

外海波浪実験設備による現地波浪のスペクトル近似と 波圧問題への適用

小 森 修 蔵*・田 中 寛 好*・和 田 明**

1. 緒 言

従来、海岸工学上の諸問題を取り扱うにあたっては、不規則な現地波浪を統計的代表値である有義波等の規則波におきかえて実験的に研究し、これらの結果を設計に適用しており、現在に至るまで現地波浪の不規則性が諸現象に与える影響については、充分解明されていないのが実情である。したがって、今後、不規則波の特性を理論的に検討するとともに、温排水の拡散挙動、海中構造物に作用する波力・波圧等海岸・海洋工学上の諸現象に対する不規則波浪の影響を実験的に解明することは重要な課題であり、そのためには、まず、現地波浪を模型上に再現させることが必要である。現地波浪のスペクトル近似については東京電力 K.K. 福島第一原子力発電所地先海域を研究対象地点として選び、全自動化制御装置を有する造波実験設備により、模型水槽内に現地波浪と同一のスペクトルを有する不規則波を発生させる過程ならびに現地波浪スペクトルの再現性について検討した。さらにその適用例として Neumann スペクトルに近い任意の波浪を用いて直立壁に作用する波圧特性について不規則重複波浪の影響度合を基礎的に検討した。

2. 外海波浪実験設備の原理と構造

現地波浪と同様な特性を有する波浪を実験室内で再現する試みは、これまで種々行なわれているが^{1)~6)}、その手法を大別すると

- 1) 風洞水槽による方法（すなわち、水面に風を吹かせて風波を発生させるかあるいはこれに規則波を重ねさせる方法）
- 2) 造波板を駆動するモーターの回転数を時々刻々変化させる方法
- 3) 数種類の正弦波を重ね合わせる方法
- 4) ランダム波を発生させる方法

になる。1), 2) は波浪スペクトルを任意に設定することはできないが、3), 4) の手法を用いると任意のスペクトル形をもつ波浪を実験室内で再現することが可能であ

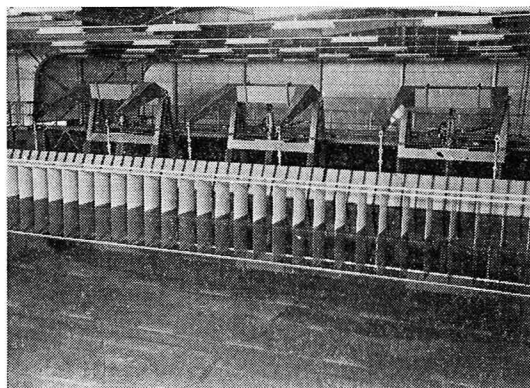


写真-1 外海波浪実験設備

る。しかしながら、これまで報告されている研究成果では、スペクトル形の中高周波数領域についてはほぼ満足される結果となっているが、低周波数領域での近似についてはいま一步の感がある。

ここで紹介しようとする外海波浪実験設備は、任意のスペクトルを有する波を起こすための装置であり^{7), 8)}、写真-1 に示すような外観を呈しており、長さ 50 m、幅 22.6 m、高さ 1.5 m の平面造波水槽の中に設置されている（図-1 参照）。

この設備は、

- (i) 直立フラップ型造波板（水中起伏式フラップ型造波板に取り替え可能）を有する造波機本体
- (ii) 電気-油圧サーボ機構を有する造波機駆動装置
- (iii) 電子計算機（HITAC 10）を本体とする制御システム

より成り立っている。

- (i) 造波機本体

造波機本体は写真-1 に示すように、1 基あたり 6 m のスパンを有する 3 基より構成されており、各基分割運転および 3 基同期運転が可能である。発生波の特性は、最大波高 35 cm、周期 0.5~10 sec である。

