

V字型航路掘削による波浪制御と その有効適用範囲に関する基礎的研究

APPLICABILITY OF THE WAVE-CONTROL METHOD
USING NAVIGATION CHANNEL WITH V-SHAPED CROSS SECTION

印牧史人¹・由比政年²・國田 治³・石田 啓⁴

Fumihito KANEMAKI, Masatoshi YUHI,
Osamu KUNITA and Hajime ISHIDA

¹工修 福井県 土木部 (〒910-8580 福井県福井市大手三丁目17-1)

²正会員 博(工) 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

³正会員 博(工)(財) 国際臨海開発研究センター (〒107-0052 東京都港区赤坂1-9-20)

⁴フェロー 工博 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 金沢市角間町)

Deeply dredged navigation channels have significant influences on waves incoming to harbors. The present study examines the basic characteristics of wave refraction induced by a deeply dredged channel with V-shaped cross section. Systematic numerical computations are carried out for regular waves on the basis of parabolic mild slope equation. The influences of incident wave angle as well as of the wave period have been studied for a channel with 1,000 m length, 200 m width, and 10 m depth. The numerical results have shown that the V-shaped channel has remarkable effects in attenuating the incident waves to port entrance when the incident wave period is larger than 7 s and the incident angle is less than 30 degrees.

Key Words : Wave control, refraction, approach channel, V-shape, harbor tranquility, wave attenuation, trench.

1. はじめに

船舶の航行を阻害することなく、航路・泊地への進入波を低減し、静穏度を確保するための技術開発を進めることは、現在においても、海岸・港湾工学における重要課題の一つである。こうした観点から、航路・泊地への進入波の伝達について、実務的な事例検討を中心に、広く研究が進められてきた。これらの既往研究の一部として、航路掘削の影響に関する解析結果^{1),2),3)}が報告されており、航路部分の水深変化に誘起された屈折効果が、入射波の進行に顕著な影響を与え得る事が指摘されている。

著者らは、船舶航路をV字型に掘削して波向きを制御することで、航路・泊地の静穏化を図る工法を提示してきた^{4),5)}。V字型航路掘削による波浪制御は、波の屈折を基本原理として利用するものであり、図-1に示すように、沖に向かい航路に沿って地形をV字型に掘削することで、凹レンズ型の屈折効果により進入波を屈折させ、波のエネルギーを側方へ逸らすことで航路部および港内の波高を低減するものである。この種の掘削型地形改変による波浪制御は、船舶の航行性を損なうことがないため、港湾開

口部からの入射波を低減し、港湾設計の自由度を拡張するための新しい手法として期待できる。

著者らは、これまでに、実験的・数値的な基礎検討を実施し、一定の条件下において、V字型航路掘削により、港湾開口部からの侵入波を効果的に低減可能であることを示している^{4),5)}。本研究では、こうした従来の検討をさらに発展させ、入射波の周期および波向きを広範な範囲で体系的に変化させて数値解析を行い、その有効適用範囲や留意点を明らかにすることを試みる。

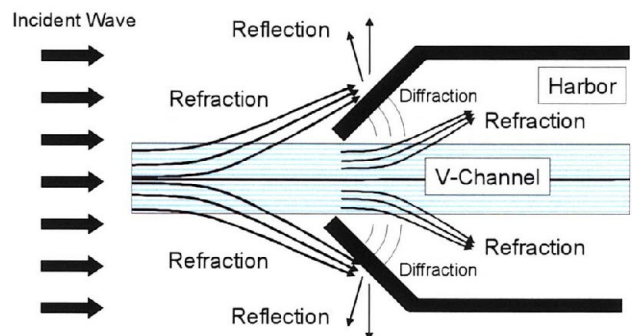


図-1 V字型航路掘削による波浪制御の概念

2. 解析の手法

(1) 解析モデル

船舶航路をV字型掘削することでもたらされる屈折特性および波浪制御効果を明らかにするために、放物型近似された緩勾配方程式^{6),7)}を用いた数値解析を行った。

$$A_x - i(k - k_0)A + \frac{(kCC_g)_x}{2kCC_g}A - \frac{i}{2kCC_g}(CC_g A_y)_y = 0 \quad (1)$$

