

港内静穏度の計算法

高山 知 司

1. ま え が き

港内に静穏な水域を確保することは、新しい港の計画や既存の港の改良および拡張の計画の際に港湾技術者が常に考慮しておかなければならない重要な問題の一つである。「静穏な水域」とは、船舶が完全に避泊・係留することができ、かつ荷役作業を支障なく行える水域のことである。

港内を静穏に保つためには以下の2つのことが重要であるといわれている。i) 港口幅に比して港内幅を広くとること、ii) 港口からの進入波のエネルギーを速やかに消散するような消波海浜あるいは消波構造物を設けること、である。i)は、港内幅を広くとることによって波のエネルギーを拡散し、波高を下げようとするものであり、ii)は、進入波の波高の高い部分が直接岸壁によって反射され、港内奥深くまで侵入するのを防ごうとするものである。

水域の静穏を示す言葉として「港内静穏度」という言葉が広く用いられているが、「港内静穏度」

表－1 荷役状況調査からみた荷役の中断 昭和54年12月～55年1月

	港	タイムシート	荷 役 ア ン ケ ー ト	中 断 (待機, 中止)			中 止 , 再 開		
				風 速	港 内 H 1/3	港 内 Hmax	風 速	港 内 H 1/3	港 内 Hmax
木 材	秋田	Strong Wind & Rough Sea	海上のいかだ作業, いかだ 曳航困難	m/s 12.4	m 0.42	m 0.92	中止 20.0	m 0.91	m 1.35
	"	"	海上のいかだ作業, いかだ 航困難, 雨雪で作業が危険	4.7	0.19	0.31	中止 8.4	0.25	0.40
	新潟	Rough Sea	海上のいかだ作業, いかだ 曳航困難	11.8	0.56	1.11	再開 6.0	0.43	0.77
鉱	秋田	Rain	雨雪で貨物が濡れる	7.1	0.12	0.15	再開 9.0	0.14	0.26
	"	Strong Wind	荷役機械の操縦困難	9.0	0.14	0.26	中止 13.0	0.41	0.71
	"	Strong Wind & Snow	荷役機械の操縦困難, 粉じん の飛散, 雨雪で貨物がぬれる	17.8	0.46	0.75	再開 5.6	0.14	0.28
石	新潟	Strong Wind	荷役機械の操縦困難	17.2	欠 測	欠 測	再開 15.0	0.40	0.55
	"	Snow	雨雪で貨物が濡れる	中止 4.9	0.20	0.34	中止 5.0	0.15	0.25
チ ッ ブ	新潟	Strong Wind & Rough Sea	本船の動揺による作業困難	13.0	0.41	0.98	再開 10.0	0.23	0.42
	"	"	"	9.4	0.41	0.60	中止 7.6	0.98	1.61
雑 貨	"	記 入 な し	雨雪で貨物が濡れる	9.0	0.12	0.21	再開 14.7	0.13	0.19
	"	"	"	4.7	0.21	0.40	再開 9.8	0.25	0.49
	"	"	"	7.0	0.51	0.92	再開 12.1	0.51	0.92
	"	"	"	2.5	0.40	0.41	再開 2.9	0.07	0.11

には、波浪および風や流れなどの海象・気象条件ばかりでなく、荷役効率からみた経済条件も絡み、その判定は非常に難しい。表－1は、運輸省第一港湾建設局¹⁾が秋田港および新潟西港における係留船舶が荷役を中断あるいは中止したときの条件を調べたものである。この表からわかるように荷役を中断あるいは中止したときの原因としては、Strong Wind, Strong Wind & Rough SeaあるいはRough Seaと記されたものが多く、船舶の荷役からみると、港内静穏度には波浪と風が主要な影響要素であることがわかる。風向きにもよるけれども、一般にStrong Windの場合は波浪も高いと推定されるため、両者はお互いに影響し合っていると考えられる。RainやSnowという記載もあるが、これは荷役貨物の種類に依存しているようである。

また、港内静穏度の問題としては、荷役中の船舶の問題ばかりでなく、荒天時の船舶避泊の問題がある。巨大船舶は荒天時には港内から退避し、港外において錨泊あるいは航行して風を避けることが行われるが、中小船舶は港内で錨泊あるいは係岸避泊することになる。そのため、港内においてはこのような船舶に対しても十分安全に避泊できるほど静穏でなければならない。前記の第一港湾建設局の調査でも、停泊中の海難件数のうち28%が気象・海象に関係する原因で起っており、気象・海象の影響が大きい。

以上のように、港内静穏度の判定には波浪と風が主要な要素となっているが、風については、ウィンドスクリーンで風速を抑える検討²⁾もなされたことがあるけれども、一般には人意的に制御することは非常に困難である。一方、波浪については、われわれが従来から行ってきたように防波堤などの建設によって人意的に制御することが可能である。船舶には風と波浪の相乗効果で大きな影響を与えと考えられるので、一方を制御することによって、他方の影響は軽減できると推測される。

このことを考慮して、本稿においては人意的な制御が比較的容易な港内波浪に主眼を置いて、港内静穏度の判定法を検討することにする。

2. 港内静穏度に影響する波とその特性

港内波浪は、以下に述べる港口進入波、港内伝達波など、発生原因を異にする多くの波の重ね合わさったものとして出現するため、ここではそれらの各要素の波の特性および算定法について述べる。

(1) 港口進入波

港口進入波とは、港口部における防波堤開口部を通して港内に進入してくる波のことで、防波堤で回折された波である。この波が港内波浪の中で最も重要な波で、防波堤はこの波を低減させるために建設される。

港口進入波の算定法に関しては、半無限の直線板による光の回折に関する Sommerfeld の解が半無限防波堤による水の波の回折にも適用できることを1944年に Penny および Price³⁾が示して以来、この解は開口防波堤による波の回折に応用されてきた。この解を半無限堤(図－1)の反射率 K_r を考慮して書き直すと次式のようなになる⁴⁾。

$$\phi(r, \theta) = \frac{1}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ kr \cos(\theta - \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(r_1) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(r_1) + \frac{1}{2} \right\} \right] \\ + \frac{Kr}{\sqrt{2}} \exp \left[i \left\{ kr \cos(\theta + \alpha) + \frac{\pi}{4} \right\} \right] \left[\left\{ C(r_2) + \frac{1}{2} \right\} - i \left\{ S(r_2) + \frac{1}{2} \right\} \right] \quad (1)$$

ここに、 $C(r)$ および $S(r)$ は次式のような Fresnel 積分で、

$$C(r) = \int_0^r \cos \frac{\pi}{2} x^2 dx, \quad S(r) = \int_0^r \sin \frac{\pi}{2} x^2 dx \quad (2)$$

r_1 および r_2 は、

$$r_1 = \sqrt{4kr/\pi} \cos(\theta - \alpha)/Z, \quad r_2 = \sqrt{4kr/\pi} \cos(\theta + \alpha)/Z \quad (3)$$

