

ブロック積み防波堤の波高伝達率に関する実験的研究

服部 昌太郎*・堺 和 彦**

1. ま え が き

人工ブロックを使用した捨石防波構造物は、防波堤として従来より数多く建設されて来たが、近年では、マリーナや人工漁場などの外郭施設としても使用されている。ブロック積み捨石構造物は消波または波高減衰効果がすぐれているため、潜堤や離岸堤として海岸侵食防止にも使用されている。特に、最近では、離岸堤の天端高さを、設置地点での期望平均満潮位より入射波の半波高程度の高さとする、比較的天端の高い離岸堤が建設される傾向が見られる¹⁾。

ブロック積み捨石防波堤に関しては、ブロックの安定性、波力の減殺効果、うちあげ高さや越波量など、従来より数多くの研究がなされている²⁾。

ブロック積み捨石構造物は、入射波エネルギーの一部を、その背後の水域内に透過させるため、背後水域内での漂砂移動や海水交換に関連した流況の解明および背後地の護岸などの施設の設計に当っては、透過波の諸特性を算定する必要がある。透過性構造物としてのブロック積み防波堤の利用が高まるにつれて、近年、捨石およびブロックなどによる透過性構造物の波高伝達率に着目した、理論的、実験的研究^{3),4),5),6),7)}が数多くなされている。しかし、ブロック積み防波堤の波高伝達率は、入射波の特性、堤体形状などその他数多くの要因が関係するため、伝達波高を推定しうる基本的な資料をうるには、まだ至っていないものと思われる。

そこで、本報では、現在広く採用されていると考えられる代表的な2種類のブロック積み防波堤の断面を選び、波高伝達率に関する基礎的な実験を行なった結果を報告する。

2. 従来の研究

Le Méhaut⁸⁾が指摘しているように、鉛直捨石構造物中を進行する進行波のエネルギー損失には、(1)入射波の特性(波高、周期、水深)、(2)捨石の大きさ、形状、空げき率と、(3)構造物の幅が関係する。また、ブロック積み防波堤では、上記のもの以外に、防波堤の天端高、のり面の勾配と表面粗度も関係する。このよう

に、数多くの要因が関係する、ブロック積み防波堤の波高伝達率を解析的に計算することは、非常に困難である。

富永・坂本⁹⁾および井島ら¹⁰⁾は、速度ポテンシャルをもつ微小振幅波を考え、また透過性構造物の流体運動に対する抵抗を流速に比例すると仮定して、それぞれ鉛直捨石構造物の透過率と反射率とを計算している。また、近藤¹¹⁾は、透過層内を進行する長波の理論と、不連続面でのエネルギーおよび質量の保存則と水圧強度の連続とにより、透過性構造物内の進行波の変形を計算し、その結果を応用して、鉛直透過性防波堤の波高透過率を計算した。これらの理論計算で仮定した透過性構造物内での抵抗則は、透過層内の流れが乱流である場合には適用しえないため、実験などによって計算に導入された抵抗係数を検討している。

ブロック積み防波堤の波高伝達に関する実験は、岩崎・沼田が行なっている¹²⁾。岩崎らは、長さ46.0m、幅1.0m、深さ1.5mの2次元波動水槽内に作られた海底地形(平均海底勾配1/11.6)上に、テトラポッドを使用した3種類のブロック積み防波堤模型を設置して、実験を行なった。その結果、相対天端高さが $h_c/H_I > 1.0$ の場合には、波高伝達率は入射波の波形勾配によって一義的に関係づけられるが、 $h_c/H_I < 1.0$ の場合には、 h_o に関する Reynolds 数にも関係することを示した。久保らは、捨石堤の越波量と伝達波高との関係について実験を行なっている¹³⁾。上記のもの以外に、人工ブロックの特性を調べる実験の一部として2、3の研究で波高伝達率に関する実験が行なわれている。

