

トレンチ工法による港内波浪の静穏化 に関する研究

EFFECTIVENESS OF AN ARTIFICIAL TRENCH FOR HARBOR TRANQUILITY

中村孝幸¹・竹本剛²

Takayuki NAKAMURA and Tsuyoshi TAKEMOTO

¹正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8577 松山市文京町3)

²正会員 (株)荒谷建設コンサルタント 技術部 (〒790-0045 松山市余戸中2丁目1番2号)

In order to reduce wave heights in a harbor, an artificial trench installed in front of the harbor entrance was newly proposed as alternative works of detached and offshore breakwaters. Based on the wave refraction mechanism by water depth variations, change of wave propagation direction by the artificial trench is realized. Several factors regarding artificial trenches, such as locations, sizes, plane figures and so on, were examined theoretically by the numerical method of analysis. For the comparison, effectiveness of a rectangular resonator for harbor tranquility was also examined. It was confirmed that artificial trenches with a circular and rectangular figures are effective for reducing incoming waves to the harbors, especially for normal incidence of waves to that entrance.

Key Words : Artificial trench, wave refraction, resonator, harbor tranquility

1. 序論

本研究では、船側の利便性を考慮して、港口部が防波堤などにより遮蔽されことなく外洋側にそのまま開いている平面形状を維持して、港内への波浪の侵入を阻止しようと試みた。ここでは、図-1に示すようにトレンチ工(深溝工)を港口部沖合側に設ける方法を提案する。この方法は港口部付近の海底を掘削し、局所的に深溝(トレンチ)を設けることにより入射波の波向きを変え、港内へ侵入する波を低減するものである。以下では、このような工法をトレンチ工法と称するが、これは現在行われている航路浚渫と類似した方法で施工することができ、効果が確認されれば、現実性の高い工法と考えられる。また、このようなトレンチ工は、水面上に突出する構造物を必要としないことから、景観を乱さない防波施設であり、受け入れられやすい工法といえよう。

2. 断面2次元的なトレンチを対象にした鉛直線グリーン関数法の適用性

本研究では、トレンチ工を設けた場合の平面的な波変形の算定法として水深変化を近似的に考慮した鉛直線グリーン関数法¹⁾を用いた。ここでは、この算定法の適用性をMeiら²⁾の長波近似を仮定した場

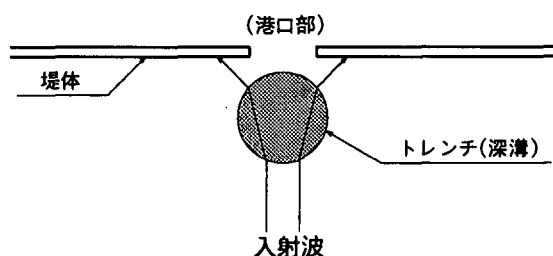


図-1 トレンチ工を港口部沖合に設けたときの配置状況

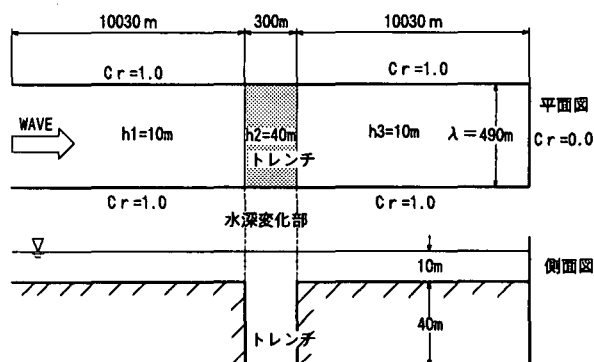


図-2 平面波浪場に設けた擬似2次元的な水路

合の解析的な理論結果との比較から検証する。

想定したモデルは、Meiらの結果との比較が行えるように、図-2に示すように平面波浪場に擬似2次元的な水路を作り、側壁部の反射条件を完全反射(反射率1.0)とし、透過側の最奥部の壁を完全吸収条件(反射率0)として、いわゆる水深変化のある数値波浪水槽を対象にした。なお、水路幅入は長峰性の波面形状が水槽内に形成されるように $\lambda/L < 1$ になるように設定した。図-3は上述した断面2次元的な数値波浪水路にトレンチを設けたときの反射率 Cr および透過率 Ct の算定結果を示す。このとき、反射率 Cr は数値波浪水槽の反射側において、ヒューリーの方法にて求めた。また、透過率 Ct は透過側の一定波高値から求めた。

