

人力地動を用いないダム振動の逆解析

Inversion of Dam Vibration without Using Input Ground Motion

大町 達夫* 片岡 俊一**

By Tatsuo Ohmachi and Shun'ichi Kataoka

Due to complexity of foundation motion, it is hard to identify dynamic characteristics of an actual dam by means of an identification procedure which requires both input and output of the dam. This study aims to estimate vibration modes of a dam from only its response, without using information about input excitation. Performance of a factor analysis procedure applied to the inverse problem is first examined using simulated earthquake response of a rockfill dam. Some factors resulting from the factor analysis are found to have significant contribution from plural vibration modes. Thus, a procedure to purify the factors is then proposed, and applied to the simulated response as well as to microtremor data observed at an existing dam to demonstrate its validity.

1. 序論

地震工学において、構造物の耐震性の確認や耐震設計の手がかりを得る為に、実在構造物の動的挙動を実測することは非常に有用なと考えられる。塔や高層ビルのような単純な形状をした構造物で、基礎部が固定端と仮定できるような場合においては、振動系への入力と振動系の応答が判れば、いわゆる情報理論の同定手法を利用して構造物特性を十分な精度で推定できる^{1) 2) 3)}。しかしながら、アースダムやロックフィルダムなどのフィルダムの場合には次に述べるような理由により既往の手法を適用して振動系を同定することは容易でない。まず、ダム基礎は平面的に大きな広がりをもつため基礎からダム本体に入力する地動を完全に把握することは原理的に困難である。既に指摘されているように^{4) 5)}、例えばダムの右岸と左岸では地震時挙動が異なり、ダム基礎における地震動は一樣ではない。このことは、同定手法を適用する際の入力にあいまいさを残すこととなる。次に、一般にダムと地盤との剛性比は極端に大きくはなく、そのためダムと基礎系の連成振動あるいは動的相互作用が生じている可能性が十分あるため基礎振動を単純に入力と考えるわけにはいかない場合がある。このような系に対して同定手法を厳密に適用しようとするならば、いわゆる地震基盤面における地震動とダム・地震基盤間にある地盤の諸物性値が新たに必要となる。また、ダムは剛性分布、質量分布とも不均質な3次元体であり、水平、鉛直各方向に無限の自由度を有しているのみならず多くの固有振動モードが狭い振動数範囲に存在している。しかしながら、我々が測定する観測点の数は有限であるので低次から高次まで多くの振動モードを精度よく求めることもまた困難である。

*工博 東京工業大学助教授 大学院総合理工学研究科 (〒227 横浜市長津田町 4259)

**工修 清水建設(株)技術研究所 (〒135 江東区越中島3-4-17)

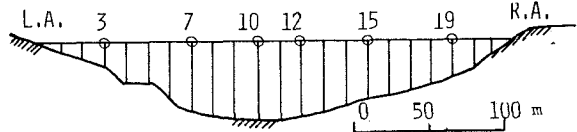
これらのことから、振動系に対する入力と出力とをともに必要とする同定手法はダム振動については適用性に限界があるように思われる。そこで入力地動を必要とせず、出力すなわち応答のみからダムの動特性を推定する、一つの逆問題について考えてみることにした。但しここでは前述のことを勘案し、立体的なダムに多数の測点を配置することによって得られる多数の不規則な振動波形が示す統計的性質を重視して振動モードを抽出することを意図した。この意図のもとに、本論文では多変量解析手法のひとつである因子分析法を利用することを考え、その適用性を検討した。更にその改良手法を提案し、その有効性を確認した後に実測データに適用した。最近の測定機器の高性能化により、多点同時測定データを収集することは容易になっているので、ダム振動以外の分野でもこのような試みは有用性を増してくるものと思われる。

2. シミュレーションデータ

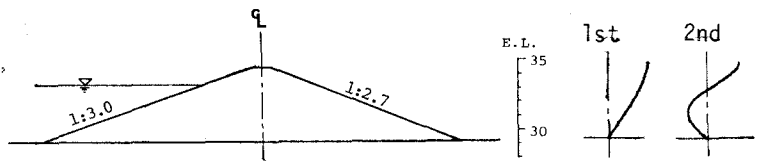
因子分析法の適用性を調べる為に、まず既に開発されている簡便手法⁶⁾を用いてロックフィルダムの地震応答を算出した。

図-1(a)は計算に用いたダムの概観図である。本ダムは高さ56m、クレスト長340mであり、解析に当りダムは剛体基礎上に置かれた均質な弾性体であると見なし、上下流方向のせん断変形のみを考慮

することとした。応答を求める為に図-1にあるようにダムを22個のプリズム状有限要素に分割した。図-1(b)はダムの標準横断面図と鉛直方向1次および2次の振動形を示す。このダムモデルに、図-2に示す最大値35.2ガルの加速度を入力し、0.01秒毎に計算を行った。この入力波は、1978年の宮城県沖地震の際に本ダム右岸上で記録されたもの⁷⁾の主要動部分である。入力波のパワースペクトルを図-2(b)に示す。応答計算に用いたダムの振動モードは低次の14個のモードであり、

