

港湾技研資料

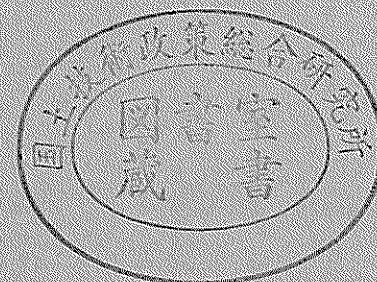
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 968 Dec. 2000

斜め一方向不規則波および多方向不規則波による
隅角部を有した消波ブロック被覆式護岸の越波特性

富 田 孝 史
河 合 尚 男
平 石 哲 也

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 水理模型実験	5
2.1 対象地形および護岸断面	5
2.2 波浪条件	5
2.3 実験方法	6
3. 波浪および流速場の特性	8
3.1 対象領域における波の入射角	8
3.2 隣接護岸の波の反射率	9
3.3 モデル地形周辺の波浪場の特性	9
3.4 モデル地形周辺の流速場の特性	13
4. 越波特性	15
4.1 断面実験の結果	15
4.2 越波流量の空間分布	15
4.3 波の入射方向による影響	16
4.4 波の多方向性による影響	18
4.5 隅角部付近の越波特性	19
5. 消波ブロックの耐波安定性	20
6. 結論	21
7. あとがき	22
参考文献	22

Wave Overtopping on Wave-dissipating Seawall with Corner Part in Oblique Unidirectional and Multidirectional Waves

Takashi TOMITA*
Takao KAWAI**
Tetsuya HIRAISHI***

Synopsis

In oblique unidirectional and multidirectional wave fields, wave overtopping on a seawall which is covered with wave-dissipating blocks and which protects land area with corner parts geometrically is investigated with conducting horizontally two-dimensional physical model tests.

At the corner part the multidirectional waves cause more overtopping rate than the unidirectional waves, depending on wave incident angle. This feature is affected by component waves of multidirectional waves normally incident upon the seawall as well as diffracted waves generated at the corner part. Oblique multidirectional waves make less reduction of overtopping rate than the oblique unidirectional waves. In a range of wave incident angle, the oblique multidirectional waves cause more overtopping rate than the unidirectional waves even on a straight part of the seawall.

The results on the physical model tests under the unidirectional wave action show that the wave-dissipating blocks at the end part of seawall where the waves acts on the side of blocks are easily movable. In the area where waves overtop severely on the seawall, the blocks on a crown part of wave-absorbing work is also movable easily.

Key Words: wave overtopping, seawall covered with wave-dissipating blocks, oblique unidirectional waves, multidirectional waves, horizontally two-dimensional physical model tests

* Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division
** Ex-Member of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division
(At Present, Mikawa Port Construction Office, The 5th District Port Construction Bureau)
*** Chief of Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-468-445010 Fax : +81-468-413888 E-mail : tomita@cc.phri.go.jp

斜め一方向不規則波および多方向不規則波による 隅角部を有した消波ブロック被覆式護岸の越波特性

富田 孝史*
河合 尚男**
平石 哲也***

要 旨

海上空港のように地形的に隅角部を持った陸域を海の波から防護する消波ブロック被覆式護岸に斜め一方向不規則波や多方向不規則波が作用するときの越波特性を平面模型実験を行って検討した。

凸型隅角部に多方向不規則波が作用する場合には、一方向不規則波の場合よりも越波流量が増大することがある。この現象には、隅角部から発生する回折波の他に隅角部を構成する2つの面から直角に近い角度で入射する多方向不規則波中の成分波が寄与している。主波向が護岸に対して斜めの多方向不規則波の場合には、一方向不規則波の場合ほど斜めの入射角にともなった越波流量の低減は認められない。さらに、入射角によっては斜め多方向不規則波の方が一方向不規則波よりも越波流量を増大させることがある。

また、斜め一方向不規則波を対象にして行った模型実験から、消波ブロック被覆式護岸の端部になり護岸断面の側面方向から波の作用を受けるようなところや、越波が頻繁に起こるような場所における消波工の天端面では消波ブロックは動揺しやすくなることが明らかとなった。

キーワード：越波流量，消波ブロック被覆式護岸，斜め一方向不規則波，多方向不規則波，平面模型実験

* 水工部主任研究官

** 前水工部波浪研究室（現第五港湾建設局三河港湾工事事務所）

*** 水工部波浪研究室長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所

電話：0468-44-5010 Fax：0468-41-3888 E-mail：tomita@cc.phri.go.jp

1. まえがき

海上空港の新規建設や拡張ともなっていて空港護岸の建設計画が増大している。近年の社会情勢により、海上空港は沖合へ展開することが多くなっており、空港の防波護岸の設置水深は深くなりつつある。水深の深い海域に設置される構造物に作用する波は、様々な方向から来襲する波が重ね合わさった波（多方向不規則波）となる。さらに、海上空港の向きは、空港機能や周辺環境への配慮によって決められるため、作用波の主要なエネルギーが空港護岸に対して斜めの方向から入射する場合があることを考慮しなければならない。

海上空港施設をそのような波浪から防護するため、すなわち波の作用により引き起こされる越波、打上げおよび飛沫を軽減するために、海上空港外縁には護岸が設置される。ただし、空港護岸の天端高は進入表面（航空機の離着陸時の直線飛行を確保するために障害物等を制限する表面）等の制限表面および航空保安施設の機能を損なわない高さでなければならない。すなわち、空港護岸には低い天端の護岸が要求される。また、護岸の天端を下げることは、空港埋立地の地盤高を下げられる可能性を生みだし、埋立土量の軽減につながることもある。現在、低天端護岸の構造様式として消波ブロック被覆式護岸が使われることが多い。それは単純な斜面でなく消波工の上部にパラペット（波返し）を持つ形式である。

このような状況において安全かつ経済的な消波ブロック被覆式護岸の天端高や消波工等を検討するためには、消波護岸に斜めに波が作用する場合、とくに斜めに多方向不規則波が作用する場合の消波護岸の越波特性に関する知見が必要である。

また、海上空港としての臨海部の埋立地や沖合に造成する人工島は、一般的には地形的に凸型隅角部を有する。このため、多方向不規則波の作用下における隅角部近傍の護岸の越波特性に関する情報は、隅角部の護岸天端高や消波工の断面形状などの設定に重要となる。

さて、護岸の直線部分の越波に関する既往の研究成果は幾つかある。消波ブロック被覆式護岸に直角に多方向不規則波が作用する場合の越波特性は榊山ら(1994)によって実験的に検討されている。その結果として、越波流量は、同一の波高の下では一方向不規則波が護岸に直角に入射する場合が最も多く、直角入射の多方向不規則波、斜め入射の一方向不規則波の順に小さくなることが報告されている。

護岸に波が直角に入射する場合において多方向不規則波の越波流量が一方向不規則波によるものよりも減少す

ることは、平石ら(1996)によっても報告されている。ただし、彼らは、消波ブロック被覆式護岸ではなく単純な直立護岸を対象としている。彼らは、直立護岸に斜めに入射する一方向不規則波と直角に入射する多方向不規則波による実験結果を利用して、数値計算から斜め入射する場合の多方向不規則波の越波特性を推定している。その推定結果によると、入射角（護岸に直角に入射する角度を0度とする）が30度程度までは多方向不規則波の場合の方が一方向不規則波の場合よりも越波流量は少なくなる。また、Franco(1995)は、直立護岸に多方向不規則波を斜めに入射させた実験から、入射角が60度までの範囲では、多方向不規則波の方が一方向不規則波よりも越波流量が少ないことを報告している。平石(1996)とFranco(1995)の結果を比較すると、波の入射角が30度程度よりも大きな場合において両者は若干一致していない。

構造形式が直立護岸ではなく斜面の場合の波の入射角による越波特性の変化はde Waal and van der Meer(1992)により検討されている。彼らは、勾配が1:2.5や1:4のパラペットを持たない単純な斜面を対象にした水槽実験を行って多方向不規則波と一方向不規則波による越波流量を比較している。その結果として、入射角が30度位を境として、それ以下のときには一方向性の強い不規則波の方が越波流量は多く、それ以上のときには逆に多方向不規則波の方が越波流量が多いことを示している。入射角が30度程度よりも大きな場合において波の入射角が越波流量に及ぼす影響は、構造物の形状が異なるためにFranco(1995)の結果と異なっている。すなわち、この不一致は、入射角による越波流量の変化が護岸の構造形式に依存することを示している。

海上空港の防波護岸としてよく使われるようなパラペットを持った消波ブロック被覆式護岸に多方向不規則波が斜めに作用する場合の越波特性は、これまで検討されていないので、上記の研究成果等から推測しなければならない。しかし、上述したようにそれは護岸の構造形式に依存するために、とくに波の入射角が大きな場合には、一方向不規則波よりも多方向不規則波の方が少ない越波流量になるのか、逆に多くなるのか不明である。

また、地形的に隅角部を持った地形外縁の消波ブロック被覆式護岸に多方向不規則波が作用したときの越波特性は前出の榊山ら(1994)によって実験的に若干検討されている。その結果として、隅角部の存在によって生じる回折波の影響によって沿岸方向の越波流量分布に変動が生じることが指摘されている。しかし、隅角部における越波流量は計測されておらず、波の作用による隅角部付近の越波流量の特性は未だによくわかっていない。

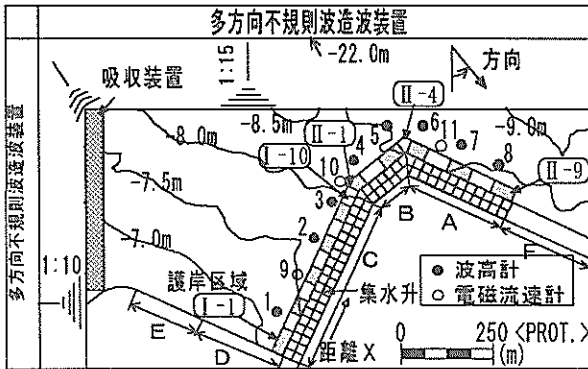


図-1 モデル地形と平面水槽

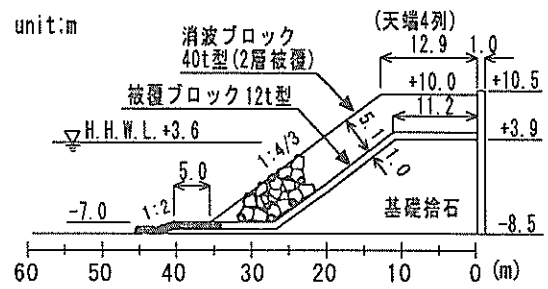
以上のように、護岸の直線部分に限ってみても、消波ブロック被覆式護岸に斜めに入射する多方向不規則波はどのような越波を引き起こし、入射角によって一方向不規則波の場合よりも多くの越波流量を生じさせることがあるのか未解明である。また、護岸の隅角部における越波はどのような特性を持っているのかも未解明の部分が多いのが現状であり、データの収集が必要である。そこで、本研究では、3次元水槽内にモデル地形を作成し、パラペットを有する消波ブロック被覆式護岸の直線部分や凸型隅角部に一方向不規則波および多方向不規則波が斜めに作用するときの越波特性を実験的に検討した。

さらに、消波護岸を構成する消波ブロックの耐波安定性についても、一方向不規則波を対象として実験を行って検討した。

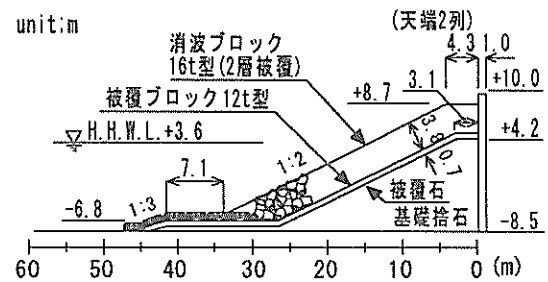
2. 水理模型実験

2.1 対象地形および護岸断面

図-1 に示すような模型縮尺 1/50 のモデル地形を港湾技術研究所大水深海洋構造物実験棟の長さ 37m、幅 25m、深さ 2m の切れ波水槽内に作成した。モデル地形やモデル海底はモルタル成形されている。水槽内にはその 2 面に多方向不規則波造波装置が設置されているが、モデル地形を図-1 に示すように水槽内に配置したので同図中の上方にある造波装置のみを使用して実験を行った。実験において越波の計測や消波ブロックの耐波安定性の観察を行った領域は、モデル地形の凸型隅角部の頂点を境界として区分けした領域 A~C である。実験では図に示した水深に潮位 3.6m (現地換算値) を加えた水深に設定した。このため、護岸前面で水深が最も深い領域 A と B の境界付近では水深が 12.1m になる。なお、今後とくに注意書きがない場合は模型実験で使用した時空間スケール



