

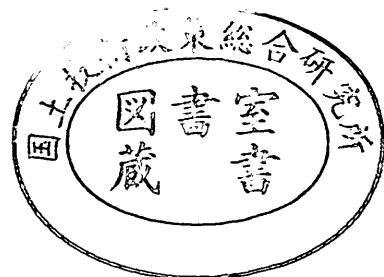
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 29 NO. 1 MAR. 1990

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第29巻 第1号 (Vol. 29, No. 1) 1990年3月 (Mar. 1990)

目 次 (CONTENTS)

1. Mathematical Modeling of Mud Transport in Ports with a Multi-Layered Model —Application to Kumamoto Port—
..... Hiroichi TSURUYA, Kazuo MURAKAMI and Isao IRIE... 3
(多層レベルモデルによる港湾埋没の数値計算モデルの開発—熊本港への適用例—
..... 鶴谷広一・村上和男・入江 功)

2. 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重
..... 高橋重雄・谷本勝利・下迫健一郎...53
(Wave and Block Forces on a Caisson Covered with Wave
Dissipating Blocks.
..... Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi TANIMOTO
and Ken'ichirou SHIMOSAKO)

2. 消波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する 波力とブロック荷重

高橋重雄*・谷本勝利**・下迫健一郎***

要 旨

我が国における代表的な防波堤構造の一つである消波ブロック被覆堤について水理模型実験を行い、直立部に作用する透過波力とブロック荷重の特性を明らかにするとともに、滑動安定性に関する検討を行った。

透過波力の算定には合田式を準用し、波力低減係数 λ で補正する方法が用いられ、通常の条件では $\lambda = 0.8$ で設計されている。今回の実験により、消波ブロック被覆堤が通常用いられている波高の大きい領域ではこの方法が妥当であることがわかった。ただし、波高の小さい領域では λ の値がやや大きくなることに留意する必要がある。

ケーソンに作用する静水時のブロック荷重は、設置直後は小さく、波の作用を経るにつれて大きくなっていくが、最終的に安定となる値は、作用した波の大きさやケーソンの重量によって変わる。現地においては静水時のブロック荷重が設計波力よりも大きくなることはほとんどない。

波の作用時には、ブロック荷重は浮力の増加やケーソンの微小な変位により、静水時に比べて減少する。波高が大きいほど減少量は大きくなり、大波高の場合にはほとんど0とみなせる。ただし、この減少量はブロックの締め固まりの程度などによっても異なる。波作用時にブロック荷重を考慮しなければならぬのは、波高がかなり小さいか、水深の大きい場合であり、通常の設計条件ではほとんど無視できる。

滑動安定性の計算においては、ブロック荷重を考慮する必要はなく、合田式を準用して計算される波力のみを考慮すればよい。ただし、施工直後でブロックが締め固まっていない場合には、波作用時のブロック荷重の減少量が小さいため、ブロック荷重の影響でケーソンが滑動しやすい場合がある。

キーワード：消波ブロック被覆堤，防波堤，波力，ブロック荷重，ケーソンの滑動

* 防波研究室長
** 水工部長
*** 水工部防波研究室

2. Wave and Block Forces on a Caisson Covered with Wave Dissipating Blocks

Shigeo TAKAHASHI*

Katsutoshi TANIMOTO**

Ken'ichirou SHIMOSAKO***

Synopsis

A caisson breakwater covered with wave dissipating concrete blocks is one of the typical breakwaters in Japan. The breakwater can reduce the wave reflection and increase the stability of the caisson. Wave forces are reduced by the blocks, but the force due to blocks also acts on the upright section of the caisson. In this study, a series of model experiments have been carried out in order to investigate the characteristics of random wave forces and the block force on the caisson, and the stability of the caisson against sliding.

Wave pressure reduction by the blocks depends on the wave height and the width of covering blocks. Wave pressures are reduced greatly for large waves, but the reduction is not significant for small waves. However, when the covering is very wide comparing with ordinary design, wave pressures are reduced even for small waves. An estimation method of the wave force reduction due to blocks is proposed.

The static block force on the upright section depends on the height of piled blocks and the degree of compaction of blocks. During wave action, the block force become smaller than the static block force because of increasing buoyancy and the rotational and horizontal movement of caisson, even though the movement is very small. A method is proposed to estimate the static block force and the reduction of the force during wave action.

For usual design conditions the caisson stability against sliding can be judged without considering the block forces. This is because of their reduction during wave action and because when the caisson slides, the block force is reduced to 0 at the moment.

Key Words: Caisson Covered with Wave Dissipating Blocks, Breakwater, Wave Force, Block Force, Sliding of Caisson

* Chief of Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engineering Division

** Director of the Hydraulic Engineering Division

*** Member of Maritime Structures Laboratory, Hydraulic Engineering Division

目 次

要 旨	53
1. ま え が き	57
2. 実 験 の 方 法	57
2.1 実験水路と模型	57
2.2 実験の種類と測定方法	58
2.3 実験波の特性	58
3. 波 力 の 低 減	59
3.1 従来の設計波力算定法	59
3.2 波圧波形の変化と同時波圧分布	60
3.3 水平波力の低減率	62
3.4 揚圧力の低減率	64
3.5 滑動合成波力の低減率	65
3.6 腰掛け部の波力	65
3.7 被覆断面の違いによる波力特性	66
4. ブロック荷重	67
4.1 静水時のブロック荷重	67
4.2 波作用時のブロック荷重	68
4.3 水平力載荷試験によるブロック荷重の変化	69
4.4 ブロック荷重を含む全水平力	70
4.5 現地設計事例におけるブロック荷重	70
5. ケーソンの滑動	71
5.1 波力とケーソンの滑動安定性	71
5.2 滑動実験結果	71
5.3 設計波力と滑動安定性	73
6. ま と め	74
参 考 文 献	74
主要記号一覧表	75

1. まえがき

消波ブロック被覆堤は、我が国における代表的な防波堤構造の一つであり、主として波浪条件の厳しい砕波領域で用いられている。近年は防波堤の大水深化により、重複波領域においても用いられることがある。

消波ブロック被覆堤の直立部に働く波力の算定法としては、森平式¹⁾が使われていたが、合田式を準用して波力低減係数 λ で補正する方法が一般的となりつつある²⁾。 λ は消波ブロックの設置による波力低減効果を示すもので、通常的设计条件では $\lambda=0.8$ が標準的に用いられている。しかし、筆者ら^{3) 4)} や服部ら⁵⁾ などの既往の研究でも明らかにように、実際の波力の低減効果は、構造条件や波浪条件によって異なるため、 $\lambda=0.8$ が適用できる条件について検討する必要がある。

さらに、従来の設計では考慮されていないが、実際にはケーソンに対してブロックの寄りかかり荷重も作用している。この点についても、広本ら⁶⁾、島田⁷⁾、田中⁸⁾ らなどによって研究が行われており、条件によっては波力に比べて無視できない値になることが指摘されている。しかし、これらの研究でも述べられているように、ブロック荷重はケーソンのわずかな変位で大きく変化するものであり、実際のケーソンの滑動に対するブロック荷重の影響については明らかになっていない。

本研究は、これらの問題点を実験により明らかにし、一般的な設計法を検討するものである。

2. 実験の方法

2.1 実験水路と模型

(1) 実験水路と実験断面

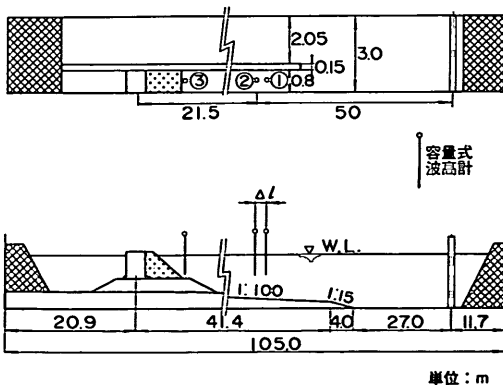


図-1 実験水路

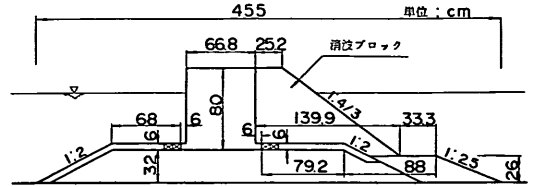


図-2 基本断面

実験は長さ105m、幅3m、深さ2.5mの大型造波水路で行った。当水路は図-1に示しているように途中から隔壁によって幅80cmの主水路と205cmの副水路に分割されており、今回の実験は主水路で行った。造波機は低慣性直流電動機駆動のピストン型で、入力信号に追従して任意波形の波を造波することができる。

実験は、水深およびマウンドの厚さを変えた数種類の断面で行っている。図-2は基本断面を示したもので、これ以外に、比較のためにブロックの被覆幅を大きくした断面や、被覆しない断面などについても実験を行った。被覆のない場合などのマウンド前肩幅は、衝撃砕波力が生じないように条件に応じて変えている。

(2) 模型の構造

実験に使用したケーソンは、モルタル製底版の上にアクリル製のケーソンを固定したもので、ケーソンの各面には波圧計を取り付け、波圧を測定できるようにしてある。また、ケーソンの前面板はロードセルで本体に固定し、前面板に作用するブロック荷重や透過波力を測定している。図-3はその断面を示したもので、 P が波圧計、 L がロードセルである。消波ブロックはモルタル製で、1個の平均重量が2.94kgと1.84kgの2種類を使用した。

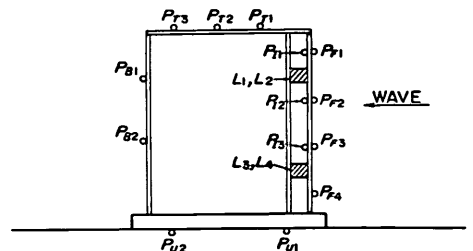


図-3 ケーソン断面

表-1 実験波一覧

波名	$T_{1/3}$ (s)	$L_{1/3}$ (m)	$h/L_{1/3}$	$H_{1/3}$ (cm)	H/h
A 波	4.27	12.18	0.073	17.8 ~ 42.8	0.200 ~ 0.482
B 波	3.72	10.50	0.085	8.8 ~ 50.6	0.099 ~ 0.570
C 波	3.00	8.26	0.108	17.7 ~ 38.3	0.199 ~ 0.431
D 波	2.55	6.83	0.130	13.5 ~ 29.9	0.152 ~ 0.337
E 波	1.96	4.88	0.182	7.8 ~ 23.7	0.088 ~ 0.267
F 波	1.58	3.57	0.249	7.3 ~ 15.9	0.082 ~ 0.179

2.2 実験の種類と測定方法

実験に用いた波は、すべて不規則波（有効波数約 250 波）で、有義波周期 $T_{1/3}$ が 1.58~4.27s（模型縮尺を 1/25 とすれば、現地換算 7.9~21.4s）の 6 種類である。周期の長いほうから順に A~F 波と呼ぶ。ただし周期の短い D~F 波についてはケースを限定して行った。表-1 に実験波の一覧を示している。

実施した実験は次の 3 種に大別される。

- ① 波力測定実験
- ② 水平力載荷実験
- ③ 滑動実験

波力測定実験では波を作用させ、波圧計やロードセルを用いて、ケーソン各面に働く波力やブロック荷重の変化を測定した。ブロック荷重については設置直後と波作用後の静水時荷重も測定している。実験波は A~F 波の 6 周期で、有義波高は各周期とも 3 種類とした。

