

透過性構造物を有する 多方向不規則波浪場の計算方法

A NUMERICAL SIMULATION METHOD FOR MULTI-DIRECTIONAL RANDOM WAVES WITH THE PERMEABLE BREAKWATERS

金澤 剛¹・長山英樹²・藤原隆一³・松村章子⁴

Tsuyoshi KANAZAWA, Hideki NAGAYAMA, Ryuichi FUJIWARA and Akiko MATSUMURA

¹正会員 工修 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 西宮市鳴尾浜1-25-1)

²工修 東洋建設株式会社 北陸支店 (〒920-0852 金沢市此花町6-10)

³正会員 博(工) 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 西宮市鳴尾浜1-25-1)

⁴正会員 東洋建設株式会社 鳴尾研究所 (〒663-8142 西宮市鳴尾浜1-25-1)

It is important to estimate an influence of permeable breakwaters in a numerical simulation for multi-directional random waves. In this study, a proposed method for generating transmission waves has been applied to the time-dependent mild slope equation for random waves. Transmission waves was generated by the wave damping method. The relationship between damping coefficients and transmission coefficients has been investigated by numerical simulations for uni-directional irregular waves. The validity of the method has been verified through the hydraulic model test for multi-directional random waves.

Key Words : numerical simulation, multi-directional random waves, permeable breakwater, transmission coefficient

1. はじめに

近年、基礎方程式の発展と計算機の発達により、港内静穏度等の平面波浪場を予測する場合、多方向不規則波を対象とすることが一般的になってきた。そして、そこでは地形変化や構造物による多方向不規則波の各種変形を精度良く考慮することが求められている。特に、構造物の特性に左右される反射波や透過波は適切に評価する必要がある。

多方向不規則波を対象とした任意反射率を有する構造物周辺の波浪変形計算法に関して、金澤ら^{1),2)}は磯部³⁾あるいは石井ら⁴⁾の有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を基礎方程式に、反射境界上に任意反射率に対応した減衰係数を与えて任意反射率境界を構築している。そして、任意反射率と減衰係数に関する汎用的な関係式を数値実験結果から求め、平面水槽実験結果と比較することでその有効性を確認している。また、有川・磯部⁵⁾は非線形緩勾配方程式を用いて、平石ら⁶⁾、平山⁷⁾はブシネスク方程式を用いて、それぞれ、開境界処理に用いられるスポンジ層を構造物境界の前面に配置して任意反射率境

界を構築し、そこで波エネルギーの減衰量を調整して構造物の所定の反射率を得ようとしている。さらに、平山・平石⁸⁾はスポンジ層によるエネルギー減衰を利用した部分反射境界について、数値実験結果から波浪条件やスポンジ層の諸元によって変化する目標反射率を設定する際の目安となる図表を提案している。

一方、透過性構造物は海水交換機能等の環境面でも利点の多い構造物であり、平面波浪場の予測でもその透過性を考慮することが重要である。しかしながら、多方向不規則波浪場の波浪変形計算において、任意の透過率を有する透過構造物を扱った例は少ないようである。

そこで、本研究では、線形方程式ではあるものの各種の波浪変形を同時に考慮できる磯部³⁾あるいは石井ら⁴⁾の有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を用いて、多方向不規則波浪場で任意透過率を有する構造物を取扱う比較的簡易で実用的な計算法を構築することを目的とした。そして、通常的设计等で対象となる条件範囲内で波浪諸元、構造物諸元等を系統的に設定した数値実験を実施し、設定透過率に対して一意的に波のエネルギー減衰係数が求ま

る汎用的な関係式を提案した。さらに、多方向不規則波実験を実施して、提案した透過性構造物モデルの妥当性を検証した。

2. 基礎方程式

磯部⁹⁾により示され、石井ら⁴⁾が平面2次元波浪場へ適用した有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式は次式で与えられる。

$$\nabla^2 \tilde{\phi} - ia_1 \nabla^2 \left(\frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} \right) + (b_0 + ic_0) \tilde{\phi} + i(b_1 + ic_1) \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial t} - b_2 \frac{\partial^2 \tilde{\phi}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{\phi}$ はRadder変換した複素水面変動振幅と次式の関係にある。

