

波エネルギー吸収型波浪制御構造物(フラップボード)の開発について

Development of Energy Absorbing Type Breakwater "Flapboard Breakwater"

小島朗史*・西村宜信**・宇戸寿一***

Roshi.Ojima, Yoshinobu.Nishimura and Toshikazu.Uto

Flapboard breakwater is a newly developed structure made up of rows of elastic boards with high rigidity. Reducing the energy of the incoming waves due to reaction forces and swing of the elastic boards, this breakwater creates calm sea area. The 3rd District Port Construction Bureau is now carrying out fundamental hydraulic model tests to examine the functions and characteristics of this newly developed breakwater. This paper reports the hydraulic property of this flapboard breakwater obtained through the hydraulic model tests.

Keywords ; Flapboards breakwater, Wave dissipation by elastic boards, Energy reduction by reaction force and swing

1. はじめに

近年、余暇時間の増大とともに、沿岸地域においてはマリンスポーツ・マリレジャーをはじめ様々な活動が活発になってきている。また、これらのウォーターフロントは、市民生活における潤いある憩いの場としての役割も再認識されてきている。

このため、これらの海域は、安全であることはもとより、心なごむ快適な空間であることが求められてきており、静穏で良好な水質の海域創出が必要となってきた。

これまで、こうした静穏な海域空間の創出は、防波堤で海域を囲んだり、沖合いに離岸堤を設置するなどの方法によるが多かった。しかしながら、これらの方策は、陸上からの景観を阻害する場合があったり、閉鎖性水域となる港内の水質の悪化、また、潜堤タイプの波浪制御構造物の場合などは、港内水位の上昇とそれに伴う底層流の増大などといった課題が指摘されている。

第三港湾建設局では、これら環境上の課題を解決し、安全で快適な海域空間の創出に寄与するため、新しい波浪制御構造物として、フラップボード工法の開発を検討しているところである。

本報告は、フラップボード工法の開発に際しての基礎的調査課題である、本工法の水理特性（波高透過率、反射率など）についての実験結果を紹介するものである。

2. フラップボードの構造及び特徴

従来の波浪制御構造物は、ケーソンなどにより堅牢な堤体を構築し、それにより波のエネルギーを遮蔽・反射する不透透性の構造物、あるいは、堤体上で砕波を発生させ波のエネルギーを消費する潜堤、堤体内部で渦または乱れを発生させて波のエネルギーを消散する異形ブロックなどを使用した透過性構造物などであった。

これに対し、フラップボード型波浪制御構造物は図-1に示すように、海底または基台上に適当な剛性を持つ弾性板（硬質ゴム板等）を多数直立させた構造のものであり、これら弾性板間を波が通過するときに生じる渦などによるエネルギー消費、および、これら弾性板群を波が変形させることによるエネルギー消費などにより通過する波のエネルギーを減衰させようというものである。

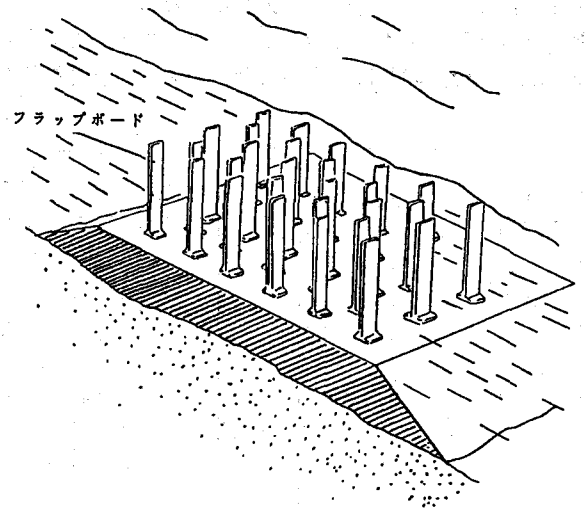


図-1 フラップボード型波浪制御構造物

* 正会員 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所 (650 神戸市中央区海岸通 神戸地方合同庁舎)

