

横波が作用する弧状の浅喫水連結浮体構造物における応答特性

高村 浩彰*・多田 彰秀*・増田 光一**

1. はじめに

湖沼やダム貯水池などに親水性レクリエーション施設として導入が検討されている「横断浮歩道」は、浅喫水の浮体ユニットをピン構造で弧状に多数連結した浮体式構造物（以後、「連結浮体」と呼ぶ）である。このため、浮体ユニット数が増えるほど水平方向に対して不安定となり、波浪外力によって特有の応答特性を呈するものと予想される。既に、正面からの波浪（縦波）を受ける直線状の連結浮体（例えば登川, 1980）、マリーナの浮き桟橋（例えば平石ら, 1992）および大型弾性浮体（例えば前田ら, 1995）については、船舶工学の分野などで水理実験並びに数値解析が数多く実施され、その応答特性は明らかにされている。一方、ノルウェーのフィヨルドで供用されている Floating bridge のような横波を受けるアーチ状の弾性梁モデルに関する研究（渡邊ら, 1995）はあるものの、上述した横断浮歩道のような浮体間をピン構造で連結した弧状の連結浮体が横波を受ける場合の波浪応答特性については、殆ど検討されていないのが現状である。このようなことから、本研究では、始めに横波を受ける弧状の浅喫水連結浮体に関する波浪応答解析手法を開発する。次いで、3 連結および 5 連結浮体の動揺特性および連結部軸力の応答特性を明らかにするために水理模型実験を行い、得られた実験値と数値解析結果との比較から開発した波浪応答解析手法の有効性を検証する。

2. 連結浮体の波浪応答解析手法

(1) 基本仮定および解析座標系

定式化に際して導入した基本仮定を示せば以下のとおりである。

- 各浮体ユニットは剛体とし、その運動は 3 次元 6 自由度とする。
- 入射波による連結浮体の動揺は、初期配置された位置から微小である。
- 個々の浮体に作用する流体力の相互干渉は無視する。

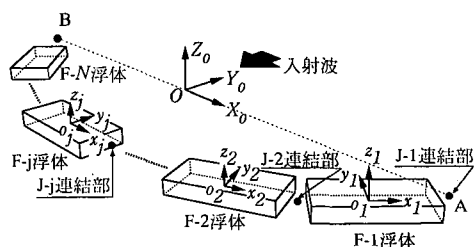
る。

- 各浮体の連結部は、1 つの回転方向に対して剛結合、他の 2 つの回転方向に対してピン結合されている。

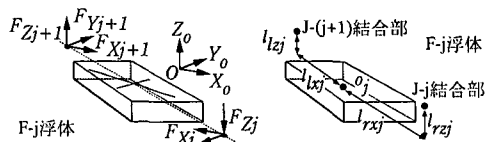
なお、個々の浮体に作用する流体力については、J. V. Wehausen ら (1960) が提案したグリーン関数を用いるとともに、Papanikolaou (1983) の離散化法を採用した三次元特異点分布法より算定した。

連結浮体の応答解析に用いる座標系を図-1 に示す。固定座標系の原点 O は、連結浮体の A 端と B 端とを結ぶ直線上の midpoint に位置している。入射波は、 Y_0 軸の正方向から負方向へと伝播する。さらに、浮体番号は、 Y_0 軸正方向に向かって右側からナンバリングされている。また、各浮体の局所座標系はそれぞれ浮体ユニットの重心位置を原点とし、浮体長手軸方向を x 軸としている。

基本仮定 d) に基づいて、各浮体ごとに定義される局所座標系の x_j 軸回り（横揺れ）を剛結合、 y_j 軸回り（縦揺れ）並びに z_j 軸回り（船首揺れ）をピン結合と設定すれば、 $F-j$ 浮体の左右の連結部に作用する y_j 軸回りおよび z_j 軸回りの荷重はゼロとなる。さらに、波浪によって生じる連結浮体の横揺れはすべて拘束されているため、運動方程式中で横揺れの変位量はゼロとなるばかりでな



