

長波の研究用造波装置とその特性について (1)

岩 崎 敏 夫*・楊 沢 民**

1. 序 論

長波の模型実験における困難の一つは、水槽の長さに比して波長が同程度のオーダーであるために、数波以内で造波部に反射波が到達して所期の波形の造波ができないことである。このために造波部分に生じた実際の水位を検出し、これを考慮に入れた造波によって所期の波形をうることがのぞましい。すなわち造波部分の水位信号をフィードバックして計画水位との差異により、造波機構の運動を制御するいわゆる自動制御機構を取り入れることが考えられる。

わが国でも洪水、潮汐等に関する模型実験において自動制御機構が利用されているのであるが、その特性については部分的にとりあげられたことはあっても、総合的には理論的にも実験的にも明確にされていない^{1),2)}。

東北大学においては、昭和 38 年以來、主として津波を対象とする長波の研究用造波装置を設置し、総合特性について研究を行ってきたので、ここにその第 1 報を報告するものである。

2. 造 波 装 置

(1) 水理系造波装置

図-1 水理系造波装置部分概要図 (1)

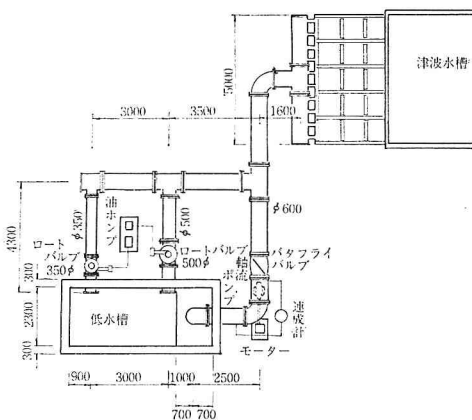


図-2 水理系造波装置部分概要図 (2)

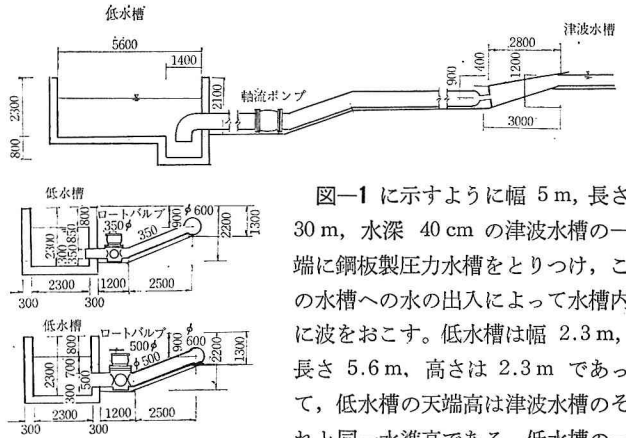
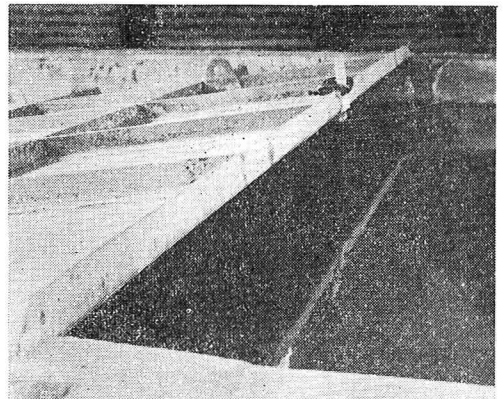


図-1 に示すように幅 5 m, 長さ 30 m, 水深 40 cm の津波水槽の一端に鋼板製圧力水槽をとりつけ、この水槽への水の出入によって水槽内に波をおこす。低水槽は幅 2.3 m, 長さ 5.6 m, 高さは 2.3 m であって、低水槽の天端高は津波水槽のそれと同一水準高である。低水槽の一端は 図-2 に示すように 0.8 m だけさらに深くなっており、35 kW モーターにより駆動される径 600 mm の軸流ポンプの吸込管を入れている。径 600 mm の鉄管は一方は津波水槽へつながる。また他方は径 500 mm および径 350 mm の帰還管によって、ふたたび低水槽へ戻っている。径 500 mm, および径 350 mm の帰還管の中途にそれぞれロートバルブが設けられ、また、軸流ポンプ吐出側にバタフライバルブがあって流量を制御できる。

