座屈解析に進化計算を適用した
薄板軽量形鋼の断面寸法最適設計坂本 二郎^{*1}, 小林 佳介^{*2}, 北山 哲士^{*3}, 清水 信孝^{*4}

Optimum design of cross-sectional sizes for thin steel plate columns considering buckling using the finite strip method and evolutionary computing

Jiro SAKAMOTO^{*1}, Keisuke KOBAYASHI^{*2}, Satoshi KITAYAMA^{*3} and Nobutaka SHIMIZU^{*4}^{*1}Institute for Frontier Science Initiative, Kanazawa University
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan^{*2}Graduate School of Natural Science and Engineering, Kanazawa University
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan^{*3}School of Mechanical Engineering, Kanazawa University
Kakuma-machi, Kanazawa-shi, Ishikawa 920-1192, Japan^{*4}Nippon Steel and Sumitomo Metal Corporation
20-1 Shintomi, Futtsu-shi, Chiba 293-8511, Japan

Received: 16 August 2017; Accepted: 19 September 2017

Abstract

An optimum design method for determining the cross-sectional sizes of thin steel plate columns used for steel framed house was developed to maximize their buckling strength under a constraint of constant volume using evolutionary computing and cold forming. Buckling analysis was performed by finite strip method (FSM) that can analyze the buckling loads of local, torsional, and total buckling within less computational time. Differential evolution (DE) was used for the optimization algorithm because it is a fast and reliable method for non-linear, non-convex, and multimodal optimization problems. In this research, an optimum design method is proposed, which combines DE and FSM to achieve an efficient global optimum design considering comprehensive buckling modes. This method was applied to overcome the optimum design problems of the thin steel plate columns with a lip channel cross-section. Normal axial compression capacity (N_c) of the column under a constant volume was maximized by considering design variables such as web height, flange width, and lip length of the cross-section. The search performance of the optimization method was evaluated by obtaining an objective function ($1/N_c$), which was calculated at the lattice points of the design variables. The optimum design point obtained by the optimization method included a global minimum point of the objective function surface, hence ensuring the validity of the proposed method. Furthermore, the optimum design problem was solved under the deformation constraint by considering connection to the wall panels for the column length of 1000 mm, 2000 mm, and 3000 mm. Optimum designs with the open profile cross-section was obtained for all the abovementioned column length. The optimum designs obtained by the proposed method can be used for practical purposes because of their open profiled cross-section and can be produced by cold forming.

Keywords : Thin steel plate column, Optimum design, Buckling, Finite strip method, Differential evolution, Lip channel steel, Cross-section, Structural design, Steel house

1. 緒 言

住宅の工法として、厚さ 1mm 前後の薄鋼板からなる部材を用いたスチールハウス工法が実用化されている（スチールハウス協会，2015）．この工法は、枠組壁工法（ツーバイフォー）の枠組材を、木材から薄板軽量形鋼（冷

No.17-00212 [DOI:10.1299/transjsme.17-00212], J-STAGE Advance Publication date : 28 September, 2017

^{*1} 正員，金沢大学新学術創成研究機構（〒920-1192 石川県金沢市角間町）^{*2} 金沢大学大学院自然科学研究科^{*3} 正員，金沢大学理工研究域^{*4} 新日鐵住金技術開発本部鉄鋼研究所鋼構造研究部（〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1）

E-mail of corresponding author: sakamoto@se.kanazawa-u.ac.jp

間成形された薄鋼板からなる構造用鋼材)に置き換えたものであり、構造用面材(合板や石こうボードなど)をドリリングタッピングねじ(以下ドリルねじ)で枠組材に固定した壁パネルや床パネルを箱のように組み立てた構造からなる(藤内他, 2015)。パネル構造の枠組材には、規格寸法の溝形やリップ溝形の断面を持つ薄板軽量形鋼が使用されることが多く、作用する外力(軸力や曲げ)に対する座屈耐力の評価に基づき、部材の断面形状(日本鉄鋼連盟, 2002)が選定される。

このようなスチールハウス工法の構造の合理化に向け望まれるのが、枠組材として使用される薄板軽量形鋼の断面の最適設計である。しかし、スチールハウスに使われる薄板軽量形鋼は、圧縮力に対して複雑な座屈性状を示すため、耐力確保と省材料化を両立させる条件での最適化は計算が煩雑でかつ計算量も多く、数理的に最適解を求めるのは困難である。薄板軽量形鋼断面の座屈を考慮した最適設計については1960年頃から行われているが(Krishnan and Shetty, 1959)、古典的な研究の多くは、弾性座屈理論から導いた部材耐力に関する制約条件下で重量を最小にするように部材寸法を最適化するというものであった。全体座屈だけでなく、歪み座屈、各所の局部座屈並びに降伏応力も考慮すると多数の非線形な制約条件が課せられ、複数の局所解を持つ非凸な最適設計問題となることも少なくなかった。そのため、2000年頃からは大域的な最適解を得るためにニューラルネットワークが利用されたり(Karim and Adeli, 1999)、遺伝的アルゴリズム(Lee et al., 2005)が使われたりしている。一方、薄板構造の座屈解析手法としては、少ない計算量で半解析的に座屈応力を求めることが可能な有限帯板法(Finite Strip Method, 以下FSM)がその技術を確立し、航空分野を中心に異方性板や薄板補強パネルの最適設計ソフトウェアが開発されている(例えば, Williams et al., 1995)。しかし、薄板軽量形鋼の断面最適設計にFSMが使われるようになるのはそれよりも遅く、専用のフリーソフトウェアとしてCUFSM(Li and Schafer, 2010)が普及した頃から、最適設計でもFSMの活用が進んでいる。FSMを利用した近年の研究では、メタヒューリスティクスとしての進化的計算によって座屈を受ける薄板構造部材の断面最適化がLengら(Leng et al., 2011)やGilbertら(Gilbert et al., 2012a, Gilbert et al., 2012b)によって行われている。進化的計算を利用することで、数理的に解くのが難しい問題でも経験的に有効なアルゴリズムによって最適解を探索することが可能となる。LengやGilbertらにより、薄板構造部材の断面形状を進化的計算によって生成する手法が開発され、より良い適応度を持つ断面形状の生成には成功したもの、断面形状に大きな自由度を持たせたために、曲面が多く実際に製造するのが難しい形状しか得られていない。対象とする薄板軽量形鋼はロール成形によって冷間加工されることが多く、曲面の多い複雑な断面形状の部材を製造することは実用的ではない。

