

ケーブル構造の導入張力の最適化 -異なる手法の比較-

杉内章浩^{*1}
呉 明児^{*2}
川口健一^{*3}
半谷裕彦^{*4}

梗概

ケーブル構造の自己釣り合い応力の最適化問題を扱った4つの手法 (I. 逆変分原理、II. 変位ノルム最小化、III. 固有振動数最大化[2]、IV. GAを用いた方法[4]) について最適化状態を比較する。手法(I),(II)については幾何学的非線形挙動までを含めた最適化を行い、(I)については幾何学的非線形問題に対し定式化を行う。その結果、変位の扱いによる(I),(II)の相違点、線型計算の有効性、手法(III)と荷重条件との対応、対称性の強い問題に対する対称自己釣り合いモードの有効性が明らかになった。

1. はじめに

自己釣り合い応力の導入はケーブル構造や膜構造などの柔軟で軽量の構造物を安定化する手法の一つである。これらの張力構造に導入する適切な初期張力を決定する方法は構造設計上重要な問題であり、種々の手法が提案されている。

本論文では、同一のケーブル構造モデルを対象にした次の最適化手法を取り上げ、これらの手法による最適化結果を比較する。

- (I). 逆変分原理[1]による方法
- (II). 変位ノルム最小化
- (III). 固有振動数最大化[2]

また、最適化の対象とする構造モデルの形状、寸法は若干異なるが、次の最適化手法も取り上げる。

- (IV). GAを用いた方法[4]

更に手法(I),(II)についてはケーブル構造の幾何学的非線形挙動までを含めた最適化を行い、結果を比較する。

1.1 自己釣り合い応力

ケーブル構造の自己釣り合い応力は、軸力ベクトル \mathbf{n} 、外力ベクトル \mathbf{f} 、釣り合いマトリクス \mathbf{B} を用いた釣り合い式

$$\mathbf{Bn} = \mathbf{f} \quad (1)$$

を $\mathbf{f}=\mathbf{0}$ について解くことにより次式で得られる。 \mathbf{B} は (n,m) 型マトリクスで n は自由度数、 m は部材数である。

$$\mathbf{n} = [\mathbf{I}_m - \mathbf{B}^* \mathbf{B}] \boldsymbol{\beta} \quad (2)$$

ここに \mathbf{B}^* は \mathbf{B} の Moore-Penrose 型一般逆行列で $\boldsymbol{\beta}$ は任意のベクトルである。ここで $\text{rank}(\mathbf{B})=r$ とすると

$$\text{rank}(\mathbf{I}_m - \mathbf{B}^* \mathbf{B}) = m - r = q \quad (3)$$

q は不静定次数であり、自己釣り合い応力の独立なモード数を表す。式(2)において $[\mathbf{I}_m - \mathbf{B}^* \mathbf{B}]$ の独立な列ベクトルを $\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_q$ とすると

$$\mathbf{n} = \beta_1 \mathbf{g}_1 + \dots + \beta_q \mathbf{g}_q \quad (4)$$

上式で $|\mathbf{g}_i|=1$ と正規化しておく。本論文では上式における自己釣り合い応力モードの導入係数 β_i を設計変数として最適化を行う。

1.2 各最適化手法の概要

本論文で取り上げた4つの最適化手法の概要を次に示す。計算手法については3節で述べる。

(I) 逆変分原理

Horák[1]は、物体の全体積一定等の付帯条件の下で物体に生じるポテンシャルエネルギー

$$\Pi = \int_V \frac{1}{2} C_{ijkl} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} dV + \int_V K_i u_i dV - \int_{S_p} P_i u_i dS + \lambda \left(\int_V dV - V_0 \right) \quad (5)$$

C_{ijkl} : 弾性係数テンソル成分、 ε_{ij} : 歪テンソル成分、

K_i, P_i : 体積力・表面力ベクトル成分、 u_i : 変位ベクトル成分、

V : 体積積分領域、 S_p : 表面 S のうち表面力が与えられる領域、

V_0 : 体積規定値、 λ : 体積一定条件に関連する Lagrange 乗数

が停留するような形状、変位を考察することによって、材料を有効

*1 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 修士課程

*2 小川テント株式会社 建築設計部

*3 東京大学生産技術研究所 助教授

*4 東京大学生産技術研究所 教授 (平成10年8月9日逝去)

