

## 1. はじめに

設計実務において、鉄骨造および CFT 造における柱の座屈長さは日本建築学会「鋼構造塑性設計指針<sup>1)</sup>」(以下、塑性設計指針)により評価される場合が多い。塑性設計指針では、「柱頭の水平移動が拘束される場合」と「柱頭の水平移動が拘束されない場合」に分類して評価が行われる。しかしながら実際の構造物においては、水平移動の拘束の有無に関して判断基準が明確でない点や、水平移動が拘束されないと判断した場合の座屈長さが節点間距離の3倍にも達する等といった実情に即しない場合も生じる<sup>2)</sup>。

そこで本研究では、既往の規準・指針および文献を基に比較を行い、座屈長さの評価方法について考察した。

## 2. ラーメンの柱材の座屈長さ

### 2.1 座屈長さの評価方法

塑性設計指針<sup>1)</sup>、日本建築学会「鋼構造座屈設計指針<sup>3)</sup>」(以下、座屈設計指針)、「鋼構造設計規準<sup>4)</sup>」では、ラーメンの柱材の座屈長さは、原則的には骨組の座屈解析による精算により求め

ることとされているが、略算により求める方法も併せて示されている。これは、a)実務において、座屈解析は計算が煩雑なこと、b)水平移動が拘束されている場合、座屈長さ $l_k$ は節点間距離 $h$ を超えることが無いため $l_k=h$ とすれば安全側の評価となること<sup>1)</sup>、c)また純ラーメンでも、地震力・風力などの水平力にラーメン自身で抵抗するように設計するため、柱の細長比はあまり大きくなり、結果的に座屈耐力に及ぼす影響は小さくなり、略算式によって近似的に求めれば十分と判断されるためである<sup>4)</sup>。

### 2.2 座屈長さの略算による評価方法

ラーメンの柱材の座屈長さは、一般に水平移動の拘束の有無により分類して評価される<sup>1), 3)~5)</sup>。この分類に関して、座屈設計指針では「筋かい付きラーメン骨組に組み込まれている場合(図1(a)参照)や、壁などを有する横移動の拘束された骨組と剛性の大きい床版で結合されたラーメン骨組の場合」には、横方向への節点の移動は拘束されていると見なすことができるとし、一方「純ラーメン骨組(図1(b)参照)」は横移動が拘束され

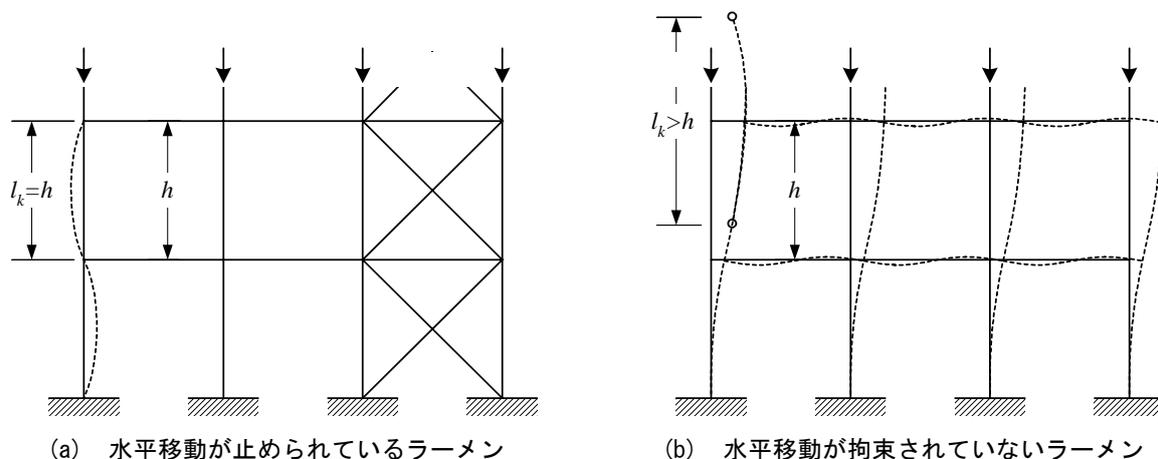


図1 座屈モードと座屈長さ

ていないラーメンと分類している。

しかしながらこの分類では、柱の座屈長さの評価に関して、前者ではブレース等の水平剛性の負担割合に関わらず水平拘束を100%期待し、後者では周辺骨組の水平剛性を無視して水平拘束を0と考えることになり、骨組の実状を充分反映しているとは考えにくい。よって周辺骨組の拘束力を適切に反映した評価方法を用いる必要がある。

