

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。

16年度は、サイトの地震動特性を反映した設計地震動の設定手法のうち、位相特性の設定手法を高度化するとともに、設計地震動の設定手法の妥当性を検証した。

2 調査方法

2.1 設計地震動の設定手法

設計地震動の設定には振幅特性と位相特性が必要となる。振幅特性については、過年度に作成したダムサイト岩盤における距離減衰式を用いて加速度応答スペクトルの推定値を算出し、これを参考に目標加速度応答スペクトルを設定した。位相特性については、観測記録の位相特性をそのまま使い、振幅のみを

調整して設計地震動を作成する手法が広く用いられているが、本研究では群遅延時間を用いて位相特性をモデル化し模擬地震動を作成する手法により、位相特性の設定手法を高度化した。

2.2の動的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。

2.1.1 振幅特性

ダムサイト岩盤における地震動の振幅特性を評価するため、ダムサイト岩盤における最大加速度、及び加速度応答スペクトルの距離減衰式を作成した。このうち、加速度応答スペクトル（水平2成分合成、減衰定数5%）の距離減衰式を用いて、M8.0、断層面最短距離を10kmとして推定した加速度応答スペクトルを図-1に示す。これを参考に、同図に示すとおり周期0.1秒から0.7秒までの最大加

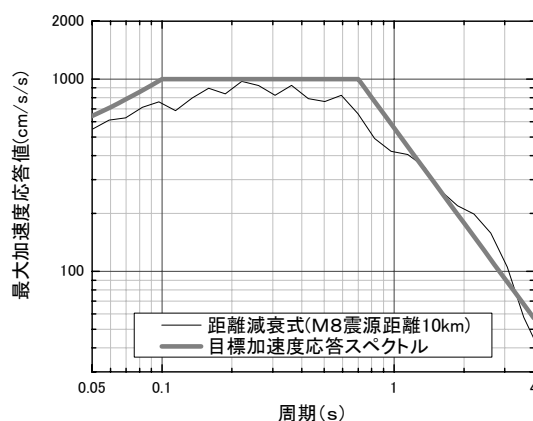


図-1 目標加速度応答スペクトル

速度応答値が 1000gal となる目標加速度応答スペクトルを設定した。

2. 1. 2 位相特性

ダムサイト岩盤における地震動の位相特性の評価には、群遅延時間を用いた。群遅延時間の平均と標準偏差は、それぞれ波形の中心位置と時間的な広がりを表しており、地震波形の非正常性を表現するために適した指標である。

本検討では、周波数ごとの位相特性を個別に評価するために、ウェーブレット変換を用いて各周波数帯域の地震動に分離したうえで、群遅延時間による位相特性の評価を行った。観測記録のサンプリング周波数を 100Hz、データ数を 65536 個に統一してウェーブレット変換を行った結果、サポート区間 J=8、J=10、J=12 の対応周波数はそれぞれ 7.68~1.92 秒、1.92~0.48 秒、0.48~0.12 秒である。

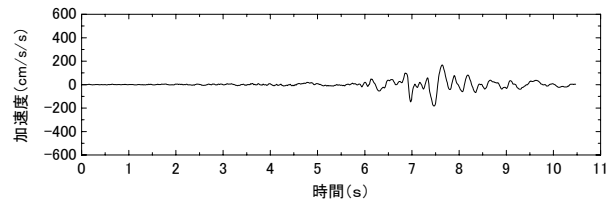
位相のモデル化には、J=8 から J=12 までの各サポート区間の地震動の群遅延時間の平均と標準偏差を用いた。また、簡単のため J=9 における群遅延時間の平均と標準偏差については、J=8 と J=10 の平均値とした。同様に J=11 についても J=10 と J=12 の平均値を用いた。

2. 1. 3 ダムの動的解析に用いる地震動

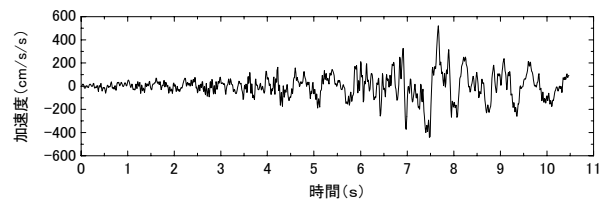
減衰定数 5% の加速度応答スペクトルが 2. 1. 1 で設定した目標加速度応答スペクトルとなるように観測記録を振幅調整して入力地震動を作成した。観測地震動と作成した振幅調整波の例を図-2の a) b) に示す。

2. 1. 1 の振幅特性と、2. 1. 2 の手法で特定の観測記録の群遅延時間を算出した結果を用いて模擬地震動を作成した。また、観測記録 9 波の群遅延時間の平均と標準偏差を算出し、これらをモデル化することで、観測記録の平均的な位相特性を抽出した地震動を作成した。

