小特集号論文

GBS LNG 受入基地向け SPB タンクの地震解析

Seismic Analysis of an SPB Tank Installed in the Offshore GBS LNG Terminal

真　鍋　英　男　株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド　エンジニアリング事業部　技術部　課長
桜　井　朋　樹　技術開発本部基盤技術研究所構造研究部　主査

IHIMU が独自開発した SPB TANK SYSTEM を用いて GBS 方式の洋上 LNG 受入基地に設置する LNG 貯蔵タンクを設計した．SPB TANK SYSTEM は，安全性と信頼性の高いロバストな設計であり，LNG 船だけでなく，世界初の浮体式洋上 LPG 生産貯蔵設備 FPSO を実現した実績をもつ．独立タンクであるため，津波や地震による GBS の動的な挙動の影響を受けにくく，仮に地震によってスロッシングが起きた場合でも耐久性が高いという特長をもっており，GBS に搭載するタンクシステムとして適している．本稿では，LNG タンク構造設計のために実施した地震応答解析と，耐震性をさらに高めるため，タンクそのものの免震システムの試設計について報告する．

A preliminary design of LNG tank for the offshore GBS (Gravity Based Structure) LNG terminal has been conducted using the unique IHI-SPB (Self-supporting Prismatic shape IMO type B) technology. The SPB tank system achieves the robust and high reliable design, and has been applied not only to LNG carriers but also to the world first LPG FPSO. Moreover the SPB tank system should be one of the most suitable tank systems for GBS. The tank is independent from the concrete GBS and insensitive to dynamic behavior of GBS due to tsunami or other environmental loads and to accidents on the GBS. The SPB tank system can also resist the sloshing loads of LNG caused by earthquakes. This paper presents the seismic response analysis of the tank and the study on seismic isolation system.

1. 緒　　言

クリーンエネルギーとしての天然ガス需要が世界的規模で急拡大している．日本・韓国・台湾などの従来の LNG 主要消費国に加えて中国・インドなどの新需要の拡大，従来パイプラインが主であったヨーロッパ・アメリカにおいてエネルギー不足への対応に LNG の導入が計画され大幅な需要の増大が予測されている．

特にアメリカにおいては大幅な需要の増大に加え，住民による受入基地の地元建設反対運動の高まりのなかで洋上 LNG 設備の実現が強く望まれている．

株式会社アイ・エイチ・アイ マリンユナイテッド（以下，IHIMU と呼ぶ）では，これらの動きに呼応して，独自開発の SPB 方式 LNG 貯蔵タンクを用いた LNG 洋上設備の実現に向けて活動を続けている．SPB 方式の LNG 貯蔵タンクは IHIMU が独自開発した低温液化ガス貯蔵タンクシステムで，さまざまなサイズの液化ガス運搬船だけでなく，FPSO（洋上浮体式生産・貯蔵・積出し設備）などの海洋構造物にも，幅広く適用可能なタンクシステムとして評価されており，世界初の洋上で LPG を生産・貯蔵する FPSO を実現した実績をもっている．

LNG 洋上設備の一つとして，GBS (Gravity Based Structure) と呼ばれる海底着床式コンクリート構造体内に SPB タンクを設置し，LNG を貯蔵・供給する設備を提案している．GBS 内に設置される SPB タンクの設計に当たっては地震荷重に対する構造応答を，精度良く解析する計算手法が確立されていなければならない．一方，GBS 設置サイトの地震荷重が大きい場合，陸上建築，橋梁に適用されている免震技術を利用して SPB タンクに作用する地震荷重を低減させ，タンク構造の軽量化，コスト最適化を図らなければならない．

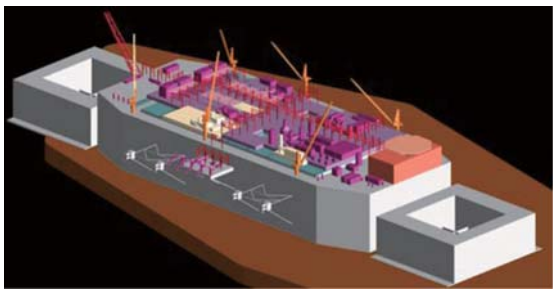
本稿では，地震荷重に対するタンク構造応答を非線形時刻歴計算コードによって，直接数値シミュレーションする手法を提案し，GBS 内の長大 SPB タンク設計に適用したので報告する．

