

論文 非線形バネにより係留されたコンクリート製大型浮体の動揺解析

天野 喜勝*¹ ・ 田辺 忠顕*²

要旨：設計に必要な断面力をより正確に算定するために、係留力の非線形性を考慮した新たなコンクリート製浮体構造物の動揺解析手法を提案した。また、100mの大型浮体構造物の数値解析シミュレーションを行った結果、係留系の非線形性が断面力および鉛直方向変位に大きく影響を与えることがわかった。

キーワード：コンクリート製浮体構造物、係留系の非線形性、動揺解析

1. はじめに

近年、浮体式空港等の大型のコンクリート製浮体構造物の提案がなされているが、実際の設計を行うためには、断面力を解析的に得る必要がある。しかしながら、その解析手法は確立されていないのが現状である。今までに、コンクリート板を対象とする、曲げ変形挙動を考慮した解析手法が、西村ら[1]によって提案されているが、線形解析理論の範囲内にとどまっており、係留装置などの正確なモデル化がなされていない。そこで、本研究では、係留系の非線形性を考慮し、実際の構造物の挙動をより正確に表すことにより、コンクリートブロック接合時に必要なプレストレス力などの設計を行う際に必要となる断面力を算定することを試みた。

2. 解析理論

一定水深 h の海域にコンクリート製浮体構造物があり、これに角振動数 ω の微小振幅波が入射しているものとする。このとき浮体がカテナリーチェーンや柱式係留装置などの非線形バネによって係留されているとすると、従来の線形解析のように、浮体運動が入射波と同じ角振動数 ω を有する調和振動となるとは仮定できない。

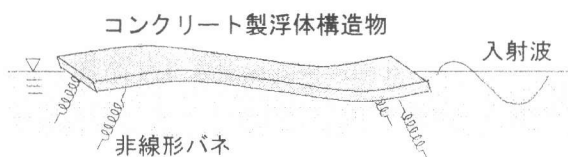


図-1 解析対象物

そこで本研究では、周波数領域・時間領域混合解析手法[2]の手順に従い、係留系の非線形性を考慮した新たな解析手法を提案する。以下にそれを簡単に説明し、図-2として解析手順の概要図を示す。紙面の都合上、解析の詳細については参考文献[3]に委ねることにした。

Step 1: 入射波を考慮した線形解析

まず、コンクリート製浮体構造物に微小振幅波が入射した場合の有限要素法解析を、線形解析理論の範囲内で行う。このとき、浮体運動が入射波と同じ角振動数 ω を有する調和振動となると仮定すると、周波数領域での取り扱いが可能となる。

流体場は、Hybrid法[4]の手順に従って、図-3のように解析領域を浮体近傍に設けた鉛直な仮

*¹ 名古屋大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (正会員)*² 名古屋大学教授 工学部 土木工学科、工博 (正会員)

想境界 S_R によって、内部領域 Ω および外部領域 $\bar{\Omega}$ に分割する。幾何学的な不規則性を全て内部領域に含ませれば、外部領域は水深が一定で解析的な取り扱いが可能になり、外部領域における速度ポテンシャルは解析的に表示することができる。これに、仮想境界 S_R において連続条件を課すことにより、内部領域での有限要素法近似と接続する。これにより、流体場の解析は、閉領域 Ω の解析へと帰着されたことになり、有限要素法の適用が可能になる。一方、コンクリート製浮体構造物は、曲げ変形挙動を考慮するために、いまのところ弾性はりとして取り扱う。浮体に働く外力としては、(1)入射波による波力、(2)浮体動揺により生ずる散乱波による外力、(3)浮体鉛直方向動揺による静水圧の変化による外力、(4)線形バネによる係留力、を考える。

以上の解析から、鉛直方向変位 $w(\omega)$ および断面力 $M(\omega)$, $S(\omega)$ が得られるが、それらは周波数領域で示されているため、高速フーリエ逆変換[5]を用いて時間領域 $w(t)$, $M(t)$, $S(t)$ に変換し、トータル量として保存しておく。ただし、高速フーリエ変換 (FFT) を用いる便宜上、時間ステップ数は 2^N 個とする必要がある。

