

消波ブロック傾斜堤とスリット堤からなる 二重防波堤の水理特性

北海道開発局開発土木研究所 正会員 柳瀬 知之
同 上 同 上 梅沢 信敏
同 上 同 上 谷野 賢二

はじめに

近年、港湾内の高度利用がさげばれ、それに伴い、利用する上で港内静穏域の水質向上が望まれることから、海水交換型の港湾構造物に対する要請が高まっている。海水交換の手段を考える場合、一年を通して波がある程度高い場合は波浪をその外力として用いる。また海水交換を必要とするときに、それに有効に働くほどの波浪が期待できない場合には、潮流や潮位変動を利用することとなり、構造物の透水性をできるだけ高くすることが必要となる。従来からある傾斜堤は、水理特性として透水性に優れており、こうした場合有利であると考えられるものの、傾斜堤のみで港湾内の静穏度を確保するには透水性について不利となる芯壁をいれなくてはならない。また、透過型のスリット堤のみでは、外海に直接面した防波堤の場合、波力に耐えるには大断面となり、さらに港内の静穏度確保といった点からは空隙率を低く抑えざるを得ない。

そこで本研究では、透水性を確保した上で静穏度を確保する事も期待できるひとつの方法として、傾斜堤背後に透水型のスリット堤を配置した二重防波堤をとり上げ、模型実験によりその水理特性について検討を行った。

この二重防波堤について検討する場合の課題として、二段目のスリット堤の設計に必要な一段目傾斜堤部の伝達波特性および越波の打ち込み位置、二重防波堤間における水位上昇量、そして二段目スリット堤背後の状態（伝達波、流れ）などがあげられる。以下では、それぞれについて順に検討結果を記し、最後に二重防波堤の伝達波高の算定法を検討してみた。

なお海象条件としては、北海道の日本海側における代表的な設計波の周期と潮位を用いて実験を行った。

1. 実験装置

実験は、小型平面水槽内に設置した2次元造波水路（長さ15m、幅0.8m、高さ1m）を用いて行った。この水路の特徴として、通常の2次元造波水路にみられるような堤背後の静穏域での実際の現象にない水位上昇が生じないように水路端は解放されており、二重防波堤の沖と岸の平均水位が常に水路周りの水位と一致するようになっている（図-1）。実験はフルードの相似則を用い、縮尺は1/20および1/30、また水路床はモルタル製で、海底勾配として、縮尺1/20では水平、縮尺1/30では1/100とした。

2. 傾斜堤部における伝達波特性

二重防波堤を考える場合、後段スリット堤設置位置としては傾斜堤背後の乱れの影響範囲や越波の打ち込み位置を避けることが望ましいと考えられる。また、後段スリット堤の設計波としては傾斜堤の伝達波が用いられる。

