

漁港の津波低減効果

中村克彦*・佐々木崇之**・中山哲巖*

Effect on a Reduction of Tsunamis on Fishing Ports

Katsuhiko NAKAMURA, Takayuki SASAKI and Akiyoshi NAKAYAMA

Abstract: We carried out a hydraulic experiment to estimate Tsunami reduction effects that fishing ports have experienced. Mainly, we paid attention to surface elevation in fishing port and runoff of Tsunami in hinterland of fishing port. As the result, the following were clarified.

1. The largest fishing port was most effective facilities regarding a reduction of Tsunami. However, if second or third wave, which were Tsunami reflected by around configuration, the larger fishing port had more likely to receive damage. As the larger fishing ports needed much more time to reduce their surface elevation.
2. Although we constructed breakwaters of high crowns to reduce Tsunami overflowing into fishing port, we could not expect effect of Tsunami reduction because Tsunami entered from around other structures.

Keywords: tsunami reduction, fishing port, surface elevation,

1 はじめに

津波に関する研究は、過去に発生した被害津波の検証に基づき、発生メカニズム、伝播、地形の影響を受けた場合の進行特性及び遡上特性等に関して相当数行われてきた。最近では、計算機の著しい発達により、今後発生する津波に関して数値計算による予測も頻繁に行われている¹⁾。そのため、津波による被害を阻止すべくハード面での整備も進んできているところではあるが、日本沿岸部の大部分が津波被害を被る可能性があることを考えると、その整備率は非常に低いものと言わざるを得ない。また、津波の発生確率、予算、海岸の利用性、景観等の種々の要因から考えても、津波を完全に防ぐような構造物を作ることには限界がある。

そこで着目したのが既存の海岸保全施設や漁港構造物である。主に異常波浪時を対象として設計されたこれらの海岸構造物の規模や配置が、津波に対してどのような低減効果を有しているかを検討することにより、今後に必要な津波対策のあり方や、既存の海岸構造物を利用したハード整備のあり方等を明らかにしようとした。

本報は、既に行った離岸堤に対する実験²⁾に引き続き、漁港構造物を対象として行った実験の整理を行った。

2 実験方法

2.1 実験条件及び測定方法

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

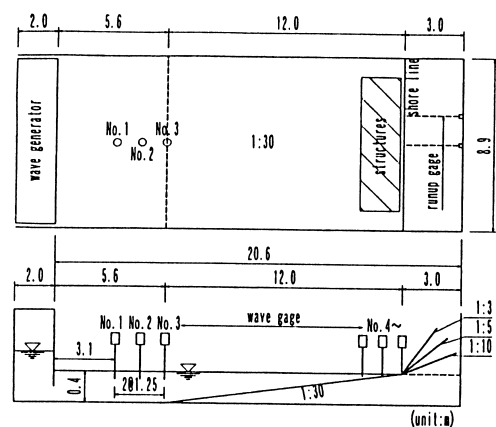


図1 実験施設

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により測定した。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、漁港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。

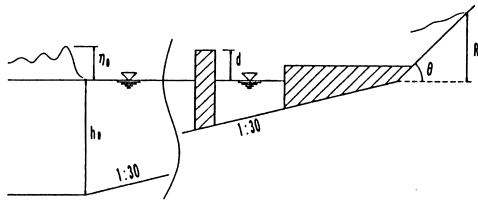


図2 記号の説明

2.2 実験ケース

実験ケースは、表1に示すように3種類の遡上面勾配に対し、漁港構造物を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。

表1 実験ケース

(unit:m)				
遡上面 勾配	構造物緒元			津波ケース
	種類	港口幅	泊地岸沖距離 用地部岸沖距離	
1/20	漁港小	50	120.4	各5種
1/10	漁港中	110	250.4	
1/5	漁港大	170	380.4	

表2 津波ケース

津波ケース	緒元
A	$\eta_0 \approx 5.0\text{m}$ 、見かけ上の周期やや長
B	$\eta_0 \approx 5.0\text{m}$
C	$\eta_0 \approx 8.0\text{m}$
D	$\eta_0 \approx 10.4\text{m}$
E	$\eta_0 \approx 13.4\text{m}$

