II-15　波力に対する構造物の動的応答

東京大学　正会員　堀川清司
東京電力　正会員　○宮本幸始

1. はじめに

最近、構造物の動的な波力応答に関心が高まってきており、その数値計算の結果もいくつか報告されている。しかしながら、波力については、その特性は既知の外力として扱う立場の計算例が多く、振動する構造物に働く波力の特性を調べる目的でなされた計算は少ない。また、計算の結果を実験により検証したものは　あまり見あたらない。筆者らは　振動する構造物に作用する波力の特性を調べる立場から　波力を受ける柱状構造物の動的応答解析を行ない、簡単な構造物について実験も行なった。その結果、波力の評価ならびに動的応答解析に関して興味深い事項がいくつか明らかになった。

2. 波力の評価

静止円柱に作用する波力の算定式として　実用上は次式を用いることができる。

$$dF = dF_D + dF_I \qquad \langle 総波力 \rangle \qquad (1)$$

$$dF_D = C_D \cdot \rho \cdot \frac{D}{2} \cdot v|v|\, ds \qquad \langle 抗力 \rangle \qquad (2)$$

$$dF_I = C_I \cdot \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \dot{v}\, ds \qquad \langle 質量力 \rangle \qquad (3)$$

C_D：抗力係数，C_I：質量力係数，ρ：水の密度

v：水粒子速度，$\dot{v} = \frac{dv}{dt}$：水粒子加速度

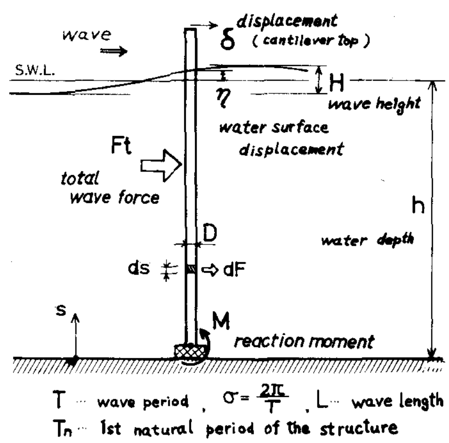

Fig.1 Definition Sketch

円柱の振動も考慮した場合は　円柱の変位をu，速度を$\dot{u} = \frac{du}{dt}$ 加速度を $\ddot{u} = \frac{d^2u}{dt^2}$ と書くと　次のようになる。

$$dF_D = C_D \cdot \rho \cdot \frac{D}{2} (v - \dot{u}) |v - \dot{u}| ds \qquad (4)$$

$$dF_I = C_I \cdot \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \dot{v}\, ds - C_{IM} \cdot \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \ddot{u}\, ds \qquad (5)$$

C_D は静止円柱の場合と同じ値を用いることができよう。C_I, C_{IM} は　ポテンシャル理論からは　$C_I = 2C_{IM} = 2.0$　となる係数である。(5) 式の第2項は　いわゆる付加質量による項である。真の質量のかわりに　付加質量　$C_{IM} \cdot \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} ds$　を加えた　見かけ質量を用いれば、質量力としては (6) 式の第1項だけ、すなわち (3) 式　を用いる形となる。ここで注意すべきは (3) 式を誤まって拡張して　$dF_I = C_I \cdot \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} (\dot{v} - \ddot{u})\, ds$　としてはならないことである。この式を用いると　例えば　$C_I = 2.0$，$C_{IM} = 1.0$　の場合，付加質量を2倍に算定することになり　構造物の固有振動数を過小に計算して　その動的特性を誤って評価する恐れがある。

3. 数値計算・実験

可撓性構造物に働く波力の算定式について考察し、また動的応答解析の妥当性ならびに必要性を検討するため、新たに数値計算のプログラムを開発した。対象としたのは　1～数本の直円柱の脚に波力を受ける平面ラーメン構造物で、入射波浪は微小振幅の単一規則波を考えた。数値計算は構造物を有限節点で分割し，マトリックス構造解析の手法により行なった。分布荷重である波力は等価節点外力に置き換え、また自由度を減少させる操作を取り入れている。微分方程式の積分には Runge-Kutta-Gill法を用いて，経時変化を step by stepに算出した。

また、可撓性構造物に作用する波力の特性を調べるとともに，数値計算を検証するために基礎的な実験を行なった。実験は，二次元造波水槽内に水底で固定した単一円柱に一方向の規則波を作用させ，その振動応答を記録解析したものである。水位変動ならびに構造物の歪、変位の測定には、それぞれ、抵抗線式波高計，ストレイン

