

河川総合開発事業調査費

サイトの地震動特性に基づく設計地震動の設定手法に関する調査

危機管理技術研究センター地震防災研究室

室長 日下部 毅明

主任研究官 片岡 正次郎

研究官 松本 俊輔

(調査期間 平成12～16)

1 調査の背景および目的

河川技術五計で提唱されている性能規定型設計技術を促進するためには、従来の震度法だけでなく、動的解析を活用したダムの健全性に対する照査を可能とし、耐震設計法の自由度を向上させる必要がある。その場合、入力としては設計震度ではなく、地震動を与えることになるが、合理的な設計地震動を設定するためには、サイト周辺における地震の発生特性を含めた、各サイトにおける地震動特性を反映する必要がある。本調査は、このようなサイトの地震動特性を反映した設計地震動の設定手法を開発し、動的解析による耐震性照査に基づくダムの耐震設計の高度化に資することを目的とするものである。

15年度は、兵庫県南部地震(1995)や十勝沖地震(2003)の際にダムサイト岩盤で観測された強震記録を基に、強震記録の加速度応答スペクトルと基準となる加速度応答スペクトルが一致するように振幅調整し、位相特性の異なる複数の入力地震動を作成した。また、作成した入力地震動によりロックフィルダムの動的解析を行い入力地震動の位相特性の違いがダム構造物の地震時挙動に与える影響について検討した。

2 調査方法

2.1 入力地震動の設定

動的応答解析に用いる入力地震動の作成に

あたっては、以下のように振幅特性と位相特性の設定を行った。

入力地震動の振幅特性として、図-1に示すとおり周期0.1秒から0.7秒までの最大加速度応答値が1000galとなる加速度応答スペクトルを設定した。これは、距離減衰式より推定したM8の地震が発生した場合の震源距離10kmのダムサイト岩盤における地震動の加速度応答スペクトル値を参考としたものである。

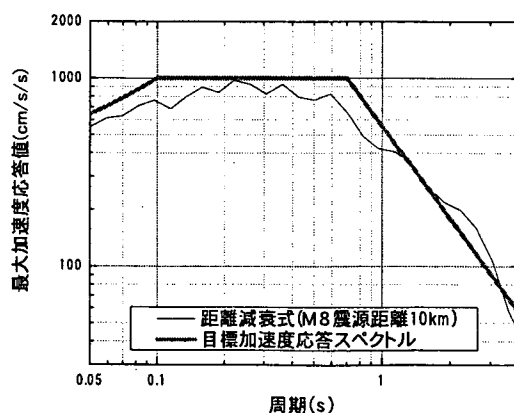
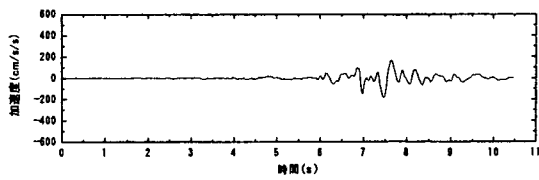
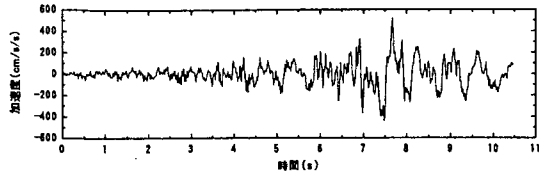


図-1 目標加速度応答スペクトル

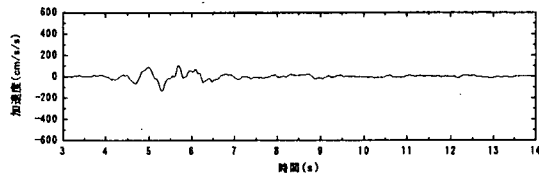
位相特性には、既往の代表的な地震のうち兵庫県南部地震(1995)と十勝沖地震(2003)の観測記録を用いた。ここでは、1995年兵庫県南部地震で観測された一庫ダムと箕面川ダム、権現ダムの観測記録を図-2a)c)e)に示す。これらの観測記録を基に、加速度応答スペクトルが目標値となるように振幅調整し、図-2b)d)f)に示す入力地震動を作成した。