で表わされる。また、 k は波数、 α および θ 、 r は図-1 に示されているような波の入射角と計算点の座標である。式(1)によって入射波高に対する波高比 Kd (回折係数とも呼ばれている) は次式で与えられる。

$$Kd = |\phi(r, \theta)| \quad (4)$$

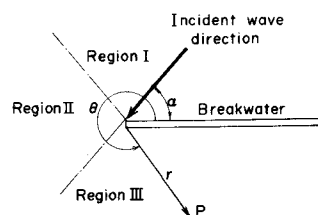
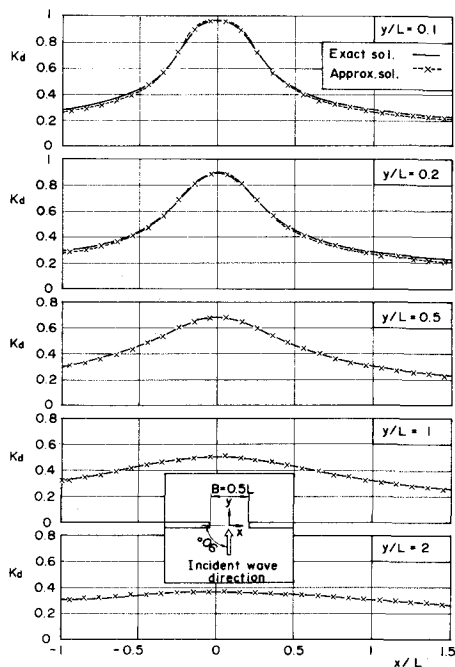


図-1 半無限堤による波の回折における座標

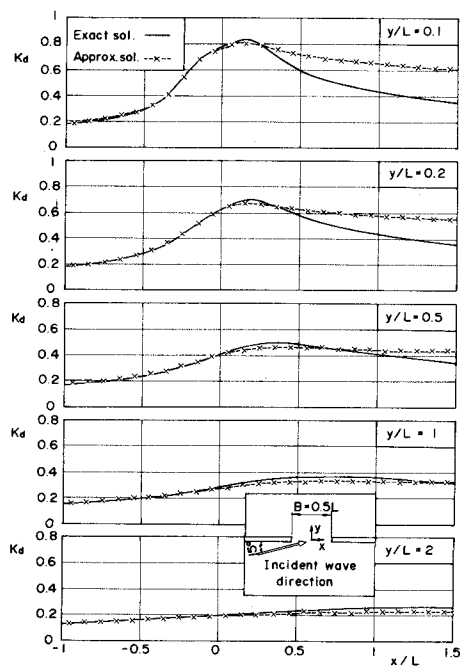
式(1)の解を開口防波堤に応用して求められた解は、防波堤面上の境界条件を完全には満足していない近似解であるが、Mathieu

関数を用いて得られた厳密解と比較すると、図-2⁵⁾で示すように開口幅比が $B/L = 0.5$ と小さくても、波の

入射角度 α が小さくなくれば、比較的良好一致することがわかる。しかし、図-2のように防波堤が一直線状に配置されるこ



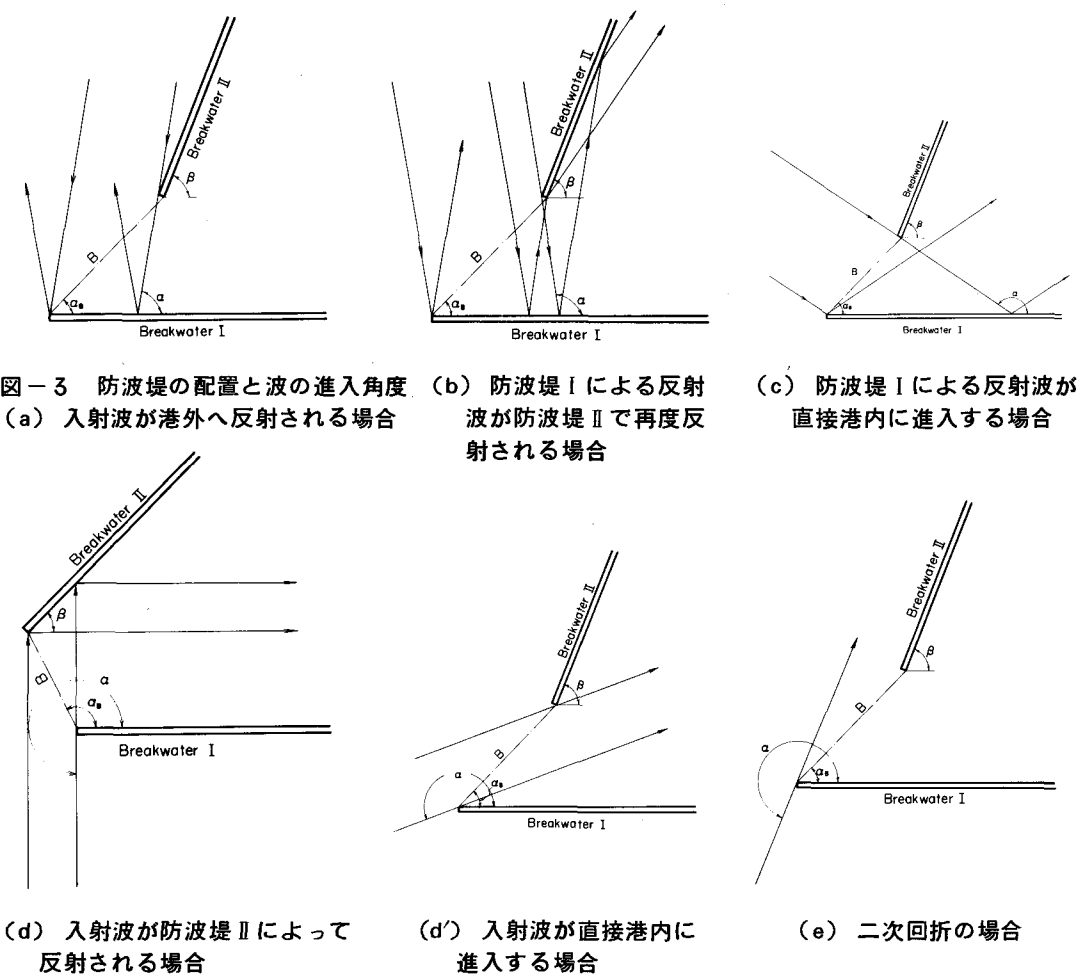
(a) $\alpha = 90^\circ$



(b) $\alpha = 15^\circ$

図-2 $B/L = 0.5$ における近似解と厳密解の比較

とはまれで、通常は、主防波堤と副防波堤から成り立っている。主防波堤は年間を通じて最も発生頻度の高い波向の波あるいは来襲波の中の高波高の波を効果的に遮蔽する方向に建設され、副防波堤は波向が季節的に変化するため、主防波堤一本では港内静穏度が十分でない場合に建設される。そのため、主防波堤は一般に延長が長く、副防波堤をその遮蔽域内に抱え込むように配置される。このような防波堤配置に対する港内波高の計算法として、Green関数を用いて解析する方法^{6),7)}や波の運動方程式を差分で解いて解析する方法^{8),9)}が提案されている。また、式(1)を用いて図-3に示されるよ