利用する最適形状とその真の変位場であるための条件が導かれることを示唆した。瀬口、多田ら[5]は逆変分原理を有限要素モデルに適用し、種々の応用を試みている。本論文では逆変分原理を最適自己釣り合い応力の決定に適用する。

(II) 変位ノルム最小化

この手法では節点変位を最小化することを目標にしており、目的関数として変位ベクトルのノルムを用い、非線型計画法の「外点罰金法(Exterior Penalty Function Method)」を利用して最適化を行う。

(III) 固有振動数最大化[2]

小田・半谷らは、構造物の振動方程式における円振動数を最大化することで構造物の初期剛性を最も大きくすることが出来るとし、文献[2]において設計変数 β_i を求めている。

(IV) GAを用いた方法[4]

中澤・加藤らは、接線剛性マトリクス K_T の行列式と最小固有値を考慮した最適基準を採用し、連続探索空間に適した改良型GAを用いて最適自己釣り合い応力を探索する方法を提案している。

2. モデルの概要と自己釣り合いモード

2.1 解析モデルの形状とパラメタ

手法(I),(II),(III)で用いるケーブル構造モデルを **fig.1** に示す。手法(IV)においては、形状、寸法の若干異なったモデルを用いている。また各手法(I)~(IV)で用いた材料定数を **Table-1** に示す。

2.2 自己釣り合いモード

本論文で採用したモデル(**fig.1**)及び手法(IV)で用いられているモデルには5つの独立な自己釣り合いモードが存在するが、各々のモードの決定方法は一通りではない。**Table-2**に本論文で用いた異なる自己釣り合い応力モードの組を3種類 (mode-a,b,c) 示す。mode-a,bは5つの独立なモード全てを含んでいるが、mode-cは対称性のある2つのモードの組み合わせとしている。また mode-dは正規直交モード、mode-b,cは正規(非直交)モードである。

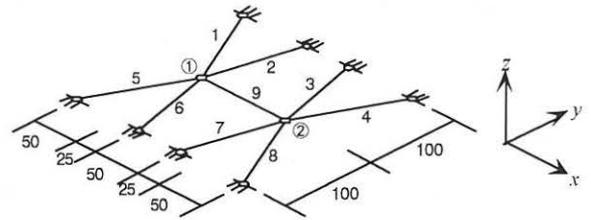
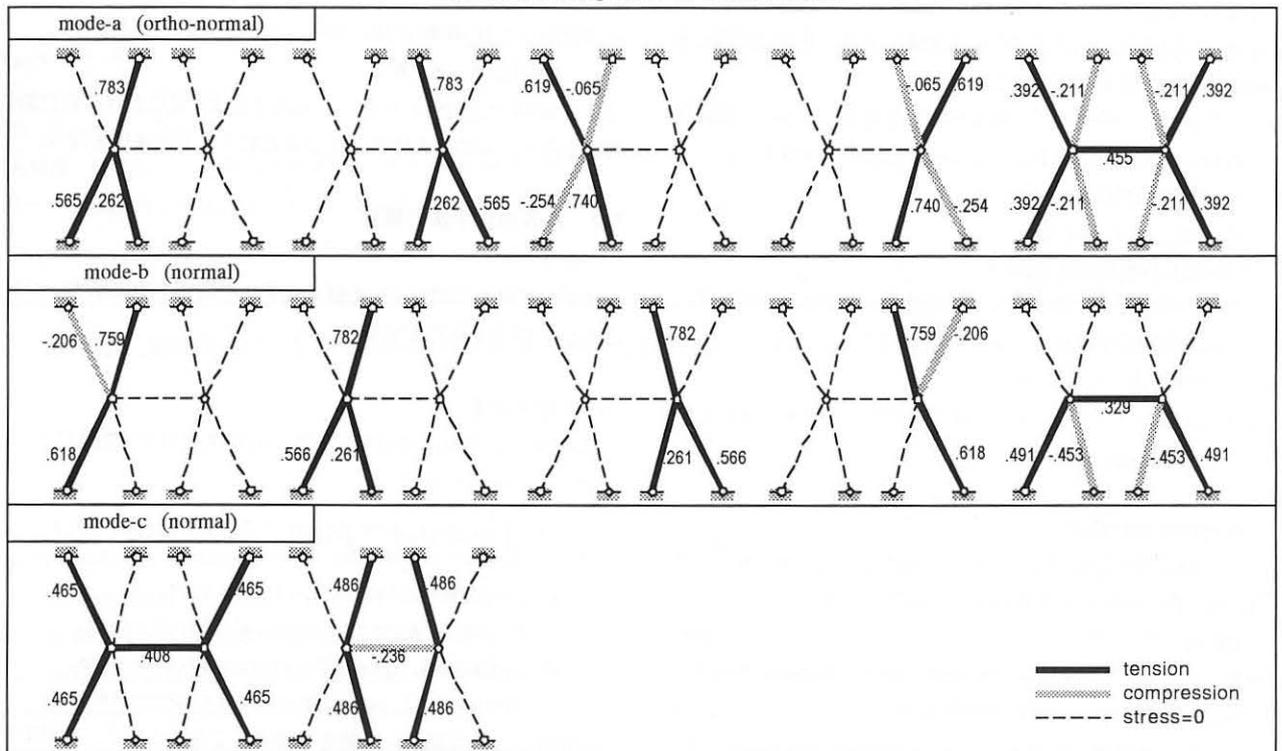


