

伸縮継手を有する塔類の耐震設計について

株式会社 プラント耐震設計システムズ
池 田 雅 俊

1. まえがき

塔類の耐震設計において応答計算は、通常、胴を梁に置き換え、地震荷重が作用した時の各部に生じる曲げモーメントを、連続梁問題として計算することにより行う。

胴は、断面が中空円筒形状であり、梁計算に必要な断面 2 次モーメントは容易に計算できる。しかしながら、縦型熱交換器のような伸縮継手を有する塔類の場合には、伸縮継手は複雑な形状であるため、通常の塔類の耐震設計手法が採用できない。

そこで、伸縮継手を有する塔類の耐震設計を行うために、伸縮継手を、曲げモーメント及びせん断力と変位角及び変位の関係が等価な中空円筒に置き換えて、通常の塔類の耐震設計手法を適用した応答計算（曲げモーメント及びせん断力の計算）を行い、応力評価は梁としてではなく伸縮継手として扱う方法を説明する。

本稿で扱うのは、胴厚さとほぼ同等の厚みを有するような比較的剛性の高い伸縮継手を有する塔類の耐震設計法を示す。伸縮継手の剛性が低い場合には、不安定な構造になるため伸縮継手部で上部胴のせん断力を下部胴に伝えるような構造的工夫が必要となる。

固定管板方式の縦型熱交換器において、胴とチューブの温度差に基づく熱応力を緩和するために胴に伸縮継手を設ける。耐震設計上は、各部に発生する地震荷重は胴を通して支持部に伝えられるので、伸縮継手部は強度的に弱点となり、破損につながるおそれがある。地震荷重は胴部を通ると同時に、チューブを通して伝えられが、固定方法が不明確であるなど力学的モデルの設定が困難なこともあり、安全側の評価として地震荷重はすべて胴側を通して伝えられるとする。したがって、チューブは重量としてのみ考慮して剛性を期待しないものとして、伸縮継手を有する塔類の耐震設計法を示した。

第 2 章で、伸縮継手と変形と荷重特性の等価な中空円筒の設定の仕方及びその考え方・根拠を示す。続いて第 3 章で伸縮継手を等価な中空円筒に置き換えて、地震時の地震荷重、変形分布の計算の仕方を述べる。第 4 章には第 3 章の計算方法で得られた伸縮継手に生じる変形量（軸方向変位量、軸直角方向変位量及び曲げ角度）から、伸縮継手の耐震性能評価方法を示す。更に第 5 章では、第 2 章から第 4 章までに説明する伸縮継手を有する塔類の耐震設計法の理解の助けのために、耐震設計事例を示す。

2 . 伸縮継手

2 . 1 伸縮継手のばね定数

JIS B2352 による。図 1 に示すような補強リングなしの伸縮継手の場合、図 2 に示すように伸縮継手の端部に軸力 F 及び曲げモーメント M が作用し、軸方向変位 X 及び曲げ角度が生じた時、次式が成立する。

$$F = \frac{f_w}{N} X \quad (\text{式 1})$$

$$M = \frac{f_w d_p^2}{8N} \theta \quad (\text{式 2})$$

ここで、

- X : 伸縮継手の軸方向変位量 (mm)
: 伸縮継手の曲げ角度 (rad)
 F : 軸方向変位 X に対する伸縮継手のせん断力 (N)
 M : 軸まげ角度 に対する伸縮継手の曲げモーメント (N・mm)
 f_w : 伸縮継手の毎山ばね定数 (N/mm)
次式 (Kellogg 式) により計算される値とする。

$$f_w = \frac{2E_b d_p t^3 n}{3 \left(\frac{q}{2} \right)^{0.5} W^{2.5}} \quad (\text{式 3})$$