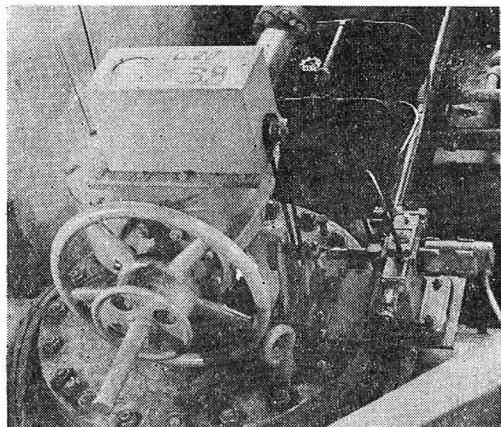
津波水槽に連結する部分は T 字管分岐で行止りとなっており、水撃圧をここでうけとめる。これに径 100 mm の鉄管 10 本を配置し、ポンプ吐出圧力と、津波水槽圧力との差で静圧的に水を流出せしめ、均一な流入を得る

写真-1 圧力水槽吐出部分



* 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
 ** 正会員 工修 東北大学大学院学生

写真-2 500 mm ロート バルブ



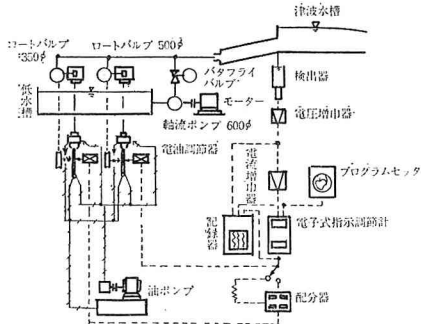
ようにつとめる。傾斜部分は延長 3 m で噴流をこの間で拡散せしめさらに仕切り導流板で整流するが、導流板末端は水槽まで 1 m の余裕水域を残し、ここでさらに噴流が混合する。

流量制御の原理はつぎのようである。まず図-3 にしめすようにロートバルブを適当な開度にしておき、ポンプを起動すると、分岐点 M_1 の圧力と低水槽 L における吐出口 B, C との水圧差のために還流する流量が、ちょうどポンプによる送水量と等しくなる。このとき津波水槽の水位は、 M_1 の(圧力水頭+速度水頭)に等しい位置を保つ。つぎに、ロートバルブをこの位置より開けば、津波水槽の水が流れ出し、津波水槽には負の段波が発生する。逆にロートバルブをさきの平衡位置より閉じれば、津波水槽に水が流入し、正の段波が進行する。ロートバルブの開閉を適当にすれば、津波水槽には、波形が現われる。

(2) 電気-油圧式自動制御機構

図-4 は、電気-油圧式自動制御機構の系統図であ

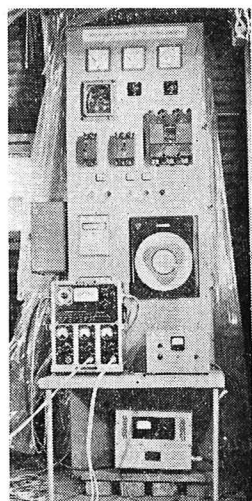
図-4 電気-油圧式自動制御機構



る。原理は津波水槽の水位を検出し、プログラムセッティングに刻まれた波形との差異を電子式指示調節計で計算し、電油調節器の油噴射管ノズルの位置を制御し、ロートバルブの回転軸を回転せしめるピストンの変位を加減するものである。

電子式指示調節計はPID動作を行ない、直流直結増幅器である。設定は電流設定でカスケード制御、プログラム制御等が可能であり、調節動作は、比例帯 5~300%, 微分時間 0~8 min, 積分時間 1 sec~30 min, 調節誤差は $\pm 10 \sim 20$ %である。

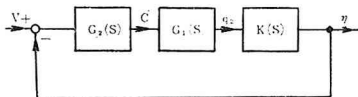
写真-3 制御盤



3. 自動制御系のブロック線図

図-5 は本装置のブロック線図である。まず η は水位信号で V は設定波形信号で、いずれも電流量に変換されたものとする。 $G_2(S)$ は、電気-油圧式自動制御機構の伝達関数であり、信号 C となる。本装置では、ロートバルブの流量係数にとった。 $G_1(S)$ は、水理系造波装置の伝達関数であり、これによって、津波水槽への流入量 q_2 を生じる。流量 q_2 より、水位 η をうるには、津波水槽の物理特性よりさだまる伝達関数 $K(S)$ を通過する。

