

表面遮水壁型ダムー貯水池連成系の動的挙動

渡辺 啓行¹・曹 増延²

¹正会員 工博 埼玉大学教授 工学部建設工学科
(〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

²PH.D. 開発計算センター(株) 研究員 科学システム事業部第一技術室
(〒135 東京都江東区深川2-2-18)

地震時、貯水池と連成する表面遮水壁型ダムの挙動及び伴う動水圧についてはまだ不明瞭な問題がたくさん残されている。本研究は数値シミュレーション(FE-FD ハイブリッド法)方法によって表面遮水壁型ダムと貯水池が連成する条件でのダムの挙動及び動水圧荷重を検討したものであり、相互作用による堤体挙動に対する影響が明らかになった。水平方向加振時における水との相互作用はダムの上下方向の応答に顕著な影響を与えることを明らかにするとともに、水平方向の応答に影響する条件を指摘した。遮水壁に作用する動水圧荷重についての基本的な特性及び斜面勾配による影響を解明した。Zanger の実験結果と比較することにより、ダムに掛かる動水圧荷重を計算する際に考慮すべき事項を指摘した。

Key Words: *facing dam-reservoir system, dynamic behavior, interaction, numerical analysis*

1. 研究の背景と目的

周知のとおり、世界中に数多くの表面遮水壁型ダムが建設され、又は設計されている。この種類のダムの設計には一般的には、動水圧荷重の影響が小さいと思われるので、貯水池との相互作用の影響は無視される。しかし、実ダムと貯水池が連成する場合、表面遮水壁型ダムの挙動及び動水圧についての研究はまだ非常に少ないといえる。剛体の斜面に掛かる動水圧については従来 Zanger の二次元実験式があるが、実験には様々な仮設や条件などがあるため、実ダムへの応用に際してはこれらに十分配慮する必要がある。ダム工学及び数値シミュレーション技術の発展に伴って、斜面に作用する動水圧及び斜面のある重力式ダムの挙動についての研究は進んで来た。本研究は数値シミュレーション方法によって表面遮水壁型ダムと貯水池とが連成する条件でのダムの挙動及び動水圧荷重を明らかにし、既設ダムの真の耐震性の評価や、計画中のダムの設計の合理化に資するものである。

本文はダム本体の挙動を検討し、スペースの節約のため、表面遮水壁の挙動については省略する。

2. 表面遮水壁型ダムー貯水池連成系

ダムー貯水池連成系の解析モデルの一ケースは図-1に示す。基礎岩盤は剛体と仮定し、アバットメントから地震動を一様に入力する。ダムが地震動を受けて振動し、次第に貯水池との連続面で自身の振動を貯水へ伝える。水がダムと連続面でダムの振動により励起され、貯水池の上流方向へ波動が伝播する。水の運動により動的内力(動水圧)が生成され、逆にダムに作用する。そういう連成系は次の方程式で表わす。

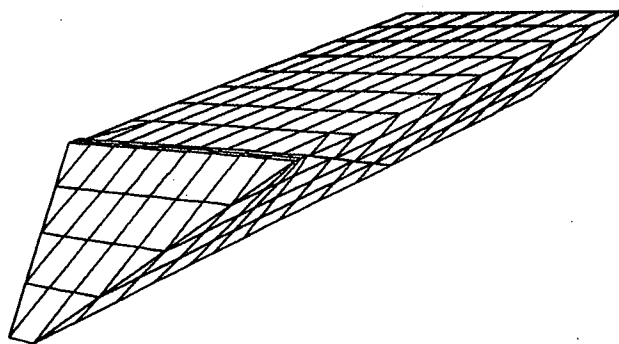


図-1 表面遮水壁型ダムー貯水池連成系モデル

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \Phi}{C_0^2 \partial t^2} = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} & (1.1) \\ [M] \{\ddot{u}\} + [C] \{\dot{u}\} + [K] \{u\} \\ = \{F_w\} + \{T_b\} & (1.2) \end{cases}$$

ここに、式(1.1)と式(1.2)は貯水に関する波動方程式及びダム運動方程式である。各変数とマトリックスの意味は下記の通りである。

Φ : 速度ポテンシャル

x, y, z : 直角座標

t : 時間

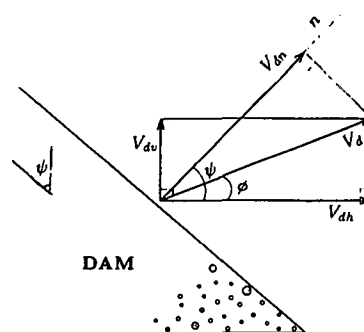
C_0 : 水中の音速 (1440 m/s)

