

多方向不規則波の護岸越波流量の数値計算

平石 哲也*・金澤 剛**・榎本 達也**・佐藤 一央***

1. ま え が き

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。護岸の越波流量を算定し、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次元水路を用いた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)。しかし、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いるため、筆者ら(平石ら, 1994)は、浅海域の護岸を対象として、多方向不規則波の越波流量を測定した。その結果、単一方向不規則波に比較すると多方向不規則波の場合には越波流量が低下する現象が見られた。沖合の大水深海域では波の方向分散性がより大きくなるため、沖合へ展開されつつある人工島や新しい港湾施設に建設される護岸においては、外力となる波の多方向性の越波流量に及ぼす影響がより大きくなると考えられる。筆者らは、前述の実験報告書において護岸前面の水位変化から多方向不規則波の越波流量を算定するモデルを提案したが、大水深護岸を用いた模型実験による検証が不十分であった。そこで、本研究では模型実験により数値計算式中の係数を決定し、計算モデルの改良と検証を図った。

2. 数値計算法とその適用性

(1) 数値計算法

計算を簡単にするために、海底は一樣で勾配がなく、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、護岸面に直角に侵入する波(直方向波)の進行方向が 0° となるように角度を定義する。完全反射を仮定すると、護岸前面の多方向波の水位変動は次式で示される。

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

ここで、 $\xi(x, t)$ は、時間 t における護岸前面の水位である。添字 n は、 n 番目の成分波の諸量であることを示し、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て多方向波の水位変動を計算した。 $a_n, k_n, \theta_n, \sigma_n, \epsilon_n$ 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。 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。

$$K = \xi/H = \min\{[1.0 + a_0 H/d + b_0 (H/d)^2 / K_{s0}], c_0\} \\ (a_0 = 1.0, b_0 = 0.8, c_0 = 10) \cdots \cdots (2)$$

K_{s0} 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 $\{ \}$ 中の最小値を作用することを示す。 H は波高、 d は護岸前面の水深である。本計算においては、水深が深く碎波等の影響は小さいと仮定して、補正係数 K を次式で与える。

$$K = \xi/H = \min\{[1.0 + a_0 H/d], c_0\} \\ (a_0 = 1.0, c_0 = 10) \cdots \cdots (3)$$

図-2に示すように水位 $\xi(x, t)$ が護岸の天端高 h_c を超えると、越流が生じ越波する。越波流量 $q(\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{sec})$ は、次式で計算できる。

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

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(1975a)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。

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、後述のような実験の結果、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ので、以下のように修正天端高を定めた。

$$h_c^* = \left[\sum_{n=1}^{N_s} \frac{S(f_n) \delta f_n}{m_0} h_{cn} \right] \cdots \cdots (5)$$

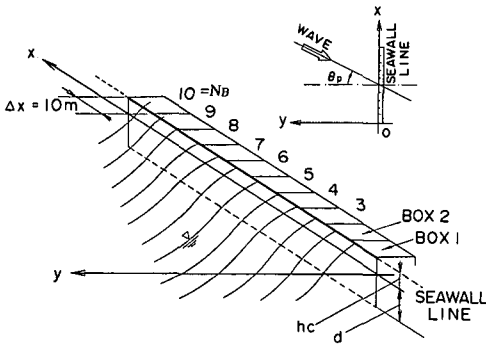
$$h_{cn} = \frac{h_{c0}}{\beta_n} \cdots \cdots (6)$$

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。 h_{c0} は、修正前の護岸天端高すなわち実の天端高であ

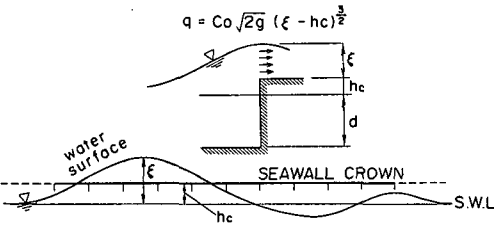
* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部

** 正会員 東洋建設(株)

*** 運輸省第二港湾建設局



図一1 計算の座標系と角度の定義



図一2 護岸越波の模式

る。

成分波の振幅 a_n は次式で求められる。

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

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；

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

ここで、 $S(f)$ ；周波数スペクトル、 f ；周波数、 $H_{1/3}$ ；有義波高、 $T_{1/3}$ ；有義波周期である。方向関数 $G(\theta)$ は、次式で示す改良光易型 (合田・鈴木, 1975b) を用いた；

