

杭状構造物の波浪による応答解析

中 川 良 隆*・高 畑 市 三*

1. はしがき

ここ数年来、わが国でも海洋開発への関心が急速に高まり、海洋構造物も従来では考えられなかった大水深の地点に、計画および施工が成されるようになった。特に C. T. S. の要となるドルフィンおよび荷役棧橋については、水深 30 m 余の地点にも建設され、今後とも大水深の地点に建設される趨勢にある。しかるに大水深の地点にあるドルフィン等杭状構造物の波による変位は、構造物が長い固有周期を持つにいたり、設計波よりも、むしろ小さな波による動的変位が大きくなる傾向にある。それを実証するがごとく、1961 年アメリカ東部におけるレーダー基地（テキサスタワー No. 4）の倒壊は、波浪による動応答の重要性を実証している。そこで筆者らは、今までに実施されたドルフィンおよび荷役棧橋の振動測定結果と、構造物を多質点系に置換した際のモデルの動特性を比較した。また、この動特性をもとに波浪による杭状構造物の応答値を算出した。さらに、Harleman¹⁾により開発された一質点等価モデルによる動的応答との比較も行なった。波力の算定には、従来の Morison-O'Brien²⁾ 式を用いた。また、水粒子速度、加速度を以下の 3 つの方法で計算し、一質点等価モデルによる動応答値への影響を検討した。

- i) 微小振幅波理論
- ii) 有限振幅波理論
- iii) 実測値を回帰解析した結果を用いる手法

2. 杭状構造物の振動特性

ドルフィン、棧橋等に代表される杭状海洋構造物の振動測定の結果をいくつか示す。ここでは、ドルフィンの振動減衰性および、ドルフィン、棧橋の振動特性について言及する。

(1) 振動減衰性

ドルフィンに船舶等の衝撃力を作用させた際の減衰自由振動曲線（変位）を 図-1 に示す。図-2 には A, B, C ドルフィンの概略図を示す。図-1 より減衰定数を求めたのが 表-1 である。表-1 からわかるように、減衰定数はばらつきはあるが、一般に小さく 2% 近傍の値が多い。

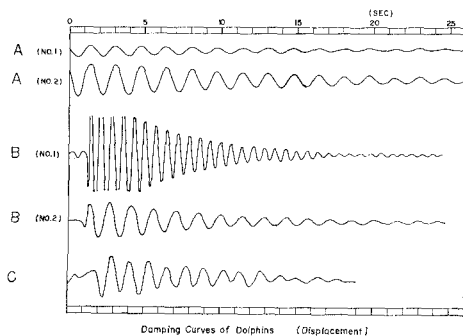
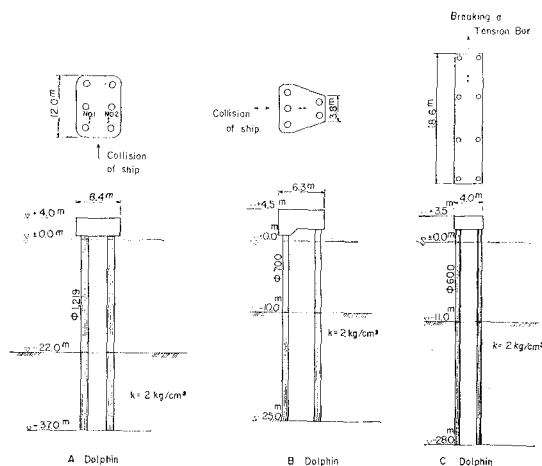


図-1



General Views of Dolphins

図-2

表-1

Damping Constant of Dolphins

Name		Damping Constant (%)
A	NO 1	2.54
	NO 2	2.25
B	NO 1	1.60
	NO 2	2.45
C		5.0

* 正会員 大成建設（株）土木設計部

(2) 振動特性

ドルフィンおよび棧橋の常時微動(変位)の同時測定結果を図-3および図-4に示す。おのおのの概略図と測点を図-5に示す。図-3は連続した記録で、測点No. 2とNo. 3の記録は前半部において逆位相(ねじれ運動)を示し、後半部では同位相(並進運動)である。

