

隅角部を有する消波ブロック被覆式護岸の多方向不規則波による 越波特性とブロックの安定性

富田 孝 史*・河 合 尚 男**・海 原 敏 明***・平 石 哲 也****

1. 緒 言

海上空港の新規建設や拡張にともなって空港護岸の建設計画が増大している。海上空港は臨海部の埋め立て地や沖合に造成した人工島の上に建設されるので、空港の外周護岸は凸状隅角部を有することが多い。また、海上空港の沖合への展開にともなって空港護岸の設置水深が深くなると、護岸には多方向性の波浪が作用するようになる。しかしながら、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や消波ブロックの耐波安定性については十分に明らかにされているとは言い難い。

隅角部を有する護岸に多方向不規則波が作用したときの越波特性や消波ブロックの安定性は榊山ら (1994) によって検討されている。また、波浪が護岸に直角に入射する場合には一方向不規則波に比べて多方向不規則波による越波流量は低減することが指摘されている (平石ら, 1996)。しかし、凸状隅角部に斜めに多方向不規則波が作用する場合の越波特性やブロックの安定性などについて未解明の部分が多いのが現状であり、さらにデータの収集が必要である。本研究では、三次元水槽内にモデル地形を作成し、一方向不規則波および多方向不規則波を作用させた場合の、隅角部を有する護岸の越波特性や消波ブロックの耐波安定性を実験的に検討した。

2. 水理模型実験

水理模型実験は運輸省港湾技術研究所の長さ 37 m, 幅 25 m, 深さ 2 m の切れ波水槽で行った。水槽内には多方向不規則波造波装置が 2 台設置されているが、本実験では縮尺 1/50 のモデル地形を図-1 に示すように水槽内に配置したので、図-1 中の上方にある造波装置のみを使用して実験した。実験で対象としたのは図-1 に示した A~C の領域であり、そこには二つの凸状隅角部が含まれる。実験では図に示した水深に潮位 3.6 m (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くなる領域 A と B の境界付近では水深が

12.1 m になる。

領域 A~C に設置す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護岸断面を使って断面実験や平面実験を予め行った (富田ら, 1999)。その結果から、後述するような 0 度方向からの作用波に対してブロックの安定性が確保されており、越波流量が $0.02 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ を越えないような消波護岸断面を選定した。具体的には、領域 A と B では図-2 (a) に示すような 40 トン型消波ブロックを使用した断面、領域 C では同図 (b) に示すような 16 トン型消波ブロックによる断面を使用した。後述する波諸元を使った断面実験の結果では、40 トン型ブロック護岸の被害率は 0 %, 16 トン型ブロックの方は 3 % 以下であった。領域 A の右側と領域 C の左側に隣接する護岸には捨石による消波工を取り付けた。領域 C の左側の隣接護岸からの反射波は領域 C に影響を及ぼすので、予備実験を行って反射率を推定したところ約 0.4 であった。

実験では越波を計測する実験とブロックの安定性を調べる実験を別々に行った。越波実験では、護岸の背後に越波水を集めるための集水升を前後 2 列に配置し、計測時間内に集水升に貯まった水量から護岸単位幅当たりの越波流量を算定した。集水升には底面が $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ (現地換算値) のペイント塗装した木製の箱を主に使用したが、隅角部付近では地形に合わせた形のものを使用した。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

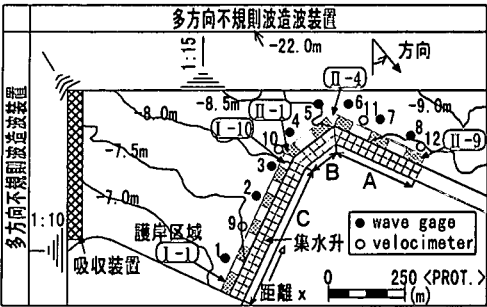
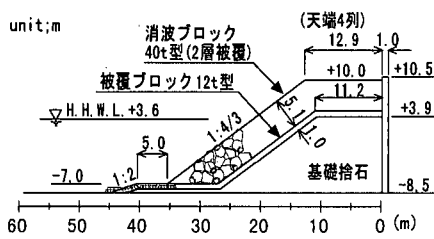
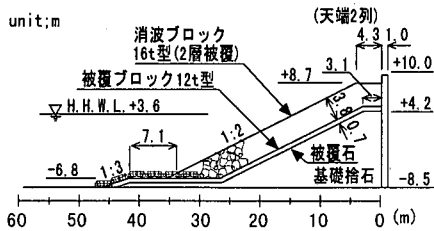


