

ヘキサフロートによる洋上多目的空間の創造

— 振動及び応力解析 —

泉川達哉、比嘉眞嗣

洋上多目的空間として活用できるコンクリート製六角形フロート（ヘキサフロート）の開発を行った。波に対するヘキサフロートの応答特性について、CAE による応答解析や造波水槽を用いた模型実験を行い、ヘキサフロートの振幅に関する計算モデルを考案した。また洋上に敷設したヘキサフロートの挙動について加速度や発生応力の測定を行った。

1 はじめに

四方を海で囲まれた沖縄では、従来から埋め立て工法による土地造成が盛んに行われてきたが、近年、自然保護の観点から、埋め立てに代わる環境負荷の少ない工法の開発が求められている。

本研究は、洋上において多数のコンクリート製六角形フロート（ヘキサフロート）を連結し、柔構造で耐波浪性に優れた洋上多目的空間の創造を目的としたものである。

工業技術センターでは、ヘキサフロートに関する研究課題の1つである、波に対する応答特性および係留力等について CAE や水槽実験を行い、振動特性に関する計算モデルの確立を目指した。

2 解析手法

ヘキサフロートの応答特性および係留力等の解析手法について図1に示す。まず、縮尺模型に関してバネやダンパー、仮想質量および波による加振力を考慮した計算モデルを設定し、様々な固有値の波に対する模型の応答を求めた。ここで計算上バネ要素として考慮したのは、浮体に作用する浮力と浮体の形状や材質によって決まる浮体弾性であり、ダンパー要素としては流体との摩擦によって生じる粘性減衰を考えている。また、水中を運動する物体に生じる見かけ上の質量増加分を仮想質量として与えた。次に1/80 縮尺模型を用いた水槽実験を行い、造波直後の波高や模型前後の波高、模型に発生する係留力および鉛直方向

