

日本鋼管 正会員 ○加納 勇
日本鋼管 正会員 辻 松雄

1. 概要 海洋構造物には、浮遊式海洋構造物の係留ラインに代表されるような、水中ラインの使用がよくみられる。又最近では、条件の厳しい海域への開発が強いられているため、ラインを利用した斬新な構造形式の提案もみられる。水中ラインは、大張力を導入した緊張状態と、着底部分を持つスラックカタナリー状態にその使用方法が大別できる。前者については、ラインの動的張力の検討が必要と考えられているが、後者では、振動のために付加される張力は小さいと考えられ、静力学関係からライン設計するのが一般的手法のようである。しかし、振動領域によっては付加張力が無視しえない程度に発生することが考えられる。筆者らは、単純なスラックカタナリー鎖ラインの上端点（海洋構造物側とりつけ点）を強制加振させた時に発生する動的付加張力に着目して、模型実験と理論解析を行ない、基礎的な振動特性に関して調査した。

2. 動的付加張力 水中ラインの上端点を強制変位加振したときに付加される張力 ΔT は表-1 に示すような発生要因別の各張力から成る。本報告での着目点は、静的に変位させた時に増加する張力 ΔT_s のうちの線形増加分 ΔT_{sl} （接線剛性から算出される張力）に対する ΔT_d あるいは ΔT_{sn} の比率にある。

3. 解析手法 有限要素法による、時系列応答解析（解析-Ⅱ）と周波数応答解析（解析-Ⅰ）の2つの手法を用いた。前者は、ラインの離着底、要素剛性の非線形性および流体抗力の非線形性を考慮したのに対し、後者は、流体抗力の非線形性だけを考慮した。要素剛性には、のびひずみの2次項までを考慮した張力部材の剛性評価式を適用し、流体力については、Morison の式を適用した。解析-Ⅱでのラインの離着底は、着底部の各節点に Voigt要素をとりつけ、その反力を参照して切り離し、接続を行うことで処理した。

4. 模型実験 図-1 に示すように、片面アクリル張り水槽に模型ラインを入れ、この上端を耐力壁に据付けた油圧式加振機で加振した。加振方向はライン面内水平方向とし、振巾 A と振動数 n は $A = \pm 0 \sim \pm 5 \text{ cm}$ $n = 0 \sim 2.5 \text{ Hz}$ の範囲で加振した。各加振に対してライン上端張力 T を主に計測した。実験は、高さ $H = 2.23 \text{ m}$ と水平距離 $L = 5.37 \text{ m}$ の支持点間隔を固定値とし、ライン長 S 、鎖径 ϕ 、水中空中の別をパラメーターにして7 ケース行なった（表-3 参照）。実験の相似率は、同一流体（水）の使用と同一重力場での実験条件から、 $[\text{力}] = [\text{長さ}]^3$ 、 $[\text{時間}] = [\text{長さ}]^{1/2}$ が決まる。したがって、1つの次元、たとえば $[\text{長さ}]$ の縮尺を仮定すれば実験値はそのまま実機換算が効く。尚、検討の結果、弾性相似は、実験結果に大きく影響しないので鎖材料として鋼を使用した。

又、レイノルズ数は実機に近い領域であるため、これに対する特別な工夫はしなかった。

表-1 付加張力 ΔT (A, n)

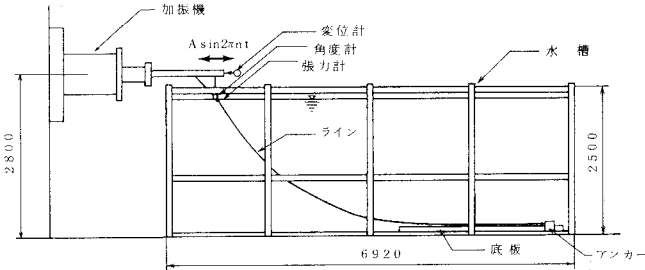
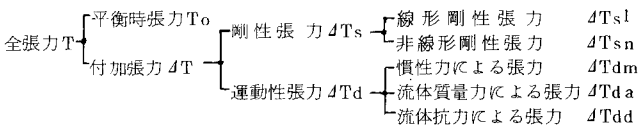


図-1 実験装置（単位mm）

表-2 鎖の諸元

鎖元	鎖径 ϕ	空中重量 W_a (kg/m)	水中重量 W_w (kg/m)	伸び率 $E\epsilon$ (mm)	d	f_1	f_0
$\phi 3$	3.0	1.42	1.24	9.90×10^{-4}	11.1	258	316
$\phi 4$	3.9	2.41	2.10	1.67×10^{-4}	14.3	300	378
$\phi 5$	4.8	3.86	3.37	2.53×10^{-4}	17.2	320	416

