浅海変形後の多方向不規則波を造波するための 造波装置改良

平山 克也¹・中村 聡孝²・相田 康洋²

¹正会員 港湾空港技術研究所 海洋研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

E-mail:hirayama@pari.go.jp

² 港湾空港技術研究所 海洋研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬三丁目1-1)

多方向不規則波を対象とした平面模型実験では、実験波がほぼ沖波とみなせる水深で造波し、それ以降の浅海変形は水槽内に設置した海底床模型上で再現される。しかし一方で、実験対象範囲は有限な平面水槽の大きさや縮尺効果等による制約を受ける。そこで本研究では、波浪変形計算により算定された沿岸方向に一樣でない浅海変形後の方向スペクトルを直接造波できるよう既存のサーペント型造波装置を改良するとともに、その効果を、等深線海岸に斜め入射する多方向不規則波による護岸越波量の空間分布を通じて考察した。その結果、従来のようにある1つの代表方向スペクトルを与えて造波した場合とは有意な違いが生じ、造波検定の効率化・高精度化には未だ課題が残るものの、海岸近傍の波浪変形をより詳細に再現する機能が追加されたことが確認された。

Key Words : *serpent-type wave maker, multi-directional wave, shallow water, wave transformation*

1. はじめに

大水深域を伝播する多方向不規則波は、ある1つの方向スペクトルに対する成分波セットを互いに異なる位相で同時に造波することにより、その線形重ね合わせとして平面水槽内に再現される。これは、波長が水深に依存しない深海波では近隣の方向スペクトルが空間的に一樣とみなせるため、斜め波を造波するために平面水槽内に並べた各造波板（造波面）位置で同じ成分波セットを共有することによる。一方、浅海域では水面波の分散関係に従い水深に応じて波長が変化するため、主波向きに対し対称な方向スペクトルが等深線海岸に対し真正面から入射しない限り、各地点の方向スペクトル形状及びそれらに対応する各成分波セットには沿岸方向に違いがみられるようになる。したがって、多方向不規則波を対象とした平面模型実験では通常、実験波がほぼ沖波とみなせる水深で造波し、それ以降の浅海変形は水槽内に設置した海底床模型上で生じさせる必要があるが、実験対象範囲と模型縮尺との兼ね合いによっては平面水槽の深さや岸沖方向長さが大きな制約条件となり得る。そこで本研究では、沿岸方向に一樣でない浅海域での方向スペクトルを直接造波できるよう既存の造波装置を改良するとともに、その効果を、等深線海岸に斜め入射する多方向不規則波による護岸越波量の空間分布を通じて考察した。

2. 改良デュアルフェースサーペント型造波装置

(1) ハード上の改良点

改良したサーペント型造波装置を写真-1に示す。幅0.6m、高さ1.3mの造波板が平面水槽の長辺側（ファーストフェース）に69枚、短辺側（セカンドフェース）に29枚設置され、板の上下で互いにヒンジ結合された部分が全100台の造波機によってそれぞれ前後に駆動するというデュアルフェースサーペント型造波装置¹⁾の基本構造はそのままに、平成27年度において新型制御基板を新た

写真-1 改良後の多方向不規則波造波装置

(写真右奥：水槽脇には制御基板・アンプユニットが並ぶ)

に導入することにより、同時に造波できる成分波数が1000波から2000波に倍増した。また、この新型制御基板は、1枚で最大8台の造波機を制御することができるため、造波機1台につき1枚必要であった旧型制御基板に比べ、設置枚数が従来の1/8程度に削減された。これは、いずれか1枚が故障することによる造波装置全体のシステム障害のリスクを大幅に削減するとともに、この結果コンパクトになった制御基板ユニット（制御基板を収めた箱）を水槽脇のプラットフォーム上に集約して集中的に冷却・防塵対策を行うことを可能とし、特に夏場には高温多湿となり、また海底床模型等の製作・解体時には粉塵対策としてブルーシート等による養生が不可欠な水槽内に比べ、基盤自体の故障リスクを下げることに也大いに貢献するものと期待される。