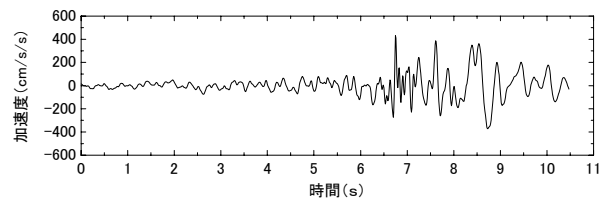
ダムの動的解析には、これら①観測記録の振幅調整波、②特定の観測記録の群遅延時間を用いた模擬地震動、③多数の観測記録の平均的な群遅延時間の特性に基づく模擬地震動、の 3 種類の地震動を用いた。



a) 一庫ダム観測記録



b) 一庫ダム振幅調整波



c) 観測記録 a) の群遅延時間を用いた模擬地震動

図-2 入力地震動の作成例

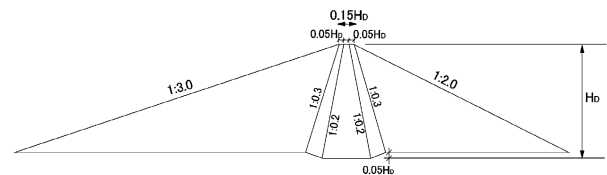


図-3 解析モデル

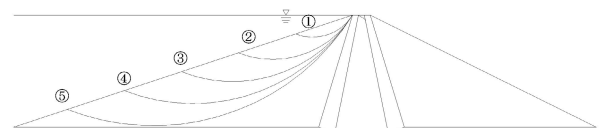


図-4 想定すべり線（上流側）

2. 2 ダムの動的解析による妥当性の検証

観測記録の振幅調整波と、同じ観測記録の群遅延時間に基づく模擬地震動を用いてダム構造物の動的解析を行い、これらの結果を比較することにより、群遅延時間をモデル化して位相特性を設定した設計地震動の妥当性を検証した。

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。堤高は 120m とし、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。

2. 2. 2 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た。入力地震動は2. 1. 3で作成したものとし、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. 3 滑動変位量

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. 2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変位量の算出を行った。

3 調査結果

3. 1 設計地震動の設定手法

3. 1. 1 観測記録の群遅延時間を用いた模擬地震動

観測記録99波に対して、それぞれ群遅延時間の平均と標準偏差を算出した。算出した群遅延時間と、2. 1. 1の振幅特性より模擬地震動を作成した。一例を図-2のc)に示す。図-2のa)とc)を比較すると、主要動の開始時刻と継続時間がほぼ同程度であり、群遅延時間の平均と標準偏差により、観測記録の位相特性を適切に再現していることがわかる。

3. 1. 2 群遅延時間をモデル化して作成した模擬地震動

観測記録99波に対して、サポート区間J=10の群遅延時間の平均と標準偏差を算出し、図-5の通り関係を整理した。図より群遅延時間の平均と標準偏差には相関があり、群遅延時間の平均を決定すれば、標準偏差が推定できることがわかる。同様の整理をサポート区間J=8とJ=12に対して行った。また、サポート区間ごとの群遅延時間の平均の関係を図-6のとおり整理した。図より、各サポート区間の群遅延時間の平均値には正の相関があり、J=10の群遅延時間の平均を決定すれば、J=8とJ=12の群遅延時間の平均が推定できることがわかる。以上により、サポート区間J=10の群遅延時間の平均を決定すれば、観

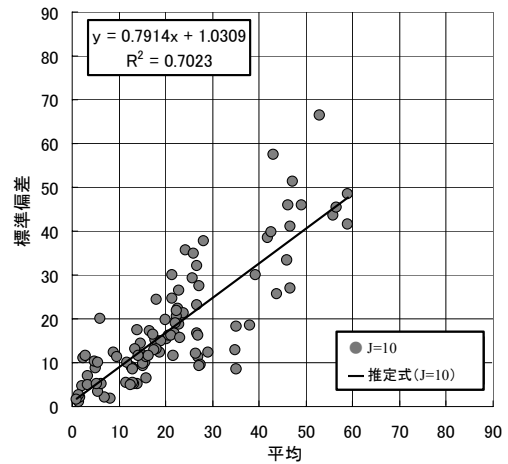


図-5 群遅延時間の平均と標準偏差の関係

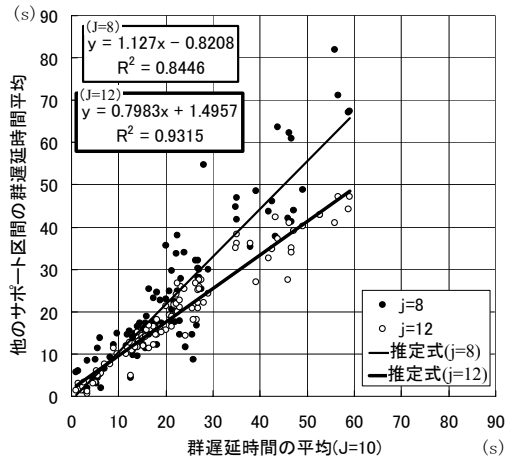
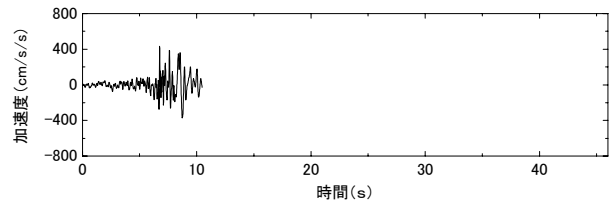
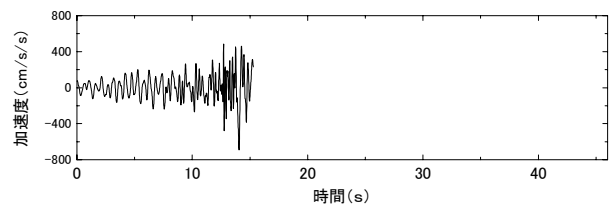