水平力載荷実験は、波力のかわりに重錘を用いてケーソンに水平力を作用させ、ブロック荷重の変化やケーソンの変位を調べるものである。水平力の載荷高さは、静水面付近とケーソン底部近くの 2 種類について行った。

滑動実験ではケーソンの重量を調整して滑動しやすい状態とし、波の作用によるケーソンの滑動量を測定した。測定には非接触式の超音波式滑動測定装置と、防水型差動トランス式変位計を併用した。滑動実験の一部のケースでは波圧やブロック荷重の測定も行っている。実験波は B 波と E 波の 2 周期で、有義波高はケーソンの重量に応じて変更し、各重量について 5 種類程度とした。なお B 波については B1~B3 の 3 波群の波を用いている。

2.3 実験波の特性

造波板の偏心量と波高の関係を求めると同時に、実験波の特性を把握するため、堤体設置以前の状態を通過波の検定を行った。得られた波高のデータは不規則波実験制御解析装置 (NOVA 4/X) で行った。

通過波の実測有義波周期は、造波信号作成時の設定有義波周期に比べて、7% 程度長周期側にずれていた。これは、造波機や水路の特性の影響によるものと考えられる。今回の実験結果の整理はすべて実測有義波周期を用いている。

図-4 は、通過波の周波数スペクトルの例を示したもの

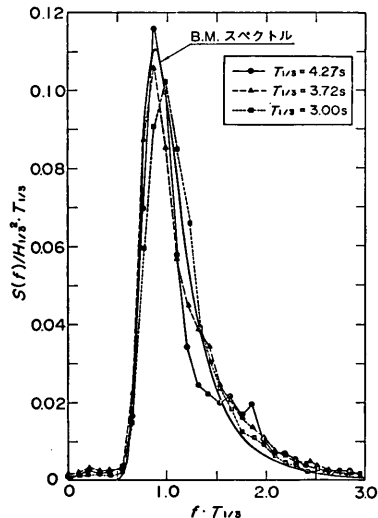


図-4 通過波スペクトルの例

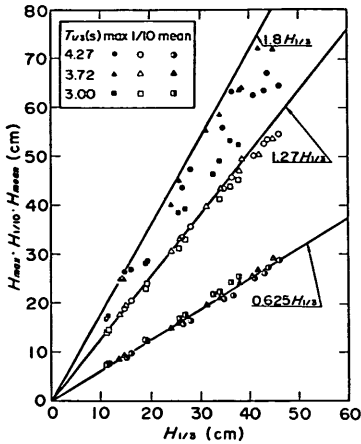


図-5 有義波高とその他の代表波高の関係

である。目標としたスペクトルは修正プレットシュナイダー・光易型で、次式で表される。

$$S(f) = 0.204 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \text{Exp} [-0.75 (T_{1/3} f)^{-4}] \quad (1)$$

計算においては実測有義波周期を用いているが、通過波のスペクトルは、目標としたスペクトル形とよく一致している。

図-5 は通過波における有義波高 $H_{1/3}$ と、その他の代表波高の関係を例示したものである。最高波高 H_{\max} と有義波高の比は、周期や波高レベルによって多少のばらつきがみられるが、全体的に H_{\max} は $1.8H_{1/3}$ よりもやや小さく、特に有義波高が大きい場合には砕波による波高減衰の影響がみられる。なおレーリー分布に基づく $H_{\max}/H_{1/3}$ の期待値は、波数 250 波の場合、最頻値が 1.66、平均値が 1.75 である。 $T_{1/3}=3.00\text{s}$ の C 波は、やや H_{\max} がレーリー分布にもとづく期待値より小さい。一方、1/10最大波高 $H_{1/10}$ および平均波高 H_{mean} と有義波高の比については、図中に示した理論式とほぼ一致している。

3. 波力の低減

3.1 従来の設計波力算定法

(1) 森平式による算定法

消波ブロック被覆堤の直立部に作用する波力の算定式として最初に用いられたのは、次式で示される森平式¹⁾である。

$$p = 1.0 w_0 H_{1/3} \quad (2)$$

ここに、 w_0 : 海水の単位体積重量

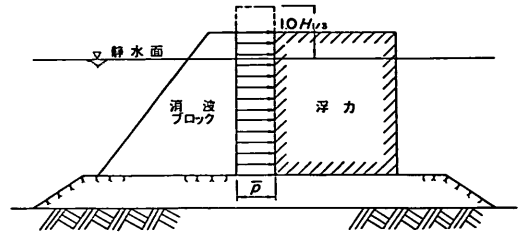


図-6 森平式による波力算定法

図-6 は森平式による波圧分布を示したものであり、直立部の底面から静水面上 $1.0H_{1/3}$ の高さまたは直立部の天端高のいずれか低いほうまで、式(2)の波圧が一樣に作用するとしている。また、揚圧力についてはケーソン全体に浮力が働くものとし、その中に含まれるものとする。森平式では設計波高として有義波高を用いており、有義波高が砕波の影響によって低下する砕波帯内にあるような場合に対して適用できるとされている。

(2) 合田式を準用した算定法

現在の設計では、消波ブロックを十分に被覆したときの直立壁に作用する波力は、合田式を準用して次式のように計算するのが標準である²⁾。

$$\eta^* = 0.75(1 + \cos \beta) \lambda H_{\max} \quad (3)$$

$$p_1 = 1/2(1 + \cos \beta) \lambda \alpha_1 w_0 H_{\max} \quad (4)$$

$$p_3 = \alpha_3 p_1 \quad (5)$$

$$p_u = 1/2(1 + \cos \beta) \lambda \alpha_1 \alpha_3 w_0 H_{\max} \quad (6)$$

ここに、 η^* : 静水面上の波力作用高さ、

λ : 消波ブロックによる波力低減係数、

β : 防波堤の壁面に対する垂線と波の主方向とのなす角、

p_1 : 静水面における波圧、

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left[\frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right]^2$$

p_3 : ケーソン下端における波圧、

$$\alpha_3 = 1 - \frac{h'}{h} \left\{ 1 - \frac{1}{\cosh(2\pi h/L)} \right\}$$

p_u : ケーソン前趾における揚圧力

図-7 は合田式を準用した波圧分布を示したものである。設計波高としては最高波高を用いており、重複波砕波の区別なく用いることができる。この方法を用いる場合には、 λ としてどのような値を用いるかが問題となる。通常は $\lambda=0.8$ とすることが多いが、実際には構造条件や波浪条件によって異なる。

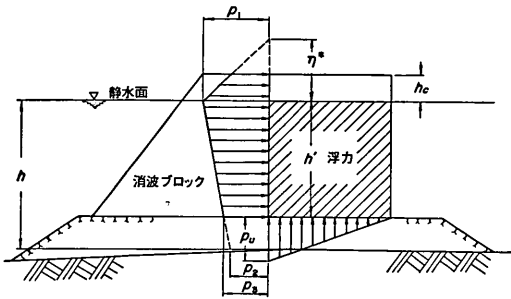


図-7 合田式による波力算定法

筆者らは、不規則波圧測定実験結果⁴⁾ から $\lambda=1.0$ という値を得ている。ただし、この値は波力のピーク値のみに注目したもので、必ずしもケーソンの滑動に対する有効波力としての低減効果を表すものではない。筆者らが別の機会に行った滑動実験³⁾ では、 $\lambda=0.7\sim 0.9$ という結果が得られており、 λ の値は波圧測定実験結果に比べてやや小さいことがわかっている。

また、服部ら⁵⁾ は波力測定実験結果に基づいて、水深、波高、周期、ブロックの大きさ、被覆幅等をパラメータとした一般的な λ の算定法として次式を提案している。

$$\lambda = 1.2 \text{Exp} [-0.63K] \quad (7)$$

ここに、 $K = \{(1-\epsilon)/\epsilon\}^{1/3} (Hb_0/hB) \tanh kh$

ϵ : ブロックの空隙率, b_0 : 静水面での被覆幅,
 B : ブロックの代表寸法, k : 波数

ただし、服部らの研究は、実験条件が被覆幅の大きいケースに限られているため、被覆幅が比較的小さい条件に対する適用には、さらに検討の必要があると思われる。

森平式による計算値と、合田式 ($\lambda=0.8$) による計算値を比較すると、 $[H_{\max}/H_{1/3}]$ の値が小さい砕波領域ではほぼ一致するが、 $H_{\max}/H_{1/3}$ の値が大きい重複波領域では森平式は小さめの値を与える。また、森平式では周期の影響が考慮されていないため、周期の長い波に対しても合田式より小さな値となる。

3.2 波圧波形の変化と同時波圧分布

(1) 波高による波圧波形の変化

消波ブロックにより堤体に作用する波力は一般に小さくなり、森平らはこれを波力減殺効果と呼んでいる。こうした波力低減について、波圧波形の変化によって検討する。図-8 はケーソン前面の静水面よりも下の測点 (P_{F3}) について、ブロックの有無による波圧波形の変化の違いを示したものである。図には波高が小さい重複波の場合 (下段)、波高がやや大きい場合 (中段)、波高

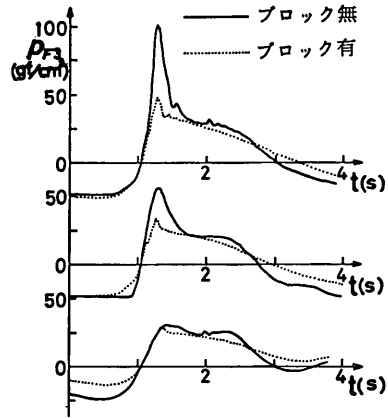


図-8 波高による波圧波形の変化

が非常に大きい砕波の場合 (上段) を示している。

3つの例を比較すると、波高の大きい場合ほどブロックによる波力低減効果が大きく、これはおもに切り立ったピークが減衰することによって生じていることがわかる。また、ピークの後はしばらくはほぼ一定の値が続いており、このいわゆる腰掛け部の値は、ブロックの有無による差はほとんどない。なお、ここに示したのは 2.94 kg のブロックを用いたときの結果であるが、今回の実験範囲ではブロックの大きさによる波力の違いはほとんどみられなかった。したがって、以後述べる実験結果は、特にことわらない限り、すべて 2.94 kg のブロックを用いたときの結果を意味する。

図-8 に示したのは、相対被覆幅 $b_0/L_{1/3}$ (b_0 : 静水面における被覆幅) が 0.053 とかなり小さい場合の例であり、後述するように、相対被覆幅が大きいと、ピークの減衰だけでなく、腰掛け部を含む波圧波形全体もやや小さくなる。現地において最近建設された 111 の消波ブロック被覆堤の例をみると、設計波に対する $b_0/L_{1/3}$ は、0.05~0.17 に分布し、平均値が 0.094、標準偏差が 0.022 であり、相対被覆幅は比較的小さいものが多い。したがって、通常のブロックによる波力低減は切り立ったピーク値が減衰することによって生じていると考えられる。

(2) 波圧のピーク値と同時波圧分布

図-9(a), (b) は各測点における波圧の時系列データを、それぞれブロックのある場合とない場合について、波高の非常に大きい一波分について示したものである。前面の波圧 P_{F1} がピークとなるタイミングでは、ブロックあり、ブロックなしともに、上面の波圧 (P_T) および背面の波圧 (P_B) はほとんど 0 である。したがって、

