

消波ブロックの比重変化が安定性に及ぼす影響について

On an effect of Specific-gravity Change for Stability in Armor Unit

伊藤政博*・岩垣雄一*

Masahiro Ito, Yuichi Iwagaki

根本建治**・山本方人**・半沢 稔**

Kenji Nemoto, Masato Yamamoto, Minoru Hanzawa

From Hudson's formula, armor unit weight is found to be proportional to specific gravity to the 3rd power if wave height, slope angle, and stability coefficient are constant. Then, it is expected that the specific gravity becomes heavier, the stability for wave become very higher. To check these properties, laboratory rests on the stability were conducted with 2-layer covered breakwater by 6 types of tetrapod models for 5 kinds of specific gravities; 1.82, 2.30, 2.77, 3.40, and 4.27, under no-overtopping condition. The effect of specific gravity upon the stability of armor unit is examined by using experimental data.

Keywords; heavy armor unit, stability, surf similarity parameter, tetrapod

1. はじめに

防波堤の消波工や捨石堤の被覆工として消波ブロックを使用する場合、設計波高に対する消波ブロックの所要重量はHudson式¹⁾で算出している。Hudson式中の安定係数 K_D は、数多くの水槽実験に基づいて、消波ブロックの設置場所(防波堤法面、天端)及び波の特性(碎波、非碎波)に応じた値が定められている。この式によると、安定係数、法面勾配及びコンクリートの比重が一定の下では、消波ブロックの所要重量は入射波高の3乗に比例するので、波高の増大に伴って所要重量が飛躍的に重くなる。したがって、離島など大きな施工機械が利用できない場所やその他の制約などから、小さい消波ブロックで、大きな波高に耐えられるようにしなければならないことが多い。このような場合には、普通コンクリートより比重を重くした高比重の消波ブロックの使用が有効であると考えられる。このような目的で、高比重テトラポッドに関して、高吉・高橋・徳川²⁾らは、高知県室津港の防波堤前面の消波工として使用するために、通常のコンクリート比重2.3のほか2.55のテトラポッドと2.3のドロスについて、現地波浪を想定した模型実験を行っている。その結果、テトラポッドの比重を重くすることによって、被害率が小さくなることを指摘している。また、Zwamborn³⁾は、ドロスの比重を2.31, 2.41, 2.57の3種類に変えた小規模な水槽実験を行い、ブロックのロッキング及び移動に及ぼす比重の影響を調べている。この研究方法は、ブロック形状が同じならば比重の増大に伴ってドロスの重量も大きくなるので、真に比重の効果を調べたことにはならないが、実験によれば比重の増大によって、ロッキングや移動がかなり減少することを示した。また、最近、大中・石崎・堺⁴⁾は比重の重いブロックの安定性を調べる研究を始めている。大中らの研究は、形状寸法及び体積が同じで比重2.25, 2.43, 3.14, 4.04の模型のテトラポッドに規則波及び不規則波を作用させた実験を行い、比重の増加に伴って、安定性が相対的に低下する傾向にあることを指摘している。ただし、この研究方法では、波高が大きくなるにつれて消波工の法肩及び越波などが生じやすくなるので、ことに注意を要する。

このように、最近、わが国や諸外国において、比重を重くしてブロックの耐波性能を向上させる基礎的な研究が行われるようになった。しかし、従来から慣用されているHudson式による安定係数は、普通コンクリート(比重2.3)の模型を用いて実験的に定められたものであって、比重を変えた場合について、Hudson式そのものや、慣用されている安定係数の適用性を調べた基礎的な研究はほとんどない。このような背景から、消波ブロックとしてテトラポッドを用い、比重の変化(比重1.82, 2.30, 2.77, 3.40, 4.27)による水理特性を詳しく調べる。

2. Hudson式による比重の影響⁵⁾

Hudson式に基づいて、比重の変化が各諸量にどのような影響を与えるかについて検討を加える。ただし、 K_D 値は比重が変化しても一定であると仮定すれば、波高 H 、法面角度が一定のとき、消波ブロックの比重変化が所要

