

名城大学 高度制震実験・解析研究センター
平成20年度第2回定期講演会

非線形スロッシングによる石油タンク 浮き屋根の振動 (内部共振の応力への影響と 液位依存性)

2008年10月

内海 雅彦、石田和雄、
日詰雅之

発表の内容 目次

- 1. 研究の背景と目的
- 2. 浮屋根の非線形応答解析手法
- 3. 非線形特有の内部共振の解析事例
- 4. 内部共振の液位依存性
- 5. 実地震入力下での内部共振
- 6. 過去の実験との比較、検証
- 7. まとめ(得られた知見)

1. 研究の背景と目的

●過去の研究の特徴

スロッシングは振幅増大と共に非線形挙動を示すことが知られているが、非線形性に着目した研究は、浮き屋根のない自由表面の場合を考えている。したがって、非線形性の、浮き屋根に生ずる応力への影響は未解明。

●本研究の目的

(1) 非線形性の、浮き屋根に生ずる応力への影響を調べ、特に、半径方向1次のスロッシングによるポンツーン部の円周方向2次モードの**内部共振**の場合、応力の非線形応答が線形応答より大きくなることを示す。

(1) 内部共振の**液位依存性**を調べる。

(2) 内部共振が**実地震入力**に対しても起こるか検証する。

このような振動論的検討は、近年実施されつつある汎用解析コードによる浮き屋根応答解析では行われていない。

(モード分離による解析的アプローチにより、内部共振のような物理的洞察が行える)

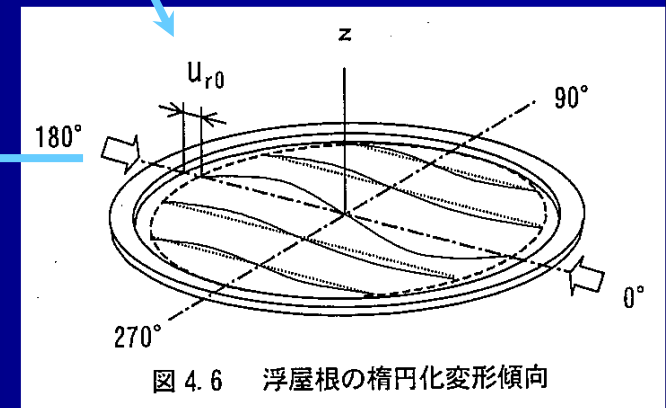
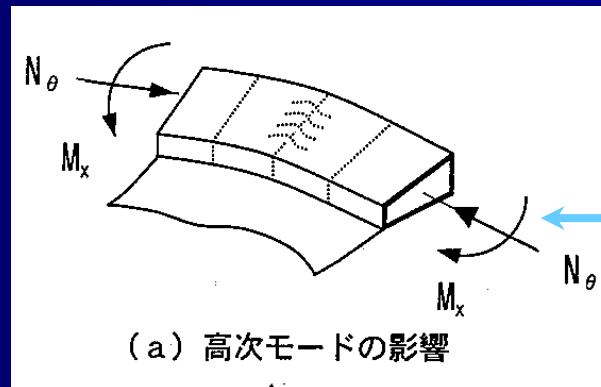
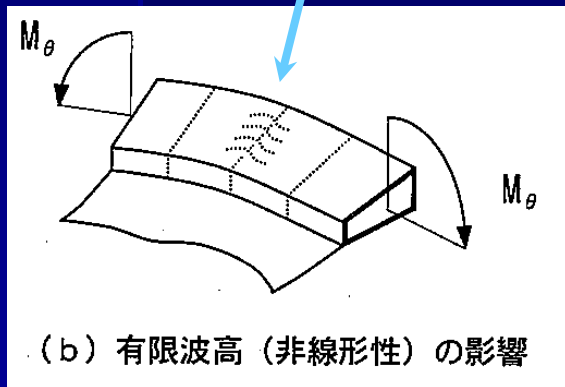
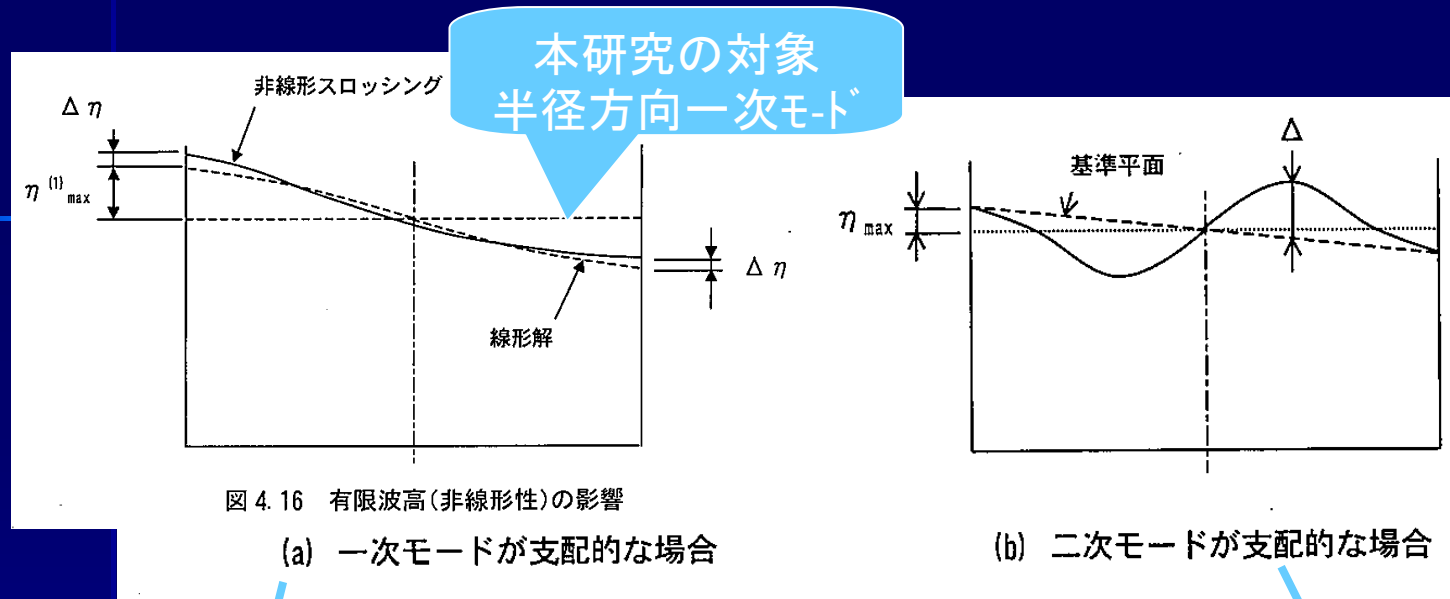
これまでの成果の論文

●圧力技術 2008, Vol.46, No.2, p.2

●ASME J. Applied Mech. 2008, Vol.75, p.41008

●日本機械学会ダイナミクス&デザイン講演2008、講演番号170

代表的なスロッシングモードと浮屋根の変形



外周ポンツーンに作用する外力 (b)は主に半径方向1次モードによる円周方向面外曲げモーメント(周方向波数2)

