

浮上免震構造物の挙動の予測

清川 哲志*・ 稲田 裕**・ 中田 博昭***・ 荒井 哲也****

1. はじめに

日本列島は有数の地震帯であり、日本近海における海洋構造物の支配外力は、通常、地震時慣性力となる。したがって、地震時慣性力を減らすことができれば、設計が容易になるのみならずその経済的な効果は大きい。

本研究は、地震時にも暴風時にも揺れない構造物としての浮上免震方式の概念を具体的に提案し、数値シミュレーションを用いて挙動を予測することによって、その実現性に関する技術的評価を行うものである。

浮上して地震を回避するという基本的アイデアは、既に寺井(1986)によって示されているが、実現性に関する具体的な検討はなされていない。また、大規模な排水システムが必要となることが予測され、この点からも実用上の問題があった。本研究では、浮上免震方式を現実的なものにするために、自然環境条件を常時、地震時、暴風時に分け、それぞれに対応して構造物の状態を変化させることを提案している。これによって地震時に浮上するためのバラスト排水量を最少にし、さらにそれを重力を利用して自然に排水することでシステムの簡略化を図っている。数値シミュレーションは、主にバラスト水の排水による浮上、浮上時の波浪による動揺、および潮流による漂流について行う。

2. 浮上免震構造物の概念

(1) 浮上免震システムについて

ここで提案する浮上免震方式とは、設計において地震時荷重と暴風時荷重を組み合せないことに着目したもので、自然環境条件を (i) 常時、(ii) 地震時、(iii) 暴風時に分け、それぞれ構造物の状態を、バラスト水の注排水により軟着底、浮体、着底とすることによって浮上時の排水の負担を軽減するものである。すなわち、常時は構造物に作用する自然環境荷重はわずかなため、バラスト水量をこれに対して安定するだけの低レベルにし、浮

上に必要な排水量を最小限にする。そして、センサーにより地震の初期微動を感じたら、バラストタンク内の海水を排水し浮上することにより地震を回避する。暴風時はバラストタンク内に十分な量の海水を注水し、暴風時波浪および風による荷重に対して安定性を確保する。

以上の様に、浮上免震構造物は外部自然環境条件に応じてバラスト水を注排水することによって、構造物自身の状態を変化させ、構造物に要求される耐波浪性および耐震性を効率よく充足させようとする点に特徴がある。

(2) 構造物の概要

具体的な検討を可能にするため、ここでは 50 m 間隔で12個配置した 11 m 径および 13 m 径の円筒形カラムをブレースで結合し、150 m×150 mの井桁状の下部構造を構成した上に建屋をはじめとする諸施設を搭載するものとする。構造物の概観を図-1に、寸法およびカラムの配置を図-2に示す。構造物の全重量(バラスト水を含む)は約 32,000 ton、慣性モーメントは約 49,692,300 $\text{ton}\cdot\text{m}^2$ である。また、メタセンタ高さは 78 m、構造物下端より重心、浮心までの垂直距離は、それぞれ 20 m、8.3 m である。これが、水深 20 m、潮流速 0.5 m/sec、有義波高 0.5 m、有義波周期 4 秒の海域に設置されているところにマグニチュード7の地震が発生した場合を考える。

3. 地震の有効継続時間

浮上免震方式にとって、構造物をどれだけの時間浮上させていなければならないかが、設計上考慮すべき大きな問題の一つである。本検討では、原子力発電施設の耐震設計で用いられている地震の有効継続時間の概念(大崎, 1984)を導入し、その時間中に上部浮体と基礎部分が

