

階段護岸ブロックの耐波安定性に関する研究

Stability of step-shaped armor blocks on the slope against wave actions

中村孝幸*・河野幸浩**・大塚明人***・小野塚孝***

Takayuki Nakamura, Yukihiro Kono, Akito Ohtsuka and Takashi Onozuka

Stability of step-shaped armor blocks for covering a sloped revetment against wave actions was examined experimentally. Two different types of armor blocks were used as a model, i.e., a step-shaped concrete block with a hole on its center and the one without a hole. Wave pressures on both the front and bottom sides of the armor block were measured in order to examine the effect of the hole on the stability against wave actions.

Keyword: Stepped slope, armor block, stability, wave pressure

1. まえがき

従来、階段式ブロックの安定重量は、緩傾斜護岸の被覆材と同様にハドソン式により推定されることが多い。しかし、階段式ブロックでは、ブロック間のかみ合わせ効果が強いことや階段立ち上がり部があるため波力を受けやすいなどの特性などから、捨石などの安定性を対象にしたハドソン式がそのまま適用できるかどうかは疑問視される。また、法面被覆ブロックを含め、偏平な形状の被覆ブロックは、安定性の向上を目的として、その中央部に穴を設け、有孔型ブロックとしたものが多い¹⁾。しかしながら、このような有孔型にすることの安定性への寄与は、十分に明らかにされていない。

本研究は、まず最初に有孔および無孔型の両者の階段式ブロックの模型を用いた水理実験を行い、それらの耐波安定性を実験的に検討する。この際、ハドソン式の適用性についても、ブロックの移動形態や移動状況などの観測結果を参照して考察する。また、移動に関係すると考えられる階段式護岸よりの反射波や遡上高の実態についても把握する。そして、このような移動実験に引き続き、移動と直接的に関係する各構成ブロックに作用する波圧を測定し、その分布特性から、作用波力の特性や波力に及ぼす有孔型ブロックの穴の効果などを実験的に明らかにする。

2. 被覆ブロックの移動状況

2. 1 実験装置および実験方法

(1) 実験水槽：実験には、長さ28m、幅1m、高さ1.25mの2次元造波水槽を用いた。水槽内には、図-1に示すように1/30の一樣傾斜勾配を設置した。水槽は、水路をその幅方向に2分して、模型斜面を設置する水路と入射波及び沖波波高を測定する水路にそれぞれ用いた。

(2) 階段式護岸：模型護岸は、図-1中に示すように1/30勾配の傾斜底上に設けた1/3および1/5の各勾配の碎石よりなる斜面とそれを階段上に被覆するように配列した階段式ブロックで構成されている。斜面上のブロックの配列は、1/3勾配の例を図-2に示すように、横方向に8列の千鳥配列として越波を許さないように斜面上端まで設置した。用いた階段被覆ブロックは、現地ブロック（三柱ブロック製のタブレック）の1/30の模型で、図-3に示す有孔型および無孔型の2種類である。そして碎石斜面の内部には、図-2に見られるように、現地での施工状況を参照して表面より10cm下部に防水ベニヤ板よりなる不透水層を設けた。これは、現地において、被覆ブロックの下部に基礎栗石、さらにその下に透水性の低い地盤があるのが一般で、このような状況を近似的に模型化したものである。なお、斜面を構成する碎石には、模型ブロックの縮尺1/30を考慮して、粒径5~10mmのものをを用いた。

実験では、これら各斜面の法先での水深 h_d は20cm、沖側の水平床上での水深 h_o は58cmと一定にした。

(3) 実験条件：入射波の条件は、模型縮尺1/30を考慮して、周期 T は1.4、1.9、2.3secの3種類、入射波高には6~17cmの範囲のものを採用した。なお、入射波高としては、ハドソン式などを想定して入射波測定用水路で護岸法先の真横の位置で測定される波高 H_d を用いている。

