

第 6 章 ダムの耐震性に関する評価

6.1 震度法によるダムの耐震設計

6.1.1 震度法の概要

現在、ダムの構造の安全性は「河川管理施設等構造令」および「河川管理施設等構造令施行規則」の定めるところに基づいて検討することになっており、この中で、ダムの耐震設計は「震度法」によることとしている。

「震度法」によるダムの耐震設計の考え方は、関東大震災をうけて、1925年に物部長穂博士によって提案され、1930年に小牧ダムで初めて「震度法」を用いたダムの設計が行われた。以後、地震による貯水の振動の影響、ダム型式による振動特性の違いなどが研究され、1953年に「ダム設計基準」（国際大ダム会議日本国内委員会）で耐震設計法が明文化された。その後、1971年に「改訂ダム設計基準」（日本大ダム会議）で一部内容が修正され、1976年に「河川管理施設等構造令施行規則」（建設省）が制定され、法的拘束力をもつ設計基準がつくられた。さらに、1981年の「河川管理施設等構造令施行規則」改訂（建設省）によって設計震度の地域区分の見直しが行われ、現在に至っている。

「震度法」では、堤体の振動によって生じる慣性力の影響を堤体各部の重量に比例する静的荷重として評価している。このとき、その比例定数を設計震度と呼び、「河川管理施設等構造令施行規則」では表-6.1の値をその下限値として規定している。

「震度法」を用いた耐震設計には一様な震度分布の仮定など実現象を必ずしも正確に表現していない部分がある。しかし、「震度法」によって設計されたダムは今回の兵庫県南部地震をはじめとした過去の大きな地震において構造の安全性を損なうような被害を受けておらず、「震度法」によって設計されたダムは高い耐震性を有していると判断される。これは、以下に示す耐震性の評価基準との組み合わせにおいて、震度法が合理的に体系づけられているためと考えられる。

しかし、今回の兵庫県南部地震の大きさに鑑み、ここでは、今回の地震で計測された地震動を用いて「震度法」によって設計されたダムの耐震性を改めて評価するものとした。

6.1.2 震度法におけるコンクリートダムの構造の安全性の要件

「震度法」を用いたコンクリートダムの構造設計においては、ダムの構造の安全性は次の要件を満足することで確保されるものとしている。

- (1) 重力式コンクリートダムにおいては、堤体の上流面に鉛直方向の引張応力を生じないこと。
- (2) 堤体の滑動に対して4以上の安全率を有すること。
- (3) 堤体内に生じる応力が許容応力の範囲内にあること。ただし、コンクリートの許容応力はコンクリートの圧縮強度を基準として安全率が4以上となるように定める。

なお、(1)の要件は貯水中の堤体の転倒に対する安全性を定めたものであって、貯水中の転倒が考えにくいアーチ式コンクリートダムには(1)の要件は適用されず、堤体上流面の応力は(3)の要件として評価することになっている。

6.1.3 震度法におけるフィルダムの構造の安全性の要件

「震度法」を用いたフィルダムの構造設計においては、ダムの構造の安全性は次の要件を満足することで確保されるものとしている。

- (1) 堤体のすべりに対して1.2以上の安全率を有すること。

なお、フィルダムの堤体材料のせん断強さはそれぞれのダムで使用される材料を用いた大型三軸圧縮試験によって求めるが、「震度法」を用いたフィルダムの耐震設計では、安全性に対する余裕として、ロック材、フィルター材については粘着力を考慮しないこととしている。

表-6.1 「河川管理施設等構造令施行規則」による設計震度の下限值

ダムの種類		地域区分		
		強震帯地域	中震帯地域	弱震帯地域
重力式コンクリートダム		0.12	0.12	0.10
アーチ式コンクリートダム		0.24	0.24	0.20
フィルダム	ダムの堤体が概ね均一の材料によるもの	0.15	0.15	0.12
	その他のもの	0.15	0.12	0.10

6.2 兵庫県南部地震におけるダムの実測挙動解析

6.2.1 一庫ダムの実測挙動解析

今回の兵庫県南部地震で大きな地震動を記録した重力式コンクリートダムに一庫ダム（1983年完成）がある。そこで、重力式コンクリートダムの耐震性の検討に用いる動的解析法の基本的な解析精度を確認するため、一庫ダムの実測解析を実施した。

一庫ダムの断面形状と地震時の貯水位を表-6.2、図-6.1に示す。また、地震計の設置位置を図-6.1に示す。

解析モデルは図-6.2のように剛基礎上に2次元有限要素法で表現した。また、解析に用いた材料の物性値は一庫ダムの設計値より表-6.3のように設定した。なお、解析に用いた入力加速度波形（底部通廊で計測されたもの）を図-6.3に示す。

実測解析では減衰定数の設定が重要となる。そこで、減衰定数 h を5%、10%、15%の3段階に変化させ、堤体内に設置された地震計で計測された加速度と解析から求められた加速度を比較検討した。その結果を図-6.4に示す。図によれば、減衰定数は10~15%の範囲内にあると考えられ、ここで解析した3つのケースの中では、減衰定数を10%とした場合に解析値と実測値は最もよい一致を示した。

この結果を踏まえて、減衰定数を10%として詳細な動的解析を実施した。ダム天端付近の加速度の実測値と解析値を表-6.4、図-6.5に比較して示す。これらの図表より、地震時のダムの挙動が十分な精度で再現できることが確認された。

