

浮標に働く負の揚力に関する研究 (第2報)

永井 莊七郎*・倉田 克彦**

1. 緒 言

現在までに、著者らが行ってきた潮流中の浮標に作用する力に関する多くの実験結果より、浮標には、潮流の作用により鉛直下向きの力が働くことが明らかになり、この鉛直下向きの力を負の揚力と名づけた^{1)~4)}。

負の揚力についての基礎的な知識を得るために行なった、底部が半球状の浮標模型を用いた実験の結果では、負の揚力は見掛けの浮力の 1~3% 程度になった⁵⁾。

本論文は、模型浮標の形状を実際の浮標 (円盤型、船型および 5 型浮標) の形状に合わせて、模型実験により負の揚力の大きさを検討した結果をまとめたものである。

2. 負の揚力 L_n および負の揚力係数 C_L

負の揚力 L_n は、実験的に明らかにされたものであり、次式より求まる (図-1 参照)。

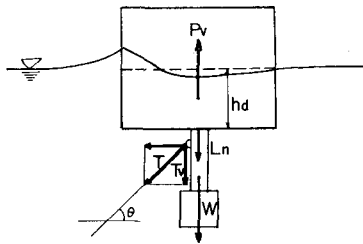


図-1 浮標に働く力

$$L_n = P_v - (W + T_v) \dots\dots\dots (1)$$

ここで

L_n : 負の揚力

P_v : 平均きつ水 h_d の場合の、圧力が静水圧分布をなすとして求められる見掛けの浮力

W : 浮標重量

T_v : 繫留索上端に働く張力の鉛直成分 $= T \cdot \sin \theta$

T : 繫留索上端に働く張力

θ : 繫留索上端において繫留索が水平となす角度
流れの中に置かれた物体の抵抗係数と同様に、負の揚力係数 C_L を次式のように書く。

$$C_L = \frac{L_n}{\frac{w_0}{2g} \cdot A \cdot U^2} \dots\dots\dots (2)$$

ここで

C_L : 負の揚力係数

A : きつ水 h_d のときの浮標の水中部分の流れに垂直な面への投影面積

U : 浮標に作用する流れの速度

w_0 : 水の単位体積重量

g : 重力の加速度

3. 実験設備および方法

実験水路として、大阪市立大学工学部河海工学実験場の長さ 40 m、深さ 0.8 m、幅 2.2 m のモルタル仕上げの開水路を、全長にわたって隔壁によって幅 1.2 m に狭くして用いた。流速は、プロベラ式のフォト・トランジスター型の流速計を用いて測定し、平均流速 $U \approx 20 \sim 50$ cm/sec の範囲に変化させ、水深は $h = 45$ cm に一定にした。

模型浮標として、図-2 (a), (b) および (c) に示すような、円盤型、船型の浮標、および現在一般に使用されている 5 型浮標 (アルミニウム製浮標) の模型を用いた。模型の縮尺は、円盤型および船型浮標は実物の 1/20、5 型浮標は実物の 1/10 である。

模型浮標を繫留している繫留索の上端に働く張力 T を、繫留索上端に取付けた内径 2 cm、厚さ 0.05 cm、幅 0.8 cm のリング・ゲージ (図-3 参照) により測定し、繫留索の傾き角

