

# 貯水タンクと貯水池のスロッシング解析事例の紹介

エンジニアリング本部 防災・環境解析部

西村 貴一

## 1. はじめに

スロッシングとは、自由液面を有する液体の振動現象のことを言い、液面揺動ともいう。筆者の携わっている耐震分野では、液体貯蔵施設の地震時挙動において問題となる現象である。

例えば、「水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版 I 総論」<sup>1)</sup>では、池状構造物やタンク構造物に対して、必要に応じて影響を考慮すると記載されている。

本稿では、円筒形水槽（貯水タンク）と貯水池を例として、スロッシングの検討事例を紹介する。

## 2. 二重円筒形水槽の事例

対象構造物は二重の円筒形水槽を有する RC 構造物であり図 1 に示す。外側水槽は運用上の最高水位が H.W.L.=25.200m と高く、蓋の設置高 (H.W.L.=26.050m) との差が 85cm と小さい。スロッシング現象により生じる上向きの荷重により外側水槽を覆う平屋根の損傷が懸念された。一方で、内側水槽は水深が浅く、水面と蓋の間には 10m 以上の高低差があり、スロッシングによる被害は生じないであろうと判断された。以上の理由より、外側水槽を対象としたスロッシング解析を行い、平屋根を構成する桁の照査を実施した。

### 2.1 解析プログラム

汎用構造解析プログラム TDAP III©Ver3.08.03 (株式会社アーク情報システム、大成建設株式会社) (以降、TDAP III と呼称する。)を使用した。

### 2.2 基礎理論

TDAP III において、スロッシング解析のための液体要素は、非粘性液体で変位を微小と仮定すると、運動方程式は、次のように示される<sup>2)</sup>。

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \dots \dots \dots \text{in } V$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\frac{1}{g} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} \dots \dots \dots \text{on } S_0$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = \frac{\partial u_n}{\partial t} \dots \dots \dots \text{on } S_1$$

ここで、

- $\varphi$  : 速度ポテンシャル
- $c$  : 液体中の音波速度
- $g$  : 重力加速度
- $u_n$  : 構造物と液体の連成面  $S_1$  における外向き法線方向の絶対変位

また、 $S_0$  は自由表面、 $V$  は液体領域を表す。 $n$  は、外向き法線方向を示す。

そして、波高  $h_w$  と動水圧  $P_d$  はそれぞれ次の式で表現される。

$$h_w = -\frac{1}{g} \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

$$P_d = -\rho \frac{\partial \varphi}{\partial t}$$

ここで、

- $\rho$  : 液体の質量密度

### 2.3 解析法

直接積分法による、時刻歴動的解析を実施した。積分間隔は、0.01 秒とした。

### 2.4 解析モデルと物性値

解析モデルを軸対称モデルとして作成した。

内壁は厚さ 500mm、外壁は厚さ、1,500mm の軸対称平板要素とする。RC 構造物の単位体積重量は、 $24.5\text{kN/m}^3$  とし、ヤング係数は  $E=2.35 \times 10^7\text{kN/m}^2$  とする。内水は、軸対称流体要素として、単位体積重量を  $9.8\text{kN/m}^3$  とし、ここでは、音波速度を  $1,400\text{m/s}$  とする。内水の減衰率は  $0.005^3$  とした。モデルを図 2 に示す。

### 2.5 内水の固有周期

水槽内部の水に対して、固有値解析を実施したところ、水の固有周期は 35.7 秒であった。

### 2.6 外力条件

まず、一般的な地震波形に対するスロッシングの解析を実施した。入力波形は、「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」<sup>4)</sup> に示される強震記録の 1 つである「I-I-1」(平成 15 年十勝沖地震 清水道路維持出張所構内地盤上 EW 成分)を対象とした。

