

不規則波による消波ブロック被覆堤の安定実験

谷本勝利* ・ 大里睦男** ・ 高岡征二郎***
内田豊彦****・ 池田辰男*****

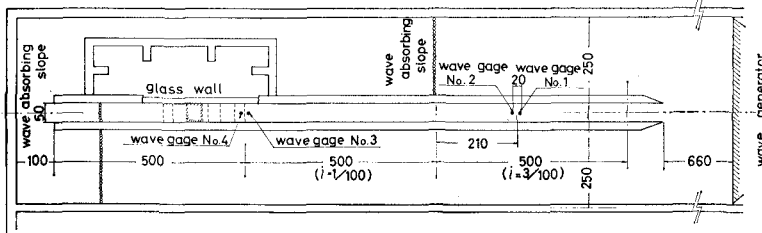
1. ま え が き

直立壁前面に消波ブロックを適切に投入することによって、反射、越波、波力等が軽減される。この防波堤構造を消波ブロック被覆堤と呼び、わが国における比較的水深の浅い所での防波堤の主流型式の一つとなっていることは周知のとおりである。そのため、設計上の水理的諸問題に対し多くの研究が行われてきており、消波ブロックについては Hudson 式により所要重量を、直立部については森平ほかの方法あるいは合田式を準用する方法により作用波力を検討することができる。

しかしながら、Hudson 式や森平ほかの方法においては、設計計算に有義波高を適用するが、実際の不規則波の作用との関連は必ずしも明白でなく、また K_D 値など算定式の係数は実験結果等に基づいて適切に与えなければならない。したがって、消波ブロックの安定性については条件に適合した水理模型実験、それも不規則波によって検討するのが好ましいといえる。本報告は、特定の条件に限定したものであるが、不規則波による消波ブロック被覆堤の安定実験を行った 1 例の結果をとりまとめたものである。

2. 実験水路および模型

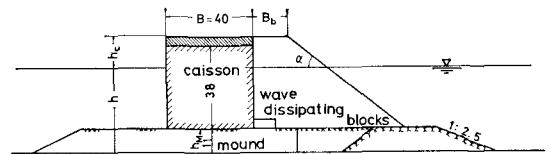
本実験に用いた水路は、図—1 に示しているように、



図—1 実験水路

幅 5 m、長さ 30 m の水槽の中に造波板中立位置から 6.6 m の距離を離して隔壁を設け、幅 50 cm の水路としたものである。水路床は造波板から 7.6~12.6 m の 5 m 区間を 3/100 こう配、つづいて 17.6 m までの 5 m 区間を 1/100 こう配としてあり、あとは水平床である。

模型堤体の断面は図—2 に示したとおりである。直立部はコンクリートケーソンに、上部工として木製版を固定したもので、重量の調節はその内室に鉛の方塊を入れて行う。マウンドについては、壁体の滑動面となる部分をセメントモルタルで固めた砕石版とし、滑動により状態が変わることを防止した。



図—2 堤体模型

表—1 模型消波ブロックの諸元

ブロックの種類	高さ (cm)	空中重量 (gf)	標準偏差 (%)	体積 (cm ³)	単位体積重量 (gf/cm ³)
Aブロック	10.5	743.3	2.63	320.3	2.32
Bブロック	12.0	647.2	3.17	284.2	2.28

実験に用いた模型ブロックは A ブロックと B ブロックの 2 種であり、表—1 にその諸元を示しておいた。A ブロックの平均重量は 743.3 gf、B ブロックの平均重量は 647.2 gf である。

3. 実験波の特性

本水路の造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン型で、造波板の長さは約 5 m である。入力信号は磁気テープに作成しておき、データレコーダから入力する。今回の実験では、Bretschneider・光易型のスペクトルを目標として種々用意してある標準入力信号のうち G 波を用いた。ここに、G 波はこの入力信号に名づけた符号であり、同一目標スペクトルに対

