

## LNG タンクシビル設計技術

### Features of LNG Tank Civil Engineering

佐藤 吉孝\*1、加納 直樹\*2、岡見 篤史\*3、片岡 俊二\*4  
Yoshitaka Sato\*1, Naoki Kano\*2, Atsushi Okami\*3, Shunji Kataoka\*4

日揮グローバル株式会社 オイル&ガスプロジェクトカンパニー

JGC Corporation, Oil & Gas Project Company,

\*1,2 デザインエンジニアリング本部 シビルエンジニアリング部

\*1,2 Design Engineering Division, Civil Engineering Department

\*3,4 プロセステクノロジー本部 ENテクノロジーセンター

\*3,4 Process Technology Division, EN Technology Center

#### 要旨

当社の LNG タンクシビル設計技術の概要を述べる。本技術は Full Containment Tank の一連のシビル設計技術を対象とし、主に東南・南アジアの事業者が計画している LNG ターミナルプロジェクトに貢献するものである。

#### Abstract:

This report discusses our civil design capabilities for LNG tanks. Covering every civil engineering element of LNG full containment tanks, this technology will contribute to LNG terminal projects mainly in South-East and South Asia.

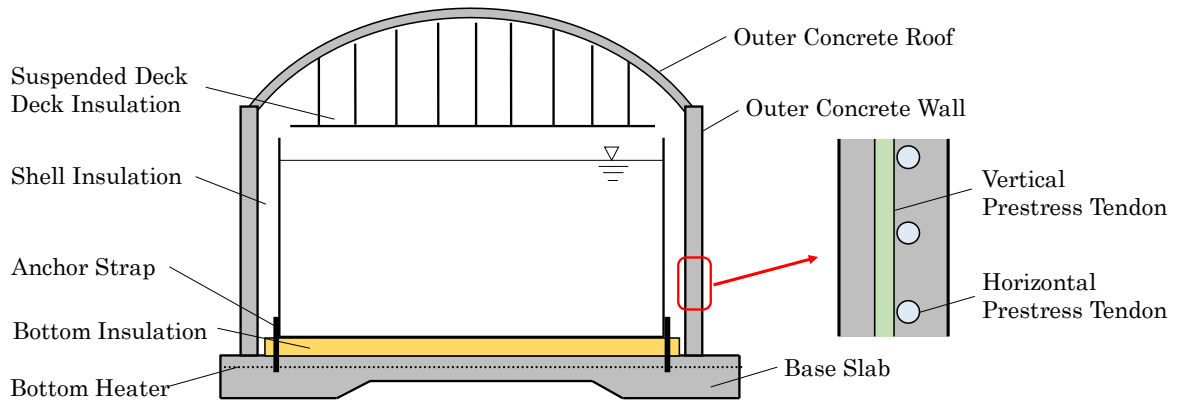
#### 1. はじめに

現地電力需要の増加から東南・南アジアでは LNG 導入の計画が多く存在する。当社は LNG ターミナルプロジェクトにおける顧客ニーズに基づく合理的な技術ソリューションの提供を目的として、LNG タンクのシビル設計技術の開発に至った。同技術は、耐震設計、基礎設計とコンクリートタンクの構造設計があり、各々についてエンジニアリングを遂行する体制が整った。

本技術は現在主流の Full Containment Tank タイプ (Fig.1) を対象とするが、各要素技術は他のタイプにも適用可能である。Full Containment Tank のシビル構造は、コンクリート製のスラブ、壁、屋根から構成されている。壁には水平と鉛直方向のプレストレス鋼が配置され、LNG 液圧や内圧に対する補強を担っている。これらの設計基準は米国 NFPA59A、ACI376 あるいは BS EN14620 を基本としている。

