

多面式造波装置の適用性

平石 哲也・金澤 剛**

1. はじめに

近年、防波堤や人工島のような海洋構造物が、沖合いの大水深域に設置されるようになり、その設計においては、波の多方向性を考慮することが必要になってきている。それにともない実験室の平面水槽にも、多数の小型造波機を一直線に配置した“サーペント型多方向不規則波造波装置”が設置されている(たとえば、平石, 1992)。一方、このサーペント型造波装置を用いて多方向不規則波を造波した場合、目標とする波浪場が再現できる領域、すなわち、有効造波領域が水槽の一部に限られるという問題がある (Funke and Miles, 1987)。有効造波領域を拡大するには、造波板枚数を増加し、造波機の有限長を延ばせばよいが、より広い水槽面積が必要となり、水槽長に制限がある場合には実現が困難である。また、造波装置の両端に反射壁を設置し、そこからの反射波を利用する方法が著者の一人によって検討されているが(平石, 1991)、反射壁間でクロスモード波が発生するという問題がある。さらに、成分波の波向が限定されるために、従来型の多方向不規則波造波装置では、主波向が直方向から傾いた多方向波を造波できない。

本研究では、有効造波領域の拡大を目的として、水槽の側壁にも造波装置を設置する、すなわちコの字型に吸収型造波装置を設置し、水槽の複数面から波を造波する多面式多方向不規則波造波装置を提案した。そして、水槽実験および数値計算により本造波装置の適用性と造波装置の配置条件について検討した。

2. 多面式造波装置の概要

図-1 に造波機をコの字型に配置した多面式造波装置の配置状況を示す。造波装置は1枚の造波板幅が50.0 cmであり、それを15枚並べた左右の側方造波装置(延長7.5 m)と、30枚並べた沖側造波装置(延長15.0 m)の3ブロックから構成される。左右の造波装置と沖側のそれは90°の角度で接し、同一水平床上に設置されている。水槽の岸側には消波材を並べ、15.0 m×7.5 mの実験

水槽を形成した。本実験水槽における座標系は、沖側造波装置前縁に沿ってx軸(右向き正)、沖側造波装置中点から法線方向にy軸をとり岸向きを正とした。また、波向の定義はy軸から反時計回りに正である。

本造波装置に与える造波信号はシングルサンメーション法 (Takayama and Hiraisi, 1989) を用いて作成した。沖側造波装置のi番目の造波板の変位 $\eta_i(t)$ は、次式で与えられる。

$$\eta_i(t) = \frac{a_n}{F_n} \sin(2\pi f_n t - (i-0.5)k_n b \cos \theta_n + \epsilon_n) \sin \theta_n \dots\dots\dots (1)$$

ここで、添え字のnはn番目の成分波の値であることを示し、 a, f, k, θ および ϵ はそれぞれ成分波の振幅、周波数、波数、波向および位相差を表す。また、 F はピストン型の造波機に対する造波効率である。一方、左右の造波装置に対する信号は、まず、これらの造波装置が沖側造波装置の延長線上にあるものとして考え、実際の造波板との90°の位相差を考慮して与える。いま、沖側と右側の造波装置から波向 θ の斜め規則波を造波する場合を考える。図-2 に示すように、沖側造波装置の中立軸左端に原点をとり、右向き正にx'軸、沖向き正にy'軸をとる。右側造波装置のj番目の造波板から生じる波は、この造波板の中点Aを通る波向線がx'軸と交差する点A'で生じた波が伝播したものに相当する。したがって、A'点で生じた波がA点に達するまでの時間 ϵ_i を考慮すれば、式(1)から右側造波装置の造波信号を作成できる。

