

東急建設株式会社 正員 ○渡会 英明
 中央大学 正員 川原 睦人

1. はじめに

現在、通常のドルフィンにおける設計強度は、主に、係留浮体の接岸衝撃力と地震力とによって決定されているが、大型浮体が係留されたドルフィンを想定した場合には、浮体が波浪により受ける力がすべてドルフィンに作用すると考えられ、設計外力としての波力は無視できないものである。しかし、係留浮体周辺の波は、浮体自身による回折・散乱などによって複雑な様相を呈し、浮体に働く波力を計算によって求めることは非常に困難である。そこで、本報では、浮体とドルフィンを一つの構造体と考え、有限要素法を用いることによってドルフィンに係留された浮体に働く波力の数値計算を試みた。

2. 有限要素法による定式化

流体は非粘性、非圧縮、非回転で、波は微小振幅波であると仮定すると、係留浮体による表面波の回折・散乱現象は、次のヘルムホルツの方程式によって表現される。

$$\nabla^2 F(x, y) + k^2 F(x, y) = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (1)$$

$$\Phi, n = u_n \quad \text{on } \Gamma_s \quad (2)$$

$$\sqrt{r} (\Phi_{sc, r} - i k \Phi_{sc}) = 0 \quad r \rightarrow \infty \quad (3)$$

ここで、F: 振幅分布関数, k: 波数, u_n : 浮体表面の法線方向速度, n: 浮体表面の法線ベクトル, Φ_{sc} : 散乱波ポテンシャルである。

定式化するにあたり、流体領域を図-1に示す様に内部領域 Ω_A と外部領域 Ω_B に分割して考える。内部領域に対する空間方向への離散化には有限要素を用い、外部領域においては無限領域を表現するために境界要素を用いると、系に関する方程式は次のように得られる。¹⁾

$$\begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] & [K_{13}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] & [K_{23}] \\ [K_{31}] & [K_{32}] & [K_{33}] + [B]^{-1}[A] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{F_1\} \\ \{F_2\} \\ \{F_3\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_{1,n}\} \\ \{0\} \\ [B]^{-1}[A] \{F_{31,n}\} + \{F_{31,n,n}\} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ここで、 F_1, F_2, F_3 : 浮体表面、内部領域、内部領域と外部領域の境界での振幅分布関数である。

3. 流体と構造体の連成解析

ドルフィンに係留された浮体の波浪による変位は微小であると仮定し、波と構造体の振動は時間的に調和であるとする。式(4)において、流体と構造体との境界点でのフラックス量が決まれば、構造体の振動を考慮した解析を行うことができる。

まず、ドルフィンの骨組構造に対し、ドルフィン全体系の剛性方程式を立てる。次に、浮体を剛体とみなし、ドルフィンの浮体に接触している節点と浮体重心点での節点力の関係(図-2)と変位の関係(図-3)を用いることによって、次式を得ることができる。

$$\{\delta_o\} = [K_o] \{P_o\} \quad (5)$$

ここで、 P_o, δ_o : 浮体重心点の受ける外力および変位量である。

同様にして、浮体表面での変位と外力との関係は次のように表わされる。

$$\{\delta\} = [R]^T [K_o] [R] \{P\} \quad (6)$$

ここで、[R]: 図-2, 3で表わされるマトリックスである。

さらに、浮体表面の法線方向変位 $\{\delta'\}$ と $\{\delta\}$ との関係を次式にて表わす。

$$\{\delta'\} = [H] \{\delta\} \quad (7)$$

さて、式(2)の仮定より、

$$\{\Phi, n\} = i \omega \{\delta\} = -i g / \omega \cdot \{F, n\} \quad (8)$$

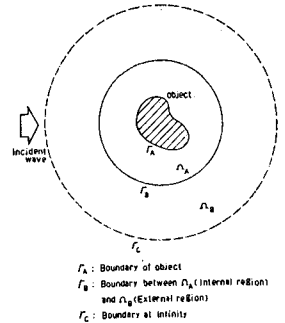


図-1 領域分割図

よって、

$$\{F, n\} = -\omega^2 / g \cdot [H]^T [R]^T [K_0] [R] [H] \{P\} \quad (9)$$

ここで、浮体表面での節点力 $\{P\}$ と振幅分布関数 $\{F\}$ との関係は、次式で表わすことができる。

$$P_i = F_i A_i \int_{z=-h_1}^0 \rho(z) dz \quad (10)$$

$$\rho(z) = \rho g \cosh k(h+z) / \cosh kh$$

ここで、 A_i : その節点が受け持つ要素長さである。

式(10)を式(9)に代入することにより、境界 Γ_a における $\{F, n\}$ と $\{P\}$ の関係が求まるので、これを式(4)に代入すると、係留浮体の振動を考慮した場合の、周辺表面波高分布を求めることができる。

