

進行性地震入力波を考慮したロックフィルダムの
三次元震動応答解析THREE-DIMENSIONAL DYNAMIC ANALYSIS OF A ROCKFILL DAM FOR
INCLINED INCIDENT TRAVELING SEISMIC WAVE

駒田 広也*・林 正夫**・北原 義浩***・藤原 義一****

By Hiroya KOMADA, Masao HAYASHI, Yoshihiro KITAHARA
and Yoshikazu FUJIWARA

1. ま え が き

構造物を設計する場合、とくに地震応答計算をするような場合、地震時に地盤はすべて同位相振幅で動くという前提に基づいて通常は設計している。しかし、ロックフィルダムのように、平面的に大きな広がりを持った構造物では喜撰山ダムの地震記録¹⁾にもみられるように、地震時に地盤上の各点は同じ位相で動くとは限らない。とくに地表面に現われる地震波の周期が短いときに、その位相のずれは著しい。進行波の波長がダム底よりも十分長ければ、ダム底の地盤が一様に震動する。すなわち、同位相で動くと仮定しても妥当であるが、波長がダム底より短い場合には明らかにこの仮定は妥当ではない。

この進行性地震入力波について、山原^{2),3)}は、地動の位相差が建物基礎に拘束されることによって、失われる地動勢力の減衰について、理論的検討を行い、井口⁴⁾は、地動の位相差および地盤、構造物の相互作用を同時に考慮して、自由地表面での地震動と建物に作用する入力地震動との関係を検討している。これらより以前に、竹山⁵⁾は地震波の水平2方向成分を用いて構造物の平面的広がりを考慮した応答解析を行っているが、これは構造物の各基礎における地動の相違の影響を論じたものではない。また、小西⁶⁾、および小坪⁷⁾は長大橋梁の応答解析について、各橋脚で地動位相差を考慮したモード解析法を示している。

さらに、桜井^{8),9)}は埋設パイプラインなどの長大構造物において、多入力系としての構造物の地震応答解析法を示している。

一方、Dibaj ら¹⁰⁾は、二次元有限要素法を使って、基盤面が水平なアースダムについて、進行波地震入力に対する震動解析を行っている。

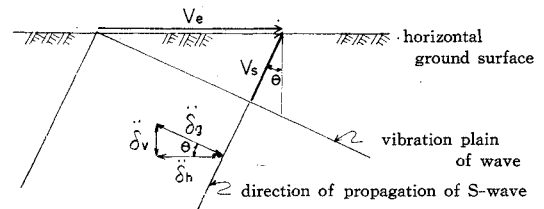
ここでは、進行波地震入力に対する Dibaj らの二次元の理論を三次元に拡大し、入力基盤面が複雑な場合にも適用可能な一般的な解析法を述べる。そして、数値解析例として三次元モデル化したロックフィルダムの場合について、地盤が進行波により震動する進行地震波と地盤が同位相で震動する一様地震波との応答の差違について検討する。

2. 進行地震入力波

(1) 概 念

地表面の付近では、地震時には、縦波であるP波と横波であるS波の実体波、および境界面の存在のために起きる表面波とがある。実体波のうちで、P波の振幅と持続時間はS波のそれらに比較して、小さいことより、工学的にはP波を無視できる場合が多い。したがって、地震波の主要動はおおむねS波とみなすことができる。

S波が鉛直方向より傾斜して地表面に伝播するものと想定すると、図-1の二次元表示によると、水平な地表面に沿って地震波の伝播が見られ、地表面の2地点の地震波には位相差が生じる。また、S波が鉛直方向より傾斜す



V_s : velocity of S-wave
 V_e : velocity along ground surface

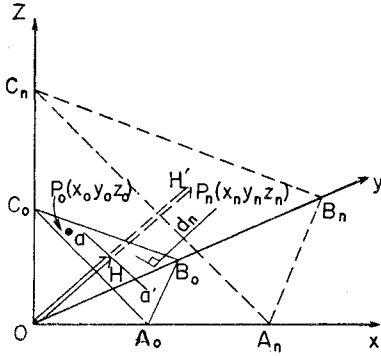
図-1 地震波伝播の二次元表示

* 正会員 工博 電力中央研究所 地盤耐震部地盤基礎研究室

** 正会員 工博 電力中央研究所 地盤耐震部部长

*** 正会員 電力中央研究所 地盤耐震部地盤基礎研究室長

**** 正会員 電力中央研究所 地盤耐震部地盤基礎研究室



(λ, μ, ν) : direction cosine of OH
 (α, β, γ) : direction cosine of aa'
 図-2 地震波伝播の三次元表示

ることにより、S波の加速度 $\ddot{\delta}_g$ が水平加速度 $\ddot{\delta}_h$ と鉛直加速度 $\ddot{\delta}_v$ との成分に分割されることになる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_h &= \ddot{\delta}_g \cos \theta \\ \ddot{\delta}_v &= -\ddot{\delta}_g \sin \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

である。逆に $\ddot{\delta}_h$ と $\ddot{\delta}_v$ との比が観測されれば、地震波の地表面への入射角が推定できる。金井教授によると、この入射角は $5^\circ \sim 10^\circ$ の場合が多いとされている¹¹⁾。

(2) 三次元進行地震入力波

上記の二次元表示による水平な地表面の場合の進行地震波の概念を地表面の形状、地震波の進行方向を三次元に拡大して、図-2 に従って解析してみる。

進行方向に直角な方向に変位する S 波の進行方向を OH とし、この OH を法線とし、 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ を含む平面 $A_0B_0C_0$ 上では、地震波は一樣な変位をする。しかし、平面 $A_0B_0C_0$ 上に存在するとは限らない任意点 $P_n(x_n, y_n, z_n)$ では、 P_0 と比較して、地震波の到達時刻にずれが生じる。

そのずれ時間 t_n は P_n と平面 $A_0B_0C_0$ との距離 d_n と地震波 (S 波) 速度 v_s とから求められる。すなわち、

$$t = d_n / v_s \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 d_n は次式で求められる。

$$d_n = \lambda(x_n - x_0) + \mu(y_n - y_0) + \nu(z_n - z_0) \dots\dots(3)$$

ここで、 λ, μ, ν は地震波進行方向の方向余弦である。

実際の計算に用いる $P_0(x_0, y_0, z_0)$ には、地震入力の各節点 $P_n(x_n, y_n, z_n)$ に式 (3) の d_n が負にならないような任意の座標を選べばよいことになる。

次に、地震波の 3 方向の成分について解析してみる。地震波の加速度 $\ddot{\delta}_g$ の振幅の方向 aa' についての方向余弦を (α, β, γ) とすると、基準 3 方向の成分は式 (1) に準じて次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_x &= \ddot{\delta}_g \cdot \alpha \\ \ddot{\delta}_y &= \ddot{\delta}_g \cdot \beta \\ \ddot{\delta}_z &= \ddot{\delta}_g \cdot \gamma \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(4)$$

OH と aa' とは直交していなければならないので、両者には次式が満足されていなければならない。

$$\lambda\alpha + \mu\beta + \nu\gamma = 0 \dots\dots\dots(5)$$

したがって、各点の 3 方向の加速度成分 $\ddot{\delta}_{x,n}(t), \ddot{\delta}_{y,n}(t), \ddot{\delta}_{z,n}(t)$ は、基準加速度を $\ddot{\delta}_g(t)$ とすると、基準点 P_0 からの地震波の位相遅れ時間 t_n を用いて、次のようになる。

$$t \geq t_n \text{ では } \left. \begin{aligned} \ddot{\delta}_{x,n}(t) &= \ddot{\delta}_g(t-t_n) \cdot \alpha \\ \ddot{\delta}_{y,n}(t) &= \ddot{\delta}_g(t-t_n) \cdot \beta \\ \ddot{\delta}_{z,n}(t) &= \ddot{\delta}_g(t-t_n) \cdot \gamma \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

$$t < t_n \text{ では } \ddot{\delta}_{x,n}(t) = \ddot{\delta}_{y,n}(t) = \ddot{\delta}_{z,n}(t) = 0 \dots\dots\dots(7)$$

3. 進行地震波に対する応答解析法

1 方向の進行地震波入力に対するフィルダムの二次元応答解析法については、Dibaj, Penzien¹⁰⁾ が述べている。そして、一樣地震波に対する三次元震動応答解析法については著者¹²⁾らがすでに述べている。したがって、ここでは三次元の一様地震波と異なる部分についてののみ説明する。

一般運動方程式は次式で表わせる。

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = P \dots\dots\dots(8)$$

ここで、総節点数を n とすると、変位ベクトル δ は $3n \times 1$ 、質量行列 M は $3n \times 3n$ 、減衰行列 C は $3n \times 3n$ 、剛性行列 K は $3n \times 3n$ になる。そして、 n を内部節点の総数 a と入力境界上の総節点数 b とに分ける。さらに δ を静的変位 δ_s と動的変位 δ_d とに分ける。すなわち、

$$\delta = \delta_s + \delta_d \dots\dots\dots(9)$$

δ_s は入力境界の変位 δ_b によって生じる内部 a の静的変位とする。したがって、入力境界 b では全変位 δ_b が静的変位 $\delta_{s,b}$ なので、

$$\delta_b = \delta_{s,b} \dots\dots\dots(10)$$

となる。静的変位 δ_s は一般的に静的条件を下式のように満足しなければならない。

$$K \cdot \delta_s = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_{s,b} \end{Bmatrix} = P_s \dots\dots\dots(11)$$

