

大型浮遊構造物による波の反射および透過に関する模型実験

高山 知司*・菊地 治**・西田 一彦**

1. ま え が き

大型浮遊構造物を建設し、発電プラントや海上空港などに利用しようとする計画がある。このような構造物を計画する際に建設地点をどこに設定するかが大きな問題となる。わが国のように巨大な波と強い風を伴う台風が毎年数十回襲ってくるような国においては、外洋あるいは外洋に面する海域に巨大浮遊構造物を建設することは、係留装置の問題と維持管理の面から非常に難しい。特に、巨大海洋構造物の建設の経験が乏しい現状では外洋に建設することは非常に危険になる。そのため、まず、自然条件、特に波浪条件の厳しくない湾内に候補地点を捜すことになるであろう。

湾内に巨大な構造物を建設すると、湾内の沿岸海域には構造物によって変形された、従来とは異なった波が来襲することになり、この来襲波の変化は、沿岸各港の港内静穏度および漂砂特性に変化を及ぼす。さらには、構造物に近接する海域を航行する漁船等の小型船舶にとっては、構造物による反射波で航行が危険になるという問題も生じる可能性がある。

このような巨大浮遊構造物周辺の波の変形については、ある程度数値計算によって推定することができるが、本論文で対象としているような多数の円筒形の支持浮体で浮遊している構造物にとっては、浮体下面を波が通過する際にエネルギー損失を起し、波の透過率はポテンシャル流を仮定して推定した値とは異なる恐れがある。

本研究は、多数の円筒支持浮体が格子状に配列されて浮遊している構造物によって起る波の反射および透過について、その特性を実験的に調べたものである。

2. 実験装置と実験条件

(1) 実験装置

巨大浮遊構造物の断面実験を行うことにして、実験水路として運輸省港湾技術研究所の 40 m 不規則波造波水路を用いた。本水路は、長さ 40 m、深さ 1.5 m の二次

元水路で、幅は造波板付近で 2.0 m、7 m 区間で漸次縮小されて、以後 1.5 m の一様幅となっている。

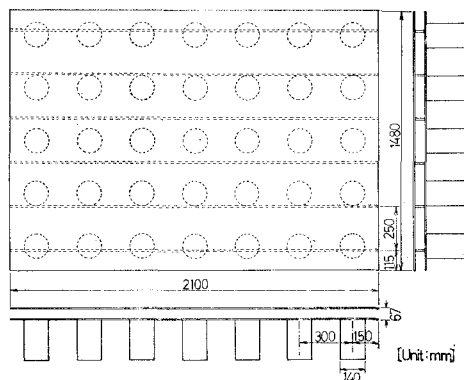
波高計として、容量式波高計を 3 台用い、2 台は模型前面から 3 m 程度離れた地点にお互いに 25 cm 離して設置し、入射波および反射波を計算するのに使用した。もう 1 台の波高計は模型後端から 3 m 離して設置し、透過波を測定するのに用いた。

模型前端には両端にヒンジのついた真ちゅう棒を取り付け、真ちゅう棒の他端には全体波力を測定するために六分力計を取り付けた。この真ちゅう棒は水平になるようにセットした。

模型円筒支持浮体に働く力も測定できるように中心を通る鋼棒に歪ゲージをはりつけた。また、模型の変位を測定するために、模型前端、中央、後端に変位計を取り付けた。

(2) 模 型

模型縮尺として $s_r=1/50$ を想定した。模型は図一に示すように長さ 210 cm、幅 148 cm のユニット浮体に分かれていて、このユニット浮体を連結することによって浮体の長さを変化させた。下部の円筒支持浮体は直径 14 cm、長さ 23 cm のアクリル製円筒で、中心間隔 30 cm で格子状に配列されている。現地の上部工の単位幅当りの曲げ剛性が $(EI)_p=2.1 \times 10^7 \text{ t} \cdot \text{m}^2/\text{m}$ になっていると想定して、以下のように模型上部工の曲げ剛性を決定した。



図一 ユニット模型の諸元

* 正会員 工務 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室長
 ** 学生会員 運輸省港湾技術研究所海洋水理部波浪研究室

