

離岸堤消波ブロックの波浪に対する動揺特性

RESPONSE CHARACTERISTICS OF CONCRETE BLOCKS OF
DETACHED BREAKWATERS AGAINST IRREGULAR/LONG WAVES
FOR ANNUAL JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING IN THE OCEAN, JSCE

柿沼太郎¹・下西甲祐²・垣内健太郎²・中村和夫³

Taro KAKINUMA, Kosuke SHIMONISHI, Kentaro KAKIUCHI and Kazuo NAKAMURA

¹正会員 博(工) 鹿児島大学大学院准教授 理工学研究科海洋土木工学専攻
(〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40)

²学生会員 鹿児島大学大学院 理工学研究科海洋土木工学専攻 (同上)

³鹿児島大学大学院先任専門技術職員 理工学研究科技術部 (同上)

Response characteristics shown by concrete blocks of detached breakwaters were studied through hydraulic experiments. Concrete-block models were used for construction of detached breakwaters, where the blocks were built in two ways of different density. In the cases with incident irregular short waves, the static water level was the mean water level, high water level, or high high water level, whereas in the cases with long waves, the static water level was the high water level. In the irregular-short-wave cases, the wave transmission ratio was higher as the static water level and the incident waves were higher, as well as as the block density was low; the number of fallen blocks was largest when the static water level was the high water level. In the cases with long waves, the wave attack with large-scale vortexes due to wave breaking made the detached breakwater looser, after which the relatively long-term flow made blocks move and fall. In several cases with both irregular short waves and a long wave, the displacement of concrete blocks was accumulated, such that they easily fell due to the following short or long waves.

Key Words : Concrete block, detached breakwater, irregular waves, long wave

1. 序 論

外洋に面し、波浪の来襲する海浜では、海岸侵食対策を講じる必要がある。離岸堤を設置する方法は、代表的な侵食対策の一つである。ところで、離岸堤の堤本体、または、その表面には、消波ブロックが用いられることが多い。これは、ブロックを積み上げていくという堤の設置工法が、他の堤体の設置工法と比較して一般に容易であり、かつ、据えられたブロックによって、押し寄せる波の力が弱まるからである。

しかしながら、消波ブロックを用いた離岸堤において、暴浪時の波の入射によってブロックの幾つかが滑落すると、その滑落箇所を中心として、高波や越流の侵入を許すことになる。更に、これらの滑落を端緒として、ブロックの滑落個数が増加し、破堤部が大きく広がってしまうと、堤そのものの機能が失われることになる。従って、離岸堤消波ブロックの滑落条件を検討することは、特に、消波ブロックを用いた低天端離岸堤を設置する場合において、重要な課題になる。

そこで、本研究では、消波ブロックの一種である「合掌ブロック」(Steep Raft Block)を用いて築

造された低天端離岸堤を対象とし、消波ブロックの動揺特性や滑落条件に関して検討する。

本研究に先立ち、黒木¹⁾は、静水位が朔望平均満潮位(HWL)である場合を対象として、不規則波の作用下における離岸堤の合掌ブロックの滑落実験を行なっている。ここでは、この実験を参考にし、静水位がHWLである場合と共に、最高満潮位(HHWL)及び平均水位(MWL)である場合をも対象として、不規則波の作用下における、堤体の安定性、消波ブロックの滑落状況や、波高伝達率に関して水理模型実験により検討する。

また、気圧変動や強風に伴い、外洋でうねりといった比較的長い波が発生し、こうした長周期波が沿岸に来襲する可能性がある。例えば、曾我部ら²⁾に、不規則波における比較的周期の長い成分の、また、岩垣ら³⁾に、wave groupの、構造物に対する影響が述べられている。そして、依然として、長周期波そのものと構造物の被災との関係には、不明な点が多い。そこで、本研究では、1～2波の長周期波が、単独で、または、不規則波と共に入射する場合を対象とした実験も実施する。すなわち、長周期波を入射させる場合、または、長周期波と不規則波とが連続した波列を入射させる場合を対象とし、うね

り等の長周期波成分が存在する場合の、離岸堤消波ブロックの安定性及び波高伝達率に関して水理模型実験により検討する。なお、ここでは、現地スケールで 30 ～ 70 s 程度の周期を有する波を長周期波の対象とする。