FMSでは解くのが困難な問題を扱うために有限要素法(Finite Element Method, 以下FEM)を利用する断面最適化の研究も見られる(Caseiro et al., 2010)。この研究では、弾塑性座屈荷重をFEMで解き、T型断面の寸法最適化には差分進化(Differential evolution, 以下DE)と粒子群最適化(Particle Swarm Optimization, 以下PSO)のハイブリッド法であるHDEPSOを用い、その性能を古典的な最適化法と比較した。最適解を得るまでの関数評価回数は古典的最適化法の方が少なかったことが報告されている。この原因としては、FEMの計算負荷が高いことからHDEPSOでは人口数(同時探索点数)を4として計算しており、DEやPSOの集団でより良い設計点を見つける集団降下特性が発揮されなかったためと考えられる。このことから、DEやPSOの特性を活かしてその能力を引き出すには、座屈解析にかかる計算負荷は低いほど良く、FEMよりはFSMとの組合せが適していると言える。

そこで、本研究では、製造を考慮した実用的な観点から、スチールハウスに実際に使われている薄板軽量形鋼の断面を対象とし、体積一定の条件下における部材耐力の最大化を目的として、進化的計算によりその断面寸法の最適設計を行う手法を開発した。座屈解析には、少ない計算時間で局部座屈、ゆがみ座屈、全体座屈の各モードに応じた座屈応力を計算することが可能なFSMを用い、進化的計算としては非線形問題、非凸問題、多峰性問題などの最適化問題に対して高速で頑健なアルゴリズムであるDEを用いた。FSMとDEの組合せにより、網羅的に座屈モードを考慮した最適設計を効率的に求めることが期待できる。本手法を実用的なリップ溝形断面を有する薄板軽量形鋼の最適設計問題に適用し、その有効性を検討した。

2. 薄板軽量形鋼の座屈モードと有限帯板法による解析

2・1 座屈解析の方法

本研究で対象とする薄板軽量形鋼に生じ得る座屈モードは、接合線の移動および断面変形の有無により分類され、局部座屈、ゆがみ座屈、全体座屈（曲げ座屈および曲げねじり座屈）に大別される（日本鉄鋼連盟，2002）．対象部材には、これら3種類の座屈モードが連成したモードが現れ、各モードの比率は断面形状に依存して変化する．断面形状を変えることにより発現する座屈モードを制御し、座屈に対する強度を変化させることができる．断面形状の最適設計においては、上記の座屈モードに応じた座屈応力を効率良く計算する手法が必要となるため、部材軸方向に沿った帯板要素（strip）に分割するモデルによるFSMを用いる．FSMでは、図1のエッジ補強板の例に示す様に（Hancock et al., 2001），薄板構造部材を長手方向に細長い帯板要素で分割する．

Fig.1 An example of finite strip analysis : edge stiffened plate

帯板要素では、面外変形を近似する変位関数を長手方向（Z方向）とそれに直交する方向（X方向）に分離して、Z方向を境界条件を満足したFourier級数で展開し、X方向を区分多項式を仮定した内挿関数で近似して離散化する．長手方向の応力（ σ_x ）は図1の例のように節点ごとに与えられるが、 σ_x は長手方向には一様で、どの部材断面にも同じ分布で応力が作用すると仮定される．以上のような離散化により座屈固有値問題が定式化され、固有値解析によって解かれる．FSMを用いることで、部材軸直交方向の要素分割を伴う有限要素法（Finite Element Method, 以下FEM）よりも入力データが少なく、未知数を大幅に低減させることができるため、効率よく薄板構造部材の座屈解析を行える．本研究では、FSMのプログラムとして、ジョンズ・ホプキンス大学が開発し公開しているソフトCUFSM（Schafer, 2011）を用いた．このCUFSMに薄板部材の断面形状座標を入力し、座屈固有値解析を行うことで、座屈半波長に応じた座屈応力を示す座屈曲線を得ることができる．解析の一例として、図2に示す両端回転自由の条件で軸圧縮力を受けるリップ溝形鋼の座屈応力を算出した．座屈半波長10mmから1000mmまでの座屈曲線は図3のようになる．ここでは2つの局所的な最小値が見られ、1つ目が局部座屈、2つ目がゆがみ座屈に対する座屈荷重を示す点となり、全体座屈に対する座屈荷重は座屈半波長が部材長となる点の値を用いる．

