

函館港の防波堤計画に関する模型実験

近藤俊郎* 田中義一**

目 次

I 序 論	37
II 函館港の沿革と問題点	37
III 波浪特性について	38
IV 実験方法	40
V 実験項目	41
VI 実験結果	42
VII 考 察	47
VIII 結 論	49
参 考 文 献	49

I 序 論

港湾の外かく施設は、その港の地形および利用上の諸条件に応じて、外海から来襲する波浪に対し効果的に配置されることが必要である。地形、波浪などの外海の自然条件がまったく同じでも、一般に新設の港よりも既設のものに、小規模の港よりも大きいものに利用上の条件が多いから、外かく施設を効果的に配置することがよりむずかしいと考えられる。

古い歴史を持つ函館港は、岬に遮へいされた現在の港の南端部から海岸沿いに次第に北側に発展してきたもので、ほぼ長方形の水面を持っている。こうした沿岸港の場合、けい船岸は外かく防波堤の延長とともにそれと平行な位置に築設される傾向をたどる。その際、港口位置が利用上からほぼ定められると、それに近い位置のけい船岸は当然比較的悪い波浪状態に置かれるから、所要静穏を得るための最終的な外かく防波堤の配置の決定は港口との関連において考察することが必要である。

外かく防波堤の配置計画には、最近20年間に顕著に発達した浅海の波に関する知識がかなりの範囲で応用できるが、複雑な幾何学的形状の影響のもとに現われる港内の波浪状態を対象としていることから、水理模型実験が有力な手段として用いられている。

函館港については、すでに当土木試験所¹⁾(1957)および北海道大学²⁾(1959)において模型実験が行なわれ、そ

の時点での外かく防波堤計画が検討されている。しかしその後けい船岸、護岸など港内施設の延長が著しく増加し、当時と比べ現在の港内の境界条件はかなり変化している³⁾ので、現在および計画けい船施設完成後の港内波状況を推測するには新たな模型実験が必要とされるに至った。

こうした状況に応じて、この実験は広範囲の方向からの来襲波の影響を受けると同時に、海峡連絡港として利用上の特色を有する函館港の外かく防波堤の整備計画を決定することを主目的に行なわれたものである。

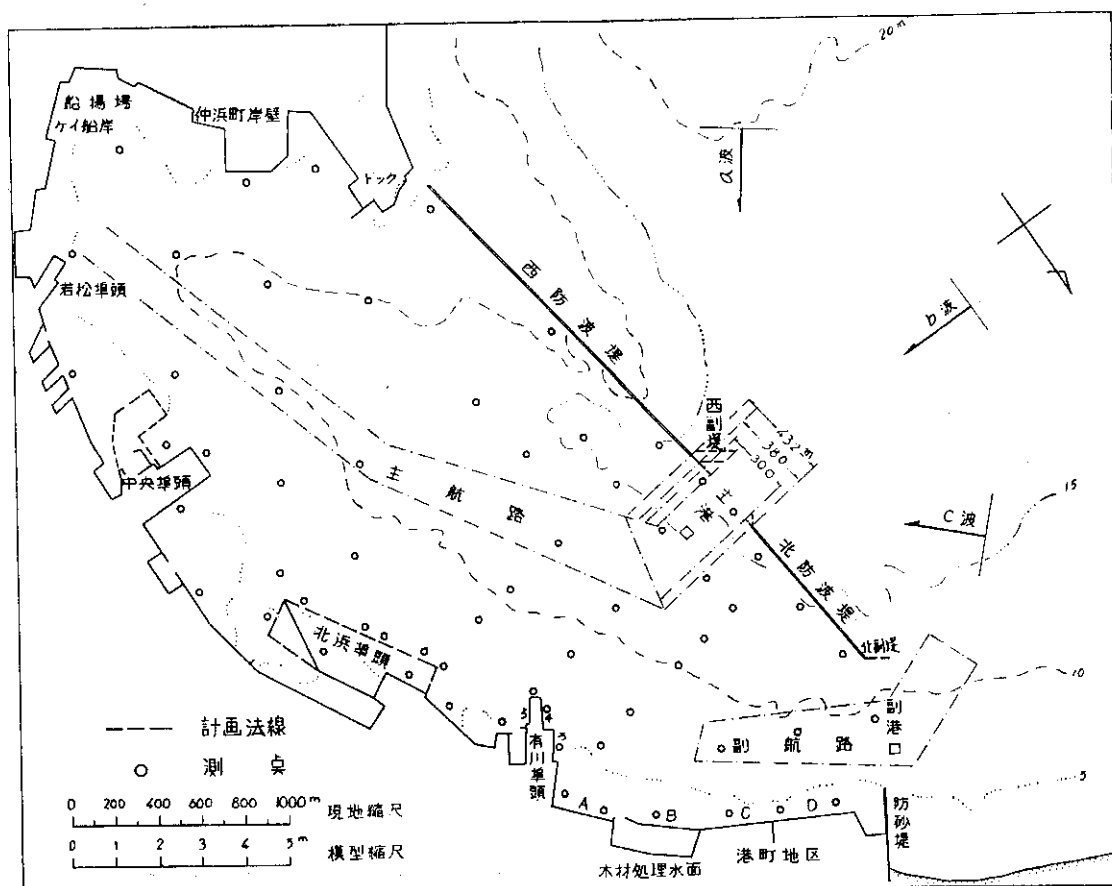
II 函館港の沿革と問題点

北海道と本州を連絡する港として本道開発に重要な役割を果たしてきた函館港は、北海道最古の歴史を持つ港であり1800年ころすでに埋立工事が行なわれている⁴⁾。

現在の港湾の位置、その配置・形状は、道内の他の主要な港湾と同様に、1889年の C. S. Meik およびその直後の広井勇博士の調査、設計に基づいている。

現存の外かく施設のうち西防波堤の一部と防砂堤は第1期拓殖計画(1910~1918年)に基づいて築設され、北防波堤および西防波堤の延伸は第2期拓殖計画(1929~1946年)によって行なわれた(図-1参照)。こうした外かく施設の整備に伴って国有鉄道の海陸連絡施設が整備され、若松ふ頭(1925年)および有川ふ頭(1944年)がそれぞれ完成した。

*前港湾研究室副室長 現室蘭工業大学助教授 **同室



図—1 模 型 平 面 図

第2次大戦前後の港湾工事は、乏しい工事費にもかかわらず輸送力増強の目的で上記のけい船施設の築設およびその再建に重点がおかれ、外かく防波堤の整備が遅れていた。そのような理由もあって、1954年の台風15号（月26日）により港内停泊中の船舶が大きな被害を受け、また港内外で多数の人命を失ったことは、いまだに憶に新しい。

その後、わが国経済の発展と本道開発事業の進捗とともに当港の修築も着々と進められ、西、北防波堤の延伸およびかさ上げ工事と並行して、中央ふ頭（1959年）が完成し北浜ふ頭が着工された（1960年）。これら大規模ふ頭工事に加えて次第に北側の海浜に移動してきた港施設の築設は、外かく施設の整備をはるかに上回るペースで進められ、港町地区に木材取扱施設と埋立護岸が完成された1964年には、7.6km²の広い港内から自然海浜はまったく姿を消している。

このような港内水域の変化に伴い、けい船岸における穏度⁴⁾がかなり劣化してきたとの意見が、利用者側から出されている。国有鉄道の若松、有川両ふ頭においては車乗り入れ作業が行なわれるので、とくに良好な静穏が必要とされる。これら両ふ頭、とくに港口に近い有川ふ頭においては、1963年ころから作業不能回数が目立って多くなっている。その原因としては、海象の年変

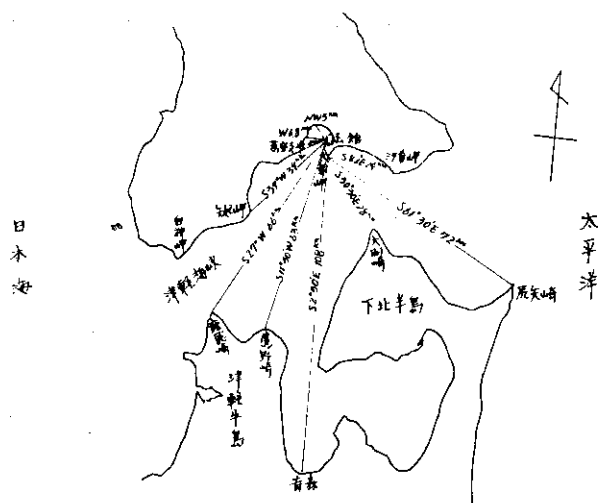
化、ふ頭利用回数の増加なども考慮されなければならないが、上記の港内水域変化もかなり影響していると考えられる。