- N : 1 個の伸縮継手の山数
 n : 伸縮継手層の厚さ t の層数
 t : 伸縮継手 1 層の呼び厚さ (mm)
 d : 伸縮継手端末部の外径 (mm)
 W : 伸縮継手山の高さ (mm)
 d_p : 伸縮継手の平均径 (mm), $d_p = d + W$
 q : 伸縮継手山ピッチ (mm)
 E_b : 伸縮継手材料の設計温度における縦弾性係数 (N/mm²)

2.2 伸縮継手に等価な中空円筒

図 3(b)に示すような等価中空円筒の平均径 d_e 、肉厚 t_e 、長さ L_e 及び縦弾性係数 E_e とする時、図 4(b)に示すような軸方向変位 X に対する等価中空円筒の軸力 F 及び曲げ角度 θ に対する等価中空円筒の曲げモーメント M は、はり理論により次式で計算される。

$$F = \frac{E_e}{L_e} \pi d_e t_e X \quad (\text{式 4})$$

$$M = \frac{E_e}{L_e} \frac{\pi d_e^3 t_e}{8} \theta \quad (\text{式 5})$$

ここに、

d_e :	等価中空円筒の平均径	(mm)
t_e :	等価中空円筒の肉厚	(mm)
L_e :	等価中空円筒の長さ	(mm)
E_e :	等価中空円筒の縦弾性係数	(N/mm ²)

そこで、(式 1)と(式 4)及び(式 2)と(式 5)において、それぞれ(式 6)及び(式 7)が成立するよう、等価中空円筒の平均径 d_e 、肉厚 t_e 、長さ L_e 及び縦弾性係数 E_e を決めてやる。伸縮継手を有する塔類の応答計算で、図 3(a)の伸縮継手ABの代わりに、(b)の等価中空円筒A'B'で置き換えて応答計算した結果は、図 4(b)の等価中空円筒A'B'をそっくり、(a)の伸縮継手ABに置き換えても、そのまま、上下の胴との接続部における変形の連続性、力の釣り合いが成り立ち、伸縮継手を有する塔類の応答と同等であることがわかる。なお、応答とは構造物各部の地震動による変位量、たわみ角、力、曲げモーメント等をいう。

$$\frac{f_w}{N} = \frac{E_e}{L_e} \pi d_e t_e \quad (\text{式 6})$$

$$\frac{f_w d_p^2}{8N} = \frac{E_e}{L_e} \frac{\pi d_e^3 t_e}{8} \quad (\text{式 7})$$

等価中空円筒と伸縮継手はせん断力及びモーメントの作用点が一致しなければならないので、両者の長さは等しいとおく。

$$L_e = Nq \quad (\text{式 8})$$

さらに、等価中空円筒と伸縮継手の板材肉厚は等しいと仮定する。

$$t_e = nt \quad (\text{式 9})$$

これらの式 (6) ~ (式 9)より、等価中空円筒は次の緒元とすることができる。

$$L_e = Nq \quad (\text{式 8})$$

$$t_e = nt \quad (\text{式 9})$$

$$d_e = d_p = d + W \quad (\text{式 10})$$

$$E_e = q \frac{f_w}{\pi d_p n t} = \frac{2\sqrt{2}}{3\pi} \frac{q^{0.5} t^2}{W^{2.5}} E_b \quad (\text{式 11})$$

3 . 伸縮継手を有する塔類の応答計算

通常の自立式の塔類の耐震設計は、高圧ガス保安協会発行の KHK E 012-1-1997「高圧ガス設備等耐震設計指針 レベル 1 耐震性能評価（耐震設計設備・基礎）編」又は石油学会発行の JPI-R-35-96「スカート有する塔類の強度計算」に準じて行われる。

これ等の基準では、設計のための計算書式及び計算例が参考で示されている。

伸縮継手を有する塔類に関しては、伸縮継手の部分を式 (8) ~ (式 11)により、長さ L_e 、径 d_e 、肉厚 t_e 及び縦弾性係数 E_e の胴に置き換えて、通常の塔類の応答計算を行うことにより耐震設計をおこなうことができる。

