

## 2003年十勝沖地震時の苫小牧における タンク内容液のスロッシング挙動の非線形性について

前田建設工業（株） 正会員 吉田 隆治  
香川大学工学部 フェロー会員 野田 茂

### 1. はじめに

2003年十勝沖地震ではタンク内容液のスロッシングが一因となり大火災が発生した。1964年の新潟地震の際も新潟で同様なタンク火災が発生しており、原油タンクの耐震安全性を考える上で、内容液のスロッシングは重要な検討項目の一つとなっている。タンク内容液のスロッシング挙動を推定する場合、その非線形性が無視できないことが指摘されており、著者ら<sup>1)</sup>も1983年日本海中部地震の際の検討結果から、最大スロッシング高さ4.5mが観測された新潟で最大約15%、最大スロッシング高さ2mが観測された苫小牧で最大約10%の非線形性の影響が含まれていたことを数値解析によって確認している。

ここでは、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した結果を報告する。

### 2. 検討方法

坂田ほか<sup>2)</sup>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<sup>1)</sup>の項を導入した方法<sup>1)</sup>を用いる。即ち、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用い、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。検討対象とするタンクは苫小牧にある浮き屋根式タンク<sup>3)</sup>を参考に容量11,000~116,000klの8種類のタンクとし、内容液の深さは満液時、満液時の90%、80%、50%の4種類想定する。また、入力地震動は（独）防災科学技術研究所<sup>4)</sup>のK-NETによる苫小牧での加速度記録を用いる。

### 3. 検討結果

図1に2003年十勝沖地震の苫小牧での加速度記録から水平2成分の応答の合成として求めた2次元速度応答スペクトル（ $h=0.1\%$ ）を示す。この記録はやや長周期成分が卓越しており、周期4~8秒で200kineを超え、5秒付近では300kineにも達している。図1にはNS、EW成分のそれぞれの速度応答スペクトルも示したが、2次元速度応答スペクトルはEW成分のそれにほぼ一致している。また、図1には1983年日本海中部地震の際の苫小牧および新潟での記録より求めた2次元速度応答スペクトル<sup>5)</sup>（ $h=0.1\%$ ）も併せて示した。2003年十勝沖地震の苫小牧での揺れは、卓越周期は異なるものの、日本海中部地震の新潟での揺れ（周期10秒で約270kine）に匹敵する大きさであることが分かる。

図2に非線形解析（EW・UD同時入力）の最大応答液位とスロッシング1次固有周期の関係を示す。地震動の卓越周期5~8秒に近いスロッシング1次固有周期を有する容量11,000~44,000klのタンクで大きな応答液位を示しており、満液時のスロッシング1次固有周期が7.5秒となる44,000klタンクでは最大応答液位は約4mに達すると推定される。

線形解析（EW入力）の最大応答液位と非線形解析（EW・UD同時入力）の最大応答液位の関係を示す図3から、最大応答液位が1.5mを超えたあたりから非線形性の影響が現れていることが見て取れる。

図4には線形解析（EW入力）に対する非線形解析（EW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した。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。

図5にはEW入力の非線形解析に対するEW・UD同時入力の非線形解析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したが、上下動が最大応答液位に与える影響は無視できると言える。

図 6 にはタンク高さに対する非線形解析 (EW・UD 同時入力) の最大応答液深の比をスロッシング 1 次固有周期との関係で示した。地震動の卓越周期 5~8 秒付近にスロッシング 1 次固有周期を有する 11,000~44,000kl のタンクでは満液時の 90% の液位でも最大応答液深がタンク高さを超える可能性があることが読み取れる。

4. おわりに

2003 年十勝沖地震の苫小牧での揺れは、卓越周期は異なるものの、1983 年日本海中部地震における新潟での揺れに匹敵する大きさであり、やや長周期の地震動強度に関する検討が必要である。地震動の上下動の影響は無視できるが、スロッシング高さに与える非線形性の影響は無視できないことが 2003 年十勝沖地震の苫小牧の記録からも確認され、非線形性を考慮したスロッシング高さ算定法の導入を検討する必要があると言える。

最後に、地震記録は (独) 防災科学技術研究所の K-NET の記録を使用させて頂きました。ここに感謝します。

参考文献

- 1) Shimada, S., Noda, S. and Yoshida, T.: Nonlinear sloshing analysis of liquid storage tanks subjected to relatively long-period ground motions, Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, Vol. , pp. -613 ~ -618, August 1988.
- 2) 坂田、木村、内海：円筒タンク内の非線形液面揺動の非定常不規則応答解析、日本機械学会論文集、C 編 第 49 巻 第 442 号、pp.963-970、1983 年 6 月 .
- 3) 嶋田三朗：長周期設計用地震入力に関する基礎的研究、前田建設技術研究所報、Vol.28-1、p.51、1987 .
- 4) (独) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク K-NET、<http://www.k-net.bosai.go.jp/>、2004 年 3 月現在 .
- 5) 山田、野田、嶋田、吉田：振り切れた 1 倍強震計記録の修復波形による長周期応答スペクトル、土木学会論文集、第 386 号/ -8、pp.417-426、1987 年 10 月 .

