

骨組構造物の離散的全応力設計に関する 数値実験的研究

NUMERICAL STUDY ON DISCRETE FULLY STRESSED DESIGN OF FRAMED-STRUCTURES

杉本博之* 山本洋敬**

By Hiroyuki SUGIMOTO and Hiroyuki YAMAMOTO

The discrete fully stressed design of framed-structures is studied. It has been said that the fully stressed design of framed-structures with continuous design variables is unique. In this study, giving many initial sets of design variables, the discrete fully stressed design of several truss structures and framed-structures using only the ready-made shape steels are calculated iteratively. The results are arranged and investigated. It is concluded that the discrete fully stressed designs are not unique, but, among the results of the numerical examples, there are not so few cases with plural fully stressed designs. And also it is shown that, in some cases, the maximum value of the total volume of the structure among the fully stressed designs is much greater than the minimum value.

1. まえがき

骨組構造物の設計は、現在でも一般に全応力設計法的な論理によりなされている。全応力設計法は、試行錯誤的に断面寸法を決定するという設計法であり、設計変数の変更法に論理がなく、また、工学的価値基準の存在が希薄であるという側面を持っている。その結果、得られた設計は必ずしも最適設計であるという保証はないが、一方、少ない構造解析の回数で少なくとも安全側の設計が得られるという大きな長所を有している。さらに、実際の構造物の設計においては、全応力設計と最適設計の差はほとんどなく、また設計変数が連続量の場合は、全応力設計は唯一であるという暗黙の了解に対する明確な反証がなされていないのも、全応力設計法を用いる理由の一つのように考えられる。

著者の一人は、以前から離散変数を扱う最適設計法に関心を持ち、研究を継続してきた^{1) 2) 3) 4) 5)}。その中で、既製形鋼を用いる骨組構造物の最適設計法に関する研究の過程で、既製形鋼を用いる場合の全応力設計（以下、これを離散的全応力設計とする）が、1、2の計算例で複数存在するという結果を得た⁵⁾。

既製形鋼を用いる場合でも、一般には全応力設計法的な論理により設計されているが、全応力設計と最適設計の関係云々の前に、全応力設計が複数存在するのであれば、必然的に、例えば総鋼重の多い方の組み合わせで設計するケースもあるわけで、これは全応力設計法の問題点と考えなければならない。

離散的全応力設計が複数存在すること（複数性）を理論的に証明するのは困難であるので、本研究におい

* 工博 室蘭工業大学助教授 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)

** 室蘭工業大学大学院 工学部建設システム工学科 (〒050 室蘭市水元町27-1)

ては、数値実験の手法を用いて離散的全応力設計の複数性を検証することを試みた。

つまり、いくつかのトラス構造物、および平面骨組構造物を例にとり、一様乱数により初期設計を多数与え、それぞれの初期設計からスタートし、一般に用いられていると考えられる繰り返し計算法により全応力設計を求め、結果を整理して離散的全応力設計の複数性を検証した。

その結果、離散的全応力設計に関して、いくつかの知見が得られた⁶⁾のでここに発表するものである。

なお、応力等の制約条件は、道路橋示方書⁷⁾に従っている。

2. 離散的全応力設計の定義

設計変数が連続量である場合の全応力設計は、部材強度に関する制約条件の内、最もアクティブなものを等号として解き、それを繰り返すことにより得ることができる。例えばトラス構造物の場合は、

$$F(A) - F_a(A) = 0 \quad (1)$$

を解いて部材断面積を求め^{8) 9)}、すべての部材断面積が収束するまで繰り返すことにより、その全応力設計を得ることができる。ここで、 F は作用軸力、 F_a は許容軸力、 A は設計変数に対応する断面積である。

設計変数が離散量の場合も、基本的には同じと考えられるが、式(1)は必ずしも成立せず、

$$F(A) - F_a(A) \leq 0 \quad (2)$$

ができるだけアクティブに近い状態で満足されることになる。

本論文の離散的全応力設計は、次のように定義される。

「ある設計変数にリンクされている部材の少なくとも1つにおいて、それが少なくとも1つの荷重条件下において、部材強度に関する条件の内少なくとも1つをできるだけアクティブに近い状態で満足する設計。」

計算法については、次章で説明する。

表-1 断面ランク

3. 離散的全応力設計法

本論文の離散的全応力設計法について、その概要を説明する。

(1) 断面ランク

本研究で使用した既製形鋼は、JIS G 3192に定められているH形鋼とJIS G 3444に定められている一般構造用炭素鋼鋼管（以下、鋼管と略する）である。H形鋼は62種類、鋼管は71種類定められており、それらを全部使用することも可能であるが、目的に応じて使い分ける必要もあり、また、中には、道路橋示方書の板厚、および幅厚比関係を満足していない断面もあるので、それぞれ以下のように適当に選択した。