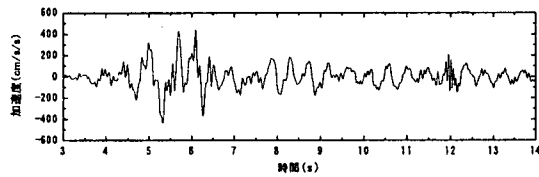
a) 一庫ダム観測記録



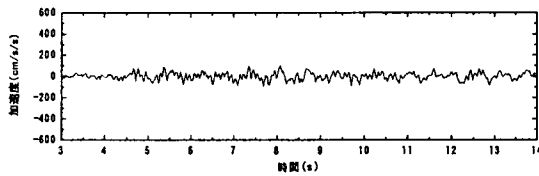
b) 一庫ダム振幅調整波



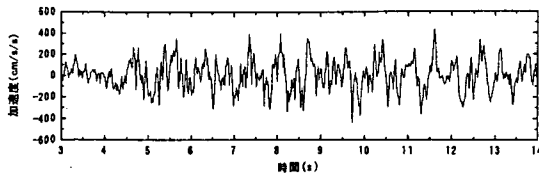
c) 箕面川ダム観測記録



d) 箕面川ダム振幅調整波



e) 権現ダム観測記録



f) 権現ダム振幅調整波

図-2 入力地震動作成例

2.2 フィルダムの動的解析方法

2.2.1 解析モデル

解析に用いるダムモデルは、既存のダムの形状・寸法を参考に図-3に示すモデルとした。

モデルは堤高 90m と 120m の 2 種類とし、ダム形状や要素分割形状は両モデルで相似形とした。なお、最大要素寸法を 2.6m に設定した結果、解析で考慮できる周波数はおよそ 15Hz 以下である。

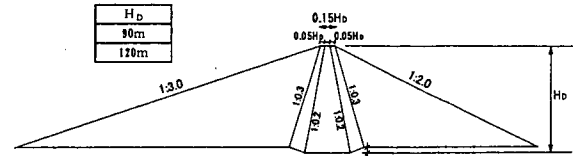


図-3 解析対象モデル(ロックフィルダム)

2.2.2 物性値

単位体積重量、強度特性、弾性波速度、動的ポアソン比、ひずみ依存特性等については、文献類 1)2)より平均的な物性値を設定した。

ただし、せん断弾性波速度(以下 V_s)、剛性残存率(以下 G/G_0)および減衰率(以下 h)については、物性値のばらつきの影響を検討するため平均と平均 $\pm \sigma$ とした場合について検討を行った。この場合の解析対象モデルは堤高 90m とし、入力地震動は、箕面川ダム観測記録を図-1に示す目標加速度応答スペクトルの 0.7 倍に振幅調整した箕面川ダム観測記録を用いた。

2.2.3 動的解析

上記の解析モデルと物性値を用い動的解析により要素ごとの加速度時刻歴を求める。入力地震動は2.1で作成した地震動とし、動的解析手法は、周波数領域における等価線形法による複素応答解析とした。

2.2.4 滑動変位置

想定滑り線は、上流側、下流側それぞれに 20 本を設定した。一例として上流側の 5 本の想定滑り線を図-4に示す。設定した各想定滑り線に対して、2.2.3で求めた要素ごとの加速度時刻歴をもとにニューマーク法により滑動量の算出を行った。

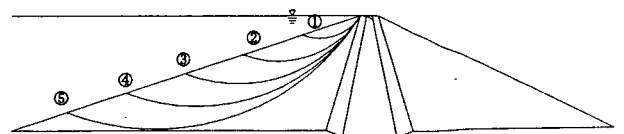
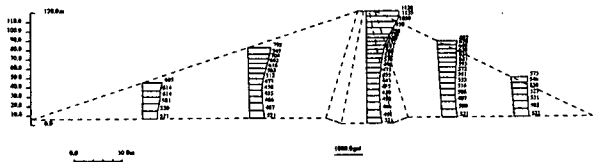


図-4 想定滑り線 (上流側)

