

## (19) 海洋円筒シェルの連成振動に関する実験的研究

○\*倉田 冬彦 \*河邊 正治 \*\*西條 修 \*\*\*加藤 渉

### 1. 緒言

海洋シェル構造物は広大な海洋スペースを利用する上で形態的にも力学的特性にも優れており、なかでも固定式円筒シェルは形状が単純で海洋原子力プラントや海洋備蓄タンクなどに広い応用性があると考えられる。また、現在の海洋構造物は使用条件の過酷化と大型化の傾向にあり、構造設計上の合理化、さらに固有振動数の低下による地震動や波浪との共振に対する安全性の検討が望まれている。これらに対して、理論・数値解析は数多くあり、濱本、田中<sup>1)</sup> 登坂<sup>2)</sup> 西村<sup>3)</sup> 西村、神園<sup>4)</sup> 西村、新宮<sup>5)</sup> 等が弾性シェルと流体の動的相互作用としての定式化、解析結果を報告している。しかし、実験研究としては、濱本、田中 他、<sup>6)</sup> 文献5) 等があるが数少ない。よって著者らは新しい振動実験材料として優れたシリコンゴムを用い、固定式海洋円筒シェルと地震動、とくに加速度タイプの高周波地震動との共振を問題とし、振動特性(固有振動数、モード、波圧)の把握を目的に水槽振動実験を行った。実験は付加水慣性力による流体との連成影響が大きい短形の弾性円筒シェルの想定してモデルを作製し(写真-1)、上端フリーと上端エッジ・リング付について引張・解放による自由振動(写真-2)及び水中振動台による強制加振(写真-3)、さらに剛体円筒の強制加振(写真-4)を行い、それぞれ加速度、歪、動水圧を測定した。本論では上端フリー・下端固定の片持円筒シェルの場合の自由振動及び強制振動実験から得られた共振振動数、モードの結果と動水圧の解析解を用いたレーリー・リッツ法による数値解析を比較・検討して報告する。

### 2. 円筒シェルモデルによる振動実験

A. 材料実験 モデル材料としてRTVシリコンゴムを用いた。これは二液混合常温硬化型であり、型枠によって種々のモデル形状を作製できる。硬化は混合の後、約15分で始まり、約24時間後に終了し、作業性も良い。また、多種多様で硬化剤の調合により幅広い値域でのヤング係数が得られる。弾性範囲も線形で幅広く、材質的にも安定し、力学的特性もすぐれている。大変形問題の検討やシェルのような剛な構造物の振動変形量を求める場合の小型実験用モデル材料として適していると考えられる。本実験モデルに用いたシリコンゴムの材料実験結果を表-1に示す。ポアソン比の値はやや大きい、体積変化を伴うほどの変形はしないものとし、影響はないと考える。

B. 円筒シェルモデル 本実験で想定したフルスケールモデルは半径  $R=20\text{ m}$ 、シェル長さ  $L=40\text{ m}$ 、シェル厚  $t=0.2\text{ m}$ 、ヤング係数  $E=2.1 \times 10^6\text{ kg/cm}^2$ 、比重  $\rho=7.86$  の鋼製の円筒シェルの想定している。モデル縮尺は  $1/\lambda=1/100$  とした。表-2 にはフルスケールモデルと実験モデルの相似比を示しており、その結果から相似則より求めた振動数比は1.10 となり、実験モデルで生じた振動数がほぼフルスケールモデルでの振動数であると見なしてよい。しかし、実験モデルでは静水圧や動水圧で座屈しないように考慮して  $t/R=1/100$  であるのを  $t/R=1/20$  と薄肉シェル理論の適用範囲の限界まで大きくした。

