

新しいタイプの人工リーフ堤体の水理特性に関する研究 Studies on A New Type of Artificial Reef Breakwaters

角野 昇八*・佐々井 伸行**・遠藤 正男***

Shohachi KAKUNO, Nobuyuki SASAI and Masao ENDOH

Hydraulic characteristics of a newly developed artificial reef breakwater are studied experimentally. The breakwater is composed of units which are utilized of the concepts of a perforated horizontal plate set in water and placed horizontally in 1-layer on a rubble mound. The superiority of the breakwater in hydraulic characteristics has been shown by comparing with those of conventional artificial reef breakwaters.

Key Words: artificial reef breakwater, wave transmission, stability, perforated horizontal plate

1. まえがき

波浪制御を目的とする海岸構造物のうち、人工リーフや没水平板などは、海面下に没していて海上の景観を殆ど損なわない特徴を有する構造物であることから、最近、注目を集める構造物の一つとなっている。著者らも、没水平板に多数の開口部を設けて海面下に設置するような没水水平透過板の概念を提示し、それによる波浪制御の可能性について理論的ならびに実験的に検討を加えた¹⁾。水平透過板は、水中に没している点では在来的人工リーフ堤体と同様であるが、板上の砕波ではなく、むしろ板開口部での渦の剥離に伴う波のエネルギー減衰によって波高の減少を期待する点が異なる。水平透過板の下部には空洞の水域があり、しかもそれと板上部の空間とは開口部をとおして連続していることから、堤体近傍で波浪場を不連続とすることが殆どないので、周辺波動場に与える影響が小さいことが期待できる。したがって、それゆえに、不透過板に比べて、1) 波高伝達率および反射率が小さい、2) 作用波力が小さい、などの特性を期待できる。また、在来型的人工リーフに比べても、1) 海浜流を妨げない、2) 新たに流れをつくらない、3) 溶存酸素の鉛直混合拡散を促進する、4) 上面板下部空間を魚礁として利用でき、しかもそこでは開口部からの採光もある、などの特性を期待することができる。そこで、没水水平透過板の基本概念を実用化することを目的として、天端に開口部を持ち、内部は空洞の直方体形状のブロック(図-1)を海底のマウンド上に多数設置することによって人工リーフ堤体とする工法を開発した。

本論文では、このような新しいタイプ的人工リーフ堤体に関して、1994年より現在に至るまでに実施した、波高伝達率や反射率、堤体上平均水位上昇量、堤体上波高分布、耐波安定性などの水理特性についての総合的検討結果を報告する。

2. 新形式のブロックとそれで形成される人工リーフ堤体

新たに提案の図-1に示すブロックでは、その上面板は水平透過板の理論解析で最適とされた開口率(10%)の開口部を有し、側面は上面を支持するためのみの柱構造として、没水水平透過板の概念を具体化している。具体的には、ブロックの一边長は3mで、上面開口部はスリット状とし、支持柱断面は一边が40cmの角柱である。ブロック重量は約16tfである。底板部は枠構造のみであって、ほぼ全面開放状態としている。このブロックを図-2および写真-1に示すように、その上面板が水面下最大2m程度の深さまでになるようにしてマウンド状に一層状に多数並べることで、水平透過板の水理特性を利用した人工リーフ堤体とする。

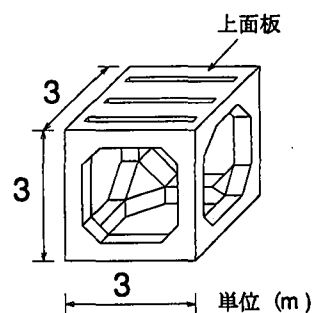


図-1 ブロック形状-1

3. 実験方法

いずれの実験も、長さ50m、幅1m、高さ1.5mの片面ガラス張り二次元造波水槽を用いて規則波で行った。模型縮尺は1/20とした(以下の数字は全てフルード則による現地寸法)。堤体模型は、1個が40kgf程度の砕石を用いて高さ3mの捨石マウンドを形成し、そのうえにブロックを並べたものである。実験では、ブロックを16

