

多方向不規則波を用いた波浪変形実験

高山知司*・池田直太**・小杉宜史***

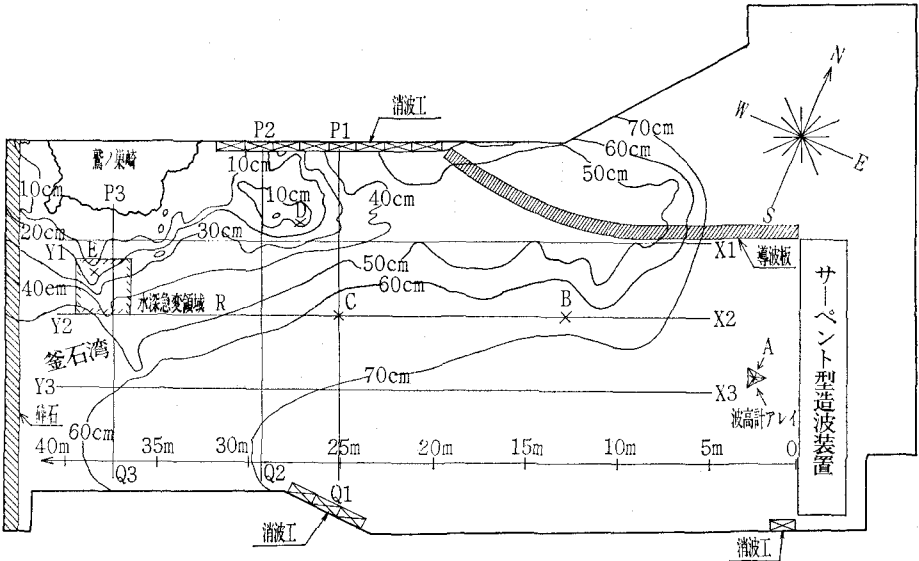
1. ま え が き

設計波浪のような巨大な波浪が来襲するときの波浪変形を推定する方法としては、数値計算と水理模型実験の2つがある。数値計算は、比較的少ない費用と時間で実施することができる上に、現実の海の波に近い多方向不規則波を用いた検討が可能であるなどの利点を有しているが、海底地形が複雑で、碎波によって波浪が急に変化する地点では、推定精度が低下すると考えられる。これに対して水理模型実験は、精度のよい推定が可能ではあるものの、従来の不規則波造波装置は一方向不規則波しか起こせなかったため、海の波の多方向性が実験に導入できないという問題があった。

最近になって、サーペント型造波装置の開発とそれに対する造波信号発生法の研究が行われ、現実の海の波に近い多方向不規則波を精度よく発生することが可能にな

ってきた。高山ら（1988）は、サーペント型造波装置を用いて一様勾配斜面上における波浪変形実験を行い、一方向不規則波と多方向不規則波に関して、波高の変化や平均水位の上昇量、サーフビートの強さの比較を行っている。それによると、一方向不規則波と多方向不規則波で大きな差異は見られなかった。しかしながら、現地の地形のように複雑に水深が変化する場合についての実験は今のところ行われた例がなく、多方向不規則波で実験した場合と、一方向不規則波で実験した場合とで、どのような差が生じるか、明らかになっていない。

そこで、本研究では、多方向不規則波と一方向不規則波の波浪変形特性の違いを調べるために、複雑な地形を示す釜石湾湾口部北部の地形を水槽内に再現し、多方向不規則波と一方向不規則波の両方を用いて波浪変形実験を行った。



図一1 釜石湾地形模型平面図

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室長
** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部波浪研究室
*** 運輸省第二港湾建設局宮古港工事事務所工務課

2. 実験条件及び実験方法

2.1 地形模型と造波機の配置

波浪変形実験では、一般に次のような条件を考慮して地形模型と造波機の配置が決められる。

- ①水面の塵などによって波が減衰しないように、実験波の周期を 0.5 s 以上にする。不規則波の場合、有義周期の前後の周期で成分波のエネルギーが大きいので、有義周期としては 1 s 以上にするのがよい。
- ②波高を測定する対象地点に波が十分に作用するようにすること。

