

貯留堰を有する取水路を対象としたスロッシング解析

大成建設(株)技術センター 正会員 ○本田 隆英, 正会員 織田 幸伸, 正会員 伊藤 一教

1. はじめに

原子力発電所では、津波来襲時においても必要量の冷却海水が取水できるよう、取水路の入口付近に貯留堰を設置する場合がある(図1)。この時、余震の発生により水路内でスロッシングが発生すると、補機ポンプ位置の水位が取水限界水位を下回り、補機ポンプによる取水ができない恐れがある。一般に、円筒や矩形などの形状が単純な容器のスロッシングに対しては、Housner 理論¹⁾に基づく評価式があるが、発電所取水路のように形状が単純でない場合は、数値解析により評価する必要がある。ここでは、図2に示す矩形形状と取水路形状の水槽を対象に、数値解析および既存評価式(Housner 理論)によるスロッシング結果について比較検討を行った。

2. 解析方法

数値解析モデルには、汎用数値流体解析コード SATR-CD を使用した。SATR-CD は、液相、気相のそれぞれについての連続式および Navier-Stokes 式から成り、乱流モデルには標準 $k-\varepsilon$ モデル、自由液面の追跡には VOF 法を適用した。外力となる地震については、防災科研の K-NET および KiK-net から震度 3~7 の観測地震波を 3 ケース使用し、地震加速度を水槽内の流体に直接与えた。各水槽は非構造格子を用いてモデル化し、解析メッシュサイズは、既往のスロッシング解析事例²⁾を参考に $dx = dy = 0.5 \text{ m}$, $dz = 0.1 \text{ m}$, $dt = 0.05 \text{ s}$ とした。解析条件は、表1に示す通りである。

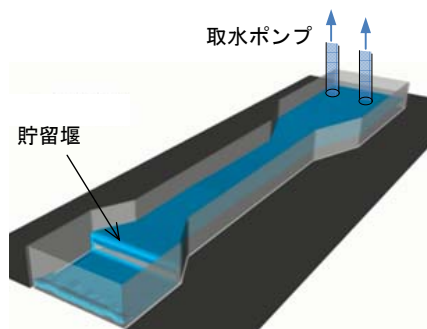


図1 貯留堰を有する取水路の例

3. 解析結果

矩形水槽に対する解析結果の一例として、壁面位置における水位の経時変化を地震加速度とともに図3に示す。震度7のCase03(図3(b))では、2000 cm/s/s を超える加速度が作用しており、壁面での水位変動は地震の揺れとともに発生し、その最大値は0.901 m となった。震度3のCase01(図3(a))では加速度が5 cm/s/s を超えてから水位変動が生じ始め、揺れの継続とともに増幅し、主な地震の揺れが収まった80 s 程度で最大のスロッシング高0.056 m が発生した。両ケースとも地震の揺れが収まっても、一度発生したスロッシングにより、矩形水槽の固有周期11.4 s の周期で振動を繰返しながら徐々に減衰している。

取水路に対する解析結果として、陸側および海側の壁面位置における水位の経時変化を地震加速度および累積溢水量とともに図4に示す。水位変動の経時特性は矩形水槽の場合と同じであるが、陸側壁面と海側壁面の水位変動は約25 s の位相差となっており、加速度が最大となる100 s 前後に陸側と海側で同程度の水位変動が算出されている。この傾向は、溢流が発生しないCase11でも同様であった。なお、Case12の溢

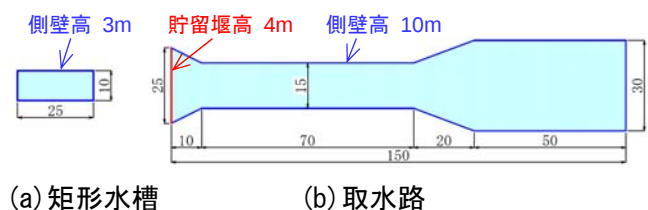


図2 水槽平面形状(単位:m)

表1 解析条件

ケース	水槽形状	地震波形	水深	溢流	固有周期	応答速度 ¹⁾
Case01	矩形	EQ1(震度3)	2.0 m	なし	11.4 s	0.113 m/s
Case02		EQ2(震度6弱)				1.004 m/s
Case03		EQ3(震度7)				1.281 m/s
Case11	取水路	EQ3(震度7)	3.0 m	なし	55.3 s	0.963 m/s
Case12			4.0 m	あり	47.9 s	0.879 m/s

