

常時微動測定による地すべり地盤調査の一手法

A METHOD FOR SURVEYING GROUND CONDITIONS IN
LAND-SLIDE AREA BY MEANS OF MICROTREMORS泉谷 恭 男*・島 垣**
By Yasuo IZUTANI and Hiromu SIMA

1. はじめに

地すべり地の地盤の状態を知る手段として、最近、常時微動記録の解析が行われてきている^{1),2)}。ところが現在までのところ、常時微動記録の解析手法としては、地震対策のために都市地盤において通常用いられている手法^{3),4)}をそのまま適用している場合がほとんどである。しかも、得られた成果をみると、常時微動記録解析によって推定された地下構造とボーリング調査や物理探査によって推定されたものがうまく対応するかどうかを調べるにとどまっている。地すべり地において観測した常時微動記録が都市地盤における記録と異なる最大の点は、水平動成分において、都市地盤上での記録振幅はあらゆる方向に同程度の大きさを示すのに対し、地すべり地での記録振幅はある1つの方向に卓越する場合が多いことである。また、振幅の卓越する方向が地すべり地の地表においてみられるクラック群の走向にほぼ直交することも確認されている⁵⁾。図-1には例として、常時微動記録の振幅の卓越する方向の成分 (x -component) と、それに直交する方向の成分 (y -component) のスペクトルを示したが、見た目にも互いかなり異なっている。スペクトル図においてピークをとる周波数が振動方向によって異なることがあるのでは、地すべり地における常時微動記録の解析に都市地盤における手法を適用するに際して非常に都合が悪い。

筆者らは、地すべり地における常時微動特性をむしろ利用するような解析手法について検討してきた。その結果、地すべり地の地盤は地表付近に存在するクラック群のために異方性体となっており、基盤から入射してくる波のスペクトルが振動方向によって変化しないものであっても地表において観測される常時微動にはそのような

特性が現われる、との仮説の上に立って、地表においてみられるクラック群の到達している平均的な深さと、クラックの混み具合とを推定できる解析手法を見出した。この解析手法を長野県奈良尾地すべり地での常時微動記録に適用し、一応の成果を得てすでに発表した⁶⁾。その後、この解析手法を適用できるための条件などについて検討していたが、その過程において、前論文⁶⁾で用いた手法に若干の欠点があることが明らかになった。今回は、その欠点を改善するとともに、解析結果の信頼性を確かめるための数値実験結果について報告する。

2. 解析手法の改善

まず、前論文⁶⁾で適用した解析手法の概略を説明する。図-2には地盤モデルを示す。各層は深部より新鮮岩層、風化岩層、崩土層に対応する。崩土層上部はクラック群の存在を考慮して x 軸に関して回転対称な異方性体で近似する。この異方性体の応力 p とひずみ e の関

