

複合消波構造物の水理特性に関する実験的検討

(株)大林組海洋技術部	正会員	藤沢康雄
建設省土木研究所海岸研究室	正会員	宇多高明
建設省土木研究所海岸研究室	正会員	村井禎美
日本大学理工学部海洋建築工学科	正会員	増田光一
日本大学理工学部理工学研究所		林 秀郎

1. はじめに

近年、ウォーターフロントが注目され、沿岸域の有効利用が図られようとしている。特に、海洋性レクリエーションに対するニーズの増大に伴い、新たな利用空間の創出が期待されている。このような空間を創出するためには、外洋に面した海域の波浪、流れ、漂砂等を制御し、従来利用されにくかった海域に静穏海域を創出する海域制御構造物の開発が必要である。そこで筆者らは、水平板とY型垂直板を組み合わせて、従来型の離岸堤と同程度の消波特性 ($K_T \leq 0.6$, $K_R \leq 0.5$) を目標とし、かつ海水交換機能も有する複合消波構造物を考案し、2次元水理模型実験により水理特性を検討してきた^{1), 2)}。しかし、本構造物は複合消波機能を有しているため、種々の構成部の消波特性および消波メカニズムなどに関し不明な点が残されていた。そこで、本研究では複合消波構造物の種々の構成部の諸元を変化させ、規則波による2次元水理模型実験を行ってその消波特性を明らかにする。また、透過式の下部構造物を含めた全体構造物模型を用いて、規則波および不規則波による2次元水理模型実験を行い、その消波特性を調べる。

2. 実験方法

規則波実験は、長さ30m、幅1.35m、水深1mの諸元を有する2次元造波水路を用いて行った(図-1参照)。この水路を2分し、幅0.8mの水路に仮底を設けて実験した。仮底は造波板から2.1m離れた位置より1/8勾配の斜面とし、水深0.4mの位置より平坦とした。平坦部の長さは16mである。模型は平坦部の中央に設置し、模型中央から沖側4mの地点に入・反射波分離用の波高計H2, H3を間隔0.4mで、また、岸側4mの地点に透過波高計測用の波高計H4を設置した。さらに、幅0.55mの水路には沖波計測用と、波高の再現性をチェックするための波高計H1を模型の真横に設置した。

不規則波実験は、長さ142m、幅0.6m、水深1mの不規則波造波水路を用いて行った(図-2参照)。水路中に1/50勾配の斜面を造り、水深が0.4mの位置より平坦とした。模型は、この平坦部に設置した。また、入・反射波および透過波測定用として模型の前後5mの位置に0.2m間隔で波高計を設置した。

実験模型は、縮尺1/25とし、全体模型(図-3)と6種類の上部消波構造物模型(図-4:M-1~M-6模型)を用いた。模型のパラメータとして、隣接する水平板の間隔を水平スリットと呼び、その間隔を水平板間隔 W_B とする。

