

I-3 双対法および焼なまし法を用いた剛節骨組構造物の離散型最適設計法

愛媛大学工学部 正会員 谷脇 一弘 愛媛大学工学部 フェロー会員 大久保 禎二
 四国建設コンサルタント(株) 正会員 佐伯 龍司 愛媛大学大学院 学生員 ○江原 博司

1. まえがき

著者らは、これまでに連続型変数を取り扱った双対法および離散型変数を取り扱った焼なまし法を組み合わせ、設計変数となる離散値を効率的に決定することができる離散型最適設計法を開発し、トラス構造物を対象とし、その有効性を明らかにしてきている。本研究は、双対法および焼なまし法を用いた離散型最適設計法を剛節骨組構造物の離散型最適設計問題に適用し、剛節骨組構造物の重量を最小化する各部材の離散的断面の最適な組合せを効率的かつ容易に決定することができる離散型最適設計について研究を行い、得られた結果について述べるものである。

2. 双対法および焼なまし法を用いた剛節骨組構造物の離散型最適設計法

2.1 剛節骨組構造物の離散型最適設計問題の定式化

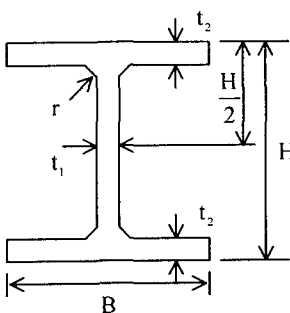
本研究では、剛節骨組構造物の梁の断面としてH鋼材、柱の断面として角型鋼管を使用するものとし、それぞれの使用可能な断面性能を表-1および表-2に示す。設計変数として表-1および表-2に示す離散値で表される材種 M を考慮するものとする。制約条件として鋼構造設計基準に規定する応力度の制約および建築基準法施工令に規定される層間変位角の制約を考慮するものとし、目的関数 $W(M)$ として剛節骨組構造物の重量を最小化する離散型最適設計問題を定式化し、以下に述べる双対法および焼なまし法を用いて解くことにより剛節骨組構造物の重量を最小化する各部材の離散的断面の最適な組合せを決定している。

表-1 梁の使用可能な鋼材

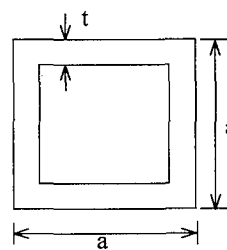
設計変数 M	H (mm)	B (mm)	t_f (mm)	t_w (mm)	r (mm)	A_x (mm ²)	I_x (mm ⁴)	I_y (mm ⁴)	Z_x (mm ³)	I (mm)	A_y (mm ²)
1	100	50	0.05	0.07	0.08	11.85	187	1.12	37.5	1.31	3.45
2	125	60	0.06	0.08	0.09	16.84	413	1.32	66.1	1.57	4.81
3	150	75	0.05	0.07	0.08	17.85	666	1.66	88.8	1.96	5.25
4	175	90	0.05	0.08	0.09	23.04	1210	2.06	139	2.38	7.21
5	198	99	0.45	0.07	0.11	23.18	1380	2.21	160	2.57	6.94
6	200	100	0.55	0.08	0.11	27.16	1840	2.22	184	2.60	8.01
7	248	124	0.65	0.08	0.12	32.68	3540	2.79	285	3.23	9.91
8	250	125	0.06	0.09	0.12	37.66	4030	2.79	324	3.26	11.26
9	298	149	0.55	0.08	0.13	40.80	6320	3.29	424	3.85	11.94
10	300	150	0.65	0.09	0.13	46.78	7210	3.29	481	3.87	13.48
11	346	174	0.06	0.09	0.14	52.68	11100	3.88	941	4.51	15.65
12	350	175	0.07	0.11	0.14	63.14	13600	3.95	775	4.58	19.24
13	396	199	0.07	0.11	0.16	72.16	20000	4.48	1010	5.19	21.89
14	400	200	0.08	0.13	0.16	84.12	23700	4.54	1190	5.26	26.01
15	446	199	0.08	0.12	0.18	84.30	28700	4.33	1290	5.11	23.89
16	450	200	0.09	0.14	0.18	96.76	33500	4.40	1490	5.18	28.02
17	496	199	0.09	0.14	0.20	101.3	41900	4.27	1690	5.08	27.87
18	500	200	0.10	0.16	0.20	114.2	47800	4.33	1910	5.14	27.86
19	550	200	0.10	0.16	0.22	1200	59900	4.23	2180	5.07	29.86
20	554	201	0.11	0.18	0.22	133.5	67400	4.28	2430	5.13	38.19
21	560	202	0.12	0.21	0.22	151.2	79200	4.38	2790	5.22	36.2
22	606	201	0.12	0.20	0.22	152.5	90400	4.22	2980	5.11	46.65
23	612	202	0.13	0.23	0.22	170.7	103000	4.31	3380	5.19	46.44

