

港湾技研資料

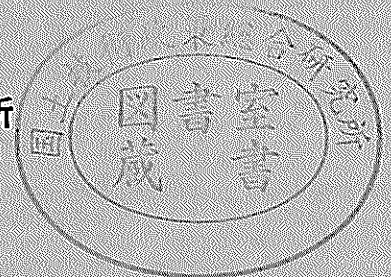
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.551 June 1986

大陸棚における津波の変形過程と海岸構造物の
津波低減効果について

鶴谷原山松
谷本中寄延
広勝祐一嘉
一利人雄國

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. ま え が き	3
2. 実験装置と実験方法	4
2.1 実験水路および模型床	4
2.2 実験方法	5
3. 実験ケース	5
3.1 小縮尺実験	5
3.2 大縮尺実験	5
4. 津波の変形	7
4.1 津波波形の記録例	7
4.2 津波の変形計算	8
5. 構造物による津波低減効果	18
5.1 構造物のない場合の遡上高	18
5.2 離岸堤の効果	20
5.3 海岸堤防の効果	25
5.4 各構造の比較	26
6. ま と め	26
参 考 文 献	27

Deformation of Tsunami in a Continental Shelf and Countermeasure Against Tsunami Run-up by Coastal Structures

Hiroichi TSURUYA*
Katsutoshi TANIMOTO**
Suketo HARANAKA***
Kazuo YAMAZAKI****
Yoshikuni MATSUNOBU*****

Synopsis

Experiments were performed in a long wave channel of 163 meters in order to investigate the deformation of tsunami propagating in a continental shelf. Abilities of coastal structures in reducing the tsunami run-up were also examined. Two types of experiments were performed, namely, one is the small scale experiments (model scale is 1/200) in which deformation and run-up of tsunami without structures were mainly investigated, the other is the large scale experiments (model scale is 1/50) in which effects of coastal structures on tsunami run-up were investigated.

Peregrine's model was used in order to calculate the deformation of long waves and the development of solitons at the head of the bore. The mean height of the bore was well explained by Kishi's finite amplitude long wave theory.

Coastal structures used in the experiment were offshore breakwaters, composite breakwaters and seawalls. Abilities of such structures in reducing the tsunami run-up were investigated and compared each other.

It must be recognized that the opening of offshore breakwaters reduce the ability to a certain extent for tsunami run-up.

* Chief of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division
** Chief of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division
*** Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division
**** Member of Breakwaters Laboratory, Hydraulic Engineering Division
***** Member of Hydrodynamics Laboratory, Marine Hydrodynamics Division

大陸棚における津波の変形過程と海岸構造物の 津波低減効果について

鶴谷 広一*・谷本 勝利**・原中 祐人***
山崎 一雄****・松延 嘉國*****

要 旨

大陸棚のかなり緩勾配な地形上を進行する津波の変形と、そのような津波に対する海岸構造物の津波低減効果を調べる目的で水理模型実験を行った。実験水路は津波水路(長さ163m, 幅1m, 深さ1.5m)を用いた。

実験は、津波の変形と遡上を主として調べた小縮尺実験(模型縮尺1/200)と、津波の遡上に与える構造物の効果を調べた大縮尺実験(模型縮尺1/50)の二種類に分けて行った。

津波の変形過程は、段波先端部でのソリトンの発達と、その後続く段波の平均高さで特徴づけられる。ソリトンについては、非線形分散波理論の中で最も一般的である Peregrine の式を用いて計算を行い、実測値と比較した。その結果、ソリトンの波形は実測値のほうが計算値よりかなりとがった形となり、ピーク値の出現時刻も実測値のほうが早く出現することがわかった。しかし、ピーク値そのものは、砕波点の近くまで両者にそれほど差は出なかった。

段波の高さについては岸の有限振幅長波の変形理論と実測値がほぼ合う結果が得られた。

離岸堤、防波堤や海岸堤防等の各種構造物が津波の遡上に与える影響を調べ、構造物単独の場合および組み合わせた場合の効果を把握することができた。離岸堤の場合は、実際には開口部があるので、実験でも開口部を設けた検討も行ったところ、開口部なしの場合と比べてかなり遡上高が割り増しされることがわかった。

1. まえがき

昭和58年5月26日正午に発生した日本海中部地震によって発生した津波は日本海沿岸を襲い、各地に甚大な被害をもたらした。この津波は、特に秋田県沿岸の遠浅な海岸に段波状となって来襲するという、近年では余り例のない特徴を有するものであった。津波はその波長が長く規模も大きいため、陸岸に接近するに値がって通常の重力波の場合と異なり、より段波的な形となることは古くから認識されていたが¹⁾、今回のような大規模な津波が実際に観測され、また各種のデータが残された例はほとんどない。さらに、遡上高も最大で13~14m²⁾とチ

り地震津波以降では最も大きく、これまでの常識からすると余り大きな津波は来ないであろうと思われていた遠浅で開かれた海岸にも津波被害の可能性が大いにあり得ることが認識されるようになった。

このように、遠浅な海岸における津波の対策施設としては離岸堤や海岸堤防等の構造物が考えられるが、これらの配置計画の策定や設計に際しては、津波の遡上に与える構造物の効果が十分に把握されていなければならない。ところが、大陸棚の海底勾配が1/200程度ときわめて緩勾配の地形を対象とした実験についてはこれまで一例²⁾あるのみで、また遡上に与える構造物の効果については縮尺が1/200と小さく、またケース数も多くは

* 海洋水理部 水理研究室長

** 水工部 防波堤研究室長

*** 水工部 主任研究官(水理計測担当)

**** 水工部 防波堤研究室

***** 海洋水理部 水理研究室

なかったためにまだ不明の点が多い。

そこで、本研究は非常に遠浅な海岸に津波が来襲した場合の津波の変形過程と、離岸堤、海岸堤防、防波堤などの構造物が津波の遡上高にどのように影響するか、また津波対策施設としてどのような構造物を考えればよいかを検討するために、水理模型実験を実施したものである。

海底地形は秋田および山形県沖を対象として選び、津波の変形を主として調べた小縮尺実験と、構造物の効果を調べた大縮尺実験の2種類を実施した。

2. 実験装置と実験方法

2.1 実験水路および模型床

実験は当所の津波造波水路(長さ163m, 幅1.0m, 深さ1.5m)で行った。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン型で、最大ストロークは±40cmであり、任意の波形の波を造波することができる。大縮尺実験では、造波機の後方にある別の造波板と直流電動機を拡大機構を介して直結し、最大ストロークを2.5倍に拡大して大きな波が起こるようにした。ただし、造波板は鋼製ワイヤーで引っ張られる構造のため、この場合は押し波による一歩しか造波することができない。

模型床は、主として大陸棚における津波の変形および

海岸への遡上高を調べた小縮尺(1/200)のもの2種類と、構造物付近を大縮尺で再現し、主として構造物の津波低減効果を調べた大縮尺(1/50)のもの1種類の合計3種類を作製した。海底地形は秋田、山形県沖を参考にしている。

(1) 小縮尺実験(縮尺1/200)

秋田県沖を対象とした模型床を図-1に示す。水深は240mからを再現し、海底地形は以下のように決めた。

-240~-80m(1/10勾配), -80~-50m(1/400勾配),
-50~-5m(1/140勾配), -5m以浅(1/20勾配)。

これを以後海底地形Iと呼ぶ。

山形県沖を対象とした模型床を図-2に示す。海底地形は以下のとおりである。

-240~-100m(1/30勾配), -100~-5m(1/130勾配),
-5m以浅(1/20勾配)。

これを以後海底地形IIと呼ぶ。

(2) 大縮尺実験(縮尺1/50)

構造物の津波防護効果を調べる目的で、縮尺は1/50の大縮尺とし水深は50m以浅を再現した。海底地形は以下のとおりである。

-50~-5m(1/140勾配), -5m以浅(1/20勾配)。

図-3にその状況を示す。これを以後海底地形IIIと呼ぶ。

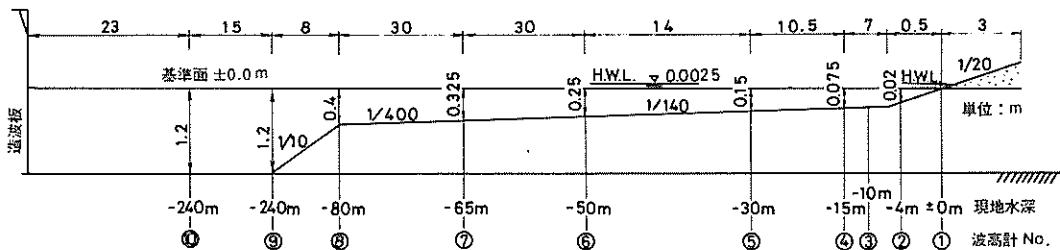


図-1 海底地形I(模型縮尺1/200)と水位計測点

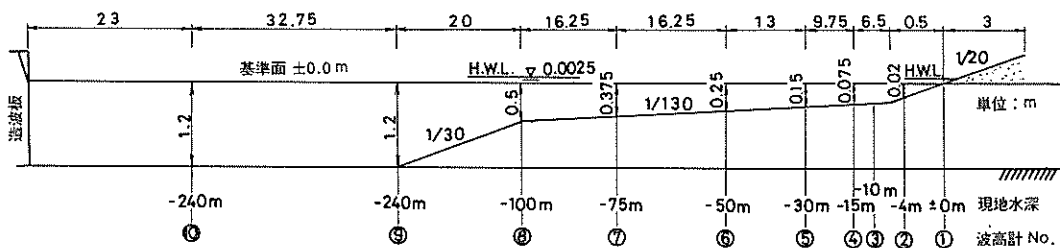


図-2 海底地形II(模型縮尺1/200)と水位計測点

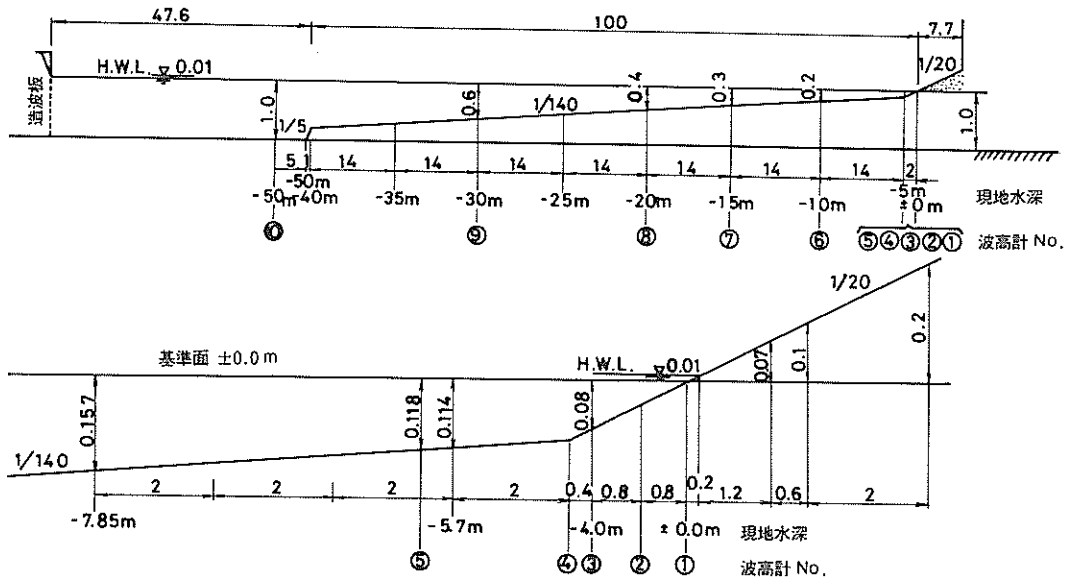


図-3 海底地形Ⅲ(模型縮尺1/50)と水位計測点

海底地形Ⅰ, Ⅱ, Ⅲに共通するのは、水深5mから浅い部分の勾配が1/20となっていることである。これまでは、一様勾配斜面上での遡上高に関する実験が数多く行われてきたが、本実験のような複合断面に対する実験は数少ない。しかし、遠浅な海岸でもパー・トラフの発生する水深より浅い所では急勾配になっているのが普通であり、このような地形では一様勾配斜面より遡上高が高くなる傾向にあると言われていたので³⁾、本研究ではより現地の地形に近い形を採用している。

模型床は耐水ベニア製で、水路と模型床の間およびベニア板の接続部等はコーキング剤を用いて水の出入りがないようにしてある。なお、ベニア板は塗装していない。

2.2 実験方法

小縮尺実験に用いた波は、沖側一定水深部で正弦波形となるように造波したものである。海底地形Ⅰ, Ⅱに対応してこれを以後実験Ⅰ, Ⅱとする。周期は現地換算で8分、10分、15分の3種類である。大縮尺実験に用いた波は第一波押し波だけを対象としたもので、小縮尺実験による周期8分の-50m地点での記録から縮尺換算を行って造波機信号に変えて発生させたもの(実験Ⅲ)と、周期の効果を調べるために2~8分に対応する周期の波の一山を与えたもの(実験Ⅳ)の2種類である。

それぞれの実験における水位変動は容量式波高計を10測点に設置してデータレコーダに記録する方法による。測定点の位置は図-1, 2, 3に丸で囲った数字で示してある。