(a) 領域 A と B における護岸断面



(b) 領域 C における護岸断面

図-2 対象とした消波ブロック被覆式護岸

ルをフルードの相似則にしたがって長さスケールは 50 倍、時間スケールは $\sqrt{50}$ 倍した値で示すことにする。

対象領域における消波ブロック被覆式護岸の断面形状を決定するために、消波工の法面勾配や天端のブロック列数を変化させたり護岸前面に小段を付加したりした断面水路実験や平面水槽実験を予め行って、幾つかの護岸断面の越波特性や耐波安定性を検討した(富田ら, 1999)。その結果から、領域 A と B では図-2(a) に示すような基礎捨石を 40 トン型消波ブロックで 2 層被覆したもの(斜面勾配は 1:4/3、天端上のブロック列数は 4 列)、領域 C では同図(b) に示すような 16 トン型消波ブロックで 2 層被覆したもの(斜面勾配は 1:2、天端上のブロック列数は 2 列)とした。対象領域 A~C 以外である領域 A の右側の領域 F や領域 C の前面にある領域 D や E は斜面勾配 1:2 や 1:3 の捨石による消波工を取り付けた。なお、領域 D~F の消波工の天端幅や斜面勾配は異なっている。

2.2 波浪条件

越波量を計測する越波実験と消波ブロックの耐波安定性を観察する安定性実験を別々に行っているが、作用波の条件は概ね一致しているので、作用波の条件をここでまとめる(表-1 参照)。越波実験と安定性実験との間の波浪条件の差異は、越波実験のときには越波が生じるよ

表-1 発生波の諸元

波浪条件	H_0' (m)	$T_{1/3}$ (s)
W11	2.3	10.0
W12	3.3	
W13	4.4	
W14	5.5	
W15	7.3	
W21	2.9	12.2
W22	3.8	
W23	4.7	
W24	5.9	
W25	7.8	
W31	2.9	14.0
W32	3.7	
W33	4.6	
W34	5.6	
W35	7.8	

うな波高の大きな一方向不規則波と多方向不規則波について実験を行い、安定性実験のときには波高の小さな波も対象とする代わりに一方向不規則波のみを対象にしたというものである。

作用波の有義波周期 $T_{1/3}$ は3種類であり、10.0s、12.2s および 14.0s である。また、それぞれの有義波周期について換算沖波波高 H_0' を安定性実験では5種類変化させた。越波実験では、各々の周期について越波の生じないような波高の小さな条件を除いた波高上位3種類の波について実験を行った。目標とした周波数スペクトルは、式(1)に示すような合田により修正されたブレットシュナイダー・光易型スペクトル(合田, 1990)である。

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp\left\{0.75(T_{1/3} f)^{-4}\right\} \quad (1)$$

ここに、 $S(f)$ は周波数スペクトル、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $T_{1/3}$ は有義波周期、 f は周波数である。また、多方向不規則波の場合の目標となる方向関数は式(2)~(4)の光易型方向関数(合田, 1990)である。

$$G(f, \theta) = G_0 \cos^{2S}\left(\frac{\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$\text{ここに、} G_0 = \left[\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{2S}\left(\frac{\theta}{2}\right) d\theta \right]^{-1} \quad (3)$$

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

$G(f, \theta)$ は方向関数、 θ は方向、 S_{\max} は方向集中度パラメータ、 f_p は卓越周波数である。不規則波を構成する成分波の数は1000成分である。波向は2種類とし、一方向不規則波の場合には造波装置から波向を斜めにするこ

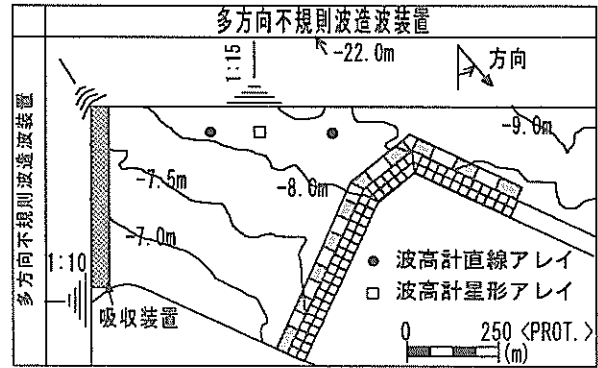


図-3 入射波検定実験の概要

く真っ直ぐに造波した方向(0度方向と定義する)と、造波装置前面の斜面やモデル海底地形上を波が屈折しながら進行してモデル地形、とくに領域B、に達したときに0度方向から反時計回りに15度回転した方向(15度方向)である。多方向不規則波の場合には主波向が0度方向と15度方向になるように実験条件を設定した。

2.3 実験方法

(1) 入射波検定実験

波向が0度や15度に変化したり波の多方向性が変化しても、護岸にはほぼ同じような波高の波が作用するようにするために、護岸前面、とくに領域Bの前面、において0度方向の一方向不規則波によって生起される波高になるように0度方向多方向不規則波や15度方向の一方向および多方向不規則波の波高を調整した。

波向が0度方向の一方向不規則波の場合における入射波の検定は、越波実験や安定性実験を実施する前に図-3における●印の場所に電気容量式波高を直線的に3本配置して水面の時間変動を計測することによって行った。その際には、モデル地形の前面にポーラス材による消波装置を設置してモデル地形からの反射波を極力小さくした。電気容量式波高計で計測された3箇所の水面の時間変動データを合田らの方法(1976)によって入・反射波分離し、計測水深において目標とした入射波高および周波数スペクトル形状になるように発生波の周波数スペクトルを調整した。図-4は解析された0度方向の一方向不規則波の入射波スペクトルの一例である。なお、0度方向波の場合には、0度方向が造波装置から波を斜めにするこなく真っ直ぐに造波したときの波向であるので、とくに波向の調整は行わなかった。

15度方向の一方向不規則波や0度および15度方向の多方向種規則波の場合には、まず、図-3における□印の位置に星形に配置した4本の電気容量式波高計で計測し

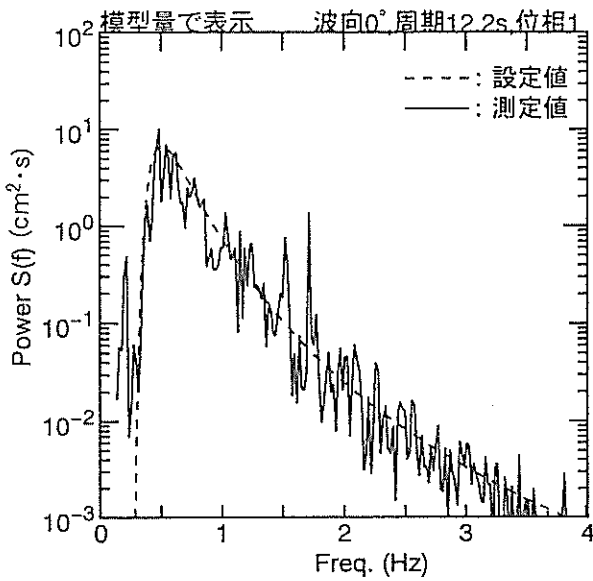


図-4 一方向不規則波の入射波スペクトルの一例

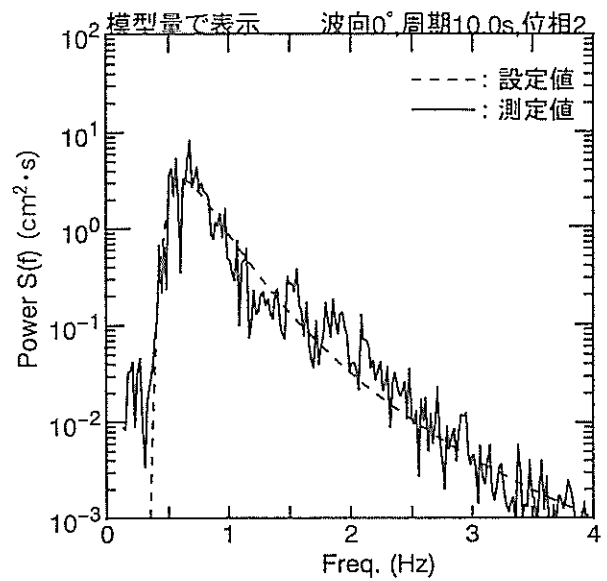


図-5 多方向不規則波の入射波スペクトルの一例

た水面の時間変動データを解析して、波向や周波数スペクトルの形状が所定方向や形状になるように造波装置への入力値を調整した。データの解析にはEMLMに基づく方向スペクトル解析を使用した。その解析によって得られる周波数スペクトルの一例を図-5に示す。波向や周波数スペクトル形状を合わせ込んだ後に、後述する越波実験や安定性実験のときに波高を計測する位置、とくにPt.3やPt.4、において、0度方向の一方向不規則波を作用させたときに計測される有義波高と同じ有義波高になるように造波装置の出力を調整した。

越波実験および安定性実験において護岸に作用させる波の数は、それぞれ200波および600波以上とした。また、越波実験と安定性実験ともに、各周期および波高の波浪条件毎に不規則波を構成する成分波の初期位相の組合せを3種類変化させて3種類の波群に対して実験を行った。

(2) 隣接護岸の反射率測定実験

領域Cに隣接する領域DやEからの反射波は領域BやCにおける越波に重要な影響を及ぼすと考えられるので、予めその反射率を検討した。

領域DやEの護岸前面に形成される部分重複波から入射波と反射波を分離するためのデータを得るために、護岸面に対して鉛直方向に有義波長の1波長分以上離して3本の電気容量式波高計をそれぞれの領域の前面に配置して、水面の時間変動を計測した。

(3) 越波実験

護岸を越波した水を集めるための集水升を領域A~C

の護岸の背後に前後2列に配置した(図-1中の細かな升目)。計測時間内に集水升に貯まった水量(越波量)を計測し、それから護岸単位幅および単位時間当たりの越波流量を算出した。集水升には底面が25m×25mのペイント塗装した木製の箱を主に使用し、隅角部付近では地形に合わせた形のものを使用した。越波量の計測では、集水升に貯まった水量が多い場合には秤を使って測定した水の重量から越波量を算出し、水量が少ない場合にはメスシリンダーで越波量を直接測った。越波水の集水は、水槽内の波がほぼ安定し、計測対象領域において顕著な越波が生じないような波高の小さな時期から始めた。造波してから越波水の集水を開始するまでの間は集水升の上面に塩化ビニル製の蓋を置いて越波水が集水升に侵入しないようにし、集水の開始と定めた小さな波高の波になった時点で一斉に蓋を取り除いて集水を開始した。

越波水の集水に合わせて、図-1に示した護岸の前面のPt.1からPt.8に電気容量式波高計を設置して波浪の時間的な変化を計測し、Pt.9からPt.11に2成分電磁流速計を設置して図-1の上下および左右方向の水粒子速度を計測した。データのサンプリング時間間隔は0.05s(模型スケール)である。

(4) 安定性実験

安定性実験では、実現象において高波浪に至る過程を考慮して、各々の周期について表-1に示した波高の小さな波から順次波高を増大させて実験を行った。波高条件を変更する際にブロックの並べ替えは行わなかった。したがって、移動したブロックの個数は累積個数である。

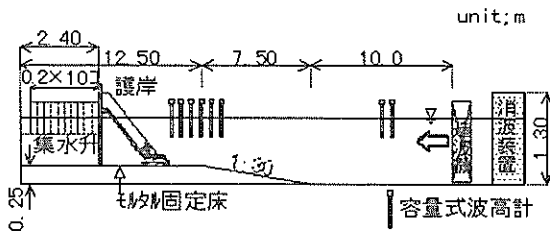


図-6 断面実験の概要 (模型スケール)

