

二次元ダム-基礎-貯水系における 動的相互作用の評価

大町達夫¹・片岡正次郎²

¹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)
²学生員 工修 東京工業大学大学院総合理工学研究科 博士課程, 日本学術振興会特別研究員

時間領域FE-BE結合解法を用いてダム-基礎-貯水系の衝撃応答解析を行い、その結果を従来の有限要素法による解析結果と比較することにより、動的相互作用を評価した。具体的には、相互作用効果をダム堤体のせん断波速度減少率、内部減衰定数および付加質量分布をインピーダンス比の関数として表現した。また、基礎で得られた地震動記録に動的相互作用の影響が含まれていることを指摘し、動的解析に用いるべき入力地震動についても考察した。これらの結果を従来のFEMによる動的解析に導入し、FE-BE法とともに実ダムの地震応答解析に適用した。両者による解析結果はほぼ一致し、地震観測記録とも良い対応を示した。

Key Words : *dynamic interaction, dam-foundation-reservoir system, FE-BE method, simplified procedure, earthquake response analysis, incident seismic wave*

1. はじめに

コンクリートダムの耐震性を検討する場合には、基礎、あるいは貯水との動的相互作用を考慮しなければならないことが指摘されている¹⁾。例えばChopraらはアーチダムや重力ダムを対象として、貯水がダムの地震時応答に及ぼす影響²⁾、あるいは基礎の弾性の影響をも含めた解析をサブストラクチャー法³⁾や有限要素法⁴⁾で行い、詳細に検討を行っている。また、Antes and Estroff⁵⁾は時間領域境界要素法を、Hallら^{6),7)}は有限要素法を用いて同様にダム-基礎-貯水系の解析を行い、動的相互作用の効果について論じている。しかし、これらの解析について共通にいえることは、一部に簡略化のための仮定があったり、ダム-基礎-貯水系における全ての相互作用を考慮した解析を行うには至っていないことである。なお、本論文ではダム本体を支持する基礎地盤をダム基礎、あるいは単に基礎と呼称する。

一方、塩尻・田口はこれら全ての相互作用を考慮し、ダムや基礎の非線形性をも導入することができる手法を開発している⁸⁾。しかし、そこに至る定式化の過程は非常に複雑である。これは、ダム、基礎、貯水3者の相互作用に加え、無限領域への波動の放射をも考慮しなければならないために、問題自体が非常に複雑になっているためであると考えられる。

東平・大町はこの波動の放射条件の設定を容易にするために、時間領域の有限要素法と境界要素法を重み付き残差法によって結合し、さらに固体と流体の連成振動方程式を導入することによりダム-基礎-貯水系の

動的解析法を開発した⁹⁾。この手法によれば、ダムは有限要素で、基礎や貯水のような半無限部分は境界要素でモデル化することができるため、動的相互作用や無限領域への地震波の逸散を厳密に取り入れた解析を行うことができる。しかしその反面、現時点では次のような実用上の問題点がある。すなわち、

1. FEMとBEM双方から生じる制約条件を満たす解析モデルの設定が困難である。
2. 計算時間が非常に長くなる。
3. FEMなどに比較して解析例が少なく、過去の経験や知見が生かしくにくい。

などである。

しかしながら、ここに示しただけでも動的相互作用の研究は非常に多岐にわたり、数々の有用な成果が得られていることが分かる。ところが、実際の耐震設計に当たって動的相互作用を考慮した動的解析が行われた例は未だ少数である。この原因として、上に挙げた解析手法自体の実用面での問題の他に、動的相互作用が構造物の挙動にどのような影響を与えるのかが明らかにされていないことが指摘されている¹⁰⁾。

このような背景から、著者らは動的相互作用の基本的な性状を明らかにすることを目的として、2次元線形のダム-基礎-貯水系における動的相互作用について検討した¹¹⁾。これは、東平らによる時間領域FE-BE結合解法を用いてダム-基礎-貯水系の動的解析を行い、従来の有限要素法による解析結果と比較して各構成要素(ダム・基礎・貯水)間の動的相互作用がダムの応答に

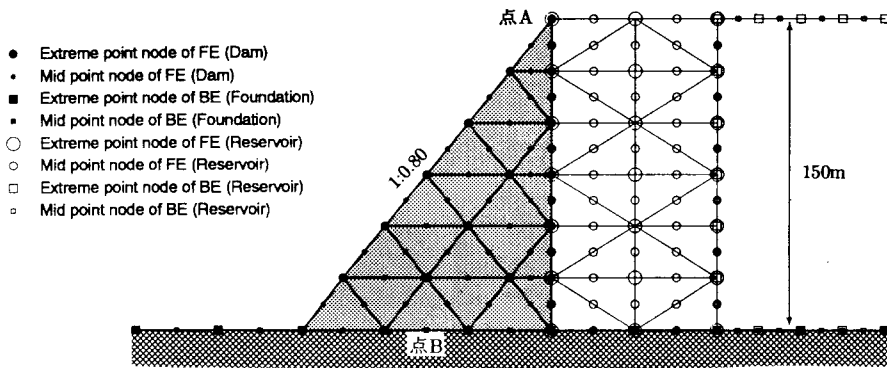


図-1 解析モデル

どのような影響を与えるのかを定量的に評価したものである。しかし、文献11)ではダム-基礎間、ダム-貯水間の動的相互作用については検討を行ったものの、基礎と貯水の動的相互作用には触れることはできなかった。また、文献11)では地震応答解析の入力地震動としてダム基礎で得られた加速度記録を変位に変換したものをを用いたが、この観測記録がもともと動的相互作用の影響を受けており、本来はこれを鉛直下方からの入射波としてそのまま用いるべきではないと考えられる。本論文では主にこれらの点について検討する。またその検討結果は、従来の有限要素法によるダムの動的解析へ導入され、実務に活用されてこそ意味があるとも考えられるので、本論文ではその導入方法を例示し、妥当性を検証する。

2. 解析モデルと入射波

(1) 解析モデル

本論文では重力ダムを解析の対象とする。これは、ロックフィルダムでは非線形性が生じやすく、アーチダムでは3次元効果が大きくなるため、2次元線形系であるという仮定が成り立ちにくくなるためである。また、動的相互作用の影響はダムと基礎のインピーダンス比によって大きく変化する^{9),12)}ため、ここでは図-1のような簡単な三角形断面の重力ダム-基礎-貯水系の解析モデルを設定し、インピーダンス比を0.0, 0.5, 2/3, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0と変化させて2次元線形解析を行った。ただし、本論文ではインピーダンス比 I を次式で定義する。