2. 2 移動状況

(1) 移動の進行状況：階段ブロックの移動を観測する際、作用波数は100波程度に限定した。これは、ブロックの移動が見られるときには、波の作用しはじめから100波以内で移動が生じはじめることや、移動後の定常状態もこの波数の範囲内でほぼ現れることなどから設定したものである。

移動実験で共通して観測されたことは、①ブロックの移動は常に波が遡上する時に生じる、②その移動形態は斜面上側

*正会員 愛媛大学工学部土木海洋工学科(790 松山市文京町3番)

** 三次工業高校

*** 三柱ブロック(株)

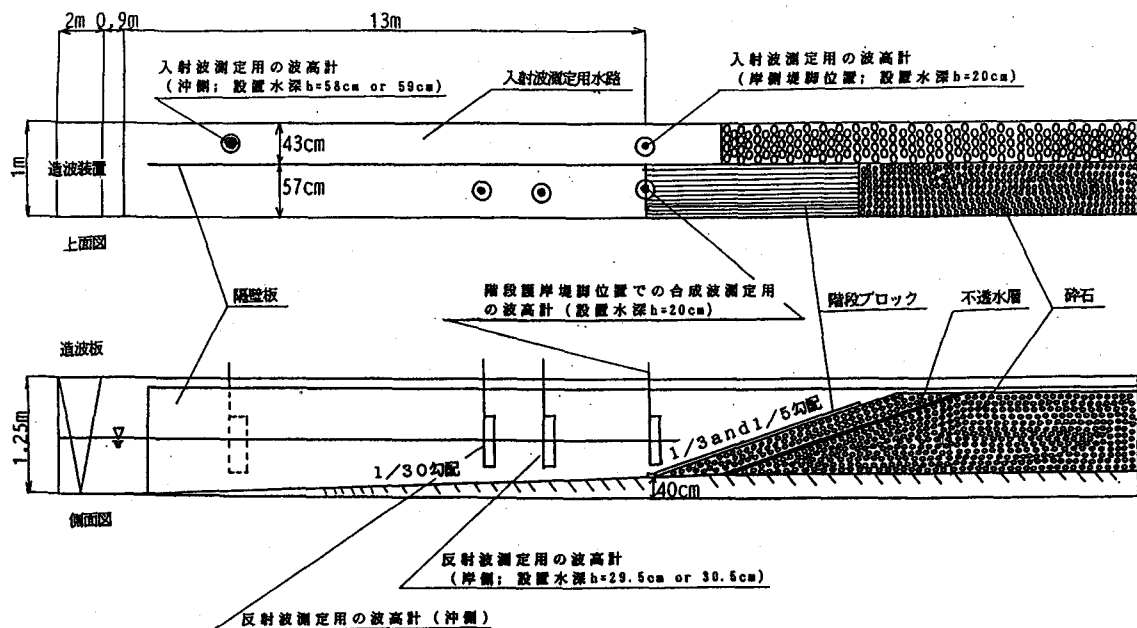


図-1 実験水槽および模型斜面

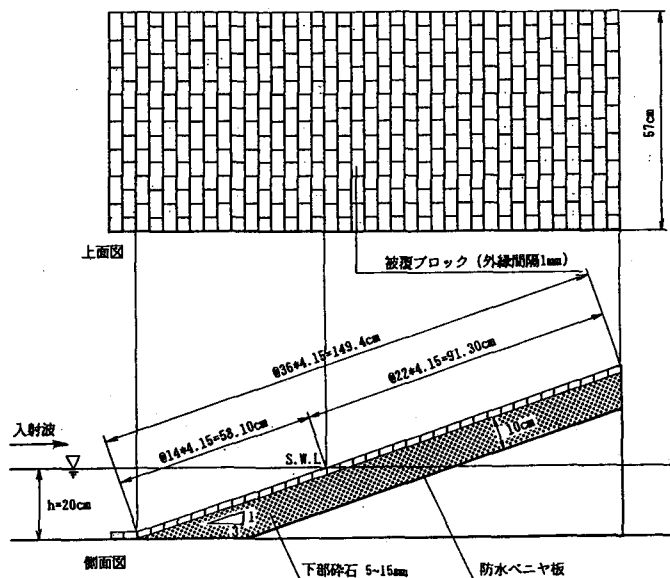


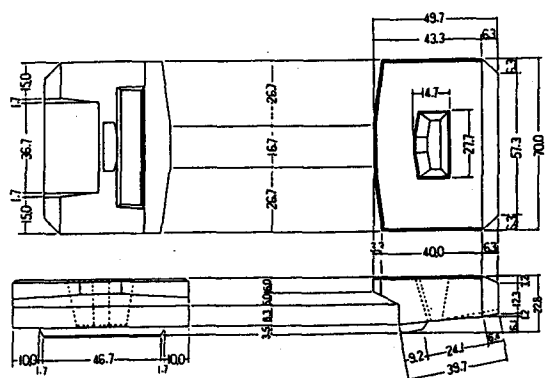
図-2 階段式護岸の模型：1/3勾配

への回転移動により生じる、③移動が生じるブロックの場所は、汀線付近より水面最大下降位置までの範囲に集中していることなどである。

