固定式円筒シェルーデッキ系海洋構造物の地震応答特性

EARTHQUAKE RESPONSE CHARACTERISTICS OF AN OFFSHORE DECK STRUCTURE SUPPORTED BY CYLINDRICAL SHELLS

福住 忠裕*

Tadahiro FUKUSUMI

Dynamic response of two cylindrical shells with a deck which may be used as an offshore structure is dealt with. Taking into account interaction effects between shells and fluid, the harmonic response as well as earthquake response of the system subjected to horizontal excitation at seabed are determined. Earthquake response in time domain is determined by the inverse transforms of multiplication of transfer function and Fourier transform of input wave, and the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake wave is adopted as input earthquake motion. When the mass of the deck becomes large, concentrated inertia force of deck is predominant compared to the distributed wave pressure, and the existence of the inner fluid has little effect on the dynamic responses different from the case of without a mass of deck. The effects of the shell thickness and deck mass on the earthquake responses of structure and fluid are discussed.

Keywords: offshore structure, cylindrical shell-deck system, fluid-structure interaction, earthquake response analysis, 1995 Hyogoken-nanbu earthquake wave

海洋構造物, 円筒シェルーデッキ系構造物, 流体-構造物相互作用, 地震応答解析, 兵庫県南部地震

1. 序

近年、海洋の有効利用に向けて、海上空港や海上都市の実現に期待が高まっている。従来、海洋空間の開発は専ら埋立方式を行ってきたが、今後は多様な海洋構造物を用いて空間開発がなされるものと推察される。この種の海洋構造物の上部構造の重要性はもちろんのこと、それを支持する下部構造はさらに重要である。しかし、このような上部構造物を含めた海洋構造物と流体の動的相互作用問題に関する未検討課題はまだ多く残されている。

大楠¹⁾は複数の固定鉛直円柱と波の関係を流体の多重散乱場における問題として解析し、さらに、任意の子午線形状をもつ鉛直軸対称物体として、カラムフォーミング型複合円柱浮体の解析が松井²⁾、Kagemoto³⁾などによって行われた。剛構造物として扱う場合は、マクロ的外力である波力（構造物全面での波圧積分値）が解析項目となる。一方、元来構造物は弾性変形するものであり、弾性体として扱う場合は、ミクロ的外力である波圧が解析の主眼となり、この見地から登坂⁴⁾、西村⁵⁾は流体波動と3次元弾性体および弾性シェルについての連成問題の定式化を示した。

1次元弾性円柱の調和地動応答については、単一円柱の場合、Tanakaら⁶⁾は流体の圧縮性についての考察を行っており、また、Westermo⁷⁾は複数円柱間の相互作用について、基本固有振動数で

は影響がなく2次の固有振動数において影響が出ると報告している。地震応答としては、Liaw等により搭状⁸⁾あるいはシェル⁹⁾構造物の逐次積分による地震応答解析法の提示と動特性の考察が行なわれた。濱本、田中らは内部および外部流体が有る場合の固定式円筒シェルに対するシミュレーション解析とスペクトル解析との比較検討も含め¹⁰⁾、内部流体の存在やスロッシングによる影響について報告を行なった¹¹⁾。以上はすべて上部構造を持たない場合を扱っているのに対し、筆者等は、上部構造物を有する海洋構造物の一形態として、無限に並ぶ1列および2列円筒シェル群-デッキ系構造物の流体調和表面波応答についての検討を行ない、円筒構造物が弾性体でも剛体でも波圧および波力はほぼ同じであること、デッキが有る場合には円筒構造物面には波圧が作用する他、構造物上端にデッキ慣性力が作用し、構造物形状が細長くデッキ質量が大きい時には波浪応答は地震応答と異なり相当低い振動数を扱うものの弾性応答に共振点の現れることが有ることを報告した¹²⁾。本論では2体の円筒シェルデッキ系構造物に対する調和地動応答を求め、円筒シェル間の距離、シェル板厚半径比（シェル剛性）およびデッキ質量の違いが波圧および円筒シェルの変形と応力の応答に及ぼす影響について考察すると共に、1995年兵庫県南部地震時に観測された人工島での地震波を入力地震波とす

* 神戸大学工学部建設学科 助教授・博士(工学)

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Kobe University, Dr. Eng.