ブロックの移動や動揺は目視観察するとともに移動状況を写真やビデオで記録した。このため、図-1に示すように護岸周辺を区域I-1からII-9のように細かく分割した。波浪や流れの計測は越波実験のときと同様である。

(5) 断面実験

対象とした消波護岸に一方不規則波が直角に入射する場合 (入射角0度) の越波特性を検討するために断面実験を行った。実験では港湾技術研究所大型水工実験場にある片面ガラス張りの造波水路 (実物のスケールで長さ35m, 幅0.6m, 高さ1.3m) に図-6に示すような底面地形を作成して、その上に護岸模型を設置した。模型縮尺は1/25である。護岸設置位置における水深は12.1mである。作用波は平面実験と同様な波諸元を持った修正ブレットシュナイダー光易型周波数スペクトルの不規則波 (式(1)) である。

実験では、護岸背後に集水升 (長さ5m, 幅12.5m, 高さ7.5m) を10列並べて越波水を集水した。越波水の集水開始までは護岸上部に鉛直板を取り付けて越波しないようにし、集水開始とともに鉛直板を素早く取り去ってその後の200波以上の波を対象に越波水を集水した。

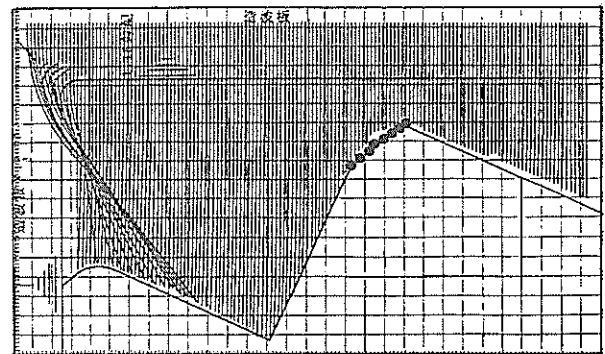
越波水の集水とともに、波浪場の計測を図-6に示すように護岸上の汀線位置から半有義波長離れた位置から沖側に向けて有義波長の1/4ずつ離れた6箇所と、造波装置前面の一樣水深部で $0.13L_{1/3}$ ($L_{1/3}$ は有義波長) 離れた2箇所の合計8箇所ですべて電気容量式波高計を使って行った。

3. 波浪および流速場の特性

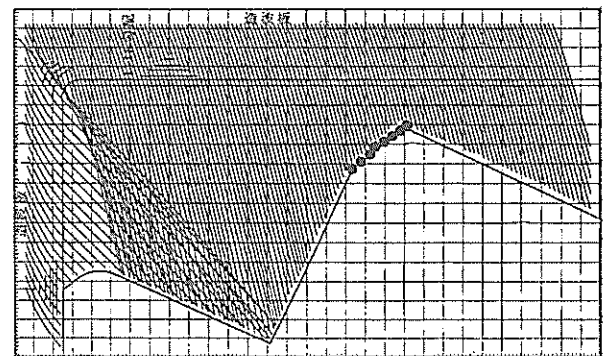
平面実験における越波特性や消波ブロックの耐波安定性を検討する前に、それらを生起させる外力としての護岸周辺の波浪や流速場の特性を検討する。

3.1 対象領域における波の入射角

まず、屈折計算によって、領域A~Cに作用する波の入射角を検討する。図-7は対象地形において $T_{1/3}=12.2s$ の0度方向および15度方向の一方不規則波を作用させ



(a) 0度方向波の場合



(b) 15度方向波の場合

図-7 一方不規則波の屈折図 ($T_{1/3}=12.2s$ の場合)

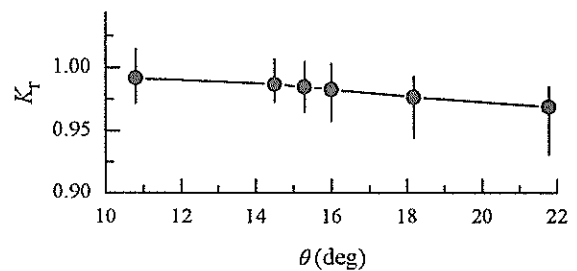


図-8 領域Bにおける屈折係数

た場合の屈折図であり、図-8は波向 θ と屈折係数 K_r の関係を示したものである。図-8において、●印は領域Bの範囲内における平均屈折係数で、屈折係数の領域Bの範囲内における変動の幅を縦線で示している。これらの図によると波向の変化が15度までであれば対象とした海底地形による波の屈折効果は非常に小さいと見なせる。このため、護岸に作用する波の入射角 α は、0度方向波の場合には領域A~Cのそれぞれにおいて25度、38度および65度となる。また、15度方向波の場合にはそれぞれ40度、23度および50度となる。なお、波の入射角

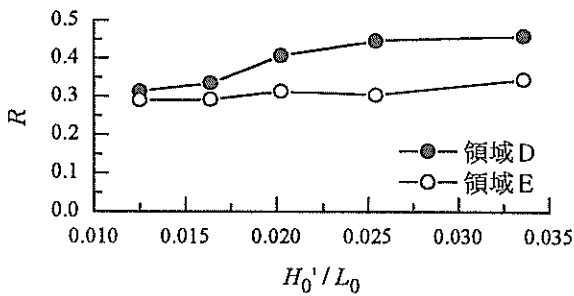


図-9 隣接領域 D と E の波の反射率

α は護岸に対して直角に入射する角度を 0 度と定義しており、入射角が 0 度や 15 度の方向と波向の 0 度や 15 度方向は異なるので注意が必要である。

3.2 隣接護岸の波の反射率

隣接護岸の反射率測定実験から得られた水面の時間変動データを使って、合田らの方法 (1976) により入・反射波分離して推定した反射率 R を図-9 に示す、反射率は波形勾配 H_0'/L_0 の増大にともなう若干増大する傾向にあるが、領域 C に隣接する領域 D や E の反射率はそれぞれ概ね 0.4 と 0.3 である。伝播にともなう反射波の減衰が無いと仮定すれば、この隣接護岸からの反射波の影響により領域 B や C に作用する波の波高は、造波装置からの入射波の波高よりも領域 B では 4%、領域 C では 8% 程度増大する。

3.3 モデル地形周辺の波浪場の特性

図-10~12 は、それぞれ波浪条件 W15, W25 および W35 のケースを代表的に取り出して、Pt.1 から Pt.8 において計測された水面変動データから算出した周波数スペクトルを示している。これらのスペクトルは 3 つの波群ケースの各々から算出されるスペクトルを平均したものである。図中の U00, U15, M00 および M15 はそれぞれ 0 度方向の一方不規則波, 15 度方向の一方不規則波, 0 度方向の多方向不規則波および 15 度方向の多方向不規則波を示している。これらの記号はこれ以降の図においても同じ意味を持つものである。同図に示した各周期および各計測ポイントにおいて、入射波の有義波周期の逆数に近い周波数 (W15 の場合には 0.1Hz, W25 では 0.08Hz, W35 では 0.07Hz) 辺りに大きな波エネルギーのピークが出現しているとともに、周波数 0.01~0.02Hz 辺りの長周期波の周波数帯にもう 1 つの波エネルギーのピークが認められる。その第 2 のエネルギーピークは多方向不規則波の場合よりも一方不規則波の場合の方が顕著である。この長周期波帯の波は、モデル地形からの反射波を示し

ているものと思われる。モデル地形を取り巻く消波ブロック被覆式護岸は、通常の風波に相当する周波数 0.1Hz 程度以上の高周波数 (短周期) の波の消波には有効であるが、低周波数 (長周期) の波になるほど反射率が增大する傾向を一般に持っている。この特性により、消波ブロック被覆式護岸で十分に消波されなかった入射波中の長周期波成分が反射波として海域に反射され、その結果として、周波数 0.01~0.02Hz 辺りに波エネルギーが出現したと考えられる。なお、図-13 に 0 度方向の一方不規則波の場合を対象として各護岸から発生する反射波の向きを示す。

また、領域 C と D で挟まれるような海域にある Pt.1 では、さらに第 3 のエネルギーピークが周波数 0.007~0.009Hz 辺りにある (図-10~12 参照)。この周波数帯のエネルギーは領域 C と D で挟まれる海域内に励起される副振動の影響ではないかと考えられる。Pt.1 には造波装置によって発生した入射波の他に領域 C の護岸によって反射される波と領域 D から反射される波が重畳する。そして、領域 C と D を直角三角形の直角を挟む 2 辺としてその斜辺が Pt.1 を通るようなときのその斜辺の長さはおおよそ 300m である。この距離は周波数 0.008Hz 程度の波の波長の 1/4 に相当するので、この三角形の海域において副振動が生じていた可能性がある。

上記の計測データの解析によって、対象としたモデル地形周辺の海域における波浪場では、モデル地形からの反射波だけではなく周辺領域 D や E からの反射波が影響を及ぼすことを指摘した。そこで、数値計算によって領域 D や E からの反射波の影響がどの程度の範囲に広がっているのかを検討する。使用した数値計算モデルは、ヘルムホルツ方程式を支配方程式として島や陸周辺の波高を計算するもので、水深の変化にともなう屈折や碎波現象は考慮できないが波の反射や回折現象を計算することができる (三井・村上, 1967)。計算では、断面実験の結果を参考にして、領域 A と B に取り付けられた消波護岸の反射率を 0.4 とし、領域 C では 0.3 とした。また、領域 D と E における護岸の反射率は、その反射率測定実験の結果に基づいて 0.4 とした。なお、計算モデルの制約により、護岸形状は実験で用いた形状とは異なり、直立消波壁となっている。図-14 が計算結果であり、同図 (a) は実験地形において 0 度方向の一方不規則波 ($T_{1/3}=12.2s$) を作用させた場合、(b) は作用波は同じであるが領域 D と E の反射率を 0 とした場合のものである。両図を比較することによって、領域 D や E からの反射波がモデル地形の切り欠き部にあたる領域 B の沖合にまで達していることが理解できる。また、同図 (c) に示した 15 度方向の

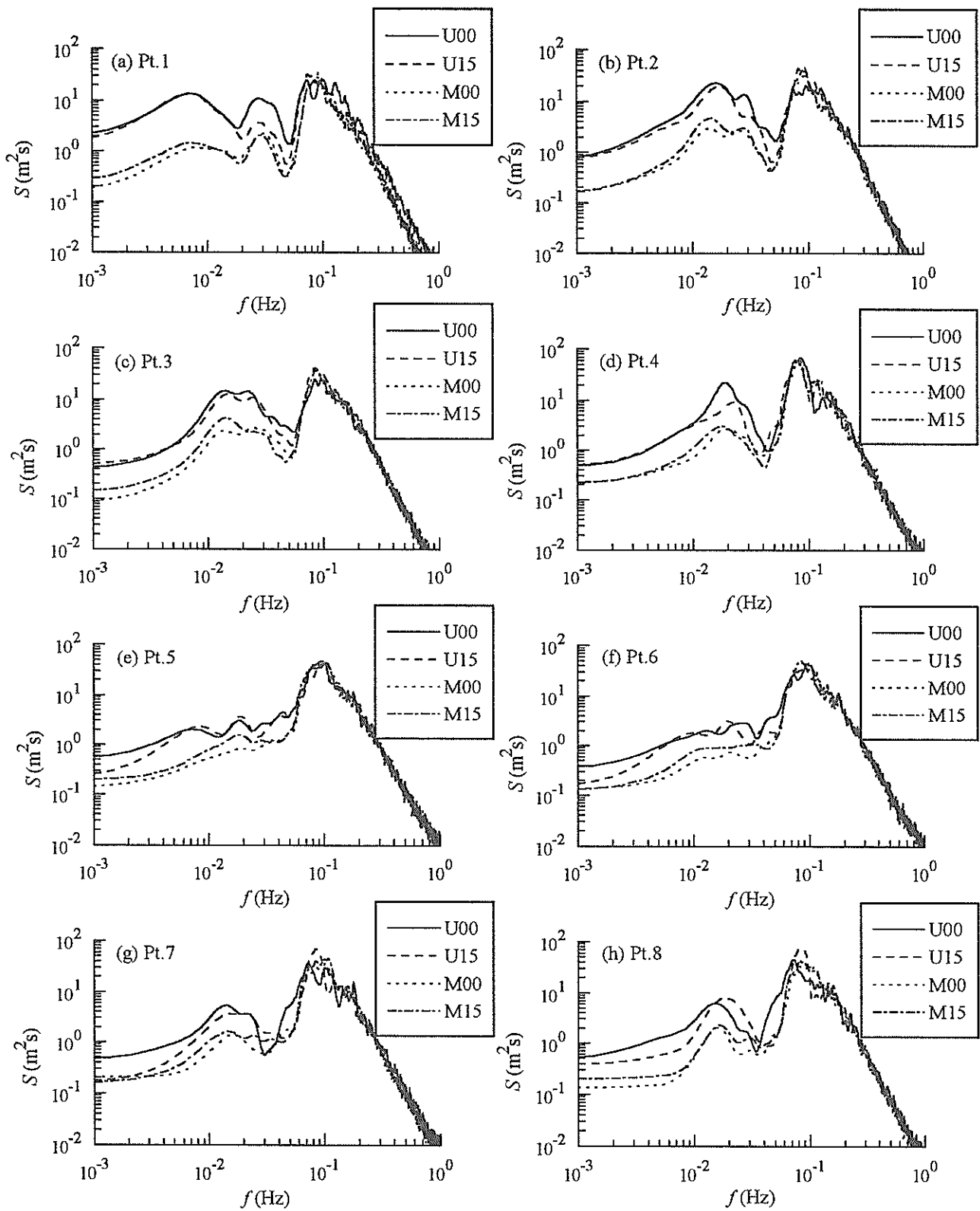


図-10 波の周波数スペクトル (W15 の場合)

