

波による消波ブロックの振動に関する実験的研究

Laboratory Tests on the Vibration of Armor Blocks by Waves

名城大学 理工学部 土木工学科 伊藤政博

Masahiro Ito

A armor units placed on a slope of breakwater collapse in the damage process such as repose, slight vibration, rocking, movement and dropping depending on the intensity of attacked waves. The slight-vibration and vibration of armor units concern considerably with the compacting between armor units in breakwater and settlement of armor units into the sandy seabed. A breakwater model of the two layerer Tetrapod was used in the laboratory test. The Tetrapod model attached with a micro-accelerometer sensor were set on the positions of still water level on the surface and under layers of breakwater, respectively. Vibration characteristics of Tetrapod are discussed in terms of the damage ratio by waves, fluctuation of water surface on the slope breakwater, and surf similarity parameter. It is found that the peak value of power spectral distribution depends on the surf simirality parameter.

Keywords: armor unit, vibration of armor units, surf simirality parameter

1. はじめに

海岸堤防および防波堤の前面には、波の反射と波圧の軽減、越波および洗掘の防止などの目的で、消波ブロックによる消波工が設置されている。これらの消波ブロックは、来襲波高の増大に伴い、静止状態から微動、振動、揺動、移動の過程を経て、脱落し、被害に至る。特に、波によるブロックの微動、振動、揺動などの挙動は、消波工の締め固めに大きく関係するので、無視できない。離岸堤及び消波工のブロックが海底地盤中へ数メートルも潜り込んだ事例¹⁾が報告されている。この原因として、海底地盤の間隙水圧の変化のみならずブロック振動の影響も無視できないものと考えられる。さらに、振動によるブロック間の衝突が原因と考えられるブロックの破損も数多く見られる。しかしながら、消波ブロックの振動については、現地観測のみならず基礎的な研究が十分行われていない。本研究では、波の作用による消波ブロックの微動、振動、揺動の特性を調べるために、消波ブロック二層被覆堤の法面と静水面が交差する位置に、超小型の加速度計センサーを埋め込んだ模型ブロックを設置して、実験的に数々の波を作用させてブロックの振動を測定した。この測定結果に基づいて、法面上の波の遡上・流下速度、碎波帯相似パラメーター等との関係で検討する。

2. 実験²⁾

(1) 平面造波水槽

長さ18m、幅10m、深さ1.17mの平面造波水槽内をコンクリート板で仕切った四つの小水路内に、消波ブロックで二層被覆堤の模型を造った。造波板と消波ブロックによる被覆堤との間に生じる波の多重反射を防ぐために、それぞれ小水路の間に消波マットからなる反射吸収斜面(1:5)を設置した。そのために、模型に長時間の波を作用させても、比較的安定した実験波を得ることができた。

(2) 二層被覆堤模型

二層被覆堤の模型断面が図-1に示してある。この模型は、下層に捨石として38gf(径47mm)の碎石を使用した。被覆堤の法面勾配は1:4/3とし、法面に消波ブロックを二層乱積みとした。

(3) 消波ブロック模型

消波ブロック模型は表-1に示すように、比重2.30の普通コンクリート製と比重2.77の高比重コンクリート製のテトラポッドを使用した。これらの模型の分類番号はそれぞれA-4、B-4及びB-3型とした。特に、B-4とB-3型は比重が異なるが、設計波高(移動限界波

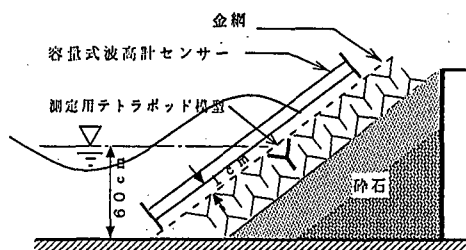


図-1 二層被覆堤模型

表-1 使用した消波ブロック(テトラポッド)模型の特性

模型分類番号	A-4 型	B-4 型	B-3 型
比 重	2.30	2.30	2.77
鉛直高h (cm)	4.52	5.68	4.25
体積 V(cm ³)	25.6	51.2	20.0
重量 W(gf)	58.9	117.8	55.4
移動限界波高 Hc (cm)	8.6	10.8	10.8

