

港 湾 の 遮 へ い に つ い て

—主として高砂港の模型実験による—

田 中 茂*・松 梨 順三郎**

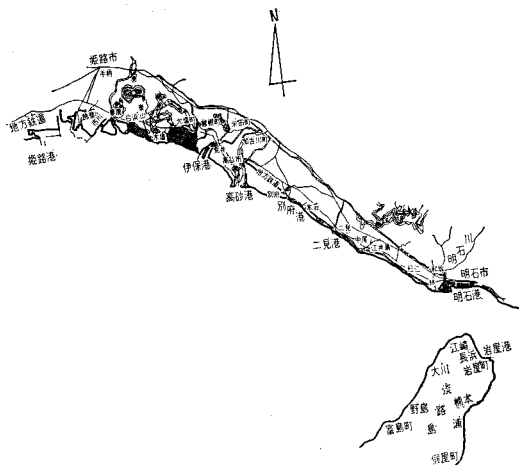
要 旨 兵庫県 高砂地区では、播州臨海工業地帯造成計画の一翼として、臨海地帯の埋立てによる工業用土地造成計画が進められている。この計画にともなって臨海産業の需要に応じよう高砂港区を拡張、整備することが必要になってきた。一般に港湾の拡張整備の問題は、必然的にその港湾の遮へいの問題を提起する。ここでは高砂港の拡張にともなう遮へい実験の概要を述べるとともに、それと関連して行なった、直交半無限防波護岸による波の反射に関する理論的考察結果について述べる。

1. 基礎調査

図-1 は高砂港を中心として、播磨臨海工業地帯の現況を示す。高砂港では高極潮位として、昭和36年9月16日の最高潮位 N. P. +2.66 m が記録されており、遡望平均満潮位は N. P. +1.41 m である。ここに N. P. はこの地方で古くから使用されてきている潮位の基準面で、N. P. ±0.0 は T. P. -0.850 m である。模型実験では N. P. +3.00 m の潮位を採用した。つぎに計画の概要を述べよう。高砂港区西防波堤から伊保港東防波堤にいたる約 3km の海岸を埋立て、210万 m² の工場用敷地を造成する計画である。埋立計画高は N. P. +3.50 m とし、外海に面した防波護岸の天端高は N. P. +6.50 m とする。既設の高砂港は 500 t 程度の船舶の入港、接岸および避難を目的とする小港湾である。図-2 はその拡張計画の一般図で、既設の西防波堤および東防波堤をとともに南西方向にそれぞれ約 260 m および 190 m 延長することにより、約 31 000 m² の泊地を拡張すると同時に、約 3 000 t の船舶の航行および入港接岸を可能にする計画である。

つぎに港口築造予定海面沖合の波の推定は、高砂市の東南約 5km の地点にある加古川市別府町の風の観測資料をもとにした。兵庫県ではこれらの記録のうち昭和28年から同36年にわたる 8 年間の記録を整理して報告している。図-3 はその結果で、①, ②, ③, ④, ⑤は風域をあらわし、それぞれWNW~ESE, ESE~SSE, SSE~SSW, SSW~WSW, WSW~WNW に区分される。この図では、おのおの風域別に風速および延継続時間の関係が示されている。図-1 より明らかなように、本港湾の

図-1 港湾計画位置付近地形図



遮へい実験に際して、対象となる風域は第2~5風域である。図-3 によると、実験上対象となる風域では、風速 7.5m~20.0m/secのおおのこの風に対して、継続時間および頻度の点から問題となる風向は夏期台風時の SE, S 方向、および冬季節風時の W 方向であることがわかる。また夏期台風時の SE, S 方向の資料を継続時間および頻度の点から比較すると、いずれの風速の風に対しても S 方向のものが工学的に重要であることがわかる。S, SW および W 方向の風に対して、SMB 法および Molitor 公式を用いて沖波を推定すると表-1 のようになる。S 方向については沖波波高 2.6 m, 周期 6.1 sec とし、W 方向については、その波高を 3.0 m, 周期を 6.7 sec とし、海底の深浅による屈折図をえがくと、S および W いずれの風向に対しても港口築造付近の海面での波の進行方向はほぼ SW 方向をとる傾向