うな各種の波向に対する近似解も得られている¹⁰⁾。

近年、実際の海の波の観測技術が進み、海の波の不規則性が調べられてきている。その結果、波の周波数スペクトル形はもとより波の方向関数形までその標準形が提案されるまでに至っている。波の方向スペクトル $S(f, \theta)$ は一般に周波数スペクトル $S(f)$ と方向関数 $G(f, \theta)$ の積として、次式のように表わされる。

$$S(f, \theta) = S(f) G(f, \theta) \tag{5}$$

ここに、 f は周波数、 θ は波の主方向からの偏角である。周波数スペクトルとしては、Pierson・Moskowitz 型¹¹⁾、Bretschneider・光易型¹²⁾ および JOHNSWAP 型¹³⁾ のものがよく知られている。また、方向関数形としては Cote ら¹⁴⁾ あるいは光易¹⁵⁾ による提案式がある。よく使われる光易型の関数形を示すと、次式のようになる。

$$G(f, \phi) = G_0 \cos^{2S}(\theta/2) \quad (6)$$

ここに、 G_0 は $G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} \cos^{2S}(\theta/2) d\theta \right]^{-1}$ で与えられ、 $\theta_{\max} = \pi$ および $\theta_{\min} = -\pi$ の場合には、 $G_0 = 2^{2S-1} \Gamma^2(S+1) / \{ \pi \Gamma(2S+1) \}$ となる。 S の値としては、合田および鈴木¹⁶⁾ は S の最大値 $S_{\max}$ をパラメータとして、次式で与えている。

$$S = \begin{cases} S_{\max} \cdot (f/f_p)^5 & (f \leq f_p) \\ S_{\max} \cdot (f/f_p)^{-2.5} & (f > f_p) \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 f_p は周波数スペクトルのピーク周波数である。式(6)および(7)でわかるように、 $S_{\max}$ が増大すると、波向が一方方向に集中するようになる。合田および鈴木は方向スペクトルの性質が観測によって詳しくわかるようになるまでは、風波で $S_{\max} = 10$ 、うねりで $S_{\max} = 75$ を用いるのがよいとしている。

名古屋港における防波堤の内外で波浪の同時観測を行い、それぞれの周波数スペクトルを比較した結果によると、港内の波浪スペクトルは波を規則波として計算したのでは小さくなり過ぎ、波の方向スペクトルを考慮して計算しないと、うまく説明できないことがわかった¹⁷⁾。そこで、方向スペクトルを有する不規則波に対する計算法が規則波の重ね合わせとして開発された。この方法は半無限防波堤の解、式(1)の重ね合わせによる方法である。この方法によって計算された、 $S_{\max}$ の値に対する波高比 K_d の変化が図-4¹⁸⁾ に示してある。 $S_{\max}$ の値が小さいほど、つまり波の方向集中度が弱いほど、防波堤の遮蔽域では K_d の値が大きくなり、波の直進領域では小さくなる。 $S_{\max} = \infty$ の単一方向不規則波と $S_{\max} = 10$ の不規則波では、 K_d の値にして2倍以上異なる部分がある。

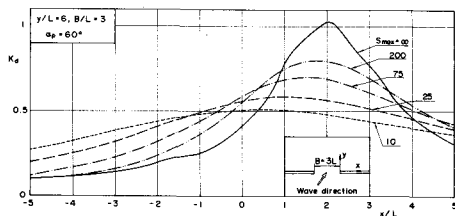


図-4 $S_{\max}$ の変化による波高比の変化

防波堤の配置によっては、主波向の波に対しては回折しか起きない場合でも、波の方向スペクトルを考えると、一部の成分波が防波堤の背面で反射を起し、港内波高を増大させる。図-5¹⁹⁾ はこのような場合における港内波高分布を示したものである。図-5 中の実線と点線は、 x 軸上の防波堤が完全反射堤および完全消波堤になっている場合の波高比を示している。防波堤の反射波によって港内波高が増大しているのがわかる。ただし、図-5 は、前述の図-3 に基づいた近似解による計算である。

以上のように、港口進入波の計算においては、波の方向スペクトル形を考慮しないと、場所的に波

高を過大に見積ったり、過小に見積ったりすることが起こる。

(2) 港内伝達波

港内伝達波とは、防波堤を越波した波によって発生する波と防波堤マウンドを通過して港内に伝わる波の総称である。図-6は、混成防波堤に関する断面模型実験結果に基づいて合田²⁰⁾が求めた港内伝達波高の算定図である。実験では規則波を対象に行われているが、不規則波に対しても港内伝達率は図-6とはほぼ一致し、また、これは有義波高だけでなく、1/10最大波高および平均波高に関しても成立することが示されている²¹⁾。混成防波堤に関する港内伝達波の周期は図-7²¹⁾に示すように有義波周期および平均周期において入射波の周期の50～80%に減少する。

その他に、防波堤の前面をテトラポッドで消波した場合や捨石堤に対する波高伝達率については多くの実験公式が示されている。また、理論的に解析しようとする試みもなされている²²⁾。このように港内伝達波高については多くの解析が行われているので、実際問題に適用する場合には、条件にあったものを用いるか、模型実験を行う必要がある。

以上の港内伝達波の解析は断面模型に対するものであるが、波は防波堤に対して直角に入射してくるとは限らず、斜めに入射してくる場合がある。その場合の伝達波の波高および周期、さらにはその伝播についてはほとんど解析がなされていないのが現状である。そのため、以下に述べるような簡便な方法が用いられている。

波が斜めに入射する場合であっても、港内伝達波は波が防波堤に直角に入射する場合と同じになると仮定して、上記の算定式を用いて港内伝達波の諸元を求める。そして、越波を起す部分を仮想の開口部として、既に求めた諸元の港内伝達波がこの仮想開口部に港外の波向と同じ向きから入射すると仮定して、回折計算を行い、港内伝達波の波高分布を推定する方法である。ただし、回折計算における S_{max} の値は港外のものと同じ値とする。

この簡便法は、実験的検証がなく、次のような問題を有している。

a) 斜め波における港内伝達波が直角入射の場合と一致するかどうか。

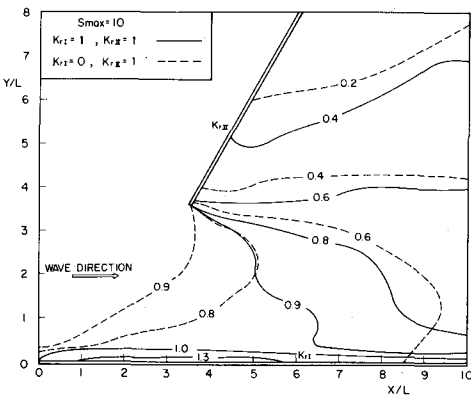


図-5 不規則波の回折図

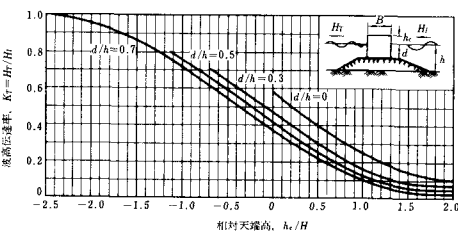


図-6 波高伝達率の算定図

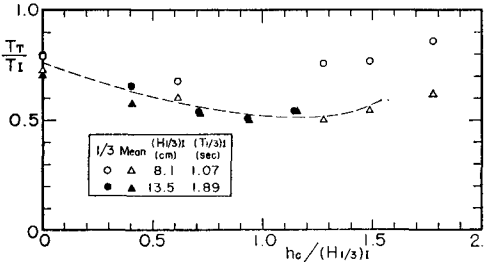


図-7 越波による伝達波の周期変化

- b) 斜め波に対する港内伝達波の波向が港外での波向と一致するか。
- c) 仮想開口部として回折計算を行うのが妥当であるか。また、 S_{max} の値は港内外で変化しないのか。