** 同上 同上

*** 同上 同上

また、本工法は、弾性板の天端が水面下にある没水構造のため陸上からの景観を阻害することがないとともに、海水の透過性に優れているため海水交換性能が高く、港内の水質を良好に保つことのできる波浪制御構造物である。

3. 水理模型実験

3-1 波高減衰実験

フラップボード型波浪制御構造物は、従来の波浪制御構造物とは異なり、弾性板群によるエネルギー吸収あるいは消費などにより通過する波のエネルギー減衰を図ろうというものである。本実験はフラップボード型波浪制御構造物の開発に向けての基本的検討として弾性板群による波エネルギーの減衰と反射について測定を行ったものである。

弾性板群によるエネルギーロスの大きさは、入射する波浪の条件 (H_i 、 T_i)、弾性板の設置水深 (h) および天端水深 (d)、弾性板の配列幅 (B) と配列数 (n)、配置形状や延長方向の投影面積を加味した空隙率 (ε) さらに弾性板の剛性など様々な要因により変化するものと考えられる。そこで本実験では、これらの要因のうち特に弾性板群の天端水深 (d) に注目して実験を行った。

(1) 実験条件

実験には、第三港湾建設局、神戸調査設計事務所 小型二次元水槽を使用した。(図-2参照) 水路は、全長7.6m、幅0.5m、高さは0.5mでフラップ型造波装置を備え、弾性板群後方の水路端には消波装置を設置したものである。

実験縮尺は1/20とし、弾性板の配列幅 B は1.5m (現地換算で30m)、水深 h は25cm (同、5m) とした。

弾性板模型は硬質ゴムを素材とするものであり、図-3に示すように、水中で揺動するタイプとして剛性の異なる2種類 (Aタイプ、Bタイプ) を用いた。また、揺動しない場合の波高減衰を把握するための比較対象として、Aタイプを硬質塩化ビニール板で補強することにより

水中で直立したままのものとしたCタイプを用意した。弾性板の配置は幅方向 (水路延長方向) に48本、長さ方向 (水路断面方向) に4本の合計192本 (現地換算配置密度0.64本/m²) を千鳥状に配置する事とした。

