

港湾模型を用いた波の変形特性に関する研究

齊藤 栄一* ・ 沖 政和** ・ 清水 琢三***
 鵜飼 亮行**** ・ 磯部 雅彦*****

1. はじめに

実際の海の波は方向スペクトルを有する多方向不規則波である。波の屈折、回折、反射などの波の変形計算では、波を多方向不規則波として扱う手法が主流であり、港内や海域の静穏度計算や設計波の算定などに応用されている。一方、多方向不規則波を実験室内に再現できるサーペント型造波装置も多く、多くの研究所で導入されており、特に造波方法、実験方法に関する研究例は多いが（例えば、平石，1991；池谷ら，1992）、それを用いた実験結果については未だ報告例が少ないのが現状である（例えば、高山ら，1990）。そこで本研究では、サーペント型造波装置を使用して、規則波から多方向不規則波までの様々な条件の波を、一般的な形状の港湾模型に作用させ、実験結果に基づき港内の波高分布を系統的に調べた。さらに実験結果と実験と同一条件で行った計算結果を比較することにより、回折と反射に関する波の変形特性について検討した。

2. 水理模型実験

2.1 実験条件

実験は図-1に示すような幅24m、長さ33m、深さ1.5mの平面水槽を用いて行った。水槽の一边には幅50cm、48枚のピストンタイプ非連続型のサーペント型造波装置が設置されており、他の3辺は消波材で覆われている。実験に用いた港湾模型は図-2に示すようである。港湾模型は、造波した多方向不規則波が水槽の側壁反射の影響を受けないよう、できるだけ造波板に近づけた。港湾模型の港外壁は十分な消波材を施し、極力模型からの反射を抑えている。模型の主防波堤の先端は造波板水槽沿岸方向中央から5mの地点（図-1中に×印で示す）に設定した。これは、十河ら（1992）が求めた多方向不規則波の安定造波領域である。港湾模型には、全ての港内壁を直立の耐水ベニヤ板で作成したもの（以降直立壁タイプと呼ぶ）と、図-2中A-B、B-Cラインに消波工

を設置したもの（以降消波壁タイプと呼ぶ）の2種類を用意した。入射波の種類は、規則波、一方向不規則波、多方向不規則波の3種類とした。入射波周期 T （不規則波は有義波周期 $T_{1/3}$ ）は1.41s、入射波高 H （不規則波は有義波高 $H_{1/3}$ ）は3.0cm、一様水深 h は14cmとした。これは、規則波を直立壁タイプに作用させると港湾内で共振現象を起こす条件である。規則波に関しては、共振現象の変化具合についても調べるために、 $T=1.41$ sに対して ± 0.01 sおよび ± 0.02 sの周期条件でも実験を行っている。本実験条件におけるアーセル数は $U_r \approx 30$ と大きかったために、同じく規則波では、非線形性の影響を調べるため、波長は同じでアーセル数の小さい条件（ $T=1.07$ s、 $H=3.0$ cm、 $h=35$ cm、 $U_r \approx 3$ ）でも実験を行っている。不規則波の周波数スペクトルはプレットシュナイダー・光易型、多方向不規則波の方向関数は光易型とし、方向集中度は $S_{\max}=25$ を目標とした。港内の水面変動は容量式波高計を用いて、港内壁から50cm内側の領域を50cm、あるいは25cm間隔のメッシュ点で測定した。実験ケースおよび実験条件を表-1に示す。