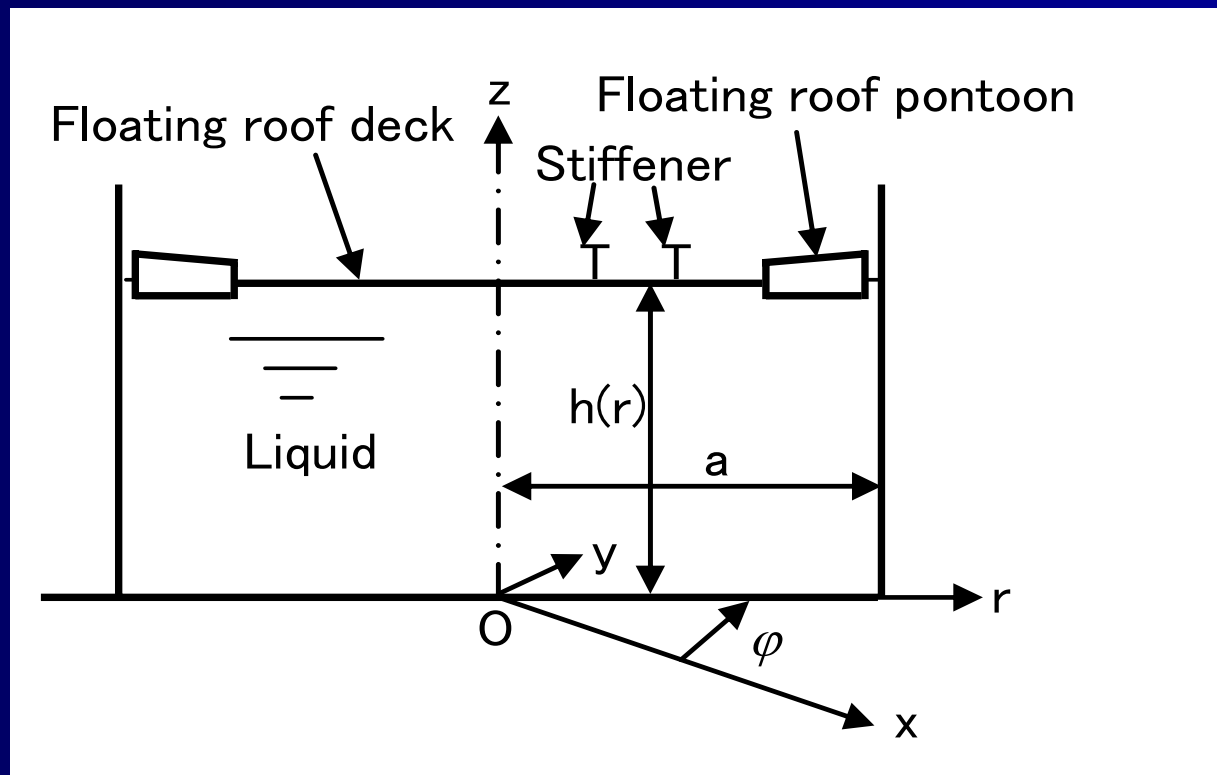
名城大学 高度制震実験・解析センター 平成20

出典:危険物保安技術協会「屋外タンク貯蔵所浮屋根審査基準検討会報告書」16年9月

2. 浮屋根の非線形応答解析手法

2.1 浮屋根解析のモデル

(任意の周方向角 ϕ での断面)



a: 側板半径
h: 静止液位

座標(円筒系)

r: 半径

ϕ : 円周

z: 鉛直

浮屋根周囲に中空
部分(ポンツーン)

浮屋根を軸対称弾
性シェル

シェルの変位

(u, v, w)

-z、 ϕ 、r方向

2.3 非線形常微分方程式系の導出

液体運動の解析的モード展開と、シェルFEMモデルのモード展開式を、変分原理に代入し、ガレルキン法によりモード座標(一般化座標)に関する非線形常微分方程式系を導出する。

- 液体の速度ポテンシャルの解析的なモード展開式:

$$\phi(r, \varphi, z, t) = \sum_{m=0} \sum_{n=1} \{ \dot{A}_{mnx}(t) \cos m\varphi + \dot{A}_{mny}(t) \sin m\varphi \} J_m(\lambda_{mn} r) \cosh(\lambda_{mn} z) / \cosh(\lambda_{mn} h)$$

- シェルFEMモデルの変位のモード展開式:

$$\bar{u}(r, \varphi, t) = \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{p=1}^{\infty} \{ E_{mpx}(t) \cos m\varphi + E_{mpy}(t) \sin m\varphi \} S_{mp}(r)$$

- p: 半径方向モード次数; スロッシングと非連成時のモードで展開。

2.4 一般化座標に関する非線形常微分方程式 (モード座標)

各周方向波数 $m=0,1,2$ について行列表示:

■ $M\ddot{X}_1 + KX_1 =$ 加振加速度項 $\sin \omega_{11}t$ + 3次非線形項

$M\ddot{X}_2 + KX_2 = X_1$ の2次非線形項 $\sin^2 \omega_{11}t$

■ $M\ddot{X}_0 + KX_0 = X_1$ の2次非線形項 $\sin^2 \omega_{11}t$

■ 内部共振の条件: $\omega_{0n} = 2\omega_{11}$, $\omega_{2n} = 2\omega_{11}$

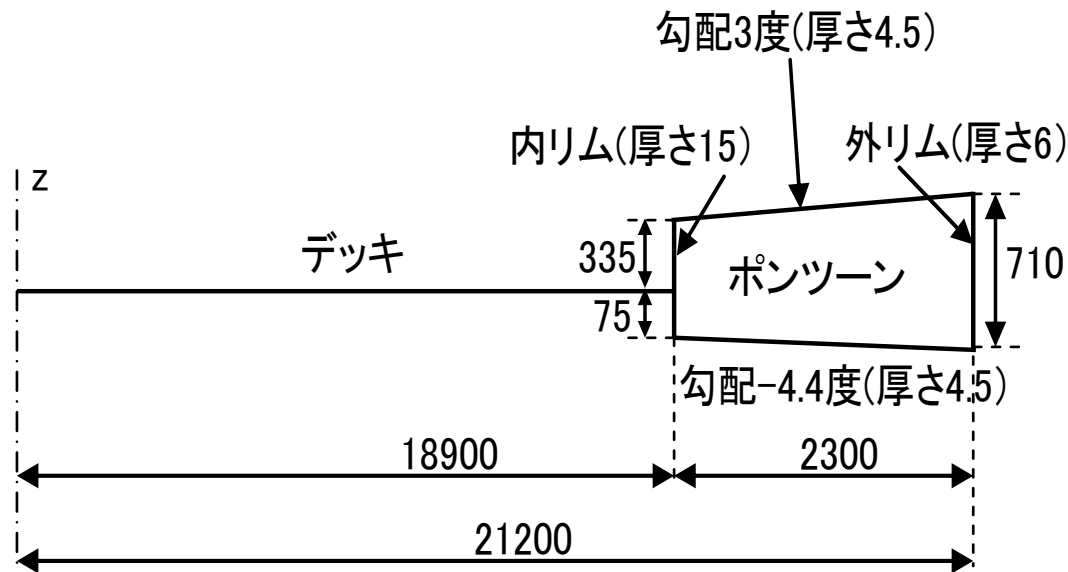
■ 周方向波数1の変数の2次非線形項が下記モードに共振

■ ●周方向波数0のモード

■ ●周方向波数2のモード(応力評価上、重要)

3. 非線形特有の内部共振の解析事例

3万klタンクで検証。



液位	21.75m
補強材のr座標	$2.75+3i$ ($i=0,1,2,3,4$)
補強材の高さと幅	0.1m, 0.2m

■ タンク主仕様

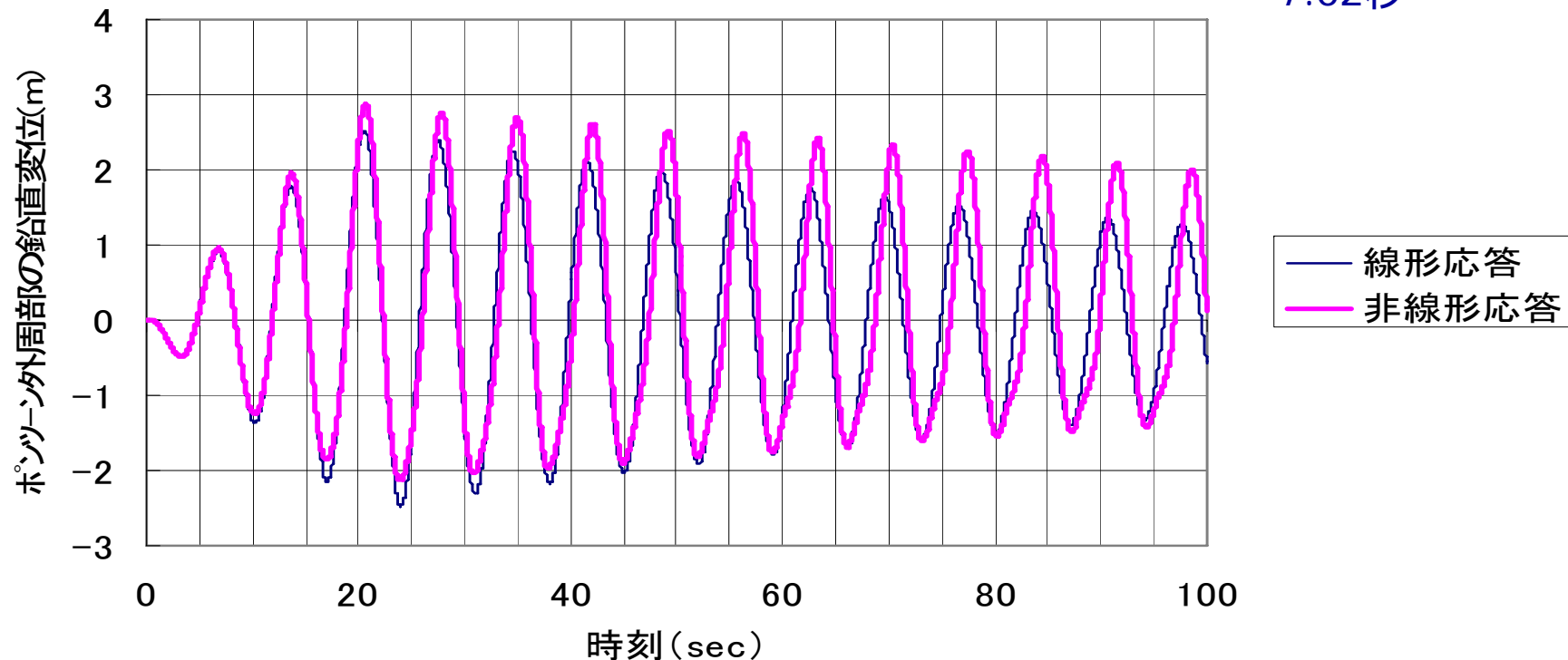
- タンク側板半径 21.35m
 - 静止液位 21.75m
 - 液密度 845kg/m³
 - 浮屋根材料密度 7850kg/m³
 - 浮屋根ヤング率 2.1×10^{11} N/m²
 - シール部の間隔 0.15m
 - ソフトシール部の水平方向ばね
(単位周長当たり) 86000N/m
- 注) 図中の寸法の単位はmm