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部防波堤研究室長

** 運輸省第二港湾建設局八戸港工事事務所むつ小川原工場 (前港湾技術研究所水工部)

*** 正会員 運輸省第四港湾建設局八代港工事事務所長 (前第五港湾建設局設計室長)

**** 正会員 運輸省港湾技術研究所設計基準部自動設計室長 (前第五港湾建設局設計室)

***** 運輸省第五港湾建設局設計室

し、4種の波群が設定してある。これらを各々G1、G2、G3、G4波と呼ぶ。厳密に言えば所定の水深、波高に対してそれぞれ別の入力信号を作成すべきであるが、今回の実験ではすべてG波の入力信号を適用し、波高の変化は入力に際しての基準電圧 e を変化させることによった。

入射波形の測定は図-1に示しておいたように、設置予定の直立壁前面から造波機側8.4m地点にNo.1、それから20cm模型側にNo.2、および直立壁から1.2m地点にNo.3、その20cm模型側にNo.4の合計4台の容量式波高計によった。このうち、沖側のNo.1、No.2は主として反射波の影響をチェックするためのもので、実験データの解析に用いるのは堤前のNo.3およびNo.4での測定値である。

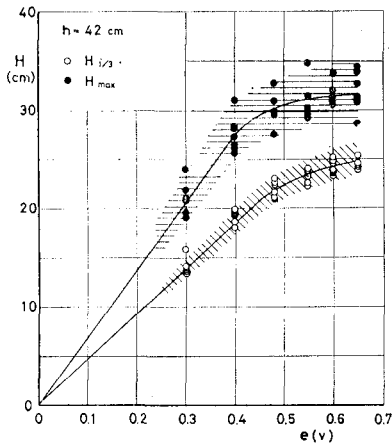


図-3 入力電圧 e と発生波高($h=42$ cm)

図-3はG1~G4の波群それぞれについて入力電圧 e とゼロアップクロス法による有義波高 $H_{1/3}$ 、最高波高 H_{max} の関係をまとめて示したものである。ただし、波高は測点No.3とNo.4の平均値をとっている。入力電圧が大きくなるにつれて波高は増大するが、それが鈍化傾向を示すのは碎波の影響による。G1~G4波について解析の対象時間範囲は常に同じとしたが、実現波数は入力電圧等により100~120波の範囲となった。これによって平均周期 $\bar{T}$ は1.8~2.2s、有義波周期 $T_{1/3}$ は2.3~2.8sの範囲で変化し、入力電圧が大きくなるにつれてやや長くなる傾向を示す。目標とした有義波周期は2.53sであり、ばらつきのほぼ平均値に対応している。

なお、通過波測定の際、No.1、2の波形から入・反射波を分離して反射率を求めているが、反射率は0.15以下である。また、堤体設置後は造波板からの再反射波の影響が問題となるが、本実験で用いた水路は模型の幅が50cmで、反射波は幅5mの水槽に拡散するようにしてあることもあって、ほとんど影響がない。

4. 消波ブロックの安定実験

(1) 実験の方法

消波ブロックの安定実験は堤体模型位置での水深 h が42cm、48cmについて実施した。消波工の諸元は表-2に示したとおりで、天端幅15.8cmはAブロック2列並びに相当する。ブロックは全断面乱積みである。

表-2 消波工の諸元(消波ブロック安定実験)

水深 h (cm)	ケーソン 基面水深 h' (cm)	天端高 h_e (cm)	消波工 天端幅 B_b (cm)	のりこう配 $\cot \alpha$	使用ブロック数 N_b	
					Aブロック	Bブロック
42.0	31.0	13.0	15.8	4/3	160~164	139
48.0	37.0	12.0	15.8	4/3	181	169

本実験では、小さな波によってある程度たたかれ、締め固められたあとの安定性を把える。そのため、新しく消波ブロックを乱積みしたのち、ブロックが移動しない程度の小さい波高の波を数百波作用させて初期状態とした。しかるのち、所定の実験波を波高の小さい波から作用させ、大きな波高の波に移るとき、前の波による状態をそのままとして、移動ブロックの個数はそれ以前のものも含めた累計で数える。最後の波まで終了して初めて消波ブロックを積直し、これを繰返すことにした。波数は同一入力電圧でG1~G4をそれぞれ2回づつ合計約1000波とし、有義波高はG1~G4の平均値を用いることにした。

今回の実験における被害率 D は次の式で定義している。

$$D = (n_a / N_b) \times 100 \quad (\%) \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、 N_b は断面を構成するブロックの総数、 n_a は当初の位置より1個分程度以上移動したブロックの累積数である。

