

大阪大学工学部 正員 小松 足夫
広島工業大学 正員 〇 中山 隆弘

1. まえがき 一端を固定支持された円柱の波浪応答問題は、ドルフィン等のさらに構造的に複雑な海洋構造物の応答特性を解明するための基本的テーマである。いま、波と円柱との振動数比、波高を直径で無次元化した無次元波高および浅水化によって、円柱の挙動がほぼ決定されるということが工学的に実証されるなら、設計上の便宜性は大きく向上するものと思われる。本研究は、上述のいわば仮説を実証するために、とりあえず、振動数比と無次元波高の2つのパラメーターの応答特性への影響度を考察したものである。また、波と円柱との相互作用を無視した解析と、抗力項を省略した解析も同時に行ない、解析過程におけるこの種の簡略化の妥当性についても検討した。

2. 逐次積分法による応答解析 本研究では波の進行方向の振動のみを考慮している。さて、円柱に作用する波力がMorison式で表わされると仮定して波と円柱との相互作用を考えれば、系の運動方程式が非線型方程式になることは周知の通りである。そのため本解析ではR.W. Clough¹⁾の提案する逐次積分法を使用した。基礎式は式(1)の通りである。

$$[M^*]\{\Delta \ddot{u}\} + [C]\{\Delta \dot{u}\} + [K]\{\Delta u\} = [C_0]\{\Delta(\dot{v}-\dot{u})|\dot{v}-\dot{u}|\} + [C_M]\{\Delta \ddot{v}\} \quad (1)$$

断面の都合上、各マトリックスの内容の詳細は省略させて頂き、記号の説明だけにしておく。

$[M^*]$: 円柱の質量マトリックスと付加質量マトリックスの和、 $[C]$: 減衰マトリックスで、Rayleighの研究によれば比例定数 a, b と、質量マトリックス $[M]$ および剛性マトリックス $[K]$ により、 $a[M] + b[K]$ で表わされる。 $[C_0], [C_M]$: それぞれ、分布波力を等価節点波力におきかえたときの抗力係数、質量係数に関するマトリックス、 $\{\Delta u\}, \{\Delta \dot{u}\}, \{\Delta \ddot{u}\}$: それぞれ、各節点の変位、速度、加速度の Δt 時間の増分を表わす列ベクトル、 $\{\Delta \ddot{v}\}$: 水粒子加速度の Δt 時間の増分を表わす列ベクトル。

次に、解析上の主な仮定について列挙する。(1) $\dot{v}, \ddot{v}$ はAiryの微小振幅浅水波理論式により算出する。(2) 規則波および不規則波を問わず、波は砕けないものとする。(3) 水深方向に対する $\dot{v}$ と $\ddot{v}$ の変化率は、円柱の各要素内では一定とする。(4) $(\dot{v}-\dot{u})$ の3次導関数は、 Δt 時間内では一定とする。(5) $\Delta(\dot{v}-\dot{u})|\dot{v}-\dot{u}|$ のTaylor展開級数において、 $(\dot{v}-\dot{u})$ の3次以上の導関数を含む項は省略できるものとする。(6) Δt は系の最高次の固有周期の1/6を基準とする。²⁾(7) $\phi = 0$ において $u = \dot{u} = 0$ 、また波の初期位相は π とする。(8) 1次モードに対する減衰定数は0.05とする。(9) 計算時間の都合と円柱が等断面であることから、要素数は2要素とする。(10) 抗力係数 C_0 、質量係数 C_M はそれぞれ1.2, 2.0とする。(11) 水面変動が円柱の挙動に与える影響はないものとする。

3. モデルと波の特性 異なる直径 D を有する3種類の円柱を基本にして頂部の集中マスを変化させ、それぞれについて3ケースの固有振動特性を与えた。表1にこれらの値を示す。表中の1次固有振動数 f_s は、空気中における非減衰時の値である。なお、円柱の高さ、板厚はすべてのモデルについて同一で、それぞれ20 m, 20 mmである。次に入力波となる規則波および不規則波の特性を、それぞれ表2, 表3に示す。不規則波の特性は、光島³⁾の提案する波浪スペクトルを用いて発生させた100秒間のシミュレーション結果より計算したもので、 V_0 は水面上の高さ10 mにおける風速である。なお円柱を設置する地点における水深 h は、すべて10 mに統一した。