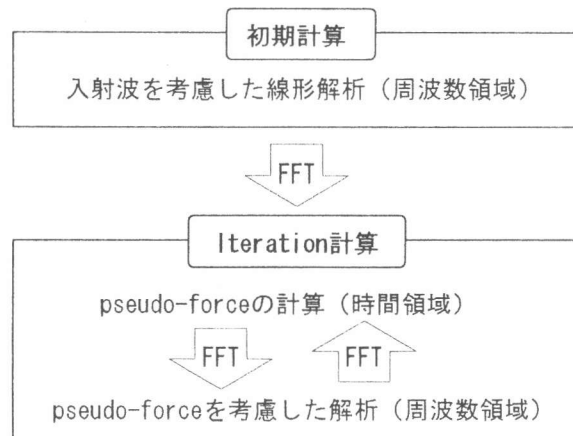


図-2 解析手順概略図

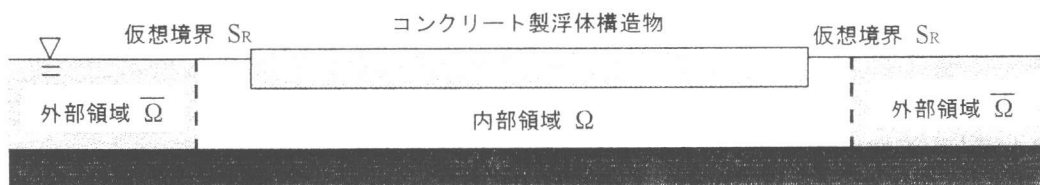


図-3 仮想境界 S_R

Step 2: pseudo-force の計算

Step 1 (Step 3) の解析から得られた鉛直方向変位 $w(t)$ にバネ定数 k_z を乗ずることにより、線形バネによる係留力 $P_l(t)$ が得られる。実際の構造物の係留系は非線形であると考えられるため、得られた鉛直方向変位 $w(t)$ に対応する非線形系の係留力を $P_{nl}(t)$ とすると、 $P_{nl}(t)$ と $P_l(t)$ の差 $P(t) = P_{nl}(t) - P_l(t)$ を再び浮体に与え直す必要がある。ここでは、この力 $P(t)$ を pseudo-force と呼ぶ。次に高速フーリエ変換を用いて、pseudo-force $P(t)$ を周波数領域 $P(\omega_i)$ に変換する。このとき 2^N 個の角振動数 ω_i それぞれに対応する $P(\omega_i)$ が用意されることとなる。

Step 3: pseudo-force を考慮した計算

Step 2 により、 2^N 個の角振動数 ω_i が用意されるので、それぞれに対して別々に、Step 1 と同様な方法で、pseudo-force を考慮した解析を行う。ただし、Step 1 とは若干異なり、(1)角振動数は ω_i として取り扱い、(2)入射波による影響は考えず、外力項には pseudo-force $P(\omega_i)$ の項が入る。全ての角振動数 ω_i に対して解析を行うと、周波数領域の鉛直方向変位 $w(\omega_i)$ および断面力 $M(\omega_i)$, $S(\omega_i)$ が 2^N 個ずつ得られる。それらを FFT を用いて時間領域 $w(t)$, $M(t)$, $S(t)$ に変換し、トータル量に加える。

Step 2 および Step 3 の計算を、pseudo-force $P(t)$ の絶対値が常に適当な微小量 ε より小さくなるまで繰り返す。

3 係留系の非線形性による影響

係留系の非線形性が、コンクリート製浮体構造物の鉛直方向変位および断面力（曲げモーメント、せん断力）に及ぼす影響を検証するため、自由浮体、線形バネによる係留浮体、非線形バネによる係留浮体の3種類について、数値解析シミュレーションを行った。