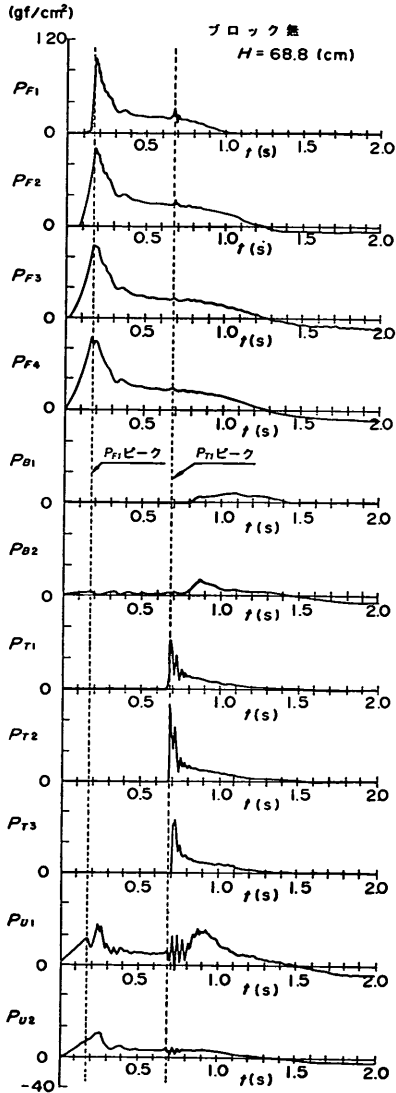


図-9(a) 各測点における波圧波形
(ブロック無)

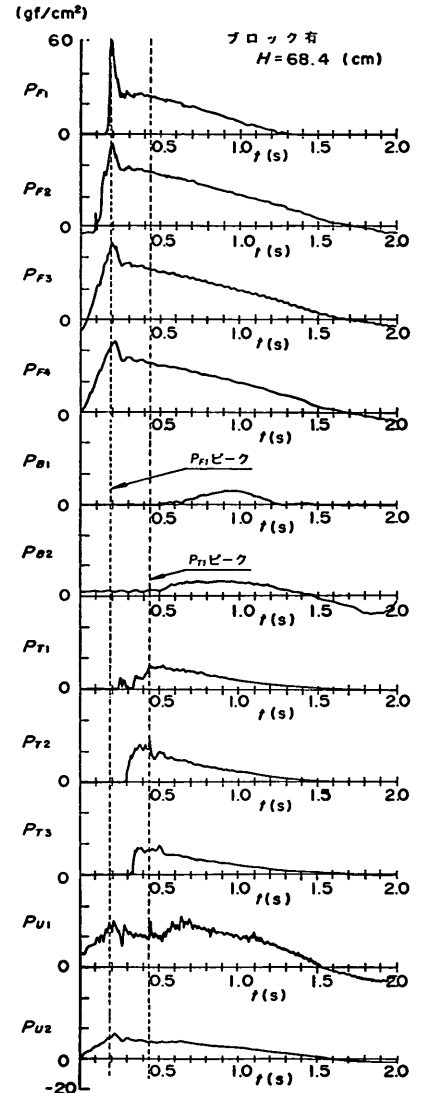


図-9(b) 各測点における波圧波形
(ブロック有)

ケーソン全体の安定性については、これらの波力は考慮する必要はないことがわかる。

また、 p_{F1} のピークから上面の波圧 p_{T1} がピークとなるまでの時間は、ブロックありでは 0.25s であるのに対して、ブロックなしでは 0.5s と長い。これは、ブロックありの場合は波がブロックの上を翹上るようにして越波するのに対し、ブロックなしの場合は直立部に衝突した水塊が大きく上に跳ね上がってから越波すること

による違いである。写真-1(a), (b)はそのようなことを示したものである。越波による打ち込み波力はケーソンの滑動に対してブレーキをかける効果があり、ブロックありのほうが時間差が小さいので、滑動量があまり大きくならない。この事実は、既往の研究⁹⁾において指摘されているように、消波ブロック被覆堤は通常の混成堤に比べて滑動限界波高を超える波がきても滑動量が急激には増加しない一つの理由と考えられる。

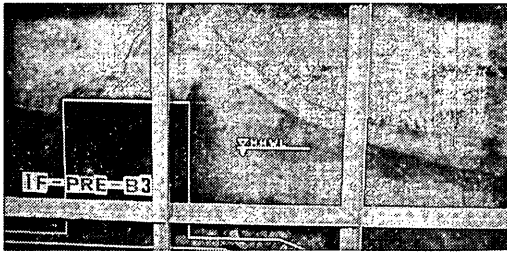


写真-1(a) 波作用時の状況 (ブロック無)



写真-1(b) 波作用時の状況 (ブロック有)

図-10(a), (b)は 図-9(a), (b)に示した同一の波における各測点の波圧のピーク値および p_{F1} のピーク時の同時波圧分布であり、合田式による計算値も合わせて

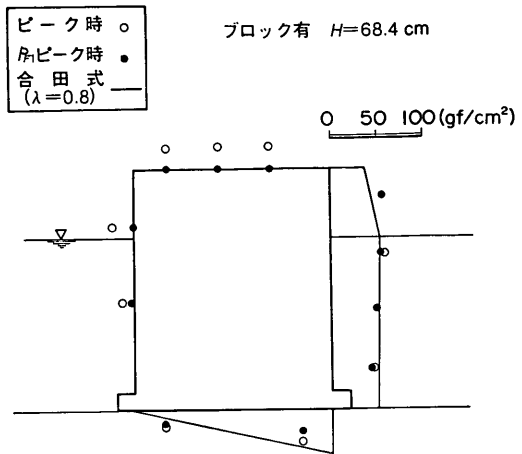


図-10(b) 波圧のピーク値および同時波圧分布 (ブロック有)

示している。 p_{F1} ピーク時の前面下側および底面の波圧をみると、ブロックなしの場合、各測点でのピーク値に比べてかなり小さくなっている。これは砕波によって波形が前傾して生ずる位相差の影響であり、前面上側の波圧がピークとなるタイミングでは前面下側や底面の波圧はまだピークとならないことを示している。この影響はブロックありの場合にもみられるが、ブロックなしの場合に比べると比較的小さい。

3.3 水平波力の低減率

(1) λ_{H^*} による評価

実験結果から波力低減係数 λ を決めるには、二通りの方法がある。一つはブロックのある場合とない場合の実験値の比で定義する方法で、この方法による λ は合田式の計算値とは無関係に、ブロックの設置による実質的な波力低減率を示す。もう一つは実験値と合田式 ($\alpha_2=0$) による計算値の比で定義する方法である。ただし、厳密には波力の作用高さ η^* も λ 倍されるので、その影響も考慮する必要がある。設計においては実際に作用する波力が重要であるので、後者の方法が適当である。本報告では両方の定義を用いて検討しており、区別するために前者の場合は λ^* のように * を付けて表すものとする。

図-11 は、水平波力のピーク値の低減率 λ_{H^*} と波高水深比 H/h の関係を示したものである。図中には、1つの波群における波高と波力の代表値(最大値, 1/10最大値, 1/3最大値) どうしを対応させ、実験結果をプロットしている。波高が小さい範囲では $\lambda_{H^*}=0.85\sim 0.92$ ではほぼ一定であり、波高が大きくなると、 λ_{H^*} はしだい

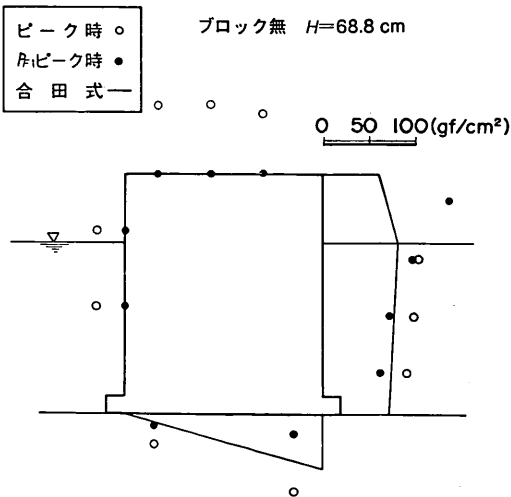


図-10(a) 波圧のピーク値および同時波圧分布 (ブロック無)

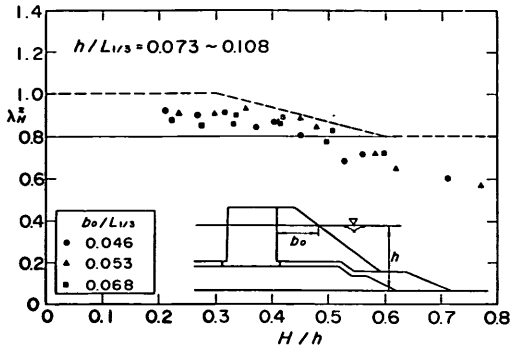


図-11 水平波力の低減率 λ_H^*

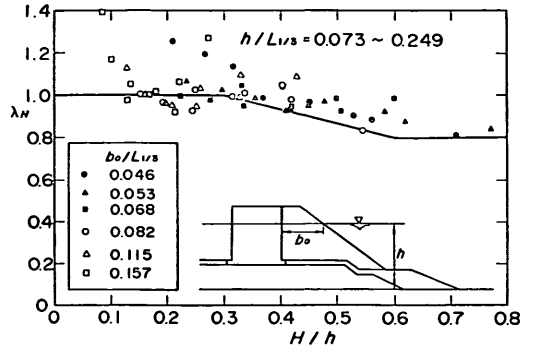


図-12(a) 水平波力の低減率 λ_H

に小さくなってくる。 $\lambda_H^* < 0.8$ となるのは $H/h > 0.5$ の範囲であり、ブロックによる波力低減効果は波高が大きいほど顕著であることがわかる。

(2) λ_H による評価

図-12(a) は合田式の波力に対する低減率 λ_H を、図-11と同様に示したもので、A~C波のほかに、D~F波の結果についても合わせて示してある。今回の実験範囲では λ_H のほうが λ_H^* より全体的にやや大きく、すべてのデータが $\lambda_H > 0.8$ である。図中には、次式で表される λ の値も示している。

$$\begin{aligned} \lambda &= 1.0 && (H/h < 0.3) \\ \lambda &= 1.2 - 2/3(H/h) && (0.3 \leq H/h \leq 0.6) \quad (8) \\ \lambda &= 0.8 && (H/h > 0.6) \end{aligned}$$

式(8)は、後述する滑动実験の結果も考慮して作成した λ の算定式で、波力実験結果に対してはやや危険側である。しかし、波力のピーク値は作用時間が短いことや揚圧力との位相差などもあり、滑动安定性を検討する波力算定式としてはほぼ妥当な結果を与える。前掲の図-11にも式(8)に相当する λ^* の計算値を示しているが、この場合は実験値よりも安全側となる。

図-12(b) は、種類の異なるブロックを用いた別の実験結果を示したもので、図-12(a)に比べて同じ周期の波に対する水深の値が大きく、大水深型の防波堤に対応している。ただし、図-12(a)ではかなり周期の短いD~F波のケースも行っているため、 $h/L_{1/3}$ の値としては図-12(b)よりも大きい範囲まで含んでいる。結果は図-12(a)とほとんど同じであるが、 H/h が 0.3 よりも小さくなると、 λ の値がやや減少する傾向がみられる。

