

# 重力式カーテン防波堤の上・下部工に作用する 波力と移動特性に関する研究

## WAVE FORCES ON A GRAVITY-TYPE CURTAIN-WALLED BREAKWATER AND STABILITY AGAINST WAVES

中村孝幸<sup>1</sup>・中村文彦<sup>2</sup>・川部正司<sup>2</sup>・井上温人<sup>3</sup>・森本 睦<sup>3</sup>

Takayuki NAKAMURA, Fumihiko NAKAMURA, Shouji KAWABE, Nukuto INOUE  
and Mutumi MORIMOTO

<sup>1</sup>正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科(〒790 愛媛県松山市文京町3番)

<sup>2</sup>正会員 兵庫県土木部(〒650 兵庫県神戸市中央区下山手通5-10-1)

<sup>3</sup>正会員 工修 (株)ニュージェツク(〒542 大阪府大阪市中央区島之内1-20-19)

Wave forces on a curtain-walled breakwater of gravity-type were dealt with experimentally and theoretically. Using the two different super structures such as a rectangular body and a thin wall, characteristics of wave forces on these super structures and submerged mound structures were examined extensively. The thin-wall super structure is adopted as a simplified model of a curtain-walled breakwater. Stability test of the breakwater against waves was also carried out. From the comparison between the two results regarding wave forces and breakwater displacements, major factors relating to the stability of the breakwater were clarified.

**Key Words:** Gravity-type breakwater, curtain-walled breakwater, wave force, stability against waves, reflection and transmission

### 1. まえがき

カーテン防波堤は、長周期波に対して十分な静穏化効果が期待できないことから、内海や内湾など外洋波が直接的に作用しない海域を中心にして使用されてきている。しかしながら、内海や内湾に面する港湾でも、大水深となる場合も見られ、このとき杭式の支持構造を利用することは不経済となる場合がある。

既に著者ら<sup>1),2)</sup>は、このような大水深における防波施設として、重力式カーテン防波堤を提案した。この防波堤は、図-1に示すように、下部に捨石マウンド、カーテン壁等の上部工支持のための下部コンクリート構造体、そしてその上部には従来のカーテン防波堤と同様に鋼管杭で支持されたカーテン壁及び上部矩形堤がある。そして、従来の研究<sup>1),2)</sup>では、主にその波浪制御効果を中心にして検討してきた。しかしながら、堤体の滑動や転倒に係る作用波力の特性やその推定法については十分に明らか

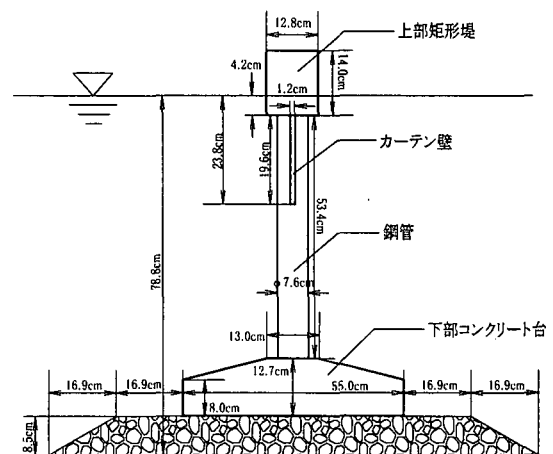


図-1 重力式カーテン防波堤の模型

にされていない。

ここでは、図-1に示すような現地の構造物に即した模型堤体を採用して、上部コンクリート堤体や

下部構造体に作用する波力および全体波力の特性を実験と理論により明らかにする。また、防波堤の耐波安定性を知る目的から、移動実験も行い、作用波力の特性を考慮した移動限界などについて考察する。

## 2. 実験装置及び実験条件

### (1) 堤体の波力実験

実験には愛媛大学環境建設工学科の長さ28m、高さ1.25m、幅1mの二次元造波水槽を用いた。この水槽の一端には、ピストン型の反射波吸収方式の造波装置が設置されており、他端には再反射を防ぐため砕石による1/5勾配の消波工が設けられている。

