

不規則波に対する円柱構造物の動的応答

小 森 修 蔵*・ 田 中 寛 好*・ 和 田 明**・ 竹 内 出***

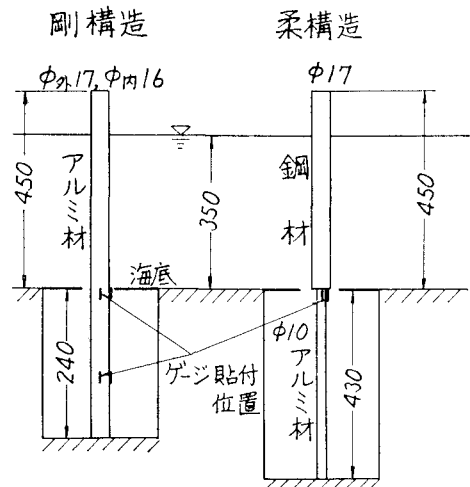
1. 緒 言

近年、海洋開発に関心がもたれ、海上発電所建設等が現実の問題となってきたが、この場合、建設水深が従来の海岸構造物に較べて増大するため、構造物の固有周期が長くなり、海洋波の周期に近くなる。このため、たとえ小さな波浪による外力であっても共振現象を起し、構造物が倒壊する危険性が生じてくるものと考えられるので、動的影響をも考慮した設計が不可欠となる。ところで、従来、このような問題に対して、構造物の固有振動周期あるいはその整数倍の周期の単一波を一定時間作用させ、構造物の挙動を検討してきた。しかしながら、実際の海洋でこのような波浪が連続的に襲来する可能性はないとは言えないが、一般的には、不規則な波浪が襲来すると考えるのが妥当である。そこで、こうした問題の解決のため、基礎的な第一歩として円柱構造物を対象とし、まず、単一周期波（規則波）によって従来の研究結果の検証を行なった後、現地波浪（不規則波）を作用させ、構造物の動的挙動を検討したものである。

2. 実験装置および実験方法

実験は、任意のスペクトルをもつ波浪を発生できる外海波浪実験設備を用いて行なった¹⁾。実験水槽の大きさは、長さ 50 m、幅 22.6 m、高さ 1.5 m である。大水深に設置される海洋構造物は種々考えられるが、ここでは、基礎的に検討するのに最も都合のよい円柱構造物を対象にした。そして、現在、この種の研究で一般的に用いられる実験水槽規模にかんがみ、模型縮尺を 1/100 程度とした場合を考えた。この円柱構造物が、水深 35 m に設置された時の波に対する周波数応答特性も考慮した模型を製作し、これを「柔構造」とした。次に、これと同一寸法で共振現象が無視できる剛な構造物模型を製作し、両者に同時に種々の波浪を作用させ、底部にかかるモーメントを比較することによって、従来の「剛構造」としての取り扱いが、大水深ではどのように修正されな

ければならないかを検討した。実験に使用する単円柱構造物模型（柔構造）の周波数特性が、現地と相似になるようにするために、図—1 に示すような構造とした。この模型の固有振動数は、空中で 3.19 Hz、水中で 3.08 Hz である。模型は、上部円柱（ $\phi 17$ mm の SS 41 鋼）と下部円柱（ $\phi 10$ mm のアルミ）より構成されている。ひずみゲージは、模型の海底位置に、波の進行方向ならびに直角方向に貼り付けた。円柱模型の上部と下部の接続ならびに下面への固定に関しては、相当の精度で製作しないと自由振動させた時に楕円運動を起し、所期の目的が果たせなくなるため、かなりの注意を要した。一方、剛構造模型を製作するにあたっては、まず、実験に使用する波の範囲でひずみが生ずるように、模型の材質、構造を配慮した。この模型の固有振動数は、空中において 36 Hz である。模型の材質はアルミで、構造は中空（ $\phi_{外} 17$ mm、 $\phi_{内} 16$ mm）になっている。この模型は、図—1 に示すように設置し、その構造系を現地と相似にするためにバネ部は設けなかった。また、微小ひずみを検出するために切り欠きを入れてゲージを貼り、最小検出可能ひずみを 2×10^{-7} 程度とした。しかも、実験波によって共振しないように、剛構造模型の固有振動数が波の振動数の 10 倍程度以上になるように工夫し



