

横断浮歩道の流体力および波浪応答特性に関する水理模型実験 Experimental Studies on Wave Responses of a Floating Footpath

高村 浩彰* 多田 彰秀*
Hiroaki Takamura Akihide Tada

要 約

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の検討がな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である。しかしながら、連結する浮体ユニット数の増加とともに、横波を受けて水平方向に不安定な形状となるため、横断浮歩道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。そのため、親水性レクリエーション施設として横断浮歩道を湖面へ導入していくためには、歩行者の安全性を確保する上で重要となる波浪に着目した検討が必要と考えられる。このような背景から、著者らは水理模型実験並びに数値解析を実施し、横断浮歩道の流体力特性並びに波浪応答特性について詳細に検討したので報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 理論解析
- § 3. 水理模型実験の概要
- § 4. 波浪による基本的応答特性
- § 5. 横断浮歩道特有の応答特性
- § 6. おわりに

として高まってきた自然環境を楽しむ空間として再評価されるようになっている。さらに、このようなダム貯水

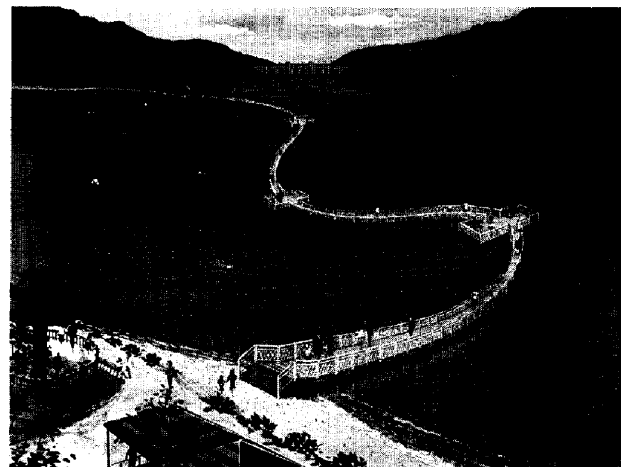


写真-1 横断浮歩道のイメージ図

§ 1. はじめに

従来より、洪水調節および利水のための水資源確保を主目的として建設されてきたダム貯水池は、大半が豊富な緑に包まれた山岳部に位置するために、社会的ニーズ

*技術研究所海洋技術課

池周辺部を整備し、人々が観光やレクリエーション等の目的で利用しやすくすることは、地元の地域振興にも大いに役立つものであり、今後とも積極的に推進されていくものと予想される。そのような観点に立てば、写真-1に示すようなダム貯水池の水面上を横断して対岸へ渡り、ダム周辺部の散策を満喫できる「横断浮歩道」は、近い将来、親水性レクリエーション施設として導入の可能性が十分に高いものと予想される。

本研究は、横断浮歩道の設計を実施する際に必要な技術資料、特に浮体に作用する環境外力および浮体の動揺に関する基本特性の解明を最終目標としている。一般に、横断浮歩道に作用する環境外力としては、波浪、波漂流力、風および流れが考えられる。ここでは、歩行者の安全性を確保する上で重要となる波浪に着目し、横断浮歩道の波浪応答特性を水理模型実験並びに理論解析より明らかにし、横断浮歩道が有する流体力および波浪動揺の基本特性について考察を加えている。

§ 2. 理論解析¹⁾

2-1 基本仮定および座標系

基礎方程式の定式化に際し、次のような基本仮定を設けた。

- ①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。
- ②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。
- ③個々の浮体に作用する流体力の相互干渉は無視する。

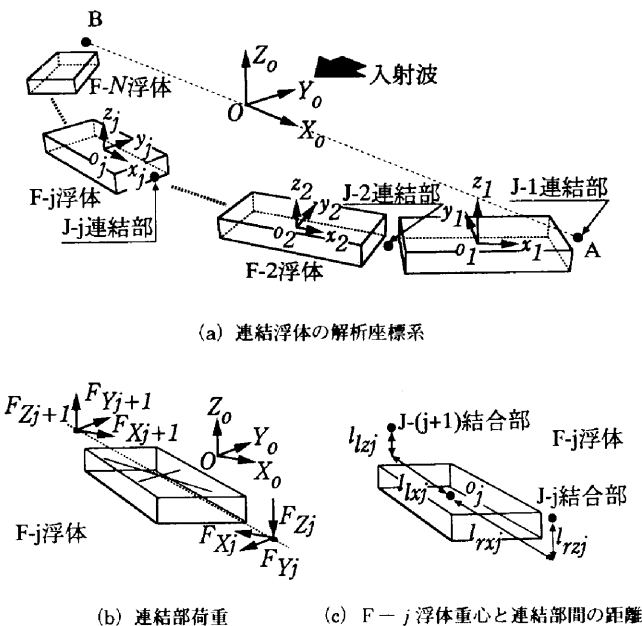


図-1 解析座標系

④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の解析方法については、参考文献²⁾を参照されたい。

連結浮体の波浪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、Y₀軸の正方向から負方向へと伝播する。さらに、浮体番号は、Y₀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④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)、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軸回りの力はゼロとなる。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く、連結部のx_j軸回りの力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力については、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)。