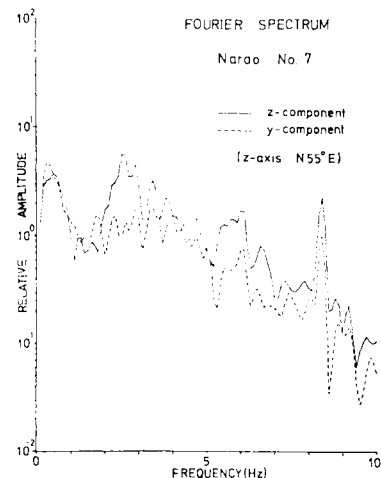


図-1 観測されたスペクトル

* 正会員 理修 信州大学助手 工学部土木工学科

** 正会員 理博 信州大学教授 工学部土木工学科

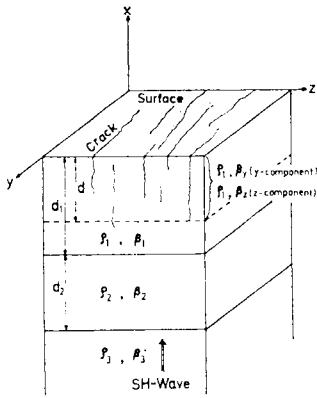


図-2 地盤モデル

係は、

$$\begin{bmatrix} p_{xx} \\ p_{yy} \\ p_{zz} \\ p_{yz} \\ p_{zx} \\ p_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{12} & c_{11} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ c_{13} & c_{13} & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (c_{11}-c_{12})/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{yz} \\ e_{zx} \\ e_{xy} \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表わされ、 x 方向に伝わる S 波のうち y 方向に振動する波の速度 $\beta_y (= \sqrt{(c_{11}-c_{12})/2\rho})$ は z 方向に振動する波の速度 $\beta_z (= \sqrt{c_{44}/\rho})$ より大きい⁷⁾。層厚 (d_1, d_2)、密度 (ρ_1, ρ_2, ρ_3) はボーリング資料より与え、S 波速度を ($\beta_1, \beta_2, \beta_3$) = (100, 200, 400 m/s)、また $\beta_y = \beta_1$ と仮定した。この解析手法の根拠をなすものは次の 2 つの仮定である。

- i) 常時微動は基盤からの SH 波垂直入射に対する地盤の応答である。
- ii) 常時微動の源は時間的、空間的にランダムに分布しており、基盤より入射する波の y, z 成分のスペクトルは相等しい。

これらの仮定のもとに、2 つのパラメーター (d, β_z) を変化させつつ地盤応答を計算し、観測されたスペクトルにみられる特徴を説明しようというわけである。

前論文⁶⁾においては、観測された y, z 成分のスペクトル比 $S_z(\omega)/S_y(\omega)$ と地盤の応答比 $H_z(\omega)/H_y(\omega)$ の一致程度を 0.1 Hz から 10 Hz までの 0.1 Hz ごとの値を用いて、

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{100} \sum_{i=1}^{100} [\{S_z(\omega_i)/S_y(\omega_i)\} - \{H_z(\omega_i)/H_y(\omega_i)\}]^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

を計算することにより評価し、 σ の最大値を与えるパラメーター (d, β_z) を求めた。しかしながら、この方法ではスペクトル比を計算する際に y, z 成分のどちらを分母または分子にとるかによって σ の値に違いを生じる。そこで、この欠点を改善するために、入射波のスペ

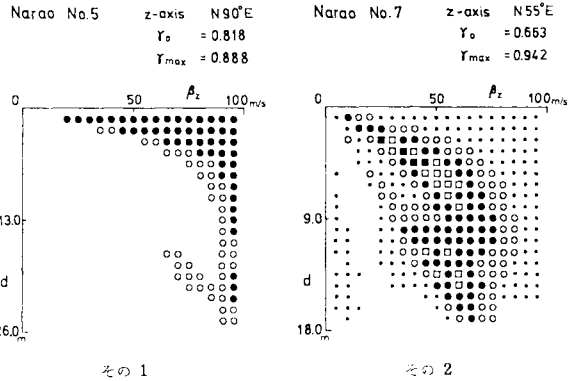


図-3 相関係数マップ

クトルの y, z 成分を $S_y(\omega)/H_y(\omega), S_z(\omega)/H_z(\omega)$ によって計算し、それらの一致程度からパラメーター (d, β_z) の妥当性を判定することにした。ここで、 $S_y(\omega)/H_y(\omega)$ と $S_z(\omega)/H_z(\omega)$ の一致程度は 0.1 Hz ごとの値による相関係数 r の大きさで評価する。