陸上への遡上はベニア板に記入してある目盛りを利用

して遡上距離を目視で求め、これから遡上高に換算した。

3. 実験ケース

3.1 小縮尺実験

小縮尺実験の実験ケースを以下に示す。なお、前述したように海底地形Ⅰ, Ⅱがそれぞれ実験Ⅰ, Ⅱに対応する。

海底地形(Ⅰ, Ⅱ)	2ケース(実験Ⅰ, Ⅱ)
潮位(+0.5m)	1ケース
周期(8, 10, 15分)	3ケース
津波の振幅	5ケース(実験Ⅰ)
	7ケース(実験Ⅱ)
構造物の有無	5ケース

なし

離岸堤(設置位置-4.0m, 天端高+2.5m, 捨石)

海岸堤防(設置位置±0.0m, 天端高+7.5m)

離岸堤+海岸堤防(設置位置等は単独の場合と同じ)

防波堤(設置位置-15m, 天端高+6.5m)

ここに、離岸堤は砕石を後に述べる図-4の形に設置したもので、空隙率は45%であった。海岸堤防の模型としては幅2cm, 高さ3.75cm, 長さ99cmの木材を用い、防波堤の模型としては幅10cm, 高さ10.8cm, 長さ99cmの木材を用いた。

3.2 大縮尺実験

(1) 実験Ⅲ

実験Ⅲの実験ケースを以下に示す。

海底地形(Ⅲ)	1ケース
---------	------

潮位 (+0.5m) 1 ケース
 津波波形 6 ケース (構造物なしの場合には 20 ケース)
 構造物の有無 10 ケース

なし

離岸堤 I (設置位置 -4m, 天端高 +2.5m, 全断面消波ブロック)

離岸堤 II (設置位置 -4m, 天端高 +2.5m, 捨石中詰め消波ブロック被覆)

二重離岸堤 (離岸堤 II の沖にもう一つの離岸堤を設置。沖側離岸堤: 設置水深 -5.7m, 天端高 +3.5m, 全断面消波ブロック)

海岸堤防 I (設置位置 ±0.0m, 天端高 +7.5m)

海岸堤防 II (設置位置 ±0.0m, 天端高 +5.5m)

海岸堤防 III (設置位置 +3.5m, 天端高 +6.5m)

離岸堤 II + 海岸堤防 II

離岸堤 II + 海岸堤防 III

防波堤 (設置水深 -15m, 天端高 +6.5m)

津波波形は第一波押し波だけを対象としたもので、縮尺実験による周期 8 分の -50m 地点での水位記録と同じ波を作るため、縮尺換算を行って造波機信号に変えて発生させた。しかし、造波機のストロークの制約から小

縮尺実験と同じ波形を作ることはできず、時間的には周期を約 3 分に短縮したものに对应している。

構造物の断面は図-4~9 に示したとおりである。実験に用いた消波ブロックは空隙率約 50% のもので、離岸堤 I に対しては模型重量 73.6gf, 120gf の 2 種、離岸堤 II に対しては 120gf, 二重離岸堤に対しては 296gf のブロックである。

(2) 実験 IV

海底地形 III に対して、津波の周期の効果を調べたもので、正弦波の一山を与えたものである。また、離岸堤の開口部が遡上高に与える影響についても検討している。

実験ケースを以下に示す。

海底地形 (IV)	1 ケース
潮位 (+0.5m)	1 ケース
津波波形 周期	7 ケース (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 分)
波高	1 ケース (2, 6, 7, 8 分)
	2 ケース (5 分)
	3 ケース (4 分)
	5 ケース (3 分)

構造物の有無

なし

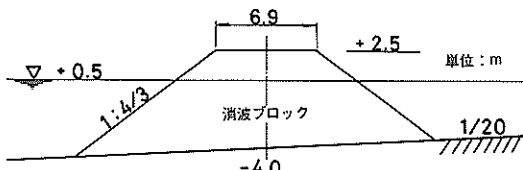


図-4 離岸堤 I

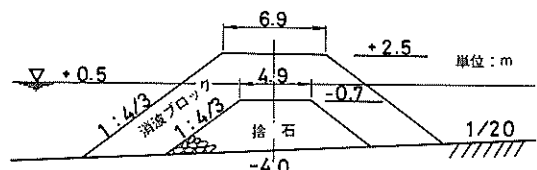


図-5 離岸堤 II

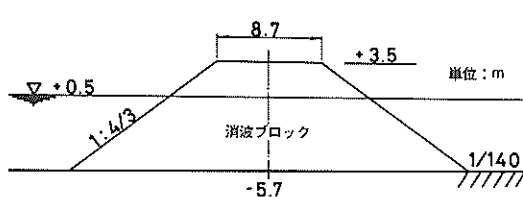


図-6 沖側離岸堤

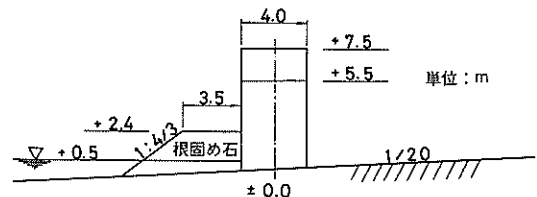


図-7 海岸堤防 I, II

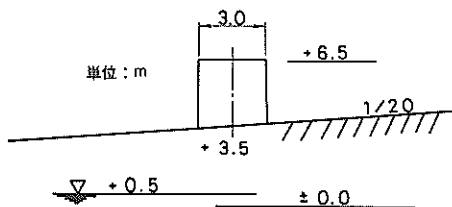


図-8 海岸堤防 III

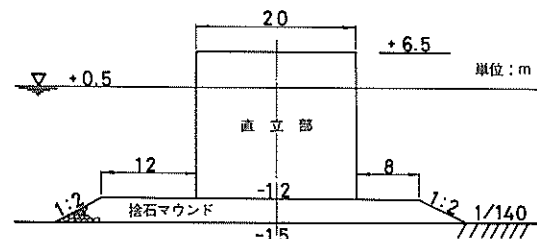


図-9 防波堤

離岸堤 I (開口部なし)

離岸堤 I (開口部あり, 開口率 25%)

二重離岸堤 (開口部なし)

二重離岸堤 (開口部あり, 開口率 岸側 25%, 沖側 50%)

開口部ありの岸側離岸堤を図-10に, 沖側離岸堤を図-11に示す。さらに, 二重離岸堤の配置状況を図-12に示す。図の左下側が沖側になっている。離岸堤 I の開口部ありは, 同図の沖側離岸堤を取り除いた配置である。

4. 津波の変形

4.1 津波波形の記録例

図-13は小縮尺実験による海底地形 I に対する津波の波形記録であり, 周期 8 分の例である。第一波の押し波を黒く塗りつぶしてあるが, 沖から海岸へ伝播するにつれて波の前部が急傾斜となり, 段波状津波に変形してゆくようすがよくわかる。測点 4 あたりから段波の先端にソリトンの分裂が見られる。また, 海岸からの反射波が沖へ戻ってゆくようすもよく認められる。

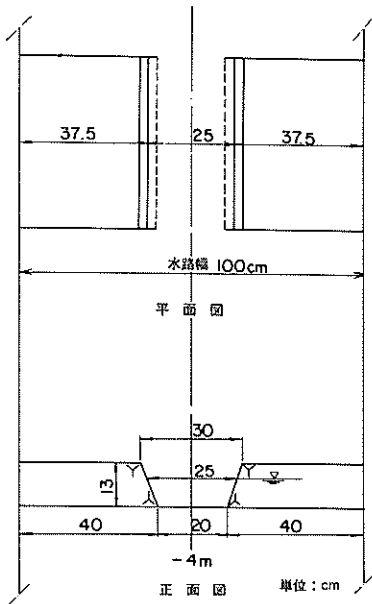


図-10 離岸堤 I (開口部あり)

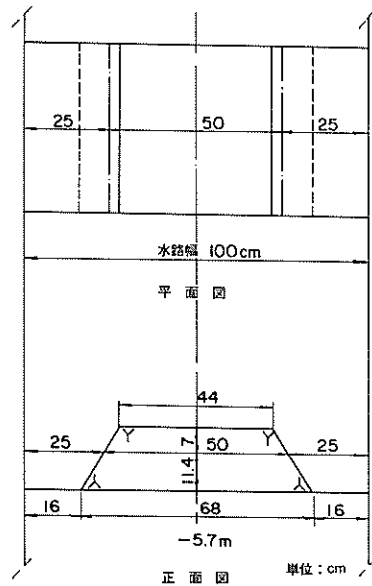


図-11 沖側離岸堤 (開口部あり)

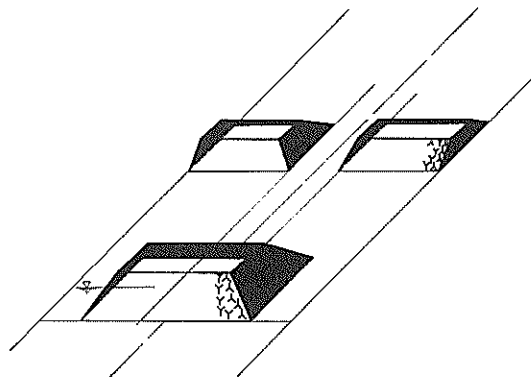


図-12 離岸堤配置図 (開口部あり)

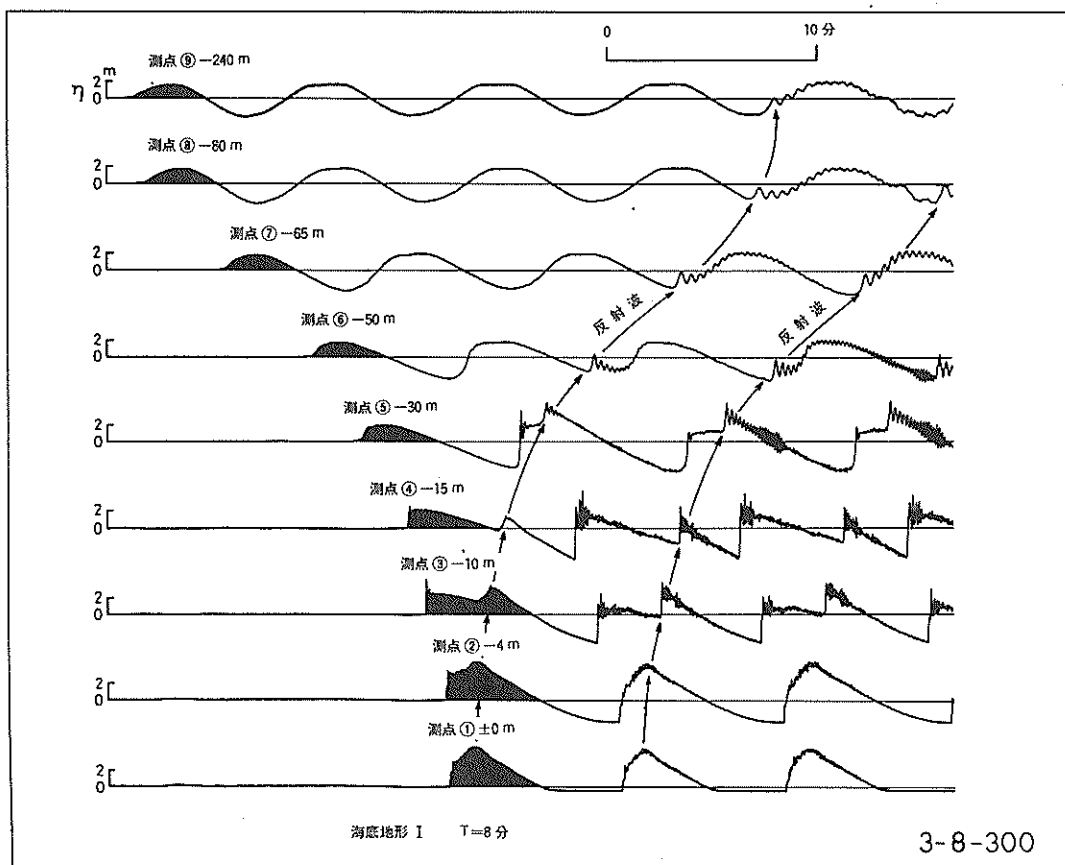


図-13 波形記録の例(海底地形I, $T = 8$ 分)

