# 過去2ヶ年の検討概要

#### 1 検討目的

南海トラフ地震などの大規模な地震の発生が懸念されている状況に鑑み、大規 模地震に対する地震動を想定した屋外タンク貯蔵所の耐震安全性確認のため、平 成26年度から3ヵ年の予定で調査検討を行うものである。

#### 2 検討結果の概要

平成26年度及び平成27年度は、南海トラフ地震の想定地震動に対する屋外タンク貯蔵所の耐震安全性について調査・検討を行った。その概要を以下に示す。

(1) タンク本体

内閣府(中央防災会議)から公開されている南海トラフ地震の想定地震動(短 周期成分)に対する屋外貯蔵タンク本体の耐震安全性について確認するため、 図1のとおり3種類の解析を実施した。



#### 1 1 質点系モデルによる時刻歴応答解析結果(平成 26 年度)

タンク容量、新法旧法の別等を考慮して11基の代表タンクを抽出し、南海 トラフ地震の検討対象として計測震度、液状化の可能性、地盤改良工法等を 考慮して選択した3地区について、想定地震波入力による解析を行った。

平成 26 年度は、現行消防法の終局強度耐震設計法に採用された水平方向の 地震応答を考慮した解析モデルの基本的考え方に沿って作成した 1 質点非線 形ばね系モデルを用いて水平方向地震力に対する時刻歴応答解析を行い、タ ンクの浮き上がり量の検討を実施した。当該解析・検討では、非線形水平ば ね特性に、S字非ループ型の弾塑性復元力特性(第 2 剛性を無視した水平抵 抗力 Q と水平変位 Δ の線図(バイリニア型))を持つ動液圧の影響を無視し た簡便な非線形水平ばねを使用したため、最大で浮き上がり変位 104.3 cm (浮 き上がり回数:正負合計 67 回)となるタンク(旧法、30,000k1、内径 45.1m、 高さ 21.3m。以下「最大浮き上がりタンク」という。)があった。

#### ① -2 1質点系モデルによる時刻歴応答解析結果(平成 27 年度)

平成 27 年度はタンクの浮き上がり量をより適切に評価するため、2 通りの 手法で検討を行った。

1通り目として、1 質点モデルの非線形水平ばね特性に、S字非ループ型 の弾塑性復元力特性(第2剛性以降を考慮した水平抵抗力Qと水平変位Δの 線図(マルチリニア型))を持つ動液圧の影響を考慮した非線形水平ばねを 採用して解析を行った。最大浮き上がりタンクについて、想定地震動の入力 波に対する時刻歴応答解析を実施した結果、最大浮き上がり変位は75.1cm(浮 き上がり回数;正負合計34回)となった。



平成 26 年度モデル

平成 27 年度モデル

図2 タンクの片浮き上がりロッキング挙動解析用1質点非線形水平ばね系モデル(Q-Δ線図)の概念図



図3 1質点モデルの非線形水平ばね特性(Q-Δ線図)概念図



図4 浮き上がり変位の時刻歴(平成27年度モデル(Q-△線図)による解析)

次に、タンク全体の 3D シェルモデルを用いた FEM 弾塑性大たわみ解析を 実施し、その結果から求めた抵抗モーメント M と回転角度 θ の復元モーメン ト特性 (M-θ 線図)を1 質点モデルの非線形水平ばね特性に採用して解析を 行った。最大浮き上がりタンクについて、想定地震動の入力波に対する時刻 歴応答解析を実施した結果、最大浮き上がり変位は、45.0cm (浮き上がり回 数;正負合計 29 回)となった。







図6 浮き上がり変位の時刻歴(3DシェルモデルのM-θ線図による解析)