1) 算出にあたり、減衰定数は0.1%とした。

キーワード スロッシング, 取水路, 数値流体解析, STAR-CD, Housner 理論

連絡先 〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 TEL045-814-7234

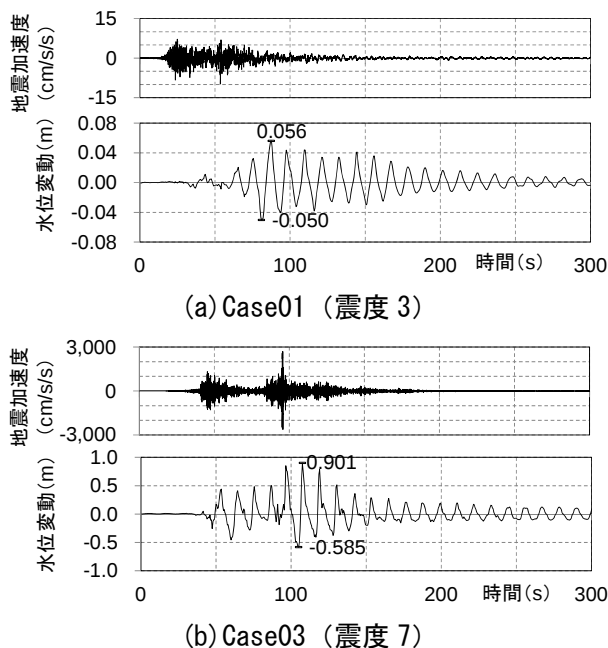


図3 矩形水槽のスロッシング解析結果

水量については、海側壁面の水位が貯留堰水位を上回る約 120 s で多くの溢流が発生しており、今回のケースでは合計 615 m³ の水が流出した。

今回の検討条件では、補機ポンプのある陸側位置において、震度 7 の地震によるスロッシングにより 0.817 m の水位低下が発生した。これは、貯留堰による湛水深 4 m の約 20% に相当し、無視できない程度である。以上から、想定地震にともなうスロッシングが大きな場合は、取水限界に対する最低水位の検討に対し、貯留堰による水深確保に加えスロッシングによる水位低下を考慮する必要性が示された。

4. 既存評価式 (Housner 理論) との比較

以上の解析で得られたスロッシング高と Housner 理論により算出したスロッシング高を、図 5 に示す。ここで、取水路のケースについては、解析は陸側のスロッシング結果を代表して示している。また、Housner 理論により算出する際は、取水路形状を包絡する矩形水路と見なして算出した。

矩形水槽については、解析により Housner 理論とおおむね近い結果が得られているものの、その差は 15% ~ 33% とやや大きい。これについては、今回は震度 6, 7 の地震加速度を与えているため、スロッシングの規模が大きくなり、Housner 理論で仮定されている微小振幅の適用限界を超えていることがひとつの要因として考えられる。一方で取水路については、得られたスロッシング高は微小振幅条件の範囲内にあるも

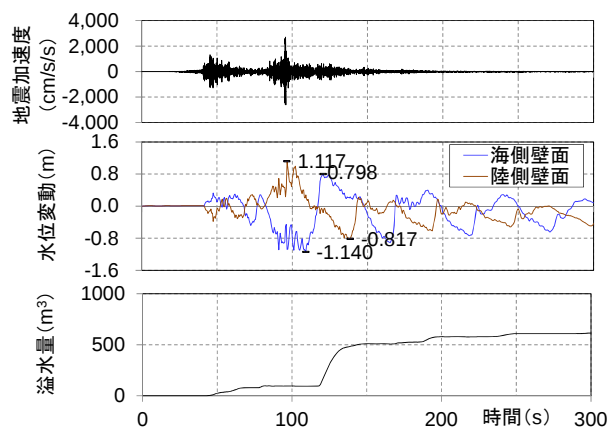


図4 取水路形状水槽のスロッシング解析結果 (Case12, 震度 7)

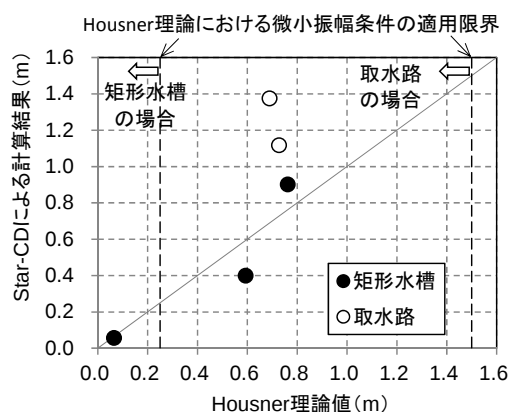


図5 スロッシング高に対する理論値との比較

の、解析では Housner 理論に対して 1.5~2.0 倍のスロッシング高が算出されている。これは、複雑形状水槽のスロッシングを評価する場合、水路幅一定を前提とした Housner 理論式では差異が大きく、数値解析の必要性が再確認された。

5. おわりに

取水路のスロッシング高について、解析結果は既存式の 1.5~2.0 倍となり、水槽形状の影響を大きく受けることが定量的に示された。さらに、ポンプ取水に対する最低水位の検討に、スロッシングによる水位低下を考慮する必要性が示された。数値解析結果の定量確認が、今後の課題である。

参考文献

- 1) Housner (1957): Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers, Bull. Seism. Soc. Am., Vol.47, No.1, pp.15-135.
- 2) 酒井ら (2007): 溢流を伴う矩形水槽の非線形スロッシング評価, 電中研報告, No. N06031.