

# 矩形堤体列まわりの平面的な波変形の特性と 波向き制御法に関する研究

中村 孝幸\*, 長田 和久\*\*, 栗田 清光\*\*\*

## 1. ま え が き

現在, 沿岸海域の有効利用を目的として, 各種の沖合防波堤の波浪制御効果に関する検討が進められつつある。しかしながら, 従来の研究では, 波浪制御として1次元的な波高制御効果に着目したものがほとんどで, 構造物まわりの平面的な波変形を推定する際に重要となる, 透過波や反射波の波向き特性などはほとんど知られていない。

本研究は, 離岸堤などのように構造物が直線状に配列される場合を想定して, その波浪制御効果を波高値のみならず波向き特性をも考慮して総合的に検討するものである。この際, 特に堤体間の開口長や堤体の傾斜配置角などの配列条件に伴う透過波高やその方向分布の変動特性などを明らかにする。そして, これらの結果に基づき, 透過波の主卓越波向きを入射波のそれより変化できるような堤体の配列法, すなわち波向き制御に有効な堤体の配列法についても究明する。

## 2. 平面的な波変形の算定法と評価法

### (1) 波変形の算定法

本研究で用いた解析モデルおよび座標系は, 図-1に示すものである。一定水深  $h$  の波動場中に, 直立式堤体構造物が一定間隔  $\lambda$  で  $y$  軸方向に規則的に配列されており, これに  $x$  軸と角度  $\theta$  をなして平面波が作用するものとする。流体は非圧縮性完全流体で, 波動運動は, 微小振幅波理論により表現できるものとする。

既に中村ら (1988) は, 図-1 のような直立式堤体列まわりの波浪ポテンシャル問題の解析法をグリーン関数法に基づき導いている。ここでも同様な解析法を採用して矩形堤体列による波変形を算定した。この解析法によると, 隣接する堤体の中心間隔  $\lambda$  が, 作用波の波長  $L$  との関係で, 次式を満足する  $|n| \geq 1$  が存在するとき,

$$\lambda/L \geq |n|/(1 \mp \sin \theta) \quad (n = \pm 1, \pm 2, \dots \text{複合同順}) \quad (1)$$

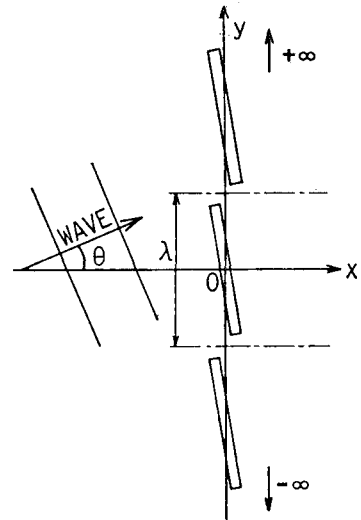


図-1 解析モデルおよび座標系

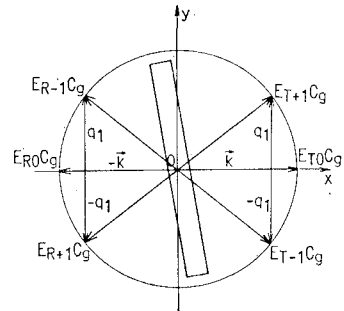


図-2 堤体列まわりの各波向き成分 ( $1 < \lambda/L < 2$  の場合)

透過波には, 入射波と同方向に伝播する成分波 (直進行波成分と称する) のみならず, それと異なる方向に伝播する成分波 (斜波成分と称する) も含まれるようになることが明らかにされている。Dalrymple ら (1990) は, このような堤体列まわりでの斜波成分の発生を, より簡単にホイヘンスの原理を用いて図的に説明している。

そして, 図-1 のような堤体列まわりの透過波および反射波の平均エネルギーフラックスを各波向き成分別にその波数ベクトル  $\vec{k}$  と併せて示すと 図-2 のようであ

\* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科

\*\* 正会員 工修 広島県土木部

\*\*\* 京都府土木部

る。なお図中では、簡単化のため作用波の入射角度  $\theta = 0^\circ$  で、さらに  $n = -1, 1$  の両者のみが式 (1) を満足する条件、すなわち入射波の方向から見て左右に1つずつ斜波成分が出現する条件が仮定してある。また、図中で  $q_1 = 2\pi/\lambda$ ,  $E_{T0}$ ,  $E_{R0}$ : 透過波, 反射波の直進行波成分の単位水表面積当りのエネルギー,  $E_{T+1}$ ,  $E_{R+1}$ : 同様の波の第1次斜波成分のエネルギーで、添字中の  $\pm$  は左右の斜波成分を表す。また  $C_g$ : 群速度である。式 (1) で等号が成立する条件は、第  $n$  次斜波成分が現れるか否かの限界を示し、第  $n$  次の横波共振点と呼ばれている。

## (2) 波変形の評価法

堤体列により斜波成分が発生する条件になると、直進行波成分と斜波成分が重畳した短峰性の波面形状になるため、単に透過・反射率などの1次元的な指標で波浪制御効果を評価することが困難になる。中村・小野 (1990) は、図-2 に示すようなエネルギー的な考察に基づき、堤体列による透過波や反射波の特性を合理的に評価する方法を提案している。ここでも、同様な評価法を用いて波高値や波向き特性などを判定しており、以下その概略を示す。

a) rms 波高比: これは、平面的に分布する波高の代表量を表すもので、堤体列方向における波高の rms 値と入射波高との比で定義される。そして、上記した各波向き別のエネルギーを用いると次式で算定される。

$$K_T = \sqrt{\frac{\sum_{n=N-}^{N+} E_{Tn}}{E_I}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$K_R = \sqrt{\frac{\sum_{n=N-}^{N+} E_{Rn}}{E_I}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $K_T$ ,  $K_R$ : それぞれ透過・反射波側における rms 波高比,  $N+$ ,  $N-$ : それぞれ式 (1) を満足する  $n$  の最大値と最小値,  $E_I$ : 入射波の単位水表面積当りのエネルギーである。

b) 波向きに着目した成分波のエネルギー比: これは、透過波 (or 反射波) の全エネルギーに占める各波向き成分のエネルギー比を示し、以下の式で定義される。

$$T_n = E_{Tn}/E_T \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, N\pm) \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$R_n = E_{Rn}/E_R \quad (n=0, \pm 1, \pm 2, \dots, N\pm) \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 $T_n$ ,  $R_n$ : それぞれ透過・反射波の波向き別のエネルギー比で、 $n=0$  のときが直進行波成分,  $n \geq 1$  が左斜波成分,  $n \leq -1$  が右斜波成分に対応する。また、 $E_T$ ,  $E_R$ : それぞれ透過・反射波の全エネルギーで、式 (2), (3) の平方根中の分子の量に等しい。

このとき第  $n$  次斜波成分の波向きの角度  $\xi_n$  は、透過波に関する結果のみを示すと次式で与えられる。

$$\xi_n = \tan^{-1} \left[ \frac{k_y + q_n}{\sqrt{k^2 - (k_y + q_n)^2}} \right] \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 $k_y$ : 波数  $k$  の  $y$  方向成分,  $q_n = 2n\pi/\lambda$  である。ただし、 $\xi_n$  は  $x$  軸とのなす角 (反時計まわりを正とする) で定義してある。