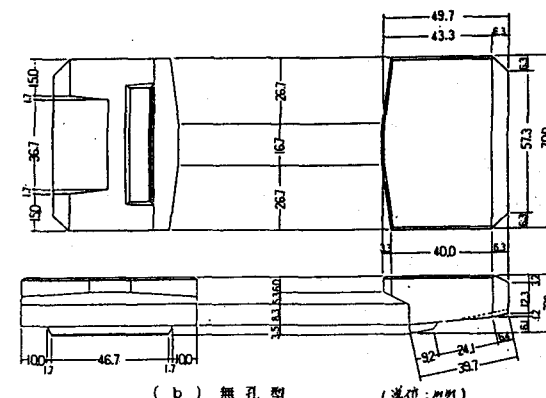
階段ブロックの移動は、作用波高の増大に伴い、概略的に図-4に示すように、(a) 振動より (d) 飛散の過程を経て進捗した。

(2) 移動状況： 図-5、6は、無孔型ブロックに対する異なる斜面勾配の条件下での被災率Dと入射波高 H_d との関係を、周期Tをパラメータにして示す。ここで、被災率Dは、一般によく利用される次式による定義で与えた。

$$D = \frac{\text{移動した個数}}{\text{汀線より } \pm H_d \text{ の範囲内にあるブロックの総個数}} \quad (1)$$



(a) 有孔型



(b) 無孔型

(単位:mm)

図-3 階段被覆ブロックの模型

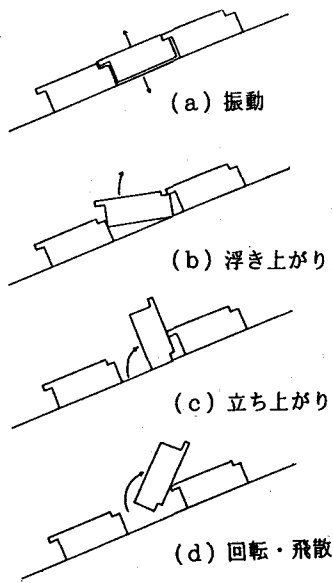


図-4 ブロックの移動形態

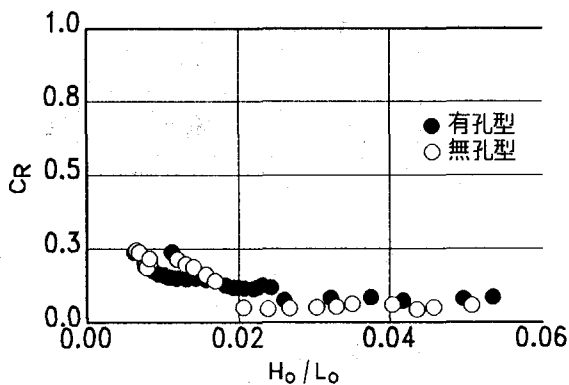


図-7 反射率 C_R (勾配 1/5)

