

## 長野盆地の堤防の常時微動について\*

服部 秀人\*\*・国井 隆弘\*\*\*

## Study on Microtremors of Levee in the Nagano-basin.

Hideto HATTORI, Takahiro KUNII

The observations of microtremors were carried out at 55 spots within 2.75km along the levee of the Chikuma-river in the Nagano-basin. Microtremors were observed simultaneously on the top and the toe of the slope of the levee.

From the spectrum ratio of microtremors at the top and the toe of the slope, it was confirmed, at many observation spots, that the levee is in a state of plane strain. So, based on the spectrum ratio, the rigidity of the levee was tried to estimate by using the Frequency Response Function which was calculated by the Finite Element Method. And it was resumed that the former river channel exists under the spots of the levee, considering the characteristics of amplitude and predominant frequency of microtremors and the information of old map of the area.

## 1. はじめに

長野盆地内を流れる千曲川は、両側の山地により形成された大小の扇状地の扇端部に挟まれている。筆者らは数年来、当盆地の代表的な扇状地である浅川扇状地において常時微動の観測を行い、地盤の振動特性を調べてきた<sup>(4)</sup>等。扇端部は、千曲川の自然堤防や後背湿地により複雑な地盤の変化を呈する。そこで今回は、浅川扇状地扇端部に築造されている千曲川堤防に着目し、その地盤と堤体の常時微動観測を行って、それらの微動特性を調べた。

常時微動を用いて堤防の動特性を調べた報告は意外に少なく、筆者らの知り得た範囲では浅田らが八郎瀧堤防の耐震性を検討した際に、堤体の震害と地盤との関係について微動データを用いて考察している<sup>(1)</sup>程度であり、堤体自体の動的挙動を常時微動を用いて調べた例は見当たらない。

本研究では、堤防の天端と法尻において常時微動の同時観測を行い、それらのスペクトル比により、堤体の動的挙動を調べた。その結果多くの観測点において、堤体が平面ひずみ場の挙動をしていることが確認された。そこで、有限要素法により、平面ひずみ問題としての周波数応答解析を行って、堤体の剛性の同定を試みた。また、法尻における微動の振幅と卓越振動数の変化をもとに、大正元年の地形図<sup>(3)</sup>等を参考にして、旧河道の存在について推察

\* 昭和63年3月 土木学会関東支部 第15回技術研究発表会にて一部発表

\*\* 土木工学科 助教授

\*\*\* 東京都立大学工学部 教授

原稿受付 昭和63年9月30日

した。

## 2. 常時微動観測

### 2-1 観測方法

図1に堤防の測定区間を示す。村山橋から屋島橋に至る左岸堤防約2.75kmについて常時微動の観測を行った。

図2に振動計の配置を示す。i番目の観測点の法尻と天端において、それから50m隔てた

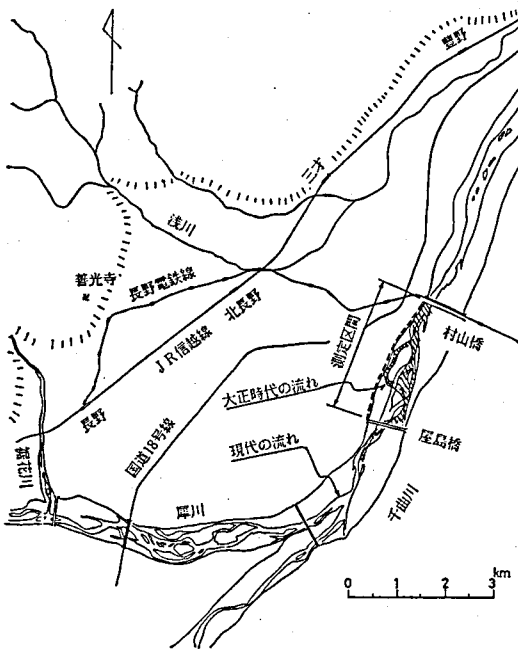


図1 観測地

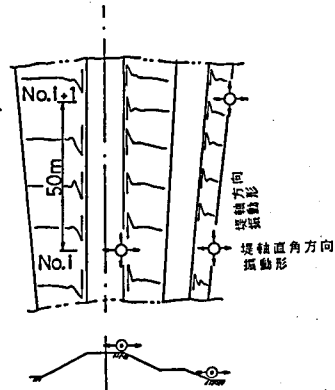


図2 振動計の配置

i+1番目の観測点の法尻において、各々堤軸方向・堤軸直角方向の水平2成分、合計6成分の同時観測を行った。固有周期2秒の振動計を用いて、安定した状態の微動の速度波形を約1分間記録した。