ゲージ，16mm シネカメラを用いた。構造物模型は，構造物の振動を強調するため，剛性のかなり低いものとした。

4. 計算と実験の結果例

単一円柱モデル（円柱長：約 90cm，水深：約 80cm，第1次固有振動周期：1.25 秒）について，実験値と計算値（(4),(5)式適用）を比較すると　周期の比較的大きいところでは，かなりよい一致を示している（Fig. 2(a)など）。共振点付近では　実験値から　波高の大きいほど増幅率（静的な応答値との比）が小さく，構造物の振動による減衰効果のあることが推察される（Fig. 2(b)）。これは計算結果からも確認される。すなわち，抗力の算定に構造物の振動を考慮して(4)式を用いた場合の計算結果と，無視して(2)式を用いた場合の計算結果とを比較すると，Fig. 3 のようになる。共振時（T = 1.25 sec）には，相対速度を考慮しないと応答値が過大に評価されることがわかる。共振点付近で構造物振動により波力が減少するのは　構造物の速度 $\dot{u}$ が抗力に影響し，抗力と質量力の位相が逆転の状態に近くなり，総和としての波力が減少するものであって　$\dot{u}$ により抗力そのものが減少しているのではない。

5. 結　論

今回の研究で以下のことが明らかになった。

1) 構造物も振動する時の質量力の算定式は (5)式であって (3)式の $\dot{v}$ を相対加速度 $\dot{v}-\ddot{u}$ で置きかえた式は不適当である。

2) 一般に　付加質量は構造物部材の質量に比して小さくはなく，付加質量を考慮することは計算を複雑にするものではないから，動的な計算を行なうならば (3)式ではなく (5)式を用いるのが適当である。

3) 抗力の算定に構造物の振動を考慮しないと共振点付近での応答値は過大に算定されることがある。

4) 共振点付近の応答値は　相対速度を考慮することにより小さく計算されるが，このとき抗力係数 C_D を大きくとることは　減衰効果を過大に評価し　応答値は過小となって　かえって危険側の計算となることがあるので注意が必要である。

5) 抗力計算に (4)式を用いると数値計算は複雑になる。構造物が比較的剛な場合には　計算の簡便のため (2)式を用いても　その誤差は大きくないであろう。

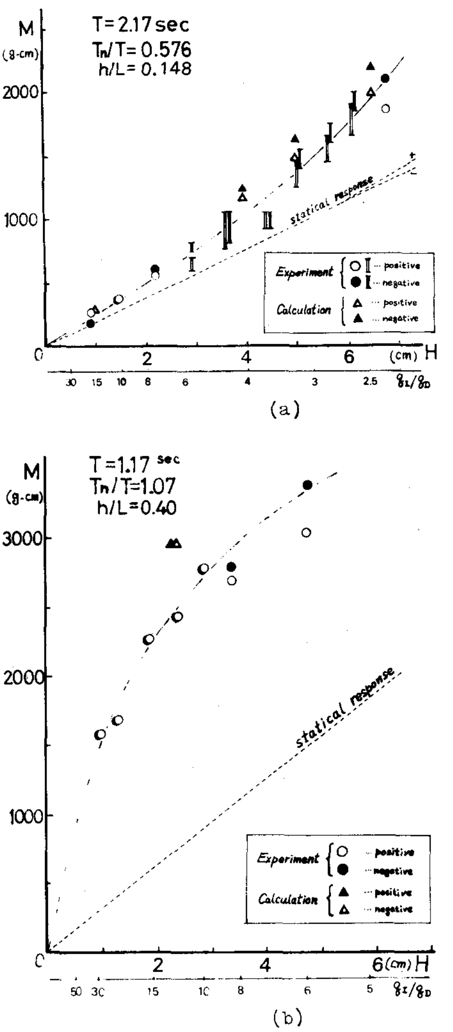

Fig.2 Amplitude
(calculation & experiment)

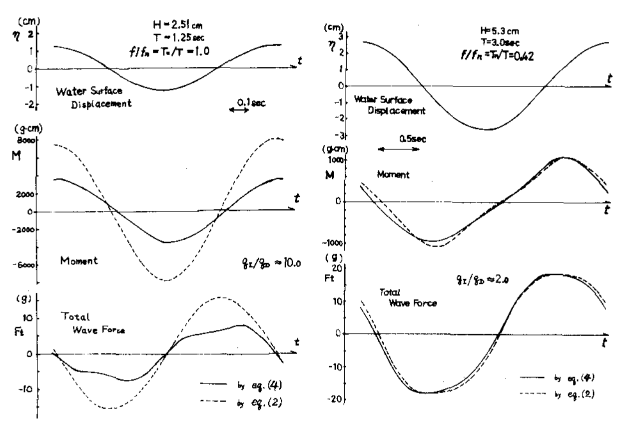

Fig.3 Calculation Results