

消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果

榊山 勉*・鹿島 遼一*

1. 結 論

消波ブロックの安定性に関する研究は、消波ブロックの所要重量算定式として広く用いられている Hudson 式 (Hudson, 1959) 中の K_D 値と被害率との関係や新しい所要重量算定式の提案に関心がもたれ多くの実験的研究が行われてきた。しかしながら、消波ブロックに作用する波力を測定した研究や実験スケール効果に関する研究は少ない。著者ら (1986) は大型造波水路を用いた大スケールの実験を実施し Thomsen ら (1972) と同様に、小スケールの実験では消波ブロックの安定性を過小評価する結果を得た。しかしながら、その理論的な説明は未だされていない。

そこで、本研究では消波ブロックに作用する波力に及ぼす実験スケール効果について、理論的な考察を加え、水理実験によりその検証を行う。そのため、直接波力を測定し、実験スケールによる相対的な波力の変化を調べ、さらに、基礎的な実験を行い理論的な考察を検証する。

2. 波力のスケール効果に関する理論的考察

波力に関する実験スケール効果という視点から Hudson 式の誘導過程を再検討した (榊山・鹿島, 1989)。Hudson 式は波力 F を式 (1) の Morison 式で表し、式 (2) の消波ブロックの抵抗力 F_r とから安定限界における所要重量 W について解かれたものである。

$$F = \frac{1}{2} \rho C_D A u |u| + \rho C_M V \dot{u} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 ρ : 流体密度、 C_D : 抗力係数、 C_M : 慣性力係数、 u : 流速、 $\dot{u}$: 加速度、 A : ブロックの投影面積、 V : ブロックの体積である。

$$F_r = f W' \cos \theta \pm W' \sin \theta \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 f : 摩擦係数、 W' : ブロック水中重量、 θ : 防波堤斜面勾配である。

安定限界を $F = F_r$ で与え、式 (1) と式 (2) より、所要重量 W は式 (3) で表される。

$$W = \frac{1}{8} \frac{k_a^3 \gamma_r C_D^3 (u|u|)^3}{k_v^2 \{ (f \cos \theta \pm \sin \theta) (S_r - 1) g - C_M \dot{u} \}^3} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 k_a : 面積係数、 k_v : 体積係数、 γ_r : ブロックの単位体積重量、 S_r : ブロックの比重、 g : 重力加速度である。

さらに、Hudson 式の誘導における仮定①慣性力を無視する ($C_M = 0$)、②波高 H は水深 h に比例し、流速 u を長波近似で表す、即ち、 $H = \gamma h$ 、 $u = \alpha \sqrt{g h}$ より $u = \alpha \sqrt{\gamma g H}$ を用いる。さらに、ブロック重量の斜面方向成分 $W' \sin \theta$ を無視すると次式を得る。

$$W = \frac{1}{8} \frac{k_a^3 \alpha^6 \gamma_r C_D^3 H^3}{k_v^2 \gamma^3 \{ f \cos \theta (S_r - 1) \}^3} \dots \dots \dots (4)$$

一方、Hudson 式は次式で表される。

$$W = \frac{\gamma_r H^3}{K_D \cot^3 \theta (S_r - 1)^3} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、式 (4) と式 (5) の Hudson 式を比較する。式 (4) の分母の $\cos \theta$ に対して、Hudson 式では $\cot \theta$ となっているのは Hudson が stability number N_s を $\cot \theta$ で整理したためである。 N_s と K_D との関係は次式で表される。

$$\frac{\gamma_r^{1/3} H}{W^{1/3} (S_r - 1)} = N_s = K_D^{1/3} (\cot \theta)^{1/3} \dots \dots \dots (6)$$

$\theta = 0$ で $\cot \theta \rightarrow \infty$ となり、 $W \rightarrow 0$ と不合理な結果を与えることは従来から指摘されている。 θ は幾何学的なパラメータであるから、所要重量 W に関する実験スケール効果という視点においては直接的には無関係である。

K_D 値は周知のように数多くの変数をまとめたパラメーターである。そこで式 (4) と式 (5) の比較より波力に関する実験スケール効果という視点からパラメーターを抽出し比較すると、 K_D 値は抗力係数 C_D と次式で表されるような密接な関係にあることが導かれる。

$$K_D \propto \frac{1}{C_D^3} \dots \dots \dots (7)$$

即ち、慣性力が作用しない場では、 K_D 値は抗力係数 C_D の 3 乗に反比例する。抗力係数がレイノルズ数の関数であることから、相対的に等しい波力を与える K_D 値

