

駒井鉄工株式会社 正会員 玉田和也  
長岡技術科学大学 正会員 林 正

### 1. まえがき

立体骨組構造物の最適設計では、多数の部材と設計変数を用いるので、制約条件式の数が多くなるとともに感度係数を求めるための構造解析の計算時間が大幅に増加する。そこで、逐次線形計画法（SLP）に余裕変数を用いた手法<sup>1)</sup>をさらに改良して記憶容量の節約と計算時間の短縮を図り、この解法を実橋規模の立体構造物に適用して解の精度、収束性について調べた。SLPの定式化については説明を省略する。

### 2. 設計条件

- (1) 構造解析：マトリックス法を用いた立体骨組構造解析。
- (2) 設計荷重：鋼重、死荷重（床版等一定荷重）、活荷重、衝撃、支点移動及び従荷重（風荷重、温度変化、地震による影響）の組合せ荷重。
- (3) 目的関数：鋼材の材質による単価を考慮した換算体積。
- (4) 設計変数：床組部材を除く全部材の板幅と板厚。
- (5) 制約条件：道路橋示方書による応力、細長比、変位、板の幅厚比の制約、及び箱型断面のトラス材に対する制約 ( $A_w \geq 0.4A$ 、 $\lambda_y \geq \lambda_z$ )。

### 3. 数値計算法

(1) 設計変数の変換：設計変数の上下限値、ムーブリミットと曲げ圧縮を受けるフランジ幅の制約をシンプレックス法の非負条件により変数変換し1本の制約条件式に縮小した。

(2) 余裕変数：  
a) 部材に関する応力と細長比の制約条件を次式の余裕変数 $\alpha$ を用いて表す。

$$\alpha_{m,k,l} = \delta_{m,k,a} / \delta_{m,k,l} \geq \zeta, \quad \alpha_{m,in/out} = \lambda_{a,in/out} / \lambda_{m,in/out} \geq \zeta, \\ \alpha_{m,truss} = \lambda_{m,y} / \lambda_{m,z} \geq \zeta, \quad \zeta = 1.0 + \epsilon \quad (m=1, 2, \dots, M; k=1, 2, \dots, K; l=1, 2, \dots, L) \quad (1)$$

ここに、Mは設計部材の総数、Kは応力の照査式の数、Lは荷重の組合せ数であり、 $\delta_{m,k,a}$ 、 $\lambda_{a,in/out}$ はそれぞれ応力、細長比の許容値を表す。また、 $\zeta$ は余裕変数の目標値である。

b) 節点変位に関する制約条件を余裕変数 $\beta$ を用いて次式で表す。

$$\beta_{n,i,d} = \delta_{n,a,d} / \delta_{n,i,d} \geq \zeta \quad (n=1, 2, \dots, N; d=x, y, z) \quad (2)$$

ここに、Nは全節点数、dは照査する方向を表し、 $\delta_{n,a,d}$ は変位の許容値を表す。

c) 設計変数相互の制約条件は余裕変数 $\gamma$ を用いて次式で表す。

$$\gamma = c t / B \geq 1.0, \quad \gamma_{truss} = 5 t_w H / A \geq 1.0 \quad (\text{Box Sec.}) \quad (3)$$

cは道示による定数、t/Bは幅厚比、t<sub>w</sub>はウェブ厚、Hはウェブ高、Aはトラス材の断面積である。

$\alpha$ については [ $M \times K \times L + 2$ ] 個の制約条件式があり、実際の構造物において式(1)～(3)に示す全ての式を考慮することは計算効率を悪化させてしまう。そこで、アクティブな制約条件として、余裕変数の値の小さい式を選ぶ。これにより、膨大な数の制約条件を数十本に縮小できる。

(3) 修正SLP：SLPにおける感度係数の計算時間は解法全体の計算時間の約9.5%を占めている。そこで次の条件を満たしたときに、その設計変数に対する感度係数の計算を省略する修正SLPを用いて計算時間の短縮を図った。なお、修正SLPの連続使用回数は2～4回とする。

- ① 目的関数の変化率がある値( $\eta_1$ )以下に収束していること。
- ② 設計変数の変化率がある値( $\eta_2$ )以下に収束していること。

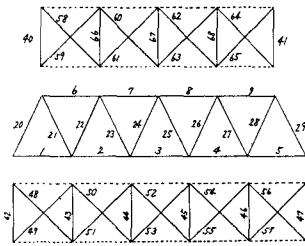
(4) 非許容解に対する対策：線形化による誤差、制約条件の選択方法による不連続性などにより、求めた解が式(1)、(2)の条件を満足しない場合に、次の手法により解の回復を促した。

