

# (121) 時間領域 FEM-BEM 結合解法による フィルダムの地震時挙動の検討

佐藤工業(株) 東平 光生  
東京工業大学 大町 達夫

## 1. はじめに

フィルダムの地震時挙動を調べるために、フィルダムを弾性体とみなし、FEM (有限要素法) を適用することがしばしば行われる。しかし、現状ではダムの基礎を剛体と仮定して計算することが多く、ダムと基礎の動的相互作用を考慮して地震応答解析を行うケースは、まだ少ないようである。こうした中で、著者らは時間領域で FEM と BEM (境界要素法) を結合する手法 (時間領域 FEM-BEM 結合解法) を開発し、この手法が、ダム-基礎の振動モード解析や、ダム-基礎-貯水系の振動解析に有効であることを示してきた<sup>1) 2) 3)</sup>。

これら一連の研究の中で、ダム-基礎系の振動モード解析に手法に関する研究<sup>2)</sup>では、基礎を弾性体と仮定したことによるダムの固有振動数の変化やダムの逸散減衰について論じている。本論文ではこれに引き続き、時間領域 FEM-BEM 結合解法を用いて、フィルダム-基礎系の地震応答解析を行う。そして、入力地震動の周波数特性の違いによるフィルダムの地震応答特性の相違を、フィルダムと基礎の動的相互作用の観点から考察する。またこれより、強震を受けるフィルダムは、地震動の特性によっては 基礎との相互作用から、応答がそれほど大きくなる可能性のあることを述べる。

## 2. 解析モデルおよび解析条件

本論文の解析に用いるフィルダム-基礎系のモデル図を Fig. 1 に示す。Fig. 1 に示すように、ここでは基礎を半無限弾性体として時間領域 BEM でモデル化する。また、基礎の自由表面の境界条件を導入するための境界要素はダムの法尻から約 100m で打ち切る。さらに、フィルダムは均一型ダムとして FEM でモデル化する。ただし、本解析では、材料減衰は考慮しない。

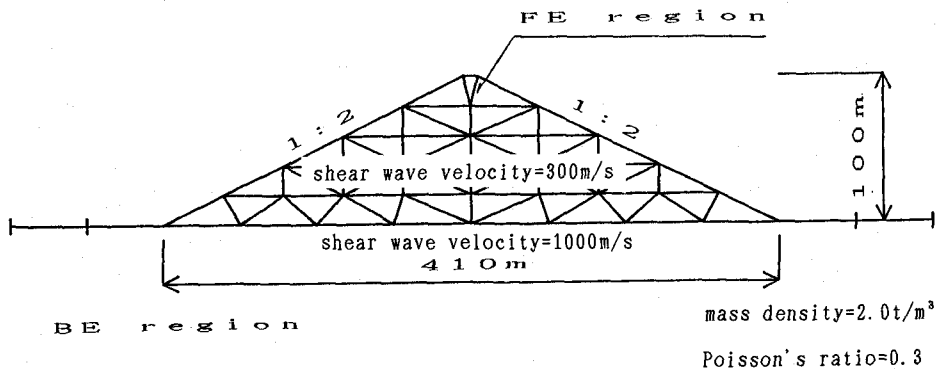


Fig. 1 Analyzed model

また、入力地震動には、El-centro(1940) NS成分を用いる。ここでは、この地震動の最大速度を20 kineに正規化する。そして、後述のようにダムの応答を速度波形で考察することにする。入力地震動の加速度波形ならびに速度波形を Fig. 2 および Fig. 3 に示す。上述の正規化を行った場合の地震動の最大加速度は 146gal である。ただし、境界要素解析を行う都合上、入力地震動は変位波形に変換して入力している。

解析は、前述のように入力地震動の周波数特性とダムの地震応答特性との関連に焦点を当てて行う。ここでは、このために Fig. 3 に示された速度時刻歴の時間間隔を変化させ、異なる周波数特性の入力地震動を作成する。そして、これら異なる周波数特性の地震動を入力することで、ダムの地震応答特性の変化を考察する。Fig. 3 に示された時刻歴のデジタル・データの時間間隔は0.01秒である。ここでは、この地震動を用いて地震応答解析を行う他に、最大速度20kineの条件は変えずに、デジタル・データの時間間隔を0.013秒ならびに0.007秒とした場合の地震応答解析を行う。Fig. 4 から Fig. 6 は、このように時間間隔を変化させた場合の入力地震動の速度フーリエ・スペクトルを示している。すなわち、ここでは3種類の入力地震動による3ケースの地震応答解析を行うことになる。また、これらの入力地震動は水平動として、鉛直下方より入射する。