式 (9)、式 (11) を式 (8) に代入し、外力 P を 0 とおくと、

$$M\ddot{\delta}_d + C\dot{\delta}_d + K\delta_d = -M\ddot{\delta}_s - C\dot{\delta}_s - P_s \dots\dots(12)$$

いま、 M を集中質量と考え、式 (12) を a と b の部分行列に分けると、次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} M_a & 0 \\ 0 & M_b \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_{d,a} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{\delta}_{d,a} \\ 0 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{d,a} \\ 0 \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} M_a & 0 \\ 0 & M_b \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\delta}_{s,a} \\ \ddot{\delta}_{s,b} \end{Bmatrix}$$

$$-\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{s,a} \\ \delta_{s,b} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} 0 \\ P_{s,b} \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (13)$$

内部節点 a についての動的つり合い式である上の行について展開すると、

$$M_a \cdot \ddot{\delta}_{d,a} + C_{11} \dot{\delta}_{d,a} + K_{11} \delta_{d,a} = -M_a \ddot{\delta}_{s,a} - C_{11} \dot{\delta}_{s,a} - C_{12} \dot{\delta}_{s,b} \dots (14)$$

となる。ここで、上式の右辺を求める準備をすることにする。境界上での速度および変位は、式(6)、式(7)の加速度より次式で求められる。

$$\dot{\delta}_{s,b} = \int_0^t \ddot{\delta}_{s,b} dt \dots\dots\dots (15)$$

$$\delta_{s,b} = \int \int_0^t \ddot{\delta}_{s,b} dt \dots\dots\dots (16)$$

次に、式(11)を内点節点 a と入力境界節点 b に分けると、次式に書き直せる。

$$K \cdot \delta_s = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_{s,a} \\ \delta_{s,b} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ P_{s,b} \end{Bmatrix} = P_s \dots (17)$$

式(17)の上の行を展開すると、次式が得られる。

$$[K_{11}] \{\delta_{s,a}\} + [K_{12}] \{\delta_{s,b}\} = 0 \dots\dots\dots (18)$$

したがって、地動 $\{\delta_{s,b}\}$ が生じたときの内部 a の静的変位 $\{\delta_{s,a}\}$ は次式になる。

$$\{\delta_{s,a}\} = [T] \{\delta_{s,b}\} \dots\dots\dots (19)$$

この場合、変換行列 $[T]$ は、

$$[T] = -[K_{11}]^{-1} [K_{12}] \dots\dots\dots (20)$$

であり、 $3a \times 3b$ の行列である。

速度、および加速度については式(19)を1回微分、および2回微分することにより、

$$\{\dot{\delta}_{s,a}\} = [T] \{\dot{\delta}_{s,b}\} \dots\dots\dots (21)$$

$$\{\ddot{\delta}_{s,a}\} = [T] \{\ddot{\delta}_{s,b}\} \dots\dots\dots (22)$$

となる。

これで式(14)の右辺は既知となったので、 $\{\delta_{d,a}\}$ に関する運動方程式を解くことができる。この場合、式(14)において、右辺の減衰項 $[C_{11}] \{\dot{\delta}_{s,a}\}$ 、 $[C_{12}] \{\dot{\delta}_{s,b}\}$ は慣性項 $[M_a] \{\ddot{\delta}_{s,a}\}$ に比較して、非常に小さく無視することができる。しかし、左辺の減衰項は $[C_{11}] \{\dot{\delta}_{d,a}\}$ は $\{\delta_{d,a}\}$ に大きな影響を与え無視することができない。

以上のようにして、内部節点 a において、 $\{\delta_{s,a}\}$ 、 $\{\dot{\delta}_{s,a}\}$ はそれぞれ式(19)、式(21)、式(22)より得られ、 $\{\delta_{d,a}\}$ 、 $\{\dot{\delta}_{d,a}\}$ 、 $\{\ddot{\delta}_{d,a}\}$ は式(14)から得られる。そして、合成すれば次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \{\delta_a\} &= \{\delta_{s,a}\} + \{\delta_{d,a}\} \\ \{\dot{\delta}_a\} &= \{\dot{\delta}_{s,a}\} + \{\dot{\delta}_{d,a}\} \\ \{\ddot{\delta}_a\} &= \{\ddot{\delta}_{s,a}\} + \{\ddot{\delta}_{d,a}\} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (23)$$

境界節点 b においては、 δ_b 、 $\dot{\delta}_b$ 、 $\ddot{\delta}_b$ が存在し、それぞれ式(16)、式(15)、式(6)より求められる。