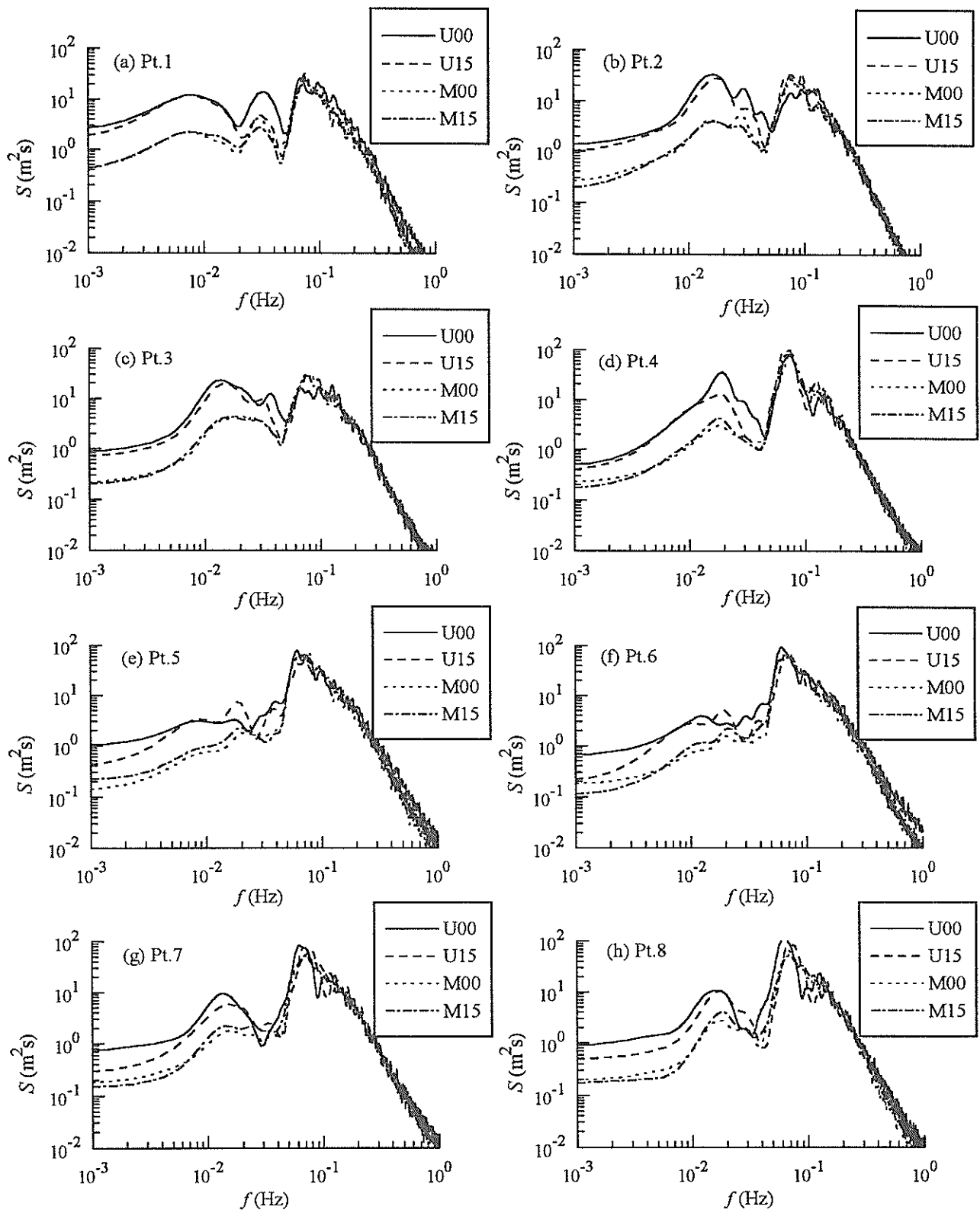


図-11 波の周波数スペクトル (W25 の場合)

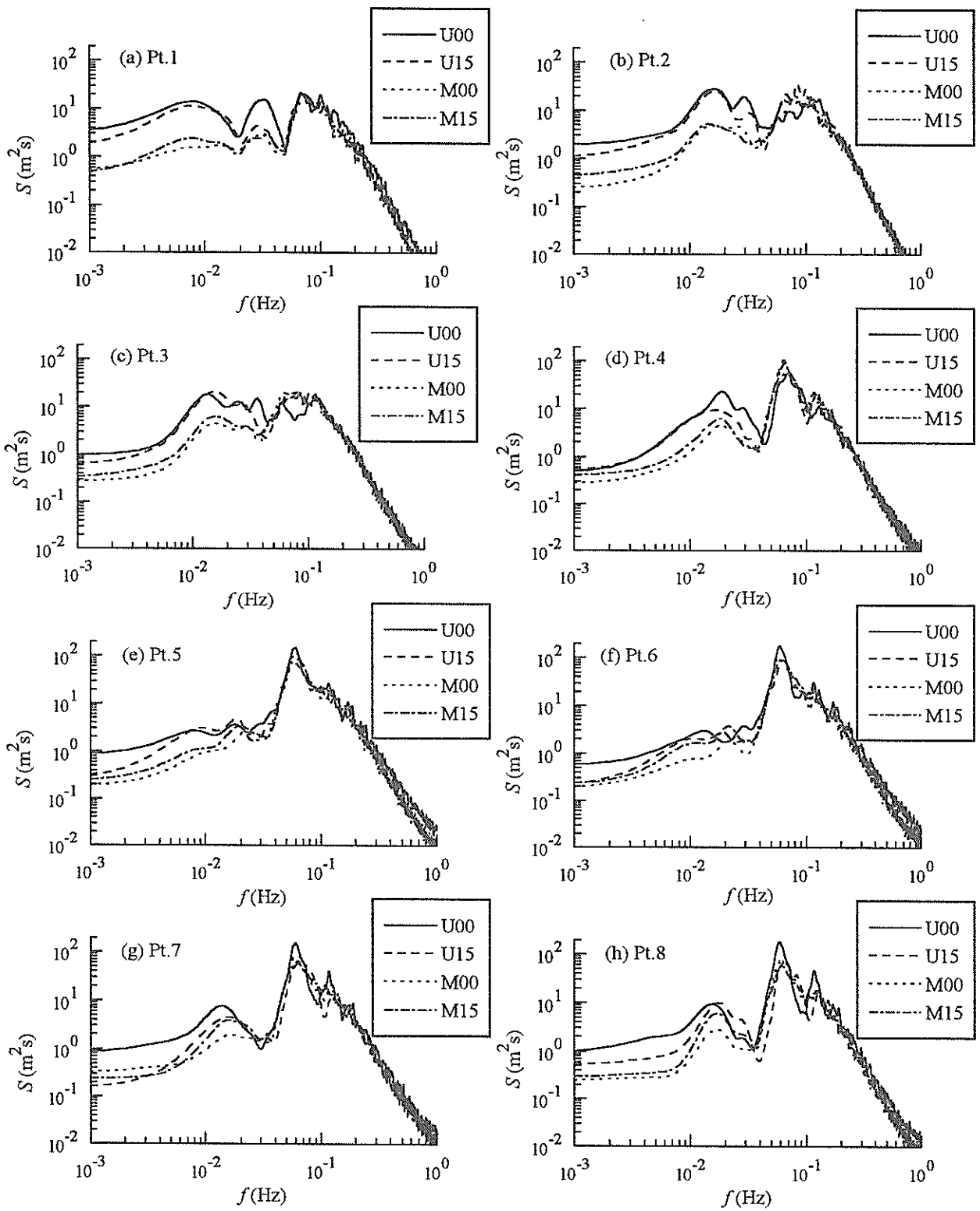


図-12 波の周波数スペクトル (W35 の場合)

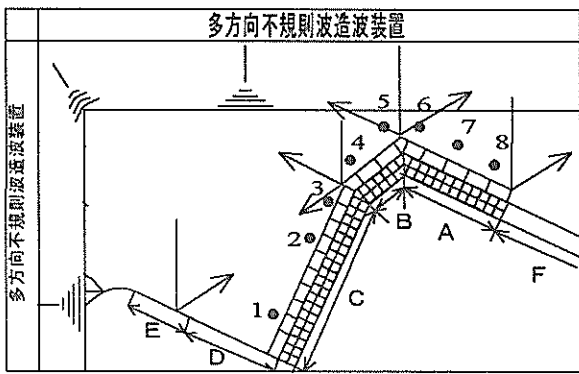


図-13 反射波の伝播方向
(0度方向の一方方向不規則波の場合)

一方方向不規則波の結果をみると、15度方向波の場合には0度方向波に比べると領域DやEからの反射波の影響は若干弱くなるようであるが、モデル地形側面の領域Cの前面海域には反射波の影響が現れている。

図-15は波浪条件W25を例にとって示したPt.1からPt.8までの最高波、1/10最大波、有義波および平均波の波高である。実験では同一波浪条件について3種類の波群を使用しているの、3つの波群毎に算出された各代表波の波高を自乗平均した後にその平方根をとって波浪条件毎の代表波の波高とした。なお、図中の代表波高は、換算沖波波高 H_0' で無次元化している。また、同図には合田(1975)に基づいて計算した浅海域における砕波変形を考慮した一方方向不規則波の推定波高を併記した。どの代表波高をみても、モデル地形の沖側に位置するPt.4からPt.8までの波高はモデル地形からの反射波の影響を受けて推定波高よりも高くなっており、とくに反射波の影響が強く現れる0度方向の一方方向不規則波の場合に1/10最大波高、有義波高および平均波高が高くなっている。一方、モデル地形の側面に位置するPt.1~Pt.3では、多方向不規則波の場合にPt.3からPt.1へ波が進むにつれて各代表波高は減衰している。この減衰は反射波の影響と言うよりは、モデル地形が存在しなければその方向から伝達すべき波エネルギーがモデル地形の存在により遮断されるため、その不足したエネルギー分だけ波高が減衰しているものと思われる。また、15度方向の一方方向不規則波の場合において、周辺領域DやEからの反射波の影響によるものと思われる各代表波高の若干増大がPt.2に認められる。