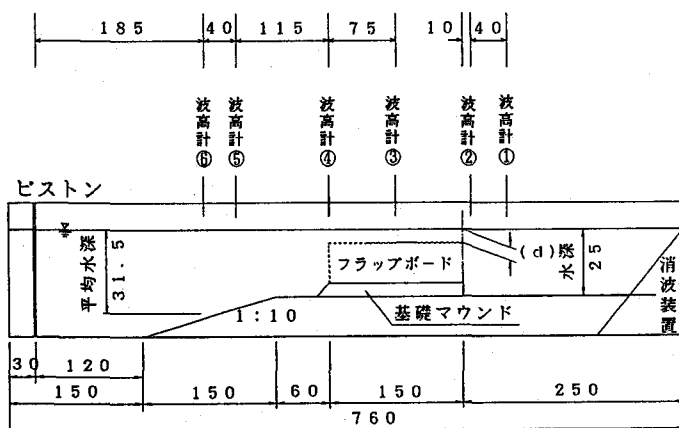


図-2 実験水槽

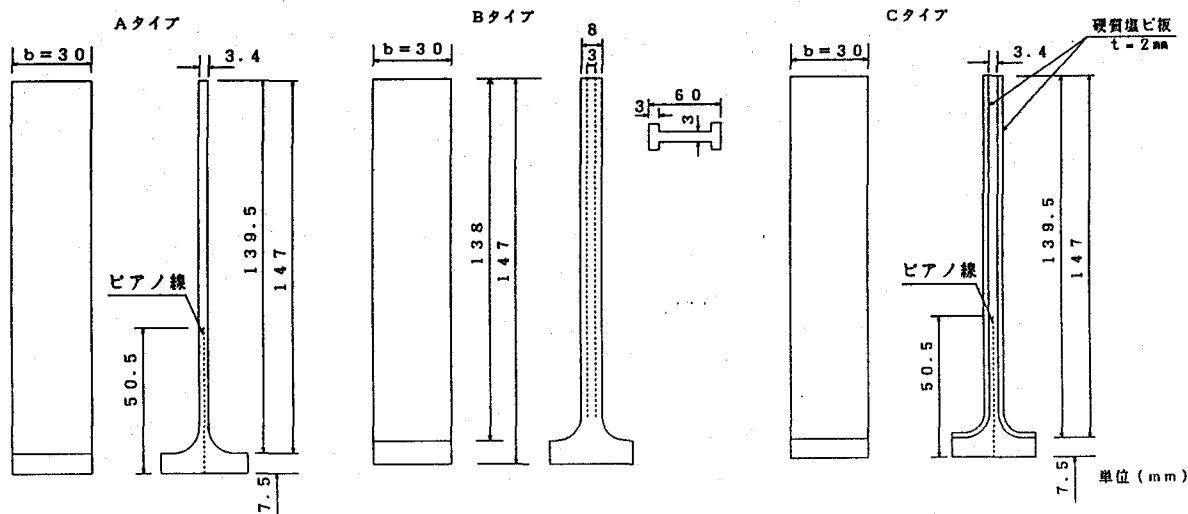


図-3 実験模型

(2) 実験方法

実験は、水槽内の固定床の上に基礎マウンドを築き、その上にフラップボード型波浪制御構造物の模型を設置した状態で表-1に示す規則波を作用させ、図-2に示す各位置での波高・反射率などの測定を行ったものである。弾性板の天端水深 d は、基礎マウンドの厚さを調整する事により 0 cm 、 2 cm 、 5 cm 、 8 cm 、 10 cm と変化させ測定を行う事とした。

図-2において、波高計⑥、⑤は入射波高測定用（入射波分離、入射波高 H_I 、反射波高 H_R ）、波高計④は堤体前面直上波高測定用、波高計③は堤体中央部波高測定用、波高計②、①は透過波高測定用（透過波高 H_T ）とした。

透過率 K_T の算定にあたっては、波高計⑥、⑤より得られた入射波高 H_I を浅水係数で除して求めた沖波波高 H_0 を基準として $K_T = H_T / H_0$ と算出する事とした。したがって、この透過率 K_T には、水深による波高変化の影響が含まれている。

弾性板による波の反射は、波高計⑥、⑤の同時波形記録をFFT解析することにより反射率を求めた。すなわち、 $K_R = H_R / H_I$ である。

また、波浪作用時にはビデオカメラにより、堤体前面部を撮影し弾性板の頭部水平変位量を測定した。

周期 $T(\text{sec})$	平均換算沖波波高 $H_0(\text{cm})$
1.0	6.7
1.5	4.5

表-1 波浪条件

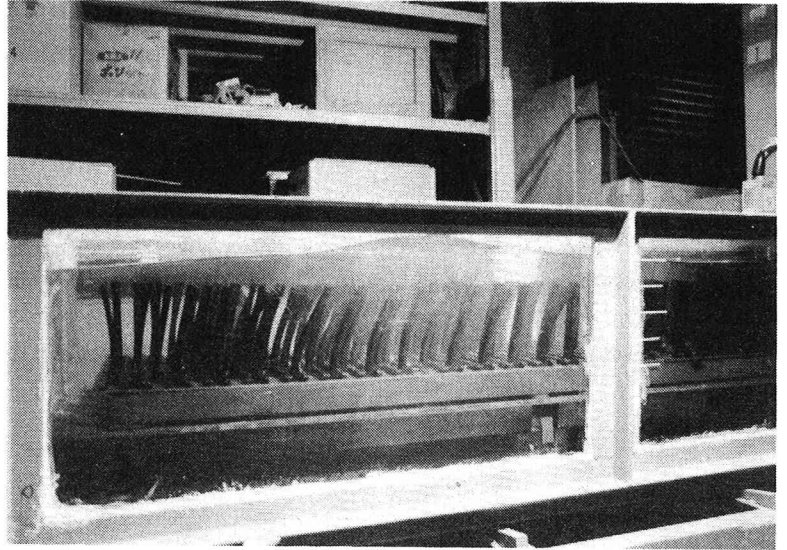


写真-1 波高減衰実験

(3) 実験結果

まず、水中で揺動するタイプの弾性板（Aタイプ、Bタイプ）についての天端水深 d と透過率 K_T 、反射率 K_R の関係を図-4、5に示す。また、各ケースの頭部水平変位量を図-6に示す。

