

# 固定式海洋構造物の地震応答に関する基礎的研究（その3）

——2 質点モデルの正弦波入力について——

中 村 嶽 竹 本 靖  
武 田 寿 一 安 楽 秀 嶽

## Study on Fixed Offshore Structures Subjected to Earthquake Motion (Part 3)

——Two-Mass Model Forced by Simple Harmonic Wave——

Takashi Nakamura Yasushi Takemoto  
Toshikazu Takeda Hidetake Anraku

### Abstract

This report concerns a fundamental study on fixed offshore structures subjected to earthquake motion. In the experiments, a one-mass and a two-mass model of a cylinder set in a circular tank were adopted. With depth of water as the parameter, free-vibration experiments, and forced-vibration experiments under simple harmonic and random waves were conducted. The studies reported here were mainly about the two-mass model forced by simple harmonic waves. The natural periods of the model in water were extended in accordance with depth of water, and the values were increased to 120 percent at maximum depth. The natural periods and water pressures of analyses by FEM agreed well with experimental data.

### 概 要

前報に引き続き、固定式海洋構造物が地震を受けて示す挙動の基礎資料を得る目的で、円形水槽を用いて、柔らかな支持構造を有する剛な円筒模型の振動実験を行なって、その振動特性を調べ、一部解析的な考察を加え、検討を行なった。

実験では1質点および2質点モデルを用い、水深をパラメーターとして自由振動実験、正弦波およびランダム波入力による強制振動実験を行なったが、本報では主に2質点モデルの正弦波入力による強制振動実験について報告する。

実験で得た固有周期は、1次、2次共に、水深に従ってほぼ同様の傾向で長くなり、最大水深時での値は、空気中の値の約1.2倍となり、FEMによる解析で求めた固有周期の値と良く一致しており、また動水圧分布も両者良く一致していることが分った。

## 1. 序

前報<sup>1)2)</sup>において、固定式海洋構造物の地震応答に関する基礎的資料を得る目的で、海洋構造物によく用いられる円筒形の1質点モデルを対象に、水槽の大きさと形状、水深、入力をパラメーターとした一連の自由振動実験および正弦波入力による強制振動実験を行ない、水中構造物の減衰や付加質量、抗力係数等について、一部解析的な考察も加えながら、検討を行なった。本報では、これ等の研究を継続させ、1質点モデルおよび2質点モデルを用いて行なった一連の自由振動実験、正弦波入力およびランダム波入力による強制振動実験のうち、主に、2質点モデルの正弦波入力による強制振動実験について報告する。

## 2. 実験装置および実験方法

実験は、前報でも使用した円形水槽（鋼製、直径4.0 m、深さ1.5 m）、小型振動台、加振機を用いて行なった。その概略および測点の位置を図-1に示す。

供試体は、写真-1に示すような、直径190.7 mm、高さ265 mm、重さ約9.8 kgの鋼製円筒を、小型振動台上に板ばね（材質SM50、厚さ0.32 cm、幅2.30 cm、長さ32.0 cm）2枚で支持し、2層にしたものである。供試体と支持ばねの接合部は、減衰が小さくなるように溶接接合とした。円形水槽の内壁には、金網を張って軟質ウレタンの細片を入れた消波装置を施し、供試体の振動によって発生する波を吸収するようにした。

実験は、水深をパラメーターとして、2質点モデルの

水没体積を変化させ(図-2参照),加振機を用いて,5gal一定加速度で振動数を約2Hzから10Hzまで変化させて入力を行ない,加速度,支持ばねの歪,動水圧,波高等を測定した。

実験データは,全てデータレコーダーに記録し,電子計算機で処理を行なった。

### 3. 振動実験結果

#### 3.1. 固有周期

図-3に,水深と系の固有周期の関係を示す。1次,2次共に,ほぼ同様の傾向で水深に従って固有周期は伸び,最大水深時(C-2-7)におけるその値は,空気中(C-2-1)の値の約1.2倍となっている。

#### 3.2. 振動モード

図-4に,代表的な水深における実測加速度モードを示す。各モードの1層の値を1として標準化すると,2層の値は,供試体が空気中にある状態(C-2-1)と,最大水深時で完没している状態(C-2-7)で,1次,2次共近い値となっている。1層のみが完没して2層が空気中にある状態(C-2-4)では,1次モードでは2層の値が小さくなり,2次モードの2層の値は大きくなっている。これは1層の付加質量効果によるものと考えられる。