3.4 モデル地形周辺の流速場の特性

図-16はPt.9からPt.11で計測した流速ベクトル V の時間的な変化の様子を示したもので、流速の向きを角度

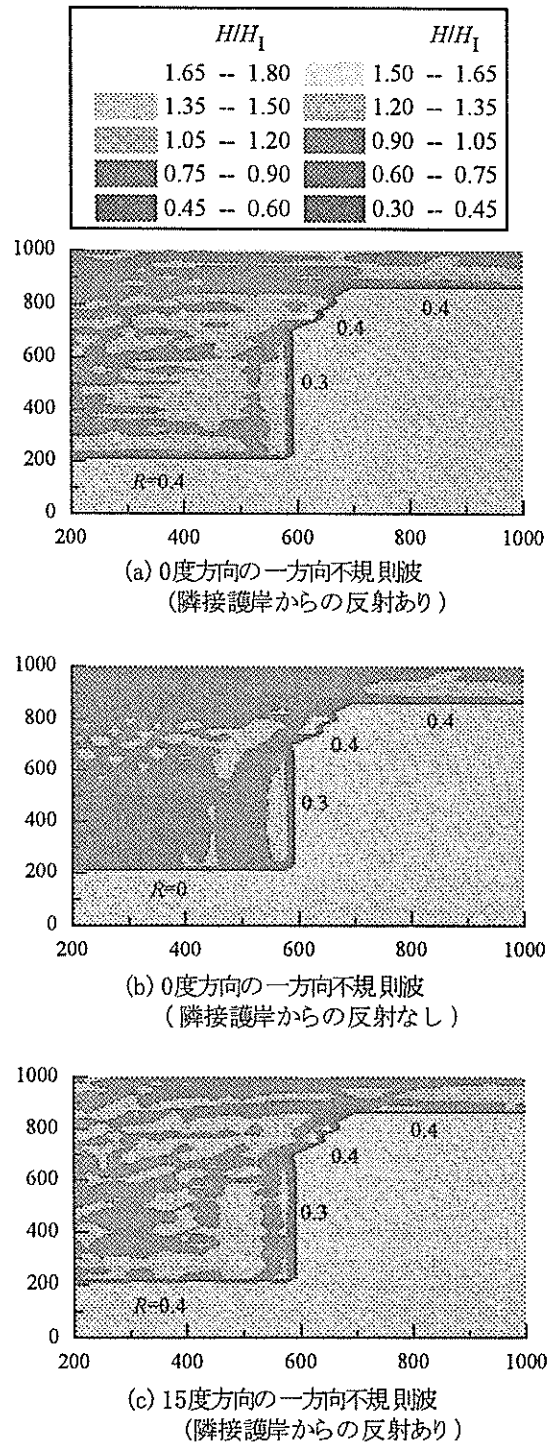


図-14 数値計算による波高分布

で流速の大きさを半径によって示している。したがって、波の一方方向性が強ければ流速ベクトルの時間的な変化は直線状になり、多方向性が強ければ円形状になる。なお、図に代表的に示した実験ケースは波浪条件W25のある1つの位相条件のものである。入射波だけでなく領域Cや周辺領域DとEからの反射波が影響するPt.9では、たと

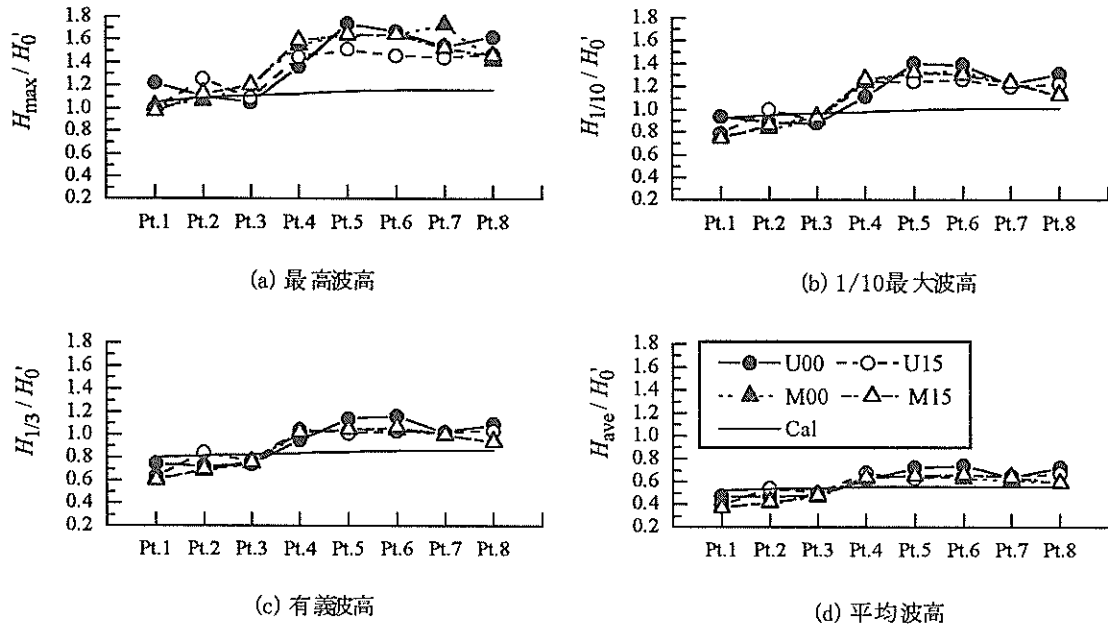


図-15 代表波高の空間的な分布 (W25 の場合)

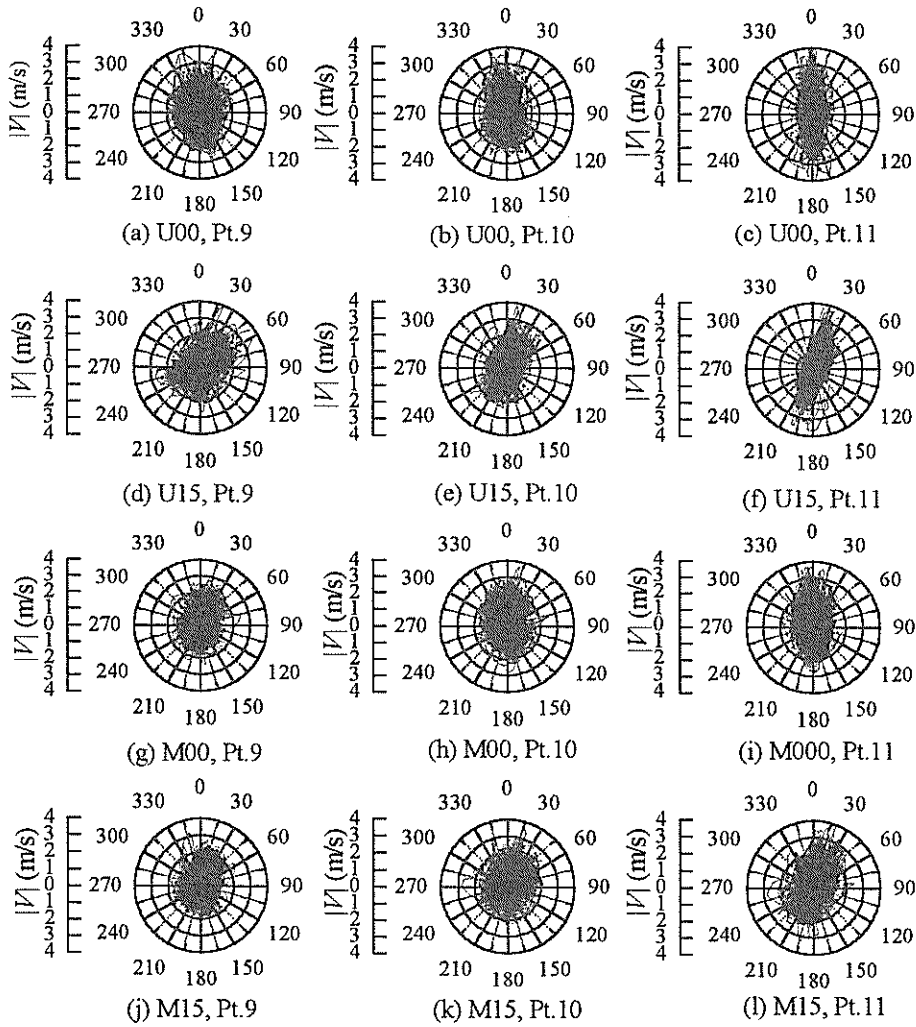
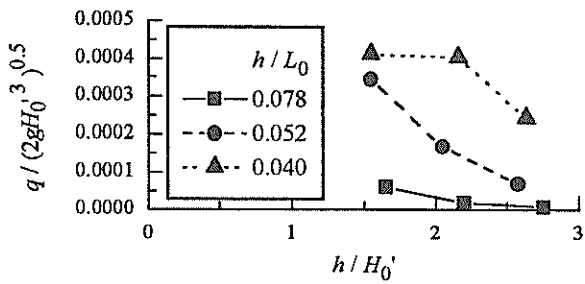
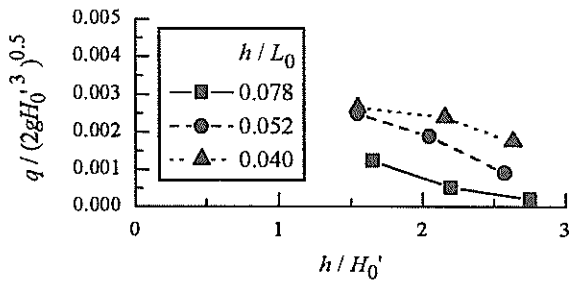


図-16 流速ベクトルの時間的な変化 (W25 の場合)



(a) 40トン型消波ブロックによる消波護岸



(b) 16トン型消波ブロックによる消波護岸

図-17 断面実験による越波流量

え一方不規則波の場合であっても流速ベクトルの時間変動は円形状であり、多方向性の波の様相を示している。Pt.10では、周辺領域DやEから離れてそれらからの反射波の影響が弱くなるために、一方不規則波の場合には入射波の波向方向に大きな流速が出現しやすくなっている。さらに、モデル地形の沖側に位置するPt.11では、一方不規則波と多方向不規則波では流速ベクトルの時間変化の様子は顕著に異なり、一方不規則波の場合には所定の方向に伝播する一方性の強い波、多方向不規則波の場合には所定の方向に主波向のある多方向性の波になっていることが確認できる。

4. 越波特性

4.1 断面実験の結果

図-17は、換算沖波波高 H_0' を使って無次元化した越波流量と相対水深 h/H_0' の関係を示したものである。また、図中の L_0 は $gT_{1/3}^2/2\pi$ （ここに g は重力加速度）で定義される沖波波長である。同図(a)に示した40トン型消波ブロックによる消波護岸の無次元越波流量は、(b)に示した16トン型消波ブロックによる消波護岸の無次元越波流量よりも0.1倍程度小さくなっている。また、水深波長比 h/L_0 が無次元越波流量に及ぼす効果は、相対水深 h/H_0' が大きな場合には大きい、 h/H_0' の減少にともなって小さくなる。今回の実験の範囲では h/H_0' が小さくなる

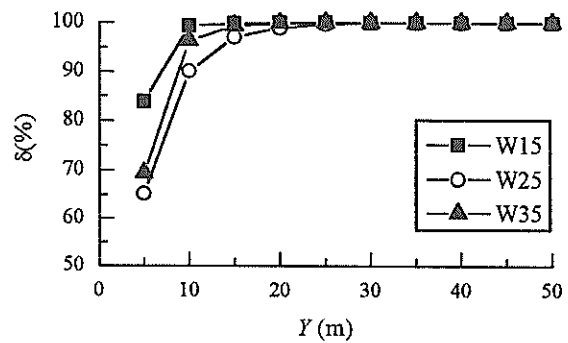


図-18 越波流量の護岸背後の分布

につれて無次元越波流量は多くなるので、 h/H_0' の減少にともなって水深波長比の影響が小さくなることは、無次元越波流量が大きな場合には波の周期（水深が変化しない場合）の効果はあまり効かなくなることを意味している。

また、護岸背後の越波流量の空間分布を図-18に示す。同図は、40トン型消波ブロックによる消波護岸の場合の、護岸背後の全越波流量に対する各地点の越波流量の百分率を護岸背後から累積したもの（ δ (%)）の護岸背後の変化の様子（図中の Y は護岸からの距離である）を示している。同図から、護岸背後の全越波流量の90%以上は護岸直背後の10m辺りまでに着水することが判明した。

