

## (50) PCLNG タンクの事故時熱応力解析の試み

金沢大学 工学部 ○近田 康夫  
 株式会社ピー・エス 正会員 大浦 隆  
 株式会社ピー・エス 正会員 関井 勝巳

### 1 はじめに

近年、液化天然ガスはクリーンエネルギーとして、世界中で注目されてきている。海外では、従来の LNG タンクは、金属二重殻地上式貯槽が主流であり、その構造は、LNG を保持する低温鋼(9%ニッケル鋼)の金属内槽、LNG への入熱を低減する保冷材、そしてその保冷材を保持する外槽から構成され、その外周に防液堤を備えている。しかし、最近では、プレストレストコンクリートによる貯槽機能を備えた防液堤を外槽として使用した、従来の金属二重殻地上式貯槽と PC 防液堤を一体化した構造のもの(以下 PCLNG タンクと称す)が建設されてきている。

この種のタンクは極めて危険な内容物を大量に貯蔵しているため、一旦事故が起きれば大災害に発展する可能性がある。したがって、欧米諸国ではタンクに起こりうる事故を想定した事故解析が施主の強い要求で行われている。本稿は、多くの施工実績を持つキャンペノン・ベルナル社(仏)の資料を基に、三種類の事故を想定し、それらの事故時熱伝導および熱応力解析を試みたものである。

### 2 事故の想定

LNG タンクに起こり得る事故には、内部欠陥(内槽の漏水、内槽の急激な破壊、タンク内の火災)、外部からの攻撃(地震、衝撃、ガス雲の爆発、隣接タンクの火災)などが挙げられる。

本稿では、これらの事故の中で熱に関係する次の3つの事故について検討を行う。

- ・ Major Leak Event (内槽の急激な破壊)
- ・ External Fire Event (隣接タンクの火災(外火事))
- ・ Burn Out Event (タンク内の火災(内火事))

#### 2.1 メジャーリーク (Major Leak Event)

Major Leak Event とは、9%ニッケル鋼を内槽に使用している場合、その内槽が急激に破壊され、LNG が瞬時に PC 外槽に達する事故のことである。この場合、PC 外槽が瞬時に約 $-170^{\circ}\text{C}$ の LNG に接触するため、その急激な温度変化とそれに続く長時間の低温状態に耐えることができるかどうか問題となる。図-1は Major Leak Event の概念を示している。この Major Leak Event に対して以下のようなシナリオを設定した。

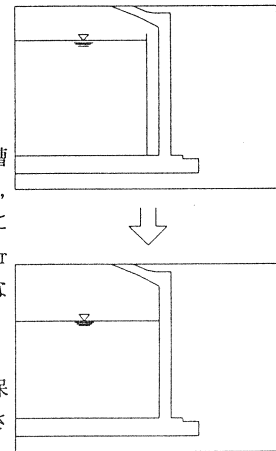


図-1: Major Leak Event

- ① メジャーリークは金属製内槽の破壊により発生する。
- ② 金属製内槽と PC 外槽との間は瞬時に LNG により満たされる(パーライト保冷材は無視する)。ただし、外槽内壁面の粘着性保冷材の効果は100%維持される。
- ③ 初期液面高は、設計最大液深とする。
- ④ 初期状態は、供用状態に等しい。
- ⑤ LNG による静水圧は静的に PC 外槽の内面に作用する。
- ⑥ 液面より下の PC 外槽は瞬時に LNG の設計温度( $-170^{\circ}\text{C}$ )になりそれらの間は熱伝達状態となる。
- ⑦ 事故の継続は10~14日間である(適宜設定する)。
- ⑧ 考慮する力学的作用力は、液圧、死荷重、プレストレスである。
- ⑨ 安全性の判定は、LNG 液面下のコンクリートに圧縮領域が50mm以上存在し、かつ鉄筋が降伏していなければよい。

## 2.2 外火事 (External Fire Event)

External Fire Event とは、隣接タンクが火災を起こすことによりタンクの外側が炎に包まれる状態のことである。この場合、外部からの炎に対して、タンクが所定の時間破壊されずに耐えることができるかどうかが問題となる。図-2 は External Fire Event の概念を示している。この External Fire Event に対して以下のようなシナリオを設定した。