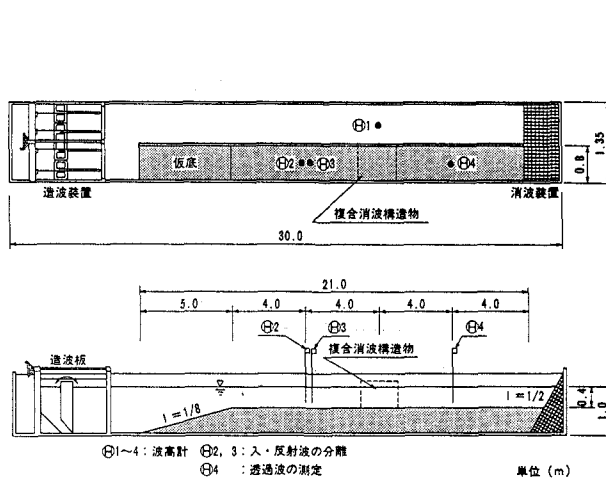


図-1 2次元造波水路

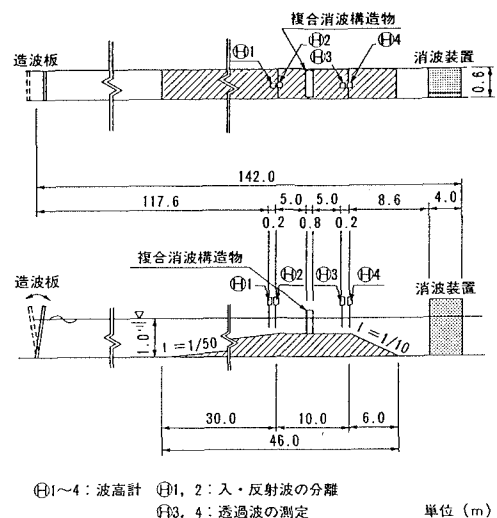


図-2 不規則波造波水路

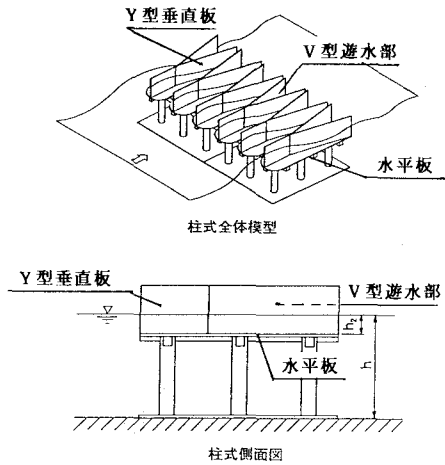


図-3 全体模型

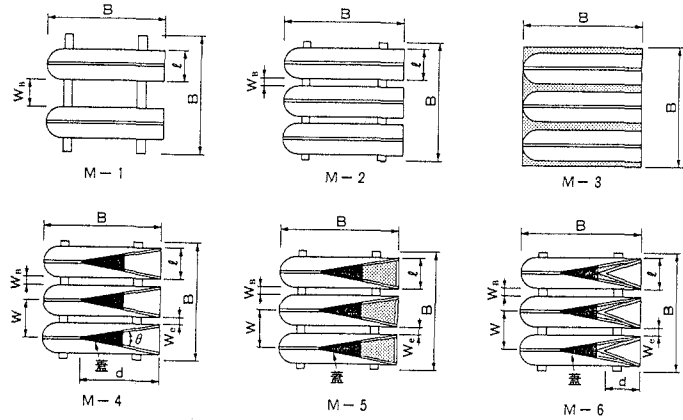


図-4 上部消波構造物実験模型

また、Y型垂直板先端部の間隔 W に対する後端部の間隔 W_e の比を、開口率 ε (W_e/W)とする。さらに、模型後端部からV型遊水部の頂部までの長さをV型遊水部の奥行 d と定義した。Y型垂直板の開閉角 θ は 21° とした。また、図-4のうち、M-5、M-6模型における網掛けの部分は、V型遊水部の入口を不透過壁で閉じたときに形成された空間である。また、M-3模型の網掛け部分は、スリット部を不透過板で置き換えた部分を表わす。実験模型の諸元を表-1に示す。

規則波実験には、表-2に示す波浪条件を用いた。不規則波実験はBretschneider・光易型のスペクトルで有意波周期、有意波高を変化させ表-3に示す4種類の波浪条件で全体模型について行った。なお、全ての実験で、水平板の没水深は8 cm ($h_2/h=0.2$)とした。

規則波実験の解析は波高計H1, H4で計測されたデータをFFT処理し、沖波波高 H_0 、透過波高 H_T を求めた。さらに、波高計H2, H3で計測した入射波と反射波の合成波高データをFFT処理し、合田ほか³⁾の分離推定法によって入射波高 H_I と反射波高 H_R に分離するとともに、透過率 K_T (H_T/H_I)、反射率 K_R (H_R/H_I)を求めた。

