

上下スライド可能な浮力タワーの 波力応答に関する解析

STUDY ON THE MOTION RESPONSE TO WAVES OF A BUOYANT TOWER CAPABLE TO VERTICALLY SLIDE

関田欣治¹・鈴木智也²・野本由紀夫³・谷口直之⁴

Kinji SEKITA, Tomoya SUZUKI, Yukio NOMOTO and Naoyuki TANIGUTI

¹正会員 工博 東海大学 海洋学部 海洋土木工学科 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3-20-1)

²学生会員 東海大学大学院 海洋学研究科 海洋工学専攻 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3-20-1)

³正会員 (株) 緑星社 龍ヶ崎工場 生産管理部

⁴学生会員 東海大学大学院 海洋学研究科 海洋工学専攻 (〒424-8610 静岡県清水市折戸3-20-1)

An articulated buoyant tower developed more than fifteen years ago for offshore oil and gas development has often been used for marine communication tower in Japan. Owing to a set of universal joints at bottom and a buoyant tank attached to intermediate part of the tower, the tower rotates small against rough waves; however it is affected to the tidal changes, thus the height of a navigation light on the top of the tower from sea surface varies. So we designed the new buoyant tower having a slide beneath the joints, which permits amount of vertical movement so as to keep the height almost constant. Therefore we conducted the time domain analysis for the pitching and heaving motion of the vertical movable tower to the waves, currents and winds. In this study, we intended to make clear the both effect of the nonlinear drag damping which caused by the relative velocity between tower and water particle and the natural periods to the response. The paper describes the nonlinear effects of the damping caused by the wave and current to the response characteristics for the towers installed at the three kinds of water depth, along with the changes of the natural period in accordance with the draft and inclination of the tower.

Key Words : Buoyant tower, dynamic analysis, wave, wind and current, nonlinear wave damping

1. はじめに

石油掘削のために開発された中間部に大きな浮力を有するアーティクレートタワー（以下浮力タワーと呼ぶ）が1980年代に開発され、我国では浮体式灯標として、振れ回りが少ないので、狭い航路に適するなどの理由で、東京湾横断道路や関西と中部国際空港建設工事になどに数多く利用されてきた。この浮力タワーは海底部にチェーンを取付ける方式と、2軸回転自由なユニバーサルジョイント（アーティクレート）を取付ける方式がある。前者の場合、振れ回りが大きくなる欠点があるが潮位変動に対応して、チェーンが長くなり、タワー頂部と水面間の相対高さが変化しにくいというメリットがある。しかしながら、使用するチェーン部が疲労や衰耗（磨耗、腐食）及び衝撃的荷重に対し、長期耐久性や信頼性の点でおとる。一方、後者では振れ回りは小さいものの、大きな潮位変化がある海域ではタワー頂部と水面間の相

対高さが変化し、特に標識ブイとして利用される場合は、航行船舶からの視認性が低下するおそれがある。

そのため、従来型のメリットを損なわず潮位に対応できるスライド機構を海底部上ユニバーサルジョイント下に設けた浮力タワーが考案された。従来型浮力タワーは波浪や風による傾斜によって上部デッキ部がセットダウンを起こす。そのため、波浪による浮力増加により、この上下移動が緩和されないかを含め、数値シミュレーション¹⁾²⁾により潮位対応性や波浪応答性を解明する。