\*日本大学大学院 \*\*日本大学理工学部 助教授-工博 \*\*\*日本大学理工学部 教授-工博

このやや厚くした影響については後述する。モデル寸法を 図-1 に示す。

C. 水槽実験 実験は日本大学理工学部・習志野総合水槽棟平面水槽及び同内設置水中振動台を使用した。自由振動の起振方法はテグスでの同張力の内側引張・切断による円筒上端の1点部分加振で行い(写真-1)、約2秒間で減衰する自由振動が生じた。強制振動の場合には、水中振動台により1 Hz~50 Hzまで約70秒間で正弦波スイープ加振を行った(写真-2)。計測は加速度センサー、歪ゲージ、圧力センサーを用いた。図-1 に示すように、加速度センサーは応答スペクトルを求めるために加振方向0°の軸方向上5点、上端円周方向上に45°間隔で片側5点に設置した。歪ゲージはモードを求めるために、加振方向0°, 45°, 90°の軸方向上4点に内側は3軸、外側は縦1軸の計24点、上端円周方向に30°間隔で12点に設置した。圧力センサーは、動水圧を求めるために加振方向0°, 45°, 90°の軸方向上4点の計12点に設置した。また、水深の変化は水深D、シェル長さLとしたとき、 $D/L=0.0$ (気中),  $0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の計5ケースで行なった。

D. 計測・解析システム 図-2に計測・解析システムを示す。各センサーからのピック・アップをアンプで増幅してアナログ・ビデオデータレコーダに記録した後、A-D変換して磁気テープにデジタル・データとして集録し、FACOM・M-160コンピュータにてF.F.T.を行ってスペクトル化し、X-Yプロッタでグラフ化した。尚、A-D変換のサンプリング周波数は理論的には解析範囲の倍の100 Hzで充分であるが、より精密な時刻歴の振動モードを確認するために、自由振動、強制振動ともに500 Hzでサンプリングした。

### 3. 実験結果及び数値解析

数値解析は、以下の仮定 —— a) 流体は非回転、非圧縮、非粘性のパロトロピー流体で、シェルの外側の半無限領域を有するものとする。 b) シェルは等方性で線形弾性範囲内にあるものとし、等厚・薄肉である。 c) シェルは線形振動の範囲内にあるものとする。 —— のもとに、シェルの振動モードの線形結合を仮定し、流体の無限遠の放射条件を含んだ境界値問題を満足する動水圧の解析解を用いてレーリー・リッツ法で行った。ただし、シェルの歪エネルギーは、Novozhilovの歪エネルギーを用いた。以下に解析・実験結果について述べる。

まず、 $t/R=1/20$ とモデル厚をやや厚くした影響であるが、図-3に $D/L=0.0$ (気中)におけるシェル厚変化の固有振動数に対する影響を示した。各シェル厚についてモデルの $t/R=1/20$ で無次元化している。各シェル厚とも円周方向リングモード次数 $n=2$ までの低次固有振動数はほとんど変化しないが、 $n=3$ 以降から急激に低下する傾向を示す。フルモデルスケールである $t/R=1/100$ では、 $1/20$ に比べて高次振動数が約 $1/5$ に低下する。よって、モデルに生じた高次の固有振動数は、実際のフルスケールモデルでは約 $1/5$ 程度であることがわかる。シェル厚によっては低い振動数でも低次モードと連成して円周方向に高次モードが生じることが推定される。また、厚さ変化は各固有振動数の刺激係数の変化に敏感であり、厚さによっては2次以降のモードの影響を無視できない場合もあると考える。

自由振動実験結果・解析について、まず、図-4に各水深の1次共振ピークから4次共振ピークまでの実験値の固有振動数と( $m$ ; 軸方向ビームモード次数,  $n$ ; 円周方向リングモード次数)=(1, 3)の計算値を示す。全体的に各ピークは水深が増加すると固有振動数は低下し、1次共振ピークは、計算値の( $m, n$ )=(1, 3)の固有振動数とほぼ一致する。しかし、2次と3次の共振ピークは一様には低下せず、4次共振ピークは低下しているが、それぞれ計算