不規則波実験の解析は、合田ほか³⁾の手法を用いて、入・反射波の分離を行い、谷本ほか⁴⁾の手法に従って透過率および反射率を求めた。これから得られた入射波、反射波および透過波のスペクトル密度を 0.29Hz ($B/L=0.12$)から 1.87Hz ($B/L=1.8$)の範囲で積分し、入・反射波および透過波のエネルギー E_I 、 E_R および E_T を求めた。これより、透過率 K_{TE} 、反射率 K_R は次式によって求めた。

$$K_{TE} = \sqrt{E_T/E_I} \quad (1)$$

$$K_R = \sqrt{E_R/E_I} \quad (2)$$

また、透過率 K_T は、波高比からも定められる。

$$K_T = H_T/H_I \quad (3)$$

ここに、入射波高 H_I は、入・反射波の合成波の

表-1 実験模型諸元

模型形状 名称	水平板間隔 W _B (cm)	開閉角 θ (deg.)	Y型垂直板 端部間隔(cm)	開口率ε (W _e /W)	V型遊水部の 奥行 d
M-1	16.3	21	W = 26.7 W _e = 6.7	0.25	
M-2	6.7				
M-3					
M-4	6.7				
M-5					
M-6					
全体					

表-2 規則波の波浪条件

周期 T (sec)	沖波波高 H_0 (m)	沖波波長 L_0 (m)	入射波高 H_I (m)	入射波長 L (m)	入射波波形勾配 H_I/L	相対幅 B/L
1.0	0.08	1.56	0.086	1.46	0.059	0.547
1.2		2.25	0.091	1.93	0.047	0.414
1.4		3.06	0.085	2.39	0.036	0.335
1.5		3.51	0.088	2.61	0.034	0.306
1.6		3.99	0.091	2.83	0.032	0.282
1.7		4.51	0.088	3.05	0.029	0.262
1.8		5.05	0.094	3.27	0.029	0.245
1.9		5.63	0.090	3.48	0.026	0.230
2.0		6.24	0.090	3.69	0.024	0.217

表-3 不規則波の波浪条件

波浪No.	有義波高 $H_{1/3}$ (m)	有義周期 $T_{1/3}$ (sec)	入射波波長 L (m)	入射波波形勾配 $H_{1/3}/L$	相対幅 B/L
1	0.04	1.2	1.93	0.021	0.414
2	0.04	1.6	2.83	0.014	0.282
3	0.07	1.6	2.83	0.025	0.282
4	0.08	2.0	3.69	0.026	0.217

有義波高 $H_{0.1/3}$ と反射率 K_R から、次式で推定できる。

$$H_1 = H_{0.1/3} / \sqrt{1 + K_R^2} \quad (4)$$

一方、エネルギー損失率 K_L^2 、 K_{LE}^2 は次式で求めた。

$$K_L^2 = 1 - K_T^2 - K_R^2 \quad (5)$$

$$K_{LE}^2 = 1 - K_{TE}^2 - K_R^2 \quad (6)$$

3. 実験結果および考察

(1) 水平板間隔の消波特性に及ぼす影響

水平板間隔の消波特性に及ぼす影響を明らかにするために、水平板と垂直板のみで構成された模型(M-1, M-2, M-3模型)の水平板間隔 W_B (M-1: 20cm, M-2: 6.7cm, M-3: 0cm)を変えて規則波実験を行った。 $H_0=8$ cmの波を作用させたときの透過率 K_T 、反射率 K_R を図-5に示す。横軸は入射波長 L で無次元化した模型幅 B である。透過率は水平板間隔を20cmから6.7cmと変えると約0.15小さくなり、更に水平板間隔を閉じると約0.3小さくなる。透過率を下げる点からは、水平板に間隙を設けない方が望ましい。しかし、反射率は透過率と逆の傾向を示し、間隙を持たない水平板の反射率は著しく高くなる。水平板は主として波を反射させることにより透過率を下げる。したがって、このままでは透過率、反射率両面から与えられた条件を満足しない。そこで、本研究では水平板の間にスリットを設け、ここを通過する流体により渦を発生させて消波する機能を付加させた。スリット付水平板に関する既存の研究として、永井ほか⁵⁾によると、水平板の空隙率を0.15にした場合に最も良い消波効果を示した。この研究結果と図-5によれば、水平板間隔をM-2模型の間隔よりも狭くすることによって、より小さな透過率を得られそうである。しかし、水平板と垂直板のみで構成された模型の水平板間隔を狭めるだけでは、長周期側の透過率が小さくならず、反射率も大きくなるので、期待する K_T 、 K_R の条件を達成することは難しかった。

