

TRIP を考慮した SUS316L 製液化水素貯蔵タンクの巨大地震時変形評価用 FEM モジュール開発

FEM Module Development Considering TRIP for Evaluating Liquefied Hydrogen Storage Tank Deformation under Huge

学籍番号 03210899 津田麟太郎
指導教員 川畑友弥

(2023 年 2 月 2 日提出)

Keywords: FEM 解析, 弾塑性解析, マルテンサイト変態, 液化水素貯蔵タンク, 材料構成式

1. 緒言

現在、地球温暖化に伴う気候変動が世界中で見られる。その原因としては、温室効果ガス排出量増加が挙げられる。2015 年のパリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前と比べ 2°C より十分低く保つとともに、1.5°C に抑える努力をすることが目標にかかげられた。世界ではカーボンニュートラル実現に向けての動きが活発になっている。その一環として液化水素をエネルギーキャリアとして用いる、そのために水素インフラを整備する計画がある。液化水素を安定して使用するためには、今までにない大型貯蔵タンクの建造が必須である。しかし、液化水素の温度は 20K であり、いままで構造物が晒されたことのない極低温である。液化水素貯蔵タンクの破壊事故は悲惨な事態を招く。20K という過酷な環境下、かつ、考えうる最大地震が起きた際にかかるタンクへの負荷、変形量を計算し、その安全性を評価することがこの研究の最終目的である。大型で複雑な構造物の負荷様式・量を評価する際には FEM 解析が用いられる。しかし、極低温の解析において、従来の FEM 解析手法では問題点があると考えている。本論文では、その問題点を解決する新たな FEM 解析の手法を提案する。

2. 従来の FEM 解析手法とその問題点

2.1 従来の FEM 解析

弾塑性体の有限要素法解析においては、降伏応力の定義が必要である。降伏条件の定義は「von Mises 相当応力が降伏応力に達すること」とされている[1]。解析においては式(1)を解く必要があり、その際に相当塑性ひずみと降伏応力の関係が必要である。

$$\bar{\sigma}^{tr} - 3\mu\Delta\varepsilon^p - \sigma_f = 0 \quad (1)$$

$\bar{\sigma}^{tr}$ は変形が弾性と仮定したときの計算される応力成分から求めた相当応力、 μ はせん断弾性係数、 $\Delta\varepsilon^p$ は相当塑性ひずみ変化量、 σ_f は降伏応力である。単軸引張試験において、引張方向応力と相当応力の値は理論的に一致するため、相当塑性ひずみと降伏応力の関係を求める際に、よく引張試験のデータが用いられている。

2.2 従来の手法の問題点

今回液化水素貯蔵タンクの材料としてオース

テナイト系ステンレスである SUS316L が考えられている。その理由は、面心立方構造をとるオーステナイトは構造物において危険とされる脆性破壊が起こらないからである。しかし、準安定オーステナイトである SUS316L は TRIP を起こし、マルテンサイト相(α' 相)が生成することが知られている。 α' 相は体心立方構造をとり、脆性破壊が起こる材料とされている。SUS316L において、TRIP が起こると脆性破壊の危険が高まるのである。この TRIP の起こる程度は応力場の状態と大きく関係すると考えられている。つまり、タンクのような複雑な構造物での応力場と、単純な引張試験での応力場は異なるため、TRIP の程度、つまり、 α' 相の体積分率はタンクと引張試験とで変化することが考えられる。従来の引張試験のデータを用いた解析では、 α' 相の体積分率変化に伴う材料構成式の変化に対応できていない。この点が問題であると考え、これを解決する新たな有限要素法の手法を提案する。

3. 新たな有限要素法解析の手法の提案

3.1 二相鋼の材料構成式の推定

Weng[2]によって二相鋼の応力ひずみ関係を、secant 法を用いて単相の応力ひずみ関係から推定する手法が考えられた。この理論は、複合組織のモデルを球場の介在物がマトリクスに埋め込まれていると仮定して考える。今回は、オーステナイト相を母相、マルテンサイト相を介在相として考える。変形の段階はそれぞれの相の状態により 3 つに分類可能である。一段階目は両相が降伏前、二段階目は片方の相のみが降伏しているとき、三段階目は両相が降伏しているときである。二段階目においては降伏している層に応じて 2 通りにわけることができるが、今回はオーステナイト相の降伏前にマルテンサイト相は存在せず、降伏後にマルテンサイト相が変態して現出すると仮定しているため、必ず母相が先に降伏するものとする。

第二段階においては式(2),(3)が成り立つ。

$$\bar{\sigma}^* = \frac{a_0(b_0 + \varepsilon^{p*(0)})^{N_0}}{B_0^s} \quad (2)$$

$$\bar{\varepsilon}^{p*} = (1 - f)\varepsilon^{p*(0)}B_0^s \quad (3)$$

第三段階においては式(4), (5), (6)が成り立つ。

$$B_0^s \bar{\sigma}^* + 3\mu_0^s(1 - \beta_0^s) f B_1^s \varepsilon^{p*(1)} = a_0(b_0 + \varepsilon^{p*(0)})^{N_0} \quad (4)$$

$$B_1^s \bar{\sigma}^* - 3\mu_0^s(1 - \beta_0^s)(1 - f) B_1^s \varepsilon^{p*(1)} = a_1(b_1 + \varepsilon^{p*(1)})^{N_1} \quad (5)$$

$$\bar{\varepsilon}^{p*} = f B_1^s \varepsilon^{p*(1)} + \frac{2}{3} \left(\frac{1}{2\mu_s'} - \frac{1}{2\mu} \right) \bar{\sigma}^* \quad (6)$$

