

# 牧尾ダム堤体の地震時振動特性

正木和明・飯田汲事

## Seismic Characteristics of the Makio Dam

Kazuaki MASAKI and Kumizi IIDA

1976年10月1日18時4分42秒に長野県王滝村西部に発生した地震による牧尾ダム堤体の振動を測定し、速度および変位波形を求め、堤体の振動モードを研究した。またこれらの波形を高速フーリエ変換し、パワースペクトルを求めた。

### 1. はじめに

1976年8月13日以来、牧尾ダムの北西部、王滝村西部に群発地震が発生し始め、8月19日には有感地震の回数は最高の25回を記録した。その後、地震発生数は減少し、10月には有感地震回数は一日当たり0～2回程度になった。しかし、地震計による記録回数は依然多く、一日当たり20～30回であった。そこで著者らはこの機会を利用して、牧尾ダム本体の地震時振動特性を求めることにした。堤体上に6台の地震計を設置し、9月30日から10月2日まで3日間地震観測を行なった。測定期間中23個の地震記録を得ることができたが、そのうち1976年10月1日18時4分42秒に発生した地震の記録を解析したので報告する。この地震の震源およびマグニチュードは不明であるが、規模は比較的小さく、有感地震ではなかった。

### 2. 牧尾ダム概要

牧尾ダムの基礎地盤を図1に示す。ダムの基礎地盤は古生層を主として粘板岩、砂岩、チャートおよびこれらの中に貫入した輝緑岩である。これらの地層の走向は、 $N50^{\circ}E \sim N80^{\circ}E$ で傾斜は $N30^{\circ} \sim N70^{\circ}$ 、即ち、斜め下流に向かって傾斜している。川の中央部には大きな断層があり、これを境にして、左岸は下部からチャート、粘板岩、砂岩の順で分布し、中腹部には数条の平行断層がみられる。また右岸は下部から粘板岩、輝緑岩、チャートの順で分布し、中腹部に一条の断層がみられる。

牧尾ダムの標準断面を図2に示す。牧尾ダムは中心コア型ロックフィルダムで、堤高は河床上81m、基礎岩盤上106m、堤頂長は264m、堤体積は $2,651,000\text{m}^3$ である。のり面は上流側1:3、下流側1:2.25の勾配をもって、10月1日におけるダム平均水位はEL.874mであった。

\* カイン=cm/sec

### 3. 観測方法

地震計は図2に示すように、ダム天ば下流側端(a点)、下流側中腹(b点)および下流側河床(c点)の3点に、ダム軸直交水平動成分と上下動成分をそれぞれ設置した。a点は整地された比較的堅固な地面であるが、b点はロックゾーンを構成するひとつの石塊上の点であり、c点は砂地盤上の点である。各地震計は同軸ケーブルによって天ばに設置された増巾器およびデータレコーダーに接続された。

使用した地震計は振動技研製MTKV-1CおよびMTKH-1Cで、固有周期1秒の動コイル型速度計である。増巾器は同社製TA403を用い、データレコーダーを用いて磁気テープに記録を収録した。磁気テープにはパルス発振器から発振された1秒間隔パルスも同時に収録し、時間目盛とした。JJYも同時に収録し、地震発生時刻を決めた。

ダム左岸の岩盤上に名古屋大学理学部が設置した地震計があり、その記録と比較することにより、得られた振動記録が地震によるものであることを確認した。

### 4. 波形記録

a, b, cの3点において得られたダム軸直交水平動成分および上下動成分の波形記録を図3に示す。S波の立ち上がりは明瞭であり、PS遅延時間は2.5秒である。従って、この地震は牧尾ダム北西に発生している群発地震のひとつであると考えられる。各地点の各成分とも最大速度振巾は4～6ミリカイン\*程度であるが、a地点の水平動成分の振巾がやや大きいことが注目される。