る地震応答を求め、固定式円筒シェルデッキ系構造物の動的応答性状の解明を図るものである。

2. 構造物と流体の調和波応答解析

本論での地震応答解析法は周波数応答解析による伝達関数（定常応答解）と地震波のフーリエ変換の積を逆フーリエ変換する方法による周波数領域での解析法である。従って地震応答解を得る上で予め調和波応答解析による伝達関数を求めておく必要がある。

2.1 円筒シェルの解析

円筒シェルは等方・等質の薄肉シェルとし、図1に示す通り、半径 a 、板厚 h 、ヤング率 E 、密度 ρ 、ポアッソン比 ν とする。円筒座標系 x, θ, r （鉛直、円周、半径）各方向の運動方程式としては下式の通り Donnell 形の式を適用する。

$$N_{x,x} + N_{\theta} x_{,\theta} / a - \rho h U_{,tt} = 0 \quad (1a)$$

$$N_{\theta} x_{,\theta} / a + N_{x\theta} x_{,\theta} - \rho h V_{,tt} = 0 \quad (1b)$$

$$-N_{\theta} / a + M_{x,xx} - 2M_{x\theta} x_{,\theta} / a + M_{\theta\theta} \theta\theta / a^2 - \rho h (W + W_G)_{,tt} - P_s = 0 \quad (1c)$$

ただし、表示記号は下記とする。

$$F_{,x} = \partial F / \partial x, \quad F_{,\theta} = \partial F / \partial \theta, \quad F_{,t} = \partial F / \partial t \quad (2)$$

運動方程式(1)に含まれる $N_x, N_{\theta}, N_{x\theta}$ は面内応力、 M_x, M_{θ} と $M_{x\theta}$ は曲げモーメントとねじりモーメントである。これらの応力および換算せん断力は、以下の通り変位で表される。

$$\begin{aligned} N_x &= (B/a)(aU_{,x} + \nu \circ V_{,\theta} + \nu \circ W), \\ N_{\theta} &= (B/a)(a\nu \circ U_{,x} + V_{,\theta} + W), \\ N_{x\theta} &= (B/2a)(1 - \nu)(U_{,\theta} + aV_{,x}), \\ M_x &= -(D/a^2)(a^2W_{,xx} + \nu \circ W_{,\theta\theta}), \\ M_{\theta} &= -(D/a^2)(W_{,\theta\theta} + \nu \circ a^2W_{,xx}), \\ M_{x\theta} &= (D/a)(1 - \nu)W_{,x\theta}, \\ V_x &= M_{x,x} - 2M_{x\theta} x_{,\theta}, \\ V_{x\theta} &= N_{x\theta} - M_{x\theta} / a \end{aligned} \quad (3)$$

本論における減衰の扱いについては速度に関する粘性型減衰ではなく、構造物構成材料の応力-ひずみ関係が履歴を描くことによってエネルギー消費を生じる履歴型であると仮定する。この場合履歴減衰定数を h_d とすれば、上式中のシェルの歪剛度 B および曲げ剛度 D は下記の通り複素剛性で表される。

$$B = Eh \circ (1 + 2h_d i) / (1 - \nu^2), \quad D = Bh^2 / 12 \quad (4)$$

x, θ, r 方向のシェルの変位 U, V, W は次式の通り変数分離形で表す。

$$\begin{aligned} U(x, \theta, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} u(x) \cos n\theta e^{i\omega t}, \\ V(x, \theta, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} v(x) \sin n\theta e^{i\omega t}, \\ W(x, \theta, t) &= \sum_{n=0}^{\infty} w(x) \cos n\theta e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (5)$$

なお、右辺項 $u(x), v(x), w(x)$ は円周方向次数 n での項である。シェル面に作用する流体波圧 P_s （圧縮を正）および応力の例としての N_x も、上記変位と同様に表される。

$$P_s(x, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} p_s(x) \cos n\theta e^{i\omega t},$$

$$N_x(x, \theta, t) = \sum_{n=0}^{\infty} n x(x) \cos n\theta e^{i\omega t} \quad (6)$$

$F(x)$ の有限フーリエ Cosine と Sine 変換の定義と像関数の表記は、

$$\begin{aligned} C\{F(x)\} &= \int_0^H F(x) \cos \alpha_m x \cdot dx = F^c(\alpha_m), \\ S\{F(x)\} &= \int_0^H F(x) \sin \alpha_m x \cdot dx = F^s(\alpha_m) \end{aligned} \quad (7)$$

ここに、 $\alpha_m = m\pi/H$ である。偏微分方程式(1a)式に有限フーリエ Cosine 変換を、同じく(1b)、(1c)式に有限フーリエ Sine 変換を施すと、 $m=0$ の時は像関数 $u^c(0)$ が単独に得られ、 $m=1, 2, \dots$ の時は下式の通りシェル変位 u, v, w の像関数 $u^c(\alpha_m), v^s(\alpha_m), w^s(\alpha_m)$ に関する3元連立方程式を得る。（文献12参照）

$$[A] \{u^c(\alpha_m), v^s(\alpha_m), w^s(\alpha_m)\}^T = [B] \left(\{\chi_1\} - (-1)^m \{\chi_2\} \right) + [0, 0, -a^2/B \circ S\{p_s(x)\}]^T \quad (8)$$

ここに、 $[A], [B]$ は、振動数 ω 、円周方向次数 n 、鉛直方向フーリエ展開項数 m およびシェルの諸定数と寸法で表される係数マトリックスである。 $\{\chi_1\}, \{\chi_2\}$ は下記の通り、シェル上下端境界($x=0, H$)の変位と応力ベクトルであって本解の未定定数に当たる。

$$\begin{aligned} \{\chi_1\} &= \{n_x(0), v(0), w(0), m_x(0)\}^T, \\ \{\chi_2\} &= \{n_x(H), v(H), w(H), m_x(H)\}^T \end{aligned} \quad (9)$$

