

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

An Experimental Study on the Vibration of Armor Unit by Wave Action伊

伊藤政博* 小川浩司** 国枝圭介** 村上廣***

Ito, Masahiro, Koji. Ogawa, Keisuke. Kunieda, Hiroshi. Murakami

Armoring concrete blocks on the slope of seawall reach the damage under the processes from the state of repose to the slight vibration, vibration, rocking, movement and dropping-out depending on the intensity of waves. The slight vibration and vibration of armor units is considerably concerned with the compaction of wave breaking works and the settling of armor units into the underside of sand seabed. The vibration of armor unit due to the wave action was measured in laboratory by using the tetrapod-model attached the micro-accelerometer, which is set on the armor layer crossed the still water level. Based on the result analyzed the measured data, the characteristic of vibration is examined.

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、各種の消波ブロックが設置されている。この消波ブロックは、波高の増大に伴い、静止状態から微動・振動・揺動・移動・脱落といった過程を経て被害に至る。特に、波によるブロックの微動・振動・揺動は、消波工の締め固めや砂質地盤内へのブロックの沈下に大きく関係する。現地海岸では、消波ブロックで造られた離岸堤が締め固め及び沈下などによってしばしば不等沈下することがある。砂質地盤上に造られた消波工のブロックが地盤中数メートルも潜り込んだ事例が報告されている。しかし、消波ブロックの微動・振動・揺動については、十分な現地観測が行われていないのみならず、基礎的な研究も十分行われていない。著者らは、これまでに、テトラポッドを用いた実験を行い、振動と水面変動の関係¹⁾および振動と被害率の関係²⁾について調べた。本研究は、波の作用による消波ブロックの微動・振動・揺動の振動特性および被害率との関係を調べるために、二層被覆堤の汀線に加速度計を取り付けたテトラポッドの模型を据え付けて実験を行い、その結果に基づいて検討を加える。

2. 実験装置

2-1 実験装置

(1) 平面水槽

写真-1に示す長さ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た四つの小水槽（A、B、C、D）内に、テトラポッドで二層被覆した堤防の模型を造った。造波板とテトラポッド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A～Dの小水槽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、比較的きれいな安定した実験波を得ることができた。

(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、前後にふれるピストン式である。一様水深部の水深は60cmとした。B水槽には、波高増大装置が取り付けられているので周期 $T=1.5, 2.0, 2.5\text{sec}$ で、最大波高32cmを発生が可能である。

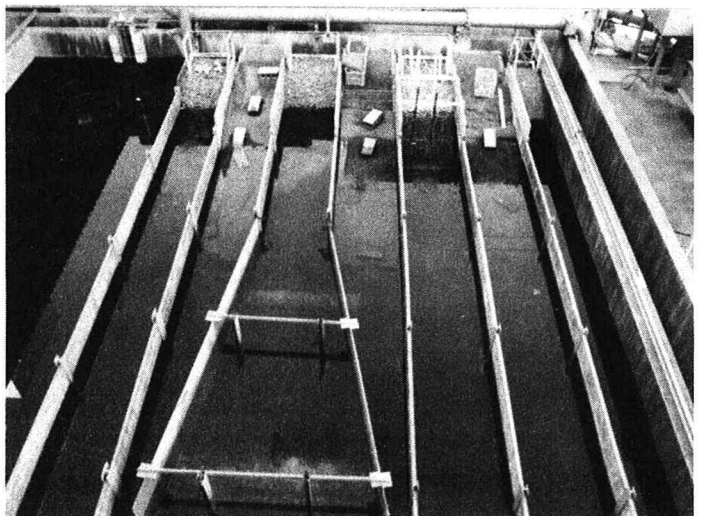


写真-1 造波水槽

* 正会員 名城大学理工学部土木工学科（〒468 名古屋市天白区塩釜口1-501）

** 学生員 名城大学大学院

*** 正会員 ミタコンサルタント（株）

(3)二層被覆堤の模型とテトラポッド

図-1のように、二層被覆堤の模型を小水路内に造った。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、法面にテトラポッドを二層乱積みとした。テトラポッドは、普通コンクリート(比重2.3)製で、重量 $W=58.9\text{gf}$ である。