図-5 ブロック線図



従来 $G_2(S)$ についての記述は多く行なわれているが、 $G_1(S)$ および $K(S)$ についてはまったくなされてはいない。そしてこれが水理学的な研究によってなされてはじめて、この造波装置の特性が解明されたものといえるはずである。

4. 水理系造波装置の伝達関数 $G_1(S)$

いま図-3 において、入口 A からポンプをへて M_1 までを「系Ⅰ」、 M_1 から津波水槽出口 D までを「系Ⅱ」、 M_1 から M_2 までを「系Ⅲ」、 M_2 から 500 mm 管出口 B までを「系Ⅳ」、また M_2 から 350 mm 管出口 C までを「系Ⅴ」にわけることとする。

各系において造波運転にはいる前の状態について、定常流と考えると運動方程式をたてておき、つぎに非定常な

造波運転にはいった際の量を定常状態の量と、これに対する変化量との和として表わして運動量方程式をたて、両者をさしひいてつぎの各式をうる。

$$\begin{aligned} \text{系 I : } h_L - K_1[(Q_1 + q_1)^2 - Q_1^2] + \Delta h_P \\ = \frac{L_1}{gA_1} \cdot \frac{dq_1}{dt} + h_{M_1} \dots\dots(1) \end{aligned}$$

$$\text{系 II : } h_{M_1} - K_2 q_2^2 = \frac{L_2}{gA_2} \cdot \frac{dq_2}{dt} + h_U \dots\dots(2)$$

$$\begin{aligned} \text{系 III : } h_{M_1} - K_3[(Q_3 + q_3)^2 - Q_3^2] \\ = \frac{L_3}{gA_3} \cdot \frac{dq_3}{dt} + h_{M_2} \dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{系 IV : } h_{M_2} - K_4[(Q_4 + q_4)^2 - Q_4^2] - \Delta h_R \\ = \frac{L_4}{gA_4} \cdot \frac{dq_4}{dt} + h_L \dots\dots(4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{系 V : } h_{M_2} - K_5[(Q_5 + q_5)^2 - Q_5^2] - \Delta h_{R'} \\ = \frac{L_5}{gA_5} \cdot \frac{dq_5}{dt} + h_L \dots\dots(5) \end{aligned}$$

ここに、 h は各点の全水頭の非定常量で定常量よりの差、 Q および q は各系の流量の定常量および変動量、 KQ^2 等は各系の摩擦、分岐、拡大、流入、流出等の損失水頭、 Δh_P はポンプの付加水頭、 Δh_R 、 $\Delta h_{R'}$ はロートバルブの損失水頭、 L, A は各系の管路長および断面積であり、また g は重力の加速度である。添字 L, M_1, M_2, U はそれぞれ低水槽、 M_1 分岐点、 M_2 分岐点および津波水槽を示し、添字 1~5 は各系を示し、 P はポンプ、 R はロートバルブを表わしている。

式 (1)~(5) は 2 次項を含むのでつぎの線型化を行なう。まず、

$$K_i q_i^2 \doteq K_i' q_i \quad (i=1 \sim 5) \dots\dots(6)$$

$$\Delta h_P \doteq -a q_1 \dots\dots(7)$$

また系 V のロートバルブは操作しないものとし、 $K_5 \times [(Q_5 + q_5)^2 - Q_5^2]$ の中に定常時の損失を含ませて、 $\Delta h_{R'} = 0$ とする。さらに Δh_R についてはつぎのように考える。すなわち、流量係数を C とすると、

$$\Delta h_R = \frac{(Q_4 + q_4)^2}{2gC_0^2 A_4^2} - \frac{Q_4^2}{2gC_0^2 A_4^2} \dots\dots(8)$$

ここに、 C_0 は定常時の流量係数である。 C を変動量 c と C_0 との和と考えて式 (8) に入れ、 $c/C_0 \ll 1$ と仮定して書き直すと、

$$\begin{aligned} \Delta h_R &= \frac{Q_4^2}{2gC_0^2 A_4^2} \cdot \left[-2 \frac{c}{C_0} + \frac{2 \frac{q_4}{Q_4} + \frac{q_4^2}{Q_4^2}}{1 + 2 \frac{c}{C_0}} \right] \\ &= -\frac{c Q_4^2}{g C_0^3 A_4^2} + \frac{2 q_4 Q_4 + q_4^2}{2g \left(1 + 2 \frac{c}{C_0} \right) C_0^2 A_4^2} \dots\dots(9) \end{aligned}$$

