

大水深域における斜板堤の消波特性および波力低減に関する実験的検討

石川島播磨重工業（株）土木建築プロジェクト部 正会員 櫻井 清一
 石川島播磨重工業（株）土木建築プロジェクト部 正会員 竹内 浩一
 石川島播磨重工業（株）技術研究所 正会員 山下 誠也
 建設省土木研究所 海岸研究室 長 正会員 宇多 高明
 建設省土木研究所 海岸研究室 正会員 小俣 篤

1. まえがき

斜板堤は、波エネルギーの集中する海面付近に、その頂部が静水面上にあるよう斜板を設置した消波構造物である（図-1参照）。近年筆者らは斜板堤の消波および波力特性について検討してきた（土木研究所，1989a, b, 1990）。これらのうち、消波特性については実海域の水深が10m程度までを想定し、その範囲内において目標とする消波特性を満たす構造諸元を求めた。本研究では、設置水深をさらに20mと深くした場合について新たに実験を行い、消波特性を検討する。

一方、波力特性に関しては、上向き波力が衝撃力となる場合があり、そのピーク値は同じ波浪条件で発生する下向き波力より大きくなることが示された（土木研究所，1989a）。安定な構造物を設計するには、このような衝撃力成分を低減することが望ましい。そこで本研究では衝撃力成分を低減する方策についても二、三の検討を試みた。

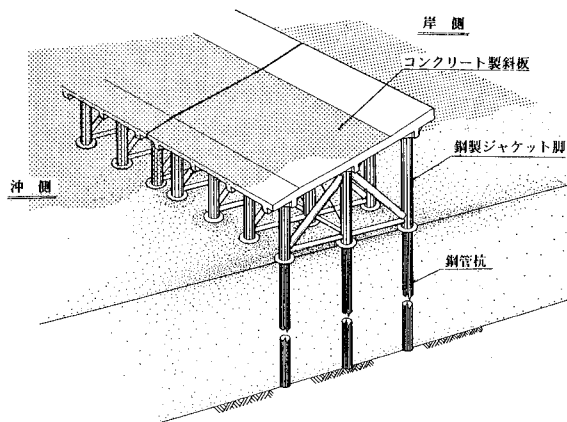


図- 1 斜板堤概念図

2. 実験内容

実験は衝撃力低減実験と大水深域における消波特性実験から成る。衝撃力低減実験では斜板に作用する衝撃的な上向き力、沖向き力を低減させる方策について検討した。

波高、水深および斜板の傾斜角が一定の条件の下で、上向き・沖向き波力は波長によってかなり変化し、 $h/L = 0.1$ 付近で最大値を取る（土木研究所，1989a）。ここに、 h は水深、 L は波長である。観察によれば、斜板の下水面が斜板の傾斜角に近い角度で上昇し、斜板下面を打つことにより衝撃力が発生している。そこで衝撃力の低減対策として、斜板下部における水面上昇時の水面形状を変化させ、衝撃力を発生させないようにすることとし、斜板下面に突起を付加する方法を採用した。本実験ではこの突起（抵抗板）の配置、高さ、枚数を種々変え、それらの効果を調べた。

大水深域における消波特性実験では現地海岸の水深が15m と20m の場合について消波特性、全体波力を調べた。実験は水深ごとに天端高 h_1 、没水深 h_2 を変化させ、目標とする消波特性を満足する構造諸元を求めた。

3. 衝撃力低減実験

3. 1 実験方法

実験には石川島播磨重工業（株）技術研究所水理実験場の第1水路を使用した（図-2参照）。水路は全長39.5m、幅2.5m、高さ1.8mであるが、幅1.0mの水路を設けるため、高さ1.1mの仕切壁を水路の長さ方向に設置した。水路端にピストン式造波装置を設置し、反対側の水路端には消波板を設置した。模型設置部付近の水路壁はガラス張りで、側面からの観察が可能である。模型は造波板より18.5mの位置に模型上下動装置により固定した。