ここで、 A は複素振幅、 k は波数、 k_0 は基準点における波の波数、 C および C_g は波速および群速度、 i は虚数単位、下付き添え字の x, y は、偏微分を意味する。 x 方向が入射波の進行方向に対応している。上式 (1) に対して、クランク・ニコルソン法に基づく差分化を行い⁸⁾、航路上を伝播する波に対する波高変化の数値解析を行った。

(2) 解析条件

解析条件としては、図-2(a)に示すように、沿岸方向および岸沖方向がそれぞれ 1,000 m、一様水深 10 m の地形上に、V 字型断面（図-2(b)）を持つ航路を配置している。この V 字型航路掘削の諸元としては、全幅 200 m、最大深さは 20 m（周辺水深+10 m の掘削）で航路中央に向かって 1/10 の勾配で航路両端から掘削されているものとする。航路掘削開始地点は沖側から 50 m の地点で、ここから航路横断面の勾配と同じ 1/10 の勾配で標準断面に接続するよう設定した（図-2(c)）。

入射波は、単一成分の一方方向規則波として設定した。ここで、波浪制御の適用範囲を探る上で、入射波周期と入射角が重要なパラメータとなることから、0~35 度（2.5 度刻み 15 ケース）の範囲で入射角を、1~20 s（1 s 刻み 20 ケース）の範囲で周期を変化させ、計 300 ケースの解析を行った。以下では、入射波高により無次元化された波高分布の解析結果について示すこととする。

3. V 字型掘削航路周辺の波高変化

(1) 入射波周期の影響

計算結果の一例として、図-3 に 4 ケースの波高分布を示す。これらの図は入射角を 0 度とし、入射波周期を 5 s、8 s、10 s、20 s と変化させた場合の波高分布を示している。また、図中の濃淡の濃い部分が減衰の顕著な領域を、濃淡の淡い部分は増幅の顕著な領域を表している。

これらの図から、航路部分に入射した波は、水深の変化により屈折し、すみやかに側方へと波向きを変化させ、航路内の波高が低減していること、一方

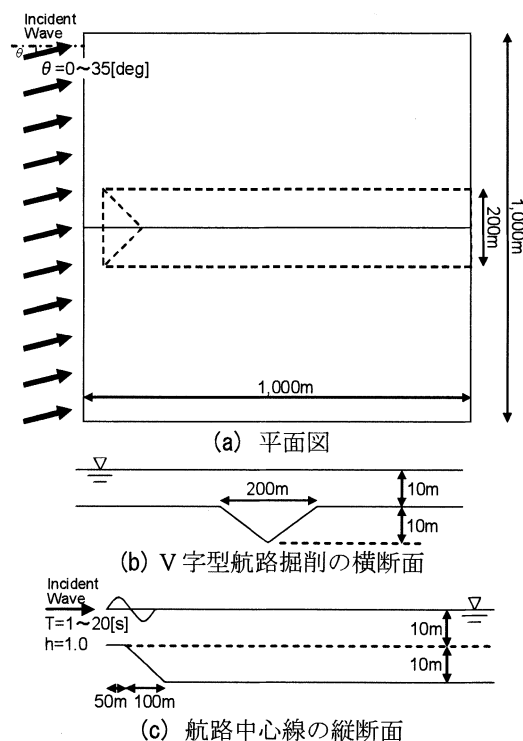


図-2 計算条件の設定

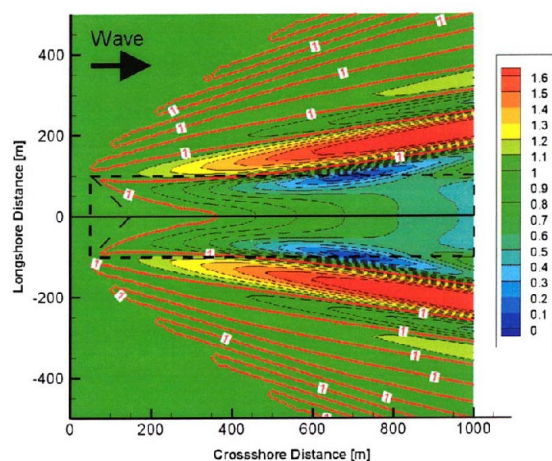
で航路外では、側方へ屈折した波と入射波の重ね合わせにより局所的に波高が増幅していることが分かる。また、航路内の波高の減衰の程度、入射波の屈折の程度は周期 8 s 以上の結果と、周期 5 s で大きく異なり、短周期の場合は波の屈折効果が弱く波高減衰効果があり期待できないことが窺える。

