

サーペント型造波装置の有効造波領域の 拡張法に関する実験的検討

平 石 哲 也*

1. ま え が き

海の波の多方向性を水槽内に再現し、模型実験の精度を高める装置として、我が国および世界の多くの水理研究所でサーペント型造波装置の設置が進められている。多方向不規則波は、周期、振幅、波向の異なる斜め波を多数重ね合わせることによって造波できる。したがって、所定の波高と波向を持つ斜め波が造波できる範囲によって、多方向不規則波の造波可能領域が定まる。多方向不規則波の造波における問題点の一つは、造波機の総延長が有限であるため、所定の斜め波が造波できる範囲が限定され、目標とする多方向性を有する波が造波できる範囲は水槽内の一部の領域に限られることである。(高山ら, 1989) 一様な斜め波が造波できる範囲を拡大し、水槽内の有効造波範囲を拡張する手法として、造波機の両端に造波板面と直角に反射壁を設け、反射波を利用して反射壁面まで斜め波の一樣波高場を拡張する方法が提案されている。(Funke, Miles, 1990) この手法では、反射壁の裏側にも造波機が続いていると仮定した鏡像部を考える。反射壁からの反射波が、鏡像部で造波されるものとした波の方向と位相に一致すれば有効造波領域が拡大できる。具体的には、実部の造波装置に鏡像部の造波板の変位を重ね合わせた変位を与える。

多方向不規則波の造波におけるもう一つの問題は、斜め波の波高が場所的に目標値よりずれるために、発生できる多方向波の方向分布特性は、水槽内で場所的に変化することである。(Takayama, Hiraishi, 1989) そこで、本研究では、数値計算と実際にサーペント型造波機を用いた実験によって、反射壁を利用して造波された斜め波の波高分布特性を検討し、反射壁を利用する造波方法の有効性と問題点を明らかにすることを目的とした。

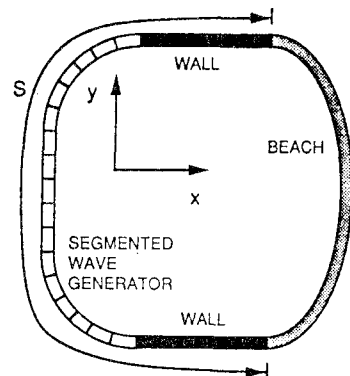
水槽内の斜め波の波高分布を推定する手法としては、1枚の造波板の周期的な運動によって起こされる回折波を線形重ね合わせることによって求める手法がある。(Takayama, 1987) この手法では厳密に理論的な解を求めることができるけれども、側壁からの反射波を鏡像法

を使って計算するので、側壁の法線が直線でない場合などは計算が困難になる。Isaacson(1989)は、造波板および反射壁を境界とした境界要素法を用いて水槽内の波高分布を求める計算法を提案している。この手法を用いると、反射板および造波機が円弧状に配置された場合でも解を求めることができるので、三側壁に造波機を設置した多方向波造波水槽(Murray, 1990)などでは非常に有用な計算法と言える。本研究ではIsaacsonモデルを用いて水槽内の波高分布を求めることにした。この計算法では、境界上に配置する要素数を適切に定める必要がある。本研究では前述の理論解と比較して所要の要素数を求めた。そして、水槽実験によってモデルの妥当性を調べた。次に、実験結果を検討して、側壁を利用した造波方法の問題点を検討した。最後に、上記の検討で見つかった問題点の解決法を提案した。

2. 数値計算モデルの概要と必要要素数

図一1に本モデルにおける座標系を示す。 x および y は互いに直交する水平座標で、静水面を0として z 軸を鉛直上方に取る。水が非粘性、非回転および非圧縮性を持つと仮定すると流体の速度ポテンシャル ϕ は次式のラプラス方程式を満たす。

$$\nabla^2 \phi = 0 \dots \dots \dots (1)$$



図一1 モデルの座標系 (Isaacson, 1989)