* 正会員 大阪市立大学工学部土木工学科(〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

** 大成建設(株)(元大阪市立大学学生)

*** 東洋水研(株)

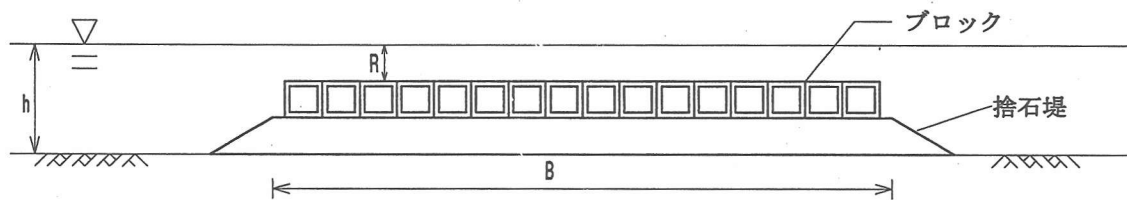


図-2 新しいタイプの人エリーフ堤体

列並べてその幅を $B=48\text{m}$ とした堤体を基本とした (以後、堤体 I と称す)。設置水深 h (天端水深 R) は $6\text{m}(0\text{m})$, $7\text{m}(1\text{m})$, $8\text{m}(2\text{m})$, $9\text{m}(3\text{m})$ とした。このような堤体模型に対して種々の特性の波を作用させ、各種の水理特性量を測定するとともに、安定性あるいは安定限界の状況を視認した。

まず、波高伝達率および反射率は、堤体模型沖側および岸側に設置した容量式波高計による波形データより、入射波高、透過波高、反射波高を入射分離法により算出して求めた。実験波の周期は $T=4.47\text{sec} \sim 13.4\text{sec}$ の範囲内とし、波高は目標波形勾配が $H/L=0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05$ 程度となるようにした $H=0.27\text{m} \sim 3.24\text{m}$ の範囲で変化させた。波高伝達率および反射率に関する実験では、ブロックを 8 列として $B=24\text{m}$ とした断面 (堤体 II) についても実験を行っている。

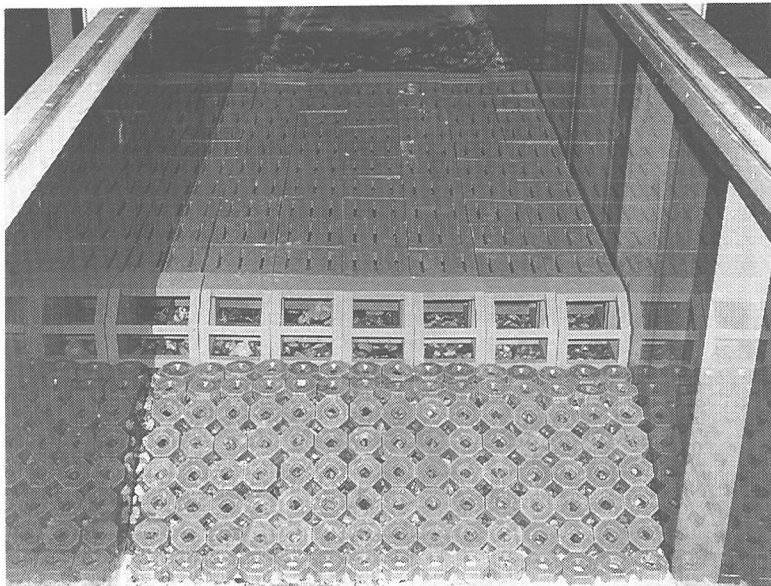


写真-1

堤体上平均水位上昇量および堤体上波高分布測定の実験は、堤体 I を対象にして行い、体沖側の先端部およびそこよりほぼ 4m (模型寸法 0.2m) 間隔にとった 13 箇所に設置した波高計で測定した水位記録より求めた。なお、波高計先端部が堤体天端に触れるのを避けるために、堤体平面中央部の波向き方向に隙間を設けて波高計先端部を挿入した。水位記録は、波高計設置点に波が到達した時刻から 60 秒間の記録をサンプリング間隔 0.04 秒で測定し、平均水位上昇量は、この 60 秒間の水位記録のうち最初の 20 秒間と最後の 12 波を除く水位の平均値と平均静水面との差とした。その際、特に堤体岸側端では、水深および波高を細かく変化させて平均水位上昇量を計測した。堤体上波高はゼロアップクロス法で定義・算定した。

