

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の検討

鶴谷 広一*・谷本 勝利**・原中 祐人***

1. ま え が き

昭和 58 年の日本海中部地震津波は、日本海沿岸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、陸岸に接近するに従って通常の重力波の場合と異なり、より段波的な形となりやすいことは古くから認識されていた。しかし、このように大規模な段波性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 13~14m とチリ地震津波以降では最も大きく、これ迄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危険性が大きいにあり得ることが一般に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、大陸棚の海底勾配は 1/200 程度ときわめて緩勾配であるため、このような地形を対象とした実験はこれ迄に谷本他¹⁾の一例があるのみで、また、構造物の効果については十分な検討が行われていない。

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変形過程を調べると共に、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。

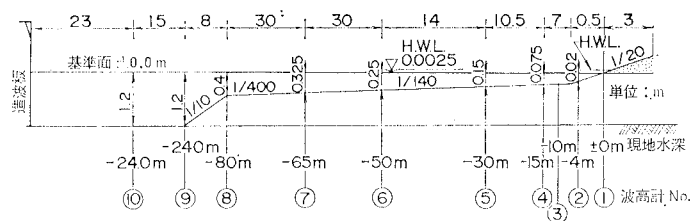
2. 実験方法

実験は港湾技術研究所の津波造波水路（長さ 163m、幅 1m、深さ 1.5m）で行った。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 種類を作成した。図—1 は 1/200 の縮尺の海底地形の例である。これを模型 I とし、この模型を使って行う実験を以後実験 I と呼ぶ。模型 I と同じ 1/200 の縮尺で、もう 1 つの海底地形を模型 II とする。模型 II の地形は、-240~-100m 迄を 1/30 勾配、-100~-5m 迄を 1/130 勾配、そして -5m 以浅を 1/20 勾配としたもので、この模型で行う実験を実験 II と呼ぶことにする。これらは、秋田県や山形県沖の代表的海岸を対象としたものである。大縮尺実験では水深 50m 以浅を再現したもので、-50~-5m を 1/140 勾配、-5m 以浅を 1/20 勾配とした。これを模型 III と呼ぶ。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。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。実験 III では、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対応している。実験 IV では、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。

実験諸元を表—1 に示す。実験 I、II の構造物は、離岸堤（設置位置 -4m、天端高+2.5m、捨石）、海岸堤



図—1 実験水路と模型床 (実験 I)

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所海洋水理部水理研究室長

** 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長

*** 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

表-1 実験ケース

	海底地形	縮 尺	潮 位	周 期	津 波 の 振 幅	構造物の有無
実験Ⅰ	I	$\frac{1}{200}$	+0.5 m	3 ケース (8, 10, 15 分)	5 ケース	5 ケース
実験Ⅱ	II				7 ケース	
実験Ⅲ	III	$\frac{1}{50}$		3 分	6 ケース (構造物なしの場合 は 20 ケース)	10 ケース
実験Ⅳ				7 ケース (2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 分)	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)	5 ケース

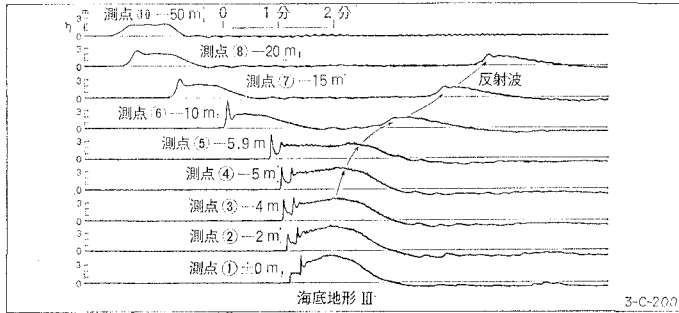


図-2 波形の記録例 (実験Ⅲ)

防 (設置位置 ±0.0 m, 天端高 +7.5 m), 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 -15 m, 天端高 +6.5 m) である。実験Ⅲの構造物は, 離岸堤Ⅰ (設置位置 -4 m, 天端高 +2.5 m, 全断面消波ブロック), 離岸堤Ⅱ (設置位置 -4 m, 天端高 +2.5 m, 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 -5.7 m, 天端高 +3.5 m, 全断面消波ブロック), 海岸堤防Ⅰ (設置位置 ±0.0 m, 天端高 +7.5 m), 海岸堤防Ⅱ (設置位置 ±0.0 m, 天端高 +5.5 m), 海岸堤防Ⅲ (設置位置 +3.5 m, 天端高 +6.5 m), 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 -15 m, 天端高 +6.5 m) 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に対して模型重量 73.6 gf, 120 gf の 2 種, 離岸堤Ⅱに対しては 120 gf, 二重離岸堤に対しては 296 gf のブロックである。実験Ⅳの構造物は離岸堤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%) である。これらのほかに構造物なしのケースを加えたケース数を表-1 の右端の欄に示している。なお, 実験装置と構造物の詳細については文献 2) を参照されたい。

