

平成21年 4月 1日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360219  
 研究課題名（和文）  
 長周期地震動の破壊力予測と大型タンクのスロッシング抑制実験  
 研究課題名（英文）  
 Prediction of Long-period Earthquake Ground Motions and Sloshing Control of Large Tanks  
 研究代表者  
 野田 茂 (NODA SHIGERU)  
 香川大学・工学部・教授  
 研究者番号：80135532

## 研究成果の概要：

本研究では、2003年十勝沖地震時の長周期地震動特性を調べ、スロッシング挙動に及ぼす非線形性の影響を検討するとともに、巨大地震に伴う長周期強震動のシミュレーション手法を提案し、想定震源域における長周期地震動の破壊力を予測した。次に、タンクを対象に流体-構造連成解析を実施し、タンク側壁・浮屋根と内容液の挙動を定量的に分析した。提案したスロッシング抑制策の効果を検討した結果、その有効性が明らかになった。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2007年度	4,700,000	1,410,000	6,110,000
2008年度	3,100,000	930,000	4,030,000
年度			
年度			
総計	11,300,000	3,390,000	14,690,000

## 研究分野：地震工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：長周期地震動、破壊力予測、大型タンク、粒子法、スロッシング、振動制御

## 1. 研究開始当初の背景

2003年十勝沖地震に伴う浮屋根式タンクの損傷は、長周期地震動の影響により、苫小牧地域においてこれまで想定されていた以上のスロッシングが生じ、浮屋根が大きく揺動したことによるものである。同地震の被害により、スロッシング対策が喫緊の課題となった。

2003年十勝沖地震の教訓を受け、消防法が

改正され、設計用スロッシング高さの見直し、液面管理、浮屋根耐震性能の強化、衝突防止対策などが講じられるようになった。しかし、地震時に生じるスロッシングを直接的に抑止することは不可能である。大型タンクの免震・制振対策については従来から幾つかの提案があるものの、効果的なスロッシング抑制策の実用化に至っていない。

こうしたことから、土木学会では、巨大地

震災を想定し、その対策を検討する「巨大地震災害への対応検討特別委員会」を設置した。NHKでは、2004年1月18日にNHKスペシャル「地震波が巨大構造物を襲う」を放送し、長周期地震動の破壊力、タンクなどの巨大地震対策の必要性を視聴者に伝えた。

近い将来、南海地震などの巨大地震が発生し、長周期地震動が我が国を襲うのは確実である。このため、中央防災会議の専門調査会ほか、産官学では長周期地震動の予測と対策のための調査・技術開発を行うこととなった。

## 2. 研究の目的

本研究では、まず、過去の地震に伴う長周期地震動の調査分析の後、来たる巨大地震を対象に、断層震源モデルと動力学的な不均質破壊過程を考慮することにより、長周期地震動を高精度に予測するシミュレーション手法を開発する。

次に、内容液とタンク側壁・浮屋根の連成効果を含む剛基礎上の円筒タンクを対象に数値実験を実施する。

具体的には、粒子法による流体-構造物の連成解析を行い、スロッシング挙動を調べる。その際、浮屋根の変形を考慮し、上下動、タンクの柔性、スロッシング高次モード、液面境界条件の非線形性がスロッシングに及ぼす影響、スロッシングがタンク側壁・浮屋根に与える相互作用などについて分析する。

最終的には、より高度かつ精緻な非線形動的構造解析ソフト（粒子法）の3次元非線形地震応答解析を適用し、本研究で提案したスロッシング抑制策の妥当性を確認する。スロッシング振動エネルギー吸収と地震入力エネルギー低減が効果的に行われることを基準としたセミアクティブ制御システムを開発し、その効果を数値解析によって検証する。