2. 数値シミュレーション法

(1) 新型浮力タワー

新型浮力タワーは図-1に示すように、海底部にスライド機構を有するアーティクレートタワーである。

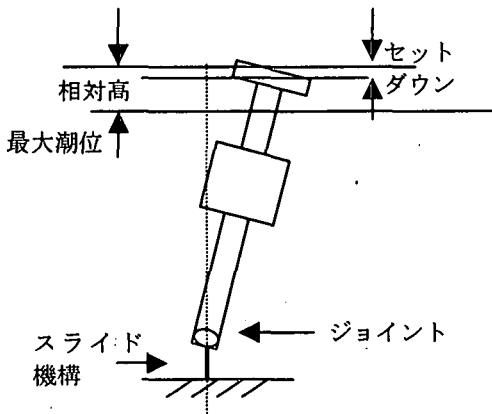


図-1 上下スライド可能な新型浮力タワー

(2) 運動方程式

a) 座標系

波浪や流れや風に対する運動状態での剛体運動を解析する事とする。運動のモデルを図-2に示す。

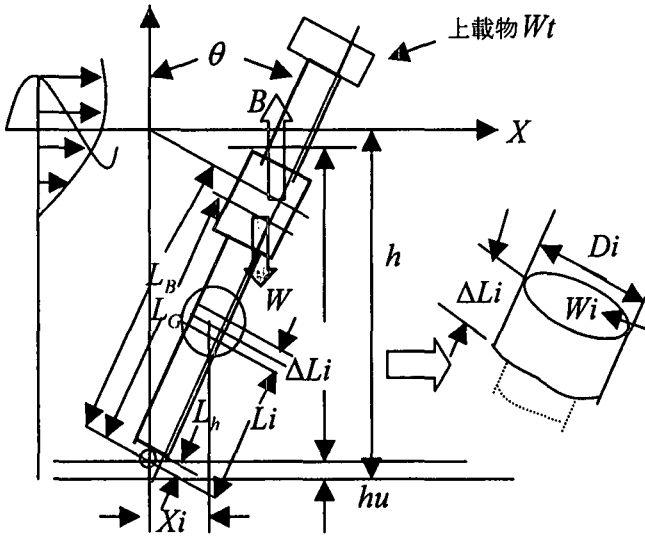


図-2 座標系

ここで、水深 h には実際の平均水深 h_0 に潮位変動 hc を与えたものとして扱う。

つづいて、タワーを長さ ΔLi 、質量（重量） $\rho_i(W_i)$ のいくつかの要素からなるとする。解析モデルでは3つの円筒水中部分について、それぞれ要素分けして、全体モデルを構成することとした。

ここで、 i 要素浮体の X 方向の変位、速度、加速度は傾斜が小さいと近似できるので、以下 θ は微小とする。

b) 慣性モーメントと付加慣性モーメント

タワーの回転を決定するうえで重要な慣性モーメント (I_θ)、水面下の海水の付加質量による付加慣性モーメント ($I_{\theta a}$) を表すと次式で与えられる。

$$I_\theta = \sum_{i=1}^N \frac{W_i}{g} L_i^2 \quad (1)$$

$$I_{\theta a} = \rho_w \sum_{i=1}^n C_{ai} \left(\frac{\pi}{4} D_i^2 \right) \Delta Li L_i^2 \quad (2)$$

である。ここで N は全要素数、 n はタワー傾斜・上下移動状態での水面下の要素数である。また、 W_i は i 要素の付加質量であり上載物も含む。 ρ_w は海水密度である。従って、運動方程式はタワー全体に作用する波力モーメント $Mw(t)$ とすれば、(3) 式で与えられる。第1項が慣性力を表し、2項が復元力であり、右辺はタワーを回転させようとする外力モーメントである。構造減衰項はここでは無視した。

$$(I_\theta + I_{\theta a}) \ddot{\theta} + (BL_B - WL_G) \theta = Mw(t) \quad (3)$$

c) 波力モーメント

要素 i 位置 ($Z_i, X_i = L_i \theta$) での水粒子速度、加速度をそれぞれ、 $U_{wi}(t)$ 、 $\dot{U}_{wi}(t)$ とする。また、相対速度 ($U_{wi}(t) - L_i \dot{\theta}$) を考慮し Morison 式で波力モーメントを算定する。要素 i に作用する波力モーメントを水面下全要素に対し総和すると (4) 式が得られる。

$$I \ddot{\theta} + C(\dot{\theta}) \dot{\theta} + K(\theta) \theta = \overline{Mw}(t) \quad (4)$$

