

エネルギーを用いる波浪制御技術の試み

Experiments on Wave Barriers utilizing Electric Power

— 液状化消波システムの考案 —

高橋重雄* 下迫健一郎* 山本 悟* 三浦裕信*

Shigeo.Takahashi, Ken-ichiro.Shimosako, Satoru.Yamamoto, Hironobu.Miura

Several wave absorbing systems are tested in a wave flume. They are two types of pneumatic breakwaters, two types of hydraulic breakwaters and two types of wave-absorbing system with sand liquefaction, all of which use electric power to dissipate waves. The hydraulic breakwaters and pneumatic breakwaters are not effective to reduce waves effectively. However, the wave-absorbing system with liquefied sand seems to be promising.

Keywords: Wave Barrier. Pneumatic Breakwater. Hydraulic Breakwater. Sand Liquefaction.

1. まえがき

港湾技術研究所では、種々の波浪制御構造物の研究開発を実施している。最初の波浪制御構造物の本格的な研究は、1980年代の始めから実施しており、水平版付き立体骨組み構造や二重円筒構造などの研究を実施した。比較的最近では、半円形構造等の開発も実施している。これらの多くは、実際に現地に造られるようになっており、波浪制御技術は着実に発展していると考えられる。ただし、これらは従来の混成防波堤ケーソンの改良が中心であり、波浪制御技術のさらなる発展を図るためには、新たな視点が必要となっている。

伊藤は、特殊防波堤論(1968)や防波堤構造論史(1969)のなかで、先人の多くの卓抜した波浪制御技術を紹介している。それらのほとんどは、残念ながら成功例ではなく標準的な防波堤とはなり得なかったものであるが、最近の材料や設計・施工技術の進歩によって新しい波浪制御技術として可能性があるものも少なくない。著者らは、新しい波浪制御技術を模索しているなかで、そうした先人の技術の見直しを図るとともに、さらに新しい技術を考案して行きたいと考えている。

本報告は、そうした研究の一端を紹介させていただくものであり、特にエネルギーを使って波を制御する技術について報告する。運輸省では、沿岸開発技術研究センターを中心とする多数の民間会社と共同で波力発電ケーソン防波堤の開発(高橋ら1992)を行っている。著者らは、波エネルギーの利用法の一つとして、波浪制御が有力であると考えており、そうした技術の開発を始めている。

2. エネルギーを用いる波浪制御システムの考案

(1) 空気防波堤と水流式防波堤

空気防波堤や水流式防波堤は、エネルギーを用いる波浪制御システムとして古くからある。1907年には、アメリカのBasherが特許をとっており、実際に使われた例も少なくない。我国では、1950年代に栗原らが長崎等で現地実験(栗原1956)を実施しており、1970年代の大阪港における現地実験(岩垣ら1980)もよく知られている。空気防波堤は、空気そのものによる消波効果はほとんど無く、上昇する空気泡による流れによって消波すると考えられている。したがって、水流式防波堤と空気防波堤は基本的には同じ消波メカニズムによっている。空気防波堤や水流式防波堤は、装置が簡易である事、航行等の障害にならず景観面の問題もない等の長所を有する。しかしながら基本的には短い波長の波にしか効果がない事が問題とされている。

図-1の(1)と(2)は水流を用いた消波システムの案であり、(1)は高速の水流を波の進行方向と逆に吹き出すものである。(2)は、その効果を高めるために潜堤と組み合わせたものである。図-2(1)は、空気泡による消波システムであるが、空気泡による流れだけでなく、空気泡自体の圧縮や乱れによる消波を期待している。したがって、潜堤がある状態で空気泡をその潜堤底面の全域から放出するシステムである。図-2(2)は、以上のものとはかなり違い、ビニール製のテント状のものであり、テントは下から供給する空気によってテントを自立させ続けるものである。波の作用による空気の圧縮と同時に起こる空気漏れによる消波を期待している。これは浮体式の波エネルギー変換装置の考え方にもとづいている。浮体式水柱振動式の波エネルギー変換装置では、水面の変動によって空気を圧縮し、ノズルからの空気パワーでタービンを回転させているが、この図では圧縮された空気は、