M, C, K : ダムの運動に関する質量、減衰及び剛性マトリックス

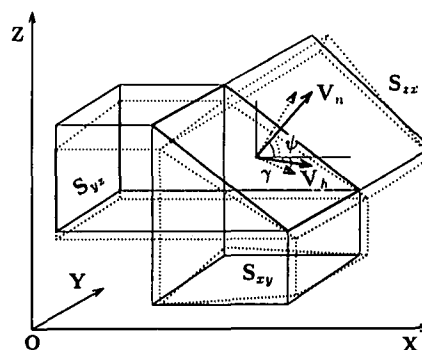
$\{u\}$: 変位、 $\dot{}$ と $\ddot{}$ は時間に対する一次、二次微分

F_w : ダムに作用する動水圧

T_b : 地震荷重



(a) 速度成分の関係



(b) 変形によるダム表面の面積と法線方向への影響

図-2 速度成分の関係及び変形による影響

ダムと貯水池の間には次の連続条件がある。水は非粘性と考えられるので、連続面ではダム面の法線方向の運動しかが伝えられない。即ち、両者の法線方向の速度が等しくなければならない。一方、ダム面に掛かる動水圧は面荷重として取り扱われ、式(1.2)に考慮されている。連続面での速度条件は次式で表す。

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = V_{dn} \quad (1)$$

ここに、 n はダム面の法線方向を意味し、 V_d はダム面の運動速度である。しかし、三次元解析の場合、基本的には座標方向の成分が用いられるが、これらの成分と法線方向の成分の間に図-2(a)に示す関係がある。ダム面と紙面の直交面(y - z 面)から成す角を ψ と表し、紙面(z - x 面)から成す角を γ と表わす。大変形状態のダムに関する力の釣り合いを考慮して、ダム面の面積及び法線方向の変化は図-2(b)に示す。

式(1.1)は有限差分法で扱い、式(1.2)は有限要素法で扱う。有限差分法の計算簡便性と有限要素法のダムの複雑形状への適用性が活用できると考えられるからである。具体的な解析方法については文献¹⁾を参考されたい。

3. 相互作用を考慮した表面遮水壁型ダムー貯水池の動的挙動

本節ではあらゆる遮水壁ダムを想定し、相互作用によるダムの挙動の変化及び動水圧の変化を解明する。

(1) 解析モデル

ダムの高さは 78 m とする。一般的表面遮水壁型ダムの上流面の勾配は 1:1.0 ~ 1:1.8 の範囲であるので、ここで、この範囲を含んで様々な上流面のあるダムとこれらのダムに対応する貯水池との連成系を解析対象とする。実際の設計においては、初期状態の解析が動的解析の前提として必要であるが、本文の主要目的からは必要ないので省略する。ダムの動的物性については非線形(全体一様)とし、表-1に示す構成関係式を用いて、等価線形化法で扱う²⁾。

一様地震動として、アバットメントから El-Centro NS 波を上下流方向に入力する。加速度の最大値は 196 Gal と規準化し、時間刻みは 1/100 s とする。

表-1 動的解析に用いる物性

せん断 係 数	G_0	$1000.0 \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} (\sigma'_m)^{0.60}$
	歪み依存性	$\frac{\gamma_r}{\gamma_r + \gamma} G_0$
減衰定数 h		$0.14 \frac{\gamma}{\gamma + \gamma_r} + 0.1$
基準歪み γ_r		3.0×10^{-4}
間隙率 e		0.30

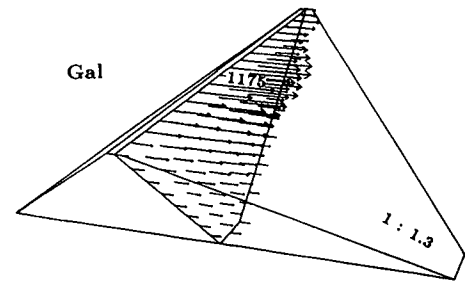
(2) ダムの挙動

図-3 には上流面と下流面の勾配がともに 1:1.3 である条件で、水と連成する時のダムの堤軸を通る鉛直面上の水平加速度応答と 2/3 高での水平面上の鉛直方向加速度の最大値及び分布を示す。図-4 には斜面の勾配による上下流方向及び上下方向の加速度の変化を示す。図-5 には連成条件及び非連成条件での上下流方向の堤体底面から天端中央点までの加速度応答の伝達関数を示す。