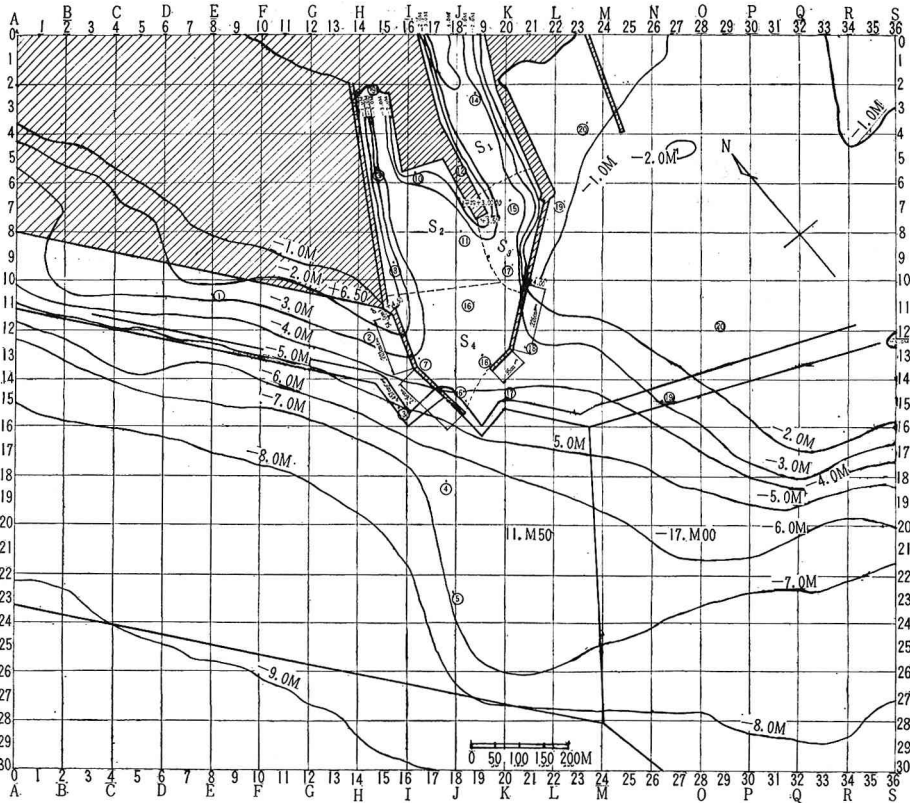
表-1 沖波の推定結果

風 向	対岸距離 (km)	風 速 (m/ sec)	継続時間 (hr)	S M B 法		Molitor 公式
				波高(m)	周 期 (sec)	波高(m)
S	29.5	20.0	1	2.6	6.1	1.7
		17.5	5	2.3	5.7	1.6
SW	67.1	17.5	3	2.6	6.1	2.1
		15.0	3	2.1	5.6	2.0
W	53.1	17.5	1	3.0	6.7	1.9
		15.0	2	1.7	7.8	1.8

* 正員 工博 神戸大学教授 工学部

** 正員 工博 神戸大学助教授 工学部

図-2 実験用模型 一般平面図



がつよい。したがって本実験の沖波の進行方向は SW を主方向とし、S 方向を副方向として取り扱うことにした。

2. 実験

一般に港湾における波の遮へいに関する模型実験は、短周期波の変形を主体とする現象であるが、粘性力に比

較し、重力のほうが運動を規定する支配的力と考えられるので、Froude の相似律にしたがうことにした。実験用水槽は 30m×25m×0.5m の内のり寸法をもっている。港の拡張計画、水槽の容量、模型波の特性などを考慮して、模型縮尺を 1/60 とした。図-2 は実験用模型の一般的平面図でもある。写真-1 はその状況を示したものである。造波機は長さ 20m、偏心型動力伝達装置によるプランジャー型のもので、7.5HP の無段変速電動機で駆動した。プランジャーの上下運動範囲は 30~70mm である。つぎに波高および周期は電気抵抗式水位計、ペンガキ オッシロを用い、場所によっては鋼尺で直接波高を測定した。なお水位計設置位置は 図-2 に示