表1 モデルの特性

No.	直径 D (m)	1次固有振動数 f_s (Hz)
1-1	0.5	0.203
1-2	0.5	0.489
1-3	0.5	1.019
2-1	1.0	0.203
2-2	1.0	0.502
2-3	1.0	0.972
3-1	1.5	0.203
3-2	1.5	0.495
3-3	1.5	0.965

4. 規則波に対する計算結果および考察

4.1 波高と頂部変位との関係 図1に Model 1-2 ($D=0.5m$, $f_s=0.489Hz$)

に対する計算結果を示す。変位は波高と共に増大し、波高が大きくなると両者の間に線型関係がなくなることがよく分かる。これが抗力の影響であることは言うまでもない。図中 $T_w=6.0sec$ の結果を特に実線で示したのは、

$f_w/f_s = \frac{1}{3}$ なるときの共振現象を説明するためである。すなわ

ち、基礎式における抗力項をフーリエ級数に展開してみると、第2

項が基本周波数 $f_w (=1/T_w)$ の3倍の周波数成分を持ち、しかも

その係数が第1項の係数の20%強を示すことが分かる。すなわ

ち、この第2項目の成分に対し、円柱は共振現象を呈しているのである。

4.2 無次元波高と頂部変位との関係 図2に示す結果によれば、減衰定

数と設置水深が与えられれば、頂部の変位は直径によらず振動数比 f_w/f_s

をパラメーターとして、無次元波高 H/D によって決定されると思われる。

4.3 振動数比と振動倍率との関係 動的変位量と静的変位量との比を振

動倍率と定義し、 u_d と振動数比との関係を示したものが図3である。

$f_w/f_s = 0.33$ 付近で急激に増加しているが、この結果が4.1で述べ

た共振現象を端的に表わしていると言えよう。この現象が直径のいかに

かわかわらず、ある程度まで(この意味については、図4の無次元波高と

振動倍率との関係を参照されたい。)無次元波高の大きさと共に顕著になる

ことも図より明らかである。

4.4 波と円柱との相互作用の影響 現在は、 f_w/f_s , H/D をそれぞれ、

0.4, 0.294 としたときの考察しかできない。表4の結果から推察すれば、

H/D が多少大きくなっても、波と円柱との相互作用は無視しても良さ

そうである。これは浅水領域における波浪応答問題を考えているためと

考えられ、深水領域の場合には別途に検討しなければならぬであろう。

4.5 抗力項の影響 これについてもあくまで f_w/f_s , H/D が上述の条件

を保っている場合の考察として話を進めれば、波高が円柱の直径より大

きい値を示す場合には、基礎式における抗力項を省略することは危険な

ものと考えられる。例えば

波高が直径の3.6倍になれば、精密解より34%弱小

さい応答量しか評価し得ないものである。

5. 不規則波に対する計算結果および考察 以下の結果はすべて評価時

間を100秒としたものであり、定常振動時の結果である。また文中の応

答スペクトルとは頂部の変位スペクトルを意味する。

5.1 不規則波の特性による応答スペクトルの差異 図5は円柱の固有振

動数と波の卓越周波数 f_{wo} が比較的接近した場合の結果である。波のエ

ネルギーが小さいときには、応答スペクトルは固有振動数付近にのみピー

クを示している⁴⁾。しかし波のエネルギーが増大すると、波の卓越周波

表2 規則波の特性

周期 T_w (sec)	3.0~10.0
波高 H (m)	0.45~3.15
浅水比 h/L	0.108~0.713

表3 不規則波の特性

No.	吹送距離 F (km)	流速 V_0 (m/s)	卓越周期 T_{wo} (sec)	有義波高 H_g (m)
RW50-10	50	10	5.71	0.91
RW50-20	50	20	6.67	1.85
RW100-10	100	10	6.67	1.37
RW100-20	100	20	8.00	2.25