- (ii) 造波機駆動装置

造波板は油圧サーボ機構により変位制御される油圧加振機により駆動される。加振機を駆動するための動力を供給する油圧源装置は、可動容量型アクシャルプランジ

* 正会員 工修 電力中央研究所土木技術研究所

** 正会員 工博 電力中央研究所土木技術研究所

するために、エネルギースペクトルが大きく違う波を3種類発生させ、それぞれの $\sqrt{\Phi_H/\Phi_S}$ を求めたところ、 $f \sim \sqrt{\Phi_H/\Phi_S}$ の関係は、水深 30 cm では波浪スペクトルの形、大きさには関係なく、 f の一価関数になることが判明した(図-3 参照)。また、造波特性の実験結果は、規則波に関する Biésel の理論値よりかなり小さくなっているが、これは不規則波では周波数相互間でのエネルギー移行がおこるため、また、造波運動の周期、振幅の変化に抗して波を起こすことになり、エネルギー消失が大きくなるため、造波効率が低下してくるものと考えられる。この結果は、規則波の造波特性がそのまま不規則波にも適用できるとしている従来の研究結果とは異なるものである。

4. 外海波浪実験設備による現地波浪スペクトルの再現性⁸⁾

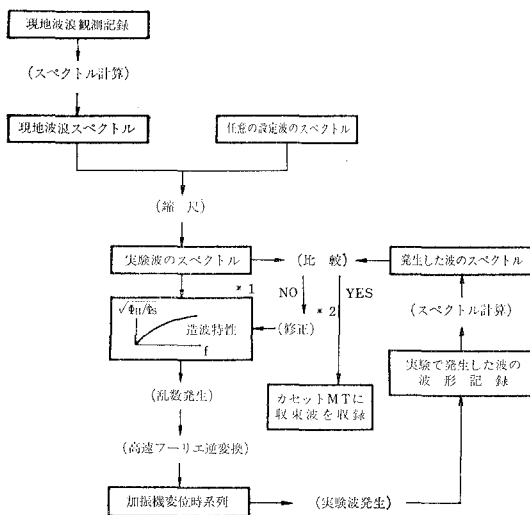
(1) 波浪スペクトルの再現方法

次のごとき過程で波浪スペクトルの再現を試みた(図-4 参照)。

(i) 設定波スペクトルを $f \sim \sqrt{\Phi_H/\Phi_S}$ 造波特性曲線を用いて造波機の動きのスペクトルに変換し、乱数を発生させ、高速フーリエ逆変換をほどこして造波機の動きの時系列に直す。

(ii) この時系列に従って造波機を動かし、発生する波を波高計で計測し、発生波のスペクトルを計算する。

(iii) 設定波スペクトルとの違いが生じた場合は、差の 1/2 だけ修正する。



- * 1 造波特性の表中 Φ_H : 表面波スペクトル, Φ_S : 造波板の静水面における変位のスペクトル, f : 波の周波数
 * 2 (修正)では「実験波のスペクトル」と「発生した波のスペクトル」の差の半分を修正する。

図-4 現地波浪発生手順ならびに収束過程

(iv) 以上の手順を繰り返す、誤差が所定の値以下となった時に収束波スペクトルが得られたものとして、その時の造波機の動きの時系列をカセット MT に収録する。

(2) 現地波浪のスペクトルの再現性

前項で述べた手続きに従えば、設定波スペクトルに対する収束波スペクトルが得られるはずである。ここでは、設定波スペクトルとして東京電力 K. K. 福島第一原子力発電所地先海域の波浪を選び、縮尺 1/150 の模型上に再現させるよう試みた。発電所地先海域の沖合 1 km, 水深 11.3 m に設置された水圧式波高計(受圧部水深 9.3 m)により得られた波形記録から、 $\Delta t = 2.94$ sec 間隔で 384 点 (3×2^7) を読み取り、スペクトルを計算した。