d) 復元力モーメント

復元力は傾斜上下移動状態における水面下の浮力 (B) 浮心 (L_B) を刻々算定し (5) 式で与えられる。

$$K(\theta) = BL_B - WL_G \quad (5)$$

e) 鉛直力

鉛直力は浮力変動と鉛直波力とからなる。前者は波形を考慮し、運動状態での浮力変動を算定する。鉛直波力は中間の拡幅円筒部に作用する抗力と質量力を考慮する。

また、減衰力と慣性力を無視し、力の釣合から上下移動を決定した。

f) 流速分布と流れによる力

流速分布を与え、要素 i における流速を内挿し、その要素に作用する流れによる力から、全体の流れによる荷重を求める。流速分布は水面と中間の水深及び、海底までの流速を与える。これにより、一様流速や任意の流速分布を与えられる。

g) 風荷重

ここではデッキ部に作用する定常風荷重 ($Mwind$) について考慮する。風荷重モーメントは次の式で算定される。

$$Mwind = \rho_a C_{da} A_w L_A u_w^2 \quad (6)$$

ここで、 A_w : デッキ部含めた重圧面積、 C_{da} : 抗力係数、 L_A : 作用中心までの距離、 u_w : 風速である。

i) 波力算定

波力は微小振幅波として水粒子速度、加速度を算定して求めるが、振幅の有限性については水面での流速 (u_{wo}) を波峰までストレッチング³⁾して取り扱う。即ち、位相によって波力作用上限は峰から谷まで

と変化する.したがって、(4)式右边に対応して、傾斜状態での抗力と質量力によるモーメント $(\overline{M_D(\theta)}, \overline{M_M(\theta)})$ を得る.

(3) 時刻応答解析

はじめに運動方程式を時間 t_{n+1} において示すと、次式の非線型微分方程式で与えられる.

$$I\ddot{\theta}_{n+1} + C(\dot{\theta}_{n+1})\dot{\theta}_{n+1} + K(\theta_{n+1})\theta_{n+1} = \overline{M_D(\theta_{n+1})} + \overline{M_M(\theta_{n+1})} \tag{7}$$

ただし、

$$C(\dot{\theta}_{n+1}) = \sum \overline{F_D L_i} |u_{mi} - L_i \dot{\theta}_{n+1}| \tag{8}$$

ただし、 $\overline{F_D}$ は抗力に相当する係数である.

ここで、式 (7) の解法にNewmarkのβ法⁴⁾を適用すると、次式の関係を導入する.

$$\dot{\theta}_{n+1} = \dot{\theta}_n + (1-\gamma)\ddot{\theta}_n\Delta t + \gamma\ddot{\theta}_{n+1}\Delta t \tag{9}$$

$$\theta_{n+1} = \theta_n + \dot{\theta}_n\Delta t + (\frac{1}{2}-\beta)\ddot{\theta}_n\Delta t^2 + \beta\ddot{\theta}_{n+1}\Delta t^2 \tag{10}$$

式(9)、(10)で外力項と復元項は一つ前の時間 t_n の値を使う.そして式(9)、(10)を式(7)に代入すると $\ddot{\theta}_{n+1}$ を未知数とする次式が求まる.

$$\begin{aligned} & (I + K(\theta_{n+1})\beta\Delta t^2 + C(\dot{\theta}_{n+1})\gamma\Delta t)\ddot{\theta}_{n+1} \\ & = \overline{M_D(\theta_n)} + \overline{M_M(\theta_n)} \\ & + K(\theta_n + \dot{\theta}_n\Delta t + (\frac{1}{2}-\beta)\ddot{\theta}_n\Delta t^2) \end{aligned} \tag{11}$$

ここで、 $\ddot{\theta}_{n+1}$ を求めれば、よいのだが、実際は $\dot{\theta}_{n+1}, \theta_{n+1}$ 等が得られていないので、繰り返し計算で答えを求めることになる.

3. モデル諸元と数値解析条件

(1) モデル諸元

ここでは3種類のタワーの解析を行うので、各部位の値、及び、波力係数等の諸元を次の表に示す.また、この表で使われている値は、L h：海底からジョイント中心までの高さ、L 1：タワー下部長さ、L 2：タワーブイ長さ、L 3：タワー上部長さ、L 4：デッキの長さ、D 1：タワー下部直径、D 2：タワーブイ直径、D 3：タワー上部直径、h u：ジョイント中心からタワー下部までの長さである.

