

浮体式低層取水施設の波浪動揺の低減法に関する研究

中村孝幸*・金 度三**・平岡順次***
泉 雄士****・浅井威人*****

臨海発電所において、取水口の沖合に設ける低層取水施設は、従来、カーテンウォール構造が主である。しかし、剛構造であることから、建設コストが高くなる場合が多い。本研究は、低コストの低層取水施設の開発を目指すもので、その一つとして、浮体式構造の施設の可能性と問題点について検討した。その結果、最も単純な深吃水矩形断面浮体では、対象波の範囲内で鉛直動揺の共振が生じやすいなど問題のあることや、その対策として堤体下部に水平版を設けると共に浮体側の係留位置を堤体上部にすると鉛直動揺は効果的に低減され、サブハーモニック成分の回転動揺量も小さくなるなど、浮体式低層取水施設として許容できることが判明した。

1. はじめに

臨海発電所において深層からの低温な冷却水を取水するための低層取水施設は、従来、大中・関本ら (1990) により紹介されているように、PC 遮水版を鋼管杭で支持し、下端に開口部を設けるカーテンウォール構造が主である。しかしながら、カーテンウォール構造はコンクリート部材や杭で構成される剛構造であることから、一般的に建設コストが高くなる場合が多い。また、固定式構造では、取水施設としての機能に加えて、本来目的としていない波浪制御効果も付随するため、作用波力も大きくなりやすく、さらに施設が大型化する傾向にある。

本研究では、建設コスト縮減を可能にする低波力型低層取水施設の開発を目指すもので、波浪の作用により遮水版が動揺することを許容する浮体形式の低層取水施設の可能性と問題点について検討する。このとき、構造体は①現地の水深条件 (低潮時 15 m 程度) と低層取水の条件 (電力土木技術協会, 1995) を勘案して、浮体底部と海底との間の通水部高さを適切に維持できること (低潮時 4 m 程度)、②経済的な建設を可能にすることを考慮し、浮体幅 3~4 m 程度、吃水 11 m 程度、乾舷高さを含む全高 12 m 程度の細長い深吃水構造を想定した。このとき、要求される性能としては、①低層取水が行われる通常波浪の作用時に浮体式施設の動揺量が比較的小さいこと、②異常時波浪に対して、浮体式施設の底部が海底と衝突しないこと。また、③浮体を支持する係留ラインの切断等が生じないことなどである。

2. 実験装置および実験方法

(1) 実験装置

実験には長さ 28 m、幅 1 m、高さ 1.25 m の 2 次元造波水槽を用いた。

- * 正会員 工博 愛媛大学工学部環境建設工学科
- ** 工博 韓国海洋大学校土木環境工学科
- *** 正会員 工修 中国電力(株)土木部
- **** 正会員 工修 五洋建設(株)中国支店土木部
- ***** 学生会員 愛媛大学大学院理工学研究科環境建設工学専攻

波高計は入射波測定用に 1 台、反射波測定用に 2 台、透過波測定用に 1 台を使用した。動揺量の測定には高速・高精度画像処理システムを用いた。

係留ラインの張力の測定は鉄製のリングゲージ式張力計を用いた。この張力計を浮体側の係留点に取り付け、係留ラインの上端の張力が測定できるようにした。

(2) 模型浮体

実験に用いた模型は、現地量の 1/20 の縮尺に相当する。実験で検討した各種の模型堤体を図-1 に示す。表-1 にはこれら各浮体の模型諸量を示す。このとき模型堤体長は水槽幅とほぼ等しい 98.0 cm とした。

(3) 係留ライン

浮体の係留は、それによる復元力モーメントの方向が逆になる堤体下端係留と上端係留の 2 種類を用いた。これらの設置状況を図-2, 3 に示す。係留ラインには、市販のチェーンを用い、図中に示すように左右のラインが交差するクロス係留とした。現地では、左右に広がるオープン係留であるが、水槽幅による制約のためこのようにした。係留点は、矩形浮体、二重水平版付浮体、T 型浮

