

港湾技研資料

TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

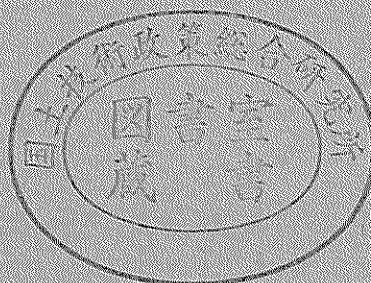
No. 788

Dec. 1994

多方向不規則波を用いた港内波高分布に関する模型実験手法の検討

平 石 哲 也

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	3
2. 実験の内容	4
2.1 対象港湾と実験条件.....	4
2.2 造波した実験波の特性.....	9
2.3 実験の項目.....	10
3. 港内波高の計算と実験の結果	11
3.1 港内波高の計算方法.....	11
3.2 実験による計算法の検証.....	17
3.3 伝達波を考慮した波高計算法の検証.....	24
4. 港内波高実験における多方向不規則の有用性	26
5. あとがき	30
参考文献	30
主要記号表	32

Laboratory Measurement of Directional Random Wave Heights in a Harbor

Tetsuya HIRAISHI*

Synopsis

A new type of caisson breakwater is proposed for wave barriers in Japanese isolated islands. The caisson has a front wall with a slope which can produce the downward components of wave force raising its stability. Meanwhile, the wave transmission coefficient of the slope caisson becomes larger than that of the vertical caisson. The transmitted waves have to be considered in the computation of wave heights in the harbors. Experimental studies in a directional random wave basin are done to develop a numerical model to estimate the wave height distribution in a harbor with the slope caisson breakwater. The following main conclusions are derived ;

- (1) The composed wave heights in the harbors can be computed as linear superposition of the transmitted and diffracted wave heights.
- (2) The wave transmission coefficient of the slope caisson becomes 70% of that measured in the two dimensional channel test.
- (3) Multi-directional wave generation should be applied to three dimensional hydraulic model tests in a basin.

Key Words : Directional random wave, Slope caisson, Harbor tranquility, Transmitted wave, Serpent-type wave generator

*Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

多方向不規則波を用いた港内波高分布に関する 模型実験手法の検討

平石 哲也*

要 旨

沖縄県地方および伊豆諸島の離島においては、生活環境の向上を図るため港湾の整備が必須である。しかし、現状では港湾の整備は遅々として進んでいない。それは、外洋に面した孤立島であり、作用する波が非常に大きいことや、島内に施設がなくケーソンが製作できないことなどが原因となっている。そこで、離島港湾の防波堤として、堤体がなるべく小さく、しかも高波浪時にも十分な安定性を有するものとして上部斜面型ケーソン堤が考案されている。上部斜面堤は、斜面に作用する波力成分の一部を下向きに作用させるため、耐波安定性に優れているものの、波が斜面を遡上しやすく、直立堤に比べて伝達率が大きくなり、港内波高の計算においては伝達波を考慮しなければならない。本研究は、多方向不規則波を用いた平面実験において、上部斜面堤の越波が港内波高分布に与える影響を検討することを目的としたものである。得られた主な結論は以下の通りである：

- (1) 上部斜面堤の越波による伝達波の周期は、港口部における入射波のその0.5倍として評価できる。
- (2) 港口部からの回折波による港内波高と伝達波による港内波高を線形に重ね合わせることで、合成波の波高分布を求めることができる。このとき、上部斜面堤の波高伝達率は、2次元水路実験で得られた伝達率の0.7倍の値を用いればよい。
- (3) 多方向波の港奥における波高は、単一方向波のそれよりも大きく、平面実験においては多方向不規則波を用いるべきである。

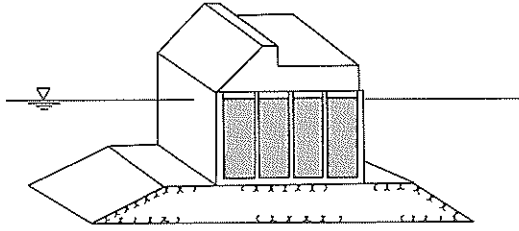
キーワード：多方向不規則波、上部斜面堤、港内波高分布、波高伝達率、サーペント型造波装置

1. はじめに

沖縄県地方および伊豆諸島の離島において、生活環境の向上を図り、産業を振興させつつ、観光客を誘致するためには港湾の整備が必須である。しかし、現状では港湾の整備は遅々として進んでいない。それは、予算的な問題に加えて、次のような問題が原因となっている：①外洋に面した孤立島であり、作用する波が非常に大きい、②島内に施設がなくケーソンが製作できない。したがって、離島港湾の防波堤としては、①堤体がなるべく小さ

く、本土から曳航しやすい、②高波浪時にも十分な安定性を有するもの、が必要である。そこで、図-1に示す上部斜面型ケーソン堤が、離島港湾用の防波堤として考案されている。これは、ケーソンの前面に斜面を設けることにより、作用波力に鉛直下方へ向かう成分を生ぜしめ、堤体の安定性を増加させるもので、箱型ケーソンに比べて堤体幅と重量を軽減することができる。上部斜面堤の伝達波特性および耐波安定性は高橋・細山田(1994)が断面実験により検討しており、水平波力の低減効果と波高伝達率を定量的に明らかにしている。

*水工部 主任研究官



図一 上部斜面型ケーソンの外観

一方、斜面を有するために越波量は増加する。平口ら(1991)は二次元水路において矩形ケーソン式防波堤の越波量と波高伝達率の関係を検討し、越波量が大きいと伝達率も増加することを明らかにしている。離島の港湾は水域が小さいために、防波堤からの越波は伝達波として港内の波高分布に大きい影響を与える。越波を防ぐためには、防波堤天端を高くすれば良いが、建設費が増大する。したがって、離島港湾においては、荒天時にある程度の越波を許容できるように堤体を設計する。そのためには、越波による伝達波を考慮した港内の静穏度を検討できる手法を確立しておくことが必要である。

本研究は、上部斜面堤の越波が港内の静穏度に及ぼす影響を検討し、それを定量的に評価する計算法を提案することを目的としており、多方向不規則波を用いた模型実験を実施している。また、多方向不規則波と単一方向波を作用させた場合の港内における波高分布を比較し、多方向不規則波を用いる有用性を示すことを目的とした。そして、実験条件を示した後に、上部斜面堤からの越波を考慮する計算法を示し、その適用性を実験で明らかにした。最後に、多方向不規則波と単一方向不規則波の実

験結果を比較して、多方向不規則波を用いた模型実験の重要性を議論した。

2. 実験の内容

2.1 対象港湾と実験条件

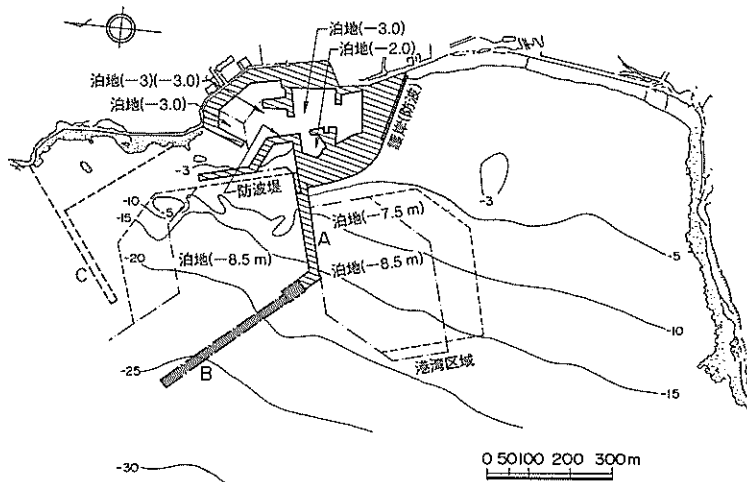
(1) 対象とする港湾地形と模型

本実験は、離島の小型港湾を整備するにはどのような港湾形状が望ましいか、を明らかにしたモデル・スタディ(シップ・アンド・オーシャン財団, 1992)の一部であり、実験条件は、港湾の整備方針にしたがっている。以下に、対象とする港湾の状況を概述する。

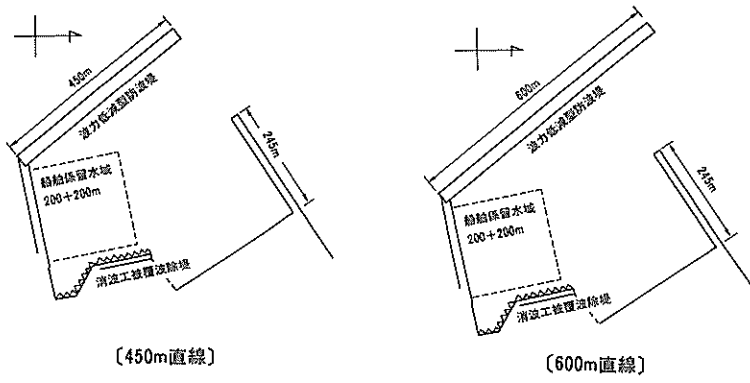
図一2は、モデル・スタディが行われた東京都K島P港の現況の地形を示す。現在は、写真一1に示すように、防波棧橋Aは、両岸接岸が可能な構造となっており、波向にしたがって使用する側を選択できる。しかしながら、波高が高くなると、波浪の遮蔽効果が小さいために船舶



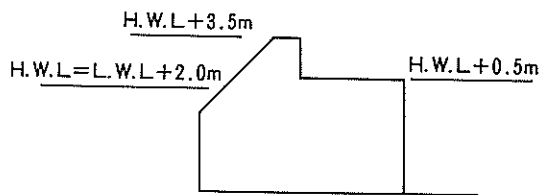
写真一1 防波棧橋の使用状況



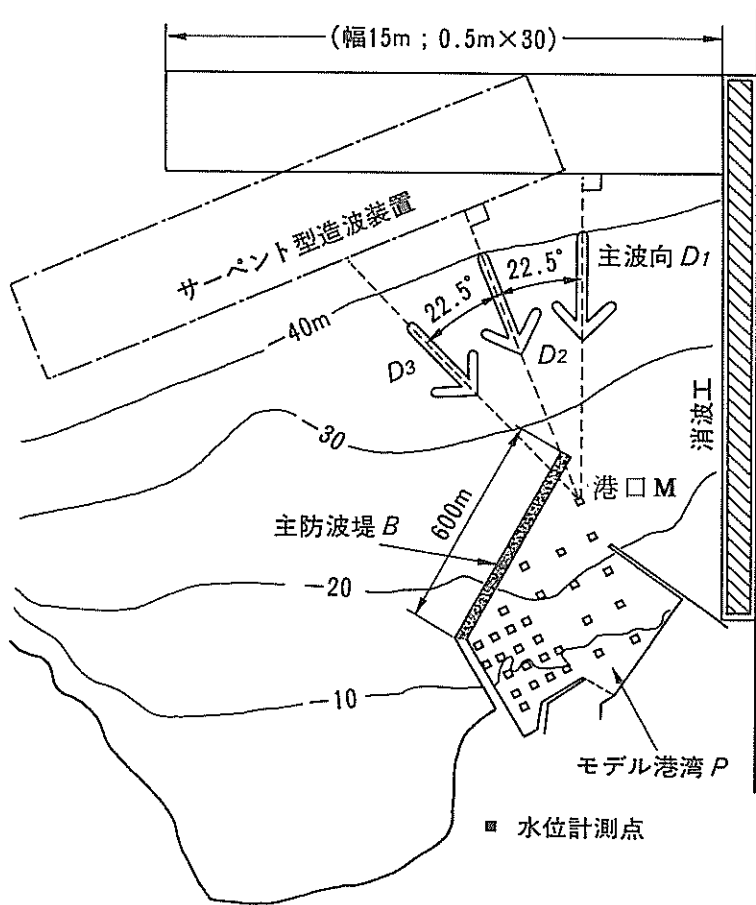
図一2 モデル港湾の現況地形



図一 3 (1) モデル港湾の整備目標



図一 3 (2) 上部斜面堤の断面



図一 4 モデル港湾の模型の配置

がどちらにも接岸できなくなる。そこで、離島における就航率を上げるために、防波堤BおよびCを整備して、荒天時でも利用できる遮蔽水域を確保することが考えられた。このとき、防波堤Cは、水深10m以下の地点に建設されるため、堤体が小さく、その製作は比較的容易とされている。防波堤Bは、水深15～30mの海域に建設される。防波堤Bの設計波は、東京都の波浪推算結果（東京都、1985）を参考にすると、 $H_{max}=13.9m$ になり、非常に大きな波力が作用する。そこで、防波堤Bは、上部斜面堤を用いて建設するものとされた。泊地の大きさとしては、今後、離島港湾での運航が期待されている600トンクラスの高速船が接岸できるように200m×200mが必要とされた。図-3(1)は、P港の整備計画を示し、400mあるいは600mの総延長を持つ上部斜面堤で構成された波力低減型防波堤を主防波堤とし、200m×200mの泊地を有する港湾を整備目標としている。図-3(2)は、P港に関する本模型実験で対象とした上部斜面堤の断面形状を示す。天端高は、H.W.L.（高潮位）上、3.5mである。

図-4は、伊豆諸島周辺の離島地区を対象としたモデル港湾Pの模型平面図である。水槽は、50cm幅の造波板を30枚有するサーベント型造波機を持つ多方向不規則波造波水槽である（平石、1992）。モデル港湾は、島礁でよく見られる急勾配斜面に設置され、開口部の水深は約25mである。モデル・スタディにしたがって、図の長さ600mの主防波堤Bが上部斜面堤で建設されるものとし、縮尺を1/100として実験を行った。なお、以下の実験結果を説明する文章中の数値は、特別に指示のない限り現地換算値である。

(2) 実験波の条件

離島港湾へ就航する高速客船の運航限界波高（シップ・アンド・オーシャン財団、1992）は3.5mであり、港湾の目的の一つは就航してきた高速船が安全に係留できる静穏度を港内に確保することにある。そこで、実験波の波高は港外における有義値で $H_{1/3}=3.5m$ とした。さら

に、船舶が入港後に時化が始まることを想定して、 $H_{1/3}=5m$ の波を実験では作用させた。また、上部斜面堤の越波による影響を大きくするために、造波機で起こせる最大値に近い $H_{1/3}=7.5m$ についても実験を行った。周期は東京都（1985）の波浪推算結果を参考にして、有義波高3.5mの場合に8と12s、5mの場合に12s、7.5mのときに16sとした。表-1は、実験に用いた波の一覧表である。表-1の条件は、造波機設置位置における条件として設定している。主波向も上記の推算結果をもとに、図-4に示す $D_1 \sim D_3$ の3種類とした。なお、主波向とは、波の峯が最も密に並んでいる方向として定義できる（橋本、1992）。

港内の波高分布は、波の方向集中度によって変化する（斎藤ら、1993）ので、本実験では、 $H_{1/3}=3.5m$ に対しては、単一方向不規則波だけでなく多方向不規則波を作用させた。波の周波数スペクトル形は、次式に示すBretschneider-光易型とした。

$$S(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} f^{-5} \exp[-1.03(T_{1/3} f)^{-4}] \quad (1)$$

ここに、 $S(f)$ ：周波数スペクトル

$H_{1/3}$ ：有義波高

$T_{1/3}$ ：有義波周期

f ：周波数

である。

波の多方向波のエネルギーの方向別分布を表す方向分布関数（たとえば、合田ら（1975）は光易型を用いた。光易型の方向関数は次式で示される。

$$G(\theta; f) = G_0 \cos^{2n} \left(\frac{\theta - \theta_0}{2} \right) \quad (2)$$

ここに、 θ ：成分波の進行方向（波向）

θ_0 ：主波向

である。 G_0 は方向関数の正規化のための変数で次式で表

表-1 実験に用いた波の条件

設定根拠	$H_{1/3}$ (m)*1	$T_{1/3}$ (s)*1	主波向	方向集中度**2 S_{max}
高速船運航限界	3.5	8.0	D_1, D_2, D_3	10,999
		12.0	D_1, D_2, D_3	25,999
時化時想定	5.0	12.0	D_1, D_2, D_3	999
水槽造波限界	7.5	16.0	D_1, D_2, D_3	999