なお、図-11の提案した式(7)を今回の実験条件に適用

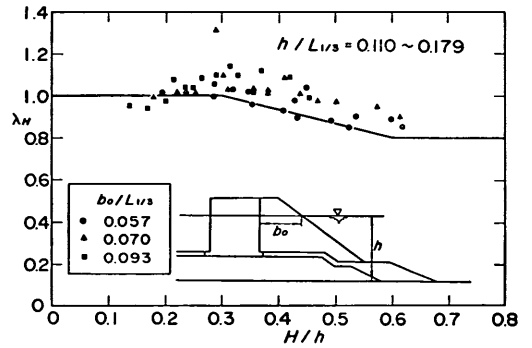


図-12(b) 水平波力の低減率 λ_H (大水深型)

すると、 λ の値が最も大きくなる $T_{1/3} = 4.27$ s の場合でも、

$$\lambda = 1.2 \text{Exp} [-0.836H/h] \quad (9)$$

であり、 $H/h > 0.22$ では式(8)で計算される λ よりも小さな値となる。したがって、全体としてやや波力を小さく見積もることになる。この理由としては、服部らの実験では $b_0/L_{1/3}$ の値が 0.134~0.270 であり、被覆幅が通常の場合に比べてかなり大きいことや、測定系の固有振動数の影響などが考えられる。

(3) 森平式による評価

図-13(a) は水平波力強度の代表値(最大値と1/10最大値)を $w_0 H_{1/3}$ で無次元化し、 $H_{1/3}/h$ との関係で示したものである。森平式の波力が安全側の値となるためには、最大値の実験値が $1.0w_0 H_{1/3}$ 以下でなければならない。しかし、実際には最大値はすべて $1.0w_0 H_{1/3}$ よりも大きくなっており、特に $H_{1/3}/h$ が小さいとき、

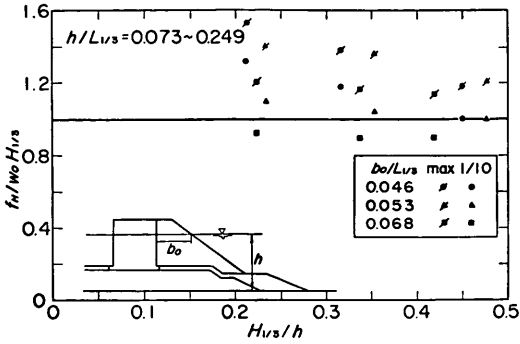


図-13(a) 水平波力強度

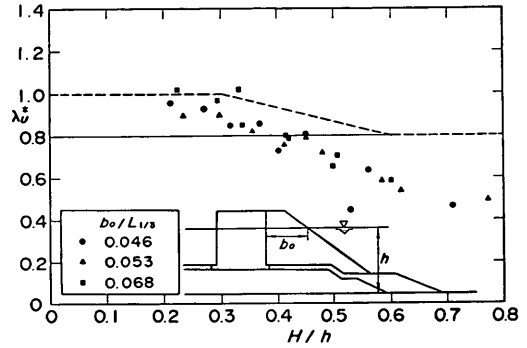


図-14 揚圧力の低減率 λ_u^*

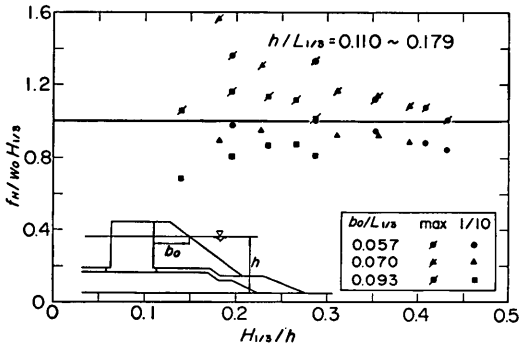


図-13(b) 水平波力強度 (大水深型)

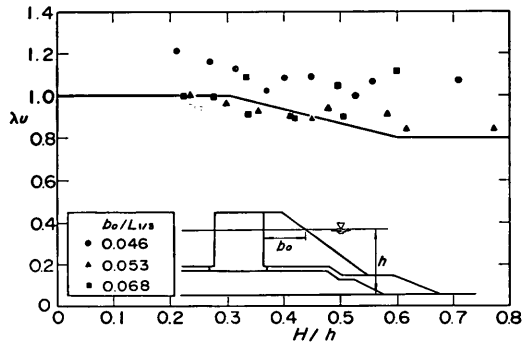


図-15 揚圧力の低減率 λ_u

周期の長い2ケースについては $1/10$ 最大値でも $1.0w_0 H_{1/3}$ を上回っている。図-13(b) に示した大水深型の実験結果においても、最大値はすべて $1.0w_0 H_{1/3}$ を上回っている。したがって、森平氏は波高の大きい砕波領域で周期のあまり長くない場合に適切な波力を与え、それ以外の場合は波力を過小に見積もる危険性があることがわかる。

3.4 揚圧力の低減率

図-14 は、揚圧力のピーク値の低減率 λ_u^* と H/h の関係を示したものである。 λ_u^* については、 λ_H^* とほとんど同じ傾向が認められる。また、図-15 は λ_u と H/h の関係を示したもので、実線は水平波力について与えた λ の算定式(式(8))である。全体的な傾向は λ_H の場合とほとんど同じであるが、波高の大きい領域で実験値がやや大きい場合もある。

しかしながら、ケーソン全体の安定性について考える場合は、揚圧力についてはピーク値を考える必要はなく、水平波力がピークとなるタイミングでの値を考えればよい。図-16 は、水平波力ピーク時の揚圧力に対する低減

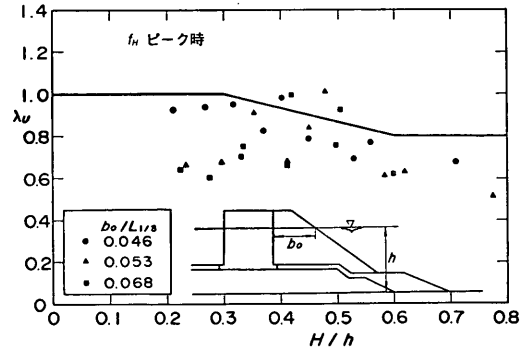


図-16 揚圧力の低減率 λ_u (水平波力ピーク時)

率 λ_u を示したものである。前述したように、水平波力と揚圧力のピークとなるタイミングが異なるため、水平波力ピーク時の揚圧力は、ピーク値よりもやや小さくなり、かなり安全側になる。したがって、揚圧力に対しては水平波力と同じ低減係数を用いて問題ないと考えられる。

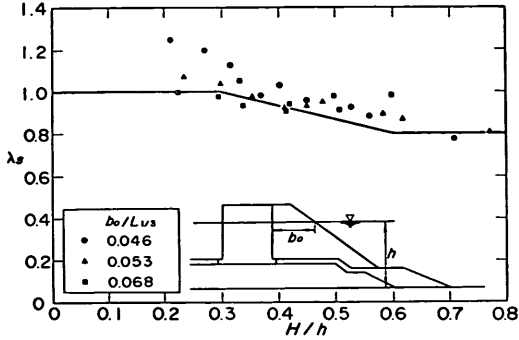


図-17 滑動合成波力の低減率 λ_s

3.5 滑動合成波力の低減率

実際の設計では、水平波力と揚圧力と同じ波力低減係数 λ が用いられており、今回の実験結果でもこれがほぼ妥当であることがわかった。ここではさらに、設計に用いるべき λ の値を、水平波力と揚圧力の両方を考慮した滑動合成波力を用いて検討する。滑動合成波力は次式で定義される。

$$F_S = F_H + \mu F_V \quad (10)$$

ここに、 F_H ：延長方向単位長さあたりの水平波力、
 F_V ：同鉛直波力、
 μ ：摩擦係数 (=0.6)

図-17 は滑動合成波力のピーク値の低減率 λ_s と H/h の関係を示したものである。水平波力の場合と同様で、ほとんどの実験値が $\lambda_s = 0.8$ よりやや大きい。ただし、波力のピークの作用時間が短いことや、後述する滑動実験の結果なども考慮すると、前述の算定式で与えているように少なくとも $H/h > 0.6$ のときは、 $\lambda = 0.8$ としてよいと考えられる。なお、最近建設された111の消波ブロック被覆堤の現地における設計条件を調べた結果、設計波に対する H/h はほとんどの場合 0.6 以上であり、0.6 よりも小さいのは内湾で波高が小さいか、または大水深の場合の数例のみであった。

3.6 腰掛け部の波力

従来の設計においては、波力のピーク値のみを考慮しており、作用時間や腰掛け部の波力の大きさなどについてはほとんど考慮していない。しかし、ケーソンの滑動を考える場合にはこれらも重要である。ここでは腰掛け部の波力について検討する。

腰掛け部の波力の値については、ピーク値のように明確な定義はない。ここでは、前面水平波力のピークとケ

ーソン天端面に働く打ち込み波力のピークに位相差があり、打ち込み波力のピーク時には前面波力はすでに腰掛け部にはいつていることを利用して、打ち込み波力ピーク時の水平波力を腰掛け部の波力と定義する。

図-18(a), (b) は、上述した定義により求めた腰掛け部の平均水平波力強度 f_{FM} と波高 H の関係を示したものである。図にはブロックなしとブロックありについて、 $T_{1/3} = 3.72s$, $H_{1/3} = 42.6cm$ の一波ごとの腰掛け部波圧について示している。ただし、対応する波高については、一波ごとの値を直接求めることはできない。そこで、あらかじめ入射波高と前面下端の波圧 (p_{F4}) のピーク値の代表値 (最大値, 1/10 最大値, 1/3 最大値) ど

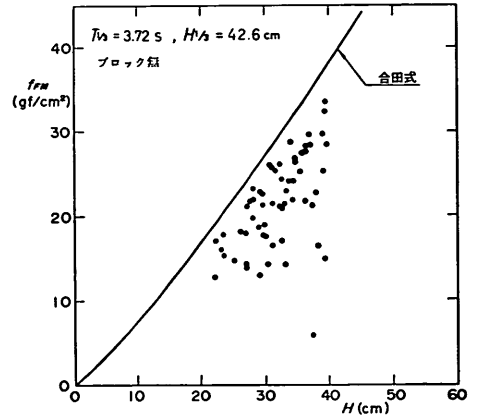


図-18(a) 腰掛け部の平均水平波力強度 (ブロック無)

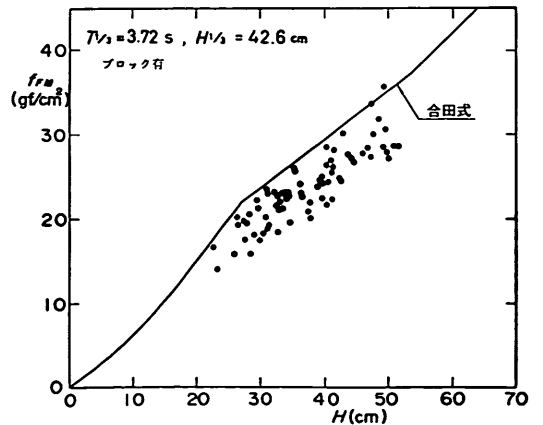


図-18(b) 腰掛け部の平均水平波力強度 (ブロック有)

うしを対応させ、最小自乗法により関係式を求めておき、前面下端の波圧から入射波高を推定する方法を用いた。なお、波力データのなかにはピーク値のタイミングと腰掛け部のタイミングが極端に離れていたり、逆にほとんど同時となるものもあるので、これらのデータは除いてある。また、越波が生じないような小さい波高では、この方法は適用できないので、これもデータには含まれていない。

