

水との相互作用を考慮に入れた氷海構造物の地震応答特性に及ぼす氷の影響

三浦房紀*・王 均**

本研究は重力着底式海洋構造物の地震時挙動を、水、地盤、氷との動的相互作用を考慮に入れて求め、構造物の応答、滑動に対する安全性について検討を行ったものである。すなわち、氷の影響は動水圧で評価し、地盤の材料非線形性、氷の異方性を考慮に入れ、周波数特性の異なる3種類の地震波に対して応答解析を実施、地盤の非線形性、氷の異方性、さらに氷の存在が応答や滑動安全率に及ぼす影響を詳細に調べた。

Key Words : off-shore structure, semi-infinite element method, nonlinear analysis, anisotropy

1. まえがき

石油資源に限らず各種の資源が海洋に求められており、極寒の海洋もその例外ではない。このような海域においては冬季に厚い氷が張るため、資源掘削のための構造物に及ぼす氷の影響に関して十分な検討を行う必要がある。特にこのような海域において、近くに地震活動帯がある場合には、構造物の地震時挙動あるいは動的安定性に及ぼす氷の影響も明らかにしておく必要がある。

氷は海面に張るため、氷の存在によって構造物はそのかなり高い位置を拘束されることになる。これは一見構造物の動揺運動が抑えられ構造物に対して有利に作用するようにも思えるが、その拘束が非常に強い場合には逆に構造物と地盤との相対運動を大きくすることになり、ひいては構造物底面におけるベースシアを増大させ、滑動の危険性を高める可能性も考えられる。

このような観点から、筆者らは北極海に建設が考えられている重力着底式構造物を対象に、この地震時挙動および滑動安全性に及ぼす氷の影響に関して検討を行っている¹⁾。これによれば氷の存在は構造物の運動を押さえる効果があり、構造物の安定性に対して有利に作用するという結果が得られている。しかしながらこの研究では、①海水を付加質量でモデル化し、②地盤も線形弾性体と仮定、さらに③異方性の著しい氷を等方質の弾性体と仮定して解析を行っている。

そこで、本研究ではこれら3つの仮定をとり除き、より現実に即した構造物—地盤—氷—水系のモデル化を行い、構造物の地震応答特性、滑動安定性に及ぼす氷の影響を調べたものである。

2. 地盤—構造物—氷—水系の地震応答解析法

通常、地盤—構造物—水系の運動は周波数領域で解かれるが、本研究では非線形解析を行うので、筆者らが既に提案している時間領域における運動方程式を用いる²⁾。解析には有限要素法を用いるが、その場合には半無限の広がりを持つ地盤系と水系に対して人為的な境界を設けなければならない。本研究では地盤の境界に対しては粘性境界を、水に対しては半無限要素を用いる。

地盤—構造物—氷—水系の運動方程式は、(1)地盤—構造物—氷系すなわち固体系の運動方程式と、(2)水系の動水圧に対する運動方程式と別々に立てられ、固体系—水系の接触面における境界条件によって両者は結びつけられる。以下にその概要を示す³⁾。

(1) 地盤—構造物—氷系の運動方程式

地盤の側方に粘性境界を用い、動水圧との相互作用を考慮に入れた運動方程式は次式で与えられる。

$$\begin{aligned}
 [M]\{\delta\} + ([C] + [C_k^f] + [C_k^i])\{\delta\} + [K]\{\delta\} \\
 = -[M]\{a_g\} + [L]\{p\} + ([C_k^f] + [C_k^i])\{\dot{x}_f^f\} \\
 + ([C_k^f] + [C_k^i])\{\dot{x}_f^i\} + [G_k^f]\{x_f^f\} + [G_k^i]\{x_f^i\} \\
 \dots\dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ は質量、減衰、剛性マトリクス、 $\{\delta\}$ は節点変位ベクトル、 $\{a_g\}$ は基盤における入力加速度である。 \cdot は時間に関する微分を意味する。また、 $[C_k^f]$ 、 $[C_k^i]$ 、 $[C_k^f]$ 、 $[C_k^i]$ は粘性境界マトリクス、 $[G_k^f]$ 、 $[G_k^i]$ は境界剛性マトリクスであり、これらの具体的内容は文献1)を参照されたい。ここに上添字の L 、 R はそれぞれ左側、右側の境界を、下添字の R は逸散波に対する粘性境界を、 F は自由地盤の運動に対する粘性境界を意味する。 $\{x_f^f\}$ 、 $\{x_f^i\}$ は自由地盤の変位ベクトルである。 $\{p\}$ は節点動水圧ベクトルであり、 $[L]$ は動水圧を節点力に変換するマトリクスである。すなわち、

* 正会員 工博 山口大学工学部教授 知能情報システム工学科

(〒755 宇部市常盤台 2557)

** 工修 山口大学大学院博士後期課程 システム工学専攻

右辺第2項が水系との相互作用を表わす項である。

なお、本研究では、構造物、地盤、氷と氷との全ての境界で相互作用を考慮に入れて解析を行う。

(2) 水系の運動方程式

水の圧縮性の影響は小さいことから、ここではそれを無視すると水系の方程式は次式で与えられる。

$$[H]\{p\} = -\rho_w [L]^T \{a_g\} + \{\delta\}^B \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $[H]$ は係数マトリクス、 ρ_w は水の密度である。また $\{a_g\} + \{\delta\}^B$ は水系と固体系の境界における絶対加速度を表しており、 $\{\delta\}^B$ は境界上の相対加速度で式(1)の $\{\delta\}$ の一部である。

(3) 連成系の運動方程式

式(2)より

$$\{p\} = -\rho_w [H]^{-1} [L]^T \{a_g\} + \{\delta\}^B \dots\dots\dots (3)$$

これを式(1)へ代入すると

$$\begin{aligned} [M]\{\delta\} + ([C] + [C_k^i] + [C_k^f])\{\delta\} + [K]\{\delta\} \\ = -[M]\{a_g\} - \rho_w [L][H]^{-1}[L]^T \{a_g\} + \{\delta\}^B \\ + ([C_k^i] + [C_k^f])\{x_f^i\} + ([C_k^f] + [C_k^i])\{x_f^f\} \\ + [G_k^i]\{x_f^i\} + [G_k^f]\{x_f^f\} \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、上式をニューマークの β 法($\beta=1/4$)を用いて $(n+1)$ ステップの運動方程式に展開すると次式を得る。

$$\begin{aligned} \left([M]^* + \frac{1}{2}\Delta t [C]^* + \frac{1}{4}\Delta t^2 [K] \right) \{\delta\}_{n+1} \\ = \{F\} - [C]^* \{A\}_n - [K] \{B\}_n \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