(a) 連結浮体の解析座標系



(b) 連結部荷重

(c) $F-j$ 浮体重心と連結部間の距離

図-1 解析座標系

* 正会員 工修 西松建設(株) 技術研究所

** 正会員 工博 日本大学教授 理工学部海洋建築工学科

く、連結部の x_j 軸回りの荷重はすべての連結部において同一の値となる。したがって、 $F-j$ 浮体の連結部に作用する荷重については、局所座標系の各軸に平行な成分だけを考慮すればよいことになる (図-1(b) 参照)。

(2) $F-j$ 浮体の重心に作用する荷重

局所座標系上からみた $F-j$ 浮体の重心に作用する荷重 $\{F_j\}$ は、左右の連結部に作用している固定座標系上の荷重 $\{F_{oj}\}$ (図-1(b) 参照) を用いて (1) 式のように表すことができる。

$$\begin{aligned}\{F_j\} &= [B_{ij}]\{f_{ij}\} + [B_{rj}]\{f_{rj}\} \\ &= [B_{ij}][C_j]\{F_{oj+1}\} + [B_{rj}][C_j]\{F_{oj}\} \\ &= [Q_j]\{F_{oj+1}\} + [P_j]\{F_{oj}\} \\ &\quad (j=1, 2, \dots, N) \cdots (1)\end{aligned}$$

ここで、 $\{f_{ij}\}$ および $\{f_{rj}\}$ は局所座標系からみた $F-j$ 浮体の左側および右側の連結部に作用する荷重である。また、 $[B_{ij}]$ および $[B_{rj}]$ は、それぞれ左側および右側の連結部に作用している荷重を浮体の重心に作用する荷重に変換する局所座標系上でのマトリックスであり、以下のようになる。

$$[B_{ij}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -l_{xj} & 0 \\ l_{xj} & 0 & l_{xj} \\ 0 & -l_{xj} & 0 \end{bmatrix} \quad (j=1, 2, \dots, N) \cdots (2)$$

$$[B_{rj}] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & l_{xj} & 0 \\ -l_{xj} & 0 & l_{xj} \\ 0 & -l_{xj} & 0 \end{bmatrix} \quad (j=1, 2, \dots, N) \cdots (3)$$

なお、上式中の記号は、図-1(c) に示すような $F-j$ 浮体の重心と両連結部までの距離を表している。浮体重心と結合部までの座標変換を容易に行うために、上式中には $F-j$ 浮体の横揺れに関する項も記述してある。さらに、(1) 式中の $[C_j]$ は固定座標系上から局所座標系上への座標変換マトリックスを示しており、以下のとおりである。

$$[C_j] = \begin{bmatrix} \cos(x_j, X_o) & \cos(x_j, Y_o) & \cos(x_j, Z_o) \\ \cos(y_j, X_o) & \cos(y_j, Y_o) & \cos(y_j, Z_o) \\ \cos(z_j, X_o) & \cos(z_j, Y_o) & \cos(z_j, Z_o) \end{bmatrix} \quad (j=1, 2, \dots, N) \cdots (4)$$

(3) $F-j$ 浮体に関する運動方程式

局所座標系で表示される $F-j$ 浮体の周波数領域における運動方程式は、各浮体の付加質量係数を含んだ質量係数マトリックス $[M_j]$ 、造波減衰係数マトリックス $[N_j]$ 、復元力係数マトリックス $[B_j]$ 、浮体の重心に作用す

る荷重ベクトル $\{F_j\}$ 、波強制力ベクトル $\{E_{oj}\}$ および変位ベクトル $\{X_j\}$ を用いて以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned}(-\omega^2[M_j] + i\omega[N_j] + [B_j])\{X_j\} + \{F_j\} \\ = [D_j]\{X_j\} + [P_j]\{F_{oj}\} + [Q_j]\{F_{oj+1}\} = \{E_{oj}\} \\ (j=1, 2, \dots, N) \cdots (5)\end{aligned}$$

