アルミニウム合金押出型材防護柵の 最適形状に関する研究

伊藤 義人¹・勝田 裕仁²・佐藤 遼一³

¹フェロー会員 国立岐阜工業高等専門学校校長/名古屋大学客員教授/名誉教授
工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: itoh@civil.nagoya-u.ac.jp

²学生会員 名古屋大学大学院生 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

E-mail: katsuda.hirohito@h.mbox.nagoya-u.ac.jp

³正会員 JFEスチール (〒100-0011 東京都千代田区内幸町二丁目2番) (研究当時名古屋大学大学院生)

E-mail: sato.ryoichi@c.mbox.nagoya-u.ac.jp

本研究では、道路景観に影響を与えるアルミニウム合金の押出型材防護柵支柱に対し、最適型材形状について検討を行った。厳しい環境での橋梁用ビーム型防護柵の支柱には、耐久性の高いアルミニウム合金が多く用いられる。多室ホロー断面を持つ押出型材防護柵支柱に対して変形性能と経済性を指標とする多目的関数を設定し、遺伝的アルゴリズムを用いて形状最適化を行った。また、最適化に用いるパラメータを変更することによって、各パラメータが最適化に及ぼす影響を考察した。さらに、押出成形のプレス力の限界のため支柱を上下に分割して押出成形を行う二分割押出支柱モデルでの最適化の結果を基に、今後可能となる容量の大きな押出成形機を用いて押出成形を行う一体型支柱モデルについても形状最適化の検討を行った。

Key Words : aluminum-alloy railing, genetic algorithm, shape optimization, extruded shape

1. はじめに

車両用防護柵は、車両が路外へ逸脱するのを防ぎ乗員の障害を防止・軽減し、運転者の視線を誘導することなどを目的として設置される交通安全施設である。道路沿線に連続的に設置されることから周囲の景観との調和が重要視される¹⁾。我が国では昭和 40 年に初の防護柵の設置基準が制定された。また、平成 10 年には防護柵の設置基準が仕様規定から性能規定へと変更され、形状や材料をより合理的に模索できる設計が可能となった。さらに、防護柵に用いる材料として、鋼やコンクリートに加えアルミニウム合金が明記された。

アルミニウム合金は鋼やコンクリートと違い押出加工が可能であり、より自由な形状を実現できる材料である。すなわち、図-1 に示すようにダイスを用いた橋軸方向に長尺な部材の押出成形が可能であり、必要な幅で切断することにより同一の多室ホロー断面の部材を大量に生産することができる。

文献 2), 3)では、この特性を利用してアルミニウム合金押出型材を用いた、景観に配慮した新しい形式の橋梁

用ビーム型防護柵支柱の開発に関する研究が世界で初めて行われた。図-2(a)に示す多室ホロー断面を有する押出型材支柱が、防護柵の設置基準・同解説で要求されている橋梁用ビーム型防護柵の極限支持力などの性能を満たしていることが明らかにされた。また、開発された新しい形式の防護柵支柱は図-2(b)に示す従来の防護柵支柱比べて透過性が高く、遠景が望めるような景観性に優れたものとなった。

前述のように、アルミニウム合金は押出加工性に優れていることから、連続的な板厚変化や曲率を持ったより自由な形状の断面を有する防護柵支柱を設計することができる。文献 2), 3)における開発研究では、実験的及び

図-1 ダイスを用いた押出成形

(a) 新型 (曽根漁港道路)

(b) 従来型

図-2 橋梁用ビーム型防護柵支柱

解析的検討を行い、試行錯誤により形状を決定し、その成果を利用して図-2(a)に示すように曽根漁港道路に初めて本研究で扱っている新しいタイプの防護柵が建設された。

本研究では、文献 2), 3)で、試行錯誤により決定された防護柵支柱の形状を基にして、文献 4)-6)で用いた、最適化アルゴリズムの中でも遺伝的アルゴリズムを採用し、アルミニウム合金押出形材防護柵支柱の形状最適化を試みる。また、文献 2), 3)で開発された二分割押出防護柵支柱だけでなく、一体型押出防護柵支柱についても、その最適断面形状を求める。大型の押出形材用のダイス作製には高いコストと労力が必要であり、多室ホロー断面を持つ防護柵用の押出形材の形状最適化を効率的に行うことは、経済性及び構造工学に貢献するものと考えられる。

