鋼製タンク耐震設計法における構造特性係数について

武蔵工業大学　大学院　学生会員○荻久保智隆
武蔵工業大学　工学部　正会員　　小池　武
JFE エンジニアリング㈱　正会員　今井俊雄

１．はじめに

平底円筒形アンカーストラップ型式鋼製タンクのレベル２地震動に対する耐震設計法に関する国内２指針[1),2)]について，その適合性を比較検討する．
両指針とも地震時損傷モードとして，側板の座屈とアンカーストラップの引張破断を耐震安全性照査対象としている．レベル２地震動に対する弾塑性応答値を簡易評価する構造特性係数は照査対象箇所の塑性エネルギー消費から算定されるべきだが，両指針で想定する箇所は必ずしも一致しない．また，耐震安全性評価式も弾塑性変位を基準にするものと力を基準にするものとに分かれている．

これら両指針の問題点について検討する．

２．現行の耐震設計法比較

（１）地震時損傷モード

鋼製タンクの地震時損傷モードとして，
１）側板最下端部塑性座屈損傷（象の脚座屈）
２）アンカーストラップの降伏
の二つのモードが想定される．Fig.1 はその模式図である．

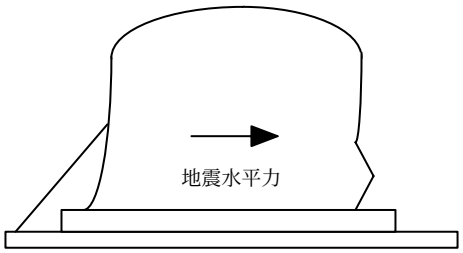

Fig.1 鋼製タンクの地震時損傷モード

レベル２地震動を受ける構造物で１自由度振動系としての挙動が卓越している場合には，その弾塑性応答をエネルギー一定則を用いて簡易的に求める手法が耐震設計法の体系の中に取り入れられ，弾性応答の地震荷重を構造系評価断面の降伏荷重に低減するための係数として次式で定義する構造特性係数が用いられる．

$$D_S = \frac{1}{\sqrt{2\eta - 1}} \quad \text{or} \quad \frac{1}{\sqrt{1 + 2\mu}} \tag{1}$$

ここで，η，μはそれぞれ塑性率あるいは靭性率であり次式で定義する．

$$\eta = \frac{\delta}{\delta_y} \quad , \quad \mu = \frac{\delta - \delta_y}{\delta_y} \tag{2}$$

ただし，δ, δ_yはそれぞれ地震応答変位と降伏変位．

（２）日本建築学会（容器構造設計指針・同解説）

レベル２地震動による設計水平力 Q_{dW}に対する耐震安全性照査は，Q_{dW}が側板下端部の象の脚座屈耐力およびアンカーストラップ許容耐力以下であることをそれぞれ Q_yを確認する形で次式により行われる．

$$Q_y \geq Q_{dW} \tag{3}$$

ここで，設計水平力は次式により算定される．

$$Q_{dW} = P + \left(W_R'' + W_S + W_B\right) \cdot K_{h2} \tag{4}$$

ただし，

$$K_{h2} = D_S^A \cdot K_{h02} \tag{5}$$

ここで，P, W''_R, W_S, W_B はそれぞれ動水圧，積載荷重と屋根重量，側板重量，底板重量，そして，K_{h02}はレベル２地震動に対する基準設計震度であり，D^I_Sは日本建築学会指針で用いられる構造特性係数であり次式で定義される．

$$D_S^A = \frac{1}{\sqrt{1 + 6\dfrac{\delta_B}{\delta_y}\left(\dfrac{T_1}{T_e}\right)^2}} \tag{6}$$

ただし，$\delta_B, \delta_y, T_1, T_e$はそれぞれ底板浮上がり変位，降伏変位，底板変形時タンク固有周期，タンク合成固有周期である．

Fig.2 は当該指針の側板およびアンカーストラップに対する耐震設計フローである．

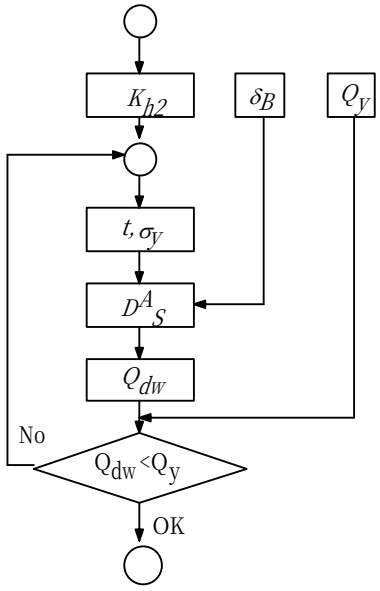

Fig.2　日本建築学会の耐震設計フロー

式（６）では限界変位δ_Bで D^I_Sが算定されるが，本来はδ_Bの代わりに地震応答値δが用いられるべきであり，その分 D_Sを過小にすなわち地震荷重を過小（危険側）に評価している．

式（１）の構造特性係数は，地震荷重を降伏荷重に

キーワード：鋼製タンク，耐震設計法，構造特性係数，アンカーストラップ，象の脚座屈，耐震安全性照査
連絡先：〒158-8557　東京都世田谷区玉堤 1-28-1

低減する係数のため，式（5）で D^I_S より地震荷重を算定すると，Q_y と Q_{dW} は等号で結ばれるはずのところを，照査式として式（3）の不等号を要請している．この不等号が成立するのは，D^I_S を評価する箇所が照査箇所の側板象の脚座屈部位と異なる場合にのみ可能である．すなわち，当該指針では，地震応答による塑性エネルギー消費が側板の塑性変形ではなく，アンカーストラップの塑性変形のみに基づいていると判断される．