津波A及び津波Bは、波高が同じで波形だけが異なり、津波Aは水位上昇のピークをむかえた後、減衰が緩やかであり、見かけ上の周期が長くなったものである。津波B, C, D及びEは、見かけ上の周期はほぼ同じで、波高が、E, D, C, Bの順に大きい。これら5種類の津波は、比較的大きな被害を及ぼすと考えられる津波規模階級 $m=2\sim 3$ を想定した。この津波規模階級とは、今村・飯田³⁾により提案されたもので海岸で観測された津波の最大高さ、被害の発生した海岸の範囲との関係を-1~4までの階級に分類したものである。各漁港の断面図及び形状は図3に示す通りである。防波堤及び漁港施設用地には、木材を使用した。尚、漁港施設用地は、以下において用地部と表現する。また、本実験で用いた津波の

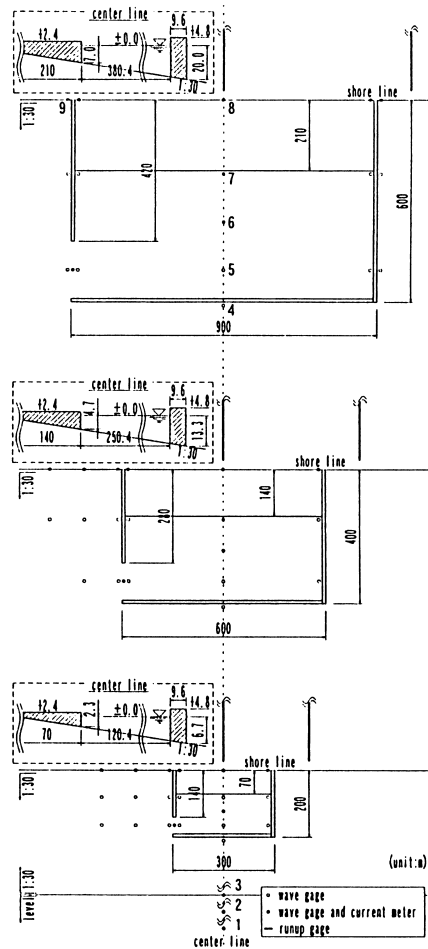


図3 漁港の断面及び形状

波形は、いずれもピークが前部に偏り孤立波である。本報告においては、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。この波高は、津波が水槽水平部で示す最大の水位である。本実験で用いた津波の特性については前報に詳しく記載してあるため今回は割愛する。

3 漁港施設による津波低減効果

まずはじめに、段波状となって来襲する津波が漁港施設を越流して進行する際にどの程度低減されるかを検討した。尚、漁港構造物に対する津波の波向は岸沖方向のみであり、他の波向に関しては実験を行っていない。よって、ここでは岸沖方向に関し断面2次元的な考察を行った。

図4は、縦軸に用地部と沖側防波堤の越流量の比 (Q_1/Q_2)、横軸に沖側防波堤直前の水位と泊地の岸沖距離の比 (η_1/L_0) を示している。越流量は、吉川・椎貝らの越流量の式⁴⁾を用いて概算した。

図から、泊地の岸沖距離が長くなれば、用地部の越流量は沖側防波堤の越流量に対してよく低減されていることが分かる。また、その効果は、津波が小さいほど大きいことが分かる。これは、沖側防波堤を越流することで強制的に碎波させ