浮体に働く波力を F とすると、波力の縮尺 s_F は $s_F = s_l^3$ で与えられるから、曲げモーメント M の縮尺は $s_M = s_l^4$ となる。浮体の変位と曲げモーメントの関係から、曲げ剛性の縮尺を s_{EI} とすると

$$s_l = \frac{s_M}{s_{EI}} s_l^2 \dots\dots\dots (1)$$

となって

$$s_{EI} = s_l^5 \dots\dots\dots (2)$$

と求まる。この結果、模型の水路幅当りの曲げ剛性 $(EI)_m$ は $(EI)_m = 4.97 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ となる。この値になるように上部工の高さおよびアクリル板の厚さを決定した。

模型の重量は、模型の吃水が 13 cm になるように重量を調整している。

(3) 実験条件

構造物設置点が湾内にあることを想定して、実験に用いる不規則入射波の諸元を表一のように決めた。ただし、表一 の値は目標値であって、実際に起した波の諸元とは少し異なる。周期は沖波の波形こう配が 0.035 程度になるようにとった。ただし、湾口を通過するうねり性の波が入ることも考えて、表一 の 4 の波の波形こう配は 0.004 と小さくしている。実験に用いる不規則波のスペクトル形は表一 の波の諸元から決定される Bretschneider 型のものを採用した。実験では水深は 40 cm と一定にした。

表一 入射波の諸元

波の種類	1	2	3	4
有義波高 [cm]	9.8	7.0	5	2
有義波周期 [sec]	1.37	1.14	0.97	1.86

模型長の違いによる反射波および透過波の変化特性を調べるために、2.1 m の模型ユニットを 1, 2, 3, 5, 7 基と連結していった。連結の際、連結部での曲げ剛性が他の部分のものと一致するように工夫した。

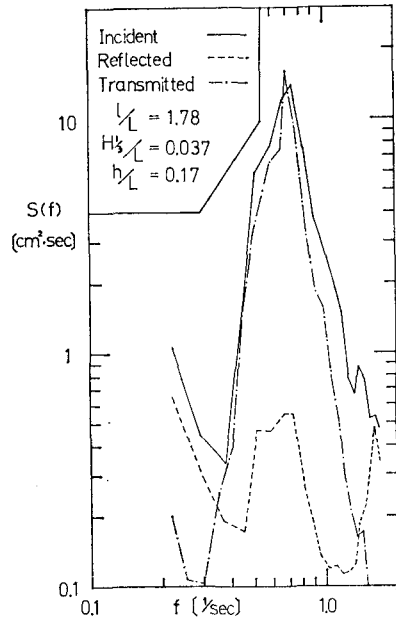
実験では、同じ有義波の波群に対して 2 回行ったが、それぞれの波連は異なったものを用いた。

3. 反射波と透過波の特性

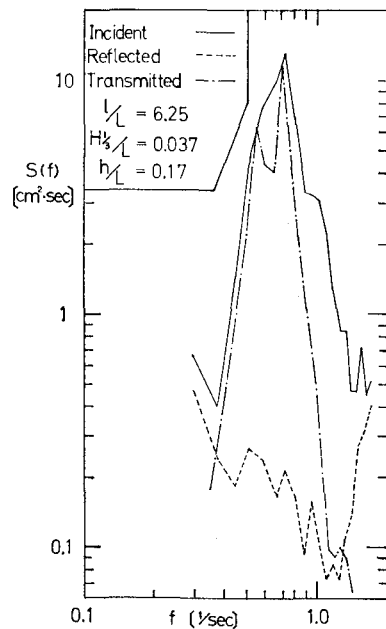
(1) 反射波および透過波のスペクトル特性

図二および図三は $H_{1/3} = 9 \text{ cm}$ 、 $T_{1/3} = 1.4 \text{ sec}$ の波に関する入射波および反射波、透過波のスペクトル形を示したものである。図中の入射波および反射波のスペクトル形は模型前面で 2 台の波高計を用いて測った波形記録から入・反射波を分離計算¹⁾して求めたものである。

図二と図三はそれぞれユニット浮体を 2 基と 7 基連結した時のスペクトル形である。入・反射波は分離計算で求められているので、 $f < 0.3 \text{ Hz}$ では推定精度が悪くなっている。