部材長や断面形状によっては座屈曲線に局所的な最小値が1つ、あるいは全く現れない場合もある．このような場合も考慮し、連成座屈のモード成分の比率を定量評価できるcFSM(constrained Finite Strip Method) (Li et al., 2014)の機能を用いて、局部座屈、ゆがみ座屈、全体座屈の各モードの比率が最も大きくなる座屈半波長の座屈応力を特定し、それぞれの座屈モードに応じた座屈応力を抽出した．以上のような方法で局部座屈、ゆがみ座屈、全体座屈に対する座屈応力を求め、3.2節に述べる最適設計問題の目的関数を計算するために利用する．

Fig.2 The lip channel steel model (left) and its boundary condition (right)

Fig.3 The elastic buckling curve shows the load factor versus half-wave length of the lip channel steel

2・2 構造用面材による変形拘束を考慮した解析モデル

図4に示すように、スチールハウスの壁パネルで使用するリップ溝形鋼のフランジは、ドリルねじによって構造用面材に接合される。ここで、 x 軸はフランジの幅方向、 z 軸はウェブの高さ方向、 y 軸は部材の長さ方向に対応する。面材の拘束により z 軸回りの部材の曲げ変形および y 軸回りのフランジの回転変形が抑制されるため、リップ溝形鋼に生じ得る z 軸回り（弱軸方向）の全体座屈（曲げ座屈および曲げねじり座屈）およびゆがみ座屈の発生が抑えられる。

Fig.4 The fixation condition of the lip channel steel columns with wall panels by drilling tapping screws.

本研究では、構造用面材とドリルねじによる変形拘束の有無を考慮してリップ溝形鋼の座屈特性を評価する。構造用面材がない場合は、図5(a)に示すように、リップ溝形鋼の断面内に変形拘束は設けない。一方、構造用面材がある場合は、 z 軸回り（弱軸方向）の全体座屈およびゆがみ座屈の発生が抑制されるため、この変形拘束を図5(b)のように上下フランジの中央の点の x 軸方向変位を拘束することで表現する。

Fig.5 Fixation conditions of the model of lip channel steel column with wall panels in analyses of the finite strip method.

3. 最適設計の方法と問題の定式化

3・1 最適設計の方法

本研究では、プログラム言語 Python を用いて進化的計算による最適化アルゴリズムを作成する。進化的計算としては差分進化 (DE) を用いた。DE は解集団において新たな解との発生とより良い解への更新を繰り返しながら最適解を探索する集団的降下法の一つであり、交差や突然変異に基づく確率的な解の発生と集団による探索特性から、進化的計算の中でも特に非線形問題や、非凸問題、多峰性問題に対して有効なアルゴリズムであることが知られている (Price, 2013) (北山他, 2010)。本研究で扱うリップ溝形鋼の断面寸法最適設計問題においては、局部座屈、ゆがみ座屈、全体座屈という 3 つの座屈モードの比率が断面寸法に応じて変化し、それらの連成によって部材耐力が決まることから、この問題は非線形性や非凸性、多峰性を持つと考えられる。すなわち、断面寸法のわずかな変化であっても座屈モードの移行により座屈応力が大きく変化することで強い非線形性を生じ、そのような点が多数存在することにより多峰性を生じる可能性がある。非線形・非凸・多峰性の問題に有効とされる DE を適用すれば、本問題においても効率良く精度の高い大域的最適解を得ることが期待できる。DE には交差や突然変異の方法が異なる幾つかの形式が提案されているが、その中でも基本的な DE/rand/1/bin と呼ばれるアルゴリズムを用いた (Storn and Price, 1997)。

DE/rand/1/bin の基本アルゴリズムを以下に示す。 k 回目の探索において、 i 番目の探索点の設計変数ベクトルを $\mathbf{x}_i^k$ と表記し、設計変数の数を n とする。

(STEP1) 初期探索集団 (人口) をランダムに生成。突然変異確率 F 、交叉確率 Cr 、最大探索回数 (計算終了世代数) を設定。探索回数を $k=1$ とする。

(STEP2) すべての探索点に対し、以下の操作を繰り返す。

(STEP2-1) d 番目の探索点 $\mathbf{x}_d^k$ が、ランダムに 3 つの探索点 $\mathbf{x}_{r1}^k$, $\mathbf{x}_{r2}^k$, $\mathbf{x}_{r3}^k$ を選ぶ。ただし $d \neq r1 \neq r2 \neq r3$ 。

(STEP2-2) 突然変異によって、新たな探索点 $\mathbf{v}_d^k$ を次式で生成。 $\mathbf{v}_d^k = \mathbf{x}_{r1}^k + F(\mathbf{x}_{r2}^k - \mathbf{x}_{r3}^k)$

(STEP2-3) 探索点 $\mathbf{x}_d^k$ と $\mathbf{v}_d^k$ から設計変数を引き継ぐ交叉を行い、新たな点 $\mathbf{u}_d^k$ を生成。どちらの探索点から何番目の設計変数を引き継ぐかは、乱数を発生させ交叉確率と比較して決定される。

(STEP2-4) 目的関数 $f(\mathbf{x})$ の評価をし、探索点の位置を更新。

$$f(\mathbf{u}_d^k) \leq f(\mathbf{x}_d^k) \rightarrow \mathbf{x}_d^k = \mathbf{u}_d^k \quad f(\mathbf{u}_d^k) > f(\mathbf{x}_d^k) \rightarrow \mathbf{x}_d^k = \mathbf{x}_d^k$$

(STEP3) 探索回数を更新 ($k = k+1$)。

(STEP4) 終了条件を満足していれば終了。そうでなければ、(STEP2) へ戻る。

上の流れの中で、(STEP2-2) が突然変異と呼ばれ、(STEP2-3) が交叉と呼ばれる。設計変数が 2 つの場合に対して、突然変異における新たな探索点の生成と、交叉による新たな設計点の生成の様子を図 6 に示す (北山他, 2010)。

突然変異により新たな探索点 $\mathbf{v}_d^k$ を発生させ、その新探索点 $\mathbf{v}_d^k$ と現探索点 $\mathbf{x}_d^k$ が交叉してできた新たな点 $\mathbf{u}_d^k$ から最も良い解を選ぶことにより、大域的な探索を行いながら集団でより良い解を得るアルゴリズムとなっている。

Fig.6 Generation of new search point by mutation and neighborhood points by crossover in DE.