2. 二分割押出防護柵支柱の形状最適化

(1) 遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた形状最適化システム

文献6)では、防護柵支柱の形状最適化手法として多目的遺伝的アルゴリズムの一種であるNon-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA II) が用いられた。NSGA IIは、エリート主義や混雑度等の評価指標を導入した、pareto最適集合解の探索性能に優れているアルゴリズムであり、多面的な要求性能を満足しながら最適形状を効率的に探索できる。本研究のアルミニウム合金の押出形材支柱の形状最適化についてもこの最適化アルゴリズムを採用した。遺伝的アルゴリズムは生物進化(選択淘汰、突然変異)の原理に着想を得たアルゴリズムであり、確率的探索・学習・最適化の一手法として考えることができる⁷⁾。

また、本研究では、橋梁用ビーム型防護柵支柱の性能を評価するために、式(1)に示す2つの目的関数から構成される多目的関数を設定した。

$$\text{minimize } f(x) = \begin{cases} f_1 = -W(x) + C \\ f_2 = A(x) \end{cases} \quad (1)$$

図-3 荷重-変位曲線の面積

図-4 下部支柱の形状設計変数 (ケース 1)

表-1 その他の設計変数 (ケース 1)

形状設計変数	14
個体数	50
突然変異率	0.1
選択方法	トーナメント選択
交叉方法	一様交叉
突然変異方法	摂動

ここで、 x は設計変数のベクトル、 A は支柱断面積の面積 (mm^2)、 W は図-3に示す支柱の荷重-変位曲線の面積 (kJ)、 C はスケーリングのための定数である。今回行う最適化では、防護柵の設置基準・同解説⁸⁾により規定されたエネルギー吸収に関する要求性能(極限支持力)を満たしつつ、押出形材支柱の重量を減らすことを目的とするため、 f_1 には性能の指標となる極限支持力、 f_2 には経済性、透過性の指標となる支柱重量(支柱断面積)を採用した。なお、支柱重量は、断面積に支柱幅(145mm)とアルミニウム合金の比重をかけたものである。

(2) 二分割押出防護柵支柱の形状設計変数

本研究で最適化の対象となる防護柵の押出形材支柱の断面形状は、直線と円弧により構成されていることから、

図-5 形状設計変数 (ケース 2)

表-2 その他の設計変数 (ケース 2)

形状設計変数	27
個体数	200
突然変異率	0.1
選択方法	トーナメント選択
交叉方法	一様交叉
突然変異方法	摂動

これらの形状パラメータの値を最適化することとした。また、対象とする防護柵が主に支柱下部の塑性変形により車両衝突時の衝撃を吸収することを想定し、支柱下部の内部に 14 の形状設計変数を設定した場合 (ケース 1)、及び支柱の外形の影響を考慮し、支柱全体の輪郭部分にも形状パラメータを採用し 27 の設計変数を設定した場合 (ケース 2) の 2 つの条件で最適化を行った。最適化に用いた各設計変数をそれぞれ図-4 と表-1 及び図-5 と表-2 に示す。支柱の各部材の板厚 t と中空部角部の曲率 R 及び支柱下部の斜材の傾きを決定する 2 つの P 点 (P_{11} , P_{12}) を設計変数としている。すなわち、各部材の中間部は、2 つの曲率で構成され法線方向の板厚は同一である。また、斜材は支柱の外側に置いた 2 つの P 点を結び、支柱外形とぶつかった所に設置することを想定している。なお、設計変数は離散値で扱っており、P 点及び曲率は 1mm、板厚は 0.5mm ごととしている。

