

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.40 NO.4 December 2001

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 40 卷 第 4 号 (Vol.40, No.4), 2001年12月 (December 2001)

目 次 (CONTENTS)

1. ブシネスモデルにおける任意反射境界処理法を用いた非線形部分重複波の計算
..... 平山克也 3
(Numerical Simulation of Nonlinear Partial Standing Waves using the Boussinesq Model with New Reflection Boundary
..... Katsuya HIRAYAMA)

2. 期待変形量を用いた防波堤のマウンド支持力に関する設計法
..... 土田 孝・梅沢信俊・石倉克真・湯 怡新 49
(Design Method on Bearing Capacity of Composite Breakwater using Expected Deformation
..... Takashi TSUCHIDA, Nobutoshi UMEZAWA, Katsumasa ISHIKURA and Yi Xin Tang)

ブシネスクモデルにおける任意反射境界処理法 を用いた非線形部分重複波の計算

平山克也*

要 旨

防波堤や護岸における波の反射を適切に計算するために、平山・平石(2001)は、消波ブロックなどの消波材による波浪減衰機構を透水層によりモデル化し、ブシネスクモデルにおいて波の部分反射を直接的に計算する任意反射境界処理法を開発した。透水層モデルでは、消波工の内部で生じる波浪減衰は、透水層による層流抵抗と乱流抵抗によって表現される。これらの抵抗係数は、消波材の形状や大きさ、および積み方や空隙率などの物理量から客観的に定量化される。また、消波工の法面勾配は、透水層の空隙率に水平分布を与えることによって表現され、透水層幅は、消波工の設置幅と等しく設定される。

本研究では、この透水層モデルの基本特性と汎用性について詳細に検討した。まず、反射率に関する透水層パラメータの感度分析を行い、消波断面の諸元や波浪条件と反射率との関係を整理した。つぎに、1/30勾配斜面の岸側に法面勾配の異なる2種類の消波ブロック被覆堤、および繊維状消波材を充填した直立消波堤を設置して、透水層モデルを用いた非線形波の反射計算を実施した。断面水路を用いた検証実験との比較では、反射率や入・反射波のスペクトル形状の変化、および部分重複波形の再現性に注目した。得られた結果はおおよそ次のようである。

- 1) 消波ブロック層を透水層とみなして計算された反射率は、空隙率 $\lambda=0.3\sim 0.8$ のとき小さい。
- 2) 空隙率 λ が1に近いとき、透水層モデルによる波浪減衰は、層流抵抗よりも乱流抵抗のほうが支配的である。
- 3) 透水層モデルは、消波工の法面勾配や消波材の諸元が異なるそれぞれの消波断面において、入射波の波高や周期、および水深によって変化する反射率や入・反射波のスペクトル特性を非常によく再現した。
- 4) 空隙率 $\lambda=1$ (このとき透水層モデルは完全反射境界となる)とした直立堤を対象とした反射計算では、反射率はほぼ $K_r=1.0$ となった。一方、模型実験で得られた反射率は $K_r=0.6\sim 1.0$ であった。模型実験におけるエネルギー損失、非線形波に対する反射率の推定方法、波の非線形性に関する数値モデルの近似精度などに関する検討が、今後の課題である。

キーワード：ブシネスク方程式、透水層、任意反射、部分重複波、消波ブロック

* 海洋・水工部波浪研究室

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1, 独立行政法人港湾空港技術研究所

TEL: 0468-44-5042, FAX: 0468-41-3888, E-Mail: hirayama@cc.phri.go.jp

Numerical Simulation of Nonlinear Partial Standing Waves using the Boussinesq Model with New Reflection Boundary

Katsuya HIRAYAMA*

Synopsis

Present time-dependent wave transformation models such as Boussinesq-type models can simulate standing waves in front of a vertical wall using a perfect reflection boundary. The waves in front of actual seawalls and harbor breakwaters, however, are rather partial standing waves such that some incident wave energy is dissipated, especially when covered with wave energy dissipating blocks.

Recently we reported on a new boundary model developed to reproduce the partial standing waves in a Boussinesq-type wave transformation model, named a porous boundary. This model consists of a special porous region where wave energy is dissipated due to laminar and turbulent flow resistances, and can reproduce the amplitude and phase of partial standing waves.

In the present report, numerical calculations are systematically carried out to conduct a basic parameter study on wave conditions and porous media, i.e., concrete blocks and geotextile wave-absorber. Another series of numerical calculations are also conducted to investigate the suitability of using the wave transformation model with this porous boundary model. Resultant wave profiles in front of the boundary, wave spectrum, and reflection coefficient are compared with values obtained from model experiments in a wave flume. Major conclusions are as follows:

- 1) The reflection coefficient of the porous boundary varies significantly with porosity, i.e., when porosity is from 0.3 to 0.8, the reflection coefficient is small; becoming smaller with decreasing wave period and increasing wave height as predicted.
- 2) Wave energy dissipation mainly occurs by turbulent flow resistance for a geotextile wave-absorber having large porosity and small diameter.
- 3) Partial standing waves in front of a vertical wall covered with concrete blocks are suitably reproduced by the model.
- 4) Simulations agree well with experimental results using geotextile wave-absorber in that it can effectively reduce the reflection coefficient.
- 5) Calculations and experiments for a solid vertical wall indicate that calculational reflection coefficients are about 1.0, while experimental ones are relatively low ranging from 0.6–1.0. Experimental results may include the effect of wave damping due to friction of the walls and/or measurement errors, which should both be investigated further.

Keyword: Boussinesq equation, Porous layer, Partial reflection boundary,
Partial Standing wave, Armor Block

* Wave Division, Marine Environment and Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan, Port and Airport Research Institute

TEL : 0468-44-5042, FAX : 0468-41-3888, E-Mail : hirayama@cc.phri.go.jp

目 次

要旨	3
1. はじめに	7
2. 反射率に関する透水層パラメータの感度分析	7
2.1 透水層を用いた任意反射境界処理法	7
2.2 透水層パラメータに対する抵抗係数の変化	9
2.3 透水層パラメータの感度分析とその計算条件	9
2.4 消波ブロック被覆堤における感度分析結果	10
2.5 空隙率が大きい直立消波堤における層流抵抗係数と乱流抵抗係数の感度分析結果	13
3. 非線形波の反射計算とその検証	15
3.1 計算条件と実験条件	15
3.2 消波ブロック被覆堤における波の反射特性	16
3.3 消波材充填型の直立消波堤における波の反射特性	26
3.4 直立堤における波の反射特性	30
3.5 透水層モデルによる反射率の計算精度	37
4. 結論	39
5. あとがき	39
謝辞	39
参考文献	39
記号表	40
付録A 数値計算と模型実験の入射波検定	41
付録B 斜面沖側における反射率の再現性	45

1. はじめに

波の分散性や非線形性を考慮できるブシネスクモデルは、水位や流速の時間変動やその伝播を直接解くことにより、海底地形の変化に伴う波の屈折や浅水変形、および陸地や港湾構造物等による波の回折や完全反射を、同時に、かつ精度よく計算することができる。このため、複雑な港形や海底地形を有する港湾における港内静穏度や構造物の設計波の計算、あるいは海浜周辺の波・流れ場の推定などへの適用が広く検討されている。また最近では、自由長周期波の発生過程を再現する試みもなされている（例えば、富田・平山，2000）。しかしながら、消波工を有する防波堤や護岸による波の部分反射に対する計算手法は、ごく最近まで必ずしも確立されておらず、このことがモデルを汎用化する際の障害となっていた（部分反射波の計算例として、例えば、有川・磯部，1999、喜岡ら，1996）。

一般に、防波堤や護岸の反射率や、その前面で形成される部分重複波の波形は、消波断面の構造と入射する波の特性との関係によって変化する。ブシネスクモデルにおいてこれらを精度よく計算する手法の一つとして、消波工内部や堤体壁面における波浪変形を、直接、数値的に解く方法が考えられる。平山・平石（2001）は、修正ブシネスク方程式（Madsen and Sørensen, 1992）を透水層内へ拡張した式を用いて、さまざまな諸元を有する入射波に対して、その反射率や部分重複波形を再現する任意反射境界処理法を開発した。ここで提案された透水層モデルは、実際に現地や水理模型実験で用いられている各種消波ブロックなどの消波材による波浪減衰過程を、空隙率などの工学的パラメータが考慮された透水層内の波浪変形現象として物理的に表現したものである。断面2次元水路（水平床）に設置された消波ブロック被覆堤を対象とした波の反射計算では、数値計算と全く同じ条件で実施された模型実験による検証によって、非常に高い計算精度を有することが示されている。

本研究では、この透水層モデルによる任意反射境界処理法の汎用性について詳しく調べるために、まず、透水層の性質を決定する空隙率や抵抗係数などのパラメータに対して、反射率に関する感度分析を行い、消波断面の諸元や波浪条件と反射率との関係を整理した。つぎに、1/30 勾配斜面の岸側に設置された、法面勾配の異なる2種類の消波ブロック被覆堤、直立消波堤、および直立堤を透水層モデルで表現して、波高や周期、水深の異なる波の反射計算を実施した。計算結果は、断面水路を用いた模型実験により検証している。

2. 反射率に関する透水層パラメータの感度分析

2.1 透水層を用いた任意反射境界処理法

透水層を用いた任意反射境界処理法は、消波ブロックの層を等価な透水層で置き換え、さらに、堤体直立壁面を完全反射境界として取り扱うものである。つまり、入射波は透水層内を伝播する過程で減衰した後、堤体直立壁面で完全反射し、反射波は再び透水層を通過する過程で減衰しながら伝播して沖へ向かうというプロセスが忠実にモデル化されている。

図-1(b)は、図-1(a)に示す消波ブロック被覆堤に対する透水層モデルである。ここで、透水層の幅 B は消波工の設置幅とほぼ等しくなるように設定されている。ただし、消波工が 1:4/3 勾配で施工されていることは、透水層の空隙率 λ が水平方向に変化することで考慮され、堤体壁面からの距離を x として、空隙率は式(1)のように定義された。

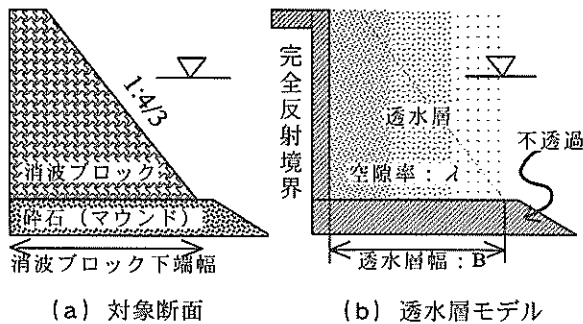
$$\lambda = \lambda_0 + (1 - \lambda_0) \frac{x}{B} \quad (0 \leq x \leq B) \quad (1)$$

ここで、 λ_0 は消波工の空隙率であり、消波ブロックの形状や積み方によって変化する。式(1)では、透水層の空隙率 λ が水域と透水層との境界で $\lambda=1$ 、堤体壁面に近づくにつれて（消波工の施工高さが高くなるにつれて）線形に減少し、壁面で $\lambda=\lambda_0$ となるように分布すると仮定されている。ただし、混成堤マウンドによる透過波は無視されている。

一方、図-2(a)に示すような、消波ブロックを直積みした直立消波堤や、模型実験におけるヘチマロンシートを充填した消波堤などに対する透水層モデルは、消波工内の空隙の分布を一様とみなして図-2(b)のように設定される。この場合には、透水層の空隙率 λ は、消波工の空隙率 λ_0 と等しいとして、空隙率は式(2)のように定義された。

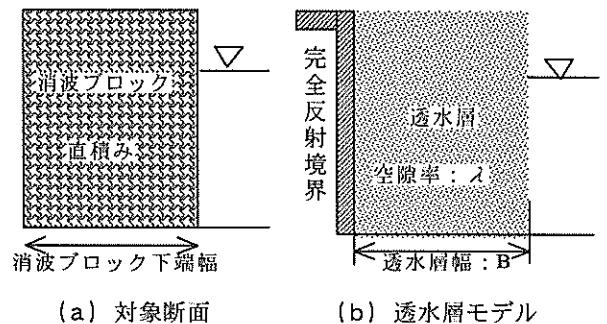
$$\lambda = \lambda_0 \quad (0 \leq x \leq B) \quad (2)$$

透水層内での波の減衰は、図-1(b)および図-2(b)ともに、透水層の層流抵抗係数 α と乱流抵抗係数 β を用いて推定された。これらの係数は、空隙率 λ 、水の動粘性係数 ν 、異形ブロックの代表径 d を用いて式(3)で見積もられる（近藤・竹田，1983）。



(a) 対象断面 (b) 透水層モデル

図-1 消波ブロック被覆堤



(a) 対象断面 (b) 透水層モデル

図-2 直立消波堤

表-1 各種材料の α_0 と β_0 (近藤, 1981 より転載)

個体の種類 積み方	テトラポッド		六角		中空三角		ホロースケヤ		三連		三柱		ジュゴン		石	球	立体格子
	整積	乱積	整積	乱積	整積	乱積	整積	乱積	整積	乱積	整積	乱積	整積	乱積	乱積	整積	整積
α_0	1200	2100	19000	5000	3500	9600	800	1500	1300	2100	10000	31000	6000	8300	800~1500	520	750
β_0	1.7	2.2	7.1	3.5	2.9	4.7	1.4	1.8	1.7	2.2	2.1	2.6	1.2	1.4	1.8~3.6	0.85	0.35

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^3}{\lambda^2} \frac{\nu}{d^2}, \quad \beta = \beta_0 \frac{(1-\lambda)}{\lambda^3} \frac{1}{d} \quad (0 < \lambda < 1) \quad (3)$$

ここで、 α_0 、 β_0 は、消波材の種類や積み方によって異なる定数であり、すでにいろいろな条件に対する値が実験的に与えられている (表-1: 近藤, 1981)。

透水層内へ拡張した断面 1 次元の修正ブシネスク方程式 (分散項の補正係数 $B=1/15$) は、平山 (2001) によって次のように導かれている。

連続式:

$$\lambda \frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

運動方程式:

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \frac{\partial P}{\partial t} + \varepsilon \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \varepsilon \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \frac{P}{D} \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) \frac{\partial P}{\partial x} \\ & + \alpha \left\{ P - \mu^2 \left(\left(B + \frac{1}{2} \right) h^2 \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{h^3}{6} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{P}{h} \right) \right) \right\} \\ & + \varepsilon \beta \sqrt{\left(\frac{P}{D} \right)^2 + \mu^2 h^2 \left\{ \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P}{D} \right) \right)^2 - \frac{2P}{3D} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(\frac{P}{D} \right) \right\}} P \\ & = \mu^2 \left[\left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \left(B + \frac{1}{3} \right) h^2 \frac{\partial^3 P}{\partial x^2 \partial t} + Bgh^3 \frac{\partial^3 \eta}{\partial x^3} \right. \\ & \left. + h \frac{\partial h}{\partial x} \left\{ \left(\frac{\tau}{\lambda} \right) \frac{1}{3} \frac{\partial^2 P}{\partial x \partial t} + 2Bgh \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right\} \right] \quad (5) \end{aligned}$$

ここで、 P は線流量フラックス、 η は水位、 h は静水深、 D は全水深であり、 λ は透水層の空隙率、 τ は流体質量の見かけ上の増加率を表す慣性係数である。また ε 、 μ は、それぞれ摂動パラメータとして定義された相対波高および水深波長比である。線流量フラックスを用いることにより、壁面境界において連続式を厳密に満足させることができる。

ところで、消波工を設置しない直立堤による波の反射は、波を透水層で減衰させることなく、完全反射境界に直接入射させることにより実現される。式(4)、(5)において、透水層による波浪抵抗が生じない条件を考えると、透水層の空隙率 $\lambda=1$ 、層流抵抗係数 $\alpha=0$ 、および乱流抵抗係数 $\beta=0$ と設定すればよい。このとき、消波材は存在しないので、慣性力係数は $\tau=1$ である。式(4)、(5)にこれらを代入すると、この任意反射境界は Madsen and Sørensen (1992) が導いた修正ブシネスク方程式による完全反射境界と等しくなる。

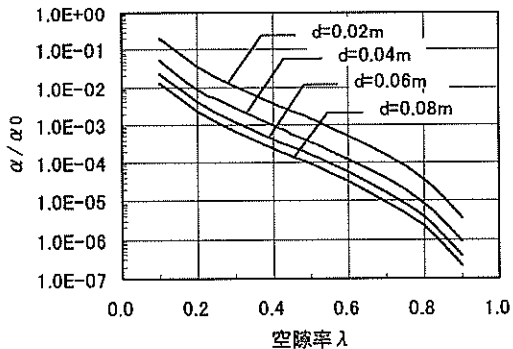
したがって、直立壁面における完全反射境界は、式(3)における λ の定義域 ($0 < \lambda < 1$) を $\lambda=1$ まで拡張することにより、透水層モデルによる任意反射境界と同様な表現が可能である。空隙率 λ が 1 に等しいとき、透水層内はすべて流体で占められていることを意味するため、本来、消波材の代表径 d を定義することはできない。しかしながら、 $\lambda=1$ のとき、任意反射境界においては、消波材が全く存在しないことと等価であるから、透水層による波浪抵抗は存在せず、 $\alpha=0$ 、 $\beta=0$ と考えることができる。よって式(3)は、つぎのように書き改められる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^3 \nu}{\lambda^2 d^2}, \quad \beta = \beta_0 \frac{(1-\lambda)}{\lambda^3 d} \quad (0 < \lambda < 1) \\ \alpha &= 0, \quad \beta = 0 \quad (\lambda = 1) \end{aligned} \right\} (6)$$

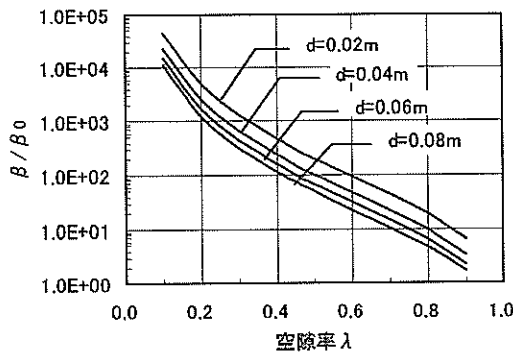
慣性力係数 $r=1$ とした透水層モデルにおいて、透水層内での波浪減衰に影響を与える係数は、層流抵抗係数 α 、乱流抵抗係数 β 、および透水層の空隙率 λ である。このうち空隙率 λ は、式(3)に示したように、 α および β の値を決定する際にも重要な役割を果たす。そこで、まず、これらの関係について整理しておくことにする。

2.2 透水層パラメータに対する抵抗係数の変化

式(3)あるいは式(6)より、透水層内での波の減衰に関与する層流抵抗係数 α および乱流抵抗係数 β の値は、透水層を構成する消波材の代表径 d と透水層の空隙率 λ によって大きく変化することがわかる。そこで、消波材の種類や積み方に依存しないこれらの関係を調べるために、物理量 λ 、 d に対する、 α/α_0 値および β/β_0 値の変化を図-3(a)および図-3(b)に示す。消波材の代表径 d が [L] の次元を、水の動粘性係数 ν が [L²T⁻¹] の次元



(a) 層流抵抗: α/α_0



(b) 乱流抵抗: β/β_0

図-3 代表径 d と空隙率 λ に対する抵抗係数の変化

をそれぞれ有しているために、図中の縦軸(対数軸)の α/α_0 値、 β/β_0 値はそれぞれ、[T⁻¹]、[L⁻¹] の次元量で示されている。

透水層の空隙率が等しいときには、消波材の代表径 d が大きくなるにつれて α/α_0 および β/β_0 の値はともに小さくなり、透水層による波浪抵抗が弱まることがわかる。一方、ある代表径 d では、空隙率が大きくなるにつれて α/α_0 および β/β_0 の値は急激に小さくなり、やはり透水層による波浪抵抗は低減する。この傾向は、空隙率 λ が 0.0 に漸近するとき、あるいは 1.0 に漸近するとき、より顕著に現れる。とくに、 $\lambda \rightarrow 1.0$ のときは、代表径 d が有限な値をとるとき、 $\alpha/\alpha_0 \rightarrow 0$ 、 $\beta/\beta_0 \rightarrow 0$ となり、式(6)の表現と一致している。

2.3 透水層パラメータの感度分析とその計算条件

透水層パラメータの感度分析に用いる計算条件は、3章で非線形波の反射計算と模型実験を行うことを考慮して、以下のように設定した。図-4に、断面2次元水路(水平床)を模した計算領域と境界条件を示す。長さ 32.4m の水路の左端に、消波ブロック被覆堤(法面勾配を 1:4/3 および垂直とする)をモデル化した透水層(図-1(b)および図-2(b))を設置してある。右端の造波境界には線境界入射法(石井ら, 1993)を用い、この位置で吸収造波を実現するために、沖側にはスポンジ層を配置した。この層において無反射境界を効率よく実現するために、式(5)で表される運動方程式には、平山(2001)による高次型エネルギー減衰項が付加された。

計算は、空間格子間隔 $\Delta x=0.1\text{m}$ 、時間差分間隔 $\Delta t=0.01\text{s}$ で行い、計算結果として、図-4で沖から順番に①、②、・・・と名付けた計算格子において、0.05s 毎に水位変動量 η を出力した。透水層パラメータの感度分析は、入・反射波の波長に応じて適切に選択された2地点における時系列データに対して、合田ら(1976)による入・反射波分離推定法を適用して求めた反射率に対して行っている。

感度分析に用いた波浪条件を表-2に示す。水平床上の水深 h は 32cm、入射波は波高 3cm と 8cm、周期 0.99~2.82s の規則波である。これらを岩垣(1987)の分類に従って整理した結果を図-5に示してある。図中、 $h/L=0.5$ と記した点線は深海波と浅海波の境界、 $h/L=0.04$ と記した点線は浅海波と長波の境界である。また、図中には、波の非線形性の程度を表すパラメータ II の値によって微小振幅波理論の適用限界を示した。実線 ($II=0.03$) と破線 ($II=0.10$) は、それぞれ波の峰高に関する限界と、波長や波速に関する限界である。この図より、計算ケース

の入射波はすべて浅海波に分類され、かつ波高に関してはすべて有限振幅波の特性を有することがわかる。一方、波速に関しては、波高 $H=8\text{cm}$ で周期 $T=1.84\text{s}$ と 2.82s の2つのケースを除き、微小振幅波理論の適用範囲にあることがわかる。

感度分析の対象とした透水層パラメータは、それぞれの波浪条件において、2.2節における検討結果を踏まえ、空隙率 λ および消波材の代表径 d である。特に λ は、運動方程式(5)において、層流抵抗(左辺第5項)や乱流抵抗(左辺第6項)以外の項に対しても直接的に影響を与える非常に重要な工学的パラメータである。

そこで、これらの感度分析では、透水層パラメータをつぎのように設定した。動粘性係数 ν 、層流および乱流抵抗係数の定数 α_0 および β_0 、透水層の幅 B の値は一定とし、それぞれ、 $\nu=1.14 \times 10^{-6}(\text{m}^2/\text{s})$ (水温 15°C)、 $\alpha_0=2100$ および $\beta_0=2.2$ (テトラポッド乱積みを想定、表-1参照)、 $B=0.5\text{m}$ と設定した。一方、消波工の空隙率は $\lambda_0=0.1$ から $\lambda_0=1.0$ まで 0.1 刻みで変化させ、法面勾配を $1:4/3$

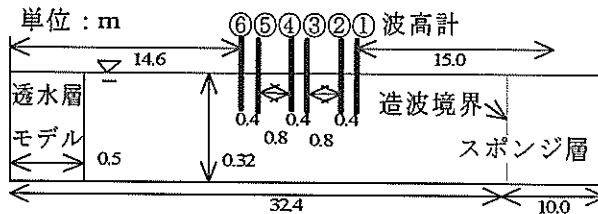


図-4 感度分析に用いた計算領域と境界条件

表-2 感度分析に用いた波浪条件

波高 $H(\text{cm})$	周期 $T(\text{s})$	水深 $h(\text{cm})$	波の種類
3.0	0.99	32.0	規則波
3.0	1.41		
3.0	1.84		
3.0	2.82		
8.0	0.99		
8.0	1.41		
8.0	1.84		
8.0	2.82		

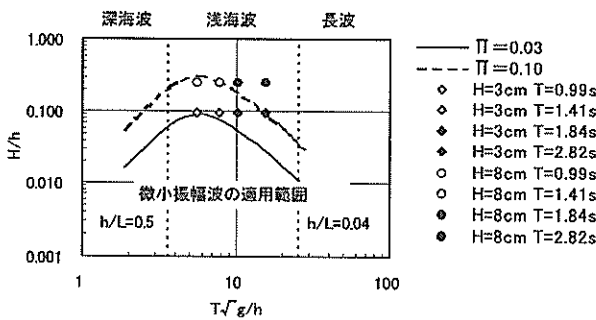


図-5 感度分析に用いた入射波の波浪特性

とした消波ブロック被覆堤(図-1)では式(1)を、消波ブロックを直積みした直立消波堤(図-2)では式(2)をそれぞれ適用して、透水層の空隙率 λ を設定した。また、消波材の代表径は $d=0.02\text{m}$ から $d=0.08\text{m}$ まで 0.02m 刻みで変化させた。したがって、透水層モデルの感度分析は、護岸形状および波浪条件ごとに、それぞれ40ケースずつ波の反射計算を行うことにより実施された。

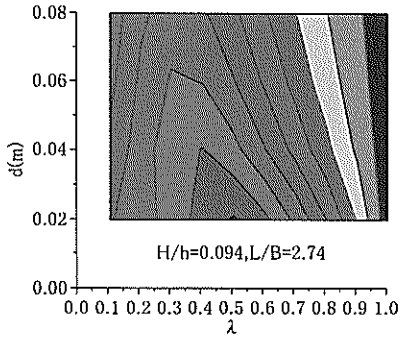
2.4 消波ブロック被覆堤における感度分析結果

(1) 法面勾配を $1:4/3$ とした場合

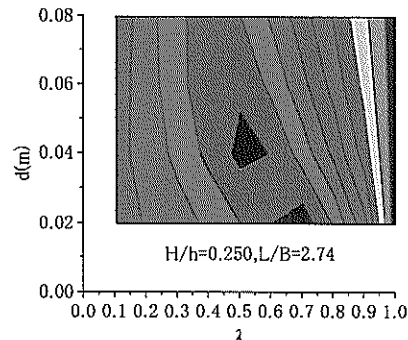
消波ブロック被覆堤において、入射波の波高 H を 3cm および 8cm とした場合の反射率に関する透水層パラメータの感度分析結果を、それぞれ図-6および図-7に示す。両図において、(a)~(d)は入射波の周期 T の違いを表し、(a)から(d)に移るにつれて周期が長くなる。図中、横軸は透水層の空隙率 λ 、縦軸は消波ブロックの代表径 $d(\text{m})$ であり、等値線は透水層モデルによる波の反射率を表す。また L/B は、透水層の幅 B に対する入射波の波長 L の比である。

$L/B=2.74$ (すなわち、消波ブロック下端幅が波長の $1/3$ 程度) のとき、反射率が 10% 未満となる空隙率 λ と消波材の代表径 d の条件が存在することがわかる(図-6(a)および図-7(a))。また、透水層の幅 B (消波ブロック下端幅) は一定であるから、 $L/B=4.44$ (図-6(b)および図-7(b))、 $L/B=6.10$ (図-6(c)および図-7(c))、 $L/B=9.70$ (図-6(d)および図-7(d)) のように入射波の波長が長くなるにつれて、反射率が全体的に大きくなっていることがわかる。一方、各図において、反射率が最小となる空隙率は $\lambda=0.3\sim 0.8$ の範囲に分布している。図-3より、 $\lambda \rightarrow 0$ のとき透水層が不透過となり、 $\lambda=1$ のとき波は透水層による抵抗を受けずに直接堤体壁面に入射することがわかり、いずれも完全反射の条件に近づくことから、これは妥当な結果であるといえる。したがって、特に、入射波の波長に対して、透水層の幅が十分長いときには、透水層モデルの反射率を決定する主なパラメータは空隙率 λ であると考えられる。また、消波材の代表径 d の増加に伴い反射率が増加する現象は、透水層の抵抗係数が減少することから理解できる。

