

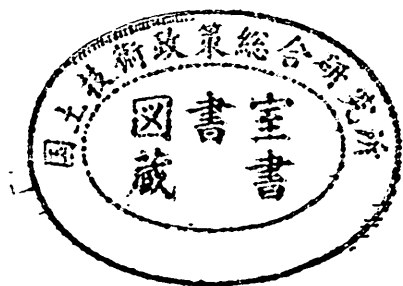
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 35 NO. 1 MAR. 1996

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第35巻 第1号 (Vol.35, No.1), 1996年3月 (Mar.1996)

目次 (CONTENTS)

1. Wave Height and Fraction of Breaking Waves on a Bar-Trough Beach
—Field measurements at HORS and Modeling—
.....Yoshaki KURIYAMA and Yasushi OZAKI.....1
(バー型海岸における波高と碎波率の岸沖分布
—波崎海洋研究施設における現地観測とモデルの開発—
.....栗山善昭・尾崎 靖)
2. 護岸越波量における波の多方向性の影響
.....平石哲也・望月徳雄・佐藤一央・丸山晴広・金澤 剛・榎本達也.....39
(Effect of Wave Directionality on Overtopping at Seawall
.....Tetsuya HIRAISHI, Norio MOCHIZUKI, Kazuo SATO, Haruhiro MARUYAMA,
Tsuyoshi KANAZAWA, and Tatsuya MASUMOTO)
3. 沖波の方向スペクトルの出現特性 (第2報) —いわき沖における7か年方向スペクトル統計—
.....清水勝義・永井紀彦・橋本典明.....65
(On the Properties of the Directional Wave Spectra Observed in Deep Seas
— 2nd Report:7-Year Statistics of Directional Wave Spectra of Iwaki —
.....Katsuyoshi SHIMIZU, Toshihiko NAGAI, Noriaki HASHIMOTO)
4. 主成分分析とカルマンフィルタを用いた統計的波浪予測手法の適用性について
.....橋本典明・永井紀彦・清水勝義・菅原一晃.....91
(On the Reliability of the Statistical Wave Forecasting through Kalman Filtering
Combined with Principal Component Analysis
.....Noriaki HASHIMOTO, Toshihiko NAGAI, Katsuyoshi SHIMIZU,
and Kazuteru SUGAHARA)
5. 港湾構造物の円弧すべり解析における最適な安全率に関する研究
.....土田 孝・湯 恰新.....117
(The Optimum Safety Factor For Stability Analysis of Harbour Structures by Use of
the Circular Arc Slip Method
.....Takashi TSUCHIDA, Tang Yi Xin)
6. 市区町村間の道路距離と時間を用いた三大湾の港湾貨物背後流動特性の解析
.....池田秀文・布川恵啓・村田利治・竹下正俊・奥田 薫・岡野秀男.....147
(A Quantitative Analysis on Characteristics of the Land Transport Flow of Port Cargo
through Three Major Bays
.....Hidefumi IKEDA, Yoshihiro NUNOKAWA, Toshiharu MURATA, Masatoshi TAKESHITA,
Kaoru OKUDA, and Hideo OKANO)
7. アジア圏域を軸とした21世紀の日本の海運像
[CALSによるコンテナ流動ネットワークとアジアが結ぶ世界高速コンテナ航路の形成]
.....高橋宏直.....189
(The Vision of Japanese Marine Transportation in the 21 Century From a View Point of Asian Area
.....Hironao TAKAHASHI)

2. 護岸越波量における波の多方向性の影響

平石哲也*
望月徳雄**
佐藤一央***
丸山晴広****
金澤 剛*****
樹本達也*****

要 旨

海の波は、様々な方向から来る波が重なり合った状態となっており、多方向不規則波としての性質を有する。そこで、沖合の大水深海域に建設される人工島等の護岸を対象として越波量に及ぼす波の多方向性の影響を模型実験と数値計算で検討した。さらに、従来の海岸線近くに建設された護岸についても、沖合の多方向不規則波が及ぼす影響を模型実験で調べた。

まず、水深40m程度の大水域の直立護岸を対象とした模型実験と数値計算から以下の結論が得られた。

- 1) 多方向不規則波の護岸越波量は、実験結果を平均すると、単一方向不規則波のその約7割として評価できる。
- 2) 斜め入射波の実験結果をもとに提案した修正天端高係数を用いる数値モデルを提案した。本モデルの計算結果は、斜め入射単一方向不規則波および多方向不規則波の実験結果とよく一致し、多方向不規則波の推定法として用いることができる。
- 3) 主波向が 0° より大きくなり 30° 程度になると、波の多方向性が越波量に及ぼす影響は小さくなり、単一方向波との差が小さくなる。

浅海域の海浜護岸を対象として模型実験を実施した結果、以下の結論が得られた。

- 1) 直立護岸の場合には、浅海域においても多方向不規則波の越波量は、単一方向波のその約7~8割程度に減少する。傾斜護岸の場合には、実験値のばらつきが大きい、平均して8割程度に減少する。
- 2) 海浜護岸の場合には、エネルギー平衡方程式を用いて護岸前面の波浪条件を求め、それを前出の数値モデルに適用することで多方向不規則波の越波量を推定できる。

キーワード：多方向不規則波，護岸，越波量，水理模型実験，シングルサンメーション法

* 水工部主任研究官

** 海洋環境部漂砂研究室

*** 第二港湾建設局（前 波浪研究室）

**** 水工部波浪研究室

***** 水工部波浪研究室研修生（㈱東洋建設）

2. Effect of Wave Directionality on Overtopping at Seawall

Tetsuya HIRAISHI*
Norio MOCHIZUKI**
Kazuo SATO***
Haruhiro MARUYAMA****
Tsuyoshi KANAZAWA*****
Tatsuya MASUMOTO*****

Synopsis

Sea waves have such characteristics that they consist of component waves propagating with directional randomness. The component waves, thus, propagate in different directions with random amplitudes, periods and phases. Therefore, it is very important to recognize how much discrepancy will occur when the directional randomness is not properly taken into account in the estimation of wave overtopping rate at offshore seawalls.

The report examines experimentally the overtopping rate of directional waves at the seawalls in deep sea. A numerical model to estimate the overtopping rate of directional random waves is also proposed and validated on the basis of the experimental results. The effects of wave directionality on the overtopping at seawalls located in shallow water area are also discussed.

For the cases that vertical seawalls are installed in the water about 40m deep, the following major conclusions are derived from the model test and numerical simulation on wave overtopping.

- (1) The overtopping rate of directional random waves becomes about 70% of that in uni-directional waves.
- (2) The proposed numerical model well estimates the wave overtopping rate measured in the experiments of oblique uni-directional and multi-directional waves.
- (3) The wave overtopping rates measured in the experiments under the action of multi-directional waves turned out to be almost equal to those observed in uni-directional waves when the deviation of the incoming wave direction is 30° from the normal direction to the seawall face.

The following are results from the observations of waves in shallow water area:

- (1) The wave overtopping rate at vertical seawalls turned out to be smaller in the multi-directional wave condition than in the uni-directional one. This is the same phenomenon as was observed at the offshore seawalls.
- (2) The numerical model mentioned above well estimates the wave overtopping rate of seawalls when the wave condition at the sea area in front of seawalls is calculated properly. The energy balance equation is one of the appropriate methods to analyze wave transformation as the waves propagate into shallow water area.

Key Words : Directional random wave, Hydraulic experiment, Seawall, Single summation model, Wave overtopping

* Senior Research Engineer, Hydraulic Engineering Division

** Littoral Drift Laboratory, Marine Environment Division

*** Second Port Construction Bureau (Former Member of Wave Laboratory)

**** Wave Laboratory, Hydraulic Engineering Division

***** Wave Laboratory (Trainee, Toyo Corp.)

目 次

要 旨

1. まえがき	43
2. 越波量算定式とその適用性	43
2.1 算定法の定式化	43
2.2 大水深護岸の越波量を求める模型実験	45
2.3 実験結果による算定式の係数決定	49
2.4 多方向不規則波の越波特性	53
3. 海浜地形における多方向不規則波の越波特性	53
3.1 模型実験の内容	54
3.2 実験結果と考察	57
4. まとめ	62
参考文献	62
主要記号表	63

1. まえがき

海岸および港湾の背後地を防護する施設としては、護岸が一般的に用いられる。護岸の設計においては、背後地への越波が許容値を超えないように天端高と構造様式が決められる。護岸からの越波量が許容値を超えると、水たたき部などの施設が破壊されたり、排水機能が阻害される。護岸の越波量を算定し、護岸構造を設計する基となる平均越波流量推定法は、主に2次元水路内の模型実験結果から導かれたもので、外力となる波は単一方向不規則波である(合田,1970)。実際の海域では、沖合の海の波は多方向不規則波としての性質を有しており、これまでの単一方向不規則波を対象とした模型実験において、現地の越波現象が適切に再現されているかどうかは十分確かめられていない。しかし、波が浅海域へ伝播してくるにしたがい、屈折効果により多方向波を構成するすべての成分波の波向が汀線に対して直角の方向に揃ってくるという性質を有していることから、浅海部での波は単一方向不規則波の性質に近づいてゆくと考えられる。こうした海の波の性質を考慮すると、従来の護岸は汀線付近の浅い海域に建設される例が多く、外力となる波を単一方向不規則波として越波量を求めても支障がないと考えられる。ところが、最近では港湾構造物が沖合の大水深域へ展開されつつあるので、人工島や新しい港湾施設に建設される護岸は、外海に直接面し、水深が比較的深い海域に建設される例が多くなっている。したがって、外力となる波を単一方向不規則波として扱うことによって、実際現象より越波量を過大あるいは過小に評価することになり、不都合が生じる危険性がある。また、浅海域においても、港内のように防波堤・岸壁からの反射波が重なり合っているような水域に親水性護岸を建設するためには、外力となる波の多方向性が、一方向性の

波に比べて、どのように異なった現象を引き起こすのかを検討しておく必要がある。

多方向不規則波の越波に関する研究としては、防波堤を越流した多方向波の背後水域における波高分布を調べた例はあるが(平口ら,1991,Hiraishi and Takayama,1993)、越波量を測定し、波の多方向性の影響を検討した例はない。そこで、本実験では、水平床に護岸模型を設置して、前面水深が深い場合の多方向不規則波の越波量を測定するとともに、斜め入射波に対する実験を行い、波の入射角が越波量に及ぼす影響を検討した。

2. 越波量算定式とその適用性

2.1 算定法の定式化

ここでは、計算を簡単にするために、海底は一様で勾配がなく、水深は一定とする。今、無限に続く直線状の護岸がx軸上にあり、y軸を、護岸法線を0として沖側が正となるように取る。図-1に座標軸を示す。来襲する多方向波の主波向を θ_0 とし、図に示すように、護岸の前面に対して直角方向の波の進行方向が 0° となるように角度を定義する。護岸前面で波が完全反射するものと仮定すると、多方向不規則波が入射する場合の護岸前面の水位変動は次式で示される。

$$\xi(x,t) = K \sum_{n=1}^{N_s} 2a_n \cos(k_n x \sin \theta_n + \sigma_n t + \varepsilon_n) \quad (1)$$

ここで、 $\xi(x,t)$ は、時間 t における護岸前面の水位であり、添字 n は、 n 番目の成分波の諸量であることを示している。シングルサンメーション法(高山・平石ら,1989)によって、波向の異なる N_s 個の成分波を重ね合わせるにより、多方向不規則波の水位変動を計算した。 $a_n, k_n, \theta_n, \delta_n, \varepsilon_n$ は、それぞれ、成分波の片振幅、波数、波向、角周波数および初期位相を示す。また、 K は波の非線形効果による波高増大および碎波減衰を考慮するために導入された係数(合田ら,1975a)で、直立護岸の場合は次式で与えられる。

$$K = \xi/H = \min \left\{ \left[1.0 + a_s H/d + b_s (H/d)^2 / K_s \right], c_s \right\} \quad (2)$$

$(a_s = 1.0, b_s = 0.8, c_s = 10)$

K_s は碎波および浅水変形による波高の変化係数である。 \min は{ }中の最小値を採用することを示す。護岸前面水深が十分に大きい場合には碎波等による波高変化は小さいと考えられるので、本計算では補正係数 K を次式で与える。

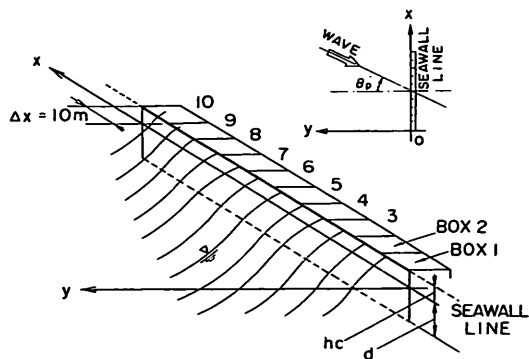


図-1 計算の座標系

$$K = \xi/H = \min \left\{ [1.0 + a_s H/d], c_s \right\} \quad (3)$$

$$(a_s = 1.0, c_s = 10)$$

図-2に示すように水位 $\xi(x,t)$ が護岸の天端高 h_c を越えると、越流が生じ越波する。図中の d は護岸前面の水深である。越波流量 q ($m^3/m \cdot sec$)は、次式で計算できる。

$$q = \begin{cases} C(\xi - h_c) & (\xi \geq h_c) \\ 0 & (\xi < h_c) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 C は越流係数で $C_0 \sqrt{2g}$ で表される。係数 C_0 については合田ら(1975)は0.5を用いているが、ここでは後述のように実験結果から決定する。