例として、奈良尾地すべり地 No. 5, 7 地点の結果を図-3 に示した。計算に用いた (d, β_z) の位置に各シンボル ■ ($0.925 \leq r$)、□ ($0.9 \leq r < 0.925$)、● ($0.85 \leq r < 0.9$)、○ ($0.8 \leq r < 0.85$)、• ($r < 0.8$) を描くことにより r の値を示した。各地点での相関係数マップの右上に示した r_0 の値は観測スペクトル $S_y(\omega)$ と $S_z(\omega)$ の相関係数の値である。相関係数マップには r_0 より大きい相関係数が得られた場合についてのみ表示した。 r_{max} は得られた相関係数の最大値である。相関係数の値に注目する限りどちらの観測点のものについても $r_0 < r_{max}$ であるが、相関係数マップ上でのシンボルの分布状態に注目すると大きな違いがある。No. 5 地点のように d が小さく、 β_z が大きい位置に同程度の相関係数を意味するシンボルが広く分布する場合は、崩土層上部を単純な異方性体で近似するだけでは観測された $y,$

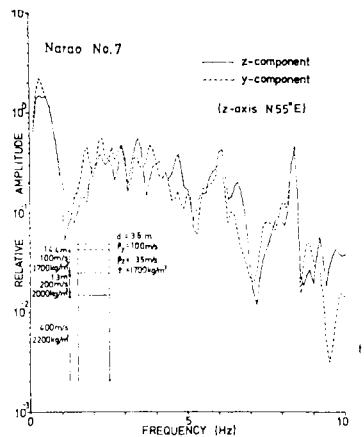


図-4 推定された入射波のスペクトル

z 成分のスペクトルの相違を説明できなかったことを意味する。それに対して、No. 7 地点のように r_{max} を与える (d, β_z) の位置から離れるに従って r の値が小さくなっている場合には、崩土層上部を異方性体で近似することの妥当性が支持されるとともに、その異方性体の厚さ d 、異方性の程度に関するパラメーター β_z が得られたことを意味する。今回の結果は前論文⁹⁾の結果に比べて d の値が小さくなる傾向がある。図-4 に相関係数が最大となる場合の入射波のスペクトルと地盤柱状図の一例を示した。

3. 解析手法および結果の信頼性について

(1) 層パラメーターの見積り間違いの影響

ボーリング資料を参考にして与える密度にはあまり問題はないが、不確かな要素の大きい層厚と S 波速度の見積り違いが結果に対してどの程度の影響を与えるのかを調べておく必要がある。まず、入射波のスペクトルとして、図-4 のスペクトル形状を参考にして、0.1 Hz から 10 Hz まで 0.1 Hz ごとに、

$$A_y(\omega_i) = A_z(\omega_i) = (2\pi/\omega_i) + r_i \dots \dots \dots (3)$$

の値を与える。ここで r_i は平均値 0、標準偏差 0.1 の正規分布に従う乱数である。次に層パラメーター (ρ_1, ρ_2, ρ_3) 、 (d_1, d_2) 、 $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ および異方性体のパラメーター $\beta_y = \beta_1$ 、 (d^T, β_z^T) を与えて $H_y(\omega)$ 、 $H_z(\omega)$ を計算する。さらに、

$$\left. \begin{aligned} S_y^T(\omega) &= A_y(\omega) \cdot H_y(\omega) \\ S_z^T(\omega) &= A_z(\omega) \cdot H_z(\omega) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

の関係から得られた $S_y^T(\omega)$ と $S_z^T(\omega)$ を観測されたスペクトルに相当すると考える。このような準備をした後、層パラメーターを正しく $(S_y^T(\omega), S_z^T(\omega))$ を計算するときに用いた値どおりに与えた場合、また、見積り間違っただけのおおの 20% 増減した場合などについて相関係数マップを求めた。

当然のことながら層パラメーターを正しく与えた場合には $(d, \beta_z) = (d^T, \beta_z^T)$ のところで $r=1.0$ となる。パラメーターのどれかに見積り間違いがあった場合には一般に $r_{max} < 1.0$ となるが、 $(d, \beta_z) = (d^T, \beta_z^T)$ のところで相関係数が最大値をとる場合には結果に大した影響を与えなかったと考える。検討結果をまとめてみると、