3. 実験結果

3.1 津波の変形

図-2 は大縮尺実験による海底地形Ⅲに対する津波の

波形記録である。図中, 測点 1 から 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。沖側の測点 10 では波の峰のところでやや平たい形となっている。また, 水深 10 m の測点では先端部にソリトンが大きく発達している。

ソリトン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。ここでは, Peregrine³⁾ の理論でソリトンの分裂を計算し, 実測値との比較を行う。Peregrine によれば, 水深方向に積分された平均流速 $\bar{u}$ 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。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{1}{2} h \frac{\partial^3 (h \bar{u})}{\partial t \partial x^2} - \frac{1}{6} h^2 \frac{\partial^3 \bar{u}}{\partial t \partial x^2} \quad \dots \dots (1)$$

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

ここに, 各変数は水深の代表値 h_0 を用いて無次元化されている。式 (1), (2) を数値的に解くが, 解法は陰解法である。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。一様水深部での測点を沖側境界として, この点における水位変動を初期値として計算を進める。

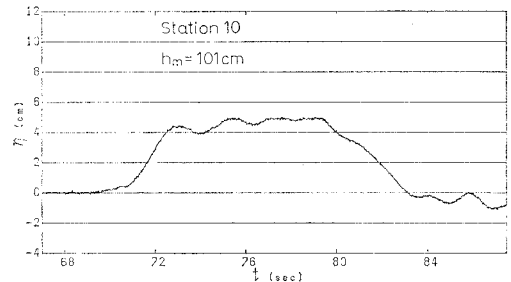


図-3 測点 10 の波形 (実験Ⅲ)

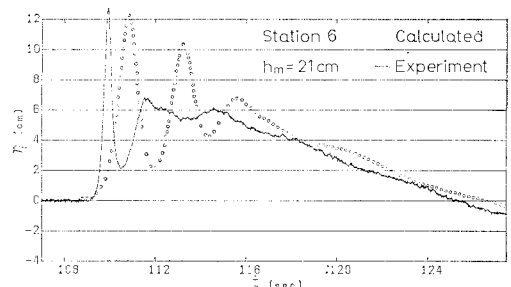


図-4 測点 6 の波形 (実験Ⅲ)

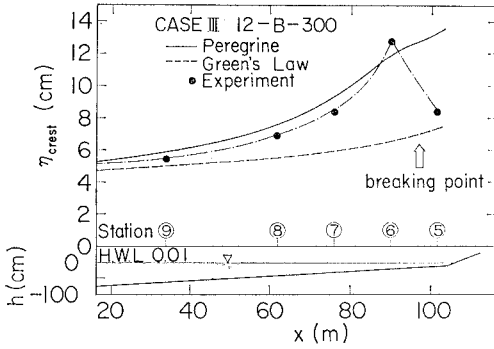


図-5 ソリトンの最大水位 η_{crest} の発達

図-3 は実験Ⅲの測点 10 (水深は 1m, 現値換算で 50m) での波形記録である。この波形を境界条件として与え、それ以後の津波の伝播を計算する。図-4 は測点 6 (水深は模型で 20 cm, 現地換算で 10 m) での計算値と実測値を比較したものである。水位の上昇し始める時刻はほぼ同じであるが、実測と比べて計算値のほうがソリトンの波形の幅が広がっているために、ピークの出現時刻は計算値のほうが遅くなっている。また、計算では 3 つのソリトンが発生しているが、実測では第 1 波しか顕著に発達していない。第 1 波目のソリトンの高さを η_{crest} とする。実験Ⅲの場合について、この最大水位が津波の伝播とともにどう変わるかを調べたのが 図-5 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。また、図中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いるが、実験と比べるとかなり小さな値となっている。

3.2 構造物による津波の低減効果

a) 構造物のない場合の遡上高

図-6 は水深 50m 地点での津波の振幅と遡上高の関係を示したものである。実験Ⅰ, Ⅱについては津波の振幅を α_{-50} , 遡上高を R_0 とし、実験Ⅲ, Ⅳについてはそれぞれに ' を付けて区別してある。海底地形ⅠとⅡでは傾向的な違いは見られない。また、周期 8 分と 10 分ではほとんど差がないけれども、周期 15 分では遡上高がやや小さくなる傾向が認められる。既に、谷本他¹⁾の実験でも同様の傾向が認められている。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關係を示したものである。これによると、 $\alpha_{-50}=1.7$ m のときに $R_0=6$ m, $\alpha_{-50}=3$ m のときに $R_0=10$ m となる。

