

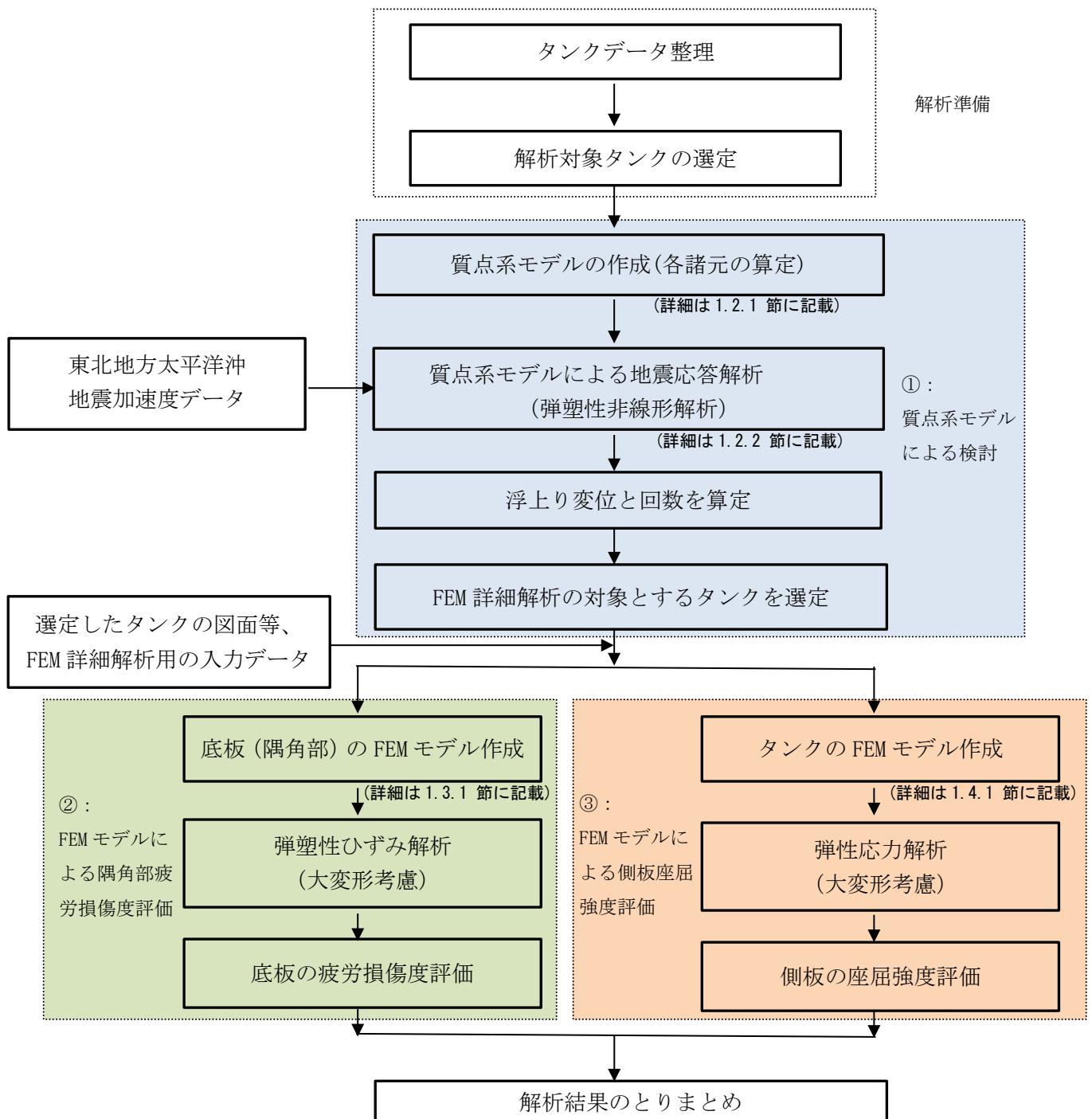
屋外貯蔵タンクの解析について

1 東北地方太平洋沖地震に対する屋外貯蔵タンクの耐震安全性確認解析の流れ

以下のような手順により、東北地方太平洋沖地震に対する屋外貯蔵タンクの耐震安全性確認のための解析を行う。

本調査は3種類の解析により行う。

- ① 質点系モデルによる側板下端部の浮上り解析
- ② 2次元軸対称モデルによる浮上りの繰返し挙動を考慮した底板の疲労損傷度評価解析
- ③ 3次元シェルモデルによる底板浮上り時の側板の座屈強度評価解析