本研究でもこれらの点について検討し、水槽内に再現する領域を水深 70 m 以浅とし、模型縮尺を 1/100 として、地形模型と造波機の配置を図-1 に示すように決定した。

釜石湾湾口部北部には、図-1 の中に水深急変領域 R で示す位置に、海底地形が非常に複雑に変化する部分がある。この領域の詳細な現地の地形を図-2 に示す。図-2 の中央付近には、水深 25 m から水深 10 m まで変化する直径が約 20 m の突起状の急峻な浅瀬がいくつも存在している。このような地形に多方向不規則波が来襲した場合、複雑な地形によって、一方向不規則波と多方向不規則波では波高が大きく異なることが考えられる。

高山ら (1984) によると、サーベント型造波装置で多方向不規則波を起こして模型実験をする場合、波高が一様になる領域が一方向波に比べて狭いとされている。したがって、図-1 の造波装置の配置では、造波装置から水深急変領域までの距離が長く、この領域に十分波が伝わらない恐れがある。しかし、図-1 に示すように、鷺

の巣崎の東側には水深の浅い海底地形が ENE 方向にせりだしているため、ENE から進入した波は、屈折によって鷺の巣崎の方向に曲がるものと考えられ、もし造波装置を釜石湾側に近付けた場合、実際に ENE から進入する波の波向と、造波した波の波向が異なってしまう恐れがある。そこで、造波装置を水深急変領域に近づける代わりに、南側的水槽側壁で波を反射させて、波高の低下を防ぐようにした。また、造波装置の北側の端から北側的水槽側壁まで図-1 に示すように導波板を設置して、側壁と同じ効果を持たせるようにした。

2.2 実験波

本実験で用いたサーベント型造波装置は、幅 50 cm のピストンタイプ型造波機30台で構成されている。実験波の周波数スペクトルとしては、次式で表わされる合田 (1987) によって提案された修正 Bretschneider—光易型の周波数スペクトルを用いた。

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^2 T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp\{-0.75(T_{1/3}f)^4\} \dots\dots\dots (1)$$

また、多方向不規則波の方向関数としては、光易型の方向関数を採用した。多方向不規則波の造波信号を作成するときの成分波を重ね合わせる方法としては、ダブルサンメーション法とシングルサンメーション法があるが、Takayama・Hiraishi (1989) はシングルサンメーション法がよいとしている。そこで本研究では、シングルサンメーション法によって1000個の成分波を重ね合わせて造波信号を作成した。目標とした実験波の有義波高は 9.2 cm、有義周期は 1.3 s である。また、多方向不規則波の信号作成時に設定する主波向は、造波板に対して直角方向の ENE 方向とし、 S_{max} の値は 25 とした。

図-1 に示すように、造波装置前面に設置した波高計アレイによって実験波を測定したところ、目標とする波浪条件が得られていることが確認できた。

2.3 実験方法

実験は、水槽内に容量式波高計をセットし、造波を開始して2分経過してから4分間水位を測定した。測定したデータをデジタルデータレコーダーを用いて0.1秒間隔で収録し、2048個のデータについて統計解析を行い、各測点における有義波の諸元や、周波数スペクトルを求めた。なお、同一波浪条件について波連を変えた2つの波を作用させて測定し、2つの波連の平均値として実験結果を整理した。

3. 波高の変化

一方向不規則波と多方向不規則波の変形特性を比較するために、図-1 に示すように造波板と直角な方向に波高測線 X1—Y1, X2—Y2, X3—Y3 を設けた。まず、これらの測線上で測定した有義波の波高 $H_{1/3}$ を造波装