## 3. 研究の方法

### (1) 長周期地震動の予測

#### ①2003年十勝沖地震時の地震動特性

2003年十勝沖地震の際にスロッシングが発生した苫小牧において、どの程度のスロッシング高さが推定され、どの程度の非線形性の影響が含まれていたかを数値解析的に検

討する。

解析に当たっては坂田ほかによる剛体円筒タンクのスロッシング解析法に上下動入力項を導入した方法を用いる。すなわち、スロッシングの0~2次モードに着目した水平・上下2方向入力による非線形スロッシング解析法を採用する。その上で、苫小牧におけるスロッシング高さの推定およびその非線形性の影響を検討する。

検討対象としたタンクは、苫小牧にある浮屋根式タンクを参考に容量11,000~116,000klの8種類である。内容液の深さは満液時、満液時の90%、80%、50%の4種類を想定する。入力地震動には（独）防災科学技術研究所のK-NETによる苫小牧の加速度記録を用いる。

#### ②想定地震に伴う地震動予測

地震動評価手法としては釜江ほかの統計的グリーン関数法に久田による長周期領域への拡張法を導入した方法を用いる。地震動計算は表層地盤の非線形性の影響を受けない工学的基盤面（せん断波速度 $V_s=400\text{m/s}$ 程度の地盤）で行う。

想定地震は1923年の関東地震（地震規模 $M=7.9$ ）とする。断層モデルにはWald & Somervilleのモデルを用いる。断層の巨視的パラメータ、微視的パラメータは地震調査研究推進本部地震調査委員会による海溝型地震の地震動評価レシピに基づいて設定する。図1には仮想関東地震断層の平面位置を示す。



図1 仮想関東地震の断層位置

要素地震は想定断層の中央部に設定する。地震基盤面で求めた要素波を工学的基盤面まで重複反射理論（計算機コードSHAKE）により引き上げ、それを地震動合成に用いる要

素波とする。

### (2) タンクのスロッシング解析

タンクのスロッシング解析に当たっては粒子法を用いる。

粒子法は従来の差分法や有限要素法では困難であった複雑現象をシミュレートできる。中でも本研究で用いる MPS (Moving Particle Semi-implicit) 法では、連続体をメッシュ (計算格子) 分割するのではなく、自由に動く粒子の集まりとして表現することができる。同法は非圧縮性粘性解析に適した計算アルゴリズムであり、砕波などの非線形現象を再現可能な解析手法として注目を集めている。

MPS 法では連続体の運動を有限数の粒子運動として離散化すると、粒子の挙動が解明される。各粒子が持つ速度などの状態変化は粒子間相互作用に基づいて計算される。連続体を有限個の粒子で表すことが空間の離散化に相当するとともに、支配方程式を粒子間相互作用に置換することが偏微分方程式の離散化に相当する。

従来手法である有限要素法や差分法と比較すると、1) 完全ラグランジュ法であるので、2) メッシュ生成が不必要などの特徴がある。この利点より、移流項に起因する数値拡散が生じず、自由液面の境界を特別なスキームなしに追跡できる。このため、安定した流体-構造物連成解析を実現できるようになった。

ここでは、浮屋根を剛体、弾性体でモデル化したときのスロッシング挙動を調べる。モデル化に当たっては、浮屋根の有無、構造条件 (剛体・弾性体、強度)、液深をパラメトリックに変化させ、2 次元タンクモデルを対象に解析する。これらの相違が流体-構造物の連成効果、スロッシングや浮屋根の挙動に及ぼす影響を検討する。浮屋根部については、解析の都合上、ポンツーンなどのマイクロなモデル化をしない。

### (3) スロッシング抑制実験

本研究の特徴の一つは、スロッシングの検討のため、内容液を粒子群でモデル化し、その挙動計算に SPH (Smoothed Particle

Hydrodynamics) 法を適用することにある。同手法には、従来のように流体を連続体として取り扱うのではなく、破碎の発生に見られるように流体の厳密な挙動を容易に分析できる利点がある。