図-3 延継続時間

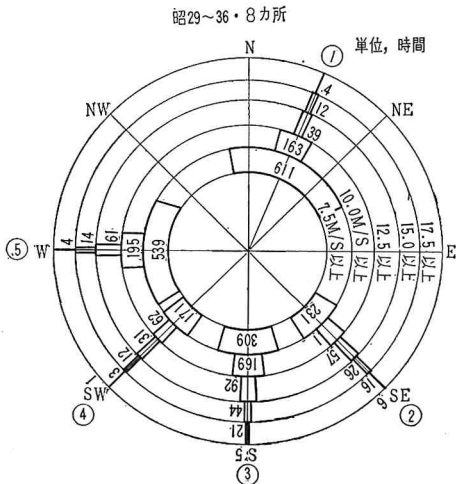
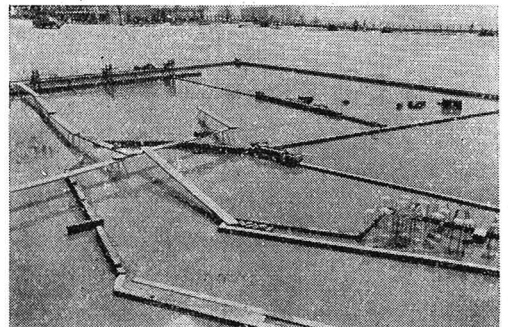


写真-1



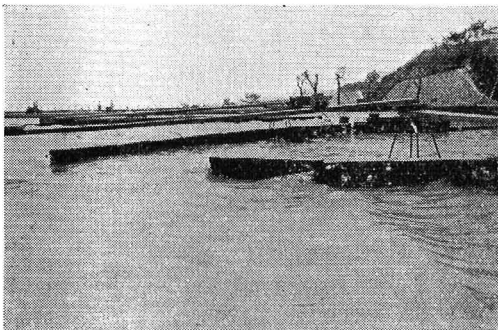
した。

一般に港の拡張計画、本港の場合は主防波堤を沖合に延長して泊地を拡げるわけであるが、この場合、どのような主防波堤配置にすれば、港湾機能上さしつかえない程度に、しかも広い範囲にわたって、泊地内の静穏度(波高/沖波波高)をたもつことができるかということは非常に重要である。本実験の目的は上述の要請をみたす主防波堤配置を決定するとともに、もし必要があれば港内副堤配置を決定することである。

3. 実験結果

主防波堤配置として、港口を W 方向にむけた場合、SE 方向にむけた場合、南に開いた場合、および一文字堤にして港口を W 方向にした場合、SE 方向にした場合などについて実験し、泊地内静穏度を比較検討した結果、港口を SE 方向にむけた案が有利であることがわかった。加古川(計画高水量 4450 m³/sec)の流出土砂の港内侵入のおそれ、船舶の入港のしやすさ、その碇泊に必要な有効水面積などを慎重に検討し、主防波堤配置の最良案として βI 型式を決定した。図-2 はこの型式を示し、表-2 はこの型式を適用したときの実験結果を示す。表中 S₁, S₂, S₃, S₄ は新旧泊地の区分を表わし、それによって測点を区別した。実験は SW 方向および S 方向の沖波を用いたわけであるが、おのおの領域別に両者を比較してみよう。まず前者についてはいずれの領域もほぼ一様な静穏度になるようであるが、S₂, S₃ 領域がいずれもわずかばかり静穏度が低下するようである。一方、後者では領域によって静穏の差がはなはだしく、S₂, S₄ 領域はかなりあれるようである。また港口付近の測点 ⑥ の結果に注目すると、前者では静穏であるが、後者では波高が異常に上昇する傾向があり、興味深い。写真-2 は港口付近の入波状況を示す。

写真-2



4. 回折係数の計算

3. に述べた実験結果と Sommerfeld の理論によって計算される回折係数とを比較検討した。図-4, 5 はその結果を示す。ここに、東防波堤の反射領域、 $\theta_1' \geq \theta_1 \geq$

$$(\theta_1 + 2\theta_2 - 180^\circ), \quad 0 \leq \theta_2 \leq 180^\circ - \theta_2 \text{ では,}$$

図-4 回折係数と実験値との関係 (SW 方向の沖波)