この図より、トレンチ工による Cr 、 Ct の鉛直線グリーン関数法(VLG)による算定結果は、Meiらの長波近似を仮定した解析的な結果とよく一致しており、その適用性が確認できる。

3. 各種トレンチ形状による波変形

本研究では、形状が簡単でかつ波向き制御に有効であると考えられる、三角形、逆三角形、ひし形、円形、四角形トレンチの5種類のトレンチ工の波向き制御効果について検討した。ここでは、各トレンチ工は統一した比較を行えるように面積は4万平方メートルと等しく、各トレンチ工内の水深は20m、その他の水深は10mと一定にしてある。図-4は、各種トレンチ工まわりの形状とそれに対する直角入射($\theta = 0^\circ$)方向の定義を示す。

(1) 各種トレンチ工まわりの波高分布および波位相

本研究では、各種トレンチ工の波向き制御効果を比較するため、無限海域を想定した平面波浪場にトレンチ工を設け、規則波を作用させてトレンチ工まわりの同位相線および波高分布を算定した。算定では統一した比較をするため波周期を $T = 1.5$ sと固定した。また、波向きは $\theta = 0^\circ$ および $\theta = 30^\circ$ の2種類とした。また、直角入射($\theta = 0^\circ$)の場合は同位相線および波高分布はトレンチ工の中心線に対して左右対称に現れるため図中にはトレンチ工の中心線より右側領域のみを表示した。

図-5は代表例として、直角入射($\theta = 0^\circ$)の場合の円形トレンチ工まわりの同位相線および波高分布を入射波で除した波高比のコンターで示したものである。ここで、同位相線図にはスネルの法則に基づき作成した波向き線も併記した。また、波高分布図には、後述する港湾港口部を模擬する開口部を想定したときの堤体部分を点線で示してある。

この図より波峰線に相当する同位相線は、トレンチ工を通過するときに歪められていることがわかる。また、スネルの法則による波向き線を見ると、トレンチ工を通過するとき、トレンチ工に波が入る側(沖側)およびトレンチ工から波が出る側(岸側)の外

