

CS4-18〔I〕 コンクリートダムサイト岩盤内地震動に関する解析的研究

中電工事 技術コンサルタント部 ○正会員 恒川和久  
 中部電力 電力技術研究所 正会員 上田 稔 奥田宏明  
 電力中央研究所 耐震部 沢田義博

1. まえがき コンクリートダムの耐震に関する研究において、ダムサイトの地震動は基礎的かつ重要な課題の一つである。本研究は、ダムサイトにおける地震観測や観測地震動の評価及びダムの地震応答解析等に資することを目的として、ダムの形式や減衰による応答性状の違いや岩盤の物性がダムサイトの岩盤内地震動に与える影響について解析的検討を行ったものである。

2. 解析の概要

(1) 解析モデルと検討方法 基礎的検討として二次元FEM解析とし、100m級のアーチダム、重力ダムを対象にダムと岩盤の連成解析を行った(図-1)。岩盤領域については岩盤内の応答を調べることを考慮して  $dx=500m$  ,  $dy=600m$ と設定した。岩盤領域の広さを変えた解析を行い、領域の広さがダムの応答に影響を及ぼさないことを確認してある。面内単位振幅正弦波を岩盤底部に入力し、ダムの応答が岩盤内地震動に最も影響を与える場合として、ダム頂部の伝達関数が最大となる周波数の正弦波を与えたときの散乱波  $U_s$  ( $U_s = U - U_k$ ,  $U$ :ダムがあるときの応答,  $U_k$ :ダムがないときの応答)に着目して、ダムがない場合(半無限領域の応答)とダムがある場合の岩盤内の応答の比較を行った。なお、貯水は考慮していない。

(2) 解析ケースと物性値 解析ケースと物性値を表-1に示す。ダムの物性はダムコンクリートの試験及び起振実験の結果を、岩盤の動弾性係数はダムサイトの弾性波探査結果を参考に設定した。基本ケースを岩盤の動弾性係数がアーチダムは  $3.6 \times 10^6$  [ $t/m^2$ ](ケースIV)、重力ダムは  $6.0 \times 10^5$  [ $t/m^2$ ](ケースII)、減衰定数はダムが5%岩盤が3%の場合とし、この基本ケースに対し岩盤の動弾性係数、ダム及び岩盤の減衰定数を変えてその影響を調べた。重力ダムについてはダム形式の違いによる影響も調べることを考慮して、アーチダムと岩盤の動弾性係数が同じ場合(ケースIII~V)も解析した。

3. 解析結果と考察 基本ケースに対し岩盤の動弾性係数を変えたときのアーチダム、重力ダムそれぞれのダム頂部の伝達関数を図-2に、岩盤内散乱波のダムがないときの応答に対する振幅の比率 ( $|U_s| / |U_k| \times 100$  [%]) を表-2, 3に示す。各表の上には対象とした入力波の周波数(図-2のピークの周波数)と波長も合わせて示す。

(1) アーチダム ①岩盤が硬くなるにつれてダムの影響は小さくなる(表-2)。これは岩盤が硬いほどダムの挙動に伴う岩盤の応答が小さいためである。②ダム付近( $D=0 \sim 20m$ ,  $Z=0 \sim 20m$ )ではダムの影響が顕著であるが、ダムから深部、遠方に遠ざかるに従いその影響は徐々に小さくなり、数パーセントの値まで低下している(表-2)。これはアーチダムは水平方向の応答が大きく、影響が大きい範囲はダム付近に限られるためである。③結果は略すが、ダムの減衰(3.5, 7%)が大きい程ダムの影響は小さくなる。しかし、その影響の程度は減衰定数2%の違いに対しダム付近の $D=0 \sim 20m$ ,  $Z=0 \sim 20m$ の範囲で5~10%認められるもののそれ以外の範囲では数パーセントである。④結果は略すが、岩盤の減衰(1.3, 5%)が大きくなる程ダムの影響は小さくなる。しかし、その影響の程度は減衰定数2%の違いに対しダム付近も含め3%以下と小さく岩盤の減衰定数の影響は小さい。⑤基本ケースに対し、入力波の周波数による違いを調べたのが表-4である。結果はダム直下( $D=0m$ )に対して示す。二次のピーク周波数(5.88Hz)のときに一次のピーク周波数(1.68Hz)の場合よりダムの影響が大きくな

表-1 物性値

ケース	動弾性係数 $E_d$ ( $t/m^2$ )	せん断波伝播速度 $V_s$ (m/sec)	動ポアソン比 $\nu_d$	減衰定数 $h$ (%)	単位体積重量 $\gamma$ ( $t/m^3$ )
ダム I	$3.5 \times 10^6$	2470	0.20	3.5, 7	2.35
II	$3.0 \times 10^5$	660			
III	$6.0 \times 10^5$	930			
IV	$3.6 \times 10^6$	1200	0.25	1.3, 5	2.50
V	$6.0 \times 10^5$	2400			
VI	$3.6 \times 10^6$	2800			

