

II-33 柱状構造物の不規則波浪による動的応答

大成建設株式会社 正会員 田 口 正 孝
" " ○田 中 良 弘

1. はじめに

近年、原油タンカーの巨大化にともない、杭式シーバースは水深30～35mの地点にも建設されるようになり、今後とも大水深の地点に建設される趨勢にある。このように大水深の地点にある杭式ドルフィン等の杭状構造物は、従来のものより長い固有周期を持つことになり、通常の波の周期に近くなるので、波力による動的応答が問題となる。また、実際の海の波は、波高および周期共に不規則であるので、確率論的な取扱が必要となる。本報告は、実際に水深30～35mの水深に建設された50万トンシーバースを対象として、波浪による応答測定を行ない若干の理論計算を行ない実測との比較を行なったものである。

2. 測定方法

2.1 波浪応答測定

測定は、直径2,300mmの鋼管杭3本から成るサブドルフィンを対象として、図-1に示すようにデッキ上に電磁コイル型振動計および歪型加速度計を設置して各方向の応答変位と応答加速度をデータレコーダーおよび電磁オシログラフに記録した。図中№1の振動計は、特殊電磁制動をかけて、振動数特性は0.07～30Hzまで応答するが、№2～№4の振動計は、0.8～100Hzまで応答する。歪型加速度計については0～30Hzまで応答するが、分解能が5gal程度である。また同時に、写真-2に示すように直読式波高計を杭に設置して波高測定を行なった。波向は、高位置からの写真撮影と目測によった。

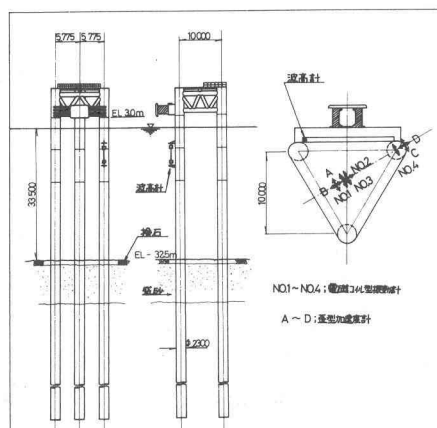


図-1 測定器配置図

2.2 自由振動試験

対象構造物の固有振動数と減衰定数を調べる目的で、波が静穏な時に、タグボートを杭に衝突させることにより構造物に衝撃力を与えて、自由減衰振動を生じさせ、これによる応答変位を電磁コイル型振動計により測定した。

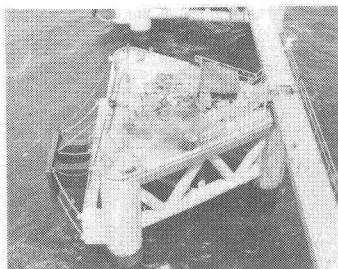


写真-1 波浪応答測定

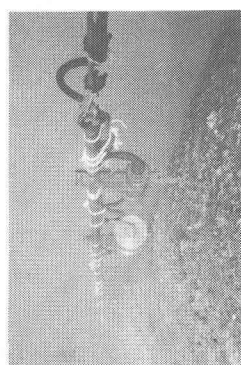


写真-2 波高計

3. 測定結果

3.1 波浪スペクトル

表面波高の記録波形を図-2に示す。この記録波形よりグラフペンシステムにより波高のデジタルデータを作成し、パワースペクトルの計算を行なった結果を図-3に示す。これより波の卓越振動数は、0.131Hz（周期7.6秒）であることがわかる。また、平均波法により有義波波高等を求めたところ、有義波波高が105cmで有義波周期が7.3秒、また平均波高が73cmで平均周期が7.0秒であった。

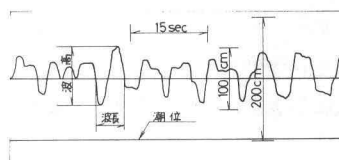


図-2 表面波高記録波形

3.2 応答スペクトル

データレコーダーに収録された
 応答波形をディジタル変換して、
 パワースペクトルの計算を行な
 った結果を、図-4～7に示す。
 №1の変位応答スペクトルで
 は、振動数0.15 Hzの付近で
 大きなパワーを示しているのに、
 №2～№4の変位応答スペ
 クトルでは小さい値を示してい
 るのは、振動計の振動数特性の
 相異によるもので、実際には、
 振動数0.15 Hz付近でも応答
 しているものと考えられる。
 また、№3と№4の同時記
 録よりねじり角を算出してスペ
 クトル計算を行なった結果を図