1.1 解析対象タンクの選定

解析対象タンクは、仙台・塩釜及び広野の特防区域に実在するタンクを関係団体を通じて調査し、以下のような考え方で東北地方太平洋沖地震時の貯蔵率を考慮して選定した。なお、質点系モデルによる解析については、当該貯蔵率を用いて行う。

(1) 仙台・塩釜地区

仙台・塩釜の特防区域の解析対象タンクは、入手できたタンク 101 基のうち、東北地方太平洋沖地震時の貯蔵率が不明のものを除き、当該貯蔵率が 75%以上の 10 基を選定した。内訳は図 1.1-1 のとおり。

タンク番号	内容物	貯蔵内径 (m)	側板高さ (m)	公称容量 (KL)	震災時貯蔵量 (KL)	震災時貯蔵率
①	RG	27.5	19	1,542	1,218	79%
②	並揮	13.54	12.035	1,570	1,262	80%
③	軽油	13.54	13.7	1,780	1,408	79%
④	LSA	14.63	14.632	2,272	2,040	90%
⑤	灯油	17.07	16.525	3,425	2,689	79%
⑥	ナフサ	23.248	14.595	5,540	5,300	96%
⑦	重油	26.151	21.855	10,930	8,400	77%
⑧	軽油	37.776	21.855	22,450	17,100	76%
⑨	ガソリン	58.113	22.195	53,620	48,200	90%
⑩	原油	78.471	22.545	98,060	86,800	89%

図 1.1-1 仙台・塩釜地区の解析対象タンク

(2) 広野地区

広野の特防区域の解析対象タンクは、入手できたタンク 10 基のうち、東北地方太平洋沖地震時の貯蔵率が不明のものを除き、当該貯蔵率が 70%以上の 3 基を選定した。内訳は図 1.1-2 のとおり。

タンク番号	内容物	貯蔵内径 (m)	側板高さ (m)	公称容量 (KL)	震災時貯蔵量 (KL)	震災時貯蔵率
①	軽油	15.5	13.17	2,000	1,477	74%
②	燃料	61	21	50,000	35,955	72%
③	燃料	61	21	50,000	41,654	83%

