

# 海岸構造物の津波遡上抑制効果に関する実験的研究

Hydraulic Model Study on Reduction of Runup of Tsunami by Coastal Structures

中村克彦\* 佐々木崇之\*\* 中山哲蔵\*

Katsuhiko Nakamura, Takayuki Sasaki, Akiyoshi Nakayama

## Abstract

The object of this investigation is to estimate viability of coastal protection facilities, fishing port construction and so on against tsunami runup. As the first step, we carried out a hydraulic experiment on a detached breakwaters and with no structure. Detached breakwaters were of permeable, impermeable and continuous impermeable varieties. Offshore distance, slope of runup zone and characteristics of tsunami were varied. As a result of the experiment, it was clarified tsunami runup was mainly influenced by the diffraction and that surface elevation around shoreline was influenced by the detached breakwaters and the slope of runup zone. As a whole, the effects of opening width and overflow were great.

Key words: Tsunami, hydraulic experiment, runup height, detached breakwater

## 1. はじめに

沿岸部には、漂砂対策等の様々な目的に応じて構造物が建設されているが、その多くは来襲波浪のエネルギーの減殺を目的とし、陸域を守るためや静穏な海域を確保するためである。よって、気象擾乱に伴う異常波浪時を対象として設計されており、津波に対してどのような影響を与えるかは明確でない。

このため、既存の海岸保全施設や漁港構造物等が津波遡上に対しどの程度防災効果を有するかを把握するため、実験及び数値計算によりこれを定量的に明らかにすることが必要である。今回の研究ではその第一段階として、海岸に離岸堤を設置した場合、津波の遡上や汀線付近の水位変化に与える影響を検討するとともに、陸上域の勾配がどのように影響するかに関して、実験による解明を図った。

## 2. 実験方法

実験は、図1に示す 9m × 34m の平面水槽において 1/200 スケールで行った。津波の造波には、真空ポンプを使用して津波造波装置内に水を吸い上げ、同装置上部にある開口板を開放する方法を用いた。海底床勾配は 1/30 であり、津波造波装置前面の水平部（最深部）の水深は 40cm である。遡上距離は、遡上面に直接設置した遡上計及び紙テープ上に印される水濡れ痕跡高により測定した。ただし、今回の報告で使用した値は、測定の誤差が小さかった紙テープによるものを用いた。遡上状況は、水槽上部からのビデオ撮影及び写真撮影により記録した。また、容量式波高計により、水槽水平部、構造物周辺部及び汀線における水位変化を 0.02 秒間隔で約 40 秒間測定した。本報告で用いた記号の説明は図2に示す通りである。実験ケースは、表1に示すように4種類の遡上面勾配に対し、構造物を3ケース、それらの離岸距離を3ケース、津波の種類を5ケース組み合わせて行った。津波の諸元は表2に示す通りである。津波 A 及び津波 B は、波高が同じで、水位上昇継続時間だけが異なるものである。津波 B、C、D 及び E は、水位上昇継続時間はほぼ同じで、波高は、E、D、C、B の順に大きい。これらの津

