

論文 / 著書情報
Article / Book Information

論題(和文)	圧縮力を受ける冷間成形リップ溝形断面部材の弾性座屈耐力に及ぼす端部境界条件の影響
Title(English)	Effect of End Boundary Conditions on Elastic Buckling Strength of Cold-Formed Lipped Steel Channel Members under Compression
著者(和文)	光廣 日向子, 五十嵐規矩夫, 三井 和也, 小橋 知季, 桑田 涼平
Authors(English)	Hinako Mitsuhiro, Kikuo Ikarashi, Kazuya Mitsui, Tomoki Kobashi, Ryohei Kuwada
出典(和文)	日本建築学会大会学術講演梗概集, , pp. 731-732
Citation(English)	Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, , pp. 731-732
発行日 / Pub. date	2022, 7
権利情報	一般社団法人 日本建築学会

圧縮力を受ける冷間成形リップ溝形断面材の弾性座屈耐力に及ぼす端部境界条件の影響

正会員 ○光廣 日向子*¹ 正会員 小橋 知季*⁴
同 五十嵐規矩夫*² 同 桑田 涼平*⁴
同 三井 和也*³

薄板軽量形鋼 エネルギー法 ゆがみ座屈
有限帯板法 座屈耐力 座屈モード

1. 序

既往の文献において圧縮力を受ける冷間成形リップ溝形断面材の弾性座屈耐力は有限帯板法、有限要素法やエネルギー法により導出されている^{1)~3)}。これら各手法により導出されている座屈耐力は端部境界条件や材長の影響を受けているものの、これらの関係性については不明確な場合も多い。そこで本研究では有限帯板法、エネルギー法、有限要素法による数値解析結果を比較し、各手法を用いて端部境界条件および材長が弾性座屈耐力に及ぼす影響について明らかにする。

2. 各種解析概要

まず、エネルギー法に基づく理論解析によりリップ溝形断面材の各板要素の両端が単純支持の場合、固定支持の場合の弾性圧縮座屈耐力を算定した^{2), 3)}。両端単純支持の弾性局部座屈耐力は文献 2)、両端単純支持、両端固定支持の弾性ゆがみ座屈耐力は文献 3)のエネルギー法による数値解析結果を用いた。両端固定支持の弾性局部座屈耐力は表 1 の式(1)~(4)に示す変位関数により座屈モードを仮定し、式(5)~(11) に示すエネルギー式を用いて算定した。表 2 に本論文で使用する記号の定義を示している。次に座屈変位関数として正弦半波を使用する有限帯板法(FSM)により弾性座屈耐力を計算した。ここでは有限帯板法による数値解析ソフト CUFSM¹⁾を用いた。なお FSM は米国における最大耐力算出手法である Direct Strength Method に用いられている。また、エネルギー法や有限帯板法と異なり座屈モードを仮定しない解析手法として有限要素法(FEM)による固有値解析を行った。ここでは有限要素法プログラム ABAQUS を用いた。各板要素の端部境界条件は図 1 に示すように両端単純支持の場合と両端固定支持の場合の 2 種について検討した。両端単純支持の場合は端部に剛体を設けず、断面の応力が一定となるように端部の各節点に力を加えている。その際、端部ウェブ部分は z 方向の変位を固定し、端部フランジ部分は x 方向の変位を固定している。両端固定支持の場合は端部に剛体を設け、剛体の参照点に力を加えている。また端部剛体の x 軸(弱軸)まわりの回転は許容している。

