

恋ヶ浜海岸における波の変形に関する模型実験的研究

土 屋 義 人・芝 野 照 夫

MODEL EXPERIMENT ON THE WAVE TRANSFORMATION OFF KOIGAHAMA COAST

By *Yoshito* TSUCHIYA and *Teruo* SHIBANO

Synopsis

This paper deals with some problems of applying the results of model experiments for practical purposes, based on the experiment on wave transformation off the Koigahama Coast. The experiment was conducted in the model to horizontal and vertical scales of 1/200. If the effect of wave damping due to bottom friction is taken into account the basis of laminar boundary layer theory in addition to the effect of wave refraction and wave shoaling, it is shown that the computational results agree relatively well with the experimental results of wave height distribution. Consequently, a method to apply the result of model experiment to practical use is proposed.

1. 結 言

波浪は深海域から浅海域へと進入すると、反射および回折のほか屈折し、また海底摩擦などによって変形する。とくに、波浪が防波堤などの壁面に衝突すると、一般に反射して、防波堤の前面で重複波が発生し、それがまた対岸で反射するなど反射をくりかえして、その海域の波高分布は一般に複雑になる。このような複雑な現象を数値計算によって求めることは、実際上現地海岸については不可能である。そこで、現地海岸を縮小した模型をつくり、模型実験を行なって詳細な検討をして港湾計画を遂行することが通例である。この種の模型実験については、従来より相似則との関係から、底面摩擦による波浪の変形を無視できるものとして検討が進められてきた。しかし、模型実験において必ずしも底面摩擦の影響は無視できない場合があって模型実験の適用性の検討が余儀なくされている。したがって、本研究では山口県下松市の恋ヶ浜海岸を対象とし、この海岸における波の変形特性を模型実験によって調べ、前述した模型実験における諸事項を再検討することにした。とくにこの海岸では、来襲波浪の観測資料が皆無であるので、計画波の決定のみならず、それに基づく実験波の選択においても少なからず問題があり、ここでは台風時の風の資料に基づいて推算することにしたので、その概要も述べることにした。

一方、前述した模型実験における底面摩擦の影響については、著者の一人¹⁾が提案した層流境界層理論に基づく波高減衰式を適用して、実験結果におけるその影響を検討し、実際面への適用方法を示唆することにする。

2. 模型実験における相似則

2.1 一般的考察²⁾

波高分布に関する実験においては、内部摩擦および表面張力の効果は無視すると、一般に Froude の相似則が適用される。この場合、模型をひずめないで水平および鉛直の縮尺を等しく選ぶと、速度および時間の縮尺は長さの 1/2 乗に等しくなる。したがって本模型実験においては、これまでに実施した同様の実験結果と模型

設置の関係を考慮して、長さの縮尺を 1/200 に定めた。この場合、模型縮尺が、かなり小さいために内部摩擦、底面摩擦および表面張力などによる波高の減衰が問題になるので、必ずしも Froude の相似則のみで十分であるとはいえなくなる。したがって、これらの影響について、あらかじめ検討しておかなければならない。

摩擦による波の変形を無視すれば、波の運動に対して Euler の運動方程式がなりたつが、一般に模型実験では水を使用するのが普通であるから、流体の密度は実物と模型に対して $\rho_p = \rho_m$ としてよいので、結局つぎのような関係式がえられる。

$$\frac{x_p}{x_m} = \frac{y_p}{y_m} = \frac{z_p}{z_m} = \frac{l_p}{l_m} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 x_p, y_p, z_p および l_p はそれぞれ実物における 2 つの水平方向、鉛直方向の座標を表わし、 x_m, y_m, z_m および l_m はそれらに対する模型における諸量を表わす。したがって、周知のように波の変形の模型実験においては、水平縮尺と鉛直縮尺とは同一にしなければならないことになる。

速度の縮尺は、

$$\frac{V_p}{V_m} = \left(\frac{l_p}{l_m} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(2)$$

で表わされ、長さの縮尺の 1/2 乗に等しく、また時間の縮尺は

$$\frac{t_p}{t_m} = \left(\frac{l_p}{l_m} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(3)$$

となって、長さの縮尺の 1/2 乗に等しくなることはいうまでもない。さらに、単位面積当りに働く圧力の縮尺は

$$\frac{p_p}{p_m} = \frac{l_p}{l_m} \dots\dots\dots(4)$$

となって、長さの縮尺に等しくなる。

2.2 内部摩擦の影響²⁾

粘性のための内部摩擦による波高の減衰は、二次元の場合には次式で表わされる。

$$H/H_0 = \exp[-(8\pi^2\nu/L_0^2)\sqrt{2\pi g L_0} x] \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 H_0 および H はそれぞれ初期波高および t 時間後の波高、 L_0 は深水波長および ν は動粘性係数である。この内部摩擦による波高減衰の影響は、主として実験波の周期に依存し、それが極端に小さくない限り一般にはとくに考慮する必要がなく、たとえば本実験における波の特性と水深との関係から検討すれば、たかだか 2～3% となる。

2.3 底面摩擦の影響

底面摩擦による波高減衰¹⁾ は、二次元の場合には、

$$\left. \begin{aligned} H/H_0 &= \exp(-\epsilon_b x/L) \\ \epsilon_b &= A[(4\pi^2/\beta L)]/(\sinh 2kh + 2kh) \\ \beta &= (\pi/\nu T)^{1/2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(6)$$

で表わされる。ここに、 $k=2\pi/L$ 、 L は波長、 A は理論上は 1 であるが、実験結果との比較において 1.4 と仮定した定数である。Fig. 1 は(6)式を図示したものである。本模型実験では、波高を測定する場合において、護岸の前付近での水深は 9 cm～15 cm であり、波長は 30 cm～50 cm 程度である。造波板からの観測最遠距離を 25 m として、このときの波高減衰率を求めると 13% 近くも減衰することになる。しかし、これは一定水深 $h=9$ cm と仮定した場合であって、 $h=13$ cm とすると波高減衰率はただちに 4% 程度になり、ほとんど底面摩擦の影響は考慮しなくてもよいようになる。このように水深の影響がきわめて大きいことはいうま

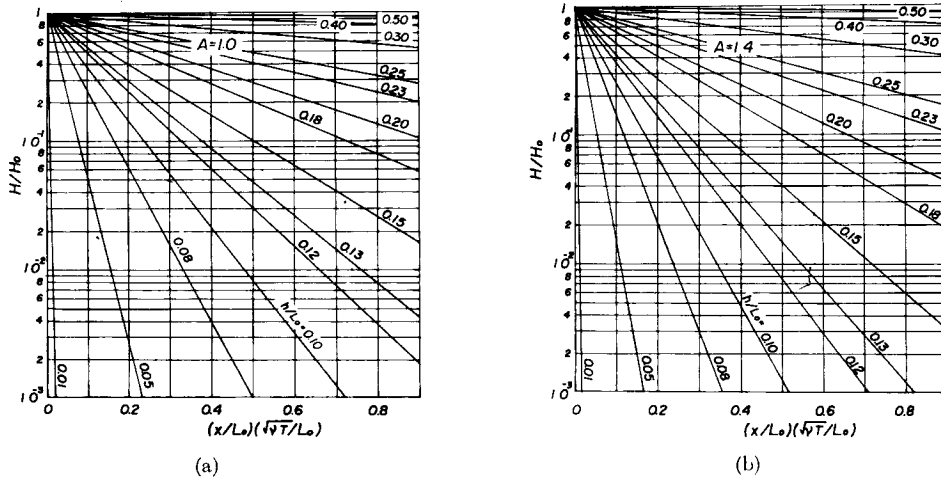


Fig. 1 Wave damping due to bottom friction

もなく、したがって模型縮尺の決定とあいまって底面摩擦の影響はきわめて慎重に検討しなければならないといえる。

2.4 表面張力の影響²⁾

表面張力を考慮した浅水波の波速は、

$$c = [(gL/2\pi + 2\pi K/\rho L) \tanh 2\pi h/L]^{1/2} \dots\dots\dots (7)$$

であり、また深水波の場合には、

$$c = (gL/2\pi + 2\pi K/\rho L)^{1/2} \dots\dots\dots (8)$$

で表わされる。ここに、 K は表面張力を表わす。(8)式で表わされる表面張力波の波速と重力波の波速の比をとると、

$$c/\sqrt{gL/2\pi} = \sqrt{1 + 4\pi^2 k/\rho g L^2} \dots\dots\dots (9)$$

となる。いま、15°C の水の K の値 73.5 dyne/cm と実験波の最小波長 30 cm を(9)式に代入して速度比を求めると 1.002 となり、表面張力の影響はほとんどの場合無視してよいことがわかる。

3. 恋ヶ浜海岸における波の変形に関する模型実験

3.1 恋ヶ浜における海象条件および実験条件

(1) 海象条件

海岸構造物の計画においては、当然のことながら、対象とする海域における自然条件とくに海岸波浪や潮位などについて十分な調査を実施して、適確な外力の推定を行なうことが大切である。しかしながら、Fig. 2 に示す恋ヶ浜海岸のように、隣接海岸においても波浪観測資料が皆無の場合には、通常、風または潮位の資料をできるだけ収集解析し、波浪の推算を行なって、計画波浪を決定する場合が少なくない。ここでは、山口県をはじめとする隣接海岸地域におけるこれらの資料を整理解析して、計画波浪またはこれに準ずるものの推定を行ない、模型実験における実験条件を検討することにする。

a. 風の特性：波浪を推算する場合には、風の特性を知る必要があるので、恋ヶ浜海岸の波浪に関係する風の資料を検討する。Fig. 3 は下松市における四季別風向頻度図であるが、これから冬期は NW 方向の季節風が卓越し、春期には E または W 方向の風が吹くことがわかる。夏期には、E または S E あるいは S 方向の台風に