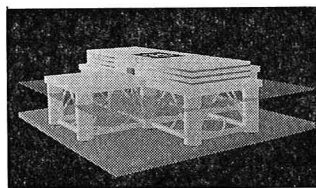


図-1 構造物の概観

* 正会員 工博 (株)大崎総合研究所 主任研究員

** 工修 (株)大崎総合研究所

*** 正会員 工修 沿岸開発技術研究センター 第一調査研究部長

**** 沿岸開発技術研究センター 調査研究部

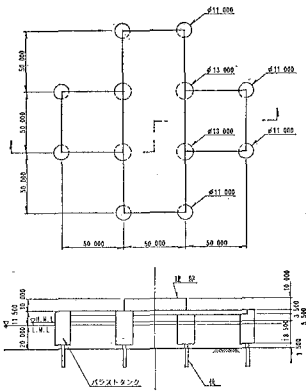


図-2 カラムの配置と構造物の寸法

表-1 地震のマグニチュードと時間比 (大崎, 1984)

マグニチュード	T_b/T_d	T_c/T_d
6	0.16	0.54
7	0.12	0.50
8	0.08	0.46

表-2 マグニチュードと有効継続時間の関係

マグニチュード	有効継続時間(秒)
6	4.6
7	9.5
8	19.3

接触しなければ免震機能が満足されるものとする。

(1) 有効継続時間の定義 (大崎, 1984)

初期微動 (P 波) 後, 本震 (S 波) が到達する。S 波の到達時刻を 0 とし, その後の加速度振幅の包絡線としての関数として示すと一般に図-3 のようにモデル化することができる。

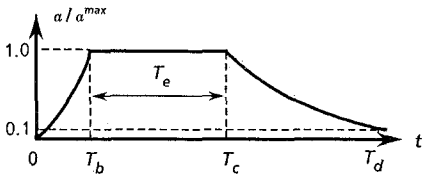


図-3 加速度振幅の包絡線と有効継続時間

この図において $T_e = T_c - T_b$ を有効継続時間, T_d を地震動の継続時間と呼ぶ。図に示したように継続時間 T_d は, 加速度振幅が最大加速度振幅 a^{max} の 1/10 まで減衰するのにかかる時間として定義されている。

(2) マグニチュードと有効継続時間の関係

時間比 T_b/T_d および T_c/T_d は地震のマグニチュードに応じて表-1 のように与えられている。一方, 継続時間 T_d は, 多くの観測データの回帰分析結果に基づき, 次のようにマグニチュード M の関数として与えられることが知られている。

$$T_d = 10^{0.31M - 0.774} \dots\dots\dots (1)$$

継続時間 T_d が式 (1) で表されることから, これと表-1 に示される時間比 T_b/T_d および T_c/T_d を用いて有効継続時間 T_e を求めると, 次式が得られる。

$$T_e = (T_c/T_d - T_b/T_d) \times 10^{0.31M - 0.774} \dots\dots\dots (2)$$

表-1 と式 (2) によって種々のマグニチュードを有する地震に対して有効継続時間を算定することができる。このようにして計算された, 地震マグニチュードと有効継続時間の関係の一例を表-2 示す。

4. シミュレーション法の概要

(1) バラストタンクからの排水

一般にバラスト水の排水方法として, ポンプによる排水, および重力利用による排水が考えられる。しかし, 短時間で浮上を行うためには単位時間当たりの排水量を大きくする必要があり, 立ち上がり時間などの関係からポンプの適用には困難な点が多い。一方, 重力利用の自然排水の場合, 時間に伴う排水量の変化がタンク内の水位, タンクおよび放水口の断面積の関数となり, それらの組合せによりかなり自由に設計できる。