従来の研究では浮屋根を無視した線形・非線形スロッシング解析が行われることが多かった。そこでまず、浮屋根の存在がスロッシングに及ぼす影響を定量的に検討する。制御装置としては、図 1、図 2 に示すごとく、ケーブル剛性、付加マス、バネおよびダンパーで構成されたスロッシング防止装置系を浮屋根に設置するとともに、そこからケーブルを介して浮屋根に取り付けるペアモデルを考える。

3 次元解析の結果、スロッシングの何次モードがどのように卓越するのか、スワール (液面が回転するような振動の変化) はどのようになるのか、浮屋根・ケーブルにかかる力・変形量はどうか、制御装置の導入効果はどの程度あるのかなどを詳しく調べる。

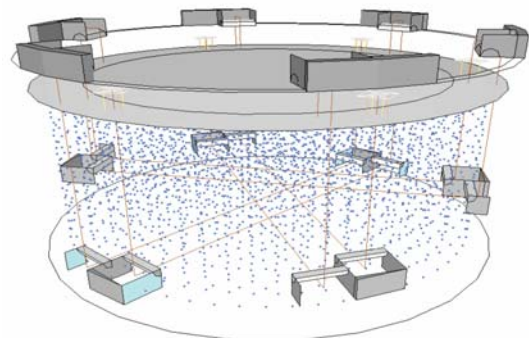


図2 マス・バネ・ダンパー装置に連結したケーブル制御装置の立体図

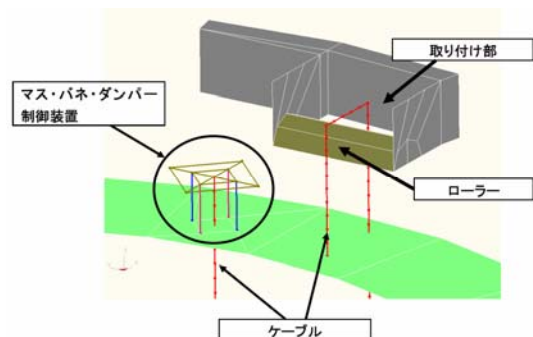


図3 タンク頂上部における上部ローラー付近の取り付け部と制御装置 (マス・バネ・ダンパー・ケーブル) の拡大図

#### 4. 研究成果

##### (1) 長周期地震動の予測

###### ①2003年十勝沖地震時の地震動特性

2003年十勝沖地震時のスロッシング高さ  
を推定し、どの程度の非線形性の影響が含ま  
れていたかを検討することにより、長周期地  
震動特性を明らかにする。

スロッシングについて、線形解析 (EW 成分  
入力) の最大応答液位と非線形解析 (EW・UD  
成分同時入力) の最大応答液位の関係を示す  
と、図4のようになる。同図より、最大応答  
液位が 1.5m ほどを超えると、非線形性の影  
響が顕著に現れることがわかる。

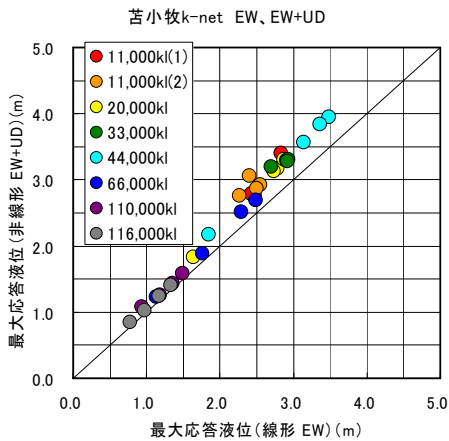


図4 線形最大応答液位 (EW 成分入力) と非線形最大  
応答液位 (EW・UD 成分入力)

図5には線形解析 (EW 成分入力) に対する  
非線形解析 (EW 成分入力) の最大応答液位の  
比をスロッシング1次固有周期との関係で示  
す。応答液位の大きな周期 5~9 秒で概ね 10  
~20% の非線形の影響が含まれており、周期  
6 秒付近では最大応答液位が 1.3 倍に増幅す  
るケースもあることが理解できる。