図-4において透過率 K_T は、天端水深 d の減少とともに小さくなるのが認められ、 $d = 0\text{ cm}$ の場合には、どのケースにおいても $K_T = 0.3$ 以下という結果が得られた。すなわち、フラップボードによる波高減衰効果は、天端水深が小さくなるほど大きくなるといえる。周期 T の変化による波高減衰効果の違いについては、図-4によれば、 $T = 1.0\text{ sec}$ の場合のほうが 1.5 sec の場合に比べ、波高減衰効果が大きくなっている。しかしながら、今回の実験は、周期ごとに入射波高 H_I が異なっているため、 H_I の変化による影響も考えられる。

また、弾性板の剛性の差による透過率への影響は本実験においては顕著に表れなかった。

反射率 K_R については、図-5に示すとおり $K_R = 0.15$ 以下と非常に小さいものであった。このことより、フラップボードによる波の反射はほとんどないものと考えられる。

また、図-5において、天端水深の変化による反射率の違いはあまり見られず、周期の変化については $T = 1.5\text{ sec}$ の場合の反射率がやや大きい傾向ではあるが、その差は顕著なものではない。

図-6は、最前列の弾性板の頭部変位量を示したものであるが、天端水深 d が小さいほど変位量は大きくなる事が明かである。

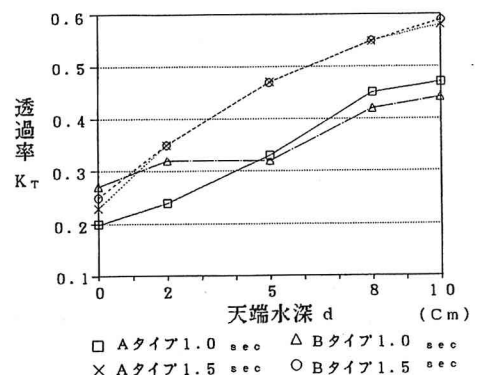


図-4 透過率測定結果

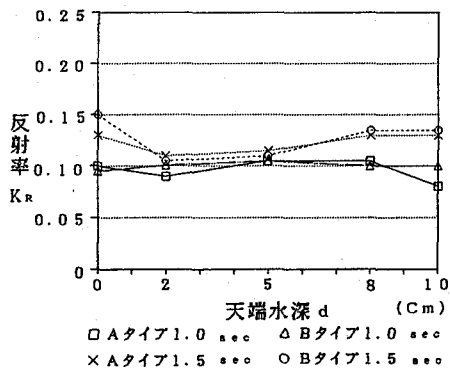


図-5 反射率測定結果

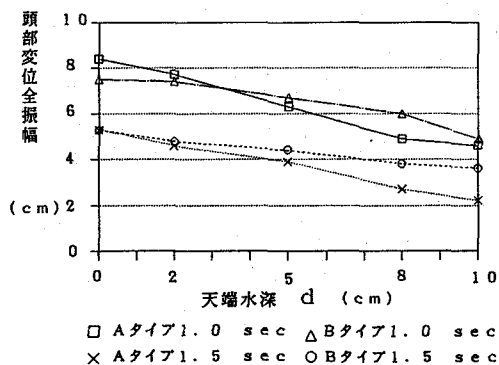


図-6 頭部水平変位置

次に、水中で揺動するタイプ（A、Bタイプ）と揺動しないタイプ（Cタイプ）との比較実験結果を図-7、8に示す。

図-7より、揺動しないタイプの波高減衰効果は、 $T=1.0\text{sec}$ 、 1.5sec の各周期の場合とも揺動するタイプと同様、天端水深の減少とともに次第に大きくなることが認められた。しかしながら、揺動しないタイプの透過率 K_T は、揺動するタイプに比べ $T=1.0\text{sec}$ の場合で $0.13\sim0.22$ 、 $T=1.5\text{sec}$ の場合で $0.09\sim0.14$ 程度高い値となっており、揺動の効果が顕著に認められた。