表-6.2 一庫ダムの断面形状と地震時の貯水位

堤 高	75m
フィレット高さ	21m
上流面勾配	1 : 0.00
下流面勾配	1 : 0.79
フィレット勾配	1 : 0.70
地震時貯水位	38.4m

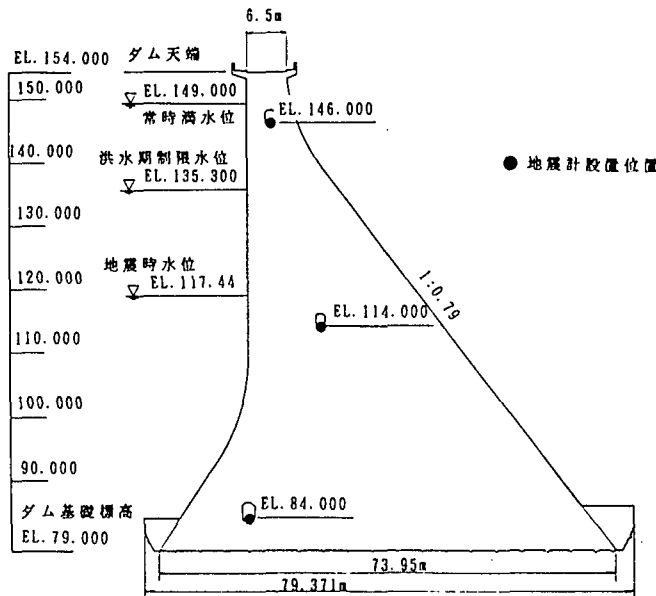


図-6.1 一庫ダムの断面形状と地震計の設置位置

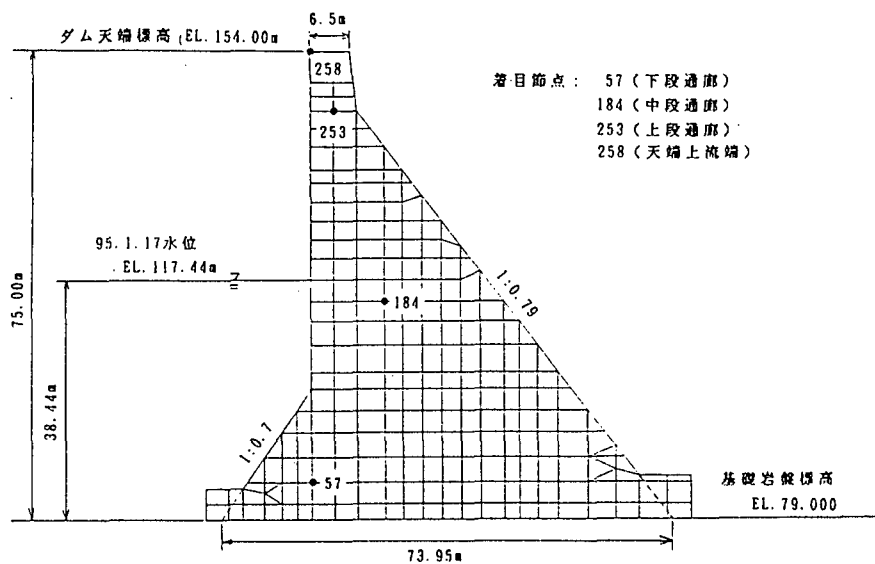
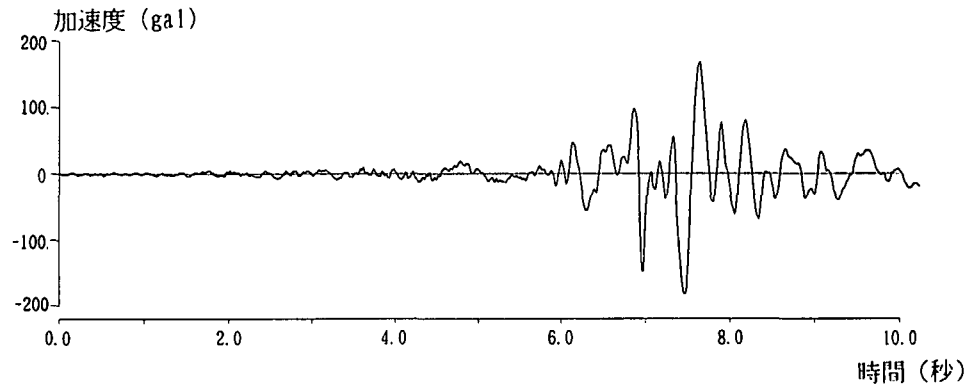


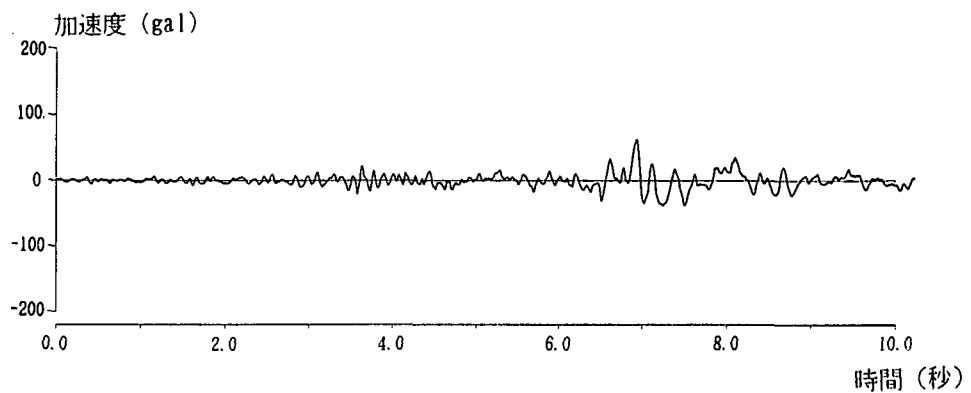
図-6.2 一庫ダムの解析モデル

表-6.3 実測解析に用いた物性値

弾性係数	240,000kgf/cm ²
ポアソン比	0.2
単位体積重量	2,450kg/m ³
減衰定数	5、10、15%



(1) 上下流方向水平加速度



(2) 鉛直加速度

図-6.3 一庫ダムの実測加速度波形 (底部通廊)

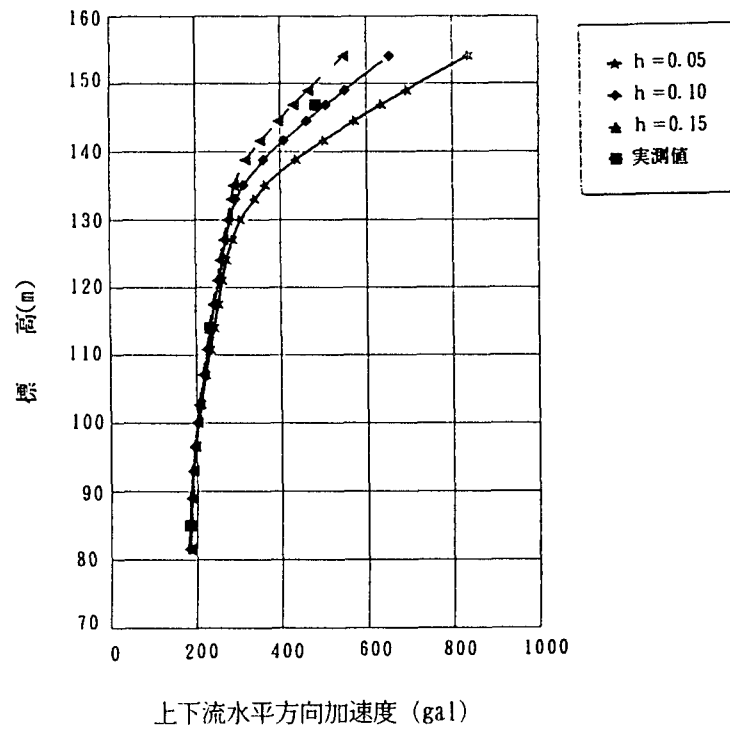
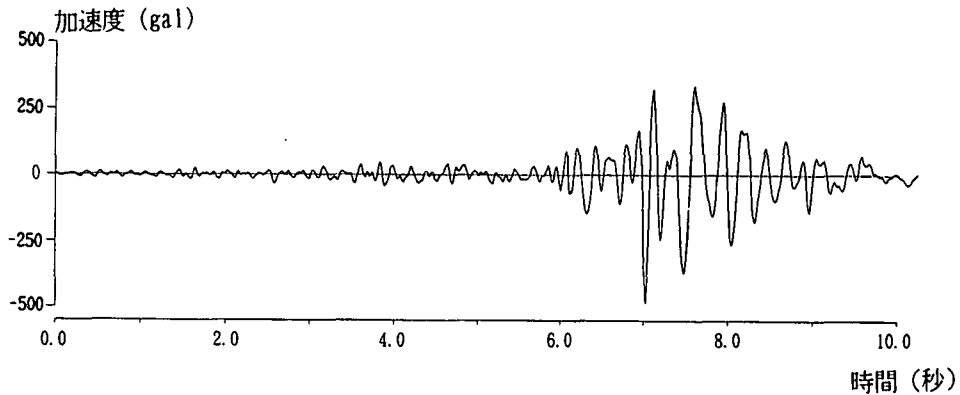