普通コンクリート製テトラポッド模型で、鉛直高さ $l=4.52\text{cm}$ 、重量 $w=58.9\text{gf}$ 、および比重2.3のブロック模型を使用した。この模型に小型加速度センサー(5×5×15mm)を、写真-2のように埋め込んだ。ただし、模型の重さは変わらないようにした。

(4)測定装置

a)ブロックの安定性

波の作用に伴うテトラポッド模型の揺動、移動および脱落などの様子をSONY CCD-V88 のビデオカメラで撮影し、カセットテープに記録した。また、適宜35mmカメラで写真撮影を行った。ナショナルAG-3530再生装置とSONY KV-14MD1テレビで再生して、波高と被害率との関係を調べる。

b)振動

波によるテトラポッド模型の振動測定は三計エンジニアリング製の加速度センサーA5-2とアンプM-0101を用いた。この加速度センサーは最小・最大±2G($G=980\text{cm/sec}^2$)まで測定できる。この加速度センサーによる加速度は、アンプで±10(V)の電圧に変換し出力されるようになっている。このアナログ信号はA/Dボードでデジタル量に変換してパーソナルコンピュータエプソンPC286LSTで計測制御し、サンプリングデータは、フロッピーディスクに記録する。

3. 実験方法

実験は、まず、波の大きさとテトラポッドの安定性の実験を行って、波高と被害率との関係を求める。次いで、この関係に基づいてテトラポッドの微動・振動および揺動を調べることにする。被害率は、通常しばしば使われる方法と同じように、波の周期を一定に保ち、一定波高の波を600波~1000波作用させる。その後、移動・脱落した模型をそのままにしておいて、1段階大きくした波高を作用させる。被害率は積分値として評価する。

加速度計センサーを埋め込んだテトラポッド模型を図-1のように静水面と被覆層の表層、水路の中央部付近に設置し、ブロックの振動を測定する加速度計センサーは、1軸方向にのみ測定可能である。そのため、X(法面に直角方向)、Y(波の遡上・流下方向)、Z(汀線方向)方向の振動は図-2に示すように決めておいて、その都度消波ブロックの据え付けを変えて測定した。振動測定用ブロック以

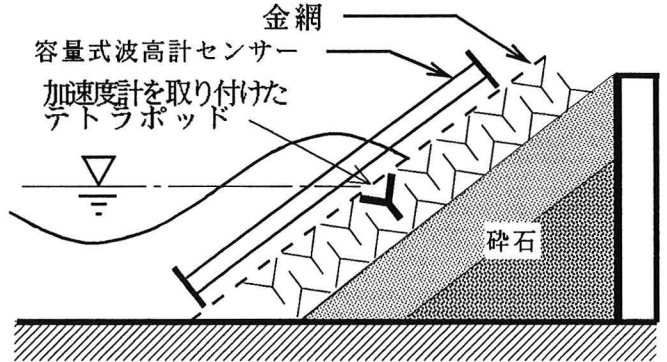


図-1 二層被覆堤断面

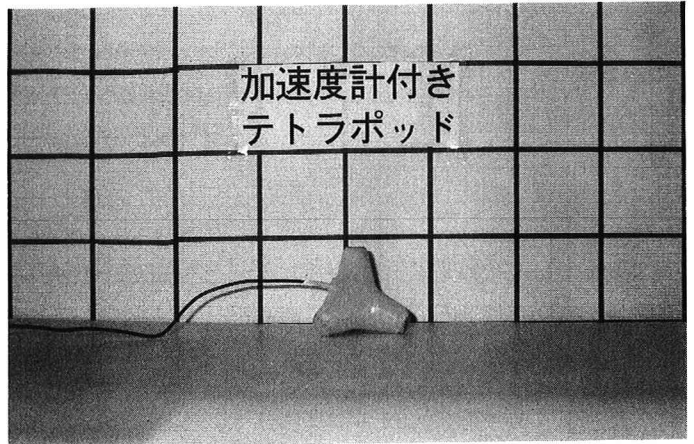


写真-2 加速度計を取り付けたテトラポッド(1マス5cm)

