

不規則波に対する消波ブロック被害率の変動性

谷本勝利*・原中祐人**・山崎一雄***

1. ま え が き

消波ブロックは防波堤や護岸の被覆材として我が国では非常に多く用いられている。こうした消波ブロックの所要重量は Hudson 式を用いて算定するのが標準であるが¹⁾、これを適用するに際して重要な K_D の値については模型実験等に基づいて適切に定める必要がある。しかし、この種の実験では被害率等の結果が非常にばらつく。特に、不規則波の作用のもとでは、たとえ有義波諸元が同じであっても、波群によって最高波の現われ方等が異なるため、消波ブロックの被害率等はさらに変動することになり、確率変量として扱わなければ的確な判断はできない。また、近年各種の分野で実用化への努力が払われている信頼性設計手法²⁾の導入においても、現象の変動特性を明らかにすることがまず第一に重要である。そのため、本研究は直立壁の前面を被覆した消波ブロックの安定性について、不規則波による繰り返し実験を行い、被害率等の変動特性を明らかにするものである。

2. 実験の方法

(1) 実験水路

実験は全長 163 m、幅 1.0 m、深さ 1.5 m の半地下式の長水路で行った。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン形式で、入力信号に追随して不規則な波を発生させることができる。水路床は造波板位置から 115 m の区間が水平で、それから約 13 m 区間は 3/100 勾配、そのあとは 1/50 勾配の模型床である。堤体模型はこの 1/50 勾配模型床の上に設置するが、この部分は片面ガラス張り、側方からの観察が可能になっている。

(2) 模型および実験条件

堤体断面を図-1 に示す。水深 h は 39.7 cm、捨石マウンドの厚さは 5 cm、消波ブロックの法勾配は 1:4/3、マウンド勾配は 1:2 である。このようにマウンドの厚さを小さくしたのは消波ブロックの法面長をできるだけ長くとり、法先の影響を小さくするためである。図中、

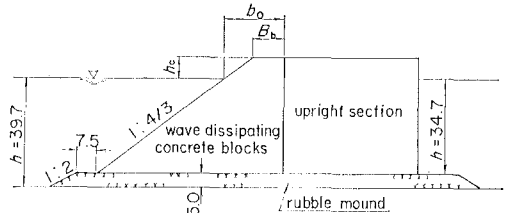


図-1 堤体断面

B_b は消波ブロックを天端で 2 個並びとしたときの幅、 b_0 は静水面での被覆幅、 h_c は静水面上天端高であるが、これは消波ブロックの重量によって異なる。

実験に用いたブロックの種類は 1 種で、平均重量 (質量) W は 296.0 g, 596.4 g の 2 種類に変化させた。それぞれの重量の変動係数 (= 標準偏差/平均値) は 0.0143, 0.0163 であり、単位体積重量 (密度) の平均値 γ_r は 2.32 g/cm³, 2.35 g/cm³ である。消波ブロックは全断面乱積み被覆で、これらの重量に対する前述の断面諸元は $W=296.0$ g の場合 $h_c=8.3$ cm, $B_b=11.8$ cm, $b_0=22.9$ cm, $W=596.4$ g の場合 $h_c=10.5$ cm, $B_b=15.2$ cm, $b_0=29.2$ cm である。この天端高は Hudson 式¹⁾により消波ブロックの重量に対応する有義波高 $(H_{1/3})_W$ を逆算して、次の関係から決定したものである。

$$h_c = 0.6 (H_{1/3})_W \dots \dots \dots (1)$$

$$(H_{1/3})_W = \{WK_D(S_r - 1)^3 \cot \alpha / \gamma_r\}^{1/3} \dots \dots (2)$$

ここに、 S_r は流体の単位体積重量に対する消波ブロックの単位体積重量の比、 α は消波ブロック法面と水平面とのなす角度であり、 K_D の値はの場合概略値として 8.3 を用いている。

実験波は Bretschneider・光易型スペクトルを目標として作成した 12 種の波群 (D1~D12、各波群約 250 波) である。これを D 波と呼んでいるが、相対水深 $h/L_{1/3}$ ($L_{1/3}$: 有義波長) は波高レベルにより 0.0806~0.0890 の間で変化し、平均 0.0856 である。波高レベルは非碎波から強度の碎波条件に至るまで 6~7 種類に変化させた。