- a) トラス構造物に使用したH形鋼：H形鋼は、柱用と梁用に分けられるが、主に柱用と考えられる21断面を選択した。
- b) 平面骨組構造物に使用したH形鋼：平面骨組構造物は、柱と梁が混在しているので、板厚制限関係を満足する29断面を選択した。
- c) トラスおよび平面骨組構造物に使用した鋼管：ほぼ同一の断面積であれば、許容軸方向圧縮応力度の大きい方を選び29断面を選択した。

選択した断面を、それぞれ断面積の少ない順番に並べ通し番

ラン ク	断面積 (cm ²)		
	H形鋼 (トラス)	H形鋼 (平面)	鋼管
1	21.90	63.53	22.72
2	30.31	71.53	29.94
3	40.14	72.38	38.36
4	51.21	84.12	54.08
5	63.53	84.30	67.55
6	71.53	92.18	70.21
7	92.18	96.76	80.42
8	104.70	101.30	90.64
9	107.70	101.50	100.90
10	119.80	104.70	133.60
11	134.80	131.30	138.80
12	146.00	134.40	148.80
13	173.90	152.50	163.90
14	178.50	157.40	167.10
15	186.80	163.50	179.10
16	218.70	173.90	195.40
17	250.70	174.50	209.40
18	295.40	192.50	217.90
19	360.70	211.50	221.70
20	528.60	222.40	238.20
21	770.10	235.50	259.40
22		243.40	278.70
23		267.40	301.70
24		295.40	319.20
25		309.80	343.80
26		360.70	349.40
27		364.00	400.50
28		528.60	451.60
29		770.10	502.70

号をつけたのを断面ランクとする。それらを表－１に示した。

(2) 初期設計の与え方

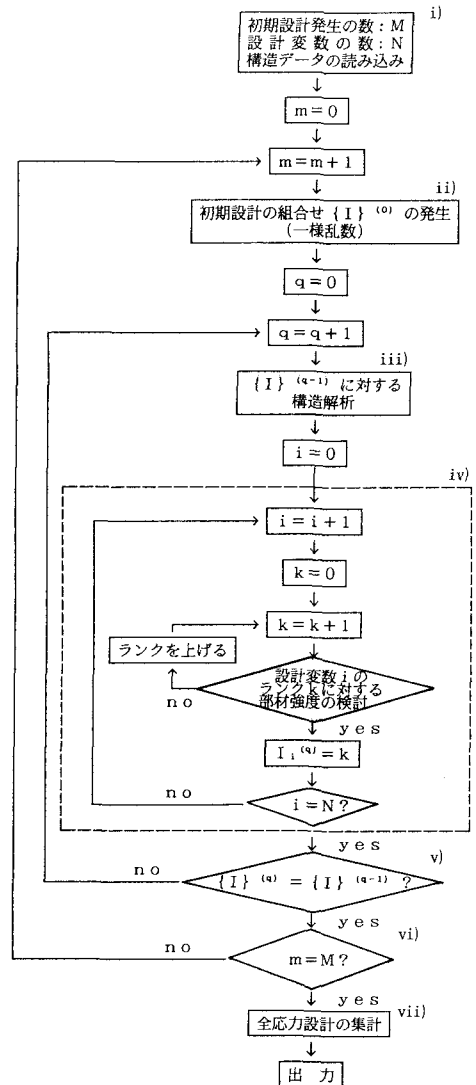
本研究は、トラス構造物および平面骨組構造物の離散的全応力設計の複数性の検証を主な目的としているが、その他に、離散的な全応力設計が複数存在する場合、どの離散的な全応力設計に収束しやすいかについても検討している。本研究の離散的な全応力設計法は、次節に説明するような収束計算であるが、上記の目的のためには、考えられるすべての組み合わせの設計を初期設計として与え収束計算を行えば良いが、その場合は、
 [断面ランクの総数]の[設計変数の数]乗の数の初期設計を与えて計算しなければならない。例えば、設計変数の数が6であり、鋼管を用いる場合は、表－１に示すように鋼管の断面ランクの総数は29であるので、 $29^6 = 594823321$ ケースの計算をしなければならない。これは、非現実的な数であるので、初期設計は一樣乱数¹⁰⁾で発生させることにし、その総数Mは、対象とする構造物の設計変数の数に応じて900～10000の数値とすることにした。

