独立型取水塔に作用する地震時動水圧に関する 解析的検討

秦 逸平¹· 亀谷 泰久²· 伊藤 真佑³

1 正会員 株式会社構造計画研究所 耐震技術部 (〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3) E-mail: ippei-hata@kke.co.jp

 2 正会員 中部電力株式会社 発電カンパニー 再生可能エネルギー事業部 (〒461-8680 愛知県名古屋市東区東新町1番地)
 E-mail: Kamegai.Yasuhisa@chuden.co.jp

3 正会員 株式会社シーテック 土木建築本部 技術コンサルタント部 (〒455-0054 愛知県名古屋市港区遠若町 3-7-1) E-mail: sh.itou@ctechcorp.co.jp

ダムの関連構造物の耐震性能照査では地震時動水圧を適切に評価することが重要であるが、関連構造物 のひとつである独立型取水塔は周囲を貯水で取り囲まれる特徴のため、動水圧の算定式や解析におけるモ デル化方法の検討事例が少ない.そこで、独立型取水塔を模擬した簡易モデルに対する三次元有限要素法 解析を実施し、動水圧を付加質量により適切にモデル化する方法について検討した.

剛な構造物を対象として貯水をポテンシャル流体要素でモデル化した連成解析の結果より,水門鉄管式 は断面寸法によっては動水圧を過大に評価するが,種々の断面寸法に対して過小評価せずに比較的精度良 く評価することを確認した.また,弾性体の構造物を対象とした付加質量モデルの解析結果は連成解析結 果に概ね近似することから,付加質量モデルが妥当であることを確認した.

Key Words : hydrodynamic pressure, intake tower, added mass, potential fluid element, finite element dynamic analysis

1. はじめに

大規模地震に対してダム全体の耐震性能を確保す るためには、ダム本体のみならず、関連構造物の耐 震性能も確保する必要がある¹⁾. 関連構造物に作用 する地震時外力のうち、地震時動水圧の影響が支配 的になる場合があり、耐震性能照査を目的とした解 析では、動水圧を適切に評価することが重要である.

関連構造物のひとつである独立型取水塔は周囲を 完全に貯水で取り囲まれるという特徴があり、ダム 堤体などの壁状構造物と比べて検討事例が少ない. 既往の動水圧評価式の根拠となっている理論および 実験による研究^{2),3)}や、橋脚を対象とした有限要素 法解析による検討⁴⁾、取水塔を対象とした実験およ び解析による検討事例^{5),6)}があるものの、動水圧の 算定式や解析におけるモデル化方法に関しては十分 な実績が蓄積されていない状況である.

解析における動水圧の評価方法としては、付加質

量に置き換える方法(付加質量モデル),貯水との連 成を考慮した解析による方法(連成解析モデル),荷 重に置き換える方法などがある.連成解析モデルを 用いると,解析により直接動水圧を評価できる利点 がある一方で,解析モデルは複雑で大規模になる傾 向がある.付加質量モデルを用いる場合,あらかじ め解析モデルに設定する動水圧の付加質量を算定す る必要があるが,その分動水圧の影響度を理解しや すく,解析モデルは貯水のメッシュが不要な分規模 は小さい.独立型取水塔に対する妥当な付加質量モ デルの設定方法が明らかになれば,耐震性能照査を 実施するうえで有意義である.

2. 検討目的と検討内容

上記の背景を踏まえ、本研究では、独立型取水塔 の耐震性能照査のための解析において、動水圧を付 加質量としてモデル化する場合の適切なモデル化方 法を明らかにすることを目的とする.特に,動水圧 を適切に評価する算定式を検討すること,ならびに, 解析における付加質量モデルの妥当性を確認するこ とを主目的とする.本研究は,独立型取水塔を模擬 した仮想の簡易モデルを対象とした一連の有限要素 法解析を実施し,上記の目的に対して解析的にアプ ローチするものである.

検討フローを図-1に示す.はじめに、剛な鉛直壁 を対象とした二次元連成解析を実施し、連成解析モ デルのモデル化方法の妥当性を確認する(4章).次 に、剛な独立型取水塔の簡易モデルを対象とした三 次元連成解析を実施し、周囲を貯水に取り囲まれる 構造物に作用する動水圧を適切に評価する算定式に ついて検討する(5章).最後に、柔な(弾性体の) 独立型取水塔の簡易モデルを対象とした付加質量モ デルと三次元連成解析モデルの解析結果を比較して 付加質量モデルの妥当性を確認する(6章).