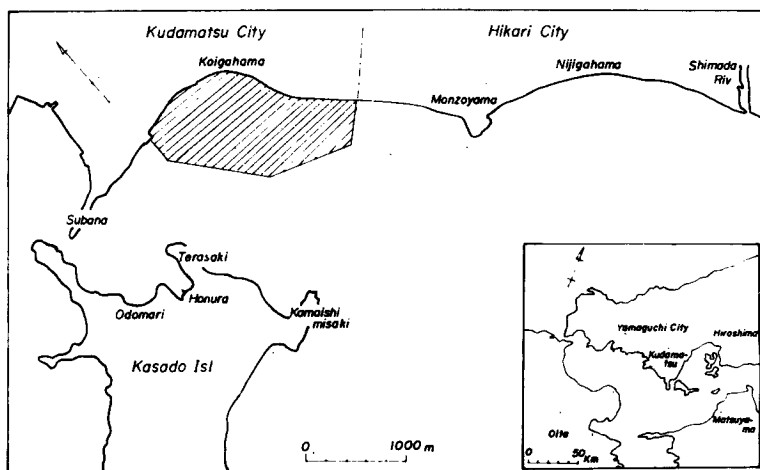


Fig. 2 Location and plan of Koigahama Coast

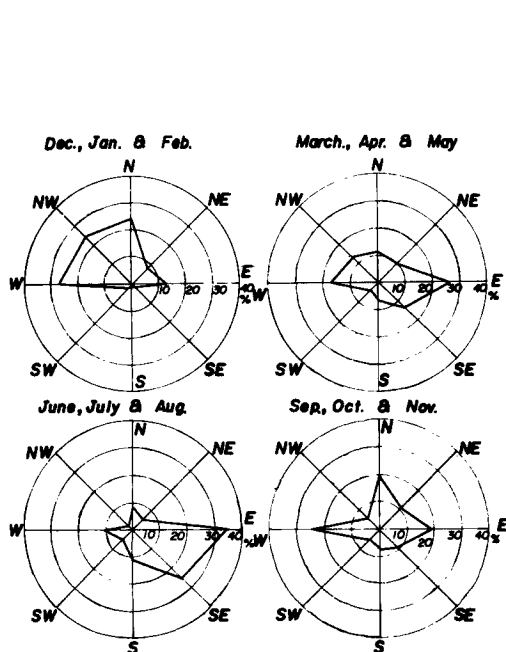


Fig. 3 Wind rose at Kudamatsu City

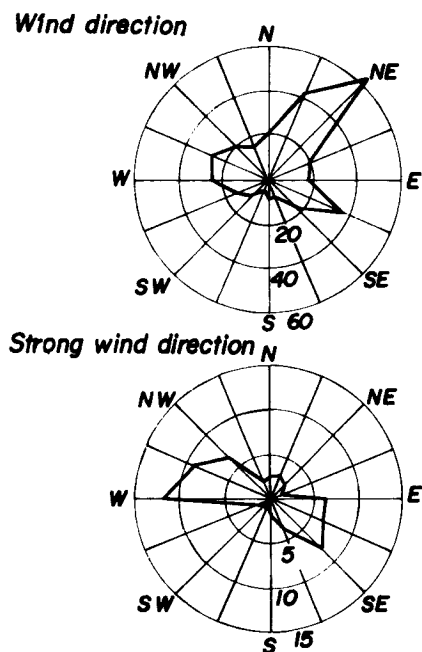


Fig. 4 Strong wind rose at Bofu

よる風が卓越するが、秋期には W, N あるいは E 方向の風が吹くことがわかる。

同様に、**Fig. 4** には防府における風向頻度図と 10 m/sec 以上の強風時の風向頻度図を示すが、これによると、W または NW 方向の季節風と S, SE または E 方向の台風時の風が問題となることが見出される。

一方、以上述べたように、風向特性から考えると、台風時の風の特性とくに風向、風速およびその継続時間が問題となるので、過去の台風による風の特性について検討する必要がある。

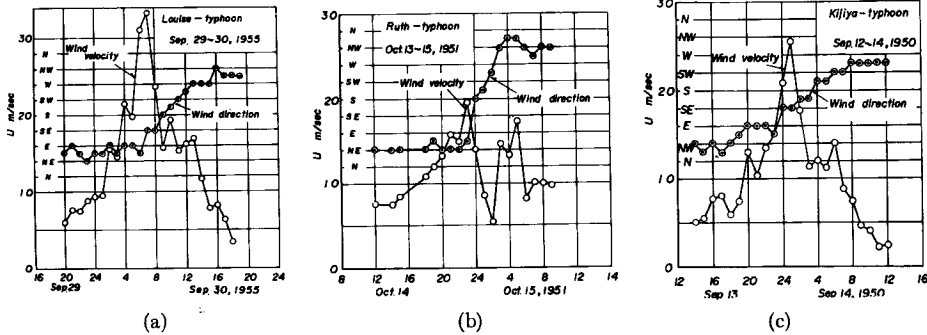


Fig. 5 Time variations of velocity and direction of winds during typhoon

これまで防府地方に大きな高潮をもたらしたキジャ、ルースおよびルイズ台風それぞれの風速および風向の変化を示したものが Fig. 5(a), (b) および (c) である。

これらは、いずれも防府における観測記録によるものであるが、これからつぎのことがわかる。まず、Fig. 5(a) は後述するように、ルイズ台風の場合であって、これは下松に最大偏差 91 cm の高潮を発生せしめたものであるが、最大風速は 33 m/sec にも及び、また、Fig. 5(b) はルース台風の場合であるが、この場合はさほど強風は吹いていない。Fig. 5(c) はキジャ台風の場合であって、ルイズ台風よりも風速は小さいが、ほぼ同様の風向、吹続時間であることがわかる。以上いずれの場合でも、風向が S または SSE 方向のときは、ある限られた時間帯であることがわかる。

b. 波浪の推算：波浪推算においては、前述した風向図におけるこの範囲の風のみが対象となる。すなわち、冬期季節風による波浪は、その頻度は高いが、対岸距離が短かいためにあまり大きな風波とならないが、隣接の虹ヶ浜海岸では若干対岸距離が大きくなるので、あまり大きくない沿岸方向の波浪が発生するであろう。これに対して、夏期の台風時の風向は主として S から E 方向に限定され、それは強風時にとくに顕著であり、さらに S または SE 方向の対岸距離が最長であることから、この海岸における波浪の推算において検討すべき風向は S から SSE 方向のものであることがわかる。

以上の結果から、この海岸の波浪を推算する場合には、前述したように対岸距離の関係から、風向 S および SSE の場合の継続時間を検討する必要があるので、Fig. 5 にもとづいて、S および SSE 方向の風速に換算

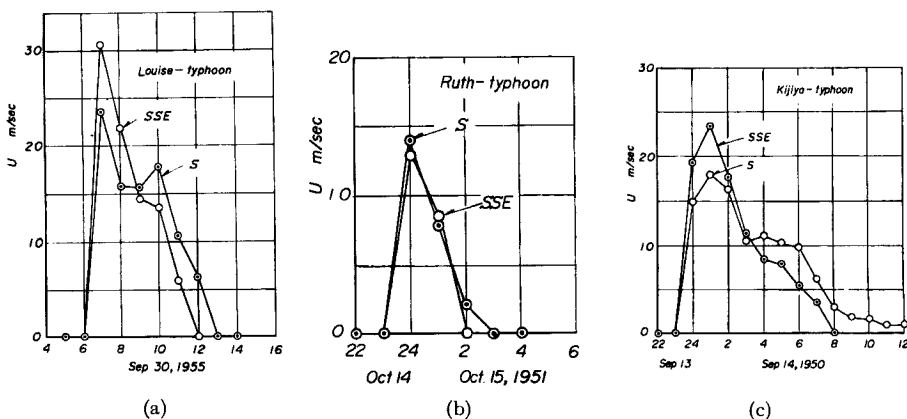


Fig. 6 Time variations of wind velocity components in directions of S and SSE

し、その時間変化を示すと、**Fig. 6(a), (b)** および **(c)** がえられる。これから、ルース台風を除いて、キジャおよびルイズ台風の場合には、風速 10 m/sec 以上がかなり長時間継続していることがわかる。そして、両者とも S より SSE の風向の方が風速は大きい、風速 10 m/sec 程度では S 方向の方が継続時間がかなり長いことがわかる。したがって、ここではこの二つの台風について、波浪推算を行なうことにする。すなわち、**Fig. 6(a)** および **(c)** において、風速を 10 m/sec、15 m/sec、20 m/sec および 25 m/sec 付近で平均した風速とその継続時間を求め、それぞれに対応した対岸距離とを用いて来襲波浪を推定することにした。その結果、キジャ台風およびルイズ台風の場合では、一般に最小吹続時間より継続時間が短いので、波浪は発達域のものであって、波高も最大 3.1 m 程度であり、また周期は 7.3 sec 程度である。すなわち、この海岸に来襲する波浪は、既往最大と考えられる以上の二つの台風に関する限りでは、波高は 3.0 m から 3.5 m 程度までであり、また周期は 6 sec から 7.5 sec 程度までと考えられる。

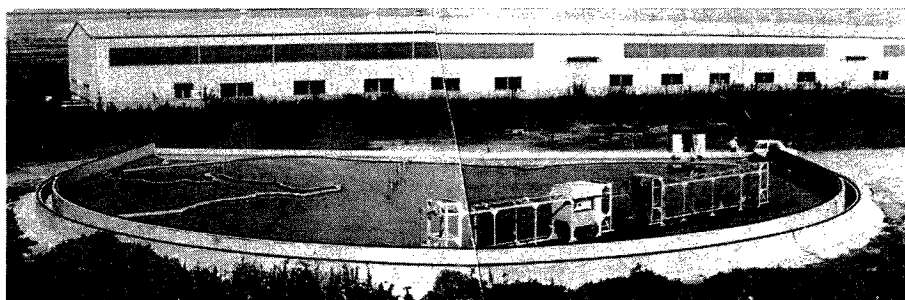
c. 計画潮位：一般に高潮対策における計画潮位の決定には、一般に4つの方法があるが³⁾、そのうちの望平均満潮位に既往の最大潮位偏差、あるいはモデル高潮の潮位偏差を加えた方法を用いて検討された結果、計画潮位は D.L.+5.5 m として与えられた。