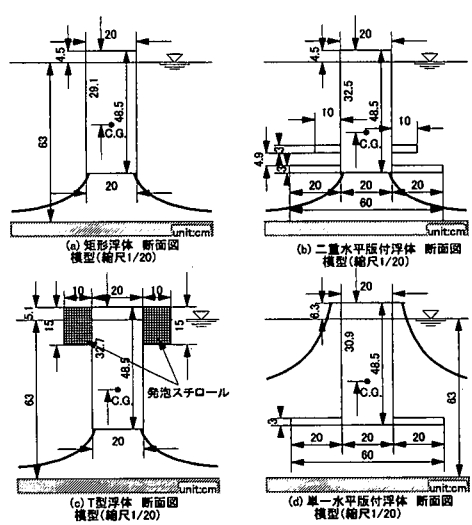


図-1 模型堤体断面 (縮尺 1/20)

表一 浮体の諸量, 模型 (縮尺 1/20)

	矩形浮体	二重水平版付浮体	単一水平版付浮体	T型浮体
固有振動周期 T_n (s)	Heave 1.55 Roll 2.50	2.90 4.10	2.92 3.20	1.20 1.40
重心位置 (浮体上部より) (cm)	29.1	32.5	32.8	32.7
重量 W (N)	847.7	1054.5	1006.5	1006.5
長さ l_0 (cm)	98.0	98.0	98.0	98.0
水面幅 B (cm)	20.0	20.0	20.0	20.0
下部水平版第一版長 (cm)	—	10.0	—	—
下部水平版第二版長 (cm)	—	20.0	20.0	—
上部浮体水平長 (cm)	—	—	—	10.0
上部浮体鉛直長 (cm)	—	—	—	15.0
高さ h_0 (cm)	48.5	48.5	48.5	48.5
乾舷 (cm)	4.5	4.5	2.1	5.1
吃水 d (cm)	44.0	44.0	46.4	43.4
傾心高さ (Gより) (cm)	3.2	4.1	6.6	9.5

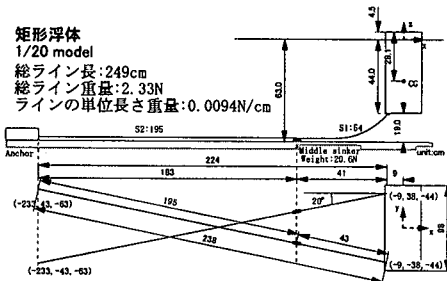


図-2 下端係留状況

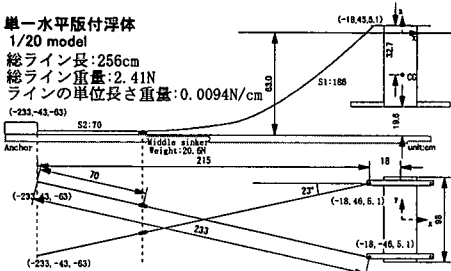


図-3 上端係留状況

体については堤体下端, 単一水平版付浮体については, 堤体上端とした。また, ラインの反力特性を強化する目的から中間シンカーを設置した。

(4) 実験条件

入射波は, 事前検討のため規則波とし, 設定波が有義波高 $H_{1/3}=2\text{ m}$ 程度であることから模型波高 H を 10 cm (2 m), 15 cm (3 m), 20 cm (4 m) の 3 種類とし, 有義波周期 $T=6.5\text{ s}$ 程度であることから, 周期 T は, 0.89~2.6 s (4~11.6 s) の範囲の 13 種類とした (上記 () の量はすべて現地量)。このとき, 水深 h は現地の低潮位 12.6 m を 1/20 に縮尺した 63 cm に固定した。

3. 基本型浮体 (矩形浮体)

まず最初に基本型となる矩形浮体について波浪動揺変位を検討した。変位は, 浮体重心位置の水平変位 X_1 (sway), 鉛直変位 X_2 (heave), 回転変位 X_3 (Roll) に着目した。このとき, 振動方向に定常変位を生じながら振動する時間波形になることから, 正負ピーク変位 X_{pi} , X_{mi} ($i=1\sim3$) をそれぞれ検出し, それらの差 $X_{pi}-X_{mi}$ を両振幅 X_{vi} として定義した。

