

骨組構造の塑性設計における 多目的最適化に関する一考察

A STUDY OF MULTIOBJECTIVE OPTIMAL DESIGN OF SKELETAL PLASTIC STRUCTURES

三原 徹治* 千々岩浩巳** 中山 弘隆***

by Tetsuji MIHARA, Hiromi CHIJIWA and Hirotaka NAKAYAMA

This study presents a multiobjective programming approach for the optimal plastic design of skeletal structures. The method is first formulated by two-objective linear programming problem that entails the minimization of total structural weight and the maximization of applied proportional load as objective functions while satisfying the conditions of equilibrium and yield as constraints. Then, linearly weighted sum method and the satisficing trade-off method are used to find the Pareto solutions of the problem. This paper also examines a design method by combining a trade-off method without solving the optimization problem and the minimum weight design. Two skeletal structures are designed as numerical examples to illustrate the characteristics of the approach.

Key words : skeletal plastic structure, proportional loading, rigid-plastic theory, multiobjective optimization, satisficing trade-off method

1. 緒 言

従来の骨組構造物の最適塑性設計に関する研究では、適用荷重一定のもとで構造総重量を最小にする断面配分を求める、いわゆる最小重量設計¹⁾と、一定の構造総重量のもとで最大の荷重に抵抗できる断面配分を決定する最大荷重設計^{2), 3)}とが、それぞれ別個に行われてきた。いずれの設計法においても、その設計基本式は、慣用の塑性解析理論の仮定下では単一目的の線形計画問題(LP)として定式化されるため、解を求めることは容易であり、解の保証性も高い。ただし、最小重量設計における「一定の適用荷重」や最大荷重設計における「一定の構造総重量」をいかに与えるかに関する資料が少なく、最適塑性設計の適用拡大を制限するひとつの要因とされている。また、一般の設計においては、「ある経済性(あるいは安全性)の範囲内で、安全性の最大化(あるいは経済性の最小化)を図る」設計より、むしろ「より安全で、かつ、より経済的な」設計が要求される場面が多く、この点においても従来の設計法では、本来「目的」である複数の評価指標からただひとつだけを残して他を「制約」に置換えざるを得ないため、設計者の意図を直接的に反映することができない。

* 工博 九州共立大学 助教授 工学部土木工学科 (〒807 北九州市八幡西区自由ヶ丘1-8)

** 九州大学 助手 工学部土木工学科 (〒812 福岡市東区箱崎6-10-1)

*** 工博 甲南大学教授 理学部応用数学科 (〒658 神戸市東灘区岡本8-9-1)

本研究は、このような設計意図に適した設計手法、すなわち、安全性と経済性を同時に「目的」として追求する設計手法の確立を企図するものである。その手法は、著者のひとりが多目的線形計画問題として提案した設計基本式⁴⁾を基礎とし、先の研究⁴⁾で用いた満足化トレードオフ法⁵⁾のみならず、目標計画法 (Goal Programming) で通常用いられる加法型スカラー化関数⁶⁾を用いた解法を示し、簡単な数値計算による特性分析から本設計法においては満足化トレードオフ法の方が有用であることを確認し、さらに、逐一最適化問題を解く必要のないトレードオフ法と従来の最小重量設計法を組合せた設計法の提案を行う。最後に、数値計算を行い、本設計法の妥当性と適用性を示す。

なお、本研究では慣用の剛塑性理論にしたがうほか、分布荷重は等価な集中荷重に置換できるものとする。

2. 2 目的最適塑性設計の基本式⁴⁾

従来、最適塑性設計には大別して2種類の手法が用いられてきた。すなわち、最小重量設計 (MWD)¹⁾は、最適塑性設計の一般的な手法であり、与えられた設計荷重レベル以下で塑性崩壊を起こさないことを保証し、かつ構造重量の最小化を図る手法である。一方、ある構造重量以下の構造物のうち最大の荷重を受け持つことができる断面配分を求める手法は最大荷重設計 (MLD)²⁾と呼ばれる。いずれの手法においても、その設計基本式は次のような単一目的線形計画問題として得られる。

既知数: $a, C, F, N, R, x^L, x^U, \alpha$. (MWDの場合), W . (MLDの場合)

