

# 孤立波による浮体構造物の応答並びに係留索張力の応答特性に関する水理実験的研究

## Hydraulic Experiments on Dynamic Response of the Moored Floating Structure under Solitary Wave

高村浩彰\*・増田光一\*\*・宮崎 剛\*\*\*・橋本 剛\*\*\*\*

Hiroaki Takamura, Masuda Koiti, Miyazaki Tsuyoshi, Hashimoto Tsuyoshi

Tsunami regarded as a long-period wave is brought about a submarine earthquake. Tsunami's wave height becomes higher in shallower onshore area. Wave road from Tsunami has much influenced to the motions and mooring tensions of a moored floating structure in onshore area. For this reason, it is very important for submarine works to estimate the dynamic response of a moored floating structure under Tsunami. This study deals with the characteristics of motions and mooring tensions on moored floating rectangular body by means of the hydraulic experiments under solitary wave considered as tsunami.

Keywords: Moored Floating Structure, Solitary Wave, Tsunami, Hydraulic Experiment

### 1. はじめに

海底地震に伴って発生した津波は、大水深海域では波速が大きいものの波高が小さいために、浮体構造物の動揺にはさほど大きな問題とはならない。しかしながら、沿岸域まで伝播してきた津波は浅水効果ばかりでなく平面的な地形の影響も相俟って岸に近づくほど波高が増大する。このため、浅海域に設置された浮体構造物に津波が襲来した際の流体力は、非常に大きくなるものと予想される。1981年の日本海中部地震ではソリトン分裂遡上津波が発生し消波ブロックを破壊したことが首藤ら(1988)によって報告されているが、このことから上述したことは推測される。また、社会基盤整備に伴う沿岸域開発プロジェクトでは、環境問題への配慮などから浮体構造物を積極的に採用するケースが多くなりつつある。このような状況下で、浅海の沿岸域に弛緩係留された浮体構造物では、係留索長が十分に確保できないために係留系から最小限必要な復元力を得ることが困難となる。このため、沿岸域に弛緩係留された浮体構造物に津波が襲来した場合の動的挙動を明らかにしておくことは、安全性を確保する上で工学的に重要な課題である。

弛緩係留された浮体構造物の津波応答に関する研究は、吉田ら(1996)および増田ら(1996)によって行われている。吉田ら(1996)は、セミサブ型浮体構造物を対象に数値解析を実施した。その結果から、津波荷重の大部分が抗力であると仮定するならば、水深が浅くなるに従って流速が早くなるため、水平方向の荷重が卓越して係留索張力が大きくなることを示した。さらに、水深の浅い海域への浮体構造物の設置は避けるべきであると提案している。一方、増田ら(1996)は、孤立波を入射させた浮体構造物の応答を予測する簡易算定手法を提案し、水理模型実験との比較を行っている。その結果、孤立波を入射させた浮体構造物では、孤立波の波高の数倍程度の左右揺れが発生することを明らかにした。また、開発した簡易算定手法では、定性的に実験結果を再現計算できるものの、定量的には左右揺れおよび係留力を過大に評価する結果となっていることも確認している。なお、両者の研究は特定な条件のみを対象としたものであった。

以上のようなことを踏まえ、本研究では、水理模型実験に基づいて水深、波高および係留条件などを実験パラメーターとして変化させながら、孤立波の入射に伴う弛緩係留された浮体構造物の動揺並びに係留索張力の応答特性を詳細に検討した。特に、中間シンカーの有無、係留索の長さ、初期張力並びに単位水中重量の違いが浮体構造物の動揺量や係留索張力の応答特性に及ぼす影響について考察を加えている。

