

# I-14 高見ダム洪水吐耐震設計

北海道大学 工博 能町 純雄  
 北海道電力㈱ 安田 稔  
 北電興業㈱ 杉田 誠  
 " " 〇渡辺 信行

## 1. ま え が き

高見ダム洪水吐シュート部の一部には、左岸側ウォールに押え盛土のない区間があり、この箇所は10mのブロック（開渠）が5箇連結され杭基礎に支持された構造体である。これより上流側は押え盛土で、下流側はスラストブロックで固定されている。

この構造体には右岸側ウォールに山側から土圧が作用しており、さらに地震力が作用した場合にこれら5ブロックのチャンネルが両端で固定されたブロックの間にあるどのような挙動を示すか検討するものである。

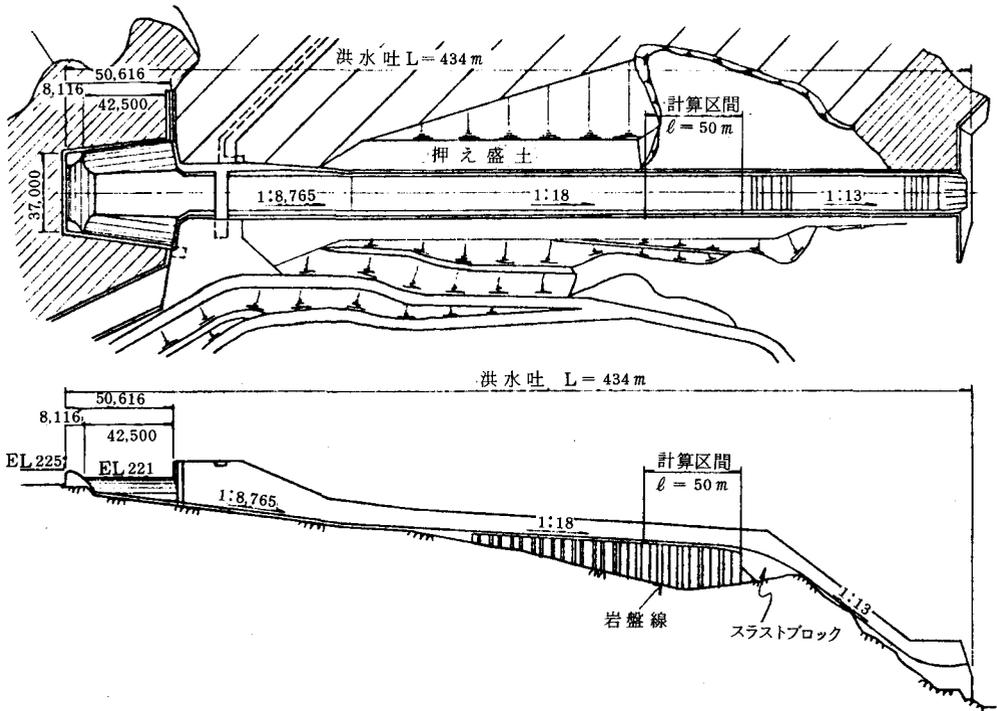


図-1 洪水吐平面図及び縦断面図

## 2. 解析手法

洪水吐の解析モデルは、5ブロックが両端のブロックおよび杭によって支持され、各要素間は施工継手が設けられており縁が切られた構造となっているが、水平方向のせん断力は伝達されるものとした。