なお、式(14)は本来、非線型変形解析により求められることが望ましいが、ここでは三次元のモード解析法によることにした。

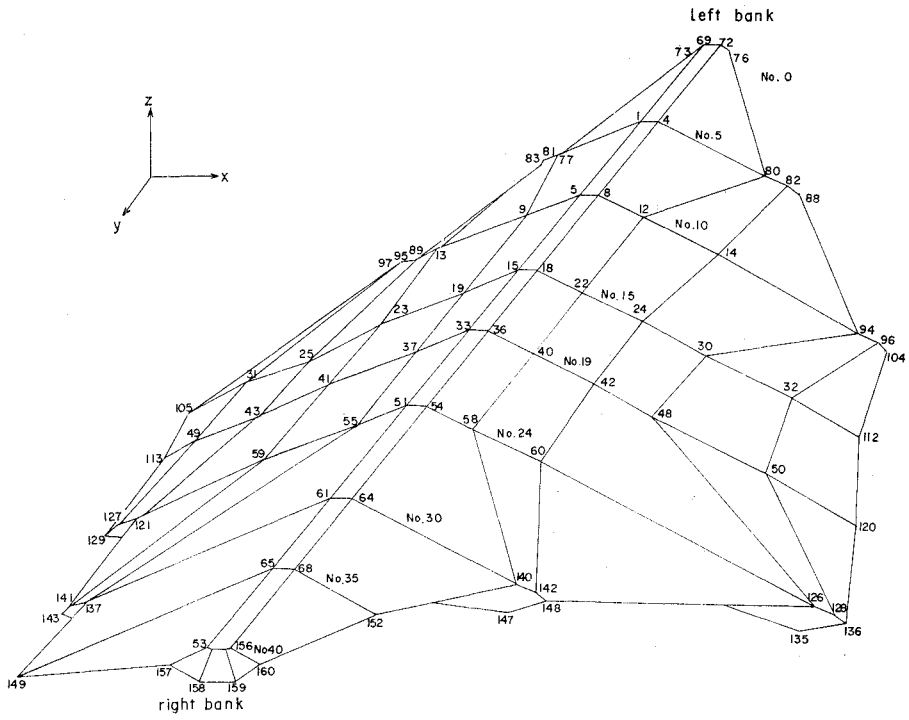


図-3 ロックフィルダムの三次元震動モデル

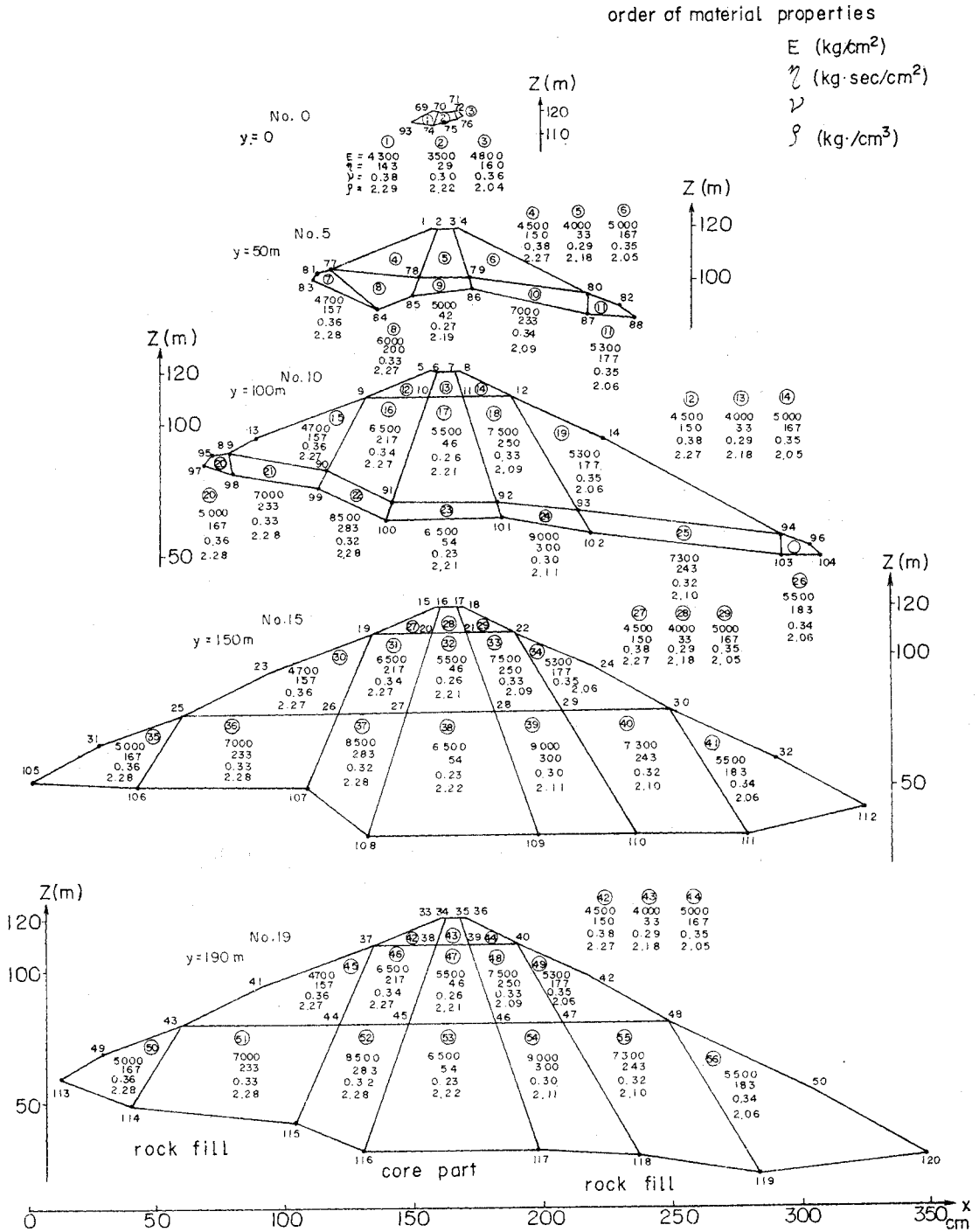


図-4 ロックフィルダムの各断面と材料物性値

4. ロックフィルダムの震動モデル

(1) 三次元モデル

図-3 に解析に用いたロックフィルダムの立体図を示す。堤体中央部の堤高は 88.5 m、堤頂長は 401.4 m、上流側斜面勾配 1 : 2.5、下流側斜面勾配 1 : 2.0 の中央コア型のロックフィルダムである。ここで、図-3 の要素分割の大きさの妥当性を以下に検討してみる。

Lysmer ら¹³⁾によって、S 波の進行方向の要素長さは、集中質量行列では、S 波の波長の 1/6 以下であれば、十分な精度が得られると記されている。一方、数地点のロックフィルダムの S 波測定によると¹⁴⁾、堤体の天端付近では $V_s=400$ m/sec、深さ 50 m 付近では $V_s=700$ m/sec が得られている。そして、固有値解析により、堤体の堤軸方向固有振動数（後述の表-1）を求めてみると、 $f=2.20$ Hz であることより、天端付近の要素長さは 30 m 以下に、深さ 50 m 付近の長さは 50 m 以下にする必要がある。なお、応答解析はモード解析法によるため、応

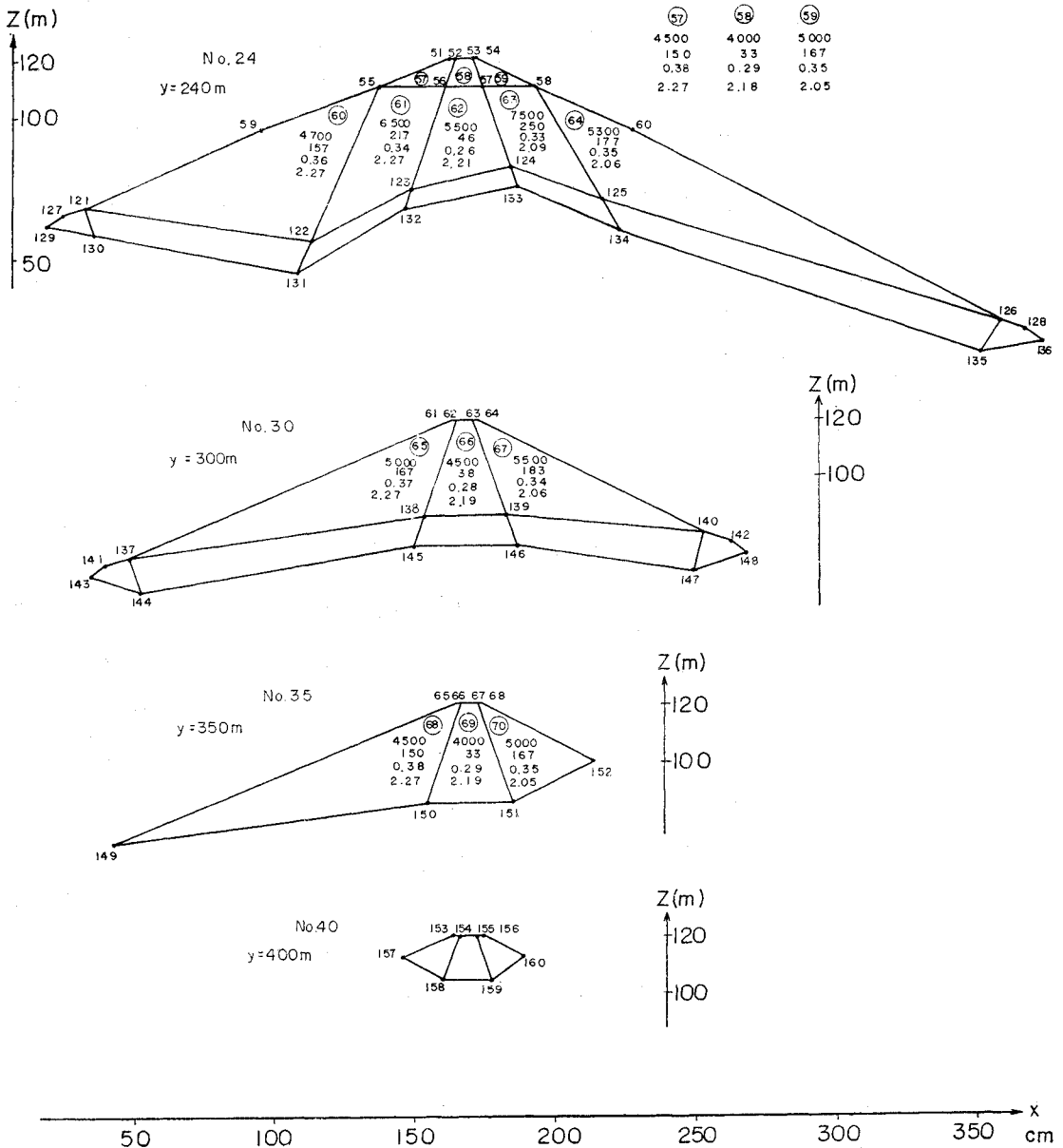


図-4 ロックフィルダムの各断面と材料物性値

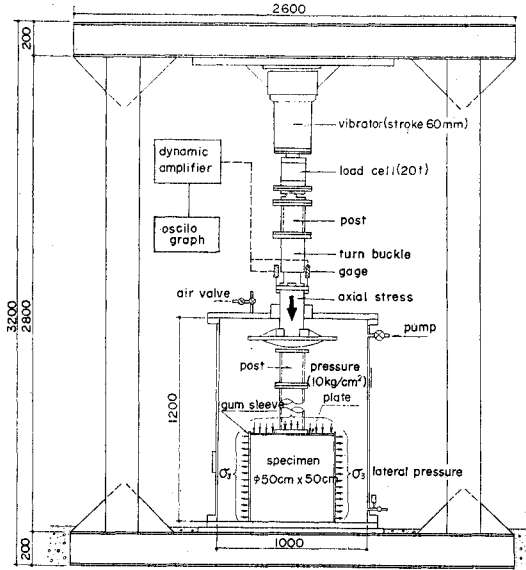


図-5 ロックフィル材料の動的三軸試験装置

表-1 固者振動数, 減衰定数, モード (計算値)

order	natural freq. (c/s)	damping coef.	mode
1	1.91	0.116	1st in X
2	2.20	0.128	1st in Y
3	2.44	0.146	2nd in X
4	2.75	0.162	2nd in Y
5	2.84	0.162	3th in X
6	2.86	0.166	
7	2.93	0.165	1st in Z *
8	2.94	0.172	
9	3.18	0.190	
10	3.33	0.202	

* X : upper and down stream direction
 Y : dam axial direction
 Z : vertical direction

答計算に考慮された堤体の最高次の固有振動モード ($f=3.3\text{ Hz}$) に対しても, 上記の条件を満足するのが望ましい。しかしながら, 計算結果の応答波形 (後述の図-15) によると, 堤体の堤軸方向1次固有振動数 ($f=2.20\text{ Hz}$) にはほぼ一致した振動数の波形を示していることより, $f=2.20\text{ Hz}$ の波形に対して, 上記の条件が満足されれば, 応答値の第1次近似はおおむね得られるものと思われる。したがって, これより図-3の要素分割はおおむね上記の要素長さ以下であり, 近似的に解の精度が得られているものと思われる。

(2) 物性値

図-4に各6面体要素の物性値を示す。各要素ごとの4個の数値は上段から動的弾性係数 $E(\text{kg/cm}^2)$, 動粘性係数 $\eta(\text{kg}\cdot\text{sec/cm}^2)$, ポアソン比 ν , 単位体積重量 $\rho(\text{kg/cm}^2)$ の順になっている。

ロックフィルダム材料の力学的性質には, 振動数や応力水準により, 非線型性があるので, ここでは, ダム材料の動的三軸試験を実施して, 振動数や応力水準による物性値の変化を調