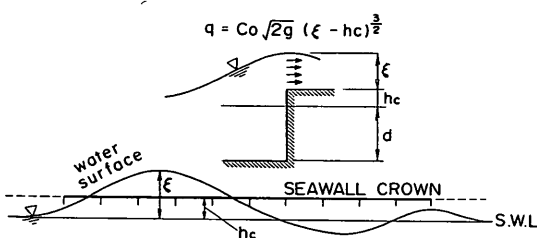


図-2 護岸越波の模式

h_c は、斜め入射の成分波による越波の減少効果を考慮する修正天端高である。ここでは、高山ら(1984)によって示された換算天端高係数と波入射角の関係図を参考にするとともに、後述のように実験の結果から、入射波向が斜めになると直入射波に比較して越波流量が低下することが判明したことから、以下のように修正天端高を定めた。

$$h_c = \left[\sum_{n=1}^{N_s} \frac{S(f_n) \delta f_n \lambda_n}{m_0} \right] \quad (5)$$

ここで、 $f, S(f), \delta f, m_0$ はそれぞれ、周波数、スペクトル密度、代表周波数間隔および波の全エネルギーを表す。 λ_n は、波向による越波量の変化を表す関数で、次式で求める。

$$\lambda_n = \frac{h_{c0}}{\beta_n} \quad (6)$$

ここで、 h_{c0} は修正前の護岸天端高すなわち実の天端高である。 β_n は n 番目の成分波に対する修正天端高係数である。高山・永井ら(1984)の調べた斜め入射単一方向波の越波量は、一般に直入射波に比較して減少する。 β_n は同じ越波量を与える斜め波に対する護岸天端高と直入射波に対する護岸天端高の比で、 β_n が1より小さい場合は、天端高が直入射波の場合より低くなっても、斜め入射波

に対しては同じ越波量を与えることになる。この修正天端高係数は後に述べる模型実験結果に基づいて与えるものとする。

成分波の振幅 a_n は次式で求められる。

$$a_n = \sqrt{2S(f_n; \theta_n) \delta f_n \delta \theta_n} \quad (7)$$

ここで、 $S(f_n; \theta_n)$ 、 δf_n および $\delta \theta_n$ は、それぞれ方向スペクトル、 n 番目の成分波の周波数幅および波向幅である。方向スペクトルは周波数スペクトル $S(f_n)$ と方向関数 $G(\theta)$ の積として表される。波の周波数スペクトルは、次式で示す合田(1987)が提案した改良Bretschneider・光易型を用いた;

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^2 (T_{1/3} f)^{-5} \times \exp \left[-0.75 (T_{1/3} f)^4 \right] \quad (8)$$

ここで、 $S(f)$;周波数スペクトル、 f ;周波数、 $H_{1/3}$;有義波高、 $T_{1/3}$;有義波高である。多方向不規則波の方向分布特性を表す指標としては方向スペクトルが使われている。方向スペクトル $S(f; \theta)$ は、周波数スペクトル $S(f)$ と方向関数 $G(\theta)$ の積として表される。方向関数 $G(\theta)$ としては、次式で示す改良光易型(合田・鈴木,1975b)を用いた;

$$G(\theta; f) = G_0 \cos^2 \left(\frac{\theta - \theta_p}{2} \right) \quad (-90^\circ < \theta < 90^\circ) \quad (9)$$

ここで、 θ_p は主波向、 G_0 は方向関数の面積を1とする係数で、次式で計算する;

$$G_0 = \frac{1}{\int_{-\pi/2 + \theta_p}^{\pi/2 + \theta_p} G(\theta; f) d\theta} \quad (10)$$

s は、波の方向分布特性を表す係数で、次式で定義される;

$$s = \begin{cases} S_{\max}(f/f_p)^5 & : f \leq f_p \\ S_{\max}(f/f_p)^{-2.5} & : f > f_p \end{cases} \quad (11)$$

ここでパラメータ S_{\max} は、 s のピーク値で方向集中度パラメータと呼ばれる。 f_p はピーク周波数($=1/1.05 T_{1/3}$)である。

式(1)で護岸前面の時間的な水位変動がわかると、式(4)で単位幅、単位時間当たりの越波量 q ($m^3/m \cdot sec$)が計算できる。ここでは、まず図-1のように護岸背後に幅 Δx の測定箱が設置してあるものと仮定して、一定時間 t_0 に各測定箱に溜まる総越波量 Q (m^3)を計算した。 Q を t_0 と Δx で除すと各測定箱における平均越波量 q_i ($m^3/m \cdot sec$)が計算できる。対象とする護岸の越波量 q は、仮想越波箱の総数を N_b として、各測定箱で求められる q_i の平均値として次式で計算する。

$$q(\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}) = \frac{1}{N_b} \sum_{i=1}^{N_b} q_i \quad (12)$$

2.2 大水深護岸の越波量を求める模型実験

越波量算定式に含まれる修正天端高係数を決定するとともに、それをを用いた数値計算結果を検証するために、大水深海域に建設された直立護岸を想定した模型実験を行った。

(1) 実験条件と造波した波の特性

図-3に本実験で用いた護岸模型および造波装置の配置を示す。水槽は、横幅40m、縦20mの平面水槽で、横壁に沿って、幅50cmのピストン型造波機60台を有する多方向不規則波造波装置が設置されている。多方向不規則波造波装置は、サーベント型造波機とも呼ばれ、斜め方向へ進む規則波（斜め波）、斜め方向へ進む一方不規則波および多方向不規則波を造波できる（平石,1992）。図に示した造波機面に対して垂直の水槽中央線方向を波向 0° として定義する。そして、反時計回りに波向の正方向を定義する。護岸模型は、ベニヤ板を鉛直に立つようにL字スタンドに固定して、造波機面に平行に、6.4m離して設置した。護岸模型の総延長は約18mで、両端をやや折り曲げて、両端における回折波の影響が計測点に影響を及ぼすことを防いだ。図中のA.1およびA.2では、容量式波高計4本を正三角形の3頂点と重心点に配したアレイ配置により、これら4点の同時計測波形記録から、波の方向スペクトルを解析することとした（合田,1980）。

図-4は、護岸模型中央部の外観を示す。実験では、

縮尺1/100として、現地の護岸水深が約40mとなる条件を想定した。したがって、模型では、護岸模型の高さを44cm（現地で44m）とした。なお、以下の記述では、特別の記述がなければ、模型実験および数値計算結果は、現地換算値で示している。図に示すように、護岸模型の中央部には幅50cmのステンレス製の測定箱を設けた。測定箱の周辺は、越波量を測定しない場合には、ステンレス製のカーテンを降ろして、越波を防ぐことができる。そして、一定時間だけカーテンを上げて越波を許容し、その時間内で測定箱に溜まった水量を測定して、越波流量 $q(\text{cm}^3/\text{s}\cdot\text{cm})$ を求めた。実験は、(i)斜め単一方不規則波と(ii)多方向不規則波について実施した。なお、多方向不規則波の場合には、主波向は 0° で一定とした。

多方向不規則波造波装置では、波向、周波数および振幅がそれぞれ異なる規則的な成分波を造波するための信号を多数重ね合わせて、多方向不規則波のための造波信号を作成し、式(8),(9)に示した方向スペクトルを有する波が水槽内で再現できるようにする。このとき造波信号の作成法としては、シングルサンメーションモデル（高山・平石ら,1989）を用い、成分波の数は約1000個とした。作成手順の詳細について文献（平石,1992）を参照されたい。

実験では、水深を38cm（現地換算38m）で固定した。護岸の天端高 h_r は、6および8cmの2種類とした。これらは、現地換算でそれぞれ6および8mに相当する。それぞれの天端高について(i)斜め単一方不規則波実験と(ii)多方向不規則波実験を実施した。(i)および(ii)において、実験波の有義波高 $H_{1/3}$ は6.0および8.0cmとした。こ

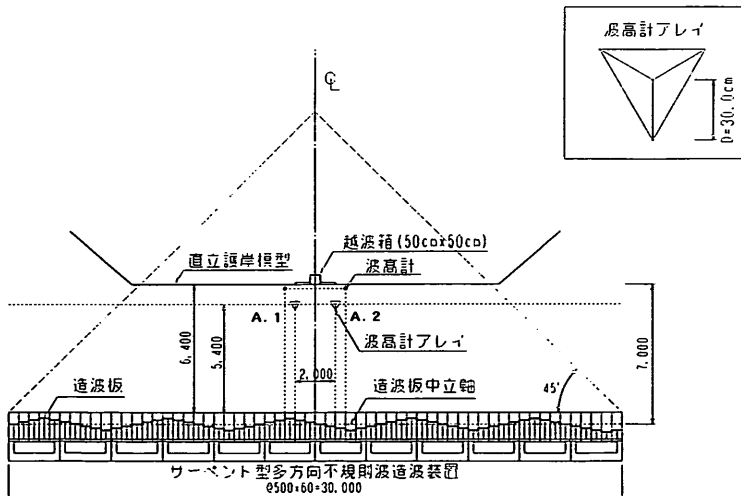


図-3 護岸模型と造波装置の配置

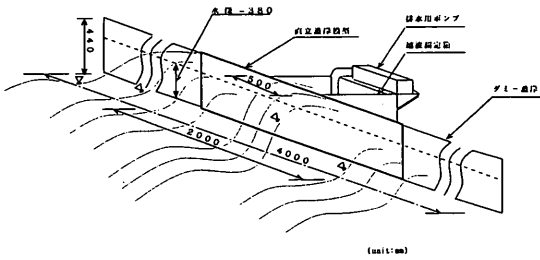


図-4 越波測定装置の外観

これは現地換算値でそれぞれ6および8mに相当する。有義波周期 $T_{1/3}$ は1.131s(11.3s)および1.414s(14.1s)の2種類とした。

実験(i)の波向は0,7.5,15,22.5,30および45°とした。実験(ii)では、主波向 θ を0°で一定とし、目標とする S_{max} を10,25および100に変化させた。なお、実験では各ケースについて不規則な信号を作成する際に入力する乱数の初期値を2種類に変化させ、2回計測を行った。すなわち同一波高および周期で波群が異なる2つの波を作用させて、越波量を測定し、その平均値を各ケースの結果として採用した。越波の計測時間は、造波開始30秒後から120秒としたが、測定箱内の水量により、若干長くした場合もある。

実験に先立ち、護岸模型を水槽より撤去し、図-3の2つのアレイの片方を、越波測定箱前面に当たる位置に移動して、作用波の特性を調べた。まず、造波信号の周期、波高を目標値の前後で数段階に変化させて、護岸設置位置の波高・周期を測定し、目標とする波高・周期が再現できるように造波信号として与える波高・周期の値を定めた。次に、設定造波信号値で波を造波し、水槽内

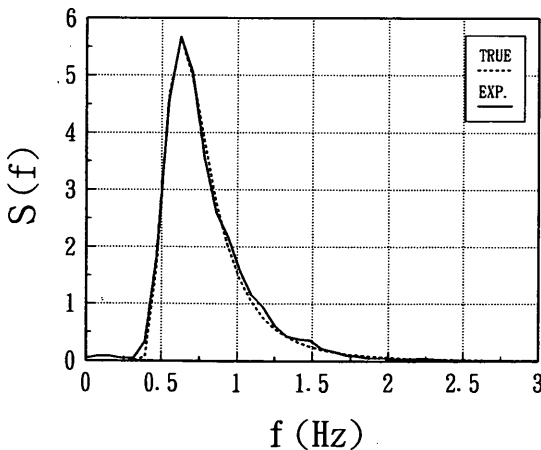


図-5 実験波の周波数スペクトル

のアレイで測定した周波数および方向スペクトルを検討した。周波数スペクトルはFFT(高速フーリエ変換)を用いて、アレイの重心点の波形記録より求めた。方向スペクトルは、アレイ上の4本の波高計の同時記録からEMEP(Extended Maximum Entropy Principle, 橋本ら,1993)によって求めた。

図-5は、一方向不規則波に対する周波数スペクトルの一例を示したものである。図中の'TRUE'および'EXP.'が、それぞれ、目標値および実験値を示す。図に示すように、目標および実験スペクトル形はよく一致し、ピーク周波数およびピークの高さにほとんど差が見られない。したがって、水槽内で、目標とする周波数スペクトル形を有する波が再現できていることがわかる。0.4Hz以下の低周波数側に実験値には、わずかな膨らみが見られる。これは、水槽内の固有振動により、低周波数の定常振動が生じているためと思われる。一方向不規則波の他のケースおよび多方向不規則波の場合においても、実験においては目標とする周波数スペクトルをうまく再現できた。

図-6は、目標方向集中度パラメータ $S_{max}=10$ の多方向不規則波を造波した場合の方向スペクトルの解析結果を示す。解析結果は、エネルギーが集中するピーク周波数における方向関数形として表示した。図において、太い実線が実験値を示し、細線で各 S_{max} に対する理論値を示した。実験値の分布形は、なだらかな分布形を示し、 $\theta=0^\circ$ におけるピークの高さは造波目標とした $S_{max}=10$ の理論値より若干低くなっている。したがって、エネルギー集中度が、造波目標よりやや低い多方向不規則波であるものと考えられる。

図-7は、 $S_{max}=100$ を目標とした場合のピーク周波数

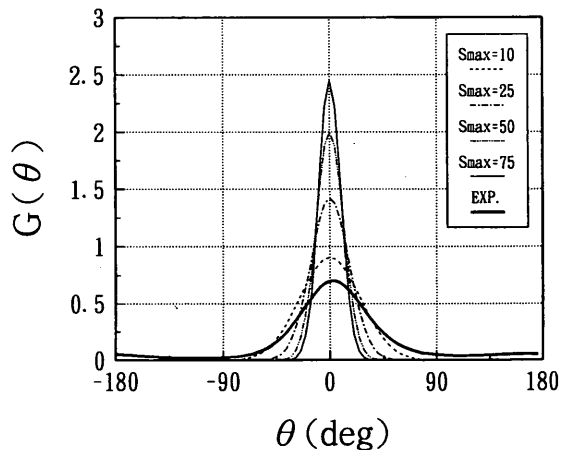


図-6 実験波の方向関数(目標 $S_{max}=10$)