上記に加えて、共振現象の発生する地震波形に対しても比較検討した。波形周期が 35.7 秒の地震波は、周期が長過ぎるので、ここでは波長の 1/8 として、最大振幅が「I-I-1」と同じ値の波形を作成した。地震の波長は約 4.5 秒であり、高層ビルの固有周期がこの程度である。

作用荷重の円周方向のフーリエ展開次数を 1 次(反対称)とする。図 3 に、地震波形を示す。

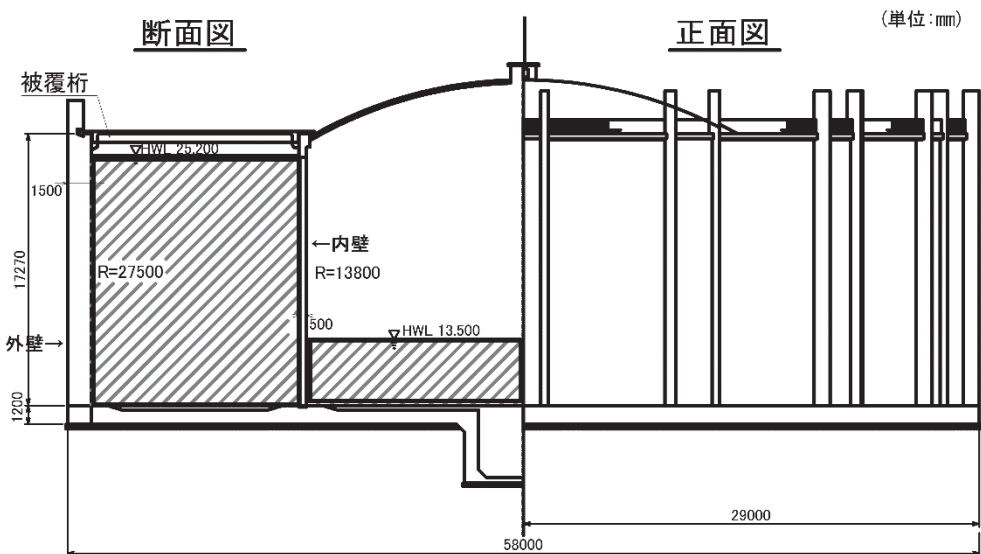


図 1 構造形状

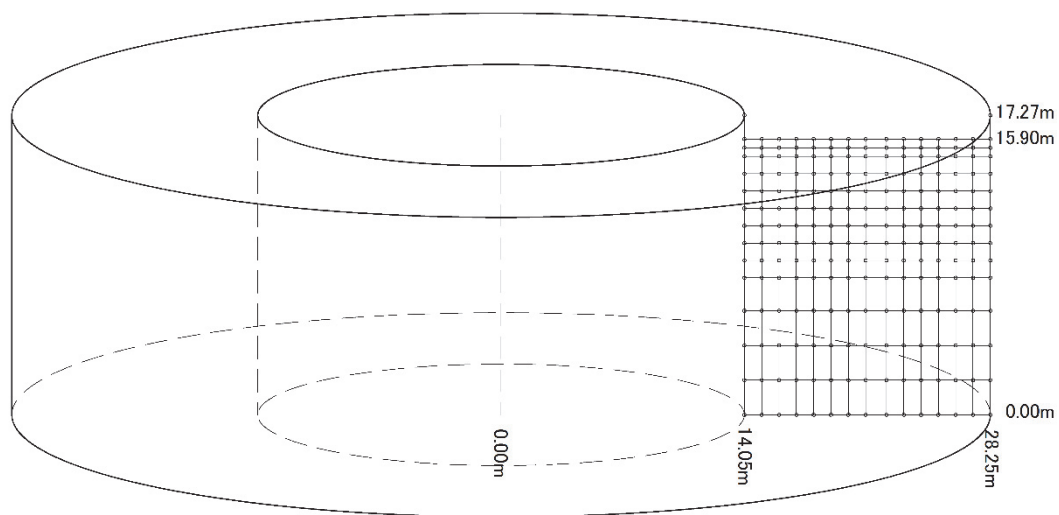


図 2 モデル図

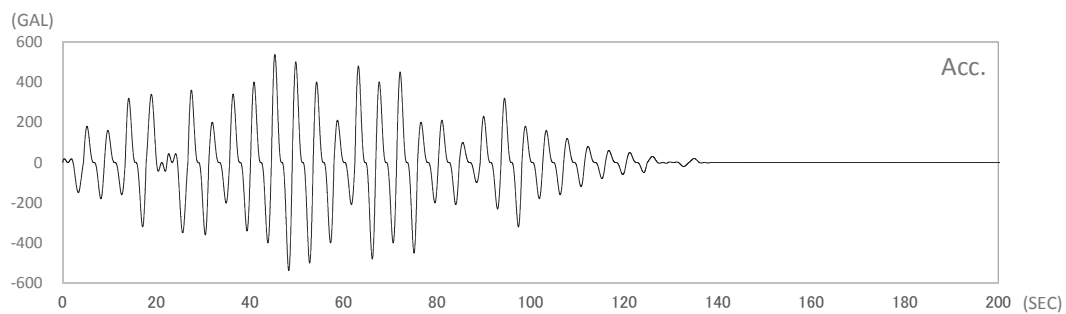
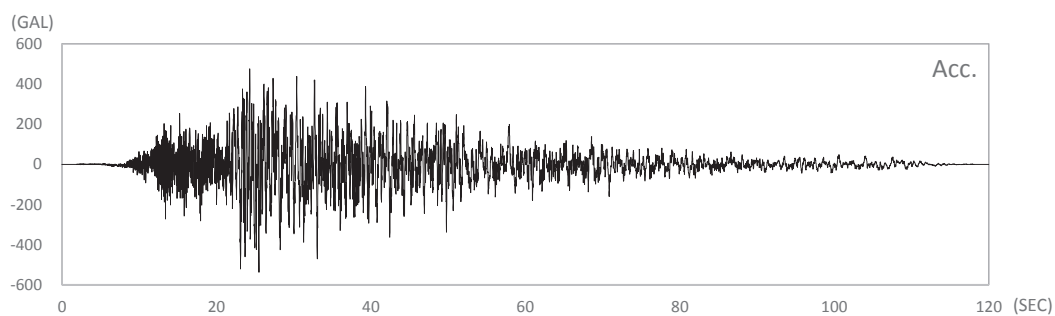


図 3 入力波形(上:I-I-1 波 下:共振波)

## 2.7 解析結果

二重円形水槽の自由水面の内壁位置と外壁位置における波高の時刻歴図を図4と図5に示す。

「I-I-1」の解析結果では、内壁位置において水面が+31.2cm から-33.8cm の幅で変動した。外壁位置においては+48.2cm から-48.1cm 幅で変動した。

「共振波」の解析結果では、内壁位置において水面が+139.4cm から-167.5cm 幅で変動した。外壁位置においては+260.6cm から-157.8cm 幅で変動した。

## 2.8 解析結果の考察

地震波形の最大加速度はともに 537.8gal で同じだが、生じる波高には 5 倍程度の差が生じた。自由液面の振動において、地震の周期が重要なファクターであることがわかる。

## 2.9 平屋根の照査

自由水面位置から平屋根までの高さは、85cm である。したがって、「I-I-1」作用時は水面上昇による水圧は桁に作用しない。「共振波」作用時は、水面上昇による水圧が被覆桁に作用するので、その影響を照査する。

照査項目は、水面上昇により生じる腰掛圧により、平屋根が損傷しないことを照査する。平屋根の構造は、図6に示すようにプレストレスコンクリート製の橋桁(S212-500)を渡し、上部に厚み 150mm のコンクリート床版を載せた構造である。また、隣り合った桁は連結していない。