各手法における板要素の端部境界条件をまとめると、有限帯板法では単純支持のみ¹⁾、エネルギー法および有限要素法では単純支持、固定支持の 2 種を検討している。

3. 両端単純支持の場合の各種解析結果の比較

図 2 に前節で述べた各種解析のうち端部境界条件を単純

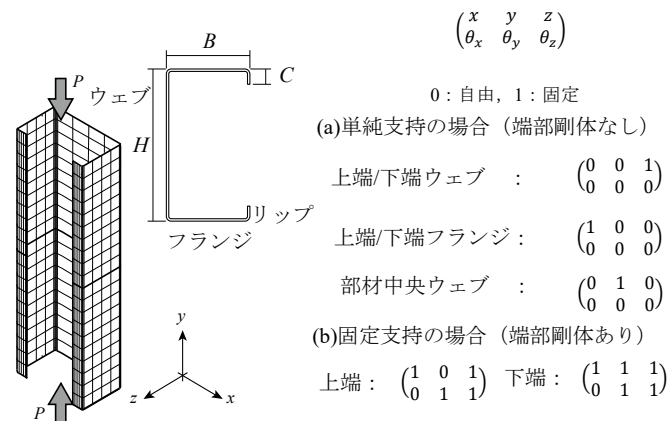


図 1 各モードおよび有限要素法の端部境界条件

表 1 板端部固定支持条件下で発生する局部座屈のエネルギー式一覧

材長方向変位関数 : $\mu_k(y) = \sin \frac{\pi y}{L} \sin \frac{k\pi y}{L}$	(1)
ウェブ変位関数 : $w(x,y) = \mu_k(y) \left[l_a \sin \frac{\pi x}{b_w} + l_b \left(1 + \cos \pi \left(\frac{2x}{b_w} - 1 \right) \right) \right]$	(2)
フランジ変位関数 : $f(y,z) = \pm \mu_k(y) \left(l_c \sin \frac{\pi z}{b_f} + l_d \sin \frac{(b_f - z)^2 \pi}{b_f^2} \right)$	(3)
リップ変位関数 : $l(x,y) = \mp \frac{\pi}{b_f} l_c \mu_k(y) x$	(4)
$4U_1 + 4U_2 + 4U_3 = 4T_1 + 4T_2 + 4T_3$	(5)
$4U_1 = \frac{D}{2} \int_0^L \int_0^{b_w} \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy$	(6)
$4U_2 = \frac{D}{2} \int_0^L \int_0^{b_f} \left[\left(\frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} \right)^2 + 2\nu \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 f}{\partial y \partial z} \right)^2 \right] dz dy$	(7)
$4U_3 = \frac{D}{2} \int_0^L \int_0^C \left[\left(\frac{\partial^2 l}{\partial y^2} \right)^2 + 2(1-\nu) \left(\frac{\partial^2 l}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] dx dy$ (8) $4T_1 = \frac{\sigma_{cr,fix} t}{2} \int_0^L \int_0^{b_w} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 dx dy$ (9)	
$4T_2 = \frac{\sigma_{cr,fix} t}{2} \int_0^L \int_0^{b_f} \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 dz dy$ (10) $4T_3 = \frac{\sigma_{cr,fix} t}{2} \int_0^L \int_0^C \left(\frac{\partial l}{\partial y} \right)^2 dx dy$ (11)	

表 2 記号の定義

H:ウェブ全幅 (mm), B:フランジ全幅 (mm), C:リップ全幅 (mm)
t:板厚 (mm), L:材長 (mm), E:ヤング率 (N/mm²), σ_{Euler} :弾性曲げ座屈応力度, $\sigma_{cr,l}$:有限帯板法による弾性局部座屈耐力, $\sigma_{cr,d}$:有限帯板法による弾性ゆがみ座屈耐力, $b_w = H - t$, $b_f = B - t$, $l_c = C - t/2$

支持とした場合の結果を示す。両端単純支持のエネルギー法により導出した弾性局部座屈耐力 $\sigma_{cr,l, pin}$ を破線で、弾性ゆがみ座屈耐力 $\sigma_{cr,d, pin}$ を実線で示している。図 2(a)-(c)では任意の材長においてエネルギー法により求めた局部座屈耐力 $\sigma_{cr,l, pin}$ 、ゆがみ座屈耐力 $\sigma_{cr,d, pin}$ と全体曲げ座屈耐力 σ_{Euler} のうち小さい方の値は、FEM のプロット(□)と一致している。また図 2(a)-(c)において、材長 L が十分大きい場合、エネルギー法の座屈耐力は FSM の結果(■)のうち小さい方の値に収束している。しかし図 2(d)において、材長が 300~500(mm)の場合、FEM のプロット(□)とエネルギー法