図-4 は図-3(a)~(d)それぞれの波高分布から航路中心線上の値を抽出して比較した図である。入射波の周期による波高減衰効果の違いがより明確に表され、周期 8 s 以上の場合に顕著な効果が認められる。例えば入射波周期 10 s の場合、所定の減衰効果を得るために必要な距離として、この条件下では、入射波高を 50 %、20 %まで低減するために、それぞれ、250 m（深海波長の約 2.7 倍）および 500 m（同約 5.4 倍）程度の航路長確保が必要という結果となった。なお、図-4 の横軸（岸沖方向距離）で 50 m の地点を航路掘削開始地点として航路長を算出している。

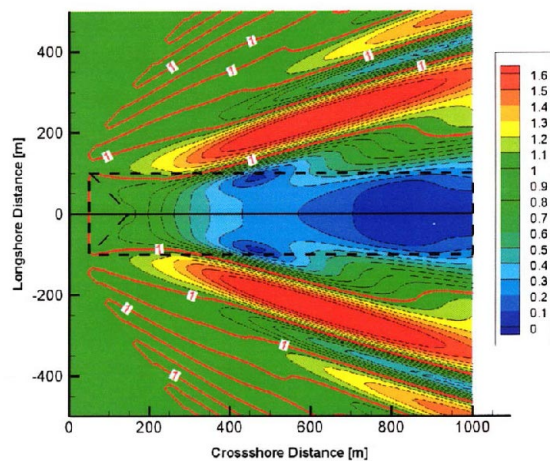
一般に、航路の長さは、船舶のストップングディスタンスである船長の 4 倍の距離を確保できるよう、船長の 5 倍以上に計画することとされている。重量トン数 6 万 DWT のコンテナ船ならば、標準的な船長は 286 m であるから 1,400 m 程度の航路長が確保されることになる。よって、航路沖合部から V 字型掘削を開始することにより、標準的な航路設定長の範囲内で、充分な波高低減効果を期待できる。

図-5 は、縦軸に航路中心線上距離を、横軸に周期をとり、入射波周期と航路中心線上距離に対する波高の変化をコンター表示する形で航路中心線上の波高分布を比較したものである。

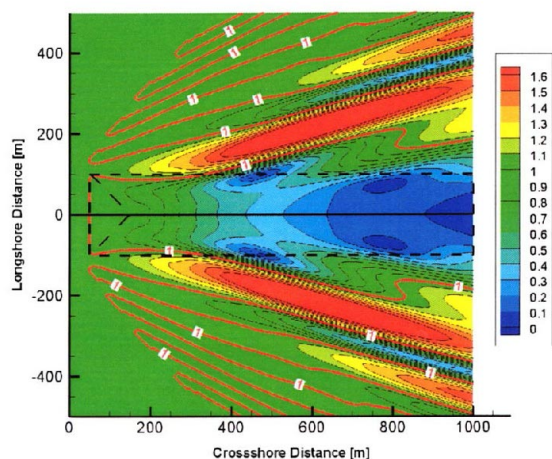
波高低減率 50 %のラインに注目すると、入射波周期 5~7 s 付近を境界に波高低減効果が大きく変