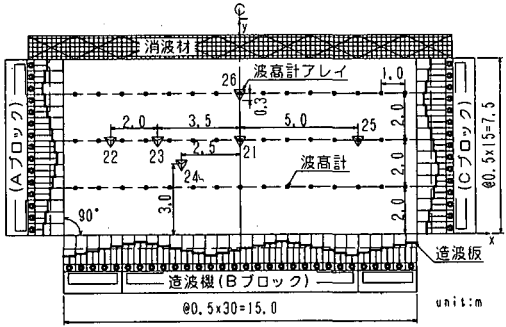


図-1 多面式造波装置の平面図

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 水工部主任研究官
** 正会員 工修 東洋建設(株)土木本部 土木設計部

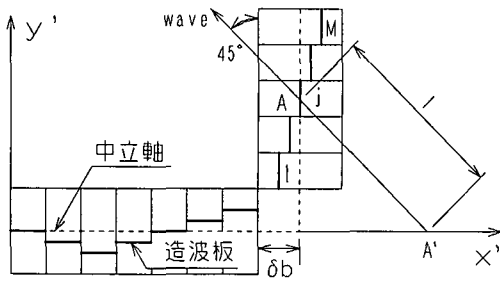


図-2 側面造波機の位相のずれ

A点とA'点間の距離 l は次式で与えられる。

$$l = \{(j-0.5)b + \delta b\} / \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 δb は沖側および右側造波装置の中立軸のずれを表し、中立軸から造波機前縁までの距離に相当する。微小振幅波理論を用い、対象波の波速を c とすると、 ε_T は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_T &= l/c \\ &= \frac{\omega}{g} \frac{(j-0.5)b + \delta b}{\cos \theta} \frac{1}{\tanh kh} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

よって、 N を沖側造波機の造波板総数として、右側造波装置の j 番目の造波板に与える造波信号は次式となる。

$$\begin{aligned} \eta_j(t) &= \frac{a_n}{F_n} \sin [2\pi f_n(t - \varepsilon_{Tn}) - \{(N+1)b + \delta b\} \\ &\quad + \{(j-0.5)b + \delta b\} \tan \theta_n] k_n \cos \theta_n \\ &\quad + \varepsilon_n \sin \theta_n \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

3. 実験条件

本造波装置の適用性を確認するため、水深 50.0 cm の一様水深場で斜め規則波および多方向不規則波実験を行った。斜め規則波実験では、波高 5.0 cm、周期 0.8~1.0 s、波向を $0^\circ \sim 60^\circ$ に変化させた。この場合は、図-1 に示すように水槽内に沿岸方向 3 本、岸沖方向 15 本の計測ラインを設け、合計 45 点で容量式波高計により水位計測を行った。一方、多方向不規則波実験では、有義波高 5.0 cm、有義波周期 0.9 s に固定し、主波向と方向集中度を変化させた。周波数スペクトルには改良型 Bretschneider-光易型(合田, 1987)、方向関数には光易型(合田・鈴木, 1975)を用いた。この実験では、方向スペクトル解析を行うため、容量式 4 本からなる波高計アレイを水槽内の POINT 21~26 の 6 ヶ所に設置した。

4. 実験結果

(1) 斜め規則波実験結果

図-3 は、波向 45° の斜め規則波の沿岸方向波高比分布である。波高比は各測点の波高を測線の平均波高で除して求めた。各測線における波高比は、広い範囲で 1 付近

に分布しており、従来型の造波法で生じる造波機端部付近での波高の減衰がみられない。よって、多面造波法の有効性が顕著に認められる。ただし、各測線には 1 点ずつ波高比が 0.4 程度と極端に小さい測点が存在している。

図-4 は、図-3 と同一ケースについて、波高と波向の平面分布を示したものである。波高は測点●の下に数値で示し、波向は矢印の向きで示した。なお、波向は隣合う 2 測点で測定された同一波の位相差から個々波の波向を求め、計測時間内の波数で平均した。また、図の右下の隅角部から波向と同じ角度で延びる破線は、沖側と右側造波装置のそれぞれの有効造波領域が接する線を表している。この図から、図-3 で見られた各測線に 1 点ずつある低波高点は、右下の隅角部から延びる斜め線に沿って存在していることがわかる。一方、波向はややばつきがあるものの、ほぼ目標値を再現している。