図—1 実験装置

* 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

*** 正会員 電力技術整備株式会社

た。ひずみゲージの貼り付け位置は、模型の海底位置とそれより 20 cm 下とし、波の進行方向ならびに直角方向に貼り付けた。実験には、規則波と不規則波を使用した。規則波としては、波高 0.3~10.9 cm [現地換算 0.3~10.9 m]、周期 0.33~2.86 sec [現地換算 3.3~28.6 sec] の範囲の波を用いた。不規則波としては、3 種類を使用した。すなわち、不規則小波 ($H_{1/3}=1.40$ cm, $T_{1/3}=0.80$ sec) [現地換算 $H_{1/3}=1.40$ m, $T_{1/3}=8.0$ sec], 不規則中波 ($H_{1/3}=3.56$ cm, $T_{1/3}=1.08$ sec) [$H_{1/3}=3.56$ m, $T_{1/3}=10.8$ sec], 不規則高波 ($H_{1/3}=4.45$ cm, $T_{1/3}=1.10$ sec) [$H_{1/3}=4.45$ m, $T_{1/3}=11.0$ sec] であり、これらの現地波浪スペクトル形については、図-4 を参照されたい。

3. 従来の研究結果の検討

単円柱構造物の規則波による動的応答に関しては、榎木ら^{26,27)}の報告をはじめとして多くの研究結果⁴⁷⁻⁴⁹⁾がある。これらの研究結果を検証するため、「柔構造」と「剛構造」の単円柱構造物模型に規則波を作用させ、海底位置に作用するモーメントについて検討した。図-2 には、波の進行方向底部モーメントの「柔構造」物と「剛構造」物の比を示す。横軸には、波の周期を柔円柱構造物の固有周期で除して無次元化した値をとってある。

柔構造物の固有周期 (T_0) の整数倍の周期を有する規則波が定常的に襲来する際は、柔構造物には共振現象が見られ、剛構造物の場合より、大きな底部モーメントが生ずる。特に、柔構造物の固有周期の波が作用する時には、比率にして 29 倍もの底部モーメントがかかる場合がある。図-2 では、r.m.s. K-C 数をパラメーターにとってみたが、この値にはあまり依存しないようである。6 倍周期以上の波および固有周期の非整数倍の波では、共振現象は明瞭でなくなり、底部モーメント比は整

数倍の場合ほど大きくない。

図-3 には、柔構造物についての波に直角方向と進行方向の底部モーメントの比率が示されている。構造物の固有周期あるいは 2 倍周期ではこの比率は小さいが、これらの高周波の波は、実験上においては小波高でしか安定な規則波は得られないため K-C 数が大きくなり、見かけ上比率があまり大きくない結果のみ得られたものと考えられる。波高が大きくなり、K-C 数が大きい場合には、縦軸の値が充分 1.0 を越える可能性がある。(現地でも、この周期では、それほど大きな波があるとは考えられない。) 3~5 倍周期の波では、K-C 数が大きい場合は、底部モーメントは直角方向が進行方向の 2 倍近くなる。これは、円柱の左右に生ずるうずの規模ならびにその非対称性が大きくなり、これに誘われて共振現象が起こりやすくなるためであると考えられる。6 倍周期の波あるいは非整数倍の周期の波では、波と直角方向の底部モーメントは相対的に小さいが、K-C 数が大きい場合には、比率が 1.0 以上になる場合がある。

以上の結果は、榎木らの研究をはじめ、多くの研究結果と傾向を同じくするものである。なお、剛構造物の進行方向モーメントは計算値でなく実験値を用いた。

4. 規則波および不規則波による動的応答の検討

従来までの多くの研究は、規則波を作用させて得られた結果がほとんどである。そこで筆者らは、規則波を用いて得られた結果で従来の研究結果を検証するとともに、不規則波を用いて得られた結果と比較検討することにより、波の不規則性が単円柱構造物の動的応答に与える影響について検討した。

図-4 に、柔構造物にかかる合成底部モーメント (波の進行方向と直角方向底部モーメントを合成した値)「柔合」と、剛構造物の進行方向底部モーメント「剛 α 」の比を示した。横軸には、波の周期と柔構造物の固有周期の比をとってある。剛構造物に関しても合成底部モーメントをとる方が妥当とも考えられるが、従来の設計の基本としているのが進行方向モーメントであることからこの値を採用した。ただし、波によっては、剛構造物であっても波と直角方向にかなり大きなモーメントが発生することがあるので注意を要する⁷⁾。図-4 は、左から規則波、不規則小波、不規則中波、不規則高波作用下の底部モーメント比の実験結果である。不規則波

