

I-93

海洋ケーブルの解析

○前島正彦 正 福井高専

事口寿男 正 大同工大

酒造敏廣 正 大同工大

1. はじめに 最初に、ケーブルの位置ベクトルと変形後のケーブルに働く張力ベクトルを未知量にとった3次元の運動方程式を示す。次に、静的問題について、Adams-Moulton の二次の積分公式に高階の導関数項を含めることによって、高精度で初期形状が決定できることを示す。動的問題は、求められた初期形状を初期条件として、Newmark の β 法によって、非線形の運動方程式を直接数値積分して解く。

2. ケーブルの運動方程式 流体中で運動しているケーブルの変形後の微小線素に働く力のつりあいは、

$$P' + (f_w + f_b + f_d + f_m)S = 0. \quad (1)$$

Pは張力ベクトルで、微分はケーブル軸線長による。

f_w はケーブルの自重、 f_b はケーブルに働く浮力(静水圧)、 f_d は潮流・波動などによる流体力、 f_m はケーブルの慣性力であり、いずれもケーブルの変形後の単位長さに働く量である。また、位置ベクトルと張力の関係は、

$$\xi' = S\tau = S_0(1+e)\tau. \quad (2)$$

ξ はケーブル任意点の位置ベクトル、 S_0 は無荷重状態でのケーブルの長さケーブルの接線 τ は、パラメタ ξ による微分を(')で示せば、 $\tau = \xi' / S$ はケーブルの接線、 e はケーブルのGreenの伸び歪みである。

3. 静的解析 ケーブルの初期形状の決定方法に、Adams-Moulton の積分公式とTransfer Matrix 法を組み合わせる方法を使う。ケーブル上の任意点 k 点と、 z だけ離れた l 点の張力と位置の関係はAdams-Moulton の二次の積分公式に、張力に対しては二階導関数項、位置ベクトルに対しては三階導関数項を含めると、

$$P_l = P_k + \frac{1}{2}((P_k' + P_l')z + (P_k'' - P_l'')z^2/2) \quad (3)$$

$$\xi_l = \xi_k + \frac{1}{2}((\xi_k' + \xi_l')z + (\xi_k'' - \xi_l'')z^2 + (\xi_k^{(3)} + \xi_l^{(3)})z^3/6). \quad (4)$$

式(4)の誤差は、 $\xi^{(5)}z^5/80$ の大きさとなる。実際の計算は、。(1)現在の k 点の値から l 点の予測値を計算する。(2)現在の k 点の値と、 l 点の予測値から l 点の修正値を式(3)と式(4)から計算する。(3)始端の張力か位置のどちらかは未知量であるが、隣合う2点の位置、張力の変動量の関係を用いて終端の変動量を始端の変動量の線形結合で与え、境界条件から始端の変動量を決定する。

4. 動的解析 動的解析にはNewmark の β 法を用いた。時刻 t における位置、速度、加速

度と、時刻 $t+h$ における加速度の推定値を用いて時刻 $t+h$ における位置と速度の推定値を計算する。これらを式(1)、(2)に代入し、両辺が等しくなるように加速度の推定値を修正する。

表-1.1 解法の精度(P:2次、 ξ :3次) $W/EA=10^{-10}$

支間 m	分割数	反復数	水平張力(N)	sag(m)
0.5000	10	7	1.1288	0.40095
	20	5	1.1252	0.39836
	40	4	1.1252	0.39820
	theory	—	1.1252	0.39819
0.9999	10	20	200.01	0.005879
	theory	—	200.00	0.005882

表-1.2 解法の精度(P:2次、 ξ :3次) $W/EA=10^{-5}$

支間 m	分割数	反復数	水平張力(N)	sag(m)
0.5000	10	8	1.1518	0.40095
	20	6	1.1482	0.39836
	40	5	1.1482	0.39820
	theory	—	1.1482	0.39819
0.9999	4	27	13.353	0.00936
	10	20	13.353	0.00936
	theory	—	13.353	0.00937

表2 浮力と水中質量の相違

	span	ρ (kg/m ³)	E_0 (kN/m ²)	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	sag (m)
浮力	90 m	2000	10^7	0.43818	0.25288	19.247
		8000	10^7	2.6006	1.8643	19.021
		2000	10^3	0.39091	0.05130	51.299
水中質量	90 m	2000	10^7	0.43000	0.03600	40.854
		2000	10^7	0.36110	0.26934	19.021
		8000	10^7	2.5248	1.8814	19.115
水中質量	50 m	2000	10^3	0.26264	0.10547	44.921
		2000	10^7	0.24059	0.05523	39.822

