

フィルダムの堤敷における地震時の動的相互作用特性

岩下 友也¹・井根 健²・吉田 等³

¹正会員 工修 建設省土木研究所フィルダム研究室 研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番)

²正会員 工修 建設省土木研究所フィルダム研究室 交流研究員 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番)

³正会員 工修 建設省土木研究所フィルダム研究室長 (〒305 茨城県つくば市大字旭1番)

フィルダムと基盤の動的相互作用の影響を調べるために、2次元 FEM 解析によりダム堤敷での応答特性を検討した。さらに、その結果と常時微動計測記録ならびに地震観測記録を比較することにより、その妥当性を検証した。その結果をまとめると、①ダム堤敷での地震動はダムの構造系に対する固有周波数近傍のスペクトル成分が減少する。②ダム堤敷における動的相互作用は、入力地震波にダムの固有周波数付近のスペクトル成分が大きいくほど、またダムと基礎岩盤のインピーダンス比が大きいくほど、その影響が大きくなる。③法尻付近では動的相互作用の影響は小さくなる。

Key Words : dam bottom, dynamic interaction, earthquake motion, embankment dam, impedance ratio, natural frequency

1. はじめに

従来、ダムの動的解析では、既設ダムの底部監査廊で得られた記録をダム基盤に対する一次元重複反射等で調整することによりダム基盤の入力波としていることが多い。しかし、ダム堤敷における観測地震波は、ダム堤体と基礎岩盤の動的相互作用によるダム堤体内を進行する波動の影響を受けた反射波を含む。そのため、ダム堤敷での動的応答特性を明らかにすることは、ダムサイト岩盤での入力地震動特性、およびダム堤体の応答特性を把握する上で重要な課題である。本研究では、ダムと基礎岩盤の動的相互作用の影響を検討するために、フィルダムを対象として2次元 FEM 解析により、入力地震波の周波数特性やダムと基礎岩盤のインピーダンス比が、フィルダム堤敷での応答特性に及ぼす影響を評価した。さらに、それらの解析結果の妥当性を常時微動計測記録ならびに地震観測記録と比較することにより検証した。

2. 解析方法

(1)対象ダム

三保ダムを対象に検討を行った。当ダムは高さ 95m の中央コア型ロックフィルダムであり、基礎岩盤は安山岩質火山砕屑岩を主体とした S 波速度 V_s が 2000m/s 程度の硬岩である。

(2)解析モデルおよび解析方法

ダム軸直交方向の標準断面でダムと基礎岩盤を2次元 FEM によりモデル化した。解析モデルを図-1に示す。基礎岩盤の半無限性を考慮するために基盤底面を粘性境界で、側方をエネルギー伝達境界でモデル化した。

密度についてはゾーン毎に既往試験結果より定めた。堤体の初期せん断剛性率は当ダムで実施した弾性波探査結果から定めた¹⁾。堤体材料のせん断剛性率および減衰定数のひずみ依存性は堤体の大部分を占めるロック材料の室内試験結果から定めた。

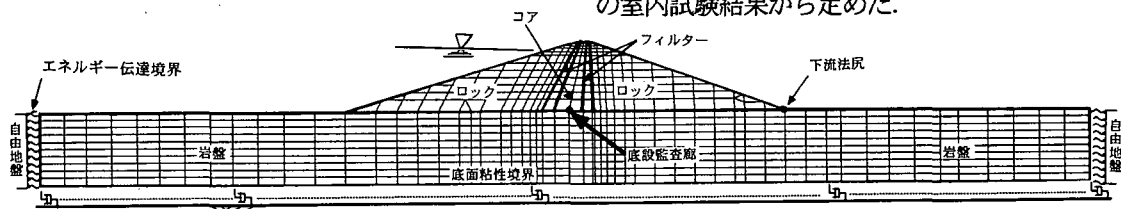


図-1 解析モデル

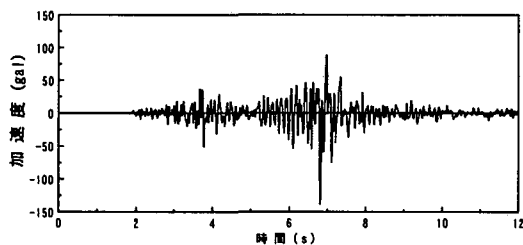


図-2 入力地震波時刻歴 ($\Delta t=0.01s$)

