

ダム - 貯水の動的相互問題における水の粘性に関する検討

関西電力(株)	正会員	○重光 泰宗
(株)ニュージェック	正会員	山田 雅行
京都大学防災研究所	正会員	澤田 純男
京都大学工学研究科	正会員	五十嵐 晃

1. はじめに

現在、地震時のダムの動的解析を行う場合、貯水については Westergaard の式から得られる付加質量により簡便的に考慮されることが一般的に行われている。一方、地震時のダムと貯水の動的相互作用についての解析的な研究も行われている。上田、塩尻¹⁾は、貯水部に速度ポテンシャル要素を用いた 3 次元 FEM 解析を実施し、主に実ダムの耐震安定性評価に役立てている。片岡・大町²⁾は、ダム部は FEM、貯水部と基礎部を BEM とした FE-BE 法解析を実施し、ダム - 基礎 - 貯水の 3 次元連成解析の有用性を示している。なお、これらはいずれも貯水は非粘性として取り扱われている。

本報告では、ダム - 貯水の動的相互問題に関する検討の一部として、地震時の動水圧に及ぼす貯水の粘性の影響について示す。

2. せん断振動平板上の粘性の影響範囲

図 1 は、せん断振動平板上の粘性流体（水：粘性係数 $0.001\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ）の理論解を示したものである。理論的には、せん断振動の伝達範囲は振動面から数 mm 程度であることがわかる。また図 2 は、粘性流体解析コード ADINA-F³⁾を用いて、同条件におけるせん断振動平板上の流れを計算した結果である。ここで ADINA-F は流体のみを取り扱うコードである。この解析結果からも、水の挙動は底面から数 mm の範囲であることがわかる。これらから、ダムのような大規模な構造物を対象にする場合、貯水の粘性は特に考慮しなくて良いと考えられる。

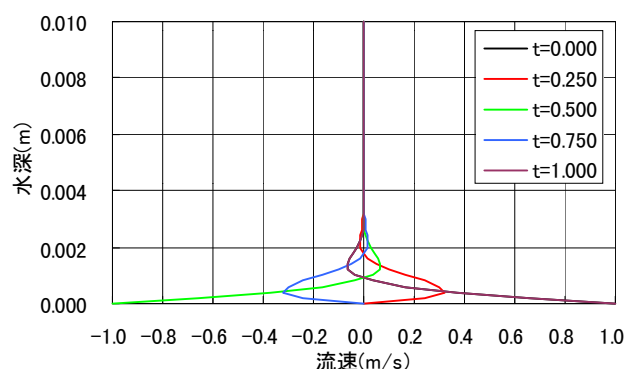


図1 せん断振動平板上の粘性流体の理論解

(f=1Hz, V=±1.0m/s, $\mu=0.001\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)

3. 動水圧の伝播における粘性の影響

FEM 解析時における液体部分のモデル化については、既に圧力または速度ポテンシャル要素等⁴⁾が開発されている。また、従来のソリッド要素に水の物性を与え、構造物との境界面を 2 重節点化することでも解析可能なことが知られている。ここで圧力または速度ポテンシャル要素モデルは、解析時において記憶容量が少なく計算速度も迅速であり、また既存構造解析コードへの組込みが比較的容易という有利点がある。そのため、既往の構造物と貯水の動的相互作用解析では、圧力または速度ポテンシャル要素モデルが使われることが多い。

そこで、動水圧の伝播における粘性の影響を把握するため、前述の粘性流体解析から得られる結果を正しいものと仮定し、速度ポテンシャル要素モデルおよびソリッド要素モデルの解析結果（使用コード名：ADINA³⁾）とを比較検討した。

図 3 の解析モデルにおいて、貯水を粘性流体（貯水部のみモデル化）、速度ポテンシャル要素、ソリッド要素でそ

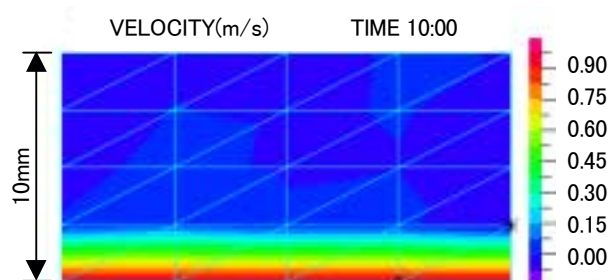


図2せん断振動平板上の粘性流体の解析解

(f=1Hz, V=±1.0m/s, $\mu=0.001\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)

キーワード：ダム、貯水、動的相互作用、動水圧、粘性

連絡先：関西電力(株) (〒530-8270 大阪市北区中之島 3-3-22 Tel.06-7501-0400 Fax.06-6441-3879)

れぞれモデル化し、また貯水要素の物性をそれぞれ表1で与え、図4の Sweep 波形を上下流方向に入力したときの最深部の最大動水圧の結果を図5に示す。なお、ダムと岩盤は剛体とし、また反射波が到達する前の動水圧を比較している。この結果によれば、それぞれダムから上流に向かうに従って