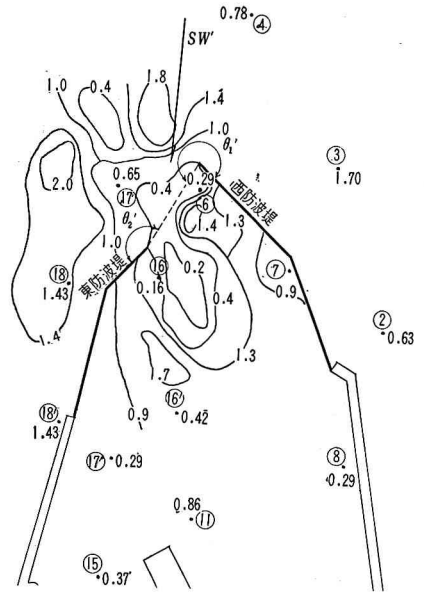


図-5 回折係数と実験値との関係 (S 方向の沖波)

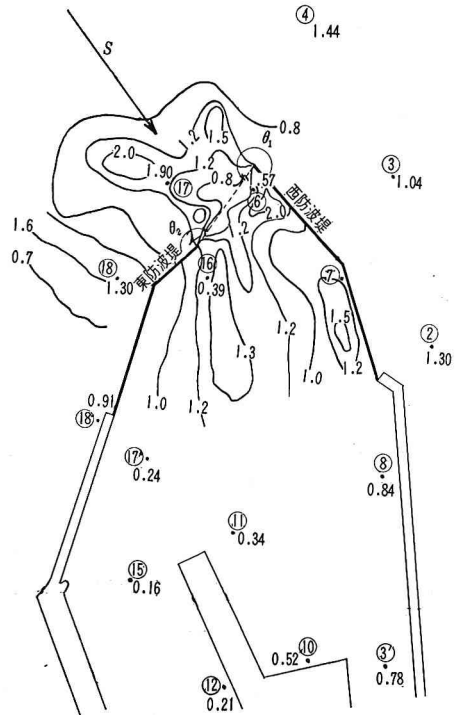


表-2 実験結果

領域	測点	風向: SW H=2.6m T=6.1秒, N.P.=+3.0m		風向: S H=2.3m T=5.7秒, N.P.=+3.0m	
		βI		βI	
		静穏度	領域平均	静穏度	領域平均
S ₁	12	0.1050	0.1657	0.2090	0.1567
	13	0.1310		0.1830	
	14	0.2610		0.0780	
S ₂	3'	0.2350	0.3552	0.7830	0.6108
	8	0.2870		0.8360	
	9	0.1570		0.5740	
	10	0.2350		0.5220	
	11	0.8620		0.3390	
S ₃	15	0.3660	0.3265	0.1570	0.1960
	17'	0.2870		0.2350	
S ₄	6	0.2870	0.2873	1.5670	0.7837
	7				
	16	0.1570		0.3920	
	16'	0.4180		0.3920	
港内	最低静穏度	0.3552		0.7837	
	平均静穏度	0.2837		0.4368	

$$\begin{aligned} & \cos\{kr_1 \cos(\theta_1 - \theta_1)\} + \cos\{kr_2 \cos(\theta_2 - \theta_2)\} \\ & + \cos\{kr_2 \cos(\theta_2 + \theta_2)\} + (1/\sqrt{2}) \\ & (P_1 \cos a_1 - Q_1 \cos b_1 + P_2 \cos a_2 + Q_2 \cos b_2) \\ & = K \cos \mu \\ & \sin\{kr_1 \cos(\theta_1 - \theta_1)\} + \sin\{kr_2 \cos(\theta_2 - \theta_2)\} \\ & + \sin\{kr_2 \cos(\theta_2 + \theta_2)\} + (1/\sqrt{2}) \\ & (P_1 \sin a_1 - Q_1 \sin b_1 + P_2 \sin a_2 + Q_2 \sin b_2) \\ & = K \sin \mu \end{aligned} \dots\dots\dots (1)$$

とし、西防波堤の蔭の領域、 $360^\circ \geq \theta_1 \geq 180^\circ + \theta_1$,
 $180^\circ + \theta_2 \geq \theta_2 \geq \theta_2'$ では、

$$\begin{aligned} & \cos\{kr_2 \cos(\theta_2 - \theta_2)\} + (1/\sqrt{2})(-P_1 \cos a_1 \\ & - Q_1 \cos b_1 + P_2 \cos a_2 - Q_2 \cos b_2) \\ & = K \cos \mu \\ & \sin\{kr_2 \cos(\theta_2 - \theta_2)\} + (1/\sqrt{2})(-P_1 \sin a_1 \\ & - Q_1 \sin b_1 + P_2 \sin a_2 - Q_2 \sin b_2) \\ & = K \sin \mu \end{aligned} \dots\dots\dots (2)$$

