

2003 年十勝沖地震時の苫小牧における大型タンクの非線形スロッシング挙動に関する検討

吉田 隆治・野田 茂*1

Nonlinear Sloshing Analysis of Liquid Storage Tanks in TOMAKOMAI Area Subjected to Relatively Long-Period Ground Motion During the 2003 TOKACHI-OKI Earthquake

Takaharu YOSHIDA, Shigeru NODA

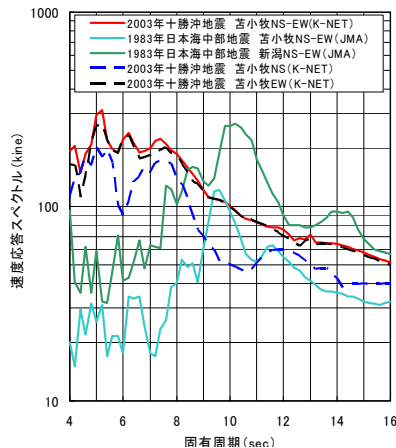


図 1 入力地震動の 2 次元速度応答スペクトル ($h=0.1\%$)

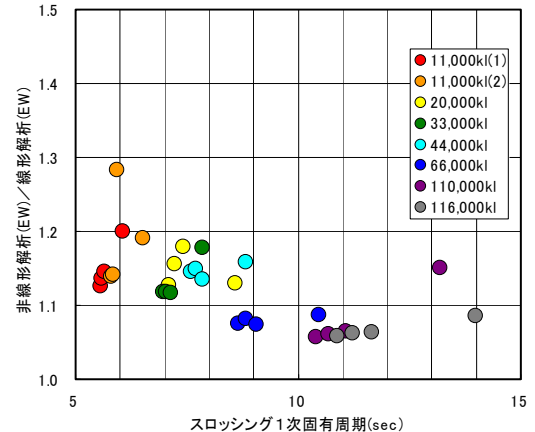


図 2 線形最大応答液位(EW 入力)に対する非線形最大応答液位(EW 入力)の比

研究の目的

2003 年十勝沖地震ではタンクの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 年の新潟地震でも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。現行設計法ではスロッシング高さの算定は微小振幅波の仮定（線形解析）の下に行われている。しかし、その非線形性が無視できないことが指摘されている。

そこで、耐震設計技術向上の基礎資料とすることを目的とし、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。

技術の説明

2003 年十勝沖地震の際に苫小牧で記録された地震記録を用いてスロッシング高さに与える非線形性の影響、および地震動の上下動がスロッシング高さに与える影響について検討した。検討には坂田、木村、内海による剛体円筒タンクの非線形スロッシング解析法に著者らが上下動入力の項を導入した方法を用いた。検討対象タンクは、苫小牧における浮き屋根式タンクの形状を参考に、容量 11,000~116,000kl の 8 種類とし、内容液の深さを満液時、満液時の 90%、80%、50% の 4 種類想定した。

主な結論

結果を以下に示す。

- 1) 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（図 1）、やや長周期の地震動強度に関する検討が必要である。
- 2) 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（図 2）、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。

* 1 香川大学工学部 教授

2003年十勝沖地震時の苫小牧における 大型タンクの非線形スロッシング挙動に関する検討

吉 田 隆 治 野 田 茂*¹

要 旨

2003年十勝沖地震ではタンクの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年の新潟地震でも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。現行設計法ではスロッシング高さの算定は微小振幅波の仮定（線形解析）の下に行われている。しかし、その非線形性が無視できないことが指摘されており、著者らも1983年日本海中部地震の際の検討結果からそれを確認している。

そこで、耐震設計技術向上の基礎資料とすることを目的とし、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。結果を以下に示す。

- 1) 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。
- 2) 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。

キーワード 2003年十勝沖地震／やや長周期地震動／円筒形タンク／スロッシング／非線形解析

目 次

- | | |
|---------|---------|
| 1. はじめに | 4. まとめ |
| 2. 検討方法 | 5. おわりに |
| 3. 検討結果 | |

NONLINEAR SLOSHING ANALYSIS OF LIQUID STORAGE TANKS IN TOMAKOMAI AREA SUBJECTED TO RELATIVELY LONG-PERIOD GROUND MOTION DURING THE 2003 TOKACHI-OKI EARTHQUAKE

Takaharu YOSHIDA Shigeru NODA

Synopsis:

In this paper, data obtained by nonlinear sloshing analysis of liquid storage tanks in Tomakomai area subjected to relatively long-period ground motion during the 2003 Tokachi-oki earthquake were compared with ones of linear analysis. By the comparison and investigation for the input ground motion, the following findings were made.

