

海洋構造物の地震時流体力によるねじり振動特性

中 村 孝 明*

1. はじめに

海洋での石油・天然ガス生産プラットフォームを着定式として計画する場合、地震時での安全性の検討が必要となる。この種の構造物では、ジャケット構造やコンクリート製多柱構造が多く、機能的必要性から非対称構造であり、柱断面も真円でない場合が多く、ねじりが発生し易い構造となっている。構造物にとってねじりの発生は損傷危険度が高く、極めて重要な問題である。

地上構造物は、通常、重心と剛心を一致させ、ねじりが発生しないように計画される。この場合、ねじりについての検討は必要としない。しかし、水中では流体力が加わることで重心が見掛け上移動し、予期せぬねじり振動を引き起こす可能性がある。既往の地震時流体力と構造物との動的相互作用問題では、搭状構造物を対象として Liaw & Chopra(1974), Williams(1986), Tanaka & Hudspeth (1988) らにより応答計算手法が提案されているが、ねじり問題については、まったく触れられていない。これは、軸対称構造物を対象としているからであるが、先に述べた様に、既存のコンクリート製プラットフォームのほとんどは軸対称構造ではない。

本研究は、3次元任意形状の構造物を対象とし、流体との動的相互作用まで扱える汎用的な計算手法の開発を目的としており、著者ら(1992a)の前報において、計算手法の提案を行った。本論文では特に、水中での楕円柱のねじり振動問題に着目し、単体及び複数体の場合について、流体力による重心の移動、ねじり振動特性等について検討を行ない、水中での多柱構造物を設計する際の新たな留意点を提示する。

2. 解析手法

2.1 支配方程式と境界条件

一定水深 h の海域にある構造物に対して、 x 軸から α なる角度をもって、角振動数 ω の調和振動が作用した場合を想定する(図-1参照)。流体は、非粘性、非回転で圧縮性を考慮する。これにより、流体場の支配方程式は、

3次元 Helmholtz 方程式となり、各境界条件とともに、次の様に与えられる。

$$\nabla^2 \phi + \frac{\omega^2}{c^2} \phi = 0 \quad \text{in } \Pi \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\phi = 0 \quad \text{on } z = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } z = -h \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = V_n \quad \text{on } \Gamma_s \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 c は水中での音速(1430 m/s; 15°C)を表わす。また、 V_n は、構造物回りの法線速度成分、 n は、構造物に向かって内向法線方向を表わす。上記に加え、無限遠方での Sommerfeld の放射条件が加わる。求めるべき速度ポテンシャル ϕ は、上記条件を満足する境界値問題の解となる。

2.2 境界積分方程式

境界値問題を解くに当たり、境界積分法を用いる。Green の第2公式より、次の Fredholm 型の積分方程式を得る。

$$-\frac{1}{2} \phi(P) = \int_{\Gamma} \left(G(P, Q) \frac{\partial \phi(Q)}{\partial n} - \phi(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} \right) d\Gamma \quad \dots\dots\dots (5)$$

点 P, Q 共に境界上の点である。式中 G には、海底面、自由表面、無限遠方の各境界条件を満足する Green 関数を適用する。これにより、積分は構造物表面だけとなる。Green 関数については、著者(1992b)により、誘導の詳細が示されている。構造物表面を m 個のパネル要素に分割し、 $\phi, \frac{\partial \phi}{\partial n}$ を要素内で一定とすると、次の連立方程式

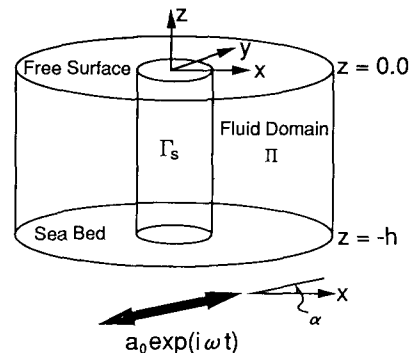


図-1 流体領域の定義

* 正会員 (株)藤塚研究所 主任研究員

を得る。

$$-\frac{1}{2}\phi_i + \sum_{j=1}^m \phi_j \int_{\Gamma_{ij}} \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} - \sum_{j=1}^m \frac{\partial \phi_j}{\partial n} \int_{\Gamma_{ij}} G_{ij} d\Gamma = 0; \quad i=1, 2, \dots, m \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 Γ_{ij} はパネル要素の領域を意味する。これらをマトリックス表示すると、次の様になる。