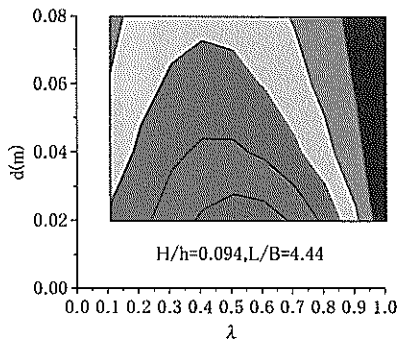
図-6と図-7の比較において、入射波の周期 T が等しい場合には、波高 $H=3\text{cm}$ のときに比べてより非線形性の強い波高 $H=8\text{cm}$ のときのほうが、反射率は全体的に小さくなっている。これは、微小振幅波理論に基づく入射波分離法によって解析される反射率が、波の有限振幅性により、見かけ上、小さく推定されるためである。また、入射波の非線形性が強くなると、各周期において、反射



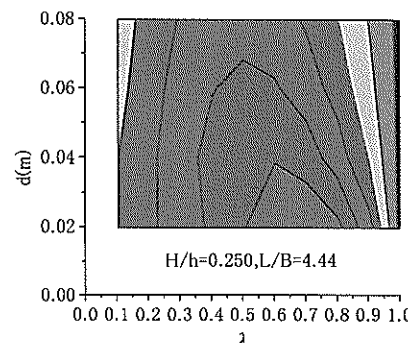
(a) 周期 $T=0.99s$



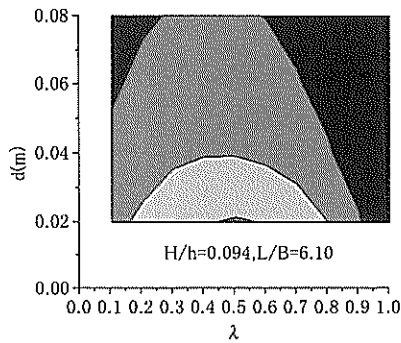
(a) 周期 $T=0.99s$



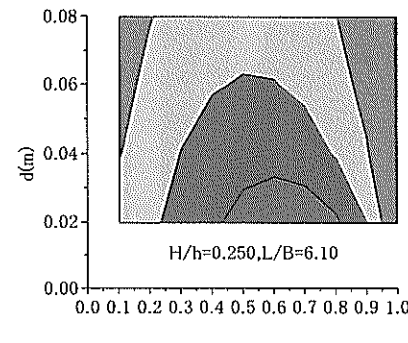
(b) 周期 $T=1.41s$



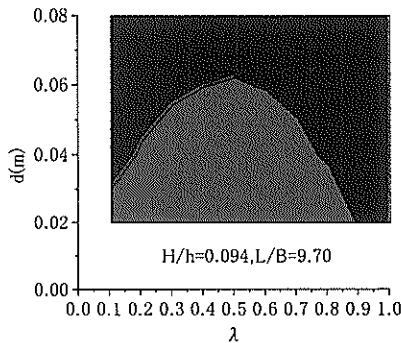
(b) 周期 $T=1.41s$



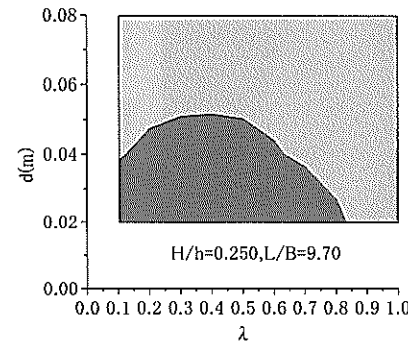
(c) 周期 $T=1.84s$



(c) 周期 $T=1.84s$



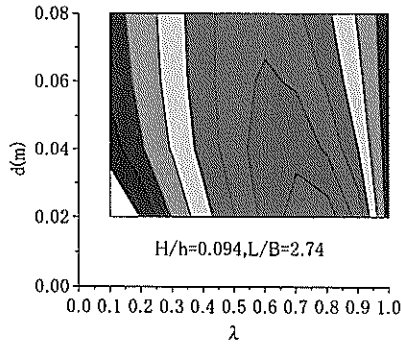
(d) 周期 $T=2.82s$



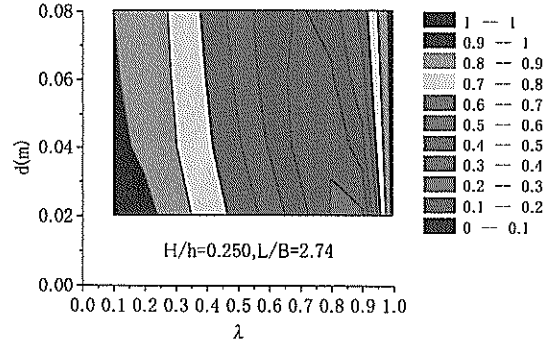
(d) 周期 $T=2.82s$

図-6 消波ブロック被覆堤の感度分析 (波高 $H=3cm$)

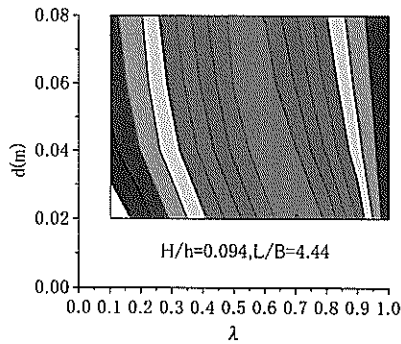
図-7 消波ブロック被覆堤の感度分析 (波高 $H=8cm$)



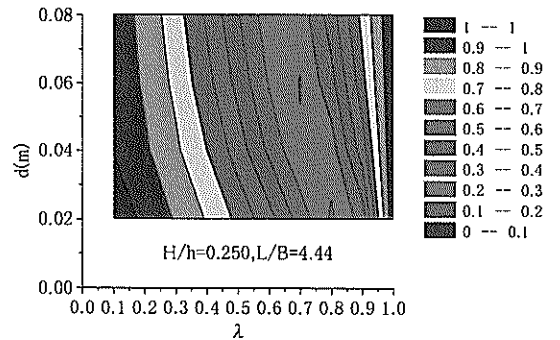
(a) 周期 $T=0.99s$



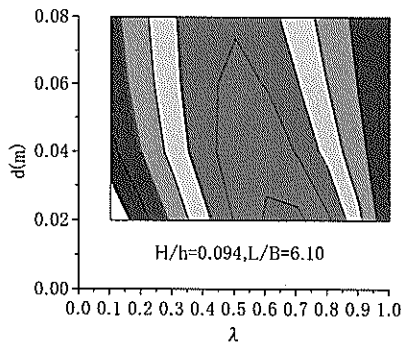
(a) 周期 $T=0.99s$



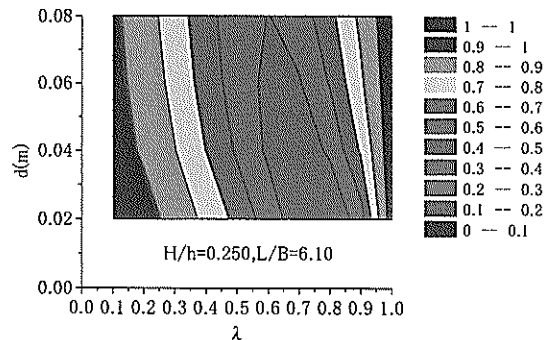
(b) 周期 $T=1.41s$



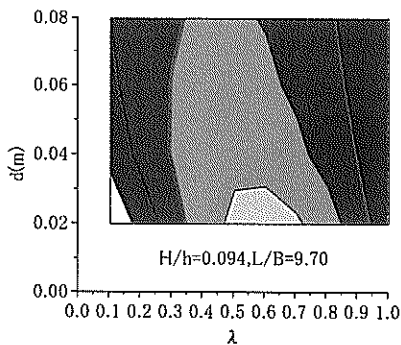
(b) 周期 $T=1.41s$



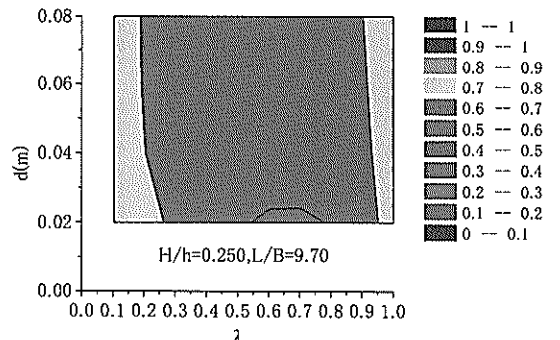
(c) 周期 $T=1.84s$



(c) 周期 $T=1.84s$



(d) 周期 $T=2.82s$



(d) 周期 $T=2.82s$

図-8 直立消波堤の感度分析 (波高 $H=3cm$)

図-9 直立消波堤の感度分析 (波高 $H=8cm$)

率が最小となる空隙率 λ および代表径 d の値は、ともに大きくなる傾向が得られた。

(2) 消波ブロックを直積みした場合

2.4 節と同様に、消波ブロックを直積みした直立消波堤において、入射波の波高 H を 3cm および 8cm とした場合の反射率に関する透水層パラメータの感度分析結果を、それぞれ図-8 および図-9 に示す。直立消波堤の透水層モデルが法面勾配を 1:4/3 とした消波ブロック被覆堤のそれと異なる点は、透水層内部の空隙率の空間分布のみである。すなわち、消波工が 4/3 勾配で施工されていることを式(1)で考慮すると、透水層の空隙率 λ は水平方向に変化する。これに対し、直立消波堤では、透水層の空隙率 λ は式(2)で与えられるように空間的に一定である。

透水層の幅 B に対する入射波の波長 L の比が $L/B=4.44$ (図-8 (b) および図-9 (b)), $L/B=6.10$ (図-8 (c) および図-9 (c)), $L/B=9.70$ (図-8 (d) および図-9 (d)) と移り、透水層の幅 B に対して波長 L が長くなるにつれて、直立消波堤の透水層モデルによる反射率は、4/3 勾配の法面を有する消波ブロック被覆堤のときと同じように、全体的に大きくなっている。しかしながら、 $L/B=2.74$ (図-8 (a) および図-9 (a)) から $L/B=4.44$ に移るときには、上記のような傾向に反して、反射率は全体的に小さくなっている。つまり、直立消波堤における反射率は、 L/B 値の変化に対して極小値をもつことがわかる。これは、透水層内を伝播する入・反射波の位相差を考慮することにより理解できる。すなわち、 $L/B=4.44$ のときには、消波ブロックの設置幅は入射波の波長の 1/4 程度となる。したがって、直立壁（完全反射境界）の前面で形成される重複波の位相は、直立壁の位置で腹、透水層の沖側端でほぼ節となり、このとき、重複波のエネルギーは透水層内の抵抗によって最も効率的に減衰される。この結果、直立消波堤による反射率が極小となると考えられる。一方、法面勾配が 1:4/3 のとき、図-6 および図-7 においてこのような傾向がみられない理由は、空隙率 λ が式(1)に従って空間的に変化するのに伴い透水層内の抵抗が徐々に変化するため、顕著な重複波の節が形成されにくくなっているためである。

また、各図において、透水層モデルの反射率を決定する主たるパラメータが、代表径 d ではなく空隙率 λ であるという傾向は、法面勾配を 1:4/3 としたときに比べ、直立消波堤ではより明確に表れている。

図-8 および図-9 の (a) ~ (d) に示した各図において、反射率が最小となる空隙率は $\lambda=0.5 \sim 0.9$ の範囲に分布しており、図-6 および図-7 に比べ、空隙率が大きくな

るほうにシフトしている。これは、透水層モデルの空隙率が、それぞれ式(1)および式(2)によって与えられるため、消波工の空隙率 λ_0 が互いに等しいとき、法面勾配を 1:4/3 とした透水層モデルの空隙率が、直立消波堤のそれに比べ、水域との境界に近づくほど大きくなることに対応していると考えられる。つまり、直立消波堤の透水層モデル全体の空隙率は、法面勾配を 1:4/3 とした消波ブロック被覆堤のものに比べ相対的に小さくなっているため、直立消波堤の空隙率 λ_0 を大きくすると、直立消波堤の透水層モデルの性質が 4/3 勾配の法面を有する消波ブロック被覆堤のものに近づくことになる。

一方、図-8 と図-9 の比較において、入射波の周期 T が等しい場合に、波高 $H=3\text{cm}$ に比べて非線形性の強い波高 $H=8\text{cm}$ のほうが反射率は全体的に小さくなることや、入射波の非線形性の増加に伴って反射率が最小となる空隙率 λ および代表径 d の値がともに大きくなる傾向は、法面勾配を 1:4/3 とした消波ブロック被覆堤における感度分析結果 (図-6 および図-7) と同様であった。

なお余談であるが、本研究で用いた透水層モデルが、現実の消波工による波浪減衰機構を物理的にモデル化したものであることを考えると、ここで行った感度分析結果が、今後、消波効率に優れた最適な消波護岸の設計に役立てられることが期待される。しかしながら、その際には、波浪外力による消波ブロックの安定性など、他の設計要因を十分考慮することはもちろんのこと、消波護岸の反射率は、設計波の諸元や消波工の空隙率によって極めて敏感に変化することを、設計時だけでなく施工時においても十分に注意しておくことが必要である。

2.5 空隙率が大きい直立消波堤における層流抵抗係数と乱流抵抗係数の感度分析結果

式(5)によると、運動方程式に直接作用する透水層パラメータは、空隙率 λ と層流抵抗係数 α および乱流抵抗係数 β である (本研究では、慣性係数は $\tau=1$ で一定とした)。2.2 節では、 α 値および β 値の設定に対して λ の値が重要な役割を果たすことを示した。そこで、本節では、透水層モデルの反射率に対して、層流抵抗係数 α と乱流抵抗係数 β が、互いにどのような関係において寄与しているかについて検討した。

ここで対象とした透水層モデルは法面が垂直な直立消波堤であるが、消波工の空隙率は消波ブロックを直積みしたときの空隙率 ($\lambda_0=0.45$) よりもかなり大きめに設定し、 $\lambda_0=0.928$ とした。この条件は、後述するヘチマロンシート (型番#350) を充填した直立消波堤での波の反射に関する数値計算と模型実験にほぼ対応している。

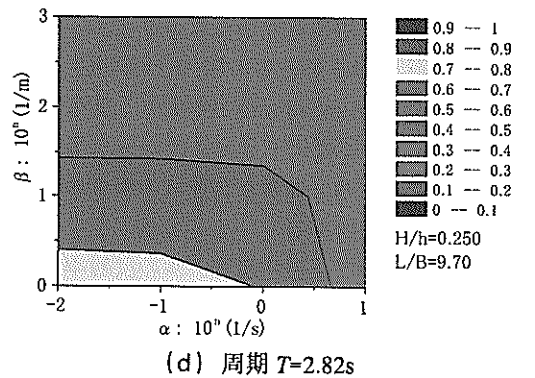
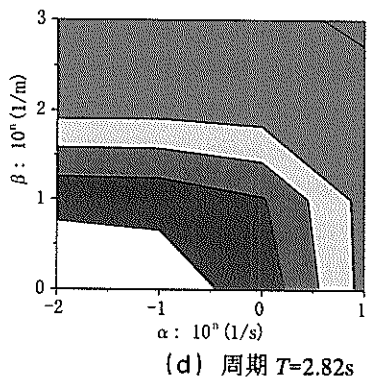
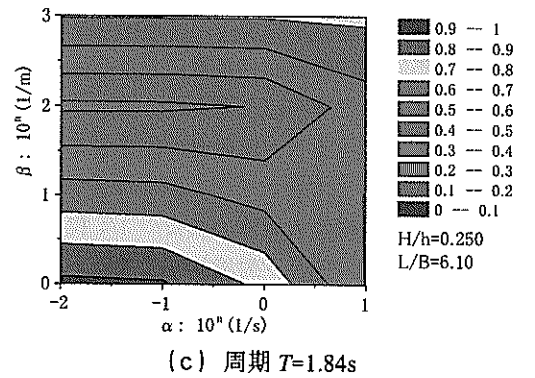
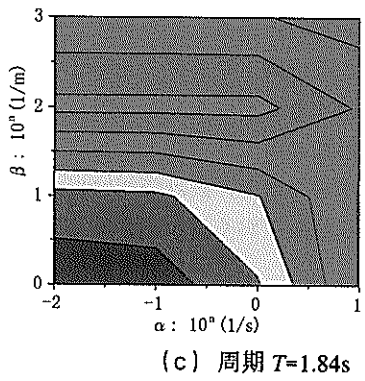
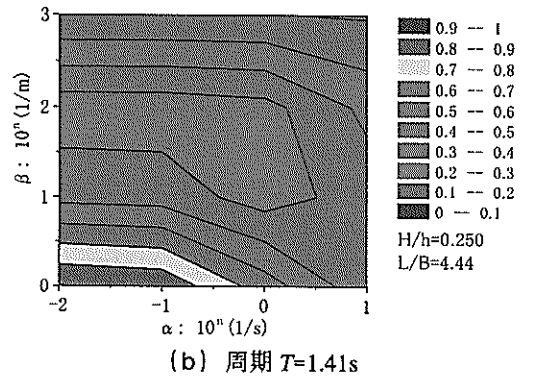
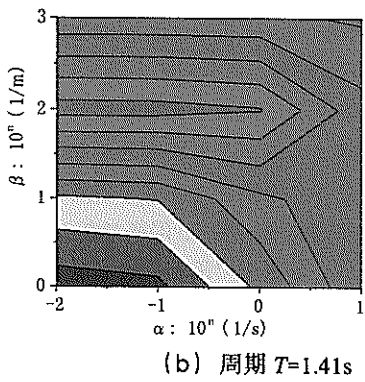
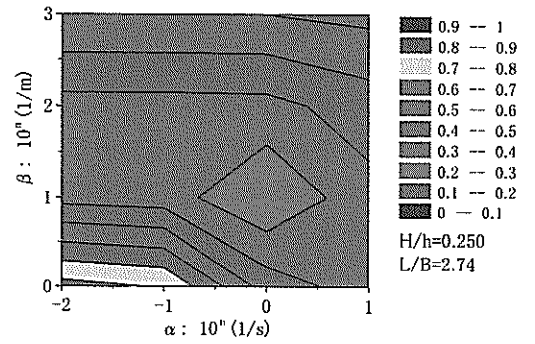
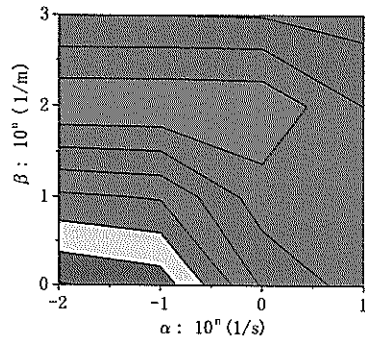


図-10 直立消波堤の α , β に関する感度分析
(波高 $H=3cm$)

図-11 直立消波堤の α , β に関する感度分析
(波高 $H=8cm$)

透水層モデルの反射率に対する α , β の感度分析はつぎのように行った。数値計算の条件、および入射させる波の条件は 2.3 節で述べた感度分析の計算条件と同様とした (図-4 および表-2)。一方、層流抵抗係数を $\alpha = 10^2(1/s)$ から $\alpha = 10^1(1/s)$ まで、乱流抵抗係数を $\beta = 10^0(1/m)$ から $\beta = 10^3(1/m)$ まで、それぞれ 1 オーダー刻みで変化させて、透水層モデルの反射率を計算した。したがって、計算ケースは、波浪条件ごとにそれぞれ 16 ケースである。

式(2)に従って、透水層の空隙率を $\lambda = \lambda_0$ (一定) としたとき、入射波の波高 H を 3cm および 8cm とした場合の反射率に関する α , β の感度分析結果を図-10 および図-11 に示す。図中、横軸は層流抵抗係数 α 、縦軸は乱流抵抗係数 β であり、等値線は透水層モデルによる波の反射率を表している。

透水層の幅 B に対する入射波の波長 L の比が $L/B=2.74$ から $L/B=9.70$ に移るにつれて、透水層の空隙率 λ 、消波材の代表径 d に関して行った感度分析と同様に、反射率は全体的に大きくなっている。また、直立消波堤の透水層モデルにおいて、波高 $H=3\text{cm}$ のときには、 $L/B=4.44$ のときに反射率が最も小さくなることも 2.5 節における感度分析結果 (図-8 および図-9) と同様である。

入射波の波高 $H=3\text{cm}$ のとき、図-10(a)~(d) に示した各図において、反射率が 0.4 程度よりも小さい場合には、反射率は、層流抵抗係数 α が 10^0 のオーダーよりも小さいとき、乱流抵抗係数 β の値のみによって変化し、 $\beta=10^2$ のオーダーで最小となった。また、反射率が 0.4 程度よりも大きい場合には、反射率は、 β 値だけでなく、 α 値によっても変化するという傾向が得られた。

一方、波高 $H=8\text{cm}$ のとき、図-11(a)~(d) に示した各図をみると、反射率に対する α の寄与度は、波高 $H=3\text{cm}$ のとき (図-10) に比べて大きくなっていることがわかる。とくに、 $L/B=2.74$ (図-11(a)) では、反射率は、層流抵抗係数と乱流抵抗係数がそれぞれ $\alpha=10^0$, $\beta=10^1$ のオーダーのとき最小となった。ただし、 L/B が 6.10 より大きいとき (図-11(c), (d)) における反射率の変化は、波高 $H=3\text{cm}$ のとき (図-10(c), (d)) に得られた傾向とほぼ同様となった。

以上のことから、透水層モデルの反射率は、まず乱流抵抗係数 β の値によって大きく影響され、層流抵抗係数 α のオーダーが β に近づくにつれて、層流抵抗係数 α の値にも影響されるようになることが考察された。また、波の非線形性が強い場合には、反射率に対する α 値の寄与度は、非線形性が弱い場合に比べて相対的に大きくなることが示された。

3. 非線形波の反射計算とその検証

法面勾配の異なる 2 種類の消波ブロック被覆堤、堤内に繊維状の消波材を充填した直立消波堤、および直立堤に対して、それぞれ透水層モデルを設定して、非線形波の反射計算を実施した。計算結果のうち、反射率や入・反射波スペクトルの変化、および部分重複波の波形に関して、模型実験結果との比較を行った。

3.1 計算条件と実験条件

図-12 に、断面 2 次元水路を模した計算領域と境界条件を示す。長さ 32.4m の水路の左端に長さ 12m の 1/30 勾配斜面と水平床を設け、それぞれ後述する消波ブロック被覆堤、直立消波堤、および直立堤をモデル化した透水層モデルを設置した。また、右端の造波境界には境界線入射法を用い、この位置より沖側には、高次型エネルギー減衰項を用いたスポンジ層を設置して吸収造波を実現した。入射波は規則波および不規則波とし、模型実験で用いた造波信号を直接造波境界に与えた。

計算は、空間格子間隔 $\Delta x=0.1\text{m}$ 、時間差分間隔 $\Delta t=0.01\text{s}$ で行った。計算結果として、斜面沖側の水平床上に設けた 3 地点 (沖から順に①, ②, ③)、および護岸前面の水平床上に設けた 3 地点 (沖から順に④, ⑤, ⑥) において (図-12)、5step 毎 (=0.01s × 5step=0.05s 間隔) に水面変動量 η を出力した。

一方、模型実験の条件は、数値計算の条件に対応させて図-13 のように設定した。長さ 35m の不規則波造波水路 (吸収造波機能付き) の岸側に、1/30 勾配斜面模型と水平床模型が設置してある。造波水路の左端壁を堤体壁

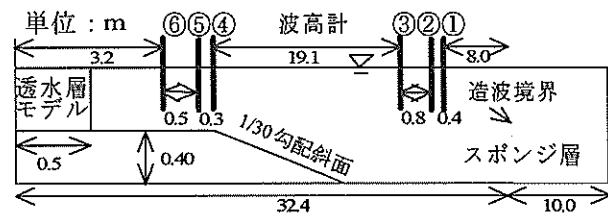


図-12 数値計算の計算領域と境界条件

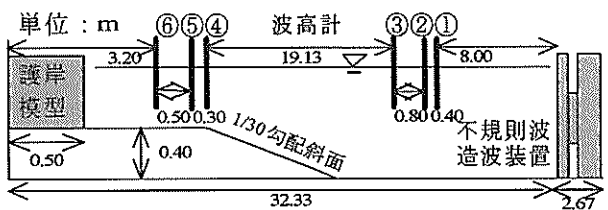


図-13 35m 不規則波造波水路と模型配置

とみため、その前面に、想定される消波構造物に応じて消波材模型を設置した。模型縮尺は 1/50 である。

実験波の計測も、数値計算と同じ条件で行った。数値計算で水位変動量を出力した位置に対応する地点に合計 6 台の容量式波高計を設置し (図-13)、数値計算結果と同じ 0.05s 間隔で水位変動量をサンプリングした。

このように、数値計算と模型実験で得られた水位変動量は、同じ位置および時間間隔で測定された時系列データになっているので、それぞれに対して全く同じ方法でデータを解析し、両者の比較を行った。例えば、両者における規則波と不規則波の反射率は、岸側の 3 地点 (④, ⑤, ⑥) で計測された水位時系列データを用いて、合田ら (1976) による入・反射波分離推定法により推定した。また、同時に得られるそれぞれの入・反射波のスペクトルを比較して、透水層モデルによる不規則波の反射特性について模型実験により検証した。さらに、規則波では、数値計算および模型実験で計測された沖側と岸側の合計 6 地点における時系列波形を直接比較して、透水層モデルにおける部分重複波形の再現性を確認した。

なお、沖側の 3 地点 (①, ②, ③) での水位時系列データから解析された入・反射波スペクトルは、数値解析および模型実験において、主に造波信号の目標スペクトルに対する入射波スペクトルの検証に用いた。模型実験では造波装置の造波効率調整を行わなかったため、結果的に、模型実験で得られた入射波スペクトルは、造波信号の目標スペクトルに比べ全体的に若干小さくなっている。一方、数値計算で得られた入射波スペクトルは、造波信号の目標スペクトルと非常によく一致した (付録-A, 参照)。

3.2 消波ブロック被覆堤における波の反射特性

(1) 消波ブロック被覆堤を対象とした透水層モデル

消波ブロック被覆堤を対象とした透水層モデルの空隙率 λ は、前述のように、消波ブロック被覆工の法面勾配を考慮して式(1)で与えられる。すなわち、消波工を含む水域において、捨石マウンド (不透過とみなす) から

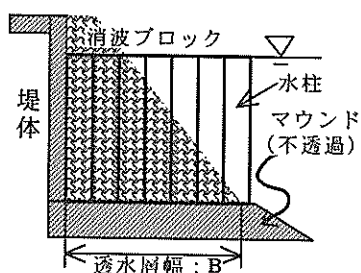
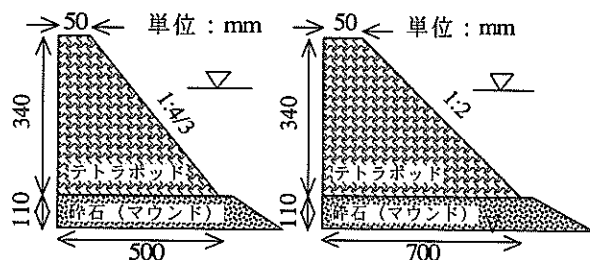