5. 解析結果 精度の評価のために、理論解の容易に得られる水平2点間に張られた自重のみを受けるケーブルの計算を行った。表1.1、1.2にその結果を示す。

浮力は静水圧の合力であるから、ケーブル軸線に垂直に働くが、文献によっては浮力の効果を水中質量として処理しているものもある。ケーブルを水中で張り渡した場合の、浮力を正しく評価したときと、水中質量として処理した時の相違を表2に示す。一般に『浮力』と『水中質量』の差は、ケーブルの質量・剛性が小さいほど、緩く張ったときほど大きい。張力の方が形状より差が大きい。最大張力・最大たわみの大き

さから判断すれば、浮力を水中質量として処理するのは、設計上、危険側にあるといえる。球状物体を一定速度で水中曳航するときのケーブルの定常(つりあい)形状を図1と計算結果の一部を表3に示す。

動的過渡応答解析の1例として、Webster等のアンカー・ドロップの

計算と比較計算を行った。アンカーの落下形状を図2に示す。このケーブルは、水中質量0とされているのでアンカーに伴って落下するので、常にケーブルは緊張状態にある。次に、水中に懸垂された初期形状を有するケーブルのアンカー・ドロップの解析を行った。ケーブル比質量は5である。ケーブルの落下形状と落下軌跡を図3に示す。この場合は、ケーブル反曲点近傍で張力を担えない、slack 状態が生じている。

参考文献

1) Webster, R.L.: Nonlinear static and dynamic response of underwater cable structures using the finite element method. OTC 2322, 1975.
2) 吉田他: 有限要素法による水中線状構造物の応答解析. 日本造船学会論文集, 第144号, 1979.
3) 福元他: 海中ケーブル構造の波浪応答解析とその計算プログラム. 土木学会論文集, 第356/I-3, 1985.
4) 水澤他: 海洋ケーブルの動的非線形挙動について, 第9回海洋工学シンポジウム, 日本造船学会, 東京, 1989.
5) Gibbons, T. and Walton, C.O.: Evaluation of two method for predicting towline tensions and configurations of a towed body system using bare cable. DTMB Report 2313, 1966.

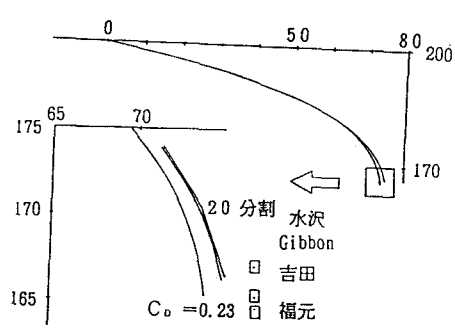


図1 アンカーの曳航

表3 アンカーの曳航

So=85.344m, do=8.89mm, EoAo=853.5kN, w=0.3515kg/m, Cdn=1.5, Cdt=0.03
Do=0.3048m, W=27.928kg, Cd=0.5, 曳航速度=5.397m/s

	Gibbons 実験値	Webster 計算値	吉田ら 計算値	福元ら 計算値	水澤ら 計算値	著者ら 計算値
Depth of body (m)	32.9	36.6	33.0	33.3	32.8	33.7
Tension at ship (kN)	2.930	2.842	2.939	2.911	3.005	2.935
Tension at body (kN)	2.626	2.577	2.636	2.636	2.626	2.624
Angle of ship	8.0°	11.0°	10.7°	10.7°	—	10.7°
Angle of body	80.0°	86.0°	82.9°	75.3°	—	78.4°

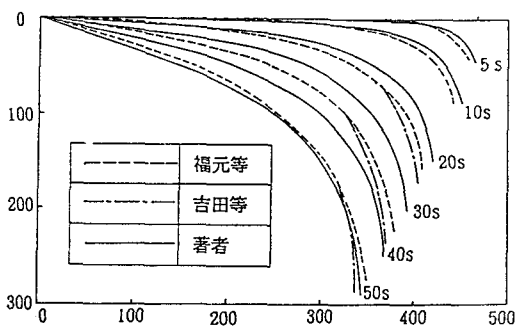


図2 アンカー・ドロップ (ρ=1)

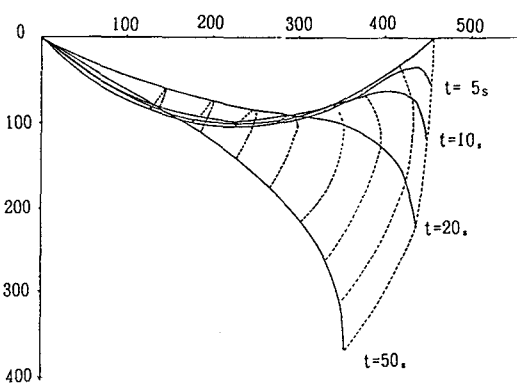


図3 アンカー・ドロップ (ρ=5)