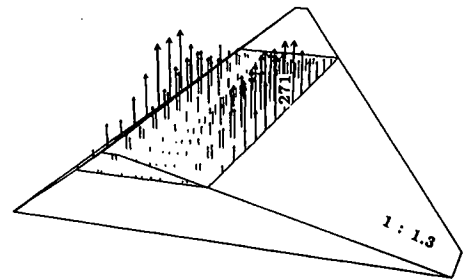
解析結果から次のことがわかった。非連成条件でのダムの応答と比較すると、連成条件でのダム天端中央の加速度応答が大きくなる。勾配が 1:1.3 である場合、上下流方向、上下方向の加速度応答がそれぞれ 3.81%、19.35% 増大している。上下流方向の変化は大きくないが、上下方向の変化が著しい。この現象は動水圧とダムの地震慣性力との関係によるものと考えられる。動水圧の方向が作用面と直交するので、地震動を上下流方向に入力する時、動水圧の水平成分がダムの同方向の慣性力に比べ小さく、鉛直成分がダムの同方向の慣性力に比べ大きいからである。例えば、図-4 から、連成条件でダム表面の勾配が緩やかになるに従って上下流方向の加速度の増大率(非連成条件の応答と比較する)が小さくなり、上下方向の増大率が大きくなることわかる。このことが斜面の勾配の変化により動水圧の水平成分と鉛直成分の配分が変わる原因となっているものと考えられる。この変化を上下流方向と上下方向共に直線で近似的に表示してある。図-5 によると連成条件で堤体の固有振動数がほぼ変化しないことが明らかになった。ダム面の勾配が 1:1.0 であっても固有値の変化は 5% 以下である。

(3) 変形によるダム挙動及び動水圧への影響

以上の検討と同時に、ダムの変形によるダムの挙動及び関連する動水圧への影響を検討した。上流面の勾配が 1:1.3 である場合、変形の影響を考慮すると加速度の最大値の変化は変形に伴う法線方向の変動に起因する部分が約 2.2%。動水圧への影響も 4%に過ぎない。