図-14 式(1)による消波工の法面勾配の表現



(a) 法面勾配 1 : 4/3 (b) 法面勾配 1 : 2

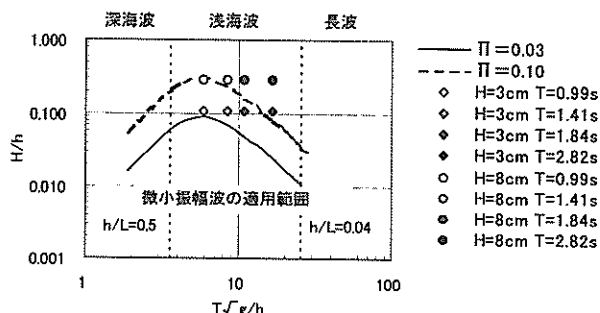
図-15 法面勾配が異なる消波ブロック被覆堤

表-3 消波ブロック被覆堤の透水層モデルパラメータ

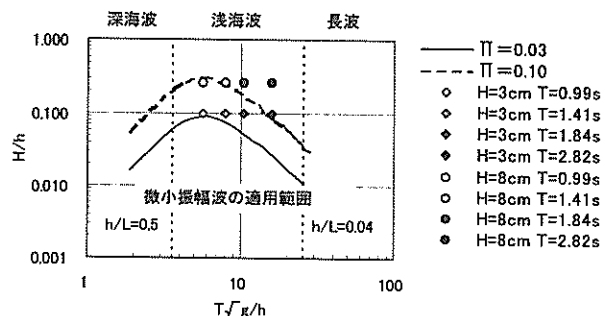
消波ブロック被覆堤	τ	$\lambda 0$	$\alpha 0$	$\beta 0$	d (m)	ν (m ² /s)	B (m)
法面勾配 1:4/3	1	0.450	2100	2.2	4.56×10^{-2}	1.14×10^{-6}	0.5
法面勾配 1:2	1	0.450	2100	2.2	4.56×10^{-2}	1.14×10^{-6}	0.7

表-4 消波ブロック被覆堤に対する波浪条件

模型量 [縮尺: 1/50]			
堤前波高 H (cm)	周期 T (s)	水深 h (cm)	波の種類
3.0	0.99	27.9 and 30.4	規則波 and 不規則波 (Bredschneider-光易スペクトル)
3.0	1.41		
3.0	1.84		
3.0	2.82		
8.0	0.99		
8.0	1.41		
8.0	1.84		
8.0	2.82		



(a) 堤前水深 $h=27.9$ cm



(b) 堤前水深 $h=30.4$ cm

図-16 堤前波の波浪特性 (消波ブロック被覆堤)

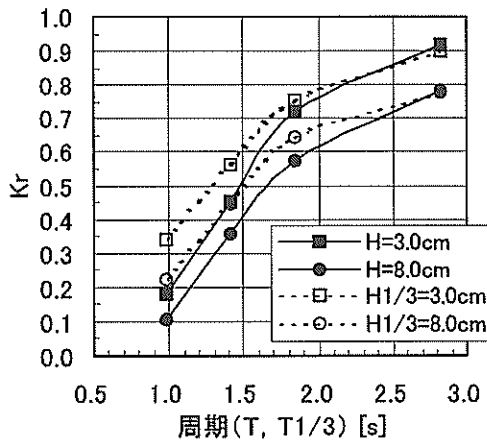
静水面までの高さを有する短冊状の水柱を考えると、消波工の施工高さは水柱内の空隙率に対応し、また、消波ブロック被覆工の法面勾配は空隙率の変化割合に対応する(図-14)。したがって、透水層の幅を消波工の設置幅と同等に設定すると、消波工の法面勾配は自動的にモデルに考慮される。

そこで、消波工の法面勾配が異なる2種類の消波ブロック被覆堤(図-15(a), (b))を対象に波の反射計算を行い、それぞれの計算精度を模型実験により検証した。

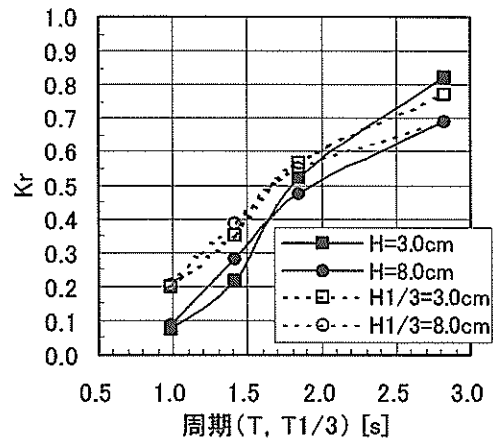
模型実験において、消波ブロック被覆堤は、堤体前面にテトラポッドを乱積みして整形された。そこで、透水層モデルでは、透水層パラメータを表-3のように設定した(式(1), 式(6)参照)。消波工による層流および乱流

抵抗係数の定数 α_0 および β_0 は、表-1の値をそのまま使い、それぞれ $\alpha_0=2100$, $\beta_0=2.2$ とした。また、消波工の空隙率 λ_0 は、砕石や異形ブロックに関して Madsen and Write (1975) が提案した関係式を引用し、 $\tau=1$ とすることにより、 $\lambda_0=0.45$ とした。さらに、消波材の代表径 d には、実験で用いたテトラポッド模型から計算した 4.56cm ($=\sqrt[3]{V}$; V はテトラポッドの体積)を用いた。透水層の幅 B は、図-15(a)で $B=0.5\text{m}$, 図-15(b)で $B=0.7\text{m}$ である。

数値計算および模型実験に用いた波浪条件を表-4に示す。堤体前面の水平床の水深 h は、対象とした消波ブロック被覆堤のH.W.L. ($h=27.9\text{cm}$)とL.W.L. ($h=30.4\text{cm}$)とした。入射波は、斜面模型による浅水変形(首藤, 1974)

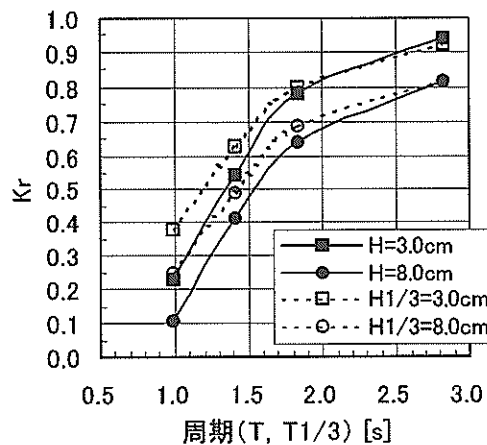


(a) 数値計算

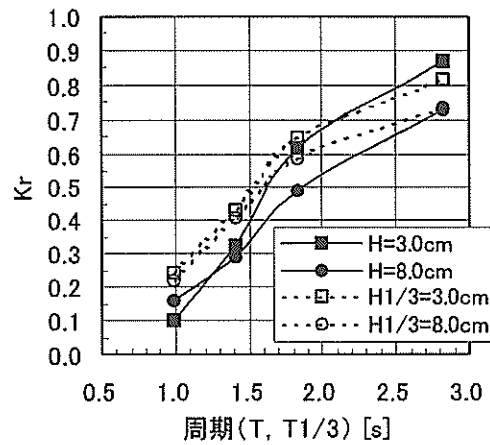


(b) 模型実験

図-17 反射率の再現性 (消波ブロック被覆堤, 法面勾配 1:4/3, $h=27.9\text{cm}$)



(a) 数値計算



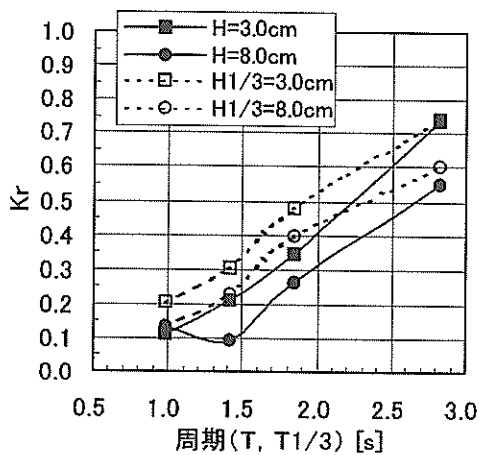
(b) 模型実験

図-18 反射率の再現性 (消波ブロック被覆堤, 法面勾配 1:4/3, $h=30.4\text{cm}$)

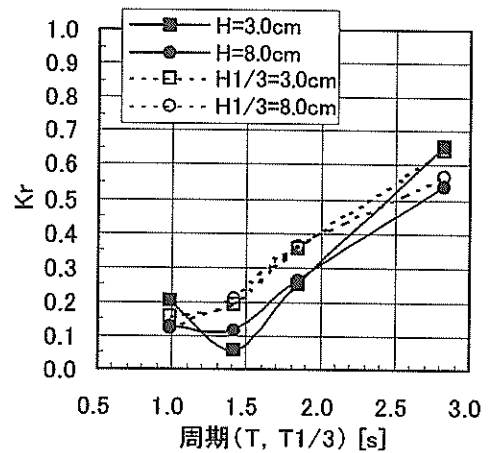
を考慮して、堤体前面で波高が3cmと8cm, 周期が0.99s~2.82sとなる規則波および不規則波とした。これらの波浪条件は、図-5と同様に岩垣(1987)の分類に従って整理した図-16より、2.3節の感度分析に用いた計算ケースとほぼ等しい波浪特性を有することがわかる。すなわち、入射波はすべて浅海波であり、波高に関してすべて有限振幅波の性質を有する。また、波速に関して有限振幅波となるのは、波高 $H=3\text{cm}$ で周期 $T=2.82\text{s}$ のとき、および波高 $H=8\text{cm}$ で周期 $T=1.41\text{s}$, 1.84s , 2.82s のときであり、これ以外の波浪条件は微小振幅波とみなされる。

(2) 反射率の再現性

法面勾配 1:4/3 の消波ブロック被覆堤 (図-15(a)) の反射率を図-17および図-18に示す。

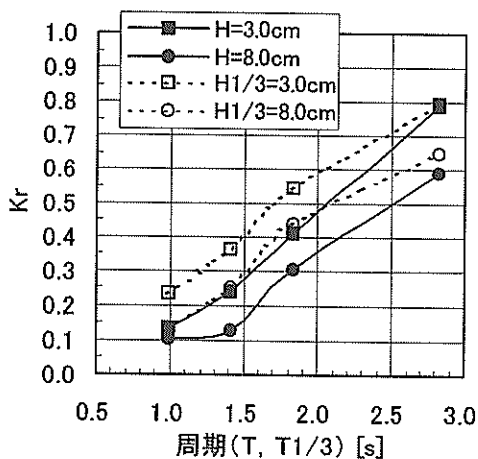


(a) 数値計算

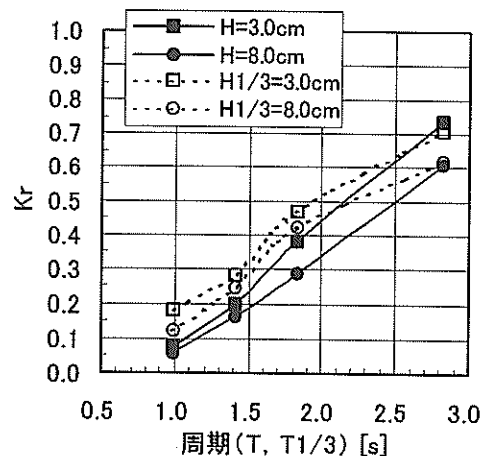


(b) 模型実験

図-19 反射率の再現性 (消波ブロック被覆堤, 法面勾配 1:2, $h=27.9\text{cm}$)



(a) 数値計算



(b) 模型実験

図-20 反射率の再現性 (消波ブロック被覆堤, 法面勾配 1:2, $h=30.4\text{cm}$)

a) 入射波の諸元による反射率の変化

堤前水深 $h=27.9\text{cm}$ のときの規則波および不規則波に対する数値計算結果を図-17(a)に、模型実験結果を図-17(b)に示す。図中、実線は規則波の反射率、点線は不規則波の反射率である。数値計算では、規則波および不規則波とも、周期が長くなるにつれて反射率が増加している。また、波高3cmに比べ、波高8cmのほうが反射率が小さくなっている。これは、入・反射波スペクトル分離法によって得られる部分重複波の反射率が、波の有限振幅性の影響により、見かけ上、小さく推定されるためである。一方、不規則波の反射率は、特に周期が短いときには、波群に含まれる波長の長い成分波の反射率の影響を受け、規則波のものに比べ少し大きくなる。実験結

果では、反射率は若干小さめながらもこれらの傾向がよく現れている。

b) 堤前水深による反射率の変化

堤前水深 $h=30.4\text{cm}$ のときの規則波と不規則波の反射率を図-18(a), (b)に示す。堤前水深が深くなると、数値計算で得られた反射率は、規則波、不規則波ともに、全体的に大きくなっている。この傾向は、模型実験結果にも認められる。これは、堤前水深の増加に伴う静水面における消波ブロック被覆厚の減少が原因である。この比較においても、上述した特性は両者に認められる。

c) 法面勾配の違いによる反射率の変化

つぎに、法面勾配 1:2 の消波ブロック被覆堤 (図-15(b)) の反射率を図-19 および図-20 に示す。

堤前水深 $h=27.9\text{cm}$ のときの数値計算結果を図-19(a) に、模型実験結果を図-19(b)に示す。法面勾配 1:4/3 のとき (図-17(a), (b)) と比較すると、数値計算では、規則波、不規則波ともに、反射率は全体的に小さくなっており、法面勾配による反射率の違いが明瞭に現れている。規則波の周期が 0.99s のとき、法面勾配の違いによらず両者の反射率がともに約 0.1 となっているのは、法面勾配 1:4/3 において、波長に対してすでに十分な消波工幅が確保されていたためであると考えられる。実験結果ではこれらの傾向がよく現れている。

また、堤前水深 $h=30.4\text{cm}$ のときの反射率を図-20(a), (b)に示す。法面勾配 1:4/3 のときと同様に、水深の増加に伴い、数値計算で得られた反射率は、規則波および不規則波とも全体的に大きくなり、この傾向が模型実験結果にも認められる。また、この場合にも、堤前水深 $h=27.9\text{cm}$ のときと同様に、数値計算および模型実験とも、法面勾配による反射率の違いが明瞭に現れている。

(3) 入・反射波スペクトル形状の比較

a) 法面勾配 1:4/3 の消波ブロック被覆堤の場合

堤前水深 $h=27.9\text{cm}$ のときに得られた入・反射波スペクトルの解析結果を、図-21 および図-22 に示す。

有義波高 3.0cm 、有義波周期 $0.99\text{s}\sim 2.82\text{s}$ の不規則波に対する数値計算結果を図-21(a)に、模型実験結果を図-21(b)に示す。それぞれ有義波周期の異なる不規則波が消波護岸で反射したとき、数値計算の反射波スペクトル形状は、模型実験のそれによく似ている。ここで注目すべきは、各図において、反射波スペクトルのピークが入射波スペクトルのピークに対して低周波数側にずれていることが、計算と実験の両者に認められることである。これは、図-17 および図-18 で述べたように、周期が長くなるにつれて反射率が増加するためである。したがって、図-21(a), (b)において明らかなように、このピークの

ずれの程度は有義波周期が短い (反射率が小さい) ときほど大きく、有義波周期が長くなる (反射率が大きくなる) につれて次第に小さくなる。

また、有義波高を 8.0cm としたときの入・反射波スペクトルを図-22(a), (b)に示す。数値計算において、波高の増加に伴い、入射波のスペクトル値に対する反射波のスペクトル値の割合は全体的に小さくなっており、この傾向は模型実験結果にも認められる。これらは、反射率に関して得られた傾向 (図-17, 図-18) とよく一致している。その他、有義波高 3cm のときにみられたものと同様なスペクトル特性は両者に認められる。

さらに、代表波が有限振幅波に分類される有義波周期 1.44s , 1.84s , 2.82s のとき (図-16(a)参照) は、数値計算および模型実験ともに、低周波数帯に自由長周期波と思われる有意なスペクトル値が分布し、かつ両者はそれぞれよく一致している。自由長周期波は単純に波群を造波するだけでも発生するが、波群に拘束された長周期波が部分反射するときに反射波として発生した自由長周期波 (筧田・水口, 1997) が、造波境界との間で多重反射を起こしているとも考えられる。波群の部分反射によって発生する自由長周期波に対する透水層モデルの再現性に関しては、別の機会にさらに詳細に検討したい。

このように、空隙率等の工学的パラメータを用いて消波工を物理的に表した透水層モデルでは、反射による不規則波のスペクトル特性の変化も計算することができる。

ところで、有義波周期が 0.99s のときには、有義波高が 3cm と 8cm のとき、ともに、 1Hz 以上の高周波数側において、数値計算の入・反射波スペクトル値が模型実験のそれよりも大きくなっている。これは、護岸前面の斜面より沖側で行った入射波検定 (付録A) において、数値計算の高周波数側の入射波スペクトルが目標スペクトルに対して大きくなっていることから明らかなように、数値計算における差分格子間隔が、このような周期の短い成分波の波長に対して相対的に粗いために、高周波数の数値振動を励起したことが原因であると考えられる。

b) 法面勾配 1:2 の消波ブロック被覆堤の場合

堤前水深 $h=27.9\text{cm}$ のときに得られた入・反射波スペクトルの解析結果を、図-23 および図-24 に示す。

有義波高 3.0cm 、有義波周期 $0.99\text{s}\sim 2.82\text{s}$ の不規則波に対する数値計算結果を図-23(a)に、模型実験結果を図-23(b)に示す。法面勾配 1:4/3 のとき (図-21(a), (b)) と比較すると、有義波周期の異なるそれぞれの不規則波において、数値計算の反射波スペクトル値は全体的に小さくなり、かつ、入射波スペクトルのピークに対する反射波スペクトルのピークの低周波数側へのずれの程度が

大きくなっていることがわかる。模型実験結果もこれらによく対応しており、両者ともに、法面勾配の違いによる反射波スペクトルの差異が明瞭に現れている。もちろん、法面勾配 1:2 の消波ブロック被覆堤に対して、それぞれの有義波周期における数値計算の反射波スペクトル形状や入射波スペクトルに対するピークのずれの程度は、模型実験のそれらによく対応している。

また、有義波高を 8.0cm としたときの入・反射波スペ

クトルを図-24(a), (b)に示す。波高の増加に伴い、入射波のスペクトル値に対する、数値計算で得られた反射波のスペクトル値の割合は全体的に小さくなっており、この傾向は模型実験結果にも認められる。これらは、反射率に関して図-19 および図-20 で得られた傾向とよく一致している。この場合にも、数値計算の反射波スペクトル形状や入射波スペクトルに対するピークのずれの程度は、模型実験のそれらによく対応している。

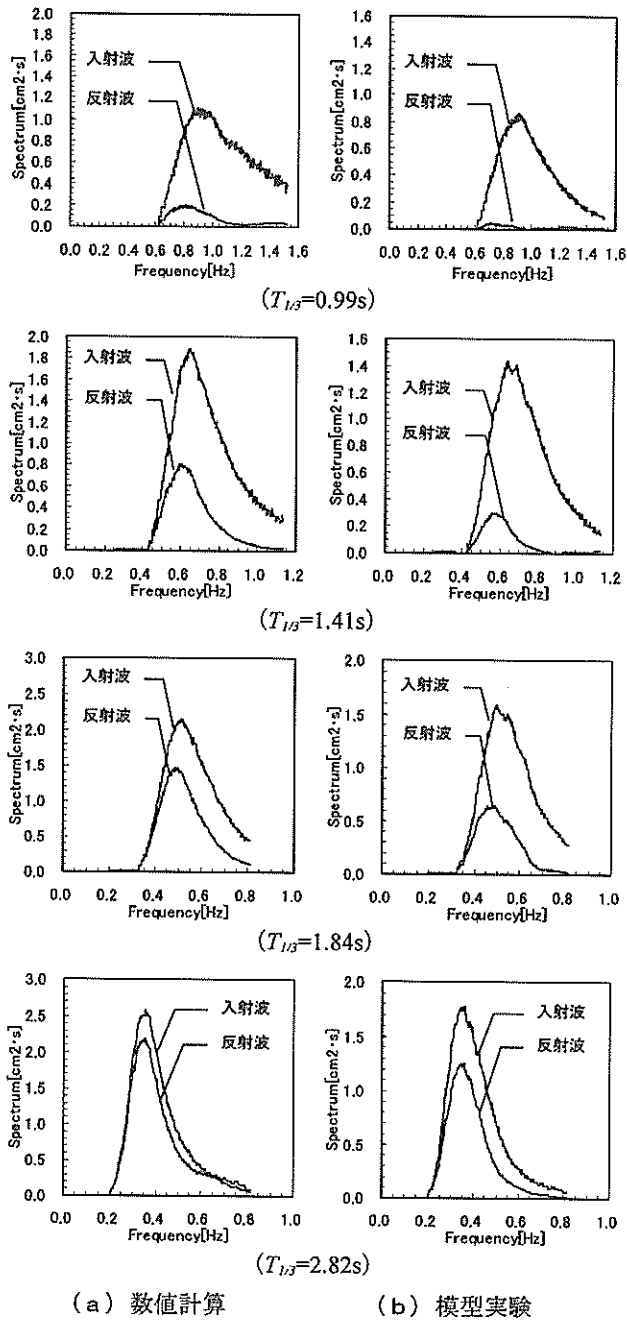


図-21 入・反射波スペクトルの再現性 ($H_{1/3}=3.0\text{cm}$)
(法面勾配 1:4/3, 堤前水深 $h=27.9\text{cm}$)

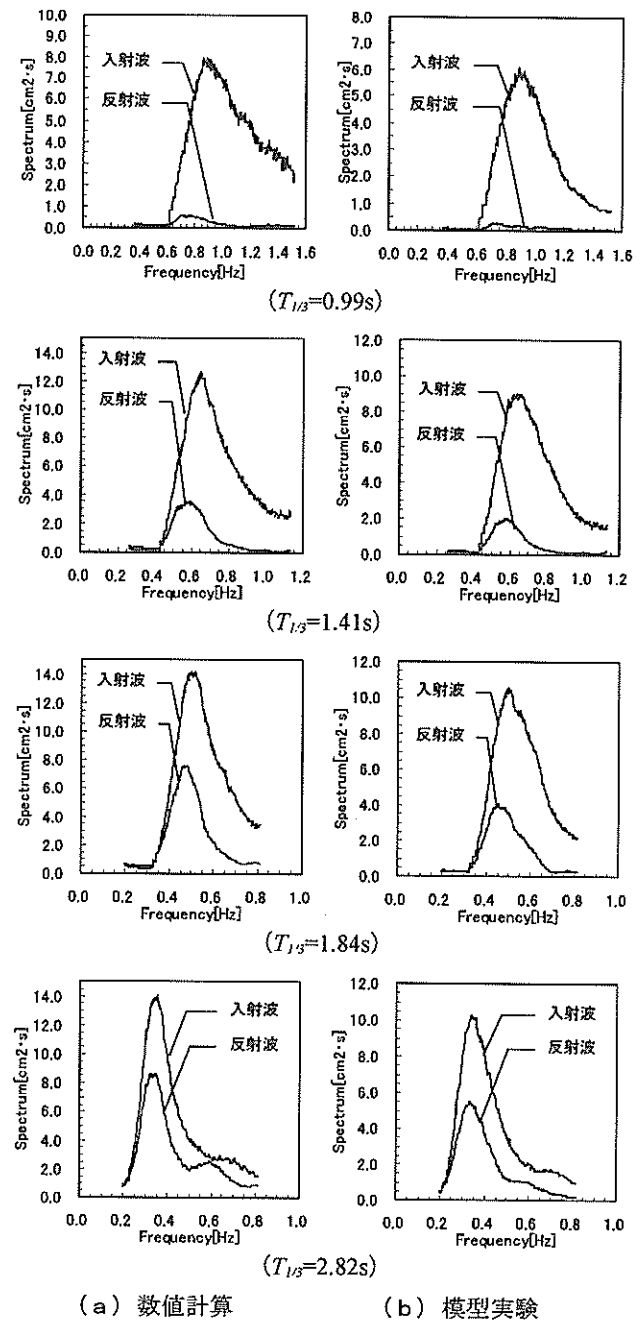


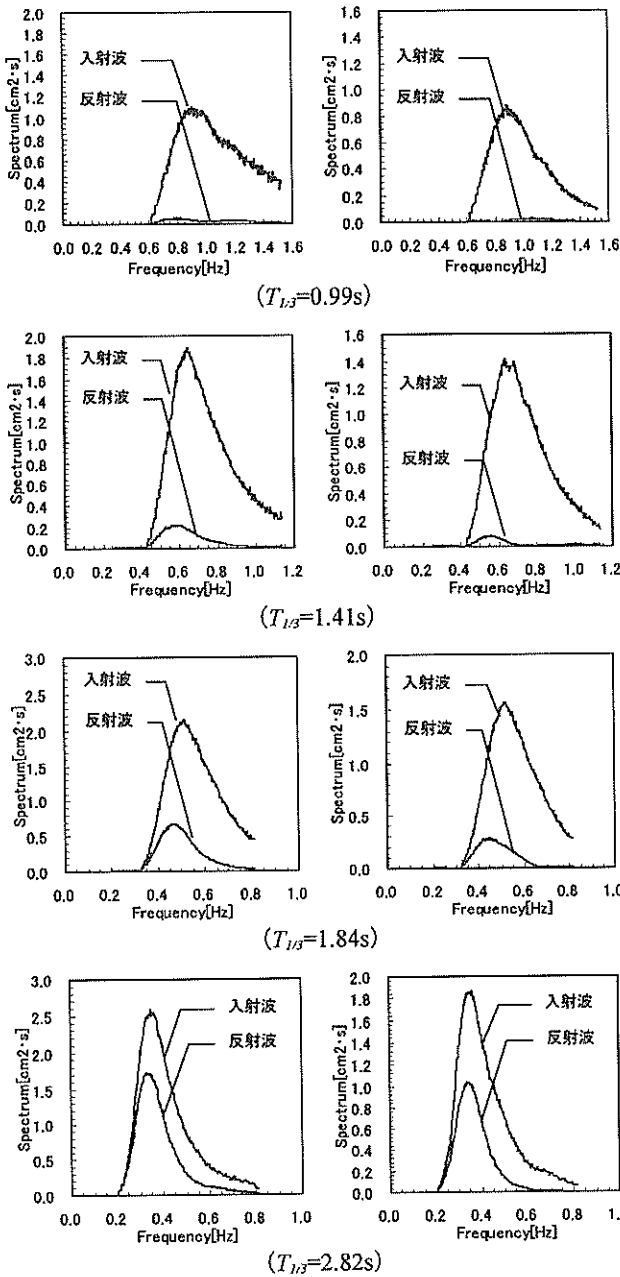
図-22 入・反射波スペクトルの再現性 ($H_{1/3}=8.0\text{cm}$)
(法面勾配 1:4/3, 堤前水深 $h=27.9\text{cm}$)

また、有義波高 3cm としたときにみられた法面勾配の違いによる反射波スペクトルの差異は、有義波高 8cm としたときにも、数値計算および模型実験の両者に認められる (図-22(a), (b), および図-24(a), (b)). 代表波が有限振幅波に分類されるときは、法面勾配 1:4/3 のときと同様に、低周波数側に自由長周期波のスペクトルがみられる。これらは、この透水層モデルが、不規則波の反射に関して、法面勾配の違いによるスペクトル特性

の変化をよく再現することを示している。

(4) 部分重複波形の再現性

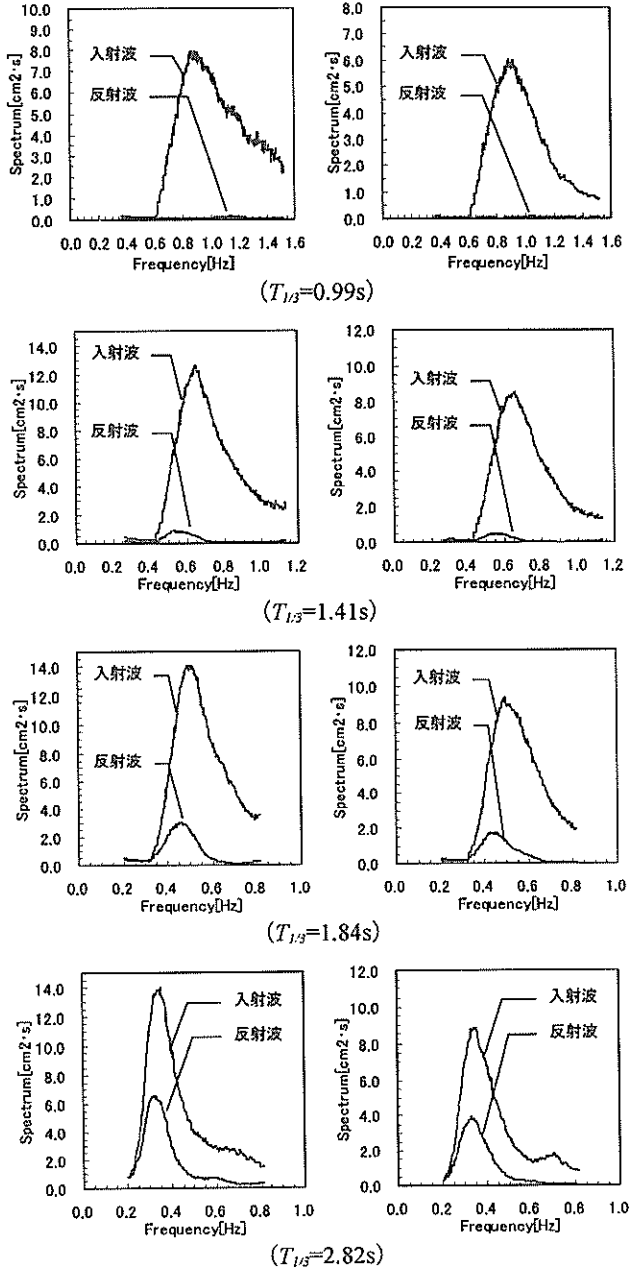
防波堤や護岸の前面で形成される部分重複波形を数値計算で再現するためには、消波構造物の反射率や反射波スペクトルとともに、反射波の位相が正しく計算されなければならない。このためには、消波工の抵抗や反射自由端となる堤体壁面までの距離、および入・反射波の波速などを精度よく再現することが必要である。



(a) 数値計算

(b) 模型実験

図-23 入・反射波スペクトルの再現性 ($H_{1/3}=3.0\text{cm}$)
(法面勾配 1:2, 堤前水深 $h=27.9\text{cm}$.)