$$\tilde{\phi} = \hat{\phi}^{-\omega t} \quad (2)$$

$$\omega' = \omega - \bar{\omega} \quad (3)$$

ただし、 $\bar{\omega}$ は代表角周波数、 ω' は $\bar{\omega}$ と成分波の角周波数 ω との差である。また、 t は時間、 ∇ は水平2方向の微分演算子、 i は虚数単位である。 a_1 、 b_0 、 b_1 、 b_2 はBerkhoff⁹⁾の緩勾配方程式をRadder¹⁰⁾による変数変換を用いて変形した式(4)の係数 k^2 (k :波数)を式(5)の有理式によって近似したときの係数、 c_0 、 c_1 は砕波などによるエネルギー減衰を表す項(虚数項)を式(4)に含めた場合に、その項を1次近似によって近似した係数であり、式(6)および(7)に示すようにエネルギー減衰係数 f_D および b_1 、 b_2 から決定される係数である。

$$\nabla^2 \tilde{\phi} + k^2 \tilde{\phi} = 0 \quad (4)$$

$$k^2 = \frac{b_0 + b_1 \omega' + b_2 \omega'^2}{1 - a_1 \omega'} \quad (5)$$

$$c_0 = \bar{k}^2 f_D \quad (6)$$

$$c_1 = (2b_2 / b_1) c_0 \quad (7)$$

なお、 \bar{k} は代表波の波数である。エネルギー減衰係数 f_D は、砕波している個々波に対しては砕波減衰係数として与えられ、開境界を構築するエネルギー吸収帯ではエネルギー吸収係数として与えられる。また、金澤ら^{1), 2)}の任意反射率境界は、任意反射率に応じたエネルギー減衰係数を設定し、構造物壁面上の計算点に完全反射境界を設定した上でそのエネルギー減衰係数を式(6)の f_D に与えている。したがって、有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式においては、計算領域内の任意の点に適切な減衰係数 f_D を与えれば、必要な波のエネルギーを減衰させ得る可能性があり、透過性構造物への適用拡張が可能

であると考えられた。

3. 透過性構造物の評価方法

(1) モデル化

先に示したように有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式は砕波などによるエネルギー減衰を表す項を含むため、任意の計算点で強制的にエネルギー減衰係数 ε_m を新たに付加することで、所要の波のエネルギーを減衰させることが可能と考えられる。そこで、計算対象領域中に存在する透過性構造物を図-1に示すようにモデル化した。すなわち、透過性構造物に対し、透過率を含む構造物境界を設定するのではなく、構造物内の計算点に一律なエネルギー減衰係数 ε_m を与えることとした。そして、入力条件としては従来から一般的に用いられている入射波高と透過波高の比である透過率を採用した。したがって、本モデルに汎用性を持たせるためには、与えられた透過率に対し、波浪条件や設置水深等の条件で変化すると考えられるエネルギー減衰係数との間に高い相関を有する関係を見出す必要があった。

(2) エネルギー減衰係数と透過率の関係

エネルギー減衰係数と透過率の関係は、一様水深における一方向不規則波を対象とした数値実験から求めることとした。数値実験条件は対象波浪諸元と構造物設置水深を種々変化させ、水深波長比 $h/L_{1/3}$ が $0.054 \leq h/L_{1/3} \leq 0.483$ の範囲とした。また、構造物の天端幅 B も $0.04 \leq B/L_{1/3} \leq 1.06$ の範囲で変化させ、エネルギー減衰係数 ε_m はCruzら¹¹⁾によるスポンジ層内のエネルギー減衰係数の分布関数を参考に次式で定義し、その強度 θ を $0.25 \leq \theta \leq 3.0$ の範囲で変化させた。

$$\varepsilon_m = \theta \sqrt{g/h} \quad (8)$$

透過率は、透過性構造物岸側壁面上に相当する計算点の有義波高と無堤時の同一地点の有義波高との比で定義した。

入力したエネルギー減衰係数 ε_m と計算結果から求めた透過率 K_T の関係は、エネルギー減衰係数 ε_m に堤体幅波長比 B/L を乗じたパラメータをエネルギー減衰強度 $\varepsilon_m \cdot B/L$ と定義して、以下のように表