- 1) The record at Tomakomai obtained by K-NET during the 2003 Tokachi-oki earthquake gave higher response spectrum than design values for long-period structures.
- 2) The effects of vertical excitation for maximum sloshing wave height were about 2%, which were negligible from an engineering stand point.
- 3) Taking into account the nonlinearity, the wave heights increased 10 to 20%, which were not negligible.

* 1 香川大学工学部 教授

1. はじめに

2003 年十勝沖地震ではタンクの内容液のスロッシングが一因となり大火災が発生した。タンクのこのような火災は今回が初めてではなく、1964 年の新潟地震の際も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。

スロッシングを誘発するやや長周期地震動は距離減衰が小さく、1983 年日本海中部地震では震源から約 270km も離れた新潟でスロッシング高さが 4.5m にも達し、原油が溢流したタンクも見られた。

現行設計法ではスロッシング高さの算定は微少振幅波の仮定（線形解析）の下に行われている。しかし、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¹⁾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的検討によって確認している。

ここでは、耐震設計技術向上の基礎資料とすることを目的とし、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

2003 年十勝沖地震の際に苫小牧で記録された地震記録を用いて、スロッシング高さに与える非線形性の影響を検討する。また、地震動の上下動がスロッシング高さに与える影響についても検討を加える。

2.1 検討用地震動

非線形スロッシング解析の入力地震動として（独）防災科学技術研究所²⁾の K-NET で観測された苫小牧における地震記録を用いる。図 2-1 に 2003 年十勝沖地震（2003

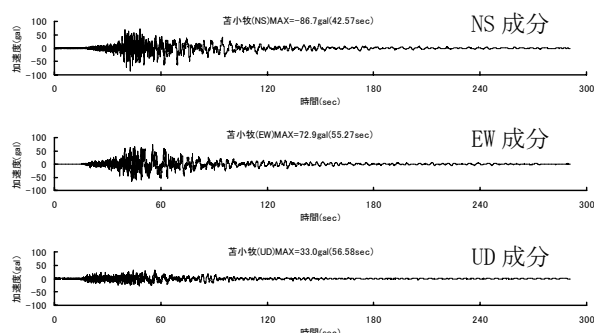


図 2-1 2003 年十勝沖地震における
苫小牧での加速度記録²⁾

年 9 月 26 日、地震規模 $M_{JMA}=8.0$ ）における苫小牧での加速度記録を示す。

2.2 検討対象タンク

苫小牧における浮き屋根式タンクの形状³⁾を参考に検討モデルを設定する。容量 11,000～116,000kl の 8 種類のタンクを検討対象とし、内容液の深さを満液時、満液時の 90%、80%、50% の 4 種類想定する。表 2-1 に検討対象タンクの形状と満液時の液深を示す。

表 2-1 検討対象タンクの形状と満液時の液深

容量 (kl)	内径 (m)	高さ (m)	液深(m)
			満液時
11,000	27.80	19.515	18.015
11,000	29.55	17.655	16.039
20,000	40.68	17.265	15.462
33,000	42.70	24.390	22.890
44,000	49.40	24.390	22.890
66,000	60.40	24.390	22.890
110,000	78.20	24.500	22.900
116,000	82.00	24.500	22.050

2.3 解析方法

坂田、木村、内海⁴⁾による剛体円筒タンクの非線形スロッシング解析法に著者ら¹⁾が上下動入力 of the 項を導入した方法を用いる。

内容液のタンクに対する相対運動の速度ポテンシャルを用いるとラプラスの方程式は図 2-2 の座標系を用いて式 [2-1] で表すことができる。

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad [2-1]$$

ϕ : 内容液のタンクに対する相対運動の
速度ポテンシャル

r : タンクに固定された運動座標系（図 2-2 参照）

θ : タンクに固定された運動座標系（図 2-2 参照）

z : タンクに固定された運動座標系（図 2-2 参照）

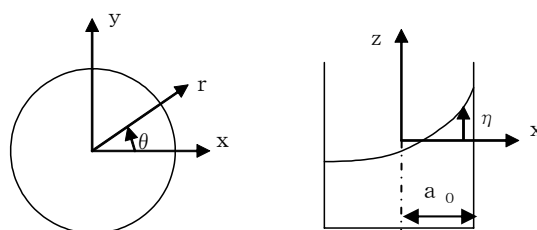


図 2-2 円筒タンクと座標系

この式 [2-1] とタンク底面および側面における境界条件，ならびに液面における非線形境界条件から，タンク半径で無次元化した一般化座標に関する常微分方程式が式 [2-2] で示され，内容液の応答液位は式 [2-3] で求まる．すなわち，スロッシングの半径方向次数 $n=1$ ，周方向波数 $m=0\sim 2$ のモード（図 2-3 参照）に着目した水平・上

