

三次元FE-BE法を用いた ダム-基礎-貯水系の振動解析手法

片岡正次郎¹・大町達夫²

¹正会員 博(工) 東京工業大学大学院総合理工学研究科 研究員 (〒226 横浜市緑区長津田町4259)
²正会員 工博 東京工業大学大学院総合理工学研究科 教授 (〒226 横浜市緑区長津田町4259)

固体の弾性波動方程式にFE-BE法、流体の圧力波動方程式に境界要素法を適用し、さらに固体と流体の連成振動方程式を導入することで、三次元ダム-基礎-貯水系の振動解析手法を開発した。この手法の特徴は、全ての動的相互作用および波動の逸散を考慮できるところである。まず、三次元境界要素法と有限要素法、固体領域と流体領域の境界条件およびマトリクス方程式について述べ、簡単な数値計算例を通じて手法の妥当性を確認した。さらに、アーチダム-基礎-貯水系の振動解析を行い、基礎および貯水との動的相互作用がダム堤体の振動特性に及ぼす影響について論じた。

Key Words : dynamic interaction, 3-D FE-BE method, dam-foundation-reservoir system, hydrodynamic pressure, dynamic response analysis

1. はじめに

地震時におけるダム堤体の応答は、基礎地盤（以下、単に基礎とする）および貯水との動的相互作用に大きく影響される¹⁾。したがって、ダムの耐震設計を合理的に行うためには、これら3者間の相互作用を全て考慮して検討することが望ましい。なかでもアーチダムは、三次元的な構造形態で水圧に耐えるものであり、二次元近似したモデル化が困難なため、その応答に対する地形効果や動的相互作用の影響は、従来から実測²⁾、あるいは三次元モデルを用いた実験³⁾や解析⁴⁾⁻⁹⁾を通して調査・研究されてきた。しかし、アーチダム、基礎、貯水間の相互作用を厳密に考慮できる三次元解析手法の開発ならびに実用化については、なお改良の余地が残されている。

近年、上田ら¹⁰⁾は三次元有限要素法を用いて、アーチダム-基礎-貯水系の動的相互作用を考慮した起振実験や弱地震に対する応答シミュレーションを行っている。この研究では、有限要素の大きさや解析領域の広さなどについて詳細な数値実験が行われ、ダムのモデル化に際しての目安が与えられている。しかし、動的相互作用の影響についてより正確かつ定量的な議論を行うためには、波動の無限遠への逸散を厳密に考慮できる手法を用いる必要があると考えられる。

このような手法の一つとして、有限要素法と境界要素法の結合解法（以下、FE-BE法）を用いた手法が提案されている¹¹⁾が、三次元モデルを対象とした振動解析は行われていない。

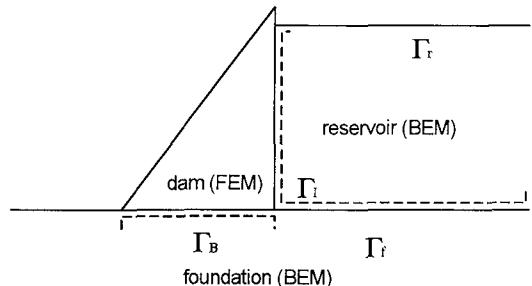


Fig. 1 Outline of a dam-foundation-reservoir system.

一方、著者らは三次元FE-BE法を用いて、不整形地盤を対象とした地震動シミュレーション等を行っている¹²⁾。この手法を固体と流体の連成振動解析に適用可能となるように定式化すれば、基礎の弾性や貯水の影響、および三次元的な振動モードなどの全てを考慮した振動解析を行うことができるものと考えられる。

本論文ではこのような観点から、三次元FE-BE法に固体と流体の連成振動方程式を導入することで、ダム-基礎-貯水系の三次元振動解析手法を定式化し、実際に振動解析に適用してその有用性を検討する。

2. ダム-基礎-貯水系の振動解析手法の定式化

Fig.1に示すように、ダム部には不均質な材料をモデル化できるように有限要素法を用い、基礎および貯水部には、固体の弾性波動や流体の圧力波動の無限遠へ

の逸散を考慮できるように、境界要素を用いてモデル化する。ここではまず、固体の弾性波動方程式を対象とした周波数領域の三次元有限要素法、境界要素法とそれらの結合について述べる。次に、流体の圧力波動方程式に境界要素法を適用し、固体と流体の連成振動方程式を用いて全ての方程式を連立する定式化を示す。なお、以下ではダム、基礎、貯水それぞれの領域に属するマトリクスおよびベクトルを、添字 d, f, r をもつて区別する。

(1) 固体の弾性波動方程式に対する有限要素法

三次元波動場の弾性波動方程式は、Fourier 変換した変換面において、慣性力以外の物体力を無視すると次式で表される。

$$(\lambda + \mu)u_{j,ij} + \mu u_{i,jj} + \rho\omega^2 u_i = 0 \quad (1)$$

ここで、 u_i は $x_1-x_2-x_3$ Cartesian 座標系における変位の x_i 成分を表し、 λ, μ は Lamé の定数、 ρ は質量密度、 ω は角振動数である。なお、繰り返す指標について総和規約を用い、以下でも同様とする。