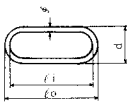


表-3 実験ケース

ケース	パラメーター			平衡状態				備考
	ライン長 S 距離	鎖 径 φ 距離	流 体	着底長 ΔL 距離	張 力 T ₀ g	水平張力 T _h g	$\frac{cm}{a} = \frac{T_h}{w}$	
①	6039	3	水中	930	867	592	475	基本形
②	5860	3	水中	0	1694	1400	1129	よりトウトな形
③	6193	3	水中	1940	642	367	296	よりスラックな形
④	6021	4	水中	780	1530	1070	508	鎖重大
⑤	6033	5	水中	880	2390	1640	487	鎖重大
⑥	6044	3	空中	970	981	666	469	空中
⑦	5860	3	空中	0	1939	1602	1128	②の空中

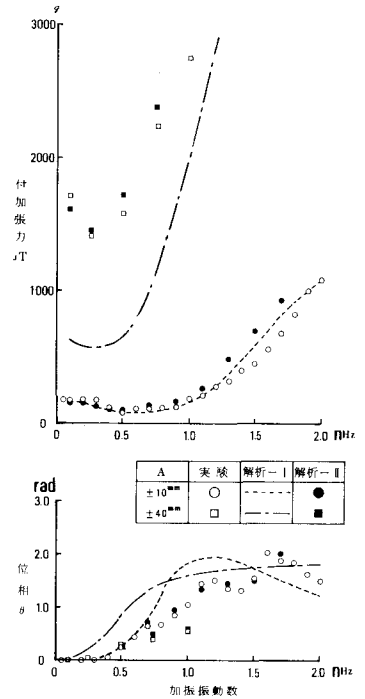
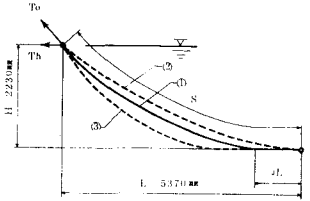


図-2 解析法の比較

5. 振動特性 図-2は、ケース②の付加張力 ΔT とその加振変位との位相 θ の加振振動数による変化について実験と解析の結果を比較したものである。図-3は、全ケースの付加張力 ΔT ($A = \pm 10$ mmの実験結果) の変化を示し、特に基本ケース①の固有振動数(解析値) n_0 とモード形を示した。図-4は、ケース②で、付加張力 ΔT が振動領域 (A, n) によりどのように変化するかを示した図 ($T-A-n$ コンタ図) である。水中ラインの振動特性について、以下にまとめる。

(1) 剛性が線形な振動領域であれば、振動数が高い領域でも解析Ⅰの手法程度で付加張力を推定しうる(図-2)。(2) 空中ラインにみるような非線形共振現象はまったく発生しない。共振現象は重量鎖ライン(たとえば、水深3.6mで鎖径8.0mm程度)でかすかに発生する。それは、面内対称2次モード共振であり、最低次振動である逆対称1次では共振しない。又、この振動数は a と H などから決まるカテナリー形状にのみ依存する(図-3)。(3) カテナリーラインの張力変化のパターンは概ね図-4のコンタ図のようになる。 ΔT_{sn} と ΔT_d が ΔT_{s1} に比して5割に満たない振動領域を③として図に示したが、仮にこの程度の誤差を許容するならば、領域③では水中ラインを線形バネ置換してよいことになる。逆に④は線形バネ置換ができない振動領域を示している。

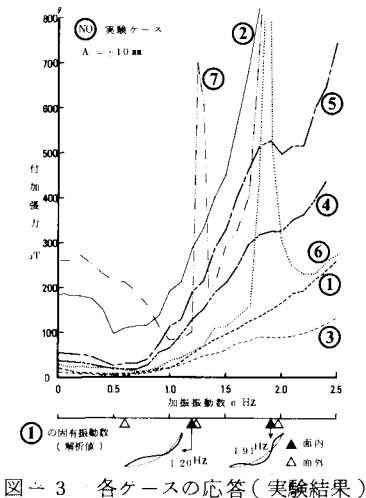


図-3 各ケースの応答(実験結果)

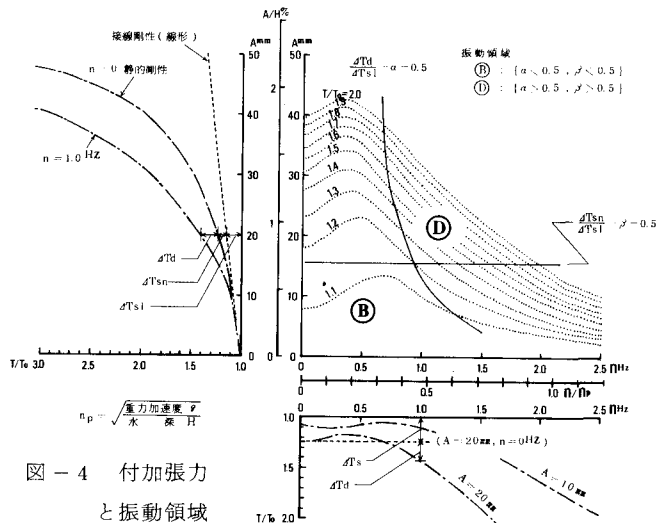


図-4 付加張力と振動領域