

中間浮子による衝撃緩和に関する研究 (2)

——模型実験による検証——

中村 充*・上北 征男**・芥川 健一***

1. ま え が き

浮消波工, 沖合養殖施設など浮施設の大型化, 沖合化に伴ない必然的に大きな波力が浮施設に加わる. これら浮施設は係留索, アンカーなど係留施設により所定の海面に維持されている. 係留索の切断, アンカー固定力の不足などは, 施設の破損, 背面施設の二次災害の発生を伴うため, これら浮施設の大型化, 沖合化に伴う係留索に加わる衝撃力の緩和方法の開発が非常に重要である. 筆者らは昭和 50 年度から浮施設の係留索に加わる衝撃力を緩和する係留方法について研究を続けてき, 第 23 回海岸工学講演会に中間浮子による衝撃緩和機構の理論的考察結果について報告した¹⁾. 本報告は理論検証のため引き続き模型実験を行なった結果の報告である.

2. 衝撃緩和理論の概要

図一1 に係留方法の概略を示す. 衝撃力の緩和機構は施設浮体の運動が連結索を通じて係留浮子に作用し, 係留浮子が運動する際に生じる流体抵抗によって衝撃力を吸収する. その際, ① 係留索長に比較して浮子の移動距離が小である. ② 係留索の伸びによる衝撃力吸収は無視する. ③ 係留索の重量および係留索の流体抵抗は無視すると仮定すれば, 係留浮子の運動方程式は式 (1) で示される.

$$\frac{\sigma_0}{g} V \frac{dv}{dt} = F \cdot \sin \theta - f \cdot \cos \theta - C_D A \frac{w_0}{2g} v^2 - C_M V \frac{w_0}{g} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

ここに, σ_0, w_0 : 係留浮子 (B_A), 海水の単位体積重量, V : B_A の容積, F : 施設浮体 (B_F) と B_A の連結索に生じる力 (B_A を引く方向を正), f : B_A の余剰浮力, A : B_A の v 方向の投影面積, g : 重力の加速度, v : B_A の移動速度, dv/dt : B_A の加速度, θ : 係留索緊張時の海底面となす角, C_D, C_M : B_A の抗力係数, 付加質量係数.

他方, 施設浮体 (B_F) が連結索を通じて係留浮体 (B_A)

に作用する力 F は式 (2) で示される.

$$F = -\frac{dM}{dt} = -m \cdot \sin \theta \frac{dv}{dt} \quad (2)$$

式 (2) を式 (1) に代入, 初期条件を $t=0$ のとき $v=v_0$ として, 作用力 F を求めると式 (3) となる.

$$F = \frac{m\gamma}{\alpha} \sin \theta \cdot \sec^2 \left[-\frac{\sqrt{\beta\gamma}}{\alpha} t + \tan^{-1} \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} \frac{v_0}{\gamma} \right] \quad (3)$$

ここで,

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\sigma_0}{w_0} + C_M \right) V + \frac{mg \cdot \sin^2 \theta}{w_0} &= \alpha \\ \frac{1}{2} C_D A &= \beta \\ \frac{g}{w_0} \cdot f \cdot \cos \theta &= \gamma \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

である. また, F の作用時間内での F の最大値 $F_{\max}$ は,

$$\frac{dF}{dt} = 0 \text{ より, } t_0 = \frac{\alpha}{\sqrt{\beta\gamma}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} \frac{v_0}{\gamma} = t_1$$

$$\left. \frac{d^2 F}{dt^2} \right|_{t=t_0} > 0$$

から, $t=0$ のときに生じ, 式 (5) を得る.

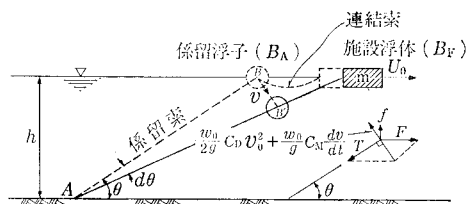
$$F_{\max} = \frac{m\gamma \sin \theta}{\alpha} \left[1 + \frac{\beta}{\gamma} v_0^2 \right] \quad (5)$$

なお, ここで, $v_0 = u_0 / \sin \theta$ である.

