

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

THE EFFECT OF ICE ON THE SEISMIC RESPONSE AND DYNAMIC STABILITY
AGAINST SLIDING OF OFF-SHORE STRUCTURES

三浦房紀*・野沢逸男**・榎 信昭***・平野勝志****

By Fusanori MIURA, Itsuo NOZAWA, Nobuaki SAKAKI and Katsushi HIRANO

The purpose of this study is to investigate the effect of ice on the seismic response and dynamic stability against sliding of a large-scale off-shore structure that is surrounded by thick ice. The nonlinear soil-structure-ice interaction system was analyzed by the two-dimensional finite element method. In modeling the system, a modified joint element was employed to simulate sliding phenomena at the interface between the soil and the structural base. Three accelerograms having different predominant frequencies were used as input motions to examine the effect of frequency on the structural response and stability. Three different values of Young's modulus were used for the ice. It was found from the analyses that the ice decreased the seismic response of the structure and increased the stability against sliding.

Keywords: offshore structure, ice, dynamic stability, nonlinear analysis

1. まえがき

資源を海洋に求めることは早くから行われており、石油資源は北海油田に例をみるように、すでに商業ベースで行われている。今後は、石油資源に限らず各種の資源が海洋に求められることは明らかであり、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、冬季には厚い氷が張るため、資源掘削のための構造物に及ぼす氷の影響に関して、十分な検討を行っておく必要がある。すなわち、構造物に及ぼす流水等による氷荷重の影響、さらに、このような海域において、地震活動地帯があることを考えると、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を明らかにしておく必要がある。前者の影響すなわち、流水による一方向からの荷重の影響に関してはすでに多くの研究が行われているのに対し^{1)~5)}、後者すなわち、地震時の氷の構造物に及ぼす影響に関してはほとんど行われていないのが現状である。

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場所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、ベースシアを増大させ、ひいては構造物底面における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、本研究は北極海 (Beaufort sea) に建設が考えられている重力着定式構造物を対象に、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たものである。

2. 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-1に示す。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静的解析手法は提案されているもの⁶⁾、動的解析手法はまだ確立されていない。そこで、本研究では構造物の固有振動数を等置することによって、二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。なお、二次元解析による構造物の滑動に対する安全率は三次元解析によるものよりやや低く求まることかわ

* 正会員 工博 山口大学工学部助教授 建設工学科
(〒755 宇部市常盤台 2557)

** 正会員 NKK エンジニアリング事業部都市環境エンジニアリングチーム課長 (〒230 横浜市鶴見区末広町 2-1)

*** 正会員 NKK 鉄鋼研究所都市工学研究部課長
(〒210 川崎市川崎区南羽田町 1-1)

**** 正会員 戸田建設(株)大阪支店(元・山口大学大学院生) (〒550 大阪市西区西本町 1-13-47)

かっている⁷⁾。すなわち、本研究による結果は安全側にあるものと考えられる。

上述のように、本研究においては、軸対称構造物を二次元モデルに変換しなければならない。図-2はその構造物-地盤-氷系の構成（左半分）および有限要素網（右半分）である。本章ではまずこの構造物のモデル化について（1）で詳しく述べ、次に地盤のモデル化について（2）で述べる。氷は温度、塩分濃度によってその物性値が異なることが知られている。また、氷は海底地盤と

同様に構造物の規模に対して半無限の広がりをもっていると考えられる。そこで、この氷のモデル化について（3）で述べる。

（1）重力着定式構造物のモデル化

図-1に示したように、構造物はその水平断面が正六角形をしており、ほぼ軸対称形とみなせる。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タ水を含めた全空中重量は916700tである。

この軸対称構造物を二次元モデルに変換するためには以下の手順を踏んだ。

まず、二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を実際の底面積と等しくなるように、それぞれ200m、157.08mとした。そして、図-2（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まで番号付けがしてある）、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157.08m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二次元モデルのそれ