解析の基本ケースを表-1に示す.本検討で着目す る主なパラメータとして,貯水のモデル化方法に加 えて,振動特性と動水圧に影響を与えると考えられ



図-1 検討フロー

衣-	表-1	基本ケース
-----------	-----	-------

2次元	貯水の	構造物		
/3次元	モデル化	断面形状	質量	剛性
2次元	流体要素	鉛直壁		∞:剛体
3次元	流体要素	円形		∞:剛体
		正方形		∞:剛体
3次元	流体要素	円形	小	小:弾性体
		正方形	大	大:弾性体
	付加質量	円形	小	小:弾性体
		正方形	大	大:弾性体
	2次元 /3次元 2次元 3次元 3次元	2次元 貯水の /3次元 モデル化 2次元 流体要素 3次元 流体要素 3次元 流体要素 小位加質量 行加質量	2次元 貯水の /3次元 モデル化 断面形状 2次元 流体要素 鉛直壁 3次元 流体要素 円形 3次元 流体要素 円形 3次元 流体要素 三方形 4 一元方形 三方形 3次元 一 一 3次元 一 一 3次元 二 二	2次元 貯水の 構造物 /3次元 モデル化 断面形状 質量 2次元 流体要素 鉛直壁 二 3次元 流体要素 円形 二 3次元 流体要素 円形 二 3次元 流体要素 円形 二 3次元 流体要素 一 一 小 一 二 二 3次元 二 二 二 (1) 二 二 二 (1) 二 二 二 (1) 二 二 二

水深,構造物の高さ:50m,断面幅:7m

る構造物の断面形状,質量,剛性の違いを設定し, 鋼製取水塔を想定した円形断面(躯体の質量および 剛性が小さい)と RC 製取水塔を想定した正方形断 面(躯体の質量および剛性が大きい)の2断面の簡 易モデルを設定した.基本ケースでは構造物の高さ および断面幅は同一とする.

3. 解析条件

解析には,汎用有限要素法解析プログラム: ADINA 9.3⁷⁾を用いた.

解析対象は独立型取水塔を模擬した仮想の簡易モ デルとし、上述した着目する主なパラメータ以外の 条件は極力簡易な条件とするため、貯水の水深は構 造物の高さと同一とし、一定水深が半無限に広がる 貯水池を設定した.

(1) 二次元解析モデル(4章)

二次元解析では、剛な鉛直壁の両側に一定水深の 貯水が接するモデルを設定した.解析モデルを図-2 に示す.

貯水は二次元ポテンシャル流体要素でモデル化し, モデル化方法は**表-2**に示すとおりとした.

構造物は梁要素でモデル化し、剛体を表現するた



図-2 二次元解析モデル

	単位体積重量:9.8 kN/m ³			
物性值	体積弾性係数:2060000 N/mm ²			
	(水の標準値の1000倍)			
1	モデル化幅 : 水深Hの2.5倍			
メツンユ	分割:高さ方向に20分割			
	底面:剛壁境界(境界を通して流れない)			
境界条件	上面:自由表面			
	側面(構造物側):流体構造連成境界			
	側面(遠方側):半無限境界(動的解析)			
	剛壁境界(固有値解析)			

め全節点を完全固定とした.

なお,これらの解析条件は後述する4章の検討を 踏まえて妥当性を確認した上で設定した条件である.

(2) 三次元解析モデル(5章,6章)

三次元解析では,独立型取水塔の簡易モデルの周 囲を一定水深の貯水が取り囲むモデルを設定した. 解析モデルを図-3に示す.

連成解析モデルでは、貯水は三次元ポテンシャル 流体要素でモデル化し、モデル化方法は二次元解析 と同様に表-2に示すとおりとした。付加質量モデル では、貯水の影響を付加質量としてモデル化し、節 点の集中質量として地震動の入力方向であるX方向 のみに設定した。

構造物はシェル要素でモデル化し、剛体とする場合(5章)は二次元解析と同様に全節点を完全固定 とした.弾性体とする場合(6章)は下端の節点の みを完全固定とし、断面形状および板厚は下端から 上端まで一定とした.弾性体の構造物には、以下の 方針に沿う諸元を設定するために事前に実施したパ



(構造物:シェル要素)円形断面 正方形断面

図−3 三次元解析モデル

ラメトリックスタディの結果より, 表-3 に示す諸元 を設定した.