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所

は実験スケールにより変化することが導かれる。

波力中の慣性力と抗力について、樫木ら(1982)は surf similarity パラメーター $\xi = \tan \theta / \sqrt{H/L_0} = 2$ 近傍で慣性力が抗力と同程度もしくはそれ以上の値をとることを示している。また、中村・小野塚(1988)は一般的に慣性力が卓越するとしているが、中村らの実験条件は波力が相対的に小さいときに限られている。抗力と慣性力との比は波高に依存するため、上記の結論は一般的にいえるものではない。円柱の例(小田, 1982)を引用すれば、波高が小さい範囲では慣性力が卓越し、波高が大きくなるにしたがって、抗力が卓越してくる。その中間では慣性力と抗力が同程度となる領域が存在する。Hudson 式はブロックの安定限界を表す式であるから、仮定①の妥当性は特にブロックの安定性が問題となる波高の大きい条件のもとで議論する必要がある。

3. 2層被覆層内の消波ブロックに作用する波力

実験スケールによる相対的な波力の変化を調べるために、2層被覆層内の消波ブロックに作用する波力を4種類の大きさの消波ブロック(重さ2.2 kg, 570 g, 120 g, 60 g, コンクリート製, 比重2.3)について測定した。実験は長さ51m, 幅0.9m, 深さ1.2mの2次元造波水路を用いてフルードの相似則にしたがい行った。図-1に測定部の概略を示す。消波ブロックを鋼製の支柱に取り付け、3分力計を用いて波力測定を行った。この方法では支柱に作用する波力まで同時に測定することになるため、もう1台の分力計と支柱を用いて支柱のみに作用する波力を測定し、これを差し引くことにより、消波ブロックに作用する波力を求めた。実験条件を表-1に示す。

図-2にブロックの水中重量 W' で無次元化した斜面沿いの波力の最大値 F_b/W' と沖波波形勾配 H_0/L_0 の関係を示した。図より重さ570 gの結果を除いて、ブロックが小さいほど相対的に大きな波力が作用していることがわかる。重さ60 gのブロックには重さ2200 gのブロックに比べて約4倍(相対的に)の波力が作用している。

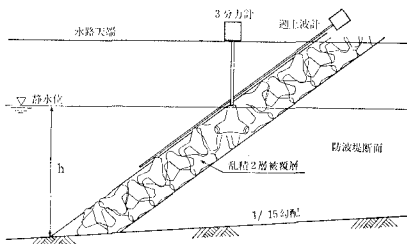


図-1 防波堤断面形状と消波ブロックの設置状況

表-1 実験条件(ブロックに作用する波力の測定)

CASE	ブロック		法先水深 $h(\text{cm})$	周 期 $T(\text{s})$	法先波高* $H(\text{cm})$
	重量 W (g)	高さ b (cm)			
F4	2200	15.0	68.2	2.32	16.9~33.3
F3	570	9.6	43.6	1.85	11.6~27.7
F2	120	5.8	26.4	1.44	6.9~17.6
F1	60	4.6	20.9	1.27	5.7~14.3

* 首藤の理論により一様水深部での波高から換算して求めた。

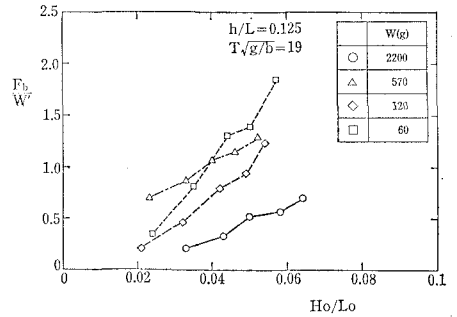


図-2 実験スケールによる相対波力の変化

重さ570 gの場合においては波力波形のパターンが異なっているために他の3種類のブロックの結果と異なった傾向を示した(神山・鹿島, 1989)。また、残りの3種類のブロックについても波力のパターンが若干異なっていた。これは、波力測定のために設置した消波ブロックの位置が密着に一致しなかったことや被覆層の乱積みの影響のためであろう。

以上のように、週上波による消波ブロックに作用する波力を直接測定した結果、小スケールの実験が相対的に大きい波力を与える傾向にあることが確認された。

4. 波動場における慣性力係数と抗力係数

消波ブロック単体の慣性力係数と抗力係数を求めるために、進行波による波力を測定した。図-3に示すように3章と同様に2組の分力計で波力波形を測定した。また容量式波高計を用いて水面波形を測定した。消波ブロックは3次元形状をなすため、波の軌道運動の往復で投影面積が等しくなる向きに消波ブロックを設置した。この実験に用いたブロックは5種類(重さ6.8kg, 2.2kg, 570g, 120g,

