

大阪市立大学工学部 正員 小田 一紀

角野 昇八

1. 緒言

吃水に比べて直径がかなり大きな、いわゆる円盤型ブイは流れに対する抵抗と波浪に対する共振横揺角が小さいという利点から洋上における気象・海象観測用ブイとして米国を中心として世界的に使用されており、わが国でも気象庁や運輸省や三港事局で用いられている。これらの中には100m前後の比較的水深の浅い海域に係留されているものもあるが、ほとんどの場合、水深1000~2000m以上の大水深係留で、しかも例外なく伸びの大きな合成繊維索が用いられている。したがって、係留ブイ系の波浪応答に関する研究もそのような場合を対象としたものが多い。このような大水深係留では係留索張力は、一般に小さく、耐波設計上それほど重要でない。

これに反して、内海の航路浮標は、一般に水深が比較的浅い海域に、自重が大きく、伸びの小さな鉄鎖で係留されることが多い。円盤型ブイをこのような場合に用いると、潮流による定常流体力と大波浪によって係留鎖に極めて大きな衝撃張力が発生することが著者の模型実験によって確認されており、ブイの耐波設計上、このような衝撃張力の特性を把握しておくことは重要なことと思われる。しかしながら、国の内外ともに浅海域で、伸びの小さな鉄鎖で係留する場合を対象とした研究例はほとんど見当たらない。

この論文では、定常流体力と波の作用を受ける円盤型ブイの係留鎖に生ずる衝撃張力の発生機構を説明し、近似的な理論モデルによって張力の大きさを概算し、モデルの妥当性を検討する。

2. 張力の実験結果

実験は次のようにして行った。実物で、高さ2.0m、直径10m、重量62tの円盤型ブイとリング径78mmの鉄鎖の縮尺1/20の模型を製作し、この係留索に潮流30kt、風速50m/secの定常流体力を受けて静的つり合い状態にあるときの力学的関係をB.W. Wilsonの理論の数値計算によって求め、そのときの係留鎖上端張力の水平成分に相当する重量を有する錘でブイ模型を水平に引っ張り、初期定常つり合い状態を造波水槽内に再現した。これに波を与えてリング・ゲージによって張力を計測した。また同時に、ポテンシオメーターによってブイの x - y 座標を計測した。

実験の観測によれば、波高が小さい間はブイは水面の水粒子の軌道とほぼ同様な楕円軌道を描くが、波高がある程度以上大きくなるとブイの運動は有限長の係留鎖によって拘束され、軌道運動の途中で瞬間的に止められる。この瞬間に係留鎖によって大きな張力を受け、ブイは波の進行方向と進入方向に後退し、その後の1周期の間に1回転する楕円軌道を描き、2周期目の軌道運動の途中で再び係留鎖によって止められるという運動を繰り返す。図-1はこのようなブイの軌道運動の典型的な一例を示したものである。图中、 S :係留鎖長、 h :水深、 T_w :波の周期、 H_w :波高、また水深は1.5mである。また、●印は衝撃張力の発生した軌道位置を示す。

以上のことから、係留鎖に衝撃張力が発生する原因は、軌道運動の途中で係留鎖によって急激に運動が止められ、ブイの運動量が張力による力積に変換される、

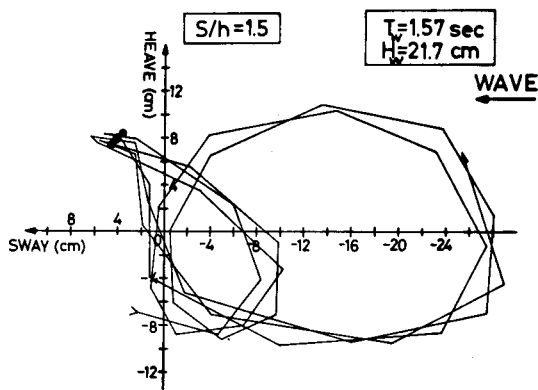


図-1. 衝撃張力発生時のブイの軌道

あるいは運動エネルギーが張力による仕事に変換されるためであると考えられる。このような衝撃張力の実験結果の一例を示すと図-2のごとくである。図中、

T : 張力, TW : ブイの自重。図-2によくと、張力は波高がある値以上になるとほぼ波高に比例して増大する傾向がある。また、前述の衝撃張力の発生機構からも理解できるように、僅かな条件の違いによって、張力は大きく変動することになる。

3. 理論モデル

張力計算のために次のような理論モデルを考える。

図-3に示すように、ブイは $x=l_0$, $z=h_0$ を中心とし、波高を半径とする円軌道を描き、軌道上の点Aにおいて速度 V_0 を有し、B点において最大張力が働くものとする。