速度波形をカーブリーダーを用いて読みとり、一度デジタル化した後、高速フーリエ積分を実行し変位波形を求めた。この際、読みとり時間間隔は0.01秒とした。

得られたa, b, c3点のダム軸直交水平動成分および

上下動成分の変位波形を図4に示す。各波形とも10秒ないし20秒の長い周期の波がみられるが、これはデジタル化する際のゼロ点のとり方に起因するもので、堤体自身の振動ではないと考えられる。速度波形と比較してみると、変位波形においては短周期成分に比べ長周期成分が卓越してくる傾向があることがわかる。bおよびc点の水平動成分は最大変位振巾が1ミクロン程度であるのに比べて、a点の水平動成分は5ミクロンにもなっている

ことが注目される。即ち、堤頂部において振動が約5倍に増巾されていることがわかる。この傾向は上下動成分についてもみられ、堤頂部において約3倍増巾されていることがわかる。

5. パワースペクトル

得られた速度波形および変位波形を高速フーリエ変換し、パワースペクトルを求めた。波形の読みとり間隔を

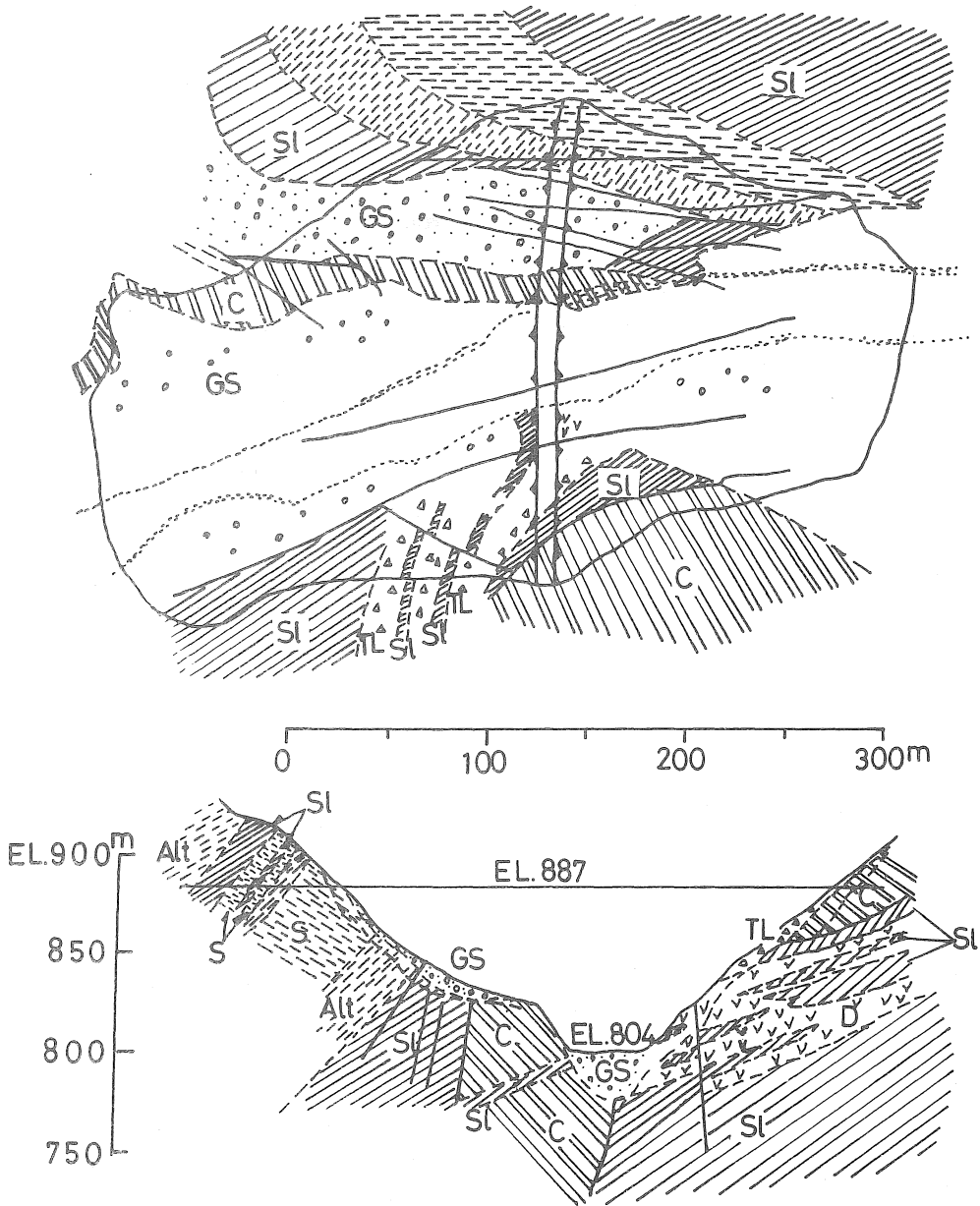


図1 牧尾ダムの基盤地質図

SI: 粘板岩 S: 砂岩 C: チャート D: 輝緑岩 GS: 砂, 礫 Alt: 粘板岩, 砂岩互層

0.01秒にとり、解析時間はP波初動立ち上がりから10秒間とした。

a, b, c 3点の上下動成分およびダム軸直交水平動成分の速度波形について得られたパワースペクトルを図5に示す。c点のスペクトルには6ないし7Hzにピークが

みられる。10Hzより短い周期の波も存在するが、特に卓越した波はみられない。b点のスペクトルには5Hzと13Hz, 更に20Hzにピークがみられる。a点のスペクトルにも5Hz付近にピークがみられるが弱い。a点の水平成分のスペクトルには2.2Hzに鋭いピークが存在するこ