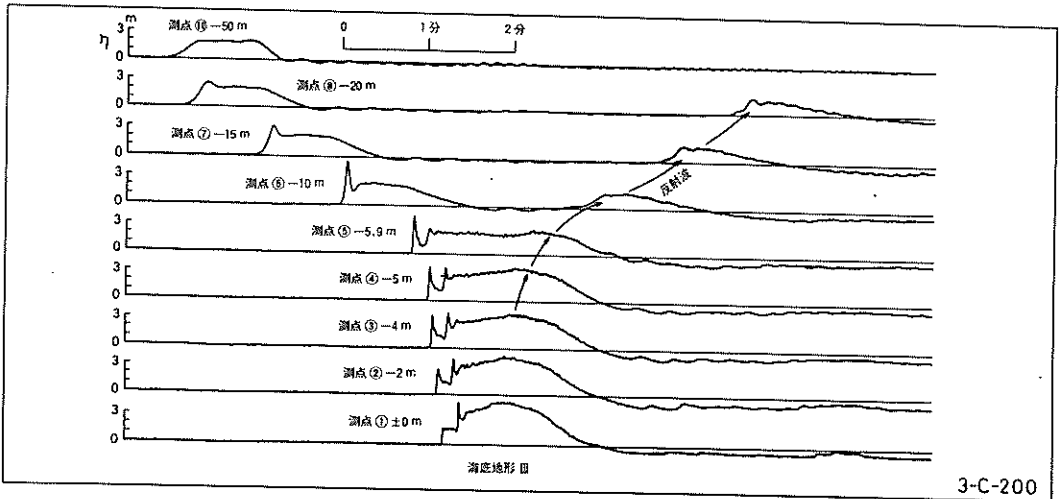
一方、図-14, 15は大縮尺実験による同様な津波の波形記録の例である。この場合、前述したように第一波の押し波だけを発生させている。両図とも、測点1から測点8までの時間軸の関係は実測のままであるが、測点10だけは図に入るように時間軸をずらせている。振幅の小さい図-14の例では、波の峰のところでやや平たくなっているけれども、前出の図-13の波形と比較的よく似た変化を示している。図-15は振幅が比較的大きい例であるが、この場合-50m地点での波形にも波状性が現れており、適度な水深のところではこれが非常に大きく発達する。適上高に関係する津波の振幅としては、こうした波状性を無視した波形の静水面からの高さで表している。なお、-50m地点の波形に認められるように、波の峰を過ぎたあとに水位が急激に低下する波形となっている。これは造波機のスローク不足のため、水位が低下するところを若干カットしていることによるものであり、本来であればもう少し緩やかな低下を示すはずである。

図-16は-240m地点での振幅 a_{-240} と-50m地点での振幅 a_{-50} の関係を示したものである。一部のデータを除いて a_{-50} が大きく、平均的には $1.34 a_{-240}$ 程度である。グリーンの公式を適用すれば、 $a_{-50} = 1.48 a_{-240}$ であり、実験I, IIではこの関係よりやや小さい。この原因は、後述するように波の有限振幅の効果のためであると考えられる。

4.2 津波の変形計算

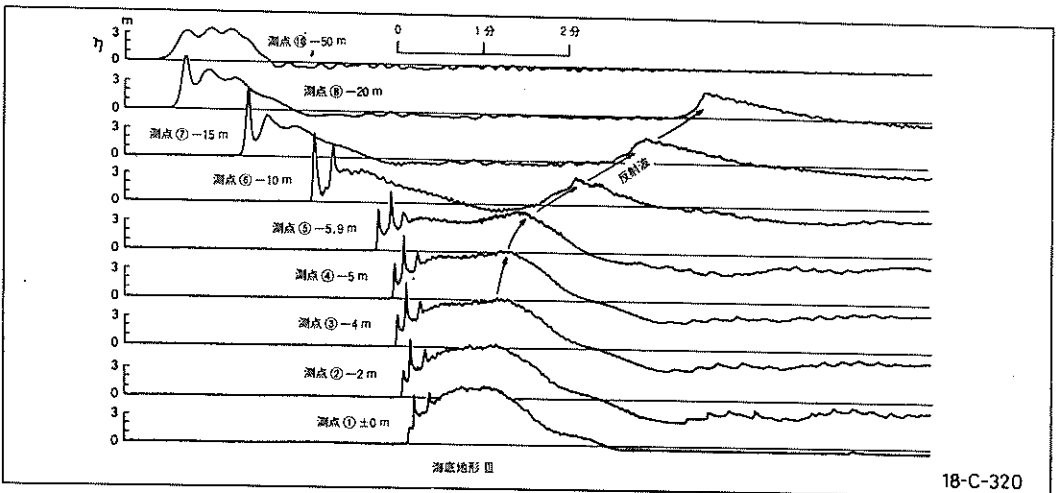
(1) ソリトンの計算

前節で述べたように、津波は岸に向かって進行するにもなると段波状に変形し、その先端部が2~3波のソリトンに分裂する。ソリトンへの分裂は非線形分散波理論を用いて計算することができる。非線形分散波理論としてはアーセル数を1のオーダーとして導いたPeregrine⁴⁾の式とアーセル数の大きい場合の後藤⁵⁾の式が代表的である。後藤⁶⁾によれば、Peregrineの提案した式の結果のほうが後藤の式によるものに比べて大き目の分裂波高



3-C-200

図-14 波形記録の例(海底地形 III)



18-C-320

図-15 波形記録の例(海底地形 III)

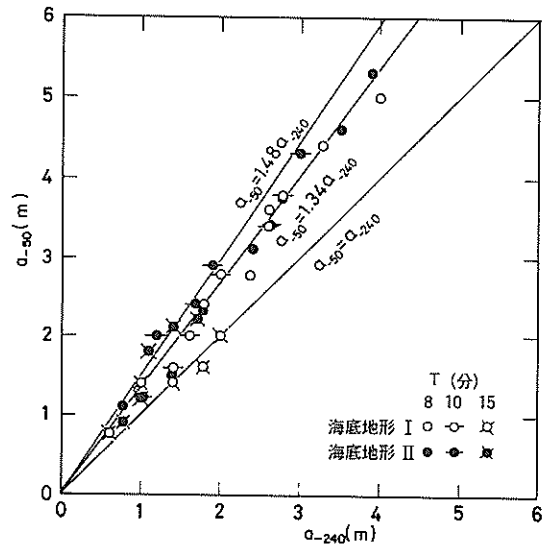


図-16 -240m地点での振幅と-50m地点での振幅の関係

を与えるようである。

ここでは、ソリトンの分裂に着目して検討する目的から、Peregrine の式を用いて計算を行い、実験値と比較する。

無次元変数を次のようにとる。

$$(x, y, z) = h_0^{-1}(x^*, y^*, z^*), t = t^*(g/h_0)^{\frac{1}{2}},$$

$$p = p^*/\rho gh_0, (u, v, w) = (gh_0)^{\frac{1}{2}}(u^*, v^*, w^*),$$

ここに、*は次元を持つ変数を表す。 h_0 は水深の代表値、 z 軸は鉛直上方を正にとり、水面は $z = \zeta(x, y, t)$ 、底面は $z = -h(x, y)$ で表されるものとする。 x, y 軸は静水面上にとる。カッコは x と y 方向のベクトル成分を表す。すなわち、 $\mathbf{u} = (u, v)$ 、 $\mathbf{x} = (x, y)$ である。二次元のベクトルオペレータ $(\partial/\partial x, \partial/\partial y)$ は ∇ で表される。

水深方向に積分された平均流速 $\bar{\mathbf{u}}$ と波の振幅 η で記述された運動量方程式と連続の式は次のようになる。

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + (\bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla) \bar{\mathbf{u}} + \nabla \eta = \frac{1}{2} h \frac{\partial}{\partial t} \nabla \{ \nabla \cdot (h \bar{\mathbf{u}}) \}$$

$$- \frac{1}{6} h^2 \frac{\partial}{\partial t} \nabla (\nabla \cdot \bar{\mathbf{u}}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla \cdot [(h + \eta) \bar{\mathbf{u}}] = 0 \quad (2)$$

底面が一様勾配の場合には、 $h = \alpha x$ とおくと、 x 方向に進行する波に対して式(1), (2)はそれぞれ

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{3} \alpha^2 x^2 \frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial x^2 \partial t} + \alpha^2 x \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x \partial t} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \{ (\alpha x + \eta) \bar{u} \} = 0 \quad (4)$$

となる。

ここでは、図-1~3に示すように底面が一様勾配ではないので、式(1), (2)をそのまま差分化して計算することにする。

差分化はPeregrineに従う。解法は陰解法である。まず、式(2)を使って $\eta_{r, s+1}$ の仮の値 $\eta_{r, s+1}^*$ を求める。

$$\frac{\eta_{r, s+1}^* - \eta_{r, s}}{\Delta t} + (h_r + \eta_{r, s}) \frac{u_{r+1, s} - u_{r-1, s}}{2 \Delta x}$$

$$+ u_{r, s} \left[\frac{\eta_{r+1, s} - \eta_{r-1, s} + h_{r+1} - h_{r-1}}{2 \Delta x} \right] = 0 \quad (5)$$

ここで、 r は x 方向のステップ、 s は時間ステップで、 $u_{r, s} = u(r \Delta x, s \Delta t)$ である。

次に、 $u_{r, s+1}$ を求めるために、運動量方程式(1)を使う。

$$\frac{u_{r, s+1} - u_{r, s}}{\Delta t}$$

$$+ u_{r, s} \frac{u_{r+1, s+1} - u_{r-1, s+1} + u_{r+1, s} - u_{r-1, s}}{4 \Delta x}$$

$$+ \frac{\eta_{r+1, s+1}^* - \eta_{r-1, s+1}^* + \eta_{r+1, s} - \eta_{r-1, s}}{4 \Delta x}$$

$$= \frac{1}{2} h_r \frac{h_{r+1} u_{r+1, s+1} - 2 h_r u_{r, s+1} + h_{r-1} u_{r-1, s+1}}{\Delta x^2 \Delta t}$$

$$- \frac{1}{2} h_r \frac{h_{r+1} u_{r+1, s} - 2 h_r u_{r, s} + h_{r-1} u_{r-1, s}}{\Delta x^2 \Delta t}$$

$$- \frac{1}{6} h_r^2 \frac{u_{r+1, s+1} - 2 u_{r, s+1} + u_{r-1, s+1}}{\Delta x^2 \Delta t}$$

$$- \frac{1}{6} h_r^2 \frac{u_{r+1, s} - 2 u_{r, s} + u_{r-1, s}}{\Delta x^2 \Delta t} \quad (6)$$

最後に、 $\eta_{r, s+1}$ の補正值を求めるために再び連続の式を用いる。

$$\frac{\eta_{r, s+1} - \eta_{r, s}}{\Delta t} + (h_r + \eta_{r, s})$$

$$\times \frac{u_{r+1, s+1} - u_{r-1, s+1} + u_{r+1, s} - u_{r-1, s}}{4 \Delta x}$$

$$+ \frac{u_{r, s+1} + u_{r, s}}{2} \left[\frac{\eta_{r+1, s} - \eta_{r-1, s} + h_{r+1} - h_{r-1}}{2 \Delta x} \right] = 0 \quad (7)$$

式(6)はimplicitの差分であるため、以下のようにして解いている⁷⁾

式(6)を書き直すと次のようになる。

$$d_{r, s} u_{r-1, s+1} + e_{r, s} u_{r, s+1} + f_{r, s} u_{r+1, s+1} = g_{r, s} \quad (8)$$

ここに、

$$d_{r, s} = \frac{1}{2 \Delta x} \left(-\frac{u_{r, s}}{2} - \frac{h_r h_{r-1}}{\Delta x \Delta t} + \frac{h_r^2}{3 \Delta x \Delta t} \right)$$

$$e_{r, s} = \frac{1}{\Delta t} \left(1 + \frac{2 h_r^2}{3 \Delta x^2} \right)$$

$$f_{r, s} = \frac{1}{\Delta x} \left(\frac{u_{r, s}}{4} - \frac{h_r h_{r+1}}{2 \Delta x \Delta t} + \frac{h_r^2}{6 \Delta x \Delta t} \right)$$

$$g_{r,s} = \frac{u_{r,s}}{\Delta t} - u_{r,s} \frac{u_{r+1,s} - u_{r-1,s}}{4\Delta x} - \frac{\eta_{r+1,s+1}^* - \eta_{r-1,s+1}^* + \eta_{r+1,s} - \eta_{r-1,s}}{4\Delta x} + \frac{h_r(h_r - 3h_{r+1})u_{r+1,s} + 4h_r^2 u_{r,s}}{6\Delta x^2 \Delta t} + \frac{h_r(h_r - 3h_{r-1})u_{r-1,s}}{6\Delta x^2 \Delta t} \quad (9)$$

である。

式(8)を $u_{r,s+1}$ について解くと

$$u_{r,s+1} = -\frac{f_{r,s}}{e_r} u_{r+1,s+1} + \frac{g_{r,s} - d_{r,s} u_{r-1,s+1}}{e_r} \quad (10)$$

と書ける。ここで、 $u_{r-1,s+1}$ を既知であると考え、式(10)を

$$u_{r,s+1} = -E_{r+1,s+1} u_{r+1,s+1} + F_{r+1,s+1} \quad (11)$$

と書く。ここに、

$$E_{r+1,s+1} = \frac{f_{r,s}}{e_r} \quad (12)$$

$$F_{r+1,s+1} = \frac{g_{r,s} - d_{r,s} u_{r-1,s+1}}{e_r} \quad (13)$$

である。

さらに、式(8)において $r \rightarrow r+1$ とすれば

$$d_{r+1,s} u_{r,s+1} + e_{r+1} u_{r+1,s+1} + f_{r+1,s} u_{r+2,s+1} = g_{r+1,s} \quad (14)$$