港内伝達波に関する a)～c) の問題点は港内波高の算定の上で基本的問題であり、今後、実験による検討が望まれる。しかし、現行の設計法では、防波堤の天端高は設計波高の 0.6 倍以上となっているため、波高伝達率は小さく、荒天時以外の場合、つまり港内避泊を問題にする場合以外では、無視できるように思われる。

(3) 港内発生波

港内発生波とは、港域を吹いている風によって発生される波で、港域が広く、風が強い場合には比較的高くなるので、港内静穏度に影響する場合がある。一般に港内においては岸壁などによって吹送距離が限定され、風域の幅も狭く抑えられるので、港内発生波を計算する場合には有効吹送距離を用いることが重要である。有効吹送距離 Fe は次式を用いて算定する²³⁾。

$$Fe = \frac{\sum_i Fi \cos^2 \theta_i}{\sum_i \cos^2 \theta_i} \quad (8)$$

ここに、 θ_i は i 番目の対岸距離 Fi (km) の方向と風の方向とのなす角度である。この場合、 θ_i としては $|\theta_i| \leq 45^\circ$ 程度とするのがよい。

式(8)で Fe が求まると、波高 $H_{1/3}$ と周期 $T_{1/3}$ は次式を用いて推算する²⁴⁾。

$$\left. \begin{aligned} \frac{gH_{1/3}}{U^2} &= 0.30 \left\{ 1 - 1/\left[1 + 0.004 \left(\frac{gFe}{U^2}\right)^{1/2}\right]^2 \right\} \\ \frac{gT_{1/3}}{2\pi U} &= 1.37 \left\{ 1 - 1/\left[1 + 0.008 \left(\frac{gFe}{U^2}\right)^{1/3}\right]^5 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここに、 g は重力加速度、 U は海上 10m の高さにおける風速である。 $H_{1/3}$ および $T_{1/3}$ は無次元表示されているので、ms 単位で表わすなら、 U [m/s]、 Fe [m]、 $g = 9.8 \text{ m/s}$ となる。

港域が非常に広い港を除けば、一般の港の有効吹送距離は 1 km 以下であり、そのため、波高は、0.75 m 以下、周期は 2.5 s 以下となる。このような短周期波で影響を受ける船舶は小型船であるので対象とする船舶によってはこの港内発生波は無視しても大きな問題はない。

(4) 港内反射波

港内反射波とは、港口進入波や港内伝達波などが港内の岸壁によって反射されて生じる波のことである。この反射波は、港口進入波などの入射波と重なって港内波高を増大させる。しかし、港内の岸壁沿長は有限であるため、反射波のエネルギーは横方向に広がり、その結果、反射壁から遠ざかるに従ってその波高は減少する。

反射波の波高低下の推定法として、小舟および大里²⁵⁾は反射面を仮想開口部とし、この仮想開口部に入射波の波向と対称な方向から波が入射してくると考えて、反射波高を仮想開口部の回折波高と

して求めている。この方法の妥当性を検討するために、反射壁として島堤を考え、島堤の反射波高と仮想開口部の回折波高とを比較したのが、図-8²⁶⁾である。島堤による反射波高は、半無限堤に開する解、式(1)の重ね合わせで求まる近似解から入射波を除くことによって求めている。また、開口部による回折波高も式(1)の重ね合わせで求めている。図-8からわかるように、島堤の近傍を除けば、両計算値はよく一致し、反射壁を仮想開口部として反射波高を推定することができる。

(5) そ の 他

港内静穏度に影響する波浪としては、前述の(1)~(4)の波が主要であるが、他にいくつかの要素がある。

1) 航 走 波

航走波とは港内を航行する船舶によって起される波で、船舶の背後において船舶の進行方向に進む横波と船舶の側方に八の字状に広がる縦波とから成っている。港内静穏度には縦波が重要である。航走波は船舶の形状、速度などによって変わり、その伝播および波高変化については不明点が多い。しかし、港内の場合、船舶の航行速度は小さいため、航走波は小さいので、航路沿いに係留している小型船舶以外はこの航走波の影響を受けることは少ないと考えられる。

2) 副 振 動

副振動とは、港外の長周期波によって起される港内の長周期水面振動で、一種の強制水面振動である。この水面振動は港内水の固有振動周期に密接に関連している。そのため、港内の形状によって副振動の振幅が異なり、通常の港内波とはその解析法を異にする。副振動に関しては必要に応じて別途取り扱うのがよい。

3. 港内波高の計算法

港内波高の計算法としては、既に述べたようにGreen関数法を用いた方法や波の運動方程式を直接差分法で解析する方法などがある。しかし、これらの方法は規則波を対象にしており、方向スペクトルを有する波に適用するには計算時間が非常に多くかかる。港内静穏度の計算においては、各種の波向と周期に関して計算しなければならない。また、港湾計画に利用する場合には、数多くの防波堤および港内岸壁配置に対して計算する必要がある。このことを考えると、実用的に十分な精度を有していて、不規則波としての計算が比較的容易で、短時間に港内波高が求まる計算法が必要となる。ここでは、これらの条件を満足する簡便な方法²⁷⁾を示す。

この方法においては、港内波高に重要な港口進入波と港内反射波を考えることにし、港内伝達波や

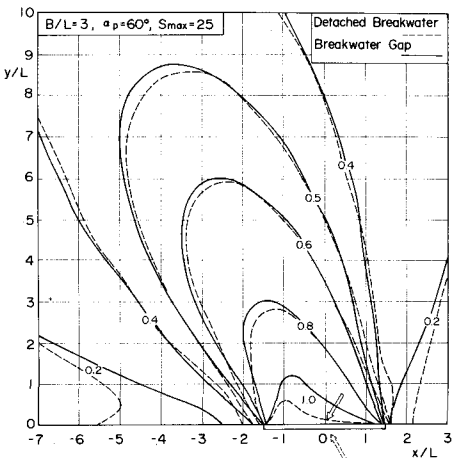


図-8 島堤の反射波高と仮想開口部とみなした場合の反射波高の比較

港内発生波は一応除外している。しかし、必要に応じてこれらの波も計算に取り入れることができる。

(1) 港口進入波

港口進入波としては、図-3に示した近似解を用いて計算することにする。ただし、港口進入波の計算領域としては、計算点から港口部や港口防波堤が見通せる範囲とし、岸壁などで遮蔽されている領域は除く。入射波の方向スペクトルとしては、周波数スペクトルとしてBretschneider・光易型、方向関数として光易型を用いることにする。

港口部前面に島や岬などが存在して、入射波の波向範囲が狭められる場合もあるので、そのような場合も想定して、入射波の成分波の波向範囲が限定できるようにしておく必要がある。

(2) 港内反射波

岸壁による反射波の計算には、2.(4)で述べたように反射面を仮想開口部とする方法も適用できるが、ここでは反射壁を島堤と考える。しかし、反射壁を島堤と考えて不規則波の計算する場合、反射壁に入射する波の方向スペクトルを定める必要がある。

入射する波の波高と周期は、港口進入波の計算で求まっている反射壁前面の波高と周期のそれぞれの平均値とする。この平均波高および平均周期を用いてBretschneider・光易型の周波数スペクトルを求め、これを反射壁への入射波の周波数スペクトルとする。実際の入射波スペクトルは港口部の防波堤で回折されているので、計算して求めた周波数スペクトルとは異なる可能性があるが、周波数スペクトル形の相違は回折波の計算に大きな影響を与えないことから推測して、このようにした。