ただし、伸縮継手部の耐震性能評価は、次章の方法に置き換えて評価する必要がある。このため、伸縮継手と胴との接続部の変形量（軸方向、軸直角方向変位及び曲げ角度）を算出する必要がある。いずれも上記の資料で変形量の計算方法は記載されている。

4 . 伸縮継手の耐震性能評価

4 . 1 伸縮継手の算定応力

伸縮継手の評価は、応答解析で計算された伸縮継手の生じる軸方向変位全振幅 $X(\text{mm})$ 、軸直角方向変位全振幅 $Y(\text{mm})$ 及び曲げ角度全振幅 (radian)から評価応力を計算して許容応力 S_a を超えないことを確認することによって行う。なお、変位全振幅等の値は、通常の応答計算で算出される軸方向変位量、軸直角方向変位量及び曲げ角は片振幅で計算されるので、これを2倍した値となる。

伸縮継手の応力算定は Kellogg 社の式として広く知られている式をしめすと、次のようになる。

$$\sigma_{\max} = \frac{0.75 E_b t}{\left(\frac{q}{2}\right)^{0.5} W^{1.5}} e + \frac{P}{2n} \left(\frac{W}{t}\right)^2 \quad 2 S_a \quad (\text{式 12})$$

ここで、

- n : ベローズ層の厚さ t の層数
 t : ベローズ 1 層の呼び厚さ (mm)
 d_p : ベローズの平均径 (mm), $d_p = d + W$
 d : ベローズ端末部の外径 (mm)
 W : ベローズ山の高さ (mm)
 q : ベローズ山ピッチ (mm)
 E_b : ベローズ材料の設計温度における縦弾性係数 (N/mm²)
 e : 伸縮継手の毎山全動き量で下式による。 (mm)

$$e = e_x + e_y + e$$

$$e_x = 2 \frac{\Delta\chi}{N} \quad \text{(式 13)}$$

$$e_x = 2 \frac{3d_p \Delta\delta}{Nq - \Delta\chi} \quad \text{(式 14)}$$

$$e_x = 2 \frac{d_p \Delta\theta}{2N} \quad \text{(式 15)}$$

N : 1 個のベローズの山数

- : 塔類の応答計算から得られる伸縮継手の軸方向変位片振幅 (mm)
- : 塔類の応答計算から得られる伸縮継手の軸直角方向変位片振幅 (mm)
- : 塔類の応答計算から得られる伸縮継手曲げ角度片振幅 (radian)

この式は、伸縮継手を簡単な梁の曲げ問題として変位による最大曲げ応力と圧力による曲げ応力の和を伸縮継手に生じる最大応力としたものである。

4.2 伸縮継手の耐震設計用許容応力

伸縮継手に生じる軸方向応力の耐震設計用許容応力は、配管の伸縮継手に係る耐震設計用許容応力に準じるとして、耐震告示第 16 条第 2 の 2 号二により、設計繰り返し数 500 回に応じた日本工業規格 B 8281「圧力容器の応力解析及び疲労解析」(1993 年)の図 1 及び図 2 又は図 3 から得られる許容応力振幅の 2 倍の値であるので次の値となる。

(1) 炭素鋼、低合金鋼、フェライト系ステンレス鋼及び高張力鋼に係る伸縮継手のベローズに生じる軸方向応力の耐震設計用許容応力 S_a は次の値となる。

最小引張強さが 551.6 N/mm² 以下の場合、 $S_a = 2 \times 724 = 1448$ N/mm²

最小引張強さが 792.9 以上 896.3 N/mm² 未満の場合、 $S_a = 2 \times 689 = 1378$ N/mm²

最小引張強さが 551.6 超 792.9 N/mm² 未満の場合、及び の値を比例法により計算する。

(2) オーステナイト系ステンレス鋼、ニッケル基合金 (Ni-Cr-Fe 合金、Ni-Fe-Cr 合金)

及びニッケル銅合金の場合に係る伸縮継手のベローズに生じる軸方向応力の耐震設計用許容応力は、 $S_a = 2 \times 1020 = 2040 \text{ N/mm}^2$ となる。