この実験で用いた堤体および波力計の設置状況を図-2に示す。この実験では、カーテン版など上部工を支持するための鋼管杭については、実験装置が複雑になるため取り除いてある。模型堤体の上部工には、その形状による差異が検討できるように、図-2に示す上部工幅を12.8cmとしたものおよびそれを簡略化してカーテン板のみ(壁厚1.5cm)としたものの計2種類を用いた。前者の上部工の寸法は、現地堤体を参照して決定してある。これらの模型堤体では、カーテン板を含む上部工については上部固定の片持ち梁形式の波力計で支持した。また、捨石マウンド上に設けた下部工については、マウンド内に設けたT字型梁構造の波力計を介して支持した。このとき、上部工、下部工ともに軽量化する目的から木製構造とした。また、下部工用の波力計は、捨石内に矩形状の収納箱を設けてこの中に収納し、捨石等との接触が生じないようにした。

この実験で用いた入射波の条件は、周期 $T$ が1s~2sの範囲の7種類で、波高 $H$ は各周期について6, 12, 24cmの3種類とした(但し造波板の前面付近で砕波するときを除く)。また、堤体の設置水深 $h$

は78.8cmと一定にしており、堤体の吃水 $d$ も23.3cmと一定条件にした。この実験では、上記した波力計による上部工への水平波力、モーメント、下部工の水平波力、鉛直波力の測定に加え、模型防波堤による透過率 $C_t$ 、反射率 $C_r$ についても測定した。

### (2) 堤体の移動実験

この実験では、図-1に示す模型堤体を用いた。前出の波力測定用の模型に比較して、上部工および下部工の両者は、現地堤体の重量の模型化のため鉄筋コンクリート製とした。また、上部工を支持する鋼管杭も設けてあり、その配置数および重量についても正確に模型化した。このとき実験で想定した模型縮尺は約1/24であり、その空中重量は1.12kN(114kgf)である。

模型防波堤は、図-1に示すように粒径5~10mmの砕石を締め固めた砕石マウンド上に設置した。堤体の移動量は、レーザ式変位センサーを用いて測定した。実験では、採用した各周期の規則波を堤体に連続して100波程度作用させ、変位量の時間的な変化や最終的な移動量を測定した。このとき、採用した入射波の条件は、概略的に周期 $T$ が0.87~2.0sの範囲の7種類、作用波高 $H$ は造波限界の30cm程度までとした。この際、堤体の設置水深 $h$ は、波力実験時と同様に78.8cmと一定にし、堤体の吃水 $d$ も23.3cmと一定条件にした。

模型堤体と砕石マウンドの間の静止摩擦係数 $\mu$ は、別途に水中および空中で移動実験を行って測定した。その結果、水中時および空中時共に $\mu=0.59$ であることが確認されている。

## 3. 理論解析法の概要

本研究では、中村・井手<sup>3)</sup>による減衰波理論を用いて、上記したカーテン防波堤まわりの波変形および堤体に作用する波力の算定を行った。この理論は、カーテン壁下端部付近に顕著に見られる渦流れの発生等に起因するエネルギー逸散を近似的に考慮する方法で、渦流れが影響する流体域において流速に比例する減衰力が作用すると仮定している。

この解析モデルを図-3に示す。解析では、2次元物体まわりの波動場を領域Ⅰから領域Ⅲまでの3領域に分割し、逸散が生じる水域の領域Ⅱの中に構造物が固定されている。領域Ⅰおよび領域Ⅲでは、それぞれ入射波と反射波が共存および透過波が存在する領域で非減衰波領域とする。一方、領域Ⅱは隅角部を有する物体まわりのように渦流れ等の流体抵抗による逸散が生じるような減衰波領域とする。この流体領域は、渦流れ等の発生によるエネルギー逸散を近似的に考慮するために設けられている。