式 (6), (7), (9) および $\Delta h_{R'} = 0$ を用いて式 (1)~(5) を書き直すとつぎの諸式をうる。

$$\frac{dq_i}{dt} + m_i q_i = k_i RC + n_i y_i \quad (i=1 \sim 5) \dots\dots(10)$$

ここに、 m_i, k_i, n_i, y_i はつぎの諸式で示される。

$$\begin{aligned} m_1 &= (a + 2K_1 Q_1 + K_1') \cdot \frac{gA_1}{L_1} \\ m_2 &= K_2' \frac{gA_2}{L_2}, \quad m_3 = (2K_3 Q_3 + K_3') \cdot \frac{gA_3}{L_3} \\ m_4 &= \left(2K_4 Q_4 + K_4' + \frac{Q_4}{g \left(1 + \frac{2c}{C_0} \right) C_0^2 A_4^2} \right) \cdot \frac{gA_4}{L_4} \\ m_5 &= (2K_5 Q_5 + K_5') \frac{gA_5}{L_5} \dots\dots(11) \end{aligned}$$

$$n_i = \frac{gA_i}{L_i} \quad (i=1 \sim 5), \quad k_i = 0 \quad (i=1, 2, 3, 5) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} y_1 &= h_L - h_{M_1}, \quad y_2 = h_{M_1} - h_U, \quad y_3 = h_{M_1} - h_{M_2}, \\ y_4 &= y_5 = h_{M_2} - h_L \dots\dots(13) \end{aligned}$$

また、 $R = Q_4^2 / C_0^3 A_4 L_4$ である。

さらに連続方程式として、

$$q_1 - q_3 = q_2 = -A_L \frac{d}{dt} (y_1 + y_2) \dots\dots(14)$$

$$q_3 = q_4 + q_5 \dots\dots(15)$$

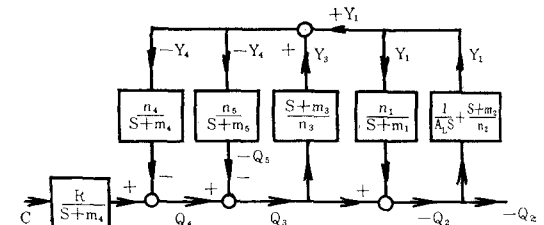
ここに、 A_L は低水槽の面積である。

式 (10), (14), (15) が基本方程式であるが、伝達関数をもとめるために、ラプラス変換を行なう³⁾。 $S = d/dt$, $Q_i = \mathcal{L} q_i$, $Y_i = \mathcal{L} y_i$, $C = \mathcal{L} C$ とおけば、

$$\begin{aligned} (S + m_i) Q_i &= k_i RC + n_i Y_i \quad (i=1 \sim 5) \\ Q_1 - Q_3 &= Q_2 = -A_L S (Y_1 + Y_2) \\ Q_3 &= Q_4 + Q_5 \dots\dots(16) \end{aligned}$$

さて図-5 にたちもどって考えると、水利系の伝達関数 $G_i(S)$ は、信号 C より流量 q_2 をもとめるためのものである。そこで式 (16) によってブロック線図をえがくと、図-6 に示すような水利系ブロック線図をうる。

図-6 水利系ブロック線図



そしてこのブロック線図を簡略化するために、

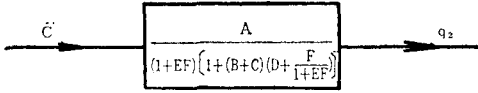
$$\begin{aligned} A &= \frac{R}{S+m_4}, \quad B = \frac{n_4}{S+m_4}, \quad C = \frac{n_5}{S+m_5}, \\ D &= \frac{S+m_3}{n_3}, \quad E = \frac{n_1}{S+m_1}, \\ F &= \frac{1}{A_4 S} + \frac{S+m_2}{n_2} \dots\dots(17) \end{aligned}$$

とて等価なブロック線図の変換を行なえば、最終的

に図-7 に示す形となる。これより、水理系伝達関数はつぎの式で表わされる。

$$G_1(S) = \frac{A}{(1+EF) \left[1 + (B+C) \cdot \left(D + \frac{F}{1+EF} \right) \right]} \quad \dots\dots\dots (18)$$