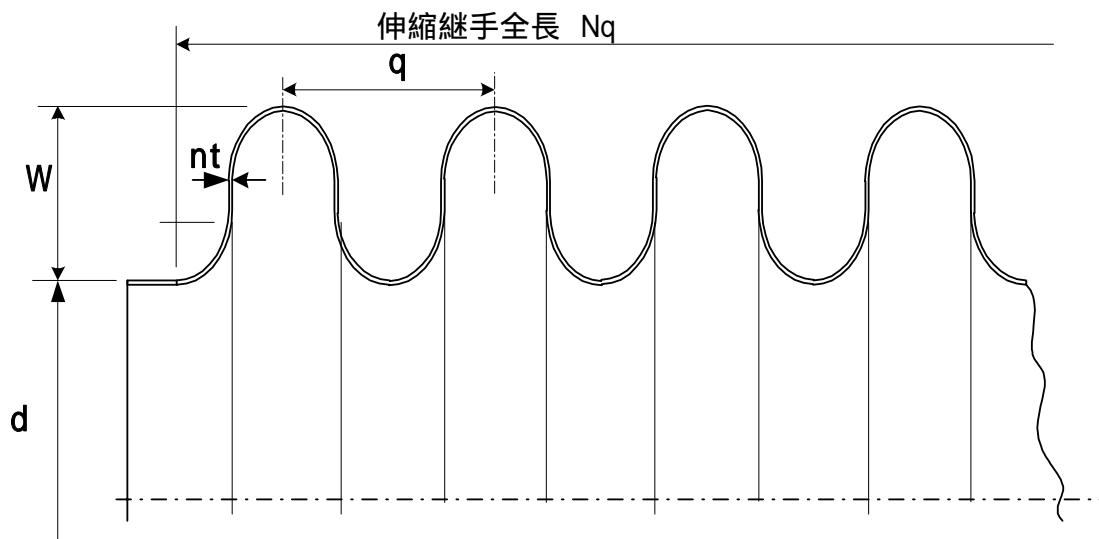


図 1 伸縮継手の概要図

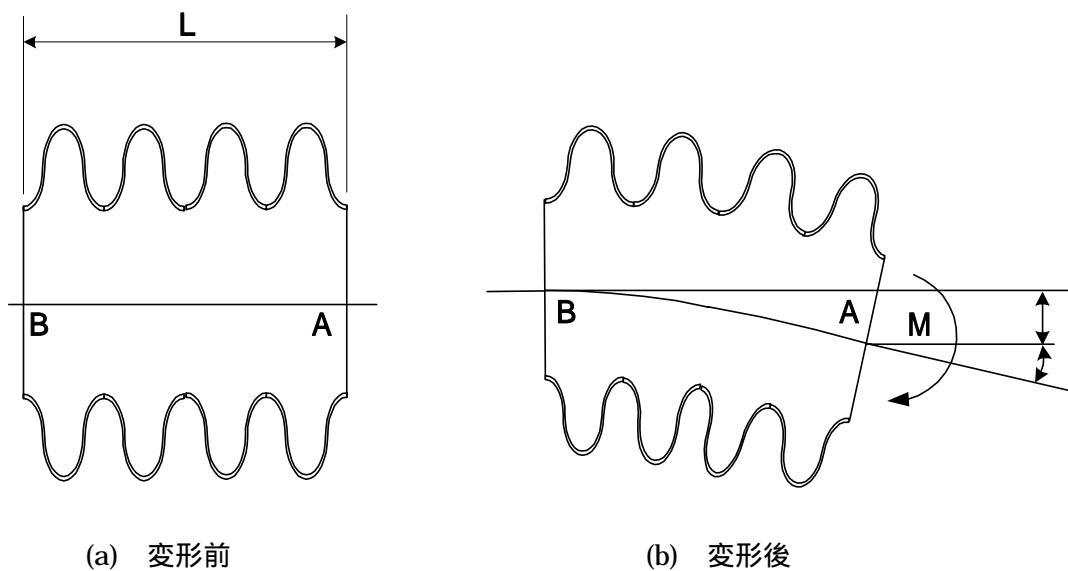


図 2 伸縮継手の変形図

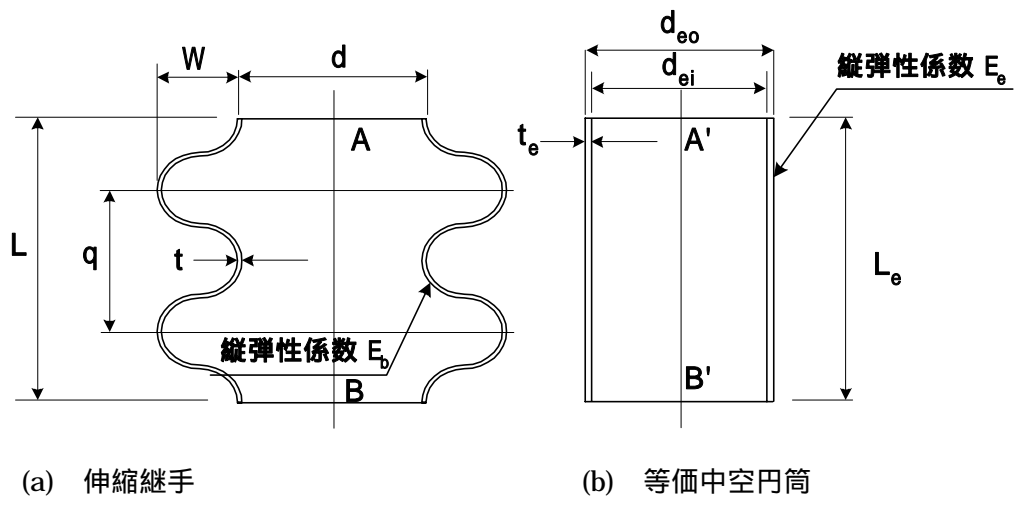


図 3 変形前の等価中空円筒