牧尾ダム標準断面図

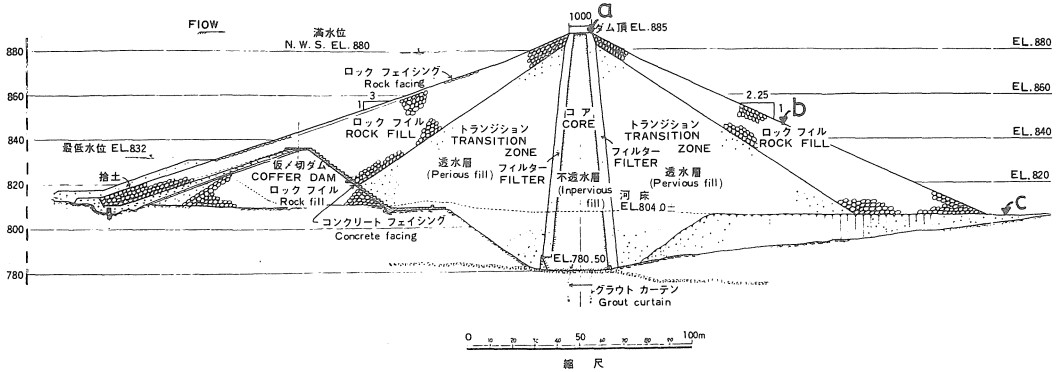


図2 牧尾ダム標準断面図。a, b, cは地震計設置点

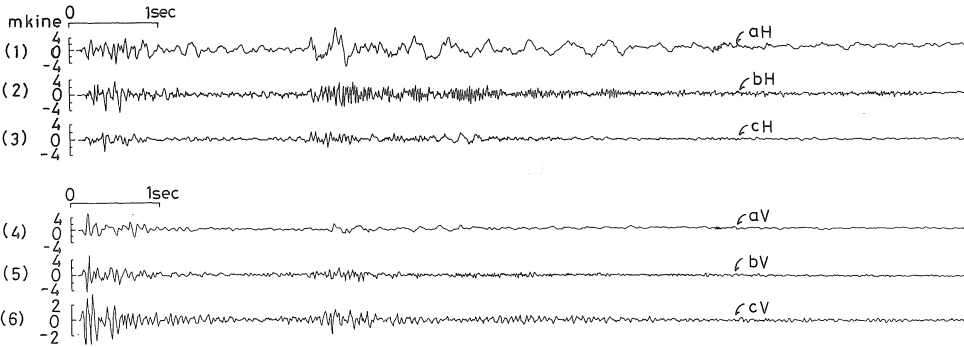


図3 a, b, c点における速度波形。H;ダム軸直交水平動成分, V;上下動成分

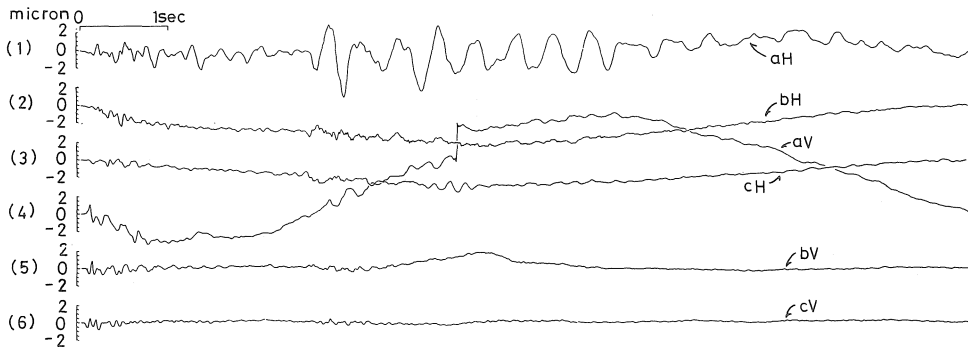


図4 a, b, c点における変位波形。H;ダム軸直交水平動成分, V;上下動成分

とがわかる。

変位波形について得られたパワースペクトルを図6に示す。スペクトルのピークの位置は速度波形について得られたピークの位置と大体一致しているが、スペクトル全体に短周期成分が減少し、長周期成分が卓越してくる。ここでも、a点の水平動成分のスペクトルに2.2Hzの鋭いピークが存在することが注目される。

## 6. 振動モード

得られた変位波形から堤体の振動の様子を描いたのが図7である。図はc点に対するa点、b点の水平相対変位を求めて描いてある。

即ち、a点の水平変位からc点の水平変位を差し引い

た値を堤頂部の水平変位とし、b点の水平変位からc点の水平変位を差し引いた値を堤体中間点の水平変位としてある。ダムの高さおよび変位は図を見易くする為に拡大してある。図はS波による振動の第一波について、即ちP波の立ち上がり後の2.60秒から3.08秒の間の振動について、0.01秒ごとに描いてある。

図7をみるとふたつの振動モードが存在することがわかる。a点とb点が同じ方向に変位を生ずるモードと、a点とb点が逆の方向に変位を生ずるモードとである。ただし、後者において堤体が折れ曲る位置についてはもっと上かもしれないが、測定点が中間部にひとつしかないのではっきりしない。またa点はb点に比べて、極端に大きな変位を生じており、いわゆる「むち打ち現象」

