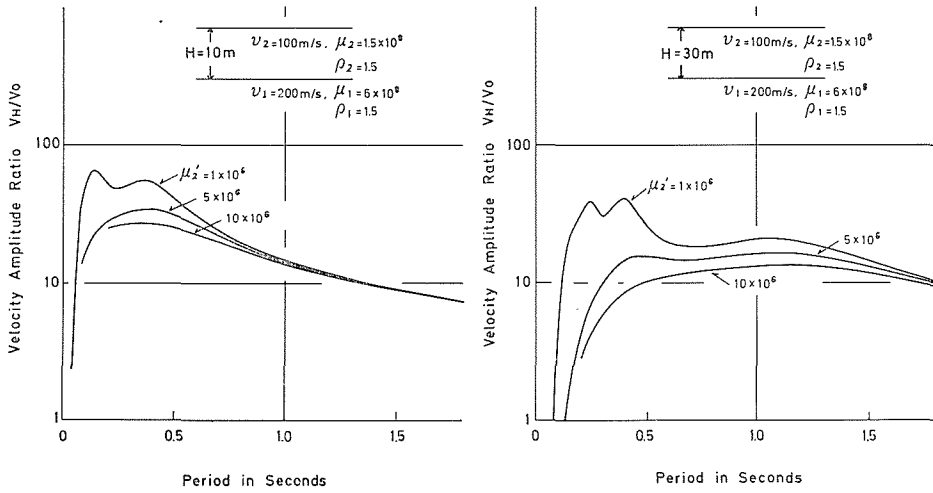


図8 表層の上と下における振巾比と周期の関係における表層の厚さの影響
速度比 $v_1/v_2 = 4$

たとき、速度振巾の比 V_H/V_0^* を縦軸に周期を横軸にとってプロットしたものである。厚さがあつくなると振巾比の極大がいくつかあられるが、これは高次の振動に対応する。2つのモデルにおける相異は表層の粘性係数を一定としたとき、振巾比の極大に対応する振動周期は表層の速度に依存するから両モデルとも同じであるが、極大値のあらわれ方が次数にかかわらず鋭くなる。

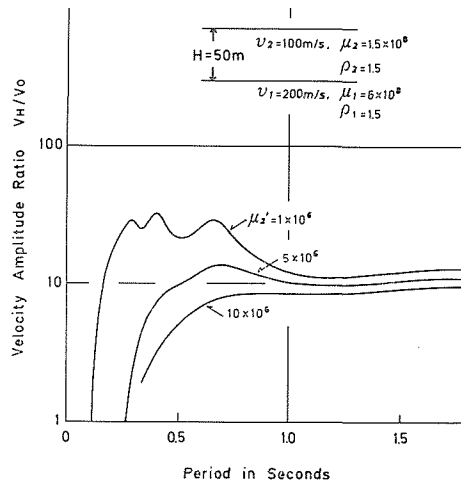
つぎに粘性係数の影響であるが、いま表層の厚さをたとえば10m, 30m, 50mとしてそれぞれの場合に表層の粘性係数 μ_2' を 1×10^6 , 5×10^6 , 10×10^6 CGS と変化させて求めた振巾比 V_H/V_0 の図が図9, 図10である。各々の場合について粘性係数が大きくなるとこれまで大きかった固有振動数に相当する周期の山はゆるやかになり、2.に述べた基本周期と高次の周期の関係が $1 : 1/3 : 1/5 : \dots$ の比率より小さくなる。すなわち図4の傾向がみられる。さらに粘性係数が大きくなるとある周期以上では全体でほぼ平らとなり特