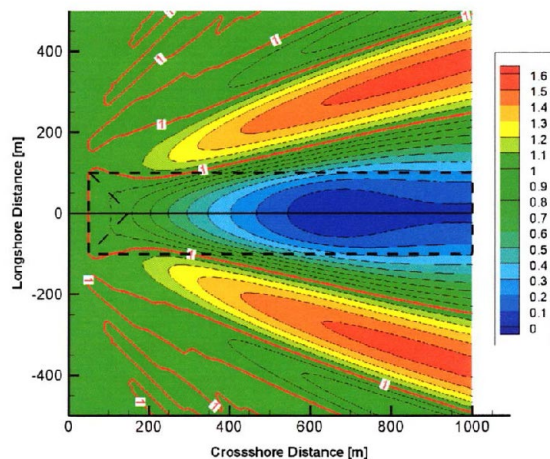
(a) 周期 5 s



(c) 周期 10 s



(b) 周期 8 s



(d) 周期 20 s

図-3 入射角 0 度での波高分布図 (航路位置は破線で表示)

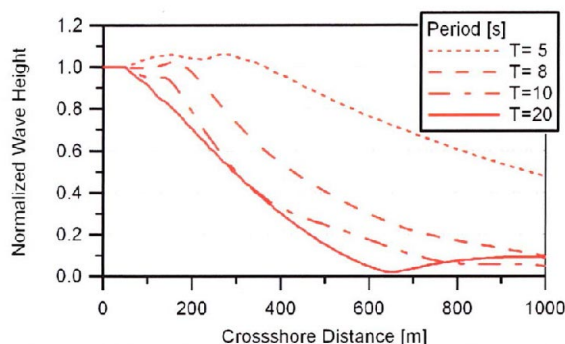


図-4 入射角 0 度での航路中心線上における波高変化

化する。7 s 以上の入射波周期の場合、航路長 300～400 m 以上で航路中心部の波高は 50 %以下まで低減し、20 %まで波高を低減するには 500～700 m 以上の航路長が必要になる。これに対し 5 s 以下の周期では 1,000 m の航路長があっても波高は 50 %以下まで低減されない。

(2) 入射角の影響

図-6 は入射波を航路法線に対して 25 度の角度で入射させた場合の波高分布である。図の左下から右上に向かって波を入射させた。

水深変化による入射波の屈折効果が確認されるが、

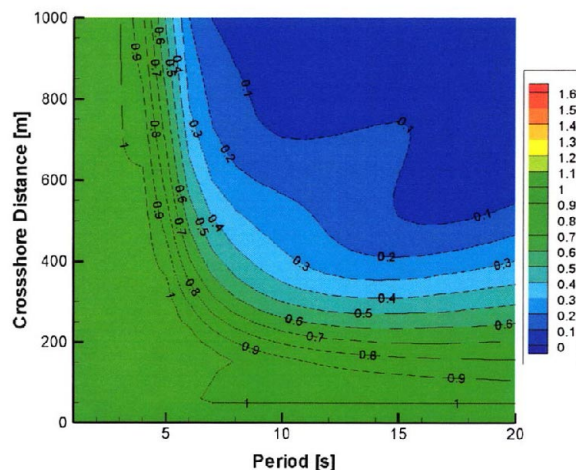


図-5 入射波周期、航路中心線上距離と波高の関係図 (入射角 0 度)