### 2-2 観測結果

#### 2-2-1 応答倍率

観測された速度波形のフーリエスペクトルを求めた。そして、法尻の微動を堤体への入力と見なして、天端と法尻のスペクトル比から、応答倍率を求めた。図3に、各観測点における堤軸方向のスペクトル比と堤軸直角方向のそれを示す。堤軸方向の応答倍率は比較的平坦であり、従って、法尻と天端はほぼ同一の振動をしていると見ることができよう。それに対し、堤軸直角方向の応答倍率には、ほとんどの観測点で、5~6 Hzのあたりに顕著なピークが見られ、堤体の固有の応答が表われているものと思われる。

以上の観測結果から、堤体は、堤軸直角方向にのみ固有の応答を示しており、従って平面ひずみの状態にあると見ることができよう。

#### 2-2-2 法尻地盤における微動の振幅

法尻地盤においては、図2に示すようにi番目とi+1番目の観測点で同時観測を行っているので、観測点相互の相对比较が可能である。法尻における微動の振幅 rms 値を図4に

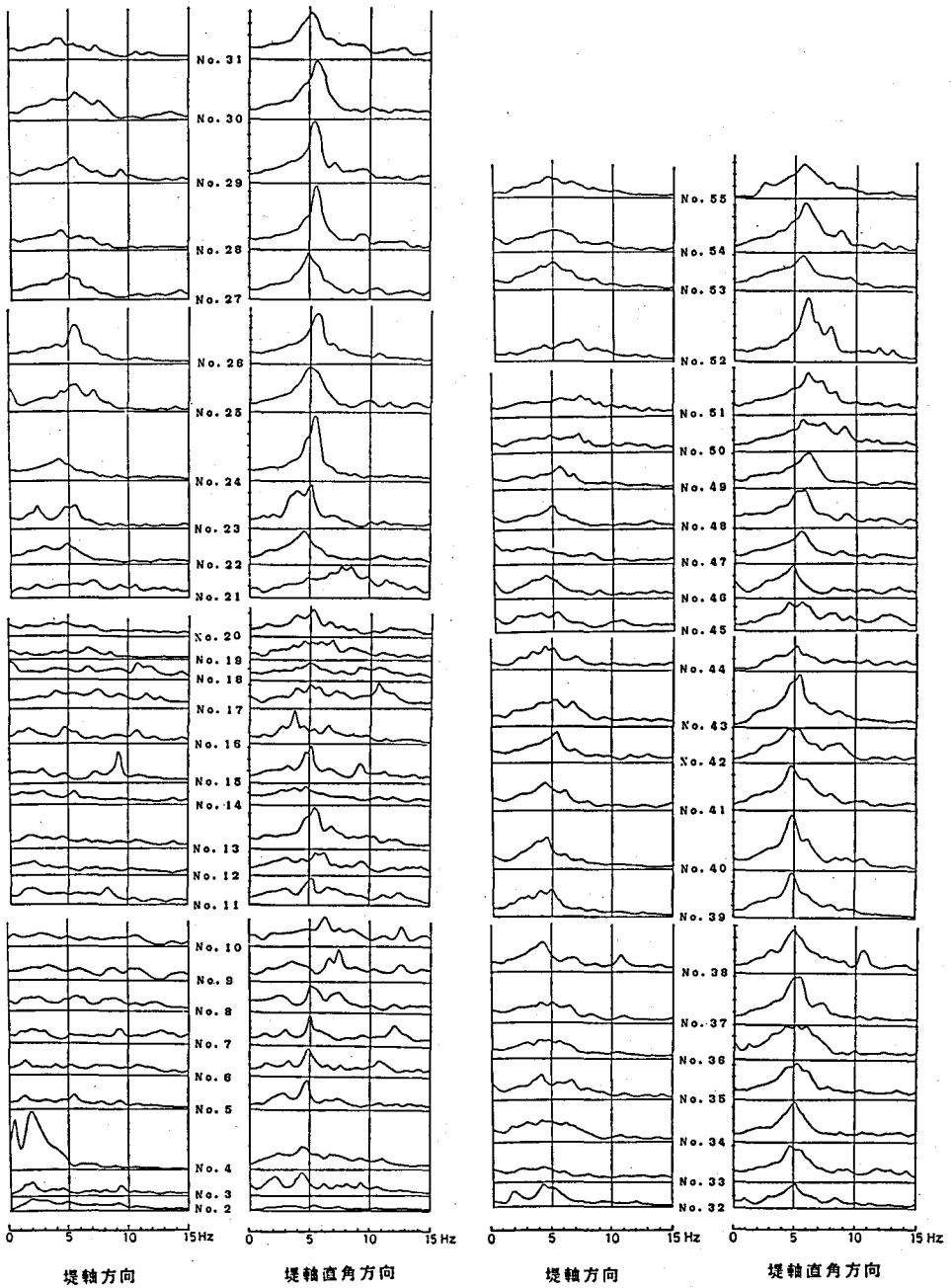


図3 応答倍率 (スペクトル比)