4.2 越波流量の空間分布

図-19は、各周期の波浪において波高の最も大きなケース(W15, W25 および W35)を取り上げて、無次元越波流量 $q/(2gH_0'^3)^{0.5}$ の沿岸分布を示したものである。同図では異形の升を使った隅角部のデータを除いてある。図中、 X は図-1に示すように護岸に沿った距離である。同図を見ると、波向の影響が一方不規則波の越波流量に顕著に現れている。0度方向と15度方向の一方不規則波の場合を比較すると、0度方向から15度方向に波向が変化することによって、領域Aでは波の入射角が増大する（より斜めの方向から波が入射する）ので越波流量は減少するのに対し、領域Cでは入射角が小さくなる（より直角に近い方向から波が入射する）ので越波流量は増大している。多方向不規則波の場合にも同様な傾向は現れているが、一方不規則波の場合よりも波向の影響は強くない。

また、0度方向からの波浪に対しては、一方不規則波や多方向不規則波によらず領域Aと領域Bの接続部近くの領域Aにおいて沿岸方向で最大の越波流量が出現する。この場所の水深は12.1mとモデル地形に沿って最も

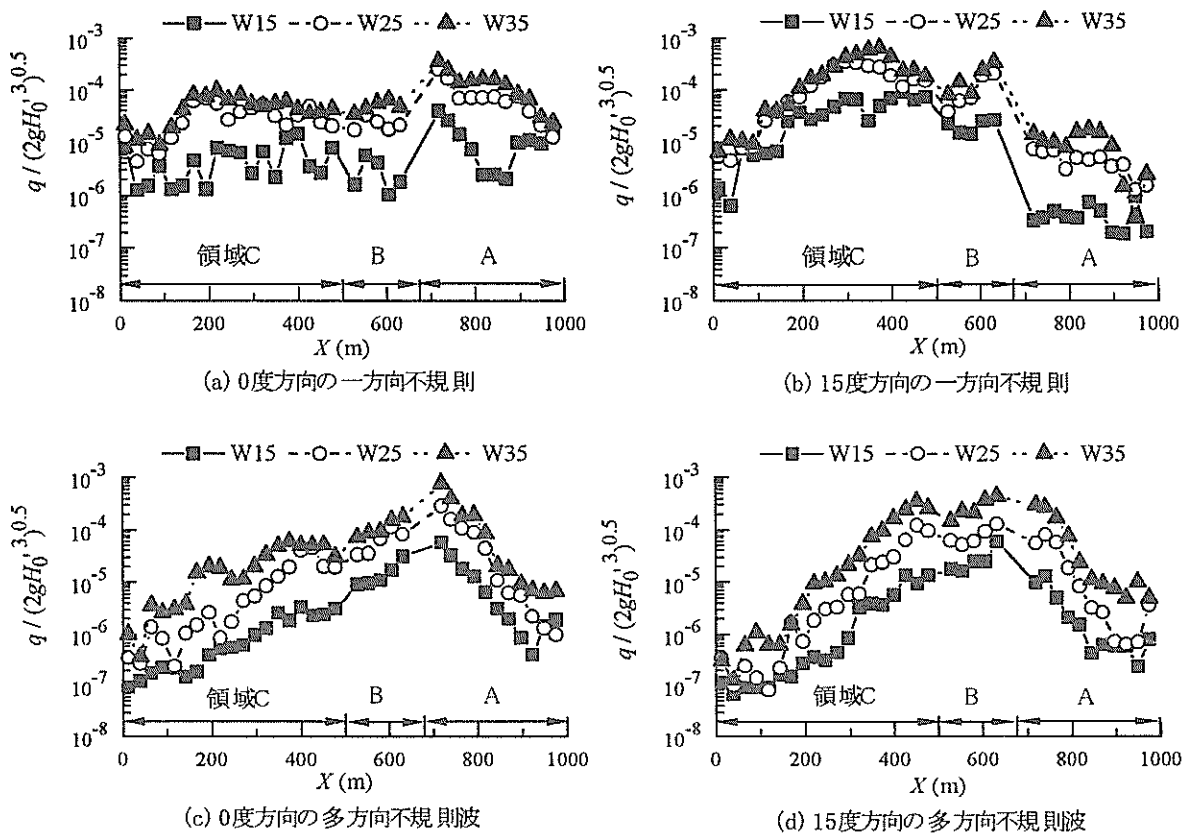


図-19 護岸直線部における越波流量

水深が深いところであるため、他の場所よりも砕波による波浪エネルギーの減衰が小さいことに起因した相対的に波高の大きな波浪の作用によって越波流量が多くなったと思われる。一方、15度方向波の場合には一方不規則波と多方向不規則波ともに領域Bや領域Cの400m付近で越波流量が多くなる。40トン型消波ブロックによる相対的に大きな断面の消波護岸が設置された領域AやBでは入射角が斜めになるほど越波流量の減少が著しくなるのに対して、16トン型消波ブロックで造られる消波護岸が設置される領域Cでは消波工の断面が小さいために作用波の入射角が直角に近くなるほど越波流量が顕著に増大する。このため領域Cにおいて大きな越波流量が発生する箇所が出現したと考えられる。

護岸背後の奥行き方向の越波流量分布を検討するために、護岸背後に配置した2列の集水升の越波流量を比較した。その結果を図には示さないが、護岸直後の1列目の集水升、すなわち護岸背後の25mの範囲、に全越波水の90%以上が貯まる結果となっている。

4.3 波の入射方向による影響

0度方向と15度方向の一方不規則波が作用する場合

の越波流量の沿岸分布において、入射角が越波流量の変化に強い影響を及ぼしていることが確認されたので、図-20に入射角 α と越波流量 q の関係をまとめる。同図では、護岸断面形の異なる領域Cと隅角部付近のデータを除いている。なお、波の周期の短いW13、W14およびW15の実験ケースの図は、他の図よりも縦軸が1オーダー小さいことに注意が必要である。また、入射角が0度のデータは断面実験から得られたものである。作用波の波高や周期によらず、一方不規則波の場合には、入射角の増大にともなって越波流量は線形的に減少する。多方向不規則波の場合にも、波の多方向性の影響のためにデータがばらついているが、入射角の増大にともなって越波流量は減少する。しかし、多方向不規則波の場合には一方不規則波の場合ほど入射角の増大にともなって越波流量は減少しない。このことは、多方向性の強い波浪の場合には、主波向が護岸に対して斜めになっても、一方不規則波の場合ほど越波流量の低減が期待できないことを示唆している。

図-21は、一方不規則波の場合の入射角による越波流量の低減の様子を再整理したもので、入射角が0度の場合に越波流量が1になるようにした越波流量低減係数

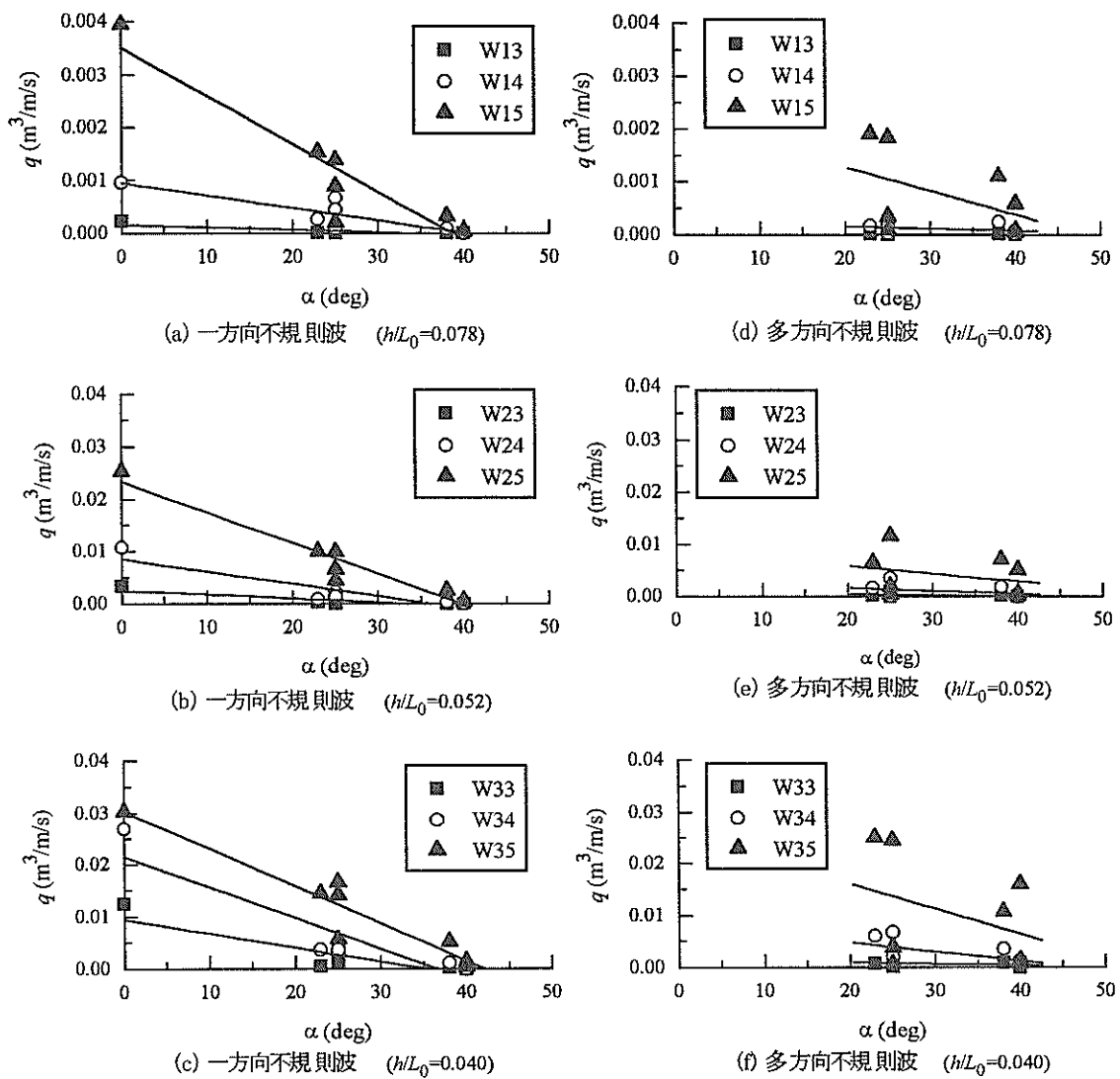


図-20 入射角と越波流量の関係

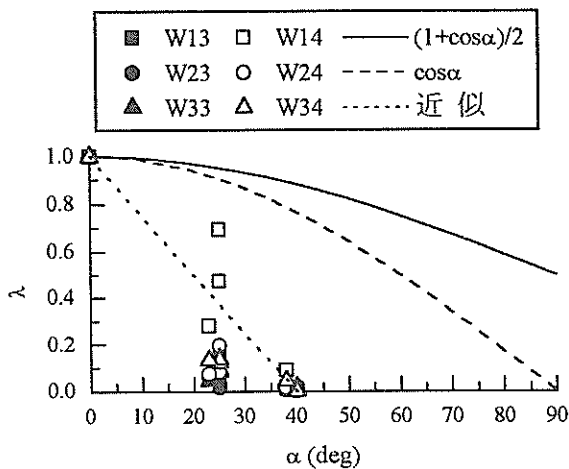
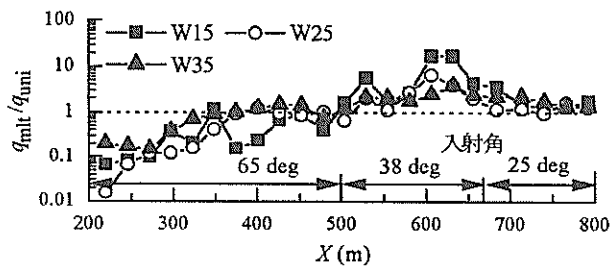