DE による最適化アルゴリズムの中でリップ溝形鋼の断面形状を生成し、断面の節点座標を有限帯板法による座屈解析ソフト CUFSM に与えて座屈固有値解析を行う。解析により得られた座屈応力を Direct Strength Method (以下 DSM) の耐力式に導入して部材耐力を算出し (AISI, 2006)、部材耐力と断面積に基づく目的関数の評価を行うことで、最適な断面寸法を探索する。DSM は薄板軽量形鋼に関する北米規格 (AISI, 2007) に採用される部材耐力の算定方法で、座屈解析で求めた座屈応力および鋼材の降伏応力に基づき座屈モード (局部座屈, ゆがみ座屈, 全体座屈) に応じた耐力を求め、これらの中の最小値を部材耐力とするというものである。DSM は、それに先行する幾つかの北米規格や、局部座屈, ゆがみ座屈, 全体座屈, 及びそれぞれの相互作用等を考慮して、経験と理論に基づき開発された方法であり、現在も拡張を続けながら様々な断面の実用的な薄板構造部材に応用されている (Schafer, 2008)。

3・2 最適設計問題の定式化

以下のように最適設計問題を定式化する。

$$\text{Minimize } 1/N_c(\mathbf{b}) \quad (1)$$

$$\text{Subject to } A(\mathbf{b}) = A_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{b} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \quad 0 \leq x_i \leq 1 \ (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式(1)は目的関数であり、 N_c は DSM により求めた部材耐力を表す。式(2)は制約条件であり、 A はリップ溝形鋼の断面積、 A_0 はその規定値を表す。式(3)は断面寸法をその最大値で規準化した設計変数であり、0～1 の値をとる。ここで、CUFSM に入力する部材断面を構成する要素長 (部材断面の一边を 4 分割した要素) が小さくなり過ぎて生じる解析上の不具合を防ぐため、設計変数の下限値は要素長が最低でも 0.3 mm を取るように設定した。なお、 n は設計変数の次数を表す。断面積一定、すなわち体積 (重量) 一定の下で、部材耐力を最大化する断面寸法を求める最適設計問題を解くものとする。

4. リップ溝形鋼の最適設計

4・1 リップ溝形断面の設計変数の定義

Leng ら (Leng et al., 2011) や Gilbert ら (Gilbert et al., 2012a, Gilbert et al., 2012b) の研究では断面を離散化した各要素間の角度を設計変数としていたため、設計変数の次数が高くなり、かつ曲線的な断面形状が生成されるため、

実用的な断面形状の導出が難しいという課題があった．これに対し，本研究では実用的な最適解を得ることを意図し，スチールハウスに用いられているリップ溝形鋼を対象に，断面寸法の最適設計を行う．

設計変数となるリップ溝形鋼の断面寸法（ウェブの 1/2 高さ h ，フランジ幅 b ，リップ長さ d ）を図 7(a)に，実用されているリップ溝形鋼の部材の例として呼び名 89LCM10（日本鉄鋼連盟，2002）の断面寸法を図 7(b)に示す．

Fig.7 Cross-sectional shapes of the lip channel steel: (a) size symbols related the design variables, (b) the lip channel steel 89LCM10 in practical use (unit:mm).

設計変数から断面寸法（単位は mm）を決定する式を以下に示す．

$$h = (A_0/2t) \cdot x_1 \quad (4)$$

$$b = (A_0/2t) \cdot x_2 \quad (5)$$

$$t = 1 \times x_3 \quad (6)$$

$$d = (A_0/2t) \cdot (1 - x_1 - x_2) \quad (7)$$

実用部材 89LCM10 の断面形状を参考とし，リップ溝形鋼の断面積の規定値 A_0 を 202mm^2 とした． x_1 はウェブ部の 1/2 高さ h を， x_2 はフランジ幅 b を決定し， x_3 は板厚 t を決定する．これらの寸法から式(7)によって断面積が規定値の 202mm^2 となるようにリップ長さ d が決定されるものとした．リップ長さ d を従属変数とすることにより，断面積に関する制約条件の式(2)は必ず満足されることになる．式(3)の設計変数ベクトルは $\mathbf{b} = \{x_1, x_2, x_3\}$ となる．以上の設計変数の設定により，実用部材 89LCM10 と同じ重量を保ちながら，部材耐力を最大化するリップ溝形鋼の断面寸法を求めることができる．なお，図 7(a)において $d \geq h$ となり，上下のリップが相互に重なる断面形状が生成された場合は，ペナルティとして強制的に部材耐力 N_c に低い値を与え，目的関数 (N_c の逆数) を大きくすることで，実現不可能な断面形状は最適化の過程で自然と排除されるように設定した．ここでは，リップ溝形鋼の断面寸法に対する設計変数の設定について述べたが，他の薄板軽量形鋼においても，I 型鋼や H 型鋼などの直線で構成される断面形状を持つものであれば，同様の設定により重量を一定に保ちつつ部材耐力を最大化する断面寸法を求めることが可能と考えられる．