* 正会員 運輸省港湾技術研究所耐波研究室 (〒239 横須賀市長瀬3-1-1)

Fax 0468-42-7842

テントから漏れて大気へ解放される。

(2)地盤による消波

メキシコ湾のミシシッピデルタといわれる海域では、異常波浪時に漁船等が逃げ込む比較的静かな海域があるといわれている。これは柔らかい粘土地盤が波によって動きその粘土のダンピングによって波のエネルギーが消費されるためである。このメカニズムの研究は米国で行われ（山本・高橋1982）、その後我国を含めいくつかの国で行われている。こうした柔らかい粘土による消波の問題点は、適した柔らかい粘土がどこにでもあるわけではない事と、粘土の特性によって消波能力が大きく変わるため制御しにくい事である。

砂地盤の場合は、地盤が硬く（せん断弾性係数が大きく）こうした消波は発生しない。しかしながら、なんらかの方法で地盤を柔らかくしてやれば、同様な消波機能を生じさせる事が可能と考えられる。図-3(1)は、砂地盤の下にパイプを敷設しそこから空気泡を出すものである。空気泡の圧力による間隙水圧の上昇と空気の圧縮性によって砂地盤が結果的に柔らかくなる事を期待するものである。図-3(2)は、空気泡ではなく水を供給するシステムである。供給された水によって間隙水圧が上昇し、ボーリング状態になり、いわゆる液化化するため地盤が柔らかくなると期待される。

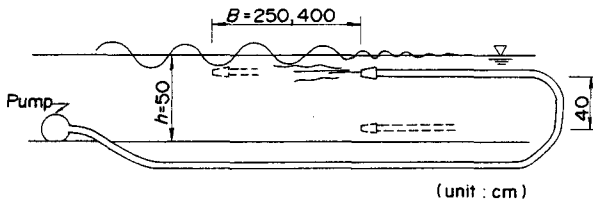
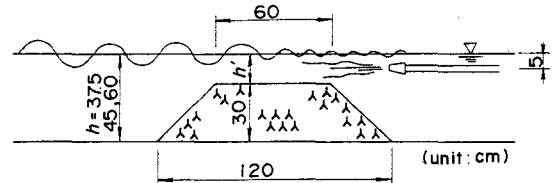


図-1(1) 水流式消波システム



(2) 水流+潜堤式消波システム

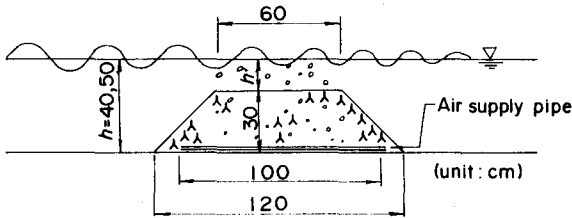
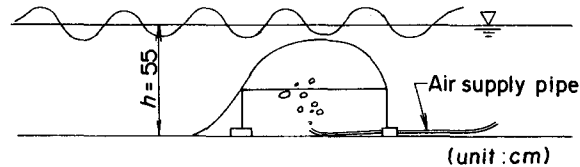


図-2(1) 空気泡+潜堤式消波システム



(2) 空気テント式消波システム

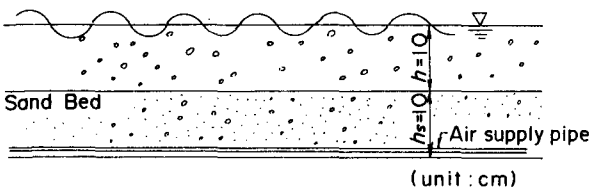
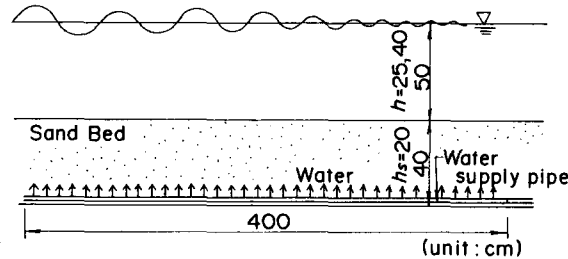