(3) 被害率の定義

実験は消波ブロックを並べて準備完了したのち、まず

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長

** 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

*** 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室

波高の小さい波から作用させ、消波ブロックの挙動を目視で観察することによって、波高は順次大きくしてゆくわけであるけれども、波高レベルを変更する際消波ブロックの並べ換えは行わず、被害ブロックの個数はそれまでの被害個数に当該波高レベルで新たに発生した個数を加えた累計数とした。

消波ブロックの被害個数は検査域を設定して、その範囲だけで数える。被害の判定はブロックの長さの $1/2$ ないし 1 倍以上移動したものを被害とするのを基準とした。

被害率 D (%) は次の式で定義している。

$$D = (n/N) \times 100 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 N は検査域での消波ブロックの総数、 n は当該波高条件での累積被害個数である。

本実験における検査域は水路幅方向には全幅 1 m のうち中央の 50 cm の範囲とし、さらに水深方向には天端から静水面下 $2.5h_0$ の深さまでとした。これは傾斜堤などの被覆材の Hudson 式による重量の被覆深さは静水面下 $1.5H_{1/3}$ とするのが通常であり¹⁾、これに準じたものである。つまり、この場合天端高 h_0 を消波ブロック重量から逆算した有義波高 $(H_{1/3})_w$ の 0.6 倍としているため、 $1.5(H_{1/3})_w$ に対応する深さが次式のように天端高で表される。

$$\text{検査域の下端深さ} = 1.5(H_{1/3})_w = 2.5h_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

こうして決定した検査域での消波ブロックの総数 N は $W=296.0\text{ g}$ のとき 184 個、 $W=596.4\text{ g}$ のとき 135 個である。

3. 不規則波実験の特性

(1) 有義波高および有義波周期の変動性

一般に、不規則波実験では波を長時間連続して作用させるため、造波板からの再反射波の影響があって、実験時の堤体への入射波は堤体設置以前の通過波の条件とは異なる。しかし、本実験水路は非常に長く、かつ側壁等の粗度が大きく水路における波の減衰が大きい。しかも、対象とする構造が低反射であるため、造波板からの再反射の影響はほとんど無視できる³⁾。そのため、後述の安定実験における波浪諸元はすべて通過波諸元を用いている。以下、その堤体設置以前の状態で測定した不規則実験波の特性について述べる。

ある長さの記録に対する有義波高や有義波周期等は、波の不規則性に起因する統計的性質のため変動する。図-2 は D1~D12 の 12 種の波群に対し、堤体設置位置 (水深 39.7 cm) での記録から求めた通過波の有義波高 $H_{1/3}$ および有義波周期 $T_{1/3}$ の相対度数分布である。図中、 $\bar{H}_{1/3}$ および $\bar{T}_{1/3}$ は各波高レベル条件ごとの有義波高および有義波周期の平均値であり、横軸はこれで割

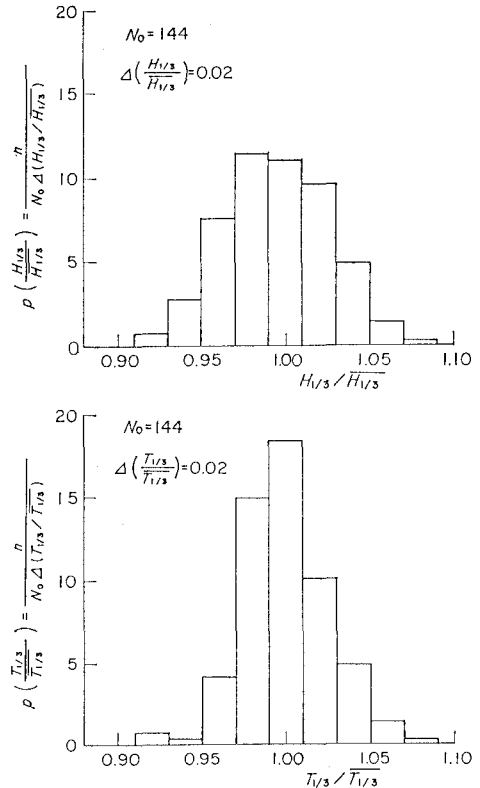


図-2 有義波高および有義波周期の相対度数分布

って規準化してある。縦軸は相対度数 n/N_0 を分割幅 $\Delta(H_{1/3}/\bar{H}_{1/3})$ あるいは $\Delta(T_{1/3}/\bar{T}_{1/3})$ で割って確率密度のかたちにしてある。ここに、 n は各クラスごとの度数、 N_0 は総度数である。この相対度数は波高レベルを 6 種に変化させたときの集計であり、総度数 N_0 は波高を 2 点で測定しているため、 $12 \times 6 \times 2 = 144$ となる。これによると、 $H_{1/3}/\bar{H}_{1/3}$ は $0.93 \sim 1.08$ 、 $T_{1/3}/\bar{T}_{1/3}$ は $0.93 \sim 1.07$ の範囲に分布し、標準偏差 σ (この場合変動係数と同じ) はそれぞれ 0.031 および 0.021 である。