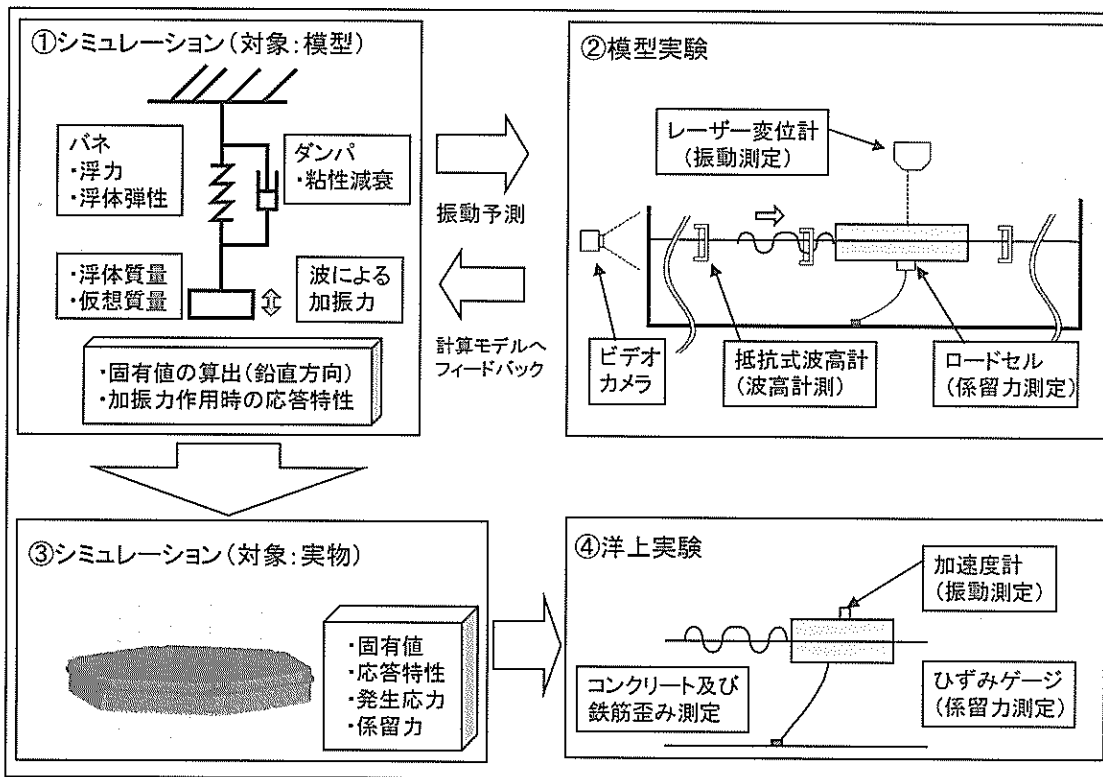


図1 研究概念図

の振動を測定した。これらの実験結果は、計算モデルへフィードバックし、モデル化手法の改善に使用した。洋上実験では加速度計測の他、歪みゲージを使用した係留力の測定やコンクリート、鉄筋に発生する応力値の測定を行った。これらの測定結果については、実物フロートを対象としたシミュレーションを行うことで、その信頼性を確認した。

3 自由振動実験

CAEによる応答解析を行う前に、計算モデルで用いる減衰係数を求めるため自由振動の実験を行った。実験ではアクリル製水槽(φ800×H190)に浮かべたヘキサフロートの模型(詳細は後述)を、手で水中に沈め、そっと離れた時の減衰振動をレーザー変位計により測定した。

模型の質量を m 、仮想質量を m_v 、浮力を k 、減衰係数を C とすると、減衰系の自由振動は式①で表され、その一般解は $C^2 < 4(m+m_v)k$ の場合、式②のようになる¹⁾。

$$(m+m_v)y'' + Cy' + ky = 0 \dots\dots ①$$

$$Y(t) = Ae^{-\alpha t} \cos(\omega^*t - \delta) \dots\dots ②$$

ここで、 $\alpha = C / (2(m + m_v))$ 、 A = 定数

$\omega^* = (4(m + m_v)k - C^2)^{0.5} / (2(m + m_v))$ である。

実験で得られた振動の波形と式②で表される曲線を比較することで減衰係数を求めると $C=7.0$ となった。実験値と $C=7.0$ の場合の近似式を図2に示す。波形の後半部分において実験値と近似式の差が大きくなっているが、これは振動の後半になると揺動が複雑になり、ここで考慮している鉛直方向以外の揺れが加わるためだと考えている。また、減衰係数を質量や浮力との関係で減衰比として表すと、減衰比 $C' = C / (2((m + m_v)k)^{0.5}) = 0.096$ となる。

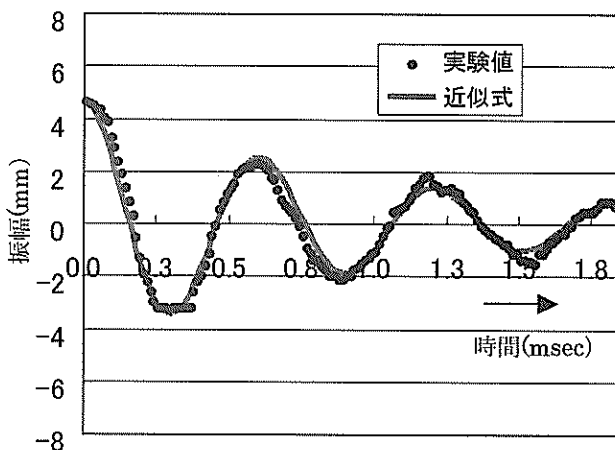


図2 自由振動の近似式 ($C' = 0.096$ の場合)

4 簡易モデルによる応答解析

図3に簡易モデルの模式図を示す。ここで考えているのはバネ要素とダンパー要素がそれぞれ1つある単純なモデルで、バネ要素としては浮力のみを考慮している。この場合、振動の基礎式は波による加振力の項を式①の右辺に加えることで式③のようになる¹⁾。

$$(m+m_v)y'' + Cy' + ky = F_0 \sin \omega t \dots\dots ③$$

ここで、 $k = \rho g S$ (ρ :水の密度、 g :重力加速度、

S :模型の六角形面積)、 $C = C' \times 2((m+m_v)k)^{0.5}$ 、 $F_0 = \rho g S H_0$

(H_0 :波高)、 $m = 0.868 \text{ kg}$ 、 $m_v = 2.6 \text{ kg}$ である。また、模型の振幅と波高の比は式③を解くことで以下のように求められる。

振幅比 = (模型振幅/波高) =

$$k / (m^2(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \omega^2 c^2)^{0.5} \dots\dots ④$$