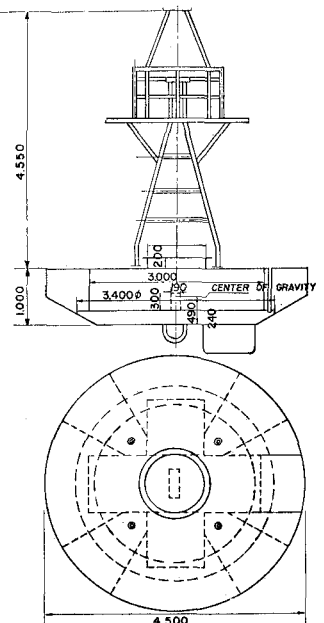


図-2 (a) 円盤型浮標

* 正会員 工博 大阪市立大学教授 工学部河海工学研究室
** 正会員 工修 大阪市立大学助手 工学部河海工学研究室

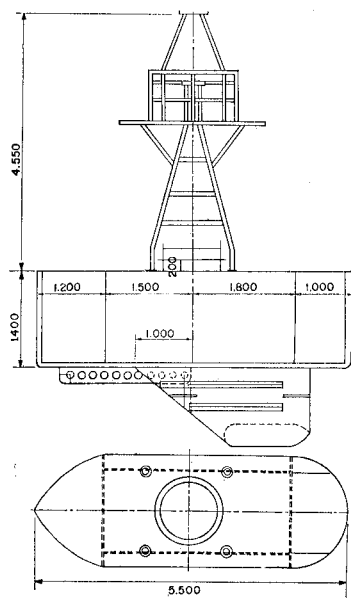


図-2(b) 船型浮標

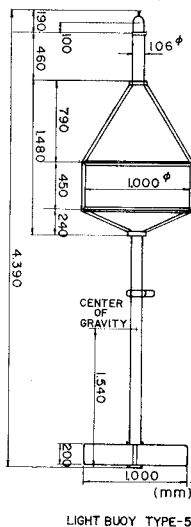


図-2(c) 5型浮標

θ を写真撮影により読取った。

浮標のきつ水は、模型浮標に適当な重量の荷重 w を載せ、あるいは繫留索の長さ l を変えることによって変化させた。そのきつ水は浮標側面に記入した目盛りにより求め、平均きつ水 h_a 、静水中での自重のみによるきつ水よりの増加きつ水 Δh_a 、および増加きつ水 Δh_a に相当する見掛けの浮力の増加 ΔP を計算した。いま模型浮標の自重 W に等しい浮力を P_0 、増加浮力を ΔP とおけば、浮標に働く見掛けの浮力 P_V は

図-3 リング・ゲージ (しんちゅう製)

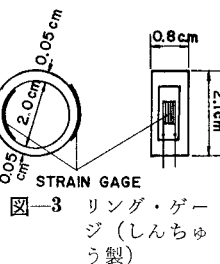


図-3 リング・ゲージ (しんちゅう製)

$$P_V = P_0 + \Delta P \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。式 (3) を式 (1) に代入し、荷重 w を考慮に入れば、式 (1) は

$$L_n = (P_0 + \Delta P) - (W + w + T_V) \\ = \Delta P - (w + T_V) \quad \dots\dots\dots (4)$$

となり、 L_n は増加浮力 ΔP と、荷重 w と繫留索に働く張力 T の鉛直方向の成分 T_V の和 $(w + T_V)$ との差に等しくなる。

実験を行なった諸条件は表-1 に示すとおりである。

表-1 実験条件

浮 標	模型縮尺	流速 U (cm/sec)	水深 h (cm)	きつ水 hd (cm)	荷重 w (gr)	繫留索長 l (cm)
円盤型浮標	1/20	21.2	45	2.4~4.0	0~658	35~85
船型浮標		32.2		2.5~4.2	0~330	35~75
5型浮標		39.5		0.6~4.0		35~95
5型浮標	1/10	53.4				

4. 増加浮力 ΔP

静水中、自重のみによる浮標のきつ水を h_{a0} 、流れの中に繫留され、荷重 w が加えられた場合のきつ水を h_a とすれば、きつ水の増加 $\Delta h_a = h_a - h_{a0}$ および増加きつ水 Δh_a に相当する増加浮力 ΔP は次のようにして求めることができる。ただし水面形は、浮標側面に記入した目盛りの間では直線的な変化をすると考える。

(1) 円盤型浮標

円盤型浮標の側面上に、図-4 に示すように中心角で 45° 間隔に、浮標の上面および底面に

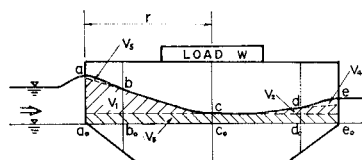


図-4 円盤型浮標のきつ水

垂直に記入した目盛りを用いて、静水時自重のみの場合の目盛りの読み $a_0, b_0, \dots, e_0$ および流速 U 、荷重 w の場合の目盛りの読み $a, b, \dots, e$ を読取る。目盛りの読みの増加 $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta e$ は

$$\Delta a = a - a_0, \Delta b = b - b_0, \dots, \Delta e = e - e_0 \\ \dots\dots\dots (5)$$