2. 実験装置

(1) 実験水槽

実験で用いた、長さ 30 m、幅 1.0 m 及び高さ 1.2 m の鉛直 2 次元造波水槽を図-1 に示す。

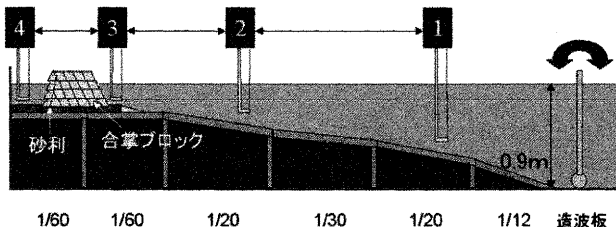


図-1 鉛直 2 次元造波水槽

海底地形は、沖から、それぞれ、1/12, 1/20, 1/30, 1/20, 1/60 及び 1/60 の勾配を有する 6 個の底床を組み合わせて構成している。

(2) 入射波の生成

造波装置は、フラップ型直流サーボ・モータ式である。

不規則波を入射する実験においては、次式で表わされる Bretschneider・光易型のスペクトル構造を有する不規則波を発生させる。

$$E(f) = 0.257 H_{1/3}^2 T_{1/3} (T_{1/3} f)^{-5} \times \exp\{-1.03 (T_{1/3} f)^{-4}\} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

ここで、 E 、 $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ 及び f は、それぞれ、エネルギー・スペクトル、有義波高、有義波周期及び周波数である。不規則ノイズ発生装置と 12 本のバンド・パス・フィルタを用いて信号を生成し、これをコンピュータで DA 変換して造波装置に入力する。

本装置では、無反射造波ができない。そこで、Healy の方法を用いて造波板近傍の反射率 K_r を求めた。すると、図-2 のように、反射率 K_r の最大値が 0.17 程度であることが確かめられた。

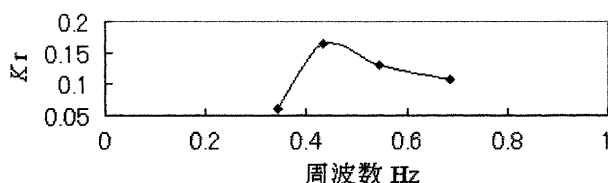


図-2 造波板近傍の反射率

(3) 模型ブロック

離岸堤を構成する消波ブロックの模型として、図-3 に示す、長さの縮尺が 1/43 で、実物と同一の密度を有するコンクリート製の合掌ブロック模型を用いる。

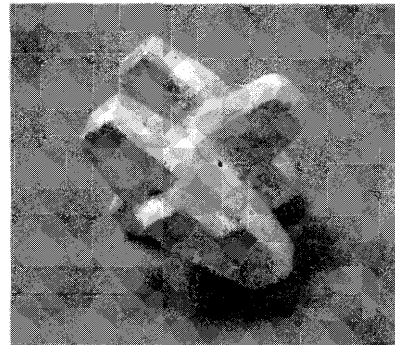


図-3 消波ブロックのコンクリート製模型

本ブロックは、図-3 のように、3 本の四角柱を組み合わせたような形状を有している。2 本の四角柱に 1 本の四角柱が挟まれた格好である。模型ブロックの最大幅及び重量は、それぞれ、約 7.2 cm 及び約 17.7 N である。

勾配 1/60 の斜面上に、岸沖方向の幅が 1.5 m となるよう捨石を敷き、その上に、模型ブロックを 3 層 4 列で組み上げて低天端離岸堤を築く。

他方、長周期波を入射する実験においては、不規則波の造波で用いるのと同じ装置により、周期 $T = 5 \sim 11$ s の長周期波を発生させる。

3. 実験条件・実験方法

(1) 不規則波を入射する実験

不規則波を入射する実験では、初期水位を MWL, HWL, または、HHWL の 3 通りに設定する。

各静水位に対して、入射波の有義波高が 0.077, 0.094, 0.118, 0.158, 0.167, 0.208 及び 0.258 m である 7 パターンの場合の実験を実施する。各実験において、波を約 5 分間発生させる。

消波ブロックの配置密度の違いを検討するため、消波ブロックを 1 列に 15 個、または、16 個並べる 2 通りの積み方の場合を対象とする。このとき、ブロックの総数は、前者が 225 個、後者が 240 個である。

