

既製形鋼を用いる平面骨組構造物の全応力設計の特性とGAの応用に関する研究

A STUDY ON FULLY STRESSED DESIGN METHOD AND GA FOR THE DESIGN OF FRAMED STRUCTURES USING READY-MADE SHAPE STEEL

杉本 博之*、杉本 治暁**、鹿 汴麗**

By Hiroyuki SUGIMOTO, Haruaki SUGIMOTO and Bianli LU

The designs of the framed-structures given by the conventional design method are studied. The framed-structures have been designed by the fully-stressed design method under the tacit understanding of its uniqueness and optimality. But, in this study, the tacit understanding is proved numerically not to be hold. Three types of the initial designs are given in this study, random selection of the sectional ranks, equal selection of the ranks for beams and columns respectively, and random and almost best selection for the members. Most of the design examples show the non-uniqueness, non-optimality and non-reliability of the fully-stressed design method. GA is also applied to the designs and the results show the possibility of GA.

Key Words: fully-stressed design method, framed-structures, GA

1. まえがき

現在の道路橋示方書¹⁾は、各部材の断面で安全性の照査を行うことを基本としているため、平面骨組構造物の設計は、断面寸法に係わる何らかの仮定の下で構造解析を行い、得られた断面力に対して断面を照査し、必要があればこれらの過程を繰り返すという、いわば照査型の設計法（これを、ここでは全応力設計法という）によりなされていた。現在の道路橋示方書¹⁾は、許容応力度設計法を基本としているが、将来、終局強度設計法が導入されるようになって、全応力設計法が、実務レベルの設計法の中心であることには変化がないと予想される。その理由は、やはり効率が最も良い（構造解析の回数が少ない）設計法であることと、得られた設計（全応力設計）の（準）唯一性と（準）最適性に対する暗黙の了解があるように思われる。

筆者の一人は、すでに、既製形鋼を用いるトラス構造物および小規模な平面骨組構造物の全応力設計について、まったくランダムに初期設計を与える数値計算の結果より考察を加え、構造系によっては複数の全応力設計が存在することを確認した²⁾。そこで、平面骨組構造物の設計変数（決めるべき部材断面）の数は、3～6と少なかったが、その後、より大規模な異なる構造系において設計変数の数を多くして全応力設計法を適用したところ、予想を上回る多数の全応力設計を得るに至った。

そこで、初期設計をただ単にランダムに与えるのみでなく、梁・柱それぞれを同一断面とした設計、あるいは、各部材毎に最適値に近い断面を与えた設計それぞれを初期設計とした場合の計算も行い、より詳細に

* 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)

検討を加える事を試みた。さらに、全応力設計法は、収束計算となるが、収束した全応力設計に加えて、収束計算の過程で得られる許容設計をも同時に考慮して考察を加えた。これは、実務の設計においては、収束過程の途中で得られる許容設計を採用する可能性があるためである。また、本研究の既製形鋼を用いる骨組構造物の最適設計に関しては、GAの応用が考えられる。そこで、全応力設計法を適用した同様の設計問題に、単純GAおよび生長を考慮したGA³⁾を応用し、GAの可能性についても考察を加えている。

なお、本研究においては、設計を評価する評価値として鋼材総容積を用いた。鋼材総容積を設計の評価値とする事自体については種々議論のあるところであるが、本研究に関しては、評価値の取り方により、得られた結論の一般性は失われないと考える。

表－1 断面ランクと断面寸法

2. 既製H形鋼を用いる平面骨組構造物の全応力設計

本研究では、通常の設計法で既製形鋼を用いる骨組構造物の設計を行った場合、どのような設計を選択することになるかについて統計的に処理し、結果を考察することを第一の目的としている。そのため、収束解として得られる全応力設計のみでなく、繰返し計算の過程で得られる許容設計も抽出して考察の対象とした。

以下に、本研究の全応力設計について説明する。

なお、用いるH形鋼(図－1)は、JIS G 3444に定められている断面の内、表－1に示す29種類であり、鋼種はSS400(SS41)である。表－1は、選択した29種類の断面を、その断面積の小さい順に並べたものである。

ランク	断面積 (cm^2)	I_x (cm^4)	H (cm)	B (cm)	t_w (cm)	t_f (cm)
1	63.53	4720	20.0	20.0	0.8	1.2
2	71.53	4980	20.0	20.4	1.2	1.2
3	72.38	11300	29.4	20.0	0.8	1.2
4	84.12	23700	40.0	20.0	0.8	1.3
5	84.30	28700	44.6	19.9	0.8	1.2
6	92.18	10800	25.0	25.0	0.9	1.4
7	96.76	33500	45.0	20.0	0.9	1.4
8	101.30	41900	49.6	19.9	0.9	1.4
9	101.50	21700	34.0	25.0	0.9	1.4
10	104.70	11500	25.0	25.5	1.4	1.4
11	131.30	56500	50.6	20.1	1.1	1.9
12	134.40	77600	60.0	20.0	1.1	1.7
13	152.50	90400	60.6	20.1	1.2	2.0
14	157.40	56100	44.0	30.0	1.1	1.8
15	163.50	71000	48.8	30.0	1.1	1.8
16	173.90	40300	35.0	35.0	1.2	1.9
17	174.50	103000	58.2	30.0	1.2	1.7
18	192.50	118000	58.8	30.0	1.2	2.0
19	211.50	172000	69.2	30.0	1.3	2.0
20	222.40	137000	59.4	30.2	1.4	2.3
21	235.50	201000	70.0	30.0	1.3	2.4
22	243.40	254000	79.2	30.0	1.4	2.2
23	267.40	292000	80.0	30.0	1.4	2.6
24	295.40	92800	41.4	40.5	1.8	2.8
25	309.80	411000	90.0	30.0	1.6	2.8
26	360.70	119000	42.8	40.7	2.0	3.5
27	364.00	498000	91.2	30.2	1.8	3.4
28	528.60	187000	45.8	41.7	3.0	5.0
29	770.10	298000	49.8	43.2	4.5	7.0