こうした現在の函館港の港内の波浪状態を改善し、また建設中の北浜ふ頭および増設計画がある中央ふ頭さらには港町地区の利用度を高めるためには、外かく防波堤の整備が急がれている。

Ⅲ 波浪特性について

函館港には継続的な波浪観測資料がないので、ここでは沿岸地形、港湾形状および風の記録から概括的な考察を試みる。

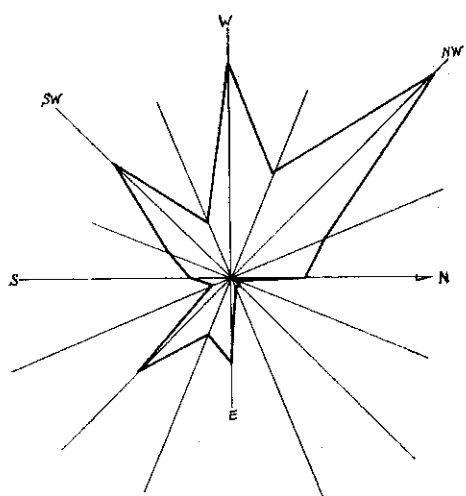
当港は、北海道南西部の渡島半島南岸に位置し、津軽海峡の中央部に面する函館湾の東半分の水面を占めている（北緯41°47′、東経140°42′）。港の南側は大鼻岬によって外海から遮ぎられ、西および北防波堤がほぼ南北の方向に配置されて2つの港口を函館湾の西岸に向けている。このような地形、港口形状の特徴のため、函館湾口ではN～E方向を除いた広い範囲からの波浪が出現するが、湾内の港口付近には対岸距離がごく小さいNW以北および岬で遮へいされるS以東の波は、ほとんど影響がないと見なされる。残るNW～S方向について、主港口からの対岸距離の主なものを図—2に示してある。なお同図にはS以東方向についても、大鼻岬からの対岸距離



図一2 函館港の対岸距離図

を示してある。この図から $S39^{\circ}W$ (矢越岬) 以北は対岸距離は40km以下、さらに $S56^{\circ}W$ (葛登支岬) 以北については10km以下となるので、これらの方向からの波浪は波高、周期ともに小さい小規模の波である。日本海に直面する $S39^{\circ} \sim S27^{\circ}W$ (竜飛岬) の方向は、その範囲は狭いが対岸距離が500km以上であり、当港について最も大きな規模の波を与える。さらに南に寄る $S27^{\circ}W \sim S$ 方向は、津軽半島が対岸となりその距離は70km程度である。

次に風の記録から見ると (図一3 参照), 風速10m/sec. 以上の強風の出現頻度はNW~SWの方向が多く、冬期季節風の影響が大きい。当港は主港口をW, 副港口をNWに向けているため、これらの方向の波が港内に侵入しやすい形状を示しているの、来襲波の規模は小さくて



自昭27年
至昭32年
の1カ年当たり平均日数

図一3 函館港強風風向図

(函館市の資料による)

も港内の水域、けい船岸の静穏を対象とするときには視できない。

来襲波の波向がWからSよりになるにつれて、当港場合は港口に対する入射角が小さくなる傾向にある。たがって最大規模の波浪をもたらす $S39^{\circ}W \sim S27^{\circ}W$ 日本海からの波は重要であるが、さらに南に寄っても対岸距離が小さくなる $S27^{\circ}W \sim S$ の波は、港内へ侵入波としては影響が小さいと見なすことができる。

以上を総合すれば、当港の場合は最大波浪をもたらす方向として $S39^{\circ}W \sim S27^{\circ}W$, 頻度の多い波向としてNW 現在の港口配置形状から最も港内に侵入しやすい波向としてはWであることが認められる。次にそれら3方向からの来襲波浪の規模を調べる。

1) SW ($S39^{\circ}W \sim S27^{\circ}W$) 方向

前述のとおりこの方向の波浪は当港について最大規模の波浪を与える。函館開発建設部が行なった風記録による追算によれば、最近50年間で、深水波高 $H_0 \geq 8$ mの波浪が5回程度あったとされている。これらの大浪のうち、最も新しいものは1954年の台風15号当時のもので、その際の波浪の追算は種々の方法でなされて

る。⁴⁾ ここでは当時の海峡沿岸の各地の風記録を基に、新にSMB法によって函館港に来襲した波浪を追算して

る。この風記録によれば、津軽海峡一帯は風向SW~SW, 風速30~40m/sec. の暴風が5時間程度吹送したと推定できる。しかし函館港の風速値と、対岸の竜飛岬および大瀬灯台のそれとはかなりの差があり、前者は後よりも30%程度小さく現われている。当時の天気図気圧傾度から求めた海上風速は竜飛灯台のものより小さく、函館港のそれよりは大きであって、竜飛のそれには傾度風速に近い。そこで日本海から函館湾に至る海の風向を $S39^{\circ}W \sim S27^{\circ}W$ 方向とし、風速は函館港有ふ頭と竜飛灯台のものと平均値を採用することにした。表一1は19~22時の1時間ごとの深水波 (有義波の諸元を示すものである。この間、有川ふ頭の風向は

表一1 台風15号 (1954年9月26日)

時の深水波の推定

時刻	風速	t_e	Fmin	H_0	T
hr.	(m/sec.)	(hr)	(km)	(m)	(sec.)
19	28	1.0	12	2.4	5.6
20	33	1.8	35	4.5	8.0
21	34	2.6	50	5.3	9.1
22	36	3.1	70	6.2	10.0

t_e : 有効吹送時間 Fmin: 最小吹送距離
 H_0 : 深水波高 T: 周期

り、竜飛灯台はSWで一定している。

れより風向が一定している間では、有義波の最大波高は、 $H_0=6.2\text{m}$ 、 $T=10.0\text{sec.}$ である。しかし、波高が変化した後の、この方向の風速成分を取って追算すれば22時以後には $H_0\approx 8.0\text{m}$ 程度の波浪の出現も得る。それゆえ、 $H_0=6.2\text{m}$ は必ずしも台風15号時と大波高を意味するものではなく、この程度の波高は3日に一度出現するものと考えられる。

1) W, NW方向

これらの方向の対岸距離は函館湾内のもので、主港口は7km、副港口から6km以下できわめて小さい。そのためこの方向の風によって発達する波は、風速が10m/sec.以上であれば、吹送時間が1時間以内で定常状態になる。これらの方向の風速は、前記の台風15号時において30m/sec.が最大である。このような小さい湾内では、この観測風を湾上のそれとみなしてよいから、この程度の風速の発生確率は前記SW波のそれに匹敵するものとなることができる。

表-2はこれら方向について、それぞれ風速が20, 30m/sec.の場合に主港口および副港口に出現する波高諸元を、Bretschneiderの浅海風波推定のための図表によって計算したものである。この表から、いずれの方向についても $H\leq 2.0\text{m}$ 、 $T\leq 6.0\text{sec.}$ の小規模の波しか出ないことがわかり、しかも副港口での波は主港口のそれに比べ小さいものであり、とくにNW波の場合にそれは著しいことが認められる。

表-2 WおよびNW風による波浪諸元

向	位置	対岸距離 (km)	平均水深 (m)	H (m)	T (sec.)
W	主港口	6.8	15	1.2	4.1
				1.7	5.0
				2.1	5.6
	副港口	6.0	8	1.1	4.1
NW	主港口	4.5	12	1.6	4.9
				1.8	5.2
				1.1	4.1
	副港口	2.0	5	1.4	4.6
				1.7	5.2
				0.8	3.4
				1.0	3.9
				1.2	4.1

- 主 1. 波高H, 周期Tの値は上段から風速20, 25, 30m/sec.の場合にそれぞれ対応する。
主 2. 対岸距離は、港口中心から各方向についての対岸までの距離である。

N 実験方法

1. 実験設備

実験は土木試験所構内の屋外平面水槽(25.4×19.8m)より行なわれた。模型縮尺は港内水面積、周辺地形と記水槽面積を考慮して、水平、鉛直とも $\frac{1}{200}$ とした。型は、海底地形を表面モルタル固定床で作製し、函館

