

高比重ブロックの安定性に及ぼす碎波帯相似パラメータの影響

伊藤政博*・岩垣雄一*・山田卓生**
根本建治***・山本方人***・半沢 稔***

1. はじめに

消波ブロックを防波堤の消波工や捨石堤の被覆材として使用する場合、設計波高に対する所要重量は Hudson 式で算出している。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（防波堤頭部、堤幹部）及び波の特性（碎波、非碎波）に応じた値が定められている。Hudson 式によれば、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大きくなる。そのために離島などのように大きな施工機械が利用できない場所では施工上の制約などから、形状の小さい消波ブロックで、より大きな波高の入射波に耐えられるようにしなければならない。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。Hudson 式では消波ブロックの所要重量 W が比重の 3 乗 $[w_r/(w_r/w) - 1]^{3/2}$ に比例するので、比重を重くすると所要重量が小さくなることは明らかである。ただし、Hudson 式中の K_D 値は比重に関係なく一定であるという前提での議論である。周知のように、Hudson 式は幾つかの仮定の下で導かれ、諸々の影響がすべて K_D 値に含めてある。たとえば、比重が変化すると同一寸法では重量が変わるので、テトラポッド間のかみ合わせに影響すると考えられる。この噛み合わせの効果は安定係数 K_D の中に含まれているので、結果的には比重の変化は安定係数に関係するのではないかと考えられる。そのため、本研究では、消波ブロックとしてテトラポッドを使用し、比重と安定係数の関係に碎波帯相似パラメータがどのような影響を及ぼすかについて詳しく調べる。

2. 実験装置

(1) 平面水槽

図-1 のように、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、四つ小水槽（A、B、C、D）を造った。テトラポッドで被覆した模型堤防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、模型堤防に長時間波を作用させても比較的きれいな波形で、安定した実験波を得ることができる。

(2) 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って、水深 50cm の場合、 $T=1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ sec で最大波高 $H=30$ cm が発生可能である。特に、B 水槽では、水深が 60cm の場合、 $T=1.5, 2.0, 2.5$ sec で、最大波高 32 cm を発生させることができる。そのため、幅広い実験条件下でブロックの安定性の実験ができる。なお、大きな波高が必要な場合には、他の二次元造波水槽を使用した。表-1 には、実験条件の概要がまとめてある。

(3) 測定装置

波形の計測は、大型測定台車に容量式波高計センサーを取り付け、KENEK CA-104 型水位計増幅器と渡辺測器 WR 3001 型熱ペン式記録計を用いて行った。また、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

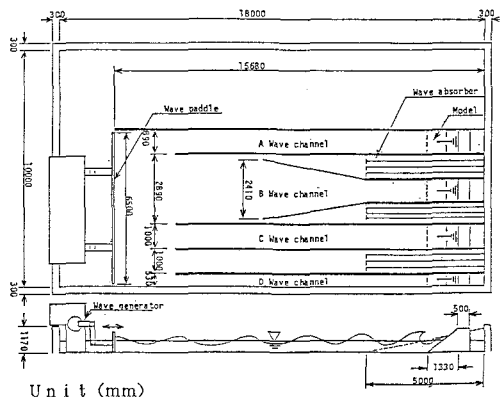


図-1 実験造波水槽の概略図

* 正会員 工博 名城大学教授 理工学部土木工学科
** 学生会員 名城大学大学院 工学研究科
*** 正会員 日本テトラポッド(株)

表—1 実験条件の概要

波	水深 h	(cm)	50, 60
	波高 H	(cm)	~40
	周期 T	(sec)	1~3
	沖波波形勾配 H_0/L_0		~0.14
テトラポッド 模 型	比重		1.82, 2.30, 2.77 3.40, 4.27
	重量	(gf)	34.2~2329
	高さ (鉛直高さ)	(cm)	3.08~16.6
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 (min)			5~70
(波の作用数 t/T)			(80~2000)