図-1 平面模型実験の概要

* 正会員 博(工) 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官
** 運輸省第五港湾建設局三河港湾工事事務所 (株)エコー
*** 正会員
**** 正会員 工 博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長



(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

図一2 使用した消波ブロック被覆式護岸の断面形状

表一 作用波の諸元

記号	周期 $T_{1/3}$ (s)	波高 $H_{1/3}$ (m)	記号	周期 $T_{1/3}$ (s)	波高 $H_{1/3}$ (m)
W11	10.0	2.2	W31	14.0	3.1
W12		3.2	W32		4.1
* W13		4.2	* W31		3.1
* W14		5.2	* W31		6.1
* W15		6.2	* W35		7.1
W21	12.2	2.9	* は越波実験で使用した波を示す。		
W22		3.9			
* W23		4.9			
* W24		5.9			
* W25		6.9			

はメスシリンダーで越波量を直接測った。作用波は表一に示す有義波周期 $T_{1/3}$ と有義波高 $H_{1/3}$ の一方向不規則波と多方向不規則波である。波向は2種類で、造波装置から波向を斜めにするのではなく真っ直ぐに一方向波を造波したときの方向（0度方向と定義する）と、造波装置前面の斜面を登りきって対象となる海底地形に達したときに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、主波向がこれらの方向になるようにした。なお、屈折計算によると対象とした海底地形による波向の変化は非常に小さかったので、0度方向波は、領域A～Cのそれぞれに25度、38度および65度で入射する（入射角は護岸に対して直角に入射する場合を0度とした）。また、15度方向波の

場合には、それぞれの領域に40度、23度および50度の角度で入射する。また、多方向不規則波の方向集中度 S_{max} は造波装置位置において10となるように設定した。作用波数は、200波程度とし、波群特性を3種類変えた。

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、表一に示した波高の小さい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。波の作用数は越波実験よりも多くして600波程度とし、波群特性を3種類変化させた。ただし、この実験では一方向不規則波を対象とした。ブロック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、護岸周辺を図一1の区域I-1～II-9のように分割した。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と定義した。

3. 越波特性

図一3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)をとりあげて、越波流量 q 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いる。図中、 X は図一1に示すように護岸に沿った距離である。波向の影響が、一方向不規則波の結果に顕著に現れている。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、一方向不規則波の場合よりも波向の影響は強くない。

入射角 θ と越波流量 q の関係を図一4に示す。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。一方向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は、波の多方向性の影響のためかデータがばらついているが、一方向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、一方向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。

図一5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_{mul} 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）。

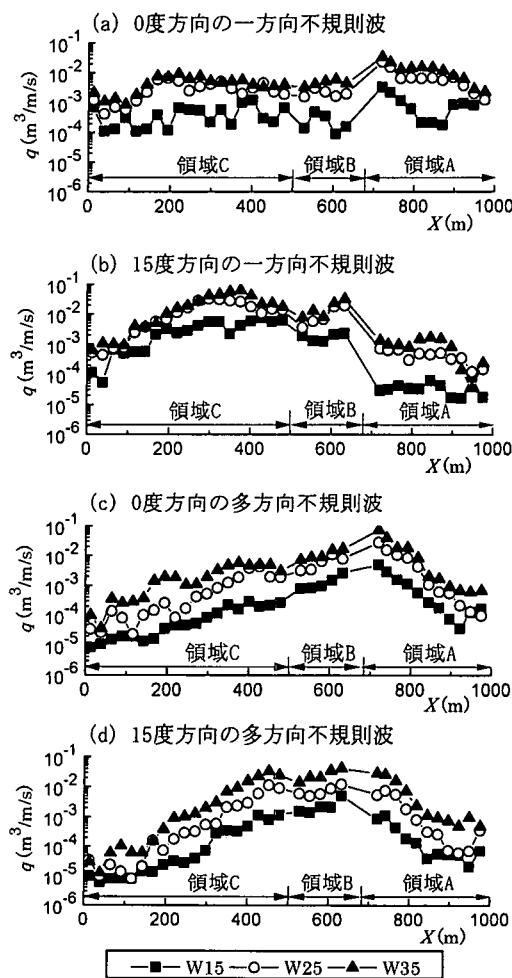
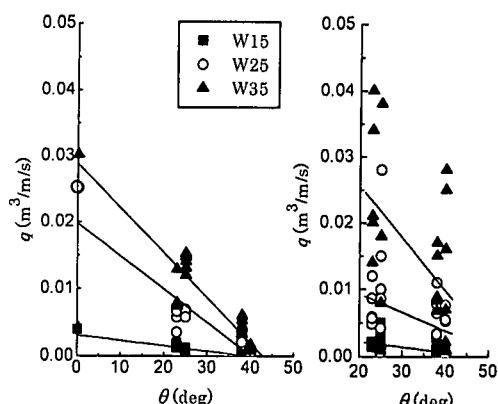