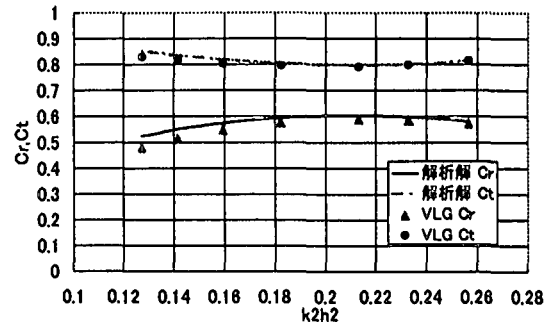


図-3 断面2次元的なトレンチ工による Cr 、 Ct に関するMeiの解析結果と鉛直線グリーン関数法(VLG)による算定結果の比較

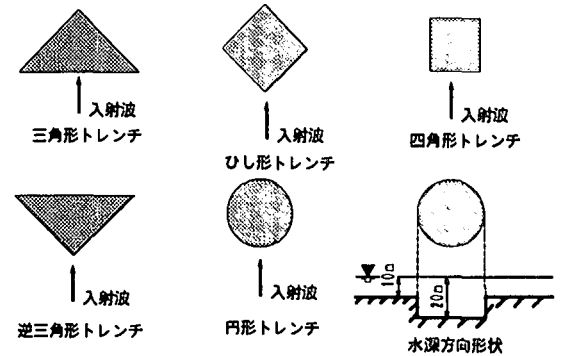


図-4 各種トレンチ工の平面形状および直角入射($\theta = 0^\circ$)の定義

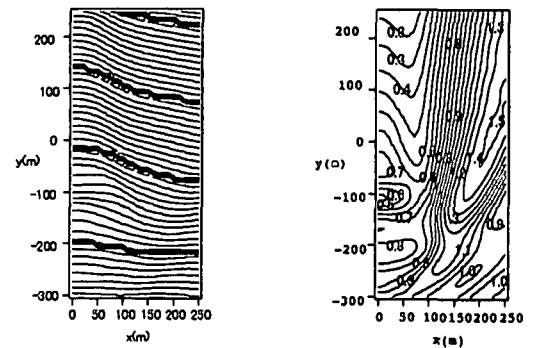


図-5 円形トレンチ工まわりの同位相線図および波高分布のコンター($\theta = 0^\circ$)

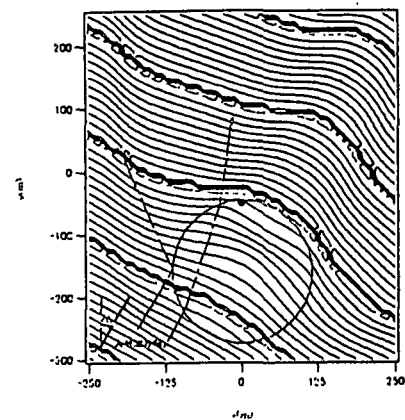


図-6 円形トレンチ工まわりの同位相線図($\theta = 0^\circ$)

縁で2回曲げられることになる。一方、波高分布図をみると、トレンチ工の透過側では波高比はx方向に大きく変動することがわかり、トレンチ工の背後で波高比は低く、それより左右に離れるにつれ、波高比は急激に増加している。これは、入射波がトレンチ工を通過するときに側方外側へ屈折するためと考えられる。

図-6, 7は斜め入射($\theta = 30^\circ$)の場合の円形トレンチ工まわりの同位相線および波高分布を入射波で除した波高比のコンターで示したものである。

この図の同位相線および波向き線をみると入射波が港内側に曲げられ、そのままストレートに港内へ侵入することがわかる。

ここでは、円形トレンチ工を代表例として取り上げたが、各トレンチ工を比較検討した結果、直角入射波に対しては、円形、ひし形、四角形トレンチ工が効果的に波向きを制御できており、斜め入射波に対しては、三角形トレンチ工が効果的であることが判明した。

(2) 港口部まわりの波高分布および平均波高比

本研究では、図-8に示すように各種トレンチ工の最も岸側の部分が港口部を想定した開口部の沖合50mにくるように配置したときの波高分布の算定を行った。算定では開口部の両側の防波堤は半無限堤としてその反射率は0.9とした。このとき波周期は $T = 15\text{ s}$ と固定した。また、入射波方向は直角入射($\theta = 0^\circ$)と斜め入射波($\theta = 30^\circ$)の2ケースで行った。

a) 平均波高比

ここでは、各トレンチ工の港内への侵入波の低減効果を比較するため、図-9に示すように半無限堤開口部の透過側に $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ の水域を設定し、その水域内の平均波高比を求めた。図-10はその結果を示す。この図より直角入射波に対しては、トレンチ工を設けない場合と比較して、ひし形トレンチ工は、5割以下に平均波高比が低減されており最も波浪の侵入を防ぐことができるといえる。また、斜め入射波においてはどのトレンチ工も侵入波の低減効果は不十分であるといえる。

b) 波高分布

図-11, 12は代表例として直角入射($\theta = 0^\circ$)が作用するときの円形トレンチ工を開口部沖合に設けた場合とトレンチ工を設けない場合の開口部まわりの波高分布を示す。この図より、トレンチ工を設けると、トレンチ工を設けない場合と比べ、港内への侵入波が低減されることや、トレンチ工の両側で高波高領域が現れることから入射波がトレンチ工により側方へ屈折し、さらに半無限堤により反射されていることがわかる。

図-13, 14は斜め入射($\theta = 30^\circ$)が作用するときの円形トレンチ工を開口部沖合に設けた場合とトレンチ工を設けない場合の開口部まわりの波高分布を示す。この図より、トレンチ工を設けても、港内