平成 27 年度に採用した 2 通りのばね特性について、それぞれまとめると表 1 のとおりとなる。

以上の結果から、最大浮き上がりタンクの最大浮き上がり変位については、 両ケースから求められた 45.0cm~75.1cm の幅内にあると推定される。

表1 ばね特性の比較

	定式化による特性のばね	3D シェルモデルより 得られる特性のばね	
動液圧の影響	考慮	考慮	
タンク浮き上がりを繰り返すことにより 2回目以降は浮き上がり易くなる効果	Wozniak モデルを使用繰返しにより 浮き上がり易くなる傾向を考慮	考慮せず	
作成されるばね特性	比較的柔らかいばね (保守的な設定)	比較的固いばね	
ばね特性作成の簡便さ	作成が容易 (算定式を利用)	時間と手間がかかる (FEM 解析が必要)	

# ② 2次元軸対称モデルによる浮き上がりの繰返し挙動を考慮した隅角部の疲労損傷度評価解析

最大浮き上がりタンクについて、浮き上がり変位の最大時を対象とし、有限要素法を用いた静的応力解析を実施して浮き上がり時に隅角部に発生する ひずみ量を算出して飯田の最適疲労曲線とマイナー則を使って疲労損傷度 D (D=1 のとき疲労寿命)の評価を行った。平成 26 年度の評価では、板表面 上の全ひずみ振幅が最大で約 35%となり、飯田の最適疲労曲線の範囲外とな ったが、平成 27 年度の評価では、浮き上がり変位 75.1cm 時の全ひずみ振幅 が最大で約 25%となり、疲労損傷度は D=0.333 で許容値以内となった。



隅角部の半径方向ひずみ成分分布図

#### 図7 隅角部の解析

### ③ 3次元シェルモデルによる底板浮き上がり時の側板の座屈強度評価解析

最大浮き上がりタンクについて、浮き上がり変位の最大時を対象とし、3 次元シェル要素モデルによる弾性大変形解析を実施して沈み込み側の側板下 端に発生する最大軸方向圧縮応力を算出し、側板の限界座屈応力との比較に より側板の地震時の座屈強度評価を行った。平成26年度の評価では、最大浮 き上がり変位が104.3cmのときの沈み込み側の最大沈み込み変位は0.6cmで あり、ダイヤモンド座屈及び象の脚型座屈は限界応力を超えない結果となっ た。平成27年度の評価では、最大浮き上がり変位が75.1cmのときの沈み込 み側の最大沈み込み変位は0.44cmであり、同評価手法で限界応力を超えな いという結果となった。

なお、平成27年度の解析では、トップアングル及びウィンドガータを考慮 したモデルを採用したことから、平成26年度の解析のように浮き上がり側の 側板が動液圧の影響でタンク内側へ凹むような変形は生じない結果となった。



図8 75.1cm 浮き上がり時の変形図と相当応力分布図

## (2) 基礎・地盤

内閣府(中央防災会議)から公開されている南海トラフ地震の想定地震動(短 周期成分)における屋外貯蔵タンクの基礎・地盤の安全性について確認するた め、以下の検討フロー図のとおり解析を実施した(平成26年度)。



対象地区は、西日本の代表的な特防区域5地区の中から地盤の改良方法、 物性値から得られる地盤変形の可能性、タンク周辺の液状化が発生する可能 性等を考慮し、タンク直下の液状化の可能性が高いと思われる2地区を選定 し、タンクは地盤に対する影響や事故が発生した場合の影響の大きさ等を考 慮し10万KL(旧法、内径83.1m、高さ19.985m、内容物の比重0.95)を選定 した。また、解析に用いるタンク基礎は、施工実績で最も多い盛り土基礎及 びリング基礎とした。



図 10 断面 2 次元非線形有効応力解析結果 【沈下量が最も多い地区における過剰間隙水圧消散後(約 45 日後)の変形図】

沈下量が最も多い地区では、タンク本体の直下で 27.7cm 沈下し、その周 辺の未改良地盤では 12.7cm 沈下するという結果となった。南海トラフの想 定地震動が大きいため、タンク本体の直下の地盤の変形がやや大きい結果と なっている。過剰間隙水圧は、各砂層で上昇が激しい結果となっているが、 粘性土層に挟まれていること、各層の層厚が厚くないことから、タンク本体 に大きな影響を与えるほどの変形とはなっていない。