安定性に関する実験では、水槽床の一部を嵩上げた水平床の上に堤体模型を造波板から約 34m の位置に設置して行った。マウンドの肩幅は 6m である。図-1に示すブロックを全幅に設置して行った安定性に関する実験では、後述のように、不安定性が観察されたとき、堤体の最沖側列のものにそれが現れた。そこでこの実験では、堤体 I 以外に、最沖側のみに比重を 3.0 としたブロック列を設置した堤体 (堤体 III)、また同じく、図-3に示すような断面のブロック列を設置した堤体 (堤体 IV) についても実験を行った。実験波の周期は $T=6.7\text{sec} \sim$

表-1 ブロックの安定度

安定度	基準	安定度内容
A	ロッキングおよび移動なし	安定
B	わずかなロッキングあり	安定
C	ロッキングあるいは浮上あり	不安定

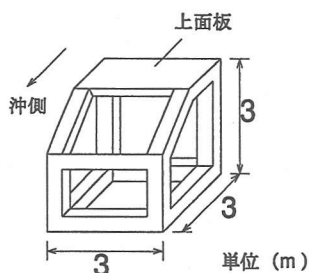


図-3 ブロック形状-2

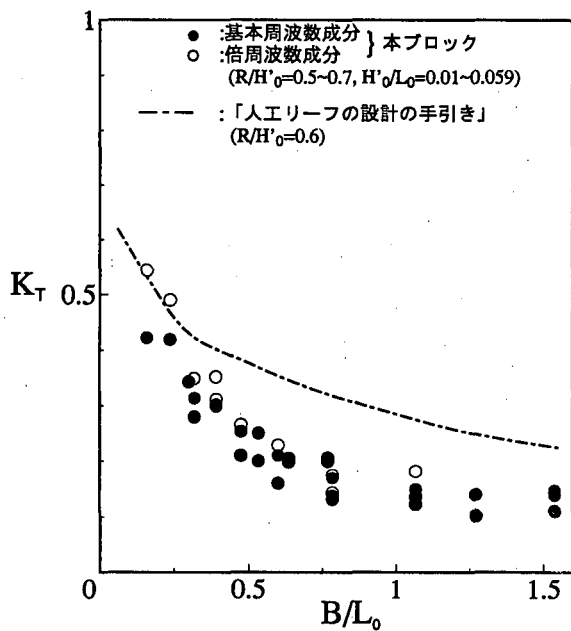


図-4 波高伝達率 (堤体 I,II) ($R/H'_0 = 0.5 \sim 0.7$)

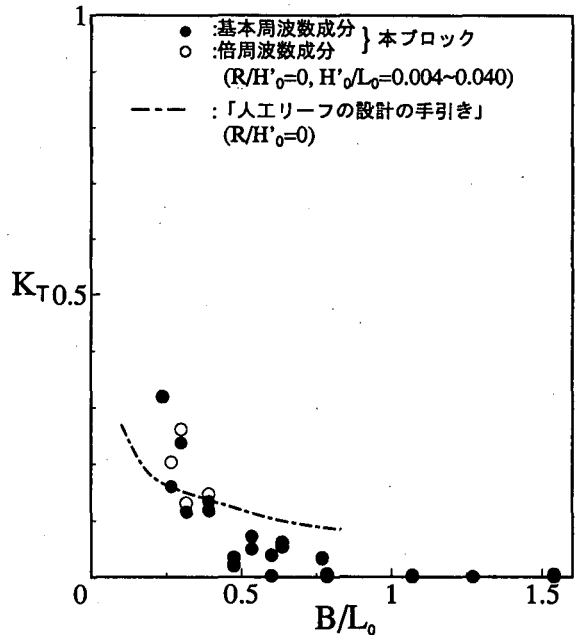


図-5 波高伝達率 (堤体 I,II) ($R/H'_0 = 0.0$)