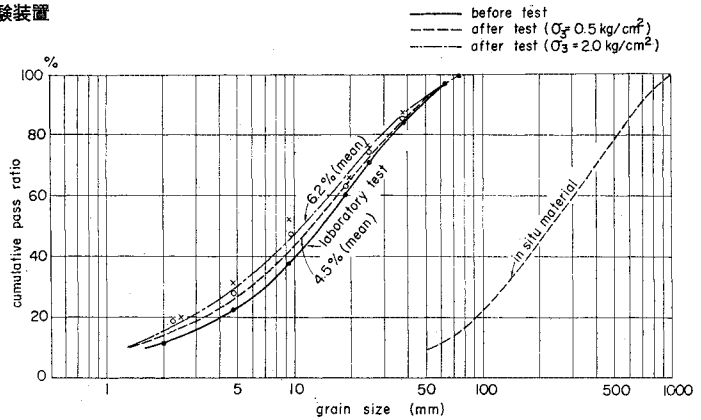


図-6 ロックフィル材料の粒度分布

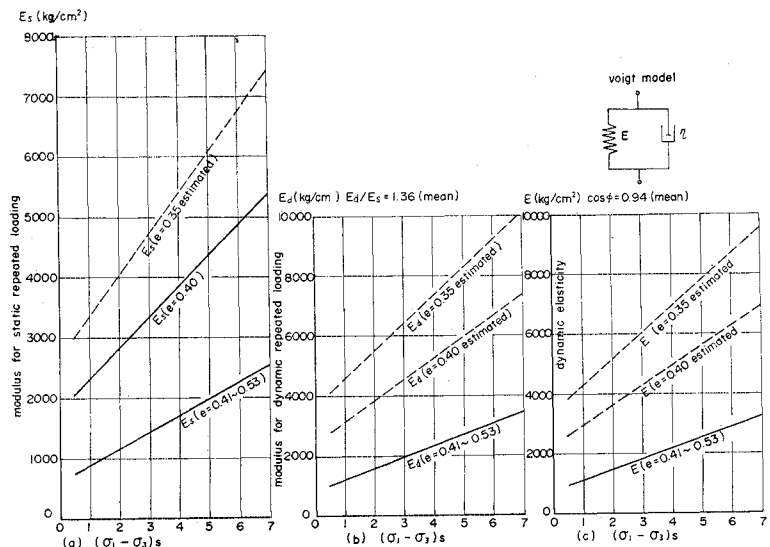


図-7 ロックフィル材料の間隙比の違いによる E_s , E_d , E の変化

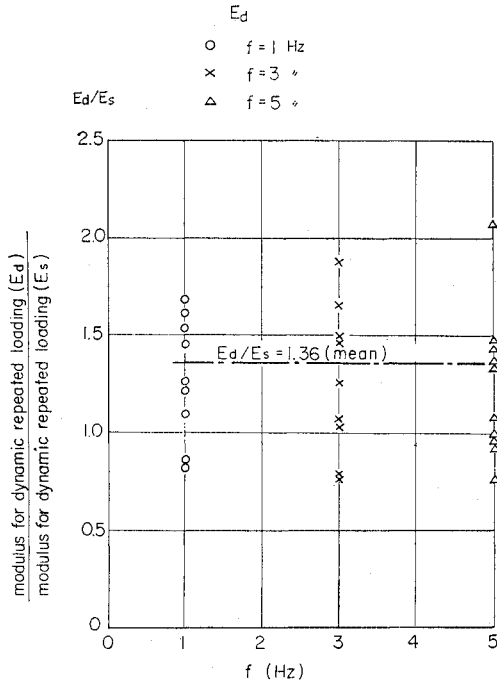


図-8 ロックフィル材料の E_d/E_s と f との関係

べ¹⁵⁾、以下のようにして、図-4 の物性値を定めた。

a) 動的弾性係数

図-5 に示すような動的三軸試験装置を使って、図-

6 の粒度分布をもつロックフィル材料の動的性質を調べた¹⁵⁾。ロックフィル材料の動的弾性係数は一般に応力水準 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ 、振動数 f 、間隙比 e に依存している。そこで、動的三軸試験により、 $e=0.41 \sim 0.53$ と $e=0.40$ における静的繰り返し弾性係数 E_s (振動数 $f=0.05$ Hz) を求めた。一方、実ダムでは築堤後 $e=0.35$ 程度には、締め固められると思われるので、 $e=0.35$ における E_s を図-7 (a) のように推定した。次に、動的繰り返し弾性係数 $E_d (f=1 \sim 5$ Hz) と静的繰り返し弾性係数 $E_s (f=0.05$ Hz) との比が、図-8 に示すように、 $E_d/E_s=1.36$ が得られているので、図-7 (b) のように、 $e=0.35$ が E_d の推定できる。さらに、Voigt モデルとしての動的弾性係数 E に関して、 $E=E_d \cos \phi$ (ϕ は応力とひずみとの位相角) より¹⁶⁾、図-7(c) が得られる。

次に、コア材料についても、弾性係数は応力水準、間隙比などに依存しているとみられる。したがって、応力水準、間隙比などをパラメーターにして、コア材の動的三軸試験

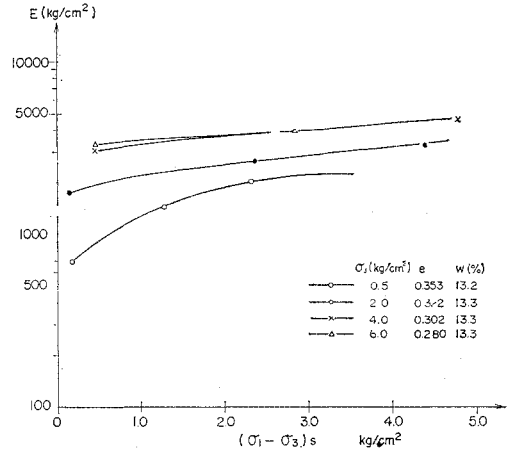


図-9 コア材料の $f=1$ Hz における Voigt モデルの動的弾性係数 E (電研・緒方)

を行い、図-9 に示すような、 $f=1$ Hz における E と $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ との関係が得られた。これより、堤体内の想定した応力水準の分布に応じて、動的弾性係数を定めた。なお、堤体内の応力水準 $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ の分布は堤体の築造湛水過程における二次元弾塑性解析による $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ の分布¹⁷⁾を使用した。

b) 動粘性係数 η

動粘性係数 η についても、動的弾性係数 E と同様に、応力水準、振動数によって、非線型性が見られるが、ここでは、あらかじめ想定した応力水準の分布および振動

- △ $f = 5$ Hz
- × $f = 3$ Hz
- $f = 1$ Hz
- △ $f = 0.1$ Hz

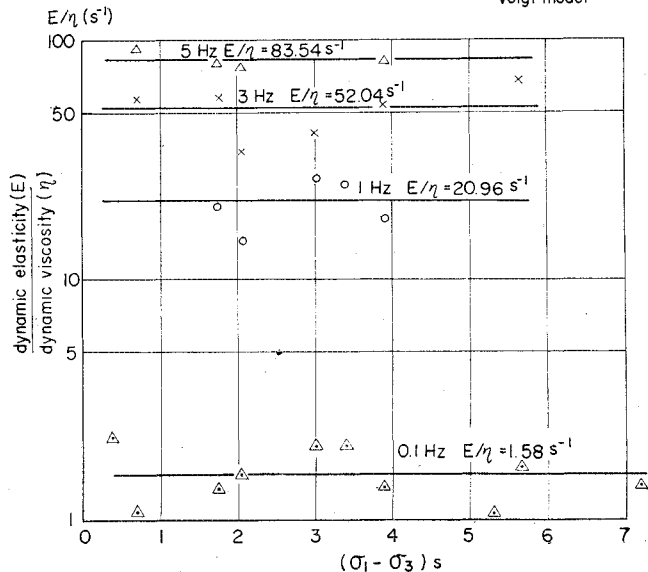
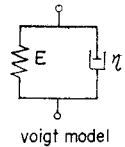


図-10 ロックフィル材料の E/η

数に従って、 η の値を定め、ロックフィルダムの内部粘性減衰を考慮した。

ロックフィル材料の Voigt モデルとしての E/η と軸差応力および振動数の関係をプロットした図-10によると、 E/η は軸差応力にほとんど影響されず、振動数 f に依存していることがわかる。そして、この E/η と f との関係を使って、あらかじめ固有値解析により、堤体の堤軸方向固有振動数（後述の表-1）を求めてみると、 $f=2.20$ Hz であることより、 $E/\eta=30 \text{ sec}^{-1}$ が得られる。

コア材料についても、図-11 のような E/η と f との関係が得られ、 $f=2.20$ Hz における $E/\eta=120 \text{ sec}^{-1}$ を用いた。なお、 η に基づいて式 (8) の減衰行列 C を作成する方法は文献 (12) で述べている。

c) ポアソン比 ν および単位体積重量 ρ

単位体積重量 ρ は築堤中の応力に応じて堤体中で変化する。その変化はおおむね計算可能である。その予測によって、著者らは先に喜撰山ロックフィルダムについて、地震応答の計算値と実測値との比較を行い、比較的よい一致を得た¹⁵⁾。その場合に用いられた ρ の分布をここでは用いられることにした。ポアソン比 ν については、静的には比較的小さく、動的には比較的大きく、飽和時