高)は計算上同じである。振動の測定は図-2に示すように、これらの模型中に超小型加速度計センサー(5×5×15mm)を埋め込んだ。ただし、超小型加速度計センサーを埋め込んでも模型の重さは変わらないようにした。

3. 実験方法

(1) ブロックの安定性

図-1のような消波ブロック二層乱積みの法面に、波の周期を一定に保ち、段階的に波高を大きくして波を作用させた。波高の増大に伴って消波ブロックは、揺動、移動及び脱落するが、消波ブロックをそのままにしておいて、被害率は積分値として評価した。この間に波の作用で消波ブロック模型の揺動、移動及び脱落の状態をビデオカメラで撮影録画し、600~1000波作用させた。実験条件の概要は表-2に示してある。

(2) ブロックの振動測定

従来の研究³⁾によると、消波ブロック被覆法面は静水面付近で最も被害を多く受ける。そこで、静水面と法面とが交わる被覆層の表層と下層で振動を測定することにした。そのため、被覆ブロック法面全体を網目の粗い金網で固定して、消波ブロック全体が波によって動かないようにし、金網の15×10cmの部分を取り取って、その中央部に超小型加速度計センサー付きテトラポッドを据え付けた。振動の測定方向は、図-3に示すように、法面に垂直方向をX軸、法面(波の遡上・流下)方向をY軸、汀線方向をZ軸とった。また、振動測定と同時に法面方向の水面変動を測定するために、容量式波高計センサーを法面から約1cm離し、法面に平行に設置した。振動の測定は、波の作用開始後、作用波が安定する10波目以降に開始した。加速度計センサーと容量式波高計センサーからの信号は、直流増幅器を介して、AD変換ボードでデジタル量に変換し、パーソナルコンピュータに取り込み、光磁気ディスクに収録した。

4. 実験結果

(1) 被害率

波高の増大に伴って、消波ブロックは"微動","振動","揺動","移動","脱落"に至る。ブロックの被害は、従来の研究を参考に目視による判断が可能な方法として、次のようにした。

- ①揺動：ブロックの位置は変化しないが、大きく振動している。
- ②移動：揺動と脱落との中間。

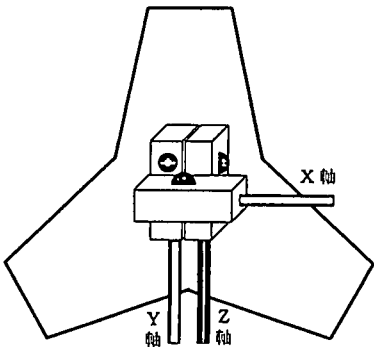


図-2 ブロック内のセンサー埋め込み状態

表-2 実験条件の概要

規則波	波高 H (cm)	6~18
	周期 T (sec)	1, 2, 3
	水深 h (cm)	60
二層被覆堤(法面勾配)		1:4/3
海底勾配		水平床
測定項目	被害率	波の作用時間 (min) 15~50
		波数 (1/T) 600~1000
	振動法	サンプリング間隔 (msec) 30
		データ総個数(個) 2100
項目	振動方向の	X方向 法面に対して垂直方向
		Y方向 法面(遡上・流下)方向
		Z方向 汀線方向