実験Ⅲに対応する平均的關係を破線による曲線で示しているけれども、 α'_{-50} が 2.0 m 程度以上のところで伸びが鈍化する傾向にあり、実験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 α'_{-50} の値は 3.4 m で α_{-50} より 0.4 m だけ

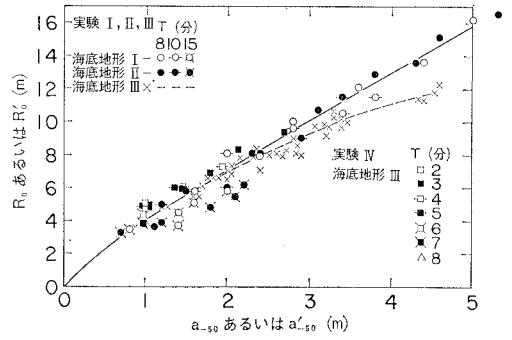


図-6 α_{-50} , α'_{-50} と R_0 , R'_0 の関係 (構造物なし)

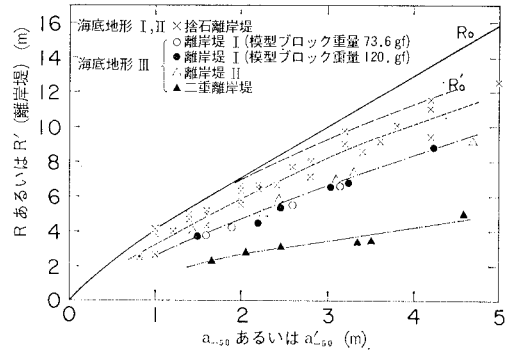


図-7 離岸堤があるときの遡上高 (実験Ⅲ)

大きい。これは、造波能力の制約から振幅の大きい条件ほど波の峰から急激に水位の低下が起きているために生じたものと推測される。また、図中には実験Ⅳの結果も併せて示してある。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、各周期とも実験Ⅰ, Ⅱの α_{-50} と R_0 の関係とはほぼ同様の傾向を示している。

b) 離岸堤の効果

図-7 は -50m 地点での振幅と離岸堤を設置したときの遡上高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Ⅲに対する構造物なし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ある。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。海底地形Ⅲの場合は -4m 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 -5.7m 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あるが、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、実際には離岸堤には開口部があるため、この効果についても調べておく必要がある。

図-8 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。図中の点鎖線は、図-7 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-2 からわかるように約3分と考えられるので、図-8 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ので、図では周期の違いによる遡上高の変化ははっきりわからない。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に増大し構造物なしの場合の93%程度となるにすぎない。

図-9 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。二点鎖線は図-7 の二重離岸堤の実験で得られた関係を示している。開口部なしの二重離岸堤の場合の遡上高は、 $a'_{-50}=2$ m に対して2.5m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6.0mとなり、85%程度となる。

c) 離岸堤の有無による遡上高の比較

図-10 は実験Ⅳの単一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てある。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、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、これよりも周期の長い津波に対しては、離岸堤の効果はより小さくなるものと考えられる。図-10 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逸散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、離岸堤上部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-10 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。したがって、このような傾向は今回実験に用いた構造物と実験条件に特有のものと考えた方がよいかもしれない。事実、次に示す二重離岸堤の場合は周期の影響が見られる。

図-11 は二重離岸堤について、図-10 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瞭に認められる。離

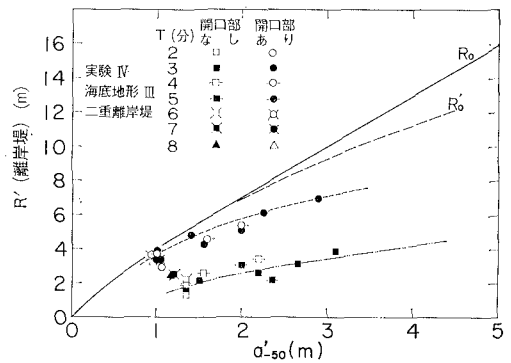


図-9 離岸堤があるときの遡上高 (実験Ⅳ)

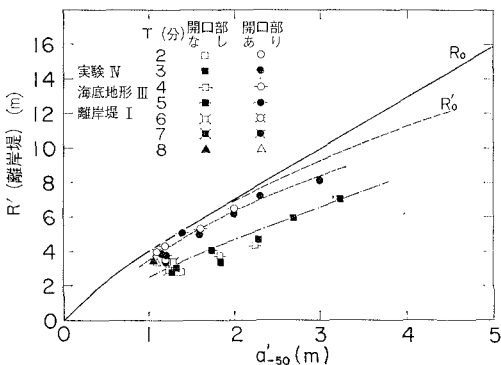


図-8 離岸堤があるときの遡上高 (実験Ⅳ)