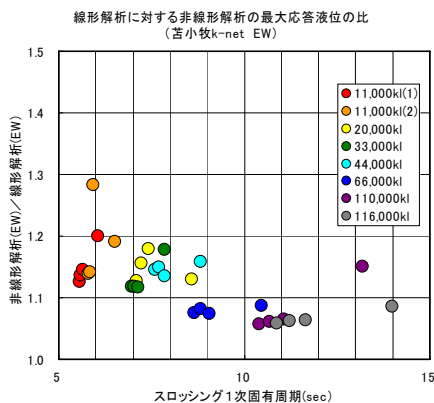


図5 線形最大応答液位 (EW 成分入力) に対する非  
線形最大応答液位 (EW 成分入力) の比

これより、スロッシング高さに与える非線  
形性の影響が無視できないことが確認され  
る。非線形性を考慮したスロッシング高さ算  
定法の必要性が明らかである。

###### ②想定地震に伴う地震動予測

図6に TOY 地点の解放工学的基盤面におけ  
る合成波の加速度波形 (EW 成分) を示す。

久田の方法を適用したケース2と適用しな  
いケース1の結果を比較すると、包絡形はほ  
ぼ同じであるが、ケース2はケース1に比べ、  
最大加速度が大きく、周期の長い成分を含ん  
だ加速度波形となっている。断層の大きさ  
を変えたケース2~4からは、加速度波形の包  
絡形はほぼ同じ形状を示すものの、断層の  
大きさが小さいほど加速度が小さく、断層を  
1km×1km に分割したケース4ではケース2、  
3 に比べ、短周期成分を多く含む波形となっ  
ていることがわかる。

ここでは示していないが、断層分割数が大  
きくなると加速度波形に蛇行するような見  
かけの長周期成分が現れる現象が見られた。

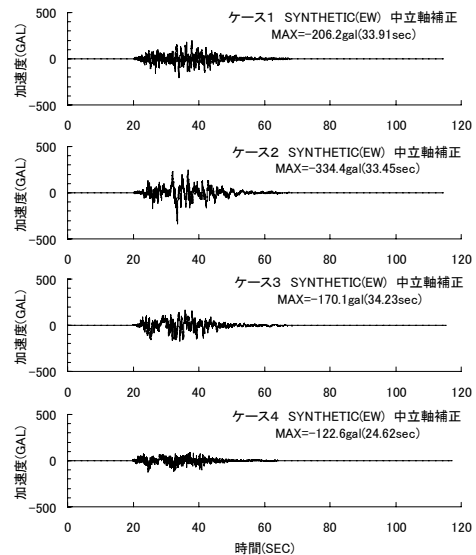


図6 工学的基盤での合成波 (EW 成分)

統計的グリーン関数法による仮想関東地  
震の地震動評価を試みた結果、久田の方法を  
適用することにより周期の長い帯域で改善  
が見られること、合成波形は断層の分割数に



大きく影響され、従来から指摘されているように細かい分割では粗い分割に比べて疑似速度応答スペクトルに中間周期帯域での落ち込みが見られることが確認できた。

### (2) タンクのスロッシング解析

浮屋根がないと、図7に示すように、自由表面の液面状態になる。そのため、地震入力波に対してスロッシングが成長することにより、 $H/D$  ( $H$ は液深、 $D$ はタンクの内径)や空間余裕高さが違うと、内容液がタンクから溢流するケースがあった。粒子法の解析を導入した結果、スロッシングに伴う砕波や飛沫現象を的確に再現できることがわかった。