(2) Y型垂直板の消波特性に及ぼす影響

M-5模型はY型遊水部の後端に蓋を取り付けて閉鎖することにより、M-2模型にY型垂直板のみを取り付けた模型形状となっている。また、Y型垂直板は正面から見れば縦スリット構造を有している。つまり、水平板による消波機能に、Y型垂直板による縦スリット機能と収斂機能を付加した模型である。両者の実験結果の比較を図-6に示す($H_0=8$ cm)。Y型垂直板模型は縦スリット機能と収斂機能が無い垂直板模型に比べて、 $B/L=0.3\sim 0.55$ の範囲で透過率を約0.1、また、 $B/L=0.23\sim 0.42$ の範囲で反射率を最大0.15小さくすることができる。透過率が小さくなった理由は、主として縦スリットによるエネルギーロスによると考えられる。なお、過去の研究によれば、縦スリット構造は、長周期側では消波に対して有効ではないことが一般的に知られている。図-6においてもM-5模型とM-2模型の透過率は長周期側では変わらない。

(3) V型遊水部の消波特性に及ぼす影響

V型遊水部の奥行 d が異なるM-4、M-6、M-5模型($d: 2B/3, B/3, 0$)の消波特性の比較を図-7に示す($H_0=8$ cm)。V型遊水部の消波機能が無いM-5模型を基準にして実験結果を比較する。V型遊水部の奥行が浅いM-6模型の場合は、 B/L が大きく(波の周期が短く)なると、また、奥行が深いM-4模型の場合は、 B/L が小さく(波の周期が長く)なると透過率が小さくなる。反射率はV型遊水部の奥行が深いM-4模型の場合に B/L の小さい方で若干増大し、奥行が浅いM-6模型の場合にはあまり顕著な差が見られない。

