

半潜水式マルチユニット構造物の波浪中動揺ならびに 結合力に関する一考察

片山正敏*・宇野木賢一**

1. まえがき

海洋空間に安定した広大なプラットフォームを構成するための一手段として、“マルチユニット方式”が考えられる。これは単体のプラットフォーム（一般に要素プラットフォームと呼ばれる）を建造の上、現地まで曳航し、順次結合して最終的に所要規模のプラットフォームを建設しようとするものである。

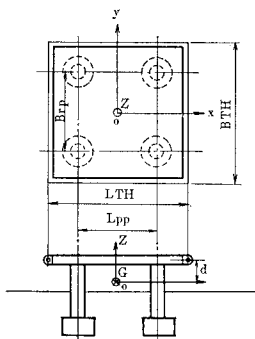
要素プラットフォームの結合方式としては、剛結、ピン結合、リンク結合、ばね結合などがあるが、要素浮体を単列に複数個ピン結合したマルチユニットの波浪中動揺特性、結合力に関しては Marbury¹⁾、田原ら²⁾の研究があり、またブロック結合方式についての系統的研究^{3)~6)}もある。さらに要素浮体を多列に複数個剛結合した（すなわち平面的な広がりをもった）ものとしては Ochi⁷⁾、Seidle⁸⁾ らの研究があげられる。

著者らは、要素プラットフォームとして波浪中動揺特性に優れた半潜水式プラットフォームについて、ピンまたはばね結合したマルチユニット構造物の波浪中動揺ならびに結合力に関して、基礎的な近似理論と二、三の数値計算により、その特性を考察してみた。

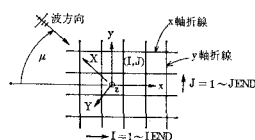
2. 波浪中動揺および結合力に関する理論的考察

(1) 記号、座標系

検討の対象とした要素プラットフォームの形状を図一（単体）、図二（マルチユニット）に示す。記号は $o-x, y, z$: 基本座標系（原点は船体中心、重心高さとする）、 d : 重心・結合部間距離、 L_{pp} (L): コラムセンター間距離 (x 方向)、 B_{pp} : 同 (y 方向)、 LTH : 要素プラットフォーム結合部間距離 (x 方向)、



図一 要素プラットフォーム



図二 マルチユニット

BTH : 同 (y 方向)、 $IEND$: x 方向要素数、 $JEND$: y 方向要素数、 μ : 波方向、 H : 波高、 λ : 波長、 ω : 波円周波数、 t : 時間、 k : 波数 ($=2\pi/\lambda=\omega^2/g$)、 $A=[a_{ij}]$:

慣性力係数マトリックス、 $B=[b_{ij}]$: 減衰力係数マトリックス、 $C=[c_{ij}]$: 復原力係数マトリックス、 $S=\{x, y, z, \phi, \theta, \psi\}$: 動揺 (サージ, スウェイ, ヒープ, ロール, ピッチ, ヨー)、 $G=\{g_i\}$: 外力ベクトル ($\cos$ 項)、 $H=\{h_i\}$: 同 ($\sin$ 項)、 $\bar{F}=\{\bar{F}_x, \bar{F}_y, \bar{F}_z, \bar{M}_x, \bar{M}_y, \bar{M}_z\}$: 結合部に作用する力、 $\bar{F}'=\{\bar{F}'_x, \bar{F}'_y, \bar{F}'_z, \bar{M}'_x, \bar{M}'_y, \bar{M}'_z\}$: 結合部に作用する重心回りの力、 D_1, D_2, Y_1, Y_2 : 結合条件の変換マトリックス、 D_3, D_4, Y_3, Y_4 : 結合力の変換マトリックス、 K : ばね定数マトリックス、 c (添字): $\cos$ 項、 s (添字): $\sin$ 項、 i (添字): i 要素の諸元、 $*$ (添字): $\cos$ 項ベクトル、 $\sin$ 項ベクトル、 A (添字): 片振幅、 d : 要素プラットフォーム排水量、を示す。

(2) 要素プラットフォームの運動方程式

解析にあたって、次のような基本的仮定が設けられている。

- 流体は非圧縮、非粘性、非回転の理想流体とする。
- 没水部（フロート）の断面寸法は、波長に比較して十分小さく、かつ、その流体力学的な相互干渉は無視できる。
- 波は規則波、微小振幅の深海進行波とし、運動は微小で、線形理論が適用できるものとする。
- 連結部は 1 自由度の理想的ピン結合またはばね結合とし、すべてのフロートは同一形状とする。