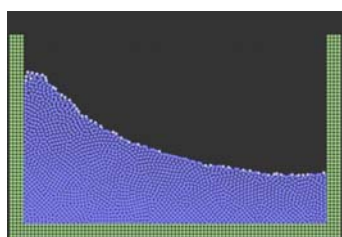


図7 浮屋根のないタンクのスロッシング

図8に示すように、浮屋根が剛体であると、変形が許されなため、スロッシングは線形的挙動を呈す。浮屋根が弾性体になると、自由表面の状態に近い挙動を呈することになり、浮屋根のない状態におけるスロッシングの非線形性が見られ、スロッシングの成長に伴い、2次モード以上の高次モードが生起する特徴のある応答が発現した(図9)。モード変化やスロッシングの非線形性によっては浮屋根に大きな圧縮力や引張力が作用した。高次モードの励起したスロッシング挙動に起因し、浮屋根のたわみが大きくなることも明らかになった。

なお、本研究ではポンツーンなどをモデル化していないため、スロッシングに伴う浮屋根挙動に応じ、図8、図9のように、内容液が浮屋根とタンク側壁の隙間から流れ出る現象や浮屋根の大変形現象が見られる。MPS法によって流体-浮屋根構造の連成挙動が表現できていることが明らかになった。

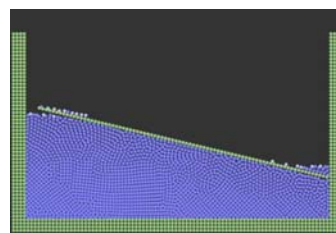


図8 剛体浮屋根タンクのスロッシング

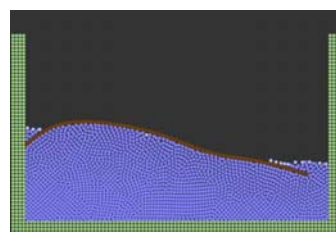


図9 弾性体浮屋根タンクのスロッシング

実際には、タンク側面上で波高が最高となるわけではないが、タンク左側側面上における液面の変化量からスロッシング波高 $h$ を計測し、その正規化時刻歴 $h/H$ を調べると、図10のようになる。

図から、浮屋根がない場合の、また浮屋根があって剛体か弾性体の場合のスロッシング挙動の相違が理解できる。浮屋根がないと、すなわち液面の拘束がないと、スロッシングが大きく励起されていることがわかる。スロッシング波の上昇側が大きくなる非線形挙動を呈している。

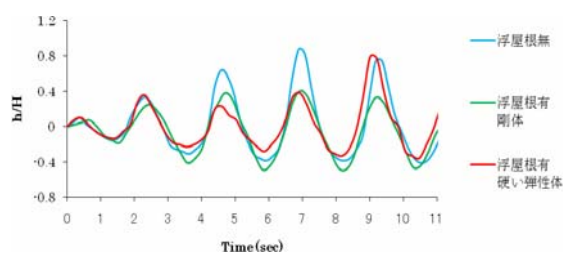


図10 スロッシング波高の時刻歴

この場合には、浮屋根を導入することにより、特異な挙動を示す。浮屋根が硬い弾性体の一部時点を除き、上昇側へのスロッシングが抑えられている。浮屋根の強度特性、変形に伴ってスロッシングに高次振動モードが卓越する。スロッシングモードには大きな変化が見られた。