- ・円形断面と正方形断面でそれぞれ, 躯体の質量が 比較的小さい/大きい, 剛性が小さい/大きい特 徴を反映する.
- ・高さおよび断面幅は同一とし、それぞれ 50m、7m とする.
- ・構造物の弾性振動による応答の差異が大きくならないよう、いずれのモデルも構造物の1次固有周期が入力地震動の加速度応答スペクトルがフラットな周期帯(0.1~0.7秒)になるような板厚を設定する.

なお,これらの諸元は実構造物を模擬して設定し たものではなく,本検討で目的とする解析結果の比 較ができるように設定した仮想のモデルである.

3次元モデル		円形断面	正方形断面	供来	
構造物諸元		直径 φ7m	辺長 7x7m	调与	
	高さ	m	50	50	
形状	直径・辺長	mm	7000	7000	
	板厚	mm	500	4000	
新西	構造物のヤング係数 E	N/mm ²	2.00E+05	2.50E+04	円形:鋼材 正方形:コンクリート
性能	断面二次モーメントI	mm ⁴	6.77E+13	9.89E+14	
	曲げ剛性 EI	$N \cdot mm^2$	1.35E+19	2.47E+19	正方形/円形=1.83
	構造物の単重	kN/m ³	0	24.5	円形:ゼロと仮定
質量	構造物の質量	t	0.0	14000.0	
	内水体積	mm ³	1.92E+12	2.45E+12	
	内水質量	t	1922.9	2448.3	
	躯体質量=構造物+内水	t	1922.9	16448.3	正方形/円形=8.55

表-3 三次元モデルの構造物諸元

解析モデルの躯体質量は、構造物の質量+内水の質量と仮定する。 躯体質量をシェル要素の質量密度として設定する。





図-4 入力地震動:照査用下限スペクトル適合波

(3) 入力地震動

時刻歴応答解析に用いる入力地震動にはダムの耐 震性能照査に用いられる照査用下限スペクトル¹⁾の 適合波を用いた.入力地震動の加速度時刻歴波形, 加速度応答スペクトル(減衰:5%)を図-4に示す. 地震動は水平1方向加振とした.

(4) 解析条件

4 章~6 章の時刻歴応答解析は線形解析とし,積 分時間間隔は 0.01 秒とした.構造物が剛な場合(4 章,5章)は減衰を考慮しない.構造物が柔な場合 (6章)は Rayleigh 減衰により構造物に減衰 5%を 考慮する.なお,ポテンシャル流体要素には減衰は 作用しない.

4. 二次元解析による連成解析モデルの検証

本章では,連成解析モデルのモデル化方法の妥当 性を確認することを目的とする.

Westergaard式の仮定条件に合わせて剛な鉛直壁 を対象とした二次元連成解析モデルを設定し、時刻 歴応答解析より得られる動水圧がWestergaard式 による算定値を再現することを確認することにより, モデル化方法の妥当性を確認する.

全動水圧(構造物全体に作用する動水圧荷重の合計値)が最大となった時刻におけるポテンシャル流体要素の動水圧コンターを図-5に,構造物の応答加速度と構造物に作用する動水圧の鉛直方向分布を図-6に示す.

構造物の応答加速度は,構造物が剛体であるため 高さ方向に一様であり,入力加速度に等しい.

解析結果の動水圧の鉛直方向分布は、下端におい てやや小さいが、Westergaard 式の分布形状を概ね 再現する結果となった.

全動水圧の時刻歴および最大値の一覧表を図-7 に示す.解析結果の全動水圧は,Westergaard式よ り算定した全動水圧に近似しており,最大値では解 析結果の方が約10%小さい結果となった.

以上より, 連成解析結果が Westergaard 式に近似 することから, 3章に示した解析条件(例えば, 表-2) は妥当であるといえる.

なお、水の体積弾性係数については、水の標準値 とした場合に体積弾性係数の影響がみられたが、本 検討の着目点ではないため、非圧縮性を仮定して水 の標準値の 1000 倍とすることでその影響が表れな いようにした.本章と同様の解析手法にて 5 章,6 章の三次元解析を実施する.