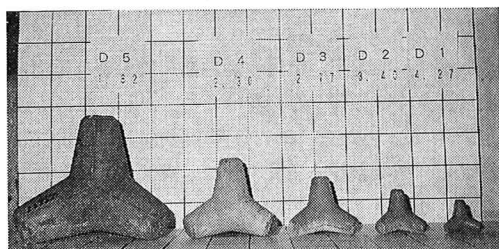
再生装置および SONY KV-14MD1 テレビで再生し、ブロックの揺動・移動・脱落の状況を調べた。また、適宜 35 mm カメラで写真撮影を行った。

(4) 堤体模型

模型の堤体は、中心部に捨石として 38 g (径 47 mm) 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 24 g (平均粒径 41 mm)、水槽 B には、47 g (平均粒径 56 mm)、水槽 C には 7.5 g (平均粒径 27 mm)、水槽 D には 3 g (平均粒径 21 mm) の砕石を使用した。テトラポッドの被覆斜面勾配は 1:4/3 とし、法面のみに模型のテトラポッドを積み、非越波実験の条件に対する対応するようにした。

(5) 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、1.82, 2.30, 2.77, 3.40 及び 4.27 の 5 種類の異なった比重の模型を用意した。造波装置の最大発生波高が約 32 cm であることを考慮し、模型重量を 27 gf~2,330 gf の範囲で変化させた。全体で模型は 21 種類用意した。この模型の一覧が表—2 に示されている。また、写真—1 には模型分類番号 “D” について各比重のブロックの大きさを比較して示してある。



写真—1 比重の違いによるブロックの大きさの比較 (5 cm 方眼)

表—2 実験に使用した各種の比重の模型テトラポッド

模型 分類 番号	比重 番号	5	4	3	2	1	移動 限界波高 H_c (cm)
	W_t/W	1.82	2.30	2.77	3.40	4.27	
A	l (cm)	7.16	4.52	3.29			8.6
	w (gf)	186.4	58.9	27.7			
B	l (cm)	9.04	5.68	4.14			10.8
	w (gf)	372.7	117.8	55.4			
C	l (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	l (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	l (cm)		14.15	10.48	7.72	5.68	26.9
	w (g)		1811.0	886.4	435.2	218.6	
F	l (cm)		8.28				15.7
	w (g)		368.0				

3. 実験方法

それぞれの模型の大きさと重量に見合った小水槽の捨石斜面にテトラポッドの模型を 2 層乱積みにし、特に静水面上のブロックは赤色に着色し、被害の様子を確認しやすくした。波の周期を 1.0~3.0 sec まで 0.5 sec おきに变化し、各周期について波高を小さいものから段階的に大きくする方法で行った。ブロックの移動、脱落などの被害の挙動を目視及びビデオカメラを使用して記録した。さらに、砕波が起こった場合については、その種類 (崩れ波、巻き波、砕け寄せ波)、汀線から砕波点までの距離、砕波高、砕波水深を測定した。

4. 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、ついに “脱落” に至る。ブロックの被害については次のように定める。

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。

被害率は、従来より用いられている次の式 (1) によることにする。

$$\text{被害率}(\%) = \frac{\text{移動・脱落した個数}}{\text{使用した全ブロック個数}} \times 100 \quad \cdots (1)$$

また、運輸省の災害調査資料 (1975) から、現地海岸のテトラポッドについても、被害率が比較的大きい (30~50%) 場合について、参考のために表—3 にまとめている。この表には范ら (1983) の研究を参考に、 $H_{rea} \div 1.5 H_{1/3}$ で規則波に変換して求めた K_D 値が示してあ