こうしたことからまず、傾斜堤のみを設置し傾斜堤背後の波高変化の測定、および越波の打ち込み位置についての目視観察を行った。

2-1. 堤体および海象条件

堤体条件としては図-2に示すように異形ブロック傾

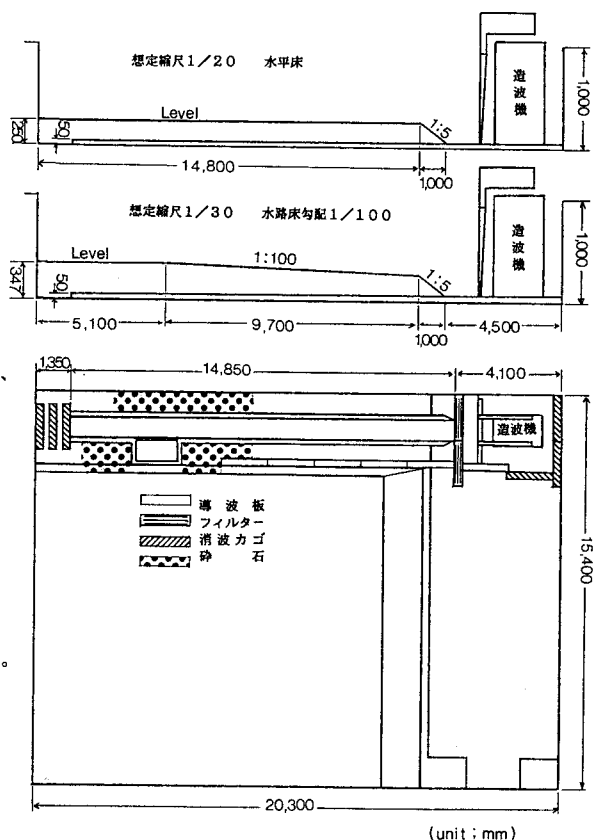


図-1 実験水路

斜堤とし、天端幅（7.3 m、ブロック3個並び）、ブロック重量（12.5 t型）、法勾配（1：1.5）、水深（5.8 m）を一定として、傾斜堤天端高（R）、不透過芯壁天端高（R'）を変化させた。潮位は堤体天端高の検討に用いられるH、W、Lに相当する+0.3 mおよびH、W、Lに偏差を加えたH、H、W、Lに相当する+0.8 mの2種類について実験を行った。なお実験は規則波で行っており、作用させた波浪諸元を表-1に示す。なお伝達波高の測定位置は図-3に示すように、現地に換算すると傾斜堤中心から24 m、40 m、56 m港内側の点とした。

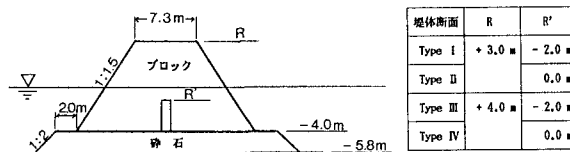


図-2 傾斜堤断面図

表-1 傾斜堤伝達波測定 海象条件

水路床勾配	周期	潮位	波高 (m)
水平	10.0 sec	+0.3 m	0.9, 1.8, 2.3, 2.8
		+0.8 m	1.0, 2.0, 2.6, 3.2
1/100	10.0 sec	+0.3 m	3.3, 4.6
		+0.8 m	3.5, 4.7

2-2. 実験式と実験結果の比較

異形ブロック傾斜堤の伝達波特性については、過去40年に渡り当研究室で行った研究があり、その成果として、坂本ら¹⁾は後に示す実験式を提案している。実験式では伝達率の考え方として、非越波の場合の伝達率と越波する場合の伝達率に計算式を分け、どちらか大きい方をその入射波に対する伝達率としている。

図-4は横軸に入射波の波形勾配、縦軸に伝達率をとったものである。図中には実験値と、実験式により得られる計算値を示してあり、実線が非越波、破線が越波した場合の伝達率である。この実線と破線の交点を越波が発生する境界とみなすことができる。なお、水平床と水路床勾配1/100の実験結果を同一図中に示しており、白抜きが水平床、黒塗が水路床勾配1/100の値である。

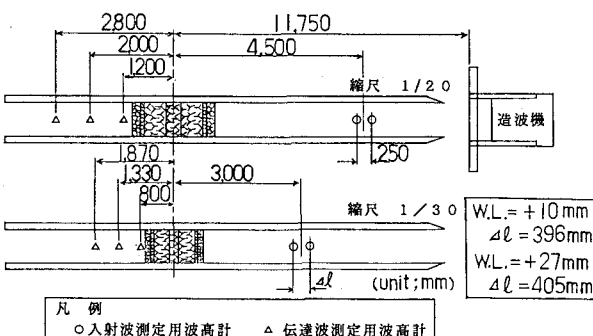


図-3 伝達波高測定点

水平床で行ったケースに着目すると傾斜堤背後40 m、56 m地点の伝達波高は実験式により求められる値にほぼ等しく、傾斜堤背後24 mだけが大きな値を示していることから、このときの海象条件下においては傾斜堤から概ね40 m程度以上離れた地点に実験式は対応するものと考えられる。

次に、現地の条件にできるだけ近づくため、水路床勾配を水平床から1/100勾配に変えて実験を行った。その結果、伝達率は実験式から求めた値よりも0.1~0.2程度大きな値を示した。この理由は次のように推察される。堤体設置位置において同じ入射波高となる波浪条件を考えた場合、水平床では進行波が水路床との摩擦などで波高減衰しながら所定の波高になるのに対して、1/100勾配では進行波が浅水変形などにより徐々に発達しながら堤体に到達するため、波高は同じでも波形がやや前傾した状態となる。このような波の前傾角の違いが越波しだす波高の違い、ひいては伝達率の違いとなって現れたものと考えられる。この波の作用状況の違いはビデオによる目視観察からも確認できた。以上のことから、坂本らの実験式は水平床の実験結果から算定されているため、海底勾配のある場合に同式を適用する場合は注意が必要と考えられる。