(3) 三次元モデルと簡易化された二次元モデル

本研究で形状最適化の対象となる防護柵支柱の三次元モデルを図-6 に示す。この解析モデルは、文献 2) で用いたものと同じであり汎用有限要素解析プログラム Abaqus Ver.6.12^{9, 10)} を用いて解析するものである。支柱は上部部材と下部部材の二部材に分割して押出成形し、嵌合とステンレスボルトによって接合する構造となっている。ここでは、A 種防護柵を想定しており、支柱の幅は 250mm、高さは 750mm、奥行きは 145mm である。

図-6 三次元モデル

図-7 二次元モデル

支柱上部は 1 次元低減積分 solid 要素、変形が大きいと予想される支柱下部については 2 次元完全積分 solid 要素を用いた。材料特性は弾塑性体とし、ヤング率とポアソン比については既往の研究²⁾で行われた材料の試験の結果を参考にし、ヤング率 $E = 71.1$ (GPa)、ポアソン比 $\nu = 0.329$ とした。支柱ベースプレートの下には完全固定の剛体プレートを設置し、支柱との接触条件を与えた。また、支柱ベースプレートとアンカーボルトの接合には Abaqus の埋め込み要素による拘束条件を適用した。上部部材と下部部材を接合する嵌合部と、上部部材とダミー横梁にはベースプレート部と同様の接触条件を与え、各ボルトは 1 次元低減積分 solid 要素でモデル化を行った。荷重については、载荷のための治具の一部をモデル化し、指定した表面上の節点集合の運動を参照節点の運動に従属させるカップリング拘束を適用した。拘束条件を治具の両端面に適用し、支柱から 300mm の強制変位を与えることによって支柱に荷重を与えている。この三次元モデルは、文献 2), 3) において、実験結果と比較され十分な精度を持つことが確認されている。

図-8 荷重-変位曲線の比較

しかし、図-6 に示す三次元モデルで GA 解析の中の個体選択を行うことは膨大な時間を必要とするため、図-7 に示す簡易な二次元モデルに置き換えて最適化を行い、得られた pareto 集合解の代表的な設計変数を基に三次元モデルを作成し、性能評価を行う二段階手法を採用した。二次元モデルを作成するにあたって、上下の部材を接合する嵌合を再現したモデル(a)及び嵌合を省略したモデル(b)でそれぞれ GA 解析を行い最適化に及ぼす影響を考察した。なお、三次元モデルでは支柱底部のボルトをモデル化しているが、二次元モデルは、支柱底面はいずれも完全固定とした。文献 2), 3)での実験及び解析で、底部はほぼ固定と考えてよいとされているので、大きな差は出ないと考えられる。外力条件は三次元モデルと二次元モデルは同一である。

GA 解析に適用する前に、三次元モデルと簡易な 2 次元モデルの力学的挙動の違いを確認するため、防護柵の設置基準・同解説で想定されている支柱の荷重-変位曲線の数値解析の比較を行った。二次元モデルの解析は三次元モデルと同様の Abaqus が用いられた。得られた 2 つのモデルの荷重-変位曲線を図-8 に示す。二次元嵌合なしモデルでは三次元モデルに比べて最大荷重が約 25% 大きくなっていた。また、初期剛性も大きくなっており、最大荷重後の急激な除荷が確認された。これは、嵌合部を省略したことにより、その部分の変形が考慮されていないことが主な原因であると考えられる。また、二次元嵌合ありモデルにおいても最大荷重や初期剛性がやや大きくなるということが確認された。しかし、除荷後の挙動が良い一致を示していること、解析時間を大幅に短縮できることなどの理由から、三次元モデルを簡易化した 2 つの二次元モデルに置き換えて最適化を試みることにした。

図-9 pareto 集合解の比較

図-10 設計候補の選定 (ケース 2)