$\bar{\sigma}^*$ は相当応力、 $\bar{\varepsilon}^{p*}$ は相当塑性ひずみ、 $\varepsilon^{p*(0)}$ 、 $\varepsilon^{p*(1)}$ はそれぞれ母相、介在相の相当塑性ひずみ、 $a_0, b_0, N_0, a_1, b_1, N_1$ は母相特有の材料値、 $\mu_0^s, \beta_0^s, B_0^s, B_1^s, \mu_s', \mu$ は母相、介在相の機械特性値および体積分率から計算される値である。 f は介在相の体積分率である。これらの式を式(1)とあわせて解くことで、TRIPによる α' 相の体積分率の変化を考慮した有限要素法解析が可能になる。

3.2 単相の材料構成式

タンク解析に必要な 20K での単相の材料構成式は、引張変形中のその場中性子回折実験の結果をもとに Swift[3]の式に Fitting して求めた。Fig. 1 はその結果である。

3.3 引張試験と新手法 FEM 解析結果の比較

今回提案した、体積分率の変化に応じて材料構成式を書き換える有限要素法解析の結果と 20K の引張試験の結果を Fig. 2 に示す。実験では γ 相より相応力の小さい ε' 相が現出していたが、有限要素法解析の都合上 γ 相として扱った。そのため、有限要素法解析による結果の方が応力の値が大きくなっているが、解析結果と実験結果は十分一致していると言える。

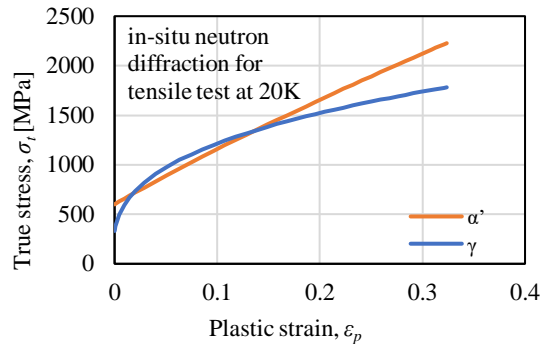


Fig. 1 Constitutive equation of γ and α' phase

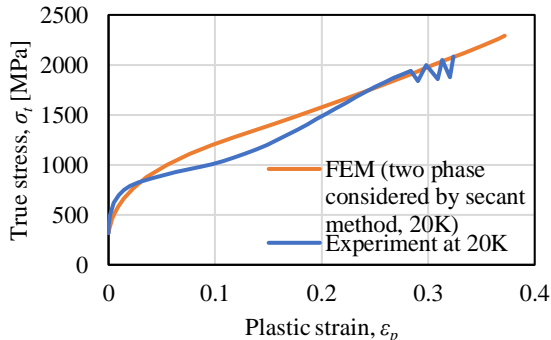


Fig. 2 True stress vs plastic strain in experiment and FEM

4. タンク解析

現在構想されている 50,000m³級の液化水素タンクの試設計をタンクファブリーケータがシミュレーション実施している。液化水素が満液状態の際にレベル2地震が発生した場合の変形を全体シェル解析で求める活動を行っており、その結果を得た。詳細な破壊発生照査のため、側板最下段とアニュラー板接合部に着目したソリッド解析を本研究で実施した。従来の引張試験のデータをもとに作られた材料構成式で行う手法と、新たに提案した TRIP による体積分率の変化に応じて材料構成式を書き換える手法の両方で行い、その結果を比較した。き裂を定義しないモデルに関しては、アニュラー板と側板の溶接部境界の点で最大主応力が最大値をとった。2つの値の違いを Table 1 に示す。また、初期欠陥を考慮し板厚の 0.2 倍の長さのき裂を入れたモデルについて、き裂先端の最大主応力、相当塑性ひずみ量、J 積分値は Table 2 のようになった2つの解析の結果に大きな差はなく、レベル2地震動を受けても、従来法で設計したタンクはシビアな力学状態になる可能性は低い。つまり材料に要求すべき破壊靱性値などのクライテリオンもそれほど高くない可能性がある。しかし、今後さらに多数の設計思想により構想されているタンク形式においても同様のチェックを進めていく必要がある。

Table 1 Maximum principal stress and equivalent plastic strain in each calculation

	Maximum equivalent stress [MPa]	Equivalent plastic strain
Conventional FEM	457.4	1.67E-04
New FEM	425.4	5.12E-04

Table 2 Values for fracture assessment in strain concentration area in each calculation

	Maximum equivalent stress [MPa]	Equivalent plastic strain	J integral [N/mm]
Conventional FEM	1069	8.49E-03	0.95
New FEM	947.7	6.66E-03	0.8

参考文献

- [1] 社会法人日本塑性加工学会, 非線形有限要素法, (コロナ社,1994)
- [2] G.J.Weng, J. Mech. Phys. Solids 38 419 (1990).
- [3] H. W. Swift: J. Mech. Phys. Solids, 1 1 (1952)