

I-16 任意形状の谷に位置する ロックフィルダムの応力解析

室蘭工業大学大学院	学生員	西村 哲治
室 蘭 工 業 大 学	正 員	岸 徳光
室 蘭 工 業 大 学	正 員	松岡 健一
日本大学生産工学部	正 員	能町 純雄

1. はじめに

フィルタイプダムの応力解析は、従来までダムを定剛性せん断梁にモデル化して行なわれてきた。しかしながら、近年実ダムにおける波動伝播や振動性状に関する実測結果よりせん断波速度がおおよそ天端からの高さの $1/3$ 乗に比例することや、ダムの振動特性に関しては谷形状によってその特性が大きく変化し、U字谷ではせん断変形に近いが、V字谷では堤体上部に変形が集中する傾向にあることが明らかとなり、種々の理論の修正が試みられている。たとえば、Gazetas¹⁾ は剛性が高さの $2/3$ 乗に比例するとして不均質せん断梁理論を展開しており、大町等^{2) 3)} は同様なモデルを有限要素法化することによって任意形状の谷に位置するダムの応答解析を可能にしている。

著者等も先に、矩形谷に位置するフィルタイプダムの動的問題について、ダムを剛性が高さの指数乗に比例する不均質せん断梁にモデル化し、ダム軸方向には有限Fourier変換、ダム高さ方向には有限差分変換を用いて解析を行ない、ダムの各パラメーターが固有値特性に与える影響について検討を行なった^{4) 5)}。さらに、これら動的な解析手法と同様な手法を用いて矩形形状の谷を有するダムに静的荷重（静水圧の水平方向成分）が作用する場合の解析を行ない、ダムの剛性や谷幅等による変形、応力への影響について検討を行なっている⁶⁾。ここでは、上記矩形形状の谷に位置するダムの静的解析結果に、Point-matching法を併用して任意形状の谷に位置するダムの静的解析を試み、ダムの剛性や谷形状による変形への影響について検討を行なったので報告する。

2. 解析法

2.1 矩形形状谷の解析

図-1 に示すような矩形形状谷を有するダムにおいて、座標軸 x, y, z を図のようにとり対応する変位をそれぞれ u, v, w とする。変位は y 軸方向に平面保持を仮定して次のようにおく。

$$u = 0, \quad v = v(x, z), \quad w = 0 \quad \dots\dots (1)$$

さらに、座標と断面形状に関する無次元パラメーターを次のように定義する。

$$\xi = x/h, \quad \eta = z/h, \quad \Gamma_h = h'/h$$

$$\Gamma_L = h/L, \quad \Gamma_B = H/B, \quad K' = h'/H \quad \dots\dots (2)$$

いま、図-2 で示される微小要素において、 Q_z, Q_x をそれぞれ z 断面、 x 断面に作用する y 軸方向の断面力、 P_y を y 軸方向に作用する外荷重とすると、 y 軸方向の力の釣合いは図より

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_z}{\partial z} = -P_y \quad \dots\dots (3)$$

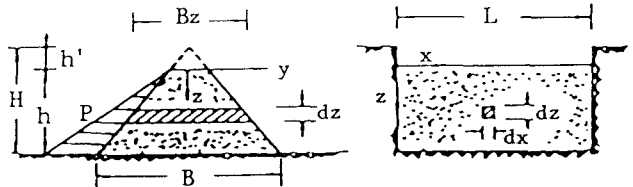


図-1 矩形形状谷を有するダムの断面形状および座標軸

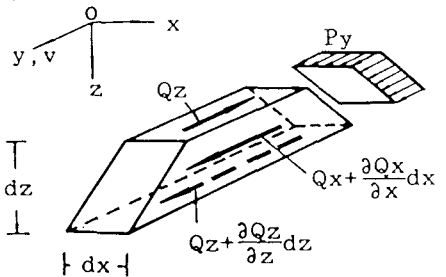


図-2 微小要素に作用する断面力および外力

さらに、 z 断面のせん断係数を G_z 、上下流方向の堤幅を B_z とすると各断面力は変位の関数として次のように示される。

$$Q_z = G_z B_z \frac{\partial v}{\partial z} \quad \dots\dots (4)$$

$$Q_x = G_z B_z \frac{\partial v}{\partial x} \quad \dots\dots (5)$$

ここで、ダム堤体の剛性を一般化して次のように仮定する。

$$G_z = G_m \eta^n \quad (G_m : \text{堤体底部のせん断係数}) \quad \dots\dots (6)$$

式(3)をFourier変換することにより次式が得られる。

$$\frac{d Q_{z,m}}{d \eta} - (m \pi r_L) Q_{x,m} = -P_{y,m} \quad \dots\dots (7)$$