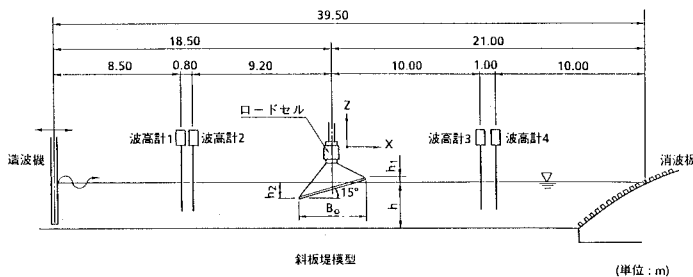


図- 2 衝撃力低減実験の実験装置

実験では規則波を入射させ、表-1に示す9種類の波を選定した。計測には、図-2に示すように波高計、ロードセルを用い、入射波高 H_I 、透過波高 H_T 、反射波高 H_R 、模型全体に作用する水平波力 F_x および鉛直波力 F_z を測定した。

波力の符号は、水平波力 F_x については岸向きを正とし、鉛直波力 F_z については上向きを正とする。そして、 F_x の岸向き、冲向き最大波力をそれぞれ F_{xon} 、 F_{xof} とし、 F_z の上向き、下向き最大波力を F_{zup} 、 F_{zdn} として区別する。

入射波高 H_I は模型を設置しない状態で波高計1により計測した値とした。透過波高 H_T は波高計3、4により計測した値の平均値とした。反射波高 H_R は、波高計1、2のデータから入・反射波を分離する方法により求めた。透過率 K_T は H_T / H_I 、反射率 K_R は H_R / H_I より算出した。

実験の縮尺は1/25で、斜板下面に抵抗板を取り付けた模型とした(図-3)。実験ケースを表-2に示す。斜板下面が平滑な模型をケース①とし、抵抗板の設置位置(ℓ_1 で表示)が異なる3ケース(ケース②, ③, ④)と設置位置がケース②と同様で抵抗板の高さ h_4 が異なる2ケース(ケース⑤, ⑥)および複数の抵抗板を設置した2ケース(ケース⑦, ⑧)について実験した。

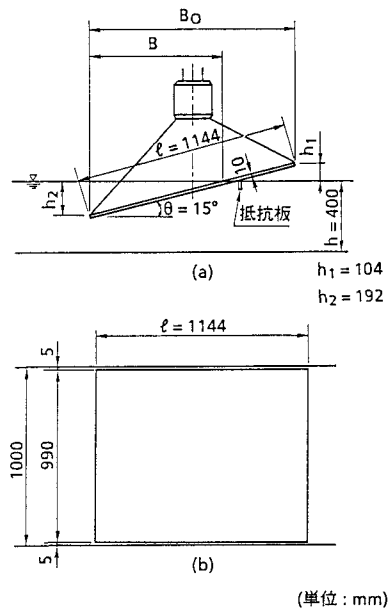


図-3 衝撃力低減実験の模型形状

表-1 衝撃力低減実験の波浪条件

波高 H_I (cm)	周期 T (sec)	波形勾配 H_I / L
8	2.00	0.022
12	2.00	0.033
16	1.14	0.089
	1.50	0.062
	1.82	0.047
	2.00	0.043
	2.14	0.040
	2.62	0.032
20	2.00	0.054

表-2 衝撃力低減実験の実験ケース一覧

ケース番号	抵抗板設置位置 ℓ_1 (mm)	抵抗板高さ h_4 (mm)	設置位置の概要	実験ケース図
①	—	—	抵抗板無し	
②	309	60	静水面付近	
③	100	60	空中部	
④	463	60	海中部	
⑤	309	80	静水面付近	
⑥	309	40	静水面付近	
⑦	抵抗板を2枚設置。 設置位置はケース②、③を組合わせ、右図のとおりとする。 抵抗板高 h_4 はいずれも60mmとする。			
⑧	抵抗板を4枚設置。 設置位置および各々の抵抗板高 h_4 は右図のとおりとする。			

