

ジャケット構造物の海上実験による波力係数、波力の研究

吉田 常松*・伊藤 壮一*・堤 大三郎**

1. ま え が き

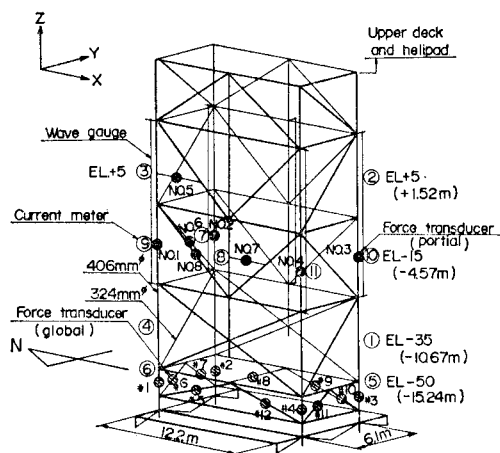
ジャケットのように円柱部材で構成される海洋構造物に作用する波力は、通常、モリソンの式に基づいて評価される。モリソンの式の適用については、抗力係数 C_d と質量係数 C_m の値を求めることを中心に、多くの実験研究がこれまで実施されている。しかしながら、これらの多くは水槽実験であったり、単一円柱部材に対する海上実験であったりして、実際に何十メートルもの海中に設置される構造物に対する作用波力を考える上で、十分な究明がされているとは言えない。波力係数に対しては、実物のレイノルズ数レベル ($1 \times 10^6 \sim 10^7$) に対する C_d 、 C_m 値とか、海生物の付着の影響という問題があるし、その他にも、波下の水粒子速度、加速度の分布、構造物全体に作用する波力の算定法の妥当性など、考えられる問題点が多い。

これらの問題点に対する資料を得るため、EPR (Exon Production Research Co.) では、実際の海にジャケットの全体模型を建てて、その作用波力に関する実験的研究を実施することにし、内外に参加を求めた。結局、我々を含む 13 団体、企業が研究グループを成し、1976 年 11 月から 2 年間に亘り、海上での実験計測を行なった。本研究は、その海上実験で得られたデータの一部について一次的な解析をしたもので、構造物全体に作用する波力と、それに関連する事項として、波力係数 C_d 、 C_m の値、波下水粒子速度の鉛直方向分布について検討したものである。

2. 実験の概要

実験構造物 OTS (Ocean Test Structure) が設置されたのは、メキシコ湾、ニューオーリンズ南沖、水深 20 m の地点である。この辺りでは、冬季にハリケーンによる大振幅の波が期待できる。

OTS はパイプ構造のジャケット模型で、断面は 12.2 m × 6.1 m、高さはヘリデッキまで含めて 38.6 m である。主要部材の径は 406 mm、水平、斜め部材の径は 324



図—1 計測器設置状況図

mm である。この構造物の上に、次のような各種計測器がセットされた (図—1 参照)。

(i) 全体波力用荷重計——構造物全体に作用する波力を計測するためのもので、平均水面下 16.2 m (EL -53 ft) の断面で切る部材の肉厚を薄くして歪ゲージを貼ったものである (図中 ● 印)。

(ii) 部材波力用荷重計——円柱部材の一部 (径の 2 倍の長さを持つアクティブ部分) に作用する波力を測定するもので、アクティブ部分を支えるロードセルによって 2 方向力を検出する。主として、平均水面下 4.6 m (EL -15 ft) の位置にセットされた (図中 ● 印)。

(iii) 流速計——部材波力用荷重計の置かれている場所の流速と鉛直方向流速分布を測定するために、2 方向電磁流速計が、部材波力用荷重計の近傍と、鉛直方向に 2 列セットされた (図中、○ 印内数字)。

(iv) 波高計——容量式波高計で、図中に示す 5 ケ所にセットされた。

(v) その他——デッキ上に、風向風速計、温度計、気圧計など。

以上、計測チャンネルにして計 96 チャンネルである。計測は、OTS 上の計測器室内に設置されたミニコンにより自動制御され、それぞれデジタル量に変換されたデータが、DMT 上に記録された。A/D 変換に際して