ブロックの移動は実験時における観察により判定した。かなり激しく動揺してもほぼ元の位置に留まるものとか、若干移動したとしても結果的にほぼ元の位置に戻るもの、ほぼ同じ位置で半回転して向きを変えるものなどについては移動ブロックとしていない。他の実験との比較などにおいては、この被害ブロックの判定基準に注意することが必要である。

(2) 実験結果

実際の実験では $h=39$ cmについても安定性を調べたが、碎波によってそれ以上波高が大きくなる状態でも、A、B両ブロックとも被害率0であった。しかし、 $h=42$ cm、48 cmと水深が大きくなるにつれて被害が生じるようになる。

図-4はその $h=42$ cm、48 cmについて、有義波高と被害率の関係を示したものである。被害率は2回の繰返しでばらついているが、同一の有義波高でも水深が大

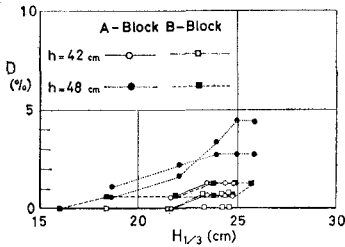
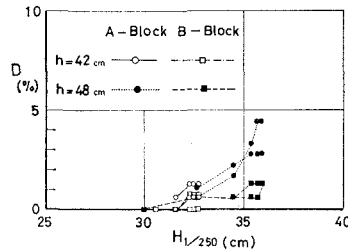
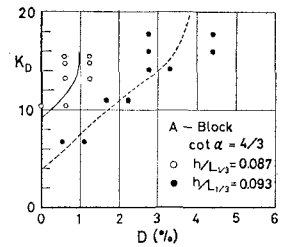
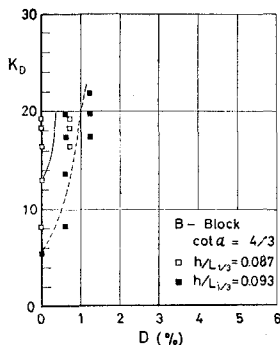


図-4 有義波高と被害率

図-5 $H_{1/250}$ と被害率図-6 被害率と K_D 値 (A ブロック)

きいほど大きくなる傾向を示している。また、移動個数が 1~2 個の初期の被害では A ブロック、B ブロックに大差ないけれども、波高増大につれて A ブロックの被害が進行するのに対し、B ブロックの場合にはそれほど進行しないといえることができる。これは B ブロックが主としてブロック同志の強いかみ合わせでもつタイプに属しているからであり、大きく移動はしないものの動揺はかなり激しい。今回の実験ではブロック自身の強度の相似性は考慮しておらず、ブロックが破壊することはなかったが、実際には強度に十分注意することが必要である。

さて、同じ有義波高でも水深によって被害率が異なるのは砕破帯内であって、最高波高と有義波高の比が異なることが一因と考えられる。ちなみに、図-5 は合田による算定図²⁾ から推定した $H_{1/250}$ を用いて書き換えたものである。ここに、 $H_{1/250}$ は約 400 波の最高波高の平均値に相当する。結果は水深による違いがほとんど認められなくなっており、消波ブロックの安定性においても代表波高として最高波高を用いるのが簡明であることを示唆しているといえる。

図-7 被害率と K_D 値 (B ブロック)

なお、図-6, 7 は有義波高 $H_{1/3}$ を用いて、Hudson 式における係数 K_D を求めてみたものである。 $h/L_{1/3}$ すなわち水深によって被害率と K_D 値の関係は異なり、 K_D 値は有義波高を用いる限り一定値で与えられないことを示している。このほかブロックの安定性は周期によっても変化するといわれている³⁾。したがって、Hudson

式における K_D 値を一定値で与えるならば、それは種々の条件を包含した代表値であって、個々の条件では相当程度変化するものであると考えるべきであろう。

5. 直立部の滑動波力実験

(1) 実験の方法

本実験は $h=42$ cm の条件で実施した。消波工の諸元は表-2 の同水深条件のものと同じであるが、消波ブロックは B ブロックのみである。一方、消波ブロックの天端幅については 15.8 cm のほか、23.7 cm と広くした条件についても検討した。