4・2 リップ溝形断面の最適化

リップ溝形鋼の断面寸法の最適設計を行うにあたり，図 2 に示すように，一端で軸方向と軸直交方向が拘束され，他端で軸直交方向が拘束されて，部材が軸力を受ける条件を想定する．リップ溝形の断面形状について，板厚 t については薄板軽量形鋼の標準的な寸法である 1mm と一定にし，ウェブ 1/2 高さ h とフランジ幅 b が独立に変化するように設計変数を設定した．すなわち，設計変数ベクトルは $\mathbf{b} = \{x_1, x_2\}$ で， $x_3 = 1$ とした．

部材長 L の影響を調査するため, $L=1000\text{mm}$, 2000mm , 3000mm の 3 ケースそれぞれについて最適設計を行った. ここで, 部材長 $L=3000\text{mm}$ のケースは住宅の壁パネルで使用する部材を想定しており, 2000mm 及び 1000mm のケースは部材長の影響を考察するために便宜的に設定した. DE における各種パラメータは, いずれのケースにおいても, 人口数 20, 計算終了世代数 100, 突然変異率 0.8, 交叉確率 0.5 とした. 人口数については, 設計変数の数を考慮し DE の成書 (例えば, Qing, 2009) を参考にして決めた. 突然変異率と交叉確率の値については, DE を種々のベンチマーク問題に適用し PSO 等の類似手法と比較して良い結果が得られたとの報告 (北山他, 2010) を参考に決定した. 終了世代数は, 上記の条件でリップ溝形鋼断面寸法の最適化計算を何度か実行し, その際の最適解への収束状況を踏まえて設定した. 実用的な薄板軽量形鋼の断面であれば, CUFSM による座屈解析に要する計算時間はリップ溝形鋼の場合と大きく変わらないことから, 問題が変わっても上記のような DE のパラメータ設定がそのまま利用できると思われる.

図 5(a)に示す構造用面材による変形拘束がない場合を対象に, 各部材長に対して最適設計の解 (世代数 100 の解) として得られた断面形状および実用部材 89LCM10 の断面形状を図 8 に示す. 最適解における部材耐力は, $L=1000\text{mm}$ の場合が 42.8 kN , $L=2000\text{mm}$ の場合が 20.5 kN , $L=3000\text{mm}$ の場合が 9.6 kN となった. 一方, 実用部材 89LCM10 の部材耐力は, $L=1000\text{mm}$ の場合が 33.8 kN , $L=2000\text{mm}$ の場合が 15.6 kN , $L=3000\text{mm}$ の場合 7.8 kN であった. これより, 部材長と断面積が等しい条件で比較すると, 本検討で最適解として導出した部材の耐力は, 実用部材 89LCM10 の耐力に比べて, 約 23~31 %高いことが分かる.

Fig.8 Optimal cross-section designs of the lip channel steel column with various column length ($L=1000\text{mm}$, 2000mm , 3000mm) in comparison with 89LCM10 cross-section.

部材長 L が 1000mm , 2000mm , 3000mm と長くなるにつれ, リップ長さが相互に重なる限界近くまで長くなり, 閉鎖断面に近い断面形状となった. この形状は, 構造用面材による変形拘束がない場合では, z 軸回り (弱軸方向) の全体座屈が誘起されやすいため, リップを長くすることで弱軸方向への曲げ抵抗を確保しようとして導出されたものと推察する.

この最適設計問題では, 設計変数が 2 つ (ウェブ高さを決める x_1 とフランジ幅を決める x_2) であることから, これらの設計変数を座標軸として目的関数の大きさを示す解空間を可視化することができる. 図 9 に部材長 $L=1000\text{ mm}$ の解空間を示す. 解空間における目的関数の計算は, それぞれの設計変数を 0.01 ずつ変えて行った. 図中に示す解空間の計算過程で得られた大域的最適解 (Global minimum) と DE による最適設計で得られた最適解 (Best fitness) の対応から, DE による最適解は解空間の大域的最小値とほぼ一致していることが分かる. 図は省略するが, $L=2000, 3000\text{ mm}$ においても同様の傾向が見られ, 本最適設計手法で得られた最適解は大域的最適解であることが明らかとなり, 手法の有効性が確認された.

Fig.9 The objective function surface related with the design variables in the optimum design problem of cross-sectional shape of the lib channel steel ($L=1000\text{mm}$). The global minimum and the best fitness point obtained by DE are shown.

図 5(b)に示す構造用面材による変形拘束がある場合を対象に、各部材長に対して最適設計の解（世代数 100 の解）として得られた断面形状を図 10 に示す。最適設計における部材耐力は、 $L = 1000\text{mm}$ の場合が 50.5 kN 、 $L = 2000\text{mm}$ の場合が 42.4 kN 、 $L = 3000\text{mm}$ の場合が 33.0 kN となった。一方、実用部材 89LCM10 の部材耐力は、 $L = 1000\text{mm}$ の場合が 40.7 kN 、 $L = 2000\text{mm}$ の場合が 40.8 kN 、 $L = 3000\text{mm}$ の場合 32.8 kN であり、それぞれ 24 %、3.9%、0.6%の部材耐力の増加がみられた。