(2) 実験条件と実験方法

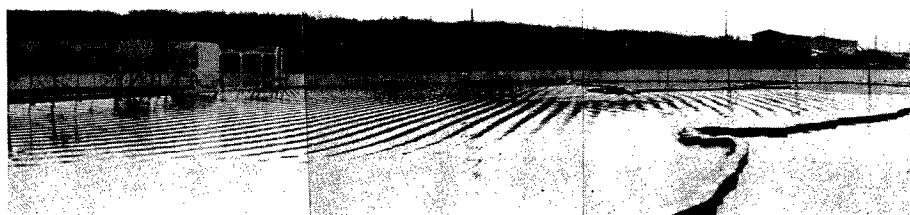
海域の模型は、前述した相似則の考察に基づき、また用いた扇形波浪平面水槽の規模と従来のこの種の実験における経験とから、模型縮尺を水平・鉛直縮尺ともに 1/200 とし、モルタル刷子仕上げとした。なお、**Photo. 1** は実験水槽および模型を示したものである。

波浪および潮位については、前述の海条条件と計画潮位に従ってつぎのような条件で行なった。

Table. 1 に示すように、まず波浪に対しては、波向として S および SSE を主体とし、また波高に対しては、つぎのように考えた。すなわち、台風時に来襲する最大波浪はおおむね周期で 6 sec~7 sec、波高として最大 3.5 m 程度であるので、これらの波浪条件が包含される波浪特性として、周期は 6 sec、7 sec および 8 sec に対して、最大波高は 3.5 m 程度と考えることにした。波高の測定点は、現地形(埋立前)の恋ヶ浜海岸の汀線を基準として、沖合に向かって原則として 1 m ごとに、また汀線と平行方向においても、州鼻の先端を基準として島田川まで各 1 m ごとに設けた。



(a)



(b)

Photo. 1 General view of fan-shaped wave basin used

Table 1 Characteristics of waves used in experiment

Wave direction	Wave height		Wave period		Sea water level (Proto-type m)	Before reclamation	After reclamation
	$H_m(\text{cm})$	$H_p(\text{m})$	$T_p(\text{sec})$	$T_m(\text{sec})$			
S	1.75	3.5	6	0.424	D.L.+ 0	○	
					D.L.+5.5	○	○
			7	0.495	D.L.+ 0	○	
					D.L.+5.5	○	○
			8	0.566	D.L.+ 0	○	
					D.L.+5.5	○	○
SSE	1.75	3.5	6	0.424	D.L.+5.5	○	○
			7	0.495	D.L.+5.5	○	○
			8	0.566	D.L.+5.5	○	○

なお、実験における波高の測定は、造波機によって起こした波が実験に使用できうる範囲、すなわち造波板の範囲からはずれる区域を除いた海域において行なった。また実験によっては、原則として左右 1 m 間隔の格子目の波高測定点で波高の測定を行なった。

以上の実験条件、実験方法で現地形の場合や埋立完了後について実験したが、とくに埋立完了後における実験では、計画護岸高に一致させた模型護岸を銅板にて作製して設置し、さらに航路を掘削して実験を行なった。この場合潮位は D.L.+5.5 m とし、波向は S および SSE で、周期は 6 sec, 7 sec および 8 sec のそれぞれについて実験した。埋立護岸の前面には、ブロックなどの消波工を設置せず、ごくわずかの捨石に対応させられきを護岸基部において実験したが、護岸前面の水深が深いので、波は護岸でほぼ完全反射し、一般に斜め重複波の形成が顕著であった。

3.2 波の屈折特性

海岸における波の変形特性のうち、海底地形による屈折は、いわゆる屈折図をえがくことによって検討することができる。Figs. 7 および 8 は潮位 D.L.+0 m および D.L.+5.5 m の場合の波向 S に対する屈折図である。恋ヶ浜海岸では潮位 D.L.+0 m で S 方向からの進入波の波向線は発散する傾向にあるが、その中央部では逆に収束する個所もみうけられる。一方、州鼻と笠戸島にはさまれた海域では、鎌石岬による波のしゃへい効果によって、きわめて静穏であると思われる。Fig. 8 は潮位 D.L.+5.5 m の場合の屈折図であって、この場合には海域の水深が深くなるので、波は全般的に屈折しにくくなり、恋ヶ浜海岸における波の発散は潮位 D.L.+0 m の場合より顕著でない。いいかえれば、波の屈折に関する限りでは、海岸近くまで波高はあまり減少しないで侵入することになる。さらに、波向 SSE についても、Fig. 9 に示すように恋ヶ浜海岸では波向線は発散し、波高の減少の傾向は波向 S の場合より著しい。しかし、恋ヶ浜の西海岸では、一部波が収束し、また州鼻と笠戸島にはさまれた海域では、波向 S の場合に比べて若干波が侵入しやすくなる傾向がみられる。

3.3 現地形における波高分布と波の変形特性

各波高測定点で得た波高記録から求めた波高分布を示したものが Figs. 10 および 11 である。いずれも、波高分布は造波機前面に設置した波高計による測定波高を沖波とし、その沖波波高と各測定点における測定波高との比 H_R によって示した。また図中には、その波高比に基づいて波の進入状況と波高分布の概要がわかるように、等波高比線を記入してある。

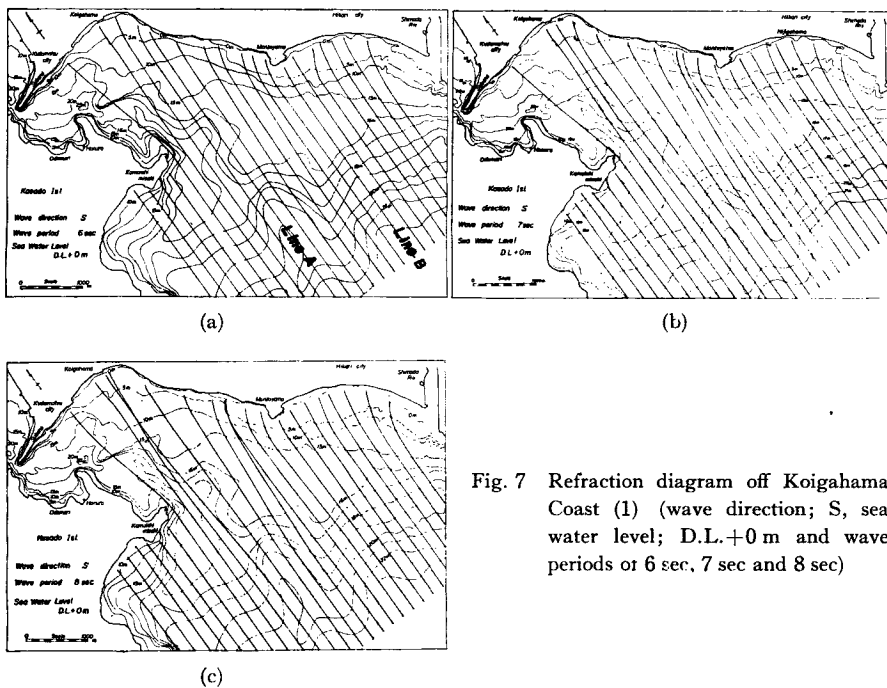


Fig. 7 Refraction diagram off Koigahama Coast (1) (wave direction; S, sea water level; D.L. +0 m and wave periods of 6 sec, 7 sec and 8 sec)

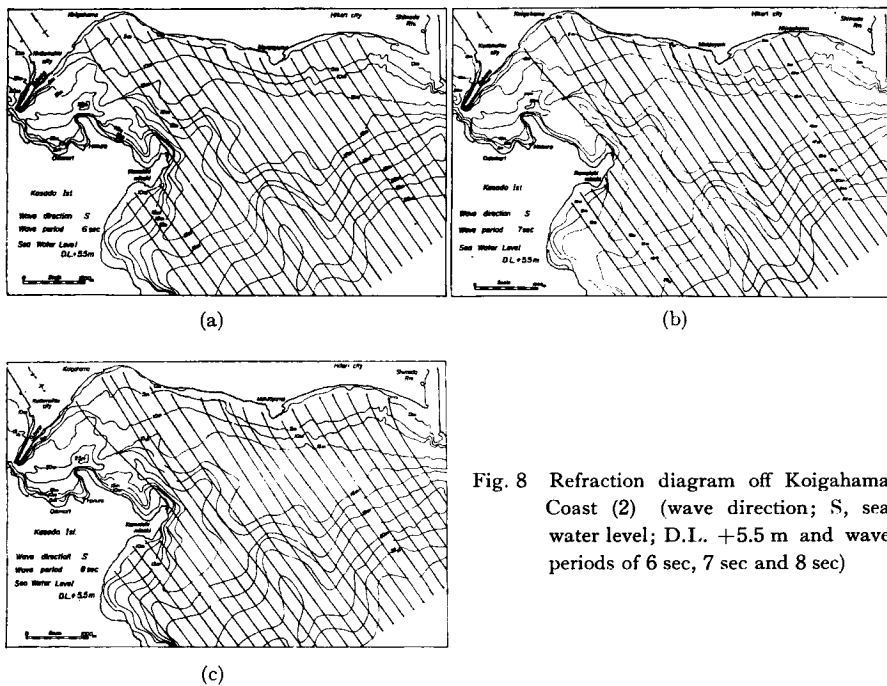


Fig. 8 Refraction diagram off Koigahama Coast (2) (wave direction; S, sea water level; D.L. +5.5 m and wave periods of 6 sec, 7 sec and 8 sec)