港口部で回折された波は、防波堤の先端から円弧状に進行する波と開口部から直接進入する波とから成っている。しかし、港口部から直接入射する波の波高が高いため、岸壁による反射波を計算するときの入射波の主方向は、反射壁の midpoint と開口部の midpoint とを結んだ方向と考える。そして、波向の範囲としては、岸壁の midpoint と防波堤の先端とを結んだ線で囲まれる範囲とし、これを図示すると、図-9のようになる。図中の α_p が主波向、 α_{max} と α_{min} が波向範囲を示す。回折後の波の方向関数形は回折前の形を維持し、波向範囲だけが制限されると仮定して岸壁入射波の方向関数形を定めた。この波向範囲の制限は、見掛け上方向集中度を大きく見積ることに対応している。

港の形によっては、岸壁の midpoint と港口部の midpoint が防波堤によって遮ぎられて見通せない場合がある。このような場合には、防波堤の先端と岸壁 midpoint とを結んだ方向から単一方向の不規則波が入射すると仮定して計算する。図-9にこのような場合の例が示してある。

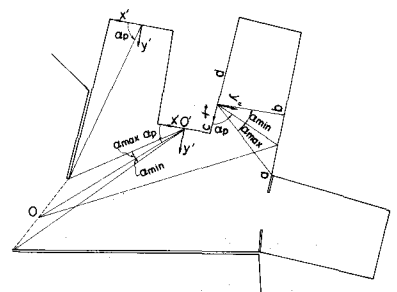


図-9 岸壁に入射する波

岸壁による反射波が再度他の岸壁で反射される多重反射の現象が起る。港内が直立岸壁で囲まれている場合にこの多重反射によって港内波高が増大し、船舶の係留に支障をきたしたという例がある。そのため、この多重反射についても計算できるようにしておくことが重要である。図-9には、岸壁

abによる反射波が岸壁cdで反射される例が示してある。このような場合にも、岸壁abの反射波を用いて、岸壁cdで反射させることを考えればよい。

岸壁を島堤とみなして反射波を計算する場合、岸壁延長が波長に比して長くなると、岸壁の前面波高が大きく変化する。この場合でも、岸壁を一つの島堤として、岸壁前面の波の波高および周期の平均値を用いて反射波を計算すると、反射波を過大に計算したり、過小に計算したりすることになるので、岸壁を適切に分割して、それぞれを島堤として計算することが重要となる。

(3) 岸壁などによる回折波

港口部から進入してきた波が港内の岸壁や突堤あるいは波除堤で遮ぎられて、直接到達できない領域がある。このような領域内には、岸壁などで回折された波が進入してゆくことになる。図-10は、岸壁abで回折される波を考えた場合である。この場合、港口部から進入してきた波は点aを半無限堤abの先端として回折されると考える。

入射波の周波数スペクトルは点a近傍の波高と周期のそれぞれの平均値を用いて求め、波向の範囲と主波向は図-10のように定め、入射波の方向関数は岸壁による反射波の場合と同じ仮定で求める。

このような回折波は小さくなるので、この回折波が再度岸壁で反射されることは考えなくてもよいと思われる。

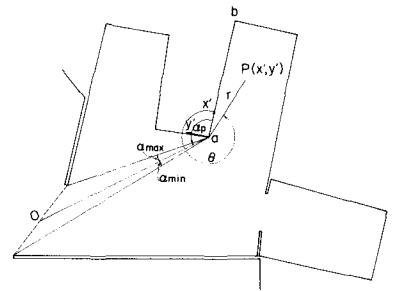


図-10 半無限堤と考えたときの入射波

(4) 港内開口部における波の回折

港によっては港内に旧港があって、旧港そのものもやはり防波堤で遮蔽されている場合がある。このような港の港内波高は港口進入波の計算と同じ方法で行う。この港内での岸壁による多重反射も計算する。入射波の周波数スペクトルは港内開口部前面近傍の波高と周期の平均値を用いて求め、波向範囲や主波向は図-11のように定める。

(5) 合成波の計算

(1)~(4)の方法によって求められた波高と周期を用いて、合成波の波高と周期を次のように求める。

港口進入波や岸壁による反射波に対応する波群の中の n 番目の波群の有義波高を H_n 、有義波周期を T_n とすると、これらの波群の波が重なったときの合成波の有義波高 $H_{1/3}$ と有義周期 $T_{1/3}$ は入射波の有義波高 H_i と有義周期 T_i を用いて次式のように求める。

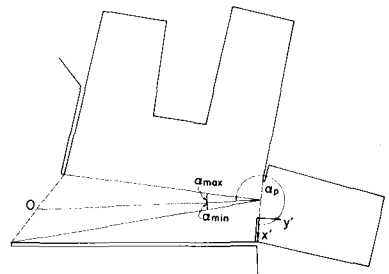


図-11 港内開口部への入射波

$$K_d = H_{1/3}/H_i = \sqrt{\sum_n H_n^2}/H_i$$

(10)

$$K_{d_T} = T_{1/3} / T_i = \sqrt{\sum_n H_n^2 / \sum_n \frac{H_n^2}{T_n^2}} / T_i \quad (11)$$

ここに、 K_d と K_{d_T} はそれぞれ波高比と周期比である。式(11)はRice の理論²⁸⁾を応用して求めたものである。

岸壁沿いでは入・反射波の位相が揃うため、岸壁近傍の波高は式(10)より大きくなると予測される。しかし、遮蔽実験で調べた限りでは、岸壁付近で顕著な波高増大は現われなかった。

(6) 計算の流れ図と計算例

(1)～(4)の計算を適切に組み合わせると、港口部が数個ある場合でも、ほとんどあらゆる形状の港について港内波高が計算できる。また、すべて計算は式(1)で表わされる半無限堤による解析解を用いているので、計算時間が短くてすむ。本計算の流れを示すと、図-12 のようになる。この方法によって計算した港内波高比の分布図の一例を図-13 に示す。本計算の精度は、模型実験値と比較すると、全体的にみた場合30%程度の誤差の範囲に入っている。

4. 港内静穏度の計算

ここでは、港内静穏度の判定法について、計算例に基づいて説明する。

(1) 港の形状と沖波の条件

港内静穏度を計算する港として、図-14 に示す仮想の港を考える。この港の形状から考えて北および東・西水路内の港内静穏度はほとんど問題にならないと考えられるので、図-14 に示すように中央水路とその近辺をⅠ～Ⅳの4領域に分けて、これらの4領域内の港内静穏度を検