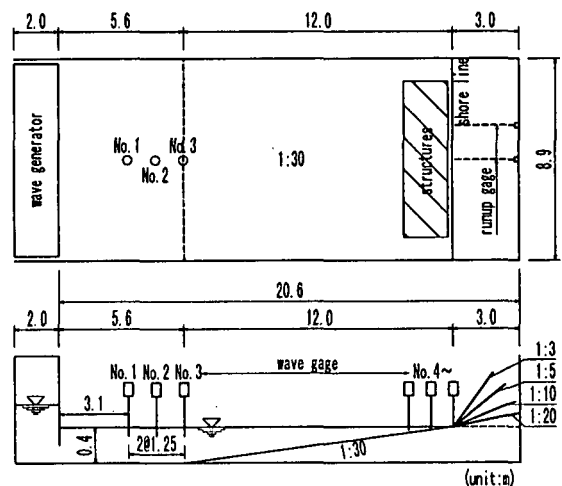


図1 実験施設

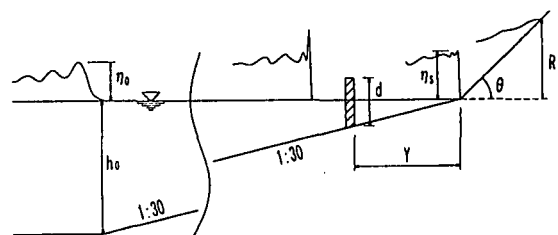


図2 記号の説明

\* 正会員 水産庁水産工学研究所漁港水理研究室 (314-0421 茨城県鹿島郡波崎町海老台)  
 \*\* 株式会社 アルファ水工コンサルタンツ

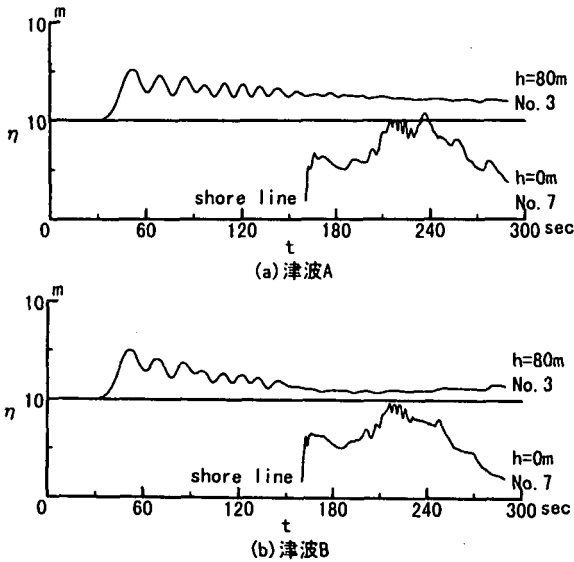


図3 津波A及び津波Bの波形

波は離岸堤設置位置で天端高の2.5～5倍程度の水位を示し、いずれのケースにおいても越流現象が顕著であった。参考として、津波A及びBの水槽水平部と汀線における時間波形を図3に示した。

各離岸堤の断面図及び平面配置は図4及び図5に示す通りである。開口部付透過堤には、フルードの相似則に従い20t型ブロックに相当する重量の砕石を用い、ナイロン製のネットで覆い固定した。開口部付不透過堤及び連続不透過堤には、木材を使用した。なお、本実験で用いた津波の波形は、いずれもピークが前部に偏った孤立波的なものである。本報告においては、第1波の津波の最低水位（静水面）から最高水位までの水面の差を波高とした。

### 3. 実験結果

#### 3.1 実験波

ここでの実験条件は離岸堤を設置していない場合のものである。

##### 3.1.1 実験波の波高変化特性

図6は、津波B,C及びEについて、水深変化に伴う波高変化の様子を示したものである。なお、横軸hは水深である。

首藤<sup>1)</sup>は、水路幅が変化しない場合の孤立波の変形について、 $\eta \propto h^{1/3}$  または  $\eta \propto h^1$  ( $\eta$ は任意点における最高水位)の関係を導き、斜面勾配と $\eta/h$ を用いて、 $\eta \propto h^{1/3}$ 、 $\eta \propto h^1$ の成立する範囲を示している。今回の実験では、海底勾配が1/30であるから、首藤の報告より $\eta \propto h^{1/3}$ と $\eta \propto h^1$ の境界は $\eta/h = 0.83$ となり、これらを図中に示した。

図6において、実験では途中計測していない区間があり、詳細な変形過程を比較することができないが、砕波点近傍では波高は水深の-1乗に比例することがわかる。また、 $\eta \propto h^{1/3}$ と $\eta \propto h^1$ の境界を与える $\eta/h=0.83$ も良い近似となっている。よって、本実験による津波の波高変