実験の手法としては滑動実験の手法を用いており、次の二つの限界状態を見出す方法による。

- a) 壁体重量を一定にしておいて、波高を種々に変化させたときの滑動量を測定し、滑動量が丁度 0 となる滑動限界波高を見出す方法
- b) 波の条件を一定にしておいて、壁体重量を種々に変化させたときの滑動限界重量を見出す方法

不規則波による実験では、a) の滑動限界波高は滑動回数と波高の超過出現率を対応させることにより求める⁴⁾。しかし、不規則波群中の個々の波高はさまざまな周期と結合しているから、波力は波高だけで決まらず、同一壁体重量であっても波群が異なれば当然滑動限界波高も異なってくる。したがって、種々の波列、規模の波群を作用させ、その平均値を一つの滑動限界波高とみなすことにする。また、b) の滑動限界重量に対しては不規則波群中の最高波高を対応させる。

滑動限界状態から滑動波力の逆算は、水平波力と壁体の摩擦抵抗力の静的釣合状態を考え、かつ揚圧力と水平波力の比が合田式において $\alpha_2=0$ としたときの揚圧力 U_G と水平力 P_G の比に等しいと仮定して次式により求める⁵⁾。

$$P_B = \mu W_{00} / (1 + \mu U_G / P_G) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 P_B は水平波力 (合力)、 μ は摩擦係数、 W_{00} は壁体の静水中重量 (滑動限界重量) である。

式 (2) において摩擦係数 μ は予め検定試験により与えておかねばならない。今回の実験では、マウンドとして碎石をセメントモルタルで固めた版を用いてお

り、検定試験の結果 0.65 を得た。しかし、通常の混成堤を対象として別に行ったセメントモルタル固定のマウンド ($\mu=0.65$) と、固めない捨石マウンド ($\mu=0.60$) の両方を用いた滑動実験結果では、この両者の間で滑動限界波高、滑動限界重量ともに明らかな差は認められず、本報告では通常の 0.60 の値を用いて整理することにした。

なお、滑動量は差動トランス式変位計を壁体背面に取付け、これをペン書きオシログラフに実寸相当の倍率で記録することにより測定し、各波について残留変位が認められる場合に 1 回の滑動とみなすことにした。

(2) 実験結果

図-8 は $B_0=15.8$ cm の場合について壁体重量と滑動限界波高の関係を示したものである。図中数字はデータ数で、データ数 6 以上については標準偏差の範囲も示してある。この標準偏差は平均値の 6~10% となる。壁体重量の増大につれて平均滑動限界波高は大きくなる傾向を示しているが、中には低下しているものもある。これはデータ数が少ないこともあって、実験のばらつきによるものと考えられる。

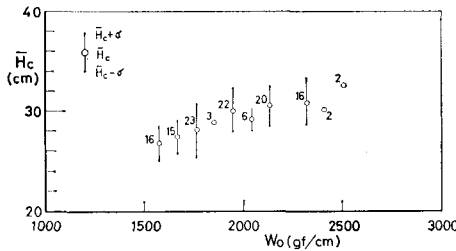


図-8 壁体重量と滑動限界波高

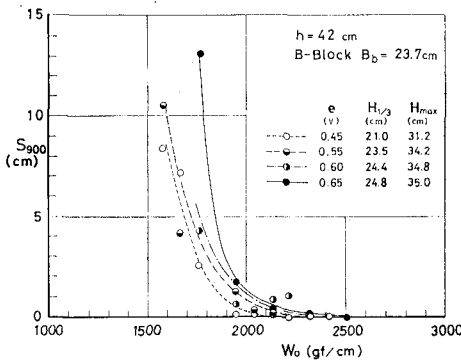


図-9 壁体重量と滑動量

図-9 に $B_0=15.8$ cm の場合の壁体重量 W_0 と約 900 波あたりの滑動量 S_{900} の関係を示した。ここに、約 900 波というのは同一入力電圧で G1~G4 をそれぞれ別々に 2 回づつ繰り返し作用させたもので、 S_{900} はその滑動量の総和をとったものである。データにはやや傾向から