14.1sec の範囲内の 4 周期とし、各々の周期で入射波高を徐々に増大させながら、安定限界を視認し、安定度を評価した。なお、本ブロックの安定度の判定基準は、表-1 に示す内容に基づいて行った。

実験は、以上の断面の他にも種々の堤体断面とブロック断面²⁾を対象として行っているが、ここでは触れない。

4. 波浪制御特性

4.1 波高伝達率と反射率

人工リーフの水理特性の中でも、波高伝達率は海岸浸食防止に大きく関わる量である。それゆえ、ここで提案の人工リーフ堤体の波高伝達率を在来他形式の人工リーフの波高伝達率³⁾と比較してみる。まず、堤体 I および堤体 II の両者の波高伝達率 ($K_T = H_T/H'_0$) を堤体幅/沖波波長 (B/L_0) の関数として天端水深波高比 (R/H'_0) 別に表したものの一例を図-4 に示す。図中には在来的人工リーフ堤体の波高伝達率の実験曲線 (文献 3) 中の図-3.3) も示した。伝達波高には、基本周波数成分 (H_{T1}) のほかに倍周波数成分 (H_{T2}) の現れる場合もみられたため、基本周波数成分のみの分を●で、また $H_T = \sqrt{H_{T1}^2 + H_{T2}^2}$ の関係より合成した両者の和に相当する分を○で表した。

図-4 に代表的にみられるように、いずれの天端水深の条件でも、本堤体の波高伝達率は在来断面のものに比べてかなり小さく、上面開口部での大きなエネルギー散逸の効果がうかがわれる。両者の波高伝達率におけるこの差は、天端水深波高比 (R/H'_0) が大きくなるにつれて大きくなるが、天端水深が $R=0\text{m}$ の場合で $B/L_0 < 0.3$ の場合には、本堤体のものの方が大きくなる場合もみられた。しかるにその一方で、この天端水深でも堤体幅を $B/L_0 > 0.75$ 程度に十分にとれば、伝達波高が $H_T = 0\text{m}$ となって、堤体背後の水面には擾乱の全く見られない完

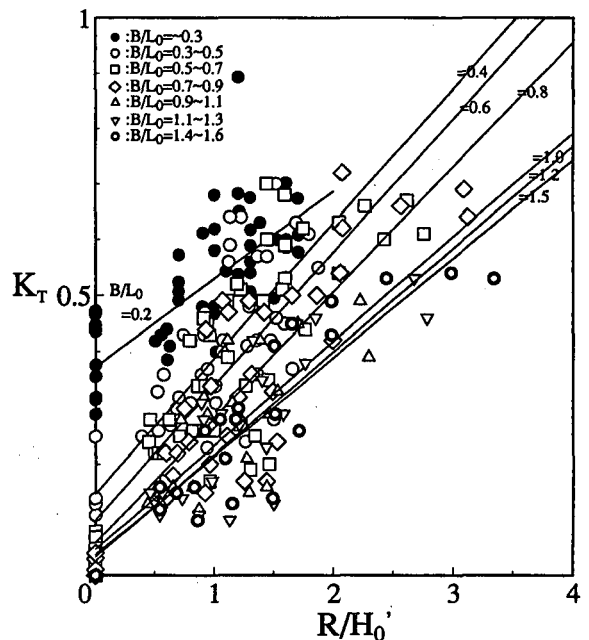


図-6 波高伝達率 (堤体 I,II) (全データ)