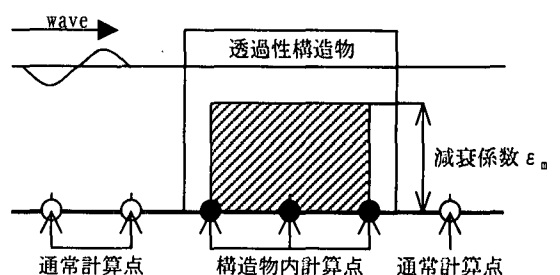


図-1 透過性構造物の模式図

することができた。

$$\varepsilon_m \cdot B/L = -0.248 \ln(K_T) - 0.0232 \quad (9)$$

最小二乗法により求めたこの関係式における両者の相関係数は $r=0.998$ と非常に高い値を示した。しかしながら、この関係式には空間刻み幅 Δx の影響が加味されていないため、堤体幅をモデル化する計算格子数によっては、入力した透過率と計算結果から算出した透過率との差異が大きくなる場合があった。図-2は、波浪条件を同一としてエネルギー減衰強度 $\varepsilon_m \cdot B/L$ を固定し、堤体幅 B を $1 \Delta x$ から $5 \Delta x$ に変化させたケース、すなわち、堤体幅 B を増大させるにつれエネルギー減衰係数 ε_m を減少させたケースについて、堤体背後の点で周波数スペクトルの分布形状を比較したものである。図中の横軸はピーク周波数で無次元化した周波数、縦軸はピーク周波数に対応するスペクトルのエネルギー密度で無次元化したエネルギー密度である。また、図中の実線、破線および点線は、それぞれ、相対堤体幅 $B/\Delta x$ が1, 2および5の場合を示す。この図-2によれば、堤体幅が広く $B/\Delta x$ が大きいほどスペクトルのエネルギー密度が大きい傾向を示した。すなわち、透過率とエネルギー減衰係数の関係には、堤体幅をモデル化する空間刻み幅の影響も考慮する必要があることが示唆された。

図-3は新たにエネルギー減衰強度 $\varepsilon_m \cdot B/L$ に重み関数として相対堤体幅 $B/\Delta x$ を乗じてエネルギー減衰係数と透過率の関係を示したものである。また、最小二乗法で求めた両者の関係式は次式となり、相関係数は $r=0.997$ であった。

$$(\varepsilon_m \cdot B/L)/(B/\Delta x)^{0.11} = -0.190 \ln(K_T) - 0.0132 \quad (10)$$

これにより、有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を用いた波浪変形計算において、透過性構造物設置位置の計算点上に、所定の透過率から式(10)で求めたエネルギー減衰係数を付加することで、透過性構造物周辺の不規則波浪場を予測することが可能となった。

4. 平面水理模型実験

(1) 実験条件

式(10)の妥当性と多方向不規則波への適用性を検証するためのデータを取得することを目的として、平面水理模型実験を実施した。実験は東洋建設株式会社鳴尾研究所の多方向不規則波造波水槽(L30m×W19m×D1.5m)を使用し、平坦床上に透過性構造物模型を設置して、多方向不規則波を作用させて構造物周りの波高分布を計測した。実験概要図を図-4に示す。また、実験波浪条件を表-1に示す。透過性構造物模型はステンレス製のガゴ(L2.95m×B0.42m×H1.02m)の中に多繊維製の消波マットを入れたもの