ビデオ・カメラを 2 台設置し、堤前面と堤背面を撮影して、各消波ブロックの動揺や、離岸堤の動き、そして、消波ブロックの落下の仕方等を記録する。更に、造波終了後の消波ブロックの滑落状況をデジタル・カメラで撮影し、底面に滑落した消波ブロッ

クの平面分布を調べる。

容量式波高計を図-1 に示すように 4 台設置し、波高を測定する。ここで、波高計 1～4 の設置間距離は、それぞれ、波高計 1～2 間が 12 m、波高計 2～3 間が 4 m、そして、波高計 3～4 間が 1 m である。波高データは、コンピュータを用いて 0.05 s 間隔でサンプリングして記録する。このうち、波高計 1、3 及び 4 で測定された有義波高をそれぞれ入射波波高、堤前波高及び堤背後波高と呼ぶ。

(2) 長周期波を入射する実験

長周期波を入射する実験では、初期水位を HWL に設定する。

ここでは、現地スケールで 30～70 s 程度の周期を有する波を長周期波の対象とする。すなわち、実験スケールで 5～11 s の各周期に対して、様々な波高の波を長周期成分として入射させる。

入射波波高は、実験スケールで、0.045～0.193 m の範囲とする。これは、現地スケールで 1.935～8.29 m の範囲である。

また、こうした長周期波が不規則波と連続して来襲する場合も対象とする。入射波の有義波高が 0.0818 及び 0.132 m の 2 通りの不規則波と、周期が約 5.0 s で入射波波高が 0.113, 0.138, 0.165 及び 0.193 m の 4 通りの長周期波とを接続した。

長周期波を入射する実験では、消波ブロックを 1 列に 16 個並べる積み方の場合を対象とする。このとき、ブロックの総数は、240 個である。

ビデオ・カメラ 2 台とデジタル・カメラを用いて、不規則波のみを入射する場合と同様に撮影を行なう。

容量式波高計を図-1 に示すように 4 台設置する。ここで、波高計 1～4 の設置間距離は、それぞれ、波高計 1～2 間が 9.6 m、波高計 2～3 間が 4.1 m、そして、波高計 3～4 間が 0.7 m である。不規則波のみを入射する場合と同様に、波高データは、コンピュータを用いて 0.05 s 間隔でサンプリングして記録する。このうち、波高計 1、3 及び 4 で測定された波高をそれぞれ入射波波高、堤前波高及び堤背後波高と呼ぶ。

各ケースに対して、実験を数回実施するが、本論文では、そのうちの代表的な結果例を示す。

4. 不規則波に対する離岸堤消波ブロックの動揺特性

(1) 波高伝達率

不規則波のみを入射する場合の実験結果を図-4 に示す。ここで、消波ブロックを 1 列に 16 個配置して離岸堤を組み上げたときの、各静水位の場合に対する波高伝達率 $K_t = \text{堤背後波高 } H_t / \text{堤前波高 } H_i$ が示されている。横軸は、天端高（海底から天端までの高さ） H_c と堤前波高 H_i の比である。

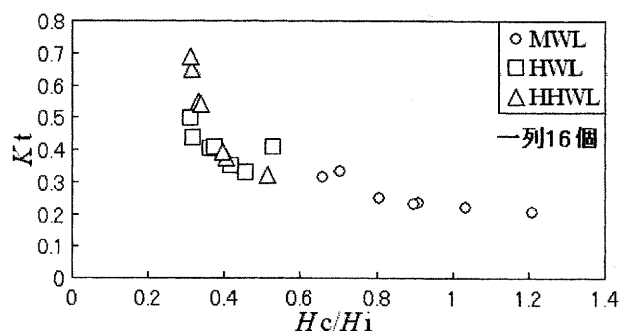


図-4 消波ブロックを 1 列に 16 個配置して組み上げた離岸堤に対する波高伝達率（ここで、各静水位の場合に対する波高伝達率 $K_t = \text{堤背後波高 } H_t / \text{堤前波高 } H_i$ が示されている。横軸は、天端高 H_c / 堤前波高 H_i である。）

図-4 より、静水位が高い程、また、波高が大きい程、波高伝達率が高いことがわかる。これは、波高が大きい程、越流量が大きくなり、波が低天端離岸堤を越える際の波のエネルギーの軽減量が低減するからである。