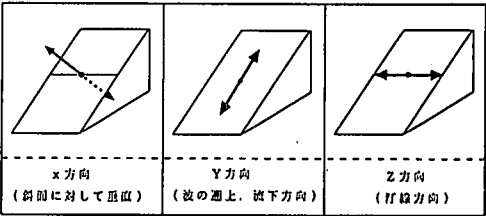


図-3 測定方向の定義

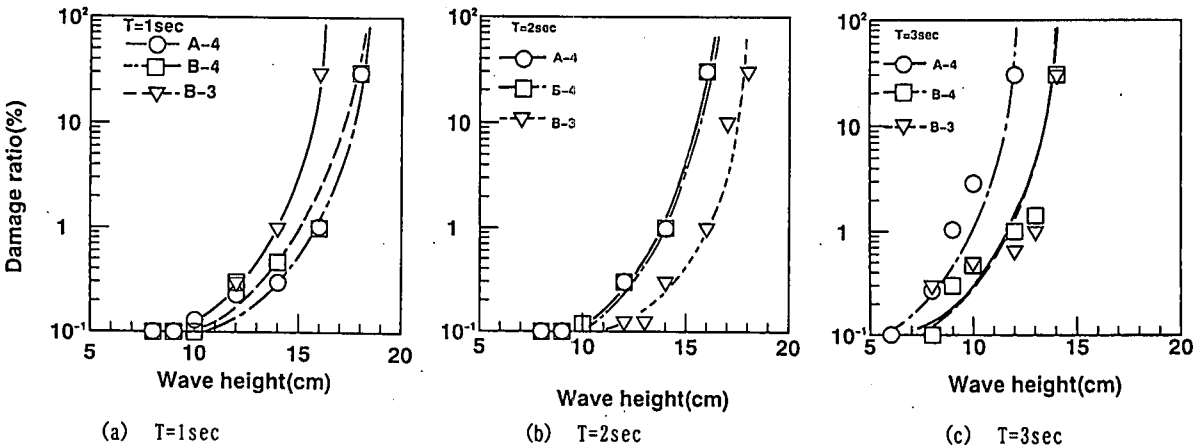


図-4 被害率と波高の関係

③脱落：ブロックの大きさの1倍以上の移動。

被害率は次式のように定義する。

$$\text{被害率(\%)} = \frac{\text{移動・脱落した個数}}{\text{全被覆ブロック個数}} \times 100 \quad \dots\dots\dots (1)$$

(2) 被害率と波高の関係

実験に用いた消波ブロックの移動限界波高 H_c は、Hudson式に従えば消波ブロックの安定係数が $K_D=8.3$ である
ら、A-4、B-4及びB-3型ブロックは周期に関係なく、表-1に示すようにそれぞれ $H_c=8.6\text{cm}$ 、 10.8cm 及び 10.8cm

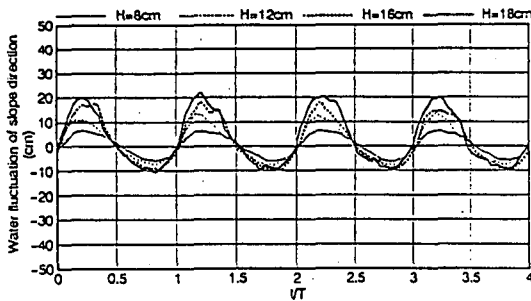
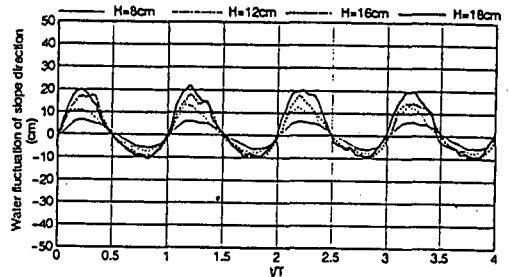


図-5 法面上の水面変動(B-4型ブロック, T=1sec)



(a) 法面上の水面変動

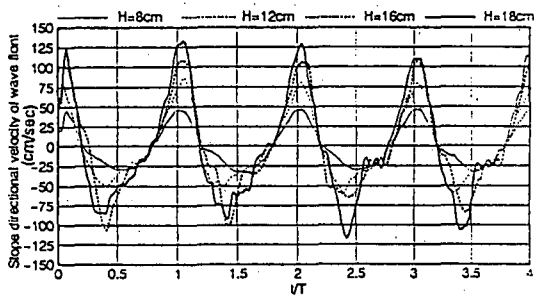
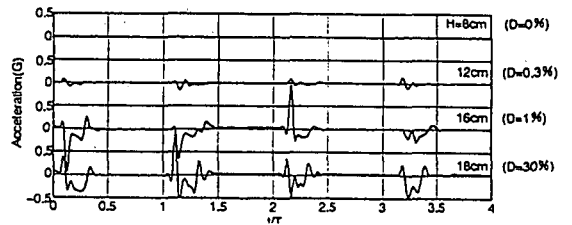
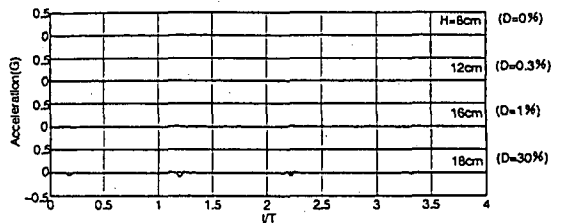