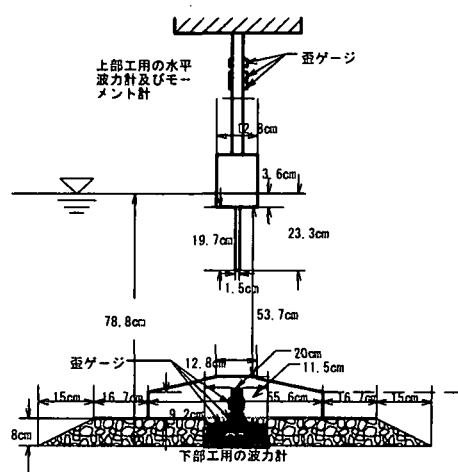


図-2 波力実験における堤体及び波力計の設置状況(鋼管杭なし、矩形上部工の場合)

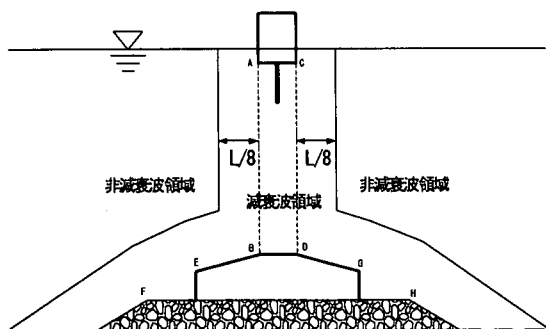


図-3 減衰波領域の設定法

このような解析では、減衰波領域の設定およびその中で使用する線形抵抗係数の値が必要になる。ここでは、減衰波領域として、中村ら<sup>3)</sup>の解析と類似させて図-3に示すように堤体の前後に波長の1/8までの範囲を、鉛直方向には水表面から水底までとした。また、線形抵抗係数 $f_c$ についても、やはり中村らにより採用されている $f_c = 0.15$ が適用できるものとした。

本研究では、後述する作用波力に関する検討において、重力式カーテン防波堤を構成する下部コンクリートマウンドに作用する波力についても算定する必要がある。この際、最下部にある捨石マウンドとコンクリートマウンドとを分離して取り扱う必要がある。以下の解析では、簡単化のため、最下部の捨石マウンドについても、下部コンクリートマウンドと同様に不透水性構造物と仮定した。このとき、最下部の捨石マウンドとその上の下部コンクリートマウンド間の間隔をどのように設定するかが問題になる。ここでは、実験で用いた砕石の粒径が1cm以下であることを考慮して、両構造物の間隔が0.5cmと1.0cmの二種類を採用した事前検討の後に捨石マウンドと下部コンクリートマウンド間の間隔は0.5cmに設定した。

#### 4. 透過率と反射率

図-4、図-5は、入射波高 $H$ を各種に変化させたときの透過率 $C_t$ 、反射率 $C_r$ の実験結果と算定結果に関する比較を示す。図中では、横軸に周期 $T$ の無次元量として吃水・波長比 $d/L$ が採っている。このとき模型堤体の条件は、上部工幅 $B = 12.8 \text{ cm}$ 、支持鋼管杭なしである。これは、算定結果において、やはり断面2次元解析であることから、鋼管杭の影響が考慮できず、算定法の妥当性を最初に検討するためである。

まず図-4の透過率 $C_t$ に着目すると、よく知られているように $d/L$ の小さな長周期側で増大する傾向が認められる。そして、透過率 $C_t$ は、高波高の条件