逆変換によって原関数 u, v, w は次式で表され、応力も同様なフーリエ級数表現で表される。

$$\begin{aligned} u(x) &= \frac{1}{H} \left\{ u^c(0) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} u^c(\alpha_m) \cdot \cos \alpha_m x \right\}, \\ v(x) &= \frac{2}{H} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ v^s(\alpha_m) + \frac{1}{\alpha_m} [(-1)^m v(H) - v(0)] \right\} \sin \alpha_m x \\ &\quad + \frac{x}{H} v(H) + \frac{H-x}{H} v(0), \\ w(x) &= \frac{2}{H} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ w^s(\alpha_m) + \frac{1}{\alpha_m} [(-1)^m w(H) - w(0)] \right\} \sin \alpha_m x \\ &\quad + \frac{x}{H} w(H) + \frac{H-x}{H} w(0) \end{aligned} \quad (10)$$

2.2 流体の基礎式および解

構造物の径は流体粒子運動の径にくらべて十分大きく、波高が比較的小さいものとすれば、非線形流体力は無視でき、微小振幅波理論が適用できる。さらに、流体は非粘性、無渦流、非圧縮性と仮定すると、流体速度ポテンシャル理論が適用でき、流体の速度ポテンシャル ϕ に関する次式が流体の解析対象式となる。

Fig.1 Analyzed model of cylindrical shells with deck

度ポテンシャル ϕ に関する次式が流体の解析対象式となる。

$$\nabla^2 \phi = \phi_{rr} + \phi_r/r + \phi_{\theta\theta}/r^2 + \phi_{xx} = 0 \quad (11)$$

2.2.1 構造物内部領域における速度ポテンシャル

構造物内部領域 I($r \leq a$) に対して、上端自由表面・下端鉛直方向拘束条件を満足する水深 L の円筒 S_1 の内部流体ポテンシャル ϕ の解は、局所円筒座標系 $O_i(r_i, \theta_i, x)$ に関する次式で表される。

$$\begin{aligned} \phi_i(r_i, \theta_i, x, t) = & \sum_{n=0}^{\infty} e^{in\theta_i} \{ A_{ni} \cdot J_n(k_0 r_i) \cdot \frac{\cosh(k_0 x)}{\cosh(k_0 L)} \\ & + \sum_{q=1}^{\infty} B_{nqi} \cdot I_n(k_q r_i) \cdot \frac{\cos(k_q x)}{\cos(k_q L)} \} \cdot e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (12)$$

ここに、 A_{ni} , B_{nqi} はシェルと流体接触面での境界条件により決定される未定定数。 J_n , I_n は n 次の第 1 種ベッセル関数、同変形ベッセル関数であり、 k_0 , k_q は次式を満足する波数である。

$$\omega^2 = g \cdot k_0 \tanh(k_0 L), \quad \omega^2 = g \cdot k_q \tan(k_q L) \quad (13)$$

ここに、 g は重力の加速度である。

2.2.2 構造物外部領域における速度ポテンシャル

構造物外周領域 II ($a \leq r$) に対し、上記流体の上下端境界条件及び無限遠放射条件を満足する円筒 S_1 の外部流体ポテンシャル ϕ の解は、

$$\begin{aligned} \phi_{ii}(r_i, \theta_i, x, t) = & \sum_{n=0}^{\infty} e^{in\theta_i} \{ C_{ni} \cdot H_n(k_0 r_i) \cdot \frac{\cosh(k_0 x)}{\cosh(k_0 L)} \\ & + \sum_{q=1}^{\infty} D_{nqi} \cdot K_n(k_q r_i) \cdot \frac{\cos(k_q x)}{\cos(k_q L)} \} \cdot e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (14)$$

ここに、 C_{ni} , D_{nqi} は未定定数で、 H_n , K_n は第 2 種ハンケル関数、第 2 種変形ベッセル関数である。他の円筒 S_j の速度ポテンシャルの解 ϕ_{ji} は、上記円筒 S_i の解 ϕ_{ii} で i を j に読替えて得られる。これにベッセルの円筒座標変換公式を適用し、 $O_j(r_j, \theta_j, x)$ 座標系に関する上記ポテンシャル $\phi_{ji}(r_j, \theta_j, x, t)$ を $O_i(r_i, \theta_i, x)$ 座標系に関する表現に替えたものを $\phi_{ij}(r_i, \theta_i, x, t)$ と記号付けるものとして、

$$\begin{aligned} \phi_{ij}(r_i, \theta_i, x, t) = & \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_{q=0}^{\infty} (-1)^n e^{i(q+n)\beta_{ji}} \cdot e^{-in\theta_i} \\ & \{ C_{ni} H_n + q(k_0 d_{ij}) J_n(k_0 r_i) \frac{\cosh(k_0 x)}{\cosh(k_0 L)} \\ & + \sum_{q=1}^{\infty} D_{nqi} \cdot K_n + q(k_q d_{ij}) I_n(k_q r_i) \frac{\cos(k_q x)}{\cos(k_q L)} \} \cdot e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (15)$$