図-3(1) 地盤による消波（空気泡）



(2) 地盤による消波（水）

3. 実験方法

図-1 から 3 の各消波システムについて、小型造波水路（36x0.48x1m）を用いた基礎的な実験を行った。実験波は、規則波であり、その周期と波高そして水深は各システムによって変えているが、周期は1.0～2.6 s、水深は37.5～60 cmの範囲である。実験では、主に波を作用させ伝達波高を測定している。

(1)水流消波システム

水流による消波システムについては、前掲図-1(1)と(2)を対象に実験を実施した。このうち的水流のみの場合は、図の(1)に示すように水路内に水中ポンプを設置して流れを生じさせている。ポンプの台数は一台と二台の場合があり、その位置も水面付近、水底面付近の二種類がある。ポンプは、表-1に示すように定格が400Wであり、ポンプ一台の流量は400 cm³/s(71W)で、ホース先端の放出口（断面積6.7 cm²）からの流速は600 cm/sとかなり速くなっている。

水流と潜堤を組み合わせたシステムについては、図の(2)に

表-1 水中ポンプとコンプレッサー

AIR COMPRESSOR	PRESSURE	7.0 ~ 9.9 Kgf/cm²
	DISCHARGE	2.8 ㍓/分/s (0.58 cm³/s)
	ELECTRIC POWER	750 W
WATER PUMP	PRESSURE	0.65 Kgf/cm²
	DISCHARGE	4.3 ㍓/分/s
	ELECTRIC POWER	400 W

示すように水路底面上に幅120cmで高さ30cm天端幅60cmの異形ブロックによる潜堤を設け、そこ天端上に水流を発生させている。ポンプは同じものであるが、放出口を0.5x10cmの断面に絞っており、平均流量は3900cm³/s(116W)で放出口での流速は775cm/sとかなり速く、水ジェット状となる。ポンプからの流量を潜堤天端上の水の断面積で割った平均流速は、水深37.5、45、60cmの各水深で、10.8、5.4、2.7cm/sとなる。

(2)空気泡消波システム

空気泡に関する実験は、前掲図-2(1)と(2)を対象にしている。(1)の潜堤と空気泡を組み合わせたシステムでは、潜堤の下に内径0.5cmのビニール管を敷設し、そのビニール管に直径1mmの穴を多数あけ、コンプレッサから圧縮空気を送り込んでいる。コンプレッサは、定格750Wであり、圧力は7.0-9.9kgf/cm²、空気供給量は2800cm³/sである。空気泡は潜堤底面全体からでており、平均の供給速度は0.58cm/sである。

空気テントは、ビニール製であり、長さ100cm、上端幅30cm、下端幅40cm、高さ20cmである。水深は55cmでテント上の天端水深は10cmである。このテントを、針金で係留し、常に13.2cm³/sの空気を供給して自立させている。

(3)地盤による消波

前掲図-3(1)の空気泡によって地盤を柔らかくする装置は、厚さ10cm、長さ2mの砂地盤を設け空気泡+潜堤の場合と同様にその底面にビニール管を敷設してコンプレッサから空気を送り込んでいる。このケースは、空気泡によって砂地盤が柔らかくなるかを確認する実験であり、特に伝達波等は測定していない。

前掲図-3(2)の地盤に水を供給する装置は、水路内に長さ11.4mの砂地盤層を設け、その内の4mの地盤下に直径13mm、長さ4mのパイプを6列に配置したものである。パイプには直径2mmの穴が3cm間隔に2箇所あけてある。この穴から水が出て地盤内に強制的に上向きの流れ(上向き浸透流)を起こし、間隙水圧を上昇させ砂の締めりを緩くする(液状化状態)システムである。間隙水圧はパイプに供給する水圧(実際には水量)を調節して変化させる事ができる。実験では20と40cmの2種類の地盤の厚さについて消波効果を比較している。水深はそれぞれ地盤上25cmおよび40cmとし、周期は1.0s、1.6s、2.0sの3種類とした。