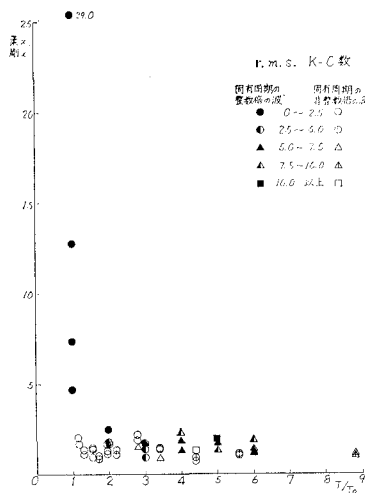


図-2 規則波による円柱構造物の底部モーメント比(波の進行方向)

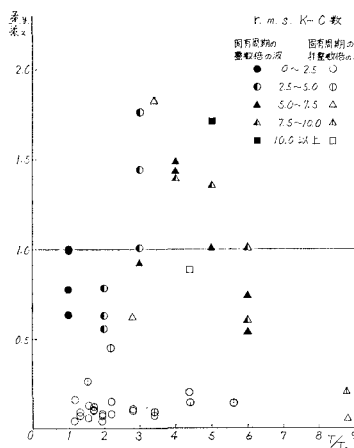


図-3 規則波による柔構造物の直角方向と進行方向の底部モーメント比

の波浪スペクトル形も同時に示してある。「柔合」、「剛 x 」の底部モーメントを求めるにあたっては、規則波では最大値、不規則波については波形をゼロアップクロス法によって1波1波区切り、それぞれの波に対応する底部モーメント値を採用した。

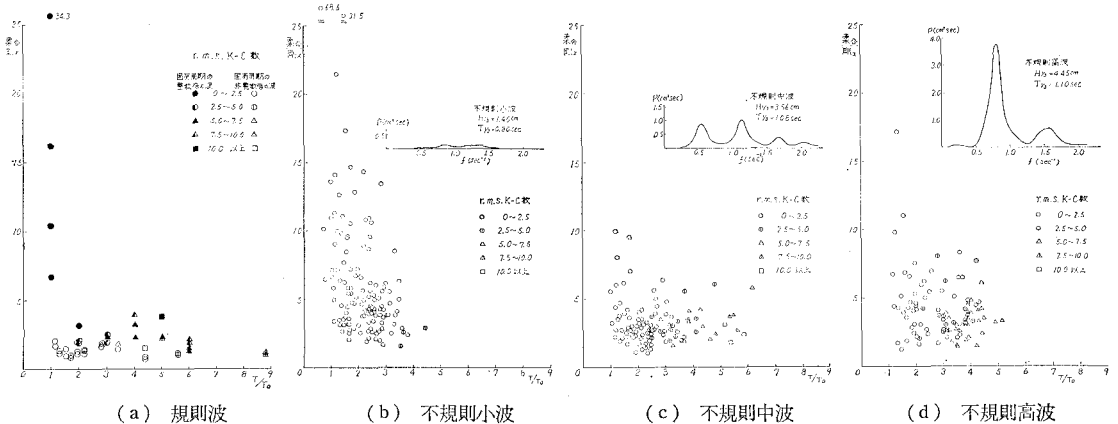
規則波では、固有周期のところで 柔合/剛 x が大きな値になるが、他のところではただか3倍程度であるのに対し、不規則波では全体的にこの比率が高くなっている。特に、不規則小波ではこの傾向が著しい。しかしながら、この場合、底部モーメントの絶対値は小さいので、比率だけでは一概に論じられない。また、K-C 数をパラメーターとしているが、この値による差はほとんど見られない。

図—5 には、図—4 の観点をえて示してある。すなわち、縦軸に「柔合」の絶対値、横軸に「剛 x 」の絶対値をとってある。まず、不規則波の値の方が全体的に「柔合」軸の近くに集まっており、共振の度合いが大きいことがわかる。そして、同一波高でみると、「柔合」の値は規則波より不規則波の方が大きい。これは、波が不規則な方が共振しやすいことを示している。さらに、不規則波では、小さい波高の時であっても大きな「柔合」