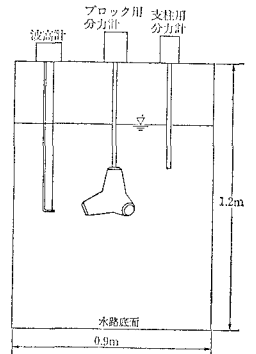


図-3 消波ブロックの慣性力、抗力係数の測定

表-2 実験条件(慣性力係数, 抗力係数の測定)

CASE	ブロック		水深 $h(\text{cm})$	周期 $T(\text{s})$	波高 $H(\text{cm})$
	重量 W (g)	高さ b (cm)			
C5	6800	22.0	92.5	2.87	6.2~31.8
C4	2200	15.0	90.8	2.36	7.0~34.3
C3	570	9.6	89.9	1.87	7.3~35.9
C2	120	5.8	57.3	1.45	4.2~21.4
C1	60	4.6	49.7	1.28	4.4~20.9

60 g, 比重 2.3) で, 波の周期はフルードの相似則にしたがい, 水深と波高は水粒子速度, 加速度をできるだけ広範囲に与えられるように設定した. 慣性力係数と抗力係数は Morison 式を適用し, フーリエ平均法 (小田, 1982) によって算出した. これらの係数の算出のための水粒子速度, 加速度は実測の水面形から Stokes 波第 5 次近似解 (磯部ら, 1978) を用いて与えた. 実験条件を表-2 に示す.

図-4 に水面波形 (上段) と波力波形 (下段) の実測値と計算値の 1 例を示す. 水面波形の実測値 (実線) と計算値 (一点鎖線) は良く一致し, Stokes 波 5 次近似解の適用が妥当であることを示している. また, 波力波形には実測値 (実線) と計算値である抗力 F_D , 慣性力 F_I の各成分ならびその合力 F (一点鎖線) を示した. 波力波形の実測値と計算値の合力 F も良く一致し, Morison 式の適用の妥当性が確認された. 図-5 に消波ブロック単体の慣性力係数 C_M , 抗力係数 C_D とレイノルズ数 Re との関係を示す. 横軸はレイノルズ数 $Re=ub/\nu$ で示した. ここに, u_c : ブロック重心深さでの波峰時の流速, b : ブロック高さ, ν : 動粘性係数である. 個々の重さのブロックの慣性力係数 C_M , 抗力係数 C_D に着目する

と, レイノルズ数 Re が大きくなるにしたがって, C_M , C_D はとも減少する. 実験スケール効果を調べるためにはフルード数一定の条件に着目する必要がある. このためこれと等価である KC 数一定の関係を示したのが図中の曲線である. ここで, $KC=u_cT/b$ で定義した. 図より, レイノルズ数が増加するにしたがって, KC 数一定のもとで慣性力係数 C_M は増加し, 抗力係数 C_D は減少する傾向を示している.

このように, 消波ブロックの慣性力係数, 抗力係数は基本的には円柱のそれらと同じ性質を持つものである (Sarpkaya, 1976).

図-6 に波力中の抗力と慣性力それぞれの最大値の比とレイノルズ数 Re との関係を示す. 個々の大きさのブロックごとにレイノルズ数 Re が大きくなるにしたがって抗力が卓越してくることがわかる. 重さ $W=60\text{ g}$ のブロックでは抗力・慣性力比 F_D/F_I は約 3 に達している. この条件で波力の最大値はブロックの水中重量の約 0.4 倍であった. 重さ 2200g, 6800 g の実験では造波水路の制限から大きな波がおこせなかったために F_D/F_I は約 1 程度にとどまっているが, さらに大きな波高に対しては他の結果と同様に F_D/F_I が大きくなり, 抗力が卓越することが容易に予想される.