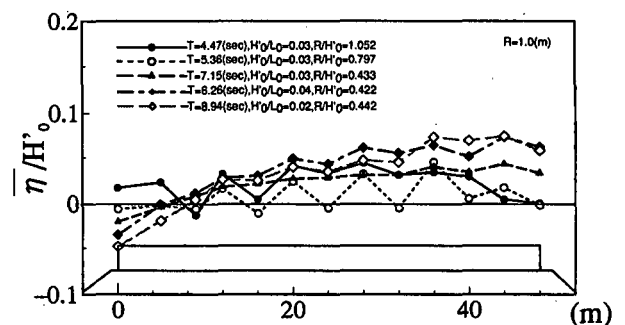


図-7 堤体上平均水位上昇量 (堤体 I)

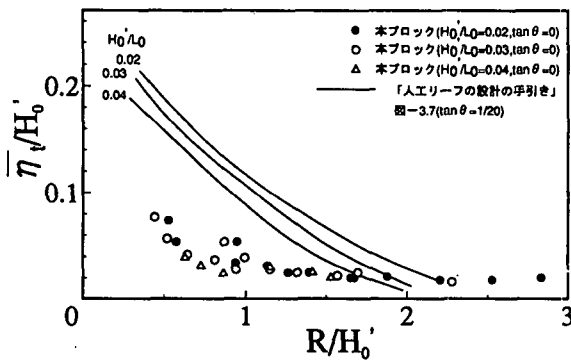


図-8 堤体上岸側端平均水位上昇量 (堤体 I)

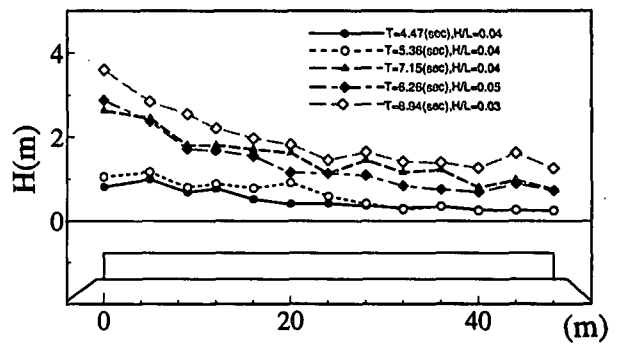


図-9 堤体上波高分布 (堤体 I)

全静止状態が観測された (図-5)。なお、ブロック模型のスリット開口部の向きはすべてのケースで波向きに平行としたが、波向きに直角方向にした実験でも全く同じ値が得られ、開口部の向きの影響は全く見られなかった。

図-6には、堤体 I と堤体 II の波高伝達率に関する全実験データを B/L_0 をパラメータにとり、 R/H_0' の関数として表したものを示した。直線は同一の B/L_0 をとるデータ群に対して引かれた再帰直線を表している。この直線群とデータより、現地での波浪条件と達成目標の波高伝達率が決定されれば、本人工リーフ堤体の諸元を決定することができる。

なお、反射率は、天端水深の増大とともに減少する傾向を示し、堤体 I の場合、 $R=0\text{m}$ で 30% 程度、 $R=3\text{m}$ では 10% 程度であった。

4.2 堤体上平均水面上昇量

堤体 I における堤体上平均水位上昇量/沖波波高 ($\bar{\eta}/H_0'$) の分布を図示したものが図-7である。ただし天端水深は $R=1\text{m}$ とした。堤体上平均水位は、堤体上の沖から岸に向かうにつれて大きくなり、岸側端直前の点で最大となっている。また、在来的人工リーフ堤体の場合と同様に、 R/H_0' が小さいほど $\bar{\eta}/H_0'$ は大きくなる傾向がある。在来の堤体でも岸側に向かって平均水位の上昇量は増加するので、岸側端でのその値を本堤体のそれと比較し、その結果を図-8に示した。図において、在来の堤体に対する値 (文献 3) 中の図-3.3) を曲線群で示した。この図より、本堤体では、 $R/H_0' < 2$ の条件下でも平均水位上昇量が在来の堤体のように急激に増大せず、漸増し、値自体も最大 20% にもなる在来のものと比べて著しく小さく、最大 10% 程度におさまっている。