そして中間部では、同位相および逆位相の混在した波形になっている。図-4の棧橋Aの記録においても、測点No. 1とNo. 2の波形は同位相および逆位相となっている。図-3, 4からドルフィンおよび棧橋は並進運動およびねじれ運動をしていることが明らかで、かつ並進、ねじれ運動の固有周期は、ほぼ同じである。

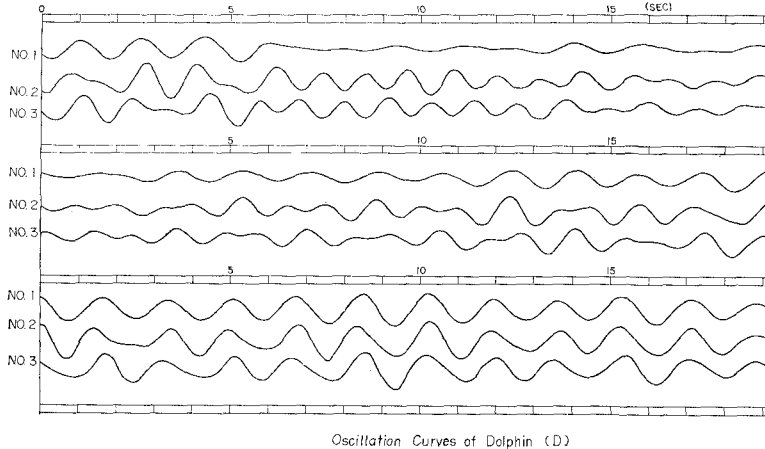


図-3

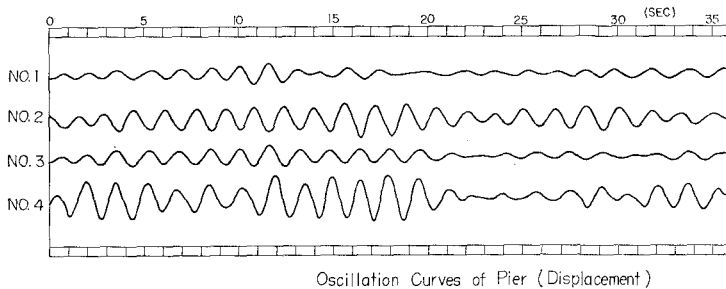
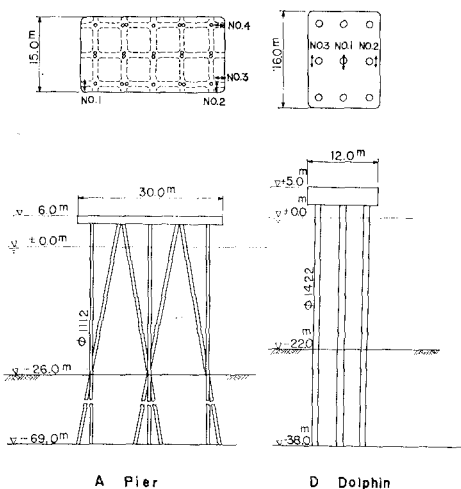


図-4



General View of Dolphin and Pier

図-5

3. 動的応答の解析

(1) 応答の解析法

a) 一質点等価振動モデル

Harleman¹⁾らによって提案された方法であり、図-6に示すような1自由度のばね質量系モデルに置き換えて応答変位を計算する方法である。この際の運動方程式は次に示すとおりである。

$$M \frac{d^2 X}{dt'^2} + C \frac{dX}{dt'} + KX = P(t') = P_m \sin \omega t' \quad \dots\dots (1)$$

M : 振動系の有効質量

C : 構造物の減衰係数

K : 構造物のばね定数

上式において、 $P(t')$ はSystem (b)のプラットフォームに作用する仮想水平力である。 $P(t')$ はプラットフォームの変位 $X(t)$ をSystem (a)の変位 $X(t)$ に等しくするように選ぶ。

