

京都大学工学部 正員 尾島 勝

1. まえがき

重力ダムに作用する地震時の動水圧の解析において、従来、ダム貯水池の形状や貯水量を視覚したものではなく、ほとんど半無限領域と仮定して考察がなされてきた。本研究は、ダム貯水池を有限長のものとして仮定して、貯水池形状および貯水量を定目し、動水圧の性状に影響を及ぼすものの影響因子との関連性を理論的・実験的に考察したものである。

2. 理論的考察

図-1に示すようにモデル化した重力ダムと貯水池とが、同一位相で流れ方向に水平単振動を受ける場合に、圧縮性を考慮した水の運動は、図示のような波動方程式によって規定される。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

ここで、 ϕ : 速度ポテンシャル、 c : $c = \sqrt{B/\rho}$ 水中音速

表面波の影響を無視して、式(2)に示す境界条件を満足する解として式(3)を得る。

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{x=h} &= 0, \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad -\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{h_0 g}{\omega} \cos \omega t \\ -\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=l} &= \frac{h_0 g}{\omega} \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

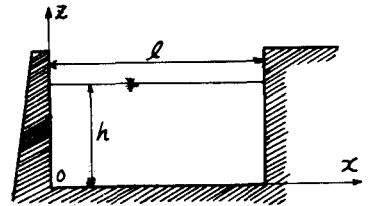


図-1 重力ダムのモデルと座標

$$\phi = \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} = \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \frac{2k_0 p g}{\alpha_m \beta_m h} \cdot \frac{\sin \beta_m (\frac{l}{2} - x)}{\cos \beta_m \frac{l}{2}} \cdot \cos \alpha_m z \sin \omega t + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{2k_0 p g}{\alpha_m \beta_m h} \cdot \frac{\sinh \beta_m (\frac{l}{2} - x)}{\cosh \beta_m \frac{l}{2}} \cdot \cos \alpha_m z \sin \omega t \quad (3)$$

ここで、 ϕ : 動水圧、 ρ : 水の密度、 α_m : $\alpha_m = (2m+1)\pi/2h$ ($m=0,1,2,\dots$) で表わされる固有値、

β_m : $\beta_m = \sqrt{(\alpha_m)^2 - (\omega/c)^2}$, β'_m : $\beta'_m = \sqrt{\alpha_m^2 - (\omega/c)^2}$, r : $\alpha_m^2 < (\omega/c)^2$ と満足する m の最大値である。

ダムに作用する動水圧の最大値は、式(2)において $\sin \omega t = 1$, $x=0$ として得られる。また、ダムに作用する全動水圧の最大値は、上式を x 方向に 0 から l まで積分することによって、つぎのようになる。

$$P_0 = -\sum_{m=0}^r \frac{2k_0 p g}{\alpha_m \beta_m} \cdot \frac{\tan \beta_m l}{2} - \sum_{m=r+1}^{\infty} \frac{2k_0 p g}{\alpha_m \beta'_m} \cdot \frac{\tanh \beta'_m l}{2} \quad (4)$$

動水圧に及ぼす水の圧縮性の影響は式中の β_m , β'_m によって評価できる。有れば、水の圧縮性の影響は、地震周期、水深、水中音速の相関関係により左右される。図-2にこれらの関係を示した。

有れば、水深 (h)、地震周期 (T)、水中音速 (c) の3者から、 $h/c > 9/4$ の関係にある場合には、 β_m を含む第1項による動水圧も現われ、水の圧縮性の影響は大きい。逆に、 $h/c < 9/4$ の関係にある場合には、 β_m を含む第1項は現われず、 β'_m を含む第2項のみによる動水圧が作用することになる。一般にこの場合には、水の圧縮性による影響は小さくはなすが、零ではない。これは、

$\eta/\epsilon = 5/8$ は右直線に仮定し、 h と T の関係が図に示した直線よりも上の領域では、水の圧縮性の影響を考慮するべきであり、直線よりも下の領域では、水の圧縮性の影響は無視できるとした。この仮定は、つぎに述べる数値計算例の結果をよく説明できるので、ほぼ妥当であろう。また、水の圧縮性に起因する共振現象についても検討したが、その周期は、従来の無限大水として解析した値よりも小さくなる。しかも、第2次以上の高次の共振周期が、第1次共振周期に接近している場合もあり、耐震的に、従来の問題にうしろめた高次の共振点をも考慮有ることを必要とする。水深100 m のダムを対象として共振周期を計算した例を表-1に示す。