5. 定常流中の抗力係数

最後に, 定常流中での消波ブロックの抗力係数を測定した. この抗力係数は慣性力が作用しないもとで消波ブロックの水中重量に等しい流体力を与えるものであり, 安定限界における実験スケール効果を示す指標になるものである. 実験には断面 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, 高さ 4 m の水槽を用い, 6 種類の重さ (6.8 kg, 2.2 kg, 1.26 kg, 280 g, 60 g, 16 g, 比重 2.3) の消波ブロックの沈降速度を測定した. 沈降速度の測定にはビデオを用い, ビデオ・タイ

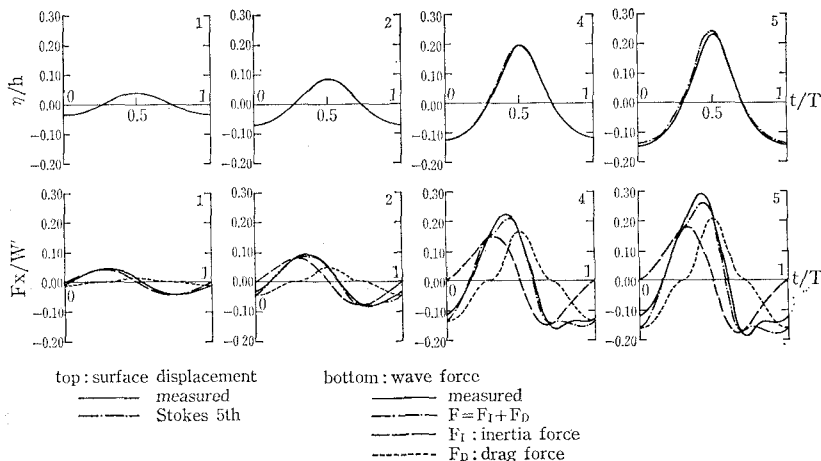
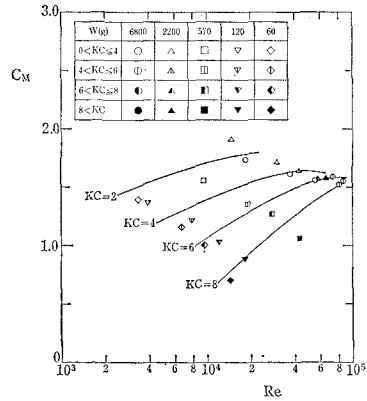
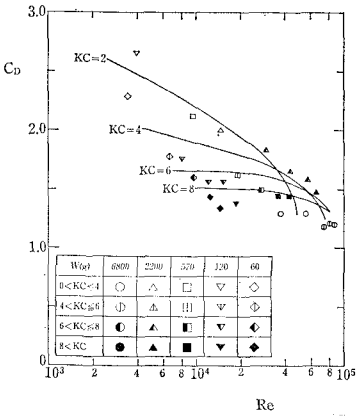


図-4 水面波形 (上段) と波力波形 (下段)



(a) 慣性力係数 C_M



(b) 抗力係数 C_D

図-5 消波ブロックの波力係数

マーにより時間を記録した。深さ 2.5m, 3.0m, 3.5m の 3 箇所の前後 0.5m の区間を通過する時間をビデオのこま送りから求め沈降速度を算出した。測定は各々の重さのブロックについて 5~10 回ずつ行った。鉛直方向の一様性を確認し、全測定の平均値を沈降速度 w とした。抗力係数 C_D は $C_D = W / (1/2 \cdot \rho A w^2)$ より算出した。

図-7 に抗力係数 C_D とレイノルズ数 R_b との関係を示す。横軸のレイノルズ数 R_b は沈降速度 w とブロック高さ b を用いて、 $R_b = wb/\nu$ で定義した。レイノルズ数 R_b が小さい領域で多少のばらつきがあるものの、レイノルズ数 R_b が増加するにしたがって抗力係数 C_D は減少する。但し、円柱や球の場合にみられるような臨界状態は表れていない。概ね、 $R_b = 10^4$ から 10^6 で $C_D = 1.1$ から 0.6 に変化している。このことは、消波ブロックの水中重量に等しい流体力を与える沈降速度がフルードの相似則に従わないこと、小スケールの実験ほど、相対的に大きな流体力が作用していることを示している。