こうした不規則波の統計的変動特性に関しては台田が数値実験によって調べている⁴⁾。今回の実験における 1 波群の解析波数 N_w の平均値は 251 波であるので、これに対する数値実験による標準偏差を図から外挿して読みとると、 $H_{1/3}/\bar{H}_{1/3}$ に対して 0.035 、 $T_{1/3}/\bar{T}_{1/3}$ に対して 0.022 程度であり、今回の実験結果とはほぼ一致している。

(2) 最高波高の変動性

最高波高 $H_{\max}$ は、たとえ有義波高が同じであっても、波形記録が違えば皆異なるという基本的性質を有しているため、変動性が特に高い。しかも、碎波帯内においては波高が規制されるので、 $H_{1/3}/h$ の値によってもその分布が異なる。そのため、相対度数分布で示すべきで

表—1 $H_{\max}/\bar{H}_{1/3}$ の平均値と標準偏差

$\frac{\bar{H}_{1/3}}{h}$	$H_{\max}/\bar{H}_{1/3}$		標準偏差 平均値
	平均値	標準偏差	
0.233	1.686	0.123	0.073
0.335	1.725	0.166	0.093
0.436	1.618	0.138	0.085
0.523	1.453	0.096	0.066
0.581	1.364	0.077	0.056
0.616	1.372	0.090	0.066

あるが、ここでは、紙数の関係で波高レベルごとの平均値と標準偏差のみを示す。

表—1 は 6 種の波高レベルに対する $H_{\max}/\bar{H}_{1/3}$ の平均値と標準偏差、および変動係数の値を示したものである。非砕波条件と考えられる $\bar{H}_{1/3}/h=0.233, 0.335$ の条件では $H_{\max}/\bar{H}_{1/3}$ の平均値は 1.69~1.73 で、Rayleigh 分布のときの $N_w=251$ に対する期待値 1.75 よりやや小さい。 $\bar{H}_{1/3}/h \geq 0.436$ では、 $\bar{H}_{1/3}/h$ が大きくなるにつれて $H_{\max}/\bar{H}_{1/3}$ の値は小さくなっており、砕波の影響を受けていることが明らかである。変動係数は波高レベルによって 0.056~0.093 とばらついているが、有義波高の変動係数と比較すると明らかに大きい。

なお、最高波の周期 $T_{\max}$ と有義波周期 $T_{1/3}$ の比の集計の平均値は 1.11、変動係数は 0.159 である。

4. 被害率の変動性

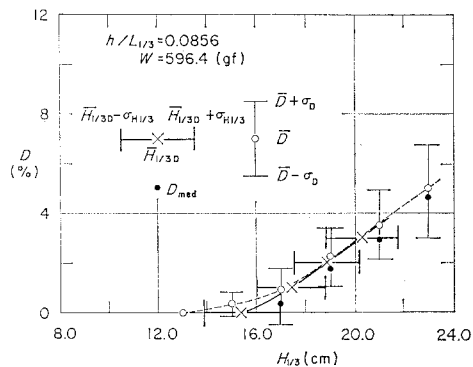
(1) 有義波高と被害率の関係

本実験では D1~D12 の 12 波群の波を用いて繰り返し安定実験を行ったが、 $W=596.4\text{ g}$ の条件については D1~D12 波群をさらに 2 回繰り返し合計 24 回の実験を行った。同一波高レベルでの連続した波の有効作用時間は 540s で、波数に換算すると約 250 波である。しかし、実際には波が定常状態となるまでの時間も作用しているので、実際の総波数は 290 波程度となる。

図—3 は $W=596.4\text{ g}$ の条件での有義波高と被害率の関係を例示したもので、それぞれ次の 3 種の関係をプロットしてある。

- ① 有義波高と被害率の平均値±標準偏差 ($\bar{D} \pm \sigma_D$)
- ② 有義波高と被害率の中央値 (D_{med})
- ③ 被害率と有義波高の平均値±標準偏差 ($H_{1/3} \pm \sigma_{H_{1/3}}$)