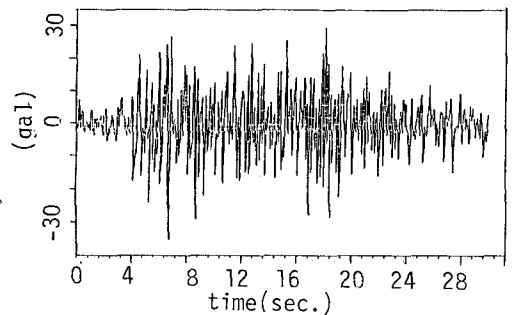


(a) ダム縦断面および有限要素分割

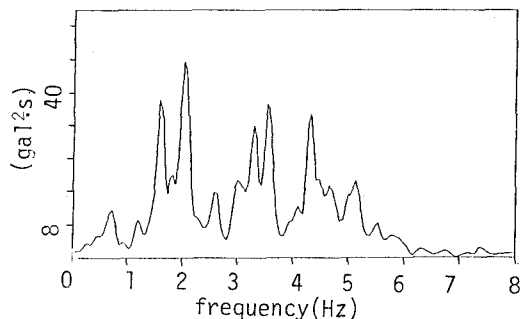


(b) ダム標準横断面とダム鉛直軸に沿う振動形

図-1 解析に用いたダムの概要



(a) 入力波形



(b) 入力波形のパワースペクトル

鉛直方向1次			鉛直方向2次		
次数	固有振動数	刺激係数	次数	固有振動数	刺激係数
1	1.92	2.0468	1	4.07	-1.4039
2	2.38	0.2119	2	4.56	-0.0600
3	2.78	1.1324	3	5.07	-0.8238
4	3.19	-0.0316	4	5.53	-0.2787
5	3.59	0.8696	5	5.96	-0.7369
6	3.96	-0.0948			
7	4.36	0.5676			
8	4.78	-0.0374			
9	5.21	-0.5294			

表-1 固有振動数 (Hz) と刺激係数

図-2 入力波形について

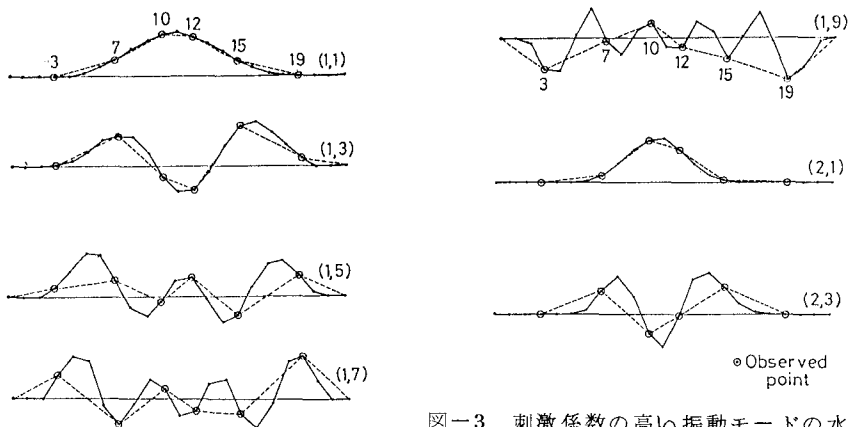


図-3 刺激係数の高い振動モードの水平振動形

各モードの減衰定数は全て5%とした。固有値解析の結果求めた、固有振動数と刺激係数を鉛直方向の振動モード毎に分けて表-1に示す。また、刺激係数の比較的大きなモードの水平方向の振動形を図-3に示す。図中カッコ内の数字は、各々順に鉛直、水平のモード次数を示す。クレスト上の21個の節点のうち図-1に数字で示した節点3, 7, 10, 12, 15, 19を仮の測定点として選び出した。以降この点を単に測点と呼ぶ。図-3の破線は測点間を結んだものである。図-4に、各測点の応答変位波形のフーリエ振幅スペクトルの形状を示す。中央部の測点では、2.0Hzが極めて顕著であるが、端部に近い測点では高次モードの影響が表れていることが判る。

3. 因子分析法の直接適用

一般に、直交因子モデルによる因子分析法を複数の時系列データに適用した場合、次式のように表すことができる。また(1)式を模式化すると図-5のようになる。

$$X(t) = AF(t) + U(t) \quad (1)$$

ここで $X(t)$: 分散1, 平均0に基準化したNコのサンプルデータ

A : $(N \times m)$ 行列の因子パターン行列

$F(t)$: m コの因子スコア

$U(t)$: 残差項

ここで、次のように $X(t)$ と $F(t)$ とを基準化しておく。

$$E[x_i^2(t)] = 1, E[f_i^2(t)] = 1 \quad (2)$$

$E[\cdot]$ は平均を取ることを示している。また、 $F(t)$ と $U(t)$ の性質を次のように仮定しておく。

$$E[f_i(t)f_j(t)] = 0, E[u_i(t)u_j(t)] = 0 \quad E[f_i(t)u_j(t)] = 0 \quad (i \neq j) \quad (3)$$