- ① 隣接タンクで火災が発生し、軸対称熱流束が PC 外槽外壁面に加えられる。
- ② 初期状態は、供用状態に等しい。外気温は 43°C (適宜設定できる) とする。
- ③ 内部ガス圧は 2.9tf/m<sup>2</sup> とする。
- ④ 半径方向の熱流束は 12kw/m<sup>2</sup>(一定) とする。
- ⑤ 力学的作用力は供用条件に等しい。
- ⑥ 事故の継続時間は 6 時間とする (この間に LNG はタンクから抜き取られる。)
- ⑦ 安全性の判定は、構造物のコンクリートに圧縮領域が 50mm 以上存在すればよい。

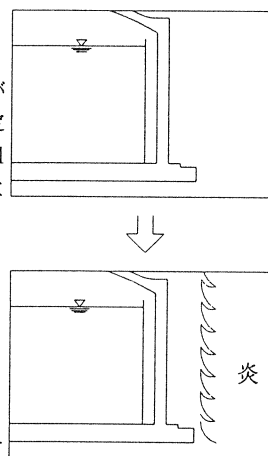


図-2: External Fire Event

## 2.3 内火事 (Burn Out Event)

Burn Out Event は次のようにして起こる。タンクの屋根が吹き飛ばされ、内槽が破壊され、タンク内にとどまっている LNG が燃える。大きな炎がタンクの上に展開し、風によって折り曲げられ、タンクの側壁をなめる。LNG が燃えつきるまで、事故は継続する。この場合、溶液表面の下側の PC 外槽が破壊されず、液体を保持し続けることができるかが問題となる。図-3 は Burn Out Event の概念を示している。この Burn Out Event に対して以下のようなシナリオを設定した。

- ① Major Leak Event が発生した直後にタンク内部で火災が発生する。
- ② 初期状態は、供用状態に等しい。
- ③ 屋根部分は破壊され、LNG は静的に PC 外槽内に留まっている。
- ④ 炎は平坦であり、液面が降下しても外槽上端部近傍に位置する。このようなタンクの火災事故では、多量の酸素が消費されるために炎はタンク上端部に留まる。また、いかなる場合にも、外槽内壁面の熱流束設計に影響しない。なぜなら、外槽は内壁面の熱流束は LNG 液面よりも上にあるからである。
- ⑤ 炎は、一定方向の一定速度の風により 30° 曲げられる。熱流束は軸対称である。
- ⑥ PC 外槽内壁面、外壁面の熱流束値はキャンペノン・ベルナール社の値に従った。各時間ステップにおいて、PC 外槽内壁面の熱流束は、外槽頂部から LNG 液面までの範囲に作用する。
- ⑦ LNG の燃焼速度は 0.6m/hr とする (適宜設定する)。
- ⑧ 事故の継続時間は LNG が燃えつきるまでとする。
- ⑨ Slab 面の断熱材および Slab heating system の機能は完全に維持される。
- ⑩ 安全性の判定は、LNG 液面以下のコンクリートに圧縮領域が 50mm 以上存在すればよい。

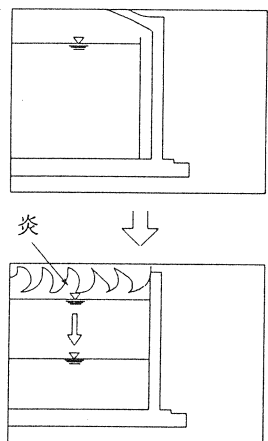


図-3: Burn Out Event

## 3 解析手法

モデル作成プログラム、熱伝導解析プログラム、熱応力解析プログラムそして図形処理プログラムを作成して解析を行った。

- ① モデル作成プログラム：解析対象の形状と、そのブロック分割および境界条件、物性値番号を与えることで、FEM メッシュデータを含む解析プログラム用データを生成する。熱伝導解析プログラム、熱応力プログラムそれぞれに対応したモデル作成プログラムを用意した。なお、解析モデルは軸対称物体としてモデル化している。