図-6 法面方向速度(B-4型ブロック, T=1sec)



(b) 表層のブロック振動



(c) 下層のブロック振動

図-9 B-4型ブロックのY方向の振動特性(T=1sec)

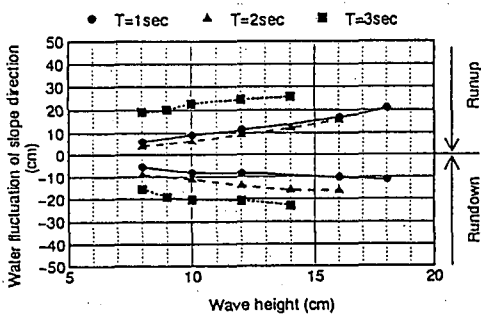


図-7 法面方向の遡上・流下高と波高の関係

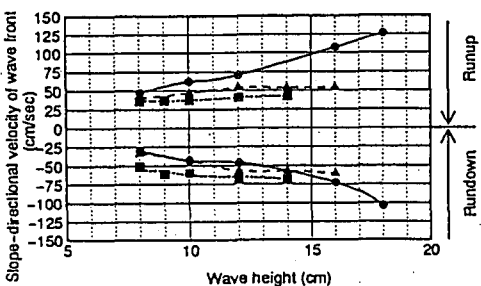
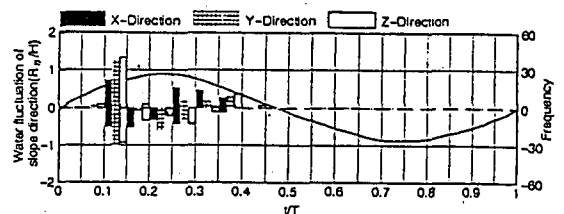
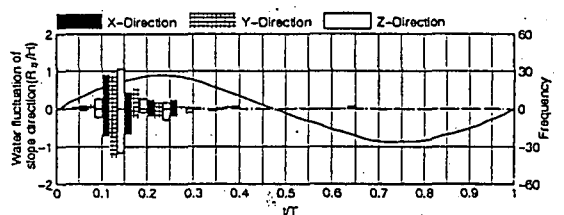


図-8 法面方向の最大・流下速度と波高の関係



(a) T=1sec, 表層の場合



(b) T=1sec, 下層の場合

図-10 B-4型ブロックの振動加速度の最大、最小と水面変動の関係

になる。B-3型ブロックは、比重が2.77の高比重ブロックであるが、 $K_o=8.3$ とすると、計算上の設計波高は、B-4型ブロックと同じになる。実際に波高と被害率の関係を実験的に調べた結果が、周期ごとに図-4にまとめ、各ブロックの被害率と波高の関係が曲線で表してある。図-4(a)から、B-4とB-3型ブロックの被害率と波高の関係は、Hudson式によると同じでなければならないが、多少の違いがある。一方、図-4(b)によると、 $T=2\text{sec}$ ではA-4とB-4型ブロック（普通コンクリート製）の移動限界波高が異なるので、被害率は違うはずである。しかしながら、被害率は同じ結果になっている。このことは、伊藤ら⁴⁾が指摘しているように、波の周期が消波ブロックの被害率に影響を及ぼしていることを裏付けている。