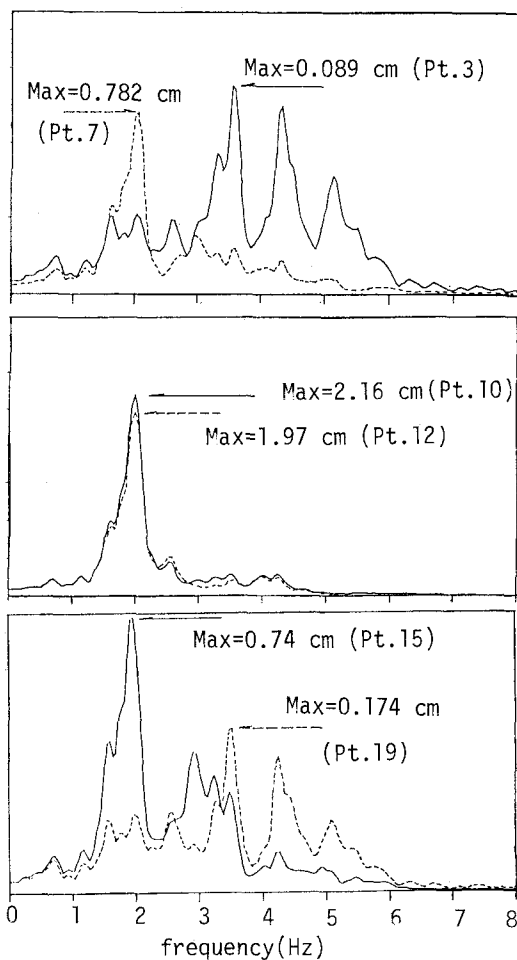


図-4 応答変位のフーリエスペクトル

また、各因子パターンベクトルの内積の大きさは異なり、この値が大きいほどその因子の寄与が大きいことを意味し、一般に因子寄与と呼ばれている。基準化された波形 $X(t)$ と測定波形 $Z(t)$ との関係は(4)式のように簡単に表すことができる。

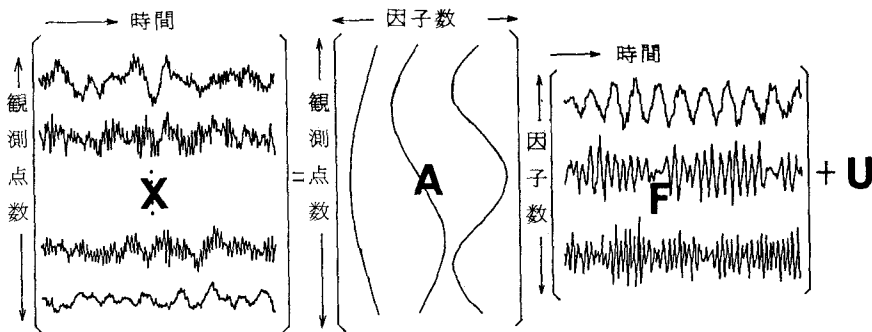


図-5 因子分析法の考え方

$$X(t) = S^{-1} Z(t) \quad (4)$$

ここで S は、各測点のデータの標準偏差を対角成分においた対角行列である。因子分析法の基本式は(1)式であるが、ここでは、各測点間の相対的な大きさも問題に取り入れたいので、(1)式の左より S を乗じて

$$Z(t) = B F(t) + S U(t) \quad (5)$$

$$\text{ここで、} B = S A \quad (6)$$

とし、 B の各列ベクトルを修正因子パターンと仮に呼び、今後はこれについて考察することとする。(5)式はモード重ね合せの式である(7)式と形式的に類似していることは注目してよい。

$$Z(t) = H Q(t) + V(t) \quad (7)$$

ここで、 H : $(n \times n)$ のモード形行列 ($N > n$)

$Q(t)$: n コの基準座標

$V(t)$: n コの残差項

式の類似性より(5)式の B と(7)式の H 、また(5)式の $F(t)$ と(7)式の $Q(t)$ がどのように対応するかは興味深い点であるが、これは後述する。一般に $X(t)$ より A と $F(t)$ とを推定する手法には様々なものがあるが⁹⁾ ここでは A の推定には正準因子分析法を用い、 F の推定は A の推定後に二乗平均の意味で推定誤差を最小にすることを基準として、(8)式を使用した。

$$F(t) = A^T R^{-1} X(t) \quad (8)$$

ここで、 T は転置を意味し、 R は $(N \times N)$ の測定データ間の相関行列である。

先程の地震応答データに対する因子分析の結果を図-6に示す。図-6(a)の実線は、3つの修正因子パターンを示している。1次のパターンはV字形、2次、3次はM字形、W字形の形状であり、谷形状がほぼ対称であることから、これら3つのパターンは合理的なものであると考えられる。因子寄与率は順に59%、33%、7.5%であった。スコア $F(t)$ については波形の代りに最大値1に基準化したフーリエスペクトルとして図-6(b)に示した。各フーリエスペクトルのピーク振動数は順に2.0Hz、3.5Hz、2.9Hzとなっており、(1,1)、(1,5)、(1,3)の振動モードの固有振動数に極めて近い値であり、参考の為にこのモードの振動形を図-6(a)に、基準座標のフーリエスペクトルを最大値1にして図-6(b)に、ともに破線で示す。実線と破線とを比較すると、第1因子と(1,1)モード、第3因子と(1,3)モードとはよく類似していることが判る。しかしながら、第2因子と(1,5)モードとは対応がさほどよくない。これは(1,7)、(2,1)、(1,9)などの高次モードが混入していることの影響と考えられる。

図-6や別に行ったいくつかの解析例から判明したことをまとめると次のようになる。

- ① 因子スコアのスペクトルにおいて、単一のピークが卓越しているならば、因子パターンはある1つのモードの振動形とよく一致し、このピーク振動数は対応する振動モードの固有振動数とほぼ一致すると考えうる。