(3) 離散的な全応力設計の計算法

離散的な全応力設計を求める手順を、図－１に示した。図－１の各手続きの右肩についている番号に従って計算手順を説明すると、以下ようになる。

- i) 初期設計発生数M、設計変数の数N、および構造解析のためのデータの読み込み。
- ii) 一樣乱数により、初期設計 $\{I\}^{(0)}$ を発生する。ここで、 $\{I\}$ は設計変数ベクトルであり、表－１の各断面ランクの値が適当に代入される。
- iii) 現在の設計変数の組み合わせ $\{I\}^{(q-1)}$ に対する部材断面積、部材断面2次モーメントが各部材ごとに設定され、構造解析が行われる。q は、繰り返し回数である。
- iv) 設計変数 i にリンクされている部材毎に、部材強度に関する制約条件を最もアクティブに近い状態で満足する断面ランクを決定する。
 これは、断面ランク k を1から順に増加して制約条件を検討し、最初に制約条件をすべて満足する断面ランクを設計変数の値とする方法を用いている。
- v) 収束の判定を行う。
 収束は、すべての設計変数において、

$$I_i^{(q)} = I_i^{(q-1)} \quad (i = 1 \sim N) \quad (3)$$
 が満たされたら収束とみなしvi)へ行く。満足されなければqを1つ増やし、今回得られた結果を $\{I\}^{(q-1)}$ としてiii)へ行く。
- vi) i) で与えられたM組の初期設計に対する離散的な全応力設計を計算し終わったらvii)へ行く。
 そうでなければmを1つ増やしてii)へ行く。
- vii) M組の離散的な全応力設計を整理し集計して出力する。



図－１ フローチャート

この方法では、多くても10回程程度の繰り返しで1つの設計が収束する。このようにして、数種類のトラス構造物および平面骨組構造物の離散的全応力設計を求め、その複数性を検討した。

4. トラス構造物の数値計算結果

まず最初に、トラス構造物の数値計算結果について説明する。

(1) 計算の対象としたトラス構造物

トラス構造物は、図-2～図-7に示す6種類の構造系を計算の対象とした。

すべての結果を詳細に説明することはできないので、ここでは、図-7の39部材6変数トラス、および図-2の3部材2変数トラスの結果を説明し、後者の結果に若干の考察を加えた後に全体の結果をまとめて説明する。

(2) 39部材6変数トラスの結果

図-7に示す39部材トラスの計算結果を表-2に示した。図-7のPは80tfであり、断面はH形鋼である。この場合は、設計変数の数は6とし、表の上から、設計変数の番号、それらにリンクされている部材の番号、および得られた3種類の離散的全応力設計の各設計変数の断面ランクが示されている。鋼材総容積は、各離散的全応力設計に対応する構造物全体の鋼材総容積であり、最右欄の収束数は、10000発生した初期設計の内、各離散的全応力設計に収束したケースの数を表している。

表に示すように、離散的全応力設計は3つ得られており、最も鋼材総容積の多い③は最も少ない①の鋼材総容積の1.14倍であった。また、収束数は②が一番多く、次に③、一番少ないのが①であった。この結果から単純に判断すると、最も鋼材総容積が少ない①に収束する可能性は19%ということになる。

表-2 39部材6変数トラスの結果

設計変数		1	2	3	4	5	6	鋼材総容積 (cm ³)	収束数 初期設計数
部材		1-2-3 8-9-10	4-5 6-7	11-12 13-18 19-20	14-15 16-17	22-24-26 28-30-32 34-36-38	21-23-25-27 29-31-33 35-37-39		
結果	①	14	16	19	16	13	12	4823819	1870/10000
	②	14	17	19	16	13	12	4901162	5735/10000
	③	13	16	20	16	13	12	5502283	2395/10000

(3) 3部材2変数トラスの結果

図-2に示す3部材2変数トラスの計算結果を、表-3に示した。使用鋼材はH形鋼の場合である。初期設計の数は900とした。表に示すように、離散的全応力設計は5種類得られている。⑤の鋼材総容積は、①の1.16倍であり、大部分は②に収束している。①に収束したのは、900ケースのうち39ケース（4%）であった。

表-3で注目されるのは、離散的全応力設計③、④、⑤において、設計変数1の値がすべて16であるのに対し、設計変数2の値が1～3と異なる値をとっており、また、①、⑤において、逆に、設計変数2の値がすべて3であるのに対し、設計変数1の値が15、16と異なる値をとっている点である。これについて次節で考察を加える。