表1 実験ケース

遡上面 勾配	構造物諸元		津波 ケース	
	種類	離岸距離; Y 堤高; d		
1/20	無	-	5種	
	不透過堤 (開口部有)	90	6	各5種
		120	7	
		150	8	
	連続不透過堤 (開口部無)	90	6	各5種
		120	7	
150		8		
無限高不透過堤 (開口部有)	90	$\infty$	各2種	
	150	$\infty$		
1/10	無	-	5種	
1/5	透過堤 (開口部有)	90	6	各3種
		120	7	
1/3	不透過堤 (開口部有)	150	8	各5種
		90	6	
		120	7	
連続不透過堤 (開口部無)	150	8	各5種	
	90	6		
	120	7		
		150	8	

表2 津波ケース

津波ケース	諸元
A	$\eta_0 = 5.0\text{m}$ , 水位上昇継続時間やや長
B	$\eta_0 = 5.0\text{m}$
C	$\eta_0 = 8.0\text{m}$
D	$\eta_0 = 10.4\text{m}$
E	$\eta_0 = 13.4\text{m}$

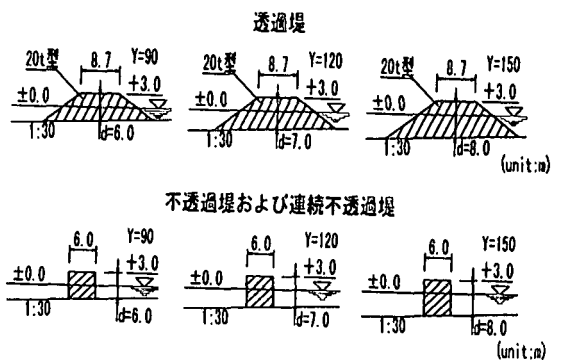


図4 離岸堤断面図

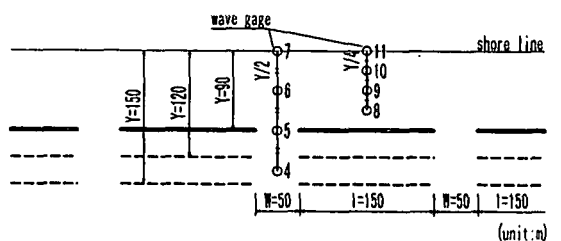


図5 開口部付離岸堤平面配置図及び波高計測点

化は首藤の式と対応しており、孤立波的な取り扱いが可能なことがわかった。

### 3. 1. 2 パラメータの設定

最初に、対象とする全ての津波に対しスペクトル解析 (MEM) を行った。エネルギーの集中している周波数帯の代表値として次式<sup>2)</sup>で定義される平均周波数  $\bar{f}$  を用いて平均周期  $T$  を求めた。その結果を表3に示す。

$$\bar{f} = \frac{m_1}{m_0} \quad (1)$$

$$m_n = \int_0^\infty f^n P(f) df \quad (2)$$

次に、表3に示した平均周期  $T$  から、 $L = \sqrt{g(h_0 + \eta_0)} \cdot XT$  として各々の仮の波長を求めた。これらの値を用いて次式に示す富樫ら<sup>3)</sup>の実験式から遡上高を算出し、図7に実験結果とともに示した。同式による計算値は一様勾配斜面での値を与える。

$$\log\left(\frac{R}{H}\right) = 0.421 - 0.095 \log\left(\frac{1}{L}\right) - 0.254 \left[ \log\left(\frac{1}{L}\right) \right]^2 \quad (3)$$

ただし、 $R$  は遡上高、 $H$  は斜面法先での波高、 $l$  は斜面法先から汀線までの水平距離である。

本実験においては、波形をあらわすパラメータとして、水槽水平部における静水面上の水位を波高  $H$ 、平均周期の半周期に相当する時間長さを周期  $T$  として用いた。このパラメータの取り方は、一山の正弦波形を用いて実験を行った富樫らの方法を参考にしたものである。

その結果、本実験により得た遡上高は、富樫らが明らかにした遡上高さの傾向と類似した傾向を示し、実験で用いた津波と遡上高の関係は先に述べたパラメータを適用することで把握できることがわかった。なお、今回行った実験においては、最大遡上高に著しく影響するほどの周期の違いは認められなかった。また、水位上昇継続時間が異なる津波 A 及び B に関しては、実験条件によらずほぼ同じ遡上高となった。