なお、 $\{E_{oj}\}$ の算定に際しては、各浮体に作用する波強制力の位相差および波入射角の関係を考慮している。

(4) 隣接する浮体ユニットの連続条件

固定座標系で示された $F-j$ 浮体における左右連結部の座標を局所座標系を用いて表示すると、(6) 式および (7) 式のようになる。

$$\begin{aligned}\{U_{ou}\} &= \{o_j\} + [C_j]^t \{U_j\} \\ &= \{o_j\} + [C_j]^t \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} + [C_j]^t [R_{uj}] \begin{bmatrix} \phi_j \\ \theta_j \\ \psi_j \end{bmatrix} + [C_j]^t \begin{bmatrix} -l_{xj} \\ 0 \\ l_{xj} \end{bmatrix} \\ &= \{o_j\} + [J_j]\{X_j\} + [C_j]^t \{d_{uj}\} \cdots \cdots (6) \\ \{U_{orj}\} &= \{o_j\} + [C_j]^t \{U_j\} \\ &= \{o_j\} + [C_j]^t \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} + [C_j]^t [R_{rj}] \begin{bmatrix} \phi_j \\ \theta_j \\ \psi_j \end{bmatrix} + [C_j]^t \begin{bmatrix} l_{rxj} \\ 0 \\ l_{rxj} \end{bmatrix} \\ &= \{o_j\} + [K_j]\{X_j\} + [C_j]^t \{d_{rj}\} \cdots \cdots (7)\end{aligned}$$

ここで、 $\{U_{ou}\}$ および $\{U_{orj}\}$ はそれぞれ固定座標系で表示された $F-j$ 浮体の左側および右側連結部の座標、 $\{U_j\}$ および $\{U_{rj}\}$ はそれぞれ局所座標系上でみた左側および右側連結部の座標、 $\{o_j\}$ は固定座標系の原点 O から $F-j$ 浮体の重心までの距離である。さらに、 $\{d_{uj}\}$ および $\{d_{rj}\}$ はそれぞれ局所座標系上でみた左右の連結部と $F-j$ 浮体重心との距離を示している。 $[C_j]^t$ は $[C_j]$ の転置マトリックスを示している。また、 $[R_{uj}]$ および $[R_{rj}]$ は、それぞれ $F-j$ 浮体の重心における回転方向変位を左右連結部での変位に変換する局所座標系上でのマトリックスを表示しており、以下のとおりである。

$$[R_{uj}] = \begin{bmatrix} 0 & l_{xj} & 0 \\ -l_{xj} & 0 & -l_{xj} \\ 0 & l_{xj} & 0 \end{bmatrix} \quad (j=1, 2, \dots, N) \cdots (8)$$

$$[R_{rj}] = \begin{bmatrix} 0 & l_{rxj} & 0 \\ -l_{rxj} & 0 & l_{rxj} \\ 0 & -l_{rxj} & 0 \end{bmatrix} \quad (j=1, 2, \dots, N) \cdots (9)$$

各浮体間には連結されているため、固定座標系での $F-j$ 浮体の左側連結部の座標と $F-j+1$ 浮体の右側連結部の座標は同一となり、(10) 式が成立する。

$$\{U_{orj+1}\} = \{U_{ouj}\} \quad (j=1, 2, \dots, N-1) \cdots (10)$$

さらに、浮体が初期配置された位置 (浮体が動揺していない静止状態) においても上式が成立しなければならぬため、次式のように書き直すことができる。

$$[K_{j+1}]\{X_{j+1}\}=[J_j]\{X_j\} \quad (j=1, 2, \dots, N-1) \dots\dots (11)$$

なお、 $F-j$ 浮体の右側端部および $F-N$ 浮体の左側端部は、既知の座標点に固定されている。

(5) 連結浮体の運動方程式

各浮体の運動方程式 (5) 式および連結部での結合条件を示す (11) 式をまとめると以下のような連結浮体の運動方程式が誘導される。なお、前述したように、局所座標系で表示された各浮体の横揺れは全て拘束されているため、横揺れに関する行および列を除外している。

$$\begin{bmatrix} 0 & K_1 & & & \\ P_1 & D_1 & Q_1 & & 0 \\ & J_1 & 0 & K_2 & \\ & & \ddots & & \\ 0 & & P_N & D_N & Q_N \\ & & J_N & 0 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{o1} \\ X_1 \\ F_{o2} \\ \vdots \\ X_N \\ F_{oN+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ E_{o1} \\ 0 \\ \vdots \\ E_{oN} \\ 0 \end{bmatrix} \dots\dots (12)$$