図-11 変形図

表-3 支柱断面積と極限支持力

モデル	支柱断面積 (mm ²)	極限支持力 (kN)	最下端の中空部の面積 (mm ²)
No.1	30350	40.8	38800
No.2	27940	36.0	41300
No.3	27080	32.8	42100
現行モデル	30310	32.7	38900

図-12 荷重-変位曲線の比較

図-13 コンター図 (300mm変位時の主ひずみ)

(4) 二次元嵌合なしモデルにおける pareto 集合解

2次元嵌合なしモデルのGA解析結果を図-9に示す。ケース1ではpareto集合解の収束に約20世代を要したのに対し、ケース2では約10世代で解が収束した。これは、GAに用いる初期世代の個体数を50から200へ変更したことにより、より効率的に最適解を探索することができたためであると考えられる。なお、ケース1及びケース2で1つのモデルを解析するのに要した時間は約15分であった。図-9よりケース1に比べてケース2のpareto集合解が左下に推移しており、より最適化が進行したことがわかる。最終世代のpareto集合解の個数については、ケース1は49個、ケース2は45個であり設計変数を変更したことによる大きな変化は見られなかった。

Pareto集合解からモデルの形状や性能を明らかにするため、図-10に示す3つの設計候補(ケース2)について三次元モデルを作成して性能評価を行った。ここで、設計候補No.1は現行モデル^{2),3)}と同程度の支柱断面積を有するモデル、設計候補No.3は同程度の極限支持力を有するモデル、設計候補No.2はその中間である。それぞれの設計候補の変形図及び極限支持力を図-11及び表-

図-14 pareto 集合解の比較

図-15 設計候補の選定

図-16 変形図

3に示す。表-3には、支柱断面積と最下端の中空部の面積も示す。これらより、支柱断面積が小さくなるにつれて中空部の面積が大きくなっていることが分かる。また、支柱下部の最下端の斜材の傾きは現行モデルに比べて小さくなっており、ベースプレートと平行に近い傾きを有

図-17 荷重-変位曲線の比較

していた。支柱下部部材の最下端のフランジについては、圧縮フランジの板厚に比べて引張フランジの板厚が小さくなった。これは圧縮フランジの変形により支柱への衝突エネルギーを吸収しているためであると考えられ、最適化により不要な断面が適切に除去されたとと言える。

図-10 中の設計候補 No.1 について、GA 解析で得られた設計変数を基に三次元モデルを作成し、三次元複合非線形解析により性能評価を行った。解析モデルについては(3)と同様の手順で作成した。モデルの要素数は 17354、節点数は 45568 であった。また、解析には名古屋大学情報基盤センターのスーパーコンピュータ CX400 を使用した。1つのモデルを解析するのに要した時間は約 60 分であった。

三次元複合非線形解析で得られた荷重-変位曲線及びひずみコンター図を図-12 と図-13 に示す。図-12 より、三次元モデルの解析結果では最大荷重や極限支持力の極端な低下が確認された。図-8 より、三次元モデルで解析を行った場合の最大荷重は二次元嵌合なしモデルの約 75%の数値を示すことが明らかとなっている。しかし、今回の解析では、二次元嵌合なしモデルで約 56kN であった最大荷重が三次元モデルでは約 31kN となっており、約 45%の低下が確認された。これは、最適化によって支柱断面積が減少したことにより、嵌合部付近の板厚が極端に小さくなったことが原因であると考えられる。二次元嵌合なしモデルでは主に下部支柱の圧縮フランジの塑性変形により衝突のエネルギーを吸収していたのに対し、三次元モデルでは嵌合部付近の部材で塑性変形が生じている。二次元嵌合なしモデルの GA 解析では嵌合部付近の板厚に関する制約がないため、嵌合を挿入して三次元化した際に、このような現象が起きた可能性があると考

図-18 コンター図 (300mm 変位時の主ひずみ)