小型モデルは高潮位の水深が16.8m、中型モデルは19.6m、大型モデルは38.4mにそれぞれ設置されることを想定する. 中型モデルはタワーブイ部の軽量化を図ったため、他の小型タワーと大型タワーに比べて相対的に重量が小さい. ジョイント中心からタワー下部までの長さh uは、小型タワー、中型タワー、大型タワーの順に大きくなる.

表-1 小型タワーの各部位の値と各係数値

L h (m)	0.45	タワー下部抗力係数 $C_{D1}(-)$	0.8
L 1 (m)	7.70	タワーブイ抗力係数 $C_{D2}(-)$	0.8
L 2 (m)	2.83	タワー上部抗力係数 $C_{D3}(-)$	0.8
L 3 (m)	8.40	タワー下部質量力係数 $C_{M1}(-)$	1.5
L 4 (m)	1.40	タワーブイ質量力係数 $C_{M2}(-)$	2.0
D 1 (m)	0.61	タワー上部質量力係数 $C_{M3}(-)$	1.5
D 2 (m)	2.14	タワー下部重量 $\rho 1(kg)$	1041.3
D 3 (m)	0.61	タワーブイ重量 $\rho 2(kg)$	3053.0
h u (m)	1.40	タワー上部重量 $\rho 3(kg)$	1136.0
HWL (m)	16.80	デッキ重量 $\rho_t(kg)$	350.0
LWL (m)	15.20		

表-2 中型タワーの各部位の値と各係数値

L h (m)	0.45	タワー下部抗力係数 $C_{D1}(-)$	0.8
L 1 (m)	11.50	タワーブイ抗力係数 $C_{D2}(-)$	0.8
L 2 (m)	2.93	タワー上部抗力係数 $C_{D3}(-)$	0.8
L 3 (m)	6.90	タワー下部質量力係数 $C_{M1}(-)$	1.5
L 4 (m)	1.80	タワーブイ質量力係数 $C_{M2}(-)$	2.0
D 1 (m)	0.61	タワー上部質量力係数 $C_{M3}(-)$	1.5
D 2 (m)	2.44	タワー下部重量 $\rho 1(kg)$	1555.2
D 3 (m)	0.61	タワーブイ重量 $\rho 2(kg)$	396.4
h u (m)	1.40	タワー上部重量 $\rho 3(kg)$	933.1
HWL (m)	19.60	デッキ重量 $\rho_t(kg)$	470.0
LWL (m)	18.10		

表-3 大型タワーの各部位の値と各係数値

L h (m)	0.75	タワー下部抗力係数 $C_{D1}(-)$	0.8
L 1 (m)	27.40	タワーブイ抗力係数 $C_{D2}(-)$	0.8
L 2 (m)	3.10	タワー上部抗力係数 $C_{D3}(-)$	0.8
L 3 (m)	6.80	タワー下部質量力係数 $C_{M1}(-)$	1.5
L 4 (m)	1.80	タワーブイ質量力係数 $C_{M2}(-)$	2.0
D 1 (m)	0.81	タワー上部質量力係数 $C_{M3}(-)$	1.5
D 2 (m)	2.84	タワー下部重量 $\rho 1(kg)$	6973.3
D 3 (m)	0.81	タワーブイ重量 $\rho 2(kg)$	6584.0
h u (m)	2.75	タワー上部重量 $\rho 3(kg)$	1372.0
HWL (m)	38.38	デッキ重量 $\rho_t(kg)$	470.0
LWL (m)	36.30		