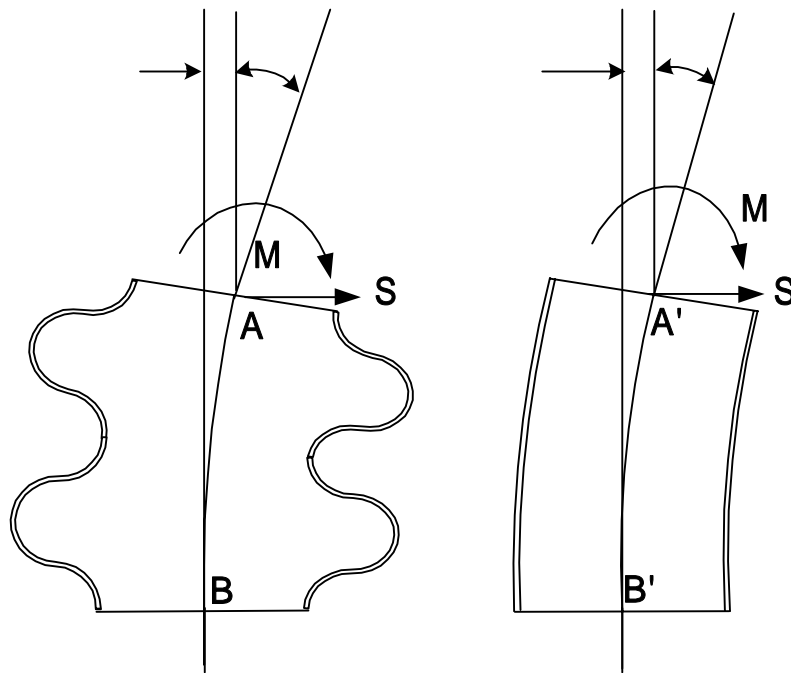


図 4 変形後の等価中空円筒

5. 伸縮継手を有する塔類の耐震計算事例

前章までに説明した伸縮継手を有する塔類の耐震計算法に従った計算事例を、参考までに示す。計算は簡単のために静的震度法で行うものとして、架構上の12mの位置に支持固定される伸縮継手のある600 × 5000Lの塔類である。