値の固有振動数とは良好な一致はしない。これは、1次共振ピークが、計算値の  $(m, n) = (1, 3), (1, 4)$  の固有振動数のみのピークであり、他の固有振動数にあまり接近していないのに対し、2次共振ピーク以降は付加水慣性力の影響によるシェルの固有振動数の全体的な低下によって、各固有振動数が互いに接近して連成したり、同じ共振ピークでも水深によっては異なる固有モードが主成分として含まれてしまう影響によるものと考えられる。図-5, 6には、 $D/L = 0.0, 0.8$  での円筒シェル上端加振方向  $0^\circ$  位置の加速度応答スペクトルを示す。 $D/L = 0.0$  (気中) の応答スペクトルに比べて  $D/L = 0.8$  では全体的に加速度応答量が減少し、逆に同じ周波数範囲に数多くの共振ピークが生じている。応答量の減少は、水深増加につれて応答量が漸次減少していくことより、シェル側壁表面に作用する付加水慣性力の増加による影響と考えられる。共振ピーク数の増加は、同じく付加水慣性力の増加によるシェルの各固有振動数の低下及び接近によるものである。これらの現象について  $D/L = 0.0, 0.6$  の実験共振ピークと計算結果のシェルの各固有振動数とを比較したものを、それぞれ 図-7, 8に示す。横軸に平行に描いた実線及び破線は、加速度応答スペクトルの共振ピーク値を表わし、各点で示したのはシェルの  $m, n$  モードに対する固有振動数である。図-8の  $D/L = 0.6$  でのシェルの固有振動数は、図-7の  $D/L = 0.0$  (気中) のものに比べて、水深増加による影響により、全体的に低下している。特に、 $n = 1, 2$  及び  $4$  以降のモードに対する固有振動数の低下は大きく、全体的に並んだようになり、同じ振動数付近に多くの固有振動数が生じやすくなっていることがわかる。実験値共振ピークとの比較では、 $D/L = 0.0, 0.6$  ともに共振ピークがシェルの各固有振動数の連成作用として生じているのがわかる。卓越した共振ピークは、 $D/L = 0.0$  のとき、 $(m, n) = (1, 4) \sim (1, 5)$  の  $13 \text{ Hz}$  付近、 $(2, 2) \sim (2, 5)$  の  $21 \text{ Hz}$  付近、 $D/L = 0.6$  のとき、 $(m, n) = (1, 5) \sim (1, 6), (2, 2) \sim (2, 4)$  の  $12 \text{ Hz}$  及び  $14 \text{ Hz}$  付近、 $(3, 3) \sim (3, 4)$  の  $20 \text{ Hz}$  付近に生じている。自由振動では部分加振によって  $n \approx 1$  のモードが現われやすく、さらに片側のみの1点加振であることより  $n = 2$  のオーバリング振動も生じにくい。よって、円周方向リングモード次数  $n$  は、3次と4次が卓越したモードであると推定できる。実際、図-9に示すように、上端円周方向歪から求めた円周方向リングモードの時刻歴には連成した複雑な波形が生じており、なかでも  $n = 3, 4$  が卓越している。円周方向のモードを円周方向歪から求めているが、これはシェルの法線方向変位が、円周方向歪に近似的に比例していると考えて求めたものである。また、図-10には  $D/L = 0.8$  での軸方向ビームモードの計算値を示す。シェル長さ  $L$  に対する半径  $R$  の比  $R/L = 1/2$  すなわち本実験モデルのような短く太いシェルタイプの場合にはモードが崩れており、 $R/L = 1/4, 1/8$  と細長いタワータイプになってくると片持梁の振動モードに近づいてくる。よって、短く太いシェルタイプには水圧による付加水慣性力が複雑に作用してくることがわかる。

強制振動実験結果・解析については、図-11, 12に  $D/L = 0.0, 0.8$  における加速度応答倍率のスペクトルを示す。図-5, 6の自由振動時の応答スペクトルと比べてみると、 $D/L = 0.0$  (気中) では、共振ピークが約  $16 \text{ Hz}$  と約  $43 \text{ Hz}$  付近の2つのみになり、 $D/L = 0.8$  では逆に小さなピークが多く、加速度応答量も減少する。また、自由振動時と強制振動時の各共振ピークにおける振動数に約  $1 \sim 2 \text{ Hz}$  の差が生じている。原因としては種々の要因の複合作用と考えられるが、1つには円筒上端での1点引張・解放による部分加振の