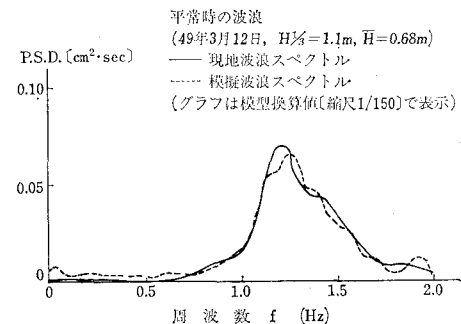
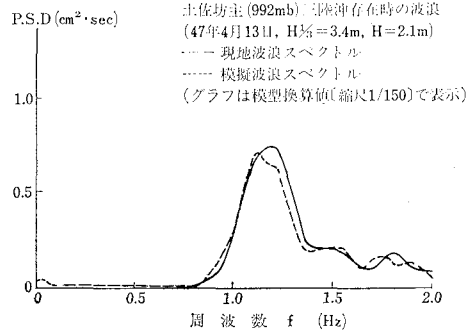
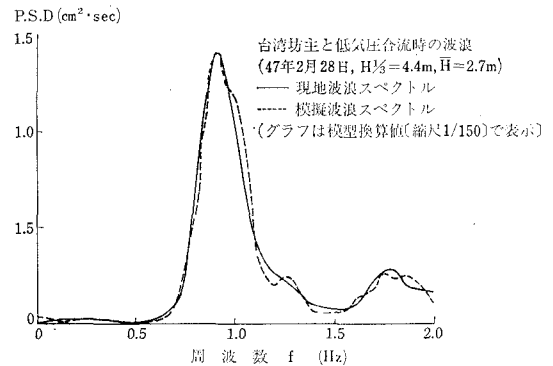
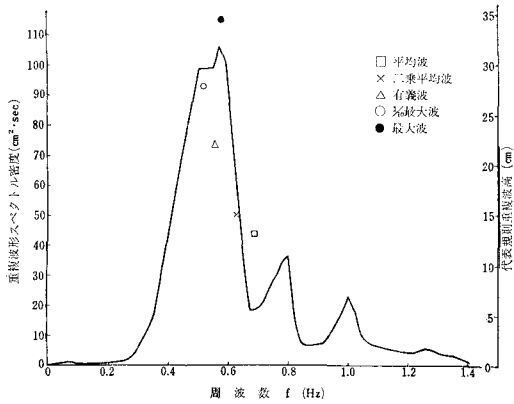


図-5 現地波浪のスペクトル近似(福島第一原子力発電所地先海域の波浪)

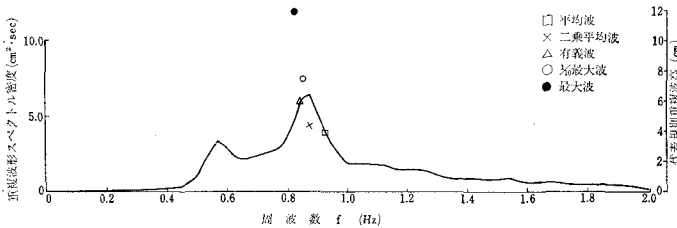
現地の長期間連続観測記録から、気象・海象条件の異なる3つのスペクトルを選んで示したのが図-5である。図中実線で示したのが現地波浪スペクトルであり、これを設定波スペクトルとして、4(1)の過程に従って波浪スペクトルの再現を試みた。図に示した点線は、この過程を8回程度繰り返した後得られた収束波スペクトルである。誤差許容値としては、設定波スペクトルのピーク値の1/10以上のスペクトル密度値をもつ周波数範囲内では相対誤差評価として20%をとり、ピーク値の1/10以下のスペクトル密度値しかもたない周波数範囲内においては絶対誤差評価とした。このような評価方法により、設定波スペクトルへの収束の度合および収束速度もかなり改良された。図-5に示した現地波浪スペクトルと模擬波浪スペクトルとは、いずれの場合もかなりよく一致しており、現地波浪を十分よく模擬しているものと判断される。