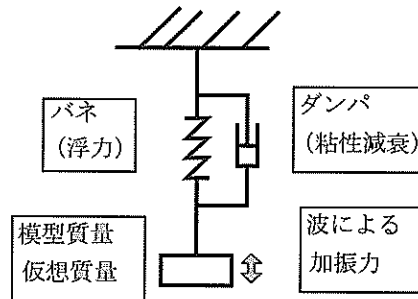


図3 簡易モデル

横軸に模型と波の固有値比、縦軸には式④で表される振幅比をとり、減衰比 C' をパラメータとしてプロットすると図4のようになる。自由振動実験で求めた減衰比 $C' = 0.096$ の場合、固有値比が1付近において、振幅の最大値が5にもなるが、ヘキサフロートの敷設海域である中城湾の波浪データによると、通常有義波の場合の固有値比は0.72、最大波高として考慮した50年確率波の場合は0.32となり、この場合、通常有義波の場合で最大振幅比は2程度、50年確率波では1程度になることが分かる。ここで、通常有義波とは、計測された波の中から波高の高い順に全体の1/3を選び、これらを平均したものである。また、50年確率波とは、確率的に50年に一度発生する大波のことである。

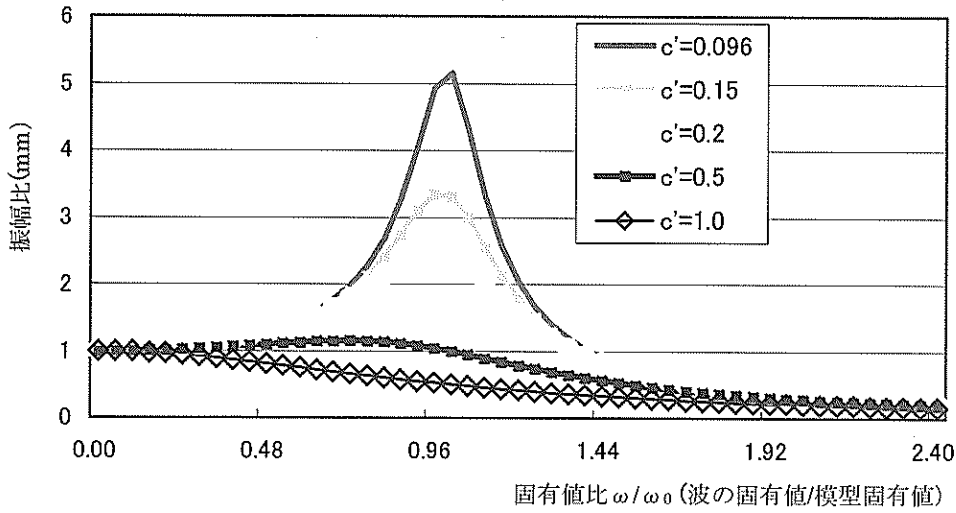


図4 振幅比

5 模型実験

簡易モデルによる応答解析の結果を検証するため、琉球大学環境建設工学科の造波水槽(幅0.7×長さ20×実験時水深0.25m)を用いた1/80縮尺模型実験を行った。

実験時の測定項目を表1に示す。また、波浪条件は周期 $T=0.4\sim 1.9$ (秒)、波高 $H=0.6\sim 8.5$ (cm)の間で変化させたが、この中で特に通常有義波、50年確率波の場合について、それぞれ実際の波浪と比較し表2、3に示した。ここで波高 H と波長 L は実際の値 $\times 1/80$ で計算し、周期 T は $T = (2\pi L/g)^{0.5}$ から求めた²⁾。また、実験で考慮した模型の連結パターンは、模型数および波を受ける方向によって6種類あり、波の種類は正弦波、不規則波の2種類であったが、ここでは模型数1個、波の種類は正弦波の場合について述べる。

製作した模型を図5に示す。実際のフロートの場合と喫水位置の比を合わせるため、内部のリブ構造は実物と異なっている。模型本体とアルミ板製の蓋はシリコンシーラントを用いて接着し、模型の縁にはゴム板を張り付け防舷材として使用した。また、模型中心部に設けたネジ穴には係留力測定用のロードセルを取り付け、六隅に備えたボルトは模型の連結時に使用した。図6に水槽実験の様子を示す。