4.3 堤体上波高分布

図-9 は、堤体 I における堤体上波高分布の様相を図示したものである。この場合も天端水深は $R=1\text{m}$ とした。在来的人工リーフ堤体の場合には、堤体に襲来した波は堤体沖側ののり肩付近で碎波して天端上で急激に減衰することが知られているが³⁾、本堤体上では、開口部での流れの剥離に伴うエネルギー減衰の効果により、波高は緩やかに減衰していく様子がよみとれる。

5. 耐波安定性

ここで提案の新形式人工リーフ堤体とブロックは、比較的小さな開口部をもつ上面板とその下の大きな空洞部で特徴づけられる断面を有している。それゆえ、上面板に作用する波力への耐波安定性の検討が欠かせない事柄となる。また同時に、本ブロックは捨石マウンド上に 1 層にほぼ水平に設置するので、堤体にのり面をもつような在来型的人工リーフ堤体 (あるいはその形成ブロック) とは異なるメカニズムで対波不安定性が生じると考えられる。したがって、その安定性の検討も本堤体 (あるいはブロック) 独自のものが必要と考えられる。

5.1 堤体への波の作用状況

本堤体では、堤体上で波をあまり碎波させることなく、波高の減衰は主として上面の開口部でのエネルギー減衰によって生ずる。それゆえ、沖側から襲来した波浪は、まず、ブロック列の最沖側列に入射し、波浪はその後、主として開口部でのエネルギー減衰の影響を受けて波高を徐々に減少させながら堤体上を進行した。このため、ブロックの安定/不安定は、最沖側のブロック列で生じ、しかもそれはブロックと水塊との空中での衝突あるいはそれに伴う抗力の発生によるものではなく、わずかの開口部を有する水平版の存在による波動運動の流線のゆがみによる力の発生、すなわち慣性抵抗力の発生によるものと判断された。

5.2 安定限界波高

堤体最沖側端の列に比重が 3.0 のブロックを設置した堤体 III および図-3のブロックを設置した堤体 IV について、その安定度 C のときの耐波安定限界波高を周期の関数として天端水深別に図-10に示した。図示のよう

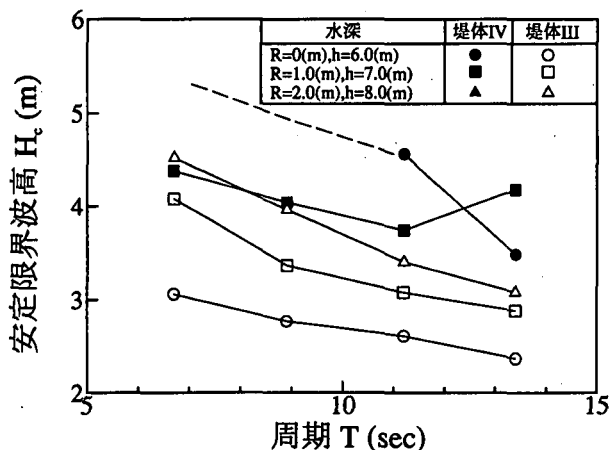


図-10 安定限界波高 (堤体 III, IV)

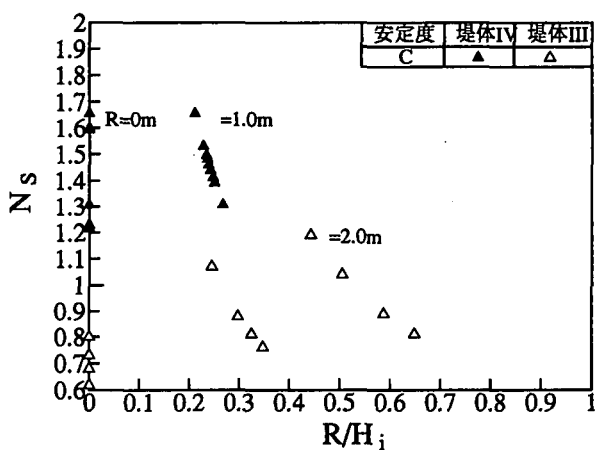


図-11 安定限界 N_s 値 (堤体 III, IV)