2. 構造応答解析手法

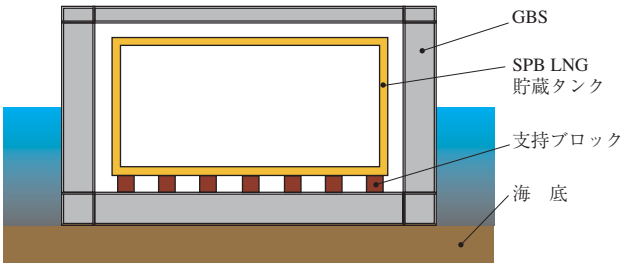
GBS と内部に設置される SPB LNG 貯蔵タンクの概念図を**第 1 図**[1] に示す．本稿で想定した LNG 貯蔵タンクは，長さ 140 m，幅 38 m，高さ 26 m，LNG 貯蔵容量 125 000 m^3 のステンレス鋼 (SUS304) 製矩形タンクであり，底部を合板製ブロックで支持された自立構造となっている．

船舶の防振設計および陸上構造物の耐震設計には，応答スペクトルによるモード合成法（線形モーダル応答解析手法）が広く適用されている．しかし，本タンクのよ

（a） 洋上 LNG 受入基地



（b） 横断面



第 1 図　GBS および SPB LNG 貯蔵タンク概念
Fig. 1　GBS and SPB LNG tank concept

うな長大矩形タンクの場合，地震荷重として考慮の必要な周波数域（ 40 Hz 以下 ）に多数の固有モードをもつため，高精度なタンク応答解析を実現するには時刻歴計算を行う必要がある．また，免震装置（ 高減衰積層ゴムなど ）の復元力特性は非線形であるため，最適設計を行うには非線形減衰問題が解析可能でなければならない．

ところで，タンク内流体のすべてが地震荷重（ 加速度 ）の大きさに比例した慣性力を発生する訳ではなく，一部は液面の自由振動に対してのみ流体力を発生する．加速度の大きさに比例して慣性力を発生する質量を固定水質量 (Impulsive mass)，液面の自由振動によって流体力を発生する質量を自由水質量 (Convective mass) と呼ぶが，タンク構造応答に対して有効に作用する質量は前者である．したがって，地震応答解析に用いる計算コードは固定水質量計算にも対応していなければならない．

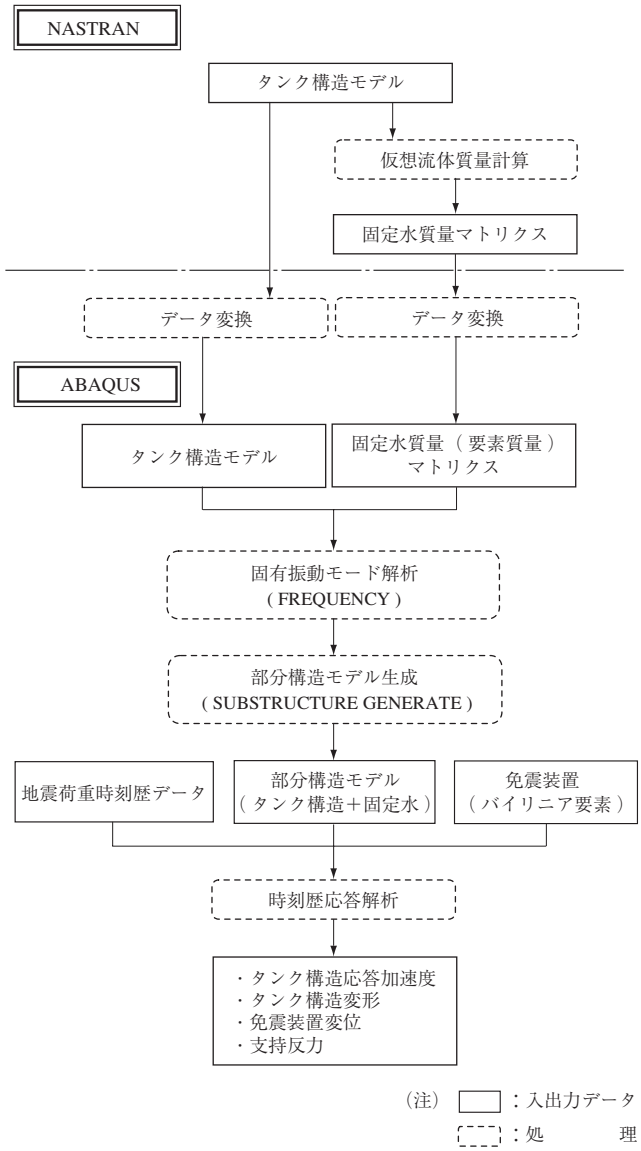
以上の必要要件を満足させるため，船体構造・振動解析に広く用いられている汎用構造解析コード NASTRAN と，非線形解析に用いられている ABAQUS を組み合わせる計算手法を考案した．NASTRAN と ABAQUAS の解析機能比較を**第 1 表**に，SPB タンク地震応答解析フローを**第 2 図**に示す．