3. 実験装置と実験方法

実験は、長さ30m、幅0.8m、高さ0.7mの片面ガラス張りの2次元波動水槽を使用して行なった。図-1に示す実験装置の一般的配置に見られるように、波動水槽の一端にはフラップ式造波装置、他端には反射防止用の消波斜面が設置されている。

実験に使用する模型ブロック積み防波堤は、すでに2で述べた理由から、表-1に示す型状と空げき率が異なる2種類の模型ブロックを使用して、図-2に見られる2種類の防波堤断面(のり面勾配1:1.3と1:1)のものとする。首藤ら¹⁴⁾は、人工ブロックの抵抗則を検討

* 正会員 工博 中央大学教授 理工学部 土木工学科

** 正会員 工修 中央大学助手 理工学部 土木工学科

堤体の反射率は Healy の方法によって算出する。ブロック積み防波堤への入射波のうちあげ高さおよび越波の状態は、ビデオレコーダーを使用して記録し、堤体面上の流況を解析した。

実験は、平均水面より防波堤天端までの鉛直距離 h_0 と平均水面をよぎる堤体幅 B とを変化させるため (図-2 参照)、水深を変化させ、また各実験条件下での相対水深 h/L を等しくするように入射波の周期を設定して行なった。表-2 は、本実験での実験条件を一括表示したものである。

4. 実験結果とその考察

ブロック積み防波堤の波高伝達には、3 種類の形態が存在することが認められた。すなわち、(1) 入射波が防波堤に達するとのり面上をはい上がる。その先端が防波堤天端に達するまでは、防波堤背後への伝達エネルギーは堤体中を透過してゆく。(2) 入射波高が増大すると入射波のうちあげ高さが防波堤天端を越え、この状態より防波堤背後への波高伝達率は増大する。しかし、この状態では、入射波の実質部分が防波堤背後に直接流入することがないため、伝達波の波形は何らじょう乱は受けない。(3) 入射波の波高がなお増大すると、入射波は防波堤を完全に越波し、伝達波の波形は非常に乱れ、防波堤の波高伝達率および反射率は若干減少することが認められる。そこで、本報においては、防波堤の波高伝達機構が変化する (2) と (3) の状態のことを、「越波の状態」として表現することにする。

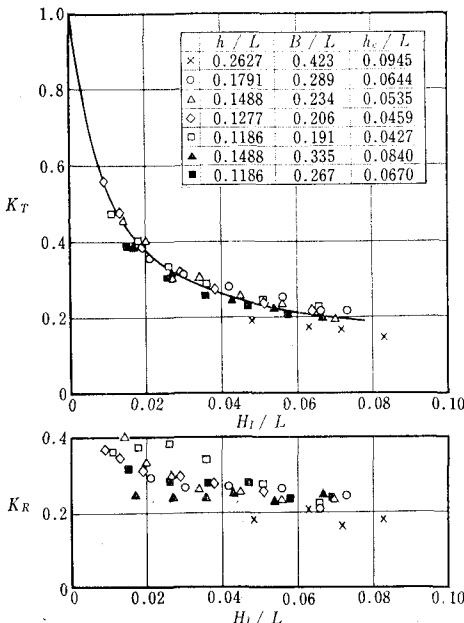


図-3 入射波波形勾配と伝達率および反射率 (Exp. 1 & 2) (ブロック A, のり面勾配 1:1.3)

図-3 と 図-5~8 は、ブロック積み防波堤の波高伝達率および反射率と入射波波形勾配との関係を、相対水深をパラメーターとして示した実験結果である。

図-3 は、越波による波高伝達率の変化が生じない場合の実験結果である。この実験結果に見られるように、ブロック積み防波堤の形状、特性が一定であれば、相対水深が $h/L = 0.2627$ (入射波周期 1.0 sec) の場合を除くと、防波堤の波高伝達率は h/L などの値に関係なく、入射波の波形勾配によって定まることが認められる。これは、