式(1)を有限要素法を用いてマトリクス方程式化すれば次式が得られる。

$$[Z_d]\{u_d\} = \{f_d\} \quad (2)$$

ここで、 $\{u\}$ は節点変位ベクトル、 $\{f\}$ は節点力ベクトルである。動的解析でよく用いられる速度比例型の減衰を考慮する場合には、マトリクス $[Z_d]$ は次式で表される。

$$[Z_d] = -\omega^2[M_d] + i\omega[C_d] + [K_d] \quad (3)$$

ここで、 $[M], [C], [K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクスを表し、添字でない i は虚数単位である。

(2) 固体の弾性波動方程式に対する境界要素法

a) 境界積分方程式

Fig.1に示した基礎部の境界 Γ_f については、次の境界積分方程式が成り立つ¹³⁾。

$$c_{ij}(x)u_j(x) + \int_{\Gamma_f} T_{ij}(x, x_0)u_j(x_0)d\Gamma(x_0) - \int_{\Gamma_f} U_{ij}(x, x_0)\tau_j(x_0)d\Gamma(x_0) = \bar{\psi}_i(x) \quad (4)$$

ここで、 c_{ij} は境界 Γ_f の点 x における形状によって定まる係数、 τ_i は表面力の x_i 成分であり、 U_{ij}, T_{ij} は x_0 を作用点、 x を観測点とする変位および表面力の基本解テンソルを表す。左辺第2項の積分記号は主値積分を示している。また、 $\bar{\psi}_i$ は入射波の影響を表す項である。

b) マトリクス方程式

境界 Γ_f を境界要素を用いてモデル化することにより、式(4)は離散化され¹⁴⁾、次のマトリクス方程式が得

られる。

$$[H_f]\{u_f\} - [G_f]\{\tau_f\} = \{\bar{\psi}\} \quad (5)$$

ここで、 $\{\tau\}, \{\bar{\psi}\}$ はそれぞれ節点表面力ベクトル、節点入射波項ベクトルである。

(3) 流体の圧力波動方程式に対する境界要素法

a) 流体の圧力波動方程式

流体が圧縮性の非粘性流体であるとすると、流速が小さく、渦なし流れの場合には、Fourier 変換した変換面において圧力 p の波動方程式は次式となる。

$$\nabla^2 p + \frac{\omega^2}{c_h^2} p = 0, \quad c_h = \sqrt{\frac{E_v}{\rho_h}} \quad (6)$$

ここで、 c_h は流体圧力波動の伝播速度、 ρ_h は流体の質量密度、 E_v は体積弾性率である。

b) 境界積分方程式

式(6)を用いると、貯水部の境界 Γ_r に関する次の境界積分方程式が成り立つ。

$$\frac{\chi(x)}{4\pi} p(x) - \int_{\Gamma_r} Q(x, x_0)p(x_0)d\Gamma(x_0) + \int_{\Gamma_r} P(x, x_0)q(x_0)d\Gamma(x_0) = 0 \quad (7)$$

ここで、 χ は点 x における立体角、 q は圧力勾配であり、 P, Q は圧力および圧力勾配の基本解を表す。圧力勾配とその基本解は次式で定められる。

$$q = \frac{\partial p}{\partial n}, \quad Q = \frac{\partial P}{\partial n} \quad (8)$$

ただし、 n での微分は、流体領域に対して内向き法線方向の微分をとることを意味する。

c) マトリクス方程式

固体の場合と同様に、式(7)を離散化するために境界 Γ_r を境界要素を用いてモデル化すれば、次のマトリクス方程式が得られる。

$$[H_r]\{p_r\} - [G_r]\{q_r\} = \{0\} \quad (9)$$

ここで、 $\{p\}, \{q\}$ はそれぞれ節点圧力ベクトル、節点圧力勾配ベクトルである。

(4) 特異積分の評価

本論文では有限要素、境界要素とも isoparametric 線形要素を用いるが、式(5), (9)のマトリクスの成分を求めるとき、基本解の特異性が問題になる。ここでは基本解 U_{ij}, T_{ij}, P, Q として放射条件を満たす無限体の Green 関数を用い、文献 12) と全く同様に、基本解の特異性を厳密に評価して計算を行う^{15), 16), 17)}。

ただし、 P に関しては、 U_{ij}, T_{ij} の場合のように特異項と正則項に分解する¹²⁾必要はなく、サブ要素分割法¹⁵⁾を用いれば積分を計算することができる。また、作用点と観測点が同一平面要素上にある場合は $Q = 0$ なので、ここでは Q に関する特異積分を計算する必要は

ない。

したがって本論文では、 U_{ij} と T_{ij} の特異項および P の特異性を評価して計算を行い、その他の境界積分は数値積分で計算する。

(5) 境界条件式とマトリクス方程式の結合

a) ダム-基礎間の境界条件式

ダム部と基礎部の境界 Γ_I においては、次の境界条件式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\{u_d\} &= \{u_f\} \\ \{f_d\} &= -[D_f]\{\tau_I\}\end{aligned}\quad (10)$$

$[D_f]$ は分布マトリクスとよばれ、境界における形状関数によって定まる¹⁴⁾。

b) 固体と流体の連成振動方程式¹¹⁾

式(6)を流体の波動方程式として用いると、固体と流体が相互作用を行う境界では、次の境界条件式が成り立つ。

$$\begin{aligned}\tau_i &= -n_i p \\ q &= \rho_h \omega^2 u_k n_k\end{aligned}\quad (11)$$