(2) 解析ケース

小型タワーモデル、中型タワーモデル、大型タワーモデルについて解析を行い、はじめに、最大傾斜角 θ (max)、最小傾斜角 θ (min)、ピッチ振幅 θ_p 、固有周期 $T_n(s)$ 、ヒービング $H_{ev}(m)$ 、静水面からタワー最上部までの相対高さ $Z_{rs}(m)$ 、波峰からタワー最上部までの相対高さ $Z_{rw}(m)$ を調べる.解析は一定の規則波高2mにおいて、周期を4s～14

sと変化させる。また水深は、高潮位(H.W.L),低潮位(L.W.L)の、2パターンを解析する。

a) 小型タワー

特に小型タワーでは、上下運動可能なスライド機構がある場合の移動可能高さYU(m),YL(m)を与え、それによるタワー最上部までの相対高さの変化を調べ、また許容する上下移動がピッチ運動に及ぼす影響を調べることを目的にする。許容すべき上下移動の上限および下限の値を次の表に示す。

表-4 移動可能高さ

	I	II	III
上限移動可能高さYU(m)	0.0	1.0	2.0
下限移動可能高さYL(m)	0.0	-0.25	-0.5

b) 中型タワー

一方、中型タワーでは、潮の流れ(流速)のパターンを変える事で、タワーと流れとの相対運動に伴う抗力が非線形減衰として作用することから、その大小によりピッチ応答がどのように変化するかを解析する。解析の条件を以下の表に表す。

表-5 流速パターンの変化

水深	流速パターン I	流速パターン II	流速パターン III
0.0(m)	1.20(m/s)	1.00(m/s)	0.70(m/s)
-5.0(m)	0.60(m/s)	0.50(m/s)	0.35(m/s)
-10.0(m)	0.00(m/s)	0.00(m/s)	0.00(m/s)

c) 大型タワー

大型タワーでは、潮の流れ(流速)、風(風速)が共存するときを考慮し、その有無による変化と波高非線形性を調べることを目的に解析する。これらの条件を以下に示す。

表-6 流速パターンの変化

波高(m)	周期(s)	流速(m/s)	風速(m/s)
2.0	4~14	0	0
2.0	4~14	1.2	0
2.0	4~14	0	5
2.0	4~14	1.2	5
0.5~2.0	8	0	0
0.5~2.0	8	1.2	0
0.5~2.0	8	0	5
0.5~2.0	8	1.2	5

4. 解析結果及び考察

(1) 初期条件の影響

解析は時間刻み幅(Δt)を0.2sとした場合のタワーの傾斜についての時刻歴応答であり、図-3に中型タワーの0~400s、図-4に20sまでの種々の周期に対する初期応答の解析結果を示す。

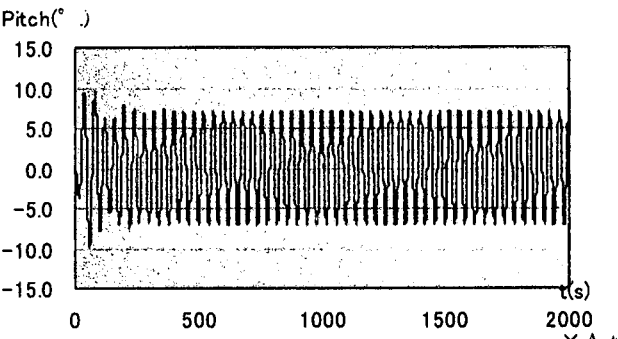


図-3 ピッチ応答時刻歴(中型タワー：0~400s)

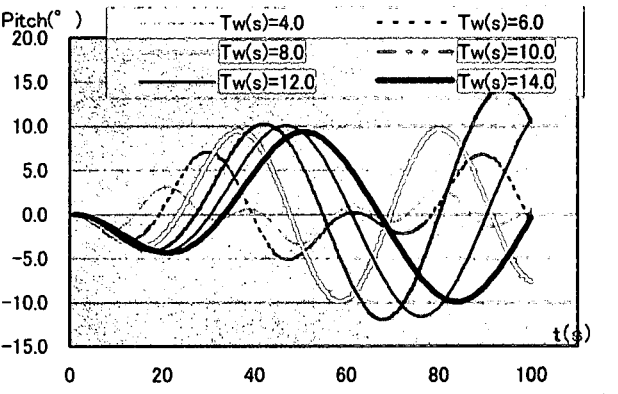


図-4 初期応答時刻歴(中型タワー：0~20s)