4. 水流消波システムの実験結果

図-4は、水流による消波システムの実験結果である。消波効果が最も高いのは、水面に水路長方向に2つの放水口をならべた場合で、周期が1.0sのときであり、波高伝達率が0.1程度と極めて高い。ただし、水流式の消波システムの周期の特性は明白であり、同じ条件でも周期が1.2sと少し長くなっただけで0.6程度と効果はかなり減少している。ポンプ台数による伝達率の違いを周期1.2sの波で見ると、水面に2台設置した場合(前後2台)と1台の場合の伝達率低下の割合は10~25%程度であり、2倍のエネルギーを用いても伝達率の低減効果は小さい。設置位置の違いを比較すると、やはり水面に近いほど伝達率は低下する。水流式では、台数や流量をかなり多くしてもその効果はやはり比較的周期の短い波に限られるようである。

図-5(1)と(2)はそれぞれ潜堤と水流+潜堤による消波システムの実験結果である。ここでは、水流を潜堤と組み合わせて効果を高める事を意図しており、特に周期の長い波でも消波できる事を考えている。まず、図-4と図-5の(2)を比較すると、水流+潜堤では明らかに周期が長い場合にもある程度の消波効果が期待できる。周期が2s以上であっても波高が大きければ伝達率は0.6程度となる。しかしながら、これは水流よりも潜堤の効果が大きく、図-5(1)を見ると潜堤だけでも波高が大きい場合には碎波によって伝達率が0.7程度になっている。碎波の効果は、潜堤天端上の水深が浅いほど大きく、その傾向は潜堤のみの場合だけでなく、水流+潜堤の場合にも認められる。