単位: mm

単位: mm

模型を水中に設置した状態での固有振動数はX方向が約45Hz、Z方向は約60Hzである。これに対し測定時のカットオフ周波数はX方向30Hz、Z方向40Hzであるので、衝撃力成分を含む全体波力は比較的精度の良い波力値を得られたと考えられる。

3.1 実験結果

(1) 抵抗板位置が鉛直波力に及ぼす影響

抵抗板がないケース①と抵抗板高さ h_4 が6cmと一定で、設置位置を変化させた場合(ケース②, ③, ④)の F_z の最大値(F_{zup} 、 F_{zdn})の無次元波力と B_0 / L との関係を図-4に示す。ここに無次元化に用いた W は斜板堤長(構造物の波峰線方向の長さ)である。

上向き波力 F_{zup} については抵抗板を設置することにより低減でき、静水面と斜板下面が交差する付近に抵抗板を設

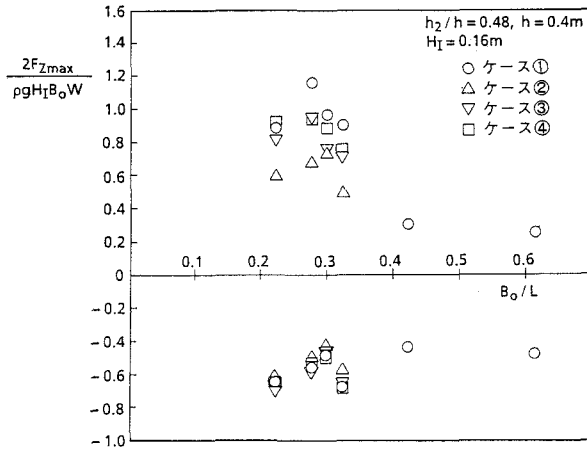


図-4 抵抗板位置と無次元鉛直波力との関係

置する場合（ケース②），最も効果があることが分かる。ケース②とケース①との上向き波力 $F_{z\uparrow}$ の比は $B_0/L = 0.28$ で約 0.6 となる。実験時の観察によれば，水面上昇時に抵抗板が水面の急激な上昇を防ぎ，衝撃力の発生を抑制していた。一方，下向き波力 $F_{z\downarrow}$ はほとんど変化が見られず，抵抗板の効果はない。

（2）抵抗板高さが鉛直波力に及ぼす影響

抵抗板の高さ h_4 を変化させた場合（ケース②，⑤，⑥）とケース①の F_z の最大値の無次元波力を図-5に示す。 $F_{z\uparrow}$ ， $F_{z\downarrow}$ とも抵抗板の高さによる変化はほとんど見られない。抵抗板高さ h_4 が 4 cm，6 cm および 8 cm は実機ではそれぞれ 1.0 m，1.5 m および 2.0 m に相当するが，この抵抗板の高さの範囲ではいずれの場合でも衝撃力は有効に低減される。

（3）抵抗板の枚数が鉛直波力に及ぼす影響

実機の斜板は梁・スラブ構造となり梁が斜板下面に存在することから，複数の抵抗板が設置される状態について調べた。抵抗板が水面付近と海上部分に設置された場合（ケース⑦）と 4 枚の抵抗板が設置された場合（ケース⑧）の F_z の最大値の無次元波力を図-6に示す。上向き波力 $F_{z\uparrow}$ ，下向き波力 $F_{z\downarrow}$ とも枚数を変えたことの影響はほとんどない。図示していないが入射波高 H_1 が 8，12，および 20 cm の場合も同様であった。このことより，実機の構造計画において抵抗板および斜板下面に存在する梁は斜板幅方向に任意に配置できると考えられる。