未知数: x, Q, W, α

$$\text{目的関数: } W = a^T x \rightarrow \min. \quad (\text{MWDの場合}) \quad \text{-----} \quad (1a)$$

$$\alpha \rightarrow \max. \quad (\text{MLDの場合}) \quad \text{-----} \quad (1b)$$

$$\text{制約条件: } C^T Q - \alpha F = 0 \quad \text{-----} \quad (1c)$$

$$N^T Q - R^T x \leq 0 \quad \text{-----} \quad (1d)$$

$$x^L \leq x \leq x^U \quad \text{-----} \quad (1e, f)$$

$$\alpha \geq \alpha. \quad (\text{MWDの場合}) \quad \text{-----} \quad (1g)$$

$$W = a^T x \leq W. \quad (\text{MLDの場合}) \quad \text{-----} \quad (1h)$$

ただし、 x は設計変数ベクトル、 Q は内力ベクトル、 W は構造重量 ($= a^T x$ 、 a は重量換算ベクトル)、 α は崩壊荷重係数、 C は適合マトリックス、 F は基準となる外力ベクトル、 N は降伏面における単位法線マトリックス、 R は塑性容量の1次微係数マトリックス ($R^T x$ は塑性容量ベクトル)、 x^L は設計変数の下限値ベクトル、 x^U は設計変数の上限値ベクトル、 α は設計荷重係数、 W は構造重量の上限値であり、 T は転置を示す記号である。なお、式(1)は塑性解析の静的定理に基づいており、MWDとMLDに共通な式(1c)は内力 Q と外力 αF がつりあうという平衡条件を、式(1d)は内力 Q がその塑性容量 $R^T x$ を越えないという降伏条件を、式(1e)および式(1f)は設計変数 x の上・下限値制約を、それぞれ表している。

式(1)においてMWDの目的 (式(1a)) がMLDの制約 (式(1h)) と、MLDの目的 (式(1b)) がMWDの制約 (式(1g)) と、それぞれ入替っており、式(1a)および式(1b)はいずれも最適塑性設計における目的であるが、その1つが解法上の制限から制約条件に置換えられているとみることができる。式(1)に示すMWDおよびMLDは、問題設定がなされた場合には通常のLPにより容易に解を求めることができる。しかし、式(1g)における α や式(1h)の W の値を与える根拠は一般に希薄であり、「より安全で、かつ、より経済的な」設計が要求されることの方が一般的であるように思われる。このような要求への対処は単一目的問題では困難であるので、ここでは、比例荷重を受ける骨組構造の安全性の評価指標として崩壊荷重係数を、経済性的の評価指標として構造総重量を、それぞれ選び、いずれをも目的として同時に追求する設計問題を、次のような2目的問題として定式化する。

既 知 数 : a, C, F, N, R, x^L, x^U

未 知 数 : x, Q, W, α

目的関数 : $\alpha \rightarrow \max.$ ----- (2a)

$W = a^T x \rightarrow \min.$ ----- (2b)

制約条件 : $C^T Q - \alpha F = 0$ ----- (2c)

$N^T Q - R^T x \leq 0$ ----- (2d)

$x^L \leq x \leq x^U$ ----- (2e, f)

ここに、式(2)はすべて未知数の線形式で構成され、式(2c)～(2e)の制約条件を満たしながら安全性を追求する式(2a)および経済的な設計を図る式(2b)という2目的関数を有する2目的線形最適化問題を示している。式(2)では評価指標をすべて目的として取扱うため、式(1)における α_0 や W_0 の値を直接必要としない。

3. 加法型スカラ化関数⁸⁾を用いた解法

(1)基本式

多目的線形最適化問題の解法として種々の手法が提案されているが、式(2)に示す問題には、得られた解に対するトレードオフが不可欠であるので、その解法として取扱いが容易で保証性の高い解が得られる必要がある。このため、まず、式(2)が有する線形性を保持し、かつ、単一目的問題への還元が可能な手法のひとつであり、目標計画法でよく用いられる加法型スカラ化関数を用いた解法を示す。

加法型スカラ化関数を用いた解法は、複数の目的関数に対して適当な重みを掛け、それらを加え合わせるにより問題を単一目的問題に還元する手法であり、式(2)に適用すると、次のようなLP問題が得られる。

既 知 数 : $a, C, F, N, R, x^L, x^U, \xi_w, \xi_s$

未 知 数 : x, Q, W, α

目的関数 : $\xi_w a^T x - \xi_s \alpha \rightarrow \min.$ ----- (3a)

制約条件 : $C^T Q - \alpha F = 0$ ----- (3b)

$N^T Q - R^T x \leq 0$ ----- (3c)

$x^L \leq x \leq x^U$ ----- (3d, e)