$$\ddot{C}_1 + 2\zeta_1 \dot{C}_1 + \{1 + \ddot{f}_z(t)/g\} C_1 + C_1^3 P^{(1)} + C_1 \dot{C}_1^2 P^{(2)} + C_1 C_0 Q_0^{(1)} + \dot{C}_1 \dot{C}_0 Q_0^{(2)} + C_1 C_2 Q_2^{(1)} + \dot{C}_1 \dot{C}_2 Q_2^{(2)} = -\psi_1 S_1 \ddot{f}_x(t)$$

$$\ddot{C}_0 + 2\zeta_0 \omega_0 \dot{C}_0 + \omega_0^2 \{1 + \ddot{f}_z(t)/g\} C_0 = C_1^2 R_0^{(1)} + \dot{C}_1^2 R_0^{(2)}$$

$$\ddot{C}_2 + 2\zeta_2 \omega_2 \dot{C}_2 + \omega_2^2 \{1 + \ddot{f}_z(t)/g\} C_2 = C_1^2 R_2^{(1)} + \dot{C}_1^2 R_2^{(2)} \quad [2-2]$$

$$\eta(r, \theta, t) = \sum_m \sum_n C_{mn}(t) \cos(m\theta) J_m(\lambda_{mn} r) \quad (m=0, 1, 2, \dots, n=1) \quad [2-3]$$

C_0, C_1, C_2 : 各モードに対する一般化座標

(C_{01}, C_{11}, C_{21} を略して表記)

$\zeta_0, \zeta_1, \zeta_2$: 各モードに対する等価減衰定数

$\ddot{f}_x(t), \ddot{f}_z(t)$: 水平方向および上下方向の入力加速度

g : 重力加速度

ω_0, ω_2 : 1 次モードの固有角振動数で無次元化された 0 次および 2 次の無次元固有角振動数

S_1 : 定積分値

$\psi_1, P^{(1)}, P^{(2)}, Q_m^{(1)}, Q_m^{(2)}, R_m^{(1)}, R_m^{(2)} (m=0, 2)$

: 無次元液深（液深/タンク半径）に依存する非線形パラメータ

$\eta(r, \theta, t)$: スロッシングの応答液位

J_m : 第 1 種 m 位ベッセル関数

$\lambda_{mn} : dJ_m(\lambda r)/dr|_{r=a_0} = 0$ を満たす n 番目の正根

a_0 : タンク半径

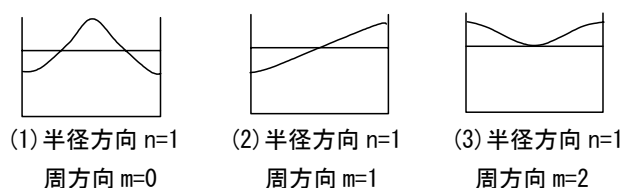
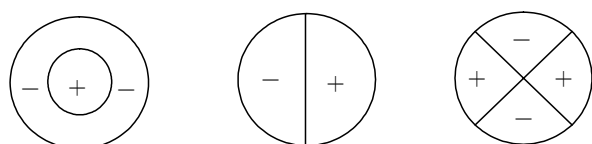


図 2-3 非線形スロッシング解析に用いた振動モード

下 2 方向入力に対する非線形性を考慮したスロッシングの応答液位が式 [2-3] で算定される（記号の詳しい説明は文献 4）を参照）。

3. 検討結果

3.1 解析ケース

検討対象タンク，液深，解析手法（線形，非線形），入力地震動成分の組み合わせを考慮した 192 ケースを解析ケースとする．表 3-1 にタンク 1 種類当たりの解析ケースを示す（24 ケース×タンク 8 種類=192 ケース）。