fig.1 : ケーブル構造モデル (単位 : cm)

Table-1 : 材料定数

Method	(I)	(II)	(III)	(IV)
E [kgf/cm ²]	1.4×10^6	1.4×10^6	1.0×10^6	3.0 tonf
A [cm ²]	0.1	0.1	1.0	

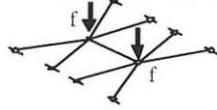
Table-2 : Self-Equilibrating Tension Modes



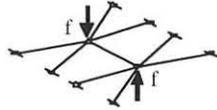
2.3 荷重条件

手法(I),(II)で用いた荷重条件を以下に示す。手法(III),(IV)は荷重を考慮した最適化ではないため、これらの荷重条件は扱っていない。

荷重条件① (対称荷重)



荷重条件② (逆対称荷重)



荷重条件③ (非対称荷重)

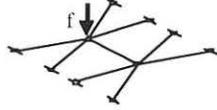


fig.2: 荷重条件 (|f|=1.0 tonf)

3. 計算手法の説明

3.1 逆変分原理

逆変分原理をケーブル構造の自己釣り合い張力決定問題に対して定式化すると次のようになる。

(i)微小変位問題に対する定式化

弾性剛性マトリクスを \mathbf{K}_E 、式(4)で与えられる幾何剛性マトリクスを \mathbf{K}_G とする。即ち

$$\mathbf{K}_G(\beta_1, \dots, \beta_q) = \beta_1 \mathbf{K}_{G_1}(\mathbf{g}_1) + \dots + \beta_q \mathbf{K}_{G_q}(\mathbf{g}_q) \quad (6)$$

初期軸力ベクトル \mathbf{n} に対して次の付帯条件を付ける。

$$|\mathbf{n}|^2 = \alpha^2 \sigma_y^2 \quad (7)$$

ここに α_y はケーブルの破断応力、 α は導入張力の大きさを表すパラメータである。自己釣り合いモード \mathbf{g}_i の直交性を仮定すると式(7)は次のように表せる。

$$\beta_1^2 + \dots + \beta_q^2 = \alpha^2 \sigma_y^2 \quad (8)$$

これらを用いて次のポテンシャルエネルギー関数を導入する。

$$\Pi = \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K}_E \mathbf{d} + \frac{1}{2} \mathbf{d}^T \mathbf{K}_G \mathbf{d} - \mathbf{d}^T \mathbf{f} + \lambda (\beta_1^2 + \dots + \beta_q^2 - \alpha^2 \sigma_y^2) \quad (9)$$