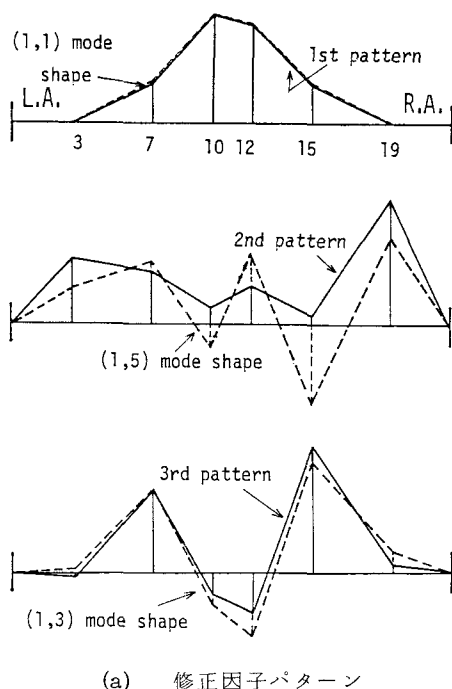
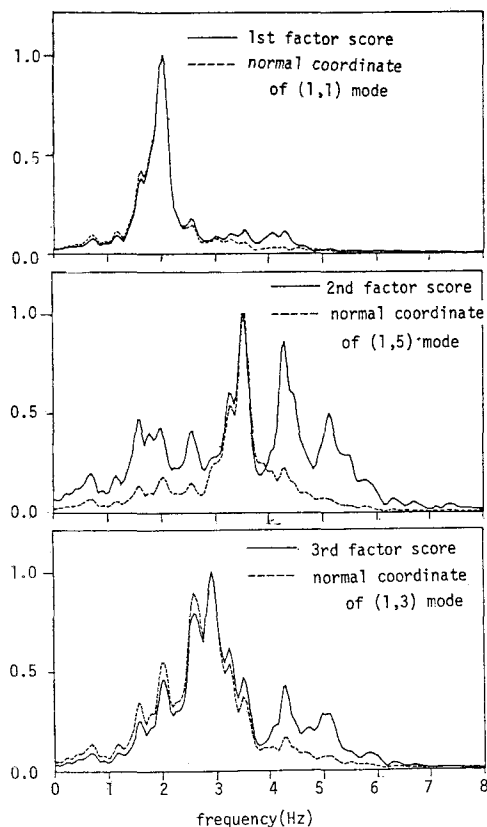


図-6 因子分析法の直接適用結果



(2) スペクトルにピークが複数ある場合、その因子は1つの振動モードに対応しているというよりも、むしろ多くの振動モードが関与していると考えの方がよい。

(3) スコアのスペクトルについては、たとえ全体的なスペクトル形状が基準座標のスペクトルに似ていなくとも、ある特定のピーク付近では両者がよく一致する振動数域がある。

(4) 因子寄与率は、ダムの動的特性と入力性状によって決まり、刺激係数のみで因子寄与率を表わすことはできない。

(5) 以上のことより、因子分析法は数個の低次の振動モード形と基準座標を粗く推定するには有効であり、特に低次のモードに対しては、推定精度が高いと考えられる。

4. 因子の改良

推定された因子は、因子スコアのスペクトル形状などから複数の振動モードから構成されていると判断される場合が多い。そのような場合にはその因子への特定の振動モードの寄与を高め、他のモードの寄与を低減させることにより、抽出因子と振動モードとの対応を改良することが望ましい。いま、因子スコアは同次元数の基準座標の線形結合で表わされるとし、(9)式で表わす。

$$F(t) = C Q(t) \quad (9)$$

ここで、変換行列 C は $(m \times m)$ の正則行列であると仮定する。また、各基準座標は大きさを1に基準化しておくものとする。

$$E[q_i^2(t)] = 1 \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (10)$$

(9)式の両辺に右より F の転置行列を乗じ、時間領域について平均をとると因子スコアの正規直交条件 (2)お

よび、(3)式)より

$$I = C E [Q(t) F^T(t)] \quad (11)$$

$$C^{-1} = E [Q(t) F^T(t)] \quad (12) \quad \text{ここで } I \text{ は単位行列}$$

(2), (10), (11), (12)式より明らかなように C^{-1} の i 行 j 列要素は $q_i(t)$ と $f_j(t)$ との相関係数であり、このことより、 C , C^{-1} は非対称行列であることが判る。(1)式と(9)式を用いて(5)式を書き直すと次のようになる。

$$\begin{aligned} Z(t) &= B C C^{-1} F(t) + S U(t) \\ &= \hat{B} \hat{F}(t) + S U(t) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで } \hat{B} &= B C && \text{改良されたパターン行列} \\ \hat{F}(t) &= C^{-1} F(t) && \text{改良された因子スコア行列} \end{aligned}$$

しかしながら、(12)式における基準座標 $Q(t)$ は当然未知である。そこで前項のまとめ③より、因子スコアの適切な振動数域を取り出して、その代用とすることを考える。ここでは、この振動数域として、因子スコアの卓越振動数成分を利用することとする。

図-6 で見たように、第2因子には多くの振動モード、特に高次のモードが寄与していると判断される。そこで(9)式から(13)式で記した改良手法を用いる為に、前述の3個の因子のはかに因子寄与率は微小であるが、第4因子を考慮に加えることとする。図-7 に第4因子の修正因子パターンと最大値を1に基準化したスコアのフーリエスペクトルを示す。変換行列を定めるに当って、使用した前述の卓越振動数域は、各因子の順に 1.7-2.3 Hz, 3.3-3.8 Hz, 2.8-3.1Hz, 4.2-4.6Hz の範囲である。これらによって相関行列 C^{-1} を定めた。この C^{-1} より求まる C は次のようになる。

$$C = \begin{bmatrix} 1.058 & 0.104 & 0.035 & 0.127 \\ 0.112 & 0.985 & 0.700 & -0.985 \\ -0.057 & 0.104 & 1.705 & 0.270 \\ 0.013 & 0.758 & -0.107 & 1.021 \end{bmatrix}$$