なお、これに伴い、造波機モータのサーボアンプと制御基板との通信距離が増大することによるノイズ混入等のリスクを回避するため、従来は水槽内の造波機上に設置していた、全100台のサーボアンプを小分けして収めた各アンプユニットもそれぞれ、制御基板ユニットに近接するよう移設した。

(2) ソフト上の改良点

浅海変形後には平面水槽内の造波面に沿って空間分布する、複数の方向スペクトルに対する多方向不規則波を造波する機能を追加するために、波浪変形計算におけるスペクトル法と波動モデルとのone-wayカップリング法²⁾を適用した造波ソフトウェアを新たに開発・導入した。これは、スペクトル法で算定された各地点の異なる方向スペクトルに対し、これらを構成するすべての成分波を各地点で共有しつつ、それらの振幅は各地点の方向スペクトル形状に応じたゼロ以上の増幅率（振幅調整値）を乗じ調整することにより、地点毎に成分波構成が異なる多方向不規則波の波形を造波面で発生させるものである。したがって、この場合には、ある1つの代表方向スペクトルに対する多方向不規則波を造波する従来の造波法に比べ、より多くの成分波を同時に造波することが必要となるため、この造波法は、成分波数が倍増した新型制御基板の能力を最大限引き出せる機能の1つと言える。

また、同時に造波できる成分波数が倍増したことは、当該造波装置が従来から有している機能のうち、拘束長周期波の造波精度³⁾をさらに高めることにも寄与するものと期待される。すなわち、静水に対して波群を造波した際には、波群に拘束された長周期波による水位変動を妨げるかのように水槽内で自由波が自然発生する。この自由波を能動的に制御するためには別途、これとは逆位相の波を波群と同時に造波する必要があるが、従来はこのために必要な成分波数を確保するため、本来造波したい波群を構成する成分波数を大幅に制限せざるを得な

った。したがって、波群をより多くの成分波で造波することにより、不要な自由波を打ち消しつつ波群に拘束された長周期波のみをより正確に造波できるようになる。

(3) 造波支援ツールの実装

前節で述べたように、浅海変形後の複数方向スペクトルに対する多方向不規則波の造波においては、各造波機で造波すべき網羅的な成分波リスト及び各造波機で設定すべき各成分波の振幅調整値リストを必要とする。これらは、近隣の方角スペクトルが一樣とみなせる深海域から平面水槽内の造波面位置に相当する沿岸域までの、実海域における波浪変形計算を予め実施して設定しなければならないが、造波面位置で未だ波の非線形変形が卓越する状況でない限りは、これより沖の波浪変形計算には、（必要に応じて波の回折変形を考慮した）エネルギー平

図-1 エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算

(a) 水槽内の模型縮尺，原点位置及び回転角，等の指定

(b) 水槽内の造波機位置における方向スペクトルの内挿補間

図-2 計算格子と水槽内の造波機との対応

衡方程式法を適用することができる。そこで、改良後の造波ソフトウェアに対する支援ツールとして、各造波板位置で算定された方向スペクトルに対する成分波・振幅調整値リストを出力する、エネルギー平衡方程式法ベースの支援ソフトウェアを新たに作成し、造波システムの一部として実装することとした。