(3) 法面上の水面変動特性

図-4から、被害率 $D=0\%$ （実際は0.1%であるが、ほとんど被害が無いので以下0%として扱う、0.3%、1%、及び30%に相当する4種類の波高を求めた。被害率に相当するデータがある場合は、そのデータに基づいて波高を求めた。データの無い場合は、被害率と波高の傾向を表す曲線から求めた。このようにして求めた波高について、周期 $T=1\text{sec}$ の波が作用した場合の法面方向の水面の変動と速度が、図-5及び6に水面変動の位相 l/T を横軸にとって、4波分の結果が示してある。図-6から、波の遡上時の最大水面速度は水面が汀線を通過するときに、また流下の最大速度は水面が汀線を通過する直前に生じていることがわかる。

(4) 法面方向の遡上・流下

被害率と波高の関係を示した図-4から、波高が同じでも、波の周期が長いほど、被害率が大きくなる傾向があることがわかる。このことは消波ブロックに作用する流体力、すなわち水粒子速度が大きくなるためであると考えられる。そこで法面方向の水面変動の遡上流下の最大速度を詳しく調べるために、B-4型ブロックで被覆した場合について、法面方向の遡上・流下高と波高の関係が図-7に、また法面方向の最大および最小速度と波高との関係が図-8にまとめてある。十分な実験データが無いので詳しいことはわからないが、本研究で使用した波については、周期 $T=1\text{sec}$ の場合、遡上時に最大速度を示している。しかし、周期 $T=3\text{sec}$ の場合には、流下時に最大速度を示している。

(5) ブロック振動^{5), 6)}

図-9には、周期 $T=1\text{sec}$ で波高を $H=8\sim 18\text{cm}$ （被害率 $D=0\%$ 、0.3%、1%及び30%）に変えた場合について、B-4型ブロックの表層と下層のY方向の振動が水面変動に対応させて示してある。図-9(b)から、汀線の表層に設置した消波ブロックの振動は、波高（ $H=8, 12, 16, 18\text{cm}$ ）によってかなり違っている。この図によると、消波ブロックは、周期 $T=1\text{sec}$ のとき遡上波が汀線を横切る時に水面の変動速度が極大になり、被害率 $D=0.3\%$ （ $H=12\text{cm}$ ）以上になると、大きな振動が表れる。このことは、図-6に示すように遡上波が静水面を横切る位相で最大速度を表すことによく対応している。一方、下層ではブロック振動が見られないほど小さいことがわかる。

B-4型と同じ移動限界波高となる高比重のB-3型ブロックの表層の振動は、周期 $T=1\text{sec}$ で波高が同じ波の場合、高比重のB-3型ブロックは図-4(a)によると、普通コンクリートのB-4型より被害率は大きくなるはずである。しかし実際には、ブロックの振動はかなりB-4型より小さくなっている。

(6) 振動加速度の最大・最小値の頻度分布

水面変動1サイクルの間におけるブロック振動の加速度が最大(max)と最小(min)値を示す位相（ l/T ）、すなわち振動の頻度分布を、法面方向の水面変化と波高の比 R_o/H で表すことにする。図-10には、B-4型ブロックの被害率 $D=1\%$ になる波高 $H=16\text{cm}$ で、B-4型ブロックを表層と下層に置いたときの頻度分布が、図-10(a)と(b)に示してある。この図によると、振動の最大、最小の発生頻度が大きくなる位相は、水面が汀線から上昇する間に生じている。このことは、図-8で示した周期 $T=1\text{sec}$ の波が、遡上時に最大になることに対応している。この傾向は、被害率が大きくなってもあまり変わらない。このように、振動は周期による影響を強く受けることがわかる。

(7) スペクトル解析

表-2で示したように30msecでサンプリングしたブロックの振動の測定データ2048個を高速フーリエ解析法（FFT法）を用いてスペクトル解析を行った。その例として、法面方向の振動（B-4型、 $T=1\text{sec}$ ）が図-11(a)に示してある。この図からわかるように、ブロック振動のスペクトル分布は高周波部分でかなりの変動がある。この原因の一つとして、ブロック振動が図-9(b)と(c)で示すように矩形波あるいは三角波形になっているためであろう。このように、ブロック振動の高周波部分では変動が激しいので、振動の特色を検討しにくい。いま、40点移動平均してスムージングすると、図-11(b)のように、振動の特性がわかりやすくなる。図-12には、法面上の水面変動のスペクトル分布が示してある。このように振動のスペクトル計算結果をスムージングして、X、Y、Z方向毎に波高（被害率）変化による違いがわかるように図-12～14に整理してある。図-13～15から、波高の増大に伴って振動は大きくなることがわかる。特に、表層のブロックは波の周期とその倍数のところでピークを示す共振が発生していることがわかる。この傾向は波高の増大に伴って鮮明になっている。