港を含む水深20m以浅の約20km²を収容した(図-1参照)。造波機はフラッター型式で造波板の長さが15, 8mの2基を波向によって使い分けた。波高測定には多点式ネオン管波高計(針間隔1mm)を用い、この波高計60台を港内外に配置した。

2. 実験波

前章における検討結果から、現在(昭和41年)の港内波状態を把握するためには、a). SW, b). W, c). NWの3方向の波について実験する必要があることが認められた。それらの方向の波を代表する実験波は、a)については台風15号当時の表-1の推定値から、その深水波諸元を波向S39°W, 波高 $H_0=6.2\text{m}$ 、周期 $T=10.0\text{sec.}$ としたものを用いることとした。b), c)については表-2の中から風速30m/sec.の場合に主港口に現われる波を対象とすれば、それぞれ $H=2.1\text{m}$ 、 $T=5.6\text{sec.}$; $H=1.7\text{m}$ 、 $T=5.1\text{sec.}$ となる。起波水深での波高はa)については屈折および水深による波高変化を考慮して求めるが、b), c)は浅水で発達したものであるから上記の値がそのまま用いられる。

模型の場合の波口、上記の値をFroudeの相似律によって換算して求められるが、b), c)については模型波がかなり小さく、内部摩擦による波高減衰の度合いが大きくなり実験精度上問題があることから、波高、周期とも上記の値より若干増大したものを用いた(表-3参照)。

表-3 模型波諸元

種類	波 向	起波水深 : h	波 高 : H	周 期 : T
a)	(S39°W)	10cm(20m)	2.0cm(4.0m)	0.71 (10) sec. sec.
b)	(W)	8 (16)	1.5 (3.0)	0.42 (6)
c)	(NW)	6 (12)	1.0 (2.0)	0.42 (6)

注 ()内は、実物についての諸元であり、a)波の波向は深水波のそれである。

防波堤の配置などを検討する目的で行なわれる模型実験では、できるだけ多くの諸元の異なる波を用いて実験することが望ましい。しかし実際には費用、実験日数などに制約されるから実験波の種類を少なくしなければならない。ここでは波向の違いによる港内波状況への影響を重視して、上記3種類の実験波を定めたもので、同一波向の中での周期、波高の変化による効果の検討は省略した。

3. 所要静穏度

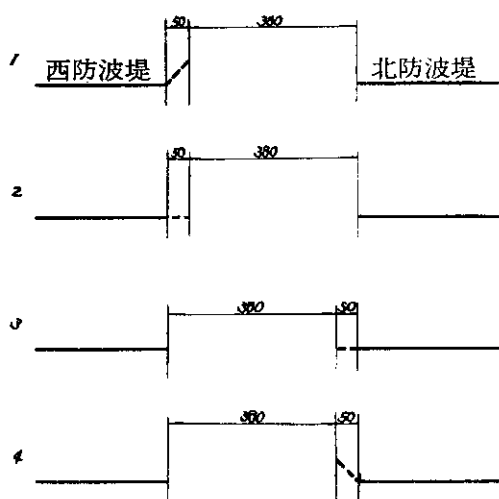
上述の実験波を作用させた場合に、港内の水域およびけい船岸前面においてどの程度の波高まで許容するか、換言すれば所要の静穏度をどう定めるかは、多くの要素があるので厳密にはかなり面倒な問題である。ただ、連

絡船基地としての当港の特異性を考えると、他の場合よりもかなり良好な静穏度が必要とされることはいうまでもない。また船舶の動揺の観点からすれば、静穏度は単に波高だけで定められるものではなく、船体の固有振動の観点から周期も考慮されなければならないことが示唆⁸⁾されている。ここでは比較的短周期の波を対象としていることから、上述の利用上の特質を考慮に入れ、第二港湾建設局の調査資料をもとに、5,000ton級の船舶がけい留可能な限界波高として0.8mを採用した。そして前記の実験波のいずれについても、港内のけい船岸の前面における波高がこの限界値より小さい場合に所要静穏に保たれているとすることとした。後出の実験資料には港内の各点の波高が、起波波高に対する波高比(%)で表わされているので、その場合は2節の実験波からして、静穏限界の波高比は、a) 波については20%、b)、c) については40%となる。

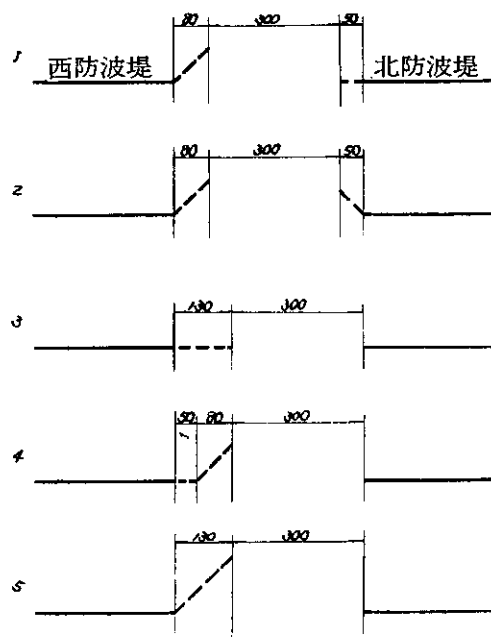
V 実験項目

前章まで述べたことから、次のような項目を実験する

A. 港口部計画巾員 380M



B. 港口部計画巾員 300M



図—4 主 港 口 計 画

3)は1)で副港口からの侵入波の影響が港内のけい船岸にかなり現われる場合の対策であり、北防波堤の北端から副堤を出してその所要長を検討する。

4)は港内南部の港町地区にある木材処理施設防波堤および護岸の前面に、透過性の消波工を設けることによって、港内波の波高を減衰させる効果がどの程度あるかを調べるものである。消波工の設置場所は図—1に示す記号によって、(i) B地区、(ii) A, B, C地区、(iii) 港

ことにした。

- 1) 現在の波浪状況の把握
- 2) 主港口計画 (A. 幅員380m, B. 幅員300m)
- 3) 副港口対策 (北副防波堤計画)
- 4) 港内消波工の効果
- 5) 港内波状況の経年変化 (自昭和36~至41年)

1) の場合では、外かく防波堤はほぼ昭和41年度末の状態をとり、港内けい船岸などについては北浜、中央ふ頭の計画箇所が設置された状態を対象とした。正しい意味での現況は5)の中での40年度末のものが該当する。

2)~4)は1)において所要静穏が得られている場合の対策として計画されたものである。

2)は現幅員432mの主港口を、A. 380 m, B. 300 mに狭めるものである。この両計画について、現在の西、北防波堤をその堤端から延長、または副堤を新設する案 (図—4 参照) を実験により比較検討するものである。B. の300mは、現在当港における利用上の最小必要幅員とされている。

町地区全域 (A~D) の3通りとした。これらの場所に消波工を設置した場合と、その他の状態が同じで消波工がない場合とを比較し、その効果を求めるものである。実験に用いた模型消波工は金網 (22#, 3mm目) で折り重ねて作製した斜面を用いている。

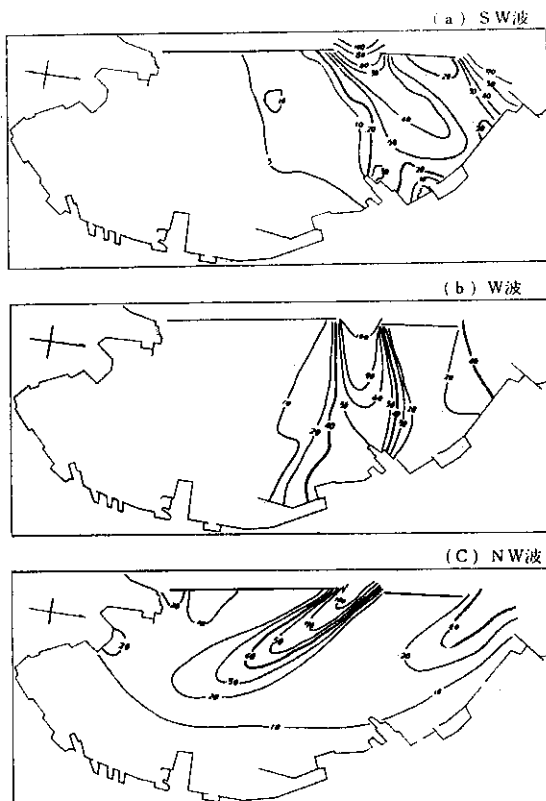
5)は港内施設延長が昭和36年以降に急激に増加しているので、それら施設築造によって港内波の状況がどのように変化してきたかを調べるものである。ここでは昭和