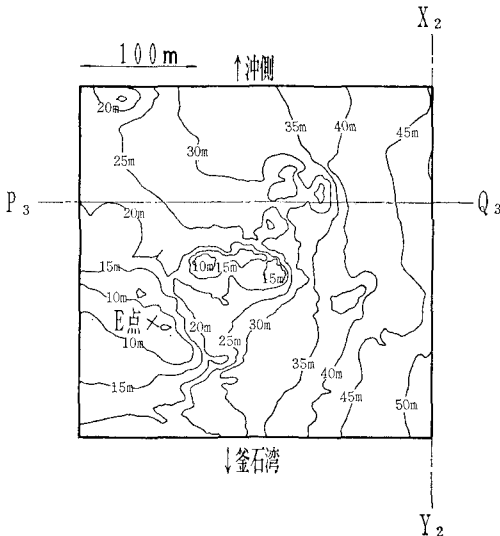
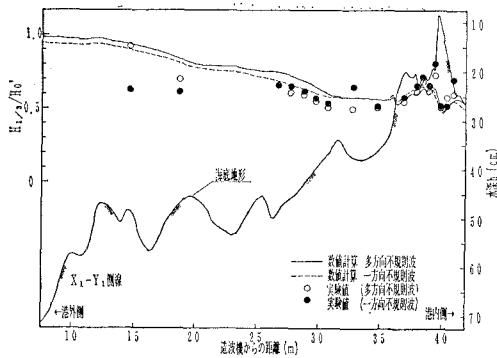


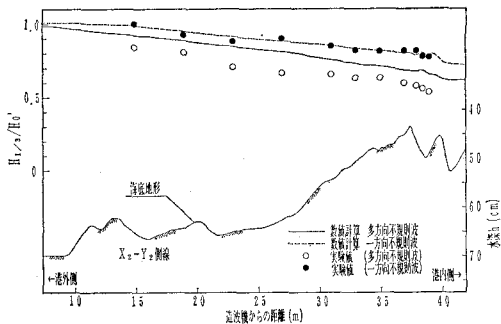
図-2 水深急変部等深線図

置前面に設置した波高計アレイで測定した有義波高 H_0 で除して求めた波高比の変化を調べた。

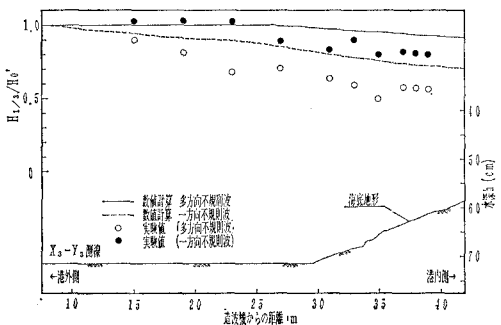
図-3 は、湾外湾内方向になる波高測線 X1-Y1, X2-Y2, X3-Y3 上の波高比の変化を示したもので、横軸は、造波装置からの距離を示している。図中の実線及び点線は、砕波を考慮したエネルギー平衡方程式を用いて実験模型の水深や境界条件を設定して、多方向不規則波と一方向不規則波の変形を計算した結果を示したものである。また、地盤記号の入った線は、測線上の海底の地形変化を示している。



(a) 測線 X1-Y1



(b) 測線 X2-Y2



(c) 測線 X3-Y3

図-3 測線上の波高比変化

図-3 (a) は、造波装置の北側の端部から湾内側に伸びる測線 X1-Y1 上の波高比の変化を示す。これによると、造波機からの距離が 15m から 20m の地点では、多方向不規則波の波高比が一方向不規則波の場合よりも大きい。その後両者の値は接近し、造波機からの距離が 25m から 38m の範囲では、ほとんど差がみられず、水深の浅くなる造波機からの距離が 38m から 41m にかけての地点では、一方向波の方が 0.1 程度大きくなっている部分がある。図-3 (b) は、造波装置の北側の端から 4m 南側の測線 X2-Y2 上の変化を示している。実験では、常に一方向波が多方向波よりも大きな波高になっており、造波装置から離れて湾内側に進むのにしたがって、その差は徐々に大きくなる。数値計算の方も実験結果と同様な傾向を示している。さらに南側になり、ほぼ造波機の中心から湾内に伸びる測線 X3-Y3 上の変化を示す図-3 (c) になると、一方向波の波高比と多方向波の波高比の差は、0.2 から 0.3 程度に大きくなる。