図-4 は, 矩形浮体の動揺変位の両振幅 X_{vi} を入射波高 H で無次元化した量の現地波周期による変化を示す。図中の (a), (b) は, それぞれ heave, roll の結果を示す。なお, roll については浮体高さ h_0 を乗じて一旦長さの次元量に変換して無次元化してある。図中には, 比較のため理論算定結果についても示す。このとき, 理論解析法には, 渦流れの発生等によるエネルギー逸散が近似的に考慮できる減衰波理論 (中村ら 1997) を用いた。ここで線形抵抗係数 f_c は, やはり著者ら (1997) の過去の研究に準じて $f_c=0.1$ とした。そして, 係留ラインによる復元力の算定には, 静的なカタナリー理論を仮定して求めた。

図-4(a) から, 対象波の範囲内に, heave 共振点があることや, 実験でも heave 動揺量の両振幅が波高以上になる場合もあることなどが認められ, 取水施設と水底との衝突が懸念される。ただし, 実験では高波高の条件ほど無次元変位量は低下する傾向にある。これは高波高になると堤体上面を越波するようになり, 鉛直方向の復元力が低下するようになるためと考えられる。また, 図-4

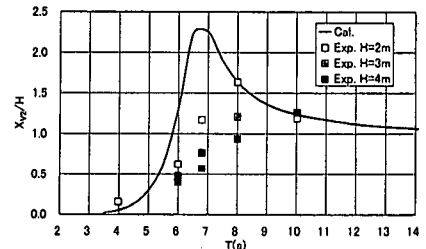


図-4(a) 矩形浮体 無次元鉛直動揺量 (両振幅/入射波高)

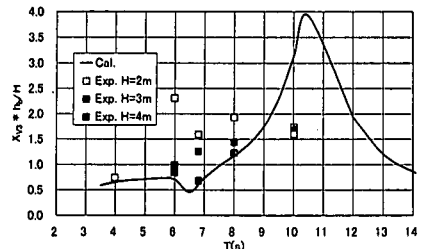


図-4(b) 矩形浮体 無次元回転動揺量
(回転角両振幅 * 堤体高さ / 入射波高, 堤体高さ $h_0=9.7\text{ m}$)

(b) より回転動揺量も比較的大きく、その共振周期も対象波の範囲に近いことから何らかの対策が必要と判断される。なお、波周期 $T=6$ s 付近で roll 変位が増大する傾向が一部見られるが、これは後述するサブハーモニック振動によるものであることを確認している。

4. 動揺低減法

(1) 低減法に関する理論的検討

矩形浮体の動揺低減法としては、鉛直・回転方向の付加質量・付加慣性モーメントを増大させて、動揺共振点を長周期側に移行させることを考えた。このような目的のため、図-1(b)・(d) に示す二重水平版付浮体および単一水平版付浮体を採用してみた。

図-5(a), (b) は、これら水平版付浮体および基本型浮体の heave, roll の理論算定結果を示す。図中に見られるように、heave, roll の共振周期は、二重水平版付浮体および単一水平版付浮体ともに対象波の範囲より長周期側に移行するなど対策法として有効と推定される。

(2) 二重水平版付浮体に対する実験的な検討

鉛直動揺の低減に効果があると考えられる二重水平版付浮体について実験により効果を検討した。図-6(a), (b) は、二重水平版付浮体の heave, roll 変位の実験結果を示す。Heave 変位は、特定の条件を除けば有意に低減されることがわかる。一方、roll 変位は、逆に増加するなど、理論算定結果とは大きく異なる傾向を示す。

図-7 は、roll 変位の算定結果と実験結果の差が最も大きな $T=10$ s の条件下での各動揺変位の時間波形の

代表例を示す。この図から roll 変位は、他のモード変位と異なり、作用波の周期のほぼ 2 倍で振動していることがわかる。そして、roll 変位の算定結果と実験結果の差は、線形理論に基づく動揺算定では予測できない作用波の周波数のほぼ 1/2 の周波数(サブハーモニック)成分が比較的大きな量で現れるためであると考えられる。