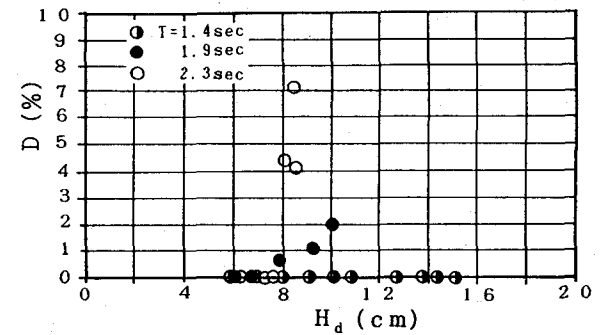


図-5 被災率 D (無孔型ブロック、勾配 1/5)

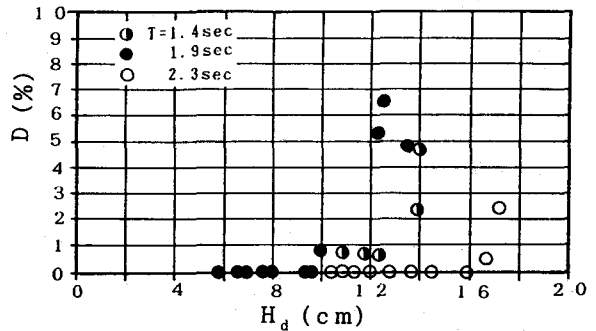


図-6 被災率 D (無孔型ブロック、勾配 1/3)

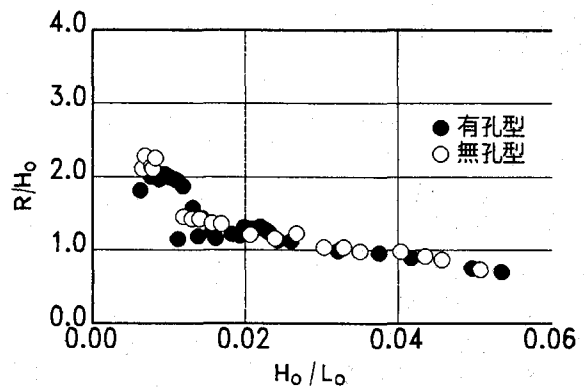


図-8 遡上高 (勾配 1/5)

なお、有孔型ブロックでは、本実験での最大波高 $H_d = 17 \text{ cm}$ までの範囲では移動が見られなかったため、そのグラフは示していない。

これらの図より、無孔型ブロックの移動は、緩勾配 (1/5 勾配) の方がより小さな波高で生じることや、短周期波に比べ長周期波の方が移動を生じやすい傾向にあることなどが認められる。また、移動の見られたブロックの場所は、汀線付近より水面最大下降位置までの範囲に集中しており、遡上時における水面前部での複雑な流体圧力場がブロックの移動に関係しているものと推測される。

図-7、8は、移動が顕著であった 1/5 勾配のときの斜面よりの反射率 C_R および遡上高 R を、沖波波形勾配 (H_0/L_0) による変化で示す。図中には、有孔型および無孔型ブロックで被覆したときの結果が併せてプロットしてある。これらの図より、反射率 C_R および遡上高 R には、ブロックの有孔・無孔による有意な影響が認められない。このため、上記したような有孔・無孔ブロックの間での移動の相違は、斜面上での波の変形に起因するものではないと推定される。そして、有孔型ブロックの方が軽いにもかかわらず移動を生じなかった理由としては、ブロックに設けられた孔が、下面圧力の逃げ道になるなど安定性の向上に寄与していることによるものと推測される。これについては、3. で後述したい。