となり、 $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta e$ を用いて円盤型浮標の増加浮力 ΔP および増加きつ水 Δh_a を求めると次のようになる。

図-5 に示すように、円柱をその軸に対して傾いた平面で切ったときの、平面と円柱の底面および円柱の側面とで囲まれた斜線部分の体積 V は次式のように書ける。

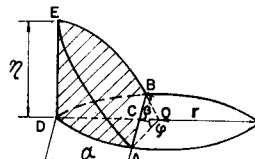


図-5 平面により切断された円柱の体積

$$V = \frac{\eta}{3\alpha} \{ \beta(3r^2 - \beta^2) + 3r^2(\alpha - r)\varphi \} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで

$$r = \overline{OA} = \overline{OB} = \overline{OD} = \text{円柱の半径} \\ \alpha = \overline{CD}, \beta = \overline{AC} = \overline{BC}, \eta = \overline{DE}, \varphi = \angle AOD$$

図-4 に示す静水時、自重のみによる場合より増加した水中部分の容積を ΔV とすれば

$$\Delta V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで V_1, V_2 について式 (6) を用いれば

$$\alpha = r, \beta = r, \varphi = \frac{\pi}{4}, \eta_1 = \sqrt{2} \cdot (\Delta b - \Delta c) \\ \eta_2 = \sqrt{2} \cdot (\Delta d - \Delta c)$$

であるから、

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot r^2 \cdot (\Delta b - \Delta c) \\ V_2 &= \frac{2\sqrt{2}}{3} \cdot r^2 \cdot (\Delta d - \Delta c) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。 V_3, V_4 についても同様の計算を行なえば

$$\left. \begin{aligned} V_3 &= \frac{Aa - Ab - (Ab - dc) \cdot (\sqrt{2} - 1)}{3 \cdot (\sqrt{2} - 1)} \cdot r^2 \\ &\quad \times \left(\frac{5}{2} - \frac{3\pi}{4\sqrt{2}} \right) \\ V_4 &= \frac{Ae - Ad - (Ad - dc) \cdot (\sqrt{2} - 1)}{3 \cdot (\sqrt{2} - 1)} \cdot r^2 \\ &\quad \times \left(\frac{5}{2} - \frac{3\pi}{4\sqrt{2}} \right) \end{aligned} \right\} (9)$$

となる。 V_3 は半径 r の円柱の容積であるから

$$V_3 = \pi \cdot r^2 \cdot \Delta c$$

によって与えられる。増加浮力 ΔP は

$$\Delta P = w_0 \cdot \Delta V = w_0 (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5) \dots (11)$$

で与えられ、増加きつ水 Δh_a は浮標の断面積 $A = \pi \cdot r^2$ であるから

$$\Delta h_a = \frac{\Delta V}{A} = \frac{\Delta V}{\pi r^2} \dots (12)$$

となる。円盤型浮標の $r = 11.25$ cm を代入すれば、円盤型浮標の ΔV , ΔP , Δh_a は次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta V &= 84.8 \cdot (Aa + Ae) + 3 \cdot (Ab + Ad) + 218 \cdot \Delta c \text{ (cm}^3\text{)} \\ \Delta P &= w_0 \cdot \Delta V = 1.0 \cdot \Delta V \text{ (gr)} \\ \Delta h_a &= \Delta V / 394 \text{ (cm)} \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