における方向関数形の比較を示す。太い実線で示した実験値の分布形は $S_{max}=25$ および50の分布形の間値に近く、目標とする $S_{max}=100$ の理論分布形に比較するとピークの値は低い。ただし、ピークの出現する角度は $\theta=0^\circ$ で波群全体の進行方向については偏りは生じていない。

図-6および図-7に示すように造波信号で与えた S_{max} で表される方向集中度に比較して、実際に水槽内で造波される多方向不規則波の方向集中度が低下し、より幅広く波のエネルギーが分布する場合があることは、従来から指摘されている(高山・平石,1987)。この理由としては、(i)造波装置の総延長が有限であり、端部における回折波の影響が現れる、(ii)成分波となる斜め波の水粒子は、水平面上で楕円軌道を描く(Takayama,1982)ことが考えられる。

このように、方向関数の分布形のピークが目標値より低くなる傾向は他の波のケースでも現れ、その小さくなる割合は波群によっても若干異なった。本実験では、方向関数形を目標値に一致させるための造波信号の修正は行わず、実験波の解析から求められた方向関数の分布形から判断できる S_{max} を、作用波の方向集中度パラメータとして考えた。したがって、信号として与えた方向集中度パラメータと以下の実験結果を示す図の中の S_{max} は異なり、実験結果を示す図においては、実際に造波された波の解析結果から求めた方向集中度パラメータを用いている。

図-8は、理論計算で求めたピーク周波数における方向関数のピーク値 $G(\theta)$ と S_{max} の関係式を示したものである。実験解析によって、 $G(\theta)$ を求めた後に、図の関係式を用いて実験波の S_{max} を推定した。

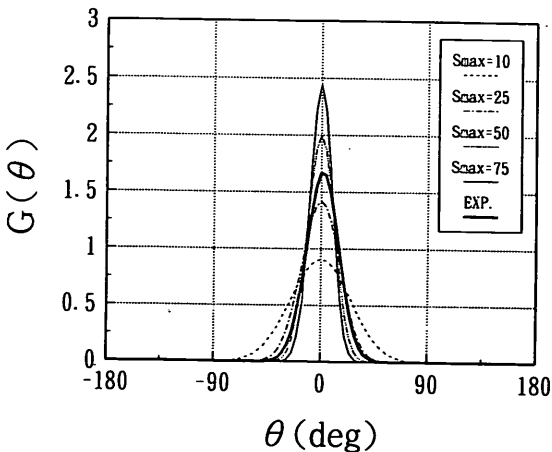


図-7 実験波の方向関数 (目標 $S_{max}=100$)

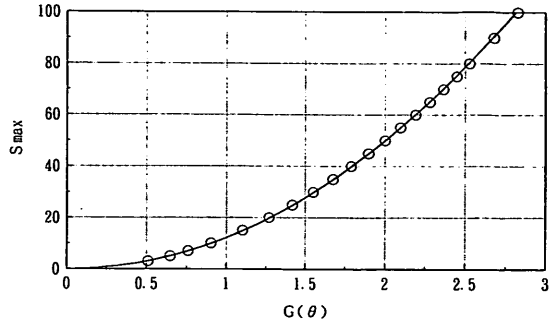


図-8 $G(\theta)$ と S_{max} の関係

(2) 実験の結果

図-9は、斜め単一方向不規則波の越波流量 $q(\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec})$ を無次元越波流量 $Q/\sqrt{2gH_0^3}(=q^*)$ として表したものである。ここで H_0 は、換算沖波波高で、護岸前面の波高 $H_{1/3}$ を、浅水係数 K_s で除した値である。図は、波群の異なる2種類の波について、波向を変化させて越波流量の変化を調べたものである。図に示すように、波群が異なると同一の波高・周期であっても越波流量が若干変化する。特に越波流量が大きい $\theta < 15^\circ$ の場合に波群による差が大きい。このように、越波量は同一のスペクトルを有する波条件下においても、ばらつきを示す。したがって、複数回の実験を行って、これらの平均値として越波量を表示することが妥当と言える。しかし、實際上、測定を多数繰り返すことは労力と時間を要するため、ここでは2回の平均値を用いる。一方、 $\theta > 15^\circ$ では両者の差は小さくなり、波群を変化させても越波量は大きく変化しない。

波向による変化を調べると、 20° 付近で極小値を示し、 45° では 30° のケースより越波量は大きくなっている。

図-10は、2つの波群の測定値を平均して求めた代表無次元越波流量の波向による変化を示す。全実験条件の

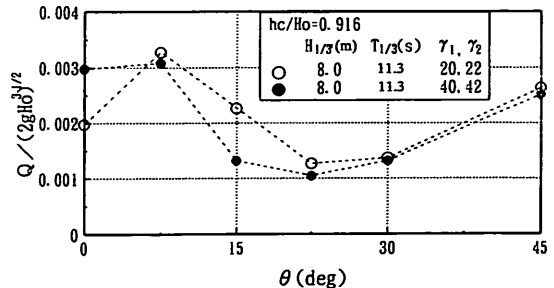
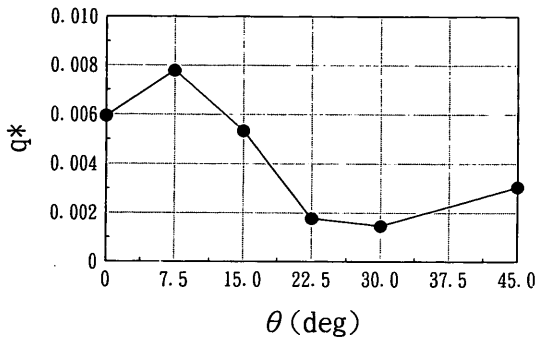


図-9 波向と波群による越波量の変化 (単一方向不規則波)



図一10 無次元越波量の波向による変化
($h_c/H_0=0.65\sim 0.75$, $H_0/L_0=0.025\sim 0.045$, $h/H_0=3.5\sim 4.5$)

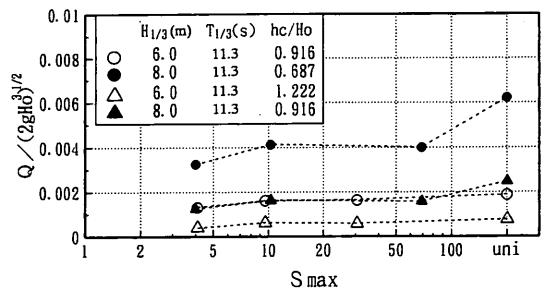
全体的な傾向を調べるために、 h_c/H_0 が0.65から0.75に含まれる比較的越波量が大きくなるケースについて、各ケースの越波量を平均した値を示した。波高および天端高によって越波流量は異なるが、全体を平均した場合でも、 $\theta=7.5^\circ$ の場合に無次元越波流量 q^* は最大となり、それより θ が大きくなる、あるいは小さくなるにつれて越波流量は減少する。すなわち、護岸面に対して直角に作用する波よりも、若干波向が変化し、わずかに斜め方向から入射する場合に越波流量は最大となる。波向が 7.5° より大きくなると波向が大きくなるほど越波量は小さくなり、 $\theta=30^\circ$ の場合には、 $\theta=0\sim 7.5^\circ$ に比べて無次元越波流量は3割以下に小さくなる。

このように、 θ が大きい斜め入射波の越波量が、直に入射する波やわずかに傾いて入射する波の場合に比べて越波量が減少することが、後述するように、多方向不規則波の越波流量が一方向波のそれに比べて減少する原因になると考えられる。 $\theta=45^\circ$ の場合には斜めからの入射にもかかわらず、 $\theta=30^\circ$ に比べて越波量がわずかに増加している。 $\theta=30^\circ$ に比べて $\theta=45^\circ$ の場合に無次元越波量が若干増加する傾向は、越波量小さいケースでも見られた。高山・永井ら(1984)の実験結果でも、 $\theta=45$ および 60° の結果は $\theta=30^\circ$ よりも少し大きくなっている。高山・永井ら(1984)は、その理由を水槽側壁からの反射波の影響が大きくなったためと説明している。しかしながら、側壁からの反射波の影響がない本実験においても $\theta=45^\circ$ の場合に越波量が若干増加しているの、水槽側壁からの反射という模型実験特有の原因の他にも原因があると思われる。森屋ら(1995)は護岸に対して大きな角度で波が当たる場合には、非線形干渉によってMach stemと言われる波が発生することを示唆している。Mach stemの影響により波高が増大することが考えられ、これが $\theta=45^\circ$ において越波量が増大する原因となっ

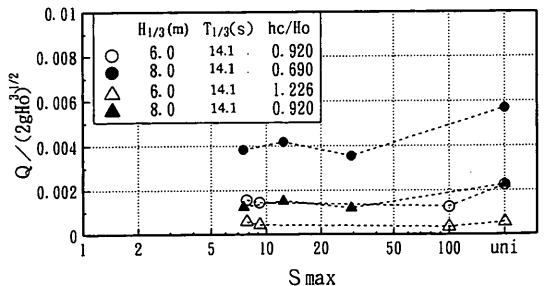
ていると考えられる。このように、 45° の場合の方が 30° の場合より越波量大きいという結果になったけれども、その差は顕著ではない。そこで、実用上、 θ が 30° 以上になると越波量はほぼ一定となるものとして推定計算式を検討するものとする。

図一11は、多方向不規則波の場合における無次元越波流量を示したものである。図一11(1)および(2)はそれぞれ、 $T_{1/3}=11.3$ および 14.1 sのケースに相当する。横軸の S_{max} は、実験で計測した方向関数から推定した方向集中度パラメータである。"uni"は単一方向不規則波の場合を示す。越波流量が小さい場合には、方向集中度によって越波量が大きく変化する様子は見られない。しかし、一方向波の場合に比べると越波流量はわずかに小さくなっている。越波流量が大きい低天端高のケースで $H_{1/3}=8$ mのケースでは、一方向波に比較して、多方向波の場合の越波流量が減少していることがわかる。

図一11(2)に示されるように、多方向不規則波の越波流量は、方向集中度が変化してもほとんど変化しないが、単一方向不規則波の場合と比べると、明らかに減少している。減少の割合は各ケースの平均値を計算すると、概ね70%であった。

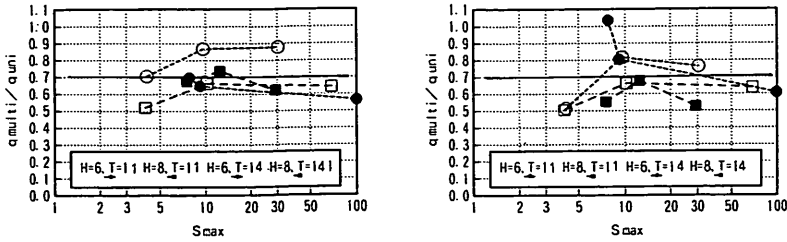


(1) $T_{1/3}=11.3$ s



(2) $T_{1/3}=14.1$ s

図一11 無次元越波量の方集中度 S_{max} による変化



(1) $h_c = 6\text{m}$ (2) $h_c = 8\text{m}$
 図-12 多方向波と単一方向波の越波量比

図-12は単一方向不規則波の越波流量を1とした場合の多方向不規則波の越波流量を比($q_{\text{multi}}/q_{\text{uni}}$)の形で示したものである。図-12(1)および(2)はそれぞれ、護岸天端高が6および8mの場合を示す。図に示すように、実験値の比は0.7の回りに分布している。ばらつきを示す標準偏差は、 $h_c = 6\text{m}$ の場合0.10、 $h_c = 8\text{m}$ の場合に0.15になる。すなわち、多方向不規則波が作用する護岸における越波流量は、直入射の単一方向不規則波の越波流量の70%として推定できる。

2.3 実験結果による算定式の係数決定

越波量算定式における越波量係数および修正天端高係数を模型実験結果から設定した。

(1) 数値モデルにおける計算諸条件の決定

Hiraishi(1995)が指摘しているように多方向不規則波の時系列を用いた数値モデルでは成分波数が十分大きくない場合には計算結果が初期乱数毎に変化し、一定の解が得られない。また、本計算においては想定した護岸分割数、計算時間によって結果が異なると思われる。そこで、まず条件を変化させた場合の結果の変化を調べ、最適計算条件を設定した。ここでは、修正天端高係数としては後述の実験結果から決定した値を用いている。

(a) 成分波数

図-13は成分波数 N_s を変化させた場合の無次元越波量の変化を調べたものである。シングルサンメーション法による多方向不規則波の波形計算においては、クロスベクトルの推定値を得るためには N_s が450以上にするのが望ましい(Takayama and Hiraishi, 1989)。図-13においては、 N_s が100以上であればほぼ計算結果が一定になる。計算においては、10個の測定箱の越波量の平均を取って計算結果を得ているため、成分波数が450以下であっても安定した結果が得られているものと思われる。成分波数は計算に要する時間に大きく影響するため、なるべく小さい方がよい。そこで、本計算では、安全側を考慮して N_s を300とした。

(b) 波の継続時間

図-14は N_s を300で固定して、波の継続時間 t_0 (実機スケールで表示)を変化させた場合の無次元越波量を調べたものである。 t_0 が10minの場合は、それより長い計算時間の結果よりも q^* は大きくなっている。計算時間 t_0 が20min以上になると計算結果はほぼ一定となっている。したがって、越波量のシミュレーションにおいては t_0 を20min以上にすればよい。ただし、ケースによっては安定性が低下する場合危険性があるので、継続時間としては30minを採用する。

