

I-606

アーチダムの地震応答解析  
に関する一考察

建設省土木研究所 正会員 永山 功, 佐々木隆

**1. まえがき** コンクリートダムの耐震設計は震度法によって行われているが、震度法の理論には必ずしも合理的でない部分がある。そこで、動的解析法によって得られたコンクリートダムの振動特性を考慮した簡易で合理的な耐震設計法として、修正震度法の開発が強く望まれている。このうち、重力ダムに対しては、応答スペクトル法を用いた耐震設計法の具体案<sup>1)</sup>が筆者によって提案されている。この応答スペクトル法の基本概念は、アーチダムにおいても同様に適用可能であると考えられるが、アーチダムの場合には構造が3次元的で複雑であるため、応答スペクトル法の適用性についてはより詳細な検討が必要である。そこで、本論分はアーチダムにおける応答スペクトル法の適用性について検討を加えたものである。

**2. 検討方法** 解析の対称としたアーチダムは、堤高140m、堤頂長382mで、クラウンにおける堤体厚は河床部で33m、天端で8mである。解析のモデル化は、図-1に示すように堤体のみを考慮し、シェル要素を用いて行った。解析においては、弾性係数を2,500,000tf/m<sup>2</sup>、ポアソン比を0.2、単位体積質量を2.3t/m<sup>3</sup>とした。

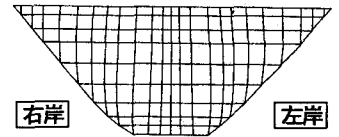


図-1 要素分割図

入力地震の元波には樽水ダムサイトにおいて1978年の宮城県沖地震で計測された波形(最大加速度236gal)を用い、解析対象のダムサイトにおいて100年間の発生確率を50%として、その加速度応答スペクトルを調整した波形<sup>2)3)</sup>を入力加速度波形とした。この入力加速度波形の加速度応答スペクトルを図-2に示す。なお、地震動は水平振動とし、その振動方向を図-3に示した角度 $\theta$ で表すことにする。

さて、ある1つの入力地震波に対する動的解析では、時刻歴解析法による解析結果が正解となり、応答スペクトル法の解析結果はその近似解となる。ここでは、応答スペクトル法としてSRSS法(2乗和平方根法)とCQC法(完全2次結合法)<sup>4)</sup>を考え、これらの結果と時刻歴解析法による結果とを比較するものとした。なお、解析に考慮するモードは10次までとし、減衰定数 $h=0.1$ として解析を行った。

SRSS法およびCQC法において、 $i$ 次のモードに対するある特定の要素 $e$ の応力の最大値を $\sigma_i$ とすると、各モードの影響を重ね合わせた時の最大応答の推定値 $\sigma_{max}$ は、 $\sigma_{max} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \rho_{ij} \sigma_i \sigma_j} \dots (1)$ と表される。ここで、 $N$ は総自由度数、 $\rho_{ij}$ は $i$ 次のモードと $j$ 次のモードの相関係数で、SRSS法では、 $\rho_{ij}=1 (i=j)$ 、 $\rho_{ij}=0 (i \neq j)$ であり、CQC法では $\rho_{ij} = \frac{8h^2(1+s)s^{3/2}}{(1-s^2)^2 + 4h^2s(1+s)^2}$  (ただし $s = \omega_i/\omega_j$ ) $\dots (2)$ である。

**3. 解析結果および考察** 固有値解析によって求められた固有振動数 $f_s$ を表-1に示す。また、 $\theta=0, 45, 90^\circ$ とした時の天端上流面の水平応力の分布を図-4に示す。図によると、 $\theta=0^\circ$ の時には、どの方法においても水平応力はほぼ同様な分布をしている。しかし、 $\theta=45^\circ$ の時には、時刻歴解析、CQC法では応力が最大となる点がやや右岸側に片寄っているが、SRSS法では中央で最大値を生じている。また、 $\theta=90^\circ$ の時には $0^\circ$ の時と同じように各計算法とも同様な応力分布を示している。このように振動方向の角度を変えた検討を行った場合、CQC法では時刻歴解析法とほぼ同じ結果が得られるが、SRSS法では角度によってその解析精度が低くなる。SRSS法は、近い固有振動数を持つモードがあるとその解析精度が落ちるといわれており、アーチダム

表-1 固有振動数

モード 次数	固有振動数 $f_s$ (Hz)
1	2.515
2	2.536
3	3.594
4	4.857
5	5.343
6	6.178
7	6.602
8	7.842
9	8.327
10	8.470

では、表-1に示すように最大応答に与える影響が大きい1, 2次の固有振動数が近接しているため、その影響が現れたと考えられる。そこで、近接した*i*次と*j*次の2つのモードのみの重ね合わせを考え、その固有振動数比