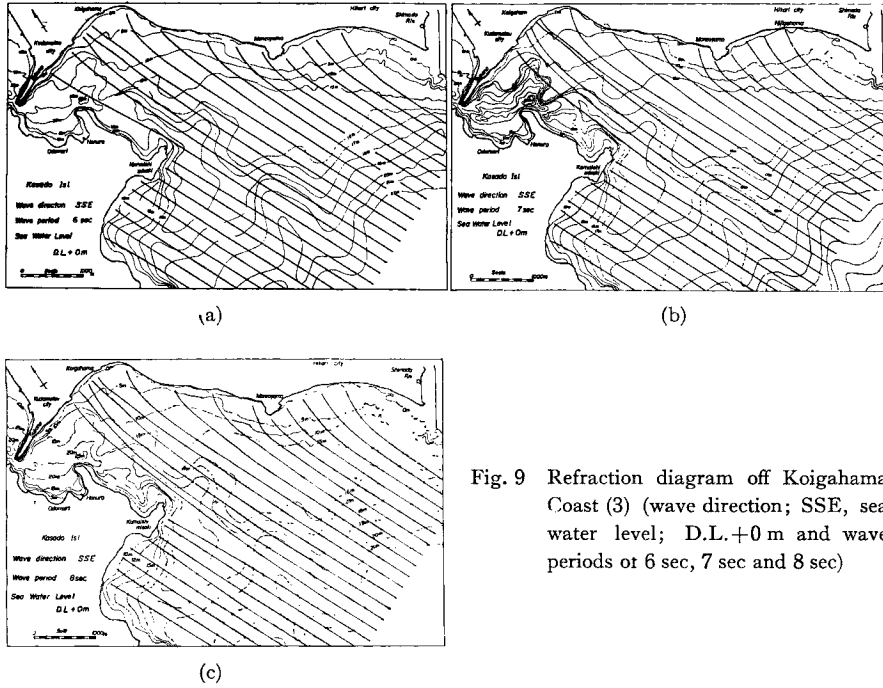
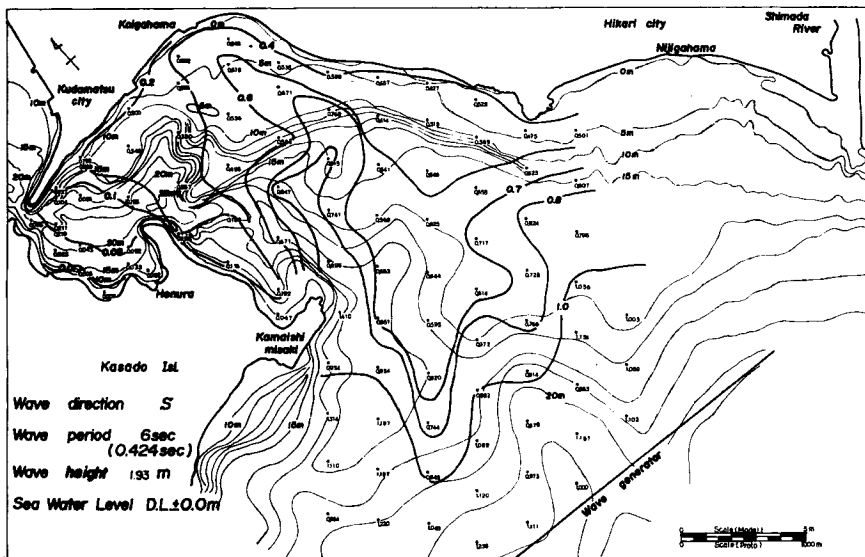
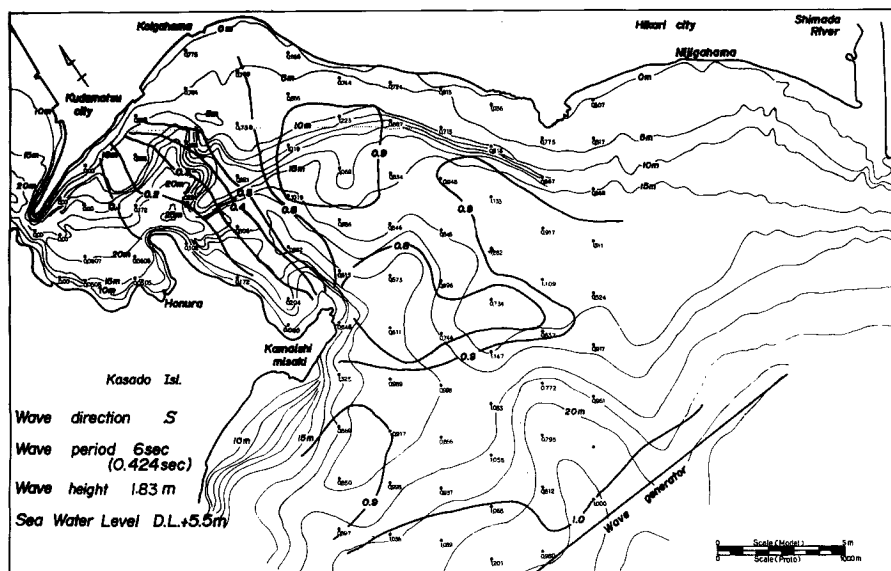
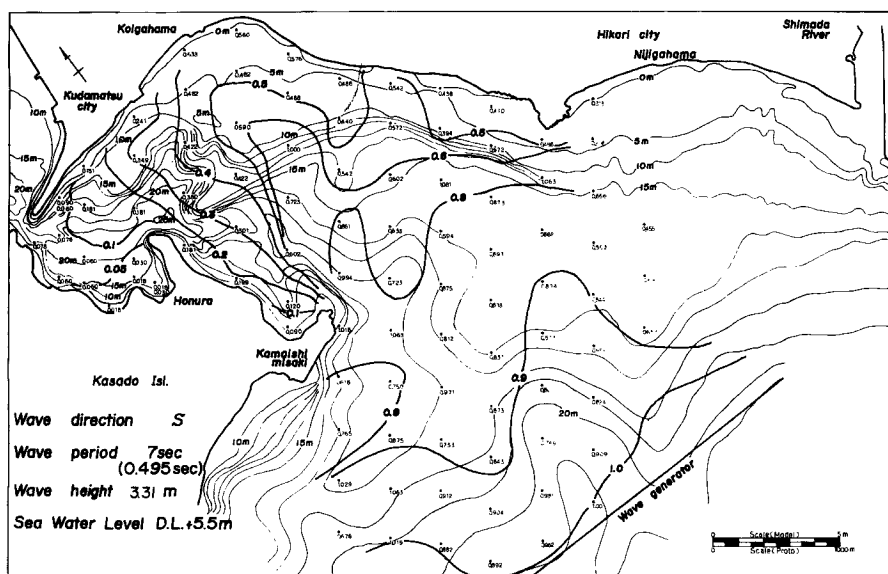


Fig. 9 Refraction diagram off Koigahama Coast (3) (wave direction; SSE, sea water level; D.L.+0 m and wave periods of 6 sec, 7 sec and 8 sec)

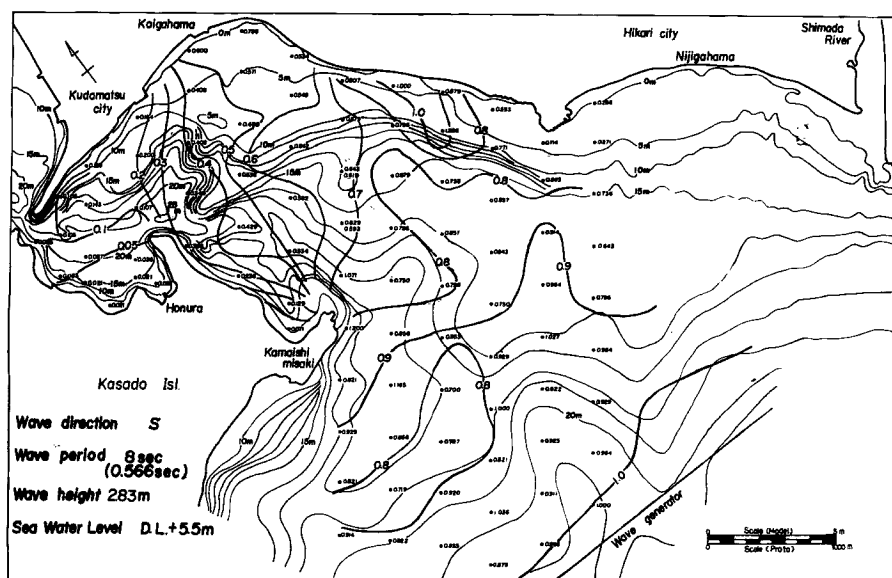




(a)



(b)



(c)

Fig. 11 Wave height distribution off Koigahama Coast (2) (wave direction; S, sea water level; D.L.+5.5 m and wave periods of 6 sec, 7 sec and 8 sec)

(1) 波向Sの場合

Fig. 10 は波向 S, 潮位 D.L.+0 m の場合における海域内の波高分布であり, 周期はそれぞれ 6 sec, 7 sec および 8 sec である。各周期の場合とも, 恋ヶ浜と笠戸島にはさまれた湾口部から州鼻近くの湾奥部に行くにしたがって, その波高比の値は一般に小さくなっている。とくに, 周期 6 sec の場合には, 波高比が 0.2 以下の等波高比線の占める範囲が広く, また笠戸島沿いの鎌石岬から対岸の州鼻に至る範囲では波高比は, かなり小さくなっている。笠戸島の本浦沿岸付近ではさらに小さな波高比 (約 0.01 程度) を示している。これは, 本浦には寺崎よりの回折波と州鼻からのわずかな反射波のみが侵入するためと考えられる。しかし, 鎌石岬と恋ヶ浜の間では, 鎌石岬による波浪の回折と進入波の影響によって, 波高比は 0.8~0.9 と大きく, 等波高比線が広がっている。周期 7 sec および 8 sec の等波高比線の分布はおおむね同じようであるが, 周期 6 sec の場合に比べて, 恋ヶ浜の前面で等波高比線の間隔が大きく広がり, 周期によって若干屈折特性が異なっていることがわかる。以上の全体的な傾向は屈折図の傾向とほぼ一致する。