図-5 動水圧コンター図(単位:N/mm²)



図-6 応答加速度,動水圧の鉛直方向分布



図-7 全動水圧の時刻歴,最大値一覧

動水圧算定式の検討

本章では、周囲を貯水に取り囲まれる構造物に作 用する動水圧を適切に評価する算定式について検討 することを目的とする.

はじめに,(1)において比較検討する動水圧の算定

式を整理し、(2)および(3)において剛な独立型取水 塔の簡易モデルを対象とした連成解析モデルの時刻 歴応答解析より得られる動水圧に対する算定式の適 用性を比較する、その結果を踏まえ、(4)において算 定式の検討結果を整理する.

(1) 比較検討する動水圧の算定式

周囲を貯水に取り囲まれる構造物に作用する動水 圧の算定式として、以下の3式について比較検討を 行う.

a) Westergaard 式

鉛直壁に作用する動水圧の算定式として一般的に 用いられている式であり、下式(1)にて表される. 文 献5)では、独立型取水塔の簡易検討の事例において

「Westergaard 式による付加質量の 0.7 倍」が採用 されている.水面から水底までの水深Hに依存し,水 深hの二次関数であるという特徴がある.

$$p_d = \frac{7}{8} K \cdot W_0 \sqrt{H \cdot h} \tag{1}$$

なお、本章における Westergaard 式の評価値は式 (1)を 0.7 倍した値とする. (4 章の Westergaard 式 による算定値は 0.7 倍していない.)

b) 水門鉄管式

水門鉄管技術基準 %において「周辺を水で覆われ た構造物に働く動水圧荷重の一般的計算法」とされ ている算定式であり,円柱の場合と角柱の場合でそ れぞれ下式(2a), (2b)にて表される. 円形または正方 形断面の場合、構造物が排除した水に作用する慣性 力と等しく、矩形断面の場合は幅厚比b/aにより決 まる係数αを乗じる.水深hによらず一定であるとい う特徴がある.

断面形状が円柱(半径r)の場合,

 $P_d = K \cdot W_0 \cdot \pi \cdot r^2$ (2a)断面形状が角柱(前面幅b)の場合,

$$P_d = \alpha \cdot K \cdot W_0 \cdot b^2 \tag{2b}$$

ここに、角柱の断面の幅厚比b/aにより決まる係 数αは, 表-4のとおりである.

c) 道示式

道路橋示方書 9における「周辺を完全に水で取り 囲まれた柱状構造物に作用する地震時動水圧」の算 定式であり、後藤・土岐の提案式 1), 2)に基づく、細 長比b/Hと幅厚比b/aに依存し、水深hの三次関数で

表−4 幅厚比b/aにより決まる係数a



あるという特徴がある. $b/H \leq 2.0$ の場合,

> $P_d = K \cdot W_0 \cdot A_0 \cdot \frac{b}{a} \left(1 - \frac{b}{4H}\right)^3 \sqrt{\frac{h}{H}}$ (3)

上記の式(1)~(3)において、p_d:水深hにおける動 水圧(圧力,単位:N/mm²), P_d:水深hにおける単 位高さあたりの全断面に作用する動水圧荷重(単位: N/mm), K: 水平震度, W₀: 水の単位体積重量, H: 水面から水底までの水深, A₀: 断面積, b: 動水圧の 作用方向に直角方向の躯体幅(断面幅), a:動水圧 の作用方向の躯体幅(断面厚さ)を示す.

本章で解析結果と比較する動水圧の算定値は、上 記の算定式における水平震度Kに、構造物の応答加 速度を重力加速度で除した応答震度を用いる.本章 の検討では構造物は剛体であるため、応答加速度は 高さ方向に一様で入力加速度に等しい.

(2) 連成解析と動水圧算定式との比較:円形断面, 正方形断面(断面形状と細長比)

本節では、断面形状および細長比に着目し、連成 解析より得られる動水圧を算定式(1)~(3)による評 価値と比較した結果を示す.検討ケースを表-5に示 す. 基本ケースの円形断面と正方形断面(断面幅 7m) に加えて、断面幅 20m, 50m のケースを設定した.