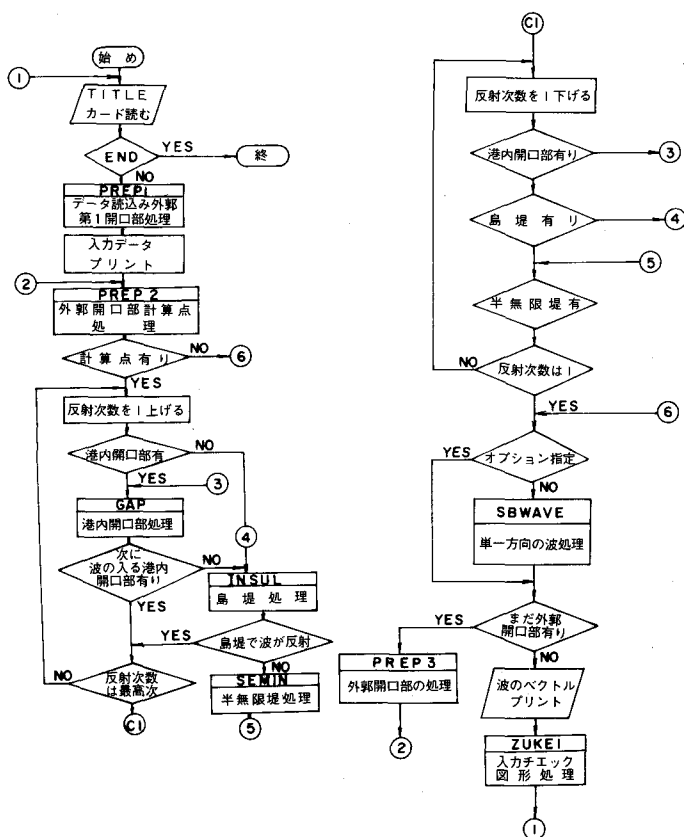


図-12 港内波高計算の流れ図

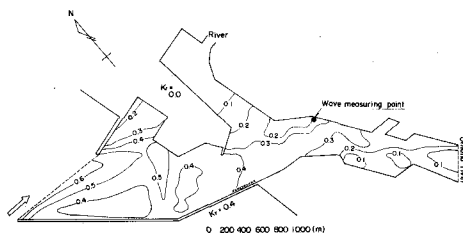


図-13 秋田港内の波高分布

討することにする。

この港の沖波は表-2で示されるような波高の出現率を示すものとする。波高の出現率表としては、各年における波高出現率の変動特性を除く意味もあって、数年間の平均値として出現率を表わすのがよい。港内静穏度の解析には波向毎の波高・周期の出現率表が必要であるが、一般にはこのような形で与えられることは少なく、表-2の形で与えられるのが普通である。そこで、表-2の形の波高出現率を用いることにした。

表-2でわかるように周期8~10sの波が非常に多く、波向としては半分近くがSWの波である。表-2(b)中のNおよびNE、NWの波は沖波としては存在していても海岸方向からくる波であるため、本解析では除外することができる。

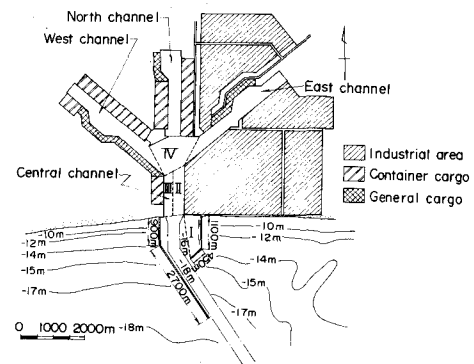


図-14 仮想の港

表-2 波高の出現率(%)

(a) 周 期 別								
Period $T_{1/3}$ [sec]	Significant wave height $H_{1/3}$ [m]							Total
	0-0.6	0.6-1.2	1.2-1.8	1.8-2.4	2.4-3.0	3.0-3.6	3.6 plus	
0-6	2.9	2.8	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	5.8
6-8	10.5	16.7	6.3	1.8	0.4	0.1	0.0	35.8
8-10	10.1	19.5	10.9	4.9	1.2	0.4	0.1	47.1
10-14	2.3	6.3	2.1	0.6	0.0	0.0	0.0	11.3
Total	25.8	45.3	19.4	7.3	1.6	0.5	0.1	100.0

(b) 波 向 別								
Direction	Significant wave height $H_{1/3}$ [m]							Total
	0-0.6	0.6-1.2	1.2-1.8	1.8-2.4	2.4-3.0	3.0-3.6	3.6 plus	
N	1.1	0.8	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.1
NE	1.3	0.7	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	2.1
E	1.9	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.6
SE	2.5	2.4	0.7	0.2	0.1	0.0	0.0	5.9
S	6.3	9.9	3.6	1.1	0.3	0.1	0.0	21.3
SW	7.9	22.6	11.2	4.6	0.9	0.3	0.0	47.6
W	3.0	7.2	3.2	1.2	0.3	0.1	0.1	15.0
NW	1.8	1.1	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	3.4
Total	25.8	45.3	19.4	7.3	1.6	0.5	0.1	100.0

前述のように、港内静穏度を解析するためには波向毎の波高・周期の出現率表が必要となるので、

表-2(a)の波高・周期の出現率は波向が異なっても同じ波高階級では同じ出現率を示すと仮定して、波向毎の波高出現率を次式で求める。

$$(p_{ij})_k = (p_i)_k (p_j)_k / \sum_k (p_j)_k \quad (12)$$

ここに、 k は波高階級の順位で、波高の小さい方から数える。また、 i は波向、 j は周期階級で、それぞれ表-2(b)および(a)の上段から数える。 p は出現率である。例えば、波高階級0.6～1.2m、波向SW、周期8～10sの波の出現率は、式(12)を用いて次式のようにになる。

$$(p_{6,3})_2 = 0.226 \times 0.195 / 0.453 = 0.0972$$

このようにして得られた波向毎の波高・周期の出現率として、SWの波向について示すと、表-3のようになる。

表-3 波向SWにおける周期別波高の出現率(%)

Period $T_{1/3}$ (sec)	Significant wave height $H_{1/3}$ (m)							Total
	0-0.6	0.6-1.2	1.2-1.8	1.8-2.4	2.4-3.0	3.0-3.6	3.6 plus	
0-6	0.89	1.40	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	2.35
6-8	3.27	8.34	3.64	1.13	0.22	0.06	0.00	16.61
8-10	3.09	9.72	6.30	3.09	0.68	0.24	0.10	23.22
10-14	0.70	3.14	1.20	0.38	0.00	0.00	0.00	5.42
Total	7.90	22.60	11.20	4.60	0.90	0.30	0.10	47.60

(2) 港内波高の計算

港内波高の計算を行うためには、港口部における波の方向スペクトル形を定める必要がある。そのために、沖波の代表波周期として各周期階級のはば中央値を用い、4、7、9および12sとした。沖波の波向毎にこれらの周期を用いて波の変形計算を行い、港口部における波高および主波向を求める。この波の変形計算では方向スペクトルを有する不規則波として計算することが望ましいが、単調な海岸では規則波として計算しても大差はない。本計算の場合、平行等深線海岸と仮定しているので、合田および鈴木²⁹⁾が方向スペクトルを用いて計算している結果を用いて定めた。波が屈折すると、見掛け上、波の方向集中度を示すパラメータ S_{max} の値が増大するので、沖波の波形勾配から沖波の S_{max} を算定し、屈折による S_{max} の増大を考えて、港口部の S_{max} を定めた。図-4で示したように、 S_{max} の値のわずかな差では港内波は大きく変化することはないので、 S_{max} として $S_{max} = 10, 25, 75, 100$ の4段階を用い、算定した港口部 S_{max} を上記の4段階の内の近い値を用いた。港口部の周波数スペクトルは港口部における波高と周期から定めた。