表-1 実験条件の概要

規則波	水深 h	: 60cm
	波高 H	: ~16cm
	周期 T	: 1~3
テトラポッド模型	比重	: 2.3
	重量	: 58.9gf
	高さ	: 4.52cm
2層被覆堤	法面勾配	1:4/3
海底勾配	水	平床
被害率の測定	波の作用時間	15~50min
	(波数)	(600~1000)
振動測定	データ取り込み間隔	10msec
	データ総数	4096個
振動の測定方向	X方向	: 斜面にして垂直方向
	Y方向	: 波の遡上方向
	Z方向	: 汀線方向

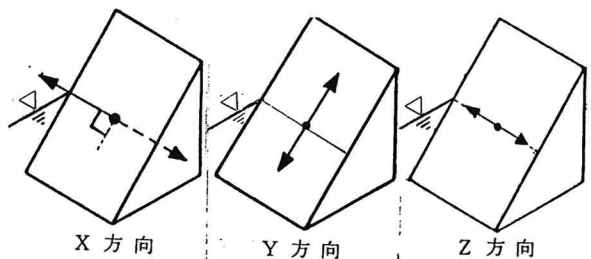


図-2 振動方向の定義

外は、金網で固定し、ブロックが移動しないようにしてある。この振動の測定と同時に、法面方向の波の遡上及び流下を容量式波高計で測定した。これらの測定は、パーソナルコンピュータを用いて、テトラポッドの振動と同時に、フロッピーディスクに記録した。実験の条件概要が表-1にまとめてある。

4. 実験結果

4-1 被害率

波高の増大に伴って、テトラポッドは“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、次のようにする。

- 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
- ③脱落：ブロックの大きさの1倍以上の移動

被害率は次のように定義する

被害率 = $\frac{\text{移動・脱落した個数}}{\text{使用した全被覆ブロック数}} \times 100(\%)$ — (1)

4-2 被害率と波高の関係

Hudson式で、テトラポッドの安定係数を $K_D=8.3$ とすると、実験に用いた模型の重量は $W=58.9\text{ g f}$ であるから、被害率1%に対する波高は、周期に関係なく $H=8.6\text{ cm}$ となる。実験結果に基づいて縦軸に被害率、横軸に入射波波高をとった結果が図-3に示してある。被害率の小さい部分が分かりやすくするために、図-3中の破線で囲んだ部分が図-4に拡大してある。この図から、周期 $T=1, 2, 3\text{ sec}$ に対して被害率1%の波高は、それぞれ $H=14, 12, 10\text{ cm}$ である。このように周期と波高によって被害率が変わる理由として、伊藤ら(1991)は砕波帯相似パラメータおよびレイノルズ数の影響を指摘している。

4-3 斜面方向の波（水面変動）の遡上-流下高、速度、加速度

図-1で示すように、波高計センサーは被覆堤法面より約1cm程離して設置してあるので、実際に法面を波が遡上・流下する状態より

ほんのわずか時間が早めに記録される。測定データに基づいて、波の周期 $T=2\text{ sec}$ 、波高 $H=8, 10, 12$ 、および 14 cm について、汀線における斜面方向の水面変動から、速度および加速度を計算して、水面変動の位相と合わせて、図-5にそれぞれ示してある。この図-5(a), (b), (c)から、水面変