表 3-1 タンク 1 種類当たりの解析ケース

ケース番号	液深 (m)	解析手法		入力地震動		
		線形	非線形	K-NET 苫小牧		
				NS	EW	UD
1	満液	○	—	○	—	—
2	"	—	○	○	—	—
3	"	—	○	○	—	○
4	"	○	—	—	○	—
5	"	—	○	—	○	—
6	"	—	○	—	○	○
7	満液×0.9	○	—	○	—	—
8	"	—	○	○	—	—
9	"	—	○	○	—	○
10	"	○	—	—	○	—
11	"	—	○	—	○	—
12	"	—	○	—	○	○
13	満液×0.8	○	—	○	—	—
14	"	—	○	○	—	—
15	"	—	○	○	—	○
16	"	○	—	—	○	—
17	"	—	○	—	○	—
18	"	—	○	—	○	○
19	満液×0.5	○	—	○	—	—
20	"	—	○	○	—	—
21	"	—	○	○	—	○
22	"	○	—	—	○	—
23	"	—	○	—	○	—
24	"	—	○	—	○	○

3.2 入力地震動の特性

図 2-1 に示した 2003 年十勝沖地震の苫小牧での加速度記録から水平 2 成分の応答を合成して求めた 2 次元速度応答スペクトル（減衰定数 $h=0.1\%$ ）を図 3-1 に示す．この記録はやや長周期領域の地震動成分が卓越しており，周期 4～8 秒の範囲で 200kine を超える値を示している．特に 5 秒付近では速度応答スペクトル値（ $h=0.1\%$ ）は約 300kine にも達している．

同図には NS、EW 成分のそれぞれの速度応答スペクトルも示しているが、NS 成分に比べて EW 成分の方が全体的に大きなスペクトル値を示しており、2 次元速度応答スペクトルはほぼ EW 成分の速度応答スペクトルと一致する。詳細に見ると、4 秒付近、5 秒付近、7 秒付近で EW 成分の速度応答スペクトルに比べ 2 次元速度応答スペクトルが幾分増幅しており、この周期成分では EW 成分だけでなく NS 成分の影響も含まれていることが分かる。

同図には 1983 年日本海中部地震の際の苫小牧および新潟の記録より求めた 2 次元速度応答スペクトル⁵⁾

($h=0.1\%$) も併せて示した。10 秒付近の周期成分が卓越していた日本海中部地震では苫小牧での速度応答スペクトル値は最大で約 120kine (周期 10 秒付近) を示したが、2003 年十勝沖地震での速度応答スペクトル値は、卓越周期は異なるものの、日本海中部地震でスロッシング波高約 4.5m を記録した新潟のスペクトル値 (周期約 10 秒で約 270kine) に匹敵する大きさであることが分かる。

また、これらの速度応答スペクトル値はタンク内容液のスロッシングに対する必要余裕空間算定時の改訂前のスペクトル値⁶⁾ (約 100kine) を上回っていた (2005 年 4 月に地域によっては約 2 倍に引き上げられた)。

これらの事実は固有周期の長い (数秒から 20 秒) 構造物の設計用地震動の見直しの必要性を示唆するものである。

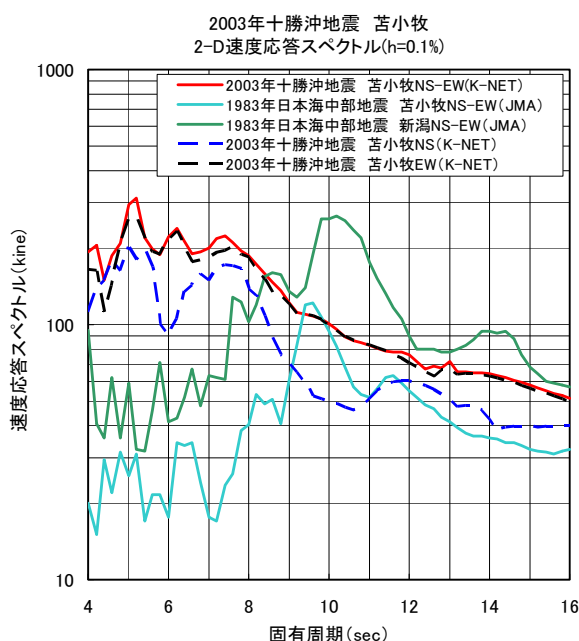


図 3-1 図 2-1 の加速度記録 (NS および EW 成分) より求めた 2 次元速度応答スペクトル ($h=0.1\%$)

