

ダムの地震時挙動を理解するための基礎的検討

ーダム軸方向モデルへの面外波入射ー

弘前大学 正会員 片岡俊一

1. はじめに

ダムは長大であり不整形であることから、その地震時挙動は複雑になることは間違いない。さらに、最近ダムで観測された大振幅の地震動記録¹⁾はダム近傍で起きた地震によるものも多く、ダムへ入力する地震動の方向が鉛直方向からではないことが想像される。このような複雑な状況をそのままに計算する手法も提案されているが、問題を単純化し、現象を考察することも重要と考えた。そこで、ダム軸方向をモデル化し、二次元場で面外波が入射するモデルでの検討を試みた。

通常ダムの耐震解析を二次元で行う場合には、上下流方向の断面を対象とし、面内波に対する応答を計算するが、この場合は、P波とSV波がカップリングし、二次元断面であっても複雑な波動場となる。さらに、ダム上下流の斜面で地震動が反射する際に臨界角を超える可能性もあり、ダム堤体を伝播する波動がより複雑になる。一方、面外波が下方から入射する場合には、斜め入射であっても、臨界角を迎えることは無く、波動の性質が変化することはない。この点で今回のモデルは極めて単純である。

2. 解析概要

堤高 90m のロックフィルダムを想定し、谷地形を図1の太実線に示すように左右非対称の三角形とモデル化した。左側の境界面の傾きは10度、右側は20度としているので、堤頂長は786mとなる。堤体の物性値は堤体内で一定とし、ロックフィルダムの実測値を参考にS波速度 500 m/s、密度 2.0 t/m³とした。岩盤の物性値も実測値を参考に、S波速度 2000 m/s、密度 2.2 t/m³とした。この三角形谷モデルと比較するために、破線で示す台形モデルと一点鎖線で示す平行成層モデルについても同じ物性値で応答計算を行った。このような計算は、結局、過去に多く計算されている不整形地盤モデルの計算と同じことになる。

計算方法は、簡便に斜め入射を扱える擬似スペクトル法を採用した²⁾。

グリッド間隔は水平方向、鉛直方向ともに2mとし、グリッド数は水平

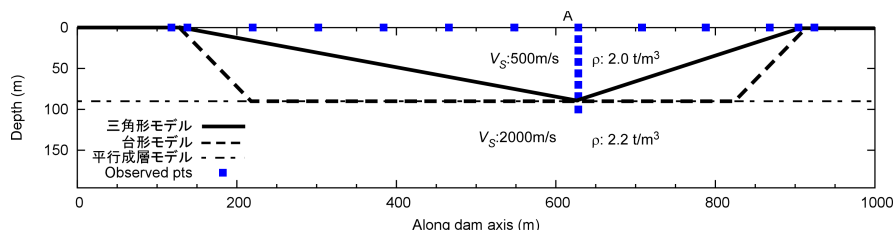


図1 計算モデルと範囲

方向 512、鉛直方向 128 としている。計算時間ステップは 1.0×10^{-4} s とし、出力は 0.005 秒毎に行った。

3. 鉛直下方からの入射による3モデルの応答の違い

3つのモデルに卓越周期 0.2 秒のリッカーウェーブレットを入射した場合の、図1に示すA地点における応答加速度波形を比較したものが図2である。台形モデルは最初の1.5秒までは平行成層モデルとほぼ同じ結果となっている。平行成層モデルの結果に(#)マークをつけた位相は入射波が表層で反射して下降し、さらに基盤との境界で反射して上昇してきた位相である。その前後から二つのモデルの様相が異なり、台形モデル継続時間が延びている。これは、水平方向に伝播してきた波（盆地生成波）の影響である。

一方で、三角形モデルの場合、初動部分から振幅が他に比べて大きい。この増幅は、図3に示すように鉛直下方から入射した波動が境界で谷中心方向に曲がることによって生じているのだと思われる。また、平行成層モデルの(#)位相に対応すると思われる位相に(#)マークを付けたが、その到来時刻は平行成層モデルよりもやや早い。底面が三角形になっているため、平行成層よりも浅い位置で反射したと考えれば、これも三角形谷の影響と考えられる。さらに、台形モデルよりも振幅が大きい時間が長いことも分かる。台形モデルで

は、盆地生成波が生成されるのは、盆地端部であるが、三角形モデルでは様々な地点で生成されているため継続時間が伸びたのだと考えている。

3. 三角形モデルに斜め入射した場合の応答の違い

三角形モデルに対して、斜め下方から入射する場合を検討した。具体的には、鉛直下方から時計回りに10度、20度回転させた方向から前節と同じリッカー波を入射した。結果を図4に示す。なお、入射角度はマイナスとして表している。

図から斜め入射になると振幅が小さくなること分かる。入射角が -20° の場合、最初の負のピークは鉛直入射のその73%程度となり、平行成層モデルの対応する位相よりも小さい。さらに、図2で(＃)とした位相で比べると、入射角 -20° の場合の振幅は鉛直入射の場合の61%になっている。