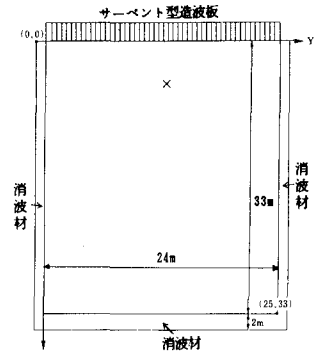


図-1 平面水槽概要

2.2 入射波の諸元

港湾模型に作用させる入射波は、模型の無い状態で測定した湾口付近の水位変動より決定した。多方向不規則波の測定には最小間隔が40cm

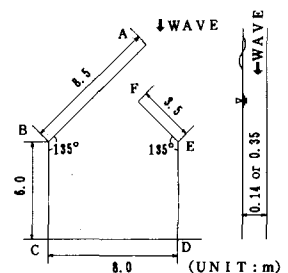


図-2 港湾模型概要

* 正会員 工修 (株)ハザマ 技術研究所
 ** 正会員 (株)ハザマ 技術研究所
 *** 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部
 **** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

表-1 実験条件

ケース名	波の種類	周期(s)	水深(cm)	測点間隔	模型概要
1	規則波	1.39	14	50 cm	直立壁
2	"	1.40	"	50 cm	
3	"	1.41	"	25 cm	
4	"	1.42	"	50 cm	
5	"	1.43	"	50 cm	
6	"	1.07	35	25 cm	
7	一方向不規則波	1.41	14	50 cm	
8	多方向不規則波	1.41	"	50 cm	
9	規則波	1.41	14	25 cm	消波壁 直立壁
10	一方向不規則波	1.41	"	50 cm	
11	多方向不規則波	1.41	"	50 cm	

の星型アレイを用い、方向スペクトルの解析には、拡張最尤法(EMLM)およびベイズ型モデル(BDM)を用いた。多方向不規則波の造波信号の作成にはダブルサンメンション法(DS法)を用い、周波数成分は1024、方向成分は91とした。多方向不規則波の測定ス