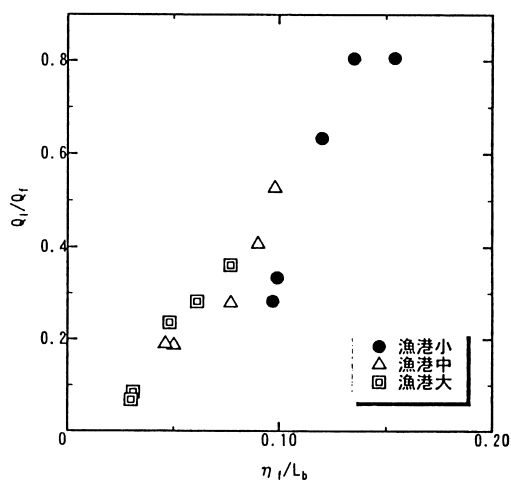


図4 泊地の岸沖距離の効果

られた津波が、砕波減衰を起こしながら泊地内を進行するためである。つまり、泊地の岸沖距離に応じ、減衰する津波のエネルギーが大きくなるためと考えられる。

図5は、縦軸に汀線流速と泊地内の平均波速の比 (v_s/c_s)、

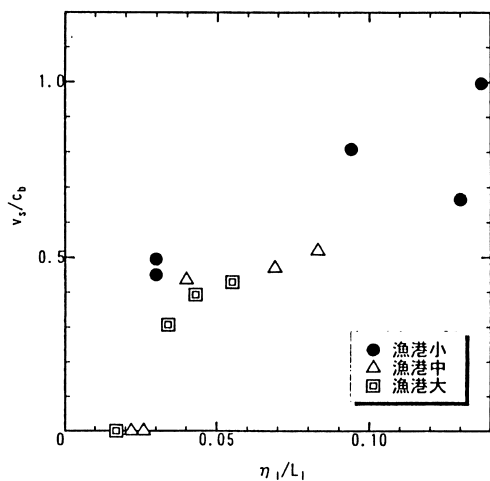


図5 用地部の岸沖距離の効果

横軸に用地部への流入水位と用地部の岸沖距離の比 (η_1/L_0) を示している。汀線流速は、汀線の水位を用地部上の水位に換算し、それらを用いて福井らの式⁹⁾から求めた。また、用地部の流入水位は、用地部前面の水位を用地部上の水位に換算した量である。

図から、用地部の岸沖距離が長いほど、泊地内の波速に対する汀線流速は低減されていることが分かる。また、その効果は用地部への流入水位が小さいほど大きいことが分かる。これは、用地部上を進行する津波が、砕波や摩擦によるエネルギー減衰の影響を受けるためと考えられる。特に、用地部前面の水位が用地部の天端高以上となるのが断続的な場合

や、その時間が短い場合、用地部への打ち込んだ水塊は汀線到達までに著しく減衰される。なお、図中の一部は、汀線流速が零となっているが、これは汀線の波高計が3m（用地部上では0.6m）以下を測定できないことによるものである。

4 泊地内の水位変化

ここでは、漁港規模による津波低減効果の違いを検討するため、泊地内への流入出量や水位変化に着目した。

図6は、泊地内7カ所で計測した水位変化の平均値と、簡単

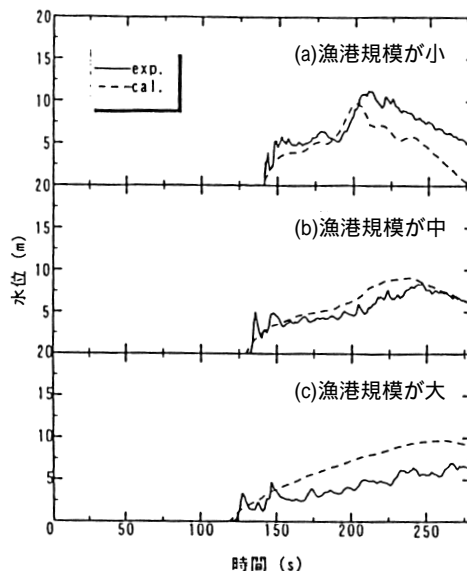


図6 泊地内の平均水位変化

なモデル計算により求めた平均水位変化を比較している。いずれも、泊地内の波動性は無視した。図6(a)~(c)は、種々の実験条件に対する平均水位変化の代表例として、津波C、遡上面勾配が1/10の時の各漁港規模に対する結果を示している。

4.1 水位変化特性

図が示すように、泊地内の水位変化は、漁港規模が小さいほど最大水位は大きく、そのピークを早く迎える。これは、図示した実験条件以外でも同様の傾向を示した。また、遡上面勾配の影響としては、その勾配が緩やかなほどピークが遅くなり、若干ではあるがその時の最大水位も小さくなる。ピークを示すのは、いずれも遡上面からの戻り流れが泊地に到達した時であり、その最大水位は、泊地内水位や遡上面からの戻り流れの速さ、沖から継続して越流する津波等により決定される。