全動水圧が最大となった時刻における構造物に作 用する動水圧の鉛直方向分布を図-8に、動水圧コン ターの一例を図-9に示す.全動水圧の最大値の一覧 表を表-5に示す.

解析結果の動水圧分布は,水面位置がゼロであり, 水深が深くなるにつれて水底位置の最大値に漸近す る特徴がある. 断面幅が小さい(細長い) 場合, 最 大値に漸近する水深が浅く, 断面幅が大きいほど動 水圧分布の曲率が緩やかであり、二次元の場合の分 布形状に近くなる.

上段:全動水圧の最大値(kN) 解析ケース 下段: 算定式による評価値/解析結果 Wester 断面 断面幅 細長比 解析 水門鉄管 道示 gaard b/H 形状 b (m) 結果 454986126 4434 52727 0.14 円形* (863%) (116%)(84%) 36654 129993 50006 33754 0.40 20円形 (355%)(136%)(92%)164065 324982 312539 175803 1.00 円形 50(198%)(190%)(107%)7861 454987800 56457 正方形* 0.14 (579%)(99%)(72%)53533 129993 63670 42977 正方形 20 0.40 (80%)(243%)(119%)231126 324982 397937 223840 50 1.00 正方形 (172%)(97%)

(141%)

表-5 解析ケース,全動水圧の最大値一覧

※: 基本ケース (高さH=50m)



図-8 動水圧の鉛直方向分布

動水圧の鉛直方向分布を算定式(1)~(3)による評価値と比較すると、Westergaard式(式(1))は、いずれの断面形状および細長比に対しても解析結果の動水圧を過大評価し、特に断面幅が小さい(細長い)場合の乖離が著しい.

水門鉄管式(式(2a),(2b))の動水圧分布は高さ方向に一定であるため、水面位置でゼロにならない点で相違がある.全動水圧は、正方形断面の基本ケース(1%過小評価)以外は解析結果を大きめに評価した.断面幅が大きい(太短い)ほどより大きめに評価する傾向があるが、b/H = 1.0は極端に太短いケースであり、円形断面の基本ケースでは16%大きめの評価である.

道示式(式(3))の分布形状について,水面位置は 解析結果と同様にゼロであり,特に円形断面の水底 の動水圧最大値の近似精度が良好であるが,断面幅 が小さい(細長い)場合に水面付近の動水圧分布の 曲率が解析結果より緩やかである点で相違がある. この相違により,全動水圧は断面幅が小さい(細長 い)場合に解析結果を小さく評価し,正方形断面の 基本ケースでは28%の過小評価である.



(単位:N/mm²)

(3)連成解析と動水圧算定式との比較:矩形断面 (幅厚比)

本節では、矩形断面の場合の幅厚比に着目し、連 成解析より得られる動水圧を水門鉄管式(2b)による 評価値と比較した結果を示す.

解析ケースを表-6に示す.基本ケースの正方形断 面に加えて、断面幅bを同一として断面厚さaを変化 させた 2 ケースの矩形断面を設定した.断面幅bは 同一であるため、水門鉄管式(2b)によると、3 ケース の動水圧の比は係数aに比例することが予想される.

全動水圧が最大となった時刻における構造物に作 用する動水圧の鉛直方向分布を図-10 に示す.全動 水圧の最大値の一覧表を表-6 に示す.

矩形断面の動水圧分布は,正方形断面と相似形で ある.断面厚さaが小さい(幅厚比b/aが大きい)場 合,正方形断面に比べて動水圧は小さくなり,水門 鉄管式(2b)の幅厚比b/aと係数aの関係と同じ傾向 である.

解析結果の正方形断面に対する矩形断面の全動水 圧の比は、断面厚さaが小さい場合と大きい場合の いずれの場合においても、約 10~15%ほど係数aの 方が大きい.

以上より, 矩形断面の場合, 水門鉄管式(2b)の幅厚 比b/aにより決まる係数αは, 全動水圧の再現精度と しては最大で約 15%の差異があるが, 幅厚比の影響 のおおまかな傾向を捉えており, 動水圧を大きめに 評価することが分かった.