図-3 越波流量の沿岸分布

しかし、斜め入射する場合には、図-5 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。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方向不規則波によるものとほぼ同等であるが、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。この特性については、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ろう。

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ので、



(a) 一方方向不規則波 (b) 多方向不規則波

図-4 入射角と越波流量の関係

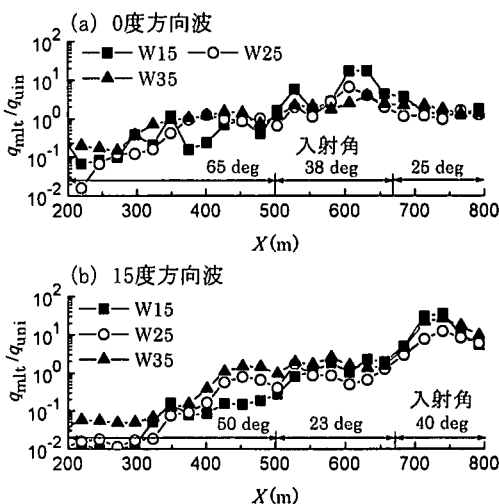


図-5 多方向不規則波と一方方向不規則波による越波流量の比較

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-6は領域AとBの境にある隅角部周りの約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-7は、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示している。数値計算では25mの正方形メッシュを使用し、計算モデルの制約のために直立消波護岸を使用した。同図(a)で領域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、その近傍にある二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

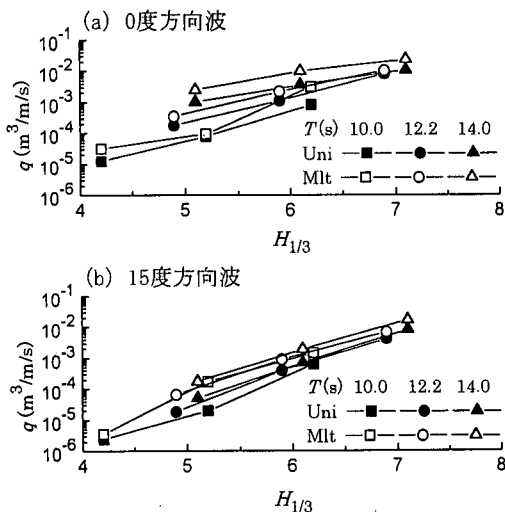


図-6 隅角部における越波流量

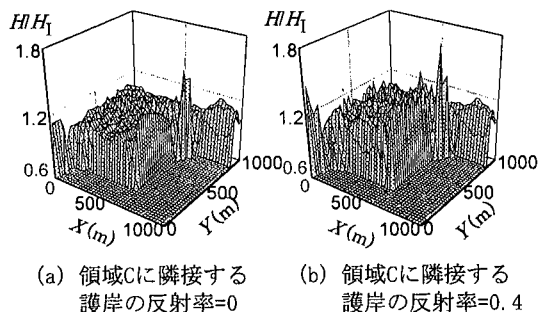


図-7 護岸周辺の波高分布：0度方向の一方不規則波、W25の場合

を増大させる一因と考えられる。なお、同図(b)は領域Cの左側に隣接する護岸の反射率を水槽実験に合わせて0.4とした場合である。隣接護岸の反射率を0とした同図(a)と比べると、領域CやBにおける越波は隣接護岸からの反射波の影響を受けていることが指摘できる。

隅角部において越波流量が増大する別の原因には、多方向不規則波を構成する成分波の中の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。この隅角部には波は20～40度の範囲の入射角で来襲するので、前述したように多方向不規則波の方が一方不規則波よりも強い越波を引き起こしていることが推察される。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度であるので、それによる越波流量は多方向不規則波であっても一方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度であるので多方向不規則波の方が一方不規則波よりも多くの越波流量を発生させる。したがっ

て、隅角部付近では、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。

護岸背後に配置した二列の集水升の前後で越波流量を比較した結果、図示はしないが、護岸直後の25m以内の範囲に全越波流量の90%以上が貯まることが明らかとなった。

4. 消波ブロックの耐波安定性

図-1に示した護岸区域毎に被害率（区域内の全体のブロック数に対する移動したブロック数の比率）を算出した。図-8に区間毎の被害率の代表例を示す。また、図-9にブロックの移動状況を示す。40トン型消波ブロックを使った範囲のうちでは区域II-9においてブロックの安定性が相対的に悪い。ここは空港護岸の端部で、隣接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、その断面の小さな捨石護岸に被さるように40トン型消波ブロックを乱積みした。実験の観察によると、大きな波の作用時に、その取り巻き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移動するブロックの範囲が左側に広がっていった。また、0度方向波の場合の隅角部付近の区域II-5も安定性が相対的によくない。防波堤堤頭部では防波堤背後に回り込む波があるという差異はあるが、本実験における隅角部付近のブロックの安定性の低下もそれと似たような機構によるものなのかもしれない。

