

ダム軸の湾曲したフィルダムに関する研究

関西電力株式会社

原田次夫

〃

大西正記

(株) 構造計画研究所

広瀬正行

〃

柿本 哲

〃

○外川清治

1 まえがき

近年フィルダムの築堤にあたってダム軸を湾曲させた大規模ダムが比較的多く見受けられる。フィルダム工学に関する研究はコンピュータの普及ならびに解析手法の発展により数多く発表されている。しかしながらダム軸の湾曲したフィルダムについては堤体の挙動さらに基礎岩盤に対する湾曲の影響等の検討は殆んど行なわれていない。そこで筆者等は高圧100クラスのモデルダムを設定し数値解析法により、ダム軸が直線の場合および湾曲した場合のそれぞれについて、フィルダムの静的条件下(築堤時、湛水時)および動的条件下(地震時)における堤体ならびに基礎岩盤にダム軸の湾曲がどの程度影響するかを定量的に把握し、検討を行なった。以下、その成果の一部を報告する。

2 解析モデルおよび解析手法

研究対象として中央コア型の実在ダムを選び、図1に示すようにダム軸が直線($R=\infty$)の場合と湾曲($R=346\text{m}$)の場合にモデル化し、有限要素法により三次元の連続体として解析を行なった。

④ 静的解析 図2に示すように対称条件により左岸側をモデル化し、境界条件は対称面の面外方向固定、岩着部については予備検討を行ない実ダム実測データと比較検討の上固定とした。

堤体材料の非線形特性は実ダム築堤中の挙動実測データを基に求められた(1)式、(2)式に示す構成関係式を用いた。

$$E = \alpha G_z^\beta \quad \text{----- (1)}$$

$$\nu = a + \frac{c}{G_z + b} \quad \text{----- (2)}$$

ここに E : 変形係数, ν : ポアソン比, G_z : 鉛直応力
 α, β, a, b, c : 材料に判定する定数

築堤時解析に用いた堤体材料の非線形特性を表1に一括して示した。湛水時解析には築堤後の鉛直応力 G_z により求められた変形係数とポアソン比を用いた。ただし上流側のロック材とランジション材は水浸による浮力を考慮して変形係数は表1で与えられる値の0.8

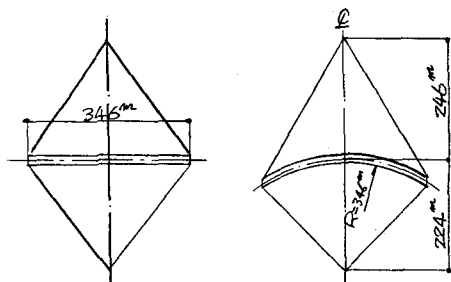


図1 解析モデル平面図

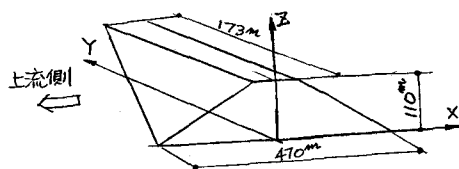


図2 静的解析モデル図

表1 静的解析に用いた堤体材料の諸定数

材料	変形係数 (G_z)	ポアソン比	単位体積重量 (単位時) γ/m^3
ロック材	$E = 142 G_z^{0.131}$	$\nu = 0.30 + \frac{0.075}{G_z + 0.90}$	$\gamma = 2.02$
ランジション材	$E = 234 G_z^{0.203}$	$\nu = 0.34 + \frac{0.074}{G_z + 0.90}$	$\gamma = 2.11$
コア材	$E = 242 G_z^{0.312}$	$\nu = 0.37 + \frac{0.073}{G_z + 0.90}$	$\gamma = 2.05$

倍と小さく評価した値を用いた。

築堤時の荷重は自重のみとし、湛水時は水圧（湛水時）による荷重をコア材の上流面に分布荷重として載荷した。

築堤解析はダム全高を8層に分割し、荷重増分法による逐次並立解析を行なった。

② 動的解析 対称条件は保持できないので図3に示すようにダム全体をモデル化し、静的解析に比べ計算容量を考慮して要素分割を粗くした。

堤体材料の物性は表2に示すように実ダムの弾性波試験を基に求められた動的変形係数および動的ポソソビヒを用いた。

堤体の減衰定数は一律10%とし、入力地震波は強震記録として重用されている図4に示すE L centro 1940 NS波を最大加速度150galに規準化した最初の8秒間について解析した。地震波の入力方向は上下流方向（X方向）およびダム軸（Y方向）とした。