Fig. 11 は現地形における潮位 D.L.+5.5 m に相当するそれぞれの周期の場合の波高分布を示したものである。潮位 D.L.+5.5 m の場合には, 3.2 において述べたように一般的に D.L.+0 m に比べて水深が大きいために, 来襲波浪は屈折しにくく, また海底地形の影響を受けにくい。その結果, 波浪は波高の減少も顕著でなく, 海岸線近くまでかなり波高比が大きくなる傾向を示す。Fig. 11 (a) の周期 6 sec において, 鎌石岬と恋ヶ浜の間で D.L.+0 m の場合と等波高比線の分布は異なり, その値が 1.0 程度にもなるところもある。しかし, 湾奥部においては, いずれの周期とも, 潮位 D.L.+0 m の場合と同様な等波高比線となるが, D.L.+5.5 m の場合の方が若干波の侵入が顕著であることがわかる。

以上, Figs. 10 および 11 から, この海域に来襲する S 方向からの波浪の場合には, いずれの周期においても, 鎌石岬と恋ヶ浜の中央部においては波高比が若干大きな値で表わされている。しかし, 湾奥部および笠戸島の沿岸部ではその波高比の値が非常に小さくなっている。

(2) 波向 SSE の場合

Fig. 12 は波向 SSE の場合の各周期に対する海域内の波高分布を示したものである。これらはいずれも計画潮位 D.L.+5.5 m に対応した場合であるが、これからつぎのことがわかる。まず、この場合には、波向が SSE であるために、海岸線に沿って波が侵入することになるので、波は恋ヶ浜海岸付近で極度に屈折し、発散する傾向になり、波高は一般にかなり小さくなる。これに対して州鼻付近では外海からの侵入波がほとんどそのまま侵入することになり、とくにその中央部付近にはかなり波が集中することがわかる。

なお、虹ヶ浜海岸への波の侵入状態は、恋ヶ浜海岸の場合と同様に、波が屈折し発散する傾向にあり、とくに波が集中するような場所でないことがわかる。

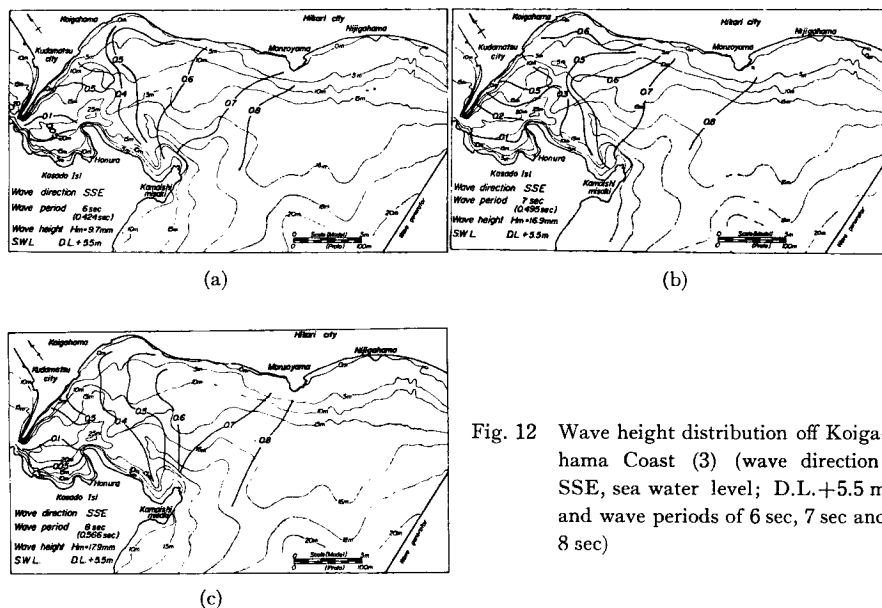


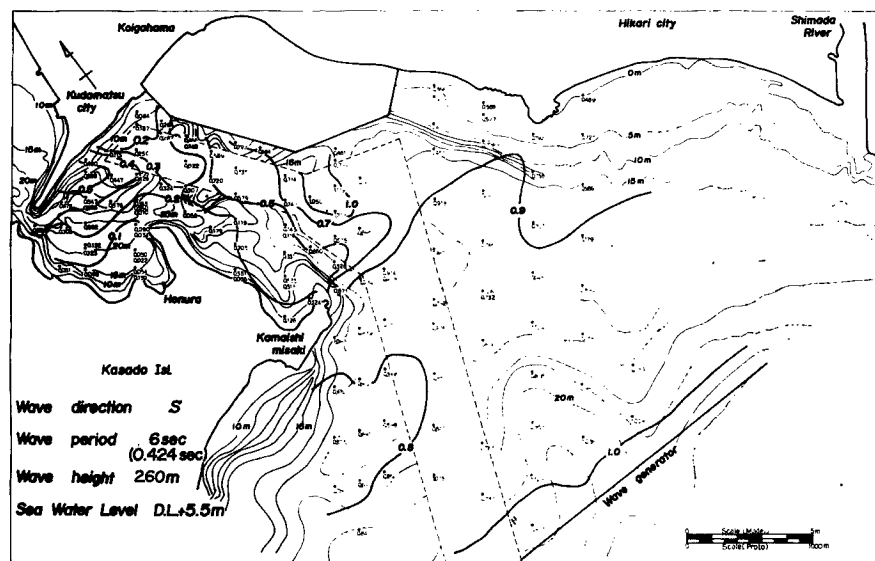
Fig. 12 Wave height distribution off Koigahama Coast (3) (wave direction; SSE, sea water level; D.L.+5.5 m and wave periods of 6 sec, 7 sec and 8 sec)

3.4 埋立完了後における波高分布と波浪の変形特性および消波突堤の効果

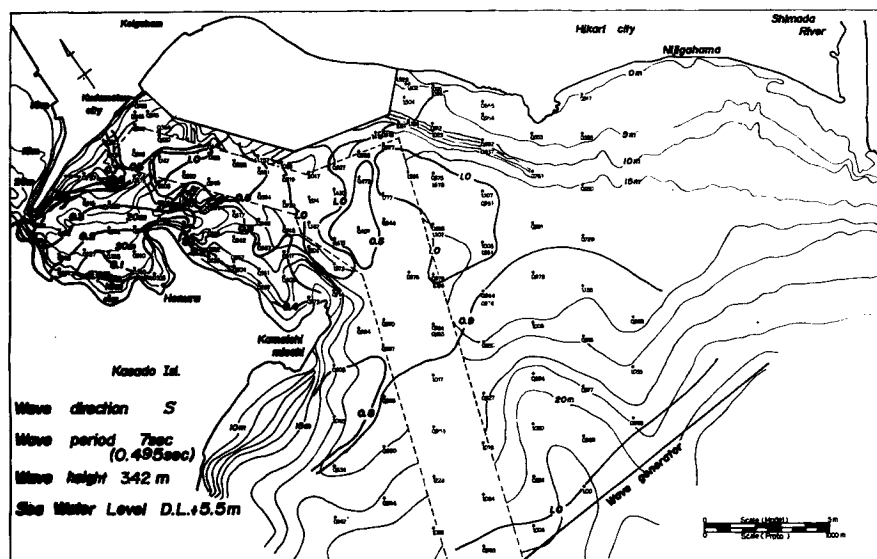
(1) 波向 S の場合

Fig. 13 は波向 S の場合で、周期 6 sec, 7 sec および 8 sec のそれぞれの場合における海域内の波高分布を示したものである。これらに共通して見られる現象としては、埋立護岸の南向き法線の前面では、前述したように斜め重複波が顕著に形成され、この付近では波高比は 2 程度になるが、実験値に大小のものが混然としているのは、重複波の形成をよく示しているものと解すべきである。したがって、一般にはこの付近の等波高比線を描くことはきわめて困難であり、ここに示したものは大体の傾向を示しているものと考えなければならない。同様に、護岸東端の光市との境界付近にも、護岸や海岸からの反射波と入射波とが重複して複雑な重複波が形成されることが、実験値の散乱やその大小の値の発生および観察の結果からよく理解される。

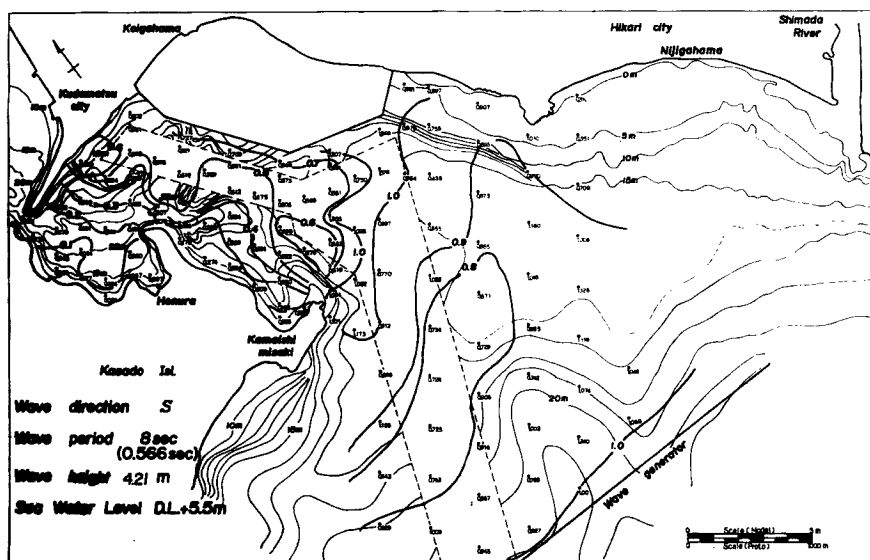
一方、埋立護岸から州鼻へ至る護岸側の海域では、入射波のほか反射波および回折散乱波が重複して、ちょうど護岸で反射する方向に波高比がかなり大きくなっていることがわかる。したがって、この結果から州鼻海岸はほぼ全般にわたって波高比が増大することになり、海岸侵食対策を考慮した消波工の設置を検討すべきものと考えられる。本浦の海岸へは、この州鼻での反射がさらに侵入するほか寺崎での回折波などが加わるわけであって、**Figs. 10** および **11** に示した埋立前の波高比に比べて若干大きくなっていることがわかる。ただ