ここに \mathbf{d} は変位ベクトル、 \mathbf{f} は荷重ベクトル、 λ は Lagrange 乗数である。上式を $\mathbf{d}, \beta_i, \lambda$ で偏微分すると Π の停留条件が得られる。

$$[\mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G(\beta_1, \dots, \beta_q)] \mathbf{d} = \mathbf{f} \quad (10)$$

$$\frac{1}{2} \mathbf{d}^T \frac{\partial \mathbf{K}_G}{\partial \beta_i} \mathbf{d} + 2\lambda \beta_i = 0, \quad i = 1, \dots, q \quad (11)$$

$$\beta_1^2 + \dots + \beta_q^2 = \alpha^2 \sigma_y^2 \quad (12)$$

式(10)は釣り合い式、式(12)は付帯条件であり、 β_i を決定する式(11)が最適性条件を表す。これら(10)(11)(12)の連立方程式が解($\mathbf{d}, \beta_i, \lambda$)を与える。

(ii)幾何学的非線型問題に対する定式化

ある部材について、微小変位に対する歪エネルギーは次式で表される。

$$\int \delta \epsilon_G S dV_o = \delta \epsilon_G S L_o A_o \quad (13)$$

ここに ϵ_G は green 歪、 L_o, A_o はそれぞれ初期部材長・断面積、 S は

第2種ピオラキルヒホッフ応力である。初期応力 σ_o に対応する第2種ピオラキルヒホッフ応力を次式で仮定する。

$$S = \sigma_o + S_f \quad (14)$$

$$\sigma_o = \frac{n}{A_o} = \left(\sum_{k=1}^q \beta_k \mathbf{g}_k \right) / A_o \quad (15)$$

有限変位に対する歪エネルギーは荷重経路に沿って積分し

$$\int_{initial}^{final} (S_f + \sigma_o) L_o A_o d\epsilon_G = L_o A_o \int_{initial}^{final} S_f d\epsilon_G + L_o A_o \sigma_o \int_{initial}^{final} d\epsilon_G \quad (16)$$

構造物のポテンシャルエネルギーは全部材について和を取り次のように表される。

$$\begin{aligned} \Pi &= U - V + \lambda (|\boldsymbol{\beta}|^2 - \alpha^2 \sigma_y^2) \\ &= \sum_{member} \left\{ L_o A_o \int_{initial}^{final} S_f d\epsilon_G + L_o A_o \sigma_o \int_{initial}^{final} d\epsilon_G \right\} \\ &\quad - \mathbf{d}^T \mathbf{f} + \lambda (|\boldsymbol{\beta}|^2 - \alpha^2 \sigma_y^2) \end{aligned} \quad (17)$$

上式の $\mathbf{d}, \beta_i, \lambda$ に対する停留条件を求める。最小ポテンシャルエネルギーの原理により \mathbf{d} に対する停留条件は非線型釣り合い方程式を与え、また λ に対する停留条件は付帯条件を与える。最適性条件を与える β_i に対する停留条件 (式(11)に相当) は次のようになる。

$$\sum_{member} (L_o g_i \epsilon_G) + 2\lambda \beta_i = 0 \quad (18)$$

上式と非線型釣り合い方程式、付帯条件との連立方程式が最適解を与える。

(iii)数値計算法

(i)(ii)共に最適解を求めるにはそれぞれ非線型連立方程式を解くことになる。本論文では文献[5]の方法を参考に、「エネルギー比法」を用いた収束計算により各変数の数値解を求めた。概略を以下に示す。

最適性条件である式(11)(線型)及び(18)(非線型)はそれぞれ次のように変形される。

$$\frac{1}{2} \frac{\mathbf{d}^T \mathbf{K}_{G_i} \mathbf{d}}{\beta_i} = -2\lambda (= const.) \quad (19)$$

$$\frac{\sum_{member} (L_o g_i \epsilon_G)}{\beta_i} = -2\lambda (= const.) \quad (20)$$

どちらの式も、「単位自己釣り合い張力モードに対し蓄えられるポテンシャルエネルギーをその導入係数 β_i で割った値は全モードについて一定である」という力学的意味を有している。拘束条件(12)を満たしながら式(19)或いは(20)を満たすように β_i を修正していくことにより解が得られる。