* 正会員 日本鋼管 (株) 津研究所

** 正会員 工博 日本鋼管 (株) 海洋技術室

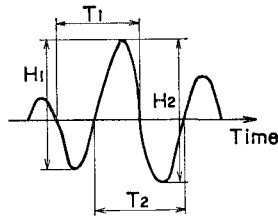
の読み取り間隔は 0.1 sec で, 3 Hz のローパスフィルターを通してている。

記録としては, 大きく 2 種類に分けられる。1 時間毎に各計測チャンネルの 20 分間のデータを平均したもの及びそれに関連した統計値から成る“時間平均データ”と, 大波高の波が起こっている時の時系列データ, “ストーム データ”である。本報告の解析は, 主に後者のデータを使ったものであるが, 一部, 潮流, 風速, 平均水深などは前者から読み取っている。なお, 収録されたデータの総数は, 2 400 フィート MT にして, 冬季 2 シーズンの全計測期間で, 時間平均データが 34 巻, ストーム データが 26 巻である。

3. 解析データ

前述したように 2 シーズンの計測から膨大なデータが得られているが, 本報告で述べる解析に使ったのは, その一部で, 76/77 のストーム データから抽出したものである。具体的には, ストーム データの中から, 所要のレベルを越える大きな波を, 解析波として数十個選出した。所要レベルとは,

構造物を構成する全円柱部材に対するレイノルズ数 (R_e 数) が, 円柱の C_a に対する臨界レイノルズ数 2×10^5 を越える波高 - 周期のレベルである。なお, 解析では, 波高, 周期については, 図-2 に示すように 3 種類を定義した。



Definition 1 : H_1, T_1
(upcrossing)

Definition 2 : H_2, T_2
(downcrossing)

Definition 3 : $\frac{H_1+H_2}{2}, \frac{T_1+T_2}{2}$

図-2 波高, 周期の定義

4. C_a, C_m の解析

C_a, C_m を計算するのに用いた計測チャンネルは, 平均水面下 4.6 m に設置された部分波力用荷重計 (WFT) と, 対応する流速計である。WFT は, 貝殻などの付着が波力に及ぼす影響を知る目的で, 2 種類セットされている。No. 1, 3 は付着防止の塗装を施したものの, No. 2, 4 は無処理のものである。

係数値 C_a, C_m を求める手順は以下の通りである。まず, 初期値として C_a, C_m の値を設定する。次に, 波力データに対して, 定常成分である潮流による抗力成分を補正する。一方, 速度記録とそれから計算される加速度データにより, 抗力成分が卓越する領域, 質量力が卓越する領域を求める。卓越する条件としては, どちらか一方が他方の 2 倍以上であるとした。それぞれ卓越領域の波力, 速度, 加速度の RMS を求め, モリソンの式に従って C_a, C_m を計算する。得られた C_a, C_m 値が設定し

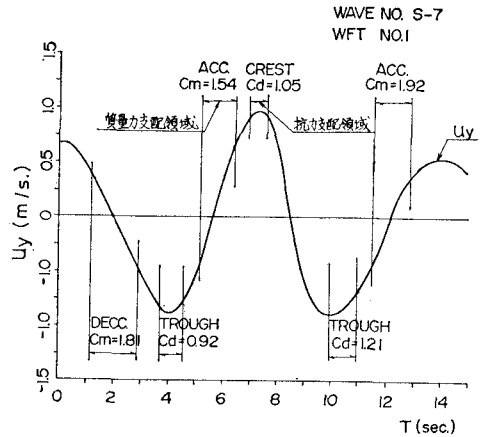


図-3 記録波形及び計算領域

た値と 0.1 以下の差であれば計算を終わり, そうでなければ設定値を変えて計算を繰り返す。計算の例を図-3 に示す。図中の波形は速度記録を表わしている。

速度記録から加速度への変換は, 次のようにする。

一般に, 時系列信号 $p_i(t), p_o(t)$ に対するパワースペクトル $S_{p_i}(\omega), S_{p_o}(\omega)$ は, 応答関数 $H(\omega)$ との間に次の関係が成立する。

$$S_{p_o}(\omega) = |H(\omega)|^2 \cdot S_{p_i}(\omega) \quad \dots\dots\dots (1)$$

一方, $p_o(t)$ と $p_i(t)$ を合積を用いて

$$p_o(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t') p_i(t-t') dt' \quad \dots\dots\dots (2)$$