(4) 3部材2変数トラスの考察

図-8は、3部材2変数トラスの設計空間を示した図である。5つの領域に分割されているが、各領域内

表-3 3部材2変数トラスの結果

設計変数		1	2	鋼材総容積 (cm ³)	収束数 初期設計数
部材		1-3	2		
結果	①	15	3	284245	39/ 900
	②	15	4	289780	749/ 900
	③	16	1	320238	44/ 900
	④	16	2	324443	54/ 900
	⑤	16	3	329358	14/ 900

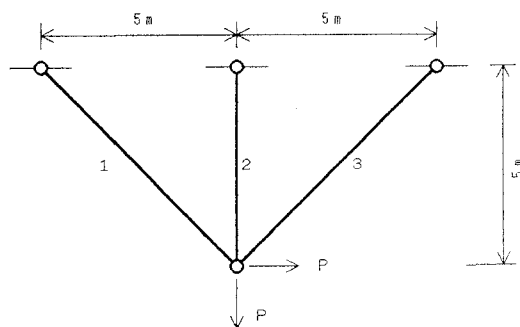


図-2 3部材トラス

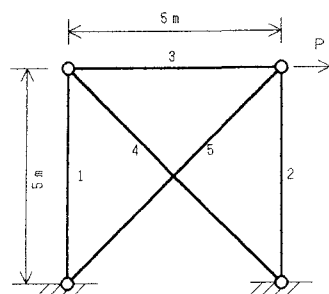


図-3 5部材トラス

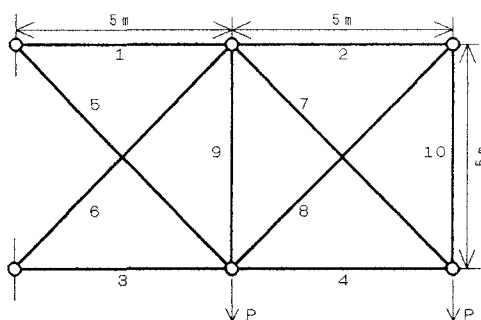


図-4 10部材トラス (荷重が等しい場合)

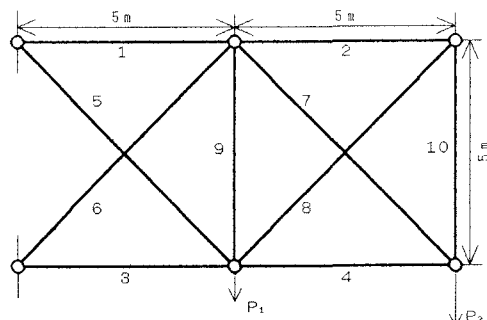


図-5 10部材トラス (荷重が異なる場合)

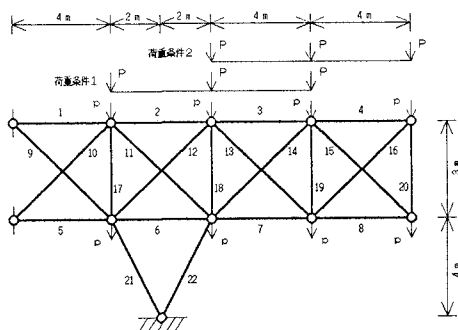


図-6 22部材トラス

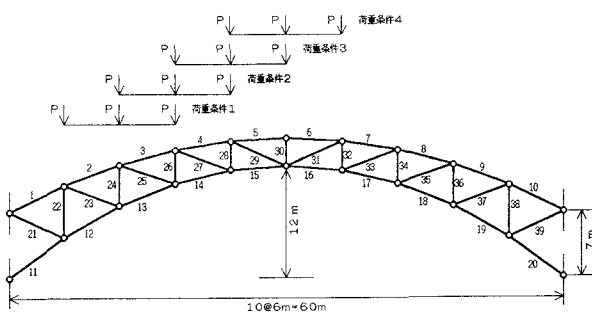


図-7 39部材トラス

の設計を初期設計する離散的全応力設計は、各領域内の丸付数字に収束することを表している。これらの丸付数字は、表－３の丸付数字に対応している。

この図からも、大部分のケースで②に収束する状況が理解される。また、最も鋼材総容積が少ない①に収束する初期設計は、非常に狭い領域にあることがわかる。

ここで、図中のイの方向、およびロの方向に設計空間を切断し、作用軸力・許容軸力と、設計変数の関係を示したのが、図－９（イの方向の切断）、図－１０（ロの方向の切断）である。