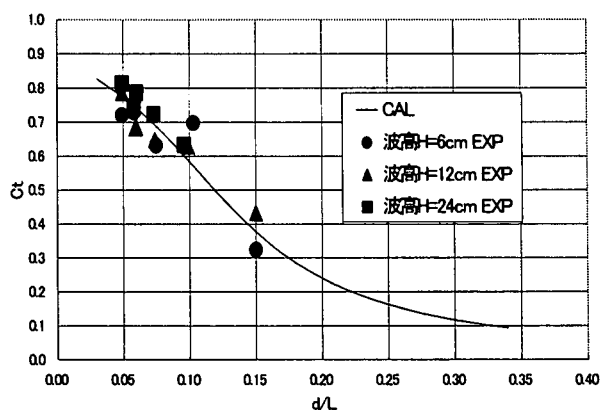


図-4 透過率 $C_t$ の $d/L$ による変化(上部工幅 $b = 12.8 \text{ cm}$ 、鋼管杭なし)

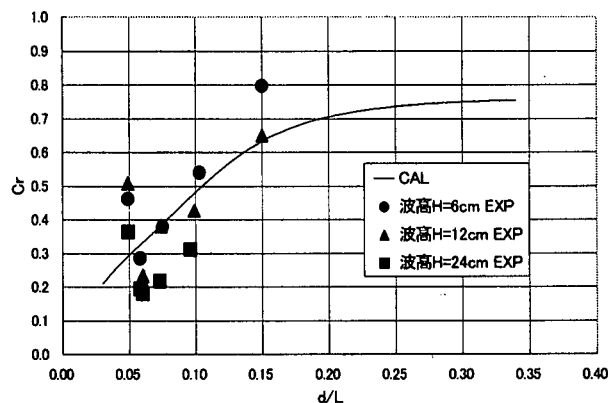


図-5 反射率 $C_r$ の $d/L$ による変化(上部工幅 $b = 12.8 \text{ cm}$ 、鋼管杭なし)

のときに多少大きく、これは波が上部工を越波するようになるためと考えられる。しかしながら、全体的には、入射波高による差異はそれほど顕著ではない。算定結果と実験結果を比較すると、各種の波高条件における平均的な $C_t$ の実験曲線と算定曲線とはほぼ一致している。

次に図-5の反射率 $C_r$ に着目すると、透過率とは逆に $d/L$ の小さな長周期側で減少する。 $C_r$ の実験値には、ばらつきが見られるが、周期条件を固定すると、高波高になるにつれ反射率は減少する傾向が認められる。これは上記したように越波による影響や入射波高に伴う渦流れの増大の影響によるものと推定される。算定結果と実験結果を比較すると、透過率の場合と同様に、両結果はほぼ一致している。

図-6、7は、前出の上部工幅12.8cmとした場合および矩形上部工を取り除きカーテン板のみで近似した場合の透過率 $C_t$ 、反射率 $C_r$ の比較を示す。このとき、支持鋼管杭はやはりなしの条件としてある。これらの図より、 $C_t$ 、 $C_r$ は両堤体形式でそれほど有意な差が見られず、波変形に関しては上部矩形堤を簡単化して、カーテン板のみで近似してもよいことがわかる。ただし、透過率については、 $d/L$ の大きな短周期側で、カーテン板で近似するときに最も低くなるなどの特性も認められる。そして、この

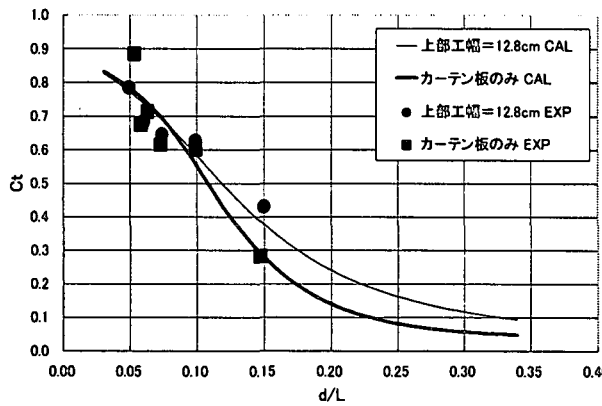


図-6 各上部工のときの透過率 $C_t$  (波高 $H=12.0\text{cm}$ 、鋼管杭なし)