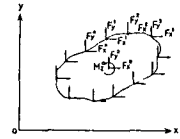


図-2 節点力の関係

$$\begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ y_1 & y_2 & \dots & y_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_n \end{pmatrix}$$

4. 数値計算例

ここでは、浮体が2本の鋼管柱からなるドルフィンに固定されているとし、浮体は、長さ $\ell = 130\text{m}$ 、幅 $b = 36\text{m}$ 、吃水深さ $h_1 = 20\text{m}$ の矩形浮体を考える。鋼管柱は $\phi = 800\text{mm}$ 、 $h = 30\text{m}$ とし、間隔は 40m とする。図-4が流体部分における要素分割図であり、図中の点は、境界要素法における内部点を示す。図-5が、 $\ell/L = 2.0$ と 1.0 の場合について、浮体前面の波力強度を入射波角度をパラメータとして表わしたものであり、縦軸の無次元表示は、防波堤が完全重複波によって受ける波力強度を基準としたものである。これらの図によると、波力強度は大きく変動する波状形を示し、入射波角度によって大きく変化することがわかる。また合田ら²⁾は、浮体を楕円柱で近似し、Mathieu 関数の級数の形で表わされた回折・散乱波の厳密解を用いることによって係留浮体に働く波力強度を求めており、同様の結果を得ている。

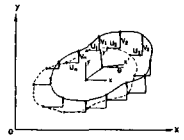


図-3 変位の関係

$$\begin{pmatrix} -y_1 \\ -y_2 \\ \vdots \\ -y_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

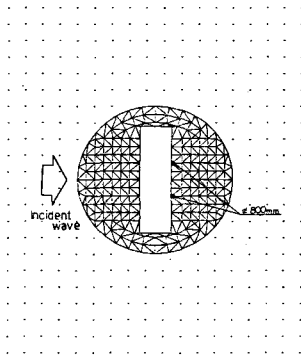


図-4 要素分割図

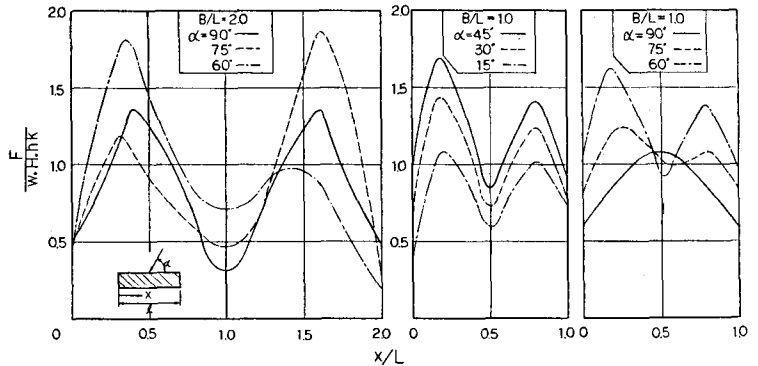


図-5 波力強度の分布形 ($B/L=2.0$), ($B/L=1.0$)

5. おわりに

本報では、これらの計算結果の妥当性を実験等により確認することはできなかったが、本手法によれば、構造物の幾何学的形状が任意である場合の取り扱いが可能であり、例えば、大水深地点の建設目的のために提案された半潜水型有脚式離岸堤(図-6)等の数値計算には特に有効である。

参考文献 1) O.C.Zienkiewicz, D.W.Kelly and P.Bettors: "The Coupling of the Finite Element Method and Boundary Solution Procedure", Int. J. Num. Meth. Engng. vol. 11 2) 合田良美・吉村知司: 海中に孤立した巨大構造物に働く波力の計算, 港湾技術研究所報告, 第10巻, 第4号, 1971.12.

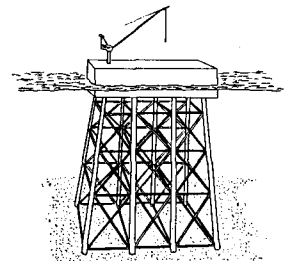


図-6 有脚式離岸堤