2-2 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力{F_j}は、左右の連結部に作用している固定座標系上の力{F_{0j}}(図-1(b)参照)を用いて(1)式のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \{F_j\} &= [B_{lj}]\{f_{lj}\} + [B_{rj}]\{f_{rj}\} \\ &= [B_{lj}][C_j]\{F_{0,j+1}\} + [B_{rj}][C_j]\{F_{0j}\} \\ &= [Q_j]\{F_{0,j+1}\} + [P_j]\{F_{0j}\} \end{aligned} \quad (1)$$

(j = 1, 2, \dots, N)

ここで、{f_{lj}}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力である。また、[B_{lj}]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力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、以下のようなる。

$$[B_{lj}] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -l_{lj} & 0 \\ l_{lj} & 0 & l_{lj} \\ 0 & -l_{lj} & 0 \end{bmatrix} \quad (2) \quad [B_{rj}] = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & l_{rj} & 0 \\ -l_{rj} & 0 & l_{rj} \\ 0 & -l_{rj} & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

(j = 1, 2, \dots, N)

なお、上式中の変数は、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。また、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。

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

$$(j=1, 2, \dots, N)$$

2-3 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 $\{E_o\}$ 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。

$$(-\omega^2[M_j] + i\omega[N_j] + [B_j])\{X_j\} + \{F_j\} = [D_j]\{X_j\} + [P_j]\{F_o\} + [Q_j]\{F_{o,j}\} = \{E_o\} \quad (5)$$

$$(j=1, 2, \dots, N)$$

なお、 $\{E_o\}$ 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。

2-4 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) 式ようになる。

$$\{U_{oj}\} = \{o_j\} + [C_j]\{u_{oj}\}$$

$$= \{o_j\} + [C_j] \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} + [C_j][R_j] \begin{bmatrix} \phi_j \\ \theta_j \\ \psi_j \end{bmatrix} + [C_j] \begin{bmatrix} -l_{wj} \\ 0 \\ l_{wj} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$= \{o_j\} + [J_j]\{X_j\} + [C_j]\{d_{oj}\}$$

$$\{U_{oj}\} = \{o_j\} + [C_j]\{u_{oj}\}$$

$$= \{o_j\} + [C_j] \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} + [C_j][R_j] \begin{bmatrix} \phi_j \\ \theta_j \\ \psi_j \end{bmatrix} + [C_j] \begin{bmatrix} l_{wj} \\ 0 \\ -l_{wj} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$= \{o_j\} + [K_j]\{X_j\} + [C_j]\{d_{oj}\}$$

ここで、 $\{U_{oj}\}$ および $\{U_{oj}\}$ 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、 $\{U_{oj}\}$ および $\{U_{oj}\}$ 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浮体重心までの距離である。さらに、 $\{d_{oj}\}$ および $\{d_{oj}\}$ 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。 $[C_j]'$ は $[C_j]$ の転置マトリックスである。また、 $[R_j]$ および $[R_j]$ 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。

$$[R_j] = \begin{bmatrix} 0 & l_{wj} & 0 \\ -l_{wj} & 0 & -l_{wj} \\ 0 & l_{wj} & 0 \end{bmatrix} \quad (8) \quad [R_j] = \begin{bmatrix} 0 & l_{wj} & 0 \\ -l_{wj} & 0 & l_{wj} \\ 0 & -l_{wj} & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$(j=1, 2, \dots, N)$$

各浮体間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。

$$\{U_{o,j+1}\} = \{U_{oj}\} \quad (j=1, 2, \dots, N-1) \quad (10)$$

さらに、浮体が初期配置された位置（各浮体は動揺しておらず静止状態）においても上式が成立しなければならないため、次式のように書き直すことができる。

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

なお、F-1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。

2-5 連結浮体の運動方程式

各浮体の運動方程式を示す(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。

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

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. 水理模型実験の概要

水理模型実験は、当社技術研究所所有の平面水槽（長さ25m×幅18m×高さ1.5m）において平成8年9月1日から10月31日の期間に実施した。図-2に示すように5連結浮体、7連結浮体および9連結浮体に規則波を入射