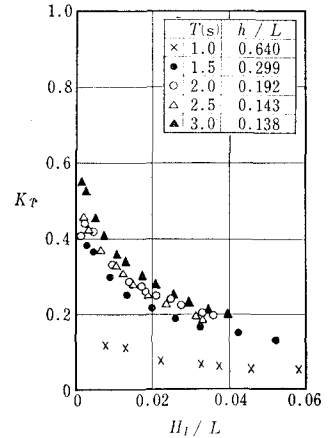


図-4 入射波波形勾配と伝達率 (Le Méhauté の鉛直捨石堤の実験) (Essai No. 14~18, $h=100$ cm, $B=44$ cm, 捨石粒径 5.9 cm, 空けき率 40% の場合)

ブロック積み防波堤の水深方向の平均幅 $\bar{B}$ と入射波の波長との比 $\bar{B}/L$ の値が、水深変化によってあまり大きく変化していないことに関係するものと考えられる。図-4 は、Le Méhauté の鉛直捨石堤の実験結果¹⁵⁾を、図-3 と同様の表示で整理したものの一例で、この図よりも図-3 と同じ傾向が波高伝達率と入射波波形勾配との間に認められる。図-3 と 4 に共通して認められることは、入射波周期が 1 sec の場合の波高伝達率が、周期 1 sec 以上の場合に比べて相当程度小さい値を示していることである。この原因については今後検討する必要があるが、透過層の幅が入射波の 1/4 波長と同程度となると、後続波による水位降下によって、波高伝達率が低下すると考えることができる。図-3 および 4 の実験結果は、捨石防波堤の実験を行なう場合、周期が 1 sec 以上の実験波によって行なう必要があることを示唆しているものと考えられる。

図-5~8 は、越波による波高伝達率の変化が発生する場合の実験結果である。ブロック A を用いた、のり面勾配が 1:1.3 の場合の実験結果 図-5 と 6 には、図-3 の実験結果を実線で記入してある。図-5 と 6 の実験結果に見られるように、越波を生じない場合の波高伝達率は、図-3 の実験結果と一致するが、越波が生ずると、防波堤の波高伝達率は、図中の破線に示されるようにいったん増大し、防波堤天端付近で入射波が碎波するような状態となると、波高伝達率は再び減少する。一方、防波堤の反射率は、入射波の波形勾配が増大するにつれて減少するが、越波を生ずる状態になると、反射率

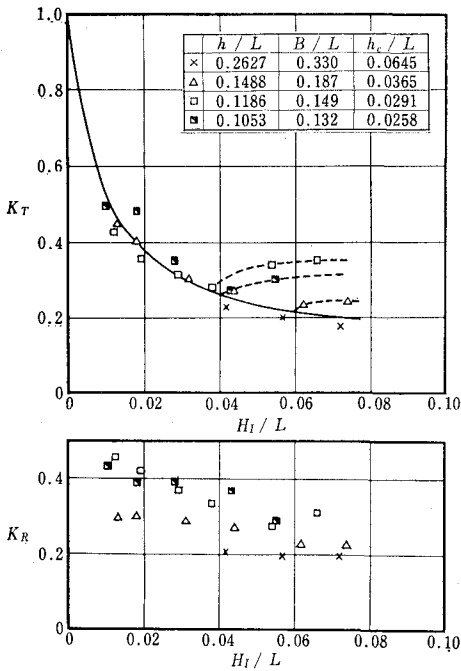


図-5 入射波波形勾配と伝達率および反射率 (越波の状態が発生する場合, Exp. 3, ブロック A, のり面勾配 1:1.3)