もう一方の地区では、タンク本体の直下で 8.9cm 沈下し、その周辺の未改 良地盤では 13cm 程度沈下するという結果となった。その差は 5cm 程度ある が、未改良地盤の変形に引きずられる格好で、改良地盤も変形している。タ ンク周辺 10m の改良地帯が緩衝帯として働くことで、地盤が若干外側には変 形するが、改良地盤が一定の沈下となり、タンク本体や基礎に影響を与える ような変形とはなっていない。

## (3) 浮き屋根

内閣府(中央防災会議)から公開されている南海トラフ地震の想定地震動(長 周期成分)における屋外貯蔵タンクの浮き屋根の耐震安全性について確認する ため、以下の手順で検討を実施した(平成27年度)。



図 11 浮き屋根の検討フロー

#### 解析対象タンクの選定

現行消防法の技術基準に基づき改修された、危険物の規制に関する技術上の基準を定める告示第4条の21の3に規定される容量2万キロリットル以上、または同告示第2条の2に規定するHcが2.0m以上となる一枚板構造の浮き屋根を有する特定屋外貯蔵タンクを対象として、内閣府から示された南海トラフ地震の想定地震動(長周期成分)に対する耐震安全性を確認するため、本詳細解析の対象とするタンクの浮き屋根を選定して3次元 FEM 解析を行った。

タンク選定の前段階として、三大都市圏の首都圏、中京圏、関西圏近傍の 特防区域から1カ所ずつ区域を選定した後、各区域からタンク容量も考慮し て、強度上不利であると考えられるタンクを2基ずつ選定した。また、その 中から線形 FEM 浮き屋根動的応答解析システム及び消防法告示による算定 式を併用して、想定地震動に対する浮き屋根の耐震強度が最も不利となるタ ンクと考えられるタンクを3次元 FEM 解析の対象に選定した。

## ② 詳細 F E M モデルによる浮き屋根の耐震強度評価

荷重条件については、浮き屋根のFEM解析モデルに与える揺動変位として、線形FEM浮き屋根動的応答解析システムでの時刻歴地震応答解析結果のうち、揺動高さやポンツーンの発生モーメントが大きくなる次の2条件を 選定した。

変位①:揺動変位が最も大きくなる時刻の揺動変位

(NS 波 132.92 秒後 スロッシングの1次固有モードが卓越)

変位②:ポンツーン断面力が最大になる時刻の揺動変位

(EW波 92.02 秒後 スロッシングの2次固有モードが卓越)

選定揺動変位 地震	本會十百	摇動変位(mm)		発生時刻		
	地辰刀问	最大	最小	(sec)	順方	
変位① NS	NC	1126. 7	-270. 0	132. 92	ポンツーンの変位が最大になる	
	NO				時刻の変位形状	
変位②	ΓW	1070 0	010 0	92. 02	ポンツーンの断面力 $N_{\theta}$ 、 $M_{x}$ 、 $M_{\theta}$	
	EW	1370.0	-213.3		が最大になる時刻の変位形状	

表2 選定揺動変位の詳細





図 12 選定揺動変位形状(上段:変位①、下段:変位②)



図 14 浮き屋根全体の相当応力分布図(揺動変位①)

断面力の種別			最大値	最小値	
		角度(度)	断面力	角度(度)    断面力	
円周方向面外曲げモーメント	$M_{\theta}$	105.9	-106.2 kN.m	176.7	−124.4 kN.m
水平面内曲げモーメント	M <sub>x</sub>	91.1	758.5 kN.m	4.1	-88.2 kN.m
円周方向圧縮力	N <sub>θ</sub>	2.4	1478.9 kN	89.8	948.1 kN

表3 ポンツーンの算定断面力の最大値と最小値(揺動変位①)



図 16 浮き屋根全体の相当応力分布図(揺動変位②)

