

ロックフィルダムの地震時の挙動について

電力中央研究所 高橋 忠 澤田義博 国生剛治
 関西電力、KK. 大長昭雄 手塚昌信
 新日本技術コンサルタント 国井仁彦

§1 まえがき

フィルタイプダムの耐震性に関する研究は、物部以来、せん断振動理論により数多くの研究がなされ、最近では電子計算機の利用の進歩により、有限要素法による伸縮も考慮に入れられた振動の研究がさかんである。現在迄に実施されてきたフィルタイプダムの研究を振り返ってみると、数理的な研究は数多くあるが、実際に基づく研究はその例が少ない。従って、フィルタイプダムの地震時の挙動については不明な点が多く、このため実物ダムについて実際により動的挙動を解明し、理論のよりどころを確立することが必要である。筆者等は、最近完成したロックフィルダムの動的挙動に関する研究会に参加する機会を得た。その成果は既に報告されているが、その後引き続きこれらの結果を検討を加えると共に、そのダムについて更に種々のアプローチを実施し、加えて既往の研究成果を参考にしながら、従来の理論と実測結果との対比を行なってみた。

§2 地震観測結果について

観測と実施したのは高さ約90m、堤頂長約300mの中心コア型ロックフィルダムである。この観測に当って特に解明を試みるのは、ダム表面のみならず内部についても地震応答を知ることであった。従ってダム表面はもとより内部と基礎にも多数の地震計が設置された(図・1)。観測波形の一例を図・2に示す。観測結果によると(1)地震時には卓越振動数が存在し、それは上下流方向では2.0~2.2 Hz, 3.0~3.3 Hz, ...であり、ダム軸方向では2.2~2.4 Hz, ..., 鉛直方向では2.9~3.0 Hzであった。特に最低次の振動が卓越している場合が多かった。また卓越振動数は、空座時と満水時では数%以下の差があった。(2)上下流方向の最大加速度は標高が高くなるに従って大きくなり、特に天端付近ではそれが著しい。天端中央部の3方向の最大加速度を比較すると、ダム軸方向では若干小さく、鉛直方向では約50%であった。同じ標高における上下流方向の最大加速度を比較した結果、上下流のり面で最大値を示し、ロック部中央で最小であった。ダム軸線上における上下流方向最大加速度は、中央で最大値を示し、1/4英では約2/3であった。(3)変位波形については標高が異なれば波形が異なるが、同一標高で

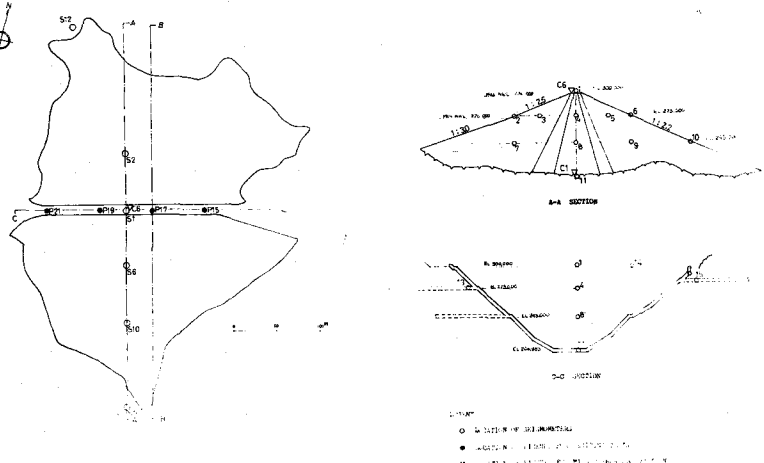


Fig-1 Location of Instruments

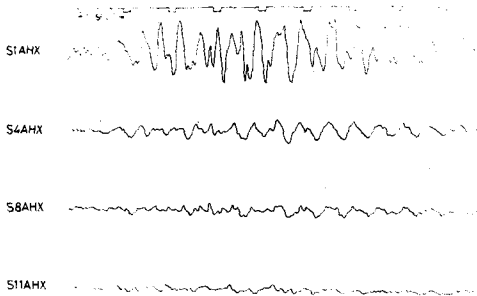


Fig-2 Observed Waves of No.46 Earthquake.