ここで、Fig. 1 に示された弾性基礎上のフィルダムの固有振動数ならびに逸散減衰定数について述べておく。先の論文によれば、このダムの1次固有振動数は、0.94Hz、2次の固有振動数は1.67Hzである。また、それぞれのモードに対する逸散減衰定数は、10.6%ならびに3.4%である<sup>2)</sup>。

したがって、本解析で用いる地震動の卓越振動数は、いずれもダムの1次の固有振動数より低振動数側にある。この意味で入力地震動は、微妙に周波数特性が異なるものの、ダムの固有振動に与える影響は、ほとんど変わらないと考えられる。入力地震動の速度成分がこのような性質を持つので、以降でも、速度時刻歴ならびに、そのフーリエ・スペクトルを用いた議論を行うことにする。そして、ダムと基礎の動的相互作用について考察を進めて行く。

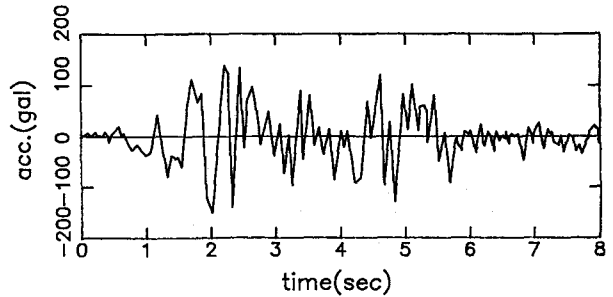


Fig. 2 Incident wave form  
(acceleration, El-centro NS, 1940, normalized 146gal)

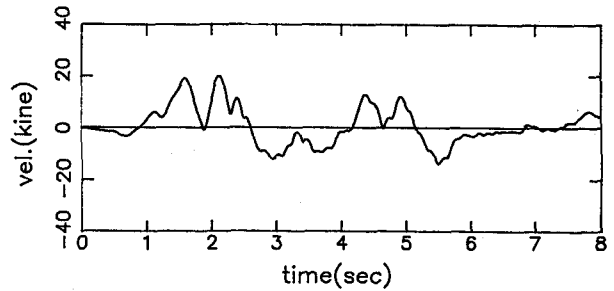


Fig. 3 Incident wave form  
(velocity, El-centro NS, 1940, normalized 20kine)

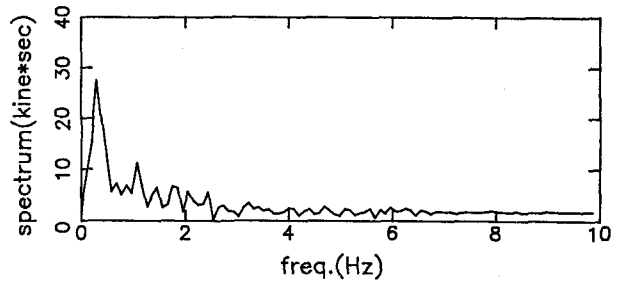


Fig. 4 Fourier spectrum of incident wave  
(time increment of incident wave=0.01sec)

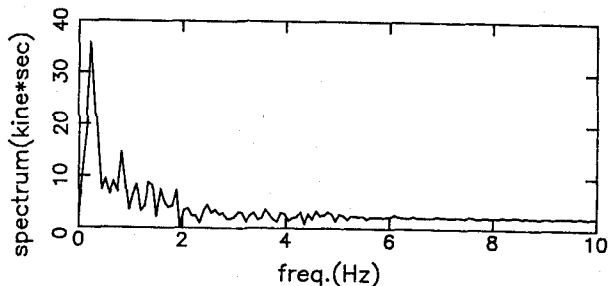


Fig. 5 Fourier spectrum of incident wave  
(time increment of incident wave=0.013sec)