断面力の種別			最大値	最小値	
		角度(度)	断面力	角度(度)    断面力	
円周方向面外曲げモーメント	$M_{\theta}$	176.3	45. 7 kN.m	4. 1	−540. 1 kN.m
水平面内曲げモーメント	$M_{\star}$	88.5	2416.0 kN.m	176. 3	-388. 2 kN.m
円周方向圧縮力	N <sub>θ</sub>	177.6	4597.8 kN	87. 2	3015.7 kN

表4 ポンツーンの算定断面力の最大値と最小値(揺動変位②)

ポンツーンの耐震強度評価については、詳細FEM解析結果を利用して求 めたポンツーンの最大断面力から、消防法告示の方法を応用して応力を算定 し、許容応力との比較による評価を行った。

ケースNo.	算定断面力						
括動 最大P ・ 括動 最大水	最大円周	同方向面外曲げモーメント	kN.m	1.24E+02			
	最大水平	- 面内曲げモーメント	kN.m	7.59E+02			
<b></b> 及 ⊡ ①	最大円周	周方向圧縮力	kN	1.48E+03			
<b></b>	最大円周	同方向面外曲げモーメント	kN.m	5.40E+02			
変位の	最大水平	ヹ 面内曲げモーメント	kN.m	2.42E+03			
<b></b>	最大円周	周方向圧縮力	kN	4.60E+03			
有効断面係数		$Z_{\theta-eff}$	mm <sup>3</sup>	9.49E+06			
		$Z_{x-eff}$	mm <sup>3</sup>	9.47E+07			
		$A_{eff}$	mm <sup>2</sup>	5.61E+04			
算定応力		$\sigma_{bl}$	N/mm <sup>2</sup>	13.1			
	揺動	$\sigma_{b2}$	N/mm <sup>2</sup>	8.0			
変位①	$\sigma_{c2}$	N/mm <sup>2</sup>	26.4				
	$\sigma_{max}$	N/mm <sup>2</sup>	36.8				
揺動 変位②	$\sigma_{bl}$	N/mm <sup>2</sup>	56.9				
	摇動	$\sigma_{b2}$	N/mm <sup>2</sup>	25.5			
	変位②	$\sigma_{c2}$	N/mm <sup>2</sup>	81.9			
		$\sigma_{max}$	N/mm <sup>2</sup>	121.6			

表5 ポンツーン応力評価結果

ポンツーンの合成応力値  $\sigma_{max}$  は、揺動変位①、揺動変位②ともに許容応力 である  $0.9\sigma_y$  (=211.5 N/mm<sup>2</sup>)以下となり、当該浮き屋根のポンツーン応力は 許容値を満足しているという評価結果となった。

ここでの計算に使用している断面力 M<sub>e</sub>、M<sub>x</sub>、N<sub>e</sub>は、全ポンツーンの中から 最大値を選び出したものであり、発生している断面位置は異なることから、 安全側での評価となっている。

### 3 今後の検討課題

### (1) 首都直下地震の想定地震動の影響に関する検討

平成26年度及び平成27年度は西日本を中心に大きな被害が予想される南海 トラフ地震の影響を精査したところであり、平成28度は、首都圏に大きな被害 が予想され、かつ、内閣府(中央防災会議)から強震動波形の提供が行われて いる首都直下地震の想定地震動に対する耐震安全性を検討する。

この際、南海トラフ地震の想定地震動の時刻歴波形や加速度応答スペクトルと比較しつつ、今回の手法を用いて検討する。

# (2) 屋外タンク貯蔵所の耐震安全性確保策に関する検討

南海トラフ地震に対する耐震安全性の検討については、解析のために一定の 条件を設定して解析を行い、概ね致命的な被害はないとの評価であったが、本 解析で前提とした条件の範囲を超えるような場合も完全には否定できないこと や、今後、新たな知見を踏まえた想定地震動の変更も考えられることから、必 ずしも安全性を担保するというものではないということに留意が必要である。

このことから、各事業者が自ら地震リスクを検証し、必要な改修を行う際に 参考となるよう、南海トラフ地震及び首都直下地震の想定地震動に対する耐震 安全性の検討結果も踏まえ、耐震安全性を確保する上で有効な対策について整 理する。

以上