(a)



(b)



(c)

Fig. 13 Wave height distribution off Koigahama Coast after reclamation (1)
(wave direction; S)

し、本浦地区ではすでに現地地形の場合においても述べたように波浪の侵入がきわめて少ない静穏な浦であって、その特性は埋立後も計画波高の1/10以下程度の波浪しか侵入しないことが明らかにされるのである。

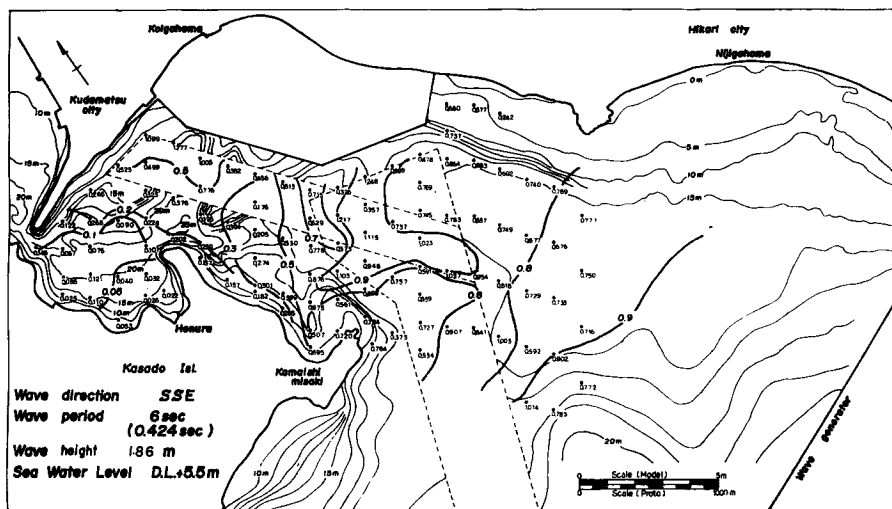
つぎに、笠戸島のうち護岸前面に位置する海岸では、とくに鎌石岬の東および南側では護岸からの反射や鎌石岬自身の反射波のために、波高比はかなり大きいことがわかる。この付近では、海底地形が急激に深くなっているため、波浪がそのまま襲う傾向を示し、複雑な重複波を形成することになるであろう。しかし、鎌石岬の西側にあたる東風浦では、若干波高比が増大する程度にとどまっているようであって、これはこの岬による回折波と対岸からの若干の反射波が重なるためであろう。また、東風浦よりこれに続く西海岸とくに埋立護岸の前面では、同様に若干波高比が大きくなる傾向を示すようであるが、いずれも入射波に対しては顕著なものではない。

(2) 波向 SSE の場合

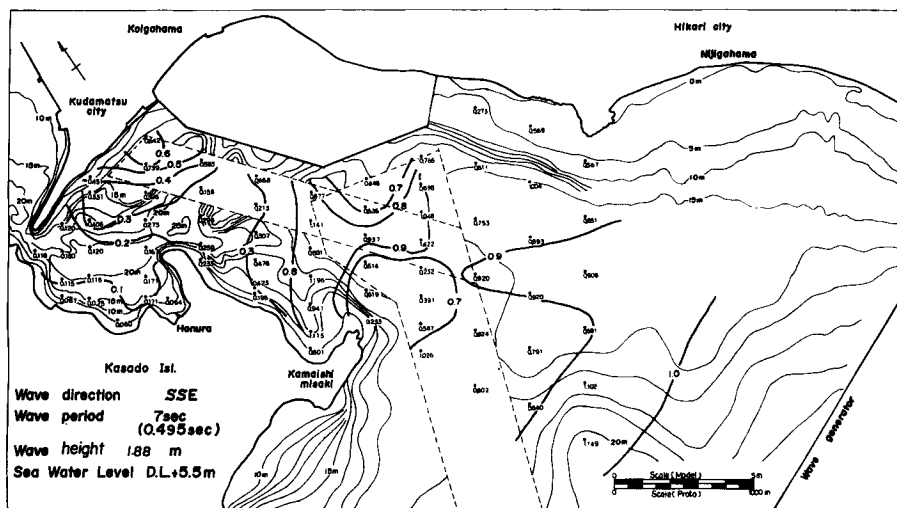
この場合の実験結果を **Fig. 14** に示すが、これは潮位 D.L.+5.5 m に対応した場合である。ただし、この実験では、実験の都合上造波機は1台としたために造波板の長さは10 mに限られたので、鎌石岬の南側と門蔵山前面付近では波高分布についての詳細な検討はできない。ここでは、主として波向Sの場合の **Fig. 13** と比較して、その特徴を考察することにしてしよう。

まず、この場合の大きな特徴は埋立護岸の南向き法線で波が反射し、それがちょうど鎌石岬の波高比の増大をもたらすことであって、この護岸線では波向 SSE の場合がとくに顕著になるものと考えられる。これは入射波に対して反射波の方向がちょうど鎌石岬に向かっているためである。このことから鎌石岬付近の海岸では、回折波のみが主体であったところへ反射波が侵入して、来襲波浪の波高にはほぼ等しい程度の波高比となり、それは回折波に比べて反射波の方がかなり大きいので、波向として対岸の護岸からくるようになるであろう。しかし、この波浪は台風の進路によって相違するが、この恋ヶ浜海岸に最悪のコースで台風が上陸した場合でも、波向が SSE 方向である継続時間はたかだか2時間程度であって、きわめて短時間に限定されると考えられる。

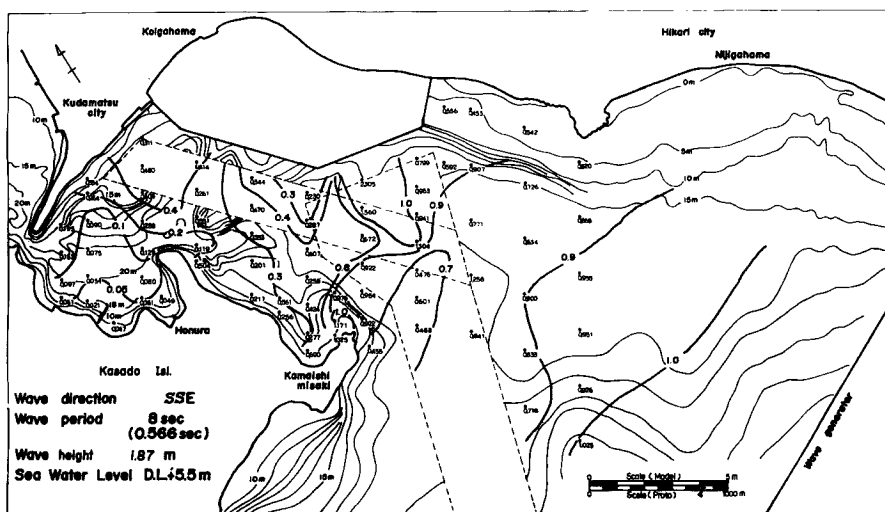
つぎに問題となるのは、波向 SSE の場合には、ほぼ護岸に沿った方向に州鼻まで波が侵入することになるので、州鼻付近では波高比がかなり大きくなる。この傾向は埋立前とさほど変わらないと考えられるが、この意味で州鼻付近の消波対策を十分に検討すべきであるように思われる。この点については、波向 S の場合も全く同様であるが、州鼻の海岸侵食対策と合わせて消波工の設置が有効であろうと思われる。そのほか本浦の海岸に対しては、波向 S の場合と比較して顕著な傾向はないようであり、むしろ若干波高比が減少しているようにさえみうけられる。なお、埋立護岸の東端に発生する重複波については、波向 S の場合と同様であるが、さほど顕著ではないと考えてよいであろう。



(a)



(b)



(c)

Fig. 14 Wave height distribution off Koigahama Coast after reclamation (2)
(wave direction; SSE)

(3) 消波突堤の効果

前述したように、波向 S の場合には、州鼻付近を中心として波高比がかなり増大する結果となったが、これは埋立護岸での反射波と回折散乱波の影響であろうと考えられたので、つぎの2つの方法によって、その消波効果を検討することにした。

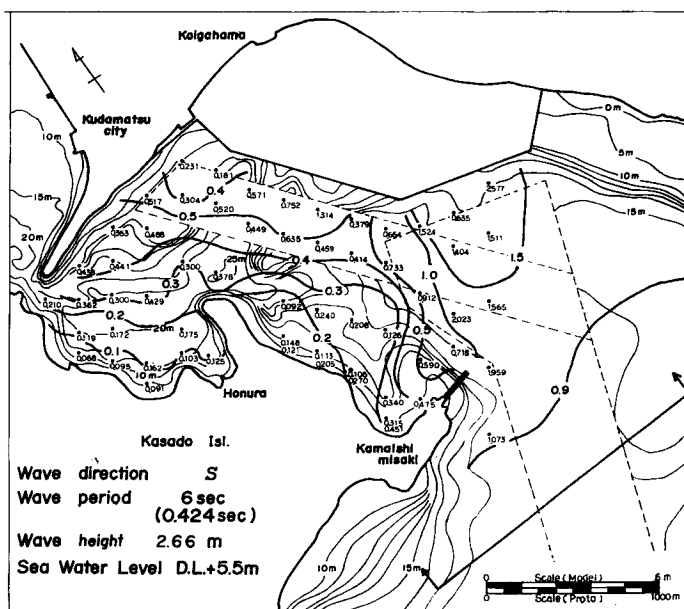
その1つは入射波そのものを減少させる目的で鎌石岬に防波突堤を出す方法であり、いま1つは、けい船岸壁をかねて埋立護岸に消波突堤を出す方法である。

a. 鎌石岬の防波突堤の効果：鎌石岬から波向にほぼ直角方向に不透過の突堤を最長 320 m (実験では 160 cm) まで順次延長した場合について、波向 S および SSE に対して突堤の延長による波高比の変化を調べた。その結果、周期によって若干傾向は相違するが、突堤を延長するにつれて波高は若干減少し、突堤の効果は全般的にはさほど顕著でないようであるので、全海域にわたっては、320 m (実験では 160 m) の突堤の場合についてのみ、周期 6 sec, 7 sec および 8 sec のそれぞれについて、潮位を D.L.+5.5 m として波高の測定を行ない、Fig. 15 のような結果を得たのである。

