浮遊式海洋構造物の実海域実験

その 4. 方向スペクトル波中における動揺応答

正員 大 松 重 雄* 正員 安 藤 定 雄*
正員 小 宮 治 彦**

At-sea Experiment of a Floating Offshore Structure Part 4. Motion Responses in Directional Spectra Waves

by Shigeo Ohmatsu, *Member* Sadao Ando, *Member*
Haruhiko Komiya, *Member*

Summary

The at-sea experiment of the moored floating platform “POSEIDON” has been carried out at Japan Sea since 1986 for four years. In this experiment, three ultra-sonic type wave probes were installed as a line array at the sea bottom of the test area, and the directional wave spectra were obtained using measured three time series of water surface elevation by Maximum Likelihood Method (MLM). Also, the six components of motions of POSEIDON were measured by accelerometer and vertical/directional gyro.

In this paper, the authors tried to estimate the directional frequency response functions in wave frequency range using these field data. The results estimated by present method were compared with the theoretical response functions and it was found that we need many experimental runs of various wave directions for obtaining fairly good response functions.

1. 結 言

浮遊式海洋構造物の波浪中動揺応答を精度よく予測することは非常に重要であり、多くの理論的、実験的研究がなされている。従来、これらの研究の多くは海洋波を長波頂の一方方向不規則波とみなして行われて来たが、近年、海洋波を現実の短波頂不規則波として取り扱った研究が盛んに行われるようになった。(たとえば文献 1, 2, 3)。この場合、海洋波はあらゆる方向からの不規則波が重ね合わされたいわゆる方向スペクトル波として取り扱われる。そして方向スペクトル波中の動揺の線形一次応答は線形重ね合わせ理論で推定可能であるといわれている。

しかしこれらの研究は理論計算および模型実験によるものであり、実機実験によって検証された例は著者の知る限りないようである。そこで本論文では、浮遊式海洋構造物『POSEIDON 号』(以後 P 号と略す)の実海域実験データを利用し、短波頂不規則波中の実測値から応答関数を推算す

ることを試みる。また逆に、そうして求めた応答関数あるいは理論計算による応答関数から方向スペクトル波中の動揺応答を推定した結果と実測値との比較を行うことにする。P 号の動揺特性についてはすでに文献 4) で模型実験結果との比較を中心に発表しているが、本論文は方向波中の動揺としての取り扱いを中心に述べたものである。

なお不規則波中での海洋構造物の動揺には、よく知られているように、線形一次応答のほかに長周期運動などの非線形応答があるが、それらについては別の機会にゆずることにする。

2. 実 機 実 験

実海域実験に使用した P 号は、Fig. 1 に示すように 12 本のフーティング付きコラムに支えられたプラットフォームの形状をしている。コラムの直径は 2 m (左右舷の 2 本ずつは 2.5 m)、フーティングの直径は 4 m、高さは 2.5 m で、各コラムはそれぞれ 10 m の間隔で配置されている。P 号の主要目を Table 1 に示す。また P 号は、沖側のコーナー各 2 本、陸側のコーナー各 1 本、合計 6 本のチェーンで弛緩係留されている。係留の方向は、実験海域の冬場の海象

* 運輸省船舶技術研究所海洋開発工学部

** 日本鋼管(株)

Fig. 1 Side view and plan view of POSEIDON

Table 1 Principal dimensions of POSEIDON

ITEMS	DIMENSIONS
Length overall	34.0 m
Breadth overall	24.0 m
Height of main structure	13.5 m
Draft	5.5 m
Distance between columns	10.0 m
Column diameter	2.0 m (2.5 m)
Column height	8.5 m
Footing diameter	4.0 m
Footing height	2.5 m
Displacement (Δ)	514.63 m ³
Height of C.G. (KG)	6.48 m
Height of C.B. (KB)	2.01 m
Metacentric height	
Transverse (GMT)	1.89 m
Longitudinal (GML)	5.30 m
Radius of gyration	
Roll (Kxx)	9.81 m
Pitch (Kyy)	12.86 m
Yaw (Kzz)	14.85 m

* water depth is 41.6 m.

Fig. 2 Arrangement of chain lines and wave probes

条件を考慮し、主に船首方向から入射波を受けるように、船首をWNW (292.5°) の方向にして係留されている⁵⁾ (Fig. 2 参照)。

P 号の動揺は, surge, sway, heave は甲板上中央に設置した加速度計の信号を時間につき 2 重積分することにより求めた。その際, P 号の傾斜による重力加速度の成分は除去した⁶⁾。Roll, pitch は vertical gyro で, yaw は船用 directional gyro で計測した。なお本論文に示す surge, sway, heave は甲板上中央での値であり, 重心位置での値ではない。

入射波の計測は, P 号の船首側前方約 180 m に設置された 3 台の海底設置型超音波式波高計により行った。前報⁷⁾に示したように, 3 台の波高計アレイの信号より最尤法 (MLM) で入射波の方向スペクトルを求めた。

