

大口径円柱に作用する波圧について

橋 本 宏*・白 波 瀬 正 道**

1. ま え が き

海中構造物の代表的な形状である円柱に作用する波力に関しては Morison¹⁾ らが抗力と質量力の和として求めて以来、多くの研究がなされてきた。しかし、大口径の円柱になると質量力が卓越し、波自体が円柱により変形をうけることになる。また大口径円柱が何本か隣接して立つばあい円柱の相互干渉を受ける。これらは、Mac Camy Fuchs²⁾ らをはじめとして波の回折理論として研究されてきたが、その実験値、観測値は十分とはいえず、実際の設計に取り入れられる段階に至っていない。そこで、われわれは、本州四国連絡橋公団の鳴門海底岩盤掘削実験塔に波高計、波圧計を取りつけ、自動観測を行ない、測得したデータより波のスペクトルおよび波圧のスペクトルを推定し、波と波圧との間の応答が回折波理論と一致するかを検討してみた。

2. 現 地 観 測

鳴門海底岩盤掘削実験塔は鳴門海峡の本州四国連絡橋ルート予定地点付近・飛島の南側に設置された全高約 40 m、縦・横幅 24 m の格子状のわくで、このわくの中央部に口径 10 m の Well が設けられた。この実験塔のわくに波高計、Well に波圧計が取り付けられ、波高、波圧の自動観測が行なわれた。波高計は波が来襲すると考えられる南南東側に 2 台設けられ、波圧計は円柱前面、水深方向一直線に 4 台、円柱にビス止めされた。波高計、波圧計の配置は 図-1 に示す。波高計はストレインゲージタイプの水圧式波高計で、波圧計は受圧面の径 100 mm のストレインゲージタイプのもので容量 2 kg/cm^2 であった。設置は 46 年 9 月 20 日に取り付けられ、4 時間ごとに、波高は 10 分間、波圧は 5 分間、自動観測され、47 年 4 月取りはずされた。試行錯誤的なところもあり、コードの切断や気温低下によるバッテリーの電圧低下、塩害による異状電流の発生などにより高波浪時に波圧、波高のどちらかが欠測することが多く、両者がともに測得できた高波浪時の記録が少なかったが、解析には 47 年 3 月 17 日 16 時の結果を用いることとした。波高計の水圧記録、および波圧記録の一部を 図-2 に示す。

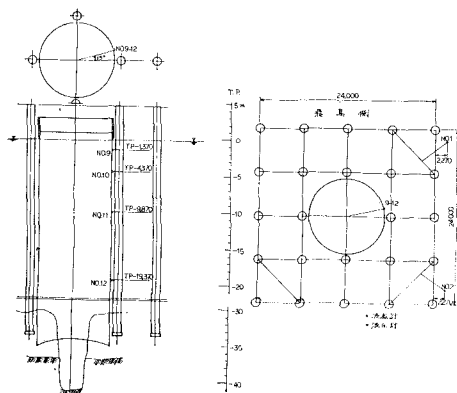


図-1 波高計、波圧計の設置位置

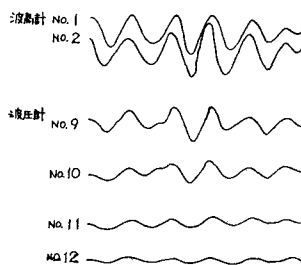


図-2 波高計、波圧計記録の一例

3. 波スペクトルと波圧スペクトル

波高計の水圧 $X(t)$ と波 $X(t)$ の間には式(1)のような関係がある。

$$X(t) = \frac{n}{w} \frac{\cosh kh}{\cosh k(h+z)} x(t) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

n : 補正係数, $w = \rho g$: 水の単位体積重量,

ρ : 水の密度, g : 重力加速度, h : 水深,

L : 波長, $k = 2\pi/L$

z : 波高計受圧面の水表面からの高さ

ゆえに波のスペクトル $S_X(f)$ と水圧のスペクトル $S_x(f)$ の間には、式(2)が成り立つ。

$$S_X(f) = \left\{ \frac{n}{w} \frac{\cosh kh}{\cosh k(h+z)} \right\}^2 S_x(f) \dots \dots \dots (2)$$