#### 3.3. 減衰定数

周波数応答曲線の共振点における加速度応答倍率から求めた減衰定数と水深の関係を,図-5に示す。空気中(C-2-1)の1次の減衰定数は0.40%で,2次は0.21%であった。2次の減衰定数の値は0.6%以下で,水深にあまり関係せず,ほぼ一様の値を示す。1次の減衰定数の値は2次の値に比べてかなり大きく,バラツキも激しい。また1次の減衰定数は,供試体の本体が水面に出ている状態では,水深とともに増大していく(C-2-2, C-2-3とC-2-5, C-2-6)が,供試体が完没してからは

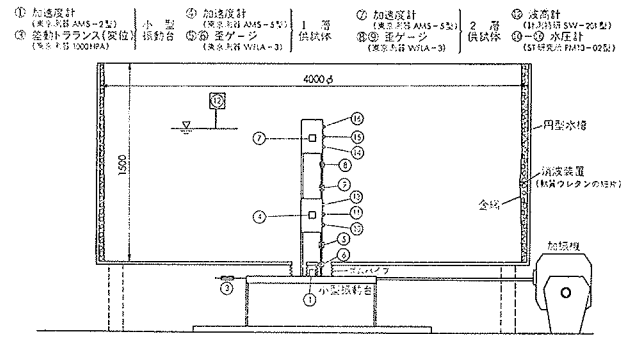


図-1 実験装置概略図および測点

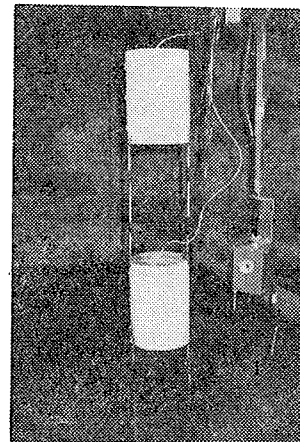


写真-1 2質点モデル供試体

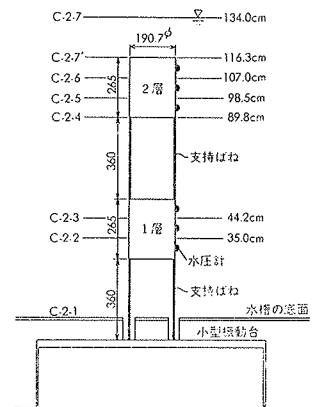


図-2 水深パラメーター

(C-2-7'とC-2-7),逆に小さくなる。これは,1次振動は振幅が大きく,供試体の本体が水面に出ている状態では,波高の大きな表面波を生じ,系の減衰に大きな影響を及ぼすためと思われる。供試体の2層の頂上に水面がある状態(C-2-7')では,大きな波高の表面波は発生しにくく,また発生しても波が供試体の頂上を超えて通過するので,減衰定数の値は小さくなり,最大水深時(C-2-7)では,波はほとんど発生せず,更にその値は