方法と、水中振動台によって底部から全体的に1方向加振する方法との差によるものがあると考えられる。加振方法の相違によって、付加水慣性力の作用も各モードの発生も異なってくることが考えられ、振動特性をみる場合には考慮すべき要因である。図-13, 14には図-7, 8と同様に、 $D/L = 0.0, 0.6$ について実験共振ピーク値とシェルの固有振動数の計算値を比較した。ともに図-7, 8の自由振動時の場合と似た傾向を示し、 $D/L = 0.6$ では水深増加による固有振動数の低下により、各連成共振ピークは $D/L = 0.0$ のときより下がっている。図-15には、実験の1次共振ピークと計算値の $(m, n) = (1, 1), (2, 3), (2, 4), (1, 5)$ の固有振動数の水深変化を示す。気中から $D/L = 0.8$ にかけて、実験値は約16 Hzから約9 Hzまでに低下する。実験値の $D/L = 0.2$ で振動数がやや上がるが、計算値とはほぼ良好な一致を示す。また、図-7, 8の自由振動では、部分加振によって $n = 3, 4$ のモードが卓越しているのに対し、図-13, 14の強制振動では振動台による1方向底部加振であることを考慮すれば、 $(m, n) = (1, 1)$ が卓越モードであり、さらに $n = 2$ 以降のリングモードの振動が連成してくるものと考えられる。実際、写真-4の剛体円筒のリングウェーブのみに対して、写真-5の共振1次ピーク時の波形にはリングウェーブの他に2方向に広がる発散波と周囲に波立つ状態が生じた。写真-6の共振3次ピーク時の波形には幾重にも重なる細かな発散波が生じている。さらに、上端円周方向歪から近似的に求めた共振1次ピークのリングモードの時刻歴には、乱れているが連成した波形が生じ、なかでも図-16に示すように $n = 3, 4, 5$ のモードが卓越して現われる。但し、歪から求めているため、剛体移動に相当する $n = 1$ のモードは得られなかった。

#### 4. 結語

本実験結果より、短く太い海洋円筒シェルの振動特性、特に固有振動の連成ピーク、円周方向のリングモードが把握できた。自由振動では1点部分加振により $n = 3, 4$ 次が卓越し、強制振動では振動台による加振で $n = 1$ が卓越し、2次以降が連成して生じている。これは、波の発散波によって目視にても認められた。強制振動において $n \neq 1$ のモードが生じているのは、初期不整の影響など種々の要因が考えられるが、やはり $n \neq 1$ のモードは形状によっては無視できないものと考えられ、文献7)の討論にも同様の主旨が述べられている。また、実際の海洋構造物としてのフルスケールモデルでは低次から高次まで低い振動数が生じ、形状によっては地震動との共振を検討する必要がある。

〔謝辞〕 振動実験に協力頂いた日大理工 海洋建築工学科 西條研 卒研究生諸君に感謝致します。

#### 〔参考文献〕

- 1) 濱本, 田中: “固定式海洋円筒シェルの動的解析(その1)”, 建築学会論文報告集, S55.5
- 2) 登坂: “流体波動と弾性シェルの動的相互作用に関する定式化”, 建築学会論文報告集, S57.4
- 3) 西村: “三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”, 建築学会論文報告集, S57.9
- 4) 西村, 神園: “固定式海洋球形シェルの地震応答解析”, 建築学会大会梗概集, S58.9
- 5) 西村, 新宮: “水中に於ける円錐形シェルの連成固有振動解析ならびに実験的研究”, 建築学会大会梗概集, S58.9
- 6) 濱本, 田中 他: “固定式海洋円筒構造物の波浪応答実験”, 建築学会関東支部研究報告集, S55
- 7) 清水, 山本, 河野: “円筒タンクの耐震設計法に関する研究(第2報)” 機械学会論文集, S57.3