- i) d_1 または β_1 を 20% 見積り間違っても概して正しい結果が得られるが、他のパラメーターの見積り間違いとの関連で結果に影響する場合もある。
- ii) d_2, β_2, β_3 の 20% の見積り間違いは結果に対して大した影響を与えない。

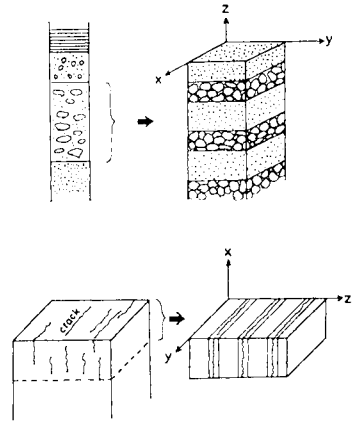


図-5 砂礫層(上図)と地すべり地の表層(下図)のモデル化

つまり、最も重要な層パラメーターは d_1 と β_1 である。

(2) 異方性体のパラメーターについて

結果として得られた β_z は、No. 7 地点を例にとれば、 $\beta_y=100$ m/s に対して $\beta_z=35$ m/s とかなり小さい値をとる。つまり $\beta_y/\beta_z=2.9$ である。 β_y/β_z の値として現実にとどの程度まで考え得るものか検討する。図-5 右上図は水平に互層を成した地盤を示している。この地盤は鉛直な z 軸に関して回転対称な異方性体としての性質を示す。 x 軸方向に進行する S 波の y, z 成分の速度はおのこの、

$$\beta_y^x = \sqrt{(c_{11} - c_{12})/2\rho}, \beta_z^x = \sqrt{c_{44}/\rho} \dots \dots \dots (5)$$

と与えられる⁷⁾。また z 軸方向に進行する S 波速度は、

$$\beta_x^z = \beta_y^z = \sqrt{c_{44}/\rho} \dots \dots \dots (6)$$

であり、その値は β_z^x に等しい。Kitsunozaki⁸⁾ は図-5 左上図の砂礫層の S 波速度を実測した結果として $\beta_y^x/\beta_z^x=1.8$ という値を得た。そして、この S 波速度の大きな違いを説明するために砂礫層を図-5 右上図の互層モデルで近似し、砂層と礫層の厚さの比と剛性率の比の組合せ方によって十分に説明できるとしている。

今回の地すべり地の場合は、図-5 左下図のような表層部分を右下図のようにモデル化したことに相当する。

z 軸は水平で、正常な崩土が互層の片方に対応し、他方にはクラックの近傍の崩土に対応する。Postma⁹⁾ によれば、厚さ h_1, h_2 、剛性率 μ_1, μ_2 の媒質が互層をなしている場合の弾性定数は、

$$\left. \begin{aligned} c_{44} &= (h_1 + h_2) \mu_1 \mu_2 / (h_1 \mu_2 + h_2 \mu_1) \\ (c_{11} - c_{12})/2 &= (h_1 \mu_1 + h_2 \mu_2) / (h_1 + h_2) \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (7)$$

と与えられる。いまの場合、クラックの入っている近傍のパラメーター h_2, μ_2 は正常な崩土のパラメーター h_1, μ_1 に比べてかなり小さいと思われる。仮に $h_2/h_1=1/10$ 程度と考えると $\mu_2/\mu_1=1/100$ ならば、

$$\left. \begin{aligned} c_{44} &\doteq (1/10)\mu_1 \\ (c_{11} - c_{12})/2 &\doteq (10/11)\mu_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

となり $\beta_y/\beta_z \doteq 3.0$ となる。クラックの入っている近傍の剛性率 μ_2 が μ_1 に比べてこの程度に小さいことは現実であり得るであろう。また、相関係数マップを求めるときに $\beta_y = \beta_1$ を仮定していたが、その妥当性もこの考察によって裏付けられている。