させて、浮体の動揺および連結部に作用する軸力を計測した。また、写真-2には9連結浮体での実験状況を、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。なお、模型の縮尺は平面水槽の造波特性および浮体喫水の再現性を考慮して1/10とし、フルード則に従って水理実験を実施した。

浮体の動揺量は、(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

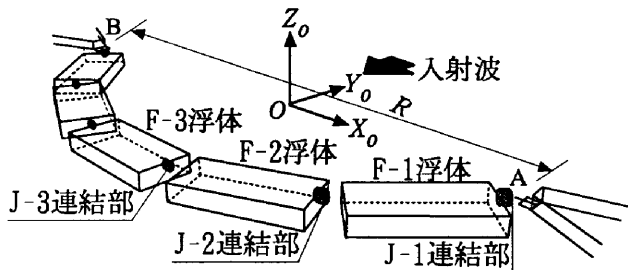


図-2 5連結浮体の実験概要

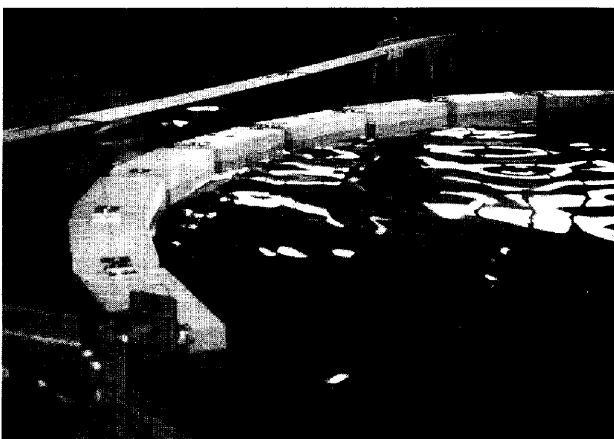


写真-2 実験状況

表-1 浮体模型の諸元および実験条件

| | | 模型 | 実機 | |
|-----------|-------|--------|-----------|-----------|
| 浮体喫水 | (m) | d | 0.02 | 0.2 |
| 浮体幅 | (m) | B | 0.3 | 3.0 |
| 浮体長さ | (m) | L | 0.675 | 6.75 |
| 浮体高さ | (m) | H | 0.1 | 1.0 |
| 浮体質量 | (Kg) | W | 4.050 | 4050.0 |
| 横揺慣性モーメント | (Kgm) | I_x | 0.082 | 830.0 |
| 縦揺慣性モーメント | (Kgm) | I_y | 0.380 | 3800.0 |
| 浮体重心高さ | (m) | KG | 0.055 | 0.55 |
| 前後揺メーター | (m) | GM_x | 0.296 | 2.96 |
| 左右揺メーター | (m) | GM_y | 1.860 | 18.60 |
| 水深 | (m) | h | 1.0 | 10.0 |
| 波周期 | (sec) | T | 0.62~1.50 | 1.96~4.74 |
| 波振幅 | (m) | a | 0.01 | 0.1 |
| 波浪条件 | | 規則波 | | |

体の中央に位置する浮体を対象に計測した。すなわち、浮体上面の3点に取り付けられた計測用マーカーの変位を非接触型変位計(CCDカメラ)で計測するとともに、デジタル変換されたマーカーの変位量を浮体重心が原点である局所座標系に変換し、浮体の応答変位を算出した。

浮体を結合する連結部の詳細を図-3に示す。結合部は、水平方向に最大90°、鉛直方向に最大70°まで可動ができ、横揺れを拘束した2ピンタイプのヒンジを採用した。また、連結部の片側に(株)SSK社製のロードセル(LT25-30、定格30kg)を取り付けて軸力を計測した。なお、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配慮して製作した。特に、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。このため、全ての連結浮体は局所座標系における横揺れを拘束した状態となっている。

水理模型実験に際して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、連結浮体数(5連結、7連結および9連結浮体)および端部に配置された浮体長軸と X_0 軸とのなす角度(端部配置角度： $\alpha=25^\circ, 37.5^\circ, 50^\circ$)との関係から各浮体間の相対角 θ_j ($6.25^\circ \sim 25.0^\circ$)を一定とすることにより決定された。初期配置形状の概念図を図-4に、初期配置形状の連結浮体数と端部配置角度との関係から算出された設置幅 R 並びに浮体間の相対角 θ_j を表-2に示す(図-4参照)。なお、浮体の動揺によって模型は初期配置形状からドリフトを起こすことが予想されたため、実験の再現性を高めるために、実験開始前に毎回模型の位置を初期配置形状に再設定した。