5.1 耐震設計条件

耐震重要度係数	1 =	0.5
地域係数	2 =	1
地盤増幅係数	3 =	2
地表震度	Kh =	0.15

5.2 耐震設計方法

- (1) 静的震度法
- (2) 反力・モーメント及び変位・曲げ角度の計算は耐震指針・レベル1耐震性能評価(耐震設計設備及び基礎)編100～103頁の方法による。
- (3) 伸縮継手に等価な中空円筒に示す等価中空円筒に置換して地震時の変形(水平方向変位及び曲げ角度)を算出する。

5.3 計算モデル

節点(Node)

- A: 伸縮継手上端
- B: 伸縮継手下端
- K: 塔類支持固定部
- S: 塔類中間部
- T: 塔上端

胴部(section)

L_{TS} : TS胴長さ、 L_{SA} : SA胴長さ、 L_{BK} : BK胴長さ、

d: 胴内径

t: 胴板厚

E: 胴板材の縦弾性係数

伸縮継手

L_e : 伸縮継手の投下中空円筒長さ

d_e : 伸縮継手の等価中空円筒径

t_e : 伸縮継手の等価中空円筒板厚

E_e : 伸縮継手の等価縦弾性係数

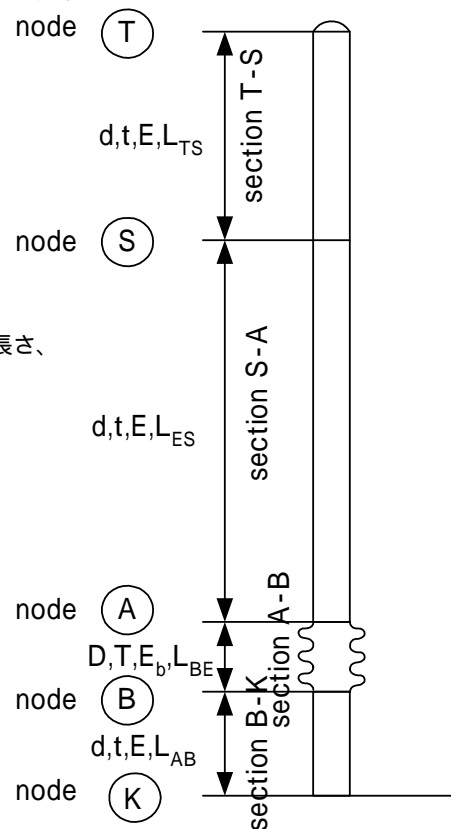


図5. 伸縮継手を有する塔槽類の応答計算モデル

5.4 伸縮継手

5.4.1 伸縮継手仕様

P	: 常用の圧力	=	1.5	(MPa)
T	: 設計温度	=	210	
d	: 伸縮継手端末部の外径	=	0.61	(m)
W	: 伸縮継手の山の高さ	=	0.11	(m)
n	: 伸縮継手の層数	=	1	(m)
t	: 伸縮継手1層の呼び厚さ	=	0.01	(m)
N	: 伸縮継手の山数	=	1	(-)
q	: 伸縮継手山ピッチ	=	0.2	(m)
E_b	: 伸縮継手材料の設計温度における縦弾性係数	=	1.906E+08	(kN/m ²)
2Sa	: 伸縮継手の耐震設計用許容応力 (ただし、伸縮継手の材料: SUS304)	=	2040	(kN/m ²)