3.2 変位ノルム最小化

次式で与えられる目的関数

$$F(\boldsymbol{\beta}) = \sum_i \sqrt{|\mathbf{d}_i|^2} \quad (21)$$

を、制約条件

$$|\mathbf{n}|^2 = \alpha^2 \sigma_y^2 \quad (22)$$

の下で、非線形計画法の「外点罰金法(Exterior Penalty Function Method)」により最小化する。

3.3 振動固有値最大化[2]

質量マトリクスをMとすると、振動方程式は \mathbf{K}_E と \mathbf{K}_G を用いて次のように表せる。

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{d}} + [\mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G]\mathbf{d} = 0 \quad (23)$$

質量マトリクスを単位マトリクス \mathbf{I} とし、 $\mathbf{d} = \mathbf{a}e^{i\omega t}$ とすると

$$[\mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G] - \omega^2 \mathbf{I} = 0 \quad (24)$$

ω^2 は円振動数であり、 $\mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G$ の固有値になっている。文献[2]では \mathbf{K}_G のみを用い、さらに2つの対称モードのみの組み合わせ(mode-c)を採用し、最小固有値の ω_1^2 が最大となる β_1 と β_2 の比を求めている。制約条件は手法(I)(式(7))、(II)(式(22))と同様である。

3.4 GAを用いた方法[4]

この手法では、接線剛性マトリクス \mathbf{K}_T の最小固有値を λ_1 としたとき、次式で与えられる目的関数

$$f(\boldsymbol{\beta}) = \begin{cases} \det[\mathbf{K}_E + \mathbf{K}_G(\mathbf{N})] & (\lambda_1 > 0) \\ 0 & (\lambda_1 \leq 0) \end{cases} \quad (25)$$

を、制約条件

$$N_{\min}^i \leq N^i \leq N_{\max}^i \quad i = 1, \dots, m \quad (26)$$

の下でGAを用いて最大化している(詳細は[3]を参照)。fig.1とは形状・寸法が若干異なるケーブル構造モデルを用いている。

3.5 解析条件

手法(I)~(IV)で用いた荷重条件、自己釣り合いモードなどの解析条件をTable-3,4に示す。

Table-3 : Conditions of Analysis, etc. (method (I),(II))

Method	Model	Mode	Load	Structural Analysis	Sub-ordinate condition
(I)	fig.1	a	①②③	Linear/Nonlinear	$ \eta = 1.0 \times 10^4 \text{kgf}$
(II)	fig.1	a,b,c	①②③	Linear/Nonlinear	$ \eta = 1.0 \times 10^4 \text{kgf}$

Table-4 : Conditions of Analysis, etc. (method (III),(IV))

Method	Model	Mode	Sub-ordinate Condition
(III)	fig.1	c	—
(IV)	*1	*2	case1 : $N_{\min}^i = 0.5tf, N_{\max}^i = 3.0tf$ case2 : $N_{\min}^i = 1.5tf, N_{\max}^i = 3.0tf$

*1 : a slightly different model is used in [4]
*2 : 5 independent modes exist

4. 結果

Table-3,4に示した解析条件の下での手法(I)~(IV)による最適化解析結果をTable-5,6,7,8に示す(表中には図番号fig.6-24を振ってある)。また、(I)逆変分原理による最適化状態(線型/非線型、荷重条件①、②、③、表中のfig.6-8)における荷重・変位曲線をそれぞれfig.3,4,5に示す。

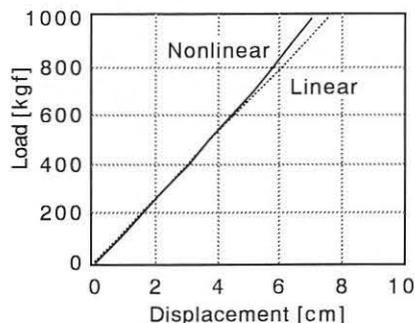


fig.3 : Load-Displacement Curve (Load Condition : ①)