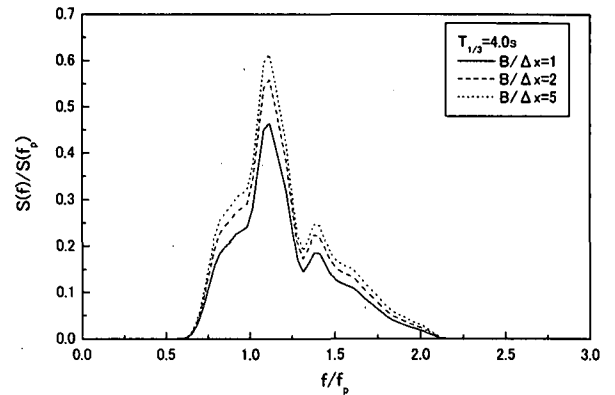


図-2 周波数スペクトルの変化

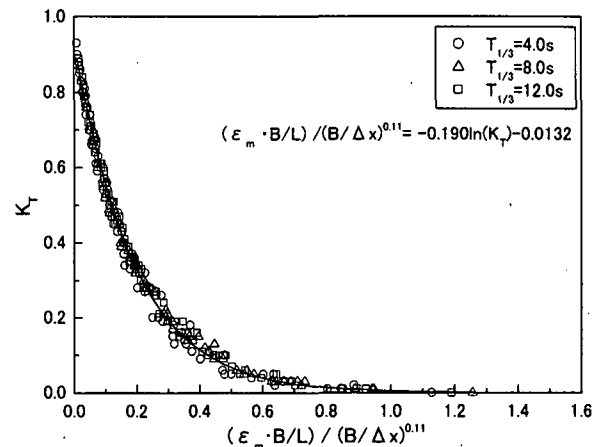


図-3 エネルギー減衰係数と透過率の関係

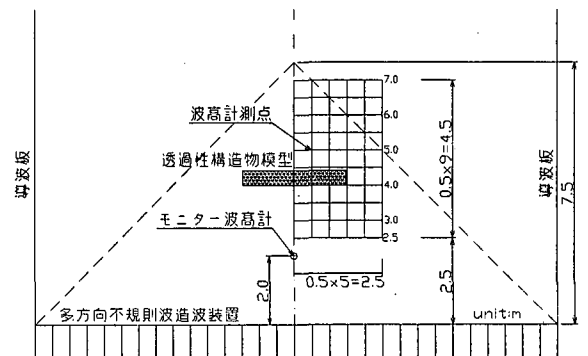


図-4 平面水理模型実験概要図

表-1 実験波浪条件

波浪種別	多方向不規則波
有義波高 $H_{1/3}$	5.0cm
有義波周期 $T_{1/3}$	①0.91s, ②1.12s, ③1.54s
周波数スペクトル	Bretschneider-光易型
方向関数	光易型
S_{max}	25
主波向	造波板に直角方向
水深	30cm

とし、消波マットの厚さを変化させることで、透過率も変化させた。

表-2 透過性構造物模型の透過率

$T_{1/3}$ (s)	消波マット枚数(厚さ)		
	5枚(25cm)	3枚(15cm)	1枚(5cm)
0.91	0.30	0.40	0.65
1.12	0.40	0.50	0.65
1.54	0.45	0.55	0.80

(2) 透過性構造物模型の透過率

平面実験を実施してその結果と数値計算結果を比較する際には、透過性構造物模型の透過率を把握しておく必要があった。そこで平面実験に先立ち、透過性構造物模型の透過率を測定するため、平面水槽内に導波板を用いて堤体模型幅の水路を作って一方向不規則波実験を実施した。計測は堤体模型の沖側および岸側にそれぞれ1波長離れた位置に2本ずつ容量式波高計を設置し、入射波スペクトル分離法にてそれぞれの位置での進行波成分を算出した。透過率は透過波領域の進行波成分と入射波領域の進行波成分の比で算定した。この実験により得られた透過性構造物模型の透過率と透過性構造物模型を成した消波マット枚数の関係を表-2に示す。

表-3 実験条件と計算条件の対比

	実験	計算
造波境界	再反射防止	再反射防止
側方境界	導波板	完全反射境界
岸側境界	碎石斜面	開境界
水槽幅	15.0m	600m(=15×40)
水槽長	25.0m	1000m(=25×40)
水深	30.0cm	12m(=0.3×40)
有義波高	5.0cm	2.0m(=0.05×40)
有義波周期①	0.91s	5.76s(=0.91×400.5)
有義波周期②	1.12s	7.08s(=1.12×400.5)
有義波周期③	1.54s	9.74s(=1.54×400.5)
透過堤の位置	造波装置から4.0m	160m(=4×40)
透過堤の幅	5~25cm	2~10m
透過堤の長さ	2.95m	118m(=2.95×40)
堤体の側面	透過	透過

5. 検証

(1) 再現計算条件

再現計算における計算条件は実験条件とできる限り同一とした。ただし、計算は模型縮尺1/40を想定して現地の規模にスケールアップして実施した。実験条件と計算条件の対比を表-3に示す。なお、多方向不規則波の信号作成方法は、水理実験と計算は同一であり、周波数スペクトルおよび方向関数も同一である。しかしながら、解析は主として有義波高分布に着目していたため、水理実験と計算では発生させた波群自体は異なる。