表-3 現地海岸における被害データ

PORT	BLOCK	W (t)	T (s)	DAMAGE (%)	H _{1/3} (m)	K _D	R _e	被災年月日
浜名港	TETRA	3	13	50	5.6	64.6	6.7E+06	S47.9.16(台風20号)
浜田港	TETRA	20	13	50	8.0	23.6	1.6E+07	S46.1.4 (低気圧)
下田港	TETRA	8	12	30	5.0	14.4	9.3E+06	S45.8.21(台風10号)
下田港	TETRA	16	12	30	5.0	7.2	1.2E+07	S45.8.21(台風20号)
延岡港	TETRA	13	14	50	4.0	4.7	9.6E+06	S46.8.30(台風23号)
宮崎港	TETRA	8	14	50	4.0	7.4	8.3E+06	S46.8.5 (台風19号)
宮崎港	TETRA	5	14	50	4.0	11.8	7.1E+06	S46.8.30(台風19号)

表-4 記号分類表

模型分類番号	比 重				
	5	4	3	2	1
A	▷	◊	◻	◼	◽
B	▷	◊	◻		
C	▷	◊	◻	◼	◽
D	▷	◊	◻	◼	◽
E		◊	◻	◼	◽
F		◊			
現地	◯				

接取り出して検討してみる。安定性と碎波帯相似パラメータの関係については、樫木ら(1982)は、斜面勾配 1:2 の捨石防波堤斜面について実験的研究を行い、碎波帯相似パラメータが $\xi = 2.0 \sim 3.0$ で、波が斜面上を

る。以下の検討では、このような現地データも含めて用いることにする。

5. 比重変化と安定性

実験結果の被害率が $D=0 \sim 1\%$ について、安定係数 K_D とブロックの比重の関係を整理し、図-2 に示してある。図中の記号は、表-4 に従っている。この図から、実験結果はばらつきがかなり大きく、 K_D 値と比重の関係を読みだすことが困難である。

run-up および run-down する水粒子の最大流速が、斜面上の波の共振現象のために $\sqrt{gH}$ (H : 波高) に比例するという Hudson の仮定に合わなくなるとした。そのために、捨石斜面では $\xi = 2.0 \sim 3.0$ のとき、安定係数 K_D 値が最小値をとる。しかし、 $\xi > 4.0$ 以上になれば、Hudson の仮定が成立することを指摘した。

(1) 理 論

Hudson 式による安定係数 K_D は、次式のように表わされる。

$$K_D = \frac{w_r H^3}{W \{ (w_r/w) - 1 \}^3 \cot \alpha} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 H : 波高、 W : ブロック重量、 w_r : ブロックの単位体積重量、 $\{ (w_r/w) - 1 \}$: ブロックの水中比重、 α : ブロック被覆法面角度である。一方、碎波帯相似パラメータ ξ は次のように表される。

$$\xi = \tan \alpha / \sqrt{H/L_0} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 L_0 : 沖波長である。さらにブロックの形状寸法 $(W/w_r)^{1/3}$ と波高によるレイノルズ数 R_e は次のように表せる。

$$R_e = \frac{(W/w_r)^{1/3} \sqrt{gH}}{\nu} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ν は水の動粘性係数である。

式(2)の安定係数を、式(3)および式(4)を用いて、書き直すと、次のように表せる。

$$K_D = \frac{Re^2}{\xi^4} \cdot \frac{1}{\{ (w_r/w) - 1 \}^3} \cdot \frac{1}{W/w_r} \cdot \frac{1}{\cot^3 \alpha} \cdot \frac{\nu^2}{g} \dots\dots\dots (5)$$