このうち、① は同一波高レベル条件で 12 波群に対して得られた被害率の平均値と標準偏差を示したものであるが、標準偏差の値は後出の式 (5) による推定値を用いている。② の中央値は被害率の分布における累積相対度数が 0.5 となるときの値である。③ は各試行ごとの有義波高と被害率の関係から、 $D=0, 1, 2, 3\%$ のと



図—3 有義波高と被害率の関係

きの波高を読み取って、その平均値と標準偏差の範囲を示したものである。

この 3 種のいずれの関係においても、有義波高の増大とともに被害率が大きくなる傾向を示しているが、特に被害率の小さい領域において差が認められる。これは被害率の平均値は各試行のうち 1 回でも被害が生じれば 0 とならず、試行回数が多ければ多いほど波高条件の小さい方へ伸びる性質があることによる。

(2) 被害率の変動性

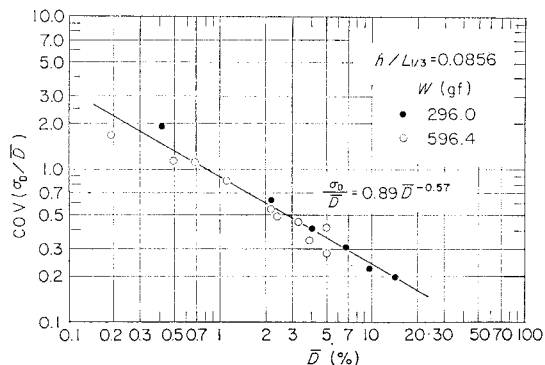
図—4 は被害率の平均値と変動係数の関係をプロットしたものである。重量による違いがやや認められるけれども、変動係数 $\text{COV}(\sigma_D/\bar{D})$ は被害率が大きくなるにつれて小さくなる傾向にあり、次式で表すことができる。

$$\text{COV}(\sigma_D/\bar{D}) = 0.89 \bar{D}^{-0.57} \quad (5)$$

図中の直線はこの関係を示したものである。これによると、平均被害率 1% のときの変動係数は 0.9、5% のときの変動係数は 0.4 である。

(3) 安定限界波高の分布

(1) で代表的被害率に対する有義波高の平均値と標準



図—4 被害率の平均値と変動係数の関係

偏差の範囲を示したが、図-5 はそのうち $D=0\%$ に対する安定限界有義波高 $H_{1/3D=0}$ の相対度数分布である。 $W=296.0\text{g}$ および 596.4g に対する $H_{1/3D=0}/\bar{H}_{1/3D=0}$ の値を集計して確率密度分布のかたちにしてある。ここに、 $\bar{H}_{1/3D=0}$ は各ブロック重量ごとの安定限界有義波高の平均値である。これによると、 $H_{1/3D=0}/\bar{H}_{1/3D=0}$ の値は $0.75\sim 1.25$ の範囲に分布し、最頻値は平均値よりやや小さい $0.85\sim 0.95$ のクラスで生じている。また、安定限界有義波高の変動係数は 0.102 であり、有義波高自体の変動係数よりも大である。

図中の曲線は次式で定義される対数正規分布を当てはめてみたものである。

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad \cdots (6)$$

ここに、 $\lambda = E(\ln X)$ 、 $\zeta = \sqrt{\text{Var}(\ln X)}$ はそれぞれ $\ln X$ の平均値と標準偏差であり、この場合 $\zeta=0.102$ 、 $\lambda=-0.0052$ を用いている。

以上、 $D=0\%$ の安定限界有義波高の分布を示したが、任意レベルの被害率に対する有義波高の値も分布し、ここには示していないけれども、被害レベルが大になるにつれてやや正規分布に近づく傾向を示す。また、変動係数の値は $D=0\%$ に対しては消波ブロックの重量にかかわらず約 0.10 でほぼ一致し、被害が大になるにつれて低下していく傾向を示すけれども、その低下の程度は $W=596.4\text{g}$ の条件のほうが大きい。