* 正会員 工修 運輸省港湾技術研究所水工部主任研究官

微小振幅波理論を用いると水底および水面における境界条件は次式で表される。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad ; \quad z = -d \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad ; \quad z = 0 \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$\eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right)_{z=0} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 η 、 d および g は水面変位、水深および重力加速度である。式(2)、(3)、(4)の境界条件を満たす ϕ は定常減衰項を無視すると水平座標ベクトル $\mathbf{x}(x, y)$ を用いて次のように表される。

$$\phi(\mathbf{x}, z, t) = \phi(\mathbf{x}) \frac{\cosh(k(z+d))}{\cosh(kd)} \times \exp(-i\omega t) \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで ϕ 、 d および ω はそれぞれ2次元ポテンシャル関数、水深および波の角周波数である。波数 k は次の分散関係式を満たす。

$$kd \tanh(kd) = \omega^2 d / g \quad \dots \dots \dots (6)$$

$\phi(\mathbf{x})$ はそれ自身、Helmholtz 型の方程式にしたがい、消波ビーチではラディエーション条件を満たすので、グリーン関数 $G(\mathbf{x}; \xi)$ を用いて次式のように表される。

$$\phi(\mathbf{x}) = \frac{1}{4\pi} \int_S s(\xi) G(\mathbf{x}; \xi) dS \quad \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 S は境界面を表し、 $s(\xi)$ は点源の強さを表す関数である。グリーン関数 $G(\mathbf{x}; \xi)$ は次のように表される。

$$G(\mathbf{x}; \xi) = i\pi H_0^{(1)}(kr) \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 $H_0^{(1)}(x)$ は第1種0次のハンケル関数で、 r は境界上の点 ξ と水槽内の任意点 $\mathbf{x}$ の距離である。また速度ポテンシャル ϕ は造波板および反射壁上の境界で以下の境界条件を満たす

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad \text{on } S_g (\text{造波板境界}) \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = 0 \quad \text{on } S_w (\text{反射板境界}) \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここで ζ は造波板の水平変位を表し、ピストン型造波機を直線配置した場合には ‘snake principle’ (Biesel, 1954) によって次式で計算できる。

$$\zeta = ib_0 \exp(ik'y) \exp(-it\omega) \quad \dots \dots \dots (11)$$

ここで、 θ を造波板の放線方向を 0° とし反時計回りを正として定義した波向とすると、 $b_0 = a \cos \theta / F(kd)$ 、 $k' = k \sin \theta$ で表される。 $F(kd)$ および a は造波効率および目標波振幅である。式(7)を式(8)、(9)の境界条件に代入すると要素数と同じ数の連立方程式が成立し、それらを解けば $s(\xi)$ が求まり、ポテンシャル $\phi(\mathbf{x})$ が計算できる。水槽内の水位は次式で計算できる。

$$\eta(t=0) = -\frac{g}{\omega} \text{Im}(\phi) \quad \dots \dots \dots (12)$$

ここに、 $\text{Im}(x)$ は、複素数 x の虚数部分であることを示す。図-2 は本数値モデルの計算例である。両端に水槽壁を有する幅 30、長さ 20 m の水槽の一端に幅 50 cm のピストン型造波機 60 台からなるサーペント型造波装置が設置されており、波向 30° の斜め波を造波した様子を示す。