固定水質量は，NASTRAN の仮想流体質量計算機能を用いて直接算定することができる．しかし，NASTRAN は基本的に線形解析コードであり，強い非線形性をもつ

第 1 表　解析コードの機能比較
Table 1　Comparison between NASTRAN and ABAQUS

機　　能	NASTRAN	ABAQUS
バイリニア特性（ 荷重－ひずみ，減衰 ）	△	○
固定水質量計算	○	△
応答スペクトルによるモード合成法	○	○
時刻歴計算（ 線形 ）	○	○
時刻歴計算（ 非線形 ）	△	○

（注）○: 適
△: 条件によっては不適



第 2 図　SPB タンク地震応答解析フロー
Fig. 2　Procedure of seismic response analysis for SPB tank

計算モデルに対して，有意な解が得られないことが多い．非線形計算には ABAQUS が適しているが，固定水質量を流体－構造連成機能を用いて直接解析することは，流体部分のモデル化の煩雑さと計算規模の大きさの観点から，本タンクの解析手法には適していない．そこで，仮想流

体質量のみ NASTRAN で計算し，この質量マトリクスを ABAQUS モデルに変換して，ABAQUS で非線形解析を実行する．また計算規模を縮小するため，タンク支持構造を除くタンク本体と仮想流体質量に対して部分構造法を適用することにした．

本タンクの水平免震装置として，陸上建築向けに実用化されている高減衰積層ゴム (HRB) を使用することを検討した．積層ゴムのモデル化には，一般的に用いられている移動硬化型バイリニア特性を適用する．

3. 模型タンク試験による解析手法の検証

3. 1 模型試験概要

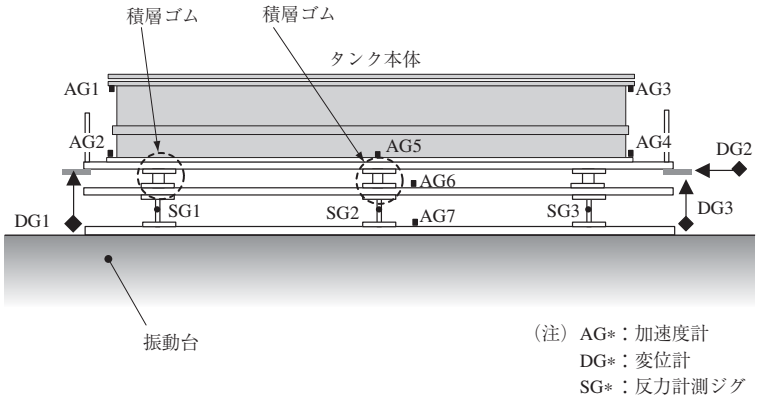
第 3 図に示す模型タンクを用いて地震荷重に対する応答計測を行い，模型タンクを正確に再現した解析モデルによる時刻歴計算との比較によって，本解析手法の精度検証を行った．模型タンク本体は $L \times B \times D = 3\ 500 \times 600 \times 600$ mm のアクリル樹脂製である．タンク底部の固定条件は，支持反力計測ジグを介して振動台に固定した状態（非免震）と，タンク底面とジグの間に積層ゴムを挿入した状態（免震）の 2 条件で試験を行った．支持反力計測ジグおよび積層ゴムの配置は，タンクコーナ 4 か所とタンク中央 2 か所である．