また、

$$[H]\{p\}_{n+1} = -\rho_w [L]^T \{a_g\}_{n+1} + \{\delta\}_{n+1}^B \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

$$\begin{aligned} [M]^* &= [M] + [L][H]^{-1}\rho_w [L]^T \\ [C]^* &= [C] + [C_k^i] + [C_k^f] \\ \{A\}_n &= \{\delta\}_n + \frac{1}{2}\Delta t \{\dot{\delta}\}_n \\ \{B\}_n &= \{\delta\}_n + \Delta t \{\dot{\delta}\}_n + \frac{1}{4}\Delta t^2 \{\ddot{\delta}\}_n \end{aligned} \dots\dots\dots (7)$$

式(5)より $(n+1)$ ステップ目の加速度が求まると、これを用いて式(6)より $(n+1)$ ステップ目の動水圧が求まる。ここで、水系の半無限の広がりを表す半無限要素は $[H]$ マトリクスの中に含まれていることに留意されたい。この半無限要素を導入すれば、同じ精度の解を得るのに、それを用いない場合に比べて水系の有限要素領域は半分でよいことが判っている⁹⁾。

3. 氷海構造物のモデル化

本研究では軸対称形とみなせる氷海構造物を平面ひずみモデルに置き換えて解析を行うが、本章で、まず地盤の材料非線形性の導入を簡単に説明し、次に氷の異方性を

考慮に入れる手法を示す。そして構造物の滑動安全性を評価するための修正ジョイント要素の説明を行った後、解析モデルの説明を行う。

(1) 地盤の材料非線形性の導入

土の材料特性に関する研究は盛んに行われており非常に多くの構成関係式が提案されているが、本研究では取扱いが容易であることとジョイント要素の構成関係との関係から、弾性-完全塑性体として地盤の材料非線形性を仮定する。地盤の破壊条件式である破壊基準としては、次式で与えられる Mohr-Coulomb の破壊基準を採用する。

$$\left. \begin{aligned} \tau_y &= C \cos \phi - (\sigma_m - u) \sin \phi \\ \sigma_m &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 τ_y は降伏せん断応力、 C 、 ϕ はそれぞれ土の粘着力と内部摩擦角であり、 σ_1 、 σ_3 はそれぞれ最大、最小主応力、 u は間隙水圧である。

本研究では荷重伝達法を用いて非線形解析を行うが、その非線形解析スキームについては文献4)を参照されたい。

(2) 材料の異方性

前述の通り、氷は強い異方性を示す。このため氷の有限要素モデルの剛性マトリクスには以下のような異方性を考慮する。

要素剛性マトリクス $[k]$ は

$$[k] = \int [B]^T [D] [B] dV \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 $[B]$ は通常形状関数マトリクスであり、平面ひずみ条件下の $[D]$ は次式で与えられる⁵⁾。

$$\left. \begin{aligned} [D] &= \begin{bmatrix} k+m & l & 0 \\ l & n & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \\ n &= \frac{(1-\nu_1)E_2}{1-\nu_1-2\nu_2^2e} & l &= \frac{\nu_2 E_2 e}{1-\nu_1-2\nu_2^2e} \\ k &= \frac{E_2 e}{2(1-\nu_1-2\nu_2^2e)} \\ m &= \frac{E_1}{2(1+\nu_1)} & \mu &= \frac{E_2}{2(1+\nu_2)} & e &= \frac{E_1}{E_2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

ここに、 E はヤング率、 ν はポアソン比、添字 1、2 はそれぞれ x 、 y 方向を意味する。

一般に氷は柱状の節理を有する。その柱の方向は氷の厚さ方向である。従って、水平座標軸を x 方向、鉛直座標軸を y 軸とすると、氷のヤング率は y 軸方向が大きくなる。

(3) 修正ジョイント要素

構造物底面における滑動安定性の評価は修正ジョイント要素⁹⁾を用いて行う。その修正ジョイント要素を図-1に、またそのせん断応力-変位関係を図-2に示す。

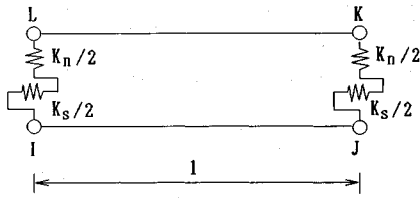


図-1 修正ジョイント要素

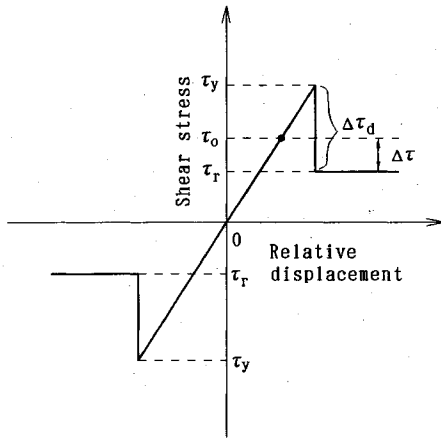


図-2 ジョイント要素のせん断応力-変位関係

修正ジョイント要素は2組の節点对I-L, J-Kの各々にジョイントばね k_s , k_n を結合, それによって不連続面の応力の評価を行うものである. 修正ジョイント要素の剛性マトリクスは次式で与えられる.

$$[k] = \frac{l}{4} \begin{bmatrix} k_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_s & 0 \\ k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_n \\ k_s & 0 & -k_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_n & 0 & -k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \text{Symm.} & & & k_n & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_n & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(11)$$

ここに, l はジョイント要素の長さ, k_s , k_n はそれぞれせん断ばね, 垂直ばねである. 構造物底面の滑動に対する安全性の検討は次式で定義される構造物全体の滑動に対する安全率, $T.S.F.$ ⁶⁾ を用いて行う.

$$T.S.F. = \left| \frac{\sum_{i=1}^N \tau_{yi} l'_i}{\sum_{i=1}^N \tau_i l'_i} \right|_{\min} \quad \dots\dots\dots(12)$$

ここに, τ_{yi} , τ_i はそれぞれ節点对 i における降伏せん断応力, せん断応力であり, l'_i は節点对 i の分担するジョイント面の長さである. また $|\cdot|_{\min}$ は応答時間中の絶対値の最小値であることを意味する.