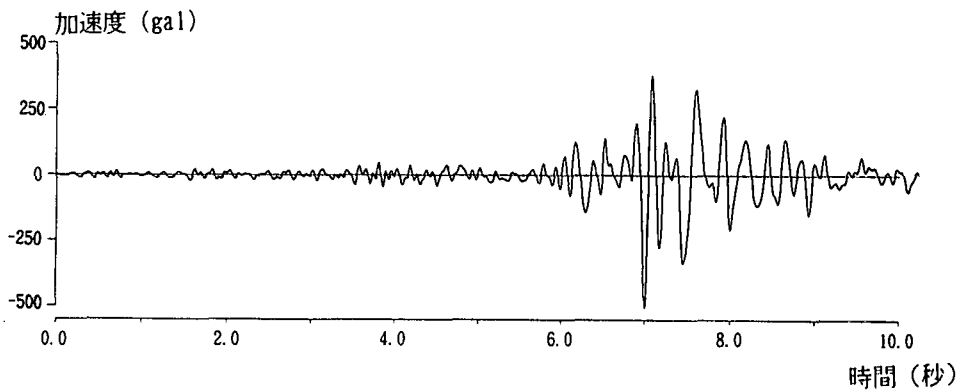
図-6.4 最大加速度の実測値と解析値の比較

表-6.4 天端付近の加速度の実測値と解析値の比較

最大加速度	実測値 gal	解析値 gal
上下流方向	482	505
鉛直方向	170	190



(1) 加速度の実測値



(2) 加速度の解析値

図-6.5 天端付近の加速度の実測値と解析値の比較（上下流方向水平加速度）

6.2.2 箕面川ダムの実測挙動解析

今回の兵庫県南部地震で大きな地震動を記録したロックフィルダムに箕面川ダム（1982年完成）がある。そこで、ロックフィルダムの耐震性の検討に用いる動的解析法の基本的な解析精度を確認するため、箕面川ダムの実測解析を実施した。

箕面川ダムの断面形状と地震時の貯水位を表-6.5、図-6.6に示す。また、地震計の設置位置を図-6.6に示す。

解析モデルは図-6.7に示すように剛基礎上に2次元有限要素法で表現した。解析に用いた材料の物性値は箕面川ダムの試験値より表-6.6、図-6.8のように設定した。なお、解析に用いた入力加速度波形（底設通廊で計測されたもの）を図-6.9に示す。動的解析では減衰定数の設定が重要となる。そこで、ダム天端の地震計で計測された加速度（最大値および波形）と解析から求められた加速度の整合性を検討して減衰定数を推定した。推定に当たっては、まず、築堤解析および湛水解析を行って要素毎の平均主応力を計算し、その値から初期せん断剛性率を決定した。

このような実測解析により減衰定数を検討した結果、「材料の履歴減衰定数+15%」が妥当と判断された。

天端の加速度の実測値と解析値を比較して表-6.7および図-6.10に示す。これらの図表によれば、最大加速度の実測値については上下流方向の地震動のみならず、他の複雑な入射波並びに構造的要因によると見られる影響が認められるが、全体としての地震時のダムの挙動が良好な精度で再現できることが確認された。

表-6.5 箕面川ダムの断面形状と地震時の貯水位

堤 高	47m
上流側法勾配	1 : 2.80
下流側法勾配	1 : 2.00
地震時貯水位	24.5m

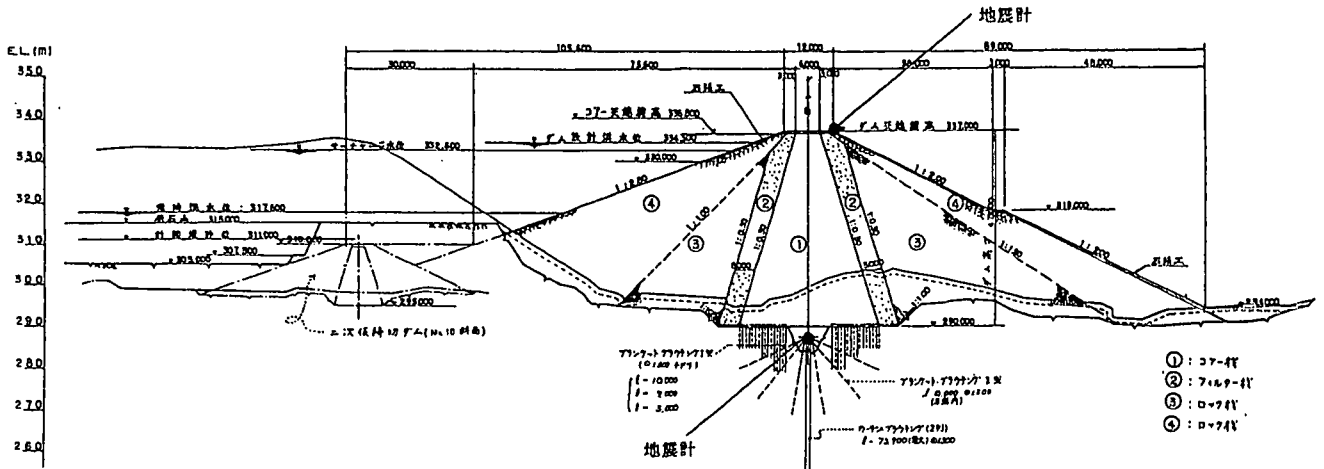


図-6.6 箕面川ダムの断面形状と地震計の設置位置

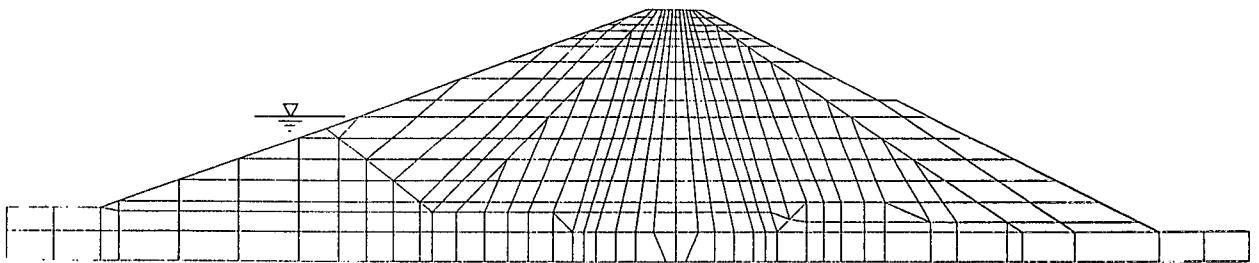


図-6.7 箕面川ダムの解析モデル

表-6.6 実測解析に用いた物性値

	ロック I	ロック II	フィルター	コア
比重	2.73	2.74	2.73	2.68 *
含水比 (%)	1.40	1.50	4.30	15.40
湿潤密度 (t/m ³)	2.12	2.03	2.23	2.18
飽和密度 (t/m ³)	2.32	2.27	2.35	2.18

