

TMDを用いた浮体の動揺軽減特性について

On motion reduction characters of floating body utilizing TMD

大本 晋士郎・新田 良典・
Sinjiro Omoto, Yoshinori Nitta

Several troubles will occur because that floating marine structures are shaken by waves. So, the reduction mechanism for motions of the floating body has been developed. This mechanism was adopted TMD (Tuned Mass Damper), and experiments has been done to estimate reduction effects for this mechanism. As a result, it is obtained that reduction effects are influenced by TMD natural period which is based on the relation between springs and weights, and heaving and pitching motion on a specific period can be reduced by this mechanism.

Key words: motion reduction mechanism, TMD, floating body, natural period

1. はじめに

最近、海洋空間開発の方法として浮体構造物が注目されている。海外では浮体式橋梁が建造され、国内では浮き防波堤などに採用される一方で、さらに大きな浮体構造物として建造技術の向上により浮体式海上空港が現実のものとなりつつある。しかし特に浮体式橋梁のように波長に対し小規模構造物の場合、波による動揺の影響を受けやすく動揺により浮体躯体に応力が発生したり、従来の浮体の動揺防止である係留系への入力荷重の増大などの問題が生じる可能性があり、波浪条件の厳しい海域への適用は有効な動揺対策を行う必要がある。

そこで本研究では波に対し小規模な浮体を対象とし、係留以外の動揺軽減対策としてTMDによる動揺軽減機構を組み込んだ浮体の模型実験を行い、この浮体の動揺軽減効果、特性を調べた。

2. 浮体の動揺軽減機構

陸上の構造物（高層建築物や吊橋主塔など）では、風や地震による横揺れを低減する有効な方法としてバネ、おもり、ダンパーからなるTMDが多く実用化されている。一方浮体の動揺軽減の研究は、浮体を没水型にする、エアチャンバーを設けるなど浮体の形状に工夫を行った物やり、アンチローリングタンクを用いる方法、また油圧装置などを用いた能動型動揺軽減装置が見られる²⁾。

本研究では浮体橋梁など使用期間が長期にわたる構造物には、メンテナンスコストが比較的低いパッシブ型が有利と考え、その中でも多くの実用実績のあるTMDを参考にし図1に示す動揺軽減機構を考案した。浮体のヒープ運動、ピッチ運動に対応するため、波の来る方向に対し前後にそれぞれおもりの載ったカンチレバーが、端部ではバネにより、中央ではヒンジ支点により浮体に取り付けられている。それぞれのおもりはヒンジ支点を中心に上下に運動することができ、ヒープに対しては前後のおもりが同位相で上下に、またピッチに対しては前後のおもりが逆位相で上下に動き、それぞれの運動を軽減させるものである。

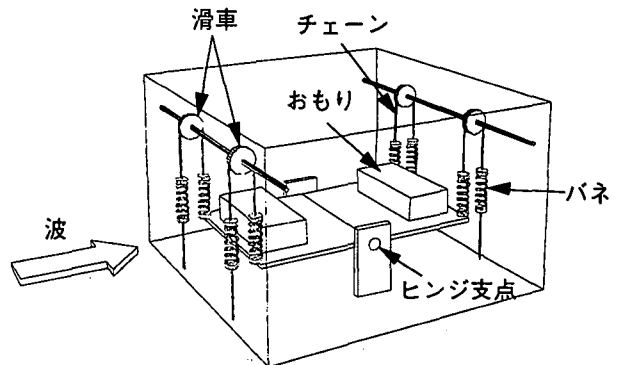


図1 浮体模型概要図

3. TMDを有する浮体の動揺実験概要

実験に用いた模型は図1の箱形浮体(長さ0.27m×幅0.25m)で、図2に示す(株)熊谷組技術研究所内の小型二次元水路(幅0.3×長さ15.0m)で実験を行った。実験条件を表1に示す。実験波は規則波で動揺軽減効果の周波数特性をみるため波高一定とし、周期を変化させた。浮体側で変化させたパラメー

