D — 4　　　動水圧の減衰作用がダムの耐震性に及ぼす影響について

准員　九大工学部　小坪清眞

1. 概論

全く不規則な地震動による動水圧の理論式を誘導し，2，3の地震記録に対して数値計算を行つた結果，従来の定常振動論における誤を指摘し，次の諸点を明らかにすることができた。 (1) 地震週期が動水圧の共振週期より短かい場合には，地動の位相より90°おくれた位相の動水圧が支配的である。(2) 実際に起る有限時間続く不規則な地震による動水圧の最大値は，Westergaard の式による値の2倍以下である。(3) 地震週期が動水圧の共振週期より短かい場合には，ダムの弾性変形によつて生ずる附加的動水圧は，ダムの弾性変形の位相より90°おくれて生じ，減衰力としてダムに作用する。(4) 重力ダムの満水時固有振動週期は動水圧の共振週期より短かい。従つて，ダムが共振するような地震週期に対しては，動水圧の減衰作用が働らき，重力ダムの振動応力は従来考えられていたものより遥かに小さい。

2. 不規則な地震動による動水圧

地震加速度を $\alpha g\psi(t)$ とすれば，動水圧 σ は次式によつて求められる。

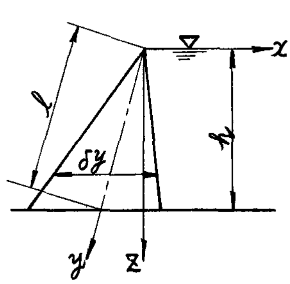
$$\sigma=\sum_{m=0}^{\infty}\frac{4\alpha w_0 V(-1)^m\cos\lambda_m(h-z)}{(2m+1)\pi}\int_0^{t-x/V}\psi(\tau)J_0\left\{\lambda_m V\sqrt{(t-\tau)^2-(x/V)^2}\right\}d\tau \qquad (1)$$

こゝに，w_0 は水の単位重量，V は水中音速，h は堤高，z は天端よりの深さ，$\lambda_m=(2m+1)\pi/2h$ である。

特別な場合として，地動が $(\alpha g/\omega^2)\cos\omega t$ で始まる場合の動水圧を，定常状態と過渡状態に分離すると次式が得られ，地震週期が動水圧の共振週期より短かい場合には，地動の位相より90°おくれた位相の動水圧が支配的となる。

$$\begin{aligned}\sigma=&-\sum_{m=0}^{s-1}\frac{4\alpha w_0(-1)^m\cos\lambda_m(h-z)}{(2m+1)\pi\sqrt{(\omega/V)^2-\lambda_m^2}}\sin\left(\omega t-\sqrt{(\omega/V)^2-\lambda_m^2}\,x\right)\\&-\sum_{m=s}^{\infty}\frac{4\alpha w_0(-1)^m\cos\lambda_m(h-z)}{(2m+1)\pi\sqrt{\lambda_m^2-(\omega/V)^2}}e^{-x\sqrt{\lambda_m^2-(\omega/V)^2}}\cos\omega t\\&+\sum_{m=0}^{\infty}\frac{4\alpha w_0 V(-1)^m\cos\lambda_m(h-z)}{(2m+1)\pi}\int_t^{\infty}\cos\omega(t-\tau)J_0\left\{\lambda_m V\sqrt{\tau^2-(x/V)^2}\right\}d\tau\end{aligned} \qquad (2)$$

図−1 重力ダム



こゝに，S は，$\lambda_m^2>(\omega/V)^2$ を満たす m の最小値である。

図−2は塚原ダムサイト地震記録（電研所報）に対し，(1)式によつて動水圧を求め，Westergaard の式による計算値に対する倍率で示したものである。また，図−3は，地震動が $(\alpha g/\omega^2)\cos\omega t$ で始まる場合に，動水圧生成のために，ダム上流面単位巾が水にあたえるエネルギーを，ダムが剛振動をなすとして求めたものである。