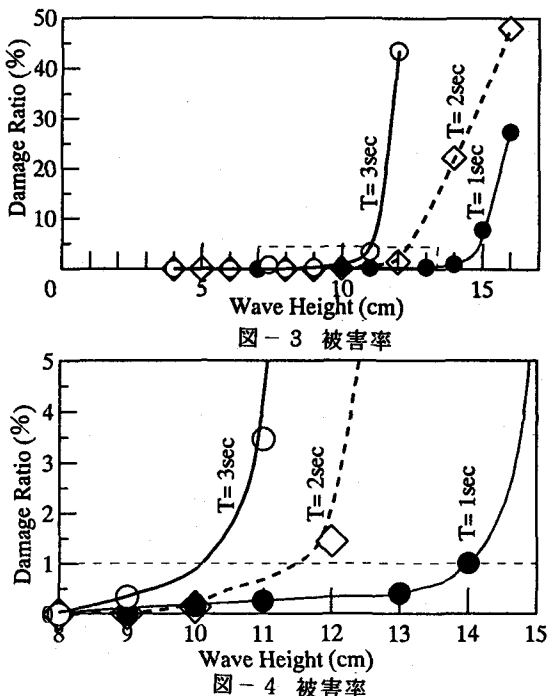


図-3 被害率

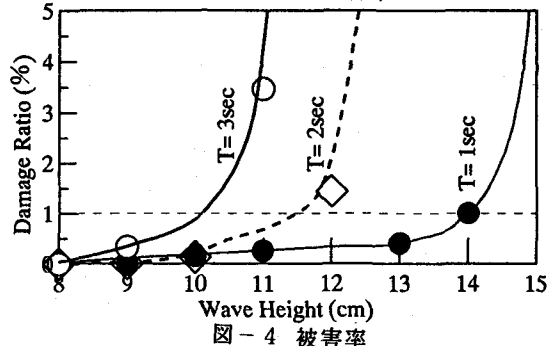


図-4 被害率

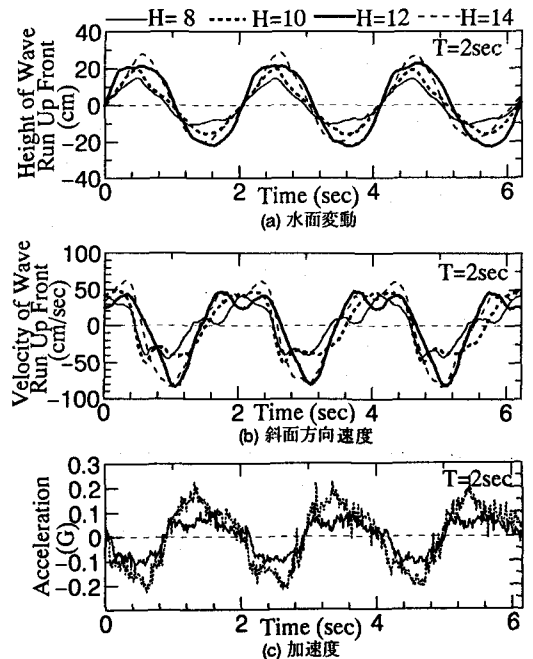


図-5 斜面方向の水面変動特性 (波の周期 $T=2\text{ sec}$)