なお、ここでは応答値を計算

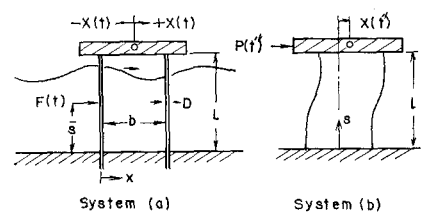


図-6

する際に、土質条件すなわち土の横抵抗ばね定数を考慮した。

b) 多質点系モデル

強制振動を受ける多質点系の振動方程式は、粘性減衰という仮定を入れると、式(2)となる。

$$[M](\ddot{\delta}) + [C](\dot{\delta}) + [K](\delta) = \{P\} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 $[M]$: 構造物の質量より構成されるマトリッ

クス

[C]: 構造物の減衰マトリックス

[K]: 構造物の剛性マトリックス

$\{\delta\}$: 格点の変位ベクトル

$\{P\}$: 外力 (波力) ベクトル

式 (2) を解くのに、いわゆるモーダルアナリシスの手法 (式 (3)) を用いて解く。式 (3) を式 (2) に代入し、モードの直交性より式 (4) が導かれる。

$$\{\delta\} = \sum_{i=1}^n z_i(t) \{\delta_0\}_i \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\ddot{z}_i + 2\omega_i h_i \dot{z}_i + \omega_i^2 z_i = \{\delta_0\}_i^T \{P\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 ω_i : i 次の固有振動数

h_i : i 次の減衰定数

$\{\delta_0\}_i$: i 次の固有モード

式 (2), (3), (4) にある $[M]$ $[C][K]$, ω , h 等は構造系により決まるもので、ここで問題となるのは波力 $\{P\}$ の取り扱いである。

波力 $\{P\}$ は Morison-O'Brien の式より算出し、杭に作用する分布力を杭の格点に集中荷重として作用させ応答計算を行なう (図-7)。

(2) 波力算定法の動応答計算におよぼす影響

一質点等価系モデルの応答計算を行なう際に、波力は以下のような Morison 式により算定する。

$$dF = C_D \cdot \rho D \cdot \frac{u|u|}{2} dz + C_M \cdot \rho \cdot \frac{\pi D^2}{4} \frac{du}{dt} dz \quad (5)$$

dF : 杭の微小部分 dz に作用する波力

C_D : 抗力係数

C_M : 質量係数

u : 水粒子速度

$\frac{du}{dt}$: 水粒子加速度

D : 杭径

ρ : 流体密度

しかるに、上式中の水粒子速度および加速度をいかに表現するかによって波力が異なり、応答計算にも影響を

およぼすことになる。また、抗力係数 C_D は、レイノルズ数と物体形状に関係するので、 C_D も水粒子速度の表現法によって異なってくると考えられる。したがってここでは、実際の杭状構造物を対象として微小振幅波理論、有限振幅波理論および実測値を回帰解析した結果を用いた手法の3つの方法により、波浪に対する応答計算を行なった。

そしてその計算結果をもとに、波力算定法の動応答におよぼす影響を検討する。

a) 従来の波動理論を用いる方法

従来の波動理論を用いて水粒子速度、加速度を計算する方法であり、計算は以下の2つの理論を用いて行なった。

i) 微小振幅波理論

ii) 有限振幅波理論 (Stokes の 3rd order 理論)

最近、岩垣³⁾らは水平水粒子速度について従来の波の理論と実験値との比較を行なった (図-8, 図-9 に示す)。これによれば 図-8 のように水深が大きく波の周期が短い場合、微小振幅波でも有限振幅波でも、実験値に良く合い、その差が小さい。しかし、図-9 のように水深が減少し、周期が長くなった場合には有限振幅波に合うことが確かめられている。したがって、微小振幅波理論と有限振幅波理論の相違が応答計算におよぼす影響を調べるために、モデル波として 図-9 の条件である $T\sqrt{g/h}=8.61$, $H/h=0.307$ と同じ波を設定した。