36, 38, 40年度末の施設および地形を復元して、それぞれの時点での波浪状況を実験している。個々の施設の影響を正確に求めるのはかなり困難であることから、港内皮の経年変化として取扱うものである。

V 実験結果

1. 現 状

現在の波浪状況については前記3種の実験波を作用させて港内の波高分布を調べ、その結果を図一5 a～cに示す。これらの図には、起波位置での波高 H_i と港内の観測点の波高 H との比 H/H_i から画いた等波高線(%)が記入されている。図中の太線は限界波高比を表わすものである(V. 3参照)。



図一5 港内波高分布(現況)

a) S 39° W波 屈折図によるとこの波は主港口に対してほぼ45°の角度で、副港口に対してはほぼ平行に入射している。図一5 aに見られるように、主港口から侵入した波は港内においてもほぼその方向に進んでおり、副港口からの侵入波の影響は小さい。所要静穏の限界波高比20%の線は、ほぼ西防波堤北端と有川ふ頭先端部を結ぶ位置にあって、これより南側の水域は静穏に保たれているが北側では30%以上でかなり悪いことがわかる。

現存のけい船岸のうちで問題となるのは有川ふ頭北岸の第3, 4岸壁で波高比が30%以上となっている。この理由は、このふ頭が主港口の近くに位置していること、ふ頭が階段状をしているので反射波高がかなり大きくな

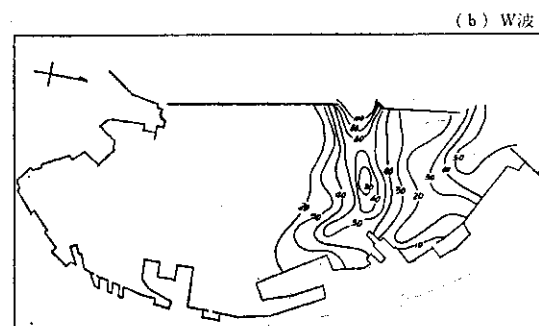
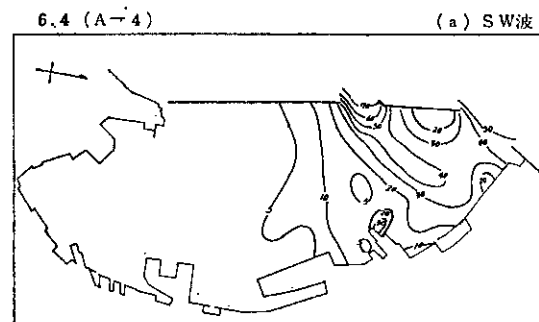
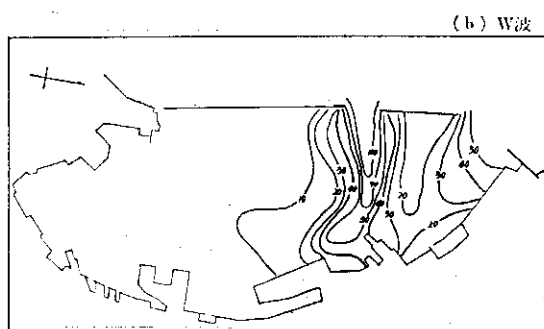
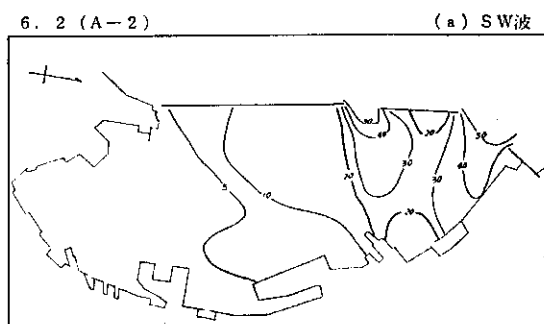
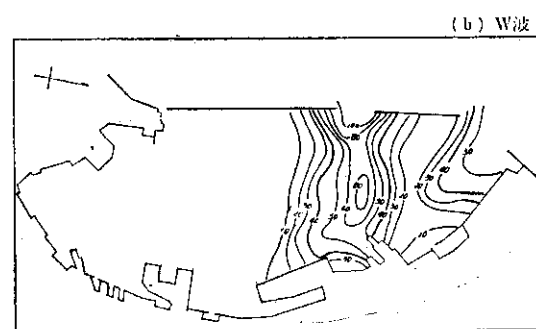
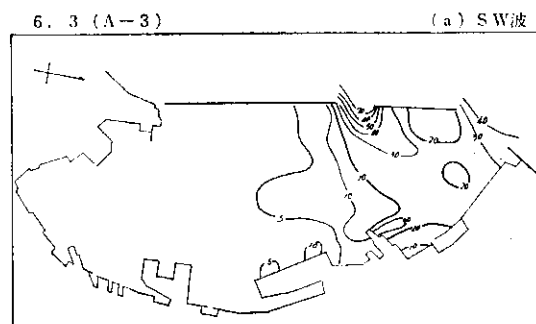
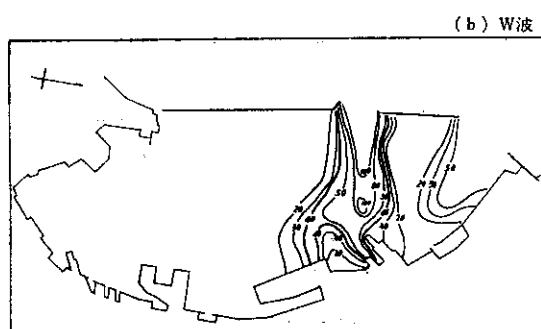
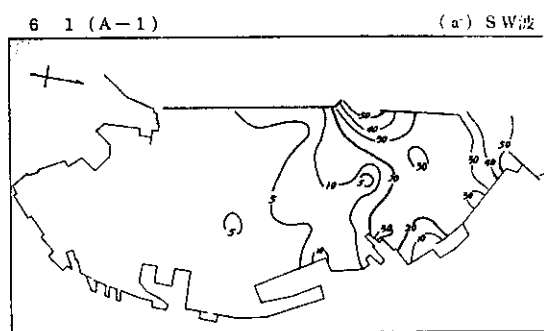
ることにある。この方向の波に対しては、入射方向に対してほぼ直角な法線をもつ西副防波堤を新設することが最も効果的になる。

b) W波 この波は主港口にほぼ直角に入射し、また副港口のこの方向成分もかなり広いので、港内に侵入する度合いが大きい(図一5 b参照)。この図に見られるように、主港口に近い有川、北浜両ふ頭前面の波高は大きく、とくに有川第4岸壁が著しい、副港口から侵入する波浪は主として港町北部の水域にその影響が限られて、港町地区護岸からの反射波による港内中央部への影響はあまり現われていない。したがって所要静穏を得るためには、この方向の波については、主港口幅員(現在432 m)を狭める他はないと考えられる。

c) NW波 強風の頻度が最も多い方向の波であるが、図一5 cによれば、港内のけい船岸はほぼ完全に静穏に保たれていることがわかる。これは、この波が主港口に対して約45°の角度で入射し港の長手の方向に進行するので波のエネルギーが拡散しけい船岸に達するまで波高がかなり減衰し、また副港口からの侵入波は地形の影響で主港口からのものより相当に波高が小さいことなどによる。しかし、この結果は港外から作用する波に対するものであって、この方向の港内だけの対岸距離は最大3 km(若松町ふ頭付近)にも達するので、港内発生波の波高がかなり大きいことに留意しなければならない。港内発生風波の規模、その分布などについてはV章に述べる。

2. 主 港 口 計 画

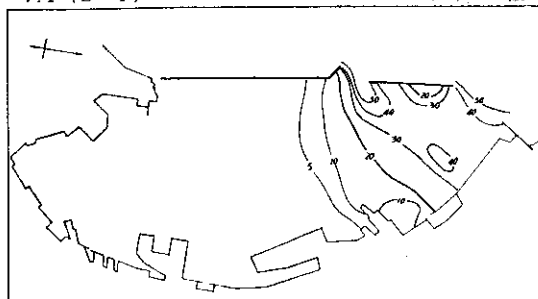
上述のとおり、NW波を除いては、現状では北浜、有川の両ふ頭に関する限りその静穏が十分でないことが明らかで、その主たる原因は主港口からの侵入波であることがわかる。そこで前章で示したA, B 2つの主港口計画をa) SW, b) W の両波について実験検討する。図一6.1～6.4はA計画、図一7.1～7.5はB計画についての結果を示す。これらの図から、A計画に関しては、西副防波堤などによってSW波に関する限りかなり効果が現われているが、全体としていずれの案でも両波について所要静穏を得ることができないことが認められる。このことはA計画では主港口幅員が現幅員より約10%減であるに過ぎず、侵入波の量があまり減っていないことによる。B計画については、港口幅員が約30%減となることから一般にかなり効果が現われている。ことに、SW波に関しては西防波堤の延長、あるいは副防波堤新設の効果が大きくなっている。しかし、W波は主港口にほぼ直角に入射しているので、港口幅員が同じである計画の中ではいずれの案でも侵入波のエネルギーはほぼ等しく、港内の波高分布もその集中位置はいくらか異なるにして