一方、図-6 は各波群別の最高波高と被害率の関係から $D=0\%$ の安定限界最高波高 $H_{\max D=0}$ を読み取って、その平均値 $\bar{H}_{\max D=0}$ で規準化したときの相対度数分布である。これによると、 $H_{\max D=0}/\bar{H}_{\max D=0}$ の値は $0.75\sim 1.25$ の範囲に分布するけれども、変動係数は 0.088 で先の有義波高基準の場合より若干小さく、集中度がやや高くなる。この変動係数は最高波高自体の変動係数の値に近く、不規則波実験においては有義波高ばかりでなく、最高波の現れ方が重要であることを示唆している。図中の曲線は式 (6) と同じ対数正規分布を当てはめてみたものであるが、この場合のパラメーターの値は $\zeta=0.088$ 、 $\lambda=-0.00039$ である。

(4) 被害率と K_D 値の関係

消波ブロックの被害率等が変動するということは Hudson 式における K_D 値が変動するということを意味している。そのため、次式によって K_D 値を逆算し、その変動特性を示す。

$$K_D = \frac{\gamma r}{W(S_r - 1)^3 \cot \alpha} H_{1/3}^3 \quad \cdots (7)$$

図-7 は今回の繰り返し実験で得られた被害率と K_D 値のすべてのデータをプロットしたものである。ただし、 K_D 値の逆算に際して有義波高は 12 波群の平均値を用いているので、繰り返し実験の結果は同じ K_D 値

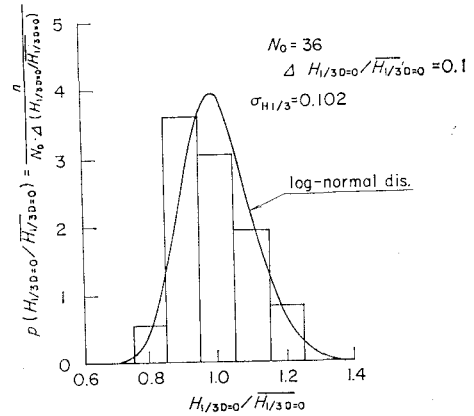


図-5 安定限界有義波高の相対度数分布

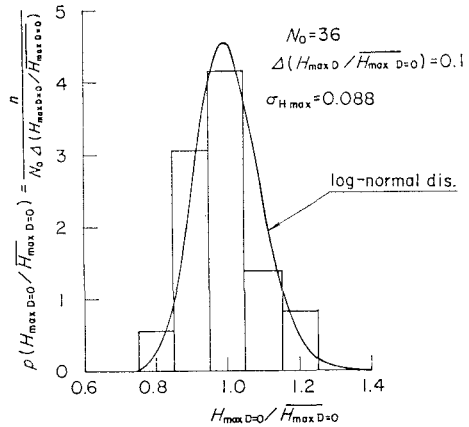


図-6 安定限界最高波高の相対度数分布

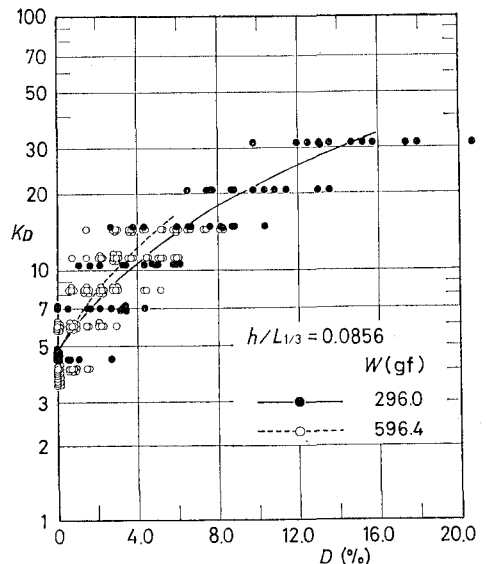
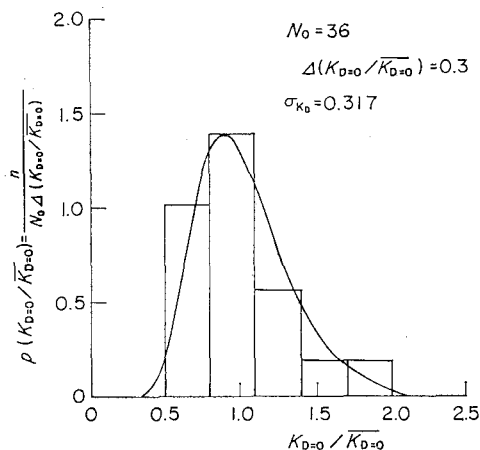
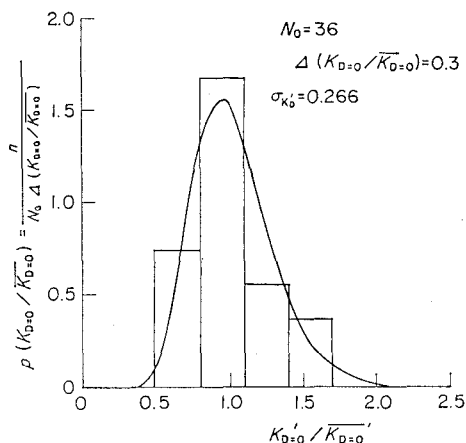