に、いずれの堤体でも、安定性は周期が長くなるとともに減少していく傾向にある。また、最沖側端に比重を増したブロックを設置するよりも、図-3に示すような断面のブロックを設置した方が安定性に優ることがわかる。なお、堤体 I については両堤体よりも安定性に劣るのでここには示していない。

5.3 N_s 値

ブロックで被覆した堤体の安定性を検討するための式に *Brebner・Donnelly* の式がある。この式は、周知のように

$$N_s = \frac{(w_r^{1/3} H_c)}{W^{1/3} (S_r - 1)} \quad (1)$$

と表され、式中の N_s 値の大小により堤体の安定性が判断されている。ここに w_r はブロックの単体重量、 H_c は限界波高、 S_r はブロックの比重、 W はブロックの重量である。図-11には、堤体 III および堤体 IV の N_s 値を R/H の関数として表した。ここで、式中の波高は、C の不安定状態となる限界の最小波高を代入した。図には、図-10で示された両堤体の安定性が N_s 値として示されているが、その値は周期とともに大きく変化し、単一の係数 N_s 値で本堤体の安定性を評価するには多少の難点があることがわかる。

5.4 安定重量算定式

1) 理論的考察：安定性を N_s 値から判定することには難点があること、および実験の観察結果から、本堤体の安定性は最沖側のブロック列に作用する鉛直上向きの慣性力によって生ずるものと考えられたので、本堤体の安定性を理論的に検討した。

いま、ブロックの上面水平板部をスリットをもつ角柱列と考えれば、上面板に作用する慣性力 (単位面積当たり) は $\Delta P = 2\rho C(Dw/Dt)$ で与えられる⁴⁾。ここに、 ρ は流体密度、 C は閉塞係数 (blockage coefficient) と呼ばれる慣性力係数に相当する係数であり、角柱列に対しては理論的に求めることができる⁴⁾。したがって、水平板に作用する鉛直加速度 Dw/Dt を評価できれば慣性力が評価できることになる。ここでは $Dw/Dt \approx w(\partial w/\partial z)$ と考え、慣性力加速度は移流加速度によって決定されていて、局所項は無視できるとする。また、 w は上面板部での水粒子速度の鉛直方向成分とした。ここでさらに、 $\partial w/\partial z$ は $\partial w/\partial z \approx \alpha(w/b)$ で評価できるものと仮定する。ここに α はブロック形状や波の特性に依存すると考えられる係数であり、実験的に定められることになる。 b は上面板部の厚みである。結局、このようにして慣性力の加速度を $Dw/Dt \approx \alpha(w^2/b)$ で評価した。このような考察に基づく鉛直慣性力がブロック水中重量 W_w に等しくなったときに堤体は不安定となるものとしてブロックの安定重量算定式を構成した。それは

$$W_w = 2\rho C \alpha \frac{\pi^2 H^2 \sinh^2 k(h-R)}{b T^2 \sinh^2 kh} L_B^2 \quad (2)$$

で表される。ここに H は波高、 T は周期、 L_B はブロックの一辺の長さである。

2) 係数 α の推定：式 (2) に不安定性発生時の水中重量と波の特性値 (安定度 C) を代入し、係数 α の値を求めた。図-12 は、堤体 III の実験結果より求めた α をフルード則で換算した現地周期の関数として表したものである。ブロックの緒元は $W_w = 13.35 \text{ tf}$ 、 $b = 0.4 \text{ m}$ 、 $L_B = 3 \text{ m}$ を代入し、閉塞係数としては、開口率： $a/B = 0.1$ 、隣接柱体間隔： $2B = 0.94 \text{ m}$ 、 $b = 0.4 \text{ m}$ に相当する $C = 2.374$ を代入した。図示のように、係数 α は波の周期によって変化するものの、天端水深 R による影響はほとんどみられず、また、その値自体も 1 桁の値をとっていて、ここで考えたメカニズムのモデル化の基本的な妥当性が示されていると考えられる。