ブイに働く流体力中、静水圧項、ブイと流体の相対速度に関する粘性減衰項、および流体の加速度と速度に比例する項 (diffraction 項) は、瞬時的にブイの運動に拘束されるような場合にはブイ自体の加速度に比例する項 (radiation 項) および張力項に比べて無視できると仮定する。このとき、ブイの運動方程式は次式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} M_E \ddot{x} &= -(1 + \beta_E \cos^2 \phi_w) T_x + \beta_E \sin \phi_w \cos \phi_w T_z \\ M_E \ddot{z} &= -(1 + \beta_E \sin^2 \phi_w) T_z + \beta_E \sin \phi_w \cos \phi_w T_x \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 M_E, M_E : ブイの中心軸方向およびそれと直角方向の見掛け質量、 ϕ_w : 波面の傾斜角度、 T_x, T_z : 張力成分 $\beta_E = (\beta_{ME} - \beta_{MS}) / M_E$, β_{MS}, β_{ME} : ブイの中心軸およびそれと直角方向の付加質量。(1)式を係留鎖上端の接線方向のブイの加速度 α_s を用いて書き変え、(2)式が得られる。

$$M_E \alpha_s = [-(1 + \beta_E \cos^2 \phi_w) T_x + \beta_E \sin \phi_w \cos \phi_w T_z] \cos \phi + [-(1 + \beta_E \sin^2 \phi_w) T_z + \beta_E \sin \phi_w \cos \phi_w T_x] \sin \phi \quad (2)$$

ここに、 ϕ : 係留鎖上端の傾き角度。

(2)式をブイの運動軌道上のA点からB点まで積分し、B点における接線速度 $U_{sb} = 0$ と置くと、次のエネルギー式が得られる。

$$\frac{1}{2} M_E U_{sa}^2 = \frac{H_w}{2} \int_{\theta_A}^{\theta_B} \left[T^2 + \beta_E (T_x \cos \phi_w - T_z \sin \phi_w)^2 \right] (T_x \sin \theta + T_z \cos \theta) / T^2 \cdot d\theta \quad (3)$$

ここに、 U_{sa} : A点における張力に対する接線方向の速度、 H_w : 波高、 T : 張力、 θ : 軌道上の位相角度

係留鎖張力としてカテナリー理論解を用い、 $\beta_{MS} = 1.0, \beta_{ME} = 0.2$ (にヒ)、 $S/h = 1.5, H_w/S = 0.178, T_w = 1.79 \text{ sec}$ の場合の張力を(3)式の数値解析から求めると、 $l_0/h_0 = 0.998 \sim 1.001$ の範囲において $(\bar{T} \pm \sigma)/TW = 2.92 \sim 4.34$ の値を示し、図-2の実験値に比較的一致した結果が得られた。 $\bar{T}$: 張力の平均値、 σ : 標準偏差。

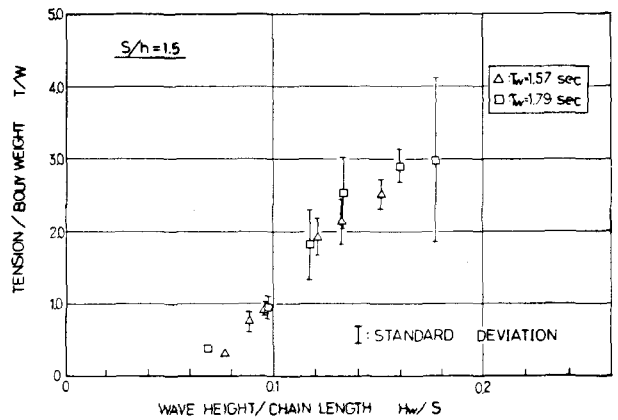


図-2. 円盤型ブイの係留鎖張力の実験値の一例

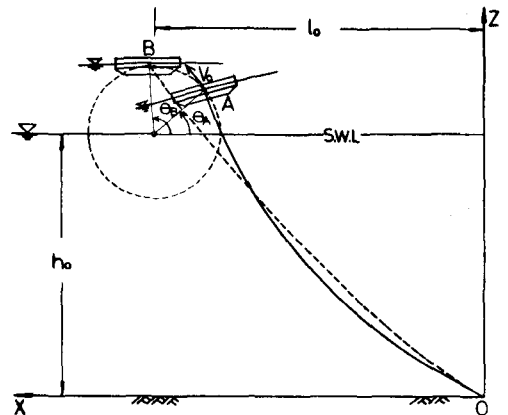


図-3. 理論モデルの座標系