4.2 モデル計算法

計算方法について説明する。港口部は波高計及び流速計の測定値を使用し、卓越する流入方向によって港口断面積が変化するものと考え、次式により求めた。

$$Q = (h + \eta) \times V \times W_{in} \quad (1)$$

$$V = (V_x^2 + V_y^2)^{1/2}$$

$$W_{in} = W \cos \phi - B \sin \phi$$

$$\phi = \tan^{-1}(V_x/V_y)$$

ただし，Q：港口流出量

h：港口中央部の水深

η：港口中央部の水位

V_x/V_y ：港口中央部の岸沖方向及び沿岸方向の流速

W：港口幅

B：防波堤幅

港口部からの流入出力以外は、全て波高計より得られた水位を基に、吉川・椎貝らの越波量の式や台形堰の式等、既に提案されている流量算定式を用いた。ただし、港外部分から遡上した津波の一部は漁港背後から泊地に流入するが、この際、実験条件によって卓越する流入方向が変化する。この流入方向の変化に伴う流入量の変化に関しては、波高計が示す水位から流量を計算しているため考慮できない。よって、漁港背後からの流入量のみ、次式の流量係数Cで補正を行った。これは、漁港背後から一様な沖方向の流入が見られた実験条件時（漁港小、津波C）の流量を基準とし、津波波高、漁港規模によってその沖方向の流量が変化するものと考えており、また係数については試行した物も考慮し決定している。

$$C = (0.168 \times \eta_0/d + 0.8)(-0.0048 \times L/d + 1.3) \quad (2)$$

ただし，η₀：津波波高

L：漁港幅（漁港の沿岸方向距離）

d：防波堤天端高

これらの計算により時々刻々の累積流入出力量を求め、それらを泊地面積で割って水位の時間変化を求めた。

図からも分かるように、実験結果と計算結果の傾向は比較的類似しており、モデル計算がある程度有効であることが分かった。

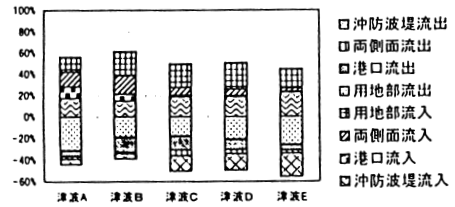
4.3 流入出力の割合

図7(a)～(c)は、泊地内への越流開始後約140秒間（実験スケールで10秒間）の各流入出力の割合を示しており、遡上面勾配が1/10の時の各漁港規模に対する結果を表している。計算は、図6においてその有効性を示したモデル計算法を用いた。

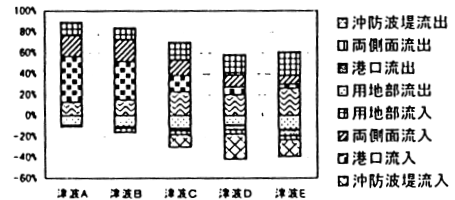
図は、漁港が大きいかほど流出成分に対する流入成分の割合が大きいことを示している。よって、津波来襲後間もない段階においては、泊地面積が大きいかほど一時的な貯留効果（ピークカット）は大きいことがわかる。また、各流入出力成分に関しては次のことが分かった。

流入成分：

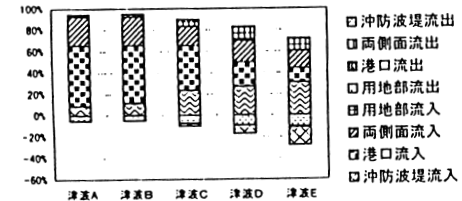
津波が小さければ全体に占める港口からの流入量の割合が増大し、津波が大きければ沖側防波堤からの越流量の割合が増大する。また、図示していないが、津波が小さければ全体の流入量は減少するものの、港口からの流入量は増加する。