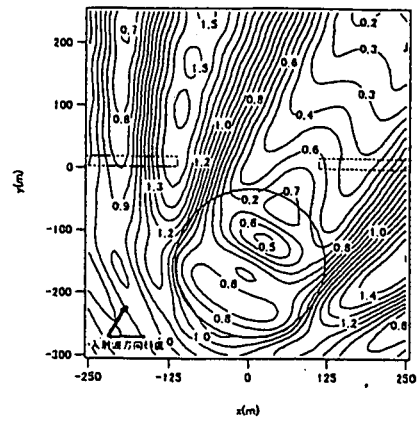


図-7 円形トレンチ工まわりの波高分布のコンター ($\theta = 30^\circ$)

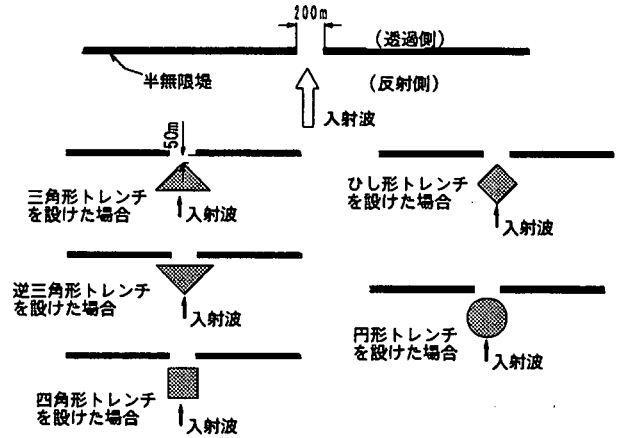


図-8 各種トレンチ工の配置状況

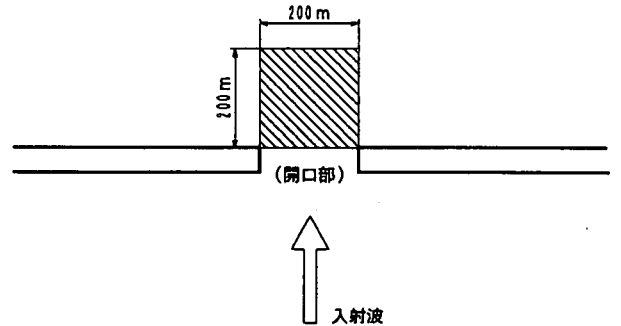


図-9 各種トレンチ工の効果の検討のための検査領域

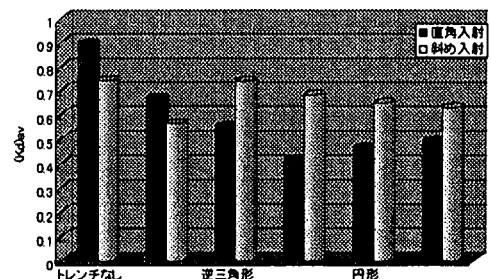


図-10 各種トレンチ工を設けた場合の検査領域内の平均波高比形状

への侵入波があまり低減されないことがわかる。これは、上述したように、入射波が港内側に曲げられ、そのままストレートに港内へ侵入するようになるためと考えられる。

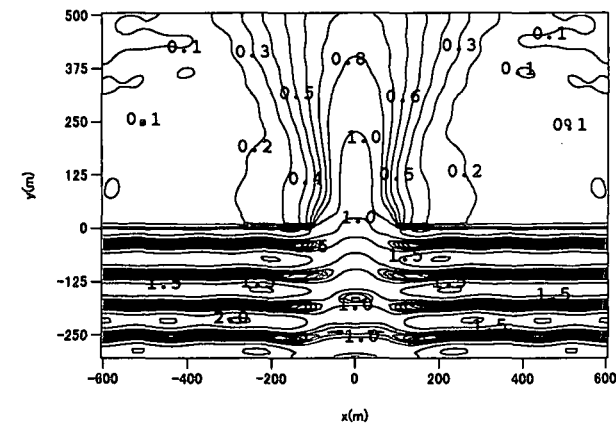


図-11 トレンチを設けない場合の波高分布($\theta = 0^\circ$, $T = 15s$)

