

(株) 熊谷組 正会員 中北 昭浩
 長岡技術科学大学 正会員 笹戸 松二
 長岡技術科学大学 正会員 林 正

1. まえがき

逐次線形計画法 (SLP) は汎用性に優れた解法であるが、標準的な解法をそのまま用いたのでは膨大な計算を要するので、計算効率の向上を図った種々の解法が提案されている。一般的に、余裕のある制約条件式を棄却して有効な条件式のみを用いれば計算時間の短縮と記憶容量の縮小には効果があるが、条件式の選択方法によっては解の精度や収束性が悪くなることがある。本報告では、余裕変数と修正 SLP を用いた手法¹⁾をさらに改良して計算時間を短縮するとともに安定な解法を工夫した。この解法を実橋規模の骨組構造物に適用して、解の精度、収束性や計算時間について調べた。SLP の定式化については説明を省略する¹⁾。

2. 設計条件

- (1) 構造解析: マトリックス法により平面骨組構造物を解析する。(2) 荷重: 前元荷重 (設計変数とした部材の自重), 後元荷重 (床版等の一定荷重), 活荷重, 衝撃, 従荷重 (温度変化, 地震の影響)。(3) 目的関数: 材料の単価を考慮した換算体積を用いる。(4) 設計変数: 板厚, 板幅を用いる。(5) 制約条件: 応力, 変位, 面内・面外細長比, 板の幅厚比, 箱形断面のトラス材 ($A_w \geq 0.4A$) の制約。

3. 効率化手法

- (1) 設計変数の変換: I 個の設計変数に対する $4 \times I$ 個の制約条件式 (上・下限値とムープリミット) と, 板の幅厚比の制約による設計変数間の制約条件式を, 変数変換の手法により I 個の制約条件式に縮小する。(2) 余裕変数 ($\alpha_m, \beta_n, \gamma_m$) の導入と選択手法: 次式により応力, 変位, 細長比に関する制約条件を表わす。

$$\alpha_{m,k,\ell} = \sigma_{m,k,\ell} / \sigma_{m,k,\ell} \geq 1, \quad \beta_{n,\ell} = \delta_{n,\ell} / \delta_{n,\ell} \geq 1, \quad \gamma_{m,\ell} = \lambda_{a,\ell} / \lambda_{m,\ell} \geq 1$$

$$(m = 1, 2, \dots, M; \quad k = 1, 2, \dots, K; \quad n = 1, 2, \dots, N; \quad \ell = 1, 2, \dots, L) \quad (1)$$

ここに, M は部材の総数, K は各部材毎の応力照査点数, N は全節点数, L は荷重ケースの総数であり, $\sigma_{m,k,\ell}$, $\delta_{n,\ell}$, $\lambda_{a,\ell}$ は応力, 変位および面内または面外の細長比の許容値を表わす。

式(1)の数は実際の構造物では数百から数千となり, 記憶容量, 計算時間や解の収束性に問題が生じるので制約条件の縮小を図る。応力に関する制約条件の縮小は各部材毎に全荷重ケース, 全照査点から最小の α_m を用いる。これは, 全部材 (全設計変数) の情報を出来るだけ LP に導入し, LP の計算を問題なく行なうためである。変位に関しても同様な考えから各節点毎に最小の β_n を求める。細長比に関しては, 各部材毎に面内, 面外から条件の厳しい γ_m を用いる。すなわち, 余裕変数は次式で表わされる。

$$\alpha_m = \min_{k,\ell} \alpha_{m,k,\ell}, \quad \beta_n = \min_{\ell} \beta_{n,\ell}, \quad \gamma_m = \min_{\ell} \gamma_{m,\ell} \quad (2)$$

式(2)の α_m と γ_m は各部材毎に求められるので, 両者の厳しい方を制約条件式 ϕ_m として採用する。

$$\phi_m = \min(\alpha_m, \gamma_m) \geq 1, \quad \beta_n = \min_{\ell} \beta_{n,\ell} \geq 1 \quad (m = 1, \dots, M; \quad n = 1, \dots, N) \quad (3)$$

さらに, 大規模な構造物では M と N の数が多くなるので, 次の方法により LP の次元数を数十元に縮小した。

① ϕ_m は, 条件の厳しい順 (値の小さい順) に一定の個数 J だけ選択する。 β_n は 1 個とする。

② ϕ_m の値がある値 (λ) 以下の余裕変数を制約条件式として採用する。

ここで, 式(2), (3) のような縮小方法の代りに, 式(1)から条件の厳しい順に制約条件として採用する方法では, LP の計算に支障を来したり, 最適解に収束しないことがある。

(3) 修正 SLP: 本法では感度係数を数値微分により求めたが, このときの構造解析に要する時間は全計算時間の大部分を占める。そこで目的関数の変化率が 10^{-1} 未満に収束すれば, 感度係数の計算を適宜省略する修正

SLP (MSLP) を用いて計算時間の短縮を図った。このとき、収束性を考慮して次のパラメータを用いた。

- ① 使用回数 S : ある段階で求めた感度係数をその後何回の反復計算まで使用するかを表わす回数。
- ② 適用限界値 μ : 設計変数の変化率の値が μ 以下の変数に対してのみ修正 SLP を適用するための判定値。
- (4) 安定化手法 : 線形化による誤差等のために、LP の解が式 (1) を満足しない場合に次の手法を用いた。
 - ① 式 (3) の ρ_m 等が $\rho_m < 1$ となった場合には、式 (3) の右辺の 1 を $1/\rho_m$ に修正する。
 - ② 同時に、ムーブリミットの上限値を大きくし、下限値を小さくする。