また、静水位が HWL である場合の、消波ブロックの各配置密度に対する波高伝達率を図-5 に示す。

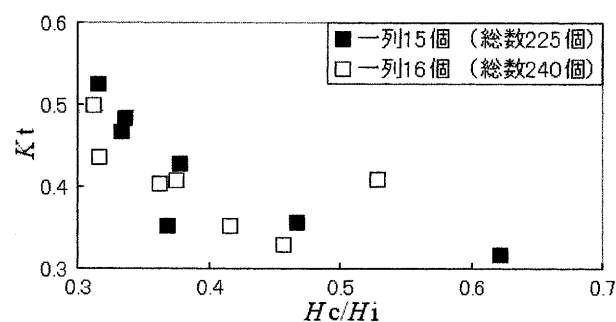


図-5 静水位が HWL である場合の各配置密度の離岸堤に対する波高伝達率

図-5 より、消波ブロックの個数が多く、その配置が密である方が、波高伝達率が低くなることがわかる。消波ブロックを 1 列に 15 個配置して離岸堤を組み上げた場合、比較的早い段階でブロックの滑落が見られた。この離岸堤崩壊部を通して、波の伝達があったため、波高伝達率が高くなったと考えられる。

(2) 静水位が MWL である場合の消波ブロックの滑落

図-6 に滑落ブロック数の平面分布を示す。

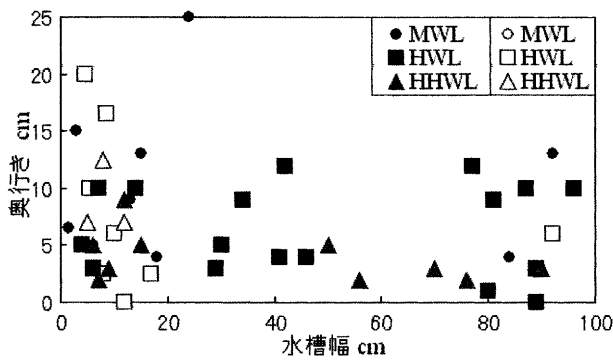


図-6 滑落ブロック数の平面分布（黒色のプロットは、1 列 15 個配置の場合、白抜きのプロットは、1 列 16 個配置の場合の結果を示す。）

静水位が MWL である場合、越流量があまり大きくなりえないため、離岸堤が波力の全体を受け止めることになる。しかしながら、消波ブロックを 1 列に 15 個配置して離岸堤を組み上げた場合、水槽壁付近の消波ブロックのみが落下し、離岸堤の中央部は、壊れることなく安定していた。また、1 列に 16 個配置して離岸堤を組み上げた密な配置の場合には、消波ブロックは、1 個も落下することなく噛み合ったままであった。なお、滑落ブロック数の平面分布には、水槽側壁の存在の影響もあると考えられる。

(3) 静水位が HWL である場合の消波ブロックの滑落

図-6 に示す滑落ブロック数の平面分布より、静水位が HWL である場合、消波ブロックを 1 列に 15 個、または、16 個配置して離岸堤を組み上げた両者の密度の場合とも、他の静水位の場合に比べて滑落するブロック数が多かったことがわかる。これは、碎波が、MWL の場合のように沖でなく、離岸堤直前で発生することが多く、比較的大きなエネルギーを維持した波が離岸堤まで伝播し、その波の力によって消波ブロックが動き、更に、この状態に越流による力が加わって、消波ブロックが滑落しやすい状況が発生したためである。静水位が HWL である場合、波と越流による力の働き方が、ブロックを最も滑落させやすい状態にあったと言える。

(4) 静水位が HHWL である場合の消波ブロックの滑落

図-6 に示す滑落ブロック数の平面分布より、静水位が HHWL である場合、消波ブロックを 1 列に 15 個、または、16 個配置して離岸堤を組み上げた両者の密度の場合とも、ブロックが滑落しにくかったことがわかる。静水位が HHWL である場合、水位が高く、越流時に、低天端離岸堤が潜堤のように水中に潜ってしまう。その結果、離岸堤が波から受ける作用が弱くなり、消波ブロックが崩れにくくなったのである。

5. 長周期波に対する離岸堤消波ブロックの動揺特性

(1) 長周期波の波形

周期約 5.0 s の場合の、図-1 の波高計 1 で測定された、入射波の沖波波形例を図-7 に示す。ここで、 V_{pp} 値は、造波信号の電圧（単位：Volt）の全振幅（Peak to peak 値）であり、これに従って造波装置の造波板の全振幅が決定される。