また、同様に式(4)、(5)をFourier変換することにより次式を得る。

$$Q_{z,m} = \frac{1}{r_B} (\eta + r_h) \eta^n \frac{d V_m}{d \eta} \quad \dots (8)$$

$$Q_{x,m} = \frac{m \pi r_L}{r_B} (\eta + r_h) \eta^n V_m \quad \dots (9)$$

ここで、 $V_m = G_m \cdot S_m[v]$ 、 $P_{y,m} = S_m[Py]$ 、 $Q_{z,m} = S_m[Q_z]$ 、 $Q_{x,m} = C_m[Q_x]$ である。

式(7)に式(8)、(9)を代入すると V_m に関する式が得られる。すなわち、

$$\frac{d^2 V_m}{d \eta^2} + \left(n + \frac{\eta}{\eta + r_h}\right) \frac{1}{\eta} \frac{d V_m}{d \eta} - (m \pi r_L)^2 V_m = - \frac{h r_B}{(\eta + r_h) \eta^n} P_{y,m} \quad \dots\dots (10)$$

境界条件は次式で与えられる。

$$\text{ダム天端} (\eta = 0) \text{で } Q_{z,m} = 0, \quad \text{ダム底部} (\eta = 1) \text{で } V_m = 0 \quad \dots\dots (11)$$

これらの境界条件式を用いて式(10)を解くのは困難なのでここでは差分式に変換して解析を行なう。これにより、式(10)は次のようなmatrix式に整理できる。

$$[K_v] \{V\} = h \cdot r_B [K_p] \{Py\} \quad \dots\dots (12)$$

したがって、変位 $\{V\}$ は次式より求められる。

$$\{V\} = [K]^{-1} \{Py\} \quad (\text{ただし } [K]^{-1} = h \cdot r_B [K_v]^{-1} [K_p]) \quad \dots\dots (13)$$

2.2 任意形状谷の解析

任意形状谷の解析は、図-3のようにダム天端の谷幅が等しい矩形状谷の解析結果(以下基本形という)に、境界条件を満たすようにPoint-matching法を併用して行なう。ただし、ダム天端とダム底部においては既に境界条件を満足しているのでここでは考慮しない。したがって、ダム高さ方向の分割数を N とすると、谷形状が対称の場合は $N-1$ 個、非対称な場合は $2(N-1)$ 個の差分点においてmatchingを行なう。

いま、 P_k 、 $V_{i,k}$ 、 $V_{i,o}$ を次のようにおく。

P_k : 基本系の k 点に作用する集中荷重 ($k=1 \sim N-1$, $1' \sim N-1'$)

$V_{i,k}$: P_k が作用したときの基本系の i 点の変位

$V_{i,o}$: 基本系に静水圧の水平方向成分が作用したときの i 点の変位

これより、それぞれの境界について次式が成り立つ。

$$V_{i,o} + \sum_{k=1}^{N-1} (V_{i,k} \cdot P_k) + \sum_{k=1'}^{N-1'} (V_{i,k} \cdot P_k) = 0 \quad \dots\dots (14)$$

$$V_{i',o} + \sum_{k=1}^{N-1} (V_{i',k} \cdot P_k) + \sum_{k=1'}^{N-1'} (V_{i',k} \cdot P_k) = 0 \quad \dots\dots (15)$$

式(14)、(15)を1つのmatrix式にまとめ、整理すると、

$$\{P_k\} = -[V_p]^{-1} \{V_o\} \quad \dots\dots (16)$$

上式中の $\{P_k\}$ 、 $\{V_o\}$ はそれぞれ P_k 、 $V_{i,o}$ に対応するベクトルであり、matrix $[V_p]$ の要素は集中荷

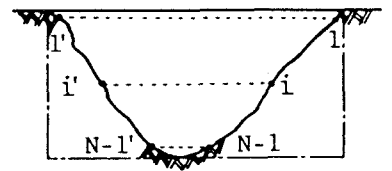


図-3 Point-matching法の併用

重が作用する場合として式(13)を適用し、逆変換を行なうことにより求められる。

以上より、任意点(i,j)の変位 $V_{i,j}$ は次式より得られる。

$$V_{i,j} = (V_{i,j})_0 + \sum_{k=1}^{N-1} \{ (V_{i,j})_k \cdot P_k \} + \sum_{k=1}^{N-1'} \{ (V_{i,j})_k \cdot P_k \} \dots\dots (17)$$