**Mechanical Structure**

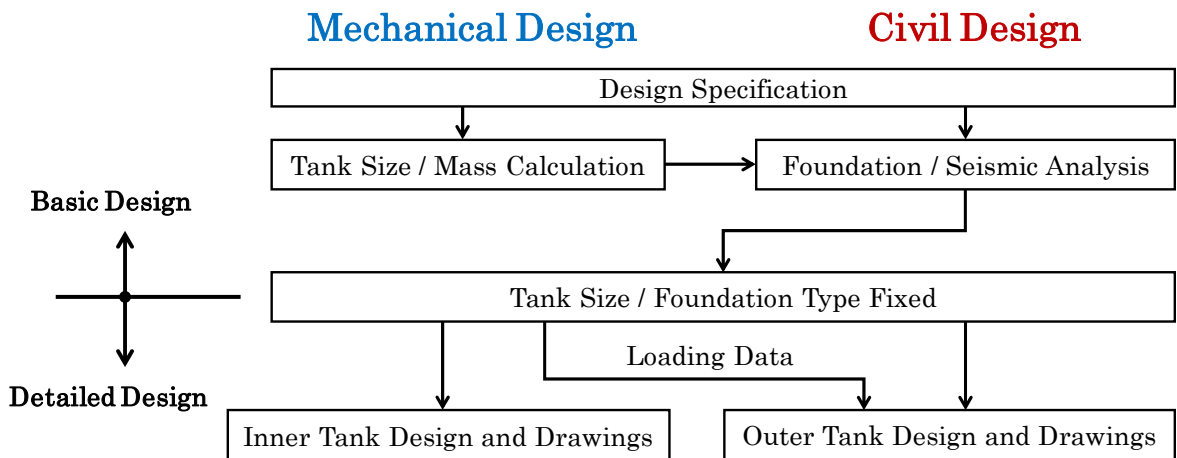
**Civil Structure**



**Fig. 1 LNG Full Containment Tank System**

2. 設計フロー

LNG タンクの設計フローを Fig.2 に示す。シビルは設計初期段階において耐震設計およびその前提となる基礎設計を、タンク構造設計者とタンク寸法や重量を相談しながら確定していく。その後、詳細設計へと進み、コンクリートタンク構造設計では鉄筋やプレストレス鋼材の数量や配置を決定する。



**Fig. 2 LNG Tank Design Flow**

3. 基礎設計

基礎設計とは、サイトごとに異なる地盤データを基に、数多くの種類の杭あるいは地盤改良工法から適用性を精査し、現地の手配可能性を考慮の上、コストミニマムの最適解を見出す作業である。当社はプラント基礎設計の経験からあらゆる基礎形式の経験を有するが、一般に LNG タンクの基礎は直接基礎とし、必要に応じて地盤改良を施す設計がコスト・スケジュールの観点から優位であることが多い。また、後述するが耐震挙動の不確実性も杭基礎に比べて小さいといえる。

基礎沈下に対する設計要求は、不等沈下量を ACI376 の制限値に抑えること、また、パイプラックとの相対沈下により接続配管に損傷が生じないことである。プロセスユニット内と異なり、インターコネクティングパイプラックへと続く接続配管は、鉛直変位にある程度追随することができる。

精度が要求される沈下解析は、有限要素モデルにより弾塑性地盤モデルを用いてタンク直下の地盤特性を適切に考慮する。

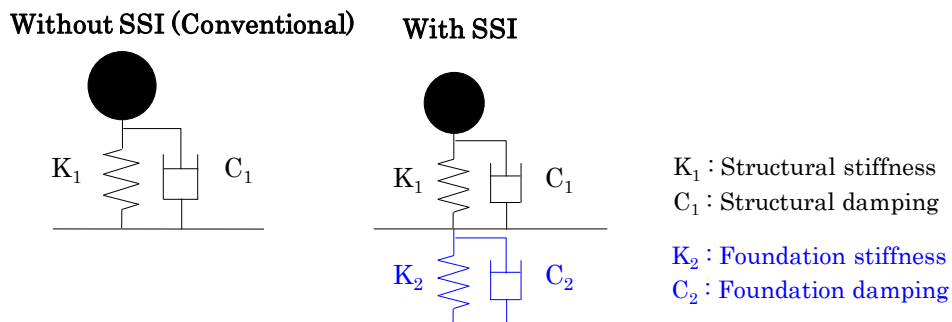
#### 4. 耐震設計

地上式 LNG タンクの地震時挙動には、地盤構造相互作用 (SSI: Soil Structure Interaction)<sup>注1</sup>が構造物の応答に大きな影響を及ぼすことが知られている。比較的軽く固有周期の長い構造物の場合、構造物の地震時慣性力に対し地盤は相対的に剛な挙動を示すが、タンクのような高い剛性と巨大な重量をもつ構造物に対して地盤は変形し柔な挙動を示す。これが LNG タンクの地盤構造相互作用で、地盤のエネルギー吸収による減衰および地盤構造システムによる固有周期の長期化が生じる (Fig.3)。