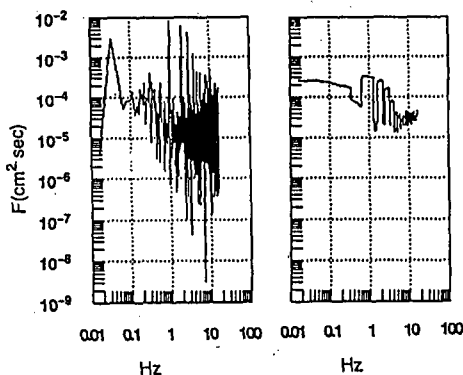
図-1 3と1 5を比較すると、表層と下層の振動の違いがわかる。すなわち、下層のブロック振動は表層に比べてかなり小さくなっている。また、図-1 4には、波の周期 $T=3\text{sec}$ における表層ブロックの振動スペクトルが示してある。この図と図-1 3を比較すると、振動のスペクトルは波の周期が長く($T=1\rightarrow 3\text{sec}$)なると、全体に小さくなり、XとY方向の振動に波の周期に対応する共振現象が現れている。

(8) ブロック振動のパワースペクトルと砕波帯相似パラメーターとの関係^{7), 8)}

パワースペクトル分布図から波の周期と同じ周波数のパワースペクトル $F_{\max}$ ($G^2 \cdot \text{sec}$)の値を読みとった結果が、砕波帯相似パラメーターとの関係で振動の方向(X, Y, Z)ごとに、図-1 6に示してある。この図には、表層あるいは下層に置かれたブロックの違いが分かるように、下層の結果を表す印を黒く塗りつぶして示してある。スペクトル分布がピークを示したケースは、図中の印の中に"×"印を付けて区別してある。この図から、表層のブロック振動の $F_{\max}$ は、 ξ が3~4以下になると、急激に大きくなる傾向が見られる。この原因として、波がブロック被覆層法面に衝突する状態が、非砕波から砕け寄せ波砕波に変わるためと考えられる。すなわち、砕け寄せ波砕型の砕波は砕波時に空気を取り込みながら衝突するために、消波ブロックに衝撃を与えるためと推定される。しかし、下層のブロックは、表層に比べて $F_{\max}$ の値はあまり変化していない。これは、表層のブロックの振動が下層のブロックと捨石に伝搬し、吸収されるためと考えられる。

5. 結論

本研究では、超小型加速度計センサーを埋め込んだ普通コンクリート及び高比重の三種類の模型ブロックを法面の汀線の表層と下層に置いて、波によるブロック振動を測定した。この測定データを用いて、振動と水面変動、振動の最大・最小の発生と水面変動、さらに振動のスペクトル分布の特性と砕波帯相似パラメーターの関係を調べ、検討を加えた。その結果は、以下のよ



