

多方向不規則波造波機の反射波吸収性能 に関する実験的研究

平口博丸*・鹿島遼一**・田中寛好***・石井敏雅****

1. はじめに

防波堤などを対象とした水理模型実験では、模型からの反射波が造波板で再反射されるため、所定の入射波が造波できないという問題がある。これを解決するために反射波吸収型の造波機が既に開発されており、断面2次元の不規則波実験への適用性も検証されている(Hirakuchi et. al. (1990))。一方、平面実験の場合には、種々の方向からの反射波が造波板に到達するため、幅の広い造波板1枚あるいは数枚から構成される従来の造波機では、これらの反射波を精度よく吸収する事は不可能である。多方向不規則波の造波機は、多数の造波板から構成されているため、吸収型の造波機としても使用できる可能性がある。

本研究は、多方向不規則波造波機の反射波吸収性能を水理模型実験により評価し、斜め規則波および多方向波に対する有効性を示すものである。

2. 進行波に関する水理実験

水槽内に反射性構造物が無い状態で規則波および多方向波の実験を行い、造波された進行波の諸元や特性をまず把握する。

(1) 実験方法と実験条件

実験は、図-1に示すような長さ35m、幅45m、深さ1.1mの平面水槽で行い、幅40cmの造波板48枚(計19.2m)からなる多方向不規則波造波機を用いた。本造波機は、水面波形制御方式の吸収型造波機であり、各造波板の前面には波高計が取り付けられている。造波機の制御は吸収制御方式の他に、造波板位置制御方式が選択できる。本実験施設の詳細は平口ら(1990a)に詳しく述べられている。

実験時の水深は50cmの1様水深とし、水槽壁の周囲は碎石により消波した。実験に用いた規則波の波高 H は4.5~12.0cm、周期 T は1.0~2.5s、波向 θ は90~

135°である。また多方向波は、風波性波浪、うねり性波浪および方向分散性の無い一方向の不規則波の計3種類を対象とし、それらの周波数スペクトルはBretschneider-光易型、方向関数は光易型、主波向 θ_0 は90°とした。有義波高・周期および方向集中度パラメーター S_{max} は、風波性波浪の場合は5.0cm、1.0s、 $S_{max}=10$ 、うねり性波浪の場合は4.0cm、1.25s、 $S_{max}=75$ とし、一方向不規則波($S_{max}=\infty$)の波高と周期はうねり性波浪と同じに設定した。これらの不規則波のシミュレーションにはシングルサンメーション(SS)法を用い、周波数は512分割とした。

方向スペクトルの設定は、図-1に示すように、4台の波高計から成る星型アレーを3組、および11台の波高計を30cm間隔に並べたリニヤアレーを用いて行った。星型アレーの波高計の基本間隔は50cmである。リニヤアレーの場合、波高計間隔が1:3:2になるように11台の波高計の中から4台を選び、長さ1.8mのリニヤアレーとして解析に用いた。多方向波の計測時間は約7分とし、方向スペクトルの解析にはベイズ型モデル(橋本, 1987a)を用いた。

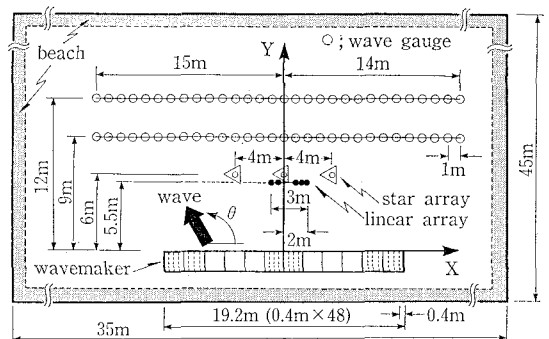


図-1 実験装置の概略図と進行波の測定位置

(2) 規則波の実験結果

斜め規則波($\theta=135^\circ$)の波高断面分布の一例を図-2に示す。同図は、図-1に示した $Y=9m$ 断面での結果であり、造波設定波高 $H_0(=4.5cm)$ で無次元化してい