表-1 共振周期

C	l/h m^2	2.0				10.0			
		0	1	2	3	0	1	2	3
1400	0	0.202	0.089	0.056	0.040	0.280	0.245	0.202	0.166
	1	0.090	0.067	0.049	0.037	0.093	0.079	0.060	0.046
	2	0.056	0.049	0.040	0.032	0.057	0.054	0.036	0.035
	3	0.040	0.038	0.033	0.029	0.041	0.040	0.030	0.040
1450	0	0.195	0.087	0.054	0.039	0.271	0.237	0.195	0.160
	1	0.086	0.063	0.047	0.036	0.092	0.079	0.060	0.049
	2	0.054	0.046	0.039	0.032	0.055	0.053	0.036	0.033
	3	0.039	0.036	0.032	0.028	0.039	0.039	0.030	0.038
1500	0	0.189	0.084	0.052	0.038	0.261	0.229	0.189	0.156
	1	0.084	0.063	0.046	0.035	0.089	0.087	0.060	0.048
	2	0.052	0.044	0.038	0.031	0.053	0.053	0.036	0.035
	3	0.038	0.035	0.031	0.027	0.038	0.038	0.030	0.037

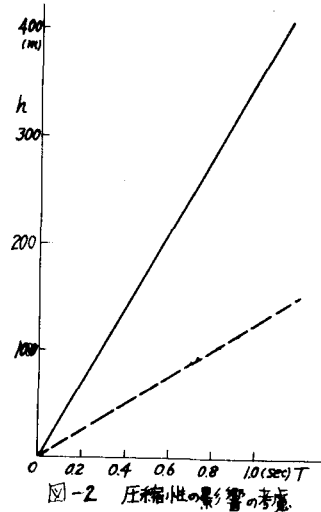


図-2 圧縮性の影響の考慮

3. 数値計算例およびその考察

水深を100 mとし、貯水地長さ(l)との比 l/h を2.0, 10.0の2つの貯水率をとり、流速の影響を考慮して水中流速を1400 m/sec, 1450 m/sec, 1500 m/secと仮定して、地震周期1.0 sec, 0.5 sec, 0.2 sec, 0.1 sec, 0.05 secに對して、それぞれダムに作用する動水圧の最大値を式(3)にもとづいて計算した。表-1のなかからように水深100 mに對する動水圧の第1次共振周期は、 $l/h = 2.0, 10.0$ に對してそれぞれ0.2 sec, 0.27 sec近くであり、この値を境にして、動水圧の示有性が非常に異なってくることをわかった。

共振周期よりも大きい1.0 sec, 0.5 secの場合の応答曲線を一般に図-3に示す。図中にWestergaardの近似式、畑野氏の表面波の影響を考慮した場合の応答曲線をも示した。これらの解析では水圧を無限と仮定して取り扱っている。これらの応答曲線を比較すると、周期が1.0 sec程度以上にたれば、表面波の影響や貯水域の大きさによる影響を考慮する必要はなく、Westergaardの式を用いて十分であると云えよう。しかし、周期0.5 secの場合には、1.0 secの場合より相対的な値を示している。つまり共振周期に近づくにつれて水の圧縮性の影響が大きくなり、動水圧の値はますます大きくなることを予想される。したがって、Westergaardの近似式では過小値を与えることになる、むしろ用いることは不適当である。

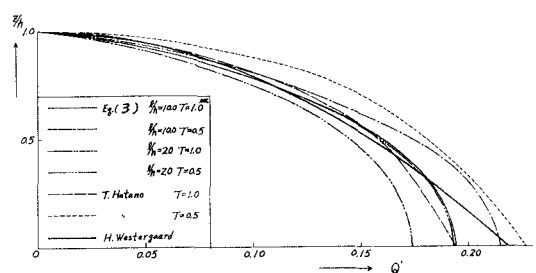


図-3 動水圧応答曲線 ($T = 1.0, 0.5$ sec, $h = 20, 100$)

