

II-4 振り子式波浪エネルギー吸収装置の水室設計要因

室蘭工業大学 学生員 玉手 聡
室蘭工業大学 正会員 近藤 一郎

I. はじめに

振り子式波浪エネルギー吸収装置(図-1)は、入射波を直接振り子板に作用させて、背後に設けられた水室内に発生する定常波を利用して振り子板を振らせる方式のもので、振り子板の動揺による水流の乱れが少くないことを特性としており、その性能は過去に於て行われてきた研究結果からも実証されている。従来の振り子式装置に関する研究の多くは入射波に対する振り子板の運動特性とその効率について行われてきたが、それらに伴う水室内の波動についてはあまり解明されてこなかった。

そこで昨年より水室内に波高計を設置し水室内に於ける波の挙動を調べることにした。昨年は基礎的研究として振り子板を電動モータにより強制的に任意な条件で振らせて水室内における波の挙動に付いて調べたが、今年は入射波を直接振り子板に作用させる状態で水室内の波動を調べることにした。それらと共に本装置の持つ固有な形状に伴う様々なエネルギー損失についても実験と理論の両面から検証してみることにした。

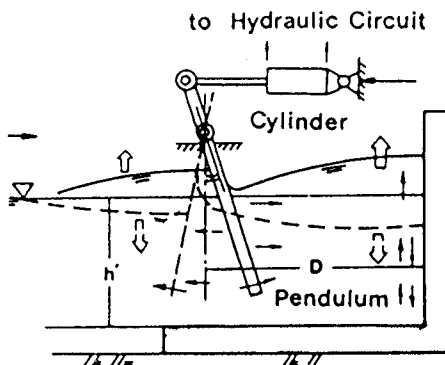


図-1 振り子式装置の断面略図

II. 実験と結果

II. 1. 水室内波形記録実験

II. 1. 1. 実験

本学内の河海工学実験室にある二次元造波水路(0.6×1.0×24m)上に図-2に示したような装置を設置した。この装置は、沖からの入射波を装置内の振り子板に作用させて振り子板を振らせる装置のもので、振り子板は装置上をスライドして移動して任意の水室幅に設定することが出来る。この水室内に波高計を水室幅 B に

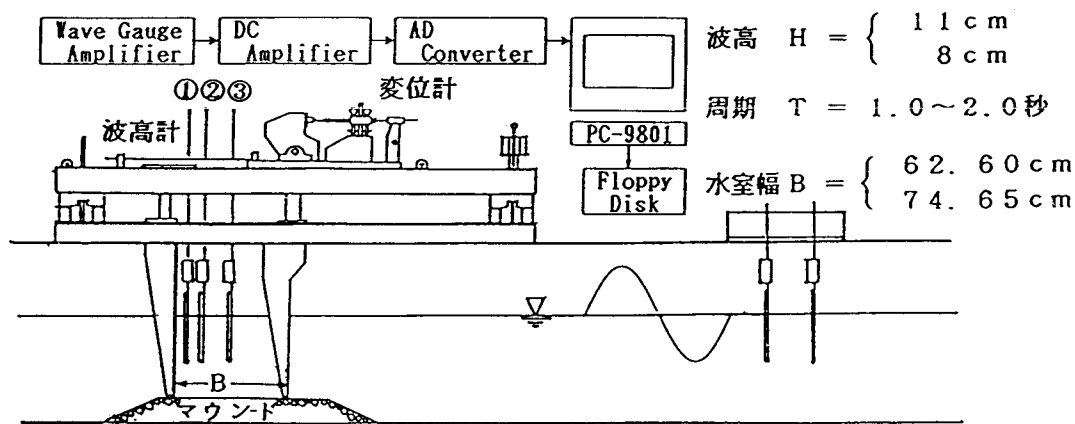


図-2 振り子式実験装置と実験記録方法

DESIGN FACTOR OF CAMBER SIZE OF PENDULAR POWER EXTRACTOR
BY SATOSHI TAMATE AND HIDEO KONDO

対して後壁から $B/8, B/4, B/2$ の位置に3本設置すると同時に振り子板に変位計を設置して振り子板の運動も記録した。実験にあたっては水室幅を周期 T を1.4と1.6秒に対する4分の1波長に対応する $B=62.6\text{cm}$ と 74.65cm に設定し沖からの入射波波高は11cmと8cmとし周期は1.0～2.0秒までを0.05秒間隔で行うこととした。波高計からのデータはAD変換機をかいしてコンピュータに送り磁気ディスクに保存した。