表-6	解析ケース.	全動水圧の最大値一覧
10 0		

	/41 01	·	/			
解析ケース				全動水圧の最大値		
断面	断面厚	幅厚比	係数	解析結果	矩形/正方形	
形状	a (m)	b/a	α	(kN)		
矩形	1.4	5.0	0.95	6638	0.84	
正方形*	7	1.0	1.00	7861	1.00	
矩形	14	0.5	1.20	8292	1.05	

※:基本ケース (幅b=7m)



図-10 動水圧の鉛直方向分布

(4) 動水圧算定式に関するまとめ

検討対象とした3つの動水圧算定式について,周 囲を貯水に取り囲まれる剛な構造物に作用する動水 圧の評価精度を整理すると以下のようになる.

- ・Westergaard 式:細長い場合に大幅な過大評価
- ・水門鉄管式:分布形状は異なり、極端に太短い場合は過大評価となるが、全動水圧は基本ケースに対しては比較的良い近似精度である
- ・道示式:分布形状は良い近似精度であり、全動水
 圧も比較的良い近似精度ではあるが、特に構造物
 が細長い場合に過小評価となる

独立型取水塔の耐震性能照査を目的とした解析に 用いる動水圧という観点では、動水圧を小さめに評 価しないこと、特に、構造物の基部に作用する曲げ モーメントおよびせん断力が重要となるため、動水 圧の分布形状より全動水圧の評価精度が重要になる こと、などを考慮して、6章の検討に用いる付加質 量の算定には水門鉄管式(2a)、(2b)を採用する.

水門鉄管式の全動水圧の近似精度を整理すると, 基本ケースの円形断面の場合やや大きめの評価 (+16%),正方形断面の場合ほぼ同値(-1%)である.

6. 付加質量モデルの妥当性検討

本章では、柔な(弾性体の)独立型取水塔の簡易 モデルを対象とした三次元付加質量モデルの解析結 果を三次元連成解析モデルの解析結果と比較した結 果を示す.付加質量モデルの妥当性を確認すること を目的とする.

固有値解析により得られる構造物の1次固有周期 および時刻歴応答解析より得られる動水圧に着目し、 付加質量モデルの解析結果が連成解析モデルの解析 結果に近似することを確認することにより、付加質 量モデルの妥当性を確認する.

5 章の検討結果より、付加質量モデルは水門鉄管 式(2a)、(2b)より算定した付加質量を節点の集中質 量として地震動の入力方向であるX方向のみに設定 した.

(1) 連成解析モデルと付加質量モデルの固有周期 の比較

連成解析モデルと付加質量モデルの固有値解析結 果を図-11 に示す.参考のため、貯水の影響を考慮 しない(ポテンシャル流体要素および付加質量を設 定しない)躯体単体モデル,付加質量をWestergaard 式により算定した付加質量モデルの固有値解析結果 についても併記した.



※: 括弧内の%は、各ケースの固有周期/連成解析モデルの固有周期を示す. 図-11 固有値解析結果

連成解析モデルの固有周期を躯体単体モデルと比 較すると、貯水の影響により固有周期が長くなり、 その影響は躯体の質量が小さい円形断面にて顕著で ある.

付加質量モデル(Westergaard 式)の固有周期は 連成解析モデルに比べて大幅に長周期であり、この 結果からも Westergaard 式による評価値が過大評 価であることがわかる.

付加質量モデル(水門鉄管式)の固有周期を連成 解析モデルと比較すると良く近似しており,両者の 差は10%以下である.円形断面と比べて正方形断面 の方がより近似精度が良いことについては(3)にて 考察する.

以上より,水門鉄管式により付加質量を設定した 付加質量モデルで,貯水の影響を考慮した弾性体の 固有周期を精度よく評価できるといえる.

(2) 連成解析モデルと付加質量モデルの動水圧の比較

連成解析モデルと付加質量モデル(水門鉄管式) の時刻歴応答解析結果について,構造物の応答加速 度と構造物に作用する動水圧の鉛直方向分布(全時 刻中の最大値の包絡線)を図-12,図-13に示す.分 布図には,参考のため5章に示した剛体に対する連 成解析モデルの結果も併記した.全動水圧の時刻歴 および最大値一覧を図-14,図-15に示す.

はじめに,連成解析モデルの剛体と弾性体の結果 を比較して構造物の剛性の影響を確認する.弾性体 の動水圧分布は,応答加速度の増幅に伴い上部で増 幅する分布となっており,剛体の動水圧分布に応答 加速度分布を乗じたものにほぼ等しい.弾性体に作 用する動水圧は構造物の応答加速度に比例するとい える.