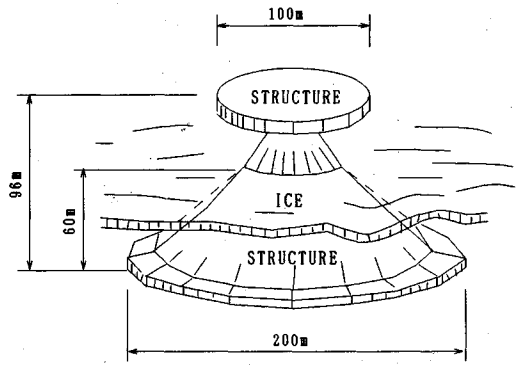


図-3 氷海構造物の概要図

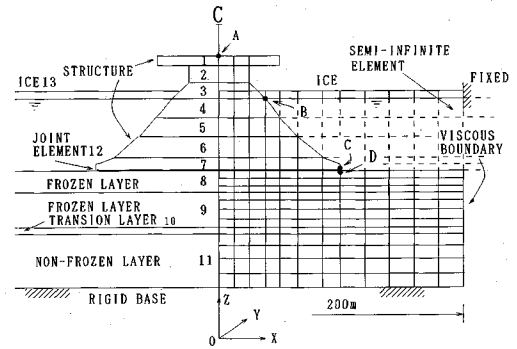


図-4 モデルの構成と有限要素網

(4) 解析モデル

解析の対象とする重力着定式構造物の概略を図-3に示す¹⁾. このように, 構造物はほぼ軸対称形をしており, 軸対称有限要素法を用いて解析することが理想であるが, 滑動現象を表すための軸対称ジョイント要素を用いた動的解析手法はまだ確立されていない. そこで本研究では文献1)と同様に構造物の固有振動数を等置することによって, 2次元非線形動的解析法を用いて構造物の安定性を調べることにする.

図-4はその構造物-地盤-氷-水系の構成(左半分)および有限要素網(右半分)である. 解析は以下に述べるモデル化の手順に従って求めた材料定数を用いて, 単位奥行き当たりの2次元平面ひずみ問題として行った.

a) 重力着定式構造物のモデル化

図-3に示したように, 構造物はその水平断面が正16角形をしておりほぼ軸対称形と見なせる. 底面直径200m, 頂部プラットフォームの直径100m, 高さ96mの鋼鉄製であり, 設計水深60mにおいてそのパラスト水を含めた全空中重量は916700 ton・fである.

この軸対称構造物を2次元平面ひずみモデルに変換するためには以下の手順を踏んだ.

まず, 2次元モデルの単位体積重量は以下のようにして決定した. 解析モデルの底面の幅と奥行きとを実際の底面積と等しくなるように, それぞれ, 200m, 157.08

表—1 モデルの材料定数

Material No.	Unit weight ton·f/m ³	Shear wave vel. m/sec	Poisson's ratio	Damping %
1	0.110	2600.0	0.30	2.0
2	0.056			
3	0.300			
4	0.300			
5	0.683			
6	0.877			
7	1.093			
8	1.700	120.0	0.497	10.0
9	1.920	160.0	0.497	
10	1.920	1020.0	0.40	
11	1.730	1470.0	0.30	
12	$k_n=7.2 \times 10^8 \text{ ton} \cdot \text{f/m}^2$, $k_s=1.2 \times 10^8 \text{ ton} \cdot \text{f/m}^2$		0.40	

mとした。そして図—4の左半分に示すように、構造物を高さ方向に7分割し（図中には上から順に1から7まで番号が付してある）、それぞれの部分の実際の重量を、図示した断面をもち奥行きが157.08 mである矩体の体積で割って単位体積重量を求めた。その結果を表—1に示す。

次に構造物の基本固有振動数と2次元モデルのそれとを合わせるために、まず構造物を軸対称有限要素法でモデル化し、これに対して固有値解析を行って固有振動数を求めた。そして質量は変えずに剛性を調整することによって、2次元モデルの構造物の固有振動数をこれに合わせて。固有振動数は7.52 Hzであり、それに対応する構造物各部の剛性(せん断波速度)は表—1に示す通りである。その際、ポアソン比は鉄のそれを用いた。減衰定数は基本固有振動数7.52 Hzに対して2%を仮定した。

b) 地盤のモデル化

地盤は大別して非凍土 (NON-FROZEN LAYER)、凍土 (FROZEN LAYER) およびその遷移層 (TRANSITION LAYER) の3種類の層からなる。凍土はさらに2層に分けられる。現地調査による地盤データをもとに、本解析で用いる地盤定数を表—1に併せて示す。表中の番号は図—4の材料番号に対応する。

本研究では地盤の下には剛な基盤を仮定し、側方には粘性境界を用いて逸散波によるエネルギーの吸収を計った。減衰定数は地盤を等価な2層系に置換する手法⁷⁾を用いて固有振動数を求め(1.94 Hz)、これに対して10%を仮定した。

前述した通り、構造物の動的な滑動に対する安全性を評価するために、構造物底面と地盤との間に修正ジョイント要素を配列する。しかしながら、実際の構造物の底面は平らではなく、滑動防止のためのスカートが設けられ、これが地中内1 mの深さまで侵入するよう設計されている。即ち、実際に滑り面が形成されるのは構造物底面と地盤の接触面ではなく、接触面から1 m下方付近の地盤内であると考えられる。したがって、滑動に対

