

東京電力(株)技術開発研究所 正会員 前 田 弘 同 江川顕一郎
同 太 田 孝

1. まえがき

フィルダムが地震を受けたときの破壊性状には種々の型が考えられるが、⁽¹⁾堤体の振動により破壊するものは次のようなものがある。①法面の崩壊、②クラックが発生し、そこでパイピングが起っての破壊、③堤体の沈下による越流破壊。フィルダムの耐震性の検討では、ダムの横断面をモデルとした2次元解析によりその振動性状が検討されることが多い。しかし、このような破壊現象は、両岸の谷の拘束、堤体各部の水平面内での変形および上下動等と関係があるため、3次元での振動性状に関する検討が必要であると思われる。

ここでは、合成樹脂を用いた模型振動実験および3次元有限要素法による数値計算を行ない、フィルダムの3次元での自由振動について検討した。

2. 解析方法

振動特性を検討するモデルとして、図-1に示すような、高さ約120mで左右岸の谷の形状の異なる、大型ロッキンフィルダムを選んだ。

2-1. 模型振動実験

弾性係数 = $230\%/cm^2$ の塩化ビニール樹脂をダム材料とし、縮尺 = $1/800$ の弾性模型による振動実験で、材料および実験の詳細については、第13回地震工学研究発表会にて報告したとおりである。⁽²⁾

2-2. 有限要素法による数値解析

計算は有限要素法により、剛性マトリックス、質量マトリックスを作成し、自由振動の方程式をHouseholder法を用いて解くものである。解法の概要は次のとおりである。

自由振動の運動方程式は次のとおり示される。 $M\{\ddot{u}\} + K\{u\} = 0$ ----- (1)

ここに、 M = 質量マトリックス、 K = 剛性マトリックス、 $\{u\}$ = 変位ベクトルである。⁽³⁾

ここで $\{u\} = \{q\}e^{i\omega t}$ とすると、式(1)は $-\omega^2 M\{u\} + K\{u\} = (-\omega^2 M + K)\{u\} = 0$ ----- (2)

となり、この式が意味をもつためには $\det[-\omega^2 M + K] = 0$ ----- (3)

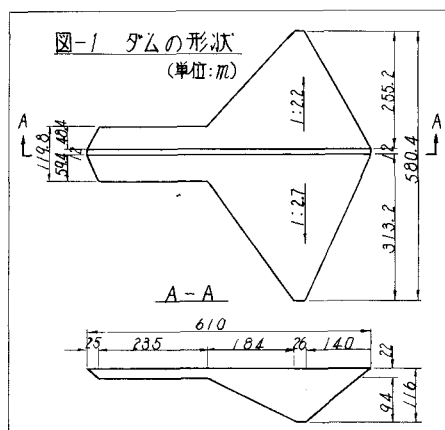
である必要がある。 $\lambda = \omega^2$ とし、 M 、 K を変換して式(3)を次のようにダイナミックマトリックス D で表わす。

$$\det[D - \lambda I] = 0 \text{ ----- (4)}$$

ここに、 I = 単位マトリックスである。この式を解いて、固有値、固有ベクトルを計算するには、次のような計算ステップによる。

i) Householder法により、 D マトリックスを3重対角マトリックスに相似変換する。(P を仕意の正則な行列とすると、 A と $P^T A P$ は同じ固有値をもつことから、対称な P を選んで、 $C = P_{n-2} \dots P_2 P D P_2 \dots P_{n-2}$ なる相似変換により、 D を3重対角マトリックス C とする)。

ii) Sturm 法により、3重対角マトリックス C に関する固有



値(λ)を求める。

iii). 逆べき乗法 (Inverse Power Method) により、 C に関する固有ベクトルを $\{x\} = (C - \lambda I)^{-1} \{z\}$ の型より求め、これより D に対する固有ベクトルを求める。

なお、計算にあたっては、堤体の物性値をこれまでの試験測定結果等により、次のとおり定めた。

密度 = 2.05 t/m^3 、弾性係数 = $10,000 \text{ kg/cm}^2$ 、ポアソン比 = 0.35 、また、有限要素に分割したときの節点数は 168 である。