* 前出の金井の式は変位についての式であるので速度をあらわすために $2\pi/T$ をかけたものである。



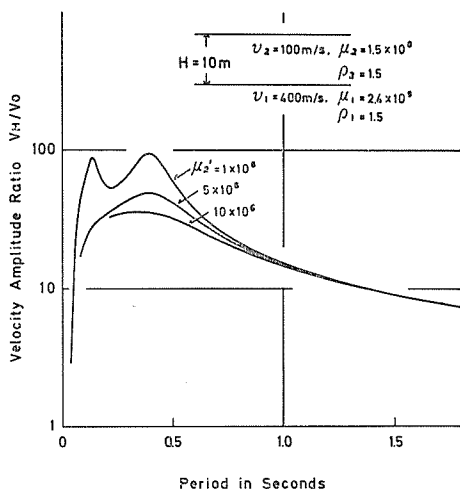
(a) 表層の厚さ10mの場合

(b) 表層の厚さ30mの場合

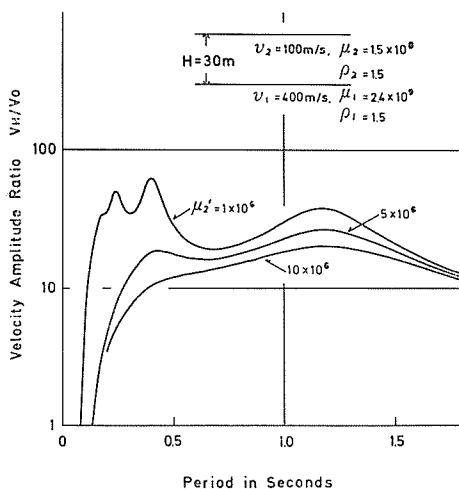


(c) 表層の厚さ50mの場合

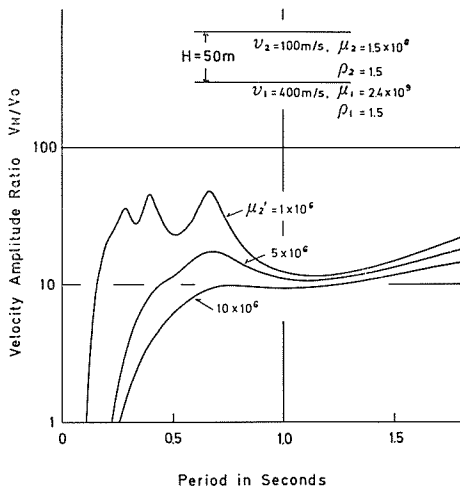
図9 振巾比と周期の関係における表層の粘性係数の影響 (model 1 の場合)



(a) 表層の厚さ10mの場合



(b) 表層の厚さ30mの場合



(c) 表層の厚さ50mの場合

図10 振巾比と周期の関係における粘性係数の影響 (model 2 の場合)

定の周期の卓越が消えてくる。もし地下構造が決定されているならば、常時微動より求めたスペクトルをこれらの理論から得られた振巾比—周期曲線と比較して表層の粘性係数を決定することができる。

4. スペクトルと表層における粘性の影響

図9, 図10からみてスペクトルの形が粘性係数によって変化することが分かったので、さきに分類したa型, b型, c型を説明することができる。もし同じ地下構造で説明するならばa型からb型への移行は表層の粘性が大きくなったためと解釈でき、さらにc型のようにスペクトルにいくつかの高次の振動の山ができるのは、同じ地下構造

でも表層の厚さのみがあつくなるためであろうという定性的な結論をすることは先の論理計算からいえる。

図2に示したスペクトルのa型の中、No.12地点を除いて長周期の部分にやや卓越した振巾成分がみられ、したがってa, b, cの3つの型も地下構造の相異は小さいとするならば、図9, 図10のように粘性係数の大小でスペクトルの型を説明できる。実際には13点の