ブロックありの場合はばらつきは小さく、ほぼ波高に比例している。図中の実線は前述した算定方法による λ を用いた合田式の計算値であるが、実験結果の上限の値を示している。これに対してブロックなしの場合も、ばらつきは大きいですが、実験値はすべて合田式による計算値よりも小さい。すなわち、腰掛け部の波力が設計波力よりも大きくなることはなく、たとえピーク時の波力が設計波力と同じか、多少上まわる値になっても、その作用時間は短いため、滑動量はあまり大きくならない。また、ばらつきは大きいものの、平均的にみるとブロックの有無による腰掛け部の波力の差は小さい。このことから被覆幅があまり大きくない場合は、ブロックによる波力低減効果はピーク値に対してのみ影響し、腰掛け部の波力にはあまり影響しないと考えられる。

3.7 被覆断面の違いによる波力特性

(1) 不完全被覆時の波力特性

前節まではブロックにより十分に被覆されている場合について検討してきたが、被覆が不十分でブロックの天端が低い場合、ケーソン前面で激しく砕波して、かえって大きな波力が作用する場合があるといわれている。そこで、静水面よりも上の部分のブロックを取り除いた状態での実験を行い、ケーソン天端まで被覆した場合と比較した。図-19 はその結果を λ_{H^*} を用いて示したもの

である。被覆が不完全な場合、やはり波高が非常に小さいとき以外は $\lambda_{H^*} > 1.0$ であり、被覆しない場合よりも波力が増大していることがわかる。現地においては、沈下などによりブロックの天端が低くならないよう十分に注意する必要がある。

(2) 前肩幅の違いによる波力特性

同じ入射波であっても、マウンドの形状が異なれば作用する波力も変わってくる。そこで、消波ブロック前面のマウンドの前肩幅を広くして砕波を促進させた実験を行い、基本断面の場合と比較した。図-20 はその結果を λ_{H^*} を用いて示したものである。ただし、 λ_{H^*} を求めるとき比較の対象としているブロック無のケースは、前肩幅の小さい断面であり、基本断面の λ_{H^*} を求めたときと同じものである。

前肩幅を広くした場合、全体的に基本断面よりも λ_{H^*} がやや大きい。特に基本断面では波高が大きくなるにつれて λ_{H^*} の値が小さくなるのに対して、前肩幅が広い場合はばらつきが大きく、あまり小さくならないこともある。これはブロックによる波力低減効果の違いというよりも、マウンドの前肩幅を広くしたことにより作用する波力そのものがやや大きくなったためと考えられる。

合田式を準用する方法の場合、本来の合田式においてマウンドや海底勾配の影響をあらわすパラメータ α_2 を考慮していない。したがって、マウンドの前肩幅の広い場合や海底勾配が急な場合など、波力を小さく見積もる可能性があり、注意が必要である。

(3) 被覆幅の違いによる波力特性

これまでは、ブロックの被覆幅が天端面2個並びの断面について検討してきたが、ブロックの被覆幅が異なれば、波力の低減効果も変化すると考えられる。そこで、天端面5個並びの断面について実験を行った。図-21 は

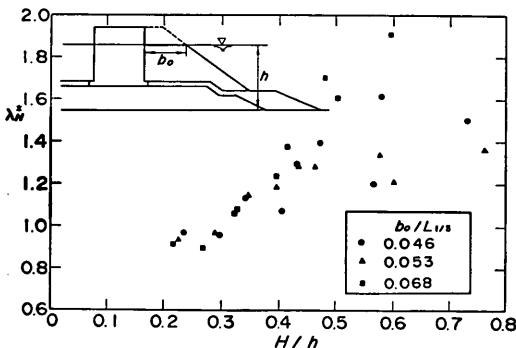


図-19 不完全被覆時の波力低減率

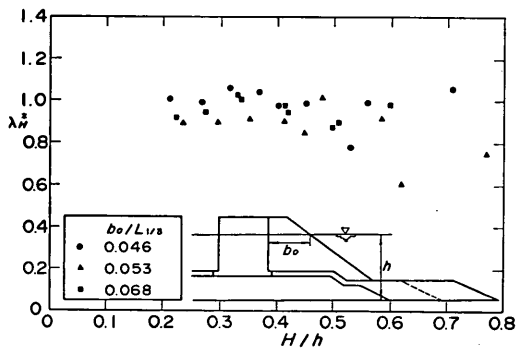


図-20 マウンド前方幅が広いときの波力低減率

その結果を示したものである。図-20 との比較でわかるように、被覆幅が小さい場合は、波高の小さい重複波領域では $\lambda_H^* = 0.9 \sim 1.0$ で、波力はあまり減少しないが、被覆幅が大きい場合は重複波領域でも明らかに波力が小さくなっている。一方、波高の大きい領域では、被覆幅の影響はあまりみられない。なお、 $H/h = 0.4$ 付近で λ_H^* がやや大きくなっているが、これはマウンドの前方幅を広くしたことの影響で、砕波により波力が大きくなるためと思われる。

図-22 は、被覆幅の小さい場合(図-20)と、被覆幅の大きい場合(図-21)の前面水平波力強度 f_{FP} の波形を比較したもので、波高が大きいときと小さいときについて示してある。波高が大きいときはほとんど同じような波形となっているのに対して、波高が小さい重複波のときは、被覆幅の大きいほうが波形の最初の立ち上がり方がゆるやかであり、波圧波形全体もやや小さくなっている。

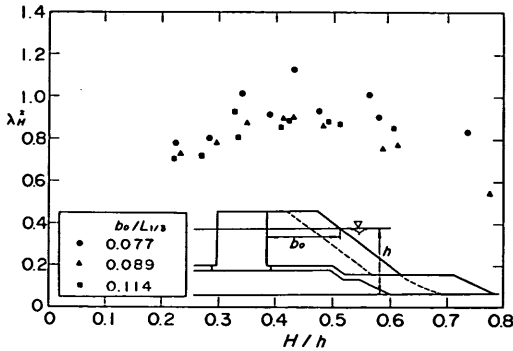


図-21 被覆幅が広いときの波力低減率

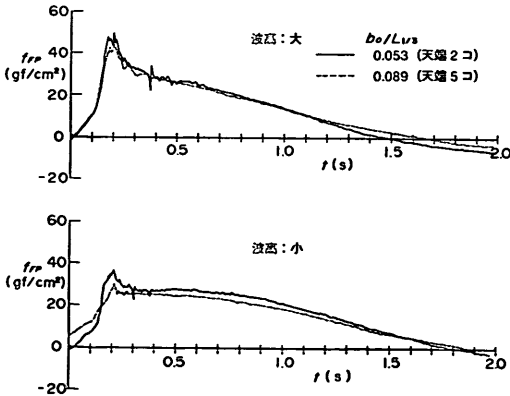


図-22 被覆幅の違いによる波圧波形の変化

これらの結果から、波圧波形の変化がゆるやかな重複波領域では、ブロックの被覆幅が波力低減効果に影響し、被覆幅が大きいと波力の低減効果も大きいことがわかる。これに対して波圧波形が切り立っている砕波領域の場合は、被覆幅が小さくてもピーク部分の低減効果は大きく、被覆幅をさらに大きくしても効果が小さいといえる。

4. ブロック荷重

4.1 静水時のブロック荷重

ケーソンには波力以外に、波の作用によりブロックを通じて伝達される力や、ブロックの自重による水平力も作用する。既往の研究ではこれらを分けて考えているものもあるが、計算上は、ブロックがケーソンにおよぼす力としてまとめて考えたほうが簡単である。以後これを単にブロック荷重と呼ぶことにする。静水時のブロック荷重 F_{BS} については、図-23 に示すように土圧と同様に考え三角形分布を仮定すると、次式で計算できる。

$$F_{BS} = K_S \{ \gamma (1-\epsilon) (h' + hc)^2 - w_o (1-\epsilon) h'^2 \} \quad (1)$$

ここに、 K_S : 土圧係数に相当する係数、

γ : ブロックの単位体積重量、

ϵ : ブロックの空隙率、

h' : ケーソンの基面水深、 hc : 天端高、

w_o : 水または海水の単位体積重量

K_S の値が波の作用によってどのように変化するかを調べるため、ブロック設置直後と各波高レベルの波作用後の、静水時ブロック荷重を測定した。図-24(a) は、最初にケーソン重量を十分重くして順々に大きな波まで作用させたあと、おもりを抜いて重量を軽くし、さらに波を作用させたときの静水時のブロック荷重を K_S によって示している。横軸には各作用波(約250波)中の最高波高 H_{max} をとっている。図中の W はおもりを含めたケーソンの水中重量である。

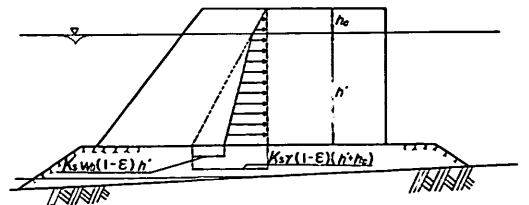


図-23 静水時ブロック荷重

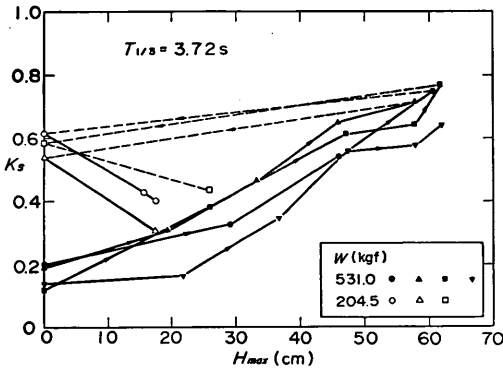


図-24(a) 波の作用による K_s の変化(1)

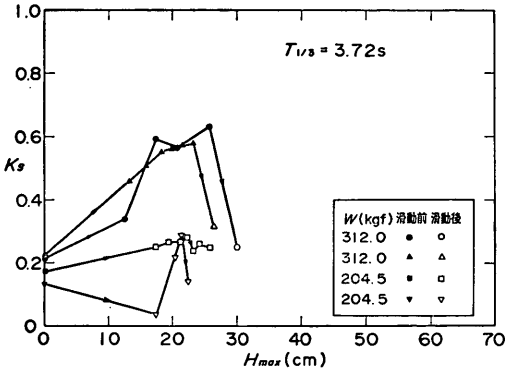


図-24(b) 波の作用による K_s の変化(2)

設置直後のブロック荷重については、ここに示したデータ以外にも測定している。設置の際には、極端に隙間が生じないように注意し、多少力を加えて積み上げており、毎回ほぼ同じように行ったが、設置して給水した直後の初期ブロック荷重は $K_s = 0.12 \sim 0.25$ であり、ばらつきが大きい。またブロック一個ごとに意識的に大きな力を加えながら設置した場合、最大で $K_s = 0.36$ まで大きくなったが、波を作用させていくと普通に設置した場合と変わらなくなった。

図-24(a) では、作用した波が大きくなるにつれて静水時ブロック荷重も大きくなり、最終的には $K_s = 0.65 \sim 0.77$ 程度まで増加している。しかし、その状態から重量を軽くするとブロック荷重は減少し、 $K_s = 0.6$ 前後となっている。これは、ケーソンとブロック荷重がつりあっていた状態でケーソン重量を軽くしたため、ブロックに押されてケーソンがわずかに変位し、ブロック荷