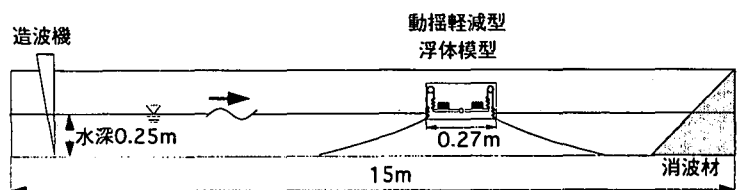


図2 実験概要

ターは、バネ定数、おもりの位置、吃水（浮体底におもりを載せ変化させた）である。また各 case に対し効果の比較を行うため、おもりを固定としたTMDなしの浮体の動揺の計測を行った。係留はスウェー方向の移動を止める目的で、ヒープ、ピッチの運動を妨げないよう弛緩係留状態とした。浮体の動揺計測はビデオカメラによる非接触の動体計測装置を用いた。

表 1 実験条件

	波周期(sec)	おもりの質量(kg)	おもりの位置(ヒンジより,cm)	吃水(cm)	バネ定数(kgf/m)
case 1	0.6~1.4	0.9	6.0	4.2	4.897
case 2	同上	0.9	6.0	4.2	4.284
case 3	同上	0.9	5.0	4.2	4.284
case 4	同上	0.9	6.0	5.8	4.284

4. 実験結果

結果を図3-1~5-2に示す。図3-1, 4-1, 5-1は縦軸をヒープ量 η/h で、横軸は波長 L / 浮体長 B で示してある。また図3-2, 4-2, 5-2は縦軸をピッチ量 θ/kh で、横軸は波長 L / 浮体長 B で示した。

図3-1, 3-2ではバネ定数の違いによる軽減効果の違いを示した。ヒープではCase 2が効果が大きい。Case 1, 2ともに L/B が5を超える領域では効果が見られない。一方ピッチでは、Case 1のほうが $L/B=4$ 付近の動揺量を抑えることができるが、Case 2のほうがより広い L/B に対応できることが分かる。またCase 1の固有周期は0.63sec ($L/B=2.3$) でこの付近でTMDが共振を起こしているのが実験中に確認できた。そのためピッチで2.0近い値が見られる。Case 2でも生じると考えられるが、 $L/B=2\sim3$ の間でデータの不足により現れていない。ヒープで共振は見られない。

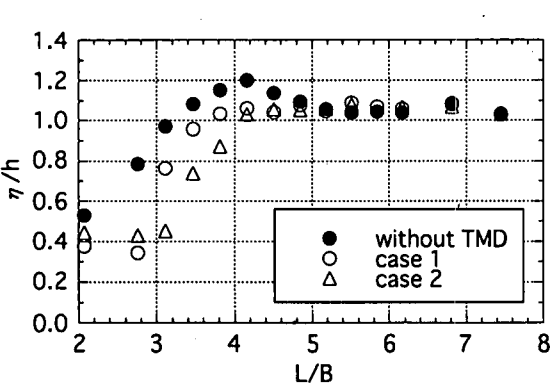


図3-1 ヒープの軽減効果(case 1,2)

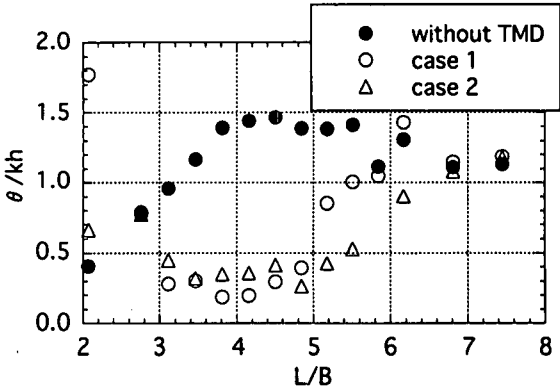


図3-2 ピッチの軽減効果(case 1,2)