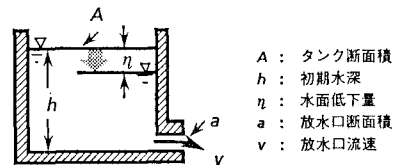


図-4 バラストタンクからの排水のモデル

図-4 に示すように断面積 A , 水深 h のバラストタンクに小口径の開口部があり, ここからバラスト水を放水するものとする。水面低下量を η とすると, η に関する微分方程式は次式ようになる。

$$d\eta/dt = (Ca/A)\sqrt{2g(h-\eta)} \dots\dots\dots (3)$$

ただし, C : 縮脈係数 (オリフィスの場合 0.6, ベルマウスの場合 1.0), g : 重力加速度 (他の記号は図-4 参照)。これを初期条件 $t=0$ で $\eta=0$ の下に解くと,

$$\eta = -(Ca/A)t\{(gCa/2A)t - \sqrt{2gh}\} \dots\dots\dots (4)$$

さらに, 初期水位 h に対して, 浮上高さ Z と浮上終了までの時間が定められたとして, T 秒間で排水を終了するために必要な放水口断面積は次式で得られる。

$$a = (A\sqrt{2hg}/CT)(1 - \sqrt{1-Z/h}) \dots\dots\dots (5)$$

目標とする浮上高さを $Z=0.5m$ とし, 初期水深およ

び排水時間をパラメータとして式(5)から必要な放水口断面積を求めた結果が表-3である。ただし、タンクはカラムの水面上の部分に設けることとして、その断面積はカラムの断面積と一致するものとしている。また、径の異なる2つのカラムの放水口断面積は、全バラスト水の排水終了時間が等しくなるように求めている。()内には、その断面積を1つの円形断面の開口部で得るものとしたとき必要となる直径を示してある。

表-3 必要な放水口断面積 (単位: m²)
(かっこ内は円形断面とした場合の径 単位: m)

排水時間 T (sec)	排水タンク内の初期水深 h (m)		
	3	5	7
10	1.08 (1.18)	0.82 (1.02)	0.69 (0.94)
	1.51 (1.39)	1.15 (1.20)	0.96 (1.11)
15	0.72 (0.96)	0.55 (0.84)	0.46 (0.76)
	1.01 (1.13)	0.76 (0.99)	0.64 (0.90)
20	0.54 (0.83)	0.41 (0.72)	0.34 (0.66)
	0.75 (0.98)	0.57 (0.85)	0.48 (0.78)

上段: 11 m 径, 下段: 13 m 径

例えば、初期水深を $h=7\text{m}$ として排水を $T=10$ 秒間で終了させるには、11 m 径, 13 m 径のカラムそれぞれに 0.69, 0.96 m² の断面積を有する放水口が必要となる。これは1つの円形の開口部とした場合 0.94, 1.11 m の径に相当するが、開口部を 4 個設けるとすると、0.47, 0.56 m の径ですむことになり、十分実現可能である。

(2) 浮上および漂流シミュレーション

浮上免震構造物は浮上に伴い、浮上による鉛直運動と潮流による漂流運動によって決まる重心の平均変位軌道を波浪によって動揺しながら上昇すると考えられる。

次に、平均変位軌道を決定する排水による構造物の浮上運動および潮流による漂流運動を支配する運動方程式について述べる。

構造物が浮上する直前までは、吃水が変化しないので、浮力 F_W は一定である。図-5 に示すように初期状態における水線面上に x 軸、鉛直上向きに z 軸をとって座標系を定義する。

排水により構造物の総重量が減少し、浮力 F_W が総重量 W を上回り、 $F_W > W$ となった瞬間より運動方程式に従って浮上運動を始める。このとき、浮上に伴って浮

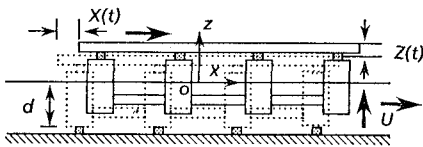


図-5 解析モデルおよび座標系の定義

力は減少する。例えば、構造物が初期状態から t 秒間で $Z(t)$ の高さ浮上したとすれば、水線面が $Z(t)$ だけ下がったときの没水体積にかかる浮力を考えればよいから、次のように表すことができる。

$$F_W(t) = \rho g \int_{-d}^{-Z(t)} S(z) dz \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 d : 初期状態における吃水、 ρ : 流体密度、 $S(z)$: 水深 z における構造物の水平断面積。