この C と C^{-1} を用いて決定した改良因子パターンと改良因子スコアを図-8 に示す。図-8 (b), (c)より

改良因子スコアは時間領域、振動数領域ともに基準座標とよく一致していることが判る。時間領域での相関係数を求めるといずれも 0.95 以上であった。また第2因子を見ると、図-6 で複数あった顕著なピークがなくなっていることが判る。各因子のピーク振動数を読みとると、2.0Hz, 2.9Hz, 3.6Hz で計算に用いたダムの固有振動数との違いは 5% 程度である。改良因子パターンの形状を見ると、第1パターンでは (1,1) モードの振動形とまったく一致している。第3パターンにおいても図-6 では振動の節が3個あるのに対し、(1,3) モードが2個の節しか持たないことから、もとの因子パターンには部分的に位相の反転が見られたが、図-8 ではそれが改良されている。第2番目の改良パターンは、2つの節しか有していないのに対し、(1,5) モードは4つの節を有しているので、両者の対応はあまり良くないように感じられるが図-6 と比較すれば判るように節の数が0から2に増えており、この点で当初のパターンは改良されたと言ってよい。このような高次の振動モードを精度よく推定するには、より多くの観測点が必要であることがわかる。

以上、一つのダムモデルの地震応答について、因子分析法を直接適用し、更にその結果に改良を加えることにより、既知の振動モードを抽出しうることを示した。他の振動モデルを用いて、入力振動や系の固有振動数、減衰定数などを変化させ、数値実験を行ってみたが上に述べた改良手法は同様に有効であった。

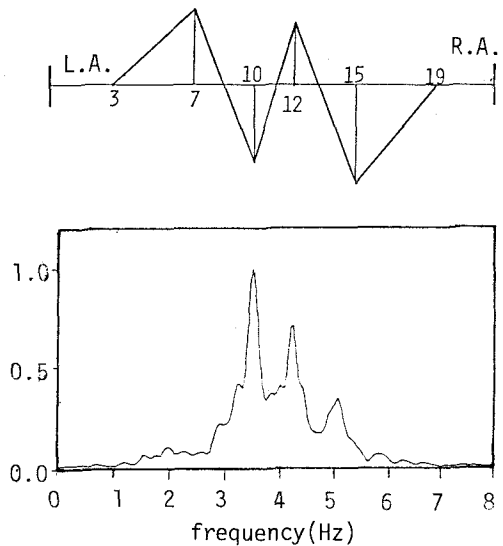


図-7 第4因子の修正因子パターンと
因子スコアのフーリエスペクトル

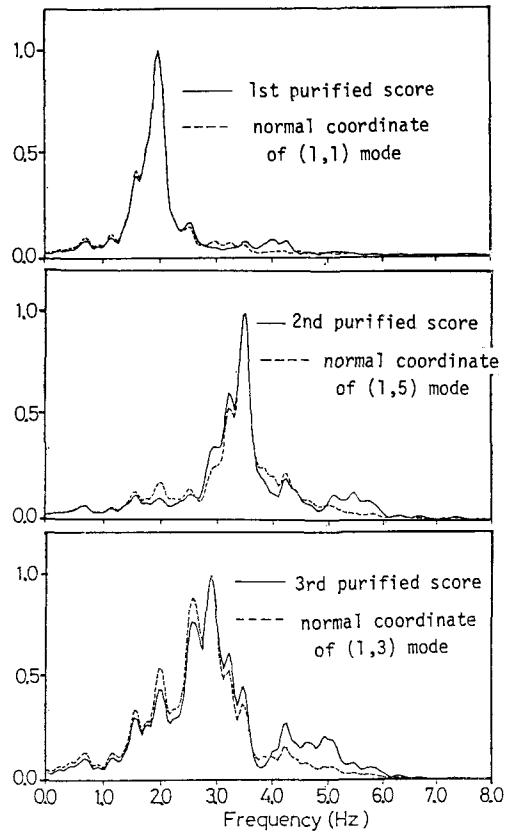
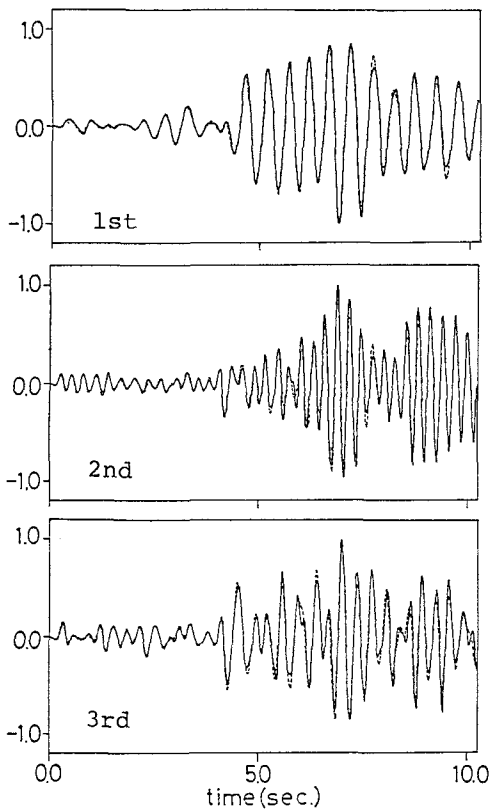
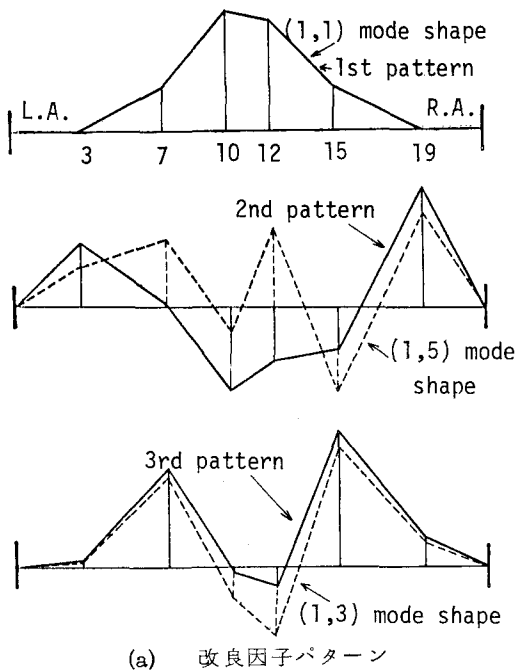