ただし、 ξ_w は構造重量最小化の目的に関する重み係数、 ξ_s は崩壊荷重係数最大化の目的に関する重み係数である。

(2)数値計算による特性分析

式(3)に示す解法の特性を検討するため、図-1に示す簡単なラーメン構造($P=10.0\text{tf}$, $L=4.0\text{m}$)の設計を行った。なお、以下の数値計算においては、曲げモーメントが支配的な構造を対象とし、設計変数には全塑性モーメントを採用する。よって、式(2b)に示す構造重量の最小化は重量関数(=Σ全塑性モーメント×部材長)⁷⁾の最小化と同値となり、以下、本論文では W は重量関数、 a はリンキングされた全塑性モーメントベクトルに対応する部材長ベクトルを示すものとする。また、2目的の特徴を顕著にするため $x^L = 0$ 、 x^U には十分に大きな値を与え、設計変数の上下限值制約がinactiveになるよう配慮した。

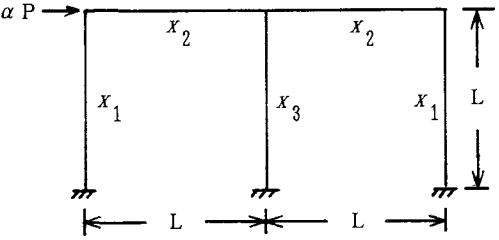


図-1 1層2スパンラーメン

表-1 加法型スカラ化関数を用いた解法による解

ξ_w	ξ_s	x_1^P	x_2^P	x_3^P
2.0	1.0	0.0	0.0	0.0
1.0	1.0	0.0	0.0	0.0
1.0	2.0	∞	∞	∞

式(3)における各目的の重み係数 w および s の組み合わせを3種類設定した場合の計算結果を表-1に示す。表-1は、 w に対する s の比率が1.0以下の場合には最適値はいずれも設定した下限値に収束し、それ以外の場合には設定した最大値を最適解とする解、すなわち、安全性か経済性かいずれか一方のみを重視し、他方を全く無視した解が得られることを示している。さらに、表-1以外の重み係数の組み合わせについても同様の解が得られた。このような解が得られる理由は次のように説明される。一般に、加法型のスカラ化手法は多目的問題のPareto解(ある目的を改善するために他の目的を犠牲にせざるを得ない解)集合の端点を探索するため、Pareto解集合が典型的な凸多面体を形成する問題では適当な重み係数を与えることにより種々の異なる解を得ることができる。しかしながら、式(2)に示す問題のPareto解集合は、後述するように最適塑性設計の線形性から原点を始点とする半無限直線を形成し、結果的に表-1に示すような2目的のいずれか一方のみを重視した解が得られる。このような解は「より安全で、より経済的な」設計を指向する設計者の意図を反映させることができず、本解法が式(2)に示す問題には適していないことがわかる。

4. 満足化トレードオフ法による解法

(1)基本式⁴⁾

多目的計画問題のPareto解を求めるにあたり、意志決定は人間の価値判断の問題であるという観点から意志決定者に満足化を、計算機に最適化計算をそれぞれ担当させる対話型満足化手法のひとつとして満足化トレードオフ法⁵⁾がある。この手法は、各目的に対して理想点および希求水準の値を設定して、各目的をその満足度に関する制約条件に変換し、各目的の満足度の均一化を図るという目的関数を新たに設定することにより、結果的に単一目的問題として解を求める方法であり、いかなる理想点および希求水準値に対してもあるPareto解が得られ、しかも、得られたPareto解が意志決定者にとって不満な場合のトレードオフに関する情報も提供されるという利点を有する。よって、次に、満足化トレードオフ法により式(2)に示す2目的最適塑性設計問題を、以下のように展開する。

まず、 S および A をそれぞれ理想点および希求水準を示す添字とすれば、式(2)の各目的の満足度関数は次のように表される。

$$Z_w = \frac{a^T x - W_s}{W_A - W_s} \quad \text{-----} \quad (4a)$$

$$Z_s = \frac{\alpha - \alpha_s}{\alpha_A - \alpha_s} \quad \text{-----} \quad (4b)$$

ここで、理想点は実際には到底実現不可能と思われる値でよい。よって、 W_s には十分小さな値を、 α_s には十分大きい値を与えれば、常に $W_A - W_s > 0$ 、 $\alpha_A - \alpha_s < 0$ となる。次に、問題全体の満足度を示す新たな変数を Z とし、次のように定める。

$$Z = \max(Z_w, Z_s) \quad \text{-----} \quad (5)$$

ここに、 $Z_w \leq Z$ 、 $Z_s \leq Z$ であるから、式(4a)、(4b)からそれぞれ次のような関係が得られる。

$$a^T x - (W_A - W_s) Z \leq W_s \quad \text{-----} \quad (6a)$$

$$\alpha - (\alpha_A - \alpha_s) Z \geq \alpha_s \quad \text{-----} \quad (6b)$$

また、各目的の満足度関数の均一化を図ることは、式(5)に示す Z の最小化により実現される。結局、式(2)は式(5)、(6)から次のような単一目的問題に変換される。