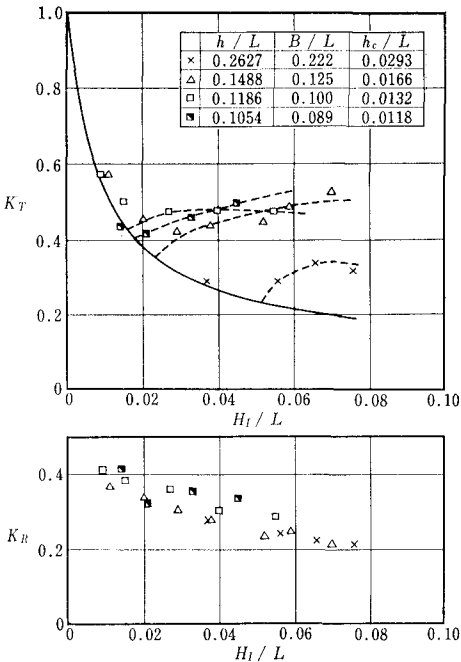


図-6 入射波波形勾配と伝達率および反射率 (越波の状態が発生する場合, Exp. 4, ブロック A, のり面勾配 1:1.3)

はより減少することが認められる。

図-7 は A ブロックを使用した, のり面勾配が 1:1 の場合, 図-8 は B ブロックを使用した, のり面勾配が

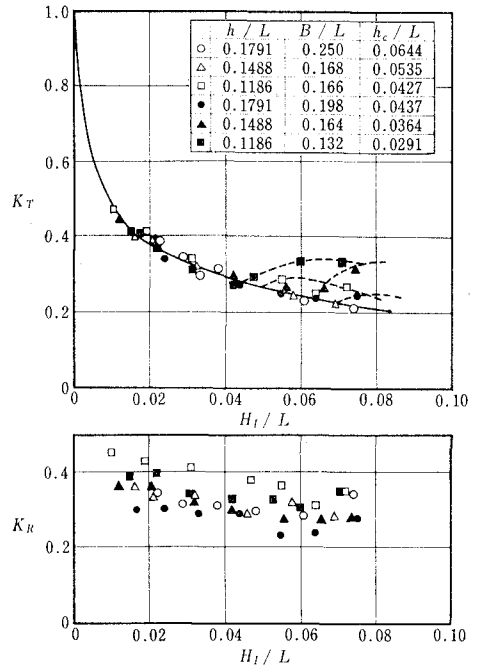


図-7 入射波波形勾配と伝達率および反射率 (越流の状態が発生する場合, Exp.5 & 6, ブロック A, のり面勾配 1:1)

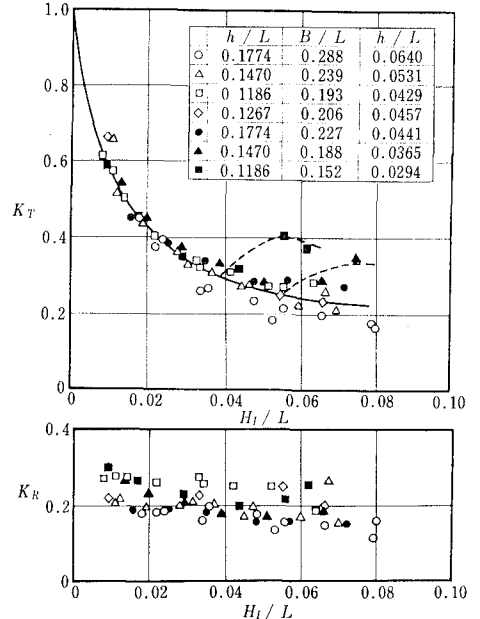


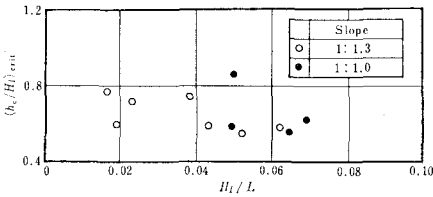
図-8 入射波波形勾配と伝達率および反射率 (越流の状態が発生する場合, Exp. 7 & 8, ブロック B, のり面勾配 1:1.3)