桁スパン $l$ は、13.10m である。桁1本当たりの負担するコンクリート床版幅は外壁側で1,197mm、内壁側で625mm である。以上の条件より、部材の単位体積重量を 24.5kN/m<sup>3</sup> として、桁の断面あたりの負担重量を計算すると 6.40~4.30kN/m であり、桁1本あた

りの重量は、70.09kN である。

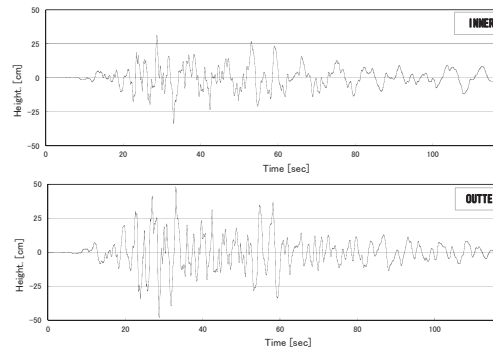


図4 「I-I-1」の波高

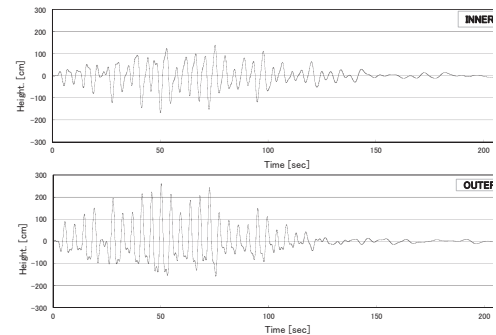


図5 「共振波」の波高

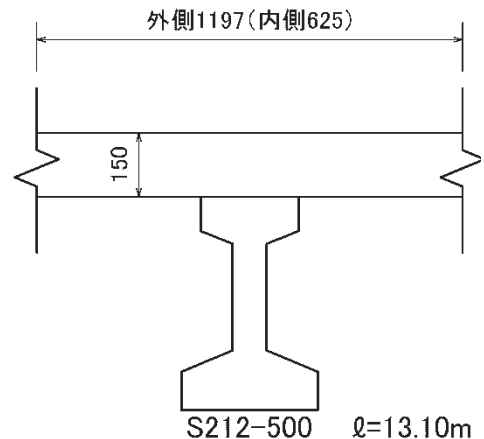


図6 平屋根の桁断面の構造(桁1本あたり)

スロッシング解析の結果より、内壁位置での波高と外壁位置での波高は、変動にずれがあるが、簡単のために波高の高い外壁位置の最大波高 260.6cm を照査外力として採用する。腰掛圧 $p_w$ は、

$$\begin{aligned} p_w &= \gamma_w(2.606 - 0.850) \\ &= 17.21(kN/m^2) \end{aligned}$$

また、桁一本当たりの腰掛圧 $P_w$ は、

$$\begin{aligned} P_w &= 17.21 \cdot 13.10(1.197 + 0.625)/2 \\ &= 205.39(kN) > 70.09(kN) \end{aligned}$$

以上の結果より、スロッシングにより生じる腰掛圧は、平屋根の自重よりも大きいので浮き上がり損傷に対して NG 判定とする。

## 2. 10 対策工法の検討

スロッシング対策の最も簡便な対策は、貯留水位を下げることである。欠点は、タンクの運用容量の低下である。

平屋根の RC 増厚などにより、平屋根重量を大きくする対策が考えられる。利点は、平屋根部材の部材補強を兼ねることができ、補強工事も簡単である。ただし、上部重量が増加すると、構造計算上、問題が出る可能性がある。

桁をアンカーボルトなどにより、固定する対策も考えられる。利点は、平屋根の重量の増加がわずかであることや、工事が簡易なことである。欠点は、従来想定していない、上向きの荷重に対する桁の検討が必要になることが挙げられる。桁は下向き荷重に対してのみ設計しているため、腰掛圧が上向きに作用することを想定した場合、桁の部材補強が必要になる可能性がある。以上、簡単に 3 工法を例示した。