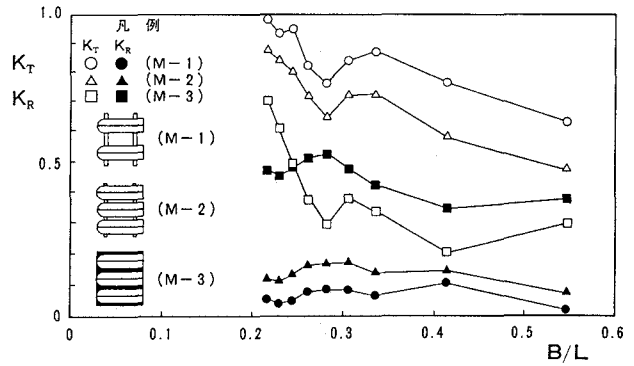


図-5 水平板間隔を変えた場合の K_T 、 K_R と B/L の関係

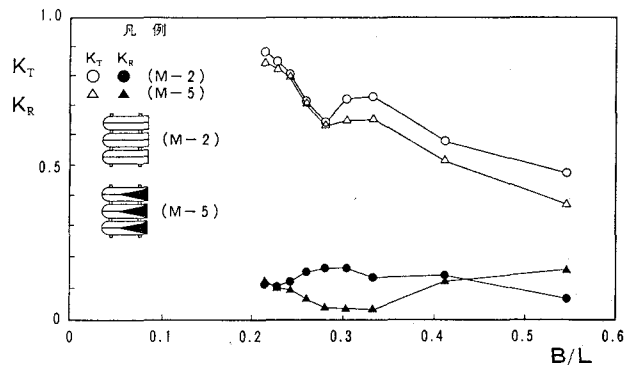


図-6 Y型垂直板の有無による K_T 、 K_R と B/L の関係

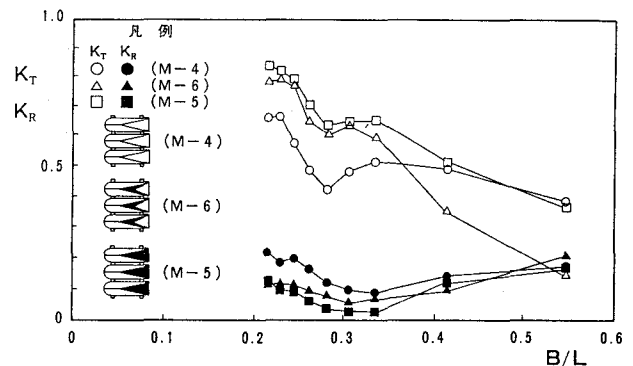


図-7 V型遊水部の奥行を変えた場合の K_T 、 K_R と B/L の関係

V型遊水部近傍の流れと渦の状況は次のようである(図-8参照)。入射波の峰が模型後端部に達すると、Y型垂直板後端部の間隔 W より波の進行方向に強い吹き出し流れを生ずる(①)。その水の一部はV型遊水部との水位差および流速差等によって水平方向の渦(②)と、鉛直方向の渦(③)を発生し、逆方向の流れとなってV型遊水部へ導かれる(④)。次に、入射波の谷が模型後端部に達すると、逆方向の流れ(④)はV型遊水部の内部で反射され、後方へ吹き出す流れを生じる(⑤)。この流れは入射波との水位差および流速差等によって水平方向の渦(⑥)と、鉛直方向の渦(⑦)を発生する。

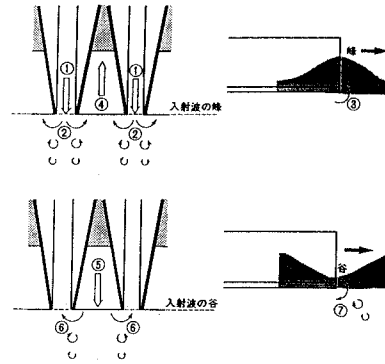


図-8 流れ及び渦の説明図

V型遊水部の奥行きが透過率に及ぼす影響をより明確に把握するために、V型遊水部を塞いだM-5模型とM-4、M-6模型との透過率の差 ΔK_T を図-9に示す。 ΔK_T は奥行きが深いM-4模型の場合には $B/L=0.27$ 付近で、また、奥行きが浅いM-6模型では $B/L=0.55$ 付近で最大値を示し、その値は両者共約0.25である。さらに、 $B/L=0.27$ 、 $B/L=0.55$ の値から、波長とV型遊水部の奥行きとの比はそれぞれ5.56、5.45となる。このことから、今回の水理模型実験の場合、V型遊水部は、その奥行の約5.5倍の波長を持つ入射波に対して、透過率を0.25程度小さくする特性を有することがわかる。この結果、奥行きが深いM-4模型の場合、水平板およびY型垂直板で十分に消波できなかった長周期の波をV型遊水部により消波し、全体として広い周期帯で良好な消波特性が得られるようになった。また、本構造物の水平板間隔をより狭めることによって、消波特性の向上が十分期待できるので、V型遊水部の奥行きを適当に選択することで、本構造物の消波特性の向上が可能と考えられる。さらに、構造より明らかに、波による水粒子の往復運動を考えた場合、水粒子の冲向きの運動は大きく阻害される。そのため、1周期平均で見たとき岸向きの平均流を発生させることができる。すなわち、本構造物は、消波効果だけではなく、同時に構造物より岸側の海域の海水交換機能をも有している。