ここに、 d_{ij} は i, j 円柱原点 O_i-O_j 間の距離、 β_{ji} は O_j を始点とする直線 O_j-O_i の Z 軸となす角度である。上式 ϕ_{ij} は S_i 円筒に対する S_j 円筒からの寄与分に当たり、 S_i の全ポテンシャル ϕ_i (S_j についても同様)は次式のように表すことができる。

$$\phi_i = \phi_{ii} + \phi_{ij}, \quad \phi_j = \phi_{jj} + \phi_{ji} \quad (16)$$

2.2.3 波圧と波力の表現

S_1 円筒に作用する波圧 P_{S1} および水平 (Z 方向) 波力 P_{Z1} は上記ポテンシャル ϕ_i を用いて次式で表される。

$$P_{Si}(\theta_i, x, t) = -i\omega \cdot \rho_F \phi_i(a, \theta_i, x, t) \quad (17)$$

$$P_{Zi}(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^L P_{Si}(\theta_i, x, t) \cos \theta \cdot a d\theta \cdot dx \quad (18)$$

ここに、 ρ_F は流体の密度である。

2.2 境界条件

円筒表面での連続条件、シェル上下端での境界条件およびデッキの釣合条件は以下とする。

① 円筒表面、シェルと流体の半径方向速度の一致条件；

$$W, t = -\phi_r \quad (r=a, 0 \leq x \leq L) \quad (19)$$

② 円筒下端、固定条件；

$$u=0, \quad v=0, \quad w=0, \quad w_{,x}=0 \quad (x=0) \quad (20)$$

デッキは剛で円筒シェル上端水平断面は円形を保持するものとし、シェルとデッキの接合は剛節とする。また、地動入力方向は S_1, S_2 円筒の軸心を結ぶ図 1 の Z 方向とし、デッキの水平方向の釣合 ($\Sigma F_z=0$) は考慮するが、鉛直およびロッキング運動は扱わないものとする。以上より円筒上端境界条件は下記のとおり、フーリエ級数の次数 n に応じた式で表される。

③ 円筒上端 ($x=L$)、シェルおよびデッキに関する条件；

$$i) n_x=0, \quad v=0, \quad w=0, \quad w_{,x}=0 \quad (n=0, 2, 3, \dots) \quad (21a)$$

$$ii) n_x=0, \quad \Sigma F_z = \sum_{i=1}^2 V_{Zi} + V_{ZD} = 0, \quad v=-w, \quad w_{,x}=0 \quad (n=1) \quad (21b)$$

ここに、 V_{ZD} はデッキ慣性力であって $V_{ZD}=M_D \cdot W_{D,tt}$ (ここに M_D はデッキ質量、 W_D はデッキの Z 方向水平変位=シェル上端変位 $w(L)$) である。また、 V_{Zi} は円筒 S_i 上端での Z 方向水平力 (シェル断面換算せん断応力の積分値) であり、

$$V_{Zi} = \int_0^{2\pi} [V_{Xi} \cos \theta_i + V_{Xi} \sin \theta_i] a \cdot d\theta_i \quad (22)$$

シェルおよび液体に関する以上の境界条件および連続条件に対応して作成される複素連立方程式を解くことによって、本解に含まれる未定定数は総て確定し、それよりシェルデッキ-流体系の調和波応答解析の結果として伝達関数が得られる。

3. 数値解析と考察

数値解析上のパラメーターとしては、シェル半径を $a=5m$ とし、シェル高さ比 $H/a=5$ 、水深比 $L/H=3/4$ とする。シェルの履歴減衰定数は $h_a=0.025$ とし、鋼製を想定してヤング率は $E=2.1 \times 10^{10} \text{ kgf/m}^2$ 、ポアソン比は $\nu=0.3$ 、単位重量は 7800 kgf/m^3 とする。シェル板厚については、シェルには鉛直載荷荷重による軸圧縮力が作用するほか、シェル内部に流体が存在しない場合には、外部流体による静水圧などの外圧を受けるため座屈を考慮して板厚を設定する必要があるが^{14),15)}、ここではシェル板厚比 $h/a=1/80$ を標準板厚比として、5 割差のある 4 ケース； $h/a=1/180, 1/120, 1/80, 1/53.3$ を想定した。デッキ質量比 M_D (デッキ質量)/ M_0 (長期許容引張応力に対応する質量)には、0, 0.05, 0.1, 0.2 の 4 段階を想定した。ここに、 $M_0=4\pi ah\sigma_0/g$ であり、 σ_0 (長期許容引張応力度) $=1.6 \times 10^7 \text{ kgf/m}^2$ として $h/a=1/80$ の場合、 $M_0=6.28 \times 10^7/g(\text{kgf})$ となる。なお、デッキ質量 M_D と 2 体の円筒シェル質量 $M_S (=4\pi ahH\rho)$ の比は $M_D/M_S=82x(M_D/M_0)$ で、 $M_D/M_0=0.05, 0.1, 0.2$ の時、 $M_D/M_S=4, 8.2, 16.4$ 倍となり、支持部であるシェル質量に比べ上部デッキ質量が相当大きいモデルを想定していることになる。