基本ケース { アーチダム: ケースIV ( $E_d = 3.6 \times 10^6$ )  
 重力ダム: ケースII ( $E_d = 6.0 \times 10^5$ )  
 ダムの減衰: 5%, 岩盤の減衰: 3%

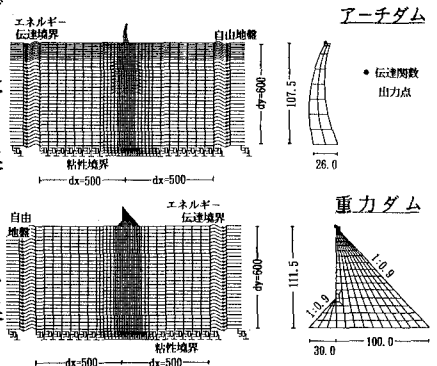
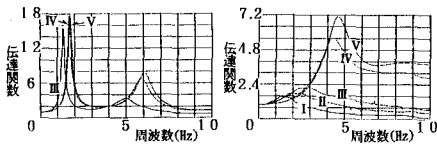


図-1 解析モデル



アーチダム 重力ダム  
図-2 ダム頂部の伝達関数

表-2 散乱波の割合(アーチダム)

ケースⅢ: $f=1.32\text{Hz}$ , $\lambda=900\text{m}$											ケースⅣ: $f=1.68\text{Hz}$ , $\lambda=710\text{m}$											ケースⅤ: $f=1.73\text{Hz}$ , $\lambda=610\text{m}$											
Z(m)	0	10	20	30	50	100	200	300	400	500	Z(m)	0	10	20	30	50	100	200	300	400	500	Z(m)	0	10	20	30	50	100	200	300	400	500	
0	4.4	4.4	3.0	2.4	1.9	1.3	0.7	0.3	0.2	0.1	0	2.2	2.2	1.9	1.7	1.4	1.1	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1	0	1.9	1.6	1.4	1.3	1.1	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1
20	1.6	1.8	2.1	2.2	1.9	1.3	0.6	0.3	0.2	0.1	20	0.9	1.1	1.1	1.0	0.9	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	20	0.8	0.9	0.9	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1
40	1.3	1.4	1.5	1.5	1.2	0.8	0.4	0.2	0.1	0.1	40	0.7	0.7	0.7	0.6	0.5	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	40	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1
100	0.9	0.9	0.9	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1	0.1	0.1	100	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	100	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1
140	0.8	0.8	0.8	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	140	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	140	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
200	0.7	0.7	0.7	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	200	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	200	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
300	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	300	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	300	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
400	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	400	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	400	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
500	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	500	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	500	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
600	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	600	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	600	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1

表-3 散乱波の割合(重力ダム)

ケースⅠ: $f=1.32\text{Hz}$ , $\lambda=900\text{m}$											ケースⅡ: $f=2.39\text{Hz}$ , $\lambda=390\text{m}$											ケースⅢ: $f=2.49\text{Hz}$ , $\lambda=480\text{m}$											ケースⅣ: $f=4.308\text{Hz}$ , $\lambda=550\text{m}$											ケースⅤ: $f=4.59\text{Hz}$ , $\lambda=610\text{m}$											
Z(m)	0	10	20	30	50	100	200	300	400	500	Z(m)	0	10	20	30	50	100	200	300	400	500	Z(m)	0	10	20	30	50	100	200	300	400	500	Z(m)	0	10	20	30	50	100	200	300	400	500	Z(m)	0	10	20	30	50	100	200	300	400	500	
0	4.1	4.1	4.1	4.1	3.1	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0	4.1	4.7	4.7	4.7	3.1	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0	5.1	5.1	5.1	5.1	3.1	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0	5.9	5.9	5.9	5.9	3.9	2.9	1.9	1.1	0.6	0.3	0	5.9	5.9	5.9	5.9	3.9	2.9	1.9	1.1	0.6	0.3
20	3.1	3.1	3.1	3.1	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	20	3.4	3.4	3.4	3.4	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	20	3.7	3.7	3.7	3.7	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	20	3.8	3.8	3.8	3.8	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	20	3.7	3.7	3.7	3.7	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	
40	2.4	2.4	2.4	2.4	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	40	2.6	2.6	2.6	2.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	40	2.9	2.9	2.9	2.9	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	40	2.9	2.9	2.9	2.9	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	40	2.9	2.9	2.9	2.9	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	
100	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	100	1.9	2.0	2.0	2.0	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	100	1.9	2.0	2.0	2.0	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	100	2.0	2.1	2.1	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	100	2.0	2.1	2.1	2.1	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	
140	1.5	1.5	1.5	1.5	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	140	1.8	1.9	1.9	1.9	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	140	1.8	1.9	1.9	1.9	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	140	1.8	1.9	1.9	1.9	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	140	1.8	1.9	1.9	1.9	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	
200	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	200	1.8	1.8	1.8	1.8	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	200	1.8	1.8	1.8	1.8	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	200	1.8	1.8	1.8	1.8	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	200	1.8	1.8	1.8	1.8	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	
300	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	300	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	300	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	300	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	300	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	
400	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	400	1.7	1.7	1.7	1.7	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	400	1.7	1.7	1.7	1.7	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	400	1.7	1.7	1.7	1.7	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	400	1.7	1.7	1.7	1.7	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	
500	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	500	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	500	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	500	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	500	1.6	1.6	1.6	1.6	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	
600	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	600	1.3	1.3	1.3	1.3	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	600	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	600	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	600	1.4	1.4	1.4	1.4	1.1	0.6	0.3	0.2	0.1	0.1	