## 3. 波変形に関する理論的考察

### (1) 堤体の配列条件

理論算定で用いた矩形堤体の平面形状は、図-3 に示すもので、後述する実験時のものと同寸法にした。堤体の配列間隔  $\lambda$  は 150 cm と固定し、入射波は配列軸の法線方向より作用する直角入射の条件に限定した。そして、この矩形堤体を配列軸 ( $y$  軸) に関して角度  $\psi = 0 \sim 45^\circ$  の範囲で11種類、また隣接する堤体間の開口部を配列軸に射影した長さ  $l_0$  と配列間隔  $\lambda$  の比で定義される見掛けの開口率  $\alpha$  を  $0 \sim 30\%$  の範囲で4種類 (隣接堤体が重なる場合を除く) に変化せしめた。この際、堤体の設置水深  $h = 40$  cm, 堤体の厚さ  $D = 15$  cm と一定にしてある。

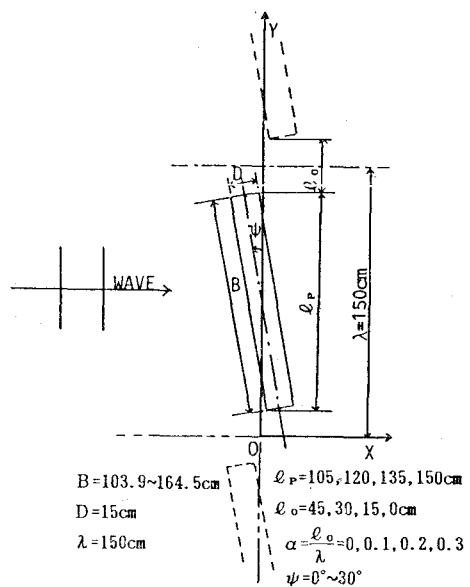


図-3 算定に用いた矩形堤体列の配置および配列状況

### (2) 透過波の波向き特性

図-4, 5 は、 $l_p/\lambda$  ( $l_p$ : 堤体の配列軸への投影長さ)  $= 1 (\alpha = 0)$  の条件下で、堤体の傾斜角  $\psi$  がそれぞれ  $12.2^\circ, 30^\circ$  のときの透過波の波向き特性量  $T_n$  の周期による変化を示す。各図中で、第1横軸には周期に関する無次元量  $\lambda/L$ , 第2, 3 横軸にそれぞれ第1, 2 次斜波成分の波向き角度  $|\xi_{\pm 1}|, |\xi_{\pm 2}|$  がとってある。なお  $\lambda/L < 1$  では、直進行波成分のみとなることから、図中ではこの範囲を省略してある。

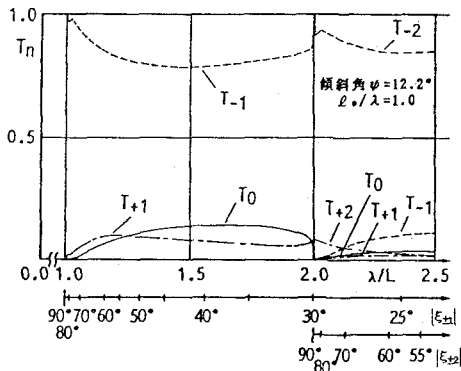


図-4 矩形堤前列背後での透過波の波向き特性 ( $\Psi=12.2^\circ$ ,  $l_p/\lambda=1.0$ )

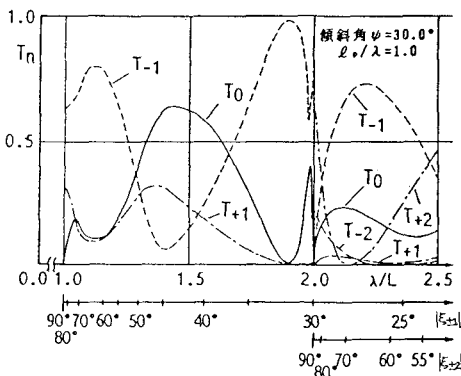


図-5 矩形堤前列背後での透過波の波向き特性 ( $\Psi=30^\circ$ ,  $l_p/\lambda=1.0$ )