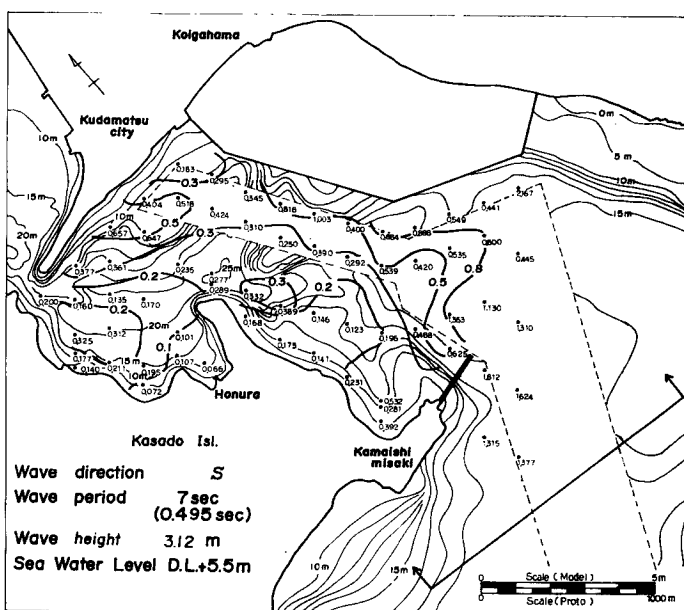
この結果と Fig. 13 に示した突堤のない場合の結果と比較して、つぎのことがわかるであろう。すなわち、州鼻付近を中心として全般的には、わずかに波高比が減少する傾向であるが、さほど大きな効果は期待されることがわかる。ただし、東風浦は当然のことながら極度に回折波が減少して、波高比は小さくなるが、一方、突堤と護岸との間の海域では護岸および突堤からの反射波が顕著な重複波を形成して波高比も大きくなっている。また、突堤の南側では、突堤で反射した波が不規則な重複波をつくり、波高比も増大していることがわかるであろう。

なお、波向 SSE の場合の護岸よりの反射波の侵入防止には、この突堤の効果はむしろ皆無といってよいであろう。

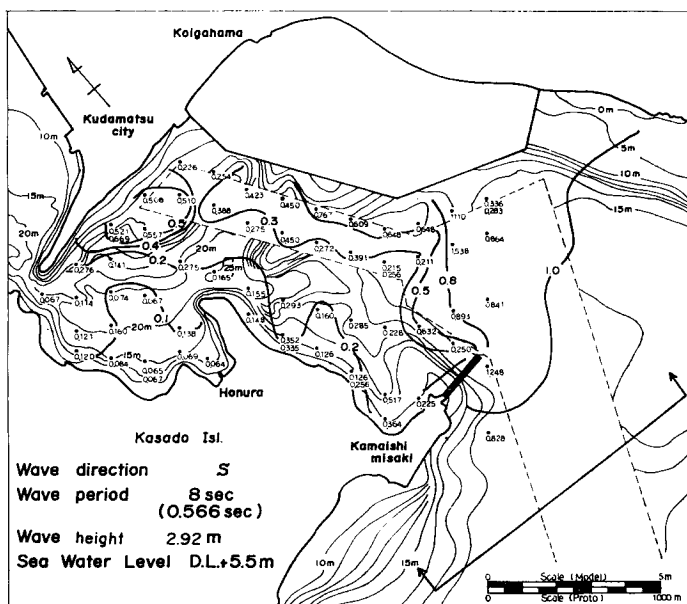
b. 埋立護岸からの消波突堤の効果：この場合には、護岸に沿って長さ 100 m, 幅 10 m で護岸隅角部より 100 m 西側へ 150 m の間隔で 3 基棧橋を設ける計画になっているので、これを適当な消波突堤とし、護岸からの反射波を減少せしめようとする考えで、実験を行なった。不透過の消波突堤を東側より順次設置してい



(a)

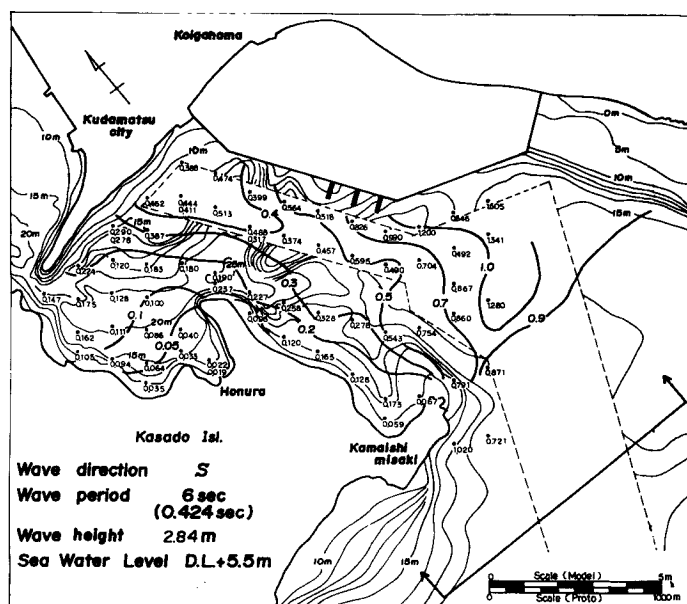


(b)

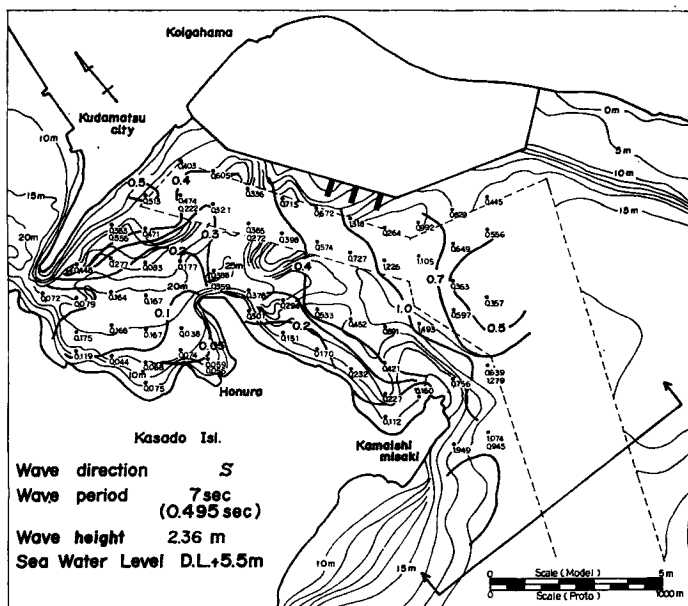


(c)

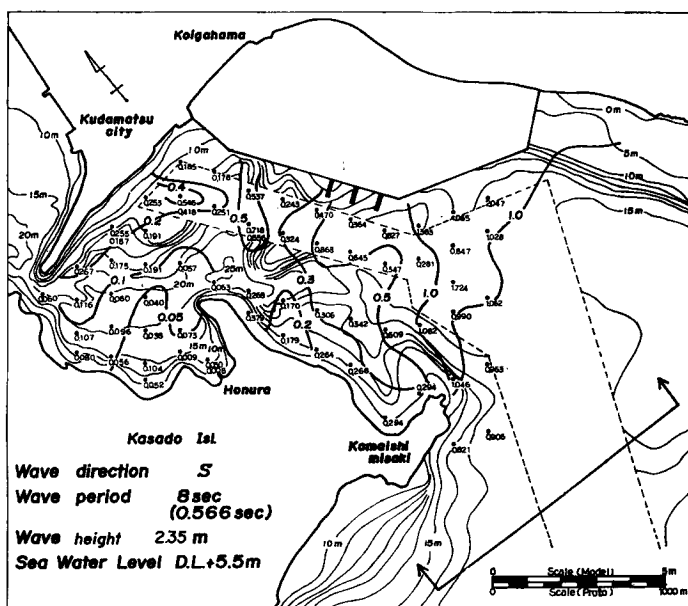
Fig. 15 Variation of wave height distribution off Koigahama Coast due to breakwater of Kamaishi-misaki



(a)



(b)



(c)

Fig. 16 Variation of wave height distribution off Koigahama Coast due to super-dikes

た場合の波高変化を、波向 S および SSE のそれぞれの場合について、周期 6 sec, 7 sec および 8 sec として測定した。これによると、州鼻付近や本浦においては波高比が減少して、かなり効果があり、波高 S の場合の方が顕著であることがわかる。とくに、3 基の突堤を設置すると、かなり波高比が減少するので、波向 S の場合について、潮位 D.L.+5.5 m とし、周期 6 sec, 7 sec および 8 sec のそれぞれの場合について、海域内の波高分布を測定した結果が Fig. 16 である。この結果と前述した Fig. 15 および突堤のない場合の Fig. 13 と比較して、つぎのことがわかるであろう。まず前述したように、護岸からの反射がかなり制御されるので、州鼻付近や護岸前面で波高比の大きかったところでの波高比は 10%~20% 以上も減少し、したがって本浦付近でも波高比は非常に減少することがわかる。なお、波向 SSE の場合には侵入波の若干を減少させるにとどまるので、この消波突堤の効果はあまり期待されないと考えられる。