- ② 熱伝導解析プログラム：①で生成されたデータを用いて、時間ステップ毎の節点温度を計算する。用いる物性値は温度依存性を考慮し、各時間ステップ毎に前ステップで求めた節点温度から物性値を修正する。時間ステップ間では物性値の変化はないものとする。
- ③ 熱応力解析プログラム：①で生成された基本データと、②の熱伝導解析結果の節点温度を用いて熱応力解析を行う。用いる物性値は温度依存性を考慮し、各時間ステップ毎に反映させる。前ステップと現ステップでの節点温度差による熱応力(ひずみ)の変化は初期ひずみ法と同様の手順で等価外力として作用させる。また、コンクリート要素の構成則は tension-cut を考慮した Mohr-Coulomb 基準を、鉄筋要素に関しては Von-Mises 基準を採用している。
- ④ 図形処理プログラム：解析結果を図形して表示する。熱伝導解析に対しては、メッシュ図、温度分布図(等温線図)を、熱応力解析に対しては、メッシュ図、変位図、降伏領域図、主応力図を出力させる。

物性値の温度依存性に関しては、コンクリートの例を図-4,5 に示す。

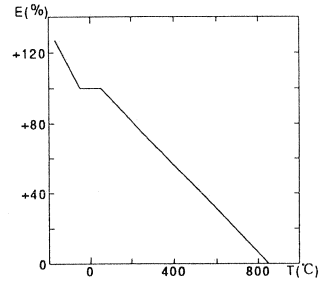


図-4: コンクリートの弾性係数温度依存特性

#### 4 解析結果

本稿では、ある外国の 10 万 Kl の PCLNG タンクをモデルに Major Leak Event, External Fire Event, Burn Out Event の解析を行った。

解析手順は、前項で述べた通りであるが、結果の図形出力の一部を図-6~9 に示す。本図では分かりにくいですが、いずれの事故解析においても 50mm 以上のコンクリート圧縮域が確保されている結果となっている。

計算上の都合から、熱応力解析において、時間ステップを熱伝導解析よりも大きくとった(熱伝導解析の結果を間引いて使ったことになる)ため、温度荷重の変化がかなり大きなものになり、降伏を速めた解析になっていることを考慮すると、安全側の解析結果となっているものと考ええる。

また、コンクリートの構成則などに検討すべき課題も残されている。

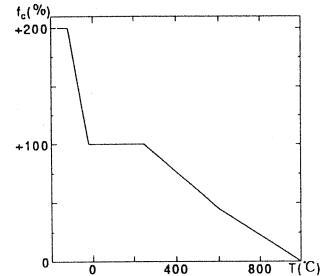


図-5: コンクリート強度の温度依存特性

#### 5 まとめ

PCLNG タンクの事故時非定常熱伝導および非線形熱応力解析を、Major Leak, External Fire および Burn Out の各事故事象に対して試みた。解析においては、解析対象の熱的物性値、力学的物性値の温度依存性を考慮している。

荷重ステップの制御やコンクリートの構成則などに検討の余地は残すものの、一応の成果が得られたと考える。

#### 参考文献

- 1) 矢川元基:流れと熱伝導の有限要素法入門, 培風館, 1987.
- 2) Owen, D.R.J. and Hinton, E.: Finite Elements in Plasticity - Theory and Practice-, Pineridge Press Ltd., 1980.
- 3) Chen, W.F.(色部, 河角, 安達 完訳):コンクリート構造物の塑性解析, 丸善, 1985.
- 4) 森正武:FORTRAN 77 図形処理プログラミング, 岩波書店, 1991.