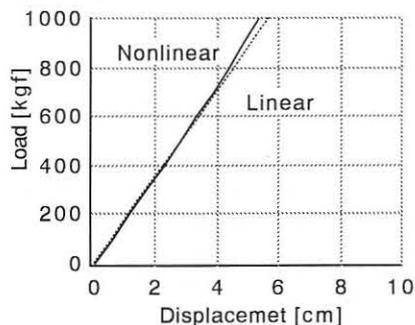


fig.4 : Load-Displacement Curve (Load Condition : ②)

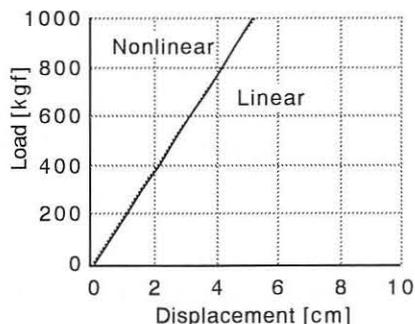


fig.5 : Load-Displacement Curve (Load Condition : ③)

Table-5 : The Optimal Tension [10^6 kgf] and Displacement [cm]

Method	(I) The Inverse Variational Principle						(II) Minimization of Displacement Norm					
Analysis	Linear Analysis			Nonlinear Analysis			Linear Analysis			Nonlinear Analysis		
Mode	mode-a			mode-a			mode-a			mode-a		
Load ①												
d	dx	dy	dz	dx	dy	dz	dx	dy	dz	dx	dy	dz
Node:1	0	0	-7.63	-2.47×10^{-2}	0	-7.04	0	0	-7.63	-2.47×10^{-2}	0	-7.04
Node:2	0	0	-7.63	2.47×10^{-2}	0	-7.04	0	0	-7.63	2.47×10^{-2}	0	-7.04
Load ②												
d	dx	dy	dz	dx	dy	dz	dx	dy	dz	dx	dy	dz
Node:1	0	0	-5.71	2.07×10^{-1}	0	-5.36	0	0	-5.71	2.07×10^{-1}	0	-5.36
Node:2	0	0	5.71	-2.07×10^{-1}	0	5.36	0	0	5.71	-2.07×10^{-1}	0	5.36
Load ③												
d	dx	dy	dz	dx	dy	dz	dx	dy	dz	dx	dy	dz
Node:1	0	0	-5.28	-1.26×10^{-2}	0	-5.12	0	0	-5.34	-7.81×10^{-3}	0	5.17
Node:2	0	0	-1.72	-4.60×10^{-2}	0	-1.66	0	0	-1.02	-6.78×10^{-2}	0	-9.80×10^{-1}

Table-6 : The Optimal Tension [10^4 kgf]

Method	(III) Maximization of the least natural frequency[2]
Mode	mode-c
—	
	fig.18

Table-7 : The Optimal Tension [10^4 tonf]

Method	(IV)A Variation of the GAs [4]	
Mode	* A slightly different cable model (not fig.1) is used	
case	1	2
—		
	fig.19	fig.20

Table-8 : The Optimal Tension [10³kgf] and Displacement [cm]

Method	(II) Minimization of Displacement Norm					
Analysis	Linear Analysis					
Mode	mode-b			mode-c		
Load ②	<p>fig.21</p>			<p>fig.23</p>		
	d	dx	dy	dz	dx	dy
Node:1	0	0	-5.71	0	0	-5.71
Node:2	0	0	5.71	0	0	5.71
Load ③	<p>fig.22</p>			<p>fig.24</p>		
	d	dx	dy	dz	dx	dy
Node:1	0	0	-5.34	0	0	-6.91
Node:2	0	0	-1.02	0	0	-0.875

5. 結果の比較及び考察

5.1 手法 (I),(II) の比較

(i)線型モデルについて (fig.6-8,12-14)

荷重条件 1, 2 についてはほぼ同じ結果が得られているが (fig.6,7, 12,13), 荷重条件 3 については全体的な傾向は似ているものの異なる結果が得られた。理由として考えられることを以下に述べる。