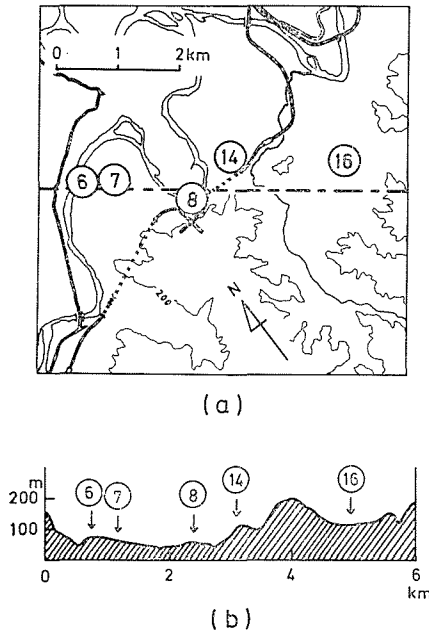


図11 地すべり地付近の地形の平面および断面図と観測点 ×印は地すべり地点

に相当することが推察され、図9(b)、図10(b)の粘性係数の変化による振巾比を観測から得たスペクトルと比較してみることができる。

図11(b)に地すべり周辺の No. 6, 7, 8, 14, 16 を結ぶ地点は一直線上にのっていないが、大体の断面を示すものである。スペクトルの形は No. 8 地点を境として逆に変化しているが、No. 6, 7 地点は平地部、No. 8, 14, 16 地点は約20~30m 高くなった山地部になっている。No. 6, 7 のスペクトルでは粘性係数が大きくなっており、No. 14, 16 地点では逆に小さいところに対応する。No. 8 地点は2つのグループの間において、スペクトルの形が a 型から b 型に変る地点となっている。いままし地すべり地域において、スペクトルの b 型を安定なところと解釈するならば、a 型から b 型に移行する。そしてその中間のところ No. 8 地点の c 型が対応し、地すべり現象を表層の粘性係数の変化によって説明しようというわけである。推定される粘性係数の変化は $5 \times 10^5 \sim 5 \times 10^6$ CGS の範囲であろうと思われる。

5. 水平・垂直成分のスペクトル振巾

常時微動の観測から得られたスペクトルの理論的検討を SH 波についておこなったが、

* 山田らの報告ではすべり面は地表下 15~20m の深さと推定しているが、すべり面の深さと現在得られる表層の厚さとの関係はいまのところ分らない。

観測から得られたスペクトルを地下構造、表層の厚さ、粘性係数といった要素を入れて関係づけたいのであるが、地下構造が不明のため、現状ではむづかしい。したがって図11に示すような地すべり地のごく周辺について観測点 No. 6, 7, 8, 14, 16 のスペクトルについて議論してみる。表1からみると卓越周期は短かい方で約0.4秒、長い方で約1.2秒となり5つの地点間でそれ程差はない。スペクトル型は No. 6, 7 は b 型、No. 14, 16 は a 型 No. 8 は c 型となっている。これらの結果を図11を参照して、図2のNo. 6, 7, 8, 14, 16 のスペクトルをみると明らかに地すべり地点近傍を境として変化しているのに気付く。

図11の地域において5つの観測点の卓越周期 $T_1=1.2$ 秒、 $T_2=0.4$ 秒で一定とみると地下構造は第1次近似としてほぼ同じであると考える。しかし地下構造は分っていないが、実際には図6のモデル1か、モデル1と2の中間位があてはまるものではないかと考えると、図9、図10からみて表層の厚さは約 30m*

常時微動は、水平方向のみならず、垂直方向の運動もすることは図2のスペクトルからも明らかである。したがって水平、垂直両成分についてスペクトル振巾を比較せねばならない。一般に山間部の表土層のあついところでは垂直成分は水平成分に比べてかなり小さく、逆に地盤のよい都市平野部では垂直成分は水平成分とほぼ同じかあるいは約1.5倍程度に大きい。本論文におけるよい例は No.12 地点の川口市南部におけるスペクトルである。

常時微動の伝播性を議論するときに出てくるのは表面波の伝播という考えであり、Love 波あるいは Rayleigh 波によって代表される。一般には両者が考慮されねばならないであろうが、常時微動が表面波の性質をもつとしたとき、地盤によって Love 波と Rayleigh 波のエネルギー比が異ると想像されるが、いまのところそれについてはよく分っていない。ここではもし地すべり地周辺で Rayleigh 波のエネルギーを同じであるとしあとの残りは Love 波的な伝播をするエネルギーだと考える。すると水平方向の運動の大きいところはすなわち Love 波の卓越したところとなる。ここでは定量的な計算はしていないが、図11における No. 14, 16 地点はスペクトルの形は No. 12 地点と同じ a 型ではあっても、卓越周期と水平、垂直のスペクトル成分の振巾の違いから区別され、地盤の相違を裏付ける。さらに No. 6, 8 地点の水平、垂直のスペクトル振巾を比較すると、振巾は両者ほぼ等しい。これは山間部におけるスペクトルの概念の例外となる。これはむしろ前述のスペクトルの形と粘性係数の議論にしたように、スペクトルの c 型にあっては粘性係数の大きくなった場合で、地盤の強度の議論はともかくとして安定化したために表面波の伝播性を考えるならば Rayleigh 波の伝播しやすい地盤といえる。