(a) 数値計算

(b) 模型実験

図-24 入・反射波スペクトルの再現性 ($H_{1/3}=8.0\text{cm}$)
(法面勾配 1:2, 堤前水深 $h=27.9\text{cm}$.)

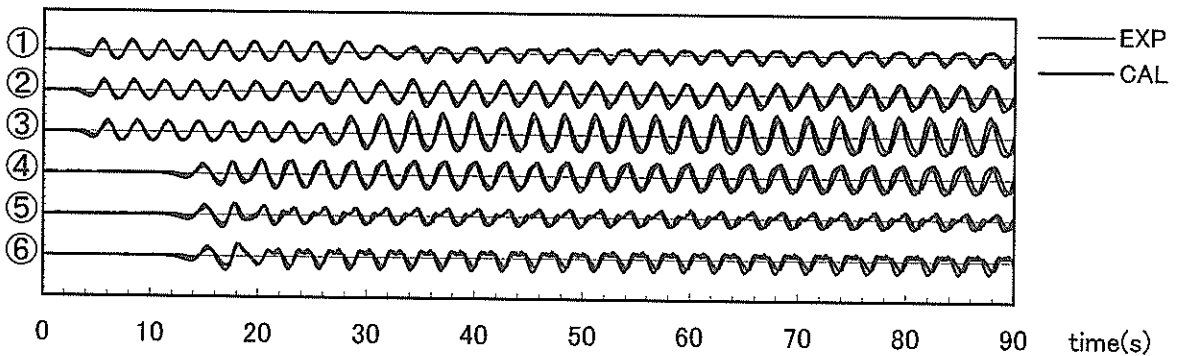
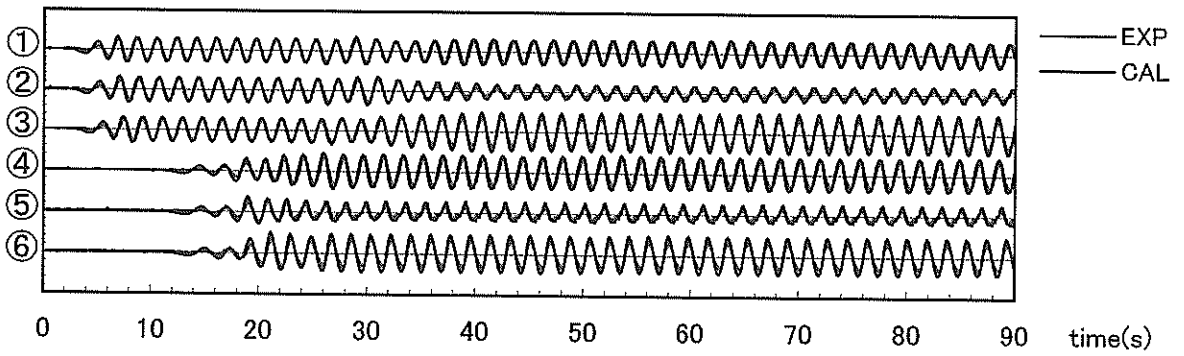
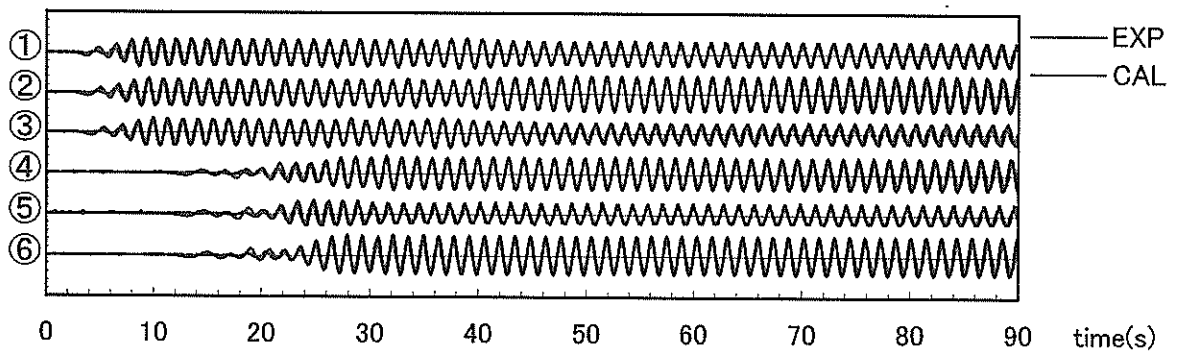
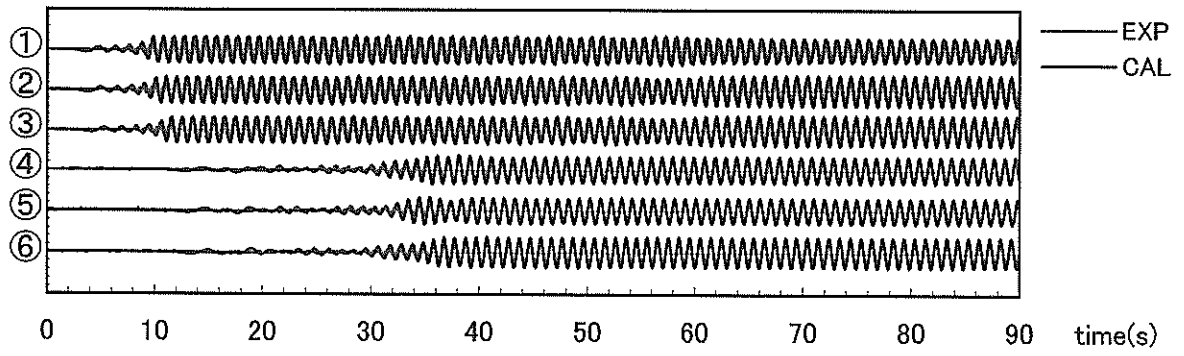
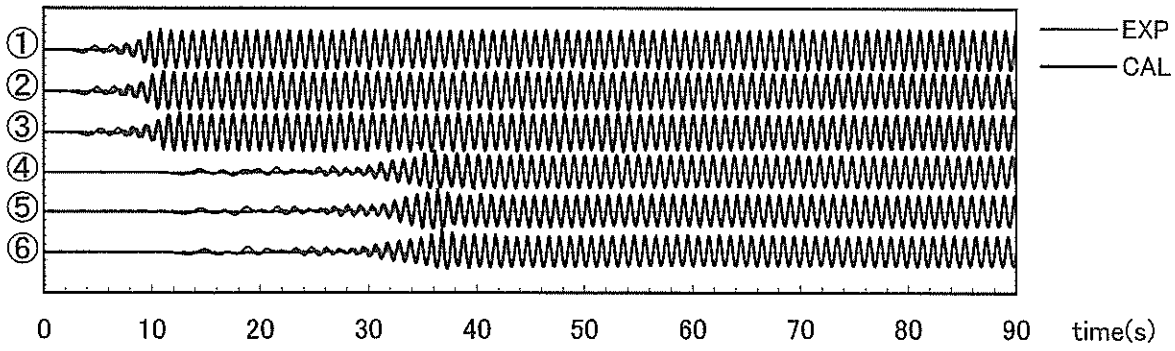
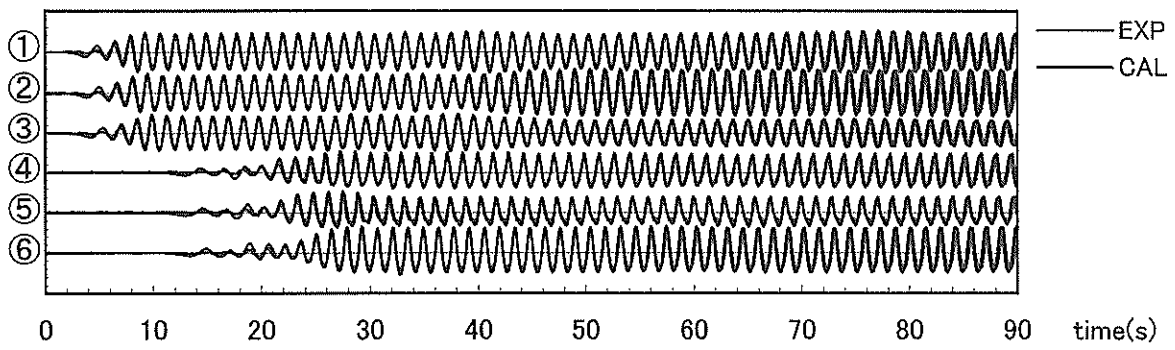


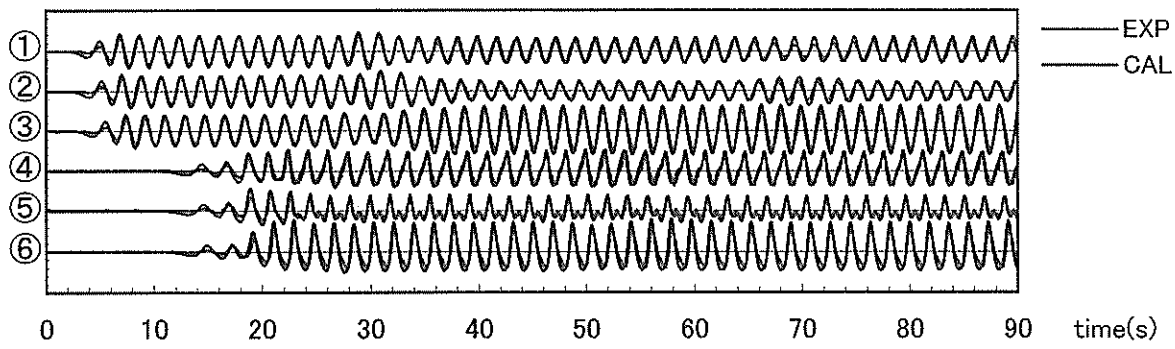
図-25 部分重複波の再現性 (規則波: 波高 $H=3cm$) (法面勾配 1:4/3, 堤前水深 $h=27.9cm$,)



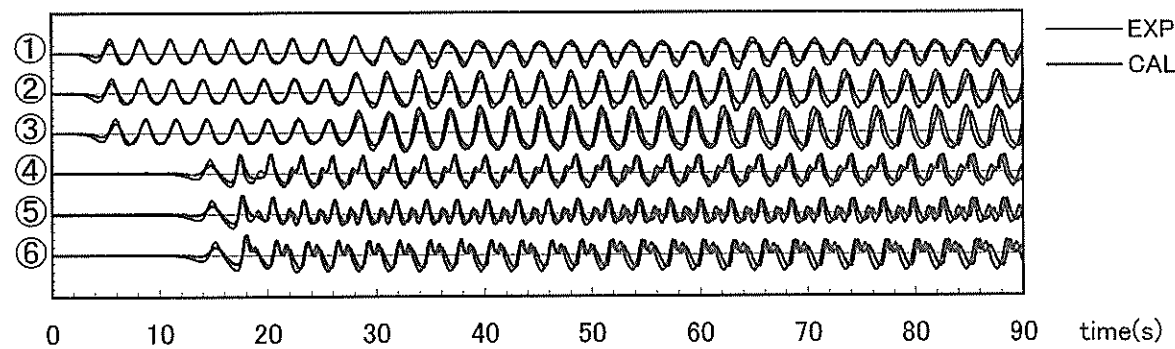
(a) $T=0.99s$



(b) $T=1.41s$



(c) $T=1.84s$



(d) $T=2.82s$

図-26 部分重複波の再現性 (規則波：波高 $H=8cm$) (法面勾配 1:4/3, 堤前水深 $h=27.9cm$.)

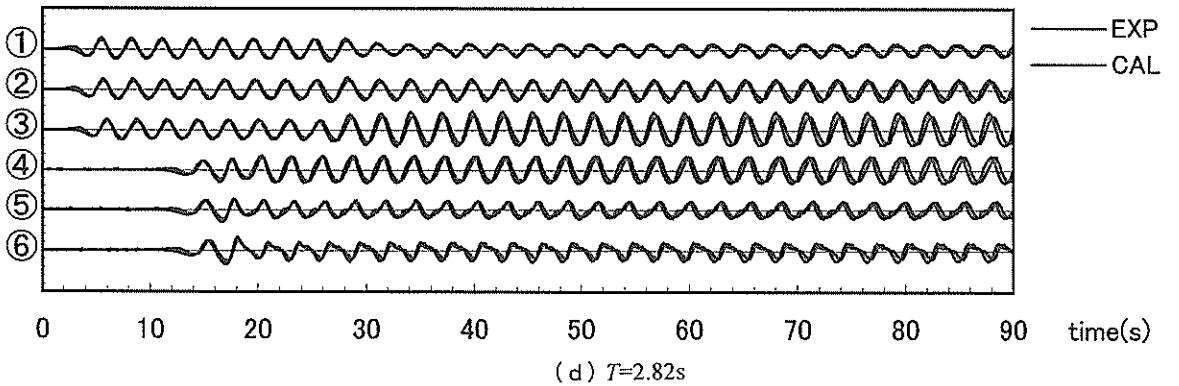
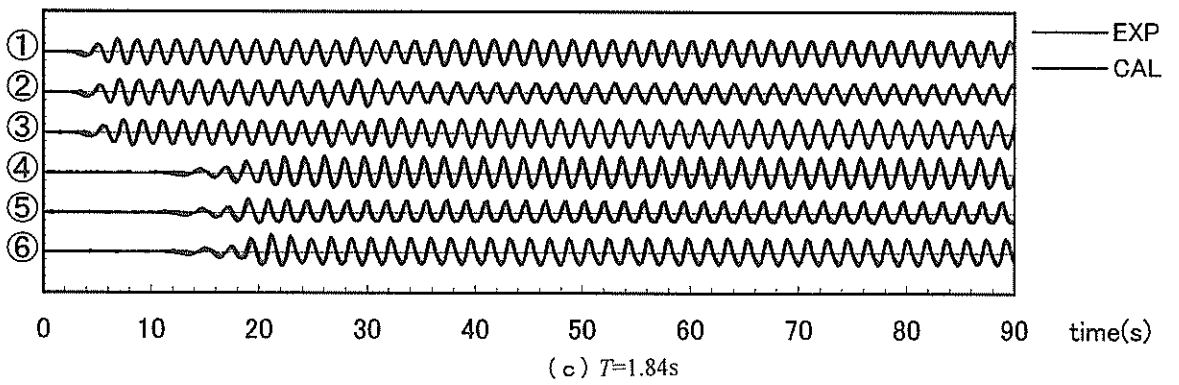
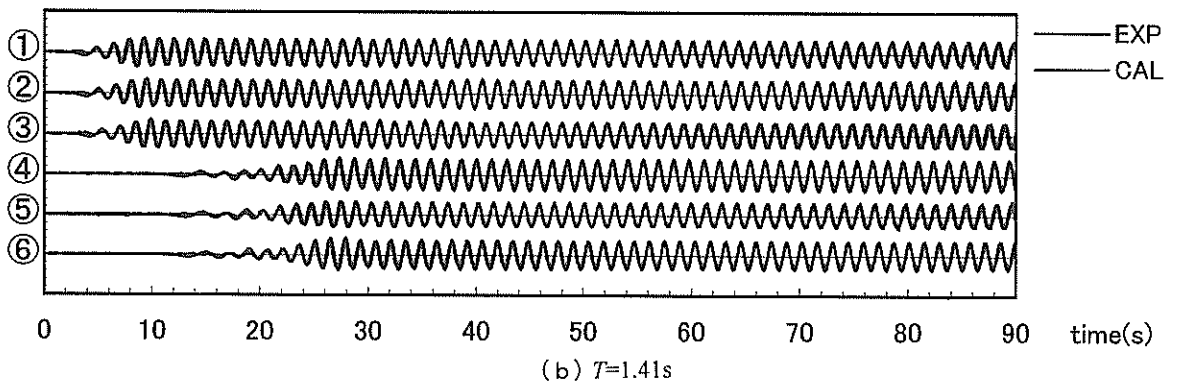
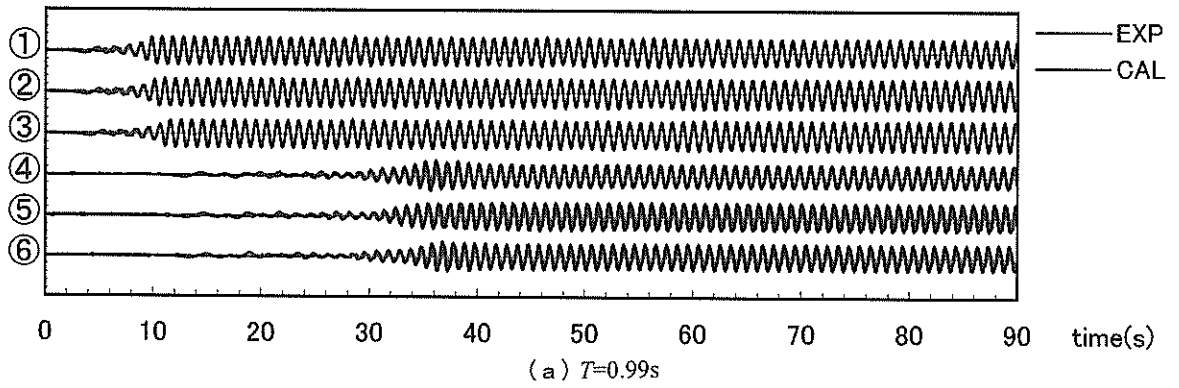


図-27 部分重複波の再現性 (規則波: 波高 $H=3cm$) (法面勾配 1:2, 堤前水深 $h=27.9cm$,)

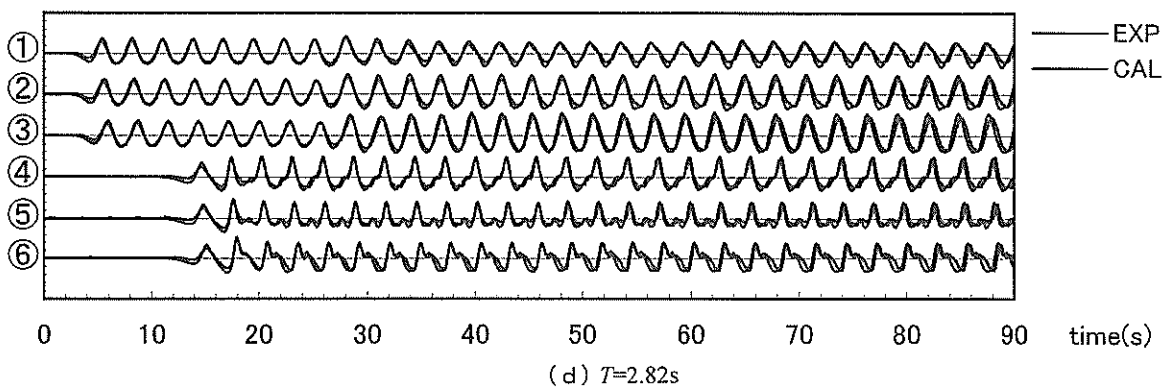
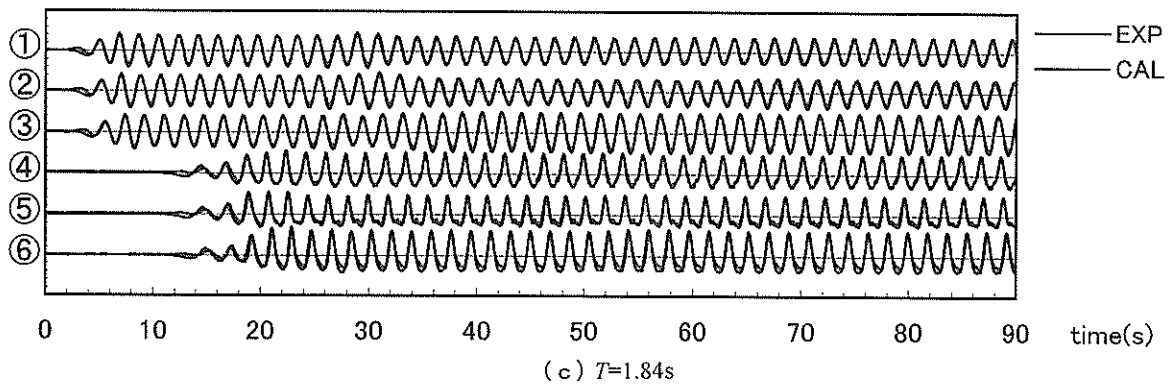
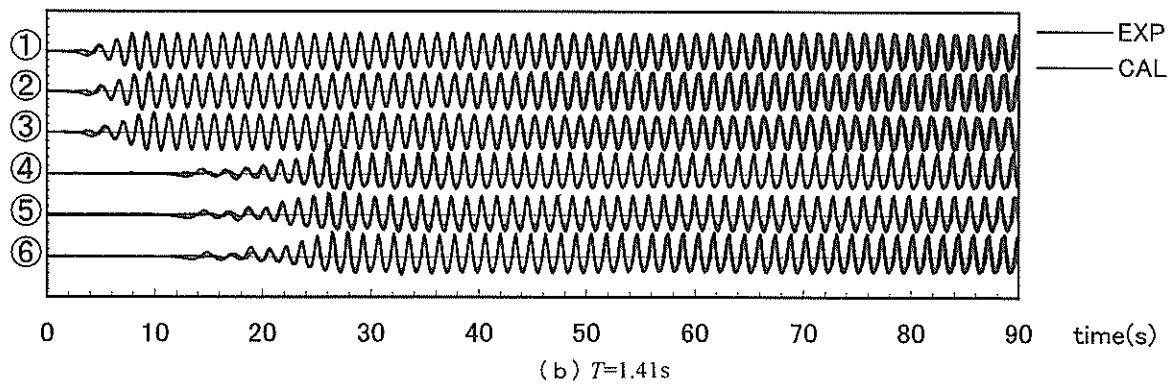
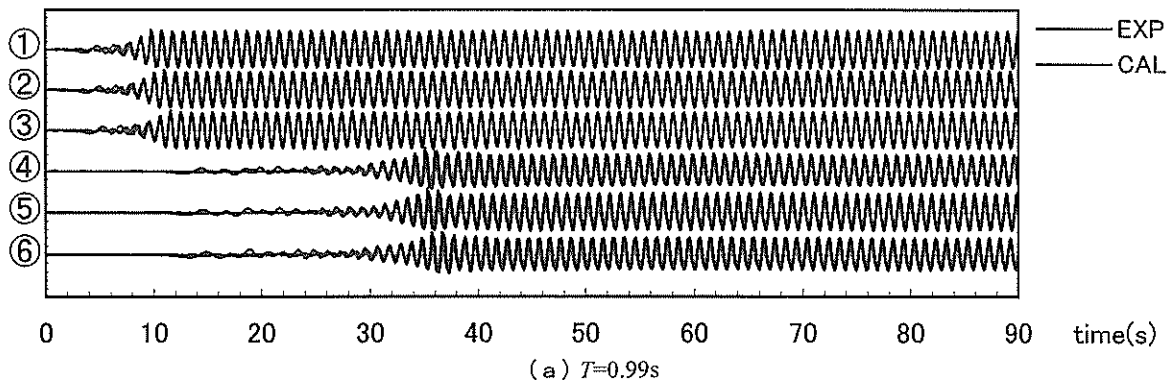


図-28 部分重複波の再現性 (規則波: 波高 $H=8cm$) (法面勾配 1:2, 堤前水深 $h=27.9cm$.)