### 2. 水理模型実験の概要

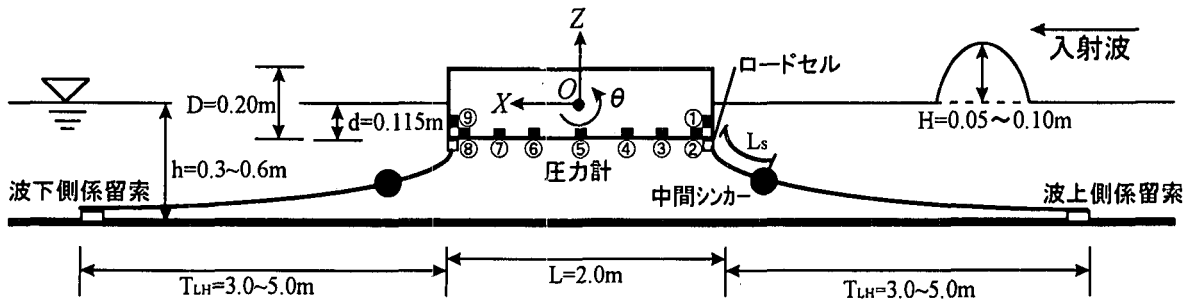
水理模型実験は、西松建設(株)技術研究所の2次元造波水路(長さ65m×幅1m×水深1.5m)において、弛緩係留された浮体模型に孤立波を入射させて、その時の浮体動揺量、係留索張力、浮体側面および浮体底面に作用する圧力を計測した。図-1は実験概念図を示しており、表-1には浮体模型および係留系模型の諸元並びに実験条件が示されている。浮体の動揺量については、(株)エムテック社製の非接触型変位計(ビデオトラッカー

\* 正会員 西松建設(株) 技術研究所 技術部 海洋技術課 (〒274 大和市下鶴間 2570-4)

\*\* 正会員 日本大学 理工学部 海洋建築工学科 教授・工博

\*\*\* 正会員 日本大学 大学院 理工学研究科 海洋建築工学専攻

\*\*\*\* 正会員 西松建設(株) 技術研究所 研究部 先端技術研究課



図－１ 実験概念図

表－１ 模型諸元および実験条件

| 浮体模型       |            |                    | 係留系模型              |                                             |
|------------|------------|--------------------|--------------------|---------------------------------------------|
| 浮体長さ       | (L)        | 2.000 (m)          | 初期張力[目標値]( $T_s$ ) | 5.0, 10.0, 15.0, 20.0 (N)                   |
| 浮体幅        | (B)        | 0.960 (m)          | 水平索長               | ( $T_{LH}$ ) 3.0, 4.0, 5.0 (m)              |
| 浮体高さ       | (D)        | 0.200 (m)          | 索単位水中重量            | ( $W_T$ ) 0.88(アルミ), 2.62(鉄), 5.06(鉄) (N/m) |
| 浮体吃水       | (d)        | 0.115 (m)          | 中間シンカー重量           | ( $W_s$ ) 0.0, 9.8, 19.6 (N)                |
| 浮体排水量      | (W)        | 0.221 ( $m^3$ )    | 中間シンカー距離           | ( $L_s$ ) 0.24, 0.45, 0.66 [浮体取付点からの距離] (m) |
| 浮体重心高さ     | (KG)       | 0.100 (m)          | 実験条件               |                                             |
| 浮体慣性モーメント  | ( $I_y$ )  | 88.300 ( $Kgm^2$ ) | 水深                 | (h) 0.30, 0.40, 0.50, 0.60 (m)              |
| 浮体メタセンター高さ | ( $Gm_r$ ) | 2.060 (m)          | 孤立波の波高             | (H) 0.05, 0.08, 0.10 (m)                    |

2次元計測装置)を用いて計測した。係留索張力は、浮体側の係留索取付点4ヶ所に(株)SSK社製のロードセル(LT25-50, 定格50Kg)を設置して計測した。なお、係留索の着鎖点に取り付けたターンバックルを用いて、係留索4本の初期張力を均等に調整して実験を行った。さらに、浮体の底面7カ所並びに波上側・波下側の側面に1ヶ所ずつ計9ヶ所(図－1参照)に(株)SSK社製の圧力計(P310-1, 定格0.1Kg)を取り付けて、浮体動揺時の圧力も計測した。また、入射波の再現性等を確認する意味で、浮体前後に13本の波高計と2本の流速計を設置し波高および流速についても計測した。なお、実験データの整理に際しては、初期条件下の浮体模型の重心を原点 $o$ として浮体動揺を定義し、原点 $o$ から11m離れた地点の波高が最大値を示した瞬間を時間0secとして浮体動揺並びに係留索張力の時間的な変化を考察した。

### 3. 入射波条件の違いによる応答特性

#### 3.1 波高変化に伴う応答特性の相違

孤立波は、波高および水深の変化によって波速並びに波形が変化する。そのため、ここでは本研究の第1段階として孤立波の入射波条件の違いが弛緩係留された浮体構造物の基本的な応答特性に及ぼす影響について明らかにする。