ここで、 n_i は流体領域に関して内向き、すなわち固体領域に関して外向きにとる単位法線ベクトル \vec{n} の x_i 成分である。

式(11)をマトリクスおよびベクトルを用いて表示すれば次式となる。ただし、 $\{g\}$ は流体領域の節点力ベクトルである。

$$\begin{aligned}\{f\} &= -[A]\{p\} \\ \{g\} &= -\omega^2 \rho_h E_v [A]^T \{u\}\end{aligned}\quad (12)$$

ここで $[A]$ は、固体と流体が接する境界 Γ_B に関する変位と圧力の補間関数マトリクス $[\Phi]$ 、 $[\Psi]$ によって、次のように表されるマトリクスである。

$$[A] = \int_{\Gamma_B} [\Phi]^T \vec{n} [\Psi] d\Gamma \quad (13)$$

また、流体領域の節点力ベクトル $\{g\}$ は圧力勾配ベクトル $\{q\}$ と次式で関係づけられる。

$$\{g\} = -[D_r]\{q\} \quad (14)$$

ここで、 $[D_r]$ は固体の場合と同じく分布マトリクスである。

c) マトリクス方程式の結合

以上の式(2), (5), (9), (10), (12), (14)を連立して解くことで、FE-BE法を用いたダム-基礎-貯水系の振動解析を行うことができる。最終的に用いるマトリクス方程式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} Z_d + L_f & A \\ -\omega^2 \rho_h E_v A^T & L_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{\phi} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

ここで、

$$\begin{aligned}[L_f] &= [D_f][G_f]^{-1}[H_f] \\ [L_r] &= [D_r][G_r]^{-1}[H_r] \\ \{\bar{\phi}\} &= [D_f][G_f]^{-1}\{\hat{\psi}\}\end{aligned}\quad (16)$$

である。

ダムや基礎が貯水と相互作用を行わない場合については、式(15)において $[A] = 0$ とすればよいので、マトリクス方程式は次のように表せる。

$$\begin{aligned}[Z_d + L_f]\{u\} &= \{\bar{\phi}\} \\ \{p\} &= \{0\}\end{aligned}\quad (17)$$

3. 数値計算例

(1) 計算モデル

ここでは、単純なモデルを用いて計算を行い、2で述べた手法と作成した解析プログラムの妥当性を示す。なお、2では総和規約を用いるために座標系の記号を $x_1-x_2-x_3$ としたが、ここでは分かりやすさのために $x-y-z$ を用いる。

Fig.2に示す、断面が y 軸方向に一定な三次元モデルを用い、 $x-z$ 平面に垂直で $x-y$ 平面から 20° 傾いた波面をもつ平面SV波を入射する。Fig.2(a)には見やすさのために貯水部のモデルを図示していないが、貯水を考慮するときにはFig.2(b)のように満水状態であるとする。また、それぞれの領域の物性値はTable 1に示すとおりである。ただし、 ρ は質量密度、 v_S 、 v_P はそれぞれS波とP波の速度を表している。なお、内部減衰は考慮していない。

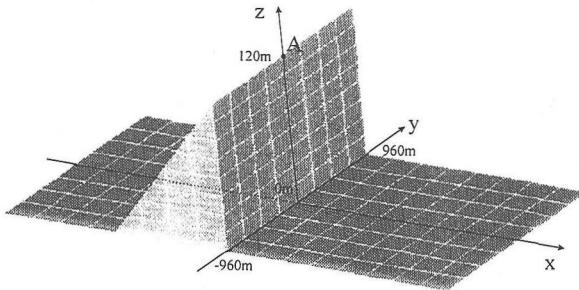
比較のために、Fig.3に示す二次元モデルを用い、東平・大町の時間領域FE-BE法¹¹⁾によって同様の計算を行う。すなわち、物性値はTable 1に従い、 20° 傾いた平面SV波を入射する。

これら2つのモデルの主な違いは、三次元モデルが線形要素、二次元モデルが2次要素を用いていることと、三次元モデルでは $y = \pm 960m$ においてモデルが切れていることである。補間関数の差違は別にして、2つのモデルを等価にするためには、三次元モデルを y 軸方向に無限に長くしなければならない。しかし、ダム部を通常の有限要素でモデル化する限り、有限長で打ち切る必要がある。三次元モデルを y 軸方向に長くとっているのは、このモデルが切れていることによる影響を少なくするためにあるが、 $y = \pm 960m$ においては自由端になっているため、三次元的なモードが励起され、二次元解析との比較が困難になる。

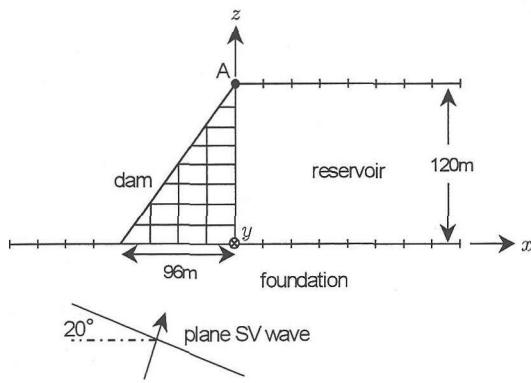
これを防ぐために、三次元解析ではダム部の材料を異方性にした。Table 1の値から求まるせん断剛性率を $\mu = \rho v_S^2$ とすれば、 $x-y-z$ 直交座標系におけるせん断応力-せん断歪関係は等方均質材料では $\sigma_{ab} = 2\mu\varepsilon_{ab}$

Table 1 Material properties of the model.