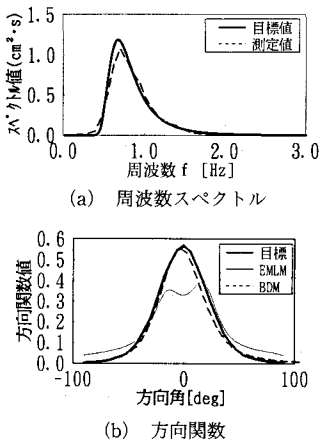


図-3 入射波スペクトル

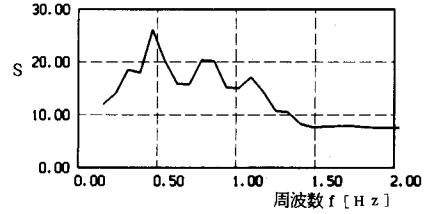


図-4 方向集中度計算結果

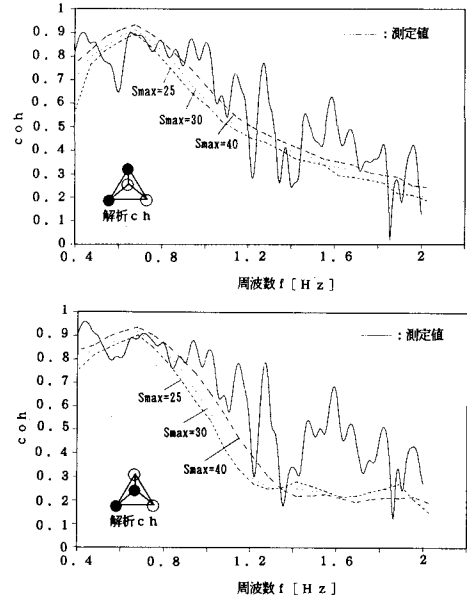


図-5 コヒーレンス解析結果

ペクトルを図-3に示す。(a)は周波数スペクトル、(b)は周波数成分を積分した方向関数である。図中には造波信号として入力した目標値($H_{1/3}=3\text{ cm}$, $T_{1/3}=1.41\text{ s}$, $S_{\text{max}}=25$)も示してある。周波数スペクトルは目標値に近く、全体的な波のエネルギーはほぼ一致している。方向関数はEMLMでは双峰型となっているが、BDMでは推定値と目標値はほぼ一致している。図-4は磯部ら(1988)にならない、BDMによる方向スペクトルの推定結果から long-crestedness パラメータを求め、方向集中度 s に換算したものである。また、図-5は平口ら(1990)にならない、アレイ中の2点間の水面変動量の測定結果よりコヒーレンス(coh)を求め、光易型方向関数を仮定した場合のcohの解析解と比較した例である。図中解析に用いたアレイ中の測点を●で示してある。以上より、今回の実験ではピーク周波数付近($\approx 0.7\text{ Hz}$)ではおおよそ $S_{\text{max}}=20\sim 30$ の多方向不規則波が水槽内に造波されていたと推測される。

2.3 消波工について

消波工は潜堤型の消波ブロックと消波材(ヘチマロン)から作成した。これは、合田(1990)を参考に一般的な

消波護岸の反射率に近くなる様、調整したものである。港内に設置したときの消波工の厚さは、消波ブロックと消波材それぞれ12 cmと10 cmで計22 cmである。消波護岸の断面概要、および別途行った2次元造波水路を用いた入・反射波分離の結果を直立壁の場合も含めて表-2に示す。また図-6には、入・反射波分離実験で得られた不規則波の場合の消波壁の反射率 K_R の周波数分布を示す。図-6より反射率は周波数により0.3~0.9にばらついている。ピーク周波数の近傍($f_p \approx 0.7\text{ Hz}$)では、 K_R は0.35で規則波の結果と同じである。

3. 実験結果

3.1 周期による影響

図-7は、直立壁タイプにおける規則波の実験結果について比較したものである。(a)~(e)はそれぞれ $T=1.39\text{ s}$ から周期を0.01 sずつ変化させた条件(ケース1~5)に相当する。本条件では、アーセル数は $U_r \approx 30$ と大きく、波の非線形性の影響により、波形に2次成分波が発生する場合があったので、実験値の記述には水面変

表-2 消波工反射率測定結果

港内壁	入射波種類	反射率 K_r
	規則波	0.95
	一方向不規則波	0.90
	規則波	0.35
	一方向不規則波	0.40

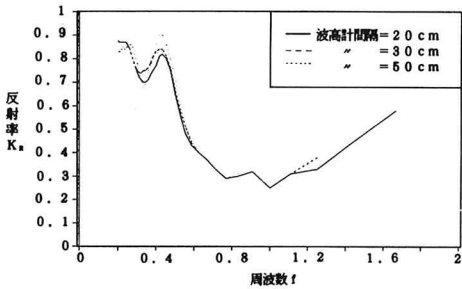


図-6 入・反射波分離結果

動量の rms 値に関する入射波との比を用いている。(b) と (c) はほぼ似たような分布のパターンであるが、入射波周期がわずか 0.02 s だけ異なる (a) や (e) では、分布のパターンが大きく異なっているのが分かる。これより、共振条件における港内の静穏度は入射波周期に非常に敏感なことが分かる。

3.2 非線形性の影響

入射波長が同一で、アーセル数が異なる条件の実験結果の比較(ケース 3, 6)を図-8 に示す。ここでは、波の非線形性の影響による両者の違いをより明確に示すよう波高比分布で比較する。ケース 3 は、全測点の約 1/3 で 2 次成分波が発生し波形が分裂したケースである。波高はゼロアップクロス法で定義した。分布のパターンは似た様であるが、前述の通りアーセル数の大きい条件で 2 次成分波が発生したために、波高比は総じて非線形性の影響の少ないアーセル数の小さい条件(ケース 6)で大

きくなった。

3.3 多方向性の影響

入射波の方向分布性による港内静穏度の違いをみるために、一方向不規則波および多方向不規則波(ケース 10, 11)を作用させた場合の rms 比コンターを図-9 に示す。港内は消波条件である。多方向不規則波の条件では、港口における波の多方向性の影響で、港内に侵入する成分波が多いため、rms 比は一方向不規則波の場合に比べて約 1 割大きい。