また、構造用面材による拘束条件の追加によって実用的で加工性の良い開放断面の生成に成功した。 $L = 3000\text{ mm}$ の鋼柱材について、非拘束と壁材による拘束の場合の座屈曲線を比較したものを図 11 に示す。構造用面材による変形拘束を考慮した場合の最適解の妥当性評価のため、 $L=1000\text{mm}$ において DE による最適設計により得られた最適解(Best fitness)と可視化された解空間の大域的最小値(Global minimum)を図 12 に示す。この図からわかるように、DE による最適解は大域的最小値とほぼ一致していた。図は省略するが、 $L = 2000$ 、 3000 mm においても同様の傾向が見られた。また、図 13 に、 $L=1000\text{mm}$ の最適化計算における第 1 世代から第 100 世代での探索点群の様子を示す。図 12 と図 13 から、探索点群は大域的最小値に向かい、正常に収束していることがわかる。以上より、本研究で作成した最適設計プログラムは、構造用面材による変形拘束を考慮したリップ溝形鋼の断面寸法の最適設計に対して十分な有効性を持つことが確認できた。建築資材として多くの実績があるリップ溝形鋼において、部材耐力に対する最適な断面寸法を示せたことの意義は少なくない。また、板厚以外の断面寸法を設計変数とした場合は、部材耐力の逆数である目的関数の解空間は比較的単純な単峰性を示し、局所的な最適解が存在しないことも明らかになった。本手法で用いている CUFMS は、汎用性が高く、直線で構成される断面形状であれば容易にモデル化して座屈解析できることから、リップ溝形鋼と同様に、Z 型鋼、I 型鋼、H 型鋼など様々な断面形状に対しても適用が期待できる。

実用的な AISI の規格に沿った部材耐力を、局部座屈、ゆがみ座屈、全体座屈の全てを考慮した上で少ない計算負荷で求めることのできる有限帯板法 (FSM) と、非線形・非凸・多峰性の問題に有効とされる同時多点探索の最適化法である DE を組み合わせることで、効率良く実用性の高い薄板軽量形鋼の最適断面寸法を得る手法を提案し、その有効性を確認した。計算負荷の高い有限要素法において、座屈曲線を求めることや、同時多点探索の DE を適用することは困難なことから、FSM と DE の組み合わせの有効性は高いと考えられる。特に、得られた最適設計において図 11 のような座屈曲線を求め、局部座屈、ゆがみ座屈、全体座屈の各座屈応力を確認できることが本手法の大きな利点として挙げられる。拘束の無い最適設計では全体座屈が最小荷重で生じるのに対し、壁拘束した場合の最適設計では局所座屈が最小荷重で生じ、壁拘束の有無で最適設計における座屈挙動に違いが生じることも確認できた。図 13 に示す様に、DE の同時多点探索によって、広い設計空間から大域的最適解を得ることができる点も本手法の利点の一つである。ここで扱った最適設計問題は単峰性で非凸性の無い問題であったが、多峰性で非凸性のあるベンチマーク問題で DE の有効性は確認されていることから（北山他, 2010）、今後、異なる断面形状や設計変数を考慮した最適設計において多峰性や非凸性が現れても、本手法は有効に動作することが期待できる。

Fig.10 Optimal cross-section designs of the lip channel steel column with various column length ($L=1000\text{mm}, 2000\text{mm}, 3000\text{mm}$) in the case of constraints by wall panels.

Fig.11 The elastic buckling curve shows the load factor versus half-wave length of the lip channel steel in comparison between the case of no constraint and constraints by wall panels ($L=3000\text{mm}$)

Fig.12 The objective function surface related with the design variables in the optimum design problem of cross-sectional shape of the lib channel steel in the case of constraints by wall panels ($L=1000\text{mm}$). The global minimum and the best fitness point obtained by DE are shown.

Fig.13 Conversion process of agents of DE to a global minimum of the objective function surface in the optimum design problem of cross-sectional shape of the lib channel steel in the case of constraints by wall panels ($L=1000\text{mm}$)

5. 結 言

本研究では、スチールハウスに使用される薄板軽量形鋼に対して、進化的計算を用いて体積一定（重量一定）条件の下、部材の軸圧縮耐力を最大化する断面寸法の最適設計を行うプログラムを作成した。薄板軽量形鋼の代表的な断面形状のリップ溝形鋼に対して、断面寸法の最適設計を行い、プログラムの有効性を評価した。さらにそのリップ溝型鋼柱材に対して壁材による固定を考慮した拘束条件を加え、得られた最適設計から手法の有効性を評価した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

(1) 進化計算の中でも優れた集団降下特性を持つ差分進化（DE）を最適化法として、座屈曲線を高速に計算できる有限帯板法（FSM）を座屈解析法として用い、薄板軽量形鋼の断面寸法の最適設計を効率良く行うことができるプログラムを作成した。この2つの手法の組合せは、最も効率的に実用的な薄板軽量形鋼の最適設計を得ることができる組合せと言える。

(2) このプログラムを用いて、リップ溝型鋼の断面のウェブ高さ、フランジ幅、リップ長さの最適設計を行い、得られた最適解が目的関数曲面における大域的最適解と一致することから、手法の妥当性を確認した。また、実用されているリップ溝型鋼の 89LCM10 と本手法で得られた最適設計を、同じ体積条件下で比較したところ、最適設計の方がより高い部材耐力を有しており、本手法の有効性が確認できた。

(3) 長さが 1000mm, 2000mm, 3000mm の異なる長さのリップ溝型鋼について、それぞれの最適設計を得た。長さが 2000mm 以上になると、89LCM10 と同じ断面積とする制約条件では両側のリップ先端が近接する閉断面に近い断面が最適設計となった。実用的な開断面の最適解を得るには板厚や体積の制約を緩和する必要がある。

