

弾性梁状浮体の剛性が動揺および断面力に及ぼす影響についての実験的研究

Experimental Study on Motions and Forces of Flexible Beam Floating Structures in Waves
and Effect of Rigidity of Body

白石 悟*・石見 剛**・米山治男*・近藤圭央***

Satoru Shiraishi, Go Ishimi, Haruo Yoneyama and Masuo Kondo

In recent years, various types of floating structures have been planned and constructed for the purpose of the effective utilization in coastal areas. The floating structures such as very large floating structures, floating bridges and submerged floating tunnels should be considered their flexible properties in the design. In this report, hydraulic model tests of a long flexible floating body are carried out and the results of the motion and the deformation are analyzed in order to evaluate the effect of incident wave direction, wave height, wave period and rigidity.

Keyword: Flexible floating structure, Motion, Force, Experiment

1. はじめに

近年、浮体橋梁あるいは超大型式浮体構造物等のように、浮体式構造物（以下、浮体）の長大化あるいは超大型化にともなって、波浪中の動揺解析において浮体を剛体としてではなく、弾性体として取り扱うことの必要性が高まってきている。今日では、浮体の波浪中弾性応答に関して、さまざまな研究が実施されているが^{1)~6)}、本論文では、浮体橋梁等のような長大な梁状浮体の弾性応答に関する実験的検討の結果について報告する⁷⁾。

2. 模型および水理模型実験手法

2. 1 模型

弾性梁状浮体の動揺および断面力に関する水理模型実験は、その単位体積重量およびヤング率が 98kg/m^3 、 410kg/cm^2 および 200kg/m^3 、 1600kg/cm^2 の2種類のポリウレタン製の弾性板を用いて行った。実験模型は図-1（図示したものはTYPE-B模型）に示すが、模型は厚さ20mmの薄い長方形板であり、その両端に位置保持用の直径50mmの穴を開けている。位置保持用ポールは水槽底面に固定されており、模型はその穴の部分ポールに差し込んで拘束される。ポールの径は40mmであり、高さは1.0mである。模型は波の作用時に自由に上下動する。すなわち鉛直方向については模型浮体は自由浮体であると言える。また、模型が弾性変形してもポールによって拘束されないよう板の穴の径を設定している。

表-1は、模型の種類を示したものであり、表には、模型の長さ L 、幅 B 、厚さ d 、密度 ρ 、ヤング率 E を

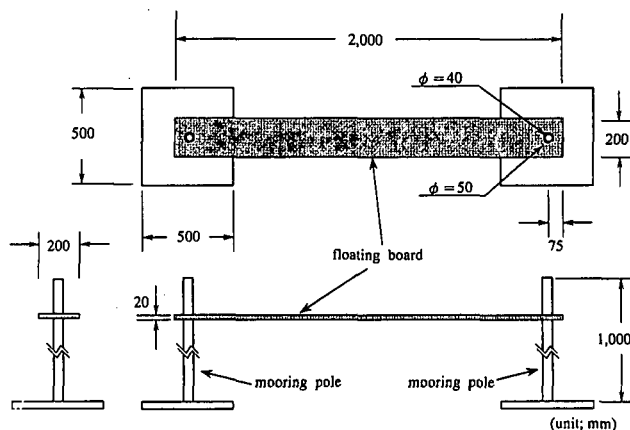


図-1 実験模型

表-1 模型の種類

Type	Length (m)	Width (m)	Thickness (m)	Density (kg/m^3)	E (kg/cm^2)
A	2.0	0.1	0.02	98.0	415.2
B		0.2			408.5
C		0.5			411.1
D		0.1		200.0	1658.7
E		0.2			1589.6
F		0.5			1584.2

表-2 実験条件(1)

	Model	Proto
Water Depth (m)	0.3	30.0
Wave Period (s)	0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6	8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26
Wave Height (m)	0.01, 0.02	1.0, 2.0
Wave Direction (deg)	0, 30, 60	0, 30, 60

* 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部(239 横須賀市長瀬3-1-1)