図4-1, 4-2ではおもりの位置について検討を行ったものである。Case 3はCase 2のおもり位置を内側に移動したものである。Case 3のバネ-おもりの固有周期は0.65secで、Case 2よりCase 1に似た動揺特性が見られる。

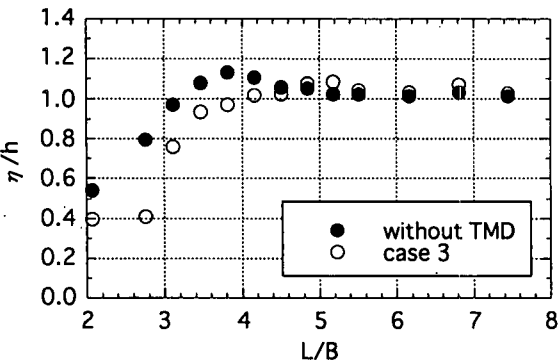


図4-1 ヒープの軽減効果(case 3)

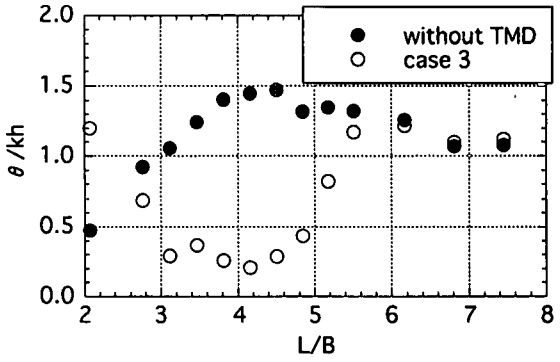


図4-2 ピッチの軽減効果(case 3)

図5-1, 5-2のCase 4では排水量に対するおもりの質量の影響をみるためCase 2の浮体底におもりを載せ吃水を増やしたものである。Case 2のおもり-排水質量比は0.64で、Case 4は0.46である。Case 2に比べCase 4の動揺量は若干大きくなっているが、TMDなしでもCase 2に比べ、Case 4の浮体の慣性質量が大きくなった分ヒープ、ピッチの最大値が大きくなっている。そのためこの実験条件では軽減効果に大きな差はみられなかった。

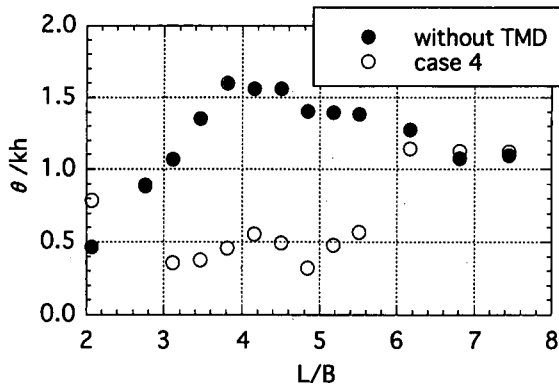


図5-1 ヒープの軽減効果(case 4)

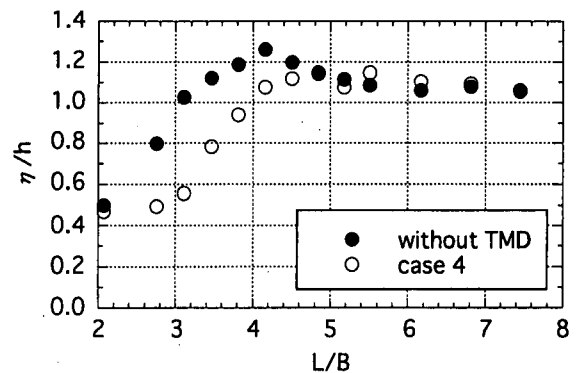


図5-2 ピッチの軽減効果(case 4)