(4) 全体模型の消波特性および機能

複合消波構造物は実海域に設置する場合、支持構造物によって海底に固定する必要がある。基本形状であるM-4模型に透過式の下部構造(柱で支持した構造)を付けたものを全体模型とし、本模型による規則波中の透過率、反射率を図-10に示す($H_0=8\text{cm}$)。下部構造の無いM-4模型に比較して、全体模型の透過率、反射率は、顕著な変化はなく、 $B/L=0.22\sim 0.55$ の範囲で透過率0.6以下、反射率0.25以下の値を示す。このことから、本消波構造物は、ほとんど上部構造

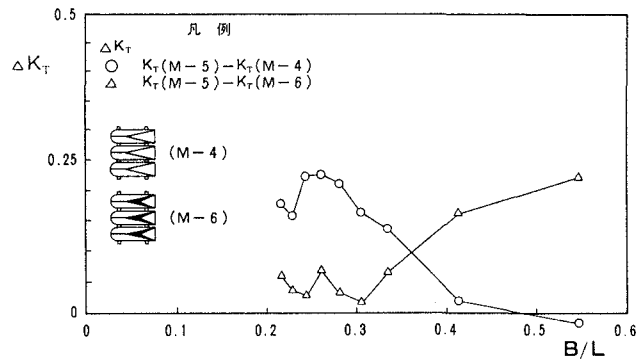


図-9 V型遊水部の奥行きを変えた場合の ΔK_T と B/L の関係

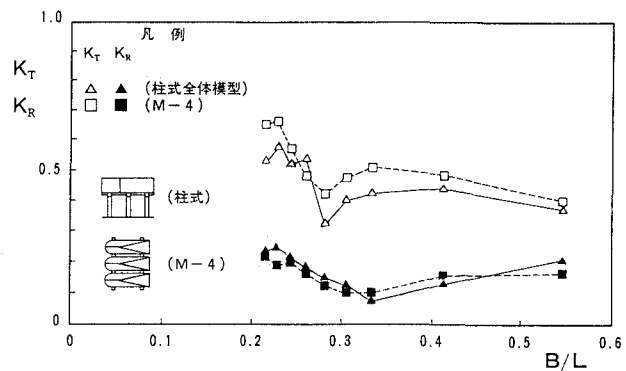


図-10 下部構造の有無による K_T 、 K_R と B/L の関係

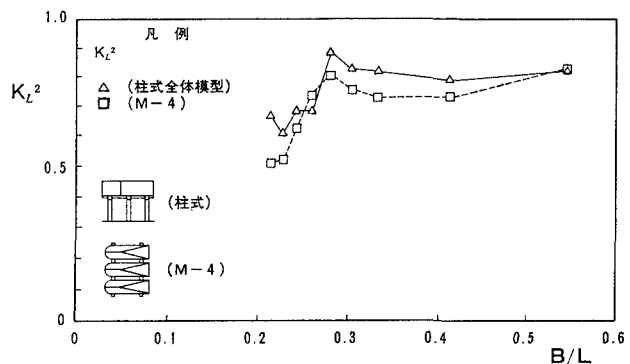


図-11 下部構造の有無による K_L^2 と B/L の関係

物によって消波しており、設置海域の状況に適した下部構造物の選択が可能であることがわかる。

次に、式(5)で求められるエネルギー損失率を比較した。M-4模型と全体模型のエネルギー損失率はほぼ同様の値を示し(図-11参照)、 $B/L=0.27\sim0.55$ の範囲で約0.8以上を示す。このことから、本構造物は入射波エネルギーの約80%以上を構造物内部で渦および流れのエネルギーとして消散させていることがわかる。

(5) 不規則波実験による消波特性の検討

不規則波実験と、規則波実験によって得られた全体模型の透過率を図-12に示す。ここに、不規則波の透過率は、各周期における入射波スペクトルと透過波スペクトルの比であり、見かけの透過率 K_T' と定義する。図より、規則波実験と不規則波実験の結果が良く一致していることから、本構造物は、波高値が変わったことによる非線形効果は少ないと考えられる。