(1) 全応力設計法

本研究では、多数の初期設計から収束計算を開始し、得られた設計を集計して考察を加えている。全応力設計法のための過程は以下ようになる。

- ①初期設計を与える。
- ②現在の設計に対する解析を行い、また有効座屈長を計算する。
- ③各部材の断面力と有効座屈長の下で、表－1のランクを1から

順に代入して強度に関する照査を行い、最初にすべての照査式を満足するランクをその部材のランクとする。これをすべての部材について行う。

なお、繰返し回数が11回目以降は、上記の手続きはとらず、各部材の新しいランクの前のランクからの移動量は±1とした。

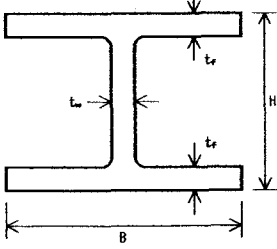
これは、設計が振動して収束性が悪くなるのを防ぐためである。

- ④新しい設計に対して解析を行い、また有効座屈長を計算して、各断面の照査を行い、新しい設計が許容設計かどうかの確認を行う。
- ⑤新設計と前設計が一致すれば、①の初期設計に対する全応力設計が得られ

たことになり、次の初期設計の計算に移る。一致しなければ、新設計を前設計として③へ返る。なお、最大の繰返し数は20である。許容設計が複数得られれば、評価値が最も小さい設計を許容設計とした。

上記の全応力設計法による設計の結果、初期設計に応じて次の4種類の結果を得た。①収束し全応力設計が得られた。②収束し全応力設計が得られたが、許容設計の方が評価値は小さい。③振動等の理由により収束はしないが、許容設計は得られた。④振動等の理由により収束せず、かつ許容設計も得られない。

後記の計算例では、①を「全応力設計」、②～③を「許容設計」、④を「なし」として集計している。



図－1 H形鋼の断面図

(2) 照査式

各部材の強度に関する照査式は、道路橋示方書¹⁾を参考にして以下を用いた。

軸方向力が引張の場合

$$g_{t1} = \frac{\sigma_t}{\sigma_{ta}} + \frac{\sigma_{bty}}{\sigma_{ta}} \leq 1 \quad (1), \quad g_{t2} = -\frac{\sigma_t}{\sigma_{ta}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy}} \leq 1 \quad (2)$$

$$g_{t3} = -\frac{\sigma_t}{\sigma_{cal}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{cal}} \leq 1 \quad (3)$$

軸方向力が圧縮の場合

$$g_{c1} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{caz}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{bagy} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}} \right)} \leq 1 \quad (4), \quad g_{c2} = \frac{\sigma_c}{\sigma_{cal}} + \frac{\sigma_{bcy}}{\sigma_{cal} \left(1 - \frac{\sigma_c}{\sigma_{eay}} \right)} \leq 1 \quad (5)$$

ここで、 σ_t 、 σ_c は、それぞれ照査する断面に作用する軸方向力による引張および圧縮応力度、 σ_{bty} 、 σ_{bcy} は、強軸まわりに作用する曲げモーメントによる曲げ引張応力度および曲げ圧縮応力度、 σ_{ta} は、許容軸方向引張応力度、 σ_{caz} は、強軸まわりの許容軸方向圧縮応力度、 σ_{bagy} は、局部座屈を考慮しない強軸まわりの許容曲げ圧縮応力度、 σ_{cal} は、局部座屈に対する許容応力度、 σ_{eay} は、強軸まわりの許容オイラー座屈応力度である。単位は、すべて (kgf/cm²) である。

(3) 初期設計

全応力設計法においては、最初に各部材の断面寸法に係わる何らかの仮定をし設計計算が開始される。

各部材毎に、表-1のランクをランダムに与える²⁾のも一つの考え方であるが、その結果得られた全応力設計の多数性は、初期設計のランダムさに起因されかねない。本研究で対象としている後記の平面骨組構造物では、梁・柱それぞれ同一の断面が仮定されることが多い事、あるいは、各部材別々に断面を仮定するにしても、過去の設計のデータ、あるいは構造内での部材の位置等により、かなり最適に近い断面ランクが仮定される可能性の高い事等により、以下の3種類の初期設計を与えて全応力設計を行い、結果を集計した。

- 1) 初期設計1：各部材毎に、[0, 1) の一様乱数を発生させ、表-1の29種類の断面ランクから全くランダムに選択する。この考え方で1000組の初期設計を与えた。
- 2) 初期設計2：梁・柱それぞれ同一の断面を与えた場合である。すべての組み合わせを考えても、29×29 = 841組であるので、この場合はすべての組み合わせ 841組を与えた。
- 3) 初期設計3：初期設計1で得られた許容設計の内、各構造系毎に最も評価値が小さい設計における各部材の断面ランクを参考にして、そのランクを中心とする5ランクに初期設計を限定し、やはり各部材毎に、[0, 1) の一様乱数を発生させ、5ランクからランダムに選択する。この考え方で1000組の初期設計を与えた。

3. GA (遺伝的アルゴリズム)

GAはダーウィンの自然淘汰説を基準とし、それを比較的簡単な数理モデルに置き換えて最適化手法の一つとして利用しているものである⁴⁾。理論は簡単であるが、関数の感度解析の情報を利用する従来の数理計画法では解くことが困難であった、離散変数、不連続関数から構成される最適化問題に容易に応用することができ、最適性の厳密な証明はできないが、とにかく解は出すという頑健さが評価されている手法である。