*1 造波機設置位置（水深40m）での条件である

*2 999は、単一方向不規則波である

される。

$$G_0 = \left[\int_{\theta_{\min}}^{\theta_{\max}} G(\theta; f) d\theta \right]^{-1} \quad (3)$$

ここで、 $\theta_{\min} \sim \theta_{\max}$ は、成分波の含まれる波向範囲である。式(2)の s は、エネルギーの方向分散を表す係数で、この値が大きくなると、波のエネルギーは一方へ集中し、この値が小さいと波のエネルギーは広範囲へ分散する。 s は、周波数によって変化し、方向集中度パラメータ(合田・鈴木, 1975) S_{\max} を用いて次式で表される。

$$S = \begin{cases} S_{\max} (f / f_p)^5 & : f \leq f_p \\ S_{\max} (f / f_p)^{-2.5} & : f > f_p \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 f_p は、周波数スペクトルのエネルギー密度が最も高くなるピーク周波数である。方向集中度パラメータは、波のエネルギーを方向分布特性を表す指標として広く用いられており、 S_{\max} が高いほど、波のエネルギーは一方へ集中し、単一方向波の場合は、理論上は、 S_{\max} は無限大になる。沖合いの風波の場合には、通常 S_{\max} は10~25程度である。 S_{\max} が0の状態は、全方位から同じ波のエネルギーが来襲している状態に相当する。

本実験においては、有義波周期 $T_{1/3}$ が8および12sの場合に対して、 S_{\max} をそれぞれ10および25とした。主波向 D_1 については、造波機を図中の実線の位置に設置し、主波向 D_2 および D_3 については、一点鎖線で示した位置に設置した。これは、多方向不規則波造波機では、造波機面法線に対して45°以上傾いた主波向を有する方向へ多方向不規則波を造波することは困難であるためである(平石, 1992)。

(3) 造波信号作成法の概要

多方向不規則波の造波信号の作成法としては、演算時間が短いシングルサンメーション法(Takayama, Hirai-shi, 1989)に従った。シングルサンメーション法における造波信号の作成法を以下に示す。

いま、図-5に示すように、水平座標軸 x および y を設定する。サーベント型造波装置は $(N_+ + N_- + 1)$ 台の造波板幅 b のピストンタイプの造波機からなるものとする。シングルサンメーション法においては、サーベント型造波装置 i 番目の造波板の変位 $\eta_i(t)$ は次式で与えられる。

$$\eta_i(t) = \sum_{n=1}^{N_s} \frac{a_n}{F_n} \sin(2\pi f_n t - i k_n b \cos \theta_n + \varepsilon_n) \sin \theta_n \quad (5)$$

ここに、添字 n は n 番目の成分波の値であることを示す。

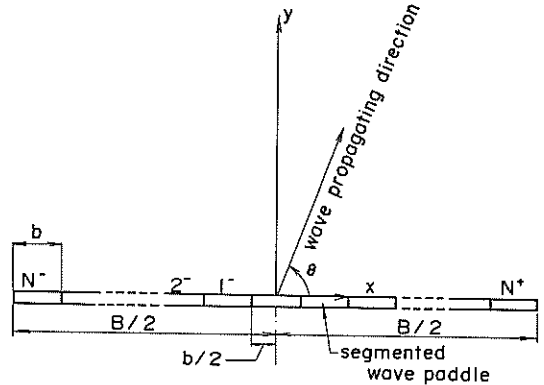


図-5 造波信号計算における座標系

N_s はシングルサンメーション法における成分波の総数である。 t 、 f_n 、 k_n および θ_n はそれぞれ時間、 n 番目の成分波の周波数、波数および波向を示す。 n 番目の成分波の振幅は次式で計算できる。

$$a_n = \sqrt{2S(f_n) \delta f_n} \quad (6)$$

ここに、 $S(f_n)$ および f_n は、それぞれ、 n 番目の成分波のスペクトル密度とスペクトル幅を示す。 n 番目の成分波の代表周波数 f_n はバンド幅 δf_n に含まれる周波数スペクトルの2次モーメントが等しくなるように決定する(永井, 1972)。あるいは、最低周波数と最高周波数を等分割して求めてもよい。

n 番目の成分波の波向 θ_n は、目標多方向波の方向分布特性を表す方向関数 $G(\theta; f)$ の累加曲線と乱数に対して決定できる。図-6は、方向関数が周波数に依存しない簡単なケースにおける波向 θ_n の求め方を示した模式図である。図で、 γ_n は0から1の値を取る一様乱数である。

$\int_0^{\theta} G(\alpha; f) d\alpha$ はエネルギーの累加曲線で0から1までの値を取る。そこで、乱数列 γ_n ($n=1, 2, \dots, N_s$)の値と

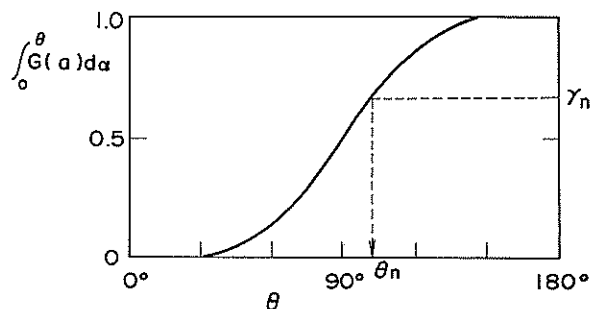


図-6 成分波の波向の決定法

等しくなるときの θ の値を図のように累加曲線から求め、波向 θ_n ($n = 1, 2, 3, \dots, N_s$)を決定する。 F_n は n 番目の成分波に相当する造波効率を示し、ピストン型造波機の場合次式で示される。

$$F_n = \frac{4 \sinh^2 k_n h}{2 k_n h + \sinh 2 k_n h} \quad (7)$$

(4) 有効造波領域の考え方

多方向不規則波を水槽内で造波すると、目標とする波が造波できる範囲（有効造波領域）は、水槽の一部に限定される。図-7は、平石（1992）による斜め波の波高分布の測定結果と、斉藤*による水槽内の多方向不規則波の方向関数の分布形から判断できる全体長 B の造波装置を配置した場合の有効造波領域の範囲を示す。このとき、造波板設置面以外の水槽側壁は反射波が生じないように、消波装置を設置する。有効造波領域は、造波板を底辺とし、 $B/\sqrt{2}$ を側方の辺長とする二等辺三角形で表される。ただし、定常減衰波（Takayama, 1987）の影響を避けるために、造波板面から $1/2$ 波長程度離して模型および計測装置を設置する必要がある。

なお、実験に先立ち、造波機の前面に、造波機面に平行に5台の波高計を設置して、造波信号のレベルを変えて波高を測定した。そして、目標とする波高が再現できるように造波信号の振幅を微調整した。

写真-2、3および4は、それぞれ、模型製作の状況、完成した海底地形模型および造波状況を示す。

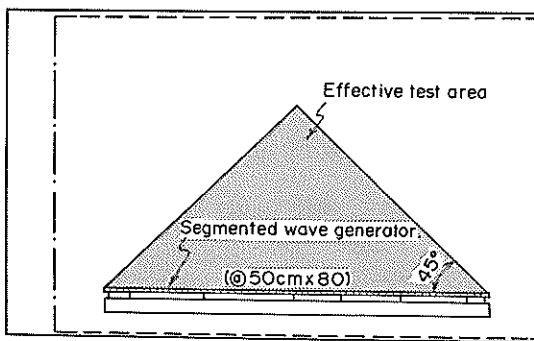


図-7 有効造波領域の範囲



写真-2 模型製作の状況



写真-3 海底地形と上部斜面堤模型

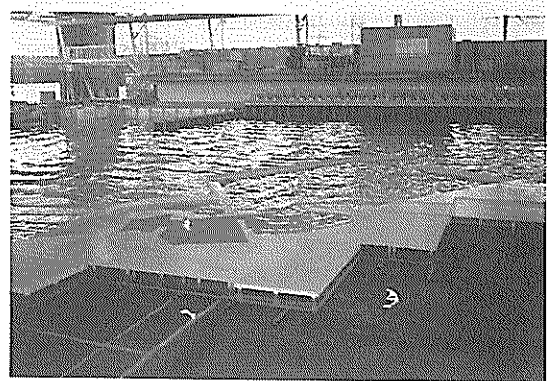


写真-4 多方向不規則波の造波状況

* “多方向不規則波を用いた模型実験における技術課題に関する意見交換会”において、1993年7月に、ハザマ技術研究所斎藤栄一氏によって、水槽内の方向スペクトル形の分布が口頭発表されている。

2.2 造波した実験波の特性

(1) 解析法および周波数スペクトルの特性

造波された波を検定するために、造波機中心から2m離れた位置に4本の波高計を組み合わせたアレイを設置し、造波機前面における入射波の波高・周期・周波数スペクトルおよび方向スペクトルを求めた。図-8は、方向スペクトルを解析するために4本の波高計で構成されたアレイを示す。アレイの形状は正三角形であり、三角形の頂点および中心の4点に容量式波高計を取り付け、同時に水面変動を計測した。波高計間隔 D は、合田(1982)に従うと、解析する最小波長の1/2以下が適当である。ここでは、 $D=50\text{cm}$ として解析を行った。方向スペクトルの解析は、ベイジアンモデル(橋本, 1992)に従った。

図-9は、アレイの中央に設置された波高計で測定した造波した実験波の周波数スペクトル形を示す。図の薄色および黒い丸印がそれぞれ単一および多方向波の測定結果を示す。図中の破線は、目標としたBretschneider・光易型の周波数スペクトル形を示す。なお、図の数値は、模型値である。図に示されるように、単一方向不規則波と多方向不規則波の周波数スペクトル形はよく一致し、両者の差異は小さい。両者とも目標とするスペクトル形によく一致し、周波数分布特性が模型実験で精度よく再現できていることがわかる。

(2) 方向分布特性

図-10は、ピーク周波数 f_p 近傍の周波数帯における主波向 D_3 の多方向波の、造波機前面における方向関数を示す。ピーク周波数は、周波数スペクトルにおいて、エネルギー密度が最大になる周波数で、最も波のエネルギーが集中している。 $0.88f_p$ から $1.63f_p$ までの間に、波の総エネルギーの80%が含まれる。図中の太い実線が実験値、細い実線が $S_{\max}=10$ の目標値を示す。図に示された場合、 D_3 方向が $\theta=90^\circ$ に相当するので、 D_3 を主波向とする目標関数のピーク角度は 22.5° ずれている。

図中の太い破線は、造波板による回折波を重ね合わせて計算した理論解(高山・平石ら, 1989)である。理論計算は、図-11に示すような一枚の造波板が、無限壁面上で前後に周期運動を行う場合に求められる波のポテンシャルを、全造波板について重ね合わせて求めるもので、文献(Takayama and Hiraishi, 1989, または、平石, 1992)に詳述されているので参考にされたい。

実験で用いた造波機は、隣合う造波板が接続されていない離散型であり、造波板による回折と、造波機全体長の有限性のため、場所によって造波された波の性質が変化し、目標方向関数が再現できない可能性もある。ただし、測定点が有効造波領域(平石, 1991)の範囲内にあ

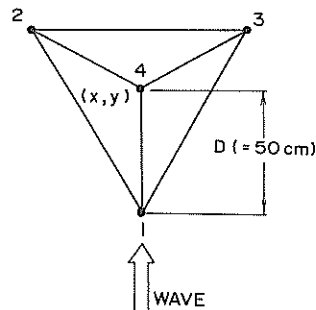


図-8 波高計アレイの構成

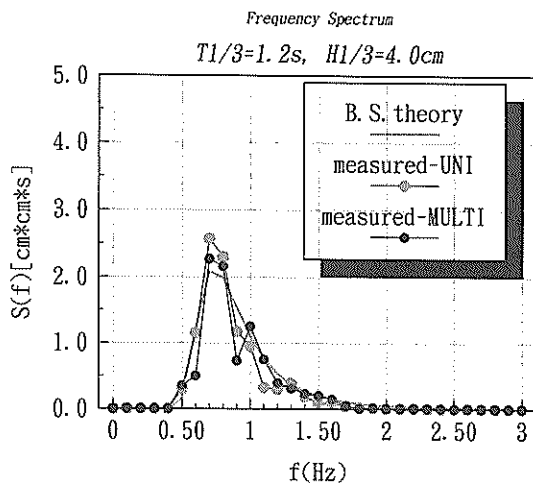


図-9 測定した周波数スペクトル

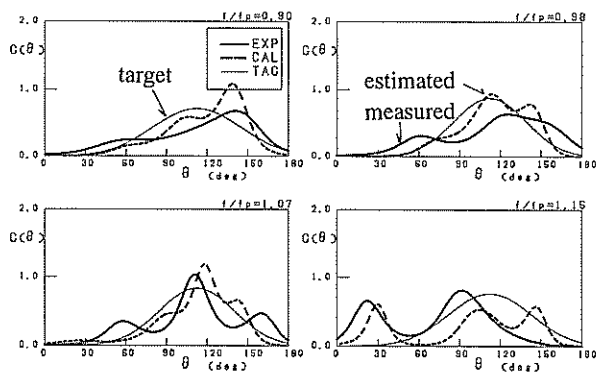
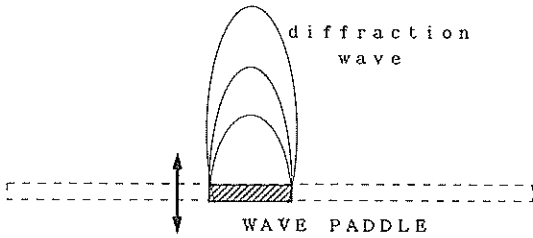


図-10 ピーク周波数近傍の周波数帯における方向関数形の分布(主波向 D_3)



図一11 1枚の造波板から発生する回折波の模式図

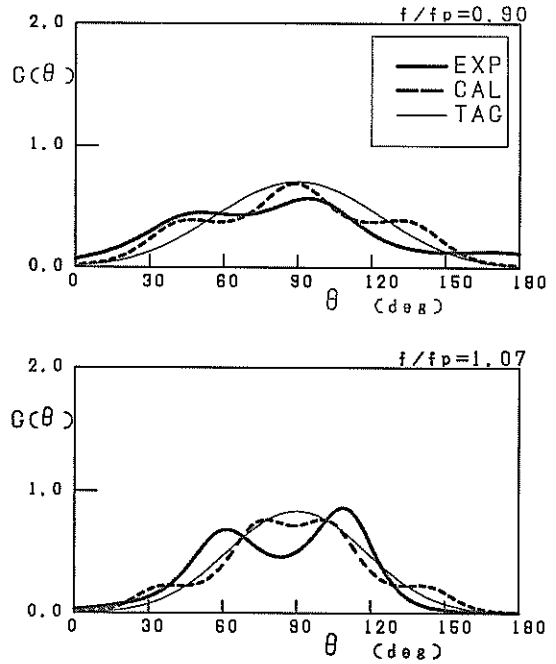
る場合には、理論解と目標値はほぼ一致する。図一10に示されるように、造波機前面では、本実験の場合、理論解は実験値とほぼ一致する。ただし、周波数によってピークの値が目標値よりも少し高くなる。実験値は、理論解にはほぼ一致しており、目標値より若干ピークが高くなる場合もある。全体的な分布形は、ほぼ目標値を表しているため、造波機前面においては、目標とする多方向不規則波がほぼ正確に造波されていると言える。

図一12は、主波向 D_2 について同様の解析を行ったものである。造波条件は、 $H_{1/3}=3.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8\text{s}$ および $S_{\text{max}}=10$ である。図中の $\theta=90^\circ$ が、波向 D_2 に相当する。破線で示した理論値と実線で示した実験値はよく一致し、理論計算により、実験室内における造波された多方向波の方向分布特性を精度よく表すことができる。理論値および実験値とも、細い実線で示した目標値とよく一致し、造波機前面においては、目標とする多方向波が造波されていることがわかる。以上のことから、造波機前面においては、いずれの波向についても、目標とする多方向波が造波されていることがわかる。そして、造波される多方向波の方向分布特性は、理論計算によって、精度よく推定することが可能である。