## 3. 貯水池の事例

照査対象とする仮想貯水池(M池)を図7に示す。

M池は、市街地近郊の山間部に設けられた歴史のあるロックフィル形式の貯水池である。

堤体下流に民家が点在しているほか、堤体天端は遊歩道として整備されている。このような事情により、貯水池の貯留水が地震時の波の発生により、堤防を越えて溢れるかが検討対象となった。

### 3. 1 解析プログラムと基礎理論

解析プログラムと基礎理論は二重円筒形水槽の例と共通である。ただし、大規模モデル解析用モジュール(64bit) (株式会社アーク情報システム、大成建設株式会社)を使用した。

### 3. 2 解析モデルと物性値

3次元立体モデルとしてモデルを作成する(図8)。モデル化範囲は貯水池を包括する 495m×595m の範囲とした。3次元立体要素としてモデル化した。

内水は、単位体積重量を 9.8kN/m<sup>3</sup>とし、音波速度を 1,500m/s とする。内水の減衰率は 0.005 とした。

地山の単位体積重量を 24.5kN/m<sup>3</sup>とし、せん断弾性波速度を 1,000m/s、ポアソン比は 0.25 とした。減衰率は 0.05 とした。

モデル下端の境界条件を粘性境界とし、せん断弾性波速度を 1,700m/s、ポアソン比を 0.25 とする。モデル側面は、鉛直固定・水平ローラー条件とした。

### 3. 3 外力条件

この地域で想定されている海溝型及び内陸直下型の 2 種類の地震を考慮する。海溝型の地震波形は、地震調査研究所推進本部の公開している長周期波形より、「Tonankai.Osaka\_fucho」<sup>5)</sup>を採用する。内陸直下型地震は、大阪府の想定標準地震動より、「R03」<sup>6)</sup>を採用する。M池の複雑な形状より、地震波形の E-W 成分と N-S 成分を同時に考慮する。図9に波形を示す。

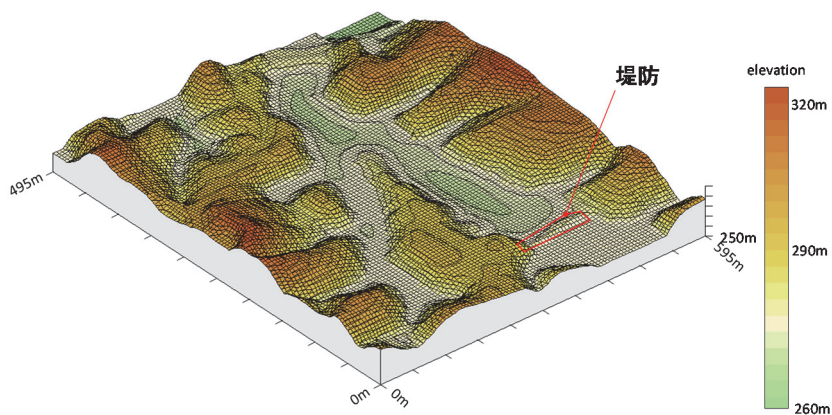


図 7 M 池と周辺のコンター表示 (地山標高と堤防位置)