(2) 周波数スペクトルの比較

図-4に示す岸沖方向測線のうち、透過性構造物の中心である測線 $X=0.0m$ において、透過性構造物岸側の実験結果と計算結果の周波数スペクトルを比較した。図-5に有義波周期1.12s(実験スケール)、透過率 $K_T=0.50$ のケースについて示す。横軸はピーク周波数で無次元化した周波数、縦軸はピーク周波数に対するスペクトルのエネルギー密度で無次元化したエネルギー密度である。図中の実線が実験結果、点線が計算結果を示す。また、 Y/L は透過性構造物沖側壁面から岸向き正にとった距離を有義波の波長で無次元化したものである。図-5によれば、全ての点で実験結果と計算結果の周波数スペクトルは似ている。特に回折散乱波の影響がほとんどなく、ほぼ透過波の周波数スペクトルと見なせる透過堤に極めて近い点($Y/L=0.31$)では両者のスペクトル形状およびピークエネルギー密度とも良く一致している。この図において、計算結果のスペクトル形状に、例えば高周波数側で減衰が著しく大きいなどの特徴的な変形が認められないため、提案した透過モデルは成分波のエネルギー密度に応じてバランス良く波のエネルギーを減じていると考えられる。

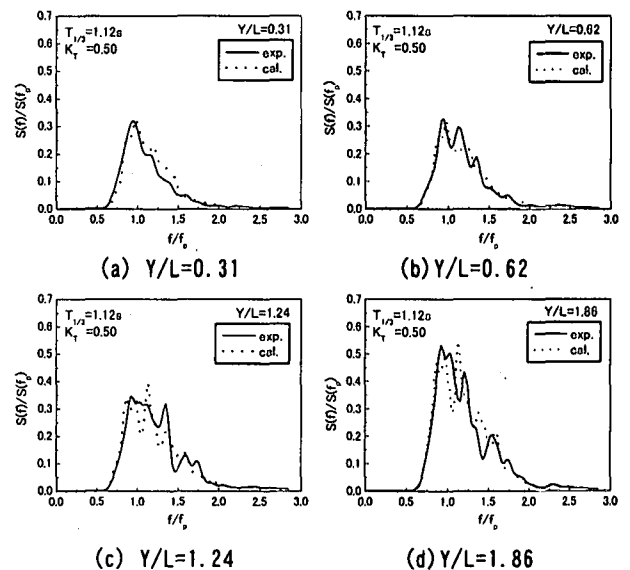


図-5 周波数スペクトルの比較

(3) 波高分布の比較

図-6に有義波周期1.12s(実験スケール)、透過率 $K_T=0.50$ のケースについて、図-4に示す岸沖方向測線における有義波高分布を示す。図中、○が実験結果、実線が計算結果である。横軸は透過性構造物沖側壁面から岸向き正にとった距離を有義波の波長で無次元化したものであり、縦軸はそれぞれの有義波高を入射波の有義波高で無次元化したものである。また、 X は水槽中心軸からの水平距離(実験スケール)