重が減少したためと考えられる。ただし、この時の変位量は 1mm 未満のごくわずかなものであった。このあと波高の小さな波を作用させると、静水時ブロック荷重はさらに減少しているが、このときもケーソンはほとんど滑動しておらず、変位量はやはり 1mm 未満であった。このことから、ブロック荷重はケーソンの極めて小さな変位でも大きく変化することがわかる。

一方、後述する滑動実験時にも、静水時ブロック荷重を測定している。図-24(b) はその結果を示したもので、滑動しやすいようにケーソンの重量はかなり軽くした場合である。水中重量が 312 kg の場合は滑動するまでに $K_s = 0.6$ 前後まで増加しているが、204.5 kg の場合は最初の波高レベルで滑動してしまい、さらに波を作用させても $K_s = 0.3$ 以上にはならなかった。

以上の結果から、静水時ブロック荷重の値はブロックの締め固まり具合とケーソンの変位量によって決まるもので、これらを左右する主要要素として、作用する波の大きさとケーソンの重量が考えられる。通常は設計波高が大きいかほどケーソン重量も重くなるので、安定となる静水時ブロック荷重の値は波高で決まると考えてよく、波高の小さい領域ではブロック荷重もあまり大きくなり得ないといえる。

なお、今回の実験では、安定となる K_s の値は最大で 0.77、平均でも 0.72 程度である。広本ら⁶⁾の実験による $K_s = 0.63$ 、島田⁷⁾の実験による $K_s = 0.42 \sim 0.66$ と比較すると、かなり大きな値である。これは、ケーソン重量を十分に重くしてケーソンがほとんど動かないようにして、かなり大きな波を作用させたためと考えられ、現地では静水時のブロック荷重がこれほど大きくなることはないと思われる。

4.2 波作用時のブロック荷重

前節では波が作用していない静水時のブロック荷重について検討したが、既往の研究でも明らかなように、ブロック荷重は波が作用すると静水時よりも小さくなる。この原因としては、水位の上昇による浮力の増加以外に、ケーソンの変位によるブロック荷重の低下が考えられる。ここでいう変位とは滑動ではなく、ロッキングなどによるケーソンの瞬間的な変位である。図-25(a) はそのようすを模式的に示したものである。実際に、波作用時にケーソン前面の上端でダイヤルゲージを用いて変位を測定した結果、全く滑動しないときでも、ロッキングにより 0.05~0.10mm 程度の変位が認められた。

図-25(b) は、波力とブロック荷重の時間波形で、ブロックが十分に締め固まった状態における例である。図中の f_{HT} はロードセルで測定した全水平力強度、 f_{FR} は

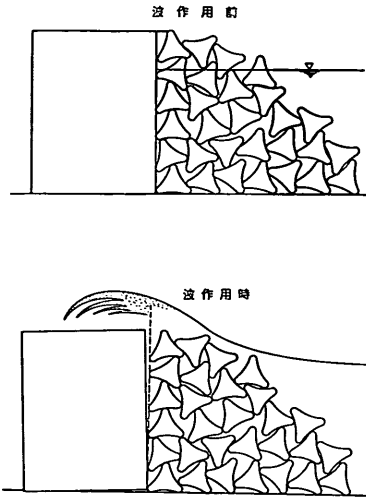


図-25(a) 波作用時のブロック荷重の減少

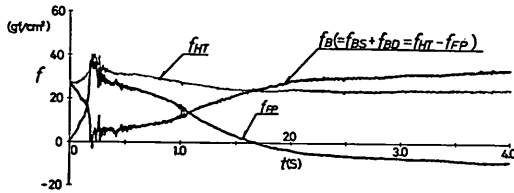


図-25(b) 波力とブロック荷重の時間波形

波圧計による前面波圧強度、 f_B は静水時ブロック荷重も含んだブロック荷重強度である。波力が0のときには静水時ブロック荷重に相当する水平力が作用しているが、波力が大きくなるとブロック荷重は減少し、この場合は波力のピーク時にはブロック荷重はほぼ0となっている。したがって、全水平力 f_{HT} の最大値は、波力 f_{BP} の最大値に等しくなる。

図-26は、平均水平波力強度のピーク値 f_{FP} と、そのときのブロック荷重の変動量 f_{BD} との関係を示したもので、ブロックが十分に締め固められた状態における結果である。ここに f_{BD} は、ブロックとケーソンが接触している場合と、金網を用いて分離した場合の全水平力(いずれも静水時を0とする)のピーク値の差で定義している。実験結果の平均的な関係式は

$$f_{BD} = -\alpha_B f_{FP} \quad (2)$$

と表され、ブロック荷重変動分(低減量)は水平波力に比例している。その比例定数 α_B をブロック荷重低減係

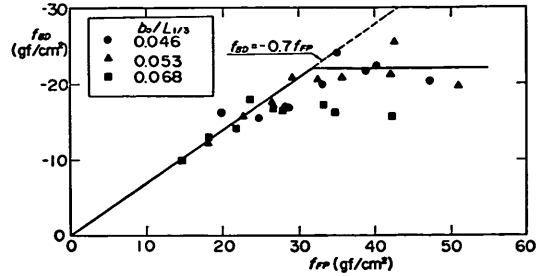


図-26 水平波力と変動ブロック荷重の関係

数と呼び、今回の実験結果では α_B は0.7程度である。波力が大きくなると f_{BD} は頭打ちになっているが、この絶対値は静水時のブロック荷重にほぼ等しく、波力がある程度大きくなると、ブロック荷重は瞬間的に0となることを示している。

既往の研究においては、 α_B に相当する値として、広本ら⁶⁾は0.5~0.7、島田⁷⁾は0.68、田中ら⁸⁾は0.4を得ている。今回得られた結果は、これらの値のなかの最大値に相当している。これは、静水時ブロック荷重の値が大きいことと関係していると思われる。すなわち、ブロックが十分に締め固まっているため、ケーソンに比べて波作用時の変位が小さく、荷重の減少量が大きいと考えられる。逆に、ブロックがあまり締め固まっていない場合はブロックの変位も大きいため、波作用時のブロック荷重の減少量は小さくなり、 α_B の値も小さくなると考えられる。

4.3 水平力載荷試験によるブロック荷重の変化

ケーソンに作用する力と変位そしてブロック荷重の関係を調べるために、水平力載荷実験を行った。この場合の水平力は、波作用時の透過波力に対応すると考えられる。図-27はブロックを積むときに力を加えて、波を作用させずに初期ブロック荷重を $K_s=0.7$ 程度に大きくしたときの結果で、載荷した水平力の単位面積あたりの大きさ $F_H/(l \cdot D)$ と水平ブロック荷重強度 f_B の関係を示したものである。ただし、 l はブロックの被覆高さ、 D は法線方向のケーソンの長さである。途中で一度水平力を除去し、ブロック荷重の残留を調べてから再び載荷している。

水平力の作用高さは、静水面付近とケーソン底部近くの2種類で行ったが、同じような傾向を示している。水平載荷力が大きくなると、荷重の減少率は-0.7程度で一定となっており、これは図-26に示した波作用時の減少率と一致する。水平載荷力が小さいうちは、波作用時

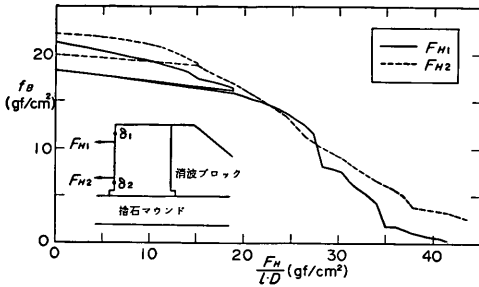


図-27 水平載荷力とブロック荷重

に比べて減少率が小さいが、これは波作用時には水位の上昇による浮力の増加があることによる違いと考えられる。

ケーソンの変位は、水平力の作用位置が底面近く、大きさが 20gf/cm^2 のとき、上側の変位 $\delta_1 = 0.44\text{mm}$ 、下側の変位 $\delta_2 = 0.19\text{mm}$ であり、マウンドの弾性係数から計算される変位量 ($\delta_1 = 0.11\text{mm}$, $\delta_2 = 0.07\text{mm}$) よりもかなり大きい。これは、ケーソンの変位にわずかな滑動が含まれることと、アクリル模型自体に多少のひずみが生じたことが原因と考えられる。なお、マウンドの弾性係数は、ケーソンの接地面積の平方根に比例するため、現地では模型との縮尺の比以上に変位は大きくなる。したがって相対的なブロック荷重の減少率は現地のほうがより大きいと考えられる。

4.4 ブロック荷重を含む全水平力

ブロック荷重を考慮した波作用時の全水平力 F_{HT} は、静水時ブロック荷重 F_{BS} 、波作用時のブロック荷重の変動量 F_{BD} 、透過波力 F_{FP} の和として、次式で表される。

$$F_{HT} = F_{BS} + F_{BD} + F_{FP} \quad (13)$$

図-28 は波高 H と水平力の関係を模式的にしたものであ

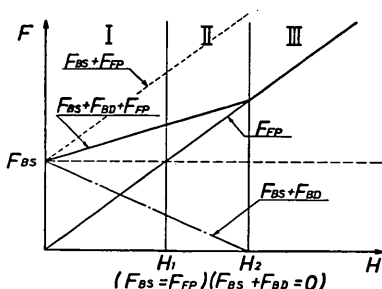


図-28 波高と全水平力の関係

る。 H_1 は静水時ブロック荷重と透過波力が等しくなる ($F_{FP} = F_{BS}$) 波高を、 H_2 は波作用時の全水平力が、透過波力と等しくなる ($F_{BS} + F_{BD} = 0$ すなわち $F_{FP} = F_{BS}/\alpha_B$) 波高を表わす。すなわち、I は静水時ブロック荷重が波力より大きい領域、III はブロック荷重を無視できる領域、II は両者の中間で、ブロック荷重が多少影響する領域である。

$F_{BD} = -\alpha_B F_{FP}$ の関係を用いると、全水平力は次のように表すことができる。

$$F_{HT} = F_{BS} + (1 - \alpha_B) F_{FP} \quad (\text{領域 I, II: } H < H_2) \quad (14)$$

$$F_{HT} = F_{FP} \quad (\text{領域 III : } H \geq H_2) \quad (15)$$

式(14)の $(1 - \alpha_B) F_{FP}$ は波作用時における全荷重の変動分であり、実験結果では $\alpha_B = 0.7$ であったので、 $(1 - \alpha_B)$ は 0.3 となる。ただし、ブロックが締め固まっていない場合は α_B の値が小さくなるので、相対的にブロック荷重の影響が大きくなる。

4.5 現地設計事例におけるブロック荷重

図-29 は、 h/L を横軸に、 H/h を縦軸にとって図-28 における H_1 および H_2 を示したものである。 H_1 および H_2 の曲線を境界として、下から順に領域 I、領域 II、領域 III となる。ただし、波力については、 $h'/h = 0.7$ 、 $hc = 0.35H$ と仮定し、合田式 ($\lambda = 0.8$) により計算しており、ブロック荷重については、静水時ブロック荷重係数 K_S として今回求められた比較的大きな値 0.72 と、やや小さい 0.50 の 2 通りについて計算している。図からわかるように、ブロック荷重が問題となるのは、水深が大きい場合や波高がかなり小さい場合である。