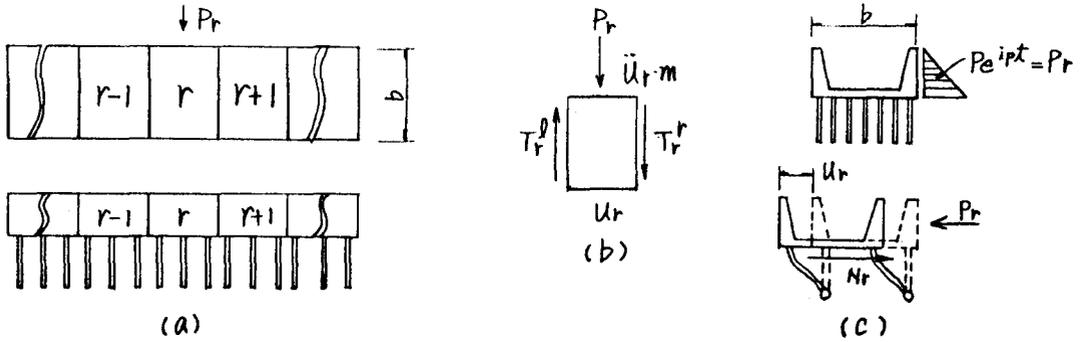


図-2 解析モデル

解析モデルの中間部第  $r$  番の要素の水平変位を  $U_r$  とし、その加速度を  $\ddot{U}_r$  とすれば力のつり合いは式(1)となる。

$$m\ddot{U}_r + T_r^r - T_r^l + N_r = P_r(t) \quad (1)$$

ここに  $T_r^r$ ,  $T_r^l$  はブロック間のせん断力を伝達するせん断鉄筋等による反力で、変位差に比例すると仮定できる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} T_r^l &= -(U_{r+1} - U_r) \times C \\ T_r^r &= -(U_r - U_{r-1}) \times C \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

図-2の(c)に示す  $N_r$  は杭基礎からの抵抗力であるから、式(3)で表わされる。

$$N_r = kU_r \quad (3)$$

故に、(1)式は次のとおりである。

$$mU_r - C(U_{r+1} - 2U_r + U_{r-1}) + kU_r = P_r(t) \quad (4)$$

ここに、 $m$  : 要素の質量、 $C$  : 要素間のせん断バネ係数 (  $\text{ton}/m$  又は  $\text{Kg}/\text{cm}$  )

$P_r(t)$  : 要素  $r$  に作用する土圧動圧力、 $k$  : 杭を単位長さだけ変位させる力

今、 $r=0$ ,  $n$  で土圧がウオールの両側から均衡に作用すると仮定すれば、

$$U_r = \sum_{j=1}^n \bar{U}_j \cdot \sin \frac{j\pi r}{n} \quad (5)$$

とおくことができるので、

$$m\ddot{\bar{U}}_j + (CD_j + k)\bar{U}_j = \bar{P}_j(t)$$

となり、 $P_r(t) = P \sin \omega t$  とおくことができれば、次式のとおりである。

$$\bar{P}_j(t) = P \sin \omega t \times \frac{\sin j\pi}{D_j} \frac{2}{n} \quad (6)$$

$$\text{ただし } D_j = 2 \left( 1 - \cos \frac{j\pi}{n} \right) = 4 \sin^2 \frac{j\pi}{2n}$$

$$\bar{U}_j = \frac{2}{n} \frac{\sin j\pi}{D_j} \frac{P \sin \omega t}{CD_j + k - \omega^2 m}$$

故に、

$$U_r = \frac{P \sin \omega t}{m \left( \frac{k}{m} - \omega^2 \right)} \left\{ 1 - \frac{\sinh(n-r)\lambda'}{\sinh n\lambda'} + \sinh r\lambda' \right\} \quad (7)$$

ただし  $\frac{\lambda'}{2} = \sinh^{-1} \sqrt{\frac{m}{C} \left( \frac{k}{m} - w^2 \right) / 2}$

中央の要素  $r = n/2$  の応答は、次式で表わされる。

$$U_{r=n/2} = \frac{P}{m \left( \frac{k}{m} - w^2 \right)} \left\{ 1 - \operatorname{sech} \frac{n\lambda'}{2} \right\} \quad (8)$$

共振点は、 $n\lambda'/2 = i\pi/2 \quad \therefore \lambda'/2 = i\pi/2n$

$$\sqrt{\frac{m}{C} \left( w^2 - \frac{k}{m} \right) / 2} = \sin^2 \frac{\pi}{2n}$$

$$w^2 = 4 \sin^2 \frac{\pi}{2n} \frac{C}{m} + \frac{k}{m}$$

今、 $c = \alpha k$  ( $\alpha$ :無名数)とおけば

$$w^2 = \frac{k}{m} \left( 1 + 4\alpha \sin^2 \frac{\pi}{2n} \right) \quad (9)$$

要素1個のみにおける共振円周波数は

$$w^2 = \frac{k}{m}$$

であるから、土圧不均衡地点では要素1個のみの円周波数より大である。

式(9)を用いて拡大すれば、一般の  $P(t)$  から次式が与えられる。

$$U_r = \frac{n}{2} \int_0^t \left\{ P(\tau) e^{-h(t-\tau)} \sin w(t-\tau) \right\} d\tau \quad (10)$$