* 正会員 工務 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 水理部 構造水理研究室

** 正会員 工務 (財)電力中央研究所 我孫子研究所 主席専門役

*** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 環境総合推進室

**** 正会員 東京電力(株) 技術研究所 構造研究室

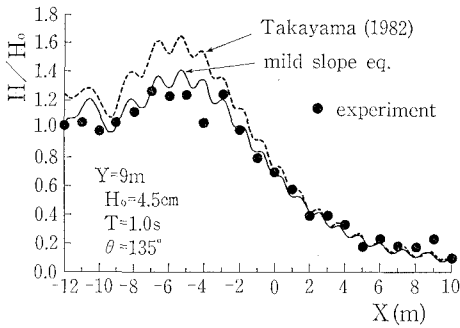


図-2 斜め規則波の波高分布

る。図中の●は実験結果、実線は造波板で波が再反射しない条件で計算した非定常緩勾配方程式の結果、破線はTakayama(1982)の造波理論解である。実験値は、非定常緩勾配方程式により精度良く評価できることが分かる(平口ら, 1990a)。

(3) 多方向波の実験結果

不規則波シミュレーション時の乱数列を6種類変化させてうねり性波浪を造波し、リニアアレーで測定されたクロススペクトル(相対位置ベクトルは同一なもの)の平均を取り、ベイズ型モデル(BDM)により進行波の方向スペクトルを推定した。図-3は、推定された方向関数を光易型方向集中度パラメータ s で評価した結果であり、横軸は造波目標スペクトルのピーク周波数 f_{pT} で無次元化した。図中の■印はBDMによる推定結果、☆印は造波目標値である。この図から、目標とするうねり性波浪が造波されていることが分かる。

造波板が24枚の状態であらうねり性波浪の造波特性を検討した平口ら(1990b)の結果では、方向スペクトル解析結果の方向集中度と、クロススペクトルのコヒーレンスの空間分布から予想される方向集中度との間に違いが見られたため、うねり性波浪に対する本造波機の性能は明らかではなかった。その後の検討では、うねり性波浪については、波高計間隔の広いリニアアレーを用いる方がより妥当な解析結果が得られることが分かった。

そこで本研究では、うねり性波浪にはリニアアレーを用い、風波性波浪には星型アレーを用いて進行波の方向スペクトルを解析した。但し、星型アレーは3組のうち中央に設置された1組のデータを解析した。

造波機の吸収性能を検討するときに用いる多方向波は、ここで述べた6種類のうねり性波浪の中の1つを用いた。用いた多方向波の有義波高・周期は、造波機の反射波吸収性能を評価する際の基準となる。本研究では、測定場所によるばらつきを平均化する意味で、3組の星型アレーの波高計(計12台)による測定値の平均をとることにする。風波、うねりおよび一方向性波浪の有義

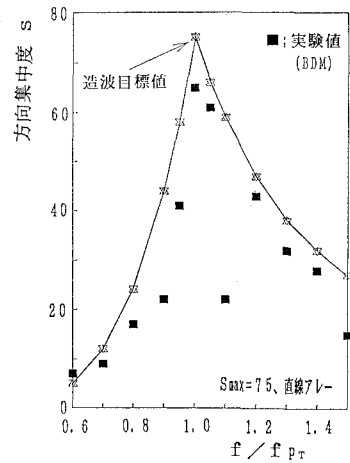


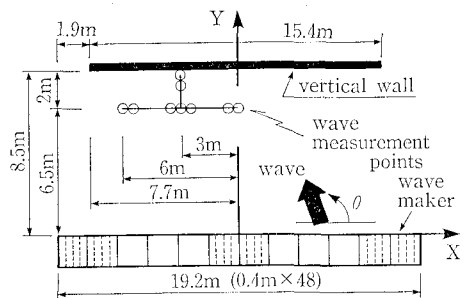
図-3 うねり性波浪の方向集中度の実験結果

波高 $H_{11/3}$ は各々、4.75, 3.59, 3.81 cm, 有義波周期 $T_{11/3}$ は各々 0.94, 1.12, 1.13 s であった。

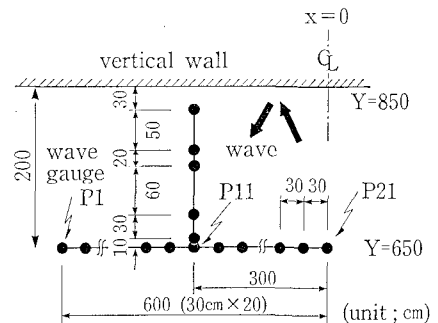
3. 入・反射波共存場に関する水理実験

(1) 実験条件

長さ15.4 mの直立壁を、造波機から8.5 m離れた位置に造波機と平行に設置した。実験状況を図-4に示す。実験には、規則波($H_0=5.65$ cm, $T_0=1.5$ s, $\theta=90^\circ$,