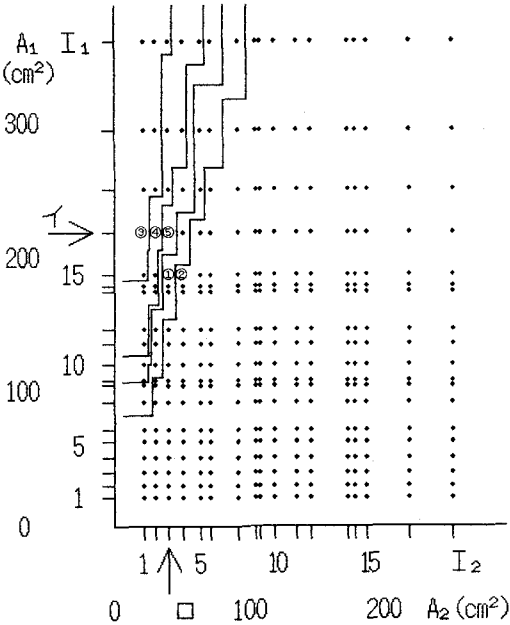
これらの図において、縦軸は軸力、横軸は、部材断面積、および設計変数としての断面ランクである。例えば図－９の場合、実線は部材２の断面積に対応する部材２の作用軸力であり、点線は、部材２の断面積に対応する部材２の許容軸力、□は、部材２の断面ランクに対応する部材２の許容軸力を表す。矢印は、離散的全応力設計法のプロセスを逆から見たものであり、以下のように、表－３の結果を説明するものである。

図－９において、設計変数１は、断面ランク１６に固定されている。今、部材２の現在の断面ランクが４にあるとすれば、それに対応する作用軸力は、断面ランク３の許容軸力より少ないので、設計は断面ランク３に移動する、次に断面ランク３に対応する作用軸力を計算すると、それは、図に示すように、断面ランク２の許容軸力より大きいので、断面ランク２に移動することはできなく、断面ランク３がこの場合の離散的全応力設計になる。一方、現在の断面ランクが２にあれば、それに対応する作用軸力は断面ランク２の許容軸力より少ない。ところが、その値は、断面ランク１の許容軸力より大きいので、設計は断面ランク１に移動することはできず、断面ランク２がこの場合の離散的全応力設計になることになる。断面ランク１に現在の設計がある場合も同様である。

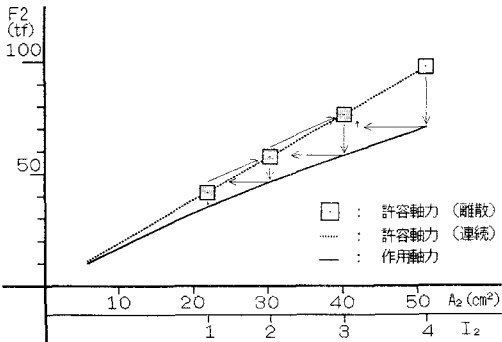
このようにして、同じ設計変数１の断面ランクに対し、複数の設計変数２の断面ランクが離散的全応力設計として存在することになる。

図－１０は、設計変数２の断面ランクを３に固定した場合の、設計変数１の関係を示す図である。図－９の場合と同様に説明される。

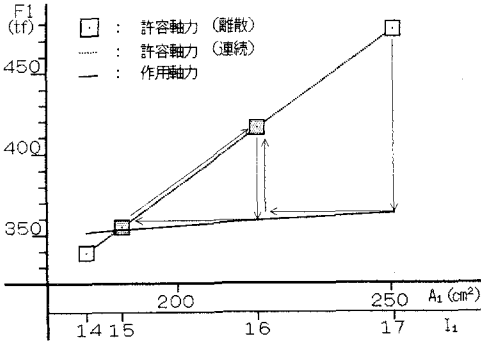
変数が連続量の場合はこのようなことはなく、離散的全応力設計の特徴の一つと考えられる。



図－８ ３部材２変数トラスの設計空間



図－９ 設計変数２の検討図



図－１０ 設計変数１の検討図

(5) トラス構造物の数値計算結果のまとめ

構造系、荷重の値、および断面形状を種々変えて行った52ケースの計算結果を、表-4にまとめて示した。表は、左から構造物名、荷重条件数、図-2から図-7に記号で示した荷重の値、初期設計数、H形鋼を用いた場合の計算結果、および鋼管を用いた場合の計算結果を示している。また、i)は得られた離散的全応力設計の数、ii)は初期設計数計算した内、最も少ない鋼材総容積に収束した数、iii)は得られた離散的全応力設計の内、鋼材総容積が最も多いものと少ないものの鋼材総容積の比を表している。

52ケースのうち34ケースで複数の離散的全応力設計が得られている。また、必ずしも、最も鋼材総容積が少ない離散的全応力設計に収束するわけではなく、場合によっては17%も鋼材総容積の多い離散的全応力設計に収束する場合があった。