(a) オリジナルな結果 (b) 40点移動平均
図-1 1 B-4型ブロックの振動加速度のスペクトル分布

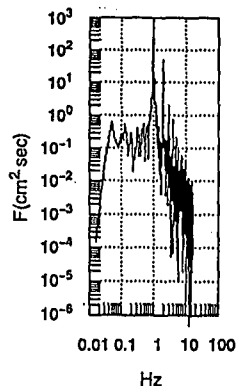
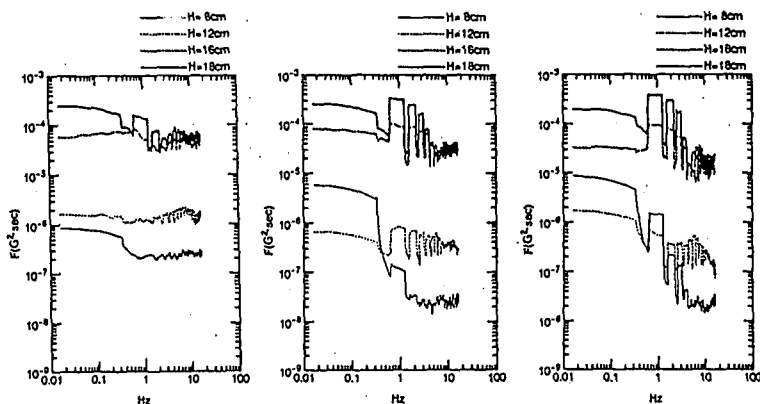
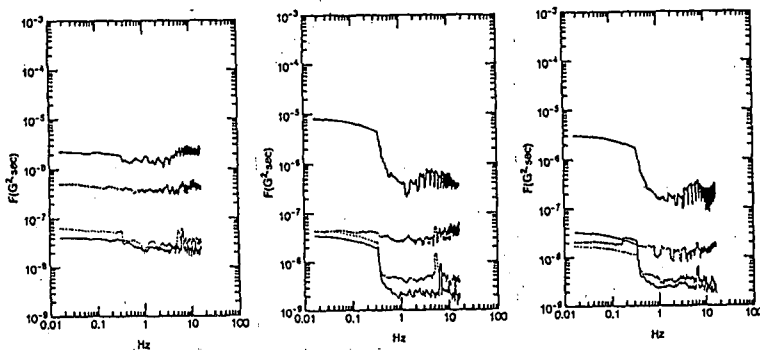


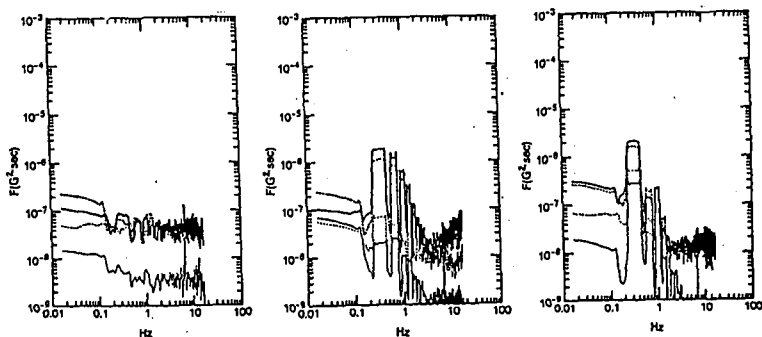
図-1 2 法面上の水位変動



(a) X方向 (b) Y方向 (c) Z方向
図-1 3 B-4型ブロックの表層の振動加速度のスペクトル分布 ($T=1\text{sec}$)



(a) X方向 (b) Y方向 (c) Z方向
図-1 4 B-4型ブロックの下層の振動加速度のスペクトル分布 ($T=1\text{sec}$)



(a) X方向 (b) Y方向 (c) Z方向
図-1 5 B-4型ブロックの表層の振動加速度のスペクトル分布 ($T=3\text{sec}$)