透水層の内外を伝播する入・反射波の波速の計算精度は、透水層モデルの基礎方程式(4)、(5)の水面波の記述に対する近似精度に依存すると考えられる。そこで、堤前水深 $h=27.9\text{cm}$ のとき、波速に関してそれぞれ微小振幅波あるいは有限振幅波に分類される規則波(図-16(a)参照)が消波構造物に入射したときの、部分重複波形の再現性を検討した。

a) 法面勾配 1:4/3 の消波ブロック被覆堤の場合

数値計算および模型実験で得られた①～⑥地点(図-12および図-13)における波高 $H=3\text{cm}$ のときの時間波形を図-25に、波高 $H=8\text{cm}$ のときの時間波形を図-26にそれぞれ重ねて示す。微小振幅波に属し、波の非線形性が弱い場合には、模型実験で得られた部分重複波の波形は数値計算の波形と非常によく一致した(図-25(a)～(c)、および図-26(a))。さらに、有限振幅波で波の非線形性が強い場合にも、数値計算では反射波の振幅と位相が精度よく計算されるために、模型実験において、岸沖方向に設置された沖側3地点、岸側3地点の波高計で計測された部分重複波の振幅の空間分布は、計算結果とよく対応した(図-25(d)、および図-26(b)～(d))。有限振幅波の時間波形の計算精度が微小振幅波に比べやや劣るのは、透水層モデルにおける基礎方程式の近似精度が $O(\epsilon, \mu^2)$ であるためであると考えられる。また、部分重複波の位相は、入・反射波の位相関係とともに反射率によっても規定される。したがって、模型実験に比べ反射率が1割程度大きい(図-17参照)数値計算の部分重複波形は、模型実験のそれと完全には一致しない。とくに、反射率が大きな場合にはその傾向が顕著に現れ、数値計算で得られた部分重複波の位相は模型実験よりも少し速くなる(図-25(d)、図-26(d))。

両図において、模型実験で得られた水位変動の時間波形では、入射波と反射波が重なる時刻より以降に、基本周波数の波のほかに2倍周波数と思われる小さな波が混在している様子が観察され、この波形が数値計算でも再現されている。また、このことは、すでに示した不規則波の入・反射波スペクトル(図-21および図-22)からも確認される。平山・平石(2001)は、透水層モデルを用いた数値計算と模型実験で得られた部分重複波の時系列データをスペクトル解析して、波が消波ブロック被覆堤で反射される際に2次波が発生し、透水層モデルはこれを比較的精度よく再現することを示した。本研究で得られた数値計算と模型実験の部分重複波形もこれと同様に考察されると思われる。

b) 法面勾配 1:2 の消波ブロック被覆堤の場合

同様に、数値計算および模型実験で得られた時間波形

を図-27、28にそれぞれ重ねて示す。数値計算における部分重複波形の再現性に関して、基本的な特徴は法面勾配 1:4/3 のときと同様である。ただし、前述のように、反射率は全体的に低減されているので、相対的に振幅が小さな反射波から得られる部分重複波形の計算精度は、有限振幅波においても比較的良好である。

3.3 消波材充填型の直立消波堤における波の反射特性

(1) 消波材を充填した直立消波堤の透水層モデル

直立消波堤を対象とした模型実験では、繊維状の消波材(ヘチマロンシート、新光ナイロン(株)製:型番#350)を充填した消波籠を水路左端の壁面前面に設置した(図-29)。そこで、数値計算では、これに対応する透水層モデルとして、透水層パラメータを表-5のように設定した(式(2)、式(6)参照)。

直立消波堤に対する透水層モデルの空隙率 λ は、前述のように、消波工の空隙率 λ_0 に等しく式(2)で与えられる。ヘチマロンシート(型番#350)の空隙率は製品仕様により $\lambda_0=0.928$ であるので、本研究でもこれを用いた。また、透水層の幅 B は図-29より $B=0.7\text{m}$ 、慣性係数 τ は1とした。一方、ヘチマロンシートの層流および乱流抵抗係数の定数 α_0 および β_0 は不明であり、各種消波材の α_0 と β_0 を示した表-1から推定することも難しい。そこで、製品仕様に記載されている動水勾配を用いて、定数 α_0 と β_0 を以下のように求めた。

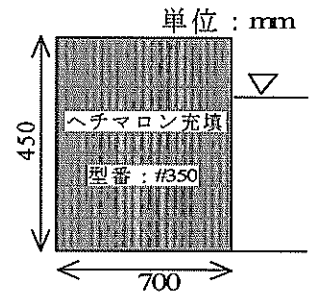


図-29 直立消波堤 (ヘチマロンシートを充填)

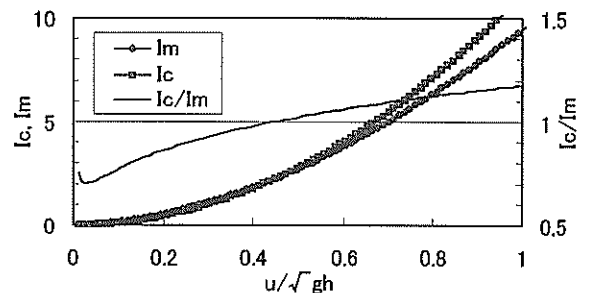


図-30 ヘチマロンシートと透水層の動水勾配の比較

ヘチマロンシート（型番#350）の動水勾配 I_m は次式のように与えられている。

$$I_m = \frac{h_l}{l} = 3.843 u^{1.789} \quad (7)$$

ここで、 h_l は損失水頭、 l は動水距離、 u は流速である。一方、透水層内の動水勾配 I_c は次式で与えられる。

$$I_c = \frac{h_l}{l} = \frac{u}{g} (\alpha + \beta |u|) \quad (8)$$

ここで、 g は重力加速度であり、 α および β は式(6)で与えられる層流抵抗係数および乱流抵抗係数である。ヘチマロンシートの定数 α_0 と β_0 は、式(8)で与えられる I_c が、式(7)で与えられる動水勾配 I_m に等しくなるように α および β を設定することにより得られる。ヘチマロン繊維の直径から消波材の代表径 d を求めると、 $d=1.8 \times 10^3$ (m)となる。そこで、式(6)を式(8)へ代入し、図-30を用いて、流速波速比 u/\sqrt{gh} (ただし、波速 $C=\sqrt{gh}$) が0から1の範囲で I_c/I_m がほぼ1に等しくなるような定数 α_0 と β_0 を試行錯誤により求めたところ、 $\alpha_0=3300$ 、 $\beta_0=0.79$ が得られた。

数値計算および模型実験に用いた波浪条件を表-6に示す。堤体前面の水平床上的水深 h は、対象とした直立消波堤の H.W.L. ($h=27.9$ cm) と L.W.L. ($h=30.4$ cm) とした。入射波は、造波境界および造波板位置において、波高 1.4cm と 3.5cm ($h=27.9$ cm のとき) または 5.0cm ($h=30.4$ cm のとき)、周期 0.99s~2.82s の規則波および不規則波とした。斜面模型による浅水変形(首藤, 1974)を考慮して、堤体前面の水平床上で得られる波を図-5と同様に岩垣(1987)の分類に従って整理した結果を図-31に示す。この図より、堤体に作用する波はすべて浅海波に分類されることがわかる。また、いずれの水深においても、造波した波が波高 1.4cm、周期 0.99s、1.41s、1.83s のときは、堤体前面では波高と波速ともに微小振幅波の特性を有し、波高 1.4cm で周期 2.82s のときと、波高 3.5cm または 5.0cm で周期 0.99s、1.41s、1.83s のときは、波高については有限振幅波、波速については微小振幅波の特性を有する。さらに、波高 3.5cm または 5.0cm で周期 2.82s のときは、波高、波速ともに有限振幅波の特性を有することがわかる。

(2) 反射率の再現性

ヘチマロンシートを充填した直立消波堤の反射率を図-32および図-33に示す。

a) 入射波の諸元による反射率の変化

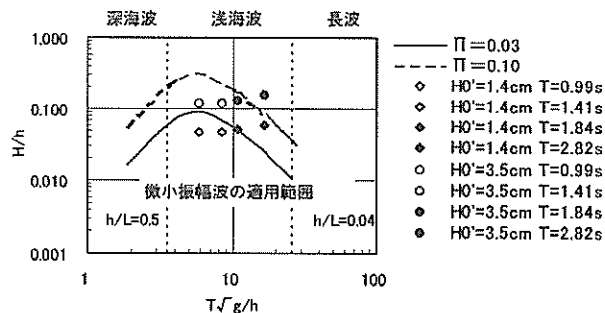
堤前水深 $h=27.9$ cm のときの規則波と不規則波に対する数値計算結果を図-32(a)に、模型実験結果を図-32(b)に示す。図中、実線は規則波の反射率、点線は不規則波の反射率である。規則波を用いた数値計算では、

表-5 直立消波堤の透水層モデルパラメータ

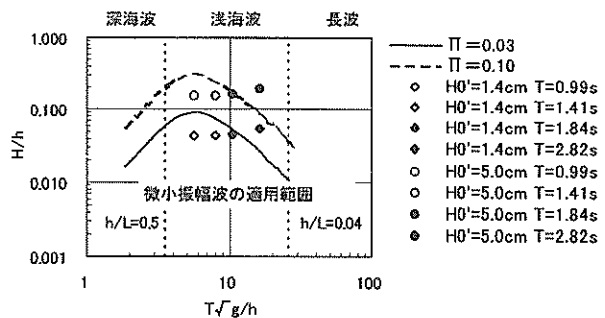
直立消波堤	τ	λ_0	α_0	β_0	d (m)	ν (m ² /s)	B (m)
ヘチマロン: #350	1	0.928	3300	0.79	1.80×10^{-3}	1.14×10^{-6}	0.7

表-6 直立消波堤および直立堤に対する波浪条件

模型量[縮尺: 1/50]			波の種類
波高 H_0 (cm)	周期 T (s)	水深 h (cm)	
1.4	0.99	27.9	規則波 and 不規則波 (Bredschneider-光易スペクトル)
1.4	1.41		
1.4	1.84		
1.4	2.82		
3.5	0.99		
3.5	1.41		
3.5	1.84	30.4	規則波 and 不規則波 (Bredschneider-光易スペクトル)
3.5	2.82		
1.4	0.99		
1.4	1.41		
1.4	1.84		
1.4	2.82		
5.0	0.99	30.4	規則波 and 不規則波 (Bredschneider-光易スペクトル)
5.0	1.41		
5.0	1.84		
5.0	2.82		



(a) 堤前水深 $h=27.9$ cm



(b) 堤前水深 $h=30.4$ cm

図-31 堤前波の波浪特性 (直立消波堤, 直立堤)

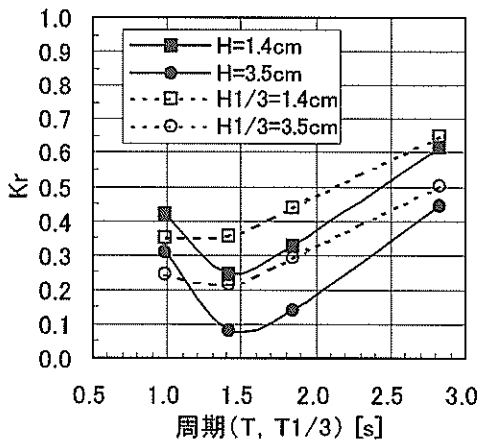
透水層沖側端で重複波の位相がほぼ節となる周期 1.41s のとき反射率が最小となり、その後は、周期が長くなるにつれて反射率が増加することがわかる。一方、不規則波を用いた数値計算では、有義波周期 1.41s のときにも反射率はそれほど減少していない。これは、不規則波では成分波の波長がそれぞれ異なるので、透水層沖側端において重複波の節が生じにくくなったためである。また、波高に関して有限振幅波となる波高 8cm のときに得られた反射率は、見かけ上、全体的に小さくなっている。実験結果では、規則波および不規則波とも、値は若干小さめながらもこれらの傾向がよく現れている。

b) 堤前水深による反射率の変化

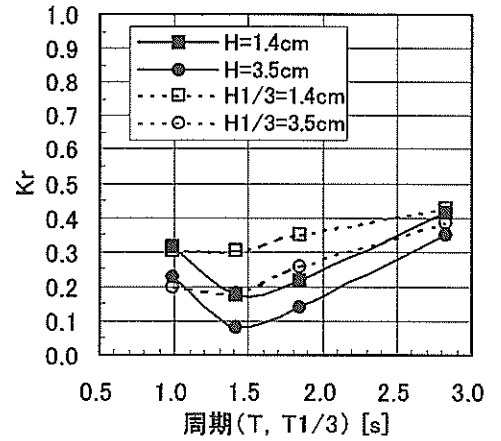
堤前水深 $h=30.4\text{cm}$ のときの規則波と不規則波の反射

率を図-33(a), (b)に示す。ある法面勾配を有する消波ブロック被覆堤を対象とした数値計算では、堤前水深が深くなると、規則波、不規則波ともに、反射率は全体的に大きくなった(3.2節参照)。しかしながら、直立消波堤を対象とした数値計算では、堤前水深が異なっても、規則波、不規則波とも、反射率はほとんど変化していない。これは、堤前水深が増加したとき、前者では静水面における消波工の設置幅が減少し、消波効率が低減するのに対し、後者では消波工の設置幅は変化せず、入・反射波の位相関係や透水層によって波が抵抗を受ける距離が変化しないことに対応していると考えられる。これと全く同じ傾向は模型実験結果にも認められる。

これらの結果から、この透水層モデルは、消波材の消

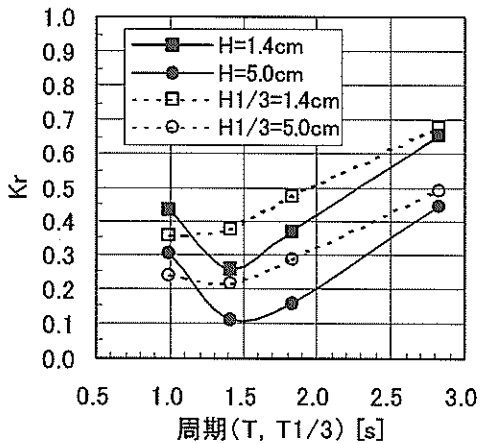


(a) 数値計算

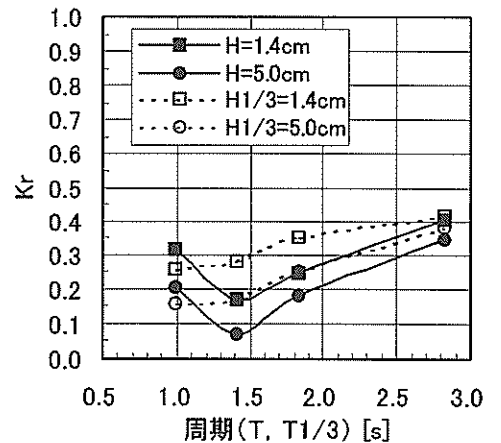


(b) 模型実験

図-32 反射率の再現性 (直立消波堤, ヘチマロンシート: 型番#350, $h=27.9\text{cm}$)



(a) 数値計算



(b) 模型実験

図-33 反射率の再現性 (直立消波堤, ヘチマロンシート: 型番#350, $h=30.4\text{cm}$)

波特性や消波工の断面形状の違いに応じた反射率の変化を精度よく再現できることが確認された。

(3) スペクトル形状の比較

直立消波堤の前面で得られた入・反射波スペクトルのうち、堤前水深 $h=27.9\text{cm}$ のときの解析結果を図-34 および図-35 に示す。

有義波高 1.4cm 、有義波周期 $0.99\text{s}\sim 2.82\text{s}$ の不規則波に対する数値計算結果を図-34(a)に、模型実験結果を図

-34(b)に示す。消波工が法面勾配を有するときと同様に、それぞれ有義波周期の異なる不規則波が直立消波堤で反射したとき、数値計算によって得られる反射波スペクトル形状は、模型実験のそれによく似ている。また、有義波周期が 1.41s 以上の各図では、数値計算と模型実験の両者にみられる入射波スペクトルのピークに対する反射波スペクトルのピークのずれは、入射波スペクトルのピークよりも低周波数側にみられる。一方、有義波周期が

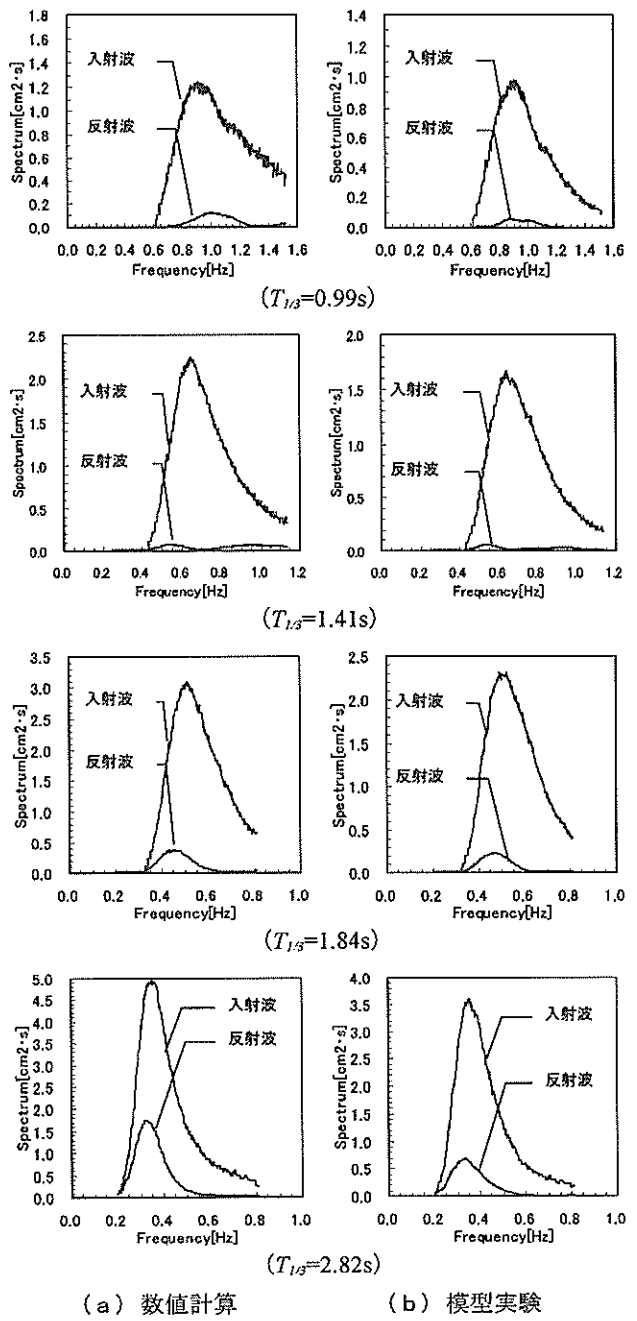
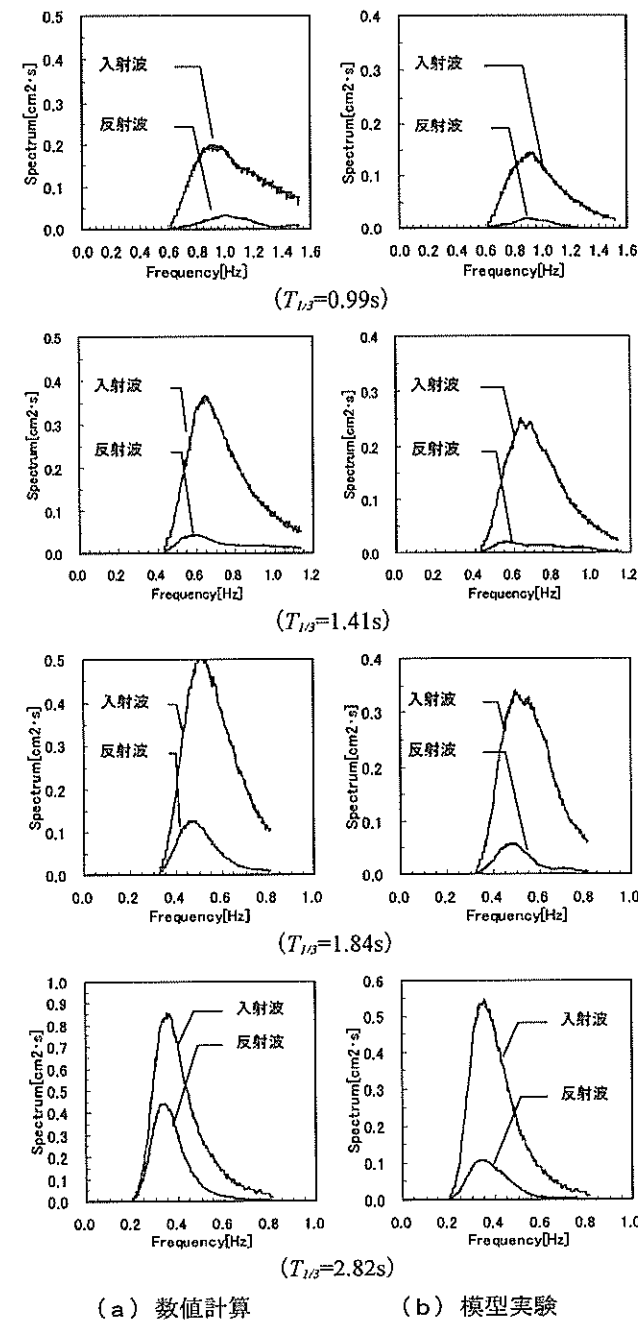


図-34 入・反射波スペクトルの再現性 ($H_{1/3}=1.4\text{cm}$)
(直立消波堤, 堤前水深 $h=27.9\text{cm}$.)

図-35 入・反射波スペクトルの再現性 ($H_{1/3}=3.5\text{cm}$)
(直立消波堤, 堤前水深 $h=27.9\text{cm}$)

0.99s のときは、数値計算と模型実験ともに、このピークのずれが入射波スペクトルのピークよりも高周波数側にみられることに注意されたい。これは、入射波のピーク周期 (1.04s) よりも短い周期の波の反射率は大きくなり、長い周期の波の反射率は小さくなることを意味している。したがって、このような反射波のスペクトル特性は、図-32 および図-33 において、周期 1.41s のときに反射率が最小値となったこととよく対応している。また、周期 1.41s 以上のときに反射率が大きくなる様子は、数値計算と模型実験の両者の入・反射波スペクトルにおいて、低周波数側でのこのピークのずれの程度が次第に小さくなることから、消波工が法面勾配を有するときと同様に説明される。

有義波高を 3.5cm としたときの入・反射波スペクトルを図-35(a), (b) に示す。波高の増加に伴い、入射波のスペクトル値に対する、数値計算および模型実験で得られた反射波のスペクトル値の割合は全体的に小さくなっており、反射率が小さくなっていることがわかる。これらは、反射率に関して図-32 および図-33 で得られた傾向とよく一致している。もちろん、この比較においても、有義波高 1.4cm としたときにみられた上述の特性は両者に認められる。

(4) 部分重複波形の再現性

水深 $h=27.9\text{cm}$ とした水路左端に直立消波堤を設置したとき、数値計算および模型実験で得られた①～⑥地点 (図-12 および図-13) における波高 $H=1.4\text{cm}$ のときの時間波形を図-36 に、波高 $H=3.5\text{cm}$ のときの時間波形を図-37 にそれぞれ重ねて示す。図-31(a) に従って直立消波堤護岸に入射する波を分類すると、部分重複波の時間波形の再現精度に関してつぎのように考察される。

波高と波速ともに微小振幅波に属し、波の非線形性が弱い場合 (図-36(a)～(c)) には、模型実験で得られた部分重複波の波形は数値計算の波形と非常によく一致した。ここで、 $T=0.99\text{s}$ のとき、岸側の④～⑥地点で観測された両者の部分重複波形の間に位相差が見られるのは、両者の反射率の差異による部分重複波の位相のずれが、波長が短いことによって際立った結果であると思われる。また、波高に関しては有限振幅波に属し、波速に関しては微小振幅波に属する場合 (図-36(d), 図-37(a)～(c)) にも、両者の部分重複波形は互によく一致した。 $T=0.99\text{s}$ のときに見られる位相のずれは、先ほどと同様な理由による。一方、波長が長い $T=2.82\text{s}$ のときも、数値計算で得られた部分重複波の位相は模型実験のそれよりも速くなっている。これは、模型実験に対して、数値計算で得られた反射率が約 1.5 倍程度大きいことが原因

であると考えられる (図-32(a), (b))。さらに、波高と波速ともに有限振幅波に属し、波の非線形性が強い場合 (図-37(d)) では、透水層モデルの基礎方程式の近似精度がたかだか $O(\epsilon, \mu^2)$ であることを考慮すれば、模型実験で得られた部分重複波の波形は数値計算の波形と非常によく一致していると考えられる。

3.4 直立堤における波の反射特性

(1) 直立堤を対象とした完全反射境界

任意反射境界処理法を用いた数値計算では、波が完全反射する直立堤は、2.1 節および 2.2 節で述べたように、透水層の空隙率 λ を 1 として表現される。このとき、透水層の層流抵抗係数 α と乱流抵抗係数 β はそれぞれ 0 となり、これは、堤体壁の前面に消波工が何も設置されていないことを意味する。したがって、数値計算と同様な条件で実施された模型実験では、堤体壁とみなした水路左端壁の前面に消波材模型を一切設置しないことが、直立堤を再現したことに相当する。

数値計算および模型実験に用いた波浪条件は直立消波堤のときと同様である (表-6)。

(2) 反射率の再現性

a) 入射波の諸元による反射率の変化

堤前水深 $h=27.9\text{cm}$ のとき、それぞれ規則波と不規則波を造波した場合の波高や周期の違いによる反射率の変化について、数値計算結果を図-38(a) に、模型実験結果を図-38(b) に示す。図中、実線は規則波の反射率、点線は不規則波の反射率である。水路左端を完全反射境界とした数値計算では、規則波と不規則波ともに、波高や周期の違いによらず反射率 K_r はほぼ 1 となった。これに対して、水路左端壁を直立堤の壁面とみなした模型実験では、周期 0.99s のとき反射率 K_r は 0.9 程度となり、周期の増加に従い反射率が減少して、周期 2.82s では 0.7～0.8 程度にまで減少した。この傾向は、周期の増加に伴い波高に関して微小振幅波の適用範囲から有限振幅波の適用範囲に移行する波高 $H=1.4\text{cm}$ のときに、より顕著であった (図-31(a) 参照)。また、不規則波では反射率は単調に減少するのに対し、規則波では反射率が急激に減少する傾向がみられた。

数値計算では、水路床や側面、直立壁での摩擦、あるいは、重複波の腹位置における砕波などといった波エネルギー損失は考慮されていない。これらを適切にモデル化した数値計算により、直立壁による波の反射率が 1 より小さくなる現象は再現できると考えられる。例えば、摩擦損失は流速の 2 乗に比例して増大するので、反射率は、周期の長い波ほど小さくなるはずである。しかしな