既知数： $a, C, F, N, R, x^L, x^U, W_s, W_A, \alpha_s, \alpha_A$

未知数： $C, Q, W (= a^T x), \alpha, Z$

目的関数： $Z \rightarrow \min. \quad \text{-----} \quad (7a)$

制約条件： $C^T Q - \alpha F = 0 \quad \text{-----} \quad (7b)$

$$N^T Q - R^T x \leq 0 \quad \text{-----} \quad (7c)$$

$$x^L \leq x \leq x^U \quad \text{-----} \quad (7d, e)$$

$$a^T x - (W_A - W_S) Z \leq W_S \quad \text{-----} \quad (7f)$$

$$\alpha - (\alpha_A - \alpha_S) Z \geq \alpha_S \quad \text{-----} \quad (7g)$$

ここに、式(7)は未知数 x , Q , α , Z に関するLP問題であり、従来の手法の最大のメリットである線形性を本解法でも失っていない。したがって、与えられた理想点および希求水準値に対するPareto解(設計点)を、従来どおりLPにより容易に求めることができる。

(2)数値計算による特性分析

式(7)に示す解法の特性を数値的に検討するため、3(2)と同様に、図-1に示す1層2スパンラーメンの設計を行った。

まず、設計結果の一例として、 $W_S=0.0$, $\alpha_S=10.0$ という理想点を設定した上で、 $W_A=180.0$ に固定し $\alpha_A=1.0 \sim 2.0$ とした場合の設計結果を表-2に示す。

表-2から、 α_A を変化させると得られる解も変化し、加法型スカラ化関数を用いた解法では得られない安全性と経済性を程々に満足させる解が得られていることがわかる。その傾向として、

α_A を大きくすると崩壊荷重係数の解 α^P も大きくなり安全性の高い設計が得られ、安全性の向上に伴って経済性は犠牲となり設計変数および重量関数の解 x_i^P , W^P も大きくなっている。この場合、 $\alpha_A > 1.5$ では $\alpha_A > \alpha^P$ であり、安全性に関する要求が厳しいと評価することができ、安全性と経済性のトレードオフのための定性的な情報が提供されていることがわかる。

また、満足度関数 Z_s^P および Z_w^P 値はすべての場合において $Z_s^P = Z_w^P$ である。これは、いずれの場合も

表-2 満足化トレードオフ法による解

($W_S=0.0$, $\alpha_S=10.0$, $W_A=180.0$)

α_A	x_1^P (tf·m)	x_2^P (tf·m)	x_3^P (tf·m)	α^P	W^P (tf·m ²)	Z_w	Z_s
1.0	7.143	7.143	14.29	1.429	171.4	0.9524	0.9524
1.1	7.212	7.212	14.42	1.442	173.1	0.9615	0.9615
1.2	7.282	7.282	14.56	1.456	174.8	0.9709	0.9709
1.3	7.353	7.353	14.71	1.471	176.5	0.9804	0.9804
1.4	7.426	7.426	14.85	1.485	178.2	0.9901	0.9901
1.5	7.500	7.500	15.00	1.500	180.0	1.0000	1.0000
1.6	7.576	7.576	15.15	1.515	181.8	1.0101	1.0101
1.7	7.653	7.653	15.31	1.531	183.7	1.0204	1.0204
1.8	7.732	7.732	15.46	1.546	185.6	1.0309	1.0309
1.9	7.812	7.812	15.63	1.563	187.5	1.0417	1.0417
2.0	7.895	7.895	15.79	1.579	189.5	1.0526	1.0526