3.1 応答波形(浮屋根の鉛直変位)

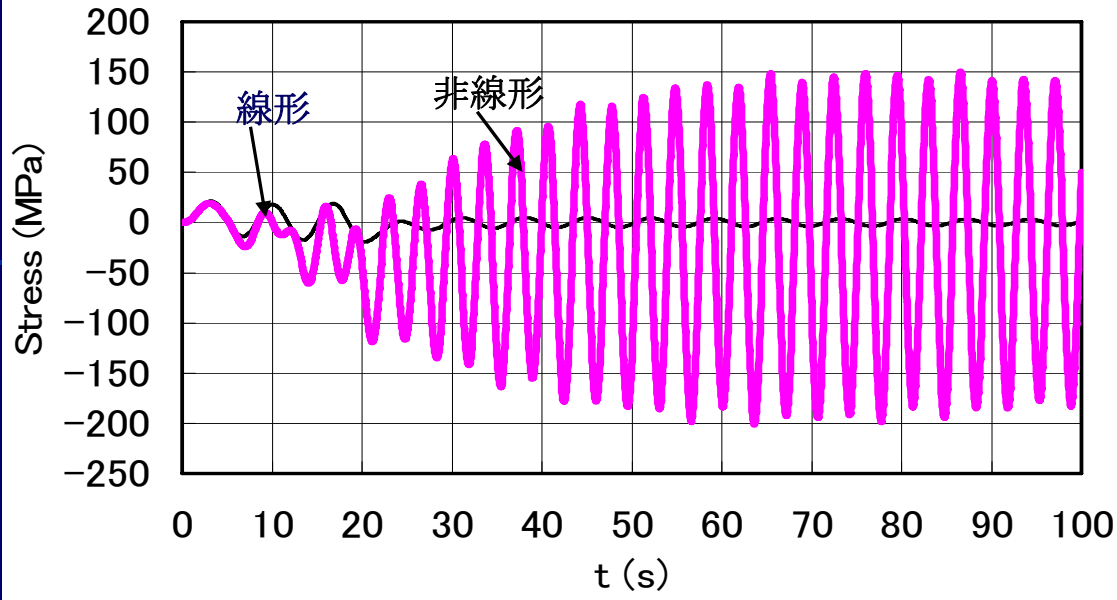
- 加振加速度: 周方向波数1次, 半径方向1次のスロッシングモードの共振点近くの3波正弦波加振
- (波高2.9m程度になる大きさ) 注) 正弦波入力は21秒まで

石油タンク浮き屋根の鉛直変位の時刻歴応答
(3万kl、D42.7m、液位21.75m、正弦波3波入力)

線形1次固有周期
7.02秒

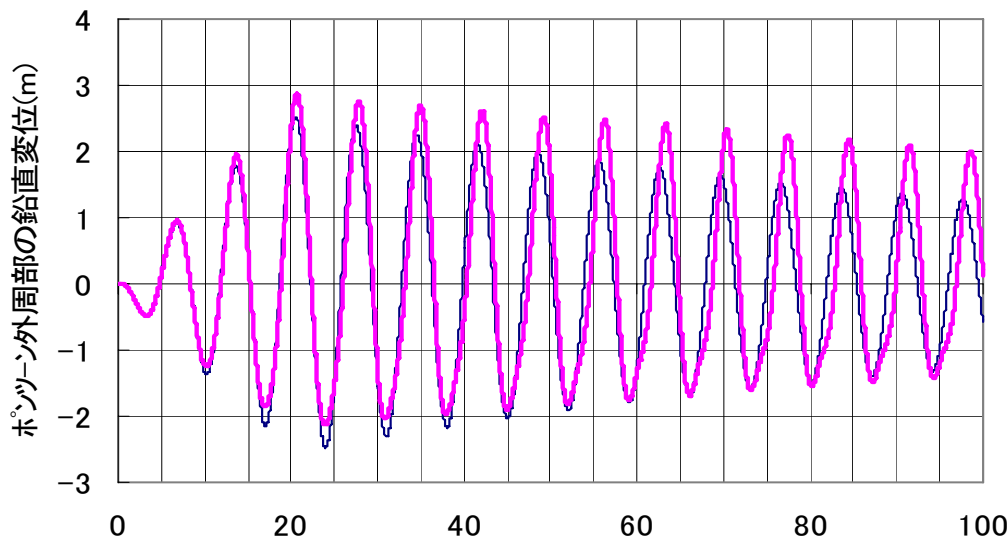


3.2 浮屋根ポンツーンの応力の時刻歴波形

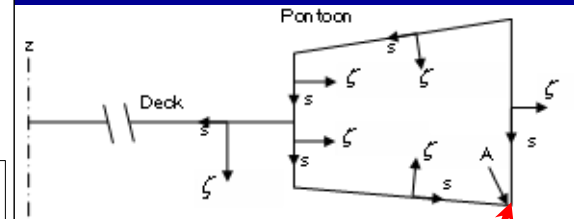


- 上図は、ポンツーン底面の外リムとの結合部(点A)での、半径方向の面外応力の応答
- 応力の非線形応答は線形応答を大きく上回り、線形解析では過小評価となる。
- 鉛直変位(下図): 21秒以降減少応力 (上図): 60秒まで増大

石油タンク浮き屋根の鉛直変位の時刻歴応答
(3万kl、D42.7m、液位21.75m、正弦波3波入力)