3.1 調和応答による船造物-流体系の伝達関数特性

本論のシェルおよび液体の解は、フーリエ級数とベッセル級数の無限級数の形式となっており、結果の精度は何項まで算入するかにより依存する。図2A-a,b,cはシェル鉛直方向フーリエ級数項数を $m=10, 50, 100$ に変化させた場合のシェル頂部水平変位 w (=デッキの水平変位)、下端垂直応力 σ_x 、外部流体の水深 $1/2$ におけるシェル面波圧 P_{sII} の伝達関数(計算パラメータは $M_D/M_0=0.05$, $d_{12}/a=6$,

$n=0\sim 2$, $q=1\sim 3$ に設定し、横軸刻み $\Delta\omega=5\text{rad/s}$ 間隔でプロット)の結果である。 $m=50$ での結果は $m=100$ での結果に殆ど同じであることが分かる。図2B-a,bはそれぞれシェル流体連成系の1次と2次の固有振動数(ω_1, ω_2)における同上伝達関数の値を、フーリエ級数項数 m (刻み $\Delta m=10$ 項間隔)を横軸にして示したものであり、 $m=50$ 項程でほぼ収束していることが分かる。図3A,Bは同様に円周方向フーリエ展開次数 n を変化させた場合の図である。た

Fig.2A Frequency responses(absolute value) for different number of terms of m of Fourier expansion of shell

Fig.2B Variation of responses(absolute value) with number of terms m of Fourier expansion of shell

Fig.3A Frequency responses(absolute value) for different number of terms of n in circumferential direction

Fig.3B Variation of responses(absolute value) with number of terms of n in circumferential direction

Fig.4 Frequency response curves of displacement w and normal stress σ_x of the shell, outer fluid pressure P_{sII} , wave force P_{zII} and inertia force V_{ZF} for different deck mass ratio of $M_D/M_0=0, 0.05, 0.1, 0.2$

A) ω_1 versus mass ratio M_D/M_0 B) ω_1 versus thickness ratio h/a Fig.5 First natural frequency ω_1 versus deck mass ratio M_D/M_0 and thickness ratio h/a A) first natural frequency $\omega_1=14.9(\text{rad/s})$ B) second natural frequency $\omega_2=83.7(\text{rad/s})$ Fig.6 Mode shapes of horizontal displacement of shell W and outer fluid pressure P_{SII} acting on the shell

だし、中心間距離比 $d_{12}/a=6$ では n による変化が見られないので、 $d_{12}/a=3$ とした時の結果である。波圧はシェルの変位や応力に比べて次数 n による収束がやや遅いと見られる。以上のような検討にもとづき、1次や2次固有振動数といった主要振動数において、多数項を採って得られる最終的な値に対して3%程度の誤差に収まるように、 $m=0\sim 50$, $n=0\sim 2$, 流体の波数は $q=1\sim 3$ を採って以下の計算を行なった。

図4A~Dは4段階の質量比における各種伝達関数 $H(\omega)$ (上述のシェルの変位 w と応力 σ_x および流体波圧 P_{SII} に加えて、水平波力 P_{ZII} およびデッキ慣性力 V_{ZD}) の結果であり、海底面で単位振幅の調和水平加速度入力に対する応答である。なお、横軸刻みは $\Delta\omega=0.307\text{rad/s}$ 間隔で85点、 $\Delta\omega=0.614\text{rad/s}$ 間隔で120点、全体で $\omega=100\text{rad/s}$ まで205点を探ってプロットしている。また、図示においては下記無次元化量を用いており、シェルの垂直応力 σ_x および曲げ応力 σ_{bx} は、材料の短期許容応力度 ($=1.5\sigma_0=2.4\times 10^4\text{kgf/m}^2$) を基準値として、また、波圧 P_s はシェル下端静水圧で、波力 P_z 及びデッキ慣性力 V_{ZD} はシェル外周流体の静水圧の積分値で除している。

$$\sigma_{bx} = M_x / (1.5 \sigma_0 z_s), \quad \sigma_x = N_x / (1.5 \sigma_0 h), \quad P_s = P_s / (L \cdot g \cdot \rho_f),$$

$$P_{ZF} = P_{ZF} / (\pi a L^2 \cdot g \cdot \rho_f), \quad V_{ZD} = V_{ZD} / (\pi a L^2 \cdot g \cdot \rho_f)$$