図－2は、水深を一定( $h=0.4m$ )とし、波高を $H=0.05m$ ,  $0.08m$ および $0.10m$ と変化させた場合の時間波形並びに空間波形を示しており、構造物を設置していない波高検定実験の結果である。両図の縦軸には波高が、上側の図の横軸は原点 $o$ から11m離れた地点の波高が最大値を示した瞬間を0secと設定した時間を、下側の図の横軸は原点 $o$ を0mとして、そこからの距離を採用している。図中には、3つの波高に対応する実験結果と孤立波の理論解が併記されている。なお、下側の図の凡例に示されているかつこ内の時間は原点 $o$ での波高が最大値となった時間を示している。波高 $H=0.08m$ 並びに $H=0.10m$ の場合の時間波形では、4.6sec付近で検定結果が理論解と若干の差を有しているものの、実験結果は理論的な孤立波をほぼ再現しているものと判断される。

図－3は、図－2と同様に水深を一定( $h=0.4m$ )とし、初期張力を $T_s=9N$ 、係留索水平索長を $T_{LH}=3.0m$ および係留索単位水中重量を $W_T=2.62N/m$ とした場合の浮体動揺並びに係留索張力に関する実験結果を示している。上から順に浮体前後揺れ変位、上下揺れ変位、縦揺れ変位、波上側係留索張力および波下側係留索張力の時間的な変化である。なお、図中の横軸には図－2の時間波形と同様な時間が採用されており、実線が波高 $H=0.05m$ 、破線が $H=0.08m$ および一点破線が $H=0.1m$ の実験結果を表示している。

入射波条件の波高が大きくなるに従って、浮体動揺量はほぼ線形的に増加しているものの、係留索張力は波高 $H=0.08m$ および $H=0.10m$ で非線形的に増大している。これは、浮体動揺量の増大に伴って係留索が直線状になる時に発生するといわれている衝撃的張力の影響によるものと考えられる。

### 3.2 水深変化に伴う応答特性の相違

図-4は、波高を一定 ( $H=0.08\text{m}$ ) とし、水深を  $h=0.3\text{m}, 0.4\text{m}, 0.5\text{m}$  および  $0.6\text{m}$  と変化させた場合の入射波の時間波形および空間波形を示している。図-2と同様な物理量で整理されている2つの図から、検定結果はほぼ孤立波の理論解を再現していることが読みとれる。なお、水深が浅い  $h=0.3\text{m}$  および  $h=0.4\text{m}$  での検定結果には多少の相違も認められる。これは、係留索のアンカーを含む水路底面や側面等の粗度の影響によるものと考えられる。さらに、上側の図に示された時間波形からは水深の増大に伴って波速が速くなっていることが、下側に示された空間波形からは水深の減少に伴って波形勾配が大きくなっていくことがわかる。

図-5は、図-4と同様に孤立波の入射波高を一定 ( $H=0.08\text{m}$ ) とし、初期張力を  $T_s=9\text{N}$ 、係留索水平索長を  $T_{LH}=3.0\text{m}$  および係留索単位水中重量を  $W_T=2.62\text{N/m}$  とした時の水深変化に伴う浮体動揺並びに係留索張力の実験結果を示したものである。図-5は、上から順に浮体の前後揺れ変位、上下揺れ変位、縦揺れ変位、波上側係留索張力および波下側係留索張力の時間的な変化である。なお、図中の実線が水深  $h=0.3\text{m}$ 、破線が  $h=0.4\text{m}$ 、一点破線が  $h=0.5\text{m}$  および2点破線が  $h=0.6\text{m}$  の実験結果に対応している。