図-3はユニバーサルジョイントが設けられていない浮力タワーで風速が無く流速パターンIIの波浪応答図である。この図から波高2.0m,周期4.0sの時の初期条件の影響を受けて、最初はピッチの揺れ幅が大きいことが判る。しかし、いったん揺れ始めると一定の揺れ幅に収まることが判る。特に、8秒の場合は図-4から判るようにすぐ定常状態になる。これは、(8)式のように抗力減衰が大きいためといえる。また、当然のことであるが波の周期で揺れている強制振動であることも判る。

(2) 固有周期

小型、中型、大型のタワーの自由に上下動を拘束した場合の固有周期を下の表に示す。

中型モデルは中間部を軽量化したため、他に比較し固有周期は短い。

表-7 各タワーの固有周期

モデル		水深(m)	固有周期(s)
大型	H.W.L	38.4	18.7
	L.W.L	36.3	19.3
中型	H.W.L	19.6	9.0
	L.W.L	18.1	8.8
小型	H.W.L	16.8	12.3
	L.W.L	15.2	12.9

a) タワーの上下移動と傾斜が固有周期に及ぼす影響

ここで、小型タワーに関しては上下移動を許容し

ていることから、上下へ移動する。また、同時に風や流れによる定常過重でタワーが傾斜する。従って、ここでは表-4のように上方に0m、1m、2m、中型タワーが移動し、同時に0度から20度まで2度毎に傾斜する場合、復元モーメントと付加慣性を算定し、タワーの静的傾斜角に対し固有周期がどの様に変化するかを調べた。この結果を図-5に示す。

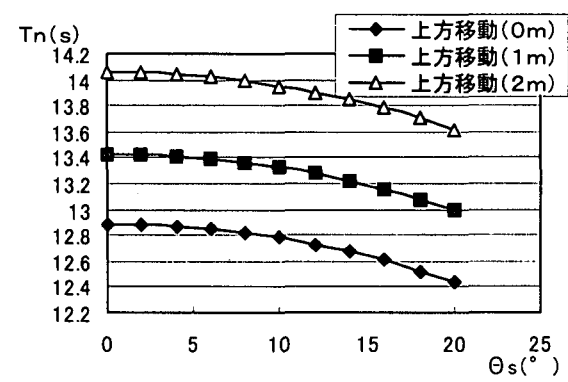


図-5 固有周期と静的傾斜角の関係

b) 主な結果

固有周期については以下のように言える。
・移動量が一定であれば静的傾斜が増すごとにピッチに関する固有周期はタワーが約20度傾斜する場合4%減少する程度であり、小傾斜に対しては若干減少または一定と言っても良い程度である。このことからタワーが傾斜することによって、タワー海水中部分は増加し付加慣性も増えるが、復元モーメントの増加の方が大きいのでその結果固有周期が減少すると言える。
・1m程度の上方向移動により、固有周期は約4～5%変化する。これは傾斜よりも大きい。したがって、タワーが上方に移動し海水中部分が減少し、その結果付加慣性はやや減るものの、復元モーメントの減少の方が大きいので固有周期が長くなると言える。

(3) タワーの応答解析結果

a) 上下スライド量が最大傾斜に及ぼす影響

最初に、小型タワーに関する最大傾斜角応答：θ (max)/H/mと周期の関係を、それぞれスライド量：0m、1m、2m、の場合を図-6に示す。なお、θは波の進入方向に倒れる場合を正としている。最大傾斜角応答は、固有周期が増加するほど大きくなり、周期1.4s程度で最も大きくなる。

