

I-27 ダムに近接した取水塔の耐震設計について

九州大学工学部 正員 小坪 清 貞

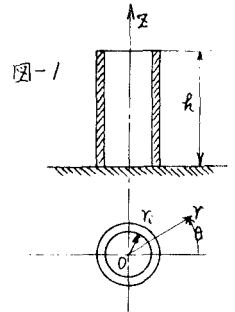
まえがき

取水塔の耐震性を究明するには先づ、その自由振動性状を求め、地震時取水塔にからく外力を明らかにし、然る後その地震に対する応答を求めなければならない。取水塔は下端固定、上端自由の塔であるが、その内部及び外部にある水の為に振動性状が空気中にある場合と異、てくる。塔状構造物に及ぼす水の影響は一般に附着質量の形で表現される。自由振動に対する附着質量と、強制振動に対する附着質量とは、取水塔がダムから相当離れている場合には殆んど同一であるが、取水塔がダムに近接している場合には異、てくる。本論はこの点について理論的考察を加えたもので、附着質量には、(i) 取水塔内部にある水の附着質量、(ii) 取水塔外部にある水の附着質量とがあるが、(i) はダムと取水塔との距離には無関係であり、(ii) はダムと取水塔との距離によつて変る。

I. 自由振動の附着質量

1. 取水塔内部にある水の附着質量

地震動を $(a_0 \omega_0) \sin \omega_0 t$ とするとき、この動水圧は図-1に示すように、



円筒座標 (r, θ, z) による σ の偏微分方程式

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma}{\partial r} + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} - \frac{w_0}{\rho E_v} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = 0 \quad \text{--- (1)}$$

境界条件

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial z}\right)_{z=0} = 0, \quad (\sigma)_{z=h} = 0, \quad \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \theta}\right)_{\theta=0} = 0, \quad (\sigma)_{\theta=\frac{\pi}{2}} = 0, \quad \left(\frac{\partial \sigma}{\partial r}\right)_{r=r_0} = \alpha w_0 \cos \theta \sin \omega_0 t,$$

によつて解けは求められ、取水塔の高さ方向単位長さ当りの附着質量 F_i は次式で与えられる。

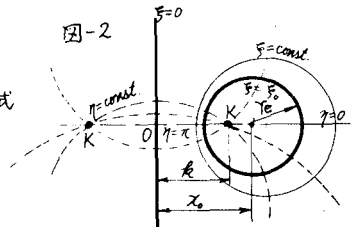
$$P_i = w_0 \pi r_0^2 F_i, \quad F_i = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{16 (R/r_0)^{(-1)^m} I_1(\lambda_m r_0) \cos \lambda_m z}{\pi^2 (2m+1)^2 \{I_0(\lambda_m r_0) + I_2(\lambda_m r_0)\}} \sin \omega_0 t \quad \text{--- (2)}$$

ここに、 w_0 は水の単位体積重量、 E_v は体積弾性率、 h は取水塔の高さ、 r_0 はその内半径、 $\lambda_m = (2m+1) \frac{\pi}{2h}$ である。 $R/r_0 \rightarrow \infty$ の場合、 $F_i \rightarrow 1$ となる。

2. 取水塔の外部にある水の附着質量

この場合は、図-2に示すように、双対円筒座標による σ の微分方程式

$$\frac{(\cos \theta \xi - \cos \eta)^2}{R^2} \left\{ \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \eta^2} \right\} + \frac{\partial^2 \sigma}{\partial z^2} - \frac{w_0}{\rho E_v} \frac{\partial^2 \sigma}{\partial t^2} = 0 \quad \text{--- (3)}$$



と、河流方向振動の場合には、次の境界条件

$$\left(\frac{\partial \sigma}{\partial z}\right)_{z=0} = 0, \quad (\sigma)_{z=h} = 0, \quad \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \eta}\right)_{\eta=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \eta}\right)_{\eta=\pi} = 0, \quad \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \xi}\right)_{\xi=R} = \alpha w_0 k \frac{\cos \theta \xi \cos \eta - 1}{(\cos \theta \xi - \cos \eta)^2} \sin \omega_0 t, \quad \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \xi}\right)_{\xi=0} = 0$$