海図等の水深データを取り込んで実施するエネルギー平衡方程式法による波浪変形計算（図-1）は、通常、現地スケールで実施する。また、算定された浅海変形後の方向スペクトルは予め指定した任意の計算格子上で出力可能であるが、これらは計算格子サイズに依存して離散的に得られるため、水槽内の各造波板位置との対応を図るためにはそれらの内挿補間を必要とする。そこで、成分波・振幅調整値リストの出力時までに、水槽内に設置された模型の縮尺、計算座標系に対する原点位置と回転角、及び造波板の初期位置（シフト量）を入力（図-2(a)）するとともに、出力時には、図-2(b)に示す通り、現地スケールに換算された水槽内の各造波板を内包する2つの計算格子間で、離隔距離 $L1$ 、 $L2$ による方向スペクトルの重み付き補間を行うこととした。ここで、 p は造波機番号($p=1-100$)、 $(m, n1)$ 、 $(m, n2)$ はエネルギー平衡方程式法による波浪変形計算で設定した最も岸側の計算領域における計算格子番号を示す。なお、各造波機に与える方向スペクトルに対する多方向不規則波は最大2048個の成分波を重ねて造波されるため、出力される成分波リストには2048成分の波高、周期、波向及び初期位相が、振幅調整値リストには100機×2048個の振幅増幅率がそれぞれ記載されることになる。

3. 浅海変形後の多方向不規則波の造波

ここでは、等深線海岸に斜め入射する多方向不規則波による護岸越波実験を実施し、越波量の空間分布に着目して、上述した造波装置の改良効果について考察した。

(1) 実験条件の設定

図-3に示す海底地形上で沖から護岸近傍までの設計波（50年確率波）及び被災波の浅海変形をエネルギー平衡方程式法で算定し、赤枠で示した実験範囲の沖側境界に相当する各造波板位置（水深-24m）での方向スペクトルを出力した。一方、平面水槽内には、図-4に示す通り、造波面より岸側の勾配1/50程度の海底地形及び護岸模型を縮尺1/60で設置した。なお図では、上部に位置する造波面（ファーストフェース）から正面に進む向きを 0° とし、反時計回りを正とした。また、図には合わせて、造波検定のために造波面近傍に設けた5地点の造波検定用波高計設置位置、及び時間平均越波量の計測に用いた護岸上10区間の越波マス設置位置を示す。なお、特に断

らない限り、以下で述べる諸量はすべて現地量で示す。

ここで、各造波機に与える方向スペクトル算定に用いた表-1に示す沖波諸元は、現地において、造波面より沖側の波浪観測地点（水深-36.7m）で設定された設計波、または護岸背後の越波被災時に観測された被災波の諸元をもとに、エネルギー平衡方程式法による逆解析を行い推定した。ただし、方向集中度は $S_{max}=10$ と仮定した。

前掲した図-3に示す計算領域を用いたネスティング計算を行い、造波面両端（地点番号：No.01, 83）で算定された設計波及び被災波に対する方向スペクトルを図-5に示す。さらに、その間（地点番号：No.01-83）での造波諸元（有義波高、周期、主波向）の変化を図-6に示す。護岸から沖を眺めたとき、主波向が負（右寄り）の設計波では図-6(a)の左から右、正（左寄り）の被災波では図-6(b)の右から左にかけて、造波面での波高が僅かながら徐々に減少する様子が見てとれる。一方、主波向角はいずれも左から右にかけて次第に増加しているが、これは、設計波では水槽の右側、被災波では水槽の左側で、より正面に近い波を護岸に作用させることを意味してい

表-1 逆推定した設計波及び被災波の沖波諸元

波浪条件	沖波諸元
設計波(50年確率波)	$H_{1/3}=9.77\text{m}$, $T_{1/3}=12.8\text{s}$, $\text{Dir}=-22.0\text{deg}$, $S_{max}=10$
被災波(2014/12/17)	$H_{1/3}=8.64\text{m}$, $T_{1/3}=10.5\text{s}$, $\text{Dir}=+36.0\text{deg}$, $S_{max}=10$

図-3 造波面の沖側及び岸側の海底地形

図-4 平面水槽内の海底地形及び護岸模型（縮尺 1/60）

図-5 造波面両端での方向スペクトル

図-6 造波面上での波浪諸元の変化

る。なお、周期に関してはいずれも、造波面位置でもほぼ一定とみなしてよいことが確認できる。

一方、本研究では比較のために、各造波板位置で一様でない方向スペクトルを造波するこのような造波方法とは別に、ある1つの代表地点における浅海変形後の方向スペクトルを各造波機に対し一様に与える、従来の造波方法による護岸越波実験も合わせて実施することとした。

