

# 面内曲げを受ける腹板の水平補剛材の配置と長さに関する数値的検討

A parametric study for location and length of the longitudinal stiffeners in web panels under in-plane bending

田淵航\*  
Ko TABUCHI

\*構造強度学研究室（指導教員：山本剛大 助教）

一般に鈹桁橋の主桁では、曲げモーメントから生じる圧縮応力によって、垂直補剛材間で腹板が局部的に座屈する。このような座屈を効果的に防ぐためには水平補剛材を適切に配置することが望ましい。水平補剛材の取り付け位置に関して、道路橋示方書には繰り返し計算に基づく設計指針が明記されているが、その長さに関しては明確な基準が設定されていない。そこで、本研究では水平補剛材の長さや座屈強度との関係について、汎用有限要素解析ソフトウェアを用いて検討し、水平補剛材の短縮が座屈強度の低下に与える影響は腹板パネルのアスペクト比に依存することを示した。

**Key Words:** longitudinal stiffener, linear buckling analysis, finite element method

## 1. 序論

本研究で取り上げる腹板を含め、鋼構造部材には経済性の観点からしばしば薄肉構造が用いられる。しかし、薄い鋼板を用いて断面を構成すると、座屈強度が著しく低下することが知られている。そこで座屈強度の向上を目的として適切な剛度を持つ補剛材が導入される。これにより、補剛材で囲まれた部分の局部座屈が板全体の座屈よりも先に生じるようになる。局部座屈を誘発するために必要な補剛材の剛比は必要剛比と呼ばれる。補剛材の座屈は解析的手法<sup>1)</sup>で評価されることが多いが、近年では、複雑な形状や荷重条件に対して、数値的手法が適用されている<sup>2)</sup>。

水平補剛材や垂直補剛材の効果的な配置や間隔は、有限要素法を用いて検討されている。例えば、Alinia & Moosavi<sup>2)</sup>は、面内曲げを受ける腹板の水平補剛材の最適配置と寸法について、汎用有限要素解析ソフトウェアを用いたパラメトリックスタディにより、腹板のアスペクト比と水平補剛材の必要剛比との相関を示し、AASHTO<sup>3)</sup>が推奨する基準と比較している。また、水平補剛材の最適位置と剛比の相関についても考察している。

日本の道路橋示方書では、繰り返し計算に基づいて水平補剛材の取り付け位置が定められている。しかし、その長さについては、道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編<sup>4)</sup>に「水平補剛材は垂直補剛材間になるべく幅広く設けるのがよい。しかし、垂直補剛材を通して連続させたり垂直補剛材と密着させる必要はない。」と記述されており、具体的な基準が設けられていない。そこで、本研究では、汎用有限要素解析ソフトウェアを用いて、様々なアスペクト比や補剛材剛比を有する腹板モデルに対して線形座屈解析を行い、水平補剛材の長さや座屈強

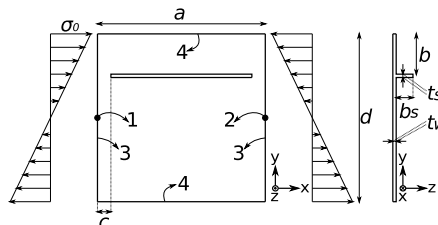


図-1 面内曲げを受ける補剛板

表-1 境界条件

	$U_x$	$U_y$	$U_z$	$\theta_x$	$\theta_y$	$\theta_z$
1	fixed	fixed	fixed	fixed	free	free
2	free	fixed	fixed	fixed	free	free
3	free	free	fixed	fixed	free	free
4	free	free	fixed	free	fixed	free

度との関係について検討する。

## 2. モデルの設定と解析方法

本研究では、汎用有限要素解析ソフトウェアを用いて、図-1に示すような純曲げを受ける単純支持補剛材の線形座屈解析を行う。図-1において、 $a$ は腹板の幅（垂直補剛材の間隔）、 $d$ は腹板の高さ、 $b$ は水平補剛材の圧縮縁からの距離、 $c$ は水平補剛材の片側省略長さ、 $t_w$ は腹板の厚さ、 $t_s$ は補剛材の厚さ、 $b_s$ は補剛材の高さを表す。これらのパラメータの内、 $a/d$ 、 $b/d$ 、 $c/a$ 、 $t_s$ を様々に変化させ、座屈強度との相関を検討する。板のモデル化にはMindlin-Reissnerの板理論に基づく4節点弾性板要素を使用した。また、 $1[m] \times 1[m]$ の無補剛材について、要素細分化と計算精度との関係を検証し、一辺の長さが $5[mm]$ の格子分割要素を採用した。境界条件は表-1に示す通りであり、 $U_x$ 、 $U_y$ 、 $U_z$ はそれぞれ $x$ 、 $y$ 、 $z$ 方向の並進自由度、 $\theta_x$ 、 $\theta_y$ 、 $\theta_z$ は

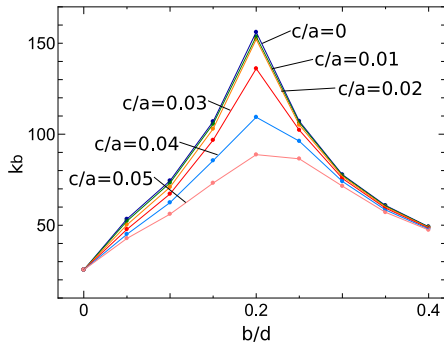


図-2  $k_b$  と  $b/d$  との関係 ( $a/d=1$ ,  $\gamma=146$ )