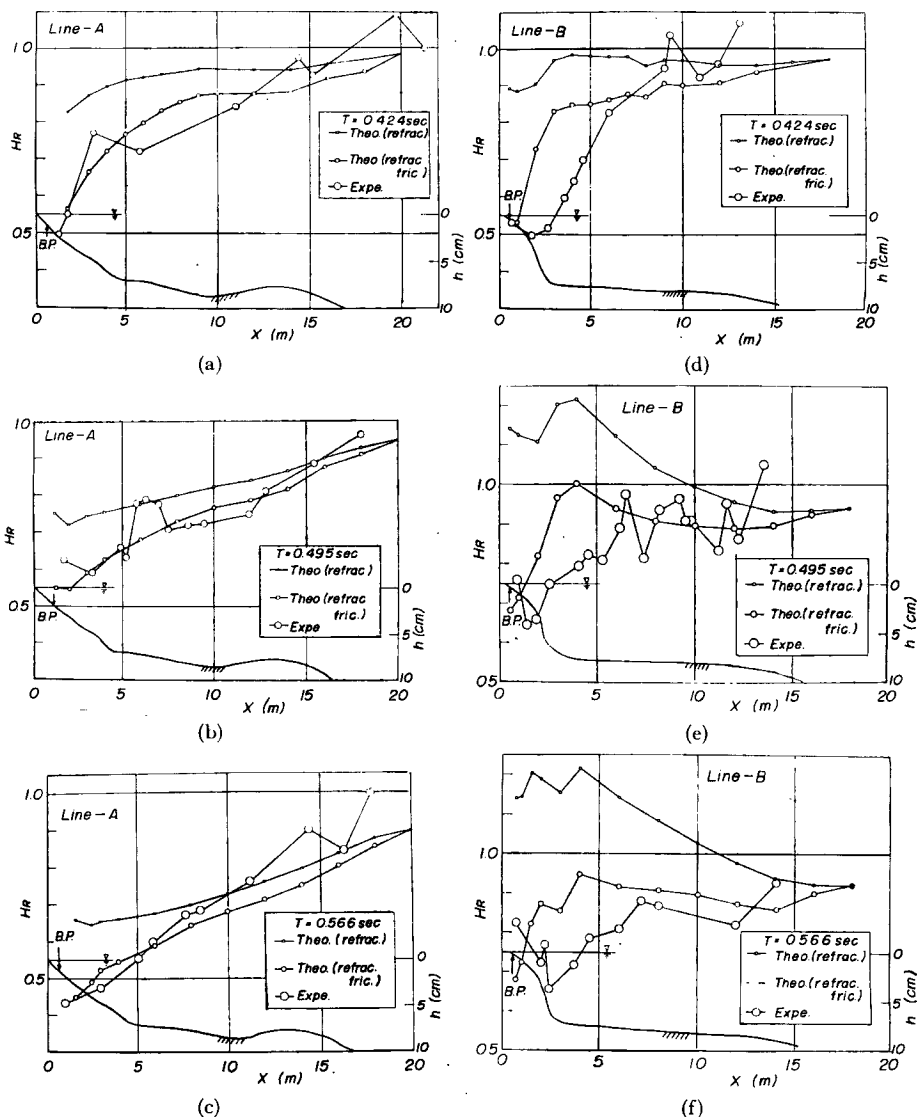


Fig. 17 Comparison between theoretical wave height change and experimental one

4. 波の変形に及ぼす底面摩擦の影響

海底摩擦による波高減衰を考慮しなければ、波は屈折および回折と浅水効果によって変形する。この場合には、屈折係数を K_r とし、浅水係数を K_s とすれば、沖波波高 H_0 の波が水深 h のところに進入した場合、その点での波高 H との間に次式の関係が成立する。

$$H = K_s K_r H_0 \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 K_r は屈折図から決定されるし、また K_s は波のエネルギーの保存則から一般に水深波長比の関数として表わされる。したがって、3.2において述べた屈折図と等深線図とを併用すれば、容易に各地点における波高の理論値を計算することができる。また、底面摩擦による波高減衰の影響を模型実験の結果について考えれば、前述した(6)式を適用することによって、(10)式を次式で表わすことにする。

$$H = K_s K_r K_f H_0 \quad \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 K_f は(6)式によって計算される波高減衰係数である。この関係によって底面摩擦の効果を導入した波の変形特性を理論的に計算することができる。

これら2つの方法によって、波向線に沿う計算値と実験値とを潮位 D.L.+0 m の場合に対して比較した結果が Fig. 17 である。Fig. 17(a), (b) および (c) は Fig. 7(a) に示した屈折図の波向線 A に沿っての比較であり、波の周期は 6 sec, 7 sec および 8 sec に対応しており、図中には(10)および(11)式による計算結果がそれぞれ示してある。この比較によると、底面摩擦の影響は水深 10 cm~15 cm 程度のところから著しくなり、水深 5 cm 程度では底面摩擦を考慮しない場合に比べて約15%も減少するが、実験値との一致はかなり良好といえる。Fig. 17(d), (e) および (f) は波向線 B について比較した結果であるが、水深の浅いところを除いて、計算値と実験値との一致は Fig. 17(a), (b) および (c) の場合と同様にかなり良好であるといえよう。これらは波の反射や回折の影響が比較的少ない波向線についてのものであるが、一般の場合には海底地形もさらに複雑になり、また波高減衰に対して(6)式がかならずしもすべての場合に適合するとはいいがたく、とくに水深が浅くなると

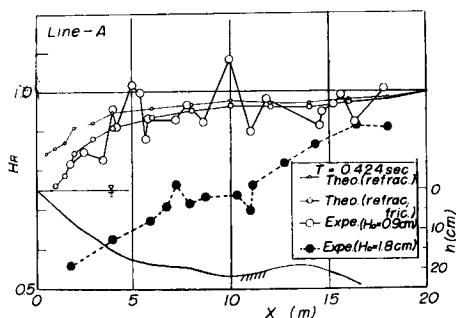


Fig. 18 Effect of wave steepness on wave height change

波の変形特性におよぼす非線型効果も無視できなくなると思われる。すなわち、波の変形に対して直接有限振幅波の特性が影響することと考えられ、したがってまた波の屈折特性に対しても多少なりともその効果が現われるものといえる。これらのことから水深の浅い海岸付近では、この非線型性を考慮した屈折特性の評価が必要であろう。この点を考察するために、周期 6 sec の場合についてのみ沖波波高がさらに大きい場合の実験を行ない、屈折特性を調べて同様に線型理論に基づいたこの計算結果と比較したものが Fig. 18 である。

このように波高を増大させると、反射波や回折散乱波と非線型干渉を起こして、海域での水位変動にはビート現象が現われ、波高の小さい場合のように各点で一様な波高を示さず、時間的に大きく変化することになる。したがってここでは、そのような変動の十分長い時間(20波~30波)についての平均波高をもって比較したが、前述した計算値とはあまり一致しなくなる。

この計算値との比較からつぎのことがわかるであろう。すなわち、前述したような平均波高による屈折特性は微小振幅波理論に基づく計算値にむしろ近づくが、これはむしろみかけ上のことかどうかは、非線型性を考慮した屈折図を描いて、波高変化を計算し、比較検討してみないと解明できないはずである。波形こう配がある値より大きくなると、このような非線型性の効果が多かれ少なかれ現われるものと考えられるので、今後こ

のことを考慮した屈折特性を究明する必要がある。

以上のように、浅海における波の変形の模型実験では、その縮尺によっては模型における底面摩擦の影響を無視することができないので、実用上つきのような方法によって模型実験を実施する必要があると思われる。その1つは、できるだけ模型を大きくするとともに、底面摩擦の減少をはかることを考えて、直接的な底面摩擦の影響の入らない実験を行なうことである。いま1つはこのようにしても一般にこの影響をさけられない場合には、実験結果に対して前述したような方法によって、底面摩擦による波高減衰を評価し、これを用いてこの影響のない場合の海域内の波高分布を推定する方法である。かように補正された海域の波高分布から、現地海岸の波高分布を推定するためには、現地海岸の海底摩擦係数を用いて前述したような方法で計算し、波高減衰の程度を見積ることにすればよいであろう。

5. 結 語

以上のように、浅海における波の変形の模型実験では、当然のことながら底面摩擦の影響を考慮すべきであるが、相似則の観点からすれば Froude の相似則に摩擦の影響を追加することはできないし、また波の変形の実験においては模型を歪めて両者を満足させることも厳密にはできない。本研究では、下松市の恋ヶ浜海岸の模型実験を例にとりて、この問題について考察し、1つの便宜的な方法を提案するとともに、この海岸における波の変形特性を主として模型実験によって究明することができた。これらの模型実験の方法や実験結果の考察が、この種の模型実験的研究においていささかでも役立てば幸である。

最後に、本研究の実施にあたり、御指導いただいた工学部岩垣雄一教授、埋立事業の推進に伴う模型実験上の諸問題について御協力願った下松市山中市長および橋本埋立事業局長、ならびに模型実験の計画、実施に御配慮いただいた日建設計株式会社清水常務取締役および藤谷取締役をはじめ関係諸氏に深く謝意を表明するとともに、実験および解析に熱心に協力していただいた元関西大学学生前田英男氏および海岸災害部門の諸氏に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・土屋義人・陳活雄：海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(3)，第12回海岸工学講演会講演集，1965，pp. 41-49.
- 2) 岩垣雄一：海岸および港湾の模型実験について，海岸工学の最近の進歩，土木学会関西支部，1961，pp. 21-42.
- 3) 矢野勝正：水災害の科学，技報堂，1971，p. 245.