*は盛土試験結果より、それ以外は施工管理試験結果より求めた。

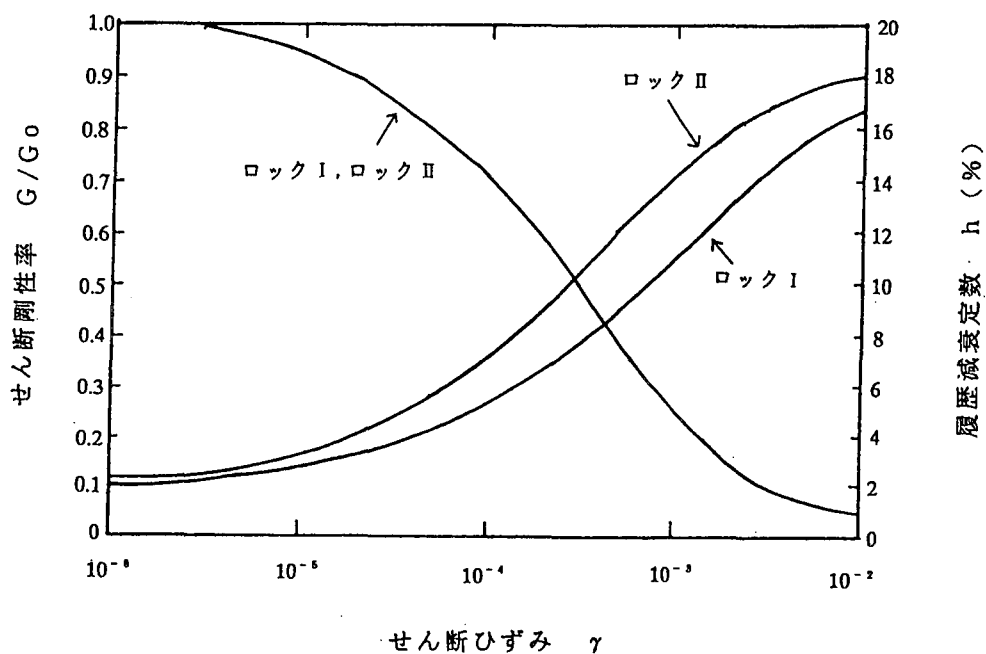
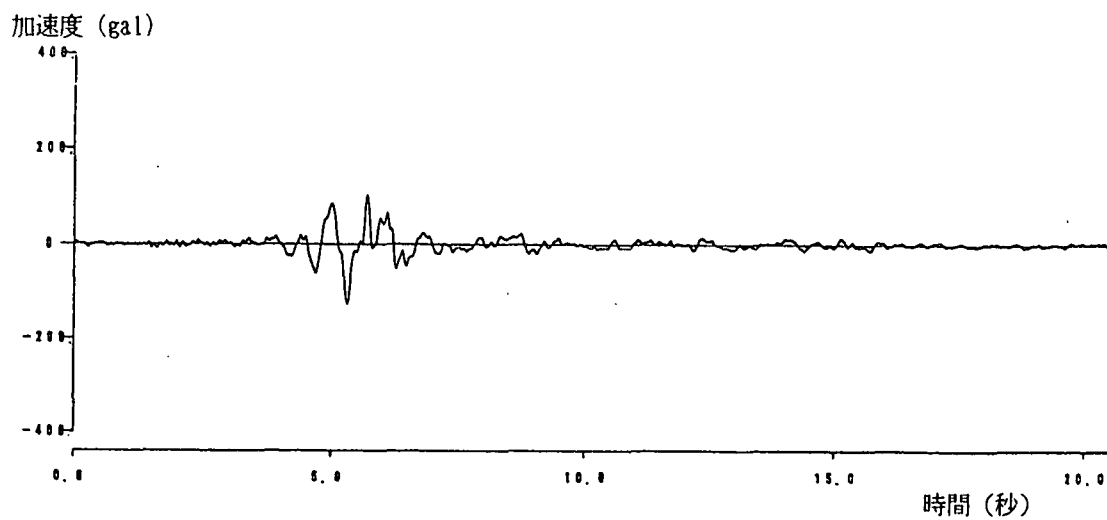
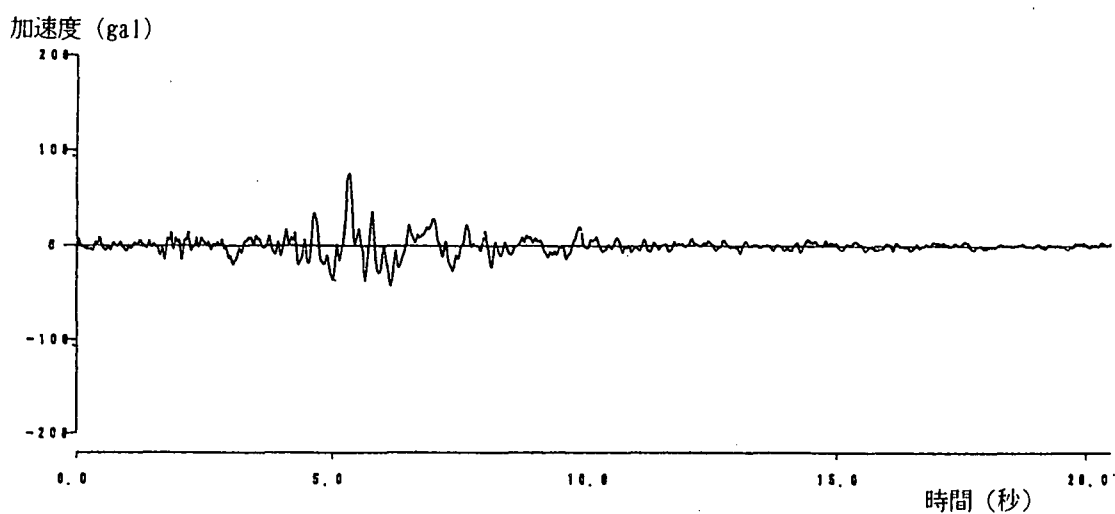