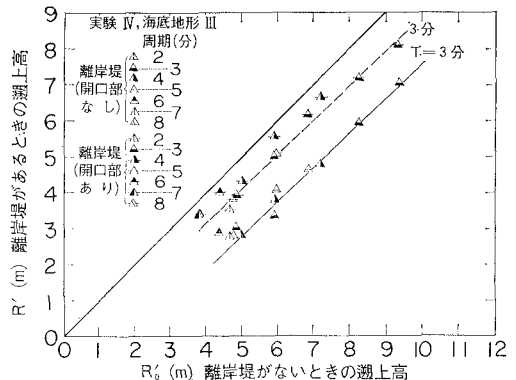


図-10 離岸堤の有無による遡上高の比較

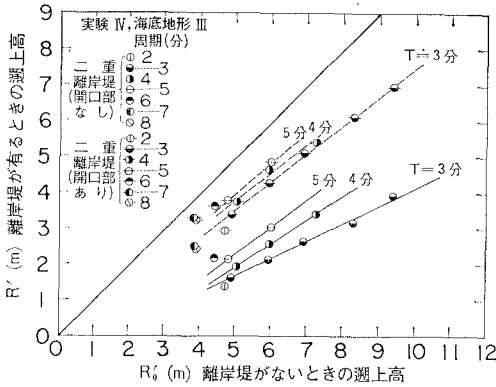


図-11 二重離岸堤の有無による遡上高の比較

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% 程度に減少する。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より小さくなると予想される。

d) 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、天端高さ十分であればその効果は明らかである。図-12 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侵水高 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。ここに侵水高 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で定義する。したがって、遡上高の基準とは 0.5m だけ異なる。また、堤防背後の地形は $1/20$ 勾配の斜面であるため、越流水の量 Q は次式で表される。

$$Q=10(R''-h_b)^2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

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 $h_b=\pm 0.0\text{m}$ 地点に設置した場合の天端高 (h_c) が $+7.5\text{m}$ と $+5.5\text{m}$ のときの結果を表す。

天端高 $h_c=+5.5\text{m}$ の場合には、 $a'_{-50}=1.5\text{m}$ 付近から越流を始め、 $h_c=+7.5\text{m}$ の場合には $a'_{-50}=1.6\text{m}$ 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 $a'_{-50}=3.3\text{m}$ に対して、侵水高は前者の場合 3.7m 、後者の場合 2.0m 程度である。×印は設置位置を背後に下げて、 $h_b=+3.5\text{m}$ 地点に $h_b=+6.5\text{m}$ の海岸堤防を設けた場合で、越流を始める振幅は $a'_{-50}=1.8\text{m}$ 程度であるが、 $a'_{-50}=3.3\text{m}$ の津波に対して侵水高は 6.3m 程度と高い。一方、白三角印

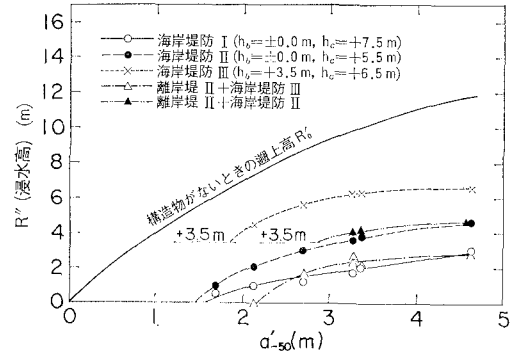


図-12 海岸堤防があるときの浸水高

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 $a'_{-50}=2.2\text{m}$ と大きくなり、 $a'_{-50}=3.3\text{m}$ に対する侵水高は 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'_{-50} 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、この場合の離岸堤には開口部を設けていない。

4. あとがき

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の変形過程と各種海岸構造物の津波低減効果について検討した。構造物が津波の遡上に与える効果については実験装置の制約から周期 3 分～5 分程度の津波を中心に実験を行ったが、これより長周期の津波に対しては今後更に検討の余地がある。なお、本研究を進めるにあたり、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た。また、防波堤研究室の吉本靖俊、木村克俊、山崎一雄の各研究官、漂砂研究室の柳嶋慎一研究官、水理研究室の松延嘉國研究官には実験の実施、図面の作成その他の協力を得ている。ここに記して深く感謝します。

参考文献

- 1) 谷本勝利 他: 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, 299 p., 1983.
- 2) 鶴谷広一・谷本勝利・原中祐人・山崎一雄・松延嘉國: 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, 港湾技研資料, No. 551, 1986.
- 3) Peregrine, D. H.: Long waves on a beach, J.F.M., Vol. 27, Part 4, pp. 815~827, 1967.