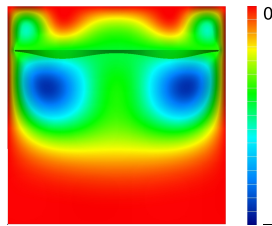


図-3  $a/d=1$ ,  $\gamma=146$ ,  
 $c/a=0.03$ ,  $b/d=0.2$  の  
時の面外方向変位図

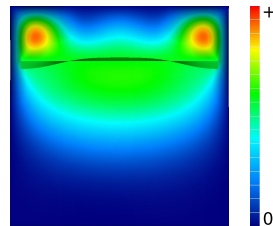


図-4  $a/d=1$ ,  $\gamma=146$ ,  
 $c/a=0.05$ ,  $b/d=0.25$  の  
時の面外方向変位図

それぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  軸周りの回転自由度を表している。Alinia & Moosavi<sup>2)</sup>に倣い、ヤング率  $E=210$ [MPa], ポアソン比  $\nu=0.3$ ,  $t_w=3$ [mm],  $t_s=5$ [mm] とした。最大圧縮応力  $\sigma_0$  に着目すると、座屈応力  $\sigma_{0cr}$  は

$$\sigma_{0cr} = k_b \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{t_w}{d} \right)^2 \quad (1)$$

と表される<sup>5)</sup>。ここで、 $k_b$  は座屈係数である。本研究では数値解析によって得られた座屈応力を、座屈係数に換算して結果を整理する。また、補剛材剛比  $\gamma$  は

$$\gamma = \frac{EI_s}{dD} \quad (2)$$

と表される。ここで、 $I_s$  は腹板の表面に関する補剛材の断面二次モーメント、 $D$  は平板の曲げ剛性を表しており、

$$D = \frac{Et_w^3}{12(1-\nu^2)} \quad (3)$$

である。

### 3. 結果と考察

図-2 は、高さ 6[cm] の補剛材を有する 1[m]×1[m] の正方形板における補剛材の位置と座屈係数との関係を  $c/a$  ごとに表したものである。図中のピークの左側 ( $0 \leq b/d < 0.2$ ) では、補剛材と引張縁で囲まれた部分で局部座屈が生じ、ピークの右側 ( $0.2 < b/d \leq 0.4$ ) では、補剛材と圧縮縁で囲まれた部分で局部座屈が生じる。ピーク周辺ではその両方の領域で局部座屈が生じる遷移的な段階が存在する。また、 $c/a$  の値を徐々に増加させていくと、ある値から座屈強度の著しい低下が観測される。これは  $c/a$  がある値以上になると、座屈強度が最大になる  $b/d=0.2$  付近で図-3, 4 に示すような全体座屈と局部

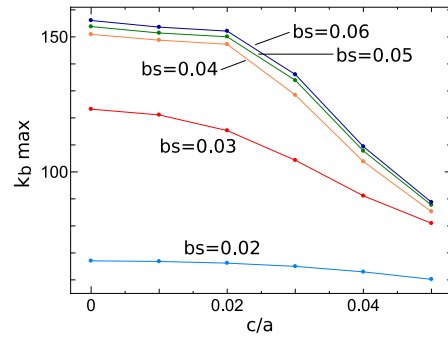


図-5  $k_b$  の最大値と  $c/a$  との関係 ( $a/d=1$ )

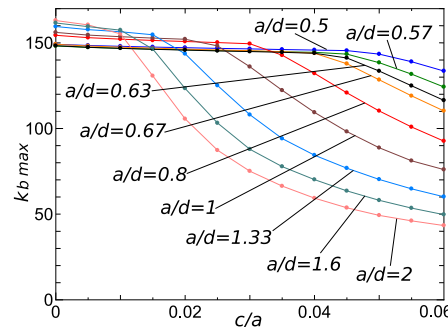


図-6  $k_b$  の最大値と  $c/a$  との関係 ( $a=1$ [m],  $I_s=36$ [cm<sup>4</sup>])

座屈が混在する座屈モードが生じるためであると考えられる。図-5 は 1[m]×1[m] の正方形板における  $c/a$  と、補剛材の位置が変化する際の  $k_b$  の最大値  $k_{bmax}$  との関係を補剛材剛比ごとに表したものである。この結果は、 $0.02 \leq c/a \leq 0.03$  の範囲で  $c/a$  の増加に伴って  $k_{bmax}$  が明らかに低下することを示している。また、この傾向は補剛材剛比が大きい時に明確に現れる。図-6 は  $c/a$  と  $k_b$  の最大値との関係を腹板のアスペクト比ごとに表したものである。アスペクト比が大きいほど座屈強度の明らかな低下が見られない  $c/a$  の上限の値が小さくなることが確認できる。

### 4. 結論

汎用有限要素解析ソフトウェアを用いたパラメトリックスタディにより、アスペクト比と  $c/a$  の相関を示した。ただし、実設計に役立てるためには材料の塑性化やせん断応力などを考慮する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 大村裕, 吉浪康行: 補剛板の座屈に及ぼす補剛材の偏心とねじれ剛性の影響について, 土木学会論文報告集, 第 267 号, 1977.
- 2) Alinia, M.M., Moosavi, S.H.: A parametric study on the longitudinal stiffeners of web panels, *Thin-Walled Structures* 46, 2008.
- 3) AASHTO: Standard specification for highway bridges, 16th ed, 1996.
- 4) 公益社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017.
- 5) 池田清宏, 室田一雄: 構造系の座屈と分岐, コロナ社, 2001.

(2019 年 2 月 5 日 提出)