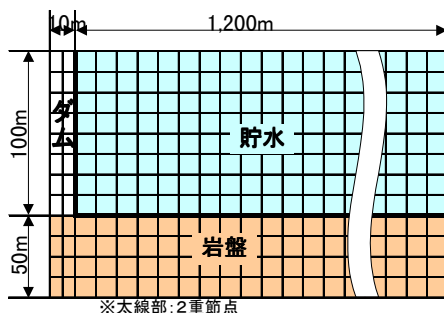


図3 解析モデル

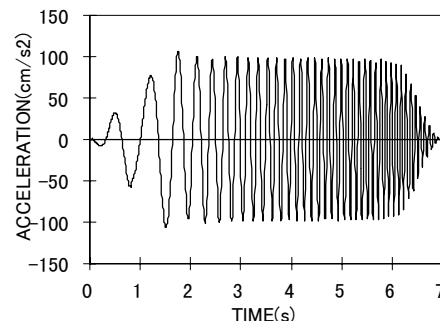


図4 Sweep 波形(1~10Hz)

最大動水圧が減少しているが、粘性流体モデルの方が速度ポテンシャル要素モデル、ソリッド要素モデルに比べて著しい。これは、粘性流体モデルではダムから発生した動水圧は粘性の影響を受けて減衰しながら伝播していくのに対して、速度ポテンシャル要素モデル、ソリッド要素モデルでは粘性を考慮していないため減衰せず伝播していくためである。従って、動水圧の伝播を正しく表現するために、貯水の粘性効果は無視できないことになる。

非粘性流体として定式化された圧力または速度ポテンシャル要素モデルではその定式化の仮定上、減衰効果を表現することは困難であるが、ソリッド要素モデルの場合には Rayleigh 減衰が一般的に使用可能である。そこでこの Rayleigh 減衰で貯水の粘性効果を表現可能か検討した。図6は、ソリッド要素モデルにおいて Rayleigh 減衰を 1~3%で与えたときの結果である。この結果によれば、Rayleigh 減衰によって粘性の効果を十分に表現できることがわかる。

表1 貯水要素の物性

速度ポテンシャル要素	ソリッド要素	粘性流体
・体積弾性係数 $1.96 \times 10^9 \text{ N/m}^2$	・弾性係数 $1.176 \times 10^3 \text{ N/m}^2$	・粘性係数 $0.001 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2$
・密度 $1,000 \text{ kg/m}^3$	・ポアソン比 0.4999999	・密度 $1,000 \text{ kg/m}^3$
	・密度 $1,000 \text{ kg/m}^3$	・水中音速(Vp) 1,400 m/s
	・(Vp 1,400 m/s)	
	・(Vs 0.626 m/s)	

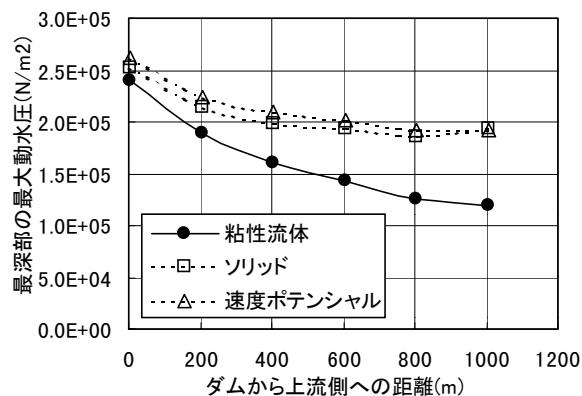


図5 各貯水要素モデル毎の動水圧の比較

4. まとめ

地震時の動水圧に及ぼす水の粘性の影響について検討を行った。その結果、次のことがわかった。

- 1) せん断振動の影響範囲から見れば粘性の影響は小さいが、動水圧の伝播における減衰から見れば粘性の効果を無視できないことが明らかとなった。
- 2) 圧力または速度ポテンシャル要素およびソリッド要素を比較した場合、粘性の効果を表現可能なソリッド要素を用いる方が、より合理的な貯水のモデル化ができる。

なお、本検討にあたっては京都大学防災研究所の本田利器氏にもご助言を頂いており、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 上田稔, 奥田宏明, 塩尻弘雄, 田村重四郎: アーチダムの起振実験シミュレーション, 土木学会論文集, No.501/ -29, pp203-212, 1994
- 2) 片岡正次郎, 大町達夫: 三次元 FE-BE 法を用いたダム - 基礎 - 貯水系の振動解析手法, 土木学会論文集, No.584/ -42, pp87-95, 1998
- 3) ADINA R&D, Inc.: ADINA Theory and Modeling Guide, 2001
- 4) 大坪英臣, 久保田晃弘: 相關問題, 株培風館, 1991

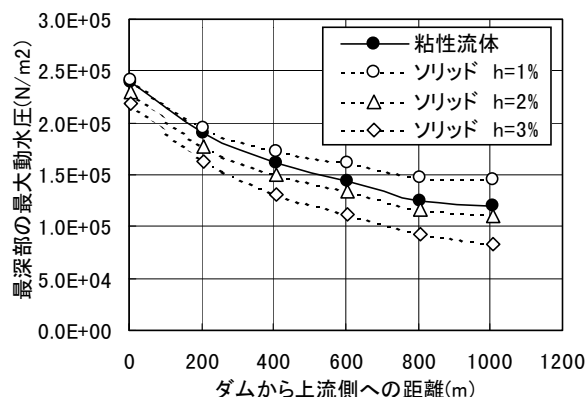


図6 減衰効果を考慮したソリッド要素モデルと粘性流体モデルの比較