図-6.8 ロック材のせん断剛性率と履歴減衰定数のひずみ依存性



(1) 上下流方向水平加速度

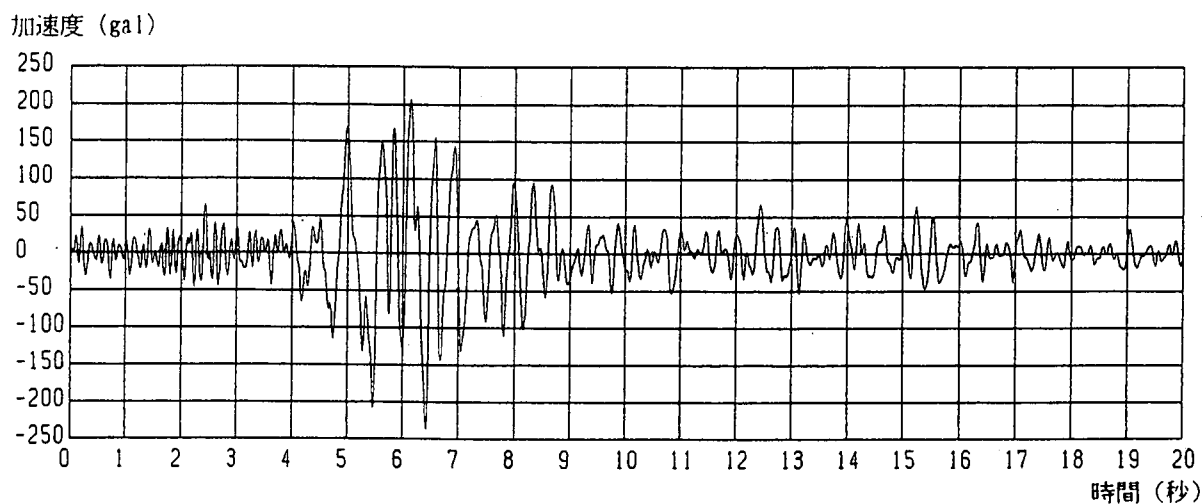


(2) 鉛直加速度

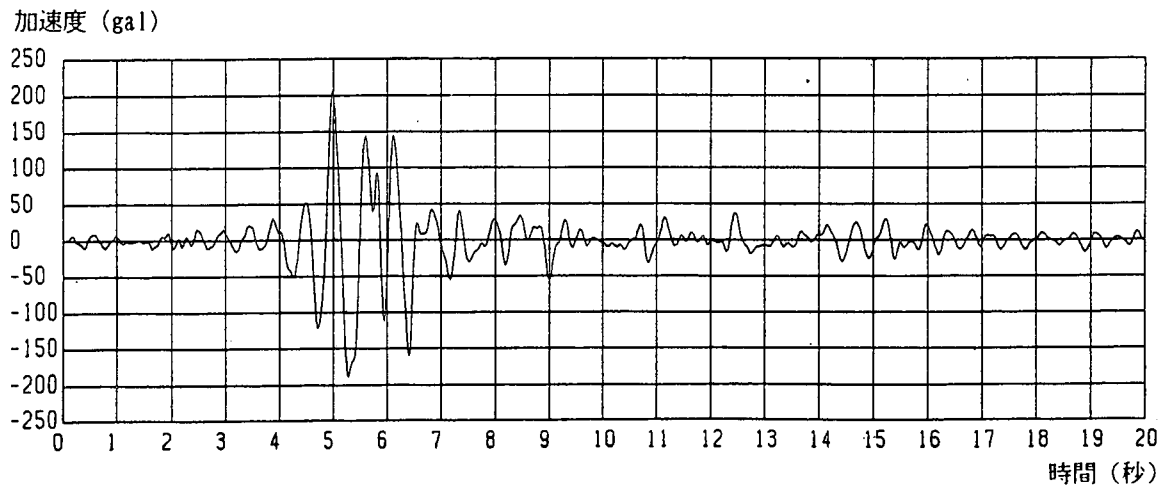
図-6.9 箕面川ダムの実測加速度波形 (底設通廊)

表-6.7 天端の加速度の実測値と解析値の比較

最大加速度	実測値 gal	解析値 gal
上下流水平方向	236	206
鉛直方向	130	123



(1) 加速度の実測値



(2) 加速度の解析値

図-6.10 天端の加速度の実測値と解析値の比較 (上下流方向水平加速度)

6.3 ダムの耐震性の検討

6.3.1 検討に用いた地震波

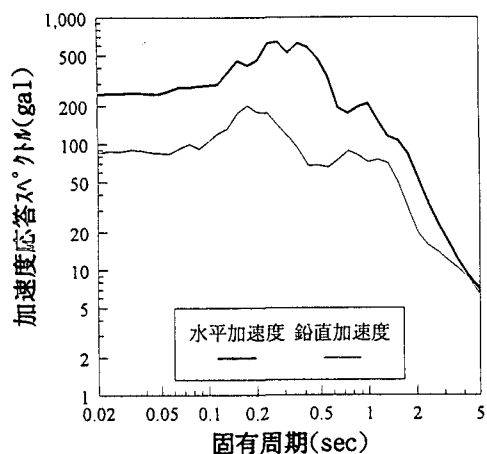
第5章で述べたように、今回の地震においてダムサイトとなりうるような岩盤で生じたと考えられる水平最大加速度の上限値は220gal程度と考えられる。そこで、ここではダムの耐震性を照査する地震動として250galの水平最大加速度を設定した。

照査に用いる地震波は兵庫県南部地震で得られた加速度波形を水平最大加速度が250galになるように調整（引き伸ばし）したものとし、波形の選定にあたっては、加速度の引き伸ばし率ができるだけ小さいこと、色々な周波数特性をもった加速度波形を採用することを基本として一庫ダム、箕面川ダム、権現ダム、黒川ダムで得られた加速度波形を選定した。なお、後述するように、鉛直地震動がダムの構造の安全性に及ぼす影響は小さいことから、原波形の特性を損なわないように鉛直加速度も水平加速度と同じ比率で引き伸ばすものとした。

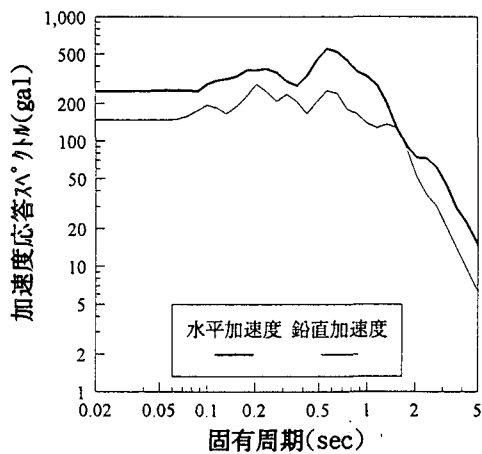
耐震性の照査に用いた4つの地震波の水平最大加速度、鉛直最大加速度、引き伸ばし率を表-6.8に示す。また、引き伸ばした各地震波の加速度応答スペクトル（減衰定数 $h=10\%$ ）を図-6.11に示す。

表-6.8 検討に用いた4波の最大加速度(最大加速度調整後)

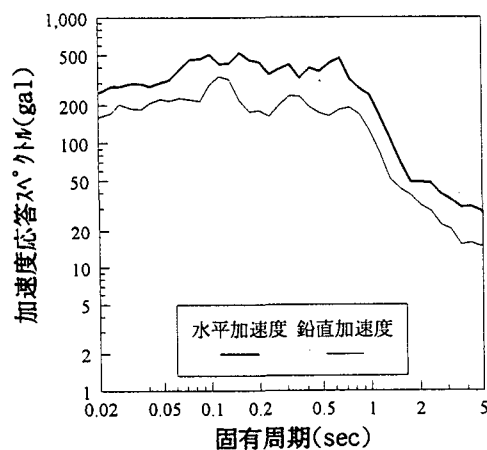
波形名	水平最大加速度	鉛直最大加速度	引き伸ばし率
一庫波	250gal	88gal	1.37
箕面川波		147gal	1.95
権現波		163gal	2.42
黒川波		157gal	2.94



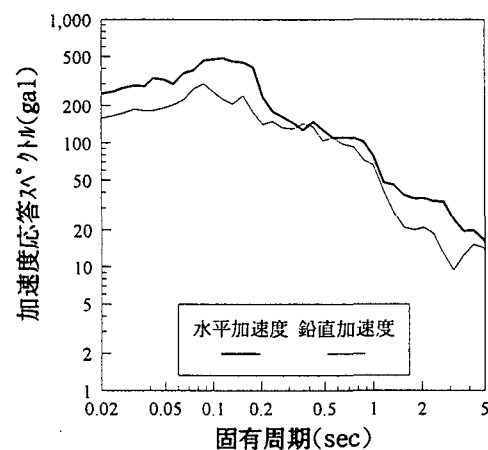
(1) 一庫波



(2) 箕面川波



(3) 権現波



(2) 黒川波

図-6.11 検討に用いた地震波の加速度応答スペクトル(最大加速度調整後, 減衰定数 $h=10\%$)

6.3.2 コンクリートダムの耐震性の照査

(1) 解析モデル

現在広く採用されているコンクリートダムの型式には重力式コンクリートダムとアーチ式コンクリートダムがあるが、ここでは、最も一般的な型式である重力式コンクリートダムについて耐震性を照査した。なお、アーチ式コンクリートダムはその形状がダム毎に大きく変化するため、一般論としてその耐震性を評価することは難しいが、アーチ式コンクリートダムは、他の型式のダムに比べて特に堅固な岩盤上に建設されること、高次の不静定構造物であるため構造全体としての安定性が高いことなどの理由から、十分な耐震性を有していると考えられる。