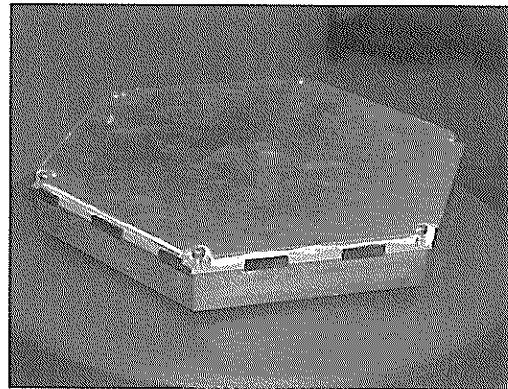


図5 模型(1/80)



図6 水槽実験

表1 模型実験の測定項目

測定項目	測定箇所	測定機器	メーカー：型式
鉛直振動	模型中央、前端、後端	レーザー変位計	オムロン社製：ZX-LD300
波高	造波装置直後、模型前後	抵抗式波高計	琉球大学製
係留力	模型中央	ロードセル	東陽テクニカ製：208C01

表2 通常有義波

	実際	模型
波高 H(m)	1	0.0125
周期 T(s)	7.5	0.84
波長 L(m)	87.8	1.0

表3 波の最大値 (50年確率による)

	実際	模型
波高 H(m)	5.8	0.0725
周期 T(s)	17	1.90
波長 L(m)	451	2.84

測定データの一例として、平均波高 57.4mm、平均周期 0.85sec ($\omega/\omega_0=0.71$) の場合の測定データを図7に示す。変位の計測値には、波形の所々に細かい乱れが確認できるが、これは模型上面に付いた水滴の影響である。係留力については測定値の殆どが0を示しているが、小さなピークが周期的に発生することが確認できた。また、模型前後の波高を比較することで模型による波高の減衰効果が確認された。

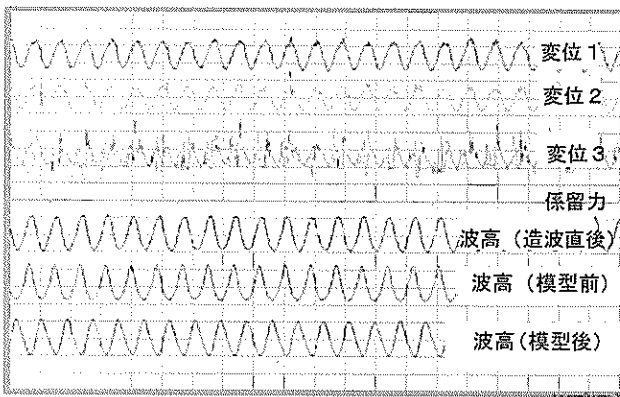


図7 実験結果の例

これらの結果のうち、特に模型の振動と係留力のデータを図8、9に示す。模型の平均振幅は約32mmであり、平均波高57.4mmとの比は約1.11となる。また、周期的に確認された係留力のピーク値は大きくても0.2kgf程度であることが分かった。この値は模型質量と仮想質量の合計値の5%程度である。

次に実験結果を簡易モデルによる応答解析の結果と比較し図10に示す。同じ固有値比の場合でも波高が異なる実験条件の下では、実験結果にバラツキが生じた。これは波高が大きくなり模型の揺動が激しくなると、鉛直方向以外の揺動成分の影響が測定誤差の原因となるためだと考

えている。また簡易モデルによる応答解析の結果のみで見た振幅比の大きなピークが、実験結果では確認できなかった。これは簡易モデルではバネ要素とダンパー要素をそれぞれ1個しか考えていないため、模型の傾き等を含めた複雑な揺動を表現できないからである。