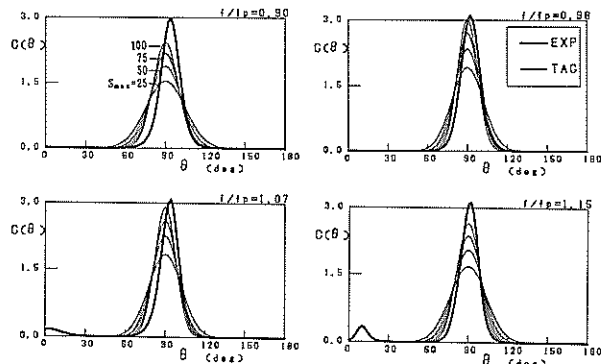
図一13は、造波機前面の波高計アレイで、単一方向波について、多方向波と同様に、ベイジアンモデルによる方向スペクトルの解析を行った結果を示す。図中の実線は実験値を示し、図中の細い実線は、 $S_{\text{max}}=25, 50, 75, 100$ の理論分布形を示す。実線で示した実験値の分布形は、解析周波数に変化しても、いずれの場合も鋭いピークを示す。その分布形は、 $S_{\text{max}}=100$ の場合より、ピークが高くなっており、単一方向波が造波されていると判断できる。また、ピークは一つしか生じておらず、水槽側壁などからの顕著な反射波は生じていない。

2.3 実験の項目

実験では、対象港湾における波の特性を把握するために、港口部の波高・周期・方向スペクトルを4本の波高計を組み合わせたアレイで測定し、港内では29カ所で波高・周期を測定した。図一4の港口部の測点Mがアレイ



図一12 ピーク周波数近傍の周波数帯における方向関数形の分布 (主波向 D_2)

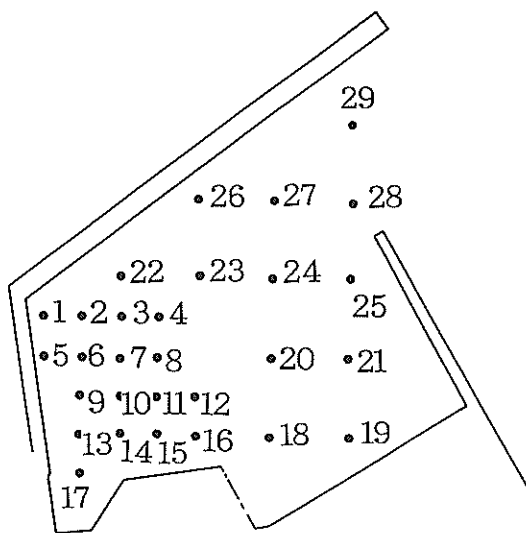


図一13 単一方向不規則波の方向分布関数の解析結果

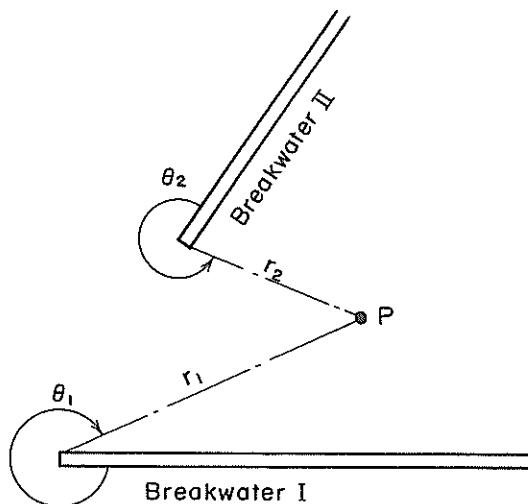
の中心を配置した点である。図一14は港内における波高計の配置図を示す。

実験は次の3種類からなる：

- ① 伝達波実験 港口部を板で遮蔽し、防波堤からの伝達波のみが港内に進入するようにして波高を測定する、
- ② 回折波実験 防波堤を高壁とし、伝達波を防ぎ、港口からの回折波のみが港内に進入できるようにして波高を測定する、
- ③ 合成波実験 実地形を用いて両者を許容した場合の波高を測定する。



図一14 港内における波高測定の配置 I



図一15 港口進入波の回折計算の説明図

3. 港内波高の計算と実験の結果

3.1 港内波高の計算方法

(1) 計算方法の概念

計算では、港内水深を一定として島堤による回折波の解を重ね合わせる手法（高山，1982）を用いた。ここでは、計算法の基本概念を示す。

港内波浪は種々の原因で発生する波が重なったものであり、その主な次の二つである：

① 港口進入波 (diffraction wave through break-water gap)

港口進入波とは沖合いから港口に達した波が港口部で回折され、防波堤の背後に回り込んで港内奥深く進入する波である。

② 港内反射波 (reflection wave in harbor)

港内反射波は、港口進入波が港内の防波堤や岸壁、護岸などで反射される波のことである。この反射波は港内で多重反射を起し、港内波高を増幅させる。

高山による計算法では、港口進入波および港内反射波による港内の回折波高を別個に計算し、計算結果を重ね合わせることによって港内波高を推算する。規則波の回折波高は、流体運動が非圧縮・非回転であると仮定すると、Laplace方程式を満足し、港内の境界条件に合致する水粒子の速度ポテンシャルを求めることによって計算できる。

(2) 港口進入波の計算

図一15は港口進入波の計算の説明図である。防波堤 I

およびIIを半無限堤と仮定すると、Sommerfeldの解析解（Penny and Price, 1954）を用いて、防波堤 I によって回折した波の港内点 P における速度ポテンシャル $\phi_1(r_1, \theta_1)$ が計算できる。防波堤 II による回折波の P 点における速度ポテンシャル $\phi_2(r_2, \theta_2)$ も同様に計算できる。r および θ は、それぞれ防波堤先端から P までの距離および直線 r と防波堤のなす角度を示す。このほかに、一方の防波堤で反射された波が他方の防波堤で回折する場合の P 点における速度ポテンシャルなどを計算し、 ϕ_1 と ϕ_2 およびそれらをすべて加えると、港口進入波による港内点 P の速度ポテンシャルが ϕ_n が計算できる。

なお、港湾へ進入する波は方向スペクトルを有する多方向不規則波として扱い、最初に各成分波毎に上述の速度ポテンシャルから港内波高 H_{mn} を計算する。合成波高は、成分波高の線形重ね合わせとして次式で計算できる。

$$H = \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N H_{mn}^2} \quad (8)$$

ここで、添字 m および n は、それぞれ m 番目の方向および n 番目の周波数の成分を示し、M および N は、方向および周波数分割数を示す。本計算では、 $M=15$ 、 $N=30$ とした。

(3) 港内反射波の計算

図一16は、港内に進入した波を多方向波として考えた場合、各方向成分が進む方向を波向ベクトルとして示したものである。M 点から入射した波は、点 S_1, S_2, \dots に達し、各点で反射され、 R_1, R_2, \dots のように進む。港内反射波は、 S_1, S_2 などの反射点において、波長の 2 倍

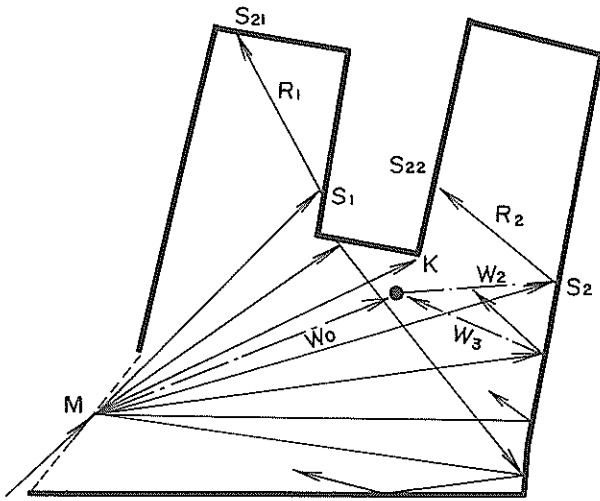


図-16 港内における波向ベクトル

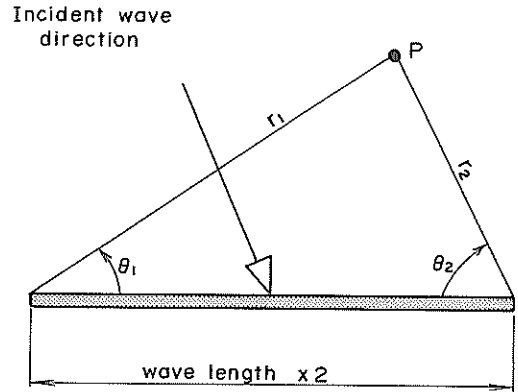


図-17 島堤による波の回折の説明図

の長さを持つ島堤が存在するものとして、島堤からの回折散乱波と反射波の和として計算できる。

図-17のように岸壁の一部を島堤と仮定する。港口進入波が図のように入射した場合には、港内のP点における波の場の速度ポテンシャルは、島堤の左端を堤端とし、右側に半無限に延びた防波堤による回折波ポテンシャル $\phi_R(r_1, \theta_1)$ と、島堤の右端を堤端とし左側に半無限に延びた防波堤による回折波の速度ポテンシャル $\phi_L(r_2, \theta_2)$ を重ね合わせ、入射波と反射波の速度ポテンシャルを差し引いたものとして計算できる。この速度ポテンシャルから入射波の速度ポテンシャルを除いたものが港内反射波の速度ポテンシャルである。

岸壁で反射された波は、対岸の岸壁で再度反射されて港内の波高を増大させるため、本計算法では、 R_1 、 R_2 などの反射波が岸壁に達した S_{21} 、 S_{22} などの点で島堤を仮定し、2次反射波の計算までを行っている。なお、周波数スペクトル形および方向関数形はそれぞれ、Bretschneider・光易型および光易型とし、実験条件と一致させた。

港内の波高計算は岸壁の反射率 K_R により大きく影響される。本計算においては、実際の施工計画を考慮して、図-18のように定めた。すなわち、上部斜面堤の背後は、消波構造がないために $K_R=0.9$ とし、係船岸壁も、消波構造ではなく $K_R=0.9$ とした。港奥部の小型船の船溜まりを遮蔽する波除堤は、消波ブロック被覆構造となっているので $K_R=0.3$ とした。

(4) 地形による波浪変形の取扱い

計算においては、最初に、越波が生じないものとして、

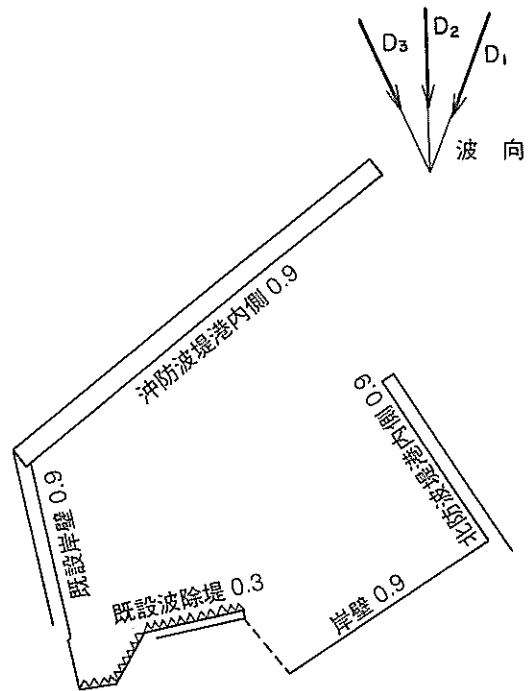
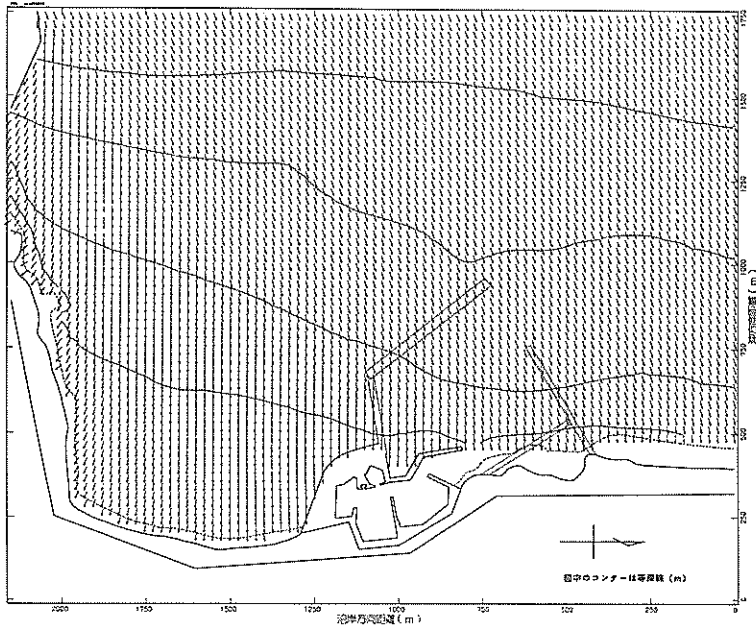


図-18 計算で用いた港内の反射率

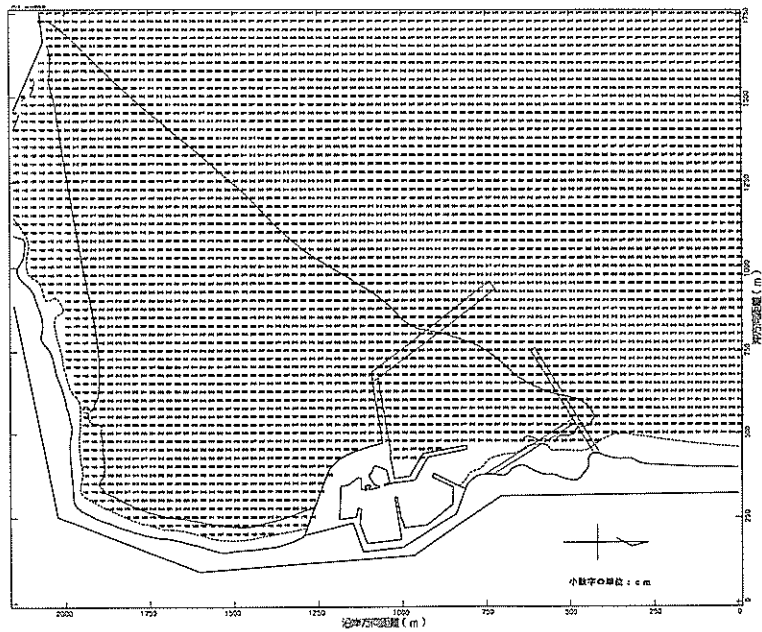
防波堤開口部のみから進入する回折波による港内波高 H_D を計算する。港口部における入射条件は、造波機設置位置を入射境界として、エネルギー平衡方程式を用いた波浪変形計算(高山・池田・平石, 1991)を行って求めた。図-19は、主波向 D_3 、 $T_{1/3}=8s$ 、 $H_{1/3}=3.5m$ の多方向波について、造波機設置位置を入射境界として、防波堤のない海底地形条件で計算した結果を示したものである。図



(1) 主波向

図一19 波浪変形計算の結果

(主波向 D_3 , $T_{1/3}=8$ s, $H_{1/3}=3.5$ m)



(2) 有義波高 (cm)

図一19 波浪変形計算の結果

(主波向 D_3 , $T_{1/3}=8$ s, $H_{1/3}=3.5$ m)

の(1)は、主波向の分布、(2)はcm単位で示した計算格子上の有義波高分布である。波向は、港湾の左手側に位置する海浜付近では、汀線と直角になるが、港湾の開口部付近では、波向は沖に比べてほとんど変化しない。また、地形は平衡等深線海岸に近似できるので、平行等深線海岸における計算結果(合田、鈴木、1975)を利用できる。それによると、造波機設置位置の水深42m地点で、等深線の法線に対して22.5°傾いた波向で入射するものとしても、水深22mの地点では、波向はほとんど変化しない。また、方向集中度パラメター S_{max} の変化も小さく、水深42mで $S_{max}=10$ と仮定すると、水深22m地点でも S_{max} は、10~11程度である。波高は、浅水変形により小さくなり、港口部で3.1m程度になる。波の周期は変化しない。したがって、港口部の条件としては、波高は変化したものを入力することにしたが、有義波周期、主波向および方向集中度は、造波条件と同一にした。