地震荷重（地震波）は，**第 4 図**に示す JMA-KOBE（兵庫県南部地震－神戸海洋気象台観測波）を適用した．なお，時間軸は実波形に縮尺比の平方根を乗じて相似則修正を行った．

3. 2 試験結果と計算結果の比較

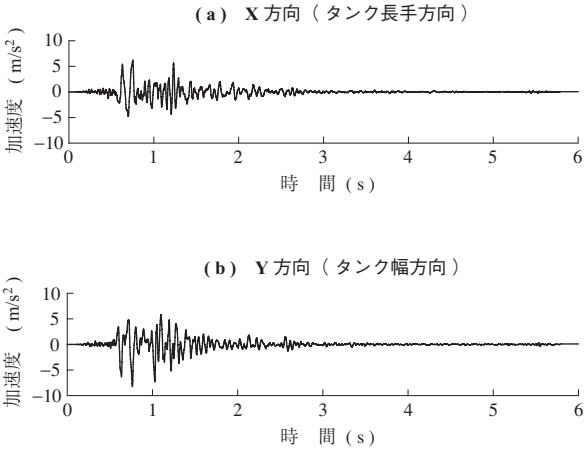
非免震状態における Y 方向（タンク幅方向）の応答加速度が卓越しているので，この方向の加速度およびタンク底部支持反力に着目して，試験計測値と数値計算値を比較した結果を**第 5 図**に示す．非免震状態における試験結果と数値計算の差異は約 20%，免震状態における差異は 10%未満である．積層ゴムの設置によって，高次の局部振動モードが現れにくくなり，タンク全体が振動す

(a) 反力計測ジグ，積層ゴム配置

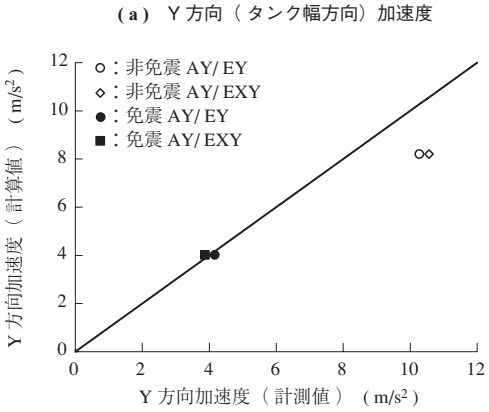


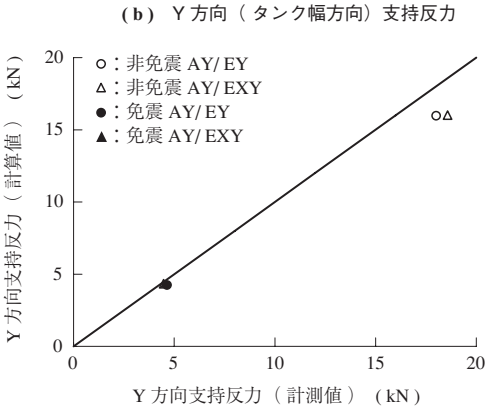
(b) 試験状態

第 3 図 模型タンク
Fig. 3 Model tank for exciting test



第 4 図　JMA-KOBE 地震荷重
Fig. 4　Seismic load of JMA-KOBE





（注）AY/EY　：Y 方向加震時 Y 方向加速度
RY/EY　：Y 方向加震時 Y 方向支持反力
AY/EXY：XY 同時加震時 Y 方向加速度
RY/EXY：XY 同時加震時 Y 方向支持反力