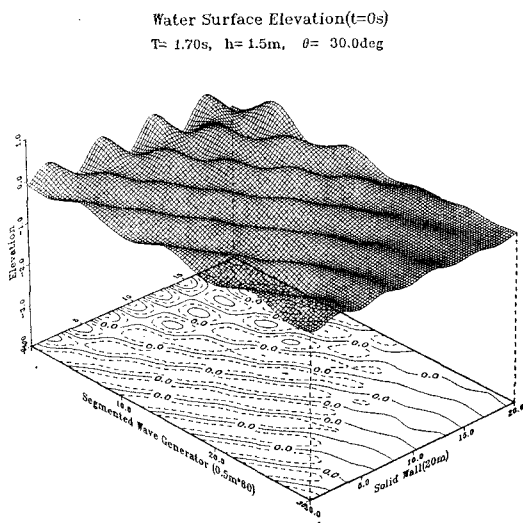


図-2 計算例

所要の要素数を調べるために、図-2 で示した平面水槽の側壁を消波構造とし、長手側の水槽壁の中央部の 20 m 部分にサーペント型造波装置が設置された水槽を想定した。図-3 は、一つの要素が代表する微小線成分長 Δs (要素数=造波機総延長/ Δs) を変化させた場合の、造波機に平行で 6 m 離れた測線上での波高分布を示したものである。 L は波長を示し、 H/H_0 は計算波高と造波板の振幅 b に2次元水路における造波効率をかけて求められる目標波高の比である。 $\Delta s/L = 0.32$ のとき H/H_0 は他のケースと異なる。 $\Delta s/L$ が 0.2 より小さくなると計算値は収束して、同一の計算結果を示す。波向および周期を変化させたケースで検討しても $\Delta s/L$ が 0.2 以下になれば解は収束した。ゆえに、1つの要素が代表する線成分の長さが $1/5$ 波長以下になるように点源を配置すれば収束解が求められることがわかった。

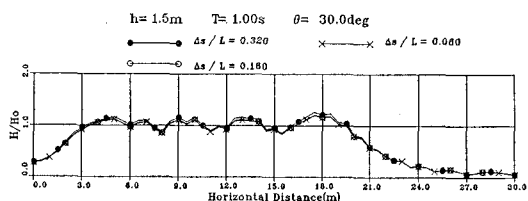


図-3 $\Delta s/L$ による計算波高の変化

次に数値計算精度を検証するために Takayama (1987) が提案した解析解との比較を行った。図-4 は本モデル (Isaacson Model) と解析解を波高コンターについて比較した図である。両者のコンター図はほとんど同一の結果を示し数値解と解析解が一致することが確認できた。なお、解析解では、定常減衰項を含んでいない。

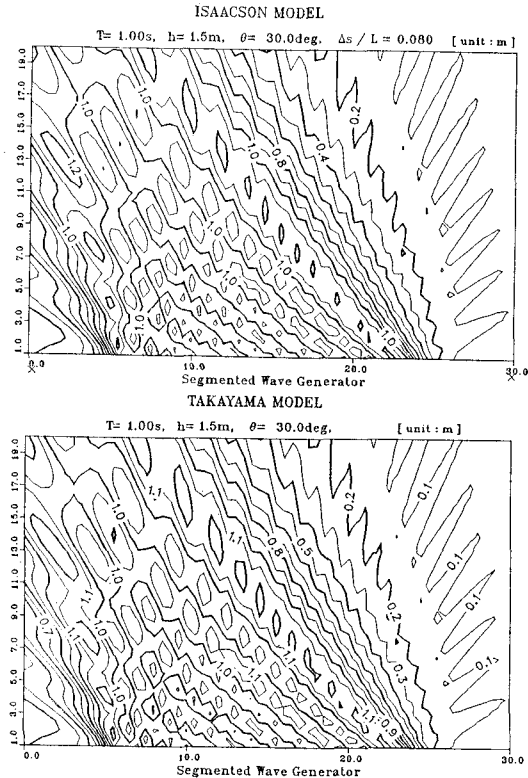


図-4 数値解と解析解の比較

3. 側壁を利用した有効造波領域の拡張法

Funkle and Miles (1987) は、有限長の反射板を造波装置の両端に法線方向に設置することによって一様な波高が造波できる有効造波領域を拡張する手法を提案している。図-5 に拡張法概念図を示す。図-5 に示すように、斜め波の上手側の造波板で起こされた波が反射板で反射されたときに、元々の波向 θ 方向へ進む波と周期と位相が一致すれば、波高が一様な領域を拡張することができる。造波板の下手側では、反射板から反射波が生じないように、一定数の造波板の変位を 0 とする。'snake principle' によれば l 番目の造波板の変位は次式で表される。

$$\zeta_D(l, t) = (a/F) \sin(\omega t + (l-1/2) k B \sin \theta) \quad (l=1, 2, 3, \dots) \quad (13)$$