地盤構造相互作用は数値解析技術が発展中の分野であり、具体的な解析手法は設計者が最新の研究成果を参照しながら最適な手法を選定する必要がある。簡易計算手法を適用する場合もあるが、より精緻な解を得る必要がある場合には、3次元非線形動的解析 (Dynamic SSI Analysis) を実施する (Fig.4)。同解析では、有限要素モデルにおいて、基盤面に3成分 (水平、鉛直) の時刻歴地震波形<sup>注2</sup>を入力し、各地盤と構造要素の時刻歴応答<sup>注3</sup>を出力するため、地震時の挙動を正確に分析することが出来る。

なお、杭基礎の場合、動的群杭効果により剛性や減衰が複雑に変化することが知られており、簡易計算の適用に限界があり非線形動的解析による評価が必要となる。レイアウト最適化のための繰返し計算を考えると設計ステップは非常に複雑なものとなる。

また、強地震地域においては LNG タンクに免振装置を適用する事例もある。当社は免振装置メーカーとのネットワークを持ち、免震設計にも対応できる。



SSI analysis model includes soil spring and damping.

Fig.3 SSI Effect

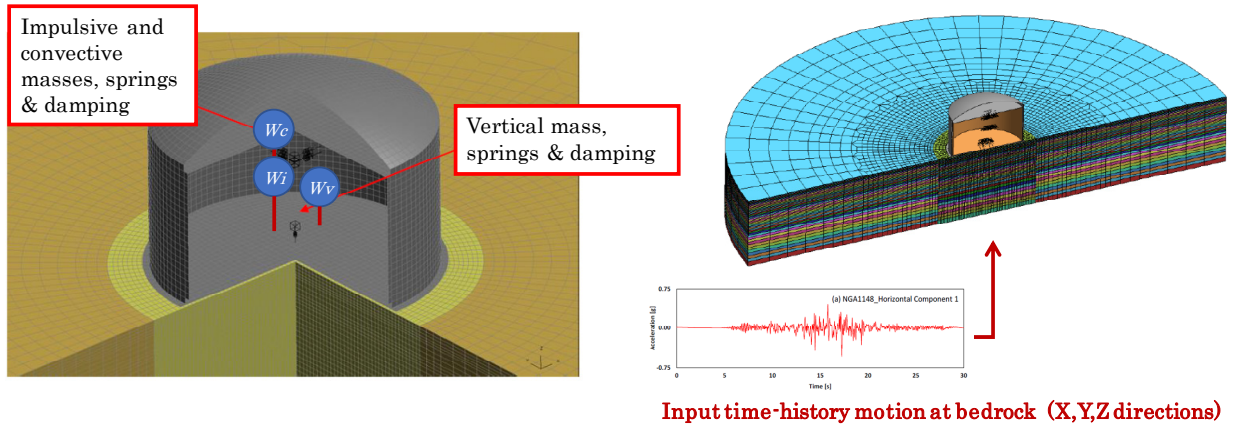


Fig.4 Dynamic SSI Analysis

### 5. 構造設計

コンクリートタンクの構造設計では、鉄筋やプレストレス鋼材の数量や配置を決め設計図面を作成する。

構造解析は有限要素モデルを用いる (Fig.5)。コンクリートは非線形材料とし、引張側はコンクリート強度の低下および引張鉄筋特性を考慮した荷重伝達をモデル化する。