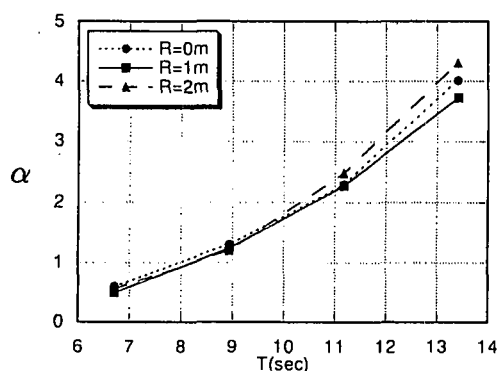


図-12 係数 α (堤体 III)

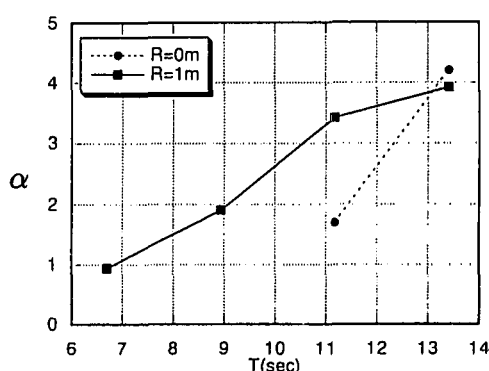


図-13 係数 α (堤体 IV)

ついで、堤体 IV における同様の図を図-13 に示した。この場合のブロックの水中重量は $W_w=9.232\text{tf}$ とし、 b および L_B の値は上と同じ値である。また閉塞係数としては、大きな開口率をもつこの断面に応じて、 $a/B=0.47$ 、 $2B=0.3\text{m}$ に相当の $C=0.721\text{m}$ をとった。図によれば、一部にデータのばらつきがみられるものの、この断面の場合にも係数 α は堤体 III とほぼ同じ値をとっていて、このことから、ここで考えたメカニズムのモデル化の基本的な妥当性が示されている。

3) 空中重量の算定：以上のようにして、係数 α の値を実験値より確定することができたので、この係数 α と周期の間の関係式を求め、それを式(2)に代入すればブロックの耐波安定所要水中重量の算定式が求められることになる。ただし、時間の次元をもつ周期の関数として表された α は無次元であることに注意する必要がある。また、式(2)が適用可能な周期は実験範囲のほぼ $T=6.7\text{sec}\sim 13.4\text{sec}$ であることに注意する必要がある。空中重量は、式(2)で算定される水中重量に $\rho g V$ (V はブロック容積)をくわえることによって求めることができる。

6. あとがき

以上より、新たに提案の本人工リーフ堤体の種々の水理特性を明らかにすることができた。なお、波が堤体付近で砕波する程度の高波高時には、砕波による波高減衰効果も加わって、波高伝達率および反射率は平常時よりもさらに減少することを付記しておく。

謝辞：実験およびデータ整理にあたっては、当時大阪市立大学大学院生の山野恵一および杉田智行、新谷尚弘の各君、同土木工学科学生青野邦男君、研究補助員久保田真子さんの補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 角野昇八・鍾一明：透過性没水水平板の波浪制御特性に関する基礎的研究，海岸工学論文集，第40巻，1993.
- 2) たとえば、角野昇八・青野邦男・遠藤正男：新形式ブロックを用いた人工リーフ堤体の安定性に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要，1996.
- 3) 建設省河川局海岸課監修：人工リーフ設計の手引き，全国海岸協会，1992.
- 4) Kakuno, S. and Liu, P. L.-F., (1993), Scattering of Water Waves by Vertical Cylinders, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engrg., ASCE, Vol. 119, No.3, pp.302-322.