図-29 には、現地の消波ブロック被覆堤の 111 の例についての設計条件もプロットしているが、 $K_S = 0.72$ と

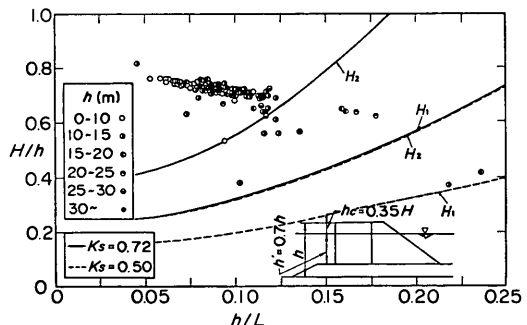


図-29 波力と静水時ブロック荷重の比較

しても、ほとんどの場合が領域Ⅲにある。図中の左上に直線状に集中して現地の条件がプロットされているが、これは不規則波の場合の砕波限界波高とほぼ一致している。すなわち、消波ブロック被覆堤の多くは、砕波条件で用いられていることがわかる。 $K_s=0.50$ とすると、領域Ⅰにあてはまる設計条件はなく、領域Ⅱに2つあるのみである。これは内湾の防波堤で、周期が短く波高もかなり小さい条件のものである。ただし、ここでは h'/h や H/h_0 の違いについては考慮していないので、高天端の場合などは、ブロック荷重の影響がもっと大きくなることに留意する必要がある。

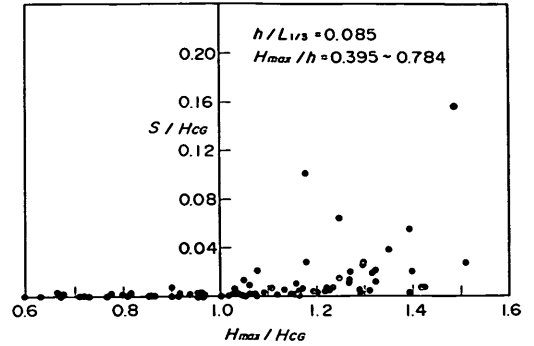


図-30 滑動実験結果 (波高レベル大)

5. ケーソンの滑動

5.1 波力とケーソンの滑動安定性

ケーソンの安定性は、最終的には滑動や転倒等によって決まるのであって、滑動や転倒が起こらず部材の破損も生じなければ、ケーソンは安定であるといえる。また、防波堤としての機能上に問題がなければ、若干の滑動を許容するという考え方もある。したがって、模型実験においても滑動量を検討することが重要である。

4.4 で検討した全水平力は、ケーソンが滑動しない状態での値であり、式(2)を用いてブロック荷重を考慮した設計を行えば、理論上は滑動することはない。しかし、前述のように、ブロック荷重の値はケーソンのわずかな変位でも大きく変化するものであるから、ケーソンが滑動を始めるときには、ブロック荷重は瞬間的に0になると考えてよい。したがって、ケーソンの滑動時には波力のみが作用していることになり、滑動量はほとんど増加しないと考えられる。

これらを考慮すると、ブロック荷重を無視して設計してもそれほど危険ではないと考えられる。こうした考え方を検証するために、波高条件やケーソン重量を広い範囲に変化させて滑動実験を行った。

5.2 滑動実験結果

(1) ブロック荷重を無視できる領域

波高の大きい領域では、波作用時にはブロック荷重は0とみなせるから、波力のみを考慮すればよい。図-30は波高レベルが大きく、ブロック荷重の影響を無視できる条件における滑動実験結果を示したもので、ケーソン重量と波高レベルをそれぞれ変化させて行った。縦軸は各波作用(250波)ごとのケーソンの滑動量 S を、横軸は最高波高 H_{max} を、滑動限界波高 H_{cg} でそれぞれ無次元化してプロットしている。ここに、滑動限界波高 H_{cg} は、各重量に対して合田式($\lambda=0.8$)で波力を計算したときに、滑動安全率が1.0となる波高である。なお、

実験に先立ってマウンドの摩擦係数 μ の検定を行った結果、 $\mu=0.573\sim0.640$ で、平均は0.604であった。したがって、実験結果の整理にあたっては $\mu=0.6$ を用いている。

計算上は $H_{max}/H_{cg}=1.0$ が滑動限界となるが、実験結果は $H_{max}/H_{cg}=0.9$ でやや滑動したケースがあるものの、それ以外はほぼ $H_{max}/H_{cg}=1.0$ が滑動限界となっている。また $H_{max}/H_{cg}>1.0$ であっても、多少のばらつきはあるが、滑動量はそれほど急激には増加しない。これは滑動限界よりも多少大きい波であっても、波圧波形のピークが鋭く作用時間が短いことや、滑動し始めた直後に越波によってケーソン天端面に下向きの打ち込み波力が作用し、滑動を抑える効果があるためと考えられる。この結果から、波高の大きい砕波領域においては、合田式で $\lambda=0.8$ として波力を計算する従来の方法が適切であり、しかも、もし設計波を多少上回る波が作用した場合でも、それほど大きく滑動しないことがわかる。

(2) ブロック荷重を考慮する領域

図-31(a)は、波高レベルが小さく、波作用時でもブロック荷重を考慮する必要があると考えられる条件での滑動実験時の変位 S 、波力 f_{PP} 、全水平力 f_{HT} 、ブロック荷重 f_B の時間波形を示したものである。ただし、最初にケーソン重量を十分に重くして大きな波を作用させ、静水時ブロック荷重を $K_s=0.7$ 程度に増加させてから、ケーソンを所定の重量に戻して実験を行っている。したがって式(2)で検討すると、波作用時のブロック荷重低減係数 α_B を0.7としても、ブロック荷重と波力によって滑動する条件である。

図の全水平力のところには、ほぼ滑動限界に相当する全水平力の限界値 f_{Hrc} を示している。ただし、揚圧力の大きさと底面の摩擦係数によってこの値はある程度変

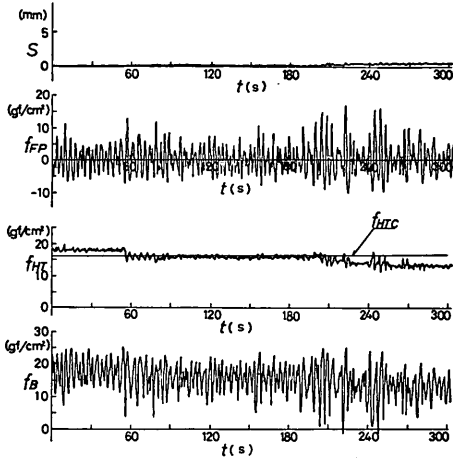


図-31(a) 滑動実験時の波力およびブロック荷重の時間波形 (1)

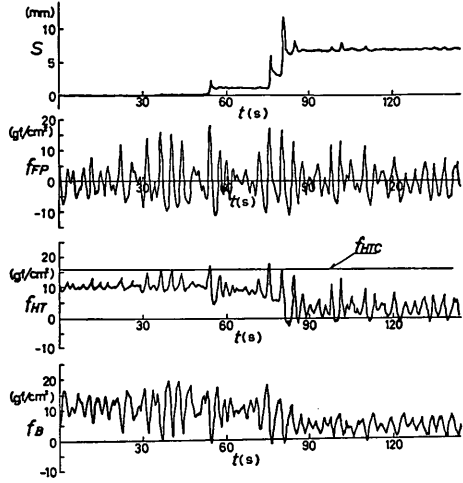


図-31(b) 滑動実験時の波力およびブロック荷重の時間波形 (2)

わると考えられる。全水平力はほぼ滑動限界値であり、比較的小さな波力でも滑動するはずである。しかしながら、実際にはほとんど滑動しておらず、1mm 未満の微小な変位のみである。これは前述したようにケーソンがわずかでも滑動するとブロック荷重は瞬間的に0となり、滑動量がほとんど増加しないためと考えられる。例えば56秒あたりでわずかな変位がみられ、その後全水平力が全体に小さくなっている。これは、ケーソンのごくわずかな変位で、ブロック荷重が瞬間的に低減することを示している。このわずかな変位はある程度残り、すなわちごく微小な滑動となって、平均的なブロック荷重（静水時ブロック荷重）のレベルを下げていく。こうした微小な滑動がこの図の中で数回発生し、その度に静水時ブロック荷重が低減し、次第に静水時ブロック荷重の影響が小さくなっていることがわかる。なお、波力の変動に比べて全水平力の変動はかなり小さいが、これはすでに図-25(b)でもみたように、波作用時のブロック荷重の低減が大きいため、静水時ブロック荷重と波力のピーク値があまり変わらないためである。

図-31(b)は、前図に続いてやや大きな波を作用させた場合の時間波形である。ケーソンの滑動が認められるが、これは波高が滑動限界波高より大きく、波力だけでも滑動する条件である。ブロック荷重をみれば、滑動時にはほとんどブロック荷重は0となっており、滑動しないときでも0に近い値となっている。例えば70秒付近では、静水時ブロック荷重が $K_S = 0.35$ 程度とかなり小さく、また α_B が0.7程度と高いために、波浪時のブ

ロック荷重が0となり易くなっている。なお、静水時のブロック荷重は、この図でも滑動とともに小さくなっている。

図-32(a)は、波高レベルが小さく、波作用時でもブロック荷重を考慮する必要があると考えられる条件での滑動実験結果を示したもので、堤体重量は一定とし、波高レベルのみを変化させて滑動量を測定している。滑動限界波高 H_{CG} は、図-30と同様にブロック荷重を無視して合田式による波力だけから求めている。したがって

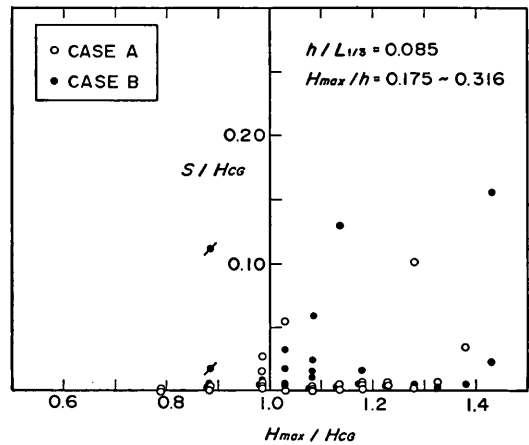


図-32(a) 滑動実験結果 (波高レベル小)

滑動に対するブロック荷重の影響が大きければ、 H_{max}/H_{CG} の値が 1.0 よりもはるかに小さい波高レベルでも滑動するはずである。なお、波力低減係数 λ の値については、式(8)で示した計算法を用いており、ここに示したデータについてはほとんどが $\lambda = 1.0$ である。

CASE A は、前述したように最初にケーソン重量を十分に重くして大きな波を作用させ、ブロック荷重を増加させてから実験を行った場合である。 $H_{max}/H_{CG} = 0.98$ で多少動いたケースがあり、図-30 に比べるとやや危険側ではあるが、 $H_{max}/H_{CG} > 1.0$ でも滑動量は数 mm 程度と小さいケースも多く、全体的には滑動限界は $H_{max}/H_{CG} = 1.0$ とみなしてもそれほど問題ない。すなわち、静水時ブロック荷重は大きいけれども、波作用時の減少率が大きいいため、滑動に対してはほとんど影響していないといえる。これは前述のように、ブロックが十分に締め固まった状態ではケーソンの変位にブロックが追従しなくなり、ケーソンが少しでも滑動するとブロック荷重が瞬間的に 0 となるためと考えられる。実験においては、写真-2(a) のように、滑動によってケーソンとブロックが完全に離れ、ブロックが自立するケースもみられた。