後記の数値計算例で示すように、今回全応力設計を試みた構造系の大部分で、数十あるいは数百の全応力設計、許容設計を得た。これは、従来考えられなかった結果と思われるが、少なくとも全応力状態のみを断面決定の根拠とする設計法では、真の最適解がなかなか得づらいことを意味する。

そこで本研究では、GAの応用も試み、その可能性を検討した。GAは、繁殖・淘汰、交叉、突然変異からなる単純GA以外に、生長オペレータを考慮したGAを適用し、比較した。

4. 数値計算結果

(1) 構造系の説明

設計の対象としたのは、図-2～5に示す4種類の平面骨組構造物である。

荷重の与え方はすべて共通で、図中に示す水平集中荷重Pと垂直分布荷重qを同時に載荷している。図-3の非対称ラーメンのみ、水平荷重を左右から別々に載荷している。Pは5tf(49.0kN)、10tf(98.1kN)、および20tf(196.1kN)、qは10/L tf/m(98.1/L kN/m)、20/L tf/m(196.1/L kN/m)、および30/L tf/m(294.2/L kN/m)とし、これらの組み合わせ9ケースに対する設計を行った。Lは支間長で、2m、3m、4mとした。図中、()内の数字は、部材番号である。図-3の非対称ラーメンでは、全部材異なる断面としているが、他の構造では、左右の対称位置にある部材は同一断面としている。結局、設計変数の数は、凸型ラーメンで6、非対称ラーメンで13、凹型ラーメンで15、5層ラーメンで20となる。

(2) 全応力設計および許容設計の数

表-2～5に、初期設計1000組あるいは841組に対して、収束し全応力設計が得られた数、許容設計が得られた数、

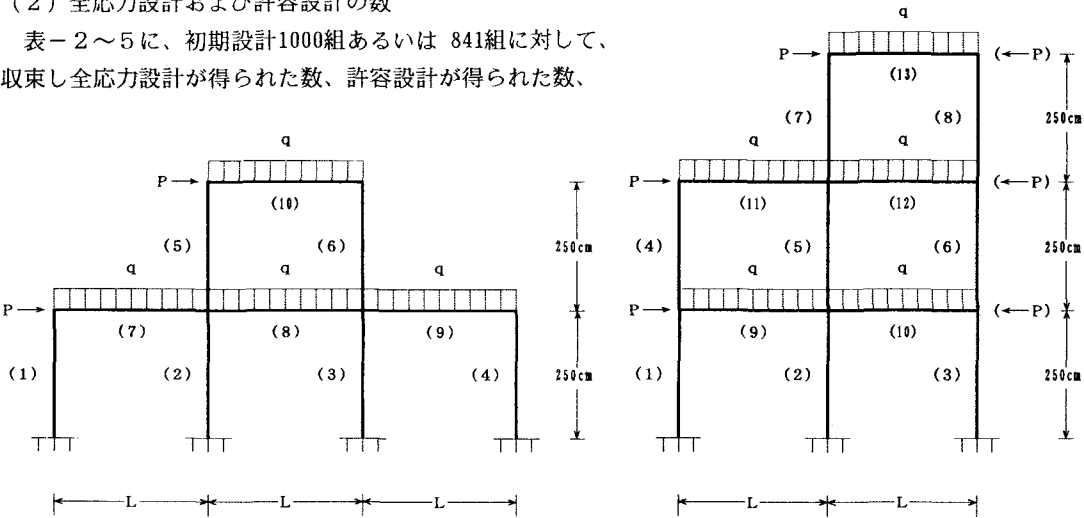


図-2 凸型ラーメン

図-3 非対称ラーメン

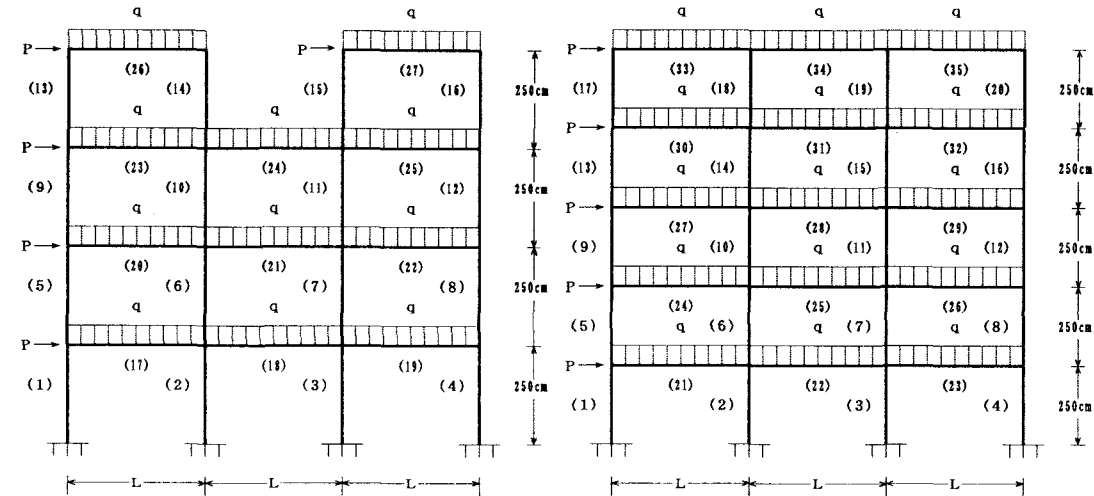


図-4 凹型ラーメン

図-5 5層ラーメン

それらの設計の種類の数、および許容設計が得られなかった数を、構造系毎にまとめて示してある。表中、例えば〔全応力設計〕あるいは〔許容設計〕の欄の (i / j) は、1000組 (初期設計2においては 841組) の初期設計の内、j組において全応力設計あるいは許容設計が得られ、その中には i 種類の組合せの設計があったことを意味する。〔なし〕の欄の数は、1000組あるいは841組 (初期設計2) の初期設計からの収束計算の内、許容設計が一つも得られなかった数である。