(4) 越波による伝達波の計算

高山法では、開口部を複数有する港湾における波高分布は計算できるけれども、港口部から入射して港内へ伝播する波(回折波)と、上部斜面堤を越波して港内へ侵入する波(伝達波)を同時に計算に取り入れることは困難である。そこで、回折波および伝達波による港内波高をそれぞれを別個に計算して、解を重ね合わせて合成波の港内波高分布を求めることが可能であると示した。図-20は回折波と伝達波の重ね合わせにより港内波高が求められることを模式的に示したものである。

具体的には、防波堤開口部を反射率0の側壁と仮定して、越波が生じる上部斜面堤部を仮想開口部として、伝達波による港内波高 H_T を計算する。このとき、入射波高は、エネルギー平衡方程式を用いた波浪変形計算によって防波堤設置点の波高を求めた後に、越波による伝達率

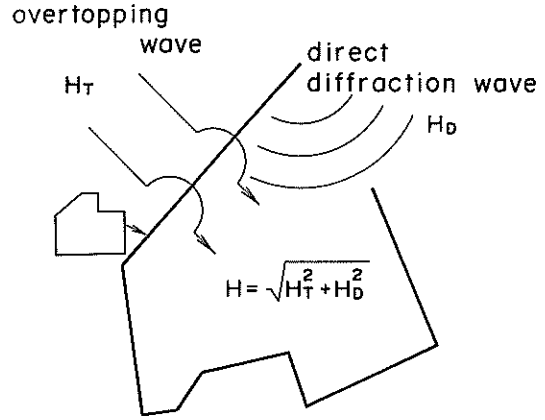


図-20 回折波と伝達波の重ね合わせの模式図

K_T を掛けて計算した。主波向および方向集中度パラメターは、回折波の場合と同一とした。

合成波の港内波高 H は伝達波高 H_T と回折波高 H_D から、次式で計算できる。

$$H = \sqrt{H_T^2 + H_D^2} \quad (9)$$

防波堤の越波による港内の伝達波の周期は、入射波のそれより短くなる(谷本ら、1988、平口ら、1992)。どの程度短くなるかについては、沖波の周期によっても異なる。ここでは、伝達波の入力周期については、実験結果を利用することにした。

図-21は、 $H_{1/3}=5m$ 、 $T_{1/3}=12s$ 、波向 D_2 の単一方向波について求めた伝達波による港内波の周期と回折波による港内波の周期を示している。図の横軸は、図-14で示した港内の波高計測点を示す。三角形で示した回折波の

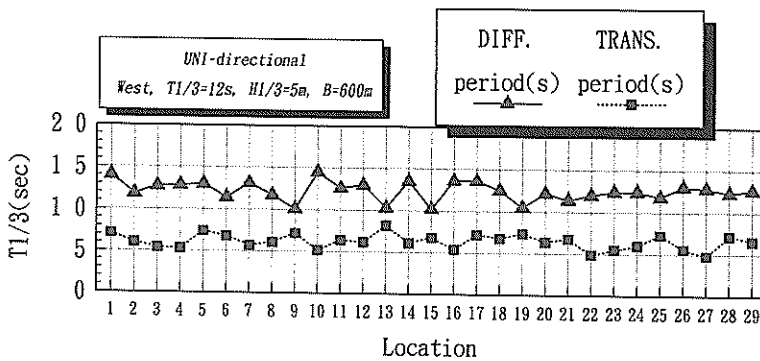


図-21 回折波と伝達波の周期の比較
(単一方向波、波向 D_2)

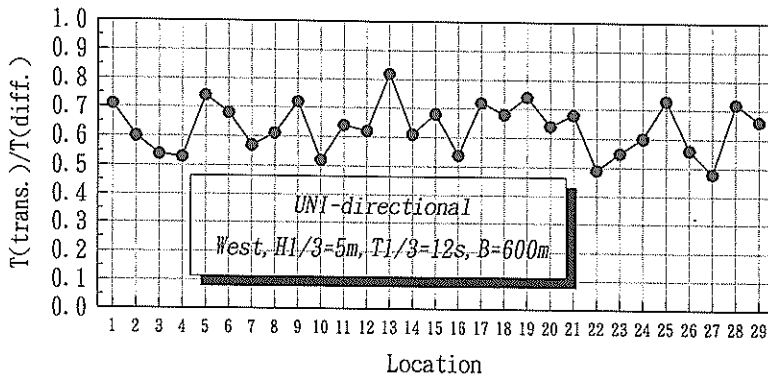


図-22 伝達波の回折波に対する周期比
(単一方向波, 波向 D_2)

有義波周期は、港内ではばらつき、P. 9, 13, 15の港奥に近い測点では10sで、入射波のものより短い。これは、港内の多重反射波の影響により波数が増えたためと思われる。P.1あるいは10などでは逆に長くなり、14~15sになる。これは、波高が小さくなり、統計処理をする場合にカウントできる波の数が減少したためである。四角で示した伝達波の周期は、港内全域で、回折波のものより短くなり、5~8s程度である。伝達波の周期と、回折波の周期の比較を明瞭にするために、回折波周期に対する伝達波周期の比を計算した。

図-22は、伝達波の周期と回折波の周期の比をとったもので、図-20と同一のケースに相当する。港内では、周期比は大きくばらつくものの、ほぼ0.5~0.7の範囲で表される。測点の中で周期比が大きいのは、P.1, 5, 9, 13, 17などで、これらの測点は、港奥の係船岸壁に沿った測点である。これらの港奥の点では、多重反射の影響により、一定時間に含まれる波の数が増加し、回折波の周期が短くなる傾向にある。そのため、伝達波と回折波の周期比が大きくなっていると思われる。既往の実験(合田・鈴木, 1974)では、0.5~0.6程度である。越波は常に生じているわけではなく、波がない場合の時間帯も含んだ統計的な解析結果が上記の値になっていることを考慮して、本計算では、入射波周期の0.5倍を伝達波の周期とした。

(5) 伝達率の設定法

本実験で対象とした上部斜面堤の伝達波高は、二次元断面実験で検討されている(高橋・細山田, 1994)。図-23は高橋らが検討した上部斜面堤の断面形状を示す。図-24は高橋ら(1994)が示した二次元断面実験における上部斜面堤の伝達率の実験結果である。ただし、上部斜面堤の断面形状は、本実験のものと若干異なる。高橋ら

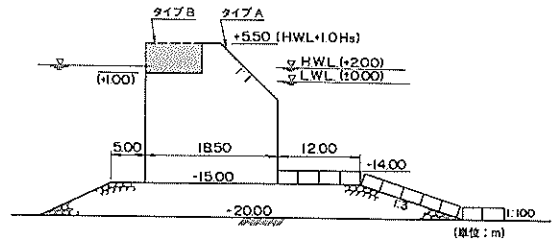


図-23 実験に用いた上部斜面堤の断面

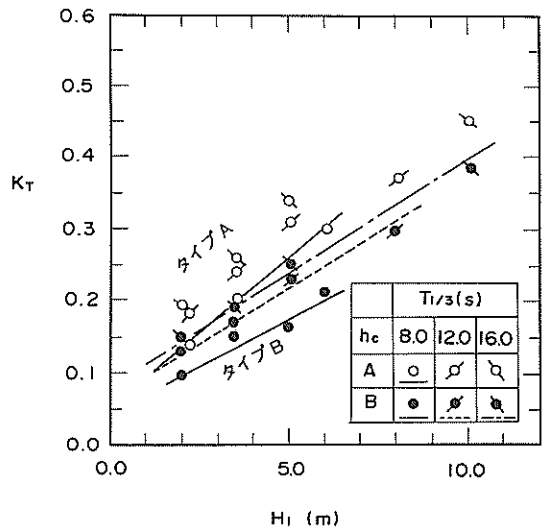


図-24 水路実験における上部斜面堤の波高伝達率(高橋ら, 1994)

の実験では、図-23に示すように、2種類の上部斜面堤を対象としている。タイプAは、堤体背面の天端が低くなったもので、背面の天端高は静水面より $0.2H_c$ だけ低

く没水状態になる。なお、 H_0 は基本波高でここでは3.5mである。タイプBは、斜面部の天端高さや背面の天端高さや同一で、ケーソンの頂上が平になっている。タイプAとタイプBを比較すると、タイプBの方が伝達率が小さい。これは、堤体上で入射波が碎波しやすく、エネルギーの損失量が増加するためと思われる。本実験で用いた上部斜面堤は背面が一段低くなっており、形状としては、タイプAに似ている。しかし、背面の天端高さは静水面上より上方で、越流した波は堤体上で摩擦などによりエネルギーを低減され易い構造となっている。したがって、機能的には本平面実験で用いた上部斜面堤は、タイプBに相当する。そこで、図-24のタイプBの伝達率を、本実験における上部斜面堤の波高伝達率とする。

なお、二次元断面実験の場合は、波は単一方向波で、直入射しているため、越波し易い条件になっている。平石ら(1994)の多方向波を用いた護岸越波量に関する模型実験によると、多方向波を作用させた場合には、単一方向波の場合に比べて、越波量は0.7~0.8倍に減少する。これは、多方向波の斜め波の成分波が、斜め入射することにより、成分波の中で越波しにくい波が現れるためである。そこで、本実験においても、二次元実験における伝達波を基本にして、若干小さな値を採用することにした。

表-2は、高山・永井ら(1985)が示した斜め入射波に対する越波量の測定結果の一部を示す。直立護岸に対しては、入射角 θ が大きくなり、波がより斜めから入射す

表-2 斜め入射波の越波量
(高山・永井ら, 1985)

実験条件	護岸	θ (deg)	測定値	
			H_0 (cm)	q (cm^3/s)
$T_0 = 1.71 \text{ s}$ $h = 15 \text{ cm}$ $h_c = 12.3 \text{ cm}$	直立	0	16.3	7.6
		15	16.3	4.2
		30	15.9	3.0
		45	16.1	2.9
		60	15.3	1.8

ると、越波量 q は減少する。 θ が30~45°になると越波量 q は、直入射波の場合に対して、0.4倍程度になる。越波量と伝達波の関係については、平石ら(1991)が調べている。図-25は、平石らが示した伝達率と越波量の関係を示す。ケーソンのタイプが異なっても、越波量と伝達率の関係は大きく変化せず、ほぼ同様の相関を示している。いま、図-25において、越波量が比較的大きい場合を仮定し $q = 1 \text{ lit}/\text{m}/\text{s}$ とすると、越波量が0.4倍に減少するときには、伝達率が0.15から0.1に減少することがわかる。

以上のことから、波が斜めに入射波すると、越波量が減少し、伝達率が小さくなることがわかる。その割合は、0.1/0.15で評価できて、ほぼ7割程度になる。本実験でも、主波向が防波堤法線に対して斜めであること、および多方向波の場合には、成分波の波向が広く分布すること、を考慮して、平面実験における波高伝達率は断面実験と比較して、70%程度に減少するものとした。

本実験の入射波の条件に応じて、断面実験から伝達率を導き、さらに平面実験であることを考慮して、各波の条件に対する伝達率を示すと表-3のようになる。表-3に補正值として計算に用いた値を示す。ただし、この値の妥当性を評価するために、採用した補正值を中心に3~4種類、伝達率を変化させて計算を行い、実験結果との比較を行った。

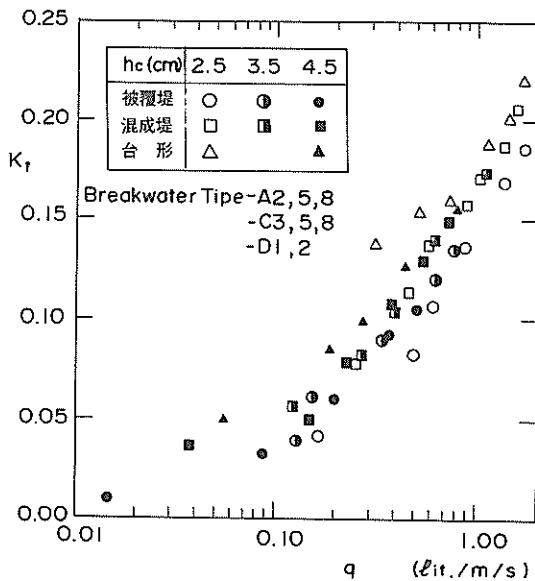


図-25 波の伝達率と越波量の関係
(平石ら, 1991)

表-3 上部斜面堤の波高伝達率

$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (m)	伝達率 (K_T)	
		二次元 実験値	平面実験 補正值
8.0	3.5	0.15	0.10
12.0	3.5	0.18	0.10
12.0	5.0	0.23	0.15
16.0	7.5	0.32	0.20

3.2 実験による計算法の検証

(1) 回折波と伝達波の線形重ね合わせ法の検証

はじめに、回折波と伝達波の線形重ね合わせ結果と合成波高の分布形が一致するかどうかを実験によって検討した。すなわち、同一の入射波条件で、①伝達波実験、②回折波実験および③合成波実験を行い、港内29点で伝達波高 H_T 、回折波高 H_D および合成波高 H を測定した。測定した合成波高を H_E とし、 H_T と H_D より $\sqrt{H_T^2 + H_D^2}$ で計算できる合成波高を H_C とする。

図-26および図-27は、 H_E と H_C を比較したものである。図中の“computed”および“measured”は、それぞれ計算値と実験値を示す。“DIFF”は、回折波高 H_D に相当し、“TRANS”は、伝達波高 H_T に相当する。“measured, DIFF+TRANS”は、 H_E に相当する。“computed DIFF+TRANS”は回折波高と伝達波高から計算した合成波高である。図-26は、波向 D_2 の単一方向波で、 $T_{1/3}=5\text{m}$ 、

$T_{1/3}=12\text{s}$ のケースである。図において、港内の伝達波高は、P.1~15の範囲では1mより若干小さいが、港口に近いP.16~29では、1mより大きくなる。薄色○で示した合成波高 H_C はP.1~P.15の範囲では、回折波高とほぼ等しいが、P.16~29では、回折波高より大きく、伝達波の影響が強くなっていることがわかる。●で示す計算した合成波高 H_C は、港奥では、 H_E より少し大きくなるが、P.15~29の範囲では、薄色○の H_E とよく一致している。したがって、回折波と伝達波を別個に計算し、結果を線形に重ね合わせることによって、合成波による港内波高を評価することが妥当であることがわかる。

図-27は、同様な比較を多方向波について行ったもので、波向 D_2 、 $H_{1/3}=3.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=8\text{s}$ のケースである。ただし、図-27においては、港内波高を入射波波高で除した波高比 K_D を示した。 $H_{1/3}$ が小さくなると、伝達波高も小さくなり、港内の全点において、波高比 K_D は0.1以下であ

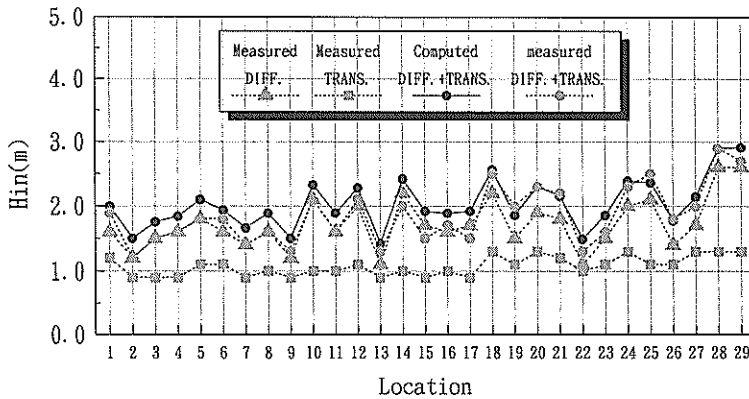


図-26 回折波と伝達波の重ね合わせ結果 (単一方向波, $T_{1/3}=12\text{ s}$, $H_{1/3}=3.5\text{ m}$, 波向 D_2)