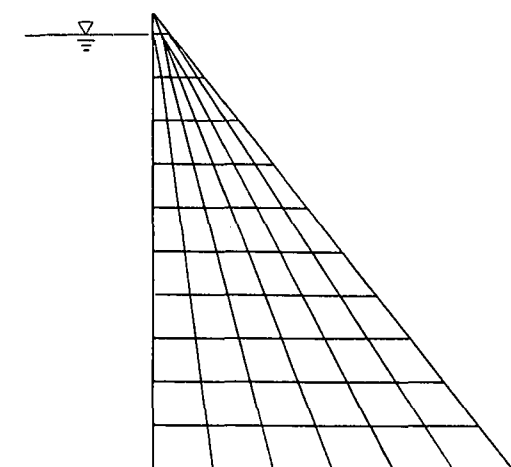
耐震性を照査する重力式コンクリートダムの断面形状は図-6.11に示すようにフィレットがない場合とフィレットがある場合の2ケースとした。また、堤高はいずれのケースも25, 50, 75, 100, 125, 150mの6種類とした。なお、これらの断面は「震度法」による設計（設計震度 $k=0.12$ ）で所定の安全性が確保される形状とした。一般的に、堤高の小さいダムではフィレットがない場合が多く、堤高が100m以上のダムではフィレットがある場合がほとんどである。したがって、フィレットがないダムは比較的規模の小さなダム、フィレットがあるダムは比較的規模の大きなダムを表している。

解析に用いる物性値は、重力式コンクリートダムの設計に用いられる一般的な値として表-6.9に示す値を用いた。なお、減衰定数は、前述の一庫ダムの実測解析結果から10～15%程度と考えられるが、ここでは余裕を見た値として10%を仮定した。また、耐震性を照査する際の貯水位は常時満水位とした。

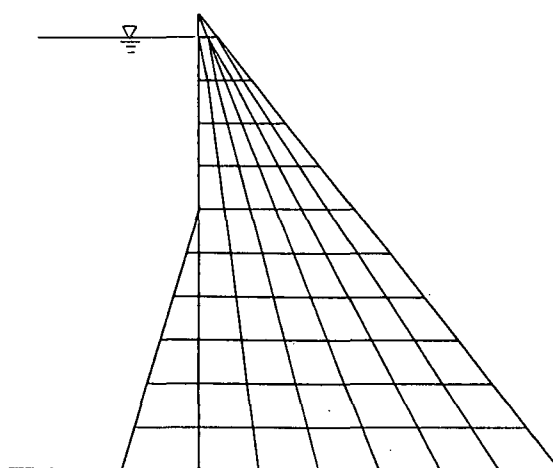
なお、コンクリートダムは近似的に弾性体と評価できることから、動的解析には振動形解析法（モーダルアナリシス）を用い、応力の算出には応答スペクトル法を用いた。

表-6.9 モデルダムの物性値

弾 性 係 数	300,000kgf/cm ²
ポ ア ソ ン 比	0.2
単 位 体 積 重 量	2,300kg/m ³
減 衰 定 数	10%



(1) フィレットがない場合



(2) フィレットがある場合

図-6.12 モデルダムの断面形状

(2) 検討項目

6.1.2で述べたように、「震度法」を用いた重力式コンクリートダムの構造設計において、ダムの構造の安全性を確保するために必要な条件は転倒、滑動、堤体内部に生じる応力の3項目からなる。このうち、転倒に対する安全性の要件は「堤体の上流面に鉛直方向の引張応力が生じないこと」と述べられているように、堤体内部の応力の問題として評価することができる。そこで、動的解析法を用いたダムの耐震性の照査は

(1) 堤体に生じる応力

(2) せん断による滑動

の2項目について実施することとした。

(3) 堤体に生じる応力

地震時に堤体に生じる応力の検討においては、引張応力の大きさが重要となる。図-6.13は、フィレットがないダムとフィレットがあるダムのそれぞれについて、種々の堤高のダムに対して地震時に堤体内に生じる引張応力の最大値を示したものである。なお、全てのケースとも、引張応力の最大値はフィレットのないダムでは堤踵部、フィレットのあるダムではフィレット取付け上端部に生じている。

図によれば、引張応力の最大値は、フィレットがない場合には、堤高50mで概ね10kgf/cm²、堤高100mで概ね30kgf/cm²、堤高150mで概ね40kgf/cm²以下となっており、フィレットがある場合には、堤高100mで概ね20kgf/cm²、堤高150mで概ね25kgf/cm²以下となっている。堤高が100mを超えるダムではフィレットが取り付けられるのが一般的であるから、重力式コンクリートダムの堤体に生じる引張応力の最大値は30kgf/cm²程度と考えられる。なお、発生する引張応力の大きさは地震波によって異なり、一庫波を除くと引張応力の最大値は全て25kgf/cm²より小さくなっている。

一方、一般的なダム用コンクリートは静的な圧縮強度で250kgf/cm²、静的な引張強度で25kgf/cm²程度の値を有しており、動的な荷重下でのコンクリートの強度は静的な荷重下での強度に比べて30~60%程度大きくなることが知られている。したが

って、動的解析で得られた $30\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度の引張応力は、瞬間的に生じる応力であることを考慮すると、十分許容できる値であると判断される。

なお、重力式コンクリートダム of 堤体に生じる圧縮応力の最大値はコンクリートの圧縮強度に比べて極めて小さく、今回の解析においても圧縮応力の大きさは問題とならなかった。

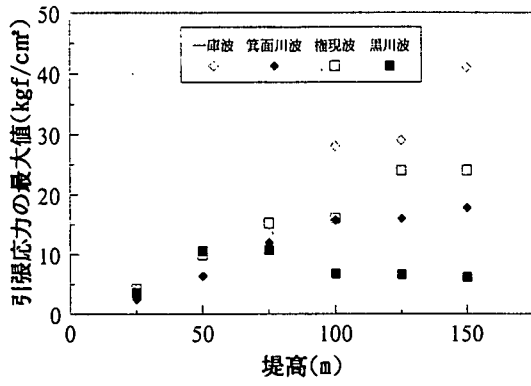
(4) せん断による滑動

図-6.14は、種々の堤高のダムに対して、地震時に堤体底面に作用するせん断力の最大値と堤体底面のせん断摩擦抵抗力の関係を示したものである。なお、せん断摩擦抵抗力を求める際に用いた岩盤のせん断抵抗 (τ_0 , $\tan\phi$) は震度法による設計で所定の安全性が確保されるように設定した。

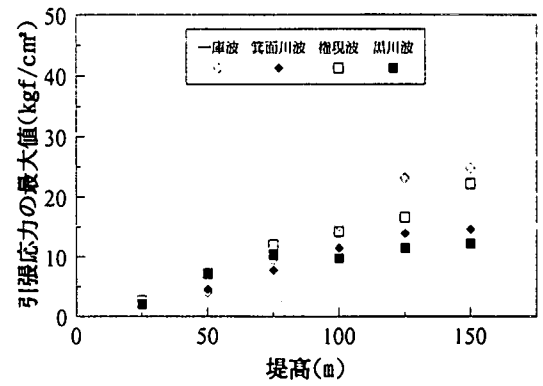
図によれば、いずれの高さのダムにおいても、堤体底面に作用するせん断力の最大値は堤体底面のせん断摩擦抵抗力に比べて十分小さく、せん断力による滑動に対してダムは十分安全であると判断される。

(5) 鉛直地震動の影響

図-6.15は、堤高 150m でフィレットがないダムについて、地震動によって生じる動的な引張応力、せん断力を鉛直地震動を考慮した場合と考慮しない場合について比較検討したものである。図によれば、鉛直地震動の影響は引張応力に対しては11%、せん断力に対しては7%程度と極めて小さいことがわかる。「震度法」を用いたコンクリートダムの耐震設計では、鉛直地震動の影響を等値水平震度という簡便化した形で取り扱っているが、以上の結果からそのような設計法は実用上問題ないものと判断される。