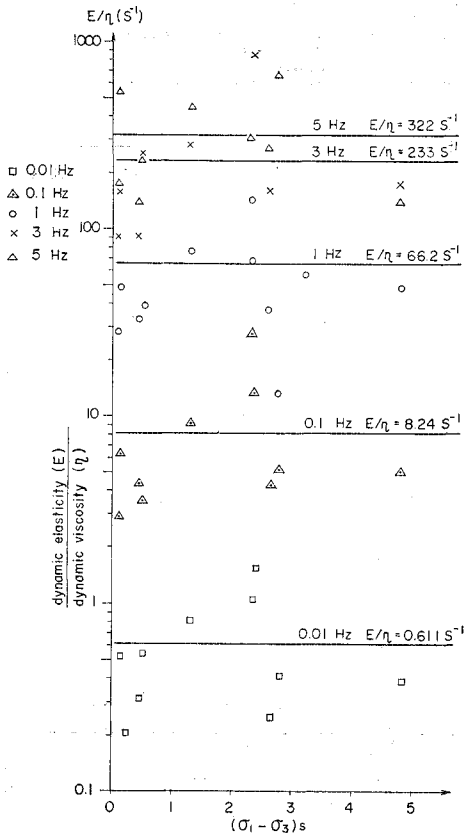


図-11 コア材料の E/η

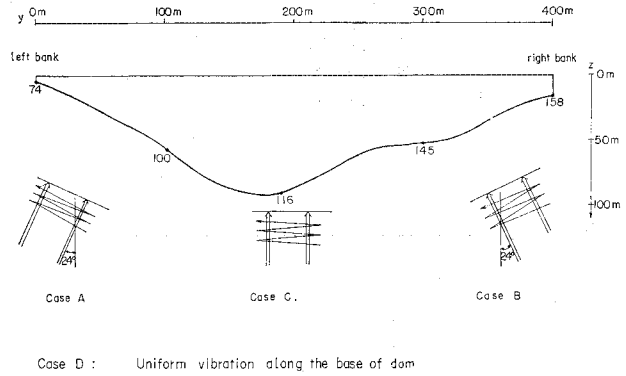


図-12 4 ケースの地震入力形態

には含水の影響が大きく 0.5 に近い。ここでは先に行った喜撰山ダムの場合と同じ値を用いた。

(3) 固有振動数, 減衰定数, 振動モード

10 次までの固有振動数, 減衰定数, 振動モードを求めると表-1 のような値が得られた。1 次に上下流方向の振動モードが生じ、固有振動数は 1.91 Hz, 減衰定数は 0.116 である。2 次には堤軸方向の振動モードが生じ、固有振動数は 2.20 Hz, 減衰定数は 0.128 である。鉛直方向のモードは全体の 7 次のモードに生じている。

(4) 地震入力形態

図-12 に 4 ケースの地震入力形態を示す。堤体の断面図はコア部の縦断面図を示し、堤体基礎部の数字は節点番号を示す。いま、図-12 において、入力地震波の振幅の方向は yz 面内すなわち縦断面内としている。

ケース A, およびケース B の入力地震波は地震波の進行方向が縦断面において鉛直よりそれぞれ時計回り、および反時計回りに 24° 傾斜している場合であり、ケース C は地震波の進行方向が鉛直である。そして、ケース D は一様地震入力の場合である。

次に、進行波地震入力形態であるケース A, ケース B およびケース C の入力地震波の進行方向および振幅方向の方向余弦を表-2 に示す。

地震波の進行方向の傾斜角を 24° と仮定したのは以下の資料によるものである。1) 一般に、地震波に含まれ

表-2 入力地震波の進行方向および振幅方向の方向余弦

	direction of propagation of wave			direction of vibration plain		
	λ	μ	ν	α	β	γ
Case A	0	$\cos 66^\circ$	$\cos 24^\circ$	0	$\cos 24^\circ$	$\cos 114^\circ$
Case B	0	$\cos 114^\circ$	$\cos 24^\circ$	0	$\cos 24^\circ$	$\cos 66^\circ$
Case C	0	0	1	0	1	0

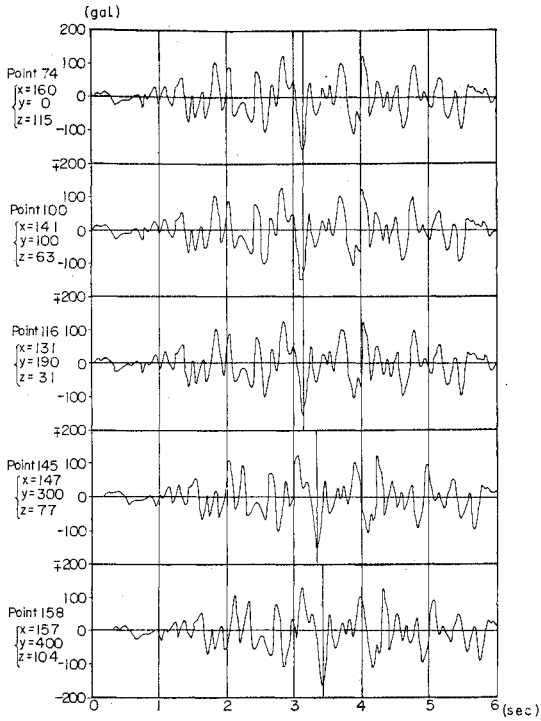


図-13 ダム基礎におけるケースAの堤軸方向の地震波形

る主要な波の種類として、P波、S波、Rayleigh波が存在する。しかしながら、近地地震で浅発地震の地震波を対象にすると、以下の理由で Rayleigh波およびP波を工学上無視することができると思われる。2) すなわち、震央距離と震源深さとの比が5以下のような近地地

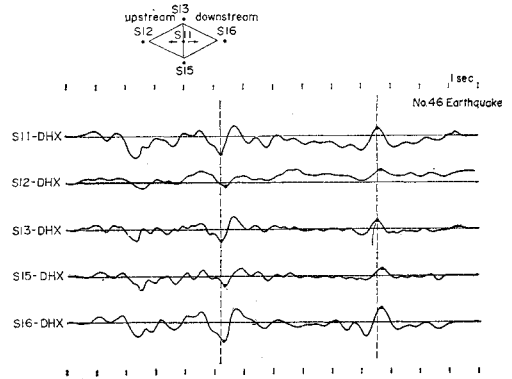


図-14 喜撰山ダム基礎の変位記録(丹羽)¹⁹⁾

震では、Rayleigh波は識別できず¹⁸⁾、S波に比較して工学上無視することができると思われる。3) また、S波のP波に対する振幅の比は、震源の断層の方向によって異なるが、浅発地震を対象にすると、おおむねこの値は5以上であり¹⁹⁾、P波はS波に比較して無視することができる。4) したがって、震源深さが20~30 kmよりも浅く、震央距離が100~150 kmよりも近いような、通常工学的に検討の対象となる場合が多い地震では、S波を地震波と見なしても第一義的には誤りはないと考える。5) 次に、ここではS波の進行方向が鉛直より傾斜することにより、鉛直方向の加速度が生じるものと工学的便宜上仮定する。そして、近地浅発地震と思われる水平最大加速度100 gal以上の日本で観測された強震記録では、鉛直加速度の水平加速度に対する比はおおむね0.45以下の記録がある²⁰⁾。したがって、ここでは入力基盤の各点