データ収録は P 号上のパソコンにより 1 日 4 回, 6 時間毎に各 34 分 8 秒間, 自動的に行われる定時計測 (サンプリングタイム $\Delta t = 0.5$ 秒) と, 観測員の判断でスタート/ストップ信号を P 号に送信することによって行われる長時間連続の臨時計測 ($\Delta t = 1.0$ 秒) の 2 種類が行われたが, 本論文では定時計測の結果を利用する。

3. 方向周波数応答関数の推定

浮遊式海洋構造物の方向周波数応答関数の推定については竹沢ら³⁾の水槽実験による研究がある。本論文でもそこ

Fig. 3 Estimated directional frequency response functions of surge motion using 30 experimental cases

Fig. 4 Estimated directional frequency response functions of (a) surge, (b) sway, (c) heave, (d) roll, (e) pitch and (f) yaw motions using 62 experimental cases

に示された解析方法を参考にする。

方向スペクトル波中での動揺の応答スペクトルは次式で与えられる。

$$S_i(\omega) = \int_{-\pi}^{\pi} |H_i(\omega, \chi)|^2 W(\omega, \chi) d\chi \quad (1)$$

ここで S_i は動揺の応答スペクトル, W は方向波のスペクトル関数であり, H_i が求めるべき動揺の方向周波数応答関数である。 ω は周波数, χ は波向角で本論文では向い波状態を 0° と設定した。方向波のスペクトル関数 W は, 周波数に対するエネルギー密度の分布を表す周波数スペクトルと, 各周波数毎の方向の分布を表す方向分布関数の積として, 次のように表される。

$$W(\omega, \chi) = D(\omega, \chi) S_g(\omega) \quad (2)$$

ここで $D(\omega, \chi)$: 方向分布関数

$$\int_{-\pi}^{\pi} D(\omega, \chi) d\chi = 1$$

(2) 式を (1) 式に代入すると

$$S_i(\omega) = S_g(\omega) \int_{-\pi}^{\pi} |H_i(\omega, \chi)|^2 D(\omega, \chi) d\chi \quad (3)$$

を得る。ここで $S_g(\omega)$ と $D(\omega, \chi)$ は 3 台の波高計アレイの信号を使用した MLM 解析により, また $S_i(\omega)$ も動揺の実測値のスペクトル解析により求められるので, (3) 式を離散化することにより $H_i(\omega, \chi)$ を未知数とする方程式が得られる。 $H_i(\omega, \chi)$ を求めるためには, 離散化による未知数の数以上の方程式が必要であり, 複数のデータを利用して連立方程式を解くことになる。

以下, 推算結果について述べる。

計算には 1988 年 12 月および 1989 年 1 月の定時計測のデータを利用した。実験海域の波向は, ある程度以上の波高になるとほとんど P 号の前の方から, すなわち $\chi = \pm 90^\circ$ の範囲に限られるので, 求めるべき方向周波数応答関数もこの範囲に限定した。また計算する周波数の範囲は入射波のパワーがある程度以上必要であり, $0.08 \sim 0.16$ Hz の範

Fig. 5 Principal directions and significant wave heights of 62 experimental cases used for estimation

囲とした。 χ の離散化については, 10° 毎および 30° 毎の 2 種類, 計算に使用する実験ケースの数は未知数の数から 62 ケースまで, 種々試みたが, 10° 毎の場合, 精度良い結果を得ることができなかった。 30° 毎の場合, 未知数の数は, 応答関数の左右対称性を考慮すると, 4 個である。4 個の未知数に対し, 4 個の実験ケースを利用すれば解は得られるが, 非常に精度が悪い。したがって, それ以上の実験ケースを利用し, 最小二乗法で解を得ることにした。計算に使用した実験ケース (つまり方程式の数) が 30 個の場合の surge の例を Fig. 3 に示す。これでもあまり精度の良い推算とは言えない。最終的には 62 個のケースを利用した。結果を Fig. 4 に示す。推算結果は χ が大きくなるほど, つまり波のパワー少なくなるほどばらつきも大きくなる。しかしながら, 図中には特異点分布法による理論計算の結果 (波高 3.0 m, コラムの軸方向の $C_d = 2.0$, 軸に垂直方向の $C_d = 1.0$ で計算) も示すが, 両者はおおよそ一致していることがわかる。推算結果のばらつきは, 風や流れなどの外乱の影響, 波の方向スペクトルおよび動揺の応答スペクトルの

Fig. 6 Bird eye view and contour curve of directional wave spectrum for the case of S8121705

Fig. 7 Estimated response spectra of (a) surge, (b) sway, (c) heave, (d) roll, (e) pitch and (f) yaw motions for the case of S8121705

Fig. 8 Errors of root mean square of zeroth spectral moment

推定精度のほかに、求めるべき応答関数そのものが厳密には波高に対して線形ではないことにも起因しているであろう。

なお、竹沢ら³⁾は方向周波数応答関数をフーリエ級数に展開する方法を示している。今回その方法も試みてみたが、結果はほぼ同様であった。いずれにせよ、精度良い解を得るにはできるだけ入射波の方向の異なる実験ケースを多数使用することが必要である。参考のために、今回の計算に使用した 62 ケースの入射波の有義波高と主波向の分布を Fig. 5 に示しておく。