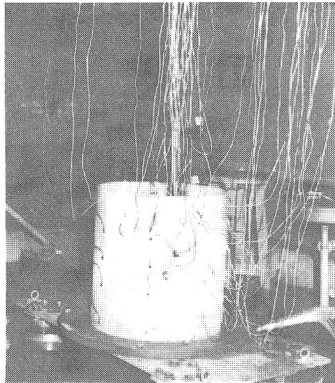


写真 - 1 円筒シェルモデル

表 - 1 シリコンゴム材料特性

| ヤング係数 (Kg/cm <sup>2</sup> ) | ポアソン比        | 比重           |
|-----------------------------|--------------|--------------|
| E = 3 8 . 5 2               | $\nu = 0.47$ | $\rho = 1.2$ |

表 - 2 実験モデルの相似則

|                           |                                                 |
|---------------------------|-------------------------------------------------|
| 長さ比                       | $\lambda = L_p / L_m = 100$                     |
| ヤング係数比                    | $\mu = E_p / E_m = 5.45 \times 10^4$            |
| 比重比                       | $\beta = \rho_p / \rho_m = 6.55$                |
| 振動数比                      | $F_p / F_m = \lambda \sqrt{\beta / \mu} = 1.10$ |
| < p : proto , m : model > |                                                 |