図 1.1-2 広野地区の解析対象タンク

1.2 質点系モデルによる検討

1.2.1 質点系モデルの作成

屋外貯蔵タンクの諸元から、消防法の式を用いて質点系モデルの入力値を算定し、解析モデルを構築する。図 1.2-1 に質点系モデルの入力値算定の一例を示す。

加谷・遊艇地区		2014.11.14	(SI単位)	
質点系モデルによる側板下端の浮上り変位計算用諸元				赤字：入力値
【諸元】				
公称容量	VOL (kL)	99630	(kL)	
貯槽内径	D	78471	(mm)	
側板高さ	hmax	22545	(mm)	
最下段側板厚	t ₂	34.2	(mm)	
1/3の最高液高さにおける側板厚	t _{1/3}	26	(mm)	
アニュラ板厚	t _b	10.9	(mm)	
突き出し長(最下段側板内側からの突き出し長さ)	LL	65	(mm)	
突き出し長(最下段側板中心線からの突き出し長さ)	E	47.9	(mm)	
鋼材のヤング係数	E	206940	(MPa)	
鋼材のポアソン比	ν	0.3		
降伏応力	σ _y	4.90E+02	(MPa)	
最高液高さ	H	20323	(mm)	
液密度	γ	8.80E-07	(kg/cm ³)	
液径/液高さ比	D/H	3.861		
液高さ/液径比	H/D	0.259		
消防法/有効液重量率 f _{w0}				
$f_{w0} = \sum_{n=0}^4 A_n (H/D)^n$		3.10E-01		
消防法/有効液重量率 f _{w1}				
$f_{w1} = \sum_{n=0}^4 B_n (H/D)^n$		2.96E-01		
消防法/有効液の重心高さ係数 f _{h0}				
$f_{h0} = \sum_{n=0}^4 C_n (H/D)^n$		4.00E-01		
消防法/有効液の重心高さ係数 f _{h1}				
$f_{h1} = \sum_{n=0}^4 D_n (H/D)^n$		3.82E-01		
底板に作用する最大静液圧	P ₀ =γH	1.75E-01	(N/cm ²)	
タンク本体重量 (赤字：入力値)				
側板重量	W _{s0}	8.80E+03	(kN)	
側板付属品重量	W _{s1}	1.43E+03	(kN)	
浮き屋板重量	W _{r0}	3.19E+03	(kN)	
浮き屋板付属品重量	W _{r1}	4.04E+02	(kN)	
			(kN)	
本体マス 合計	W _{sr}	1.39E+06	(kg)	
【計算式と質点系モデルの入力数値】				
貯槽の固有周期				
$T_b = 2 / \lambda \sqrt{W / (\pi * 1000 * E * t_{1/3})} j$			0.3737	(sec)
$\lambda = 0.067 (H / D)^2 - 0.30 (H / D) + 0.46$			0.386798	(-)
W = γ π D ² H / 4	W		86492559	(kg)
Σ W+Wsr	W+Wsr		8.79E+07	(kg)
基礎地盤と貯槽本体の連成振動補正係数	j =		1	(-)
円角振動数 ω=2π/Tb	ω		16.81177	(rad/s)
有効液重量				
W ₀ = f _{w0} * (W +Wsr)			2.73E+07	(kg)
W ₁ = f _{w1} * (W +Wsr)			2.60E+07	(kg)
消防法/有効液重量率	f _{w0}		3.10E-01	(-)
	f _{w1}		2.96E-01	
有効液の重心高さ				
H ₀ = f _{h0} *H			8.13E+03	(mm)
H ₁ = f _{h1} *H			7.76E+03	(mm)
消防法/有効液の重心高さ係数	f _{h0}		4.00E-01	(-)
	f _{h1}		3.82E-01	
ばね係数	Kb		7.71E+07	(N/cm)
浮上り抵抗力	qy		8.25E+02	(N/cm)
保有水平耐力 (降伏耐力)	Qy		8.92E+07	(N)
降伏変位 (=Qy/Kb)	Δy		1.16E+00	(cm)
タンクの重心高さ(=0.44H) (水平力の作用中心)	Hg		894.212	(cm)

図 1.2-1 質点系モデルの入力値算定の一例

1.2.2 解析方法及び解析条件

(1) 解析方法

図 1.2-2 に示す弾塑性復元力特性を有する質点系モデルを用いて、時刻歴地震応答解析を実施することにより、屋外貯蔵タンクの弾塑性応答と側板下端の浮上り挙動との関連づけを行う。

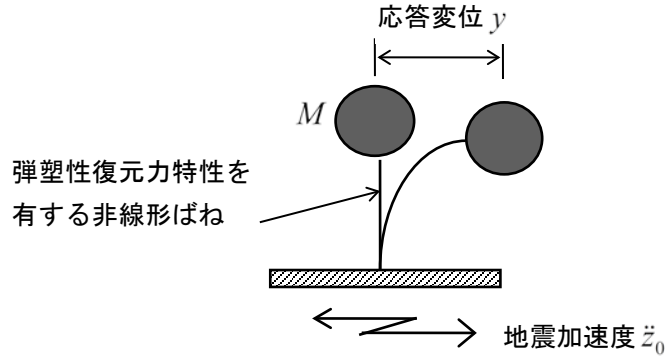


図 1.2-2 弾塑性質点系モデルの概念図

(2) 弾塑性復元力モデル

側板下端部の浮上り挙動を考慮にいて、非線形弾塑性ばね特性としては、文献調査^{※1}から以下の図 1.2-3 に示される S 字非ループ型復元力モデルを使用する。

浮上り量に対する第 2 剛性の影響を確認するため、S 字非ループ型モデルの第 1 剛性と第 2 剛性の比を $K_2 / K_1 = 0$ 及び $K_2 / K_1 = 0.3$ の 2 パターンとする。