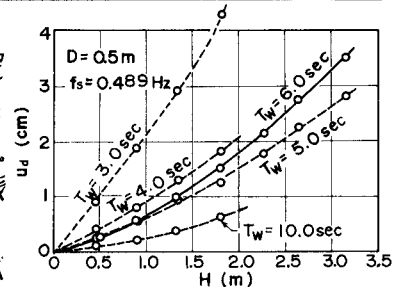


図1 波高と頂部変位との関係

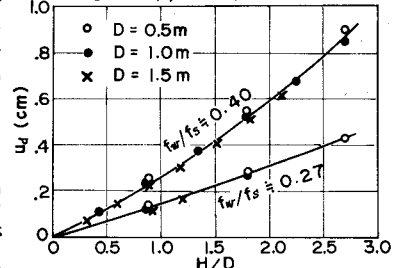


図2 無次元波高と頂部変位との関係

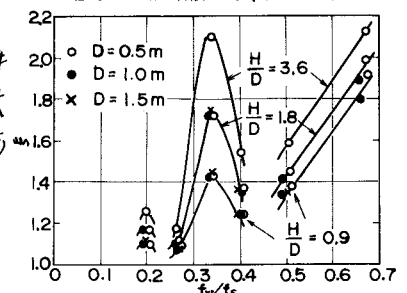


図3 振動数比と振動倍率との関係

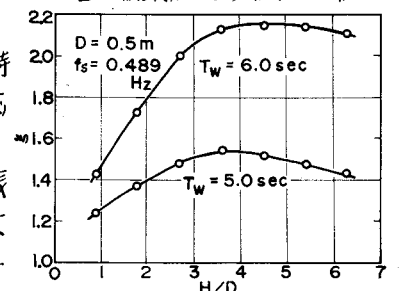


図4 無次元波高と振動倍率との関係

表4 波と円柱との相互作用および抗力項の影響

H/D	u _d (cm)		誤差 (%)	u _d (cm)		誤差 (%)
	精密解	相互作用無視		抗力項無視		
1.2	0.32	0.32	0.0	0.29	8.8	
1.8	0.52	0.52	0.0	0.45	16.1	
3.6	1.30	1.30	0.0	0.97	33.6	

数付近にもう一つのピークが生じ、両結果より周波数特性が波のエネルギーの増加と共に推移してゆくことが分かる。

5.2 円柱の動特性による応答スペクトルの差異

図6により、同一の不規則波を受ける場合でも、固有振動特性により円柱の応答スペクトルの周波数および振幅特性が非常に大きく変化することは明らかである。不規則波の条件および円柱の剛性が等しいにもかかわらず、固有振動数の小さいModel-2の変位量が著しく大きくなり、動的解析の重要性を示唆している典型的な一例と言えよう。

5.3 直径の大きさによる応答スペクトルの差異

図7から判断すれば、直径の大きさは応答スペクトルの周波数特性にほとんど影響しないと推察される。変位量に差異があるのは、剛性の違いによるもので、当然の結果である。

5.4 頂部変位のr.m.s.値 結果を無次元1/3有義波高 $H\frac{1}{3}/D$ に対してプロットし、振動数化 f_{w0}/f_s の値を考慮すれば、直径を異にする3つのデータが、ほぼ同一線上に乗ることが判明した。(図9) この結果より、不規則波を受ける円柱の応答量を算定するに際しては、 f_{w0}/f_s 、 $H\frac{1}{3}/D$ をパラメータとして選ぶことが非常に有効であると思われる。

5.5 波と円柱との相互作用の影響 図8の応答スペクトルを見て、長さより判断すると、規則波の場合と同様、浅水領域においては、相互作用が応答に及ぼす影響はほとんどないようである。

5.6 抗力項の影響 図8により、抗力項を無視して計算した応答スペクトルは、特に低周波領域で精密解よりかなり小さい値を示すことが分かる。これは、低周波領域では水粒子速度が小さくなり、抗力項が応答を増大させる効果をもっていることに帰因するものであると考えられる。変位のr.m.s.値 S_u により精密解との比較を行なったものを表5に示している。これによれば、 $f_{w0}/f_s = 0.26 \sim 0.3$ (撓性の大きい海洋構造物の波浪応答問題として、かなり普遍的な条件である。)で、 $H\frac{1}{3}/D$ がおよそ2以上の値をとる場合には、抗力項の省略は無理のようである。

6. あとがき

本研究は、当時大阪大学に在学中の瀧尾順一君(現在日本鋼管)の努力によるところ非常に大であり、ここに深謝の意を表す。さらに大阪大学工学部榎木亨教授および同研究室の諸兄には多くの有益な助言を賜った。心から感謝致す次第である。なお計算は阪大計算センターのNEAC 2200/900によった。