(a) 直立壁の設置位置



(b) 波高の測定位置

図-4 入射波共存場に関する実験状況

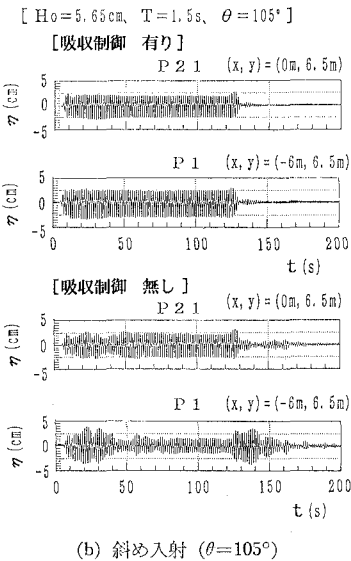
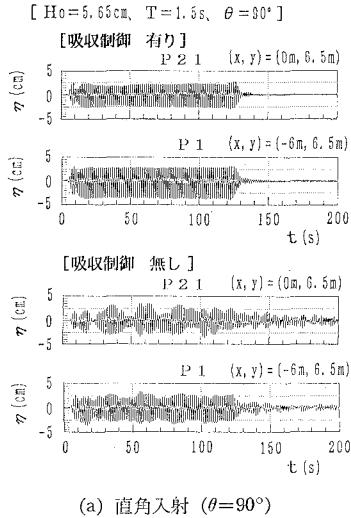


図-5 吸収制御の有無による時系列の比較

を用いた。

(2) 規則波の実験結果

造波された波は直立壁で完全反射されるため、重複波が形成される。図-5は、波高計 P1 および P21 ($(X, Y) = (-6\text{m}, 6.5\text{m})$, $(0\text{m}, 6.5\text{m})$) での水面波形時系列の一例であり、 $\theta=90, 105^\circ$ の実験結果である。図 (a) の直角入射の場合、吸収制御を行わない時には、造波板からの反射波のために波高が時間的にかなり変動するが、吸収制御時には安定した重複波波浪場が形成される。図 (b) の斜め入射の場合にも、吸収制御によって安定した波高が得られている。

図-5 (b) の場合、吸収制御を行わない時の時系列は、直角入射時に比べて波高の時間的な変動が小さい。これは、斜め入射の場合、多重反射した波は最終的には実験対象領域外へと抜けて行くため、直角入射時ほどの強い重複波波浪場とはならないためである。しかし、P1 の時系列から分かるように、 $t > 40\text{s}$ で安定した波高値は、それ以前の波高値とは明らかに異なっている。

また、造波終了後 (t 約 130s) の時系列に着目すると、吸収制御を行わない場合には、多重反射している成分が明瞭に現われるのに対し、吸収制御の場合には、斜め入射時でも波高はすぐに減衰している。同様の事は $\theta=120^\circ$ の実験結果でも確認された。

図-6は、図-5に示した吸収制御時を対象とし、直立壁に対して平行な $Y=6.5\text{m}$ 断面での波高分布を示したものであり、縦軸は設定波高 H_0 で無次元化している。

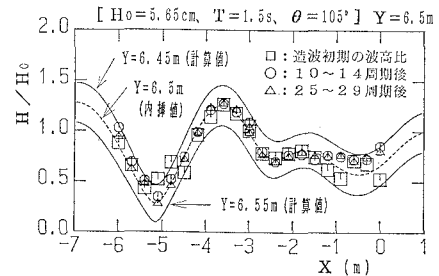
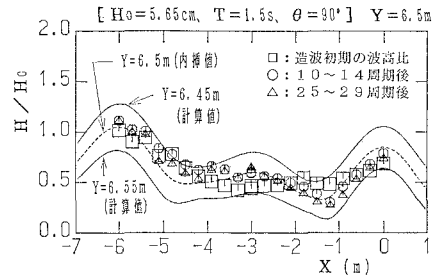


図-6 吸収制御時の規則波の波高分布

105, 120°) および前述した3種類の多方向波 (うねり, 風波, 一方向不規則波) を用いた。図-4(b) に示すように、直立壁に対して直角な方向に6台の波高計を不等間隔に配置するとともに、直立壁に対して平行な方向に21台の波高計 (P1~P21) を 30cm 間隔に配置した。