と書いて, 両辺のフーリエ変換をとる。

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} p_o(t) e^{-i\omega t} dt \\ = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \cdot \int_{-\infty}^{\infty} p_i(t) e^{-i\omega t} dt \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

(1) 式と (3) 式より,

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) e^{-i\omega t} dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \dots\dots\dots (5)$$

速度から加速度への応答関数は $H(\omega) = i\omega$ であるので

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} i\omega e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \omega \sin \omega t d\omega \quad \dots\dots\dots (6)$$

(6) 式を (2) 式に代入して, $p_i(t)$ を速度記録とすれば, $p_o(t)$ は加速度となる。(2) 式は, 一般にウィンドウ関数によるフィルタリングの式であることから, この演算もフィルタリング手法と言える。図-4 に計算例を示す。

図-5 に抗力係数の結果を示す。計算に用いた解析波は計 45 個である。(a) が貝殻など海生物の付着がない円柱, (b) が付着のある円柱に対する値を示す。この結果で注目されるのは, 臨界 R_e 数に対する傾向が明確でないことである。これについては, 他の現地観測の例, たとえば, 土屋ら²⁾の報告の中で引用されている Wiegel や Morison などの結果と同じ傾向であり, 実海域で作用

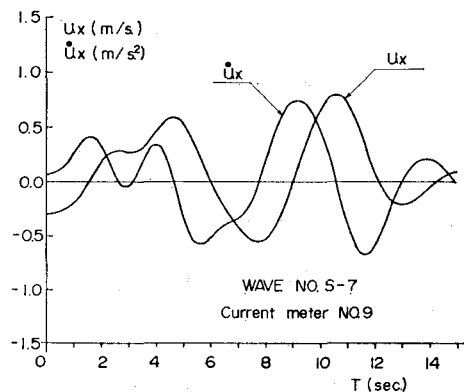
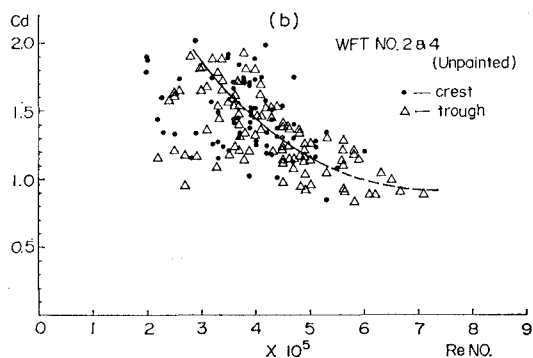
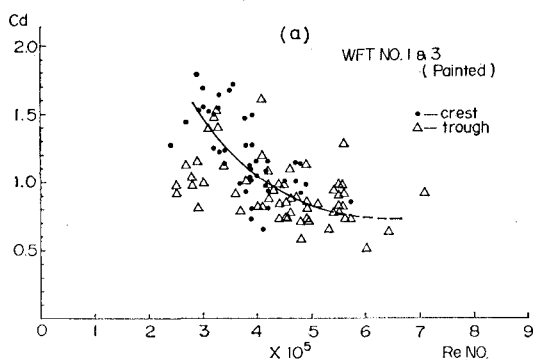
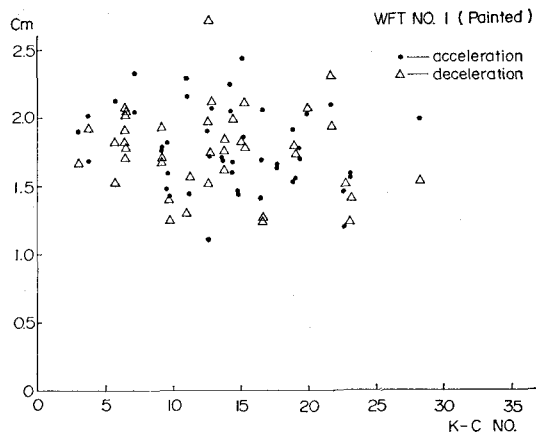