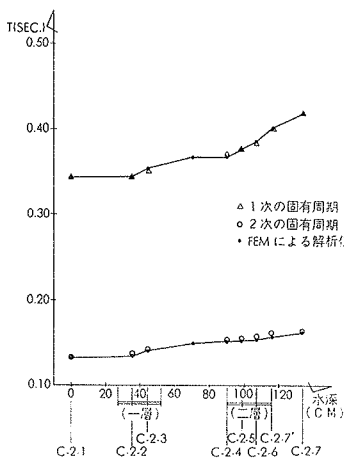


図-3 固有周期

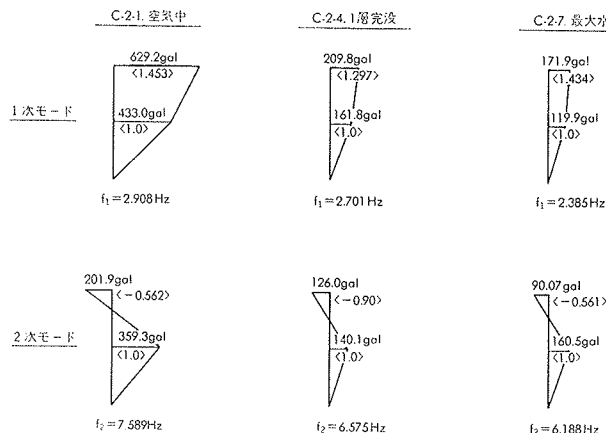


図-4 共振点加速度モードの変化

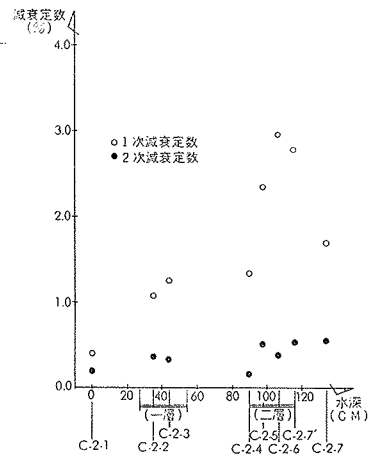


図-5 減衰定数

小さくなる。

3.4. 表面波

従来の実験において、供試体の円筒本体が水面に出ている状態では、共振点付近で表面波の発生が見られ、これが局部的な動水圧に影響を与えると共に、減衰に対しても影響を与える傾向があった。図-6に、最大水深時(C-2-7)の波高の周波数応答曲線を示す。目視では、共振点での表面波の発生は観測できなかったが、波高計による測定で、系の共振点において表面波が発生することが示されている。図-7に各水深における共振時の波高を示す。これによると、2次の共振時の波高は0.5 mm以下で、ほぼ一律の値を示すが、1次の値は2次に比べてかなり大きく、バラツキも激しい。写真-2と写真-3は、大きな波高の波が生じやすい供試体の本体が水面に出ている状態(C-2-3)の1次共振時と2次共振時での表面波を写したもので、1次共振時には、その共振振動数の波高の大きな波紋状の波が生じ、2次共振時には、周波数の高く、波高の小さい波が生じるのが分る。また水槽内壁に施した消波装置により、水槽壁面による反射波は生じていない。図-5と図-7より、表面波の発生が、減衰に大きな影響を与えることが分る。

3.5. 動水圧

図-8に最大水深時(C-2-7)における1層の円筒本体に作用する動水圧の周波数応答曲線を、図-9に2層の動水圧の応答曲線を示す。図10には、1次、2次の共振点における各測点の動水圧分布を示す。2層の最上部の水圧計の記録が行えなかったが、1層の動水圧分布を見るかぎり、動水圧は深さ方向に関して、供試体本体の中央部で最大で、上下ほぼ対称となる分布をしていることが分る。また各次のモードに対応して、1次では2層が、2次では1層がより卓越した動水圧を受けることが分る。

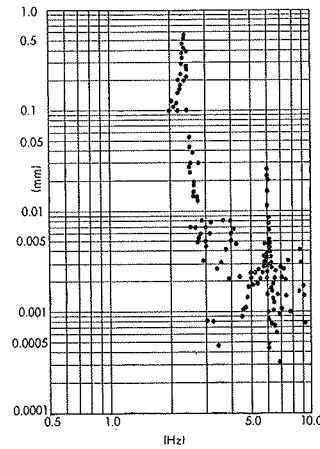


図-6 波高共振曲線  
最大水深時  
(C-2-7)

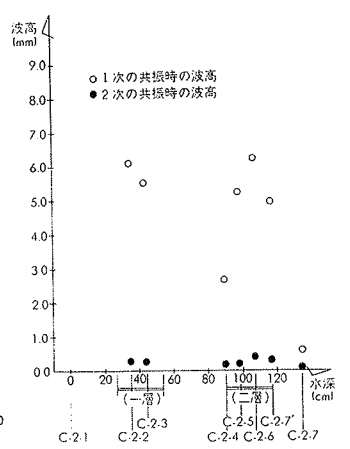


図-7 水深と波高  
の関係

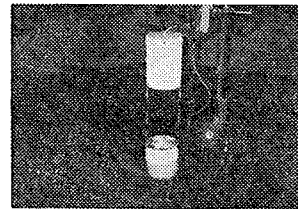


写真-2 1次共振時の波  
波高 5.5 mm  
(C-2-3 水深 44.2 cm 1層供試体 $\frac{2}{3}$ 水没)

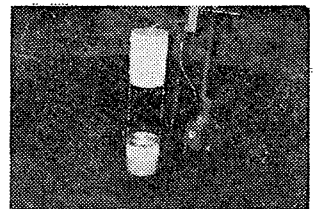


写真-3 2次共振時の波  
波高 0.3 mm  
(C-2-3 水深 44.2 cm 1層供試体 $\frac{2}{3}$ 水没)