示す。観測点 No. 2 を基準にしたものである。No. 40~No. 50 あたりは極端に振幅が小さい。No. 25~No. 35 にかけては逆に振幅が大きい。No. 2~No. 8 あたりにかけては、村山橋を通過する県道の交通が影響して振幅が大きいのかも知れない。

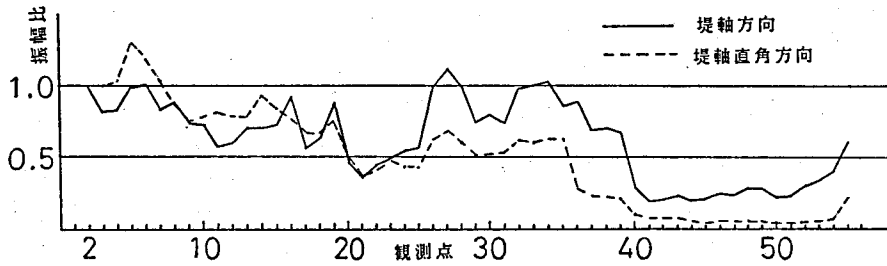


図4 法尻地盤における微動の振幅

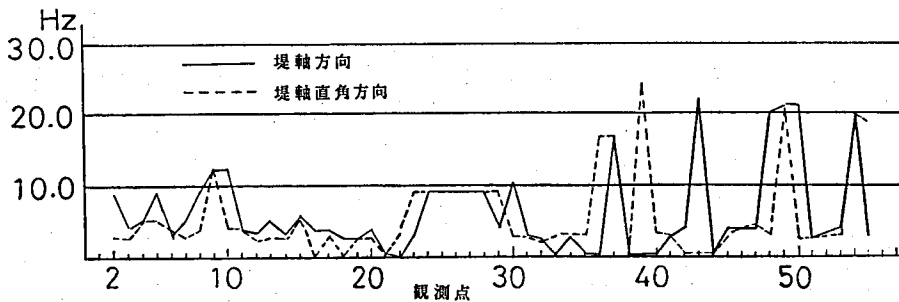


図5 法尻地盤における微動の卓越振動数

2-2-3 法尻地盤における微動の卓越振動数

図5に、スムージングしないスペクトルの卓越振動数を示す。No. 36~No. 55にかけて高周波が目立つ。図4の振幅の小さい区間と対応しており、従ってこの辺りの地盤はかなり堅固であろうと推察される。No. 16~No. 21 および No. 31~No. 36にかけては、比較的低周波であり図4においては、その辺りで振幅が大きくなっていることを考え併せると、地盤が軟弱である可能性がある。このことに関連して、旧河道の存在について後で考察を加える。

3. 堤体の剛性について

3-1 地動入力に対する周波数応答解析

構造系に任意の外力が作用する場合の運動方程式は、一般に次式で与えられる。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\} \dots\dots\dots(1)$$

ただし、[M], [C], [K] はそれぞれ系の質量、減衰、剛性のマトリクス、{x}, {F(t)} はそれぞれ応答変位、時系列外力のベクトルである。

支点に地動入力作用する場合には、変位ベクトル {x} を、既知の入力地動変位 {x<sub>b</sub>} と未知の節点変位 {x} とに分けて考える。すなわち、

$$\{x\} = \begin{Bmatrix} x \\ x_b \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

と置き、式(1)を次のように分ける。

$$\begin{bmatrix} M_1 & M_2 \\ M_3 & M_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & C_2 \\ C_3 & C_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ K_3 & K_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ x_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{(t)} \\ F_{b(t)} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 $\{F_{b(t)}\}$  は支点の未知反力ベクトル、 $\{F_{(t)}\}$  は支点以外の節点に作用する外力ベクトルである。