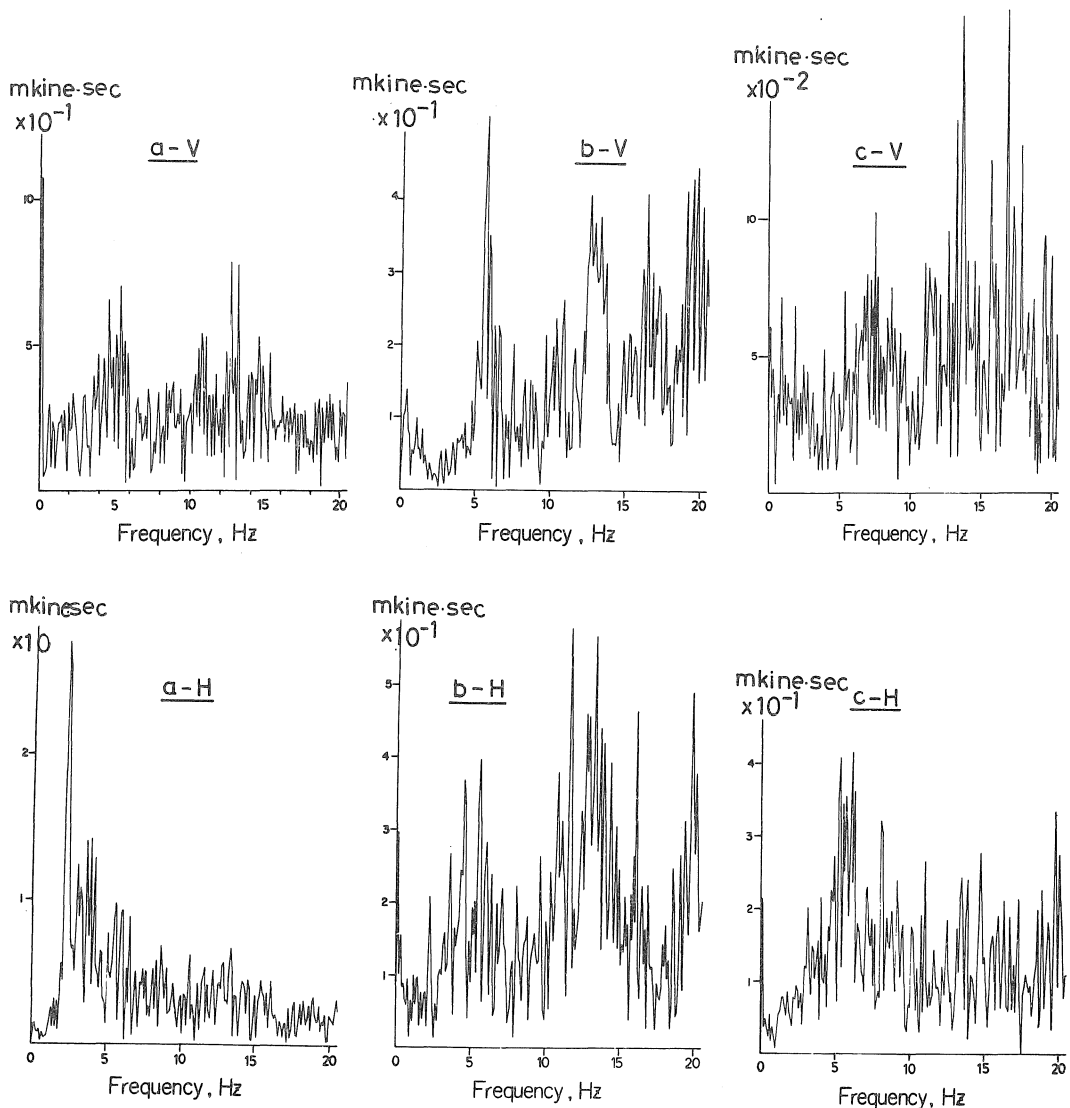


図5 a, b, c点における速度のパワースペクトル 上;上下動成分 下;ダム軸直交水平動成分

がみられる。

更に詳しい振動の様子をみるためには、上下方向変位も考慮する必要があるが今回は省略した。

7. 討 論

今回地震計を設置した地点のうち c 地点はダム下流側の堤体から10m程離れた地点であり、やや軟弱な地盤ではあるが、ダム基礎地盤と一体をなして振動する地点であると考えられる。c 地点のパワースペクトルは 6 Hz 付近にピークを持つことから、基礎地盤での卓越周期、即ち、堤底面へ入射する地震波の卓越周期は 6 Hz 程度であったと考えられる。上下動成分については、更に、13Hz および17Hz 付近にも卓越周期があったと考えられ

る。堤体中間地点である b 地点においては、やはり 6Hz 付近にスペクトルのピークがあらわれ、入力地震波の卓越周期がそのまま 堤体の卓越周期になったことがわかる。上下動成分においては、6Hz のピークは先鋭化し、13Hz および17Hz のピークもやや鋭くなっている。水平動成分においては、13Hz のピークが明瞭になってきている。上下動、水平動両成分とも 20Hz 付近に新たなピークがあらわれているが、これは、地震計をひとつの岩塊上に設置したために、この岩塊の振動を測定したとも考えられる。堤頂部である a 地点の 2 つのスペクトルは対照的である。上下動成分のスペクトルには、5 Hz 付近の弱いピークを除けば、ほとんどピークはみられないのに対し、水平動成分のスペクトルには2.2Hz に鋭いピ