4. 方向スペクトル波中の応答予測

方向周波数応答関数が与えられれば、(3)式により方向スペクトル波中の動揺応答を推算することができる。

前節で求めた方向周波数応答関数を用いて、動揺のスペクトルを推算した結果の一例を Fig. 7 に示す。この場合の入射波の有義波高は 4.9 m、主波向はほぼ船首からであった。方向スペクトルを鳥瞰図および contour curve で Fig. 6 に示す。Fig. 7 より推算値と実測値はほぼ一致していることがわかる。図中には前節で述べた理論計算による方向周波数応答関数を使用した推算結果も示してあるが、一致度はあまりよくない。特に pitch について顕著である。それは Fig. 4(e) に示されているように推算された応答関数と理論計算による応答関数がかなり違っていることによる。また Fig. 7(a) には $\chi=0^\circ$ の応答関数のみを使用した場合(すなわち長波頂と仮定した場合)の推算結果も示してあるが、当然ながら実測値より大きな値となっている。

方向スペクトル波中の応答予測の精度を調べるために、予測されたスペクトルの 0 次モーメントの平方根を、実測のそれと比較してみた。

$$E1=(\sqrt{m_0'}-\sqrt{m_0})/\sqrt{m_0} \quad (4)$$

$$E2=(\sqrt{m_0''}-\sqrt{m_0})/\sqrt{m_0} \quad (5)$$

ここで m_0 は実測値、 m_0' は推算された応答関数による予測値、 m_0'' は理論計算で求めた応答関数による予測値である。前節で示した 62 ケースにつき、この E1 および E2 を入射波の主方向を横軸に示したのが Fig. 8 である。図中には E1、E2 の平均値および標準偏差も示してある。この図よりどの程度で応答が予測できるかがわかる。横運動の精度が縦運動のそれより悪いのは、入射波が主に船首方向であり、横運動量が相対的に小さいからであろう。また、E1、E2 の標準偏差を比較すると、E1 の方が小さいことがわかる。

5. 結 言

本論文では浮遊式海洋構造物 POSEIDON 号の実海域実験のデータを利用し、方向スペクトル波中の動揺について、線形方向周波数応答関数の推算を試みた。得られた結

論を要約して、以下に示す。

- 1) 本論文で示した方法により、実海域における方向波および動揺の実測データから線形方向周波数応答関数の振幅部分を推算することができる。ただし、実用上十分な精度の応答関数を得るにはできるだけ広い範囲からの入射波を数多く利用する必要がある。
- 2) こうして求めた方向周波数応答関数と波方向スペクトルから、どの程度の精度で動揺応答のスペクトルを予測することができるかを示した。

おわりに、本研究は運輸技術研究開発費による「海洋構造物の沖合展開のための開発研究」の一環として海洋科学技術センターを始め、日本海事協会、民間企業七社との共同研究として実施された。本研究の実施に当たって設置された総合研究会の元良会長および浮遊式構造物分科会の宝田会長を始め、関係各位にお礼申し上げます。

共著者の一人である海洋開発工学部安藤定雄部長は本論文作成中の 1990 年 12 月 25 日、突然永眠されました。

本実海域実験は安藤部長の強力なイニシアチフのもとに実施されてきたものであり、その努力がこれから結実するという時に帰らぬ人となられたことは、本人にとっていかにばかりか無念であったでしょう。今後、部員一同は故人の志を継いで、このプロジェクトの完成に努力するつもりであります。

この紙面を借りて、安藤定雄部長のご冥福をお祈り致します。

参 考 文 献

- 1) 竹沢誠二、小林顕太郎：方向スペクトル波中における海洋構造物の応答—その 1 線形一次応答—、日本造船学会論文集、第 165 号 (1989)
- 2) Takezawa, S., Hirayama, T., Shivashis Acharya: Towed Ship Motion Test in Directional Spectrum Waves in a Long Tank (Part 3), Journal of Society of Naval Architects of Japan, No. 167 (1990)
- 3) 竹沢誠二、平山次清、上野誠也、陳剛：浮遊型海洋構造物の方向スペクトル波中実験に基く方向周波数応答関数推定、日本造船学会論文集、第 168 号 (1990)
- 4) 大松重雄他：浮遊式海洋構造物による実海域実験(5) 模型実験と実海域実験との相関について、第 54 回船舶技術研究所発表会講演集 (1989)
- 5) 安藤定雄、工藤君明、矢後清和：浮体式海洋構造物による海域実験、日本造船学会誌、第 695 号 (1987)
- 6) 大川豊他：浮遊式海洋構造物による実海域実験(4) 実験構造物の運動性能、第 50 回船舶技術研究所研究発表会講演集 (1987)
- 7) 吉元博又、安藤定雄、小林顕太郎：浮遊式海洋構造物の実海域実験その 3. 実験海域の波方向スペクトルについて、日本造船学会論文集、第 168 号 (1990)