図-5より水深の増加に伴って前後揺れおよび上下揺れの最大変位が増大するとともに、縦揺れの最大変位は

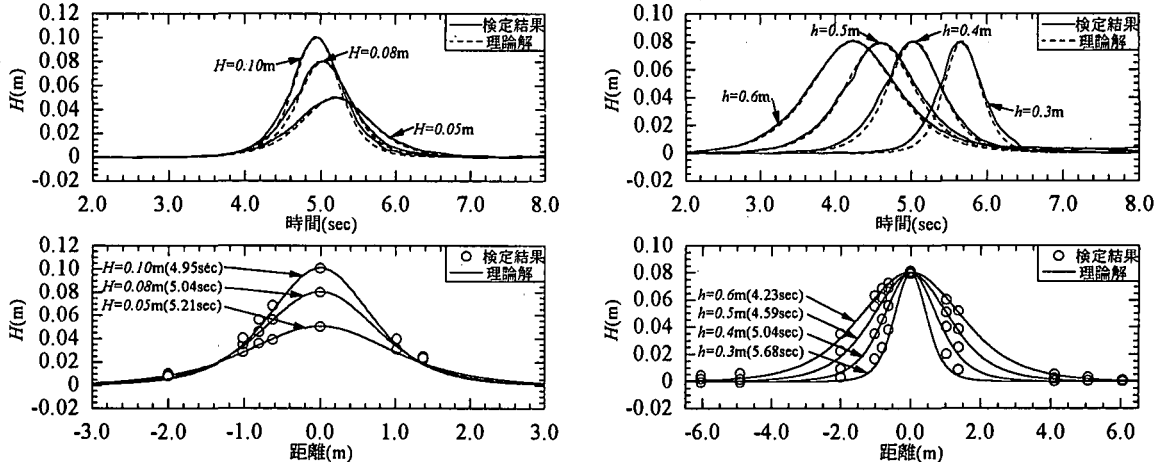


図-2 波高変化に伴う入射波の特性 (水深  $h=0.4\text{m}$ )

図-4 水深変化に伴う入射波の特性 (波高  $H=0.08\text{m}$ )

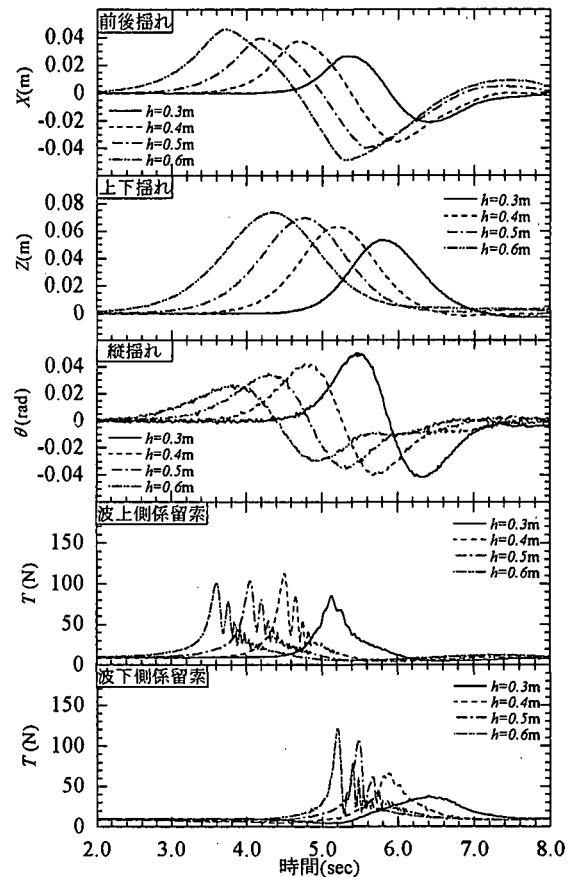
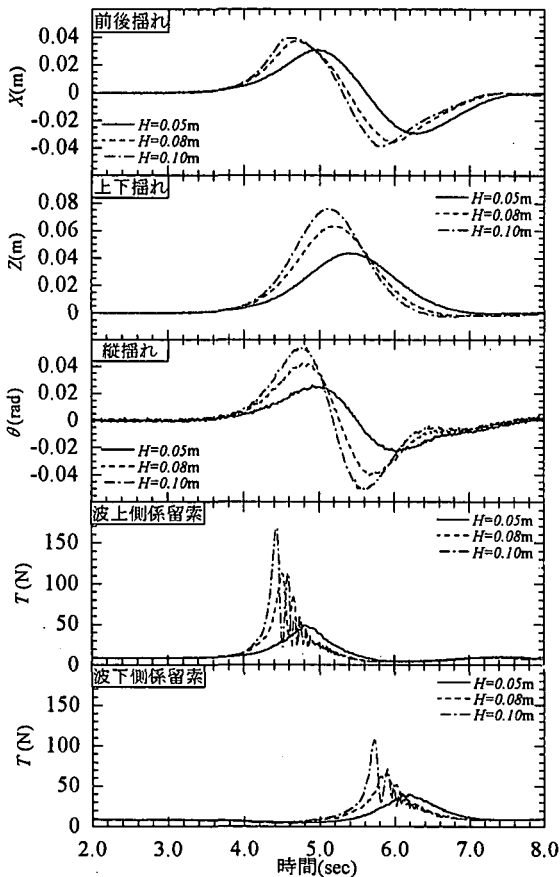


