

スカート支持の自立式塔類の固有周期の算定方法について

株式会社 プラント耐震設計システムズ

池 田 雅 俊

耐震告示でスカート支持の自立式の塔類（胴の内径及び胴板厚の変化が少ないものに限る。）の固有周期は、次の算式により計算することになっている。

$$T = \frac{CH_t}{\sqrt{K_{MH} D_m}} \quad \text{----- (式 1. 1)}$$

この算式において、 T 、 K_{MH} 、 D_m 、 C 及び H_t は、それぞれ次の値を表すものとする。

- T : 固有周期 (単位 s)
 K_{MH} : 設計修正水平震度
 D_m : 胴の平均直径 (単位 m)
 C : 0.025 ~ 0.03 の範囲で応答倍率 γ が最大となる時の値 (単位 $s \cdot m^{-0.5}$)
 H_t : 塔類のベースプレートからの高さ (単位 m)

(式 1. 1)を見ると、固有周期の値が修正震度 K_{MH} の影響を受けることとなり、本来、固有周期は材質、寸法、形状、質量のみにより定まることを考えると奇異な感じを受けると思う。そこで、どのような目的で、どういう根拠でこの簡易計算式が規定されたかを解説する。

簡易式の導入

そこで簡単のために、高さ方向に径、胴板厚、質量が変わらない自立式塔類を考える。このときの固有周期の厳密解は次式で算定される。

$$T = 2\pi \left(\frac{H_t}{\lambda} \right)^2 \sqrt{\frac{\gamma}{EI}} \quad \text{----- (式 1. 2)}$$

ここに、 γ : 単位長さあたりの塔の質量 (kg/m) E : 縦弾性係数(kN/m²)、
I : 塔断面の断面 2 次モーメント (m⁴) λ は定数で、 $\lambda = 1.875$

(式 1. 2)で、塔類の直径、高さ等は仕様で決められるが、胴板厚は設計修正震度が設定されない決められないので質量は決まらず、固有周期は計算できない。そこで、設計者は“仮定した胴板厚に対して質量 γ 及び設計修正震度 K_{MH} を計算したうえで、各部の応力を算定し仮定胴板厚の妥当性を評価してよければその胴板厚を採用する。問題があればこ

の手順を繰り返す。”という手順をとる。

このような繰り返しをなくするために、次のように考える。

設計者は発生応力 σ が許容応力 a に等しい又は小さくなるよう胴板厚を設定する。この胴板厚を用いて質量を計算しこれを(式 1. 2)に代入して固有周期を算定することを考える。

塔基部で発生応力が最大となるので、発生応力 σ は、次式で計算できる。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = \frac{D_m}{2I} \left(\frac{1}{2} K_{MH} g H_t^2 \right) \quad \text{----- (式 1. 3)}$$

ここで、 Z ：塔の断面係数 (m³)

M ：塔基部の転倒モーメント (kN・m)

そこで、(式 1. 3)から、 σ を算出して、(式 1. 2)に代入すると、次式をうる。

$$T = \frac{CH_t}{\sqrt{K_{MH} D_m}} \quad \text{----- (式 1. 4)}$$

ここで、 g は重力加速度 (m/s²)、 C は、次式による。

$$C = \frac{2\pi}{\lambda^2} \sqrt{\frac{4\sigma}{gE}} \quad \text{----- (式 1. 5)}$$

ここで、設計者は σ を許容応力に近い値に胴板厚を設定し、 λ 、 g の値は定数であり、 E の値は、通常の塔の場合には鉄鋼材料に限られるので定数と考えてもよく、この結果 C の値は塔の形状、寸法に関係なく、非常に安定した値となる。

この式を現実の塔類 40 例について適用した場合、 $C=0.025 \sim 0.030$ (s・m^{-0.5}) 程度の値となる。

このようにして耐震告示による塔類の固有周期の簡易算出式が導入された。

固有周期と水平修正震度の計算の方法

(式 1. 1)(式 1. 4)で、塔径 (D_m)、高さ (H_t) 及び水平修正震度 (K_{MH}) が知れば固有周期は計算できるが、 K_{MH} が未知数である。そこで、次のようにすると K_{MH} 及び T を設定できる。

応答スペクトルは、横軸を固有周期 T 、縦軸を水平修正震度 K_{MH} とし図 1. 1 のように表示できる。この応答スペクトル上で(式 1. 1)(式 1. 4)は、直線で表されて、それらの交点の K_{MH} 及び T は、(式 1. 1)(式 1. 4)に適合すると同時に修正震度規定に適合している。