(2) 船型浮標

図-6 (a) に示すように、船型浮標の前部の側面は曲率を有している

が、簡単のため

図-6(a) の中に

破線で示すよう

に直線状をなし

ていると考

えて、 ΔP , Δh_a の

計算を行なっ

た。船型浮標の

側面に、図-6

(b) に示すよう

に浮標の上面お

よび底面に垂直に目盛りを記入し、円盤型浮標の場合と同様に、静水時、自重のみの場合の目盛りの読み $a_0, b_0, \dots, e_0$ および流速 U , 荷重 w の場合の目盛りの読み $a, b, \dots, e$ を読取り、目盛りの読みの増加 $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta e$ を求める。船型浮標の増加浮力 ΔP および増加きつ水 Δh_a は次のようにして求める。船型浮標の場合の $\Delta V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4$ を次のようにして求める。 V_1 および V_2 は底面積 $A_1 = \frac{1}{2} \cdot B \cdot R$ の三角錐および三角柱の容積として計算でき

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{3} \cdot (Aa - Ab) \cdot A_1 \\ V_2 &= (Aa - Ab) \cdot A_1 \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

となる。 V_3 は $A_2 = B \cdot L$ とおけば

$$\begin{aligned} V_3 &= (b_0 + Ab - d_0) \cdot \frac{1}{2} \cdot A_2 + \{Ab - (Ab + b_0 - d_0) \\ &\quad + Ad + 2\Delta c\} \cdot \frac{1}{4} \cdot A_2 \dots (15) \end{aligned}$$

となる。 V_4 については、円盤型浮標と同様に式 (6) を用いれば

$$\begin{aligned} V_4 &= \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (Ad + d_0 - e_0) + \frac{2}{3} \cdot r^2 \cdot \{(De + e_0) \\ &\quad - (Ad + d_0) + Ad - (Ad + d_0 - e_0)\} \dots (16) \end{aligned}$$

と書ける。船型浮標の $L = 16$ cm, $R = 7.5$ cm, $r = 5$ cm, $B = 10$ cm, $d_0 = 3.2$ cm, $e_0 = 3.8$ cm, $Ad + d_0 = d$, $De + e_0 = e$, $Ab + b_0 = b$ を代入すれば ΔV , ΔP は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta V &= 43.3 \cdot (Aa - Ab) + 80 \cdot b + 80 \cdot \Delta c \\ &\quad + 62.5 \cdot d + 16.7 \cdot e - 478 \text{ (cm}^3\text{)} \\ \Delta P &= 1.0 \cdot \Delta V \text{ (gr)} \end{aligned} \right\} \dots (17)$$

また $A = A_1 + A_2 + \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2$ であるから

$$\Delta h_a = \Delta V / 232 \text{ (cm)}$$

となる。

(3) 5 型浮標

図-7 に示すように、円盤型浮標と同様に 5 型浮標側

面に中心角 45° 間隔で記

入した浮標の中心軸と平

行な目盛りから、 $a_0, b_0,$

$\dots, e_0, a, b, \dots, e$ および

$\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta e$ を求めれば、次のようにして 5 型

浮標の ΔP および Δh_a を

計算できる。

円盤型浮標の場合と同

様に、式 (6)~式 (12) を

用い ΔV を計算すれば、

$r = 5$ cm であるから、 ΔV ,

ΔP および Δh_a は次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} \Delta V &= 15.2 \cdot (Aa + Ae) + 2.1 \cdot (Ab + Ad) \\ &\quad + 44.0 \cdot \Delta c \text{ (cm}^3\text{)} \\ \Delta P &= 1.0 \cdot \Delta V \text{ (gr)} \\ \Delta h_a &= \Delta V / 78.6 \text{ (cm)} \end{aligned} \right\} \dots (18)$$

5. 実験結果

円盤型、船型および 5 型浮標模型のそれぞれについて、

流速 U , 荷重 w および繫留索長 l を変化させた場合

の ΔP および Δh_a を式 (13) および (17), (18) を用

いて計算した。また一方繫留索上端の張力 T , 繫留索の

傾き角 θ および荷重 w を測定すれば、式 (4) より負

の揚力 L_n が求められる。 L_n を計算する代わりに、 ΔP お

よび $(w + T_v)$ の実験値をそれぞれ縦軸および横軸にと

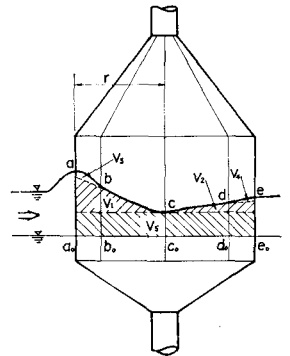
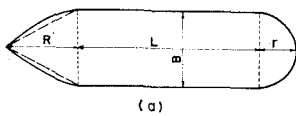