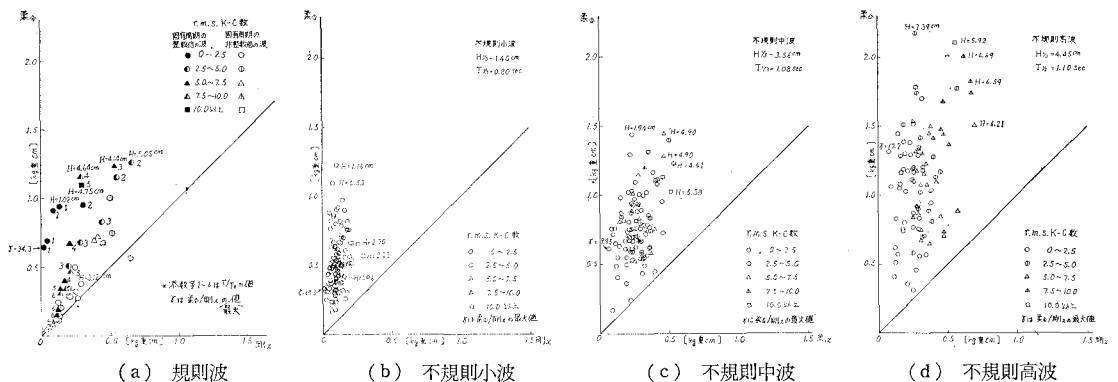
値を示すことがある。これは、それ以前の波による非対称性うずの影響が残っており、それと後続の波によるうずが干渉し合うことにより、円柱の周囲で圧力の非対称性が強くなるためであろうと推察される。

そこで、時系列的に動的挙動をとらえた様子を 図—6 ならびに 図—7 に示す。図—6 は不規則高波の場合の波形および底部モーメントの時系列の生データである。剛構造物の底部モーメントが波の時系列波形とほぼ相似の動きをしているのに対し、柔構造物にあっては、 x, y 方向とも共振の頻度が高く、ある時点から急激に共振の度合いが大きくなることがわかる。

図—7 には、3種類の不規則波において、柔構造物におけるそれぞれの最大底部モーメントが生じた前後の時系列関係を抽出し、それらの動的応答の特徴を考察した結果を示したものである。(a) 小波高ながら不規則に変動する場合、(b) 中程度の波高でやや規則的に変化する場合、(c) 比較的大きな波で、波高の変動が大きい場合、を比較してみると、いずれの場合もある時点から柔構造物において共振の度合いが大きくなり、最大底部モーメントが生じている。また、波高と周期の変化が大きいほど共振度合いが大きい。岩垣ら⁸⁾、樫木らの研究結果を