図-8 は、サブハーモニック成分の卓越しやすい roll 変位を対象にして調和解析を行い、波の基本周波数 f_F とその 1/2 周波数 f_S の振幅 θ_F, θ_S の波条件による変化を示す。このとき、横軸には波の基本周波数 f_F と roll 共振周波数 f_R の比をとり、roll 共振との関係が検討できるようにした。なお、roll 変位の各成分振幅は、前出の回転変位と同様に h_0 を乗じて長さの次元量とし、この場合振幅であることから半波高で無次元化した。この図から、roll 変位には、 θ_S が卓越して含まれることやその度合いは

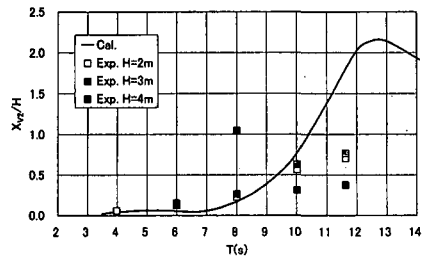


図-6(a) 二重水平版付浮体 下部係留 無次元鉛直動揺量(両振幅/入射波高)

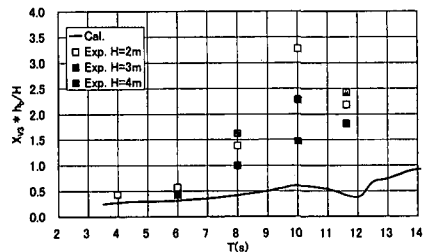


図-6(b) 二重水平版付浮体 下部係留 無次元回転動揺量(回転角両振幅*堤体高さ/入射波高, 堤体高さ $h_0=9.7$ m)

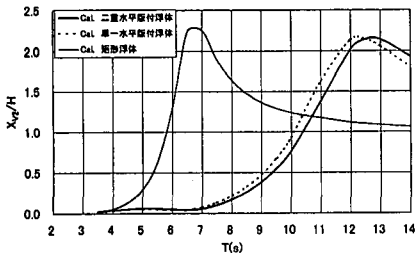


図-5(a) 各形状の無次元鉛直動揺量(両振幅/入射波高)

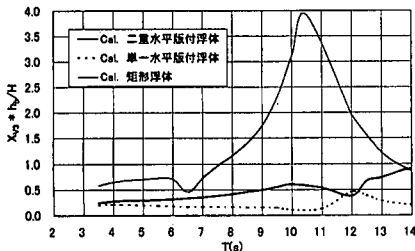


図-5(b) 各形状の無次元回転動揺量(回転角両振幅*浮体高さ/入射波高, 浮体高さ $h_0=9.7$ m)

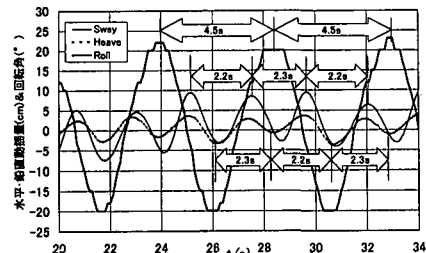


図-7 二重水平版付浮体 各動揺の時間波形 ($T=2.24$ s, $H=10$ cm, 現地換算波 $T=10$ s, $H=20$ m)

$f_F/f_N=2$ 付近で増大することなどがわかる。

この原因は、係留ラインが緊張状態になり、衝撃的なライン張力が生じ浮体が大きな力を受け、一時的に自由振動状態になることが考えられる。緊張状態は、作用波の周期に追従して生じることは少なく、2～3波の作用

毎に生じやすいことから、緊張係留力による自由振動状態が間欠的に発生して、大きな変位に増幅されるものと推定される。その他に考えられる原因は、重心と傾心間の距離 GK が小さいため回転方向の復元力モーメントが小さく不安定になりやすいことも考えられる。

(3) T 型浮体に対する検討

回転動揺のサブハーモニック成分の出現条件を知るため、二重水平版付浮体に比較して静水力学的な復元力モーメントの大きな T 型浮体を対象にして動揺変位を検討してみた。T 型浮体は、図-1(c) に示すように矩形浮体の側面に浮力体を取り付けてあり、表-1 に示すように傾心高さは、二重水平版付浮体に比較して 3 倍程度大きい。

図-9 は、T 型浮体の heave, roll 変位を示す。また、図-10 は、このときの roll 変位に含まれる θ_F , θ_S の大きさを示す。これらの図から、T 型浮体では、roll 変位にお