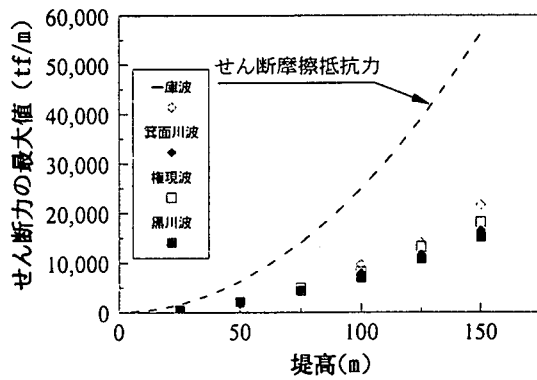


(1) フィレットがない場合

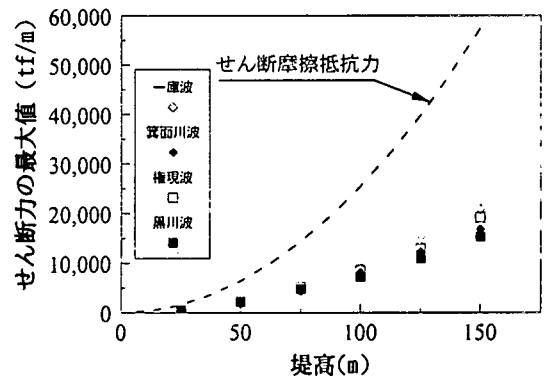


(2) フィレットがある場合

図-6.13 地震時に堤体内に生じる引張応力の最大値 (鉛直地震動の影響を含む)

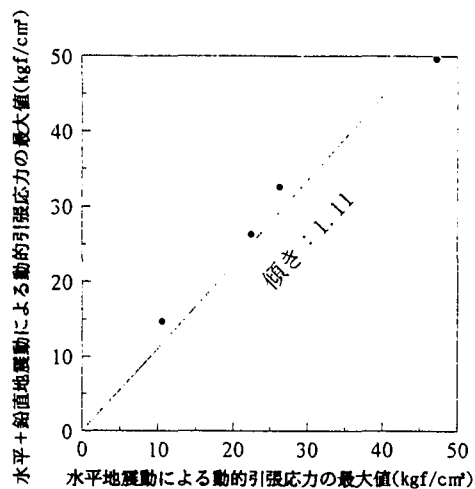


(1) フィレットがない場合

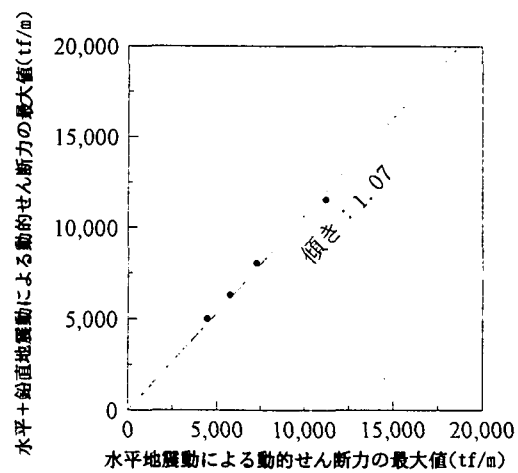


(2) フィレットがある場合

図-6.14 地震時に堤体底面に生じるせん断力の最大値 (鉛直地震動の影響を含む)



(1) 動的引張応力



(2) 動的せん断力

図-6.15 水平地震動のみを考慮した解析と鉛直地震動も考慮した解析の比較

6.3.3 ロックフィルダムの耐震性の照査

(1) 解析モデル

耐震性を照査するロックフィルダムの断面形状は、「震度法」によって設計された七ヶ宿ダム（1991年完成，堤高90m，設計震度 $k=0.15$ ）を参考にして，図-6.16に示すように上流側法勾配を1：2.60，下流側法勾配を1：2.00と定めた。また，堤高は63m，110m，150mの3種類とした。

解析に用いる堤体材料の物性は，七ヶ宿ダムにおいて使用された材料の室内試験値を用いるものとし，表-6.10のように設定した。なお，ロック材，フィルター材のせん断剛性率および履歴減衰定数のひずみ依存性は繰返し三軸圧縮試験結果から図-6.17のように設定した。なお，動的解析における減衰定数は，前述の箕面川ダムの実測解析では「材料の履歴減衰定数+15%程度」となったこと，また，既設ダムの実測解析事例なども考慮して「材料の履歴減衰定数+15%」を仮定した。また，耐震性を照査する際の貯水位は常時満水位とした。

なお，動的解析には等価線形法による時刻歴解析を用いた。

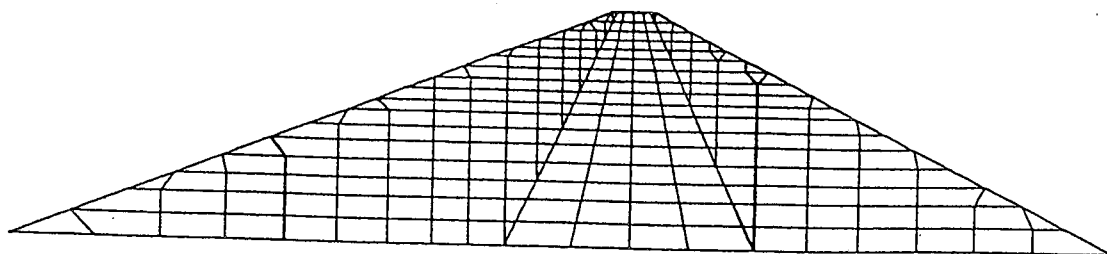
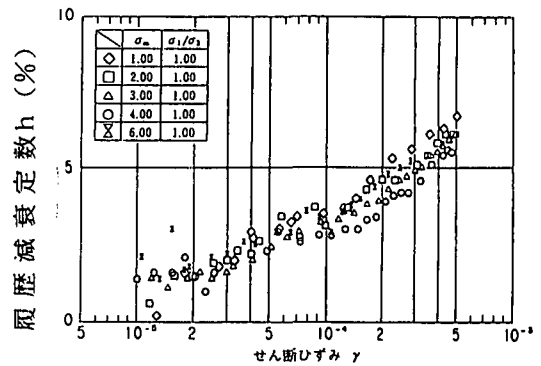
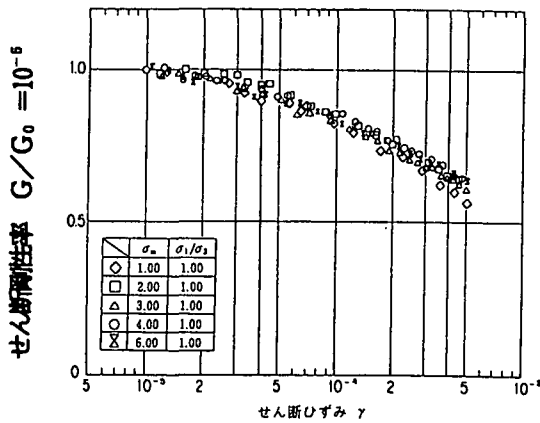


図-6.16 モデルダムの断面形状

表-6.10 モデルダムの物性値および強度定数

堤体材料	湿潤密度 t/m ³	飽和密度 t/m ³	強度定数 (tf/m ² 単位)	
			A	b
ロ ッ ク	1.88	2.08	1.778	0.804
フィルター	2.13	2.24	1.0	0.908
コ ア	2.22	2.23	C=10	$\phi=35^\circ$

注) 材料のせん断強さ $\tau_f = A \sigma_n^b$ または $\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi$
 ここに、 σ_n : すべり面に作用する垂直応力