とし、東防波堤の蔭の領域、 $180^\circ + \theta_1 \geq \theta_1 \geq \theta_1 + \theta_2$,
 $180^\circ + \theta_2 \leq \theta_2 \leq 360^\circ$ では、

$$\begin{aligned} & \cos\{kr_1 \cos(\theta_1 - \theta_1)\} + (1/\sqrt{2})(P_1 \cos a_1 \\ & - Q_1 \cos b_1 - P_2 \cos a_2 - Q_2 \cos b_2) \\ & = K \cos \mu \\ & \sin\{kr_1 \cos(\theta_1 - \theta_1)\} + (1/\sqrt{2})(P_1 \sin a_1 \\ & - Q_1 \sin b_1 - P_2 \sin a_2 - Q_2 \sin b_2) \\ & = K \sin \mu \end{aligned} \dots\dots\dots (3)$$

とし、波の直進領域、 $180^\circ - \theta_1 \leq \theta_1 \leq 180^\circ + \theta_1$,
 $180^\circ - \theta_2 \leq \theta_2 \leq 180^\circ + \theta_2$ では、

$$\begin{aligned} & \cos\{kr_1 \cos(\theta_1 - \theta_1)\} + \cos\{kr_2 \cos(\theta_2 - \theta_2)\} + \\ & (1/\sqrt{2})(P_1 \cos a_1 - Q_1 \cos b_1 + P_2 \cos a_2 \\ & - Q_2 \cos b_2) = K \cos \mu \end{aligned}$$

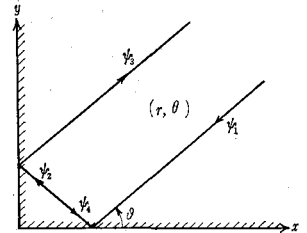
$$\begin{aligned} & \sin\{kr_1 \cos(\theta_1 - \theta_1)\} + \sin\{kr_2 \cos(\theta_2 - \theta_2)\} \\ & (1/\sqrt{2})(P_1 \sin a_1 - Q_1 \sin b_1 + P_2 \sin a_2 \\ & - Q_2 \sin b_2) = K \sin \mu \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

とした。ただし式中の各文字は文献を参照のこと¹⁾。また θ_1' および θ_2' は図-4,5 に示した。これらの図によると、港口付近では、計算値は実験値とかなりよく一致するようである。

5. 直交半無限防波護岸による波の反射について

本港の西防波護岸は N.P.+6.50 m でもかなりの越波をとまることが実験によって明らかになった。この護岸の前で西防波堤よりの領域では、波の進行方向によっては、波の重複によって異常にあられることが予想される。ここではこのような現象を想定し、直交半無限防波護岸による波の

図-6 Z 平面



反射について若干の理論的考察を行ったので、その概要をのべる。いま図-6に示すように直交半無限の防波護岸 ($x > 0$, $y = 0$; $x = 0, y > 0$) に囲まれた領域に、波が入射角 θ で入射し、防波護岸によって重複反射している状態を想定する。流体運動の速度ポテンシャルを、

$$\phi = \phi(x, y) \cosh k(z+d) e^{i\omega t} \dots\dots\dots (5)$$

とおくと、上述のような流体運動を解くということは、境界条件を満足するようなつぎの微分方程式の解を得ることに帰着する。

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + k^2 \phi = 0 \dots\dots\dots (6)$$

いま Ψ を図-6に示す成分の和と考え、

$$\Psi = \Psi_1 + \Psi_2 + \Psi_3 + \Psi_4 \dots\dots\dots (7)$$

とする。 Ψ_1 および Ψ_2 はそれぞれ入射角 θ の入射波およびその反射波を表わし、 Ψ_3 および Ψ_4 はそれぞれ上述の波の護岸による反射によって帰ってくる波を表わし、それぞれ従来の表示方法により次式で与えられるものとする。

$$\Psi_1 = \omega_1 e^{ik(x \cos \theta + y \sin \theta)} \dots\dots\dots (8)$$

$$\Psi_2 = \omega_2 e^{ik(x \cos \theta - y \sin \theta)} \dots\dots\dots (9)$$

$$\Psi_3 = \omega_3 e^{-ik(x \cos \theta + y \sin \theta)} \dots\dots\dots (10)$$

$$\Psi_4 = \omega_4 e^{-ik(x \cos \theta - y \sin \theta)} \dots\dots\dots (11)$$