手法(I)の逆変分原理は、「最小ポテンシャルエネルギー原理」を考慮すると次のように言い換えることができる：

「釣り合い条件を満たす変位のうち、外力による仕事を最小にするような設計変数(の組)が最適解を与える」

即ち逆変分原理では、載荷節点の荷重方向変位を最小化していることになる。これに対し手法(II)の変位ノルム最小化では、載荷・非載荷に関わらず全ての節点変位の大きさを最適化の基準としている。よって非載荷節点が存在する荷重条件 3 では 2つの手法による結果に差が現れたということが出来る。

(ii)幾何学的非線型モデルについて (fig.9-11,15-17)

解析条件が対応している線型の場合と比べると、殆ど差のない結果になっている。本論文で用いたモデルでは、変位がスパンに対しおよそ 1/40 になっている (fig.3-5)。従って本例に示す程度の幾何学的非線型の問題においては、最適化計算のための構造解析部が線型解析で充分であると考えられる。

幾何学的非線型モデルにおいては、荷重方向以外の変位成分が問題になる。手法(II)ではこれらの変位成分についても最適化の対象となるため、全ての節点に載荷されているようなモデル(ここでは荷重条件 1, 2)でも 2つの手法による結果に差が出るのが予想される。本論文で用いたモデルでもそうであるが、多くの場合荷重方向の変位が他方向に対し支配的である(本論文の例ではオーダーにして 10 倍~100 倍)。このことが 2つの手法の結果に差が出なかった理由の一つと考えられる。

(iii)解析に用いる自己釣り合いモードの違いについて (fig.21-24)

同一の最適化手法で、用いる自己釣り合いモードが異なる場合を比較する。mode-b では 5つの独立モード全てを用いているのに対し、mode-c では対称性のある 2つのモードのみを用いている。

逆対称性を持つ荷重条件 2 では同じ結果が得られ、非対称な荷重条件 3 では結果が大きく異なっている。

この結果から言えることは、対称性の強い問題では対称モードを利用することにより少ない自由度で計算が行える可能性があるということである。本論文の例では 2つの対称モードで 5つの場合と完全に同じ結果を得られたが、最低いくつの対称モードを用いればよいかを定量的に決定することは今後の課題である。

5.2 手法 (III) と手法 (I),(II) との比較

手法(III)においては最小固有振動数を最大化している。文献[2]ではこの固有振動数に対応する振動モードは明記されていないが、fig.18 と fig.6,12 はかなり近い軸力分布を示している。

振動モードと荷重による変位を対応させて考えれば、文献[2]の固有振動数に対応する振動モードは、荷重条件 1 に対する変位モードと類似したモードであると推察される。よって手法(III)による結果 (fig.18) は手法(I),(II)の荷重条件 1 に対する結果 (fig.6,12) と比較するのが妥当である。

手法(III)による結果は、これら(I),(II)による結果と一致していないが、差は小さい(張力の比にして 5% 程度)。このことから、固有振動数最大化では固有振動モードに対応するような荷重に対して最適化が行われているということが出来る。

5.3 手法 (IV) と手法 (I),(II) との比較

手法(IV)による最適化の結果 (fig.19,20) をみると、張力(の一部)の値が制約条件の上限・下限値に「張り付いて」いるのが分かる。即ち、手法(IV)による解は、いわゆる極値による停留解ではなく、制約された解であることが分かる。構造モデルの形状・寸法は異なるが、制約条件を緩和し、手法(I),(II)と同じ条件を与えた場合には類似した結果が得られた可能性がある。

5.4 自己釣り合いモードの直交性について

自己釣り合い張力モードを決定する際互いに独立なモードを正規直交化して抽出する事が多いが、これはモードの正規直交性により種々の理論計算が単純化されることが期待できるからである。しか

し手法(II)の変位ノルム最小化においては正規直交性は必要ない。
また対称性に基づいた直感的に理解しやすいモードは力学的解釈を
大いに助けるものであるが、それらのモードの組み合わせは互いに
直交するとは限らない。一方逆変分原理による定式化(3.1節)におい
ては式(8)の導出にモードの正規直交性を用いており、計算上変数 β
がモード毎に分離できるというメリットがある。