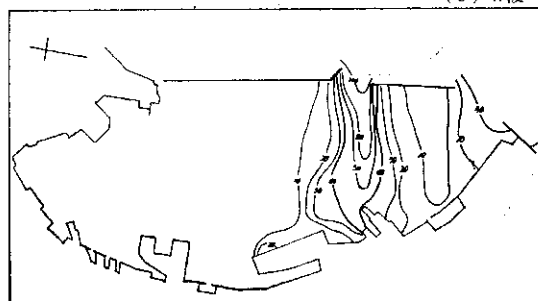
图—6 港内波高分布 (主港口幅員380m)

7.1 (B-1)

(a) SW波

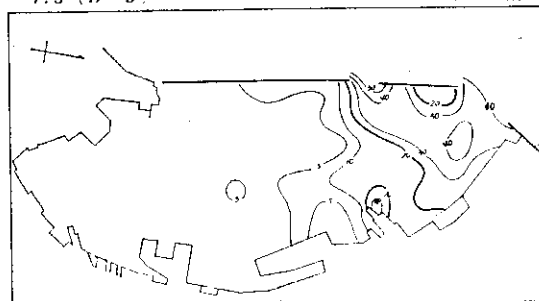


(b) W波

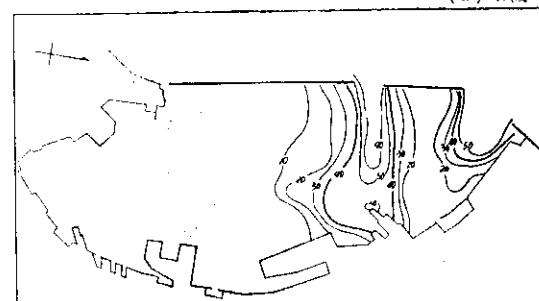


7.3 (B-3)

(a) SW波

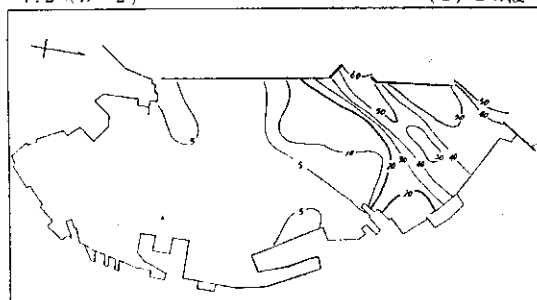


(b) W波

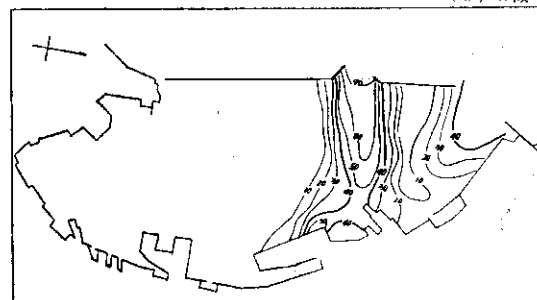


7.2 (B-2)

(a) SW波

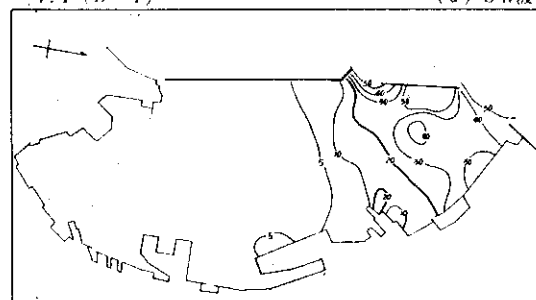


(b) W波

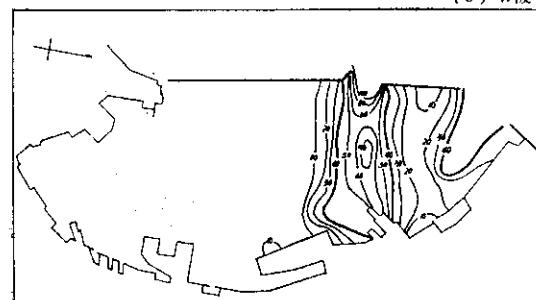


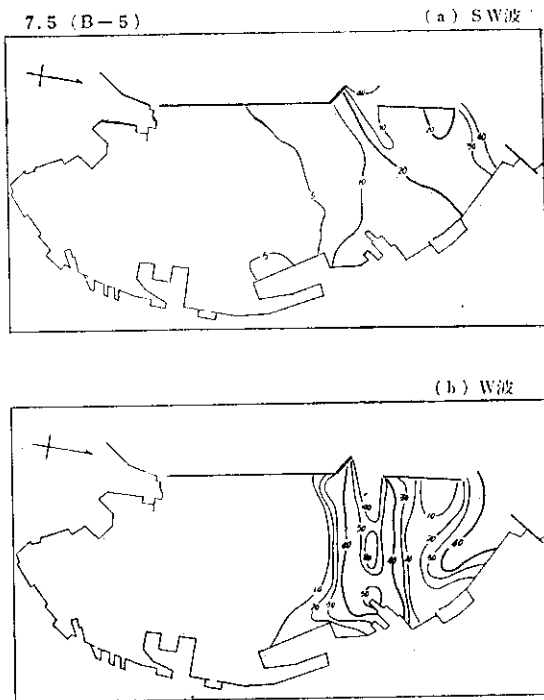
7.4 (B-4)

(a) SW波



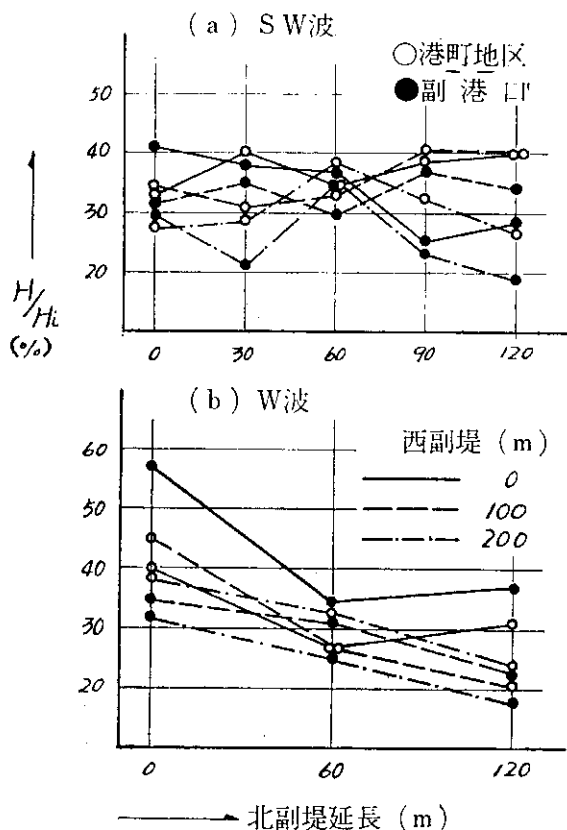
(b) W波





図一七 港内波高分布 (主港口幅員300m)

も類似の形をとる。したがってこの波に対しては、波高が大きい有川、北浜ふ頭のけい船岸が所要静穏を得ることに主眼をおいて防波堤の配置を定めるのがよいと考えられる。図に示されている実験結果を調べると、西副防