** 非会員 運輸省港湾技術研究所構造部

*** 非会員 (株)日本港湾コンサルタント(前運輸省港湾技術研究所研修生)

示している。模型は、ヤング率が2種類で、長さを2.0 mと一定にして、その幅を0.1, 0.2, 0.5 mの3種とした合計6種類である。模型はその表面を防水コーティングしたことから、その剛性はコーティング前と変化していることが予想された。したがって、すべての模型について実験前に空気中で単純梁状態で梁中央の変形量を測定し、ヤング率を求めた。これらの数値が表-1に示されている。ヤング率の小さい板については、コーティング前の数値は 322 kg/cm^2 であったが、実際にはA, B, Cの各模型について変形量から計算されたヤング率は、それぞれ、 $415, 418, 411\text{ kg/cm}^2$ であった。同様にD, E, Fの各模型については、コーティング後のヤング率は、それぞれ、 $1659, 1590, 1584\text{ kg/cm}^2$ であった。

2. 2 水理模型実験方法

図-2は、実験水槽（長さ19m×幅10m）と造波装置および模型等の配置を示す。浮体模型は水槽の中央にセットされる。波高は2基の容量式波高計で計測している。実験においては、模型の中央位置直上にレーザー式変位計をセットして模型浮体の上下動を計測している。また、加速度計および歪みゲージを模型の長手方向の $\pm 0.4L, \pm 0.3L, \pm 0.2L, \pm 0.1L$, および $0.0L$ （中央）の位置にセットして鉛直加速度および曲げ歪みを計測している。ここで、加速度計は波上側から順にAP-1からAP-9と呼称し、歪みゲージは同じく $\epsilon P-1$ から $\epsilon P-9$ と呼称する。

水理模型実験は、水深0.3mの状態で行った。波は周期0.8秒から2.6秒までの0.2秒おきの合計10周期（規則波）とした。波長 λ と浮体長 L との比 λ/L は0.48～2.16である。波向は 0° （模型に対して長軸方向から作用）を基本としたが、TYPE-B模型では、波向は $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の3種とした。波高は0.01mを基本としたが、TYPE-A模型においては、波高0.02mのケースについても実施し、波高の影響を調べた。

これらの実験条件をとりまとめて表-2および表-3に示す。なお、模型縮尺については、特に実機を想定しているわけではないが、縮尺を1/100としたときの実機の諸元を表-2に併記している。

3. 模型実験結果

3. 1 鉛直加速度および曲げ歪みの時系列

図-3は、弾性板両端および中央位置における鉛直加速度と曲げ歪みの時系列を示したものである。ただし、模型はTYPE-A模型であり、波高0.01m、波周期1.0 s、波向 0° の条件である。また、実験開始後100 s～106 sの間の時系列のみを図示している。鉛直加速度および曲げ歪みともにおおむね正弦波とみなせる波形であるが、鉛直加速度記録については板の固有振動成分と思われる高周波成分が含まれる。鉛直加速度については浮体中央（AP-5）よりも両端

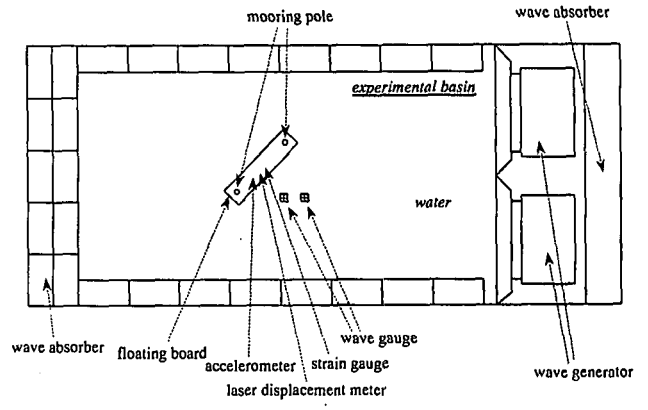


図-2 実験水槽と装置

表-3 実験条件（2）

Type	Wave Height(m)		Wave Direction(deg)		
	0.01	0.02	0	30	60
A	○	○	○		
B	○		○	○	○
C	○		○		
D	○		○		
E	○		○		
F	○		○		