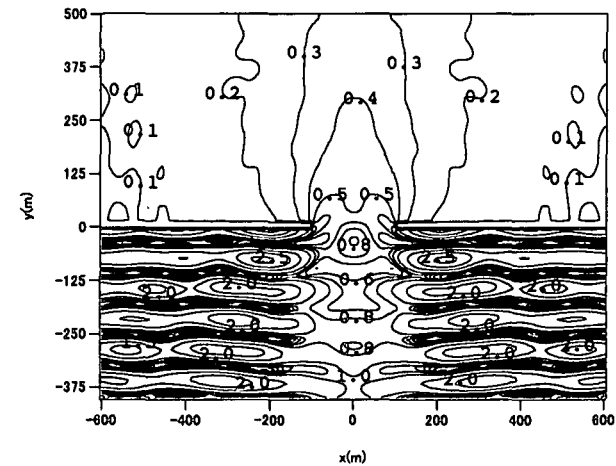


図-12 円形トレンチを設けた場合の波高分布($\theta = 0^\circ$, $T = 15s$)

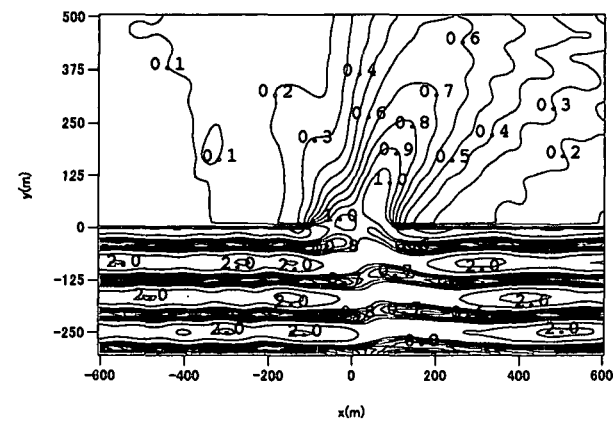


図-13 トレンチを設けない場合の波高分布($\theta = 30^\circ$, $T = 15s$)

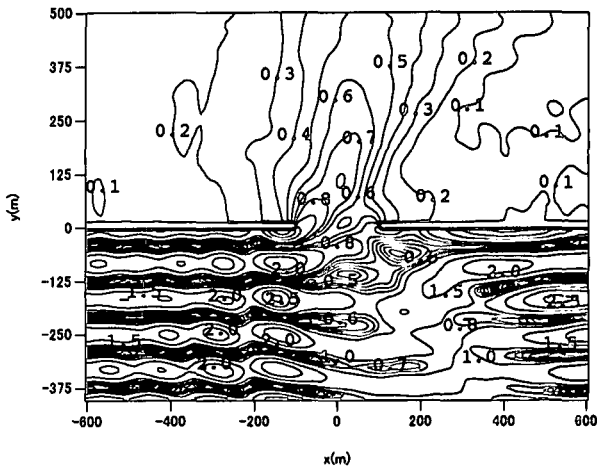


図-14 円形トレンチを設けた場合の波高分布($\theta = 30^\circ$, $T = 15s$)

4. 水深方向形状に関する検討

上記までの検討結果よりトレンチの平面形状として円形、ひし形、四角形トレンチが侵入波低減工として優位であることが判明した。ここでは、これらのトレンチの施工面を考慮して、図-15に示すようにトレンチ外縁部の水深方向形状を1/3勾配および1/5勾配にしたときの効果について検討する。なお、算定では、図中に示すように、1/3勾配および1/5勾配共に2段で近似した。

図-16は、円形トレンチにおいてそれぞれ異なる勾配のものを開口部沖合に設けた場合とトレンチを設けない場合の平均波高比の比較を示す。平均波高比の算定に用いた検査領域は図-10に示す領域である。

