

既設 LNG 貯槽のスロッシング評価

大阪ガス（株） 正会員 ○大西 俊輔

大阪ガス（株） 正会員 西崎 丈能

1. 背景・目的

2003 年十勝沖地震において、苫小牧で石油タンクの火災が発生したが、やや長周期地震動によって励起された貯蔵石油の液面揺動（スロッシング）によるものが原因とされている。これを契機に、スロッシングの評価方法や浮き屋根の強度評価方法について種々の検討が進められ、それらの検討結果を反映する形で 2005 年に消防法が改正され、やや長周期帯域の設計水平震度についても見直された。

「高圧ガス設備等耐震設計基準」¹⁾（高圧ガス耐震告示）においても、スロッシングの評価に用いられる「第 2 設計地震動」が規定されているが、地震動に関する最新の知見の収集や、第 2 設計地震動の算出方法等に関する検討が現在行われており、次期改正（2011 年予定）に反映される予定である。

改正項目の一つに、第 2 設計地震動固有の地域区分の導入がある。従来、第 1 設計地震動（加速度に対する耐震性を評価するための地震動）と同じ地域区分で、大阪府域は A 地区（地域特性係数 0.8）であったが、改正案では 1-2 地区（地域特性係数 1.0）に引き上げられる見込みである。

これらの動向を踏まえ、既設の液化天然ガス（LNG）貯槽について、高圧ガス耐震告示の改正案に基づき、時刻歴応答解析によるスロッシング評価を行った。一般ガス事業の用に供するガス製造設備については、「製造設備等耐震設計指針」²⁾に基づき設計されるため、高圧ガス耐震告示は適用されないが、高圧ガス耐震告示での地域係数の変更を反映した。

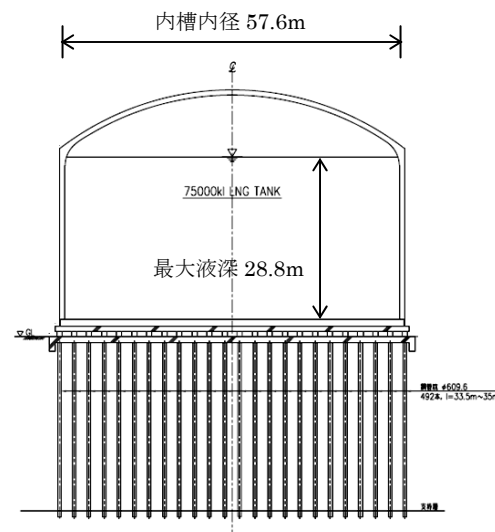
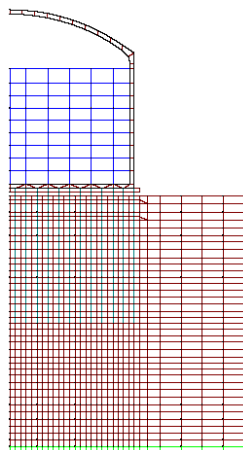


図-1 金属二重殻式 LNG 貯槽 断面図

2. LNG 貯槽の概要

評価対象は、内容量 75,000m³ の金属二重殻式 LNG 地上式貯槽とした。内槽内径 57.6m、最大液深 28.8m で、ドーム形式の屋根を有している。断面図を図-1 に示す。原設計では、三波共振法に基づきスロッシング評価を行っており、応答波高 6.63m で設計されている。



部材		要素種類
LNG		液体要素
貯槽（内槽，外槽）		シェル要素
基礎版		シェル・ソリッド要素
保冷材		ソリッド要素
基礎杭		群杭要素
地盤		ソリッド要素
境界要素	側方	エネルギー伝達境界
	底部	粘性境界

図-2 解析モデル

3. 評価方法

(1) 解析方法

地盤－貯槽－内容液の連成を考慮した一体解析とし、軸対象回転体有限要素法を用いた周波数領域の地盤・貯槽連成地震応答解析を実施した。

キーワード LNG 貯槽，スロッシング，第 2 設計地震動，地震応答解析

連絡先 〒541-0046 大阪市中央区平野町 4 丁目 1-2 大阪ガス株式会社 エンジニアリング部 TEL06-6205-4592

貯槽はシェル要素、内溶液は液体要素でモデル化し、動的相互作用（バルジング振動）を考慮した。また、側方境界要素は、地盤への逸散減衰を考慮できるようエネルギー伝達境界を用いた。（図-2）

(2) 地震波形

近傍観測地震波および想定波として、以下の地震波形を選定した。

① 1995 年 兵庫県南部地震 ポートアイランド観測波

② 2007 年作成 大阪府想定標準地震動（海溝型地震）工学的基盤面波（図-3）

①については、地表面での観測波であることから、工学的基盤面位置へ引き戻したものを、水平地動変位 $D_H=60\text{cm}$ （地域係数 1.0 に対応）となるよう振幅調整したうえで入力した。