5. TMDを有する浮体の動揺解析

TMDを有する浮体の二次元モデル化および運動方程式の定式化を行い浮体の動揺解析を行った。

まずTMDについて考える。図1, 6のように、TMDはおもりの載った梁が一方はヒンジ支点によりもう一方はバネにより浮体に固定されているもので、これを1ユニットとしそれぞれのユニット毎に考える。このモデルでは、おもりは質点とし、梁、バネの質量はおもりに比べ十分小さく無視できるとする。またこの系の減衰は考慮していない。静止つり合い状態において重心を原点とし、ヒンジ、おもり等の位置関係を図6のように定義する。動揺による浮体の重心まわりの変位量を (X_1, X_2, X_3) 、TMDのバネの伸びを Z_i とし、それぞれ波に対し微小量と仮定すると、TMDの動的状態でのヒンジまわりのモーメントのつり合いから求められる運動方程式は、

$$m_i r_i \ddot{X}_2 - m_i (r_i X_{a_i} + r_i^2) \ddot{X}_3 + m_i \frac{r_i^2}{R_i} \ddot{Z}_i + R_i k_i Z_i = 0 \quad (i = 1, nw) \quad (1)$$

となる。nwはユニットの総数である。第1, 2項は浮体の動揺に伴いおもりに生じる慣性力によるモーメント、第3項はTMDの運動により生じる慣性力によるモーメント、第4項はバネののびに伴うモーメントでこれらが動的な状態でつり合っている。

つぎに浮体全体について考える。TMDを有した浮体の運動方程式は変位に関する二次以上の項を無視すると以下の通りとなる。

$$\text{サージ方向} \quad (m + \sum_{i=1}^{nw} m_i) \ddot{X}_1 + \sum_{n=1}^3 C_m(1, n) \ddot{X}_n + \sum_{n=1}^3 C_d(1, n) \dot{X}_n + \sum_{n=1}^3 K(1, n) X_n = F_x \quad (2)$$

$$\text{ヒープ方向} \quad m \ddot{X}_2 + \sum_{n=1}^3 C_m(2, n) \ddot{X}_n + \sum_{n=1}^3 C_d(2, n) \dot{X}_n + \sum_{n=1}^3 K(2, n) X_n - \sum_{i=1}^{nw} \frac{R_i}{r_i} k_i Z_i = F_z \quad (3)$$

$$\text{ピッチ方向} \quad I \ddot{X}_3 + \sum_{n=1}^3 C_m(3, n) \ddot{X}_n + \sum_{n=1}^3 C_d(3, n) \dot{X}_n + N \ddot{X}_3 + \sum_{n=1}^3 K(3, n) X_n + \sum_{i=1}^{nw} X_{w_i} \frac{R_i}{r_i} k_i Z_i = M_y \quad (4)$$

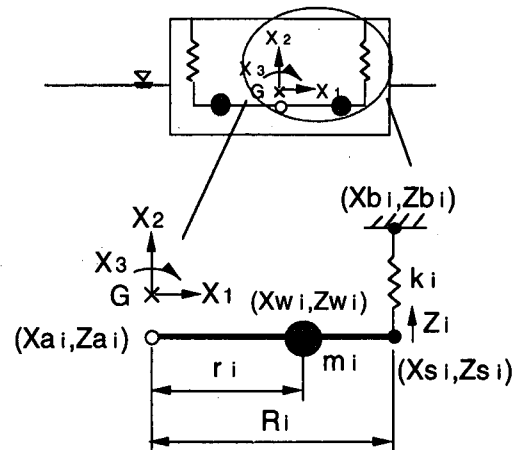


図6 TMDの解析モデル概要

ここで、 m ：TMDを除いた浮体の質量、 I ：TMDを除いた浮体の慣性モーメント、 $[Cm]$ ：付加質量マトリックス、 $[Cd]$ ：造波減衰マトリックス、 $[K]$ ：静水圧による復元力マトリックス、 F_x 、 F_y 、 M_y ：波強制力である。付加質量係数、造波減衰係数および波強制力は浮体まわりの速度ポテンシャルを湧き出し分布法³⁾⁴⁾により求め、これを基に算出する。また $N|\dot{X}_3|\dot{X}_3$ は粘性減衰項⁵⁾であるが、非線形項のため一周期間の散逸エネルギーが等しくなるように等価線形化し解析を行った。(3)式の左辺5項目と(4)式の6項目がTMDにより生じた力の項である。以上の(1)～(4)の式を連立させ解くことにより浮体の動揺量を求めた。