(データ解析と結果)

水室内波形データは、フーリエ変換を行いパワースペクトルとして整理することとした。サンプリング個数 $N=1024$ 個, サンプリング周期 $\Delta T=0.01$ 秒としてサンプリング継続時間 $N \cdot \Delta T=10.24$ 秒となり分解能 $\Delta f=0.098\text{Hz}$ とした。得られたパワースペクトルと周波数の関係から基本周波数に対応するパワースペクトルの値を読み取って表したものが図-3である。

この2つのスペクトルの様子から、スペクトルの出現傾向は、水室幅の波長に対する比である B/L に良く従っている。POINT 3のスペクトルは、振り子の振れ角の程度を表すスペクトルの傾向に従って推移している。 B/L が0.5となる付近では振り子がほとんど振れていないために、振り子板の変位スペクトルが小さくなっている。この状態では、水室内の縦断波形がちょうど $L/2$ となり振り子板前後の波の位相が一致する為と考えられ、振り子板に作用する波力の合力は、小さくなると思われる。そのため $B/2$ の位置では波の節となるために、そこに取り付けられているPOINT 2の波高計の示すスペクトルはかなり小さくなっている。

また B/L が0.2程度と小さくなるときでは、水室幅が波長に対して小さいために水室内で十分に定常波を形成できないために水面の上下振動程度の状態となっているためにPOINT 1～3の示すスペクトルの値は他の極値に比べて近い値になっているようである。

B/L が0.25の近辺では大きさの違う2つの水室幅の状態でもほぼ似たような傾向を示して推移している。これは水室内の波形が $L/4$ となる前後では B/L の大きさの違いによる波の挙動が生じ易いためと、水室内に於いて4分の1波長の定常波が形成される時は振り子板の近傍に於いて水粒子速度が最大となり、それにもなつて隙間による損失も大きくなるために振り子板の運動特性に大きな影響を与えられ、またそのためにスペクトルの出現傾向も変動しているように考えられる。そのために振り子板の表すスペクトルは、 B/L が0.25付近で必ずしも最大には成らず理想的な加振状態を完全には形成できていないことを示している。一方、 B/L が0.2程度では、水室内で十分な定常波が形成されない反面、水面の上下動のような動きになることによって、バネのような復元力をもたらすために振り子板が大きく変位したのではないかと思われる。