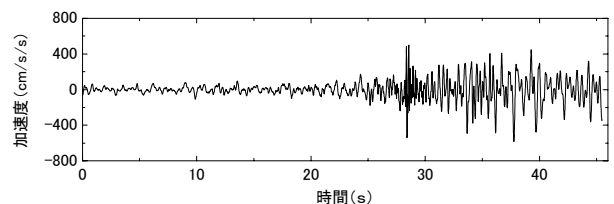
図-6 各サポート区間の関係



a) 群遅延時間(J=10)の平均値が3秒の模擬波



b) 群遅延時間(J=10)の平均値が10秒の模擬波



c) 群遅延時間(J=10)の平均値が30秒の模擬波

図-7 群遅延時間をモデル化して作成した地震動

測記録の平均的な特性を反映した模擬地震動を作成することが出来る。模擬地震動の作成例を図-7に示す。

3.2 動的解析による滑動変位量

振幅調整波と、観測記録の群遅延時間を用いた模擬地震動による滑動変位量の算出結果を図-8に示す。図の横軸は観測地震動の振幅調整波による滑動変位量であり、縦軸は模擬地震動による滑動変位量である。模擬地震動による滑動変位量がやや小さくなる傾向があるものの両者の滑動変位量はほぼ同程度であり、観測記録の位相特性をサポート区間J=8、10、12の群遅延時間の平均と標準偏差でモデル化することで、構造物に与える影響を適切に反映した模擬地震動を作成できることがわかる。

図-9に群遅延時間をモデル化して作成した模擬地震動による滑動変位量の算出結果を示す。図より、サポート区間J=10の群遅延時間の平均を大きくして作成した模擬地震動は、滑動変位量が大きくなる傾向があることがわかる。これは、群遅延時間の平均が大きくなるに従って、群遅延時間の標準偏差が大きくなるため、波の繰り返し回数が増えることが主な原因と考えられる。

なお滑動変位量は、全てのケースで図-4に示す上流側の想定滑り線①で最大となった。

4 まとめ

群遅延時間を用いて位相特性をモデル化した模擬地震動を作成することにより、設計地震動を作成する際の位相特性の設定手法を高度化した。また、手法を用いて作成した模擬地震動とモデルダムの滑動変位量の関係を示した。

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、観測波を基に作成した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26cm程度であった。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2~3m)を滑動変位量の許容値とする場合、

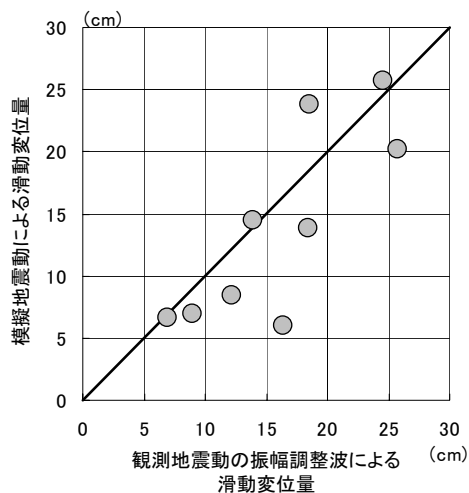


図-8 滑動変位量の一致

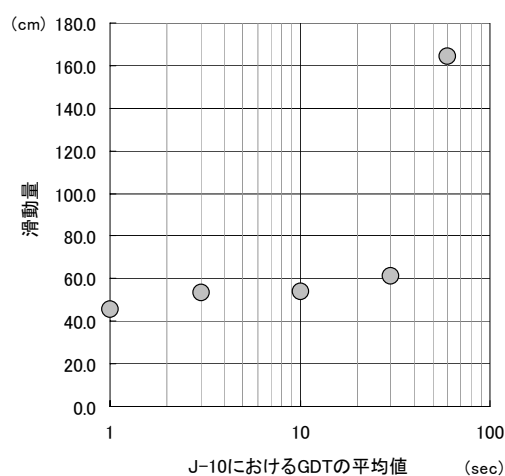


図-9 群遅延時間の平均値と滑動変位量の関係

本調査の結果からはダムの耐震安全性は高いと言える。

5 成果の活用

本調査で用いた位相特性のモデル化による設計地震動の作成手法は、ダム構造物の地震時挙動に与える影響に対して、基となる地震動の位相特性を適切に評価しており、振幅調整波に代わる手法として活用が期待される。

【参考文献】

- 1) 岡本他：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