

座屈現象における破壊確率算定への効率化モンテカルロ法の適用

中央大学理工学部土木工学科 ○学生会員 金子 裕明

中央大学土木工学科 正会員 佐藤 尚次

1. 研究の目的

性能設計の考え方の中で、信頼性の果たす役割への期待が大きくなっている。

一般に構造物の信頼性は「ある設計条件のもと」完成された断面寸法、あるいは構造形状がどのような破壊確率を持つかによって論じられる。技術設計条件のもとでの寸法等の決定に際しては、信頼性的知見が適用されることは少ない。

しかし、設計条件を構成する個々の限界状態は設計自由度に含まれる種々の寸法に支配されるものであり、断面のどの部分をどういじったら、限界状態のどれがどう影響されるのかという因果関係を知ることは、設計エキスパート育成上、重要な知識といえる。

通常その関係は確定論的に示されることが多い分、ここにも信頼性を用いることができる。本研究はその一例を示すものである。

2. 評価方法

図-1 に示す矩形箱型断面柱の軸力モデルに対し、表-1 に示すように、断面寸法、荷重 P 、許容応力 σ_y の全てを正規分布する確率変数としてモデル化し、限界状態の

$$\text{全体座屈: } \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \begin{cases} 1.0 [\lambda \leq 0.2] \\ 1 - 0.545(\lambda - 0.2) [0.2 < \lambda \leq 1] \\ \frac{1}{\lambda^2 + 0.773} [1 < \lambda] \end{cases}$$

$$\left(\begin{array}{l} \lambda = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l_e}{r} \quad , \quad \begin{array}{l} \sigma_y : \text{降伏点応力} \\ l_e : \text{有効座屈長} \\ r = \sqrt{I/A} : \text{断面 2 次半径} \end{array} \end{array} \right)$$

局部座屈:

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \begin{cases} 1.0 [R \leq 0.5] \\ 0.390 (R - 0.5)^2 - 0.911 (R - 0.5) + 1 [0.5 < R \leq 1.0] \\ -0.146 R + 0.015 / (R - 0.8) + 0.713 [1.0 < R \leq 2.1] \end{cases}$$

$$\left(\begin{array}{l} R = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k_\sigma}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{b}{t} \quad , \quad \begin{array}{l} k_\sigma : \text{座屈係数}(k_\sigma = 4) \\ \nu : \text{ポアソン比}(\nu = 0.3) \\ t : \text{板厚} \\ b : \text{板の幅} \end{array} \end{array} \right)$$

に対する破壊確率を求めたい。各寸法の諸元基準値を変えて、その信頼性に及ぼす感度を求める。

また、図-2 に示すプレートガーダーについても、同様に問題を設定した。限界状態は

$$\text{全体座屈: } \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \begin{cases} 1.0 [\alpha \leq 0.2] \\ 1 - 0.412 (\alpha - 0.2) [0.2 < \alpha \leq \sqrt{2}] \\ \frac{1}{\alpha^2} [\sqrt{2} < \alpha] \end{cases}$$

$$\left(\begin{array}{l} \alpha = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{A_w}{A}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{l}{b} \quad , \quad \begin{array}{l} \sigma_y : \text{降伏点応力} \\ l : \text{固定間距離} \\ b : \text{圧縮フランジプレート幅} \\ A_w : \text{腹板の断面積} \\ A : \text{圧縮フランジプレート断面積} \end{array} \end{array} \right)$$

web 座屈:

$$\frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \begin{cases} 1.0 [R \leq 0.5] \\ 0.080 (R - 0.5)^2 - 0.480 (R - 0.5) + 1.0 [0.5 < R \leq 1.0] \\ 0.470 R^2 - 1.340 R + 1.650 [1.0 < R \leq 1.3] \end{cases}$$

$$\text{flange 局部座屈: } \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_y} = \begin{cases} 1.0 [R \leq 1.0] \\ \frac{1}{R^2} [1.0 < R] \end{cases}$$

$$\left(\begin{array}{l} R = \sqrt{\frac{\sigma_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{k_\sigma}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \frac{b}{t} \quad , \quad \begin{array}{l} k_\sigma : \text{座屈係数(フランジ: } 0.425, \text{ web: } 23.9) \\ \nu : \text{ポアソン比}(\nu = 0.3) \end{array} \end{array} \right)$$

である。

なお、以下の章で寸法のパラメータ設定中、道示の板厚 8 mm 以上という制限を無視しているが、これはあえて破壊確率 P_f を有意な数値のレベルにするためであり、現行規定の意義の裏づけとなっている。例えば、性能設計に移行し、規制緩和されたとしても、こうした意味での評価が必要となる。