### 3. 解析結果

解析結果のうち、ダムのカレストにおける水平方向の速度時刻歴およびフーリエ・スペクトルを Fig. 7～Fig. 12に示す。

まず、速度時刻歴から眺めてみる。最も最大応答速度が大きくなるケースは、入力地震動の時間増分を0.007秒とした場合であり、このときの最大応答速度は、112kineである。その他のケースでの最大応答速度は90kineを若干上回る程度であり、前述のケースと比べると、入力地震動の振幅が同じであるにも関わらず、20 kine程度の差がでてゐる。また、最大応答値の発生時刻は、それぞれのケースで異なり、入力地震動の周波数特性が異なっていることを反映している。

これらのことを踏まえ、次にフーリエ・スペクトルを眺めてみる。これらのスペクトルのピークは、入力地震動からの寄与と、ダムの固有振動数からの寄与によるものであることが、前章で示した入力地震動のスペクトルとダムの固有振動数から理解できる。特に、ここで興味深いことは、入力地震動のスペクトルのピークが高振動数側にある解析ケースでは、ダムの1次モードに対応するスペクトルのピークが小さくなり、これに代わり、ダムの2次モードに対応するスペクトルのピークが大きくなっていることである。

このことは、前論文で述べたように、ダムの1次モードの逸散減衰は大きいため減衰しやすく、それに比べ2次モードの逸散減衰は小さく減衰しにくい<sup>2)</sup>ために生じたと考えられる。したがって、前述の速度応答時刻歴で、最も大きな値を生じたケースの入力地震動は、高振動数成分の波を多く含むために、減衰の小さなダムの2次モードを励起し、時刻歴応答の後半で大きな応答を生じさせたのであろう。

以上のことをまとめると、同じ入力振幅を有する地震動であっても、高い振動

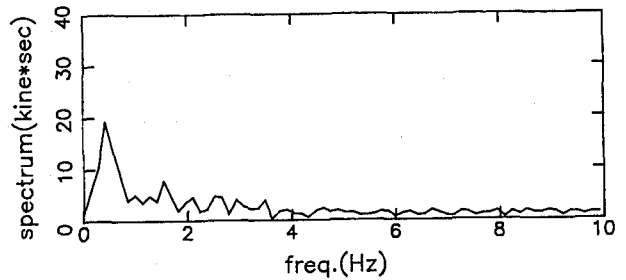


Fig. 6 Fourier spectrum of incident wave (time increment of incident wave=0.007sec)

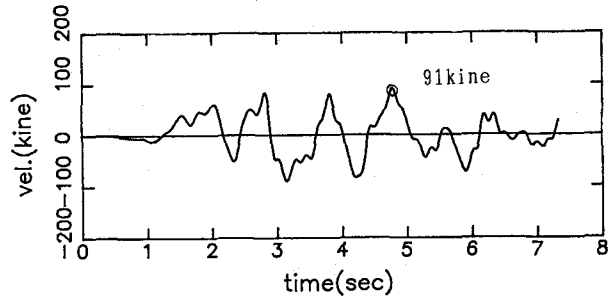


Fig. 7 Earthquake response at the crest of the dam (time increment of incident wave=0.01sec)

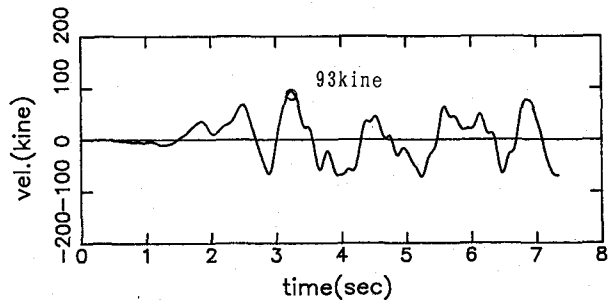


Fig. 8 Earthquake response at the crest of the dam (time increment of incident wave=0.013sec)

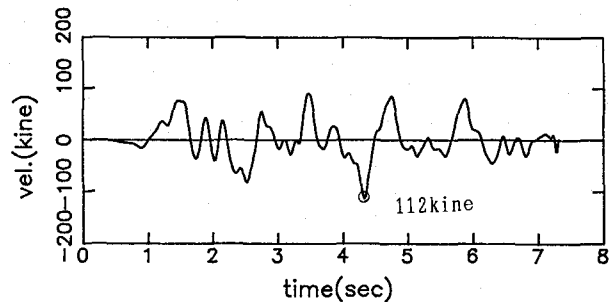


Fig. 9 Earthquake response at the crest of the dam (time increment of incident wave=0.007sec)