えられる。したがって、二次元嵌合なしモデルは非常に簡便ではあるが、図-8 から予想されるように GA 解析の pareto 集合解では必要な要求性能が得られない場合があることが分かった。

(5) 二次元嵌合ありモデルにおける pareto 集合解

二次元嵌合ありモデルの GA 解析結果及び 2.(4)で述べた二次元嵌合なしモデルの解析結果との比較を図-14 に示す。二次元嵌合ありモデルでは pareto 集合解の収束に約 10 世代を要した。最終世代の pareto 集合解の個数は 41 個であり、前述の 2つのケースと比べて大きな違いは見られなかった。

最適化されたモデルの形状や性能を調べるため、2.(4)と同じように図-15 に示す 3つの設計候補について、GA 解析で得られた設計変数を基に三次元モデルを作成し、三次元複合非線形解析を行った。ここで、設計候補 No.1 は現行モデルと同程度の支柱断面積を有するモデル、設計候補 No.3 は同程度の極限支持力を有するモデルである。それぞれの設計候補の変形図及び荷重-変位曲線を図-16 及び図-17 に示す。図-16 より、二次元嵌合なしモデルの結果同様、支柱への衝突のエネルギーを主に下部部材の圧縮フランジで吸収していることが分かる。また、下部部材の中空部の面積が大きくなる点、斜材の傾きがベースプレートと平行に近くなる点も同様の傾向を示した。支柱の外形に関わる設計変数については大きな変化はなく、今回行った支柱断面の形状最適化において支柱の外形の影響は小さいものと考えられる。

荷重-変位曲線に注目すると、二次元嵌合なしモデルで見られた最大荷重や極限支持力の極端な低下は確認されなかった。これは、二次元嵌合ありモデルの最適化では嵌合部付近の板厚が確保され、嵌合部付近での塑性変形が抑制されたためであると考えられる。

図-19 上部部材と下部部材

図-20 一体型押出支柱モデル

表-4 その他の設計変数

形状設計変数	42
個体数	200
突然変異率	0.1
選択方法	トーナメント選択
交叉方法	一様交叉
突然変異方法	摂動

次に、各モデルについてクラック発生の有無を確認するため、引張りずみによる考察を行った。図-18 は 3 つのモデルの中で最も引張りずみが大きかった設計候補 No.1 の下部部材の圧縮フランジの拡大図である。設計候補 No.1 では圧縮フランジの端部で最大引張りずみが約 0.28 であった。最適化を行う前の現行モデルでの同様の解析では斜材の一部に約 0.3 の引張りずみが生じていたことから、最適化によって得られた設計候補では現行モデルよりも引張りずみが抑制されたと言える。なお、伊藤ら²³⁾によって行われた静荷重実験及び重錘落下による動的実験において、今回対象としている防護柵支柱の斜材の引張りずみが約 0.2 に達した際に、部材の一部でクラックの発生が確認されたが、部材などの飛散はなく、防護柵支柱として問題ないので実設計に採用された。

図-21 形状設計変数

図-22 pareto 集合解の比較

以上のように、二次元嵌合ありモデルでの GA 解析結果は工学的に有用であり、現行モデルより有利な断面形状が得られた。

3. 一体型押出型材支柱の形状最適化

(1) 押出型材の大型化と一体成形

2.では、図-19に示すように支柱を上下に分割して押出成形を行う二分分割押出型材防護柵支柱について最適化を行った。これは、最適化の対象とする支柱が現存する国内最大級の9,500tプレス機を用いても一括で押出成形

図-23 設計候補の選定

図-24 変形図

表-5 支柱断面積と極限支持力

モデル	支柱断面積 (mm ²)	極限支持力 (kN)
No.1	30350	36.4
No.2	27220	34.0
No.3	26100	32.6

図-25 荷重-変位曲線

図-26 コンター図 (300mm 変位時の主ひずみ)

することが困難であるためである。しかし、近年では容量が20,000tを超える大型のプレス機が海外で導入され始めていることから、防護柵支柱を一括で押出成形できる可能性が現れている。