となる。したがって、式(14)に式(11)を代入すると

$$u_{r+1,s+1} = -E_{r+2,s+1} u_{r+2,s+1} + F_{r+2,s+1} \quad (15)$$

が得られる。ここに、

$$E_{r+2,s+1} = \frac{f_{r+1,s}}{e_{r+1} - d_{r+1,s} E_{r+1,s+1}} \quad (16)$$

$$F_{r+2,s+1} = \frac{g_{r+1,s} - d_{r+1,s} F_{r+1,s+1}}{e_{r+1} - d_{r+1,s} E_{r+1,s+1}} \quad (17)$$

である。以下同様にして次の一般式が導かれる。

$$u_{r,s+1} = -E_{r+1,s+1} u_{r+1,s+1} + F_{r+1,s+1} \quad (18)$$

$$E_{r+1,s+1} = \frac{f_{r,s}}{e_r - d_{r,s} E_{r,s+1}} \quad (19)$$

$$F_{r+1,s+1} = \frac{g_{r,s} - d_{r,s} F_{r,s+1}}{e_r - d_{r,s} E_{r,s+1}} \quad (20)$$

ここに、 $d_{r,s}$ 、 e_r 、 $f_{r,s}$ 、 $g_{r,s}$ はそれぞれ式(9)で表される値である。

式(1)、(2)を満たす理論解としては、孤立波とクノイド波が知られている。以上の計算法が妥当かどうかをチェックするために、一様水深上の孤立波の伝播を計算する。図-17はその結果であるが、孤立波は変形せずに進行しているのでここで用いる計算法は妥当であると考えられる。図-18は、一様水深の部分から $i=1/20$ の斜面を通して初期水深の $1/2$ の海底地形上を進行する孤立波の変形を計算したものである。孤立波の波高 H と初期水深 h_0 の比が 0.1 で、浅い部分の水深 h_1 と初期水深 h_0 の比が $1/2$ の場合である。孤立波は斜面上から変形を始め、浅くなった部分で二つのソリトンに分裂している。石田・中島⁸⁾ は、Mei and LeMéhauté⁹⁾ の方法と特性曲線法を組み合わせた計算法で、種々の地形上を進行する波の変形を計算している。この中では図-18と同じ地形上の孤立波の変形計算が行われているが、両者を比較するとほぼ同一の結果となっている。

以上より、ここで示した計算法でソリトン分裂が計算できることを確認することができた。このプログラムを用いて段波性津波の変形を計算し、実験値と比較することにする。

計算を実行する場合に与える初期条件は実測値を用いる。図-1の測点⑩を沖側境界とし、この点における水位変化を初期値として計算を進める。海底地形 I の測点⑩での第一波の水位変動の例を図-19に示す。水位変動は図-19の値をそのまま与え、流速は長波の関係を表す次式

$$u^* = \sqrt{\frac{g}{h^*}} \eta^* \quad (21)$$

を用いる。ここに、*は有次元の変数であることを示す。式(21)を沖側の一様水深 h_0 で無次元化すると、

$$u = \sqrt{\frac{h_0}{h^*}} \eta \quad (22)$$

となり、一様水深部では $u = \eta$ となる。

以上の方法で計算された水位変動と実測値を比較した

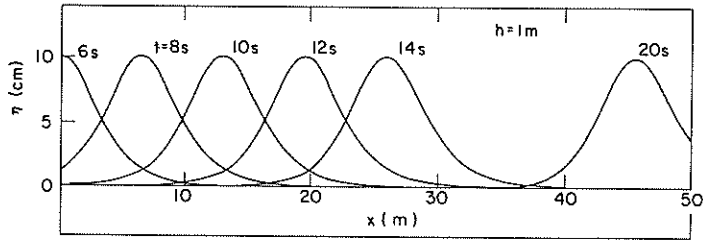


図-17 一様水深上の孤立波の計算

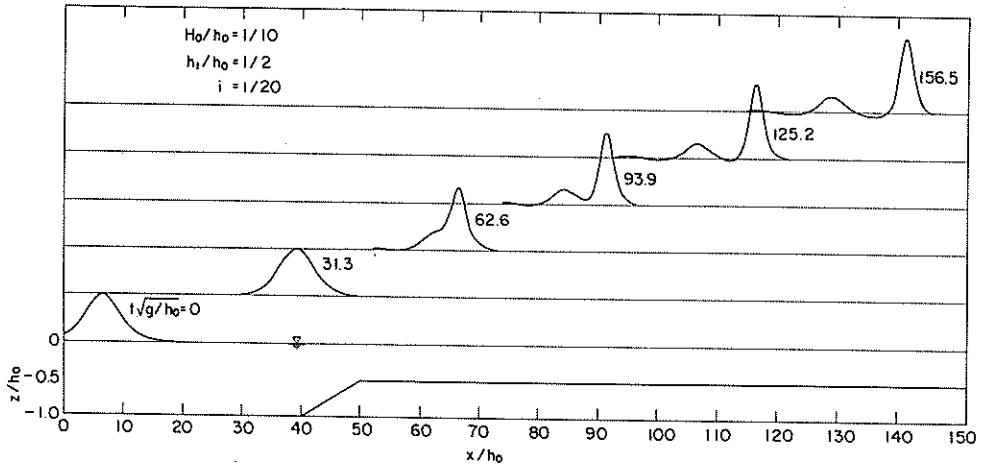


図-18 ステップ地形上の孤立波の変形

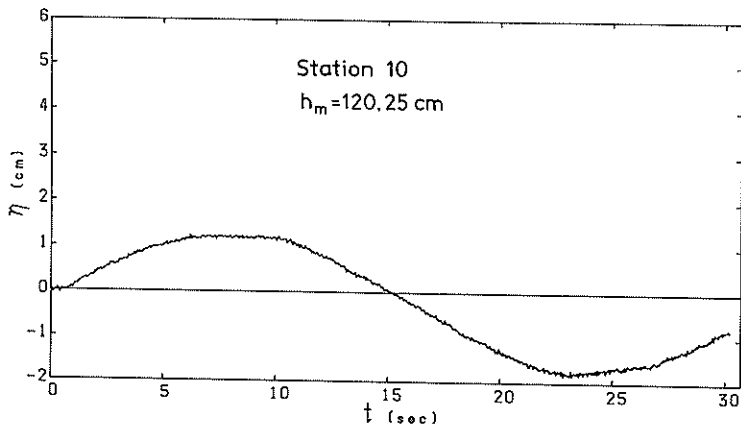


図-19 測点10の波形 (海底地形 I, $T = 8$ 分)

ものが図-20~23である。図はそれぞれ測点⑥から③までに対応している。測点⑥では、水位が上がり始めるところでやや差が見られるが、最大水位に達してから下がるころでは両者はよく一致している。さらに浅くなった測点⑤(図-21)では、計算値のほうにソリトンの分裂が見え始めているが、実測値のほうは前面がかなり段波状に切り立っているもののまだソリトンの分裂は見られない。図-22の測点④に到って実測値に小さなソリトンの発生が見られる。計算値ではソリトンは二つ発生し、実測値よりもかなりなだらかな形である。図-23の測点③では実測値でもソリトンが二つに分裂しているが、計算値の方がやはりなだらかで、両者の形には違いが見られる。これは、式(1)で表される運動量方程式が、もともとアーセル数 U_r が、 $U_r \approx 1$ の条件のもとに導かれているので、孤立波とクノイド波のような波には適用できても、本実験のようにアーセル数が 10^2 のオーダーのように非常に大きい場合には十分な精度が得られないことを示

している。

もう一例、実験の計算例を以下に示す。図-24に測点⑩の波形記録を示す。波の振幅は、図-19の実験Ⅰの場合より約4倍大きい。この波形を境界条件として与えてそれ以後の津波の伝播を計算したのが図-25~29である。測点⑩で既に波状性が現れていて、伝播とともにそれが大きくなっている。図-27あたりから、実測によるソリトンの波形はとがった形になってゆくが、計算値のほうは実験Ⅰのときと同様にやや丸くなった形となり、しかもピークの出現時刻は実測値よりも遅くなる。また、図-28から29にかけて第一波目のソリトンは砕波しているが、計算ではそのまま発達を続けている。実験ⅠとⅢに共通しているが、水位が上昇し始める時刻は実測と計算でぴったり一致している。しかしソリトンの波形は実測値より計算値のほうがかなり幅広いものとなっている。

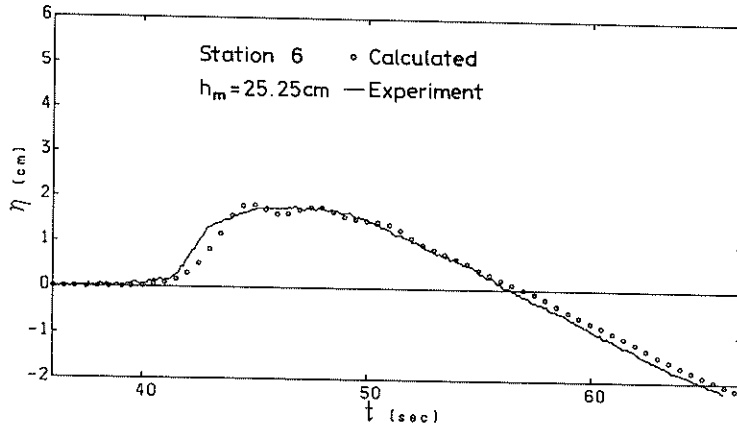


図-20 測点6の波形(海底地形Ⅰ, $T = 8$ 分)

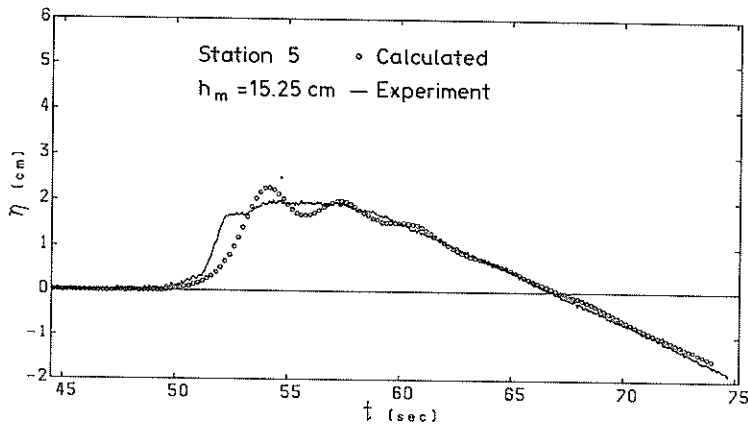


図-21 測点5の波形(海底地形Ⅰ, $T = 8$ 分)

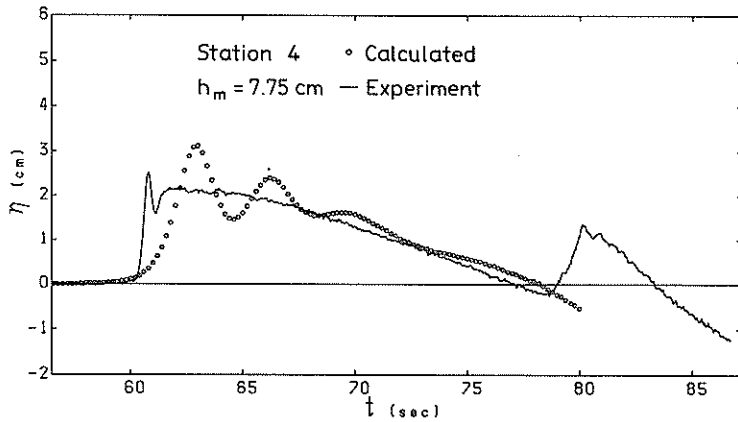


図-22 測点4の波形(海底地形I, $T = 8$ 分)

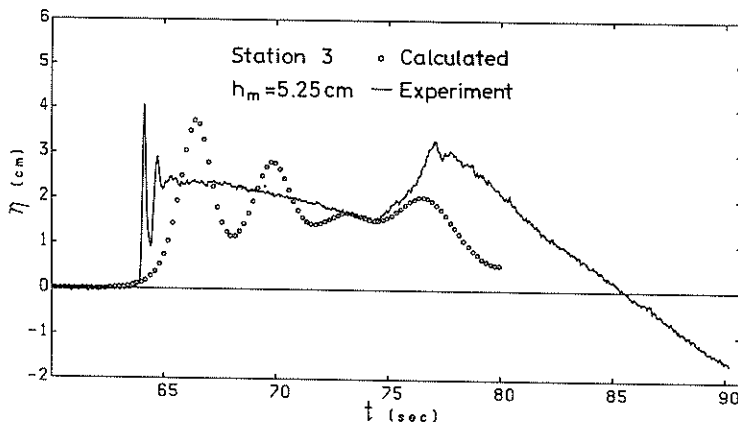


図-23 測点3の波形(海底地形I, $T = 8$ 分)