表-4 トラス構造物の数値計算結果のまとめ

構造物名 (荷重条件数)	荷 重 tf	初 期 設計数	H型鋼			鋼 管		
			i)	ii)	iii)	i)	ii)	iii)
3部材 2変数トラス (1)	P = 282.8	900	5	39	1.16	5	752	1.10
3部材 3変数トラス (1)	P = 282.8	3000	4	20	1.12	1	3000	1.00
5部材 5変数トラス (1)	P = 50.0	5000	1	5000	1.00	1	5000	1.00
	P = 100.0	5000	3	3923	1.06	1	5000	1.00
	P = 200.0	5000	7	83	1.17	2	660	1.08
	P = 300.0	5000	4	467	1.09	4	78	1.05
10部材 6変数トラス (1)	P ₁ = 100.0 P ₂ = 200.0	8000	1	8000	1.00	1	8000	1.00
10部材 10変数トラス (1)	P ₁ = 100.0 P ₂ = 200.0	8000	4	1765	1.02	3	1562	1.01
	P = 50.0	8000	2	4224	1.00	10	32	1.08
	P = 100.0	8000	2	4173	1.00	2	6596	1.05
	P = 150.0	8000	2	4493	1.01	2	3144	1.01
	P = 200.0	8000	8	2092	1.12	2	4234	1.00
22部材 8変数トラス (1)	p = 2.0 P = 50.0	10000	3	2773	1.06	5	802	1.08
22部材 8変数トラス (2)	p = 2.0 P = 40.0	10000	1	10000	1.00	3	7687	1.01
22部材 10変数トラス (2)	p = 2.0 P = 40.0	10000	15	2023	1.05	2	5888	1.03
22部材 12変数トラス (2)	p = 2.0 P = 40.0	10000	6	604	1.03	2	1295	1.02
39部材 6変数トラス (4)	P = 20.0	10000	1	10000	1.00	1	10000	1.00
	P = 40.0	10000	1	10000	1.00	5	4700	1.05
	P = 60.0	10000	2	3212	1.00	1	10000	1.00
	P = 80.0	10000	3	1870	1.15	1	10000	1.00
	P = 100.0	10000	1	10000	1.00	1	10000	1.00
39部材 10変数トラス (4)	P = 20.0	10000	1	10000	1.00	1	10000	1.00
	P = 40.0	10000	1	10000	1.00	4	4873	1.05
	P = 60.0	10000	3	1567	1.01	3	472	1.01
	P = 80.0	10000	3	3356	1.02	2	6461	1.00
	P = 100.0	10000	1	10000	1.00	3	5605	1.01