	Dam	Foundation	Reservoir
ρ (t/m ³)	2.30	2.30	1.00
v_S (km/s)	2.00	3.00	—
v_P (km/s)	3.27	5.61	1.44



(a) Perspective of the dam-foundation model.



(b) Section along x axis.

Fig. 2 Model of a gravity dam for the present method.

($a, b = x, y, z; a \neq b$) である。しかしここでは、 $\sigma_{zx} = 2\mu\varepsilon_{zx}$ に対して $\sigma_{xy} = 2 \times 10^4 \mu\varepsilon_{xy}$, $\sigma_{yz} = 2 \times 10^4 \mu\varepsilon_{yz}$ とした。これにより、 y 軸方向に伝わる v_S は 200km/s となり、最も低次の $x-z$ 面に関して対称な三次元モード（対称2次モード）の固有振動数 f_{3D} は、波長 $\lambda_{3D} = 2 \times 0.960 = 1.92\text{km}$ から、

$$f_{3D} = 200/1.92 = 104[\text{Hz}] \quad (18)$$

となる。すなわち、三次元モードは非常に高い振動数でのみ卓越するようになり、低振動数域ではその影響は無視できる。

なお、Fig.3のモデルではダム周辺の貯水も有限要素でモデル化している。これはダム近傍で動水圧分布の検討を行うことを容易にするためである¹¹⁾が、境界要素でモデル化してもその検討は可能である。そのため、本論文では定式化が複雑になることを避け、貯水は全て境界要素でモデル化している。

以上で述べたモデルを用い、三次元解析では0~10Hzの範囲を10/128Hz間隔で、二次元解析ではタイムステップを0.004秒として2048ステップ計算した。

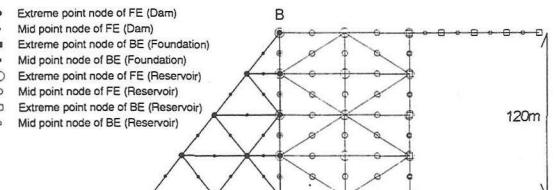


Fig. 3 Model of a gravity dam for the 2-D FE-BE method in time domain.

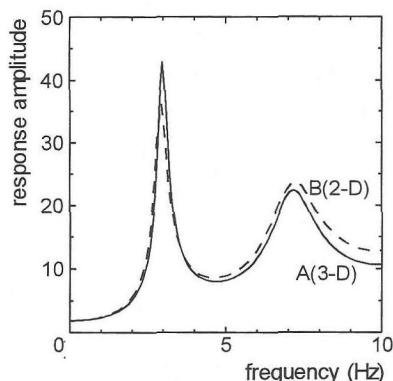
(2) 計算結果の比較

Fig.2の点Aと、Fig.3の点Bにおける x 方向の周波数応答関数を比較する。二次元時間領域解析ではGaussパルスを入射し、応答と入射波のスペクトル比をとることで周波数応答関数を求めた¹⁾。

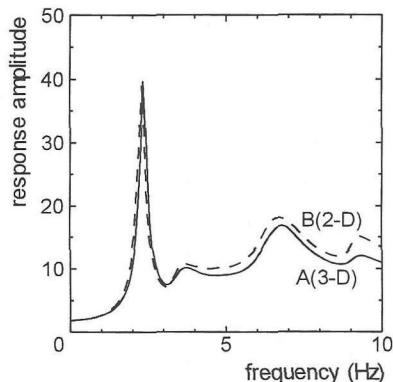
Fig.4(a), (b)はそれぞれ貯水がない場合、ある場合について比較したものである。これらの図によれば、三次元の結果は二次元の結果とほぼ一致している。Fig.4(b)によれば、三次元解析は二次元解析と同様に、貯水の存在による卓越振動数の低下や増幅倍率の変化、および貯水の固有振動によって励起されるピークを計算することもできている。計算結果にはわずかに違いも見られるが、これは先に述べたモデルの打ち切りや異なる補間関数を用いていることが、解に影響した結果と考えられる。

以上の計算結果より、式(15)のマトリクス方程式、および作成された解析プログラムは、三次元ダム-基礎-貯水系の振動解析を行う上で妥当なものであるといえる。

ただし、上述の定式化や本論文中での数値計算は、系の応答は線形であり、境界要素でモデル化する領域の物性は等方均質であるなど、理想化された条件の下で行われている。そのため、計算結果に基づいて動的相互作用の影響等を把握することはできるが、実ダムの応答解析等に用いるには注意を要する。



(a) Empty reservoir.



(b) Full reservoir.

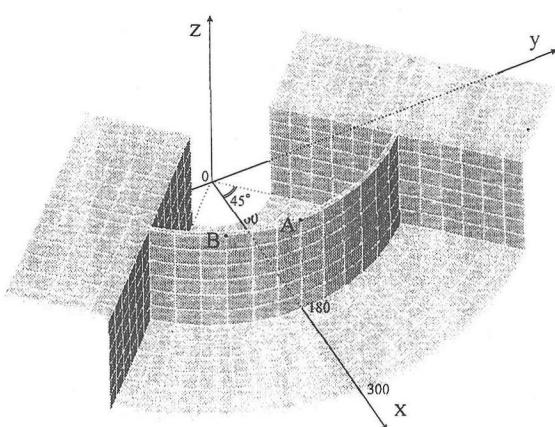
Fig. 4 Frequency response functions of x -component motion at points A and B.