* 正会員 名城大学理工学部土木工学科(〒468 名古屋市天白区塩釜口一丁目501)

** 正会員 日本テトラポッド株式会社応用水理研究所

重量に及ぼす影響は、テトラポッドの任意比重 w_r/w と普通コンクリート比重 $w_{rc}/w (=2.30)$ との比を w_r/w_{rc} で表わすと、任意比重と普通コンクリートによる所要重量比 W_*/W_c は、次式のようになる。

$$\frac{W_*}{W_c} = \frac{w_r \cdot \{ (w_{rc}/w) - 1 \}^3}{w_{rc} \{ (w_r/w) - 1 \}^3} \quad (1)$$

また、ブロックの代表寸法（形状高）を l とすれば、 k を比例定数として、

$$W = kw_r l^3 \quad (2)$$

で表わされるから、比例定数を一定とすれば、任意比重と普通コンクリートによる寸法比 l_*/l_c は、次のように表される。

$$\frac{l_*}{l_c} = \left(\frac{W_* \cdot w_{rc}}{W_c \cdot w_r} \right)^{1/3} \quad (3)$$

いま、式(2)、(3)の関係をを用いて、比重の変化が所要重量に及ぼす影響が、図-1に示してある。さらに、この図の横軸には、相対比重比の関係が分かりやすいように比重 w_{rc}/w の値が併示してある。このことから、外力としての波高が一定であっても、比重を重くすることによって、ブロックの所要重量と形状寸法が相対的に小さくなっても安定となることがわかる。

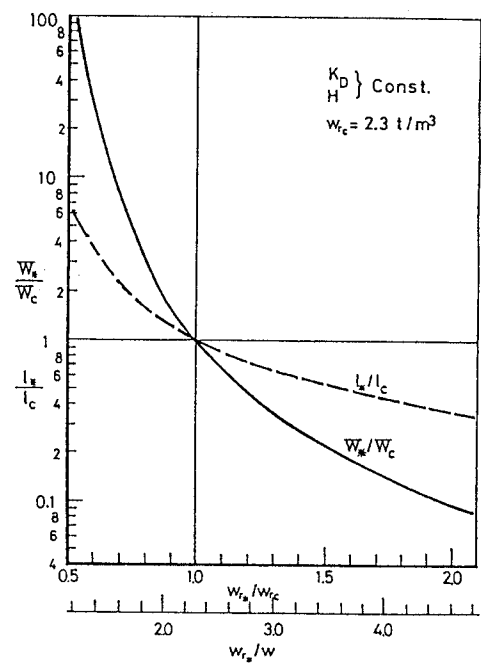


図-1 比重の変化が所要重量及び形状寸法に及ぼす影響、 K_D, H ；一定

3. 実験装置および方法

(1) 実験装置

a) 平面水槽

長さ18m、幅10m、深さ1.17mの平面水槽内を、コンクリート板で仕切って、四つの小水槽（A、B、C、D）を造った。テトラポッドで被覆した防波堤消波工と造波板との間に生じる波の多重再反射を防ぐために、消波マットからなる反射波吸収斜面（1：5）をそれぞれA～Dの小水槽の間に設置した。そのために、模型に長時間波を作用させても比較的きれいな波形の安定した実験波を得ることができる。

b) 造波装置

造波装置は、造波板（幅6.5m、高さ90cm）が吊り下げてあり、前後に振れるピストン式である。水深は60cmとし、特にB水槽では、周期 $T=1.5, 2.0, 2.5\text{sec}$ で、最大波高32cmを発生させることができる。さらに、大きな波高が必要な消波ブロックについては日本テトラポッド(株)の、二次元造波水槽を用いた。これらの実験条件をまとめれば表-1のようになる。

c) 測定装置

波によるテトラポッドの移動状況は、SONY CCD-V88の8mmビデオカメラで撮影し、ナショナルAG-3530再生装置およびSONY KV-14MD1テレビで再生し、ブロックの揺動・移動・脱落の状況を調べた。また、適宜35mmカメラで写真撮影を行った。

d) 模型消波工

模型の消波工は、中心部に捨石として38gf（径47mm）の砕石を使用した。ただし、テトラポッド模型の下層捨石は、一般にブロック重量の1/10～1/20とされているので、各種のテトラポッド模型の大きさに合うように、A水槽には24gf（平均粒径41mm）、水槽Bには、29gf（平均粒径43mm）、水槽Cには7.5gf（平均粒径27mm）、水槽Dには3gf（平均粒径21mm）の砕石を使用した。