6. 解析結果

以上の解析モデルを用いた浮体の動揺解析結果について記す。図7-1はcase 2のおもりを固定としたTMDなしの浮体のヒープ量、同じく図7-2はピッチ量で、それぞれ黒丸が実験値、実線が解析値である。ヒープ、ピッチともに比較的实验値と解析値は一致していると思われる。

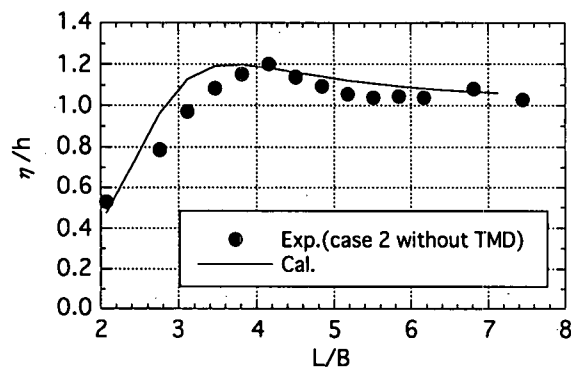


図7-1 ヒープの比較(case 2 without TMD)

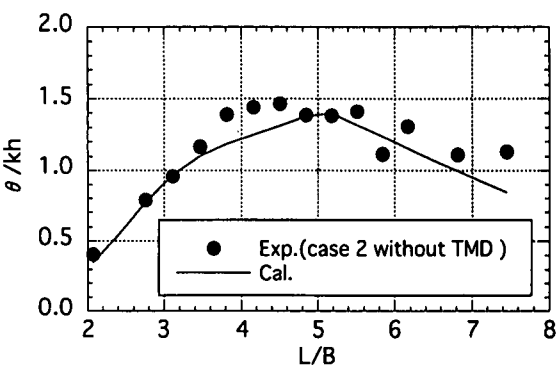


図7-2 ピッチの比較(case 2 without TMD)

つづいてcase 2 (TMDあり)についてシミュレートした結果をヒープについて図8-1に、ピッチについて図8-2に示す。図8-1ではヒープの最大値が計算では二割ほど大きくなっているが、周波数特性をほぼ示していると思われる。図8-2のピッチでは、 $L/B=6$ 付近の値はほぼ一致しているがそれ以下の領域で食い違いが生じている。解析ではTMDの固有周期である $L/B=2.8$ でヒープ、ピッチ共に0となるが実際には、TMDのヒンジの摩擦抵抗などで0とならないと思われる。

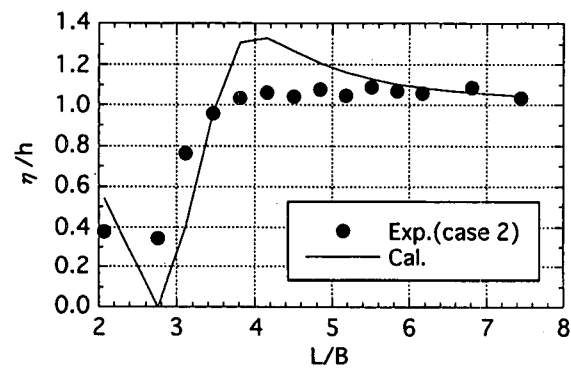


図8-1 ヒープの比較(case 2)

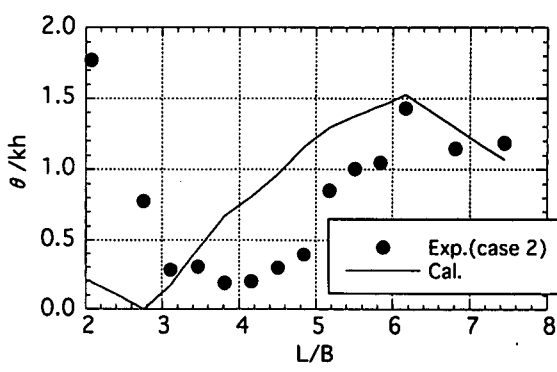


図8-2 ピッチの比較(case 2)