橋本ら(1987b)は、入・反射波が共存する波浪場での方向スペクトルの分離解析法として2つの手法 (MBM, EMBM) を提案している。本研究では、波が完全反射する直立壁を用いていることから、反射率を既知とするMBMを用い、反射率は波向によらないものとした。なお解析には、直立壁と平行に配置された21台の波高計のうち、波高計間隔が1:3:2となる [P11, P12, P15, P17] および [P11, P10, P7, P5] の2組のリニアアレー

図中の□印は、直立壁と造波板との間で多重反射系が形成される前の波高比、○印と△印は多重反射系が形成されている時間帯の結果である。また図中の実線は、造波板で波が再反射しない条件を考慮した非定常緩勾配方程式の計算結果である。計算値は波高測定断面と5cmずれているため、 $Y=6.5\text{m}$ での値を計算値から内挿し、図-6中に破線で示した。この図から明らかなように、吸収制御時の重複波の波高は時間的にほとんど変化しない。また、実験値の波高分布は、進行波の時と同様に、吸収制御の条件で計算した非定常緩勾配方程式の結果と非常によく一致している。

(3) 多方向波の実験結果

図-7は、 $X=-3\text{m}$ での有義波高 $H_{1/3}$ の断面分布を、吸収制御を行った場合と行わなかった場合とで比較したものであり、構造物が無い時の進行波の有義波高 $H_{1/3}$ で無次元化して示した。吸収制御を行わない場合、最も強い多重反射が形成される $S_{\max}=\infty$ では波高比が3倍にも達する。方向分散性が大きくなると、実験対象領域から抜けて行く成分が多くなるため、波高比は小さくなる。これに対して吸収制御時の波高比は、方向集中度によらずほぼ同じ値を示し、直立壁に近い $Y=8.2\text{m}$ で約1.0と最も小さく、直立壁から離れると理論的に予想される値 $\sqrt{2}$ に近くなっている(合田・鈴木ら(1976))。

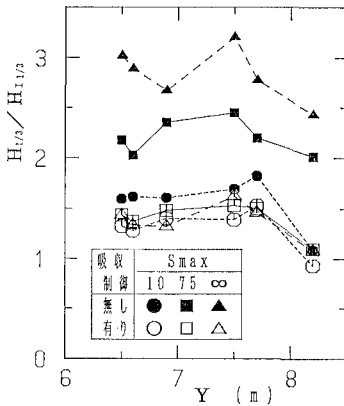


図-7 吸収制御の有無による有義波高分布の比較

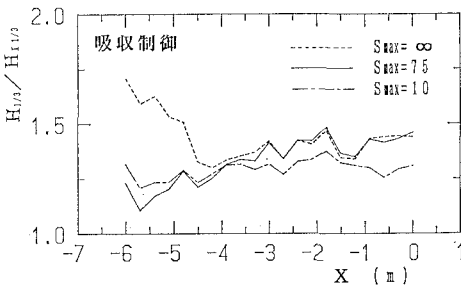


図-8 吸収制御時の有義波高の断面分布

図-8は、図-7に示した吸収制御時を対象とし、 $Y=6.5\text{m}$ 断面での有義波高比を示したものである。破線で示した $S_{\max}=\infty$ の場合、 $X<-4\text{m}$ の領域で波高比が大きくなっているが、それ以外の実験値は1.25~1.5の範囲内にある。

図-9は、造波時の目標周波数スペクトルのピーク周波数 f_{PT} における方向関数の解析結果の一例であり、図中の実線はMBMによる入射波の方向関数の推定結果、図中の破線は第3章で求めた進行波の方向関数である。MBMにより求められた入射波の方向関数は、反射波が無い進行波の時に測定された値にほぼ一致している。なお、MBMの解析において、反射率を0.05刻みに変化させて検討した結果、ABIC(赤池のベイズ型情報量規準)が最小になるのは反射率が1.0の時であった。

