

係数励振振動の発生による水中係留浮体の応答特性

北海道大学大学院工学研究科	正会員	○佐藤太裕
北海道大学大学院工学研究科	正会員	蟹江俊仁
北海道大学大学院工学研究科	フェロー	三上 隆
北海道大学大学院工学研究科	学生員	小室達明

1. はじめに

本研究で対象とする水中係留浮体とは、重力を上回る浮力を有する浮体を、係留索（テンションレグ）を用いて水中に引き込み安定化させるという、新しい発想にたつ画期的な構造体である。この特徴を最大限に生かせば、大水深のため地下構造物、大規模な基礎構造建設が困難な海域や、厳しい自然条件のために従来あまり利用されていなかった海峡を横断する物流・交通手段として非常に有効であると考えられる。

一方でこのような構造形式は、非常に特殊、複雑で、最悪の場合全体系の崩壊に至るような動的不安定挙動の発生が予想される。その一例として、係留浮体が波浪、地震、交通荷重等により振動し係留索に変動張力が作用した場合に予想される、係留浮体復元力の時間変化に伴う係数励振振動が挙げられる。本研究は波浪など種々の外力作用により励起される水中係留浮体の係数励振振動について、その基本的特性を考察することを目的としている。具体的には、波浪場のような水平、鉛直両方向に外力が作用する状況下における、係数励振振動による応答特性について解析的な検討を行う。

2. 解析モデル

図-1 は本研究で解析対象とする水中係留浮体の断面2次元モデルを示したものである。係留浮体は完全に没水した剛体の中空円筒（半径 r ）とし、長手方向に係留索が連続に配置された状態を想定する。

係留索は、ヤング係数を E 、断面積を A 、長さを l とし、質量は係留浮体のそれに比べ非常に小さいものと考え無視する。係留形式について、(a) Type-1（係留索2本で鉛直係留）、(b) Type-2（4本の斜め係留索で係留）を考えたが、Type-2 は係留索の周期変動張力による係数励振振動が発生しづらい構造形式であること

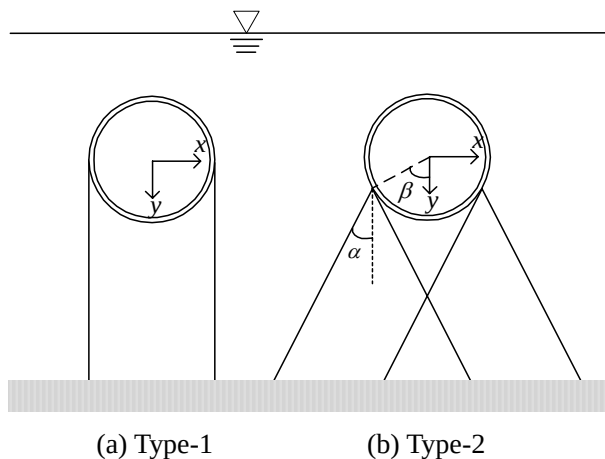


図-1 解析モデル

が著者らの研究で確認されたため、ここでは Type-1 に議論を限定する。

3. 係数励振振動による応答特性

Type-1 は水平方向に非常に柔軟な構造形式であることから、非常に低い外力振動数に対して係数励振振動（1/2 次の分数調波共振）が発生する可能性がある。このため係留索の変動張力は鉛直方向波力で十分近似が可能であると考えられる。これより作用力として水平、鉛直方向に規則波を仮定した場合、支配方程式は次式で表されることとなる。

$$(m_0 + C_A A_l) \frac{d^2 u}{dt^2} + c \frac{du}{dt} + \frac{2\{T_p + 0.5 f_y \cos(\omega t - \psi_y)\}}{l} u + C'_D A_D \left. \frac{du}{dt} \right| \frac{du}{dt} = f_x \cos(\omega t - \psi_x) \quad (1)$$

ここで t は時間、 u は係留浮体重心の水平方向変位、 T_p は係留索の初期張力、 m_0 は浮体質量、 C_A は付加質量係数、 C'_D は静水中で係留浮体が振動する時の抗力係数、 $A_l = \rho \pi r^2$ 、 $A_D = \rho r$ 、 ω は外力の円振動数、 f_x 、 f_y は係留浮体に作用する水平、鉛直方向波力振幅、 ψ_x 、 ψ_y は位相角である。式(1)において

キーワード：水中係留浮体、係数励振振動、係留索、動的安定性

連絡先：〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 TEL 011-706-6176 FAX 011-706-6174

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} \quad (\omega_0 = \sqrt{\frac{B}{(m_0 + m_a)l}}), \quad \tau = \omega_0(t + \frac{\psi_y}{\omega})$$

$$\mu = \frac{T_0}{T_p}, \quad h = \frac{c}{2\omega_0(m_0 + m_a)}, \quad U = \frac{u}{l}, \quad \gamma = \frac{lC'_D A_D}{m_0 + m_a}$$

とすると、式(1)は以下のように無次元化される。

$$\frac{d^2 U}{d\tau^2} + 2h \frac{dU}{d\tau} + \gamma \left| \frac{dU}{d\tau} \right| \frac{dU}{d\tau} + (1 + \mu \cos \Omega \tau) U = F_x \cos(\Omega \tau - \psi) \quad (2)$$

ここでは弱非線形問題の近似解を求めるため、Multiple Scales 法¹⁾を用いた。近似解は以下のように得られる（紙面の都合上導出過程は省略する）。

$$U = c \cos(\tau + \phi) + \frac{F_x}{1 - \Omega^2} \cos(\Omega \tau - \psi) + O(\mu) \quad (3)$$