ここで、 $(V_{i,j})_0$ は基本系に静水圧の水平方向成分が作用したときの任意点の変位であり、 $(V_{i,j})_k$ は P_k が作用したときの基本系の任意点の変位である。

3. 数値解析結果および考察

数値解析では精度の検討の結果、ダム高さ方向の分割数を80とし、Fourier級数の項数を71項まで考慮して解析を行なった。 また今回掲載した数値解析結果は、剛性指数 $n=2/3$ の不均質せん断梁とし、堤体の断面を三角形断面($K'=0$)としたものである。 谷形状については、非対称な形状も解析可能であるが、今回は対称なものに限定して解析した。 さらに、外荷重に関しては静水圧の水平方向成分のみを考慮し、満水状態を想定している。 なお、解析結果はデータの汎用性をもたせるために全て無次元化して整理している。

図-4は、 $L/H=3.0$ に限定したときの谷形状によるダム軸中央部の天端変位への影響について検討したものである。 横軸は三角形断面から矩形断面まで変化させるために、ダム上部の谷幅を L_1 、底部の谷幅を L_2 とし、その比(L_2/L_1)を用いて示している。 当然のことながら、天端変位は比の値が大きくなるにつれて矩形状谷の値に漸近している。 また、結果より矩形状谷に近い部分では谷形状为天端変位に与える影響は小さいが、三角形状谷に近い部分ではその影響が大きいようである。 図-5は、横軸に谷幅に関するパラメーターをとり、谷幅がダム軸中央部の天端変位に与える影響について検討したものである。 解析の対象とした谷形状は、矩形状谷と3種類の台形状谷($L_2/L_1 = 0.8, 0.5, 0.2$)である。 なお、図中の横軸に平行な直線は谷幅を無限大としたときの値を示している。 図より、谷幅が無限大のときはいずれの谷形状も同じ値を示しているが、有限な場合は谷形状による影響がみられ、 L_2/L_1 の値が小さいほど矩形状谷と比較して著しく変位が減少している。 例えば、 $L/H=3.0$ のダムの場合 $L_2/L_1 = 0.8$ では矩形状谷の場合と比較して 2%と減少の程度も小さいが、 $L_2/L_1 = 0.5$ では12%程度、 $L_2/L_1 = 0.2$ では 約44%も減少している。 また、全体的には $L_2/L_1 = 0.8$ は矩形状谷の分布とほぼ同じ傾向にあることがわかる。 図-6 は、谷形状の変化によるダム軸中央部の高さ方向変位分布((a)図)とダム軸方向の天端変位分布((b)図)を示したものである。 (a)図において、矩形状谷と $L_2/L_1 = 0.8$ なる台形状谷ではほぼ同様の分布を示しているが、 $L_2/L_1 = 0.5, 0.2$ と小さくなるにつれて変位も小さくなってい