(3) 解析手法の適用限界について

本解析手法は先に述べたように、常時微動の本質に関する2つの仮定と地表層上部を異方性体で近似した地盤モデルとに依存している。それら2つの仮定が十分に妥当なものであることはよく知られている¹⁰⁾。また、地すべり地におけるクラック群の観察とクラック群の走向に直交する方向に微動振幅が卓越するという観測事実とから、地盤モデルは十分に納得できるものである。ところが、仮定やモデルに依存している以上、それらを満足しないような状況のもとでの観測記録に本解析手法を適用することはできない。たとえば、特定の波動源が近くにある場合、上下動の振幅が非常に大きくて常時微動を伝播性表面波として扱った方がよい場合、地表変形がはなはだしくて地表層上部を単純な異方性体で近似するのが無理な場合などである。また、解析には地盤の層パラメーターが必要であり、数値実験によって検討したとおり、その上部にクラックを含んでいる層（今回の場合は崩土層）の厚さとS波速度の見積りが特に重要である。

今回の解析の場合について検討してみると、市街地から遠く離れた地域であり、概して静かな状態で観測できたこと、また上下動振幅が水平動振幅の1/10程度であったことなどから2つの仮定についてはほぼ満足されていたものと思われる。ところが、No. 5地点ではボーリング資料の不足から層厚の見積りがあまり正確でないうえに、地すべり下位部に位置するため土塊の押し出しによって地表変形がはなはだしかった。それに対し、この解析方法ではかなり良好な結果が得られたと思われるNo. 7地点付近は傾斜の緩やかな畑地でクラック群もよくそろった方向に走っており、また、ボーリング資料に

よって比較的正確な層パラメーターが得られていた。

4. ま と め

前論文⁹⁾において提出した常時微動特性に注目して地すべり地の地盤の状態を推定するという解析手法に改善を加えた。さらに、解析結果の信頼性、解析手法の適用限界について検討し、本解析手法を実用に供する場合の留意点について示した。

本研究は昭和54年度文部省科学研究費の補助を受けた。また、数値計算のために、信州大学工学部データステーションを通じて東京大学大型計算機 HITAC 8800/8700 を利用した。

参 考 文 献

- 1) 島 垣：常時微動と地すべり地への応用，地すべり，第9巻，第4号，pp. 1~8, 1973.
- 2) 松川忠司・菊地信行・神田 真：常時微動測定による地すべり調査，土木学会第33回年次学術講演会講演概要集第3部，(III-81)，pp. 148~149, 昭和53年9月.
- 3) Kanai, K. and T. Tanaka : On microtremors VIII, Bull. Earthq. Res. Inst., Univ. of Tokyo, Vol. 39, pp. 97~114, 1961.
- 4) 成瀬聖慈・出原孝示・竹内文朗・太田 裕・鏡味洋史・後藤典俊・塩野計司・工藤一嘉・坂尻直巳：やや長周期の微動観測と地震工学への適用(2)——微動の卓越周期と地下構造の関係——，地震，第2輯，第29巻，pp. 25~32, 1976.
- 5) 和田卓彦・加茂幸介・古沢 保・尾上謙介：地すべり地のクラック群の雑微動に対する影響，地震，第2輯，第26巻，pp. 316~325, 1973.
- 6) 泉谷恭男・島 垣：奈良尾地すべり地における常時微動特性，地すべり，第15巻，第3号，pp. 17~22, 1978.
- 7) Anderson, D.L. : Elastic wave propagation in layered anisotropic media, J. Geophys. Res., Vol. 66, pp. 2953~2963, 1961.
- 8) Kitsunozaki, C. : Field experimental study of shear waves and the related problems, Contributions, Geophys. Inst., Kyoto Univ., No. 11, pp. 103~177, 1971.
- 9) Postma, G.W. : Wave propagation in a stratified medium, Geophysics, Vol. 20, pp. 780~806, 1955.
- 10) 金井 清：地震工学，共立出版，pp. 97~107, 1969.

(1980.5.19・受付)