反射率については、図-8に示すように水中での揺動の影響は顕著なものではなかった。

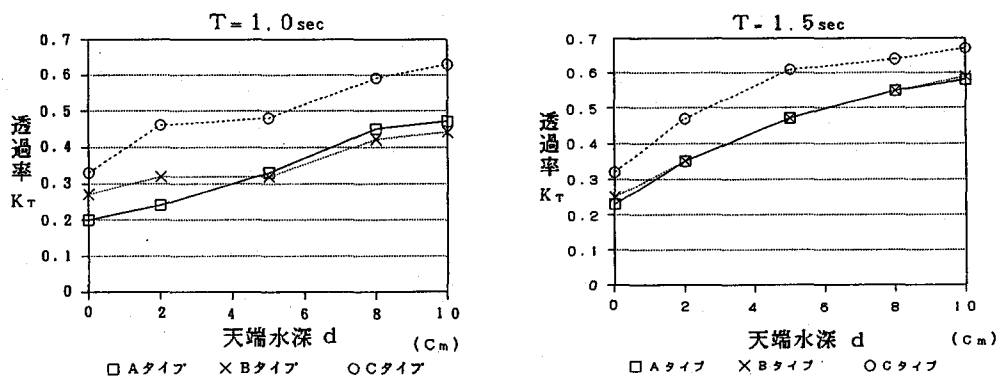


図-7 比較実験結果（透過率）

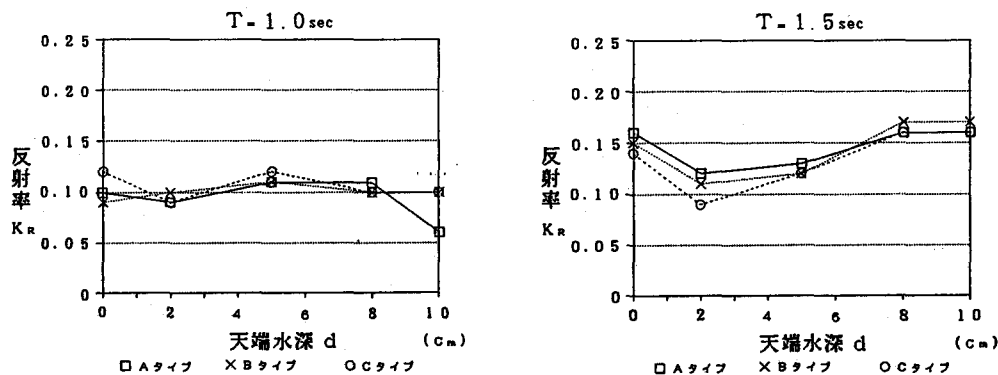


図-8 比較実験結果（反射率）

以上のような実験結果をもとに、フラップボードの波高減衰モデルについての考察を行ってみる事とする。

まず、フラップボード上におけるエネルギー関係を以下のようなつりあい関係式をもとに検討してみる。

$$E_I = E_R + E_T + E_L \quad \text{----- (1)}$$

E_I : 入射波のもつエネルギー E_R : 反射波のもつエネルギー
 E_T : 透過波のもつエネルギー E_L : フラップボードによるエネルギーロス

いまここで、(1) 式におけるエネルギーロス E_L の大きさを波高減衰を引き起こす要因ごとの和とする表現手法を仮定してみる。

$$E_L = E_{L1} + E_{L2} \quad \text{----- (2)}$$

すなわち、フラップボードによる抗力が E_{L1} であり、フラップボードを撓ませ、揺動させるのに費やされたり、弾塑性の性質のボード材のダッシュポッド効果により消散されるエネルギーなどを E_{L2} として、この二つが揺動するフラップボードのエネルギー減衰を構成していると考える。