一方 CASE B は、最初から所定の重量で波を作用させた場合である。斜線をつけた二つのデータを除けば、こちらも $H_{max}/H_{CG} = 1.0$ を滑動限界とみなしてよい。ただし、斜線をつけたデータは設置直後で最初に波を作用させたケースで、波高が小さいにもかかわらずかなり滑動している。これは設置直後でブロックが締め固まっていなかったため、波作用時にブロック荷重が減少せず、波力とブロック荷重の両方を受けて滑動したものと考えられる。したがって、現地においても施工直後のブロックが締め固まらない状態では、滑動が生じやすいと考えられる。写真-2(b) は、CASE B における最終的な滑動状況を示したもので、ブロックの上部がケーソンの動きに追従してくずれている。

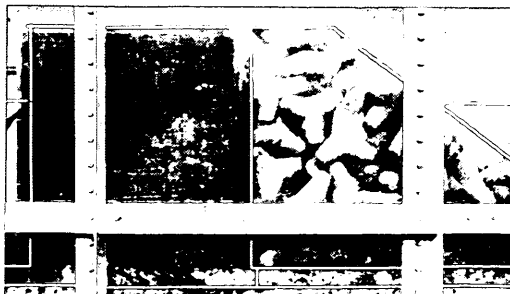


写真-2(a) 滑動実験終了後の状況 (CASE A)

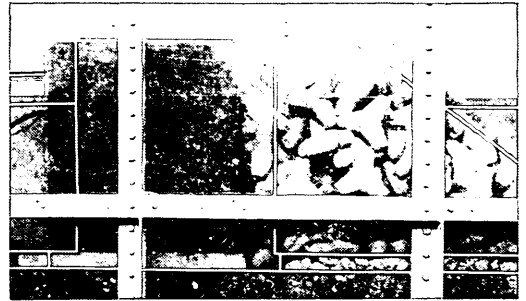


写真-2(b) 滑動実験終了後の状況 (CASE B)

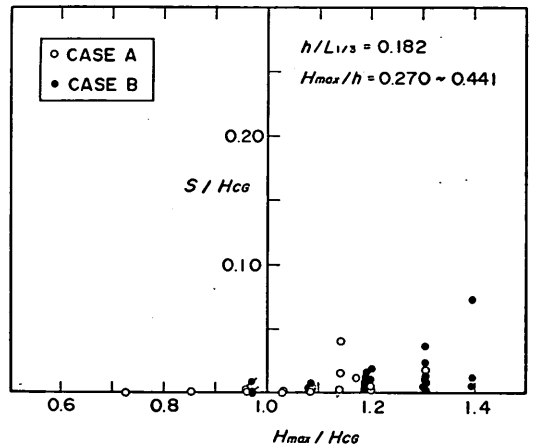


図-32(b) 滑動実験結果 (波高レベル小, 短周期)

図-32(b) は周期のかなり短い波での実験結果を 図-32(a) と同様に示したものである。この場合はかなり安全側の結果となった。ただし、設置直後についてはやはり多少滑動している。

5.3 設計波力と滑動安定性

滑動実験の結果から、ある程度ブロックが締め固められた状態では、ブロック荷重は滑動安定性に対してほとんど影響しないことがわかった。また、前章でも述べているように、静水時ブロック荷重は設計波高が小さい場合には小さいため、現実には領域 I や II の条件となりにくいと考えられる。したがって滑動安定性の計算は、基本的には従来通り波力のみを考慮し、合田式を準用して波力を計算できる。波力低減係数 λ の値は、通常は 0.8 を用いてよい。ただし、波高の小さい重複波領域では、条件に応じて適切な値を用いる必要がある。

なお、天満高が特に高い場合などで、初期状態における静水時ブロック荷重が波力よりも大きくなる場合に

は、ブロック荷重に対して設計を行う必要がある。さらに、施工直後の状態ではブロックがあまり締め固められていないので、波作用時にブロック荷重が減少しない。したがって、ブロック荷重が設計波力より小さい場合でも、波力とブロック荷重の両方の影響を受けて、設計波高以下の波でケーソンが滑動する場合もあることに注意を要する。

6. ま と め

今回の研究において得られた主要な結論を示す。

- ① 消波ブロックによる波力の低減効果は $b_0/L_{1/3}$ が小さい場合、やや切り立った波力のピークが減衰することによって生じる。したがって波高の大きい碎波的な波ほど顕著であり、重複波の場合はあまり減少しない。ただし、重複波の場合は、被覆幅を大きくすることにより波圧波形全体が減少し、低減効果が大きくなる。
- ② ケーソンに作用する波力は、場所によって位相差があり、設計においてはケーソン前面の水平波力と、揚圧力のみを考慮すればよい。ケーソン天端面に働く打ち込み波力は滑動にブレーキをかける効果があり、消波ブロック被覆堤の場合、通常の混成堤よりもその効果が大きい。
- ③ ブロックの被覆高さが十分でない場合、ケーソンに働く波力は、ブロックを設置しない場合よりもかえって増大する。
- ④ 静水時のブロック荷重は、設置直後は小さいが、波の作用を受けるにしたがって増加する。最終的に安定となる値は、作用した波の大きさやケーソンの重量などによって異なる。
- ⑤ 波の作用時には、浮力の増加やケーソンの微小な変位によりブロック荷重は減少し、波高が大きくなるとほとんど0とみなせる。ただし、この減少量はブロックの締め固まりの程度などによって決まる。
- ⑥ ブロック荷重を考慮しなければならないのは、波高がかなり小さいか、水深の大きい場合であり、通常の消波ブロック被覆堤はほとんどブロック荷重が無視できる。
- ⑦ 滑動安定性の計算においてはブロック荷重を考慮する必要はなく、合田式を準用して計算される波力のみを考慮すればよい。波力低減係数 λ の値は、通常は0.8を用いてよい。ただし、波高の小さい重複波領域においては条件に応じて適切な値を用いる必要がある。また、施工直後のブロックがあまり締め固まっていない状態では、ブロック荷重の影響によ

り、設計波よりも小さい波で滑動する場合もあることに注意を要する。

今回の研究により、標準的な被覆断面における波力低減係数 λ の値の目安が得られた。しかし、被覆幅の影響による λ の変化については、全体の傾向はわかったが、具体的な値については検討が十分でない。また、天端高の影響や、急勾配斜面上に設置した場合の波力の変化などについては実験を行っていない。これらの点が問題となる場合は、必要に応じて模型実験を行い検討することが望ましい。大水深域で消波ブロック被覆堤を用いる場合には、これまでの施工実績も少ないので、特に注意が必要である。

また、ブロック荷重については、静水時の値や波作用時の減少率などを現地へ適応するには、縮尺効果の影響などについてさらに検討する必要がある。

本研究において、静水時ブロック荷重の考え方等について土質部基礎工研究室の高橋邦夫室長から貴重な助言を得ている。また、実験の実施およびデータ整理には、耐波研究室の佐々木均技官、海洋エネルギー利用研究室の田中 智技官の協力を得た。ここに記して感謝する次第である。

(1989年11月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 森平倫生・柿崎秀作・菊谷 徹：異形ブロックの波力低減効果に関する研究，港湾技術研究所報告，第6巻第4号，1967，pp.1~31.
- 2) 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，1989.
- 3) 谷本勝利・北谷高雄・大里睦男：不規則波による消波ブロック被覆堤の模型実験例，港湾技研資料，No.321，1979，60p.
- 4) 谷本勝利・高橋重雄・明瀬一行：防波堤直立部に働く不規則波力に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第23巻第3号，1984，pp.47~99.
- 5) 常井公一・服部昌太郎・野口雄二・遠藤泰司：消波ブロック被覆堤の不規則波力の低減効果，第35回海岸工学講演会論文集，1988，pp.647~651.
- 6) 広本文泰・西島浩之・今野 茂・木村岩男：消波ブロック被覆堤に働く波浪時のブロック荷重について，第30回海岸工学講演会論文集，1983，pp.347~351.
- 7) 島田真行：消波ブロック被覆堤ケーソンに対する作用力の伝達過程について，第31回海岸工学講演会論文集，1984，pp.571~575.
- 8) 田中寛好・阿部宣行・加藤正進：消波ブロック被覆堤ケーソンに作用する水平荷重の評価，第32回海岸工学講演会論文集，1985，pp.490~494.

湧波ブロック被覆堤直立部の滑動安定性に対する波力とブロック荷重

- 9) 谷本勝利・高橋重雄・北谷高雄：混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力の発生と対策について，港湾技術研究所報告，第20巻第2号，1981，pp.3～39.
- 10) 合田良実：衝撃砕波圧を受ける混成防波堤の挙動に関する考察，港湾技術研究所報告，第12巻第3号，1973，pp.3～29.

- h_c : 静水面上天端高さ
 h' : 基面水深
 K : 波力低減係数の算定に用いるパラメータ
 K_S : ブロック荷重係数
 k : 波数
 L : 波長
 $L_{1/3}$: 有義波波長
 l : ブロックの被覆高さ
 ρ : 森平式による波圧
 ρ_1 : 合田式による静水面での波圧
 ρ_2 : 合田式による水底面での波圧
 ρ_3 : 合田式によるケーソン下端での波圧
 ρ_u : 合田式によるケーソン前趾での揚圧力
 S : 滑動量
 $S(f)$: スペクトル密度
 $T_{1/3}$: 有義波周期
 W : ケーソンの水中重量
 w_0 : 海水の単位体積重量
 α_1 : 合田式で静水面の波圧の算定に用いるパラメータ
 α_3 : 合田式でケーソン下端の波圧の算定に用いるパラメータ
 α_B : ブロック荷重低減係数
 β : 波向き
 γ : ブロックの単位体積重量
 δ_1 : 静水面でのケーソンの変位
 δ_2 : ケーソン下端近くでのケーソンの変位
 ϵ : ブロックの空隙率
 η^* : 静水面上波圧が0となる高さ
 λ : 合田式における波力低減係数
 λ_H : 合田式と比較した水平波力の低減率
 λ_H^* : 実験値どうしを比較した水平波力の低減率
 λ_S : 合田式と比較した滑動合成波力の低減率
 λ_U^* : 実験値どうしを比較した揚圧力の低減率
 λ_U : 合田式と比較した揚圧力の低減率
 μ : ケーソンとマウンドの摩擦係数

主要記号一覧表

- B : ブロックの代表寸法
 b_0 : 静水面における被覆幅
 D : 法線方向のケーソンの長さ
 F_{BD} : 波作用時のブロック荷重の変動量
 F_{BS} : 静水時ブロック荷重
 F_{FP} : ケーソン前面に働く透過波力
 F_H : 水平波力
 F_{HT} : 全水平力
 F_S : 滑動合成波力
 F_V : 鉛直波力
 f : 周波数
 f_{BD} : 単位面積あたりの静水時ブロック荷重の変動量
 f_{FM} : 腰掛け部の平均水平波力強度
 f_{FP} : ケーソン前面に働く平均波力強度
 H : 波高
 H_1 : 静水時ブロック荷重と透過波力が等しくなる波高
 H_2 : 波作用時のブロック荷重が0となる波高
 $H_{1/3}$: 有義波高
 $H_{1/10}$: 1/10 最高波高
 H_{CG} : 合田式による滑動限界波高
 H_{max} : 最高波高
 H_{mean} : 平均波高
 h : 水深