次に、 K_T 、 K_{TE} および反射率 K_R を図-13に示す。透過率は B/L の増加に伴って約0.55~0.45まで緩やかに減少し、反射率 K_R は B/L によらず約0.25を示す。また、透過率 K_T 、 K_{TE} の値がよく一致していることから、透過波の頻度分布はレーリー分布に従っていると考えられる⁴⁾。

4. 結論

- ① 水平板と垂直板のみで構成された模型の場合、水平板間隔を狭めることによって透過率は小さくなり、反射率は大きくなる。しかし、水平板だけでは、長周期側で十分な消波特性を得ることができない。
- ② Y型垂直板による縦スリット効果と収斂効果は、水平板のみの模型と比較して、短周期側で透過率を約0.1、長周期側で反射率を最大0.15下げる。しかし、水平板にY型垂直板を付加するだけでは、十分な消波特性を得ることができない。
- ③ V型遊水部の消波特性に及ぼす影響として、V型遊水部の奥行が浅い場合には短周期側、深い場合には長周期側で透過率を下げる。すなわち、奥行の約5.5倍の波長を持つ入射波に対して、透過率を約0.25小さくする。
- ④ 本消波構造物は水平板およびY型垂直板が消波しにくい長周期の波をV型遊水部によって消波し、全体として広い周期帯で良好な消波特性を得るものである。
- ⑤ 本消波構造物は、消波特性に対する下部構造物の影響が少なく、不規則波中においても規則波中と同程度の消波特性を示す。

参考文献

- 1) 宇多高明・村井禎美・藤沢康雄：複合消波構造物を有する海域制御構造物に関する実験的検討(1)，土木研究所資料，第2454号，pp.91~105，1987。
- 2) 宇多高明・村井禎美・藤沢康雄：複合消波構造物を有する海域制御構造物に関する実験的検討(2)，土木研究所資料，第2510号，pp.33~44，1987。
- 3) 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地 治：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港研資料，No.248，pp.1~24，1976。
- 4) 谷本勝利・吉本靖俊・高橋重雄：大水深波浪制御構造物に関する水工的研究(その1)，港研資料，No.516，pp.1~39，1985。
- 5) 永井荘七郎・角野昇八：スリット型防波堤に関する研究，第23回海岸工学講演会論文集，pp.100~105，1976。

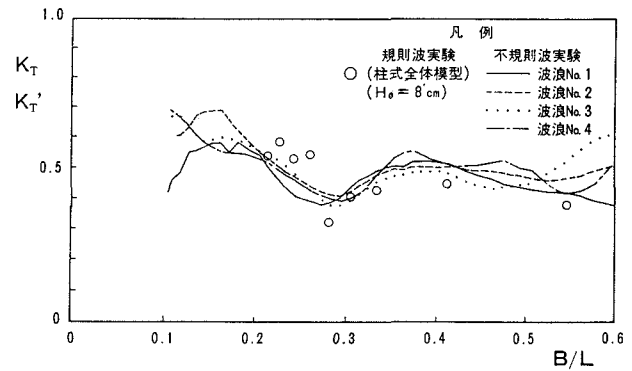


図-12 規則波と不規則波実験における全体模型の K_T 、 K_T' と B/L の関係

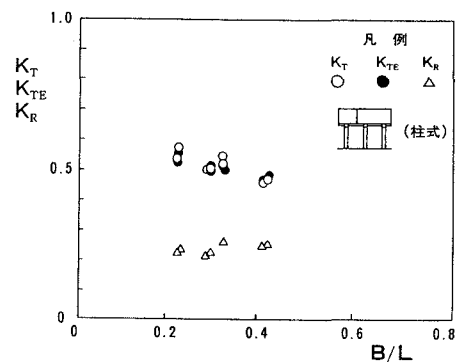


図-13 不規則波実験における全体模型の K_T 、 K_{TE} 、 K_R と B/L の関係