$$[\bar{H}_{ij}]\{\phi_j\} - [H_{ij}]\left\{\frac{\partial \phi_j}{\partial n}\right\} = 0 \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$\bar{H}_{ij} = \int_{\Gamma_{ij}} \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} d\Gamma \quad (i \neq j)$$

$$H_{ij} = \int_{\Gamma_{ij}} G_{ij} d\Gamma = -\frac{1}{2} + \int_{\Gamma_{ij}} \frac{\partial G_{ij}}{\partial n} d\Gamma \quad (i = j)$$

2.3 構造物のモデル化

構造物は、 x, y 方向及び、 z 軸回りのねじりを含めた 3 自由度質点系にモデル化する。その際、曲げ変形とせん断変形を加算して求められる等価せん断パネを使用する。これにより、各質点の自由度から“曲げ”を省くことができ、流体場との接続の際の境界条件が簡素化できる。ねじりについては、St. Venant のねじり理論を適用する。その際、2 軸対称断面を基本とし、曲げとねじりの連成は考慮しない。構造物回りの境界条件は、マトリックスで次の様に与えられる。

$$\{V_n\} = i\omega[N]\{[A]^{-1}[B]\{a\} - [A]^{-1}\{f\}\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、

$$[A] = -\omega^2[M] + i\omega[C] + [K] \dots\dots\dots (9)$$

$$[B] = i\omega[C] + [K] \dots\dots\dots (10)$$

$[M], [C], [K], [N]$ は、それぞれ質量、減衰、剛性、方向余弦の各マトリックスを表わす。 $\{a\}, \{f\}$ は、地動変位ベクトル、質点に加わる流体力ベクトルをそれぞれ表わし、 $\{f\}$ には、未知量 ϕ が含まれている。この境界条件は、構造物の運動方程式から誘導されたもので、詳細は著者ら (1992a) に示されている。その特長は、構造物と流体との相互作用を含んだ境界条件となっていることにあり、(8)式を(7)式第 2 項に適用し、これを解くことで、構造物回りの速度ポテンシャルが 1 回で求められる。

次に、速度ポテンシャルが得られたことで、各質点に加わる流体力 (動的相互作用を含んだ) $\{f\}$ が求められる。これにより、各質点の絶対変位 $\{d\}$ は次の様に与えられる。

$$\{d\} = [A]^{-1}[B]\{a\} - [A]^{-1}\{f\} \dots\dots\dots (11)$$

また、構造物に加わる x 方向の全流体力 F_{hx} 及び z 軸回りのねじり流体力 R_{hz} は、次式で得られる。

$$F_{hx} = -i\omega\rho \int_{\Gamma_s} \phi n_x d\Gamma \dots\dots\dots (12)$$

$$R_{hz} = -i\omega\rho \int_{\Gamma_s} \phi (l_x n_y - l_y n_x) d\Gamma \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 ρ は流体の密度、 n_x, n_y は法線方向と x, y 方向との方向余弦、 l_x, l_y はねじり回転中心から圧力作用点までの距離を表わす。また、基部での x 方向せん断力 F_{sx} 及び、 z 軸回りのねじりモーメント R_{tz} は、次式で得られる。

$$F_{sx} = F_{hx} - \omega^2 \sum_{k=1}^s M_k (d_{xk} - a_x) \dots\dots\dots (14)$$

$$R_{tz} = R_{hz} - \omega^2 \sum_{k=1}^s I_k \theta_{zk} \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 s は質点数で、 M_k, I_k は各質点の質量及び回転慣性を表わす。又、 d_{xk}, θ_{zk} は、質点の x 方向絶対変位、ねじり回転角をそれぞれ表わす。