（4）抵抗板が水平波力に及ぼす影響

ケース①とケース⑦の水平波力 F_x の最大値（ $F_{x\text{on}}$ ， $F_{x\text{off}}$ ）の無次元波力と B_0/L との関係を図-7に示す。ここに $h_0 = h_1 + h_2$ である。抵抗板を設置することにより，冲向き波力 $F_{x\text{off}}$ は上向き力 $F_{z\uparrow}$ と同様にかなり減少した。入射波高 H_1 が 8 cm，12 cm および 20 cm（波周期 $T=2\text{sec}$ ）の場合も同様であった。これも衝撃力成分が減少したためで，ケース⑦とケース①との $F_{x\text{off}}$ の比は $B_0/L = 0.28$ で約 0.6 である。一方，岸向き波力 $F_{x\text{on}}$ は変化しておらず，抵抗板の効果はない。

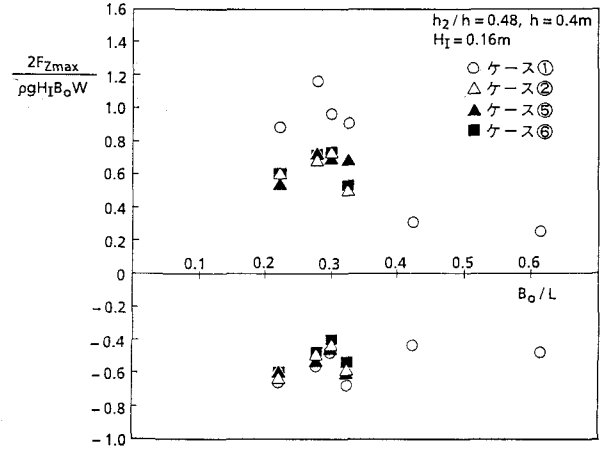


図-5 抵抗板高さと無次元鉛直波力との関係

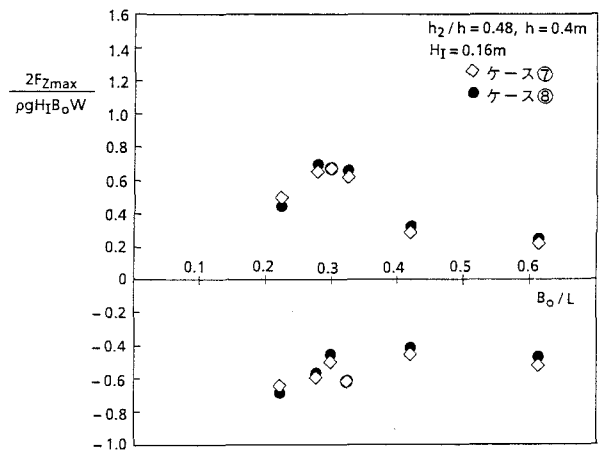


図-6 抵抗板の枚数と無次元鉛直波力との関係

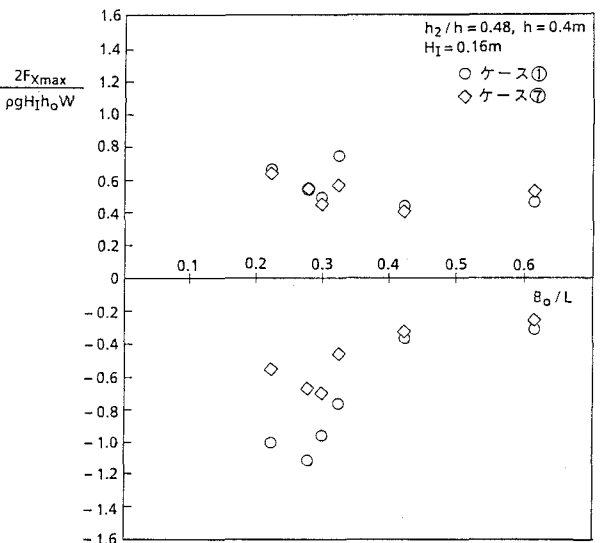


図-7 抵抗板の有無と無次元水平波力との関係

(5) 抵抗板の有無が透過率 K_T 、反射率 K_R に及ぼす影響

ケース①, ⑦の K_T , K_R と h/L との関係を図-8に示す。抵抗板を設置することは K_T , K_R に大きな影響を与えないことが分かる。

4. 大水深域における消波特性実験

4.1 実験方法

実験に使用した水路および模型と計測機器の配置は衝撃力低減実験の場合と同じである。実験波は規則波とし、表-3に示す12種類の波を選定した。 K_T , K_R の算出方法も衝撃力低減実験と同じである。実験の縮尺は1/25である。実験に使用した模型を図-9に示す。斜板傾斜角 θ は 15° と一定である。実験は斜板下面に抵抗板(高さ $h_4=60\text{mm}$)を静水面と斜板下面が交差する付近に取り付た状態でを行った。水深 h は 0.4m , 0.6m および 0.8m と変化させ、天端高 h_1 、没水深 h_2 を変化させた(表-4)。模型を水中に設置した状態での固有振動数はX方向が約50Hz, Z方向は約60Hzである。これに対し測定時のカットオフ周波数はX方向30Hz, Z方向40Hzとした。