このようにして、 C が安定した値をとることを利用すると、塔径と高さが知れば水平修正震度 K_{MH} 及び塔類の固有周期 T を算出できる。

図 1. 1 では、 $C=0.025$ と 0.030 のケースを記載している。

このようにして、塔径 (D_m)、高さ (H_t) だけが決められれば、通常的设计を行っている限り正しい固有周期と設計震度が算出されることになる。

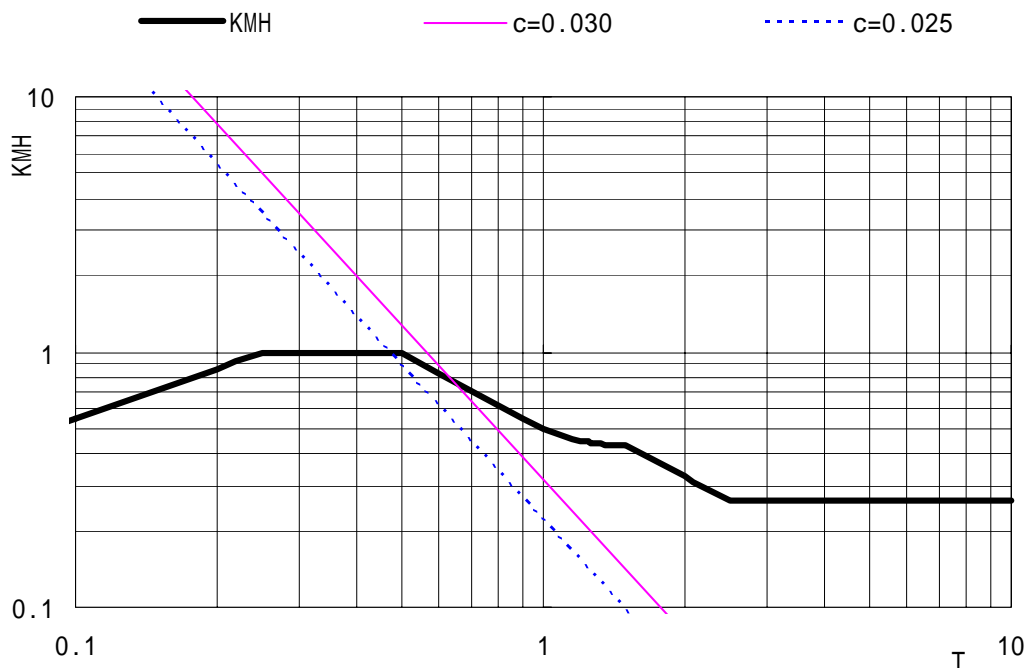


図 1.1 応答スペクトル図

簡易式の信頼性向上

現実の塔類の場合、断面寸法（胴板厚、直径）、材質、質量分布などはまちまちであるため、厳密に言うと式 1.1)は成立しない。しかし、上述したように実測例からはかなりの精度で成立している。

設備産業の機器は、建築物の場合と相違して荷重条件が機器ごとに、運転状態、経年変化などで大きく違ってくる。

- (1) 肉厚の決定が地震により支配されている場合は地震による応力値が高くなり、 C の値は大きく、周期は長くなる。 反対に内圧や風に支配される場合は、 C の値は短くなる。座屈の影響を考えると、さらに複雑になる。
- (2) 運転時及び運転休止時は、重量の変動があるため、塔の運転状態により固有周期は異なる。応答スペクトルから考えると質量が少ないほど地震応力値が小さいとは限らない。
- (3) プラント機器の場合、腐れ代を考えて設計する。胴板厚は経年的に変動すると考えられ、固有周期も経年的に変化し、地震に影響も変動する。

このように考えるとき、固有振動数を精度高く計算しても設計の信頼性が向上するとは必ずしもいえない。むしろ計算された固有周期の精度上のばらつきや、運転状態、設備維持の状態を考慮しての適切な設計を行う必要がある。本簡易式(式 1.1)の場合、設計の信頼性

を考慮して、Cの値に現実の塔程度のばらつき（ $C=0.025 \sim 0.030$ ）があるとして、このばらつきの範囲で応答（ K_{MH} ）が最大となるよう設定することにした。

適用除外

$H_t / D_m < 4.0$ の場合は(式 1. 1)の適用除外としている、これは、上述したように(式 1. 1)は、曲げ系（曲げ変形する）と仮定して導入した式であるが、ずんぐりした構造物（ $H_t / D_m < 4.0$ ）の場合せん断系（せん断変形する）とすべきであり、適用除外している。

この場合は、剛構造物（固有周期の高い構造物）であり、固有周期 T を求めることなく応答倍率 γ の値を 2.0 とするとしている。

(式 1. 1)の適用は、胴の内径及び板厚の変化の少ないものに限るとしているが、これも式の導入仮定から明らかであろう。具体的には、実記の塔類の適用評価から、胴の最大内径と最小内径の比が 2.0 以下であり、かつ、胴の周継手の上下の肉厚の比が 0.5 以上、2.0 以下のものとしている。

この場合、 D_m は塔の平均直径とし、たとえば図 1. 2 の場合、次式で計算するとしている。

$$D_m = \frac{D_1 H_1 + D_2 H_2}{H_t}$$

D_1 及び D_2 : 各胴部の平均直径（胴外径）

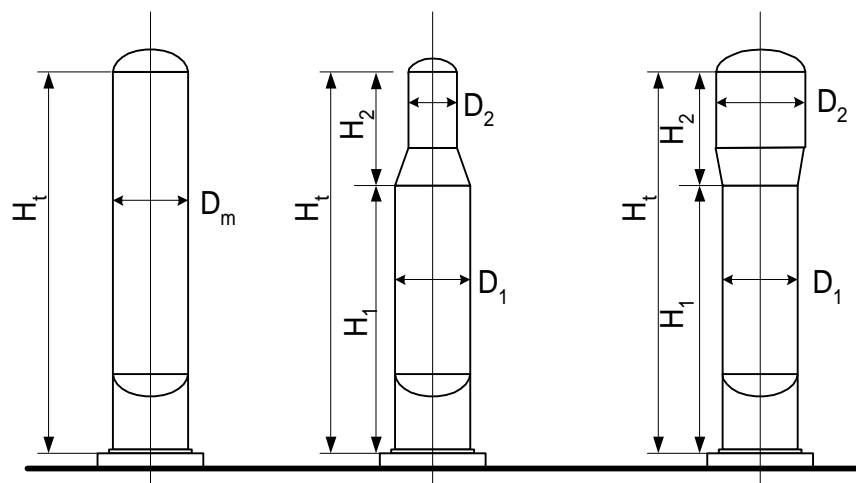


図 1. 2 塔径の変化ある場合