図二 2 基連結時の入射波および反射波、透過波のスペクトル



図三 7 基連結時の入射波および反射波、透過波のスペクトル

図二の場合、透過波は $f < 0.8 \text{ Hz}$ では入射波とほぼ同じスペクトル形を示しているが、 $f > 0.8 \text{ Hz}$ では急激に入射波より小さくなっている。このことは、周期の長い波が浮体下面を通過し易いことを示している。このため、透過波は周期の長い波を多く含むことになり、透過波の周期は長くなる。実験でも透過波の有義波周期は入射波のものより 1 割程度増大している。これとは逆に、反射波は $f < 1.5 \text{ Hz}$ で入射波のエネルギーより非常に小

さくなっているが、 $f > 1.5 \text{ Hz}$ では入射波のエネルギーに近づき、高周波側では大部分の波のエネルギーが反射されることを示している。

7基連結した図-3の場合、透過波は図-2の場合と同じ傾向を示すが、ピーク周波数付近の $f = 5.5 \text{ Hz}$ と 7.0 Hz で2つのピークが現われている。この原因ははっきりしないが、浮体の運動に関係するのかもしれない。反射波は、図-2の場合と異なり、 $f < 1.2 \text{ Hz}$ ではのこぎり状のスペクトル形を示し、こののこぎり状の変動を無視すれば、 f^{-1} でスペクトルは小さくなっている。しかし、 $f > 1.2 \text{ Hz}$ では反射波のエネルギーは増大し、入射波のスペクトルに近づく。

(2) 反 射 率

反射率 K_R を入射波の有義波高に対する反射波の有義波高の比で定義し、プロットすると図-4 のようになる。図中において l/L は模型長と有義波周期に対応する波長との比である。 K_R は模型長が増大すると、 $H_{1/3}/L = 0.037$ の波では $K_R = 0.32$ から $K_R = 0.26$ に、 $H_{1/3}/L = 0.042$ の波では $K_R = 0.035$ から $K_R = 0.3$ に少し減少する。この減少も $l/L = 4.0$ までで、 $l/L > 4.0$ ではほぼ一定となる。 $H_{1/3}/L = 0.044$ の波では $K_R = 0.4$ とほとんど変化がない。波形こう配の小さい $H_{1/3}/L = 0.007$ の波では、 $K_R = 0.38$ から $K_R = 0.34$ まで下がり、また $K_R = 0.34$ に増大する。このような K_R の変化は、模型長が短いと浮体の波による動揺が激しく、模型長が長いと浮体全体として動揺が小さくなることに起因していると思われる。しかし、 K_R の変動幅は小さく、浮体の長さに関係なく実用上一定とみなすことができる。このことは、反射率が前面数列の円筒によって決まることを示している。そこで、第1列目の円筒によって反射率が決まると考え、円筒に当る部分の波だけが反射されると仮定して、Wiegel²⁾ がカーテン防波堤の解析に作用したと同じ方法によって反射率を調べてみた。しかし、円筒の直径部分がすべて波を反射させると考えると、反射率を大きく見積る可能性があるため、波が円筒表面で幾何光学

的に反射されるとして、前面の方向に波を返す円筒部分を反射に対する円筒の有効幅と考え、 $\frac{\sqrt{2}}{2}D$ とした。ここに D は円筒の直径である。その結果、反射率 K_R は次式で与えられる。

$$K_R = \sqrt{\frac{\frac{\sqrt{2}}{2} D}{2s} \frac{\sinh 2kh - \sinh 2k(h-d) + 2kd}{\sinh 2kh + 2kh}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $k = 2\pi/L$ 、 h は水深、 d は円筒の吃水、 s は円筒の中心距離である。式(3)は微小振幅の規則波に関して求めたものであるため、不規則波に適用する場合、波のスペクトル特性を考慮して計算する必要があるが、このようにすると計算が非常に複雑になることやピーク周波数付近にかなりの波のエネルギーが集中していること、ピーク周波数は有義波周期の逆数に近いことを考えて、波のスペクトル形は考慮せず、有義波の諸元を用いて計算を行ってみた。その結果、 $H_{1/3}/L = 0.007, 0.037, 0.042, 0.044$ のそれぞれの波で、 $K_R = 0.38, 0.39, 0.43, 0.50$ となった。この値は図-4の実験値より少し大きいだけである。そこで、大まかな反射率の推定に式(3)が利用できることがわかった。