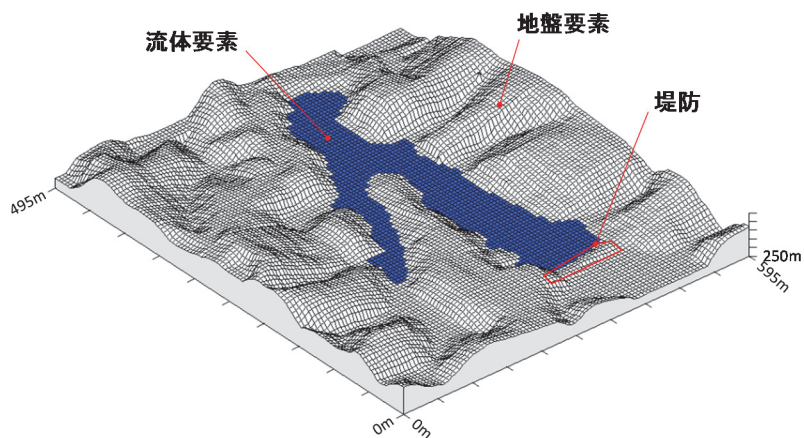


図 8 M 池の解析モデル概要

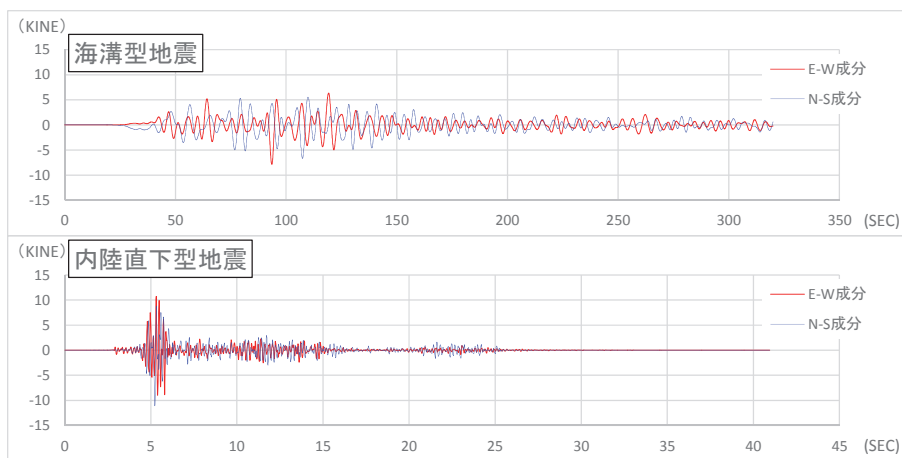


図 9 入力波形(上:海溝型地震 下:内陸直下型地震)

### 3. 4 解析結果

地震時における最大波高の平面分布図を図 10 及び図 11 に示す。図の左上が堤防位置である。堤防近傍位置における最大波高は、海溝型地震のときに 62mm、直下型地震のときに 1mm 以下である。また、貯水池全体において、波高は極めて小さく、10cm のオーダーの波しか生じない。

### 3. 5 解析結果の考察

海溝型地震では、内陸直下型地震に比べて、長周期成分を多く含むために、比較すると大きな波高が生じたと考えられる。しかし、M 池は複雑な形状のために地震波と共振せず、全体的に波高を低くしたと考えられる。

### 3. 6 溢水に対する照査

当該堤防は、堤防高=278.7m、水面高=275.4mより、3.3m よりも大きな波が生じなければ溢水しない。当該地域の想定地震動に対しては、生じる波高が 1m にも満たず、堤防を越えることはない。

## 4. まとめ

土木構造物においては、上下水道施設の処理場や、農水施設のファームポンド、あるいは各種の貯水池はスロッシング被害が生じる可能性がある。また、これらの構造物に対する照査指針・設計指針の一部では、最初に記載したようにスロッシングに対する検討にも言及されている。しかし、筆者の経験上、実際にスロッシングに対する照査・検討が行われることは稀である。