図一八 北副防波堤の延長効果

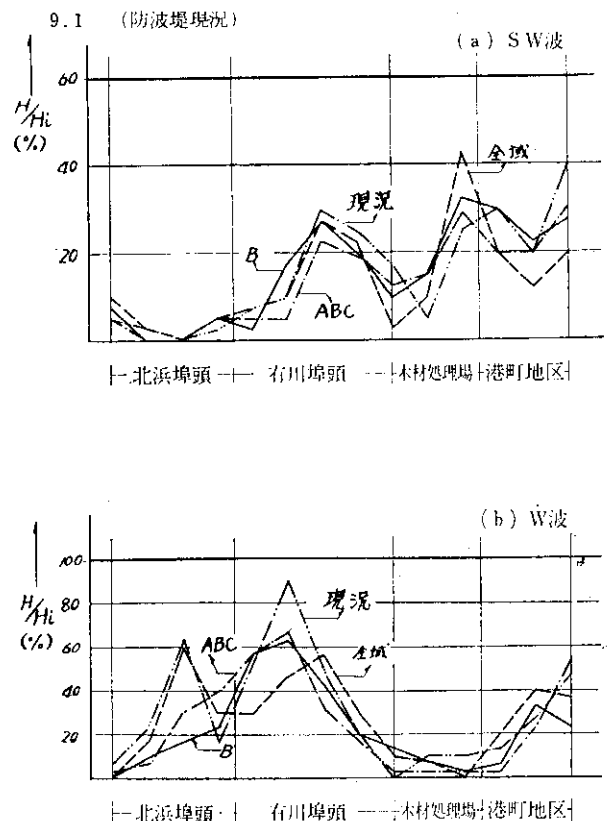
波堤を約150m築設し、北防波堤を視法線で南に50m延長して港口幅員を300mとするB-1案が、両波について、ほぼ満足できる静穏を与えている。

3. 北副防波堤計画

副港口からの侵入波を防ぐための北防波堤北端からその法線に45°の角度で副堤を設けた場合の効果を検討したものである。1.の結果から主港口侵入波が港内波を主に支配しているの、この副堤の港内全体に及ぼす効果は小さい。図一八は比較的效果があると見なされる港町地区副港口付近について、数点の波高比の平均値を北副堤を120mまで延長した場合について示したものである。これによれば、W波に関してはこれらの水域にかなり効果があるが、SW波についてはほとんど効果がない。このことはSW波の場合はこの水域でも主港口侵入波の影響が大きいことによるもので、西副堤の築設はこの場合も欠くことができない。2.で記した主港口計画が完成した後に、北副堤を120m程度延長するならば、港町地区にけい船岸を設けることは可能になると考える。

4. 港内消波工の効果

港内の港町地区護岸を透過性の消波構造とした場合の効果を示したのが図一九である。これらの図では北浜ふ頭から港町地区の水際線の延長を横軸に、その前面の波高比を縦軸にとって示してある。これより、これら消波工により有川ふ頭北岸以北では若干波高が小さくなる所



9.2 (西副堤100m築設後)

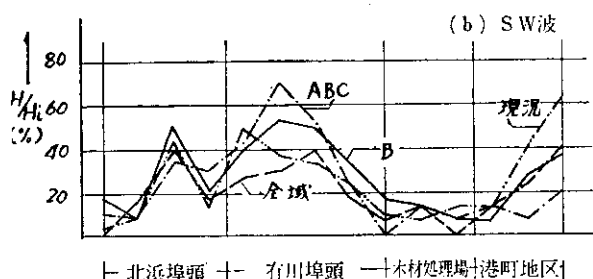
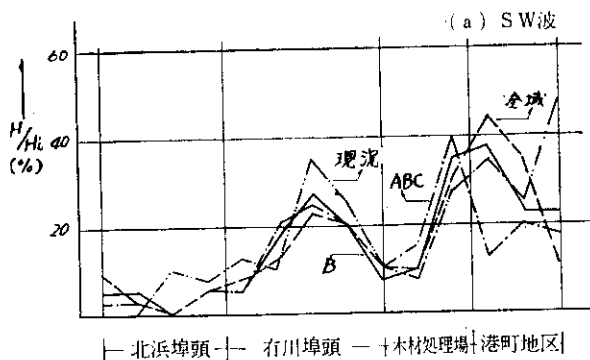


図-9 消波工効果

あるが、全体的にはその効果は小さいことが認められる。その理由は、消波工の設置個所が限られているためである。W波については、図-5 b の波高分布からわかるように、波高の大きい場所は北浜、有川ふ頭付近であって、これら消波工の設置個所ではないことによる。SW波の場合は波高が大きい港町地区北端でかなり効果が現われているが、有川ふ頭北岸については港町地区全域に消波工を設けたとしても所要静穏を得るまでに至っていない。西副防波堤を100m延長しても、ほぼ同様の傾向にあることが図-8 b から認められる。このように広い水面を有する当港の場合には、港内消波工はその設置個所が限られていることもあって予期されたより効果が小さい。

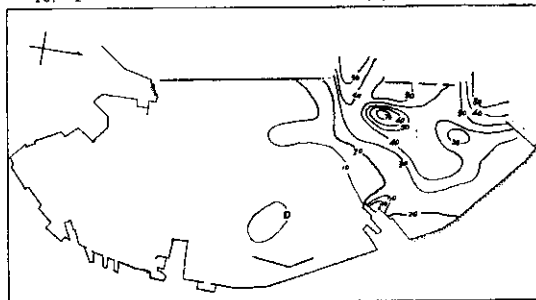
5. 港内波の経年変化

ここでは港内施設の築造が顕著に行なわれた36年度以来について、2年おきの36、38、40年度末における港内波状況を追試した。36年度においては図-10.1に見られるように、港町地区は自然海浜の状態にあり、主港口は幅員670mであった。昭和38年度には、港町地区に木材取扱施設と護岸が完成し、この水域は大きな変化をしており、その間に西および北防波堤はそれぞれ150、30m延長され主港口幅員は487mとなった。昭和40年度には北浜ふ頭の基部が有川ふ頭の南側に築設され、北防波堤はさらに55m延長して主港口幅員は432mとなったも

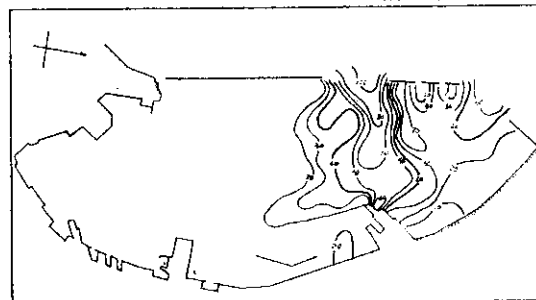
のである。このような施設築造に伴う年ごとの港内波の状況は図-10.1~10.3に示されている。

これらの図から港町地区については、護岸および木材取扱施設の築設の影響が明らかに現われており、自然海浜が直立壁に変わったことでかなり波高が増大していることが認められる。しかし有川ふ頭以南の水域についてはほとんど影響していない。けい船岸についてはSW波についてはこの間の波高はほぼ等しく変化はないが、W波については港町地区の護岸の影響が有川ふ頭第3岸壁

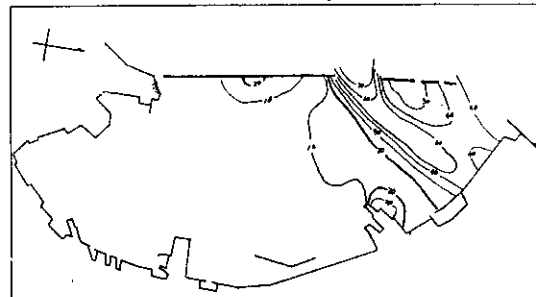
10. 1 昭和36年度 SW波



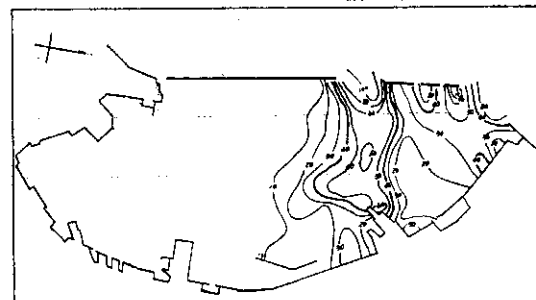
昭和36年度 W波

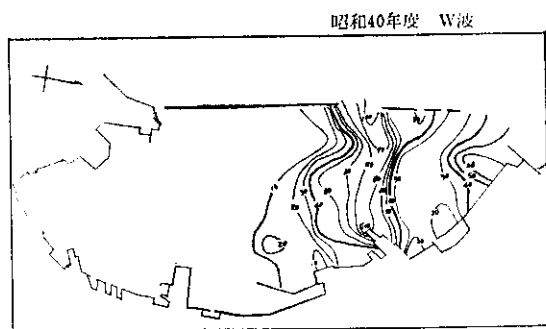
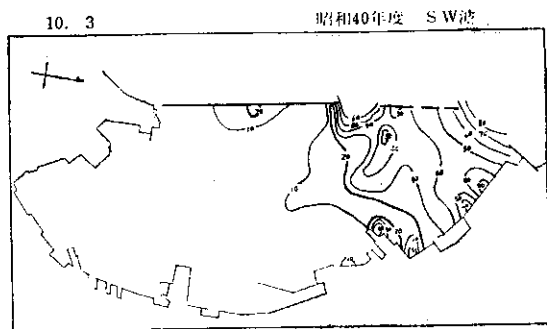