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

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；

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

s は、波の方向分布特性を表す係数で、次式で表される；

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

ここでパラメータ $S_{\max}$ は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。

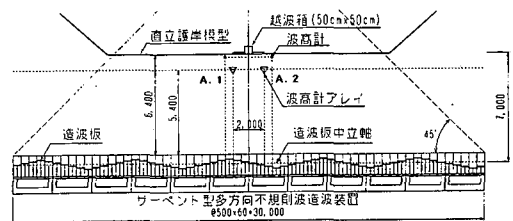
式 (1) で護岸前面の時間的な水位変動がわかると、式 (4) で単位幅、単位時間当たりの越波量 q ($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$) が計算できる。ここでは、図一1 のように護岸背後に幅 Δx の測定箱が N_b 設置してあるものと仮定して、一定時間 t_0 に各測定箱に溜まる総越波量 Q (m^3) を計算した。 Q を t_0 と Δx で除すと、各測定箱における平均越波量 q_i ($\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$) が計算できる。対象とする護岸の越波量 q は、各測定箱で求められる q_i の平均値として次式で計算する。

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

(2) 検証実験の内容

図一3 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 40 m、縦 20 m の平面水槽で、横壁に沿って、幅 50 cm 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。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、6.4 m 離して設置した。護岸模型の総延長は約 18 m 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 は、波高計アレイ設置点で、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できる。護岸模型の中央部には幅 50 cm 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 ($\text{cm}^3/\text{s} \cdot \text{cm}$) を測定した。

実験では、縮尺 1/100 として、現地の護岸水深が約 40 m 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 44 cm (現地で 44 m) とした。なお、以下



図一3 護岸模型と造波装置の配置

の記述では、波高、周期等を現地換算値で示している。水深は、現地換算値で 38 m で一定とした。護岸の天端高 h_c は、6 および 8 m の 2 種類とした。それぞれの天端高について (i) 斜め単一方向不規則波実験と (ii) 多方向不規則波実験を実施した。(i) および (ii) において、作用波の有義波高 $H_{1/3}$ は 6.0 および 8.0 m とした。有義波周期 $T_{1/3}$ は 11.3 s および 14.1 s 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_p 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。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。なお、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、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 s 後から 120 s 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。

護岸模型のない状態で測定した実験波から解析した方向関数のピークの値は、目標値よりも低かった。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。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。

(3) 実験による最適計算条件の設定

実験結果の整理にあたっては、越波流量 q ($m^3/m \cdot sec$) を無次元越波流量 $q/\sqrt{2gH_0^3}$ ($=q^*$) に換算して示した。ここで、 H_0' は換算沖波波高である。

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 (Hiraishi, 1995)。また、越波測定箱の総数、計算時間によっても計算結果が異なると思われる。そこで、まず計算条件を変化させた場合の越波流量の変化を調べ、最適計算条件を設定した。

図-4 は成分波数 N_s を変化させた場合の無次元越波流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で多方向不規則波のクロススペクトルを推定するためには、 N_s は 450 以上でなければならない (Takayama and Hiraishi, 1989) が、図-4 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。ここでは、複数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

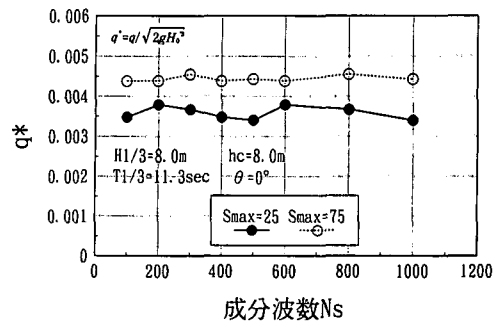


図-4 成分波数による無次元越波流量の変化

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。

次に、成分波数は N_s を 300 で固定して、実機スケールの総計算時間 t_0 を変化させた場合の無次元越波量を調べた。計算時間 t_0 が 20 min 以上になると計算結果は一定になり、 t_0 を 60 min に大きくしても q^* は変化しなかった。本計算では、ケースによっては安定性が低下する場合も考慮して、 t_0 は 30 min を用いた。

