

鋼製タンクの国内外耐震設計法比較

武蔵工業大学 学生会員 苅籠 則和

武蔵工業大学 正会員 小池 武

1. はじめに

今日国内外には鋼製タンクに関するいくつかの耐震設計法が存在するが、その内容は必ずしも統一されていない。

本研究では国内における耐震設計指針（日本建築学会「容器構造設計指針¹⁾」、高圧ガス保安協会「高圧ガス設備等耐震設計指針²⁾」）と、国外の耐震設計指針（API「API STANDARD 650³⁾」）について比較、検討する。

2. 解析対象

図1に示す様な平底円筒型、アンカーストラップ無しの地上鋼製タンクを解析対象とする。

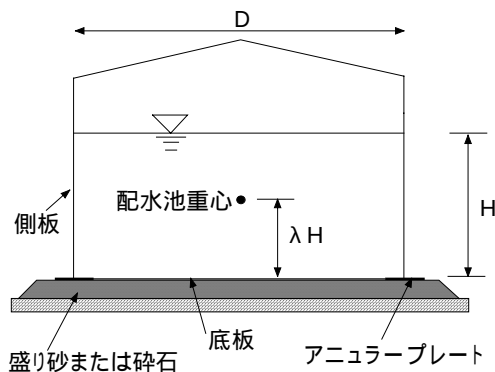


図1. 鋼製タンクモデル

3. レベル2地震動に対する鋼製タンクの挙動

鋼製タンクの耐震設計は地震動の周期に応じてその挙動を調査する必要がある。長周期地震動に対しては液面動揺の影響を考慮するが、本研究では図2に示す様に短周期地震動に対する底板の塑性変形による浮き上りと側板の座屈について検討する。

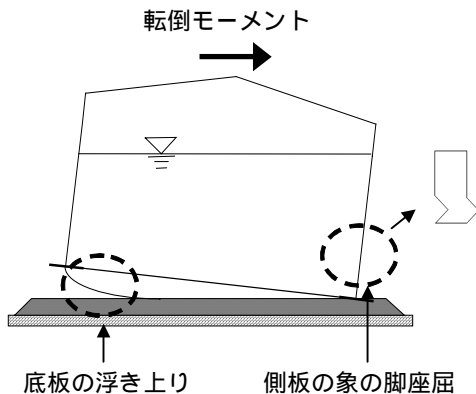


図2. タンク底板の浮き上り挙動と側板の座屈

4. 現行設計法の調査と比較

代表的な鋼製タンク耐震設計法について、以下の点に着目して調査、比較を行った。

地震荷重の取り扱い方

構造特性係数 D_s の取り扱い方

安全性照査方法

4-1. 日本建築学会

レベル2地震動によりタンク重心に作用する地震荷重は、タンクの固有周期と地盤条件から設計加速度応答スペクトルを算定し、構造物の非線形応答を考慮する為に構造特性係数を乗じて、その荷重の大きさを低減している。

構造特性係数 D_s は、底板の弾塑性挙動から次式によって示される。

$$D_s = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\delta_B}{\delta_y} \right) \cdot \left(\frac{T_1}{T_e} \right)^2}} \quad (1)$$

ここで、 δ_B は底板の浮き上がり量、 δ_y は降伏耐力時における底板の浮き上がり量、 T_1 は浮き上りモードにおける周期、 T_e は側板の変形を含む有効周期である。

ところで、底板の浮き上がり量 δ_B は地震荷重による応答値で評価するべきだが、日本建築学会では「底板が破損する終局状態の浮き上がり量」として底板に用いる鋼材の破断ひずみから規定しており、その為 D_s の値が応答値を用いた場合より小さく算出されている。その結果、設計せん断力 Q_{dw} は地震荷重による応答値より小さく、危険側に評価される事となる。

安全性照査方法は側板の座屈において、次式の様に力による判定を行っている。

$$Q_{dw} \leq Q_y \quad (2)$$

ここで、 Q_{dw} は設計せん断力、 Q_y は降伏耐力である。

しかし、既に述べたとおり構造特性係数 D_s は底板の弾塑性挙動から評価されたものである為、その結果を異なる損傷モードである側板の座屈判定に用いてよい根拠は無い。

4-2. 高圧ガス保安協会

この設計指針では全てのタンクがアンカーストラップにより固定されている為、アンカーストラップで固定した平底円筒タンクを検討対象とした。

キーワード：鋼製タンク，耐震設計法，構造特性係数

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1 武蔵工業大学都市基盤工学科 TEL03-3703-3111