図-8 二重水平版付浮体における θ_F と θ_S
($f_{Nm}=0.24$ Hz, 現地換算 $f_{Nb}=0.055$ Hz, 浮体高さ $h_b=9.7$ m)

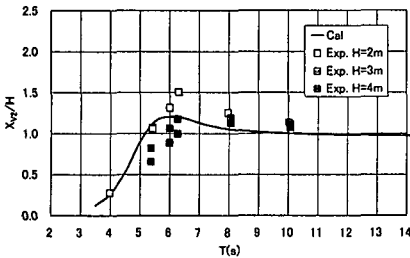


図-9(a) T 型浮体 無次元鉛直動揺量 (両振幅/入射波高)

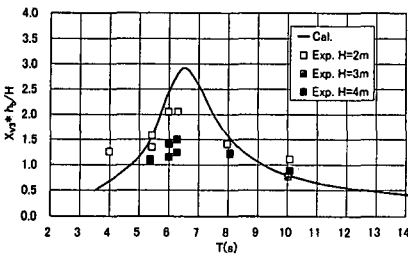


図-9(b) T 型浮体 無次元回転動揺量
(回転角両振幅 * 堤体高さ / 入射波高, 堤体高さ $h_b=9.7$ m)

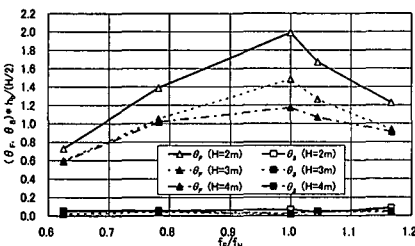


図-10 T 型浮体における θ_F と θ_S
($f_{Nm}=0.714$ Hz, 現地換算 $f_{Nb}=0.160$ Hz, 浮体高さ $h_b=9.7$ m)

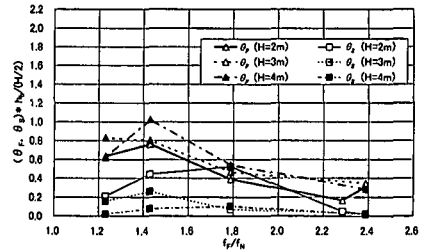


図-11 単一水平版付浮体における θ_F と θ_S
($f_{Nm}=0.313$ Hz, 現地換算 $f_{Nb}=0.070$ Hz, 浮体高さ $h_b=9.7$ m)

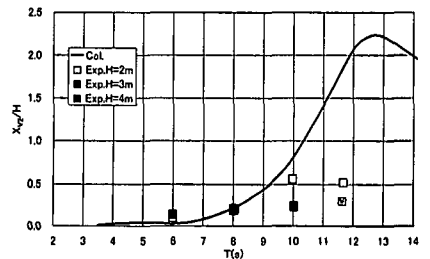


図-12(a) 単一水平版浮体 無次元鉛直動揺量 (両振幅/入射波高)

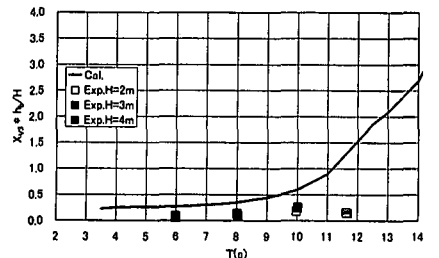
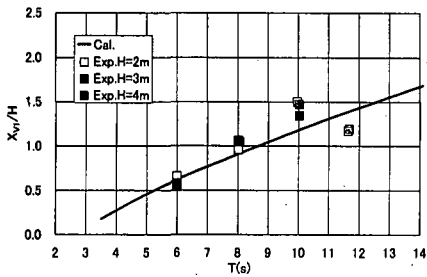
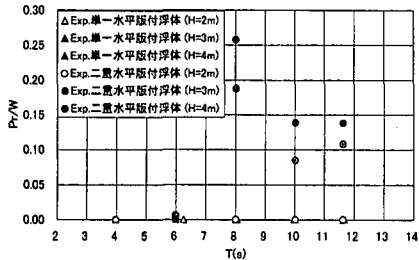
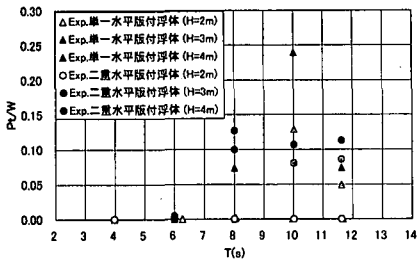


