

浮体とケーブルの挙動に関する一解法

o水沢 富作 正会員 大同工業大学
前島 正彦 正会員 福井高等専門学校
事口 寿男 正会員 大同工業大学

1. はじめに ケーブルは、構造物の支持、物体の位置保持、曳航、設置回収として、地上構造物や海洋構造物の主要構造要素として、古くから用いられている。ガイドタワーブラットホームやテンションレグブラットホームに見られるような、大規模な海洋構造物の係留ケーブルでは、ケーブルの自重、浮力、波力、潮流力などの外力が作用し、また各種の非線形性状を考慮しなければならない¹⁾。海洋ケーブルの主な非線形性を列記すると、(1) 幾何学的非線形、(2) 材料学的非線形、(3) 波力や潮流力による非線形抗力(非保存力)、(4) 非線形境界条件(接触問題)、(5) Slack状態で示されるケーブル剛性の極端な減少が挙げられる。

ケーブルの解析では、一般に部材の曲げ剛性が無視され、また引っ張りのみに抵抗するものと仮定される。この仮定のもとでは、ケーブルの形状は不定形である。この形状は、内力により生じた幾何剛性で維持されており、軸方向変位が小さくとも有限変形を考慮しなければならない。したがって、ケーブル構造の解析過程は、次のように定義される。解析過程Ⅰ：形状決定問題、解析過程Ⅱ：静的または動的問題。ここで、形状決定問題は、古くからカテナリー問題として取り扱われ、与えられた自重 w_0 、ケーブル長 L 、断面剛性 A 、 E 及び初期応力(プレストレス) σ 。での静的つり合い形状を求める問題であり、一般に強い幾何学的非線形挙動が示される。問題によっては、従来用いられてきた非線形解析法では、解けない場合も多く見られる。従って、与えられたケーブルの初期つり合い形状が求まれば、この値を初期値として用いて解析過程Ⅱでの任意の外力による静的及び動的応答を、通常非線形アルゴリズムにより解析することができる。これまでに、解析過程Ⅱの問題については多くの研究がなされているが、より一般的なケーブルの初期つり合い形状問題については、あまり研究されていないように思われる²⁾。

本文では、これらの点を考慮して、アイソパラメトリックケーブル要素を用いて、海洋中の浮体-ケーブルの初期つり合い形状及び静的解析について述べる。また高次の非線形方程式を解くために、Newton-Raphson法の一般表現として知られるViscous Relaxation法³⁾を適用している。

2. 式の定式化 従来用いられて来ているケーブルの解析法を分類すると次のような5つに分けられる。(1) 解析的手法、(2) 半解析的手法、(3) Lumped Parameter法、(4) 有限要素法、(5) 直接数値積分法。一方、非線形解析法については、ひずみと変位の関係式での高次項の採用数により異なるが、ケーブルの伸びひずみは微小であるので、低次非線形項が用いられる。また、変形前の形状を基準とするTotal Lagrangian定式化法(TL法)と変形後の形状を基準とするUpdated Lagrangian定式化法(UL法)に区別される。これらの2つの方法では、応力とひずみの定義が異なる。TL法による非線形方程式は、反復法、増分法または混合法により解かれる。一方、UL法による場合は、増分法または増分・反復法で解かれる。

ここでは、アイソパラメトリック離散化要素とTL定式化に基づき、仮想仕事の原理を用いて式の定式化を行っている。導かれた非線形方程式を解く場合に、得られたJacobi Matrix(接線剛性マトリックス)をNewton-Raphson法で解けない場合があるので、このような問題を改善するために、仮想的な減衰項を付加したViscous Relaxation法を用いて解いている。また、潮流力による抗力は、Morisonの式を用いている。

参考文献 (1) J.W. Leonard, 'Tension Structures-Behavior & Analysis', McGraw-Hill, 1987.
(2) T. Mizusawa and GODOS members, 'Bibliography and database on offshore structures', Symp. on Fundamental Study on Dynamic Failure and Design of Ocean Structures between DIT and OSU, 1988.
(3) R.L. Webster, 'On the static analysis of structures with strong geometric nonlinearities', Compt. Struct., vol. 11, pp. 137-145, 1980.

Viscous Relaxation法は、準動的解析法の一手法であり、Newton-Raphson法の一般化された方法である。さて、Newton-Raphson法に基づき本問題の非線形剛性方程式を増分式で示すと、次式で与えられる。