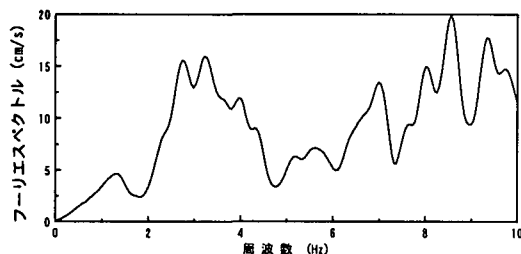


図-3 入力地震波の加速度フーリエスペクトル($\Delta t=0.01s$)

表-1 解析ケース

	$V_{SF}(m/s)$	α	$\Delta t(s)$	検討項目
CASE 1A	1950	0.29	0.01	} 入力波の 周波数特性
CASE 1B	1950	0.29	0.02	
CASE 2	1380	0.41	0.02	} インピー ダンス比
CASE 3	975	0.57	0.02	
CASE 4	690	0.81	0.02	

堤体材料の地震時の非線形性を表現するために等価線形化手法を用いた。解析は、プログラム DINAS による複素応答法で、解析対象周波数は 20Hz 以下とした。

(3)入力地震波

1996年3月6日の地震(マグニチュード 5.8、震央距離約 13km)時に当ダムで強震記録を観測した。ダム軸直交方向の最大加速度は、下流法尻で 138.2gal、底部監査廊で 84.4gal、天端で 243.9gal であった。解析には、下流法尻の基盤で観測されたダム軸直交方向の記録を基盤底面の粘性境界下端に入力した。入力地震波とした下流法尻の観測記録の加速度時刻歴を図-2に、加速度フーリエスペクトルを図-3に示す。

(4)解析ケース

次式に示すダムと基礎岩盤のインピーダンス比 α が動的相互作用に与える影響を調べるため、表-1に示す 4 ケースについて検討した。

$$\alpha = \frac{\rho_D \cdot V_{SD}}{\rho_F \cdot V_{SF}} \quad (1)$$

ρ は密度、 V_S は S 波速度を示し、サフィックスの D、F はそれぞれダムと基礎岩盤を意味する。 $\rho_D \cdot V_{SD}$ は、ダム堤体の平均的な値 $2.4t/m^3$ 、 $600m/s$ を用いた。なお、入力地震波の周波数特性がダムと基礎岩盤の動的相互作用に及ぼす影響を調べるために、入力地震波とした観測記録の卓越周波数が 0.5 倍になるように調整した波形を入力した場合も検討した。表-1 の CASE1A、CASE1B が入力波の周波数特性の検討で、CASE1B,2,3,4 が基礎岩盤の V_{SF} を変化させた場合のインピーダンス比の影響

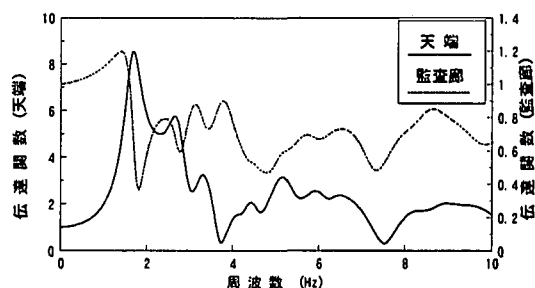


図-4 天端および監査廊の伝達関数(CASE1A)

の検討である。

3. 解析結果

(1)入力波の周波数特性が動的相互作用に与える影響

解析(CASE1A)により得られた底面粘性境界下端への入力に対する天端および監査廊での伝達関数を図-4に示す。天端の伝達関数の卓越周波数より、ダム軸直交方向のダムの固有周波数は、1次が 1.7Hz、2次が 2.6Hz、3次が 3.3Hz である。監査廊の伝達関数は、天端の伝達関数に見られるダムの固有周波数よりも若干高周波数側で陥没している。天端の伝達関数において卓越する周波数がダムと基礎岩盤の連成系の固有周波数であるのに対し、監査廊の伝達関数が陥没する周波数はダム単独の構造系の固有周波数である²⁾。

監査廊の伝達関数より、入力地震波にダムの固有周波数付近のエネルギーが大きく含まれる場合、監査廊での応答はダムの固有周波数付近のエネルギーがかなり減少したものとなると考えられる。図-3に示した入力地震波の加速度フーリエスペクトルによれば、ダムの1次固有周波数付近(1.7Hz)のエネルギーが小さく、3Hz前後の2次、3次に相当するエネルギーが大きい。図-5に監査廊での応答加速度のフーリエスペクトルを示す。同図には比較のために、堤体の影響を受けない解放基盤面(図-1に示す自由地盤)での応答加速度のフーリエスペクトルを示す。図より解放基盤に比べて監査廊ではダムの2、3次固有周波数付近の 3Hz 前後のエネルギーが小さくなっている。これは入力地震波に2、3次の固有周波数が多く含まれているためである。

