非線形地震応答解析によるサージタンクの加速度増幅特性に関する基礎的検討

1. はじめに

近年,災害の激甚化を受けて,制御できない貯水の 流出等に対する安全性の観点から,水路設備の耐震 性能照査の重要性が増している。水路設備の照査手 法は,経済産業省原子力安全・保安院(当時)により マニュアル¹⁾に取りまとめられており,サージタン クの照査手法は入力地震動による応答特性の影響が 大きいため,動的解析による照査が基本とされる。こ れは高さ方向の応答加速度の増幅と貯水の動水圧に よる影響を考慮するためである。

一方で、日本の電力会社が保有する水力発電所の 総数は約1200箇所であり、照査対象となる水路設備 は膨大な総数・総延長となる。その一部であるサージ タンク全てに対し、難易度の高い動的解析を実施す ることは現実的ではない。照査を効率的に実施する ためには、比較的簡便である静的慣性力を地震とし て考慮した静的解析法の構築が必要と考える。

本研究では,静的解析法において入力地震動の応 答特性を考慮した静的慣性力を適切に設定するため に,サージタンクにおける高さ方向の加速度増幅特 性の把握を目的として,仮想サージタンクの3次元 非線形地震応答解析を実施した。

2. 解析概要

図-1 に対象サージタンクのモデル図を示す。鉄筋 は内外面よりかぶり 100mm 位置に周方向 6°間隔で 鉛直方向に配筋した。表-1 に解析ケースを示す。解 析パラメータは高さ,入力地震動の強度,貯水の有無 とし,高さ 10m, 20m および貯水を考慮したモデル を H10, H20, H10w と呼ぶ。コンクリート,鉄筋は それぞれソリッド,トラス要素でモデル化し,材料 非線形特性を与えた。貯水は音響要素でモデル化し, 貯水下端に地震動を入力するため,底部に厚さ 10mm の剛板を付加した。

解析コードは汎用コード「Abaqus 2018」を使用した。表-2に各材料物性を示す。コンクリートの応力

電力中央研究所 正会員 〇杉本 啓太 正会員 西内 達雄

-ひずみ関係は示方書の算定式²⁾に準拠し,鉄筋の応 カ-ひずみ関係はバイリニア型として,第2勾配は初 期勾配の 1/100 とした。コンクリートと鉄筋のいず れも,除荷時の剛性は初期剛性とした。考慮した荷重 は自重,地震慣性力,静水圧,動水圧である。入力地 震動は,照査用下限スペクトル³⁾に一庫ダム観測波 の位相を適合させた模擬地震動を基準とし,水平方 向の加速度ベクトル和の最大値が所定の値となるよ うに倍率調整したものを使用した。入力地震動は,モ



(a) 平面図(共通)(b) H10およびH10w(c) H20図-1 解析モデルの概要図

Case	モデル	高さ [m]	H/D ⅔	地震動の強度 [cm/s ²]	貯水の 右無
H10A300		10	2	300	-
H10A600	H10	10	2	600	-
H10A900		10	2	900	-
H20A300		20	4	300	-
H20A600	H20	20	4	600	-
H20A900		20	4	900	-
H10A300w		10	2	300	有
H10A600w	H10w	10	2	600	有
H10A900w		10	2	900	有

表−1 解析ケース

※H:高さ[m], D:口径[m]

表-2 コンクリートおよび鉄筋の材料特性

圧縮強度	引張強度	弹性係数	減衰定数
[MPa]	[GPa]	[GPa]	[%]
36.6	2.54	30.0	5
公称断面積	降伏強度	弾性係数	減衰定数
$[mm^2]$	[MPa]	[GPa]	[%]
198.6	295	210	2
	E縮強度 [MPa] 36.6 公称断面積 [mm ²] 198.6	圧縮強度 引張強度 [MPa] [GPa] 36.6 2.54 公称断面積 降伏強度 [mm ²] [MPa] 198.6 295	圧縮強度 引張強度 弾性係数 [MPa] [GPa] [GPa] 36.6 2.54 30.0 公称断面積 降伏強度 弾性係数 [mm ²] [MPa] [GPa] 198.6 295 210

キーワード:調圧水槽,鉄筋コンクリート,耐震性能照査,地震応答解析,地震動加速度,増幅 連絡先:〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 TEL 070-5587-8032 FAX 04-7183-2941 デル底面を 3 方向同時に直接加振することで入力し た。なお,H10w では,静水圧と動水圧が構造物の没 水面に作用する。ここで,水面の動水圧は0とした。 減衰はレイリー減衰とし,固有値解析から得られた1 次固有振動数と照査用下限スペクトルの応答範囲で はない40Hzから設定した。1 次固有振動数はH10 で 26.8Hz,H20 で 8.2Hz,H10w で 23.9Hz である。

3. 解析結果

表-3 に各ケースのコンクリートの最大主応力およ び鉄筋の軸ひずみの経験最大値を示す。最大主応力 がコンクリートの引張強度を超過したケースおよび 軸ひずみが鉄筋の降伏ひずみ 1405 μ を超過したケー スを太字で示した。H20A600, H20A900 の 2 ケース ではひび割れと鉄筋降伏の発生が想定された。

外周面北端にて出力した最大加速度増幅率(以後, 増幅率)の高さ方向分布を図-2に示す。水平方向の 増幅率は高さ方向に指数関数的に増加した。一方で, 鉛直方向の増幅率は水平方向に比べ増幅率の最大値 は小さく,増幅は低い高さで顕著である。さらに,外 周面 4 方向端部の出力位置における増幅率の高さ分 布の一例を図-3 に示す。水平方向の増幅率はどの出 力方向でも大きく変化しない。一方で,鉛直方向の増 幅率は出力位置によって増幅挙動が異なる。これは 地震動の位相特性が影響しているものと推察される。

各ケースの高さ方向の増幅率分布の最大値を図-4

に示す。高さの増加および貯水の考慮に伴い,増幅率 は大きくなる。特に高さの影響が顕著で,H10 では 約1.4倍に対し,H20では約2.9倍の増幅率が示され た。H10,H10wにおいて地震力の強度は全方向にお いて増幅率にほとんど影響がないが,H20では地震 力の強度の増加に伴い,水平方向の増幅率は減少し た。これは表-3から鉄筋降伏により減衰が大きくな るためと考えられる。一方で,ひび割れによる影響を ほとんど受けない。また,貯水が有することにより水 平方向の増幅率分布の最大値は増加する一方で,鉛 直方向には大きな影響は見られなかった。

4. まとめ

本研究の範囲内において,水平方向の増幅率は高 さ方向に指数関数的に増加し,高さの増加や貯水の 考慮により,増加する傾向がある一方で鉄筋降伏に より減少する傾向を示した。鉛直方向の増幅率は低 い高さ位置で増幅が顕著であり,出力位置によって 増幅の挙動が大きく異なることを示した。

サージタンクにおける加速度増幅効果を安全側に 設定するためには,貯水を有するモデルを用いた線 形動的解析による解析結果の蓄積が必要と考える。

参考文献

1) 経済産業省原子力安全・保安院: 水力発電設備の耐震性 能照査マニュアル, 2012.2, 2) 土木学会: コンクリート標準 示方書設計編, 2017, 3) 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, 2005.3