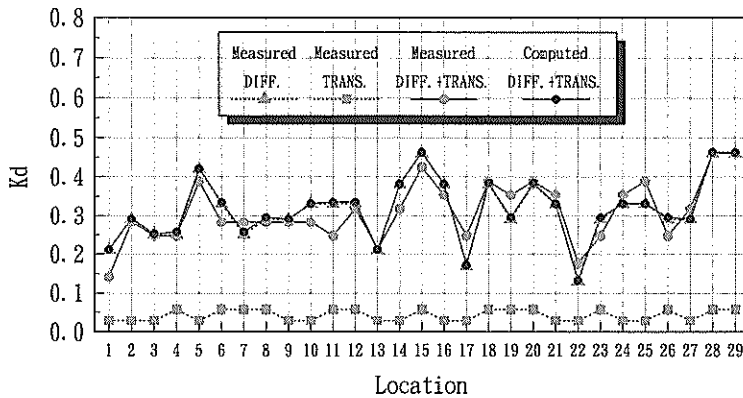


図-27 回折波と伝達波の重ね合わせ結果 (多方向波, $T_{1/3}=8\text{ s}$, $H_{1/3}=3.5\text{ m}$, 主波向 D_2)

る。この場合には、回折波高と合成波高に明確な差は生じず、三角形で示した回折波高と、回折波と伝達波高から計算した合成波高(●)は、ほとんど同一である。別個に測定した合成波高(薄白丸)は、P.9および10では、計算値より下回るものの、他の測点では、計算値とほぼ同じである。したがって、入射波波高が小さく、伝達波高が十分小さいとみなせる場合には、回折波高だけで港内の合成波高は決定できる。ただし、伝達波高を合成する手法で港内波高を計算しても支障は生じない。

以上の考察により、伝達波高と回折波高を別個に計算し、両者を線形に重ね合わせる計算法で、港内波高を算定することが妥当であることが検証できた。

(2) 港口部における実験波の方向分布特性

港内波高を求める高山法については、単一方向波による検証は十分成されている(高山, 1981)が、これまでに多方向不規則波実験による検証が成された例(斎藤ら, 1993)は少ない。そこで、本実験では、多方向不規則波による回折波高について、計算法の適用性を検討した。ただし、図-3に示したモデル港湾の港口部は、造波装置面より離れており、有効造波領域(平石, 1991)の外に位置している。したがって、目標とする多方向性が港口部で再現されない可能性がある。そこで、まず、港口部における方向スペクトルの解析を行った。港口部における方向スペクトルの解析は、港内波高の測定とは別個に、図-4の港口点Mに波高計アレイを設置して行った。波高計アレイは、図-8に示したものと同一である。造波装置は、図-4の一点鎖線で示した位置に固定し、波向 D_2 および D_3 について測定を行った。以下の方向関数の分布形を示すグラフにおいて、波向 $\theta=90^\circ$ が、波向 D_2 に相当する。

図-28は、主波向 D_3 の場合の、ピーク周波数近傍の周波数帯における実験波の方向関数形を示す。主波向 D_3

は、図-28の θ においては 112.5° に相当する。各図の右上の数値 f/f_p は、解析周波数とピーク周波数の比である。図において、太い実線で示した実験値は、細実線で示す目標値よりも高いピークを示し、波の方向集中度が目標とするものよりも高くなっていることがわかる。目標値の分布は $S_{max}=10$ の分布形に相当する。太い破線で示した分布形は回折理論解(高山・平石ら, 1989)を示し、理論解も、目標分布形より高いピークを示す。実験値と回折理論値を比較すると両者はよく一致する。したがって、有効造波領域の外側の計測点においては、造波された波の方向集中度は目標値よりも高くなるが、その分布形は理論計算によって評価できることがわかる。すなわち、港口部の方向スペクトルを測定していないケースにおいても、理論解を用いて、港口部における方向関数形を推定することができる。

図-29は、主波向 D_1 の場合について、港口部のピーク周波数での方向分布関数の理論解を示したものである。このときの、造波信号として与えた S_{max} は10である。細実線は、 $S_{max}=10\sim 100$ に対する目標分布形である。太い破線で示した理論計算による方向関数の分布形は、入力値

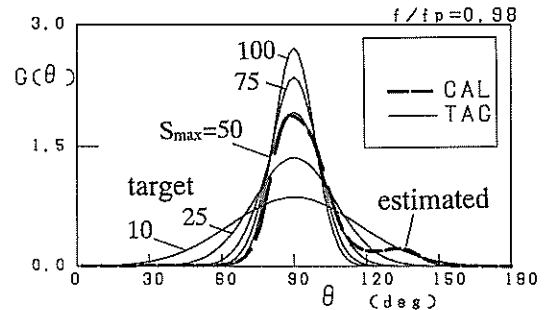


図-29 港口における方向分布の理論解(主波向 D_1 , $T_{1/3}=8$ s)

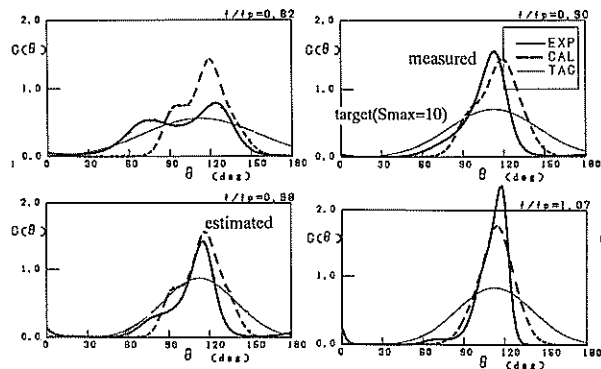


図-28 港口部における港口分布関数形(主波向 D_3 , $H_{1/3}=3.5$ m, $T_{1/3}=8$ s)

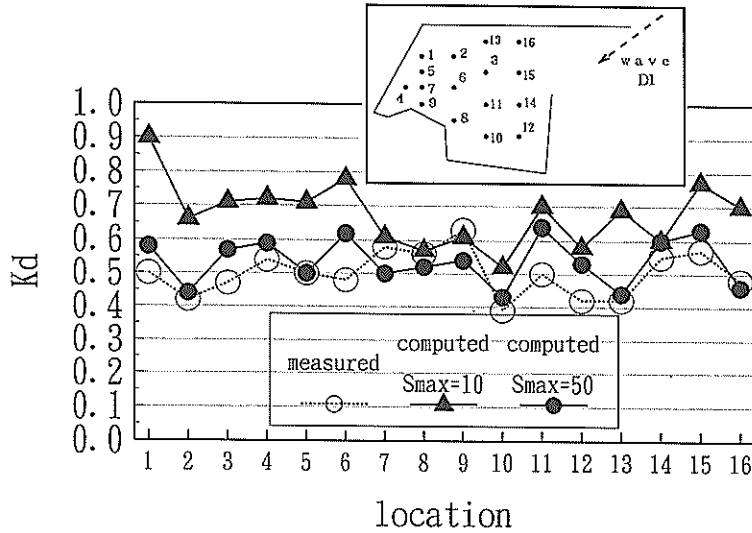


図-30 港内回折波高の計算と実験値の比較 (多方向波, 主波向 D_1 , $T_{1/3}=8s$, $H_{1/3}=3.5m$)

である $S_{max}=10$ ではなく $S_{max}=50$ 程度になっており, 本実験のモデル港湾の港口部においては, $S_{max}=50$ で分布特性を表わせる多方向不規則波が造波されていることがわかる。図-28に示した主波向 D_2 のケースでも, 実験値の分布形は $S_{max}=50$ 程度の分布形で表されている。

(3) 多方向波による港内波高計算法の検証

図-30は, 主波向 D_1 のケースにおける港内のP.1~16測点における回折波高の実験値と計算値を比較したものである。このケースでは, 伝達波高を遮蔽するための高壁は設けていないが, 主波向が, 防波堤法線に対して大きく傾いているため, 越波が生じていなかった。したがって, 港内波高は, そのまま回折による波高とみなすことができる。縦軸は, 入射波高に対する回折波高の比 K_d を表している。入射波高は, 港口部における波高に相当する。 $S_{max}=10$ の場合の計算値は, ○で示した実験値よりも大きくなり一致していない。なお, 港内の測点は, 図-26, 27などの場合と異なっており, 図-31に示すように, P.1から16の16点で比較している。

$S_{max}=10$ の計算値が実験値と一致しないのは, 前述のように, 港口部の方向集中度が入力値よりも増加しているためである。 $S_{max}=50$ として計算すると, ●で示した計算値は, 実験値はよく一致している。このように, 港口部における実測の方向集中度を入力条件として計算した結果と, 実験値が一致することより, 高山法による回折計算手法が多方向波の港内波高分布計算に適用できることが確認できた。

図-32は, 主波向 D_2 で, $T_{1/3}=8s$, $H_{1/3}=3.5m$ の多方向

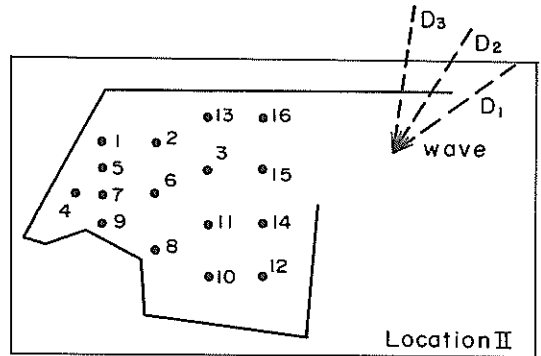
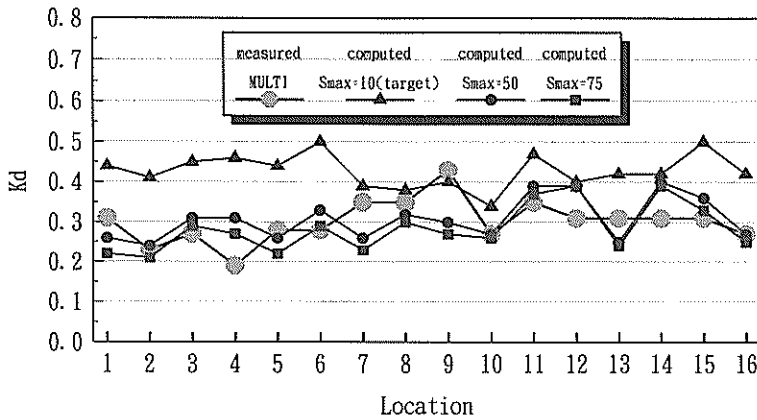


図-31 港内波高代表点の配置 II

波に対する実験値と計算値の比較を示す。このケースでは, 防波堤上に高壁を設け, 回折波高のみを測定した。黒三角は, 造波機に与えた入力条件である $S_{max}=10$ を用いて計算した港内波高分布である。この計算値は, 薄い白丸で示した実験値と比較するとP.9を除いて, より大きくなり, 実験値と一致しない。次に, ●および■で示した, $S_{max}=50$ および75の計算値と比較する。 $S_{max}=50$ および75の両計算値は, ほぼ一致しており大きな差は生じていない。実験値は, これらの計算値よりP.9で高くなるが, P.1~8ではよく一致している。P.10~16でも, ばらつきはあるが, ほぼ一致している。したがって, 港内波高は, 造波条件 $S_{max}=10$ で計算された値よりも, 高い S_{max} で計算された値とよく一致する。実測した港口部の方向分布形は $S_{max}=50$ で表されるので, この値を用いた計算値と実験値が一致することにより, 計算法が, 多方向波に適用できることが確認できた。



図一32 港内波高比の実験値と計算値の比較 (多方向波, 主波向 D_2 , $T_{1/3}=8$ s, $H_{1/3}=3.5$ m)

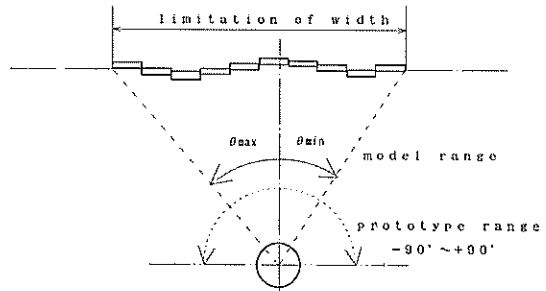
(4) 波向範囲の変化が方向分布特性に及ぼす影響

以上のように、実験対象が有効造波領域に含まれていない場合には、目標とする多方向不規則波より方向集中度が高い波が到達してしまう。この原因の一つは、図一33に示されるように造波装置全体の有限性である。本来の波は、図一33に示すように、対象点に対して、 -90° から $+90^\circ$ の範囲で作用する。しかし、造波板の総幅が有限であるために、波向の範囲は θ_{max} から θ_{min} に限定される。そのために、造波板面から模型設置点が遠くなればなるほど、 $\theta_{min} \sim \theta_{max}$ は狭くなり波向範囲が限定されるため、造波された多方向波の方向分布特性が歪んでしまう。

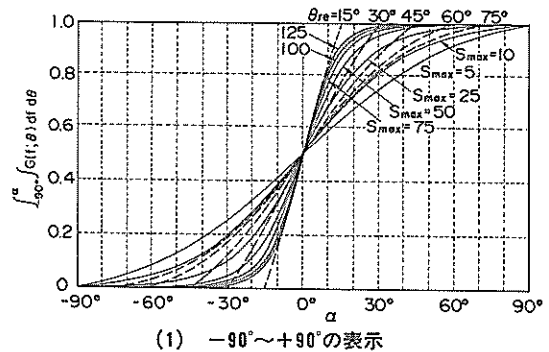
このように目標分布より歪んだ方向分布特性をあらかじめ推定することは、実験計画を立案する上で重要であるが、その計算においては理論解 (Takayama and Hiraishi, 1989) を解かなければならず、解析に時間がかかる。そこで、ここでは、比較的簡単に、方向集中度を推定できる近似手法を提案する。

一般に、方向関数は、前述したように次式で計算できる。このとき、積分の計算に当たり波向の上限と下限を決定する必要がある。通常下限 θ_{min} は -90° であり、上限値 θ_{max} は $+90^\circ$ である。この下限値と上限値の絶対値を小さくし波向範囲を狭くすると、方向関数形がどのように変化するかを検討した。図一34は、エネルギーの累加値を示したもので、図一34(1)は、波向範囲を $-90^\circ \sim +90^\circ$ として累加曲線を示したものである。(2)は、 $0^\circ \sim 40^\circ$ の範囲を拡大して示したものである。累加曲線は、 θ_{min} からある波向 α までの範囲に含まれる波の全エネルギーを示し、次式で計算できる。

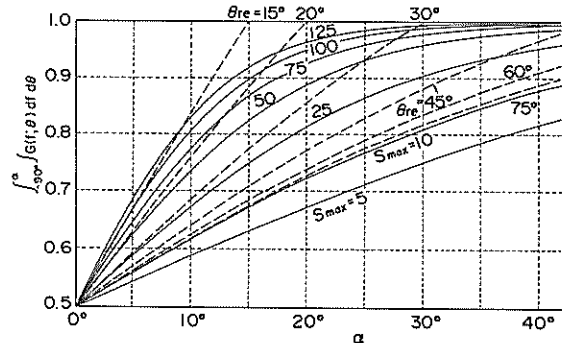
$$M_0(\alpha) = \int_{\theta_{min}}^{\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} G(f; \theta) df d\theta \quad (10)$$



図一33 造波機の有限幅の影響



(1) $-90^\circ \sim +90^\circ$ の表示



(2) $0^\circ \sim 40^\circ$ の表示

図一34 波向範囲に対するエネルギー累加曲線の変化

なお、図において、細実線は波向範囲を $-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$ で一定とし、方向集中度パラメータ S_{max} を5から125まで変化させた場合の累加曲線の変化を示す。破線は、方向集中度パラメータを $S_{max}=10$ で一定とし、波向範囲 $\theta_{max}=+\theta_{re}$ 、および $\theta_{min}=-\theta_{re}$ としたときの θ_{re} を 15° から 75° まで変化させた場合の累加曲線の変化を示す。