3.4 数値計算結果との比較

計算には、近藤ら (1987) のグリーン関数による計算手法を用いた。図-10 は直立壁タイプ、 $T=1.41$ s の条件における規則波(ケース 3)の実験値と計算値の比較である。比較には rms 値の比を用いている(以降同様)。比較した断面は同図中に①-①'、②-②'、A-A'、B-B' で示してある(比較断面の位置は以降同様)。B-B' 断面図より主防波堤と副防波堤の間で実験値が大きい。総じて実験値と計算値の一致は良好であり、共振条件における腹節の傾向が一致している。ただし、①-①'および A-A' 断面図から分かるように、主防波堤の背後領域で腹節のパターンがずれている。これは、沿い波の発生し易い主防波堤港内側の反射率が入・反射波分離の結果とは異なっていたためであると思われる。

図-11 は $T=1.41$ s、規則波の消波壁タイプ(ケース 9)の結果である。反射波が抑えられている分、腹と節の度合いが小さくなり分布はなだらかな傾向である。図-10 と同様、主防波堤と副防波堤の間で実験値が大きい傾向があるが、港内では実験値と計算値は良好に一致している。ケース 3 ほどではないが、本ケースでも主防波堤の背後領域で実験値と計算値の若干の差異が見受けられる。

図-12 は直立壁タイプにおける多方向不規則波の実験値(ケース 8)と計算値の比較である。 S_{max} は 25 とし計算を行っている。図中の実線と破線は反射率を変えて行った 2 つの計算結果を示している。実線は反射率と

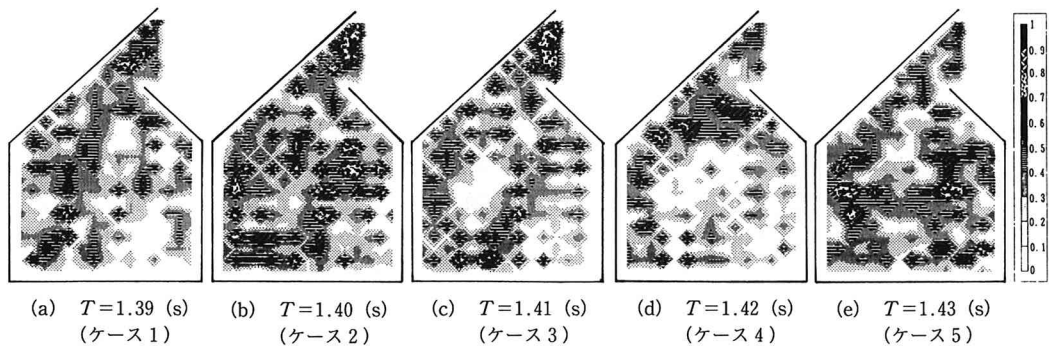


図-7 港内静穏度実験結果(規則波・直立壁)

して不規則波の入・反射波分離結果である $K_R=0.90$ を入力した場合、破線はそれよりも大きい $K_R=0.95$ を入力した場合のものである。実験値は、 $K_R=0.95$ を用いた計算値と良好に一致している。このことより、多方向不規則波を作用させた場合の港内の反射率は、2次元実験による入・反射波分離結果よりも0.05程度大きかったと推測される。ただし⑧-⑧'断面図より、湾奥を除く副防波堤近傍の背後領域では、実験値は $K_R=0.95$ を用いた計算値よりもさらに大きい。波高の腹節の分布が2つの計

算値と平行するように一様になくなってきていることから、より反射率を大きくした計算結果と実験値が一致してくる可能性がある。ただし、この領域だけ実験値が大きくなっており、入射波の方向分布特性の影響で、副防波堤背後への回折現象が顕著になったことも考えられ、ここでは反射率の影響によるものなのか、それ以外の影響によるものなのかは特定できない。