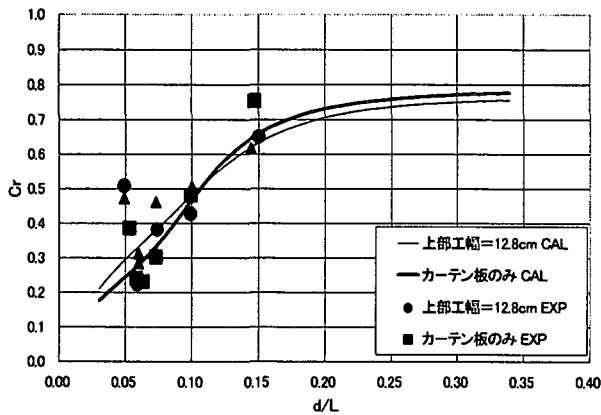


図-7 各上部工のときの反射率 $C_r$  (波高 $H=12.0\text{cm}$ 、鋼管杭なし)

ような傾向は、算定結果でも確認できる。

## 5. 作用波力

### (1) 波力の時間波形

図-8は、移動実験時と構造条件が類似している上部工幅 $B=12.8\text{cm}$ の模型堤体に作用する波力時間波形の代表例を示す。図中には、模型堤体の上部工に作用する水平波力 $F_h$ 、波力モーメント $M_y$ 、下部台形マウンドに作用する水平波力 $F_h$ 、鉛直波力 $F_v$ の4種類の同時測定時間波形がプロットしてある。波力の正負は、水平波力では入射波の進行方向が、また鉛直波力では鉛直上向きがそれぞれ正としてある。

これらの図より上部工、下部工の各部に作用する波力およびモーメントは、波の基本周期の成分が卓越した時間波形になっていることが認められる。また、大波高の条件に相当するこの例では、衝撃波力に遷移する前の双峰性の波形や波峰の鋭い波形も一部見られる。堤体の移動に関係する各部の波力の位相関係に着目すると、水平波力と鉛直波力の間には、理論的に予測されるように約 $180^\circ$  ( $1/2$ 周期)の位相差が認められ、水平波力が正のピーク時に鉛直波力は負のピークを示す。波力の絶対値に着目すると、上部工の水平波力が最大で、ほぼ下部工

のその3倍程度であることや、下部工の鉛直波力は、その水平波力よりも大きいことなどがわかる。また、上部工に作用する波力およびモーメントは、正のピーク値が負のそれより大きいことも確認できる。

### (2) 上部工に作用する水平波力

図-9は、模型堤体の上部工に作用する水平波力 $F_h$ の実験結果と算定結果に関する比較を入射波の波高別に示す。ここで、波力としては、正負波力ピークの平均値が用いてあり、その無次元量 $F_h^*$ は次式による。

$$F_h^* = F_h / (\rho g B d H / 2) \quad (1)$$

ここに、 $\rho$ ：流体密度、 $g$ ：重力加速度、 $B$ ：模型堤体の横幅、 $d$ ：上部工の吃水である。この図より、 $d/L$ の小さな長周期側では、上部工の形状による差異はあまり見られないが、無次元波力が極大となる中周期の付近ではカーテン板のみで近似した堤体で最も波力が大きくなるなどの差異が見られる。そして、このような特性は、算定結果においても認められる。矩形上部工を設けると、水平波力が低下する

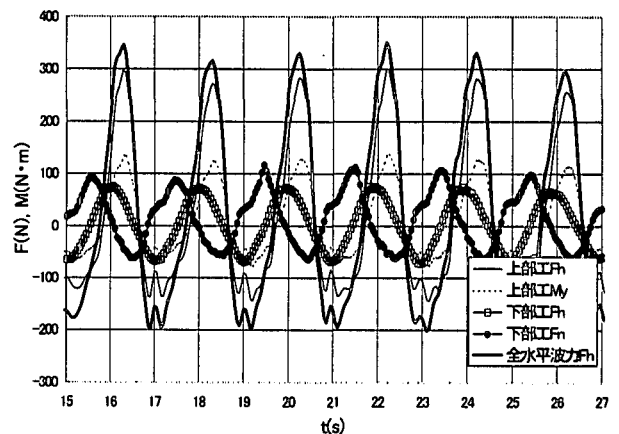


図-8 波力の時間波形  
( $T=1.99\text{s}$ ,  $H=23.6\text{cm}$ , 上部工幅 $=12.8\text{cm}$ 、鋼管杭なし)

