

電力中央研究所 正員 青柳 栄

電力中央研究所 正員 塩尻弘雄

電力中央研究所 佐藤宏一

1. はじめに

アーチダムの耐震性については、わが国に大規模な重力式ダムが建設されて以来、幾度の地震を経験したが、大きな震害を受けた報告はなく、現行の耐震設計法は信頼性のあるものと判断される。しかし、最近の動的解析手法の発展に伴ない、アーチダムについてもより合理的な耐震設計法の開発適用が要望され、特に局地的に大きな地震動を考慮することが望ましいダムサイトにおいては動的解析を実施してその耐震性を検討することが要望されている。

アーチダムの地震応答に貯水池の動水圧が大きな影響を及ぼすことは多くの報告で指摘され、アーチダムと貯水との連成を考慮した動的解析法もいくつか提案されている。しかし、いずれも貯水の扱いがやや近似的であったり、ダム基部の岩盤変形を無視していたり、ダム形状に制限があるなど不備な点がある。

本報告は、著者等が開発した貯水およびダム基部付近の岩盤との相互作用を考慮した任意形状のアーチダムの動的解析法について述べ、模型実験結果との比較を示したものである。

2. 解析方法

解析領域はダムおよびダム付近の岩盤貯水（領域Ⅰ）とこれより離れた領域の貯水（領域Ⅱ）に分割する。領域Ⅰは有限要素でモデル化し、領域Ⅱは有限プリズムでモデル化した。解析の詳細は文献(1)に譲るとして、主に領域Ⅱの定式化について記述する。水の運動方程式は(1)式で与えられる。

$$\frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} = \nabla^2 \phi \quad (\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}) \quad (1)$$

ここで ϕ は速度ポテンシャルであり、 C は水中音速である。今速度ポテンシャル ϕ が次式

$$\phi = \phi_0 e^{i(\omega t - ay)} \quad (2)$$

で与えられるものとすれば、運動方程式と境界条件式は次式で表わされる。

$$\text{運動方程式; } -\frac{\omega^2}{C^2} \phi_0 = -\alpha^2 \phi_0 + \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_0}{\partial z^2} \quad (3)$$

$$\text{自由表面; } -\frac{\omega^2}{g} \phi_0 + \frac{\partial \phi_0}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\text{境界条件式; } \begin{cases} \text{貯水池底および側方} & i\omega + c\beta \left(\frac{\partial \phi}{\partial n} - u_{gn}^* \right) = 0 \\ \text{ただし、} & u_{gn} = u_{gn}^* e^{i(\omega t + ay)} \end{cases} \quad (5)$$

β は水と貯水池底、又は側方材料とのインピーダンス比である。グリーン法による定式化を行なうと次式が導かれる。

$$g_{\omega}(\alpha^2 - \frac{\omega^2}{C^2}) \left[\iint [N]^T [J] |ds| d\eta \right] \{ \phi_0 \}_e + \left\{ \begin{aligned} &+ g_{\omega} \left[\iint [B]^T [B] |J| |ds| d\eta \right] \{ \phi_0 \}_e = \begin{cases} \frac{\rho_w \omega^2}{g} \int_S [N]^T [N] ds \{ \phi_0 \}_e & (\text{自由表面}) \\ -\frac{i\omega \rho_w}{C\beta} \int_S [N]^T [N] ds \{ \phi_0 \}_e + \rho_w \int_S [N]^T [N]^* ds \{ u_{gn}^* \}_e & (\text{貯水池底および側方}) \end{cases} \end{aligned} \right. \quad (6)$$

層要素マトリックス(6)、(7)を全要素について重ね合わせると次式が得られる。

$$(\alpha^2 - \frac{\omega^2}{C^2}) [M] \{ \phi_0 \}_e + [K] \{ \phi_0 \}_e = \omega^2 [M_0] \{ \phi_0 \}_e - i\omega [M_b] \{ \phi_0 \}_e + [C] \{ u_{gn}^* \}_e \quad (8)$$

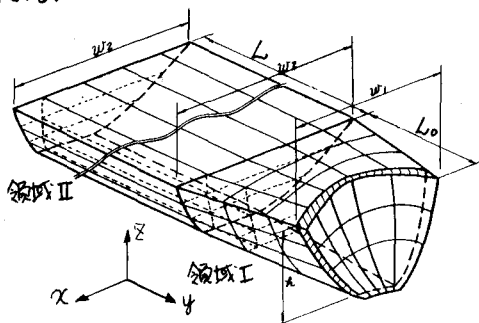


図-1 解析モデル概念図

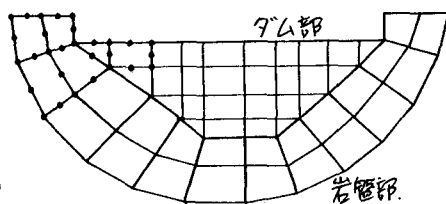


図-2 ダム-岩盤部(鉛直断面図)

(8)の解を齊次解と非齊次解に分けて求める。

i) 齊次解：齊次解は次の固有値問題として ϕ_0 を定めることができる。

$$\{A\}^T[A] + [B]\{\phi_0\} = 0 \quad \text{ここで、}[A] = [M], \quad [B] = [K] - \frac{\omega^2}{c^2}[M_s] + i\omega[M_b] \quad (9)$$