3.3 解析結果

線形解析 (水平 1 方向入力) および非線形解析 (水平・上下 2 方向入力) の最大応答液位とスロッシング 1 次固有周期の関係を図 3-1 に示す。スロッシングの最大

応答液位は地震動の周期特性の影響を受け、NS 方向に比べ EW 方向の応答液位が全体的に大きく、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 のタンクで大きな液位を示している。

また、この周期帯では明らかに非線形解析 (水平・上下 2 方向入力) の液位が線形解析 (水平 1 方向入力) に比べて大きい。44,000kl タンクでは満液時のスロッシング 1 次固有周期は 7.5 秒となり、線形解析 (水平 1 方向入力) の約 3.5m (EW 方向) に対して非線形解析 (水平・上下 2 方向入力) の最大応答液位は約 4m となる。

線形解析 (水平 1 方向入力) の最大応答液位と非線形解析 (水平・上下 2 方向入力) の最大応答液位の関係を図 3-2 に整理し直した。最大応答液位が 1.5m を超えたあたりから、非線形解析 (水平・上下 2 方向入力) の結果が明らかに線形解析 (水平 1 方向入力) の結果を上回り、水平・上下 2 方向入力による非線形性の影響が現れていることが見て取れる。

図 3-3 には線形解析 (水平 1 方向入力) に対する非線形解析 (水平 1 方向入力) 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。これを見ると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いることが分かる。EW 成分では周期 6 秒で非線形効果により最大応答液位が 1.3 倍に増幅するケースもあり、スロッシングの応答液位の算定においては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る。

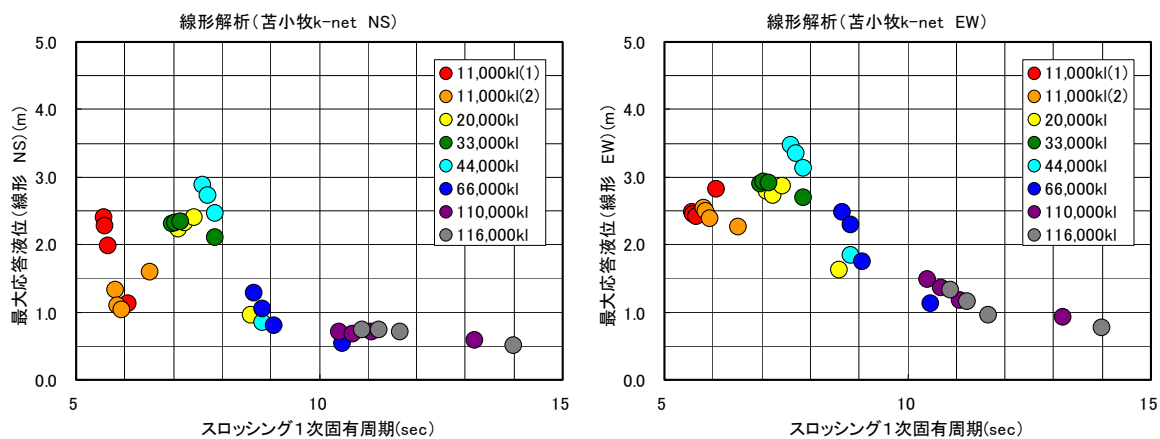
図 3-4 には水平 1 方向入力の非線形解析に対する水平・上下 2 方向入力の非線形解析の最大応答液位の比をスロッシング 1 次固有周期との関係で示した。上下動が最大応答液位に与える影響はおおよそ $\pm 2\%$ 以内に収まっており、上下動の影響は無視できると言える。

図 3-5 にはタンク高さに対する非線形解析 (水平・上下 2 方向入力) 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 秒にスロッシング 1 次固有周期を有する 11,000~44,000kl タンクでは満液時の 90% の液深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図 3-5 から読み取れ、設計用地震動の強度とともに、スロッシングに対する余裕高さについての再検討、あるいはスロッシングの制御方法の検討が必要であると思われる。

4. まとめ

2003 年十勝沖地震の際に苫小牧で記録された地震記録を用い、スロッシング高さに与える非線形性等の影響を苫小牧の浮き屋根式タンク (11,000~116,000kl) を例に数値解析的に検討した。検討結果を以下にまとめる。