図-8 因子分析法の改良結果

5. 実測データについての適用

前項までにおいて、有効性が確認された提案手法を実測データに適用してみる。

図-9 は常時微動を測定したダム の平面図と縦断面図である。本ダムは高さ90m、ダム頂長さ 487mのロックフィルダムであり、右岸側の基礎には堅硬な石英安山岩 (Da) が分布しているが、左岸側には未固結の火山泥流層 (Vm) が厚く石英安山岩を覆い、地表付近には安山岩が薄く張り出している。谷の形状は右岸が急で左岸が緩やかな非対称三角形であり、ダム頂長さ とダム高との比は 5.4である。ダム左岸部では火山泥流層があるため、基礎とダム本体との剛性比はさほど大きくなく、ダムと基礎とが連成振動をする可能性を有している。さらに図-9 (a)より明らかなようにダム軸は直線でないことから、上下流方向の振動にダム軸方向の振動モードが影響する可能性も否めない。また、このダムは揚水発電用の上池として建設されたもので、発電所 (水車回転数 375rpm)

は約2kmはなれた地点にある。

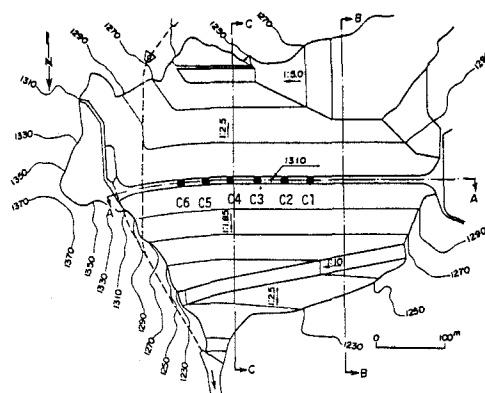
図-9に示したC1からC6までの6点で観測した上下流方向の常時微動変位波形を今回の対象波形とする。使用した6台の換振器は固有周期1秒の同一タイプのもので、増幅器に接続した総合振幅特性は図-10に示すように

1.5Hz以上で平坦である。また、換振器2台を1組にしてリサージュ図形をオシログラフ上に描せて確認した限りでは、有意な位相のズレは見られなかった。

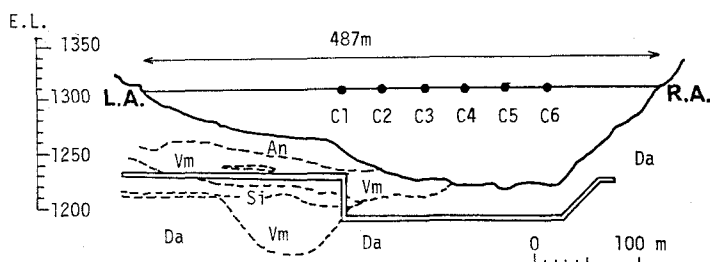
測点C4における常時微動のフーリエ振幅スペクトルを示すと、図-11のようになる。但し1.5Hz以下は滑めらかにカットした。2Hz～4Hzの間には多くのピークが存在し、これらを読むと順に2.0、2.1、2.5、2.8、3.6Hzとなるがこれらのピーク振動数が

どのような振動モードに対応するかこの段階では不明である。また、測定中には発電機が運転中であつたので6.2Hzの鋭いピークはこの水車発電機によるものと思われる。そこで、換振器の特性を考慮して観測波形を1.5Hzと4.5Hzをカットオフフィルターとする滑めらかなフィルターを通し、その後に因子分析法を適用することとした。

得られた修正因子パターンと因子スコアのパワースペクトルを図-12に示す。因子寄与率は順に58.5%、18.6%、17.9%、5.0%であった。図-12を見ると第3因子までは単一のピークが際立っており、その振動数は各々2.00、2.10、2.49Hzである。第4因子の4つの顕著なピークの振動数は、2.10、2.78、3.13、3.42Hzであるが、この内2.78Hzのピークが最も高い。修正因子パターンを振動モード形と対応させると順に、上下流方向への対称1次、逆対称1次、対称2次、逆対称2次と言えなくもないが、ダム頂中央部のみでの測定であることや、第1パターンと第2パターンのピーク振動数が、通常の場合の対称1次、逆対称1次