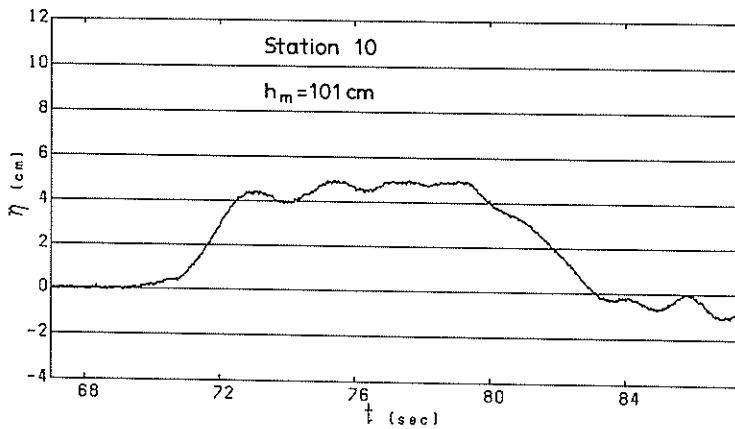


図-24 測点10の波形(海底地形Ⅲ)

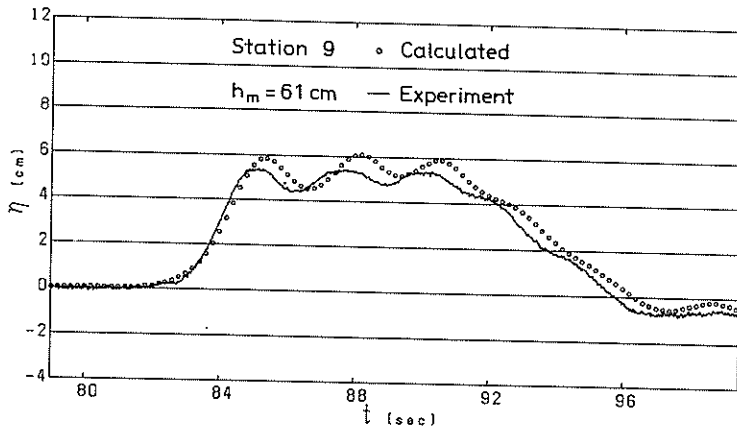


図-25 測点9の波形(海底地形Ⅲ)

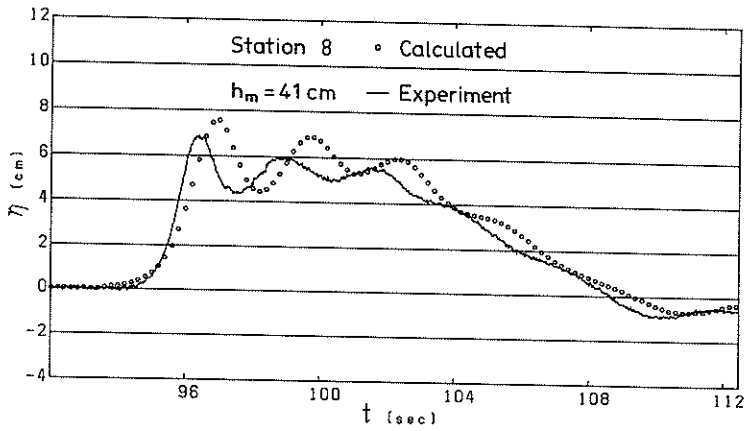


図-26 測点8の波形(海底地形Ⅲ)

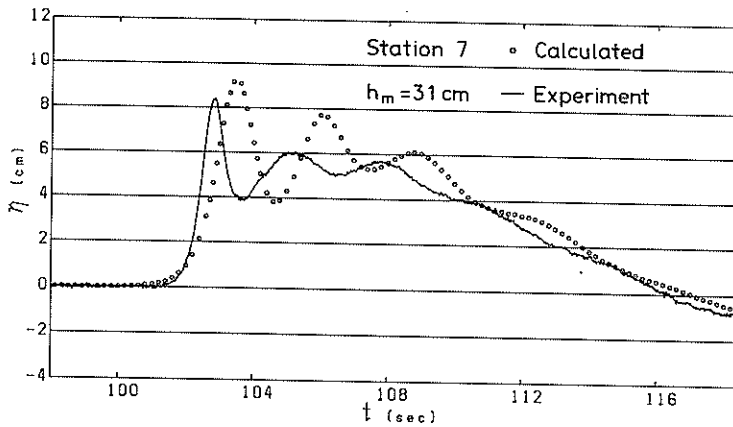


図-27 測点7の波形(海底地形Ⅲ)

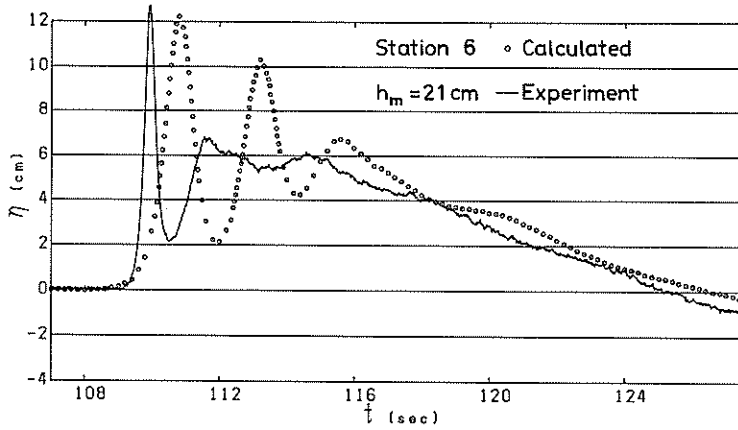


図-28 測点6の波形(海底地形Ⅲ)

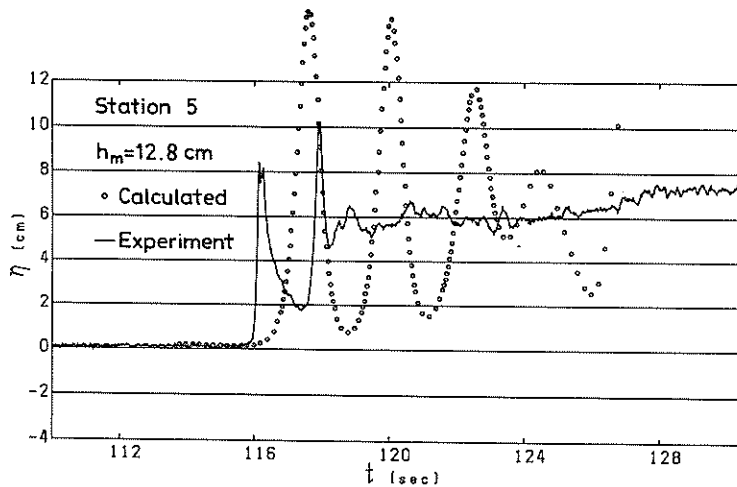


図-29 測点5の波形(海底地形Ⅲ)

第一波目のソリトンの高さを 図-30 に示すように η_{crest} とする。この最大水位の高さが津波の伝播とともにどう変わるかを調べたのが図-31である。水深が浅くなるにつれて、 η_{crest} は大きくなり、砕波する直前までは実測値と Peregrine の式とはほぼ同じ値が得られる。同図には、浅海長波の変形によく用いられる Green の式による関係もあわせて示してあるが、実験値と比べると

かなり小さな値となっている。Green の式は次式で表される。

$$\frac{a}{a_0} = \left(\frac{h_0}{h}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{b_0}{b}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (23)$$

ここに、 a_0 、 h_0 、 b_0 はそれぞれ基準点における長波の振幅、水深、水路の幅であり、 a 、 h 、 b はそれぞれ任意点における長波の振幅、水深、水路の幅である。

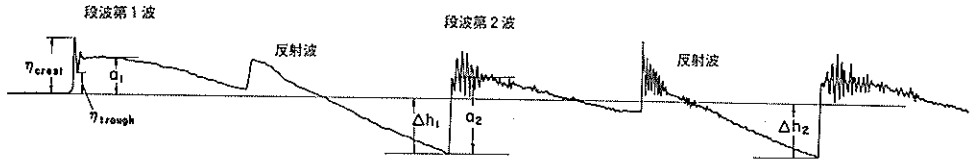


図-30 波形記録の例

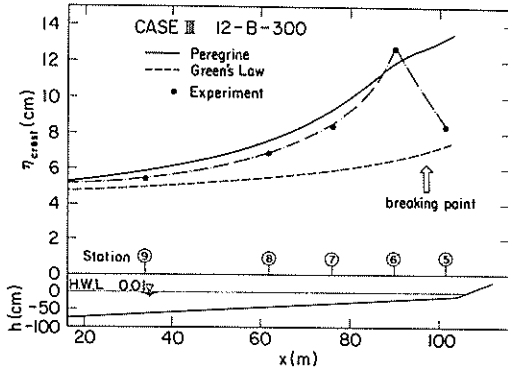


図-31 ソリトンの最大水位 η_{crest} の発達

(2) 段波の計算

図-30 に示す段波第一波の高さ a_1 が伝播とともにどのように変化するかを調べる。既に、底面の主要な勾配が $1/200$ のケースについて、周期 10 分と 8 分の津波の段波第一波の高さは岸の有限振幅長波の変形理論で求めることができることを示した。¹⁰⁾

本実験でも、岸の理論があてはまるかどうかを調べてみることにする。まず、岸の計算式を次に示す。

$$h = \left(\frac{\sqrt{1+M_0}-1}{\sqrt{1+M}-1} \right)^{\frac{4}{3}} \left(\frac{6\sqrt{1+M_0}-1}{6\sqrt{1+M}-1} \right)^{\frac{6}{5}} \quad (24)$$

ここに、 $h (= h^*/h_0^*)$ は原点での水深 h_0^* で無次元化された水深、 $M (= a/h)$ は波の無次元振幅 (a^*/h_0^*) と無次元水深の比、 M_0 は $h = 1$ での M の値である。

図-32 は、実験 I の段波第一波の高さの水深による変化を示している。図中の記号は、 M_0 がとる値によって分けてあるが、式(24)を表す実線の曲線とはよい一致を示している。図中の破線は Green の法則を表すが、明らかに実験値よりも大き目である。また、図中の岸の理論曲線からわかるように、初期の無次元振幅 M_0 が小さいほど振幅の増幅する割合は大きくなっている。

図-33 は、先に実施した海底勾配が $1/200$ 、津波の周期が 10 分の例¹⁰⁾であるが、この場合にもほぼ岸の理論に従って段波第一波の高さが大きくなってゆくのが認められる。

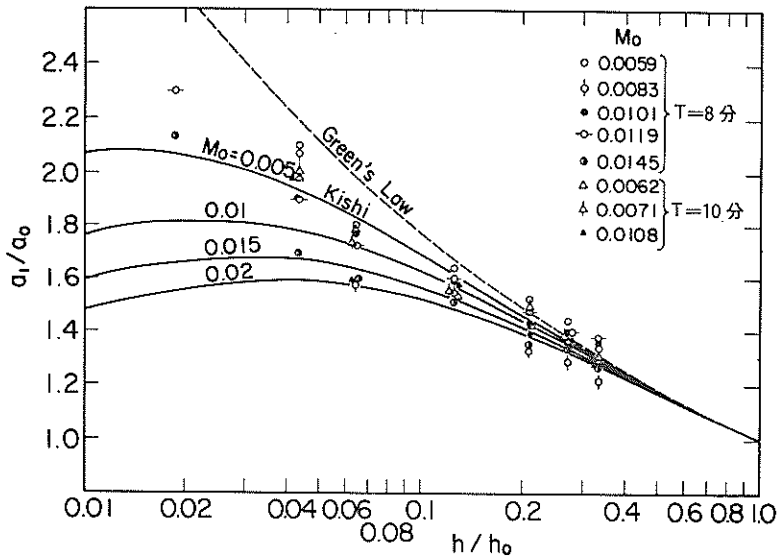


図-32 a_1/a_0 と h/h_0 の関係 (海底地形 I)

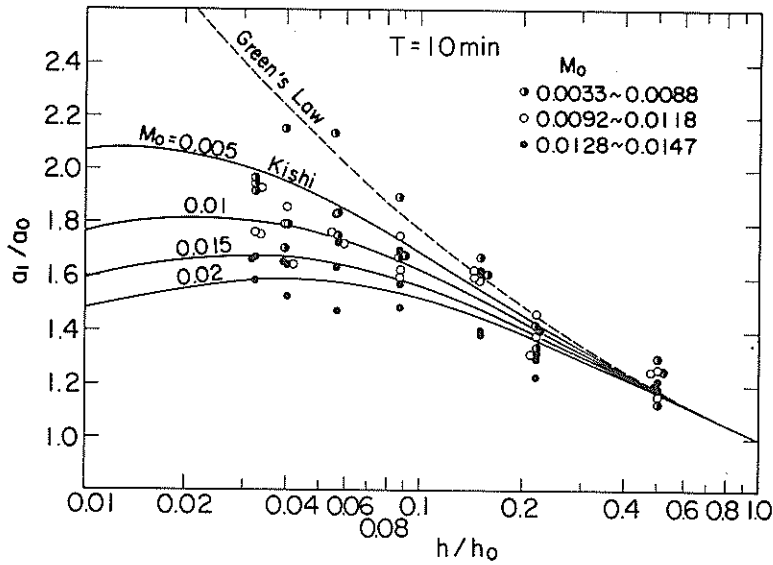


図-33 a_1/a_0 と h/h_0 の関係 (海底地形 A)