一方、全体の質量 M は t の関数として、

$$M(t) = M_0 - \rho \int_0^t Q(\tau) d\tau \dots\dots\dots (7)$$

と表すことができる。ただし、 $Q(t)$ は単位時間あたりの排水量で、浮上開始時間を 0 としている。自然排水の場合、式(4)を用いて $Q(t) = \eta(t)A$ 。また、 M_0 は初期状態における構造物の排除質量である。

構造物には速度の 2 乗に比例する抗力が働くから、結局、運動方程式は次式になる。

$$M(t) \frac{d^2 Z}{dt^2} + \frac{\rho}{2} C_{DZ} A_Z \frac{dZ}{dt} \left| \frac{dZ}{dt} \right| = -gM(t) + \rho g \int_{-d}^{-Z(t)} S(z) dz \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 C_{DZ} : 鉛直運動に対する抗力係数、 A_Z : 運動方向への構造物の投影面積。

バラスト水を排水し浮上を開始した構造物は、自由浮体として潮流によって漂流をする。図-5 に示すように潮流速を U 、 x 方向変位を $X(t)$ とする。このとき潮流によって構造物に働く抗力 F_D は、次のように表される。

$$F_D(t) = -\frac{\rho}{2} C_{DX} A_X(t) \left(\frac{dX}{dt} - U \right) \left| \frac{dX}{dt} - U \right| \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 C_{DX} : 漂流運動に対する抗力係数、 A_X : 流れ方向への構造物の投影面積。ここで、流れ方向の構造物の投影面積 A_X は浮上に伴って減少していくため t の関数となっている。

また、時刻 t における構造物の質量 $M(t)$ は式(7)で表されるから、構造物の漂流についての運動方程式は次のようになる。

$$M(t) \frac{d^2 X}{dt^2} = -\frac{\rho}{2} C_{DX} A_X(t) \left(\frac{dX}{dt} - U \right) \left| \frac{dX}{dt} - U \right| \dots\dots\dots (10)$$

運動方程式(8)、(10)を $t=0$ において、 $X=Z= dX/dt=dZ/dt=0$ の初期条件のもとで解くことによって、浮上および漂流運動による変位が求められる。

一例として図-6 に排水の能力を変えたときの浮上運動の変化を示す。これは目標とする浮上高さを 0.3 m として、必要なバラスト水の排水を 5, 10, 15, 20 秒で行った場合の浮上高さの時間変化を表している。5 秒間の短時間で勢いよく排水を行った場合は浮上後大きく振動

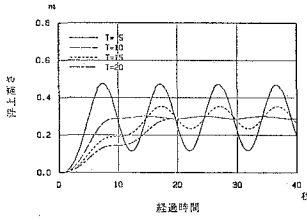


図-6 浮上運動の例

し、10秒の場合は滑らかに浮上することがわかる。構造物の上下方向の振動の固有周期が約10秒付近にあり、排水もほぼ同じ時間で完了すると滑らかな浮上が得られることが示された。

(3) 浮体動揺シミュレーション

各応答の周波数伝達関数が強い特性を示す可能性があること、実際の海の波は種々の周波数成分の波の重ね合わせと考えることができることから、スペクトル理論に基づいて不規則波による動揺応答を解析する。

スペクトル理論によれば、線形システムに対する入出力関係が次のように表される。

$$S_0(f) = |H(f)|^2 S_i(f) \dots\dots\dots (11)$$

ここに、 f : 周波数、 $S_0(f)$: 応答スペクトル、 $H(f)$: 周波数伝達関数、 $S_i(f)$: 入力スペクトル。

周波数伝達関数は、構造物に関する運動方程式から得られる次の構造物の変位振幅ベクトル $\{D\}$ に関する連立方程式を解くことによって求められる。

$$\left[\begin{matrix} [T] + [C] - i\omega[N] - \omega^2([m] + [M]) \end{matrix} \right] \{D\} = \{E\} \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $[T]$: 基礎との接触による復原力行列、 $[C]$: 静水圧による復原力行列、 $[N]$: 造波減衰係数行列、 $[m]$: 質量行列、 $[M]$: 付加質量行列、 $\{E\}$: 波強制力振幅ベクトル、 ω : 角振動数 ($=2\pi f$)。