§ 4. 波浪による基本的応答特性

4-1 波漂流力による配置形状および連結部軸力の特性

水理模型実験に基づけば、弧状に配置された連結浮体は、波漂流力の影響によって初期配置形状から定常動揺時の位置まで変位している。この時の中央浮体における変位量を y_3 と定義すれば(図-5参照)、波漂流力によって中央浮体は、初期配置された局所座標系上の原点から y 軸に沿って y_3 だけドリフトし、その位置で定常動揺する。そのため、固定架台の間隔 R が一定でかつ連結部間の距離が変化しない場合には、浮体間相対角 θ_j および端部配置角度 α が変化し、その量は中央浮体の変位量 y_3 に依存する。さらに、周期ごとに異なる y_3 によって決定される初期配置形状の変化が連結浮体の応答特性に影響を及ぼす

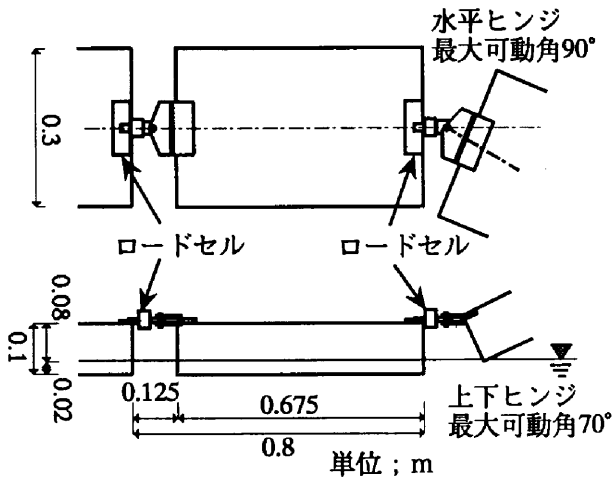


図-3 連結部の構造条件

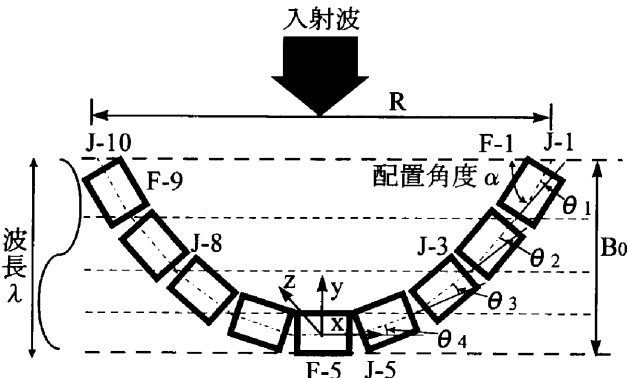


図-4 9連結浮体での初期配置形状概念図

表-2 初期配置形状の設置幅並びに浮体間の相対角

| | 5連結浮体 | 7連結浮体 | 9連結浮体 |
|--------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 端部配置角度 $\alpha=50.00^\circ$ | $R=3.28\text{m}$ $\theta_j=25.00'$ | $R=4.70\text{m}$ $\theta_j=16.67'$ | $R=6.11\text{m}$ $\theta_j=12.50'$ |
| 端部配置角度 $\alpha=37.50^\circ$ | $R=3.58\text{m}$ $\theta_j=18.75'$ | $R=5.08\text{m}$ $\theta_j=12.50'$ | $R=6.57\text{m}$ $\theta_j=9.375'$ |
| 端部配置角度 $\alpha=25.00^\circ$ | $R=3.81\text{m}$ $\theta_j=12.50'$ | $R=5.37\text{m}$ $\theta_j=8.333'$ | $R=6.92\text{m}$ $\theta_j=6.250'$ |

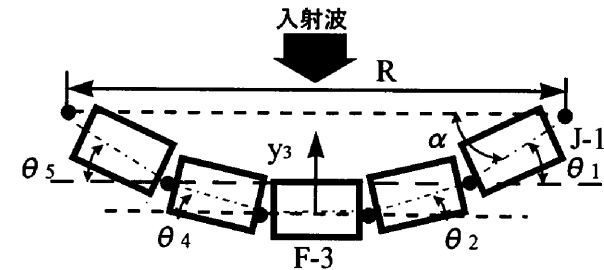


図-5 5連結浮体の初期配置形状模式図

こととなる。なお、初期配置形状は数値解析の入力条件となるために、本報では横断浮歩道の波浪応答特性を報告する前に、波漂流力に伴う初期配置形状の変化に関する基本的な応答特性を紹介する。