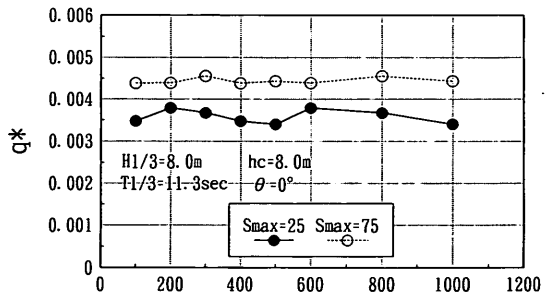


図-13 成分波数 N_s による無次元越波量の推算値の変化

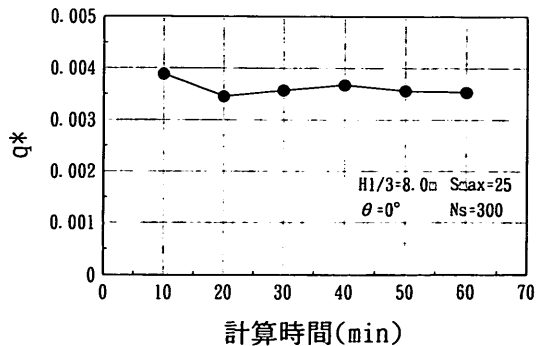


図-14 計算時間 t_0 による無次元越波量の推算値の変化

(c)越波量の計算における護岸延長

前出の式(12)に示すように、数値モデルでは、 $\Delta x \times N_B$ の延長を有する護岸における平均越波量を求めている。図-15は、図-14と同一の条件で $N_B=300$ 、 $t_0=30\text{min}$ として、護岸区間幅 Δx と区間総数 N_B を変化させた場合の q^* の変化を示す。白丸および黒丸が、それぞれ、 Δx を5および10mとしたケースに当たる。 Δx を変化させても計算結果は変化しない。このケースの護岸位置における

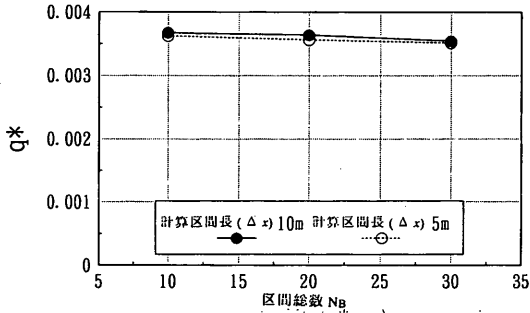
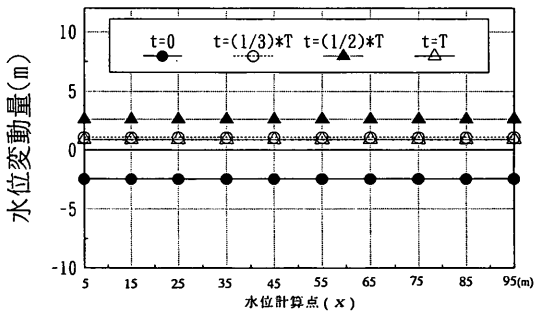
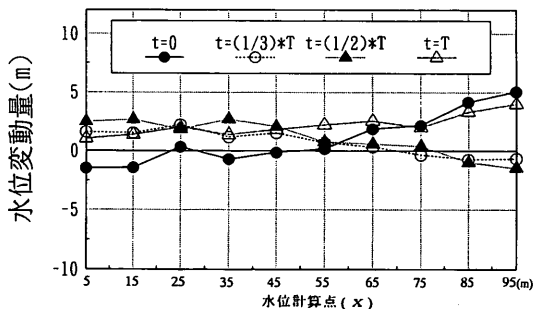


図-15 計算区間 Δx と区間数 N_B による無次元越波量の推算値の変化



(1) $S_{\max} = \infty$ (単一方向不規則波) の場合



(2) $S_{\max} = 75$ の場合

図-16 護岸前面の水位の空間的な変化

波長は100mであり、波長の1/10程度の幅を有する Δx を用いれば安定した結果が得られることがわかる。

区間 N_B の総数が大きくなると、平均する母数が増加するためより安定した解が得られると思われる。図-15では10から30まで変化させており、総数が大きくなるとわずかに q^* が減少する。しかしその減少する量は小さく、 N_B が10の場合と大きく変化していない。 N_B は計算に要する時間に大きく影響するために、本計算では、 N_B として10を採用した。

図-16は、護岸前面に沿った水位変動の時間変化を示したものである。横軸の番号は幅10mの護岸区間の中心部に当たる点で、この点の水位変動から対象区間の越波量を計算している。したがって、図-16は無限に伸びる直線護岸における90m区間の前面水位変動を示したものである。図-16(1),(2)はそれぞれ単一方向不規則波および $S_{\max}=75$ の多方向不規則波に相当する。各図において t は時刻を示し、 $t=0$ から $t=\text{有義波周期}T$ までの代表時刻における水位を示す。単一方向不規則波の場合には、護岸に沿う方向への水位差はなく一様な分布を示す。多方向不規則波の場合には、護岸に沿った方向へ水位が変化し、番号10と番号1における水位の正負が逆になることもある。多方向不規則波の場合には各区間の水位がそれぞれ異なり一様ではなくするため、ある一瞬の時刻における越波量は場所毎に異なる。したがって、多方向不規則波と単一方向不規則波の越波量を比較するためには、ある一定時間 t_0 における時間平均された越波量で比較する必要がある。

(2) 実験定数と修正天端高

次に、式(4)における越流に関する係数 C_0 を決定するために単一方向不規則波の C_0 を変化させて、計算値と実験値の差を求めた。図-17は $\theta_0=0^\circ$ の単一方向不規則

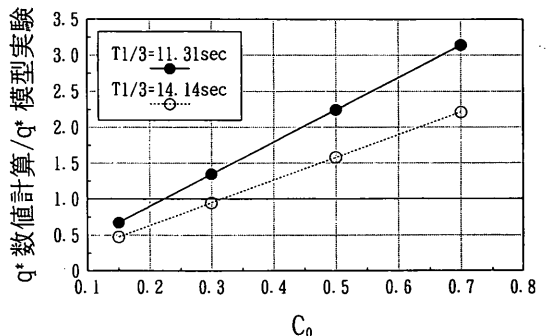


図-17 越流に関する係数 C_0 による越波量の推算誤差の変化

波を対象とし、 $h_c=6m$, $H_{1/3}=6m$ の場合の護岸越波量の計算値と実験値の比を示したものである。計算値と実験値が等しい値を与えるように C_0 を選定したとき、縦軸の値が1になる。合田(1989)が用いた $C_0=0.5$ の場合には、波の周期の長短に係わらず、計算値は実験値の1.5倍以上になっている。 $C_0=0.3$ の場合には、短い周期の場合に1.3倍程度、長い場合には計算越波量は実験値とほぼ等しい値を示す。このように、周期の違いによって最適な C_0 の値は30%程度変化するけれども、計算上の便宜という観点から、ここでは、広い周期帯にわたって、計算値と実験値がほぼ一致する $C_0=0.3$ を係数として採用した。

式(6)および(7)に表したように、修正天端高 h_c^* は、修正天端高係数 β_n から求められる各入射角に応じて変化する補正項 λ_n の重み付き平均値として計算する。実の護岸天端高を修正天端高係数で除した値を平均するため、対象入射角の越波量が直入射の場合に比較して低下するときには、修正天端高係数は1以下でなければならない。そこで、斜め入射の単一方向波の角度による越波量の変化を平均的に表した図-10を参考にして修正天端高係数を決定した。図-18に修正天端高係数の決定法を示す。図の縦軸の数値は係数値であり、また斜め入射角の直入射の場合の計算越波量に対する比を示す。ここでは修正天端高係数の計算に次式を用いた。

$$\begin{cases} \beta_n = 1 - \sin^2 \theta_n & (|\theta| \leq 30^\circ) \\ \beta_n = 1 - \sin^2 30^\circ & (|\theta| > 30^\circ) \end{cases} \quad (13)$$

図に示すように計算越波量比は $\theta=7.5^\circ$ で1以上となるが、その差が小さいので、計算越波量比は $\theta=0^\circ$ と $\theta=7.5^\circ$ の場合は修正天端高係数はほとんど変化しないものとみなす。 $\theta=7.5^\circ$ から $\theta=30^\circ$ までは越波量が顕著に減衰するので、修正天端高係数も大きく減少すると考える。 $\theta=30^\circ$ 以上では、越波量が若干増加する可能性があるた

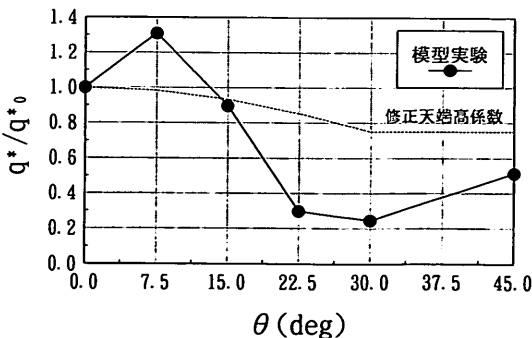


図-18 修正天端高係数の波向による変化

め、修正天端高係数は $\theta=30^\circ$ と同一とみなす。また、計算ではなるべく簡単な数式で修正天端高係数を取り入れなければならない。各種の試行計算を行った結果、以上の条件を満たし、最も実験値と近い計算値が得られる関数として、前述の式(13)を用いた。

(3) 計算法の検証

計算法の検証をするために、まず単一方向不規則波について計算結果と実験結果を比較した。図-19は計算値と実験値の無次元越波量を全ケースについて比較したものである。図中の右上がりの破線上は実験値と計算値が等しい場合を示す。図では、天端高 h_c の大きさで記号を分けており、白四角や黒四角で示す h_c が沖波波高 H_0 の0.9倍以上で越波量が小さい場合には、計算値と実験値の一致度が低く、計算値は実験値に比較して小さくなっている。 h_c/H_0 が0.9以下で越波量が比較的大きくなると、白丸および黒丸で示すように計算値と実験値はよく一致し、計算法の適用性が高いことがわかる。

図-20は、図-19と同一のデータを入射角で分けて示したものである。黒丸の $\theta=0^\circ$ の場合には計算値が実験値より若干大きくなる傾向を示し、白丸の $\theta=7.5^\circ$ の場合には計算値が若干小さくなる傾向を示す。これは、実験結果で越波量が変化していたにも関わらず、修正天端高係数としてほぼ同一の値を使用しているためである。多方向不規則波の計算をする場合には、双方の誤差が相殺されて、全体として実験値と一致する計算結果が得られるものと期待できる。 $\theta=30^\circ$ や 45° の場合は、越波量が小さいときには、実験値と計算値には差が生じるが、越波量が大きくなるとその差は小さくなり、ほぼ精度の良い計算ができています。

図-21は同一データのばらつきを検討した図である。

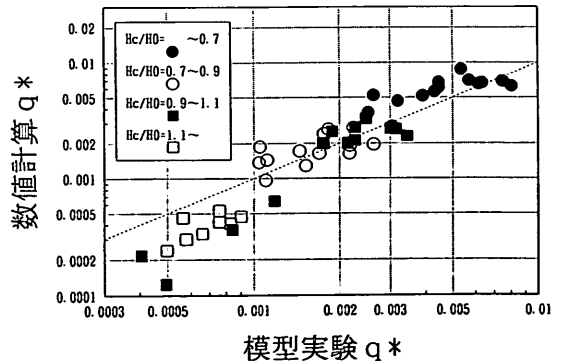


図-19 斜め一方向波に関する越波量の推定値と実験値の比較 (天端高 h_c による分類)

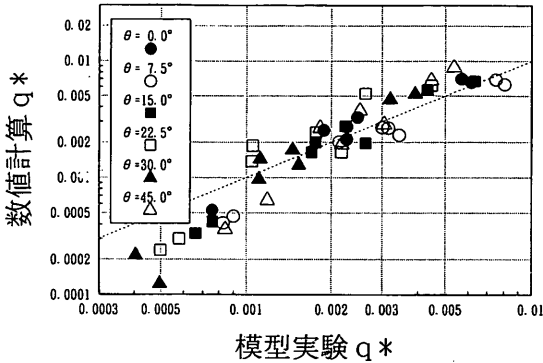


図-20 斜め単一方向不規則波に関する越波量の推定値と実験値の比較 (波向 θ による分類)

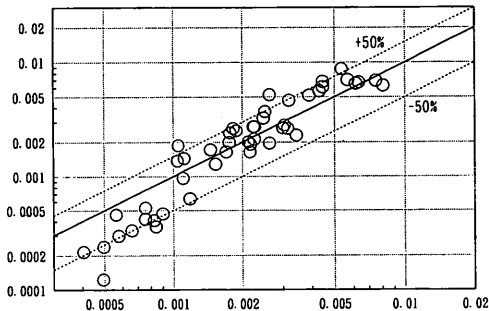
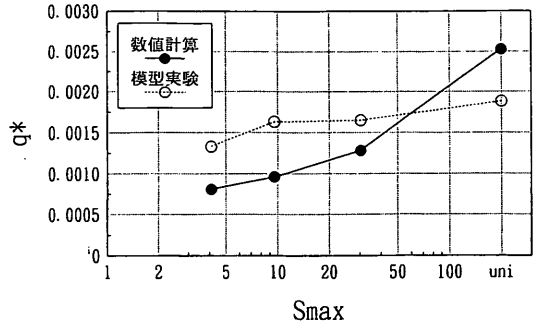


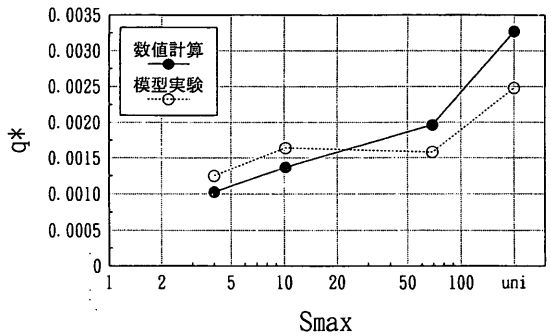
図-21 斜め単一方向不規則波に関する越波量の推定値と実験値の比較 (推定誤差の範囲)