表-2 柱の使用可能な鋼材

設計変数 M	a (mm)	t (mm)	A (mm ²)	I (mm ⁴)	Z (mm ³)	i (mm)
1	5	0.16	3.10	12.11	4.84	1.98
2	6	0.16	3.74	21.36	7.09	2.39
3	5	0.23	4.39	16.68	6.67	1.95
4	6	0.23	5.31	29.90	9.83	2.36
5	7.5	0.23	6.69	38.98	15.73	2.97
6	10	0.23	8.99	143.07	28.61	3.99
7	7.5	0.32	9.19	79.12	21.10	2.93
8	10	0.32	12.39	193.71	38.74	3.95
9	12.5	0.32	15.59	385.75	61.72	4.97
10	10	0.45	17.19	261.88	52.38	3.90
11	12.5	0.45	21.69	525.64	84.10	4.92
12	10	0.6	22.56	333.59	66.72	3.85
13	15	0.45	26.19	924.97	123.33	5.94
14	15	0.6	34.56	1196.47	159.53	5.88
15	17.5	0.6	40.56	1933.16	220.93	6.90
16	20	0.8	61.44	3781.43	378.14	7.85
17	20	0.9	68.76	4190.01	419.00	7.80
18	25	0.9	86.76	8410.23	672.82	9.85
19	20	1.2	90.24	5337.40	533.74	7.69
20	25	1.2	114.24	10812.44	864.99	9.73
21	30	1.2	138.24	19143.00	1276.23	11.77
22	30	1.6	181.76	24510.94	1634.06	11.61
23	35	1.6	213.76	39834.89	2276.28	13.65
24	40	1.6	245.76	60902.84	3025.14	15.69



設計変数 M に対するH鋼材の高さ H 、幅 B 、板厚 t 、断面積 A 、断面2次モーメント I_x 、断面2次半径 i_y 、断面係数 Z_x 、圧縮フランジとはりせいの1/6とかなるT型断面のウェブ軸まわりの断面2次半径 i 、圧縮フランジの断面積 A_f



設計変数 M に対する鋼材の一边 a 、板厚 t 、断面積 A 、断面2次モーメント I 、断面係数 Z 、断面2次半径 i_y

2.2 双対法による初期離散値の決定

本研究では、離散型最適設計問題を焼なまし法を用いて能率的に解くため、連続型の最適設計問題を双対法を用いて解くことにより得られた最適断面積の近傍で、応力度および層間変位角の制約条件を違反しない材料を設計変数の初期値 M^0 として用いている。なお、双対法を用いた最適化過程において、表-1および表-2に示した材料の断面積と断面二次モーメントの関係を最小二乗法を用いて近似式により表すことにより、設計変数を断面積のみに集約している。

2.3 焼なまし法によるトラス構造物の最適化アルゴリズム

焼なまし法による最適化アルゴリズムは、まず3つの乱数 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ を発生させ、 β_1 を用いて改良を行う変数の指標 i を決定し、 β_2 を用いて改良変数 M_i の改良幅 ΔM_i を決定し、現在の材種 $M_i^{(n)}$ の近傍で新たな探索点 $M_i^{(n+1)} = M_i^{(n)} + \Delta M_i$ を求める。探索点 $M_i^{(n+1)}$ における目的関数 $W(M_i^{(n+1)})$ を計算し、目的関数の変化量 $\delta W_i = W(M_i^{(n+1)}) - W(M_i^{(n)})$ を計算する。すべての制約条件を満足し、 $\delta W_i < 0$ ならば $M_i^{(n+1)} = M_i^{(n+1)}$ とする。目的関数が改善されず $\delta W_i > 0$ となる場合においても、温度 T_i を用いて受入れ確率 P を計算し、 $\beta_3 < P$ ならば $M_i^{(n+1)} = M_i^{(n+1)}$ とする。 $\beta_3 > P$ ならば、改良は行わず現在の材種 $M_i^{(n)}$ のままとする。 $\beta_3 < P$ となる場合には、冷却要素 F を用いて温度を $T_{i+1} = T_i \times F$ と更新する。上記の改良過程を所定の回数繰り返す。