図-6に端部配置角度 $\alpha=50^\circ$ とした5連結浮体 (各

浮体相対角: $\theta_j=25^\circ$) の中央浮体 (F-3浮体) における初期配置形状から定常動揺時の位置までの変位量に関する波周期特性を示す。縦軸には局所座標系上での変位量 y_3 を、横軸には無次元波数 B/λ を採用して整理している。ここで、 B は浮体幅 (0.3m) を、 λ は波長 (m) を表している。図より、最大で0.45mの変位量が発生し、各波周期に対応してその量は変化していることがわかる。さらに、波漂流力によって連結部にも軸力が発生しており、その特性を図-7に示す。ここでの実験パラメータは図-6と同様である。図の縦軸には軸力 (kgf) 横軸には無次元波数 B/λ を採用して整理している。図中の○は波漂流力によってJ-1連結部に作用する荷重を、●は規則波下でJ-1連結部に作用する軸力を示している。図-7より、前者は後者よりも小さいものの、無次元波数 B/λ が大きい短周期側では後者の25%程度と大きくなることがわかった。

4-2 規則波による連結部軸力の波浪応答特性

図-8から図-10は、端部配置角度 α を 50° とした5連結浮体 (各浮体相対角: $\theta_j=25^\circ$) に規則波を入射させた場合の動揺量および軸力に関する波浪応答特性を示している。図-8は左右揺れ (y)、図-9は上下揺れ (z)、図-10は各連結部での軸力である。図-8および図-9の縦軸には応答変位量を波振幅 a で無次元化した値が、図-10の縦軸には連結部軸力を流体密度 ρ (kg/m^3)、重

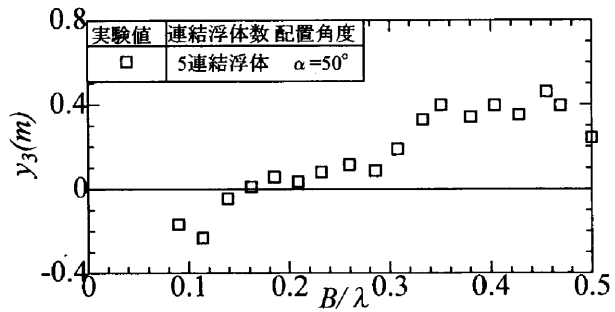


図-6 5連結浮体に作用する波漂流力に伴う変位量 (F-3浮体)

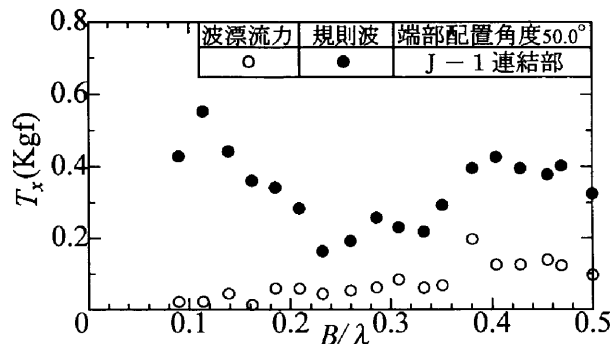


図-7 5連結浮体における連結部軸力の応答特性

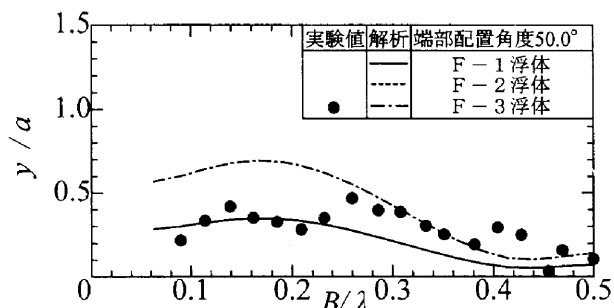


図-8 5連結浮体における左右揺れ応答特性

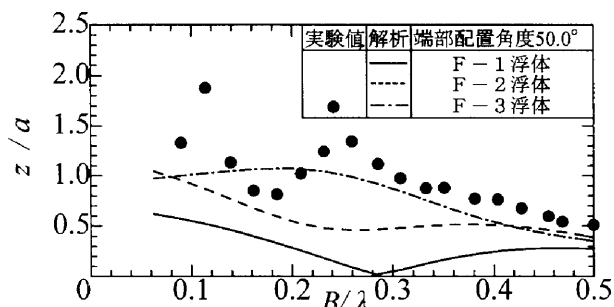


図-9 5連結浮体における上下揺れ応答特性

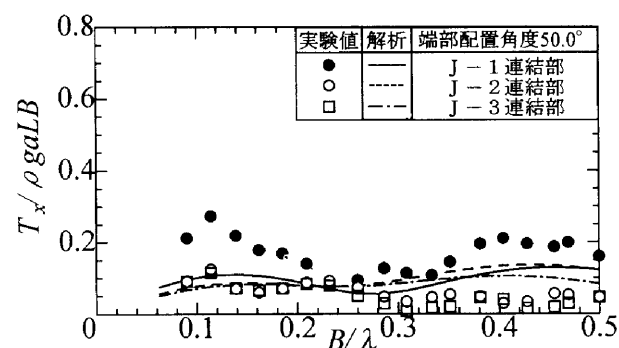


図-10 5連結浮体における連結部軸力の応答特性

力加速度 g (m/s^2), 浮体長さ L (m) および浮体幅 B (m) で無次元化した値が示されている。また、図中の記号(○, ●および□)は実験結果を、3つの線は解析結果をそれぞれ示しており、凡例のように各浮体および各連結部に対応している。

