

洪水吐ゲートの地震応答解析における動水圧評価方法の提案

三菱重工マシナリーテクノロジー（株） 正会員 ○神原 天鳴 山本 利弘
 中部電力（株） 正会員 亀谷 泰久 鈴木 唯士
 （株）シーテック 正会員 横畑 嘉人

1. はじめに

洪水吐ゲートの地震応答を精度良く予測するには岩盤・堤体・水門柱・ゲート・貯水が連成する3次元モデルによる解析が望ましい。しかし塑性等の非線形性や貯水の流体要素によるモデル化を考慮すると、この解析に要する時間や労力は大きい。耐震解析の効率化の観点からゲート単独モデルが理想であるが動水圧を評価する方法が課題となる。本報ではゲートに作用する動水圧を比較的簡便に精度良く取り入れて、ゲートの地震応答をゲート単独モデルで計算する実用的手法を提案する。

2. 地震応答の定式化

一般に流体・構造の連成問題では流体の影響は構造体に付加する質量効果として表現され¹⁾ 具体的には付加質量の形になる。動水圧による力は付加質量に加速度を乗じた慣性力と等価である。提案手法ではゲート単独モデルに作用する動水圧をゲート振動に起因するもの $\{f_1\}$ と堤体振動に起因するもの $\{f_2\}$ に分離して考慮する。ゲート単独モデルの地震応答を方程式で表すと下記となる。（減衰は省略）

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{e\}\ddot{y} + \{f_1\} + \{f_2\} \quad (1)$$

$[M], [K]$: ゲートの質量, 剛性マトリックス $\{f_1\}$: 動水圧による外力（ゲート振動による）

$\{x\}$: ゲートの相対加速度, 変位ベクトル $\{f_2\}$: 動水圧による外力（堤体振動による）

$\{e\}\ddot{y}$: 地震入力加速度ベクトル

$\{f_1\}$ はゲートの付加質量 $[m]$ にゲートの絶対加速度 $\{\ddot{x}\} + \{e\}\ddot{y}$ を乗じた力であるため次式で表される。

$$\{f_1\} = -[m](\{\ddot{x}\} + \{e\}\ddot{y}) \quad (2)$$

これを(1)式に代入して整理すると次式が得られる。

$$([M] + [m])\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = -([M] + [m])\{e\}\ddot{y} + \{f_2\}$$

以下、 $[m]$ と $\{f_2\}$ を求める方法について説明する。

3. ゲートの付加質量と堤体振動による動水圧の算出

動水圧の算出には Westergaard 式がよく使用されるが、これはゲートや堤体が鉛直な上流面を持つ剛体（同一加速度）という仮定で誘導されたものである。実際の形状はゲートのセットバックや堤体の傾斜等があつて複雑であり加速度もゲートと堤体の各所で異なるのでここでは FEM を適用し動水圧を算出する。（本報での解析は全て解析コード Abaqus を使用）

まず貯水部のみを取り出し音響要素を用いて非圧縮性流体として流体単独の有限要素モデルを作成する。（図-1 参照）

流体単独モデルのゲート部分に一樣な単位加速度を入力しゲート位置に作用する動水圧 $\{p_1\}$ を出力、一方堤体部に一樣な単位加速度を入力しゲート位置に作用する動水圧 $\{p_2\}$ を出力する。（図-2 参照）

得られたゲート位置に作用する動水圧 $\{p_1\}$ $\{p_2\}$ の水深方向の分布を同一加速度作用時の Westergaard 式（厳密式セット

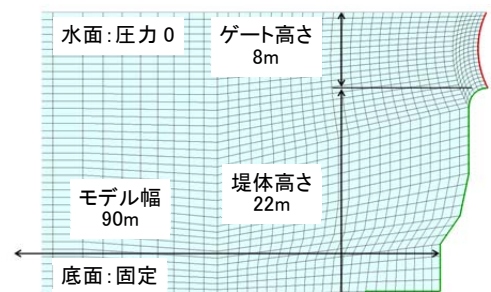


図-1 流体単独モデル

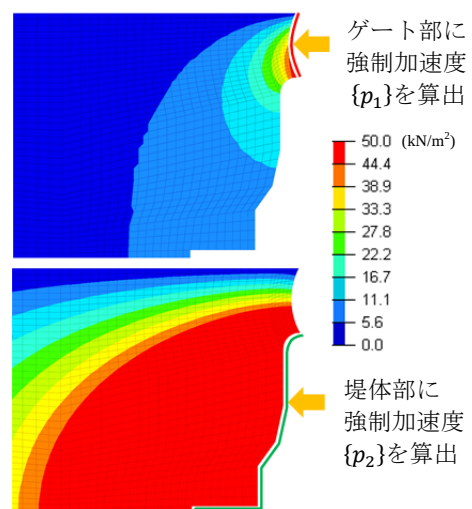


図-2 動水圧分布

キーワード 洪水吐ゲート, 動水圧, 付加質量, 時刻歴応答解析

連絡先 〒733-8553 広島市西区観音新町4丁目6-22 三菱重工マシナリーテクノロジー（株） TEL 082-295-7154

バック量考慮：以下WG式）にて算出した動水圧と比較して図-3に示す。本手法で得られた動水圧 $\{p_1\} + \{p_2\}$ はWG式とよく一致していることが分かる。