図-3 (b), (c) で多方向波の波高比が一方向波の波高比よりも小さくなった原因について考えてみると、測線 X2-Y2 や、X3-Y3 では、造波板からの距離が 30m よりも小さいところでは水深が深いため、砕波は起こらず、屈折もあまり起こらない。したがって、一方向波の場合は、測線上の波のエネルギーは、造波装置から湾内側に測線沿いに伝わって来るのに対して、多方向波の場合には、波の多方向性のため、造波装置の北側前面の浅い地形の影響を受けて北側に屈折してしまうことが考えられる。したがって、測線 X2-Y2, X3-Y3 上の湾奥には、サーベント型造波装置の北側の造波板で発生した波のエネルギーが伝わらなくなり、その結果一方向波と比べて波高比が大幅に小さくなるものと考えられる。図-3 (a) の中で、造波装置からの距離が 20m までの地点では、多方向波の波高比が一方向波よりも大きくなっているが、これは、造波装置の北側の部分で南側の方向に進むように作られた成分波が、地形の影響で北側に屈折して測線 X1-Y1 に伝わってきたためと考えられる。一方、図-3 (a) に示すように、測線 X1-Y1 上の造波装置から 25m 以上離れた領域では、一方向波と多方向波の実験結果は、概ね一致した。これは、この領域での水深変化が比較的なだらかなため、多方向不規則波を作用させても斜面上の屈折の影響で次第に一方向波に近付いてくるためではないかと考えられる。このことは、前述した高山ら (1988) の行った一様勾配斜面上での波高変化と共通した現象であると考えられる。

実際の海の波は、多方向不規則波であるから一方向不規則波で波浪変形実験を行った場合、地形がなだらかに浅くなり、屈折によって波が集中する地点では波浪変形

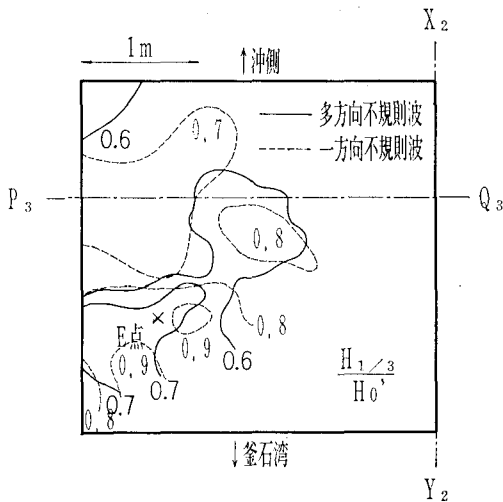
を適切に見積ることができるが、水深が深いところでも周囲の地形の屈折の影響を受ける領域では、波高を過大に見積ることになると考えられる。

図—1 および 図—2 に示した水深が急変する領域 R における一方向不規則波造波時及び多方向不規則波造波時の波高比の分布を 図—4 に示す。この領域の中央に急峻な浅瀬があるため、その背後では、波の屈折により波向線の交差領域ができて波高が増大することが予想される。実験中の観察によると、この領域を通過する波の向きは、多方向波の場合にも一方向波の場合にも 図—4 において、右上から左下の方向であった。図—4 に示した多方向波の波高比分布も一方向波の波高比分布も、図の左下に波高の増大する領域が形成される。両者を比較すると多方向波の場合には、比較的、緩やかな分布を示す