◎坂本らの実験式

○芯壁のない場合 $K_t = m \times \{K_{t1}, K_{t2}\}$

$$K_{t1} = \frac{1}{(1 + 0.32KA^{0.75}\sqrt{H/L})^2}$$

ここに、 K_{t1} ：非越波時の伝達率（ブロックのみ）

H：入射波の波高（m）

L：入射波の波長（m）

KA：堤体の断面指標

$$K_{t2} = 1.80 \left(\frac{B}{L} - 0.6 \right) \left(\frac{R}{H} - 0.85 \right) + 0.04$$

ここに、 K_{t2} ：越波時の伝達率

B：静水面での堤体幅（m）

R：静水面上の天端高（m）

○芯壁のある場合

・不透過芯壁 $K_t = m \times \{K_{t1} \times K_{t3}, K_{t2}\}$

$$K_{t3} = 0.5 \left(1 - \sin \frac{\pi}{3.6} \left(\frac{R'}{H} + 0.1 \right) \right)$$

ここに、 $K_{t1} \times K_{t3}$ ：非越波時の伝達率（不透過芯壁あり）

R'：静水面上の芯壁天端高さ（m）

静水面以下の場合は $R' < 0$

・透過性芯壁 $K_t = m \times \{K_{t4}, K_{t2}\}$

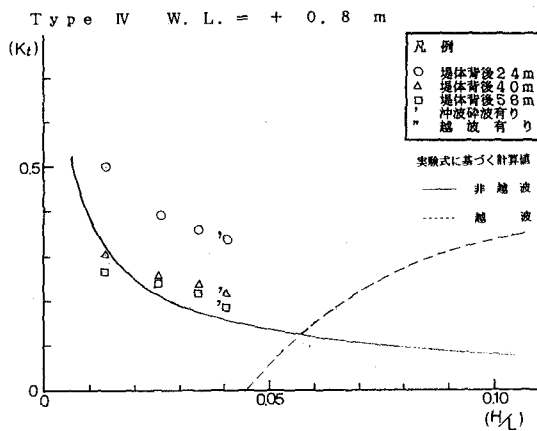
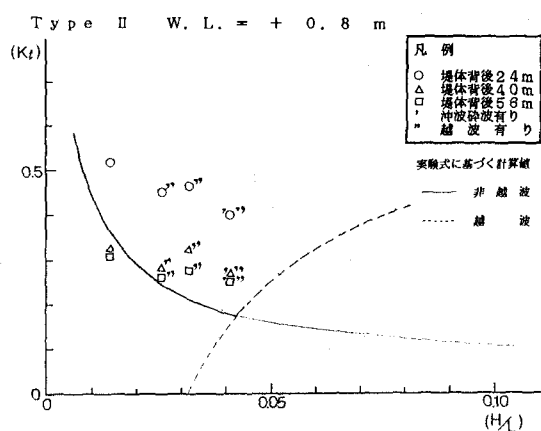
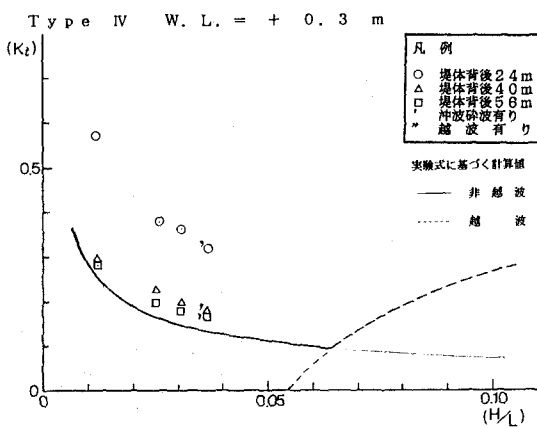
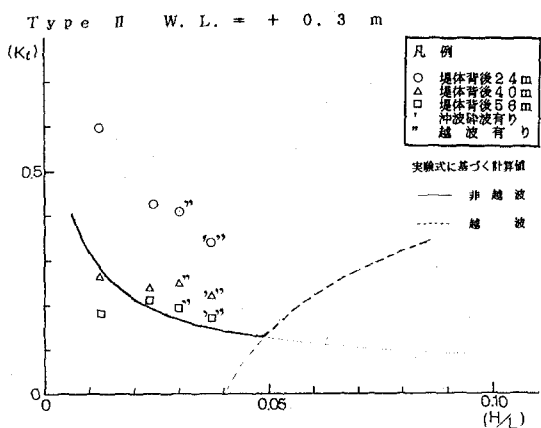
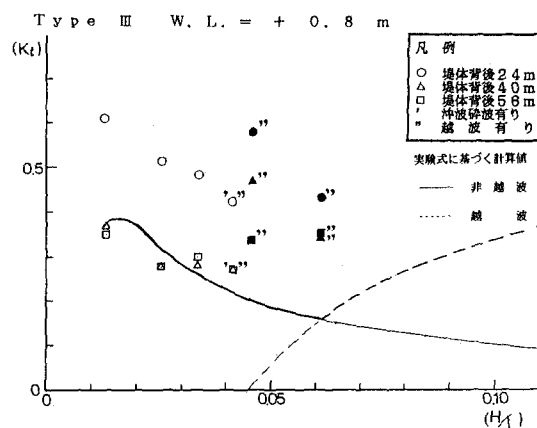
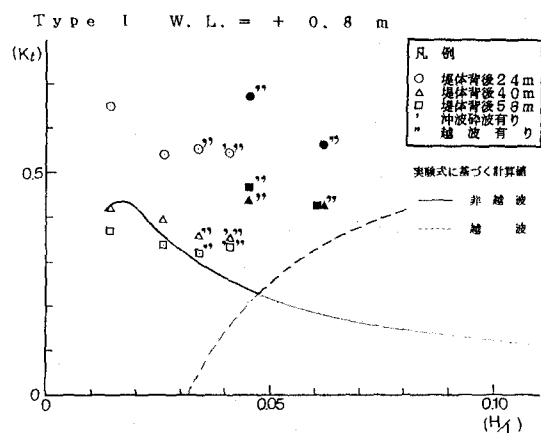
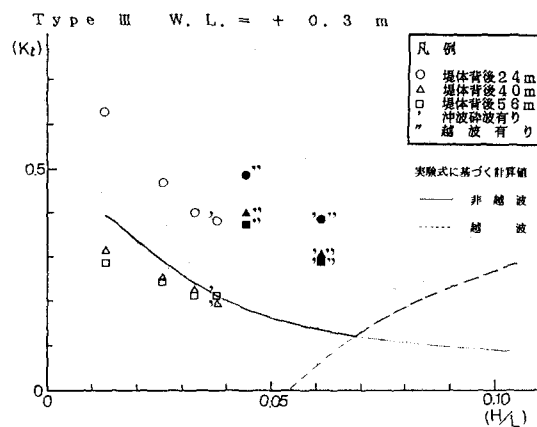
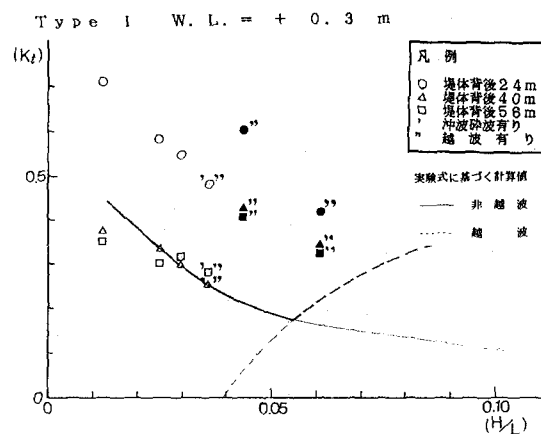
$$K_{t4} = \frac{1}{(1 + K\sqrt{H/L})^2}$$