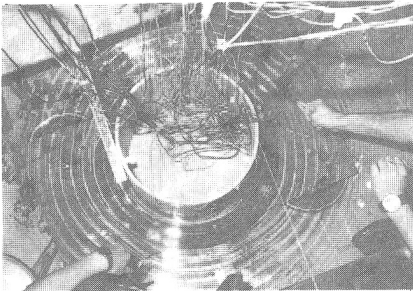


写真 - 2 シェル自由振動実験

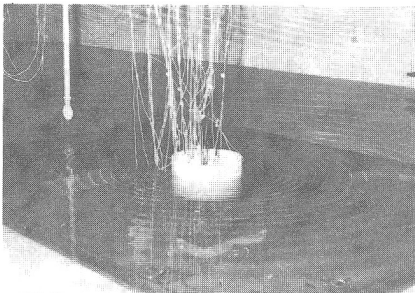


写真 - 3 シェル強制振動実験

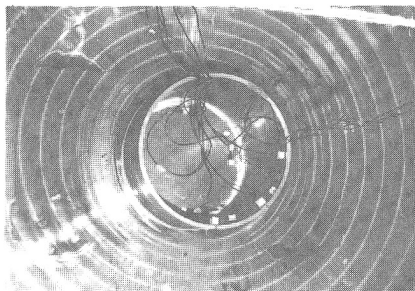


写真 - 4 剛体円筒強制振動実験

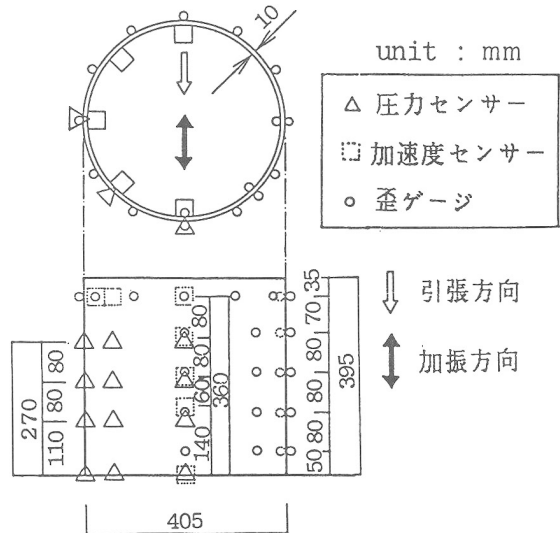


図 - 1 モデル及びセンサー位置図

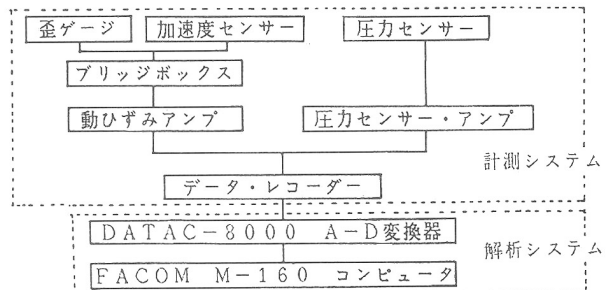


図 - 2 計測及び解析システム

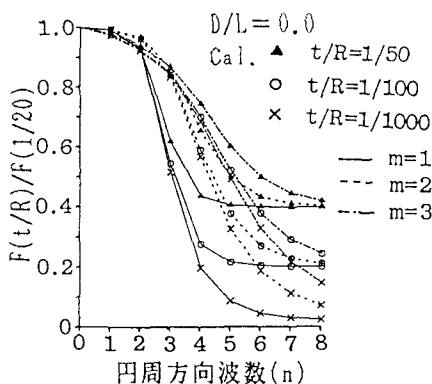


図 - 3  $t/R$ による固有振動数変化 (Cal.)

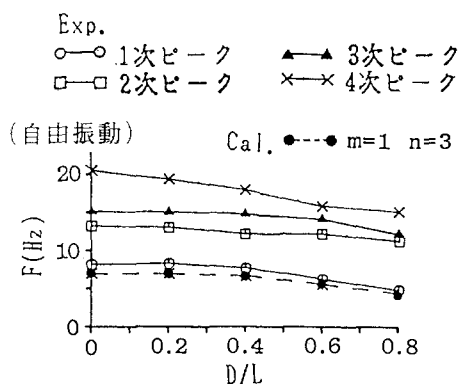


図 - 4 水深変化による固有振動数の変化

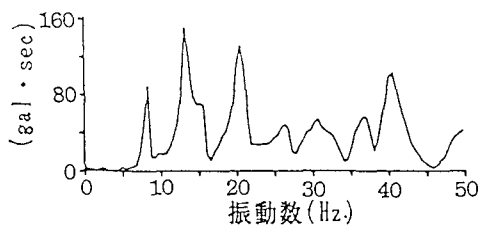


図 - 5 加速度応答のフーリエ・スペクトル (Exp. 自由  $D/L=0.0$ )

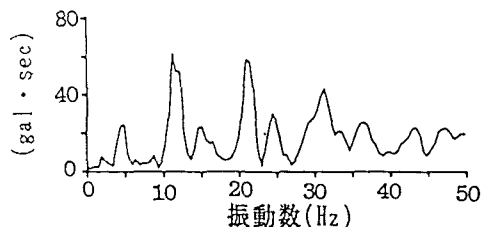


図 - 6 加速度応答のフーリエ・スペクトル (Exp. 自由  $D/L=0.8$ )

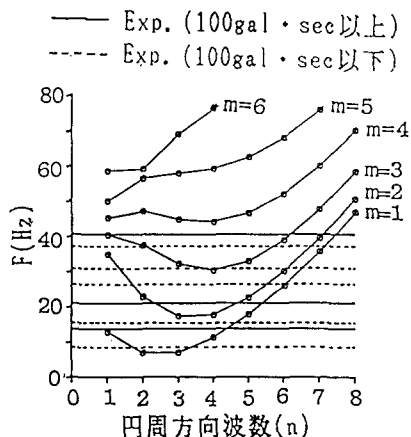


図 - 7 理論値と実験値(自由振動)の比較 ( $D/L=0.0$ )

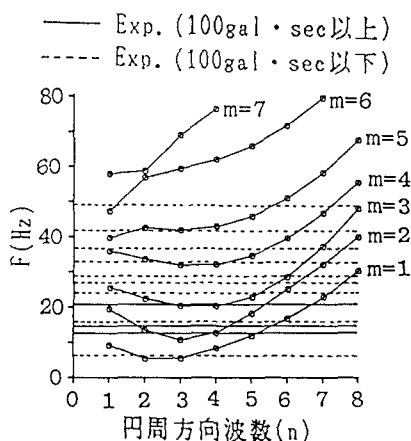


図 - 8 理論値と実験値(自由振動)の比較 ( $D/L=0.6$ )