この図より、トレンチ外縁部の水深方向形状を1/3勾配~1/5勾配程度にしても侵入波低減工としての効果はほとんど変化しないことが分かる。

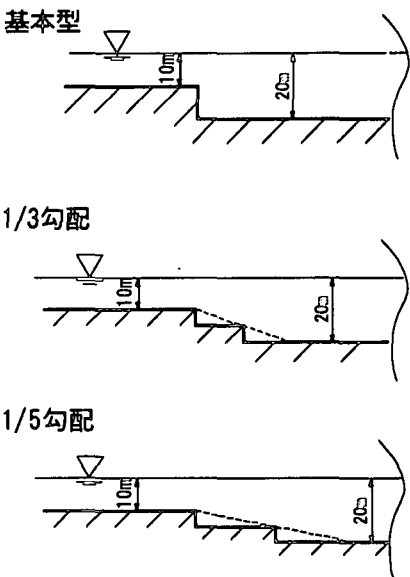


図-15 各傾斜勾配を有するトレンチの水深方向形状

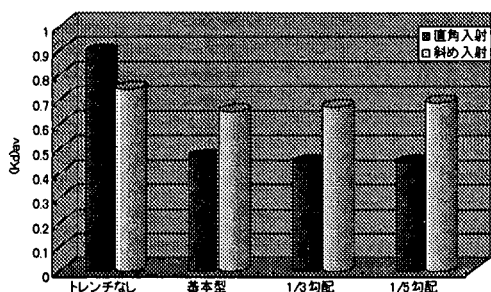


図-16 各傾斜勾配を有するトレンチ工の平均波高比

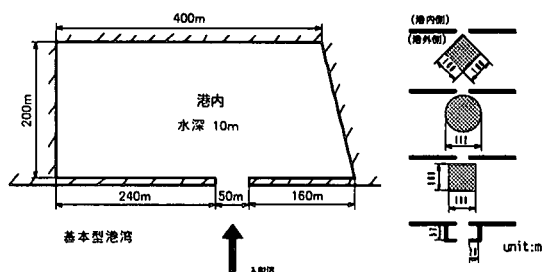


図-17 基本型港湾および各トレンチ工と矩形共振装置の配置状況

5. 港湾への適用

ここでは、図-17に示すように最終的に有効であることが確認された円形、ひし形、四角形トレンチ工を基本型港湾の港口部沖合に設け、それによる港内静穏化効果を数値実験により検討した。ここで、統一した比較を行うため、各トレンチ工の面積は1万平方メートルとし、トレンチ工内の水深は20m、その他の水深は10mと一定にした。そして、トレンチ工の配置状況は図中に示すように、トレンチ工の最も岸側の部分が開口部沖合25mになるようにした。また、中村ら³⁾により研究がなされている矩形型共振装置を港口部に設ける方法による結果とも比較し、各防波施設による静穏化効果の特徴などを明らかにした。

(1) 港内平均波高比

図-18は各港湾モデルの港口部に直角入射波($\theta = 0^\circ$)が作用するときの港内平均波高比の周期特性を示す。

この図より各トレンチ工を港口部沖合に設けた場合の港内平均波高比は、基本型港湾と比較して、周期 $T = 8$ s付近から $T = 20$ s付近にかけて6~7割程度ほどになっており、比較的広い周期帯で安定した静穏化効果が見られる。また、各トレンチ工を対象に港内平均波高比を比較すると、ひし形トレンチ工が最も効果的といえるが、各トレンチ工でそれほど有意な差は見られない。

一方、各トレンチ工の港内平均波高比と矩形型共振装置モデルのそれを比較すると、各トレンチ工を港口部沖合に設けた場合は矩形型共振装置を設けた場合の波浪制御効果にやや劣るようである。ここでは、各トレンチ工の最も岸側の部分を開口部から25mに設定したが、図-5の波高比のコンターを見てもわかるように直角入射の条件の場合、トレンチ工の背後では岸側へ行くほど波高比が下がる傾向にあるため、この設置距離を大きくすると、さらに港内侵入波を低減でき港内静穏化効果は改善されるものと考えられる。しかし、開口部からトレンチ工を離しすぎると斜め入射波の条件下において、波がそのまま港内へ侵入することになり得策とは言い難い。