ここで図7では、遡上面勾配が急になるほど、遡上高が大きくなることがわかる。通常、遡上高は、汀線における水塊の運動エネルギーが、位置エネルギーに変換されることで決定されると考えられる。そのため、遡上面が緩い勾配であるほど、遡上距離

(遡上時間) が長くなる。実験結果では、勾配の違いにより最大で5~7倍の遡上距離の差が確認された。このことより、緩勾配の遡上面を遡上する波は、摩擦及び碎波によるエネルギー減衰時間が長くなり、その結果、急勾配のものよりも遡上高が低くなったものと考えられる。また、図7で示す傾向は、岩垣ら<sup>4)</sup>の孤立波の遡上に関する実験結果と一致している。岩垣らによると、遡上高に影響する要因として、遡上面での摩擦によるエネルギー減衰や、遡上面勾配が緩い場合には汀線近傍の波形が影響することなどを報告している。

### 3. 2 離岸堤の形状による低減効果の違い

図8は、離岸堤の形状による遡上高の違いについて遡上面勾配が1/3の場合を示したものである。図中の  $\bar{R}$  は離岸堤背後と開口部背後の遡上高を平均したものである。図からは、離岸堤を設置することにより遡上高が低減されることが分かる。このことは、いずれの勾配においても同様であった。なお、離岸堤の離岸距離の違いによ

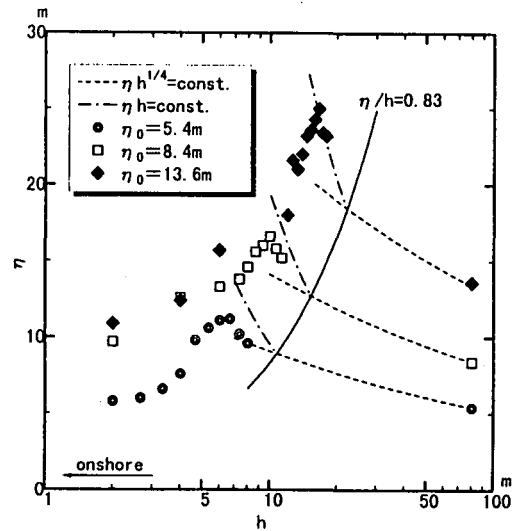


図6 離岸堤が無い場合の水深変化に伴う  $\eta$  の変化

表3 平均周波数及び平均周期

津波ケース	平均周波数(1/sec)	平均周期(sec)
A	0.0166	60.2
B	0.0122	82.0
C	0.0131	76.3
D	0.0127	78.7
E	0.0127	78.7