図-4 フィルタリング手法による加速度波形

図-5 抗力係数 C_d の解析結果

する抗力が、実験室での単一波による抗力のように単純にモデル化できないことを意味している。しかしながら今回の結果でも、 Re 数が大きくなると C_d 値は収束する傾向にあり、収束値は従来考えられている C_d 値の範囲²⁾に入っている。貝殻の付着がある円柱については、表面粗度と見かけの断面の増加により、 C_d 値は 0.2 ほど大きくなり、ほぼ 0.9 が収束値として得られる。

一方、図-6 は、質量係数 C_m について、WFT No. 1 に対する解析結果を示したものである。 C_m については、ばらつきは大きい、横軸 $K-C$ 数に対して依存性

図-6 質量係数 C_m の解析結果

がない。他の WFT についても結果はほとんど同じで、貝殻の影響もなく全 C_m 値の平均は 1.7 であった。

5. 波下流速分布の検討

従来、波下的水粒子速度の分布について、計算値と実測値を実海域で比較検討した例はほとんどない。ここでは、選択した解析波(計 30 波)の平均波高、平均周期が、それぞれ $\bar{H}_1=4.3$ m、 $\bar{T}_1=8.8$ sec (いずれも定義 1 に対する平均値)になることを考慮して、適用限界からストークス 5 次近似波によって計算値との比較検討を行なった。

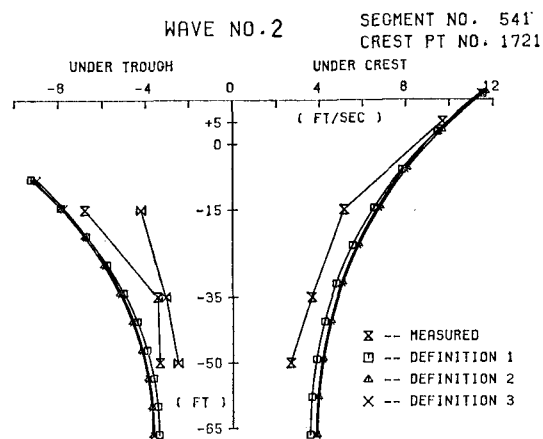


図-7 波下流速分布の計算値と実測値

図-7 は解析結果の一例である。実測点は、波峰(crest)下では、EL +5 ft (10.7 m), EL -15 ft (4.6 m), EL -35 ft (10.7 m), EL -50 ft (15.2 m) の 4 点で、波谷(trough)では下 3 点の値が得られている。trough 下で計測点が 2 点あるのは、crest の前と後の trough 下での値である。

表-1 は、計算値と実測値の比 r (計算値/実測値) について、各レベルで平均値 $\bar{r}$ と標準偏差 σ_r を求めたも

表-1 波下水粒子速度の計算値と実測値の比

位置 (EL)	波の定義 $\bar{r}, \sigma_r$	Def. 1		Def. 2		Def. 3	
		Crest	Trough	Crest	Trough	Crest	Trough
+5	$\bar{r}$	1.04	—	1.06	—	1.06	—
	σ_r	0.19	—	0.23	—	0.19	—
-15	$\bar{r}$	1.24	1.38	1.27	1.28	1.25	1.37
	σ_r	0.16	0.47	0.21	0.41	0.15	0.56
-35	$\bar{r}$	1.25	1.51	1.31	1.31	1.25	1.44
	σ_r	0.17	0.45	0.23	0.31	0.16	0.49
-50	$\bar{r}$	1.21	1.50	1.27	1.36	1.21	1.42
	σ_r	0.21	0.42	0.28	0.30	0.22	0.44

のである。この表から、計算値と実測値は平均水面付近では比較的良く一致するが、平均水面下では、crest 下の場合に 20~30%, trough 下の場合で 30~50% ほど計算値の方が大きくなることが分かる。波の定義による差は余りないが、trough 下の値については、def. 2 (down-crossing) による計算値が若干近似度が良い。実測値が計算値を上回ることに対して考えられる理由は、波の不規則性である。単一の波高、周波で入射波を表わすのは設計波の考え方であって、実際にはむしろ、異なる周期の波成分が重なり合って表面波高を与えており、その影響がこの結果に結びついたと考えられる。このことを確かめるには、入射波を周波数成分に分解して検討する必要があるが、それについては、今後更に解析をする予定にしている。