図-7 5型浮標のきつ水



(a)

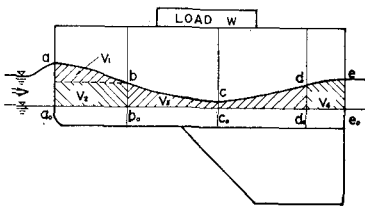


図-6 船型浮標のきつ水

って表わしたものが図-8~図-10である。図中の実線は $\Delta P = w + T_V$ を表わす直線であり、破線は $\Delta P = w + T_V$ からの模型浮標の平均のきつ水変化 $\pm 0.1\text{ cm}$ に相当する浮力変化を示すものである。

図-8~図-10 より明らかなように、浮標の形状には関係なく、円盤型、船型および5型浮標のいずれの場合にも ΔP と $(w + T_V)$ とは、きつ水変化 $\pm 0.1\text{ cm}$ に相

当する浮力変化の範囲内でよく一致し、式 (3) より求められる負の揚力 L_n は非常に小さいことがわかる。したがって負の揚力 L_n は、各模型浮標についてきつ水増加 0.1 cm に相当する浮力増加につり合う大きさであると考えれば十分であろう。

円盤型浮標に働く負の揚力 L_n は、平均きつ水 $h_a = 2.4\text{ cm} \sim 4.0\text{ cm}$ の範囲において、見掛けの浮力 P_V の $3 \sim 9\%$ 程度であり、船型浮標の場合には、平均きつ水 $h_a = 2.5\text{ cm} \sim 4.2\text{ cm}$ の範囲において、 L_n は P_V の $2 \sim 4\%$ 、5型浮標の場合には、 $h_a = 0.6 \sim 4.0\text{ cm}$ の範囲において、 L_n は P_V の $4 \sim 6\%$ 程度であって、先に発表した半球状の底部をもつ浮標の場合の $1 \sim 3\%$ 程度⁵⁾ よりやや大きい。

この負の揚力 L_n の係数 C_L を式 (2) より求めると、実験の範囲内では表-2 に示すような値となる。

表-2 負の揚力係数, C_L

円盤型浮標	きつ水 h_d (cm)	2.4	3.0	3.5	4.0	
	流速 U (cm/sec)					
	20	$C_L = 4.40$	3.37	2.82	2.42	
船型浮標	きつ水 h_d (cm)	2.5	3.0	3.5	4.0	4.2
	流速 U (cm/sec)					
	20	$C_L = 4.45$	3.79	3.25	2.84	2.71
5 型浮標	きつ水 h_d (cm)	0.6	1.0	2.0	3.0	4.0
	流速 U (cm/sec)					
	20	$C_L = 2.00$	1.66	1.16	0.90	0.72
	50	$C_L = 0.32$	0.27	0.19	0.14	0.12

6. 結果の考察

図-11 および 図-12 に示すような形状の浮標の繫留索に働く張力 T をばねを用いて測定した実験の結果では、負の揚力 L_n は見掛けの浮力 P_V の $10 \sim 40\%$ 程度の値を示し、今回得られた結果の $3 \sim 5$ 倍近くの値となっている。この違いについて考察を加える。