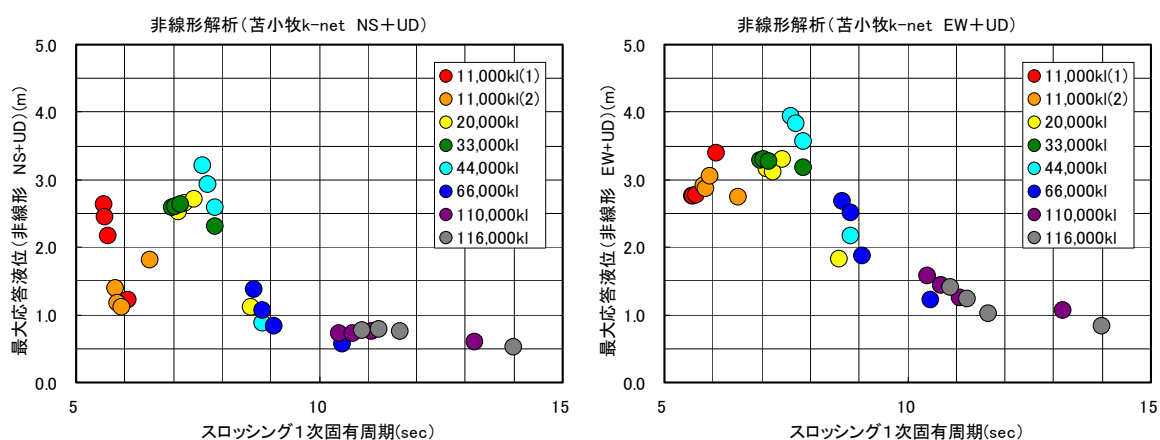
① 2003 年十勝沖地震の苫小牧での加速度記録はやや長周期領域の地震動成分が卓越しており、減衰 0.1% の 2 次元速度応答スペクトルは周期 4~8 の範囲で 200kine を



(a) NS方向

(b) EW方向

(1) 線形解析(水平1方向入力)



(a) NS方向

(b) EW方向

(2) 非線形解析(水平・上下2方向入力)

図 3-1 線形および非線形スロッシング解析による最大応答液位(k-net 苦小牧地震記録入力)
(内容液の深さ: 満液時, 満液時の90%, 80%, 50%の4種類想定)

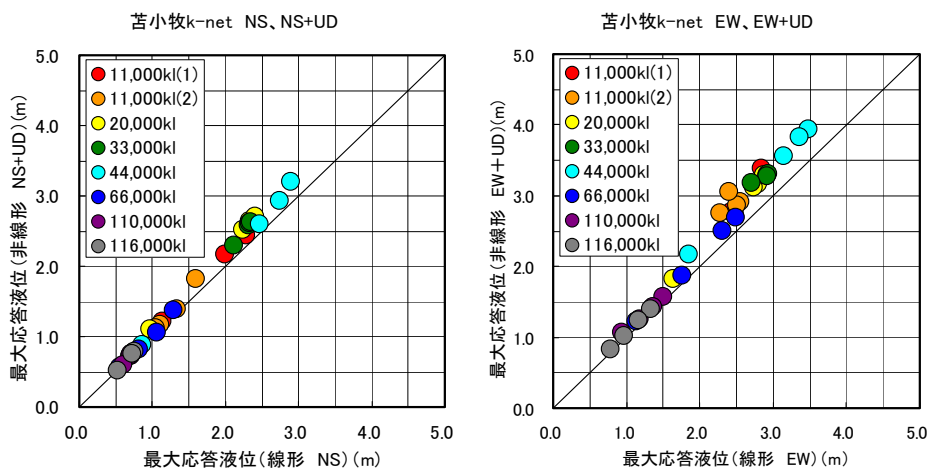


図 3-2 線形解析(水平1方向入力)と非線形解析(水平・上下2方向入力)の最大応答液位の関係
(k-net 苦小牧地震記録入力) (内容液の深さ: 満液時, 満液時の90%, 80%, 50%の4種類想定)