この式(5)によれば、 K_D 値は碎波帯相似パラメータ ξ 、レイノルズ数 R_e 、ブロックの水中比重、ブロックの体積、斜面勾配、流体の動粘性係数および重力の加速度など多くの影響を直接受けることがわかる。いま、安定係数 K_D と比重 (w_r/w) の関係に及ぼす碎波帯相似パラメータの影響に注目すれば、式(5)は、次式のように表せる。

$$K_D = \frac{C_1}{\xi^4 (w_r/w - 1)^3} \dots\dots\dots (6)$$

この式から、 K_D は水中比重の -3 乗に、 ξ の -4 乗

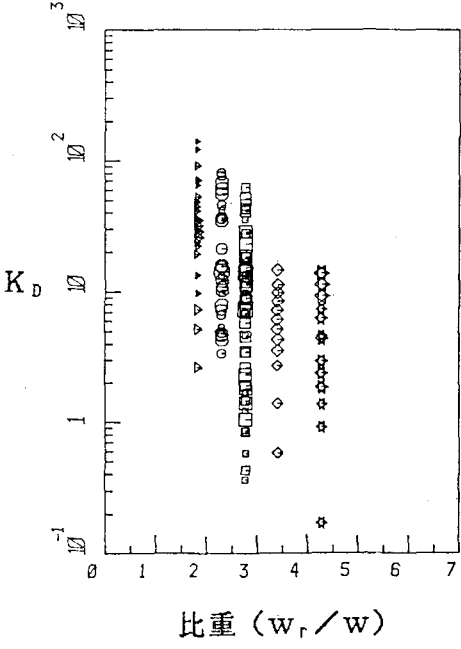


図-2 安定係数 K_D と比重の関係

6. 安定係数と碎波帯相似パラメータ

5. で検討したように、実験結果を安定係数と比重の関係で整理しても、ばらつきが大きく、比重の効果がわからない。このようにばらつく理由として、他の要因による影響が含まれているためと考えられる。そこで、碎波帯相似パラメータ及び、レイノルズ数などの影響を直

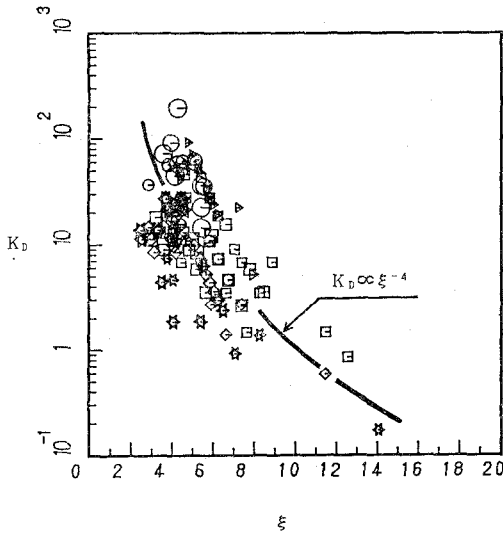


図-3 安定係数と碎波帯相似パラメータの関係

に比例することがわかる。

(2) 実験結果との比較

実験結果の中で被害率 $D=0\sim1\%$ を対象に、すべての比重について、安定係数 K_D と碎波帯相似パラメータとの関係を整理した結果を図-3に示してある。この図には、現地海岸における資料として被害率 $30\sim50\%$ のケースが比較のため併示してあるが、実験と傾向がよく一致している。この図中の記号は、表-4 に示されている。先の K_D と比重の関係を示した図-2 では、データのばらつきが大きかったが、図-3 では、データのばらつきは少なく碎波帯相似パラメータが大きくなるにつれて、 K_D 値が小さくなり安定性が悪くなっていることが分かる。しかし、図-3 では、 $\xi < 3$ の範囲のデータが少ないので榎木ら(1982)の指摘する共振現象については十分検討できない。この図中には、式(6)による $K_D \propto \xi^{-4}$ の関係曲線が入れてあるが、実験の傾向と比較的よく合うことがわかる。

さらに、比重の影響が詳しく調べるため、各比重ごとに K_D と ξ の関係を整理した結果が図-4(a)~(e)に示してある。特に、図-4(b)には現地データも含めてあるが、実験の傾向とよく一致している。これらの図中には、 $K_D = C \cdot \xi^{-4}$ の関係が同様に示してある。これらの図より、各比重とも多少のばらつきはあるが、 $K_D \propto \xi^{-4}$ の関係と傾向がよく合うことがわかる。図-4(a)~(e)の関係をまとめたものが、図-4(f)に、比重をパラメータにしてまとめている。さらに、この図-4(f)に基づいて K_D と比重の関係で再整理した結果が図-5に示してある。このように、図-4および5から、安定係数 K_D は比重の-3乗、また碎波帯相似パラメータの-4乗に比例することがわかる。