4. 三次元アーチダム-基礎-貯水系の振動解析

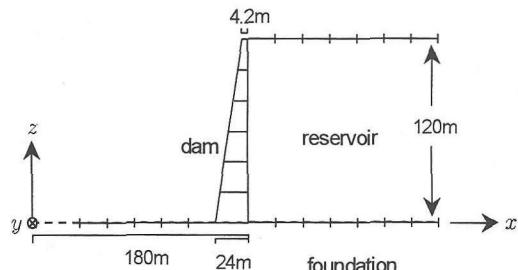
3. では二次元解析と比較するために三次元的なモードを抑制して計算したが、アーチダムの振動解析や耐震設計においては、この三次元的なモードを十分に考慮する必要がある。ここでは、三次元アーチダム-基礎-貯水系の振動解析を行い、動的相互作用、主に動水圧がダムの応答に及ぼす影響について議論する。

(1) 計算モデル

ここでは、Fig.5に示すような、1/4円弧(半径180m)の形状をもつアーチダムのモデルを用いる。これは、Porter and Chopra⁴⁾が用いたダム-貯水系のモデルを参考に作成したものである。Fig.5(a)には貯水部のモデルを図示していないが、貯水を考慮するときにはFig.5(b)のように満水状態であるとする。節点数は、ダム部が182、基礎部が549、貯水部が451である。要素の大きさや境界要素の打ち切りに留意し、計算誤差が重大にならないよう、妥当と思われるモデル化を行った。



(a) Perspective of the dam-foundation model.



(b) Section along x axis.

Fig. 5 Model of a 3-D arch dam-foundation-reservoir system.

Table 2 Material properties of the arch dam-foundation-reservoir system.

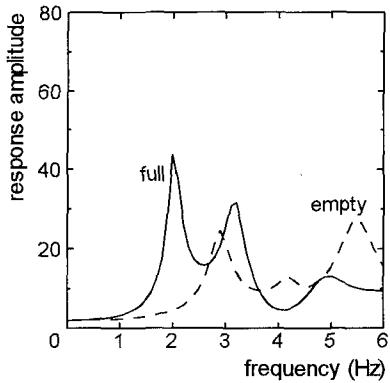
case	Dam			Foundation			Reservoir	
	ρ	ν	v_S	ρ	ν	v_S	ρ	v_P
1	2.40	0.170	2.46	2.40	0.250	2.46	1.00	1.44
2	2.40	0.170	2.46	2.40	0.250	4.92	1.00	1.44

ρ : density (t/m^3)

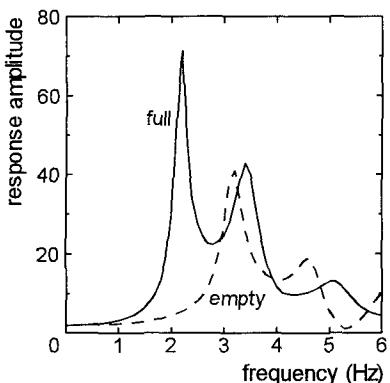
ν : Poisson's ratio

v_S, v_P : S, P wave velocity(km/s)

それぞれの領域に与える物性値をTable 2にまとめて示す。ダムと貯水の物性値はPorter and Chopra⁴⁾に倣い、ダム堤体には約5%の内部減衰をRayleigh減衰として与えている。基礎に関しては v_S がダムと同じ場合(ケース1)とダムの2倍の場合(ケース2)を考える。さらにそれぞれのケースについて貯水が満水の場合と空の場合を想定し、 x 方向(上下流方向)あるいは y 方向(流れ直交方向)に振動する単位振幅の平面SH波を鉛直入射する。すなわち、基礎の剛性、貯水、入射波について2つずつ、合計8つのケースを考え、いずれも0~6Hzの範囲を0.1Hz間隔で計算した。



(a) Case 1.



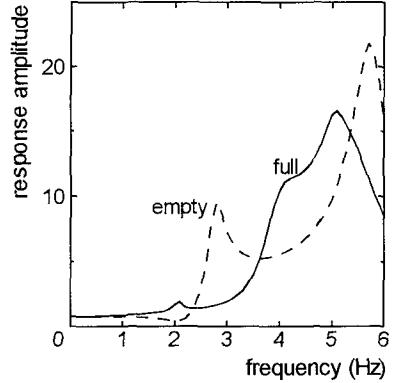
(b) Case 2.

Fig. 6 Frequency response functions of x -component motion at point A due to upstream-downstream ground motion.