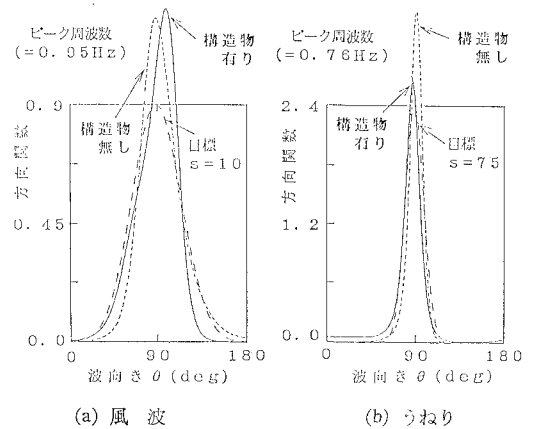


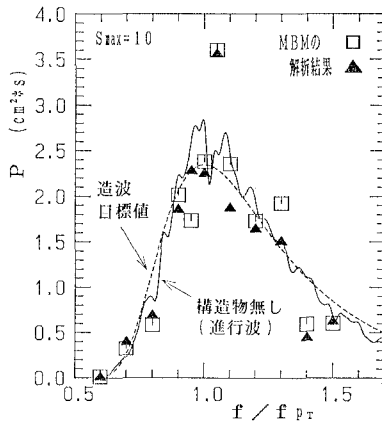
図-9 構造物の有無による方向関数の比較

図-10は、分離解析された入射波の周波数スペクトルと、構造物がない時の進行波の周波数スペクトルとを比較したもので、横軸は f_{PT} で無次元化している。図中の□印と△印は、[P11, P12, P15, P17]および[P11, P10, P7, P5]のリニアレーによる分離解析結果であり、 $f/f_{PT}=0.6\sim 1.5$ の範囲を0.1刻みに解析し、 f_{PT} 付近のみ0.05刻みとしたものである。また、実線は進行波、点線は造波目標値の周波数スペクトルである。構造物がある場合の入射波の周波数スペクトルは、進行波のそれとはほぼ一致する。

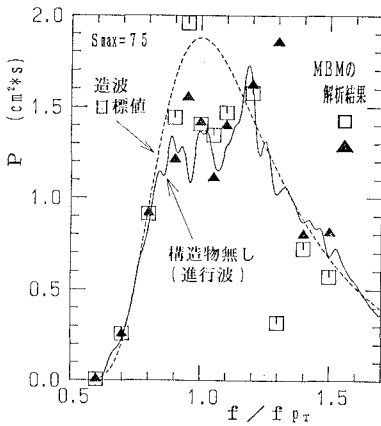
入・反射波共存場での方向スペクトル解析結果から、本造波機で造波された多方向波は、構造物の影響により多重反射系が形成されるような場合でも、反射波を吸収しつつ所定の波が造波されているものと判断される。

(4) 方向スペクトル解析に関する考察

本研究では、防波堤に対して平行な方向に配置したリニアレーをMBMに適用したが、防波堤に対して直



(a) 風波



(b) うねり

図—10 構造物の有無による周波数スペクトルの比較

果，リニアアレーを防波堤の直角方向から 5° 以上傾けると解析可能であることが分かった。この原因は明らかではないが，測定を行う場合にはこの点にも注意する必要がある。

4. おわりに

多方向波造波機の反射波吸収性能を実験的に検討した結果，斜め規則波および多方向波の両方について，優れた性能を有していることが明らかとなった。

本研究の数値計算およびスペクトル解析を行うにあたっては，(株)電力計算センターの岡本直樹氏，三枝健一氏の協力を得た。ここに記し謝意を表わす。

参 考 文 献

- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊池 治 (1976): 不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港湾技研資料，No. 248, 24p.
- 橋本典明 (1987a): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定，第34回海岸工学講演会論文集，pp. 126-130.
- 橋本典明・小舟浩治 (1987b): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定—入・反射波共存場を対象として—，港湾技術研究所報告，第26巻，第4号，pp. 3-33.
- 平口博丸・清水隆夫・池野正明・田中寛好 (1990a): 多方向波造波システムの効率化とその造波特性，海岸工学論文集，第37巻，pp. 140-144.
- 平口博丸・鹿島遼一・池野正明・田中寛好 (1990b): 造波された多方向不規則波のコヒーレンスと方向スペクトル，海岸工学論文集，第37巻，pp. 150-154.
- Hirakuchi H., R. Kaiima and T. Kawaguchi (1990): Application of a piston-type absorbing wave-maker to irregular wave experiments, Coastal Engineering in Japan, Vol. 33, No. 1, pp. 11-24.
- Takayama T. (1982): Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wave-maker, Rept. of the Port and Harbour Res. Inst., Vol. 21, No. 2, pp. 3-48.

角方向に配置したアレーに MBM を適用すると，計算値が発散し解析不能であった。数値計算により検討した結