- ① 目標値 $\zeta$ の代わりに $\zeta' = \zeta^2 / \alpha_1$  or  $\zeta^2 / \beta_1$  ( $\alpha_1, \beta_1 < \zeta$ ) を用いる。
- ②  $\alpha_1, \beta_1 < \zeta$ において、感度係数が最大の設計変数のムーブリミットの上限を広くし、下限を狭める。また、式(3)については線形性が強いために特別な対策は行わない。

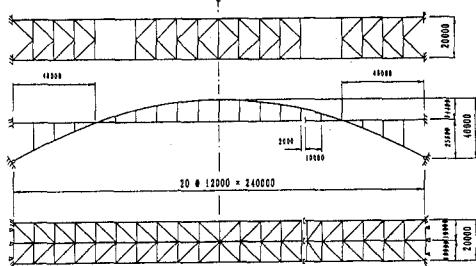
#### 4. 数値計算例

計算例として図-1に示す立体構造物について最適設計を行った。計算例(1)ではSLPと修正SLPの比較を行った。図-2と表-1に示すように、目的関数の収束性、精度についても問題はなく修正SLPは計算時間の短縮に効果があった。計算例(2)では、7パネルの平行弦ワーレントラス<sup>2)</sup>について計算した。表-2に文献2)と本解法による断面積を示す。これより、本解法によって求められた解は十分妥当性を持っていると思われる。なお、主構は面内に対してトラス部材、面外には曲げ部材として働かせた。

計算例(3)の補剛アーチでは287部材、127節点を有し、141通りの荷重の組合せを考慮した。また、設計変数は71個である。この補剛アーチにおいて、①2ヒンジアーチの①アーチリブのウェブ高の下限値を2mにした場合と、②3mにした場合、及び③固定アーチとした場合の3ケースについての比較設計を行った。図-3に目的関数の収束性を示す。図-4はアーチリブの断面積を比較したものである。アーチリブでは風荷重の影響が大きいので（設計風速 64.3m/sec）、風圧を受ける面積が最小となるように各設計例ともウェブ高は下限値に達している。また、①、②では側径間部のタイを橋台に固定した合理的な構造形式であることから、③の目的関数が最も大きくなっている。



(a) 計算例(1)

(b) 計算例(3)  
図-1 計算例表-1 目的関数と計算時間  
(計算例(1))

	収束回数	計算時間	目的関数
SLP	15	328.1	6.8535774
修正SLP	12	184.3	6.8536238

表-2 断面積の比較

	設計計算例	SLP
1 下弦材	0.010980	0.011423
15 上弦材	0.012240	0.011950
27 端柱	0.017680	0.015735
29 底材	0.009540	0.009723
30 底材	0.006890	0.007386
61 支材	0.006500	0.007071

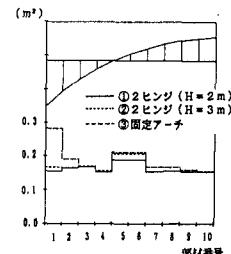
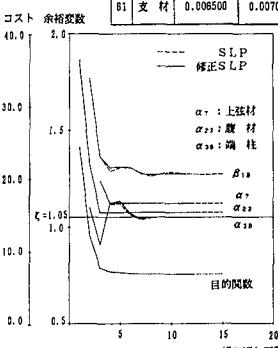
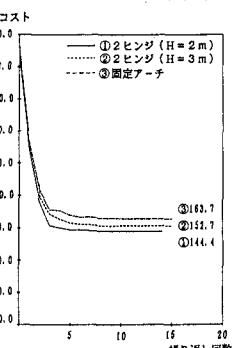


図-4 アーチリブの断面積

図-2 目的関数、余裕変数  
の収束状況（計算例(1)）図-3 目的関数の収束状況  
(計算例(3))

#### 5.まとめ

(1) 部材、節点、設計変数に関する制約条件を分離した余裕変数を用いたことにより、アクティブな制約条件の選択基準を明確にすることができた。

(2) 修正SLPは計算時間の短縮化に効果があり、収束性、精度にも問題はない。

(3) (1)、(2)の手法によって記憶容量と計算時間の大規模な短縮化を図ったSLPを開発したことにより、実橋規模の構造物に対して立体骨組構造解析を使用した最適設計を行うことが可能になった。

(4) 一部の入力データを入れ換えるだけで、最適化手法による比較設計を容易に行うことができる。

1) 中北・笛戸・林：SLPによる最適構造設計の効率化手法、第39回年次講演会概要集、I-204。

2) 橋・中井：橋梁工学（第2版）、共立出版、1981、pp.288～315。