図-3 波高変化に伴う応答特性の相違 (水深  $h=0.4\text{m}$ )      図-5 水深変化に伴う応答特性の相違 (波高  $H=0.08\text{m}$ )

減少している。これは、水深変化によって係留索からの復元力特性が変化するばかりでなく、図一4の時間波形からも判断できるように水深の増大に伴って入射波波高の時間的変化率が小さくなる影響を受けているものと判断される。さらに、波上側係留索の最大張力は水深変化にほとんど依存していないものの、波下側係留索の最大張力は水深の増大とともに大きくなっていることが確認できる。これは、各方向の浮体動揺が相互作用したためと考えられる。

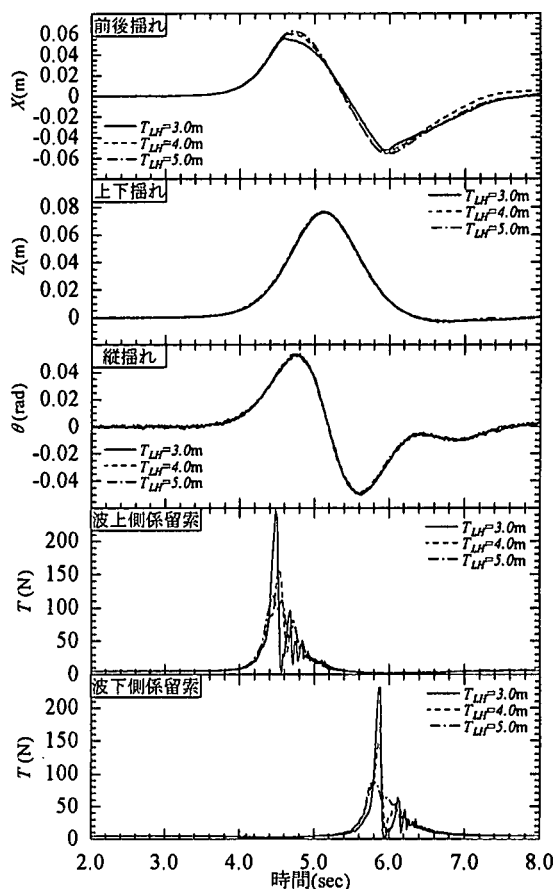
#### 4. 係留条件の違いによる応答特性

##### 4.1 係留索の水平索長

図一6は、水深を  $h=0.4\text{m}$ 、波高を  $H=0.08\text{m}$ 、初期張力を  $T_s=5\text{N}$  および係留索単位水中重量を  $W_T=2.62\text{N/m}$  と一定に保ち、係留索の水平索長  $T_{LH}$  のみを変化させた場合の実験結果である。図一3および図一5と同様に、上から浮体の前後揺れ変位、上下揺れ変位、縦揺れ変位、波上側係留索張力および波下側係留索張力の時間的な変化が表示されている。また、図中の実線は水平索長  $T_{LH}=3.0\text{m}$ 、破線は  $T_{LH}=4.0\text{m}$  および一点破線は  $T_{LH}=5.0\text{m}$  に対応している。

図一6より、水平索長が変化しても上下揺れ変位並びに縦揺れ変位の応答特性はほとんど変わらないことが確認できる。一方、前後揺れでは  $T_{LH}$  の増大とともに最大変位が大きくなっていることが読みとれる。さらに、係留索張力の最大値は、波上側および波下側ともに水平索長が長くなるに従って減少していることもわかる。

孤立波が入射する前の初期条件下における係留索は、3ケースとも同一形状となっており、係留索の復元力特性がほぼ等しいものと判断される。このため、定性的には前後揺れ変位、上下揺れ変位並びに縦揺れ変位の応答特性がほぼ等しいものとなっており、特に上下揺れ変位並びに縦揺れ変位では定量的な相違も認められない。一方、水平索長が  $T_{LH}=3.0\text{m}$  並びに  $T_{LH}=4.0\text{m}$  の場合には、前後揺れ変位が最大となる4.6sec付近において大きな衝撃的張力が発生するとともに、前後揺れの最大変位量が小さくなっている。これは、水平索長が短い場合に係留索の形状が弛緩状態から緊張状態となりやすく、その時に浮体を拘束する力が、係留索の剛性に基づく復元力へと変化するためと考えられる。



図一6 水平索長の変化に伴う応答特性の相違  
( $h=0.4\text{m}$ ,  $H=0.08\text{m}$ )