図の右上がりの実線上で計算値と実験値が一致しており、その上下に引かれた破線は、計算値が実験値の-50%および+50%になる場合に相当する。越波量が極端に小さい1ケースと+50%よりわずかに上方にプロットされた3ケースを除いて、ほとんどのケースが両破線の間にプロットされ、計算値の誤差は最大でも50%以内であり、本計算モデルを用いて護岸越波量を推定可能であることがわかる。

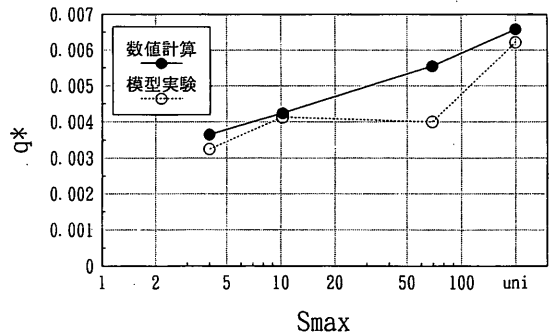
次に、多方向不規則波に対する計算結果を示す。図-22は方向集中度パラメータ S_{max} の変化に対する実験値と計算値の変化を示したものである。(1)が $H_{1/3}=6\text{ m}$, $T_{1/3}=11\text{ s}$, (2) $H_{1/3}=8\text{ m}$, $T_{1/3}=11\text{ s}$, (3)が $H_{1/3}=6\text{ m}$, $T_{1/3}=14\text{ s}$, (4)が $H_{1/3}=8\text{ m}$, $T_{1/3}=14\text{ s}$ の場合を示す。横軸の S_{max} は護岸のない状態で計測された実験値に相当する。図に示すように、実験では、波の方向集中度が大きくなる、すなわち S_{max} が増加すると護岸越波量は増加し、その傾向は計算値でもよく表されている。図-22の(1)と(2)を比較すると、(2)の方が q^* は大きい。単一方向波の場合にも検討し



(1) $H_{1/3}=6\text{ m}$, $T_{1/3}=11\text{ s}$, $h_c=6\text{ m}$ の場合



(2) $H_{1/3}=8\text{ m}$, $T_{1/3}=11\text{ s}$, $h_c=8\text{ m}$ の場合



(3) $H_{1/3}=8\text{ m}$, $T_{1/3}=14\text{ s}$, $h_c=6\text{ m}$ の場合

図-22 方向集中度パラメータ S_{max} による推定および実験越波量の変化

たように、本計算結果は、越波量大きい場合に、よく実験値と一致する。したがって(1)に比較すると(2)において計算値と実験値の一致度は良くなっており、精度の良い計算ができています。(3)の場合には、無次元越波量がさらに大きくなっている。この場合には $S_{max}=4, 10$ および単一方向波の場合に実験値と計算値がよく一致している。以上のことから本計算モデルを用いると多方向不規則波の護岸越波量をほぼ正確に推定できることがわか

る。特に、設計に対して重要な越波量が大きくなるケースにおいてその推定精度が上がる事がわかる。

2.4 多方向不規則波の越波特性

ここでは、2.3で適用性を検討した計算モデルを用いて多方向不規則波の越波特性を検討した。図-23は、 S_{max} が変化した場合の越波量の変化を示す。主波向の入射角は 0° である。計算では波高を一定とし、護岸天端高 h_c を変化させて、それぞれについて越波量を計算した。無次元越波量 q^* は、 h_c が小さくなるほど大きくなる。また、これまで検討したように、 S_{max} が大きくなるほど、 q^* は大きくなる。したがって、単一方向不規則波に比較して多方向不規則波の越波量は減少することが明らかである。減少する割合は、 h_c の大きさすなわち越波量の大小に係わらずほぼ同じである。たとえば、 $h_c=6m$ の場合は単一方向波で $q^*=0.012$ で、これが $S_{max}=25$ では、0.009になり75%に減少する。 $h_c=8m$ の場合には、 q^* は0.005から0.0035に減少し70%になり、 $h_c=6m$ の場合とほぼ同じである。図-12では、実験値から概算して、多方向波の越波量を一方波のその0.7倍としており、ほぼ妥当な推定であったことがわかる。なお、 $S_{max}=75$ の場合には、越波量は単一方向波のそれに近づくので、詳細に越波量を検討するためには現地においても、対象護岸付近の波の多方向性を表すデータが必要である。

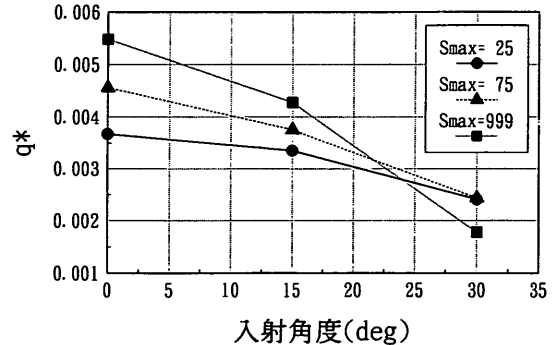
図-24は主波向を変化させた場合の q^* の変化を示す。(1)および(2)はそれぞれ $h_c=7$ および $8m$ に相当する。図からわかるように、主波向 θ_0 が大きくなると越波量は減少する。これは、直入射波に比べて越波量が小さくなる斜め入射成分波のエネルギーが増大するためである。ここで重要なことは、単一方向不規則波($S_{max}=999$ で表している)と多方向不規則波の越波量の差が、 θ_0 が大きくなるにしたがって小さくなり、 θ_0 が 30° になるとその

差がほとんどなくなることである。これは、図-24(2)の越波量が小さくなるケースにおいても見られ、波の入射角が大きくなり沿い波に近い状態になると波の多方向性の影響は小さくなる。

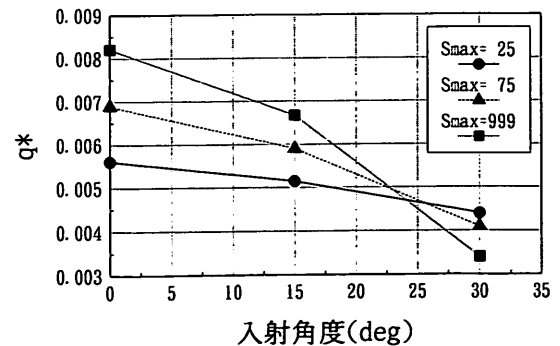
Franco(1995)は防波堤背後の越波量を多方向波について調べ、斜め入射の場合には単一方向波でも多方向波でも同様な越波量が得られることを実験的に示しており、本研究と同様な結論を同時期に導いている。

3. 海浜地形における多方向不規則波の越波特性

2.では大水深海域に設置される直立護岸を対象として多方向不規則波の越波特性を実験的に検討し、また越波量を算定する数値モデルを提案した。ここでは、浅海域において建設されてきた護岸においても沖合の波の多方向性の影響が現れるかどうかを実験と数値計算で検討した。そこで、直立護岸および親水性護岸として多用されている緩傾斜護岸を対象として、単一方向不規則波と多方向不規則波を作用させて越波量を測定した。



(1) $H_{1/3}=8m, h_c=8m$ の場合



(2) $H_{1/3}=8m, h_c=7m$ の場合

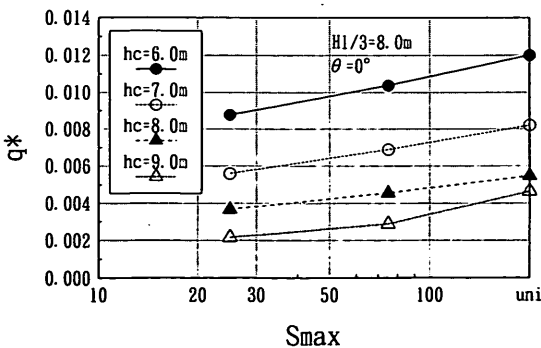


図-23 波の方向集中度 S_{max} に対する推算越波量の変化

図-24 波向による推算越波量の変化

3.1 模型実験の内容

(1) 実験模型

本実験においては、1/30の一樣勾配斜面を平面水槽内に設置し、斜面の終端部に直立護岸および緩傾斜護岸模型を設置した。護岸模型背後に越波量の測定箱を取り付け、波高と越波量の計測を行った。図-25は、造波装置、波高計、模型などの実験装置の配置を示す。使用した水槽には、50cm幅の造波板が30枚並んだサーペント型造波装置（平石,1992）があり、斜め規則波、斜め単一方方向不規則波および多方向不規則波を造波することができる。斜面模型の形状寸法は、幅12.6m×奥行き5.4m×高さ0.26~0.44mとなっている。

図-26に護岸模型の外観を示す。直立護岸模型は、幅12.6m×高さ0.08mのラワン合板製である。緩傾斜護岸は、直立護岸の前面に10mmピッチで10mmの穴を千鳥に開けたラワン合板を斜めに取り付けたものである。越波流量測定箱は、幅0.5m×奥行0.5mで、多方向不規則波の有効造波領域（平石, 1991）を考慮して、斜面模型

中央のB点およびそれより左右2.5m離れたA点, C点に設置した。B点は、有効造波領域の中央部に相当し、A, C点は、有効造波領域の端部に相当する。

斜面模型の側面には、反射波の影響を消すため消波工を設置した。沖波の計測は、三角形の3頂点および中心点に容量式波高計を取り付けた星型アレイを造波装置面から1.56m離して設置して行った。斜面模型上での波の計測のために、容量式波高計4台を沖側に、サーボ式波高計4台を岸側の水深の浅い所に設置した。

表-1に実験条件を示す。模型縮尺は1/100である。実験波は、前出の式(8)で示した修正Bretschneider-光易型の周波数スペクトルを持つ単一方方向不規則波および多方向不規則波を使用した。換算沖波の有義波高 H_0' は、

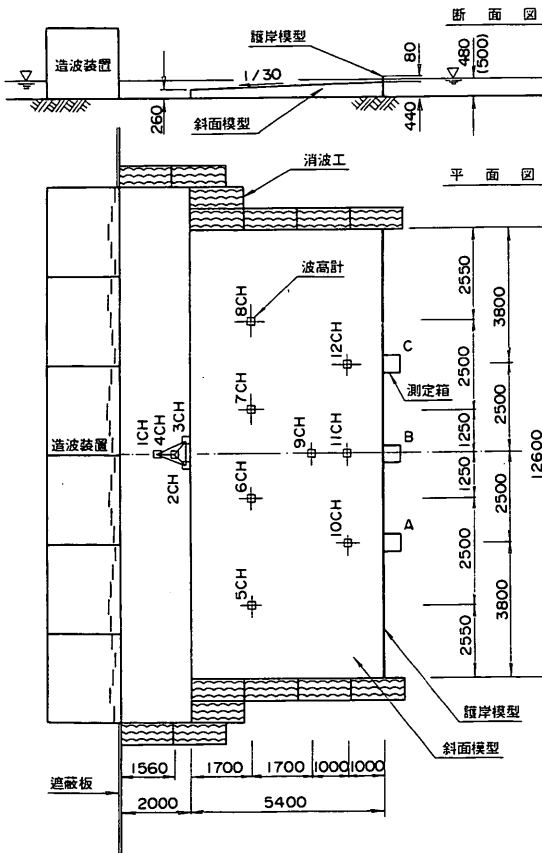


図-25 斜面, 護岸模型と造波装置の配置

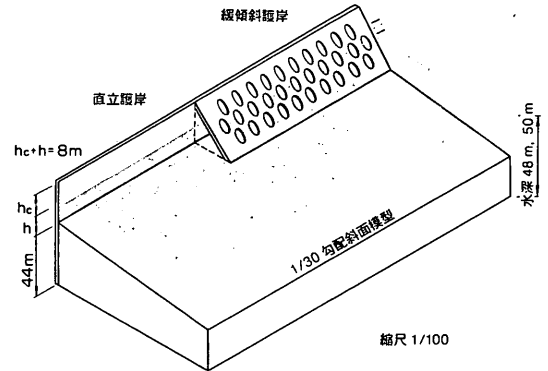


図-26 直立および緩傾斜護岸模型の外観

表-1 海況護岸の実験条件 (現地換算値)

模型縮尺	1/100
海底勾配	1/30
護岸形式	直立護岸、緩傾斜護岸
波の種類	単一方方向不規則波, 多方向不規則波
周波数スペクトル	Bretschneider-光易型
方向関数	光易型 ($S_{max}=10, 25$)
波高	4m
周期	8.44s ($H_0'/L_0=0.036$), 14.62s ($H_0'/L_0=0.012$)
水深	48m ($h_c=4m, h=4m$), 50m ($h_c=2m, h=6m$)
主波向	0°, 20°

現地スケールで全て4mとし、有義波周期 $T_{1/3}$ は、8.44s、14.62sの2種に変化させた。このとき波形勾配はそれぞれ0.036および0.012になる。水深 d は、造波装置前面で、48mと50mの2種類とし、これは、護岸前面水深でそれぞれ4mと6mに相当し、護岸天場高 h は、それぞれ、4および2mになる。波の入射角 θ は、主波向 θ_p が汀線に対して直角方向および造波機前面で 20° 傾いたものとした。多方向不規則波の方向関数は光易型とし、造波信号作成時に用いる多方向不規則波の波の方向集中度パラメータ S_{max} は、10および25とした。

図-27は越波の測定状況の模式図である。同一条件で、直立護岸と緩傾斜護岸に対して実験を行い、波の計測時間は4分で、サンプリングタイムは、実験値で0.05secとした。波の計測を開始して、1分後から2分間、測定箱のカバーを開放し、採水し、越波流量の計測を行った。

波の解析は、ゼロアップクロス法を用いて、有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ を求めた。また、図-25に示す波高計アレイの4台の内の2台、No.1およびNo.4の記録から、周波数スペクトルおよび護岸の反射率を解析した。

図-28は、解析した不規則波の周波数スペクトルの例を示す。図中の細実線は、目標とする修正Bretschneider-光易型のスペクトルである。太実線は、実験波の周波