図-12 応答加速度,動水圧の鉛直方向分布(円形断面)



図-13 応答加速度,動水圧の鉛直方向分布(正方形断面)

付加質量モデルの応答加速度分布を連成解析モデ ルと比較すると、円形断面の上部でやや相違がある ものの、正方形断面では非常に良い近似となった.

付加質量モデルの動水圧分布を連成解析モデルと 比較すると、付加質量を高さ方向に一定の水門鉄管 式により設定していることから、付加質量モデルは 水面位置における動水圧がゼロにならない点で相違 があるが、水面付近以深の動水圧分布は概ね近似し ている.

付加質量モデルの全動水圧を連成解析モデルと比 較すると、円形断面の場合、時刻歴の傾向は概ね一 致しているが、ピーク後の 8~15 秒では振動特性に 若干の違いがあり、最大値は正側では 2%の相違と 良い近似であるが負側で 23%過大評価となった.正 方形断面の場合、時刻歴および最大値ともに良い近 似であり、最大値は 4%大きめの評価となった.円形 断面と比べて正方形断面の方がより近似精度が良い ことについては(3)にて考察する.

(3) まとめ

付加質量モデルは,固有周期および動水圧ともに,



図-14 全動水圧の時刻歴,最大値一覧(円形断面)

円形断面に比べて正方形断面の方が連成解析モデル の結果を良く近似する結果となったが、その傾向は 5章に示した剛体に作用する全動水圧の水門鉄管式 の近似精度の傾向(円形:+16%,正方形:-1%)と 一致する.

全動水圧の近似精度が良好な正方形断面では、付 加質量モデルの連成解析モデルとの差は固有周期が 1%、全動水圧が4%の差異であり、本検討モデルに 対しては水門鉄管式により設定した付加質量モデル により振動特性と動水圧を精度良く表現できた.こ のことから、剛体に作用する動水圧を精度よく再現 する算定式により付加質量を設定すれば付加質量モ デルにより連成解析モデルの固有周期および動水圧 を精度よく再現できるといえ、動水圧を付加質量に よりモデル化する手法の妥当性が確認された.

一方で、円形断面の場合、剛体に作用する動水圧 で16%の差異があり、そのため付加質量モデルの連 成解析モデルとの差は固有周期が7%、振動特性が 変化する影響もあり全動水圧は最大で23%過大評 価となった.応答加速度や動水圧分布、全動水圧な どは全体的には比較的良い精度で再現できており、 かつ動水圧を大きめに評価しているが、付加質量の 算定値のずれにより振動特性や動水圧の評価結果に 影響を与えること、特に躯体質量が比較的小さい場 合に固有周期への影響が大きいことに留意すべきで ある.

なお,水門鉄管式により設定した付加質量モデル と連成解析モデルとの相違点として上端の動水圧が ゼロにならないことがあるが,5章のまとめにも記 載したとおり,耐震性能照査のための解析という観 点では,上端の分布形状の差異より全動水圧の大き さが重要であると考えられる.



図-15 全動水圧の時刻歴,最大値一覧(正方形断面)

7. まとめ

本研究では、二次元有限要素法解析によりポテン シャル流体要素を用いた連成解析モデルの妥当性を 確認したうえで、独立型取水塔を模擬した仮想の簡 易モデルを対象とした三次元有限要素法解析を実施 し、連成解析結果より周囲を貯水に取り囲まれる構 造物に作用する動水圧を適切に評価する算定式につ いて検討を行った. さらに、付加質量モデルと連成 解析モデルの解析結果を比較することにより、付加 質量モデルの妥当性を確認した.

検討により得られた知見を以下に示す.