全応力設計、許容設計の種類の数と最大値のみ構造系毎に見ていくと (表中、網掛けで示してある)、凸型ラーメンでは、初期設計1、支間長3m、荷重〔20-10/L〕の時に、全応力設計89種類、許容設計116種類、非対称ラーメンでは、初期設計1、支間長3m、荷重〔5-10/L〕の時に、全応力設計499種類、許容設計808種類、凹型ラーメンでは、初期設計1、支間長3m、荷重〔10-10/L〕の時に、全応力設計514種類、許容設計863種類、5層ラーメンでは、初期設計1、支間長4m、荷重〔5-10/L〕の時に、全応力設計510種類、許容設計896種類、初期設計3、支間長2m、荷重〔5-20/L〕の時に、全応力設計564、許容設計712種類の各設計の種類が得られている。

一般的な傾向として、初期設計2において最も設計の種類数は少なく、次いで初期設計3、初期設計1の順になっている。また、設計変数の数が多くなると、得られる設計の種類数は増加している。

とにかく、平面骨組構造物の全応力設計の数、および全応力設計の過程で得られる許容設計の数はかなり多く、どの設計が得られるかは、初期設計に強く依存していることが指摘される。

(3) 許容設計の評価値 (鋼材総容積) の分布

前記のように、初期設計2の場合は得られる設計の種類数は減少するが、それでもかなりの数の全応力設計、および許容設計の種類数を得た。しかし、各部材のランクの組合せが無数にあっても、それらの設計の評価値が同程度であれば、得られる設計の多数性、初期設計依存性はあまり問題にならない。

表-2 凸型ラーメンの全応力設計、許容設計の収束数及び種類の数

初期設計	水平荷重	支間	2m			3m			4m		
			10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L
初期設計1	5	全応力設計	4/1000	12/855	9/1000	13/1000	10/681	4/200	20/1000	4/749	4/157
		許容設計	4/1000	14/1000	9/1000	16/1000	13/1000	20/1000	20/1000	17/1000	12/1000
		なし	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	全応力設計	43/958	33/1000	9/683	75/908	22/763	14/861	33/836	18/660	16/888
		許容設計	63/1000	38/1000	25/995	91/1000	36/889	17/1000	41/1000	31/922	20/987
		なし	0	0	5	0	111	0	0	78	13
	20	全応力設計	38/656	16/253	23/379	89/755	16/663	9/162	36/981	13/822	1/234
		許容設計	60/960	60/869	43/1000	116/1000	38/953	26/1000	70/1000	28/996	27/964
		なし	40	131	0	0	47	0	0	4	36
初期設計2	5	全応力設計	3/841	8/614	4/841	5/841	7/828	1/63	5/841	4/712	1/46
		許容設計	3/841	9/841	4/841	5/841	8/841	4/841	5/841	6/841	5/841
		なし	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	全応力設計	8/841	6/841	4/658	14/813	3/12	2/841	5/841	2/9	6/841
		許容設計	10/841	6/841	7/841	16/841	9/401	2/841	5/841	5/432	6/841
		なし	0	0	0	0	440	0	0	409	0
	20	全応力設計	9/841	4/606	3/124	17/840	4/646	0/0	11/841	3/841	0/0
		許容設計	9/841	7/841	8/841	19/841	5/841	2/841	12/841	3/841	4/841
		なし	0	0	0	0	0	0	0	0	0
初期設計3	5	全応力設計	4/1000	11/849	7/1000	13/1000	10/687	3/71	20/1000	4/806	2/227
		許容設計	4/1000	12/1000	7/1000	14/1000	14/1000	11/1000	20/1000	16/1000	5/1000
		なし	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	10	全応力設計	28/977	16/1000	8/686	50/872	16/558	9/859	24/768	10/561	11/876
		なし	48/1000	19/1000	18/990	62/1000	36/811	11/1000	30/1000	20/897	14/991
		なし	0	0	10	0	189	0	0	103	9
	20	全応力設計	20/627	7/189	9/407	20/444	7/759	2/254	29/995	9/956	1/342
		許容設計	32/979	56/630	17/1000	29/1000	17/823	10/1000	49/1000	12/1000	13/1000
		なし	21	370	0	0	177	0	0	0	0