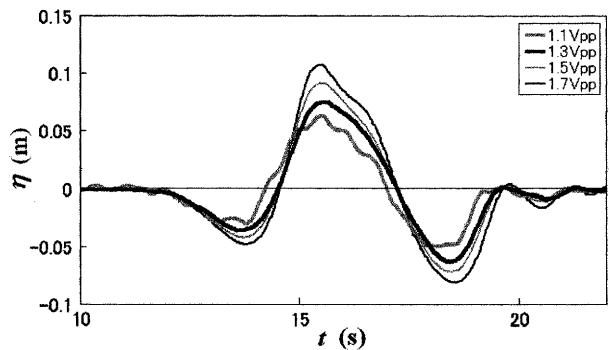


図-7 周期約 5.0 s の長周期波の沖波波形例

図-7 に示された 4 通りの長周期波の入射波波高は、それぞれ、0.113、0.138、0.165 及び 0.193 m である。

また、周期約 5.0 s の場合の、図-7 に示された 4 通りの長周期波の、図-1 の波高計 3 の位置における堤前波形を図-8 に示す。ここで、図-8 に示した各波は、図-7 に示した同一の V_{pp} 値に対する波に対応している。

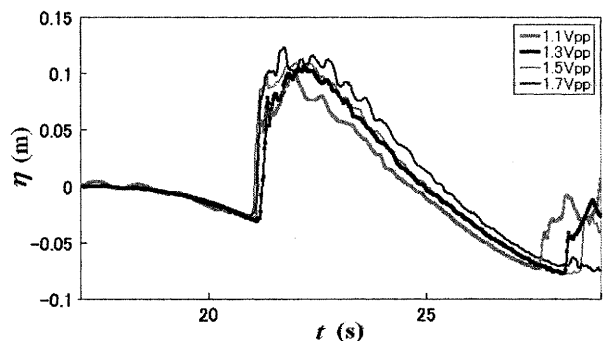


図-8 周期約 5.0 s の長周期波の堤前波形例

図-8 に示された波形は、いずれも、碎波後の長周期波の波形である。

(2) 波高伝達率

入射波の周期が約 5.0 ～ 11.0 s である各場合の波高伝達率 $K_t = \text{伝達波高 } H_t / \text{堤前波高 } H_i$ を図-9 に示

す。ここで、横軸は、天端高 H_c と堤前波高 H_i の比である。これより、波高が高い程、波高伝達率が高くなることがわかる。

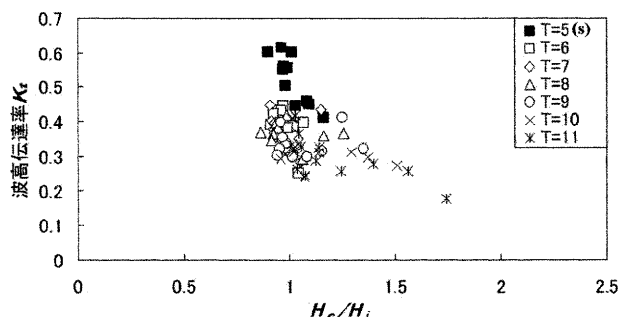


図-9 長周期波が入射する場合の波高伝達率

(3) 消波ブロックの滑落

入射波の周期が約 5.0 ～ 10.0 s である各場合の、消波ブロックの滑落総数を図-10 に示す。

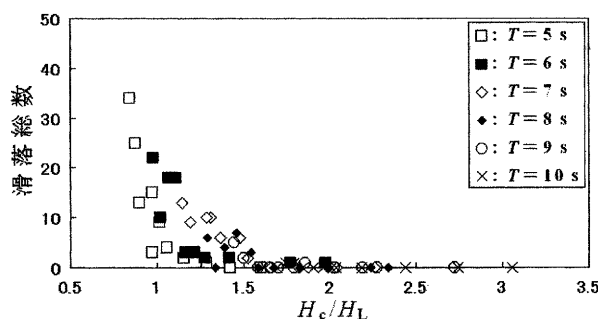


図-10 長周期波が入射する場合の消波ブロックの滑落総数（横軸は、天端高 H_c / 入射波波高 H_L である。）

天端高・入射波波高比 H_c/H_L が低い程、また、入射波周期が長い程、多くの消波ブロックの滑落が見られた。これは、越波する波のエネルギーが大きい程、滑落個数が増加するからである。