図—4 規則波、不規則波による円柱構造物の底部モーメント比

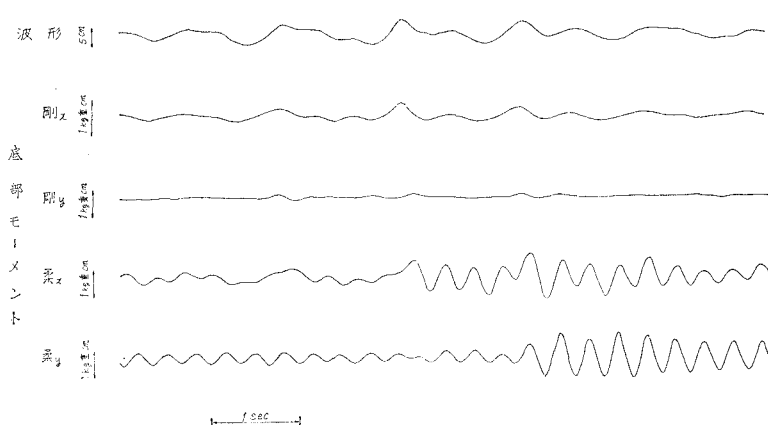


図—5 規則波、不規則波による剛 x 、柔合の底部モーメントの比較

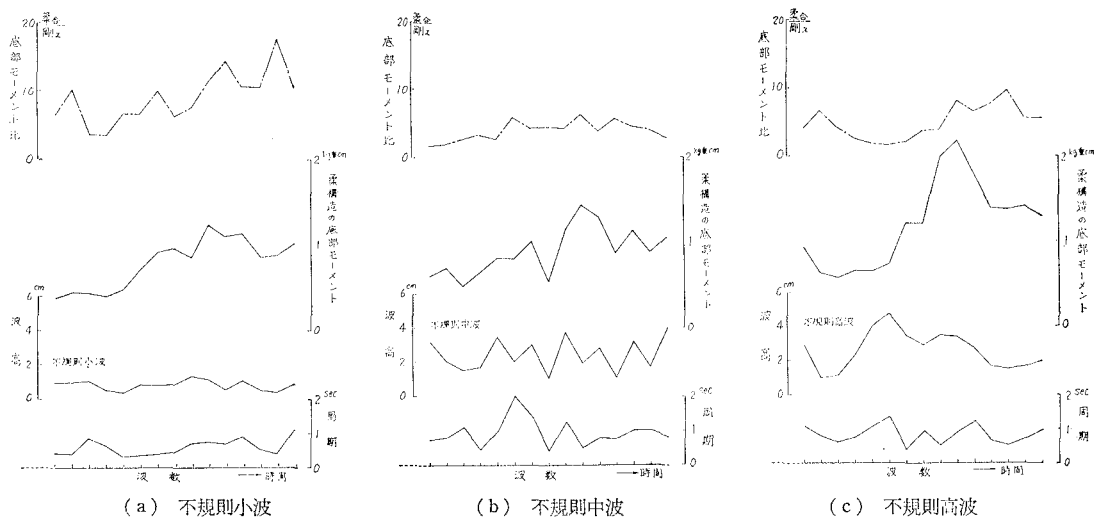
参考にして考察すると、K-C 数自体が大きい場合ほど、また、筆者らの不規則波による検討結果から K-C 数が急変する場合ほど、円柱構造物の周囲にできるうずの規模およびその非対称性の度合いが大きくなり、共振現象が誘発されやすく、共振の度合いも大きくなると考えられる。

5. 結 語

以上、従来の研究結果を参照しつつ、規則波と不規則波による単円柱構造物の「剛構造」を基本に



図—6 不規則高波における波形および底部モーメントの時系列の一例



図—7 不規則波の時系列特性の相違による底部モーメント変化の特性

した「柔構造」の動的応答を考察したところ、波の K-C 数が大きく、また急変する場合ほど円柱構造物の周囲にできるうずの規模およびその非対称性の度合いが大きくなり、共振現象が誘発されやすく、共振度合いも大きくなることが判明した。したがって、今後、この種の問題を取り扱うにあたっては、規則波よりも不規則波で検討する必要がある。また、不規則波時系列のランダム特性と波浪応答特性との関連性をさらに詳細に検討して、不規則波作用下の動的応答を考慮した大水深海洋構造物の設計手法を早急に確立する必要があると考える。

なお、実験にあたっては、日本海洋計測株式会社吉田直人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) 小森修蔵・田中寛好・和田 明：外海波浪実験設備による現地波浪スペクトル近似と波圧問題への適用，第24回海講論文集，pp. 318～322，1977。
- 2) 榎木 亨・中村孝幸・三木秀樹：波動場の円柱後流渦による振動応答の実態とその予測について，第23回海講論文集，pp. 33～38，1976。
- 3) 榎木 亨・中村孝幸・三木秀樹：単円柱構造物の波による振動挙動について，第24回海講論文集，pp. 367～371，1977。
- 4) Keulegan, G. H. and Carpenter, L. H.: Forces on cylinders and plates in an oscillating fluid, Jour. of Nat. Bur. Stand., Vol. 60, No. 5, pp. 423～440, 1958.
- 5) Sarpkaya, T.: Forces on cylinders and spheres in a sinusoidally oscillating fluid, Jour. of Applied Mechanics, Trans. of the ASME, pp. 32～37, March, 1975.
- 6) 本多忠夫・光易 恒：波の周期に近い固有周期を有する円柱と波との相互作用に関する研究，第23回海講論文集，pp. 58～63，1976。
- 7) 竹内 出・小森修蔵・田中寛好：大水深円柱構造物の波浪応答に関する実験的検討，第34回年講講演概要集，1979。
- 8) 岩垣雄一・石田 啓：小口径円柱まわりの波圧分布と後流渦について，第22回海講論文集，pp. 531～537，1975。
- 9) 川瀬健夫・西村一人：模型実験による海洋構造物の動的挙動について，第24回海講論文集，pp. 377～380，1977。