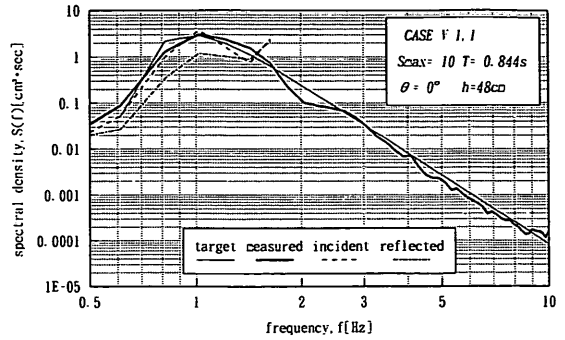


図-28 入射波と反射波の周波数スペクトル

数スペクトルを表している。実験波は、入射波と反射波の合成波であるので入射波の分離計算（合田・鈴木ら、1976）を行った。破線および一点鎖線が入射波と反射波のスペクトルを示す。入射波のスペクトルおよび合成波のスペクトル形はともに目標とするスペクトル形と一致し、精度のよい造波ができています。なお、造波信号で入力する波高と実際に造波機前面で測定された波高は一致しないことが多いので、本実験でも、あらかじめ入射波分離計算で求めた入射波の波高が目標値と一致するように造波信号の入力値を調整した。

入射波と反射波高の比から護岸からの反射率が計算できる。図-29は $\theta_p = 0^\circ$ の直入射波の場合の反射率をまとめたものである。図-29(1)および(2)はそれぞれ直立および緩傾斜護岸の反射率を示す。なお、図中の $S_{max}=999$ は単一方向波であることを示す。直立護岸および緩傾斜護岸ともに反射率が1.0に近く、波のエネルギーがほぼ完全に反射されていた。

波高計アレイNo.1~No.4の4台の波高計の同時記録からベイジアンモデル（橋本、1992）を用いて方向関数を解析した。図-30は、ピーク周波数近傍の周波数帯における方向関数形を示す。図中の細実線は、各 S_{max} に相当する理論値を表しており、下から順番に $S_{max}=10, 25, 50, 75$ に相当する。この図の場合には、 $S_{max}=25$ を目標として造波したが、太線で示した実験波は、 $S_{max}=25$ の分布形よりエネルギーの方向集中度が小さく、 $S_{max}=10\sim 20$ 程度になった。 $S_{max}=10$ の場合についても分布形のピークは目標値より若干低くなった。目標方向集中度が小さいにも関わらず、本実験により造波した波の方向集中度が目標値より若干低くなった原因は、模型床端部の水深急変部や護岸からの反射波が考えられる。

図-31は、単一方向不規則波を目標として造波した場合の造波機前面における解析結果を示す。主波向 θ_p は

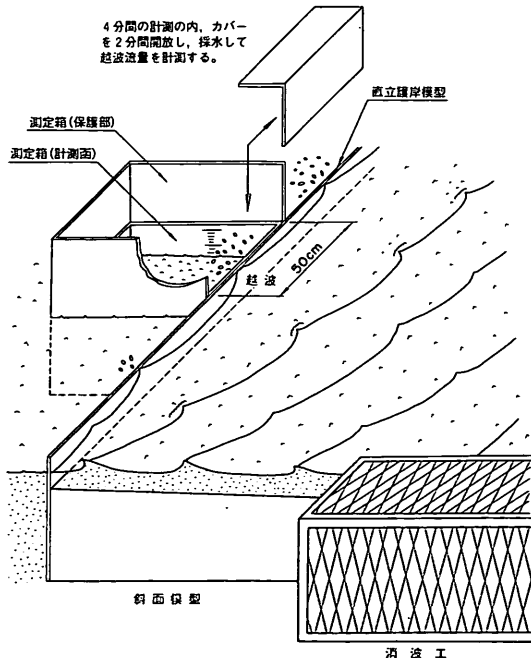
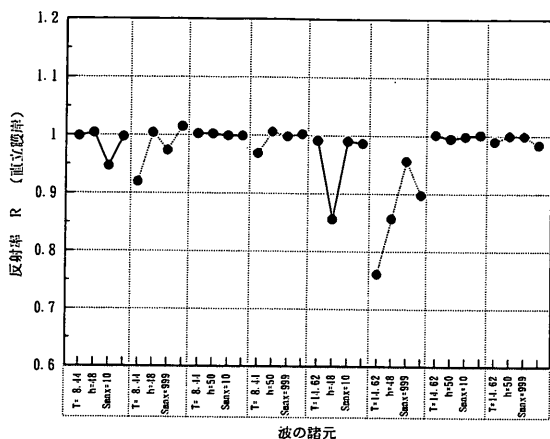
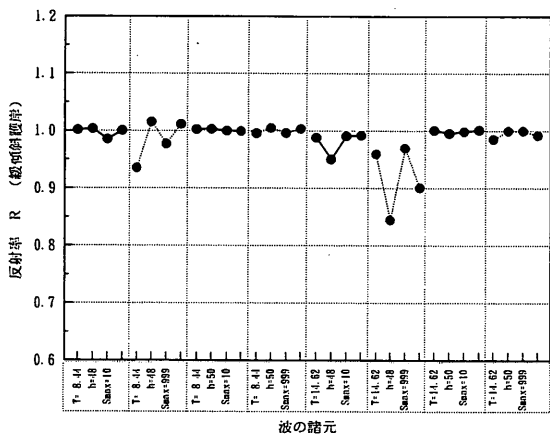


図-27 越波水の採水状況



(1) 直立護岸の場合



(2) 緩傾斜護岸の場合

図-29 護岸の反射率の測定結果

20°である。方向関数のピークが現れる角度は20°で、目標値と一致している。ピーク値は $S_{max}=100$ で示されるものよりも高く、波のエネルギーが $\theta=20^\circ$ に集中していることがわかる。しかし、単一方向不規則波の理論上の S_{max} は無限大になることから考えると、水槽内では単一方向不規則波として造波しても、護岸からの反射波、あるいは造波板が離散的になっており完全に連続な波峰線が現れないこと等の原因のために、造波された波は方向集中度の高い多方向不規則波としての性質を有していることがわかる。

図-32は、斜め主波向の多方向不規則波を造波した場合の $S_{max}=25$ を目標とする方向スペクトルの解析結果を示す。ピーク周波数近傍では、方向関数のピークは $\theta=20^\circ$ 付近に出現し、波向についてはほぼ目標とする方向へ造波が行われている。ピーク値は $S_{max}=10$ と25の理論値の

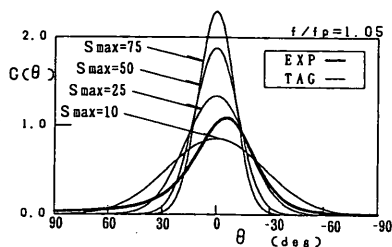


図-30 実験波の方向関数の解析結果 ($\theta_p=0^\circ$, 目標 $S_{max}=25$ の場合)

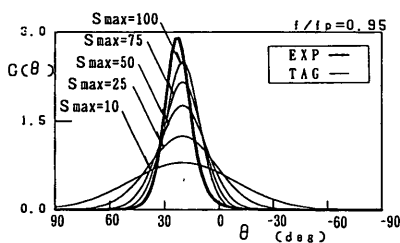


図-31 実験波の方向関数の解析結果 ($\theta_p=20^\circ$, 単一方向不規則波の場合)

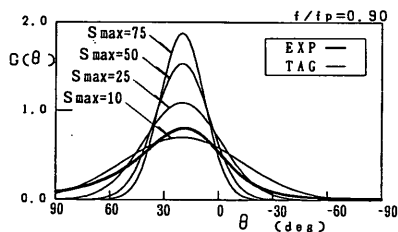


図-32 実験波の方向関数の解析結果 ($\theta_p=20^\circ$, 目標 $S_{max}=25$ の場合)

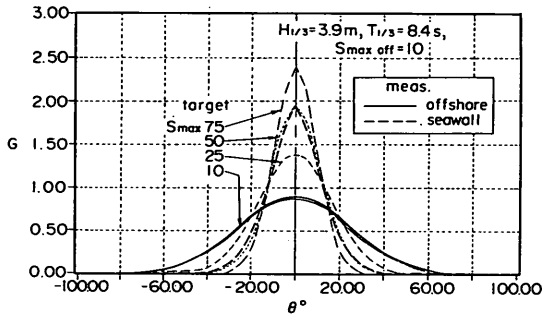
間に位置しており、目標値より低くなっている。

以上のことから、本実験で造波した多方向波は、主波向は目標値と一致しているが、方向集中度は目標値より若干低くなっていることがわかる。解析結果から考察すると、 $S_{max}=25$ を入力値として造波した波の方向集中度は $S_{max}=20$ で表現できる。 $S_{max}=10$ で造波した波の方向集中度は目標値とほぼ等しいとみなすことができた。

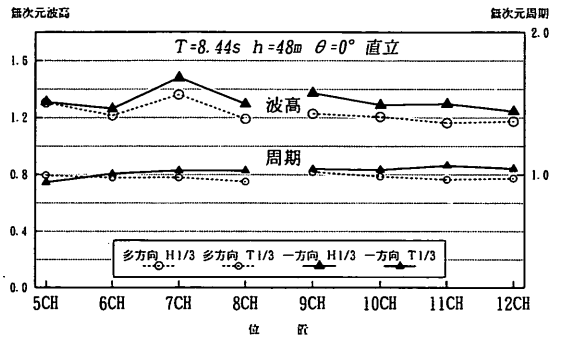
なお、沖合で多方向性を有する波は、海底床上の屈折のために護岸前面で方向集中度が増加する。本実験において、造波装置前面で $S_{max}=10, 20$ とした場合の護岸前面の波の方向集中度は、エネルギー平衡方程式(高山ら, 1991)の計算に従って求めることができる。実験で用いた斜面模型を計算領域として、造波機位置を入力境界として計算をした結果の一例を図-33に示す。なお、計算

表一 二 エネルギー平衡方程式による護岸位置における方向集中度の推定

	WAVE CONDITION						
	OFFSHORE BOUNDARY				SEAWALL LINE		
	$H_{1/3}$ (m)	$T_{1/3}$ (s)	θ_p ($^\circ$)	S_{max}	$H_{1/3}$ (m)	θ_p ($^\circ$)	S_{max}
CASE-1	3.93	8.44	0	10	3.00	0	50
CASE-2	3.93	8.44	20	10	2.98	7	40
CASE-5	3.94	8.44	0	10	3.46	0	40
CASE-6	3.94	8.44	20	10	3.43	8	40
CASE-9	3.66	14.62	0	20	3.57	0	125
CASE-10	3.66	14.62	20	20	3.55	7	125
CASE-13	3.65	14.62	0	20	4.09	0	125
CASE-14	3.65	14.62	20	20	4.07	9	125



図一三 エネルギー平衡方程式で推定した護岸前面の方向関数 ($\theta_p = 20^\circ$, $S_{max} = 10$ の場合)



図一四 斜面上の無次元波高と周期の分布

では護岸は消波境界とし、護岸からの反射波の影響は計算していない。図では、エネルギーのピーク周波数における方向関数の分布形を、入力境界および護岸位置で示したものである。また比較のために、 $S_{max} = 10, 25, 50, 75$ の理論分布形を示した。入力境界では方向分布関数は $S_{max} = 10$ で示したものと一致する。水深が浅くなると屈折効果により波の方向集中度が上昇し、図に示すように護岸位置では $S_{max} = 50$ の理論分布形と等しくなる。したがって、護岸前面での波の方向分布性を示すパラメーター S_{max} の値は50とみなすことができる。

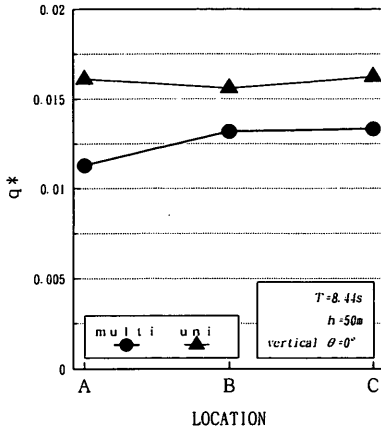
表一は、本実験で用いた波の造波機位置での条件および護岸位置での条件を計算した結果をまとめたものである。表の入力条件(OFFSHORE BOUNDARY)における $H_{1/3}$ は、換算沖波波高 H'_0 に造波機位置での浅水係数 K_s を掛けた値で、造波目標値である。護岸位置(SEAWALL LINE)の $H_{1/3}$ 、 S_{max} および θ_p がエネルギー平衡方程式で求められた有義波高、方向集中度パラメーターおよび主波向

である。したがって、沖合で S_{max} が10程度の場合は、水深4～6mの護岸前面では、 S_{max} は40～50程度となり、 S_{max} が20程度の場合には、 $S_{max} = 125$ 程度で示される方向集中度の高い波となる。沖合で $\theta_p = 20^\circ$ で斜め入射した場合でも、護岸位置では $\theta_p = 8^\circ$ 程度になり、直入射との差は小さくなる。

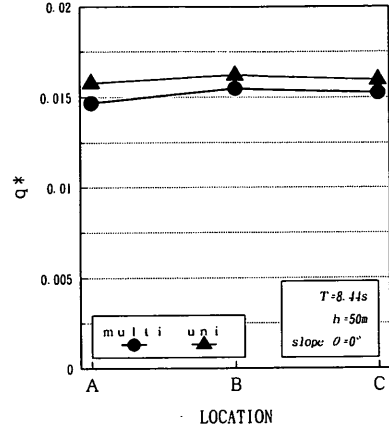
3.2 実験結果と考察

(1) 護岸前面の波高分布

図一四は、護岸前面および斜面部での無次元波高と無次元周期分布を示したものである。無次元波高は、各測定の波高値を入射波分離計算で得られた入射波高で除したもので、1.0より大きくなっており、これは反射波が共存しているためである。同水深位置で比較すると、波高の違いはあまり見られず、単一方向不規則波の場合5CH～8CHで1.3～1.6、10CH～12CHで1.3～1.4であった。多方向不規則波の無次元波高は、対応する単一方向不規