支点に地動入力のみが作用する場合には、

$$\{F_{(t)}\} = \{0\} \dots\dots\dots(4)$$

である。

さらに、節点変化ベクトル  $\{x\}$  を、準静的変位  $\{x_s\}$  と動的変位  $\{x_d\}$  とに分ける。

$$\{x\} = \{x_s\} + \{x_d\} \dots\dots\dots(5)$$

$\{x_s\}$  は、入力地動  $\{x_d\}$  による静的変位と考え、式(3)の第1式において、慣性項と減衰項を無視した解として、次式で与えられる<sup>(2)</sup>。

$$\{x_s\} = -[K_1]^{-1}[K_2]\{x_b\} \dots\dots\dots(6)$$

以上により、式(3)は、次式のように変形される。

$$[M_1]\{x_d\} + [C_1]\{\dot{x}_d\} + [K_1]\{x_d\} = ([M_1][K_1]^{-1}[K_2] - [M_2])\{x_b\} \dots\dots(7)$$

ただし、右辺に加わる減衰力項は微少につき無視している。

周波数応答解析の場合は、入力地動ベクトル  $\{x_b\}$  を、次式のような周期関数とする。

$$\{x_b\} = \{x_0\} e^{i\omega t} \dots\dots\dots(8)$$

ただし、 $\{x_0\}$  は周期的入力地動の変位振幅ベクトル、 $\omega$  はその円振動数、そして  $i$  は虚数単位である。

周波数応答においては、定常応答を問題とするので、式(7)の定常解を

$$\left. \begin{aligned} \{x_d\} &= \{X_d e^{i(\omega t - \phi)}\} \\ &= \{\bar{X}_d\} e^{i\omega t} \\ &= \{\{p\} - i\{r\}\} e^{i\omega t} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(9)$$

と置く。ただし、 $\{X_d\}$  は応答の変位振幅、 $\{\phi\}$  は入力と応答との位相差、 $\{\bar{X}_d\}$  は両者を一緒に示す複素振幅、そして  $\{p\}$ 、 $\{r\}$  は  $\{\bar{X}_d\}$  の実部と虚部のベクトルである。

式(7)、(8)、および(9)の第2式より

$$\{\bar{X}_d\} = \{([K_1] - \omega^2[M_1] + i\omega[C_1])^{-1}[-\omega^2[M_1][K_1]^{-1}[K_2] - [M_2]]\{x_0\} \dots\dots(10)$$

を得る。

式(10)は複素数の逆マトリクス計算が必要となるので、式(9)の第3式を用いて、実部と虚部に分離して、次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \{p\} &= -\omega^2 \{[K_M] + [C_\omega][K_M]^{-1}[C_\omega]\}^{-1} \{[M_1][K_1]^{-1}[K_2] - [M_2]\}\{x_0\} \\ \{r\} &= [K_M]^{-1}[C_\omega]\{p\} \end{aligned} \right\} \dots\dots(11)$$

ただし、

$$[K_M] = [K_1] - \omega^2 [M_1], [C_\omega] = \omega [C_1] \dots\dots\dots(11)$$

である。よって、動的応答の変位振幅および位相差は次式で与えられる。

$$X_{dk} = \sqrt{p_k^2 + r_k^2} \dots\dots\dots(12)$$

$$\phi_k = \tan^{-1} \frac{r_k}{p_k} \dots\dots\dots(13)$$

ただし、 $k$  は  $\{X_d\}$ ,  $\{\phi\}$  の第  $k$  成分を意味する。

準静的な応答変位  $\{x_s\}$  は、式(6), (8)より

$$\{x_s\} = -[K_1]^{-1} [K_2] \{x_0\} e^{i\omega t} = \{X_s\} e^{i\omega t} \dots\dots\dots(14)$$

となる。ここで、 $\{X_s\}$  は準静的な応答変位振幅を表わす。

従って、応答変位  $\{x\}$  は

$$\{x\} = \{x_s\} + \{x_d\} = (\{X_s\} + \{X_d\} e^{-i\phi}) e^{i\omega t} = \{X\} e^{i\omega t} \dots\dots\dots(15)$$

となり、応答の変位振幅  $\{X\}$  の第  $k$  成分は次式で与えられる。

$$X_k = \sqrt{(X_{s,k} + X_{d,k} \cos \phi_k)^2 + (X_{d,k} \sin \phi_k)^2} \dots\dots\dots(16)$$

### 3-2 周波数応答から見た堤体の剛性

先に2-2-1で考察したように、堤体は平面ひずみの状態にあると考えられるので、前節の手法により、平面ひずみ状態における堤体の周波数応答解析を行ない、観測で得られた応答倍率との比較をもとに、堤体の剛性を推定する方法について述べる。