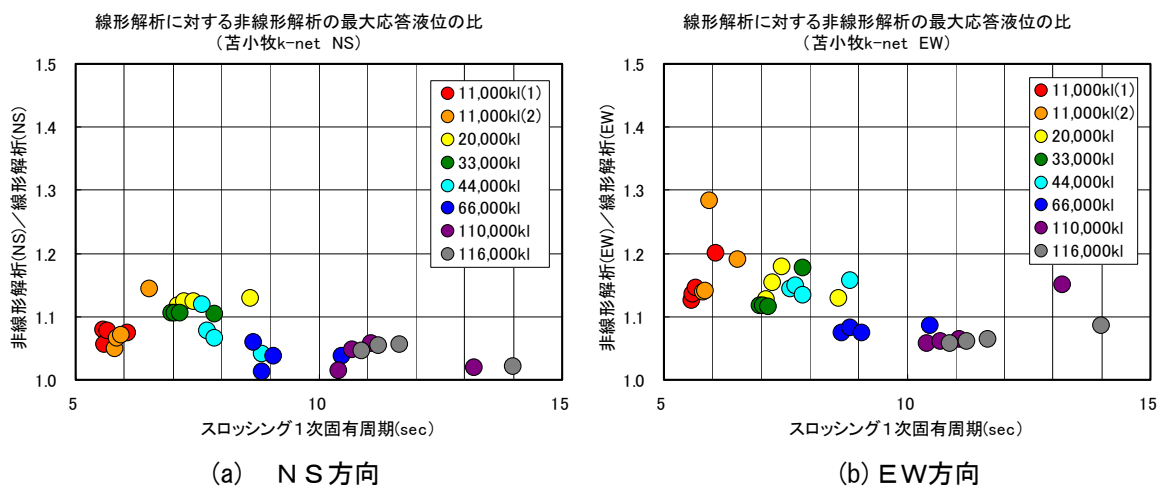


図 3-3 スロッシング最大応答液位に与える非線形性の影響 (k-net 苫小牧地震記録入力)
(内容液の深さ：満液時，満液時の90%，80%，50%の4種類想定)

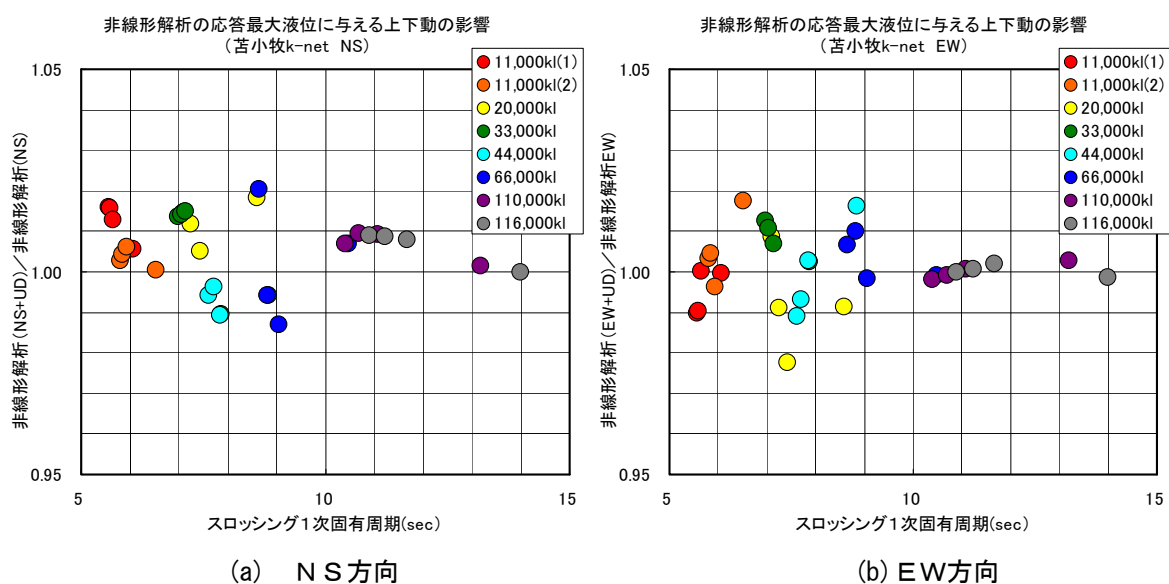


図 3-4 スロッシング最大応答液位に与える上下動入力の影響 (k-net 苫小牧地震記録入力)
(内容液の深さ：満液時，満液時の90%，80%，50%の4種類想定)