レベル2地震動によりタンク重心に作用する地震荷重は、タンクの固有周期に対する応答倍率と地盤条件等から得られる設計修正震度にタンク重量を乗じて算定している。

タンクに作用する地震荷重がエネルギー一定則を用いて、次式により弾塑性変形量に変換される。

$$\mu_p = \frac{1}{4C} \left\{ \left(\frac{K_{MH}}{K_y} \right)^2 - 1 \right\} \quad (3)$$

ここで、 μ_p は応答塑性率、 C は損傷モード係数、 K_{MH} は設計修正水平震度、 K_y は各損傷モードにおける降伏震度である。

側板およびアンカーストラップの塑性率はそれぞれの降伏震度 K_y を評価する事によって求められる。

安全性照査方法は側板の座屈において塑性率、つまり変形量による判定を行っている。

$$\mu_p \leq \mu_{pa} \quad (4)$$

ここで、 μ_p は各損傷モードにおける応答塑性率、 μ_{pa} は許容塑性率である。

4 - 3 . API

我が国では、レベル2地震動として地震動の大きさを確定的に与えているが、米国では地震発生確率を用いて地域特性を考慮した地震規模予測手法を用いている。タンク重心に作用する地震荷重は、タンクの固有周期に対する応答倍率と地盤条件等から得られる設計修正震度にタンク重量を乗じて算定している。

構造特性係数に関する記述は存在せず、計算の中でも底板の弾塑性応答を評価している箇所は見られない。

底板の浮き上りに関しては J (Anchorage Ratio : 固定比率) という値により浮き上り発生についての判定を行っている。表1は J による判定基準を示したものである。

表1 . Anchorage Ratio (J) による底板の浮き上り判定

J	判定
$J < 0.785$	転倒モーメントによる浮き上りは発生しない。 タンクは安定。
$0.785 < J < 1.54$	浮き上りは発生するが、側板が圧縮により座屈しない限り、タンクは安定。
$1.54 < J$	タンクは不安定。 アニュラープレートの変更、あるいは更にアンカーストラップで対応する必要あり。

安全性照査は側板の座屈に関して行い、圧縮応力と許容応力の比較による判定を行っている。

$$\sigma_c < F_c \quad (5)$$

ここで、 σ_c は圧縮応力、 F_c は許容応力である。

API ではこの側板の座屈判定を行う際に、底板の浮き上り有無によって圧縮応力の算定式を2種類設定している。

・ $J < 0.785$ (浮き上り無し) の場合

$$\sigma_c = \left(w_t (1 + 0.4 A_v) + \frac{1.273 M_{rw}}{D^2} \right) \cdot \frac{1}{1000 t_s} \quad (6)$$

・ $J > 0.785$ (浮き上り発生) の場合

$$\sigma_c = \left(\frac{w_t (1 + 0.4 A_v) + w_a}{0.607 - 0.18667 [J]^{2.3}} - w_a \right) \cdot \frac{1}{1000 t_s} \quad (7)$$

ここで、 w_t は周長当り (タンク + 屋根) の荷重、 A_v は入力垂直加速度、 M_{rw} はタンク側板部に発生する転倒モーメント、 D はタンクの直径、 w_a は周方向長さ当りの抵抗力、 t_s は最下段側板厚である。

このように、底板の浮き上りが発生しない場合を考慮しているのは国内の設計法と異なる大きな特徴である。

5 . 結論

日本建築学会では、構造特性係数 D_s の算定式で底板の浮き上り量 δ_B を地震荷重による応答値ではなく、終局状態の浮き上り量として規定している。その為設計荷重が地震動に対する応答値よりも小さく算出され、安全性を過大評価していると考えられる。

高圧ガス保安協会では各損傷モードにおける塑性率を評価しており、側板の座屈判定においては側板部に発生する塑性変形に基づいた評価を行っている。

API では底板の浮き上り発生の有無を判定し、側板の座屈を許容応力度によって算定している。また底板浮き上り時の発生応力を Anchorage Ratio (J) を用いて、底板塑性変形の効果を代替的に評価しているものと思われる。

参考文献

- 1) 容器構造設計指針・同解説 : 日本建築学会, pp.160-180 264-272, 1996.
- 2) 高圧ガス設備等耐震設計指針 (レベル2耐震性能評価) : 高圧ガス保安協会, pp.135-145, 2000.
- 3) American Petroleum Institute : Welded steel tanks for oil storage API650 addendum 4, 2005.