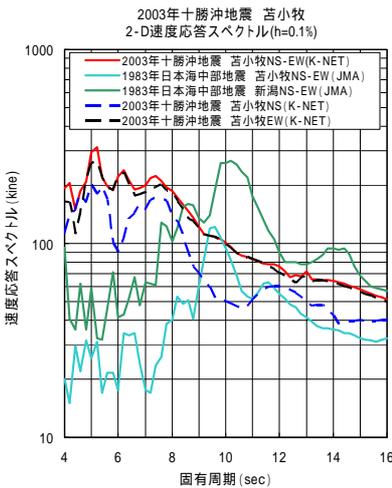


図 1 入力地震動の 2 次元速度応答スペクトル (h=0.1%)

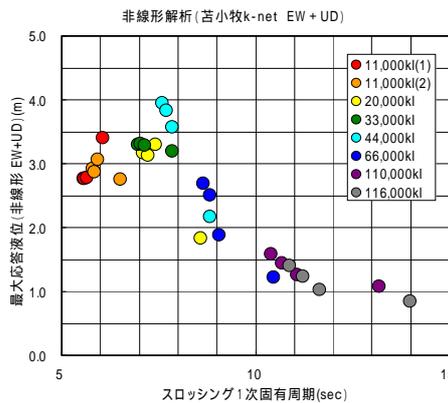


図 2 非線形最大応答液位 (EW・UD 入力)

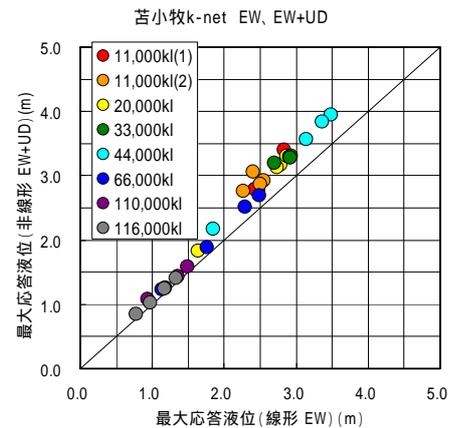


図 3 線形最大応答液位(EW 入力)と非線形最大応答液位(EW・UD 入力)

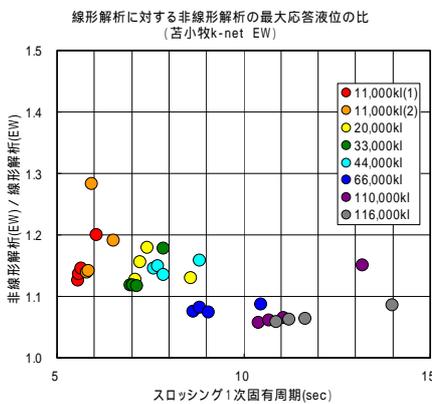


図 4 線形最大応答液位(EW 入力)に対する非線形最大応答液位(EW 入力)の比

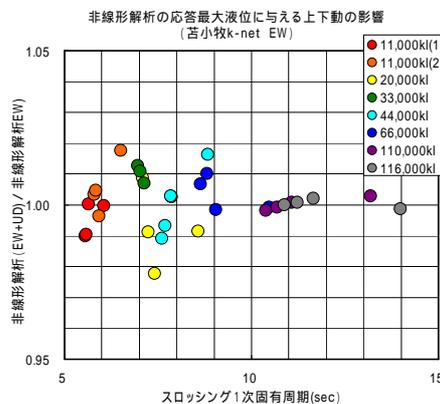


図 5 非線形最大応答液位(EW 入力)に対する非線形最大応答液位(EW・UD 入力)の比

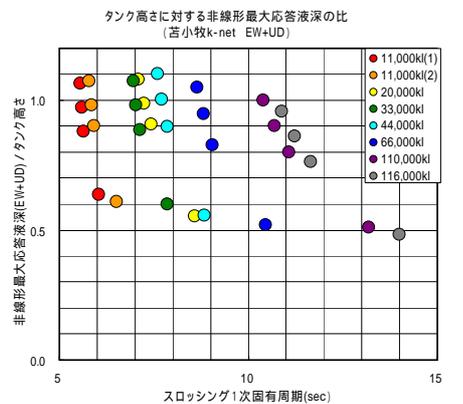


図 6 タンク高さに対する非線形最大応答液深(EW・UD 入力)の比