さらに、 $N_s = 300$, $t_0 = 30$ min として想定越波測定箱の総数を変化させた場合の q^* の変化を調べた。その結果、箱の総数が 10 以上の場合には、計算値が変化することはなく安定な結果が得られることがわかったので、本計算では、 $\Delta x = 10$ m, 越波箱の数 N_b として 10 を採用した。

次に、式(4)における係数 C_0 の値を決定するために、 C_0 を変化させて計算値と実験値の比較を行った。図-5 は $\theta_p = 0^\circ$ の単一方向不規則波を対象とし、 $h_c = 6$ m, $H_{1/3} = 6$ m の場合の護岸越波流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場合には、縦軸の値が 1 になる。合田 (1975) が用いた $C_0 = 0.5$ の場合には短周期および長周期の場合も計算値は実験値の 1.5 倍以上になる。 $C_0 = 0.3$ の場合には短い周期の場合に 1.3 倍程度、長い周期の場合には比が 1 となる。周期に

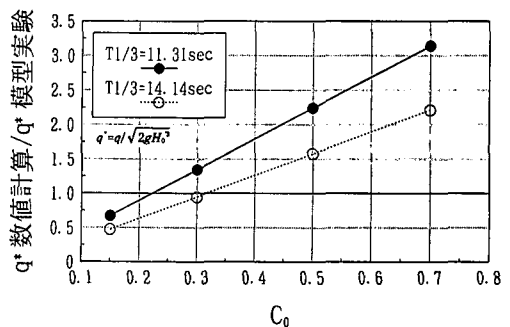


図-5 係数 C_0 による越波流量の推定誤差の変化

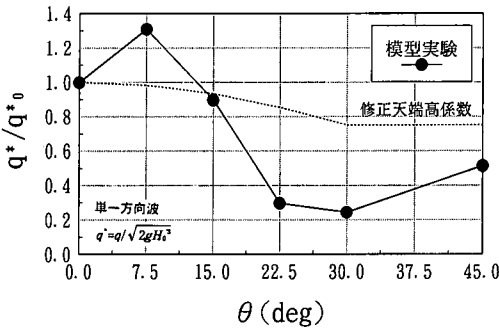


図-6 波向による越波流量と修正天端高係数の変化

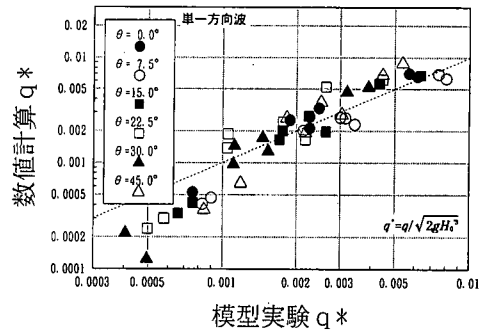


図-7 斜め単一方向波の実験および推算越波量の比較

よって係数を変化させると計算が煩雑になるため、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。

最後に、斜め入射の単一方向波の角度による越波量の変化を調べて、修正天端高係数を決定した。図-6に修正天端高係数の決定法を示す。図の実線が斜め単一方向不規則波の無次元越波流量 q^* の変化を示す。ただし、縦軸の数値は、斜め入射波の場合の直入射波の場合に対する無次元越波流量の比を示している。そして、図の数値は、全実験条件の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である。概して、波向が大きくなると越波流量が小さくなると言える。しかし、 $\theta=45^\circ$ のケースでは $\theta<45^\circ$ より越波流量が大きくなっている。ただし、 $\theta=0\sim15^\circ$ の無次元越波流量に比較すると $\theta=45^\circ$ の無次元越波流量は小さい。したがって、 θ が 30° 以上になると越波量はほぼ一定となるものとみなすことができる。また、 $\theta=7.5^\circ$ 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。ここでは、入射角が大きくなると徐々に越波量が減少することと、 $\theta>30^\circ$ では越波流量が一定とみなせることから、修正天端高係数の計算に次式を用