表-3 非対称ラーメンの全応力設計、許容設計の収束数及び種類の数

初期設計	水平荷重	支間	2m			3m			4m		
			10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L
初期設計1	5	全応力設計	355/529	313/578	230/412	499/631	263/401	213/923	482/735	174/475	47/557
		許容設計	608/949	448/917	443/971	808/975	491/907	262/998	752/989	364/942	123/939
		なし	51	83	29	25	93	2	11	58	61
	10	全応力設計	289/321	172/229	58/115	329/360	216/485	115/367	251/289	148/226	117/375
		許容設計	667/720	498/638	241/432	737/785	484/929	229/935	676/769	340/820	310/937
		なし	280	362	568	215	71	65	231	180	63
初期設計2	5	全応力設計	37/42	126/299	132/470	90/116	89/151	54/221	44/65	11/12	11/25
		許容設計	300/416	364/836	274/943	397/472	305/709	171/839	287/385	129/180	203/517
		なし	584	164	57	528	291	161	615	820	483
	10	全応力設計	21/229	9/281	1/8	21/378	6/43	25/780	15/531	9/188	3/269
		許容設計	36/788	27/677	18/816	33/841	24/563	31/841	33/841	28/801	18/753
		なし	53	164	25	0	278	0	0	40	88
初期設計3	5	全応力設計	13/60	0/0	4/111	14/160	5/634	3/224	2/21	0/0	5/235
		許容設計	36/257	11/142	26/267	36/839	19/817	7/841	21/407	18/686	20/841
		なし	584	699	574	2	24	0	434	155	0
	10	全応力設計	0/0	3/11	14/358	3/13	0/0	2/20	3/11	0/0	3/12
		許容設計	5/12	29/807	31/825	43/277	15/273	25/691	15/77	9/24	43/401
		なし	829	34	16	564	568	150	764	817	440
初期設計3	5	全応力設計	302/488	180/547	95/217	403/585	159/418	176/960	389/832	69/458	41/377
		許容設計	534/881	310/851	266/958	743/977	294/929	211/1000	616/993	181/924	107/925
		なし	119	149	42	23	71	0	7	76	75
	10	全応力設計	119/286	47/93	19/95	181/273	213/645	77/780	162/235	113/235	95/471
		なし	278/668	174/492	93/316	512/734	360/975	116/977	541/825	278/829	212/967
		なし	332	508	684	266	25	23	175	171	33
初期設計3	20	全応力設計	16/47	32/109	41/167	38/72	5/33	2/100	17/35	0/0	1/4
		許容設計	166/511	97/770	84/945	230/406	75/667	68/712	123/368	29/56	125/477
		なし	489	230	55	594	333	288	632	944	523

表-4 凹型ラーメンの全応力設計、許容設計の収束数及び種類の数

初期設計	水平荷重	支間	2m			3m			4m		
			10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L
初期設計1	5	全応力設計	284/392	397/605	376/964	457/508	376/656	343/833	399/455	341/762	55/454
		許容設計	598/840	608/967	442/991	819/919	550/980	429/979	744/921	456/1000	108/1000
		なし	160	33	7	81	20	21	79	0	0
	10	全応力設計	245/320	154/690	60/176	514/559	232/894	77/917	395/454	156/826	145/739
		許容設計	693/838	299/933	230/547	863/912	312/950	99/998	701/773	227/931	200/998
		なし	162	67	453	88	50	2	227	69	2
初期設計2	20	全応力設計	72/78	18/25	30/167	96/105	63/133	76/141	28/29	37/50	161/267
		許容設計	321/371	272/420	171/735	485/568	338/560	325/666	248/296	204/283	445/783
		なし	629	580	265	432	440	334	704	717	217
	5	全応力設計	23/428	14/709	24/824	16/190	20/656	41/774	13/506	15/807	7/278
		許容設計	40/767	22/834	37/824	36/841	33/841	54/841	34/841	21/841	19/841
		なし	74	7	17	0	0	0	0	0	0
初期設計3	10	全応力設計	8/561	13/837	3/155	13/76	8/833	7/786	20/340	6/635	16/698
		許容設計	37/756	21/840	29/714	35/481	14/840	8/841	42/688	13/646	23/841
		なし	85	1	127	360	1	0	153	195	0
	20	全応力設計	0/0	0/0	9/83	1/1	6/216	4/32	7/20	0/0	20/340
		許容設計	21/201	25/124	35/820	50/481	26/508	64/791	36/299	7/33	43/833
		なし	640	717	21	360	333	50	542	808	8
初期設計3	5	全応力設計	212/417	306/605	348/873	425/520	400/711	232/809	393/480	363/874	32/688
		許容設計	464/831	482/928	406/948	787/938	577/992	295/999	735/964	437/1000	61/1000
		なし	169	72	52	62	8	1	36	0	0
	10	全応力設計	223/349	120/762	31/92	202/310	146/951	52/966	60/184	88/894	60/731
		なし	534/885	198/989	117/451	675/914	224/977	62/1000	305/673	153/973	82/1000
		なし	115	11	549	86	23	0	327	27	0
初期設計3	20	全応力設計	18/60	13/53	13/31	39/46	51/91	21/99	2/2	39/88	80/230
		許容設計	178/325	171/630	120/832	343/504	396/649	238/805	74/137	236/408	241/951
		なし	675	370	168	496	351	195	863	592	49

表－５　５層ラーメンの全応力設計、許容設計の収束数及び種類の数

初期設計	水平荷重	支 間	2 m			3 m			4 m		
		垂直荷重	10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L
初期設計 1	5	全応力設計	351/481	384/465	415/747	465/495	359/426	207/801	510/538	208/260	54/303
		許容設計	714/913	646/987	575/932	879/927	637/990	344/1000	896/935	519/958	131/1000
		なし	87	13	68	73	10	0	65	42	0
	10	全応力設計	216/243	345/387	77/451	409/424	559/712	37/489	382/392	429/720	54/853
		許容設計	730/801	794/857	266/945	880/870	804/977	85/985	804/802	647/995	70/1000
		なし	199	143	55	130	23	15	198	5	0
初期設計 2	5	全応力設計	76/ 81	24/ 28	41/ 55	97/ 99	79/ 98	8/ 8	40/ 40	7/ 7	27/ 33
		許容設計	419/435	265/365	353/490	507/507	480/606	307/422	354/371	230/239	320/437
		なし	565	635	510	493	394	578	629	761	563
	10	全応力設計	8/204	8/ 61	44/639	4/112	0/ 0	17/841	9/357	3/ 13	2/ 22
		許容設計	30/791	26/841	85/766	42/831	19/841	32/841	29/720	51/838	16/841
		なし	50	0	75	10	0	0	121	3	0
初期設計 3	5	全応力設計	10/241	38/683	10/770	19/118	32/739	4/174	23/183	13/490	11/812
		許容設計	56/690	60/783	20/840	59/799	47/841	9/841	69/654	35/841	14/841
		なし	151	58	1	42	0	0	187	0	0
	10	全応力設計	0/ 0	0/ 0	4/ 5	0/ 0	8/ 59	0/ 0	3/ 6	0/ 0	9/152
		許容設計	32/404	31/415	27/318	16/ 43	34/547	34/319	62/435	50/234	48/551
		なし	437	426	523	798	294	522	406	607	290
初期設計 3	5	全応力設計	386/588	564/862	201/479	531/613	295/523	64/932	414/499	311/468	23/406
		許容設計	602/888	712/988	423/923	830/946	579/994	210/1000	775/931	553/984	64/1000
		なし	112	12	77	54	6	0	69	16	0
	10	全応力設計	202/238	321/455	36/112	260/326	502/797	26/650	331/570	247/717	60/851
		なし	650/812	690/913	165/913	643/837	666/978	60/996	552/929	405/991	82/999
		なし	188	87	87	163	22	4	71	9	1
初期設計 3	20	全応力設計	32/ 49	21/ 41	22/ 70	14/ 14	13/ 14	7/ 7	22/ 22	2/ 2	3/ 3
		許容設計	321/520	301/566	173/698	208/241	296/474	187/339	288/306	164/239	128/289
初期設計 3	なし	なし	480	434	302	759	526	661	694	761	711