6. 構造物全体に作用する波力の検討

OTS 構造物全体に作用する波力についても、4. で解析したのと同じ解析波 (計 30 波) について、計算値と実測値を比較検討した。その目的は、この種の構造物に対する波力外力の設計算定法が、どの程度正確に実際に評価しているかを知ることである。

実測値は、図-1 に示した #1 から #12 の全体波力用荷重計に生じた、引張、圧縮の軸力データを換算して求めた。波力としては、水平方向波力と転倒モーメント (回転中心は EL -15.2 m) の 2 種類で Q_x, Q_y, M_x, M_y のそれぞれ 2 方向の crest 下での片振幅値を求めた。これと計算値を比較する場合には、更に次のような値として評価した。

$$Q_{\text{meas. (or } Q_m)} = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}$$

$$M_{\text{meas. (or } M_m)} = \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$$

計算値を求めるにあたっては、まず、ジャケット構造を忠実に骨組構造にモデル化した。そして、水面上に露出した部分については風荷重を、水面下の部分には潮流力、波力が作用するとして、その全荷重を全体作用波力として計算した。計算はモリソンの式に基づき、波はストークス 5 次波を使っている。具体的には、当社所有の設

計用外力計算プログラム “MACAUTO OFFSHORE” を使用した。

入力データは、① 入射波の波高、周期、波向、② 平均水深、③ 風向、風速、④ 潮流の大きさ、方向、⑤ C_a, C_m の値である。① は解析波に対する値であり、② から④ は時間平均データから読み取った。⑤ の C_a については、解析波の平均波高 $\bar{H}_1$ 、平均周期 $\bar{T}_1$ の波を与えた時、EL -4.6 m (C_a, C_m を計算した部材波力用荷重計の位置) での部材に対する Re 数が 6×10^5 になることを考え、それに対応する値 $C_a=1.0$ を、図-5 (b) から読み取った。また、 C_m については、全解析値の平均 1.7 を採用した。

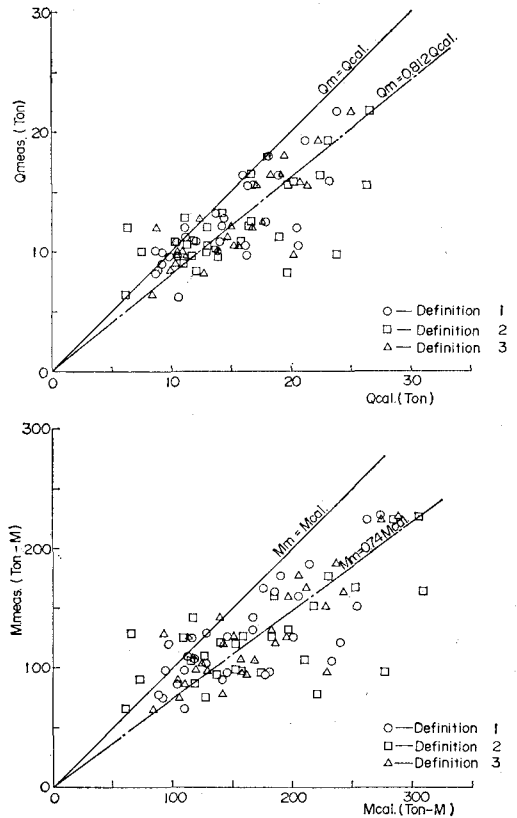


図-8 全体波力の計算値と実測値

図-8 は、水平方向波力及び転倒モーメントの計算値と実測値の結果を図示したものである。計算値と実測値の比の平均値は、

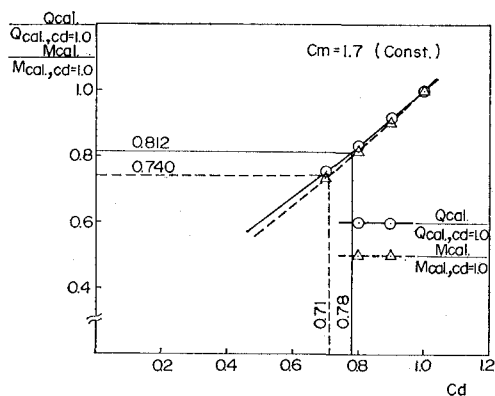
$$\frac{Q_{\text{cal.}}}{Q_m} = 1.23 \quad \frac{M_{\text{cal.}}}{M_m} = 1.35$$