このように、多面造波法で斜め規則波を造波した場合は、従来型の造波法で生じる広範囲の波高低減領域が存在せず、広範囲に目標とする波浪場が形成できる。ただし、この波浪場は、特定ライン上で目標波より低い波高分布となることが特徴である。この低波高域が存在する理由として以下のことが考えられる。すなわち、本造波装置は造波板間に隔壁があるため、2 つの造波装置ブロックが接合する隅角部では、2 本の造波板中立軸の交点から造波板は図-2 に示したように、 δb (60.0 cm) だけ

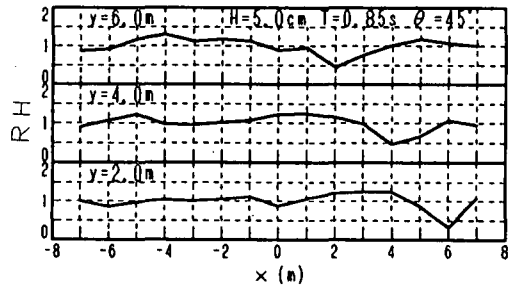


図-3 沿岸方向波高比分布

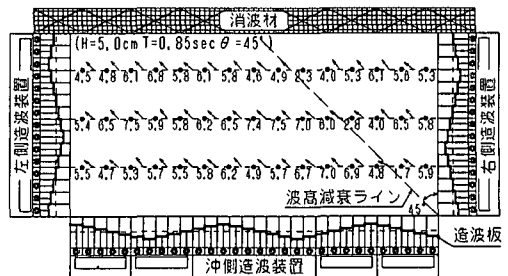


図-4 波高・波向平面分布

離れる。したがって、ここでは中立軸間に隙間が生じ、この隙間では造波板が得られないため、エネルギーロスが生じる。本多面式造波装置では、この中立軸間の影響が水槽中央部へも伝播したものと考える。

(2) 多方向不規則波実験結果

図-5は主波向 45° 、方向集中度 $S_{\max}=10$ のケースに関して、方向スペクトルの平面分布を示したものであり、(a)が目標値、(b)、(c)が POINT 21 および 26 における実験結果である。両測点における実験結果は、低周波数側のエネルギーの広がりが目標値よりやや小さいが、最もエネルギーレベルの高いピーク値は、目標値と似たレベルを示し、ピークの高さがよく再現されている。また、そのピークの波向は両測点で 45° であり、目標値と一致する。よって、多面造波法は、従来型の造波法では不可能であった主波向 45° の多方向波も、水槽中央部で再現できる。

次に、従来型の有効造波領域外の水域における多方向波の再現性を、エネルギーが最大となるピーク周波数に

おける方向関数の分布形で検討した。図-6は、主波向 45° で $S_{\max}=25$ のケースにおいて、水槽内の全測点での方向関数形を示したものである。計測点の位置は図-1に示す POINT 21~26 であり、各方向関数図はほぼ計測位置に示してある。図-6の四角い外枠は水槽範囲を示し、右および左下端から延びる斜めの両破線で囲まれた二等辺三角形が、従来型で主波向 0° の多方向波を造波した場合の有効造波領域に相当する。各測点における実験値の方向関数形(実線)は、従来型造波法では不可能な主波向であるにも関わらず、全測点で破線で示した目標値によく一致する。特に、両者のピークの波向および高さがよく一致している。したがって、多面造波法を用いると主波向が 0° でない場合でも水槽全域にわたって目標とする多方向不規則波を再現できることがわかる。