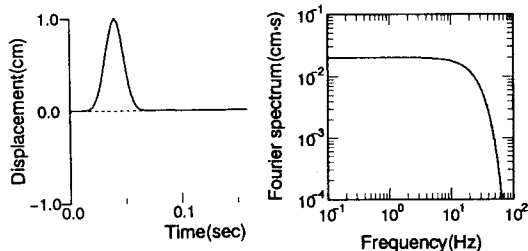
$$I = \frac{(\rho V_s)_{\text{Dam}}}{(\rho V_s)_{\text{Foundation}}} \quad (1)$$

ここに、 ρ は密度、 V_s はせん断波速度である。実際の重力ダムのインピーダンス比は、ほぼ $2/3 < I < 2$ の範囲に入ると思われる。ダム堤体の物性値はダムコンクリートの一般的な値を用いて一定とし、基礎のせん断

表-1 解析に用いた物性値

I	Dam			Foundation			Reservoir	
	ρ	ν	V_s	ρ	ν	V_s	ρ	V_p
0.0	2.30	0.200	2.00	—	—	∞	1.00	1.44
0.5	〃	〃	〃	2.30	0.300	4.00	〃	〃
2/3	〃	〃	〃	〃	〃	3.00	〃	〃
1.0	〃	〃	〃	〃	〃	2.00	〃	〃
1.5	〃	〃	〃	〃	〃	1.33	〃	〃
2.0	〃	〃	〃	〃	〃	1.00	〃	〃
3.0	〃	〃	〃	〃	〃	0.67	〃	〃

ρ : density(t/m^3), ν : Poisson's ratio,
 V_s, V_p : S, P wave velocity(km/s)



(a) 時刻歴

(b) Fourier スペクトル

図-2 入射波として用いたGaussパルス

波速度を変化させることによってインピーダンス比を設定した。それぞれのインピーダンス比と解析モデルの物性値を表-1に示す。以下、3章で行うFE-BE解析において解析時間長は10.24秒で、ダム堤体の内部減衰は考慮していない。

(2) 入射波

本論文では上下流方向鉛直断面内で励起されやすい、水平動の1次モードと2次モードを対象とする。入射波には最大振幅を1cmに正規化した変位 Gauss パルスをを用い、平面SV波として鉛直入射した。このパルスは図-

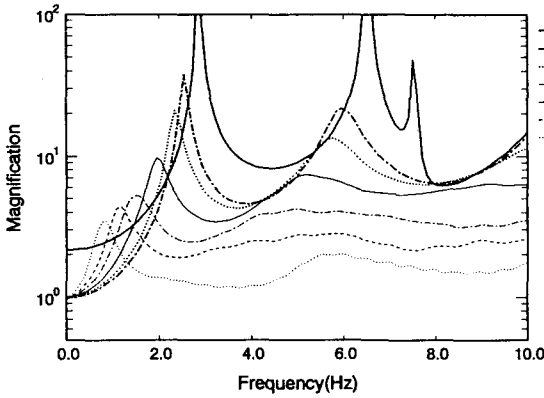


図-3 周波数応答関数(ダム頂の応答と入射波のスペクトル比)の比較

2に示すような時刻歴とスペクトルをもっている。後出する系の周波数応答関数は、ダム頂(点A)における応答と入射波とのスペクトル比から求める。したがって、スペクトルが0から20Hzでほぼフラットなこのパルスを入射波として用いることにより、この範囲での周波数応答関数を精度よく求めることができる。

3. ダム-基礎-貯水系における動的相互作用

(1) ダムと基礎の動的相互作用

ここでは貯水を無視し、ダム頂水平動の1次モードと2次モードを対象として、ダム-基礎系の動的相互作用効果を評価する。2章で概述した解析を行い、スペクトル比から求めた周波数応答関数のピークの振動数とピーク値を低振動数側から1次、2次の固有振動数、増幅率とした。それぞれのインピーダンス比におけるこの周波数応答関数を比較して示したものが図-3である。図-3によれば、従来から知られているように、基礎との動的相互作用によりダムの固有振動数は低下し、増幅率は逸散減衰によって減少している。また、その程度はインピーダンス比が大きいほど、すなわち基礎の剛性が小さいほど顕著である。

一方、ダムが剛基礎にあって相互作用を行わない場合を考えると、その振動特性は動的解析に用いるダムの物性値によって変化する。この物性値を変化させて、弾性基礎との動的相互作用による振動特性の変化と等価な変化を与えることができれば、剛基礎上のダムの解析は有限要素法のみによって行うことができるので、基礎との動的相互作用効果を近似的に取り入れた解析を簡単に行うことができ、実用的と考えられる。

一般に、ダム堤体の固有振動数を低下させるためには、内部減衰を与える方法、付加質量を与える方法、ダ

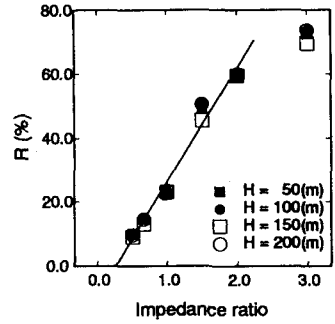


図-4 せん断波速度減少率Rとインピーダンス比の関係

ムの剛性を下げる方法などが考えられる。しかし動的相互作用による固有振動数の低下は非常に大きく、これを内部減衰の増加によって適切に補正することはできない¹²⁾。また付加質量を与える場合、ダムのどの部分に与えるのかが問題となり、モード形状が変化してしまうことも考えられる。したがってここではダムの剛性を変化させて固有振動数を低下させる方法をとる。また、増幅率を減少させるためには、逸散減衰と等価な内部減衰をRayleigh減衰として与えることにする。

以上のような考えから、ダムと基礎の動的相互作用効果を評価し、その結果をインピーダンス比との関係で示すと図-4、5、6のようになる。ダムの形状は相似とし、ダム高Hを50m、100m、150m、200mと変化させてダム高の影響も調べた。ただし、図-4の縦軸Rはダムの剛性の変化を表すパラメータで、次式で定義されるダムのせん断波速度 V_s の初期値2.00km/sからの減少率である。

$$R = \frac{2.00 - V_s}{2.00} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

これらの図から分かるように、評価した値はダム高によらず、インピーダンス比のみの関数となっている。

図-6において $I > 1$ の範囲で2次モードの逸散減衰が評価されていないのは、図-3においてこの範囲では2次モードのピークが不明瞭になっており、ダムの応答に大きな影響を与えないと考えられるからである。