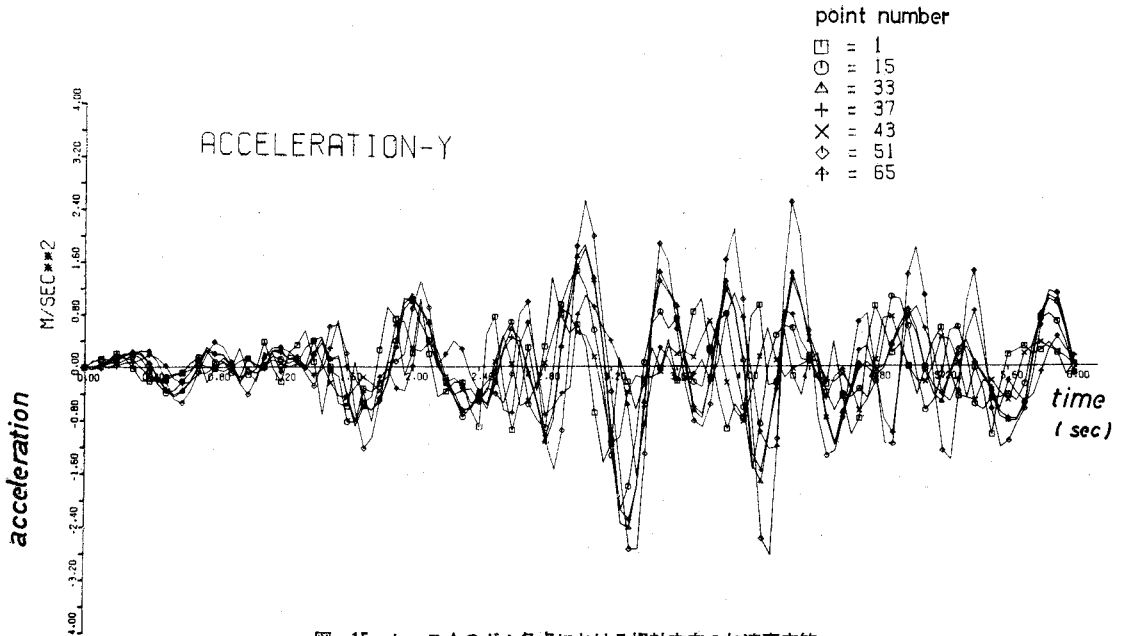


図-15 ケースAのダム各点における堤軸方向の加速度応答

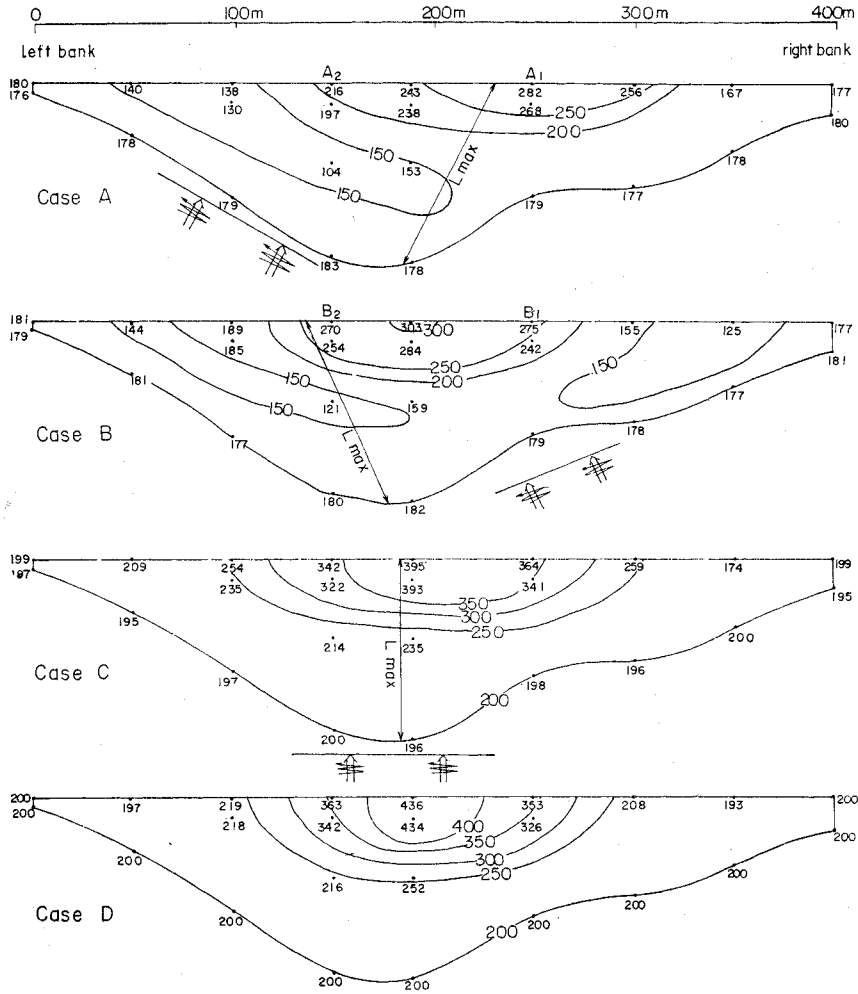


図-16 堤体コア部縦断面における堤軸方向の最大加速度分布 単位: gal

間における地震入力波の位相差が大きくなるように、この値を 0.45 とし、(鉛直加速度/水平加速度) = $\tan \theta = 0.45$ となり、傾斜角 $\theta = 24^\circ$ と仮定した。

なお、この傾斜角の算出方向およびその値については、今後、地震観測による進行性地震波の実体およびその理論付けなどにより、検討していかなければならない。

基準加速度波形は 1969 年 4 月 21 日 16 時 19 分に発生した日向灘地震を宮崎県日向市細島で記録した E-W 成分である。この波形の卓越振動数は 5 Hz であり、最大加速度は 200 gal にスケールアップして用いた。

図-13 にケース A の場合のダム基礎における地震波の進行状況を示す。節点番号 145, 158 の各地点では、節点番号 74, 100, 116 の各地点に比較して時間ずれが顕著にみられる。

なお、喜撰山ダムの基礎で実測された変位記録の位相差は 図-14¹⁾ に示すようであり、この位相差は基礎内の

S 波速度による時間差とほぼ一致していることが記されている。

(5) 地震波速度 (S 波速度)

フィルダム基礎の S 波速度として、 $v_s = 580$ m/sec (P 波速度 $v_p = 1000$ m/sec, ポアソン比 $\nu = 0.25$) を用いた。この地震波速度で、上述の卓越振動数 5 Hz の地震波が鉛直より 24° 傾斜して進行した場合には、水平地表面では約 280 m の波長になる。

5. ロックフィルダムの震動応答結果

(1) 加速度応答分布

図-15 にケース A のダム各点における堤軸方向の加速度応答履歴を示す。応答履歴の振動数は、堤体の堤軸

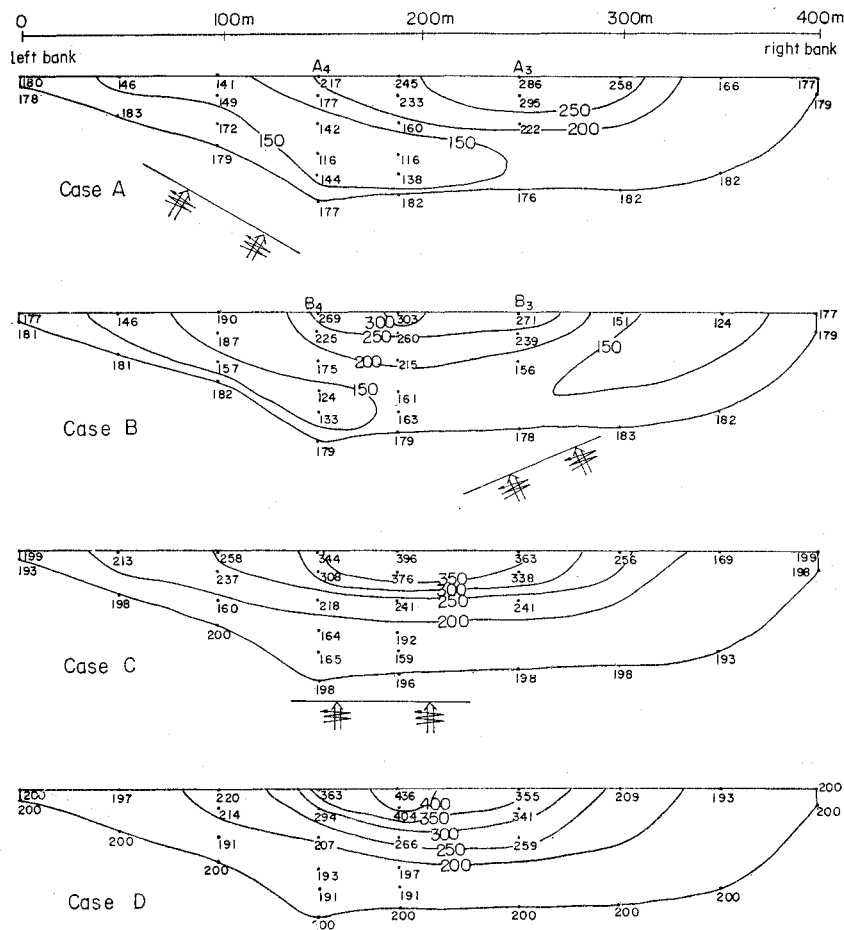


図-17 堤体上流側斜面における堤軸方向の最大加速度分布 単位: gal

方向 1 次固有振動数である $f=2.20\text{ Hz}$ にほぼ一致していることがわかる。

図-16, 図-17, 図-18 に 図-12 の 4 ケースの地震入力形態に対する, 堤体内の各地点における全時系列中の最大加速度応答値の分布が示されている。この計算結果の範囲で認められる事実は次のようになる。

1) 堤軸方向の加速度増幅率が, ケース A では 1.6 倍, ケース B では 1.7 倍, ケース C では 2.6 倍, ケース D では 2.2 倍となり, ダム基盤が一樣に運動すると仮定した従来の解析法 (振動台による模型実験も同じ特性) である ケース D の増幅率に比べて, 地震波の進行方向と速度を考慮した ケース A, ケース B, および ケース C の増幅率は 7~9 割に減少する。

既応の地震観測記録によると, 従来の計算法による結果のように増幅していない事实在認められることもあ

るが, その 1 つの要因として, この種の地震波の進行方向と位相差の影響が考えられる (図-16, 17)。

2) 入力地震を進行波と考えると今回は解析した。その進行波の進行方向に直角な振幅 (最大値 200 gal) を入力加速度振幅としたので ケース A, ケース B にみられるように, 地震波の進行方向が鉛直より傾斜すると, ダム基盤における水平成分の加速度が減少し, 一方, 鉛直成分が増大することになる。この種の特性が以下に述べる比較計算結果に影響している場合が認められる。

3) 堤軸方向最大加速度が生じる地点は, ケース A では右岸寄りの A_1 (図-16), A_3 (図-17) の地点である。これは進行波の進行方向について, 堤体内の経路が最大 (L_{\max}) になる地点にほぼ一致しているようである。