の座屈耐力の最小値である $\sigma_{cr, pin}$ は一致しておらず、FEM のプロット(○)は FSM の結果(■)のうち σ_{crd} に近い。これはエネルギー法³⁾ではゆがみ座屈の変形として図 3(a)のようなウェブとフランジの接合線が移動しない変形を仮定しており、図 3(b)に示すような全体曲げ座屈を伴うゆがみ座屈を仮定していないためである。図 3(b)のような変形が生じない限りエネルギー法の結果、FSM、FEM の結果はほぼ一致するため、両端単純支持の座屈耐力としていずれの解析結果を用いても問題ない。

4. 両端固定支持の場合の各種解析結果の比較

図 4 に 2 節で述べた各種解析のうち端部境界条件を固定支持とした場合の結果を示す。ここでは両端固定支持のエネルギー法による弾性局部座屈耐力 $\sigma_{cr, l, fix}$ を破線で、弾性ゆがみ座屈耐力 $\sigma_{cr, d, fix}$ を実線で示している。また FSM の結果(■)より図 4(a)の断面は $\sigma_{cr, l} < \sigma_{cr, d}$ であることから局部座屈しやすく、図 4(b), (c), (d)の断面は $\sigma_{cr, d} < \sigma_{cr, l}$ であることから、ゆがみ座屈が起きやすい。図 4 より、任意の材長においてエネルギー法により求めた局部座屈耐力 $\sigma_{cr, l, fix}$ 、ゆがみ座屈耐力 $\sigma_{cr, d, fix}$ と全体曲げ座屈耐力 $\sigma_{cr, Euler}$ のうち小さい方の値は FEM のプロット(○)と一致している。ここで材長 L が 100~1500 (mm)の範囲のエネルギー法の結果を FSM の結果(■)と比較、検討する。図 4(a)では $\sigma_{cr, l}$ の値、(b)では $\sigma_{cr, d}$ の値は、検討範囲におけるエネルギー法の結果とおおむね一致している。一方図 4(c), (d)では、 $\sigma_{cr, d}$ の値と検討範囲におけるエネルギー法の結果は異なっている。これはゆがみ座屈は局部座屈と比べ座屈波長が長く、 $\sigma_{cr, d} < \sigma_{cr, l}$ である図 4(c), (d)の断面では特に端部境界条件による影響を受けやすいためであると考えられる。ただし図 4(b)のように $\sigma_{cr, l}$ に比べ $\sigma_{cr, d}$ が著しく小さい場合は FSM の結果(■)とエネルギー法の結果が一致することもある。これより両端固定支持の弾性圧縮座屈耐力として両端単純支持を仮定した有限帯板法の結果を用いることは安全側の評価ではあるが、特にゆがみ座屈が生じやすい断面の場合は両端固定支持の座屈耐力と有限帯板法結果が異なる場合があるため、両端固定支持の座屈耐力を用いることで、より合理的な座屈耐力算定が可能となると考えられる。

5. 結

各板要素の端部境界条件が両端単純支持の場合、有限帯板法およびエネルギー法から得られる冷間成形リップ溝形断面部材の弾性圧縮座屈耐力は、全体曲げ座屈を伴うゆがみ座屈が生じない限り、一致することを確認した。両端固定支持の場合、冷間成形リップ溝形断面部材の弾性圧縮座屈耐力を算定する際は端部境界条件の影響を適切に考慮する必要があることを改めて明らかにした。

参考文献

- 1) American Iron and Steel Institute (AISI): North American Specification for Design of Cold-Formed Steel Structural Members, AISI-S1000, 2007
- 2) 三井和也, 五十嵐規矩夫: 圧縮力が作用する冷間成形溝形断面部材の弾性局部座屈耐力と座屈挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 790 号, pp.1685-1692, 2021.12
- 3) 三井和也, 五十嵐規矩夫, 小橋知季, 桑田涼平: 圧縮力が作用する冷間成形溝形断面部材の弾性ゆがみ座屈耐力と座屈挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 87 巻, 第 791 号, pp.139-148, 2022.1

*1 元 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系 修士 (工学)
 *2 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系 教授・博士 (工学)
 *3 東京工業大学 環境・社会理工学院建築学系 助教・博士 (工学)
 *4 日本製鉄株式会社