$\{f_1\}$ は動水圧 $\{p_1\}$ （単位加速度あたり）を補間・離散化して節点集中質量ベクトルとして求める。 $[m]$ は一般的にフルマトリクスであり全成分の個数はかなり多いため、近似的に $\{f_1\}$ の成分を対角成分とするマトリクスに置き換える。ただし動水圧はゲートの法線方向に作用するため付加質量も方向性を持った値とする。また $\{f_2\}$ も同様に動水圧 $\{p_2\}$ （単位加速度あたり）を補間・離散化して求めた節点集中質量ベクトルに堤体の代表位置の加速度を乗じて荷重ベクトルとする。

（堤体代表位置は別途定義しておく）

4. 提案手法の妥当性の確認

3次元の連成モデルとゲート単独モデルによる線形時刻歴応答解析を実施し、その結果を比較する。ゲートはラジアルゲートを対象とした。図-4に3次元連成モデルを、図-5にゲート単独モデルを示す。ゲート単独モデルは動水圧の定義を、①WG式相当の荷重、②WG式相当の付加質量、③提案手法とした3種類を対象にしている。

なお加振方向は上下流方向のみとしゲート単独モデルのピン位置（固定部）に入力する加速度と $\{f_2\}$ に乗じる加速度（今回は越流面天端位置とした）は3次元連成モデルの応答加速度を用いた。

ゲートの上下流方向における固有値の比較を表-1に、時刻歴応答解析の結果においてゲート中央位置の上下流方向加速度応答波形と応答スペクトルを比較したものを図-6に示す。

固有値は3次元連成モデルと提案手法による結果が一番よく近似しており付加質量の定義が良好であることが分かる。また、応答波形の性状、応答スペクトルの傾向についても若干のピークのずれが確認できるが良く一致している。

表-1 上下流方向固有値比較

	振動数(Hz)	周期(s)
① WG 荷重	20.45	0.049
② WG 付加質量	6.79	0.147
③ 提案手法 ([m] 付加)	9.84	0.102
④ 3次元連成モデル	10.07	0.099

5. まとめ

提案の動水圧を含めたゲート単独モデルによる地震応答計算は3次元連成モデルに近似する傾向の結果が得られた。これによりゲートに作用する動水圧は適切に評価されていることが示せた。

今後は付加質量マトリクス $[m]$ をフルマトリクスで設定する手法、また堤体の応答による動水圧 $\{f_2\}$ の定義手法について検討し、更なる精度向上を目指したい。

参考文献

- 1) 鷲津他：有限要素法ハンドブックⅡ応用編，培風館

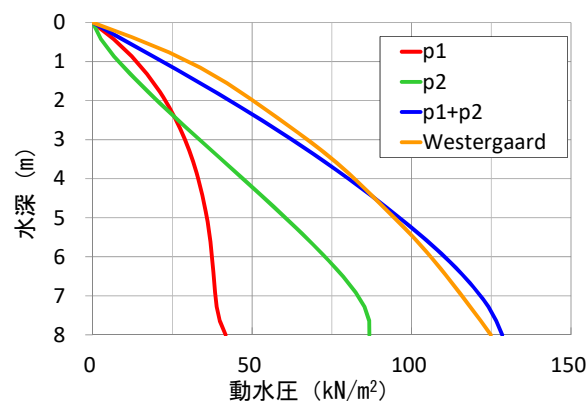


図-3 ゲート作用動水圧分布

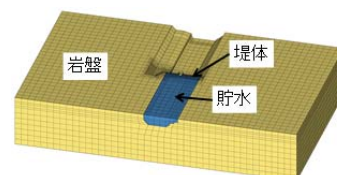


図-4 3次元連成モデル

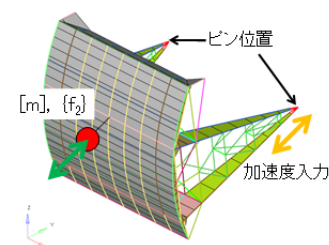


図-5 ゲート単独モデル

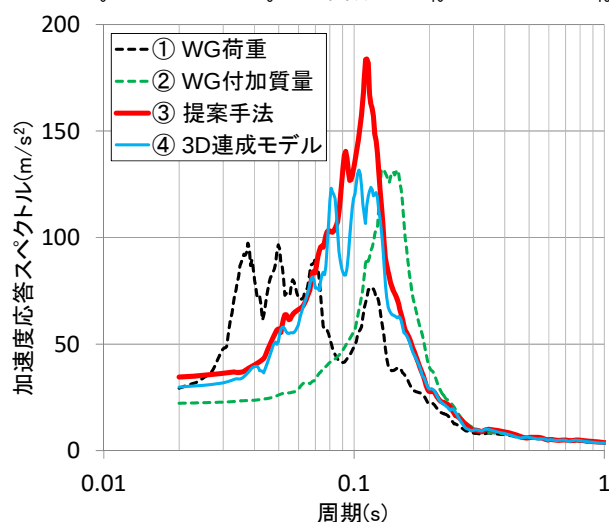
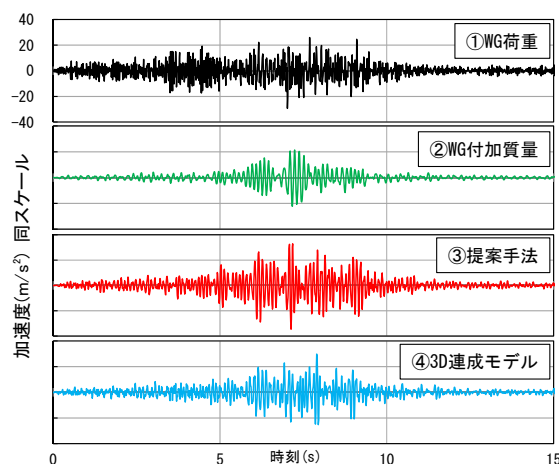


図-6 応答結果比較