図-7 被害率と K_D 値の関係

図-8 安定限界有義波高に対する K_D 値の相対度数分布図-9 安定限界最高波高に対する K'_D 値の相対度数分布

に対してプロットされている。これによると、 $D=1\%$ のとき K_D 値は 4~12、 $D=5\%$ のとき 8~20 程度にばらついている。また、図中の曲線は前出の図-3 に示した被害率と平均有義波高の関係を K_D 値との関係に書き換えたものであるけれども、これによると $D=0\%$ のときの K_D 値の平均値はブロック重量にかかわらず 4.7 程度である。被害率が大きくなると、重量の大きい $W=596.4\text{g}$ のほうがやや高い値を示す傾向にあり、 $D=5\%$ に対する K_D の平均値は $W=296.0\text{g}$ の場合 12、 $W=596.4\text{g}$ の場合 15 程度となる。これはブロック重量が大きいと、同じ被害率を与えるのに大きな波高が必要となり、そのため碎波を伴う条件となって最高波高が制限されることによる⁵⁾。

(5) K_D 値の分布

$D=0\%$ のときの安定限界有義波高に対する K_D 値 ($K_{D=0}$) の相対度数分布を図-8 に示す。ここに、 $\bar{K}_{D=0}$ は各ブロック重量ごとの平均値であり、横軸はこれで割って基準化してある。また、縦軸は確率密度のかたちにしてある。この場合、 $K_{D=0}/\bar{K}_{D=0}$ の値は 0.5~2.0 に分布し、前出の図-5 の安定限界有義波高の分布より広くなる。これは K_D が式 (7) のように $H_{1/3}$ の 3 乗に比例することによる。図中の曲線は式 (6) の関数形に対し式 (6) の分布から $K_{D=0}/\bar{K}_{D=0}$ の確率密度分布を推定したもので、ほぼ妥当な分布を与えている。また、式 (7) の関係により、 K_D 値の変動係数は有義波高の変動係数の約 3 倍となるので、安定限界における値は 0.3 程度となっている。

以上は有義波高を代表波高としたときの K_D であるが、Hudson 式における波高は本来不規則波の任意の代

表波高を適用しえる。ただし、この場合の K_D 値は代表波高によって異なり、最高波高に対応する K_D を K'_D と表記し、 $D=0\%$ に対するその相対度数分布を示したのが図-9 である。これによると、 $K'_{D=0}/\bar{K}'_{D=0}$ の値は 0.5~1.7 の範囲に分布し、変動係数も 0.266 で $K_{D=0}$ の場合よりも変動幅がやや小さくなる。図中の曲線は式 (6) の分布から推定した $K'_{D=0}$ の確率密度分布である。

5. む す び

以上、消波ブロックの被害率、安定限界波高、 K_D 値等の変動特性について述べたが、これらは本質的に変動性の高いものであり、実験や設計においてこうした事実を充分認識しておくことが必要である。今回の実験では、被害率の変動係数は平均被害率 1% のとき 0.9、5% のとき 0.4 であった。また、安定限界有義波高の変動係数は 0.1、安定限界に対応する K_D 値の変動係数は 0.3 であった。

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局監修：港湾の施設上の基準・同解説，日本港湾協会，1979。
- 2) 白石成人・吉田 成：構造物の信頼性解析手法の変遷と最近の動向，日本鋼構造物協会，Vol. 18, No. 194, pp. 40~55, 1982。
- 3) 谷本勝利・富田英治・村永 努：水路における不規則波の再反射波の影響について，港湾技研資料，No. 467, 1983, 23 p。
- 4) Goda, Y.: Numerical experiments on statistical variability of ocean waves, Rept. Port and Harbour Res. Inst., Vol. 16, No. 2, pp. 3~26, 1977。
- 5) 谷本勝利・大里睦男・高岡征二郎・内田豊彦・池田辰男：不規則波による消波ブロック被覆堤の安定実験，第 26 回海岸工学講演会論文集，pp. 343~347, 1979。