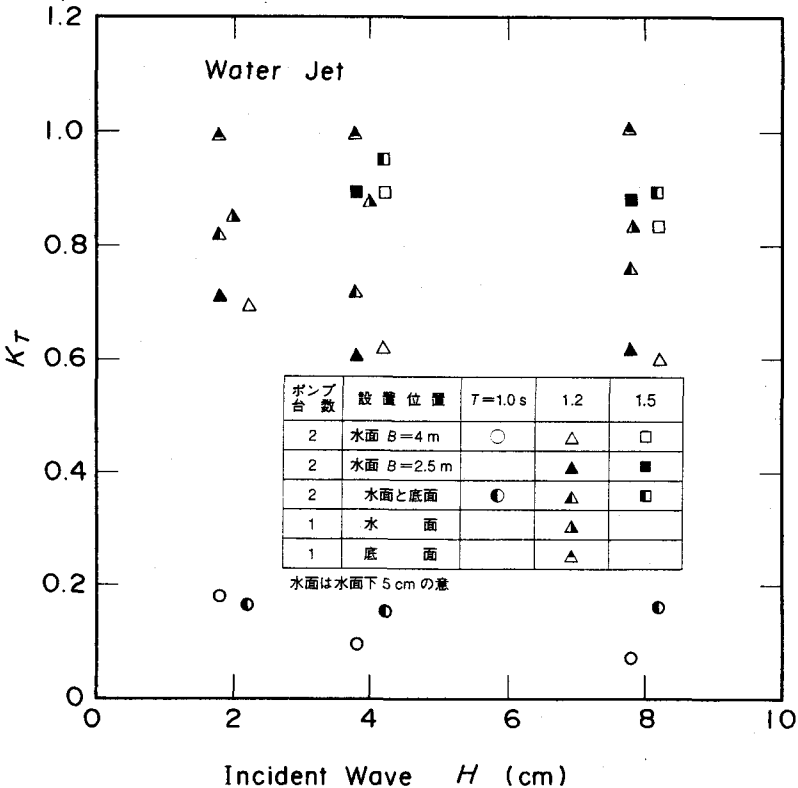


図-4 水流による波高伝達率

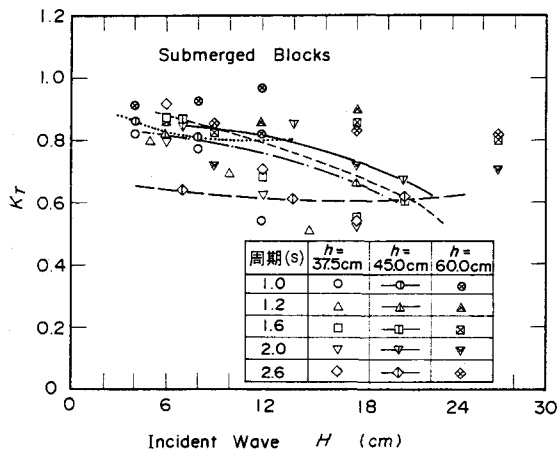


図-5 (1) 潜堤による波高伝達率

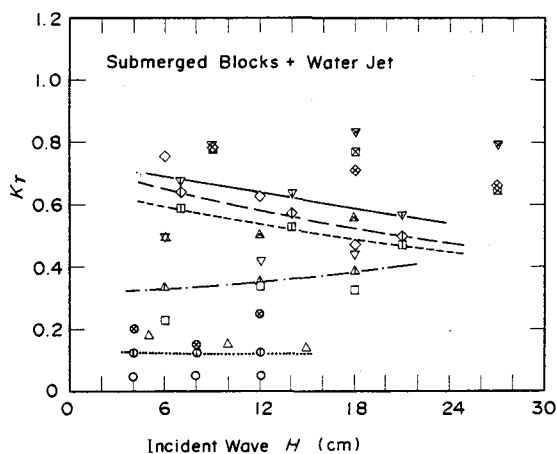


図-5 (2) 水流+潜堤による波高伝達率

5. 空気泡消波システムの実験結果

図-6は、潜堤と空気泡による消波システムの実験結果である。横軸に潜堤だけの場合の伝達波高をとり、縦軸に空気法を加えた場合の伝達波高を示したものである。水深や周期にかかわらず、波高が大きいほど空気泡がある場合の方がやや小さいが、あまり大きな差が認められない。

図-7は空気テントによる消波システムの実験結果である。周期1.0s, 1.4sの場合は波高が大きくなっても伝達率は低下せずほぼ1に近い値である。周期1.8sでは波高にかかわらず伝達率が約0.8に低下しており、3種類の周期の中では最も効果があった。これはテントのもつ固有振動周期による影響とも考えられるが、さらに検討が必要である。ただし、消波効果はかなり小さくテントの形状を変える等の工夫がさらに必要と思われる。

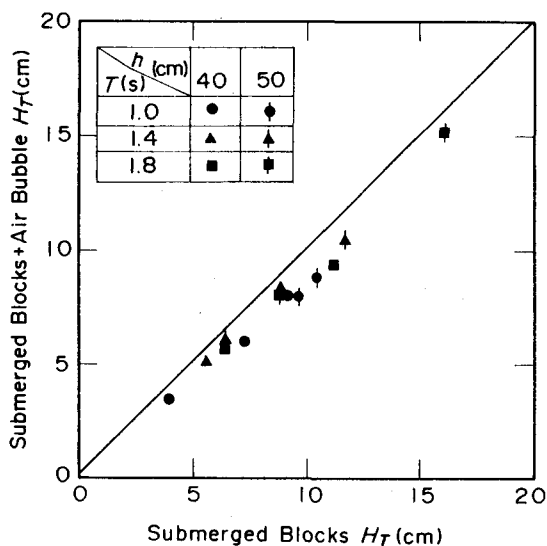


図-6 空気泡の消波効果 (潜堤+空気泡)