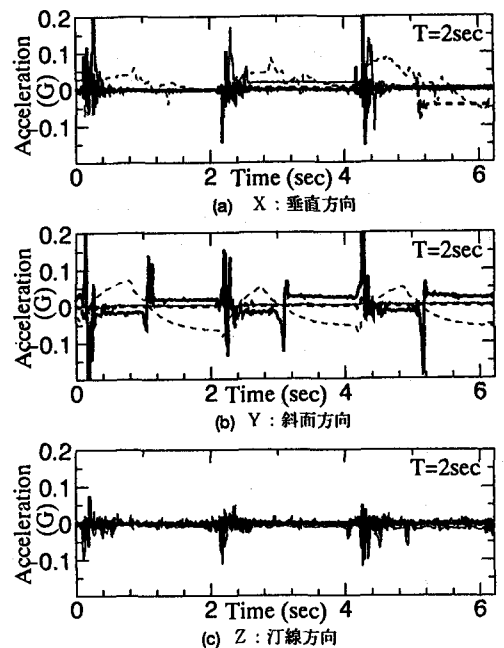


図-6 テトラポッドの波の作用による振動特性

動、速度および加速度の関連がわかる。振動測定用のテトラポッドは汀線に設置するので、この点に留意して図-5(a)の水面変動が零になる位相の水面変動の速度の変化図-5(c)をみると、遡上波および流下波が汀線を横切る時に、最大および最小の速度になっている。しかし、加速度は、ほとんど零に近い値である。

4-4 水面変動速度の最大・最小と被害率

斜面方向の最大および最小速度と、3-2で述べたテトラポッドの被害率との関係が、波の周期 $T=1, 2, 3$ secについて図-7に示してある。この図から、被害率が0.5%以上では、被害率が同じでも、水面変動速度、つまり波の遡上・流下速度が違っている。この一理由として、図-4に示されているように、被害率が同じでも周期が小さいと、波高は大きくなるため、ブロックに作用する流速 u は、Hudsonが仮定($u \propto \sqrt{gH}$)したように波高の影響が入っているものと考えられる。

4-5 振動加速度

図-6(a),(b)および(c)に、周期($T=2$ sec)一定で、波高を $H=8 \sim 14$ cmと変えたときのそれぞれ X (斜面に垂直)、 Y (斜面)および Z (汀線)方向の加速度の変化が、図-5の水面変動、流速、加速度と対応させて示してある。図-6から、汀線に設置されたテトラポッドの振動は、方向(X, Y, Z)によってかなり相違している。この図によれば、水面変動速度が非常に大きくなる(遡上波が汀線を横切)時に、 X および Y 方向のテトラポッドの振動が、非常に大きくなっている。しかし、 Z 方向の振動は、水面変動速度が大きくても、小さい。

波高が $H=14$ cm(被害率約30%)では、 X と Y 方向にかなり大きな振動あるいは揺動が見られる。このように、波高の増大に伴って、振動の特性が変わることがわかる。

4-6 振動加速度の最大・最小値の頻度分布

図-6の振動加速度の経時間的变化は、斜面方向の水面変動の周期と比較的類似した周期性を呈する。いま、水面変動が1周期の範囲内で、テトラポッドの振動加速度が最大値(遡上方向)最小値(流下方向)になる位置(位相)を全記録にわたって読み取る。このようにし周期 $T=2$ secの波について、読みとった加速度の最大値および最小値の位相を水面変動と関連付けて、図-8に頻度分布として示してある。この図によると、波高が大きくなるにつれて、最大と最小の振動加速度が発生する位相がちがっている。つまり、図-8(a)に示す波高 $H=8$ cmは、遡上波が汀線を横切った直後で最大・最小が発生している。波高が大きくなるにつれて振動加速度のPeakの発生位置は変化している。 $H=14$ cmでは、遡上波が汀線の上に横切る直前に、振動の最大が多く発生し、振動の最小(流下方向の振動)は流下波が汀線の下に横切る前に発生している。

4-7 スペクトル解析

周期 $T=3$ secの場合について、振動の加速度データをスペクトル解析した結果が、 X, Y, Z 方向に分けて図-9にまとめてある。参考に、斜面方向の水面変動のスペクトル分布が図-10に示してある。この図によると、スペクトル分布は、 X, Y, Z 方向によって違っている。すなわち Y (斜面)方向の振動は波高の増大に伴って水面変動と同じ周期のピークを示し、水面変動スペクトル分布とよく類似している。しかし、 X および Z 方向の振動は波高が大きくなってもピークは表れない。なお、振動スペクトル分布がPeakを示すときには、テトラポッドは大きな振動あるいは揺動をしている。また、スペクトル分布が、Peakを持たないときは、微動あるいは比較的小さな振動をしている。