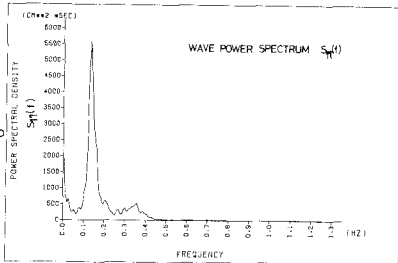


図-3 波浪スペクトル

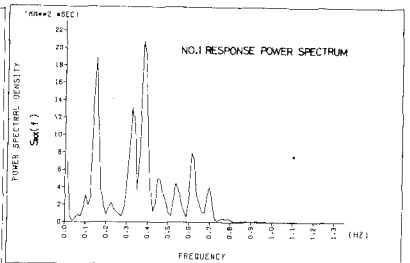


図-4 No. 1変位応答スペクトル

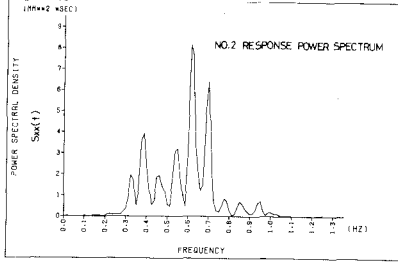


図-5 No. 2変位応答スペクトル

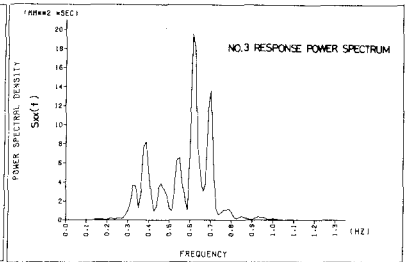


図-6 No. 3変位応答スペクトル

-8に示す。これより0.95 Hz
 がねじりの卓越振動数であるこ
 とがわかる。

3.3 固有振動数と減衰定数

自由振動試験より得られた、
 減衰振動曲線より固有振動数と
 減衰定数を求めた結果、固有振
 動数は0.7 Hzで、減衰定数が
 0.068であった。

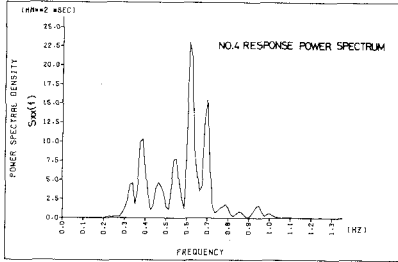


図-7 No. 4変位応答スペクトル

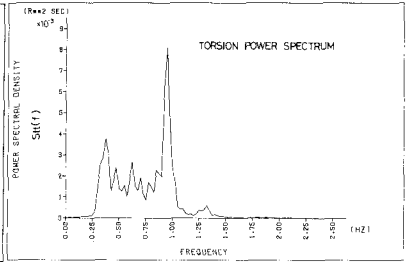


図-8 ねじり応答スペクトル

4. 理論的検討

4.1 円柱に働く波力

波力は、Morisonの式で表わされると考え、水粒子の速度、加速度を、Airyの微小振幅波理論式により、円柱に働く単位長さ当りの波力を求めると式(1)が得られる。

$$\phi_T = \phi_I + \phi_D = C_I \rho \frac{\pi D^2}{4} \left(-\frac{H}{2} \omega^2 \frac{\cosh kz}{\sinh kh} \right) \cos(kx - \omega t) + C_D \rho \frac{D}{2} \left(\frac{H}{2} \omega \frac{\cosh kz}{\sinh kh} \right)^2 |\sin(kx - \omega t)| \sin(kx - \omega t) \dots \dots (1)$$

これより、1本の円柱に働く最大の抗力と質量力の比を求めると、式(2)が得られる。

$$\frac{F_{Dmax}}{F_{Imax}} = \frac{1}{2\pi} \frac{C_D}{C_I} \frac{H}{D} \frac{\sinh 2kh + 2kh}{\cosh 2kh - 1} \dots \dots \dots (2)$$

測定より得られた有義波波高、有義波周期、水深33.5 m、また $C_D = 1.0$ 、 $C_I = 2.0$ として式(2)の値を求めると0.003となり、抗力は質量力に比べ非常に小さいので、波力としては質量力のみを考える。

4.2 波力による動的応答

波浪の周期は、構造物の1次周期に最も近いから、1次の変形モードが卓越すると考えられるので、振動モデルとして図-9に示すような1自由度系と考える。また、その際の変形モードは、Timoshenko(1956)

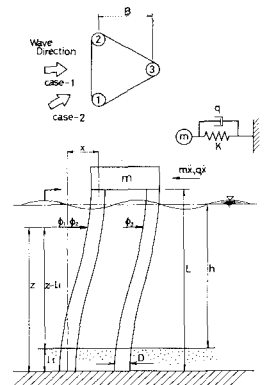


図-9 解析モデル図

が導いた式に従うものとする。つまり、質点Pの荷重がかかったときの高さ z の変形は、式(3)により求められる。

$$\delta = \frac{PL^3}{24EI} \cdot \frac{1}{1-\beta} \left(1 - \cos \frac{\pi z}{L} \right), \quad \beta = \frac{WL^2}{3\pi^2 EI g} \quad \dots\dots\dots(3)$$