また, 係留浮子に作用力 $F_{\max}$ が作用した時の係留索の最大張力 $T_{\max}$ は,

$$\left. \begin{aligned} T_{\max} &= \sec \theta [F_{\max} - F \sin \theta] \\ F &= \frac{\gamma w_0 C_M V}{\alpha g} \left(1 + \frac{\beta}{\gamma} v_0^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

で示される.



図一1 係留方法と作用力図

* 正会員 農博 農林水産省農業土木試験場水産土木第3研究室長

** 正会員 農林水産省農業土木試験場水産土木第3研究室

*** 元東海大学海洋土木工学科学生

いま,

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \left(\frac{\sigma_0}{w_0} + C_M \right) V + \frac{m_G}{w_0} \sin^2 \theta \\ \beta &= \frac{1}{2} C_D A \\ \gamma &= \frac{g}{w_0} (m_G \sin \theta - f \cos \theta) \end{aligned} \right\}$$

とおくと式(8)は式(9)で示される.

$$\alpha \frac{dv}{dt} + \beta v^2 - \gamma = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

式(9)を解く際に $|v| \geq \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}$ により解は異なるが, 実験では $v_0 > \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}$ の範囲にあることから,

$$\begin{aligned} |v| > \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} \text{ のとき, 式(9)は} \\ -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} \ln \frac{v + \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v - \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}} = -\frac{\beta}{\alpha} t + C_2 \quad \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

となる. 式(10)に初期条件, $t=0: v=v_0$ を代入すると,

$$C_2 = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} \ln \frac{v_0 + \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0 - \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}$$

となり, 式(10)は式(11)で示される.

$$-\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} \ln \frac{v + \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v - \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}} = -\frac{\beta}{\alpha} t - \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} \ln \frac{v_0 + \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0 - \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}} \quad \dots\dots\dots (11)$$

式(11)を v について解く.

$$\frac{v + \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v - \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}} = \exp \left\{ \frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + \ln \frac{v_0 + \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0 - \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}} \right\} \quad \dots\dots\dots (12)$$

いま,

$$X = \ln \frac{v_0 + \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0 - \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}$$

とおいて v について解くと, 式(13)となる.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} \cdot \frac{\exp \left\{ \frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right\} + 1}{\exp \left\{ \frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right\} - 1} \quad \dots\dots\dots (13)$$

また, dv/dt は,

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= -\frac{4\gamma}{\alpha} \exp \left\{ \frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t \right. \\ &\quad \left. + X \right\} / \left[\exp \left\{ \frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right\} - 1 \right]^2 \quad \dots (14) \end{aligned}$$

となり, 式(14)を式(7)に代入すると,

$$F = m_G \left[1 + \frac{4\gamma \sin \theta}{\alpha g} \cdot \frac{\exp \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right)}{\left\{ \exp \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) - 1 \right\}^2} \right] \quad \dots\dots\dots (15)$$

となる.

いま, F の関数系について求めると,

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dt} &= -\frac{4\gamma \sin \theta}{\alpha g \left\{ \exp \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) - 1 \right\}^4} \\ &\quad \cdot \frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} \exp \left(\sqrt{\frac{2\beta}{\alpha}} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) \\ &\quad \times \left[\left\{ \exp 2 \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) \right\} - 1 \right] < 0 \quad \dots\dots\dots (16) \end{aligned}$$

となり, 減少関数である.