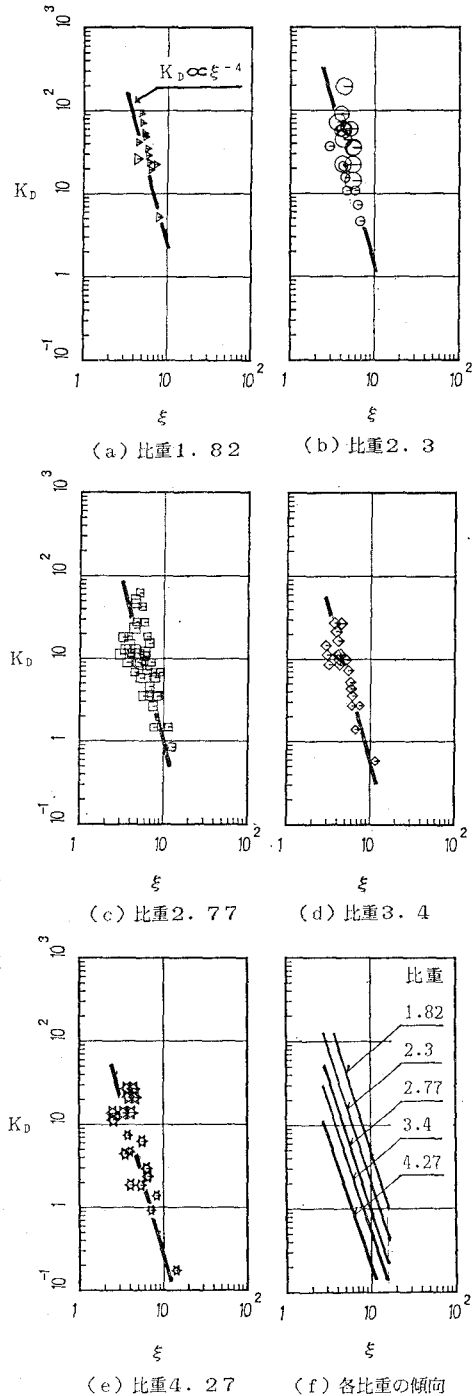


図-4 安定係数と碎波帯相似パラメータの関係に及ぼす比重の影響

7. 安定係数とレイノルズ数

式(5)から、レイノルズ数 Re は、安定係数と $K_D \propto Re^2$ の関係にあることがわかる。そこで、実験結果の被害率 $D=0\sim1\%$ および現地データを加えて図-6に整