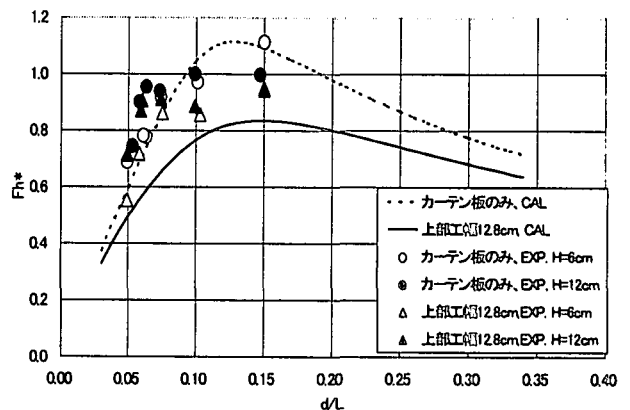


図-9 各上部工に作用する水平波力の正負ピークの平均値

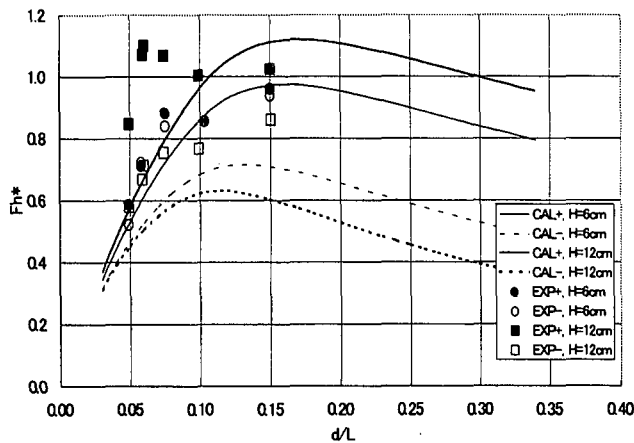


図-10 上部工の水平波力の正負ピーク値  
(上部工幅=12.8cm)

事実や理由は、既に中村らにより報告されている。これは矩形上部工を設けることにより、堤体前面での波圧の位相差が緩和されることや波圧の絶対値が低下することによる。

次に図-10は、矩形上部工に作用する水平波力の正負のピーク値を区別して再プロットした結果を示す。図中には比較のため、波圧積分領域を変動水表面までに拡張した算定結果についても併せ示した。図中で、 $F^+$ と $F^-$ はそれぞれ正負の波力ピーク値の無次元量に相当する。この図より、低波高の条件では、正負の波力ピーク値に有意な差は見られないが、高波高になるとその差は拡大することなどが認められる。この傾向は、特に $d/L$ の小さな長周期の条件で顕著である。このように高波高になると、特に正側の波力ピーク値が増大する理由としては、堤体前面に作用する衝撃性の波力の影響などが考えられるが定かでない。

### (3) 下部工に作用する波力

図-11、12は、矩形上部工のときに台形状の下部工に作用する水平波力 $F_h$ および鉛直波力 $F_n$ の実験結果と算定結果に関する比較を作用波高別に示す。図中では、正負の波力ピーク値を区別して表示してある。なお、無次元化はやはり式(1)による。

これらの図より、下部工に作用する水平波力は、その正負のピーク値( $F_{h+}$ ,  $F_{h-}$ )でほとんど差のないことがわかる。これは、下部工が水底近傍にあり、上部工のように衝撃性の波力の影響や没水面の時間的な変化などの影響を受けにくいと考えられる。