図-6 の場合には、図中右下方向へ屈折した波がほぼ航路外縁に沿う方向に屈折しており、航路中心線を境に波の入射側では航路内の波高はほとんど低減されていない。

図-7 は、入射角 25 度の場合の入射波周期、航路中心線上距離と波高低減率の関係を示している。

図-7 と図-5 を比較し、波高低減効果を期待できる

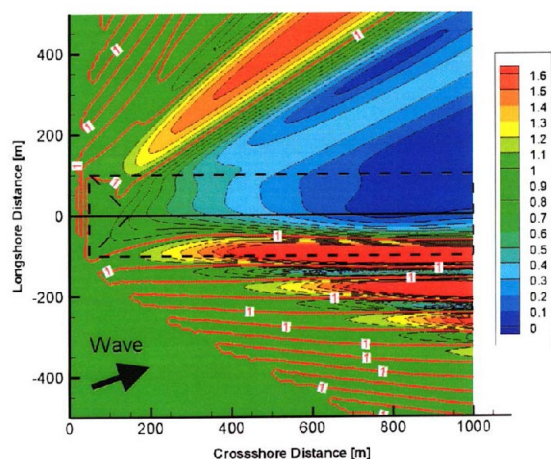


図-6 波高分布図（航路位置は破線で表示）
（周期 10 s，入射角 25 度）

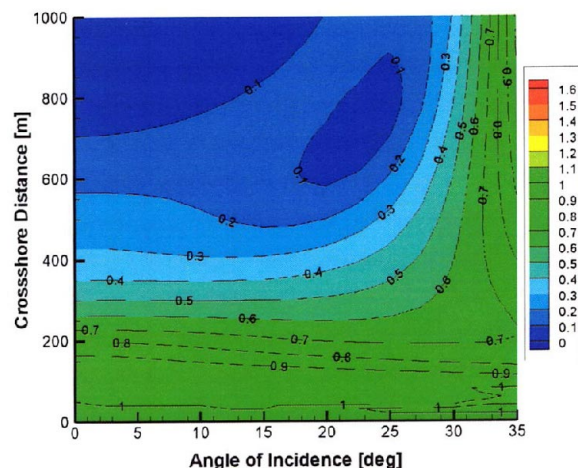


図-8 入射角，航路中心線上距離と波高の関係図
（周期 10 s）

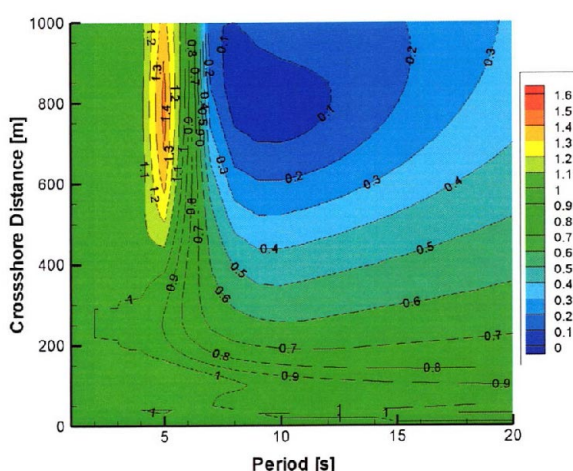


図-7 入射波周期，中心線上距離と波高の関係図
（入射角 25 度）

概ねの範囲について表-1 で比較した。入射波高の 50 % のラインと 20 % のラインそれぞれで囲まれる領域について注目すると，入射角 25 度の方が範囲が狭くなっており，V 字型掘削航路による波高低減効果は波の入射角による適用の限界があることが予想される。

また，図-7 では周期 5 s 近傍で波高の増大も見られる。これは，図-6 の所見でも述べたように，短周期の場合には波の屈折効果が弱いため，入射波と屈折波の重ね合わせが航路中心付近で発生してしまうことによるものと考えられる。

表-1 入射角による波高低減効果の発現範囲の比較

低減率	入射角	周期	航路長
50 %	0 度	6 s 以上	300 m 以上
	25 度	7 s 以上	400 m 以上
80 %	0 度	7 s 以上	400 m 以上
	25 度	7～15 s	650 m 以上

入射角による影響をさらに詳細に検討するため，入射角，航路中心線上距離に対する波高の関係を図-8 に示した。図-8 は入射波周期 10 s の場合の関係である。

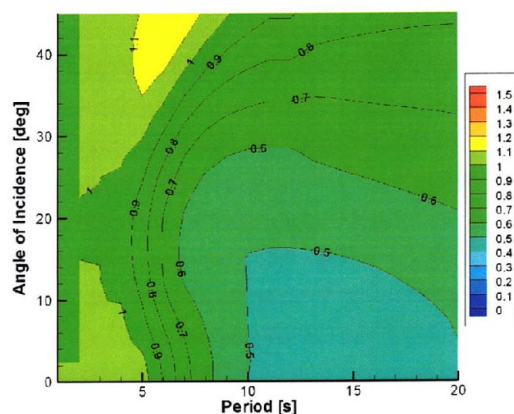
この図より，入射角が 25 度未満の範囲では一定した波高減衰効果が得られるが，28 度を超えるあたりから急激に減衰効果が低下する。波高を 50 % まで低減させるラインで判断すると，入射角 30 度が適用の限界であると言える。すなわち，入射角 0 ～30 度の範囲では安定して波高減衰効果が認められるが，30 度を超えると減衰効果は急減する。この傾向は周期がより大きな場合でも同様であった。