また, 式(15)の2次導関数は,

$$\begin{aligned} \frac{d^2 F}{dt^2} &= \frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} \exp \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) \\ &\quad \times \left\{ \exp \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) - 1 \right\}^3 \\ &\quad \times \left[\left\{ \exp 2 \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) \right\} - 1 \right] \\ &\quad \times \left\{ \exp \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) - 1 \right\} \\ &\quad + 2 \exp \left\{ 2 \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

式(17)の $t=t_0$ の時の $d^2 F/dt^2$ の値の正負について判定する. まず $t_0=t_1$ は, $dF/dt=0$ から求められ式(18)となる.

$$\begin{aligned} \frac{dF}{dt} &= \exp \left\{ 2 \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) \right\} - 1 = 0 \\ 2 \left(\frac{2\beta}{\alpha} \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}} t + X \right) &= 0 \\ t_1 &= -\frac{\alpha}{2\beta} \sqrt{\frac{\beta}{\gamma}} X = t_0 \quad \dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

式(18)を式(17)に代入すると

$$\left. \frac{d^2 F}{dt^2} \right|_{t=t_0} < 0$$

となり, F は $t=t_0$ で極大値をとる. 一方, 式(18)からわかるように t_0 は負の値をとるが現象的には適用領域が $t \geq 0$ であるため, $t=0$ で F は最大値をとり, F の最大値 $F_{\max}$ は式(15)に $t=0$ を代入し式(19)となる.

$$F_{\max} = m_G \left[1 + \frac{4\gamma \sin \theta}{\alpha g} \right. \\ \times \frac{\exp \left(\ln \frac{v_0 + \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0 - \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}} \right)}{\left[\exp \left(\ln \frac{v_0 + \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}}{v_0 - \sqrt{\frac{\gamma}{\beta}}} \right) - 1 \right]^2} \left. \right] \\ = m_G \left[1 + \frac{\gamma \sin \theta}{\alpha g} \left(\frac{\beta}{\gamma} v_0^2 - 1 \right) \right] \quad \dots\dots\dots (19)$$

次に係留浮子が係留索緊張の状態では、海底支点を中心に動いた時の係留索に加わる流体抵抗の補正を以下に示す方法で行なった。図-4に示すように係留浮子端張力を T_{w1} 、海底端張力を T_{w0} とおき、力のつり合いを考えると、

$$\left. \begin{aligned} T_{w0} \cos \theta_0 + T_{w1} \cos \theta_1 &= R \\ T_{w0} \sin \theta_0 &= T_{w1} \sin \theta_1 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (20)$$

になる。また、 θ_0, θ_1 は式 (21) に示される。

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_0 &= \frac{a}{\sqrt{\delta^2 + a^2}} & \cos \theta_0 &= \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + a^2}} \\ \sin \theta_1 &= \frac{b}{\sqrt{\delta^2 + b^2}} & \cos \theta_1 &= \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + b^2}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (21)$$

式 (21) を式 (20) に代入すると、

$$\left. \begin{aligned} T_{w0} \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + a^2}} + T_{w1} \frac{\delta}{\sqrt{\delta^2 + b^2}} &= R \\ T_{w0} \frac{a}{\sqrt{\delta^2 + a^2}} &= T_{w1} \frac{b}{\sqrt{\delta^2 + b^2}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (22)$$

$\delta \ll a, b$ であるから第1次近似は式 (23) で示される。

$$\left. \begin{aligned} T_{w0} \frac{\delta}{a} + T_{w1} \frac{\delta}{b} &= R \\ T_{w0} &= T_{w1} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (23)$$

一方、鉛直方向のつり合いは、

$$V_0 + V_1 = R$$

ゆえに

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{T_{w1}}{b} \cdot \frac{a}{T_{w0}} = \frac{a}{b}$$