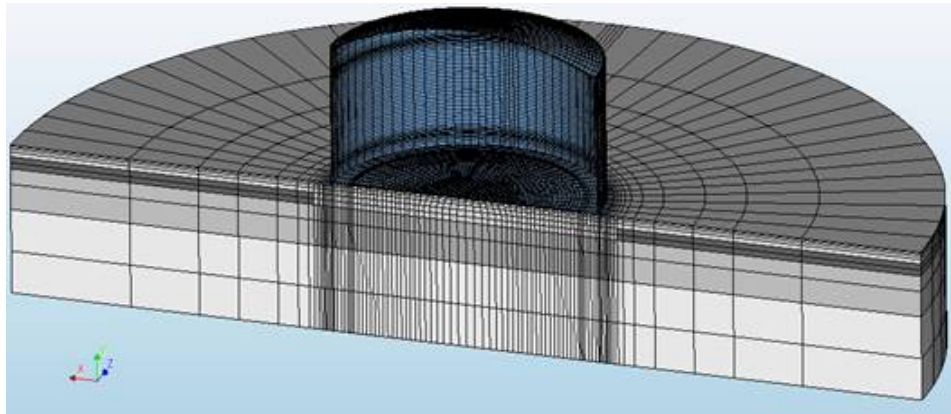


Fig.5 Structural Analysis Example (DIANA)

コンクリート部材の剛性はひび割れの発生により非線形性を示す。通常のコンクリート構造設計においては、共用時のたわみ計算には非線形性を考慮するものの、強度評価における断面力算定には安全側の仮定から線形計算を用いる。しかしながら、LNG 漏液時の壁の熱応力や水平プレストレス導入時の壁下端の拘束応力に対しては、線形計算による断面力算定は過大な結果となる。コンクリート非線形解析はこれら荷重に対する合理的な設計を可能とする (Fig.6)。

ACI376 に従い、荷重ケースには Table1.を考慮する。その組合せは 100 ケース近くに及ぶ。また時系列の施工計画を追うステップ解析が必要である。例えば、壁にプレストレスを導入する際、コンクリート屋根や壁開口の有無により構造体に発生する応力分布は異なるからである (Fig.7)。

要求性能は荷重の組合せにより異なり、ひび割れ幅制限などの使用性能、部材の終局強度ならびに LNG 漏液時の壁の液密性能が規定される。

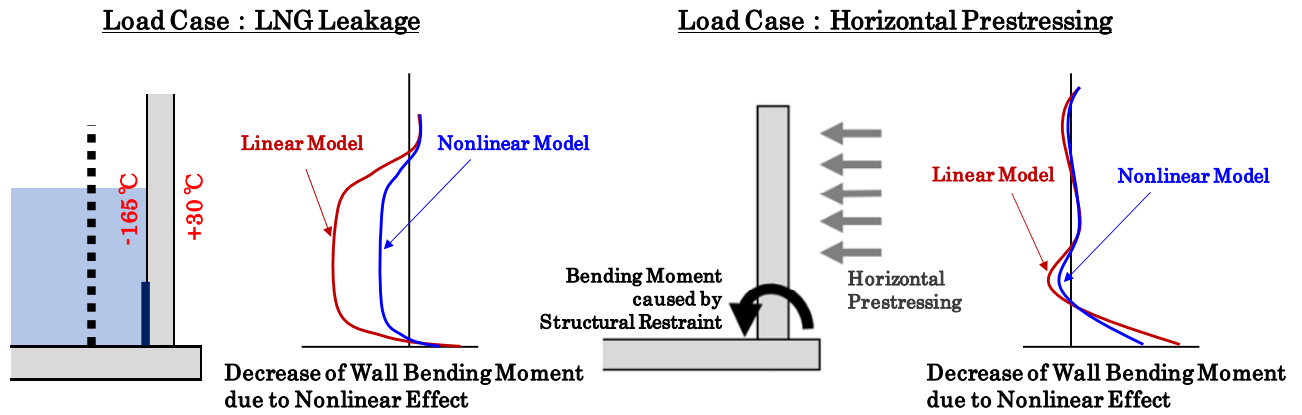


Fig.6 Effect of Nonlinear Structural Analysis

Table1. Load Case

State	Load Case
Normal Load	Dead load, Live load, Prestressing (horizontal/vertical), Product pressure and weight, Wind load, Temperature load, Construction load (hydrotest/pneumatic test)
Abnormal Load	Earthquake load, LNG major leak, Aftershock earthquake in LNG leak, Fire, Blast, Impact load