2.4 無次元振動数

水中で運動する物体には、付加質量が加わるが、流体の圧縮性を考慮することで、付加質量に加え構造物の振動による圧縮性進行波成分が、流体場へ逸散する。これは、構造物に対し逸散減衰力として作用する。その発生は、以下に示す無次元振動数によって判定できる。

$$\Omega = 2\omega h / \pi c \dots\dots\dots (16)$$

$\Omega < 1.0$ の場合、逸散減衰力の影響は少なく、 $\Omega \geq 1.0$ でその影響が顕著になる。

3. 楕円柱の動的応答特性

3.1 単柱の動的応答

図-2 に示すコンクリート製楕円柱の計算モデルにおいて、最初に、単体の場合について考える。水深方向に、10 質点の Lumped mass に理想化する。単位質量及び、弾性係数は、 $\rho_c = 265.3 \text{ kgf s}^2/\text{m}^4 (2600 \text{ kg/m}^3)$ 、 $E = 3.4 \times 10^9 \text{ kgf/m}^2 (3.33 \times 10^7 \text{ kN/m}^2)$ とし、構造減衰は考慮しない。

図-3 に、強、弱軸方向の頂部の変位 d_x, d_y を加振振幅 a_0 で無次元化した変位応答倍率と位相角を示す。図中

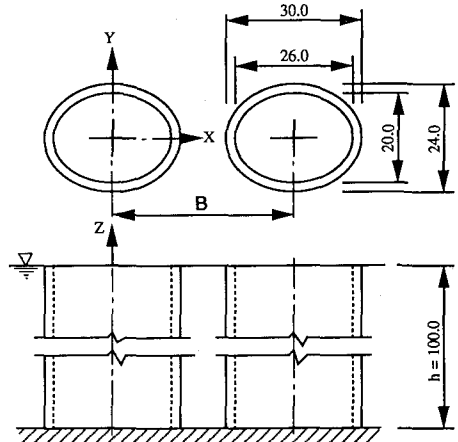


図-2 計算モデル (単位 m)

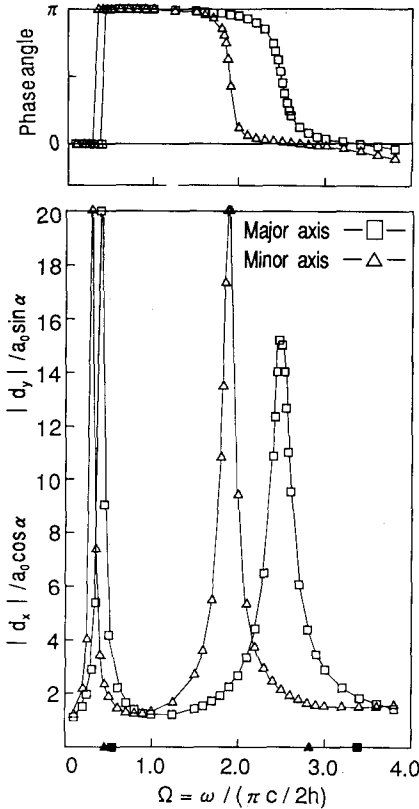


図-3 変位応答倍率と位相角

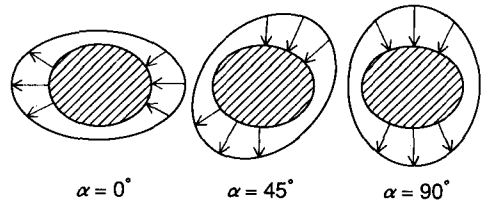


図-5 圧力分布の概念図 (単体柱)

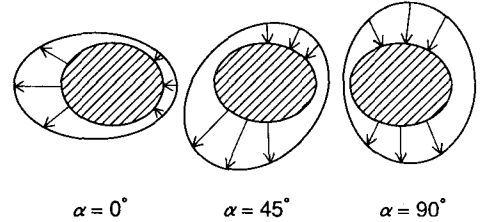


図-6 圧力分布の概念図 (2連柱)