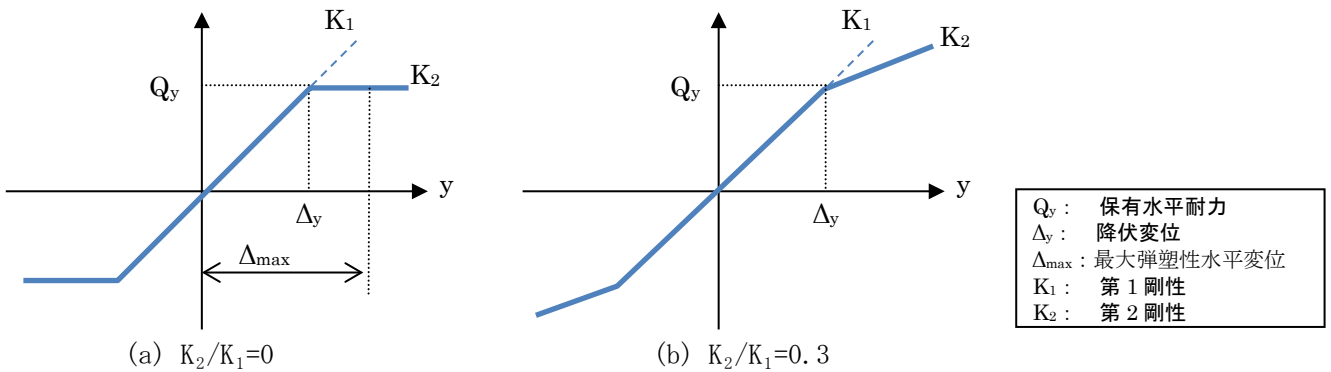


図 1.2-3 S 字非ループ型復元力モデルの概念図

※1 文献 1 : P. K. Malhotra and A. S. Veletsos, Uplift Response of Unanchored liquid-Storage Tanks, Journal of Structural Engineering, Vol.120, No.12, December 1994

文献 2 : 平成 25 年度に、(独)天然ガス・金属鉱物資源機構に委託された「陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討」、2.4 節

(3) 側板下端の最大浮上り変位の計算方法

弾塑性応答解析結果から、質点系モデルの最大弾塑性水平変位 Δ_{\max} に含まれる塑性変位成分 ($\Delta_{\max} - \Delta_y$) を抽出する。塑性変位成分によって、図 1.2-3 に示すようにタンク側板下端が片浮上りを生じた場合を考えると、最大浮上り変位 δ_{\max} は近似的に次式で表せる。

$$\delta_{\max} = \frac{D}{H_g} (\Delta_{\max} - \Delta_y)$$

ここに、 Δ_{\max} : 最大弾塑性水平変位 (cm)、 D : タンクの直径 (cm)、

H_g : タンクの重心高さ (cm) (消防法の式によって重心高さを計算する)

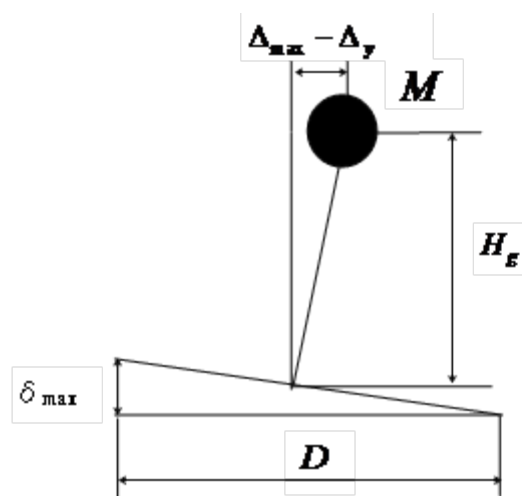


図 1.2-3 側板下端の浮上り変位を求める概念図

(4) 解析対象

1.1 節で選定した屋外貯蔵タンクとする。

(5) 地震加速度波形

資料 1-5-2 による地震加速度波形を使用する。

1.2.3 検討結果の整理

以下の解析結果をまとめる。

- (1) 検討対象とする屋外貯蔵タンクの側板下端部の浮上り変位とその回数
- (2) 検討に使用した各パラメータの影響
- (3) 解析結果の検討・考察及び FEM 解析用の屋外貯蔵タンクの選定結果