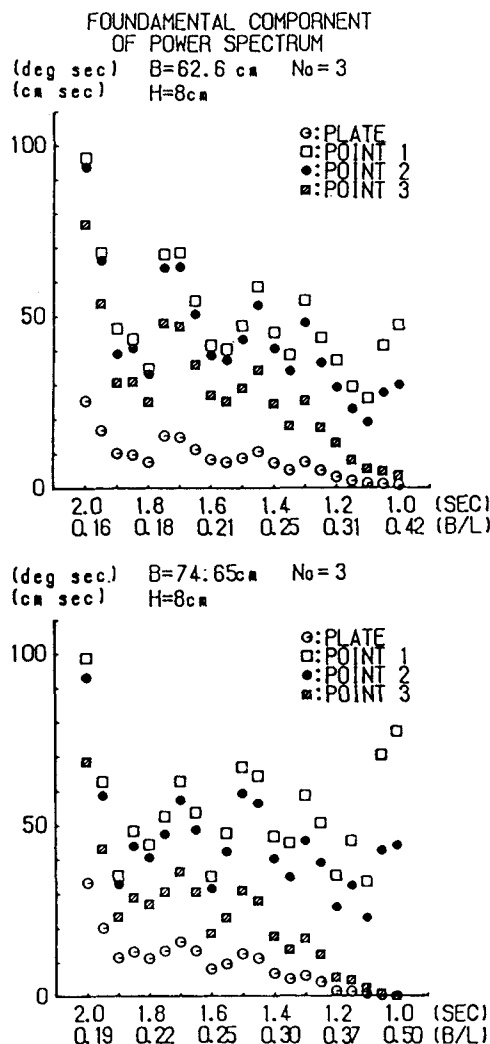


図-3 水室内波形と振り子板の基本周波数スペクトル

II. 2. エネルギー損失測定実験

II. 2. 1. 振り子板の抵抗損失実験

実験

本学実験室内にある可傾斜型開水路(0.6×0.5×17.5m)上に振り子板の形状のものに側面と底面との隙間を考慮したアクリル板を加工したものを設置した。流量は、三角堰に於ける越流水深より沼地、黒川、淵沢の式を用いて算定し約0.002m³/秒～0.01m³/秒の間で変化させて定常流を与え、マノメータにより水頭損失を測定し49のデータを得た。

結果

抵抗損失係数 Cl は、以下のように定義した。

$$Cl = \frac{2g\Delta h}{v^2}$$

ここに g = 重力加速度 v = 流速 ($=Q/A$, Q : 流量, A = 流路断面積) Re = レイノルズ数 (vd/ν , d : 代表径, ν : 動粘性係数)

図-4は抵抗損失係数とレイノルズ数の関係を示した実験値のものと実験データに対して最小自乗法を施して、図中のような2つの式をえた。実線の式は、全測定点に対して式にあてはめたもので、波線の式は、層流域と思われる10点に付いて式に当てはめたものである。グラフの様子から $Re > 2000$ で抵抗損失抵抗の変化が小さくなっているので乱流状態を呈していると思われる。

II. 2. 2. マウンド部と水室内に置く

エネルギー損失測定実験

実験

水室内の波形記録実験と同様に、波高を11cmと8cm、水室幅を62.6cmと74.65cmとして周期を1.0秒～2.0秒までを0.1秒間隔で測定した。実験にあつては、様々な損失を考慮するために図-5に示すような3つのタイプに付いて行った。Type Aは装置内の振り子板を外した状態で、Type Bは振り子板を固定して側面と、底面からの水の漏れを無い様に施した。Type Cは装置を据え付けている砂利によるマウンドの傾斜部の前面に水路を遮断できるようなプレート据え付けて固定したものである。

このような3つの状況で、入射波高を一定にすることにより反射エネルギーの差が各部のエネルギー損失を求めることが出来、それらを求める式は次のように表すことが出来る。

(入射波のエネルギー工率)

