

三次元有限要素法によるフィルダムの地震応答解析

東北大学工学部 (正) 柳 沢 栄 司
東北大学大学院 (学) 園 部 好 洋

1. はじめに

近年、大型施工機械等の進歩により、大規模なフィルダムが築造されるようになってきた。しかし、我が国のような地震国では、地震時の安全性が特に問題とな、てくるにもかかわらず、現行の安定解析には、簡便であることなどの理由によ、て、震度法を加味した円弧スバリ面法が使われているのが実状である。この方法には、数多くの問題が指摘されているが、この問題集の解決のための基礎的な研究として、筆者らは、実在するダムの三次元有限要素解析を行、たので、その結果を報告する。

2. 解析モデル

解析に用いたのは、宮城県黒川郡大衡村にある牛野ダムである。このダムは、堤高21.4m、堤長160.0m、天端幅8mの、傾斜心壁型ロックフィルダムである。図1にその標準横断面を示す。ダム地奥の対岸距離は、堤高に比して比較的長く、谷の形状は矩形谷に近くな、ている。本報告では、このダムを640個の四面体要素に分割している。図2は、解析モデルの概略である。

3. 解析手法

本報告で用いた三次元有限要素法は、任意の境界形状に適用可能で、連続体の三次元応答解析に有効である。振動方程式

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{P(t)\} \quad \text{--- (1)}$$

において、 $[M]$ 、 $[K]$ 、 $[C]$ によ、て、構造物の物理的な性質を表わし、(1)式を時間ごとに解くことによ、て、構造系の時々刻々の応答を評価することができる。

ここに、 M は集中質量型の質量マトリックス、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ、減衰、剛性マトリックスである。本報告では、(1)式をmodal analysisによ、て、評価した。これは、振動学上重要な意味を有する物理量である固有モード、および固有振動数を利用して応答を求めようとするものである。非減衰固有モードは次の式

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad \text{--- (2)}$$

に、 $\{u\} = \{\varphi\} \sin \omega t$ を代入して得られる固有方程式

$$[M]^{-1}[K]\{\varphi\} = \lambda\{\varphi\} \quad \text{--- (3)}$$

ここに、 $\{\varphi\}$: 固有ベクトル、 $\lambda = \omega^2$ を解くことによ、て得られ、これから任意の応答は各固有モードによる振動の連成(本報告では10次まで)によ、て求められる。各モードの固有モードベクトル振幅は、 n 番目のモードの振動方程式を、二元連立一階常微分方程式に分解してから、Runge-Kutta-Gill法で解くことによ、て得られる。なお、堤体材料の非線形性は考慮していない。

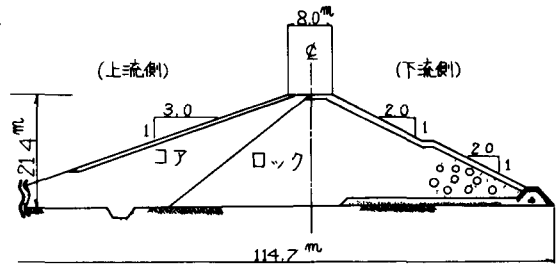


図1 牛野ダム標準断面

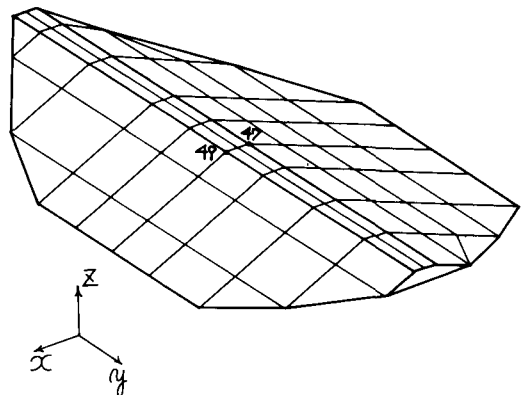


図2 解析モデル概略

4. 解析結果と考察

図3は、計算に用いた入力波形である。これは、1978年6月12日の宮城県沖地震の際に、仙台市の南東約10kmにある樽水ダムのギャラリーで得られた強震記録である。最大加速度は堤軸方向で236gal、堤軸直角方向で184galである。この2つの加速度記録を入力波として行った応答計算の結果のうち、図4に節点No. 47の応答加速度、図5に同地点の応答変位を示す。堤軸直角方向の応答加速度は最大で428gal ($t=11.22\text{sec}$)で、応答倍率は2.3倍程度である。なお、堤軸方向の最大応答加速度は338galで、応答倍率は1.5倍程度であった。また、応答変位は最大で $7.3 \times 10^{-3}\text{m}$ である。