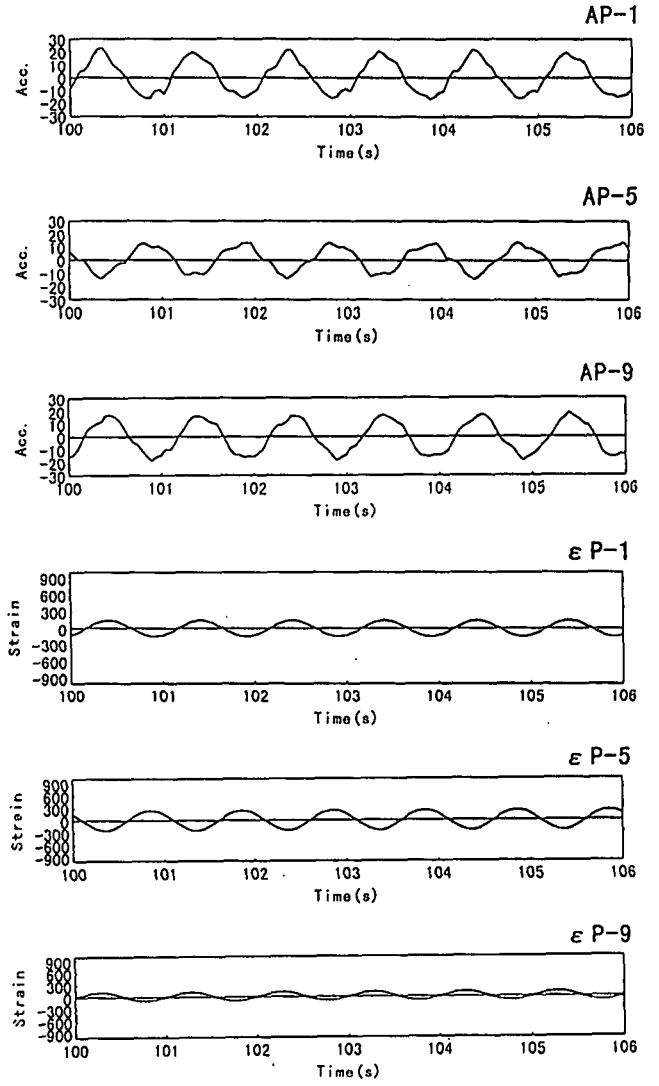


図-3 計測した鉛直加速度と曲げ歪みの時系列

(AP-1およびAP-9)においてやや大きく、曲げ歪みについては両端よりも浮体中央(εP-5)で大きい。

3. 2 波高の影響

図-4は、波高が0.01mと0.02mのときの鉛直加速度について模型実験結果を比較したものである。図の横軸は、浮体位置 X/L (X :長軸方向座標位置, L :浮体長)を示し、縦軸はその位置における最大鉛直加速度 $A_{max}(X)$ と波高 H との比を示す。また、図-5は、同じく最大曲げ歪みの軸方向分布を示しており、縦軸はその位置における最大曲げ歪み $\varepsilon_{max}(X)$ と波高 H の比を示す。これらの図より、浮体の各位置における鉛直加速度および曲げ歪みを波高で除した数値は、おおむね等しいことから、浮体の弾性応答は波高が当該波高程度(波高1cmのとき $H/\lambda=0.0023\sim0.010$ 、波高2cmのとき $H/\lambda=0.0046\sim0.021$)であれば、応答値は波高に対して線形性があると言える。

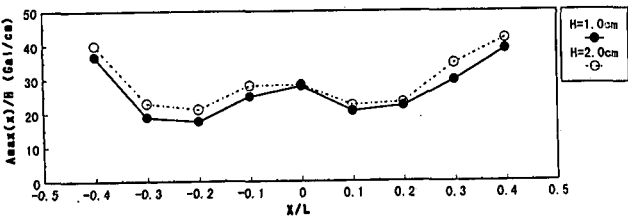


図-4 最大鉛直加速度の軸方向分布(波高影響)
(Aモデル, $H=0.01, 0.02\text{m}$, $T=1.0\text{s}$)

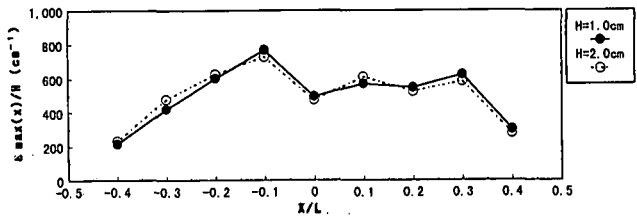
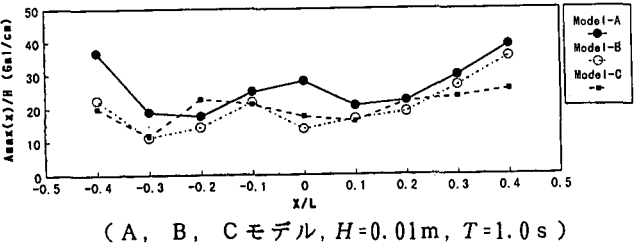