表-1 解析モデル

浮体構造物			入射波			
浮体長	浮体高	喫水	波高	周期	波長	水深
100.0m	12.0m	7.0m	4.6m	9.6s	115.0m	20.0m

浮体構造物は、表-1で示した通りの大きさとし、浮上式プレストレストコンクリート製海上空港に対する構想[6]で提案された断面（図-4）を持つものを考えた。この断面幅は60mであり、断面2次モーメントは約 $2500m^4$ である。コンクリートのヤング率を $E = 2.0 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$ とすると、単位幅当たりの曲げ剛性は $EI = 8.3 \times 10^8 \text{ KNm}^2/m$ となる。

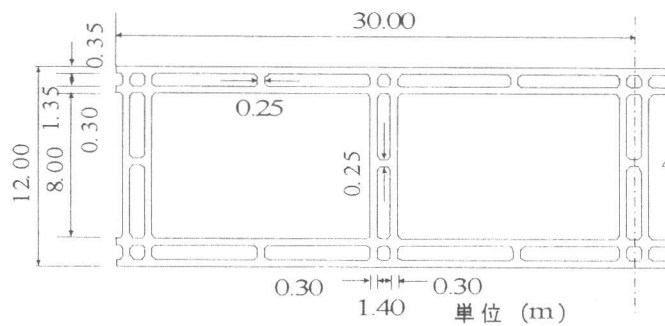


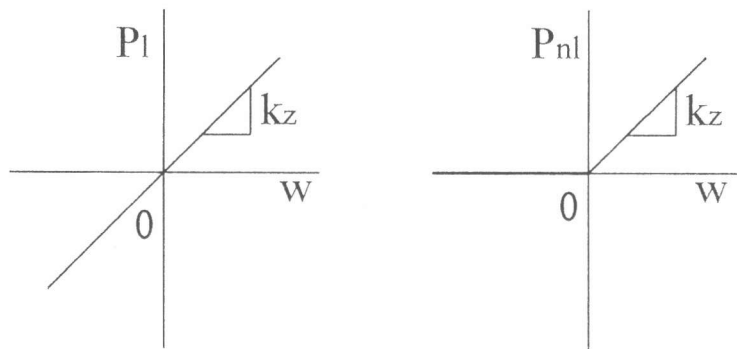
図-4 浮体断面図

ただし、浮体の長さは100mとしているが、これは数値解析の結果が、際だって線形係留と非線形係留の差を示しているのを取り上げたものであり、同種の解析が3000mの浮体に対しても実行可能であることは確認している。

実際の構造物はチェーン等によって係留されるのが一般的であるため、引っ張りに対しては係留力が生じるが、圧縮に対してはチェーンがたわみ、係留力はゼロになると考えられる。そこで、本シミュレーションでは最も簡単なモデルとして、図-5のように浮体が鉛直方向上向きに変位する場合は、バネ定数が線形バネのバネ定数 k_z と等しく、浮体が鉛直下向きに変位するときには、バネ定数がゼロとなる非線形バネ係留装置を考えた。ここで、線形バネのバネ定数は、単位幅当たり鉛直方向に $k_z = 1000 \text{ kN/m}$ とし、浮体両端での2点係留とした。

また、入射波には関西新空港の設計時に用いられた、荒天時の有義波高および周期（表-1）を採用し、右方向からの入射とした。

本解析では入射波の周期9.6sを8分割し、それぞれの時間における浮体各点での鉛直方向変位および断面力（曲げモーメント、せん断力）の分布図を求めた。



線形バネ係留力

非線形バネ係留力

図-5 線形・非線形バネ係留力

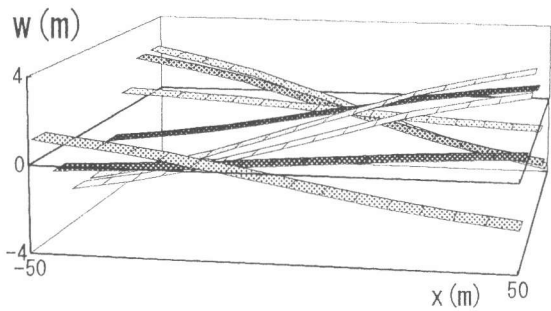
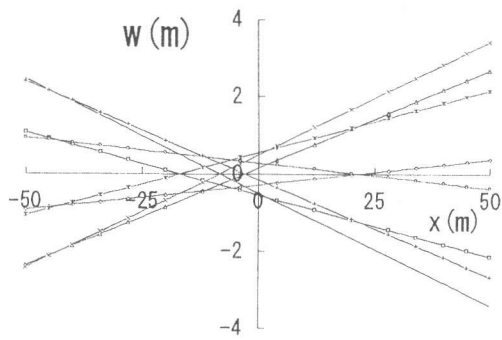