- ・剛な鉛直壁を対象とした二次元連成解析により Westergaard式の動水圧を精度良く再現できたこ とから、連成解析モデルの妥当性を確認した.
- ・周囲を貯水に取り囲まれる剛な構造物に作用する 動水圧の算定式として3式を比較検討し、全動水 圧を比較的精度良くかつ過小評価しない算定式と して水門鉄管式を選定した。
- ・貯水の影響により構造物の固有周期は長くなり, その影響は躯体の質量が小さい場合に顕著である.
- ・弾性体に作用する動水圧は、剛体に作用する動水 圧分布と比べて、応答加速度の増幅に伴い上部で 増幅する分布となる.
- ・剛体に作用する動水圧を精度良く算定する式で付加質量を設定した場合、付加質量モデルにより貯水の影響を考慮した固有周期および動水圧を表現できることから、付加質量モデルの妥当性を確認した。

ただし、これらの知見は本検討で設定した簡易モ デルの範囲内での結果である.本検討結果に関する 留意点ならびに今後の課題を以下に示す.

・本検討では単純化した簡易モデルを対象としたた

め,水深が一定ではない場合,断面形状が複雑な 場合,水の圧縮性の影響などについては本検討で は考慮していない.

- ・種々の細長比,断面の幅厚比に対して水門鉄管式 が動水圧を過小評価しないことを確認したが,特 に構造物が太短い場合や矩形の場合には水門鉄管 式による動水圧が過大な評価となる場合があるこ とに留意すべきである.
- ・水門鉄管式による付加質量は水深によらず一定であるが、構造物が太短い場合は剛体に作用する動水圧分布は緩やかな曲線状であるため、付加質量も曲線状の分布で付加するのが理想的である.太短い構造物に水門鉄管式による付加質量を適用する場合は、分布形状の差異による影響に留意すべきである.
- ・例えば、構造物の固有周期が入力地震動の加速度 応答スペクトルが急峻な周期帯に位置する場合な ど、固有周期の小さな差により地震応答が大きく 変化する対象の場合や、躯体の質量が小さく貯水 の影響による固有周期の変化が大きい対象の場合、 付加質量の算定値の小さな違いにより付加質量モ デルの応答が大きく変化する可能性があることに 留意すべきである。

参考文献

- 国土交通省河川局:大規模地震に対するダム耐震性 能照査指針(案)・同解説,2005.
- 2) 後藤 尚男, 土岐 憲三:水中橋脚の振動と耐震設計 に関する基礎的研究,土木学会論文集,1963 巻,100 号, pp. 1-8, 1963.
- 土岐 憲三, 手塚 昌信:水中橋脚に働く動水圧の近 (以計算式について,土木学会年次学術講演会講演概 要集,1965年,第20回,pp.26-1,26-2,1965.
- 4) 星隈 順一,運上 茂樹:大規模地震時における水中 橋脚の挙動と動水圧の評価法,構造工学論文集, Vol.47A, pp. 753-760, 2001
- 5) 経済産業省原子力安全・保安院,電源開発株式会社, 東電設計株式会社,株式会社ニュージェック:発電 設備耐震性能調査(平成21~23年度)報告書,2012.
- 6) 経済産業省原子力安全・保安院,電源開発株式会社, 東電設計株式会社,株式会社ニュージェック:水力 発電設備の耐震性能照査マニュアル,2012.
- 7) ADINA R & D Inc. : ADINA 9.3 Theory and Modeling Guide
- 水門鉄管協会:水門鉄管技術基準 水門扉編, pp. 23-40, 2007.
- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計 編, pp. 102-107, 2017.

ANALYTICAL STUDY ON HYDRODYNAMIC PRESSURE ACTING ON FREE-STANDING INTAKE TOWER

Ippei HATA, Yasuhisa KAMEGAI and Shinsuke ITOH

It is important to accurately estimate hydrodynamic pressure in seismic performance evaluation of dam-related structures such as an intake tower. Due to the fact that a freestanding intake tower is surrounded by water, the calculation formula and modeling method of acting hydrodynamic pressure are not clarified. Therefore, this paper presents the results of three-dimensional finite element dynamic analyses on simplified models of intake tower and the results of the investigation on an appropriate modeling method of hydrodynamic pressure by applying added mass model.

Results of analyses on rigid body with coupled fluid-structure model using potential fluid elements confirmed that the calculation formula is applicable in terms of verifying the seismic resistance of an intake tower. The formula evaluates an excessively high hydrodynamic pressure for certain cross-sectional dimensions. However, for the most crosssectional dimensions, hydrodynamic pressure is accurately evaluated without underestimating. Furthermore, it was confirmed that the added mass model is appropriate since the results of analysis on elastic body with added mass model are reasonably similar to the one with fluid-structure model.