(1) せん断剛性率

(2) 履歴減衰定数

注) ここに、 σ_m : 平均主応力 (kgf/cm²)
 σ_1/σ_3 : 主応力比

図-6.17 ロック材のせん断剛性率と履歴減衰定数のひずみ依存性

(2) 土塊平均加速度

地震時におけるロックフィルダムの安全性を照査するため、図-6.18に示すように堤体の天端中央を通るすべり円弧を想定し、堤体の各点における応答加速度の時刻歴から、すべり円弧内の土塊平均加速度の最大値を求めた。なお、一般に下流側法面は上流側法面に比べて安全率の余裕が大きいので、土塊平均加速度の算出は上流側法面に着目して行った。

3種類の堤高のダムにおいて、深度別に見た土塊平均加速度の最大値を図-6.19に示す。ここで、無次元円弧高さ (y/H) とは、ダム天端から想定したすべり円弧の最下端までの高さ (y) を堤高 (H) で除した値である。なお、図中の土塊平均加速度は、すべりに対する安全率が小さくなる深い円弧 (図-6.18の円弧(1)) についてのみ示してある。図によれば、今回の解析に用いた4ダムの地震波のうち、堤高63mの場合の一部を除いて箕面川ダムの波形が最も大きな平均加速度を与えている。

(3) 堤体のすべりに対する安全性

円形すべり面法による安定計算において、すべりを発生させるために必要な限界 (降状) 加速度の大きさを図-6.19に重ねて示す。今回の動的解析に用いた3種類の堤高のダムおよび4種類の入力地震動に対して、土塊平均加速度の最大値は全て限界 (降状) 加速度よりも小さな値となっており、すべりに対する安全性が確保されていると判断される。

なお、以上の検討において、土塊平均加速度は時刻歴中の最大値を用いており、このような加速度が堤体に作用するのはピーク時の瞬間のみで持続的なものではないため、実際のダムの安全性は計算結果よりも高いものと考えられる。

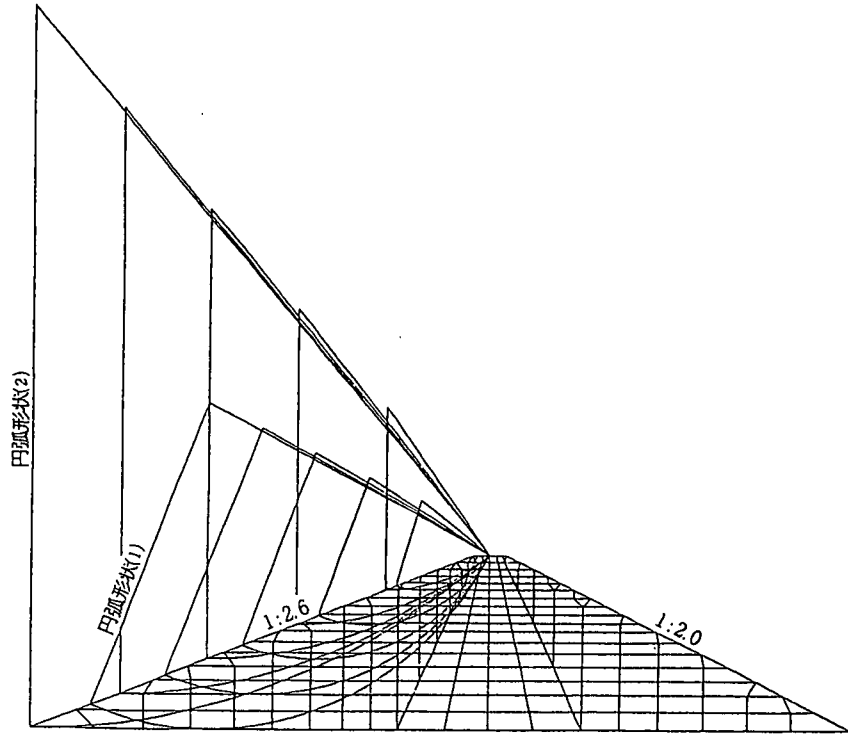
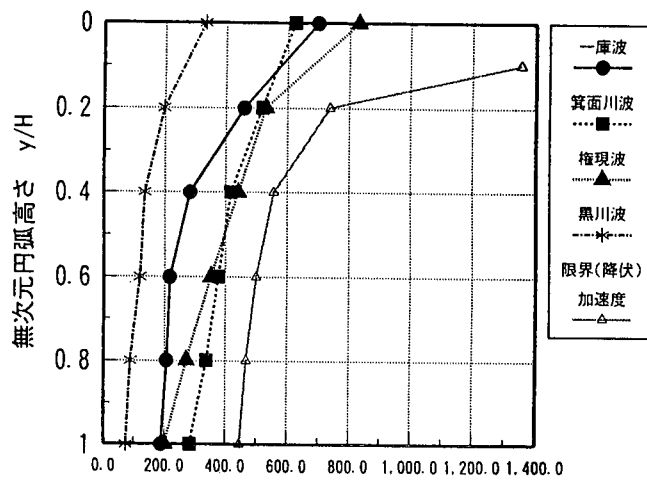
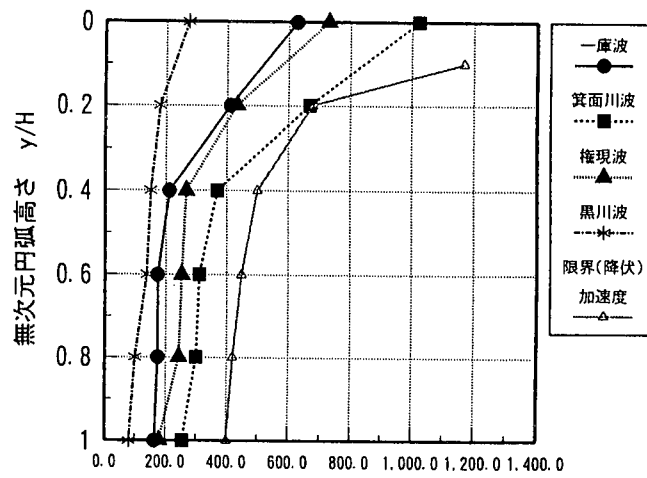


図-6.18 すべり円弧の形状



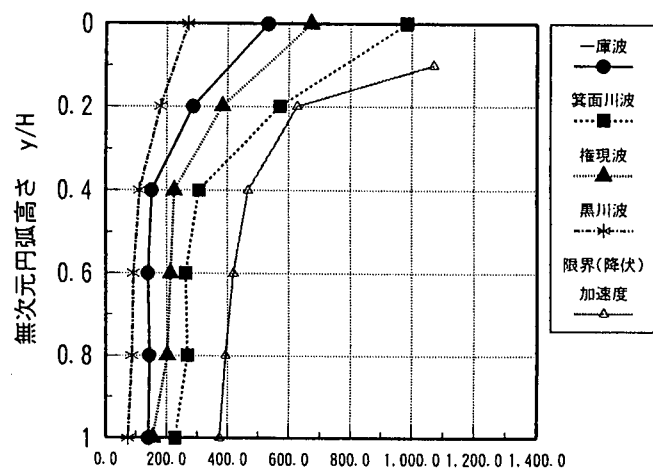
土塊平均加速度の最大値 (gal)

(1) 堤高 63 m の場合



土塊平均加速度の最大値 (gal)

(2) 堤高 110 m の場合



土塊平均加速度の最大値 (gal)

(3) 堤高 150 m の場合

図-6.19 地震時の土塊平均加速度の最大値と限界(降伏)加速度の関係 (鉛直地震動の影響を含む)