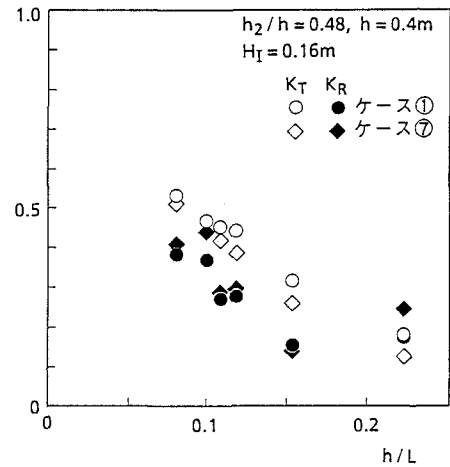


図-8 抵抗板の有無と K_T , K_R との関係

表-3 大水深域における消波特性実験の波浪条件

入射波高 H_1 (cm)	周期 T (sec)	水深 $h=40\text{cm}$		水深 $h=60\text{cm}$		水深 $h=80\text{cm}$	
		波長 L (cm)	H_1/L	波長 L (cm)	H_1/L	波長 L (cm)	H_1/L
8	1.2	190	0.042	210	0.038	220	0.036
	1.4	240	0.033	270	0.030	290	0.028
	1.6	280	0.029	330	0.024	360	0.022
	2.0	370	0.022	440	0.018	490	0.016
	2.8	540	0.015	640	0.013	730	0.011
12	2.0	370	0.032	440	0.027	490	0.025
16	1.2	190	0.084	210	0.076	220	0.073
	1.4	240	0.067	270	0.059	290	0.055
	1.6	280	0.057	330	0.048	360	0.044
	2.0	370	0.043	440	0.036	490	0.033
	2.8	540	0.030	640	0.025	730	0.022
20	2.0	370	0.054	440	0.045	490	0.041

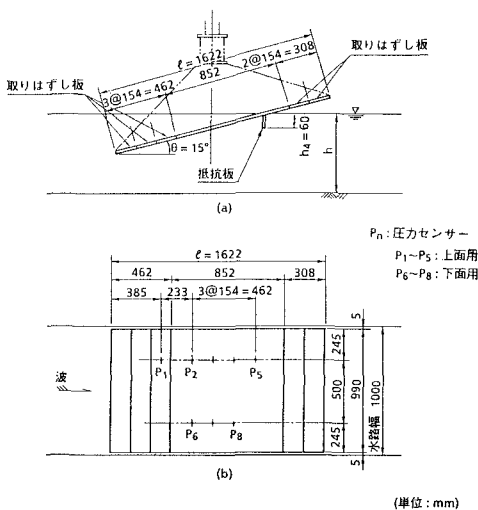


図-9 大水深域における消波特性実験の模型形状

表-4 大水深域における消波特性実験の実験ケース一覧

水深 h (cm)	没水深 (没水比) h_2 (cm) (h_2/h)	天端高 h_1 (cm)		
		6	10	14
40	16 (0.40)	—	—	○
	20 (0.50)	○	○	○
	24 (0.60)	○	—	—
60	16 (0.27)	—	○	○
	20 (0.33)	○	○	○
	24 (0.40)	○	○	—
80	16 (0.20)	—	○	○
	20 (0.25)	○	○	○
	24 (0.30)	○	○	—