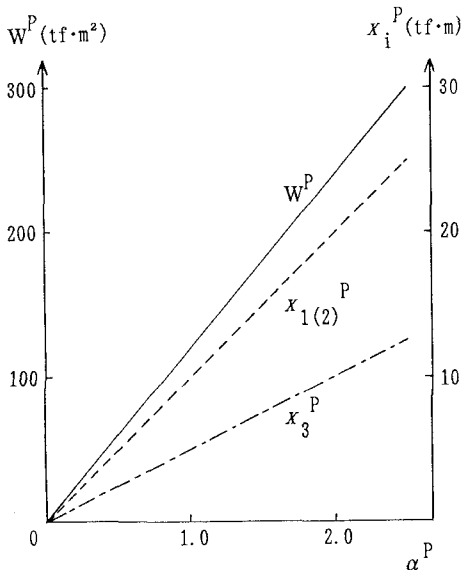


図-2 $\alpha^P \sim x_1^P$, W^P 関係

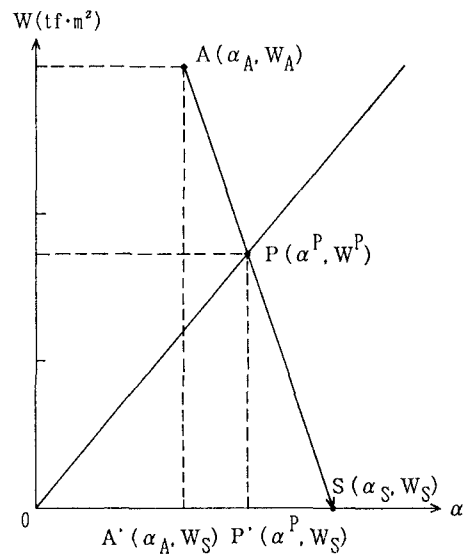


図-3 満足化トレードオフ法における理想点、希求水準とPareto解の関係

設計変数の上下限値制約がinactiveで、式(7f, g)に示す本来の目的を変換した制約がactiveであるため $Z_s^P = Z$, $Z_w^P = Z$ の関係が成立するからである。

次に、種々の理想点および希求水準の組合せにおけるPareto解を求め、 $\alpha^P \sim x^P, W^P$ 関係 (Pareto解集合) を図示すると、図-2が得られる。図-2から、設計変数の上下限値制約がinactiveである本例の場合のPareto解集合は原点を始点とする半無限直線であることがわかる。

さらに、図-3は、本解法によって得られるPareto解の理想点や希求水準との関係を明らかにするため、図-2に示した $\alpha^P \sim W^P$ 関係に理想点 $S(\alpha_s, W_s)$ 、希求水準 $A(\alpha_A, W_A)$ およびそのときのPareto解 $P(\alpha^P, W^P)$ をプロットしたものである。図-3において、Pareto解 P は希求水準 $A(\alpha_A, W_A)$ と理想点 $S(\alpha_s, W_s)$ を結ぶ直線とPareto解集合を示す半直線との交点である。設計計算上、重量関数の希求水準 W_A は理想点 W_s より大きな値であり ($W_A > W_s$)、崩壊荷重係数については $\alpha_s > \alpha_A$ と設定することを考慮すると、本解法では、ある理想点と希求水準の組合せに対してそれらを結ぶ直線 (あるいはその延長線) とPareto解集合を示す半直線との交点としてただひとつのPareto解が求められることが理解される。なお、図-3では、重量関数の理想点 $W_s = 0.0$ と最も理想的な値を設定しているが、その他の値であっても一般性が失われないことは明らかである。

(3) トレードオフ手法

式(7)を用いれば、式(2)に示す2目的問題のPareto解をLPにより求めることができ、トレードオフも理想点と希求水準を変更して式(7)をLPで解いて容易に行えることがわかった。しかし、本解法を大規模な構造へ適用する場合や数多くのトレードオフを行う場合などLPを用いることなくトレードオフを行うことができれば、より便利である。よって、ここでは前節で調べた本解法の特長から以下のようなトレードオフ手法を提示する。

まず、式(2)に示す2目的問題のPareto解は図-3にグラフ化したように線形性を有するので、 $\alpha^P \sim x^P, W^P$ 関係を次のように式表示することができる。

$$x^P = \alpha^P x^* \quad \text{-----} \quad (8)$$

$$W^P = \alpha^P W^* \quad \text{-----} \quad (9)$$

ここに、 x^*, W^* は式(1)に示すMWDにおいて $\alpha_s = 1.0$ としたときの解である。また、最適塑性設計の線形性からPareto解において常に $Z^P = Z_s^P = Z_w^P$ の関係が成立するため、式(4a, b)の Z_s, Z_w の定義式および $W_s = 0.0$ から、次式が得られる。

$$Z^P = \frac{\alpha^P - \alpha_s}{\alpha_A - \alpha_s} \frac{W^P}{W_A} \quad \text{-----} \quad (10)$$

式(10)は、図-3の $\triangle A A' S$ と $\triangle P P' S$ の相似関係からも得ることができる。

式(10)に式(9)を代入して α^P について解けば、式(11)が得られる。

$$\alpha^P = \frac{W_A}{(\alpha_s - \alpha_A) W^* - W_A} \alpha_s \quad \text{-----} \quad (11)$$

よって、 x^*, W^* が得られれば、 α_s, α_A, W_A を変更したときの α^P の値は式(11)から得られ、さらに式(8), (9)により x^P, W^P が算定される。したがって、LP計算を行わずにトレードオフを定量的に評価することができ、設計意図に適した設計を平易に得ることができる。