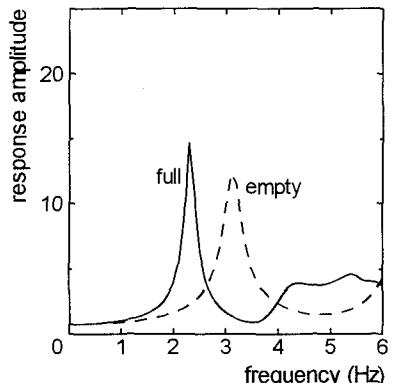
(2) 周波数応答関数の比較

a) 対称モード

まず、Fig.5(a)に示した点Aの x 方向の振動に対する x 方向の応答関数をFig.6に示す。Fig.6(a), (b)はそれぞれケース1とケース2で、貯水がある場合とない場合を比較したものである。この場合、ダムは左右対称なので、対称のモードのみが励起されている。対称1次モードに注目すると、ケース1、ケース2とも、貯水の存在によって卓越振動数が低下し、応答が大きくなっている。ハーフパワー法で概算した減衰比とともに、対称1次モードの卓越振動数と応答振幅をTable 3に示すが、この場合、ダムの応答に対する貯水の影響、すなわち動水圧の影響は非常に大きい。フィルダムを二次元モデル化して行われた同様の検討によれば、ダムの水平振動1次モードに対しては動水圧はほとんど影響を与えないという結果が得られている¹¹⁾。しかし、ここでの計算結果から、アーチダムのように薄肉で、接



(a) Case 1.



(b) Case 2.

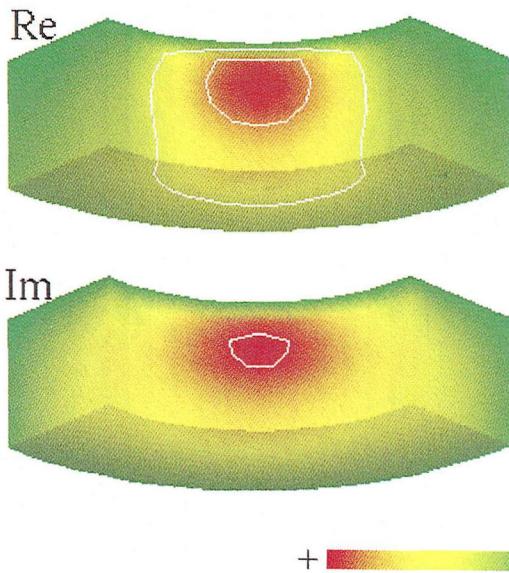
Fig. 7 Frequency response functions of r -component motion at point B due to cross-stream ground motion.

Table 3 Predominant frequency, response amplitude and modal damping ratio of the 1st symmetric modes.

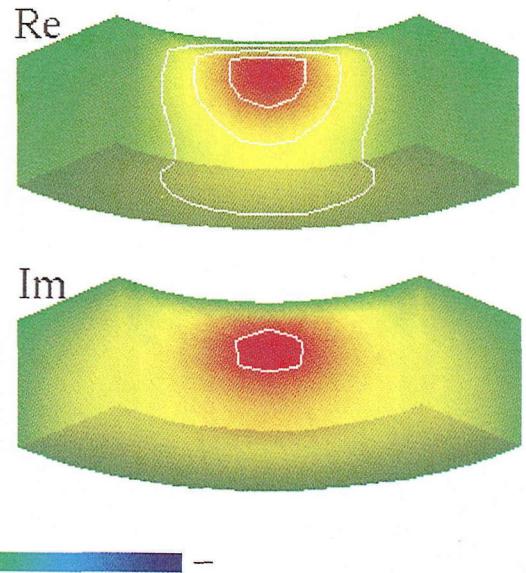
case reservoir	1		2	
	empty	full	empty	full
predominant frequency (Hz)	2.9	2.0	3.2	2.2
response amplitude	24.5	43.8	41.0	71.5
modal damping ratio (%)	6.7	6.0	5.5	4.5

水面の勾配が急である場合には、1次モードの卓越振動数、応答振幅にも動水圧は大きな影響を与える可能性があることが分かる。

また、2次モードのピークは貯水がない場合は非常に小さいが、貯水がある場合には顕著に現れ、貯水の影響で大きく増幅されている。ピーク値がうまく得られていないため、減衰比を計算することはできないが、



(a) Case 1.



(b) Case 2.

Fig. 8 Distribution of hydrodynamic pressure at the 1st symmetric modes.

ピークの形状から2次モードは1次モードよりもやや大きい減衰をもっていると考えられる。

b) 逆対称モード

次に, y 方向の振動に対する応答をみてみる。動水圧の影響を受けやすいと考えられる、ダムの半径方向(以下, r 方向)の応答については, Fig.5(a)に示した点Bにおける応答が最も大きかつたため、点Bの r 方向の応答関数を Fig.7に示す。この図によれば、ケース1において逆対称1次モードのピークは動水圧の影響でほぼ消滅している。一方、ケース2では対称モードと同様にやや低振動数側に移行するものの、1次モードのピークは貯水がある場合にも明瞭に存在している。一般に動水圧の影響は、基礎の剛性が高いほど顕著に現れる^{1),11)}が、この場合には逆になっている。基礎の側面と貯水との相互作用の影響やモード形状など、二次元解析では捉えられなかった現象が影響している可能性もあるが、具体的な原因は不明である。

なお、ケース2の逆対称1次モードにおける減衰比は、貯水がない場合 0.052、貯水がある場合 0.039 となり、対称1次モードよりもやや小さい値であった。様々なアーチダムで行われた起振実験から得られているモード減衰比¹⁸⁾をまとめたものが Table 4 であるが、高さが 70m 以下の3つのダムを除けば、逆対称1次モードの減衰比の方が小さく、計算結果と同様の傾向を示している。