図-8の実験結果に着目すれば、左右揺れの応答特性では上下揺れ、縦揺れおよび横揺れの固有周期の影響による極大値の存在が認められる。一方、同図中の解析結果からはそれらの影響が認められない。これは、数値解析で微小変位の仮定を設けているのに対して、水理実験では浮体が連結されているために左右揺れと上下揺れなどに伴う連成振動が発生し、微小変位の仮定が成立していないためと考えられる。

図-9に示す上下揺れの応答特性に関する結果では、上述した連成振動の影響のために解析結果が極大値を精度

良く再現できていないものの、概ね定性的には実験結果を再現しているものと考えられる。さらに、F-1浮体、F-2浮体およびF-3浮体の解析結果を比較してみれば、各浮体間の上下揺れに相違が読み取れる。特に、中央浮体(F-3浮体)とF-1浮体との差が大きくなっている。これは、端部に配置された浮体(F-1浮体並びにF-5浮体)に比べ中央に位置するF-3浮体では、連結部での拘束が緩くなっているためと考えられる。

図-10に示す各連結部における軸力の応答特性から、 $B/\lambda=0.23$ 以外の領域では、J-1連結部の軸力(●)が最も大きな値となっている。一方、 $B/\lambda=0.23$ では、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。J-1連結部の軸力が減少する $B/\lambda=0.23$ では、図-4に示す B_0 の値が入射波の波長 λ に極めて近い値となっていることが水理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たものと判断される。

§ 5. 横断浮歩道特有の応答特性

5-1 初期配置形状の変化に伴う応答特性

ここでは、初期配置形状の変化が応答特性に及ぼす影響を明らかにするため、連結浮体数を7連結と一定にし、端部配置角度 α を実験パラメータとして変化させた水理実験並びに数値解析の結果から考察を加える。

水理実験に際しては、端部浮体の配置角度 α を 25° 、 37.5° および 50° の3種類とし初期配置形状を変化させた。なお、端部浮体の配置角度 α が小さいケースほど、各浮体間の相対角 θ_j は小さくなり直線に近い形状で連結浮体が初期配置されている。

図-11および図-12は、中央部に配置されたF-4浮体の左右揺れおよび上下揺れの応答特性を示す。縦軸には波振幅 a で無次元化された応答変位を、横軸には無次元波数 B/λ を採用して整理している。さらに、図中の記号および線は、それぞれ凡例中に示した端部配置角度 α に対応した実験結果並びに解析結果を示している。なお、数値解析の入力条件として用いる初期配置形状は、波漂流力によるドリフトを考慮していない。

図-11に示す左右揺れの応答特性では、連成振動の影響による上下揺れ、横揺れおよび縦揺れの固有周期帯で発生する極大値が、端部配置角度 α の変化に関係なくほ

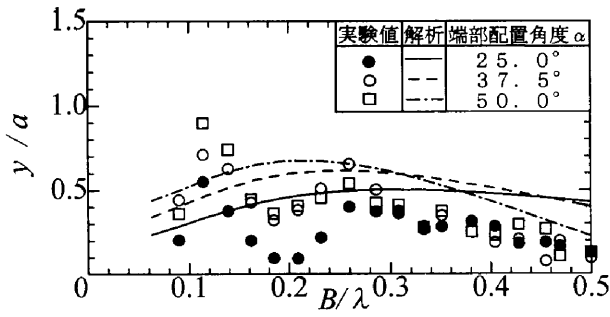


図-11 F-4浮体(中央)左右揺れ応答特性

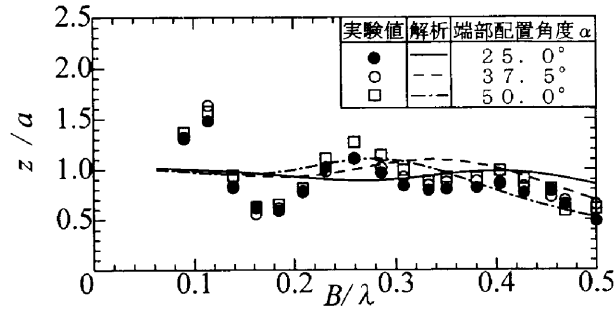


図-12 F-4浮体(中央)上下揺れ応答特性

ほぼ同じ B/λ の値近傍に出現している。特に、縦揺れの固有周期である無次元波数 $B/\lambda = 0.26$ の付近で発生している極大値では、配置形状が直線に近い端部配置角度 $\alpha = 25^\circ$ で応答量が最小となっている。このように、配置形状が直線に近い場合には、各浮体に入射する波浪の位相差が他の実験ケースよりも小さくなるために、発生する縦揺れが小さくなっている。