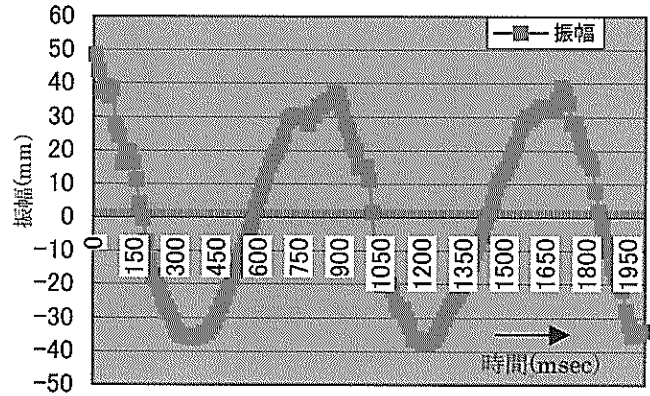


図8 振幅測定結果

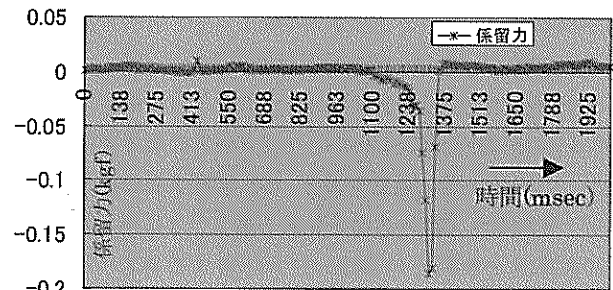


図9 係留力測定結果

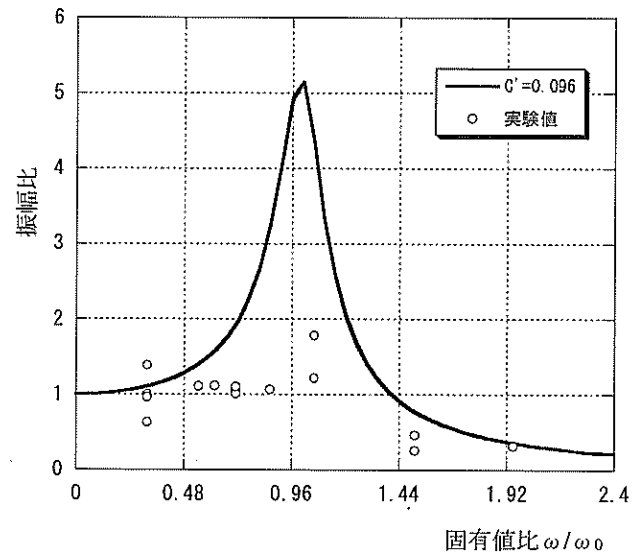


図10 簡易モデルによる応答解析結果

6 三次元モデルによる応答解析

前述のように、簡易モデルによる応答解析の結果からは、実際の模型の揺動が予測できるとは言い難い。ここでは、簡易モデルのバネ要素とダンパー要素をそれぞれ6個に増やし、更に加振力の作用点も6カ所考慮することで計算モデルの改良を行った。これにより、模型の傾きを考慮することができるようになった。応答解析に使用したのは三次元 CAD の Ideas (MS8) である。作成した解析モデルを図 11 に示す。模型の上面を6つの正三角形に分割し、その重心位置にバネ要素を設定、同様に下面の重心位置にダンパー要素を設定した。拘束条件としてはバネの上端とダンパーの下端を完全拘束している。加振力についても6つの重心位置に作用するように設定し、模型前端からの距離に応じて遅れ角を与えた。加振力 F は式⑤のようになる。

$$F = \rho g \ell \times 0.001 \times (H/2) \sin(2\pi/T) \times (t - (X/L)T) \dots \textcircled{5}$$
 ここで、 ρ : 水の密度 (kg/m^3)、 ℓ : 受波部の長さ (m)、 H : 波高 (m)、 L : 波長 (m)、 X : 模型前端からの距離、 T : 周期 (sec)

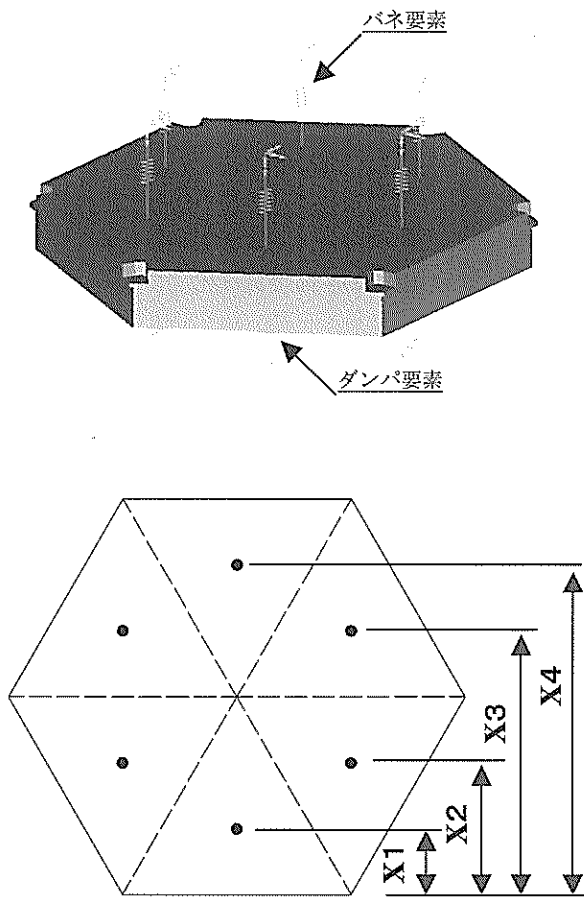


図 11 三次元計算モデル
(上：モデル形状、下：加振力の作業点)