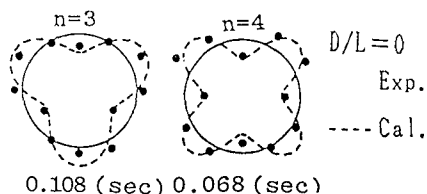


図 - 9 円周方向モードの比較 (自由振動)

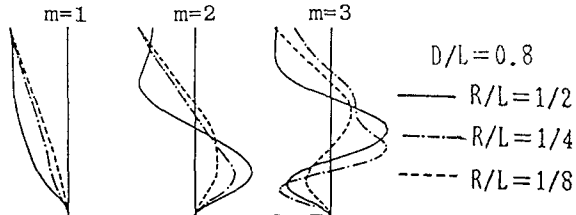


図 - 10 軸方向ビームモードの比較 (Cal.)

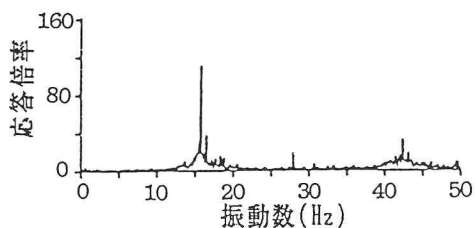


図 - 1 1 加速度応答倍率のフーリエ・スペクトル (Exp. 強制  $D/L=0.0$ )

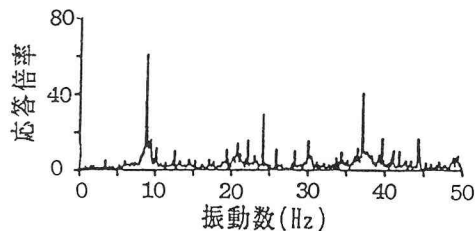


図 - 1 2 加速度応答倍率のフーリエ・スペクトル (Exp. 強制  $D/L=0.8$ )

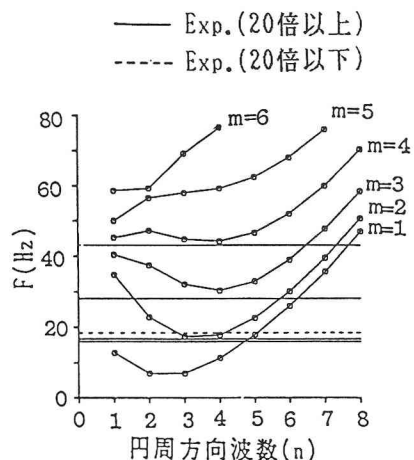


図 - 1 3 理論値と実験値(強制振動)の比較 ( $D/L=0.0$ )

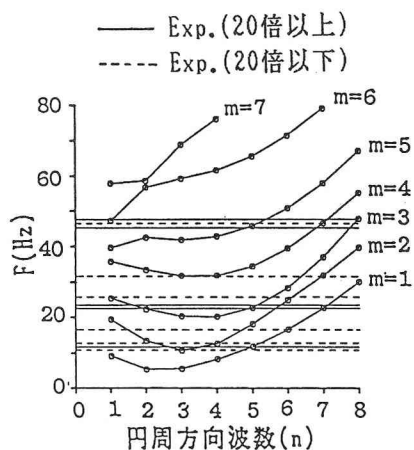


図 - 1 4 理論値と実験値(強制振動)の比較 ( $D/L=0.6$ )