1.3 浮上りの繰返し挙動を考慮した底板の疲労損傷度評価解析

タンク浮上り挙動(図 1.3-1 参照)を考慮した有限要素法モデルを作成し、解析により隅角部溶接部近傍の最大ひずみ振幅量を求め、疲労損傷度を評価する。

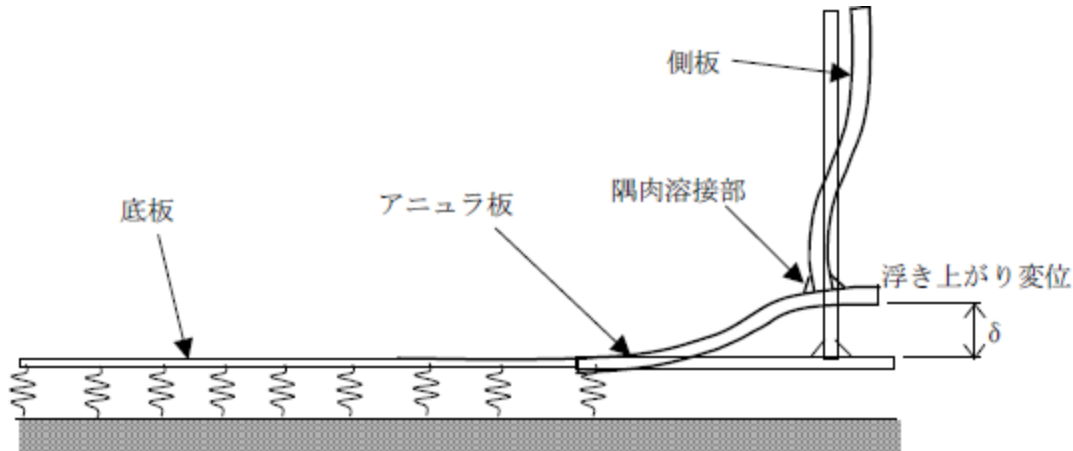


図 1.3-1 底板（隅角部）の浮上り変位のイメージ図

1.3.1 解析モデル及び解析条件

(1) 解析モデル

- ・ 図 1.3-2 に示すような、底板、アニュラ板、側板、溶接部の形状を再現した 2 次元軸対称ソリッド要素モデルを作成する。モデルの範囲は、浮上りによる変形の影響がないと考えられるところまでとし、少なくとも隅角部から $2.5\sqrt{Rt}$ 以上とする。(R : タンク半径、t : アニュラ板、あるいは側板の板厚のうち大きい値)
- ・ 基礎支持部は引張り剛性ゼロとなる非線形ばね要素を使用してモデル化し、底板と基礎（ばね）の間の接触問題を考慮する。この非線形ばねは、地盤反力係数 $30\text{kgf}/\text{cm}^3 (=294\text{N}/\text{cm}^3)^{*2}$ に相当する値とする。
- ・ 底板と側板の材料は弾塑性体とする (2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII Dev. 2 Part3 記載の応力-ひずみ特性を使用)。
- ・ 本解析には移動硬化則及び幾何学的非線形効果 (大変形理論) を考慮する。
- ・ 本解析は汎用解析コード『Abaqus』を使用する。

※2 平成 23～25 年度実施 (独) 天然ガス・金属鉱物資源機構の委託業務「陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討」で使用された値

