

清水建設(株) 正員 清川哲志 同 茅野浩一 同 小林 浩

1. はじめに

近年、海洋温度差発電プラントなどが急速に実現しつつあり、それに伴ってさまざまな技術的課題が新たに生じている。例えば、海洋温度差発電は深海より冷水を取水し、これと海面付近の海水の温度差を利用して電気エネルギーに変換するものであるが、通常冷水は500m以深の深海から汲み上げるわけで、温度差発電の成否はこの間の温度上昇をできる限り押えることにかかっている。したがって、パイプの材料は熱伝導率の面からポリエチレンなどの合成樹脂が用いられる。そして陸上型プラントの場合、このパイプを外洋からの波浪を直接受けるリーフ斜面上に沿って設置するので、波浪外力による共振等に関する検討が不可欠となる。

海中パイプの振動に関する研究は少なく、僅かに榎木ら^{1),2)}、勝井ら³⁾、山本ら⁴⁾、の研究があるのみである。また、これらは主として潮流によって発生する揚力による振動を扱っており、パイプも海中に直立している場合と、海底面に水平に置かれた場合のみを扱っている。したがって、先に述べたような斜面上のパイプの振動の問題には、これら既往の研究成果を取り入れることができない。

これらの事から、著者らは新たにこの問題を検討した。本報告は斜面上に設置された柔パイプの波浪による応答特性を明らかにする第一段階として、斜面上に単純支持された柔パイプの波浪による応答を解析的に検討した結果について述べたものである。

2. 解析法の概要

パイプの振動は通常の弾性ばりの振動方程式を用いて扱う。また、パイプに作用する波浪外力は、パイプの径が波の波長に比べて小さいためモリソン公式を用いて評価する。モリソン公式中の水粒子の速度および加速度は、斜面による波の反射の影響をポテンシャル理論によって考慮する著者らの方法⁵⁾によって求める。

本解析で用いる基礎方程式は次のようである。

$$(\rho + \rho')S \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + gEI \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = \frac{1}{2} \rho C_D D v_w |v_w| + \rho C_M S \frac{\partial v_w}{\partial t} \dots (1)$$

ここに、 ρ : 流体の密度、 ρ' : パイプの平均密度、 S : パイプの断面積、 EI : パイプの剛性、 C_D : 抗力係数、 C_M : 質量係数、 D : パイプの径、 v_w : 水粒子速度、 u : パイプの変位である。ただし、水深が浅いため水粒子の速度が大きく、パイプの変位に比較して卓越していると考えている。また座標系は図-1に示す通りである。

水粒子の速度 v_w は次のように表される。

$$v_w = \left\{ \frac{gkHe^{ikx}}{2\omega \cosh kh} f(z) + \frac{ka_0 e^{-ikx}}{\cosh kh} f^*(z) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n k_n}{\cos k_n h} e^{-k_n x} \sin(k_n(h+z) - \beta) \right\} e^{i\omega t} \dots (2)$$

ここに、 k : 波数、 H : 入射波高、 ω : 入射波の角振動数、 a_n : 複素定数、 k_n : 固有値 ($k_n \tan k_n h = -\omega^2/g$ の実正根)、 $f(z) = i n_x \cosh k(h+z) + n_z \sinh k(h+z)$ 、 $\beta = \tan^{-1}(n_x/n_z)$ 、 $f^*(z)$ は $f(z)$ の共役複素数である。複素定数 a_n の求め方については参考文献[5]を参照されたい。また、 n_x 、 n_z などは図-2に示すように斜面上に立てた単位法線ベクトルの x 、 z 成分である。

式(2)は平均水面上に x 軸をとった (x, z) 座標系で記述されているが、振動方程式を解く場合、パイプに沿った座標系 (x', z') で考えるのが便利なので、座標変換を行って式(2)を (x', z') 座標系で表す。結果は省略するが式(1)の右辺の強制外力項は5個の基本的な外力項の組み合わせで表すことができる。定常振動を考えると基礎方程式(1)はパイプの変位 u に関する非同次線形常微分方程式となるので

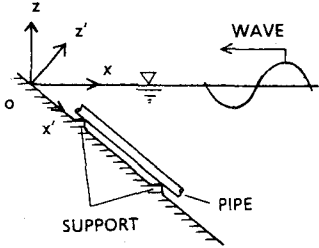


図-1 座標系の定義

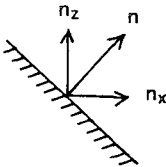


図-2 n_x 、 n_z の定義

後はこれを単純支持の境界条件、すなわち $x'=0$ および $x'=l$ で $u=\partial u/\partial x^2=0$ のもとに解けばよい。この解はかなり複雑になるが、通常の解法に従えば求められるので、ここでは省略する。