(3) 透 過 率

図-5 は透過率の変化を示したものである。この図から透過率は模型長が長くなるほど小さくなるのがわかる。また、波形こう配の小さい $H_{1/3}/L = 0.007$ の波は透過率が大きく、他の波は波形こう配に大きな差がないので、ほぼ同じような透過率を示している。波群による差はせいぜい 0.04 程度で小さい。

このような多数の円筒による波の変形については、ポテンシャル理論を用いて解く方法を大楠³⁾ や Spring⁴⁾ が提案しているが、この方法による解析で透過率を調べた結果によると、本実験の範囲内ではほとんど $K_T = 1.0$ に近く、波の不規則性を考慮しても、透過率は図-5に示したほど減少しないと思われる。このことから透過率の減少は水の粘性や渦によるエネルギー損失が支配的な要因だと推定される。また、反射率が模型長によって変

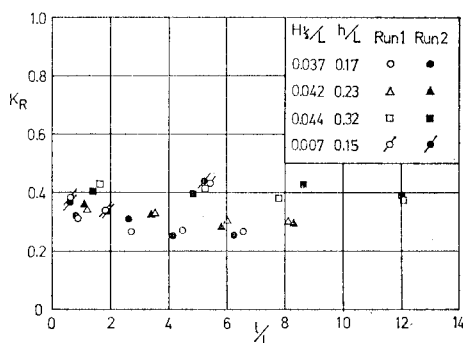


図-4 反射率の変化

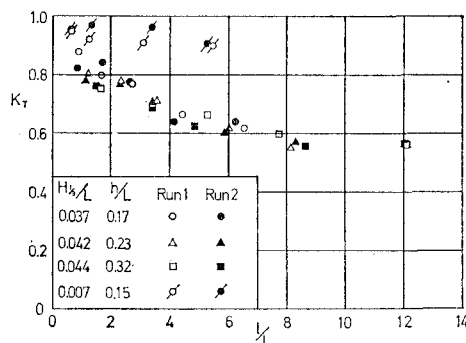


図-5 透過率の変化

化しないことから推測される。

4. 透過率の算定式

(1) 透過率の減衰機構

合田²⁾は抗力による波のエネルギー損失を考へて、網目フィルターによる波高減衰について調べている。合田の方法を適用して、円筒群による波高減衰を調べてみる。

一本の円柱に対して波が1周期間になす仕事 W は、次式で与えることができる。

$$W = \int_{-T/2}^{T/2} \int_{-d}^0 V dF dz dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 V は円筒軸に垂直方向の水粒子速度、 dz は円筒軸の微小長、 dt は微小時間、 T は波周期、 d は吃水である。円筒に作用する力 dF は Morison の公式によって慣性力と抗力であるが、慣性力による仕事は式(4)で積分すると消え、抗力による仕事のみが残る。波が円筒に対してなす仕事は波のエネルギー損失となる。これを E_{loss} で表わすと、 $E_{\text{loss}} = W$ となって、式(4)は次のようになる。

$$E_{\text{loss}} = 2 \int_{-T/4}^{T/4} \int_{-d}^0 \frac{\rho C_D}{2} DV^2 |V| dz dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ρ は水の密度、 C_D は抗力係数である。 V は円筒の運動速度と水粒子速度との相対速度であるが、ここでは浮体の動揺は小さいとして無視し、水粒子速度だけを考える。水粒子速度として微小振幅波の水平水粒子速度を用い、単位時間当りの平均波エネルギー損失 $\overline{E_{\text{loss}}}$ を求めると、次式のようにになる。

$$\overline{E_{\text{loss}}} = \frac{\rho g \sigma H^3}{16\pi} C_D D f(kh, kd) \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに

$$f(kh, kd) = \frac{4}{9} \left[1 + \frac{3}{\sinh^2 kh} - \frac{\sinh^3 k(h-d)}{\sinh^3 kh} - \frac{3 \sinh k(h-d)}{\sinh^3 kh} \right] \tanh kh \quad \dots\dots\dots (7)$$