②については、サイト想定波であるため、原波形をそのまま基盤面に入力した。

(3) 地盤条件

当該貯槽の設置地盤において地盤調査結果に基づき、基礎土質性状のほか、動的変形特性（ひずみに依存する非線形特性）等についても設定した。工学的基盤面は、地表面下-60m（ $V_s=370\text{m/s}$ ）に位置し、表層地盤は粘性土が卓越している。

(4) 計算時間

入力地震動の継続時間が長く、また、スロッシングの減衰定数が 0.5 % と非常に小さいため、時間刻みを 0.16 秒とし計算時間を 1310 秒とした。

4. 評価結果

(1) スロッシング

応答波高は、

① 兵庫県南部地震ポートアイランド波：2.91m

② 大阪府想定波：2.26m

となり、いずれも内槽側板位置で最大となった。地震発生直後からスロッシング現象が発生し、大阪府想定波では約 140 秒後で波高がピークに達する。

スロッシングの 1 次固有周期は 8.30s、2 次固有周期は 4.50s となった。（図-4、図-5、図-6）

(2) 貯槽の応力評価

得られた解析結果を用い、内槽側板に動液圧分布を作用させ、応力評価を行った。いずれの部位においても、発生応力が許容応力以下であることを確認した。

5. おわりに

今回実施した、時刻歴応答解析によるスロッシング評価により、既設 LNG 貯槽の信頼性を確認した。今後も、最新の知見を用い、適切な耐震性を評価し維持するよう努めていきたい。

参考文献

- 1) 高圧ガス設備等耐震設計基準，平成 9 年 3 月告示第 143 号
- 2) 製造設備等耐震設計指針（JGA 指-101-01），社団法人日本ガス協会，平成 13 年 8 月

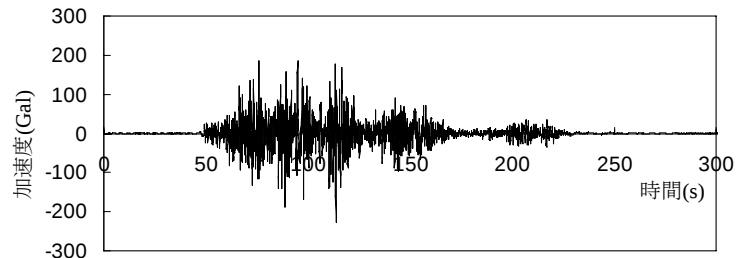


図-3 大阪府想定標準地震動 工学的基盤面波

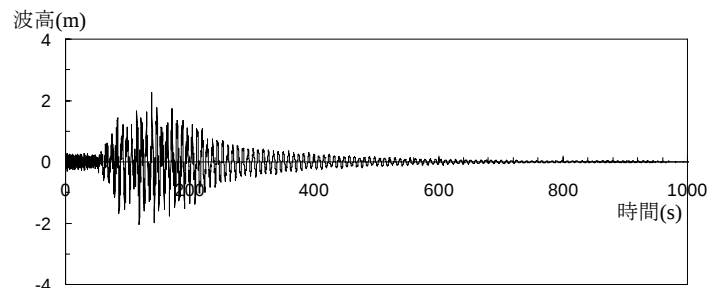


図-4 スロッシング時刻歴波形（大阪府想定波，内槽側板位置）

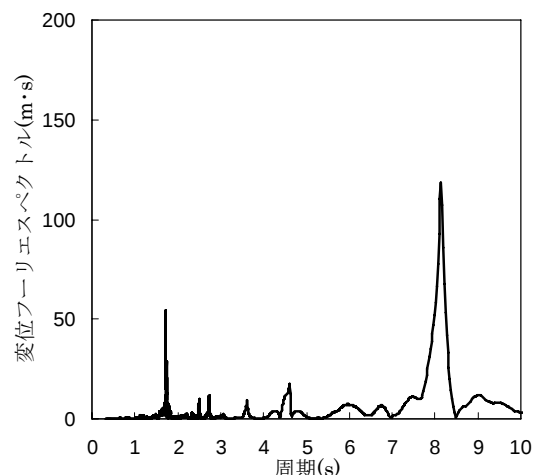


図-5 変位フーリエスペクトル（大阪府想定波）

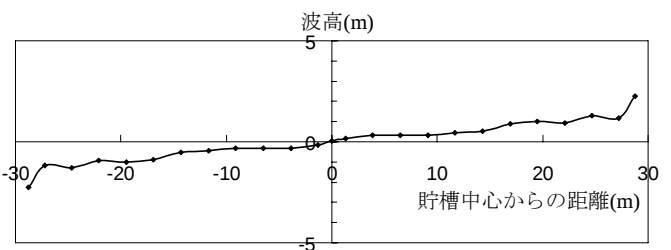


図-6 最大波高発生時の波高分布（大阪府想定波）