によつて解けは求められる。ここに ξ_0 は取水塔表面の座標で、 $\xi_0 = \cos \theta (x_0/r_0)$ 、 r_0 は取水塔の外半径、 x_0 はダム表面と取水塔中心との距離、 $\xi=0$ はダム表面の座標である。 R/r_0 の値が大きい場合には、

2方向の水の流れを無視でき、取水塔の高さ方向単位長さ当りの附着質量は次式で与えられる。

$$P_2 = \omega_0 \pi r_0^2 F_2, \quad F_2 = \frac{4}{\pi^2} \sinh^2 \xi_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cosh n \xi_0}{n} \left\{ \int_0^{\pi} \frac{(\cosh \xi_0 \cosh n \eta - 1) \cos n \eta}{(\cosh \xi_0 - \cosh n \eta)^2} d\eta \right\}^2 \sin \omega t \quad (4)$$

河流垂直方向振動の場合には、同様にして附着質量は次の如くなる。

$$P_3 = \omega_0 \pi r_0^2 F_3, \quad F_3 = \frac{4}{\pi^2} \sinh^2 \xi_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cosh n \xi_0}{n} \left\{ \int_0^{\pi} \frac{\sin \eta \sin n \eta}{(\cosh \xi_0 - \cosh n \eta)^2} d\eta \right\}^2 \sin \omega t \quad (5)$$

II. 強制振動の附着質量

1. 取水塔の内部にある水の附着質量は自由振動の場合と殆んど等しい。

2. 取水塔の外部にある水の附着質量

取水塔に切く動水圧は、取水塔とダムとの相対加速度によって生ずる。河流方向振動の場合には、取水塔とまわりの水との相対加速度はダムの振動により、地震加速度より減少し、次式で与えられる。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \alpha g f \sin \omega t, \quad f = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{4 e^{-\lambda_m' x_0} \cos \lambda_m' z}{(2m+1)\pi} \quad (6)$$

f の第2項は重力ダムに切く地震時動水圧の理論式より容易に導かれ、 $\lambda_m' = (2m+1)/2H$ 、 H は全水深である。従って、 r_0/r_e が大きい場合取水塔の高さ方向単位長さ当りの附着質量は I-2 の F_2 の値を用いて次のように表わされる。

$$P_{e2} = \omega_0 \pi r_0^2 F_2, \quad F_2 = F_2 \cdot f \quad (7)$$

河流垂直方向振動に対しては、自由振動の場合の附着質量と同一である。 $(F_3 = F_3)$

III. 数値計算

図-3 は r_0/r_e が大きい場合における自由振動の附着質量係数 F_1 , F_2 , F_3 の値と x_0/r_e のいろいろの値に対して計算したものである。取水塔に加えるべきまわりの水の附着質量は、取水塔がダムに近接すると急激に大きくなる事が判る。

図-4 は河流方向並に河流垂直方向地震動の場合に、取水塔に切く動水圧を附着質量係数 F_{e2} , F_{e3} の形で示したものである。 F_{e2} の値は H と h との関係によって異なってくるが、ここでは、取水塔に対して最も不利な $h=H$ の場合について、取水塔下端に於ける値を示した。図から明らかなように、強制外力は河流方向振動では取水塔がダムに近接する程小さくなるが、河流垂直方向振動では却って大きくなる。従って、経済的な耐震設計を行うには、河流垂直方向振動で外力が大きくなる x_0/r_e の範囲内なるべく取水塔とダムに近接させた方がよい。

なお、数値計算については学生中代真義君の労とわアうはした事を附記し、謝意を表する。

図-3 自由振動
(h/r_e が大きい場合)

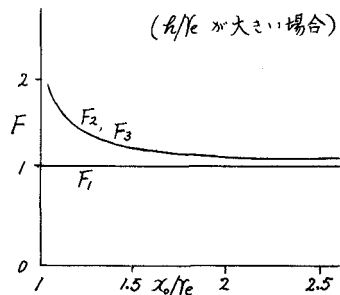


図-4 強制振動
(h/r_e が大きい場合)