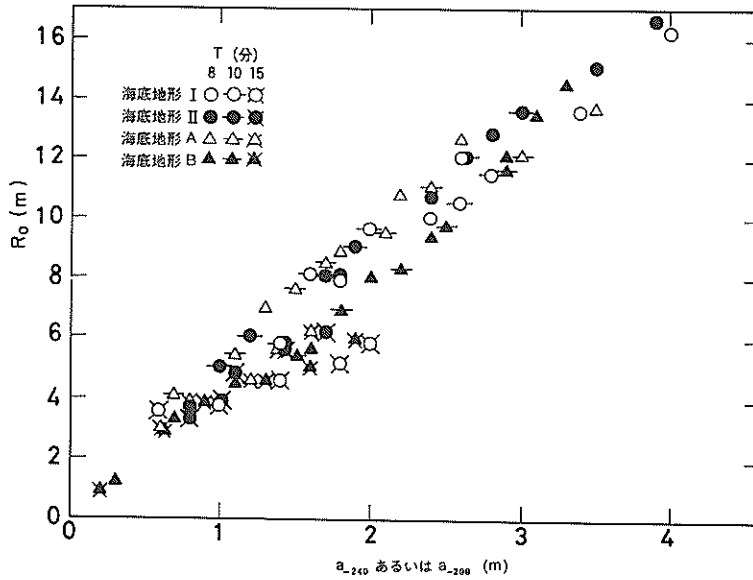


図-34 構造物がないときの沖波振幅と遡上高の関係 (楕型縮尺 1/200)

5. 構造物による津波低減効果

5.1 構造物がない場合の遡上高

(1) 沖波振幅と遡上高の関係

図-34 は縮尺 1/200 の実験による沖波振幅 a_{-240} と構造物がないときの遡上高 R_0 の関係 (海底地形 I, II) を示したものである。ここに、遡上高は静水状態での海面すなわち +0.5m を基準としたときの高さである。また、

先に実施した沖側一定水深部が -200m のときの結果 (海底地形 A, B)²⁾ もプロットしてある。海底地形 A は -200 ~ -100m 区間を 1/10 勾配, -100 ~ 5m 区間を 1/200 勾配, -5m 以浅を 1/20 勾配の斜面で続けた地形, 海底地形 B は -200 ~ -5m 区間を 1/50 勾配, -5m 以浅を 1/20 勾配の斜面で続けた地形である。この両地形の場合、いずれも -200m 地点での振幅 a_{-200} を沖波振幅としており、グリーンの法則によれば、 a_{-200} は a_{-240} の約

1.05倍となる。この違いを考慮する必要があるが、その差は小さく、この結果によれば海底地形による遡上高の変化は大きくないことがわかる。ただ、どの海底地形にも共通して言えることは、周期15分の津波だけ他の周期のもの比べて振幅が増加しても遡上高はそれほど大きくならないことである。

鶴谷他¹⁰⁾は、第一波の相対遡上高 R_0/a_0 と初期アーセル数 $U_{r_0} (= 2 a_0 L_0^2 / h_0^3)$ との関係を次のように求めた。

$$\frac{R_0}{a_0} = 13.5 U_{r_0}^{-0.188} \quad (25)$$

ここに、 a_0 、 L_0 、 h_0 は、それぞれ段波第一波の一樣水深部での振幅、波長、水深である。

式(25)には途中の地形の影響が考慮されていないので、一般性はないが、特定の海底地形に対して周期に関係なく適用できる。図-35は、本実験の相対遡上高と初期アーセル数の関係をプロットしたものである。実験値はばらついているけれども、初期アーセル数に対する相対遡上高の関係は、津波の周期によらなくなっている。図中の直線(細線)は式(25)を表しているが、今回の実験値はこれよりやや小さく目であり、ほぼ次の関係がある。

$$\frac{R_0}{a_0} = 12.2 U_{r_0}^{-0.188} \quad (26)$$

図-34の R_0 と a_{-240} あるいは a_{-200} の関係では地形による違いははっきり出ていなかったが、図-35の相対遡上高は図-34の各点の勾配をとっているために違いがややはっきりと出てきたものと思われる。ただ、初期アーセル数の大きいところでは地形による違いはデータのばらつき範囲内で、ほとんど差はなくなる。

特定の地形に対して上に示したような関係を求めてお

けば、周期の違う津波に対しても簡単に遡上高を予測することができる。

(2) -50 m 地点での振幅と遡上高の関係

図-36は海底地形I, II(縮尺1/200)、海底地形III(縮尺1/50)の実験III, IVの結果をあわせて、 a_{-50} と R_0 の関係をプロットしたものである。前述したように、海底地形IとIIでは傾向的な違いはない。また、周期8分、10分ではほとんど差はないけれども、周期15分の条件ではやや遡上高が小さくなる傾向が認められるのは図-34の場合と同様である。図中の実線による曲線は周期8, 10分の条件に対する平均的関係を示したものである。これによると、 $a_{-50} = 1.7$ m のときに $R_0 = 6$ m、 $a_{-50} = 3$ m のときに $R_0 = 10$ m となる。

海底地形III(縮尺1/50)の結果に対しては振幅、遡上高ともに'を付けて、実験I, IIの場合と区別して表す。図中、平均的関係を破線による曲線で示しているけれども、 a_{-50} が2.0m程度以上のところで伸びが鈍化する傾向にあり、海底地形I, IIの周期8, 10分に比べると遡上高がやや小さくなる。たとえば、 $R_0' = 10$ m となる a_{-50} の値は3.4mで0.4mだけ a_{-50} より大きい。これは造波能力の制限から振幅の大きい条件ほど波の峰から急激に水位の底下が起きているために生じたものである。また、図中には実験IVの結果もあわせて示してある。図中に示してある周期の波の一山のみを与えた実験であるが、各周期とも海底地形I, IIの a_{-50} と R_0 の関係とはほぼ同様の傾向を示している。図-37は同じ遡上高を与える海底地形III(縮尺1/50)のときの振幅 a_{-50}' と海底地形I, II(縮尺1/200)のときの振幅 a_{-50} の平均的関係を示したものである。これによって、 a_{-50} の値から同じ遡上高を与える a_{-50}' の値を知ることができる。

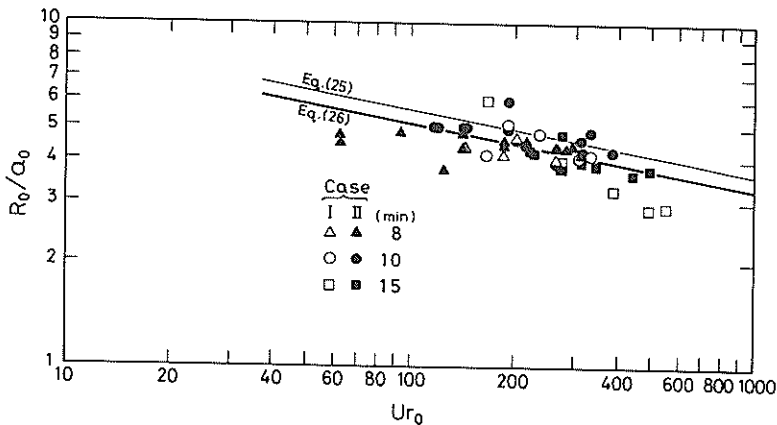


図-35 相対遡上高と初期アーセル数の関係

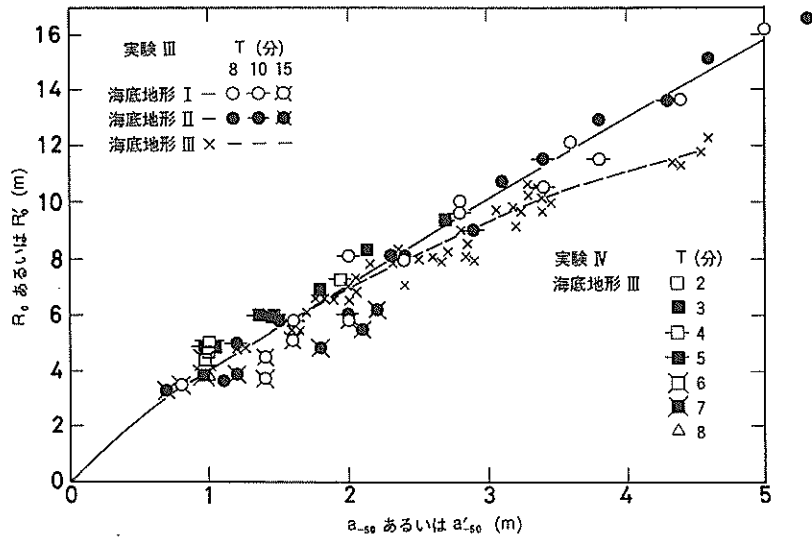


図-36 構造物がないときの-50 m地点での振幅と遡上高の関係

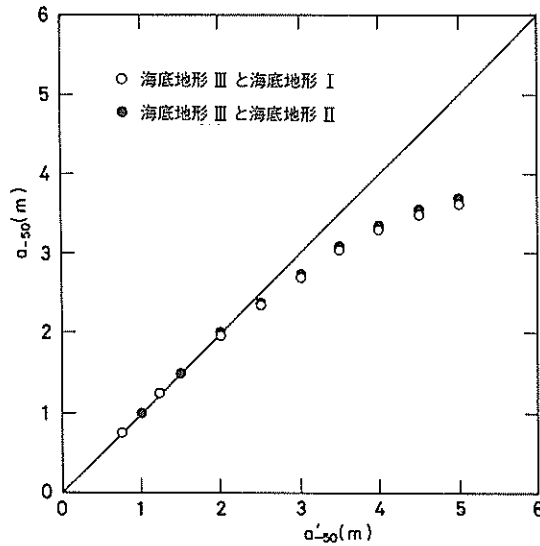


図-37 同じ遡上高となる a'_{50} と a_{-50} の平均的關係

5.2 離岸堤の効果

(1) 津波振幅と遡上高の関係

図-38は a_{-50} と離岸堤を設置したときの遡上高 R の関係をまとめて示したものである。離岸堤はすべて開口部なしの場合(実験Ⅲ)である。図中、海底地形Ⅰ、Ⅱおよび海底地形Ⅲに対する構造物なしのときのそれぞれの平均的關係(R_0 および R'_0)、および離岸堤の場合の各条件ごとの平均的關係を曲線で示している。海底地形Ⅰ、Ⅱの場合の離岸堤は捨石を用いたものであるが、構造物なしの場合と比べて遡上高が平均的に小さくなっていることが認められる。海底地形Ⅲの場合は-4 m地点に天端

高+2.5 mの消波ブロック積み離岸堤を設けたとき、さらに-5.7 m地点に天端高+3.5 mの消波ブロック積み離岸堤を設けて二重離岸堤としたときの結果である。単一離岸堤の場合には消波ブロックの重量を変えた結果や、中詰め石を設けたときの結果を示しているが、遡上高はこれらの条件によってはほとんど変化しない。海底地形Ⅰ、Ⅱ(縮尺1/200)の場合と比較すると、海底地形Ⅲの遡上高が小さくなっている。これは捨石と消波ブロックによる違いというよりも、縮尺の違いおよび入射津波の波形の違いと考えられる。二重離岸堤の遡上高はさらに小さくなっており、本実験条件に対しては効果が大き

い。

以上は開口部のない場合の離岸堤についての結果であるが、次に開口部がある場合について考察する。

図-39は実験IVにおける離岸堤Iの開口部なしとありの場合の a'_{50} と遡上高 R' (離岸堤)の関係を示したものである。実験IVでは周期の効果を見るために $T=3$ 分を主として、周期を2分から8分まで変えている。図中の一点鎖線は、図-38の実験IIIにおける離岸堤で得られた関係をそのまま示したものである。実験IIIで用いた津波の周期は図-14, 15でもわかるように約3分であるので、図-39の開口部なしの $T=3$ 分のデータと良く一致して

いる。他の周期については造波機の制約から広い範囲の a'_{50} についての検討ができなかったが、図によれば周期の違いによる遡上高の変化はそれほど大きくない。津波の振幅 a'_{50} が2mの場合の遡上高は7mであるが、開口部なしの離岸堤では遡上高は64%の4.5mに減少する。しかし、開口部があると遡上高は6.5mとなり、構造物なしの場合の93%程度となるにすぎない。

図-40は実験IVにおける二重離岸堤の開口部なしとありの場合の a'_{50} と R' (離岸堤)の関係を示したものである。一点鎖線はやはり図-38の二重離岸堤の関係を示している。開口部なしの二重離岸堤の場合の遡上高は、

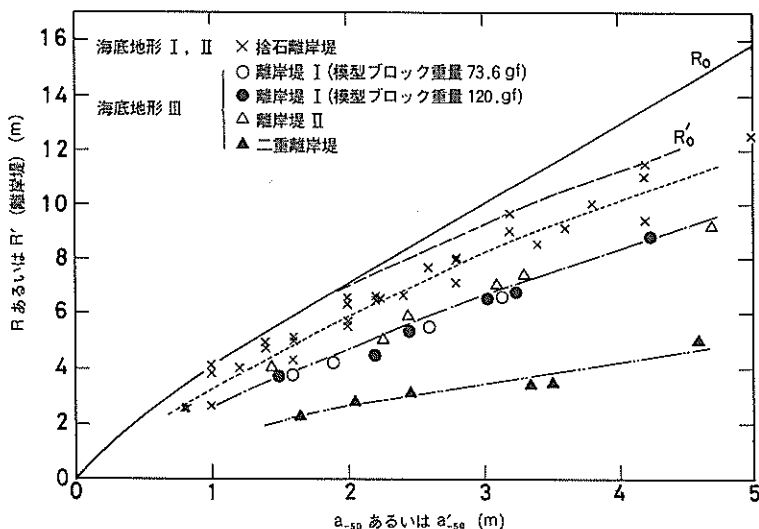


図-38 離岸堤があるときの遡上高(実験III)