この図-7 の結果を、著者ら(1986)が示した消波ブロックの安定性に関する実験スケール効果の結果と照らし

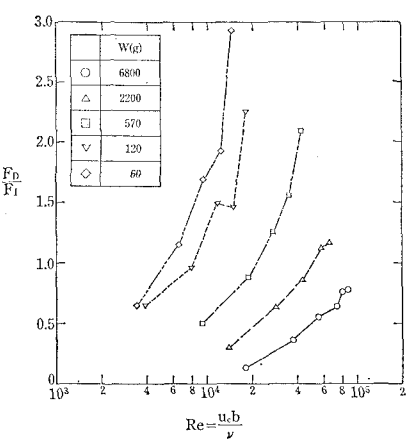


図-6 波力における抗力と慣性力との比

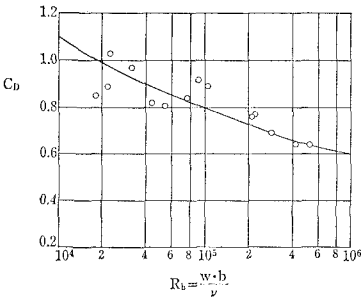


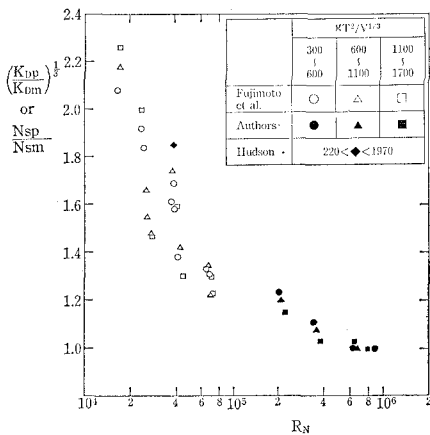
図-7 定常流中の抗力係数 C_D とレイノルズ数との関係

合わせたのが図-8 である。図-8 (a) は K_D 値の 1/3 乗または N_S を用いて消波ブロックの安定性に及ぼす実験スケール効果を示したものである。横軸はレイノルズ数 $R_N = (W/\gamma_r)^{1/3} \sqrt{gH}/\nu$ である。図-8 (b) は (a) と比較するために、図-7 の結果を $R_b = 10^6$ における C_D の値で無次元化して表した。図-8 (a) と (b) の横軸は厳密に一致しないが、同一のブロックの大きさに対する R_b と R_N はほぼ等しい。図-8 (a) には慣性力の影響が含まれるために、(b) の変化と厳密には一致しないものの、レイノルズ数が 10^4 から 10^6 の範囲で縦軸の値が両者とも約 1/2 に減少している。このように、実験スケール効果を Hudson 式の K_D で整理した図-8 (a) の結果は式 (7) の関係から主として抗力係数の変化を示すものである。

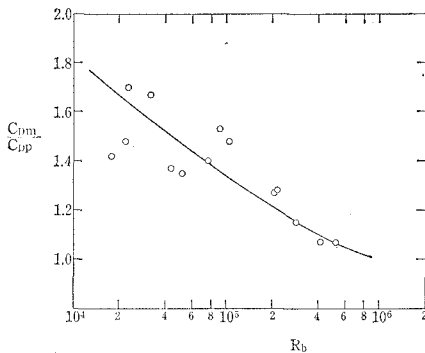
6. 結 論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) これまで被害率一定のもとで定数として扱われてきた Hudson 式の K_D 値は、慣性力が作用しない条件のもとでは消波ブロックの抗力係数の 3 乗に反比例する。したがって、抗力が卓越する場では、相対的に等し



(a) ブロックの安定に関する実験スケール効果



(b) 抗力係数による実験スケール効果の表示

図—8 ブロックに作用する波力の実験スケール効果

は、実験スケールにより変化し、小スケールの実験ほど相対的に大きな波力が作用する。

(3) レイノルズ数が大きくなると、消波ブロックの抗力係数は減少し、一方、慣性力係数は大きくなるが、大きな波高のもとでは、流速の2乗に比例する抗力が卓越する。

(4) 消波ブロックの安定限界における波力の実験スケール効果は主として相対的な抗力の変化に起因するものである。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司 (1978): 保存波の振動解の波高による表示, 第33回年講概要集, II, pp. 760~761.
- 小田一紀 (1982): 構造物に作用する波力—円柱構造物を中心として—, 水工学シリーズ82—B—4, 土木学会水理委員会.
- 榊山 勉・鹿島遼一 (1989): 消波ブロックに作用する波力に関する実験スケール効果, 電力中央研究所報告, 研究報告 (印刷中).
- 榎木 亨・柳 青魯・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.
- 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. 442~445.
- 中村孝幸・小野塚孝 (1988): 異形ブロック堤における部材波力の特性とエネルギー逸散機構について, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 712~716.
- Hudson, R. Y. (1959): Laboratory Investigation of rubble mound breakwaters, Proc. of ASCE, Vol. 85, No. WW3.
- Sarpkaya, T. (1976): In-line and transverse force on cylinders in oscillatory flow at high Reynolds number, Proc. of the Offshore Technology Conference, Vol. II, pp. 95~108.
- Thomsen, A. L., P. E. Wohlt and A. S. Harrison (1972): Riprap stability on earth embankments tested in large and small-scale wave tanks, CERC Technical Memorandum No. 37.

い波力を与える K_D 値は実験スケールにより変化する。

(2) 2層被覆層内の消波ブロックに作用する波力