消波壁タイプの多方向不規則波条件（ケース11）について述べる。図-13は②-②'、⑧-⑧'断面についての計算結果（ $s_{\max}=25$ ）を比較したものである。図中の実線、破線、点線はそれぞれ直立壁および消波壁の反射率（ K_R 直、 K_R 消）を表-2を参考に、(0.90, 0.40), (0.95, 0.40), (0.95, 0.35)で与えたものである。消波壁の影響で、直立壁条件のように計算値には大きな違いがなく、ほぼ同じ値を示している。この結果を踏まえて図-14には、反射率を(0.95, 0.40)で与えた計算値とケース11の実験値を比較して示す。総じて計算値と実験値の一致は良好であるが、②-②'、および⑧-⑧'断面図より、副防波堤の背後で実験値が大きい。これは、直立壁タイプのケースでも見受けられた傾向である。前述の通り回折現象等による影響も考えられるが、消波条件である本条件の方が波高の高い領域が広範囲に渡っていること、またこれらの領域が、特に消波壁の反射の影響を受けやすい領域であることを考えると、やはり反射の影響によるものと考えるのが妥当であろう。消波壁の反射率も直立壁の場合と同様、2次元実験による入・反射波分離結果よりも大きかった様である。計算結果には0.05程度の反射率の違いはほとんど影響なかったことから、実験結果にも同様の傾向があると考え、消波壁では、直立壁の場合以上に2次元実験での反射率と実際の反射率の差が大きかったと考えられる。今回の実験の消波壁には潜堤型の消

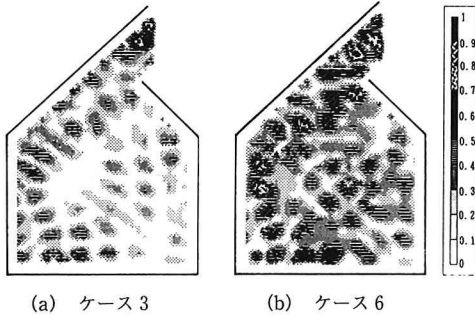


図-8 非線形性の違いによる静穏度の比較

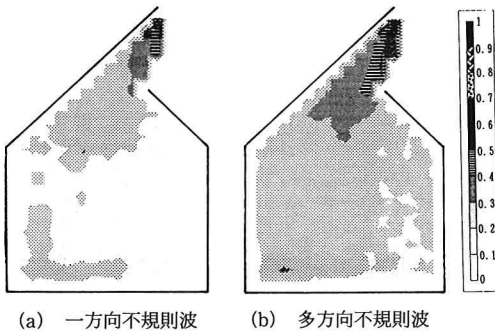


図-9 多方向性の違いによる静穏度の比較

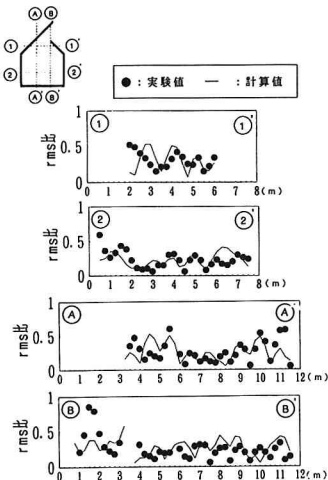


図-10 実験結果と計算結果の比較
(規則波, 直立壁)

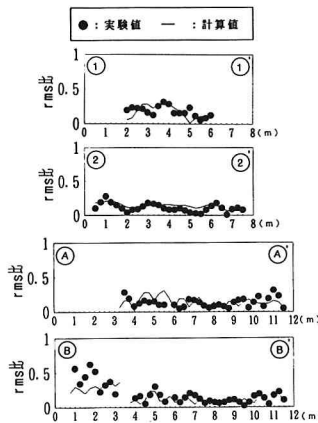


図-11 実験結果と計算結果の比較
(規則波, 消波壁)