ここに、 z_s (断面係数) $= h^2/6$ である。

シェル流体連成系の1次固有振動数 ω_1 (伝達関数のピーク振動数として決定している) は、図4中の4段階のデッキ質量比に対して、 $\omega_1=46, 14.9, 10.7, 7.7(\text{rad/s})$ である。質量比が0以外、すなわち $M_D/M_0=0.05, 0.1, 0.2$ ($=1:2:4$) の場合は、 $\omega_1^2=222, 114, 58$ ($=1.0:0.57:0.26$) となっており、大略 ω_1^2 は質量に反比例する関係になっている。また、2次の固有振動数はデッキ質量が0でない場合は $\omega_2=80\sim 90\text{rad/s}$ 程度になっている。シェルの変位・応力およびデ

Fig.7 Difference of responses of displacement W of the shell and outer fluid pressure P_{SII} by existence of inner fluid

ッキ慣性力の伝達関数の1次固有振動数でのピークは結果的には凡そデッキ質量比に比例する値となっているが、2次のピークは非常に小さく殆ど見られない。一方流体の2次の波圧および波力は1次に対して3倍程度で、質量比に関係なく同程度の大きさとなっている。デッキ慣性力の1次固有振動数でのピークは波力に比べて1オーダー大きい。掲載図は履歴減衰 $h_d=0.025$ の結果であるが、減衰はピーク振動数のごく近辺における振幅だけに影響し、ピーク値はほぼ $1/h_d$ となることを確認した。

図5Aはデッキ質量比 M_D/M_0 と連成系の1次固有振動数 ω_1 との関係、板厚比をパラメータとして描いたものである。質量比が0に近い時にはシェル板厚の相異に応じ、固有振動数の変化があるのに対して、質量比がおおよそ0.02以上の場合はシェル板厚による変化は殆ど無い。図5Bには、シェル板厚比 h/a と1次固有振動数 ω_1 の関係を示すが、内部流体存在の有無の違いも示している。内部流体が存在しなければ固有振動数は一般的に高くなるが、デ

キ質量比 M_D/M_0 が 0 若しくは 0 に極めて近い場合、内部流体の有無の違いにより固有振動数に差異を生じる。

図 6 はシェルの水平変位 w と外部流体波圧 P_{sil} の 1 次と 2 次の固有振動数付近でのモードである。シェルの変位は 2 次では 1 次に対して桁違いに小さく、一方、波圧は 1 次より 2 次の方が大きい。

図 7A, B はデッキ質量の無い場合と有る場合のシェルの変位と内外流体波圧の伝達関数の振幅を示す。デッキ質量が無い場合には、シェルの変位も流体の波圧も内液の有無によって結果が異なっている。これに対してデッキ質量がある場合には、シェルの変位は内液の有無によって変わっていないが、流体波圧は 1 次固有振動数付近では同じであるものの高振動数域で異なっている。なお、図 7 の最下段（シェル変位の伝達関数）は、 $\omega=5\text{rad/s}$ 以内の低振動数域の拡大図であり、 $\omega=1.9(\text{rad/s})$ に内部液体のスロッシングによるピークが見られる。なお、この値がスロッシングの卓越振動数の理論値に一致することは確認済である。

図 8 はシェル中心間距離比 d_{12}/a （シェル中心間距離／半径）の変動に対する伝達関数の変化を示すものである。1 次固有振動数の時について云えば、中心間距離比が 2, 3 では単一の時の応答値に比べてそれぞれ 10%, 2% 程度小さくなるという差がある。振動数が高い時ほどシェル間の相互作用は大きく現われ、2 次固有振動数の時には中心間距離比 2, 3 でそれぞれ 40%, 10% 程度の差となる。中心間距離比が 4 以上では単一の場合にほぼ同じとなりシェル間の相互作用は現れなくなる。

3.2 入力地震動特性

解析対象とする地震入力波として、1995 年兵庫県南部地震時に神戸市開発局¹⁹⁾によって神戸ポートアイランドの観測点で採取された地震波の内、G.L-32m 地点での南北成分水平地震波を用いる

こととし、これを図 9 に示す。この 30 秒間の震動中においてピークが発生するのは約 4.5 秒後であり、加速度最大値は 543cm/sec^2 、速度、変位の最大値はそれぞれ約 60cm/sec 、 30cm である。図 10 は同上波形の加速度、速度、変位のフーリエスペクトルである。変位スペクトル上には、 $\omega=0.31\text{rad/s}$ で最初のピークが見られるほか、これに続いて、変位スペクトル上においては $\omega=0.62, 1.23, 1.53, 2.0, 3.4, 5.2(\text{rad/s})$ 程度までのピーク振動数が、加速度スペクトル上においてはさらに高振動数の $6.1, 7.1, 7.5, 8.7(\text{rad/s})$ などにピーク振動数が存在している。