し、最も目的関数の値を減少させる解を最適解とする。このように、焼なまし法は新しい探索点の評価値が現在の解の評価値より劣る場合においても確率的に現在の解と置き換えることにより、局所的最適解への移行性を改善した方法である。本研究では、焼なまし法による材料の改良過程において、部材力および変位の断面積および断面二次モーメントに関する感度係数を用いて部材力および変位の断面積および断面二次モーメントの逆数による近似式を導入し、構造解析を毎回行うことなく近似式を用いて部材力および変位を推定することにより能率的に改良を行っている。

3. 最適設計例および考察

設計例として図-1に示す15部材を有する2支間3層の剛節骨組構造物の離散型最適設計を行った結果について述べる。各部材の鋼材の材料を柱の場合 STKR400、梁の場合 SS400 と仮定し、単位体積当りの重量 ρ を柱の場合 $12.4852 \times 10^{-8} \text{ kN/cm}^3$ 、梁の場合 $75.0484 \times 10^{-8} \text{ kN/cm}^3$ 、弾性係数を 205800 N/mm^2 とした。双対法により得られた連続型最適設計問題の最適解および焼なまし法における初期値を表-3に示す。表-1および表-2に示した材料によっては、断面積が増加しても断面二次モーメントが大きく減少する場合があるため、得られた連続型最適設計問題の最適断面積 A の近傍で A に対する断面二次モーメントより大きな断面二次モーメントを有する材料 M を初期値 M^0 とした。焼なまし法において、初期受入れ確率 P_0 の値は0.3、最終受入れ確率 P_f の値は 10^{-8} とし、制約条件の許容値に対する違反度の最大値を1.001、反復計算を終了させるために用いた最大反復回数および温度の最小値はそれぞれ3000回および0.0001としている。焼なまし法における最適化において、改良変数の改良幅 $|\Delta M|$ の最大値を1とした場合および2とした場合について、冷却速度を制御するパラメータ α を500~5000まで500毎に変化させ、最適解に与える影響および計算効率についての比較検討を行った。改良幅 $|\Delta M|$ の最大値が1の場合 ($|\Delta M| \leq 1$) の目的関数の値は、32.018N~35.561Nと大きく変動しているのに対し、改良幅 $|\Delta M|$ の最大値が2の場合 ($|\Delta M| \leq 2$) の目的関数の値は、31.005N~33.370Nと最小値に対して7.63%の変動量となっている。また、パラメータ α の値が増加するに従い、受入れ確率の計算回数が減少し、計算時間も減少することが明らかとなり、計算効率の観点から $\alpha=2000$ が適切な値であるといえる。 $|\Delta M| \leq 2, \alpha=2000$ の場合の最適断面積の分布を図-2に示す。次に、 $\alpha=2000$ として双対法および焼なまし法を用いた場合(DUAL+SA)およびすべての部材の初期材種を15とし、焼なまし法のみを用いて最適化を行った場合(SA)の最適解における目的関数および計算時間の比較を表-4に示す。この結果より、明らかなごとく双対法および焼なまし法を用いた場合が能率的かつ確実に離散型最適設計問題の最適解を決定することができることが明らかとなった。さらに、焼なまし法による改良過程において、部材力および変位の近似式を用いたことによる解の信頼性および計算時間に与える影響を検討するため、部材力および変位の近似式を用いた場合および毎回構造解析を行った場合の最適解における目的関数の値および計算時間の比較を行った結果を表-5に示す。この結果より、部材力および変位の近似式を用いた場合が毎回構造解析を行った場合の約20%の計算時間で極めて能率的かつ正確に最適解を得ることが明らかとなった。