となる。このことは反力 V_1, V_0 は a と b の比で表わされることを示している。したがって、第1次近似的には係留索の係留浮子端の運動と逆方向に働らく係留索の流体力 V_1 は式 (24) で示される。

$$V_1 = \frac{1}{L} \int_0^L x k D L \left(\frac{x}{L} v^2 \right) dx = \frac{1}{4} k D v^2 L^2 \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここで、 k は係留索の抗力係数で R_e 数が 80~420 の範囲のため、円柱の抗力係数を $C_D = 10/\sqrt{R_e}$ として与え、質量係数は索の径が非常に小さいため無視して、

$$k = \frac{w_0}{2g} \sqrt{\frac{10}{v_0 D}} \quad \dots\dots\dots (25)$$

とする。

式 (24), (25) を式 (1) に代入し、係留索に加わる流体力を補正した係留浮子の運動方程式を求めると式 (26) を得る。

$$\frac{\sigma_0}{g} V \frac{dv}{dt} = F \sin \theta - f \cos \theta - \frac{w_0}{2g} \left(C_D A \right. \\ \left. - \frac{1}{4} \sqrt{\frac{10}{v_0 D}} D L^2 \right) v^2 - C_M V \frac{w_0}{g} \frac{dv}{dt} \quad \dots\dots\dots (26)$$

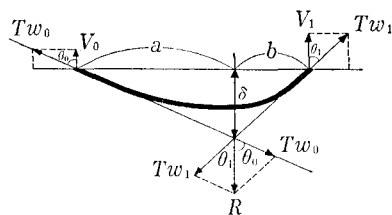


図-4 係留索懸垂線模式図

(3) 実験結果と考察

浮子の移動速度 v と係留索張力 T の実験記録の代表例を図示したのが図-5である。

図-5からほぼ移動速度 $v_{0\max}$ の時に係留索に最大張力 $T_{\max}$ が生じていることがわかる。また、 $v = v_{0\max}$ なる時の係留浮子の移動距離 $x \left(= \int_0^{t_0} v dt \right)$ は、すべての実験でほぼ同じで $x = 2 \sim 3$ cm の値をとる。このことは初期移動による変位角 $d\theta$ が約 0.5° 程度と非常に小さく、係留索方向と係留浮子の移動方向は直角になると考えてよいことを示している。

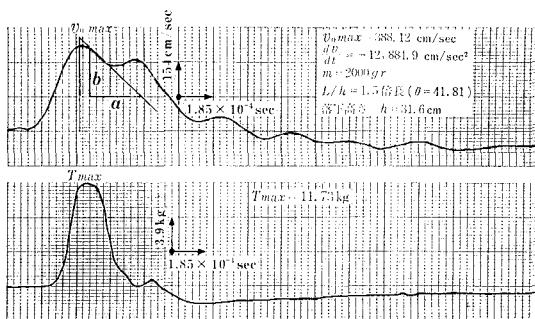


図-5 実験記録

次に、係留浮子の運動方程式、式 (1) が成り立つか否かについて計算値と実測値を比較した。図-6は、式 (1) を模型実験に即して変形した運動方程式、式 (26) に実験結果から得られた係留浮子の移動速度の最大値 $v_{0\max}$ および $v_{0\max}$ が生じた以後の速度変化勾配から求めた移動時の平均加速度 dv/dt を代入して $F_{\max}$ を求め、 $F_{\max}$ を式 (6) によって換算した $T_{A\text{cal}}$ と係留索張力の実測

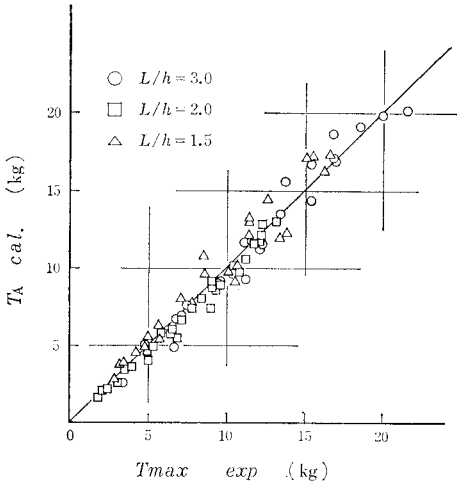


図-6 係留索最大張力の理論値 $T_{A\text{ cal}}$ と実験値 $T_{\text{max exp}}$ の比較

値 $T_{\text{max exp}}$ を比較して図示したものである。ここで、係留浮子の抗力係数 C_D には 0.5 を、付加質量係数 C_M には、ポテンシャル流から求められた球体の付加質量係数 $C_{MA}=0.5$ ($C_{MA}=C_M-1$) を用いた。