表-1 実験条件の概要

波	水深 h	(cm)	50, 60
	波高 H	(cm)	~40
テトラポッド	周期 T	(sec)	1~3
	沖波波形勾配 H_0/L_0		~0.14
比重	比重		1.82, 2.30, 2.77
	重量	(gf)	3.40, 4.27
	高さ(鉛直高さ)	(cm)	34.2~2329
堤防	2層被覆消波工法面勾配		1:4/3
	海底勾配		水平床
波の作用時間	波の作用時間	(min)	5~10
	(波の作用数 t/T)		(80~2000)

表-2 テトラポッド模型と比重

模型分類番号	比重番号	5	4	3	2	1	移動限界波高 H_0 (cm)
	w_r/w	1.82	2.30	2.77	3.40	4.27	
A	g (cm)	7.16	4.52	3.29			8.6
	w (gf)	186.4	58.9	27.7			
B	g (cm)	9.04	5.68	4.14			10.8
	w (gf)	372.7	117.8	55.4			
C	g (cm)	12.24	7.72	5.68	4.14	3.08	14.7
	w (gf)	931.8	294.4	141.8	68.0	34.2	
D	g (cm)	16.62	10.48	7.72	5.68	4.14	19.9
	w (gf)	2329.6	736.0	354.6	174.1	85.4	
E	g (cm)		14.15	10.48	7.72	5.68	26.9
	w (g)		1811.0	886.4	435.2	218.6	
F	g (cm)		8.28				15.7
	w (g)		368.0				

テトラポッドの被覆斜面勾配は1:4/3とし、法面に模型のテトラポッドを積み、非越波とした。テトラポッドの積み方は、2層の整積み及び乱積みの2種類とした。

e) テトラポッド模型

比重の効果を詳しく調べるために、テトラポッドの模型は普通コンクリート（比重2.30）を基準にし、比重が1.82、2.30、2.77、3.40及び4.27の5種類の異なった模型を用意した。造波装置の最大発生波高が約32cmであることを考慮し、模型重量を27gf～2,330gfの範囲で変化させた。全体で模型は20種類用意した。この模型の一覧が表-2に示されている。

この表は、各行が模型分類番号A～Eで分類してあるが、これにはHudson式でテトラポッドの安定係数 $K_D \approx 8$ とし、各分類番号ごとに一定の設計波高（表中には設計波高 H_c と記してある）に対して、各比重（比重番号1～5）のテトラポッド模型が移動を始める所要重量 W (gf)が示してある。

しかし、この表中の模型重量は、型枠の都合上、計算による所要重量と多少の相違がある。Hudson式を用いて、模型重量にたいする波高 H_c を求め、これを平均した値が H_c で表中の右側に示してある。この表から、波高が一定（模型分類番号が同一）であっても、テトラポッドの安定重量は、比重が重くなるにつれて、軽く済み、形状高さ（ h ）も小さくなることわかる。このことは、図-1の関係からもわかる。写真-1には、模型分類番号“C”について形状の比較が示してある。また、表-1で、B-4、C-3、D-2、E-1の模型は重量と比重が異なっているが、形状寸法（テトラポッドの高さ）は同じになっている。また、B-3、C-2、D-1；C-4、D-3、E-2；D-4、E-3についても、同様である。