ここに、 K_{t4} ：非越波時の伝達率（透過性芯壁あり）

K：透過性芯壁の空率と枚数により求まる係数

2-3. 傾斜堤を越波する波の打ち込み位置

伝達波高測定時に目視観察により越波の打ち込み位置を調べた。水平床で行ったケースでは越波はほとんどみられず飛沫が生じる程度であった。水路床勾配が1/100のケースでは表-2に示す結果となった。なお打ち



黒塗は水路床勾配 1/100 のケース

図-4 傾斜堤部の伝達率特性

込み位置としては傾斜堤中心からの距離で表し、越波した水塊そのものが打ち込む位置（水塊と表記）と打ち込み時に水塊が巻き込んだ気泡をも含んだ越波の影響範囲の先端部（気泡と表記）に分けて表した。

越波の打ち込み位置は作用させた範囲の波では傾斜堤中心からの距離にして最大24 m程度であった。より大きな波高の波が来襲した場合の越波の打ち込み位置はさらに港内側になることと予想される。

以上の検討結果より、二段目スリット堤の設置位置としては、傾斜堤の伝達波が安定し越波の打ち込み位置を避けた、傾斜堤から40 m程度以上背後の位置とすることがよいと思われる。

3. 二重防波堤間の水位上昇量

スリット堤を設置することにより2堤に挟まれた水域の水位上昇が生じることが予想される。その上昇量によっては、スリット堤の前後で水頭差が生じるため、スリット堤の設計に静水圧の差を考慮する必要がある。一方、この水頭差による港内側への流れは海水交換機能を向上させることにつながる。そこで、水位上昇量と入射波高の関係の検討、およびスリット堤の空隙率の違いによる水位上昇量の比較を行うために実験を行った。

なお、水位上昇量の測定には容量式波高計を用い、各経過時間毎に6波分の波形データの平均をその時刻における水位上昇量とした。

3-1. 堤体および海象条件

傾斜堤は伝達波測定に使用した天端高+3.0 m、芯壁天端高-2.0 m (Type I) の断面とした。傾斜堤中心から50 m離して設置したスリット堤は、図-5に示す後壁空隙率の異なる2種類の断面を用いた。縮尺は1/30、水路床勾配は1/100、また、海象条件は表-3に示す通りである。

水位測定は図-6に示した二重防波堤間、傾斜堤前面、スリット堤背後の3点で行った。二重防波堤間以外の測点はそこで水位が変化していないことを確認するためのもので、実験中それらの点における水位変化はほとんど見られなかった。なお、傾斜堤沖での測定には入射波測定用の波高計を、スリット堤背後の測定には伝達波測定用の波高計を利用した。

3-2. 二重防波堤間の水位上昇量

図-7に測定結果の一例を示す。静穏状態から波が来襲して約3分後の時点で水位はピークに達し、その後は2割程度の幅で変動している。

図-8は、この変動している水位の最大値 $\eta_{\max}$ と傾斜堤沖90 mにおける入射波高Hの比 $\eta_{\max}/H$ を縦軸にとり、傾斜堤天端高RとHの比 R/H を横軸にとったものである。これより、水位上昇量は、 R/H の関数で表されることが判る。また、スリット堤の後壁空隙率がType Aの半分であるType Bでは、 $\eta_{\max}/H$ は2割程度大きな値を示した。

表-2 越波の打ち込み位置 (水路床勾配1/100)

断 面	潮 位	入射波高	打ち込み位置	
			水 塊	気 泡
傾斜堤天端高 + 3.0 m	+ 0.3 m	3.3 m	9.0 m	12.0 m
芯壁天端高 - 2.0 m		4.6 m	12.0 m	18.0 m
傾斜堤天端高 + 4.0 m	+ 0.8 m	3.5 m	9.0 m	12.0 m
芯壁天端高 - 2.0 m		4.7 m	12.0 m	18.0 m
傾斜堤天端高 + 4.0 m	+ 0.3 m	3.3 m	9.0 m	12.0 m
芯壁天端高 - 2.0 m		4.6 m	10.5 m	13.5 m
傾斜堤天端高 + 4.0 m	+ 0.8 m	3.5 m	9.0 m	12.0 m
芯壁天端高 - 2.0 m		4.7 m	15.0 m	24.0 m