なお、堤脚部相当位置での生起最大波高が 17 cm となったのは、これ以上の波を作用させても 1/30 の傾斜勾配上

で碎波が生じ、堤脚部での波高が逆に減少するためである。

図-9は、移動の見られた無孔型ブロックの被災率の結果を、碎波帯相似パラメーター ξ との関係で示す。碎波帯相似パラメーター ξ は、Battjes²⁾によって提案されたもので、次式で定義される。

$$\xi = \tan\theta / \sqrt{H_0 L_0} \quad (2)$$

ここに、 θ ：斜面の傾斜角、 H_0 、 L_0 ：それぞれ沖波相当波高および波長である。この図より、多少のばらつきは見られるが、 ξ が2～3の範囲で大きくなっている。Bruun³⁾や樫木ら⁴⁾は、 ξ が2～3の範囲で斜面上において波の共振現象が生じることやそれに伴い斜面上の捨石の移動が顕著になることなどを実験的に明らかにしている。そして、このような移動の ξ への依存は、ハドソン式などで無視されている波の周期性の影響によることなどを指摘している。

本実験では、 ξ の範囲が特に低い方で十分でないため明言することはできないが、ブロックの移動はやはり上記のような斜面上での波の共振現象の影響を受けているものと推定され、波の周期性の影響は無視できないものと言えよう。

次に、図-10は、ハドソン式に基づく各被災率での安定係数 K_D と ξ の関係を示す。この図より、安定係数 K_D は、1/3勾配のときはほぼ7程度、1/5勾配のとき1.5程度と推定される。ただし、限界の被災率Dは1%としてある。このように1/5勾配のとき、 K_D 値が極端に小さくなるのは、移動限界波高が1/3勾配のときよりも低いのに加えて、ハドソン式では安定重量が $\cot\theta$ (θ ：斜面勾配) に逆比例することによる。そして、 K_D 値が勾配により大きく異なる理由としては、ハドソン式では移動形態として、波が下るとき斜面下方向に移動が生じるものとしており、前述した階段式ブロックの移動形態と異なることが挙げられる。また、階段式ブロックでは、斜面勾配の大きい方が、ブロック間の噛み合わせ効果が増大するものと推定される。しかし、ハドソン式では、このような勾配による噛み合わせ効果の増大は直接的には考慮されておらず、移動形態を含めてハドソン式の階段式護岸ブロックへの適用性が疑問視される。このような勾配の緩急によるブロック間の噛み合わせ効果の変動特性は、構造力学的な観点からある程度類推できるものと考えられ、今後にく検討課題としたい。