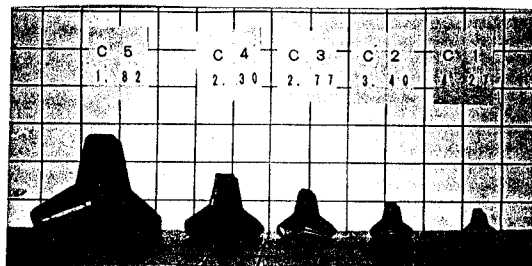


写真-1 K_D , H_c 一定、比重変化による形状寸法の比較。（表-2の模型分類番号“C”）

(2) 実験方法

実験の方法は、波の周期を一定に保ち、波高を段階的に大きくする方法で行った。通常、この種の安定性の実験は、波高の増大に伴って、テトラポッド模型が移動・脱落するが、波高のみを段階的に増大させ、被害率は積分値として評価する方法が採られる。しかし、本研究では、波の作用時間の経過に伴う被害率について詳しく調べるために、波高を段階的に増大させるごとに、移動・脱落したテトラポッド模型を元の位置に再度積み直してから、波を作用させる実験方法を用いることにした。

a) 波の打ち上げ（run up）と引き波（back rush）

波の打上げ高と引き波限界については、法面のブロック上にスタッフを置いて、目視と8mmビデオカメラで測定し静水面から鉛直方向の上下高さに換算した。特に測定を容易にするために、静水面のブロックには赤色で着色した。

b) 波の作用時間

波の作用時間については、本実験では、造波水槽内に生じる波の再反射をかなり軽減させるよう工夫してあるので、長時間の波を作用させることが可能である。一般に、現地海岸で、高波浪のピーク時の波の継続時間 t が2～3時間であると考えれば、波の周期 T を10～15secとして $t/T=720 \sim 1,080$ であるから、この程度の数の波を作用させることにした。そこで、波の作用によって、ブロックの揺動が見られる場合には、 $t/T=2,000$ 程度まで波を作用させることにした。ただし、波の作用によって、ブロックが大きく移動・脱落する場合については、その時点で波の作用を打ち切った。このように、従来あまり調べられていない波の作用時間と被害率との関係についても検討する。

4. 実験結果

(1) 被害率

波高の増大に伴って、テトラポッドは徐々に“揺動”を始め、“移動”し、遂に“脱落”に至る。ブロックの被害については、従来の研究を参考に、次のように分類・定義する。

揺動：ブロックの位置は変化しないが、微動・揺動する。

移動：揺動と脱落との中間的な場合。

脱落：ブロックの大きさの1倍以上移動する。

被害率の定義については、従来より幾つかの方法が考えられてきたが、これらをまとめれば、次のようである。

⑨ Hudsonは、移動脱落したブロック数の被覆層全ブロック数に対する比率で表わした。ただし波の作用数は数10波程度である。

⑥ 任意領域の被覆層全ブロック数に対して、移動脱落した個数の比率で表す。

⑦ ブロックの移動脱落が下層の捨石達した時、初期状態からの移動脱落個数に対する比率で表わす。

以上の④, ⑤, ⑥の方法は、いずれも波の作用数に対する考慮がなされていない。④の方法は、法面勾配が緩やかになると被覆ブロック総数が非常に多くなるので、局所的にかなりの被害が発生しても、被害率は0に近い値となる。

⑥の方法は、任意領域の定義があいまいであり、実験者の主観が入り易い。⑦の方法は、被覆ブロックが下層のcoreまで移動脱落した個数は、入射波が変わると一定でなくなるので、相対的に画一性が保たれないという欠点がある。

このように、いずれの方法も一長一短であるが、本研究では上述の④と⑥の定義法を若干改良し、次の⑧および⑨の方法を適用することにする。

⑧ 波の作用数を、現地海岸の高波浪ピーク時を想定して、1,000~2,000波作用させた後の被害個数を採用し、被覆層全体のブロック数に対する比率で表わす。

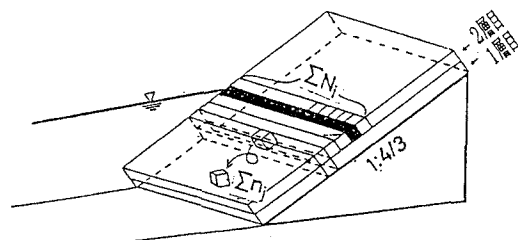
⑨ 図-2に示すように、静水面に平行な層のブロック数を100とし、この層における被害ブロック数を比率で表わす。