また、図-4と図-5によると、Rと h_1 はインピーダンス比が大きくなるとある値に収束する傾向がある。これは、 $R > 100(\%)$ や $h_1 > 1$ があり得ないことから分かる。しかし、 $I \leq 2$ の範囲ではいずれも直線に近似でき、また実際の重力ダムにおけるインピーダンス比もこの範囲に入る場合が大部分なので、図-4と図-5にはこの範囲で回帰した直線を示してある。これらの関係を表す回帰式は次のようになる。ただし、 h_1 と h_2 はそれぞれダムの水平振動1次モード、2次モードに対す

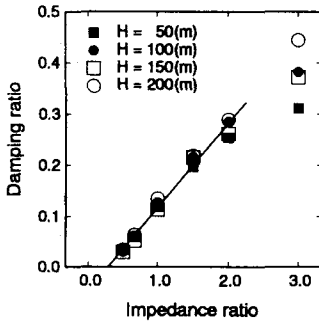


図-5 逸散減衰定数とインピーダンス比の関係(1次モード)

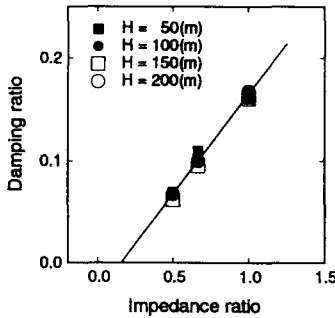


図-6 逸散減衰定数とインピーダンス比の関係(2次モード)

る逸散減衰と等価な内部減衰定数である。

$$\begin{aligned}
 R &= 35.4 \cdot I - 9.1 \\
 h_1 &= 0.164 \cdot I - 0.047 \\
 h_2 &= 0.195 \cdot I - 0.030
 \end{aligned}
 \quad (3)$$

式(3)は、インピーダンス比をパラメータとしてダムと基礎の動的相互作用効果を評価した式であり、この値を用いて有限要素解析を行うことにより、固有振動数の低下と増幅率の減少を考慮することができる。

(2) 基礎と貯水の動的相互作用

基礎と貯水の動的相互作用に関する研究は数少ない。Antes and Estroff⁶⁾および東平・大町⁹⁾は、剛体ダムに作用する動水圧の時刻歴を、基礎が剛体の場合と弾性体の場合とで比較している。そして、基礎が弾性体である場合には、貯水の波動の一部が弾性波に変換されて逸散するために、貯水がダムの応答に与える影響は小さくなることを指摘している。

ここでは動水圧ではなく、ダムの応答を直接比較することにより、基礎と貯水の動的相互作用がダムの応答に与える影響を調べてみる。そのためには基礎と貯水が相互作用を行う場合と行わない場合とを比較する必要があるため、基礎と貯水が相互作用を行わない、と

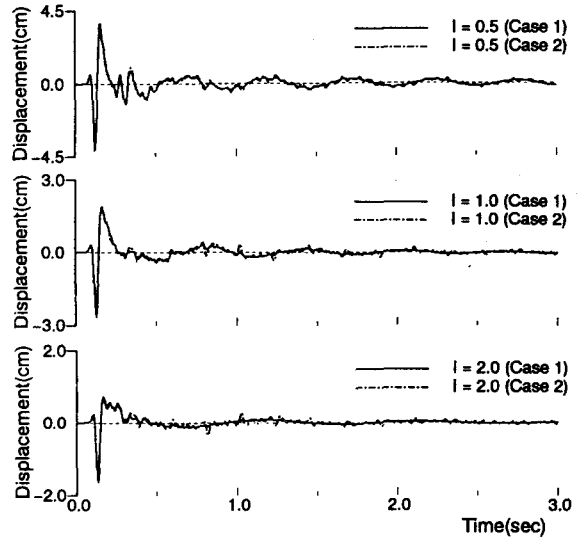


図-7 Case1とCase2の時刻歴波形による比較

いう条件を設定する方法について考えてみる。

基礎と貯水を要素で離散化したとき、基礎の節点カベクトル $\{P_{fr}\}$ と貯水の節点圧カベクトル $\{p\}$ 、および貯水の圧力勾配ベクトル $\{Q_{rf}\}$ と基礎の加速度ベクトル $\{\ddot{u}\}$ の関係は次のように表される⁹⁾。

$$\begin{aligned}
 \{P_{fr}\} &= -[\Lambda_{fr}]\{p\} \\
 \{Q_{rf}\} &= \rho_w E_w [\Lambda_{fr}]^T \{\ddot{u}\}
 \end{aligned}
 \quad (4)$$

ただし、 ρ_w は貯水の密度、 E_w は体積弾性率を表している。また、 $[\Lambda_{fr}]$ は次式で定義されるマトリクスである。

$$[\Lambda_{fr}] = \int_{\Gamma_{fr}} [\Phi]^T \bar{n} [\Psi] d\Gamma \quad (5)$$

式(5)において、 Γ_{fr} は基礎と貯水の境界、 \bar{n} はその法線ベクトル(貯水側向き)であり、 $[\Phi]$ 、 $[\Psi]$ はそれぞれ変位と圧力の補関数である。式(4)と式(5)から明らかのように、 $[\Lambda_{fr}] = [0]$ とすれば基礎と貯水の連成振動は切り離され、基礎と貯水が相互作用を行わない、という条件を設定することができる。また、それは全体の定式過程には何ら影響を及ぼさない。

ダム-基礎-貯水系が完全に相互作用を行う場合の解析をCase1、上述のように基礎-貯水間だけが相互作用を行わない仮想的な系の解析をCase2として、 $I=0.5$ 、 1.0 、 2.0 のときに両者を比較したものが図-7と図-8である。図-7では両者の時刻歴波形を比較している。インピーダンス比によらずCase2の後半部に約12Hzの振動成分が目立っているが、それ以外は両者はほぼ同一である。図-8では周波数応答関数を比較しているが、Case2にはCase1にみられないピークが存在することが分かる。また、両者の違いはインピーダンス比が大きい、すなわち基礎の剛性が小さい場合の方が顕著である。