図に示されるように、方向集中度パラメータ S_{max} が大きくなると、方向集中度が高くなるため、累加曲線の 0° 付近の傾きが急になり、勾配がきつくなる。また、 S_{max} を10として一定として波向範囲を変えた場合には、範囲が狭くなるほど、勾配が急になり、 0° 近傍の傾きは大きくなる。細実線と、破線を比較すると、図-34(2)に示すように、 $\theta<30^{\circ}$ の範囲では、両者は相似している。すなわち、 $S_{max}=10$ の細実線は、 $\theta_{re}=60\sim75^{\circ}$ の破線で示した曲線とほぼ一致する。また、 $\theta_{re}=20^{\circ}$ の破線は、 $S_{max}=50\sim75$ の細実線とよく一致する。したがって、 $\theta=0^{\circ}$ 近傍の範囲においては、 S_{max} が変化したときの累加曲線の傾きは、 S_{max} を一定として、波向範囲 θ_{re} を変化させたときの傾きに一致する。このことは、 $\theta=0^{\circ}$ 近傍の範囲においては、 S_{max}

の異なる多方向不規則波の方向分布特性を近似するためには、 S_{max} を一定として、波向範囲を変化させた多方向不規則波を用いればよいことを示している。具体的には、 S_{max} が大きくなる場合には、 S_{max} を一定として、波向範囲を狭くした多方向不規則波で近似することができる。

いま、図-35に再述する示す本実験水槽において、対象港湾の港口部Mを対象点として、造波機の設置位置に対して波向範囲を検討する。図では、波向 D_2 のときの θ_{max} および θ_{min} を示している。他の波向についても、対象点と、造波機の位置関係から、波向範囲を求めると表-4のようになる。

表-4 造波機位置と波向範囲の関係

主波向	波向範囲	
	θ_{min}	θ_{max}
D_1	-55°	$+23^{\circ}$
D_2	-55°	$+20^{\circ}$
D_3	-52°	$+23^{\circ}$

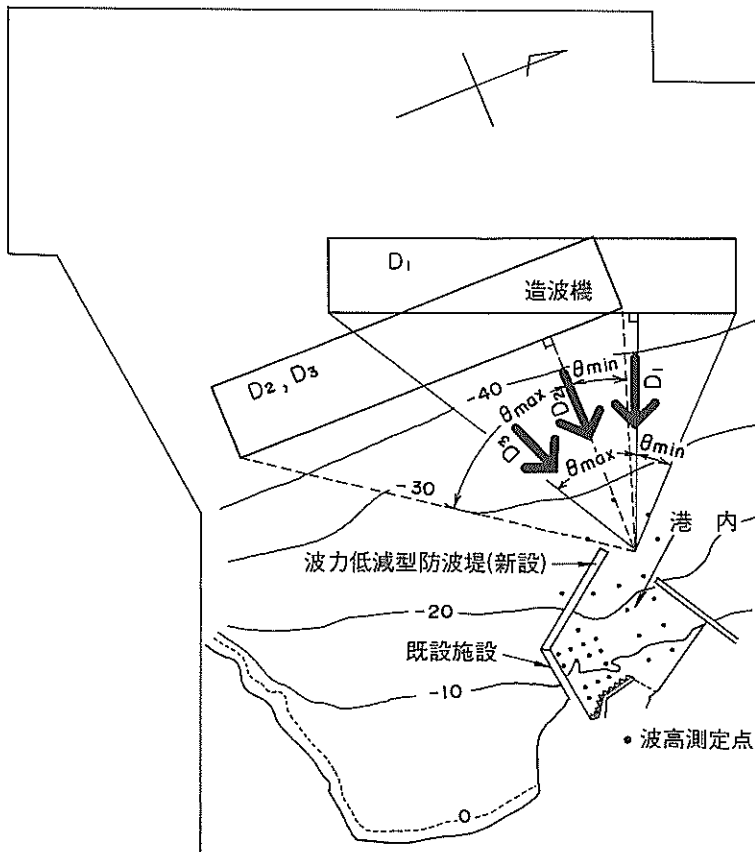


図-35 港口部における入射波向範囲

波向範囲は+-両側で同じ範囲ではないので、このままでは、図-34で比たような、 S_{max} の変化による累加曲線の変化とは比較できない。そこで、+あるいは-側のどちらの波向範囲が港内の波高計算により大きく影響するかを検討した。

図-36は、主波向 D_1 のケースにおいて、方向集中度パラメータ S_{max} を10に固定して、波向範囲を $(-90^\circ \sim +90^\circ)$ 、 $(-90^\circ \sim -0^\circ)$ および $(0^\circ \sim +90^\circ)$ に変化させた場合の港内波高比の計算結果を示す。なお、港内の計算点は、前述の図-31に示したように、No.1からNo.16である。港内波高比は、港口部の入射波高に対する港内波高の比として計算している。図に示すように、波向範囲 $(-90^\circ \sim +90^\circ)$ に対する波高比と範囲 $(0^\circ \sim +90^\circ)$ の波高比はほぼ一定である。これは、波向範囲 $(0^\circ \sim -90^\circ)$ に含まれる波のエネルギーが、港内波高に寄与していないこ

とを示す。

$0 \sim -90^\circ$ の範囲は防波堤によって遮られる方向であり、この範囲に含まれる成分波は港内の波高に影響しないことになる。波向範囲 $(-90^\circ \sim 0^\circ)$ の場合には、港内の波高は小さくなり、この範囲に成分波のエネルギーが来襲しても、防波堤の遮蔽効果のために港内の波高には影響を与えない。従って、港内波高に及ぼす波向範囲は、+側が顕著になり、+側へどれくらい広く成分波の波向範囲が広がっているかによって港内の波高分布が変化する。すなわち、図-35で説明すると、造波機の向かって右側の端点と港口点を結んだ直線で形成される波向範囲の角度が大きくなるほど、港内へ侵入する波のエネルギーが大きくなり港内波高が高くなることになる。

図-37は、主波向 D_1 のケースについて、波向範囲を一定として、 S_{max} を変化させた場合と、 S_{max} を一定として、

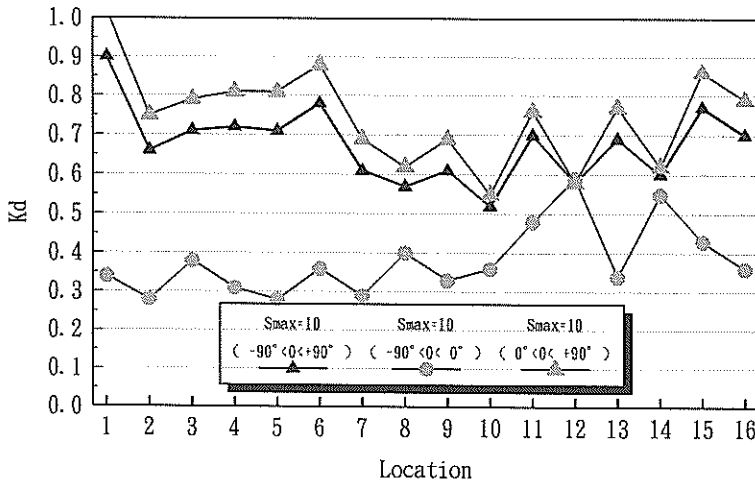


図-36 波向範囲に対する港内波高計算値の変化

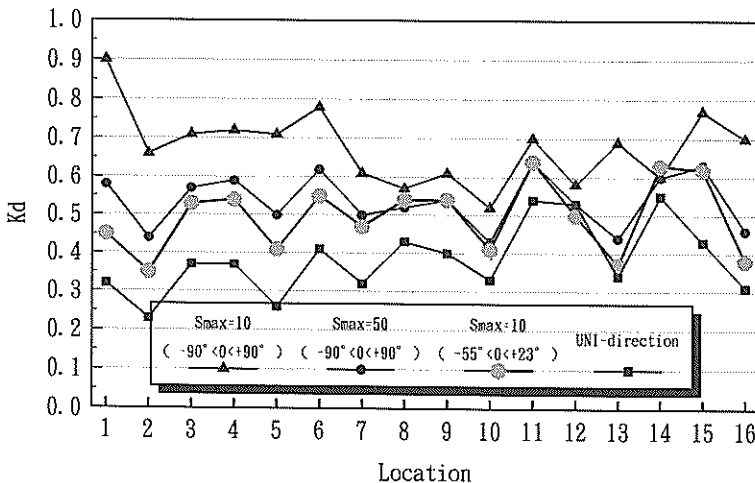


図-37 波向範囲を変更する近似計算結果と実験値の比較 (主波向 D_1 , $H_{1/3}=3.5\text{ m}$, $T_{1/3}=8\text{ s}$)

波向範囲を変化させた場合について港内波高比を計算した結果を示す。図の三角形に示したように、 $S_{max}=10$ で、波向範囲 ($-90^{\circ}\sim+90^{\circ}$) とした場合には港内の波高は全体的に大きく、0.6以上になる点が多い。これに対して、波向範囲は一定として、 $S_{max}=50$ として方向集中度を上げた場合には、防波堤に遮ぎられる波向範囲に含まれる成分波のエネルギーが増大するために、港内波高は小さくなり●で示したように、0.4~0.6程度になる。次に、 S_{max} を10で一定とし、造波機の端部と港口部の対象点を結んだ直線で示される波向範囲 $\theta_{min}\sim\theta_{max}$ を用いて計算した港内波高の結果が白丸で示したものである。計算結果は、 $S_{max}=50$ の場合の値によく一致し、波向範囲を小さくすると、 S_{max} を高くする場合と同じ効果を示すことがわかる。これは、図-34で示したように、エネルギーの累加曲線が、 $S_{max}=10$ で一定であっても、波向範囲に従って変化するからである。図-34に従うと、波向範囲が $20\sim30^{\circ}$ の場合には、 $\theta<20^{\circ}$ の範囲では、エネルギー累加曲線の傾きは、 S_{max} を50~75とした場合にほぼ等しくなる。図-37の波向 D_1 の場合には、造波機幅によって制限される波向範囲は $-55^{\circ}\sim+23^{\circ}$ であるが、一側の波向範囲に含まれる成分波のエネルギーは防波堤に遮蔽されるため、港内波高に寄与しない。したがって、港内波高分布に大きく寄与する+側の波向範囲が $+23^{\circ}$ であるため、入射する多方向波の方向分布特性は、 $S_{max}=50\sim75$ の多方向波のそれに類似するはずである。図-37では、 $S_{max}=50$ の計算結果によく一致している。

この $S_{max}=50$ という数値は、実験で測定した多方向波の方向集中度であるとともに、理論計算で推定された値でもあった。したがって、実験で模型への入射波の方向分布特性が、目標値と異なる場合には、実際に模型設置

点で方向分布特性を測定するか、理論計算で方向分布特性を推定することが重要である。しかし、実験・解析とも困難な場合には、近似的に、造波装置の両端部と模型対象点を結んだ直線で形成される波向範囲を用いて、方向関数を計算し、港内の波高計算を行うことができる。なお、図-37において、■で示した波高分布は、一方向波の場合を示し、このときには、波の進行方向が防波堤に遮蔽されるので、港内の波高分布は多方向不規則波の場合に比べて小さくなり0.2~0.4程度になる。

図-38は、主波向 D_2 の場合について、実験値と波向範囲を変化させた場合を比較したもので、白丸で示した波高分布が実験値である。もともと目標とした $S_{max}=10$ で港内波高を計算すると黒三角で示すように、実験値に比べて、港内全域で計算波高が大きくなってしまふ。波向範囲を、造波機の位置から判断して ($-55^{\circ}\sim+20^{\circ}$) として計算を行うと、計算波高と実験波高はよく一致する。したがって、ここで紹介した近似的な波向範囲修正法を用いると、有効造波領域外に設置された模型の港内波高を近似的に推定できる。

図-39は、主波向 D_3 のケースについて、実験値と計算値を比較したケースである。もともと、波は $S_{max}=10$ として造波しているが、港口部が有効造波領域の外側に位置するため、実際に港口部より進入する波の方向分布特性は目標値より高くなり、 $S_{max}=5$ 程度になっている。したがって、港内測点1~6では、波高比 K_d は0.7以上となり、実験値に比べると大きい。波向範囲を造波装置の位置にしたがって限定し ($-52^{\circ}\sim+23^{\circ}$) とすると、港内波高の計算値は白丸で示した実験値とよく一致する。特に、測点10~16点では、変化する傾向が相似しており、よい一致を示している。測点1~7においても、両者とも K_d は

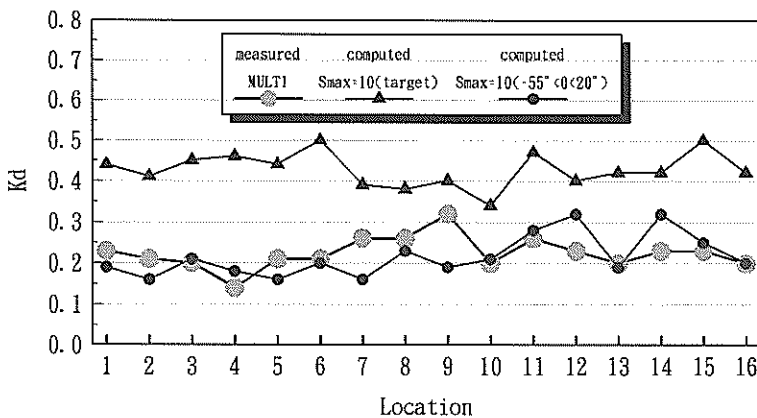
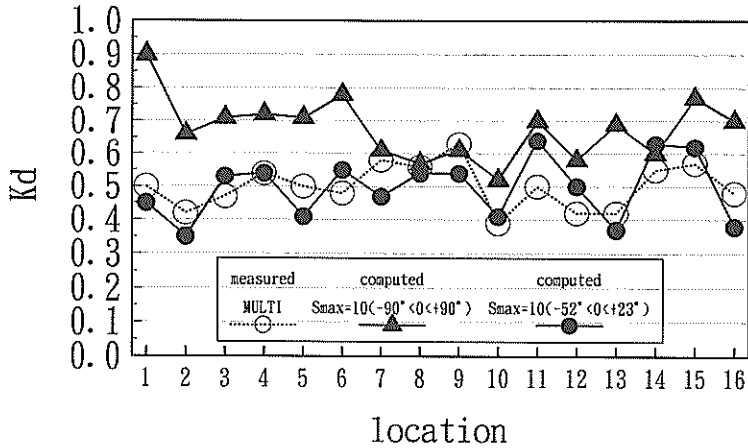


図-38 波向範囲を変更する近似計算結果と実験値の比較 (主波向 D_2 , $H_{1/3}=3.5\text{ m}$, $T_{1/3}=8\text{ s}$)

K_d : non-dimensional wave height



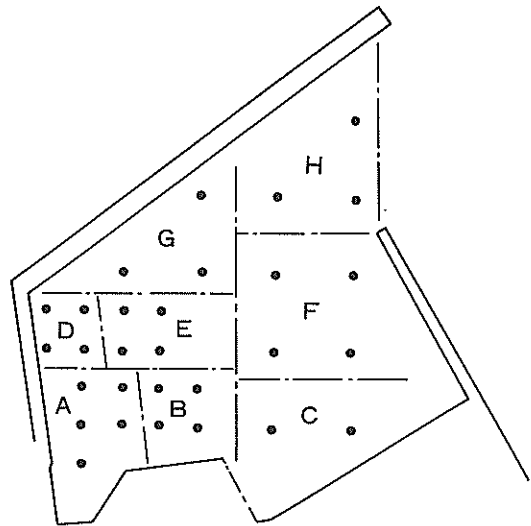
図一39 波向範囲を変更する近似計算結果と実験値の比較 (主波向 D_3 , $H_{1/3}=3.5$ m, $T_{1/3}=8$ s)

0.3~0.5でよく一致している。したがって、造波装置の総幅と模型代表点によって決定される波向範囲を用いて、進入する多方向波の方向集中度を修正して計算する手法は、近似的な計算法としては有効であることがわかる。