固有値解析はJacobi法により逐次逐次解析し、応答解析は固有ベクトルの直交性を利用したモード合成を用い、振動方程式をE. L. Wilsonの θ 法により積分間隔2/100秒で解いた。

3 解析結果および考察

静的解析および動的解析の各々の結果をダム軸が直線の場合と湾曲の場合について比較検討して、以下に示す。

① 静的解析 築堤時および湛水時解析結果は図5に示す黒塗りの要素位置での解析値について比較検討した。図6および図7は図5で示した各層にダム軸が直線および湾曲の場合の主応力を比較したものである。これらの図を見る限り築堤時、湛水時共その主応

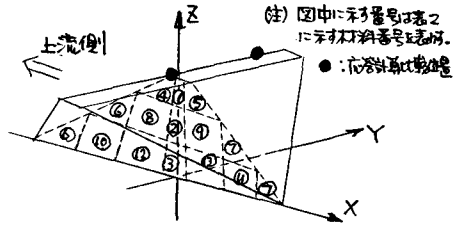


図3 動的解析モデル図

表2 動的解析に用いた動的変形係数およびポソソビヒ

No.	変形係数	ポソソビヒ	No.	変形係数	ポソソビヒ
1	6200	0.40	8	14380	0.34
2	16300	0.42	9	15790	0.35
3	31100	0.37	10	20070	0.31
4	6060	0.36	11	20610	0.33
5	5720	0.36	12	29610	0.24
6	9540	0.35	13	29370	0.26
7	9680	0.36			

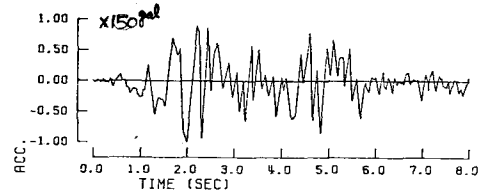


図4 EL CENTRO 1940 NS WAVE 0.0 - 8.0 SEC.

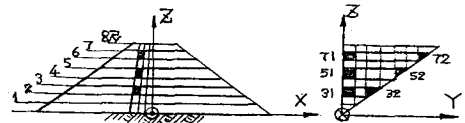


図5 静的解析結果比較用要素

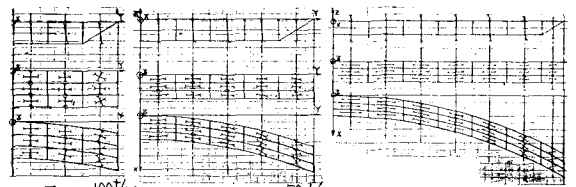


図6 築堤時最大主応力の比較

表3 湛水時におけるコア応力の比較

層No.	要素No.	σ_1 (kg/cm²)		σ_2 (kg/cm²)		σ_3 (kg/cm²)	
		直線	湾曲	直線	湾曲	直線	湾曲
3	31	7.72	7.82	10.37	10.61	16.69	16.75
	32	7.68	7.47	9.75	9.74	18.47	18.46
5	51	3.53	3.54	6.25	6.59	9.57	9.62
	52	3.43	3.17	4.58	4.65	9.24	9.31
7	71	0.92	0.91	1.62	1.80	2.44	2.46
	72	0.55	0.58	0.76	0.87	1.81	1.88

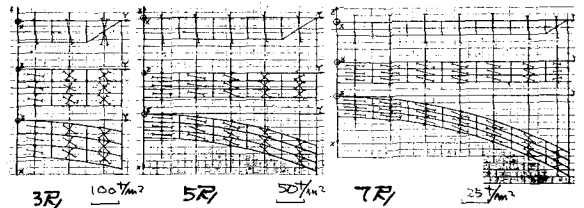


図7 湛水時最大主応力の比較

力の大きさは殆んど同じである。また主応力の方向は、 σ_1 と共にダム軸の湾曲の方向にそって方向が異なっている。コア部について洪水時の応力を定量的に比較すると表3の如くなる。

表4は基礎岩盤に生じる反力を比較したものであるが表3と同様に直線と湾曲の相違は見られない。

つぎにコアに生じるせん断応力 τ_{xy} の分布を図8に示すが、ダム軸湾曲の影響は上流部で顕著に現われている程度である。

図9、図10に堤体表面のダム軸湾曲の有無による鉛直変位および水平変位の比較分布図を示すが、殆んど差は認められない。なお、モデルダム相当の実ダムの実測値を参考として実線を示した。