### 2.3 「鋼構造塑性設計指針」による評価法

単純な支持条件を持つ圧縮材の座屈長さは表1のようになることが良く知られている<sup>6)</sup>。支持条件が同じ場合、水平移動が拘束された場合に対して、水平移動が自由になると座屈長さは2倍以上になることがわかる。

塑性設計指針のラーメンの柱材の座屈長さは水平移動の拘束の有無により以下のように評価される。

$$l_k = \eta \cdot h \quad (1)$$

ここで、 $l_k$  : 座屈長さ、 $\eta$  : 座屈長さ係数、 $h$  : 節点間距離である。

$\eta$  は近似的に(2), (3)式によって求められる。

- 水平移動が拘束される場合

$$\frac{G_A G_B \left(\frac{\pi}{\eta}\right)^2}{4} + \left(\frac{G_A + G_B}{2}\right) \left\{ 1 - \frac{\pi/\eta}{\tan(\pi/\eta)} \right\} + \frac{2 \tan(\pi/2\eta)}{\pi/\eta} = 1 \quad (2)$$

- 水平移動が拘束されない場合

$$\frac{G_A G_B (\pi/\eta)^2 - 36}{6(G_A + G_B)} = \frac{\pi/\eta}{\tan(\pi/\eta)} \quad (3)$$

(2), (3)式において  $G$  は

$$G = \frac{\sum I_c / h}{\sum I_g / l} \quad (4)$$

$G$  の添え字の  $A, B$  は柱の両端の節点を示し、 $I_c, h$  は柱部材の  $I_g, l$  は梁部材の断面2次モーメントと長さ、 $\Sigma$  は節点に集まる部材についての和を表している。ここで理論的には  $G$  の値は、柱端がピンの場合には無限大、柱端が固定の場合には0となるが、塑性設計指針ではそれぞれ  $G=10, G=1$  を採ることになっている。

(2)式による評価では、 $\eta$  は1.0を超えることはないため、設計上は安全側の評価として横移動が拘束されているラーメンの柱材の座屈長さは節点間距離とすることができる。一方、(3)式による評価では、 $\eta$  は1.0より小さくなることはないため、横移動が拘束されていない場合には座屈長さが節点間距離を下回ることはない。

なお、塑性設計指針による方法は、均等ラーメンを対象にし、骨組の全ての柱が同時に座屈すると仮定されているものであり、不均等ラーメンに適用すると誤差が大きい場合があることから、座屈設計指針に不均等ラーメンに対する座屈長さの評価方法が紹介されている。しかしながら明示的な形で定式化されていないこと、吹き抜け柱の

表1 圧縮材の座屈長さ<sup>6)</sup>

水平移動の拘束条件 材端の支持条件	拘束			自由	
	両端ピン	一端ピン, 他端固定	両端固定	一端ピン, 他端固定	両端固定
座屈形					
$l_k$	$h$	$0.7h$	$0.5h$	$2h$	$h$
(2), (3) 式	$0.963h$	$0.86h$	$0.774h$	$1.9h$	$1.32h$

取り扱いが明示されていないことなどから実務では不均等ラーメンの座屈長さを明示的に評価する近似式が提案されている。この方法を用いることで移動が拘束されていない不均等ラーメン、吹き抜け柱の座屈長さが評価できる。ただし、柱材の座屈長さは、水平移動の拘束の有無により分類して評価されるため、横移動が拘束されていない場合には、座屈長さは節点間距離を下回ることはない。

表1に示す支持条件の部材の座屈長さを(2),(3)式により求めた結果を表中に併せて示している。塑性設計指針の評価方法では、水平移動が拘束されている場合、両端ピンでは座屈長さが短く評価されるが、一端ピン、他端固定および両端固定では長く評価される。一方水平移動が自由の場合、一端ピン、他端固定では座屈長さが短く、両端固定では長く評価されることがわかる。