6. まとめ

- ・ 逆変分原理を、微小変位及び幾何学的非線型問題として
ケーブル構造の最適自己釣り合い張力決定問題に対し
定式化した。
- ・ 手法(I),(II)の類似点、相違点を考察した。
- ・ 水平スパンに対し鉛直変位が1/40程度の問題に対し本例
のような単純な荷重条件下では線型計算でも十分な最適
化が行える事が分かった。
- ・ 対称性の強い問題では、対称モードを利用するとより少
ない自由度で計算が行える可能性を示せた。
- ・ 振動固有値による最適化と荷重を考慮した最適化との
対応関係について考察した。

おわりに

本論文作成中に共著者の半谷裕彦教授が他界されてしまわれまし
た。本研究は、半谷教授の御指導と情熱がなければ遂行し得なかつ
たものです。ここに謹んで御冥福をお祈りいたします。

本研究は文部省科学研究費基盤研究 A(2)(課題番号 08405037) の
助成を受けて行いました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Horak, V : Inverse Variational Principles of Continuum Mechanics, Rozpravy
Ceskoslovenske Akademie Ved, 1969.
- [2] Yasuhiko Hangai : Shape Analysis in the Design of Spatial Structures,
Proceeding of the International Colloquium on Computation of Shell &
Spatial Structures, pp.7-18, 1997.11.
- [3] 小田憲史, 半谷裕彦 : 張力安定構造の自己釣り合い応力の導入法,
第4回設計工学・システム部門講演会講演論文集, 日本機械学会,
pp.85-88, 1994.7.
- [4] 中澤祥二, 加藤史郎 : ケーブル構造の最適自己釣り合い応力決定法
に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造-I, 日本建築
学会, pp.429-430, 1998.9.
- [5] 瀬口靖幸, 多田幸生 : 逆変分原理による構造物の形状決定問題
(有限要素法による取り扱い), 日本機械学会論文集, 44-381,
pp.1469-1477, 1978.5.
- [6] 杉内章浩, 半谷裕彦, 呉明児 : ケーブル及び複合ケーブル構造の最適
自己釣り合い張力の決定法(その1 : 研究背景と逆変分原理による
最適化), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-I, 日本建築学会,
pp.1067-1068, 1998.9.
- [7] 呉明児, 半谷裕彦, 杉内章浩 : ケーブル及び複合ケーブル構造の最適
自己釣り合い張力の決定法(その2 : 非線形計画法による最適化),
日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造-I, 日本建築学会, pp.1069-
1070, 1998.9.
- [8] 尾田十八ほか : 構造・材料の最適設計, 技芸堂, 1989.9.
- [9] 山川宏 : 最適化デザイン, 計算力学とCAEシリーズ, 培風館, 1996.3.
- [10] 半谷裕彦, 川口健一 : 形態解析, 計算力学とCAEシリーズ, 培風館,
1991.4.

OPTIMIZATION FOR INITIAL TENSION FOR CABLE STRUCTURES — COMPARISON OF FOUR ANALYTICAL PROCEDURES —

Akihiro Sugiuchi ^{*1}
Minger Wu ^{*2}
Ken'ichi Kawaguchi ^{*3}
Yasuhiko Hangai ^{*4}

SYNOPSIS

In this paper, Four different analytical methods to obtain the optimal self-equilibrated tension of cable structures are compared. The methods are based on (I) the Inverse Variational Principle[1], (II) Minimization of displacement norm using nonlinear programming, (III) Maximization of the least natural frequency[2][3], and (IV) a variation of the GAs[4], respectively. (I) and (II) are further extended to include nonlinear structural analysis. Formation for nonlinear problems of the method (I) is established for cable structures. The analytical cable structure model in the paper has five independent pre-stress modes. The identical model is calculated in the method (I), (II), and (III), while the slightly different model is used in the method (IV).

The differences in the four methods, efficiency of linear structural analysis, the relation between the method (III) and load conditions, and the advantage of the use of symmetric pre-stress modes for symmetric problems are discussed.

*1 Graduate Student, University of Tokyo

*2 Ogawa Tent Co., Ltd.

*3 Assoc. Prof., Dr. -Eng., Institute of Industrial Science, University of Tokyo

*4 Prof., Dr. -Eng., at Institute of Industrial Science, University of Tokyo (demised on August 9, 1998)