* ○印が実施した実験ケースを表す。

4. 2 実験結果

4. 2. 1 消波特性

(1) K_T , K_R に及ぼす水深変化の影響

斜板堤の没水深 h_2 および天端高 h_1 を一定 ($h_2 = 0.2\text{m}$, $h_1 = 0.1\text{m}$) として、水深 h を 0.4 , 0.6 および 0.8m と変化させたときの透過率 K_T ・反射率 K_R と没水深波長比 h_2/L との関係を図-10 に示す。入射波高 H_I は 0.16m である。図から明らかなように、 K_T は水深によってあまり変化しない。この結果は、斜板堤の没水深および天端高が同じであれば、大水深の場合でも水深が浅いときと同程度の消波特性が得られることを示している。また、3種類の水深に対する K_T の実験値が h_2/L で整理するとよくまとまることから、 K_T に対する水深の影響は主として水深の変化に伴う波長の変化によって現れると言える。

K_R については、実験値にややばらつきがみられるが、3種類の水深の間で K_R の値に大きな差はない。波長が長い領域では水深が大きいほど K_R が小さくなる傾向となっている。また、 $h_2/L = 0.08$ 付近で K_R が極小となるのは、没水部水平長さ/波長の比 (B/L) が $1/4$ に近い波長のため斜板上に定常波が生じることに起因する (土木研究所, 1989a)。

(2) 没水深が K_T , K_R に及ぼす影響

水深が最も大きい $h = 0.8\text{m}$ の場合に、天端高を一定 ($h_1 = 0.1\text{m}$) として没水比 h_2/h を 0.2 , 0.25 および 0.3 と変えたときの、 K_T ・ K_R と水深波長比 h/L との関係を図-11 に示す。この場合、水深 h が一定であるから波長の無次元化に h を用いた。図より、 h_2/h が大きいと K_T はかなり小さくなることが明らかである。このように没水深が大きくなるにしたがって K_T が小さくなるという傾向は、水深が浅い場合に見られた傾向 (土木研究所, 1989a) と同じである。一方、 K_R は K_T とは反対に、没水深が大きくなるにしたがって大きくなる。

(3) 天端高、波高が K_T , K_R に及ぼす影響

水深が最も大きい $h = 0.8\text{m}$ の場合に没水深を一定として、天端高没水深比 h_1/h_2 を 0.3 , 0.5 および 0.7 と変えたときの K_T ・ K_R の変化を図-12 に示す。図には水深波長比が $h/L = 0.163$ (波周期 $T = 2.0\text{sec}$) と $h/L = 0.276$ (波周期 $T = 1.4\text{sec}$) のときの入射波高ごとの K_T ・ K_R を示している。 K_T は図の上段の $h/L = 0.163$ のとき、波高 H_I が小さいならば h_1/h_2 によってほとんど変わらない。一方、 H_I が大きくなると、 h_1/h_2 が小さいほど K_T は大きくなるが、これは波高が大きくなつて天端高の小さいときには、越波の影響が強く現われ消波特性が低下することを示している。図の下段の $h/L = 0.276$ (波周期 $T = 1.4\text{sec}$) のときは、 h_1/h_2 とともに K_T は漸増するという傾向である。 K_R は $h/L = 0.163$ および 0.276 の双方の結果を合わせ全般的にみて、 h_1/h_2 によってほとんど変化しないと考えることができる。