今回のモデルで比較的良好に実験値をシミュレートできることが分かったので、以下では実験を補足するため、パラメータスタディを行った。

まずcase 2のバネ条件で、おもり位置 r (ヒンジからおもりまでの距離) / R (梁の長さ) を0.3～0.6に変化させた計算結果をヒープについて図9-1に、ピッチについて図9-2に示す。 $r/R=0.5$ がcase 2の条件である。ヒープ、ピッチともに r/R が大きくなるとTMDの固有周期が長くなるためより広い範囲で動揺量を抑えることができることが分かる。ピッチでは最大値は r/R によらないが、ヒープでは r/R の増加に伴い最大値が大きくなること分かる。

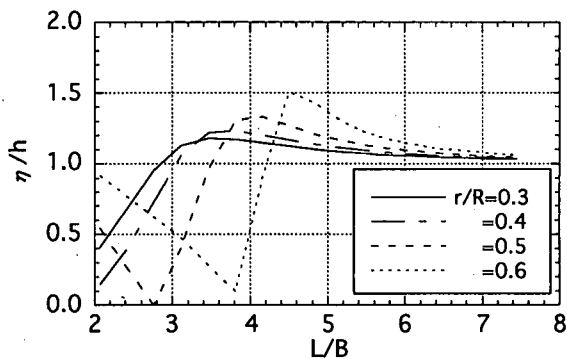


図9-1 TMDおもり位置の影響（ヒープ）

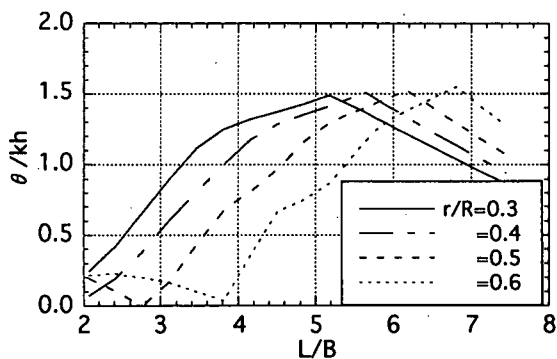


図9-2 TMDおもり位置の影響（ピッチ）

つづいて実験ではほとんど差が現れなかった吃水とおもり質量（排水質量とおもり質量）の関係について検討を行う。陸上のTMDでは制振対象の建造物の質量とTMDの質量の関係が重要であり、この構造でもこの点を明らかにする必要がある。しかし実験では吃水を変化させるためおもりを浮体の底に入れた結果case 2とcase 4の浮体の重心、慣性質量も大きく変わることとなり、排水重量と重り重量の関係がはっきり現れなかったと考えられる。そこで重心、吃水が変わらないようにcase 2のパネ、おもり位置でおもりの一部がTMDになっている（のこりのおもりは固定と考える）と考えた解析を行った。浮体の慣性モーメントには固定のおもり分を加えた。また解析結果はそれぞれTMDなしの結果に対する相対量で示した。ヒープ量を図10-1に、ピッチ量を図10-2に示す。 m_w はTMDの総おもり質量、 m_b は排水質量である。解析結果を見るとヒープ量は m_w/m_b によりあまり大きく変化しない。それに対しピッチ量は m_w/m_b が大きいほど縦軸が1.0以下となる領域が広がっておりTMDのおもり質量が大きいほど動揺軽減効果があると考えられる。