1:1.3 の場合の実験結果で, 図-3~6 の実験結果と同様の事柄が認められる。

ブロック積み防波堤の, のり面勾配および空げき率が波高伝達率におよぼす効果は, 図-3 と 6 および 図-3

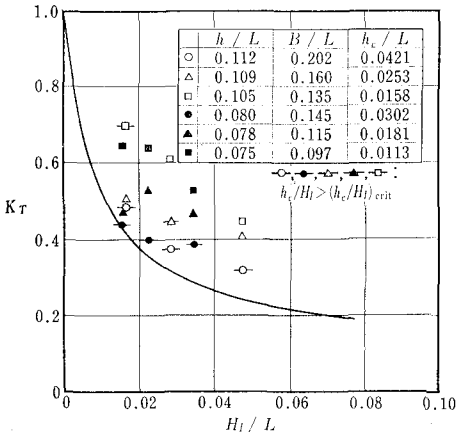
と8との比較よりそれぞれ検討しうる。本実験の結果によると、防波堤のり面勾配がゆるくなるか、堤体の空き率が減少すると、波高伝達率は若干減少することが認められた。防波堤のり面上へのうちあげ高さの測定結果によると、のり面勾配が1:1.3の場合は1:1の場合よりも、堤体面上へのうちあげ高さが減少していることが認められ、この結果波高伝達率が減ずるものと考えられる。

図—5~8より、平均水位が高まると越波の状態が発生する入射波波形勾配は減少することが認められる。いま、越波の状態が発生するブロック積み防波堤の入射波高に関する相対天端高さを $(h_o/H_I)_{crit}$ で表わし、入射波波形勾配との関係を、図—5~8より読みとって示したものが、図—9である。この図に見られるように、入射波の波形勾配が増大すると、 $(h_o/H_I)_{crit}$ の値は若干減少する傾向が見られる。本実験の範囲内では、 $0.6 < (h_o/H_I)_{crit} < 0.8$ で越波の状態が発生しはじめる。岩崎らは、ブロック積み防波堤の波高伝達率は $h_o/H_I < 1.0$ の場合に、入射波波形勾配と Reynolds 数とに関係することを指摘しているが、本研究の考えによって岩崎らの



図—9 越波の状態が発生しはじめる時の $(h_o/H_I)_{crit}$ と入射波波形勾配との関係

実験結果¹⁶⁾を書直したものが、図—10である。また、図—10には本研究の非越波時の実験結果を実線で記入してある。図—10に見られるように、実験結果のばらつきはあるが、岩崎らの実験結果でも越波の状態でない

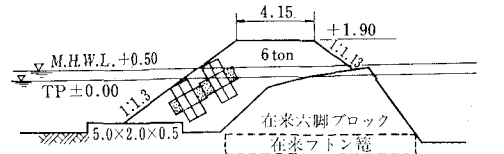


図—10 岩崎・沼田の実験結果

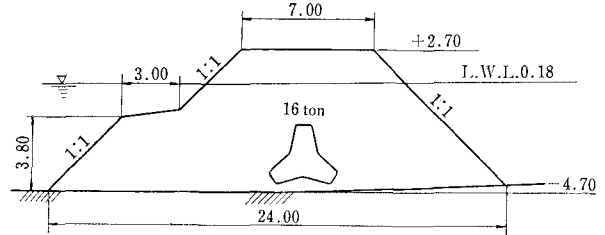
と思われる実験結果は、本研究の結果と類似の傾向を示し、越波の状態となっている場合には、 $(h_o/H_I) > (h_o/H_I)_{crit}$ の実験結果より波高伝達率ははずれている。

以上述べて来た、本研究の実験結果中に示される、非越波時 $(h_o/H_I) > (h_o/H_I)_{crit}$ の実験結果 (図—3, 7, 8 中の実線) と図—9の $(h_o/H_I)_{crit}$ と H_I/L との関係より、ブロック積み防波堤の波高伝達率を推定することができる。本実験の範囲で認められた、越波時に生ずる波高伝達率の最大値は、 $h_o/H_I = (h_o/H_I)_{crit}$ における波高伝達率の30~40%増しと認められる。