ここで、 B は造波板の幅である。反射板の反対側にも造

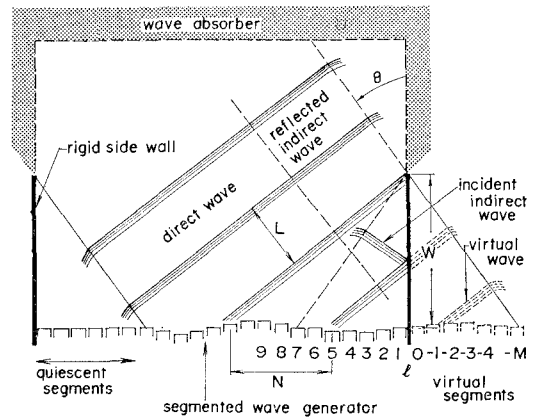


図-5 有効造波領域の拡張法

波板があるものとすれば、仮想造波板の変位は次式で示される。

$$\zeta_D'(l, t) = (a/F) \sin(\omega t + (l-1/2) k B \sin \theta) \quad (l=1, 2, \dots, M) \quad (14)$$

M は反射板長 w の関数で、 $M = w \tan \theta / B$ で計算できる。仮想造波板で起こされる波と同一の周期および位相を持つ反射波が生じるためには、 $l=1 \sim M$ 番目の造波板を次のように運動させればよい。

$$\zeta_V(l, t) = (a/F) \sin(\omega t - (l-1/2) k B \sin \theta) \quad (l=1, 2, \dots, M) \quad (15)$$

したがって、直接伝搬する波と反射して伝搬する波の両方を同時に発生させるための造波板の変位は以下のようになる。

$$\zeta_S = \zeta_D + \zeta_V = (2a/F) \sin(\omega t) \times \cos[(l-1/2) k B \sin \theta] \quad (l=1, 2, \dots, M) \quad (16)$$

いま、図-6 に示すように幅 30 m、長さ 20 m の平面水槽の一端に総幅 30 m のサーベント型造波装置が設置されているものとする。長さ 4 m の反射板を使って有効領域を拡張する手法を NRC 法、全側壁を消波構造にした方法を ORD 法とする。図-7 は波向き 30° の斜め波の、造波機より 8 m 離れた測線上における無次元波高分布を比較したものである。 H/H_0 は測線方向に一様ではなく変動するものの水槽中央部ではほぼ 1 に近い。向かって右側の水槽端近傍では波高は小さくなり所定の波高が造波できない。 H/H_0 がほぼ 1 に近い範囲は、水槽左端より計った距離で、ORD 法の場合は 22 m 程度である。NRC 法では 24 m まで無次元波高は 1 となり有効造波範囲が水平方向に 2 m 拡大されたことがわかる。図-4 の模式図を参考にすると、造波板幅方向への有効造波領域拡大距離は $w \tan \theta$ で表され、 $w=4$ m の場合は 2 m となり数値計算結果と一致する。ゆえに、有効造波領域の造波板幅方向への拡大距離は $w \tan \theta$ で推定できる。水

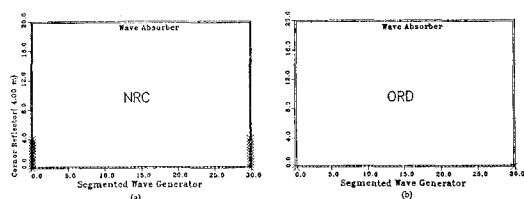


図-6 NRC法とORD法のモデル水槽

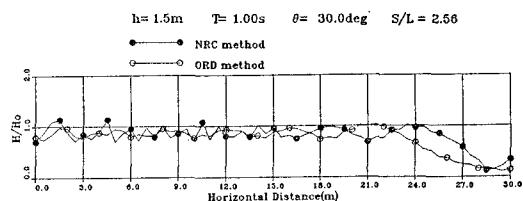


図-7 NRCおよびORD法における波高分布の比較

槽中央部での波高分布を見ると、ORD法では緩やかな変動を示すが、NRC法では、変動が細くなり短い距離内では相対的に変動が大きくなる。これはNRC法では図の向かって右端部付近の造波板は移動しないものの回折波が反射板で反射されるために波高分布に影響を与えるためと思われる。