今回の実験においては、図-7に示すとおり、揺動するタイプ(Aタイプ、Bタイプ)と揺動しないタイプ(Cタイプ)との透過率 K_T には明瞭な差が認められ、(2) 式におけるフラップボードの揺動によるエネルギーロス E_{L2} の存在は確認された。しかしながら、A、BタイプとCタイプとの K_T の差は、天端水深 d の減少にともなう揺動量の増大(図-6参照)にもかかわらず、 $T=1.0\text{sec}$ 、 1.5sec の両ケースの場合ともあまり顕著な増加は認められず、今後、 E_L の大きさについて揺動による E_{L1} の変化あるいは上記以外の他の要因 E_{L3} の存在の可能性など、より詳細な検討を行う必要がある。

3-2 水理特性実験

フラップボード型波浪制御構造物の波高減衰機能を支配する要因として、これまで述べた要因の他に、弾性板の配列幅(実海域においては堤体幅)が考えられる。本実験は、配列幅の変化による波高減衰効果の違いを測定するとともに、弾性板群設置による堤体上部の水位の上昇を確認しようとするものである。

(1) 実験条件及び実験方法

実験水槽、実験縮尺については、前述の波高減衰実験と同様、小型二次元水槽による $1/20$ 縮尺実験とした。この水槽に、Aタイプの実験模型を千鳥状に配置し、 $T=1.0\text{sec}$ 、 1.5sec の規則波を作用させた。天端水深 d については、今回の実験では水深を $20 \sim 28\text{cm}$ に変化させることにより、 $2 \sim 10\text{cm}$ に変化させた。

波高の変化および水位上昇量の測定は図-9に示すように弾性板群の前面、堤体上、堤後の12ヶ所について測定を行った。

なお、この実験において波高の減衰は、入射波高が水深 h の変化にともないケースごとに異なるため、各ケースの堤体前面における波高との比をとることとし、前述の透過率ではなく減衰率 K を定義した。

また、水位上昇は、堤体を設置しないケースとの比較により確認する事とした。

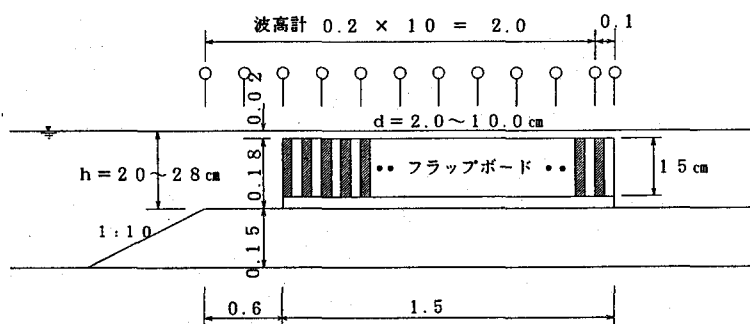


図-9 実験設備

(2) 実験結果

まず、弾性板設置延長方向の波高減衰状況の一例を図-10に示す。これは、弾性板を幅 1.5m に亘って設置した状態で、設置幅に沿った9ヶ所で波高の測定を行ったものである。

図-10は、入射波周期 $T=1.0\text{ sec}$ 、天端水深 $d=2\text{ cm}$ および 10 cm の条件下において、横軸に、図-9に示す波高測定位置（但し、堤体前面部を0とする）を、縦軸には、波高の減衰率をとり片対数で表示したものである。

図-10より、弾性板設置上において波高はほぼ指数的に減衰する事が認められ、実海域での設置にあたっては、必要とする波高減衰効果により、設置延長を増減させる施工が考えられる。

また、各測点における平均水位の測定結果の一例を図-11に示す。図-11において、周期 $T=1.0\text{ sec}$ 、 1.5 sec の両ケースとも、堤体設置による著しい水位の上昇は認められなかった。