キーワード: 信頼性設計、モンテカルロ法、破壊確率、座屈

連絡先: 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科設計工学研究室

3. モデルについて

下の図・表のような構造を想定する。材料は SM400 を使用し、寸法は以下のものを基準とする。

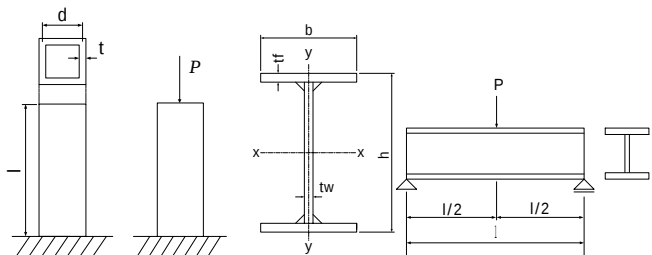


図-1: 矩形断面柱のモデル 図-2: プレートガーダーのモデル

表-1: 矩形断面柱の基準寸法

	d(mm)	t(mm)	l(mm)	P(kN)	降伏点(kN/mm ²)
寸法	300	8	2800	70	234
変動係数	0.001		0.2	0.1	

表-2: プレートガーダーの基準寸法

	tf(mm)	b(mm)	tw(mm)	h(mm)	l(mm)	P(kN)	降伏点(kN/mm ²)
寸法	15	150	6	450	4500	70	234
変動係数	0.001				0.2	0.1	

4. 計算結果

4.1. 矩形断面柱

表-3: d の寸法を変えたとき

寸法:	破壊	破壊の割合 (%)	
d(mm)	確率	全体座屈	局部座屈
280	1.93E-03	100.00	0.00
300	3.18E-04	53.86	46.14
320	7.21E-05	0.20	99.80
340	3.41E-05	0.00	100.00

表-4: t の寸法を変えたとき

寸法:	破壊	破壊の割合 (%)	
t(mm)	確率	全体座屈	局部座屈
9	2.11E-05	100.00	0.00
8	3.18E-04	53.86	46.14
7	1.15E-02	0.01	99.99
6	2.30E-01	0.00	100.00

表-5: l の寸法を変えたとき

寸法:	破壊	破壊の割合 (%)	
l(mm)	確率	全体座屈	局部座屈
2800	3.18E-04	53.86	46.14
2900	3.94E-04	82.57	17.43
3000	4.90E-04	97.51	2.49
3100	6.07E-04	99.95	0.06

4.2. プレートガーダー

表-6: t_w の寸法を変えたとき

寸法:	破壊	座屈破壊の割合 (%)		
tw(mm)	確率	全体	web	flange
5	9.78E-05	100.00	0.00	0.00
4	1.49E-04	100.00	0.00	0.00
3	8.89E-01	11.15	88.85	0.00

表-7: t_f の寸法を変えたとき

寸法:	破壊	座屈破壊の割合 (%)		
tf(mm)	確率	全体	web	flange
15	6.37E-05	100.00	0.00	0.00
10	5.13E-02	100.00	0.00	0.00
8	2.83E-01	100.00	0.00	0.00
7	4.99E-01	100.00	0.00	0.00
6	7.28E-01	83.03	0.00	16.97

5. 考察

5.1. 矩形断面柱

表-3より、板厚中心間隔 d を増やした場合、破壊確率が減少しているが、破壊の内容は全体座屈から局部座屈に移っており、必ずしも安全であるとはいえない。

表-4より、板厚 t を下げると破壊確率は徐々に上昇していく。破壊形態は全体座屈から局部座屈へと遷移しており、この境は破壊確率の変化も早い。

表-5より、部材長 l を長くすることは徐々に局部座屈の可能性を下げるにつながらるが、全体座屈や降伏による破壊確率も上昇していくことになる。

5.2. I 型断面プレートガーダー

表-6、表-7 より横ねじれ座屈に比べて、フランジ、腹板の座屈は非常に起こりにくいこともわかる。

腹板の座屈は腹板の厚さ t_w がある値になるまではほとんどその姿を見せないが、フランジの座屈に至っては横ねじれ座屈による破壊に混じって姿を見せる程度で、それ単独生じることはまれな様である。

6. まとめ

以上から、個々の寸法の決定が断面の破壊確率とアクティブな限界状態にどう影響するかを定量的に示すことができた。

参考文献

- 1) 長尚、基礎知識としての構造信頼性設計、山海堂
- 2) 熱田稔雄・当麻庄司、座屈のはなし、鹿島出版会
- 3) 橋善雄、橋梁工学第5版、共立出版
- 4) 座屈設計ガイドライン、土木学会