ここに、 $P(\tau)$  は土圧強度であるが、ここではこれにエルセントロ型の地震波形を代入して変位を求めることとした。

### 3. モデルに基づく計算

#### 3-1 計算式

前項2の式(1)より5ブロックの要素のつり合いは、式(1)のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} m \ddot{u}_1 - (T_2 - T_1) + N_1 &= P f(t) \\ m \ddot{u}_2 - (T_3 - T_2) + N_2 &= P f(t) \\ m \ddot{u}_3 - (T_4 - T_3) + N_3 &= P f(t) \\ m \ddot{u}_4 - (T_5 - T_4) + N_4 &= P f(t) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

せん断鉄筋による反力  $T_r$  は、式(2)より

$$\left. \begin{aligned} T_1 &= CU_1 \\ T_2 &= C(U_2 - U_1) \\ T_3 &= C(U_3 - U_2) \\ T_4 &= C(U_4 - U_3) \\ T_5 &= C(U_5 - U_4) \\ T_6 &= -CU_6 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

杭による抵抗力  $N_r$  は、式(3)より

$$N_1 = kU_1, \quad N_2 = kU_2, \quad N_3 = kU_3, \quad N_4 = kU_4, \quad N_5 = kU_5 \quad (3)$$

今、 $C = \alpha k = k/2$  と仮定すれば、式(1)は式(2)、(3)を代入し整理すると式(4)となり、つり合いの基本式が得られる。

$$\left. \begin{aligned}
 m \ddot{u}_1 + k/2 (4u_1 - u_2) &= P f(t) \\
 m \ddot{u}_2 + k/2 (4u_2 - u_3 - u_1) &= P f(t) \\
 m \ddot{u}_3 + k/2 (4u_3 - u_4 - u_2) &= P f(t) \\
 m \ddot{u}_4 + k/2 (4u_4 - u_5 - u_3) &= P f(t) \\
 m \ddot{u}_5 + k/2 (4u_5 - u_4) &= P f(t)
 \end{aligned} \right\} \text{----- (14)}$$

3-2 構造体の物性諸元

(1) m : 構造体の質量

図-2(c)に示す構造体の自重Wは1m当り188.9tonであり、1ブロックの長さは1.0mであるから、 $m = 1.0W/g = 1.0 \times 188.9 / 9.8 = 193 (\text{ton sec}^2 / \text{m})$

(2) k : 1ブロック(要素)を1m変位させる水平力

洪水吐の基礎杭1本当りの変位量 $y_0$ は次式で与えられる。

$$y_0 = \frac{k}{4EI\beta^3} \cdot \frac{1}{\phi_1} \text{----- (15)}$$

ここに、E : 杭の弾性係数、I : 杭の断面二次モーメント、 $\beta$  : 特性値  $\beta = \sqrt{BK_h/4EI}$   
 $\phi_1$  : 杭頭の剛性率

よって、1ブロック(杭21本)を変位させる力kは

$$k = \sum_{n=1}^{21} y_0 4EI\beta^3 \phi_1$$

ここに、 $y_0 = 1.0 \text{ m}$ ,  $\phi_1 = 1$ ,  $E = 2.1 \times 10^9 \text{ t/m}^2$ ,  $I = 5.24 \times 10^{-4} \text{ m}^4$ ,  
 $\beta = 4.1 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ ,  $4EI\beta^3 = 3,034$

$$\therefore k = 21 \times 1.0 \times 3,034 \times 1.0 = 63,714 \text{ ton}$$

(3) P : 1ブロックに作用する土圧動圧力

$$P = m + \frac{P_{HE} - P_H}{g} \text{----- (16)}$$

ここに、m : 1ブロックの質量 = 193 (ton sec<sup>2</sup> / m),

$P_{HE}$  : 地震時土圧 = 394 ton

$P_H$  : 常時土圧 = 297 ton

g : 重力加速度 = 9.8 m / sec<sup>2</sup>

$$\therefore P = 193 + (394 - 297) / 9.8 = 203 \text{ ton sec}^2 / \text{m}$$

(4) f(t) : エルセントロ地震波形

$$f(t) = \ddot{U}_{\max} w \sin(t + 3t^3) \text{----- (17)}$$

ただし、 $w \leq 1.5 \text{ cps}$  のとき  $t \leq 1.39 \text{ sec}$

$$\ddot{U}_{\max} w = 0.035 (t + 3t^3)$$

$1.5 < w < 3.5 \text{ cps}$  のとき  $1.39 < t < 1.89 \text{ sec}$

$$\ddot{U}_{\max} w = 0.33$$

$$W \geq 1.89 \text{ sec}$$

$$\ddot{U}_{\max} w = \frac{2.16}{\left(\frac{t + 3t^3}{2\pi}\right)^{1.5}}$$

#### 4. 解析結果

式(4)の解法には大型電子計算機( Univac 1100型 )を使用し、計算には Runge-Kutta の方法を、チェック計算には、Runge-Kutta-Gillの方法を使用した。その計算結果に基づいて次のとおり検討した。