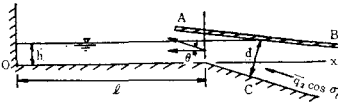
図-7 水理系等価ブロック線図



5. 流量水位伝達関数 $K(S)$

水槽流入端には q_2 なる流量が出入するが、このために津波水槽の一点 A においていかなる水位になるかが問題となる。いま津波水槽の幅 b 、長さ l 、初期水深を h とし、 x 軸を水平に原点を水槽の造波部分と反対側にとる。普通 $x=0$ には模型が設置されるのであるが、ここでは解析の簡単のために、全反射するものとする。もちろん反射係数を設定すれば、以下の解析は一般性を失うものではない。

図-8 水槽流入端と津波水槽



右端入口の斜めの壁 AB は鉄板でつくられており、この AB に対する垂直方向の速度成分は当然 0 である。したがって AB に平行な方向の速度成分のみが存在し、その値は q_2/bd である。津波水槽の水平方向なる x 成分は、 AB と x 軸とのなす角度を θ とすると、 $q_2/bd \cdot \cos \theta$ であり、また q_2/bd の y 成分は微量量でありかつ局部攪乱に使われるものと考えて無視する。すなわち、

$$U_H = \frac{q_2}{bd} \cdot \cos \theta = \frac{\bar{q}_2}{bd} \cos \theta \cdot \cos \sigma t = a \cos \sigma t \quad \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 $\bar{q}_2$ は、 q_2 の最大値であって、 $q_2 = \bar{q}_2 \cos \sigma t$ とおいた。したがって σ は流入流量の角振動数である。よって、

$$a = (\bar{q}_2/bd) \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (20)$$

つぎに長波の運動方程式として次式を用いる¹⁾。

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = gh \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} \quad \dots\dots\dots (21)$$

これは水路幅一定の自由振動の長波の方程式であって、 ξ は水粒子の水平移動量を示し次式で示される。

$$\xi = \int U_H dt \quad \dots\dots\dots (22)$$

また波の上昇量 η は ξ とつぎの関係でむすばれる。

$$\eta = -h \frac{\partial \xi}{\partial x} \quad \dots\dots\dots (23)$$

さて上にのべた考察により、境界条件をつぎのように設定する。

$$\left. \begin{aligned} x=0 & \quad \xi=0 \\ x=l & \quad \xi = \int a \cos \sigma t dt = \frac{a}{\sigma} \sin \sigma t \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここに、式 (19) を式 (22) に入れている。

また、初期条件は、つぎのとおりである。

$$t=0 \quad \xi=0, \quad \frac{\partial \xi}{\partial t}=0 \quad \dots\dots\dots (25)$$

Stokes の方法によってとけば式 (21) の解として次式をうる⁵⁾。

$$\xi(t, x) = \frac{2c}{l} \Sigma \sin \frac{m\pi x}{l} \int_0^t f(\tau) \sin \frac{cm\pi}{l} (t-\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{ここに、} \quad c &= \sqrt{gh} \\ f(\tau) &= \frac{a}{\tau} \sin \sigma \tau \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (27)$$

である。そこで、 $cm\pi/l = \sigma_1$ とおくと、式 (26) は、

$$\xi(t, x) = \frac{2ac}{l\sigma} \Sigma \left(\sin \frac{\sigma_1 x}{c} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma} \right) \times \left[\frac{\sin \sigma_1 t}{\sigma_1} \frac{\sin \sigma t}{\sigma} \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma} \right)^2} \right] \quad \dots\dots\dots (28)$$

となり、これが解となる。

つぎに式 (23) に式 (28) を入れて計算すると、

$$\eta = -2a \frac{h}{l} \Sigma \left(\cos \frac{\sigma_1 x}{c} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_1}{\sigma} \right)^2 \times \left[\frac{\sin \sigma_1 t}{\sigma_1} \frac{\sin \sigma t}{\sigma} \frac{1}{1 - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma} \right)^2} \right] \quad \dots\dots\dots (29)$$

をうるができる。いま $x=l$ においては、

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_1 l}{c} &= \frac{cm\pi}{l} \cdot \frac{l}{c} = m\pi \\ \therefore \cos \frac{\sigma_1 l}{c} &= \cos m\pi = (-1)^m \quad (m=1, 2, 3, \dots\dots) \end{aligned}$$