せよ、水中と気中とは、全く違った応答となることは明かで、本手法の様な、流場も含めた全体系として扱う計算法が必要不可欠となる。

次に、 $\alpha = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ と変えた場合の断面方向の圧力分布の概念図を図-5に示す。圧力値は振動直角方向を軸に+側と-側に分かれる。 $\alpha = 0^\circ, 90^\circ$ の場合、明かにねじりは発生しないことが分かる。また、 $\alpha = 45^\circ$ の場合においても、+側の圧力と-側の圧力によるねじりモーメントは相殺され、ねじりは発生しないことになる。

3.2 2連柱の動的応答

図-2に示す2連の楕円柱の動的応答問題を考える。構造諸元、モデル化は単体の場合と同じとする。図-6に、向かって左側の柱の圧力分布の概念図を示す。単体の場合(図-5)と比較すると、圧力分布が偏り、偏圧分布となっているのが分かる。これにより、+側の圧力と-側の圧力によるねじりモーメントに差が生じ、ねじり振動を引き起こすこととなる。しかし、 $\alpha = 0^\circ$ の場合は、ねじりモーメントは発生せず、 $\alpha = 90^\circ$ において、モーメントは最大となる。地上構造物では、剛心と重心位置の差、即ち偏心が、ねじり振動を引き起こす原因となるが、水中では圧力分布の偏りが重心を見掛け上移動させ、偏心を引き起こし、ねじり振動が起きる。2連柱の場合、圧力分布の偏りは流体を媒体とし、相互に影響し合うことにより起こるものであるが、単体柱でも岸壁が存在したり、海底地形の起伏などの影響により、偏圧分布となり、ねじり振動が発生する可能性がある。

図-7に柱間隔 $B = 40.0\text{ m}$ とした場合の、頂部の y 方向変位応答倍率と、ねじり応答を併記したものを示す。加振方向は $\alpha = 90^\circ$ である。ねじり流体力は、 y 方向への運動による偏圧により発生するが、ねじり応答のピーク

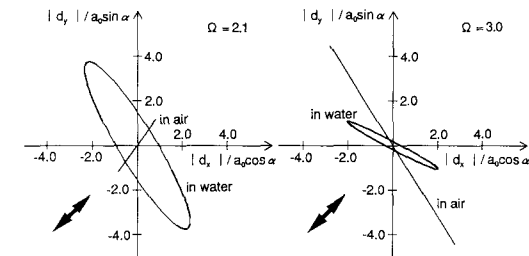


図-4 頂部の1周期間の変位応答軌跡

横軸の■▲は、強、弱軸方向の気中での固有振動数を表わす。付加質量の影響により応答ピークが低振動数側へシフトしている。また、 $\Omega \geq 1.0$ では、水の圧縮性による逸散減衰の効果が、位相曲線の傾斜として表われている。図-4に $\Omega = 2.1, 3.0$ の時の頂部の1周期間の運動軌跡を示す。図中、 \blacktriangleright は、加振方向を表わし、 α は 45° である。特徴的なことは、水中では逸散減衰の影響により位相ずれが生じ、図の様な楕円軌道を描くことである。計算では、構造減衰を考慮していないが、実際には、構造減衰、逸散減衰、双方の影響により応答が決定する。いずれに