## 2.4 周辺骨組の水平剛性を用いた評価法<sup>2)</sup>

周辺骨組の水平剛性を基に水平移動の拘束度を設定し、柱の座屈長さを評価する方法が、文献2)の方法である。以下に文献2)の方法の概要について述べる。

文献2)の方法は、検討対象となる柱が、その柱を除いた骨組により水平方向にバネ支持されていると考え、他の部分骨組による水平方向の拘束

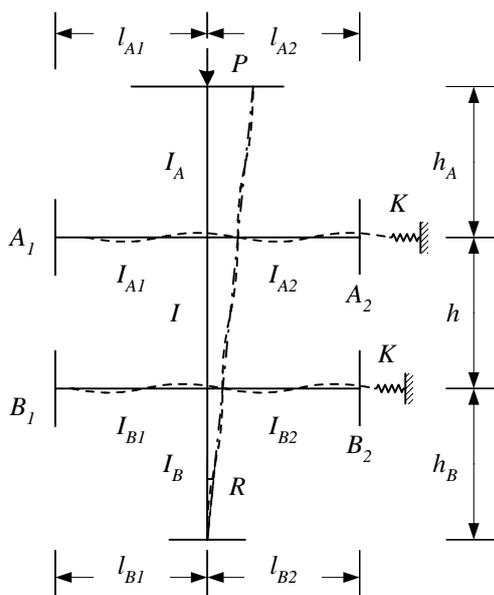


図2 座屈形式

を考慮して柱の座屈長さを評価するものである。

図2に示すように、座屈波形は破線で示すように境界条件として  $\theta_A = \theta_{A1} = \theta_{A2}$ ,  $\theta_B = \theta_{B1} = \theta_{B2}$  と仮定し、柱のせん断力は水平バネと釣り合っているものとする。

この場合の座屈条件式は以下のように表される。

$$\begin{aligned} & (\alpha^2 - \beta^2) \{ 2\gamma - (\delta + \kappa Z_n^2) \} G_A G_B \\ & - 36(\delta + \kappa Z_n^2) \\ & + 6(G_A + G_B) \{ \gamma^2 - \alpha(\delta + \kappa Z_n^2) \} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{Z \sin Z - Z^2 \cos Z}{2(1 - \cos Z) - Z \sin Z}, \quad (6a)$$

$$\beta = \frac{Z^2 - Z \sin Z}{2(1 - \cos Z) - Z \sin Z}, \quad (6b)$$

$$\gamma = \alpha + \beta = \frac{Z^2(1 - \cos Z)}{2(1 - \cos Z) - Z \sin Z} \quad (6c)$$

$$\delta = 2\gamma \cdot Z^2 = \frac{Z^3 \sin Z}{2(1 - \cos Z) - Z \sin Z} \quad (6d)$$

$$Z = h \sqrt{\frac{P}{EI}} = \frac{\pi}{\eta} \quad (7)$$

ここで、 $\eta$  : 検討対象とする柱の座屈長さ係数。

$$\kappa = \frac{K}{K_n}, \quad K_n = \frac{P_{ncr}}{h} \quad (8)$$

ここで、 $\kappa$  : 補剛剛性比、 $K$  : 水平補剛剛性、 $P_{ncr}$  : 柱頭が水平移動しないとした時の柱の座屈荷重。

$$Z_n = \frac{\pi}{\eta_n} \quad (9)$$

ここで、 $\eta_n$  : 柱頭が水平移動しないとした場合の柱の座屈長さ係数。

$$\begin{aligned} G_A &= \frac{(I/h) + (I_A/h_A)}{(I_{A1}/l_{A1}) + (I_{A2}/l_{A2})}, \\ G_B &= \frac{(I/h) + (I_B/h_B)}{(I_{B1}/l_{B1}) + (I_{B2}/l_{B2})} \end{aligned} \quad (10)$$

具体的には、以下の手順で座屈長さを求める。

- ① 検討対象とする柱の柱頭が水平移動しないとした時の座屈荷重  $P_{ncr}$  と座屈長さ係数  $\eta_n$  を計算する。
- ② 水平補剛剛性 (検討対象柱を除いた骨組の水