する抵抗力、即ちジョイント要素のせん断強度には構造物と地盤との間の付着強度ではなく、土のせん断強度を用いなくてはならない。そのせん断強度は5 ton·f/m²である。また粘性土であることから、解析にはC=5 ton·f/m², φ=0°を用いる。

ジョイント要素のパネ定数 k_s , k_n は次式により定められた¹¹⁾。

$$k_s = \frac{\mu}{h} a, \quad k_n = \frac{\lambda + 2\mu}{h} b \dots \dots \dots (13)$$

ここに、 μ , λ はラーメの定数、 h はジョイント要素に接するソリッド要素の高さ、 a , b はジョイント要素に接する両側のソリッド要素の剛性に依存するパラメータであり、本研究のように、構造物と地盤のように剛性が大きく異なる時には $a=b=1$ としても十分良い精度が得られることが分かっている。その際、 μ , λ は剛性の高い材料の値を用いることが必要である。すなわち、本研究では構造物の値を用いた。また応力降下量 $\Delta \tau_d = 0$ とした。

c) 氷のモデル化

氷の厚さは6mを仮定し、これも2次元ソリッド要素でモデル化する。氷の物理定数は詳しく調べられており、温度や塩分濃度に依存することがわかっている⁸⁾⁻¹⁰⁾。本研究では異方性をもつ弾性体と仮定し、-25°Cにおける値を基本定数として用い、これを少しパラメトリックに変えて解析を行うこととする。その基本定数を表—1に合わせて示す。

なお、氷も地盤や水と同様に無限遠まで拡がり有しているもので、側方境界でエネルギーを吸収するような境界処理が必要であるが、ここでは解析を簡単にするため固定境界とした。この固定境界の位置によって応答が異なるので、本解析の前にあらかじめ適切な位置を決めるための予備計算を行った。その結果、構造物中心からの距離が300 m以上になると結果は一定となり、200 mでも、その差は3%以下であることが判った。そこで、本研究では200 mの位置に固定境界を設けることとした。

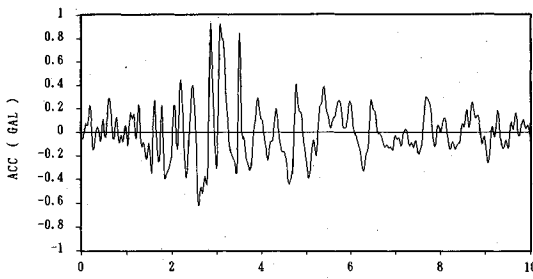
4. 解析結果

(1) 入力地震波

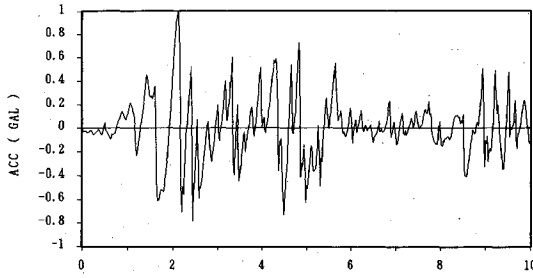
本研究では入力地震波として、卓越周波数の異なる以下の3種類の地震波を用いる。

- (a) 八戸波, NS成分, 1968年十勝沖地震
- (b) El Centro波, NS成分, 1940年インペリアルバレー地震
- (c) 開北橋波, EW成分, 1978年宮城県沖地震

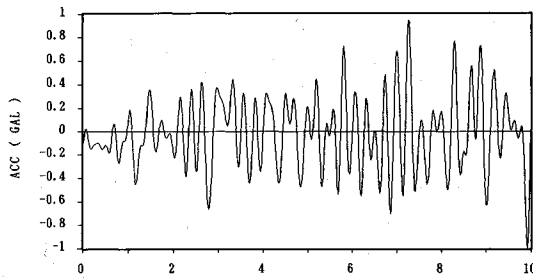
これらの加速度波形を図—5に順番に示す。卓越振動数はそれぞれ、0.37 Hz, 1.15 Hz, 3.52 Hzであり、八戸波が最も低く、開北橋波が最も高くなっている。振幅は海底面加速度で100 galとなるように、



(a) 八戸, NS成分



(b) El Centro, NS成分



(c) 開北橋, EW成分

図-5 入力加速度波形

Deconvolution¹²⁾によって基盤での波形を決めている。

(2) 動水圧法と付加質量法との比較

2章においては、水の影響を動水圧として考慮し、構造物—地盤—水—水相互作用系として解析する手法を示した。この手法によるものを動水圧法 (HDPM) と以下呼ぶことにする。一方、文献1) のように水の影響を付加質量として扱う方法もある。この方法によるものを付加質量法 (AMM) と以下呼ぶ。本研究では文献1) で行ったのと同様に、三次元特異分布法¹³⁾に基づき構造物に対して求めた付加質量を用いた。具体的には、構造物の水中体積に等しい海水の質量の4分の1を付加質量とした。

表-2に両手法による構造物各点の最大変位、最大速度、最大加速度応答量を比較して示す。表-2 (a) は八戸波、(b) はEl Centro波、(c) は開北橋波に対する

表-2 (a) 最大応答量の動水圧法 (HDPM) と付加質量法 (AMM) の比較 (八戸波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	AMM	2.086	2.131	2.229	1.974
	HDPM	1.762	1.838	1.909	1.606
	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$	-15.53	-13.75	-14.36	-18.64
Vel. (Kine)	AMM	17.69	18.08	19.16	19.16
	HDPM	16.86	16.99	17.34	17.35
	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$	-4.69	-6.03	-9.50	-9.45
Acc. (gal)	AMM	69.08	69.98	67.41	86.26
	HDPM	77.48	66.91	68.71	70.34
	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$	12.16	-4.37	1.93	-18.46

表-2 (b) 最大応答量の動水圧法 (HDPM) と付加質量法 (AMM) の比較 (El Centro波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	AMM	1.618	1.606	1.714	2.006
	HDPM	1.350	1.360	1.411	2.034
	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$	-16.56	-15.32	-17.68	1.40
Vel. (Kine)	AMM	17.79	18.10	18.63	18.62
	HDPM	16.91	16.81	16.66	17.55
	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$	-4.95	-7.13	-10.57	-5.75
Acc. (gal)	AMM	120.9	129.7	155.1	106.7
	HDPM	71.25	95.31	151.5	89.74
	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$	-41.07	-26.52	-2.32	-15.90