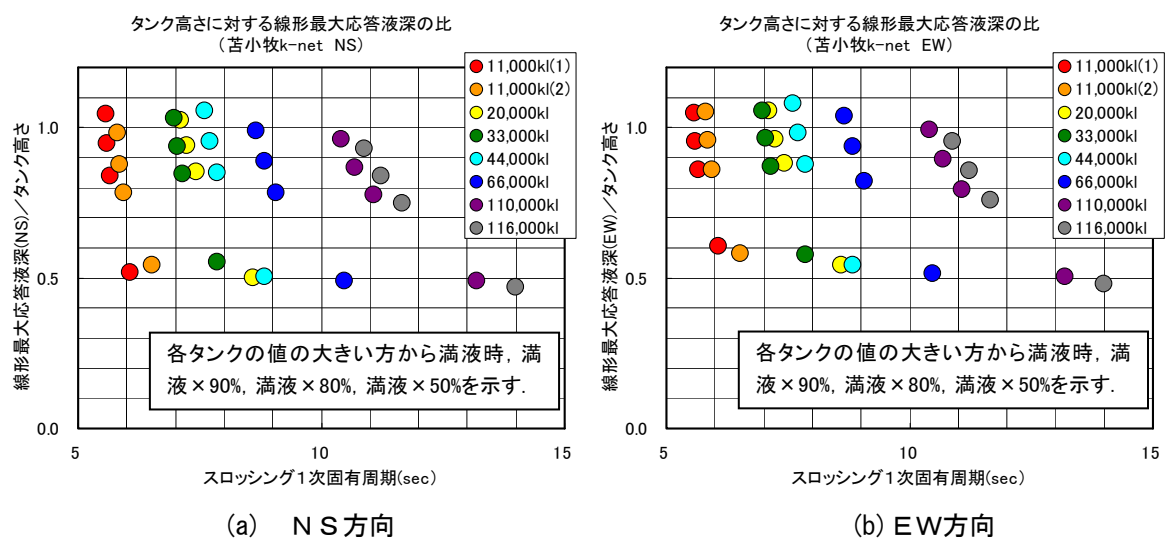


図 3-5 タンク高さに対するスロッシング最大応答液深の比 (k-net 苫小牧地震記録入力)
(内容液の深さ：満液時，満液時の90%，80%，50%の4種類想定)

を超え、5 秒付近ではその値は約 300kine にも達している。これは 1983 年日本海中部地震でスロッシング波高約 4.5m を記録した新潟の 2 次元速度応答スペクトル（減衰 0.1%，周期約 10 秒で約 270kine）に匹敵する大きさである。

- ②スロッシングの最大応答液位に与える非線形性の影響は最大応答液位が 1.5m を超えたあたりから現れ、最大応答液位 2.0～4.0m に対して概ね 10～20%の非線形性の影響が含まれていると算定された。1983 日本海中部地震の新潟および苫小牧での地震記録からも同様の結果が得られたが、応答液位に与える非線形性の影響は無視できないことが確認された。
- ③地震動の上下成分が最大応答液位に与える影響はほぼ ±2%以内に収まっており、1983 日本海中部地震の新潟および苫小牧での検討結果と同様、上下動の影響は無視できることが確認された。
- ④2003 年十勝沖地震のようにやや長周期成分の地震動強度が強い場合、満液時の 90%の液深でもタンクから内容液が溢流する可能性がある。
- ⑤1983 年日本海中部地震ならびに 2003 年十勝沖地震での検討結果から、やや長周期帯域の設計用地震動の見直し、液体貯蔵タンクのスロッシング高さの算定における非線形性の影響の導入、ならびにスロッシング挙動の制御方法の検討の必要性が示唆される。

5. おわりに

2003 年十勝沖地震の苫小牧での加速度記録からやや長周期の地震動強度に関する検討が必要であること、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確認した。

また、非線形性を考慮したスロッシング高さの算定で

は水平 2 成分の同時入力の影響に対する検討が今後の課題として残る。

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.VI, pp.VI-613～VI-618, August 1988.
- 2) （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/>, 2005 年 5 月現在。
- 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) 坂田勝，木村康治，内海雅彦：円筒タンク内の非線形液面陽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。
- 5) 山田善一，野田茂，嶋田三朗，吉田隆治：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/I-8，pp.417-426，1987 年 10 月。
- 6) 松寄達也，野田茂：仮想南海地震による長周期地震動のシミュレーション，土木学会第 59 回年次学術講演会講演集，第 I 部門，I-225，pp.449-450，2004 年 9 月。
- 7) 吉田隆治，野田茂：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，土木学会第 59 回年次学術講演会講演集，第 I 部門，I-275，pp.549-550，2004 年 9 月。