### (3) スロッシング抑制実験

スロッシング解析のため、入力地震波には2003年十勝沖地震時に観測された苫小牧波(NS、EW、UD成分)を用いた。対象モデルは8千klのタンクである。

スロッシングに伴う挙動を調べるため、図11に示す内容液上面の6SPH要素の動きに注目する。浮屋根がある場合、非制御時のスロ

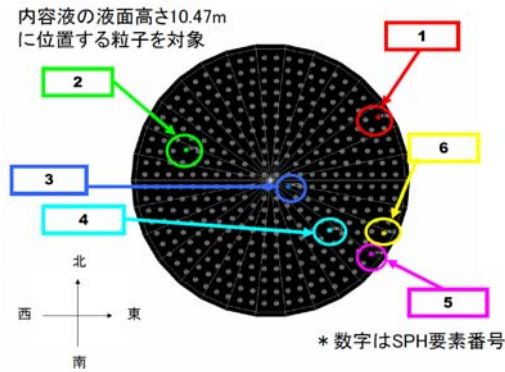


図11 スロッシング波表示のためのSPH要素番号

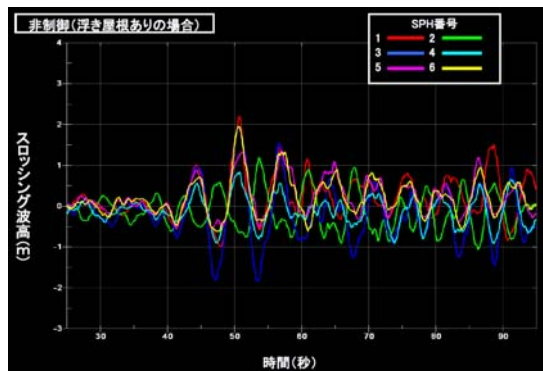


図12 非制御時のスロッシング波時刻歴

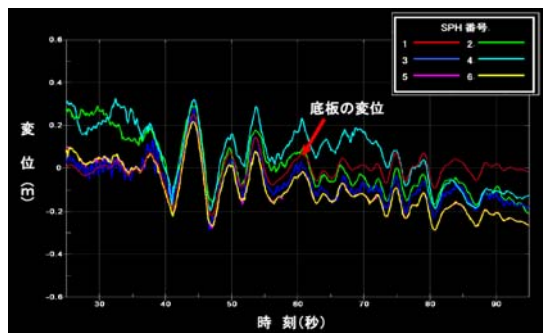


図13 制御時のスロッシング波時刻歴

スロッシング波高の時刻歴は図12のようになる。対象箇所が異なれば、スロッシング挙動は変化する。非線形性により、スロッシング波は上昇側・下降側で対称に生じない。この場合には浮屋根の存在によってスロッシング

が1mほど抑えられたが、それでも2mの波高が生じている。浮屋根がない場合、200kineの速度応答値が得られた。この値は設計値を遥かに超える大きさなので、スロッシングを抑える必要がある。

3対の制御装置を図2のごとく浮屋根に設置した結果、図13に示すように、スロッシング現象を大きく抑えることができた。浮屋根にはスロッシングに伴う力が作用して撓むが、マス・バネ・ダンパーの装置、ケーブルにかかる力がこのスロッシング力に対抗する。これにより、スロッシングを効果的に抑えられている。数値シミュレーションの結果、導入した装置の有効性が力学的かつ振動論的に明らかになった。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計10件)

- ① 斎藤章彦・山中 稔・長谷川修一・野田 茂、物理探査手法を用いたため池堰堤の物性評価、構造工学論文集、Vol. 54A、266-272、2008年、査読有

[学会発表] (計15件)

- ① 竹内裕彦・野田 茂、タンクのスロッシングに伴う浮屋根挙動のMPS解析、土木学会第64回年次学術講演会、2009年9月、福岡大学(予定)
- ② 須川智史・野田 茂・吉田秀典、MPS法を用いたタンクのスロッシング解析、土木学会第63回年次学術講演会、2008年9月11日、東北大学
- ③ 吉田隆治・野田 茂、断層分割数が統計的グリーン関数法による仮想関東地震の地震動評価結果に与える影響について、土木学会第62回年次学術講演会、2007年9月12日、広島大学

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

野田 茂 (NODA SHIGERU)  
香川大学・工学部・教授  
研究者番号: 80135532

(2)研究分担者

吉田 秀典 (YOSHIDA HIDENORI)

香川大学・工学部・教授

研究者番号：80265470

寺林 優 (YOSHIDA HIDENORI)

香川大学・工学部・准教授

研究者番号：40243745