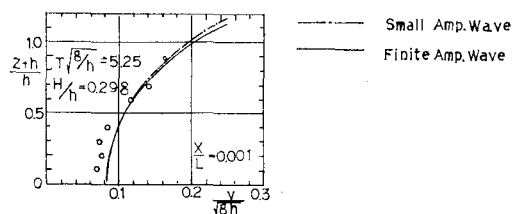


図-8

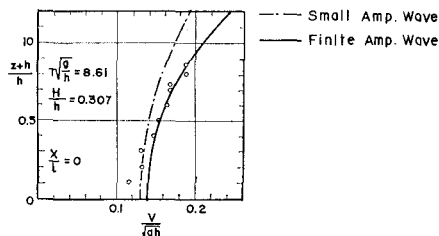


図-9

b) 回帰解析した結果を用いる手法

これは、Schueller⁴⁾ が、第3回 Offshore Technology Conference で発表した新しい手法である。すなわち、既往の実験データ、現地の観測記録を回帰解析して、レイノルズ数、周期、波高、波長などのべき関数表示で水粒子速度、加速度などを表示しようとする試みである。水粒子速度の解析には、Morison⁵⁾ および Elliot⁶⁾ の実験デー

タが用いられ、水粒子加速度の解析には、Elliot のデータが用いられた。また、抗力係数の解析には Field の実測データが用いられている。以上のような手法で回帰解析された結果は水粒子速度、加速度および抗力係数について次式で表示できる。

$$u^* = e^{-0.726(L^*)^{0.906}(d^*)^{-1.072}(S^*)^{0.528}}$$

$$a^* = e^{-0.546(L^*)^{1.571}(S^*)^{0.289}(d^*)^{-1.317}}$$

$$C_d = e^{0.484(R_e)^{-0.694}(H^*)^{-0.694}(T^*)^{0.115}}$$

ただし、

$$H^* = H/D, \quad T^* = uT/D, \quad u^* = uT/H$$

$$L^* = L/H, \quad d^* = d/H$$

$$S^* = S/H, \quad a^* = aT^2/H$$

u : 水粒子速度

a : 水粒子加速度

L : 波長

C_D : 抗力係数

D : 杭径

d : 水深

H : 波高

T : 周期

S : 海底を原点とし上方に測った距離

上記の結果を、Morison 式に代入して波力を求め、動的応答計算を行なった。

c) 計算結果と考察

図-10 は、前述の3つの方法によって求めたドルフィンの変位応答曲線である。図の縦軸は、ドルフィンの応答変位 δ cm、横軸は波の位相 θ° を示す。計算に用いたモデル波は、波高 $H=6.0$ m、周期 $T=12.0$ sec、波形勾配 $H/L=0.04$ である。ドルフィンの形状は、図中に示すとおり、水深 $h=20$ m、杭間隔 4.25 m、6 本構成で杭径は 1.2 m である。なお、減衰定数は過去の実測値から 2% とする。図において、有限振幅波は、微小振幅波よりも応答変位が $\theta=0^\circ$ 、 360° 付近(波の峯)で大きいことがわかる。この原因として考えられることは、次の2つの点である。

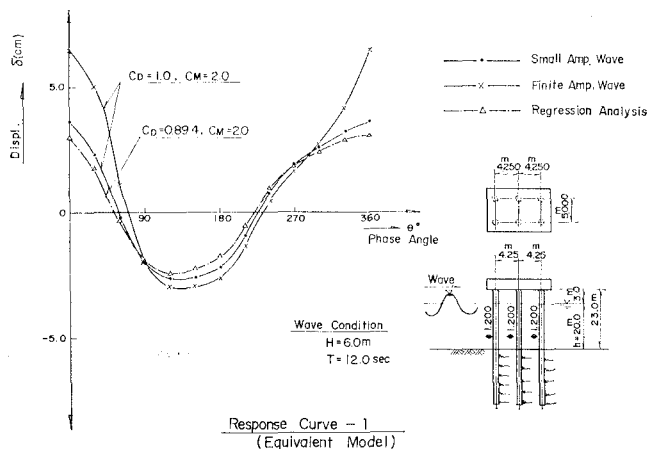


図-10

i) 水深に比して大きな波高をもつ長周期の波の場合は、有限振幅波の水粒子速度(波の峯)は、微小振幅波よりも大きい。

ii) この場合は、質量力より抗力が支配的である。

したがって、水深に比して大きな波高をもつ長周期性の波を考える場合は、応答計算に有限振幅波理論を用いることが、設計上からも望ましい。次に回帰解析法を他の2つの手法と比較した場合、微小振幅波理論より少し小さな応答値が算出されている。本計算例では、回帰解析による抗力係数は 0.894 であり、通常用いられている 1.0 よりも小さな値である。したがって、全体的に波力が小さく算定されるので、応答値も小さくなる。