そこで、本研究では、図-20に示すように上下部材の嵌合部を取り除き一括で押出成形を行う一体型押出形材支柱を新たに検討する。一体型押出形材支柱では上下部材を接合するための嵌合部を削減することができるため、アルミニウム合金製の防護柵支柱の製造においてコストの削減と施工の容易化が期待できると考えられる。

(2) 一体型押出形材防護柵支柱の形状設計変数

2で検討を行った二分割押出形材支柱モデルでは、支柱下部部材の板厚や曲率半径、斜材の傾きを主な形状設計変数として設定した。形状最適化によりこれらの設計変数に大きな変化が見られたことから、一体型押出形材支柱モデルでも同様な設計変数を設定しGA解析を行った。最適化に用いた形状設計変数を図-21に示す。支柱中央部の3つの斜材の傾きについては、自由度を考慮し4つの節点Pの座標(P₉, P₁₀, P₁₃, P₁₄)を設計変数として設定した。最上端の斜材はエネルギー吸収性能にあまり貢献しないので、現行モデルのままとし、最下端の斜材は、2と同じように節点P₁₁とP₁₂を設計変数としている。下部支柱の中空部ではそれぞれ4つの曲率半径を設計変数として設定したが、支柱上部の中空部では現行モデルの中空部や斜材の数を維持するため、それぞれ3つの曲率半径を設計変数として設定した。また、表-4に示す最適化に用いるパラメータについて、初期世代の個体数と突然変異率は二分割押出形材支柱モデルの最適化の時と同様の値を用いた。

(3) 一体型押出形材支柱モデルにおけるpareto集合解

一体型押出支柱モデルのGA解析結果と、二分割押出形材支柱モデルの解析結果との比較を図-22に示す。一体型押出支柱モデルではpareto集合解の収束に約10世代を要した。Pareto曲線は二分割押出支柱モデルの解析結果と同様の形状を示したが、二分割押出支柱モデルに比べてやや左下方へ推移しており、嵌合部をなくしたこ

図-27 pareto 集合解の比較

図-28 変形図

図-29 コンター図 (300mm 変位時の主ひずみ)

とによる断面減少が反映されていることが分かる。最終世代の pareto 集合解の個数は 40 個であり、前述したモデルと比べて大きな変化は見られなかった。

二分割押出形材支柱モデルと同様に、pareto 集合解上の設計候補の性能評価を行うため、図-23 に示す 3 つの設計候補について、GA 解析で得られた設計変数を基に三次元モデルを作成し三次元複合非線形解析を行った。ここで、設計候補 No.1 は現行モデル（二分割押出支柱モデル）と同程度の支柱断面積を有するモデル、設計候補 No.3 は同程度の極限支持力を有するモデルである。

三次元複合非線形解析により得られたそれぞれの設計候補の変形図と極限支持力、荷重-変位曲線を図-24 と表-5 および図-25 に示す。最適化によって得られた防護柵支柱断面について、支柱上部の板厚や曲率半径は一部変化していたが中空部の形状を大きく変えるほどの変化はなく、ほとんど現行モデルに近い形状を示した。一方、支柱下部の形状設計変数は大きく変化しており、支柱下部の形状に大きな影響を与えた。支柱下部の形状について、現行モデルに比べて中空部の断面積が大きくなっていること、下部斜材の傾きがベースプレートと平行に近くなっていることが確認された。これは、支柱下部の変形により衝突のエネルギーを吸収するという、二分割押出形材支柱モデルの最適化によって得られた結論と同じ結果である。