5. 平面骨組構造物の数値計算結果

ここでは、平面骨組構造物の数値計算結果について説明する。

(1) 計算の対象とした平面骨組構造物

平面骨組構造物は、図-11～図-18に示す8種類の構造系を計算の対象とした。

トラス構造物の場合と同様に、すべての計算結果を詳細に説明することはできないので、図-18の9部材平面骨組構造物の結果を説明し、次に全体の結果をまとめて説明する。

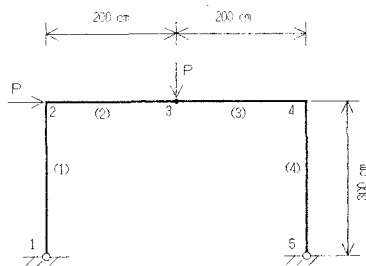


图-1 1 4 部材平面骨組構造物

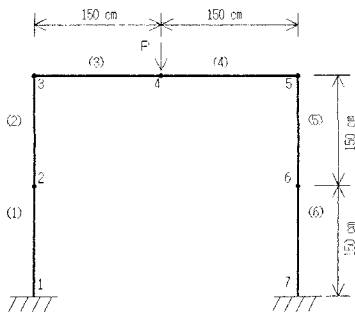


图-1 2 6 部材平面骨組構造物

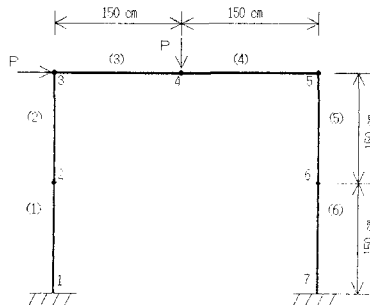


图-1 3 6 部材平面骨組構造物

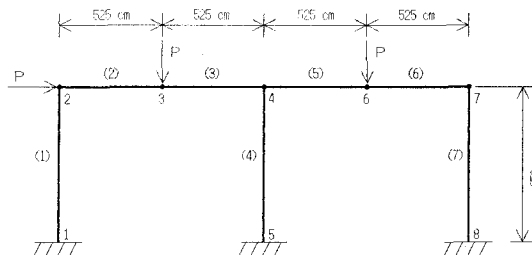


图-1 4 7 部材平面骨組構造物

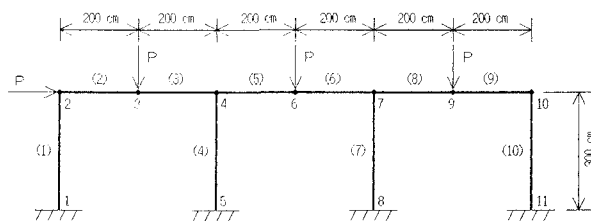


图-1 5 10 部材平面骨組構造物

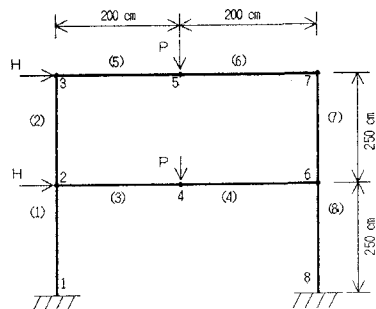


图-1 6 8 部材平面骨組構造物

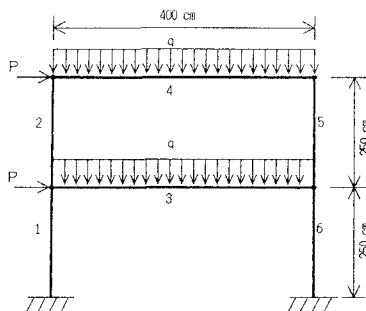


图-1 7 6 部材平面骨組構造物

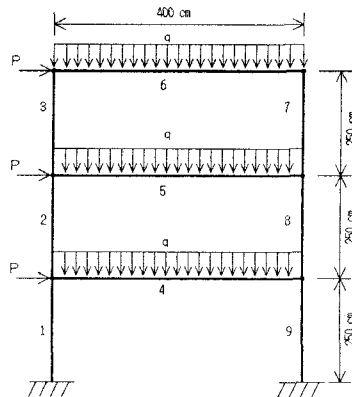


图-1 8 9 部材平面骨組構造物

(2) 9部材平面骨組構造物の計算結果

表-5に5変数、表-6に6変数の場合の結果を示した。リンクの関係は、表中に示されている。使用鋼材はH形鋼である。

どちらも5ケースの離散的全応力設計が得られており、表-5では最大鋼材総容積と最小鋼材総容積の比は1.31、表-6では1.11であった。

また、この場合は初期設計数は10000としているが、5変数の場合はほとんどのケース(77%)で最も鋼材総容積が少ない離散的全応力設計に収束しているが、6変数の場合は、594ケース(6%)しか最も鋼材総容積が少ない離散的全応力設計に収束していなかった。

(3) 平面骨組構造物の数値計算結果のまとめ

構造系、荷重の値、および断面形状を種々変えて行った24ケースの計算結果を、表-7にまとめて示した。表の説明は、表-4の場合と同様である。ただ、荷重の欄で破線を引き2段に書いてあるのは、荷重条件1と2の内容を示しているものである。

得られた傾向は、トラス構造物の場合とほとんど同じであるが、24ケースの内16ケースで複数の離散的全応力設計が得られている。また、必ずしも、最も鋼材総容積が少ない離散的全応力設計に収束するわけではなく、場合によっては31%も鋼材総容積の大きい離散的全応力設計に収束する場合もあった。