そこで、各構造系、各荷重の組合せ毎に、多数得られた許容設計の評価値の内の最小値と最大値を表－６に示した。表中、左の数字が最小値であり、右の数字が最大値である。

この表より一般的にいえることは、評価値の取る範囲は、初期設計１に対する許容設計の取る範囲が最も広く、次に初期設計３、初期設計２の順になっている、また、初期設計２に対する許容設計の範囲はかなり狭く、初期設計１の範囲の中に入り、また、初期設計３の範囲は、初期設計１の範囲より評価値の小さい方にずれていることである。つまり、梁・柱それぞれ同一断面として行った設計では、必ずしも最良の設計は得られないが、狭い範囲の評価値を与えるのに対し、最初から最適値に近い断面ランクを与えた場合には、やはり全くランダムに与えた場合より、より小さい評価値が得られたことになる。

(４) 許容設計の分布状況

各初期設計の設定法による収束性を比較するために、許容設計の評価値の頻度分布を図－６～１１に示した。荷重条件は、紙面の都合により水平10tf、垂直20/L tf/m の場合に限定している。凸型ラーメン、非対称ラーメンは支間長 3 m の結果、凹型ラーメンと５層ラーメンは 2 m と 4 m の場合の結果である。実線は初期設計１の時の結果、点線は初期設計２の時の結果、一点鎖線は初期設計３の時の結果である。

これらの図より、初期設計２に対する許容設計の評価値は、他に比べて狭い範囲に分布するが、分布のピークは値の大きい方に偏ることが多く、必ずしも最良の設計を与えないこと、初期設計３に対する許容設計の分布の範囲は、初期設計１に対する分布より値の小さい方に移動しているが、分布の幅、分布の形状はほぼ同じである事等がわかる。これらの図は一部であるが、他の場合も同様の傾向を示す。

(５) GA による結果

上記の(２)～(４)の結果および考察より、全応力設計法による結果は、初期設計の設定法により多少の差はあるが、得られる可能性のある全応力設計あるいは許容設計の種類には無数の可能性があり、最適性の保証はもとより、最良の設計に近いという準最適性の保証もなかなか得づらいことがわかる。

表-6 得られた許容設計の評価値の上下限值 ($\times 10^3 \text{cm}^3$)