数成分を多く有する場合には、ダムは、減衰の小さなモードが励起され応答が大きくなり、反対に低振動数成分を多く含む場合には、ダムの応答は大きくならないと考えられる。また、前述のように、本解析で用いた入力地震動は、いずれもダムの固有振動に与える影響がほとんど変わらないと考えられるから、これらの応答性状の相違は、ダムの固有振動よりもむしろ、ダムと基礎の相互作用に起因すると言える。そして、低振動数成分を多く含む入力地震動に対して、ダムの応答を正確に把握する必要があるれば、基礎との相互作用をより厳密に考慮する必要があると言える。

これまでに述べたことを、強震を受けるダムの挙動に結びつけるならば、長周期成分を多く含む強い地震動を受ける場合のフィルダムの応答は、基礎との相互作用により、それほど大きくならない可能性を生じる。強い地震動を受けた場合、材料の非線形性が卓越し、フィルダムの地震応答はそれほど成長しないとの見方も可能であるが、ダムと基礎の相互作用の観点から、線形領域でダムの応答の大きさを論じることも必要であろう。

#### 4. まとめ

本論文では、時間領域FEM-BEM結合解法を用いて、フィルダムの地震時挙動について考察を行った。これによれば、同じ振幅を有する波でも、長周期成分を多く含む波は、短周期成分を多く含む波に比べて、ダムと基礎との相互作用により、応答はそれほど大きくならないことが分かった。そして、このことにより、長周期成分を多く含む強い地震動を受ける場合のフィルダムの応答は、それほど大きく成長しない可能性があることを述べた。強い地震動を受ける場合には、材料非線形性を問題にすることも多いが、このように線形領域で、ダムと基礎の動的相互作用を考慮した議論を行うことも必要と考えられる。

#### 参考文献

- 1) 東平・吉田, 土木学会論文集, No. 410/I-12, pp. 395-404
- 2) 東平・大町, 土木学会論文集, No. 416/I-13, pp. 429-438
- 3) 東平・大町, 土木学会論文集, No. 422/I-14, pp. 381-390

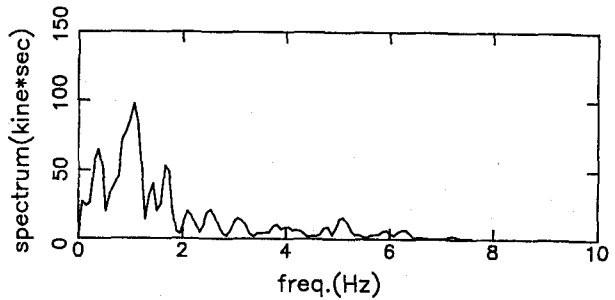


Fig. 10 Fourier spectrum of earthquake response at the crest of the dam (time increment of incident wave=0.01sec)

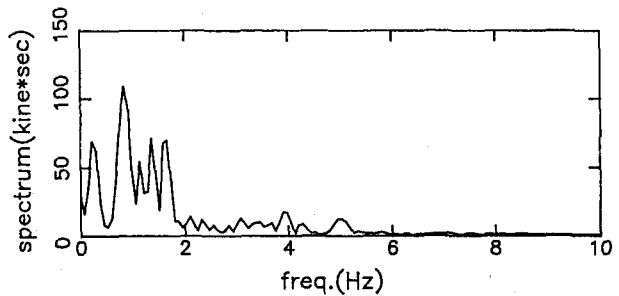


Fig. 11 Fourier spectrum of earthquake response at the crest of the dam (time increment of incident wave=0.013sec)

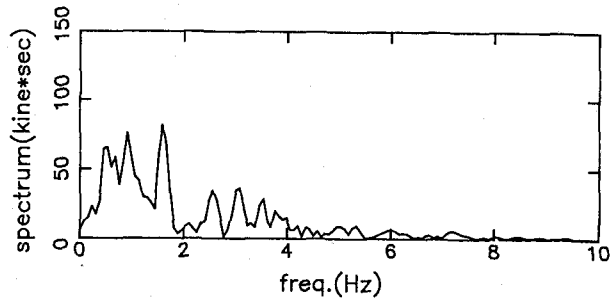


Fig. 12 Fourier spectrum of earthquake response at the crest of the dam (time increment of incident wave=0.007sec)