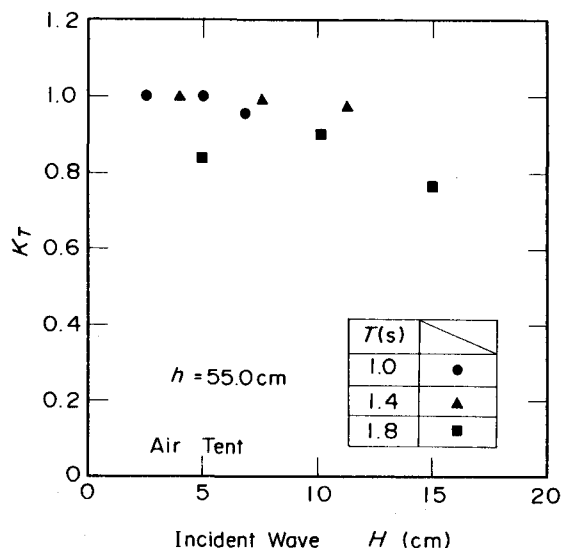


図-7 空気テントによる消波結果

6. 地盤による消波システム (液状化消波システム) の実験結果

(1) 空気泡による地盤の変化

地盤による消波を行うためには地盤を柔らかくする必要がある。その一つの方法として空気泡を地盤の底面から注入したが、地盤に特に目立った変化はない。波を作用させてもこの地盤に変化はなく、波高の減衰も認められなかった。これは地盤内に空気を注入しても間隙水圧を上昇させることなく空気泡が地盤内を上方に抜けてしてしまうからである。空気量を調整し単位時間当たりの供給量を増減しても砂地盤の変化は認められなかった。ただし、空気量を多くすると上面の砂の巻き上げは激しくなり空気泡の通過した地盤は局所的には緩んだが、砂地盤層全体が緩む事はなかった。

(2) 水の注入による地盤の変化

図-8は吉見(1991)が実施した上向き浸透流試験の装置であり、砂層内に上向きの浸透流を発生させ、この流れを測定すれば、砂の透水係数が求められる。図-9は吉見がこのシステムで行った試験結果である。図-9の

横軸は流速であり縦軸が動水勾配であるので、その勾配が透水係数の逆数となる。ここで動水勾配がある限度以上（限界動水勾配）のとき砂は顕著な膨張を見せ流動化する。これは、ボーリングあるいはク

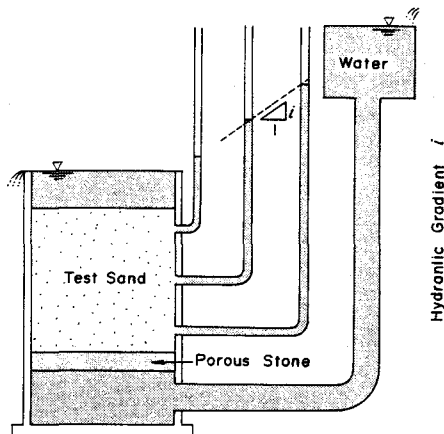


図-8 上向き浸透流試験装置（吉見1991）
呼ばれる砂の液状化現象の一つである。

限界動水勾配 i_{cr} は図-9 の場合はほぼ0.9であるが、間隙比 e 、砂の粒子比重 G によって表される。すなわち、

$$i_{cr} = (G - 1) / (1 + e) \quad (1)$$

あるいは土の水中単位体積重量 γ' や水の単位体積重量 γ_w から

$$i_{cr} = \gamma' / \gamma_w \quad (2)$$

となる。たとえば、図-3 (2) の例では、砂地盤の厚さの0.9倍以上の水のヘッド差を与えれば、砂は液状化することになる。ただし、配管の圧力損失を考慮して水を供給する必要がある。

なお、図-3 (2) のシステムでは、パイプからの水の注入のため間隙水圧が一様にならないため、部分的なボーリング状態が発生する。また、実験に用いた砂の透水係数は0.14cm/sであり、きれいな砂の透水係数に相当する。すなわち、限界動水勾配程度の間隙水圧であれば0.13cm/sの上昇流速となり、長さ4m幅0.48mの地盤面積にたいして2500cm³/sの流量となる。水圧を単純に限界動水勾配に相当する36gf/cm²とすると、そこで消費されるパワーは8.8Wとなる。しかしながら、実際にはこのシステムでは配管が細くまたパイプの穴も小さいため、そこでの圧力損失が非常に大きくなっている。

(3) 液状化消波システムによる消波効果

図-10は、砂地盤の厚さ40cm、地盤上水深25cmで $T=1s$ 、 $H=8cm$ の波が作用した場合の測定記録である。4つの波形のうち上段、中段上、下段が波高、中段下が砂の上面の動きである。砂面の動きは砂面計で計測している。地盤に水を供給し始めると、波に連動して砂が上下に6mm程度動き、地盤上を通過した波の波高が大きく低下し伝達率は0.25となっている。