（3）高圧ガス保安協会（高圧ガス設備等耐震設計指針～レベル２耐震設計評価）

レベル２地震動を受けたタンクの耐震安全性照査は，作用する地震荷重（設計水平震度 K_{MH}）が降伏荷重（降伏震度 K_y）を超過するときに発生する靭性率 μ_p が許容靭性率 μ_{pa} 以下であることを確認する形で次式により行われる．

$$\mu_p \le \mu_{pa} \tag{7}$$

ここで，発生する靭性率はエネルギー一定則を用いて次式より算定する．また，C は損傷モード特性パラメータで 2.0，許容靭性率は 0.35．この場合，構造物の弾塑性応答特性は降伏震度 K_y を算定する過程で考慮することになる．

$$\mu_p = \left\{\left(K_{MH} / K_y\right)^2 - 1\right\}/(4C) \tag{8}$$

当該指針では，限界塑性率は日本建築学会指針の構造特性係数が D^I_S=0.5 に対応する値として μ=0.35 を設定している．しかし，本来の構造特性係数の定義式（1）を考えると，この値から許容値を求めるのは適正ではなく，むしろ直接に当該構造系照査位置の限界強度から設定すべきである．

Fig.3 に高圧ガス保安協会指針の側板およびアンカーストラップに対する耐震設計フローを示す．

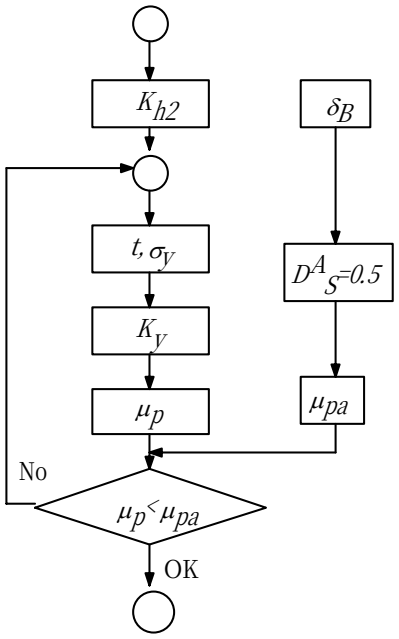

Fig.3　高圧ガス保安協会指針の耐震設計フロー

３．数値検討事例

対象モデルは，Table１の諸元を有する鋼製タンクとする．両指針のレベル２地震動応答スペクトルから得られる設計水平震度 K_{h2} をタンク重心に作用させて，その耐震安全性を照査した．

Table 1 諸元

Content	Symbols	Unit	Amount
Diameter	D	m	20
Height	H	m	22
thickness of side wall at the bottom layer	t_W	mm	16
thickness of annular	t_A	mm	12

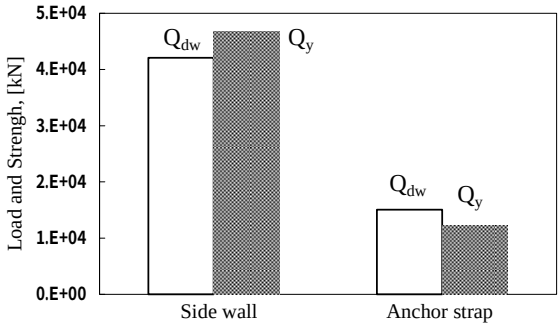

Fig.4 日本建築学会指針の耐震安全性照査結果

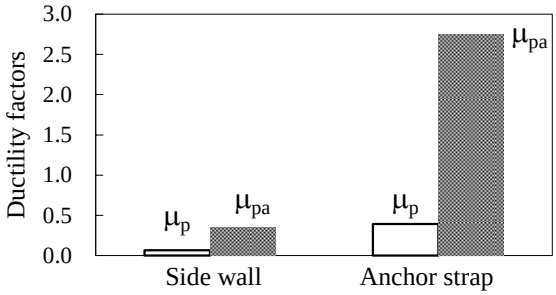

Fig.5　高圧ガス保安協会指針の耐震安全性照査結果

Figs.4,5 は，それぞれの指針に基づく耐震安全性照査結果である．Fig.4 でアンカーストラップの Q_y が Q_{dW} を上回っているのは，そこで塑性変形が発生していることを示しているが，引張破断しているかどうかは判定できない．側板の強度 Q_y,μ_{pa} と荷重 Q_{dw},μ_p の関係を両図で比較すると，Fig.4 では両者間に余裕が少ないが，Fig.5 では大きな余裕のあることがわかる．Fig.4 で荷重と強度の値が相互に接近しているのは，構造特性係数の本来の特性が反映している結果のように思われる．耐震安全性照査の明快さでは後者の方が優れているように思える．

４．まとめ

鋼製タンクの耐震設計法について国内の２手法の相互関係について検討した．レベル２地震動に対する構造系の弾塑性挙動を検討対象とする上からは，高圧ガス保安協会の手法に適合性が見られるが，その限界基準設定法については検討の余地のあることが判明した．一方，日本建築学会の手法では，構造特性係数の評価法に材料限界伸び値を採用することで，地震荷重を危険側に評価している懸念のあることが判明した．

参考文献

１）日本建築学会:容器構造設計指針・同解説,1996
２）高圧ガス保安協会：高圧ガス設備等耐震設計指針～レベル２耐震設計評価，2007．