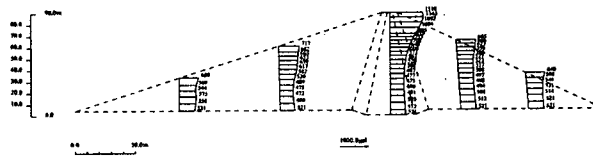
3 調査結果

3.1 最大加速度深度分布

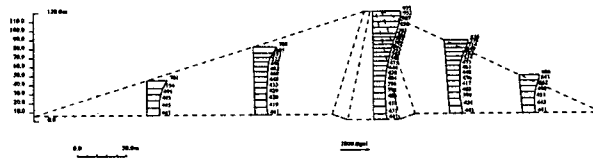
2.2.3の動的解析より算出される各要素に作用する最大加速度分布を図-5に示す。図より、一庫ダム波における天端の最大加速度が他の入力地震動と比較して大きい事、堤高が90mのダムに箕面川ダム波を入力した図-5d)のケースにおいて、比較的天端が揺れにくく、他のケースと異なった特徴的な加速度分布がみられる事がわかる。



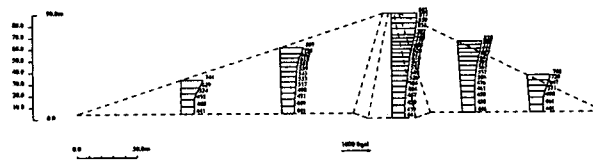
a) 堤高 120m 一庫ダム振幅調整波



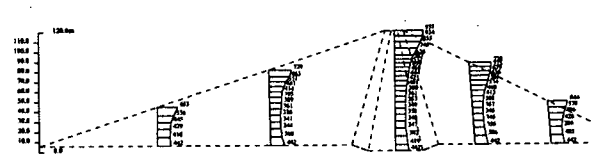
b) 堤高 90m 一庫ダム振幅調整波



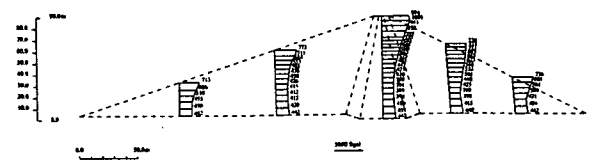
c) 堤高 120m 箕面川ダム振幅調整波



d) 堤高 90m 箕面川ダム振幅調整波



e) 堤高 120m 権現ダム振幅調整波



f) 堤高 90m 権現ダム振幅調整波

図-5 最大加速度深度分布図

3.2 滑動変位置

2.2.4より算出される滑動変位置を表-1に示す。滑動変位置は、全てのケースで図-4に示す上流側の想定滑り線①で最大となる結果となった。

表-1 上流側の想定滑り線① 滑動変位置(cm)

	ダム高 120m	ダム高 90m
一庫ダム振幅調整波	18.5	22.6
箕面川ダム振幅調整波	12.2	5.1
権現ダム振幅調整波	13.9	14.0

一庫ダム波についてはダム高 90m の場合の滑動変位置が大きく、全ケースでの最大値となったが、箕面川ダム波と権現ダム波についてはダム高 120m の滑動変位置がダム高 90m を上回った。

また、図-5において、堤高が 90m のダムに箕面川ダム波を入力したときのみ、他のケースと異なり天端が揺れにくい傾向があったが、滑動変位置においても他のケースと比較して特に変位置が小さい結果となった。これは、今回の解析条件において、最大の滑り量が発生する滑り線が比較的天端に近い場合、天端の応答が滑動変位置の大小に大きく影響しているためと考えられる。

3.3 物性値のばらつき

V_s 、 G/G_0 および h について、物性値を平均と平均 $\pm\sigma$ とした場合の滑動変位置の検討結果を表-2に示す。

表-2 物性値のばらつきの影響

想定滑り線① 上流側滑動変位置(cm)		
せん断弾性 波速度 V_s	平均+ σ	2.8
	平均	3.0
	平均- σ	2.0
剛性残存率 G/G_0	平均+ σ	2.3
	平均	3.0
	平均- σ	0.0
減衰率 h	平均+ σ	2.3
	平均	3.0
	平均- σ	4.0