4-8 スペクトルの最大値と被害率

振動加速度のスペクトル分布は図-9で示すように波の周期、波高およびその方向(X, Y, Z)によってかなり複雑な特性を呈する。そこで、 Y 方向のスペクトル分布の最大値あるいはピーク値と被害率との関係を調べた結果が、図-11にまとめてある。スペクトル分布にピーク値が現れる場合には、図-11中のマークが黒く塗ってある。十分なデータがないが、この図から、被害率が1%までは、振動加速度のスペクトル分布の最大値あるいはピーク

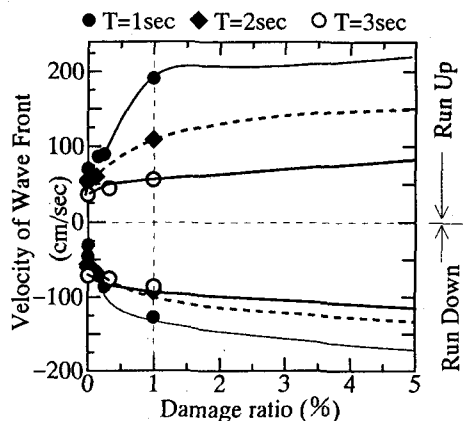


図-7 斜面方向最大・最小流速と被害率との関係

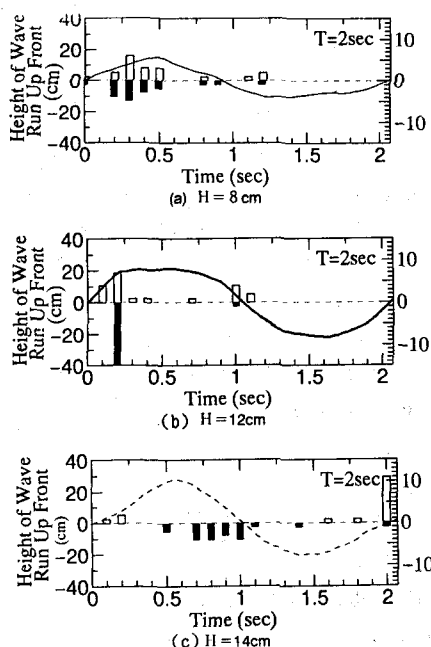


図-8 振動加速度の最大・最小値と水面変動との関係

ーク値は直線的に増加し、さらに1%以上になると比較的緩やかに増加している。ことが分かる

5. まとめ

消波ブロックの振動特性を実験的に調べるために、テトラポッド二層被覆堤の汀線に据え付けたテトラポッドに注目して測定を行った。この測定結果に基づいて検討を加えた。その結果をまとめると、次のようである。

- (1) 被害率は、波高と周期によって異なる。
- (2) 斜面方向の急激な微動および振動は、斜面方向の流速の最大・最小が発生する位相で生じる。しかし、波高の増大に伴って振動が大きくなり揺動になると、斜面方向の水面変動と同じような動きになる。
- (3) 斜面に垂直方向および汀線方向の振動は、斜面方向の振動とは異なっている。垂直方向の急激で大きな振動は、水面変動の速度が最大になる位相で起きる。
- (4) 汀線方向の振動は、遡上波が汀線を横切った直後に生じるが、斜面方向、垂直方向の振動に比して小さい。

最後に、本研究では、波によるテトラポッドの微動・振動および揺動とこれを加速度計を用いて測定した時系列データ及びスペクトル分布との間の量的な対応付けを十分検討することができなかった。この点については今後の課題としたい。

参 考 文 献

- 1) 伊藤政博・國枝圭介・小川浩司・山田卓生(1993): 波による消波ブロックの振動特性について, 土木工学中部支部平成4年度研究発表会講演概要集, PP. 311~312.
- 2) 伊藤政博・小川浩司・國枝圭介(1994): 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.
- 3) 伊藤政博・岩垣雄一・山田卓生・根本建治・山本方人・半沢稔(1991): 高比重ブロックの安定係数に及ぼす砕波帯相似パラメータの影響, 土木学会海岸工学論文集, 第36巻, PP. 666~670.