3. 重力ダムの振動応力

重力ダムの空虚時における振動型を $u_j(\varsigma)$, $(j=1,2,\cdots)$, $(\varsigma=z/h=y/l)$ とし，地動が定常的に $(\alpha g/\omega^2)\cos\omega t$ でダムに作用する時のダムの弾性変位を $\sum_{j=1}^{\infty} a_j u_j e^{i\omega t}$ とおけば，係数 a_j は次式によつて求められる。

$$a_j\left\{Cd_j(\omega_j^2-\omega^2+2i\mu\omega)+Be_j(\omega_j^2-\omega^2)\right\} + \sum_{r=1}^{\infty} a_r\left\{\sum_{m=0}^{s-1}\frac{iD\omega^2 f_{jm}f_{rm}}{\sqrt{\omega^2-\lambda_m^2 v^2}} - \sum_{m=s}^{\infty}\frac{D\omega^2 f_{jm}f_{rm}}{\sqrt{\lambda_m^2 v^2-\omega^2}}\right\}$$
$$= Fc_j - \sum_{m=0}^{s-1}\frac{iG(-1)^m f_{jm}}{(2m+1)\pi\sqrt{\omega^2-\lambda_m^2 v^2}} + \sum_{m=s}^{\infty}\frac{G(-1)^m f_{jm}}{(2m+1)\pi\sqrt{\lambda_m^2 v^2-\omega^2}} \quad \text{-----}(3)$$

こゝに，$B=w_0h^2/Eg$，$C=12w_0h^2/Eg\delta^2$，$D=24w_0 v h^2/Eg\delta^3 l$，$F=12\alpha w_0 h^2/E\delta^2$，$G=48\alpha w_0 v h^2/Eg\delta^3 l$，

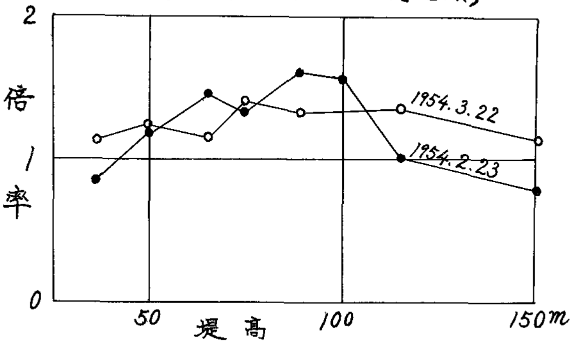
$c_j=\int_0^1 \varsigma u_j d\varsigma$，$d_j=\int_0^1 \varsigma u_j^2 d\varsigma$，$e_j=\int_0^1 \varsigma^3\left(\frac{du_j}{d\varsigma}\right)^2 d\varsigma$

$f_{jm}=\int_0^1 u_j\cos\lambda_m h(1-\varsigma)d\varsigma$，である。

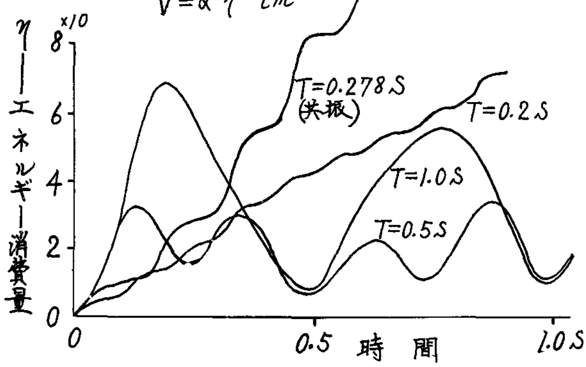
図－4は，いろいろの地震週期の場合に堤底に生ずる振動モーメントを(3)式によつて求め，静モーメントに対する倍率で示したものである。

図－4から明らかなように，振動モーメントは共振時においてもはなはだ小さい。動水圧が共振するような地震週期に対しては，振動モーメントは外力たる動水圧の倍率に支配される。図－4では定常振動を仮定したので動水圧の倍率は∞となつたのであるが，この場合には，図－2に示すような実際の地震記録による動水圧の最大値から検討して，ダムの振動モーメントは，ダムの第1次共振点における振動モーメントより大きくなることはないようである。

図－2 動水圧倍率
（塚原ダムサイト地震記録）



図－3 地動が $\cos\omega t$ で始まる場合のエネルギー消費量（$h=100\,m$）
$V=\alpha^2\eta\ \ tm$



図－4 重力ダムの堤底振動応力
（$h=100\,m$, $E=2.1\times10^6\ t/m^2$）