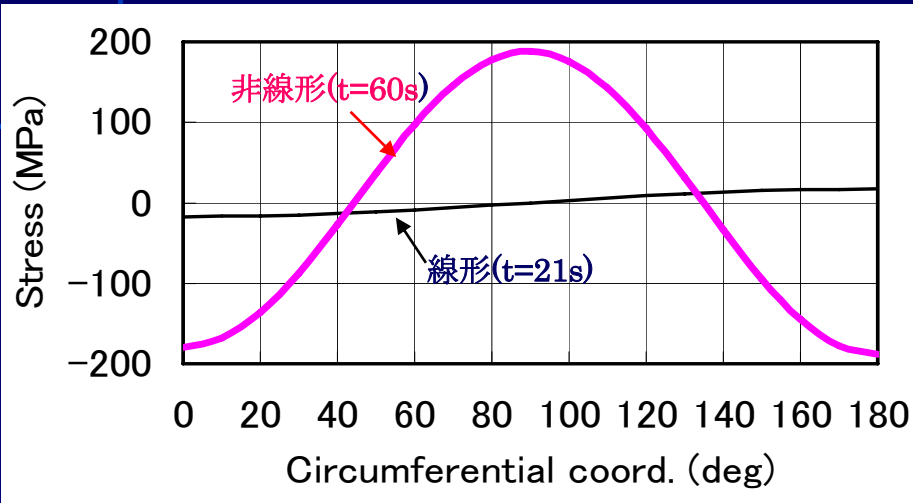


シェル要素の局部座標系



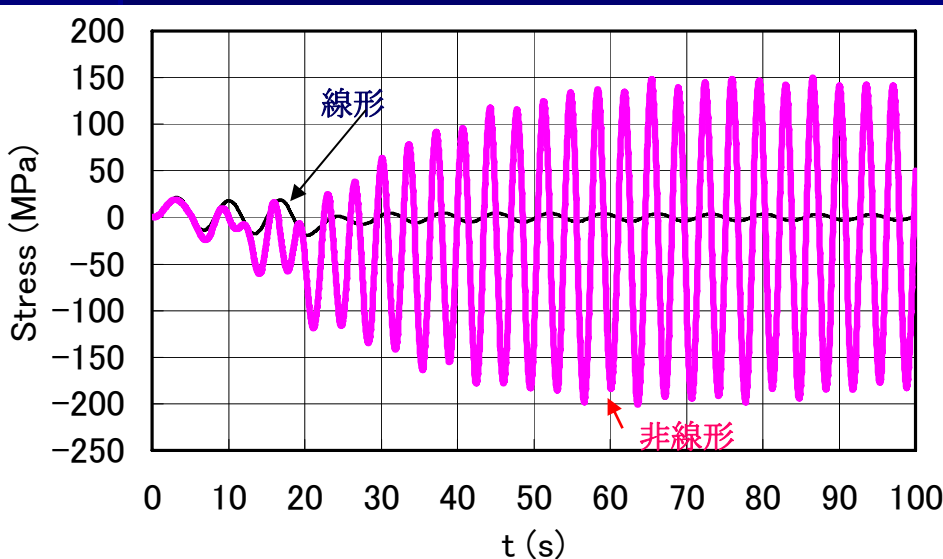
応力算出位置: 点A

3.3 応力の円周方向分布とモード波数



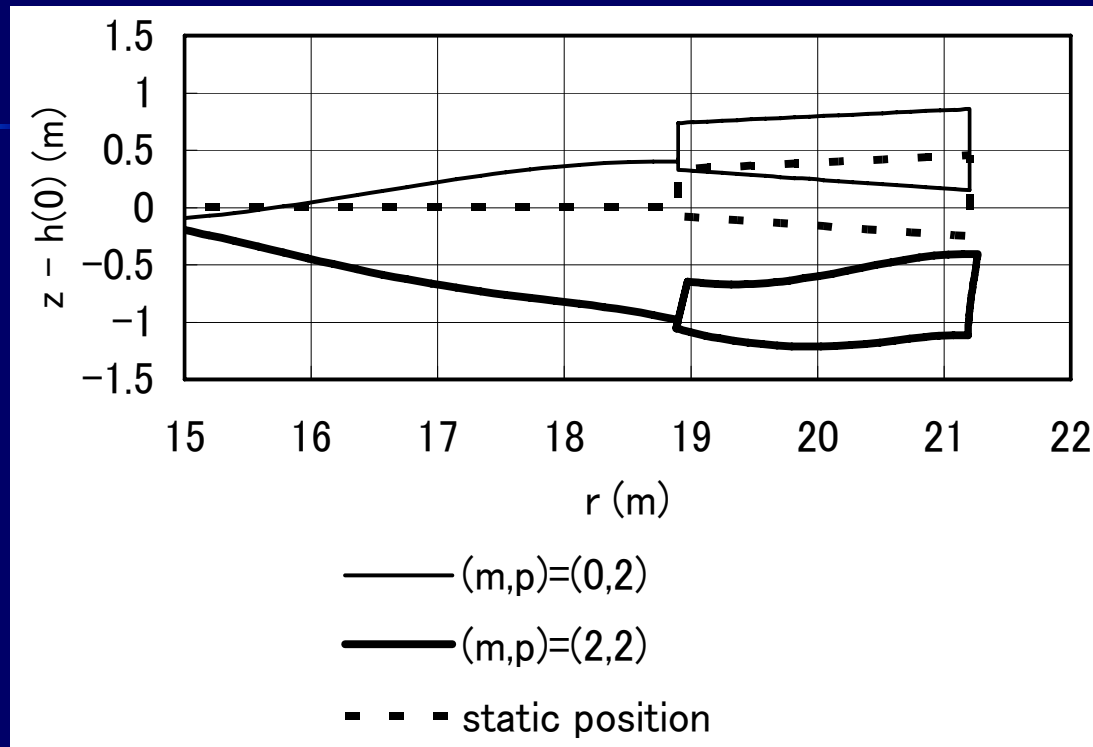
応答の周方向分布を調べると、左図のように周方向波数2のモードが卓越。

よって、過大応力の原因は ω_{02} ではなく ω_{22} のモードの内部共振にある。



3.4 ポンツーンの変形と周方向波数の関係

下図のように、周方向波数2の内部共振下にあるモードでは、ポンツーン部が大きく変形して、応力に寄与する。

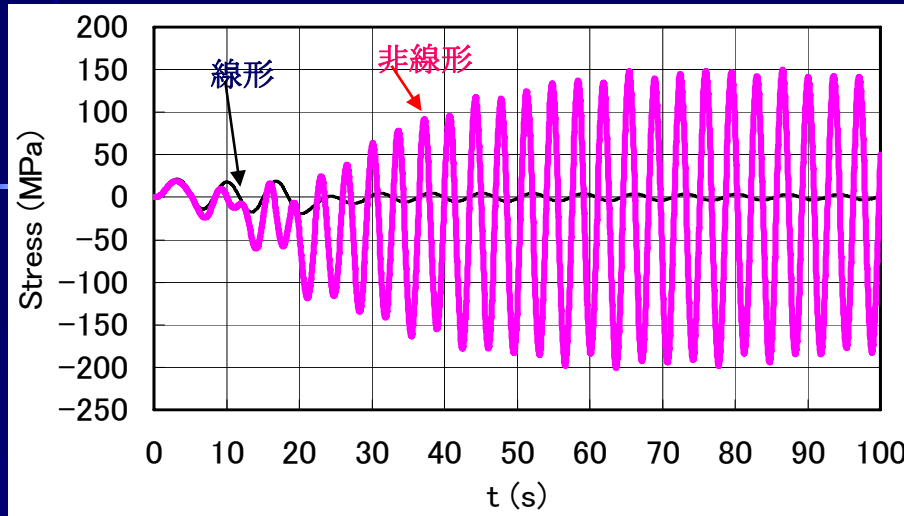


周方向波数0のモード: 軸対称変形であるため高い剛性を有する。

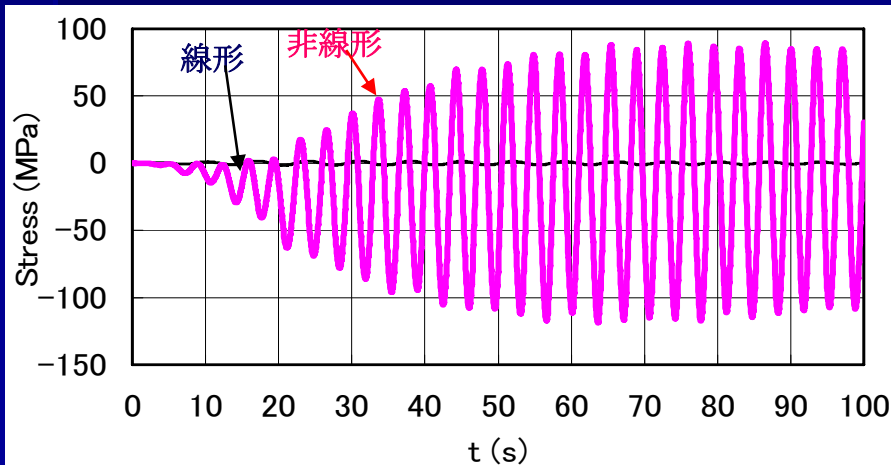
周方向波数2のモード: ポンツーンの円環としてのねじれ剛性が低く、ねじれ変形する。

3.5 内部共振の特徴

応答の持続性



上図: ポンツーン底面の外リムとの結合部での、半径方向の面外応力の応答



ポンツーン底面の外リム結合部近傍での、円周方向の膜応力の応答

3波共振の正弦波加振が終了後、線形応答は、減衰するが、非線形応答は、さらに増加する。

理由: 内部共振の加振源が、

外加振でなく、内部変数、つまりスロッシング微弱減衰を反映した周方向1次モードであるため。

応力の大きい周方向波数2のモードが共振を受け続ける。

その結果、大振幅だけでなく、持続の短い3波正弦波入力でも長時間持続する。

左図:

ポンツーン底面(下板)の外リム近傍での、円周方向膜応力も増大する。
→ポンツーン円周方向面外曲げモーメントの増大。

4. 内部共振の液位依存性

- 深いとき内部共振の条件 $\omega_{22}=2\omega_{11}$ が成立し、応力が大。
- 線形時より周波数が下がるソフトばね非線形効果も重要。

深
↑
↓
浅

h/h_1 ($h_1=21.75$ m)	$\omega_{11}/2\pi$ (Hz)	$\omega_{22}/2\pi$ (Hz)	ω_{22}/ω_{11}	$\sigma_{s.\max}$ (MPa)	$\sigma_{\phi.\max}$ (MPa)
1.25	0.1446	0.2863	1.9799	-216.3	-128.4
1.1	0.1436	0.2863	1.9937	-211.5	-125.4
1	0.1425	0.2863	2.0091	-200.8	-118.7
0.9	0.141	0.2863	2.0305	-184.8	-109.7
0.75	0.1374	0.2863	2.0837	-156.2	-91.7
0.5	0.1251	0.286	2.2862	-144.7	-83.7

σ_s : ホンツ-ン底面外周部の半径方向面外応力

σ_ϕ : 同 円周方向面内応力(膜応力)