6. あとがき 本研究は、当時大阪大学に在学中の瀧尾順一君(現在日本鋼管)の努力によるところ非常に大であり、ここに深謝の意を表す。さらに大阪大学工学部榎木亨教授および同研究室の諸兄には多くの有益な助言を賜った。心から感謝致す次第である。なお計算は阪大計算センターのNEAC 2200/900によった。

<参考文献> 1) R.W.Clough: Analysis of Structural Vibrations and Dynamic Response, Japan-U.S.Seminar on Matrix Method of Structural Analysis and Design, 1969 2) N.M.Newmark: A Method of Computation for Structural Dynamics, Proc. of ASCE, Vol. 85, No. EH3, July, 1959 3) 光島 恒: 風波のスペクトルの考慮(2), オペ回海岸工学講演会論文集, 1970 4) 小松 定夫, 坪山 隆弘: 不規則波力を受ける海中塔式構造物の応答に関する確率論的研究, 土木学会関西支部年次講演会概要集, 1974-5

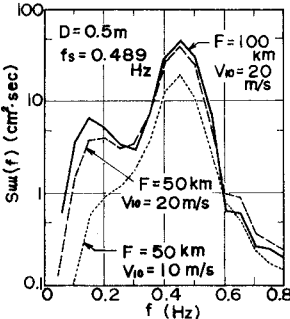


図5 応答スペクトル

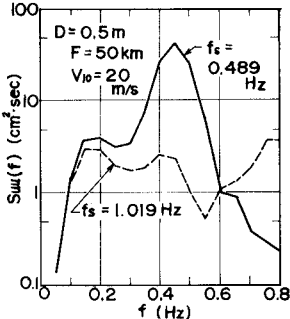


図6 応答スペクトル

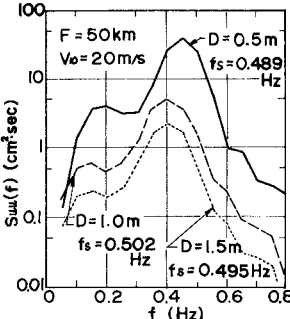


図7 応答スペクトル

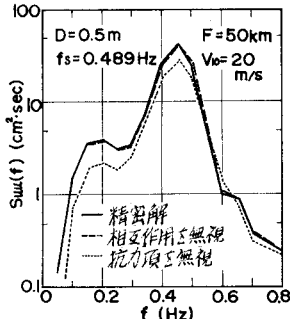


図8 応答スペクトル

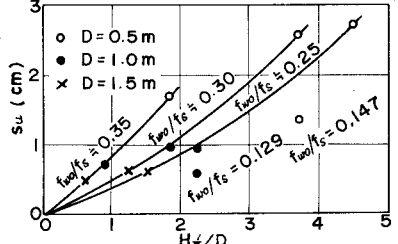


図9 無次元1/3有義波高と変位のr.m.s.値との関係

表5 波と円柱との相互作用および抗力項の影響

No.	$H\frac{1}{3}/D$	S_u (cm)		誤差 (%)	S_u (cm)		誤差 (%)
		精密解	相互作用無視		抗力項無視		
RW50-20	1.23	0.64	0.64	0.0	—	—	—
RW50-20	1.85	0.97	0.96	1.0	0.90	7.8	
RW50-20	3.70	2.56	2.55	0.4	2.12	20.8	
RW100-20	4.50	2.73	—	—	1.95	40.0	

注) $f_{w0}/f_s \approx 0.3$ (RW50-20), $f_{w0}/f_s \approx 0.26$ (RW100-20)

<参考文献> 1) R.W.Clough: Analysis of Structural Vibrations and Dynamic Response, Japan-U.S.Seminar on Matrix Method of Structural Analysis and Design, 1969 2) N.M.Newmark: A Method of Computation for Structural Dynamics, Proc. of ASCE, Vol. 85, No. EH3, July, 1959 3) 光島 恒: 風波のスペクトルの考慮(2), オペ回海岸工学講演会論文集, 1970 4) 小松 定夫, 坪山 隆弘: 不規則波力を受ける海中塔式構造物の応答に関する確率論的研究, 土木学会関西支部年次講演会概要集, 1974-5