このようにして求めた港口部における波の方向スペクトルを用いて港内波高の計算を3.で述べた方

法で行い、前述のⅠ～Ⅳの領域における平均波高比 $\bar{K}_d$ を求めた結果が表-4に示してある。ただし、計算においては岸壁の反射率はすべて0.9とした。この表からわかるように、各領域内の平均波高比は波向がEからWに向うに従って小さくなり、また S_{max} が大きくなるほど平均波高比は小さくなる傾向を示している。

(3) 港内波高の超過確率

表-4に示した波高比 $\bar{K}_d$ は港口部の波高に対する各領域内の港内波高の比の平均値であるから、この $\bar{K}_d$ をそのまま沖波波高に乗じて港内波高を求めることはできない。港口部における波高 H_{out} と沖波波高 H_0 との間には次式のような関係がある。

$$H_{out} = Kre Ks H_0 \quad (13)$$

ここに、 Kre は屈折係数、 Ks は浅水係数、 H_0 は沖波波高である。ただし、式(1)の関係は沖波が港口部に達するまでに、島や岬で回折されることがないとした場合のものである。その結果、港内波高 H_{in} と沖波波高 H_0 の間には、次式のような関係が成り立つ。

$$H_{in} = \bar{K}_d H_{out} = \bar{K}_d Kre Ks H_0 \quad (14)$$

このようにして求めた港内波高を用いて、港内波高の超過出現率 P を S の波向に関して周期毎に示したのが図-15である。周期毎の港内波高の超過出現

表-4 各領域内の平均波高比

Direction	Period $T_{1/3}$ [sec]	S_{max}	Mean wave height ratio $\bar{K}_d$			
			I	II	III	IV
E	4	10	0.467	0.723	0.773	0.486
		75	0.786	0.867	0.912	0.600
	7	10	0.471	0.579	0.630	0.389
		25	0.446	0.596	0.657	0.394
		75	0.367	0.586	0.646	0.370
		100	0.347	0.569	0.631	0.349
	9	25	0.361	0.495	0.547	0.311
		75	0.304	0.439	0.464	0.246
		100	0.289	0.419	0.428	0.219
	12	100	0.261	0.291	0.320	0.150
SE	4	10	0.466	0.591	0.635	0.386
		75	0.393	0.580	0.611	0.331
	7	10	0.454	0.513	0.558	0.341
		25	0.417	0.504	0.545	0.326
		75	0.370	0.450	0.464	0.231
		100	0.356	0.431	0.428	0.227
	9	25	0.350	0.435	0.485	0.272
		75	0.304	0.375	0.396	0.201
		100	0.294	0.358	0.364	0.178
	12	100	0.240	0.263	0.289	0.132
S	4	10	0.229	0.289	0.327	0.165
		75	0.069	0.110	0.117	0.042
	7	10	0.220	0.296	0.221	0.180
		25	0.139	0.221	0.233	0.122
		75	0.076	0.123	0.126	0.053
		100	0.067	0.107	0.112	0.044
	9	25	0.177	0.203	0.225	0.115
		75	0.099	0.118	0.127	0.053
		100	0.086	0.105	0.113	0.048
	12	100	0.106	0.108	0.120	0.054
SW	4	10	0.060	0.081	0.082	0.025
		75	0.009	0.014	0.017	0.005
	7	10	0.063	0.097	0.086	0.032
		25	0.033	0.055	0.051	0.021
		75	0.014	0.023	0.027	0.012
		100	0.014	0.023	0.026	0.011
	9	25	0.053	0.062	0.062	0.024
		75	0.024	0.031	0.036	0.015
		100	0.024	0.029	0.033	0.015
	12	100	0.034	0.040	0.047	0.022
W	4	10	0.007	0.013	0.017	0.008
		75	0.006	0.010	0.012	0.002
	7	10	0.057	0.066	0.064	0.024
		25	0.027	0.039	0.041	0.016
		75	0.014	0.019	0.021	0.009
		100	0.014	0.019	0.021	0.009
	9	25	0.046	0.052	0.044	0.021
		75	0.023	0.027	0.028	0.014
		100	0.021	0.025	0.028	0.013
	12	100	0.034	0.036	0.044	0.020

率を加え合わせると、波向Sに対する港内波高の超過出現率が求まる。これを領域Ⅲに関して各波向毎に示したのが図-16である。この波向毎の波高の超過出現率を加え合わせれば、港内波高の超過出現率が図-16の太い実線のように求まる。このようにして求めた各領域内の波高の超過出現率は図-17のようになる。この図から領域Ⅳが最も静穏であることがわかる。

現行の基準³⁰⁾では50cm以上の波高の出現率が5%以下になるようになっているが、図-15でわかるように、各領域ともこの条件を満足している。

(4) 模型実験結果を用いた修正法

港湾計画の策定に当っては、防波堤や港内岸壁の配置の適否を検討するために、模型実験がしばしば行われる。模型実験を行うのは、数値計算においては海底地形の条件が細く導入できないという数値計算上の問題を克服することにあるが、一方、模型実験では方向スペクトルを有する波が発生できないという問題がある。そのため、模型実験および数値計算の得失を考慮して、お互いに相補いながら港内静穏度を判定する方法が用いられる。以下にその方法について述べる。

規則波あるいは単一方向不規則波による模型実験から得られたある領域内の平均波高比を $\bar{K}_{de}$ とし、同一条件で数値計算を行い、同じ領域内の数値計算値を $\bar{K}_{dc}$ とすると、 $\bar{K}_{de}/\bar{K}_{dc}$ が数値計算値の精度を示す。この比が1の場合が模型実験値と計算値が一致することになり、1から離れるほど計算値の精度が低下することになる。次に、方向スペクトルを有する不規則波に関して数値計算を行い、同じ領域内の平均波高比を $\bar{K}_{ds}$ とすると、方向スペクトルを有する波に対するこの領域内の波高比 $\bar{K}_d$ は次式で推定する。