これらのことからスペクトルの形について粘性の小さい場合は水平方向の運動を促す結果となり、表面波の伝播を考えるなら Love 波的な運動をすることになり、一方粘性が大きい場合は Rayleigh 波的な伝播が卓越するのではないかと思われる。これは地すべりということを考えると極めてよい事実の裏付となる。

6. 結 論

常時微動により地すべり地周辺の振動特性をしらべた結果、スペクトルにあらわれた2つの卓越周期 $T_1=1.2$ 秒、 $T_2=0.4$ 秒について考えると、表層の固有振動周期の中、第1、第2次の固有周期に対応する。

それぞれの固有振動周期についてのスペクトル振巾について2層構造を仮定したとき、表層に粘性係数を考慮すると、その変化が説明される。地すべり地周辺の5つの点をえらんだ範囲では、地すべり地点を境としてスペクトルの形が変化している。その変化について粘性係数を推定すると地すべり地点より上方の山側ではほぼ 5×10^5 CGS、下側の平地部では 5×10^6 CGS となる。またスペクトル振巾についてもそれと同様に対応して上方の山側ではその反対方向の下側に比して、水平成分が垂直成分より大きくなっている。このことは粘性係数が大きく、かつ常時微動の動きで垂直成分が比較的卓越するところでは地盤は安定しているとみることができ、またその逆は不安定であろうと思われる。この2つの地域に分れたその中間が今回の地すべり地点に相当していた。

本論文中の計算および製図に尽力して載いた、中村孝道氏、小泉宇喜嬢に厚く謝意を表す。また本研究にあたっては文部省科学研究費補助金を用いた。

参 考 文 献

- 赤松 敬 (1956) : 微動について, 地震, 第2輯, 9, 21.
赤松 敬 (1958) : 微動について, II, 地震, 第2輯, 11, 40.
Ishimoto, M. (1937) : Observation sur les Secouses d'une petite Amplitude, Bull. Earthq. Res. Inst., 15, 697.
Kanai, K., T. Tanaka and K. Osada (1954) : Measurement of the Micro-tremor, I., Bull. Earthq. Res. Inst., 32, 199.
Kanai, K. (1950) : The Effect of Soil Viscosity of Surface Layer on the Earthquake Movements, Bull. Earthq. Res. Inst., 28, 31.
野越三雄, 五十嵐享 (1970) : 微動の伝播性, 地震, 第2輯, 23, 264.
野越三雄, 五十嵐享 (1970) : 微動の振巾特性, 地震, 第2輯, 23, 281.
Tamaki, I. (1967) : The Dominant Period of Microtremors and its Application to the Investigation of Landslides, Proc. 3rd Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 353, Haifa, Israel.
山田剛二, 小橋澄治, 草野国重, 久保村圭助 (1970) : 飯山線高場山トンネルの地すべりによる崩壊, 鉄研報告, 706号.
山田剛二, 小橋澄治, 草野国重, (1971) : 高場山トンネルの地すべりによる崩壊, 地すべり, 25号, 11.

Summary

On the Characteristics of Microtremors in and near Landslide Area—The Landslide of Takabayama, Niigata Prefecture

Hiromu SIMA and Fumio NOMURA

(Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering)

The analysis was made of the microtremors which were observed at 13 stations in the area surrounding the Takabayama tunnel destroyed by the landslide in January, 1970.

The predominant period of microtremors is determined from the spectra, which is used to illustrate the dynamic behavior of underground structure. As given in Table 1, the predominant period of about 0.3 to 0.5 sec. estimated in the shorter period range agrees to that generally observed in the mountains overlaying soft soil. Moreover, another predominant period is found to be about 1.0 to 1.2 sec. in the longer period range of the same spectra. From the correlation of the two predominant periods at each station shown in Fig. 4, it may be considered that the periods of about 0.3~0.5 sec. and about 1.0~1.2 sec. are corresponding to the first and the second mode oscillations in the underground structure respectively.

The relative variation of spectral amplitude with the location of observation is discussed mainly for the two predominant periods, and is explained to be caused by the effect of viscosity in the superficial layer on the lower medium. It seems that the coefficient of viscosity varies from about 5×10^5 to 5×10^6 CGS on the boundary of the landslide area, the value in the mountain range being smaller than in the plain.