

ラジアルゲートの耐荷力特性に基づく簡便な非線形地震応答解析手法の検討

財団法人電力中央研究所 正会員 ○山本 広祐
 財団法人電力中央研究所 正会員 齋藤 潔
 財団法人電力中央研究所 正会員 中島 正人

1. はじめに

近年、ダム構造物についても大規模地震に対して耐震性能を照査する趨勢にあるが¹⁾、ダム本体の検討に比べて洪水時の放流機能を担うダムゲートの検討事例が少ないのが実情である。著者らは、これまでダムゲートの中で地震時に座屈損傷の懸念があるラジアルゲートについて、耐荷力特性を把握するための実験的・解析的検討を実施してきた²⁾。本研究では、著者らが解析的に取得したラジアルゲート脚柱部の荷重－変位関係に基づき、これを一自由度系の復元力項に組み込んだ振動モデルを用いる非線形地震応答解析を行い、外力レベルと応答変位の関係や水圧荷重と慣性力の比率などを考察した。

2. 解析に用いる一自由度系モデルの運動方程式および解法

外力として地震時の動水圧荷重と慣性力を考慮する一自由度系モデルの運動方程式は、式(1)で表すことができる。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + F(x) = p_d - m\ddot{x}_g \quad (1)$$

ここで、 m ：質点の質量、 c ：粘性減衰係数、 $F(x)$ ：復元力（初期剛性 k_0 ）

$\ddot{x}$, $\dot{x}$, x ：質点の応答加速度、応答速度、応答変位

p_d ：地震時の動水圧荷重、 $\ddot{x}_g$ ：入力地震動の加速度

この式(1)を中央差分法による直接数値積分で解き、入力地震動に対する荷重－変位応答を取得する。なお、ダムゲートには、常時満水位相当の静水圧荷重が作用していることから、これを初期条件として考慮した上で地震応答解析を実施する。

3. ラジアルゲート脚柱部の荷重－変位関係のモデル化

図1に示すラジアルゲート脚柱部の弾塑性大変形有限要素解析（文献2)の解析を実機条件行ったもの）より得られた荷重－変位関係を多直線近似で図2のとおりにモデル化した（圧縮力・圧縮変位を+）。初期剛性は $k_0=960$ (kN/mm)、最大耐荷力は11.05 (MN)、その時の脚柱変位（座屈変位）は13.4 (mm)である。除荷剛性は、著者らが行った実験結果・解析結果の知見²⁾に基づいて、塑性化の程度によらず初期剛性 k_0 に等しいものとした。従って、骨格曲線上で最大変位を更新する時以外は、エネルギー吸収をしないモデルとなっている。また、常時満水位相当の静水圧荷重が脚柱に常に圧縮力として作用していることから、引張側で塑性化が生じるとは考えにくいため、引張側の骨格曲線は線形（剛性 k_0 ）とした。

4. 解析条件

文献1)や著者らが過去に行ったゲート単体の振動固有値解析の結果を参考に、固有振動数 $f=20$ (Hz)に設定した。この結果、式(1)のパラメータは、固有円振動数 $\omega=2\pi f=125.6$ (1/sec)、質点の質量 $m=k_0/\omega^2=0.0609$ (kN·sec²/mm)、減衰定数 $h=0.01$ 、粘性減衰係数 $c=2h\omega m=0.153$ (kN·sec/mm)となる。

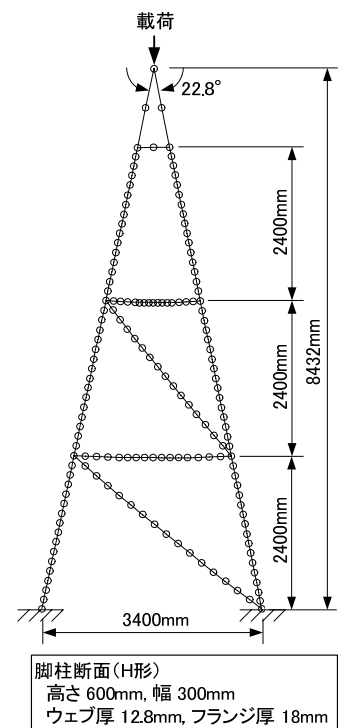


図1 検討対象構造物

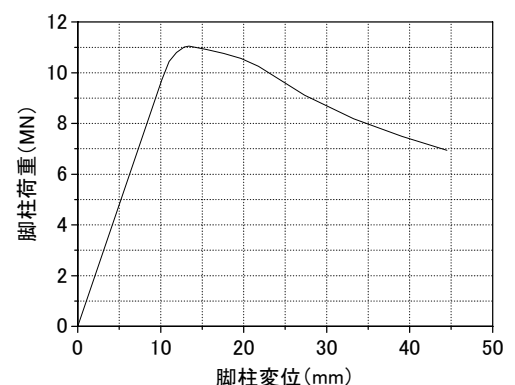


図2 脚柱部の荷重－変位関係

キーワード ダムゲート、耐震性能、荷重－変位関係、一自由度系

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (財) 電力中央研究所 地球工学研究所 構造工学領域 TEL 04-7182-1181