(4) ドリルねじによる構造用面材への接合を考慮した拘束条件を加えて同様の最適設計を行い、得られた最適解が目的関数曲面における大域的最適解と一致したことから、手法の妥当性を確認した。また、構造用面材による拘束を考慮した最適設計では、長さが 1000mm の場合だけでなく、長さが 2000mm, 3000mm とより長い場合においても、両側のリップ先端が離れた開断面形状となり、実用的な最適設計を得ることができた。

本研究では、開発した最適設計手法の妥当性・有効性の確認を主な目的として、スチールハウスに使われている薄板軽量形鋼の代表的な断面であるリップ溝形状を対象に、寸法最適化による最適設計問題を取り扱った。本手法は、様々な断面形状に対して適用可能であり、今後はより複雑な断面形状や板厚を含めた寸法最適化への応用が期待できる。また、構造用面材による変形拘束を考慮した検討は、実際の変形拘束を簡易に表現したモデルを用いた有限帯板法により求めた近似的なものであることから、得られた最適設計に対し有限要素法による座屈解析等を行い、その有効性についてさらに検討することが必要である。

文 献

- Ádány, S. and Schafer, B.W., Buckling mode decomposition of single-branched open cross-section members via finite strip method: Application and examples, *Thin-Walled Structures*, Vol.44, No.5 (2006), pp.585-600.
- AISI (American Iron and Steel Institute), Specification for the design of cold-formed steel structural members, Appendix 1 (2007).
- AISI (American Iron and Steel Institute) committee on specifications for the design of cold-formed steel structural members, Direct Strength Method (DSM) Design Guide (2006).
- AS/NZS 4600, Cold-formed steel structures, Sydney (Australia): Standards Australia (2005).
- Caseiro, J.F., Valente, R.A.F., Andrade-Campos, A. and Yoon, J.W., On an innovative optimization approach for the design of cross-section profiles of integrally stiffened panels subjected to elasto-plastic buckling deformation modes, *International Journal of Material Forming*, Vol.3, No.1 (2010), pp.49-52.
- Gilbert, B.P., Savoyat, T.J.-M. and Teh, L.H., Self-shape optimisation application: Optimisation of cold-formed steel columns, *Thin-Walled Structures*, Vol.60 (2012a), pp.173-184.
- Gilbert, B.P., Teh, L.H. and Guan, H., Self-shape optimisation principles: Optimisation of section capacity for thin-walled profiles, *Thin-Walled Structures*, Vol.60 (2012b), pp.194-204.
- Hancock, G.J., Murray, T. and Ellifrit, D. S., Cold-formed steel structures to the AISI specification (civil and environmental engineering), CRC Press (2001).

- 河合良道, 菅野良一, 宇野暢芳, 作本好文, スチールハウスの耐震性能に関する研究, 新日鉄技報, No.369 スチールハウス特集(1998), pp.8-17.
- Karim, A. and Adeli, H., Global optimum design of cold-formed steel hat-shape beams, *Thin-Walled Structures*, Vol.35, No.4 (1999), pp.275-288.
- 北山哲士, 酒井忍, 荒川雅生, 山崎光悦, 大域的最適化法としての Differential Evolution と数値計算, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.76, No.771 (2010), pp.2819-2828.
- Krishnan, S. and Shetty, K.V., On the optimum design of an I-section beam, *Journal of Aero/Space Sciences*, Vol.26 (1959), pp.599-600.
- Lee, J., Kim, S.-M., Park, H.-S. and Woo, B.-H., Optimum design of cold-formed steel channel beams using micro genetic algorithm, *Engineering Structures*, Vol.27, No.1 (2005), pp.17-24.
- Leng, J., Guest, J.K. and Schafer, B.W., Shape optimization of cold-formed steel columns, *Thin-Walled Structures*, Vol.49 (2011), pp.1492-1503.
- Li, Z. and Schafer, B.W., Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods, *Proceedings of the 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures* (2010), pp.17-31.
- Li, Z., Abreu, B., J.C., Leng, J., Ádány, S. and Schafer, B.W., Review: Constrained finite strip method developments and applications in cold-formed steel design, *Thin-Walled Structures*, Vol.81 (2014), pp.2-18.
- Price, K.V., *Document Differential Evolution*, *Intelligent Systems Reference Library*, Vol.38 (2013), pp.187-214.
- Qing, A., *Differential evolution: fundamentals and applications in electrical engineering*, John Wiley & Sons (2009).
- 作本好文, 野村広正, 堂野前等, 菅野良一, "環境に優しい住宅" スチールハウス, 新日鉄技報, No.371 (1999), pp.88-92.
- Schafer, B.W., CUFSM4.05 (2011), available from <<http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/>>, (accessed on 18 July, 2016).
- Schafer, B.W., Review: The Direct Strength Method of cold-formed steel member design, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.64, No.7-8 (2008), pp.766-778.
- スチールハウス協会, 2015 年度のスチールハウス建築着工実績について (2015), available from <<http://www.steelhouse.nssmc.com/steelhouse/result/>>, (参照日, 2016 年 7 月 18 日) .
- Storn, R. and Price, K., Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, *Journal of Global Optimization*, Vol.11, No.4 (1997), pp.341-359.
- 日本鉄鋼連盟 (編), 薄型軽量形鋼造建築物設計の手引き, 技報堂出版 (2002), pp.102-107.
- 日本鉄鋼連盟, 建築構造用表面処理薄板軽量形鋼, 日本鉄鋼連盟製品規格, MDCR 0007-2015 (2015), p.33.
- 藤内繁明, 海原広幸, 平川智久, 藤橋一紀, 川上寛明, 眞有信博, 河合良道, 田中浩史, 薄板軽量形鋼材の変遷と 4 階建てスチールハウス工法の開発, 新日鉄住金技報, No.403 (2015), pp.122-129.
- Williams, F.W., Kennedy, D., Butler, R. and Anderson, M.S., VICONOPT - program for exact vibration and buckling analysis or design of prismatic plate assemblies, *AIAA J.*, Vol.29, No.11 (1991), pp.1927-1928.