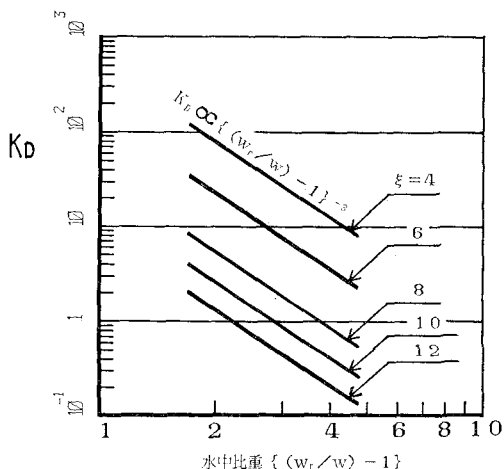


図-5 安定係数 K_D と比重の関係に及ぼす碎波帯相似パラメータ ξ の影響

理してある。さらに、参考のために、島田ら (1986) が行った数多くの実験の中で、普通コンクリート (比重 2.3) のテトラポッドを用いて行った結果も図中に“●”印で示してある。この図中で用いたデータは小さな模型から現地海岸サイズまで形状寸法は 150 倍、重量にして $(150)^3 \approx 340000$ 倍変化するので、レイノルズ数は 1000 倍変化している。この図-6 から、レイノルズ数が大きくなると (形状寸法が大になる)、 $K_D \propto Re^2$ 値も大きくなることがわかる。図中には、 $K_D \propto Re^2$ の関係が入れて比較的小さい Re 数では実験値とよく合う。しかし、 Re があるが、レイノルズ数が大きく ($10^5 \leq Re$) なるにつれて、この関係が成立しなくなることがわかる。このことは模型 $K_D \propto Re^2$ と波のスケール比によって K_D は一定でなく、いわゆる縮尺効果の影響が介入することを意味するものである。縮尺効果については、島田らが、 $Re = 10^4 \sim 10^6$ の範囲で議論しているが、現地データを含めて整理した図-6 から $Re = 10^4 \sim 10^7$ の広い範囲で K_D 値が縮尺効果のために、大きく変化することがわかる。すなわち、ブロックの形状寸法が小さく Re 数が小さいと、 K_D 値は小さく、ブロックの形状が現地サイズになり Re 数が大きくなると、 K_D 値も大きくなる。そのために、 K_D 値は約 100 倍変化することがわかる。

8. 結 言

(1) 実験結果および現地データを用いて、 K_D 値と

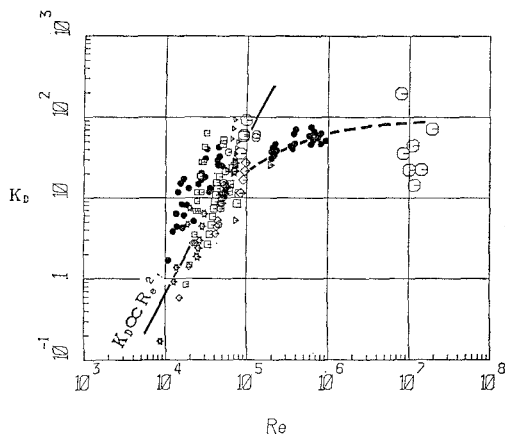


図-6 安定係数とレイノルズ数の関係

碎波帯相似パラメータ ξ の関係を調べた結果、 Re 数の影響を考慮していないが、 ξ が大きくなるにつれて K_D 値が小さくなるこがわかった。この傾向は、 $K_D \propto \xi^{-4}$ で表される。さらに、 K_D 値と ξ の関係には比重の影響が強くなることがわかった。

(2) K_D 値と比重の関係は、 $K_D \propto ((w_r/w) - 1)^{-3}$ で表され、比重が重くなるにつれて K_D 値が小さくなる。当然のことながら、この関係に ξ の影響が強くなる。しかし、模型が同程度の高さ (レイノルズ数がほぼ同じ) の場合、安定係数 (K_D 値) は比重が変化してもあまり変わらない。

(3) 安定係数 K_D は、実験規模が小さく Re 数が小さい場合、 K_D 値は Re 数の 2 乗に比例する。しかし、実験規模が大きくなるにつれて、 $K_D \propto Re^2$ の関係は成り立たなくなり、縮尺効果の影響が入ることがわかった。

参 考 文 献

- 運輸省港湾技術研究所 (1975): 港湾技研資料, No. 200, 被災防波堤集覧 (その2)。
- 榎木 亨・柳 青尙・大西明徳 (1982): 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, pp. 428-432。
- 范 期錦・渡辺 晃・堀川清司 (1983): 不規則波に対する消波ブロック傾斜堤の安定性に関する実験的研究, 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 352-356。
- 島田真行・藤本稔美・齊藤昭三・榊山 勉・平口博丸 (1986): 消波ブロックの安定性に関する模型縮尺効果について, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 422-445。