なお、これまでに説明した図一37~39のケースにおいては、上部斜面堤からの越波は許容していない。

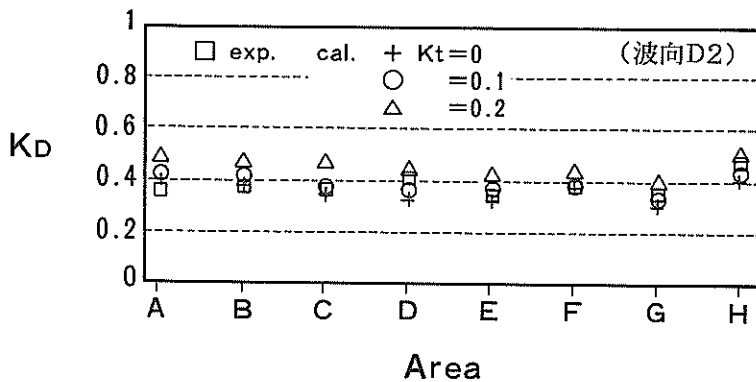
3.3 伝達波を考慮した波高計算法の検証

次に、本研究で設定した上部斜面堤の平面的な波高伝達率の適合性を検討するために、合成波高の計算結果と実験結果の比較を行った。なお、港内の代表点の配置は図一14の配置Iに従った。港内の29測点すべてにおいて計算値と実験値が一致することはなく、どのケースにおいてもある程度の誤差が生じた。そこで、水域の平均値を比較することにし、港内を図一40に示すようにA~Hの8エリアに分割し、各エリアにおける平均波高を求めた。



図一40 港内水域エリアの分割

図一41は、主波向 D_2 、沖波波高3.5mの多方向波の場合



図一41 伝達率に対する港内波高の変化 (主波向 D_2 , 多方向波, $T_{1/3}=12$ s, $H_{1/3}=3.5$ m)

の港内のエリアA~Hにおける平均波高の計算値を実験波高と比較したもので、この場合は $K_t=0.1$ が2次元実験値の70%にあたる設定値である。越波を考慮しない場合、すなわち $K_t=0$ の場合には、A, Bエリアを除き計算値が実験値より小さくなる。 $K_t=0.1$ の場合には、AおよびBエリアで計算値が若干実験値より大きくなるが、そのほかのエリアではよく一致する。 $K_t=0.2$ の場合には、全域で、計算値が実験値を大きく上回り一致しない。

次に、 $T_{1/3}=8s$ のケースについて比較を行う。図-42は、波向 D_2 、 $H_{1/3}=3.5m$ 、 $T_{1/3}=8.0s$ のケースを示す。四角で示した実験値と $K_t=0.2$ の計算値を比較すると、港内の全域において、計算値は実験値より大きくなり過大な評価をしてしまう。 K_t を0として計算すると、エリアB, D, Eでは実験値と一致するが、エリアC, Hで過少評価になっていしまう。 $K_t=0.1$ の場合にはエリアCで、わずかに過少評価になるものの、他の地域では、実験値とよく一致し、上部斜面堤の透過率を評価する数値としては、 $K_t=0.1$ が妥当であることがわかる。

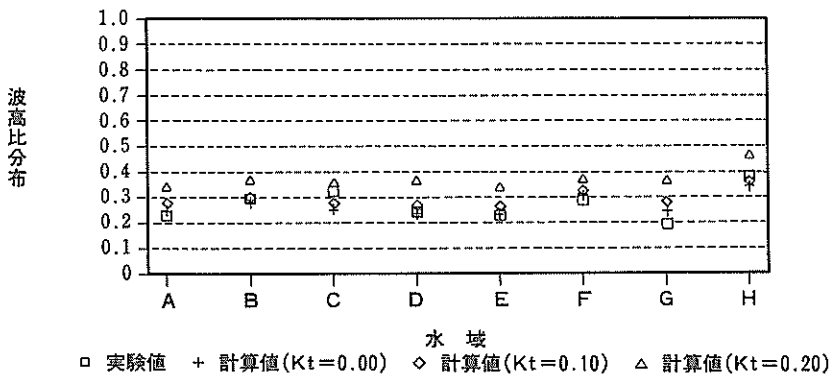


図-42 伝達率に対する港内波高の変化 (主波向 D_2 , 多方向波, $T_{1/3}=8s$, $H_{1/3}=3.5m$)

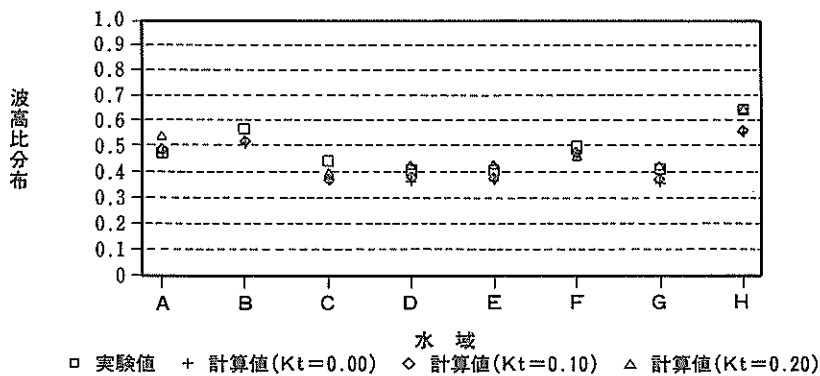
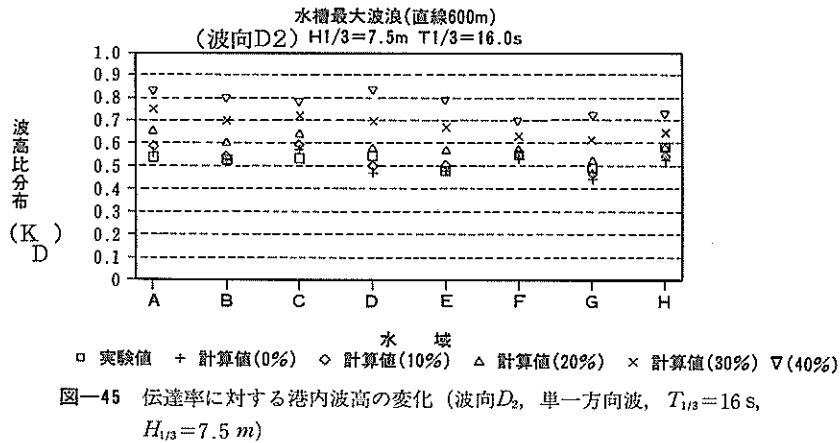
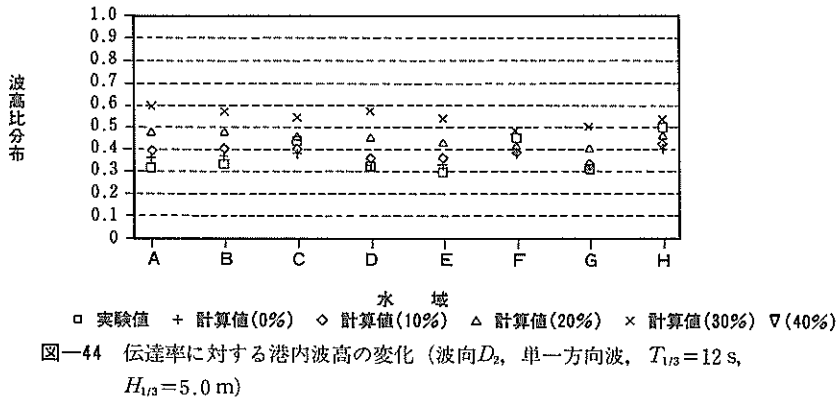


図-43 伝達率に対する港内波高の変化 (波向 D_1 , 多方向波, $T_{1/3}=8s$, $H_{1/3}=3.5m$)

図-43は、多方向不規則波の場合で主波向が D_1 の場合の計算結果を示す。主波向 D_1 の場合には、波向が、防波堤の法線方向から大きくずれてしまい、ほとんど越波が生じない。したがって、伝達率 K_t を変化させても、港内波高の計算値には変化が生じない。いずれのケースにおいても、四角で示した実験値は計算値とよく一致する。なお、計算においては、波向範囲を変化させて、有効造波領域外に設置された模型への進入波の方向分布特性を表す近似手法を用いている。

図-44は、単一方向不規則波のケースにおいて、伝達率の検討を行ったものである。単一方向波は、多方向不規則波に比較して同一エネルギーである場合には越波量が増加する(平石, 望月, 鈴木, 1994)ので、実験での比較が容易になる。図は波向 D_2 の場合を示す。 $H_{1/3}=5.0m$ 、 $T_{1/3}=12.0s$ である。 $H_{1/3}=5m$ の場合には、2次元実験における K_t は0.23であり、その値の約7割に当たる数値は0.15である。図-44では、 $K_t=0.2$ として計算を行うと、港内全域で過大な波高を与えてしまう。たとえば、



エリアAにおいては、実験値は0.32であるのに対して、 $K_t=0.2$ の場合の計算値は0.48となり、50%程度過大な評価をしてしまう。 $K_t=1.0$ とすると、エリアAでは波高比は0.39となり実験値に近くなる。その他の地域でも、 $K_t=0.1$ とすると、計算値と実験値の誤差は0.1以内でほぼ近似できていると思われる。2次元実験値の7割の値である $K_t=0.15$ を用いた計算はここでは実施していないけれども、 $K_t=0.2$ と $K_t=0.1$ の計算値のほぼ中間に位置する計算値が得られるものと思われる。これは、港内の全域で、実験値と比較してやや過大な評価を与えられ、安全性を考えると、使用しても差し支えの無い値になると思われる。

図—45は、越波の影響を顕著にするために、単一方向波で $H_{1/3}=7.5$ mとした場合のエリア内の平均波高を示す。この場合、二次元実験による K_t は0.32で、平面計算における補正値が0.2である。 $K_t=0.2$ の場合の計算値は、エリアA~Cで実験値より大きくなるが、エリアD~Hでは実験値とよく一致する。二次元実験結果と同じ $K_t=0.3$ を用いると、全エリアで、計算値は実験値を大きく上回り、一致しない。このケースの場合には、本実験

で得られた透過率の補正値を用いることによって、精度よく港内波高が推定できることがわかる。

以上の検討から、単一方向波で、 $H_{1/3}=5$ m, $T_{1/3}=12$ sのケースの場合には、港内全域で、計算値は実験値を上回る結果となるが、他の検討したケースでは、2次元実験結果の7割の値を基本として定めた補正伝達率を用いると、計算値と実験値はよく一致する。したがって、上部斜面堤を有する離島港湾では、港内波高の推定において越波を考慮する必要があり、そのときの越波による波伝達率は二次元断面実験結果の70%として評価することができる。

4. 港内波高実験における多方向不規則の有用性

(1) 港内波高における単一方向波と多方向波の比較

最後に、多方向不規則波を港内静穏度の実験に使用する重要性を検討した。図—46は、波向 D_3 について、 $T_{1/3}=8$ sと $H_{1/3}=3.5$ mの場合に、多方向不規則波と単一方向不規則波による港内波高の比を検討したケースである。白丸で示した単一方向不規則波の場合には、波向 D_3 は防波

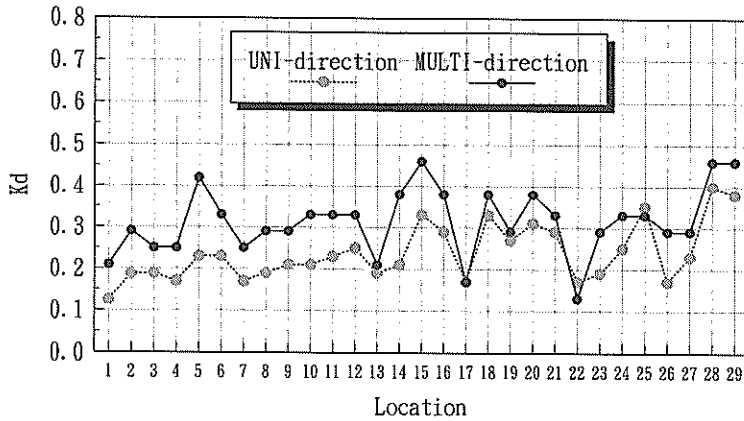


図-46 港内波高比における多方向波と単一方向波の比較 (波向 D_1 ,
 $T_{1/3}=8$ s, $H_{1/3}=3.5$ m)

堤の延長線上にはほぼ直角になるため、波のエネルギーのほとんどが遮蔽される。したがって、港内波高比は小さくなり、P.28と29を除くと、波高比は港内で0.35以下である。港内点の配置は、図-14の配置Iに示したように29点で、P.28と29は、港口部に近いため、他の測点に比べて、波高比が大きくなっているものと思われる。特に、港奥部にあたるP.1~12では、波高比は0.2程度で小さい。●で示した多方向波の場合には、前述したように、 S_{max} で評価すると50程度で、方向集中度が極端に低いケースではないが、港内波高比の分布は、単一方向波のそれと異なる。P.13, 17, 22では、単一方向波と多方向波では、その波高比に差は生じていないが、P.1~12では大きな差が生じている。多方向波の場合には、波高比はP.1を除くと0.3以上で、単一方向のその50%程度大きい。P.28~29の港口部に近い点では、波高比の差は、10%程度で小さいので、多方向波の場合には、港奥へ向かって波高比が極端に小さくなることはないことがわかる。

これは、成分波が異なった波向から伝播してくるので、単一方向波のようにすべてのエネルギーが遮蔽され易い方向から来襲することがないからである。

したがって、開口部に入射する波のエネルギーが同一であっても、港奥においては単一方向波と多方向波の差は大きくなり、多方向波の場合に波高比がより大きくなってしまふ。すなわち、港内の岸壁の稼働率や、港内の浮き桟橋の安定性を港内地形を再現して、模型実験で検討する場合、単一方向波を作用させると、港奥の岸壁の前面波高が小さくなりすぎ、適切な結果が得られない。それゆえに、港内地形を用いた模型実験においては多方向不規則波を作用させなければならない。

図-47は、主波向 D_3 について、同様に多方向波と単一方向波について、港内波高比を比較したものである。開口部に近いP.28, 29においては両者の差は小さく、単一方向波が0.34、多方向波が0.39であるのに対して、港奥部ではその差が大きくなる。すなわち、単一方向波の場