は全く相似な形であった。基盤の敷設において観測された変位波形は、ほぼ等しい形をしていた。

§3 加振実験から得られたダムの振動特性

ダム天端中央部付近に起振機(最大出力 50ton; 10 Hz時)を設置して行った加振実験によって、次のような結果が得られた。
 (1) 上下流方向加振実験により得られた共振曲線から求まる卓越振動数は、2.0~2.1 Hzの振動数がいずれの測点でも卓越しさらに測点により多少異なるが、2.4 Hz, 2.9~3.1 Hz, 3.4~3.5 Hz等の振動が卓越するのがみられた(図-4)。
 (2) 堤軸方向加振の場合の卓越振動数は、2.4 Hz, 4.7 Hz等の振動数が卓越するのが見られた。
 (3) 低水位時および満水位時の卓越振動数の変化は、最低次振動数について約数%の差であった。
 (4) 最低次振動数について共振曲線のピークの形から求めた減衰定数は4~6%であった。

§4 波動法によるダムの内部構造

フィルダムの波動伝播速度を求める試みはいくつか行なわれているが、いずれもダム上部の表面付近に限られていた。そこで以後の数値的取扱いに村する物理定数の指標を求める目的もあって、ダム全体にわたって、P波とS波の速度分布を詳細に求めた。その結果を図-5に示す。コア一部では堤頂から-16mまでは $V_s = 160$ m/sec, $V_p = 620$ m/sec, -16m~-24mまでは $V_s = 310$ m/sec, $V_p = 650$ m/sec。それ以下では $V_s = 490$ m/sec, $V_p = 1100$ m/sec であった。一方ロック部内部の速度分布は、表面から-4mまでは $V_s = 220$ m/sec, $V_p = 500 \sim 600$ m/sec, -4m~-30mでは $V_s = 350$ m/sec, $V_p = 700 \sim 800$ m/sec, それ以下では $V_s = 630$ m/sec, $V_p = 1380$ m/sec であった。コア一部およびロック部の表面より-25m~-30mにおいて、波動の速度が増加する境界面が存在することは興味ある事実であった。

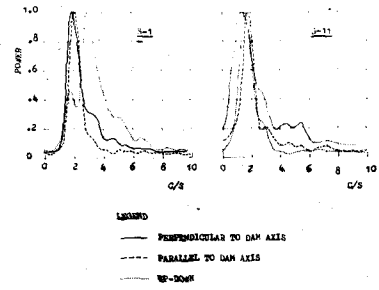


Fig-3 Power Spectrum of Earthquake Records.

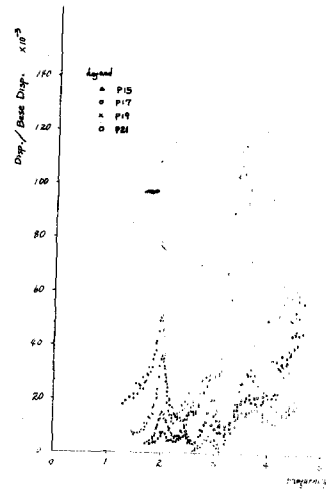


Fig-4 Resonance Curves of Vibration Tests.

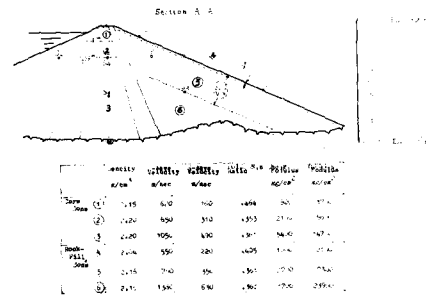


Fig-5 Distribution of Wave Velocity

§5 常時微動観測によるダムの卓越振動数

堤体や地盤の常時微動を観測することによって、ダムの振動特性の調査を試みた。観測は発電所の運転時、揚水時、運転停止時等の場合に実施した。その結果によると、堤体では、上下流方向の振動は特に約2Hzの振動が卓越し、堤軸方向では約2.4Hzの振動が卓越する。又、基礎岩盤における常時微動の卓越振動数は1Hz以下であった。常時微動のパワースペクトル解析結果の一例を図・6に示す。