抗力係数は、レイノルズ数と形状に関する因子であるが、通常設計には、レイノルズ数に関係なく $C_D=1.0$ を採用しているのが現状である。これは、既往の非定常流の C_D の値が、レイノルズ数によってかなりばらつくので、設計者にとって C_D の明確な選定基準がないためである。

したがって、ここで述べられたような回帰解析手法を用いて広範囲のデータ解析から、 C_D および水粒子速度、

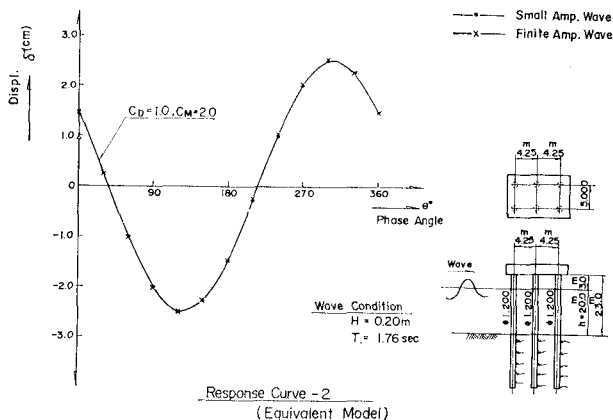


図-11

加速度などが一般化されるとすれば、非常に取り扱いが簡明となり、1つの設計基準になるものと思われる。

図-11 は図-10 と同じドルフィンに、同じ波形勾配をもつ有限振幅波と微小振幅波を作用させて応答値を計算したものである。波の条件は、波高 $H=0.2$ m、周期 $T=1.76$ sec とした。ここでは、波の周期をドルフィンの固有周期と一致するように決めた。図からわかるように、両理論波による応答変位の差はほとんどない。これは水深に比して波高が小さいので、水粒子速度の差がほとんど生じないためである。

一般に外洋に設置されるドルフィン(水深 $h=20\sim30$ m)の固有周期は 2.0 sec 前後である

ので、共振する波は、小さな波である。よって、共振条件のもとでの応答値は、微小振幅波と、有限振幅波でほとんど差がないといえる。

(3) 一質点等価振動モデルと多質点振動モデルの比較

図—12に示すようなドルフィンを対象として、共振条件で一質点等価振動モデルと多質点振動モデルの応答計算を行なった。波は波高 $H=0.55\text{ m}$ 、周期 $T=2.27\text{ sec}$ である。図の縦軸は応答変位 $\delta\text{ (cm)}$ を示し、横軸は波の位相角 θ° を示す。図から多質点系の応答値は、一質点系のそれと比較して最大変位で 20~30% 小さな値を示していることがわかる。この原因として考えられることは、次のようなことである。図—6に示すように、一質点等価系の計算では、作用する波力の合力とその作用点から、等価集中荷重 $P(t')$ を求めて変位を算定している。一方多質点系の場合は、図—7に示すように、分布波力から直接変位を計算している。このように波力から

応答を求める際の手法の違いによって差が生じているものと考えられる。一般的に、直杭式ドルフィンには、単純な形状をもつので、このような構造物の応答計算には一質点等価系の計算でもかなりの精度が得られるものと思われるが、この点については、実測値等の比較を行なって十分検討する必要がある。

(4) ねじれ振動特性について

前述したように常時微動の測定結果から、ドルフィンおよび棧橋で、ほぼ同じ固有周期をもつ並進およびねじれ振動が得られた。ここではドルフィンのねじれ振動に

表—2

Frequency of Model

Order	1	2	3
Frequency _{Hz}	0.43998	0.43998	3.9175
	1st Mode of Translation toward X AXIS	1st Mode of Translation toward Y AXIS	Twist Mode