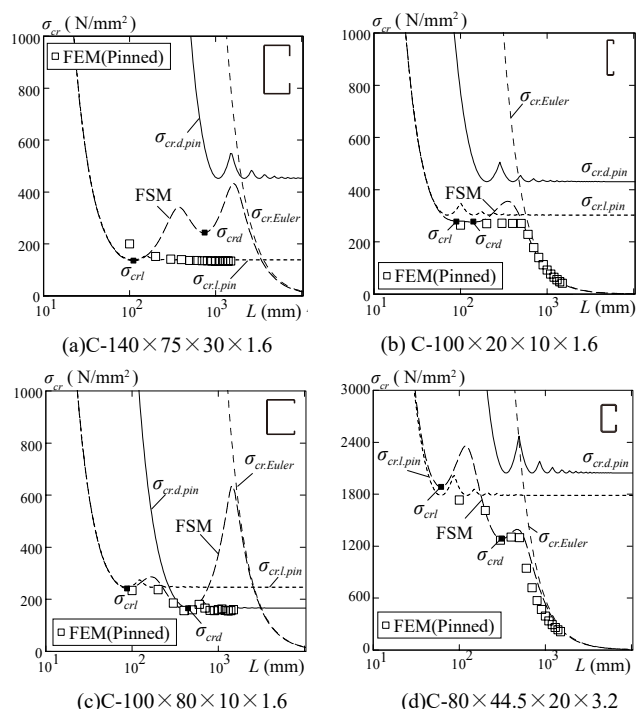


図 2 両端単純支持の場合の数値解析結果比較

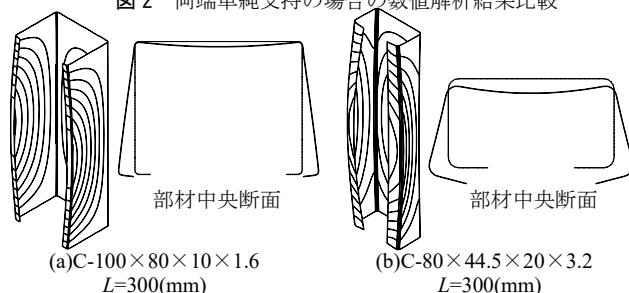


図 3 ゆがみ座屈モード図の比較 (変形倍率: 10 倍)

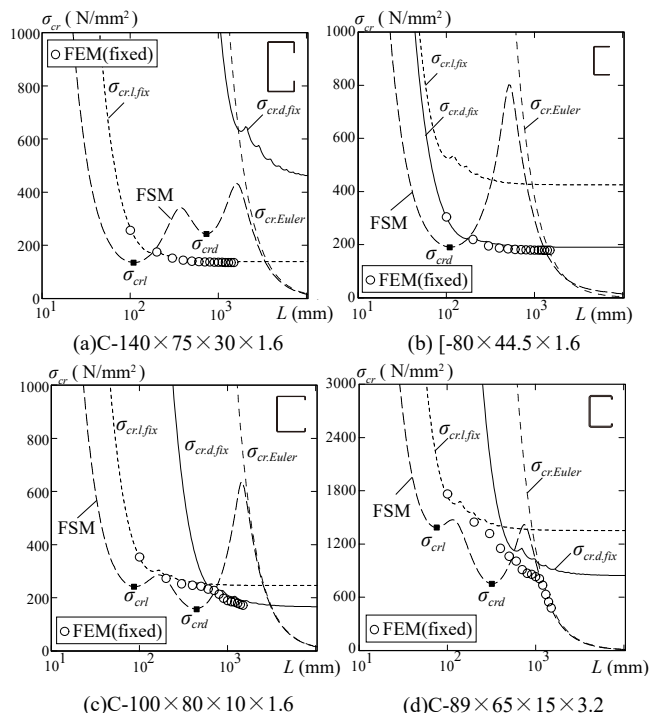


図 4 両端固定支持の場合の数値解析結果比較

*1 Graduate Student of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, M. Eng.
 *2 Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
 *3 Assist. Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
 *4 NIPPON STEEL CORPORATION