図-6a 鉛直方向変位 (非係留)

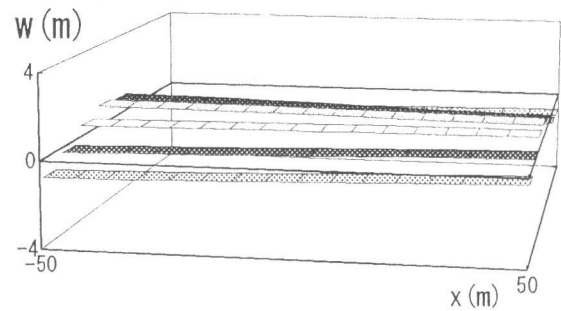
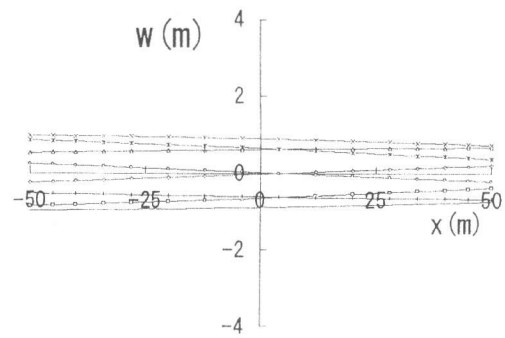


図-6b 鉛直方向変位 (線形バネ係留)

鉛直方向変位の解析結果を図-6a～図-6cに示す。ここでは、浮体の時間的な動揺挙動を把握しやすいように、3次元グラフも併せて載せた。このグラフにおいて奥行きは時間軸であり、時間は手前から奥に向かって進んでいる。また、変位は上向きを正としている。

図-6aと図-6bを比べると、自由浮体は上下両方向に約3.5m程の振幅を持った運動をしているのに対し、線形バネで係留することにより浮体動揺は1m以下に押さえられている。しかしながら、図-6cを見ると、チェーン等で係留された実際の構造物(非線形係留浮体)では、係留力の働かない鉛直下方向に、自由浮体と同程度の変位が見られる。したがって、従来通り係留系を線形バネでモデル化すると、実際の構造物と比べて、係留点での拘束を過大評価してしまうことがわかる。また、チェーン等で係留する際には、下方向の変位を押さえる工夫、あるいは、その影響を实际使用するエリア(変位が大きく生じると不都合なエリア)までに減衰させる装置が必要となることがわかる。

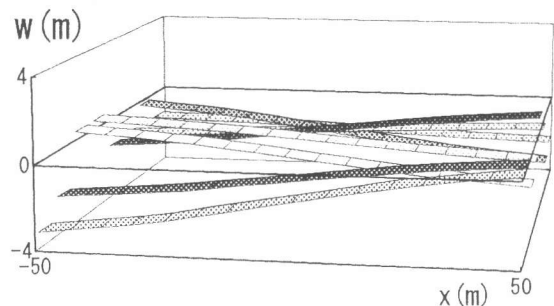
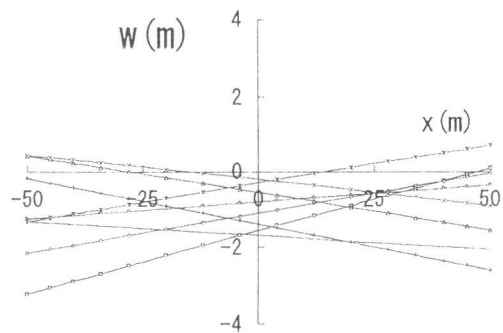