さらに吃水を変化させた解析を行い、吃水とTMD おもり質量の関係を調べた。TMD おもり質量は一定で吃

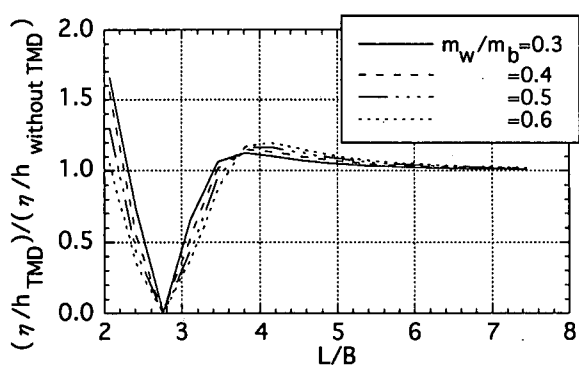


図10-1 TMDおもり質量と排水質量の関係（ヒープ）

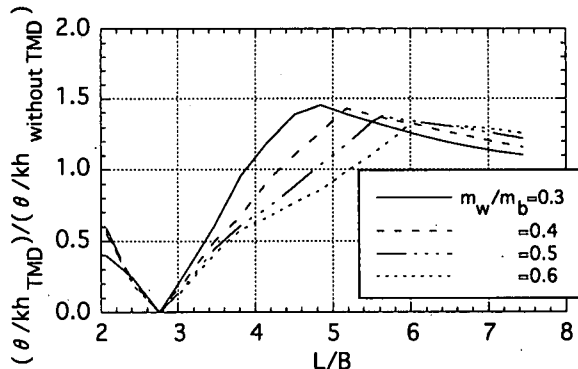


図10-2 TMDおもり質量と排水質量の関係（ピッチ）

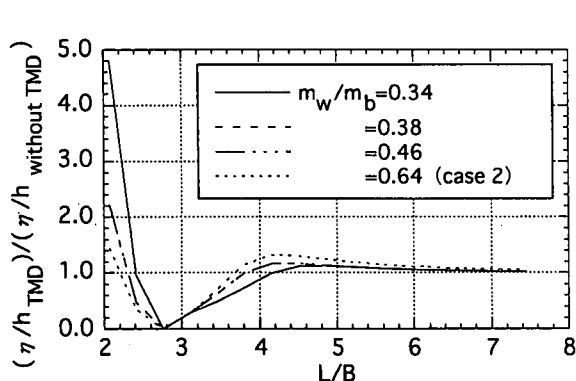


図11-1 TMDおもり質量と吃水の関係（ヒープ）

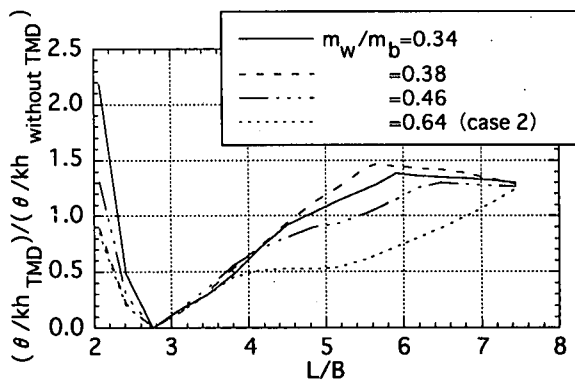


図11-2 TMDおもり質量と排水質量の関係（ピッチ）

水を変化させるため浮体質量を変えたが、それに伴い重心、慣性モーメントも変化している。結果をヒープについて図11-1に、ピッチについて図11-2に示す。これらの結果もTMDなしの結果に対する相対量で示した。図11-1をみると吃水が深い場合 ($m_w/m_b=0.34$) に $L/B=$ 約4の範囲までヒープが1.0以下となり他の場合より軽減効果があるといえる。しかし $L/B=2.5$ 以下でヒープ量が増加することが分かる。ピッチではヒープと逆で m_w/m_b が大きくなる (吃水が浅い) に従い1.0以下の領域が広がる。

したがって図10-1～図11-2の結果よりヒープよりピッチの軽減効果にTMDおもり質量/排水質量の影響が大きく現れ、ピッチではTMDおもり質量が相対的に大きい方が動揺量を軽減できる周波数帯が広がっており軽減効果が高いと言える。