最後に (12) 式の連立方程式を解くことによって、各浮体の重心位置における動揺並びに結合部に作用する荷重を計算することが可能である。

3. 水理模型実験

水理模型実験は、西松建設 (株) 技術研究所の平面水槽 (長さ 25 m × 幅 18 m × 水深 1.5 m) において、3 連結あるいは 5 連結の連結浮体に規則波を入射させて、その時の浮体の動揺量、連結部の軸力および中央部の浮体底面に作用する圧力を計測した。図-2 は 5 連結浮体の場合の実験概念図を示しており、表-1 には浮体模型の諸元および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 3 次元計測装置) を用いて連結浮体の中央に位置する浮体 (以後、中央浮体と呼ぶ) およびそれに隣接する浮体を対象に計測した。さらに、圧力計を中央浮体の底面 9 カ所に取り付けて、浮体動揺時の圧力分布も計測した。実験パラメーターである浮体模型の喫水については、模型内部に平板の錘を挿入し浮体重量の調整によって変化させた。

浮体模型および連結部の詳細を図-3 に示す。連結部の構造は、横揺れだけを拘束した 2 ピンタイプのヒンジとなっている。また、全ての連結部に (株) SSK 社製のロードセル (定格 30 kg) を取り付けて軸力を計測した。ロードセルは模型の一部となるため、連結部の可動角への悪影響や浮体重量のアンバランスなどを引き起こさないように十分配慮して製作した。なお、連結浮体の両端部 (A 端と B 端) については、連結部と同様の 2 ピンタイプのヒンジを用いて架台に固定させた。

連結浮体の初期配置形状は、 Y_0 軸に対して凹型配置のみを対象とした。特に、初期配置形状の違いが基本的な

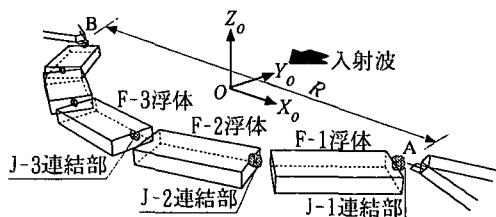


図-2 5連結浮体の実験概念図

表-1 模型諸元および実験条件

		浮体(圧力計有)		浮体(圧力計無)		
浮体喫水	(m)	d	0.02	0.05	0.02	0.05
浮体幅	(m)	B	0.3			
浮体長さ	(m)	L	0.675			
浮体高さ	(m)	H	0.1			
浮体質量	(kg)	W	4.050	10.125	4.050	10.125
横揺れ慣性モーメント(kg $\cdot$ m)		I_x	0.329	0.511	0.380	0.528
縦揺れ慣性モーメント(kg $\cdot$ m)		I_y	0.121	0.072	0.082	0.082
浮体重心高さ	(m)	KG	0.056	0.065	0.055	0.074
前後揺れメタセンター	(m)	GM_x	1.930	0.716	1.860	0.693
左右揺れメタセンター	(m)	GM_y	0.296	0.093	0.296	0.092
水深	(m)	h	1.0			
波周期	(sec)	T	0.60~1.90			
波振幅	(m)	a	0.015, 0.025			
波浪条件			規則波			
固定架台間距離	(m)	R	3 連結		2.28	
			5 連結 A タイプ		3.41	
			5 連結 B タイプ		3.64	