図-5 最大曲げ歪みの軸方向分布(波高影響)
(Aモデル, $H=0.01, 0.02\text{m}$, $T=1.0\text{s}$)

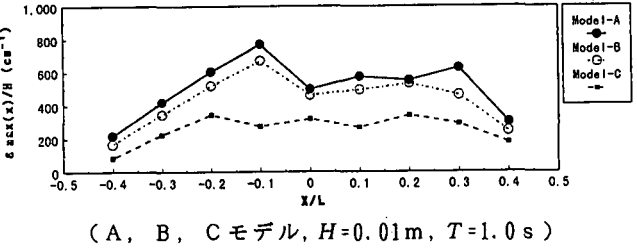
3. 3 浮体の剛性の影響

図-6は、波高 $H=0.01\text{m}$ 、波周期 $T=1.0\text{s}$ 、波向 $\alpha=0^\circ$ の条件で浮体の鉛直加速度の軸方向分布を示したものである。図の横軸は浮体位置 X/L (X :位置, L :浮体長)を示し、縦軸はその位置における最大鉛直加速度 $A_{max}(X)$ と波高 H との比を示す。最大鉛直加速度は浮体の中央部よりも板の両端付近($+0.4L$ または $-0.4L$)で大きいという傾向がみられる。ヤング率の小さいA, B, Cモデルにおいては、幅の狭いAモデルにおいて各断面位置における最大鉛直加速度が幅の広いB, Cモデルに比べてやや大きい。一方、ヤング率の大きいD, E, Fモデルにおいては、幅の狭いDモデルにおいて最大鉛直加速度が幅の広いE, Fモデルに比べて小さい傾向がみられる。この原因は定かでは無いが、後出する図-8を参照すると、板の固有振動数の差異の影響であると推察される。

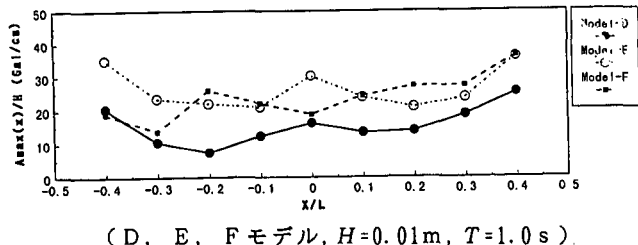
図-7は、波高 $H=0.01\text{m}$ 、波周期 $T=1.0\text{s}$ 、波向 $\alpha=0^\circ$ の条件で、浮体の曲げ歪みの軸方向分布を示したものである。図の横軸は浮体位置 X/L (X :位置, L :浮体長)を示し、縦軸はその位置における最大曲げ歪み $\varepsilon_{max}(X)$ と波高 H との比を示す。最大曲げ歪みは板の中央付近($+0.1\sim+0.2L$ または $-0.2\sim-0.1L$)で大きいという傾向がみられる。浮体中央($X/L=0.0$)で、曲げ歪みが最大とならないのは、模型中央には3軸の加速度計を設置したため、その影響によりその周辺では重量分布および曲げ剛性が、その他の部分よりも相対的に大きくなっており、その結果として曲げ歪みが小さくなったものと思われる。ヤング率の小さいA, B, Cモデルにおいては、幅の狭いAモデルにおいて各断面位置における曲げ歪みが最も大きいのにに対して、ヤング率の



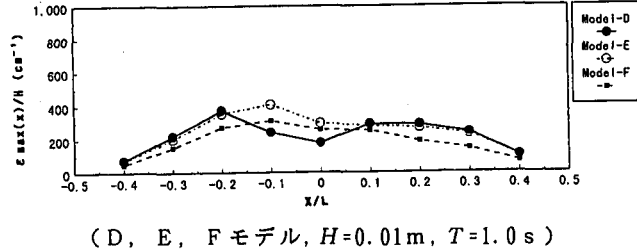
(A, B, Cモデル, $H=0.01\text{m}$, $T=1.0\text{s}$)



(A, B, Cモデル, $H=0.01\text{m}$, $T=1.0\text{s}$)