対称軸

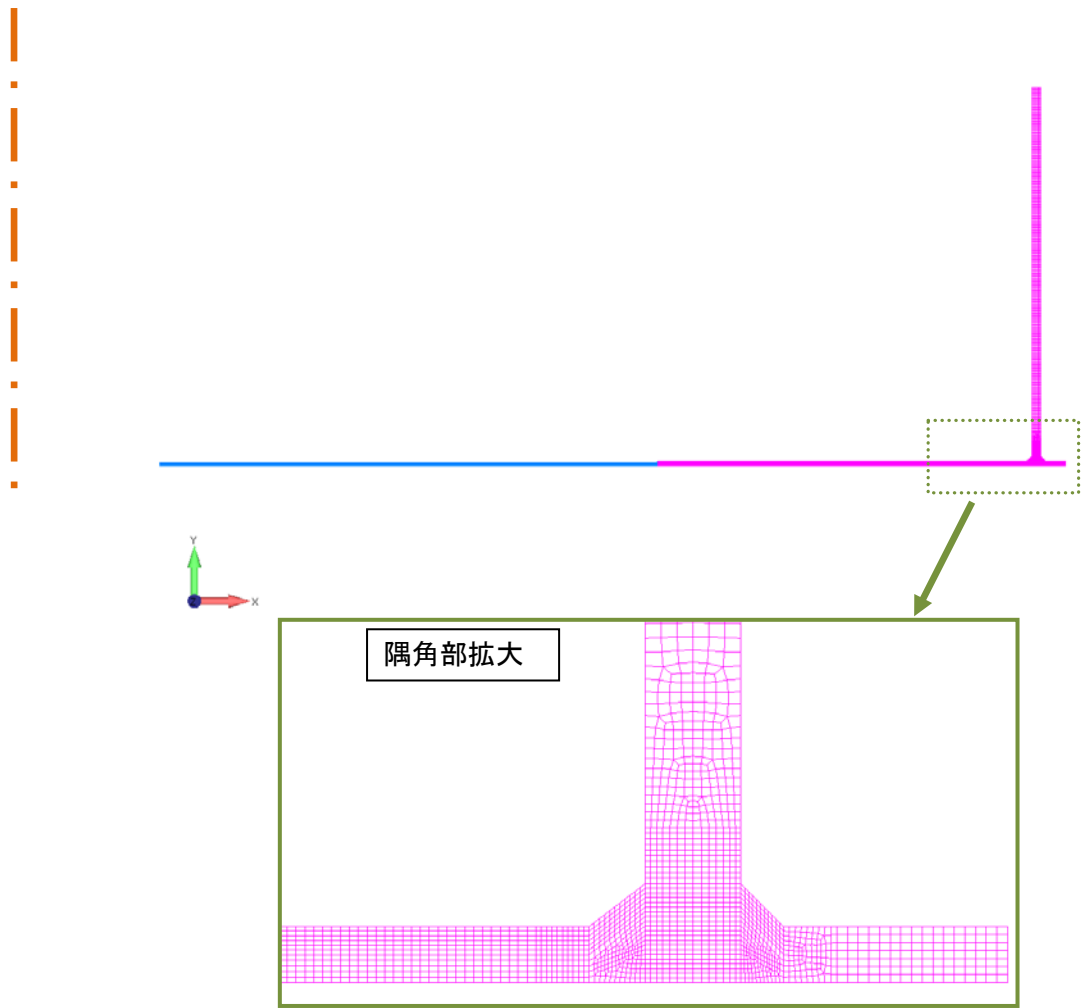


図 1.3-2 解析モデルイメージ図

(2) 解析条件・手順

解析は以下の条件及び手順で実施する。

- ① 荷重条件として、液圧及びタンク本体の自重を負荷する。
 - ② 質点系モデルから得られるタンクの最大浮上り変位と同じとなるように、モデルの側板上部に強制変位を与える。
 - ③ 浮上り変位がゼロとなるように、モデルの側板上部に下向きの強制変位を与える。
 - ④ 再度浮上り強制変位を側板上部に与える。
- 以後、③④を3サイクル以上繰り返す解析を行う。

1.3.2 最適疲労曲線を用いる疲労損傷度評価

タンク浮上りの繰り返し解析結果より、隅角部の注目点(図 1.3-3 に例を示す)におけるひずみ振幅からタンクの疲労損傷度評価を行う。地震時の浮上り挙動に対する隅角部の疲労は低サイクルの疲労であるため、式-1 及び図 1.3-4 に示される飯田の最適疲労曲線(金沢・飯田:溶接継手の強度, 産報出版, 1979)を用いる。同図及びひずみ振幅から繰り返し回数を求め、式-2 に示すマイナー則による疲労損傷度評価を行う。

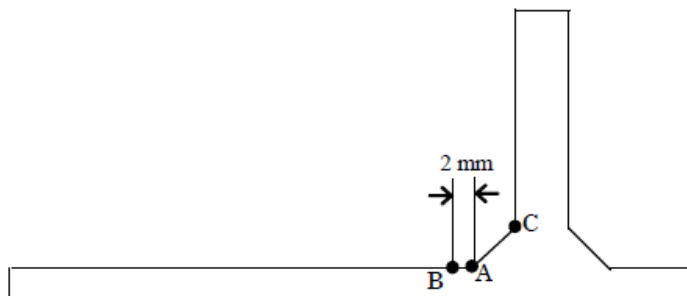


図 1.3-3 ひずみ出力位置

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = 0.415N_c^{-0.606} + 0.00412N_c^{-0.115} \quad \dots \text{式-1}$$