4. 数値計算例

図-1 に示す構造物に効率化手法を適用した結果を表-1~3 に示す。ここに、 f は目的関数 (m^3)、CPU は計算時間の比、 N は反復回数、 M は制約条件式の数、 B_i は板幅 (cm)、 t_i は板厚 (cm) である。また、表-2 の (c) において $J=30$ と 40 とした場合の収束性を図-2 に、表-3 において SLP と修正 SLP の収束性を図-3 に示す。なお、計算例 (c) ではすべて修正 SLP を適用した。図-2 より、制約条件式の数が少ない場合には、修正 SLP の適用中にハンガーケーブルの余裕変数 ρ_c が 1 未満になって収束性が悪化している。 $\nu=1.3$ とした場合にも同様な現象が生じた。

表-1 設計変数に対する制約条件式の縮小による影響

Struc.	Method	f	CPU	N	M
(a)	I + J	9.52356	1.0	15	60
	4I + J	9.52359	2.08	15	180
	4I + J	8.14457	1.74	24	64
(b)	I + J	8.14457	1.0	24	31
	4I + J	8.14457	1.74	24	64
(c)	I + J	82.64583	1.0	18	81
	4I + J	82.73907	2.71	23	201

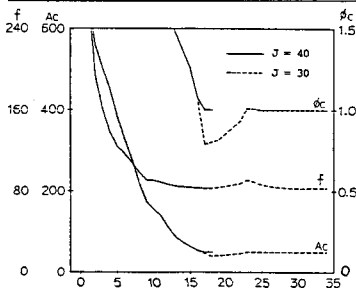


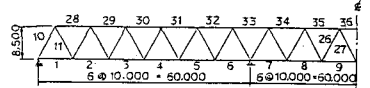
図-2 計算例(c)の収束性

5. まとめ

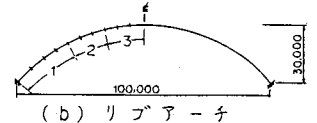
- (1) 変数変換により設計変数に関する制約条件を $1/4$ 以下に縮小する本解法は収束性に問題はなく、実用上十分満足できる最適解を求めることができ、記憶容量、計算時間を大幅に短縮することができる。
- (2) 余裕変数の導入と②の選択手法は一般的に用いることができる方法であり、収束性に影響することなく計算効率を上げることができる。 ρ_m は SLP で 1.2 以下、修正 SLP では 1.5 以下を選ぶのが最適と思われる。
- (3) 本報告で提案した修正 SLP の収束性は良好で、表-3 に示した以外の計算例の結果から判断すれば、 $S=3\sim 5$ 、 $\mu=0.1$ とすれば満足できる解が得られて計算時間を大幅に短縮することができる。

最後に、マトリックス構造解析法を用いる場合には、SLP の全計算時間を短縮するためには構造解析に要する時間を短くすることが最も効果が大きいことを付言しておく。なお、最も計算時間の長い計算例 (c) の場合、CPU 時間は $1\sim 2$ 分 (M-280H, 東大大型計算機センター) であった。

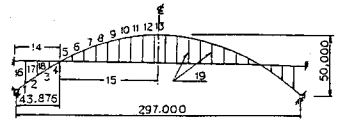
1) 前田林, 坂本: SLP による骨組構造物の最適設計, マトリックス解析法研究発表論文集, JSSC 第 15 回, 1981



(a) 3 径連続トラス



(b) リブアーチ



(c) 補剛アーチ

図-1 計算例

表-2 余裕変数の選択

Struc.	Method	f	CPU	N	
(a)	J	10	9.52355	0.91	16
		20	9.52356	1.0	15
		30	9.52356	1.10	15
		40	9.52356	1.13	15
	v	1.2	9.52356	1.06	15
(b)	J	10	8.14457	0.94	24
	J	20	8.14457	1.0	24
	v	1.2	8.14457	0.95	24
(c)	J	30	82.60564	1.74	34
		40	82.64583	1.0	18
	v	1.3	82.58720	1.71	34
		1.5	82.64583	1.01	18

表-3 修正 SLP (計算例(a))

Method		f	B _i	t _a	CPU	N
S	μ	($\times 10^{-5}$)	($\times 10^{-2}$)	($\times 10^{-2}$)		
0	0.	0.	0.	0.	1.0	15
3	0.01	0.083	0.055	-0.008	0.68	15
3	0.05	-0.459	-0.871	0.034	0.66	15
3	0.10	-0.763	-0.444	0.017	0.65	16
3	0.20	-0.018	-0.253	0.008	0.61	16
6	0.05	-0.262	-0.868	0.034	0.63	17
6	0.10	0.489	-0.930	-0.135	0.63	19
6	0.20	2.301	0.384	-1.115	0.57	17

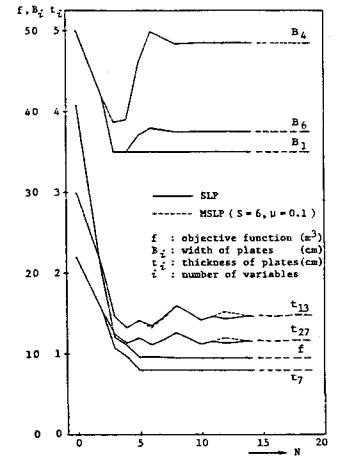


図-3 修正 SLP (計算例(a))