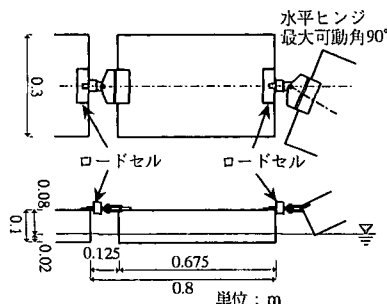


図-3 連結浮体模型の連結部

波浪応答特性に及ぼす影響を明らかにするため、5 連結浮体では固定架台間の距離 R (図-2 参照) を変化させて水理実験を行った。また、実験の再現性を高めるために、実験開始前に模型初期位置の再設定を毎回行った。

4. 実験結果および数値解析との比較

(1) 3 連結および 5 連結浮体実験の比較

図-4 は、固定架台と連結浮体とを結合する J-1 連結部で発生する軸力 (T_x) の応答特性を示したものである。縦軸には無次元化された軸力を、横軸には無次元波数

B/λ を採用して整理されている。一方、図-5には、中央浮体（3連結のF-2浮体、5連結のF-3浮体）での上下揺れに関する応答特性が示されている。図中で、 B は浮体幅(m)、 ρ は流体密度(kg/m^3)、 g は重力加速度(m/s^2)、 L は浮体長さ(m)、 a は波振幅(m)、 d は浮体喫水(m)、 λ は波長(m)である。両図中の●、○および□は、それぞれ喫水 $B/d=6$ ($d=5\text{ cm}$) での5連結浮体Aタイプ、喫水 $B/d=6$ での3連結浮体および喫水 $B/d=15$ ($d=2\text{ cm}$) での3連結浮体の実験結果である。

図-4に示す3連結浮体の実験結果から、喫水の小さい $B/d=15$ の軸力の方が $B/d=6$ よりも小さくなっていることが確認でき、喫水の変化は軸力の応答特性に影響を及ぼすことがわかる。また、両者ともに $B/\lambda=0.12$ で最大値を、 $B/\lambda=0.28$ と $B/\lambda=0.43$ の近傍で極大値をとっている。これらは、各運動方向の固有周期による共振点と解釈できる。一方、喫水を一定 ($B/d=6$) とした場合の3連結および5連結浮体の実験結果の比較からは、 $B/\lambda < 0.12$ (長周期側) では定量的にほぼ同様な特性を有しているものの、 $B/\lambda \geq 0.12$ (短周期側) では、前者が後者よりも大きくなっていることが確認される。

図-5に示す上下揺れ (z) 応答特性の結果からは、全てのケースともに軸力の応答特性と同じような周期帯で極大値が発生していることが読みとれる。さらに、喫水の違いによって、上下揺れの応答特性に有意な差は発生していない。

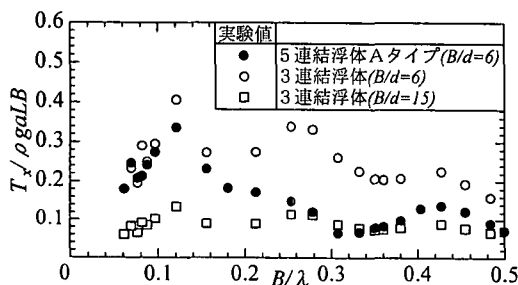


図-4 連結部軸力 (J-1 連結部)