写真-1はその時の実験状況を示す写真である。上段は造波前である。中段は $T=1s$ 、 $H=8cm$ の規則波が地盤上を通過しており、この時はまだ水を注入していない。下段は地盤が液状化した時の減衰状況である。波が進行するほど波高が小さくなっているのがよく分かる。

図-11は、このシステムによる波高伝達率の実験結果を示すものであり、横軸を動水勾配（底面での平均間隙水圧／砂地盤の厚さに相当する水圧）にとっている。砂層の厚さが20cmと40cmで、周期1.0s、1.6s、2.0sの場合であるが、砂層を40cmと厚くしたケースは伝達率が大きく低下し、特に周期1.0sの波については消波効果は極めて高い。消波効果は、砂の厚さが40cmのと

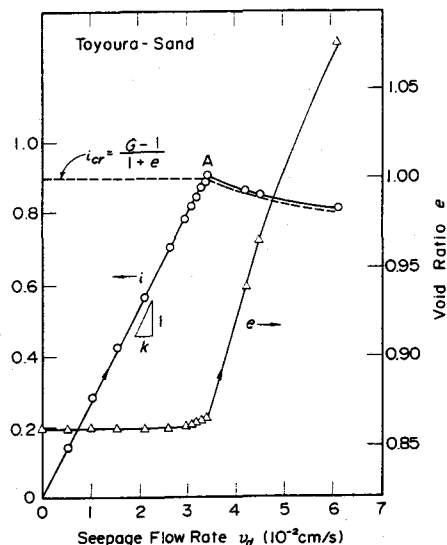


図-9 上向き浸透流試験結果（吉見1991）

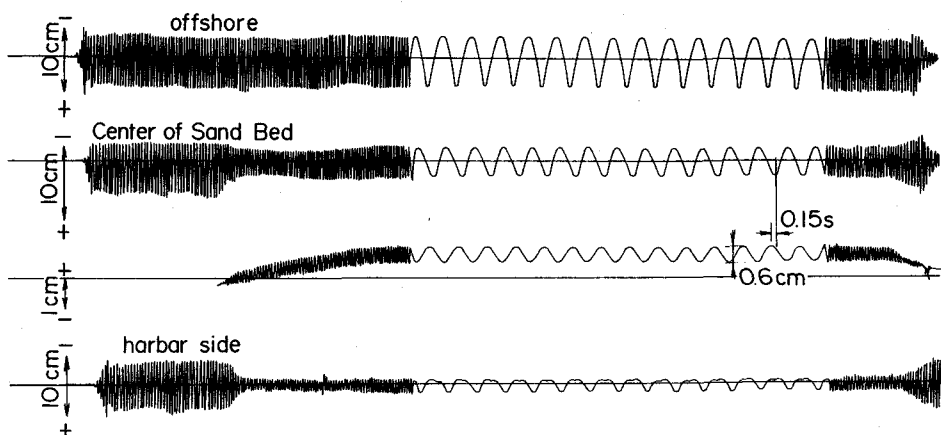
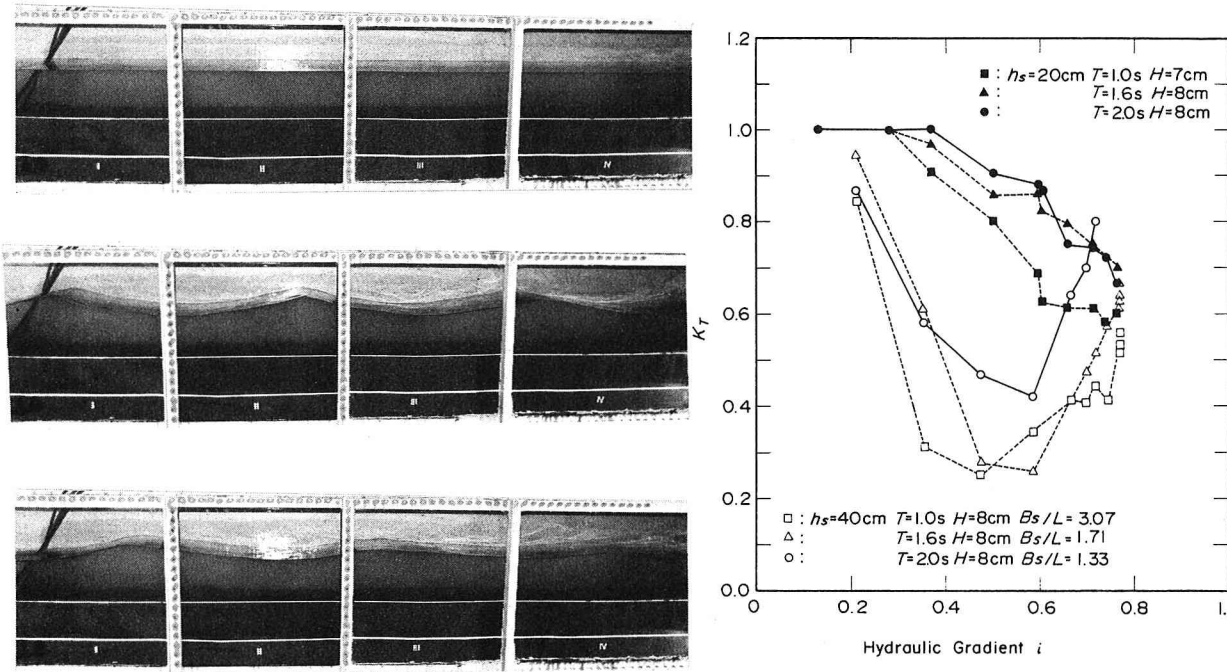