表-1 3次元固有振動

次数	振動数 (Hz)	モード	次数	振動数 (Hz)	モード
1	1.68	横断方向の1次振動	11	3.10	横断方向の3次振動
2	2.02	縦断方向の1次振動	12	3.13	縦断方向の3次振動
3	2.24	縦断方向のねじれ振動	13	3.19	左岸側の部分自由端振動
4	2.36	上下方向の1次振動	14	3.29	上流側岸部の部分振動
5	2.61	横断方向のねじれ振動	15	3.32	上下方向の3次振動
6	2.76	横断方向の2次振動	16	3.35	両のり面のねじれ振動
7	2.78	上下方向の2次振動	17	3.42	縦断方向の4次振動
8	2.83	縦断方向の2次振動	18	3.49	右岸腹部の基部振動
9	2.89	ダム上部のねじれ振動	19	3.56	上下振動
10	3.04	左岸側の部分上下振動	20	3.62	———

3. フィルダムの3次元振動について

模型振動実験は、3次元の弾性モデルを水平一方向に加振したものであるから、入力方向に支配された振動形が卓越し、ねじれや上下動は明確ではなかった。これに対し、計算では3次元の自由度に対応した振動形があらわれた。1次～20次までの振動数と振動形の主な特徴は表-1に示すとおりである。このうち主な振動形について記すと以下のとおりである。

1次 (1.68 Hz, 図-2) 谷の深い高ダム部の横断方向の1次振動で、振中は中央部の天端よりやや下がった位置で最大となる。縦断方向の動きもわずかなり、横断方向の振動が向う側の法面が両方バットメント方向に押し広げられるように変化し、反対側の法面では逆の動きである。上下方向の振動はほとんどない。

2次 (2.02 Hz, 図-3) 高ダム部の縦断方向の1次振動で、天端とやや下がった法面上の位置は同じ振中で振動する。振動が向う側の堤体は盛り上がり、横断方向に広がるような動きをする。その結果、谷の最深部を中心にしてその両側の天端は交互に上下振動する。

3次 (2.24 Hz, 図-4) 高ダム部の天端の中央を中心とするねじれ振動である。

4次 (2.36 Hz, 図-5) 高ダム部の天端の中央を中心とする上下振動で、両側の法面が天端に向かって振動することによって上下動が起っている。その結果、横断方向の2次振動とも考えられる。

5次 (2.61 Hz) ねじれ振動で、横断線のねじれが大きい振動である。

以下、モデルの自由度数だけの固有振動があるが、20次(3.62 Hz)までの振動は表-1に示すとおりである。これらの振動のうち、振動形が明確であるのは上記の1～4次の振動で、以降の次数の振動形は複雑になる。これより、フィルダムの3次元振動で基本となるものは、横断方向の振動、縦断方向の振動、ねじれ振動、上下方向の振動の4種と考えられ、各種の1次振動が1～4次の振動形となっているものと推定された。また、5次以降にはこれら基本的振動形の2次以上の振動や重合した複雑な振動があらわれているものと推定され、5～8次の振動が1～4次の振動に対応する2次振動であろう。これらの結果と水平一方向に加振した模型実験の結果とを比較すると、横断方向と縦断方向の1次振動は、振動数、振動モードとも両解析ではほぼ一致している。また、2次振動についても、その一例を図-6, 7に示すとおり、かなりよい一致が得られた。しかし、上下振動やねじれ振動については、実験では確認できなかったが、今後、この種の振動についても、実験、実測による説明が必要であろう。

4. まとめ

フィルダムの3次元振動では、種々の振動形があることが推定された。それゆえ、「まえがき」に記したような項目について、フィルダムの耐震性を検討するには、このような3次元での振動性状を考慮した地震応答を求める必要があると考えられる。

- 参考文献 (1). *Embankment-Dam Engineering* 1973. John Wiley & Sons
 (2). 前田, 高比良, 江川, 太田 “フィルダムの3次元模型振動実験について” 第13回地震工学研究発表会講演概要 1974. 土木学会
 (3). *The Finite Element Method in Engineering Science*. 1971. O.C. Zienkiewicz