ブロック積み防波堤のような透過性構造物の波高伝達率に関する実験結果を、実際の防波堤に適用する場合には、当然模型実験の縮尺効果を考慮することが必要とな



(a) 新潟海岸

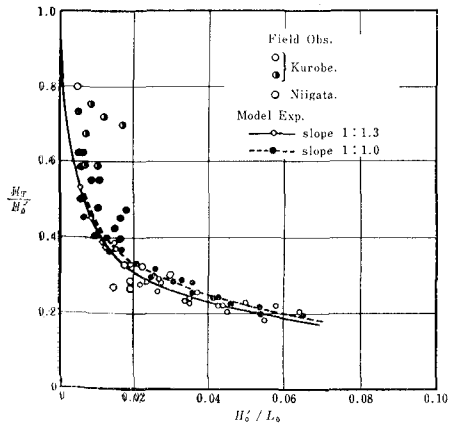


(b) 黒部海岸

図—11 建設省が実測を行なった、黒部、新潟両海岸の離岸堤断面形状

る¹⁷⁾。

ブロック積み防波堤の波浪減殺効果の現地観測は、非常な困難を伴うが、建設省で行なった富山湾沿岸下新川



図—12 波高伝達率の実測値と実験値との比較

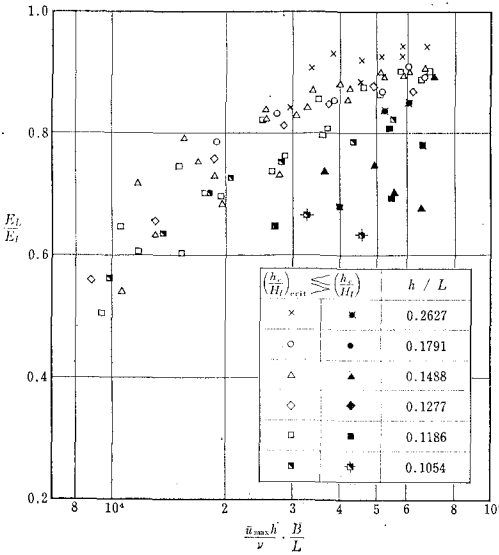


図-13 エネルギー消散率と $(\bar{u}_{max} h / \nu) \cdot (\bar{B}/L)$ との関係 (Exp. 1~4 の場合)

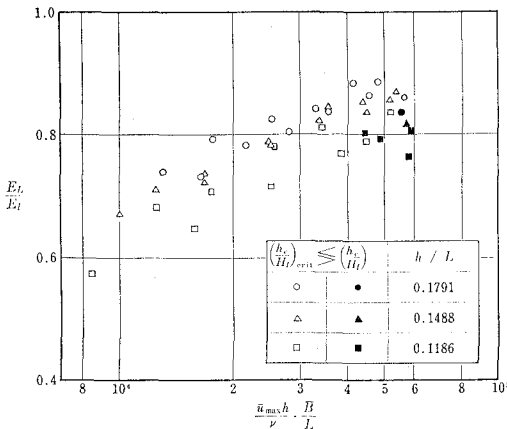


図-14 エネルギー消散率と $(\bar{u}_{max} h / \nu) \cdot (\bar{B}/L)$ との関係 (Exp. 5 & 6 の場合)

海岸赤川離岸堤(黒部)と新潟県金衛町海岸離岸堤(新潟)での現地観測結果¹⁸⁾と本研究の実験結果との比較を行なう。図-11は、現地観測を行なった地点の離岸堤断面形状である。図-11に示す離岸堤断面は、施工時または補修時のものであり、現地観測を行なった時の断面は図-11のものより若干変化していることが想定される¹⁹⁾。

図-12は、現地観測結果と本研究の結果との比較を行なったものである。現地観測結果は、沖波波形勾配 H_0/L_0 と離岸堤背後の水域内の有義波高と沖波有義波高との比 $H_{T, 1/3}/H_{0, 1/3}$ との関係がえられている。図-11の離岸堤断面形状に相当する本研究の実験結果は、図-3および図-7に示されるもので、現地観測結果との比較を行なうため、図-12は、これらの実験結果を H_T/H_0' と