(2) ⑧による被害率D

比重が、被害率Dの時間変化に及ぼす影響を調べるために、⑧で定義した被害率D（以下、特に指定しない場合、この被害率を示す）を用いて検討する。比重の影響を調べるために、波の特性（波高、周期、水深）および模型分類番号が同じ（ γ_c が同じ）条件にして、整理した結果が図-3に示してある。この図で、比重の重いRun No. C-1およびC-2は数波の波の作用で全崩壊したので、図中には破線で推定してある。この図中に示す凡例のRun No.のアルファベットは模型の分類番号と対応している。この図から、比重が重く形状寸法が小さくなるにつれて、被害が著じるしく大きくなることがわかる。この事実はHudson式で K_D を一定にし、比重を変えて単純に計算される結果と大きく異なる。

(3) ⑨による被害率 D_{II}

被害率の定義法⑨を適用して、水平方向に各層毎に被害率 D_{II} を計算し、さらに波の打ち上げ高 R_u と引き波高 R_D を用いて、法面上の相対位置 h_E/R_u および h_E/R_D と被害率 D_{II} の分布を調べる。図-4には、波の特性（水深、波高、周期）および模型分類番号を固定し、比重変化が被害率 D_{II} の分布に及ぼす影響が示してある。この図から、模型分類番号と波高が同じであっても、比重の違いによって、被害分布がかなり異なっている。特に、比重が重くなるにつれて被害が急激に大きくなることがわかる。比重が変化してもHudsonの関係



$$D_{II}(\%) = \frac{\sum n_j}{\sum N_i} \times 100$$

ここに、 $\sum n_j$: 上層被覆ブロックで、対象とする水平方向の1列の中で脱落した個数
 $\sum N_i$: 上層被覆ブロックの対象とする水平方向の1列の全個数

図-2 被害率 D_{II} の定義

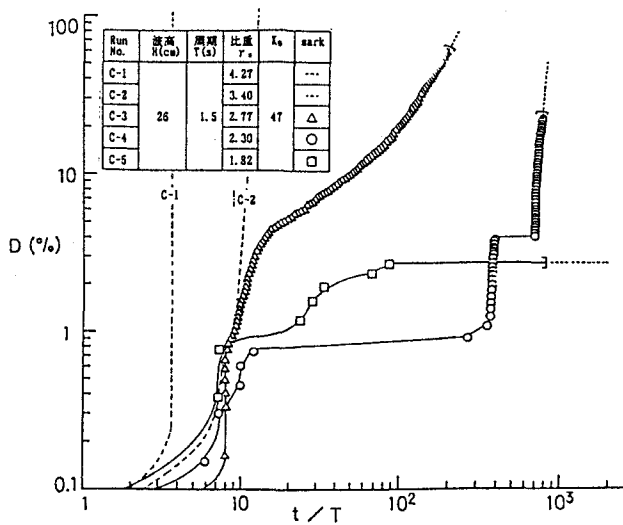


図-3 波の作用に伴う累加被害率の変化
H, T, 模型分類番号: 一定, 比重: 変化

記号	Run No.	比重 γ_c/γ_w	重量 $W(gf)$	周期 $T(s)$	波高 $H(cm)$	被害率 $D(\%)$	K_D 値	R_u (cm)	R_D (cm)
●	A-3-1	2.77	27.7	1.0	10.0	7.3	13.5	10.8	8.4
△	A-4-4	2.30	58.9	1.0	10.0	5.3	13.3	12.6	9.0
○	A-5-1	1.82	186.4	1.0	10.0	0.4	13.3	22.2	9.6