これらのうち $[T]$ 、 $[C]$ および $[m]$ は与条件であるが、 $[M]$ 、 $[N]$ および $\{E\}$ を求めるには、速度ポテンシャルに関する Radiation および Diffraction 問題を解く必要がある。本研究では清川ら(1983)によるグリーン関数法による直接法を用いている。

各動揺運動モードに対する周波数伝達関数を求め、入力スペクトルを有義波高 0.5m、有義波周期 4 秒のプレットシュナイダー・光易型とし、式 (11) により応答スペクトルを求め、さらに応答スペクトルより不規則波に

表-4 動揺応答振幅

運動モード	最大振幅
水平	2.6 cm
鉛直	0.2 cm
回転	3.1×10^{-5} rad

対する最大振幅を求めた一例を表-4 に示す。これより常時波浪による動揺運動は極めて小さいことがわかる。なお、入射方向は、より大きい応答が得られた上部建屋に平行としているが、入射方向に対する変化は小さい。

5. 浮上免震構造物の挙動

マグニチュード7の地震および 0.5 m/sec の潮流を想定すると、表-2 より有効継続時間は約10秒であり、漂流シミュレーションによればその間の漂流距離は約 50 cm であることが予測される。基礎部の断面形状が図-7 に示されるような円錐形であるとし、浮上高さは地震の有効継続時間中に、上部構造と基礎とが接触しないように定める。この結果、浮上高さは約 1 m 必要となる。タンクの初期水深を 7 m とし、排水は10秒で行うものとする、11 m、13 m 径の各カラムにそれぞれ 0.66 m、0.79 m の径の円形の放水口を 4 個設けることにより要求の排水能力が得られる。このような条件の下で実際に構造物の挙動を求めた結果を示す。

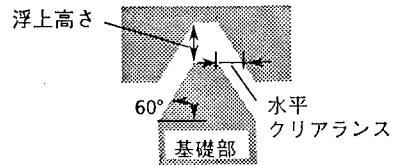


図-7 結合部の形状

(1) 変位軌道

浮上免震構造物の浮上に伴う重心の変位軌道の平均は水平、鉛直の変位をそれぞれ重ね合わせることによって得られ、その結果は図-8 に示すようになる。これは、時間経過に伴う鉛直面内での構造物の変位の様子を示したもので、丸印は浮上開始 0 秒後から 2 秒ごとの位置を示している。浮上開始後は浮上運動により急速に上方に移動するが、8 秒程度ではほぼ目標高さに到達して、その後は漂流による水平方向の運動が卓越していることがわかる。なお、検討モデルの場合、浮上に伴う水平投影面積の変化は約 6% にすぎないためこの影響を無視している。また、ここでは基礎との接触は考慮していない。

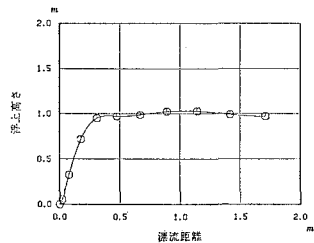


図-8 浮上および漂流運動の組合せによる構造物の平均変位軌道

(2) 浮体部分と基礎部の水平クリアランス

水平クリアランス δ_x は構造物の鉛直および水平変位の関数であり、図-7 に示した円錐台型結合部の場合次式で示される。

$$\delta_x = \{Z(t) \pm |D_3|\} \cot \theta - X(t) \pm |D_1| \dots\dots\dots (13)$$

ここに $X(t)$, $Z(t)$: 時刻 t における漂流距離および浮上高さ, θ : 円錐台の法面勾配, $|D_1|$, $|D_3|$: 水平および鉛直動揺振幅。