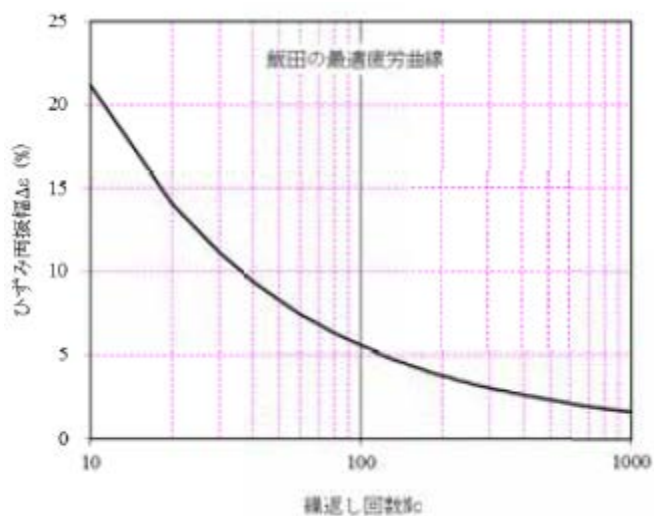


図 1.3-4 飯田の最適疲労曲線

$$D = \frac{n(\Delta\varepsilon_1)}{N_c(\Delta\varepsilon_1)} + \frac{n(\Delta\varepsilon_2)}{N_c(\Delta\varepsilon_2)} + \frac{n(\Delta\varepsilon_3)}{N_c(\Delta\varepsilon_3)} + \dots < 1.0 \quad \dots \text{式-2}$$

D : 疲労損傷度

$\Delta\varepsilon_i$: 第 i サイクル目のひずみ振幅

$n(\Delta\varepsilon_i)$: 第 i サイクル目のひずみ振幅 $\Delta\varepsilon_i$ の繰返し回数

$N_c(\Delta\varepsilon_i)$: 第 i サイクル目のひずみ振幅 $\Delta\varepsilon_i$ の疲労寿命

1.3.3 検討結果の整理

以下の内容を整理する。

- (1) 各サイクルにおける浮上り変位と浮上り抵抗力との関係
- (2) 各サイクルでのタンク隅角部の評価点(図 1.3-3 の A, B, C 位置)の最大ひずみ振幅
- (3) 疲労損傷度の算出と評価結果

1.4 3次元シェルモデルによる底板浮上り時の側板の座屈強度評価解析

タンクの浮上りの挙動を考慮したFEMモデルを作成し、側板に発生する最大圧縮応力を求め、側板の座屈強度を評価する。

1.4.1 解析モデル及び解析条件

(1) 解析モデル

- ・ 図 1.4-1 に示すような、側板及び底板の一部(浮上り/めり込みの挙動の影響を受ける箇所)の形状を再現した3次元シェル要素モデル(180°の半割モデル)を作成する。
タンク断面には対称条件を設定する。また、図 1.4-1 で示した底板切端の内縁をタンク中央一点で MPC 拘束(タンク浮上り/めり込みの挙動の影響を受けない部分は中央点と同じ移動/回転となるように設定)し、その中央点にも拘束条件を設定する(同図の Z 軸方向の並進、Y 軸周りの回転は許し、他の方向は固定する設定)。
- ・ 基礎支持部は引張り剛性ゼロとなる非線形ばね要素を使用してモデル化し、底板と基礎(ばね)の間の接触問題を考慮する。この非線形ばねは、地盤反力係数 $30\text{kgf/cm}^3 (=294\text{N/cm}^3)$ ^{※3}に相当する値とする。
- ・ 底板と側板の材料は弾性体とする。
- ・ 本解析には幾何学的非線形効果(大変形理論)を考慮する。
- ・ 本解析には汎用解析コード『Abaqus』を使用する。