上下スライド可能高さによる影響については、0mと1mでは、ほぼ類似の応答曲線となり、2m許容時の、応答が一番小さいといえる。この理由は図-5に示したように傾斜が大きくなると固有周期が短くなるためと思われる。

b) 相対上下動

次に、小型タワーの上下移動可能高さ2mの時の、静水面との相対高さZrs、波面との相対高さZrwの関係を図-7に示すが、どちらも周期が変わってもほぼ一定である。

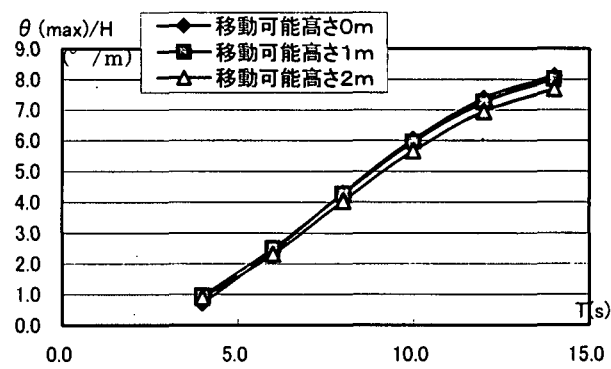


図-6 小型タワーの周期と θ (max)/Hの関係

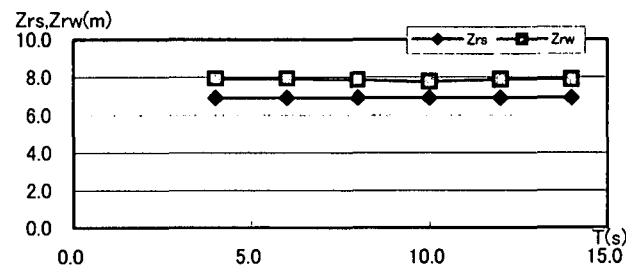


図-7 小型タワーの移動可能高さ2mの時の周期と Zrs, Zrwの関係

c) ピッチ応答に及ぼす潮流の影響

潮流が有無の状態でのピッチ振幅図を図-8に示す。

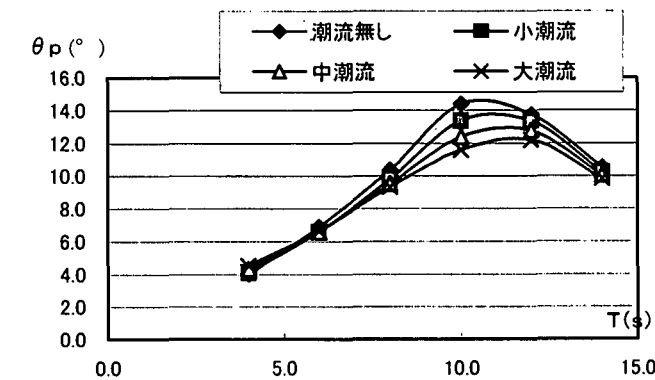


図-8 中型タワーのピッチ振幅と周期の関係

この結果、固有周期より若干長い10秒近傍で応答値が最大となることが判る。また、潮流がある場合には応答は低下する。これは、潮位によって若干異なり、高潮位になるほど応答は小さくなる傾向が見られる。潮流が大きくなるほどこの傾向が大きい。これは前述の(8)式で示したように相対運動による抗力減衰の影響が現れているからである。

d) 風・流れ定常荷重によるピッチ最大傾斜角の影響

高潮位下での大型タワーのθ (max)/Hと周期の関係を、図-9に示す。ここには、波高2mにおける定常荷重（無、流れのみ、風のみ、流れ風あり）の作用の影響による最大傾斜角応答を示している。