構造系	初期設計	本並荷重	L = 2 m			L = 3 m			L = 4 m		
			垂直荷重 tf/m								
			10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L	10/L	20/L	30/L
凸型 ラーメン	初期設計1	5	146～152	159～170	178～185	174～193	191～208	221～236	215～229	239～255	280～327
		10	172～205	187～219	213～236	202～244	228～276	256～302	244～307	283～342	344～390
		20	253～286	265～299	278～309	285～340	318～355	338～375	353～407	381～418	417～453
	初期設計2	5	146～151	159～170	178～182	174～179	191～208	225～229	215～220	243～255	288～317
		10	171～196	187～205	215～226	202～233	234～257	262～271	255～261	288～321	346～390
		20	257～286	278～299	297～309	295～331	337～355	365～368	365～407	400～418	437～449
	初期設計3	5	146～152	159～170	178～185	174～193	191～208	221～236	215～229	239～255	280～308
		10	172～199	187～211	213～236	202～244	228～261	256～292	244～290	283～325	344～390
		20	253～286	265～299	278～309	285～326	318～355	338～368	342～407	381～418	417～449
非対称 ラーメン	初期設計1	5	222～256	248～289	274～346	263～298	300～345	338～387	309～350	366～414	435～496
		10	292～351	325～393	360～409	348～413	391～439	434～478	422～489	463～525	539～584
		20	441～556	458～539	492～589	511～580	549～628	574～652	598～708	635～758	683～769
	初期設計2	5	225～246	252～294	280～302	263～281	303～352	341～357	312～332	370～403	450～503
		10	302～322	341～366	379～403	350～371	410～439	439～466	430～461	481～550	541～579
		20	448～490	476～510	496～541	513～587	554～581	574～608	617～654	649～661	682～719
	初期設計3	5	219～244	249～276	274～301	262～287	299～324	336～372	310～344	369～403	435～479
		10	288～322	324～362	360～405	343～386	388～431	436～469	423～473	463～546	532～586
		20	437～482	460～521	492～541	510～554	546～590	574～615	601～637	635～675	682～715
凹型 ラーメン	初期設計1	5	505～599	578～665	652～748	589～685	682～782	793～972	704～800	859～942	1018～1102
		10	675～788	767～844	814～1015	796～897	888～1042	979～1076	952～1048	1074～1176	1222～1314
		20	1011～1189	1077～1274	1141～1391	1153～1346	1248～1429	1336～1570	1352～1574	1439～1726	1566～1815
	初期設計2	5	497～547	615～631	683～729	593～629	707～803	811～876	700～745	888～916	1049～1096
		10	696～738	783～823	877～937	823～873	918～989	998～1049	973～1057	1113～1171	1237～1297
		20	1027～1059	1116～1189	1163～1267	1161～1251	1266～1326	1375～1489	1354～1480	1481～1541	1589～1689
	初期設計3	5	498～546	571～651	649～742	586～656	682～767	793～889	704～780	859～952	1018～1102
		10	672～759	756～814	814～924	794～861	886～979	979～1050	941～1042	1062～1154	1198～1295
		20	1009～1202	1071～1204	1157～1281	1134～1274	1236～1344	1345～1446	1352～1431	1431～1586	1561～1733
5層 ラーメン	初期設計1	5	651～776	770～875	879～1149	762～909	914～1042	1065～1206	907～1023	1094～1264	1312～1441
		10	830～962	941～1112	1096～1204	976～1128	1110～1348	1289～1443	1159～1297	1342～1478	1553～1658
		20	1173～1420	1309～1559	1480～1811	1367～1603	1530～1746	1716～1962	1593～1870	1789～2167	2010～2273
	初期設計2	5	662～750	816～848	902～1005	779～850	940～1000	1062～1177	918～963	1126～1206	1363～1418
		10	862～916	997～1061	1109～1188	1011～1058	1129～1231	1296～1359	1195～1300	1372～1414	1572～1617
		20	1208～1296	1353～1446	1502～1568	1367～1462	1564～1627	1712～1864	1603～1731	1806～1941	2021～2135
	初期設計3	5	642～706	758～851	886～979	755～836	914～993	1055～1153	904～977	1094～1211	1312～1418
		10	818～926	931～1069	1096～1215	963～1069	1098～1224	1289～1386	1153～1246	1339～1446	1553～1658
		20	1168～1319	1301～1460	1455～1682	1347～1518	1532～1661	1689～1864	1579～1684	1784～1932	2007～2208

表-7 全応力設計の最良値とGAの結果の比較 (cm^3)

構造系	支間長	全応力設計			G A	
		初期設計1	初期設計2	初期設計3	単純GA	生長
凸型	3 m	227574	233894	227574	228840	227570
非対称	3 m	391308	409827	387845	423250	379940
凹型	2 m	767106	782550	755801	832980	778100
	4 m	1073998	1113148	1061792	1119800	1100700
5層	2 m	941120	997248	931355	1055400	968700
	4 m	1341658	1372226	1338850	1543200	1356700