(1) 直立護岸の場合



(2) 緩傾斜護岸の場合

図-35 測定点A, B, Cの越波量の変化

則波のケースより0.1~0.2程度下回った。水槽横手方向に波高比の差がないことから、ほぼ一様な波が水槽内に形成されていると言える。無次元周期は測定周期を入射波周期で除したもので、単一方向不規則波、多方向不規則波ともに斜面の全域で1.0程度となっており、周期の変化はみられなかった。

(2) 越波流量の平面分布

図-35は、A, B, Cの3点の測定箱で計測された直立護岸および緩傾斜護岸での越波流量の一例を示す。(1)が直立護岸、(2)が緩傾斜護岸の場合である。縦軸に無次元越波流量、横軸に測定箱の位置を表している。無次元越波流量は、測定した越波流量 $q(\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec})$ を用いて $q^*=q/\sqrt{2gH_0^3}$ で計算した。図中の▲印が単一方向波での越波流量を示し、●印は、多方向不規則波での実験結果を示している。各点の越波流量を比較すると顕著な違いは見られない。他のケースについても同様であった。したがって、有効造波領域内であれば測定越波量の場所的な変化は小さくほぼ一様な結果が得られることがわかった。しかし、緩傾斜護岸の一部のケースでは、A, B, Cの場所的な差が大きいものも見受けられた。これは、緩傾斜護岸の模型では、形状や微妙な取付法が各点における越波量に影響し、測定値のばらつきが大きくなったためと思われる。実験中、波を作用させると緩傾斜護岸の法面を波が翹上するようなケースが見られた。

(3) 単一方向不規則波と多方向不規則波の越波流量の比較

図-36は、単一方向波と多方向波の越波流量の比較を

示す。図は、測定点Bにおける多方向波の流量を単一方向波のそれで除した無次元越波流量比を示す。直立護岸では、多方向波を作用させた場合の流量が単一方向波を作用させた場合に比べて、0.70~0.84倍となり、平均0.78倍であった。緩傾斜護岸の場合は、0.34~1.00倍となり、平均で0.80倍であった。緩傾斜護岸においては、実験結果がばらついているが、全体的に見て、単一方向波の場合に比較して、多方向波の場合は、2割~3割程度の越波流量の低減を期待することができる。緩傾斜護岸の場合に実験結果が大きくばらつく原因は、模型の構造にあると思われる。本実験では傾斜ベニヤ板に粗度を与えるために穴をあけている。したがって、天端高に比較して波高が小さい場合には翹上の間に波が穴の中に吸

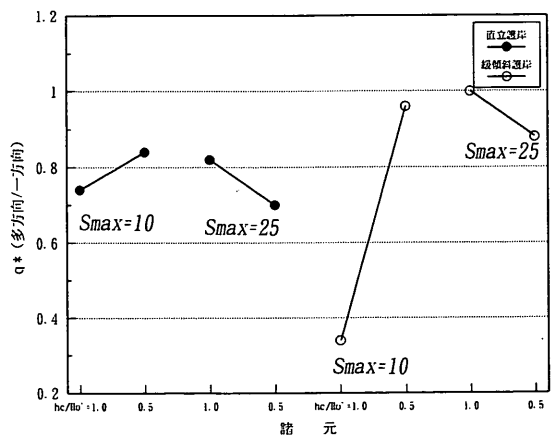


図-36 海浜護岸における多方向不規則波と単一方向不規則波の越波流量比

取られ、越波量が極端に小さくなるものと思われる。そこで、図中の $h_c/H_0' = 1.0$ の場合に越波量が小さくなってしまい、ばらつきが大きくなる。

直立護岸の $S_{max}=25$ は、実際には護岸前面では波の方向集中度が $S_{max}=125$ 程度になっているため、一方向波との差は小さいと思われたが、実験結果を見ると一方向波の場合と同様に、多方向波の越波量は単一方向波の場合に比べて、0.7~0.8倍となっている。

(4) 数値計算による推定法

次に、2. で考察した数値計算法が適用できるかどうかを検討した。数値計算では、一様水深を仮定しているため、厳密には海岸護岸には適用できない。また、緩傾斜護岸に対する推定法は開発していない。しかし、近似的に護岸前面の波の条件を用いて推定した場合に、実験値とどの程度合うかを検討することにした。計算では、エネルギー平衡方程式を用いて得られた護岸前面の入射波の条件を入力条件として用いる。護岸前面の水深は十分深く波は碎波しないものとする。もちろん水深によっては波は碎波するが、それはエネルギー平衡方程式法の計算において考慮する。

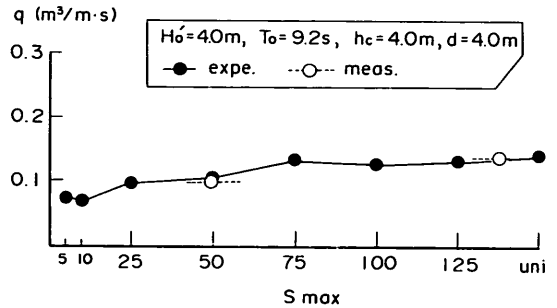
図-37は、直立護岸において波が直入射する場合の推定値(expe.)と実験値(meas.)を比較したものである。図の(1)および(2)はそれぞれ $h_c = 4$ および 2 mの場合を示す。実験ケースによって波高は若干変化するので、計算の入力波高もケースによって実験値と合うように変化させている。図の縦軸は、変化がよくわかるように平均越波流量 q ($m^3/m \cdot sec$)で表されている。横軸は計算で用いた S_{max} で、5から125まで変化させた。また、'uni'として単一方向不規則波の結果を示した。計算越波流量は、大水深直立護岸の場合と同様に方向集中度が大きくなるにしたがって増加する。多方向不規則波の実験値は、護岸前面の推定 S_{max} にしたがって、 $S_{max}=40$ または 50 に示されている。実験で造波した単一方向不規則波は、完全な一方向性を有するのではなく、わずかに多方向性を有するので、図-37においては $S_{max}=125$ よりわずかに方向集中度が高いとして示した。図-37(1)では、実験値と計算値はよく一致し、エネルギー平衡方程式法と大水深護岸越波モデルを組み合わせた本近似計算法で、海浜護岸の越波量を推定することができることがわかる。図(2)の場合には、単一方向波の実験結果は推定値よりも大きくなっているが、その差は $0.05(m^3/m \cdot sec)$ 以下で、ほぼ推定が可能であることがわかる。

なお、図-37に示されるように、 S_{max} が75以下では、越波量は方向集中度の上昇にしたがって越波量は線形的

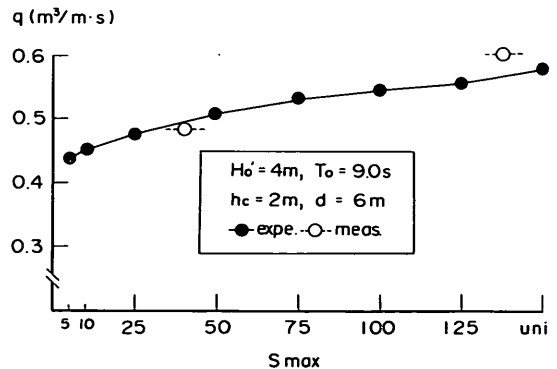
に増加する。しかし、 S_{max} が100以上では、増加の割合が若干小さくなり、漸近的に単一方向不規則波の推定値に近づくことがわかる。したがって、計算では S_{max} が100以上の場合には、多方向不規則波として計算した結果と単一方向不規則波として計算した結果はほぼ等しくなり、すべて単一方向不規則波として近似して計算して構わないと言える。

図-38は、入射境界での S_{max} が20の場合の直立護岸の越波量の推定値(meas.)と実験値(expe.)を示す。この場合には、護岸前面の S_{max} が125になり計算値は単一方向波の場合とほぼ同一になるので、単一方向波の計算結果だけを示した。実験値と計算値は、天端高が2 mおよび4 mの場合もよく一致し、本近似計算法によって護岸越波量が推定できることがわかる。

実験では、 $S_{max}=125$ の場合と単一方向波の場合でも差が生じ、多方向波の越波量が単一方向波のその0.7~0.9倍に減少する原因としては、護岸前面の方向集中度が推定値よりも低くなっているためと思われる。この原因としては、造波機の幅が30 mで短く、それより外側ではエネルギーが供給されないため、端部の方向集中度が



(1) $h_c=4m, T_{1/3}=9s$ の場合



(2) $h_c=2m, T_{1/3}=9s$ の場合

図-37 直立海浜護岸における越波量の推定値と実験値の比較 ($\theta_p=0^\circ$)

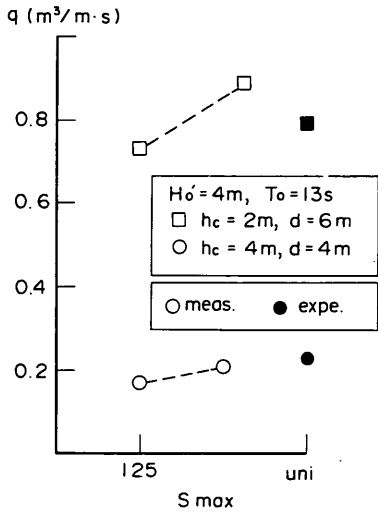
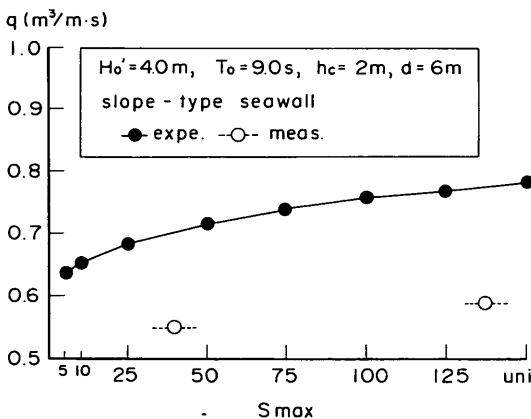


図-38 $T_{1/3}=13s$ の場合の直立海浜護岸における越波量の推定値と実験値の比較

中央部と異なってしまふこと、護岸からの反射波の影響があること、波の非線形性の影響が浅海部では大きくなることなどが挙げられる。本実験では護岸前面の方向スペクトルを測定していないので推定値との差は議論しにくい。以上のことから、海岸護岸であっても波の多方向性が強ければ、単一方向波の越波量に比べて、護岸越波量が減少すること、そしてその現象の割合は護岸前面の方向集中度によって変化すること、および、その現象の割合を数値計算によって推定できることが明らかとなった。

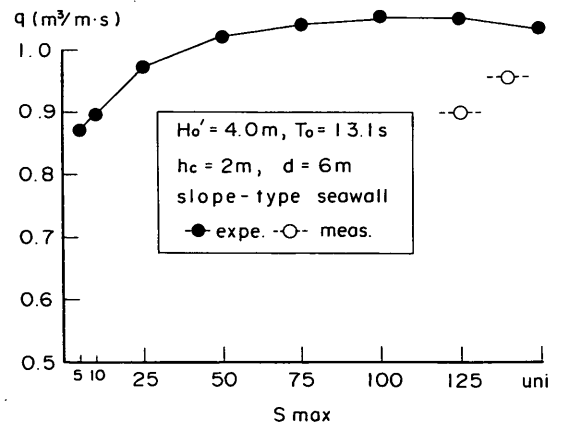


(1) $h_c=2m, T_{1/3}=9s$ の場合

図-39は緩勾配斜面護岸を対象とした計算結果と実験結果の比較を示す。緩勾配斜面護岸の計算では、高山ら(1982)が示した換算天端高係数1.1を用い、修正天端高を1.1で除して再度修正した天端高で越波量を求めた。図-39(1)および(2)はともに $h_c=2m$ の場合で、 $T_{1/3}$ が(1)で9s,(2)で13sである。直立護岸の場合と同様に、方向集中度 S_{max} が増加すると、越波量 q^* も増大する。 S_{max} が100以上ではその増加の割合が緩やかになり、(2)に示すように、単一方向波と計算結果がほとんど相違しなくなる。白丸は実験結果であり、直立護岸の場合と比較すると一致度は低下する。計算値はオーダーとして良好な推定値を与えるものの若干過大である。緩傾斜護岸の場合に推定誤差が比較的大きくなるのは、緩傾斜護岸の換算天端高係数が大きいためではないかと思われる。本実験で用いた模型は縮尺が小さく、護岸構造による換算天端高係数の相違を議論することは困難で、今後引き続き大縮尺模型を用いて護岸構造による越波量の相違を検討していく必要がある。

図-40は、沖入射角が 0° の場合において、直立および緩傾斜護岸の越波量の本計算モデルによる推定値と実験値を全ケースについて比較したものである。直立護岸に関しては、越波量が小さい場合でも計算値と推定値はよく一致し、本計算モデルの適用性が高いことがわかる。緩傾斜護岸の場合には、若干過大計算になる。

今回検討したケースでは、斜め入射の場合にも護岸位置における入射波向 θ_{wall} は 8° となり直入射の場合と変化しない。計算で $\theta_{wall}=8^\circ$ とした場合には、計算結果も直入射の場合とほとんど同じである。したがって、設計等で本計算を用いる場合には $\theta=0^\circ$ の結果を用いて、 $\theta=$



(2) $h_c=2m, T_{1/3}=13s$ の場合

図-39 緩傾斜海浜護岸における越波量の推定値と実験値の比較 ($\theta_s=0^\circ$)