16トン型消波ブロックを使用した区域(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は悪い。移動したブロックは、図-9に示されるよ

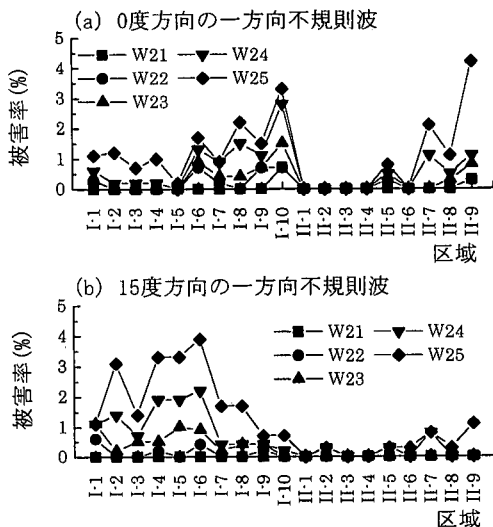


図-8 護岸区域毎のブロックの被害率

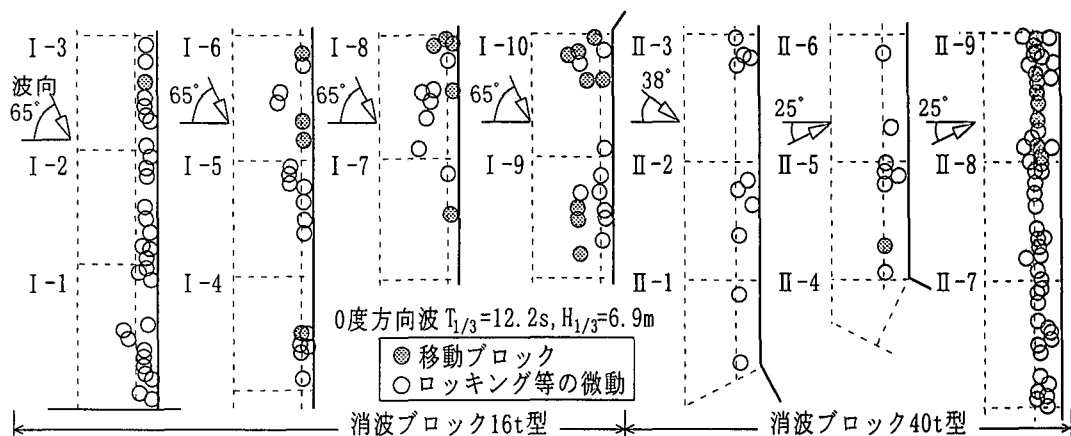


図-9 消波ブロックの移動状況

うに、消波工の天端から静水面までの範囲に多い。とくに護岸パラベット(図-9中の太い実線の位置にある)に接する部分のブロックは、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は挙動しやすくなるようである。

0度方向波と15度方向波の結果を比較してみると、区域I-1~II-3までの領域B~Cに対応する範囲では15度方向波の場合の方が被害率は大きく、逆に領域Aに対応する区域II-5~II-9までの範囲では0度方向波の場合の方がブロックの安定性は相対的によくない。このことから、入射角が小さくなって直角入射に近づくほどブロックは挙動しやすくなり被害率も増大する傾向にあることが指摘できる。

5. 結 論

海上空港護岸を対象にして、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した平面模型実験を行うことによって、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) 凸状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。この現象には、凸状隅角部からの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を構成する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ほど越波流量の低減はない。

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) 護岸に来襲する波の入射角が小さくなって直角入射に近づくほどブロックは挙動しやすくなり被害率も増大する。

5) 断面実験ではブロックが安定していた護岸でも、平面実験では消波工の断面形状が平面的に不連続になる場所や消波工の天端付近でブロックが移動した。このため、護岸直線部における護岸断面の大きな変化は危険である。

参 考 文 献

- 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.
- 榊山 勉・鹿島遼一・窪 泰浩 (1994): 多方向不規則波に対する人工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・丸山昭広・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)一隅角部付近の波高分布一, 第14回海岸工学講演会論文集, pp. 53-59.