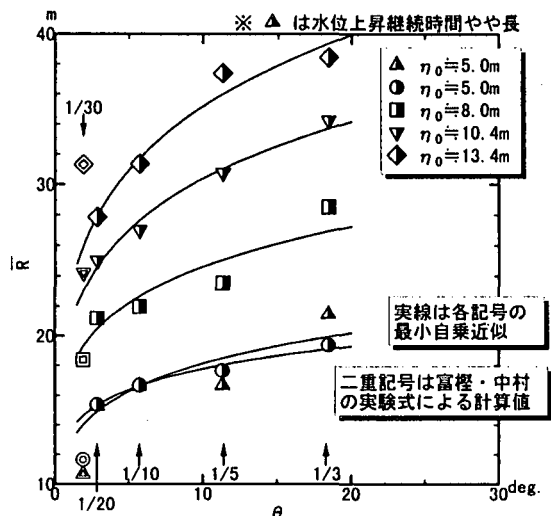


図7 離岸堤が無い場合の遡上面勾配変化に伴う  $R/H$  の変化

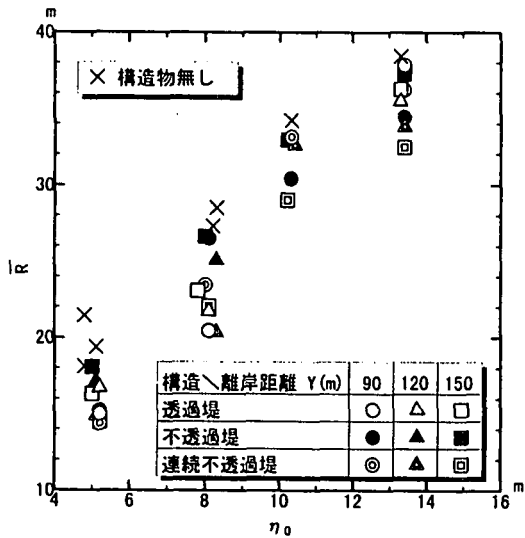


図8 遡上面勾配 1/3 の場合の  $\eta_0$  と  $\bar{R}$  の関係

る遡上高への影響は、今回の実験では顕著でなかった。

### 3. 2. 1 開口部の影響

離岸堤開口部の影響について、開口部付不透過堤と連続不透過堤を比較した。ただし、開口部付きのものは、その開口幅をいずれも 50m とした。その結果、遡上面勾配や、津波の種類に関係なく、連続不透過堤の方が遡上高低減効果は大きかった。このことより、遡上高に関しては、越流が著しいような場合においても、開口部から直接流入する津波の影響は大きいものと考えられる。

### 3. 2. 2 透過性の影響

開口部付離岸堤に関し、堤の透過性の有無が、遡上高に及ぼす影響について考える。本実験では不透過堤よりも透過堤の方が、その遡上抑制効果は大きなものとなった。これについては、本実験において越流現象が顕著であったため、透過堤内部を伝播する成分よりも、堤を越流する成分が卓越したものと考えられる。宇多ら<sup>10)</sup>も、堤体が透過性であれば、遡上高抑制効果は低くなるが、透過性の影響度は他の要因に比べて小さく、津波の波高が大きくなれば差はほとんど見られなくなる<sup>10)</sup>と述べている。また、離岸堤直前及び直後の水位変化を計測した結果、離岸堤前面の勾配や透過性の有無による反射波への影響は無く、直前の水位変化はほぼ同じであった。しかし、離岸堤背後における水位変化には大きな違いが見られた。この離岸堤背後における水位変化を示したのが図9である。不透過堤の場合、155秒付近における水位が高く、その後急減しているが、透過堤の場合、155～158秒までの水位が不透過堤より低く、その後の水位減少の割合も小さい。つまり、透過堤は越流初期段階における越流先端部の水位を低減したことで遡上高を抑制したものと考えられる。このことより、越流時には透過堤が不透過堤よりも粗度の大きいものとして作用したことが考えられる。ただし、これら離岸堤の断面の大きさが異なることや、越流現象が不安定であるため、より詳細な検討が必要である。

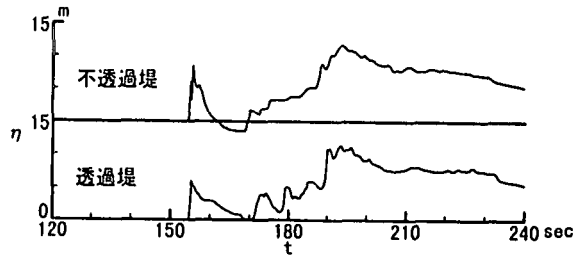
### 3. 3 回折現象の影響

開口部を有する離岸堤を設定した場合、その背後の遡上高にはある特有の沿岸方向分布が見られる。これは、津波が屈折や回折をしながら、遡上面上を進行するためである。ここでは、特に影響が大きいと考えられる回折現象に着目する。

図10は  $R_1$  を開口部背後の遡上高、 $R_2$  を離岸堤背後の遡上高とし  $\Delta R = R_2 - R_1$  を求め、 $\eta_0$  との関係を表したものである。図中の直線はそれぞれの記号別の回帰直線である。