10. 2 昭和38年度 SW波



昭和38年度 W波





図—10 年度別港内波高分布

に(図—10.2参照), 北浜ふ頭基部の影響が第5岸壁付近(図—10.3参照)に現われて波高が増大していることが認められる。この間, 外かく防波堤の延長によって主港口幅員が約240m狭められたので, 港内施設築造の影響は図に現われている以上であると推定できるが, 有川ふ頭以南の水域については影響が小さい。なお, 図—10.3と現況の図—5とを比較すると, 40年度末で未完であった北防波堤の2箇所の空隙からの侵入波が, かなり大きな影響を与えていたことが知れる。この結果から, II章でふれた昭和37年以降の有川ふ頭における作業不能日数の増加には, W波については港内施設築造の影響が若干現われているが, II章で述べたように他の原因も考えられることから, 作業不能日数増加の原因をすべて港内施設築造に帰することはできないと考える。

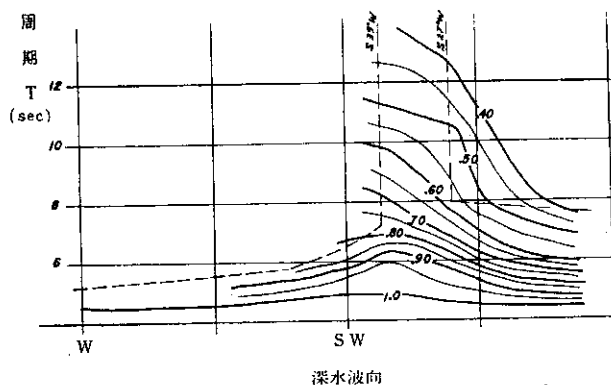
Ⅶ 考 察

実験結果に対する簡単な考察は前章のそれぞれの節に記されているので, ここでは二, 三の興味ある問題について考察する。

1. 主港口侵入波の特性

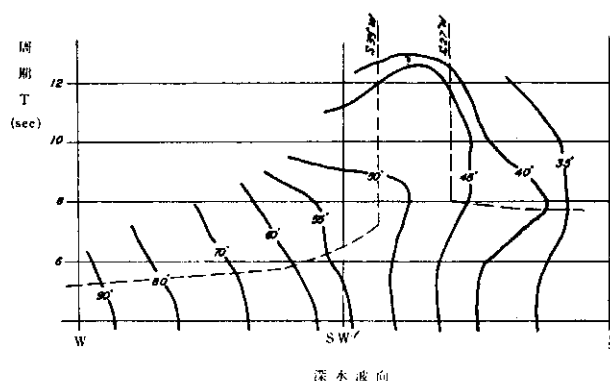
実験結果から, 函館港の場合, 港内波状況を支配しているのは主港口からの侵入波であり, 所要静穏を得るには現在の主港口幅員を狭くすることが必要であることが認められる。したがって外海から主港口への侵入波の性質を調べておくことが必要と思われる。

図—11は現在の主港口位置についての屈折係数を, 図—12は西防波堤法線に対する入射角を, 来襲波の周期と深水波向によって示したものである。両図はIII章で得た



図—11 来襲波の主港口における

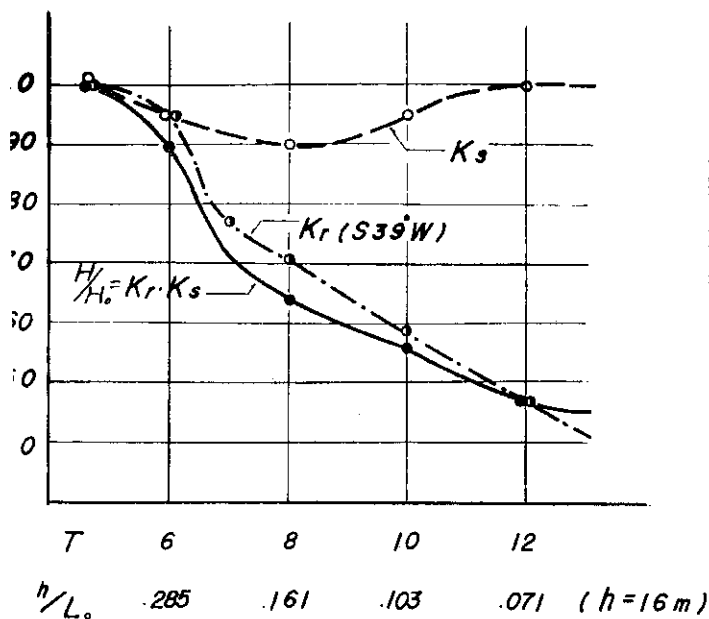
屈折係数, K_r



図—12 来襲波の主港口への入射角

(現西副防波堤法線に対する角度)

結果から考えられる深水波の周期と波向の組み合わせにより, 30枚の屈折図を作製して得られたものである。図中の破線は, その深水波向について起こり得る最大波(有義波)の周期とみなされる限界を示したものである。図—11より日本海からのSW方向の波は, 周期が増すにつれてその屈折係数が減少することがわかる。しかし図—12から, 入射角は $45^\circ \sim 50^\circ$ の範囲にあって周期Tによってほとんど変化しないから西副防波堤を設けることは $S 27^\circ \sim S 39^\circ W$ の波に対しきわめて効果的である。次に日本海からの波のうちで当港について最も危険な方向である $S 39^\circ W$ の波について, 主港口における浅水波高 H を知るために, 図—11の K_r を用いて深水波高 H_0 との比 H/H_0 を周期Tの関数として計算した結果が図—13である。この図から, 周期が大きい波ほど, 港口付近では波高が減衰していることが明らかである。例えば実験波 $T=10\text{sec}$, $H_0=6.2\text{m}$ と同一波高を主港口を与えるものは, $T=12, 8, 6\text{sec}$ の場合にはそれぞれ, $H_0=7.5, 5.5, 3.9\text{m}$ である。これより, 主港口侵入波高について考えると, 深水波高 H_0 が大である波が一義的に侵入波高を大きくするものではなく, その周期によって侵入波高の大きさがかなり異なることが知れる。風記録から推定



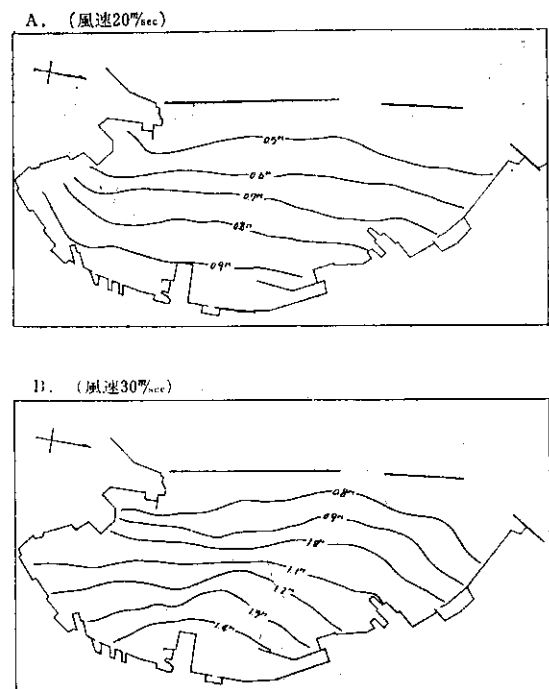
図—13 S 39°W波の主港口における
 K_r , K_s および H/H_0

した深水波では、 H_0 と T が一義的な組み合わせで与えられ、また存在しうる最大の波形勾配 H_0/L_0 によって T は規制されるものであるが、防波堤の設計波などについては T をある程度の幅をもって考えることが当港のような場合には必要と考えられる。