6 自由度の運動方程式は、形式的に (1) 式のように表わすことができる。係数マトリックスのうち、流体力係数は、強制動揺試験結果などからもとめる。

$$A \cdot \ddot{S} + B \cdot \dot{S} + C \cdot S = G \cdot \cos \omega t + H \cdot \sin \omega t \quad \dots \dots \dots (1)$$

動揺 S を $\cos$ 項と $\sin$ 項に分解し、(2) 式のように表示し、(1) 式に代入して整理すると (3) 式の代数方程式を得る。

$$S = S_c \cdot \cos \omega t + S_s \cdot \sin \omega t$$

* 正会員 三菱重工業(株)広島研究所 海洋開発研究室

** 三菱重工業(株)広島研究所 海洋開発研究室

$$=S_0 \cdot \cos(\omega t - \varepsilon_s) \dots\dots\dots (2)$$

$$\begin{bmatrix} C - \omega^2 \cdot A & \omega B \\ -\omega B & C - \omega^2 \cdot A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ H \end{bmatrix} \dots\dots (3)$$

(3) 結合条件

要素間の結合条件として、ピン結合、ばね結合の2種類を考えると、結合部での境界条件は、 y 軸折線の場合、隣りあった両要素プラットフォームの変位(動揺)と結合力の関係から次のように表わされる。

$$D_1 \cdot S_{i-1} - D_2 \cdot S_i + K_{i-1} \cdot \bar{F}_{i-1} = 0 \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$D_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & LTH/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -LTH/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & d & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -LTH/2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & LTH/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$K_i = \begin{bmatrix} 1/(K_x)_i & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(K_y)_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/(K_z)_i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(K_\phi)_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/(K_\psi)_i & 0 \end{bmatrix}$$

したがって、要素プラットフォーム i に対する運動方程式は次のようになる。

$$A_i \cdot \ddot{S}_i + B_i \cdot \dot{S}_i + C_i \cdot S_i = F_i + (\bar{F}_i' - \bar{F}_{i-1}') \dots\dots\dots (5)$$

$$i=1 \sim IEND, \quad \bar{F}_0' \equiv \bar{F}_{IEND}' = 0$$

$$\bar{F}_i' - \bar{F}_{i-1}' = D_3 \cdot \bar{F}_i - D_4 \cdot \bar{F}_{i-1} \dots\dots\dots (6)$$

ただし、

$$D_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -d & 0 & 1 & 0 \\ d & 0 & -LTH/2 & 0 & 0 \\ 0 & LTH/2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -d & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} d & 0 & LTH/2 & 0 & 0 \\ 0 & -LTH/2 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

x 軸折線の場合にも形式的には(4)~(6)と同様な式が得られる。

(4) マルチユニットの運動方程式

全要素形状が同一であるとし、波の位相差による効果を考慮して、(2)、(3)項に述べた要素プラットフォームの運動方程式および結合部条件を組立てることにより、次のようにマルチユニットに関する運動方程式が得られる。

$$\left. \begin{aligned} S_i &= S_i^c \cdot \cos \omega t + S_i^s \cdot \sin \omega t \\ F_i &= G_i \cdot \cos \omega t + H_i \cdot \sin \omega t \\ \bar{F}_i &= \bar{F}_i^c \cdot \cos \omega t + \bar{F}_i^s \cdot \sin \omega t \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

とおき、(5)、(6)式に代入し整理すると、

$$\begin{bmatrix} C_i - \omega^2 A_i & \omega B_i \\ -\omega B_i & C_i - \omega^2 A_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_i^c \\ S_i^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G \\ H \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{F}_i^c - \bar{F}_{i-1}^c \\ \bar{F}_i^s - \bar{F}_{i-1}^s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (8)$$

$$\begin{bmatrix} \bar{F}_i^c - \bar{F}_{i-1}^c \\ \bar{F}_i^s - \bar{F}_{i-1}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_3 & 0 \\ 0 & D_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{F}_i^c \\ \bar{F}_i^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} D_4 & 0 \\ 0 & D_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{F}_{i-1}^c \\ \bar{F}_{i-1}^s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (9)$$