図が示すように、全体的に  $\Delta R > 0$  となっており、離岸堤背後の方が、開口部背後よりも遡上高が高くなる傾向にある。また、遡上面勾配が比較的急な場合と、緩やかな場合とでは、 $\eta_0$  の変化に伴う  $\Delta R$  の変化の傾向が異なることがわかる。このことについては以下のように説明される。

図11は、開口部からの遡上現象及び回折の状況を、比較のため水槽の片側半分ずつを示したものである。実験条件は遡上面勾配を 1/20、対象波を津波 B とした。模型は越流が生じない天端高の大きい離岸堤（無限高堤）



(実験条件: 津波B, 離岸距離120m, 遡上面勾配1/10)

図9 離岸堤直後の水位変動

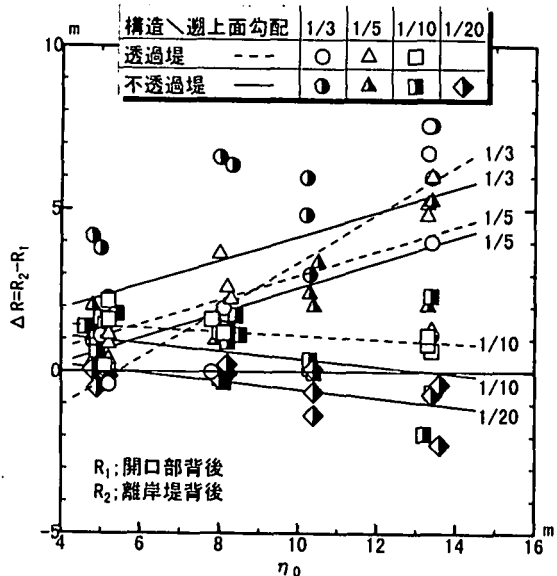


図10 離岸堤背後と開口部背後の遡上高の差の変化

を用いた。

図から、遡上面上では開口部からの水塊の流入が持続し、回折波の峰の重複を生ずる位置が移行することがわかる。時間経過に伴い、開口部背後（Ⅰ）、離岸堤背後（Ⅱ）、開口部背後（Ⅲ）の順に遡上高が高くなり、各々の段階において遡上高に沿岸方向分布を生じていることがわかる。つまり、回折現象の影響による最大遡上高の平面分布は、遡上距離に大きく影響される。具体的には、遡上面勾配が緩やかな場合、全体として遡上距離が長くなるため、開口部背後から離岸堤背後、再び開口部背後へと移行し、その途中で最大遡上高を生じる。逆に、遡上面勾配が急な場合には、全体として遡上距離が短くなるため、開口部背後から離岸堤背後までの移行途中で最大遡上高を生じる。それぞれの移行範囲内では $\eta$ 。が大きいほど移行が進むこととなる。これらの遡上面勾配や $\eta$ 。により決定される分布特性は、図 10 と一致する事が確認できた。

なお、無限高堤背後の最大遡上高と構造物を設置していない所での遡上高とを比較すると大きな差は見られなかった。これは、無限高堤により越流を完全に防いだため、堤前面における水位が高くなり、その結果、開口部にエネルギーが集中し、開口部からの流入エネルギーが大きくなったことが原因と考えられる。このことより、離岸堤等の構造物によって津波の越流を防ぐように天端高を大きくしても、開口部があるとその効果が著しく減少すると言える。

### 3. 4 離岸堤背後の水域における水位変化

#### 3. 4. 1 最大水位

表 4 は、離岸堤背後の水域（離岸堤と汀線の中央部）における津波 B の最大水位を表したものである。なお、開口部を有する透過堤及び不透過堤に関しては、開口部背後のデータを用いた。