先の実験においては、繫留索に働く張力 T を 図-13 に示すように、水底の固定点に一端を取付けたばねによ

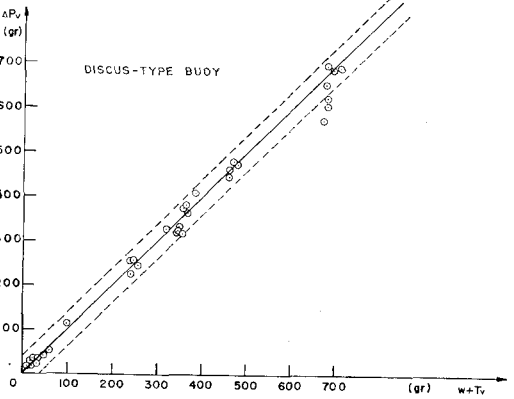


図-8 $w + T_V$ と ΔP との比較, 円盤型浮標

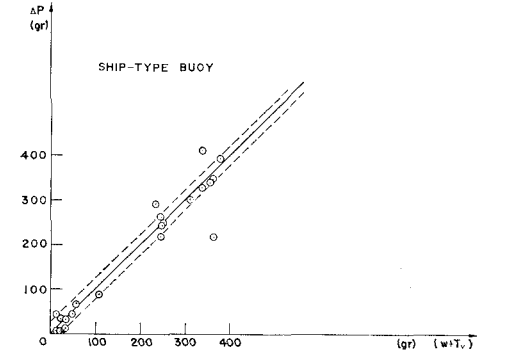


図-9 $w + T_V$ と ΔP との比較, 船型浮標

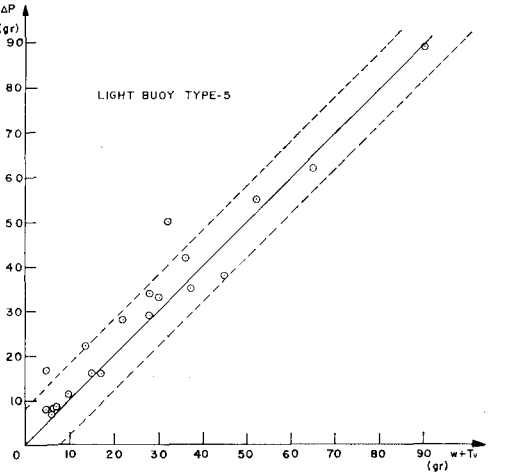


図-10 $w + T_V$ と ΔP との比較, 5 型浮標

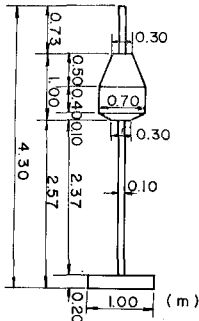


図-11 改良 I 型浮標

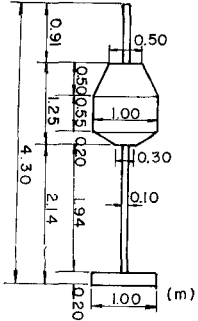
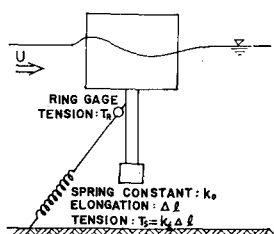


図-12 改良 II 型浮標

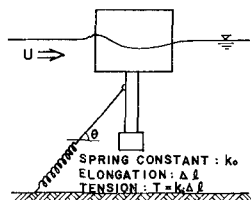
って測定し、ばねと水平とのなす角度 θ を目視により読取った。ばねに働く張力 T は、あらかじめ空気中でばね定数 k_0 を求めておき、張力 $T=0$ の時のばねの長さ l_0 からのばねの伸び Δl を読取り、 $T=k_0 \cdot \Delta l$ より求



図—13 ばねによる張力の測定

めた。 Δl の読取りには、いくらかの読取り誤差を見込んでおかねばならないため、できるだけやわらかく、 k_0 が小さいばねを用いて、 Δl の読取り誤差による張力 T の誤差を小さくするようにした。したがって、今回の実験で得られた結果、 L_n は P_V の 3~9% 程度で、図—11 および 図—12 に示す浮標の L_n は P_V の 10~40% 程度と大きいのは、水中におけるばね定数が空気中におけるばね定数と違うことを気づかなかったためであることが明らかになった。