最大応力の発生する時刻

深
↑
↓
浅

h/h_1 ($h_1=21.75$ m)	t_{\max} (s) for σ_s	t_{\max} (s) for σ_φ
1.25	84.1	84.1
1.1	84.4	84.4
1	63.6	63.6
0.9	57	57
0.75	36.3	36.3
0.5	23.45	27.5

深い時(内部共振が強い時)、
最大応力の発生時刻が遅い(長時間増加し続ける)。

線形応答 : 地震入力の減衰(応答変位の減衰)と同時に応力は減衰。

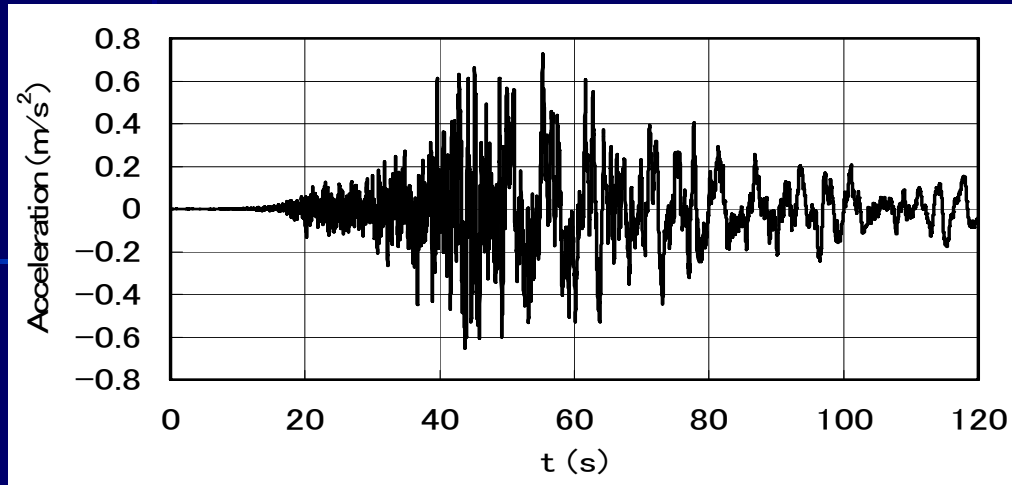
非線形応答: 地震入力の減衰後(応答変位の減衰後)も成長。

理由:

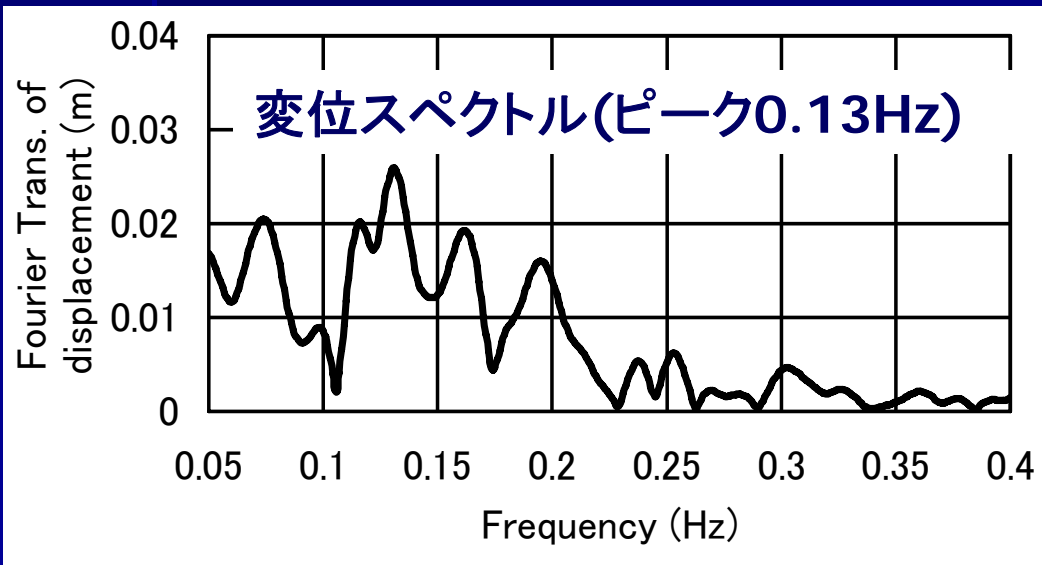
内部共振の加振源は、早く治まる地震加振でなく、微弱減衰の周方向波数1、半径方向1次モードなので、定常加振下による共振と同じになる。

(持続の短い地震入力でも長時間持続！)。

5. 実地震入力下での内部共振



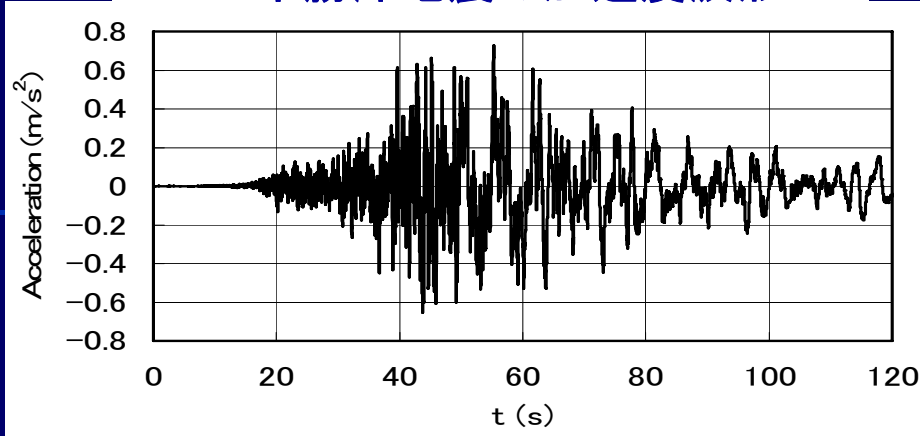
2003十勝沖地震の加速度波形



長周期成分に注目するため、
変位スペクトルを求めた。
このような広帯域加振でも、
内部共振が生じるか？

5. 実地震入力下での内部共振

2003十勝沖地震の加速度波形



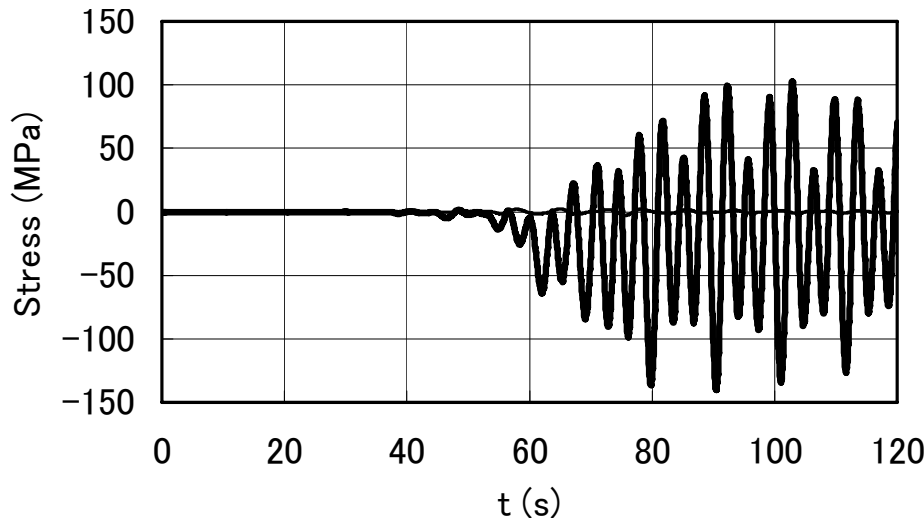
実地震でも内部共振の下記の特徴が見られる:

- (1) 線形解を大きく上回る。
- (2) 地震の減衰後も成長する(線形解は、地震の減衰と同時に減衰)。

理由:

内部共振の加振源は、早く治まる地震加振でなく、微弱減衰の内部変数なので、定常加振下による共振と同じ(持続の短い実地震波でも長時間持続!)。

ポンツーン底面の外リム結合部近傍での、**円周方向の膜応力の応答**
(線形応答は、小さく、見えない)



重要知見:

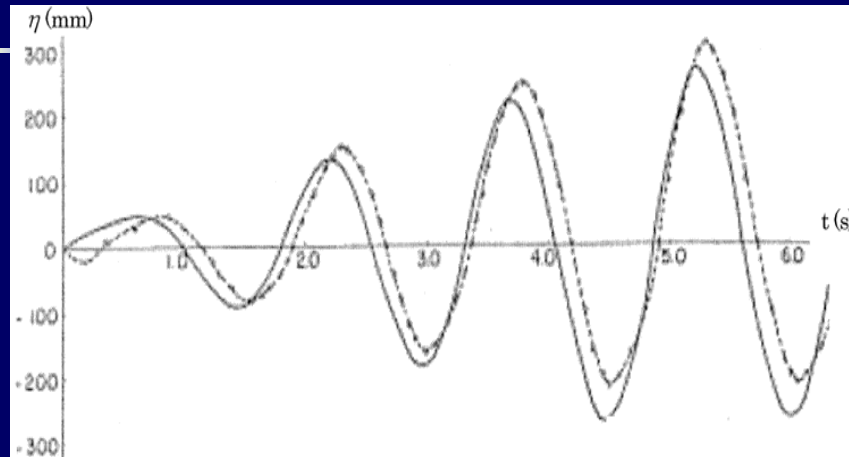
ポンツーン底面(下板)の外リム近傍での、円周方向膜応力が非線形効果で増大する。

適正評価が、沈没対策、ポンツーンの円周方向面外曲げモーメントの評価上、重要。

6. 過去の実験との比較、検証

まず、スロッシング非線形解析の検証として、

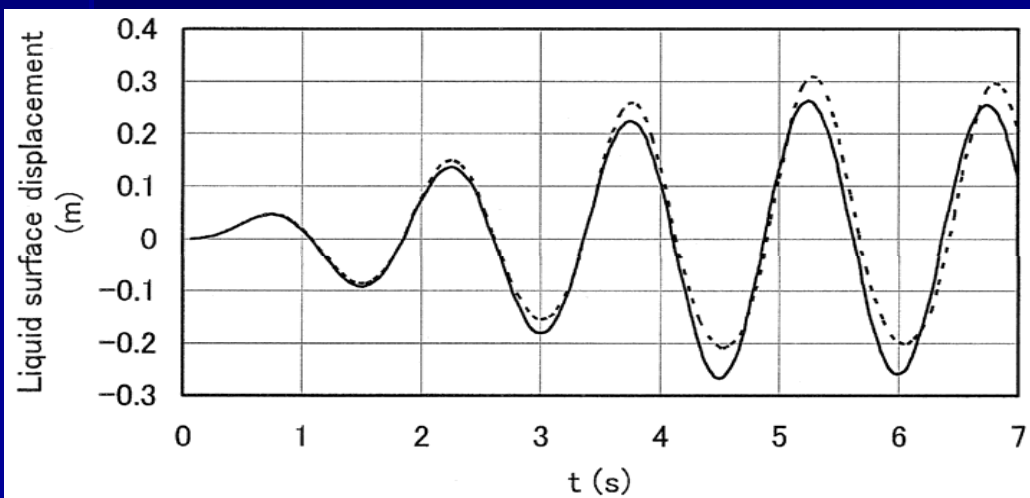
自由表面の波高を実験と比較した。タンク半径1m, 液深1.263m
変位振幅0.2mの3波共振



実線: 線形解析

点線: 実験(プラス側の振幅が大きい)

(Yamauchi, Y., Kamei, A,
Zama, S., and Uchida, Y.,
2006, ASME PVP2006-
ICPVT-11-93280)

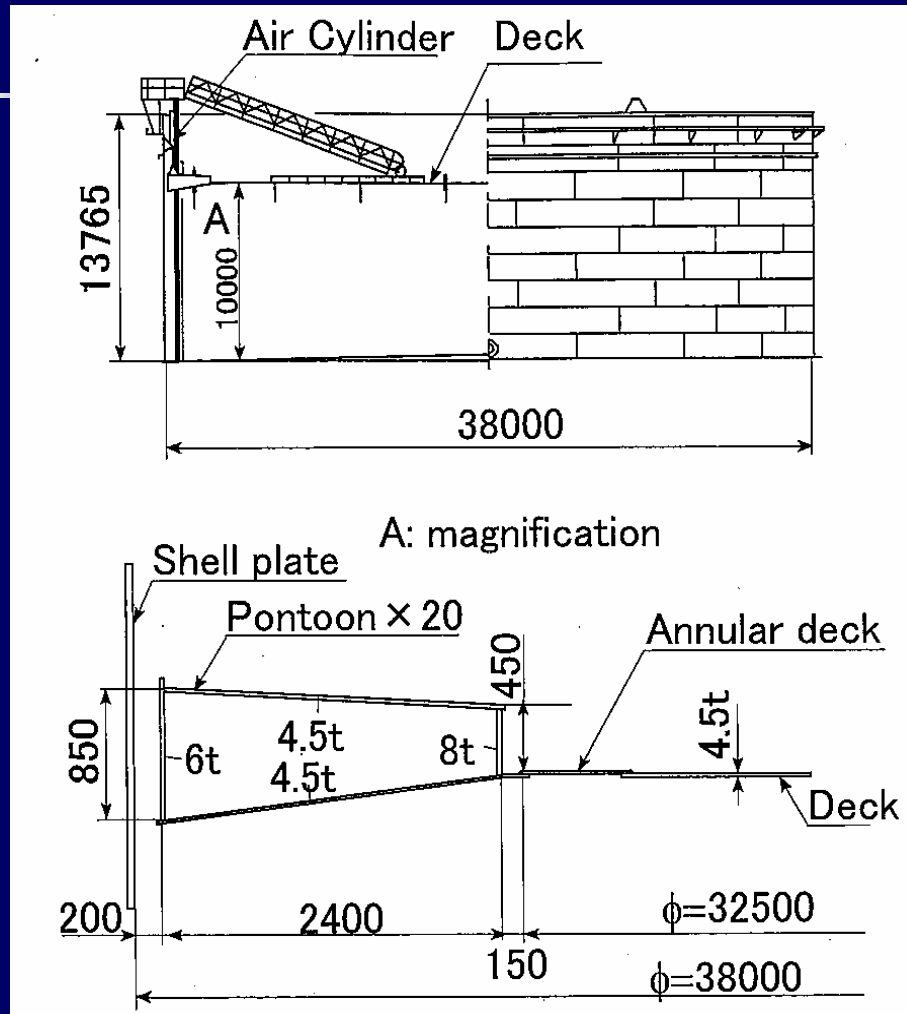


実線: 線形解析

点線: 本非線形解析
(プラス側の振幅が大きい)

(ASME J. Applied Mechanics
Vol.75, 2008 041008)