まず、これらの図の横軸を見ればわかるように、 $\lambda/L=1$  から 2 までの範囲で、波向きの角度は、 $90^\circ$  から  $30^\circ$  まで対数関数的に変化する。このため、堤前列により、ある特定の角度に、波向きを変化させることは不可能で、作用波の周期条件により、その角度は異なることに留意する必要がある。そして、これらの図より、 $\Psi=12.2^\circ$  の条件 (図-4) では、右斜波成分 ( $T_{-1}$  or  $T_{-2}$ ) が、 $\lambda/L \geq 1$  の条件下で他の成分波よりも大きく卓越するのに対して、堤体の傾斜角  $\Psi=30^\circ$  の場合、 $T_0$  と  $T_{-1}$  の卓越度が  $\lambda/L$  の値によって交互に入れ替わるなど、周期により卓越波の方向が変化することがわかる。

図-6 は、 $l_p/\lambda=0.8$  ( $\alpha=0.2$ ) と固定したときの右斜波成分の総和  $\Sigma T_{-n}$  の堤体の傾斜角  $\Psi$  による変化を示す。この図からも、 $\Psi$  を  $12^\circ$  程度にすると右斜波成分が広い周期帯で卓越することやこのような特性はほぼ  $\Psi=8\sim 17^\circ$  の範囲においてのみ現れることなどが認められる。なお、ここでは  $\Psi$  が  $5^\circ$  以下と小さなときの結果を示さなかったが、このような傾斜角の条件では左右の斜波成分が同程度の大きさになることなどを確認している。一方、図-4、6 の比較から、見掛けの開

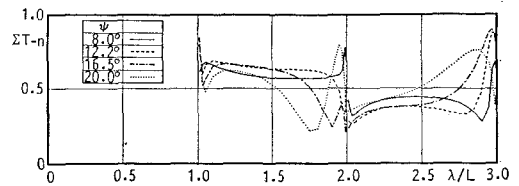


図-6 各傾斜角における右斜波成分のエネルギー比 ( $l_p/\lambda=0.8$ )

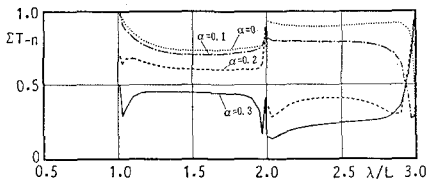


図-7 各開口率における右斜波成分のエネルギー比 ( $\Psi=10^\circ$ )

口率を大きくすると、特に  $\lambda/L > 2$  の範囲で右斜波成分の卓越度が減少することも分かる。このことは、右斜波成分の卓越度が顕著になる傾斜角  $\Psi=10^\circ$  に固定して、傾斜角による  $\Sigma T_{-n}$  の変化を示す 図-7 から分かる。

以上の検討より、矩形堤体を傾斜して配置すると透過波の主卓越波向きを入射波のそれより変化できることやそのときの傾斜角度としては  $8\sim 17^\circ$  の範囲が効果的であることなどが理論的に推測される。

### (3) 透過波の波高特性

図-8 は、図-4、5 に対応する  $l_p/\lambda=1$  ( $\alpha=0$ ) のときの透過波側で rms 波高比  $K_T$  の結果を示す。この図より、 $K_T$  は  $\Psi=12.2^\circ$  のとき  $\lambda/L$  による変化があまり見られず、ほぼ 0.4 程度と一定値を示すことがわかる。一方、堤体の傾斜角  $\Psi$  が  $30^\circ$  の場合、堤体の配列方向から見た開口幅は増大するため、 $K_T$  は 1 程度になるときもあり、 $\lambda/L$  による変動が大きくなっている。これは、図-5 に示すように、この傾斜角の条件下で透過波の卓越方向が  $\lambda/L$  により変化することが原因と考え