(a) 平面図



(b) 縦断面図

図-9 ダム概観図及び測定配置図

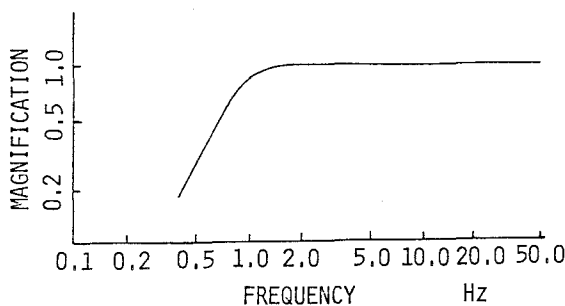


図-10 換振機の総合特性

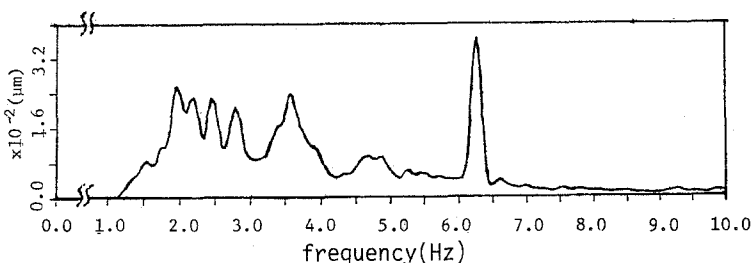


図-11 C4における常時微動のフーリエスペクトル

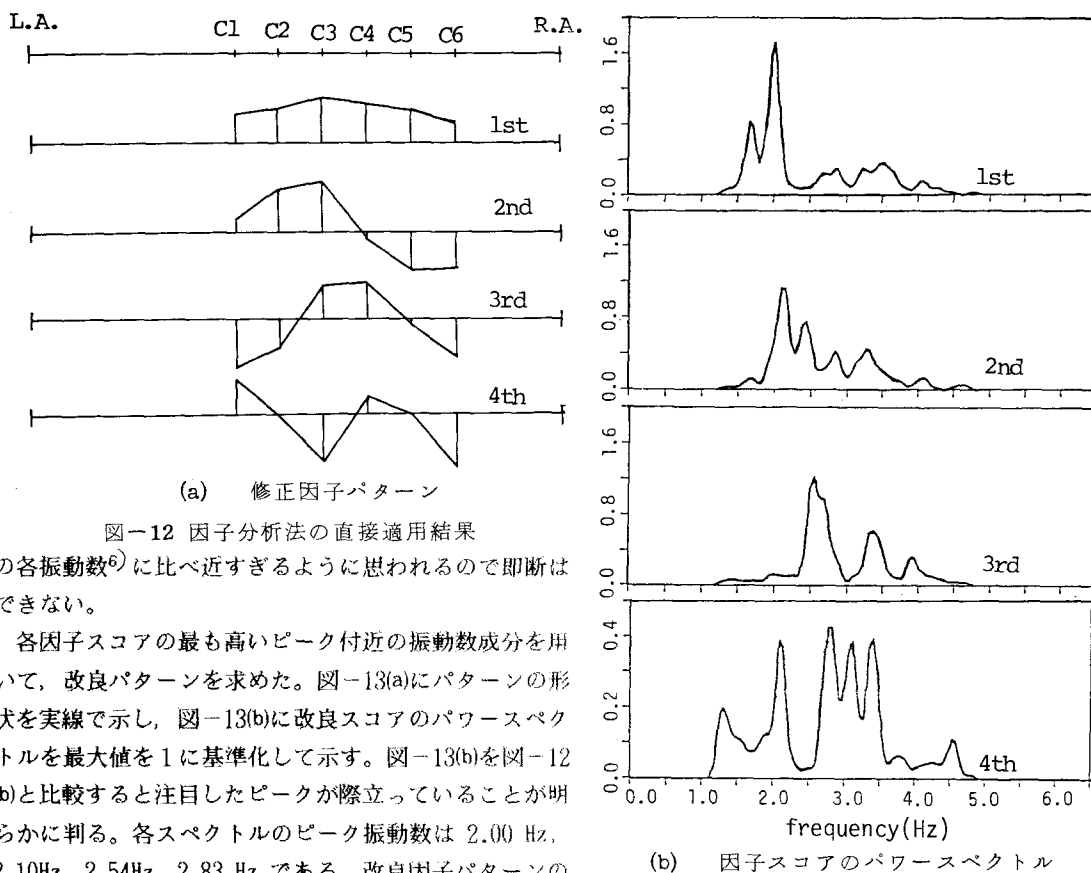


図-12 因子分析法の直接適用結果

の各振動数⁶⁾に比べ近すぎるように思われるので即断はできない。

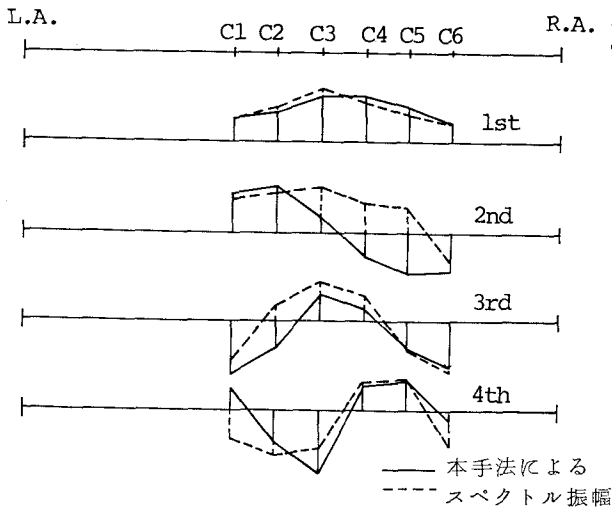
各因子スコアの最も高いピーク付近の振動数成分を用いて、改良パターンを求めた。図-13(a)にパターンを形状を実線で示し、図-13(b)に改良スコアのパワースペクトルを最大値を1に基準化して示す。図-13(b)を図-12(b)と比較すると注目したピークが際立っていることが明らかに判る。各スペクトルのピーク振動数は 2.00 Hz、2.10 Hz、2.54 Hz、2.83 Hz である。改良因子パターンの