入射波周期が約 10.0 及び 11.0 s で、入射波波高が約 0.04 ～ 0.06 m である場合、越波がなく、堤前面での反射率も低かった。そして、消波ブロックの動揺が、殆ど発生しなかった。この場合、波の通過に伴い、水が消波ブロックの隙間をすり抜けるという現象が観察された。

入射波周期が約 5.0 ～ 11.0 s のいずれの場合に対しても、入射波波高が約 0.06 ～ 0.08 m であるとき、越波による、岸側に置かれた消波ブロックの動揺、そして、消波ブロックの数個の滑落が見られた。

他方、入射波周期が約 5.0 ～ 11.0 s のいずれの場合に対しても、入射波波高が約 0.08 ～ 0.19 m であるときには、長周期波が離岸堤の沖で碎波した。この碎波した、大規模渦を伴う波が離岸堤に勢よく

衝突すると、流れが堤の前面を這い上がり、波が堤を越波し、越流が生じた。その際に、堤全体が、浮き上がって、岸側に位置がずれた。そして、これと同時に、消波ブロックの噛み合わせが緩くなった。波の周期が比較的長いため、このような状態となった堤に越流が継続し、その結果、岸側に配置されていた消波ブロックの多くが滑落した。以上が、消波ブロックの滑落数がこの場合に大きくなる傾向の見られた理由である。

一方、引き波時には、水位が、離岸堤の岸側で高く、沖側で低くなり、長周期波の周期が短い程、より強い流れが沖向きに生じた。その結果、離岸堤の下に敷いてあった砂利が、沖へとさらわれた。

なお、入射波の周期が長い方が滑落総数が多くなるとは、一概に言えない。例えば、 $H_c/H_i \sim 1.28$ の場合、周期 T が 7, 8, 6 及び 5 s の順で滑落総数が大きい。

6. 不規則波と長周期規則波が連続して入射する場合の離岸堤消波ブロックの動揺特性

(1) 不規則波・長周期波の順で連続して入射する場合の消波ブロックの滑落

不規則波・長周期波の順で連続して入射するとき、不規則波の入射波有義波高が約 0.082 m である場合、不規則波によるブロックの動揺があまり見られず、長周期波による滑落が多かった。

しかしながら、有義波高が約 0.132 m である場合には、消波ブロックの滑落が見られ、長周期波により、この滑落部から広がるように、岸側に置かれたブロックが多く滑落した。