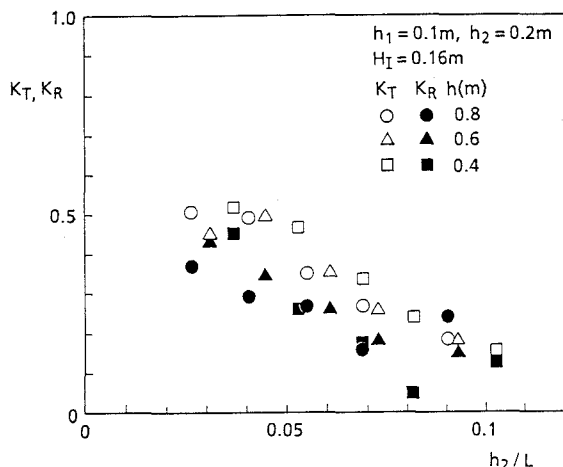


図-10 水深 h と K_T ・ K_R との関係

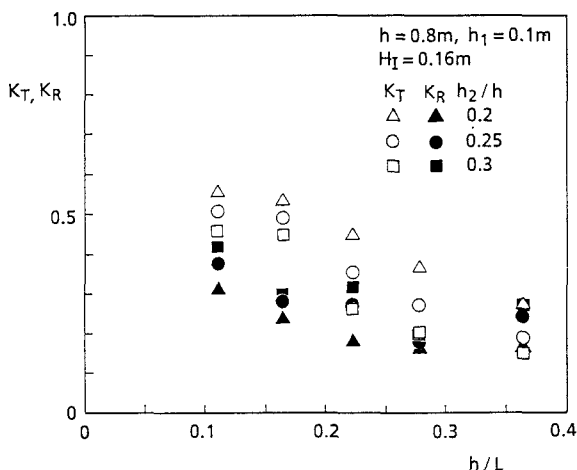


図-11 没水深 h_2 と K_T ・ K_R との関係

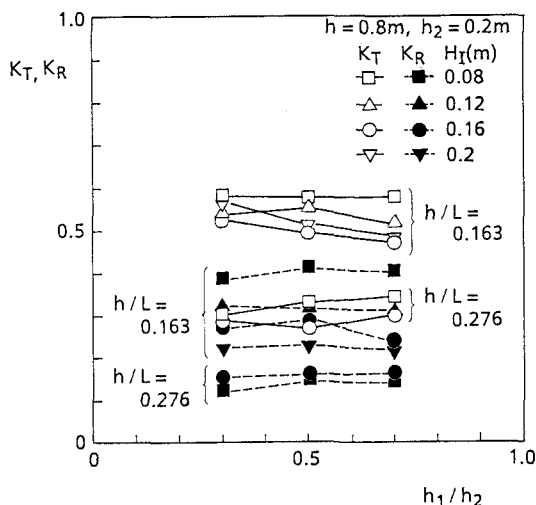


図-12 天端高 h_1 , 波高 H_I と K_T ・ K_R との関係

次に、図-12をもとに入射波高の及ぼす影響について考える。図から、 $H_1 = 0.16\text{m}$ までは波高が大きくなると K_T は減少し、それ以上の波高では越波の影響により増大する傾向がある。これに対して K_R は、波高が大きくなるにしたがって一様に単調減少しており、変化の度合いも K_T に比べてかなり大きい。この結果は、斜板上での碎波による波エネルギーの散逸の効果が、 K_R に対しては波高の増大に伴って顕著に現れることを意味している。

4. 2. 2 波力特性

水深 h が変化するときの全体波力の変化を調べるために、水平波力 F_x および鉛直波力 F_z の最大値の無次元波力と B_0/L との関係を図-13および図-14に示す。これらは $h_1 = 0.1\text{m}$ 、 $h_2 = 0.2\text{m}$ の模型について、水深 h が 0.4m 、 0.6m および 0.8m の結果を示したものである。 F_x 、 F_z の無次元波力は水深による影響が小さく、 B_0/L に対して同じ傾向を示している。全体波力は $B_0/L > 0.3$ のとき一定となり、 $B_0/L < 0.3$ のとき波長 L に依存し、 L の増加に伴い増大している。水深 h が 0.4m で $B_0/L \approx 0.3$ のとき、上向き波力 $F_{z\text{up}}$ および冲向き波力 $F_{x\text{off}}$ の場合の無次元値が大きいのは衝撃力が多少発生しているためである。