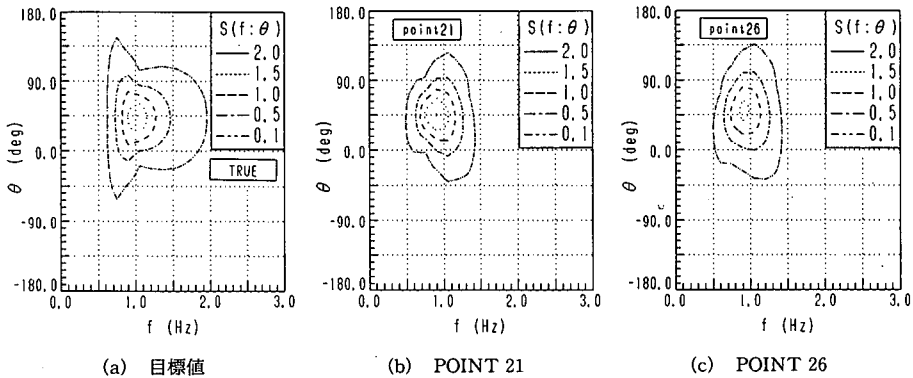


図-5 方向スペクトルの平面分布

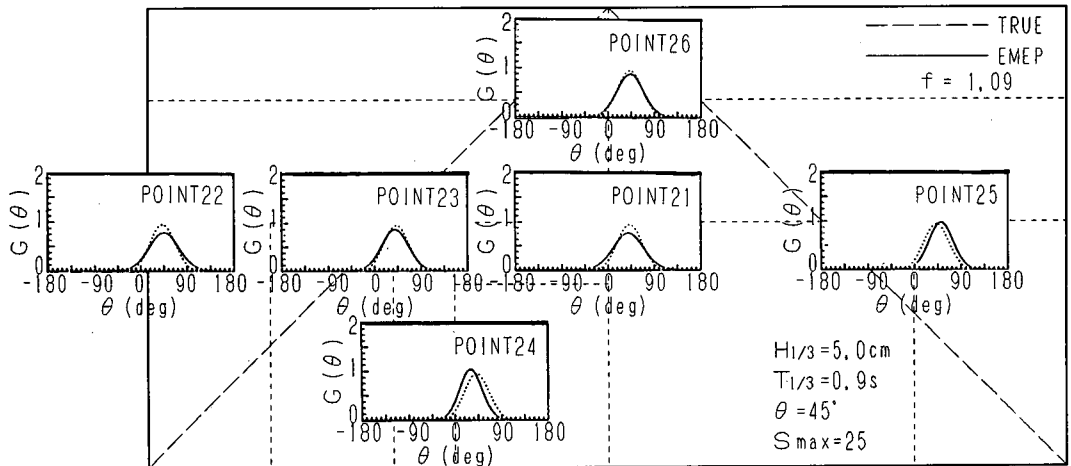


図-6 方向関数に基づく有効造波領域

5. 数値計算に基づく多面造波法の適用性の拡張

(1) 数値計算法

多面造波法に対応した波高分布計算法は、サーペント型造波機を対象とした Takayama (1982) の“斜め波の造波理論”を拡張したものである。Takayama (1982) によれば、サーペント型造波機によって発生した波の速度ポテンシャルは、個々の造波板の位相差を考慮して、それぞれから生じた波の速度ポテンシャルの重ね合わせで表現される。すなわち、波向 θ の斜め波の速度ポテンシャル ϕ は定常減衰項を無視すると次式で与えられる。

$$\phi = \sum_{l=-N_-}^{N_+} \left[\frac{\omega(\zeta a_p)}{k} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \times \left\{ \cos(\omega t + i\epsilon) \int_{(1-1/2)kb/2}^{(1+1/2)kb/2} N_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \right. \right. \\ \left. \left. - \sin(\omega t + i\epsilon) \int_{(1-1/2)kb/2}^{(1+1/2)kb/2} J_0(\sqrt{(kx-q)^2 + (ky)^2}) dq \right\} \right] \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 N_+ および N_- は x 軸の正と負の側の造波板数であり、 $(N_+ + N_- - 1)$ が全造波板数となる。また、 ζ は造波板の変位振幅、 a_p はピストン型造波機の造波効率の $1/2$ に相当する関数、 J_0 および N_0 は 0 次のベッセル関数およびノイマン関数である。また、造波板の位相差 ϵ は図-7 から次式で表される。