また、ある波の周波数 $f = \frac{1}{T}$ (T : 周期) における波の主方向は、波高計 1 と波高計 2 の水圧記録 $x_1(t)$, $x_2(t)$ の位相遅れを $\alpha(f)$ とし、座標を 図-3 のようにとると次式で求められる。

* 正会員 建設省土木研究所 海岸研究室長

** 正会員 建設省土木研究所 海岸研究室

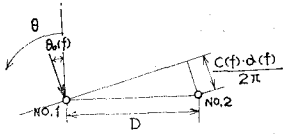


図-3

$$\theta_0(f) = \sin^{-1} \left\{ c(f) \cdot \frac{\alpha(f)}{2\pi} / D \right\} \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 D ：波高計間隔、 $c(f)$ ：波速

ここでは波 $X(t)$ の方向関数を式(1)のように仮定すると

$$h(f, \theta) = \frac{2}{\pi} \cos^2 \{ \theta - \theta_0(f) \} \dots \dots \dots (4)$$

$X(t)$ の周波数、方向スペクトル $S_X(f, \theta)$ は式(5)で与えられる。

$$S_X(f, \theta) = S_X(f) \cdot h(f, \theta) \dots \dots \dots (5)$$

また、前に述べた MacCamy, Fuchs の回折波理論を用いると、円柱表面における波圧は式(6)で示される(図-4参照)。

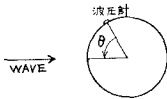


図-4

$$P(t) = -\frac{\rho g H}{\pi k a} \left[\frac{1}{H_0^{(2)'}(ka)} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{i^n}{H_n^{(2)'}(ka)} \right] \times \cos n\theta \left[\frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \right] \times e^{-i\omega t} \dots \dots \dots (6)$$

ここに、

H ：入射波高、 $\sigma = \frac{2\pi}{T}$ 、 a ：円柱の半径、

$H_n^{(2)}$ ： n 次の第2種 Hankel 関数、

'：微分を示す、

z ：波圧計受圧面の水表面からの高さ。

よって、波と波圧の間の周波数応答関数 $|G_{px}(f, \theta)|$ は式(7)となる(図-5参照)。

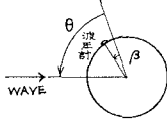


図-5

$$|G_{px}(f, \theta)| = \left| -\frac{2w}{\pi k a} \left[\frac{1}{H_0^{(2)'}(ka)} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} i^n \frac{1}{H_n^{(2)'}(ka)} \cos n(\theta - \beta) \right] \times \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh kh} \right| \dots \dots \dots (7)$$

波圧の周波数、方向スペクトル $S_p(f, \theta)$ は

$$S_p(f, \theta) = |G_{px}(f, \theta)|^2 S_X(f, \theta) \dots \dots \dots (8)$$

で求まり、波圧のスペクトル $S_p(f)$ はこれを方向で積分して得られる。

$$S_p(f) = \int_{\theta_0(f) - \frac{\pi}{2}}^{\theta_0(f) + \frac{\pi}{2}} S_p(f, \theta) d\theta \dots \dots \dots (9)$$

4. 計算結果

上のように波高計の水圧記録 $x_1(t)$, $x_2(t)$ より波圧スペクトル $S_p(f)$ が推定できる。 $S_p(f)$ と波圧計計測波圧記録 $z(t)$ より得た波圧スペクトル $S_z(f)$ を比較することにより回折波理論で与えた波・波圧間応答関数の値を議論することが可能である。この計算のフローを図-6に示す。

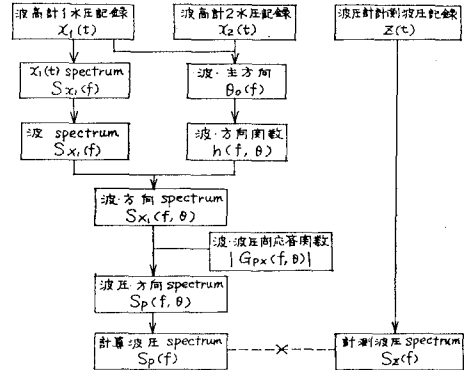


図-6 計算フロー

(1) 波のスペクトル

波高計1の水圧記録のスペクトル $S_{x1}(f)$ 、および波のスペクトル $S_{X1}(f)$ を図-7, 8に示す。データ数は496、サンプリング間隔は1secでスペクトルの推定を行なった式(2)において観測日時の潮位を考慮すると、 $h=33$