しかし、この方法では、

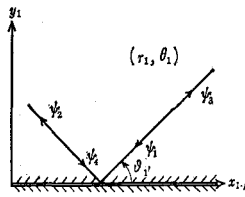
$$\left(\frac{\partial \Psi}{\partial x}\right)_{x=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial \Psi}{\partial y}\right)_{y=0} = 0 \dots\dots\dots (12)$$

$$(\Psi)_{\theta=\pi/4, r \rightarrow \infty} = e^{ik(x \cos \theta + y \sin \theta)}$$

$$+e^{-ik(x\cos\theta+y\sin\theta)} \dots\dots\dots (13)$$

で示される境界条件を満足するよう解を確定することは非常に困難である。こ

図-7 Z 平面



こではつぎに示すような方法による試算を行なった。すなわち、まず図-7に示すように半無限防波堤で周囲からのかえり波を考慮し、Sommerfeldと同様の取り扱いにより、この場合の解を確定する。しかるのち、図-7のZ1面を図-6のZ面に等角写像しようというわけである。まず式(9)~(11)の代りに、

$$\Psi_1 = \omega_1 e^{ik_1(x_1 \cos \theta_1 + y_1 \sin \theta_1)} \dots\dots\dots (8')$$

$$\Psi_2 = \omega_2 e^{ik_1(x_1 \cos \theta_1 - y_1 \sin \theta_1)} \dots\dots\dots (9')$$

$$\Psi_3 = \omega_3 e^{-ik_1(x_1 \cos \theta_1 + y_1 \sin \theta_1)} \dots\dots\dots (10')$$

$$\Psi_4 = \omega_4 e^{-ik_1(x_1 \cos \theta_1 - y_1 \sin \theta_1)} \dots\dots\dots (11')$$

とし、これらを式(7)に代入すると、

$$\frac{\partial^2 \omega_i}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial y_1^2} + 2ik_1 \left(\cos \theta_1 \frac{\partial \omega_i}{\partial x_1} \pm \sin \theta_1 \frac{\partial \omega_i}{\partial y_1} \right) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

$$\frac{\partial^2 \omega_j}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \omega_j}{\partial y_1^2} - 2ik_1 \left(\cos \theta_1 \frac{\partial \omega_j}{\partial x_1} \pm \sin \theta_1 \frac{\partial \omega_j}{\partial y_1} \right) = 0 \dots\dots\dots (15)$$

となる。ただし、 $i=1$ および 2 、 $j=3$ および 4 とし、複号は $i=1$ 、 $j=3$ のときは上の記号を、 $i=2$ および $j=4$ のときは下の記号をとるものとする。複号については以下同様とする。式(14)および式(15)に対し、それぞれ変数変換、

$$k_1 Z_1 = \zeta^2 = (\xi + i\eta)^2 \dots\dots\dots (16)$$

$$-k_1 Z_1 = \zeta' = (\xi' + i\eta')^2 \dots\dots\dots (17)$$

を行なうと、

$$\frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \omega_i}{\partial \eta^2} + 4i \left\{ \frac{\partial \omega_i}{\partial \xi} (\xi \cos \theta_1 \pm \eta \sin \theta_1) \pm \frac{\partial \omega_i}{\partial \eta} (\xi \sin \theta_1 \mp \eta \cos \theta_1) \right\} = 0 \dots\dots\dots (14')$$

$$\frac{\partial^2 \omega_j}{\partial \xi'^2} + \frac{\partial^2 \omega_j}{\partial \eta'^2} + 4i \left\{ \frac{\partial \omega_j}{\partial \xi'} (\xi' \cos \theta_1 \pm \eta' \sin \theta_1) \pm \frac{\partial \omega_j}{\partial \eta'} (\xi' \sin \theta_1 \mp \eta' \cos \theta_1) \right\} = 0 \dots\dots\dots (15')$$