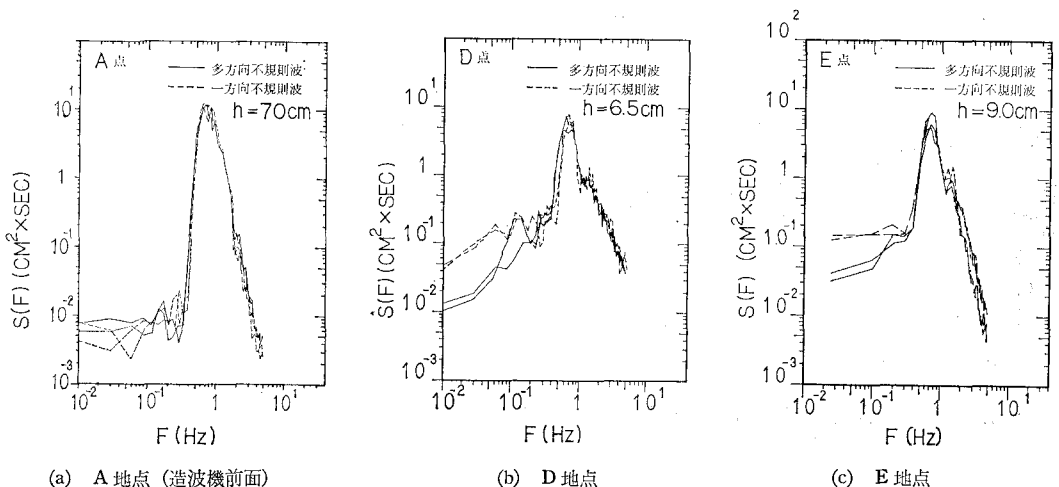
のに対して、一方向波の場合には、波高が大きくなる領域が狭く、波高が大きくなるところと小さくなるところが比較的是っきりと分かれている。これは、一方向波の場合には、この領域中央部にある急峻な浅瀬に襲われる波の向きがほぼ一定で、波向線の交差領域がほぼ同じ箇所のできるのに対して、多方向波の場合には、浅瀬を通過する波の波向が一定にならないために波向線の交差領域も通過する波によって変わるためと考えられる。

4. スペクトルの変化

波浪変形にともなう周波数スペクトルの変化を調べるために、図—1 に示した A, D, E の 3 カ所において測定した水位変動のスペクトル解析を行った。この結果を図—5 に示す。図—5 (a) は、造波機前面の波高計アレイの中心 A 点におけるスペクトルを示している。この図から、造波された直後では、一方向波と多方向波の周波数スペクトルは一致していることがわかる。図—5 (b) は、一方向波と多方向波の波高がほぼ一致する測線 X_1-Y_1 付近の D 点のスペクトル図である。この地点の水深は 6.5 cm で、碎波帯の内側になる。ピーク周波数付近のエネルギーは多方向波も一方向波も一致している。低周波側では、両者とも碎波によるエネルギーの増大がみられるが、その増大は一方向波の方が大きくなっている。図—5 (c) は、水深急変領域内の E 点のスペクトルを示している。この地点の水深は 9 cm で、やはり碎波帯の内側になっている。この図ではピーク周波数付近では、一方向不規則波の方が多方向波よりも若干エネルギーが大きくなっている。この図でも碎波による低周波側におけるエネルギーの増大がみられるが、D 点と同様に一方向波の方が多方向波よりも低周波側のエネルギーが大きくなる。



図—4 水深急変部波高比分布



図—5 周波数スペクトルの変化

合田 (1975) は、砕波帯内における波のスペクトルの低周波側のエネルギーの増大について、現地観測と断面水路を用いた模型実験によって調べている。それによると、スペクトルの低周波側のエネルギーの増大は、実験結果の方が現地観測の結果よりも大きくなっている。合田はその原因として、現地波浪の多方向性が影響しているのかもしれないと述べている。スペクトルの長周期成分の増大は、砕波に起因するといわれており、一方向波の場合には、波峰線がそろっているために、多方向波よりもその傾向が強くなると考えられる。