波向がW寄りになると起こり得る波浪規模が対岸距離で規制されその周期が6sec.以下と短いので、屈折効果はほとんどなく、屈折係数はほぼ1であり、入射角は90°前後で港口に直進する。この方向の波については、港口幅員によって侵入波エネルギーがほぼ決まってくるから、主港口の配置形状を、けい船岸の静穏を確保できるように決めることが必要となる。

2. 港内発生風波

Ⅴ.1の結果から、外海からの侵入波としてのNW波は、他の2方向の波に比べてかなり小さな港内波高を与えていて、港内は静穏に保たれている（図—5.3参照）。しかしこの方向の港内だけの対岸距離は外海のそれに匹敵するものであるから、港内で発生する風波の波高を調べておくことが必要である。図—14はⅢ.2場合と同じグラフを用いて、風向NW、風速30m/sec.のときに港内で発生する波による港内波高分布を示したものである。この場合外海からの侵入波高は、港内のほとんどの水域では0.8m(波高比で40%)以下であるから（図—5. c参照）、港内発生波のほうがかなり大きな波高を与えている。さらにその波高は、けい船岸に近いほど大になり、北浜～若松町ふ頭付近では1.3 m以上となっていることから、外海侵入波に比べはるかに大きな影響を及ぼすことが推察される。なお風速20m/sec.の場合は、これらの地区で



図—14 NW風による港内発生風波の波高分布

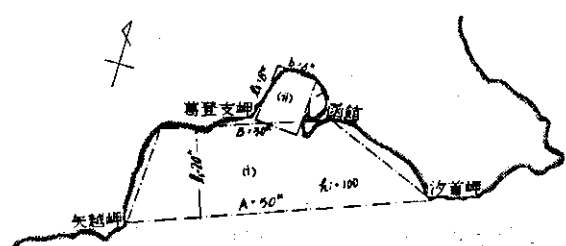
の波高は0.9 mである。また風向がNNW～N方向であれば、港内対岸距離はさらに大きくなるので、有川ふ頭～仲浜町岸壁の南端水域では上記よりも大きい波高が出現すると考えられる。

広い港内水面を有する港の場合、強風の頻度の多い方向と港の長辺の方向が一致することは、港内発生波を大きくするので利用上にきわめて不利である。

当港のような沿岸港はこうした欠陥におちいりやすいので施設配置計画の際には留意する必要がある。

3. 副振動について

函館港には副振動と見なされる長周期の水面振動がしばしば現われている。気象庁の1955～1957年の調査によると、周期40～60min.のものが全体の80%を占め、その波高は0.5 m以下のものがほとんどある。このように限られた範囲の周期で、しかも港内水面については、その自由振動周期は5min.以下であることから、この振動は周辺の湾形による副振動と考えられる。副振動を与える湾形としては、図—15に示した2つがある。それぞれの場合について、周期を概算すると次のようになる。



図—15 副振動の発生要因領域

i) この場合は矢越岬～汐首岬に至る湾形を一樣水深の台形湾と見なして、次式によって計算する。

$$T = k \frac{l}{\sqrt{gh}}$$

ここで奥行長 $l = 20\text{ km}$, 水深 $h = 100\text{ m}$ である。係数 k は、辺長 A , B の比と副振動の節の数により決まる。図に示された辺長から、節数が 1, 2, 3 の場合の T はそれぞれ 39, 13, 8 min. になる。

ii) 港外の函館湾を長方形湾とみなすと、 T は次式で求まる。

$$T = \alpha \frac{4l}{(2m-1)\sqrt{gh}}$$

この場合 $l = 8\text{ km}$, $b = 6\text{ km}$, $h = 20\text{ m}$ であるから、開口補正係数 α は b/l によって求まり、 $T = 50, 17, 10\text{ min.}$ が節数 $m = 1, 2, 3$ に対応して得られる。

上記の結果は、かなりおおまかな計算によるもので、(i) の場合は函館湾の湾口を、(ii) では函館港の防波堤開口部をそれぞれ無視して得られたものである。しかし、 $T = 40 \sim 60\text{ min.}$ の振動は、これら湾形による単節の副振動であることが認められる。しかも、これら 2 つの場合の周期 T が近接していることに着目すれば、函館湾内での振動は共振現象を起していると考えることができ。加えて函館港は幅が広く奥行の狭い長方形水面を有して、上記の振動の波長と主港口からの奥行長は $l/L \approx \frac{1}{10}$ の関係にある。副港口を無視するならば、合田の研究を参照すると上記の値は、港内の共振をさらに助長し港奥での振幅増幅率を大にするものであると推定される。

主港口計画が完成し、港口幅員が 300 m となる将来に、港内の長周期振動がどのように変化するかは簡単に予測できないが、一般には港口幅員を狭くすることはかなり効果があるとされている。

VII 結 論

実験結果および考察などからわかった事項は、次のように要約できる。

- i) 函館港の場合、港内に侵入する深水波向としては、 $S 27^\circ W \sim NW$ の方向である。大規模な日本海からの波浪となる $S 39^\circ W$ 波は、港内の北側の水域ならびにけい船岸で、また主港口に直進する W 波は主港口付近のけい船岸で波高を高め、現況では所要静穏が得られていない。
- ii) 出現頻度が大きい NW 方向に関しては、外海からの侵入波よりも、港内の対岸距離だけで発生する波のほうが、けい船岸付近の波高を大きくしている。
- iii) 現在の状況では、主港口からの侵入波の影響が、

副港口のそれより、主要けい船岸前面においてかなり大きい。

- iv) 主港口幅員を現在よりも 52 m 狭めて 380 m にしても効果は小さく、 SW 方向の波に対して最も効果的な西副防波堤 150 m を築設し、北防波堤を南に 50 m 延長して主港口幅員を 300 m にすれば、現存および計画のけい船岸において所要静穏が得られる。
- v) 副港口侵入波に対する北副防波堤は、これだけでは効果がなく (iv) の計画が完成した後にこの防波堤を 120 m 程度延長すれば、港町地区の利用も可能である。
- vi) 港町地区を消波護岸とすることは、この水域では若干効果があるが、全体的にはあまり効果がない。
- vii) 港内波の状況は、昭和 38 年度以降は港町地区と有川ふ頭の一部では港内施設築設の影響で若干波高が高くなっているが、その他のけい船岸、水域ではほとんど変化がない。
- viii) 当港に出現する $40 \sim 60\text{ min.}$ の長周期振動は矢越岬から汐首岬に至る台形湾と函館湾との 2 つの湾形による副振動と見なされ、これら 2 種の副振動周期が近接しており、さらに港内水面形状とから共振現象が起こり港内ではその振幅がかなり増幅されていると理解される。

この報文では外海から来襲する短周期の波に対する函館港の防波計画を検討したものであり、残された港内発生風波および長周期波の対策は当港の今後の発展に関連して研究される必要がある。

終わりに、この実験の機会を与えられ、資料の提供、実験計画、結果についての討議をいただいた開発局港湾部、函館開発建設部の関係各位と、前港湾研究室長宇田居吾一技官の御指導に感謝の意を表し、実験作業は細畑清光、工藤喬両君の労によるのが大きいことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 北海道開発局土木試験所：函館港の防波堤配置に関する模型実験，土木試験所彙報第 15 号，1958 P 79
- 2) 函館市・北海道大学工学部：函館港静穏度模型実験報告書，1959
- 3) 中村廉次：北海道のみなと，栗林商会，1956，P 1
- 4) 北海道開発局港湾部：函館港西副防波堤の必要性について（部内資料），1966
- 5) 北海道開発局：各港の波について，第 8 回北海道

- 開発局港湾工事研究会資料 3 の 3, 1966, P79
- 6) 運輸省港湾局：港湾技術基準設計編(案), 1966,
P 2—4—55
- 7) 土木学会：水理公式集, 1963, P 499
- 8) 織田敏夫：港湾における副振動現象と船舶との関係について, 第 8 回北海道開発局港湾工事研究会資料 3 の 1, 1966, P 23
- 9) 運輸省港湾局：港湾技術要報 No.21, 1958, P12
- 10) Wiegel, R.L.: Oceanographical Engineering, Prentice-Hall, 1964, P167
- 11) V.S.Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board : Shore Protection Planning and Design, Tech. Report No. 4, 1961, P116 a
- 12) 宇野木早苗：港湾のセイシュと長周期波について, 第 6 回海岸工学講演会講演集, 1959, P 1
- 13) 文献 1), P 551
- 14) 合田良実：長方形および扇形の港の副振動について, —フーリエ変換を用いた解法—, 第10回海岸工学講演会講演集, 1963, P 53
- 昭和42年 7 月受理 —