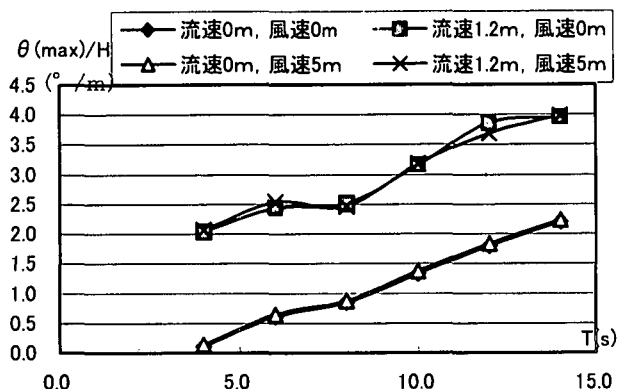


図-9 大型タワーの $\theta(\max)/H$ と周期の関係

風速5m/s単独では応答にほとんど影響しない。しかしながら、流速1.2m/sがあるとその分相対的に大きくなっている。

e) 波高と傾斜角の関係について

周期8s, 流速1.2m/s, 風速0m/sでの最大と最小傾斜と波高との関係を図-10に示す。

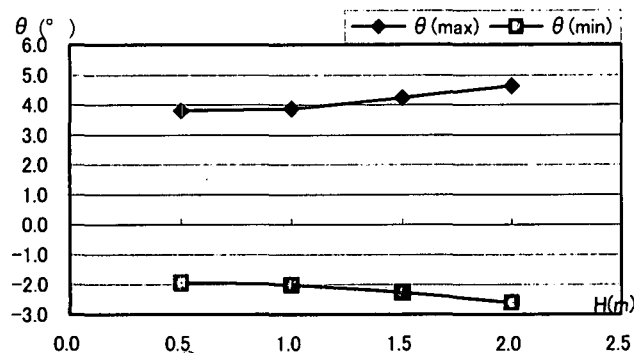


図-10 大型タワーの流速1.2m風速0mの時の波高と最大・最小傾斜角の関係

周期が固有周期と離れているので、図から非線形性の傾向が認められるものの大きくなりほぼ線形とみなせる。

5. まとめ

2軸回転自由なユニバーサル（アーティクレート）ジョイントを取付ける浮力タワーは潮位変動に対応して、風や波浪の作用時タワー頂部と水面間の相対高さが変化するというデメリットがあるといわれ、特に標識ブイとして利用される場合は、航行船舶からの視認性が低下するといわれてきた。そのため、従来型の浮力タワーのメリットを損なわず潮位に対応できるスライド部を海底部上ユニバー

サルジョイント下に設けた浮力タワーに関し波浪応答解析を行った。すなわち、波浪や風、流れによる傾斜によって、どの程度傾斜が生じるか。また、上部デッキ部がどの程度のセットダウンにとどまるか即ち、水面とデッキ頭部との相対高さを解析する数値シミュレーション法を開発し、風・潮位や波浪など様々な外的環境条件に対し検討した。

その結果、以下の結論が得られた。

(1) 有限剛体変形を考慮し、流れや波浪水粒子速度と部材速度の相対速度に基づく抗力、すなわち減衰非線形をとりいれたNewmark β 法による時刻歴解析法によって流速の効果、風速の効果等有意な結果が得られた。

(2) 実際に設計された各種大型および小型のタワーをモデルに数値シミュレーション法を実施したところ、固有周期に依存するが、どのモデルも類似の応答結果を示した。特に傾斜量やスライド量に対して固有周期が変化するという点から応答解析結果が説明できた。

(3) 潮位に対応するスライド機構のあることにより、水面とデッキと頭部との相対高さはほぼ一定が保たれ、最大傾斜角もそれほど大きくならないことが判明した。

しかしながら、解析では(1) 水平方向付加質量係数や抗力係数を従来から実験的に得られた円柱部材のものを用いていることや、(2) 鉛直波力を計算する場合の断面変化部での抗力係数を板材のものとまた付加質量係数を球のものと同じと仮定し(3) さらに微小振幅は理論で有限振幅性を考慮するため、ストレッチ理論を用いたり、幾つかの仮定を置いて応答解析を行っている。したがって、実際にこれで良いのかという、模型実験や現場実験による検証が必要であると思われる。

参考文献

- 1) N.D.P. Barltop : Dynamics of fixed Marine Structures, Third ed, Butterworth Heinemann, pp. 306-327, 1991.
- 2) K. Sekita : Model test on Guyed Towers the Focus on their Nonlinear Characteristics, Proc. of the 5th international OFFshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Vol. III, ASME, pp. 186-193, 1986.
- 3) API RP 2A-LRFD: Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms, pp. 29-30, 1993.
- 4) 河島佑男：動的応答解析，日本鋼構造協会編，pp. 46-57, 1972.