図-6c 鉛直方向変位 (非線形バネ係留)

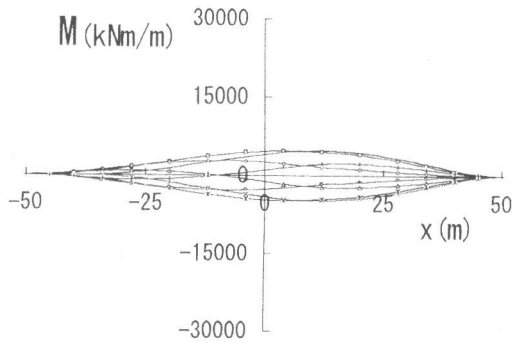


図-7a 曲げモーメント (非係留)

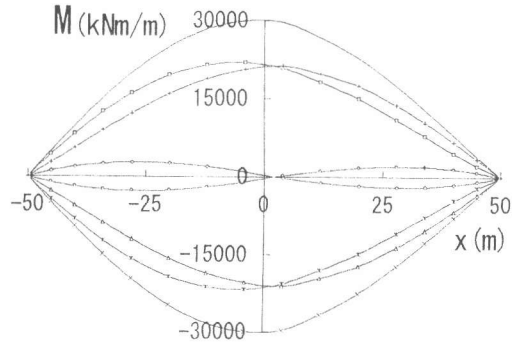


図-7b 曲げモーメント (線形バネ係留)

次に、単位幅当たりの曲げモーメントの解析結果を図-7a～図-7cに示す。ここでは、浮体下面引張りを正としている。

まず明らかかなように、係留をすることにより、変位を押さえる代償として、非係留浮体では最大約 4000kNm/m であった曲げモーメントが、線形バネ係留浮体および非線形係留浮体では、どちらも最大値が 30000kNm/m 程にまで増加している。このとき浮体表面で発生する応力は、約 4.3MPa となる。しかしながら、線形バネ係留についての解析結果では、上下面に同等な応力発生が見られるのに対して、非線形バネ係留を考慮した場合は、引っ張り応力はほとんど上面のみにしか発生しないという結果が得られた。したがって、従来通りに係留装置を線形バネで単純にモデル化すると、コンクリート構造物にとって危険視される引っ張り応力の発生を過大評価してしまうことが分かる。本解析手法を用いることにより、実際にコンクリート製浮体構造物の断面設計をする際の、鉄筋の配筋量および位置、プレストレスト鋼棒の挿入位置等の決定において、より効果的な評価ができると考えられる。

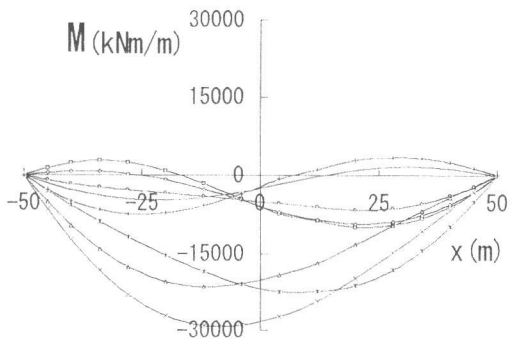


図-7c 曲げモーメント (非線形バネ係留)

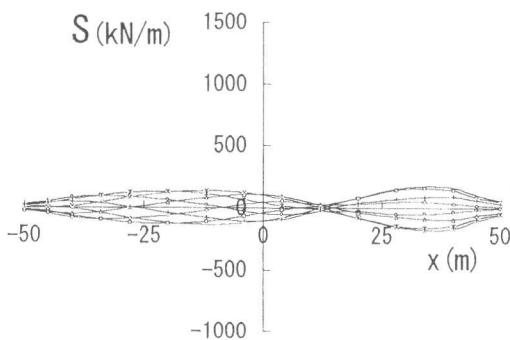


図-8a せん断力 (非係留)