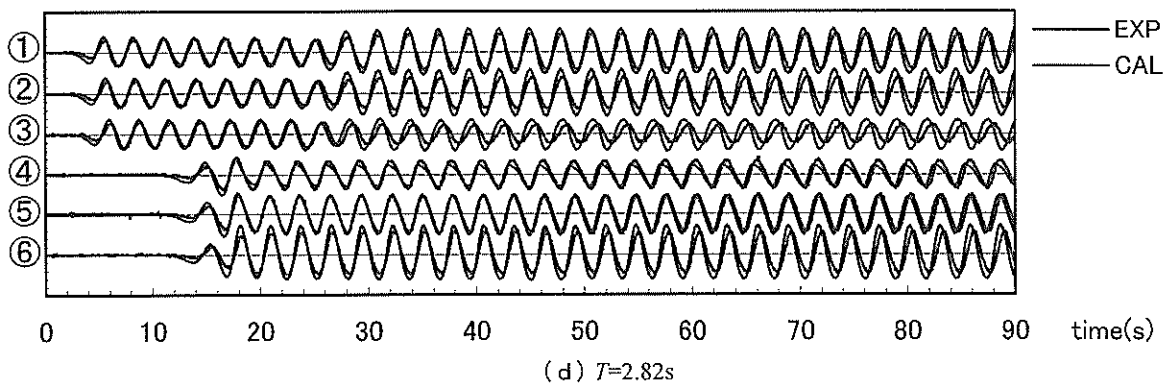
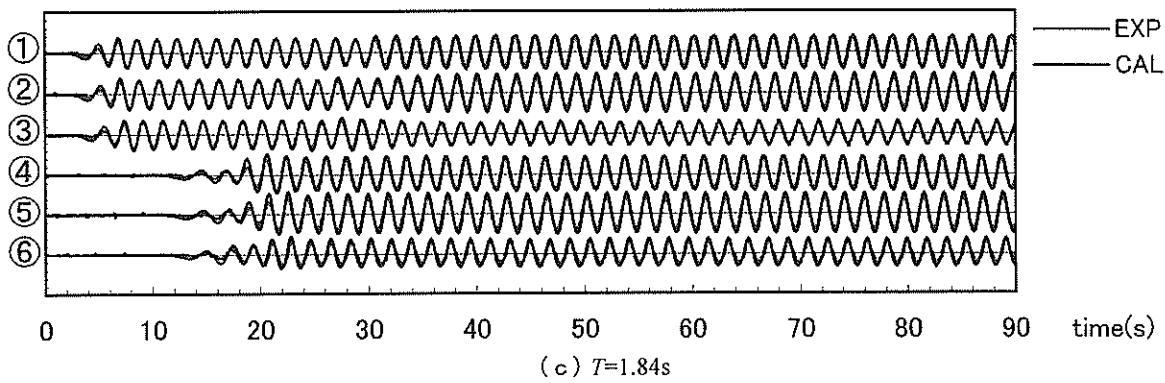
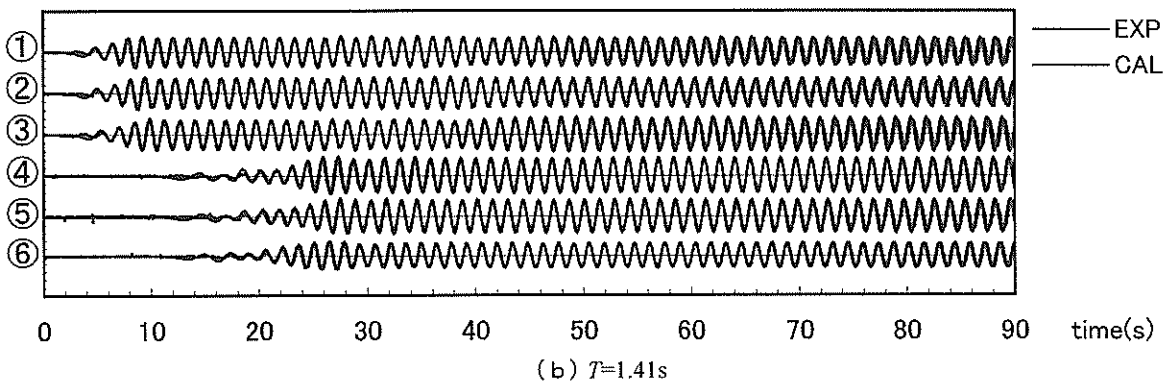
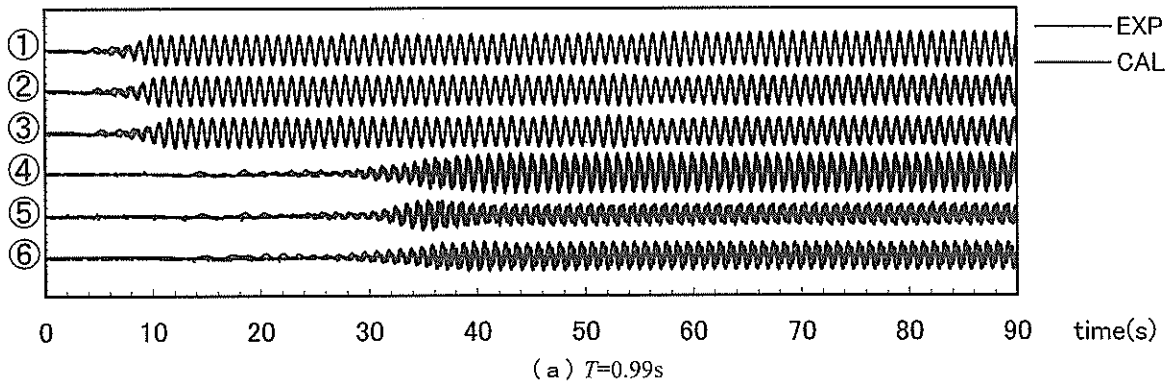


図-36 部分重複波の再現性 (規則波: 波高 $H=1.4cm$) (直立消波堤, 堤前水深 $h=27.9cm$,)

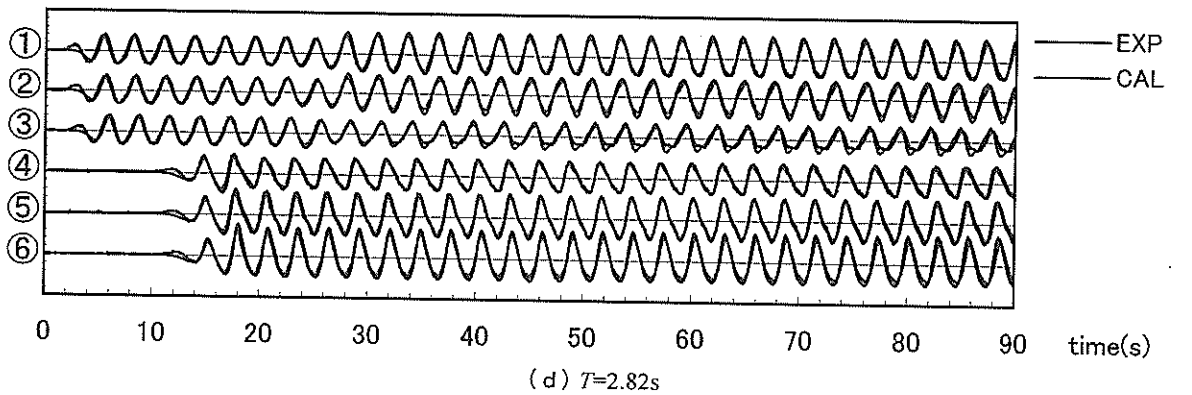
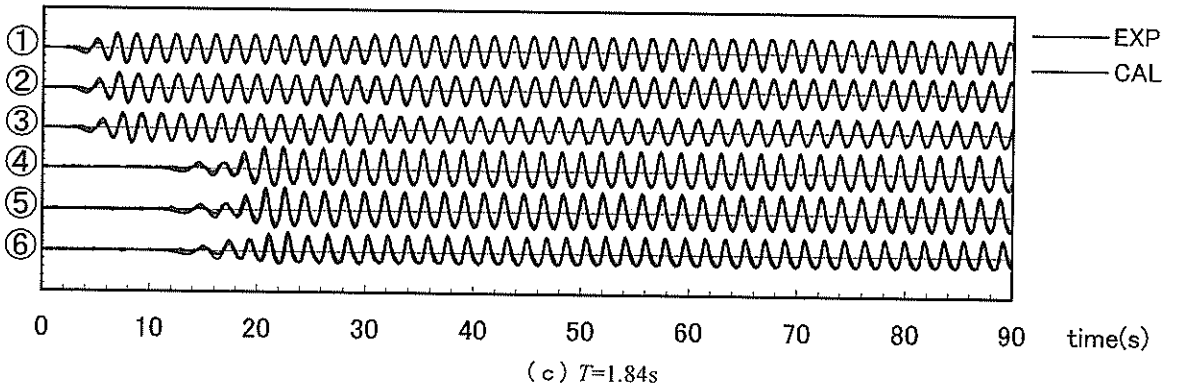
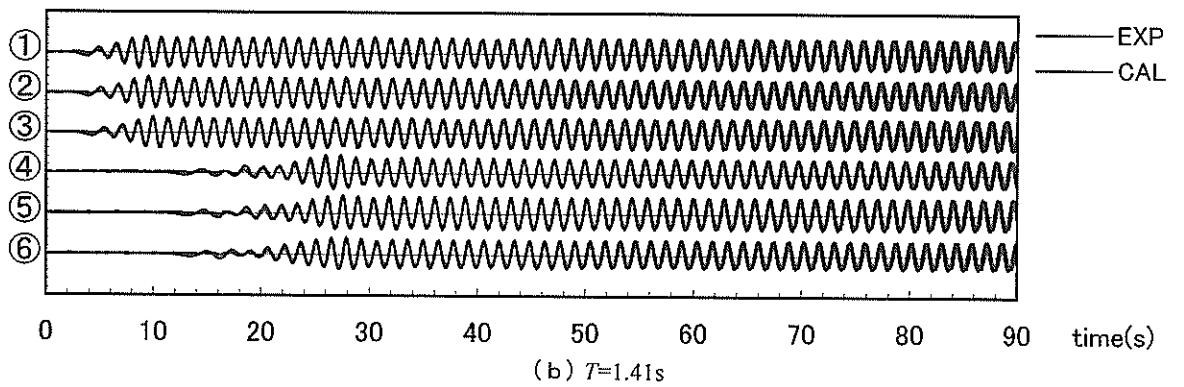
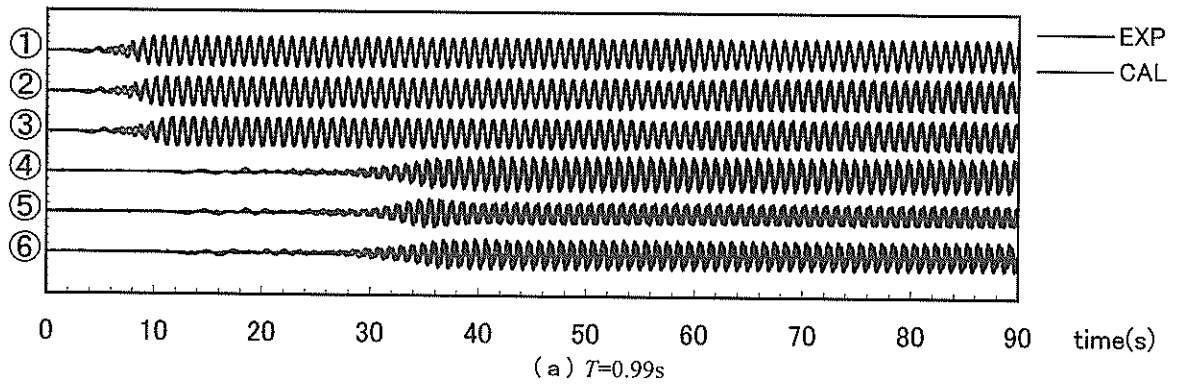


図-37 部分重複波の再現性 (規則波: 波高 $H=3.5cm$) (直立消波堤, 堤前水深 $h=27.9cm$,)

がら、これらによって反射率が $K_r=0.7\sim 0.9$ 程度となる模型実験結果をすべて説明することは難しい。

直立壁において入・反射波スペクトル分離法により得られる非線形重複波の反射率は、波形勾配が小さいほど、水深波長比が小さいほど、非線形性の影響によって、見かけ上、急激に小さくなる(合田・柿崎, 1966)。模型実験で得られた反射率には、この見かけ上の減少量も多少含まれていると考えられる。数値計算によってこれを再現するためには、波の非線形性に対する基礎方程式の近似精度をさらに向上させることが必要である。

b) 堤前水深による反射率の変化

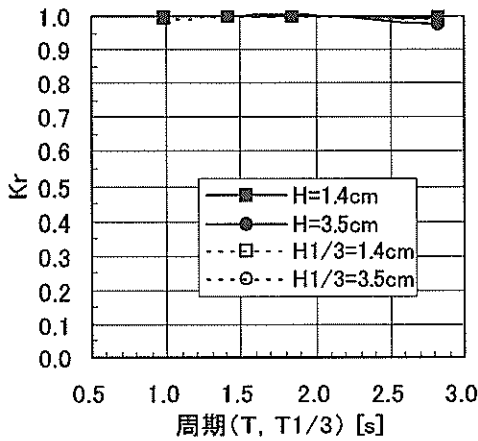
堤前水深を $h=30.4\text{cm}$ としたとき、数値計算および模型実験で得られた反射率を、それぞれ図-39(a)および図

-39(b)に示す。数値計算と模型実験ともに、水深が深くなったことによる反射率の変化は認められない。

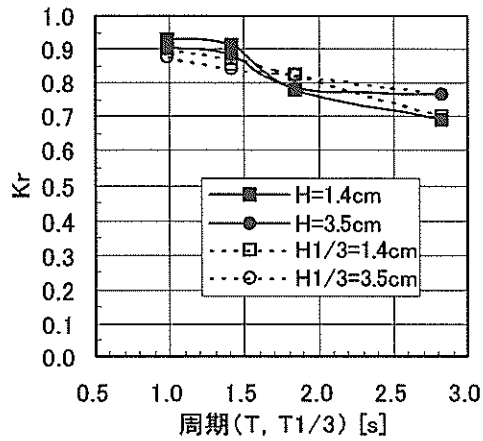
(3) スペクトル形状の比較

直立堤の前面で得られた入・反射波スペクトルのうち、堤前水深 $h=27.9\text{cm}$ のときの解析結果を図-40 および図-41に示す。

有義波高 1.4cm 、有義波周期 $0.99\text{s}\sim 2.82\text{s}$ の不規則波に対する数値計算結果を図-40(a)に、模型実験結果を図-40(b)に示す。それぞれ有義波周期の異なる不規則波が直立堤で反射したとき、数値計算で得られた反射波スペクトルは、その値や形状ともに、入射波スペクトルとほぼ完全に一致している。これは、図-38(a)および図-39(a)において、反射率が $K_r=1$ でほぼ一定となってい

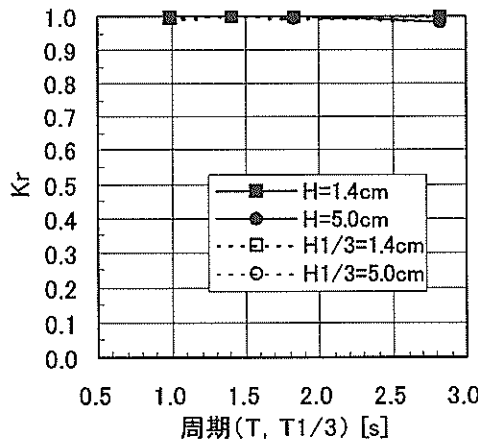


(a) 数値計算

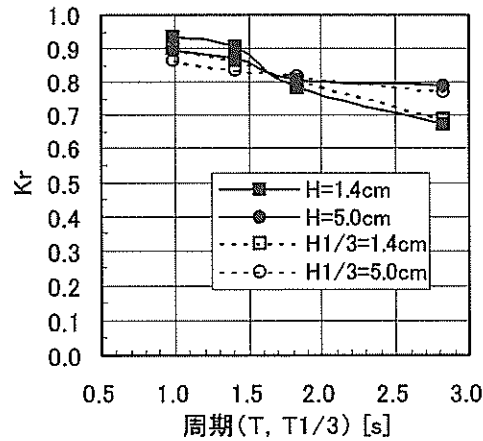


(b) 模型実験

図-38 反射率の再現性 (直立堤, 完全反射境界, $h=27.9\text{cm}$)



(a) 数値計算



(b) 模型実験

図-39 反射率の再現性 (直立堤, 完全反射境界, $h=30.4\text{cm}$)

ることによく対応している。一方、模型実験で得られた反射波スペクトル値は、入射波スペクトル値に比べ全体的に小さくなっている。また、有義波周期が長くなるほど、反射波スペクトルのピークは、入射波スペクトルのピークに対して高周波数側へずれていることがわかる。これらは、図-38(b)および図-39(b)において、反射率が $K_r=1$ より小さく、周期が長くなるにつれて反射率が減少することに対応したものである。

また、有義波高を 3.5cm としたときの入・反射波スペクトルを図-41(a), (b)に示す。数値計算では、有義波高 1.4cm のときと同様に、入射波と反射波のスペクトルは互いによく一致している。また、有義波周期 2.82s のときに得られた反射波スペクトル値は、波高の増加に伴い入射波スペクトル値に比べ少し小さくなっている。これらは反射率に関して得られた傾向によく対応している。一方、模型実験では、反射波スペクトルのピークが入射

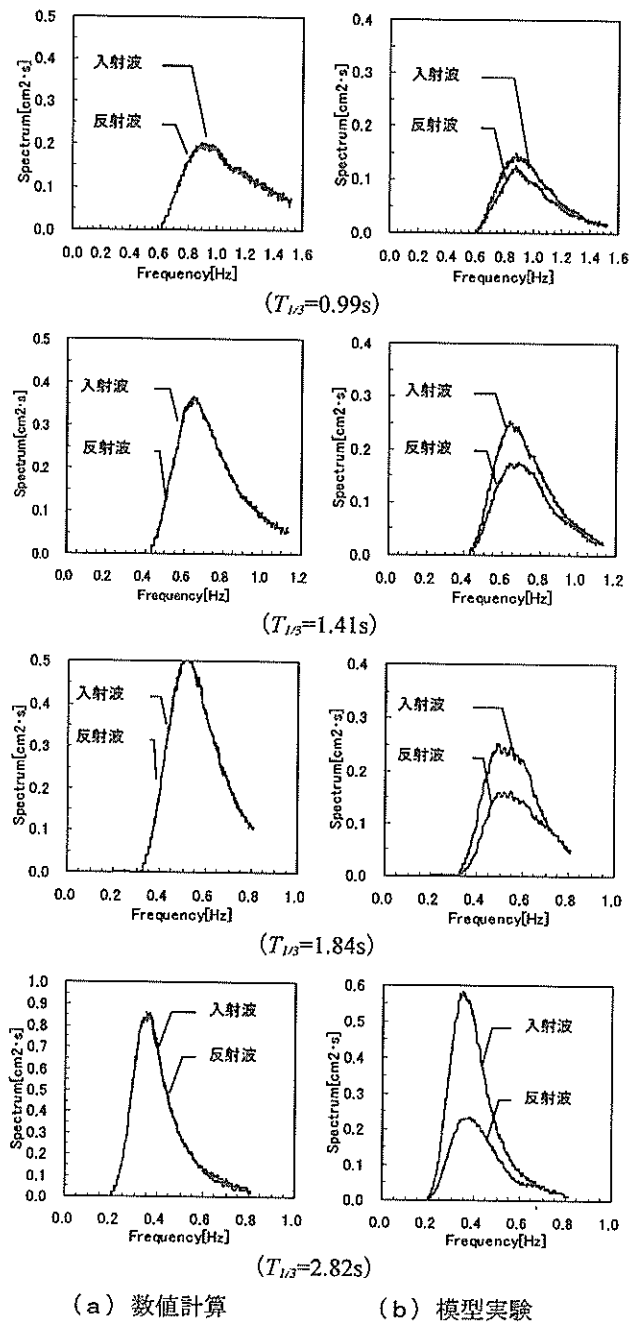


図-40 入・反射波スペクトルの再現性 ($H_{1/3}=1.4\text{cm}$)
(直立堤, 完全反射境界, 堤前水深 $h=27.9\text{cm}$,)

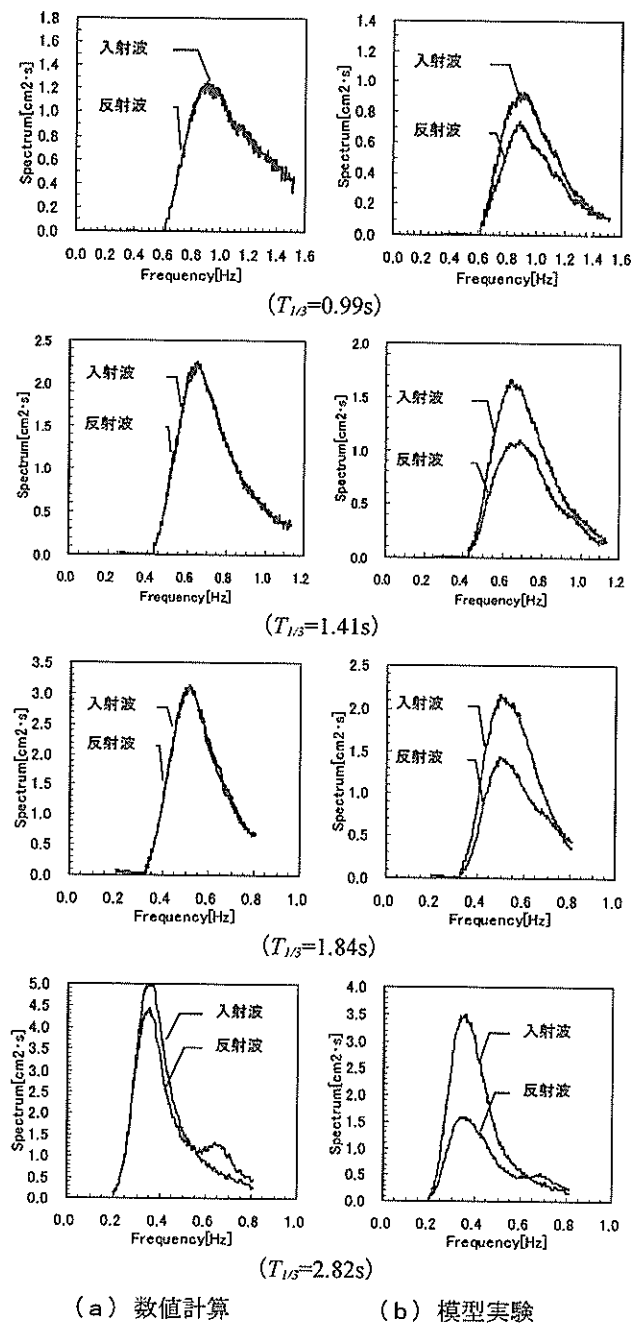


図-41 入・反射波スペクトルの再現性 ($H_{1/3}=3.5\text{cm}$)
(直立堤, 完全反射境界, 堤前水深 $h=27.9\text{cm}$)

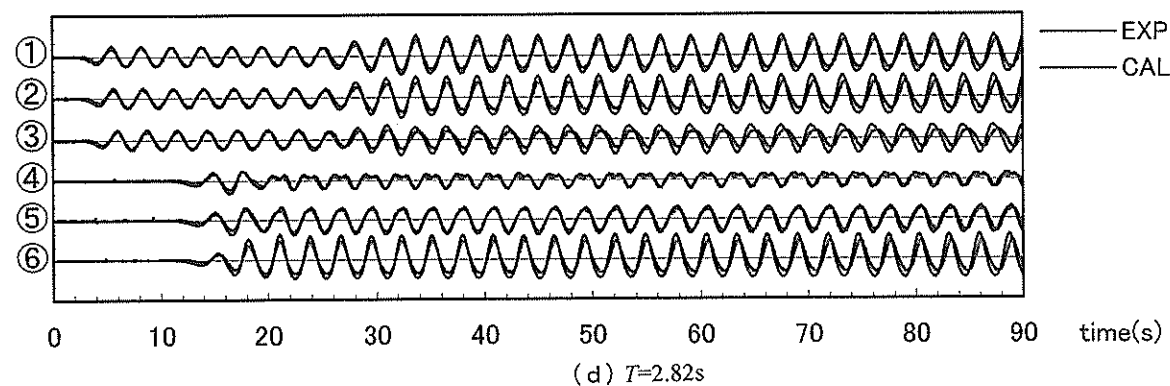
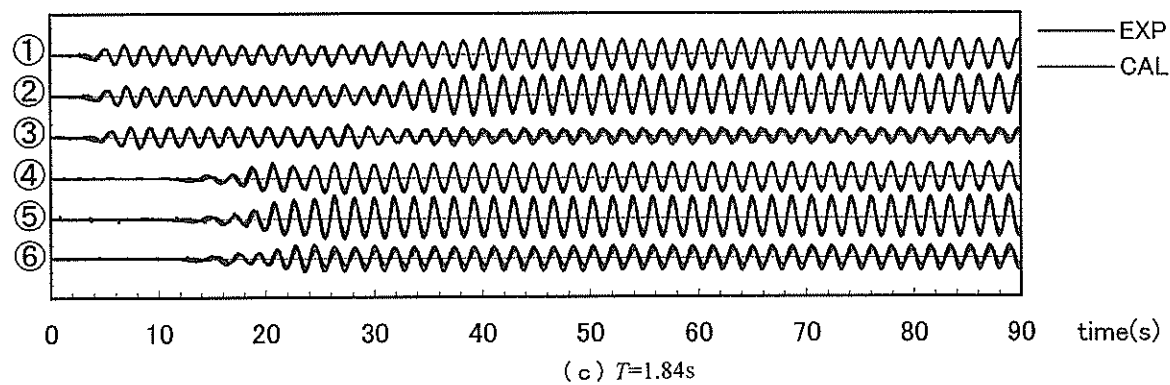
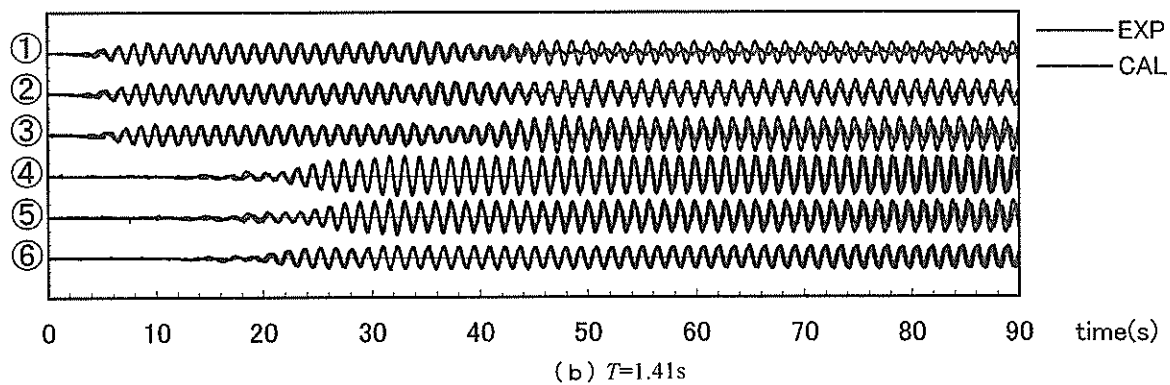
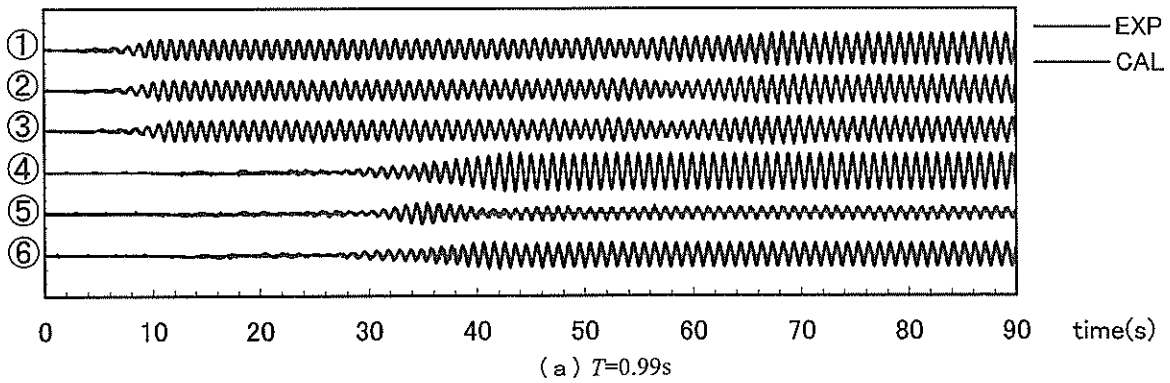
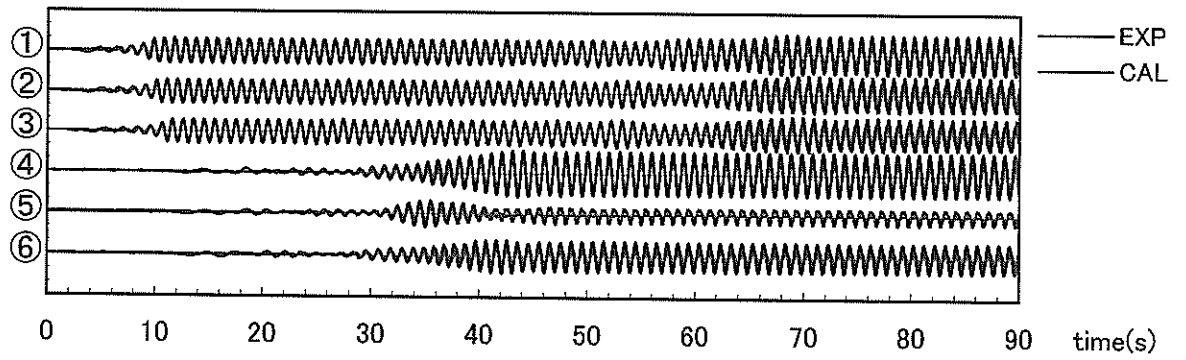
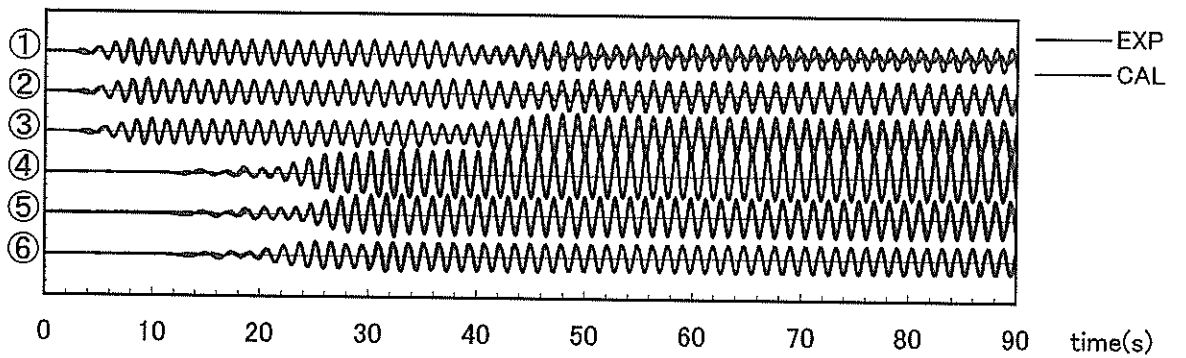