表4 コア部反力比較

反力成分	要暴時解析		洪水時解析	
	直線	湾曲	直線	湾曲
2層	X	20.6	21.3	54.0
	Y	52.4	57.1	50.5
	Z	172.1	172.2	211.3
4層	X	14.4	16.6	34.0
	Y	36.6	45.3	32.0
	Z	90.9	92.5	112.4
6層	X	7.0	8.1	10.5
	Y	10.9	17.0	8.3
	Z	24.4	25.3	28.3

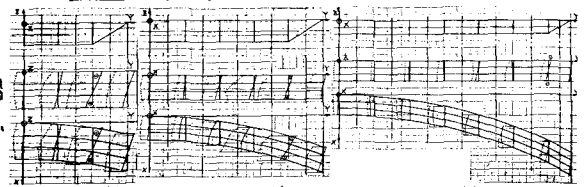


図8 コア中央部せん断応力の比較

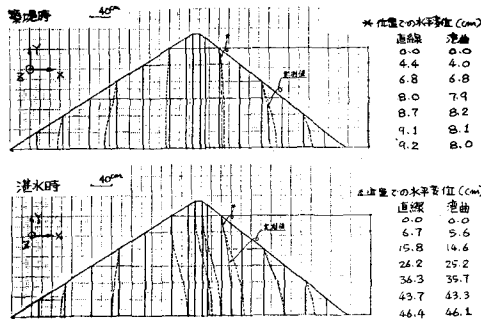


図9 湾曲の有無による水平変位の比較

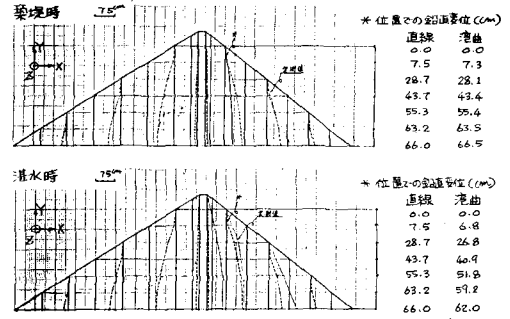


図10 湾曲の有無による鉛直変位の比較

表5 固有周期及び入力方向別刺激係数

モード 次数	ダム軸直線		ダム軸湾曲			
	固有周期	刺激係数	固有周期	刺激係数		
	(sec)	上下方向ダム軸方向	(sec)	上下方向ダム軸方向		
1	0.513	-460.9	0.0	0.512	-461.9	0.0
2	0.445	0.0	409.5	0.447	0.0	383.5
3	0.441	0.0	-43.8	0.438	0.0	150.0
4	0.372	-197.3	0.0	0.373	-184.4	0.0
5	0.359	0.0	0.0	0.359	79.6	0.0
6	0.358	0.0	28.9	0.358	0.0	68.0
7	0.338	0.0	218.3	0.338	0.0	222.5
8	0.331	18.9	0.0	0.332	0.0	0.0
9	0.329	42.2	0.0	0.331	-52.0	0.0
10	0.328	0.0	-73.2	0.327	28.4	0.0

② 動的解析 固有値解析より求めた固有周期および地震波入力方向別の刺激係数を1~10の順位表に示す。固有周期はダム軸湾曲の有無に依らず $T_1=0.51$ 秒程度(参考:喜望山ダム $T_1=0.51$ 秒)である。なお、図本、図材の式によると $T_1=0.55$ 秒となり、前値と良く近似している。つぎに10位迄の刺激係数を見ると、上下流方向に対しては1,4次また、ダム軸方向に対しては2,7次の振動モードが卓越しており、応答解析に大いに影響することが指定される。各々の振動モードを図11、図12に示す。

つぎに図3に示した中央横断面および左岸側断面位置での応答加速度波形および応答変位波形を図13、図14に示し、ダム天端での最大応答分布図および最大応答値を各々図15、図16および表6に示す。