はずれるものもある。図中の線はそれに構わず全体の傾向を眺めて引いた壁体重量と滑動量の関係を表わす。この関係から丁度滑動量が 0 となる滑動限界重量を求めるが、滑動量は小さくなってから、重量が増大しても容易に 0 とならないことが多い。

図-10 はこうした滑動限界波高、および滑動限界重量から求めた水平波力を無次元平均波力強度 $\bar{p}/w_0H$ のかたちで示したものである。 $B_0=15.8$ cm では 0.6~0.8 程度、 $B_0=23.7$ cm では 0.6~0.7 程度で、消波ブロックの天端幅が広い方がやや小さくなるようである。

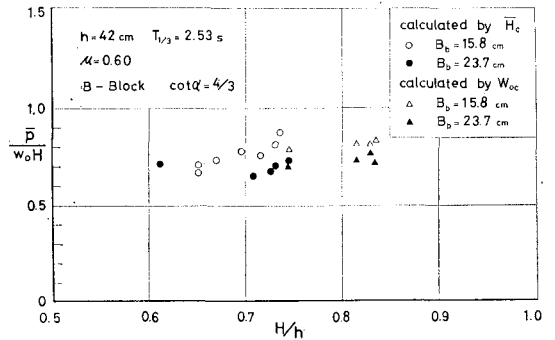


図-10 平均波力強度

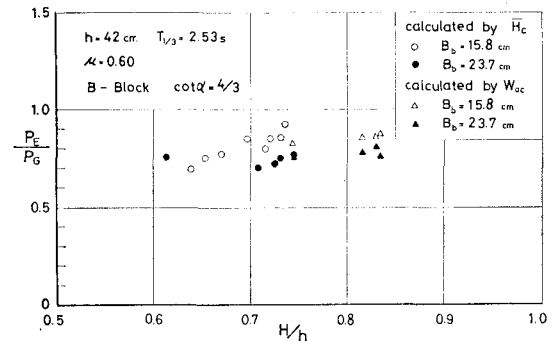


図-11 実験波力と計算波力の比

一方、図-11 は実験により求めた波力 P_E と合田式において $\alpha_2=0$ として求めた波力 P_G の比を示している。これは消波ブロック被覆による波力の減率 $\lambda^{(2)}$ に相当するものであるが、 $B_0=15.8$ cm の場合 0.7~0.9、 $B_0=23.7$ cm の場合 0.7~0.8 で、既往の規則波実験の結果を整理した $H/h>0.6$ に対する値 0.4~0.8 よりもやや大きい値となった。

6. あとがき

主要な結果をまとめると以下のとおりである。

(1) 碎波帯内における消波ブロックの安定性は有義波高が同じであっても水深によって異なる。これは主とし

て最高波高と有義波高の比が異なることによると考えられ、消波ブロックの安定性においても、代表波高として最高波高を用いた方が簡明であることを示唆している。

(2) 消波ブロックで被覆したときの直立部に働く波力と合田式において $\alpha_2=0$ としたときの計算波力の比、すなわち波力の減率 λ は今回の不規則波滑動実験では 0.7~0.9 と既往の規則波実験による 0.4~0.8 に比較してやや大きい値を得た。

なお、本実験の実施にあたっては昭和 53 年度港湾技術研究所研修員石川 卓氏（技研興業株式会社）の熱心な協力を得た。ここに記して謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1979.
- 2) 合田良実：浅海域における波浪の碎波変形，港湾技術研究所報告，第 14 卷第 3 号，pp. 59~106, 1975.
- 3) たとえば，Final report of the international commission for the study of waves, P.I.A.N.C. Annex to Bulletin, No. 25, Vol. III, 27 p., 1976.
- 4) 伊藤喜行・藤島 睦・北谷高雄：防波堤の安定性に関する研究，港湾技術研究所報告，第 5 卷第 14 号，134 p., 1966.
- 5) 谷本勝利：混成堤に作用する波力について，昭和 51 年度港湾技術研究所講演会講演集，pp. 1~26, 1976.
- 6) 谷本勝利・本 浩治・石塚修次・合田良実：防波堤の設計波力算定式についての検討，第 23 回海岸工学講演会論文集，pp. 11~16, 1976.