(4) 設計アルゴリズム

以上のことから、式(2)に示す多目的問題の解法として満足化トレードオフ法を用いると設計意図に即した解が得られることおよびそのトレードオフは、最適塑性設計の線形性から式(11), (8), (9)によりLPを用いることなく行えることが判明した。よって、図-4に示す設計フローにより2目的最適塑性設計 (式(2)) が

可能となる。

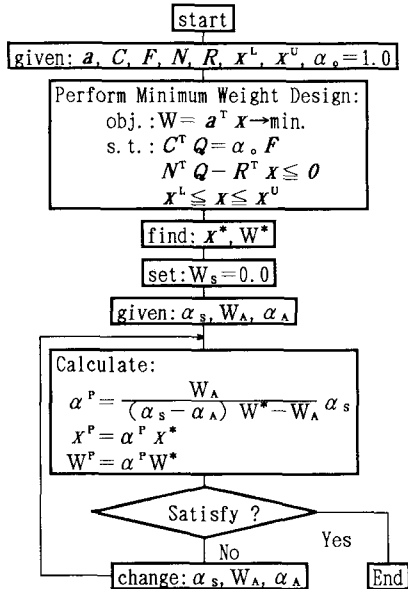


図-4 設計フローチャート

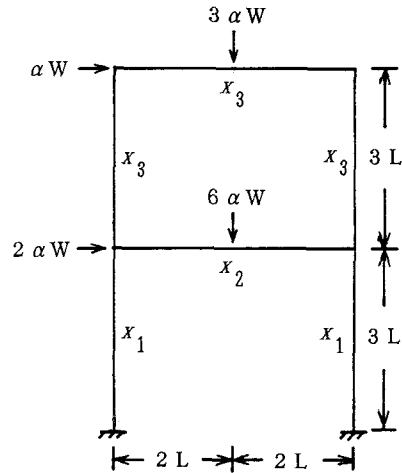


図-5 計算例1:構造・载荷形式

5. 数値計算例

(1)計算例1:2層1スパンラーメン

図-4に示す設計アルゴリズム(以下、グラフ法と呼ぶ)の妥当性と適用性を検討するため、図-5に示す複数の荷重を同時に受ける構造の設計をグラフ法により行った。本例については、式(7)をLPにより解く方法(以下、LP法と呼ぶ)により既に解が得られている⁴⁾。

$W_s=0.0$, $\alpha_s=10.0$, $W_A=51.0\text{WL}^2$ の場合の α_A と両解法によって得られたPareto解の関係を表-3に示す。両解法による解は全く一致し、グラフ法の妥当性が検証された。また、図-6に本例におけるPareto解集合を示すが、表-3および図-6から、特性分析例と同様の特性が認められ、複数の荷重を同時に受ける場合にもグラフ法の適用が可能であることが認められる。

表-3 計算例1:設計結果($W_s=0.0$, $\alpha_s=10.0$, $W_A=51.0\text{WL}^2$)

α_A	グラフ法による解							LP法による解						
	X_1^P (WL)	X_2^P (WL)	X_3^P (WL)	α^P	W^P (WL ²)	Z_w	Z_s	X_1^P (WL)	X_2^P (WL)	X_3^P (WL)	α^P	W^P (WL ²)	Z_w	Z_s
1.0	3.000	4.500	1.500	1.000	51.00	1.0000	1.0000	3.000	4.500	1.500	1.000	51.00	1.0000	1.0000
1.1	3.003	4.505	1.502	1.001	51.05	1.0010	1.0010	3.003	4.505	1.502	1.001	51.05	1.0010	1.0010
1.2	3.006	4.509	1.503	1.002	51.10	1.0020	1.0020	3.006	4.509	1.503	1.002	51.10	1.0020	1.0020
1.3	3.009	4.514	1.505	1.003	51.15	1.0030	1.0030	3.009	4.514	1.505	1.003	51.15	1.0030	1.0030
1.4	3.012	4.518	1.506	1.004	51.20	1.0040	1.0040	3.012	4.518	1.506	1.004	51.20	1.0040	1.0040
1.5	3.015	4.523	1.508	1.005	51.26	1.0050	1.0050	3.015	4.523	1.508	1.005	51.26	1.0050	1.0050
1.6	3.018	4.527	1.509	1.006	51.31	1.0060	1.0060	3.018	4.527	1.509	1.006	51.31	1.0060	1.0060
1.7	3.021	4.532	1.511	1.007	51.36	1.0070	1.0070	3.021	4.532	1.511	1.007	51.36	1.0070	1.0070
1.8	3.024	4.536	1.512	1.008	51.41	1.0081	1.0081	3.024	4.536	1.512	1.008	51.41	1.0081	1.0081
1.9	3.027	4.541	1.514	1.009	51.46	1.0091	1.0091	3.027	4.541	1.514	1.009	51.46	1.0091	1.0091
2.0	3.030	4.545	1.515	1.010	51.52	1.0101	1.0101	3.030	4.545	1.515	1.010	51.52	1.0101	1.0101