ここで

$$X_i = \begin{bmatrix} C_i - \omega^2 A_i & \omega B_i \\ -\omega B_i & C_i - \omega^2 A_i \end{bmatrix}$$

$$S_i^* = \{S_i^c, S_i^s\}, \quad F_i^* = \{G_i, H_i\}$$

$$\bar{F}_i^* = \{\bar{F}_i^c, \bar{F}_i^s\}, \quad \bar{F}_{i-1}^* = \{\bar{F}_{i-1}^c, \bar{F}_{i-1}^s\}$$

$$Y_3 = \begin{bmatrix} D_3 & 0 \\ 0 & D_3 \end{bmatrix}, \quad Y_4 = \begin{bmatrix} D_4 & 0 \\ 0 & D_4 \end{bmatrix}$$

とすると、(8)、(9)式は次のように書き換えられる。

$$X_i \cdot S_i^* - Y_3 \cdot \bar{F}_i^* + Y_4 \cdot \bar{F}_{i-1}^* = F_i^* \dots\dots\dots (10)$$

$$\text{ただし、} i=1 \sim IEND, \quad \bar{F}_0^* \equiv \bar{F}_N^* = 0$$

また、

$$Y_1 = \begin{bmatrix} D_1 & 0 \\ 0 & D_1 \end{bmatrix}, \quad Y_2 = \begin{bmatrix} D_2 & 0 \\ 0 & D_2 \end{bmatrix}$$

$$K_i^* = \begin{bmatrix} K_i & 0 \\ 0 & K_i \end{bmatrix}$$

とおくと、(4)式は次のように書き換えられる。

$$Y_1 \cdot S_{i-1}^* - Y_2 \cdot S_i^* + K_{i-1}^* \cdot \bar{F}_{i-1}^* = 0 \dots\dots\dots (11)$$

(10)、(11)式より全体の代数方程式を組立てると(12)式が得られる。

$$\begin{bmatrix} X_1 & -Y_3 & 0 \\ Y_1 & K_1^* & -Y_2 & 0 \\ 0 & Y_4 & X_2 & -Y_3 & 0 \\ & & Y_1 & K_2^* & -Y_2 & 0 \\ & & 0 & Y_4 & X_3 & -Y_3 \\ & & & & Y_1 & K_3^* & -Y_2 & 0 \\ & & & & & & Y_1 & K_4^* & -Y_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1^* \\ \bar{F}_1^* \\ S_2^* \\ \bar{F}_2^* \\ \vdots \\ S_i^* \\ \bar{F}_i^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1^* \\ 0 \\ F_2^* \\ \vdots \\ F_i^* \\ 0 \end{bmatrix}$$

近が最も減少率大きい。

垂直方向結合力は、要素数 5~6 で一定値に収束し、2 個結合体に比較すると 40~60% 減となり、 λ/L が大きいほど減少率も大きい。

図-7, 8 より明らかなように、結合力は垂直力にくらべ水平力のほうが大きい値をとり、今回計算に使用したプラットフォーム（排水量約 14 000 t）に対し、結合力の収束値は対排水量比で次のようになる。

水平力/排水量=0.2~0.3

垂直力/排水量=0.1~0.2

(2) 結合条件の影響

結合部条件の影響をみるため、次のようなばね結合およびピン結合について、2 個結合体の動揺、結合力を求めた。

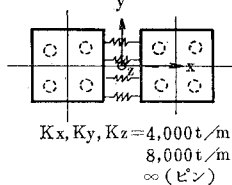


図-9 一辺あたりのばね定数

ばね結合の場合、動揺は $\lambda/L=2.5$ の付近でピーク値をとり、ばね定数が大きくなるとその値は小さくなる。 $\lambda/L < 2$ の範囲ではばね定数の影響はほとんどみられない。結合力についても定性的には動揺と同じことがいえる。

なお、斜波中の動揺、結合力についてもほぼ同様のことがいえる。ヒープ量は縦波中とほぼ同程度であり、その他の動揺、結合力は小さくなっている。

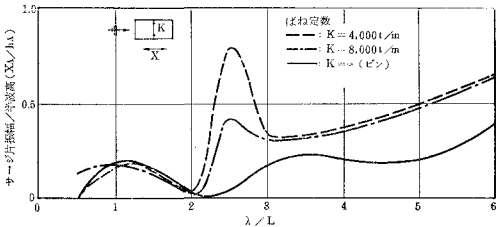


図-10 サージ (2 個結合体)

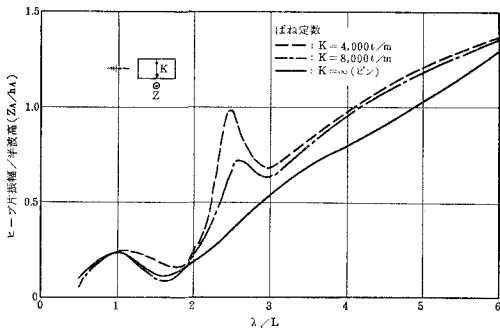


図-11 ヒープ (2 個結合体)