柳沢、福井らはセンターコア型ロックフィルタイプの樽水ダムの現地観測および応答解析を行い、しているが、その解析手法は本報告のものと同じである。それによると、堤頂での堤軸直角方向の最大加速度は382galで、応答倍率は2.1倍であった。また、応答変位は $6.8 \times 10^{-3}\text{m}$ であった。樽水ダムは堤高43.0m、堤長265.5m、堤頂幅10.0mであり、牛野ダムより堤高、堤長ともに大きなダムであるにもかかわらず、宮城県沖地震の際には被害がなかった。しかし、堤体の小さい牛野ダムでは被害が発生しており、本報告の解析結果によれば、堤体中央付近での大きな加速度、変位がこの原因として考えられる。また、材料の物性も影響していると思われるが、コア材のような比較的弱い材料が堤体の表面近くにある傾斜心壁型の構造的な影響、谷形状の影響などにも原因の一端があると思われる。なお、材料の物性は、堤体の観測固有周期(0.25sec)と計算値が一致するように定めている。

5. むすび

本報告は土も線形材料として取扱っているが、本来の非線形性を考慮する必要がある。また、三次元モデルの非線形計算にはmodal analysisが通していないようなので、運動方程式の直接積分法の使用を含めた応答計算を今後進めてゆく予定である。

(参考文献) 柳沢、福井、佐木：『樽水ロックフィルダム

の地震観測と応答解析』(第14回土木工学研究発表会論文集)

福井 孝：『ロックフィルダムの地震時応答に関する研究』(東北大学修士学位論文)

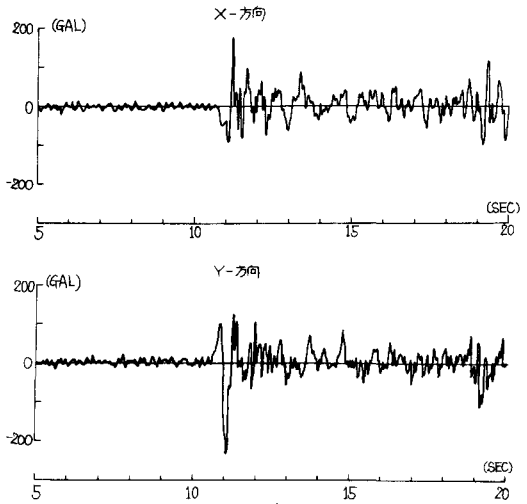


図3 入力加速度波形

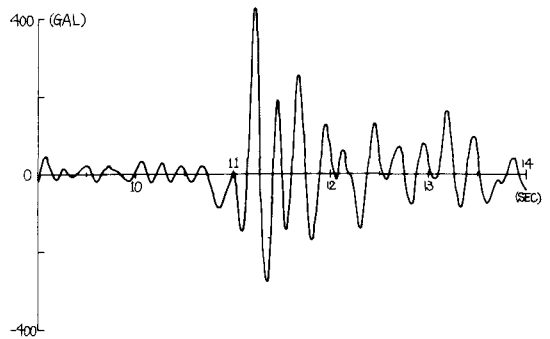


図4 節点47-応答加速度

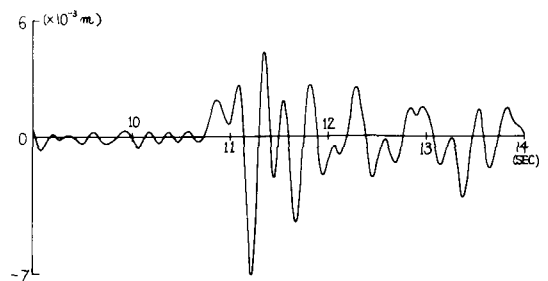


図5 節点47-応答変位



図6 X-Z面変位 ($t=11.22\text{sec}$)