離岸堤無しの場合や、開口部付きの透過堤及び不透過堤では、同じような水位を示すが、連続不透過堤のみがそれらより約 2m 程度低い水位を示した。これには、同条件における開口部付きの透過堤及び不透過堤の堤背後の水位が連続不透過堤とほぼ同じ値を示していることから、津波の直接の入射を抑えることにより、遡上面からの反射波とその重複による水位上昇を低減できることがわかる。しかしながら、連続不透過堤の場合、遡上面からの反射波が再び堤体で反射して、一時的な自由振動現象が生じ、最初のピーク時と同程度の水位が再び生じることがわかった。また、表 4 より、遡上面の勾配が急なほど最大水位の平均値が高い値を示す傾向がみられるが、その値が最大であったのは 2 番目に急である 1/5 勾配の時であった。この原因には、段波状津波の汀線付近における変形の影響が考えられるが、詳細は明らかでなく、今後さらに検討する必要がある。なお、水位のピーク値に関しては、離岸距離による差は見られなかった。

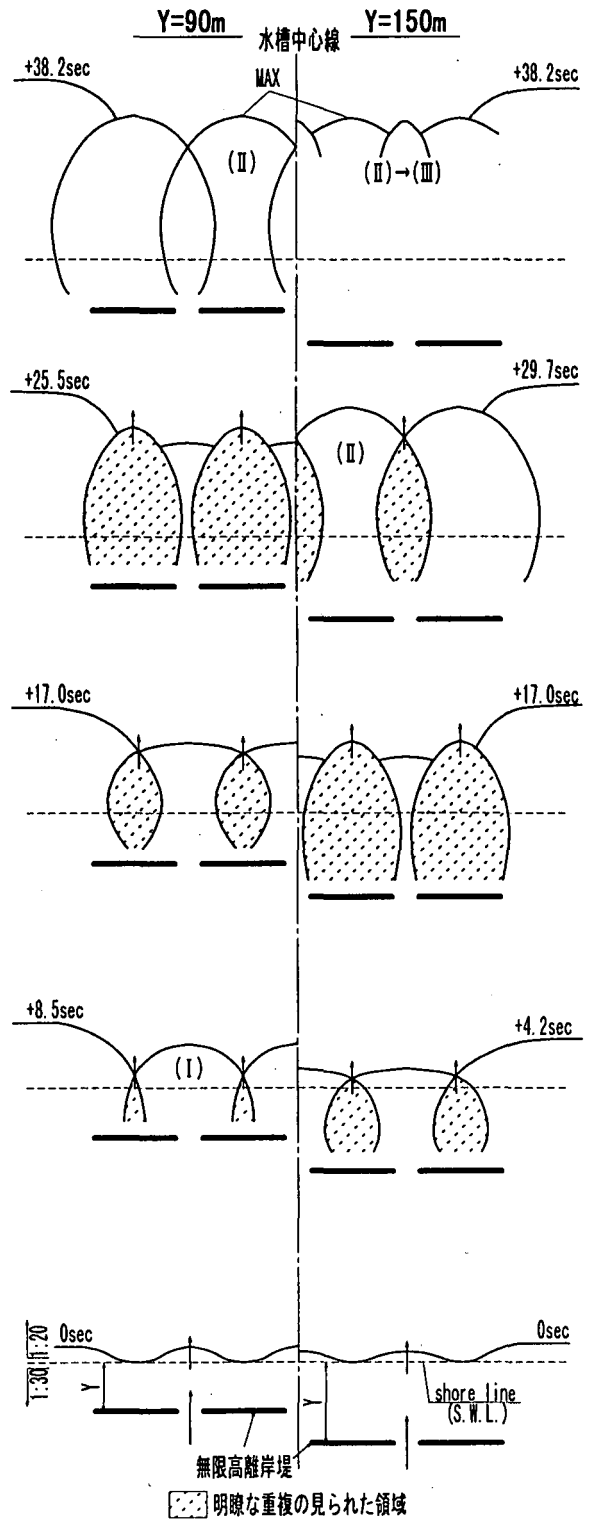


図11 越流を生じない場合の遡上状況(遡上面勾配 1/20)