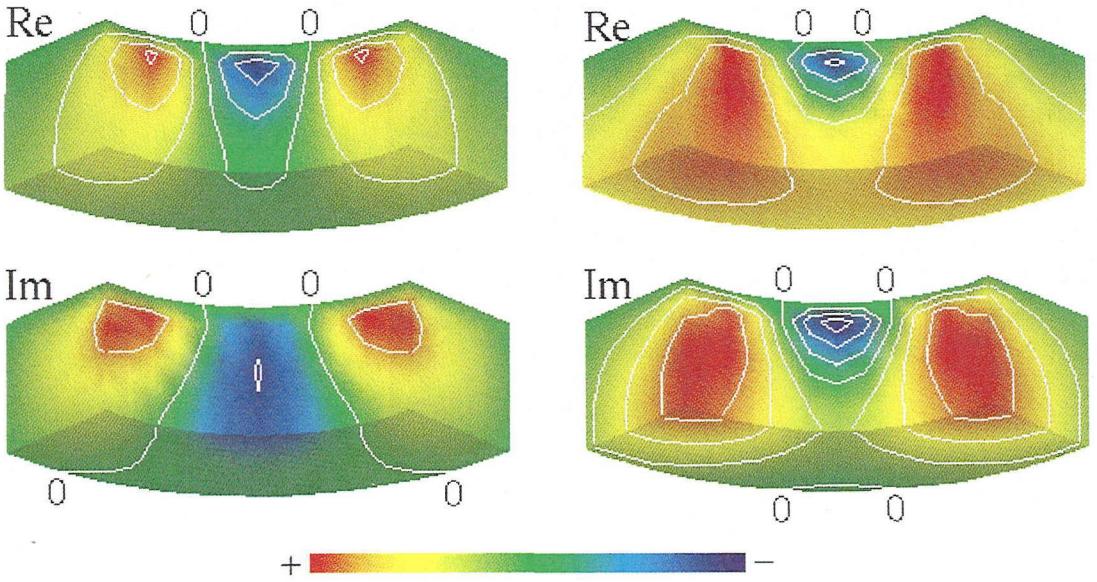
Table 4 Modal damping ratios in % and (frequencies in hz) obtained from forced vibration tests of arch dams¹⁸⁾.

dam [height(m)]	1S	1A	WL(m)
Monticello[93]	2.7(3.1)	2.2(3.6)	7
	3.1(3.2)	2.1(3.6)	12.5
	3.0(3.1)	1.8(3.6)	6
Morrow Point[142]	3.3(3.7)	1.4(3.7)	48
Quan Shui[80]	4.0(3.0)	1.5(3.3)	3
Tonoyama[64.5]	3.9(4.1)	3.5(3.9)	4.5
Kamishiiba[110]	2.5(6.2)	3.9(5.9)	15.5
Sazanamigawa[67]	2.7(5.6)	4.6(5.2)	2.5
Kolnbrein[197]	5.0(3.8)	4.0(4.3)	full
Schlegeis[131]	1.8(6.7)	1.8(5.5)	22
Yugoslavia 2[53]	2.0(4.3)	3.0(4.3)	full
Techi[181]	1.1(1.7)	0.9(1.4)	empty
	1.5(1.4)	1.3(1.2)	12
Schlegeis[131]	1.4(2.3)	1.1(2.2)	37
	1.5(4.1)	1.9(3.8)	16
Yugoslavia 2[53]	1.9(3.6)	2.7(3.3)	5
	4.6(3.3)	3.4(2.7)	17

1S: 1st symmetric mode, 1A: 1st antisymmetric mode,
WL: water level below the crest.

(3) 動水圧分布の比較

Fig.8とFig.9に、それぞれダムの対称1次モードと2次モードにおける動水圧分布図を示す。上下の図はそれぞれ動水圧応答の実部と虚部を表し、ダム下流側の基礎表面よりやや下方に視点をおき、貯水が基礎の底



(a) Case 1. (b) Case 2.

Fig. 9 Distribution of hydrodynamic pressure at the 2nd symmetric modes.

面や側面と接する領域についても描いている。赤いほどあるいは青いほど絶対値が大きく、赤は正、青は負の値を示している。また、図の白線は、入射波の振幅を1cmとすれば 0.5×10^6 Pa 間隔となる等値線である。

まず、Fig.8によれば、基礎の剛性が変化しても、1次モードに対する動水圧の分布形状には大きな違いは見られない。動水圧の大きさには差があるが、これはTable 3に示したケース1とケース2の応答振幅の差でほぼ説明できる。

しかし、Fig.9は、基礎の剛性によって2次モードに対する動水圧の分布形状が変化することを示している。すなわち、基礎の剛性が高い場合には相互作用の影響が少なく、ダム堤体は固有の振動モードを形成するが、基礎の剛性が低い場合には基礎と一体となった振動モードが作られる。そのため、動水圧が負になっている領域に注目すれば、ケース1では基礎と接する部分にまで存在するが、ケース2ではダムと接する部分に限られている。1次モードであまり分布形状に差がみられなかつたことは、1次のモード形が基礎との相互作用によって2次のモード形ほどは変化しないことを意味しているものと考えられる。

また、動水圧自体がダムの振動モード形を変化させ、その変化が動水圧に影響するという相互作用の結果として、Figs.8,9のような動水圧分布になっていることも注意する必要がある。なお、動水圧もダムや基礎の変位と同様に複素応答となるため、ここでは実部と虚部を示したが、Figs.8,9によれば実部と虚部はほぼ相似