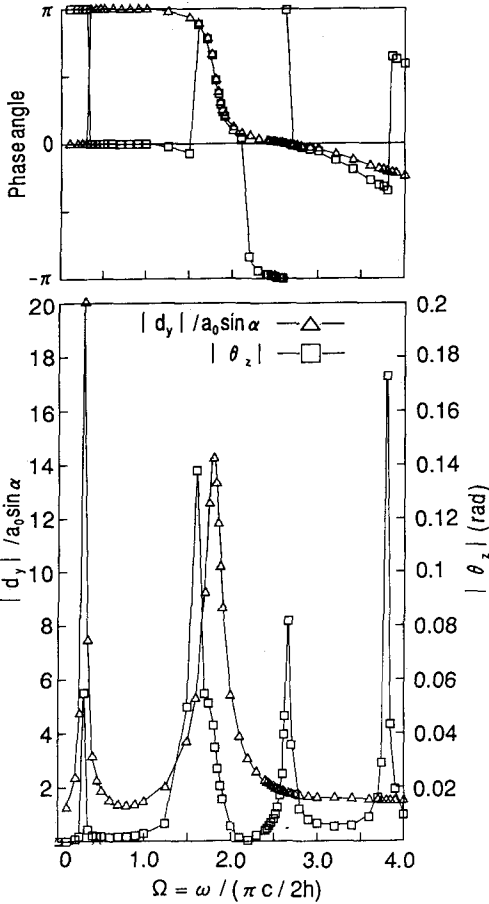


図-7 変位応答倍率, ねじり角と位相角

は、 y 方向変位応答とは無関係に現われている。

図-8 に各質点に加わる y 方向流体力 f_{yk} とねじり流体力 f_{tk} の分布を示す。図では、それぞれ付加質量成分(実部)と逸散減衰力成分(虚部)に分離し、最大の流体力で無次元化している。縦軸は水深を表わし、無次元振動数は $\Omega=1.8, 3.8$ である。 $\Omega=1.8$ は、 y 方向変位応答のほぼ共振点である。共振点では付加質量成分が極小となり、逸散減衰成分がピークとなる。図では、この傾向が現われている。興味深いことは、ねじり流体力についても、 y 方向流体力と同様に、付加質量成分がほぼ 0 となっていることである。

次に、 $\Omega=1.8$ は、 y 方向、ねじり共に 2 次モードの流体力分布となっている。しかし、 $\Omega=3.8$ では、 y 方向流体力は 3 次モードの分布であるが、ねじり流体力については、4 次モードの分布となっている。これは、 $\Omega=1.8$ では、 y 方向、ねじり共に 2 次モードの応答が現われる振動数域であるが、 $\Omega=3.8$ は、ねじりについては 3 次の共振点を越えた振動数域であり、ねじり流体力だけが、4 次モードの流体力分布となったものと判断できる。こ

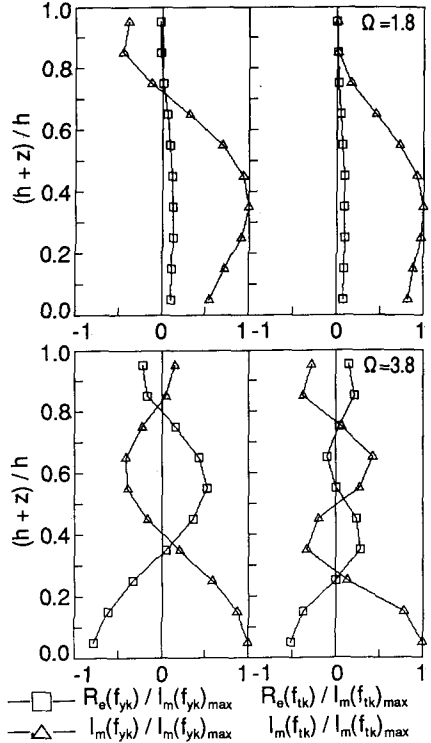


図-8 水深方向の流体力分布

れにより、ねじり流体力の発生要因は y 方向への運動による偏圧であるが、ねじり応答はむしろ、固有の振動モードで運動していることが分かる。

次に、2 連柱間の距離によるねじり応答への影響を見る。図-9 に、柱の中心距離 B を 40.0~100.0 m まで変化させた場合の頂部での y 方向変位応答倍率とねじり応答を併記したものを示す。無次元振動数は $\Omega=1.8$ と 2.675 で、それぞれ y 方向の 2 次共振点、ねじりの 2 次共振点近傍の点である。また、図中右端の ∞ は、単体柱の結果を表わす。2 連柱間の距離が開くに従い、 $\Omega=1.8, 2.675$ 共に、ねじり応答は急激に小さくなる。 y 方向変位応答において、 $\Omega=2.675$ は距離における変化はほとんど見られないが、 $\Omega=1.8$ は、距離に対する依存性が高い。これは、 $\Omega=1.8$ は、 y 方向変位の共振点であることから、流体力に対し敏感に反応している結果と考えられる。楕円のような 2 軸対称断面を持つ部材では、曲げ振動とねじり振動は互いに独立しており、連成することはないが、水中においても、流体を媒体として若干の影響はあるものの、相互の運動による影響は極めて小さいと言える。