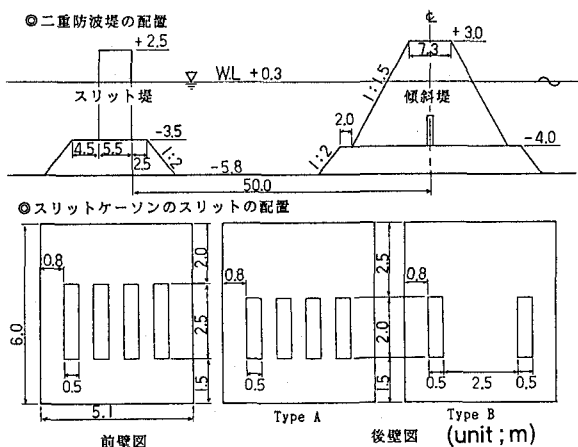


図-5 二重防波堤断面図

表-3 水位上昇量測定 海象条件

スリット堤	潮 位	周 期	波 高 (m)
Type A	+ 0.3 m	10.0 sec	1.3, 2.6, 3.6
Type B	+ 0.3 m	10.0 sec	1.3, 2.6, 3.7

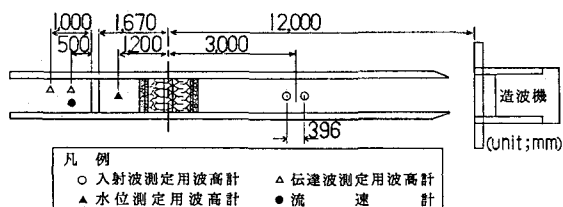


図-6 水位等測定点

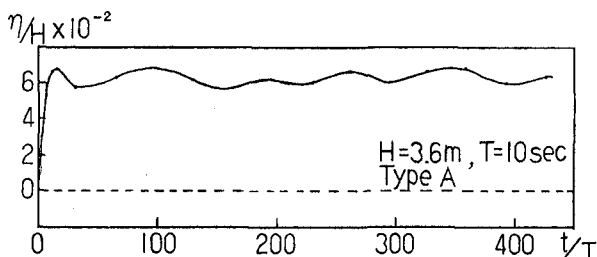


図-7 経過時間と水位変化

4. スリット堤背後の状況

二重防波堤は透過型防波堤であるため、港内に流れが発生する。大きな流れは、海水交換の面からは望ましいものの、港内利用を図る上では障害となる。また、傾斜堤のみの場合と比較して、実際にどの程度伝達波高を抑えられるかを確認する必要がある。

そこで、流速測定およびスリット堤背後における伝達波高測定を行った。

4-1. 堤体および海象条件

流速測定と伝達波高測定には、水位上昇測定時に用いた、傾斜堤部が Type I、スリット堤部が Type A の断面を使用した。各実験の測点を図-6に、海象条件を表-4に示す。

4-2. スリット堤背後の流れ

流速の測定は測定点を水深方向に3点設定して行った。実験結果を表-5に示す。ここでは、流速の符号は港外からの流入側を(+)、港外への流出側を(-)とした。水底に近づくほどその絶対値は小さくなるものの、流れの向きは皆港内への流入側である。この流れの一方向性は、前述の二重防波堤間における水位上昇に伴い生じた水頭差によるものと考えられるので、水位上昇特性と流れの特性をさらに検討することにより、水位上昇を海水導入手段として利用できるものと考えられる。

4-3. スリット堤背後の静穏性

伝達波高の測定結果を示した表-6に着目すると、傾斜堤のみの結果と比べて、二重防波堤とした場合はかなり伝達波高を抑えられることがわかる。伝達波高の絶対値に着目すると、3mの入射波に対して0.5mは、港内静穏度確保といった観点からすればやや大きい、スリット堤の断面検討や傾斜堤天端高の変更により低減可能であると思われる。

表-6 二重防波堤の伝達率

入射波高 (m)	異形ブロック傾斜堤		スリット堤		二重防波堤		計算値 ①×②
	伝達波高 (m)	伝達率 ①	伝達波高 (m)	伝達率 ②	伝達波高 (m)	伝達率 ③	
1.62	0.55	0.340	0.29	0.527	0.30	0.185	0.179
2.70	1.26	0.467	0.60	0.476	0.45	0.167	0.222
3.00	1.41	0.470	0.67	0.475	0.50	0.167	0.223
3.31	1.51	0.456	0.71	0.470	0.50	0.151	0.214