をうる。式(14')および式(15')は同型の式である。それぞれの方程式の解として、つぎの4つの関係式をうる¹⁾。

$$\omega_i = A_i + B_i \int_0^{X_i} e^{-t \sqrt{1 + \cos \theta_1}} dX_i \dots\dots\dots (18)$$

$$\omega_j = A_j + B_j \int_0^{X_j} e^{t \sqrt{1 + \cos \theta_1}} dX_j \dots\dots\dots (19)$$

ここに、

$$X_i = (1 + \cos \theta_1) \xi \pm \sin \theta_1 \eta \dots\dots\dots (20)$$

$$X_j = \sin \theta_1 \xi' \pm (1 + \cos \theta_1) \eta' \dots\dots\dots (21)$$

式(17)、(18)より (ξ, η) 、 (ξ', η') の関係を求める

$$\xi' = -\eta, \quad \eta' = \xi \dots\dots\dots (22)$$

または

$$\xi' = \eta, \quad \eta' = -\xi \dots\dots\dots (23)$$

となる式(22)および(23)を式(21)に代入して、 ξ', η' を消去し、 X_i と同じでないものとして X_j とする、

$$X_j = -(1 + \cos \theta_1) \xi \pm \sin \theta_1 \eta \dots\dots\dots (21')$$

となる。

つぎに境界条件は式(12)、(13)の代りに、

$$\left(\frac{\partial \Psi}{\partial y_1} \right)_{x_1 > 0, y_1 = 0} = 0 \dots\dots\dots (12')$$

$$(\Psi)_{x_1 = -\infty, y_1 = 0} = e^{ik_1(x_1 \cos \theta_1 + y_1 \sin \theta_1)} + e^{-ik_1(x_1 \cos \theta_1 + y_1 \sin \theta_1)} \dots\dots\dots (13')$$

となる。式(16)によって変数変換すると、

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right)_{\eta=0} = 0 \dots\dots\dots (12'')$$

$$(\phi)_{\xi=0, \eta \rightarrow +\infty} = e^{ik_1(x_1 \cos \theta_1 + y_1 \sin \theta_1)} + e^{-ik_1(x_1 \cos \theta_1 + y_1 \sin \theta_1)} \dots\dots\dots (13'')$$

となる。式(18)、(19)を式(7)に代入し、境界条件式(12'')を満足するために必要かつ十分な条件を求める

$$\left. \begin{aligned} A_1 - A_2 = 0, \quad A_3 - A_4 = 0 \\ B_1 - B_2 = 0, \quad B_3 - B_4 = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (24)$$

となる。また境界条件式(13'')を満足するための必要かつ十分条件は、

$$\left. \begin{aligned} A_1 + B_1 \int_0^{+\infty} e^{-t \sqrt{1 + \cos \theta_1}} dU_1 = 1 \\ A_2 + B_2 \int_0^{-\infty} e^{-t \sqrt{1 + \cos \theta_1}} dU_2 = 0 \\ A_3 + B_3 \int_0^{-\infty} e^{t \sqrt{1 + \cos \theta_1}} dU_3 = 1 \\ A_4 + B_4 \int_0^{+\infty} e^{t \sqrt{1 + \cos \theta_1}} dU_4 = 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (25)$$

となる。式(24)、(25)より積分定数を決定すると、

$$\left. \begin{aligned} B_1 = B_2 = \frac{1}{\sqrt{\pi(1 + \cos \theta_1)}} e^{-i \frac{\pi}{4}} \\ A_1 = A_2 = 1/2 \\ B_3 = B_4 = \frac{-1}{\sqrt{\pi(1 + \cos \theta_1)}} e^{-i \frac{\pi}{4}} \\ A_3 = A_4 = 1/2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

となる式(26)を式(18)、(19)に代入し、それらを式(8')~(11')に代入して Ψ_i 、 Ψ_j を求めるとともに、それを式(7)に代入して Ψ を求めると、