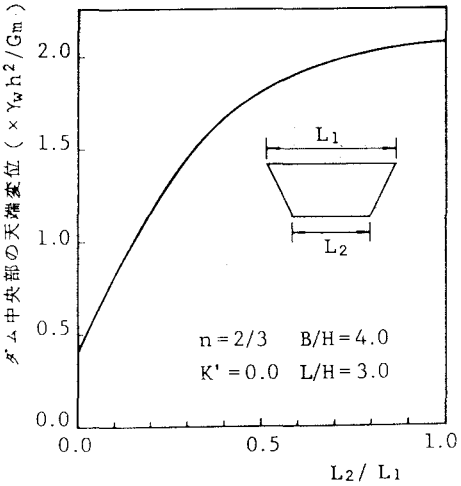


図-4 谷形状の変化による
ダム中央部の天端変位の変化

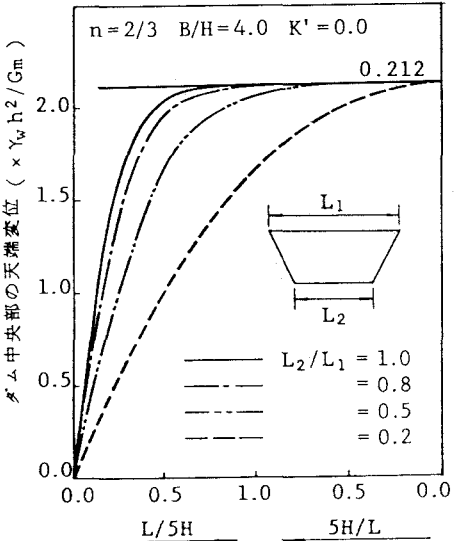
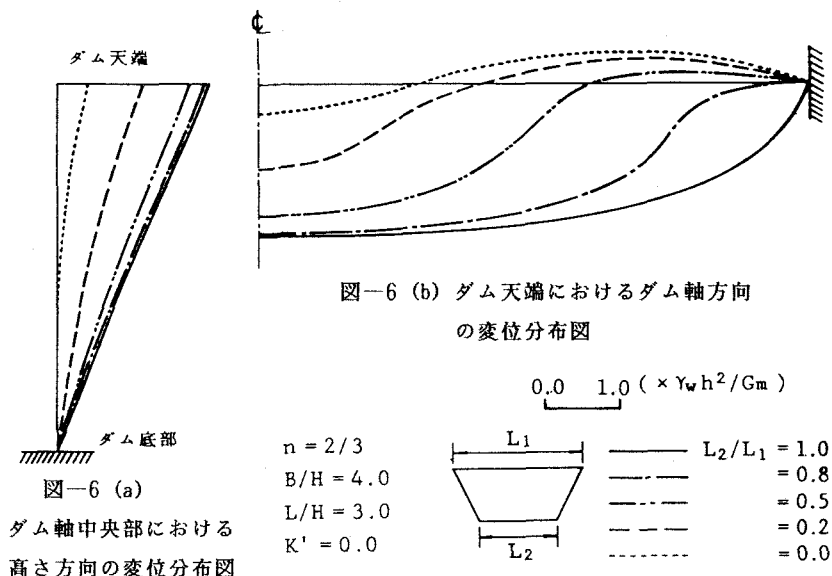


図-5 谷幅の変化による
ダム中央部の天端変位の変化

る。特に三角形状谷に関しては、天端付近では多少の変形を生じているが、底部付近ではほとんど生じていない。これは、谷の境界端の影響によるものと考えられる。一方、(b)図より $L_2 / L_1 = 0.8$ の台形状谷の天端変位分布は、ダム軸中央部では矩形形状谷とはほぼ同様の分布となっているが、境界端付近では変位が急に小さくなっており、谷形状の影響を強く受けているようである。また、 $L_2 / L_1 = 0.5$ 以下の台形状谷の場合では、負の方向(上流側)への変形が見られ、その傾向は L_2 / L_1 の値が小さいほど著しくなっている。



4. おわりに

不均質せん断梁理論を用いて矩形形状の谷を有するフィルタイプダムの静的解析を行ない、その解析結果に Point-matching法を併用して任意形状の谷に位置するダムの静的解析を行なった。その結果、 $L_2 / L_1 = 0.8$ 程度では境界端付近において変位分布が多少異なるもののほぼ矩形形状の谷の解析結果と一致した。しかし、 $L_2 / L_1 = 0.2$ あるいは三角形状谷では境界端の拘束による影響が大きく、矩形形状谷とは全く異なる変位分布を示すことが明らかとなった。したがって、現在最も多く建設されている $L/H=3.0$ 程度のダムの解析には、堤体の剛性の他に谷形状をも考慮した解析が必要であると考えられる。

なお、本研究は昭和62年度文部省科学研究費補助金を受けて行なったものである。また、数値解析は北海道大学大型計算機センター HITAC M-680H を用いて行なったものである。

5. 参考文献

- 1) Gazetas, G. : A new dynamic model for earth dams evaluated through case histories., Soils and Foundations, Vol.24, No.1, 1981.3.
- 2) 大町達夫・時松孝次 : 3次元フィルダムの振動解析手法のための実用的モデル, 土木学会論文報告集, 第328号, 1982.12.
- 3) 大町達夫・時松孝次 : フィルダムの実用的3次元地震応答解析手法の定式化, 土木学会論文報告集, 第333号, 1983.5.
- 4) 岸徳光・松岡健一・能町純雄 : フィルダムの固有振動モードの検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第41号, 1985.2.
- 5) 岸徳光・松岡健一・能町純雄 : 曲げとせん断を考慮した2次元切頭くさび形梁モデルを用いたフィルダムの固有振動数解析, 構造工学論文集, Vol.31A, 1985.3.
- 6) 西村哲治・岸徳光・松岡健一・能町純雄 : 矩形谷に位置するフィルタイプダムの静的3次元解析について, 土木学会第41回年次学術講演会講演概要集, 第1部, 1986.11.