3. 数値計算例と考察

ここでは 45° の一様斜面上で単純支持された内径690mm、肉厚30mm、平均密度1.02t/m³、弾性係数8,000Kg/cm²のポリエチレンパイプの振動について検討する。パイプの断面2次モーメントは $4.4049 \times 10^{-3} \text{m}^4$ である。ただし、パイプ中の水は曲げ剛性には寄与しないと考えて求めた。また、パイプの水中振動の固有振動数は次式によって求められる。

$$\omega_n = \left(\frac{gEI}{(\rho + \rho')S} \right)^{1/2} \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \quad (n=1,2,\cdots) \cdots\cdots(3)$$

これを用いて、支間長 $L=10、20、30、40、50、100 \text{ m}$ の各ケースについて固有周期を求めたのが表-1である。

次に支間長 30、50、100 m の場合を例にとり、このパイプの応答特性を調べる。波の周期は5~15秒とし、波高は2mとする。このとき表-1より、支間長 30m の場合は1次モードの共振、50m の場合は2次、100m の場合は3,4次の共振が起こることがわかる。実際に数値計算を行った結果を図-3に示す。これは横軸に周波数、縦軸に応答振幅をとったものである。当然のことながら共振点の付近で大きな応答となっている。このように解析の対象としたポリエチレンパイプの場合、支間長が20m以上になるとパイプが共振することが考えられ注意を要する。ただし本解析では粘性逸散などによる減衰を考慮していないので、特に共振点の付近では過大評価となっている。

それぞれの応答モードの一例を図-4に示す。これらはそれぞれ $L=30、50、100$ の場合で、上から1次、2次、3次、4次のモードを示していることがわかる。なお応答モード図はいずれも縦軸に応答振幅をとり、波の半周期を5分割して各時間位相ごとのモードを示したものである。

4. あとがき

海中の斜面に単純支持されたポリエチレンパイプの波浪外力による強制振動を、斜面による波の反射の影響を考慮して解析的に検討した。この結果、解析の対象としたポリエチレンパイプの場合、支間長が20m以上になると共振するので注意が必要なことがわかった。ただし今回の解析は充分単純化して行ったので、実際の現象とは異なると考えられ、今後さらに実際の現象に近い条件で検討することが必要と思われる。

表-1 パイプの固有周期

$\begin{matrix} n \\ L \end{matrix}$	1	2	3	4	5
10	1.03	0.26	0.11	0.06	0.04
20	4.12	1.03	0.46	0.26	0.16
30	9.28	2.32	1.03	0.58	0.37
40	16.5	4.12	1.83	1.03	0.66
50	25.8	6.44	2.86	1.61	1.03
100	103.1	25.8	11.5	6.44	4.12

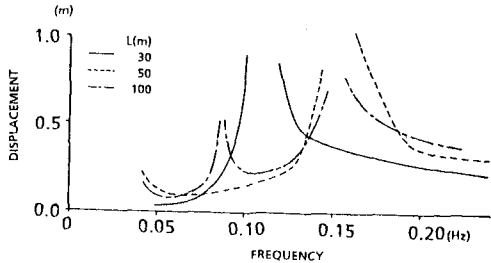


図-3 パイプの応答特性

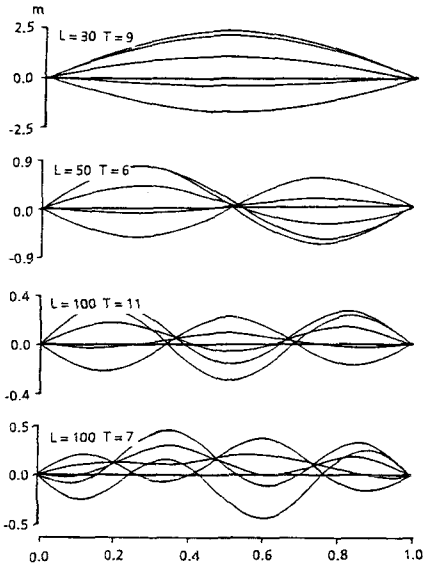


図-4 振動モードの例

参考文献

- 1) 樫木 亨・中村孝幸・三木秀樹：単円柱の波向方向に作用する波力による共振現象について、第31回年講、1976。
- 2) 樫木 亨・中村孝幸・三木秀樹：波動場の円柱後流渦による振動応答の実体とその予測について、第23回海講、1976。
- 3) 勝井秀博・宮崎 修・花村哲也：潮流下におけるパイプの防振対策に関する実験的研究、第22回海講、1975。
- 4) 山本 関田欣治：潮流海域における浮遊式鋼管構造物海底パイプライン等に作用する振動力について、第20回海講、1973。
- 5) 清川哲志・小林 浩：急勾配任意断面斜面による波の反射の厳密解の構成法とその応用、第28回海講、1981。