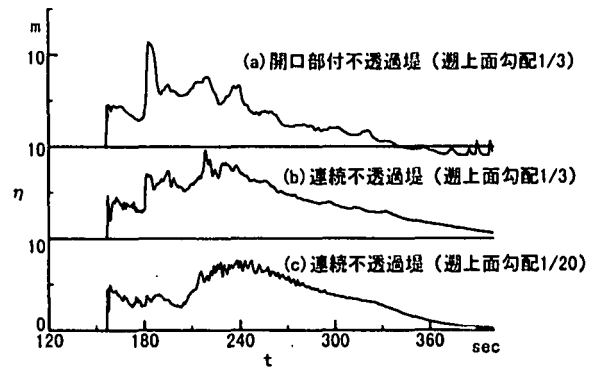
表4 汀線と離岸堤間の最大水位

離岸距離	構造物	透過堤	不透過堤	連続不透過堤	遡上面勾配	全ケース平均
	無し				1/3	10.28
90m	10.63	10.93	10.47	8.60	1/5	10.98
120m	-	10.35	10.47	8.44	1/10	9.63
150m	-	11.08	10.63	8.43	1/20	7.76

unit:m

### 3. 4. 2 水位変化特性

図12は、離岸堤の離岸距離が120mのケースで、汀線から60m地点における津波Bの水位変化である。まず、開口部の有無による影響であるが、図12(a)の開口部付不透過堤の場合、開口部からの直接の流入の影響を受け、遡上面からの反射波と重なる180秒過ぎに水位が大きく上昇する。逆に、図12(b)の連続不透過堤の場合、開口部がないため直接の流入はないが、先に述べたような一時的な自由振動の影響により、220秒前後で1回目のピークと同程度かそれ以上の水位上昇が見られる。遡上面勾配の影響としては、最も緩い1/20勾配の場合、急な場合と比べ水位変化が非常にゆるやかであり、図12(c)のように比較的高い水位が長時間継続された。本実験で得られた汀線と離岸堤間の水位変化特性を大別した場合、最初にピークが生じるもの、同程度のピークを2回生じるもの、ピークは1度であるが、水位変化がなだらかであり、時間的に遅れてピークを迎えるものの、3形態に分類できる事がわかった。



(実験条件：津波B、離岸堤の離岸距離120m)

図12 汀線から60m地点での水位変化

### 4. 結論

以上をまとめると以下の通りである。

- ①離岸堤による津波遡上高の低減効果は10～25%である。離岸堤の種類別では、連続不透過堤、開口部付透過堤、開口部付不透過堤の順に津波遡上に対する低減効果が大きい。
- ②津波の越流を完全に防ぐほどの高天端の離岸堤を設置しても、離岸堤の開口部からの流入の影響が大きいため、大きな低減効果は期待できない。
- ③斜面上における最大遡上高の沿岸方向分布は、最大遡上高を生ずるまでの遡上距離（遡上時間）により決まる。この遡上距離は、遡上面勾配や津波波高の影響を受ける。
- ④連続堤のように冲向きに流れる水流を遮断する場合には、汀線近くにおいて水位上昇がみられ、その場合、入射波形や遡上面勾配の影響により水位上昇の状況が異なる。

しかしながら、本実験で用いた孤立波的な波の取り扱いに関し、通常周期波のように波高、周期としてとらえるか、また、遡上面勾配を変化させることによる汀線での波の変形をどのように扱うか等、さらなる検討を必要とする問題点も多い。今後は、現在とりまとめている漁港構造物に対する実験結果や数値計算による検討も含め、残された問題点の解明を図っていく予定である。

### 参考文献

- 1) 首藤伸夫：非線形長波の変形-水路幅、水深の変化する場合-、第21回海岸工学講演会論文集、pp.57-63、1974。
- 2) 合田良実：港湾構造物の耐波設計、鹿島出版会、pp.182-224。
- 3) 富樫宏由・中村武弘：津波の陸上遡上高に関する実験的研究、第22回海岸工学講演会論文集、pp.371 - 375、1975。
- 4) 岩垣雄一・井上雅夫・大堀晃一：のり面上の波の遡上機構に関する実験的研究、第13回海岸工学講演会講演集、pp.198-205、1966。
- 5) 宇多高明・小俣篤・横山揚久：離岸堤の津波遡上の抑制効果、第33回海岸工学講演会論文集、pp.461 - 465、1986。