入力地震波にダムの1次固有周波数が大きく含まれる場合を調べるために、地震動の卓越周波数を 0.5 倍にし、ダムの1次固有周波数と一致させた地震波を入力した場合(CASE1B)の監査廊と解放基盤面での応答加速度のフーリエスペクトルを図-6に示す。監査廊の応答加速度のスペクトルは、解放基盤面のものに比べて、ダムの1次固有周波数付近(1.7Hz)で顕著に減少している。

以上より、入力地震波にダムの固有周波数が多く含まれている場合、ダム堤敷での応答は、動的相互作用の影響が大きくなり、ダムの固有周波数近傍のスペクトルが減少されたものとなる。

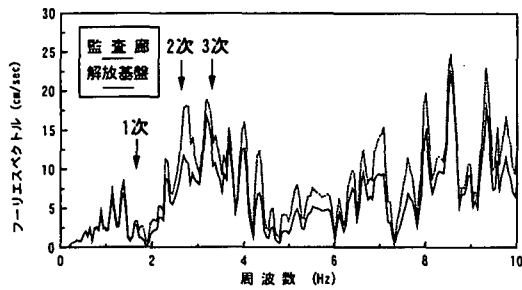


図-5 監査廊と解放基盤面での応答加速度フーリエスペクトルの比較(CASE1A)

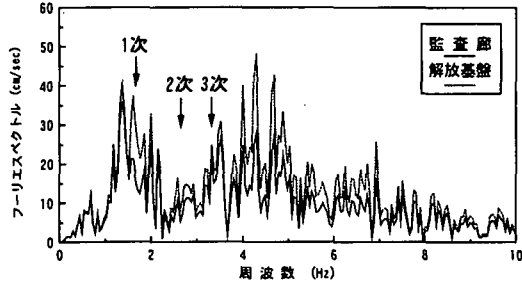


図-6 監査廊と解放基盤面での応答加速度フーリエスペクトルの比較(CASE1B)

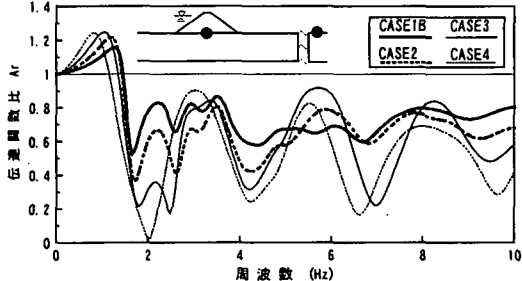


図-7 監査廊での伝達関数比

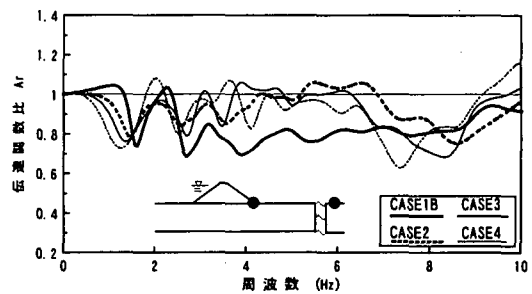


図-8 下流法尻での伝達関数比

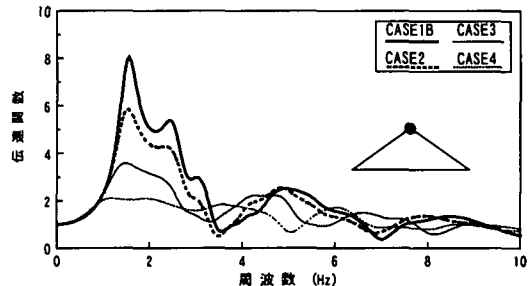


図-9 天端での伝達関数

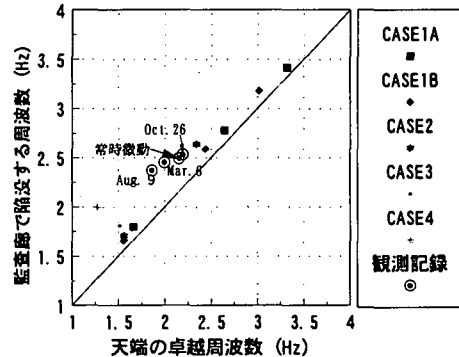


図-10 天端で卓越する周波数と監査廊で陥没する周波数の比較

(2)インピーダンス比が動的相互作用に与える影響

ダム堤敷での動的応答と解放基盤面での地震動との差を調べるために、堤敷での伝達関数を解放基盤面の伝達関数で除した値を伝達関数比 A_r として算出した。伝達関数比が、すべての周波数領域で1であれば、その地点での動的応答の振幅特性は解放基盤面のものと一致していることになる。