V_s と G/G_0 のばらつきの影響については、物性値が平均の場合と比較して、平均± σ の場合の滑動変位量が小さくなる結果となった。また、 h のばらつきの影響については、値が大きいくほど滑動変位量が小さくなる結果となった。

上記の結果のうち特に V_s については、一般的に値が大きくなるほど材料が強くなると考えられる。 V_s が平均- σ の場合の滑動変位量が平均よりも小さくなる事については材料強度では上手く説明出来ない。したがって、以下のようにダム的一次固有周期と入力地震動の応答スペクトルの関係について検討した。

3.4 一次固有周期

モデルの初期剛性における一次固有周期と、各地震動が作用し剛性が低下した場合の一次固有周期を表-3に示す。

表-3 一次固有周期の違い(秒)

		ダム高 120m	ダム高 90m
初期剛性		0.62	0.50
一庫ダム 振幅調整波		0.73	0.60
箕面川ダム 振幅調整波		0.76	0.61
権現ダム 振幅調整波		0.76	0.62
せん断弾 性波速度 V_s	平均+ σ	-	0.60
	平均	-	0.72
	平均- σ	-	0.87
剛性残存 率 G/G_0	平均+ σ	-	0.68
	平均	-	0.72
	平均- σ	-	0.95
減衰率 h	平均+ σ	-	0.72
	平均	-	0.72
	平均- σ	-	0.73

表より V_s と G/G_0 のそれぞれが平均- σ となる場合に一次固有周期が 0.9 秒程度となり、他のケースと比較して特に固有周期が長くなる事がわかる。

また、図-6により、入力地震動の加速度応答スペクトルとダムの一次固有周期とを比較すると、0.7 秒より長い周期において入力地震動の加速度応答スペクトル値が小さくなり、0.9 秒付近においては 0.7 秒付近と比較して 30%程度以上小さくなる事がわかる。したがって V_s と G/G_0 のそれぞれが平均- σ と

なる場合に滑動変位量が小さくなる理由の一つとしてダムの長周期化による地震力の低減の影響が考えられる。

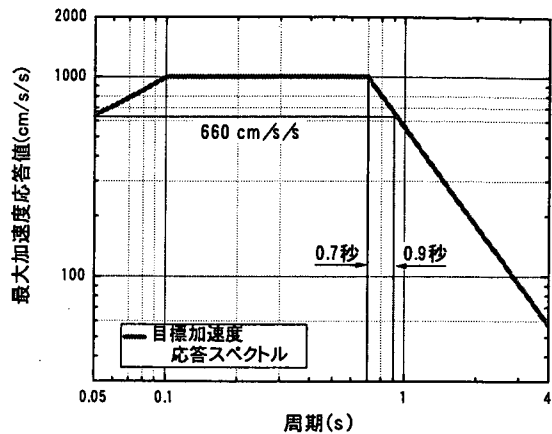


図-6 一次固有周期の長周期化の影響

4 今後の課題

本検討は、ロックフィルダムを対象とした非線形動的解析を行い、地震動の位相特性がダム構造物の動的応答に与える影響について検討した。代表的な観測地震動を用いて検討した結果、最大加速度分布や滑動変位量に、位相特性並びにダム堤体の一次固有周期の変化による地震力の低減の影響が見られた。

3.1や3.2によれば、ある1つの観測記録の位相を用いた結果のみから耐震性を議論することは困難と考えられる。したがって、現時点では詳細な耐震性照査の際には複数の観測記録の位相特性を用いて検討する必要があると考えられる。

また本検討では、M8 の地震から震源距離 10km の位置にあるダムサイトを想定し、非常に強い地震動による検討を行ったが、最も被害が大きいケースにおいても滑動変位量が 22.6cm であった。越流を生じさせないという観点からダムの余裕高(最低でも 2~3 m)を滑動変位量の許容値とする場合、本検討の結果からはダムの耐震安全性は高いと言える。

【参考文献】

- 1) 岡本敏郎ら、ロックフィルダムの地震時安定性評価に関する設計・照査の現状と今後の展望、電力中央研究所、2002.3
- 2) 最新フィルダム工学、(社)電力土木技術協会、1981.3