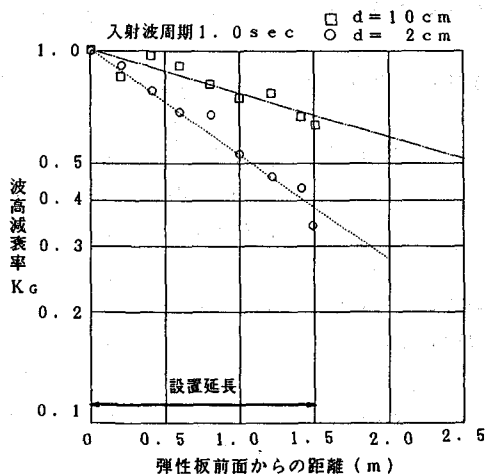


図-10 設置延長と減衰率

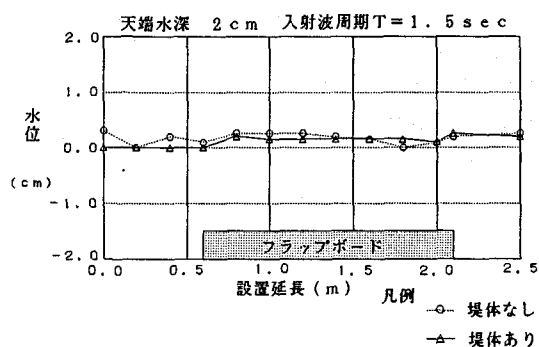
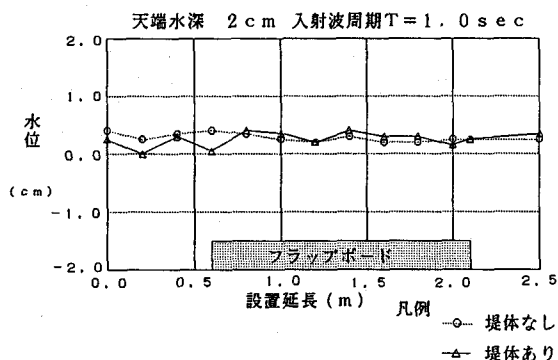


図-11 フラップボードによる水位の上昇

4. まとめ

今回実施した模型実験は、限られた実験条件下での検討ではあったが、フラップボード型波浪制御構造物の基本的効果を明らかにすることができたと考えられる。

実験により得られたフラップボード型波浪制御構造物の水理特性をまとめると以下の通りである。

- ① フラップボードの設置による波エネルギーの減衰は、天端水深が小さくなるほど大きくなる。
- ② フラップボード設置上において、波高は水路方向に指数的に減衰する。
- ③ フラップボードによる波の反射は少ない。
- ④ フラップボード設置による水位上昇量は非常に少ない。

フラップボード工法の波高減衰効果を支配する要因としては、波浪条件、ボードの剛性や配置形状など種々の要因が数多く考えられ、本工法の波高減衰理論を解明するためには、系統的な水理模型実験を実施していく必要がある。今後の系統的な実験により本工法の波高減衰理論の解明を進め、設計手法を構築していきたいと考えている。さらに、実用化を想定した場合には、実海域におけるフラップボードの設置方法、斜め入射波による影響や波浪減衰特性などいくつかの課題も予想される。今後の実験・検討により、こうした課題を解決しフラップボード工法の実用化を図っていきたいと考えている。

5. おわりに

本工法の開発検討に際し貴重な助言・指導をいただいた、九州大学 入江功教授、大阪市立大学 小田一紀教授 港湾技術研究所水工部 高橋重雄耐波研究室長、海洋水理部 永井紀彦海象調査研究室長、さらに、調査方針や実験手法など細かな点までご指導いただいた徳島大学 中野晋講師、同 三島豊秋助手、神戸市立高専 辻本剛三助教授の各氏に対し、深く感謝の意を表する次第である。

＜参考文献＞

- 1) 片岡・岩崎・寺川：養浜工としての人工海藻の開発 海洋開発論文集 Vol 6 [1990]