ケース B においては, 最大加速度地点は堤体中央部末端であるが, 進行波の堤体内の経路が最大になる地点付

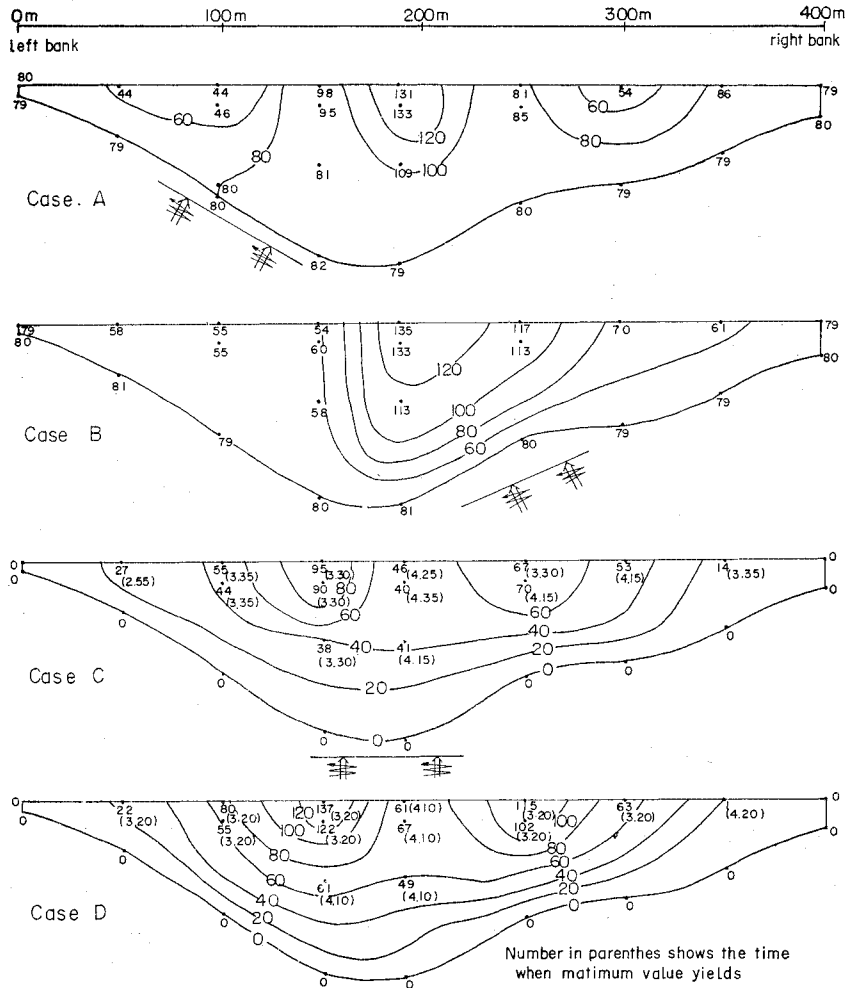


図-18 堤体コア部縦断面における鉛直方向の最大加速度分布 単位：gal

近の B_2 (図-16), B_4 (図-17) では、ケースAにおける相当点 A_2, A_4 よりも大きな応答加速度になっている。

ケースC, ケースDにおいても堤体中央部天端に最大加速度が生じている(図-16, 17)。

4) ケースA, ケースBにおける鉛直方向の最大加速度はケースCにおける値よりもかなり大きい。ケースA, およびケースBでは、地震入力の入射角の関係より入力自身に鉛直方向の加速度成分が存在することにより、上記の現象が生じる。このように鉛直方向の成分が大きい現象は近地地震ないし直下型の地震入力波の場合に対応するものと思われる(図-18)。

5) ケースCの鉛直方向最大加速度はケースDのそれに比べて約7割に減少している。ケースDでは堤体内の各地点において、ほとんど同時刻(図-18の中のカッコ内の数字)に最大値が発生していることからみて、ダ

ム底部において、堤軸方向に一様加速度が作用した結果、堤体内の堤軸方向加速度が鉛直方向加速度を助長しているように思われる。一方、ケースCでは最大値の生じる時刻が比較的ばらついていることからみて、位相ずれの地震波入力のため、堤軸方向加速度が堤軸方向の範囲で吸収され、鉛直方向には、比較的影響をおよぼしていないように思われる(図-18)。したがって、従来の慣用法による計算や水平振動台による実験では入力の位相差がないので、鉛直加速度が助長しやすい傾向にあると思われる。

6) ケースA, ケースBではダム基礎の堤軸方向および鉛直方向最大加速度よりも小さい最大加速度しか生じない領域が存在する。これらの領域では、堤軸方向と鉛直方向の加速度が干渉しているため、加速度が減少していると思われるが、さらに詳細な検討が必要である

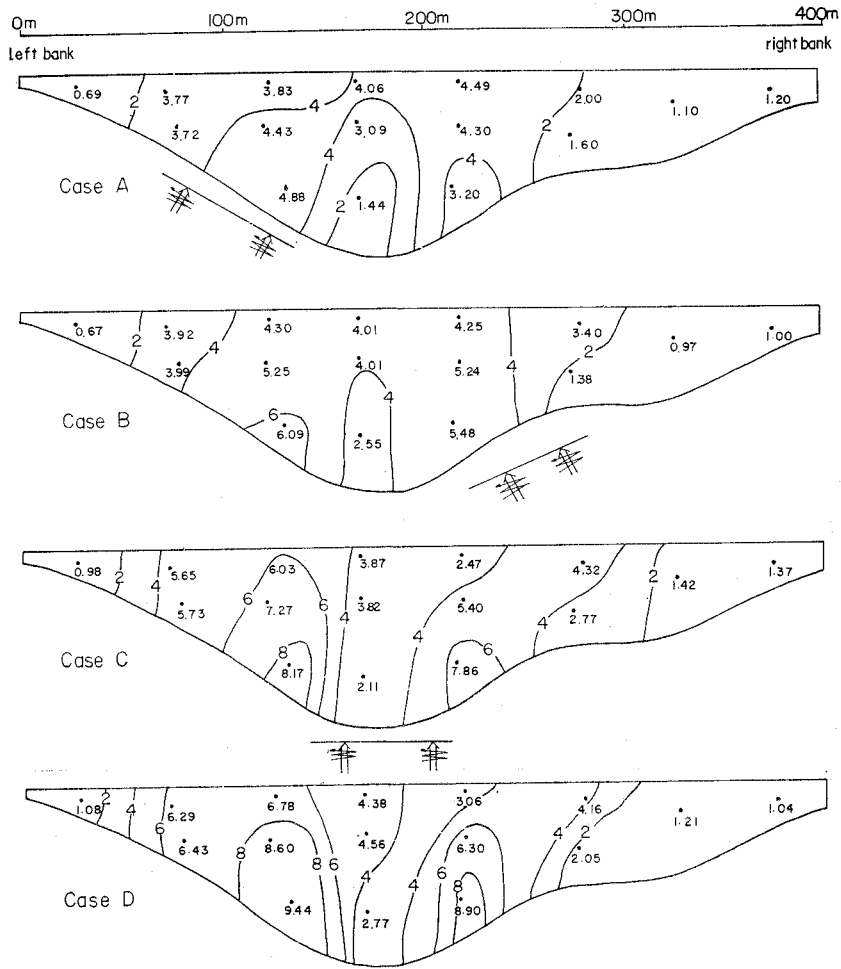


図-19 堤体コア部縦断面における堤軸方向の最大引張動応力分布 単位: t/m²

(図-16, 17).

(2) 動応力分布

図-19, 図-20, 図-21 に 図-12 のケースの地震入力形態に対する, 堤体内の各地点における全時系列中の最大引張動応力の分布が示されている. この計算の結果の範囲で認められる事実は次のようになる.

1) 堤体コアの動的安定上, もっとも重要視されるのは静的応力が少ない堤頂部の動応力の値である. 堤頂部について, 従来の解析法であるケースDの方式に比べると, ケース A, ケース B, およびケース C の進行波の場合にはいずれも動応力の値が小さく, 9 割程度に減少する (図-19).

2) ダム基盤の入力加速度に鉛直成分が存在するケース A, ケース B では, 鉛直成分が存在しないケース C,

ケースDに比べて, 大きな鉛直応力がコア部に生じている. 近地地震ないし直下型の地震においては入力基盤における鉛直の入力波成分を考慮に入れる必要がある (図-21).

3) 堤体斜面において, 地震時には堤体の上部ほどひずみが大きくなるので, 動応力の分布は堤頂部に片寄っている. その値は進行波のケース A, ケース B, およびケース C では, 従来の慣用法であるケースDより 7~9 割に減少していることが認められる (図-20).