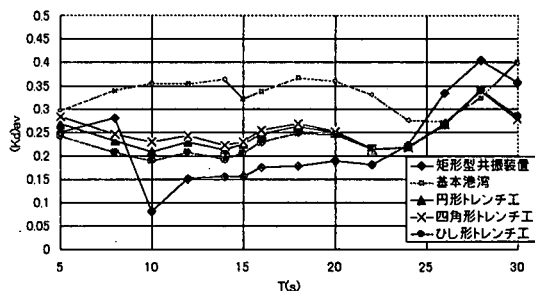


図-18 基本型港湾と各トレンチ工および矩形共振装置を設けた場合の港内平均波高比の比較($\theta = 0^\circ$)

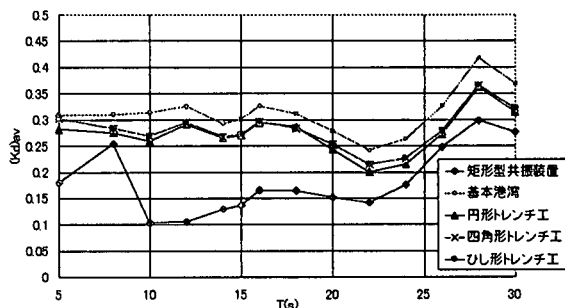


図-19 斜め入射波を作用させたときの基本型港湾と各トレンチ工および矩形共振装置を設けた場合の港内平均波高比の比較($\theta = 30^\circ$)

図-19は各港湾モデルの港口部に斜め入射波($\theta = 30^\circ$)が作用するときの港内平均波高比の周期特性を示す。

この図より、各トレンチ工を港口部沖合に設けた場合の港内平均波高比と基本型港湾のそれとを比較すると、各トレンチ工の方が若干低いものの効果的に港内静穏化が行われているとはいえない。一方、矩形型共振装置を設けた場合では、広い周期帯で安定した港内静穏化効果が得られていることがわかる。

以上の結果よりトレンチ工による港内波浪の静穏化に関しては波向きの影響を受けやすいという欠点のあることがわかる。

(2) 港内波高分布

図-20, 21は波周期 $T = 15$ sの直角入射波の条件における基本型港湾と円形トレンチを港口部沖合に

設けた場合の港内波高分布を示す。

この図より、円形トレンチ工を港口部沖合に設けたことにより、港内が静穏化できることがわかり、トレンチ工の両側で高波高領域となっていることから、入射波が屈折し、堤体より波が反射していることがわかる。

図-22は波周期 $T=15$ s の直角入射波の条件における矩形型共振装置を設けた場合の港内波高分布を示す。

この図より、矩形型共振装置を設けた場合、円形トレンチ工を港口部沖合に設けた場合よりさらに港内が静穏化されていることがわかる。また、港口部付近およびその沖合に着目すると、矩形型共振装置を設けた場合では、高波高領域が出現しているのに対し、円形トレンチ工を港口部沖合に設けた場合では、穏やかな波高分布を示す。このことから、矩形型共振装置を設けた場合より、円形トレンチ工を港口部沖合に設けた場合の方が、船舶が入出港する際に船舶の安全性を確保できるといえる。ここでは、円形トレンチ工を代表例として述べたが、ひし形、四角形トレンチ工においても同様の結果が得られた。

6. 結語

(1) 港口部沖合にトレンチ工(深溝)を設けると、屈折現象により主波向きを変化させることができ、港内侵入波を低減できる。

(2) 港口部沖合に平面形状が円形、ひし形、四角形のトレンチ工を設けると、港口部に直角入射する波に対して効果的に港内が静穏化できる。ただし、斜め入射波に対して、その効果は十分でない。

(3) トレンチ工の外縁部を $1/3 \sim 1/5$ 程度の傾斜勾配にしてもその効果はほとんど低下しない。

(4) 港内静穏化のための共振装置工法とトレンチ工法を比較すると、作用波の波向きに対して安定した効果が得られるのは共振装置工法である。ただし、共振装置工法では、港口部付近の波高が高くなりやすい。一方、トレンチ工法では、屈折現象を利用するため、港口部付近の波高は比較的穏やかであり、航行船舶には好都合である。

参考文献

1) 中村孝幸, 森田知志, 加藤孝輔: 鉛直線グリーン関数法による水深変化を伴う港湾域の波高分布の算定法, 海岸工学論文集, 第44巻, pp.16~20, 1997.