このような計算モデルを用いて求めた振幅比は図 12 のようになる。簡易モデル ($C' = 0.096$) による計算値にみられた大きなピークが、三次元モデルでは減少していることが分かる。また、周期の短い波に対しては実験値をよく近似できていると言える。計算精度としてはまだ十分ではないが、ここで行ったようにバネ要素やダンパー要素および加振力を増やしていけば、更に精度を高めることが可能であると考えられる。

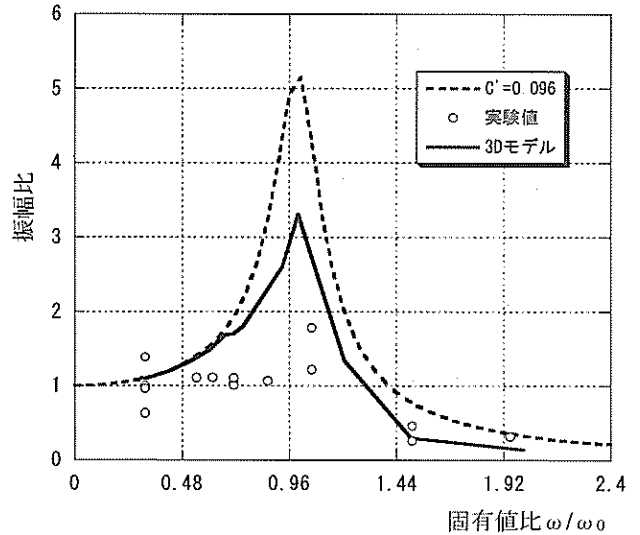


図 12 三次元モデルによる応答解析結果

7 ヘキサフロートの揺動測定

実際のヘキサフロートに三軸加速度計を設置し、実海域におけるフロートの揺動を測定した。使用したのは東陽テクニカ製の容量型 DC 応答加速度計: M3703G3FD3G である。また、加速度計の設置場所は図 13 に示す通りで紙面に垂直な向きが Z 方向となっている。図 14 には鉛直方向 (Z 方向) の振動についての測定結果を示す。得られた加速度のデータを積分処理することで変位量を求めた。