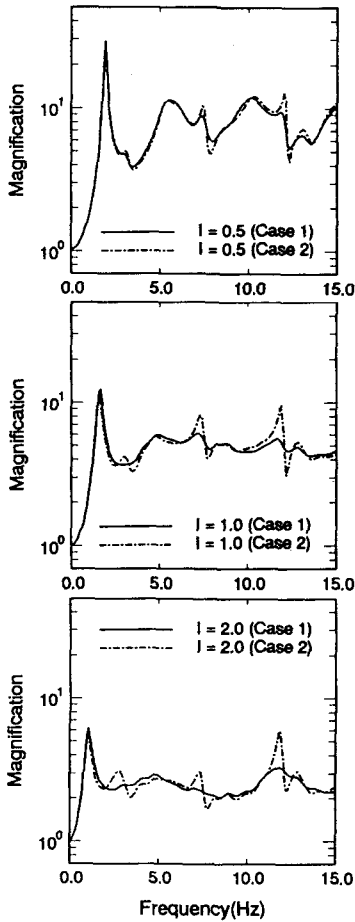


図-8 Case1とCase2の周波数応答関数による比較

ところで、Case2では貯水にとって基礎は剛体であるから、自由表面と湖底の間で貯水は固有振動を起こす。この固有振動数 f_r を求めてみると、次のようになる。ただし、 n は次数、 D は水深である。

$$f_r = (2n - 1) \frac{V_p}{4D}$$

$$= (2n - 1) \frac{1440}{4 \cdot 150} = 2.40, 7.19, 12.0, \dots \quad (6)$$

これらの固有振動数と、図-8のCase2の結果にのみ現れている周波数応答関数のピークの振動数はほぼ一致する。したがって、これらのピークは貯水の固有振動によって励起されたものであると考えられる。貯水の固有振動によって励起された低次のピークは、インピーダンス比が小さい場合には目立たなくなっている。これは、インピーダンス比が小さい場合にはダム自体の低次振動のピークが大きく、貯水によって励起されたピークは相対的に小さくなってしまふからである。

以上をまとめると、基礎と貯水の動的相互作用によって貯水の固有振動は起こりにくくなり、ダムの応答に

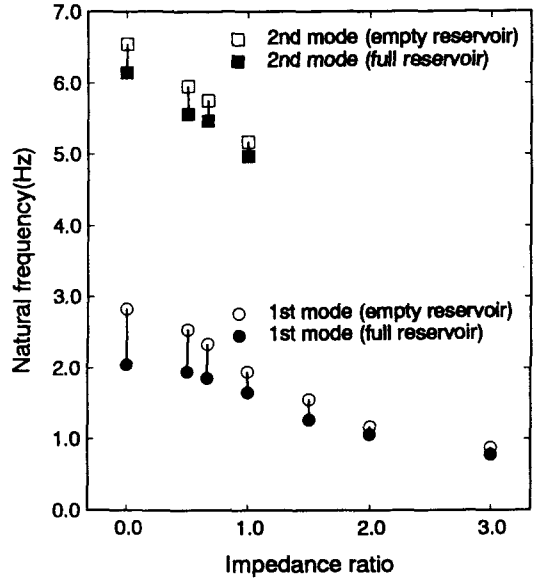


図-9 固有振動数に対する貯水の影響

及ぼす影響は小さくなる。また、全体的にダムの水平振動に及ぼす影響は小さく、無視できる程度である。これは、非粘性流体は固体との境界に垂直な方向にしか力を与えないことが原因であろう。したがって、湖底が水平でない場合、またはダムの鉛直振動に対して¹³⁾は基礎と貯水の相互作用効果はここで述べたよりも大きくなると考えられる。

(3) ダムと貯水の動的相互作用

a) 貯水の減衰効果と増幅効果

ここでは2章で示したような解析を、図-1の貯水を考慮したモデルを用いて行った。その解析結果から求めた、インピーダンス比の変化にともなう1次モードと2次モードの固有振動数、増幅率の変化を示したものが図-9と図-10である。比較のために貯水がない場合についても示した。図-9から、貯水の影響による固有振動数の低下はインピーダンス比が小さいときほど顕著であることが分かる。これは、インピーダンス比が小さいとき、すなわち基礎がより剛体に近いときには貯水の影響が現れるが、インピーダンス比が大きい場合には基礎との相互作用の影響が非常に大きいため、貯水の影響が相対的に小さくなることを意味している。

また、図-10によれば、2次モードの増幅率は貯水の影響で減少し、インピーダンス比が大きいほどその減少の度合いは小さくなっている。しかし、1次モードの増幅率は、 $I = 1/2$ では貯水がある場合の方が小さいが、 $I \geq 2/3$ では貯水がある場合の方が増幅率が大きくなっており、貯水には減衰効果と増幅効果があること

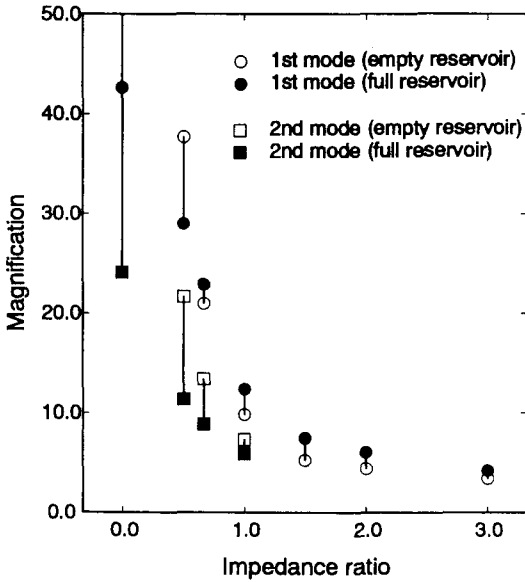


図-10 増幅率に対する貯水の影響

を示している。

b) 付加質量の分布

ダムと貯水の動的相互作用については、従来からダムの上流面に付加質量を与えて動水圧効果を表現することがよく行われている。これは、鉛直剛体壁が調和振動する場合の動水圧はダム堤体の加速度に比例するというを示した、Westergaardの解¹⁴⁾に基づく方法である。しかしダムの弾性を考慮した場合には、動水圧の分布はその解とはかなり異なると予想される。文献11)ではダム上流面における動水圧のスペクトルを加速度スペクトルで除すことによって付加質量に相当する物理量を求め、1次モードと2次モードそれぞれに対する付加質量が大きく異なることを示した。時間領域ではそれぞれのモードに異なる付加質量を与えて解析することはできないが、図-10から分かるように、貯水がある場合には2次モードの増幅率は比較的小さくなる。したがってここでは1次モードの固有振動数の低下を付加質量を与えて表すことを考える。

それぞれのインピーダンス比においてスペクトル比から求めた付加質量の分布を図-11に示す。インピーダンス比が小さいときほど全体的に付加質量は大きくなっており、図-9における貯水の影響の変化と調和的である。

図-11に示した付加質量の分布をもとに、解析の対象とするモデルのインピーダンス比と水位に対応する付加質量を求めて上流面に加えれば、貯水による1次モードの固有振動数の低下を考慮した解析を行うことができると思われる。