(3) 多成分波の場合に関する基礎検討

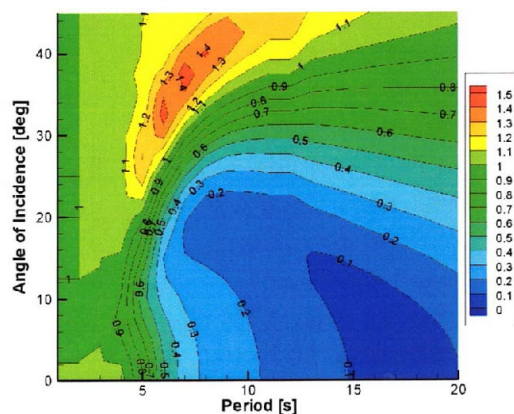
これまでの結果を元に，多成分波の場合に関して基礎的な検討を行った。図-9 は，航路中心線上の 2 地点（航路掘削開始地点から 250 m および 500 m）における，入射波周期および入射角に対する波高変化図である。これらの地点は図-4 にて，周期 10 s の場合に入射波高が 50 %，20 % まで低減される位置に対応する。

図-9 (a) より，航路掘削開始地点から 250 m の地点において，入射波高を 50 % まで低減することができるのは，概ね周期 10 s 以上，入射角 15 度以下の成分についてであることが分かる。また，500 m 地点での波高分布（図-9 (b)）からは，入射波高を 20 % まで低減できる入射波成分は概ね周期 10 s 以上，入射角 20 度以下であり，50 % まで低減できるのは周期 6 s 以上，入射角 30 度以下の成分であることが分かる。どちらの地点においても，周期 6 s 以下，入射角 35 度以上の成分に対しては波高低減効果がほとんど無く，むしろ 30 % 程度増大する可能性があることも見て取れる。

線形の重ね合わせを仮定すれば，多方向・多成分の入射波に対する効果も図-9 に例示した結果から推定が可能である。入射波の非線形性や成分間の干渉まで考慮したより詳細な特性については，今後ブジネスク方程式を用いた解析を実施する予定である。

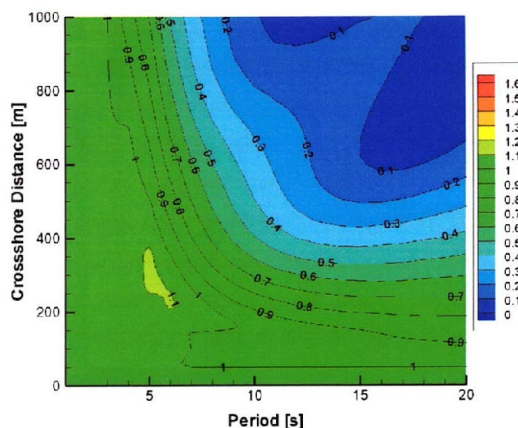


(a) 航路中心線上 250 m 地点

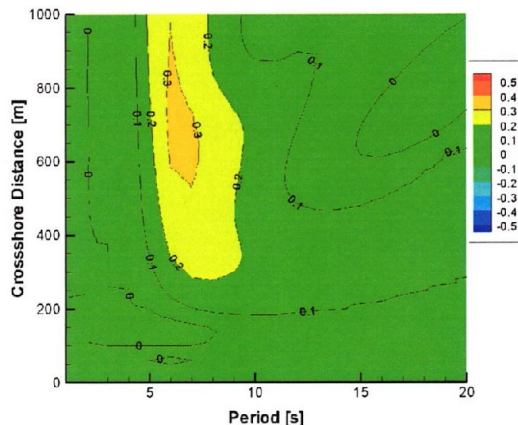


(b) 航路中心線上 500 m 地点

図-9 入射波周期、入射角と波高の関係図



(a) 入射波周期、中心線上距離と波高の関係図



(b) 台形断面の波高と V 字型断面の波高の差

図-11 台形断面における入射波周期、中心線上距離と波高の関係 (入射角 0 度)