$$\epsilon = -kb \cos \theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

多面造波機の場合の速度ポテンシャルは、式(5)を用いて、沖側造波装置および側方造波装置からの速度ポテンシャルを求め、それらを合成することによって求められる。いま、波向 $\theta (\theta > 0)$ の斜め波を造波する場合を考えると、沖側と右側の 2 ブロックだけが造波動作をする。したがって、速度ポテンシャルは、

$$\phi = \phi_A + \phi_B \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここに、 ϕ_A および ϕ_B は沖側および右側の造波装置から生じた波の速度ポテンシャルの寄与分である。沖側造波装置の寄与分 ϕ_A は式(5)で求められる。一方、

右側造波装置の寄与分 ϕ_B の計算では、両造波装置間の位相差を考慮する必要がある。図-8 は両造波装置間の位相差を示し、図-9 は右側の造波板間の位相差を表す。図-8 から両造波装置間の位相差 ϵ_{AB} は、

$$\epsilon_{AB} = -k(b/2 + \delta b)(\sin \theta + \cos \theta) \quad \dots\dots\dots (8)$$

となり、図-9 から右側の造波板間の位相差 ϵ_B は、

$$\epsilon_B = -kb \sin \theta \quad \dots\dots\dots (9)$$

となる。したがって、 ϕ_B は、式(5)中の $i\epsilon$ の代わりに次項を用いることにより、式(5)から求められる。

$$N_+ \epsilon_A + \epsilon_{AB} + j \epsilon_B \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 ϵ_A は沖側造波装置における位相差であり、式(6)で得られる。また、 j は右側造波板の番号であり、1 から M (M : 右側造波板総数) の値をとる。

(2) 数値計算法の検証

斜め規則波実験で得た水槽内の波高分布と計算結果を比較することにより、本計算モデルの妥当性を検討した。図-10 は、波向が 45° のケースで沖側造波装置前縁から 4.0 m 離れた測線における沿岸方向波高分布を示したものである。なお、実験と同様、数値計算でも造波板中立軸間の隙間を考慮した。実線で示した実験結果と破線で示した計算結果は、定性的によく似た波高分布を示しており、本計算で用いた数値計算モデルがほぼ妥当であることがわかる。なお、局所的に両者の値が比較的大きく異なり、また、計算結果には実験結果にみられる波高減衰点が明確に見いだせない等の差異があるが、これは、造波装置に存在する造波板両側の側壁を、計算では考慮していないためと考えられる。

(3) 改良型多面式造波装置の提案

水槽実験を通して本多面式造波装置の有効性が検証できた。しかしながら、再現された波高場には局所的な変動が存在している。この原因の 1 つには、造波機の斜め波に対する反射波吸収効率の低下も考えられるが、主なものは 2 つの造波装置ブロックが形成する隅角部において、それを構成する 2 枚の造波板が 90° ずれた方向にピストン運動をすること、隅角部の頂点を中心とした円筒波

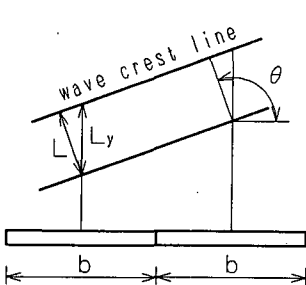


図-7 造波板の位相差 (沖側)

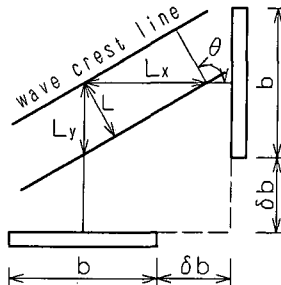


図-8 造波板の位相差 (沖側と右側)