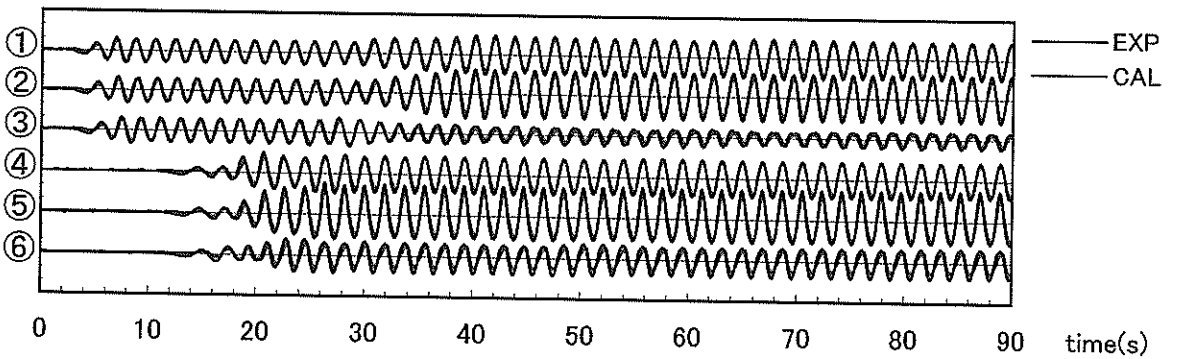
図-42 部分重複波の再現性 (規則波：波高 $H=1.4cm$) (直立堤，堤前水深 $h=27.9cm$ ，)



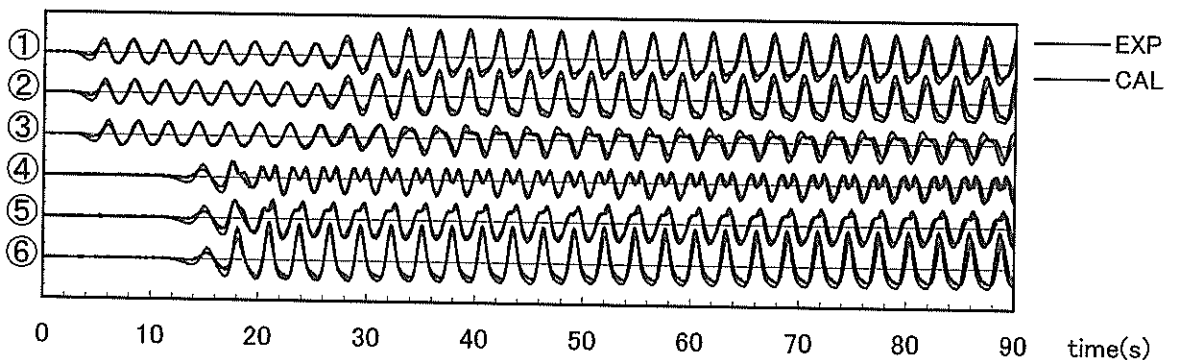
(a) $T=0.99s$



(b) $T=1.41s$



(c) $T=1.84s$



(d) $T=2.82s$

図-43 部分重複波の再現性 (規則波: 波高 $H=3.5cm$) (直立堤, 堤前水深 $h=27.9cm$.)

波スペクトルのピークに対して高周波数側へずれる程度は、有義波高 1.4cm のときに比べて小さくなっており、反射率に関して得られた傾向によく対応している。

このように、図-40 および図-41 において、数値計算と模型実験でそれぞれ得られた反射波スペクトルの値や形状が互いに異なっていることと、図-38 および図-39 において、数値計算と模型実験でそれぞれ得られた反射率が互いに異なっていることは、互に対応している。したがって、数値計算において、直立堤における反射波のスペクトル特性を再現するためには、反射率の場合と同様に、模型実験において反射波の形成に影響を及ぼしたであろう水路床や水路壁面での摩擦や、重複波の腹位置での砕波による波エネルギー損失を正しく見積もり、かつ、波の非線形性に対する基礎方程式の近似精度を向上させることが必要であることが示唆された。

(4) (部分) 重複波形の再現性

水路左端壁を直立堤とみなし、堤前水深を $h=27.9\text{cm}$ としたとき、数値計算および模型実験で得られた①～⑥地点(図-12 および図-13)における波高 1.4cm のときの時間波形を図-42 に、波高 3.5cm のときの時間波形を図-43 にそれぞれ重ねて示す。

部分重複波の位相は、入・反射波の波速とともに、振幅の比、すなわち反射率によっても変化する。すでに示したように、法面勾配の有無にかかわらず、消波ブロック被覆堤において、前面で形成される部分重複波形が数値計算によって精度よく再現された理由は、透水層による任意反射境界モデルが、入・反射波の波速に加えて、反射率を総じてよく再現していたからである。したがって、実際の波浪伝播で生じる波エネルギー損失等により、直立壁における反射率が 1 とならない模型実験で得られた部分重複波形を、直立壁を完全反射境界とした数値計算で再現することは難しい。

このような観点から図-42 および図-43 に示された部分重複波の時間波形を眺めると、つぎのような考察が可能である。すなわち、入射波の波高が等しいとき、図-38(b)より、模型実験で得られた反射率は周期が長くなるほど小さくなるので、反射率が $K_r=1$ でほぼ一定である数値計算との差が大きくなり、周期の長い波ほど、数値計算で得られる部分重複波の位相は模型実験のものより速くなる。しかしながら、部分重複波の角周波数に対する位相のずれの割合は、周期が短い波ほど大きくなるので、部分重複波形の両者の一致度は、見た目には、周期が短い波のほうが劣っているように見える。また、入射波の周期が 0.99s, 1.41s のとき、模型実験で得られた反射率は波高 1.4cm のときよりも波高 3.5cm のときのほう

が小さく、周期が 1.84s, 2.82s のときは、波高 3.5cm のときよりも波高 1.4cm のときのほうが小さい。このとき、ともに数値計算で得られた反射率との差が大きくなるので、入射波高 3.5cm のとき、部分重複波形に関する数値計算の再現性は、周期 0.99s, 1.41s のときは入射波高 1.4cm より悪く、周期 2.82s のときは良くなっている。

以上のような考察を踏まえると、すでに 3.2 節, 3.3 節で述べた消波ブロック被覆堤における部分重複波形の再現性について、つぎのように考察される。

すなわち、法面勾配 1:4/3 の消波ブロック被覆堤において、反射率が大きい周期 2.82s のときには、数値計算で得られた部分重複波形の位相は模型実験のそれに比べて若干ずれて見える(図-25(d), 図-26(d), 図-27(d), および、図-28(d))。このとき、数値計算で得られた反射率は模型実験の反射率よりも大きいので(図-17 および図-19 参照)、数値計算における部分重複波の位相が速くなっている。したがって、模型実験において存在する波エネルギー損失を考慮することにより、部分重複波形の再現性は改善されると思われる。

同様に、消波材を充填した直立消波堤において、反射率が大きい周期 0.99s, 2.82s のときには、数値計算で得られた部分重複波形の位相は模型実験のそれに比べて若干ずれて見える(図-36(a), 図-36(d), および、図-37(a))。このとき、数値計算で得られた反射率は模型実験の反射率よりも大きいので(図-32 参照)、数値計算における部分重複波の位相が速くなっている。この場合にも、模型実験における波エネルギー損失を考慮すれば、部分重複波形の再現性は向上すると思われる。波高 3.5cm, 周期 2.82s のとき、数値計算で得られた部分重複波形が模型実験のそれと比較的よく一致しているのは、波高 1.4cm, 周期 2.82s のときに比べ、反射率に関してよい再現性を有し、かつ、周期が長いために部分重複波の角周波数に対する位相のずれの割合が小さいためである。

このほか、波の位相速度は波の非線形性に応じても変化するので、数値計算モデルの基礎方程式の近似精度を向上させることによっても、部分重複波形がさらに精度よく計算されることが期待できる。

3.5 透水層モデルによる反射率の計算精度

直立壁に対する反射特性の再現に関して若干の検討課題が残されているものの、前節までに、透水層を用いたブシネスクモデルによる数値計算によって、さまざまな消波構造物に対する入射波の反射特性が非常によく再現されることが確認された。これにより、消波構造物に囲まれた港湾において、港内静穏度や設計波、あるいは、

海浜や係留浮体の外力となる流れや水位変動の時間波形を、高精度に計算することが可能となった。

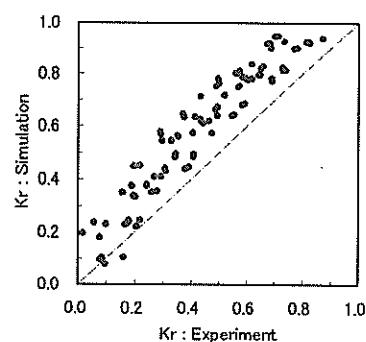
一方、実務に対してこのような計算モデルを適用する際には、計算モデルの適用条件と保障される計算精度についての十分な認識がなされていることが不可欠である。そこで本節では、3章において、さまざまな波浪条件や潮位条件に対して行われた反射計算に対する透水層モデルの検証結果をまとめて示し、それぞれの消波構造物に対する透水層モデルの適用性と計算精度を明らかにする。

図-44(a)~(d)は、それぞれ、(a)消波ブロック被覆堤(法面勾配1:4/3)、(b)消波ブロック被覆堤(法面勾配1:2)、(c)消波材充填型の直立消波堤、および、(d)直立堤、を対象とした透水層モデルにおいて計算された、模型実験結果に対する反射率の再現性を示したものである。図中、横軸は模型実験で得られた反射率、縦軸は数値計算で得られた反射率である。それぞれの消波断面において、入射波諸元や潮位、および反射率の計測位置(岸側および沖側、沖側の反射率は付録B参照)による区別は一切行っていない。

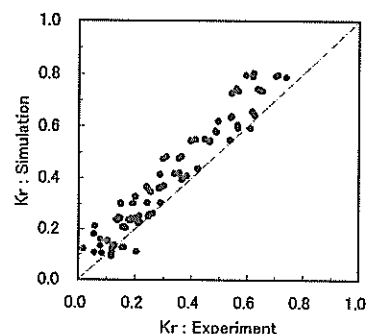
消波ブロック被覆堤を対象とした数値計算では、いずれの法面勾配においても、 $K_r=0.0\sim 0.9$ 程度に分布している模型実験で得られた反射率を定性的によく再現している(図-44(a), (b))。また、定量的には、法面勾配1:4/3の場合では0.1~0.2程度、法面勾配1:2の場合では0.1程度、数値計算で得られた反射率が模型実験のものよりも大きくなっていることがわかる。

次に、直立消波堤を対象とした数値計算では、 $K_r=0.0\sim 0.5$ 程度に分布した模型実験での反射率のうち、 $K_r=0.0\sim 0.4$ の範囲で反射率を定性的によく再現している(図-44(c))。また定量的には、0.1ほど大きめに計算されることがわかる。ただし、模型実験における反射率が $K_r=0.5$ 程度のときには、数値計算で得られる反射率が徐々に大きくなる傾向が見受けられる。

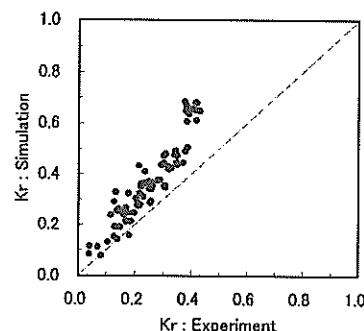
最後に、直立壁を対象とした数値計算では、3.4節で述べたように、ほとんどの計算ケースで反射率が1となり、反射率が $K_r=0.6\sim 0.9$ の範囲で変化する模型実験の結果とは異なる計算結果が得られた。したがって、図-44(d)に示すように、数値計算は、模型実験で得られた反射率を定性的に再現しているとは言い難い。しかしながら、理論的には直立壁に代表される完全反射境界における反射率は1であり、また、模型実験においても1に近い反射率となるケースも見受けられる。さらに、数値計算結果は、構造物前面の波高分布や波力に対して危険側の反射率となっていることなどから、実用上はさほど問題とはならないと考えられる。



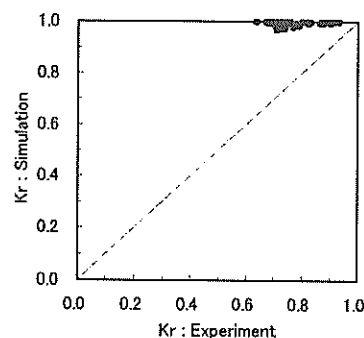
(a) 消波ブロック被覆堤(法面勾配1:4/3)



(b) 消波ブロック被覆堤(法面勾配1:2)



(c) 直立消波堤(ヘチマロン:型番#350)



(d) 直立壁

図-44 透水層モデルによる反射率の計算精度

4. 結論

本研究では、透水層モデルを用いた任意反射境界処理法の汎用性について検討するために、反射率に関する透水層パラメータの感度分析を行うとともに、1/30 勾配斜面上に設置された消波ブロック被覆堤、消波材充填型の直立消波堤、および、直立堤を対象とした非線形波の反射計算を実施して、反射率や入・反射波スペクトルの変化、および、部分重複波形の再現性を、模型実験により検証した。本研究の成果はおよそ次のようである。

- ① 透水層の空隙率 λ および消波材の代表径 d について、反射率に関する感度分析を行った。それぞれの波浪条件において、反射率を敏感に変化させる透水層パラメータは空隙率 λ であり、反射率が最小となるのは $\lambda=0.3\sim 0.8$ 程度のときであった。また、代表径 d が小さいほど反射率が小さくなる傾向が得られた。特に、空隙率 λ が大きい場合には、この傾向が顕著であった。
- ② 層流抵抗係数 α および乱流抵抗係数 β について、反射率に関する感度分析を行った。両者の値を比較すると、通常、乱流抵抗係数 β のほうが大きい。したがって、それぞれの波浪条件において、透水層モデルの反射率は、まず、乱流抵抗係数 β によって規定される。しかしながら、波の非線形性が強い場合には、反射率に対する層流抵抗係数 α の寄与度は、非線形性が弱い場合に比べて相対的に大きくなることが示された。
- ③ 消波ブロック被覆堤を対象とした透水層モデルによる数値計算では、規則波、不規則波ともに、入射波の周期が長くなるにつれて反射率が増加し、この傾向は波高が小さいほうが顕著であった。また、水深が深くなると反射率は増加した。数値計算と同様な条件で実施された実験結果は、計算結果と定量的によく一致した。さらに、消波工の法面勾配が緩やかになると、数値計算および模型実験で得られた反射率はともに低減し、かつ、両者はよく一致した。いずれの法面勾配においても、数値計算および模型実験で得られた、規則波における部分重複波形、および、不規則波における入・反射波のスペクトル特性は、互によく一致した。
- ④ 直立消波堤を対象とした透水層モデルによる数値計算では、消波ブロック被覆堤と同様に、波高が小さいほうが反射率は大きくなるものの、特に規則波では、反射率が極小となる周期がみられた。不規則波

における入・反射波のスペクトル特性からも、このような傾向が認められた。一方、水深が増加することによる反射率の変化はみられなかった。これは、直立消波堤における消波工の設置幅が、水深によらず一定であるためであると考えられる。規則波における部分重複波形とともに、消波材充填型の直立消波堤における非線形波の反射に関する実験結果は、計算結果と定量的によく一致した。

- ⑤ 直立堤を対象とした透水層モデルによる数値計算では、入射波の波高や周期、および水深に関わらず、反射率は $K_r=1$ でほぼ一定となった。一方、数値計算と同様な条件で実施された実験結果は、長い周期の波ほど反射率が小さくなり、計算結果とは異なる結果が得られた。これは、模型実験では、水路床や直立壁における摩擦損失が無視できないことに対し、数値計算では、計算格子および完全反射境界において摩擦損失を考慮していないこと、重複波の腹位置における砕波による波エネルギー損失、および、非線形波を微小振幅波理論に基づく入射波分離法によって解析したことなどが原因であると考えられる。数値計算および模型実験で得られた入・反射波スペクトルの比較でも、同様な傾向が認められた。したがって、数値計算で得られた規則波における部分重複波形の位相は、特に、部分重複波の周期が短い場合や反射率が大きく異なる場合において、模型実験のそれに比べて速くなっている。

5. あとがき

今後は、透水層モデルの平面波浪場に対する適用性について検討し、港内外の静穏度計算業務への使用に耐え得るモデルの汎用化を図る予定である。

(2001年 8月 31日 受付)

謝辞

本研究を進めるにあたり、反射波に関する模型実験では、アルファコンサルタント(株)の上原功氏および波浪研究室の皆様のご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 有川太郎・磯部雅彦(1999)：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。

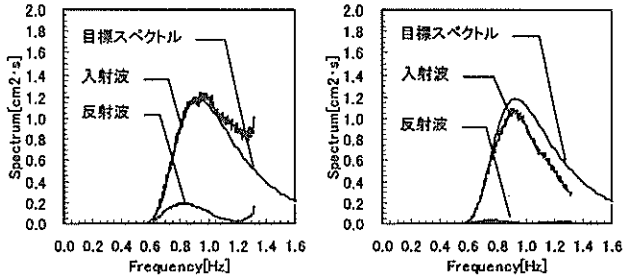
- 岩垣雄一(1987)：最新海岸工学，森北出版，250p.
- 石井敏雅・磯部雅彦・渡辺晃(1993)：非定常緩勾配不規則波動方程式における境界条件の改良と実用化の試み海岸工学論文集，第40巻，pp. 31-35.
- 喜岡渉・柏原謙爾・相川久紀・田中正博(1996)：多方向不規則波による港内副振動の予測モデルとその適用性，海岸工学論文集，第43巻，pp. 196-200.
- 合田良実・柿崎秀作(1966)：有限振幅重複波ならびにその波圧に関する研究，港研報告，第5巻，第10号，57p.
- 合田良実・鈴木康正・岸良安治・菊地治(1976)：不規則波実験における入・反射波の分離推定法，港研資料，No.248，24p.
- 近藤淑郎(1981)：直立消波構造物の水理的特性，1981年度(第17回)水工学に関する夏期研修会講義集，Bコース，B-1，16p.
- 近藤淑郎・竹田英章(1983)：消波構造物，森北出版，p275.
- 首藤伸夫(1974)：非線形長波の変形—水路幅，水深の変化する場合—，第21回海岸工学講演会論文集，pp.57-63.
- 笈田博章・水口 優(1997)：波群の反射と長周期波，海岸工学論文集，第44巻，pp.201-205.
- 富田孝史・平山克也(2000)：防波堤堤頭部近傍で発生する長周期波に関する数値シミュレーション，海岸工学論文集，第47巻，pp.791-795.
- 平山克也(2001)：ブ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(印刷中).
- 平山克也・平石哲也(2001)：ブシネスクモデルにおける透水層を用いた任意反射境界処理法の開発，港研報告，第40巻，第1号，pp. 3-30.
- Madsen, O.S. and S.M. White (1975)：Reflection and transmission characteristics of porous rubble mound breakwater, Tech. Rept. No.207, Parsons Lab., Dept. of Civil Engrg., MIT.
- Madsen, P.A. and O.R.Sørensen(1992)：A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics. Part2. A slowly-varying bathymetry., Proc.18th Coastal Eng.Conf., ASCE, pp.183-204.
- g : 重力加速度
- H : 入射波の波高
- $H_{1/3}$: 入射波の有義波高
- h : 静水深
- h_t : 損失水頭
- I_c : 透水層の動水勾配
- I_m : 消波材層の動水勾配
- K_r : 反射率
- L : 入射波の波長
- l : 動水距離
- P : X方向の線流量フラックス
- Q : Y方向の線流量フラックス
- T : 入射波の周期
- $T_{1/3}$: 入射波の有義波周期
- Δt : 時間差分間隔
- u : 水平流速
- V : 消波材の体積
- Δx : 空間格子間隔
- α : 透水層の層流抵抗係数
- α_0 : 消波材形状による層流抵抗の代表値
- β : 透水層の乱流抵抗係数
- β_0 : 消波材形状による乱流抵抗の代表値
- ε : 相対波高
- η : 静水面からの水位変動量
- λ : 透水層の空隙率
- λ_0 : 透水層端部の空隙率
- μ : 水深波長比
- ν : 流体の動粘性係数
- Π : 非線形性の程度を表すパラメータ
- τ : 慣性力係数

記号表

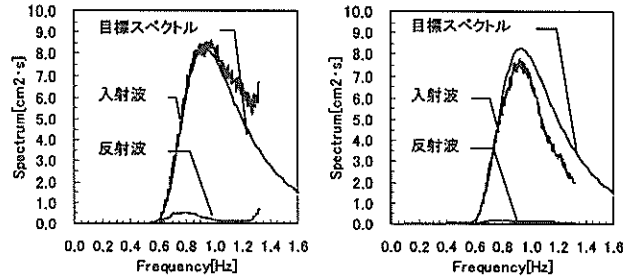
- B : 透水層の幅
- D : 全水深
- d : 消波材の代表径

付録 A. 数値計算と模型実験の入射波検定

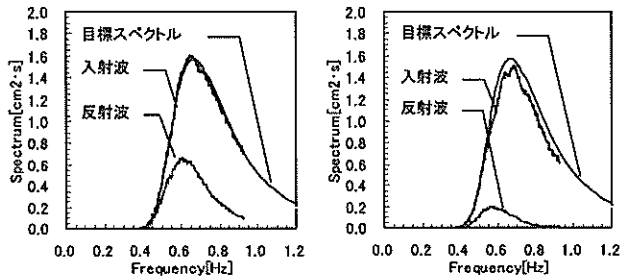
(a) 消波ブロック被覆堤 (法面勾配 1:4/3 : 沖側)



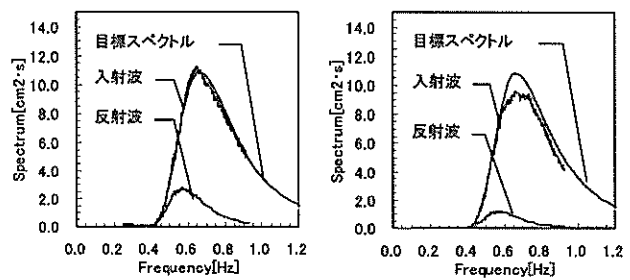
($T_{1/3}=0.99s$)



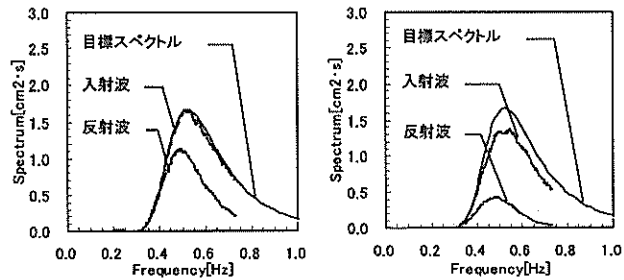
($T_{1/3}=0.99s$)



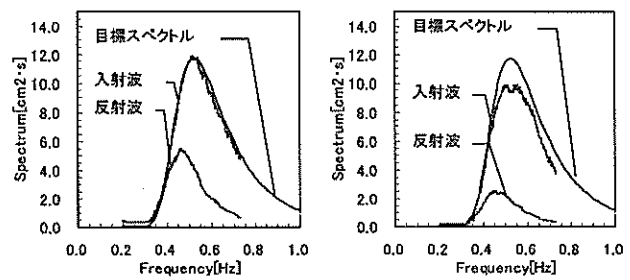
($T_{1/3}=1.41s$)



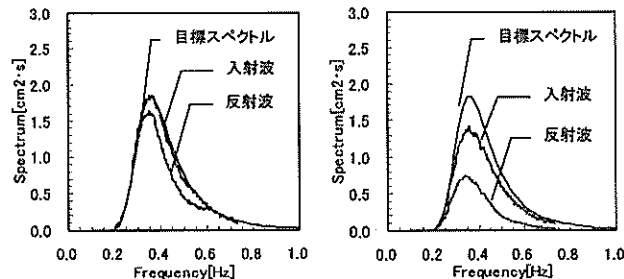
($T_{1/3}=1.41s$)



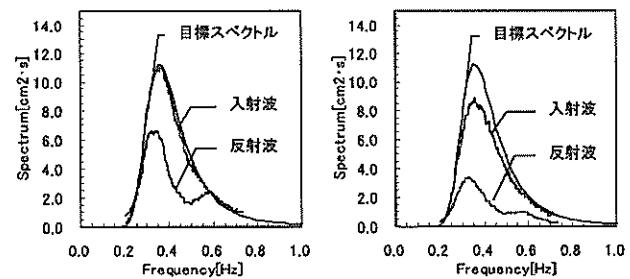
($T_{1/3}=1.84s$)



($T_{1/3}=1.84s$)



($T_{1/3}=2.82s$)



($T_{1/3}=2.82s$)

(a) 数値計算

(b) 模型実験

(a) 数値計算

(b) 模型実験

図-A. 1 入射波スペクトル検定 ($H_{1/3}=3.0cm$)
(法面勾配 1:4/3, 造波水深 $h=67.9cm$,)

図-A. 2 入射波スペクトル検定 ($H_{1/3}=8.0cm$)
(法面勾配 1:4/3, 堤前水深 $h=67.9cm$,)

(b) 消波ブロック被覆堤 (法面勾配 1:2 : 沖側)