(D, E, Fモデル, $H=0.01\text{m}$, $T=1.0\text{s}$)



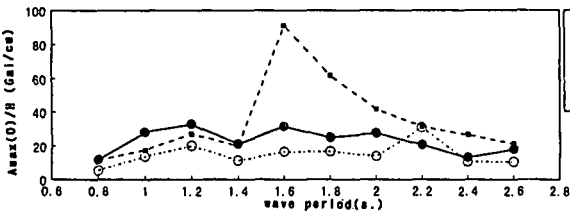
(D, E, Fモデル, $H=0.01\text{m}$, $T=1.0\text{s}$)

図-6 最大鉛直加速度の軸方向分布

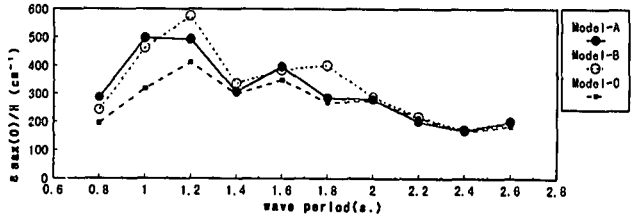
図-7 最大曲げ歪みの軸方向分布

大きいD, E, Fモデルにおいては、幅の狭いDモデルにおいて浮体中央部付近における曲げ歪みが、E, Fモデルに比べて小さくなっている傾向がみられる。Dモデルにおいて、浮体中央部付近で曲げ歪みが小さいのは、浮体幅が最も狭いことによって浮体上に加速度計を設置した影響が、他のモデルよりも顕著に生じているためと考えられる。

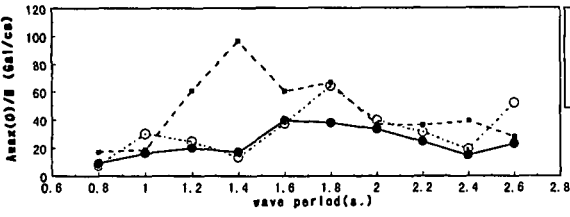
図-8および図-9は各モデルの浮体中央断面における最大鉛直加速度 $A_{max}(0)$ と最大曲げ歪み $\varepsilon_{max}(0)$ の周期特性である。最大鉛直加速度については、Cモデルの波周期1.6s付近と、Fモデルの波周期1.4s付近において鉛直加速度が大きく、これらの条件においては波周期が板の固有周期に近接しているものと思われる。ただし、これらの図は、浮体中央における値を示したものであって鉛直加速度の最大値は、図-6に示したように板の両端で大きくなることに留意する必要がある。曲げ歪みについては波周期1.2s ($\lambda/L=0.89$) 付近で最大値を示し、波周期が長くなるにつれて小さくなる傾向にある。なお、Aモデル, Dモデルについては、図-7に示したように、板の中央位置において曲げ歪みが小さくなっていることに注意する必要がある。とくに、Dモデルにおいては、この傾向が顕著であり、E, Fモデルに比べて曲げ歪みが小さくなっている。これは、前述したように浮体中央部における曲げ剛性および質量分布の不均一性によるものと思われる。なお、ヤング率の小さなA, B, Cモデルの曲げ歪みは、ヤング率の大きなD, E, Fモデルの曲げ歪みよりも大きい。



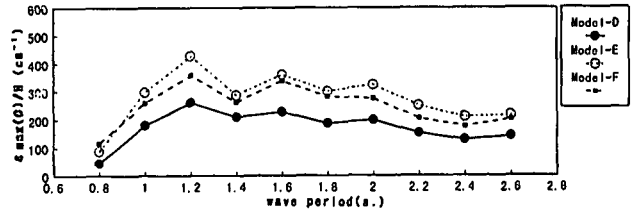
(A, B, Cモデル, $H=0.01\text{m}$)



(A, B, Cモデル, $H=0.01\text{m}$)



(D, E, Fモデル, $H=0.01\text{m}$)

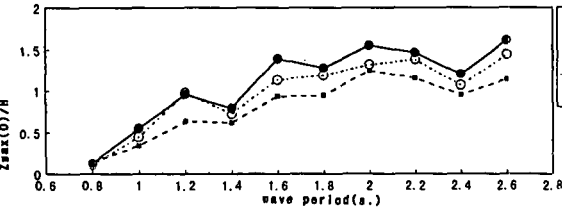


(D, E, Fモデル, $H=0.01\text{m}$)