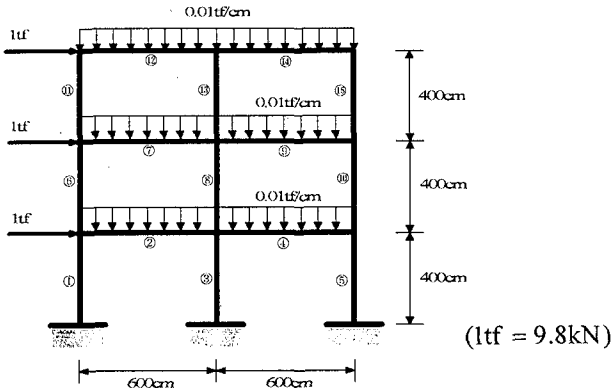


図-1 2支間3層剛節骨組構造物

表-3 2支間3層剛節骨組構造物の連続型最適設計問題の最適解および焼なまし法における初期値

	連続型最適設計	焼なまし法の初期値 M^0
$A_1(\text{cm}^2)(M_1)$	6.71	6.69 (5)
$A_2(\text{M}_2)$	48.70	46.78 (10)
$A_3(\text{M}_3)$	123.57	138.24 (21)
$A_4(\text{M}_4)$	104.33	101.30 (17)
$A_5(\text{M}_5)$	15.76	22.56 (12)
$A_6(\text{M}_6)$	5.17	6.69 (5)
$A_7(\text{M}_7)$	44.06	40.80 (9)
$A_8(\text{M}_8)$	46.02	61.44 (16)
$A_9(\text{M}_9)$	88.18	84.30 (15)
$A_{10}(\text{M}_{10})$	93.12	114.24 (20)
$A_{11}(\text{M}_{11})$	3.10	4.39 (3)
$A_{12}(\text{M}_{12})$	45.66	40.80 (9)
$A_{13}(\text{M}_{13})$	42.83	40.56 (15)
$A_{14}(\text{M}_{14})$	37.91	37.66 (8)
$A_{15}(\text{M}_{15})$	33.99	34.56 (14)

表-4 双対法および焼なまし法(DUAL+SA)を用いた場合および焼なまし法のみ(SA)を用いた場合の最適解における目的関数の値および計算時間の比較
($A_i^0 = 15 (i=1, \dots, 15)$, $P_0 = 0.3, |\Delta M| \leq 2, \alpha = 2000$)

設計変数	DUAL	DUAL+SA	SA	SA	SA	SA	SA
	連続変数	離散型変数 $ \Delta M \leq 2$	離散型変数 $ \Delta M \leq 1$	離散型変数 $ \Delta M \leq 2$	離散型変数 $ \Delta M \leq 3$	離散型変数 $ \Delta M \leq 4$	離散型変数 $ \Delta M \leq 5$
W(kgf)	3.5969	3.1638	3.4008	3.2420	3.5808	3.4540	3.3769
計算時間(秒)	3.63	336.35	293.03	306.65	212.07	356.86	348.28

表-5 部材力および変位の近似式を用いた場合および毎回構造解析を行った場合の最適解における目的関数の値および計算時間の比較 ($P_0 = 0.3, |\Delta M| \leq 2, \alpha = 2000$)

$ \Delta M \leq 1$				$ \Delta M \leq 2$			
目的関数M(kgf)		計算時間CPU(秒)		目的関数M(kgf)		計算時間CPU(秒)	
近似式	構造解析	近似式	構造解析	近似式	構造解析	近似式	構造解析
3.4135	3.4189	280.73	1427.84	3.1638	3.2303	336.36	1482.66

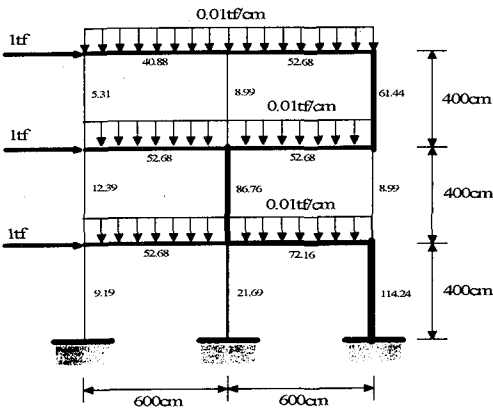


図-2 2支間3層剛節骨組構造物の最適解
($P_0 = 0.3, |\Delta M| \leq 2, \alpha = 2000$)