$$\bar{K}_d = \bar{K}_{ds} \cdot \bar{K}_{de} / \bar{K}_{dc} \quad (19)$$

そして、この $\bar{K}_d$ を表-4の波高比として採用する方法である。

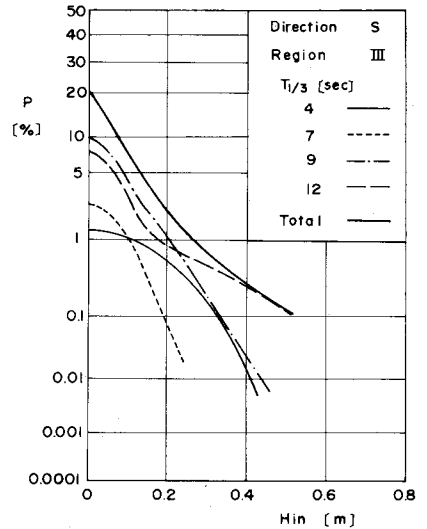


図-15 波向Sにおける港内波高超過出現率（領域Ⅲ）

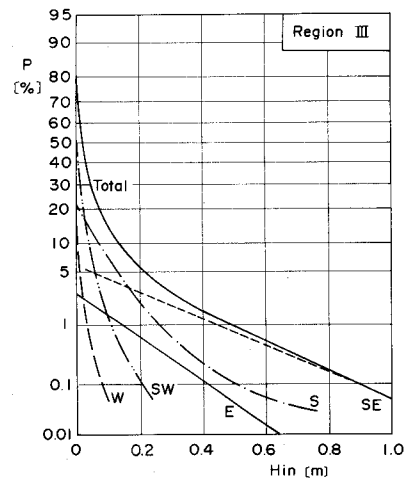


図-16 領域Ⅲにおける各波向毎の港内波高超過出現率

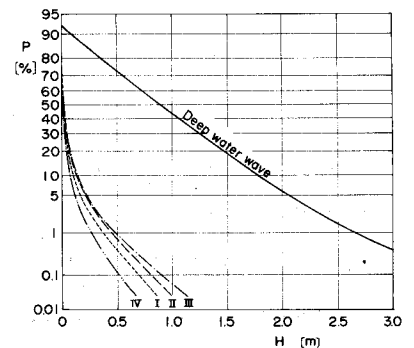


図-17 各領域における港内波高超過出現率

(5) 荒天時の港内静穏度

今まで述べた港内静穏度の計算は、船舶の荷役に関連した常時波浪に対するものであるが、もう一つの重要な問題として船舶の港内避泊に関連する荒天時の港内静穏度の問題である。荒天時の場合は、数十年に1回起るような波を対象とするため、常時波浪の場合とは異なり、港内波高の出現率よりも港内波高の値そのものが重要となる。

荒天時の港内静穏度は船舶の被災やそれに伴う人命にも関連するので、港内波浪の計算に用いる港外波浪としては設計波と同様に再現期間50年程度の波を用いる必要があると思われる。この再現期間の波を各波向毎に設定して、港内波高を計算する。数十年に及ぶ再現期待値の波を用いると、港口部前面で砕波する場合があるが、この場合でも港口部における有義波の諸元を用いて求めたBretschneider・光易型の周波数スペクトルを用いればよい。この場合の方向関数形を決める S_{max} の値としては、まだ十分解明されていないが、回折波は S_{max} に余り敏感に依存しないので、砕波を考えず、屈折を考慮して算定する。この港内波高の計算には港内伝達波は考慮しておく必要がある。

しかし、このように港内波高が算定されたとしても、港内避泊限界波高の設定の問題が残る。避泊限界波高は港内に係留している船舶の動揺とそれに働く力によって決まるが、船舶の運動や作用力は船舶の大きさ、積載状態および係船ロープの張り方、さらには波浪だけではなく風向や風速も関係するため、まだ十分な検討がなされていない。そのため、避泊限界波高については、荷役限界波高のようにその数値が与えられるほど研究が進んではいない。今後、岸壁係留やブイ係留などの避泊係留形態毎に避泊波高を定める研究が必要である。

5. あとがき

港湾計画上非常に重要な港内静穏度の計算は、単に港内波高の計算というだけではなく、港口部までの波の諸変形、さらには係留船舶の運動まで含み、非常に幅の広い多くの現象と関係している。本稿においては、特に港内波浪という観点から港内静穏度の問題を述べたため、係留船舶の運動に関することが抜けている。しかし、係留船舶の運動の問題は海岸工学と造船工学の境界に位置することもあるが、まだほとんど解明されておらず、今後の重要な課題である。また、港内波高の計算法を含め、港内静穏度の計算法はまだまだ十分とはいえず、今後も新しい概念を導入し、改良・開発してゆくことが重要である。

参 考 文 献

- 1) 運輸省第一港湾建設局：安全荷役限界分析調査報告書，昭和55年，160 P.
- 2) 加藤 始・佐野喜久雄：風洞におけるウィンドスクリーンの模型実験，港湾技術研究所報告，Vol. 11, No 2, 1979, PP. 23～66.
- 3) Penny, W. G. and A. T. Price: Diffraction of sea waves by breakwater, Dire. Misc. Weapons Develop., Tech. His., No 26, -Artificial Harbours, 1944.

- 4) Takayama, T. and Y. Kamiyama : Diffraction of sea waves by rigid or cushion type breakwaters, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 16, No. 3, 1977, P. 3~37.
- 5) 高山知司 : 波の回折と港内波高分布に関する研究, 港湾技研資料, No. 367, 1981, 140P.
- 6) Barailler, L. and D. Gaillard : Evolution récente des modèles mathématiques d'agitation due a lahoule : Calcul de la diffraction en profondeur non uniforme, La Houille Blanche, No. 8, 1967, PP. 861~869.
- 7) 山本隆一・横田基紀・滑川伸孝 : 数値波高シミュレーションについて, 第22回海岸工学講演会論文集, 1975, PP. 259~263.
- 8) 伊藤喜行・谷本勝利 : 新しい方法による波動の数値計算 - 防波堤周辺の波高分布への適用 -, 港湾技術研究所報告, 第10巻, 第2号, 1971, PP. 97~111.
- 9) Abbott, M. B., H. M. Peterson and O. Skovgaard : Computations of short waves in a shallow water, Proc. 16th Conf. on Coastal Engg., Vol. I, 1978, PP. 414~432.
- 10) 前出文献 4)
- 11) Pierson, W. J. and L. Moskowitz : A proposed spectral form for fully developed wind sea based on the similarity theory of S. A. Kitaigorodskii, JGR, Vol. 69, No. 24, PP. 5181~5190.
- 12) 光易 恒 : 風波のスペクトル発達(2), 第17回海岸工学講演会論文集, 1970, PP. 1~7.
- 13) Hasselmann, K., et al. : Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Deutsches Hydrographisches Institute, 1973.
- 14) Cote, L. J. J. et al : The directional spectrum of a wind generated sea as determined from data obtained by the stereo observation project, Meteorological Press, Vol. 2, No. 6, New York Univ., PP. 1~88.
- 15) 光易 恒・水野信二郎・本多忠夫・力石国男 : 海洋波の方向スペクトルについて (続), 第21回海岸工学講演会論文集, 1974, PP. 261~265.
- 16) 合田良実・鈴木康正 : 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料, No. 230, 1975, 45P.
- 17) 合田良実・永井康平・伊藤正彦 : 名古屋港における波浪観測, 第3報 - 現地波浪の回折現象ならびに統計的性質について -, 港湾技研資料, No. 120, 1969, 24P.
- 18) 前出文献 5)
- 19) 前出文献 4)

- 20) Goda, Y. : Re-analysis of laboratory data on wave transmission over breakwaters, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 8, No. 3, 1969, PP. 3~18.
- 21) 合田良実・鈴木康正・岸良安治：不規則波実験とその特性について，第21回海岸工学講演会論文集，1974，PP. 237~242.
- 22) 倉田克彦：越波による伝達波高，第28回海岸工学講演会論文集，1981，PP. 339~342.
- 23) Saville, T. : The effect of fetch width on wave generation, Tech, Memo., No. 70, B. E. B.
- 24) Wilson, B. W. : Numerical prediction of ocean waves in the north Atlantic for December, 1959, Deut. Hydro. Zeit., Jabrg., 18, Ht. 3, 1965.
- 25) 小舟浩治・大里睦男：防波堤隅角部付近の波高分布の算定，港湾技術研究所報告，Vol. 15, No. 2, 1976, PP. 55~88.
- 26) 前出文献 5)
- 27) 前出文献 5)
- 28) Rice, S. O. : Mathematical analysis of random noise, reprinted in Selected Papers on Noise and Stochastic Process, Dover Pub. Inc., 1954, PP. 133~294.
- 29) 前出文献 21)
- 30) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1979，P. 6-12.