H_0'/L_0 との関係に書き直してある。

図-12に見られるように、現地観測結果には若干のばらつきがあるが、本研究の実験結果との一致の程度はきわめて良好である。今後、より多くの現地観測結果との比較を行なう必要はあるが、本研究の実験結果を縮尺効果を考慮せずに、実際のブロック積み防波堤に適用することができると考える。

また、現地観測結果によると、離岸堤透過後の波の周期は、入射波のそれと比べて若干長くなるが、本実験の範囲内では実験波の周期変化はほとんど認められなかった。

ブロック積み防波堤によるエネルギーの消散率を、実験結果より検討してみる。防波堤上および堤体内で消散するエネルギー E_L と入射波エネルギーとの比を、防波堤のエネルギーの消散率と定義すると、エネルギー消散率は次式より計算される。すなわち、

$$\frac{E_L}{E_I} = 1 - K_T^2 - K_R^2 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 E_I : 入射波の単位幅、一波長当りの波のエネルギー、 K_T と K_R : それぞれ波高伝達率と反射率である。

本研究の実験結果より、ブロック積み防波堤の波高伝達率は、越波の状態を生じない場合には入射波の波形勾配によって定まることが認められた。そこで、入射波の特性およびブロック積み防波堤の形状の効果を考慮した量 $(\bar{u}_{max} h / \nu) (B/L)$ と E_L/E_I との関係を示したものが、図-13~15である。ここに、 $\bar{u}_{max}$ は入射波による水粒子の最大速度の水深方向の平均値で、

$$\bar{u}_{max} = \frac{HL}{2hT} \dots \dots \dots (2)$$

また、 L : 入射波長、 T : 周期、 $\bar{B}$: 平均水位下の防波堤の平均幅、 ν : 水の動粘性係数である。

図-13~15に見られるように、実験値のばらつきがあるが、ブロック積み防波堤でのエネルギー消散率に関しては、入射波に関する Reynolds 数と防波堤の相対平均幅との間に相関があることが認められる。図-13~15中には、越波の状態が発生した後における防波堤でのエネルギー消散率を黒印で示してある。越波の状態が発生すると、防波堤でのエネルギーの消散機構は、発生以前と異なり、防波堤面上での碎波状況、堤体の表面粗度などにも関係し、図-13~15に示されるような簡単な関係で、エネルギー消散率を表わすことができなくなる。

5. 結 論

ブロック積み防波堤の波高伝達は、入射波の特性、防波堤の形状、およびブロックの特性など数多くの要素が関係する複雑な機構である。本研究では、図-2に示す2種類のブロック積み防波堤断面を選定し、形状および

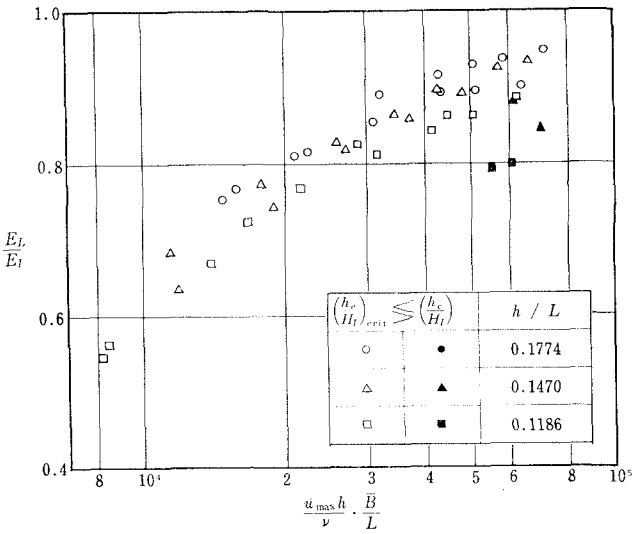


図-15 エネルギー消散率と $(\bar{u}_{max} h / \nu) (\bar{B}/L)$ との関係 (Exp. 7 & 8 の場合)