$$Wi = Cg \quad E = Cg \frac{1}{8} \rho g H^2$$

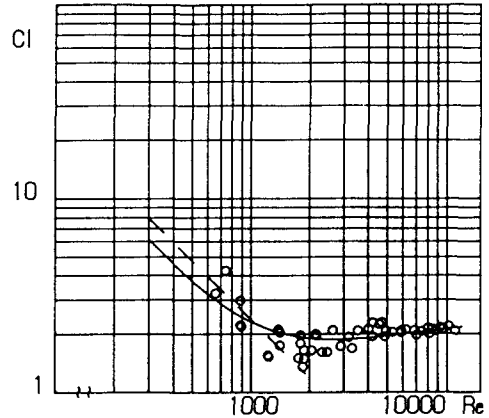


図-4 抵抗損失係数とレイノルズ数との関係

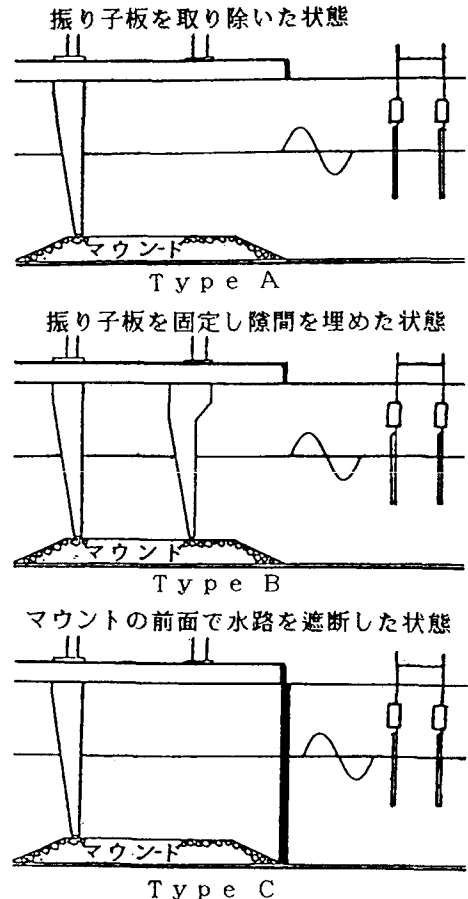


図-5 エネルギー損失実験概要図

(マウンド部での損失エネルギー率)

$$\Delta W_{\text{mound}} = \frac{W_{rc} - W_{rB}}{W_i} \times 100 (\%)$$

(水室内での損失エネルギー率)

$$\Delta W_{\text{chamber}} = \frac{W_{rB} - W_{rA}}{W_i} \times 100 (\%)$$

Type Dでは、振り子板を固定した状態で側面と底面からの水の流入を許す状態で同様の条件で水室内に伝達するエネルギーを測定した。それを示す式は、次のように表される。

(水室内部への伝達エネルギー率)

$$W_{\text{transmitted}} = \frac{W_{c,D}}{W_i} \times 100 (\%)$$

(結 果)

・マウンド部に於けるエネルギー損失について

マウンドに於けるエネルギー損失は、短周期に対して大きな損失を示しており、周期が大きくなるに従って損失が減少する傾向を示している。これは振り子板で反射する波がマウンド傾斜部上で波の節と成る時に節の位置で水平水粒子速度が最大となことと同時にするために砂利で形成されたマウンド部に水が流入入るために、その透水時に起こる損失などが影響していると考えられる。

・水室内部に於けるエネルギー損失について

水室内部に於けるエネルギー損失は、全体の周期にわたって10～20%程度の損失で推移しており、それらの間には微少なピークがいくつか見られるが、それは周期に対する2,3倍周波数の振動波成分による損失が現れているためと考えられる。また水室幅が大きいほど損失は微小ではあるが大きくなることも確認された。

・水室内部に伝達されるエネルギーについて

水室内部に伝達されるエネルギーは、長周期になるほど増加する傾向を示しており、この傾向はスリット壁を有する消波構造物の特性に類似している。

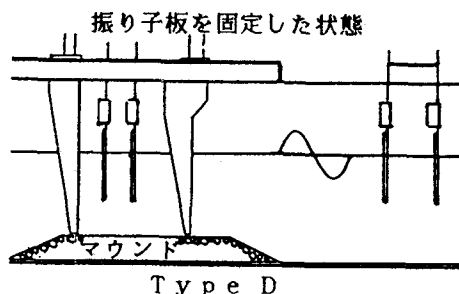


図-5 エネルギー損失実験概要図

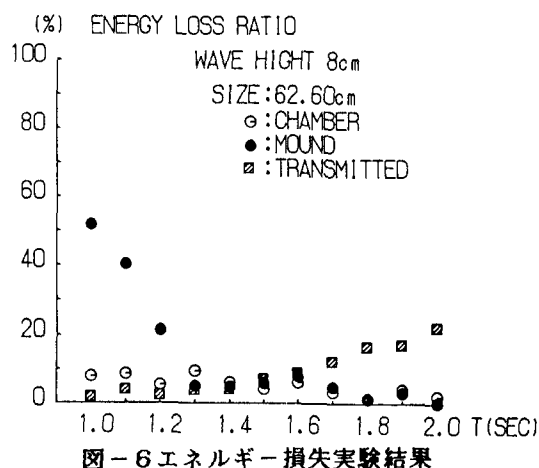


図-6 エネルギー損失実験結果

Ⅲ. 振り子板と側面からの漏れによるエネルギー損失率の計算

ここでは、Meiらが示した方法によって考えてみることにした。Meiらが示した方法は、非定常運動状態の水中の流路に於てある瞬間に通過するスリット部分で噴流となり急拡するが水の粘性と周囲の水のために元の流線に復帰することによって、抵抗損失係数 C_l と見かけのオリフィス長 L_a を用いてエネルギー損失を表している。一般的にMeiによって紹介されている式は次のようになっている。