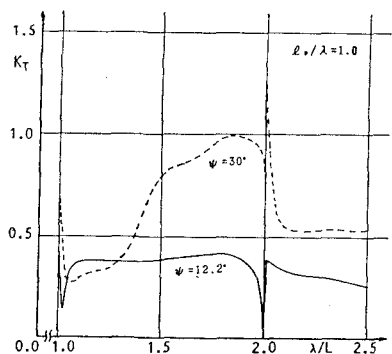
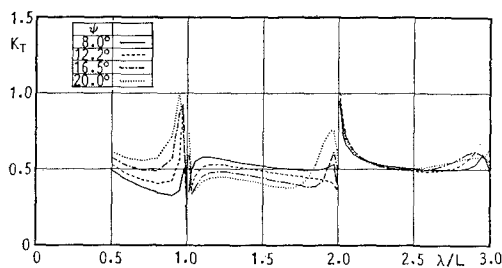
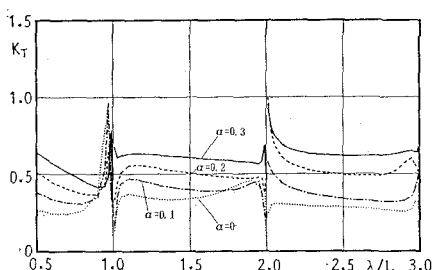


図-8 透過波側での rms 波高比  $K_T$  ( $l_p/\lambda=1.0$ )


 図-9 各傾斜角における透過波側での rms 波高比 ( $l_p/\lambda = 0.8$ )

 図-10 各開口率における透過波側での rms 波高比  $K_T$  ( $\Psi = 10^\circ$ )

られる。

図-9, 10 は, それぞれ 図-6, 7 に対応する条件下での  $K_T$  の結果を示す。これらの図より,  $K_T$  は右斜波成分の卓越する  $\Psi = 8 \sim 17^\circ$  の範囲では, 横波共振点付近を除き  $\lambda/L$  による顕著な変動は見られず, ほぼ 0.5 程度と一定値を示すことや, 見掛けの開口率  $\alpha$  を大きくすると  $K_T$  は増加することなどが分かる。また, 図-9 に見られるように, 右斜波成分の卓越する  $1 < \lambda/L < 2$  の範囲では, 傾斜角が小さな  $\Psi = 8^\circ$  の条件で  $K_T$  は最大になることなどの特性も認められる。

#### 4. 実験結果と算定結果の比較

##### (1) 実験装置および実験方法

実験は, 図-11 に示すような平面水槽を用いて行った。この水槽内には, 隔壁板で幅 1.8m の長水路を設け, 堤体列への入射波が正確に測定できるようにした。そして, 水槽の終端側には, 壁面からの再反射が生じないように, 砕石斜面よりなる消波工を設けた。また, 堤体列による透過波および反射波に含まれる斜波成分が, 水槽側面より再反射しないように, 水槽側壁にも金網と砕石よりなる消波工を設置した。模型の矩形堤体は, 防水ベニア板により同一寸法のものを 5 基製作し, これらの堤体を, ほぼ水路の中央部に造波板と平行となるように直線的に配列した。この際, 隣接する堤体の中心間隔  $\lambda$  は 150cm と固定し,  $\alpha = 0, 20\%$  の 2 種類,  $\Psi$  は  $0 \sim 30^\circ$  の範囲で 6 種類を採用した。