これらの表および図から、応答解析においても湾曲による顕著な相違は見られない。しかし、加速度方向に対し直角方向の応答値はダム軸が直線の場合に比べ湾

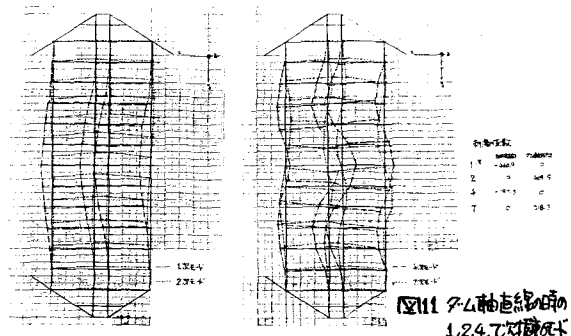


図11 ダム軸直線の振動モード1,2,4,7,10の比較

曲している方が大きくなっている。

また加振方向による相違は以下の如く見られる。上下流方向地震入力時に見られる中央横断面と左岸側横断面の位相の逆転がダム軸方向入力の場合には現れず、また前者においてはダム上流部で震動後に顕著な二次ピークが現れているが後者においては確認できない。

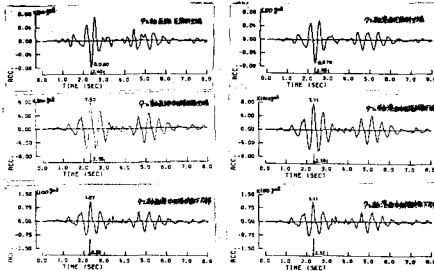


図13 地震波上下流方向入力応答加振波形状

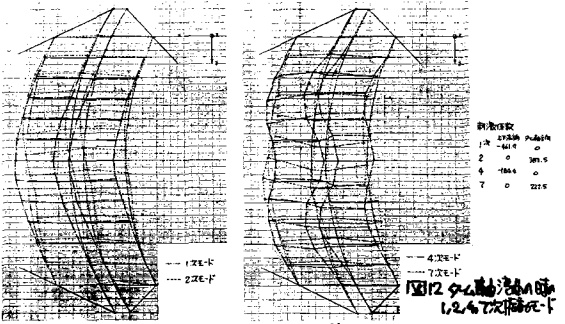


図12 ダム軸方向地震波入力応答加振波形状

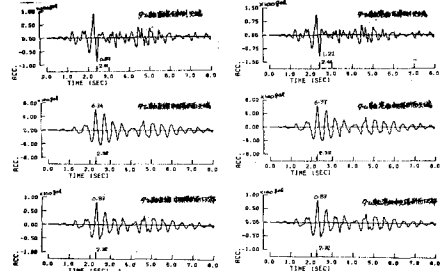


図14 地震波ダム軸方向入力応答加振波形状

4 あとがき

ダム軸曲曲の有無によるフィルタムの挙動への影響を静的および動的に検討してきたが、本検討結果を見る限り湾曲による影響は殆んどないことが判明した。すなわち、ダム軸湾曲によりアーチ効果が顕われず堤体内部の応力的安全性ならびに変形上の利便は等がなかった。この結論は換言すれば、基礎岩盤の状況によりダム軸を湾曲させたほうが好都合である場合あるいは美的観点からダム軸を湾曲させるような場合でも構造的にダムの安全性を損うものではないということと言えるであろう。

なお、本報告では記述しなかったがダム軸の曲率、堤体材料の剛性などの変因についても、ある程度研究を行っており、上記とほぼ同様の結果が得られている。

表6 ダム天端での最大応答値

応答成分	上下流方向地震入力		ダム軸方向地震入力	
	直線	湾曲	直線	湾曲
加振度	α 750 gal	771 gal	66 gal	106 gal
	β 75	143	634	637
	γ 49	54	178	171
速度	α 56.8 cm/s	56.9 cm/s	2.7 cm/s	5.0 cm/s
	β 3.4	4.6	35.0	35.9
	γ 2.3	2.6	9.8	9.0
変位	α 4.57 cm	4.63 cm	0.20 cm	0.25 cm
	β 0.29	0.44	2.76	2.77
	γ 0.20	0.20	0.70	0.60

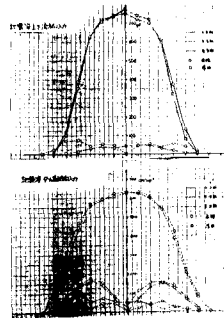


図15 ダム天端最大応答加振波形状

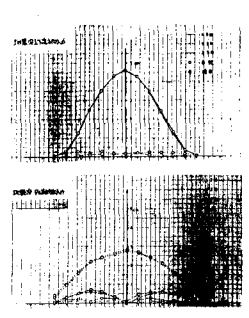


図16 ダム天端最大応答加振波形状の比較

参考文献

- 1) 原田文夫「フィルタムの変形に関する研究」関西電力総合研究所 1976.6
- 2) 川井忠孝「マトリックス法振動および応答」コンピュータによる構造工学講座 I-4-B 培風館