表-2 従来の造波方法で用いる造波面位置での代表諸元

波浪条件	検定	造波面位置での代表諸元
設計波(50年確率波)	地点4	$H_{1/3}=8.56\text{m}$, $T_{1/3}=13.2\text{s}$, $\text{Dir}=-15.0\text{deg}$, $S_{\max}=25$
被災波(2014/12/17)	地点2	$H_{1/3}=7.15\text{m}$, $T_{1/3}=10.6\text{s}$, $\text{Dir}=+23.0\text{deg}$, $S_{\max}=25$

表-3 一様でない方向スペクトルに対する各地点での目標値

波浪条件	主波向 [deg]	周期 [s]	波高 [m]				
			地点1	地点2	地点3	地点4	地点5
設計波(50年確率波)	-15.0	13.2	8.59	8.58	8.57	8.56	8.53
被災波(2014/12/17)	23.0	11.7	7.16	7.15	7.16	7.16	7.18

すなわち、主波向は、造波面より沖側の波浪観測地点で設定または観測されたものを用い、代表波浪の有義波高・周期は、主波向を考慮したとき、造波した波が護岸上の越波測定区間に直接到達するであろう造波板での造波諸元（設計波では地点4を経由する波、被災波では地点2を経由する波：図-4を参照）を用いた。なお、方向集中度は、沖での波形勾配及び沖波波長に対する波浪観測地点の相対水深との関係から、 $S_{\max}=25$ と設定した。これらの代表諸元を表-2に示す。

(2) 造波検定

沿岸方向に一様でない方向スペクトルを造波した際の目標波に対する検定は、造波面に沿った複数地点（地点1-5）でそれぞれ、主波向を考慮して設定した目標波高（造波板位置での算定波高）に対する計測波高の誤差を求め、これらの平均二乗誤差が最小となるように、各造波機での造波波高を一律に調整することにより実施した。ここで、計測波高は、各検定地点において岸沖方向に並んだ2本の波高計で得られた水面波形をもとに合田ら⁴⁾の方法により算定される入射波高とした。また、各地点と造波機との対応を図るために用いる主波向は、簡単のため、造波面より沖側の波浪観測地点で設定・観測されたものを用いた。各地点で設定した目標波高を表-3に示す。また、平均二乗誤差 R の算定式を次式に示す。

$$R = \sqrt{\sum_{i=1}^N \alpha_i (H_{1/3_i} - H_{1/3_目標値_i})^2} \quad \text{ただし、} N=5 \quad (1)$$

ここに、 $H_{1/3}$ は計測波高、 $H_{1/3_目標値}$ は目標波高、 α は重み係数($\alpha=1/N$)であり、添え字 i は地点番号を示す。

検定の結果、それぞれ3種類ずつ造波した波群毎に多少の違いはあるものの、設計波では増幅率1.20程度、 $R \approx 0.37\text{m}$ 、被災波では増幅率1.24程度、 $R \approx 0.55\text{m}$ であった。なお、周期については、目標値に対し計測値が、設計波では10～13%、被災波では7～9%それぞれ過小であった。そこで後述する護岸越波量の計測結果の整理では、この影響を排除するための補正を行うこととした。

一方、表-2に前掲したある1つの代表方向スペクトルに対する造波精度について、設計波では地点4、被災波では地点2、でそれぞれ確認したところ、波高に関する

図-7 護岸越波量の空間分布の比較

誤差の絶対値は、設計波では0.10m、被災波では0.53mであり、式(1)による誤差より小さいか同程度であった。また、周期について、目標値に対し計測値は、設計波では3%程度、被災波では6%程度、それぞれ過大であった。