References

- Ádány, S. and Schafer, B.W., Buckling mode decomposition of single-branched open cross-section members via finite strip method: Application and examples, *Thin-Walled Structures*, Vol.44, No.5 (2006), pp.585-600.
- AISI (American Iron and Steel Institute), Specification for the design of cold-formed steel structural members, Appendix 1 (2007).
- AISI (American Iron and Steel Institute) committee on specifications for the design of cold-formed steel structural members, Direct Strength Method (DSM) Design Guide (2006).
- AS/NZS 4600, Cold-formed steel structures, Sydney (Australia): Standards Australia (2005).
- Caseiro, J.F., Valente, R.A.F., Andrade-Campos, A. and Yoon, J.W., On an innovative optimization approach for the design of cross-section profiles of integrally stiffened panels subjected to elasto-plastic buckling deformation modes, *International Journal of Material Forming*, Vol.3, No.1 (2010), pp.49-52.
- Gilbert, B.P., Savoyat, T.J.-M. and Teh, L.H., Self-shape optimisation application: Optimisation of cold-formed steel columns, *Thin-Walled Structures*, Vol.60 (2012a), pp.173-184.
- Gilbert, B.P., Teh, L.H. and Guan, H., Self-shape optimisation principles: Optimisation of section capacity for thin-walled profiles, *Thin-Walled Structures*, Vol.60 (2012b), pp.194-204.

- Hancock, G.J., Murray, T. and Ellifrit, D. S., Cold-formed steel structures to the AISI specification (civil and environmental engineering), CRC Press (2001).
- Kawai, Y., Kanno, R., Uno, N. and Sakamoto, Y., Seismic resistance and design of steel framed houses, Nippon Steel Technical Report, No.369 Special issue of steel house (1998), pp.8-17 (in Japanese).
- Karim, A. and Adeli, H., Global optimum design of cold-formed steel hat-shape beams, Thin-Walled Structures, Vol.35, No.4 (1999), pp.275-288.
- Kitayama, S., Sakai, S., Arakawa, M. and Yamazaki, K., Differential evolution as the global optimization technique and its computing, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.76, No.771 (2010), pp.2819-2828 (in Japanese).
- Krishnan, S. and Shetty, K.V., On the optimum design of an I-section beam, Journal of Aero/Space Sciences, Vol.26 (1959), pp.599-600.
- Lee, J., Kim, S.-M., Park, H.-S. and Woo, B.-H., Optimum design of cold-formed steel channel beams using micro genetic algorithm, Engineering Structures, Vol.27, No.1 (2005), pp.17-24.
- Leng, J., Guest, J.K. and Schafer, B.W., Shape optimization of cold-formed steel columns, Thin-Walled Structures, Vol.49 (2011), pp.1492-1503.
- Li, Z. and Schafer, B.W., Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods, Proceedings of the 20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (2010), pp.17-31.
- Li, Z., Abreu, B., J.C., Leng, J., Ádány, S. and Schafer, B.W., Review: Constrained finite strip method developments and applications in cold-formed steel design, Thin-Walled Structures, Vol.81 (2014), pp.2-18.
- Price, K.V., Document differential evolution, Intelligent Systems Reference Library, Vol.38 (2013), pp.187-214.
- Qing, A., Differential evolution: fundamentals and applications in electrical engineering, John Wiley & Sons (2009).
- Sakamoto, Y., Nomura, H., Dohnomae, H. and Kanno, R., Steel framed houses "environmentally friendly houses", Nippon Steel Technical Report, No.371 (1999), pp.88-92 (in Japanese).
- Schafer, B.W., CUFSM4.05 (2011), available from <<http://www.ce.jhu.edu/bschafer/cufsm/>>, (accessed on 18 July, 2016).
- Schafer, B.W., Review: The direct strength method of cold-formed steel member design, Journal of Constructional Steel Research, Vol.64, No.7-8 (2008), pp.766-778.
- Steel house society, On steel house building starts results in fiscal year 2015, (2015) available from <<http://www.steelhouse.nssmc.com/steelhouse/result/>>, (accessed on 18 July, 2016) (in Japanese).
- Storn, R. and Price, K., Differential evolution - a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces, Journal of Global Optimization, Vol.11, No.4 (1997), pp.341-359.
- The Japan Iron and Steel Foundation (Eds.), Guide for design of building structure with light-gauge steel, GihodoShuppan (2002), pp.102-107 (in Japanese).
- The Japan Iron and Steel Foundation, Zinc-coated light gauge steels for building structure, Standard of The Japan Iron and Steel Foundation, MDCR 0007-2015 (2015), p.33(in Japanese).
- Thonai, S., Kaibara, H., Hirakawa, T., Fujihashi, K., Kawakami, H., Maari, N., Kawai, Y. and Tanaka, H., Transition of light-gauge steel framed houses and development of 4-story steel-structured housing method, Nippon Steel Technical Report, No.403 (2015), pp.122-129 (in Japanese).
- Williams, F.W., Kennedy, D., Butler, R. and Anderson, M.S., VICONOPT - program for exact vibration and buckling analysis or design of prismatic plate assemblies, AIAA J., Vol.29, No.11 (1991), pp.1927-1928.