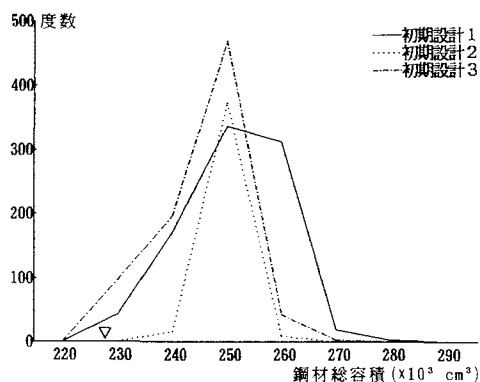


図-6 凸型ラーメン (3m) の許容設計の度数分布

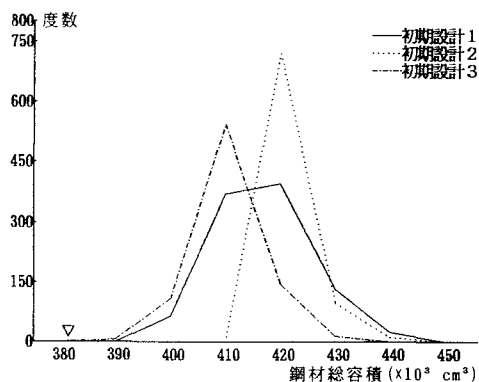


図-7 非対称ラーメン (3m) の許容設計の度数分布

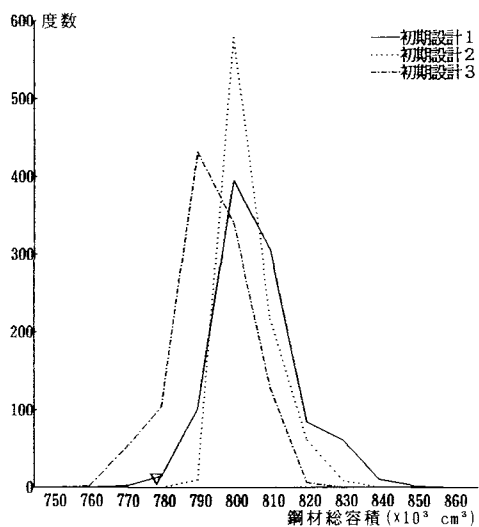


図-8 凹型ラーメン (2m) の許容設計の度数分布

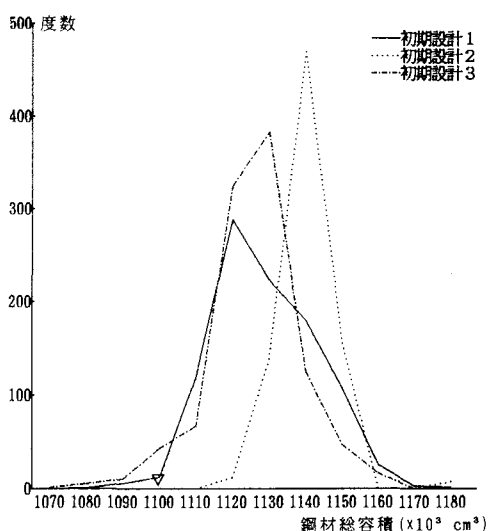


図-9 凹型ラーメン (4m) の許容設計の度数分布

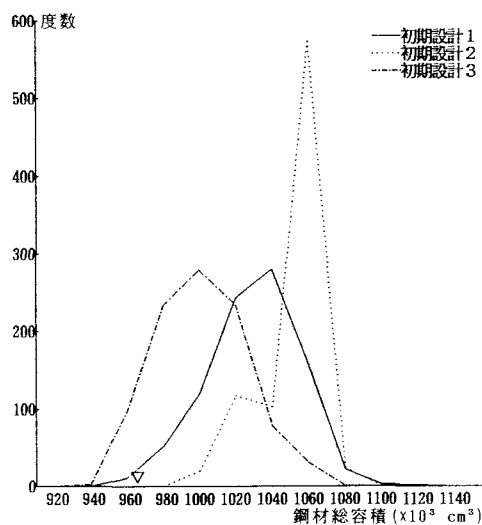


図-10 5層ラーメン (2m) の許容設計の度数分布

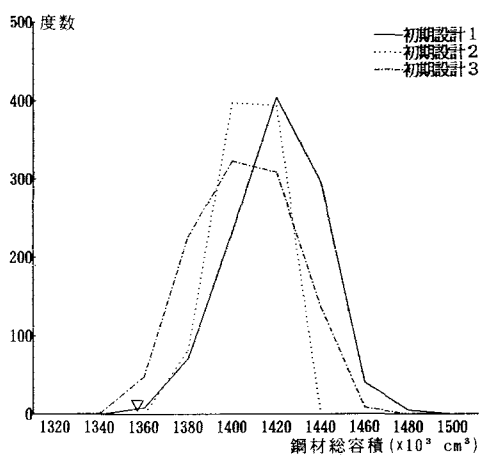


図-11 5層ラーメン (4m) の許容設計の度数分布

そこで、上記の(4)で分布状況を比較した6ケースの問題に対してGAを応用し、結果を比較した。結果を表-7に示した。表にはGAによる結果の他に、各初期設計の設定に対する許容設計の評価値の最小値も比較のために示してある。単純GAは、繁殖・淘汰、交叉、および突然変異のみからなるGAを意味し、生長は、単純GAの繁殖、淘汰の前に、次の手続きを考慮したGAである。①照査式を満足しない部材のみ満足するまでそのランクを上げる(確率2/3)。②何もしない(確率1/3)。

表-7から、あるいは、GAの結果を図-6~11にプロット(図中▽印)して検討すると、かなり良い設計をGAが与えていることがわかる。なお、これらのGAによる結果は、交叉確率が0.6、突然変異確率が0.1%、最大世代数が50の結果であり、人口サイズは、凸型および非対称ラーメンで80と100、凹型および5層ラーメンで80と120で行い、良い方の結果を示してある。

5. あとがき

現在、一般に用いられている慣用的な構造設計法(全応力設計法)は、今後も構造物の設計法として主に用いられていくと考えられる。その設計法としての簡便さ、効率性は認める上で、従来暗黙の内に認められていたその設計法で得られる設計の最適性に若干の疑問を抱き、いくつかの数値計算により考察を加えた。

本研究では、平面骨組構造物の4タイプを例にとり、全応力設計を行い、得られる設計の特性について検討を加えた。初期設計は、全くランダムに与える以外に、梁・柱それぞれ同一断面を与える場合、およびほぼ最適と考えられる値の近傍のランクのみをランダムに与えた場合の3種類を設定した。また、収束解として得られる全応力設計のみではなく、収束計算の過程で得られる許容設計も検討の対象に加えた。

本研究で得られた事項を箇条書きにすると、以下のようになる。

(1) 構造系、荷重系により差はあるが、初期設計に依存して多数の全応力設計および許容設計が存在することがわかった。全応力設計の唯一性は、既製形鋼を用いる設計の場合には全く保証されないことになる。

(2) 多数の許容設計の評価値(本研究では鋼材総容積)の分布は、比較的広い範囲に渡っており、かつ最良の設計を得る可能性はかなり少ないことがわかった。全応力設計法を用いる場合には、より良い設計を得るという観点からは、複数の異なる初期設計からの設計計算を試みる必要があると考えられる。

(3) 梁・柱同一断面を与える初期設計2の結果は、得られる設計の種類の数も他に較べて少なく、評価値の分布の幅も狭い。しかし、最適設計が得られる可能性は少ない。

最適と思われる値の近傍の断面ランクのみを与える初期設計3の結果は、評価値に関しては最も良い設計を与えるが、その分布の幅は、初期設計1の結果と同程度であった。

(4) GAによる結果は、全応力設計による結果の最良の設計と同程度の設計を与えており、既製形鋼を用いる構造物の設計法の一つとして、可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、丸善株式会社、1989。
- 2) 杉本博之・山本洋敬：骨組構造物の離散的な全応力設計に関する数値実験的研究、構造工学論文集 Vol. 38A、pp.457-466、1991。
- 3) 杉本博之・鹿汗麗・山本洋敬：離散的な構造最適設計のためのGAの信頼性向上に関する研究、土木学会論文集、No.471/I-24、pp.67-75、1993。
- 4) Goldberg, D.E. : GENETIC ALGORITHMS, Addison-Wesley P.C., 1989。

(1993年9月16日受付)