5. 直立壁に作用する不規則波の重複波圧

本節では、外海波浪実験設備を用いた波圧問題の一適用例として、大水深海洋構造物の耐波設計を念頭に置き、直立壁に作用する不規則波の重複波圧を対象とする。重複波圧を対象とした従来の耐波設計では、たとえば代表規則波として1/10最大波を選び、この規則波が作用した際の規則波圧をサンフルー簡略式を用いて算出し、それを設計波圧として用いている。また、合田¹⁰⁾は最大波を対象として、砕波圧と重複波圧とを連続的に結びつけた一つの式で設計波圧を算定している。これらの設計法の問題点は、不規則波圧群より直接求まる代表波圧が不規則波群より求めた代表規則波作用下の規則波圧と等しいという仮定を含んでいることである。すなわち、例えば一連の波群が作用した時の最大波圧が波群中の最大波を規則波で近似したときの波圧に等しくなると想定していることである。本報告では、一連の不規則波の時系列から統計的代表波(平均波、二乗平均波、有義波、1/10



その1 $h=70$ cm の例



その2 $h=30$ cm の例

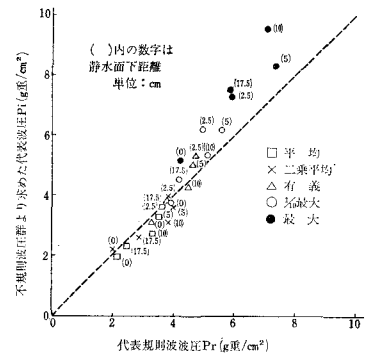
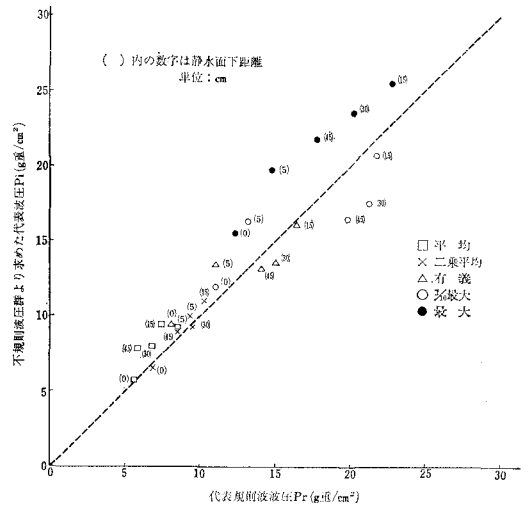


図-6 代表規則波圧と不規則波波圧との比較

最大波, 最大波) を求めてこの波を作用させた場合の規則波圧と, 不規則波群を作用させて得られた波圧記録より統計的に求めた代表波圧 (平均波圧, 二乗平均波圧, 有義波圧, 1/10 最大波圧, 最大波圧) との比較検討を Neumann スペクトルや現地波浪スペクトルに近い任意のスペクトルを有する 4 種類の不規則波について行なった。

(1) 実験装置ならびに実験方法

波圧測定装置は, 長さ 1 m, 幅 50 cm, 厚さ 6 mm のジュラルミン製の波圧測定板に波圧計として拡散型小型圧力変換器 (定格圧力最大 0.1 kg/cm²) を取りつけたものを使用した。実験方法は次の通りである。

(i) 前節で述べたスペクトル近似方法により, 水深 70 cm において 2 種類, 水深 30 cm において 2 種類の任意のスペクトルを有する不規則波を作成する。

(ii) 波圧測定板の直前に波高計をセットし, 発生不規則波の重複波形をピックアップして, その時系列からゼロアップクロス法によって一連の重複波の波高, 周期を求める。同時に, 各水深位置での不規則重複波圧時系列を収録する。

(iii) (ii) で得た一連の波高, 周期から代表規則重複波を求め, これと同等の規則波を作用させた際の各水深位置での重複波圧 Pr を調べる。ここで重複波圧は波圧の全振幅で定義する。