$\omega_i/\omega_j$ によって、SRSS法とCQC法による最大応答推定値の比  $\sigma_{SRSS}/\sigma_{CQC}$  がどのようなになるかを図-5に示した。

CQC法では、近接したモードにおける最大応答が同符号の場合 ( $\sigma_i/\sigma_j > 0$ )、モードの重ね合わせによる最大応答推定値が大きくなり、構造物にとっては厳しい条件になる。

そこで、この図ではそれぞれのモードに対する最大応答の比  $\sigma_i/\sigma_j$  を0.1, 0.5, 1.0の3種類にとっている。図より最大応答の比  $\sigma_i/\sigma_j$  が1.0の場合にSRSS法の精度が最も低くなるが、それでも  $\omega_i/\omega_j$  が0.8以下であれば80%以上の精度を有することがわかる。また  $\sigma_i/\sigma_j$  が0.1程度と小さくなれば、固有角振動数がほぼ一致していてもSRSS法は十分精度を有することがわかる。以上より、SRSS法が適用可能であるかどうかは、近接しているモードの固有角振動数の比だけではなく、最大応答の比を考慮する必要があることがわかる。すなわち、今回のアーチダムの解析の場合、振動角度によって各モードの最大応答の比が変わるため、振動角度によってその精度に差がでたといえる。

**4. おわりに** アーチダムの動的解析では、近接した固有振動数が存在するため、SRSS法で解析する場合には振動角度によって精度が落ちることがわかった。しかし、最大応答を示すのは振動角度が0°(上下振動)のときであり、そのような場合には、SRSS法でも十分精度よく解析を行うことができることがわかった。

- 1) 永山功: 重力式コンクリートダムの簡易耐震設計法に関する考察, ダム技術, No. 25, 1988年
- 2) 佐々木康, 田村敬一, 相沢興: 確率論的手法に基づく地震動強度の再現期待値の試算, 土木研究所資料第2419号, 1986年
- 3) 荒川直士, 川島一彦, 田村敬一: 確率論的手法に基づく動的解析用入力地震動波形の設定法, 土木研究所資料第1992号, 1983年
- 4) A. Der Kiureghian: A Response Spectrum Method for Random Vibration Analysis of MDF Systems, Earthq. Eng. Struct. Dyn., Vol. 9, 1981

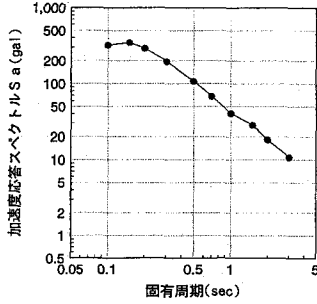


図-2 入力波の加速度応答スペクトル

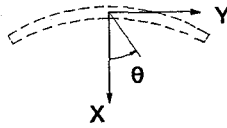
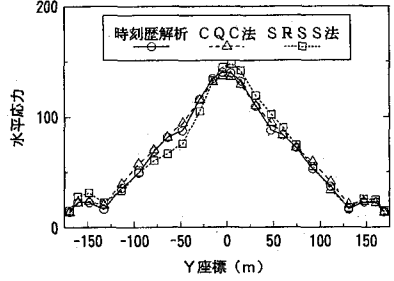
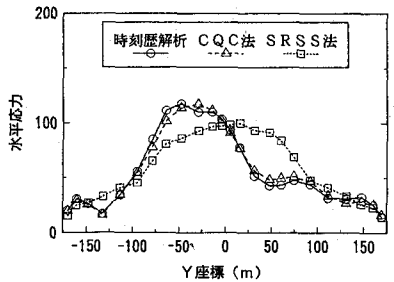


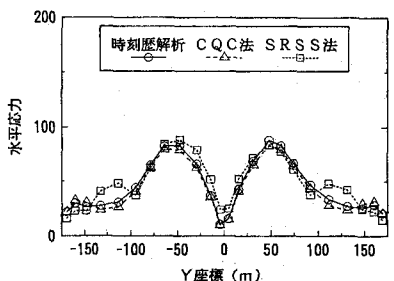
図-3 振動角度θの定義



(a)  $\theta = 0^\circ$



(b)  $\theta = 45^\circ$



(c)  $\theta = 90^\circ$

図-4 天端上流面の水平応力

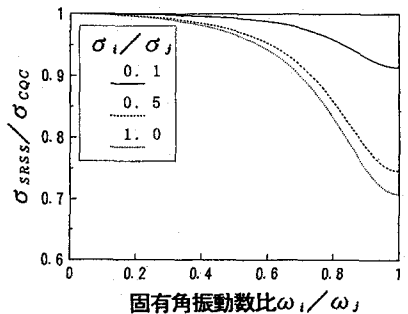


図-5 SRSS法の精度