空げき率の異なる2種類のブロック模型を使用して、波高伝達率に関する実験を行なった。

本研究で認められた主なる事柄は次のようである。

(1) 波高伝達率は、入射波のうちあげ高さが防波堤天端を越えない場合には、相対水深、防波堤の相対堤体幅などに関係せず、入射波の波形勾配によって定まる。入射波のうちあげ高さが防波堤天端を越えると、波高伝達率は増大し、防波堤天端付近で入射波が碎波する状態になると、波高伝達率は入射波波形勾配が増大するに従って、再び減少する。

(2) 越波の状態が発生する場合の防波堤の相対天端高は、図-9に示すように、入射波波形勾配の増加に伴って減少する。本実験での越波の状態が発生する(防波堤の)限界相対天端高の範囲は、 $0.6 < (h_c/H_I) < 0.8$ である。

(3) 図-3と5~8および図-9の実験結果より、ブロック積み防波堤の波高伝達率を算定することができる。この場合、建設省で行なった現地観測結果と実験結果との比較より、両者の一致の程度は非常に良好であり、本研究の結果を実物に適用するに当っては、縮尺効果を考慮する必要はないものと認められる。

(4) ブロック積み防波堤ののり面勾配がゆるくなるか、または空げき率が減少すると、波高伝達率は若干減少する。

(5) ブロック積み防波堤のエネルギー消散率は、越波の状態が発生しない場合には、入射波の特性に関する Reynolds 数と堤体の相対平均幅とに関係する。

(6) 本研究および Le Méhauté の実験結果より、ブロックまたは捨石による防波堤の模型実験は、周期が 1sec 以上の波を使用して行なう必要があることが認められた。

参考文献

- 1) 豊島 修：離岸堤工法の設計指針，第18回海岸工学講演会論文集，pp. 155~159，昭和46年。
- 2) 文献調査委員会：消波用異形ブロック，土木学会誌，Vol. 49, No. 4, pp. 77~83，昭和39年。
- 3) Le Méhauté, B. : Perméabilité des diques en enrochement aux ondes de gravité périodiques, La Houille Blanche, No. 6, 1957 et No. 2, No. 3, 1958.
- 4) 富永正照・坂本忠彦：透過性構造物による波の変形に関する研究(1)，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 309~319，昭和44年。
- 5) 近藤俊郎・藤間 聰：透過性防波構造物の水理特性，第17回海岸工学講演会論文集，pp. 155~162，昭和45年。
- 6) 井島武士・江口泰彦・小林 彰：透過性防波堤と岸壁に関する研究，第18回海岸工学講演会論文集，pp. 121~130，昭和46年。
- 7) 岩崎敏夫・沼田 淳：透過性防波堤の波高伝達率に関する実験的研究，第16回海岸工学講演会講演集，pp. 329~334，昭和44年。
- 8) 文献 3) と同じ。
- 9) 文献 4) と同じ。
- 10) 文献 6) と同じ。
- 11) 文献 5) と同じ。
- 12) 文献 7) と同じ。
- 13) 久保弘一・上田伸三・井田保夫：捨石堤背後の伝達波高について一特に越波量と伝達波高一，土木学会第27回年次学術講演会講演概要，pp. II-65~68，昭和47年。
- 14) Shuto, N. and H. Hashimoto: Hydraulic resistance of artificial blocks, Coastal Engineering in Japan, JSCE, Vol. 13, pp. 43~54, 1970.
- 15) 文献 3) と同じ。
- 16) 文献 7) と同じ。
- 17) Johnson, J. W., H. Kondo, and R. Wallihan: Scale effects in wave action through porous structures, Proc. of 10th Conf. on Coastal Engineering, pp. 1022~1024, 1966.
- 18) 富永正照・坂本忠彦：離岸堤による波浪減殺効果の現地観測，第18回海岸工学講演会論文集，pp. 149~154，昭和46年。
- 19) 豊島修・坂本忠彦：離岸堤の沈下について，第19回海岸工学講演会論文集，pp. 71~75，昭和47年。