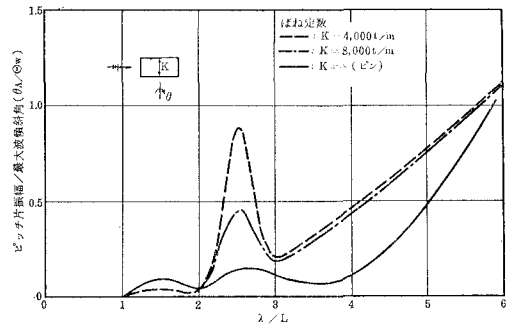


図-12 ピッチ (2 個結合体)

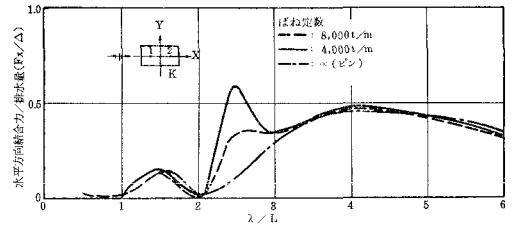


図-13 水平方向結合力 (2 個結合体)

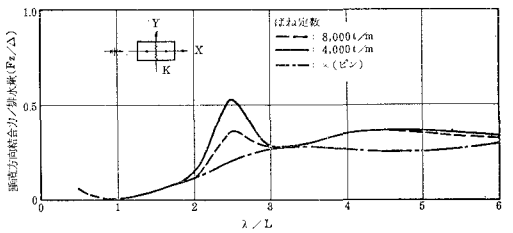


図-14 垂直方向結合力 (2 個結合体)

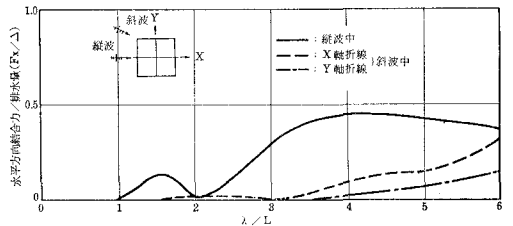


図-15 水平方向結合力 (斜波中, 4 個結合体)

4. む す び

要素プラットフォームとして、フーティング型半潜式海洋構造物を選定し、ばねまたはピン結合した、マルチユニットの波浪中動揺計算式を電算プログラム化し、動揺特性、結合力などについて、斜波を含んだ条件下で二、三の数値計算を実施した。主要な結果は次の通りである。

- (1) 要素プラットフォームの動揺は、要素数が増大するとともに、ある一定値に収束するようである。
- (2) また、要素数の増大にともなう、上下揺れと水

平揺れは減少するが、縦揺れは逆に増加する傾向にある。

- (3) 要素プラットフォームの結合力は、水平力成分の方が大きいようである。
- (4) 結合部の条件に関しては、ばね結合は、ピン結合にくらべて、長波長領域での動揺ならびに結合力が大きくなるようである。

参 考 文 献

- 1) Marbury, F., Jr.: The motions of connected hull in regular head seas, MIT Report No. 67-14, 1967.
- 2) Tahara, S., Y. Kusajima and N. Nojiri: Load on the couplers between several floating bodies in the waves, The 2nd International Ocean Development Conference, pp. 1543-1558, 1972.
- 3) 日本舶用機器開発協会: 大型浮遊海洋構造物の調査研究事業報告書, pp. 140-188, 1973.
- 4) 日本舶用機器開発協会: 大型浮遊海洋構造物の調査研究事業報告書, pp. 100-151, 1974.
- 5) 日本舶用機器開発協会: 大型浮遊海洋構造物の調査研究事業報告書, pp. 85-131, 1975.
- 6) 日本舶用機器開発協会: 大型浮遊海洋構造物の調査研究事業報告書, pp. 61-113, 1976.
- 7) Ochi, M. K. and R. M. Vulo: Seakeeping characteristics of a multi unit ocean platform, SNAME Spring Meeting, Hawaii, 1971.
- 8) Seidle, L. H.: Seakeeping considerations for the Hawaii floating city platform, The 2nd Inter. Ocean Devel. Confer., pp. 1195-1206, 1972.
- 9) 藤井 斉・高橋 雄: 海洋構造物に作用する流体力の推定, 三菱重工技報, Vol. 7, No. 1, pp. 1-8, 1970.