地震周期が動水圧の共振周期より小さい場合の動水圧分布形状は、水中の振動線形状とは著しく異なったものである。1例として周期が0.1 secの場合の分布形を図-4、図-5に示す。同図中の実線は $C=1400 \text{ m/sec}$ 、1点鎖線は $C=1450 \text{ m/sec}$ 、破線は $C=1500 \text{ m/sec}$ に対するものである、点線は畑野氏の計算結果と比較のために引用したものである。

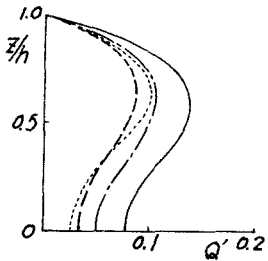


図-4 動水圧分布形 ($T=0.1, \zeta=20$)

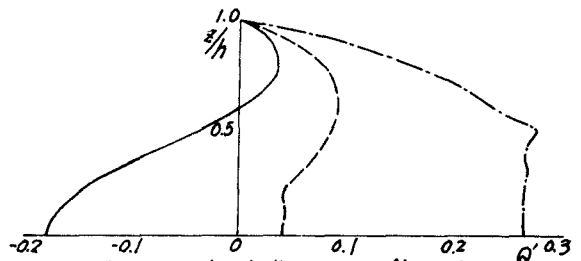


図-5 動水圧分布形 ($T=0.1, \zeta=10.0$)

図からわかるように強度の違いにもとく水中音速のとり方によって分布形状が著しく変化し、その絶対値もかなり異なったものである。同じ周期について、断水域の形状を知らなくても、難着は規則性は見られず、ただ強度の違いによる分布形状に多少の影響は断水域が大きくなるほど著しい傾向にあるように思える。また同じ断水量を扱う場合について比較すると、地震周期が小さくなるほど、分布形状が規則的になることが推測される。

4. 模型実験およびその考察

この実験に使用した模型は、高さ42cm、巾30cm、長さ90cmの寸法を有する厚さ2cmのアクリライトで作った水槽である。この模型を振動台上に固定し、水が単振動を与えて、その面を標した鉛直壁に働く動水圧、加速度を連続的に記録する方法をとった。水圧計は高さ方向に等間隔4cmに設置してある。これらの同時測定記録から実験値を求め、分布形状を推定し、全動水圧を算出し、全動水圧と断水量との関係を示した。その結果を図-6に示す。図に示した実験系列(I, II, III, IV, V, VI)は水槽の長さを変えておられ29.5, 59.75, 90, 69, 48.6 cmである。また実験系列(1, 2, 3, 4, 5)は水深を変えておられ8, 12, 18, 22, 25 cmである。○印は実験値を示し、実線は理論曲線を示すものである。実験V, VIは対岸傾斜角がそれぞれ45°, 30°である。

図から明らかなように、水深の増大とともに全圧力は増大する。しかもその増大の仕方は二次曲線的であり、全圧力および水深増減の初期は大きい。同じ断水量を扱う断水形状が異なる場合には、断水小さいほど、有圧小断水形状にしては、水深が大きくなるほど全圧力も大きくなる。ところが、断水小さいほど、分布形状は小さくなることは周知のことであるから、分布形のみから判断するときは判断する危険性があり、実際の断水形状にあわせて、全圧力がある程度ノットによる安全性的検討が必要であると思われる。

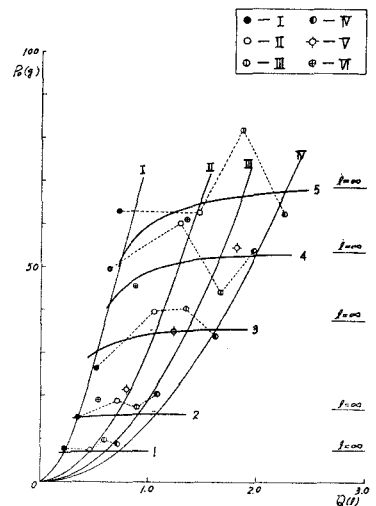


図-6 全動水圧と断水量の関係