(2) 不規則波・長周期波・不規則波の順で連続して入射する場合の消波ブロックの滑落

不規則波・長周期波・不規則波の順で連続して入射する場合の、図-1 の波高計 3 で測定された、堤前波形の一例を図-11 に示す。

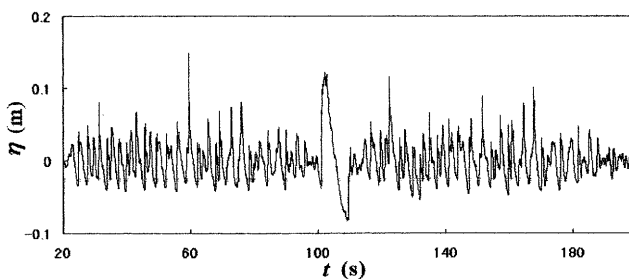


図-11 不規則波・長周期波・不規則波の順で連続して入射する場合の堤前波形例

図-11 に示された波形例では、不規則波の入射波の有義波高は、約 0.132 m であり、他方、長周期波

の周期及び入射波波高は、それぞれ、約 5.0 s 及び 0.193 m である。

また、滑落総数を図-12 に示す。横軸は、不規則波の入射波有義波高 H_s /長周期波の入射波波高 H_L である。

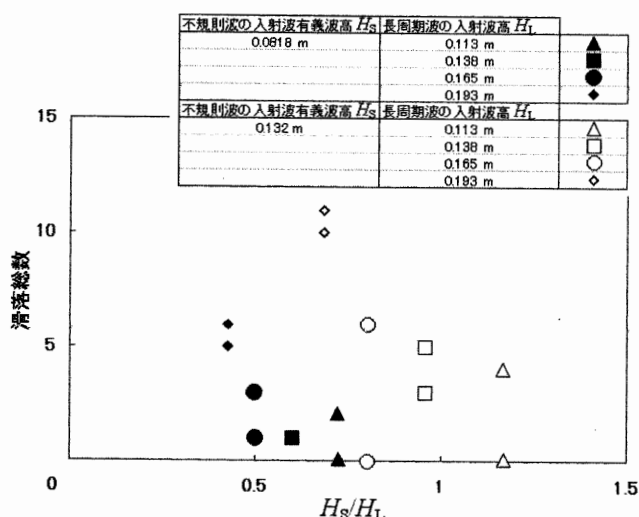


図-12 不規則波・長周期波・不規則波の順で連続して入射する場合の消波ブロックの滑落総数

長周期波の入射波波高が 0.08 m 以上であるときには、5. (3) で述べたように、長周期波が離岸堤の沖で砕波し、大規模渦を伴う波が離岸堤に勢いよく衝突するため、長周期波による消波ブロックの滑落が多く見られた。

一方、長周期波の入射波波高が 0.08 m 未満であるとき、初めの不規則波が一部の消波ブロックをずらし、長周期波がこの部分のブロックを滑落させ、また、その周囲のブロックをずらし、更に、後続の不規則波が、ずれたブロックを滑落させるという現象が多く見られた。こうした異なる形式の波の、連続した作用の結果、消波ブロックの滑落総数が、長周期波・不規則波の順で波が連続して入射する場合の 5 倍以上となる場合があった。このことは、台風が続けて訪れるといった場合に、消波ブロックのずれが蓄積されると、ブロックの滑落が生じやすくなる可能性があるということを示唆している。

7. 結 論

消波ブロックの一種である合掌ブロックを用いて築造された低天端離岸堤を対象とし、消波ブロックの動揺特性や滑落状況、そして、波高伝達率に関して検討するため、長さの縮尺が 1/43 であるコンクリート製の消波ブロック模型を用いて水理実験を実施した。

ここでは、入射波の形態が異なる 3 通りの場合を

対象とした。すなわち、1) Bretschneider・光易型の周波数スペクトルを有する不規則波が入射する場合、2) うねりのような長周期波が入射する場合、そして、3) 不規則波と長周期波が連続して入射する場合を対象とした。なお、ここでは、現地スケールで 30 ~ 70 s 程度の周期を有する波を長周期波の対象とした。

不規則波が入射する場合、静水位が高く、波高が大きい程、波高伝達率が高くなった。消波ブロックが最も滑落しやすいのは、静水位が HWL である場合であった。また、消波ブロックの配置密度が低い方が、消波ブロックが滑落しやすかった。

長周期波が入射する場合、入射波波高が大きい程、波高伝達率が高かった。また、入射波周期が長い程、多くの消波ブロックが滑落した。堤前で長周期波が砕破する場合、大規模渦を伴う波の衝突と越流により、消波ブロックの滑落が発生しやすくなった。

不規則波・長周期波・不規則波の順で連続して入射する場合、初めの不規則波が一部の消波ブロックをずらし、長周期波がこの部分の消波ブロックを滑落させ、また、その周囲の消波ブロックをずらし、更に、後続の不規則波が、ずれた消波ブロックを滑落させるという場合があった。こうした波の作用の結果、消波ブロックの滑落総数が、長周期波・不規則波の順で波が連続して入射する場合の 5 倍以上となる場合があった。このことから、台風が続けて訪れ、消波ブロックのずれが蓄積されると、うねりといった長周期成分波による消波ブロックの滑落が生じやすくなる可能性のあることが推察される。

8. 今後の課題

今後は、天端の岸沖長さを長くして越流を防ぐ方法の、ブロックの安定性に対する効果を検討したい。

また、越波や越流が、最上面に配置された消波ブロックの突脚部に作用して、消波ブロックが滑落する場合が多く見られた。離岸堤の最上部に突脚部のないブロックを用いて、波や流れの作用力を軽減するといった、滑落防止法の検討も課題である。

更に、各ケースの実験回数を多くして、実験結果の統計的安定性についても議論していきたい。

参考文献

- 1) 黒木隆之：低天端離岸堤の波高伝達率と安定性に関する不規則波実験，鹿児島大学工学部海洋土木工学科卒業論文，15p.，2007.
- 2) 曾我部隆久，伊東司郎，浅川 昭，西田芳浩：離岸堤（消波ブロック堤）の被災原因に関する考察，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 423-427，1982.
- 3) 岩垣雄一，間瀬 肇，北 直紀：Wave Group を考慮した不規則波のシミュレーションとその特性，第 29 回海岸工学講演会論文集，pp. 55-59，1982.