$$\Delta h = \frac{C_l}{2g} u |u| + \frac{L_a}{g} \frac{\partial u}{\partial t}$$

ここで、 u =通過流速 C_l =抵抗損失係数 L_a =見かけのオリフィス長

上式を使用してエネルギー損失効率を求めるために本システムに於ける波の変形をポテンシャル理論によって求めることにした。一般的に速度ポテンシャル式は、次のように与えられる。

$$\phi = A \frac{\cosh k_0(y+h)}{\cosh k_0 h} e^{i(k_0 x + \omega t)} + B \frac{\cosh k_0(y+h)}{\cosh k_0 h} e^{-i(k_0 x - \omega t)} \\ + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \frac{\cos k_n(y+h)}{\cos k_n h} e^{(k_0 x + i \omega t)} + \sum_{n=1}^{\infty} D_n \frac{\cos k_n(y+h)}{\cos k_n h} e^{-k_0 x + i \omega t}$$

上式の第1項と第3項は、 x の負の方向に進む波の成分であるので、削除して次の境界条件を満足させる

(1) 水底($y=-h$)の境界条件

$$\left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{y=-h} = 0$$

(2) 水面($y=0$)の境界条件

$$\left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \right)_{y=0} + g \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{y=0} = 0$$

(3) 造波機($x=0$)の位置での条件

$$\left(\frac{\partial x}{\partial t} \right)_{x=0} = \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{x=0}$$

上記の条件を代入すると以下のように求められる。

$$\phi = - \frac{2 a \omega}{X_0 k_0} \sinh k_0 h \cdot \cosh k_0 h (y+h) e^{i(k_0 x - \omega t)} \\ - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 i a \omega}{k_n X_n} \sin k_n h \cdot \cos k_n (y+h) e^{-k_0 x + i \omega t}$$

ここで造波機から振り子板までの距離 x は、約14mなので第2項は無視できるので以下のように改められる。

$$e^{-k_0 x} = 2.97 \times 10^{-10} \approx 0$$

$$\phi \approx - \frac{2 a \omega}{X_0 k_0} \sinh k_0 h \cdot \cosh k_0 (y+h) e^{i(k_0 x - \omega t)}$$

ここで a :造波板の振幅 R :振り子板の振幅角度

上記のポテンシャルから振り子板の位置の水平水粒子速度は、以下になる。

$$u = \frac{2 a \omega}{X_0} \cdot \sinh k_0 h \cdot \cosh k_0 (y+h) \cdot \sin(k_0 x - \omega t)$$

また運動する振り子板の任意の位置に於ける水平速度は以下になる。

$$v = \frac{\pi R \omega}{180} \cdot (l-y) \cdot \sin(k_0 x - \omega t)$$

振り子板と側面の間を通過することによる損失は、これらの差をとった相対水粒子速度で推定できることとする。これらをMeiによって表された式に代入して振り子板と側面の間を通過する時に起こるエネルギー損失率は次式のようになる。

$$\Delta W = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-h}^0 \rho g \left\{ \frac{C_l}{2g} (u-v) |u-v| + \frac{\mathcal{L}_a}{g} \frac{\partial}{\partial t} (u-v) \right\} (u-v) dy dt$$

(結 果)