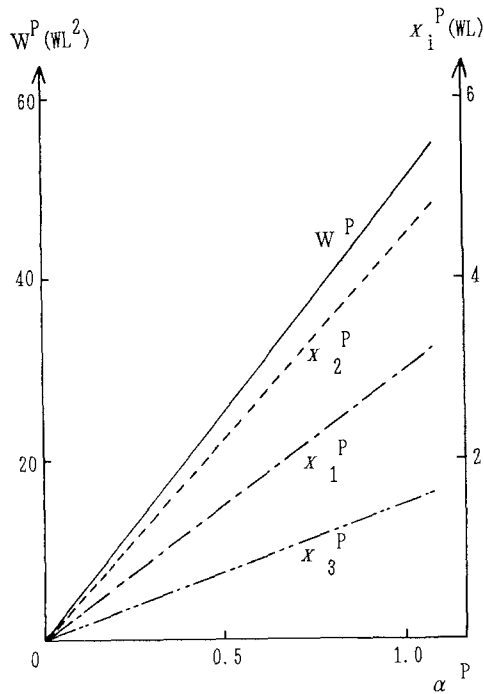


図-6 計算例1:Pareto解

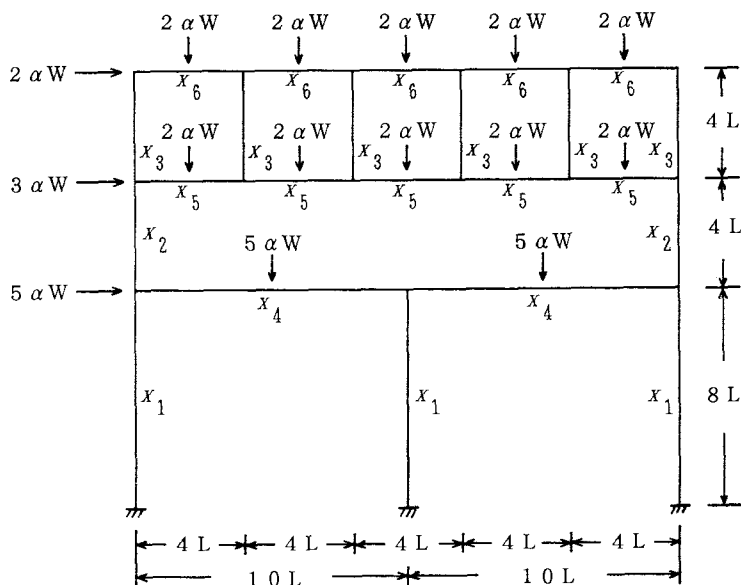


図-7 計算例2:構造・载荷形式

(2)計算例2:フィーレンディール構造

さらに、比較的大規模な構造への適用例として、図-7に示すフィーレンディール構造の設計をグラフ法を用いて行った。設計結果の一例として表-4に、 $W_s=0.0$ 、 $\alpha_s=100.0$ 、 $W_A=1000.0\text{WL}^2$ の場合の α_A と

得られたPareto解の関係を示す。図-8には、得られた $\alpha^P \sim W^P$ 関係（Pareto解集合）を示す。このような比較的規模の大きな構造に対しても、グラフ法を用いれば規模が小さな構造の場合と同様にほぼ瞬時にトレードオフを行うことができ、グラフ法が非常に有効な手法であることが認められた。

表-4 計算例2:設計結果($W_s=0.0, \alpha_s=100.0, W_A=1000.0WL^2$)

α_A	X_1^P (WL)	X_2^P (WL)	X_3^P (WL)	X_4^P (WL)	X_5^P (WL)	X_6^P (WL)	α^P	W^P (WL ²)	Z_w	Z_s
1.0	14.041	8.8661	2.4017	24.433	0.5541	2.0322	0.4157	1005.91	1.0059	1.0059
1.1	14.055	8.8751	2.4041	24.457	0.5546	2.0342	0.4161	1006.92	1.0069	1.0069
1.2	14.069	8.8839	2.4065	24.482	0.5552	2.0363	0.4165	1007.92	1.0079	1.0079
1.3	14.084	8.8930	2.4090	24.507	0.5558	2.0383	0.4169	1008.96	1.0090	1.0090
1.4	14.098	8.9019	2.4114	24.531	0.5563	2.0404	0.4173	1009.97	1.0100	1.0100
1.5	14.112	8.9109	2.4138	24.556	0.5569	2.0424	0.4178	1010.99	1.0110	1.0110
1.6	14.126	8.9198	2.4163	24.581	0.5574	2.0445	0.4182	1012.00	1.0120	1.0120
1.7	14.141	8.9291	2.4188	24.606	0.5580	2.0466	0.4186	1013.05	1.0130	1.0130
1.8	14.155	8.9381	2.4212	24.631	0.5586	2.0487	0.4190	1014.07	1.0141	1.0141
1.9	14.170	8.9472	2.4237	24.656	0.5591	2.0508	0.4195	1015.10	1.0151	1.0151
2.0	14.184	8.9561	2.4261	24.681	0.5597	2.0528	0.4199	1016.12	1.0161	1.0161