平剛性)  $K$  を計算し, ①で求めた  $P_{ncr}$  を用いて (8)式により補剛性比  $\kappa$  を算定する。

③ ①, ②で求めた値を用いて(6)式の  $\alpha, \beta, \gamma, \delta$  に含まれる  $Z$  の解を求める。

④ (7)式により検討対象とする柱座屈長さ係数  $\eta$  が求まる。

この方法によれば, 周辺骨組の構造形式 (純ラーメン, ブレース付等) に関わらず柱の座屈長さが評価可能である。

## 2.4 周辺骨組に必要とされる水平剛性

前節に示した文献2)の方法を用いて, 設計時に想定した柱の座屈長さとするために必要となる周辺骨組の必要剛性を求める方法を示す。

### a) 両端固定支持の柱

ここではまず(8)式で示した補剛性比  $\kappa$  は, 周辺骨組の水平補剛性  $K$  と  $K_n$  の比で表されていることから, 一般の利用性を考えて,  $K$  と検討対象とする柱の水平剛性  $K_c$  との関係で表す。

$$P_{ncr} = \frac{\pi^2 EI}{l_k^2} = \frac{\pi^2 EI}{(\eta_n \cdot h)^2} \quad (11)$$

一方両端固定の柱の水平剛性  $K_c$  は,

$$K_c = \frac{12EI}{h^3} \quad (12)$$

(11), (12)式を(8)式に代入すると, 水平補剛性  $K$  と検討対象とする柱の水平剛性  $K_c$  との比  $K/K_c$  は次式で表せる。

$$\frac{K}{K_c} = \frac{\pi^2}{12\eta_n^2} \quad (13)$$

### b) 一端ピン, 他端固定支持の柱

一端ピン, 他端固定支持の柱の水平剛性  $K_c$  は,

$$K_c = \frac{3EI}{h^3} \quad (14)$$

(12), (15)式を(8)式に代入すると, 水平補剛性  $K$  と検討対象とする柱の水平剛性  $K_c$  との比  $K/K_c$  は次式で表せる。

$$\frac{K}{K_c} = \frac{\pi^2}{3\eta_n^2} \quad (15)$$

### c) 周辺骨組の必要水平剛性の検討結果

座屈長さ係数  $\eta$  と周辺骨組の水平剛性  $K$  と柱

の水平剛性  $K_c$  との比  $K/K_c$  との関係を図3に示す。ここで  $K/K_c=0$  の時の  $\eta$  は, 水平移動自由の値であり, (3)式と一致する。

$\eta$  を水平移動自由とした値から水平移動固定の値へと小さくするに従い  $K/K_c$  は大きくなり, 勾配も急になる。このことは, 僅かでも周辺骨組の水平剛性が期待できれば, 柱の座屈長さは塑性設計指針の(3)式から求まる水平移動を自由とした座屈長さより短くなる

また, 両端固定の柱は  $K/K_c \geq 1$ , 一端ピン, 他端固定の柱は  $K/K_c \geq 4$  程度の水平剛性が確保されれば  $\eta=1.0$ , つまり  $l_k=h$  とする拘束条件が得られるものと考えられる。

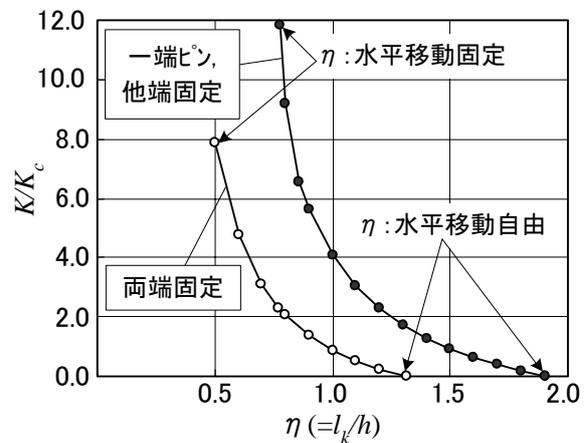


図3  $K/K_c$  と  $\eta$  との関係

## 3. まとめ

本研究では, 既往の規準・指針および文献を基に, 座屈長さの評価方法ならびに適用範囲について考察した。

その結果, 設計時に想定した柱の支持条件による座屈長さとするために必要となる周辺骨組の必要剛性を求める一方法を示した。

### 「参考文献」

- 1) 日本建築学会：鋼構造塑性設計指針
- 2) 木村衛, 他：骨組の水平剛性が骨組内柱材の座屈長さを与える影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1995.8
- 3) 日本建築学会：鋼構造座屈設計指針
- 4) 日本建築学会：鋼構造設計規準
- 5) 柴田道生：吹き抜け柱の座屈長さ, 日本建築学会構造系論文集, 第567号, 133-139, 2003/03
- 6) 高梨晃一, 福島暁男：最新鉄骨構造, 森北出版