4. 解析

4.1. 解析モデル

実験において、共振点付近の振動モードは微妙に変化し、正確なモードはつかみにくいが、供試体の質量や固

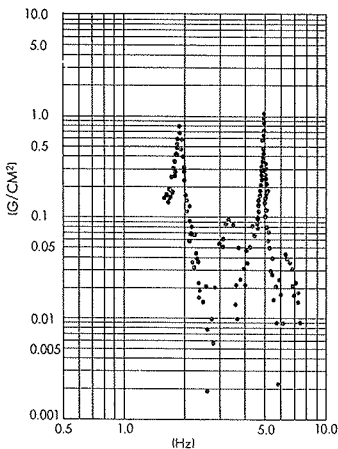


図-8 1層動水圧共振曲線  
(水圧計 13 ch)

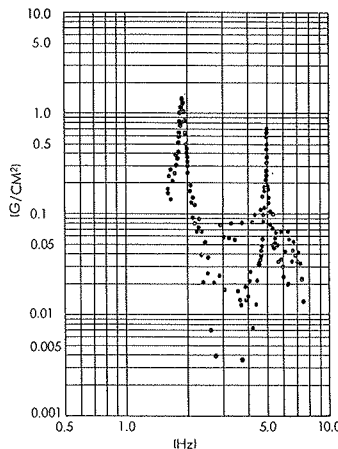


図-9 2層動水圧共振曲線  
(水圧計 14 ch)  
最大水深時 (C-2-7)

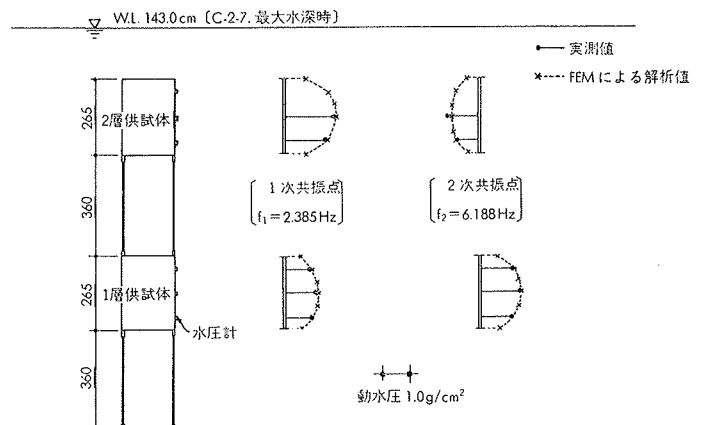


図-10 動水圧分布 最大水深時 (C-2-7)

有周期は、比較的簡単にとらえられるので、供試体の質量と、空気中の実験(C-2-1)で得た固有周期より、以下の様にして空気中のばね定数を求め、解析モデルの基本型とした。

2質点モデルの空気中における振動方程式は、次式で表わされる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = -F(t) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、Mは対角質量行列、Cは減衰行列、Kは剛性行列、F(t)は外力ベクトル、x、 $\dot{x}$ 、 $\ddot{x}$ は変位、速度、加速度ベクトルである。また1層と2層の質量を  $m_1$ 、 $m_2$ 、1層と2層のばね定数を  $K_1$ 、 $K_2$  とすると M、K は

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_2 \\ -K_2 & K_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(2)$$

で表わされ、式(1)の振動方程式の解が存在するための必要条件から、次式の振動数方程式が導かれる。

$$(m_1\omega^2 - k_{11})(m_2\omega^2 - k_{22}) - k_{12} \cdot k_{21} = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

式(3)において、 $m_1$  と  $m_2$  は計測によって既知であり、式(2)の關係を用い、実験で得た1次、2次の固有円振動数  $\omega = \omega_1$ 、 $\omega = \omega_2$  を代入すれば、次に示すばね定数  $K_1$ 、 $K_2$  に関する連立方程式を得る。

$$\begin{aligned} \{m_1\omega_1^2 - (K_1 + K_2)\} \{m_2\omega_1^2 - K_2\} - K_2^2 &= 0 \\ \{m_1\omega_2^2 - (K_1 + K_2)\} \{m_2\omega_2^2 - K_2\} - K_2^2 &= 0 \end{aligned}$$

従って、上式を解いてばね定数が求まり、固有値解析より振動モードが求まり、図-11に示す空気中における解析モデルの基本型が決定される。

4.2. 付加質量と質量係数

ばね定数と、水中での振動実験で得た固有周期が分っておれば、式(3)を用いて、そのときの質量が求まる。この場合、水中における浮力の影響を考慮して、次の様にばね定数を補正した。