4. 台形断面航路との比較

通常の航路掘削は、必要水深を満たす経済的な形状として台形型の断面であること、また仮に V 字型掘削を行ったとしても、埋没により台形に近い断面になる可能性があることから、下記のような台形型断面の航路についても、これまでと同様の検討を行い、V 字型断面との有効適用範囲の比較を実施した。

台形型航路は、図-10 に示すように V 字型航路の横断面を鉛直位置 $Z=-15$ m でカットして台形にしたものである。台形型断面の最大掘削深は、V 字型断面の 1/2 倍であり、必要な掘削量は V 字型断面の 3/4 倍になる。

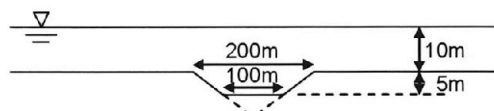


図-10 台形断面航路掘削の横断面

(1) 入射波周期

図-11 (a) は、台形断面における入射角 0 度の場合の入射波周期、航路中心線上距離と波高の関係図である。V 字型断面の場合の波高分布 (図-5) と比較し、波高分布の差をとった図が図-11 (b) である。周期 5~10 s、航路中心線上距離 300 m 以上の範囲に

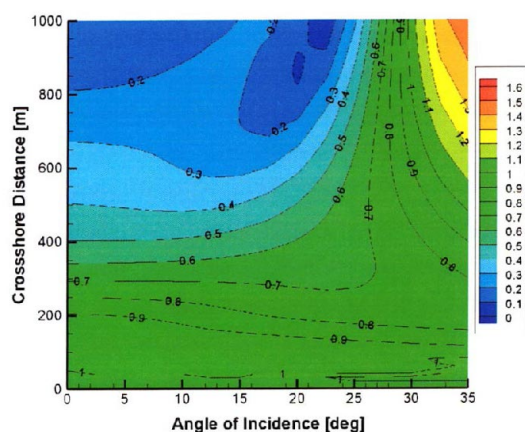
おいて、台形断面の波高分布が 0.2~0.3 程度高い結果になっている。これは V 字形状の場合に比べて周期に対する適用範囲が狭くなったこと示している。周囲の水深との関係にもよるが、V 字状に掘削することにより、台形状の場合よりも水深差が大きくなり、また水深変化域も拡張されたことで、より短周期の波に対しても効果を得られるようになったと考えられる。

入射角 25 度の場合には、紙面の制約により図示は控えるが、周期 7~16 s、航路中心線上距離 400~700 m の範囲において台形断面の波高分布が高い結果となり、断面形状による適用範囲の変化がより顕著に現れてくる。

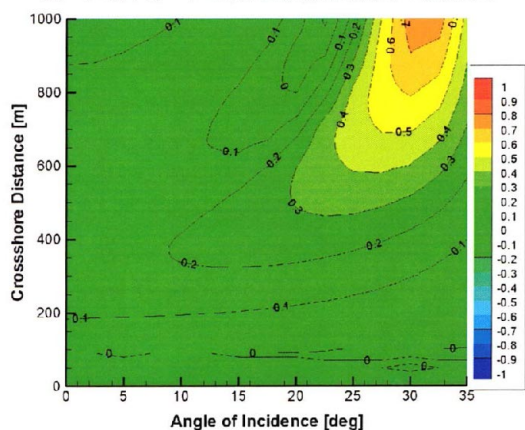
(2) 入射角

入射角の影響についても同様に、台形断面の場合の波高分布と V 字型断面の場合との比較を行った。

図-12 は入射波周期 10 s の場合であり、波高を 50 % まで低減させるラインが、V 字型断面の場合 (図-8) では入射角 30 度付近に位置していたのに対し、台形型断面の結果では 25 度付近まで移動している。関連して、入射角 25~35 度、航路中心線上距離 600 m 以上の領域において、台形断面航路の有する減衰効果が V 字型断面の場合と比較して大幅に低下している (台形断面の方が波高が大きくなって