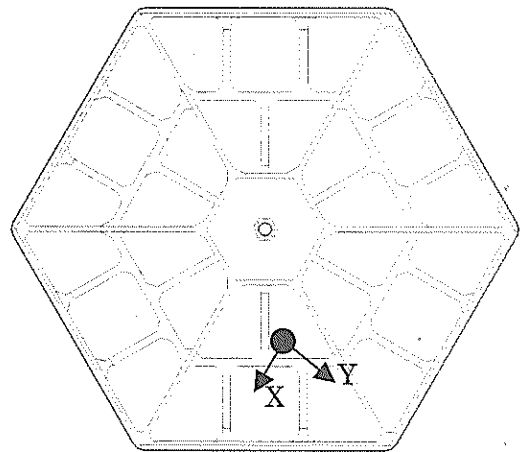


図 13 加速度計の設置箇所

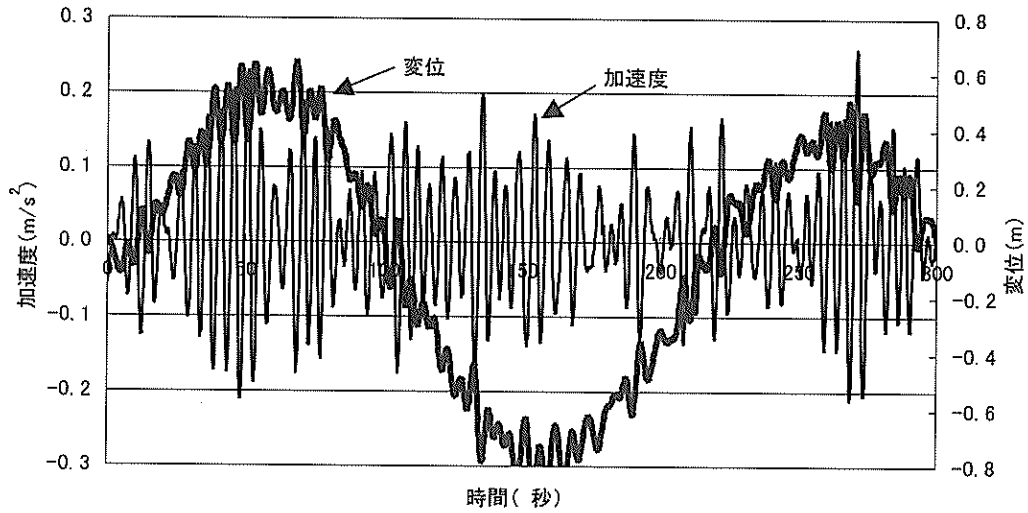


図14 鉛直方向の加速度、変位

測定当日の海域における波高は、天気予報によると約 1m (振幅は 0.5m) であったが、測定されたフロートの振幅は約 0.6m である。この結果によると振幅比は 1.2 となる。本来なら実験当日の実海域における波浪データを詳しく測定し、その波に対するフロートの振幅を求め、計算モデルの妥当性を評価すべきであるが、今回は予算の都合上、波浪データの計測機器が用意できなかった。これらは、今後の課題として残されている。

8 係留力と応力

実際にヘキサフロートに生じる係留力および応力を歪みゲージで測定した。係留力はフロート中心部にある係留用チェーンを吊り下げている丸棒に、防水型歪みゲージを貼り付け測定した。また、フロート本体に生じる応力については、コンクリート打設時に埋め込んだ鉄筋用歪み計とコンクリート用歪み計を用いて測定した。これら使用した測定機器について表4に示す。

表4 計測機器

測定項目	測定機器	備考
係留力	防水型歪みゲージ	共和電業製 KFWS-2N-120
コンクリート応力	コンクリート用歪み計	共和電業製 BS-8FT
鉄筋応力	鉄筋用歪み計	共和電業製 BF-13CT

鉄筋用歪み計は測定箇所の鉄筋を切断し、その間に鉄筋計を入れ、両端を溶接し固定している。また、コンクリート用歪み計は測定値に影響がでない程度の強さで、結束線

を用いて鉄筋へ固定しコンクリート中に埋めさせた。

係留力の測定箇所は図15に示すように、丸棒の長手方向中心部の裏側である。また、係留力の測定結果を表5に示す。ここで、両端支持の丸棒を考え、測定した応力値から係留力を換算すると約 1,276kgf となった。係留に使用したチェーンの重量が約 800kgf であることや測定当日のフロート揺動の影響、更に実際は海流の影響でフロートを係留するチェーンは斜めに張られていたことなどを考慮すると、測定結果は妥当なものではないかと考えている。なお、計測当日の波高は約 1m であった。

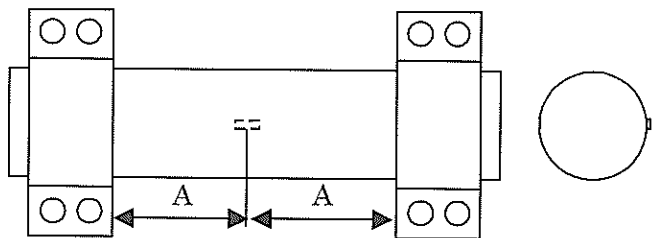


図15 係留力測定箇所

表5 係留力測定結果

歪み($\mu\epsilon$)	応力値 (kgf/mm ²)
28.6	0.60

次にコンクリートおよび鉄筋の歪みについて、その計測箇所を図16に、計測結果を表6に示す。計測箇所はフロートの下面であり、①と②の2カ所にそれぞれコンクリート用歪み計と鉄筋用歪み計を1つつペアで設置した。測