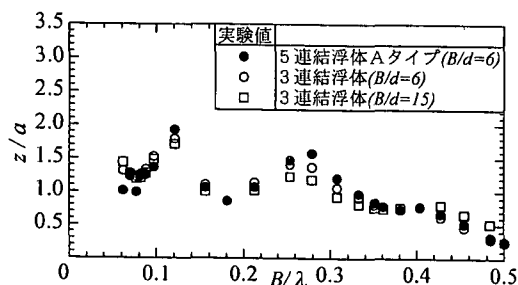


図-5 中央浮体の上下揺れ応答特性

(2) 5連結浮体の実験結果と数値解析結果との比較

図-6および図-7には喫水を $B/d=15$ とした時の5連結浮体Aタイプ並びにBタイプの実験結果および解析結果がプロットされている。図-6の縦軸はJ-1連結部に作用する軸力の無次元値が、図-7の縦軸は中央浮体での上下揺れ (z) が採用されている。5連結浮体の実験から、予想した以上に波漂流力の影響が大きく、初期配置形状から定常動揺時の位置までのドリフト量が大きくなっていることが明らかになった。このため、数値解析に際しては、前述したように横波下の連結浮体の釣合位置として初期配置形状をそのまま与える場合(方法1)に加え、水理模型実験から得られた定常動揺時の位置を与える場合(方法2)についても比較検討した。

Aタイプでの軸力の解析結果では、方法2(破線)の方が方法1(実線)よりも小さな値となっている。さらに、方法2の解析結果は、定性的に実験結果をよく再現しているものと判断される。しかしながら、定量的には $B/\lambda > 0.15$ の短周期側において、解析結果が実験結果より過大となっている。また、固定架台間距離 R を変化したAタイプおよびBタイプの比較からは、 R の大きいBタイプで軸力がAタイプよりも増大していることがわかる。これは、Bタイプの配置形状がAタイプよりも直線状に近くなり、軸力が増大したためと考えられる。

図-7の上下揺れ応答特性に関する実験結果からは、固定架台間距離 R による有意な差は認められない。さら

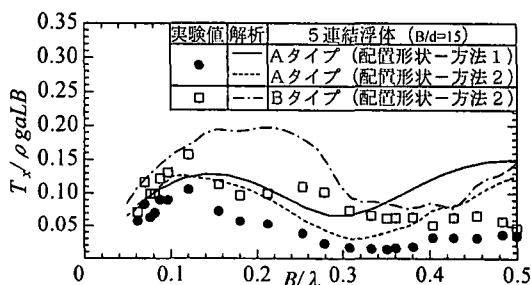


図-6 5連結浮体の連結部軸力 (J-1 連結部)

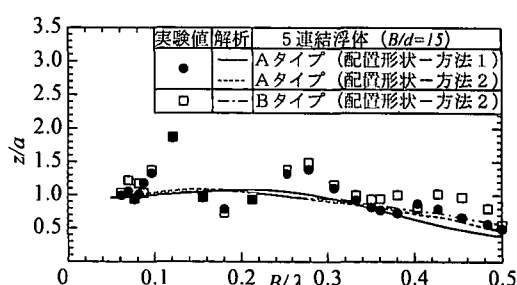


図-7 5連結浮体の上下揺れ応答特性 (F-3 浮体)

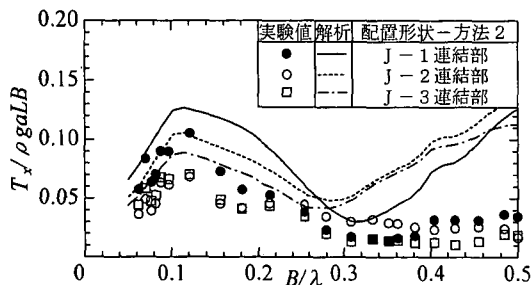
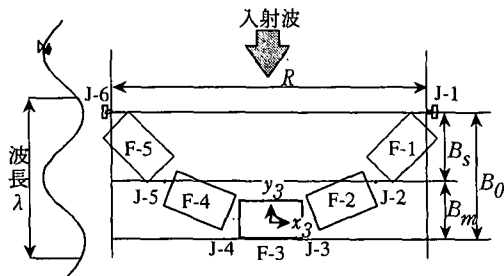
図-8 5連結浮体 A タイプの連結部軸力 ($B/d=15$)