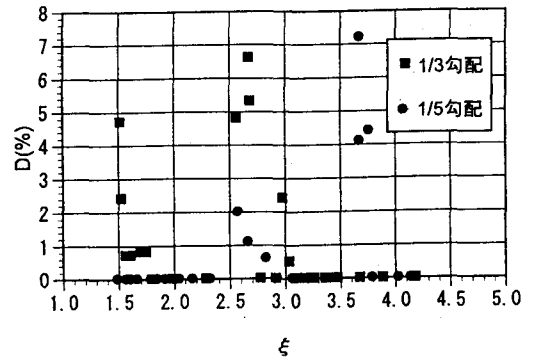


図-9 被災率Dと碎波帯相似パラメータ ξ

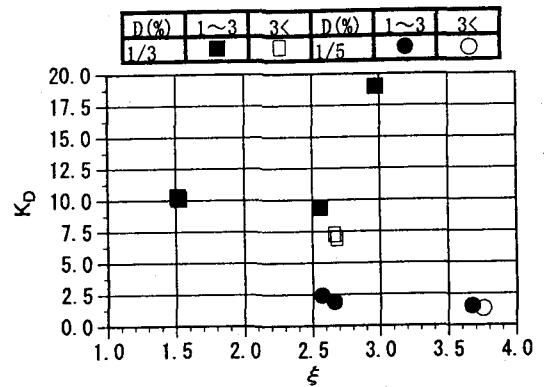


図-10 安定係数 K_D と碎波帯相似パラメータ ξ

3. 被覆ブロックに作用する波圧

ここでは、被覆ブロックの移動が生じる際に直接的に関係していると推定される作用波圧を測定し、それに及ぼすブロックの孔の効果などを検討してみた。

3.1 実験装置および実験条件

(1) 実験装置： 前節での移動観測結果を参照して、移動が生じやすい付近を中心にして、図-11に示す静水面から法先方向に向かって異なる3箇所でブロックに作用する波圧を測定した。以下、波圧計の測点を図中に示すように静水面より下方に向かって#1-#3と略称している。各測定場所で波圧計は2個使用し、図中に示すように1個はブロックの上面にセンサー面が一致するように、またもう1個はブロック下部の捨石表面にセンサー面が一致するように取り付けた。なお、下部波圧計は、ブロック中央