今、図-9に示されたケース1の方向から波が入射した場合の単位長さなりに働く波力は、式(1)より式(4)で与えられる。

$$\phi_T = C_1 \rho \frac{\pi D^2}{4} \left(-\frac{H}{2} \omega^2 \right) \frac{\cosh k(z-l_1)}{\sinh kh} \{ 2 \cos \omega t + \cos(kB - \omega t) \} \quad (4)$$

式(3)の関係から影響係数を利用して、運動方程式を導いて、定常解を求めると式(5)が得られる。

$$x = \frac{F_1}{K} G \cos(\omega t + \theta) \quad \dots\dots\dots(5)$$

但し

$$\begin{cases} \frac{1}{K} = \frac{2L^3}{72EI} \cdot \frac{1}{1-\beta}, & G = \left[\frac{(2 + \cos kB)^2 + (\sinh kh)^2}{\left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2} \right]^{1/2} \\ F_1 = \frac{1}{2} C_1 \rho \frac{\pi D^2}{4} \left(-\frac{H}{2} \omega^2 \right) \frac{1}{\sinh kh} \int_{l_1}^{l_1+h} \cosh k(z-l_1) \left(1 - \cos \frac{\pi z}{L}\right) dz \end{cases}$$

従って、波高スペクトルと変位応答スペクトルの伝達関数は式(6)で与えられる。

$$TF(\omega) = \frac{F_1}{K} G \cdot \frac{1}{-H/2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

式(6)の計算結果を図-10に、また波の入射がケース2の場合の結果を図-11に示す。なお、地盤の固定点は、施工段階で行なった杭の水平載荷試験の結果から導いた横地盤反力係数によりChangの式で求めた第1不動点を用いた。また、構造物の固有振動数および減衰定数は、自由振動試験の結果を用い、 $C_1=2.0$ として計算した。

4.3 実測と理論値の比較

理論で求められた $TF(f)$ と、測定から得られた波高スペクトル $S_{\eta\eta}(f)$ より、式(7)により応答スペクトル $S_{xx}(f)$ を求めた結果と、実測より得られたNo.1の応答スペクトルを、図-12に示す。これより、理論値は実測値と比較して、振動数により卓越する場所は比較的一致しているが、パワーの値は理論値の方が大きい。

$$S_{xx}(f) = [TF(f)]^2 \cdot S_{\eta\eta}(f) \quad \dots\dots\dots(7)$$

5. 結果および考察

ドルフィン等のように、直杭型式で上部工の重量が比較的大きい場合、1自由度系モデルとした方が計算が容易である上、比較的良好一致を示している。しかし、理論値の方が大きいのは、理論解析では一方向からの波の入射についてのみ考えているのに対して、実際には図-5,6からもわかるように立体的な応答をしていることが、一原因であると考えられるので、今後は立体的取扱いについても研究を進める予定である。

<参考文献> (1) Nath and Harleman, "Dynamic Response of Fixed Offshore Structures to Periodic and Random Waves", MIT Report No. 102, (2) Borgman, "Spectral Analysis of Ocean Wave Forces on Piling", ASCE, WW2, 1967.

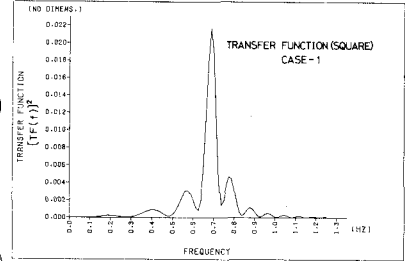


図-10 伝達関数(ケース1)

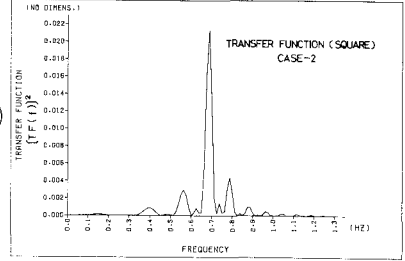


図-11 伝達関数(ケース2)

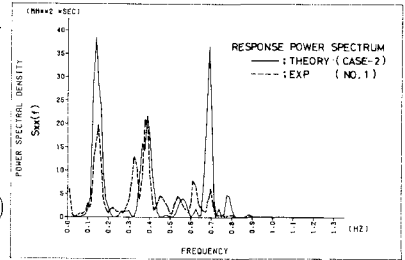


図-12 実測との比較(ケース2)