##### 4.2 初期張力

図一7および図一8は、水深を  $h=0.4\text{m}$ 、波高を  $H=0.08\text{m}$ 、係留索水平索長を  $T_{LH}=3\text{m}$  と一定に保ち、前図では係留索単位水中重量を  $W_T=2.62\text{N/m}$ 、後図では  $W_T=5.06\text{N/m}$  と設定した場合の初期張力の変化に伴う浮体動揺並びに係留索張力に関する実験結果を示している。両図ともに、上から順に浮体の前後揺れ変位、上下揺れ変位、縦揺れ変位、波上側係留索張力および波下側係留索張力の応答特性である。さらに、図中の実線、破線および一点破線は、この順番で初期張力の大きい実験ケースに対応している。

両図より、上下揺れ変位並びに縦揺れ変位の応答特性は、初期張力の変化に伴う影響をほとんど受けないことが確認できる。一方、前後揺れ変位の最大値は、初期張力の増大に伴って係留索からの復元力が大きくなるために減少していることが読みとれる。また、復元力の変化に伴って前後揺れ方向の自由振動周期（固有周期）に変化が生じていることもわかる。さらに、係留索張力では、初期張力の増大に伴って衝撃的張力の発生が抑制されるとともに、最大値も小さくなっている。これは、初期張力を大きく設定することによって、浮体前後揺れ方向の復元力が増大したためと考えらる。また、係留索単位水中重量を変化させた図一7および図一8の比較より、初期張力の変化に伴う前後揺れ変位並びに係留索張力の応答特性は定性的にはほぼ同様となっているものの、係留索から浮体を受ける復元力の特性が変化するため、定量的には大きく変化している。すなわち、浮体の前後揺れ

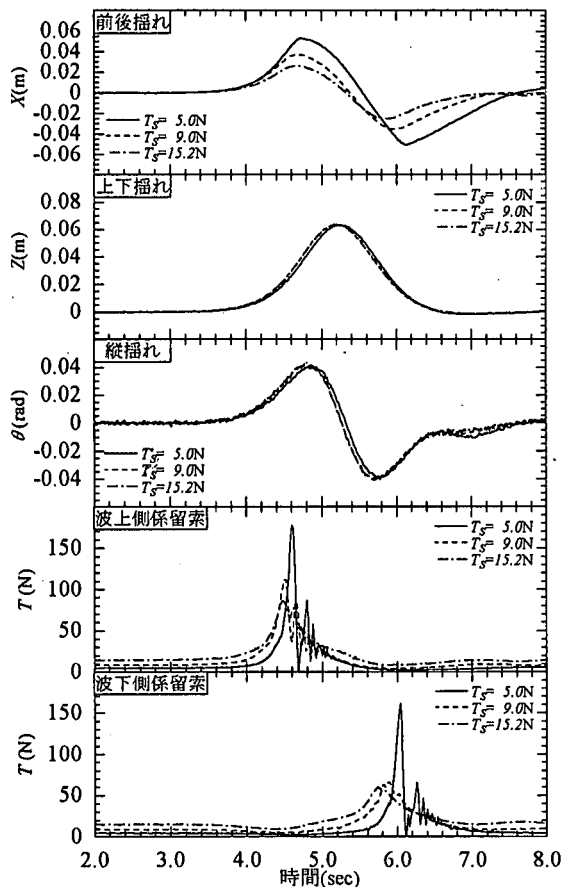


図-7 初期張力変化に伴う応答特性の相違  
(係留索単位水中重量  $W_T=2.62\text{N/m}$ )