表-2 (c) 最大応答量の動水圧法 (HDPM) と付加質量法 (AMM) の比較 (開北橋波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	AMM	1.499	1.532	1.579	1.999
	HDPM	1.351	1.393	1.472	1.871
	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$	-9.87	-9.07	-6.78	-6.40
Vel. (Kine)	AMM	15.24	15.58	16.34	16.39
	HDPM	13.60	13.69	13.85	14.37
	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$	-10.76	-12.13	-15.36	-12.32
Acc. (gal)	AMM	70.83	71.97	65.57	71.40
	HDPM	56.30	48.57	69.94	58.59
	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$	-20.51	-32.51	6.66	-17.94

ものである。なお、ここでの解析では水は等方等質、地盤は弾性体と仮定している。点A、B、C、Dの位置は、図-4に示すとおりである。点Aは構造物天端、Bは構造物の水面付近、Cは構造物底面、DはCと接触する地盤表面である。点CとDは初期状態においては同一の座標にある。もしこの点で滑動が生じれば両点は異なった挙動を呈する。

表には併せて最大応答量の比較、(HDPM-AMM)/AMM×100%が示してある。すなわち、この値が正のときは動水圧法による応答が大きく、逆に負のときは小さいことを示す。

まず構造物の応答を比較する。構造物天端即ち点Aは八戸波入力時に加速度が約12%動水圧法の方が大きくなっているのみで、他の応答量は動水圧法の方が小さ

表-3 滑動安全率 (T. S. F.) の動水圧法 (HDPM) と付加質量法 (AMM) の比較

入力波	AMM	HDPM	$\frac{HDPM-AMM}{AMM} \times 100\%$
八戸	2.896	2.557	-11.71
El Centro	2.090	1.981	-5.22
開北橋	3.263	2.582	-20.87

表-5 滑動安全率 (T. S. F.) に及ぼす地盤の非線形性の影響 (100 gal)

入力波	Linear	Nonlinear	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$
八戸	2.557	2.554	-0.12
El Centro	1.981	2.001	1.01
開北橋	2.582	2.575	-0.27

表-4 (a) 最大応答量に及ぼす地盤の非線形性の影響 (100 gal, 八戸波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	Linear	1.762	1.838	1.909	1.606
	Nonlinear	1.766	1.841	1.910	1.607
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.23	0.16	0.05	0.06
Vel. (Kine)	Linear	16.86	16.99	17.34	17.35
	Nonlinear	16.87	17.00	17.35	17.36
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.06	0.06	0.06	0.06
Acc. (gal)	Linear	77.48	66.91	68.71	70.34
	Nonlinear	77.46	66.87	68.88	70.16
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	-0.03	-0.05	0.04	-0.26

表-6 (a) 最大応答量に及ぼす地盤の非線形性の影響 (200 gal, 八戸波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	Linear	3.482	3.621	3.732	3.236
	Nonlinear	3.491	3.622	3.725	3.228
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.26	0.03	-0.19	-0.25
Vel. (Kine)	Linear	33.38	33.70	34.31	35.72
	Nonlinear	33.43	33.74	34.33	35.63
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.15	0.12	0.06	-0.25
Acc. (gal)	Linear	155.0	132.5	137.0	138.5
	Nonlinear	154.4	132.0	137.2	135.3
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	-0.39	-0.38	0.15	-2.31

表-4 (b) 最大応答量に及ぼす地盤の非線形性の影響 (100 gal, El Centro 波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	Linear	1.350	1.360	1.411	2.034
	Nonlinear	1.348	1.366	1.415	2.040
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	-0.15	0.44	0.28	0.29
Vel. (Kine)	Linear	16.91	16.81	16.66	17.55
	Nonlinear	16.92	16.82	16.68	17.55
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.06	0.06	0.12	0.00
Acc. (gal)	Linear	71.25	95.31	151.5	89.74
	Nonlinear	71.57	93.82	149.0	89.92
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.45	-1.56	-1.65	0.20

表-6 (b) 最大応答量に及ぼす地盤の非線形性の影響 (200 gal, El Centro 波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	Linear	2.679	2.631	2.686	3.462
	Nonlinear	2.681	2.628	2.684	3.350
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.07	-0.11	-0.07	-3.24
Vel. (Kine)	Linear	33.28	33.13	32.70	37.20
	Nonlinear	33.03	32.85	32.35	37.00
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	-0.75	-0.85	-1.07	-0.54
Acc. (gal)	Linear	144.8	185.1	292.6	177.1
	Nonlinear	144.1	184.7	291.5	172.2
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	-0.48	-0.22	-0.38	-2.77

表-4 (c) 最大応答量に及ぼす地盤の非線形性の影響 (100 gal, 開北橋波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	Linear	1.351	1.393	1.472	1.871
	Nonlinear	1.354	1.396	1.475	1.868
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.22	0.22	0.20	-0.16
Vel. (Kine)	Linear	13.60	13.69	13.85	14.37
	Nonlinear	13.61	13.70	13.85	14.37
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.07	0.07	0.00	0.00
Acc. (gal)	Linear	56.30	48.57	69.94	58.59
	Nonlinear	56.31	48.53	69.50	58.37
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.02	-0.08	-0.63	-0.38

表-6 (c) 最大応答量に及ぼす地盤の非線形性の影響 (200 gal, 開北橋波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	Linear	2.744	2.836	2.975	3.729
	Nonlinear	2.782	2.883	3.034	3.694
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	1.38	1.66	1.98	-0.94
Vel. (Kine)	Linear	27.00	27.12	27.22	29.84
	Nonlinear	27.13	27.27	27.38	29.89
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	0.48	0.55	0.59	0.17
Acc. (gal)	Linear	111.7	96.52	113.9	107.9
	Nonlinear	111.6	95.29	112.1	105.1
	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$	-0.09	-1.27	-1.58	-2.59