図-21 入射角ともなう越波流量低減係数

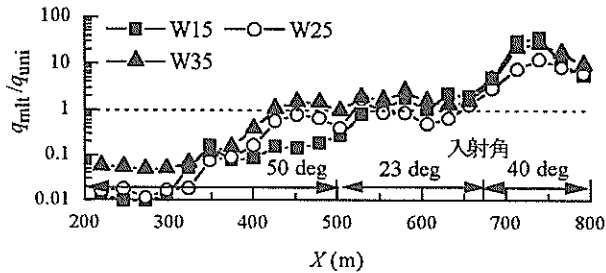
λ を示している。直立護岸の場合には、入射角 α' （ここに、 α' は護岸に平行な角度を0度、直角な角度を90度とする入射角であり、 $\alpha' = 90^\circ - \alpha$ であるので $\sin \alpha' = \cos \alpha$ の関係がある）にともなう越波流量は $(1 + \sin \alpha')/2$ と $\sin \alpha'$ の範囲内になるような実験結果が井上・土屋(1971)により示されているが、本実験で対象とした消波ブロック被覆式護岸の場合には、斜め入射ともなう越波流量の低減は直立護岸の場合よりも急激に生じるようである。図中の点線は実験結果を近似的に表現するもので、

$$\lambda = \begin{cases} 1 - 0.025\alpha & ; \alpha \leq 40 \text{ deg} \\ 0 & ; \alpha > 40 \text{ deg} \end{cases} \quad (5)$$

である。実験の範囲では越波流量低減係数に及ぼす作用波の周期の影響は顕著ではないが、波高が大きくなると低減係数はより小さくなる傾向にある。このことから、



(a) 0度方向波



(b) 15度方向波

図-22 一方向不規則波と多方向不規則波による越波流量の比較

作用波の波高が増大するほど越波流量が増大する傾向にある水深で、一方向性の強い波が作用して越波流量が多い場所では、入射角が大きくなるように波向や護岸の向きを変化させることができれば、それは越波流量の低減に効果的であると言えそうである。

4.4 波の多方向性による影響

図-22 は、一方向不規則波による越波流量 q_{uni} に対する多方向不規則波による越波流量 q_{mlt} の比を示したものである。護岸に直角に波が入射する場合、多方向不規則波による越波流量は一方向不規則波に比べて少ないことが明らかとなっている（榊山ら, 1994; 平石ら, 1996）。しかし、本実験の結果によると、斜めに入射する場合には、図-22 に示されるように、入射角によっては多方向不規則波による越波流量の方が増大することがあることが明らかとなった。具体的には、入射角が 20~30 度の範囲では、多方向不規則波による越波流量は一方向不規則波によるものと同程度であるが、入射角が 30~40 度になると多方向不規則波による越波流量の方が大きくなる。さらに入射角が増大して 50~70 度程度になると逆に一方向不規則波による越波流量の方が増大する結果となった。

このような結果は、護岸前面の波の入射角だけでなく波の方向分散特性にも強く依存していると思われる。今回の実験では護岸前面の波の方向分散特性を確認できる

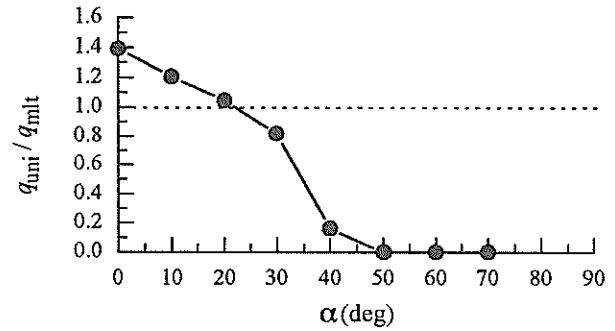
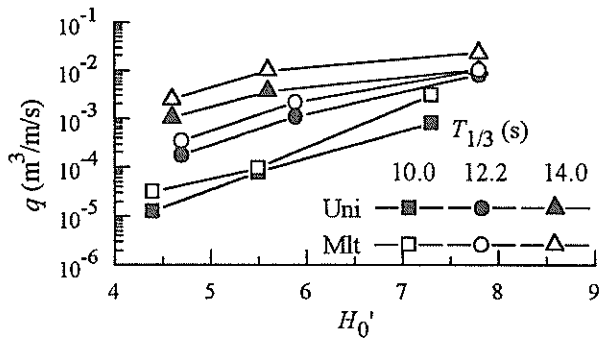


図-23 モデルに基づく一方向不規則波と多方向不規則波による越波流量の比較

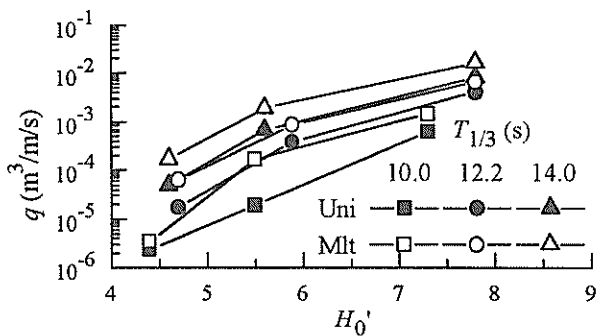
ようなデータは計測していないので、光易型方向関数と $S_{max}=25$ を仮定して、斜め多方向不規則波の越波流量の特性について検討する。

まず、 $S_{max}=25$ (多方向不規則波) と 999 (一方向不規則波) の場合について方向関数 G を式(2)に基づいて計算し、それらの方向関数に式(5)に示した越波流量低減係数を乗じる。なお、方向関数は式(2)~(4)に示されるように周波数 f にも依存するが、計算の簡略化のために $f=f_p$ における方向関数を対象とした。つぎに、一方向不規則波と多方向不規則波について得られた越波流量低減係数を乗じた方向関数を方向について積分する。その積分量は一方向不規則波と多方向不規則波による越波流量の関係を定性的に示すものであると考えられる。最終的にそれらの積分値を比較したのが図-23 である。同図によると、入射角 α (多方向不規則波の場合には主波向による入射角) が 25 度以上になると一方向不規則波の場合よりも多方向不規則波の場合の方が越波流量は増大するようである。この一方向不規則波と多方向不規則波の越波流量の大小関係が逆転するときの入射角の値は、模型実験の結果とほぼ同じくらいである。このように、波の方向分散性と入射角の関係によって、多方向不規則波は一方向不規則波よりも多くの越波流量を引き起こすことがあることに注意が必要である。

上記の検討では、多方向不規則波と一方向不規則波による越波流量の差の定量的な評価はできず、模型実験で得られた主波向が 50~70 度の場合に一方向不規則波による越波流量が多方向不規則波による越波流量よりも増大することも説明できない。構造物に平行に近い角度で波が斜めに入射する場合の研究によると、ある波条件の場合に構造物に沿ってステム波が形成され、構造物に沿って波が進行するにつれて波高が増大する現象がある。一方向性の強い波の場合ほどステム波は顕著になるため（目見田・酒井, 1999）、入射角が大きな場合にステム波



(a) 0度方向波



(b) 15度方向波

図-24 隅角部における越波流量

によって一方向不規則波の方が多方向不規則波よりも多くの越波流量を生じさせる可能性は否定できない。しかし、図-19に示した越波流量の沿岸分布や図-15の波高分布を見ると、今回対象としたような消波ブロック被覆式護岸の場合には顕著なSTEM波は形成されていないと思われる。

また、上記の検討結果は、直立護岸では入射角が増大しても一方向不規則波の方が多方向不規則波よりも多くの越波流量を生じさせるというFranco(1995)の実験結果と異なった傾向を示している。この差異には入射角にともなう越波流量低減係数を式(5)の様な線形関数で定義したことも影響している。このことから、越波流量低減係数は護岸の断面形状に依存するものであると言えよう。

このように依然として、入射角にともなう多方向不規則波の越波特性については検討する余地が残されており、とくに入射角が大きな場合の越波流量はかなり小さくなるので実験データの誤差にも注意を払いながら、波エネルギーの方向分布と関連づけて検討するための詳細な実験が今後必要となる。

4.5 隅角部付近の越波特性

隅角部で使用した集水升は護岸直線部にある正方形の集水升より底面積が小さく異形であるために、護岸に沿

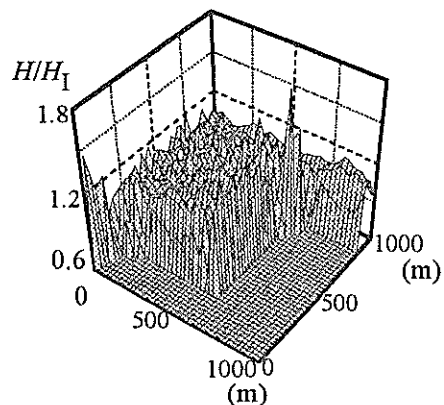
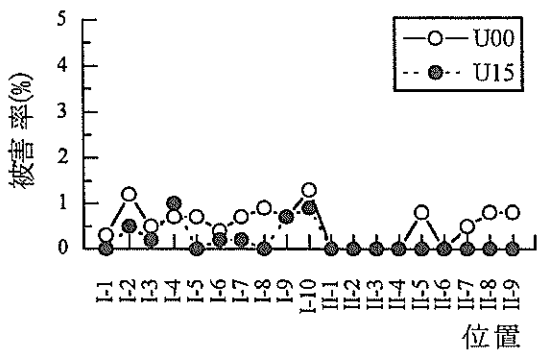


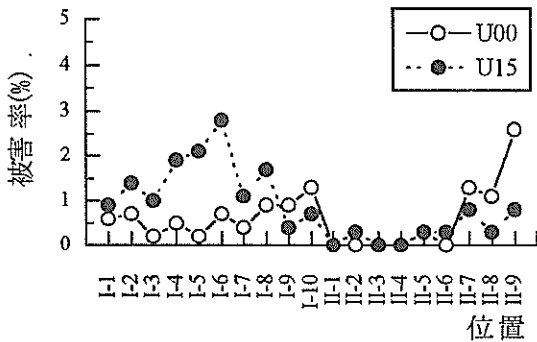
図-25 モデル地形周辺の波高分布
(W25の0度方向一方向不規則波の場合)

った単位幅当たりの越波流量によって護岸直線部との越波流量の多少を議論することは単純にはできない。しかし、底面積が小さいにもかかわらず集水升に貯まる単位時間当たりの越波流量は隅角部の方が多かったため、隅角部における越波は直線部における越波よりも強いと判断できる。図-24は領域AとBの境界にある隅角部周りの異形集水升約53m区間の単位幅当たりの越波流量である。波向や波の周期によらず、多方向不規則波は一方向不規則波よりも多くの越波流量を生じさせている。この原因の一つとして、榊山ら(1994)によって指摘されている隅角部から発生する回折波の影響が考えられる。図-25は図-14に示したヘルムホルツ方程式(三井・村上, 1967)に基づいて計算した実験地形周りの波高分布を3次元的に表示し直したものであり、周辺境界DとEからの反射波を考慮した0度方向の一方向不規則波の計算ケースである。波高分布において領域Bのほぼ中央部分の波高が他に比べて高くなっているのは、その近傍にある2つの隅角部から発生した回折波の影響であると考えられ、この回折波が隅角部付近の越波流量を増大させる一因と考えられる。

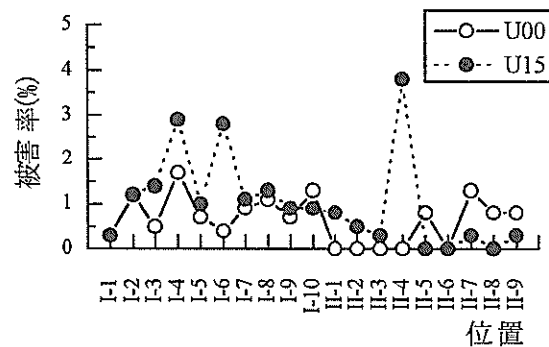
隅角部において越波流量が増大する別の要因には、多方向不規則波を構成する成分波の中で護岸に直角に近い角度で入射する成分波の影響が考えられる。対象とした隅角部には波は20~40度の範囲の入射角で来襲する。この入射角の範囲では、前述したように多方向不規則波の方が一方向不規則波よりも強い越波を引き起こす。具体的には、対象とした隅角部に領域A側から越波する波の入射角は25度であるため、それによる越波流量は多方向不規則波であっても一方向不規則波とほぼ同等になる。しかし、それと同時に領域B側からも隅角部に越波する。この波の入射角は38度であるため多方向不規則波の方