3.3 構造物－流体系の地震応答性状

図 11 は、0～0.2 の 4 段階のデッキ質量比について、構造物－流体系の各種伝達関数 $H(\omega)$ と入力加速度波形（図 9a）のフーリエ変換 $F(\omega)$ との積 $H(\omega) \cdot F(\omega)$ のフーリエスペクトルを示している。シェル（頂部変位 U 、下端応力 σ_x, σ_{bx} ）の応答も流体（水深 1/2 での波圧、水平波力）の応答も質量比の大きさに応じて大きくなっており、大抵は各々の 1 次固有振動数において最大となっている。流体の波圧および波力は内部と外部ではほぼ同量となっているが、スロッシング振動数（ $\omega=1.9\text{rad/s}$ ）の時には、内部流体は外部流体に対して 2～3 倍に大きくなっている。シェルの鉛直変位 U は水平変位 W に比べて 1/5 程度であり、シェル下端垂直応力 σ_x と同曲げ応力 σ_{bx} はほぼ同量となっている。

地震応答解析では入力加速度最大値を 500cm/sec^2 とし、入力波形のフーリエ変換 $F(\omega)$ と、伝達関数 $H(\omega)$ には $\omega=0\sim100(\text{rad/s})$ までの振動数領域を考慮に入れて得られた各種時刻歴応答結果を図 12 に示す。A 図はデッキ質量のない場合で、他の場合に比べて系の 1 次固有振動数（ $\omega_1=46\text{rad/s}$ ）が相当高いことを反映した状況が現れている。B から D 図は質量比が 0.05～0.2 の場合の結果であっ

Fig.8A Frequency responses(absolute value) for different ratio of distance of two shells to radius, d_{12}/a

Fig.8B Variation of responses(absolute value) with ratio of distance of two shells to radius, d_{12}/a

Fig.9 Input earthquake wave (Kobe Port Island, NS, GL-32m, 1995)

Fig.10 Fourier spectrum of earthquake wave (Kobe Port Island, NS, GL-32m, 1995)

Fig.11 Fourier spectrum of displacement w and normal stress σ_x of the shell, fluid pressure P_s and wave force P_z for different deck mass ratio M_D/M_0

Fig.12 Time histories of displacements U and W , normal stress σ_x , bending stress σ_{bx} , horizontal acceleration of the shell, fluid pressure P_s , wave force P_z and inertia force V_z for different deck mass ratio M_D/M_0

て、図 4 に示したようにシェルの伝達関数の場合は 10rad/s 付近の 1 次固有振動数での振幅に比べて 80~90rad/s 付近の 2 次固有振動数での振幅は殆ど 0 に近く、これを反映して時刻歴応答曲線には 2 次の成分は出なくなっている。これに対して流体の波圧および波力の伝達関数の場合は、図 11 に示したフーリエスペクトル $H(\omega) \cdot F(\omega)$ においても、2 次固有振動数付近の勢力は、1 次固有振動数付近での勢力に比べて小さいものの、相当な勢力を有していることにより、時刻歴応答曲線はシェルに比べて振動数の高い波形が現れる結果となっている。シェルの変位と応力応答は、デッキ質量が 0 の場合に最も小さく、質量の増大につれて大きくなっている。デッキ頂部の最大水平変位応答はデッキ質量比が 0~0.2 に対して $W=0.01\text{m} \sim 0.15\text{m}$ 程度で、傾斜角としては $W/H=1/2500 \sim 1/150$ 程度となっている。一方シェルの絶対水平加速度応答 $(W+W_0)_{\text{II}}$ はデッキ質量が 0 の場合に約 1500gal で最も大きく加速度応答倍率としては約 3 倍であり、また、デッキ質量のある場合は 1.5 倍程度である。シェルの最大垂直応力 σ_x および曲げ応力 σ_{bx} は、デッキ質量比が 0.1 でほぼ許容応力度程度となっている。内外流体の最大波圧 $P_{\text{sb}}, P_{\text{sh}}$ はシェル下端に生じる最大静水圧の 1 割程度で、内外流体波力最大の最大応答は静的外周水圧積分値の 1 割程度であり、静水圧に比べては小さい応答となっている。これに対してデッキ慣性力 V_{2D} は既述の通り、流体の応答と異なり 2 次の成分が殆ど含まれないが、静的外周水圧積分値の 0.2~0.6 程度で比較的大きい。なお、内部および外部流体波圧は、完全に同位相でシェル壁に作用していることを確認した。

4. 結論

本論では 2 円筒シェル上に剛体デッキを有する固定式海洋構造物の、調和地動応答および地震応答について考察した。

2 円筒シェル中心間距離については次のことが分かった。振動数が高い時ほどシェル間の相互作用は顕著に現われ、2 次固有振動数の時には中心間距離比 2, 3 でそれぞれ 40%, 10% 程度の差となる。中心間距離比が 4 以上では単一の場合にほぼ同じとなりシェル間の相互作用は現れなくなる。