6. 結 言

本研究では、塑性骨組構造物の崩壊荷重最大化と構造重量最小化を同時に追求する2目的最適化問題の解法として、加法型スカラ化関数を用いた解法および満足化トレードオフ法による解法（LP法）を示し、さらに最適化計算を必要としないトレードオフ手法と従来の最小重量設計法を組合せた設計法（グラフ法）を提示した。本研究で得られた成果を列挙すると以下のである。

(1)安全性および経済性の評価指標として崩壊荷重係数と構造総重量を用いた比例荷重を受ける骨組構造の最適塑性設計問題（2目的線形計画問題）に加法型スカラ化関数を用いた解法および満足化トレードオフ法におけるスカラ化手法を適用することにより、それぞれ単一目的線形計画問題へ変換することができ、通常のLPを用いてPareto解を求める手法を確立した。

(2)加法型スカラ化関数を用いた解法による解は、いかなる重み係数を与えても安全性または経済性のいずれか一方のみを重視した解であることがわかった。これに対して、満足化トレードオフ法による解法は、異なる理想点、希求水準の組合せに対して異なるPareto解を与えるため本来の2目的線形計画問題の設計意図に即した解法として適当であることがわかった。

(3)上記満足化トレードオフ法による解法に基づき、最適化計算を必要としないトレードオフ手法を提示することができた。さらに、従来の最小重量設計法と組合せることにより効率的な設計法（グラフ法）を確立することができた。

(4)数値計算により、グラフ法の妥当性を検証し、比較的大規模な構造への適用性も確認することができた。

(5)本研究では作用荷重を比例荷重に限定したが、非比例荷重を受ける場合⁸⁾の設計にも多目的計画法の応用が可能と考えられ、現在検討中である。

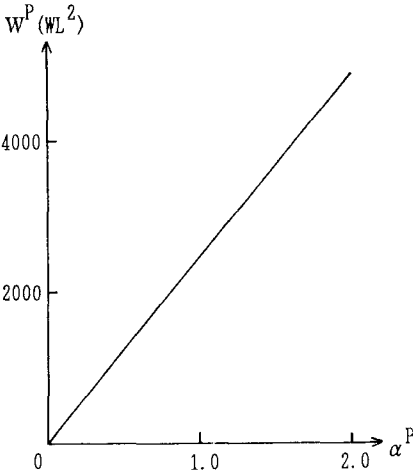


図-8 計算例2:Pareto解

謝 辞

本研究を行うにあたり、数値計算には九州共立大学情報処理センターから、図表の整理には同学工学部土木工学科学生宮良隼人、山下保両君からご助力を得た。記して厚く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 石川信隆, 大野友則: 入門・塑性解析と設計法, pp. 153~161, 森北出版, 1988. 5.
- 2) 三原徹治, 最上幸夫: 骨組構造物の塑性最大荷重設計法に関する二、三の考察, 九州共立大学工学部研究報告第12号, pp. 129~134, 1988. 3.
- 3) 山田善一編: 構造システムの最適化〜理論と応用〜, pp. 49~53, 土木学会, 1988. 9.
- 4) 三原徹治: 満足化トレードオフ法による骨組構造の最適塑性設計, 第2回システム最適化に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp. 217~222, 1991. 11.
- 5) 中山弘隆: 多目的計画に対する満足化トレードオフ法の提案, 計測自動制御学会論文集, 第20巻第1号, pp. 29~35, 1984. 1.
- 6) 田村坦之編: 大規模システム——モデリング・制御・意思決定——, pp. 164~168, 昭晃堂, 1986.
- 7) 文献1), pp. 142~143.
- 8) 三原徹治, 千々岩浩巳, 石川信隆, 太田俊昭: 多目的計画法を用いた骨組構造の塑性解析に関する一考察, 構造工学論文集, Vol. 38A, 掲載予定.

(1991年9月30日受付)