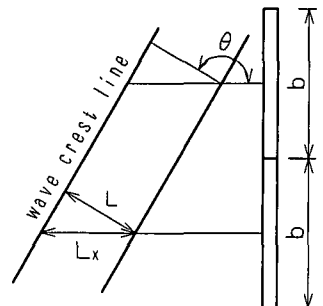


図-9 造波板の位相差 (右側)

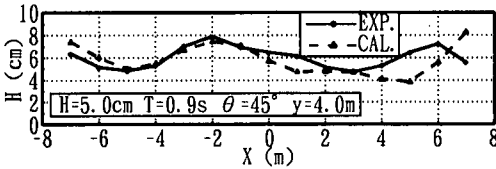


図-10 数値計算結果と実験結果の比較

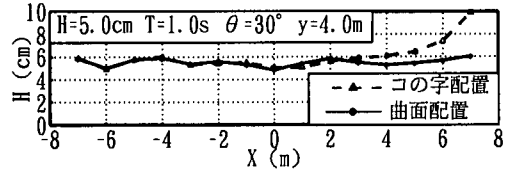


図-12 曲面配置法とコの字配置法の比較

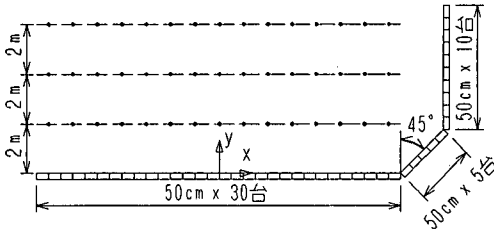


図-11 曲面配置型多面式造波装置の配置法

が生じないことであると考えられる。この対策として沖側と右側面の造波装置の間に、数枚の造波板を曲面を作るように配置し、両造波装置ブロックを滑らかに接合することが考えられる。しかしながら、造波板1枚ずつの運動軸をずらして配置し、それぞれに信号を送ることは、非常に複雑な制御が必要となり現実的でない。そこで、図-11に示すように、右側造波装置の15枚の造波板の内、5枚を x 軸に 45° の角度で配置することを考えた。ここでは、この造波装置を曲面型多面式造波装置と呼び、 x 軸に 45° の角度で配置した造波装置ブロックを曲部と呼ぶ。ここでは、この改良型多面式造波装置の適用性を数値計算で検討した。この造波法に対する合成速度ポテンシャルは、式(7)に曲部の寄与分を加えることにより得られる。

図-12に、波向 30° のケースで沖側造波装置前縁から4.0m離れた測線における沿岸方向波高分布を示す。実線および破線は曲面配置型およびコの字配置型の計算結果を表している。曲面配置型の波高分布はコの字配置型のそれに比較して、より一様に分布しており、隅角部の改良の効果がみられる。したがって、隅角部の造波板配

置を曲面にすることにより、多面式造波法の適用性が高められる。

6. 結 論

本研究によって、水槽内の複数面から造波する多面式造波装置は、従来型の造波装置に比較して、斜め規則波および多方向不規則波を広範囲に精度よく再現できることが確認できた。今後は、本造波法により水槽面積の有効な利用、模型設置位置や波浪条件等の実験条件の緩和が期待でき、精度のよい多方向不規則波実験が実施できる。

参 考 文 献

- 合田良実・鈴木康正 (1975): 光易型方向スペクトルによる不規則波の屈折・回折計算, 港湾技術研究所資料, No. 155, 33 p.
- 合田良実 (1987): 数値シミュレーションによる波浪の標準スペクトルと統計的性質, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 131-135.
- 平石哲也 (1991): 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, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 126-130.
- 平石哲也 (1992): 多方向不規則波の発生とその応用に関する研究, 港湾技術研究所資料, No. 723, 176 p.
- Funke, E. R. and M. D. Miles (1987): Multidirectional Wave Generation with corner reflectors, Technical Report, National Research Council Canada, TR-HY-021, 17 p.
- Takayama, T. (1982): Theoretical properties of oblique waves generated by serpent-type wave-makers, Rept. of PHRI, 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.