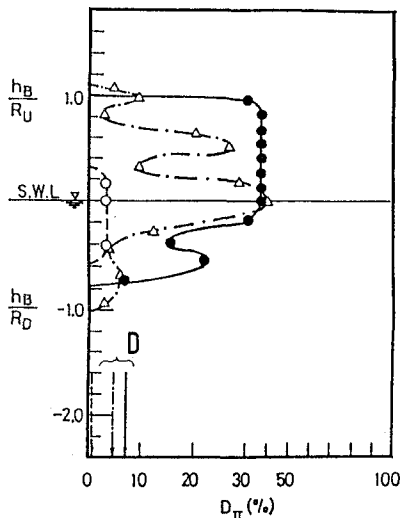


図-4 被害率 D_{II} の鉛直分布
H, T, 模型分類番号: 一定, 比重: 変化

式が普遍的に成立するならば、水理現象は同じになるはずである。しかし、比重1.82では被害が軽微であるが、比重4.27では全面崩壊になっている。このことは、われわれの直感的な考えとは一致せず興味深い事実である。なお、参考のために、図の下側には、それぞれのRun No.に該当する線（実線、破線など）の矢印で、最終の波の作用時間における被害率Dの値が示してある。

7. 検討

(1) 被害状況と安定係数 K_D

Hudsonは、理論展開において、流体による慣性力、斜面上の碎波流速、波形勾配等の波の特性、消波ブロックに関する形状、空隙率など諸々の影響を定数に含めて取り扱い、式を導いている。このように数多くの影響を含む定数は、消波ブロックの安定性を表す指標で、よく知られている安定係数 K_D である。従って、この安定係数は消波ブロックの耐波性能を表すものである。

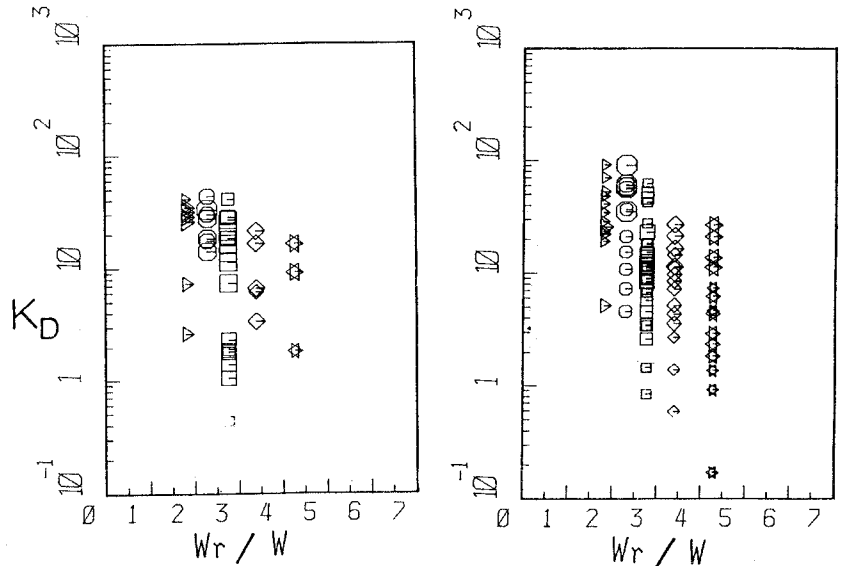
乱積の実験結果に基づいて、揺動のみで移動・脱落の無い（被害率 $D=0\%$ ）場合を図-5. aに、また移動・脱落による被害が生じた（ $D=0\sim1\%$ ）場合を図-5. bに、それぞれ安定係数 K_D と比重の関係が整理してある。これらの図から、 K_D 値はかなりばらついており、最低と最高で約100倍の幅があり、比重の影響をみだすことはできない。つこのように、 K_D 値がばらつく原因として、ブロック重量、波高、比重、及び斜面勾配を与えて K_D 値を計算したため、上述のような各種の要因の影響が含まれているためと考えられる。また、図-4. bの移動・脱落による被害は、図-4. aの揺動に比べて、 K_D 値が多少大きくなっている。