であるから、式 (29) より、

$$\begin{aligned} \eta &= 2a \frac{h}{l} \Sigma (-1)^{m+1} \cdot \frac{(\sigma_1/\sigma)^2}{1 - (\sigma_1/\sigma)^2} \cdot \left(\frac{\sin \sigma_1 t}{\sigma_1} \right. \\ &\quad \left. - \frac{\sin \sigma t}{\sigma} \right) = \frac{2h \cos \theta}{lbd} \Sigma (-1)^{m+1} \\ &\quad \times \frac{(\sigma_1/\sigma)^2}{1 - (\sigma_1/\sigma)^2} \cdot \left(\frac{\sin \sigma_1 t}{\sigma_1} - \frac{\sin \sigma t}{\sigma} \right) \cdot \bar{q}_2 \quad \dots\dots\dots (30) \end{aligned}$$

さらに、

$$A_m = (-1)^m \cdot \frac{2h \cos \theta}{lbd} \cdot \frac{(\sigma_1/\sigma)^2}{1 - (\sigma_1/\sigma)^2} \quad \dots\dots\dots (31)$$

$$\bar{q}_2 = -\frac{\sigma}{\sin \sigma t} \cdot \frac{dq_2}{dt} = -\frac{\sigma_1}{\sin \sigma_1 t} \cdot \frac{dq_2'}{dt} \quad \dots\dots\dots (32)$$

($q_2' = \bar{q}_2 \cos \sigma_1 t$) とおけば

$$\eta = \Sigma A_m \left(\frac{dq_2'}{dt} - \frac{dq_2}{dt} \right) \quad \dots\dots\dots (33)$$

式(33)をラプラス変換すると、

$$H = S \Sigma A_m (Q_2' - Q_2) = S \Sigma A_m \left(\frac{Q_2'}{Q_2} - 1 \right) Q_2 \quad \dots\dots\dots (34)$$

ここに、 $H = \mathcal{L}\eta$, $Q_2 = \mathcal{L}q_2$, $Q_2' = \mathcal{L}q_2'$ である。しかるに、 q_2, q_2' は $\cos$ 関数なのでそのラプラス変換は、

$$Q_2 = \mathcal{L} \bar{q}_2 \cos \sigma t = \frac{\bar{q}_2 S}{S^2 + \sigma^2},$$

$$Q_2' = \mathcal{L} \bar{q}_2 \cos \sigma_1 t = \frac{\bar{q}_2 S}{S^2 + \sigma_1^2} \quad \dots\dots\dots (35)$$

これを式(34)に入れると流量水位伝達関数 $K(S)$ は次式で表わされる。

$$K(S) = \frac{H}{Q_2} = S \Sigma A_m \left(\frac{S^2 + \sigma^2}{S^2 + \sigma_1^2} - 1 \right)$$

$$= \frac{2h \cos \theta}{lbd} \Sigma (-1)^m \frac{S \sigma_1^2}{S^2 + \sigma_1^2} \quad \dots\dots\dots (36)$$

この式でわかるように津波水槽の特性が、 $K(S)$ の中にはいつてくることは反射波の影響のために当然のことである。

6. 電気一油圧式制御機構の伝達関数 $G_2(S)$

さきに図-4に示したように電気一油圧式制御機構は、水位信号、プログラム信号等が電流量に変換され、PID 動作を行なう電子式指示調節計を通して、電油調節器によりロートバルブの開度が変わえられる。

電子式指示調節計の伝達関数 $G_2'(S)$ は明らかに、

$$G_2'(S) = K_p \left(1 + T_d S + \frac{1}{T_i S} \right) \quad \dots\dots\dots (37)$$

であって、 K_p, T_d, T_i はそれぞれ比例定数、微分時間、および積分時間として計器の目盛であたえることができる。

電油調節器では電流によりフォースコイルを通じて力を発生させ油圧パイロット弁を比例的に動かす。したがってシリンダー内に油圧が比例的に加わり、その積分動作でシリンダーが動く。このストロークに応じて剛性復原機構によりさきの油圧パイロット弁の動きが制約される。したがって伝達関数は

$$G_2''(S) = \frac{K_e}{1 + T_e S} \quad \dots\dots\dots (38)$$

ここに、 K_e は比例定数で単位変換の作用もふくめてあり、 T_e は積分時間である。

これより電気一油圧式制御機構の伝達関数 $G_2(S)$ は

$$G_2(S) = G_2'(S) \cdot G_2''(S)$$

$$= K_p K_e \left(1 + T_d S + \frac{1}{T_i S} \right) \cdot \left(\frac{1}{1 + T_e S} \right) \quad \dots\dots\dots (39)$$