図-12に示す上下揺れの結果からは、端部配置角度 α の違いによって無次元波数 B/λ の大きい短周期側で応答に若干の相違が認められるものの、極大値の発生周期帯並びに応答量については、 α の値に関係なく概ね一致していることが読みとれる。

図-13は、7連結浮体のJ-1連結部に作用する軸力の応答特性を示している。縦軸には、連結部軸力を流体密度 ρ (kg/m³)、重力加速度 g (m/s²)、浮体長さ L (m) および浮体幅 B (m) で無次元化した値が採用されてい

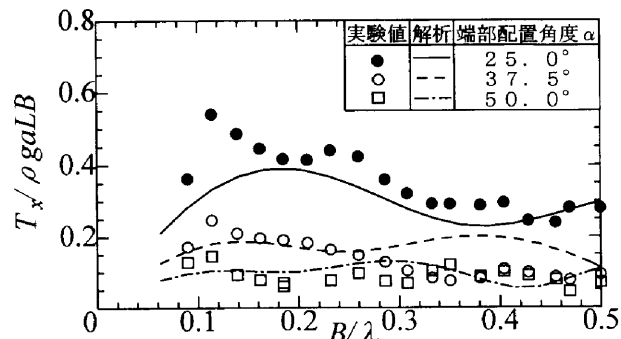


図-13 J-1連結部軸力の応答特性

る。端部配置角度 α の減少に伴って軸力が大きくなる傾向が読みとれる。これは、左右揺れの応答特性でも述べたように、端部配置角度 α が小さいほど初期配置形状は直線状に近くなっているため、各浮体に入射する波の位相差が小さくなり、隣り合う浮体同士を拘束する力(軸力)が強くなったためと考えられる。逆に、端部配置角度 α が大きい場合には、入射する波の位相差が大きく、さらに入射波に伴って生じる各浮体間の動揺の位相差も大きくなるために、連結部に作用する軸力が小さくなるものと考えられる。

5-2 連結浮体数の変化に伴う応答特性の相違

ここでは、各浮体間の相対角 θ_j を一定 ($\theta_j = 12.5^\circ$) として連結浮体数(5連結浮体, 7連結浮体および9連結浮体)を変化させた場合の規則波による応答特性について検討する。なお、連結浮体数の違いに伴って端部配置角度 α は異なるものの、各浮体間の相対角 θ_j が 12.5° と一定にしているために、初期配置形状の曲率は同一値となっている。

図-14および図-15は、5連結, 7連結および9連結浮体の中央浮体(5連結浮体のF-3浮体, 7連結浮体のF-4浮体および9連結浮体のF-5浮体)における左右揺れおよび上下揺れの応答特性である。両図の縦軸には波振幅 a で無次元化された応答変位が、横軸には無次元波数 θ_j が採用されている。

図-14の結果からは、入射する波の位相差が同一であ

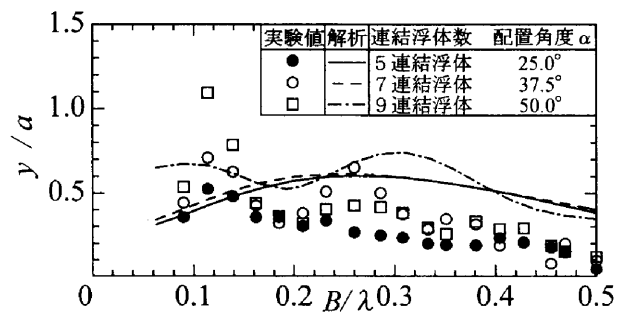


図-14 中央部浮体の左右揺れ応答特性

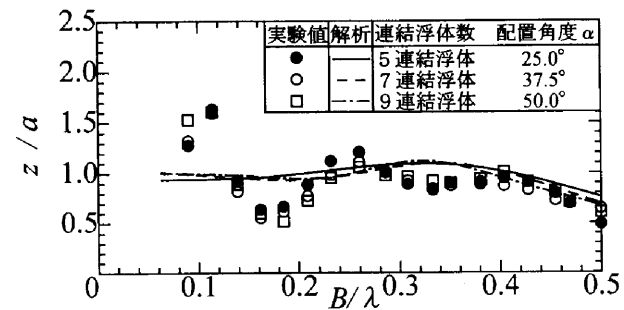


図-15 中央部浮体の上下揺れ応答特性

っても連結浮体数の増加に伴って、左右揺れの応答量が大きくなっていることが読み取れる。これは、連結浮体数の増加とともに浮体構造物としての自由度が増し、隣り合う連結浮体同士の拘束力が小さくなったためと考えられる。一方、図-15に示す上下揺れの結果からは、連結浮体数の変化に伴う応答特性の相違を読み取ることはできない。

