

## II-328

## 容量式波高計の現地適用上の留意点

鹿島建設(株) 正会員 ○ 岩瀬浩二  
 鹿島建設(株) 正会員 阪東浩造

## 1 はじめに

海岸工学分野の水理実験における波高計測では、容量式波高計が広く普及している。容量線は水位変化に対する応答性が高く出力の線形性が良好であり、加工と取扱いが容易であるためである。容量式波高計を現地で使用する場合、船舶や漂流物から容量線を保護する必要が生じる。今回、パイプの中に容量線を挿入する方法を検討した結果、海面変動を正確に計測するために参考となる知見が得られたので報告する。

## 2 波浪場の円管内の水面変動の解析

ここでは、円管を容量線の保護に用いることを考慮して、波浪場に置かれた円管の中の水面変動を定式化する。波浪場に置かれた中空円管のモデルを図-1に示す。

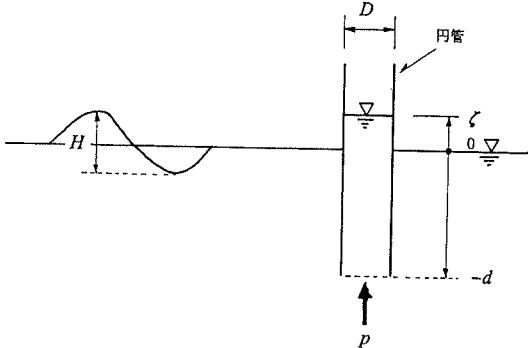


図-1 波浪場の円管

管路の水面変動の研究には木村・藤田(1977)が揚水のために行ったものがある。ここでは、以下に示す管路の損失を考慮した非定常のベルヌーイ方程式を基礎式として展開する。

$$\frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v^2}{2g} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( z + \frac{p}{\rho g} \right) + \frac{\partial h_e}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $g$ : 重力加速度、 $v$ : 管路の流速、 $p$ : 管路内の圧力、 $\rho$ : 海水の密度、 $h_e$ : 管路の摩擦による損失水頭である。

管路の水の非圧縮性を仮定すると、管路内の水面変動速度が管路の流速に等くなり、以下の式が成り立つ。

$$v = \frac{d\zeta}{dt} \quad (2)$$

ここで、 $\zeta$ : 管路内の水面の高さである。

この時式(1)は以下になる。

$$\frac{1}{g} \frac{dv}{dt} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho g} + h_e \right) = 0 \quad (3)$$

式(3)を $z = -d$ から $z = \zeta$ まで積分し、 $\zeta$ が $d$ と比較して微小であると仮定すると、以下の式が得られる。

$$\frac{d}{g} \frac{d^2 \zeta}{dt^2} + \zeta + H_e = -d + \frac{p_{-d}}{\rho g} \quad (4)$$

ここで、 $H_e$ は管路の全損失である。また $p_{-d}$ は管の底の圧力であり、微小振幅波理論より以下の式で定義される。

$$p_{-d} = \rho g d + \rho g \frac{\cosh k(h-d)}{\cosh kh} a \cos \sigma t \quad (5)$$

ここで、 $h$ : 水深、 $k$ : 波数( $2\pi/L$ )、 $L$ : 波長、 $a$ : 規則波の片振幅( $H/2$ )、 $H$ : 波高、 $\sigma$ : 角周波数( $2\pi/T$ )、 $T$ : 波の周期である。

管路の全損失は、摩擦損失の他に流入・流出の損失も考慮して以下の式で表わす。

$$H_e = \left( \frac{fd}{D} + 1 \right) \frac{v|v|}{2g} \quad (6)$$

ここで、 $f$ : 摩擦損失係数、 $d$ : 管の没水深さ、 $D$ : 管の直径である。

式(5),(6)を式(4)に代入して整理すると、最終的に管内の水面変動 $\zeta$ を記述する式が得られる。

$$\frac{d^2 \zeta}{dt^2} + \frac{g}{d} \zeta + \frac{1}{2d} \left( \frac{fd}{D} + 1 \right) \frac{d\zeta}{dt} \left| \frac{d\zeta}{dt} \right| = a \frac{\cosh k(h-d)}{\cosh kh} \cos \sigma t \quad (7)$$

式(7)を数値積分することにより解が求められる。

円管内の水塊の上下動の固有周期 $T_z$ は、管路の損失を無視すると以下の式で表される。

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{d}{g}} \quad (8)$$

## 3 水理模型実験

前節で定式化した解析法を検証するために、鹿島技術研究所の中型造波水路を用いて水理実験を行った。実験は規則波実験と不規則波実験の2通り行った。

## 3.1 規則波実験

水理実験のセットアップを図-2に示す。中型水路(長さ58m・高さ1.5m・幅0.7m)の中央に内径10.5cmの透明塩ビ管を水面から40.8cmの深さまで潜らせ、造波装置で、規

則波を造波して、円管内とその外側のそれぞれの波高を計測した。円管内の水塊の固有周期は約1.3secであるが、波の周期は、0.7sec～5.0secまで約0.1sec刻みで行い、波高は約10cmを目標として造波した。