上式を用いて計算した結果を示したものが図-6である。この結果は抵抗損失係数 C_l に、実験により求めた値から式に直したものを、見かけのオリフィス長 L_a に音響学により紹介されている式を用い、また振り子板の変位記録を用いて隙間を通過する相対水粒子速度を算定したものである。大ききの違う2つの水室幅について類似した傾向で変動していることが解り、両者とも周期的な変動を繰り返して推移してゐる。短周期で

は先に図-3で示した振り子板の変位のパワースペクトルの傾向からも振り子板が余り振れないために相対水粒子速度が大きくなるために損失が大きくなっているように思われる。また、長周期では振り子板の変位が大きくなるために相対水粒子速度が小さくなるために損失が小さくなっているように考えられる。

これは振り子板の実際の変位記録をもちいた算定を行ったため、実際に損失が大きくなる状況や水室内の波形が乱れる時は振り子板が振れず全体的に釣り合った状況となり、相対水粒子速度の算定が現状での全体に釣り合った状態の損失結果を推定することになったと思われる。これは実際の状況を考える場合についても水室内に於ける波の応答や隙間部分での損失量からある状態で釣り合ってしまうことは同様に考えられると思われる。

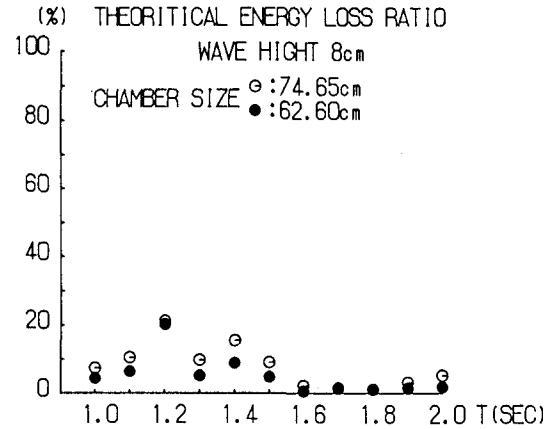


図-7 振り子板と側面の隙間によるエネルギー損失計算結果

IV. 結 論

・入射波を振り子板に作用させた時の水室内波形と振り子板の運動について

B/Lの値が0.5程度と大きくなる時には、振り子板はほとんど振れず水室内にはL/2が形成されている。一方0.2程度と小さいときは、水室内で十分な定常波が形成されず水面の上下動となっている反面復元力と働くと考えられるために振り子板はよく振れた。B/Lが0.2~0.5の間で推移する間では高周波成分の出現が多いと考えられるために振り子板は余り振れなかった。

・本装置に於て起こるエネルギー損失について

本装置に於て考えられる損失としては大きく、マウントに於けるものと水室内の形状によるものが考えられる。マウントに於ける損失は波の節の位置がマウント傾斜部にくる短周期時に大きくなることが認められた。水室内に於ける損失は、水室の形状による横断方向などに高周波成分の出現することなどによる微少なピークが見られるが約10~20(%)程度となることがわかった。

終わりに今年度の本研究実験に際して本学第2部機械工学科の渡部富治教授と本学機械工学科大学院2年井下尚紀君の御助言と、本学土木工学科4年城野公久君の惜しみない協力に深く感謝致します。

【参考文献】

- (1) 近藤・谷野・渡部・奥田・土手：室蘭工業大学に於ける波浪エネルギー利用研究(1976~1986)の総括，室蘭工大，1987。
- (2) 近藤・竹田：『消波構造物』，森北出版，1983。
- (3) 合田・鈴木・岸良・菊地：不規則波実験に於ける入・反射分離推定法，港湾技研資料，248，1976
- (4) 浅野：岸壁部に設けられた振り子式エネルギー回収装置の効率について，日本造船学会水槽委員会 第2部会 1980。
- (5) 今井 功：『流体力学（前編）』，裳華房，1973。
- (6) Mei, C.C., P.L.F. Liu and A.T. Ippen: Quadratic loss and scattering long wave, Prof. of ASCE, Vol. 100, WW3, pp. 217~239, 1974
- (7) 近藤・玉手：振り子式波浪エネルギー吸収装置の水室内波形，土木学会第44回年次学術講演概要集／Ⅱ 1989)