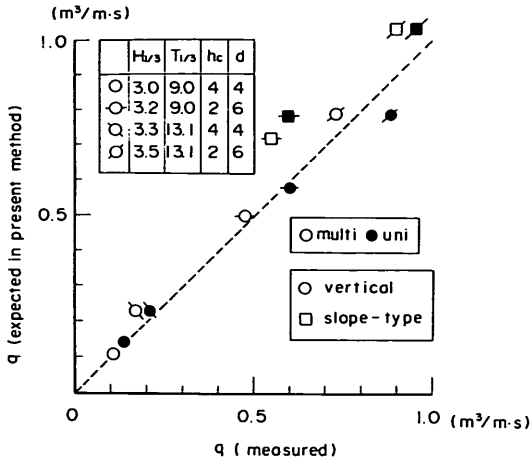


図-40 海浜護岸における越波量の推定値と実験値の全体的な比較

8°の場合を推定しても問題はないと思われる。ここでは、 θ_{wall} が0°でない場合に詳細に計算すると、どの程度差が生じるかを検討した。

図-41は、 $\theta_{wall} = 0$ および8°の場合の実験値(meas.)と計算値(expe.)の比較をしたものである。実験値も計算値も $\theta_{wall} = 0°$ に比べると $\theta_{wall} = 8°$ の場合には越波量はわずかに減少するが、その差は非常に小さい。したがって、浅海域に設置され護岸の場合には、斜め入射の場合でも屈折によって護岸前面の波向は0°に近くなり、 $\theta_{wall} = 0°$ として推算を行えばよいことが確認できた。

(5) 従来の推定法との比較

これまでの、護岸越波量は合田ら(1975a)が示した直

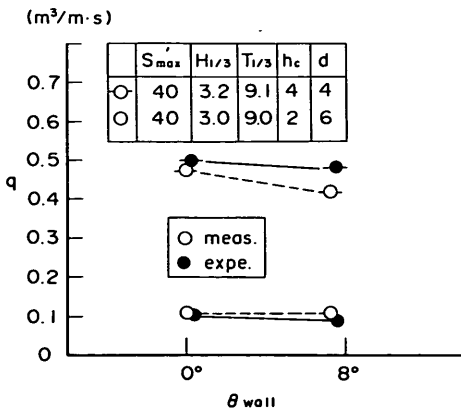


図-41 護岸位置での主波向が直入射と異なる場合の越波量に対する影響

立および消波護岸の推定法あるいは、それを改良した高山・永井ら(1982)の近似計算プログラムによって求められてきた。この推定法は一定勾配の2次元水路模型実験結果の基にしているため、斜め入射、多方向不規則波および一様海底の場合について適用できない。ただし、直入射の単一方向不規則波については適用可能である。そこで、直入射の単一方向不規則波のケースについて、本研究で提案した時系列波形を用いる計算法と合田式の計算結果を比較した。

図-42の q_1 は、本近似計算モデル、 q_2 が合田式による計算結果を示す。また、図の凡例のVは直立護岸、Sが緩傾斜護岸の場合を示す。すべてのケースについて、本近似計算法の結果が合田式によるものより大きくなっている。特に、緩傾斜護岸における推定値間の誤差が大きくなる傾向にある。これは、合田式においても換算天端高係数で修正した天端高を直立護岸の図表に当てはめるため、換算天端高係数の誤差等の影響がそのまま計算結果に影響するためである。

図-43は、直立護岸における実験値と合田式による推定値を比較したものである。 θ_p は0°である。単一方向波と多方向波の差よりも推定値と実験値の差が大きくなり、合田式による推定値は、実験値を若干過小評価していることになる。合田式による推定値が、特に越波量が小さいときに実験値あるいは現地観測値より小さくなる傾向があることは、関本ら(1993)も指摘している。実験値と推定値との誤差が大きく、多方向波と一方向波の実験値との差を評価できないので、波の多方向性による越波量の変化を検討する際には、本計算モデルによる検討が必要である。

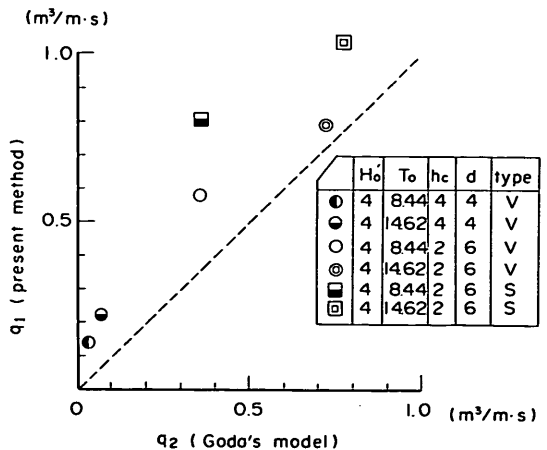
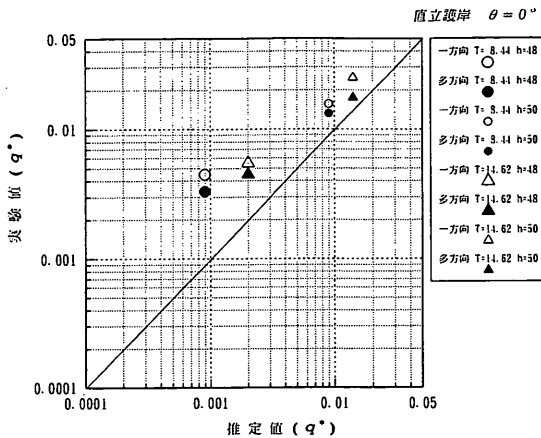


図-42 数値モデルと合田式による推定越波量の比較



図一43 合田式の推定越波量と実験値の比較

4. まとめ

本研究では、波の多方向性が顕著になる大水深海域における護岸越波量を検討するために、多方向不規則波を用いた模型実験とシングルサンメーション法を応用した数値実験によって、多方向不規則波の越波特性を調べた。さらに、浅海域に設置された直立および傾斜護岸においても沖波の多方向性の影響が現れるかどうかを検討した。

大水深海域の直立護岸の越波特性について検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 多方向不規則波を形成する単一方向斜め入射波の越波量は入射角 θ が $0 \sim 7.5^\circ$ で最大となり、角度が大きくなると越波量は減少する。角度が 30° 以上の場合には大きく変化しない。
- (2) 多方向不規則波の護岸越波量は、実験結果を平均すると、単一方向不規則波のその約7割として評価できる。
- (3) 斜め入射波の実験結果をもとに提案した修正天端高係数を用いて、シングルサンメーション法で計算した護岸前面の水位変動から越波量を求める数値モデルを提案した。本モデルの計算結果は、斜め入射単一方向不規則波および多方向不規則波の実験結果とよく一致し、多方向不規則波の推定法として用いることができる。
- (4) 主波向が 0° より大きくなり 30° 程度になると、波の多方向性が越波量に及ぼす影響は小さくなり、単一方向波との差が小さくなる。

浅海域の海浜護岸を対象として模型実験を実施した結果、以下の結論が得られた。

- (1) 多方向不規則模型実験において、有効造波領域内に測定点があれば、同一の越波量が測定できる。
- (2) 直立護岸の場合には、浅海域においても多方向不規則波の越波量は、単一方向波のその約7～8割程度に減少する。傾斜護岸の場合には、実験値のばらつきが大きいが、平均して8割程度に減少する。
- (3) 海浜護岸の場合には、エネルギー平衡方程式を用いて護岸前面の波浪条件を求め、それを前出の数値モデルに適用することによって、多方向不規則波の越波量を推定できる。

本研究の成果は、近年各地で計画されている沖合い人工島や空港島の護岸の越波量を推定することに用いることができる。その際は対象海域の波の多方向性が正しく評価されていなければならないので、今後も波浪観測体制および技術の拡充を目指すべきである。海域の発生波の多方向性が不明な場合には、本研究で提案した数値モデルにおいて、作用波を単一方向不規則波として越波量を求めておけば安全側の推定値が得られる。

本研究の遂行にあたっては、水工部波浪研究室長鈴木康正氏より適切な助言を賜った。また、波浪研究室河合弘泰研究官からデータ解析法の指導をいただいた。上記の方々へ深く感謝するものである。

(1995年11月28日受付)

参考文献

- Franco, C. (1995): 3-D wave overtopping on caisson breakwaters, *Proc., 26th Congress of IAHR*, Vol.5, pp.43-48.
- Takayama, T. (1982): Theoretical Properties of Oblique Waves Generated by Serpent-type Wave-makers, *Rept. of Port and Harbour Research Institute*, Vol.21, No.2, pp.3-48.
- Takayama, T. and T. Hiraishi (1989): Reproducibility of directional random waves in laboratory wave simulation, *Rept. of PHRI*, Vol.28, No.4, pp.3-24.
- Hiraishi, T. and T. Takayama (1993): A new approach to extension of effective test area in multi-directional wave basin, *25th Congress, IAHR*, C-3-3, pp.88-95.
- Hiraishi, T. (1995): Wave force and overtopping rate in directional sea, *Wave Generation' 95*, Yokohama, pp.160-174.
- 合田良美 (1970): 防波護岸の越波流量に関する研究, *港湾技術研究所報告*, Vol.9, No.4, pp.3-41.

合田良美・岸良安治・神山豊(1975a) ; 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, Vol.14, No.4, pp.3-44.

合田良美・鈴木康正(1975b) ; 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技研資料No.155, 33p.

合田良美・鈴木康正・岸良安治・菊池 治(1976) ; 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港湾技研資料, No.248, 24p.

合田良美(1980) ; 波高計群による方向スペクトルを用いた反射波推定法の検討, 港湾技術研究所報告, Vol.19, No.3, pp.37-70.

合田良美(1987) ; 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質, 海岸工学論文集, 第34巻, pp.131-135.

関本恒浩・国栖広志・清水琢三・京谷修・鹿島遼一(1992) ; 人工島防波護岸の短時間越波特性について, 海岸工学論文集 第39巻, pp.581-585.

高山知司・永井紀彦・西田一彦(1982) ; 各種消波工による越波流量の減少効果, 港湾技術研究所報告, Vol.21, No.2, pp.151-205.

高山知司・永井紀彦・西田一彦・関口忠志(1984) ; 斜め入射不規則波を用いた護岸の越波特性実験, 海岸工学論文集, Vol.31, pp.542-546.

高山知司・平石哲也(1987) ; サーベント型造波機による発生波の特性に関する実験-大水深海洋構造物実験場内の切れ波造波装置-, 港湾技術研究所報告, Vol.26, No.3, pp.37-83.

高山知司・平石哲也・立石義博(1989) ; 多方向不規則波の造波信号発生法に関する検討, 海岸工学論文集, 第36巻, pp.153-157.

高山知司・池田直太・平石哲也(1991) ; 砕波および反射を考慮した波浪変形計算, 港湾技術研究所報告, Vol.30, No.1, pp.21-67.

橋本典明(1992) ; 海洋波の方向スペクトルの推定法に関する研究, 港湾技研資料, No.722, 118p.

橋本典明・永井紀彦・浅井 正・菅原一晃(1993) ; 海洋波の方向スペクトルの推定における最大エントロピー原理法 (MEP) の拡張, 港湾技術研究所報告, Vol.32, No.1, pp.3-25.

平石哲也(1991) ; サーベント型造波装置の有効造波領域の拡張法に関する検討, 海岸工学論文集, Vol.38, pp.126-130.

平石哲也(1992) ; 多方向波の発生とその応用に関する研究, 港湾技研資料No.723, 176p.

平口博丸・池野正明・井上素行・柏木洋之・樋口豊久(1991) ; 越波直後の伝達波の方向スペクトルを考慮した港内波の算定法, 海岸工学論文集, Vol.38, pp.531-535.

森屋陽一・菊地正行・松立博樹・水口優(1995) ; 浅海域における周期波のマッハ反射について, 海岸工学論文集 第42巻, pp.6-11.

主要記号表

a_n, b_n, c_n	: K を計算するための係数
a_n	: n 番目の成分波の片振幅
C	: 越流係数 ($=C_0/\sqrt{2g}$)
C_0	: 越流に関する実験係数 ($=0.3$)
d	: 護岸前面の水深
f	: 周波数
f_p	: ピーク周波数 ($=1/1.05T_{1/3}$)
g	: 重力加速度 ($=9.8\text{m/s}^2$)
G_0	: 方向関数を標準化する係数
$G(\theta; f)$: 方向関数
$G(\theta)_p$: 方向関数のピーク値
h_c	: 護岸天端高
h_c^*	: 修正天端高
h_{co}	: 実際の護岸天端高
H	: 波高
H_0	: 沖波波高
H_0'	: 換算沖波波高
$H_{1/3}$: 有義波波高
k_n	: n 番目の成分波の波数
K	: 護岸前面の波の非線形性による波高増大を考慮する係数
K_s	: 浅水係数
m_0	: 波の総エネルギー
n	: 成分波の番号
N_s	: 成分波の総数
N_B	: 計算に用いる越波測定箱の総数
q	: 護岸越波流量 ($\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$)
q^*	: 無次元越波流量 ($=q/\sqrt{2gH_0^3}$)
q_i	: i 番目の越波測定箱の越波流量
s	: 方向分布特性を表す指数
$S(f)$: 周波数スペクトル密度
$S(f_n; \theta_n)$: 方向スペクトル
S_{max}	: 方向集中度パラメーター
t_0	: 越波量計算時間
$T_{1/3}$: 有義波周期
x	: 護岸面に平行な座標

- y : 護岸面に垂直な座標
 β_n : n 番目の成分波に関する修正天端高
 δf_n : n 番目の代表周波数間隔
 $\delta\theta_n$: n 番目の波向間隔
 ε_n : n 番目の成分波の位相
 θ : 波向角度($^\circ$)
 θ_n : n 番目の成分波の波向
 θ_0 : 主波向
 λ_n : n 番目の成分波に対する越波量補正係数
 $\xi(x,t)$: 護岸前面の水位
 σ_n : n 番目の成分波の角周波数