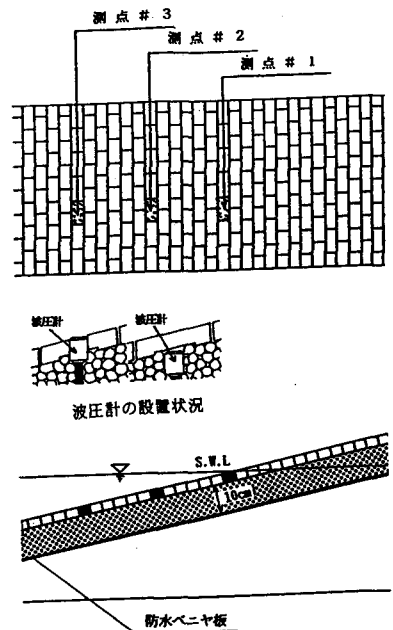


図-11 波圧計の設置状況

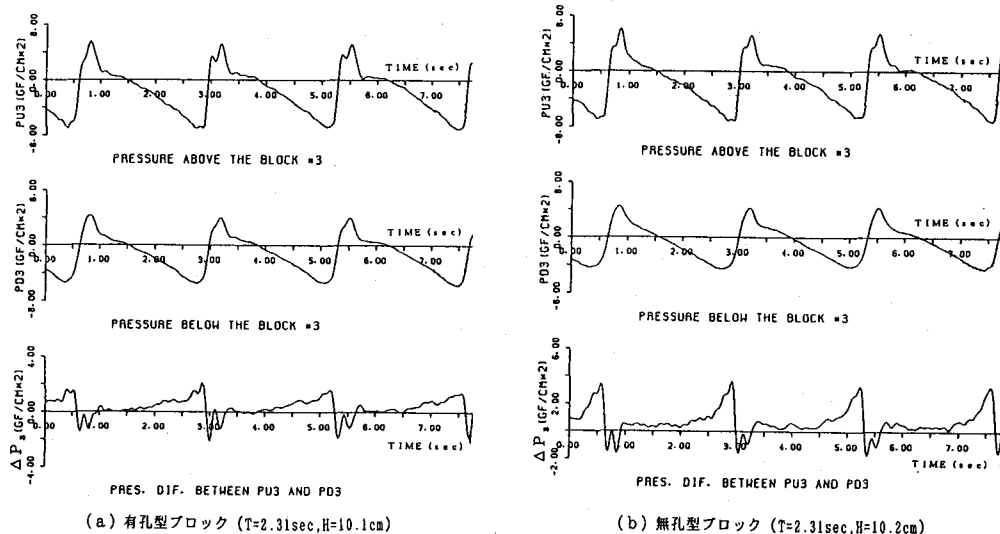


図-12 波圧および差圧の時間波形（長周期波の例）

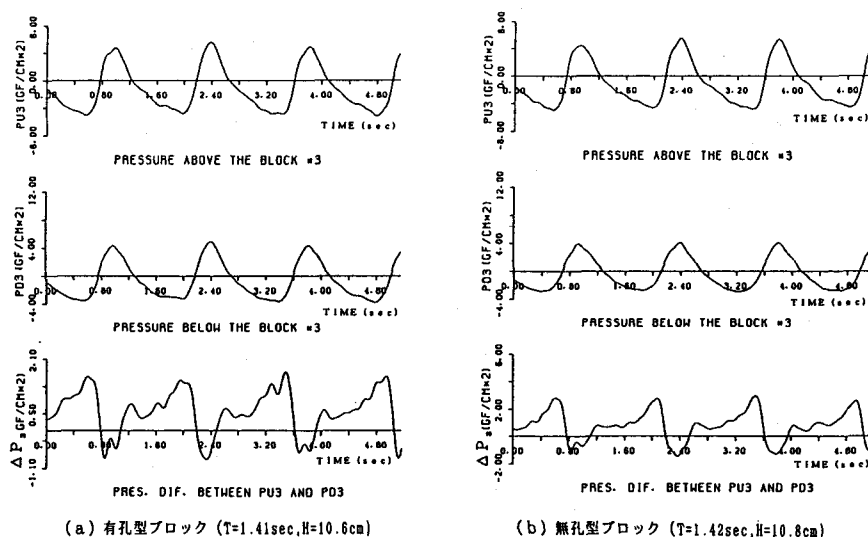


図-13 波圧および差圧の時間波形（短周期波の例）

の真下にくるように設置し、捨石などの移動による影響を受けないようにセンサー面の上部に金網よりなるプロテクターを設けた。

斜面上には、遡上波の遡上速度等を知るため、容量式波高計を改造した遡上計を取り付けた。この容量線1は、ブロックとの接触を避けるため被覆ブロックから上方約2cmの位置に固定した。また、ブロックに作用する波圧と流体場の関係が検討できるように、波圧測点#1及び#3のブロックの真横の2カ所に、抗力変換型の針流速計を設置して、斜面平行方向の流速を測定した。

(2) 波条件： 用いた波の周期条件は、移動実験時と同じ $T=1.4, 1.9, 2.3$ secの3種類とした。また入射波高 H_d は $1/3$ 勾配のとき5、10、15 cmの3種類を、 $1/5$ 勾配のとき5、10 cmの2種類を採用した。そして、堤脚水深 h_d は $1/3$ 勾配のとき35 cm、 $1/5$ 勾配のとき38.5 cmとした。

3.2 波圧の時間波形

図-12、13は、それぞれ本実験での短周期および長周期の条件下での測点#3での上面波圧： P_U 、及び下面波圧： P_B 、その圧力差： ΔP （図中では、上向きを正とする。）の時間波形を示す。このときの斜面勾配は、移動の顕著であった $1/5$ である。また、各図の (a)、(b) はそれぞれ有孔ブロックおよび無孔ブロックの場合の結果に対応する。これらの時間波形より、有孔ブロックおよび無孔ブロックの場合ともに、差圧が斜面上方向にピークになるのは、上