2) Mei, C.C.: The applied dynamics of ocean surface waves, John & Sons, pp.59-182, 1983.

3) 中村孝幸, 森田知志, 加藤孝輔: 港内波浪の静穏化のための港口部共振装置の有効性について, 海岸工学論文集, 第45巻, pp.721~725, 1998.

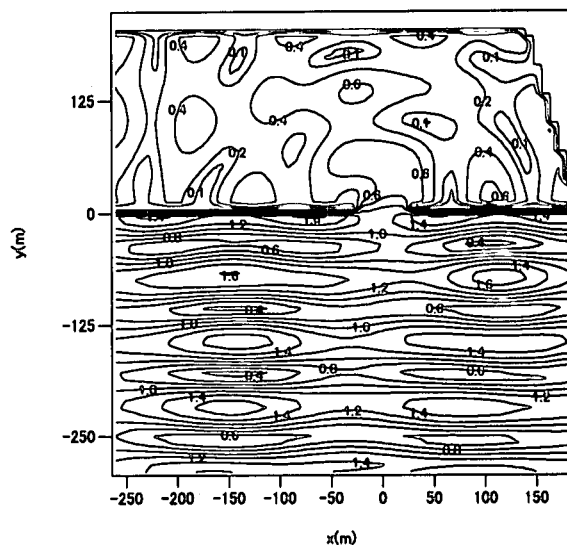


図-20 基本型港湾における港内波高分布 ($\theta=0^\circ$, $T=15$ s)

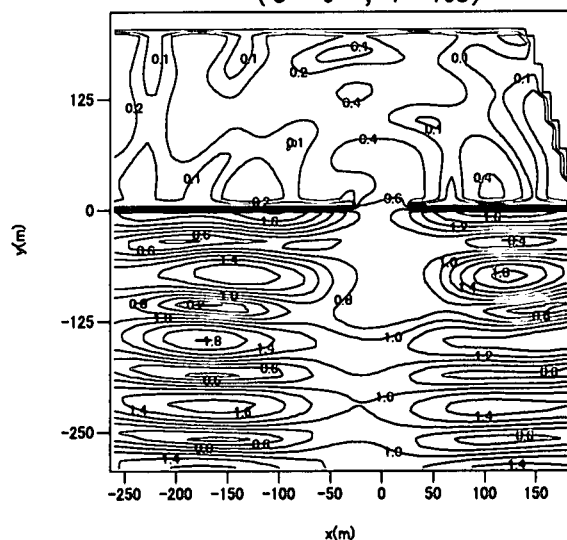


図-21 円形トレンチ工を設けた場合の港内波高分布 ($\theta=0^\circ$, $T=15$ s)

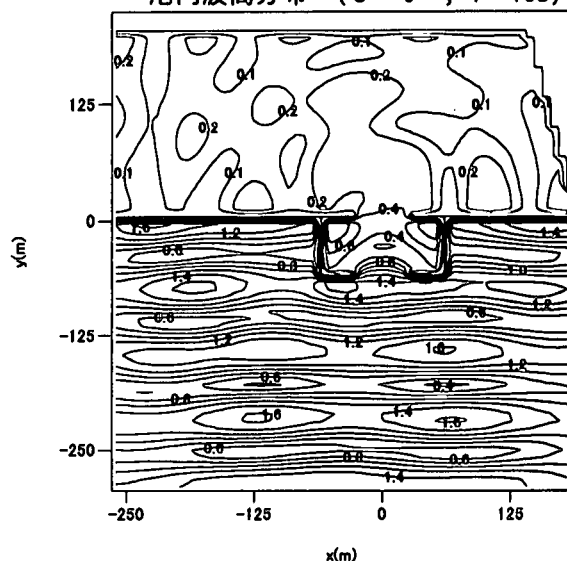


図-22 矩形型共振装置を設けた場合の港内波高分布 ($\theta=0^\circ$, $T=15$ s)