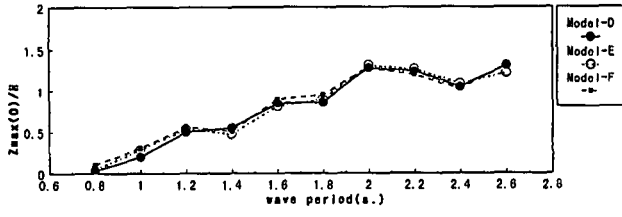
図-8 最大鉛直加速度の周期特性

図-9 最大曲げ歪みの周期特性

図-10は、各モデルの浮体中央断面における最大鉛直変位 $Z_{max}(0)$ の周期特性である。浮体中央部における最大鉛直変位は、波周期が長くなるに従って増加する傾向にあり、例えば、Aモデルの周期1.6s以上 ($\lambda/L > 1.26$) では最大鉛直変位は波高よりも大きくなる。ヤング率の小さなA, B, Cモデルにおいては、幅が広くなるほど最大鉛直変位が小さくなる傾向がみえるが、ヤング率の大きなD, E, Fモデルでは幅の影響はあらわれていない。



(A, B, Cモデル, $H=0.01\text{m}$)

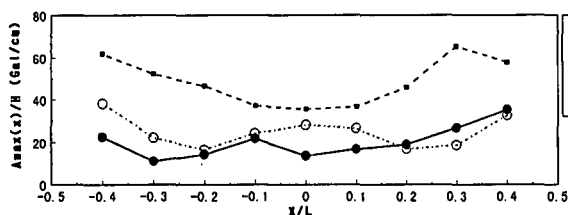


(D, E, Fモデル, $H=0.01\text{m}$)

図-10 最大鉛直変位の周期特性

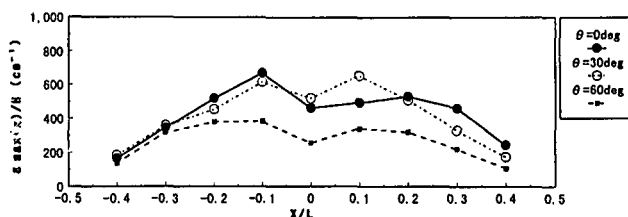
3. 4 波向の影響

図-11は、TYPE-Bの浮体について、波高 $H=0.01\text{m}$ 、波周期 $T=1.0\text{s}$ 、波向き $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の条件で浮体の鉛直加速度の軸方向分布を示したものである。図の横軸は浮体位置 X/L (X :位置, L :浮体長)を示し、縦軸はその位置における最大鉛直加速度 $A_{max}(X)$ と波高 H との比を示す。最大鉛直加速度は板の両端付近で大きいという傾向はいずれの波向についても共通している。ただし、斜波中 60° での鉛直加速度が波向 0° のそれよりも小さい傾向がある。



(Bモデル, $H=0.01\text{m}$, $T=1.0\text{s}$, $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$)

図-11 最大鉛直加速度の軸方向分布

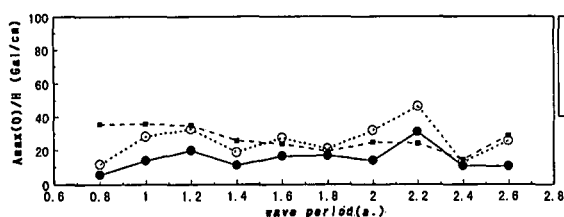


(Bモデル, $H=0.01\text{m}$, $T=1.0\text{s}$, $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$)

図-12 最大曲げ歪みの軸方向分布

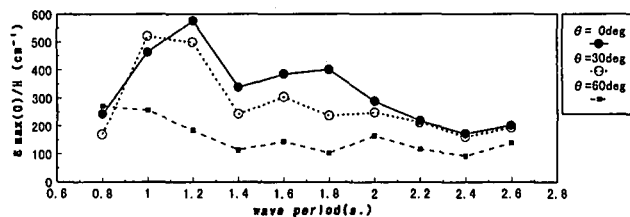
図-12は、図-11と同一の条件で、浮体の曲げ歪みの分布を示したものである。図の横軸は浮体位置 X/L (X : 位置, L : 浮体長) を示し、縦軸はその位置における最大曲げ歪み $\varepsilon_{max}(X)$ と波高 H との比を示す。最大曲げ歪みは板の中央付近 ($+0.1 \sim +0.2L$ または $-0.2 \sim -0.1L$) で大きいという傾向は、いずれの波向においても同一である。浮体中央 ($X/L=0.0$) で曲げ歪みが最大とならないのは、前述したように模型中央には3軸の加速度計を設置したため、その付近における剛性が、その他の部分よりも大きくなっていることによる影響と思われる。全体としては曲げ歪みは波向 0° で大きく、波向 60° で小さい。