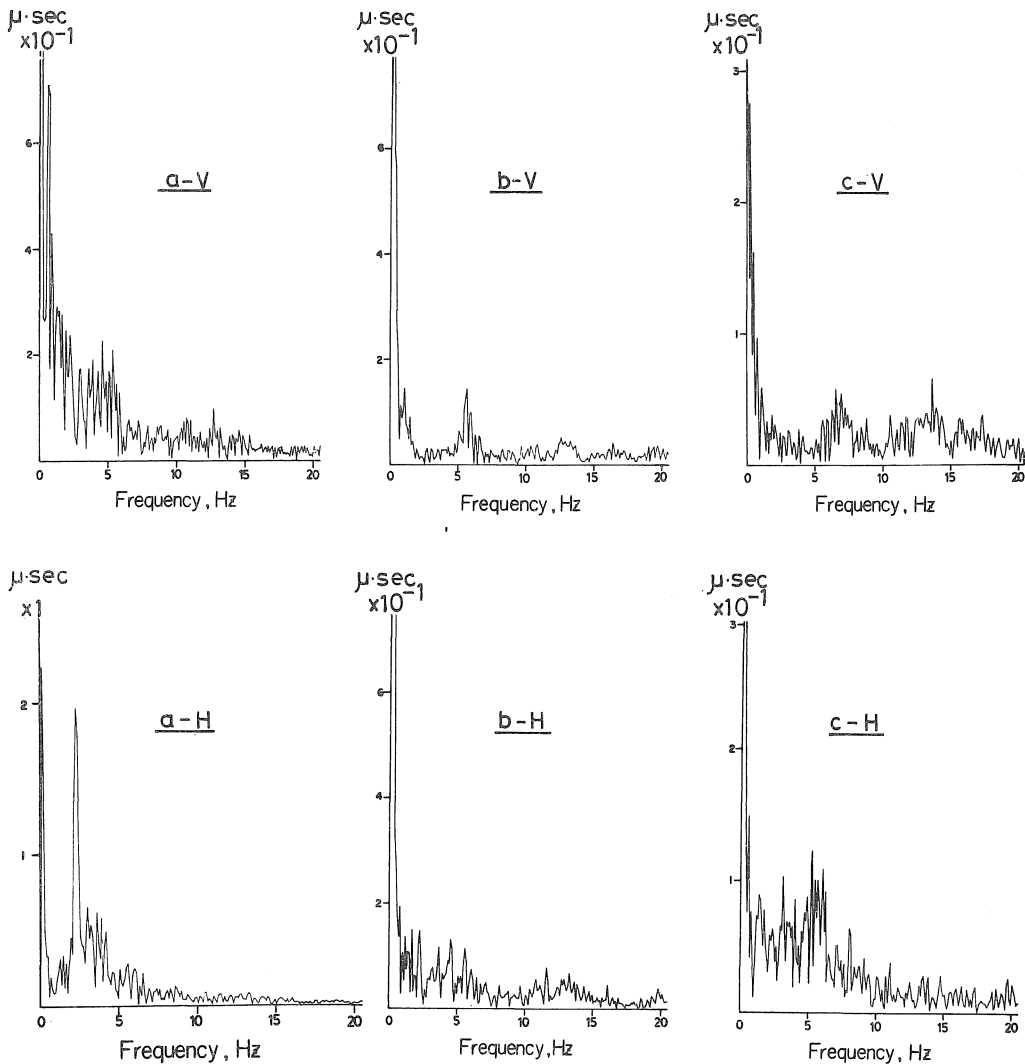


図 6 a, b, c 点における変位のパワースペクトル 上: 上下動成分 下: ダム軸直交水平動成分

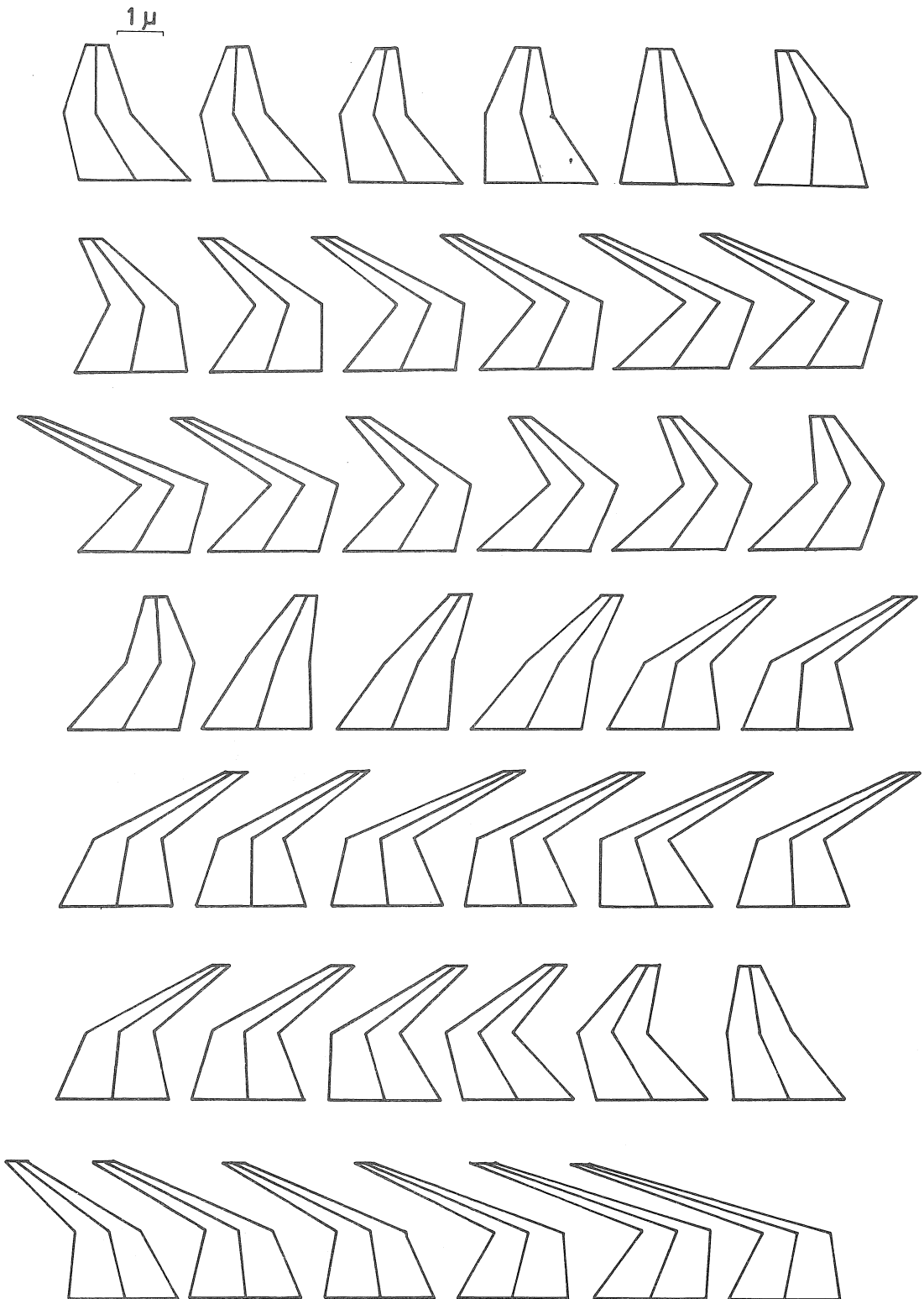


図7 堤体の振動モード。左上から右下にかけて0.01秒ごとに示してある。

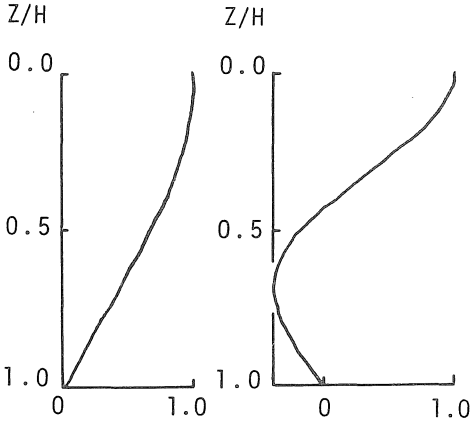


図8 せん断ばり理論による堤体の一次、二次振動モード

ークがみられる。このピークは堤体が共振現象を生じた為にあられたものと思われる。図3および図4に示した波形をみると2.2Hz程度の周期の波が3～5倍程度に増巾されており、この事からも堤体が共振現象を生じたことがわかる。

せん断ばり理論によれば堤体の固有振動周期は

$$T_i = \frac{2\pi H}{z_i C_s} \quad (1)$$

これに対する振動形は

$$\phi_i(z) = J_0\left(\frac{z_i z}{H}\right) \quad (2)$$

となる。ここに

z : 堤頂より下方方向にとった座標

H : 堤高

$C_s$  : せん断波伝播速度 ( $=\sqrt{\frac{G}{\rho}}$ )

である。 $z_i$ は $J_0(z)$ を0ならしめるzの値であり