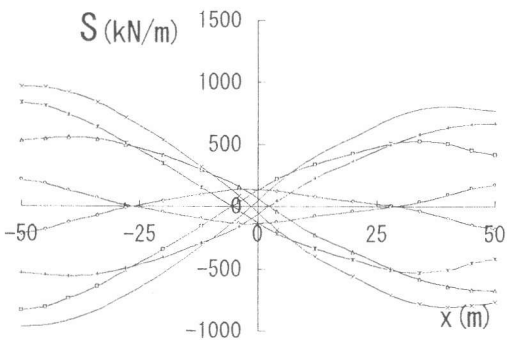


図-8b せん断力 (線形バネ係留)

最後に、単位幅当たりのせん断力の解析結果を図-8a～図-8cに示す。

この場合も曲げモーメントの解析結果と同様に、非係留浮体では最大約 200kN/m 程度であったせん断力が、係留をすることによって、最大値が 1000kN/m 程度にまで増加している。また、非線形係留を考えることにより、正負に偏りが見られ、せん断力の分布もかなり異なったものとなっている。実際に浮体式空港などの超大型のコンクリート構造物を建設するには、

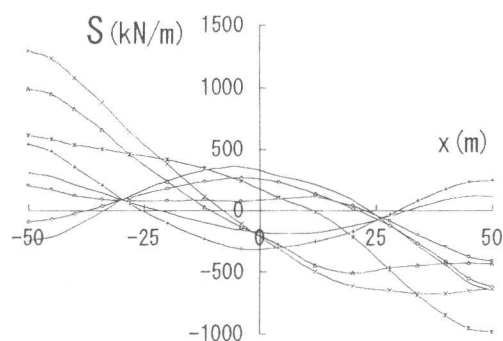


図-8c せん断力 (非線形バネ係留)

仮説ドッグで制作されたコンクリート函体ユニットを、海上でPC鋼棒により結合して施工の便を図ることが考えられるため、その接合部でのせん断力の評価はかなり重要なものとなり、正確な評価を得る為には、係留系の非線形性を考慮に入れる必要があると考えられる。

以上の結果は、あくまで表-1で示した条件下のみでの解析結果であり、浮体長、波長、波高等により、鉛直方向変位および断面力(曲げモーメント、せん断力)は大きく変化するということが、別に計算した結果から分かっている。したがって、実際に構造物の断面設計をする際には、様々な条件下での計算をし、それぞれに対しての評価をおこなう必要がある。

4 まとめ

以上述べてきたごとく、本論文では係留系の非線形性を考慮したコンクリート製浮体構造物の動揺解析手法を提案し、簡単なモデルを用いて、係留系の非線形性が鉛直方向変位および断面力に与える影響について検証した。以下に得られた主要な結論を要約して述べる。

- (1) チェーン等の係留装置を線形バネでモデル化すると、係留点での変位の拘束を過大評価することになってしまい、実状に合わなくなる。一方、実際の構造物では、係留力の弱い方向(働かない方向)への変位はかなり大きくなり、それを押さえる工夫が必要である。
- (2) 浮体を係留すると、変位を押さえる代償として、曲げモーメントおよびせん断力が極端に増加してしまう。また、係留系を単純に線形バネで近似すると、鉛直方向変位および断面力は、正負両方向に同様な値をとるが、実際は、かなり顕著な偏りが見られる。したがって、本解析手法を用いて係留系の非線形性を考慮することにより、浮体に生じる断面力がより正確に算定でき、有効な断面設計が可能となる。

参考文献

- [1] 西村政洋 : RC浮体構造の設計方法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 13、No2、pp.109-114、1991
- [2] John P. Wolf : Soil-Structure-Interaction Analysis in Time Domain, Prentice Hall
- [3] 天野喜勝 : 非線形バネにより係留されたコンクリート製大型浮体の動揺解析、名古屋大学修士論文、1996
- [4] Chiang C. Mei : The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves, John Wiley & Sons
- [5] 大崎順彦 : 新・地震動のスペクトル解析入門 鹿島出版会
- [6] 海洋構造物委員会 : 浮上式プレストレストコンクリート製海上空港に対する構想、プレストレストコンクリート Vol.21, No6, pp.23~43, 1979