4.2.1. 1層が水中にある場合

2層のばね定数  $K_2$  は変化しないが、1層の水中のばね定数  $K_{w1}$  は、空気中のばね定数  $K_1$  より、1層の水没体積  $V_1$  に比例した浮力を受けて強くなり、1層のばね長は  $H_1$  とすると次式で表わされる。

$$K_{w1} = K_1 + \frac{\rho V_1 g}{H_1} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $\rho$ : 水の密度、 $g$ : 重力加速度  
従って、式(2)において、 $k_{11} = K_{w1} + K_2$ 、 $k_{12} = k_{21} = -K_2$ 、 $k_{22} = K_2$  となり、実験で得た  $\omega = \omega_1$ 、 $\omega = \omega_2$  を式(3)に代入して得た2つの連立方程式を解くと、 $m_1$  は次式で表わされる。

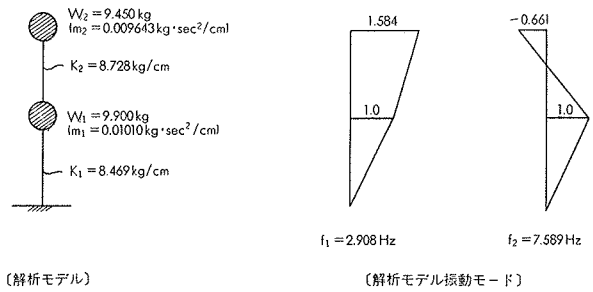
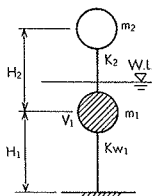


図-11 解析モデル基本型(空気中C-2-1)

$$m_1 = \frac{m_2 k_{11}}{m_2(\omega_1^2 + \omega_2^2) - k_{22}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

供試体の2層は空気中で質量  $m_2$  は一定であるので、式(5)より1層の質量  $m_1$  が求まる。

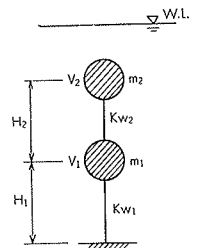
4.2.2. 1層、2層共水中にある場合

2層のばね定数  $K_{w2}$  は、2層の水没体積  $V_2$  に比例した浮力を受けて空気中のばね定数  $K_2$  より強くなり、2層のばね長を  $H_2$  とすると、式(4)と同じように、次式で表わされる。

$$K_{w2} = K_2 + \frac{\rho V_2 g}{H_2}$$

1層のばね定数  $K_{w1}$  は、1層の水没体積  $V_1$  と2層の水没体積  $V_2$  に比例した浮力を受け、次式で表わされる。

$$K_{w1} = K_1 + \frac{\rho V_1 g + \rho V_2 g}{H_1}$$



従って、式(2)において、 $k_{11} = K_{w1} + K_{w2}$ 、 $k_{12} = k_{21} = -K_{w2}$ 、 $k_{22} = K_{w2}$  となり、実験で得た  $\omega = \omega_1$ 、 $\omega = \omega_2$  を式(3)に代入して得た2つの連立方程式を解くと、 $m_2$  に関して次の2次方程式を得る。

$$(k_{11}\omega_1^2\omega_2^2)m_2^2 - (k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21})(\omega_1^2 + \omega_2^2)m_2 + k_{22}(k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}) = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(6)と式(5)より  $m_2$ 、 $m_1$  の解は2通り得られるが、空気中での基本型の質量を考慮して、付加質量が負にならない方の解を採用して、水中における総質量とした。付加質量  $M_a$  は、総質量から空気中の質量を引いて求まり、質量係数  $C_M$  は、その場合の供試体の水没体積を  $V$  とすると、次式で表わされる。

$$C_M = \frac{M_a}{\rho V}$$

以上の手法で求めた付加質量および質量係数を、表-1、図-12に示す。

図-12によれば、供試体の水没体積に比例して、その供試体の質量係数は大きくなり(C-2-2, 3の1層, C-2-5, 6, 7'の2層)、1層が完没して2層の供試体本体

が水面に出ている状態では、1層の質量係数は0.8前後でややバラツクが、最大水深時（C-2-7）では、1、2層共約0.7となり、前報の1質点モデルで得た値とほぼ同じ結果を得ている。

4.3. FEMによる解析

(1)の解析モデルに対し、前報で述べたFEMによる解析法<sup>2)3)</sup>によって、水深をパラメーターにして求めた固有周期と動水圧の解析値を、図-3、図-10に示す。また、図-13には、最大水深時の流体要素分割を示す。