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{i(\pi/4 + k_1 r_1 \cos(\theta_1 - \theta_1))} \int_{-\infty}^{\sqrt{2k_1 r_1} \cos((\theta_1 - \theta_1)/2)} e^{-ix^2} dx +$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{i(\pi/4 + k_1 r_1 \cos(\delta_1 - \theta_1))} \\ & \int_{-\infty}^{\sqrt{2k_1 r_1} \cos((\delta_1 + \theta_1)/2)} e^{-ix^2} dx + \\ & \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-i(\pi/4 + k_1 r_1 \cos(\delta_1 - \theta_1))} \\ & \int_{-\infty}^{\sqrt{2k_1 r_1} \cos((\theta_1 - \theta_1)/2)} e^{ix^2} dx + \\ & \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-i(\pi/4 + k_1 r_1 \cos(\theta_1 + \theta_1))} \\ & \int_{-\infty}^{\sqrt{2k_1 r_1} \cos((\theta_1 + \theta_1)/2)} e^{ix^2} dx \dots\dots\dots (27) \end{aligned}$$

となる。さて、**図-7**に示す z_1 面の全領域は式(16)の変換によって ζ 面の上半分に等角写像される。また**図-6**に示す z 面の上半面の右半分の領域は $\zeta = (kz)^2$ によって ζ 面の上半面に等角写像される。したがって z_1 面の全領域を z 面の上半面の右半分に等角写像する関数は、 $k_1 z_1 = (kz)^4$ 、すなわち、

$$k_1 r_1 = k^4 r^4, \quad \theta_1 = 4\theta \dots\dots\dots (28)$$

となる。式(28)を式(27)に代入し、 z_1 面の Ψ を z 面の Ψ になおすと、つぎに示す所要の解が得られる。

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{i(\pi/4 + k^4 r^4 \cos 4(\theta - \theta))} \\ & \int_{-\infty}^{\sqrt{2k^4 r^4} \cos 2(\theta - \theta)} e^{-ix^2} dx + \\ & \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{i(\pi/4 + k^4 r^4 \cos 4(\theta + \theta))} \\ & \int_{-\infty}^{\sqrt{2k^4 r^4} \cos 2(\theta + \theta)} e^{-ix^2} dx + \\ & \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-i(\pi/4 + k^4 r^4 \cos 4(\theta + \theta))} \\ & \int_{-\infty}^{\sqrt{2k^4 r^4} \cos 2(\theta - \theta)} e^{ix^2} dx + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-i(\pi/4 + k^4 r^4 \cos(\theta + \theta))} \\ & \int_{-\infty}^{\sqrt{2k^4 r^4} \cos 2(\theta + \theta)} e^{ix^2} dx \dots\dots\dots (29) \end{aligned}$$

をうる。この場合、式(8')~(11')の ϕ および境界条件の一つである式(13)は、それぞれ、

$$\Psi_1 = \omega_1 e^{ik^4 r^4 \cos 4(\theta - \theta)} \dots\dots\dots (30)$$

$$\Psi_2 = \omega_2 e^{ik^4 r^4 \cos 4(\theta + \theta)} \dots\dots\dots (31)$$

$$\Psi_3 = \omega_3 e^{-ik^4 r^4 \cos 4(\theta - \theta)} \dots\dots\dots (32)$$

$$\Psi_4 = \omega_4 e^{-ik^4 r^4 \cos 4(\theta + \theta)} \dots\dots\dots (33)$$

$$\begin{aligned} (\Psi)_{\theta = \pi/4, k^4 r^4 \rightarrow +\infty} &= e^{ik^4 r^4 \cos 4(\theta - \theta)} \\ & + e^{-ik^4 r^4 \cos 4(\theta - \theta)} \dots\dots\dots (34) \end{aligned}$$

となる。極限值が等しいことから、式(34)はまた、

$$\begin{aligned} (\Psi)_{\theta = \pi/4, k^4 r^4 \rightarrow +\infty} &= e^{ikr \cos(\theta - \theta)} \\ & + e^{-ikr \cos(\theta - \theta)} \dots\dots\dots (35') \end{aligned}$$

と書くことができる。

6. 結 語

高砂港の模型実験に関連し、Sommerfeldの解によって回折係数を計算して、実験値と比較することにより、それらがかかなりよく一致することを確かめた。さらに直交半無限防波護岸による波の反射について、直接的な方法ではないが、一応その理論解を与えた。直接的な方法による場合の指針になるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 石原藤次郎・本間 仁編：応用水理学中 II, p. 529, 丸善, 1958 出版。
- 2) 土木学会海岸工学委員会訳, 海岸工学 I, p. 36, 1955 出版。
- 3) Johnson, J. W.: Engineering Aspect of Diffraction and Refraction, Proc. A. S. C. E., Vol 78, Sep. No. 122, March, 1952.