一方、下部工に作用する鉛直波力は、上部工の水平波力に類似して、作用波高による影響を受けやすいことや正負ピーク波力で差が見られることなどが指摘できる。このような傾向は、長周期側で顕著に現れるようである。また、上記した下部工の水平波力に比較すると、 $d/L$ の大きな短周期側でも鉛直波

力は比較的大きいことがわかる。このような周期特性は、算定結果においても認められ、下部工に作用する鉛直波力は、上部工前後における波高変動、すなわち波の反射・透過現象を強く受けることによると考えられる。

以上の検討より、下部工に作用する水平波力と鉛直波力は、周期による変化特性が異なることや、その絶対値は上部工に作用する水平波力の1/3程度の大きさになることなどが判明した。

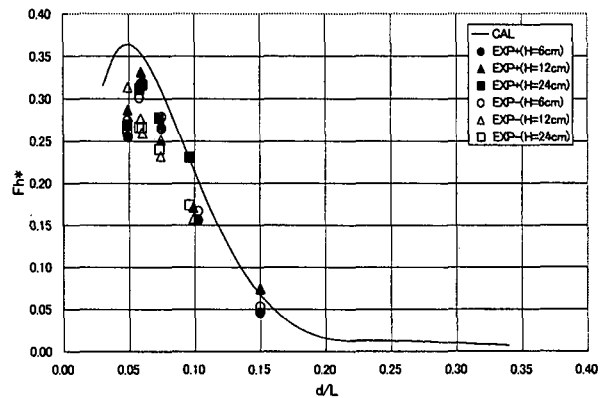


図-11 下部工の水平波力(上部工幅=12.8cm)

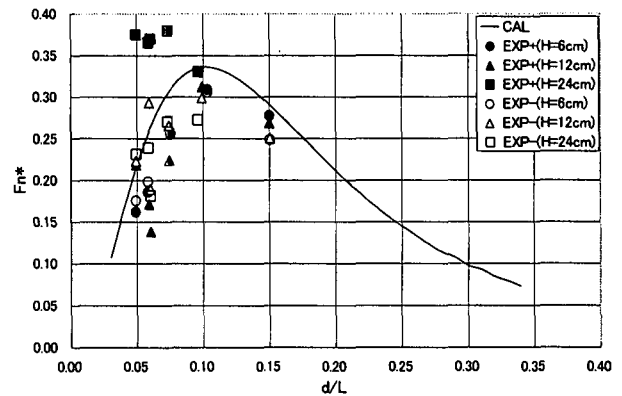


図-12 下部工の鉛直波力(上部工幅=12.8cm)

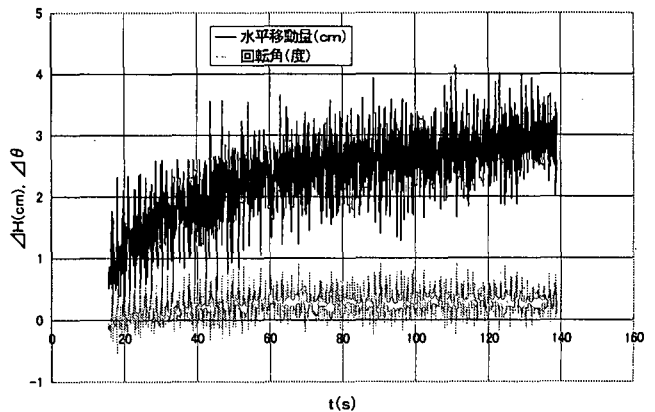


図-13 堤体の水平移動量と回転量の時系列変化  
( $T=1.50$ sec,  $H=28.8$ cm,  $X_f=3.72$ cm)