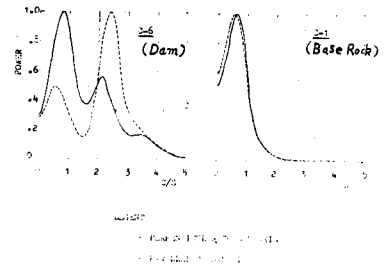


Fig-6 Power Spectrum of Microtremors

§6 動的解析

以上の実験結果を基にして、せん断振動理論、有限要素法などによる解析を試み、その適用性について検討した。[1] せん断振動理論 --- 前に示した堤体内弾性波速度を用いて、標準断面について解析した。まず、堤体の平均速度より求めた剛性率を用いて解析した結果では、固有振動数は $f_1=1.80$ Hz, $f_2=4.14$ Hz, --- となった。次に実測値に基づき、せん断剛性率が深さにより異なるとして、Rayleigh-Ritzの方法により計算した結果によると $f_1=2.07$ であった。更に堤体がせん断振動をなすとして、集中質量系によってどの程度近似できるかを調べるために、高さ方向の剛性の変化を考慮し、9質量系のモデル化を行ない計算をした。その結果、 $f_1=1.97$ Hz, $f_2=3.49$ Hz, --- と得られた。[2] せん断曲げ振動 --- ここでは、均質なくさび形状のせん断曲げ振動とし、基本振動について Rayleigh-Ritzの方法により解析した。パラメータとして堤中B/堤高Hについての1次の固有振動の変化を調べたが、 $B/H \approx 5 \sim 6$ の場合、1次振動数が純粋せん断の場合に比べて、4~8%低下することが判明した。

[3] 有限要素法による解析 --- 弾性波速度より堤体内の弾性定数の値を求め、堤体材料を弾性体として有限要素法による解析を行なった。その結果、 $f_1=1.91$ Hz, $f_2=3.01$ Hz, $f_3=3.49$ Hz, --- となった。それらに対応する振動モードを図・7に示す。

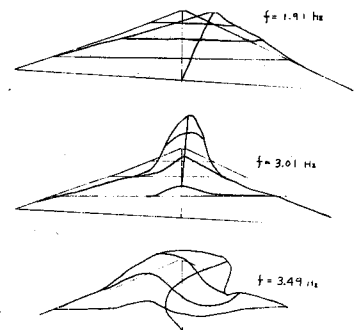


Fig-7 Vibration Modes of Dam due to F.E.M

以上の解析結果と実測値とを比較してみると(表・1)、低次の固有振動数についていずれも近似度が良いことがわかる。理論値が実測値より若干低い値となる傾向があるが、これは堤体の奥行きが無限としたため、谷幅を考慮せねばならぬ実測値に近づくと思われる。更に堤体内部の振動モードを調べた。即ち堤頂より-25mと-55mの堤体の上下流面およびロック部中央部、コア部の観測波形について調べたが、その結果によると、加速度波形については早い振動が重なり対応が付き難い。しかし変位波形については、異った標高では波形は異なるが、同じ標高では全く相似な波形であった。これはせん断振動理論による結果と予想しない。有限要素法により求めた振動モードについて、コア部と下流傾斜面のモードを示したのが図・9である。この図からコア部と表面との変位は堤頂より-40mまでほぼ一致しているといえる。

§7 地震応答解析

有限要素法によって、基礎岩盤上の観測波形を入力とし、堤体の各節の地震応答を計算し、観測波

形と比較した。さらに堤頂での観測波形を用いて、波動の重複反射理論によって堤体内部および基礎岩盤の波形を求め、観測値との比較を行った。後者の解析では簡単のため一層モデルとした。この結果によると、有限要素法では波形の一致度は良くなかったが、波動理論による解析では堤体の平均せん断波速度を580~600 m/secとした場合、両者の波形の一致度は比較的良好な結果が得られた(図・8)。さらに、常時微動観測記録についても同様に解析を行った上記と同じ結果が得られた。