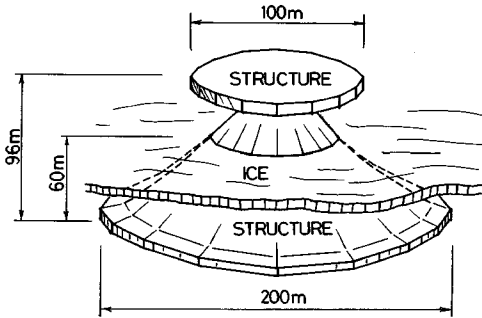


図-1 解析の対象とする重力着定式構造物の概略図

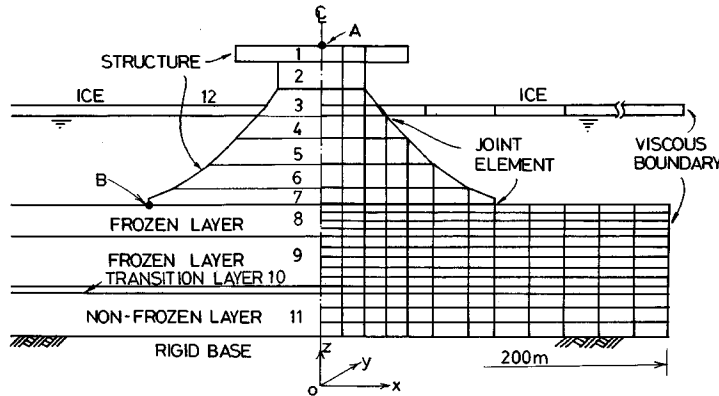


図-2 解析モデルの有限要素網と材料番号

表-1 モデルの材料定数

材料番号	単位体積重量 (ton/m ³)	せん断波速度 (m/sec)	ポアッソン比	減衰定数 (%)
1	0.110	2600	0.3	2.0
2	0.056			
3	0.300			
構造物 4	0.300			
5	0.683			
6	0.877			
7	1.093			
8	1.76	120	0.497	10.0
地盤 9	1.92	160	0.497	
10	1.92	1020	0.40	
11	1.73	1470	0.30	
氷 12	0.93	1150	0.40	2.0

とを合わせるために、まず、構造物を三次元軸対称有限要素でモデル化し、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、二次元モデルの構造物の固有振動数をこれに合わせた。固有振動数は、7.52 Hz であり、それに対応するせん断波速度は表-1 に示すとおりである。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に対して 2% を仮定した。

構造物に作用する動水圧は付加質量として扱い、その大きさは、構造物の水中体積に等しい海水の質量に 0.25 を掛けた値とした。これは以下の理由によるものである。

すなわち、一般に Off-shore の石油掘削構造物の設計は、API (American Petroleum Institute)⁸⁾あるいは、DNV (Det Norske Veritas)⁹⁾によって行われる。API-RP-2A (Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms) の 2.3.6 C-2 “Structural Modeling” の一項には「構造物の水中体積に等しい海水の質量を付加質量と見積ってもよい」とあるが、このとおりに行くと付加質量をあまりにも過大に評価してしまうおそれがある。そこで別途三次元特異分布法¹⁰⁾に基づき解析の対象とする構造物に対して付加質量を求めた。その結果を図-3 に示す。ここに、 M_a : 付加質量、 M_w : 構造物の水中体積に等しい海水の質量、 D_1 : 喫水線における構造物の直径、 ω : 円振動数、 g : 重力加速度である。これによれば付加質量係数としては 0.22 程度の値を用いればよいことがわかるが、ここでは安全側の 0.25 としたものである。

(2) 地盤のモデル化

地盤は大別して非凍土、凍土、およびその遷移層の 3 種類の層からなる。非凍土はさらに 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 に示す。表中の番号は図-2 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、地盤を等価な二層系に置換する手法¹¹⁾を用いて固有振動数を求め (1.94 Hz)、これ

表-2 地盤・氷の強度定数

	せん断強度 (kg/cm ²)	付着強度 (kg/cm ²)
地盤	0.5	...
氷	2.5	8.0

に対して 10% を仮定した。

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¹²⁾を配列した。すなわち、このジョイント要素の動的応力から滑動に対する安全率を評価するものである。しかし、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に設計してある。すなわち、実際にすべり面が形成されるのは構造物の底面と地盤との接触面ではなく、地盤内の接触面から 1 m 下方付近であると考えられる。したがって、滑動に対する抵抗力 (すなわち、ジョイント要素のせん断強度) には構造物底面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ければならない。そのせん断強度を表-2 に示す。