である。幅 B において単位時間に輸送される入射波のエネルギー $\overline{E_w}$ は $\overline{E_w} = \rho g H^2 C_g B/8$ であり、幅 B の間に N 本の円筒があるとすると、波のエネルギー損失は $N \overline{E_{\text{loss}}}$ となるから、入射する波のエネルギーに対する波のエネルギー損失の比を K_E^2 とおき、波の群速度 C_g を $C_g = \frac{1}{2} \frac{a}{k} (1 + 2kh/\sinh 2kh)$ で表わすと、

$$K_E^2 = 2 \frac{H}{L} \frac{C_D D}{s} f_1(kh, kd) \quad \dots\dots\dots (8)$$

となる。ここに $s = B/N$ で、円筒の中心間隔を示し、

$$f_1(kh, kd) = f(kh, kd)/(1 + 2kh/\sinh 2kh) \quad \dots\dots\dots (9)$$

である。反射がないとすれば、 $K_T = \sqrt{1 - K_E^2}$ であるから、波高変化に関して、次のような微分方程式が得られ

る。

$$\frac{dH}{d(l/s)} = -H \left(1 - \sqrt{1 - 2 \frac{H}{L} \frac{C_D D}{s} f_1(kh, kd)} \right) \quad \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 H は模型長 l に対する透過波である。 $\frac{2}{L} \frac{C_D D}{s} \cdot f_1(kh, kd)$ の値は非常に小さいので、この項の高次項を無視すると式(10)の解は

$$K_T = \frac{H}{H_I} = 1 \left/ \left[1 + \frac{D_D D}{s} \frac{l}{L} \frac{H_I}{L} f_1(kh, kd) \right] \right. \quad \dots\dots\dots (11)$$

となる。ここに H_I は浮体への入射波高である。このようにして K_T が求まると、 K_E は $K_E = \sqrt{1 - K_T^2}$ として計算できる。この K_E を以後波高減衰率と呼ぶ。

(2) 抗力係数と波高減衰率

波高減衰率を計算しようとするとき、抗力係数 C_D の値を決めなくてはならない。抗力係数は R_e 数と $K-C$ 数に関係するので、本実験における R_e 数と $K-C$ 数を調べてみると、それぞれ 10^4 のオーダーと $0.5 \sim 2.5$ であった。この値は入射波の有義波の諸元を用いて計算したものである。従来の研究成果を参照すると、本実験の範囲では $C_D \approx 1.0$ となる。 $C_D \approx 1.0$ を用いて波高減衰率 K_E を計算してみると、実験値より全体的に小さくなった。この原因としては、 K_E を規則波の理論から求めた式で計算しているのに対し、実験値は不規則波であることや浮体は動揺していることなどが挙げられる。そこで、有義波の諸元を用いて波高減衰率を計算するとして、実験値によく適合させるためにはどの程度の C_D の値を用いるのが適当か調べてみた。

図-6 は $C_D = 2.0$ と $C_D = 2.5$ とおいた時に得られる K_E の値と実験から求めた値とを比較したものである。これによると、 $H_{1/3}/L = 0.037$ の波については $C_D = 2.5$ とおいた方が適合度がよいが、 $H_{1/3}/L = 0.044$ の波では $C_D = 2.0$ とした方が実験値をよく表わしている。本実験の範囲では、Sarpkaya⁹⁾ や中村⁷⁾ が示しているように $K-C$ 数の増大とともに C_D は大きくなる傾向にあるので、波の条件による C_D の相違は $K-C$ 数の違いによる

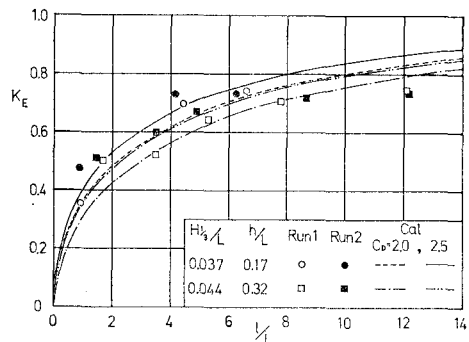


図-6 抗力係数の推定図

ことも考えられるが、浮体の運動そのものも異なるので $K-C$ 数の相違だけによるとは断定できない。 $C_D=2.0$ と 2.5 による K_E の差は 0.05 以下であり、それほど大きな差はないので、透過率の計算には波の条件に関係なく一応 $C_D=2.0$ とした。