次に、各モデルについてクラックの発生の有無を確認するため、引張ひずみによる考察を行った。図-26 は 3 つのモデルの中で最も引張ひずみが大きかった設計候補 No.1 の下部部材の圧縮フランジの拡大図である。設計候補 No.1 では圧縮フランジの端部で最大引張ひずみが約 0.29 であった。したがって、最適化によって得られたモデルにおいてもクラックの発生や部材の破断が生じる可能性があると考えられる。しかし、端部以外の引張ひずみは約 0.21-0.23 となっており、現行モデルに比べて 20-30% 程度の引張ひずみを抑制することができた。

(4) 引張ひずみ制限ありの形状最適化

今回得られた一体型の防護柵支柱のクラックの発生を防ぐため、GA による最適化の段階で大きな引張ひずみが生じる設計候補をできるだけ淘汰することを考えた。そこで、既往の研究を参考にして、支柱部材に 18% の引張ひずみが生じた設計候補をできるだけ淘汰するように GA を設定した¹¹⁾¹³⁾。

引張ひずみ制限ありの GA 解析により得られた解析結果及び引張ひずみ制限なしとの比較を図-27 に示す。ひずみ制限を加えた一体型押出形材支柱モデルでは、pareto 集合解の収束に約 5 世代を要した。また、引張ひずみ制限を加えた pareto 集合解は、引張ひずみ制限なしのものに比べてやや右上に位置していたが、圧縮フランジの板厚が大きくなり支柱断面積や極限支持力が増加したためであると考えられる。

最適化によって得られた設計候補の性能評価を行うため、現行モデルと同程度の支柱断面積を有するモデルについて三次元モデルを作成し、三次元複合非線形解析を行った。解析により得られた変形図を図-28 に示す。最適化によって得られたモデルは、ひずみ制限なしの GA によって得られたモデルに比べて、圧縮フランジの板厚が 2mm 大きくなったほか、一部の斜材の板厚も増加した。また、引張フランジに作用する力が大きくなったこ

図-30 支柱モデルの比較 (縮尺約 1/160)

とによるベースプレートの浮き上がりが確認された。

次に、ひずみ制限の効果を確認するため、引張ひずみによる検討を行った。支柱下部のベースプレート付近の 300mm 変位時ひずみコンター図の拡大図を図-29 に示す。引張ひずみは圧縮フランジの大部分で 0.17~0.19 の範囲内の値を示したが、端部で最大値 0.24 を示した。また、支柱のベースプレートと剛体プレートを接合する、埋め込み要素によって再現したアンカーボルトには大きな引張ひずみが発生しており、実際に適用するときには、ボルト径を大きくする必要がある。以上より、18%の引張ひずみ制限を個体の選択条件に加えても、制限を超えるひずみが一部生じていることが分かる。これは、簡易な二次元モデルでの GA 解析ではベースプレートを完全固定としているため、プレートの浮き上がりやステンレスボルトに生じる応力を考慮できないためであると考えられる。

本研究で行った最適化により得られた押出型材支柱と現行モデルの押出型材支柱の形状の比較を図-30 に示す。これらの支柱モデルはいずれも同程度の極限支持力を有しているものである。今回の最適化によって得られた支柱では、現行の支柱に比べ下部斜材の傾きがベースプレートと平行になっていた。また、圧縮フランジに比べ引張フランジの板厚が小さくなっており、二分割モデルで

は 9.9%、ひずみ制限なしの一体型モデルでは 13.9%の支柱重量（支柱断面積）を減らすことができた。また、引張ひずみ制限を加えた GA により得られた支柱は、大きな引張ひずみが発生する圧縮フランジの板厚が大きくなっていることが分かった。

4. 結論

本研究では、アルミニウム合金押出型材を用いた橋梁用ビーム型防護柵支柱の最適な押出型材の断面形状を求めるため、遺伝的アルゴリズムを用いて支柱形状最適化を行った。また、現行モデルの二分割押出型材支柱の形状を基に新たな一体型押出型材支柱についても検討した。得られた結論は以下の通りである。