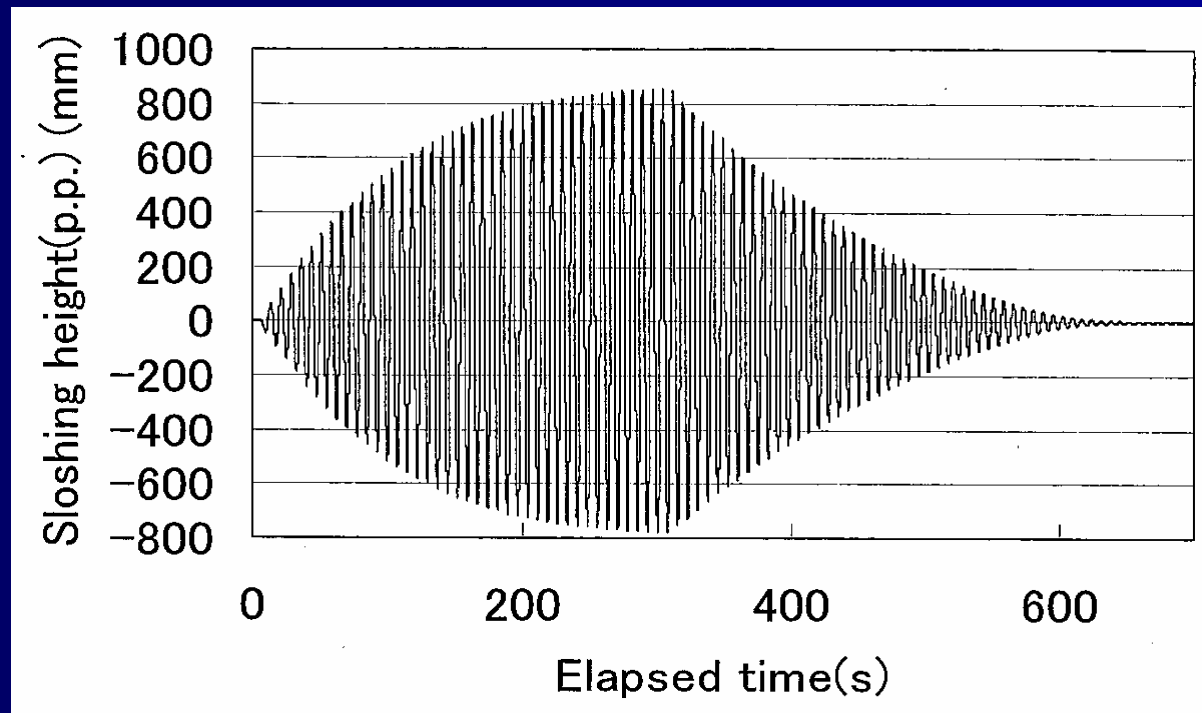
実タンク浮き屋根の油圧加振試験の結果(消防庁:西氏)と比較、検証した



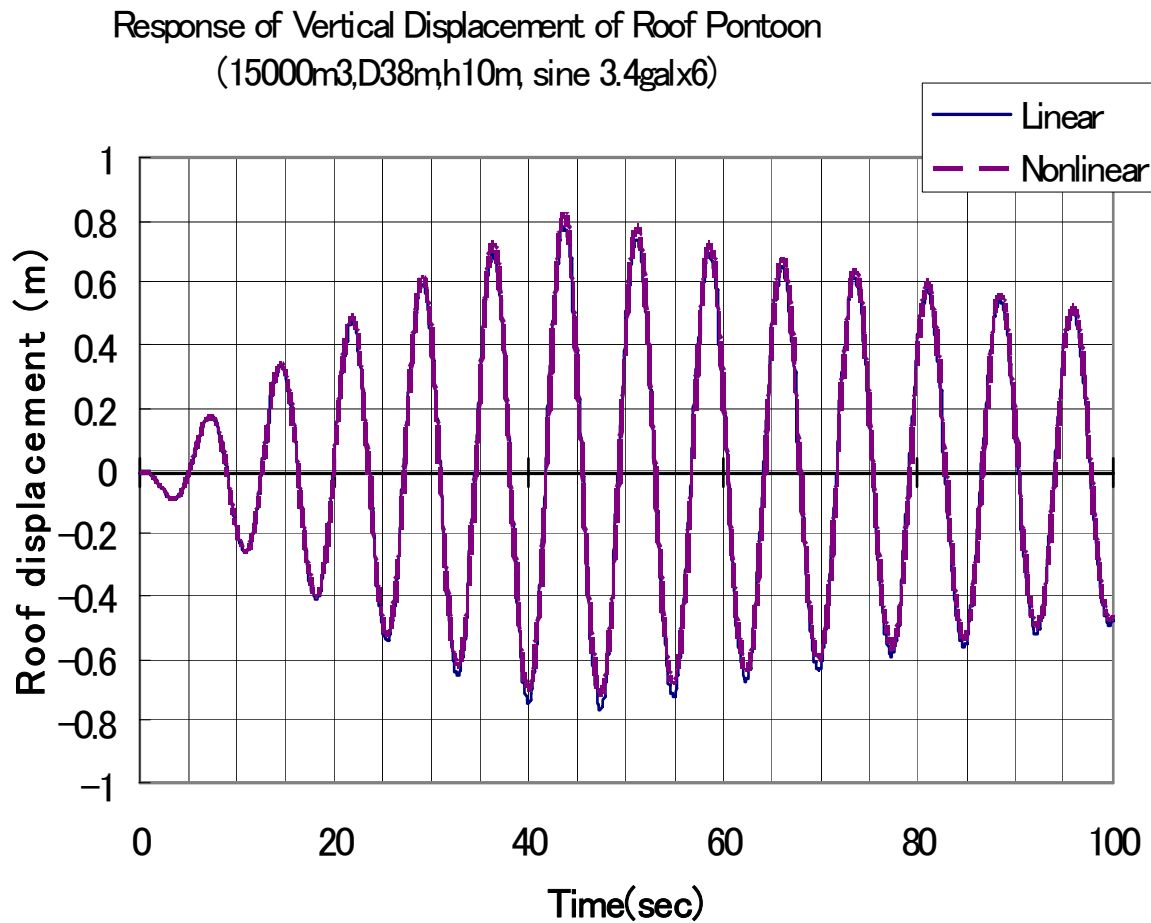
タンク直径38m
液位10m

実タンク浮き屋根の油圧加振試験の結果 (消防庁:西氏)との比較、検証 (ポンツーンの鉛直変位について)

プラス側の振幅がマイナス側の振幅より大きい下図
の実験結果が、非線形解析で説明できる(次頁)。



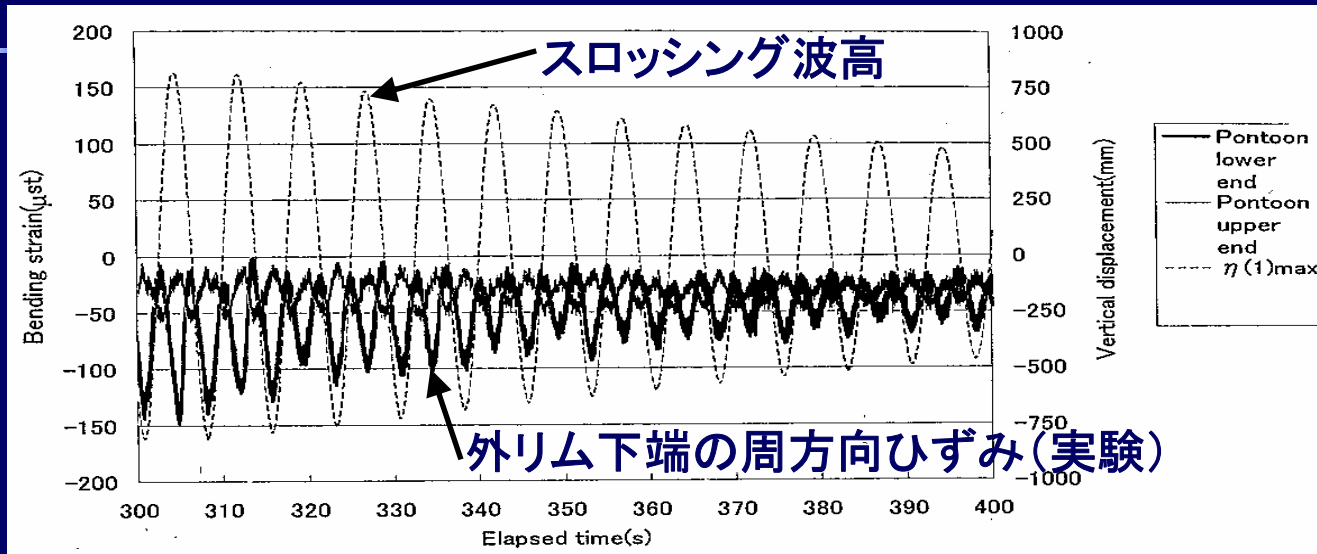
6. 実タンク浮き屋根の油圧加振試験の結果 (消防庁:西氏)との比較、検証 (ポンツーンの鉛直変位について)



解析: 正弦波を6波入力し、実験と同等の波高を再現。

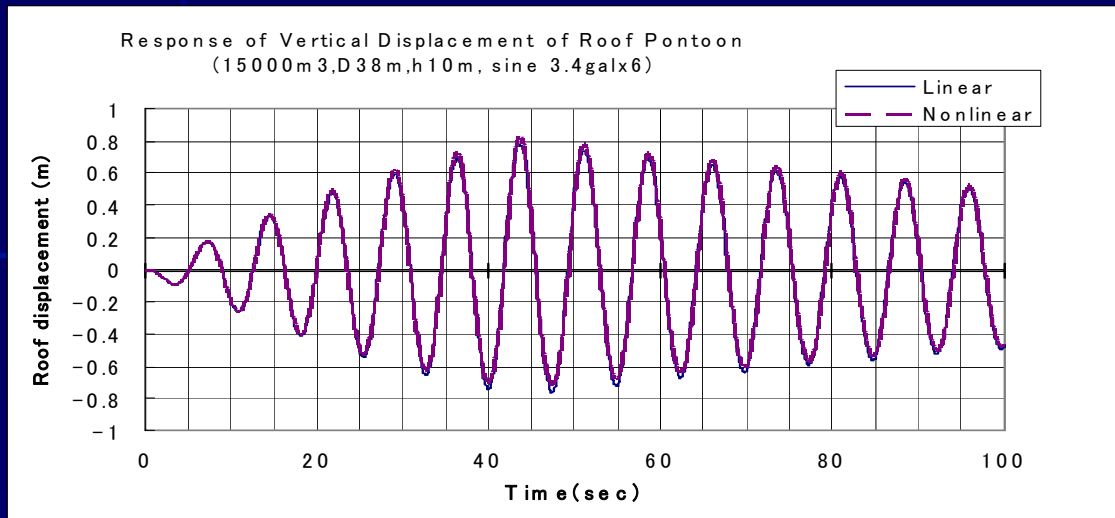
プラス側の振幅が、マイナス側の振幅より大きい実験結果が、非線形解析により説明できる。

6. 実タンク浮き屋根の油圧加振試験の結果 (消防庁:西氏)との比較、検証 (ポンツーンの応力について)