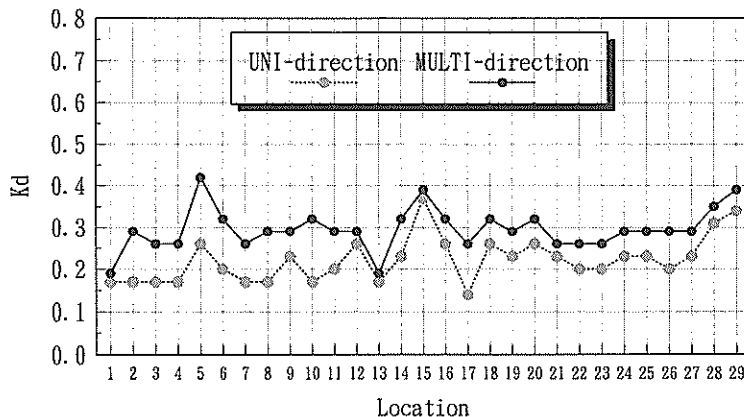
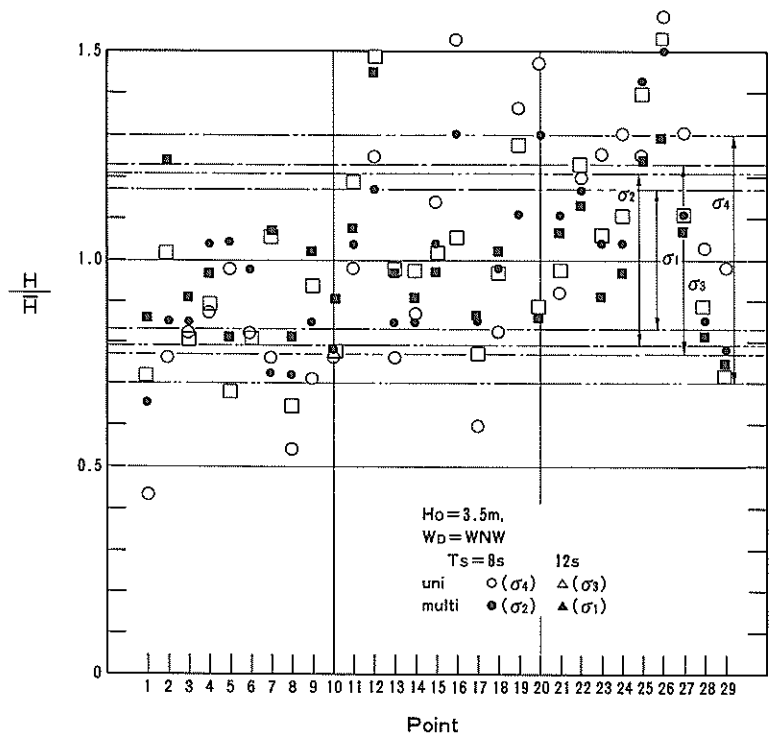
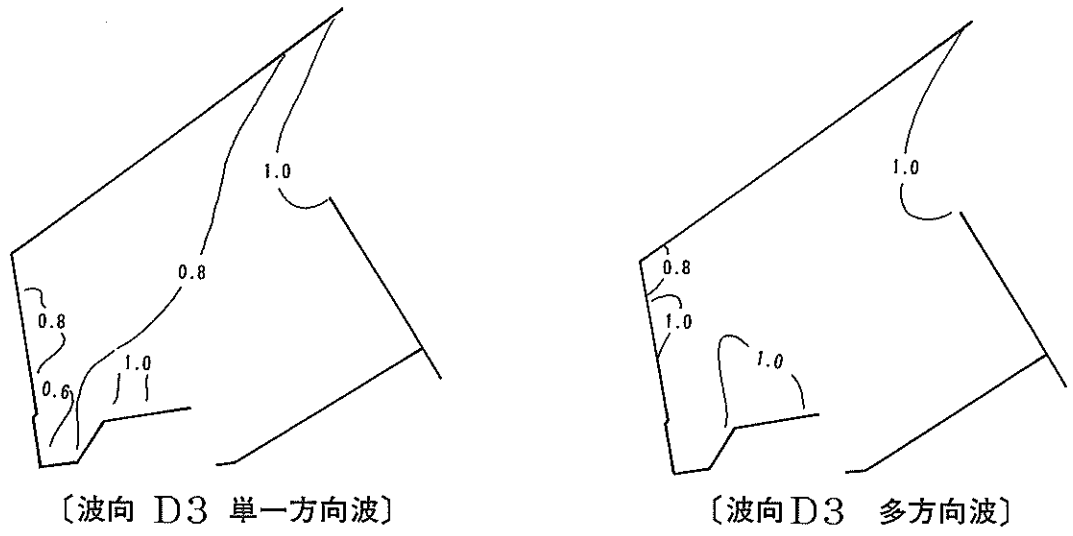


図-47 港内波高比における多方向波と単一方向波の比較 (波向 D_3 ,
 $T_{1/3}=8$ s, $H_{1/3}=3.5$ m)



図一48 港内波高波高分布と標準偏差



図一49 多方向波と単一方向波の港内波高分布の比較 ($T_{1/3}=8s$, $H_{1/3}=3.5m$, 主波向 D_3)

合に、P.1~10では波高比は約0.2であるのに対して、多方向波の場合には約0.3となり50%程度の差が生じる。したがって、この場合にも、平面実験において、多方向不規則波を用いることの重要性が説明できる。

(2) 港内波高のばらつきと比較

図-48は、主波向 D_1 、 $H_{1/3}=3.5\text{m}$ の場合に、港内の波高分布のばらつきについて、多方向波と単一方向不規則波を比較したものである。ばらつきは、港内波高の平均値を \bar{H} とし、港内波高 H /平均値 \bar{H} で表した。また σ は、 H の標準偏差を示す。図では $T_{1/3}=8$ および 12s の場合を示し、白記号が単一方向波、黒記号が多方向波を示す。標準偏差は、単一方向波については σ_1 と σ_3 で、多方向不規則波については、 σ_1 と σ_2 で表示した。図に示されるように、港奥部のP.1~10付近では、白丸と白四角が下方にばらついている。すなわち、多方向波の港内波高に比べて、単一方向波の港内波高が小さくなっていることがわかる。P.11~20は港内の中央部に当たり、この範囲では、単一方向波の方が波高が大きくなる。しかし、多方向波より波高が小さくなる点も含まれており、港内における波高のばらつきが、単一方向波の場合に大きくなっていることがわかる。したがって、実験の対象となる岸壁の位置によっては、多方向波より単一方向不規則波を作用させた場合の方が、前面波高が高くなる場合が生じる可能性があることがわかる。標準偏差を比較すると、 σ_1 に比べて σ_3 が大きく、 σ_2 に比べて σ_1 がより大きい。すなわち、港内波高比が、単一方向波の場合にはより大きくばらつくことが数値的にも示されたことになる。

図-49は、港内の波高分布における多方向波と単一方向波の比較を、平面分布図で示した一例である。主波向 D_3 で、 $T_{1/3}=8\text{s}$ 、 $H_{1/3}=3.5\text{m}$ である。図のコンターは波高(m)で示してあり、港口付近では、単一方向波も多方向波もほぼ1.0程度である。多方向不規則波の場合には、港内においても、波高は大きく変化せず、港奥まで0.8~1.0の間で波高が変化している。単一方向波の場合には、港奥の向かって左上では、波高が0.8より小さくなっていることがわかる。このコンター図からも、多方向波の場合には、港内の波高変化は小さく、港奥部においても比較的大きな波高になってしまうことがわかる。

(3) 多方向不規則波造波の有用性

以上をまとめると、港内波高実験において、多方向不規則波と単一方向不規則波を用いた場合の差異について以下のことが言える；

①港内においては、同一エネルギーの波が、港口部に進入しても、港奥部では、多方向不規則波の波高が単一方向不規則波のそれより大きくなる。

②港内の波高分布は、単一方向波の場合により大きくばらつく。そのため、港内の中央部では、単一方向波の波高が多方向波より大きくなる地点も生じる。

③実際の海の波は多方向性を有しているので、模型実験において、単一方向不規則波を作用させた場合には、上記のように港奥の波高分布を小さく見積もってしまう問題などが生じるので、平面模型実験においては、今後、多方向不規則波を用いるべきである。

(4) 多方向不規則波の港湾計画への適用例

本研究によって、多方向不規則波を用いることの重要性が実験で確認でき、上部斜面堤からの越波を考慮した港内の波高計算法が確立できた。そこで、本計算法を用いた港内波高算定を港湾整備計画へ適用した例を示す。

図-50は、主波向 D_3 、 $H_{1/3}=3.5\text{m}$ 、 $T_{1/3}=12\text{s}$ の多方向波について、 $K_1=0.1$ として港内波高を計算した結果である。図の数値は波高(cm)を示す。運航が予定されている高速船の岸壁係留のためには、所定の水域において有義波高 $H_{1/3}$ が1.5m以下になる必要がある(シップ・オーシャン財団, 1991)。図に示されるように、向かって左側の港奥部では波高は100cm以下であり、安全な係留が可能である。図では、右側に波除堤が設置されている。波除堤の背後では、波高が40cm以下であり、さらに小型の船舶であっても安全な係留が可能である。このように、本計算法を使用すると、港内の波高分布が精度よく算定することができるので、港湾計画および運航計画の策定に資することができる。

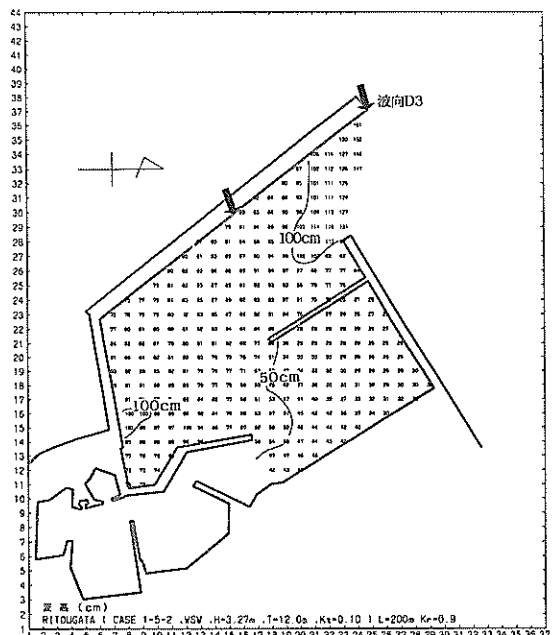


図-50 港内波高の計算例

5. あとがき

本研究では、多方向不規則波を用いた模型実験によって、港内静穏度に影響を及ぼす上部斜面堤の越波による伝達波の特性を検討し、伝達波を考慮した計算法を提案した。さらに、有効造波領域外に模型を設置した場合に、近似的に作用波の方向分布特性を評価する手法を示し、最後に、多方向不規則波を用いた平面実験の重要性を示した。本実験で得られた結論を以下にまとめる。

- (1) 港湾模型の開口部を、多方向不規則波の有効造波領域の外側に設置したため、港口部における多方向不規則波の方向分布特性は目標としたものよりずれる。すなわち、方向集中度パラメータ $S_{max}=10$ で表される多方向不規則波を造波した場合には、港口部における方向分布は、 $S_{max}=50$ 程度で表されるものになる。造波機からの距離による実験波の方向集中度の変化は、理論計算により算定できる。
- (2) 造波機から遠方にあるために、目標分布形より変化した実験波の方向分布特性は、対象点と造波機両端部を結んだ直線で構成される波向範囲を用いて計算される方向分布関数で近似できる。
- (3) 上部斜面堤を越波して港内に侵入する伝達波の周期は、入射波の0.5倍として評価できる。
- (4) 伝達波と港口部からの回折波が共存する港内の波高は、伝達波高と回折波高の2乗和の平均値の平方根を計算して、評価できる。
- (5) 上部斜面堤の伝達波の港内における波高は、入射波に伝達率を掛けた値を入射波高とし、上部斜面堤を仮想の開口部として港内回折波計算を行うことにより求めることができる。このときに、上部斜面堤の伝達率としては、2次元水路実験で得られた伝達率を0.7倍した値を用いなければならない。
- (6) 港内における回折波の計算法は、多方向不規則波に対しても適用できることが、実験で検証できた。
- (7) 多方向不規則波と単一方向不規則波の港内波高比を比較すると、港奥部では、多方向不規則波を作用させた場合の方が高くなる。
- (8) 単一方向波の場合には、多方向不規則波の場合に比較して、港内の波高分布がより広くばらつく。多方向波の場合には、波高分布がより一様になる。港内波高を求めたり、港内の構造物に作用する波力を求めるための平面実験においては多方向不規則波を用いるべきである。

本実験は、“新波浪制御構造物の開発に関する調査・実験報告書”として(財)沿岸開発技術研究センターからの受託試験として行ったものである。実験データ解析にあ

たっては、当時の沿岸開発技術研究センター調査第一部長(現第一港湾建設局新潟調査設計事務所長)田端竹穂氏のご支援とご助言を頂いた。実験解析および計算結果の取りまとめに当たっては、高山知司水工部長ならびに鈴木康正波浪研究室長の懇切なご指導を頂いた。また、計算の実施に当たっては、波浪研究室富田康大氏にご助力頂いた。上記の皆様へ深く謝意を表すものである。

(1994年8月27日受付)

参考文献

Penny, W.G. and A.T. Price (1994): Diffraction of sea waves by breakwater, *Dir. Misc. Weapons Develop., Tech. His., No.26-Artificial Harbours.*

Takayama, T. and T. Hiraishi (1989): Reproducibility of directional random waves in laboratory wave simulation, *Report of Port and Harbour Research Institute, Vol.28, No.4, pp.3-24.*

合田良実・鈴木康正・岸良安治(1974): 不規則波浪実験とその特性について, *海岸工学論文集, Vol.21, pp.237-242.*

合田良実・鈴木康正(1975): 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.155.33p.*

合田良実(1987): 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質, *海岸工学論文集, Vol.34, pp.131-135.*

齊藤栄一・沖政和・清水琢三・鶴岡亮行・磯部雅彦(1993): 港湾模型を用いた波の変形に関する研究, *海岸工学論文集, Vol.40, pp.56-60.*

シップ・アンド・オーシャン財団(1992): 伊豆諸島海域への新たな海上交通システムの導入調査報告書, 309 p.

高橋重雄・細山田得三(1994): 離島港湾における上部斜面堤の適用性について, *海岸工学論文集, Vol.41.*

高山知司(1981): 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, 140p.*

高山知司・永井紀彦・西田一彦・関口忠志(1984): 斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験, *海岸工学論文集, Vol.31, pp.542-546.*

高山知司・平石哲也・立石義博(1989): 多方向不規則波の造波信号発生法に関する検討, *海岸工学論文集, Vol.36, pp.153-157.*

高山知司・池田直太・平石哲也(1991): 碎波および反射を考慮した波浪変形計算, *港研報告, Vol.30, No.1, pp.21-67.*

東京都(1985)：伊豆諸島波浪調査および波浪変形調査報告書。

橋本典明(1992)：海洋波の方向スペクトルの推定法に関する研究，港湾技研資料，No.722，118p.

平石哲也(1991)：サーペント型造波装置の有効造波領域の拡張法に関する検討，海岸工学論文集，Vol.38，

pp.126-130.

平石哲也(1992)：多方向不規則波の発生とその応用に関する研究，港湾技研資料，No.723，176p.

平口博丸・池野正明・大橋裕寿・柏木洋之・樋口豊久(1991)：防波堤越波後の波の波高・周期・スペクトル特性，海岸工学論文集，Vol.38，pp.506-510.

主要記号表

a	: 波振幅	S_1, S_2, \dots	: 港内の反射点
b	: 単一造波板の幅	S_{\max}	: 方向集中度パラメーター
B	: 造波機総幅	t	: 時間
D	: 波高計間隔	$T_{1/3}$: 有義波周期
D_1, D_2, D_3	: 波向を表す記号	x, y	: 座標軸
f	: 周波数	α	: 波向角度
f_p	: ピーク周波数	γ	: 一様乱数
F	: 造波効率	δf	: 周波数帯の幅
g	: 重力加速度	ε	: 位相差
$G(\theta; f)$: 方向関数	η	: 造波板水平変位
G_0	: 方向関数を正規化するための係数	θ	: 波向あるいは極座標系における角度
h	: 水深	θ_0	: 主波向
h_c	: 天端高	θ_{\min}	: 波向範囲の最小角度
H	: 港内波高	θ_{\max}	: 波向範囲の最大角度
\overline{H}	: 平均波高	θ_{re}	: 変更した波向範囲を規定する角度
H_c	: 港内合成波高の計算値	σ	: 港内波高の標準偏差
H_b	: 港内における回折波高	ϕ_I	: 防波堤 I による回折波の速度ポテンシャル
H_e	: 港内合成波高の実験値	ϕ_{II}	: 防波堤 II による回折波の速度ポテンシャル
H_i	: 入射波高	ϕ_R	: 島堤の右端を堤端とし左側に半無限に延びた防波堤による回折波の速度ポテンシャル
H_{\max}	: 最大波高	ϕ_L	: 島堤の左端を堤端とし右側に半無限に延びた防波堤による回折波の速度ポテンシャル
H_s	: 基準波高		
H_T	: 港内における伝達波高		
i	: 造波板の番号(添字は, i 番目の造波板の値であることを示す)		
k	: 波数(k は分散関係式 $(2\pi f)^2 = gk \tanh kh$ を満たす)		
K_a	: 港内波高比		
K_t	: 波高伝達率		
K_R	: 反射率		
m	: 波向番号(添字は, m 番目の波向成分に関する値であることを示す)		
M	: 港口部の代表点を表す記号		
$M_0(\alpha)$: 波向範囲 $\theta_{\min} \sim \alpha$ に含まれる波のエネルギー		
n	: 周波数番号(添字は, n 番目の周波数成分に関する値であることを示す)		
N_+	: x 軸の正側に含まれる造波板の数		
N_-	: x 軸の負側に含まれる造波板の数		
N_s	: シングルサンメーション法における成分波数		
P	: 港湾模型を表す記号		
q	: 越波流量		
r	: 極座標系における距離		
R_1, R_2, \dots	: 港内の波向ベクトル		
s	: 方向分布関数形に関する係数		

港湾技研資料 No. 788

1994. 12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社 昭和工業写真印刷所

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan

Copyright © (1994) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。