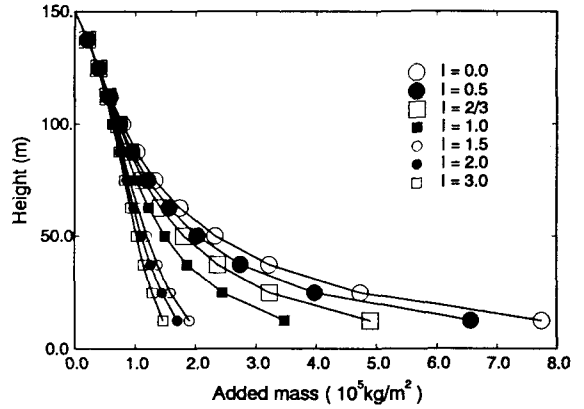


図-11 付加質量分布のインピーダンス比による変化

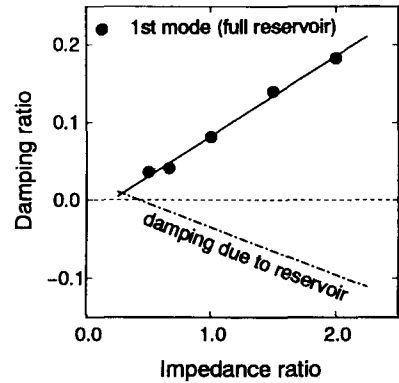


図-12 逸散減衰とインピーダンス比の関係

c) 貯水の減衰・増幅効果の評価

図-11に示した付加質量の分布を用いて、前述した貯水の減衰・増幅効果をそれぞれのインピーダンス比ごとに評価する。この場合、評価の手順は以下のようになる。

1. 式(3)第1式と式(2)を用いて、対象とするインピーダンス比に対応するせん断波速度 V_s^0 を求める。
2. 対応する付加質量をダムの上流面に加える。ただし、この場合手順1.で人為的にダムの剛性を小さくしているため、 $(V_s^0)^2/2.00^2$ を乗じて付加質量の大きさをこのときのダムの剛性に対応させる。
3. このモデルを用いて1次モードの減衰定数を0.050, 0.067, 0.100, 0.200と変化させて有限要素解析を行う。この結果から1次モードの増幅率 M_1 と減衰定数 h_1 の関係式を求めると一次式で表せる¹¹⁾。
4. 得られた一次式に、FE-BE結合解析の結果から得られた1次モードの増幅率 M_1 を代入し、この増幅率に対応する減衰定数を得る。

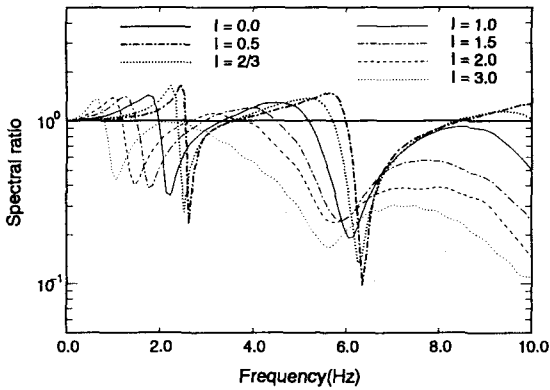


図-13 ダム底部(点B)の周波数応答関数(貯水なし)

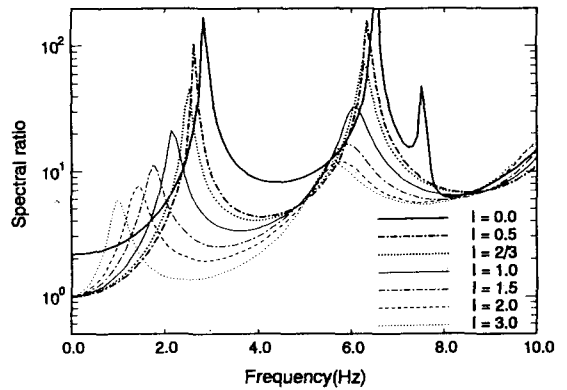


図-14 ダム頂(点A)と底部(点B)の応答のスペクトル比

このような手順で得られた減衰定数は、基礎部への逸散と貯水部への逸散によるダムの振動減衰をダムの内部減衰定数によって表した値となる。この減衰定数 h_1^r をインピーダンス比に対して示すと図-12の●のようになる。またその回帰式(図中の実線)は次のようになる。

$$h_1^r = 0.103 \cdot I - 0.021 \quad (7)$$

式(7)から式(3)第2式を引くと、貯水のみ減衰効果 h_1^r が得られ、次式となる。

$$h_1^r = -0.061 \cdot I + 0.026 \quad (8)$$

図-12には式(8)の関係も一点鎖線で示してある。この式から分かるように、 h_1^r は $I > 0.43$ で負の値をとり、貯水は増幅効果をもつようになる。実際の重力ダムでは一般に $I > 0.43$ であると考えられるから、貯水の影響を考慮した解析を行うべきであるといえる。

4. ダムの地震応答解析に用いる入力地震動

前章までは、コンクリートダムの動的解析において動的相互作用効果を考慮すべきである、という立場から、ダム-基礎-貯水間の相互作用効果について検討した。ところで、ダムの地震応答解析を行うときには、入力地震動の設定も非常に重要かつ難しい問題である。一般に、特定のダム地点でいつも適切な強震記録が得られているわけではないので、他地点、とりわけ類似のダムサイトでの記録をもとに最大加速度や周期特性などを補正して入力地震動を作成することが多い。しかし、他のダム基礎で得られた地震記録を用いる場合には、その記録が動的相互作用の影響を受けていることにも注意を払う必要がある。そのため、以下では地震応答解析に用いるべき入力地震動について考察する。

(1) 基礎部を半無限弾性体として扱う場合

FE-BE法のように基礎部を境界要素などでモデル化する場合には、系に入射する波動そのものを入力地震動として設定する必要がある。相互作用の影響を受けた地震記録をそのまま用いるべきではないと考えられる。ここでは、基礎で得られた地震記録がどのような影響を受けているのかについて検討してみる。

3章で示した図-1の貯水を無視した場合の解析結果から、ダム底部(点B)の周波数応答関数(入射波とのスペクトル比)を求め、それぞれのインピーダンス比について示すと図-13のようになる。この図と図-3を比較すると、ダム底部の応答関数は、ダム頂の応答関数がピークになる振動数よりも若干高振動数で谷になっていることが分かる。ダム底部における地震記録は、本来の入射波の周波数特性にこのようなフィルターを通した出力として得られているとみなせる。したがって、あるダムXの底部で得られた地震記録を別のダムYの入力地震動として用いる場合には、地震記録の周波数特性を図-13のフィルターで除してダムXの影響を取り除き、乱される前の入射波に戻す必要があると考えられる。しかし、得られた地震記録にどのようなフィルターがかかっているのかは、対象とするダムを忠実にモデル化して数値解析を行わなければ分からない。そのため、この場合ダムサイト近傍の露頭岩盤で得られた地震記録があれば、その振幅を半分にして入力地震動として用いるのが最も望ましいといえる。