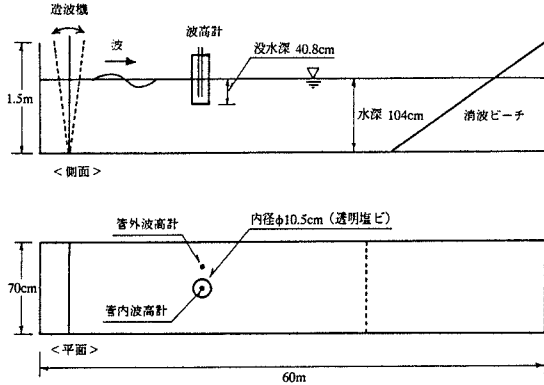


図-2 水理実験のセットアップ

図-3 に解析手法に基づいて計算された管内波高と管外波高の比（波高増幅率）と実験結果を示す。計算にあたっては、管路の摩擦損失係数として、本間（1967）の Moody 図表を参考に  $f = 0.04$  を与えた。図-3 により以下の事項が明らかになった。周期1.0sec以下の規則波は、管内の水塊を運動させることができず、管内に伝わりにくくなる。固有周期付近では、管内の水面変動量は、管外の規則波の波高の2倍以上に増幅される。周期が3.0sec以上になると、管内の水面変動は管外の規則波に追随する。解析手法に基づく計算値は、短周期から長周期に亘り、共振点付近を含めて良い一致を示しており、解析法の妥当性が検証された。

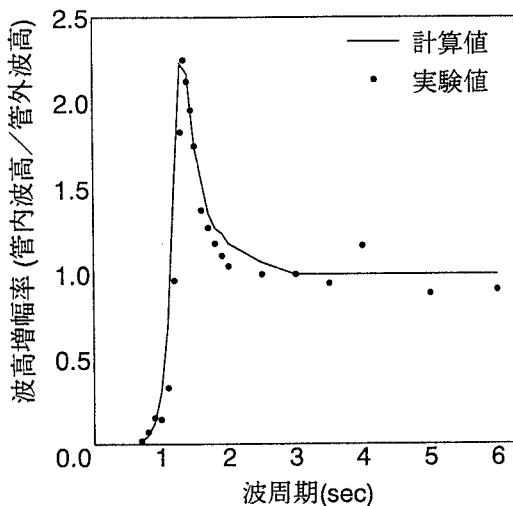


図-3 波高増幅率の実験値と計算値の比較

### 3.2 不規則波実験

規則波実験と同じ実験設備を用いて不規則波を造波し、管内と管外の波高を計測した。入射した不規則波のスペクトルはブレッグシュナイダー・光易型で、 $H_{1/3}=5\text{cm}$ とし、 $T_{1/3}$ は管路の固有周期をねらって1.4secを目標とした。

表-1 に統計解析で得られた有義値を示す。これより、管内波高は有義値で管外の2倍となっていることが分かる。

表-1 不規則波実験における管外波浪と管内波浪の有義値

| 計測場所 | 有義波高 $H_{1/3}(\text{cm})$ | 有義波周期 $T_{1/3}(\text{sec})$ |
|------|---------------------------|-----------------------------|
| 管外   | 5.5                       | 1.23                        |
| 管内   | 11.0                      | 1.37                        |

図-4 に管外と管内の水面変動から得られたスペクトルを示す。これより、管内のスペクトルは、管外のスペクトルに比べて狭帯性が強く、さらに固有周期付近のピークの値が大きく増幅されていることが分かる。

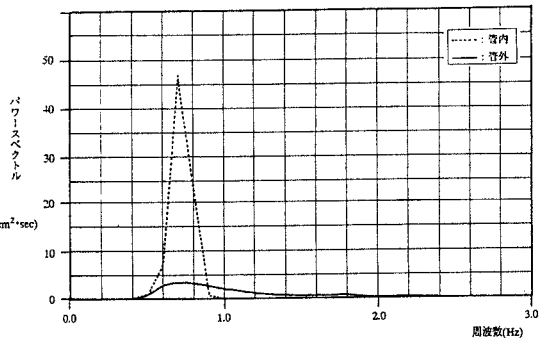


図-4 管内と管外の周波数スペクトル

## 4 まとめ

現地用容量式波高計の保護管に関して、解析と実験から検討した結果以下の知見が得られた。

1. 造波水路に円管を設置して規則波と不規則波を用いた水理実験により、解析手法の妥当性が検証された。
2. 現地で容量線式波高計を保護管に入れて用いる際、波の周期帯に管内の固有周期が存在すると計測の精度上問題があると考えられる。
3. 保護管が不可欠な場合には、管の固有周期を波周期帯から離したり、波高増幅率を十分低減させる工夫（管に穴を複数開ける等）が必要になると考える。

### 参考文献

1. 木村晴保, 藤田喜英：波動ポンプの開発, 海岸工学講演会論文集, 第24巻, pp620-624, 1977
2. 本間 仁：水理学, 丸善, pp103, 1967