これは予算や工期の問題に加えて、耐震検討を実施する技術者は主に「構造解析の技術者」であり、「水の挙動」のシミュレーションを敬遠しているためと思われる。

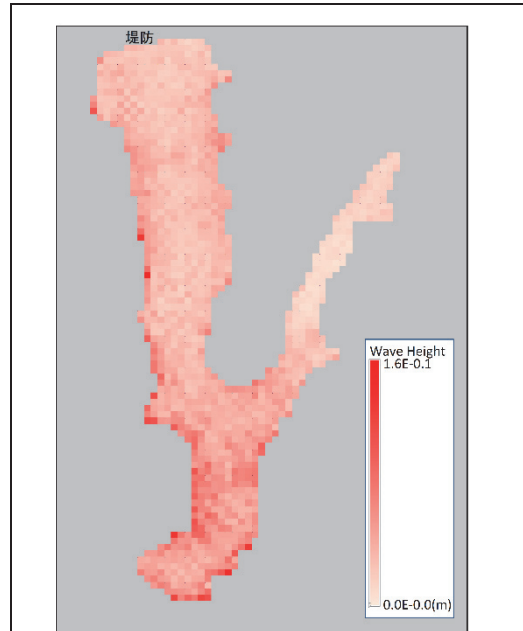


図 10 最大波高図(海溝型地震)

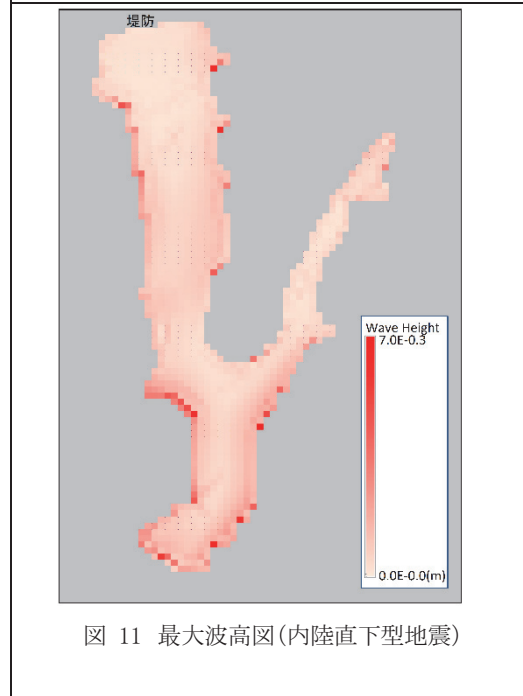


図 11 最大波高図(内陸直下型地震)



しかし、本稿で示したように、水工と呼ばれるような一般土木構造物に必要な範囲に限るならば、スロッシングの検討は比較的簡単・平易に実施することができる。

また、貯水池の事例で示したような形状の複雑な場合には、その複雑さにより共振しにくく、スロッシングは生じにくいと考えられる。スロッシングに対しては、小規模から中規模の単純な形状の方が、より検討が必要であると考えられる。

弊社、防災・環境解析部としては、スロッシングに限らず様々な自然災害や問題に対して真摯に取り組む社会の防災、減災力の向上に寄与すべく努める所存である。

#### <参考文献>

- 1) 「水道施設耐震工法指針・解説 2009 年版 I 総論」(pp.72-73, 平成 21 年 7 月, 社団法人日本水道協会)
- 2) 「TDAPIII 理論説明書バージョン 3.0.8」(p.D-21, 平成 28 年 5 月, アーク情報システム)
- 3) 「スロッシング 液面揺動とタンクの振動」(p.8, 平成 27 年 5 月, 小松敬治)
- 4) 「道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編」(pp.112-118, 平成 24 年 3 月, 社団法人日本道路協会)
- 5) 「「長周期地震動予測地図」2009年試作版報告書(想定東海地震、東南海地震、宮城県沖地震の長周期地震動予測地図)」(平成 21 年, 地震調査研究推進本部地震調査委員会, [http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic\\_hazard\\_map/lpshm/09\\_choshuki\\_dat/](http://www.jishin.go.jp/evaluation/seismic_hazard_map/lpshm/09_choshuki_dat/))
- 6) 「平成 19 年度 想定標準地震動」(平成 19 年, 大阪府)



写真 1 M 池堤体を下流側より望む

・天端部が遊歩道として整備されている。



写真 2 M 池を堤体中央より望む

・奥行きのある細長い形状の貯水池であることがわかる。



写真 3 M 池の外周部

・外周部は自然地形で構成され、人工構造物はない。