によってあたえられる。

7. 造波装置の総合伝達関数

図-5にたちもどって $G_1(S), G_2(S), K(S)$ がわか

ったならば、プログラム量 V と津波水槽内波形量 η との間の総合伝達関数 $G(S)$ は、

$$G(S) = \frac{\eta}{V} = \frac{G_1(S) \cdot G_2(S) \cdot K(S)}{1 + G_1(S) \cdot G_2(S) \cdot K(S)} \quad \dots\dots\dots (40)$$

であたえられる。ここに、 $\eta = \mathcal{L}\eta$, $V = \mathcal{L}V$ である。

8. 水理系伝達関数 $G_1(S)$ のインディシャル応答とボード線図

自動制御理論においては、ある波形の入力信号に対する出力信号の関係は、過渡応答によって明らかにされる。そのうちインディシャル応答および周波数応答がもとめられればよい。後者は周波数ベクトル軌跡やボード線図によって示される。

そこで本造波装置について $G_1(S)$ の過渡応答を調べてみる。

流量はポンプの水頭一流量特性曲線から、水頭は、圧力計からもとめ、損失係数は定常流の実験より、またロートバルブの流量係数も開度を種々にかえておなじく定常流の実験によってもとめた。ただし、系2については不定流実験にたよるを得ないので、津波水槽入口において 50 cm 間隔に 11 個の測定断面を設け、各断面において、プロペラ式流速計および抵抗線式水位計により、非定常な流速および水位を測定し、またストレージゲージを貼布した圧力計により管路内水頭を測定する方法をとり、不定流の運動方程式の各項をもとめて損失係数をえた。測定結果は図-9に示すようになったので使用範囲において直線近似して、 K_2' をもとめた。図-10は 500 mm ロートバルブの流量係数 C と、開度 θ との関係を示す。

図-9 K_2' の決定

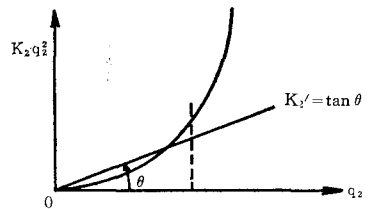
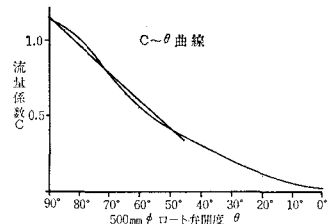


図-10 500 mm ロートバルブ流量係数



このようにして諸数値をもとめ計算をすすめると、最終的に本装置の水理系伝達関数は次式で示される。

$$G_1(S) = \frac{0.104 S(S+5.595)(S+1.436)}{(S+0.673)(S+0.0210)(S+1.373)(S+3.926)}$$

.....(41)

すなわち 4 次遅れの伝達要素である。

インディシャル応答をもとめるために C の変動量を 70° を中心とする $\pm 20^\circ$ の範囲について 図-10 よりもとめると、ほぼ 0.37 位になる。そこで 0.333 のステップ入力があることとすると、そのラプラス変換量は、 $1/3 S$ とおける。よって、出力 q_2 は、ラプラス逆変換により次式でえられる。

$$\begin{aligned} -q_2 &= \mathcal{L}^{-1} \left\{ G_1(S) \cdot \frac{1}{3S} \right\} \\ &= 0.0794 \exp(-0.0210t) - 0.0877 \exp(-0.674t) \\ &\quad + 0.00381 \exp(-1.373t) + 0.00444 \exp(-3.926t) \\ &\quad \dots\dots\dots(42) \end{aligned}$$

実験では当初バルブの開きを 70° にしておき、電油調節器の油圧パイロット弁を人為的に急に動かしてストローク全開の位置になるように作動させた。そして、低水槽水面の変化を電

図-11 インディシャル応答曲線(1)

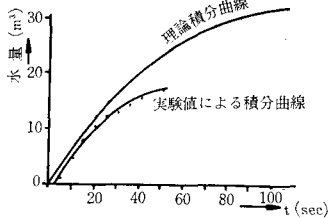
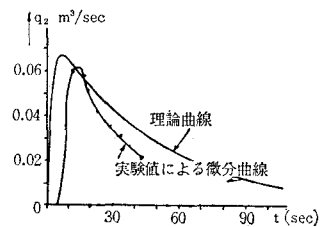


図-12 インディシャル応答曲線(2)



磁オシロに記録した。図-11に示す実験値はその場合の記録をプロットした。時間の原点は油圧パイロット弁の操作点を示す。また理論曲線は式 (42) を積分したものであり、両者が、若干ずれているが、電油調節器の特性を考慮すれば一層近づくであろう。図-12