5.4.2 等価中空円筒

d_e	: 等価中空円筒の平均径	$d_e = d_p = d + W$	=	0.72	(m)
t_e	: 等価中空円筒の肉厚	$t_e = nt$	=	0.01	(m)
L_e	: 等価中空円筒の長さ	$L_e = Nq$	=	0.2	(m)
E_e	: 等価中空円筒の縦弾性係数	$E_e = \frac{2\sqrt{2}}{3\pi} \frac{q^{0.5} t^2}{W^{2.5}} E_b$	=	6.374E+05	(kN/m ²)

5.5 胴の寸法

L(j)	: section j の長さ	(m)	
h(j)	: node j の地上からの高さ	(m)	$h(j) = h(j-1) + L(j)$
Di(j)	: section j の胴内径	(m)	
t(j)	: section j の胴板厚	(m)	
E(j)	: section j の縦弾性係数	(kN/m ²)	
P	: section j の内圧力	(Pa)	
W(j)	: node j の集中重量	(kN)	
w(j)	: section j の分布重量	(kN/m)	
I(j)	: section j の断面2次モーメント	(m ⁴)	$I(j) = \frac{\pi}{64} \{ (Di(j) + 2t(j))^4 - Di(j)^4 \}$
EI(j)	: section j の剛性	(kN·m ²)	$EI(j) = E(j) \cdot I(j)$

j	node Data	$h(j)$					$W(j)$			
	section Data	$L(j)$	$D_i(j)$	$t(j)$	$E(j)$	P		$w(j)$	$I(j)$	$EI(j)$
5	node T	16.898					0.472			
	section T-S	0.4	0.609	0.009	1.906E+08	1.500E+06		7.575	8.344E-04	1.590E+05
4	node S	16.498					12.363			
	section S-A	2.794	0.609	0.0074	1.906E+08	1.500E+06		1.908	6.807E-04	1.297E+05
3	node A	13.704					0			
	section A-B	0.2	0.72	0.01	6.374E+05	1.500E+06		2.65	1.528E-03	9.740E+02
2	node B	13.504					0			
	section B-K	1.504	0.609	0.0074	1.906E+08	1.500E+06		1.7932	6.807E-04	1.297E+05
1	node K	12								

5.6 地震力の算定

- h(j) : node j の高さ (m)
- L(j) : section j の長さ (m)
- W(j) : node j の集中重量 (kN)
- w(j) : section j の分布重量 (kN/m)
- $K_{SHn}(j)$: node j の静的震度 (-)
- $K_{SHs}(j)$: section j の静的震度 (-)
- F(j) : node j の集中地震力 (kN)
- p(j) : section j の分布地震力 (kN/m)

j	node Data	h(j)		W(j)		K_{SHn}	F(j)	
	section Data		L(j)		w(j)	K_{SHs}		p(j)
5	node T	16.898		0.472		0.308082	0.145415	
	section T-S		0.4		7.575	0.306282		2.320086
4	node S	16.498		12.363		0.304482	3.764311	
	section S-A		2.794		1.908017	0.3		0.572405
3	node A	13.704		0		0.3	0	
	section A-B		0.2		2.65	0.3		0.795
2	node B	13.504		0		0.3	0	
	section B-K		1.504		1.793218	0.3		0.537965
1	node K	12				0.3		

5.7 応答計算

- L(j) : section j の長さ (m)
- El(j) : section j の剛性 (kN・m²)
- F(j) : node j の集中荷重 (kN)
- p(j) : section j の分布荷重 (kN/m)
- S(j) : node j に作用するせん断力 (kN) $S(j) = S(j+1) + F(j) + L(j+1) \cdot p(j+1)$
- M(j) : node j に作用するモーメント (kN・m) $M(j) = M(j+1) + L(j+1) \cdot \left[\frac{L(j+1) \cdot p(j+1)}{2} + S(j+1) \right]$
- (j) : node j の変位増分 (m) $\delta(j) = \frac{L(j)^2}{E(j)I(j)} \left\{ L(j) \cdot \left[\frac{p(j)L(j)}{8} + \frac{S(j)}{3} \right] + \frac{M(j)}{2} \right\}$
- (j) : node j の角度増分 (radian) $\theta(j) = \frac{L(j)}{E(j)I(j)} \left\{ L(j) \cdot \left[\frac{p(j)L(j)}{6} + \frac{S(j)}{2} \right] + M(j) \right\}$
- (j) : node j の変位 (m) $\Delta(j) = \Delta(j-1) + L(j) \cdot \Theta(j-1) + \delta(j)$
- (j) : node j の角度 (radian) $\Theta(j) = \Theta(j-1) + \theta(j)$