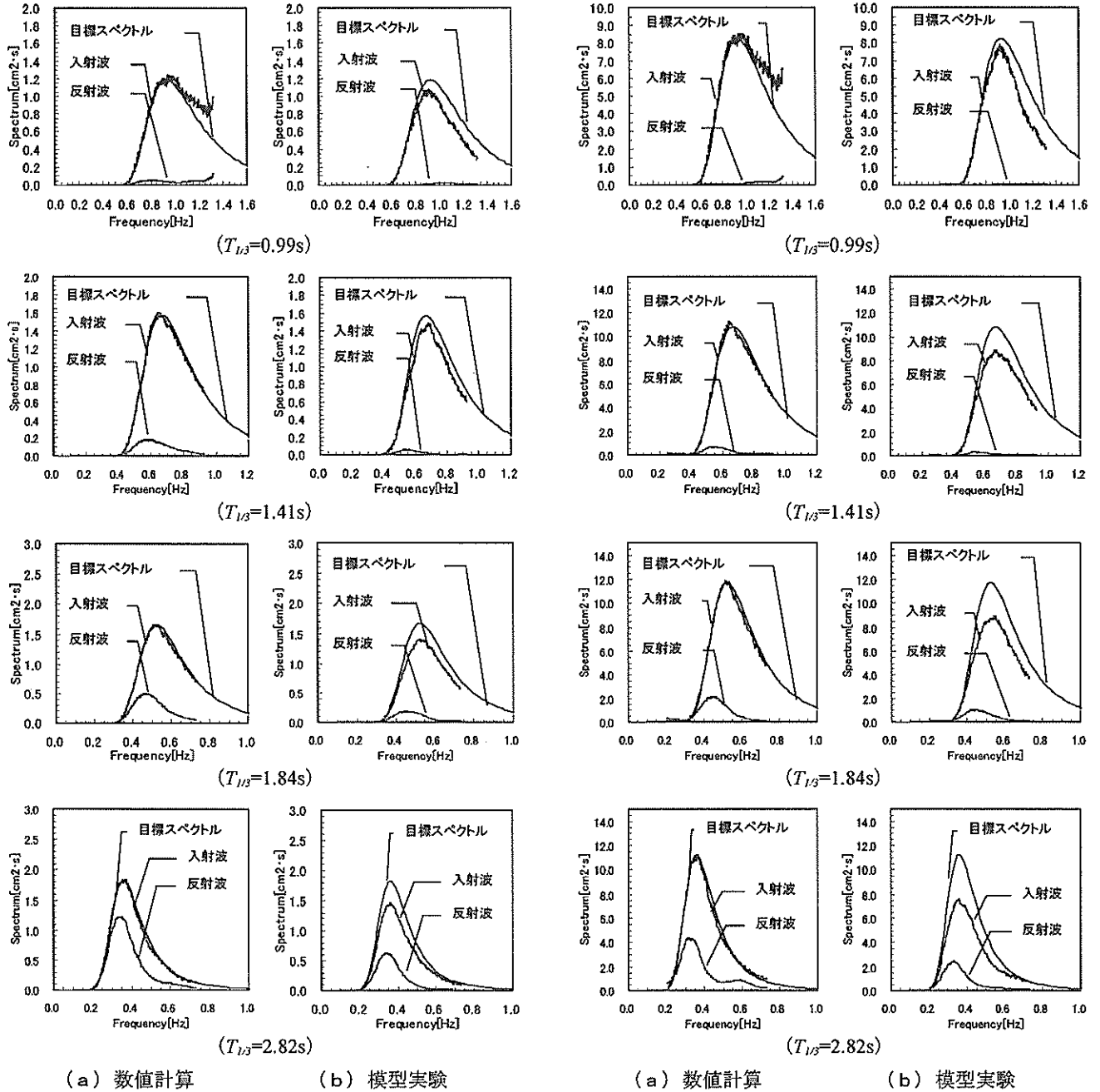


図-A. 3 入射波スペクトル検定 ($H_{1/3}=3.0cm$)
(法面勾配 1:2, 造波水深 $h=67.9cm$)

図-A. 4 入射波スペクトル検定 ($H_{1/3}=8.0cm$)
(法面勾配 1:2, 堤前水深 $h=67.9cm$)

(b) 直立消波堤 (ヘチマロンシート, 型番#350: 沖側)

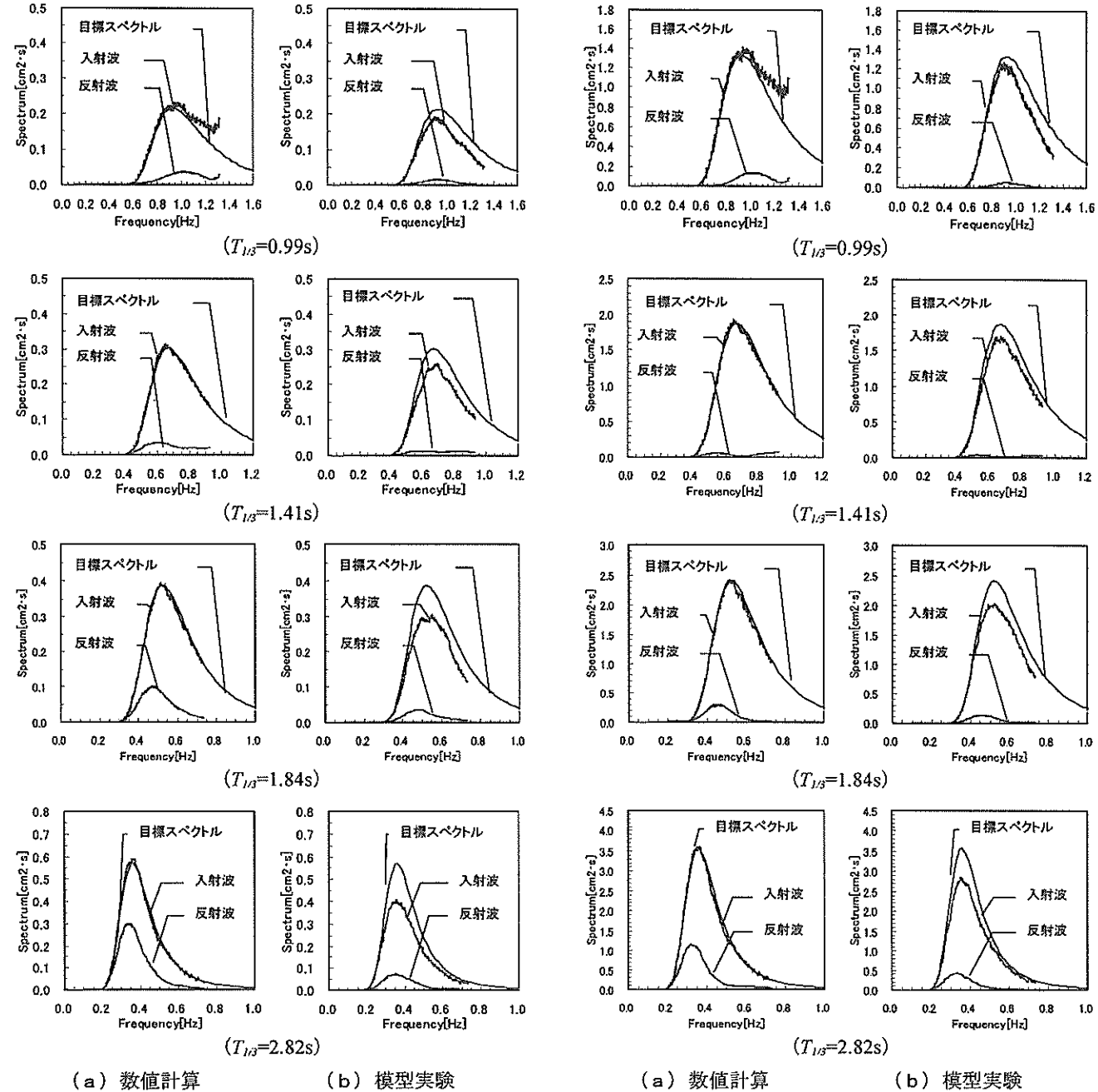


図-A. 5 入射波スペクトル検定 ($H_{1/3}=1.4\text{cm}$)
(ヘチマロンシート: #350, 造波水深 $h=67.9\text{cm}$,)

図-A. 6 入射波スペクトル検定 ($H_{1/3}=3.5\text{cm}$)
(ヘチマロンシート: #350, 堤前水深 $h=67.9\text{cm}$,)

(b) 直立堤 (完全反射境界: 沖側)

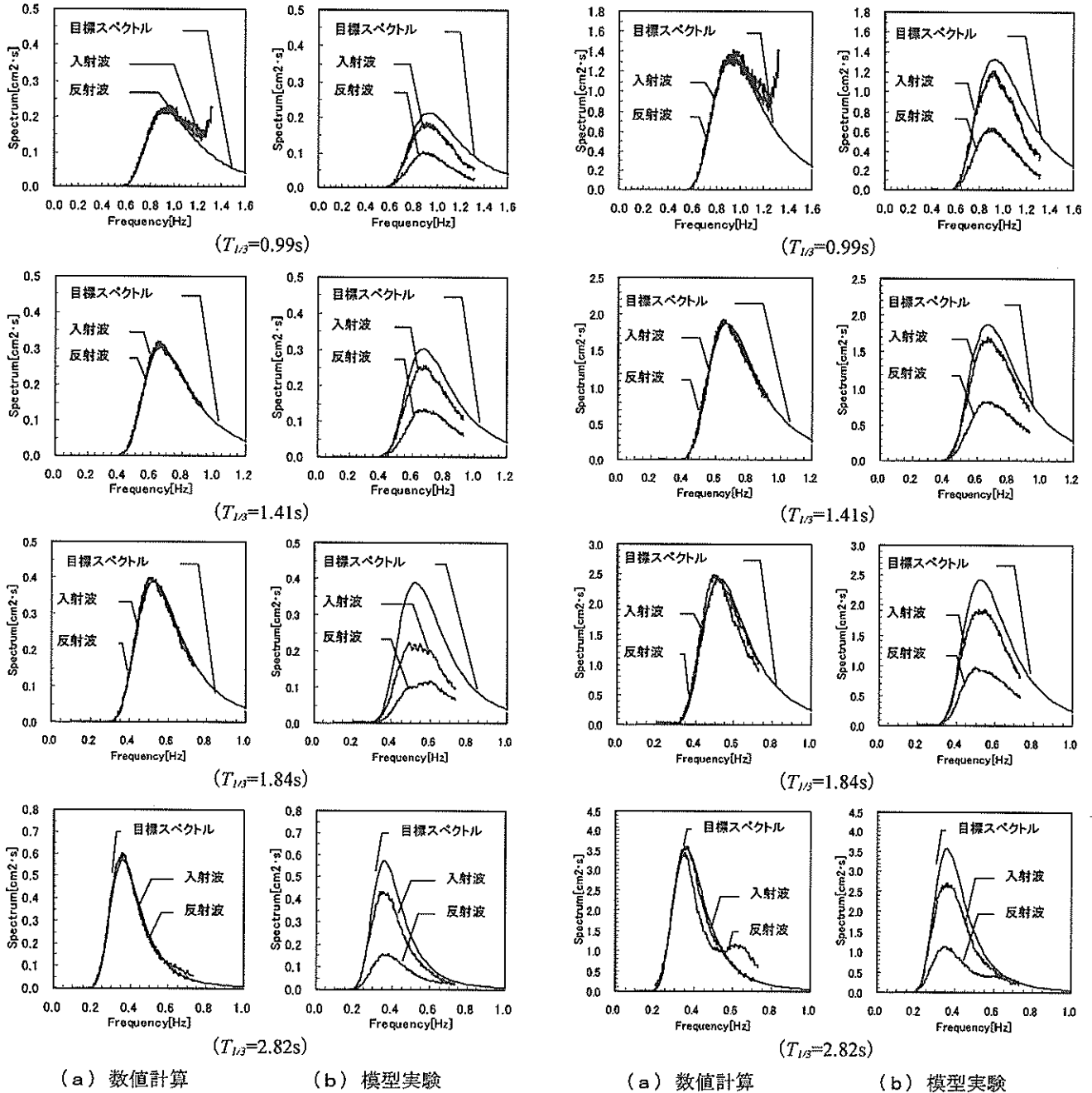
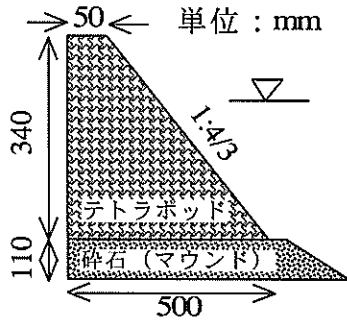


図-A. 7 入射波スペクトル検定 ($H_{1/3}=1.4\text{cm}$)
(完全反射境界, 造波水深 $h=67.9\text{cm}$,)

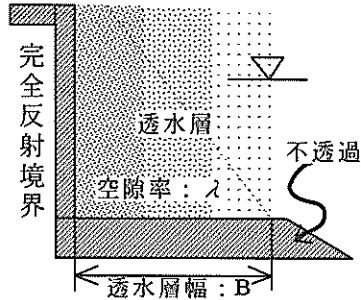
図-A. 8 入射波スペクトル検定 ($H_{1/3}=3.5\text{cm}$)
(完全反射境界, 堤前水深 $h=67.9\text{cm}$,)

付録B. 斜面沖側における反射率の再現性

(a) 消波ブロック被覆堤 (法面勾配 1:4/3)

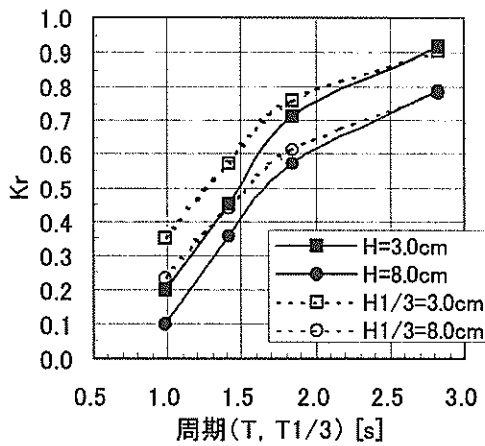


(a) 対象断面

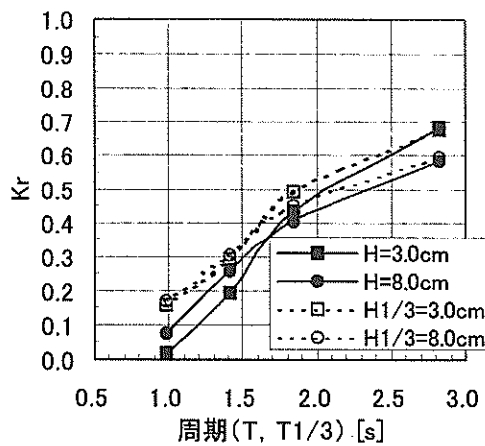


(b) 透水層モデル

図-B. 1 消波ブロック被覆堤 (法面勾配 1:4/3)

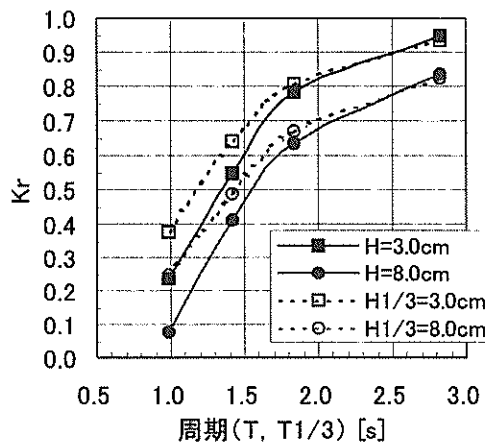


(a) 数值計算

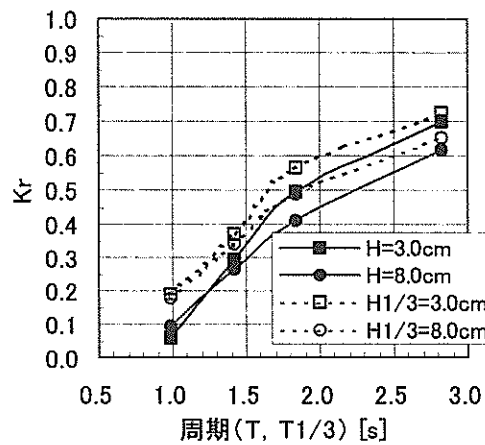


(b) 模型実験

図-B. 2 沖側の反射率の再現性 (消波ブロック被覆堤, 法面勾配 1:4/3, $h=67.9\text{cm}$)



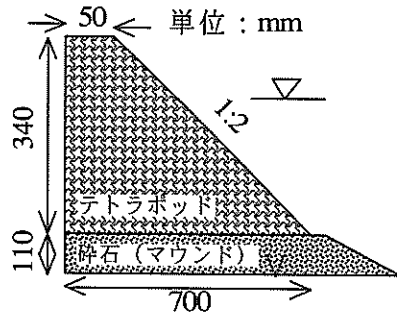
(a) 数值計算



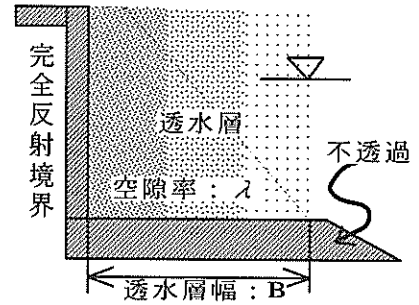
(b) 模型実験

図-B. 3 沖側の反射率の再現性 (消波ブロック被覆堤, 法面勾配 1:4/3, $h=70.4\text{cm}$)

(b) 消波ブロック被覆堤 (法面勾配 1:2)

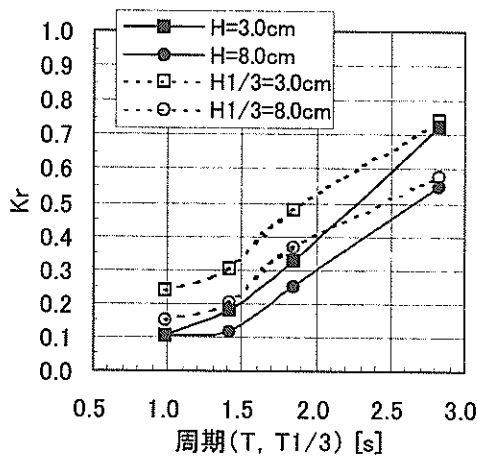


(a) 対象断面

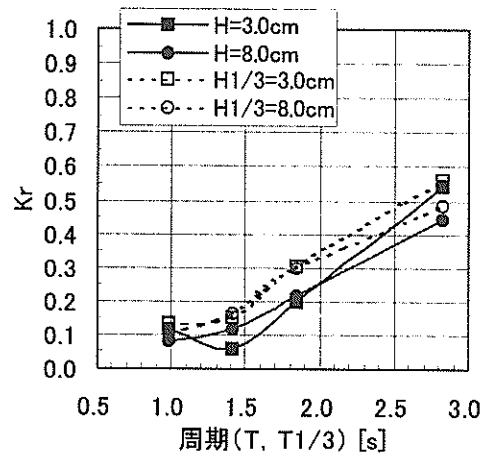


(b) 透水層モデル

図-B. 4 消波ブロック被覆堤 (法面勾配 1:2)

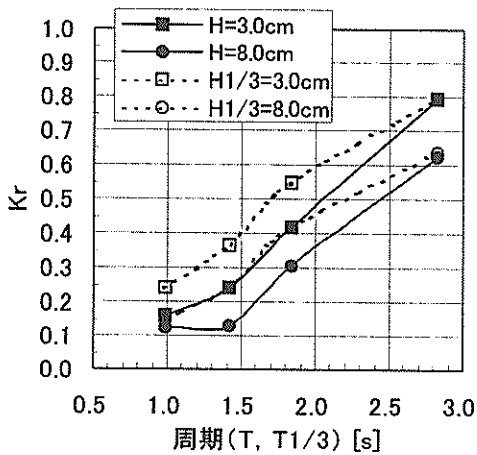


(a) 数値計算

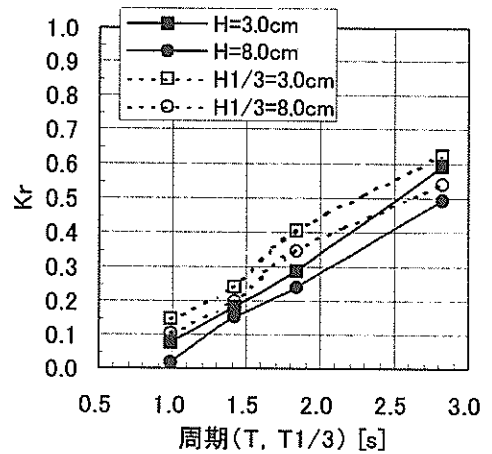


(b) 模型実験

図-B. 5 沖側の反射率の再現性 (消波ブロック被覆堤, 法面勾配 1:2, $h=67.9\text{cm}$)



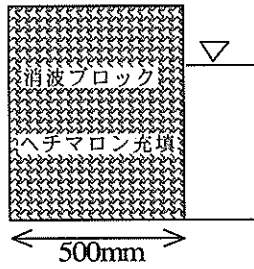
(a) 数値計算



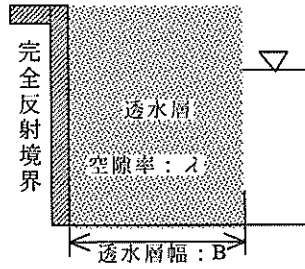
(b) 模型実験

図-B. 6 沖側の反射率の再現性 (消波ブロック被覆堤, 法面勾配 1:2, $h=70.4\text{cm}$)

(c) 直立消波堤 (ヘチマロンシート)

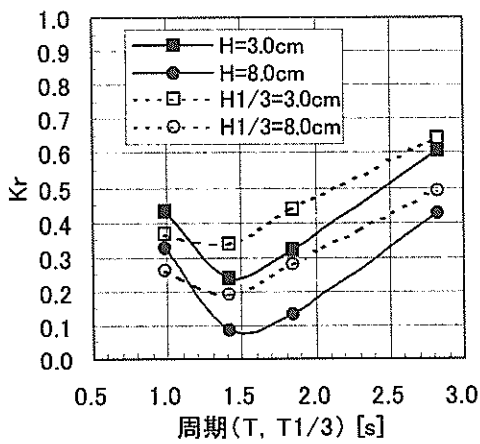


(a) 対象断面

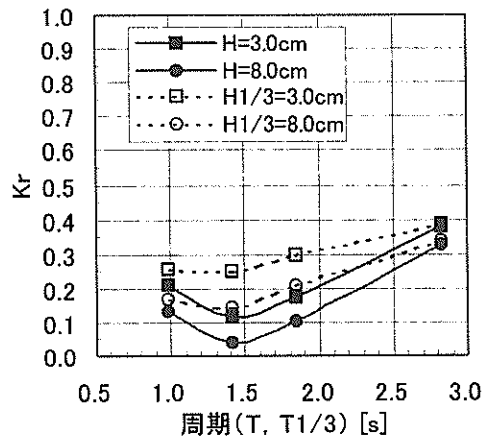


(b) 透水層モデル

図-B. 7 直立消波堤 (ヘチマロンシート)

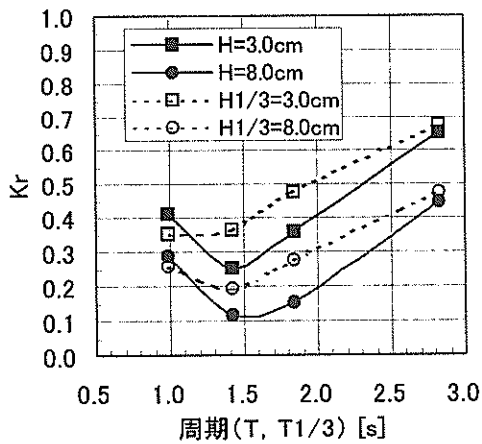


(a) 数値計算

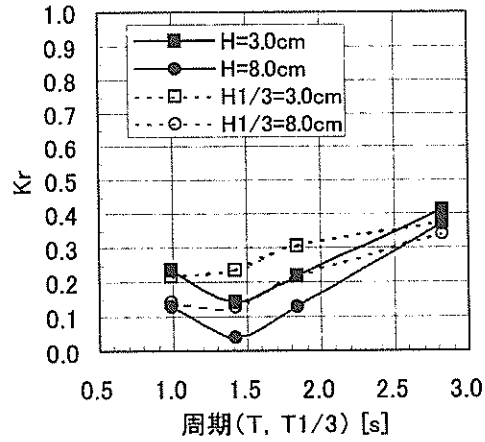


(b) 模型実験

図-B. 8 沖側の反射率の再現性 (直立消波堤, ヘチマロンシート: 型番#350, $h=67.9\text{cm}$)



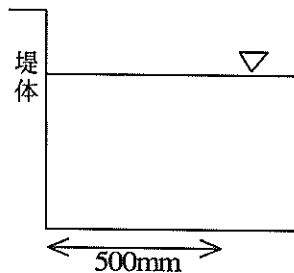
(a) 数値計算



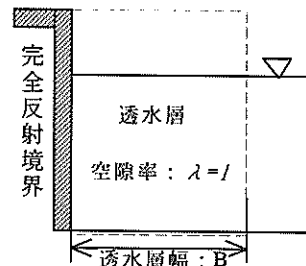
(b) 模型実験

図-B. 9 沖側の反射率の再現性 (直立消波堤, ヘチマロンシート: 型番#350, $h=70.4\text{cm}$)

(d) 直立堤 (完全反射境界)

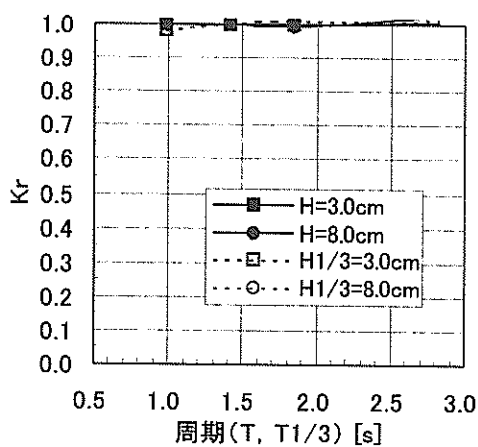


(a) 対象断面

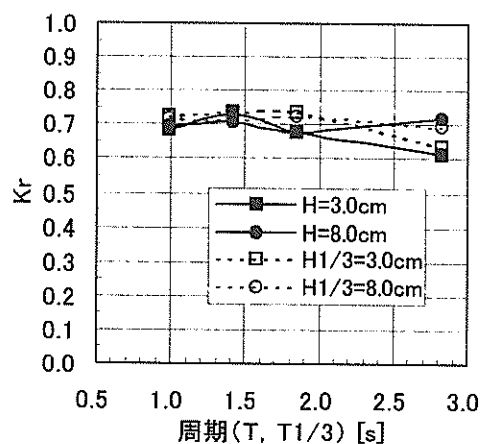


(b) 透水層モデル

図-B. 10 直立堤 (完全反射境界)

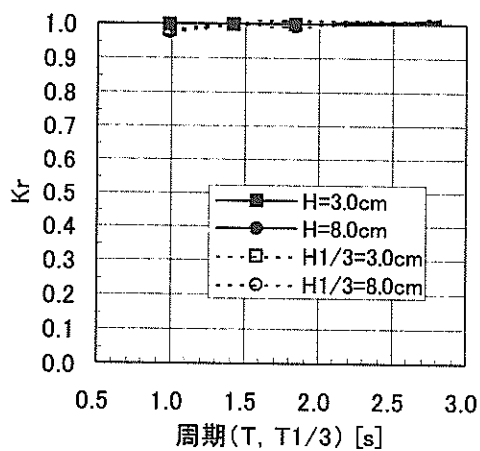


(a) 数值計算

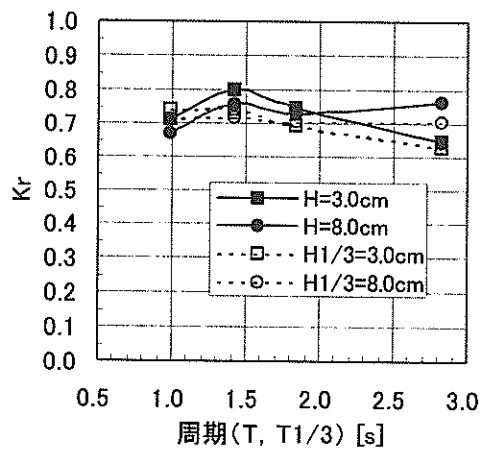


(b) 模型実験

図-B. 11 沖側の反射率の再現性 (直立堤, $h=67.9\text{cm}$)



(a) 数值計算



(b) 模型実験

図-B. 12 沖側の反射率の再現性 (直立消波堤, $h=70.4\text{cm}$)