表-7 平面骨組構造物の数値計算結果のまとめ

構造物名 (荷重条件数)	荷 重 tf or tf/m	初 期 設計数	H型鋼			鋼 管		
			i)	ii)	iii)	i)	ii)	iii)
4部材3変数平面骨組構造物 (1)	P = 10.0	3000	2	2318	1.08	1	3000	1.00
6部材6変数平面骨組構造物A (1)	P = 50.0	5000	6	53	1.10	3	147	1.11
6部材6変数平面骨組構造物B (1)	P = 30.0	5000	5	271	1.07	1	5000	1.00
7部材5変数平面骨組構造物 (1)	P = 20.0	10000	11	206	1.26	4	50	1.02
10部材5変数平面骨組構造物 (1)	P = 50.0	10000	8	526	1.12	1	10000	1.00
8部材4変数平面骨組構造物 (1)	P = 20.0	10000	6	419	1.07	2	4840	1.02
8部材4変数平面骨組構造物 (2)	$\frac{P=20.0 \text{ H}=0.0}{P=0.0 \text{ H}=20.0}$	10000	4	5756	1.15	12	28	1.08
6部材4変数平面骨組構造物 (1)	$\frac{P = 20.0}{q = 30.0}$	10000	3	458	1.03	1	10000	1.00
6部材4変数平面骨組構造物 (2)	$\frac{P=20.0 \text{ H}=0.0}{P=0.0 \text{ H}=20.0}$	10000	3	3675	1.09	1	10000	1.00
9部材5変数平面骨組構造物 (1)	$\frac{P = 20.0}{q = 30.0}$	10000	5	7714	1.31	1	10000	1.00
9部材6変数平面骨組構造物 (1)	$\frac{P = 20.0}{q = 30.0}$	10000	5	594	1.11	1	10000	1.00
9部材6変数平面骨組構造物 (2)	$\frac{P=20.0 \text{ H}=0.0}{P=0.0 \text{ H}=20.0}$	10000	5	299	1.04	1	10000	1.00

6. 結論

既製形鋼を用いるトラス構造物および平面骨組構造物の設計において、その離散的全応力設計の特性を、数値実験の手法を用いて検討した。数値計算は、多数の初期設計を乱数により発生させ、それぞれの初期設計に対応する離散的全応力設計を、本論文の全応力設計法で求め、その結果を整理して検討を加えた。

本研究により得られた事項を箇条書きにすると以下になる。

- 1) 既製形鋼を用いるトラスおよび平面骨組構造物の設計においては、構造系、荷重系、および用いる既製形鋼の種類に関係なく、離散的全応力設計が複数存在するケースが少なからずあることが確認された。
- 2) 複数の離散的全応力設計が存在する場合、それらの鋼材総容積の最大値と最小値の比がかなり大きい(1.1~1.3)場合も数多くあった。
- 3) 初期設計を、問題に応じて数多く与え、それらがどの離散的全応力設計に収束するかについても検討を加えた。その結果、鋼材総容積の最も少ない離散的全応力設計に必ずしも多く収束するとは限らないことが確認された。場合によっては、数パーセントの可能性でしか最も鋼材総容積の少ない離散的全応力設計に収束しないケースもあった。
- 4) どの離散的全応力設計に収束するかは、初期値のみに依存するので、これらは離散変数を扱う場合の全応力設計法の問題点と考えられ、既製形鋼を用いる場合は、何らかの最適設計法的手法の利用が必要ではないかと考えられる。

それでもなお全応力設計法的な手法で設計を行う場合は、細心の注意が必要であり、少なくともいくつかの初期設計からの試みが必要ではないかと考えられる。

参考文献

- 1) 杉本博之・吉岡修治：2段階最適化による格子構造の最小重量設計に関する研究，構造工学論文集 Vol.33 A, pp.687~695, 1987.
- 2) SUGIMOTO, H., KAJIKAWA, Y. and VANDERPLAATS, G. N. : ON MINIMUM WEIGHT DESIGN OF PEDESTRIAN BRIDGES TAKING VIBRATION SERVICEABILITY INTO CONSIDERATION, Structural Eng./Earthquake Eng, Vol.4, No.2, pp.321-329, 1987.
- 3) 杉本博之：板厚を離散変数とするトラス構造物の最小重量設計に関する研究，室蘭工業大学研究報告（理工編），第37号，pp.183~198, 1987.
- 4) SUGIMOTO, H. : MINIMUM WEIGHT DESIGN OF TRUSSES WITH DISCRETE PLATE THICKNESS, Proc. of the 2nd East Asia-Pacific Conf. on Structural Eng. and Const., pp.1294-1299, 1989.
- 5) 杉本博之：近似の概念を利用したトラス構造物の離散的最適設計法に関する研究，土木学会論文集 No.432/I-16, pp.79~88, 1991.
- 6) 山本洋敬・杉本博之：既製形鋼を用いる平面骨組構造物の全応力設計に関する一考察，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第1部，pp.804~805, 1991.
- 7) 日本道路橋協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，丸善株式会社，1990.
- 8) 杉本博之：トラス構造物の実用的最適設計に関する研究，土木学会論文報告集，第208号，pp.23~31, 1972.
- 9) 杉本博之：軸力のみを受ける部材のサブオプティミゼーションとその応用，室蘭工業大学研究報告（理工編），第8巻，第2号，pp.217~231, 1974.
- 10) 森 正武：FORTRAN 77 数値計算プログラミング，岩波書店，1986.

(1991 年 9月30日受付)