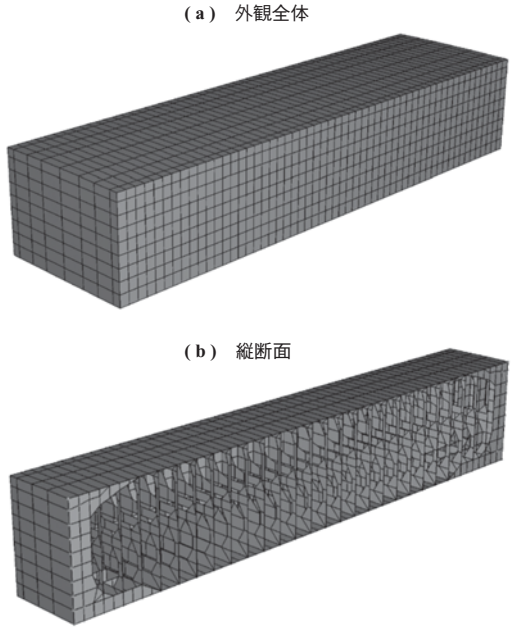
第 5 図　模型タンク試験計測値と数値計算値の比較
Fig. 5　Comparison between model tank tests and FE analysis

る低次の振動モードが支配的になるため，試験と数値計算の乖離（かい）が少なくなったと考えられる．本計算手法は SPB タンク設計に供するのに十分な精度をもつことが確認できた．

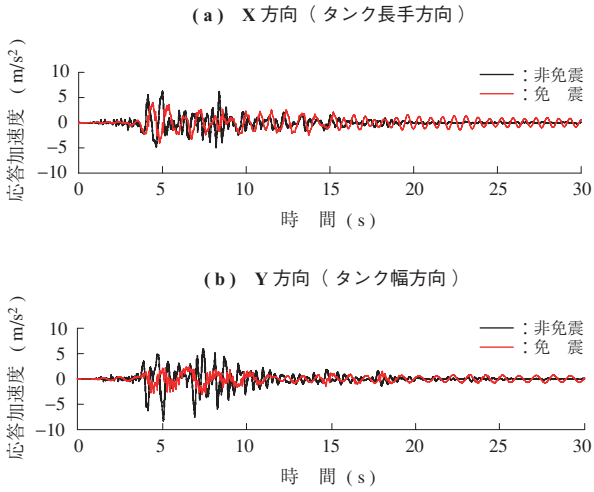
4.　想定実機タンクの地震応答解析

JMA-KOBE 地震波に対して，**第 6 図**に示す想定実機タンク構造解析モデルを用いて，応答解析を行った．タンク底部の支持方法は，合板製ブロックだけの場合（非免震）と，高減衰積層ゴムと合板製ブロックとの複合構造（免震）の 2 ケースを検討した．高減衰積層ゴムの等価粘性減衰は 20%を想定している．

非免震状態と免震状態のタンク応答加速度を**第 7 図**に示す．非免震状態では最大 8.3 m/s^2 { 0.8 G } の応答加速



第 6 図　想定実機タンク構造応答解析モデル
Fig. 6　FE analysis model for full-scale tank



第 7 図　非免震状態と免震状態のタンク応答加速度
Fig. 7　Response acceleration comparison between isolated tank and non-isolated tank

度を生じると予想されるものの，水平免震装置によって加速度を 40% 以下に軽減することが可能である．

5. 結　　言

GBS LNG 受入基地に設置される SPB タンクの地震応答を非線形時刻歴解析によって求める計算手法を示し，模型試験と数値シミュレーションによって，その精度検証を行うとともに，想定実機タンクについて例示した. さらに，タンク水平免震装置についても試設計結果を例示した．大型化する貯蔵タンクにおいて地震応答および免震効果を正確に予測することは，設計上非常に重要であるが，本稿で示した手法によって合理的な設計が可能となる．

参考文献

(1) A. Haug, R. Eie, K. Sandvik and E. Aoki：Offshore Concrete Structures for LNG Facilities － New Developments　Offshore Technology Conference 15302 (2003. 5)