くなっている。点 B は全ての入力に対して変位、速度、加速度ともに動水圧法の応答量が小さくなっている。点 C は変位、速度は全ての入力に対して動水圧法の方が小さく、加速度に関しては八戸波、開北橋波に対して僅かに大きくなっている。構造物端部に接している地盤である点 D は、El Centro 波入力時にはほんの僅か動水圧法の方が大きくなっているが、他は動水圧法の方が小さくなっている。以上より概略としては、動水圧法による方

が付加質量法による場合より応答量は加速度を除いて低下する傾向があるといえよう。

次に、構造物の滑動に対する安全率の比較を行う。表-3 に T. S. F. を比較して示す。八戸波に対して約 12%、El Centro 波に対しては約 5%、開北橋波に対しては約 21% 安全率が低くなっている。これは、動水圧法の方が一般に変位応答量は小さくなっているが、構造物と地盤との間の相対変位量は動水圧法の方がやや大きいため

表一七 滑動安全率 (T.S.F.) に及ぼす地盤の非線形性の影響 (200 gal)

入力波	Linear	Nonlinear	$\frac{Nonlinear-Linear}{Linear} \times 100\%$
八戸	1.417	1.428	0.78
El Centro	1.130	1.156	2.30
開北橋	1.418	1.391	-1.90

である。

(3) 地盤の非線形性の影響

ここでは、氷は等方等質と仮定し、動水圧法によって地盤の材料非線形性が構造物の応答、滑動安全性に及ぼす影響をみる。表一と同様に、点A, B, C, Dの最大応答量を表一四にまとめて示す。Linearが地盤を線形弾性体と仮定した場合、Nonlinearが非線形とした場合である。表より、両者の差はほんの僅かであることが判る。これは、ここでの解析では地盤の降伏強度を $C = 5 \text{ ton} \cdot \text{f/m}^2$, $\phi = 0^\circ$ としているが、この強度では地盤の非線形挙動はほんの僅かであるためである。

表一五に T.S.F. の比較を示す。最大応答量と同様に、滑動安定性に対しても両者の差は非常に小さい。

以上は海底面での最大加速度を 100 gal とした時の結果であるが、非線形性の影響があまり出ないので、入力を 2 倍、即ち海底面での振幅を 200 gal とした同様の解析を行った。各点の最大応答量を表一六に、T.S.F. の比較を表一七に示す。この結果からも、地盤の材料非線形性はあまり大きくないことが判る。

(4) 氷の異方性の影響

ここでは、氷の異方性の影響のみを考えるために、地盤を非線形弾性体と仮定して、氷の弾性定数を変化させて解析を行った。解析はいずれも動水圧法による。各地震波を入力したとき (100 gal 入力) の最大応答量を表一八にまとめて示す。(a) は八戸波、(b) は El Centro 波、(c) は開北橋波に対するものである。また、「等方」は x 方向、 y 方向ともに表一に示したせん断波速度から求めた E_0 を用いた場合である。「異方1」は $E_x = E_0$, $E_y = 4E_0$ とした場合、「異方2」は $E_x = \frac{1}{4}E_0$, $E_y = E_0$ とした場合である。表には、次節4.(5) で氷の存在の影響を見るために氷の無い場合 (No ice) の応答結果も併せて示してある。本節では氷の異方性の影響を見るため、「等方」、「異方1」、「異方2」の結果に注目して検討を行う。

これらの表より、「異方」の「等方」からの変化はかなりあることが分かる。「異方1」の場合、変位に関しては全ての点、全ての入力波に対して応答量が低下し、最大8% 余り減少している (開北橋波入力時の点C)。速度に関しては開北橋波入力時を除いて応答量がほとんど低下し、最大14% 近く減少している (El Centro 波入力時の点B)。加速度に関しては入力波形と場所に

表一八 (a) 最大応答量に及ぼす氷の異方性と氷の存在の影響 (八戸波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	No ice	2.126	2.120	2.195	2.229
	等方	1.766	1.841	1.910	1.607
	異方1	1.693	1.710	1.778	1.588
	異方2	2.012	2.028	2.056	1.992
	$\frac{\text{異方1}-\text{等方}}{\text{等方}} \times 100\%$	-4.13	-7.12	-6.91	-1.18
	$\frac{\text{異方2}-\text{等方}}{\text{等方}} \times 100\%$	13.93	10.16	7.64	23.96
	$\frac{\text{等方}-\text{No ice}}{\text{No ice}} \times 100\%$	-16.93	-13.16	-12.98	-27.90
	$\frac{\text{異方1}-\text{No ice}}{\text{No ice}} \times 100\%$	-20.37	-19.34	-19.00	-28.76
	$\frac{\text{異方2}-\text{No ice}}{\text{No ice}} \times 100\%$	-5.36	-4.34	-6.33	-10.63
	Vel. (kine)	No ice	18.81	18.05	17.81
等方		16.87	17.00	17.35	17.36
異方1		16.09	15.87	16.23	16.35
異方2		17.93	17.42	17.25	17.26
$\frac{\text{異方1}-\text{等方}}{\text{等方}} \times 100\%$		-4.62	-6.65	-6.46	-5.82
$\frac{\text{異方2}-\text{等方}}{\text{等方}} \times 100\%$		6.28	2.47	-0.58	-0.58
$\frac{\text{等方}-\text{No ice}}{\text{No ice}} \times 100\%$		-10.31	-5.82	-2.58	-2.58
$\frac{\text{異方1}-\text{No ice}}{\text{No ice}} \times 100\%$		-14.46	-12.08	-8.87	-8.25
$\frac{\text{異方2}-\text{No ice}}{\text{No ice}} \times 100\%$		-4.68	-3.49	-3.14	-3.14
Acc. (gal)		No ice	43.64	56.18	72.67
	等方	77.46	66.87	68.88	70.16
	異方1	78.51	74.66	69.73	66.48
	異方2	46.72	51.99	70.53	73.30
	$\frac{\text{異方1}-\text{等方}}{\text{等方}} \times 100\%$	1.36	11.65	1.23	-5.25
	$\frac{\text{異方2}-\text{等方}}{\text{等方}} \times 100\%$	-39.68	-22.25	2.40	4.48
	$\frac{\text{等方}-\text{No ice}}{\text{No ice}} \times 100\%$	77.50	19.03	-5.22	-7.77
	$\frac{\text{異方1}-\text{No ice}}{\text{No ice}} \times 100\%$	79.90	32.89	-4.05	-12.61
	$\frac{\text{異方2}-\text{No ice}}{\text{No ice}} \times 100\%$	7.06	-7.46	-2.94	-3.64