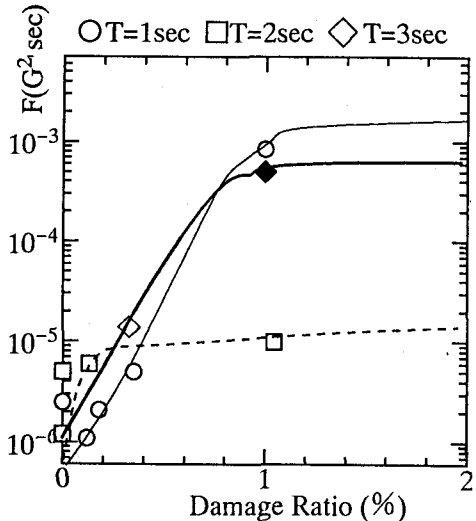


図-11 Y方向スペクトル分布の最大あるいはPeak値と被害率の関係

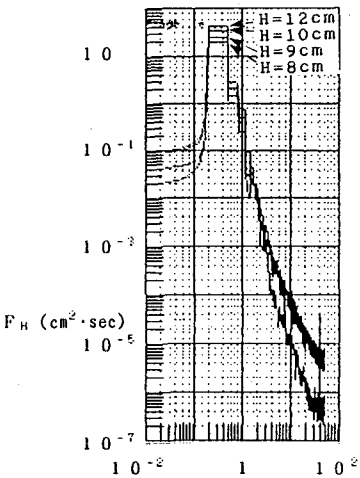
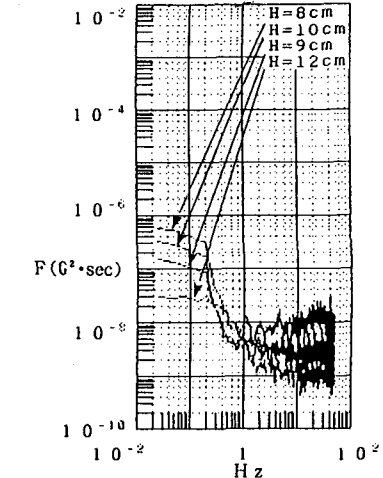
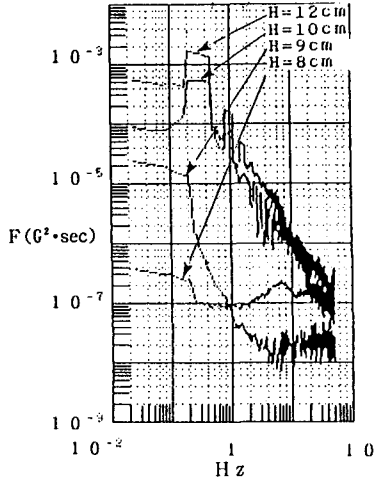


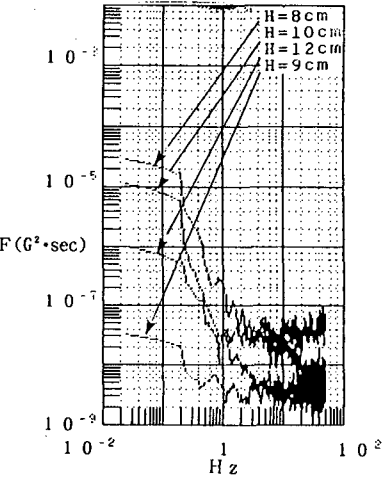
図-10 斜面方向水位変動のスペクトル分布



(a) X: 垂直方向



(b) Y: 斜面方向



(c) Z: 汀線方向

図-9 ブロック振動のスペクトル分布