図-12(b) 単一水平版浮体 無次元回転動揺量
(回転角両振幅 * 堤体高さ / 入射波高, 堤体高さ $h_b=9.7$ m)


 図-12(c) 単一水平版付浮体 無次元水平動揺量
(両振幅/入射波高)

 図-13(a) 反射側における無次元張力 P_r/W (張力/浮体重量)

 図-13(b) 透過側における無次元張力 P_t/W (張力/浮体重量)

いて θ_s は、ほとんど現れないことや動揺変位の実験結果は線形理論による算定結果とある程度の対応が見られることなどがわかる。このように、roll 変位におけるサブハーモニック成分の出現は、静水力学的な復元力モーメントの大きさにも関係していることが推測される。

(4) 単一水平版付浮体に対する検討

図-1(d) に示す単一水平版付浮体は、T 型浮体と同様の趣旨で重心と傾心間の距離 GK をある程度大きくしてあり、また、係留ラインの浮体側係留位置を水面近くに変更して総ライン長を長くすることでラインの緊張状態が生じにくくしてある。

図-11 は、roll 変位に含まれる θ_F , θ_S の大きさを示す。この図から θ_S は、 θ_F に比較して小さいか同程度の大きさであるなど、二重水平版付浮体に比べて有意に低減さ

れていることがわかる。

図-12(a)~(c) は、単一水平版付浮体の各動揺量を示す。なお、図 (c) は、水平動揺変位 (sway) の結果を示す。図 (a), (b) から、このときの heave, roll 変位は、本研究で対象にした各種堤体の中で最も小さく、共振状態も見られないことなどから、取水施設として適すると判定される。ただし、図 (c) に見られるように長周期側で sway 変位が増大するため、さらに何らかの低減対策が必要と考えられ、今後の検討課題としたい。

図-13(a), (b) は、上部係留である単一水平版付浮体の係留張力を反射側と透過側のラインについて示す。図中には、比較のため下部係留である二重水平版付浮体の結果についても示す。ここで係留張力は、張力のピーク値の平均とし、浮体重量で無次元化した。

全体的には、当然のことながら、張力は高波高になるほど増大し、浮体重量の 2 割程度になることなどがわかる。単一水平版付浮体では、透過側の係留張力が卓越した大きさを示すのに対して、二重水平版付浮体では、ラインに余裕長が少ないことから、反射側と透過側の係留張力にあまり差が見られない。そして、単一水平版付浮体において、透過側の係留張力が卓越するのは、堤体が沖側に流されるためであり、sway 変位が長周期側で増大することから、このとき張力は大きくなりやすい。

5. 結 語

(1) 矩形状の浮体式低層取水施設では、設計対象波の範囲内で鉛直動揺量が大きくなりやすく、何らかの動揺低減対策が必要となる。

(2) 浮体下端に水平版を取り付けると、鉛直動揺は効果的に低減できる。しかしながら、この場合、重心と傾心間の距離 GK が小さくなりやすく、比較的大きなサブハーモニック成分の回転動揺変位が現れやすい。

(3) 単一水平版付浮体で、静水力学の復元力モーメントを増加させ、係留位置を浮体上端にすると鉛直動揺は効果的に低減され、サブハーモニック成分の回転動揺変位も小さくなることから、浮体式取水施設として適する。

参 考 文 献

- 大中 晋・関本恒浩・今井澄雄・寺田賢二・山田富朗 (1990): カテンウォール式取水口完成後における波浪・波力特性に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 614-618.
- 電力土木技術協会 (1995): 火力・原子力発電所土木構造物の設計, 増補改訂版, 電力土木技術協会, pp. 783-786.
- 中村孝幸・井出善彦 (1997): 減衰波中における浮体の動揺理論とその適用性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 856-860.