つまり、

$$Q_m = 0.812 Q_{\text{cal.}} \quad M_m = 0.740 M_{\text{cal.}}$$

となる。この関係を図中では、一点鎖線で示している。

一方、 $Q_m = Q_{\text{cal.}}$ 、 $M = M_{\text{cal.}}$ となる C_a の最適値を求めるために、 $\bar{H}_1, \bar{T}_1$ の入射波に対して、 $C_m=1.7$ を固

図-9 最適 C_d 値の計算

定して、 C_d を変化させて計算を行なった。 $C_d=1.0$ の時の値を基準にして結果を図示したのが、図-9 である。これによると、計算値と実測値が等しくなる時の C_d の値は、次のようになる。

水平方向波力については $C_d=0.78$

転倒モーメントについては $C_d=0.71$

また、適用する波理論によって、波力の計算値がどのように違うのかを知るために、 $\bar{H}_1$ 、 $\bar{T}_1$ について、微小振幅波とストークス5次波の計算値を比較した。結果を図-10 に示すが、このように両者による結果はほとんど差がなく、最大波力で、微小振幅波による方が4%程度小さくなる。

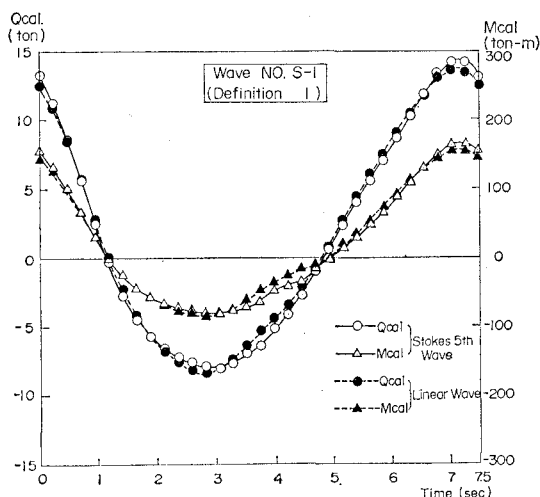


図-10 全体波力計算値(ストークス5次波と微小振幅波)

これらの結果から、全体波力については、次のことが考察される。

(1) 計算値と実測値の比のばらつきが大きいのは、 C_d 、 C_m の解析結果によっても類推されることである。また、実測値の方が大きくなるのは、4. でも述べたように、ストークス5次波理論による計算値が、crest 下の場合、平均水面下の実際の流速値を20~30% 上回ることによると考えられる。

(2) 通常の設計計算に於いては、 $C_d=0.6\sim 1.0$ 、 $C_m=1.5\sim 2.0$ (たとえば API RP2A 規格)を用いて波力の算定を行なう。今回の、 $C_d=1.0$ 、 $C_m=1.7$ による波力値が実測値を上回る結果、又、最適値として求めた $C_d=0.78$ 、 0.71 は、いずれも従来の設計法の妥当性を示すものである。

(3) 適用する波理論による波力計算値の違いは大きくなく、 C_d 値の選択が重要であることが分かる。しかしながら、波力を正確に評価するについては、波下の水粒子速度の分布が波理論による計算値と違うことに対する把握が必要である。

7. まとめ

以上、ジャケット構造物に作用する波力について、① 波力係数値、② 波下の水粒子速度分布、③ 全体作用波力の3つの観点から、海上実験で得られたデータに基づいて検討した結果を述べた。解析は一次的なもので、必ずしも十分な検討を行ない得たわけではないが、実海域のジャケット構造物に作用する波力について、モリソンの式を適用することによる問題点、特性を把握することができた。特に、水粒子速度の計算値が実測値を上回ることには注意を要することで、今後、更に詳細な検討を進める予定である。

参考文献

- 1) Haring, R. E., D. H. Shumway and L. P. Spencer: Operation of an Ocean Test Structure, European Offshore Petroleum Conference and Exhibition, pp. 24~27, Oct. 1978.
- 2) 土屋義人・山口正隆: 波による円柱の抗力係数および質量係数について, 第19回海岸工学講演会論文集, pp. 379~383, 1972.
- 3) 合田良実: 構造物に働く波力, 水工学シリーズ 67-10, pp. 10-4~10-5, 1967.