(a) W15の場合

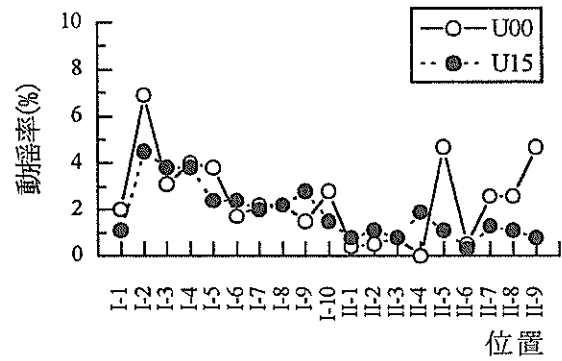


(b) W25の場合

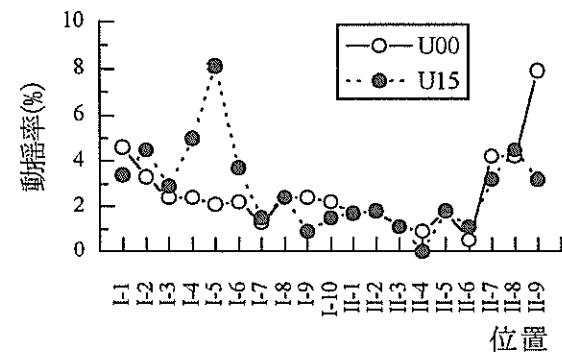


(c) W35の場合

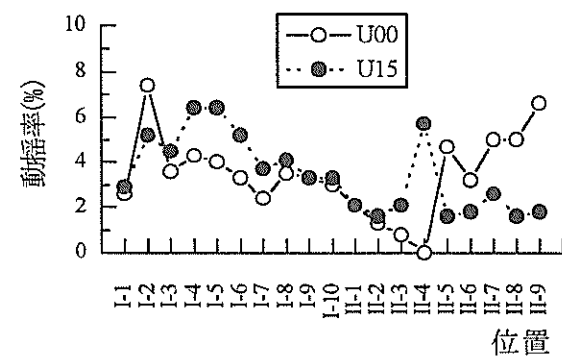
図-26 消波ブロックの被害率



(a) W15の場合



(b) W25の場合



(c) W35の場合

図-27 消波ブロックの動揺率

が一方不規則波よりも多くの越波流量を発生させる。このため、多方向不規則波による隅角部での越波流量は多くなる。したがって、隅角部付近では、隅角部を構成する2面のそれぞれに作用する波の入射角によって多方向不規則波の方が多くの越波流量を生じさせる危険性があると考えられる。

5. 消波ブロックの耐波安定性

図-1 に示した護岸区域 I-1~I-10 および II-1~II-9 毎に被害率（各区域内の全体のブロック数に対する移動ブ

ロックの数の百分率）および動揺率（各区域内の全体のブロック数に対する動揺ブロックの数の百分率）を算出した。ここに、移動ブロックとは、波の作用により元の位置からブロックの大きさの 1/2 以上移動するもの、波の作用により隣接するブロックの高さ以上にめくれあがるもの、波の作用により 45 度以上回転したものである。また、動揺ブロックは、移動ブロックも含めて波の作用により少しでも動揺したブロックのことである。

波の周期毎に最大波高まで作用させたときの護岸区域毎の被害率(%)および動揺率(%)を図-26 と 27 示す。なお、図に示した区域毎の被害率や動揺率は、作用させた

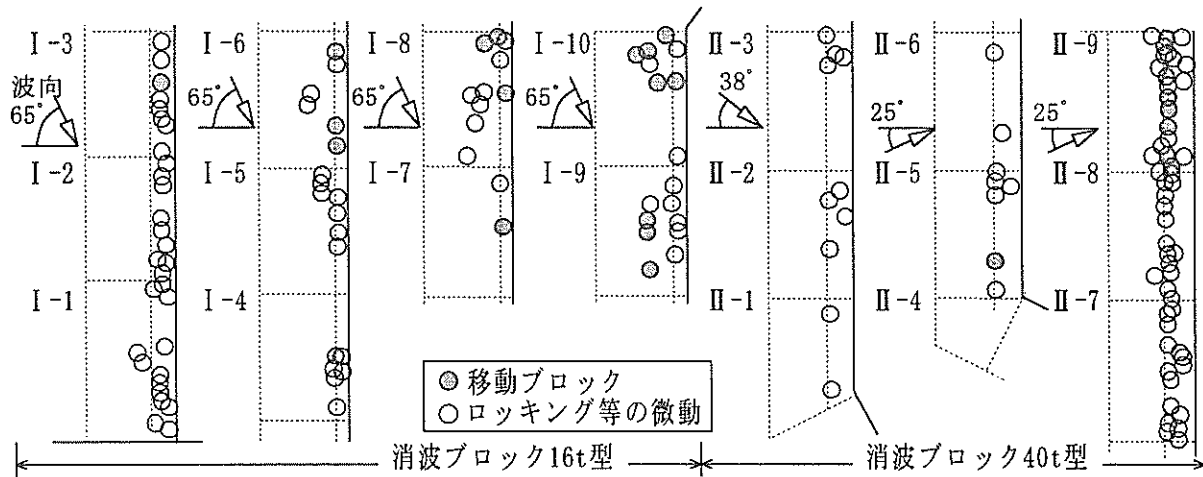


図-28 移動・動揺した消波ブロックの位置

3 波群のうち最も被害率や動揺率が大きくなったケースの値である。また、図-28 にブロックの移動状況を示す。被害率や動揺率をみると、40 トン型消波ブロックを使ったモデル地形沖側や地形切り欠き部分の区域 II-1~II-9 の範囲では、0 度方向波（図-26 と 27 中の U00）が作用した場合の区域 II-9 においてブロックの安定性が比較的悪い。この区域は 40 トン型消波ブロックによる護岸の端部であり、その右側に隣接する護岸の消波工は捨石による断面の小さなものである。このため、区域 II-9 の右隣では小さな断面の捨石護岸を覆うように 40 トン型消波ブロックを乱積みしている。実験の観察によると、大きな波の作用時に、その覆い被さった部分のブロックが最初に移動し始め、波の作用時間の増大にともなってブロックが移動・動揺する範囲が左側の対象護岸の方に拡大していった。このことから、護岸端部における護岸断面の不連続が被害率や動揺率を増大させた理由であると考えられる。

また、0 度方向波が作用する場合のモデル地形の隅角部付近の区域 II-5 や 15 度方向波（図中の U15）が作用するときの隅角部を取り巻く区域 II-4（とくに作用波の周期が長い場合）もブロックの安定性が比較的良好でない。防波堤の場合には、その堤頭部では堤幹部よりも作用波力が大きくなること木村ら(1997)によって報告されている。防波堤堤頭部と護岸隅角部との間には構造物背後に回り込む波の程度の差異はあるが、本実験における隅角部付近のブロックの耐波安定性の低下も防波堤の背後に回り込む波の作用による波力の増大機構と同様に、消波工の側面方向からの波の作用に起因しているのかもしれない。

16 トン型消波ブロックを使用したモデル地形の側面

の区域 (I-1~I-10) では、40 トン型ブロックを使用した区域よりもブロックの安定性が全体的に悪く、0 度方向波が作用する場合には区域 I-10 で、15 度方向波の場合には区域 I-4~I-6 辺りでとくに安定性が良くない。区域 I-10 は 16 トン型消波ブロックによる護岸の端部であるため、0 度方向からの波のように消波工の側方から作用する波に対してブロックの安定性が低減したと考えられる。また、区域 I-4~I-6 は領域 C の中程の位置であり、そこは 15 度方向波が作用する場合に越波流量が多い位置に相当している（図-19(b)参照）。動揺したり移動したりしたブロックの断面方向における位置は、図-28 に示すように消波工の天端から静水面までの範囲に多く、とくに護岸パラペット（図-28 中の太い実線の位置にある）に接する部分のブロックの多くが動揺している。この位置のブロックは他の位置のブロックよりも噛み合わせによる安定性が低いために、越波が頻繁に起こるようなところで動揺しやすくなったと考えられる。これと同様に、0 度方向波が作用するときに隅角部近くでブロックの安定性の良くない区域 II-5 も越波流量が多いところ（図-19(a)参照）となっている。これらのことは、護岸の直線部分や隅角部によらず、越波が厳しい場所における消波工天端にあるブロックには十分な配慮が必要であることを示唆している。

6. 結論

海上空港のように地形的に凸型隅角部があるような陸域を波に作用から防護する消波ブロック被覆式護岸を対象にして、来襲波の波向や多方向性を考慮しながら消波護岸の断面を場所的に変化させた平面模型実験を行って、

消波ブロック被覆式護岸の越波特性やブロックの耐波安定性に関して、以下のような主要な結論を得た。

- 1) 凸型隅角部に多方向不規則波が作用すると一方向不規則波の場合よりも越波流量が増大する場合がある。この現象には、凸型隅角部で発生する回折波や隅角部を構成する2つの面から直角に近い角度で入射する多方向不規則波中の成分波が寄与している。
- 2) 一方向不規則波による越波は護岸に入射する角度に強く依存して、波が斜めに入射するほど越波流量は減少する。しかし、多方向不規則波の場合には、波の多方向性に起因して主波向が護岸に対して斜め方向になっても一方向不規則波の場合ほど越波流量は低減しない。
- 3) 護岸に対して主波向が斜めの多方向不規則波の場合には、入射角によっては一方向不規則波よりも越波流量が増大することがある。
- 4) 消波ブロック被覆式護岸の端部では、護岸断面の側面方向から波の作用を受けるため消波ブロックの安定性は良くない。また、越波が頻繁に起こるような場所では、消波工の天端にある消波ブロックが動きやすくなる。

7. あとがき

護岸前面の波の方向分散性と越波流量の関係については検討する余地が残されており、水槽実験において詳細な波浪データを計測して実験的にこの課題を解決する必要があると思われる。しかし、波の方向分散性を解析できるような波浪データを平面的に多数の点で計測することは困難であることが多いので、数値実験による検討も有用であろう。その際に注意することは、構造物による波の部分反射の問題である。構造物前面における部分重複波の特性、とくに波高分布を再現するためには、構造物の反射率を単に合わせるだけでは十分でなく、越波のように構造物の直ぐ近くで生じる問題では入射波と反射波の位相関係も重要となるため、この点への配慮が必要であると思われる。

最後に実験の実施に当たり第三港湾建設局神戸調査設計事務所の協力を得ました。ここに、謝意を表します。

(2000年8月31日受付)

参考文献

井上雅夫・土屋義人(1971)：斜め入射波による鉛直堤の越波に関する実験的研究，第18回海岸工学講演会

論文集，pp.259-264.

木村克俊・上久保勝美・坂本洋一・小野雄三・竹田英章・林倫史(1997)：消波ブロック被覆堤の堤頭部におけるブロックの耐波安定性，海岸工学論文集，第44巻，pp.956-960.

合田良実(1975)：浅海域における波浪の砕波変形，港湾技術研究所報告，第14巻，第3号，pp.59-106.

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，港湾技術資料，No.248，24p.

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，333p.

榊山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩(1994)：多方向不規則波に対する人工島防波護岸の越波特性と耐波特性，海岸工学論文集，第41巻，pp.656-660.

富田孝史・河合尚男・平石哲也・朝信英明・松葉秀樹・海原敏明(1999)：複合断面消波護岸の越波特性，海岸工学論文集，第46巻，pp.751-755.

平石哲也・望月徳雄・佐藤一央・丸山晴広・金澤 剛・榊本達也(1996)：護岸越波量における波の多方向性の影響，港湾技術研究所報告，第35巻，第1号，pp.39-64.

三井 宏・村上仁士(1967)：海岸構造物不連続部の波高分布について(第2報)－隅角部付近の波高分布－，第14回海岸工学講演会論文集，pp.53-59.

目見田 哲・酒井哲郎(1999)：構造物沿いの斜め入射波の発達における入射波の非線形性および方向分散性の評価，海岸工学論文集，第46巻，pp.226-230.

de Waal, J. P. and van der Meer, J. W. (1992)：Wave Runup and Overtopping on Coastal Structures, *Proc. 23rd Int. Conf. Coastal Eng.*, Vol. 2, pp.1758-1771.

Franco, C. (1995)：3-D Wave Overtopping on Caisson Breakwater, *Hydra2000*, Vol. 5, pp.43-48.

港湾技研資料 No. 968

2000. 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 有限会社つばさ印刷技研

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

Copyright ©(2000) 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。