図-13および図-14は、TYPE-Bの浮体について、波高 $H=0.01\text{m}$ 、波向 $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ の条件で浮体中央における鉛直加速度 $A_{max}(0)$ および曲げ歪み $\varepsilon_{max}(0)$ の周期特性を示したものである。鉛直加速度は波向 0° に比べて波向 $30^\circ, 60^\circ$ においてやや大きい。これに対して、浮体中央断面の曲げ歪みは波向 $\alpha=0^\circ$ のときの方が、波向 $30^\circ, 60^\circ$ のときよりも大きい。



(Bモデル, $H=0.01\text{m}$, $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$)

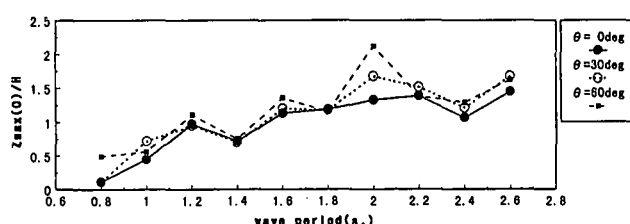
図-13 最大鉛直加速度の周期特性



(Bモデル, $H=0.01\text{m}$, $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$)

図-14 最大曲げ歪みの周期特性

図-15は、浮体中央断面における最大鉛直変位 $Z_{max}(0)$ の周期特性である。浮体の鉛直変位は波向のいかんにかかわらず、おおむね等しい。ただし、波周期 2.0s においては、斜波中の方がやや大きい。図-13に示すように最大鉛直加速度が斜波中で大きいにもかかわらず、浮体の鉛直変位は、あまり差異が無いが、この原因については、加速度波形のスペクトル解析等を行うことによってさらに分析する必要がある。



(Bモデル, $H=0.01\text{m}$, $\alpha=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$)

図-15 最大鉛直変位の周期特性

4. 数値シミュレーション

4. 1 解析モデル

弾性変形する浮体構造物を平板として、浮体の動揺解析に板の振動理論を適用する⁴⁾。弾性応答解析のモデルを図-16に示す。浮体の中心に x および y 座標をとり、浮体長、浮体幅は L, B で示す。入射波の波長を λ 、振幅を $\eta_0(x, y, t)$ とし、入射角は x 軸から y 軸に向かった角度 θ で表す。また、浮体設置点での水深を h 、浮体の鉛直動揺量を $\eta(x, y, t)$ であらわす。数値解析においては、弾性浮体の外縁を境界 B_0 として、流体を2つの領域に分る。すなわち、浮体の外側を外部領域 B_0 、内側を内部領域 B_i として、それぞれ速度ポテンシャルを仮定する。

解析においては以下の仮定を設ける。

- ① 浮体は一様水深の海域に設置されている。
- ② 浮体の板状であり、材質は一様とする。
- ③ 弾性変形による自由振動モードを考慮する。
- ④ 弾性浮体の波浪中の挙動と流体力の連成を考慮する。

⑤入射波は微小振幅規則波とし、入射波向は水平面内で任意に与えることができる。

図-17は浮体中央部における鉛直変位両振幅の実験値(レーザー式変位計で計測したもの)と計算値とを比較したものである。図の横軸は波周期である。両者の差異は大きい、浮体の中央部は両端に比べて変位が小さいこと、水理模型実験では、浮体の中央部に加速度計を設置したことによる重量分布の変化があったこと等が原因していると思われる。今後は鉛直加速度を積分して得られる鉛直変位の浮体軸方向の分布と計算値とを比較して、考察を進める必要がある。