図-7、8に基礎岩盤の v_{sp} を変化させてインピーダンス比を変えた場合の監査廊と下流法尻での伝達関数比を示す。図-9に天端での伝達関数を示す。3.(1)で述べたように、図-7に示す監査廊での伝達関数比は、図-9に示す天端での伝達関数の卓越周波数より若干高周波数側で陥没している。図-10に、天端で卓越する周波数と監査廊で陥没する周波数を示す。同図より、天端で卓越する周波数に比べて監査廊で陥没する周波数は、幾分高いことがわかる。また、図-7の伝達関数比が陥没する度合いは、インピーダンス比が大きいほど増加する。すなわち、インピーダンス比が大きいほど動的相互作用の影響が大きいと言える。図-9に示す天端の伝達関数より、堤体の応答はインピーダンス比が小さいほど大きくなる。このためインピーダンス比が小さいほど堤体の非線形性が大きくなり、ダム単独の固有周波数は低周波

数側になる。したがって、インピーダンスが小さいほど、図-7の伝達関数比が陥没する周波数は、低周波数側になったと考えられる。一方、ダムと基礎岩盤の連成系の固有周波数は、ダムの非線形性よりも岩盤の剛性の影響を大きく受けると考えられる。このため、図-9に示す天端の卓越周波数は、インピーダンス比が大きいほど若干低周波数側になったと考えられる。下流法尻については、図-8に示した伝達関数比の陥没の度合いは小さく、また、インピーダンス比の影響もあまりない。

図-11に堤敷と下流地盤表面での応答加速度の最大値の分布を示す。なお、最大加速度は各ケースの解放基盤面での最大加速度で除して正規化している。最大加速度は堤敷中央部(A地点)が一番小さく、下流法尻(B地点)付近で増加し、解放基盤面とほぼ等しくなっている。また、インピーダンス比が大きいほど、ダム堤敷での最大加速度は小さくなり、ダムと基礎岩盤の動的相互作用が大きい。

動的相互作用により解放基盤面の地動に対して、堤敷で減少したエネルギー比を推定するために、次式に示す伝達関数比の残差 e を用いて整理した結果を図-12に示す。

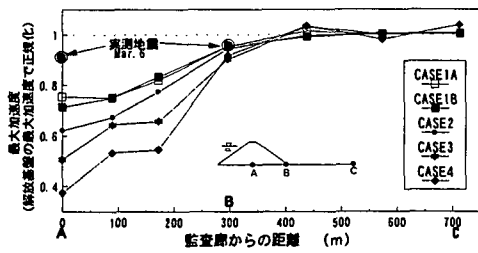


図-11 ダム堤敷と下流地盤表面での最大加速度の比較

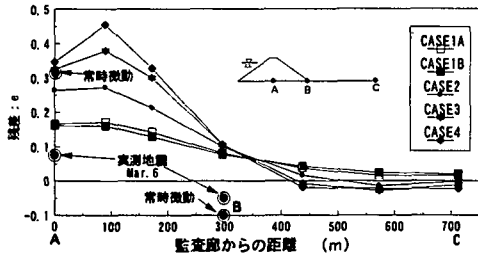


図-12 ダム堤敷と下流地盤表面での伝達関数比の比較

表-2 観測記録

発生年月日	最大加速度(gal)			震央距離(km)	マグニチュード
	天端	監査廊	下流法尻		
1996. 3. 6	243.9	84.4	138.2	13	5.8
1996. 8. 9	62.3	13.8	21.8	17	4.7
1996.10.26	15.9	3.4	5.4	11	4.0