(a)漁港規模が小



(b)漁港規模が中



(c)漁港規模が大

図7 泊地への流入出力の割合

この流入量に関し同じ波高の津波A，Bを比較すると、見かけ上の周期が長い津波Aがいずれのケースにおいても多かった。

流出成分：

津波来襲直後で、港内の波動成分が錯綜する段階では、用地部からの流出割合が全体を通して顕著である。ただし、その後は港口からの継続した流出が見られた。

及び で示した傾向については、遡上面勾配の違いによる差が見られなかった。

5 遡上高

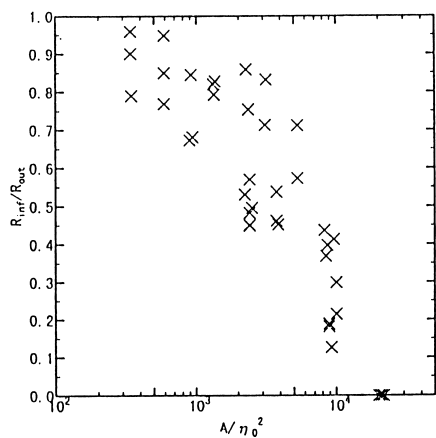
ここでは、陸上域における遡上高及びその形態に着目して検討する。

5.1 漁港規模の効果

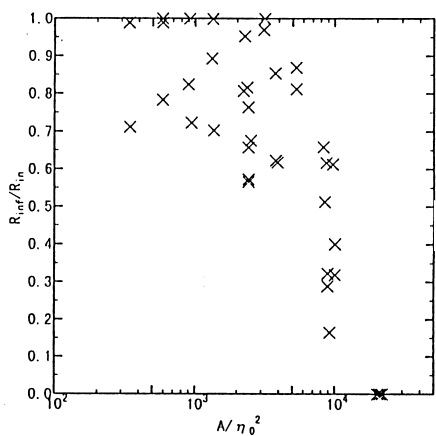
津波は汀線に到達すると、津波先端部から順次遡上していく。この先端部付近の遡上は、構造物がなければ最高遡上高を示す。以後、この津波先端の成分を第1波目と表現する。

まず、第1波目の遡上高に着目したのが図8(a)である。図は、縦軸に漁港背後の遡上高と港外背後の遡上高の比、横軸に漁港面積と津波波高の自乗の比を示している。ここで、漁港面積とは、泊地面積と用地分の面積を合わせた漁港の施設全体の面積である。

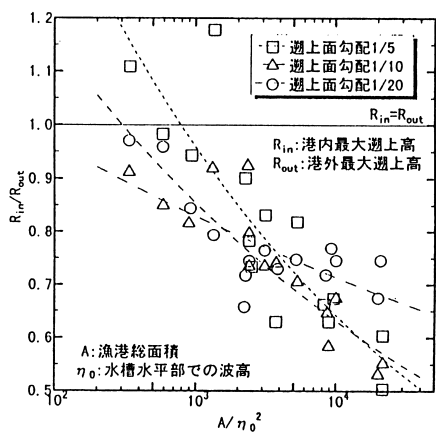
図が示すように、津波波高に対して漁港面積が小さければ進行する津波への低減効果も小さく、漁港背後の遡上高は港外背後と同程度遡上していることがわかる。



(a) 漁港背後と港外背後の比較、第1波目の遡上高

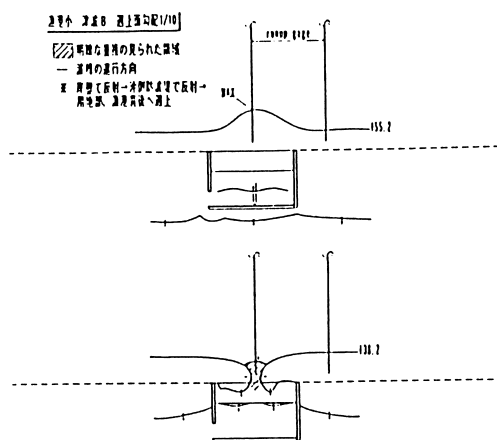


(b) 漁港背後、第1波目の遡上高と最大遡上高の比較

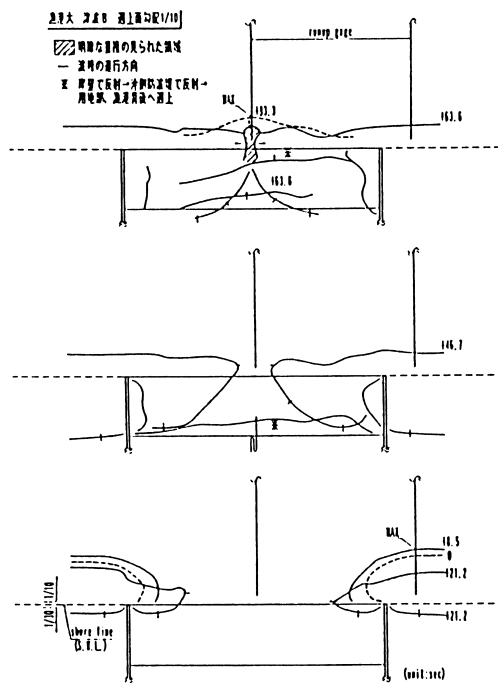


(c) 漁港背後と港外背後の比較、最大遡上高

図8 漁港規模と遡上高の関係



(a) 漁港規模が小



(b) 漁港規模が大

図9 遡上形態

次に、漁港背後のみの遡上特性を調べるため、第1波目の遡上高と最大遡上高に着目したのが図8(b)である。図は、縦軸に漁港背後における第1波目の遡上高と計測中に示した最大の遡上高の比を示しており、横軸は図8(a)と同じである。