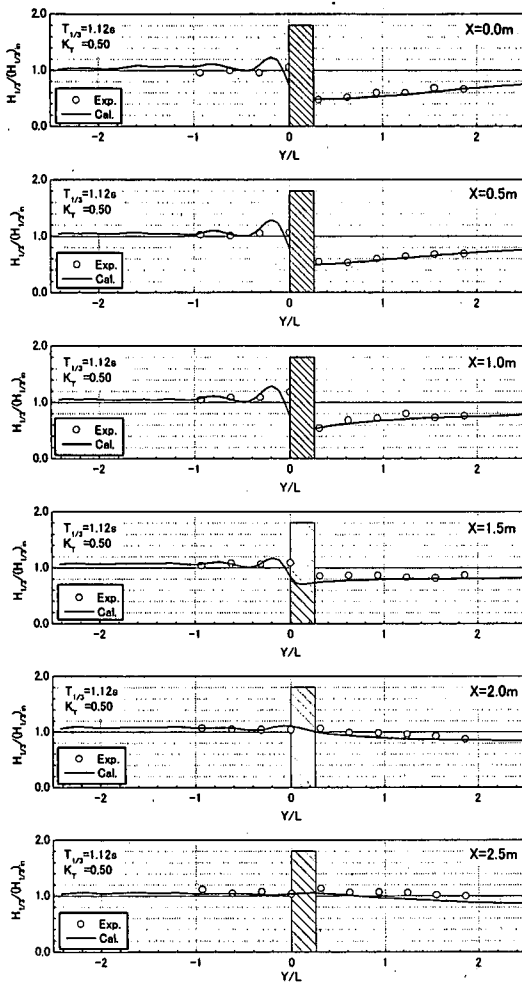
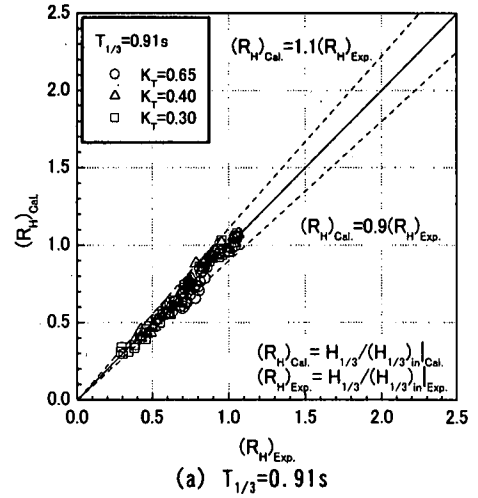


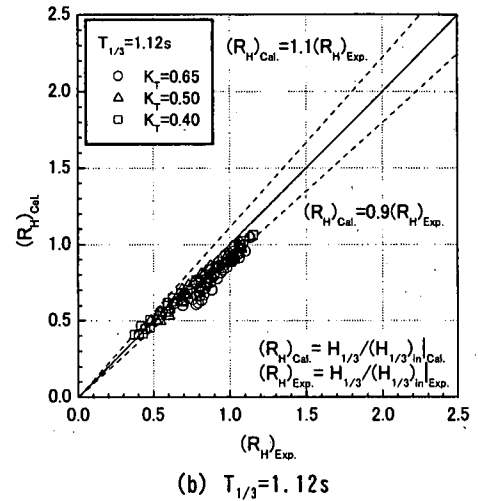
図-6 岸沖方向測線ごとの波高比の比較

ル)である。透過堤岸側の透過波領域に着目すると、透過性構造物背後から岸側に離れていくにつれて波高比が増大する実験結果を計算結果は定性的・定量的に良く再現している。また、透過性構造物が存在しない $X \geq 1.5\text{m}$ の領域でも、実験結果と計算結果は比較的良く一致している。一方、透過性構造物前面の反射波が卓越する領域では、本モデルが反射という物理現象を適切に再現しているわけではないために堤体近傍で整合が悪い所があるが、その影響は堤体近傍の狭い範囲に留まる。したがって、本透過モデルを使用した計算結果である平面波高分布は、透過性構造物沖側の構造物近傍を除いてほぼ妥当な結果を示すことが確認できた。

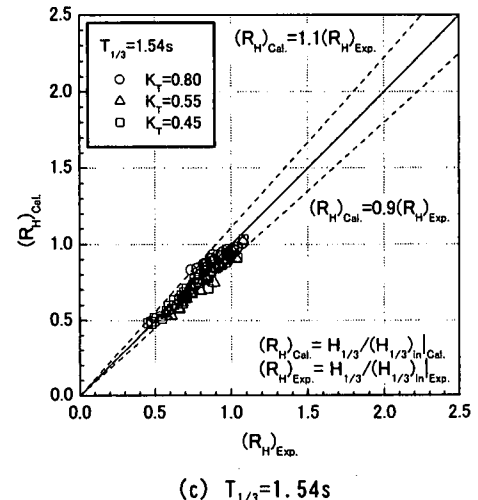
図-7は比較検討した全てのケースについて、対象波の周期別に、縦軸に計算結果の波高比を、横軸に実験結果の波高比を取り、透過性構造物より岸側の領域($Y/L > 0$)における同一地点での両者の対応を示したものである。両者は対象波の周期に関わらず、ほぼ全ての点で約±10%の範囲内に分布し、良い整合を示している。また、図-7にプロットした各点について、実験値と計算値の比に関する統計値を示したものが表-4である。平均値はほとんどのケースで1.0に極めて近く、標準偏差も0.1未満でばらつきが