各運動を組合せた後、水平クリアランスがどの程度あるかは式 (13) に従って検討できる。その際に、動揺振幅 $|D_1|$, $|D_3|$ が重心の平均位置の関数として変化することを考慮する必要がある。しかし本検討で重心位置は水平方向に約 0.5m、鉛直方向に 1m しか変位しない。これは、波の波長 (有義波周期 4 秒に対する) に対して約 4% にすぎず、浮上および漂流による重心の位置の変化が動揺振幅に及ぼす影響は無視できると考えられる。

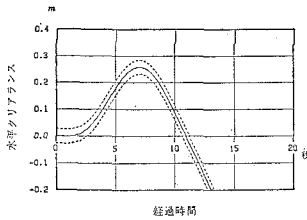


図-9 浮体・基礎間の水平クリアランスの時間変化

以上より、各運動の組合せを考慮した水平クリアランスは浮上、動揺、漂流運動のシミュレーション結果を式 (13) に代入することによって求められることがわかる。

図-9 にその結果を示す。中央の太い実線が平均クリアランスを示し、上下の破線が動揺によるそれぞれ最大間隔と最小間隔の変化を示している。これは、不規則波と考えたときの最大動揺振幅を用いて得られたものであるから、実際にはこの範囲の中で確率的に分布している。

図より基礎に接している初期状態から浮上によってクリアランスが大きくなり、漂流によりその値が減少していく様子がわかる。図中でクリアランスの値が負になっている部分は、構造物と基礎部が接触している状態であり、約 11 秒程度で構造物は基礎と再接触する。また、浮上から約 1 秒の間はクリアランスの平均の線がほぼ 0 と

なっていることから、この間は基礎と構造物が接触した状態で浮上していくことがわかる。なお波浪動揺量は表-4 の値の一部増しとし、回転運動による影響は小さいことから無視したが、動揺によるクリアランスの変化は、図からわかるように非常に小さい。

(3) 浮上免震方式の可能性

上で示したように、排水開始後約 1 秒間は構造物と基礎部が接触するが、実際には排水開始のトリガーレベルを自由に設定でき、地震の有効継続時間に入る前の比較的加速度レベルが低いうちに最初の接触状態を終え、有効継続時間中はクリアランスを保つことが可能である。また、動力を用いず自然排水により十分な排水能力が得られることから、大規模な排水設備を必要とせず、バルブ開閉操作のみによって浮上免震が可能となる。すなわち、経済面での最大のネックが取り除かれたと考えられる。もちろん、制御システムの確立等、実現化のためには解決すべき多くの問題が残されているが、本質的な問題ではなく、逐次解決できるものと考えられる。

6. あとがき

本研究はまだ基礎的段階ではあるが、浮上免震方式が成立し得るということが示されたものと思われる。海洋都市、海上原子力発電所等、浮上免震技術の適用できる海洋構造物は数多く考えられる。今後も残された課題を着実に解決しつつ浮上免震技術を確立し、これらの構造物を実現していきたいと考えている。

本研究はモーターボート競争公益資金による(財)日本船舶振興会の補助事業として実施された海洋情報都市に関する研究の一部である。実施にあたって海洋情報都市研究会 (委員長 電気通信大学寺井精英教授) 各委員から助言指導を頂いたことを記して謝意を表します。

参考文献

大崎順彦 (1984): 原子力発電所設計用の基準地震動評価に関するガイドライン—主として大崎スペクトルについて, ORI 研究報告, 84-01, 101 p.
 清川哲志・大山 巧・小林 浩 (1983): グリーン関数法による任意形状浮体の動揺解析, 土木学会論文報告集, 第 332 号, pp. 55~65.
 寺井精英 (1986): 海洋情報都市 動き出した超巨大プロジェクトの全容, TBS プリタニカ, 254 p.