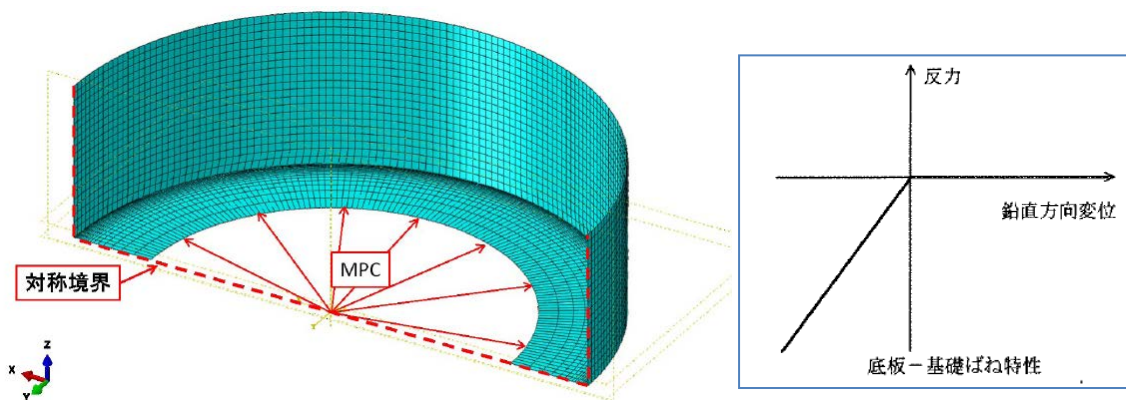


図 1.4-1 解析モデルのイメージ図

※3 平成 23～25 年度実施 (独) 天然ガス・金属鉱物資源機構の委託業務「陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討」で使用された値

(2) 解析条件

- 荷重条件として、静液圧と地震による動液圧を静的荷重として側板に作用させる。動液圧は周方向に余弦分布させる。底板には、側板最下部の静液圧+動液圧の値を一様に作用させる。

選定したタンクのサイトにおける地震動の応答スペクトルの値及びタンクの固有周期より長周期側に位置する応答スペクトルの最大値等を、消防法の危険物告示¹⁾の動液圧等の算定式に用いられる設計震度と仮定して、動液圧を求める。本告示では、設計水平震度又は設計鉛直震度を代入することにより、2方向の動液圧等をそれぞれ算定することが可能である。鉛直震度の影響が無視できないと判断される場合は、動液圧等を適切な方法で重ね合わせて検討する。

- 1) 「危険物の規制に関する技術上の基準の細目を定める告示第4条の20第1項及び危告示第4条の22の10の地震の影響に係る計算式」

- 動液圧の倍数をパラメータとして、1.2節で解析する質点系モデルから得られるタンクの最大浮上り変位と同じとなるように調整する。

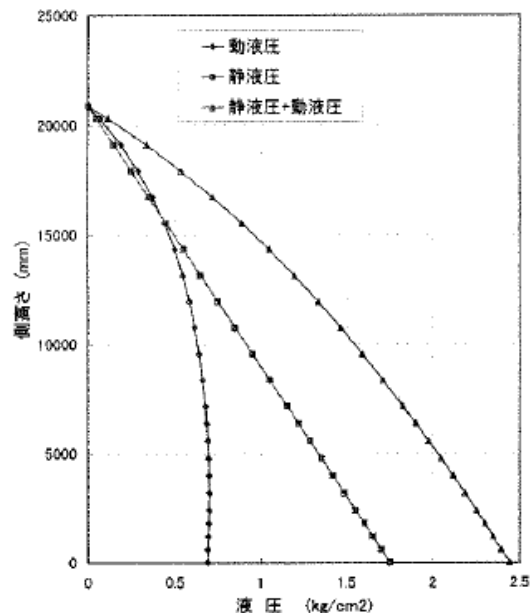


図 3.1-2 タンク液圧分布例

1.4.2 座屈強度評価

注目する各浮上り変位までに達した時、逆側であるめり込み側の最大軸方向圧縮応力を算出し、許容座屈応力と比較して座屈強度を評価する。

1.4.3 検討結果の整理

以下の内容を確認・整理する。

- (1) 浮上り変位、めり込み量、めり込み範囲（角度）と動液圧倍数との関係
- (2) 軸方向圧縮応力、円周方向引張応力と動液圧倍数との関係
- (3) 側板下端の反力と転倒モーメントの確認
- (4) 側板の変形状態の確認
- (5) 軸方向圧縮応力に対する評価結果

2 南海トラフ地震に対する屋外貯蔵タンクの耐震安全性確認解析の流れ

以下のような手順により、南海トラフ想定地震に対する屋外貯蔵タンクの耐震安全性確認のための解析を行う。手順は「1 東北地方太平洋沖地震に対する屋外貯蔵タンクの耐震安全性確認解析の流れ」と同様であり、以下3種類の解析により行う。

- ① 質点系モデルによる側板下端部の浮上り解析
- ② 2次元軸対称モデルによる浮上りの繰返し挙動を考慮した底板の疲労損傷度評価解析
- ③ 3次元シェルモデルによる底板浮上り時の側板の座屈強度評価解析