形状を考慮して振動モードと対応させると、第1パターンはダム本体の基本モードと対応すると考えられ、このことは地震観測結果¹⁰⁾と符合している。第2パターンは、逆対称1次モードというよりも、むしろダム軸方向への基本振動モードの上下流方向成分と考える方が妥当と思われる。2.54 Hzにピークをもつ第3パターンは、上下流方向3次(対称2次)と考えてよいと思われる。第4パターンについては、その形状から逆対称2次が支配的と推定されるが 2.83 Hz以外にも2、3の比較的高いピークが依然残っているので他のモードの混入も十分考えられる。参考の為に従来行なわれている手順に従って、各ピーク振動数における各測点のスペクトル振幅とその位相を用いて推定した振動形を、図-13(a)に破線で示す。実線と破線とは第1パターンに関しては、ほぼ同じ形状となっているが、他のパターンではかなりの差が認められる。特に第2パターンでの差は大きい。ダムや基礎の形状を勘案すれば、全般にここで提案した手法による実線の形状の方が妥当性が高いように思われる。

6. 結論

以上の数値実験及び実測データに対する解析結果を要約すれば、次のようにまとめられるであろう。

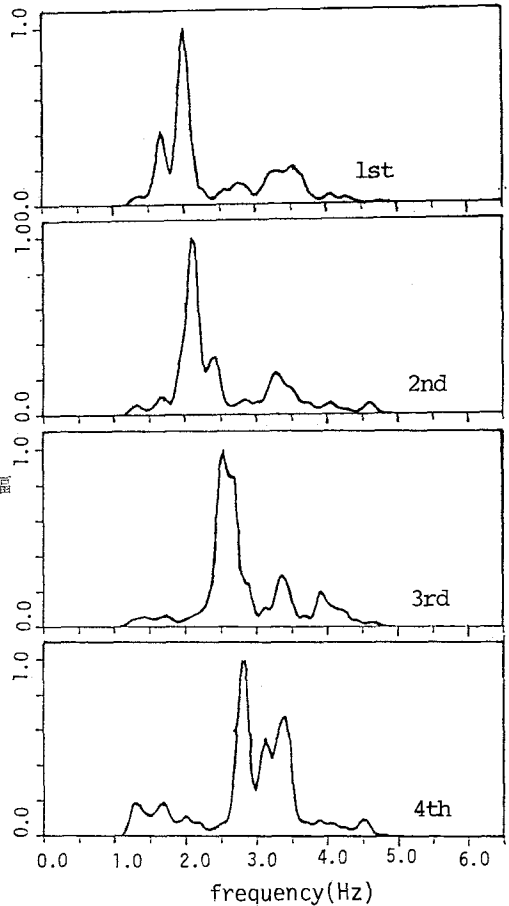
- ① 因子分析法を直接適用するだけで、入力地動を用いず振動形と基準座標とを粗く推定できる。
- ② 因子分析法を直接適用して推定された因子には、複数の振動モードが明らかに混入していると考えられる場合がある。このような場合には、ここで提案した手法を用いれば、因子パターンを単一の振動モードに対応するように改良でき、その推定精度はほぼ満足できるものであった。
- ③ 提案手法によってダムの振動モードを多点の同時観測データから推定する一連の作業は高度の技術的判断を必要とせず、短時間で容易に行なえる。



(a) 改良因子パターン

図-13 因子分析法の改良結果

冒頭にも述べたように、実測データから多自由度の実在構造物の振動特性を人力情報を用いずに高精度に抽出することができれば現実に則した震動性状を把握することが容易となり、地震工学上極めて有用と思われる。本論文では、このような観点から一つの手法を提案したが、未だ改良の余地は残されている。必要な改良を施し実用性の向上をはかることが、今後の課題である。



(b) 改良因子スコアのパワースペクトル

参考文献

- 1) 小坪清貞, 鳥野清 常時微動測定による構造物の振動性状解析 土木学会論文報告集 No.222 1974
- 2) 星谷勝, 齊藤悦郎 拡張カルマンフィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用 土木学会論文報告集 No.339 1983
- 3) 星谷勝, 齊藤悦郎 線形多自由度系の動特性の推定 土木学会論文報告集 No.344 / I-1 1984
- 4) 岡本舜三 耐震工学 P.355 オーム社 1971
- 5) 大町達夫, 片岡俊一, 曾我誠意 堆積層のあるダム基礎における常時微動の特性 第16回岩盤力学に関するシンポジウム 1984
- 6) 大町達夫, 時松孝次 3次元フィルダムの実用的3次元地震応答解析手法の定式化 土木学会論文報告集 No.333 1983
- 7) 田中忠次, 安中正実, 川本治, 仲野良紀 一志, 大倉川, 深田ダムの地震観測とフィルダムの動特性 農業土木試験場技報C 1981
- 8) 浅野長一郎 因子分析法通論 共立出版 1974
- 9) 芝祐順 因子分析法 第2版 東京大学出版会 1979
- 10) 大町達夫, 日暮孝 火山泥流層上にあるカッサダムの動的挙動について 大ダム No.95 1981