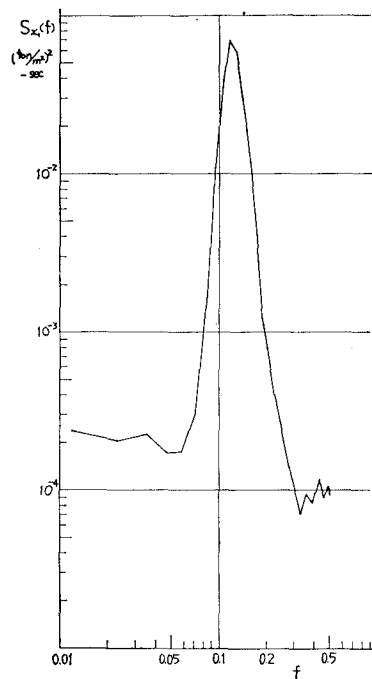


図-7 水圧式波高計による水圧スペクトル

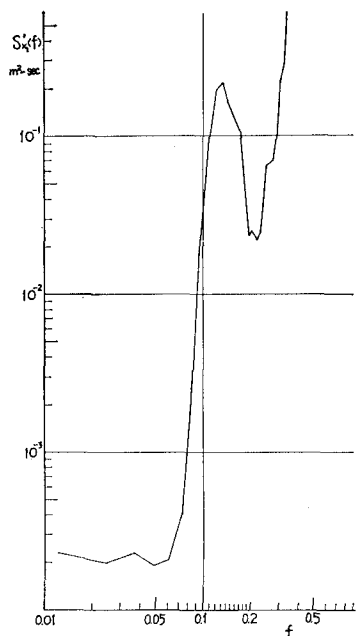


図-8 波スペクトル

m , $z = -9.5$ m となり, 補正係数として $n=1.0$ を用いている。図-8 よりわかるように波高計設置水深が深い
ため高周波領域で $S_x(f)$ は精度が悪くなっている。また
観測した 3 月 17 日には 四国の南を小さな低気圧が通過
しており, その風による波と考えられるが, 波高計の水
圧記録をみても波形は規則的で, 波のスペクトルが非常
にとがった形をしており, うねりのようなスペクトルに
なっている。

(2) 波方向スペクトル

式(3)で求めた波の主方向 $\theta_0(f)$ は 図-9 のようにな

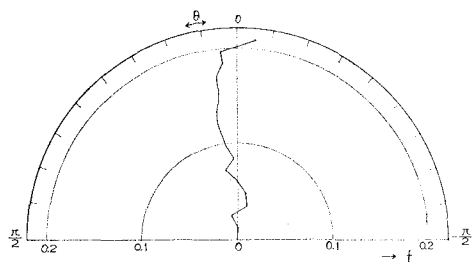


図-9 波の主方向

る。波は 2 台の波高計を結ぶ直線とほぼ直角の方向から
来ていることになり, これは前述したように低気圧に吹
きこむ南南東の風による風波あるいはうねりと考えら
れ説明できる。波の方向関数を式(4)のように仮定して
式(5)で波の周波数・方向スペクトル $S_{x1}(f, \theta)$ を求めた。
図-10 に示すように, 主方向の $f=0.12$ Hz 付近にピー
クがあり, 高周波領域と低周波領域に波スペクトルの推
定の誤差からくる山ができています。