(2) 碎波帯相似パラメーター

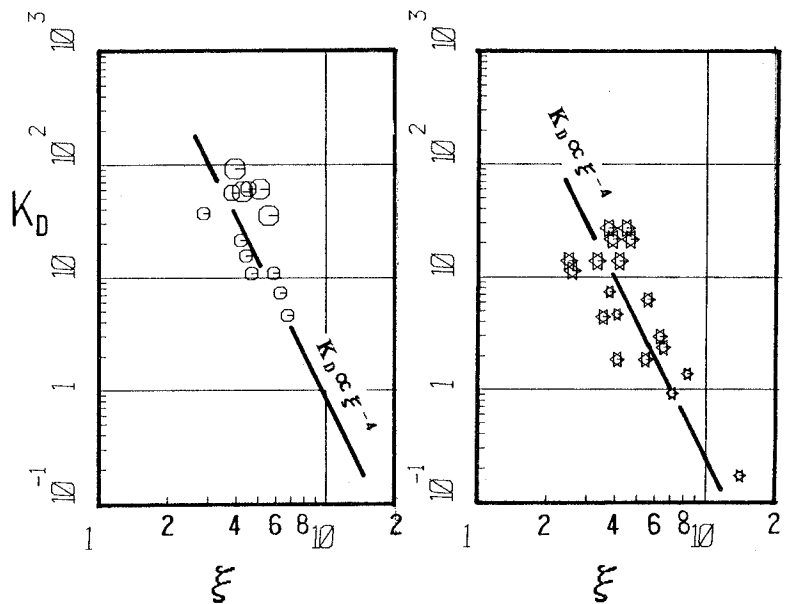
波の周期、波高及び法面勾配による碎波帯相似パラメーター ξ と安定係数 K_D との関係を、比重2.3と4.27について整理した結果が図-6にまとめてある。この図から、 K_D と ξ の関係に比重の影響が入っていることがわかる。すなわち、図-5では、 K_D 値が広くばらついたが、このばらつきの中に碎波帯相似パラメーターの影響が入っているためであると考えられる。そこで、Hudson式による K_D の表示式で比重 w_r/w と ξ の効果が現れるように書き直せば、

表-3 各種模型とその表示記号

	比 重 番 号				
	5	4	3	2	1
	1.82	2.30	2.77	3.40	4.27
模 型 分 類 番 号	A	▷	○	□	
	B	▷	○	□	
	C	▷	○	□	◇
	D	▷	○	□	◇
	E		○	□	◇
	F		○		◇



(a) 揺動, 被害率 $D=0\%$ (b) 移動・脱落, 被害率 $D=0\sim1\%$
図-5 K_D 値と比重の関係



(a) $w_r/w=2.30$ (b) $w_r/w=4.27$
図-6 K_D と ξ の関係

$$K_D = \frac{w_r H^3}{W \{(w_r/w) - 1\}^3 \cot \alpha} = \frac{N_s^3}{\cot \alpha} \quad (4)$$

すなわち,

$$K_D = \frac{C}{\xi^4 \{(w_r/w) - 1\}^3} \quad (5)$$

ここに、Cは定数で、波の特性、法面勾配、Reynolds数等を含む。N_sはスタビリティナンバー。式(5)から得られる $K_D \propto \xi^{-4}$ の関係が比較のために図-6に入れてあるが、実験結果と良く対応していることがわかる。

(3) 比重の影響

図-5では、実験結果のばらつきが大きく比重の影響がはっきりしなかったが、碎波帯相似パラメーターを用いて整理すると、図-6のようにきれいな関係としてまとまることがわかった。そこで、 ξ をパラメータにして、 $\xi < 4$ 及び $5 < \xi \leq 6$ の範囲に分けて、 K_D と比重の関係を整理した結果が図-7に示してある。この図中には、式(5)から得られる $K_D \propto (w_r/w)^{-3}$ の関係が示してある。この関係は実験結果とよく対応することがわかる。これまでに、捨石堤のように法面勾配が比較的ゆるやかな場合、 $\xi = 2 \sim 3$ で共振が発生し、安定性が急減すると言われている⁶⁾。しかし、本実験では、 $\xi < 3$ の範囲の実験結果が十分無いので、共振による安定性を十分検討することができない。