Stream Direction



Vertical Direction

図-3 上下流方向と上下方向の加速度応答

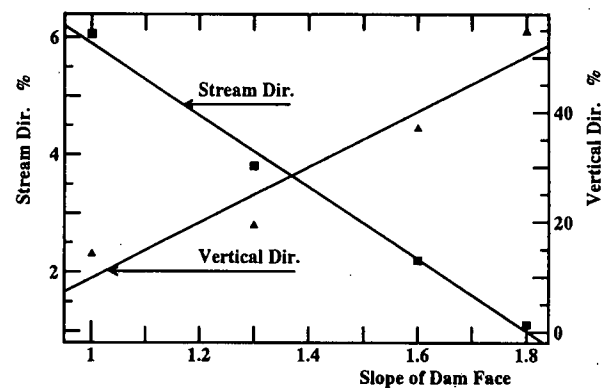


図-4 ダム面の勾配による加速度応答の変化

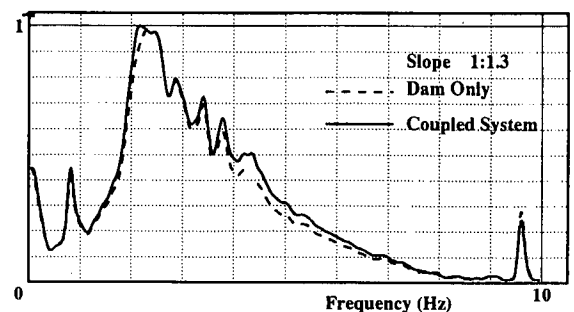


図-5 相互作用による加速度伝達関数の変化

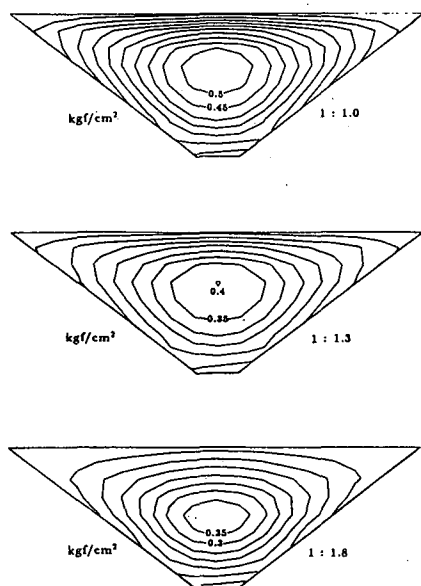


図-6 ダム面に作用する動水圧

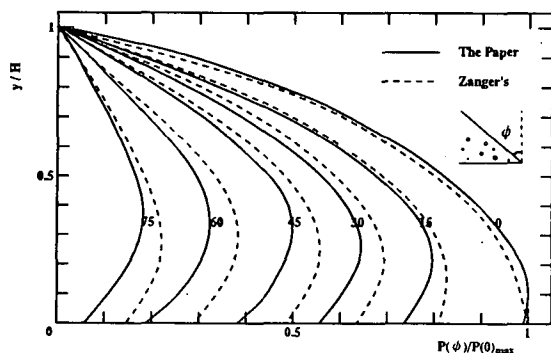


図-7 Zanger の実験式との比較

以上に述べたモデルではこのレベルの地震動を受ける時に変形による影響を考慮しなくてもよいが、高いダムが強地震動を受ける時の大変形の影響については検討する必要があると考えられる。

(4) 動水圧荷重

次にダムと貯水池連成系における動水圧を検討する。図-6には最大値が発生する時のダム面に掛かる動水圧の分布を示す。ダム上流面の勾配が変わることに従い、動水圧の変化傾向がわかる。計算した範囲のうち、勾配が緩やかになればなるほど最大圧力値が小さくなり、発生位置が低くなる。これは勾配が緩やかになるに従いダム面の法線方向の速度が小さくなったため、且つ、勾配の変化によりダムの剛性の分布も変わって、次第に速度の分布が変わることによる現象と考えられる。

Zanger の実験結果³⁾と比較するため、ダムを剛体とし、貯水池底面及び両サイドを反射境界とする。上下流方向に正弦波を入力して、様々な勾配のダム表面に掛かる動水圧を検討する。図-7にはダム面の中心線に沿う動水圧の分布を Zanger の実験結果と比較する。全体として、両方の結果が合っているが、三次元ダムに作用する動水圧が Zanger の結果より小さいことが分かる。特に貯水池底面付近で両方の差が比較的に大きいことが認められる。これは三次元貯水池の効果と共に、Zanger の実験における貯水池底面で定常なポテンシャルを加えていたことにより底面での動水圧が自然状態より大きくなっている可能性があると考えられる。

4. まとめ

以上の検討より表面遮水壁型ダムが貯水池と連成する条件で、ダム本体の地震時の基本的な挙動及び水との相互作用による堤体挙動の変化が明らかになった。水平方向加振時、水との相互作用はダムの上下方向の応答に顕著な影響を与える。水平方向の応答に対しては、緩やかな上流面のあるダムの場合水の影響を無視してもよいが、急な上流面(勾配 1:1.3 以上)のあるダムの場合、水との相互作用を考慮すべきである。表面遮水壁型ダムに作用する動水圧荷重について、Zanger の実験結果が基本的に二次元であり、実ダムへの適用には動水圧の三次元効果を考慮すべきである。また、一般的な地震動を受ける高さ 100 m 以下のダムには変形による影響は考慮しなくてもよい。

参考文献

- 1). Z. Cao: "Earthquake Response of Dam - Reservoir - Foundation System and its Analytic Methods", Doctoral dissertation, Saitama Univ., Sept., 1995
- 2). 渡辺 啓行: ≪地盤工学における動的方法と実例≫, リアライズ社, 平成 4 年 12 月
- 3). C.N. Zanger: Hydrodynamic Pressure on Dams due to Horizontal Earthquakes, Proc. Soc. Ex. Stress Anal., 1953
- 4). H. Watanabe, T. Kawakami: Characteristics of Elementary Dynamic Behavior for Three Dimensional Seismic Response of a Fill Dam, Soils and Foundations, Vol.35, No.1, pp45-54, March, 1995