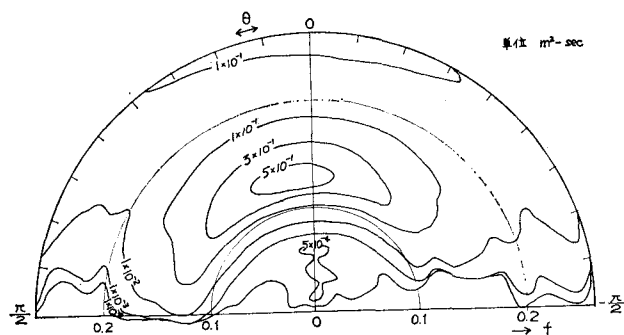


図-10 波の方向スペクトル

(3) 回折波理論

波・波圧間の周波数応答関数は回折波の理論より波圧
計 No. 9, 10, 11, 12 に対してそれぞれ求められる。波圧
計 No. 9, 10, 11, 12 の設置水深は 図-1 に示すように,
 $Z = -3.37$ m, -6.37 m, -11.87 m, -21.37 m であり,

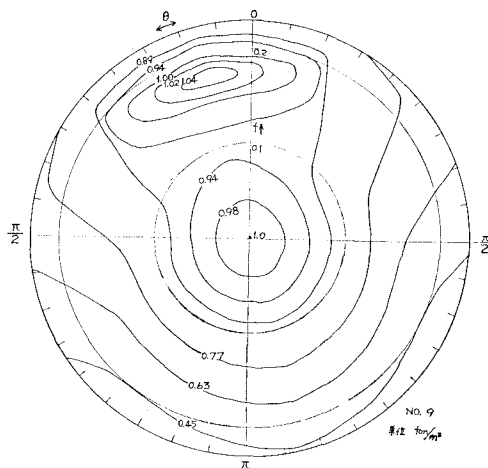


図-11 応答関数 (No. 9)

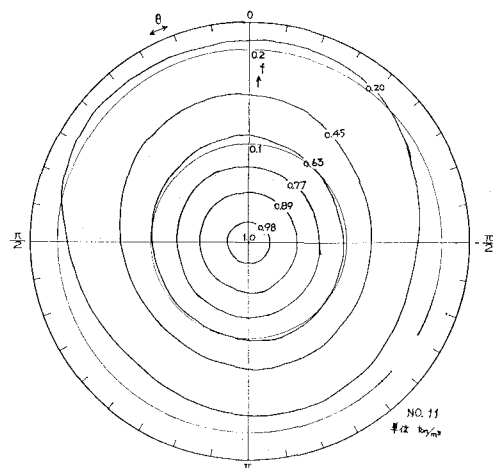


図-12 応答関数 (No. 11)

図-5の β は $\beta = \frac{15}{180}\pi$ である。例として No. 9, 11 の応答関数を 図-11, 12 に示す。周波数が無限小になると $|Gp_x(f, \theta)|$ は 1.0 に近づき、波圧計が水表面近くにあると $\theta = \beta$ の $|Gp_x(f, \theta)|$ は 2.0 に漸近する。すなわち波長に比し、口径が無限に大きい円柱では、重複波としての波圧が作用することになる。No. 9, 11 のばあい、式(7)の最後の項がきいているので周波数が大きくなると、減少する結果となっている。

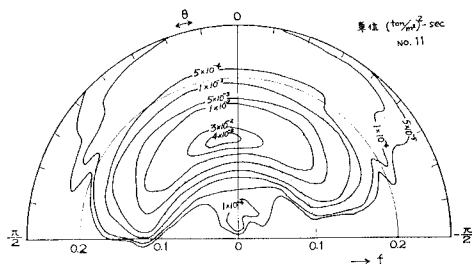
(4) 波圧スペクトル

波圧の周波数・方向スペクトル $S_p(f, \theta)$ の例として、No. 11 におけるものを 図-13 に示す。これらを θ で積分して求めた波圧のスペクトル $S_p(f)$ を 図-14 に示す。

低周波領域では 4 点とも同じ値をとるが高周波領域になると水表面近くの 9, 10 で大きくなり波のスペクトルの誤差がそのままになっている。ピークも水深が大きい点になるほど低周波側にずれている。