実験では, 計 9 本の波高計を使用し, これらの中の 2

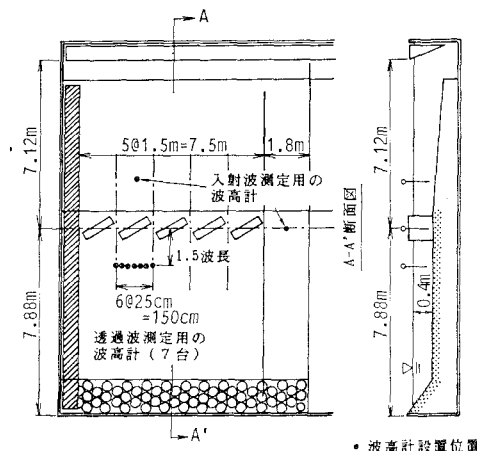


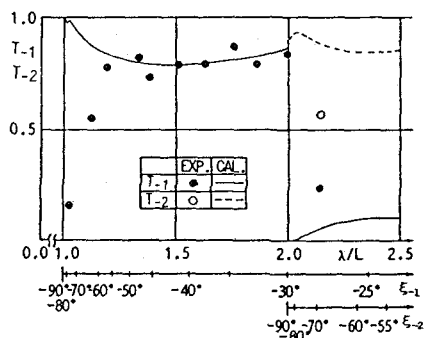
図-11 実験水槽および実験装置の概略

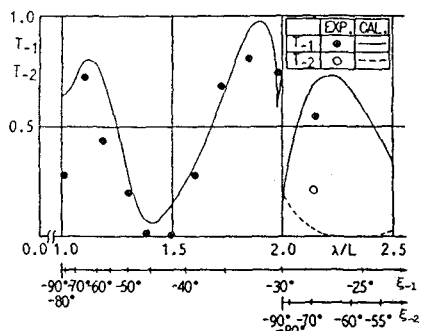
本は入射波の測定に, また残りの 7 本は, 透過波側での波高比の rms 値および透過波の波向き特性量の測定に用いた。この際, rms 波高比の推定および波向きの分解には, 中村・小野 (1990) による方法を採用した。そして, 上記した 7 本の波高計は, 隣接する堤体の中心間隔  $\lambda$  にわたり, 25cm の等間隔で堤体配列方向に直線的に設置した。

堤体に作用せしめた入射波の周期  $T$  は,  $0.6 \sim 1.4$  sec の範囲の 14 種類, 入射波の波高  $H$  は約 4cm と一定にし, 水深  $h$  も 40cm と固定した。

##### (2) 波向き制御効果

図-12, 13 は, それぞれ  $\Psi = 12.2^\circ, 30^\circ$  ( $\alpha = 0\%$ ,  $l_p/\lambda = 1.0$ ) の場合の透過波の波向き特性に関する実験結果と算定結果の比較を示すもので, 代表例として右斜波成分  $T_{-n}$  のみが表示してある。 $\Psi = 12.2^\circ$  の場合, 実験値と算定値は,  $\lambda/L = 1$  の横波共振点近傍で差異が見られるものの, この共振点付近を除けば, ほぼ一致している。そしてこの場合, 右斜波成分の  $T_{-1}$  が  $\lambda/L$  の広い範囲で 0.8 程度と大きく卓越することが実験的にも確認され, 堤体列により透過波の主卓越方向を入射波のそれより変化できることがわかる。共振点近傍での差異


 図-12 透過波中の右斜波成分 ( $\Psi = 12.2^\circ$ ,  $l_p/\lambda = 1.0$ )

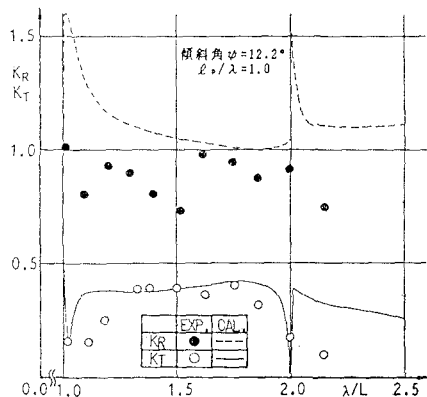
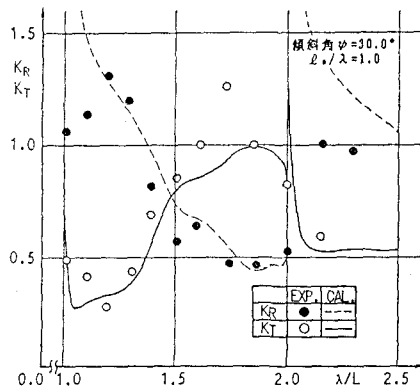
図-13 透過波中の右斜波成分 ( $\psi=30^\circ$ ,  $l_P/\lambda=1.0$ )