$$z_1 = 2.4048$$

$$z_2 = 5.5201$$

$$z_3 = 8.6537$$

$$z_4 = 11.7915$$

.....

である。添字はそれぞれ振動モードを表わしている。

堤体内のせん断波伝播速度を200%と仮定して(1)式に代入すると

$$T_1 = 1.10\text{sec}$$

$$T_2 = 0.48\text{sec}$$

$$T_3 = 0.31\text{sec}$$

となる。即ち一次、二次および三次の固有振動数はそれぞれ0.91Hz, 2.09Hz, 3.28Hzとなる。

図5および図6で示したように、スペクトルには2.2Hz付近に鋭いピークがみられるが、これは上で述べた二次の固有振動数に対応していると考えられる。また、

同図には1Hzおよび3Hz付近にもわずかながらピークが存在するが、これが一次および三次の固有振動数に対応するかどうかは明らかでない。

また(2)式より求めた一次、二次の振動モードを図8に示す。図7と図8を比較することによって堤体の振動モードが明らかになる。両図からは、堤体が一次ないし二次モードで振動していることがわかるが、二次モードがやや卓越している傾向がみられる。振動測定点が3点であるために、三次より高次の振動モードについては明らかでない。

### 8. まとめ

ダムの堤体下端に入力してきた地震波は6Hzないし13Hzに卓越周期をもっていたと考えられる。この入力地震により堤体は一次あるいは二次モードの共振現象を生じ、速度振巾、変位振巾は3～5倍に増巾された。この時の振動数は2.2Hzであり、せん断ばり理論から求めた二次モード振動数2.1Hzとよく対応する。堤体が二次モード振動をしていることは、3測定地点の波形から得られた堤体の変形の様子からも推測される。

今回は測定地点が3ヶ所であったために、より高次の振動モード、あるいは詳細な堤体の変形の様子はわからなかった。今後、多点同時測定等、より詳しい測定をすることが期待される。

終りにのぞみ、多大な御助言をいただいた本学土木工学科大根義男教授に深く感謝の意を表す。また測定にあたっては所長をはじめとして水資源開発公団愛知用水総合管理所牧尾管理所の諸氏、日本技研株式会社の磯貝洋尚氏、橋本勝弘氏、本学大学院生村瀬裕司氏に御援助いただいた。計算にあたっては本学大学院生坪井利弘氏、学部学生井上敬晴、門坂俊男君に援助していただいた。ここに合わせて感謝の意を表す。

計算には本学計算機センターのYHP21MXを用いた。

### 参 考 文 献

- 1) 牧尾ダム；水資源開発公団愛知用水総合管理所牧尾管理所
- 2) 岡本舜三；耐震工学，オーム社（1971）
- 3) 地震応答解析と実例；土木学会編（1973）