*スリット堤伝達波高はスリット堤単体に、傾斜堤伝達波高を入射波として作用させたときの実測値。

4-4. 二重防波堤における伝達波高算定法の検討

二重防波堤は傾斜堤とスリット堤が連続して存在しているので、まず前面の傾斜堤部に来襲波が作用し、それによる伝達波がスリット堤部での入射波となる。前述の実験式により傾斜堤部の伝達率は求めることができるので、スリット堤の伝達率特性を求めるか、あるいは伝達率が既知の堤体を使用すれば、各堤体の伝達率の積により二重防波堤の伝達率を求めることができる。

前出の表-6中のスリット堤の伝達波高は傾斜堤の伝達波と同じ波高の波を単独のスリット堤に作用させたときの結果である。波高が高くなるにつれて、やや二重防波堤の実測値が小さな値を示した。

おわりに

以上得られた結果として次のことがあげられる。

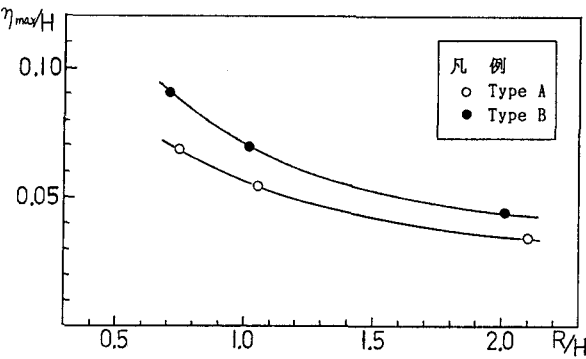


図-8 入射波高と無次元水位上昇量

表-4 伝達波及び流速測定 海象条件

測定項目	潮位	周期	波高 (m)
伝達波高	+ 0.3 m	10.0 sec	1.6, 2.7, 3.0, 3.3
流速	+ 0.3 m	10.0 sec	1.3, 2.6, 3.6

表-5 二重防波堤背後の平均流速 (m/s)

入射波高 m	測定位置 m			水頭差 m
	- 0.9	- 3.0	- 5.1	
1.3	0.35	0.24	0.16	0.02
2.6	0.74	0.58	0.27	0.11
3.6	0.82	0.51	0.02	0.19

*水頭差は二重防波堤間とスリット堤背後の水位差

①異形ブロック傾斜堤の伝達波高は海底勾配がない場合は坂本らの実験式により求めることができる。ただし、海底勾配がある場合は実験式よりも伝達波高が大きくなる傾向がみられた。

②二重防波堤間の水位は波浪が来襲してから短時間のうちに上昇し安定する。したがって、スリット堤に作用する外力の算出にあたっては、その程度に応じて、スリット堤前後の水頭差による静水圧の違いを考慮する必要があると考えられる。

③二重防波堤の伝達波高は近似的に傾斜堤部の伝達率とスリット堤部の伝達率の積により求めることができると考えられるが、本実験では二重防波堤の伝達率は傾斜堤とスリット堤の伝達率の積よりもやや小さな値を示した。

④二重防波堤とすることにより海水交換能力を有しながら静穏性を確保することが可能である。

二重防波堤は、設計上必要な伝達率に対して、消波ブロック傾斜堤とスリット堤の組合せ方により、いく種類もの断面を考えることができる。その特性をより検討していくため、今後の課題として、傾斜堤の伝達率と海底勾配の関係の検討、二重防波堤の断面の違いによる水位上昇量特性の把握、海水交換能力の把握および二重防波堤伝達率算定法の詳細検討などがあげられ、ひき続き検討を行う予定である。

<参考文献>

- 1) 坂本洋一, 宮地陽輔, 上西隆広, 竹田英章: 傾斜堤の水理機能に関する実験的研究, 土木試験所報告, 第82号, 昭和59年3月
- 2) 柳瀬知之, 梅沢信敏, 谷野賢二: 消波ブロック傾斜堤とスリット堤による二重防波堤の水理特性, 第33回北海道開発局技術研究発表会講演概要集, 平成2年2月