の原因としては、波向きが  $90^\circ$  に近く、実験で配列した堤体の基数が十分でなかったことが挙げられる。

堤体の傾斜角  $\psi$  が  $30^\circ$  の図-13に着目すると、実験値と算定値とは、やはり  $\lambda/L=1$  の横波共振点近傍で差異が認められるものの、右斜波成分が  $\lambda/L$  により複雑に変化するなど、全体的な変動特性は、両者でほぼ一致している。そして、傾斜角を大きくすると、図-12の場合に比較して、 $T_{-1}$  は、特に  $\lambda/L=1.5$  付近で著しく低下することなどが実験的にも確認できる。

### (3) 波高特性

図-14, 15 は、上記した各堤体列による透過波側での rms 波高比  $K_T$  と反射波側でのそれ  $K_R$  の実験結果と算定結果の比較を示すもので、それぞれ前出の図-12, 13 の条件に対応している。これらの図より、実験結果と算定結果は、横波共振点付近を除けば、堤体の傾斜角に関係なくほぼ一致していることが認められる。そして、堤体の傾斜角  $\psi$  が  $12.2^\circ$  の図-14を見ると、 $K_T$  は  $\lambda/L$  の値にかかわらずほぼ 0.4 程度以下であることなどが実験的にも確認できる。このことから、矩形堤体を  $\psi=12^\circ$  程度で、しかも  $l_P/\lambda=1.0$  の条件で配列すると、上述した波向き制御に加え、透過波高の制御もある程度行えることがわかる。また、傾斜角  $\psi=$

図-14 rms 波高比  $K_R$ ,  $K_T$  ( $\psi=12.2^\circ$ ,  $l_P/\lambda=1.0$ )図-15 rms 波高比  $K_R$ ,  $K_T$  ( $\psi=30^\circ$ ,  $l_P/\lambda=1.0$ )

$30^\circ$  で  $l_P/\lambda=1.0$  の条件(図-15)では、右斜波成分の卓越する  $\lambda/L=1.1$  付近で、 $K_T$  は 0.3~0.4 程度であるが、右斜波成分が再度卓越する  $\lambda/L=1.8$  付近では、0.9 以上と波高制御効果はほとんど期待できないものになっている。

## 5. 結 語

(1) 規則的に配列された矩形堤体まわりの平面的な波変形は、堤体の配列方向における波高比の rms 値と方向スペクトルと類似した概念により定義される各波向き成分のエネルギー比の両者を用いて的確に評価でき、これらの特性量は、堤体の配列条件を考慮した波浪境界値問題の解析法によりほぼ推定できる。

(2) 矩形堤体列背後での透過波の主卓越波向きは、堤体を配列軸より傾斜して配置すると入射波のそれより変化させることができる。そしてその傾斜角度を配列軸に対して  $8\sim 17^\circ$  程度の範囲に設定すると、波向き制御効果は広い周期帯にわたり安定して現れる。

(3) 堤体列による波高制御効果は、同一の傾斜角度では、開口率が小さくなるほど顕著になる。しかし、波向きの制御効果が有効な傾斜角の範囲内では、波高制御効果は傾斜角度によりほとんど変化せず、しかも作用波の周期による変動も少ない。

## 参 考 文 献

- 中村孝幸・小野正順 (1988): 規則配列された沖合消波堤まわりの波浪共振の特性とその解析法, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 527-531.
- 中村孝幸・小野正順 (1990): 波向き特性を考慮した堤体列まわりの平面的な波変形の評価法について, 海岸工学論文集, 第37巻, pp. 534-538.
- Dalrymple, R. A. and P. A. Martin (1990): Wave diffraction through offshore breakwaters, J. of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE, Vol. 116, No. 6, pp. 727-741.