仮想的にダム高 85 (m)、堤頂長 170 (m) のコンクリート重力式ダムを設定し、常時満水位 80 (m) の条件でダム堤体－基礎岩盤－貯水池連成系の 3 次元地震応答解析を行った。この解析結果より、ダム上部（ゲートの設置位置）における応答加速度（図 3）とゲート受圧面に生じる動水圧荷重（図 4）を求め、これらの外力レベルを段階的に増加させた解析を行う。原波形での最大値は、加速度が $4.47 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、動水圧荷重が 5.27 (MN) である。なお、常時満水位において脚柱に許容応力の 90% の応力が発生する（設計洪水水位において許容応力相当の応力が発生する）ものと仮定し、 3.82 (MN) の静水圧荷重を考慮した。

5. 解析結果と耐震性能評価

図 5 に解析結果の一例として、外力レベルを段階的に増加させた時の入力加速度と最大応答変位の関係を示す。原波形（最大入力加速度 $4.47 \text{ (m/s}^2\text{)}$ ）では脚柱に塑性化が生じないが、これを僅かに超える外力レベルで塑性化を生じ、さらに約 3 割増の外力レベル $5.80 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 程度で最大耐荷力（座屈）に達する。この外力レベルを超えると耐力的な余裕が乏しく、応答変位が急激に増大する結果となった。この結果から、脚柱が塑性化した後すぐ最大耐荷力（座屈）に達する状況にはないものの、座屈は許容されない状態にあたることを把握できた。

図 6 は、外力レベル $5.90 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、この時の最大応答変位 14.9 (mm) の解析ケースにおいて、脚柱荷重と水圧荷重（静水圧＋動水圧）の関係を示したものである。これによれば、脚柱に作用する荷重のうち約 9 割が水圧荷重であり、慣性力の占める割合が小さいことが把握できた。この場合、特に変動する動水圧荷重の評価が重要であり、動水圧荷重の時刻歴から最大値を抽出し、常時満水位相当の静水圧荷重を加算した上で最大耐荷力と比較することで、概略の耐震性能評価が可能になるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、一自由度系モデルの非線形地震応答解析より、外力レベルと脚柱変位の関係を定量化し、塑性化の進行程度、最大耐荷力（座屈）の発生状況、座屈後の余耐力を確認した。また、水圧荷重の総量が脚柱に作用する荷重のほぼ 90% を占める主要な外力であることを明らかにした。ここで適用した解析手法は簡易なものであるが、非線形域における耐荷力特性を考慮したラジアルゲートの解析事例は殆ど見られないことから、今後の検討を行う上で参考になるものと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料，国総研資料 No.244，2005.3.
- 2) 齋藤 潔，山本広祐：ラジアルゲートの損傷過程と耐荷力特性に関する実験的検討，土木学会第 64 回年次学術講演会，2009.9.

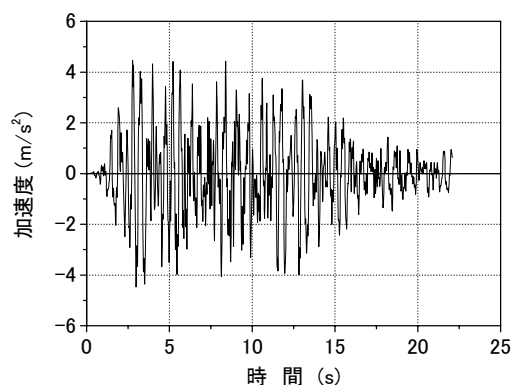


図 3 入力加速度（原波形）

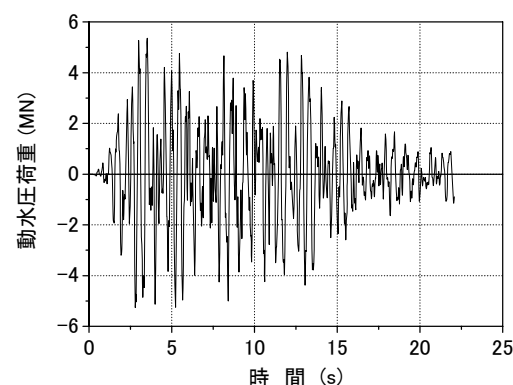


図 4 入力動水圧荷重（原波形）

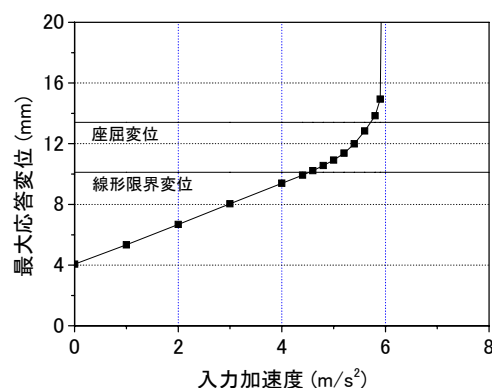


図 5 入力加速度と最大応答変位の関係

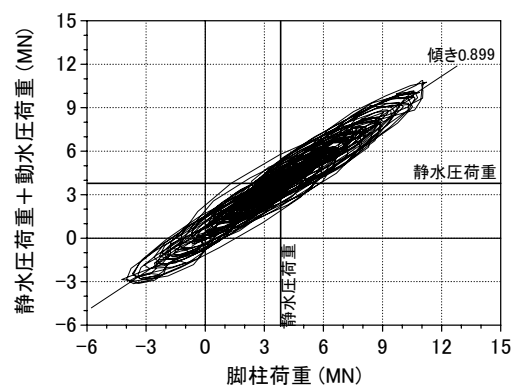


図 6 脚柱荷重と水圧荷重の関係
(最大入力加速度 5.90 m/s^2)