よって大小関係が異なる。一方、「異方2」の場合、変位に関しては全ての点、全ての入力波に対して応答量が増大し、最大36% 余りに達している (El Centro 波入力時の点A)。速度に関しては El Centro 波入力時に応答量が全ての点に対して最大10% 近く低下し、その反面、開北橋波入力時には応答量が全ての点で増大し、最大約21% に達している。加速度に関しては全ての点、全ての入力波に対して応答量がほとんど低下し、最大約40% 減少している (八戸波入力時の点A)。これらの結果から、異方性の影響はかなりあり、特に氷が軟らかくなるとその影響は顕著になることが判る。一般に氷の材料特性は温度と塩分濃度、とくに温度に依存することが知られている^{8)~10)}。したがって、温度によって構造物の応答が大きく変わることには留意しなければならないことをこの結果は示している。

表一九は構造物の滑動に対する安全率を比較したものである。「異方」の場合、「異方1」の開北橋波入力時を除いて安全率が低下していることが判る。特に「異方2」の場合にはその低下の程度が大きいことが分かる。

表一8 (b) 最大応答量に及ぼす氷の異方性と氷の存在の影響 (El Centro 波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	No ice	2.232	2.244	2.257	2.923
	等方	1.348	1.366	1.415	2.040
	異方1	1.312	1.348	1.413	1.984
	異方2	1.837	1.849	1.860	2.564
	異方1-等方 等方	-2.67	-1.32	-0.14	-2.75
	異方2-等方 等方	36.28	35.36	31.45	25.69
	等方-No ice No ice	-39.61	-39.13	-37.31	-30.21
	異方1-No ice No ice	-41.22	-39.93	-37.39	-32.12
	異方2-No ice No ice	-17.70	-17.60	-17.59	-12.28
	Vel. (kine)	No ice	16.10	15.00	14.35
等方		16.92	16.82	16.68	17.55
異方1		14.78	14.50	14.86	17.73
異方2		16.53	15.75	15.04	16.44
異方1-等方 等方		-12.65	-13.79	-10.91	1.03
異方2-等方 等方		-2.30	-6.36	-9.83	-6.32
等方-No ice No ice		5.09	12.13	16.24	5.91
異方1-No ice No ice		-8.20	-3.33	3.55	7.00
異方2-No ice No ice		2.67	5.00	4.81	-0.78
Acc. (gal)		No ice	49.09	83.95	139.5
	等方	71.57	93.82	149.0	89.92
	異方1	68.93	96.08	143.1	76.78
	異方2	57.92	94.32	145.9	79.79
	異方1-等方 等方	-8.69	2.41	-4.00	-14.61
	異方2-等方 等方	-19.07	0.53	-2.08	-11.27
	等方-No ice No ice	45.79	11.76	6.81	15.83
	異方1-No ice No ice	40.42	14.45	2.58	-1.09
	異方2-No ice No ice	17.99	12.35	4.59	2.78

表一8 (c) 最大応答量に及ぼす氷の異方性と氷の存在の影響 (開北橋波)

Point		A	B	C	D
Dis. (cm)	No ice	1.918	1.959	2.001	2.494
	等方	1.354	1.396	1.475	1.868
	異方1	1.255	1.288	1.352	1.867
	異方2	1.725	1.746	1.758	2.550
	異方1-等方 等方	-7.31	-7.74	-8.34	-0.05
	異方2-等方 等方	27.40	25.07	19.19	35.21
	等方-No ice No ice	-29.41	-28.74	-26.29	-25.14
	異方1-No ice No ice	-34.57	-34.25	-32.43	-25.06
	異方2-No ice No ice	-10.06	-10.87	-12.14	2.25
	Vel. (kine)	No ice	17.86	17.50	17.33
等方		13.61	13.70	13.85	14.37
異方1		13.86	13.86	14.05	14.59
異方2		16.45	16.39	16.42	16.42
異方1-等方 等方		1.84	1.17	1.44	1.53
異方2-等方 等方		20.87	19.64	18.56	14.27
等方-No ice No ice		-23.80	-21.71	-20.08	-17.03
異方1-No ice No ice		-22.40	-20.80	-18.93	-15.76
異方2-No ice No ice		-7.89	-6.34	-5.25	-5.20
Acc. (gal)		No ice	44.92	51.21	55.53
	等方	56.31	48.53	69.50	58.37
	異方1	59.37	60.21	66.16	53.83
	異方2	40.72	48.68	58.50	60.14
	異方1-等方 等方	5.43	24.07	-4.80	-7.78
	異方2-等方 等方	-27.69	0.31	-15.83	3.03
	等方-No ice No ice	25.36	-5.23	25.16	-20.41
	異方1-No ice No ice	32.17	17.57	19.14	-26.60
	異方2-No ice No ice	-9.35	-4.94	5.35	-18.00

(5) 氷の存在の影響

以上、動水圧法と付加質量法の比較、地盤の材料非線形性の影響、氷の異方性の影響を見てきた。最後に氷の存在の影響を見るために氷のある場合と氷のない場合の比較を行う。表一8は点A, B, C, Dの最大応答量の比較、表一9は滑動に対する安全率の比較を行ったものである。表中、「等方」、「異方1」、「異方2」は氷がある場合で、「No ice」は氷のない場合でいずれも地盤は非線形とし、動水圧法によっている。

まず変位は全ての点、全ての入力波に対して氷のない場合が大きい。速度はEl Centro波入力時を除いて氷のない方が大きい。加速度はEl Centro波入力時は「異方2」のD点を除いて全ての点で氷のない場合が大きい。他の波形では場所によって大小関係が異なる。