8. まとめ

(1) 規則波を用い、波の再反射が起こらないように工夫した装置を用いて実験を行い、被害率の判定もかなり厳密に行った。しかし、実験結果を安定係数と比重の関係で整理すると、 K_D 値はかなりばらつき、ばらつきらの幅は約100倍にも達した。

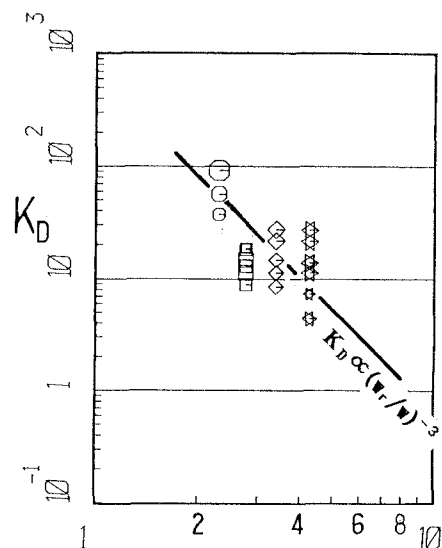
(2) K_D 値を一定とし、Hudson式を満たすように比重を変えると(表-2の模型分類番号を同じになるように)、比重が重くなるにつれて安定性が低下する。

(3) 比重が安定性に及ぼす影響は ξ をパラメーターにとって調べた結果、安定性(K_D 値)は比重の-3乗に比例する。

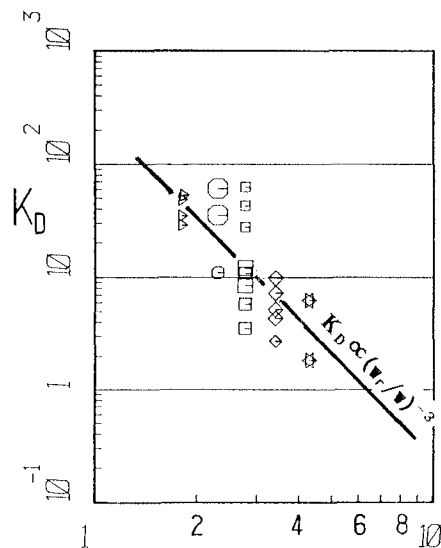
(4) ここでまとめた事柄は、小中規模の実験に基づいており、波高及びテトラポッドの形状寸法によるレイノルズ数 $Re \leq 10^5$ であり、この Re 数の影響を無視して得られた結果であることに留意すべきである。

参考文献

- 1) Hudson, R. Y. : Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, Jour. of Waterways and Harbor Div., WW3, Proc. ASCE, 1959, pp. 93~121.
- 2) 高吉晋吾・高橋吉弘・徳川和弘 : 室津港水理模型実験, 調設広報KOBÉ, Vol. 11, No. 2, pp. 17~27.
- 3) Zwamborn, J. A. : Dolos packing density and effect of relative block density, Proc. 16th ICCE, 1978, pp. 2285~2304.
- 4) 大中 晋・石崎郁夫・堺 和考 : 重量ブロックの安定性に関する実験的研究, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, 1990. 9, PP. 820~821.
- 5) 伊藤政博・岩垣雄一・山本方人・半沢 稔 : 消波ブロックの比重が安定性に及ぼす影響について, 土木学会土木学会第46年次学術講演会講演概要集, 1991, PP. 842~843.
- 6) 榎木 亨・柳 青魯・大西明德 : 捨石防波堤斜面上の共振現象による破壊機構, 第29回海岸工学講演会論文集, 1982, pp. 428~432.



(a) $\xi < 4$



(b) $5 \leq \xi \leq 6$

図-7 ξ をパラメーターにとった K_D 値と比重の関係