図-10 に、基部での y 方向最大せん断応力 τ_y と、ねじりによる最大せん断応力 τ_z について、2 連柱間の距離を変え、比較したものを示す。それぞれ単体柱での y 方向最大せん断応力で無次元化している。無次元振動数は、

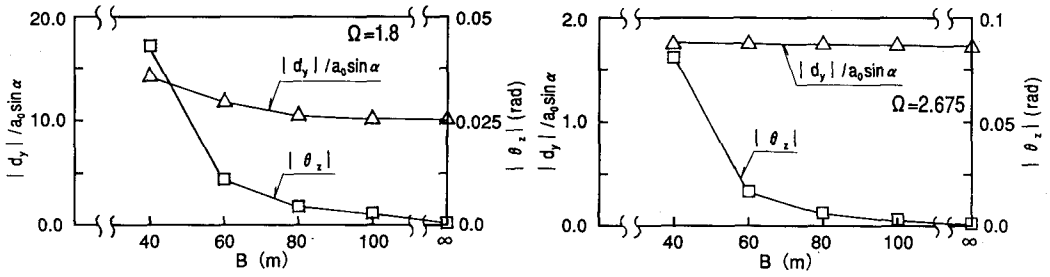


図-9 2連柱間の距離と変位応答

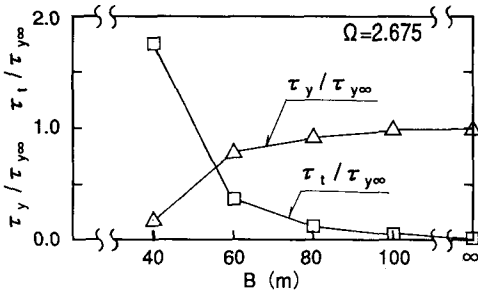


図-10 2連柱間の距離とせん断応力

$\Omega=2.675$ である。ねじりせん断応力は、距離が離れるに従い急激に小さくなるが、 y 方向せん断応力は、距離が離れるに従い大きくなり、単体柱の結果に漸近する。ここで重要視すべき問題は、距離 $B=40.0$ m の場合、 y 方向せん断応力に比べ、ねじりせん断応力が10倍以上にも達していることである。これは、設計上無視できない値であり、この種の構造物に対するねじり応答解析の必要性を示唆している。

4. 結 論

楕円柱のねじり振動問題について種々の検討を行ない次の結論を得た。

1) 剛心と重心が一致した構造物でも、水中では圧力分布の偏りによって重心が見掛け上移動し、ねじり振動を起こす。

2) 単体柱の場合は、基本的には圧力分布の偏りは起こらないが、岸壁が存在したり、海底地形の起伏などの影響により、偏圧となる可能性がある。

3) 2連柱の場合、流体を媒体とし、相互に影響し合うことにより偏圧となり、ねじり振動を起こす。

4) 偏圧によるねじり応答は、水平方向への運動により生ずるが、ねじり応答は固有の振動モードで運動する。

5) ねじり応答は、2連柱間の距離に強い依存性を持ち、距離が離れるに従い、急激に小さくなる。

6) ねじり共振点では、基部でのねじりせん断応力は、水平せん断応力に比べ、10倍以上に達する。

7) 搭状の海洋構造物で、圧力分布が偏圧となる場合、ねじり振動を含めた耐震設計を行う必要がある。

参 考 文 献

中村孝明・田中良弘・元良勇太郎 (1992a): 3次元任意形状海洋構造物の地震応答解析, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 701-705.
 中村孝明 (1992b): Green 関数法による任意形状海洋構造物の動水圧解析, 第6回計算力学シンポジウム報文集, pp. 219-226.
 Liaw, C. Y. and A. K. Chopra (1974): Dynamics of towers Surrounded by water, J. Earthquake Engng. and Struct. Dyn., 3(1), pp. 33-49.
 Tanaka, Y. and R. T. Hudspeth (1988): Restoring forces on vertical circular cylinders forced by earthquakes, J. Earthquake Engng. and Struct. Dyn., 16(1), pp. 99-119.
 Williams A. N. (1986): Earthquake response of submerged circular cylinder, J. Ocean Engng., 13(6), pp. 569-585.