(2) 基礎部を剛体として扱う場合

従来、基礎部を固定して有限要素解析などを行う場合には、入力地震動として

1. 系への入射波(露頭岩盤で得られた記録など)
2. 相互作用の影響を受けた地震動(ダム基礎で得られた記録)

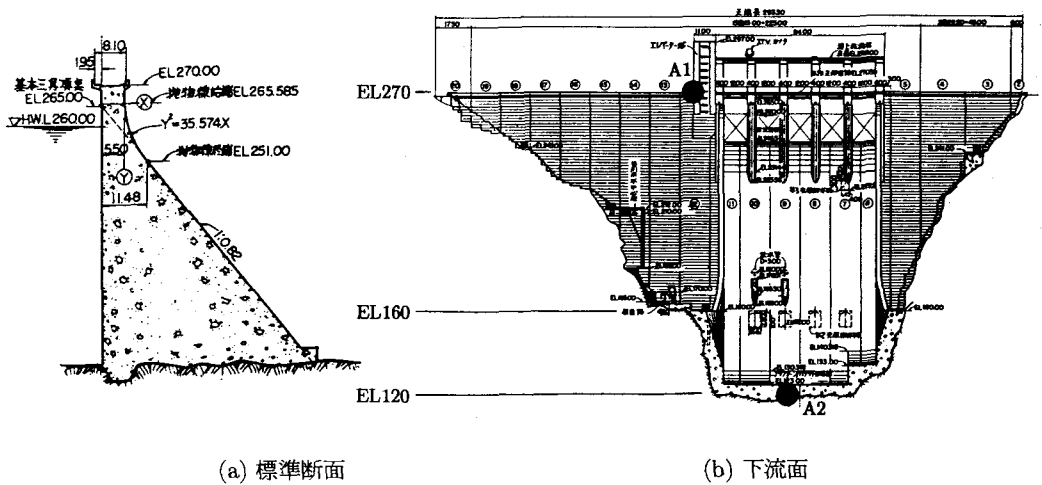


図-15 佐久間ダムの標準断面図と下流面図

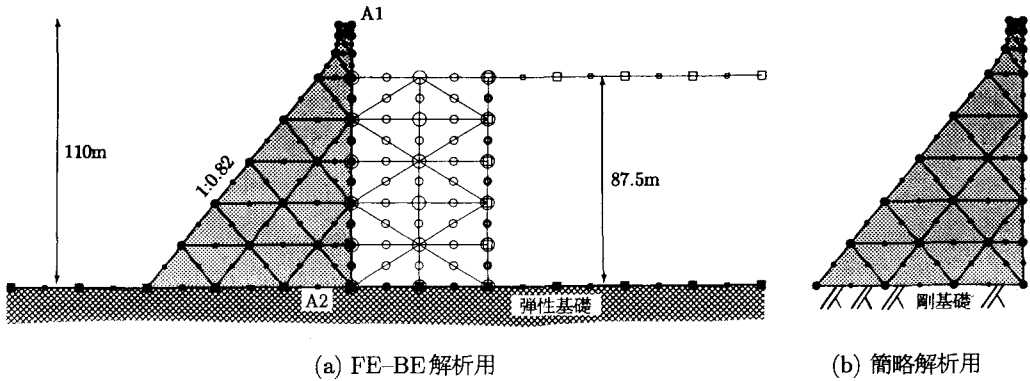


図-16 佐久間ダムの解析モデル

の一方を用いることが多い。本研究では1.を採用することとして、図-3に示した系の周波数応答関数をFEM解析で用いるために、動的相互作用をダム堤体の物性値の変化として表現した。ところで、ダム頂の点Aとダム基礎の点Bでの応答のスペクトル比をそれぞれのインピーダンス比について示すと図-14ようになるが、2.を入力地震動として用いる場合には、ダムの応答関数が図-14に示したものと等しくなるように物性値を変化させる必要がある。このための適切な変化量は、前述と同様の手順で動的相互作用を評価すれば求めることができる。

5. 実ダムの地震応答解析

(1) 解析モデル

これまでに行った評価の妥当性を確認するために、佐久間ダム(高さ155m, 堤長294m)の地震応答解析を行

う。佐久間ダムの標準断面と下流面形状を図-15に示す。加速度記録がダム頂(EL270, A1)と岩盤付近(EL120, A2)で得られている。ダム頂の観測点直下の岩盤はEL160なので、高さ110mのダムとして図-16のようにモデル化した。佐久間ダムの竣工は1956年と古く、物性についての実測値が入り困難なため、次のように物性値を推定した。

まず基礎の物性値については、佐久間ダム周辺の岩盤は堅硬な花崗岩であり、一般的な岩盤分類からB級であると判断されるため、 $V_p=3.70\text{km/s}$ とし¹⁵⁾、 V_s は V_p から換算して $V_s=2.27\text{km/s}$ と求めた。

ダムの物性値は、佐久間ダムで得られている地震記録を利用して求めた。図-17は、A1とA2で得られた記録のスペクトル比を3つの地震について示したものである。この図によると、3Hz, 5Hz, 8Hz付近にスペクトル比のピークがあることが分かる。最も低振動数の3Hzを1次モードの固有振動数とすると、3章での解析

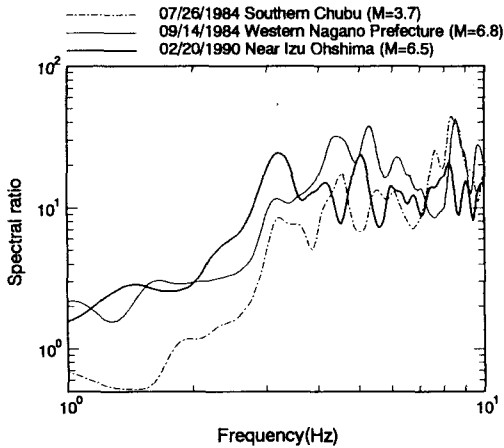


図-17 A1とA2で得られた地震記録のスペクトル比

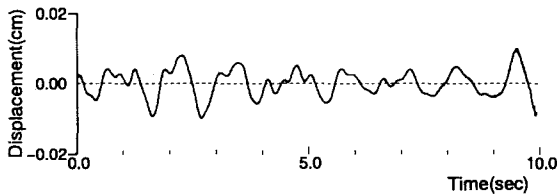


図-18 地震応答解析に用いた入力地震動

表-2 解析に用いた物性値

	Dam	Foundation	Reservoir
$\rho(t/m^3)$	2.30	2.70	1.00
ν	0.167	0.200	—
$V_s(km/s)$	2.40	2.27	—
$V_p(km/s)$	3.80	3.70	1.44