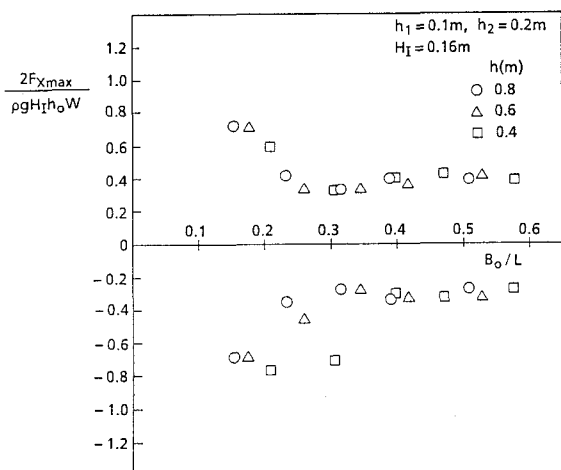


図-13 水深 h と無次元水平波力との関係

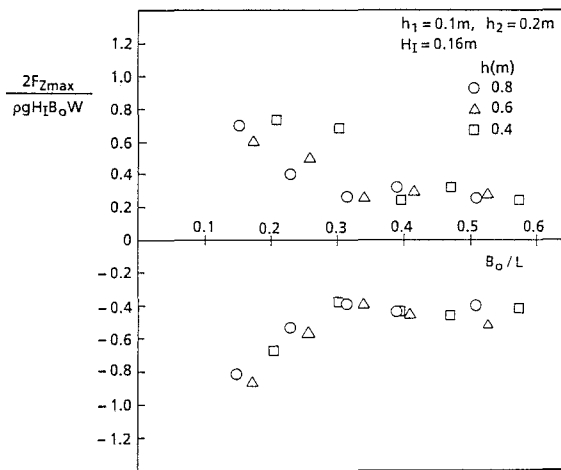


図-14 水深 h と無次元鉛直波力との関係

5. まとめ

①斜板下面に鉛直壁（抵抗板）を付加することは、上向き波力と冲向き波力の衝撃力成分を低減する上で有効である。抵抗板の位置は静水面と斜板下面が交差する付近が最も効果大きい。また実機換算で1～2mの抵抗板高さの衝撃力低減効果はほとんど同一である。

②抵抗板を付加しても斜板堤の透過率 K_T および反射率 K_R はほとんど変化しない。

③同一の斜板形状で水深 h を 0.4m 、 0.6m および 0.8m （実海域水深ではそれぞれ 10m 、 15m および 20m ）と変化させても透過率・反射率の変化は少ない。透過率・反射率に対する水深の影響は主として水深変化に伴う波長の変化により現れる。

④同一の斜板形状で水深を 0.4m 、 0.6m および 0.8m と変化させても、水平・鉛直全体波力はそれほど変化せず、波長の変化に対しそれぞれ同じ傾向を示す。

⑤斜板の傾斜角 θ が 15° で、天端高 h_1 が 0.1m （実機で 2.5m ）、没水深 h_2 が 0.2m （ 5.0m ）の形状は水深 h が $10\text{m} \sim 20\text{m}$ の範囲で透過率 ≤ 0.6 、反射率 ≤ 0.5 を満足した。

最後に、本研究は、大成建設（株）、（株）間組、東急建設（株）との共同研究により行われたことを付記する。

参考文献

建設省土木研究所河川部海岸研究室(1989)：海域制御構造物に関する共同研究報告書(8)，土木研究所資料，No. 2578，pp. 31～54。

建設省土木研究所河川部海岸研究室(1989)：海域制御構造物に関する共同研究報告書(9)，土木研究所資料，No. 2788，pp. 97～108。

建設省土木研究所河川部海岸研究室(1990)：海域制御構造物に関する共同研究報告書(10)，土木研究所共同研究報告書，第37号，pp. 43～61。