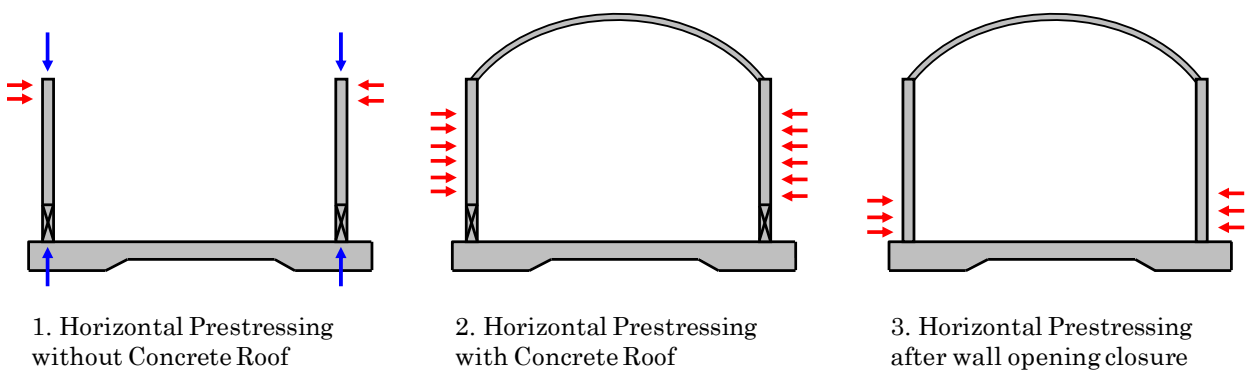


Fig.7 Effect of Step Analysis

6. おわりに

本稿にて紹介した LNG タンクのシビル設計技術は FEED プロジェクトなどにおいて適用し

技術力を蓄積してきた。これは LNG タンクの最適なシビル設計に貢献するものである。

また本稿の要素技術は、GBS (Gravity Base Structure) や着床式洋上風力発電にも通ずる部分があり、今後さらに技術力を研鑽し、様々な分野での安全を十分に配慮した設計最適化に貢献してゆきたい。

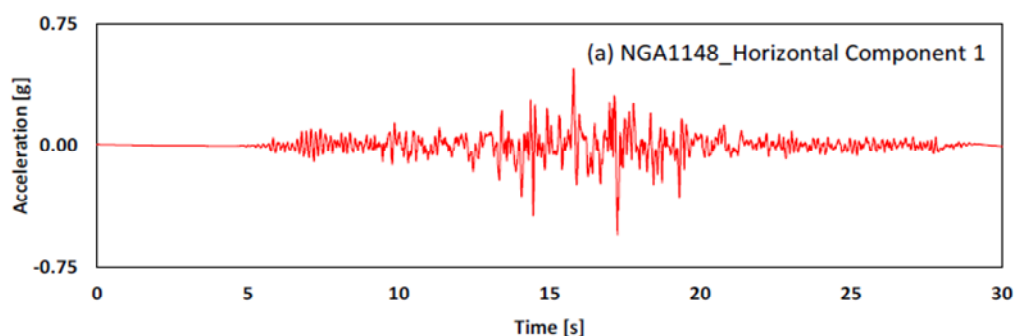
## 用語補足

### 注1 地盤構造相互作用

構造物は地盤に支持されるため、地震時には構造物と地盤の間で力やエネルギーのやり取りが生じる。これを地盤構造相互作用と呼ぶ。通常は基礎部を固定した簡易モデルにより計算を行ない、大型タンクなどの特別な場合を除き地盤構造相互作用は設計に考慮されない。

### 注2 時刻歴地震波形

時刻とともに変化する地震加速度。下図に例を示す。



### 注3 時刻歴応答

構造解析モデルにおいて、地盤に時刻歴地震波形を入力し、構造物の各質点にて得られる時刻とともに変化する地震加速度。