ていることがわかる。これはダムの一次と二次の応答モードの違いにより、二次モードの場合はダムの頂部でなくより岩盤に近い位置での応答が大きく、その影響があらわれているためと考えられる。その他の周波数ではダムの影響は着岩部付近を除いて小さくなっている。

⑥アーチダムの場合ダム直下(D=0m)においても岩盤内数十mの位置では比較的ダムの影響が小さい(表-2)。ダムから下流方向に離れた位置でもダムの影響は小さいが、ダムサイトとの谷地形の違い等の影響を考慮するとアーチダムサイトでの地震観測は、ダム直下(D=0m)数十mの堅硬な岩盤で行うのが望ましい。なお、かなり堅硬な岩盤上のアーチダムではダムの底部においてもダムの影響が小さい地震動が観測できるものと考えられる。

(2) 重力ダム ①アーチダムの場合とは異なり、岩盤の硬さによる顕著な差は認められない(表-3)。これは、岩盤が硬くなるに伴って伝達関数のピーク周波数が高周波に移行し(図-2)、そのピーク周波数を与える波の波長があまり変わらないためであり(表-3の各表の上)、重力ダムではダム自体の応答が小さく、ダムのロッキングが岩盤の応答にかなり影響していることによるものと考えられる。②ダム付近のみならずかなり深部、遠方にまでダムの挙動が影響しており、とりわけダム着岩部付近のD=0~100mでの散乱波はおおよそ30~60%とかなり大きい。岩盤の硬さにかかわらず、概ねダム下流端から200m以上(D=300m)で、その影響は10%程度以下に低下している。③結果は略すが、アーチダムの場合と異なりダムの減衰(3.5, 7%)による差はほとんど認められない。④結果は略すが、岩盤の減衰(1, 3, 5%)が大きい程ダムの影響は小さく、その程度は減衰定数2%の違いに対しD=0~100m, Z=0~500mの範囲で5~10%と比較的大きい。⑤基本ケースに対し、入力波の周波数による違いを調べたのが表-4である。結果はダムの影響が比較的小さくなるダム下流端から200m(上述②)の位置に対して示す。一次ピーク以外の周波数でも一次ピーク(2.39Hz)と同程度以上のダムの影響があり、周波数によっては10%以上の差があることがわかる。なお結果は略すが、D=0~100m, Z=0~500mの範囲では周波数にかかわらず大きな影響が認められた。

⑥重力ダムではダムの影響がかなり大きく、着岩部深度500mにおいてもその影響は10%以上である(表-3)。よって、重力ダムサイトでの地震観測はダム下流端からある程度離れた堅硬な岩盤上が好ましい。なお、対象周波数によってはダムの影響が比較的大きいのでこの点には注意が必要であると思われる。また、重力ダムの場合ダム底部で地震観測を行ってもその記録はかなりダムの影響がある。

4. あとがき アーチダム、重力ダムサイトでの岩盤内地震動について解析的に検討したが、ダム-岩盤の連成によるダムの変形モードが、ダムサイト岩盤内地震動に及ぼすダムの影響を特徴付けていることを示す結果が得られた。今回は基礎的研究として二次元解析に基づき考察した。実際のダムにおいては三次元的な影響により二次元の場合よりダムの応答が小さく、ピーク周波数は高周波側の値をとる。このような点に関しては、今回得られた知見をもとに考察及び検討を行っていく必要がある。