図-10 測定波形の例

き動水勾配が0.5から0.7程度で大きく、完全にボイリング状態より部分的にその限界になっているときに砂地盤によるエネルギー減衰が大きい事を表している。砂地盤が20cmでは全体に消波効果が少ない。これは、エネルギーを減衰させる砂が多い方が消波効果が大きいと考えられる。

液状化消波システムは、このように簡単なシステムであっても消波効果は大きく比較的有望な波浪制御システムと考えられる。しかしながら、実験は小規模のものであり、同じ砂を用いている事から相似則の問題があると考えられる。また、砂地盤に適切に水を供給する配管等についても、さらなる検討が必要である。



写真－１ 液状化消波システムによって減衰する波

図－１ 液状化消波システムによる波高伝達

7. あとがき

エネルギーを用いるいくつかの消波システムに、基礎的な実験を行い、その消波性能を検討した。得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 水流式の消波システムは、これまで言われているように長い周期に対する効果は小さい。また、流量を増やしたりしてもその消波効果はそれほど向上しない。ただし、潜堤と組み合わせると消波効果はかなり向上するが、これは、潜堤の効果が卓越している。
- 2) 空気泡による消波効果はあまり期待できない。また、空気テントによる消波システムの消波効果も少ない。
- 3) 空気泡によって砂地盤の強度の低下は確認できなかった。一方、間隙水圧によってボイリングをおこせば、消波効果はかなりある事が確かめられた。

今回の実験は基礎的なものであり、これら波浪制御技術についてはさらにデータの解析を進めるとともに、大型の実験を行っていく予定である。特に液状化消波システムについては、その消波メカニズムの解明のために理論的検討を行い、消波効果を定量的に把握できるようにして行きたいと考えている。

参考文献

伊藤喜行(1968)：特殊防波堤論、水工学シリーズ68-06、土木学会水理委員会、pp. 6-1-31。
 伊藤喜行(1969)：防波堤構造論史、港湾技研資料、N0. 69、78p。
 岩垣雄一・酒井哲郎・辻 義則(1980)：現地実験による空気防波堤の透過率の周波数特性、第27回海岸工学講演会論文集、pp. 397-400。
 栗原道徳(1956)：空気防波堤について (III)、第3回海岸工学講演会論文集
 高橋重雄・安達 崇・中田博昭・大根田秀明・加藤久雄・鹿籠雅純(1992)：波力発電ケーソン防波堤の現地実験における観測データ結果の解析結果、港研報告第31巻2号、pp. 21-54
 山本督夫・高橋重雄(1985)：Wave Damping by Soil Motion, ASCE, WW, Vol. 111, No. 1, pp. 62-77。
 吉見吉昭(1991)：砂地盤の液状化、技報堂出版、182p。