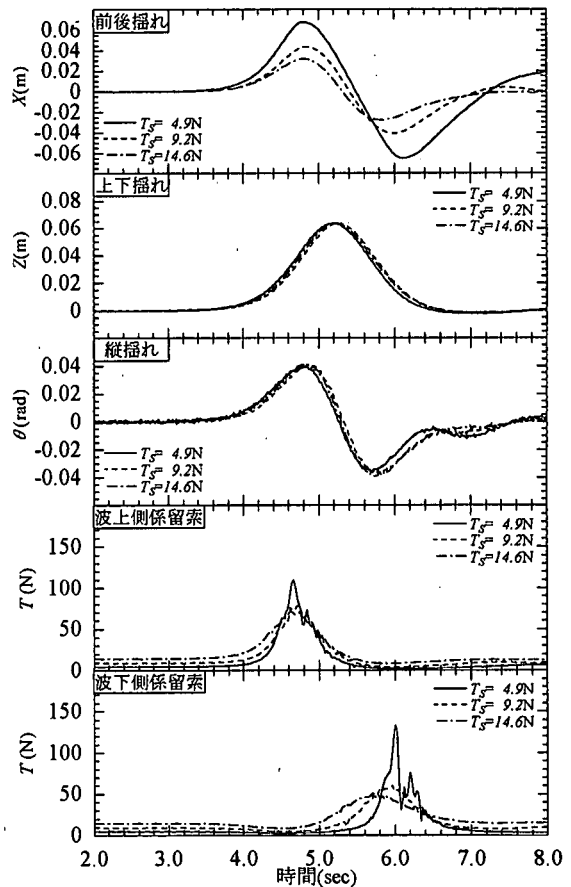


図-8 初期張力変化に伴う応答特性の相違  
(係留索単位水中重量  $W_T=5.06\text{N/m}$ )

方向の復元力がより大きくなる索単位水中重量  $W_T=5.06\text{N/m}$  の場合に前後揺れの最大変位並びに最大張力が減少している。

#### 4.3 中間シンカー

図-9および図-10は、水深を  $h=0.6\text{m}$ 、波高を  $H=0.08\text{m}$ 、係留索水平索長を  $T_{LH}=3\text{m}$  および係留索単位水中重量を  $W_T=2.62\text{N/m}$  と一定に保ち、中間シンカーの設置条件を変化させた場合の実験結果を示している。特に、図-9は中間シンカーの設置位置  $L_s$  (図-1参照) を浮体取付点から  $0.45\text{m}$  としてシンカー重量  $W_s$  を変化させた場合、図-10はシンカー重量を  $W_s=9.8\text{N}$  と一定にして設置位置  $L_s$  を変化させた場合の応答特性である。なお、孤立波が入射する前の初期条件下では、中間シンカーが水中に浮遊した状態となっているため、係留索の初期張力は実験ケース毎に異なっている。

図-9では、中間シンカーが無い場合 ( $W_s=0.0\text{N}$ ; 実線) と中間シンカーを設置した場合 ( $W_s=9.8\text{N}$ ; 破線,  $W_s=19.6\text{N}$ ; 一点破線) の浮体動揺並びに係留索張力に関する応答特性が比較されている。係留索張力に着目すると、中間シンカーが無い状態で発生している衝撃的張力は中間シンカーの存在によって抑制されていることが読みとれる。さらに、浮体の上下揺れ変位並びに縦揺れ変位の応答特性には顕著な差は見られない。一方、前後揺れでは中間シンカーの設置によって初期張力が増大し、係留索から浮体に作用する前後揺れ方向の復元力が大きくなるために、自由振動周期が短くなり最大変位量が減少している。

図-10は、中間シンカー設置位置  $L_s$  の変化に伴う応答特性の違いを比較したものである。初期条件下で中間シンカーが浮遊している状態であれば、中間シンカーを浮体から離れた所に設置する ( $L_s$  を大きくする) ほど、前後揺れ方向の拘束力が大きくなる。このような理由から、 $L_s=0.66\text{m}$  では衝撃的張力が出現していないばかりでなく、前後揺れの最大変位量も小さくなっている。一方、 $L_s=0.24\text{m}$  および  $L_s=0.45\text{m}$  の場合には浮体の前後揺れ変位並びに係留索張力の応答特性に顕著な変化は認められない。