ただし、層要素の長さは L とし、そこに鉛直な対岸があるものと仮定し、境界条件を次式で与える。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} - c\beta \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} - \dot{u}_{gy} \right) = 0 \quad (\dot{u}_{gy}: \text{仮想対岸の } y \text{ 方向速度}) \quad (10)$$

ii) 非齊次解：①貯水池底、側方変位によるもの：これは(8)、(9)式より

$$\{A\}^T[A] + [B]\{\phi_0\} = [C]\{\dot{u}_{gy}\} \quad (11)$$

となり、地震動による速度 $\dot{u}_{gy} = \dot{u}_{gy}^* e^{i(\omega t + a_g)}$ を既知とすれば $\{\phi_0\}$ が求まる。地震動が進行波でない場合には $a = 0$ とする。

②仮想対岸変位によるもの：仮想対岸の y 方向変位を $u_{gy}^* = \dot{u}_{gy}^* e^{i\omega t}$ として、これによる非齊次解 ϕ_0 を求めることができる。以上のプロセスを経て、非齊次解は次のように表わせる。

$$\phi_0^* = \phi_0^* e^{i(a_0 + a_g)} + [V][e^*][\beta][V]^{-1} \left\{ \dot{u}_{gy}^* - \left(\frac{\alpha}{\omega} - \frac{1}{c\beta} \right) \phi_0^* \right\} e^{-i\alpha(L_0 + L)} e^{i\omega t} \quad (12)$$

ここで、 $[e^*], [\beta]$ はそれぞれ $e^{-i\alpha L} \frac{-c\beta\omega}{\omega + c\beta\alpha}$ から成る対角行列、

$[V]$ は固有ベクトルから成る行列、 α は対応する固有値である。

領域 I、II の境界に加える力は、 $-\partial \phi / \partial y$ より次式で与えられる。

$$-i[M][V][\alpha][V]^{-1}\phi_0 - \phi_0^* - i\alpha[M]\{\phi_0\} e^{-i\alpha L_0} + [M][V][e^*][\beta][V]^{-1} \left\{ \dot{u}_{gy}^* - \left(\frac{\alpha}{\omega} - \frac{1}{c\beta} \right) \phi_0^* \right\} e^{-i\alpha(L_0 + L)} \quad (13)$$

貯水要素の各マトリックスを全要素について重ねあわせ、領域 I のダム岩盤モデルの運動方程式と組みあわせれば、全体系の運動方程式のマトリックス表示が得られる。これを解いて周波数応答を求め FFD により時間領域に変換する。

3. 実験

地震時におけるアーチダムと貯水との連成振動を調べるために実ダムの 1/200 縮尺モデルによる振動実験を行なった。図3にダム部の諸寸法を示す。また岩盤部の幅は堤体アバウト幅の2倍、厚さは堤体アバウト幅と同じとし、貯水池については幅は堤頂長の1.2倍、奥行きは堤高の3.0倍とした。模型の固有振動数が高く、貯水部を含めると重量も大きくなるため、加振方法は固定床上のダム模型に電磁式加振装置により集中荷重を加える方式とした。(解析モデルの岩盤領域は図4参照)

図4は横軸にモード次数、縦軸に固有振動数を示す。空虚時、満水時ともに実験値、解析値が良く一致しているといえる。

4. まとめ

岩盤、貯水との相互作用を考慮したアーチダムの地震応答解析法について述べた。動水圧分布に関する実験値と計算値の検討、貯水領域の堤体振動に及ぼす影響等について今後研究を進める予定である。

謝辞 本研究の推進にあたり中部電力(株)の関係諸氏に御協力を頂きました。ここに厚く謝意を表わします。

参考文献

- 1) 塩尻青柳：貯水及び岩盤との相互作用を考慮したアーチダムの地震応答解析
- 2) 塩尻：地震時のダムへの動水圧について 第14回ダム技術講演討論会テキスト 1982年3月

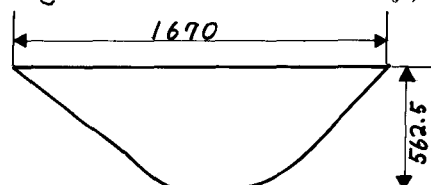


図3 ダムモデル寸法 (mm)

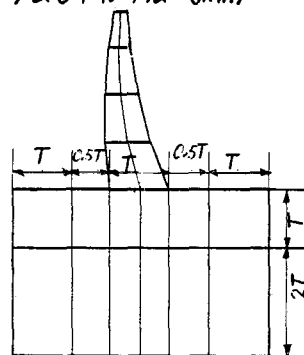


図4 解析モデル

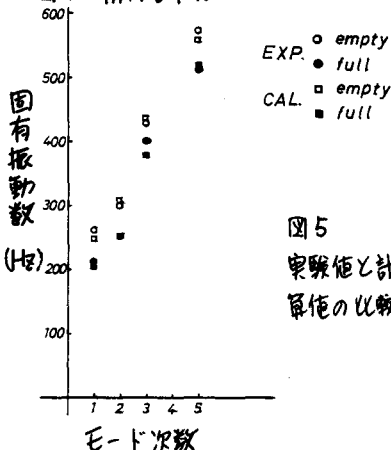


図5 実験値と計算値の比較