第8 フィルタイプダムの地震増中
基礎地盤の地震動の加速度最大値に対するダム頂加速度応答最大値の関係については、既に幾つかの例が発表されている。そこで、これら既往のものが入り出たものを全て含めて、地盤最大加速度に対する堤頂最大加速度の関係を図・10に

示した。図に示されるように、この倍率は小さい地震の時は安定しないが、地震が大きくなると安定の傾向にある。この中にはロックフィルダムもあり又アースダムもある。又、夫々のダムは高さや上下流斜面勾配が異っており、固有振動数も異なっている。以上の事柄にもかかわらず、増中率はどのダムと比べてもほぼ一定の値を示す傾向にあると云えよう。

参考文献

(1) 喜撰山ダム計画委員会 “喜撰山ダムの静的および動的挙動について” 1970年5月
 (2) S. OKAMOTO, G. TAMURA “Dynamic Behavior of Earth Dam During Earthquakes” 東大生研報告 vol.16., No.14., Oct., 1964
 (3) K. Minami “On a Vibration Characteristics of Fill Dam in Earthquakes” 4th. W.C.F.E
 (4) 河上房義, 浅田取江, 森芳信 “アースダムの地震時応答特性” 3rd. J. S. E. E., 1970, III-19
 (5) 沢田義博, 高橋忠 他. “フィルタイプダムの動特性(弾性波動法による喜撰山ロックフィルダムの内部構造)” 電力技研報告 1172.3.
 (6) 国生剛治, 高橋忠 他. “フィルタイプダムの動特性(起振実験による喜撰山ロックフィルダムの振動特性)” 電力技研報告 1972.5

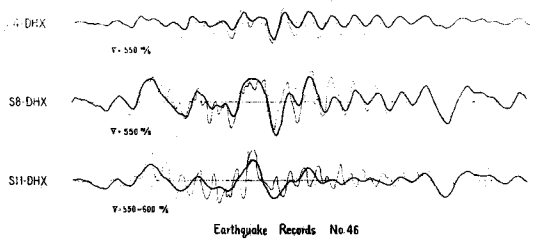


Fig-8 Comparison between Observed and Calculated Waves

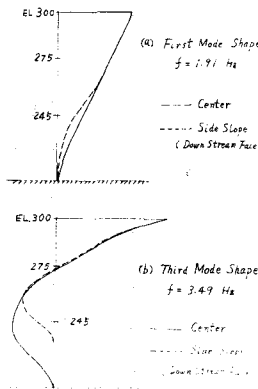


Fig-9 Vibration Mode due to F.E.M

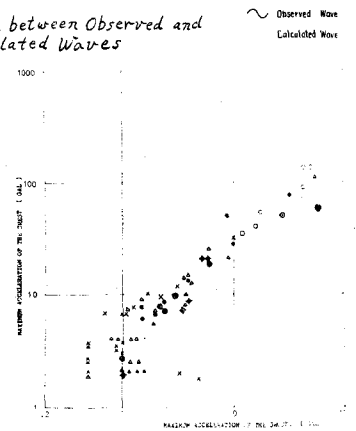


Fig-10 Relationship between Max. Acc. of on the Ground and on the Crest.

実験および解析名	卓越振動数 上下流方向	固有振動数 % 横軸方向	固有振動数 % 鉛直方向
地震観測	1.9 ~ 2.0	2.1 ~ 2.4	2.9 ~ 3.0
常時微動	1.9 ~ 2.2	2.2 ~ 2.6	2.7 ~ 3.3
起振実験	2.0 ~ 2.1	2.3 ~ 2.4	2.7 ~ 3.0
セシ断振動数 2.0° (砂-物+土)	1.80	—	—
セシ断振動数 2.2° (物+土が深さにより変化)	2.07	—	—
セシ断振動数 2.0° (砂-物+土)	1.74	—	—
セシ断振動数 集中管系 (物+土が深さにより変化)	1.97	—	—
有限要素法	1.71	—	3.01

Table-1 実験及び解析による固有振動数