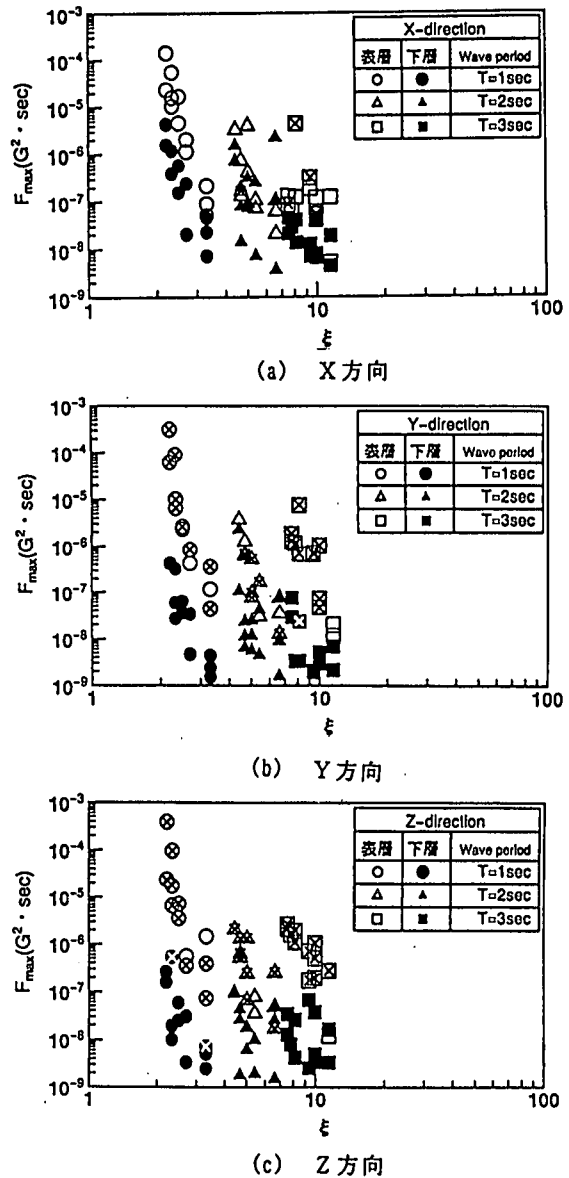
うにまとめられる。

- (1) 法面方向の水面の変動速度の最大値の発生する位置は波の周期によって変わる。この水面の変動速度が最大になる位相で消波ブロック振動が最大になる。
- (2) 法面上の水面変動が静水面から上昇し、遡上点まで、 $1/T=0\sim0.25$ の間で、ブロック振動が大きい。
- (3) 波の周期が短くなると、ブロック振動のスペクトル分布の最大値は小さくなる。
- (4) 下層のブロックの振動は、表層の約1~10%である。
- (5) ブロックの振動特性は、砕波帯相似パラメーターが3~4以下になると、波の周期に対応するブロック振動のパワースペクトル F_{max} が急激に大きくなる。このことは、非砕波から砕け寄せ波砕波に変化することに対応している。

最後に、本研究は小川浩司氏（現在、NTT）が修士論文（参考文献 2）として行った実験結果を再整理してまとめたものであることを明記し、本研究の実験を精力的に行った同氏及び名城大学理工学部土木工学科河海工学研究室の関係者に対し、謝意を表明します。

参考文献

- 1) 西田仁士・山口 豊・近藤豊次・清水謙吉：孔間弾性波探査法による離岸堤の埋没状況に関する考察，第32回海岸工学講演会論文集，p. 365~369, 1985.
- 2) 小川浩司：消波ブロックの振動特性に関する研究，名城大学大学院理工学研究科修士論文，p. 115, 1994.
- 3) 伊藤政博・小川浩司・國枝圭介・山田卓生：波による消波ブロックの振動特性について，土木学会中部支部平成4年度研究発表会講演概要集，pp. 311~312, 1993.
- 3) 伊藤政博 他6名：高比重ブロックの安定性に及ぼす砕波帯相似パラメーターの影響，土木学会海岸工学論文集，第39巻，pp. 666~670, 1992.
- 4) 伊藤政博・小川浩司・國枝圭介・村上 廣：波の作用による消波ブロックの振動に関する実験的研究，土学会海洋開発論文集，Vol. 10, pp. 171~175, 1994.
- 5) 小川浩司・伊藤政博・野口 悟：波による消波ブロックの三次元振動について，土木学会中部支部平成6年度研究発表会講演概要集，pp. 299~300, 1995.
- 6) 伊藤政博・小川浩司・國枝圭介：消波ブロックの被害率と振動特性に関する実験的研究，土木工学中部支部平成5年度研究発表会講演概要集，pp. 299~300, 1994.
- 7) 伊藤政博・小川浩司・村上 廣：消波ブロックの振動に関する実験的研究，名城大学理工学部研究報告，No. 36, pp. 124~132, 1996.



図一 1 6 スペクトル分布のピーク値と T の関係