(a) 入射角，中心線上距離と波高の関係図



(b) 台形断面の波高とV字型断面の波高の差

図-12 台形断面における入射角，中心線上距離と波高の関係（入射波周期 10 s）

いる）。断面形の違いによる無次元波高の増大幅は，周期に対する比較では最大でも0.5程度であったのに対し，角度に対する比較では最大で1.0程度と大きな差が生じている。

以上より，V字型断面の掘削は，周期および入射角に関する有効適用範囲をとともに拡大する効果を有するが，中でも，入射角に関する制約を緩和する上で，より大きな改善効果が見込めると判断できる。

5. おわりに

本研究では，船舶航路をV字型に掘削して波向きを制御することで航路・泊地の静穏化を図る工法に着目し，その適用性を明らかにするために，体系的な数値解析を実施した。その主要な成果は以下のようまとめられる。

- (1) 入射波周期 5～7 s 付近を境界に，V字型掘削航路の波高低減効果は大きく変化する。周期 7 s 以上の入射波に対しては，顕著な波高低減効果が認められる。一方，周期 6 s 以下の入射波に対

する効果は小さい。入射角 20 度以上で，周期が小さい場合には，航路内で波高が増幅することもあり得る。この点については，今後，更なる検討が必要である。

- (2) 入射角 0～30 度の範囲では安定して波高減衰効果が認められる。一方，入射角が 30 度を超過すると減衰効果は急減する。
- (3) 本研究で対象とした条件下では，航路長が概ね 300 m 以上あれば，入射波周期 7 s 以上，入射角 30 度以内の範囲において，50 % 程度の波高減衰効果が期待できる。
- (4) V字型断面の航路掘削は，台形断面の場合と比較して，入射波周期・入射角に関する有効適用範囲を拡大するために有効であり，特に，入射角に対する制約条件を緩和する上で大きな効果を発揮する。

波浪の屈折を基本原理とする本工法自身には，入射波のエネルギー総量を減衰させる効果はない。このため，静穏化領域を形成する代償として，航路周辺あるいは外縁付近に波高増幅域が形成される。この点については，航路を横切ろうとする小型船舶への危険性，底質の巻き上げと航路埋没の関連等を含め，引き続き検討が必要である。

今後，多成分多方向の入射波に関する検討を進めるとともに，入射波を片側に屈折させる非対称掘削の有効性，航路埋没対策としての効果等についても，研究を進めていく予定である。

参考文献

- 1) Zwamborn, J.A. and Grieve, G.: Wave attenuation and concentration associated with harbor approach channels, *Proc. 14th Int. Conf. Coastal Eng., ASCE*, pp. 2068-2085, 1974.
- 2) Beltrami, G.M., Girolamo, P. and Pellegrini, G.: Influence of dredged channels on wave penetration into harbors: The Malamocco Inlet case, *Proc. 4th Int. Conf. Coastal Structures*, ASCE, pp. 702-714, 2003.
- 3) Li, Y.S., Liu S.X., Wai O.W. H. and Yu Y.X.: Wave concentration by a navigation channel, *Applied Ocean Research*, Vol.22, pp. 199-213, 2000.
- 4) 國田治，由比政年，山崎純一，小瀧伸也，石田啓：船舶航路のV字型掘削による波浪制御の適用性に関する実験および数値解析，*海岸工学論文集*，第 54 巻，pp. 771-775，2007.
- 5) Kanemaki, F., Kunita, O., Yuhi M. and Ishida H.: Reduction of Wave Penetration into Harbors by V-Shaped Approach Channel, *Proc. 19th Int. Offshore and Polar Eng. Conf.*, in press, 2009.
- 6) Berkoff, J.C.: Computation of combined refraction-diffraction, *Proc. 13th Int. Conf. Coastal Structures*, ASCE, pp. 471-490, 1972.
- 7) Radder, A.C.: On the parabolic equation method for water-wave propagation, *J. Fluid Mech.*, Vol. 95, pp. 159-176, 1979.
- 8) 土木学会編：水理公式集，713p，1999.