5. 考 察

図-3(c) で示した測線 X3-Y3 において多方向波の波高が一方向波と比較して小さくなる現象が見られた。この原因として、サーベント型造波装置の造波原理から、造波装置の両端付近で発生する波のエネルギーが低減することによっても考えられる。そこで、造波装置から 2.9m 離れた造波板と平行な測線上において、多方向波及び一方向波に関して波高を測定し、この測線上の波高変化を調べた。図-6 は、有義波高 $H_{1/3}$ と造波目標とした有義波高 H_{tg} との比の変化を示したもので、横軸 X は造波装置の中心線と波高測線の交点を原点として波の進行方向に向かって右側を正にとった距離を示している。

図-6 によると一方向波を造波した場合には、造波装置の中心から 6m の範囲で目標とした波高が得られている。これに対して多方向波を造波した場合、造波装置の中心から 4m 以内の領域の波高は目標とした波高にはほぼ一致しているが、その外側の領域の波高は急激に低下している。したがって、図-3(c) でみられた波高

測線 X3-Y3 上において多方向波の波高が一方向波よりも小さくなったのは、このことも影響している可能性がある。

また、本実験では側壁を反射板として利用しているが、反射波の位相まで考慮した造波を行っていないので、直接入射してくる波と側壁からの反射波は異なる位相を有することになり、これによる波高低下も考えられる。今後は、反射板からの反射波の位相まで考慮して、装置端部でのエネルギーが低減しないような造波信号発生法も検討していく必要がある。

6. あとがき

本研究では、複雑な釜石湾地形模型に多方向不規則波と一方向不規則波を作用させ、多方向波と一方向波で、波浪変形がどのように異なるかについて調べた。その結果、水深変化が緩やかで浅い領域では、多方向波の波高変化は、一方向波の場合に近いことがわかった。しかしながら、水深が深くても、沖側に浅瀬がある場合や、地形が複雑に変化する場所では、一方向波と多方向波では屈折の状況が異なるため異なる波高分布になる。また、砕波によるスペクトルの低周波側のエネルギーの増大は、多方向波よりも一方向波の場合に大きくなることがわかった。

また、造波機から対象地点までの距離が造波板の幅に比較して長いときには、反射板を利用して波のエネルギーが十分に到達するようにする必要がある。しかし、反射板によって重複波が形成され、波浪変形実験に悪い影響を及ぼす可能性もあり、これについては今後十分に検討しておかなければならない。

なお、本研究の方向スペクトル解析に当たって、当研究所海洋水理部、橋本典明主任研究官から多大な協力を得たことを記して、感謝を表わす次第である。

参 考 文 献

- 合田良実 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告 14巻, 第3号, pp. 59~106.
- 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.
- 高山知司・永井紀彦・合田良実 (1984): サーベント型造波装置の制御方式と造波特性, 港研資料, No. 509, 30 p.
- 高山知司・平石哲也・高山 優 (1988): 多方向不規則波の斜面上における砕波特性, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 182~186.
- Takayama, T. and T. Hiraiishi (1989): Reproducibility of Directional Random Waves in Laboratory Wave Simulation, Rept. PHRI, Vol. 28, No. 4, pp. 3~24.

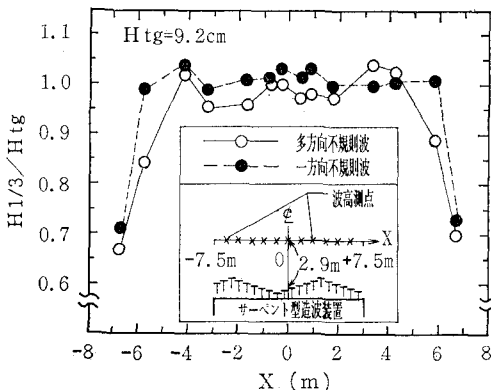


図-6 造波機前面の波高の変化