結果から1次モードと2次モードの振動数の比は1:2.5~4程度なので、2次モードの固有振動数は7.5~12Hzの間にあると考えられる。したがってここでは8Hz付近のピークを2次モードのピークであると推定し、5Hz付近のピークは3次元的なモード(逆対称1次モードなど)によって励起されたものであると考えた。後述するように、地震応答解析には1990年の伊豆大島近海地震の際に得られた記録を用いるが、この地震記録のスペクトル比の1次モード、2次モードに対応するピークの振動数はそれぞれ3.2Hz、8.3Hzである。このピーク振動数に合うダム物性値を数値解析から求めたところ、 $V_s=2.40km/s$ が得られた。以上のようにして求めた解析モデルの物性値を表-2に示す。この場合のインピーダンス比は0.902となった。また、ダムの1次モードと2

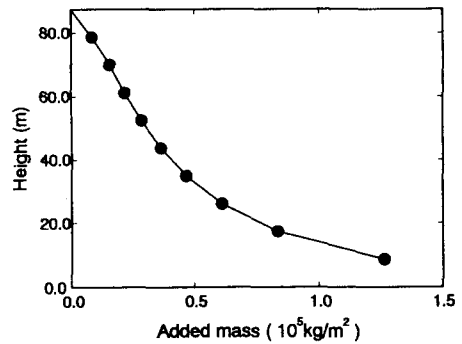


図-19 簡略解析に用いた付加質量分布

次モードに対する内部減衰定数は $h_1=h_2=0.025$ とした。

(2) 入力地震動

本研究では地震応答解析のための入力地震動として、1990年の伊豆大島近海地震(M=6.5)の際にA2で得られた記録を用いる。この記録には低周波数成分が多く含まれており、ダムの低次モードを励起することが期待できる。しかし、4章で示したようにこの記録が既に動的相互作用の影響を受けていると考えられるので、影響される前の入射波に戻す必要がある。そこで、まず3章で行ったGaussパルスによる衝撃応答解析を図-16のモデルを用いて行い、ダム底部の点A2の周波数応答関数を求めた。次に、地震観測記録の振幅スペクトルをこの応答関数で除して動的相互作用の影響を取り除いてから、1Hzのハイパスフィルターをかけて2回積分し、Fourier逆変換で時刻歴に戻した。このようにして得られた入力地震動を図-18に示す。

(3) 簡略解析のための物性値

動的相互作用効果を取り込んだ有限要素解析(以下、簡略解析とよぶ)のためのダムの物性値は、3章で行った評価式に従って定める。ただし、図-1と図-16とでは貯水の水深が異なるので、ここでは貯水の影響は水深に比例すると考えて物性値を定める。

式(3)にこの場合のインピーダンス比 $I=0.902$ を代入すれば、 $R=22.8\%$ 、 $h_1=0.101$ 、 $h_2=0.146$ となるため、 V_s は初期値2.40km/sを22.8%減少させて1.85km/sとした。また、式(8)に $I=0.902$ を代入すれば $h_1^*=-0.029$ となるが、このときの水深に対応させて $h_1^*=-0.017$ とした。さらに内部減衰定数を加え、最終的に

$$h_1 = 0.101 - 0.017 + 0.025 = 0.109$$

$$h_2 = 0.146 + 0.025 = 0.171 \quad (9)$$

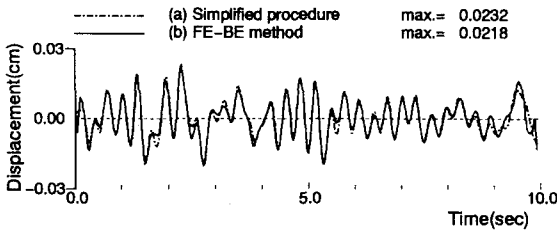


図-20 (a)と(b)の時刻歴波形の比較

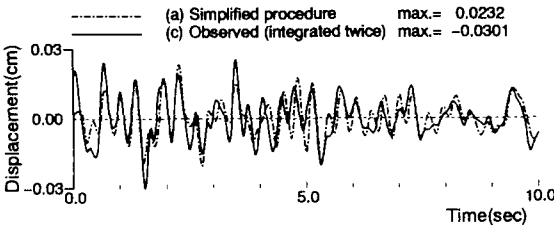


図-21 (a)と(c)の時刻歴波形の比較

とした。貯水による2次モードの減衰は無視している。付加質量については、図-11に示した分布形状から、 $I=2/3$ と $I=1.0$ の場合の線形補間によって $I=0.902$ に対応する分布を求め、水深にも対応させた。さらに上述のようにダム堤体の剛性を人為的に小さくしているので、このときの剛性に対応させるために、付加質量の大きさにせん断波速度の2乗の比 $(1.85/2.40)^2$ を乗じた。このようにして得られた付加質量の分布を図-19に示す。

このように、ここでいう簡略解析とは、図-16(b)のようにダム堤体のみを有限要素でモデル化し、基礎の弾性と貯水を無視する代わりに、物性値と付加質量を上記のような要領で定めるものであり、解析そのものは従来の有限要素法による動的解析によって行われる。

(4) 解析結果

以上のような条件で解析時間長10.24秒の地震応答解析を行った。このとき、(a)簡略解析で得られたダム頂での応答変位波形を、(b)FE-BE結合解析による結果と比較して図-20に、(c)ダム頂での観測記録を入射波と同様な手順で変位に変換したものと比較して図-21に示す。また、これらのスペクトルの比較をそれぞれ図-22、図-23に示す。(a)と(b)は非常によく一致しており、前述の動的相互作用の評価が妥当であることが確認できた。すなわち、この場合には1次モードの逸散減衰は8.4%であり、ダム堤体の内部減衰2.5%よりもかなり大きな値となっている。2次モードの振動は、貯水による減衰効果は無視したにもかかわらずほとんど現れてい