6. 結 語

地震波の主要動をS波と仮定し, そのS波の進行入射角および進行速度を考慮すると, ダム基盤の各地点間で地震波が到達する時刻にずれが生ずる. この現象がロッ

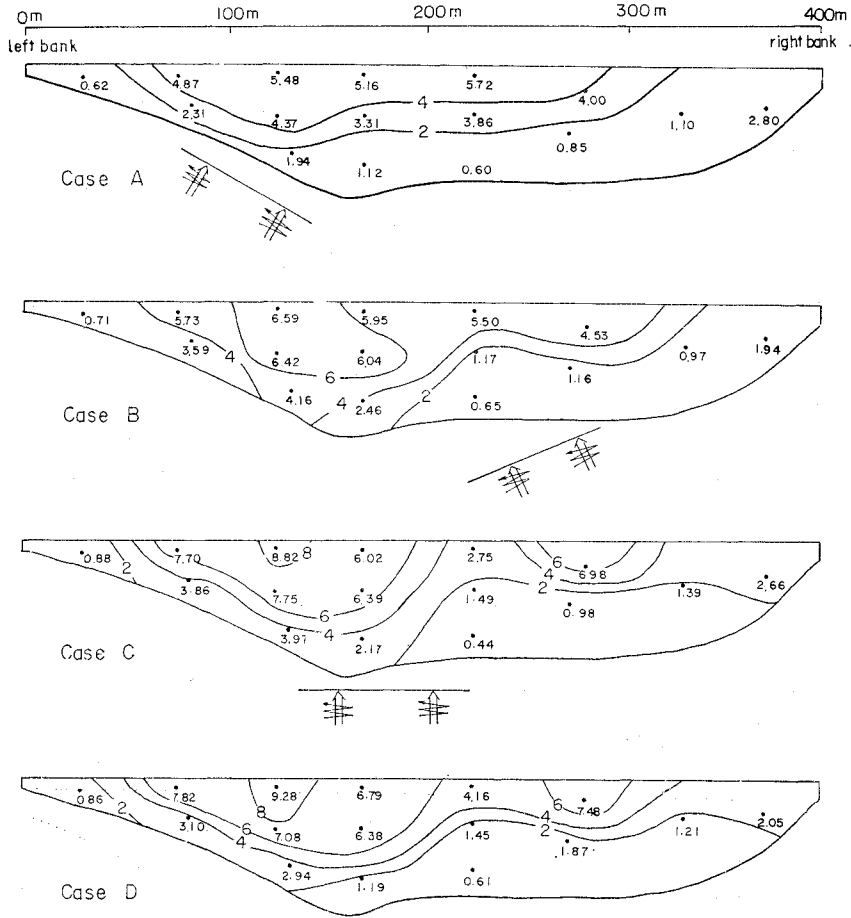


図-20 堤体上流側斜面における堤軸方向の最大引張動応力分布 単位: t/m²

クフィルダム地震応答に与える影響を調べるために、内部減衰性を考慮したモード解析法による三次元有限要素法を使って、以下のような検討を行った。なお、材料の大型動的三軸試験結果から、地震時の応力水準に応じた剛性、減衰性などの物性値を与え、材料の非線型性の第1近似として、あらかじめ予測して与えることにした。

地震波の進行方向が堤軸方向断面において、鉛直方向より右岸側に24°、および左岸側に24°傾斜した場合、および鉛直方向の場合と従来の慣用法である一様地震波の場合の合計4ケースについて、ロックフィルダムの三次元粘弾性応答の比較計算を行った。ここでは、唯一の地震波についての数値解析による検討であるので、一般論的な結論は得られないが、今回の検討では、次のような計算結果が得られた。

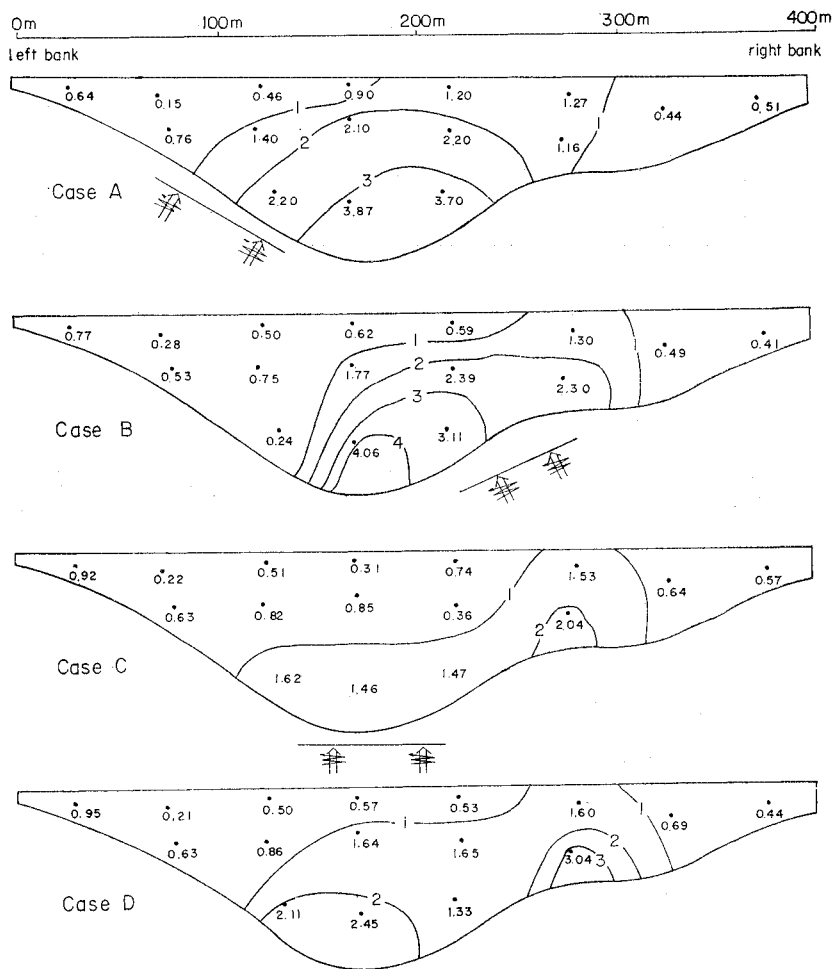
1) ダム基盤が一様に運動すると仮定した従来の解析法である一様入力地震波に比べ、進行波としての入力地震の特性(斜め入射および直上方向への入射)を考慮す

ると、応答加速度および堤体の動応力は7~9割程度の計算値が得られた。

2) 従来のロックフィルダム地震観測における加速度増幅率は、従来の解析法で得た増幅率よりも場合によっては小さいことがあると報告されている。その理由は材料の非線型変形に由来することが多いと思われるが、さらに別の理由として、入射方法および位相差の要因があわせ考えられてもよいと思われる。今回の計算による地震入力の入射方向が斜めから入ってくる位相差を考慮した場合には(このような場合が一般にはごく多いと考えられている)従来の解析法と比較して、増幅率は7~9割程度であった。

3) 堤軸方向の最大加速度が生じる堤体内の地点は進行地震波の進行方向によって異なり、その地点は堤体内の進行波の経路が最大になる地点にほぼ一致するようである。

なお、今後は計算の仮定を確かめるために、同時地震



図一21 堤体上流側断面における鉛直方向の最大引張応力分布 単位：t/m²

観測による進行性地震波の実体，および材料物性の非線形性の解明などを実施していく予定である。

参考文献

- 1) 丹羽武彦：喜撰山ダムの動的挙動について，日本ダム会議，第6回ダム技術講演討論会テキスト，pp. 79~100，1974年3月。
- 2) 山原 浩：地震時の地動と地震波の入力損失（第1報），日本建築学会論文報告集，第165号，pp. 61~66，昭和44年11月。
- 3) 山原 浩：地震時の地動と地震波の入力損失（第2報），日本建築学会論文報告集，第167号，pp. 25~30，昭和45年1月。
- 4) 井口道雄：地震動の位相差および地盤・構造物の相互作用を考慮した地震応答，関東地震50周年記念地震工学シンポジウム論文集，pp. 211~218，1973年3月。
- 5) 竹山和彦：平面的拡がり考慮した建築物の地震応答解析，日本地震工学シンポジウム，pp. 203~208，1966年10月。
- 6) 小西・山田・高岡：長大吊橋の地震応答と耐震設計法に関する研究，土木学会論文集，第159号，pp. 13~27，昭和43年11月。
- 7) 小坪・原田：各支点で異なる地震波をうける橋梁の応答

- 解析，土木学会論文報告集，第175号，pp. 39~48，1970年3月。
- 8) 桜井・栗原・矢島：多入力系としての長大構造物の地震応答解析法，電力中央研究所報告，No. 72004，1972年11月。
- 9) 栗原・桜井：地上配管系の耐震性，電力中央研究所報告，No. 74004，1974年12月。
- 10) Dibaj, M. and J. Penzien : Response of Earth Dams to Traveling Seismic Waves, Proc. ASCE, Vol. 95, No. SM 2, pp. 541~560, March 1969.
- 11) 金井 清：建築学大系 11, 地震・振動学, 彰国社版, p. 62, 昭和38年。
- 12) 林・北原・駒田：連続体の三次元震動解析，電力中央研究所報告，No. 71013，1971年4月。
- 13) Kuhlemeyer, R.L. and J. Lysmer : Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems, Proc. ASCE, Vol. 99, No. SM 5, pp. 421~427, May 1973.
- 14) Sawada, Y. and T. Takahashi : Study on the Material Properties and the Earthquake behaviors of Rockfill Dams, 第4回日本地震工学シンポジウム, pp. 695~702, 1975年11月。
- 15) 林・藤原・駒田：ロックフィルダム材料の動的繰り返し

- 変形特性・動的粘性係数の試験と実ダムの地震時挙動との関係，電力中央研究所報告，No. 74011，1974年12月。
- 16) 林・北原・藤原・駒田：動的粘性係数を考慮した三次元地盤と地上構造物の連成震動解析，土木学会論文報告集，第217号，pp. 11~23，1973年9月。
- 17) 松井家孝：ロックフィルダムの弾塑性解析—築造湛水過程における内部挙動と材料物性との関連，電力中央研究所報告，No. 72012，1973年4月。
- 18) 川崎・鈴木・佐藤：半無限媒質中の断層によって生じる地震波（その2），地震，Vol. 25, No. 2, pp. 333~342, 1972年。
- 19) 本多弘吉：地震波動，岩波書店，p. 163 1954年。
- 20) 野田・上部：強震記録の上下動成分に関する一考察，第14回地震工学研究発表会講演概要，pp. 93~96, 1974年7月。

(1976.9.3・受付)
