重力ダムの耐震性について

(動水圧の影響)

九州大学工学部　小坪清真

1. 不規則な地震動による動水圧の理論

従来の動水圧の理論式は、地震動が定常的な単弦振動であると仮定して解かれたものである。従って、地震動の卓越週期が動水圧の共振週期に一致するような場合には、動水圧は極めて大きくなり、ダムは非常に危険な状態にあるものと予想された。実在の重力ダムについて考えると、動水圧の共振週期は、地形により多少異なるが、高さ100mのダムの場合、満水時において0.2〜0.28 secである。これに対し、ダム地点の地震動の卓越週期は大体0.2 sec前後である。従って従来の理論では、ダムの安定性の問題を明白に解決することはできない。

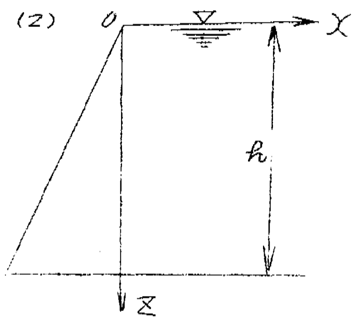
こゝに、実際に記録された不規則な地震加速度による動水圧の理論的解法が必要になってくる。

いま、図−1に示すような重力ダムにおいて、地震加速度$A(t)$による動水圧をpとすれば、pは微分方程式(1)式を、境界条件(3)式によって解けば求められる。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{w_0}{gK}\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \qquad (1)$$

$$p = \frac{w_0}{g}\frac{\partial \phi}{\partial t} \qquad (2)$$

図−1



$$\left.\begin{aligned} &(\phi)_{t=0} = 0 && (i) \\ &\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{t=0} = 0 && (ii) \\ &\left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)_{z=0} = 0 && (iii) \end{aligned}\right\} (3)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial z}\right)_{z=h} = 0 \qquad (iv)$$

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial x}\right)_{x=0} = -\int_0^t A(\tau)\,d\tau \qquad (v)$$

こゝに、w_0 及びKは、水の単位重量及び体積弾性率、gは重力加速度である。水中音速をvとすれば

(1)式の解は次のようになる。

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

こゝに、$\lambda_m=(2m+1)\pi/2h$ で、$A(t)=\alpha g\ \psi(t)$とおいた。αは地震加速度記録の最大震度である。地震加速度記録があたえられると (4)式によって、刻々における動水圧を計算できる。(図)

2、地動が$(\alpha g/\omega^2)\cos\omega t$で始まる場合

この場合には、(4)式において、$\psi(t)=\cos\omega t$とおいて積分を遂行し、定常状態と過渡状態に分離すると次式が得られる。

$$p = -\sum_{m=0}^{s-1} \frac{4\alpha w_0(-1)^m \cos\lambda_m(h-z)}{(2m+1)\pi\sqrt{(\omega/v)^2-\lambda_m^2}} \sin\left\{\omega t-\sqrt{(\omega/v)^2-\lambda_m^2}\ x\right\}$$

$$-\sum_{m=s}^{\infty} \frac{4\alpha w_0(-1)^m \cos\lambda_m(h-z)}{(2m+1)\pi\sqrt{\lambda_m^2-(\omega/v)^2}} e^{-\sqrt{\lambda_m^2-(\omega/v)^2}\ x} \cos\omega t$$

$$+\int_t^{\infty} \cos\omega(t-\tau) J_0\left\{\lambda_m v\sqrt{\tau^2-(x/v)^2}\right\} d\tau \qquad (5)$$

従来の定常振動論においては、(5)式の第1項を音速より大きな速度をもつ波動であるという理由ですてたのであるが、この項もやはり採用すべきものである。従って地震動の週期が動水圧の共振週期より短かい場合には、地動と同一位相の動水圧は極めて小さいが、地動の位相より90° おくれた位相の動水圧が支配的に大きい。(図)

3．不規則な地震記録に対する計算結果

実際に記録された地震加速度に対し、2.3 の計算を行った結果、次の諸点が明らかになった。

(1) 或時刻における動水圧は、その時刻の地震加速度に必ずしも比例するものではなく、動水圧の共振週期と、地震週期との関係により、最大動水圧を生ずる時刻及び大きさが異なる。

(2) 動水圧の共振週期が地震週期より大きい場合には、動水圧の位相は地震加速度の位相より90°おくれる。

(3) 地動が停止した後においても、動水圧は急に0となるものではなく、なおしばらく、動水圧の固有週期でダムに作用しながら次第に減衰する。

(4) 従来の理論では、地震週期が動水圧の共振週期に一致した時の現象を説明することができなかったが、著者の式によれば、このような時にも、動水圧の大きさは、Westergaard の式による計算値の約1.6倍程度に過ぎないことがわかった。水の粘性などによるエネルギー散逸を考えればさらに小さくなるであろう。

4．重力ダムの振動応力

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に大きいという現象は、ダムの耐震上極めて好都合である。すなわち、このような地震週期の場合には、ダムの弾性変形によって生ずる附加的動水圧がダムの変位の位相より90°おくれて生じ、減衰力としてダムに作用することを示すものである。この減衰力は極めて大きく、ダムの弾性変位を強く抑制するものと考えられる。

著者はこの観点から、地震動が $(\alpha g/\omega^2)\cos\omega t$ で定常的にダムに作用する場合の振動応力を理論的に解析し、高さ100mのダムに対し数値計算を行なった結果、次のような点が判明した。(図)

(1) 満水時における重力ダムの共振週期には、外力たる動水圧の共

振週期と ダム自身の共振週期とがあるが、一般に前者は後者より長週期である。従って、ダムが共振するような地震週期に対しては、必ず動水圧の減衰作用がある。

(2) 動水圧の共振週期を除けば、共振時における堤底応力の静応力に対する振動倍率は動水圧以外の減衰作用を無視した場合にも、4を越えない。もし、水の粘性、岩盤中に散逸するエネルギー損失などを考えて、これらの等価粘性減衰係数を限界減衰係数の10%と見れば、振動倍率は2以下となる。

(3) 振動倍率は高次振動程小さい。

(4) ダムの固有週期の伸びに及ぼす動水圧の影響は、第1次振動で約15%、第2次振動で約10%である。

(5) 動水圧が共振するような地震週期に対しては、ダムの振動倍率は外力たる動水圧の倍率に支配される。このような場合の動水圧については既に3節に示したように、動水圧はWestergaardの式によって求めた値の1.6倍程度に過ぎないから、ダムの振動応力も静応力の2倍以内に止まる。

(6) 地形の影響により、動水圧の共振週期が短かくなり、一方、岩盤変形のために、ダムの固有週期が伸びて動水圧の共振週期より大きくなる場合もあり得る。この場合にも、動水圧の共振週期が地震週期より大きい高堰堤では、動水圧の減衰作用が働らき、振動倍率は2以下となる。

以上を綜合して、一般に河巾が特に狭くない地点の重力ダムでは、動水圧の減衰作用により、振動応力は従来考えられていたものより遥かに小さいものであることがわかった。