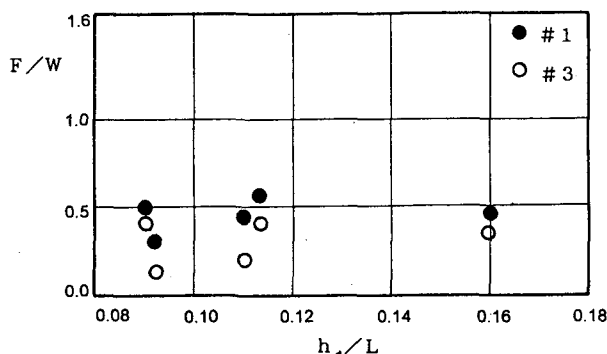


図-14 ブロックに作用する波力（有孔型ブロック）

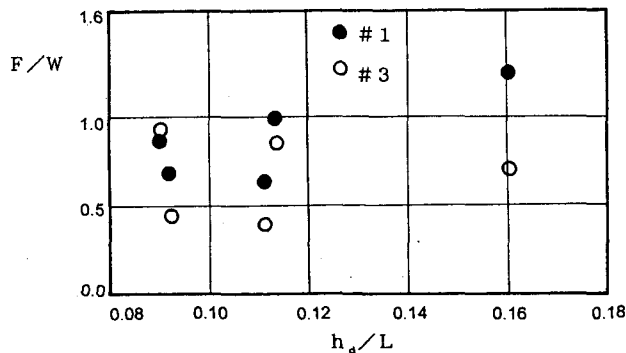


図-15 ブロックに作用する波力（無孔型ブロック）

下面の波圧が負のピーク値を示す位相であり、ちょうど波が遡上し始める位相とほぼ一致している。そして、上面波圧は有孔ブロックと無孔ブロックの場合でほぼ同一波形であるのに対して、下面波圧では、負のピーク値が無孔ブロックの場合に小さく、しかもその立ち上がりが緩いことなどの相違が認められる。このような差異は、短周期および長周期の条件に関係なく見られ、無孔ブロックの場合の差圧が、有孔ブロックの場合のほぼ2倍程度となる原因になっている。このように、ブロックの形式を無孔のものにすると、上方向への圧力差が特に増大することがわかる。そして、この事実を、2.で観測された無孔ブロックの被災率が、有孔ブロックのそれを大きく上回る直接的な要因と考えられる。

3.3 極大波力の特性

図-14、15は、上記したような圧力差のピーク値を用いて算出したブロックの上下方向に作用する波力の波周期による変化を示し、それぞれ有孔ブロックおよび無孔ブロックの場合に対応している。図中では、測点#1、3の結果がプロットしてあり、波力 F はそれぞれのブロックの空中重量 W で無次元化してある。また、周期についても、堤脚水深 h_d を用いた浅水比で表示してある。

これらの図より、上下方向の波力は、無孔ブロックの方が有孔ブロックの約2倍程度以上と大きくなることが認められる。また、無孔ブロックの場合、自重を越える波力が作用しており、ブロック間の摩擦力が低下した状態では容易に移動する可能性があることがわかる。

4. 結語

(1) 階段式ブロックの移動は、波の遡上時に斜面上方に回転することによって生じる。またその移動は、波面が最も下降する位置から静水面までの範囲にあるブロックで生じやすい。

(2) 階段式ブロックの移動は、法面勾配が $1/3$ と $1/5$ とでは、緩やかな $1/5$ の場合に生じやすく、その移動限界波高は作用波の周期により変化する。

(3) 階段式ブロックを有孔型のものにすると、ブロックの上下面の圧力差が小さくなることから、その耐波安定性を有効に改善できる。

(4) ハドソン式を用いて、階段式ブロックの安定重量を求める場合、各勾配に対して異なる安定係数を採用しなくてはならないなど、その適用性には問題がある。

参考文献

- 1) 谷本勝利、柳生忠彦、村永努、柴田鋼三、合田良実：不規則波実験による混成堤マウンド被覆材の所用重量，第28回海岸工学講演会論文集，pp.604-608,1981.
- 2) Battjes, J. A.: Surf similarity, Proc. 16th Coastal Eng. Conf, ASCE, pp.466-480,1978.
- 3) Bruun, P. and A. R. Gunbak: Hydraulic and friction parameters affecting the stability of rubble mounds, PIANC Bull.24, pp.33-46,1976.
- 4) Sawaragi, T, K. Iwata and C. Ryu: Consideration of the destruction mechanism of rubble mounds breakwaters due to the resonanse phenomenon, 8th Int, Harbor Congress, pp.197-208,1983.