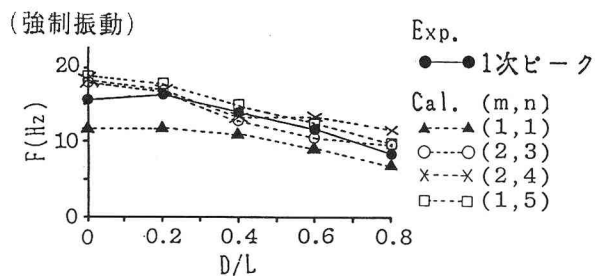


図 - 1 5 水深変化による固有振動数の変化

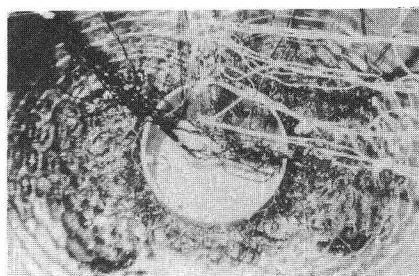
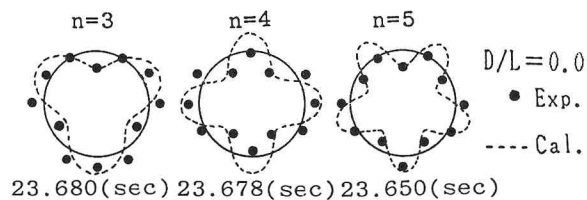


写真 - 5 共振1次ピーク (12 Hz  $D/L=0.6$ )



23.680(sec) 23.678(sec) 23.650(sec)

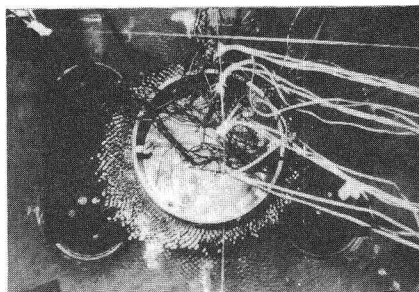


図 - 1 6 円周方向モードの比較 (強制振動) 写真 - 6 共振3次ピーク (45 Hz  $D/L=0.6$ )

# Vibration Test and Simulation Analysis of Offshore Fixed Circular Cylindrical Shell Model in Water

by      Fuyuhiko KURATA \*  
         Shoji KAWABE \*  
         Osamu SAIJO \*\*  
         Wataru KATO \*\*\*

Underwater free vibration test and forced vibration test was conducted using the underwater shaking machine, on a offshore circular cylindrical shell, the shell often generates high interest in research on the dynamical interaction problem with fluid. The shell is excellent to the mechanics from the viewpoint of the utilization of ocean space. The following is a report of a portion of the experiment.

Silicone rubber was used as the test model material due to its elastic domain covering a wide range and its excellent dynamical characteristics. The full scale of shell is assumed that the scale has 20m in radius(R), 40m in length (L) and 0.2m in thickness(t), also, which material is steel. The shell model was determined to be of a clamped-free short cylindrical shape since it is likely to induce ovaling and breathing vibrations(circumferential mode) due to the effects of dynamic interaction with the fluid. This shell model was shaken by sinusoidal wave sweeping vibrations using the underwater shaking machine. Acceleration, strain and hydrodynamic pressure were measured at each measurement point, by which results, the resonance frequency and mode were obtained. Numerical analysis was conducted by the Rayleigh-Ritz method employing an analytic function of hydrodynamic pressure.

The following are the conclusions obtained by this research. It can be said for silicone rubber, of which the shell is made to be an effective and useful material for measuring the phenomenon of interaction between the fluid and ocean structure. It was found that the natural frequency of the underwater cylindrical shell decreases as water depth increases, and the total responses also decline. Natural frequency and vibration modes were measured during the underwater shaking experiments, and it was recognized that the results of the experiment agree with the results of theoretical analysis obtained by the Rayleigh-Ritz method in terms related natural frequency. Such as the fact the third and fourth modes among the circumferential modes were found to be excellent on the free vibration test by measurements of strain taken at the top ring of the shell, were obtained. The first, third, fourth and fifth modes are exhibited, on the forced vibration test, and these modes are rather distorted due to the effects of coupling of the natural frequencies of each mode generated at the same frequency.

- 
- \*      Grad. student, Dept. of Oceanic Architecture & Engineering, College of Science & Technology, Nihon Univ.
  - \*\*     Asso. prof., Dept. of Oceanic Architecture & Engineering, College of Science & Technology, Nihon Univ.
  - \*\*\*   Prof., Dept. of Architecture, College of Science & Technology, Nihon Univ.