(3) 造波方法の違いによる護岸上の越波量分布の比較

前節までに述べた実験条件及び検定波を用いて、各造波板位置で一様でない方向スペクトルを造波した場合（以下，“SP変化”と称する）と、ある1つの代表的な方向スペクトルを各造波板位置で一様に与えた場合（以下，“SP一定”と称する）の護岸各区間の越波量をそれぞれ計測し、この違いが護岸越波量の空間的な変化傾向に与える影響を考察した。ここで、護岸上の越波計測区間（図-4参照）は75mずつ10分割し、各区間の越波量をそれぞれ背後に設置した越波マスで計測して、これを越波計測時間で除することにより、越波計測区間750mにおける時間平均越波量の空間分布を得た。また、波群毎に得られたSP変化に対する護岸越波量は、各区間で算定されるこれらの平均値とした。結果を図-7に示す。

造波検定の結果によると、SP変化に対する各検定地点での周期は、目標値及びSP一定に対する周期よりも10～15%程度短かった。そこで、各区間での護岸越波量の比較においてこの影響を排除するために、各検定地点での造波目標値を設定したときと同様な考え方を用いて、SP一定のときと同等な越波量となるよう、SP変化に対する各区間の越波量を次のように補正することとした。すなわち、設計波では地点4を経由した波が到達するであろう護岸上の区間6、被災波では地点2を経由した波が到達するであろう護岸上の区間7、の越波量はそれぞれ、この波浪諸元を代表値としたSP一定のときの越波量と

ほぼ同等になると考えられる。また、各検定地点で周期は一定であることから、これらの越波量比をそのまま、SP変化に対する各区間の越波量に乘じることとした。したがって、設計波では区間6、被災波では区間7において、両者の越波量は完全に一致する。

まず、越波を計測した全区間において、SP変化、SP一定ともに、被災波の越波量は設計波に比べ1オーダー程度小さいものの、右側の区間ほど越波量が大きくなるという大まかな傾向は比較的よく似ている。区間1から区間2にかけて越波量が小さいのは、この区間において護岸断面の改良がすでに実施されているためであるが、特にSP一定のとき、各造波板で共通の主波向が設計波と被災波では大きく異なるにも関わらず、護岸越波量の分布傾向が似ている原因は、護岸に至るまでの海底地形上で屈折変形が十分に進んだためと考えられる。

次に、造波方法（SP変化、SP一定）の違いによる護岸越波量の分布傾向についてみると、設計波、被災波ともにそれぞれ、SP変化の越波量のほうが若干大きいながらも区間6または区間7までは同様に増加する一方、区間7から区間8にかけてまたは区間8から区間9にかけては、SP一定ではSP変化よりも極端な越波量の落ち込みがみられる。このような違いが生じた原因は、図-6に示したSP変化で造波した波高及び波向の沿岸分布によるものと考えられるが、いまのところ詳細は不明である。

4. 造波装置の改良効果及び課題に関する考察

前節でみたように、等深線海岸に斜め入射する多方向不規則波について、浅海変形後の方向スペクトルが沿岸方向に異なることを考慮して造波した場合の護岸越波量の空間分布は、深海波を仮定しある1つの代表スペクトルを与えて造波した場合とは、ある区間において有意な違いが生じる可能性があることが確認された。したがって、今回の造波装置改良により従来に比べ、海岸近傍の浅海域における波浪変形を平面水槽内により詳細に再現するための機能が追加されたと考えられる。そこで本章では、平面造波実験を実施するうえでのこの機能による効果と課題について若干の考察を加えてみたい。

(1) 実験範囲の縮小による実験コストの削減

平面模型実験を実施する際には、実験波の造波や実験結果の計測・整理等に要する労力・費用もさることながら、造波した波を水槽内で適切に浅海変形させるための海底床模型の製作・設置及び解体・撤去にも、多くの時間・労力及び費用を必要とする。そこで、3章で実施したような、造波範囲を実験対象施設周辺に限定した平面模型実験を行うことにより、海底模型床の取り扱いに要する実験コストを最小限に抑えることが可能になると考