図-9 横波が作用した連結浮体の釣合状態模式図

に、解析結果が共振点以外の周期帯で実験結果とよく一致していることや定常動揺する位置の違いが上下揺れ応答特性に及ぼす影響は小さいことも確認される。

図-8は喫水を $B/d=15$ とした5連結浮体(Aタイプ)の各連結部に作用する軸力の応答特性を比較している。実験結果に注目すれば、 $B/\lambda < 0.22$ および $B/\lambda > 0.40$ の領域では、J-1連結部の軸力(●)が最も大きな値となっている。一方、 $0.22 \leq B/\lambda \leq 0.38$ の領域では、J-1連結部の軸力が他の軸力よりも小さくなるとともに、J-2連結部の軸力(○)が最大軸力となっていることが確認される。また、上述したように横波下の5連結浮体では、初期配置形状からのドリフトが大きく、各周波数毎にその値も異なっている。任意の周波数における定常動揺の釣合状態を模式的に示したものが図-9である。J-1連結部の軸力が減少する $0.22 \leq B/\lambda \leq 0.38$ の領域では、図-9に示す B_s および B_m の値が入射波の半波長 $\lambda/2$ に極めて近い値となっていることが実験より確認された。すなわち、波の入射波側に位置する浮体(F-1およびF-5浮体)と波の透過側にある浮体(F-2、F-3およびF-4浮体)が逆位相で運動しているものと判断される。換言すれば、J-2連結部とJ-5連結部を腹とした動揺が出現しており、それがJ-1連結部に作用する軸力の応答特性に影響を及ぼし、3連結浮体とは異なる軸力特性を発

生させたものと考えられる。なお、図-8には方法2による軸力の解析結果もプロットされている。定性的には上述の現象を含めて実験結果を概ね再現しているものの、定量的には $B/\lambda > 0.15$ の短周期側で解析結果が実験結果より過大となっている。これは、解析モデルで考慮することができないピン連結部の微小な隙間から発生する横揺れや摩擦抵抗などに起因するものと考えられる。

5. 結 言

連結浮体数、初期配置形状および喫水の変化は、横波を受ける弧状の浅喫水連結浮体の動揺特性には大きく影響を及ぼさないものの、連結部軸力の応答特性を支配する因子となっていることが水理模型実験より明らかとなった。また、連結浮体の波浪応答解析手法として、定常動揺時の釣合位置に初期配置形状を与える方法(方法1)および水理模型実験から得られた形状を与える方法(方法2)を開発した。それらの解析結果は、実験結果を長周期側で概ね再現できることが確認された。一方、短周期側では連結部の微小な隙間から発生する横揺れや摩擦抵抗などによって、解析結果と実験結果との間に差が生じた。今後は、流体力の相互干渉効果などを取り入れることによって数値解析手法の改良を行うとともに、詳細な検討を行う予定である。

最後に、実験模型を提供して頂いたゼニヤ海洋サービス(株)並びに本研究の遂行にあたり終始協力して頂いた日本大学大学院の星野貴彦氏(現 株式会社がまかつ)に対して、ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 登川幸生 (1980): 連結された浅喫水箱形浮遊式構造物の波浪応答に関する基礎的研究, 日本大学博士論文, 277 p.
- 平石哲也・高山和司・鹿籠雅純・松永栄一 (1992): マリーナ用柔構造浮体の特性に関する水理模型実験, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 796-800.
- 前田久明・増田光一・宮島省吾・生駒智樹 (1995): ポンツーン型超大型浮体式海洋構造物の波浪中弾性応答に関する研究, 日本造船学会論文集第178号, pp. 203-212.
- 渡邊英一・宇都宮智昭・高須賀太広・伊藤恭平 (1995): 独立カラム型浮体基礎橋梁の波浪応答に及ぼす浮体基礎形状の効果, 海洋開発論文集 Vol. 11, pp. 333-338.
- Papanikolaou, A. (1983): On Alternative Methods for the Evaluation of Green's Function of a Pulsating Three-Dimensional Source for Arbitrary Water Depth and Frequency of Oscillation. Techn. Univ. Berlin, TUB/ISM Rep. No. 83/17, 85 p.
- Wehausen, J. V. and E. V. Laitone (1960): "Surface Waves", Encyclopedia of Physics, Vol. 9 Springer, verlag, Berlin, pp. 446-778.