$[K]_n \{\Delta U\} = \{\Delta Fe\} = \{Fe\}_{n+1} - \{Fi\}_n \dots (1)$ 。ここで、 $\{Fe\}$ = 外力ベクトル、 $\{Fi\}$ = 内力ベクトル、 n は n 次荷重増分ステップを示す。 $\{U\}_{n+1} = \{U\}_n + \{\Delta U\}$ であり、 $[K]_n$ は、接線剛性マトリックス(Jacobi Matrix)を示す。式(1)に、減衰項を付加し、また n を t 、 $n+1$ を $t+\Delta t$ に置き換えると次式が得られる。 $[C]_t \{U\}_{t+\Delta t} + [K]_t \{\Delta U\} = \{Fe\}_{t+\Delta t} - \{Fi\}_t \dots (2)$ 。ここで、 $[C]_t$ は、仮想減衰マトリックスである。また、 $\{U\}_{t+\Delta t} = \{\Delta U\} / \Delta t$ であるので、式(2)に代入すると、 $[(1/\Delta t)[C]_t + [K]_t] \{\Delta U\} = \{Fe\}_{t+\Delta t} - \{Fi\}_t \dots (3)$ が得られる。ここで、 Δt は、仮想時間増分を示す。従って、式(3)を数値安定性の高いCrank-Nicolsonの数値時間積分法を用いて解けば、減衰項が零になったときに、静的解が求められる。ただし、初期条件として、任意に仮定された変位が用いられる。さらに、解の収束を高めるために、 $[C]_t = C(t)[I]$ とし、減衰係数 $C(t)$ を、次のように各時間ステップで変化させる。 $t+\Delta t C = t+\Delta t \mu C^0$ 、 $t+\Delta t \mu = t+\Delta t \mu_0 \sqrt{\sum (U_i)^2 / \sum (U_i^0)^2}$ 。ただし、パラメータ、 μ_0 、 γ 、 C^0 は、任意に仮定される。

3. 数値計算例及び考察

本手法の精度を示すために、ケーブル問題の解析解と比較を行い、

また浮体-ケーブルの初期つり合い解析及び潮流によるケーブルの静的応答解析について示す。ただし、浮体は質点剛体と仮定する。計算例として、次の3つの場合について検討する。(1) 初期つり合い形状が与えられた3次元ケーブルネットの静的解析。この問題は、文献[1]に示されている。Table 1より、本手法による値は、TL法及びUL法に基づく増分・反復法による値と非常に良く一致した結果が示されている。(2) 任意に仮定された初期変位を基に初期つり合い形状を求める。Fig. 1は、長さ200ftの水平に単純支持されたケーブルに任意の水平力、 H が作用した場合の、自重によるつり合い形状が示されている。線形アイソパラメトリックで10分割されている。Table 2には、これらの最大たわみ ΔC 、水平変位 ΔR 、支間 L 、サグ比 f 及び最大張力 T_{max} が示されている。 $H=P$ の場合、厳密解との比較をしている。(3) 海水中で浮体で支された一端固定のケーブルの初期つり合い形状が、Fig. 2に示されている。反復回数を高めることにより、厳密解と良く一致した結果が得られる。潮流力の影響については、当日発表する。なお、本研究の一部は、科研費(海外学術研究)の援助を受けている。

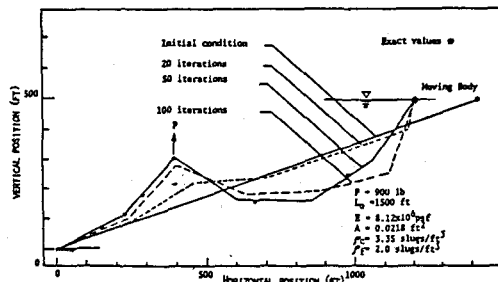


FIG. 2. STATIC DEFLECTION OF A SUSPENDED CABLE IN WATER

Table 1. Comparison of displacements of suspended cable net

Methods (with Finite Elements)	Nodal points	Displacement components x y z ftx(10 ³)		
		x	y	z
Viscous relaxation method	4	-2.354	-2.728	30.96
	5	0.0	-3.654	35.09
	6	-2.254	-0.7279	23.35
	7	0.0	-0.9612	23.94
Combined incremental and iterative scheme (TL formulation)[1]	4	-2.35	-2.73	34.0
	5	0.0	-3.66	35.1
	6	-2.25	-0.73	23.4
	7	0.0	-0.96	23.9
Baron and Vendatessen's results(AL formulation)[1]	4	-2.36	-2.73	34.0
	5	0.0	-3.67	35.2
	6	-2.26	-0.73	23.4
	7	0.0	-0.96	24.0

TL=Total Lagrangian, AL=Updated Lagrangian

Table 2. Comparison of suspended cable to dead weight
E=10⁶ psf, A=0.1ft², rho=0.031056 lbsec²/ft⁴,
g=32.2ft/sec², P=5.7735 lb and L=200ft.

Horizontal Force, H ₀ (lb)	ΔC (ft)	ΔR (ft)	L (ft)	Sag ratio f=ΔC/L	Maximum tension force, T _{max} (lb)
1.5P	45.91	28.91	171.1	0.268	12.3
1.2P	52.68	38.65	161.3	0.327	11.0
P	58.14	47.70	152.3	0.382	10.5
	(57.80)	(47.92)			
P/2	76.19	87.00	113.0	0.674	9.17
P/4	86.73	124.8	75.15	1.16	8.85
P/8	95.95	155.7	64.30	2.17	8.30
P/10	97.25	163.5	56.47	2.67	8.59

() is the exact solution.

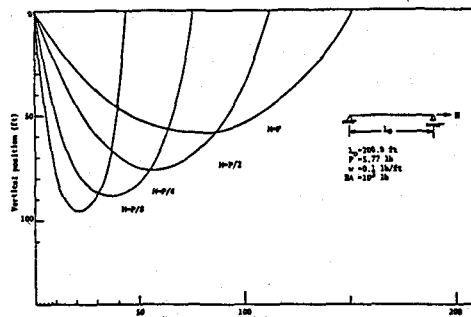


FIG. 1. INITIAL CONFIGURATION ANALYSIS OF SUSPENDED CABLES