図6に観測点 No. 30 の要素分割を示す。堤体の下面に一樣に、振幅1の周期地動を入力し、天端の応答を求めた。解析結果を図7に示す。解析に用いた堤体の物理量は、ポアソン比0.49、単位重量  $1.7 \text{gf/cm}^3$  であり、ヤング率  $200 \text{kgf/cm}^2$

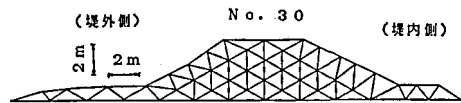


図6 要素分割

$\text{cm}^2$ ,  $224 \text{kgf/cm}^2$  の2例について図示した。減衰は便宜的にレーリー減衰(質量マトリクスの乗定数0.3, 剛性マトリクスの乗定数0.005)を用いた。観測された応答倍率を見ながら

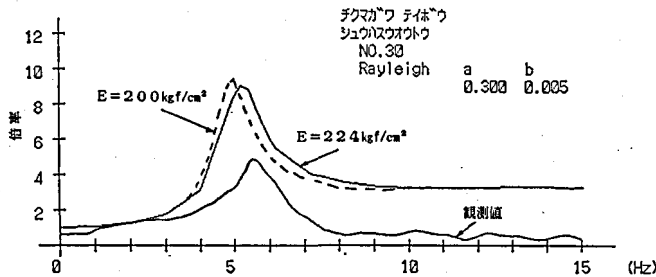


図7 堤体の周波数応答

剛性を変化させて応答曲線のピークが一致するような剛性を見出すことにより、堤体の剛性を推定することができる。

#### 4. 旧河道の存在について

2-2-3で考察したように、観測点 No. 16~No. 21, No. 31~No. 36 の2つの区間では地盤が軟弱である可能性が大きい。大正元年の測図<sup>④</sup>によれば、図1に示したように、河の流れがかなり現在の堤防に接近している。接近箇所は、村山橋の上流約700mまでと、1300~1700mにかけてである。上記の観測点は、村山橋から900~1050mと、1550~1800mにある。No. 16~No. 21 は接近箇所と若干ずれているが、No. 31~No. 36はよく一致している。両者の一致しているこの付近には集落も発達しておらず、また農道の曲がり具合を見ても、昔、この付近に河の流れが存在していたのではないかと考えられるのである。また、この区間の堤内側 1 km 辺りの長池という地名も、後背湿地に由来したものであると思われる。

今回の観測区間内におけるボーリング資料を入手していないので、推測の域を出ないのであるが、常時微動の観測結果と地形図との比較から、かなり可能性が高いと考えている。

#### 5. ま と め

以上、本研究の結果は次のように要約される。

- (1) 堤防の法尻と天端における常時微動の同時観測結果から、堤体が平面ひずみ状態で振動していることが確認された。
- (2) 常時微動から得られた堤体の応答倍率にもとづいて、有限要素法による周波数応答解析を行うことにより、堤体の剛性を推定することができることを示した。
- (3) 堤防の法尻における常時微動の振幅の相対比較と、卓越振動数の変化とから、地盤の振動特性が明らかにされた。
- (4) 常時微動の振動特性と地形図とから、当該堤防の下に旧河道が存在している可能性の大きいことが判明した。

#### 6. あとがき

浅川扇状地の扇端部に位置する千曲川堤防の一部について常時微動観測を行ない、地盤ならびに堤体の振動特性を調べた訳であるが、当該区域の地盤の変化と堤体の動特性についてかなり有効なデータが得られた。

測定区域をさらに拡げてデータを蓄積すると同時に、今後、歴史的資料にも目を向け、また、実地震記録の解析結果等も併せて検討し、当地域の地震防災に関する研究を進めて行きたいと考えている。

謝辞 堤防の資料を提供していただいた建設省千曲川工事事務所の関係各位と、卒業研究でご協力いただいた、山崎正尚、青木 隆、高橋芳民、玉水重幸、中村 博、黒岩 敏、杉浦 剛、斉藤りか、丸山 剛の各氏に心から感謝申し上げます。

#### 参 考 文 献

- (1) 浅田他、軟弱地盤上に築造された八郎潟干拓堤防の耐震性について、土と基礎、12、1975。

- (2) 河島, 動的応答解析, 培風館, 1972.
- (3) 大日本帝国陸地測量部 五万分の一地形図, 大正4年.
- (4) 服部・国井, 扇状地の常時微動について, 土木学会中部支部研究発表会, 1983.
- (5) 服部・国井, 千曲川堤防の常時微動観測, 土木学会関東支部第15回技術研究発表会, 1988.