式(3)において第一近似の定常解は次式より得られる。

$$\frac{1}{4} c \mu \sin 2(\sigma T_1 + \phi) = hc + \frac{\gamma}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left| \frac{dU}{dT_0} \right| \frac{dU}{dT_0} \sin(T_0 + \phi) dT_0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{4} c \mu \cos 2(\sigma T_1 + \phi) = -\mu \sigma^2 + \frac{\gamma}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left| \frac{dU}{dT_0} \right| \frac{dU}{dT_0} \cos(T_0 + \phi) dT_0 \quad (5)$$

図-2は $F_x = 0$ における第一近似解の応答曲線を示したものである。式(3)から式(5)より、 $F_x = 0$ の場合のみ陽な解が得られる。この図より、自乗減衰定数が応答を抑制する影響は非常に大きいといえる。図-3は無次元時間 τ に対する第一近似解の応答（ $\mu = 0.2$, $\gamma = 1.0$ ）、図-4は図-3と同条件における式(2)の解、図-5は $\mu = 0.2$, $\gamma = 1.0$, $h = 0.02$ における式(2)の解を示したものである。図-3と図-4の比較より、定常解は第一近似解でも比較的十分な精度の解が得られることがわかる。またいずれの場合も水平方向外力が小さい場合は周期 2π の係数励振振動が卓越、水平方向外力の増加に伴い周期 π の強制振動が卓越する。このことから完全没水係留浮体であれば、規則波中においては、係数励振振動が抑制される可能性があることが指摘される。

4. おわりに

今後は係留索の動的不安定挙動を含めた応答特性について検討していく予定である。

参考文献

- 1) A.H.Nayfeh, and D.T.Mook : Nonlinear Oscillations, John Wiley & Sons, Inc., 1979.

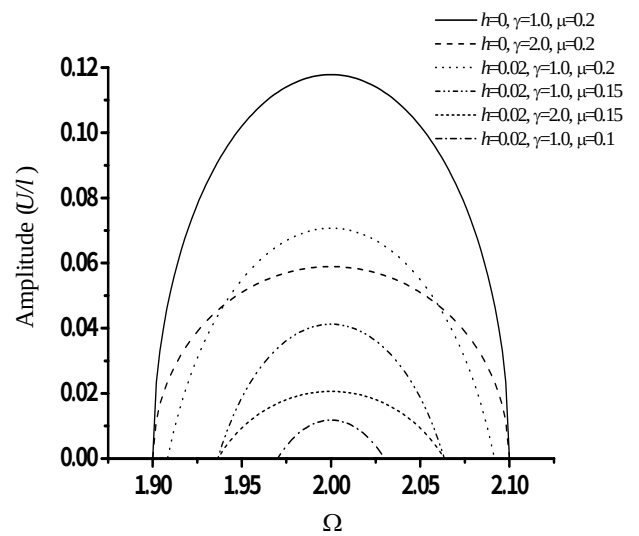


図-2 応答曲線（第一近似解， $F_x = 0$ ）

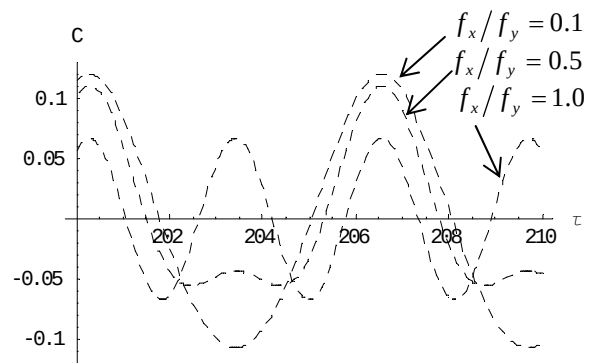


図-3 時刻歴応答（第一近似解， $h = 0$ ）

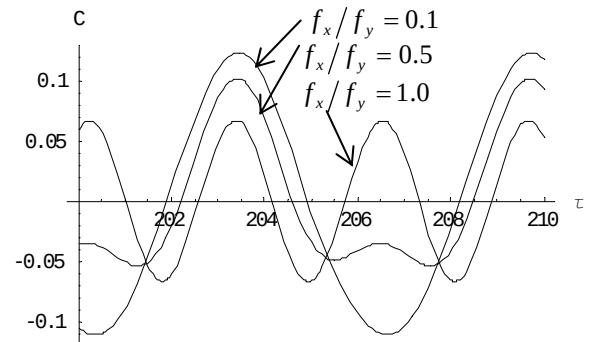


図-4 時刻歴応答（ $h = 0$ ）

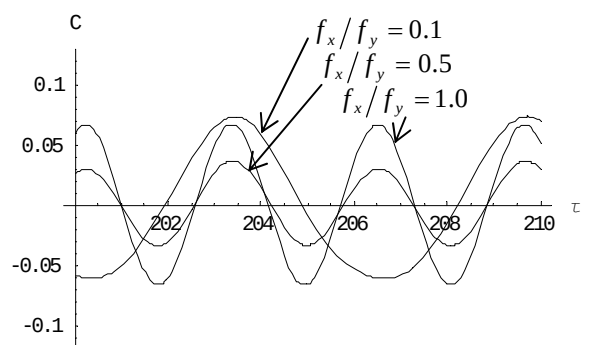


図-5 時刻歴応答（ $h = 0.02$ ）