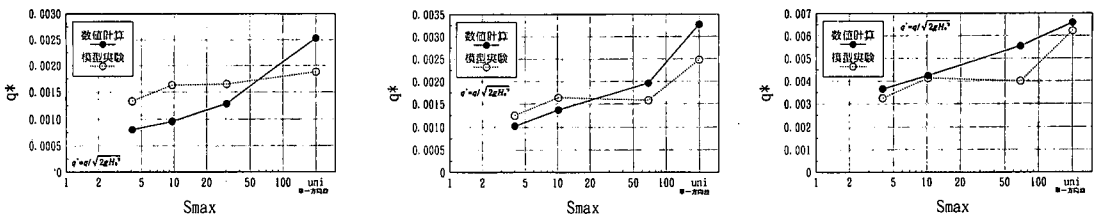
いた。

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

(4) 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-7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、入射角で記号を分けた。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。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与えたためである。 $\theta=30^\circ$ や 45° の場合は、越波量が小さい場合に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。

次に、多方向不規則波に対する計算結果を示す。図-8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 $H_{1/3}=6$ m, $T_{1/3}=11$ s, (2) が $H_{1/3}=8$ m, $T_{1/3}=11$ s, (3) が $H_{1/3}=6$ m, $T_{1/3}=14$ 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。単一方向波の場合にも検討したように、本計算結果は、越波量が大きい場合に、よく実験



(1) $H_{1/3}=6$ m, $T_{1/3}=11$ s, $h_c=6$ m (2) $H_{1/3}=8$ m, $T_{1/3}=11$ s, $h_c=8$ m (3) $H_{1/3}=6$ m, $T_{1/3}=14$ s, $h_c=6$ m

図-8 多方向不規則波の越波流量の実験値と推算値の比較

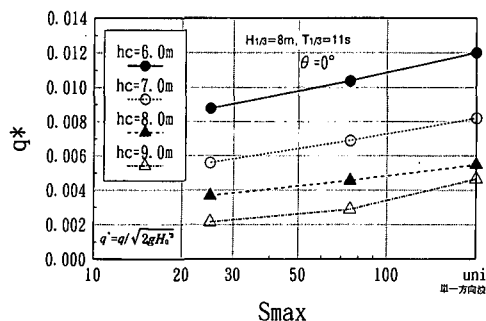


図-9 波の方向分散性に対する推定越波流量の変化

値と一致する。したがって(1)に比較すると、波高が大きい(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 $S_{max} = 4, 10$ 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。

4. 多方向不規則波の越波特性

ここでは、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-9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 を変化させて越波流量を計算した。無次元越波流量 q^* は、 h_c が小さくなるほど大きくなり、 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らずほぼ同じである。たとえば、 $h_c = 6$ m 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。 $h_c = 8$ m の場合には、 q^* は 0.005 から 0.0035 に減少する。概算すると、多方向不規則波の越波流量は単一方向不規則波のその 0.7 倍と見積もることができる。

図-10は主波向を変化させた場合の q^* の変化を示す。例として $h_c = 7$ m の場合を示す。図からわかるように、主波向 θ_p が大きくなると越波量は減少する。これは、直方向入射波に比べて、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、単一方向波と多方向波の越波量の差が、 θ_p が大きくなるにしたがって小さくなり、 θ_p が 30° になるとそ

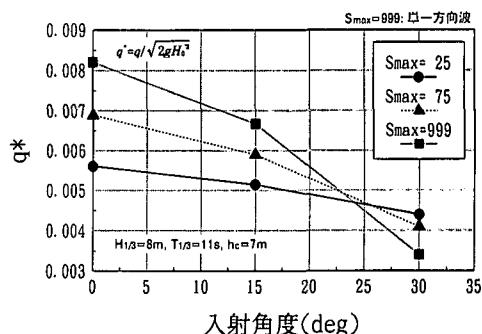


図-10 主波向に対する多方向不規則波の推算越波流量の変化

の差がほとんどなくなることである。すなわち、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。

参考文献

- 合田良美 (1970): 防波護岸の越波流量に関する研究, 港湾技研報告, Vol. 9, No. 4, pp. 3-41.
- 合田良美・岸良安治・神山豊 (1975 a): 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 (1975 b): 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, 33 p.
- 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.
- 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・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.
- 平石哲也・望月徳雄・鈴木康正 (1994): 護岸越波流量における波の多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 666-670.
- 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. (1995): Wave force and overtopping rate in directional sea, *Wave Generation '95*, Yokohama, pp. 160-174.