4. 実験によるモデルの検証と有効造波領域拡張法の問題点の把握

図-8は数値計算法を検証するとともに、有効造波領域拡張法は妥当性を調べるために行った実験における水槽と波高計設置位置を示す。実験水槽は幅30m、長さ19.5mで一方の長い側壁に沿って幅0.5mのピストン及びフラップの両モードでの運転が可能な造波板を60台並べたサーペント型造波装置が設置されている。他の3側壁はジャミーセン型(Jamieson, 1987)の消波工が設置され反射波が生じない構造になっている。実験では、水深を2.6mとし、造波板をすべてピストンモードで運転

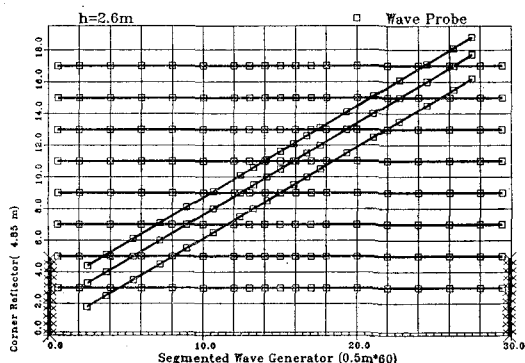


図-8 実験水槽と波高計設置点

した。造波機の両端には長さ4.85mの反射壁を設け、NRC法によって直方向および斜め波を造波し、図の□記号で示した点に波高計を設置して、水位変動を調べた。波周期は1.5~2.25sに変化させた。

図-9は、直方向波について波形勾配を変化させて無次元波高の分布を調べたものである。なお、実験においては、測線中央部の7点における波高の平均値を H_0 とした。実験で測定される波形は波の非線形性のために水面から峰および谷までの高さが異なる。そこで、本実験では、sin関数で波形を近似して、測定値との誤差が最小になるsin関数の周期と振幅を波の周期および波高とした。図-9に示すように波形勾配 H/L が変化しても無次元波高は一致した。したがって、 H/L が0.05以下の規則波であればsin関数で近似することにより波高・周期を求めることが可能であることがわかる。図-10は波向 30° の斜め波を造波したときに、造波機に平行で、造波機から7m離れた測線上における無次元波高について実験値と計算値を比較したものである。実験値と実線で示した計算値はよく一致し、本数値計算モデルによってほぼ正確に斜め波の波高分布を求めることができる。

図-11(1)および(2)は造波板から3m離れた線上におけるそれぞれ周期1.5および2.25sの直方向波の波高分布を示す。1.5sのときは水槽中央部では実験値と計算値はほぼ一致している。周期2.25sの場合には実験値と計算値は一致せず、その誤差は端部へ行くほど大きくなる。これは、水槽両端の反射板の間で重複波(クロスモード波)が生じているためと思われる。周期2.25sの場合には水槽内にクロスモード波が生じ、波高分布にも影響し、一様な波高分布が確保できないことがわかる。

水槽内のクロスモード波の影響を低減する方法としては、不規則波を造波することが考えられる。図-12は有

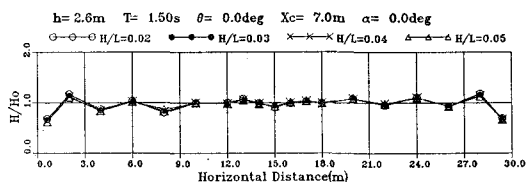


図-9 波形勾配による無次元波高分布の変化

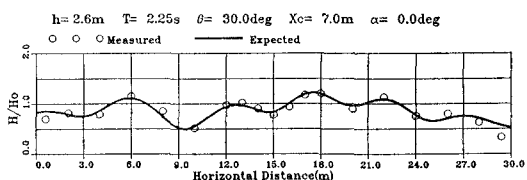


図-10 斜め波の実験値と計算値の比較

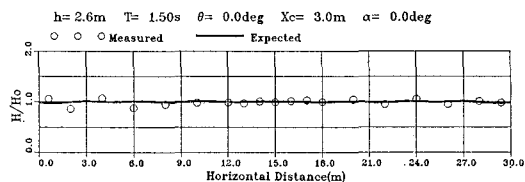
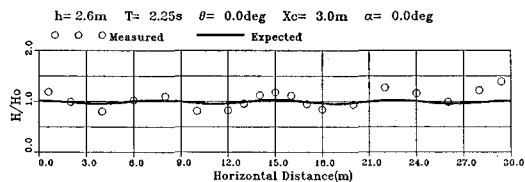
(1) $T=1.5\text{ s}$ (2) $T=2.25\text{ s}$