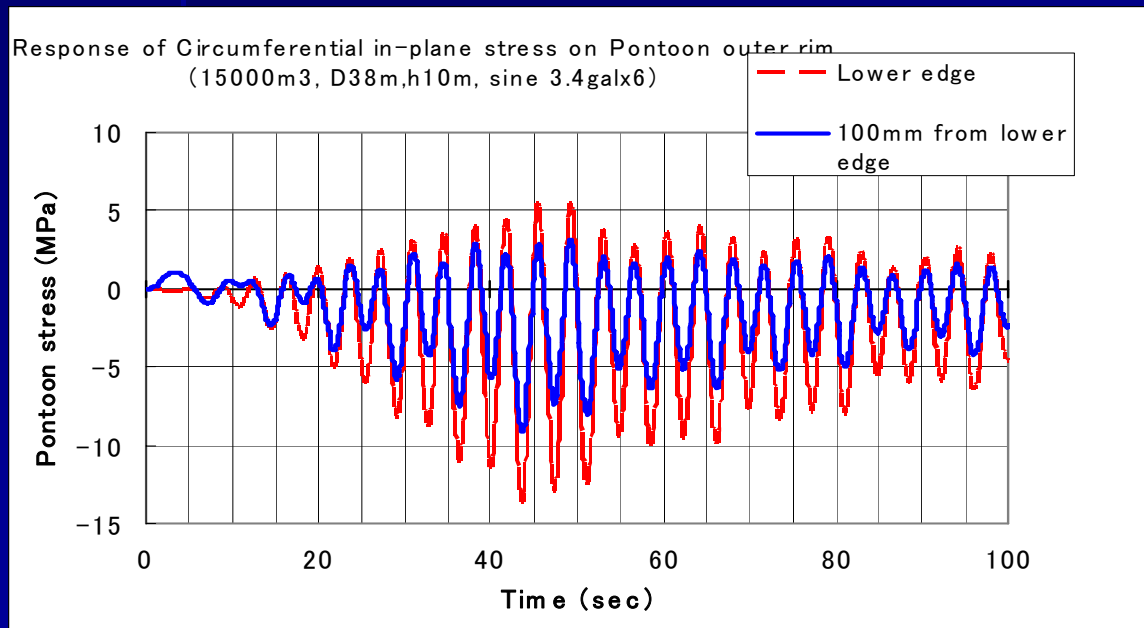


外リム下端の周方向ひずみは、スロッシング波高が極大、極小のときマイナス(圧縮)で、波高の2倍の周波数である。

ポンツーン応力の実験結果に対応する解析結果



←スロッシング波高の
周期7.47秒



←外リム下端の周方向
ひずみの周期3.74秒
波高が極大、極小の
ときマイナス(圧縮)
外リムで最下端の応
力が大きいことも実
験と一致

ポンツーン応力の実験結果:外リム下端の周方向ひずみは、スロッシング波高が極大、極小のときマイナス(圧縮)で、波高の2倍の周波数である。

これは、変位に関しては、周方向波数1の成分が支配的であるのに対し、

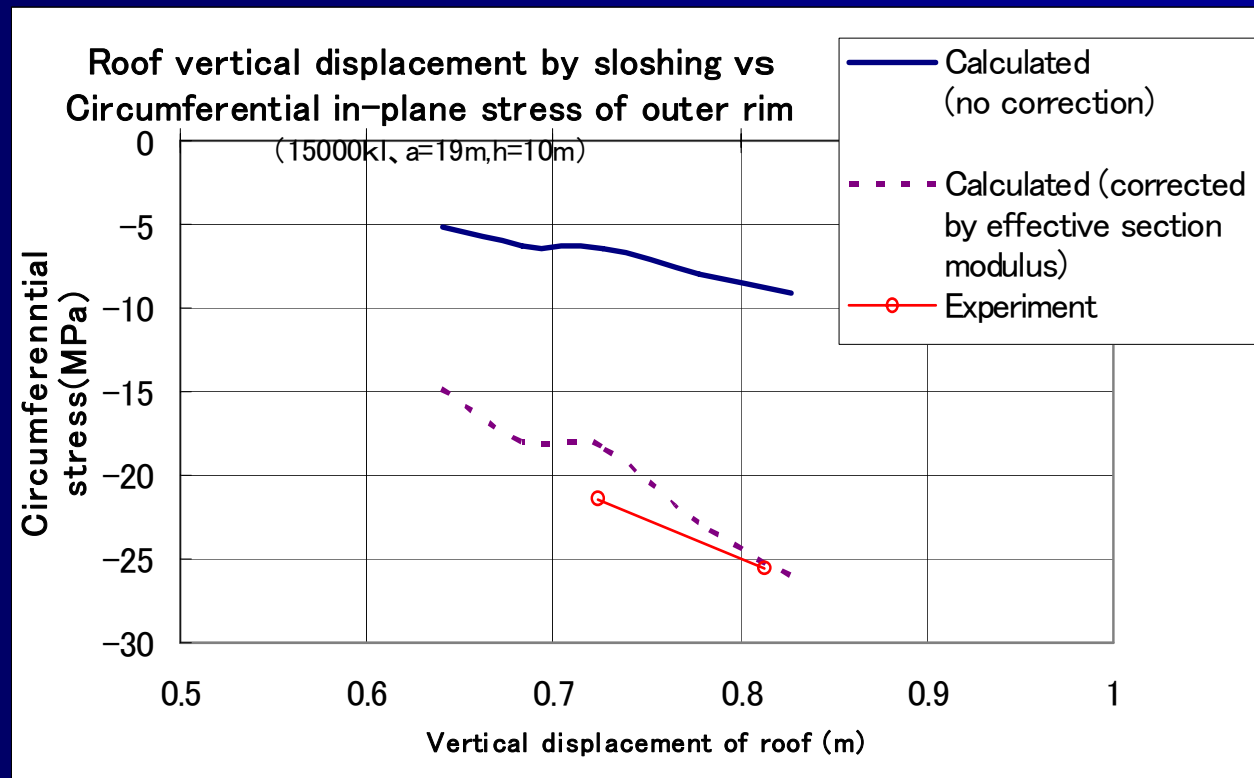
応力に関しては、周方向波数1の成分の2次非線形項によって励起されるために2倍の周波数で変動する、周方向波数2の成分が支配的になるためである。

周方向波数1の成分は、応力を生じない剛体ピッチングモードが支配的であるため、応力への寄与は小さくなる。

このように、非線形効果によって生じる周方向波数2の成分の影響が、変位に対してより応力に関して大きいという理論的知見が、実験的にも示されている。

浮屋根の揺動高さと外リム応力の関係(実験値と解析値の比較)

解析(ポンツーンの圧縮側断面の剛性を低下させた有効断面係数による補正值)と実験は、巨視的にほぼ一致し、本提案の解析手法は、変位や応力の面で妥当といえる。



7. まとめ(得られた知見)

- 1) 浮き屋根シェルFEMモデルのモード展開によって非線形スロッシング(解析的にモデル化)との連成を解く、解析ツールを開発した。このツールは、FEMモデルを直接時間応答解析する市販ソフトに比べ、次の点で便利である。
 - 設計のためのパラメータスタディ(多くの条件下での解析)が少ない時間・コストで行える。
 - モード分離の考察による、内部共振の予測、原因究明が可能。
- 2) 非線形性を考慮すると、半径方向1次モード加振で周方向波数2のモードが励起されるため、線形解析による予測より大きな応力が浮き屋根ポンツーン部に生じる。

この傾向をより顕著にする内部共振の、液位(液深)依存性について調べ、3万キロリットル級タンクで以下の知見が得られた。

 - 液位のタンク半径に対する比が1より大きくなると内部共振が顕著となる。
 - 内部共振は正弦波加振だけでなく、実地震波でも起こる。
 - 内部共振下での応力は、大きいだけでなく、長時間持続する(持続の短い地震入力に対しても！)。

7. まとめ(得られた知見)

- 3) 非線形性を考慮した本解析の妥当性を確認するため、消防研究センターが実施した実機タンク(15,000kl貯蔵タンク、液位10m)の揺動実験結果と比較し、以下の知見を得た。
- ●周方向波数2のモードのため、波高のプラス側の振幅が大きくなるのが、非線形解析によって説明できる。
 - ● 外リム部の応力(有効断面係数による補正值)と波高の関係が実験とほぼ一致する。
 - ●応力が、波高の2倍周波数で変動し、スロッシングの非線形効果により生じる周方向波数2の成分が、波高よりも応力に関して顕著に現れる点で、解析と実験との一致が確認された。
 - 実機タンクの実験に関する情報を西晴樹博士から御提供いただいた。西博士に心から謝意を表す。

参考:石油タンクの構造概要

- 浮屋根にはシングルデッキ型とダブルデッキ型がある。
- シングルデッキ型浮屋根式タンク(下図)
注)浮き室をポンツーンと呼ぶ。