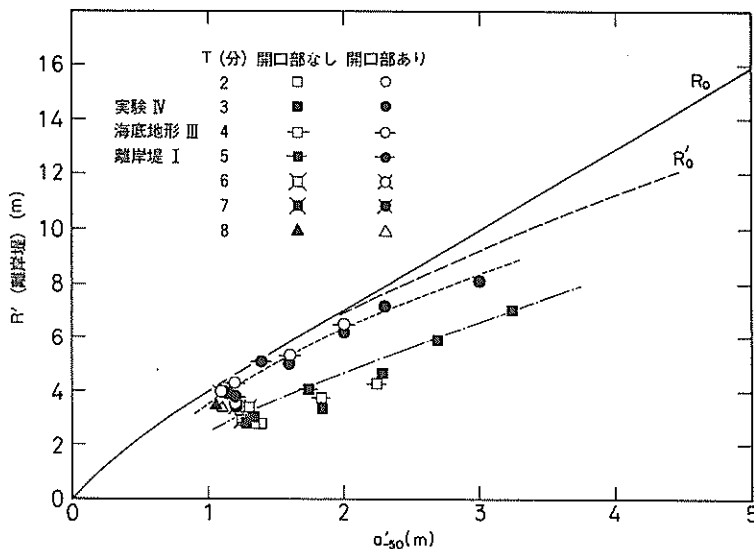


図-39 離岸堤があるときの遡上高(実験IV)

$\alpha_{-50} = 2 \text{ m}$ に対し 2.5 m と構造物なしの場合の R' の 35% 程度であり、開口部のある場合には 6.0 m となり、85% 程度となる。

図-41 は水深 50 m での津波の振幅を約 1.0 m にして、各周期ごとの遡上高 R' をプロットしたものである。構造物なしの場合の周期が 5 分から 6 分にかけて遡上高が急

に減少しているのは、このあたりを境にして周期が長いところでは段波性津波から重複波的津波に移行するためである。さらに波高が大きくなれば、6 分以上の周期でも段波性津波となり、構造物の効果は図-41 に見られるよりも更に大きくなるはずである。

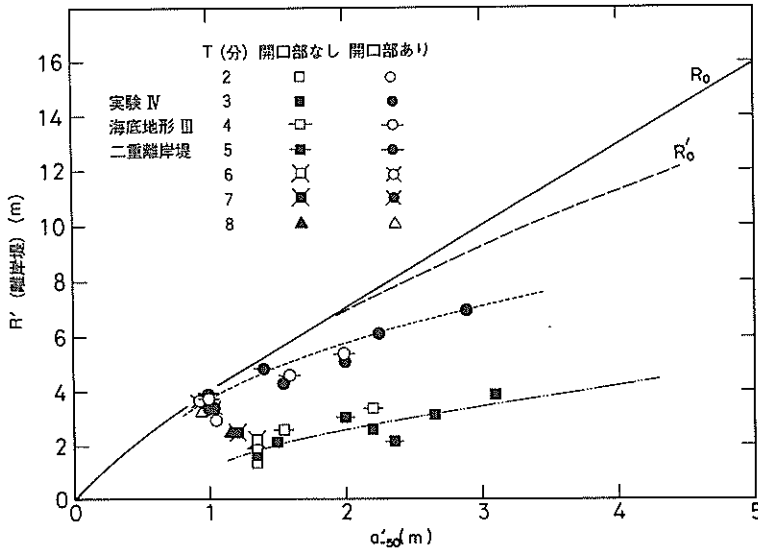


図-40 二重離岸堤があるときの遡上高(実験IV)

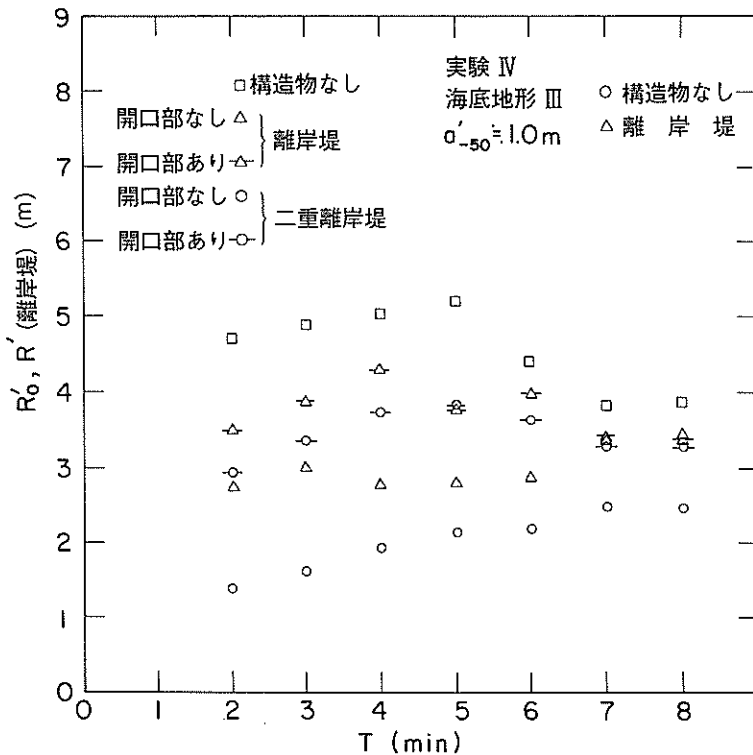


図-41 周期による遡上高の違い(実験IV)

(2) 離岸堤の有無による遡上高の比較

図-42は同じ入射津波に対する離岸堤なしの場合の遡上高と離岸堤ありの場合の遡上高の関係を示したものである。海底地形Ⅲについては開口部なしの実験Ⅲのデータのみプロットしてある。先に実施した海底地形Aに対する結果(-5m地点に天端高+2.0mの直立捨石堤を設けたもの)もあわせて示してある。まず、海底地形Ⅰ,Ⅱ(縮尺1/200)の結果を見ると、周期によって傾向の違いが認められ、周期15分では効果がほとんどないかやや大きいに対し、10分、8分と周期が短くなるにつれて効果

が大きくなっている。図-41で説明したように、周期と振幅の関係によって段波性津波か重複波性津波のどちらかのタイプになることから、周期15分の場合でもさらに振幅が大きくなった場合は段波性津波に近くなり、周期8分や10分と同じように構造物の効果が効いてくるものと思われる。ただその場合でも構造物のある場合とない場合の差は大きくないものと推察される。

一方、海底地形Ⅲ(縮尺1/50)の結果は、単一離岸堤の場合遡上高の小さい範囲では周期8分の結果よりやや小さく、大きい範囲ではやや大きい傾向を示している。二重離岸堤の場合には、明らかに小さい傾向にあり、離

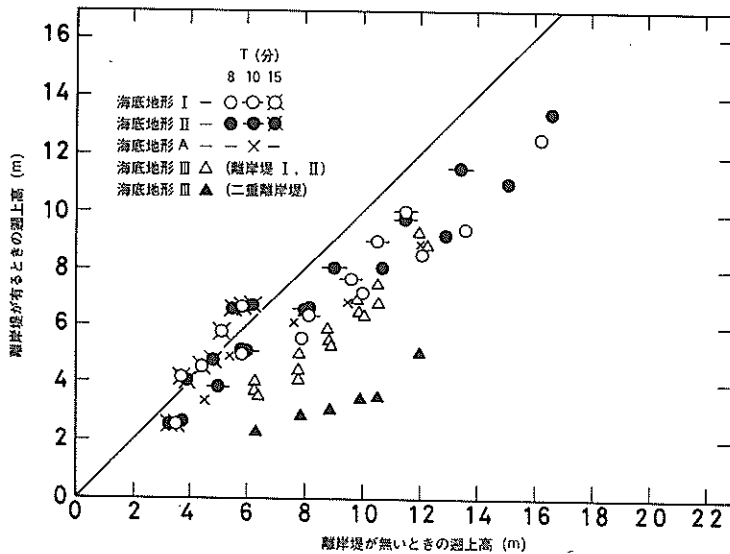


図-42 離岸堤の有無による遡上高の比較(実験Ⅲ)

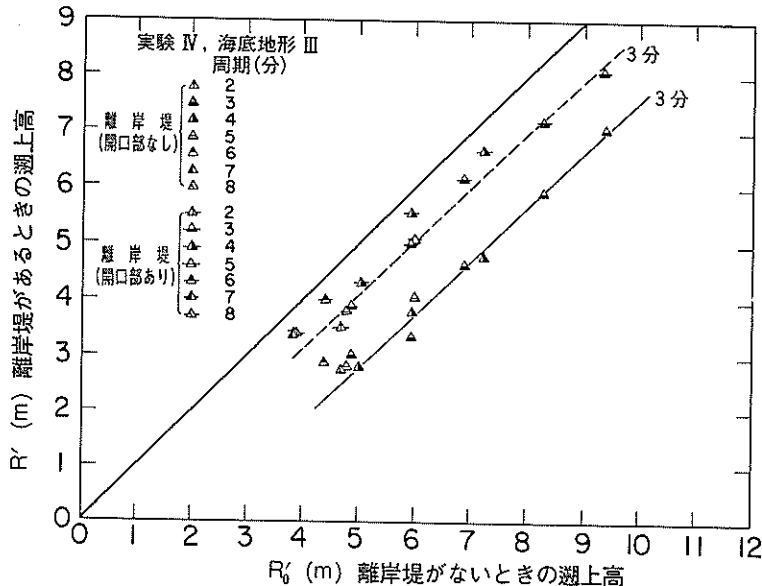


図-43 離岸堤の有無による遡上高の比較(実験Ⅳ, 開口部ありとなし)

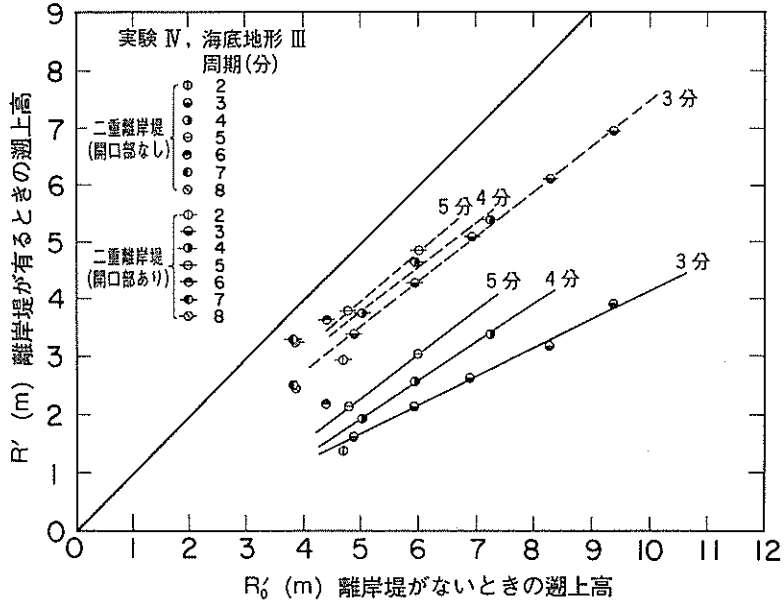


図-44 二重離岸堤の有無による遡上高の比較(実験IV, 開口部ありとなし)

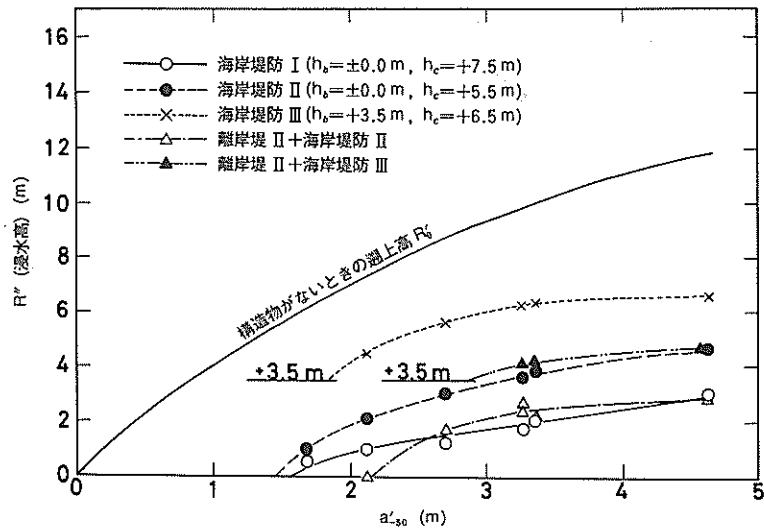


図-45 海岸堤防があるときの浸水高

岸堤なしの場合の遡上高が10mのとき3.5m程度まで小さくなっている。ただし、これは開口部のない場合の結果であることを注意する必要がある。

図-43は実験IVの離岸堤の開口部のある・なしによる遡上高の違いを示したものである。周期3分のケースでは直線的傾向が認められるので、実線と破線で示した。離岸堤がないときの遡上高が6mのときに、開口部なしの離岸堤があるときの遡上高は3.7mまで低下する。しかし、開口部があるとこれが5mまで大きくなる。つま