##### (1) 最大変位 $U_{max}$

個々のブロックの最大変位量は表-1のとおりである。

荷重及び構造体が中央ブロックに対して対称であるため、1, 5ブロック及び2, 4ブロックは同じ結果となる。

エルセントロ型地震波形では  $1.39 \text{ sec} < t < 1.89 \text{ sec}$  で最大の加速度を与えているが、最大変位はそれよりも遅れて出ている。

相接するブロックの最大変位量差は、表-2のとおりである。

相接するブロックの最大変位量差は、個々のブロックの変位量の差で表わされる。表-2からわかるように最大変位量差は、両端ブロックと固定ブロックの間で起り、その値は  $U_{max} = 3.49 \text{ mm}$  である。

表-1 最大変位量

$u_1 - u_5$	$U_{max} \times 10^{-3} (m)$	$t (sec)$
$u_1 - u_5$	3.49	2.50
$u_2 - u_4$	4.55	2.49
$u_3$	5.95	2.98

表-2 最大変位量差

	$U_{max} \times 10 (m)$	$t (sec)$
$u_1 - u_0$	3.49	2.50
$u_2 - u_1$	3.21	2.98
$u_3 - u_2$	1.38	2.99

##### (2) 最大せん断力 $T_{max}$

最大せん断力は相接するブロック間での最大変位量差から求められる。今、最大変位量差は  $U_{max} = 3.49 \text{ mm}$  であるから、これを式(2)に代入し最大せん断力を計算する。

$$T_{max} = T_1 \max C, U_1 \max = \frac{k}{2} U_1 \max = 111.2 \text{ t}$$

##### (3) せん断鉄筋量の算定

前述のとおり固定ブロックと No. 1 及び No. 5 ブロック間に作用する最大せん断力は、111.2 t であり、これを洪水吐の全断面積で受ける。

所要鉄筋量  $A_s$  は洪水吐の断面積  $A = 75.6 \text{ m}^2$  で、鉄筋の許容せん断力を  $\tau_a = 800 \text{ Kg/cm}^2$  とすると、次のとおりである。

$$A_s = T_{max} / \tau_a = 139 \text{ cm}^2$$

この結果から施工に当っては図-3に示すとおり、異形鉄筋 D 29 を 29 本配し、せん断力に対処した。

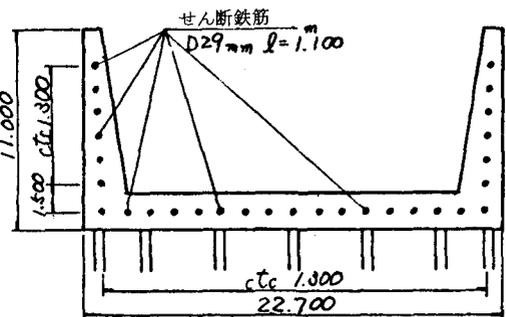


図-3 せん断鉄筋配置図

##### (4) 変位量による検討

洪水吐の静的解析による変位量  $U$  は式(5)より求められ、水平力  $H = 247.90 \text{ t}$  とすると  $U = 3.89 \text{ mm}$  となる。

この静的解析の結果と動的解析による変位量(表-1)を比較すると、両端ブロックでは静的解析値より小さく、中間のブロックでは大きな値を示しており、個々のブロックの挙動が明らかになっている。

## 5. あ と が き

以上の動的解析により5個の連結されたブロックの地震時における挙動が明らかとなり、今回の解析モデルに関する限りでは、連結されたブロック間に生ずる変位量は、静的解析で求めた変位量と大差ない値を示し、静的解析の許容範囲内にあると解され、この計算例と同規模の構造物ならば、静的解析で充分安全側にあると考えられる。今後、軟弱地盤等の基礎上に築造される長大構造物の解析の一助となるものと考えられる。