滑動に対する安全率は「異方2」のEl Centro波入力時を除いて全ての入力波に対して氷のある方が安全率は高くなる。表一9よりわかる。

表一9 滑動安全率 (T. S. F.) に及ぼす氷の異方性と氷の存在の影響

入力波	八戸	El Centro	開北橋
No ice	1.776	1.803	1.860
等方	2.554	2.001	2.575
異方1	2.340	1.928	2.579
異方2	2.099	1.742	1.914
異方1-等方 等方	-8.38	-3.65	0.16
異方2-等方 等方	-17.81	-12.94	-25.67
等方-No ice No ice	43.81	10.98	38.44
異方1-No ice No ice	31.76	6.93	38.66
異方2-No ice No ice	18.19	-3.38	2.90

5. 結 論

本研究は氷海に建設が考えられている重力着定式構造物の地震時挙動を水、地盤、氷との動的相互作用を考慮に入れて求め、氷海構造物の応答、滑動安全性に及ぼす氷の影響を以下の項目について検討したものである。

まず、付加質量法と本研究で提案した動水圧法を比較

したところ、変位、速度応答は付加質量法の方が、加速度応答は動水圧法の方が応答量は大きくなった。

動水圧法の方が変位応答は小さいにもかかわらず、安全率は低くなっている。これは動水圧法の方が地盤と構造物との間の相対変位が大きいからである。

次に地盤の材料非線形性の影響は、ここで仮定した $C=5 \text{ ton} \cdot \text{f}/\text{m}^2$, $\phi=0^\circ$ ではほとんど生じなかった。入力振幅を 200 gal としてもその影響は小さかった。したがって、滑動安全率も線形、非線形であり差は生じなかった。

また氷の異方性の影響はかなりあり、特に氷が軟らかい場合には、その影響が非常に顕著になることが判った。氷の物性はヤング率も含めて温度によって大きく変わる。すなわち、氷海構造物の応答は氷の温度によっても影響を受けることが判った。

氷の存在は本研究で対象とした 3 種類の全ての入力波形に対して最大応答変位を低下させ、滑動に対する安全率を一般に高くすることがわかった。しかし、速度、加速度に関しては必ずしも低下させるとは限らないこともわかった。

以上の様に、動水圧、地盤の材料非線形性、氷の異方性の影響が明らかになった。しかしながら、本研究は軸対称構造物を基本固有振動数を等置した 2 次元平面ひずみ問題として解析している。したがって、地盤や氷の面外変形、あるいは構造物側面での氷のせん断抵抗 (図 4 のモデル図でいえば、構造物の手前と向こう側でのせん断抵抗) 等は考慮されていない。この様な問題に対しては、地盤—構造物—水—氷系の完全な 3 次元解析を行わざるを得ないが、現段階ではその手法は開発されていない。今後の課題として引き続き研究を進めていく予定である。

最後に本研究を行うに当たって、NKK 総合エンジニアリング部の大石博博士からは貴重な助言を頂いた。感謝の意を表する次第である。また、本研究は文部省科学研究費一般研究 (C) (平成 3 年度, 4 年度, 課題番号 02805054) の補助を受けたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 三浦房紀・野沢逸男・楠信昭・平野勝志: 氷海構造物の地震時挙動と滑動安定性に及ぼす氷の影響, 土木学会論文集, 第 409 号, pp. 65~73, 1989.
- 2) 三浦房紀・王均: 半無限要素を用いた水—構造物—地盤相互作用系の時間領域解析手法, 第 21 回土木学会地震工学研究発表会講演概要, pp. 453~456, 1991.
- 3) Miura, F. and Wang, J.: Dynamic response analysis of structure-water-ground systems in the time domain using semi-infinite elements, *Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering*, JSCE, No.471, pp.59~65, 1993.
- 4) 土岐憲三・三浦房紀: 地盤—構造物系の非線形地震応答解析, 土木学会論文集, 第 317 号, pp. 61~68, 1982.
- 5) 鷲津久一郎他編: 有限要素ハンドブック, 応用編, 培風館, p. 184, 1983.
- 6) 土岐憲三・三浦房紀: 非線形有限要素法による断層運動と地震波動の生成, 第 1 回地盤工学における数値解析シンポジウム論文集, 日科技連, pp. 163~170, 1986.
- 7) Dobry, R., Oweis, I. and Urzua, A.: Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile, *B.S.S.A.*, vol.66, No.4, pp.1293~1321, 1976.
- 8) Gold, L. W. and Traetteberg, A.: Young's modulus of ice and ice engineering problems, *Proc. IAHR Symp. on applications of solid mechanics*, Hamilton, pp.1~16, 1975.
- 9) Lainey, L. and Tinawi, R.: The mechanical properties of sea ice—A compilation of available data, *Can. J. Civil Eng.*, Vol.11, No.4, pp.884~923, 1984.
- 10) Inoue, M. and Frederking, R.: Adhesion strength of piles in saline ice, *Proc. of 8th Int. IAHR Symposium on Ice*, Iowa City, pp.89~104, 1986.
- 11) 動的解析と耐震設計, 第 2 巻動的解析の方法, 土木学会編, 技報堂出版, p. 125, 1989.
- 12) Miura, F. and Toki, K.: Estimation of natural frequency and damping factors for dynamic soil structure interaction systems, *Proc. of 3rd Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Eng.*, Vol.4, pp.73~87, 1987.
- 13) Faltinson, D. and Michelson, F.C.: Motions of large structures in waves at zero fluid number, *Int. Symp. on the Dyn. of Marine Vehicles and Structures in Waves*, 1974. (1993. 3. 8 受付)

THE EFFECT OF ICE ON NONLINEAR SEISMIC RESPONSES OF A OFF-SHORE STRUCTURE SURROUNDED BY THICK ICE CONSIDERING DYNAMIC INTERACTION WITH WATER

Fusanori MIURA and Jun WANG

This paper deals with the problem of nonlinear dynamic responses of a large-scale off-shore structure that is surrounded by thick ice. In modeling the system, a modified joint element is employed to simulate sliding phenomena at the interface between the soil and the structural base, frequency independent semi-infinite elements are used to model the parts of the water system away from the structure. The anisotropy of the ice and material nonlinearity of the soil are considered as well.