$$e = \frac{1}{2f_1} \int_{0.5f_1}^{2.5f_1} (1 - Ar(f)) df \quad (2)$$

対象とした周波数領域はダムの動的挙動に大きく影響を及ぼす1次から3次の固有周波数を含む範囲内となるように、1次の固有周波数 f_1 の0.5倍から2.5倍の範囲とした。図-12より、残差は堤敷中央部(A地点)付近で大きく、下流法尻(B地点)で小さくなるのがわかる。また、最大加速度値と同様にインピーダンス比が大きいほど、残差も大きく、動的相互作用の影響は大きい。中央部(A地点)より100m程度離れた地点で残差が大きくなっているが、これは土被高による拘束圧の違いによって、コアよりもロック部の剛性が小さくなり、ロック部の動的相互作用が大きくなったためと考えられる。下流法尻(B地点)では動的相互作用の影響が小さく、解放基盤面の応答特性とほぼ同じである。

4. 観測値による検証

三保ダムで観測された3つの地震記録を表-2に示す。3地震の観測記録について、下流法尻に対する天端および監査廊での加速度フーリエスペクトル比を図-13、14に示す。同図には常時微動計測結果も併記している。図-13の天端で卓越する周波数は2Hz前後であり、天端での応答が大きくなるにつれて、卓越する周波数は小さくなっている。すなわち、堤体材料の非線形性が大きくなり、堤体の剛性が低下し、ダムの1次固有周波数が小さくなったと考えられる。一方、図-14に示す監査廊のフーリエスペクトル比については、図-13に示す天端で卓越した周波数よりも若干高周波数側に陥没している。この観測値からの結果を図-10に併記する。この傾向は、3.(2)の解析結果と一致している。

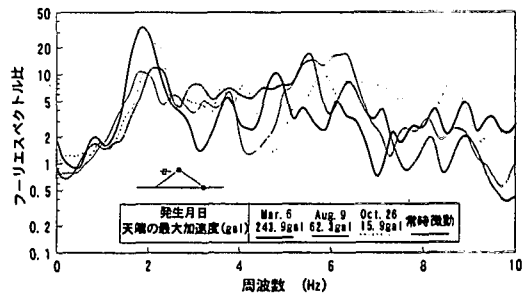


図-13 地震観測記録と常時微動計測記録のスペクトル比の比較(天端/下流法尻)

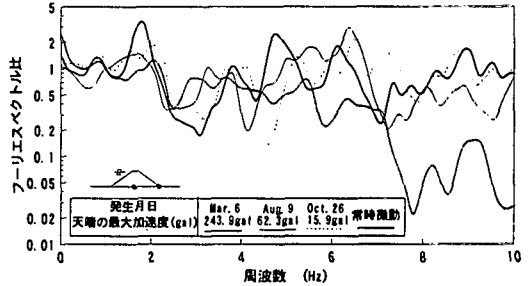


図-14 地震観測記録と常時微動計測記録のスペクトル比の比較(ダム基礎/下流法尻)

観測記録および常時微動計測記録から求めたダム堤敷の動的応答特性を前掲の図-11,12に示す。解放基盤相当の地震記録としては、ダムサイト近傍の岩盤上で観測された記録を用いた。最大加速度は堤敷中央部の方が下流法尻より小さく、伝達関数比の残差は堤敷中央部の方が下流法尻よりも大きいという傾向は解析結果と一致している。なお、最大加速度値については、解放基盤面で最大値を示した時刻周辺で整理を行った。

5. まとめ

- (1) ダム堤敷で得られた観測記録はダムの構造系に対する固有周波数近傍のスペクトル成分が減少した波形となる。この周波数は、天端の応答波形の卓越する周波数よりも若干高周波数側となる。
- (2) ダム堤敷における地震動は、入力地震波にダムの固有周波数付近のスペクトル成分が大きいほど、またダムと基礎岩盤のインピーダンス比が大きいほど、ダムと基礎岩盤の動的相互作用の影響が大きくなる。
- (3) 動的相互作用の影響によるダム堤敷での最大加速度の低下、およびエネルギーの減少といった地震動特性は、堤敷中央部付近で最も大きく、法尻に向かうにつれ小さくなる。法尻での動的応答特性は、動的相互作用の影響が少なく、解放基盤面の応答特性とほぼ同じである。

参考文献

- 1) 中村昭, 安田成夫, 岩下友也, 多賀恭一, 横山真至: ロックフィルダムの地震時観測記録とその動的解析 - 三保ダムを事例として -, 土木研究所資料, 第3228号, 1994.
- 2) 北川良和: 動的相互作用とその入力設定, 土と基礎, Vol. 40, No. 2, 土質工学会, pp. 75-82, 1992.