図-6 からわかるように計算値 $T_{A\text{ cal}}$ と実測値 $T_{\text{max exp}}$ はよく一致し、係留浮子に連結索を通じて施設浮体により生じた衝撃力が作用した場合、式 (26) すなわち式 (1) の係留浮子の運動方程式が成り立つことがわかる。

一方、係留浮子に作用する連結索に生じる作用力 F_{max} について、連結索緊張時の重錘の落下速度 $v_0 (= \sqrt{2gh})$ から係留浮子の移動速度 $v_0 (= u_0/\sin \theta)$ を求め、式 (19) に代入して求めた $F_{\text{max cal}}$ と実測値 T_{max} を式 (6) を用い換算した $F_{\text{max exp}}$ を比較して図示したのが 図-7 である。図-7 によると F_{max} が大なる程すなわち mu_0 が大なる程実測値に近づく傾向を示す。このことは実験の範囲において係留浮子の重量 W と施設浮体を模した重錘重量 mg との比 W/mg が約 $1/5 \sim 1/50$ と大きいため、重錘の運動量が係留浮子の運動にすぐ転化されず係留浮子が運動する際の加速度を生じさせることに費されるためと考えられる。現実のように、 $W/mg \approx 1/350$ のように施設浮体の重量に比較して係留浮子の重量が非常に小さい場合には、計算値と実測値は一致すると考えら

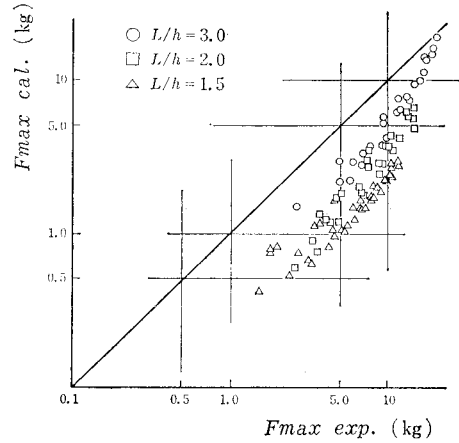


図-7 連結索最大張力の理論値 ($F_{\text{max cal}}$) と実験値 ($F_{\text{max exp}}$) の比較

れ、設計計算する上においては充分実用に供し得ると考えられる。

4. 結 言

浮体運動による係留索に生じる衝撃力を緩和する方法として、中間浮子の運動に伴う流体抵抗が施設浮体の運動量を吸収する機構を明らかにした。その結果、従来経験的に設置されていた中間浮子の大きさ、重量などは、施設浮体の運動特性が解明されることにより計算が可能となった。残された問題点として、波による施設浮体の運動特性、特に漂流力が係留張力におよぼす影響について調べる必要がある。今後、本形式の係留法を持つ施設浮体模型の波浪水槽での実験を行ない、浮体の運動特性と同時に係留力を検討していくつもりである。

参 考 文 献

- 1) 中村 充・上北征男：係留浮子の衝撃力緩和に関する研究 (1)，第 23 回海岸工学講演会論文集，pp. 70~73，1976。
- 2) 三和英一：係留システム (D.P.S. を含む) の考え方について，第 2 回海洋工学シンポジウム，pp. 57~72，日本造船学会，昭和 51 年 6 月。
- 3) 安藤定雄：係留索，鎖，アンカー，シンカー等について，第 2 回海洋工学シンポジウム，pp. 73~93，日本造船学会，昭和 51 年 6 月。
- 4) 土木学会編：水理公式集 (昭和 46 年度版)，pp. 522~523。