6. 移動特性

図-13は、周期 $T=1.50s$ 、波高 $H=28.8cm$ 、最終移動距離 $X_f=3.72\text{ cm}$ の条件のときについて、模型堤体の水平移動量と回転移動量の時間変化を示す。この図より水平移動は、波向きに前後揺しながらも、岸側に順次移動する様子が認められる。これは、作用波高が比較的大きいとき、上部工の水平波力は、 $d/L$ の小さな長周期側で波進行方向へ作用する正のピーク波力が負のそれを上回る大きさになるためと考えられる。すなわち、正のピーク波力が作用する時には移動限界を超えて移動を始め、負のピーク波力が作用する時には移動限界を下回り、移動は停止するなどである。

図-14は、入射波高による堤体の最終移動距離 $X_f$ の変化を示す。図中では、周期をパラメータにして矩形上部工の側面幅 $b$ で無次元化した $X_f/b$ と $H/b$ の関係で表してある。この図から長周期になるほど $H/b$ が低い値（低波高）で、堤体の移動が見られるようになることが分かる。そして、この原因としては、①上部工の水平波力の正のピークは、長周期でも中周期の時と同程度の大きさを持つ、②下部工の水平波力は、長周期の条件で極大となる、③上部工の支持鋼管杭に作用する波力は、長周期波で透過波が増大することから、やはり長周期の条件で増大すると推測される。そしてこれら①～③の加算的效果により、堤体の移動は長周期側でより低波高の条件で生じ易くなると考えられる。

7. 結語

- (1) 重力式カーテン防波堤の上部工に作用する水平波力は、作用波高を増大させると、正負のピーク値で絶対値が異なるようになり、波向き方向に作用する正波力ピークがより大きくなる。この傾向は、長周期波になると顕著になる。
- (2) 上部工を支持するための台形下部工に作用する水平・鉛直波力では、極大となる波周期が異なり、

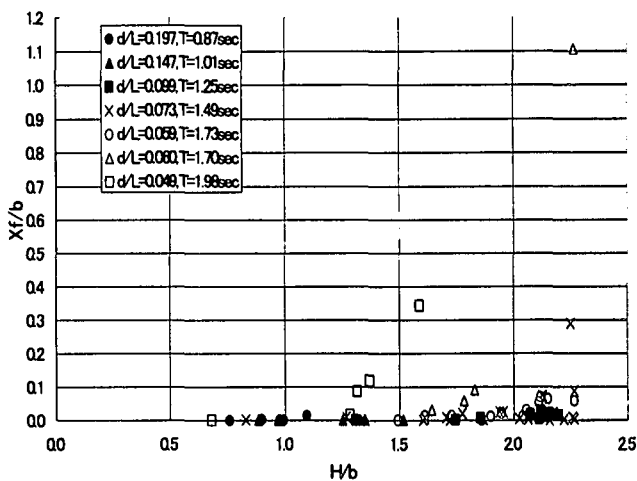


図-14 堤体の最終移動量

水平波力は鉛直波力よりも長周期側で極大となる。そして、これらの周期特性および波力の絶対値は、理論的にほぼ推定できる。

(3) 本実験で想定した重力式カーテン防波堤では、水平滑動のみが見られ、転倒は生じにくい。そして、堤体の滑動は、本実験の範囲内では長周期の条件になるほど低波高で生じやすく、これは、上部工に作用する水平波力の正ピーク値および下部工に作用する水平波力や支持鋼管杭に作用する水平波力が長周期側で増大することによると判断される。

参考文献

- 1)中村孝幸・中村文彦・川部正司・井上温人・森本暁・後藤大介:重力式カーテン防波堤による波変形と作用波力におよぼす上・下部工の影響について、海岸工学論文集 第45巻, pp781～785, 1998.
- 2)中村孝幸・中村文彦・川部正司・井上温人・森本暁:不規則波に対する重力式カーテン防波堤の波浪制御効果について、海洋開発論文集、第15巻, pp7～12、1999.
- 3)中村孝幸・井手善彦:波の逸散現象を利用した隅角物体まわりの波変形と作用波力の算定法、海洋開発論文集、第13巻, pp177～182, 1997.