図-8 デュアルフェースサーペント造波装置の改良効果

えられる。しかしながら、その際に造波する波は従来に比べより複雑になるため、特に造波検定の精度向上及び効率化をさらに進めることが課題である。

(2) 模型縮尺の拡大による実験精度の向上

造波実験に通常多く用いられるフルードの相似則は、造波実験に用いる水の粘性による影響を無視しているため、重力による作用に比べこの影響が無視できなくなるほど小さな模型縮尺を用いた場合には、実際の現象との相似性が保てなくなり、実験精度の低下を招く恐れがある。例えば、越波実験などは、水の表面張力による影響がほぼ無視できる縮尺1/50程度以上で行うことが望ましい。また、波高計などの計測機器による計測対象の分解能は有限であるため、対象となる変位等が微小なほど計測精度が劣化してしまう。したがって、造波範囲を実験対象施設周辺に限定することは、より大きな模型縮尺の設定を可能とし、実験精度の向上にも役立つと考えられ

る(図-8)。しかし一方で、造波装置には通常、水面波の碎波限界とは別に、仕様上造波できる限界の最大波高が存在するので、浅海変形後の造波波高がこの値を超えないようにする等、実験計画の策定にあたってはこれらのバランスを図ることが肝要である。因みに、デュアルフェースサーペント造波装置における設計上の造波限界波高は、最大水深である1.0mに対し規則波で40cmである。なお、不規則波では造波する波数にもよるが、造波限界となる有義波高は概ねこの半分程度と考えられる。

5. おわりに

本研究では、港湾空港技術研究所が所有するデュアルフェースサーペント造波装置のうち制御システムを改良し、等深線海岸に斜め入射する多方向不規則波の護岸越波実験を通じて、改良に伴い新たに導入した造波機能による実施上の効果及び課題について考察した。浅海変形後の多方向不規則波に対する造波検定の効率化・高精度化が今後の課題であるが、平面水槽の大きさに伴う物理的制約を克服することを目的とした新たな造波機能は、実験範囲の縮小による実験コストの削減や、模型縮尺の拡大による実験精度の向上、等の効果が期待される。

参考文献

- 1) Hiraishi, T., K., Hirayama and H., Maruyama: Applicability of Dual Face Serpent-type Wave Generator, *Rept. of Port and Harbour Res. Inst.*, Vol.37, No.4, pp.3-35, 1998.
- 2) 平山克也, 岩瀬浩之, 加島寛章, 造波境界上の水深と方向スペクトルの空間変化を考慮した多方向不規則波の造波とその特性, 港空研報告, 第51巻, 第1号, pp.3-22, 2012.
- 3) 加島寛章, 平山克也, 大型平面水槽における波群に拘束された長周期波の造波制御システムの導入, 海開論文集, 第26巻, pp.1263-1268, 2010.
- 4) 合田良実, 鈴木康正, 岸良安治, 菊地 治, 不規則波実験における入・反射波の分離推定法, 港研資料, No.248, 24p., 1976.

(2016.3.16 受付)

IMPROVEMENT OF WAVE MAKER TO GENERATE TRANSFORMED MULTI-DIRECTIONAL WAVES IN SHALLOW WATER

Katsuya HIRAYAMA, Akinori NAKAMURA and Yasuhiro AIDA

In a wave basin, a multi-directional wave is generated in nearly deep water by a serpent-type wave maker. Its transformations in shallow water are reproduced on a bathymetry model installed in physical, however, its range is restricted with both an area of the wave basin and an applicable model scale considering the scale effect. Therefore, it may be much effective for expanding the wave test area in virtual to generate the transformed multi-directional waves in shallow water. In this study, the serpent-type wave maker is improved to install such a function with a energy balance equation model, and a model experiment of multi-directional wave overtopping on revetments on sloping bathymetry is conducted to show both an effect and a problem of generating the transformed multi-directional waves in shallow water.