これは、先に記した入射波の境界における屈折によって定性的に説明できよう。鉛直下方から地震動が入射した場合は、前述のように波線は内側を向く。しかしながら、斜め入射になるとダム内の地震動の波線は鉛直上方あるいは外側に向くことが考えられる。このために、斜め入射の応答が小さくなったのであろう。

平面波入射を考えた場合、ダム堤体内での波線の向きは、入射角、境界斜面の傾きおよび支持岩盤と堤体のS波速度の比で表される。例えば、傾斜10度の場合で速度比が4の場合は入射角が 35° の場合、堤体内の波線は鉛直上方を向く。斜面の傾斜書くおよび速度比の幅はそれほど大きくないと思われるので、試算した結果、堤体内の波線が鉛直上方を向くのは限られた場合であり、定性的には、緩傾斜で速度比が小さい場合である。

5. まとめ

ダムの地震時挙動を評価するために、ダム軸方向を対象に面外波場の数値計算を行った。三角形の谷形状は鉛直入射の場合、波線を集めやすく、平行成層モデルよりも振幅が大きい。が、斜め入射になると状況が大きく変化することが分かった。

謝辞

本研究で利用した擬似スペクトル法のプログラムは東北工業大学名誉教授の神山眞先生が作成され、日本大学工学部の中村晋先生が修正されたものである。記して謝意を示す。

参考文献 1) ダム地震記録データベース更新分科会：技術委員会ダム地震記録データベース更新分科会報告、大ダム No.231, 4-54, 2015.4. 2) 神山眞・他：不整形地盤の地震応答における短周期表面波の工学的重要性に関する研究、土木学会論文集 No.682/I-56, 225-243, 2001.7.

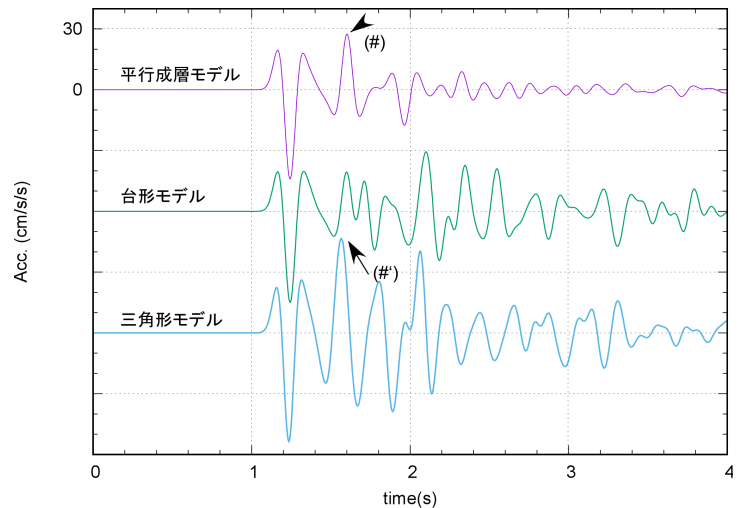


図2 鉛直入射した場合のダム上における応答の違い。

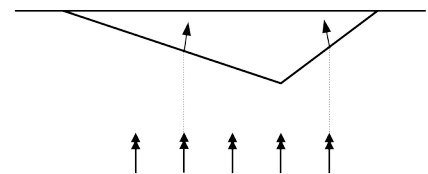


図3 鉛直下方からの入射波の伝播の様式図

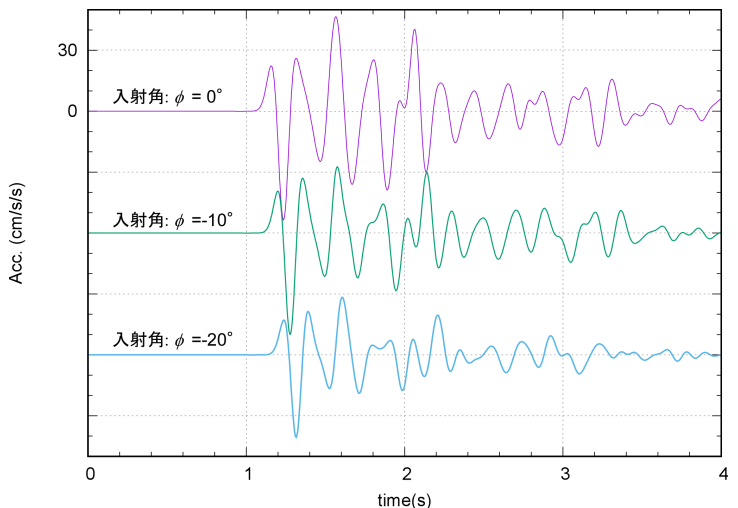


図4 三角形モデルに斜め入射した場合の応答の違い。