図が示すように、津波波高に対して漁港面積が小さければ、第1波目の遡上高は最大遡上高に近い値、もしくは最大遡上高となることわかる。この最大遡上高は、実験条件によって異なる遡上形態の影響を受ける。そのため、漁港規模を大きくするなどして第1波目の遡上高を抑制した場合には、漁港外からの波の回り込みなど、漁港外からの流入水塊の影響を相対的に大きく受ける。よって、同じ漁港背後においても、津波波高と漁港面積の関係により、最大遡上高を示す成分波が異なるのである。

図8(a)及び(b)で示した遡上高の関係を踏まえ、単純に漁港背後と漁港外背後の最大遡上高を比較したのが図8(c)である。図は、縦軸に漁港背後の最大遡上高と港外背後の最大遡上高の比を示したものであり、横軸は図8(a)、(b)と同じである。

この図からも、津波波高に対する漁港面積が大きければ、漁港背後の最大遡上高は抑制されることが分かる。

5.2 遡上形態

5.1で示したように、漁港背後の遡上高には、遡上形態が影響する。よって、以下にその遡上形態を整理する。図9(a)、(b)は、漁港規模が小及び大のケースにおける遡上形態の一例を示したものであり、これらは写真より読み取った明瞭な波峰を示したものである。

津波は港外背後で大きく遡上するが、漁港を越流してきた津波の第1波目は若干遅れて漁港背後に遡上し、この時の遡上高は、前述したように漁港が大規模であるほど抑制される。そのため、遡上面上では漁港の両側から漁港背後への流入現象が起こり、港外背後における第2波以降の遡上時にもこの流入が生じる。これらが漁港背後の中央で重複し大きな遡上高をもたらす。

ここで、このような港外からの流入も含め、漁港背後の遡上形態に影響を及ぼす波動成分に着目した。図10は、漁港規

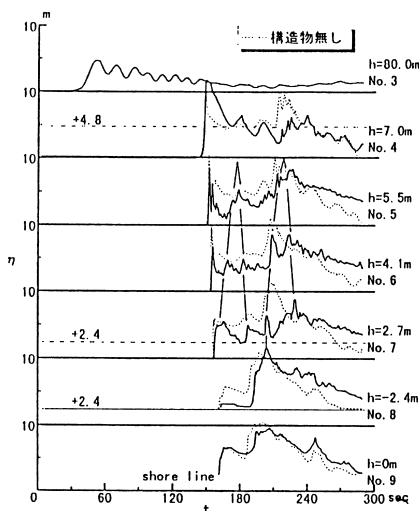


図10 港内における時系列波形の一例

模が小の時の時系列波形であり、汀線に第1波目以降第2波目、第3波目が到達する様子を示した図である。他の実験ケースも含め、これらの波動成分及び遡上形態を大別すると以下のようなになる。

沖側防波堤を越流した第1波目は、用地部の岸壁で反射され、漁港内を逆行、沖側防波堤で再び反射される。これが水位の高くなっている漁港内を再び進行するため、少ないエネルギー損失で岸壁を乗り越え漁港背後に到達する。

津波が大規模である場合には第2波目以降も沖側防波堤天端高に比して波高が大きく、越流して港内水域を進行する。そして第1波目の来襲により港内水位が高くなっているため、と同じく少ない損失で岸壁を乗り越え漁港背後に到達する。

これら2つの波動成分は、前述した漁港背後中央での重複に、さらに重複することで大きな遡上高をもたらす。本実験の全ケース中7割がこの現象により漁港背後での最大遡上高を記録した。尚、で説明した岸壁による反射波は、漁港の岸沖方向距離が小さいほど漁港背後に到達する時間が早いため、漁港規模により遡上への影響は異なる。

港外背後から漁港背後へ流入した水塊の一部は沖側へ向けて進行する。これが外郭施設で反射され、再び遡上面へ到達し、漁港背後で滞水もしくは遡上する。この波は、港外背後において一度遡上した成分であるため、及びで説明した波より時間的に遅れることが特徴である。この時間遅れの現象については遡上面勾配が急であるほど顕著に見られた。

以上述べてきたように、漁港背後における津波の遡上形態は種々の要素が重なり合って非常に複雑であるが、支配的であるのは港外背後へ大きく遡上した津波の流入である。尚、最大遡上高がおこる場合には、ほぼ同時、もしくは若干遅れて泊地内の平均水位も最大値を示すことが確認された。