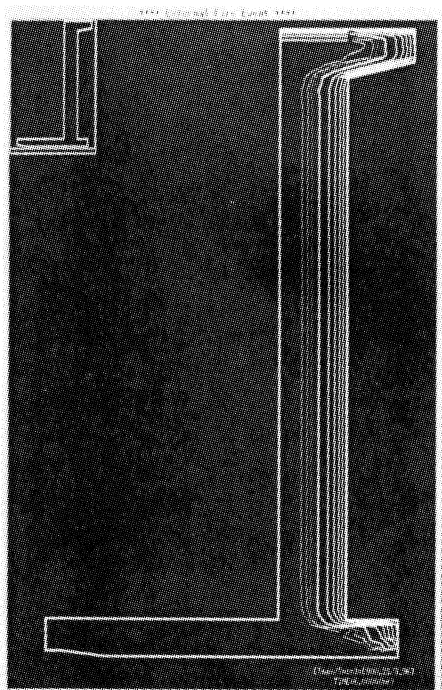


図-6 温度分布 (外火事6時間)

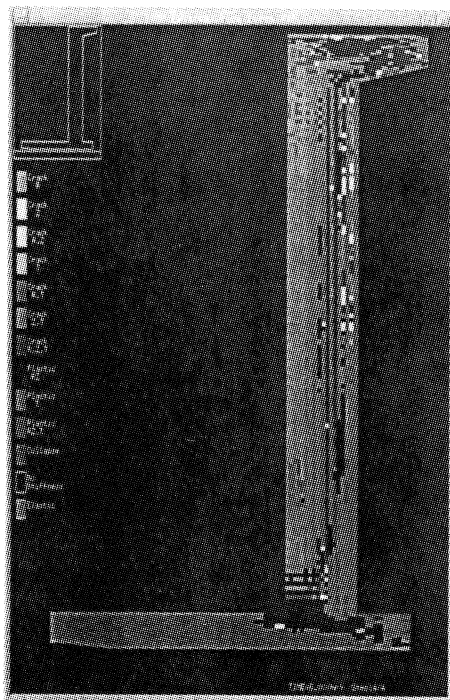


図-7 応力分布 (外火事6時間)

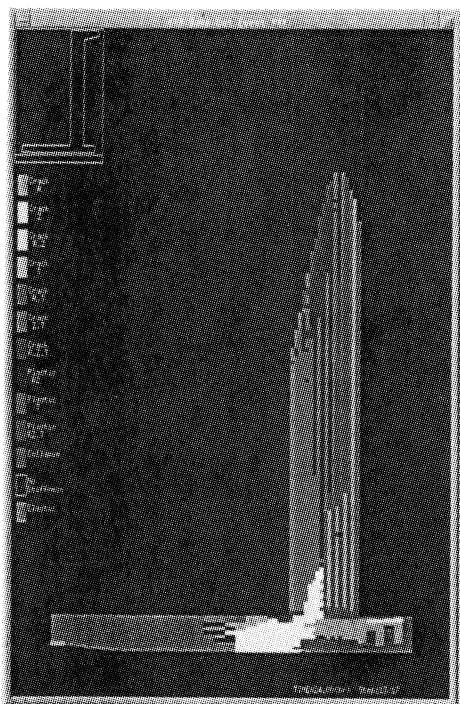


図-8 応力分布 (内火事2.4時間)

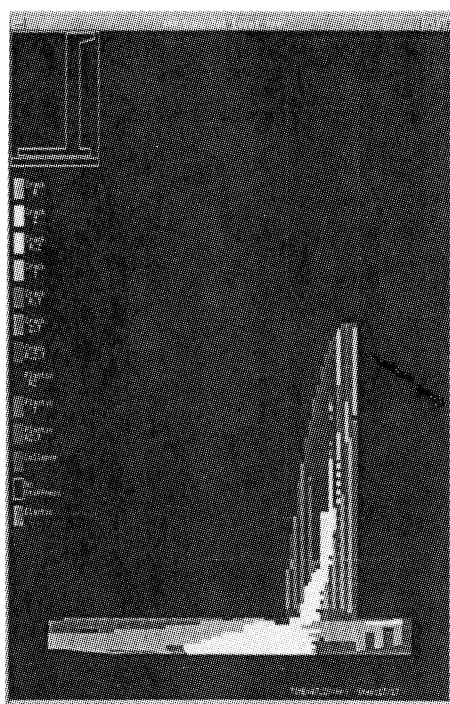


図-9 応力分布 (内火事4.7時間)