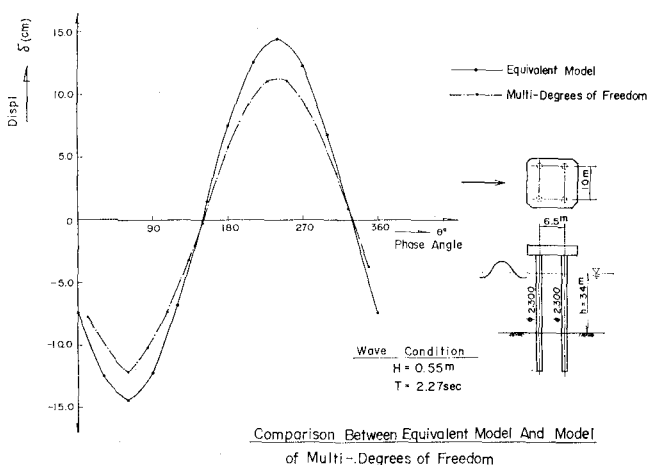
について述べる。図—13の4本杭ドルフィンを対象として振動計算すると、その固有振動数は表—2に示すとおりである。表からわかるように、ねじれ振動のモードは高次の固有振動数を持っている。同じドルフィンに、波をプラットホームの中心線に対して 45° の角度から入射させた際の応答値を図—13に示す。この際に、プラットホーム上の4点(1, 2, 3, 4)の変位は、短辺および長辺方向とも順位相を示している。以上のことからドルフィンのねじれ振動について次のことがわかった。

- 一次並進運動の固有周期に近い周期をもつねじれ振動モードはない。
- 波の作用方向および波高・周期が時間的に一定の波によっては、ねじれ振動は起きない。

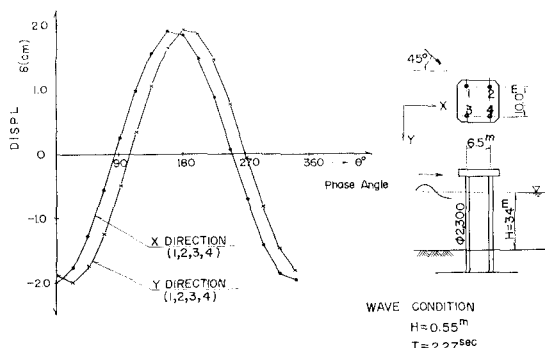
4. ま と め

振動測定および振動計算の結果、次のようなことがわかった。

- (1) 一般に減衰定数は小さく、ドルフィンにおいてほぼ 2% 内外である。
- (2) ドルフィン、棧橋等の杭状海洋構造物は、ほぼ同じ固有周期を持って、並進およびねじれ振動することが測定結果よりわかった。
- (3) 水深に比して大きな波高をもつ長周期性の波の応答計算を行なう場合、有限振幅波理論を用いて水粒子速度を計算する必要がある。
- (4) 一質点等価系モデルの応答計算は、多質点系によるそれと比較して大きな値が得られる。



図—12



図—13

杭状構造物の波浪による動応答について検討してきたが、今後とも、実測データとの比較を行ない、より合理的な解析法の確立をめざすつもりである。おわりに当たり、実測資料の提供を頂いた大成建設技術研究所計測研究室諸氏に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Harleman, D. R. F., W. C. Nolan and V. C. Honsinger: Dynamic Analysis of Offshore Structures, Proc. of 8th Conference on Coastal Engineering, Chapt. 28, 1962, pp. 482~499
 - 2) Morison, J. R., J. W. Johnson, M. P. O'Brien and S. A. Sch: The Force Exerted by Surface Waves on Piles, Tech. Pub. No. 284, Petroleum Trans. AIME, Vol. 189, 1950, pp. 149~154
 - 3) 岩垣雄一・酒井哲郎: 有限振幅波の水粒子速度に関する実験, 第16回海岸工学講演会講演集, 昭44.12, pp. 15~22
 - 4) Schueller, G. I.: Reliability of Circular Piles Subjected to Ocean Waves, OTC 1508, 1971, pp. II 919~928
 - 5) Morison, J. R. and R. C. Crooke: The Mechanics of Deep Water, Shallow Water, and Breaking Waves, Beach Erosion Board, Tech. Memo. No. 40, March 1953
 - 6) Elliot, J. H.: Interim Report, Calif. Inst. Tech., Hydro. Lab., Contract Noy-12561, July-1953
-