(5) 波圧計測波圧スペクトル

波圧計により測定された波圧のスペクトル $S_z(f)$ を 図



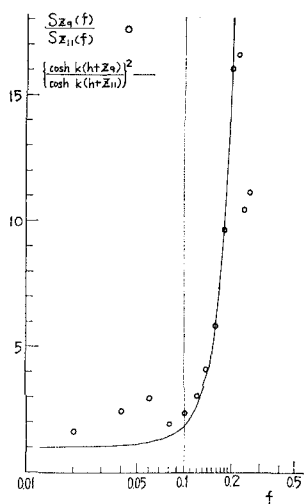


図-16

の第2実線のように幅も小さくなる。またスペクトルの考えに従う表面波にも係数 n を考慮し、 $n=1.1$ を用いると考えると、測定波圧スペクトルの値を減ずると図-17 の第3実線のように両者は近づいている。

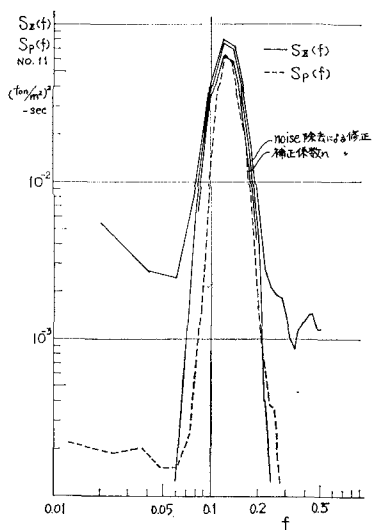


図-17 計測値と計算値の比較

(6) 見かけの波高と波圧

次に波高計の水圧記録の見かけの波高値より波圧を求めてみる。47.3.17.16時の水圧記録のうち比較的大きかった11波目、38波目をとりだして計算した波圧とそれに対応していた計測波圧値を図-18に示す。

この場合、波向は、波高計1,2の時間のずれ τ を記録より読み取り式(3)と同様の式で求めた。補正係数としては、 $n=1.35$ を用いた。これによると水表面近くで計

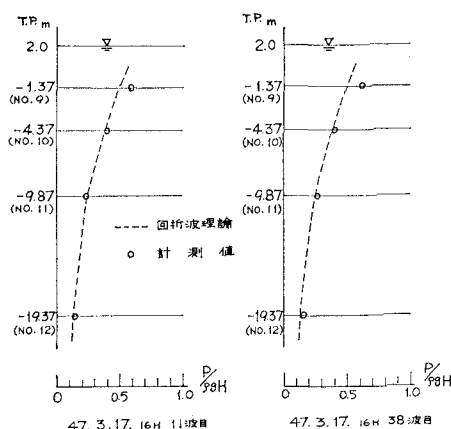


図-18 見かけ波高による波圧

測値が大きくなっているが、他の点ではおおむね一致している。この傾向は、前述の不規則波としての解析でもNo.9や10で、特に測定波圧が計算波圧より大きくなっていることから、回折波理論での壁面波高の分布に違いがでてくることによるものかもしれない。

5. むすび

大口径円柱に作用する波力算定のための一段階として大口径円柱に作用する波圧の現地観測を行ない、波・波圧を測定し、波スペクトル、波圧スペクトルを求め、その応答関数として MacCamy, Fuchs による回折波理論を用いて理論の妥当性を検討した結果、スペクトル推定の誤差、計測精度等に残しているが、おおむねよい一致の傾向をみた。これは解析した日時のデータが波の条件として波長に比し、波高も小さく円柱径も大きいことから回折波理論のよい近似を与える領域であったと考えられる。今後、高波浪時ならびに円柱相互間の干渉のある場合の精度のよいデータの蓄積が必要と思われる。

付 記：この研究は本州四国連絡橋公団の委託により行なった調査の一部であり、現地観測等で種々の御援助を受けた。また現地観測、計算において、建設省中部地建久津見生哲技官（前土木研究所）ならびに海岸研究室渡辺明技官の協力を得た。心より感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) Morison, J. R., J. W. Johnson and M. P. O'Brien: Experimental Studies of Forces on Piles, Proc. 4th Conf. on Coastal Eng., 1953.
- 2) MacCamy, R. C. and R. A. Fuchs: Wave Forces on Piles: A Diffraction Theory Tech. Memo. No. 69. B. E. B. Corps of Eng., 1954.