(iv) (ii) で得た不規則重複波圧群からゼロアップクロス法により統計的代表波圧 Pi を求め, (iii) で得た代表規則波による波圧と比較する。

(2) 実験結果および考察

実験に用いた重複波形スペクトルのうち 2 例を 図—6 の左側に示す。代表規則重複波高とその周波数も合せて図示している。同時に, それぞれに相当する Pi と Pr の比較を右側に示した。これらから得られる結果をまとめると,

1) 静水面近くの平均波圧, 二乗平均波圧に関しては, 不規則波圧と代表規則波圧とはほぼ等しい。

2) 静水面近くでは, 有義波以上の波形勾配の大きな波では, 不規則波圧の方が大きくなる傾向がある。

3) 深い位置では, 不規則波圧の方が大きくなる場合と逆に代表規則波圧の方が大きくなる場合の双方がみられ, プロットのばらつきが大きくなる傾向がある。

以上のような傾向は, スペクトルの形, 大きさを変えて実験を行なったところ常に見うけられた。

1), 2) の傾向が生ずる原因は, 波形勾配の比較的小さい波では波形が対称に近いが, 波形勾配の大きい不規則波では波形が非対称 (つまり, 波峰が波谷より大きい確率が高い) になるためと思われる。3) の傾向が生ずる原因は, 不規則波が種々の周期の波を含むため水深方向

でそれぞれの波圧の減衰率が異なるためと思われる。つまり, 深い場所での最大波圧は最大波に起因するとは限らないのである。

このように設計に用いるべき最大波等の波形勾配の大きな波では不規則波圧の方が大きくなる傾向が強くなり, 従来の代表規則波を介して求めた波圧による耐波設計法は再検討されなければならないことを示唆している。

6. 結 語

外海波浪実験設備を用いて, 現地波浪スペクトルの再現性を検討した結果, 成分波の周波数のほぼ全域にわたってきわめて近似度の高いスペクトルをもつ波を再現することができた。また, 現地波浪実験の一適用例として直立壁に作用する不規則波の重複波圧について検討したところ, 水面近くでは, 不規則波による最大波圧の方が最大波による規則波圧より大きい場合が多いことが判明し, 今後さらに検討し, 耐波設計法に修正を加えてゆく必要があると思われる。

なお, 実験にあたっては, 電力技術整備 K. K. 竹内 出氏ならびに日本海洋計測 K. K. の諸氏の協力を得たことを記し, 謝意を表するものである。

参 考 文 献

- 1) 合田良実・永井康平: 造波板の変速運動による発生不規則波のスペクトルについて, 運輸省港湾技術研究所報告, 第 8 巻第 3 号, pp. 47-75, 1969.
- 2) 岩垣雄一・石田 昭: 波起し機によって起した不規則波の特性, 第 16 回海講講演集, pp. 29-34, 1969.
- 3) 岩垣雄一・村上仁士・酒井哲郎・木村 晃: 電気油圧式不規則波発生機について, 第 17 回海講講演集, pp. 409-414, 1970.
- 4) 富永正照・橋本 宏: 造波機による不規則波の発生, 第 17 回海講講演集, pp. 415-419, 1970.
- 5) 岩垣雄一・木村 晃: 不規則波発生機による現地波浪のシミュレーションシステム, 第 21 回海講講演集, pp. 231-235, 1974.
- 6) 合田良実・鈴木康正・岸良安治: 不規則波実験とその特性について, 第 21 回海講講演集, pp. 237-242, 1974.
- 7) 小森修蔵・田中寛好: 外海波浪実験設備における造波特性, 第 30 回年講講演概要集, pp. 16-17, 1975.
- 8) 小森修蔵・田中寛好: 外海波浪実験における波浪のスペクトル近似法, 第 31 回年講講演概要集, pp. 51-52, 1976.
- 9) Biésl, F. et F. Suquet: Les appareils générateurs de houle en laboratoire, La Houille Blanche, mass-avril, pp. 145-165, 1951.
- 10) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 運輸省港湾技術研究所報告, 第 12 巻第 3 号, pp. 31-69, 1973.