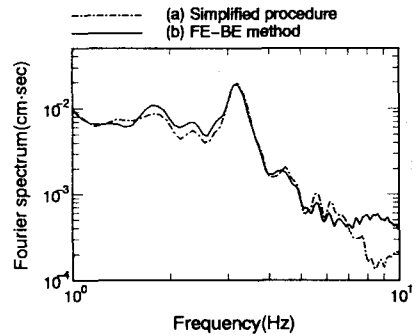


図-22 (a)と(b)のFourierスペクトルの比較

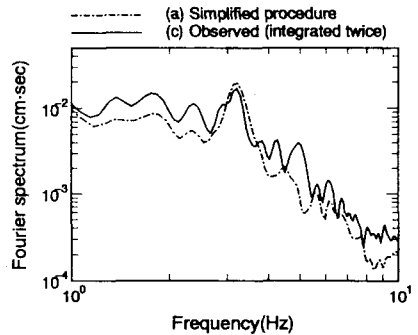


図-23 (a)と(c)のFourierスペクトルの比較

表-3 計算時間の比較例

method	elapsed cpu time
simplified	215. (second)
FE-BE	20.4 (hour)

ない。また、ダムのせん断波速度を22.8%減少させ、付加質量を与えることによって1次モードの固有振動数の低下を表現することができた。付加質量分布は水深に比例すると仮定したにもかかわらずよい一致が見られたが、今後両者の関係を明らかにする必要があるだろう。この2つの解析に要した計算時間の比較を表-3に示すが、(a)は(b)の1/300以下の時間で解析を行うことができた。

図-21において、(a)と(c)の2つの時刻歴は全体的によく一致しており、低周波数成分が優勢な入力地震動を用いた場合には、ダムの応答には1次モードが卓越することを示唆している。図-23のスペクトルにおいて5Hz付近で観測記録の振幅の方が大きくなっているのは、前述したように3次元的な振動モードの影響であろう。この付近を除けばスペクトルにおいても全般に一致度は良好であり、ここで例示した簡略解析法は、ダ

ムの動的解析を有限要素法によって行う上で簡便かつ有用であるといえる。

6. 結 論

時間領域FE-BE結合解法を用いてダム-基礎-貯水系における動的相互作用を評価し、その結果に基づいて動的相互作用の効果を取り入れた簡便な有限要素解析を試みた結果、以下の結論が得られた。

1. ダムと基礎のインピーダンス比をパラメータとして、ダム-基礎系の動的相互作用を簡便に評価できる式を提示した。
2. 基礎と貯水の動的相互作用がダムの水平振動特性に及ぼす影響は全体的に小さく、基礎の弾性は貯水の固有振動を抑制する。
3. 動水圧と加速度のスペクトル比から、ダムの上流面における付加質量の分布を示した。それによると、ダムと基礎のインピーダンス比が小さいほどダムと貯水の動的相互作用の効果は大きく、付加質量を増加させる必要があることが分かった。
4. ダム底部で得られた地震記録は既に動的相互作用の影響を受けているため、地震応答解析のための入力地震動として用いる際には注意が必要であること、および動的相互作用の影響を取り除いた入力地震動を算定する方法を示した。
5. ダム-基礎-貯水系における動的相互作用の効果を考慮した解析を、簡便に、ごく短時間で行う方法を提示し、実ダムの地震応答解析に適用した。その結果、本論文における動的相互作用の評価が妥当であることを確認できた。今後このような評価に基づく簡便な動的解析によって、従来より精度の高いダムの地震応答解析が行われ、実務に反映されることが望まれる。

謝辞：本研究遂行上、東京理科大学東平光生博士および電源開発株式会社から種々の御便宜をいただいた。末筆ながら厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 松本徳久：コンクリートダムの地震時の健全性，コンクリート工学，Vol.18，No.3，pp.62-70，1980。
- 2) Chopra, A.K.: Earthquake behavior of reservoir-dam systems, *Proc. of ASCE, Journal of the Engineering Mechanics Division*, EM6, pp.1475-1500, 1968.
- 3) Fennes, G. and Chopra, A. K.: Earthquake analysis of concrete gravity dams including reservoir bottom absorption and dam-water-foundation rock interaction, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.12, pp.663-683, 1984.
- 4) Fok, K.L. and Chopra, A.K.: Frequency response functions for arch dams: Hydrodynamic and Foundation flexibility effects, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.14, pp.769-795, 1986.
- 5) Antes, H. and Estroff, O.V.: Analysis of absorption effects on the dynamic response of dam reservoir systems by boundary element methods, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.15, pp.1023-1036, 1987.
- 6) Hall, J.F.: Study of the earthquake response of Pine Flat Dam, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.14, pp.281-295, 1986.
- 7) Duron, Z.H. and Hall, J.F.: Experimental and finite element studies of the forced vibration response of Morrow Point Dam, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.16, pp.1021-1039, 1988.
- 8) 塩尻弘雄，田口友康：重力式ダムの地震応答解析法の開発，電力中央研究所報告 No.385012，1985。
- 9) 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。
- 10) 土木学会耐震工学委員会 動的相互作用小委員会：基礎・地盤・構造物系の動的相互作用—相互作用効果の耐震設計への導入—，p.I-1，1992。
- 11) 大町達夫，片岡正次郎：時間領域FE-BE結合解法によるダム-基礎-貯水系における動的相互作用の評価，第9回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1237-1242，1994。
- 12) 東平光生，大町達夫：時間領域FE-BE法を用いた弾性基礎上のフィルダムの振動モード解析手法，土木学会論文集，No.416/I-13，pp.429-438，1990。
- 13) Chandrasherker, R. and Humar, J.L.: Fluid-foundation interaction in the seismic response of gravity dams, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, Vol.22, pp.1067-1084, 1993.
- 14) Westergaard, H.M.: Water pressures on dams during earthquakes, *Trans. ASCE*, Vol.95, pp.418-433, 1933.
- 15) 菊地宏吉，斎藤和雄，楠建一郎：ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について，大ダム，No.102,103合併号，pp.20-31，1982。

(1994. 11. 28 受付)

EVALUATION OF DYNAMIC INTERACTION EFFECTS OF 2-D DAM-FOUNDATION-RESERVOIR SYSTEMS

Tatsuo OHMACHI and Shojiro KATAOKA

Dynamic response of a dam interacted with foundation and reservoir is evaluated by an FE-BE method in time domain. Interaction effects and radiation damping are expressed in terms of reduction rate of V_s , internal damping ratio and added mass for several impedance ratios. The evaluated results applied to conventional FE analysis is presented. Interaction effects on incident seismic wave are also discussed. Both the FE-BE method and the FE one are applied to earthquake response analysis of an actual dam. The simulated responses are almost similar to each other, showing a good agreement with the observation.