(3) 透過率の推定

式(11)を用いて $C_D=2.0$ として透過率を算定した。しかし、この場合図-4で示したように波の反射が起っているため、波の反射も考慮する必要がある。3.(2)で述べたように波の反射率は浮体の長さにはほとんど関係ないので、浮体には

$$H_I' = H_I \sqrt{1 - K_R^2} \dots\dots\dots(12)$$

で計算される波高 H_I' の波が入射してくると考えた。この H_I' の波高を用いて式(11)で計算した透過率が図-7に実験値と比較してある。ここで、 $K_R=0.35$ と一定にし、実験値は2種類の波群の平均値で示してある。

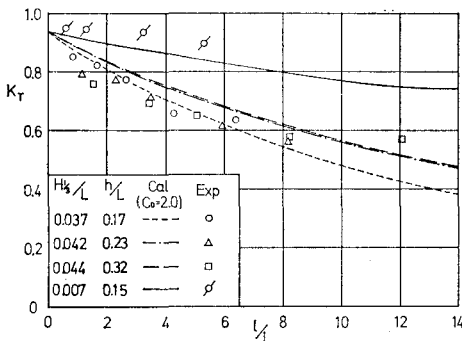


図-7 透過率に関する実験値と計算値との比較

計算値は実験値の傾向をよく表わしているけれども、 $H_{1/3}/L=0.007$ の波では透過率を 0.05 程度過小に見積り、 $H_{1/3}/L=0.042$ と 0.044 の波については 0.05 程度過大に見積っている。一方、 $H_{1/3}/L=0.037$ の波については計算値と実験値はよく一致している。実験値と計算値に差が生じる原因としては、反射率を一定にしたことや波のスペクトル形を無視し、有義波の諸元で計算したこと、 C_D の値も一定にとったことによると思われる。しかし、実用的には本計算法で透過波を計算しても問題はないと思われる。

4. あとがき

本論文では、多数の円筒支持浮体で浮遊している巨大構造物による波の反射および透過について検討を行い、このような形式の構造物では、反射率は前面数列の円筒によって決まり、構造物の長さにはほとんど関係しないことがわかった。また、透過率については、構造物の長さが長くなるほど小さくなるが、これは支持円筒間を波が通過する際に起すエネルギー損失によるものであることがわかった。そこで、この波のエネルギー損失量を推定する式を提案した。この式に含まれる抗力係数 C_D の値は、本実験の範囲では従来の研究から $C_D=1.0$ と推定されるが、実験値に最もよく適合する C_D は 2.0 付近の値であった。 $C_D=2.0$ として、波の透過率を算定した結果は実用的な範囲では実験値と一致した。計算では、波の条件にかかわらず $C_D=2.0$ としたが、詳細に調べてみると、波の条件によって C_D の値は異なることがわかった。この C_D の値については今後検討する必要がある。

この模型実験では、円筒支持浮体や浮体構造物全体に働く波力や構造物の変位についても測定しているため、これらの結果については別の機会に発表したいと思っている。

最後に、本研究は第三港湾建設局関西空港調査室の依頼によるものであることを付記しておく。

参考文献

- 1) 合田良実・鈴木康正：不規則波に対する反射波の分離法について，第1回関東支部年次研究発表会，pp. 151~154, 1974.
- 2) Wiegel, R. L.: Transmission of wave past a rigid vertical thin barrier, Proc. ASCE, Waterway and Harbour Division, Vol. 86, No. WW1, 1960.
- 3) 大楠 丹：複数本の鉛直円柱に働く波力について，日本造船学会論文集，第131号，pp. 53~64, 1972.
- 4) Spring, B. H. and P. L. Monkmeier: Interaction of plane waves with vertical cylinder, The 13th Coastal Eng. Conf., pp. 1828~1847, 1974.
- 5) Goda, Y. and A. T. Ippen: Theoretical and experimental investigation of wave energy dissipators composed of wire mesh screens, MIT Report, No. 60, 66 p., 1963.
- 6) Sarpkaya, T.: An analytical study of separated flow about circular cylinder, J. Basic Eng., Trans. ASME, Series D, Vol. 90, pp. 511~518, 1968.
- 7) 中村孝幸：海洋構造物に作用する波力特性とその振動応答に関する研究，博士論文，p. 115, 1977.