図-11 直方向波の実験値と計算値の比較

義波周期 $T_{1/3}$ を 2.25 s として、 $\theta=0^\circ$ の一方向不規則波を造波した結果である。有義波高の水平分布は一樣で、直方向規則波に対する計算値とよく一致する。したがって、不規則波を造波することによって特定の周期の波高分布の不均一性が統計的に大きな影響を与えなくなることがわかる。規則波の造波時においてクロスモード波を低減させる方法としては、反射板を若干水槽内側あるいは外側へ開くように、造波板法線方向からの傾度を少しずつして設置することが考えられる。図-13は反射板を水槽外側へ開いた場合の斜め波の波高分布を示す。Position 1, 2, 3はそれぞれ、反射板の傾度を変更しない場合、両側の反射板をそれぞれ 2° および 5° 外側へ開いた場合を示す。直方向波の場合には波高分布は変化せず、傾度を変えても同一の波高分布が得られたが、斜め波の場合は、傾度が変化すると波高も変化する。その変動は無次元波高の 10% 程度で、目標波高からの誤差は、Position 3 の場合が最も小さく、Position 1 に比べてより一様な波高分布が確保できるので、多方向波の造波においても非常に有効な方法ではないかと推測できる。

5. あとがき

本研究によって、側壁を利用した有効造波領域の拡張法を定量的に推定できる数値モデルの妥当性が検証できた。また、クロスモード波によって一様な波高分布が確保できない場合があることがわかり、その対策として側壁の傾度を変化させる手法があることが推測できた。

今後は、側壁反射を利用した場合の多方向波の特性についても検討する予定である。本研究で述べた実験は、

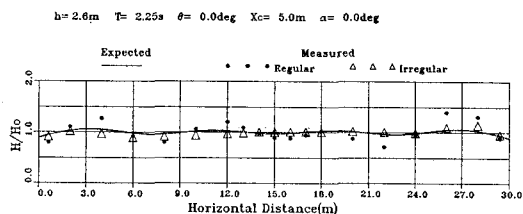


図-12 不規則波造波における有義波高の分布

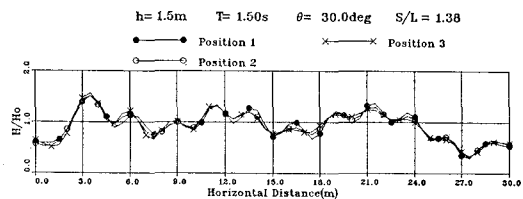


図-13 反射板傾度変化による波高分布の変化

参考文献

- 高山知司・永井紀彦・合田良実 (1984): サーペント型造波装置の制御方式と造波特性, 港湾技研資料, No. 509, 30 p.
- Biesel, F. (1954): Wave Machines, Proc. of 1st Conf. on Ships and Waves, pp. 288-304.
- Funke, E. R. and M. D. Miles (1987): Multidirectional Wave Generation with Corner Reflectors, TR-HY-021, National Research Council Canada.
- Isaacson, M. (1989): Prediction of Directional Waves Due To A Segmented Wave Generator, Proc. of 23rd IAHR Congress, Vol. C, pp. 435-442.
- Jamieson W. W. and E. P. D. Mansard (1987): An Efficient Upright Wave Absorber, ASCE Specialty Conf. on Coastal Hydrodynamics, Univ. of Delaware.
- Murray J. J. and G. J. Fudge (1990): Construction and Commissioning of the Offshore Engineering and Sea-keeping Basin at the Institute for Marine Dynamics, 22nd American Towing Tank Conf.
- Takayama T. (1982): Theoretical Properties of Oblique Waves Generated by Serpent-type Wavemakers, Rept. of the Port and Harbour Res. Ins. Vol. 21, No. 2, pp. 3-48.
- Takayama T. and T. Hiraishi (1989): Reproducibility of Directional Random Waves in Laboratory Wave Simulation, Rept. of PHRI, Vol. 28, No. 4, pp. 3-24.