j	node Data			F(j)		S(j)	M(j)	(j)	(j)	(j)	(j)
	section Data	L(j)	El(j)		p(j)						
5	node T			0.14541		0.14541	0	6.62E-08	2.29E-07	0.012736	0.003845
	section T-S	0.4	159031.4		2.32009						
4	node S			3.76431		4.83776	0.24377	0.000312	0.000167	0.011198	0.003845
	section S-A	2.794	129737.3		0.57241						
3	node A			0		6.43706	15.9947	0.000346	0.003418	0.000609	0.003678
	section A-B	0.2	973.9575		0.795						
2	node B			0		6.59606	17.298	0.000211	0.00026	0.000211	0.00026
	section B-K	1.504	129737.3		0.53797						
1	node K					7.40516	27.8269	0	0	0	0

5.8 耐震性能評価

5.8.1 応答解析結果

常用の圧力	P =	1.500	(MPa)
伸縮継手に作用する最大せん断力	S _{EX} =	6.437	(kN)
伸縮継手に作用する最大曲げモーメント	M _{EX} =	15.995	(kN・m)
伸縮継手の軸方向変位	X =	0.000	(mm)
伸縮継手の横変位	=	0.346	(mm)
伸縮継手の曲げ角度	=	0.196	(°)

5.8.2 最大応力の算出

$$\max : \text{最大発生応力 } \sigma_{\max} = \frac{0.75E_b t}{\left(\frac{q}{2}\right)^{0.5} W^{1.5}} e + \frac{P}{2n} \left(\frac{W}{t}\right)^2 \quad \max = 1322 \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここに、

d : 伸縮継手端末部の外径	d =	0.61	(m)
W : 伸縮継手の山の高さ	W =	0.11	(m)
n : 伸縮継手の層数	n =	1	(m)
t : 伸縮継手1層の呼び厚さ	t =	0.01	(m)
N : 伸縮継手の山数	N =	1	(-)
q : 伸縮継手山ピッチ	q =	0.2	(m)
E _b : 伸縮継手材料の設計温度における縦弾性係	E _b =	1.906E+08	(kN/m ²)
d _p : 伸縮継手の平均径	d _p =	0.720	(m)
e : 伸縮継手の全山動き量 $e = e_x + e_y +$	e =	9.94	
e _x :	$e_x = 2 \frac{\Delta\chi}{N}$	e _x =	0.00 (mm)
e _y :	$e_y = 2 \frac{3d_p \Delta\delta}{Nq - \Delta\chi}$	e _y =	7.48 (mm)
e :	$e_x = 2 \frac{d_p \Delta\theta}{2N}$	e =	2.46 (mm)

5.8.3 評価

max : 最大発生応力	max =	1322	(N/mm ²)
2Sa : 伸縮継手の耐震設計用許容応力 (SUS304,427 以下)	2Sa =	2040	(N/mm ²)

よって、

$$\max = 1322 \quad 2Sa = 2040 \quad (\text{N/mm}^2) \quad \text{合格}$$

6 . さいごに

今回は、伸縮継手を有する塔類の耐震設計法を説明した。事例では静的震度法について示したが、紹介した計算モデルはそのまま、修正震度法でもモード解析法（たとえば SEISMIT-TW）でも、いずれの応答計算法にでも適用できるものである。

$E_e/E_b < 10^{-4}$ の場合は伸縮継手の変形が大きくなるため、振れ止めを設置する等の構造的工夫が必要である。振れ止めを設置する場合やその他の構造的工夫については別途機会を設けて解説したい。