はインディシャル応答曲線の比較であって、実験値は、低水槽水位曲線を時間に関して微分してもとめた。当初の曲線の立ちあがりのおくれは、上述のことから理解できるが、減少部分においては、実験値の方が早く減衰し、応答の早いことを示す。これは高水位（津波水槽）の水位上昇の影響によるものであろう。

つぎにボード線図をえがくために、式 (18) 中の S を $j\omega$ とおきかえると、位相角は、

$$L\dot{G}_i = \sum L\dot{g}_i \quad (i=1, \sim, 6) \dots\dots\dots(43)$$

ゲイン曲線は、

$$20 \log |\dot{G}_i| = \sum 20 \log |\dot{g}_i| \quad (i=1, \sim, 6) \dots\dots\dots(44)$$

ここに、 $\dot{g}_1(j\omega) = 0.104 j\omega$, $\dot{g}_2(j\omega) = j\omega + 5.595$, $\dot{g}_3(j\omega) = j\omega + 1.436$, $\dot{g}_4(j\omega) = 1/(j\omega + 0.673)$, $\dot{g}_5(j\omega) = 1/(j\omega + 0.0210)$, $\dot{g}_6(j\omega) = 1/(j\omega + 1.373)$, $\dot{g}_7(j\omega) = 1/(j\omega + 3.926)$ である。

周波数応答の実験では、プログラムセッターに $\sin$ 曲

線をえがいておき、入力是一定値にしておいて、電子式指示調節計—電油調節器を通してロートバルブを開閉せしめた。微分時間 $T_d = 0 \text{ min}$, 積分時間 $T_i = 30 \text{ min}$ にとり、ほぼ、比例制御をなしている。

図-13 は位相曲線、図-14 はゲイン曲線であって、位相曲線は理論に比して実験値のバラツキが大きいけれども、傾向はよく一致し、とくに位相の進退の境界点は、理論値

図-13 位相曲線

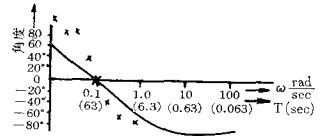
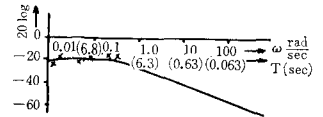


図-14 ゲイン曲線



も実験値もともに周期 $T = 60 \text{ sec}$ のところにある。周期が短くなるにつれて次第に位相が遅れてくる。 $T = 6 \text{ sec}$ 程度ではほぼ 60° おくれた。ゲイン曲線では両者はよく一致した。

以上により水理系の伝達関数はほぼ $G_1(S)$ の表示式 (41) によって表わしうるといえる。関数式誘導の過程においてとられた諸種の近似をさらに厳密にしてゆけばなお一致性は良好になってくると思われる。

9. 結 語

本造波装置の総合伝達関数は、なお $K(S)$, $G_2(S)$ 等を明らかにせねばならない。

式 (36) によって、津波水槽内の共振波の基本波のみをとった場合には、 $m=1$ とし、その他諸数値を計算して、

$$K(S) = -6.125 \times 10^4 \cdot \frac{S}{S^2 + 0.23^2} \dots\dots\dots(45)$$

をうる。

造波装置の研究の目的は、所望の波形をいかにひずみなく造波できるかにある。そして、本装置における調節可能な部分は、電子式指示調節計の K_p , T_d , T_i である。

このことから、所望の波形に対する最適制御の問題が生じてくる。いままでのべてきたことは、実はこの最適制御のための準備であったわけであって、このことに関しては、第 II 報以下において報告をしたいと思っている。

参 考 文 献

- 1) 「宇治川水理実験所概要」II 自動制御装置、京都大学防災研究所創立 5 周年記念論文集、昭和 31 年、pp. 289-303.
- 2) 高田雄之・戸原義男：「有明海の水理模型実験について」(1)、模型潮せき発生機構と水面制御の問題点、第 10 回海岸工学講演会講演集、昭和 38 年、pp. 70-74.
- 3) 東京電機大学編：「自動制御の基礎」東京電機大学出版部、昭和 40.5、pp. 57-68.
- 4) Lamb: "Hydrodynamics" 6th ed. 1932 Cambridge University Press, p. 255.
- 5) 坪井忠二：「振動論」、昭和 17 年、河出書房 p. 405.