本2質点モデルに対しても、解析値は実験値と非常に良い精度で一致しており、水中構造物の振動特性の把握に対する本手法の有効性が示されている。

5. 結 び

以上、2質点モデルの正弦波入力強制振動実験について報告を行なった。現在、ランダム波入力の実験データを処理している段階であり、その結果を合わせて、水中構造物の地震応答の解析を行なう予定である。

最後に本研究を遂行するにあたり、御指導頂きました千葉工業大学園部泰寿教授に謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村 嶽, 武田寿一, 竹本 靖, 安楽秀嶽: 固定式海洋構造物の地震応答に関する基礎的研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 14, (1977)
- 2) 同(その2)
- 3) C-Y. Liaw and A. K. Chopra: Earthquake Response of Axisymmetric Tower Structures Surrounded by Water, Report No. ERRC 73-25, (1973)

|       | 1 層             |             |              |              |            |                 | 2 層         |              |              |            |                 |             |              |            |
|-------|-----------------|-------------|--------------|--------------|------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|------------|-----------------|-------------|--------------|------------|
|       | 固有定数<br>(kg/cm) | 総質量<br>(kg) | 付加質量<br>(kg) | 付加質量<br>(kg) | 質量係数<br>Cm | 固有定数<br>(kg/cm) | 総質量<br>(kg) | 付加質量<br>(kg) | 付加質量<br>(kg) | 質量係数<br>Cm | 固有定数<br>(kg/cm) | 総質量<br>(kg) | 付加質量<br>(kg) | 質量係数<br>Cm |
| C-2-1 | 8.453           | 0.01010     | 9.90         | —            | —          | —               | 8.728       | 0.005643     | 9.450        | —          | —               | —           | —            | —          |
| C-2-2 | 8.548           | 0.01093     | 13.77        | 0.00693      | 0.87       | 0.34            | 8.728       | 0.005643     | 9.450        | —          | —               | —           | —            | —          |
| C-2-3 | 8.627           | 0.01258     | 12.33        | 0.00248      | 2.43       | 0.13            | 8.728       | 0.005643     | 9.450        | —          | —               | —           | —            | —          |
| C-2-4 | 8.706           | 0.01501     | 15.69        | 0.00690      | 5.73       | 0.76            | 8.728       | 0.005643     | 9.450        | —          | —               | —           | —            | —          |
| C-2-5 | 8.785           | 0.01629     | 15.96        | 0.00618      | 6.06       | 0.80            | 8.837       | 0.01001      | 9.829        | 0.003367   | 0.36            | 0.14        | —            | —          |
| C-2-6 | 8.863           | 0.01683     | 15.29        | 0.00652      | 6.39       | 0.85            | 8.855       | 0.01001      | 10.71        | 0.001286   | 1.26            | 0.25        | —            | —          |
| C-2-7 | 8.942           | 0.01644     | 15.11        | 0.00633      | 6.21       | 0.82            | 8.955       | 0.01282      | 12.56        | 0.003173   | 3.11            | 0.41        | —            | —          |
| C-2-7 | 8.942           | 0.01571     | 15.40        | 0.00581      | 5.50       | 0.73            | 8.955       | 0.01504      | 14.74        | 0.005395   | 5.23            | 0.70        | —            | —          |

表-1 付加質量と質量係数

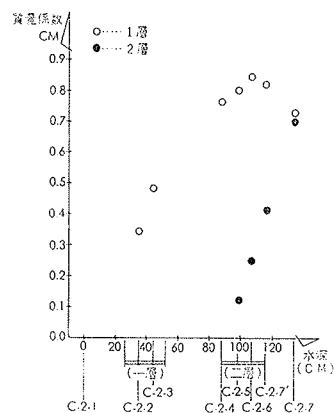


図-12 付加質量

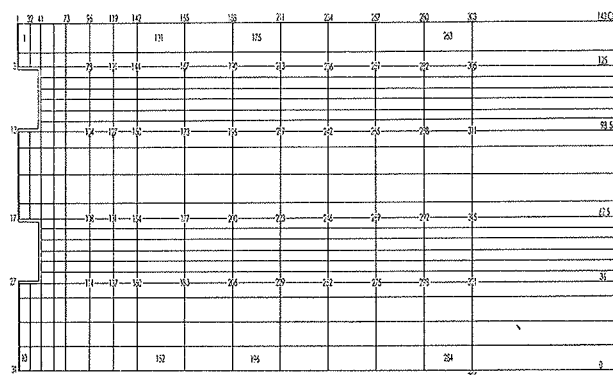


図-13 流体要素分割 最大水深時(C-2-7)