デッキ質量および内部流体の有無に関しては次のようにまとめられる。円筒シェル上端にデッキ質量の無い場合、シェルには分布力タイプのシェル慣性力と波圧が作用し、内部流体の有無は直接波圧の有無に関わり、調和波応答特性（固有振動数や振幅）および地震応答特性に影響する。一方、デッキ質量が有る場合、シェルには上述の分布慣性力と波圧の他に上端集中力タイプのデッキ慣性力が作用する。デッキ質量が大きくデッキ慣性力が波力に比べて大きくなる場合にはいわゆるトップヘビーな構造形態となり、内部流体の有無すなわち内部流体波圧の有無が円筒シェル構造物の応答に及ぼす影響度は小さくなる。また、シェル内外共に流体が存在する場合は、内外の静水圧のバランスがとれ静的応答を解消出来て構造的に有利と言える。

地震応答に関しては、本論では地震応答解析にフーリエスペクトル法を用いることによって、構造物-流体系の伝達関数特性と地震動のフーリエスペクトル特性の 2 つの要因が地震応答特性を決定するということを明示できたものと考ええる。ここでは入力地震動は最大加速度 500gal に基準化した 1995 兵庫県南部地震に

限定しているが、地震応答性状としては以下の事柄が分かった。シェルには 2 次の応答は出難いのに対し、流体には 2 次の応答も現われ、流体の波圧あるいは波力の地震応答波形はシェルに比べて高振動数の波形が出現すること、また、地震応答最大値については、デッキ質量の無い場合、シェルの加速度応答は大きく 3 倍程度の増幅倍率であるが応力応答は小さいこと、デッキ質量の増加に応じてシェルの変位と応力応答は増大する結果となるが、質量比が 0.1 の場合、傾斜角は 1/300 でシェルの応力応答は許容応力程度になる。以上、固定式円筒シェルーデッキ系構造物の調和地動応答及び地震応答について、2 円筒シェル中心間距離、シェル板厚（剛性）、デッキ質量および円筒シェル内部流体の存在の有無の違いが、応答に及ぼす影響について考察し、固定式円筒シェルデッキ系構造物の動的応答性状の解明を図った。

謝辞

本研究の遂行にあたり、研究のベース構築に貢献頂いた莞天義久神戸大学名誉教授、日下部馨神戸大学教授、野添久視広島工業大学助教授、(株)竹中工務店 田中洋氏に記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 大楠丹：鉛直円柱群による波の反射と透過、九州大学応用力学研究所報、第 57 号、pp.527-544, 1982.10
- 2) 松井徹哉、玉木利裕：複数個の鉛直軸対称構造物に作用する波力の解析（その 1、その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.907-910, 1979.9
- 3) H.Kagemoto and D.K.P.Yue: Interactions among multiple three dimensional bodies in water waves: An exact algebraic method, J. Fluid Mech., Vol.166, pp.189-209, 1986
- 4) 登坂直好：流体波動と弾性シェルの動的相互作用に関する研究、日本建築学会論文報告集、第 314 号、pp.176-183, 1982.4
- 5) 西村敏雄：3 次元弾性体及びシェルと流体波動との連成問題に対する定式化とその応用に関する研究、日本建築学会論文報告集、第 319 号、pp.176-183, 1982.9
- 6) Y.Tanaka and R.T.Hudspeth: Restoring forces on vertical circular cylinders forced by earthquakes, Earthquake Eng., Struct. Dyn., Vol.16, pp.99-119, 1988
- 7) B.D.Westermo: Dynamic response of elastic cylinders in fluid layer, Vol.107, J. EMI, ASCE, pp.187-205, 1981.2
- 8) Liaw C.Y. & Chopra, A.: Earthquake analysis of axisymmetric towers partially submerged in water, Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.3, pp.233-248, 1975
- 9) T.Hamamoto, N.Konishi and Y.Tanaka: Study on dynamic behaviors of shell type offshore towers during earthquake, Proc. of the 5th Japan Earthquake Engineering Symposium, PP.1041-1048, 1978
- 10) 濱本卓司、田中弥寿雄：固定式海洋円筒シェルの動的解析、その 3 地震応答解析、日本建築学会論文報告集、第 303 号、pp.141-154, 1981.5
- 11) 濱本卓司、田中弥寿雄：波浪及び水平地動に対する固定式海洋円筒タンクの動的応答解析、外部流体-シェル内部流体連成系の動的相互作用、日本建築学会論文報告集、第 324 号、pp.154-166, 1983.2
- 12) 福住忠裕、日下部啓、野添久視、莞天義久：海底固定式円筒シェル群-デッキ系構造物の動的応答（流体調和表面波を受ける場合）、日本建築学会構造系論文報告集、第 449 号、pp.185-194, 1993.7
- 13) 福住忠裕、田中 洋、日下部啓：波浪および地動入力による海底固定式複数円筒柱応答性状、第 9 回日本地震工学シンポジウム、pp.1297-1302, 1994
- 14) 倉西正詞：応用弾性学、共立出版、1953
- 15) Stephen P. Timoshenko and James M. Gere: Theory of Elastic Stability, McGraw-Hill, 1961
- 16) 神戸市開発局：兵庫県南部地震による埋立地盤変状調査（ポートアイランド、六甲アイランド）報告書、1995

(1997年 9 月 10 日原稿受理、1998年 1 月 16 日採用決定)