図-16は、5連結、7連結および9連結浮体のJ-1連結部に作用する軸力の応答特性を示している。縦軸には、流体密度 ρ (kg/m³)、重力加速度 g (m/s²)、浮体長さ L (m) 並びに浮体幅 B (m) で無次元化された連結部軸力の値が示されている。図-16より B/λ の値に応じて若干の相違は認められるものの、連結浮体数の増加に伴ってJ-1連結部の軸力が減少する傾向が読みとれる。さらに、9連結浮体（端部配置角度 $\alpha=50^\circ$ ）の各連結部に作用する軸力の応答特性を図-17に示す。図-16に示した9連結浮体に関する実験結果に注目すれば、 $B/\lambda=0.24$ の付近で解析結果との相違が大きくなっている。これは、 $B/\lambda=0.24$ の近傍で図-4に示す B_0 （浮体を連結したときの入射波方向の長さ）と入射波の波長 λ がほぼ等しくなっており、そのために中央浮体側と端部浮体側が逆位相で動揺しているためである。この現象は、5連結浮体（図-10参照）でも観測されたものではあるが、連結浮体数が多くなったために、各連結部に作用する軸力の応答特性は5連結浮体の場合より複雑になっている（図-17参照）。特に、 $B/\lambda=0.24$ の近傍では、他の周期帯よりも大きな縦揺れが発生し、それに前後揺れおよび上下揺れが連成するような非線形運動が卓越したものと推察される。

§ 6. おわりに

本報では、水理模型実験並びに数値解析を詳細に実施することによって、横断浮歩道の波浪応答特性を明らかにすることができた。すなわち、横断浮歩道は浮体ユニットをピン構造で弧状に多数連結した浮体構造物であるため、予想した以上に波漂流力が大きく作用していること、連結浮体数および初期配置形状の変化に伴って浮体ユニットの左右揺れ並びに連結部軸力の応答特性が大きく変化すること等が明らかとなった。最後に、水理模型実験で模型を提供して頂いたゼニヤ海洋サービス（株）に謝意を表します。

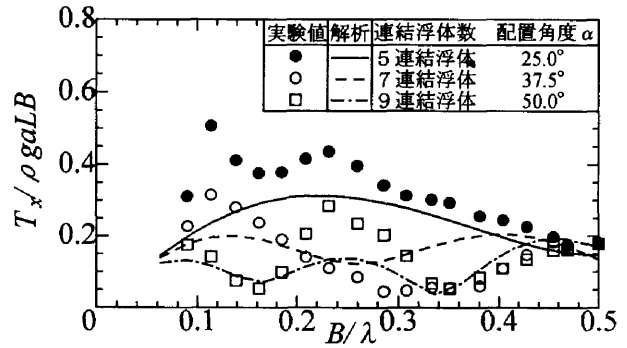


図-16 J-1 連結部軸力の応答特性

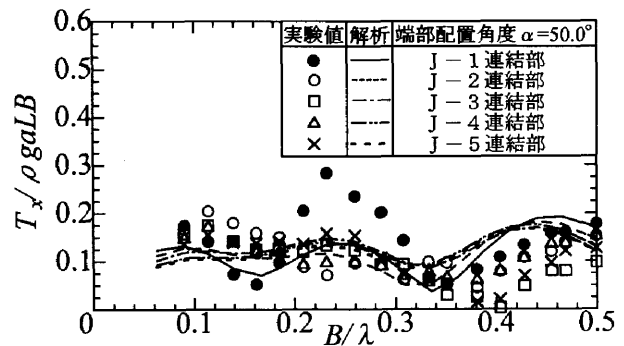


図-17 9連結浮体の各連結部における軸力応答特性

参考文献

- 1) 高村浩彰, 多田彰秀, 増田光一: 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, 海岸工学論文集 第43巻 (2), pp.931~pp.935, 1996.11.
- 2) 高村浩彰, 多田彰秀: 矩形浮体構造物の波浪応答に関する数値解析, 西松建設技報第19号, pp. 9~pp.16, 1996. 6.