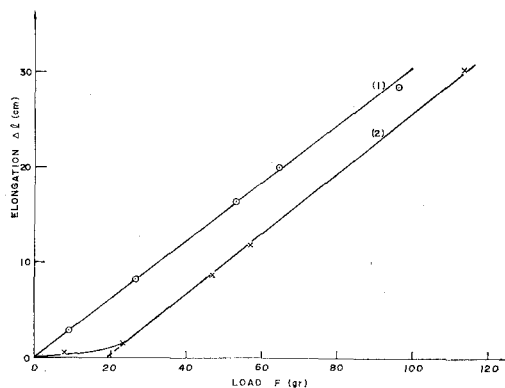
すなわち、空気中でのばね定数 $k_0=3.3 \text{ gr/cm}$ のばねおよびリング・ゲージを、それぞれ 図—14 に示すように繫留索の上、下端に取付け、繫留索に働く張力 T を 2 通りの方法で同時に測定した。



図—14 リング・ゲージとばねによる張力の同時測定

5 型浮標を用いて 3, 4 通りの場合について測定した結果、リング・ゲージにより得られた張力 T_R と、ばねの伸び Δl から求めたばねに働く張力 $T_S=k_0 \cdot \Delta l$ とは異なった値を示した。この原因は次のように考えられる。

空気中で測定したばねの荷重-伸びの関係は 図—15 の



図—15 ばねの荷重-伸びの関係

(1) の直線であるのに対して、水中で測定したばねの荷重-伸びの関係は 図—15 の (2) の曲線で表わされる。水中での荷重-伸びの関係は、荷重が 25 gr 以上になると空気中での関係を表わす (1) の直線を平行移動したのと同じになり、見掛け上、伸び $\Delta l=0$ の場合においても初期張力 $T_0=20 \text{ gr}$ に相当する力が働いているように見える。曲線 (2) の関係を用いて、同時測定を行なった時の伸び Δl から張力 T_S を求めると、リング・ゲージによる張力 T_R と比較的良好一致した。したがって空気中において荷重検定を行なったばねを水中で用い、水中での伸び Δl から空気中でのばね定数 k_0 を用いて張力 $T_S=k_0 \cdot \Delta l$ を求めると、実際に働いている張力 T より小さくなる危険性がある。

7. 結 論

以上述べてきたことを取りまとめると次のようになるであろう。

(1) 負の揚力 L_n は、円盤型、船型および 5 型浮標とも実験の範囲内では非常に小さく、きつ水増加 0.1 cm に相当する浮力増加につり合う大きさである。

(2) 負の揚力 L_n は見掛けの浮力 P_V の 3~9% 程度の大きさである。

(3) 負の揚力係数 C_L は、流速 $U=20 \text{ cm/sec} \sim 50 \text{ cm/sec}$ の範囲において、円盤型浮標については $C_L=4 \sim 0.4$ 、船型浮標については $C_L=5 \sim 0.4$ 、5 型浮標については $C_L=2 \sim 0.1$ に変化する。

(4) 張力の測定にばねを用いた実験の結果では、空気中と水中とではばねの特性の変化が考えられるので、負の揚力 L_n を大きくとりすぎていると思われる。

付 記: この研究に対して松永記念科学振興財団より研究助成金の援助を得た。ここに付記して感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 永井・小田: 潮流のある海に用いる浮標に関する研究, 第 11 回海岸工学講演会講演集, 11 月, 1964.
- 2) Nagai, S.: Hydrodynamic Forces on Light Buoys in Strong Tidal Currents, 11th Conference of I. A. H. R., Sept., 1965.
- 3) 大阪市立大学工学部永井研究室: 本州四国連絡橋橋脚に関する研究報告書 (その 1), 3 月, 1966.
- 4) 大阪市立大学工学部永井研究室: 本州四国連絡橋橋脚に関する研究報告書 (その 3), 3 月, 1968.
- 5) 永井・倉田: 浮標に働く負の揚力に関する研究 (第 1 報), 第 18 回海岸工学講演会論文集, 10 月, 1971.