5.3 漁港の沿岸方向距離の影響

図11は、縦軸に漁港背後と港外背後の最大遡上高の比、横軸に港外へ津波が到達した時刻と漁港背後中心に到達した時刻の比を示している。図中の t_{in} は港外の汀線に津波が到達し

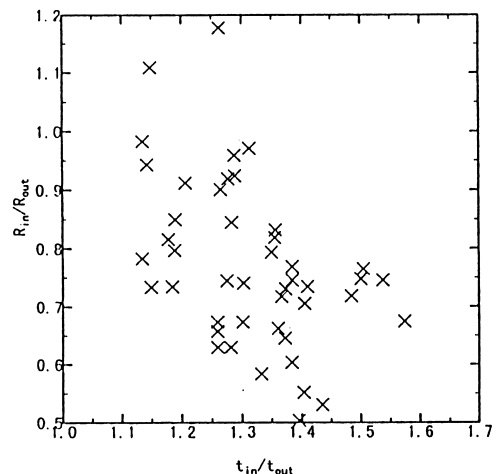


図11 漁港の沿岸方向距離と遡上高の関係

た時刻、 t_{in} は漁港背後中央部（汀線上）において両側からの流入水塊が重複する時刻である。

同図より、中心到達に時間を要するほど漁港背後の最大遡上高が小さくなるのがわかる。これは、漁港の沿岸方向距離が大きいほど、漁港背後中心に到達するまでに時間を要し、より多くの沖側への流出を伴うためと考えられる。

次に、港外背後から漁港背後へと流入する水塊に着目し、その沿岸方向成分の汀線上の平均先端移動速度を求めた。図12は、縦軸にこの平均先端移動速度 $\bar{V} = L/2/(t_{in} - t_{out})$ と津

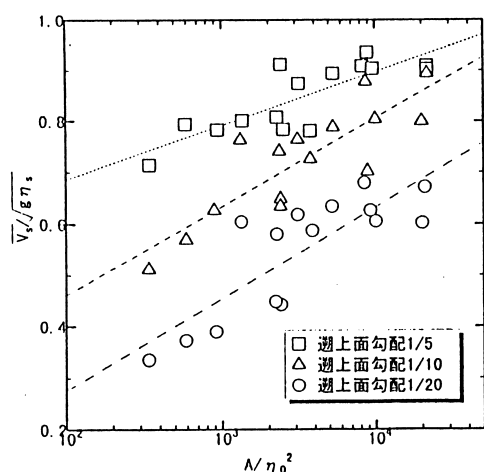


図12 港外背後から流入する水塊の平均先端移動速度（沿岸方向）

波入射波速の比、横軸に漁港面積と津波波高の自乗の比を示したものである。ここで、津波入射波速とは、港外における汀線での波速である。

図から、同じ遡上面勾配であれば、津波波高が小さいほど、汀線への入射波速に近い先端移動速度を示すことがわかる。これは、漁港によって漁港背後への直接流入が抑えられると、汀線付近において港外と港内の水位差が生じる。その水位差が大きいほど港内への速い流れが生じるためである。また、図からは、遡上面勾配による傾向の違いが分かる。これは、遡上波の戻り流れと来襲波の重複による汀線付近の水位上昇が原因と考えられる。これらの重複による水位上昇は、遡上面勾配が急な場合ほど大きい。汀線付近の波動成分を長波と考えると、この水位の違いが港内へ伝播する波速に影響を与えたと考えられる。

さらに、図からも分かるように、沿岸方向の先端移動速度は、汀線入射波速に対し、最大で9割程度にも達する。このような沿岸方向の流入成分は、段波状となって来襲する津波と異なり、比較的水位の低い水塊となって流入するが、先端移動速度が大きい場合には相当なエネルギーを持っているものと推測される。

6 既存の研究成果との比較

これまでに発生した津波に対し、数多くの研究がなされてきたが、特に1983年の日本海中部地震津波や1993年の北海道南西沖地震津波に関しては、現地調査、実験及び数値計算等で詳細な検討が行われた。例えば、谷本ら⁶⁾は日本海中部地震津波に対する検討結果として、次式に示すパラメータ K_0 によって漁港背後と港外背後における遡上高比を説明できることを示している。

$$K_0 = (A/CBhT) \cdot \sqrt{(a/g)} \\ = (A/CBh) \cdot (h/T/\sqrt{(gh)}) \cdot \sqrt{(a/h)} \quad (3)$$