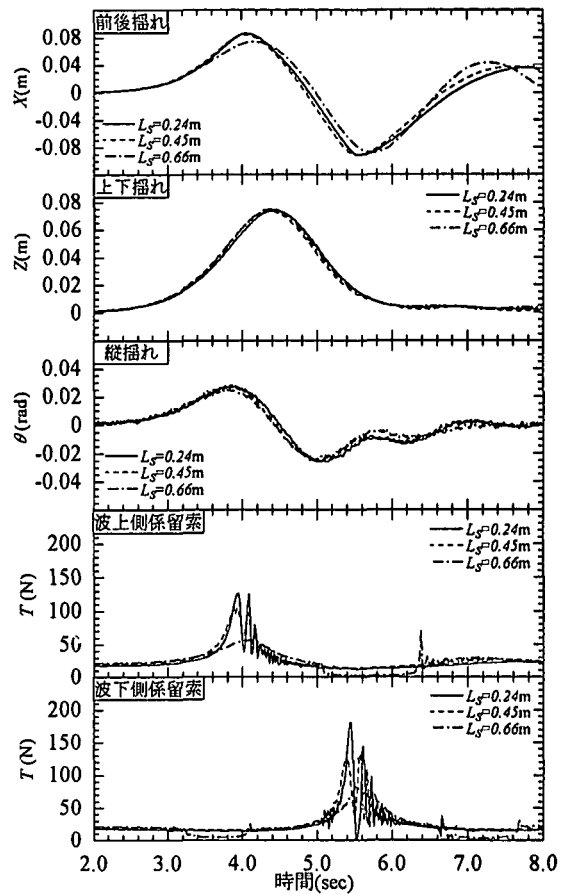
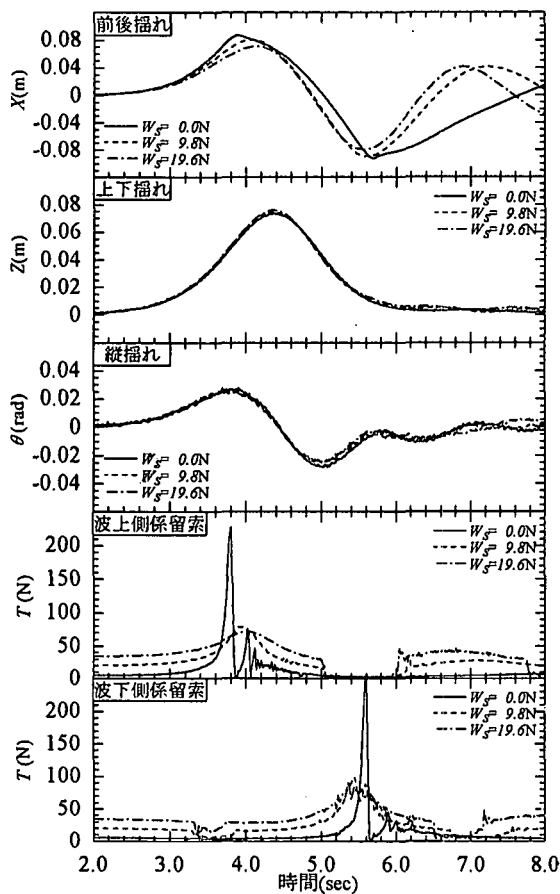


図-9 中間シンカー重量の変化に伴う応答特性の相違 図-10 中間シンカー設置場所の変化に伴う応答特性の相違

## 5. おわりに

孤立波の入射に伴う弛緩係留された浮体構造物の動揺並びに係留索張力に関する応答特性を水理模型実験により詳細に検討した。浮体の前後揺れ変位並びに係留索張力に関する応答特性は、初期張力、係留索単位水中重量、中間シンカーの重量並びに設置位置の影響を受けることが明らかとなった。すなわち、それらは係留索から浮体に作用する前後揺れ方向の復元力に大きく依存していると断言できる。さらに、係留索からの復元力が大きくなるような係留条件下で浮体構造物を係留し、浮体前後揺れの固有周期を短く設定することによって、係留索に作用する衝撃的張力を回避できるとともに、前後揺れの最大変位量を小さくすることが可能である。一般に、実際の浮体構造物の設計に際しては、波浪の卓越周期帯との同調を避ける必要があるために、海域特性を十分に考慮して係留条件を詳細に検討する必要があると思われる。今後は、数値解析によって、津波波形の実測値や複雑な地形を考慮に入れた入射波を設定するとともに、精度向上を含めて津波の襲来下にある浮体構造物の動的応答を予測する手法の確立を行う予定である。

最後に、水理模型実験の入射波として用いた孤立波の造波システムについては、岐阜大学工学部教授、安田孝志先生を中心とする研究グループによって開発されたものを利用させて頂いた。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- 首藤伸夫他(1988)：日本海中部地震津波の発生・増幅機構と破壊力，文部省科学研究費 自然災害特別研究研究成果 No.A-63-1，pp.215-227.
- 増田光一，佐竹寛之，高村浩彰，宮崎剛(1996)：津波による沿岸域に係留された浮体式構造物の運動と係留索張力応答の簡易推定法に関する研究，海岸工学論文集 第43巻，pp.956-960.
- 吉田宏一郎，鈴木英之，細見育郎，菜畑英生(1996)：津波・地震の浮体に対する影響評価，日本造船学会論文集 第180号，pp.403-409.