また、実験値には浮体上に加速度計を設置したことによる重量分布および曲げ剛性の不均一性の影響等がみられた。現実の構造物においても、重量分布および曲げ剛性の分布が不均一となることが多いので、今後はこれらの影響を考慮した解析手法を検討する必要がある。

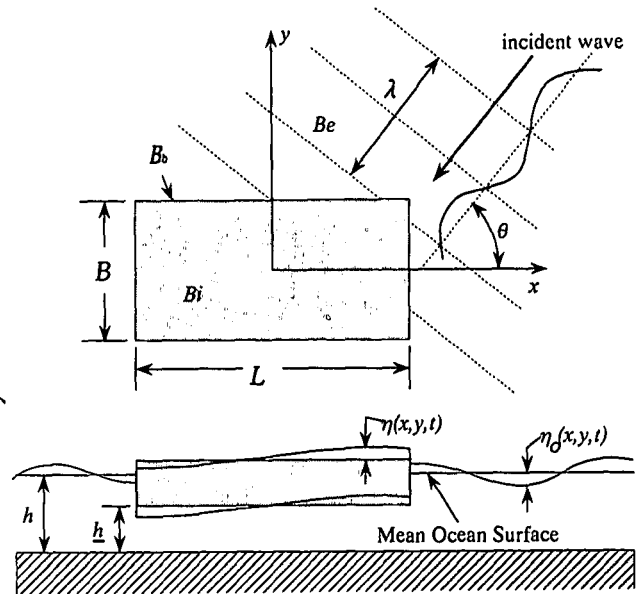


図-16 弾性浮体の動揺解析モデル

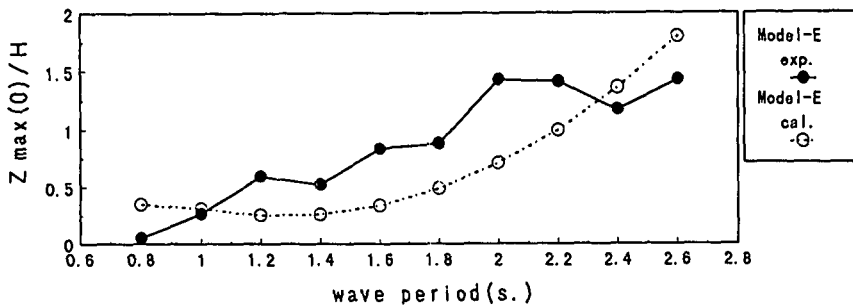


図-17 浮体中央部における鉛直変位の実験値と計算値の比較

5. 結論

- 1) 当該浮体では鉛直加速度は浮体の両端部で大きく、曲げ歪みは浮体の中央部で大きかった。鉛直加速度は、ヤング率の小さな浮体でより大きかった。一方、曲げ歪みは、ヤング率の小さな浮体で大きい。
- 2) 鉛直加速度には卓越する共振周期がみられ、その周期は版の曲げ剛性(ヤング率)によって相違する。曲げ剛性の大きな浮体では小さな浮体に比べて、より短周期側に卓越周期がみられた。

参考文献

- 1) Wen, Y. K. (1974); Interaction of Ocean Waves with Floating Plate, *Proc. ASCE*, Vol. 100, pp. 375-395
- 2) Toki, N. (1979); A Study on the Behavior of Huge Floating Structures in Regular Waves, *Jour. of Society of Naval Architects of Japan*, Vol. 146, pp. 185-194
- 3) 平石哲也, 高山知司, 鹿籠雅純, 松永栄一(1992); マリーナ用柔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
- 4) 白石悟, 米山治男, 上田茂(1994); 弾性変形を考慮した長大浮体の波浪中の動揺特性の検討、*海岸工学論文集*, 第41巻、pp. 896~900
- 5) 宇都宮智昭, 渡邊英一ほか(1995); 弾性変形を考慮した大型ポンツーン浮体の波浪応答特性について、*海岸工学論文集*, 第42巻、pp. 961~965
- 6) Wu, C., Utsunomiya, T. and Watanabe, E. (1997), Harmonic Wave Response Analysis of Elastic Floating Plates by Model Superposition Method, *Jour. of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, JSCE, No. 556, pp. 43-52
- 7) Shiraishi, S., Ishimi, G., Yoneyama, H., Kondo, M. (1996); Experimental Study on Motions of Long Flexible Floating Structures in Waves, *Proc. of International Workshop on Very Large Floating Structures*