また実験中の浮体のTMDの動きを観察していると、前側のTMDでは入射波高に応じた動きをしており、後側では透過波に応じた動きをしている。しかし透過波は入射波に比べ小さく、そのため前側より後側のTMDの動きが小さくなっている。そこで後側のバネ定数を小さくし動きやすくすればより動揺軽減効果があるのではと考え解析で検討した。case 2の浮体に対し、前側のバネはそのまま、後側のバネ定数を80%とし解析したところ図12-1、図12-2に示したようにcase 2より大きな軽減効果が得られることが分かった。浮き消波堤など波向きが特定できる浮体構造には有利であると思われる。

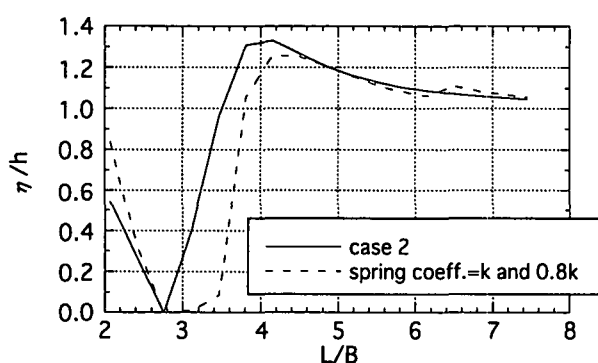


図12-1 2種類のパネを持つTMDの効果
(ヒープ)

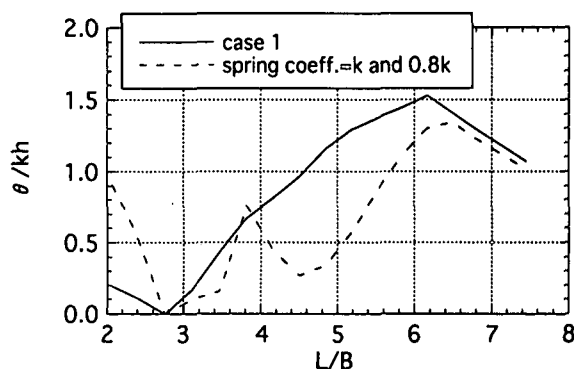


図12-2 2種類のパネを持つTMDの効果
(ピッチ)

7. 結論

TMDを組み込んだ浮体の動揺特性についての動揺特性実験および解析を行った。その結果、軽減効果はバネ定数、おもり位置によって決まるTMDの固有周期に依存し、TMDを調整することで特定範囲の周期帯の波に対し、ヒープ、ピッチ共に軽減効果が得られることが確認された。特にバネを柔らかくする、おもり位置を浮体中心から遠ざける、などの方法によりTMDの固有周期を長くすることと、TMDおもり質量を浮体の排水質量に対し相対的に大きくすることにより、軽減効果が高くなることが確認された。しかし実験を通して、実用化の問題点としてTMDの固有周期を長くするとTMDのストローク量が大きくなることがあげられる。今回の実験では滑車を用いてストローク量を確保したが、さらに固有周期、おもり質量を変えないでストローク量を減らす方法について検討を進める必要がある。

参考文献

- 1) 宮川典久他：低動揺型浮体の開発と浮遊式石油生産設備への応用：日本造船学会論文集，第169号，pp195～222，1991
- 2) 安藤祐友他：波浪中における能動的制御海洋構造物の動揺実験：日本機械学会第三回交通・物流部門大会講演論文集，pp298～301，1994
- 3) 樫木亨編著：波と漂砂と構造物：技報堂出版，pp103～108
- 4) 中村孝幸，森田知志，小野正順：斜波中における任意断面浮体まわりの波浪変形の算定法：海洋開発論文集，Vol.3，pp65～70，1987
- 5) 井上忠春，新田良典，山崎晶，森田知志：浮体動揺解析（その1）- 2次元理論の箱形浮体への適用性 -：熊谷組技術研究報告，第54号，pp27～33，1989