(a) $T_{1/3} = 0.91\text{s}$



(b) $T_{1/3} = 1.12\text{s}$



(c) $T_{1/3} = 1.54\text{s}$

図-7 実験結果と計算結果の波高比の対応

表-4 波高分布の比較結果

No.	$T_{1/3}(\text{s})$	K_T	平均	標準偏差	変動係数
1	0.91	0.65	0.956	0.067	0.070
2		0.40	0.992	0.052	0.052
3		0.30	0.988	0.059	0.060
4	1.12	0.65	0.868	0.046	0.053
5		0.50	0.941	0.043	0.045
6	1.54	0.40	0.956	0.055	0.058
7		0.80	1.002	0.045	0.045
8		0.55	0.929	0.038	0.041
9		0.45	0.958	0.043	0.045

小さいことが確認できた。このことから実験結果と計算結果の対応は良好であり、今回設定した透過率と減衰係数の関係式(10)の妥当性が確認できたと考える。また、式(10)は一方向不規則波から得たものではあるが、多方向不規則波浪場へも適用可能であることが確認できた。

6. まとめ

本研究では、多方向不規則波浪場で任意透過率を有する構造物を取扱う比較的簡易で実用的な計算法を構築した。得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) 有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を用いた多方向不規則波浪場の計算において、透過性構造物は構造物内の計算点に適切なエネルギー減衰係数を付加することで評価できる。
- (2) 透過率とエネルギー減衰係数の関係は、波浪諸元、構造物諸元等を系統的に設定した一方向不規則波を対象とした数値実験結果から求めた。
- (3) 透過率とエネルギー減衰係数の関係は、エネルギー減衰係数と堤体幅波長比の積であるエネルギー減衰強度 $\varepsilon_m \cdot B/L$ に重み関数として相対堤体幅 $B/\Delta x$ を乗じたパラメータで一意的に定まった。
- (4) 平面水槽における多方向不規則波実験を実施し、実験結果とその再現計算結果を比較した結果、両者の周波数スペクトルおよび有義波高分布は良く一致した。
- (5) 提案した透過モデルは多方向不規則波へ適用が可能である。

参考文献

- 1) 金澤 剛, 長山英樹, 藤原隆一, 小竹康夫: 多方向不規則波浪場での任意反射率境界の設定方法, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, II-3, pp.6-7, 2000.
- 2) 金澤 剛, 長山英樹, 藤原隆一, 松村章子: 緩勾配不規則波動方程式における任意反射率境界設定方法の高度化, 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, II-001, pp.1-2, 2002.
- 3) 磯部雅彦: 有理式近似に基づく非定常緩勾配不規則波動方程式, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.26-30, 1993.
- 4) 石井敏雅, 磯部雅彦, 渡辺 晃: 有理式近似に基づく緩勾配不規則波動方程式を用いた平面2次元波浪場計算, 海岸工学論文集, 第41巻, pp.6-10, 1994.
- 5) 有川太郎, 磯部雅彦: 非線形緩勾配方程式を用いた任意反射率を持つ構造物周辺の入・反射波浪共存場の解析, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.56-60, 1999.
- 6) 平石哲也, 平山克也, 河合弘泰, 上原 功: 熊本県竜ヶ岳町における台風9918号高潮被害の特性, 海岸工学論文集, 第47巻, pp.306-310, 2000.
- 7) 平山克也: プシネスクモデルにおける透水層内の波浪減衰を考慮した任意反射境界処理法の開発, 海岸工学論文集, 第48巻, pp.26-30, 2001.
- 8) 平山克也, 平石哲也: プシネスクモデルにおける目標反射率の設定法とその港内波高分布計算に対する適用性, 海岸工学論文集, 第49巻, pp.676-680, 2002.
- 9) Berkhoff, J. C. W.: Computation of combined refraction-diffraction, Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., pp.471-490, 1972.
- 10) Radder, A. C.: On the parabolic equation method for water-wave propagation, J. Fluid Mech., Vol.95, pp.159-176.
- 11) Eric Cruz, 横木裕宗, 磯部雅彦, 渡辺 晃: 非線形波動方程式に対する無反射境界条件について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp.46-50, 1993.