ここで、Aは港内水域面積、Cは損失係数、Bは港口幅、hは港口水深、Tは周期、aは港外津波振幅である。

(3)式は K_0 が大きいほど津波低減効果が大いことを示す。(3)式から、周期が短い津波や、港口断面に対して港内水域面積が大きい港湾漁港であれば津波低減効果は大いことが分かる。(3)式の中で、 a/h についてはその影響はそれほど大きくないと述べている。また、明田ら⁷⁾は、北海道南西沖地震津波に対する種々の検討の中で、谷本らの考え方が妥当であったことを示している。

本実験結果では、漁港規模が大きい（港内水域面積が大きい）ほど津波の低減効果が大い、これについては谷本らと類似した傾向を示し、(3)式で説明できることがわかった。また、港口部の影響に関しては詳細な検討ができないが、津波波高が小さい場合には(3)式を適用できると思われる。しかしながら本実験では、比較的規模の大きい津波を対象とし、全ての条件において段波状の津波が沖側防波堤を越流して打ち寄せるため、港外における津波波高((3)式ではaに相当)の影響が大い。さらに、実験条件によっては漁港全体が完全に水没するため、漁港内における水位変化や背後域における遡上面勾配によっても遡上高が変化し、その最高遡上高を示す時間も異なる。これらのことは(3)式によっては説明できない。本実験条件を単純に谷本らや明田らの検討結果と比較することはできないが、津波が段波状であり港湾漁港施設での越流現象が顕著な場合には、(3)式の適用に限界がある。

今回行った実験では、実験条件が非常に限られているため、(3)式に変わる新たな式の提案は行えないが、少なくとも遡上面勾配の影響や最高遡上高を示す津波成分（時間的なずれ）について考慮する必要がある。

7 結論

漁港施設による津波低減効果を要約すると以下のようなになる。

第1波目を減衰させるには、漁港施設の岸沖距離が長い方が効果的である。

港口部について流入量を比較した場合、最初から最後まで時間を追ってみると、ほとんどの実験ケースにおいて

流出量が多かった。ただし、港口部からの流入量は、津波来襲直後においては流入が大きく、港内水位上昇を助長している。

津波を低減するには、漁港の規模が大きいほど効果がある。しかしながら、周囲の地形によって反射し、ある時間において複数の津波が来襲する場合、規模の大きい漁港は港内水位の減衰に時間を要するため、逆に津波被害を大きくする可能性がある。

津波の港内進入を防ぐ目的で一番外側に天端高の大きい防波堤を設置しても、港外背後からの流入を遮らなければ、漁港背後の大きな遡上や港内水域の水位上昇を抑制する効果はさほど期待できない。

以上の実験結果から、漁港は限られた条件において津波のエネルギーを減殺させる効果を有していることがわかった。しかしながら、背後集落等の防災面を考えれば、やはり津波に対する低減効果は不十分であると言える。既存の漁港施設を利用した防災対策を検討するならば、周囲の地形、漁港規模等を考慮し、漁港背後域における堅牢な建物の配置が重要になると思われる。漁港背後の建物が津波に対する抵抗の役

割を果たすことで、被害の減少や、打ち寄せる時間の遅延等の効果が期待できる。

参考文献

- 1) 例えば、農林水産省構造改善局・農林水産省水産庁・運輸省港湾局・建設省河川局：太平洋沿岸部地震津波防災計画手法調査，平成8年度国土総合開発事業調整費
- 2) 中村克彦・佐々木崇之・中山哲蔵：離岸堤の津波遡上に関する実験的研究，水産工学研究所技報，第20号，pp.13-22．
- 3) 渡辺偉夫：日本被害津波総覧，東京大学出版会，pp.7-8．
- 4) 吉川秀夫・椎貝博美・河野二夫：海岸堤防の越波に関する基礎的研究(1)，第14回海岸工学講演会講演集，pp.118-122，1967．
- 5) 福井芳朗・白石英彦・中村充・佐々木泰雄：津波の研究() - 段波津波の波速について - ，第9回海岸工学講演会講演集，pp.44-49，1962．
- 6) 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，pp.212-217．
- 7) 明田定満・矢野賢二・水野雄三・佐藤仁・寺内啓：港湾漁港施設による津波被害の低減効果について，海岸工学論文集，第41巻，pp.1176-1180．