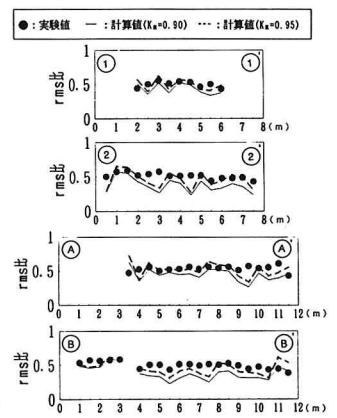


図-12 実験結果と計算結果の比較
(多方向不規則波, 直立壁)

波ブロックを用いており、反射率は図-6に示すように周波数すなわち波長により大きく変化した。多方向不規則波が入射した場合の港内壁には、種々の周波数の波が色々な方向から作用するため、入射波長に対する消波ブロックの相対的な長さが直角入射の場合とは異なる。従って2次元水路で行った入・反射波分離結果では、実際の反射率が正確に評価されていない可能性がある。斜

め入射波に対する反射率も含め多方向不規則波の反射率は、反射壁の構造形式により、2次元的に求めた結果と大きく変わってくる可能性があるため、今後更に解明する必要がある。

4. おわりに

入射波条件および港内の反射条件を変化させた水理実験より、港内の静穏度を系統的に調べ、①共振条件では港内の静穏度は入射波の周期に非常に敏感なこと、②入

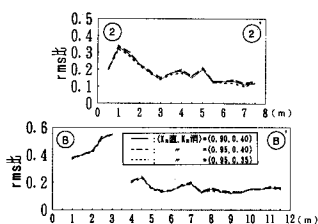


図-13 反射率の違いによる計算結果の比較

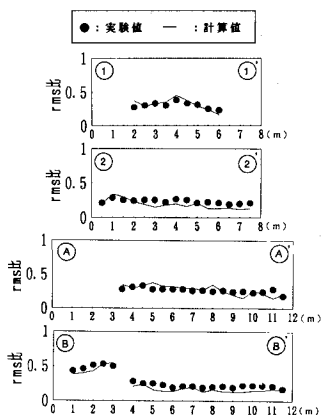


図-14 実験結果と計算結果の比較 (多方向不規則波, 消波壁)

射波の非線形性が大きくなる(アーセル数が大きくなる)と2次成分波が発生し港内の波高が小さくなること、③同一の波向であれば、一方向不規則波よりも多方向不規則波が作用した方が港内の波高は高くなることを示した。

また、グリーン関数を用いた計算結果は実験結果と概ね良好に一致していたが、多方向不規則波を作用させた場合には、港内の反射率が2次元実験による入・反射波分離結果よりも大きいものと推定された。多方向不規則波に対する反射率を正確に評価することが今後の課題であることを示した。

なお本研究は、土木学会海岸工学委員会研究現況レビュー小委員会における、「WG1 平面波浪場の計算法」ワーキンググループで検討した内容を取りまとめたものである。

参考文献

- 池谷 毅・秋山義信・今井貫爾 (1992): 多方向不規則波の吸収造波理論, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 81-85.
- 磯部雅彦・泉宮尊司・堀川清司・清水琢三・木下哲則・関本恒浩 (1988): 屈折・回折領域における波浪場の現地観測, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 108-112.
- 合田良実 (1990): 港湾構造物の耐波設計, 波浪工学への序説, 増補改訂版, 鹿島出版会, 333 p.
- 近藤浩右・清水琢三・山田耕一 (1987): グリーン関数法を用いた港内波スペクトルの計算法, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 106-110.
- 十河泰彦・斉藤栄一・沖 政和 (1992): サーベント型造波装置の造波特性について, ハザマ研究年報, pp. 295-308.
- 高山知司・池田直太・小杉宜史 (1990): 多方向不規則波を用いた波浪変形実験, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 155-159.
- 平石哲也 (1991): サーベント型造波装置の有効造波領域の拡張法に関する実験的検討, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 126-130.
- 平口博丸・鹿島遼一・池野正明・田中寛好 (1990): 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.