定結果は殆ど0となった。

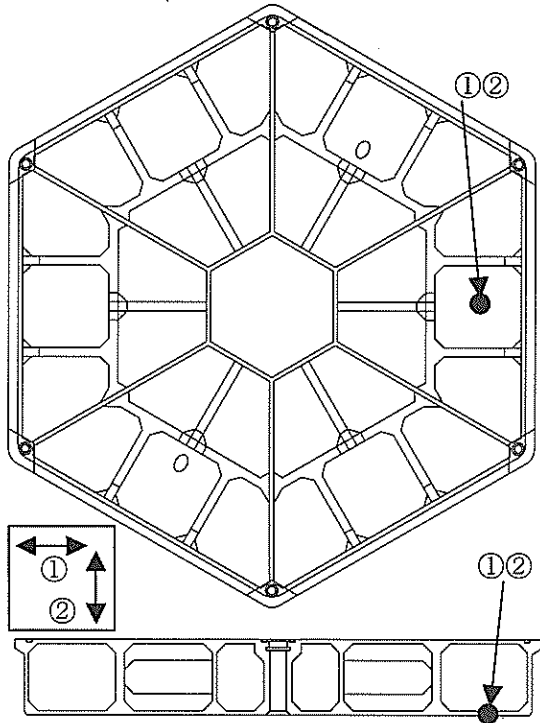


図16 応力測定箇所 (①②は互いに直交)

表6 応力測定結果

	歪み	応力値
鉄筋 (位置①)	≒0	≒0
コンクリート (位置①)	360	0.0483
鉄筋 (位置②)	≒0	≒0
コンクリート (位置②)	≒0	≒0

(歪みは $\mu\epsilon$ 、応力は kgf/mm^2)

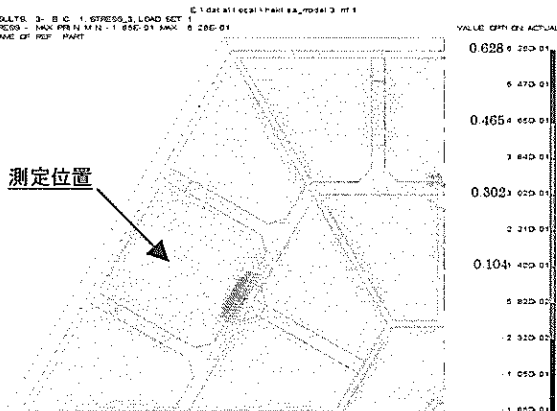


図17 応力解析結果

この結果を検証するため三次元モデルを用いた有限要素法により、フロートに発生する応力値を調べてみた。荷重条件としては、防波堤などの設計時に用いられる合田の式³⁾から算出した最大荷重 $0.6\text{kgf}/\text{cm}^2$ をフロートの外側全面に作用させた。また、拘束条件は、計算モデルの任意の3節点にキネマティックな自由度を設定し、水に浮かんだ状態を近似した。応力値の計算結果を図17に示す。前述のように、ここで用いた荷重条件は防波堤などの静止した物体を考慮したものであり、洋上に浮かんだフロートに作用する荷重に比べかなり大きな値であるが、それでもセンサー付近の発生応力は $0.2\sim 0.3\text{kgf}/\text{mm}^2$ 程度であった。この結果からすると、フロートに発生する応力値が殆ど0であったことも妥当な結果ではないかと考えている。

9 まとめ

ヘキサフロートの振動特性に関する計算モデルの確立を目的として、主にCAEによる浮体の揺動シミュレーションや造波水槽を用いた模型実験を行った結果、以下の成果が得られた。

①複数のバネ、ダンパー、加振力を設定した三次元計算モデルを用いることでフロートの鉛直方向の応答振幅を求めることができる。

また、今後の課題として以下の3点が残された。

- ①実海域における波浪データとフロート振幅の関係を調べる。
- ②係留力、応力の測定を続け、計測の信頼性を高める。
- ③複数のフロートを連結した場合についての計算モデルを検討する。

参考文献

- 1) E.クライツィグ 「常微分方程式」 倍風館
- 2) ウィラード・バスカム 「海洋の科学」 p44 河出書房
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター 「浮体構造物技術マニュアル」 p35 (平成3年3月)
- 4) (独)港湾空港技術研究所 「リーフ地形内における超大型浮体の波浪中応答特性—孤立リーフモデルと海浜リーフモデルにおける水理模型実験— (2001.12)

編 集 沖縄県工業技術センター

発 行 沖縄県工業技術センター

〒904-2234 沖縄県うるま市字州崎 12 番 2

T E L (098)929-0111

F A X (098)929-0115

U R L <https://www.pref.okinawa.lg.jp/site/shoko/kogyo/>

著作物の一部および全部を転載・翻訳される場合は、当センターにご連絡ください。