り、実際の離岸堤の効果はこの場合には83%程度に遡上高を減少させるにとどまる。しかも、周期は3分の場合であり、これよりも周期の大きな津波に対しては、離岸堤の効果はより小さくなる傾向にあると考えられる。さらに、図-43において、離岸堤の効果が遡上高の大小すなわち入射津波の大小に関係なく一定値を示すのは次のように考えられる。すなわち、津波の振幅が大きくなれば、離岸堤内部や開口部でのエネルギーロスが大きくなって遡上高はより減少するはずである。しかし、離岸堤

を越流する水量も多くなるはずであるから、これらの効果が複合して図-43のように津波の振幅の大小にかかわらず一定の減少が見られたものと考えられる。

図-44は二重離岸堤について、図-43と同様の整理をしたものである。この場合には二重離岸堤の効果が津波の周期によって変化する傾向が明りょうに認められる。離岸堤がない場合に遡上高が6mの津波に対して、開口部のある二重離岸堤のない場合の遡上高は、周期3分の津波に対して72%、4分で75%、5分で80%に減少する。ただし、この周期よりも長い津波に対しては離岸堤の効果はさらに小さくなると予想される。

5.3 海岸堤防の効果

海岸堤防は不透過構造で、そこで津波の侵入を阻止するものであるため、天端高さえ十分であればその効果は明らかである。ここでは、海底地形Ⅲ（縮尺1/50）の実験結果に基き、津波振幅と堤防背後の浸水高の関係について述べる。

図-45は横軸に-50m地点での振幅 a'_{-50} をとって、各種の海岸堤防に対する浸水高 R' を、構造物なしの場合の遡上高とともに示したものである。ここに、浸水高 R' は越流して堤防背後に滞留した水面の基準面からの高さとして定義しており、遡上高の基準とは0.5mだけ異なる。また、堤背後の地形は1/20勾配の斜面であるため、越流水の量 Q は次式のように表される。

$$Q=10(R'-h_b)^2 \quad (27)$$

ここに、 h_b は海岸堤防基面の基準面からの高さである。

図中の白丸と黒丸印は、それぞれ $h_b = \pm 0.0m$ 地点に設置した場合の $h_c = +7.5m$ と $5.5m$ のときの結果を表す。 $h_c = +5.5m$ の場合には、 $a'_{-50} = 1.5m$ 付近から越流を始め、 $h_c = +7.5m$ の場合には $a'_{-50} = 1.6m$ 付近から越流を始める。構造物なしのときの遡上高が10mの津波すなわち $a'_{-50} = 3.3m$ に対して、浸水高は前者の場合3.7m、後者の場合2.0m程度である。×印は設置位置を

表-1 各構造の浸水高（基準面上）および越流限界振幅

	浸水高（基準面上±0.0m上）		
	$R'_0 = 6m$ ($a'_{-50} = 1.6m$)	$R'_0 = 10m$ ($a'_{-50} = 3.3m$)	越流限界振幅 (m)
離岸堤Ⅰ,Ⅱ（開口部なし） ($h_b = -4.0m, h_c = +2.5m$)	+4.5	+7.6	—
離岸堤Ⅰ（開口部あり） ($h_b = -4.0m, h_c = +2.5m$)	+5.9	+9.5	—
二重離岸堤（開口部なし）	+2.6	+4.1	—
二重離岸堤（開口部あり）	+5.6	+7.9	—
海岸堤防Ⅰ ($h_b = \pm 0.0m, h_c = +7.5m$)	ほぼ越流限界	+2.0	1.6
海岸堤防Ⅱ ($h_b = \pm 0.0m, h_c = +5.5m$)	+0.7	+3.7	1.5
海岸堤防Ⅲ ($h_b = +3.5m, h_c = +6.5m$)	越流せず	+6.3	1.8
離岸堤Ⅱ+海岸堤防Ⅱ	越流せず	+2.5	2.2
離岸堤Ⅱ+海岸堤防Ⅲ	越流せず	+4.1	2.9
防波堤 ($h_b = -15.0m, h_c = +6.5m$)	越流せず	+3.6	2.1

背後に下げて、 $h_b = +3.5\text{m}$ 地点に $h_c = +6.5\text{m}$ の海岸堤防を設けた場合で、越流を始める振幅は $a_{L50} = 1.8\text{m}$ 程度であるが、 $a_{L50} = 3.3\text{m}$ の津波に高して浸水高は 6.3m 程度と高い。

一方、白三角印は $h_b = \pm 0.0\text{m}$ 、 $h_c = +5.5\text{m}$ の海岸堤防の前 -4m 地点に離岸堤を設けたときの結果で、越流を始める振幅は $a_{L50} = 2.2\text{m}$ と大きくなり、 $a_{L50} = 3.3\text{m}$ に対する浸水高は 2.5m で $h_c = +7.5\text{m}$ の海岸堤防だけの場合よりやや大きい。黒三角印は海岸堤防を $h_b = +3.5\text{m}$ 地点まで後退させ、 $h_c = +6.5\text{m}$ としたときの結果であるが、越流を始める津波振幅 a_{L50} は 2.9m 程度であり、離岸堤のない×印の場合と比べると離岸堤の効果が明らかである。ただし、離岸堤には開口部を設けていない。

5.4 各構造の比較

本章では離岸堤、海岸堤防があるときの遡上高あるいは浸水高について述べたが、これらの構造物がないときの遡上高が 6.0m および 10.0m となる津波に対する浸水高および海岸堤防については -50m 地点での越流限界振幅を海底地形Ⅲ（模型縮尺 $1/50$ 、実験Ⅲ、Ⅳ）の結果に基づきまとめて示したのが表-1である。ただし、離岸堤に対する浸水高は H.W.L. 上の遡上高に 0.5m を加えて基準面上の値に換算したものである。また、表には防波堤の場合の値もあわせて示してある。

6. まとめ

大陸棚における津波の変形過程と海岸構造物の津波防護効果について、実験を中心にして述べてきたが、概要をまとめると以下のとおりである。

大陸棚におけるきわめて緩勾配の地形上を進行する津波は、沖合においては正弦波形であっても浅いところを進行するに従って前面が切り立った段波状になる。この段波の先端部は波状性を帯び、いくつかのソリトンに分裂する。このソリトンの分裂を Peregrine の理論で計算し、実測値と比較したところ、段波第一波目のソリトンの先端部は実測値のほうが計算値よりもかなり急勾配で立ち上がっており、ソリトンの波形自体は余り良く合わなかった。しかし、ソリトンの最大水位は砕波する直前まで理論値と実測値はほぼ同じ値で増加した。

ソリトン直後の段波の平均高さの水深に対する変化は、岸の有限振幅長波の変形理論では説明できることが確認された。

構造物の津波防護効果についてまとめると、以下のとおりである。

- (1) 離岸堤消波ブロックの重量の違い (9.2tf , 15tf) および断面構造の違い (離岸堤Ⅰ、Ⅱ) は遡上高には

ほとんど影響を与えない。

- (2) 離岸堤Ⅰ、Ⅱの開口部のない場合、構造物がないときの遡上高が 6.0m ($a_{L50} = 1.6\text{m}$) と 10.0m ($a_{L50} = 3.3\text{m}$) となる津波に対して基準面からの遡上高はそれぞれ 4.5m と 7.6m に低減する。開口部がある場合 (離岸堤Ⅰ、開口率 25%) には、この遡上高がそれぞれ 5.8m と 9.5m に大きくなる。ただし、これらの値は基準面からの遡上高であるので、H.W.L. 上からの値に直せば構造物がないときの遡上高が 6.0m と 10.0m となる津波に対してそれぞれ 5.3m と 9.0m に低減したことになる。
- (3) 二重離岸堤の場合には、開口部のない場合(2)と同様の津波に対して遡上高はそれぞれ 2.6m と 4.1m になる。開口部がある場合 (開口率岸側 25% 、沖側 50%) には、それぞれ 5.6m と 8.0m であるが、H.W.L. 上ではそれぞれ 5.1m と 7.5m に低減したことになる。
- (4) 海岸堤防、離岸堤+海岸堤防および防波堤のケースでは、構造物がないときの遡上高が 6.0m となる津波に対して海岸堤防ⅠとⅡのケースを除いて越流せず、海岸堤防Ⅰではほぼ越流限界、海岸堤防Ⅱでは基準面上の浸水高が 0.7m であった。また、構造物がないときの遡上高が 10.0m となる津波に対して、浸水高が最も小さかったのは海岸堤防Ⅰで $+2.0\text{m}$ 、最も大きかったのは海岸堤防Ⅲで $+6.3\text{m}$ であった。

以上の結果は実験ⅢとⅣに基づくものであるが、実験Ⅲは周期約3分の一山の波に相当する波で行ったものである。離岸堤の開口部の効果を調べた実験Ⅳについては周期を $2\sim 8$ 分まで変えているが、造波機のスロークの制約から周期3分以上の波の振幅を大きくすることができず、この点についてはまだ十分な検討ができていない。したがって、ここで述べた結論は周期3分を中心として、せいぜい $4\sim 5$ 分程度の周期の津波に対してのものであることに注意する必要がある。すなわち、この程度の周期の津波の遡上高は、 $7, 8$ 分以上の周期の津波と比べて構造物の影響をより強く受けると考えられるので、周期の影響は更に別途詳しく検討する必要がある。

なお、離岸堤については消波ブロックの安定性を実験時に観察したが、 -4m 地点の離岸堤単独の場合、 9.2tf 相当のブロックは $a_{L50} = 1.5\text{m}$ 程度から被害が現れ、 $a_{L50} = 2.0\text{m}$ 程度で被害率 5% となった。また、 15tf 相当のブロックでは、 $a_{L50} = 2.0\text{m}$ 程度から被害が発生し始め、 $a_{L50} = 3.5\text{m}$ 程度で被害率 5% に達する。ただし、中詰捨石の上に 15tf の消波ブロックをかみ合わせよく整積みした場合には、 $a_{L50} = 4.6\text{m}$ でも安定であった。また、

二重離岸堤の沖側離岸堤に用いた 37tf 相当の消波ブロックは $\alpha_{L_{50}} = 4.6\text{m}$ でも安定であった。

本実験のうち、実験 I, II, III は第一港湾建設局の依頼で昭和 59 年度の国土総合開発事業調整費調査の一部として行われたものであり、実験に必要な資料の収集その他で第一港湾建設局企画課および新潟調査設計事務所の各位の御協力を得ている。実験 IV は当所で昭和 60 年度に追加したものである。また、堀江 毅海水浄化研究室長には、数値計算プログラム作成の際に有益な助言を頂いた。さらに、防波堤研究室の吉本靖俊研究官、木村克俊研究官、水理研究室の柳嶋慎一研究官には実験の準備、図面の作成その他の協力を得た。ここに記して深く感謝致します。

(1986 年 3 月 31 日受付)

参 考 文 献

- 1) 例えば、福井芳郎・白石英彦・中村 充・佐々木泰雄：津波の研究(I)，第9回海岸工学講演会講演集，1962，pp. 44～49。
- 2) 谷本勝利・高山知司・村上和男・村田 繁・鶴谷広一・高橋重雄・森川雅行・吉本靖俊・中野 晋・平石哲也：1983年日本海中部地震津波の実態と二・三の考察，港湾技研資料No.470，1983，299p。
- 3) 梶浦欣二郎：孤立波の陸上翹上 - 砕波と底面摩擦効果の検討 - ，東北大学津波防災実験所研究報告，第1号，昭和59年3月，pp. 49～62。
- 4) Peregrine, D.H. : Long waves on a beach, *J. F. M.*, Vol. 27, part 4, 1967, pp. 815～827。
- 5) 後藤智明：アーセル数が大きい場合の非線形分散波の方程式，土木学会論文集 第351号/II-2，1984年11月，pp. 193～201。
- 6) 後藤智明：北秋田海岸における日本海中部地震津波の計算に関する検討，第30回海岸工学講演会論文集，1983，pp. 233～236。
- 7) 堀江 毅：沿岸海域の水の流れと物質の拡散に関する水理学的研究，港湾技研資料 No.360，1980，222p。
- 8) 石田 啓・中島光浩：特性曲線法による非線形長波の変形特性について，第28回海岸工学講演会論文集，1981，pp. 59～63。
- 9) Mei, C. C. and B. Le Méhauté : Note on the equation of long waves an uneven bottom, *J. Geophys. Res.*, Vol. 71, No. 2, 1966, pp. 393～400。
- 10) 鶴谷広一・中野 晋・一戸秀久：浅海における津波の変形と翹上に関する実験的研究 - 1983年日本海中部地震津波の検討 - ，第31回海岸工学講演会論文集，1984，pp. 237～241。

港 湾 技 研 資 料 No551

1986.6

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発 行 所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印 刷 所 株式会社 ポートサイド印刷

Published by the Port and Harbour Research
Institute Nagase, Yokosuka, Japan.