- 1) 遺伝的アルゴリズムを用いたアルミニウム合金押出型材防護柵支柱の最適形状を求めるためのモデルが構築できた
- 2) 遺伝的アルゴリズムを用いて形状最適化を行う時に、複雑な三次元モデルを簡易な二次元嵌合ありモデルに置き換えることでより効率的に最適解を探索することができた。
- 3) 二分割押出型材支柱モデルの形状最適化では主に支柱下部の圧縮フランジで衝突時のエネルギーを吸収することにより、効率よく最適形状を求められることを示した。また、今回の最適化では、現行の二分割押出支柱が有する性能を保ちつつ、現行より 9.9%軽量化された押出型材支柱が提案できた。
- 4) 一体型押出支柱モデルの形状最適化では、二分割押出支柱モデルの最適化において変動の大きかった形状設計変数を基に各設計変数を設定することによって、現行の二分割押出支柱に比べて 13.9%軽量化された押出型材支柱が提案できた。
- 5) 引張ひずみ制限ありの GA 解析により、引張ひずみを抑制した最適形状断面を求めることができた。ただし、実際に適用するためには、さらに定着部付近の検討が必要である。

謝辞：本研究を行うにあたって、(株)住軽日軽エンジニアリングの酒見真志氏及び故高堂治氏には大変お世話になった。ここに深謝いたします。

参考文献

- 1) 国土技術研究センター：景観に配慮した防護柵の整備ガイドライン，大成出版社，2004。
- 2) 伊藤義人，吉野彰宏，酒見真志，佐藤遼一：アルミニウム合金押出型材を用いた新しい橋梁用ビーム型

- 防護柵開発に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 71, No. 2, pp. 186-198, 2015.
- 3) 伊藤義人, 吉野彰宏, 酒見真志, 佐藤遼一: アルミニウム合金押出型材を用いた橋梁用ビーム型防護柵の動的挙動に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 71, No. 3, pp. 352-366, 2015.
- 4) 川崎将臣, 大森博司: アルミニウム建築における最適断面設計に関する研究, 日本建築学会東海支部報告書, 第50号, pp. 245-248, 2012.
- 5) 田邊昌基, 大森博司, 飯嶋俊比古, 上村和男, 松橋雅彦: アルミニウム押出型材の最適断面システムの開発, 構造工学論文集, Vol. 55, pp. 591-598, 2009.
- 6) 伊藤誠慈, 吉野彰宏, 伊藤義人: 多目的関数を用いた橋梁用ビーム型防護柵の性能照査型最適設計, 土木学会論文集, Vol. 70, No. 3, pp. 389-408, 2014.
- 7) 北野宏明: 遺伝的アルゴリズム, pp. 3-18, 産業図書, 1993.
- 8) 日本道路協会: 防護柵の設置基準・同解説, 丸善, 2008.
- 9) SIMULIA: Abaqus 6.12 PDF DOCUMENTATION Analysis User's Manual, 2012.
- 10) SIMULIA: Abaqus 6.12 PDF DOCUMENTATION Theory Manual, 2012.
- 11) David, E. G.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley, 1989.
- 12) Kalyanmoy, D., Amrit, P., Sameer, A. and Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA2, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 6, No. 2, pp. 182-197, 2002.
- 13) Imam, M.: Three-dimensional shape optimization, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 18, pp. 661-673, 1982.

(2016. 10. 3 受付)

STUDY ON SHAPE OPTIMIZATION OF ALUMINUM-ALLOY RAILING POST

Yoshito ITOH, Hirohito KATSUDA and Ryoichi SATO

In this study, the structural design of railing post affecting road landscape was investigated. Bridge beam-type railing post is often made of aluminum-alloy because it has high durability and the extrusion process is possible to produce an arbitrary shape. The optimization of extruded shape was performed by a genetic algorithm using multiple objective functions of mechanical performance and economy. By changing dimensional parameters used in the optimization, the effect of each parameter on the optimization was examined. Based on the optimization results of separated extrusion models, the shape optimized for bulk extrusion models that require the latest developed extrusion machine was also examined.