な分布であるため、動水圧の最大値も同様の分布形状を示す。

5. 結 論

本論文では、有限要素法と直接境界要素法を組み合わせるFE-BE法を用い、三次元空間-周波数領域におけるダム-基礎-貯水系の振動解析手法を定式化した。この手法では、全ての動的相互作用および波動の放射条件を理論上厳密に考慮でき、三次元的な振動モードを取り入れた振動解析が可能である。

まず二次元解析と比較するために、三次元的なモードを抑制した三次元解析を行い、本手法の妥当性と、実際に精度良く計算が実行できることを確認した。次に、三次元アーチダム-基礎-貯水系の振動解析を行い、ダム堤体の周波数応答関数および動水圧分布を示して、動的相互作用の影響について考察を加えた。得られた結果は実験や解析から知られている定性的傾向とほぼ一致し、本手法を用いることで、より定量的な動的相互作用の評価が可能となることを実証した。

謝辞：東京理科大学東平生光博士には時間領域FE-BE法のプログラムを使用させて頂き、種々御指導頂いた。また、東京工業大学須田純也氏には、本論文作成にあたって御助力を頂いた。記して謝意を表する。本研究は文部省科学研究費（特別研究員奨励費 No. 62332）の援助を受けた。

参考文献

- 1) 大町達夫, 片岡正次郎: 二次元ダム-基礎-貯水系における動的相互作用の評価, 土木学会論文集, No. 519/I-32, pp. 199-209, 1995.
- 2) Fujii, T., Egawa, K. and Katayama, I.: Dynamic behavior of Nagawado Arch Dam in the event of 1984 Naganoken Seibu Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol. 3, pp. 347-364, 1987.
- 3) 岡本舜三: 耐震工学, オーム社, pp. 346-353, 1971.
- 4) Porter, C. S. and Chopra, A. K.: Hydrodynamic effects in dynamic response of simple arch dams, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 10, pp. 417-431, 1982.
- 5) Hall, J. F. and Chopra, A. K.: Dynamic analysis of arch dams including hydrodynamic effects, *J. Eng. Mech.*, ASCE, Vol. 109, pp. 149-167, 1983.
- 6) Fok, K. and Chopra, A. K.: Frequency response functions for arch dams: hydrodynamic and foundation flexibility effects, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 14, pp. 769-795, 1986.
- 7) Tsai, C. -S. and Lee, G. C.: Arch dam-fluid interactions: by FEM-BEM and substructure concept, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 24, pp. 2367-2388, 1987.
- 8) Duron, Z. H. and Hall, J. F.: Experimental and finite element studies of the forced vibration response of Morrow Point Dam, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, Vol. 16, pp. 1021-1039, 1988.
- 9) Dominguez, J. and Maeso, O.: Earthquake analysis of arch dams. II: dam-water-foundation interaction, *J. Eng. Mech.*, ASCE, Vol. 119, pp. 513-530, 1993.
- 10) 上田稔, 奥田宏明, 塩尻弘雄, 田村重四郎: アーチダムの起振実験シミュレーション, 土木学会論文集, No. 501/I-29, pp. 203-212, 1994.
- 11) 東平光生, 大町達夫: 時間領域FE-BE法を用いたダム-基礎-貯水系の振動解析手法, 土木学会論文集, No. 422/I-14, pp. 381-390, 1990.
- 12) 片岡正次郎, 大町達夫: 犬源近傍の不整形地盤における地震動の三次元シミュレーション, 土木学会論文集, No. 556/I-38, pp. 139-149, 1997.
- 13) 丹羽義次, 廣瀬壯一: 傾斜層を有する地盤における理論的地震動解析, 土木学会論文報告集, No. 337, pp. 57-66, 1983.
- 14) Brebbia, C. A., Telles, J. C. and Wrobel, L. C.: *Boundary element techniques-theory and applications in engineering*, Springer-Verlag, 1984.
- 15) Lachat, J. C. and Watson, J. O.: Effective numerical treatment of boundary integral equations: a formulation for three-dimensional elastostatics, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, Vol. 10, pp. 991-1005, 1976.
- 16) Guiggiani, M. and Gigante, A.: A general algorithm for multidimensional Cauchy principal value integrals in the boundary element method, *Trans. ASME*, Vol. 57, pp. 906-915, 1990.
- 17) Mantič, V.: A new formula for the C-matrix in the Somigliana identity, *J. Elasticity*, Vol. 33, pp. 191-201, 1993.
- 18) Hall, J. F.: The dynamic and earthquake behavior of concrete dams: review of experimental behaviour and observational evidence, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, Vol. 7, pp. 58-121, 1988.

(1997. 1. 27 受付)

A 3-D FE-BE METHOD FOR DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF DAM-FOUNDATION-RESERVOIR SYSTEMS

Shojiro KATAOKA and Tatsuo OHMACHI

A simulation method is developed for the dynamic response of 3-D dam-foundation-reservoir systems. The dam is modeled with finite elements; while the foundation and reservoir are modeled with boundary elements. Interaction effects and radiation conditions can be taken into account without any geometric restrictions. Following a simple analysis, responses of a 3-D arch dam interacted with foundation and reservoir to harmonic ground motions are simulated. The dynamic interaction effects are discussed based on the computed responses of the dam and distributions of hydrodynamic pressure.