(3) 氷のモデル化

氷の厚さは 6 m と仮定し、これも二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¹³⁾⁻¹⁶⁾。たとえば、ヤング率は温度の低下と塩分濃度の低下に伴って増大し、減衰定数は温度の低下とともに減少することが明らかにされている^{13),14)}。このほか、氷の単位体積重量にもこれらの定数は依存するが、本研究では線形弾性体と仮定し -25°C における値を基本定数として使い、ヤング率はこの 1/2 および 2 倍の値も用いて検討を行う。その基本定数を表-1 に示す。

氷の遠方境界の設定に関しては、あらかじめ本解析の前に、固定境界、自由境界、粘性境界の 3 通りの境界条件を用いて地震応答解析を行った。その結果、三者の間にはそれほど大きな差はなく、粘性境界を用いた結果は他の 2 ケースの結果のほぼ中間にあったので、本研究では粘性境界を用いた結果について検討を加える。

さらに、構造物が強振すると構造物周辺の氷が破碎されて、その後、構造物の挙動に変化が生じることが考えられる。氷の付着強度は引張強度の半分以下であることが明らかにされており、これは構造物と氷との間に引張力が作用すると氷の引張破壊以前に構造物との間の付着が切れることを意味している。そこで、構造物と氷の付着面にも修正ジョイント要素を配して、この面における垂直応力、せん断応力を求め、引張応力、せん断応力がその強度以上になると氷の付着が切れるようなモデル化を行った。氷の付着強度およびせん断強度を表-2 に示

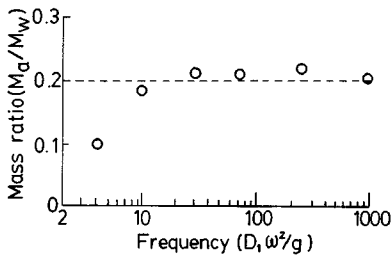


図-3 付加質量係数

す。

3. 運動方程式および解析手法

以上説明した構造物-地盤-氷系に、鉛直下方から水平地震動が入力する場合、この系に作用する力は、慣性力のほかに図-4に示す F_L, F_R, F_F が存在する。ここに、 F_L は氷の側方の粘性境界に生じる力、 F_R は地盤の側方の粘性境界に生じる力、 F_F は側方の自由地盤の運動に起因する力である。上添字、 L, R は以下特に断らない限りそれぞれ境界が左、右であることを示す。

付加質量を M^* で表わし、離散化した系の運動方程式をマトリックス表示すると、次式となる¹⁷⁾ (なお、文献17)は付加質量を考慮するときの運動方程式を示しているだけで、境界での力については言及していない)。

$$\begin{aligned} &([M]+[M^*])\{\dot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[K]\{x\} \\ &= -([M]+[M^*])\{\ddot{z}_0\}+\{F_L^*+\{F_R^*+\{F_F^* \\ &+\{F_L^*+\{F_F^*+\{F_F^* \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 $[M], [C], [K]$ は系全体の質量、粘性減衰、剛性マトリックス、 $\{z_0\}$ は基盤変位、 $\{x\}$ は基盤変位に対する系の相対変位ベクトルであり、 \cdot は時間に対する微分を意味する。また、上式の第2行目の外力ベクトルは以下のように表わせる。

$$\begin{aligned} \{F_L^*\} &= -[C_L^*](\{\dot{x}_L^*\}+\{\dot{z}_0\}) \\ \{F_R^*\} &= -[C_R^*](\{\dot{x}_R^*\}+\{\dot{z}_0\}) \dots \dots \dots (2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{F_L^*\} &= -[C_L^*](\{\dot{x}_L^*\}-\{\dot{x}_F^*\}) \\ \{F_R^*\} &= -[C_R^*](\{\dot{x}_R^*\}-\{\dot{x}_F^*\}) \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{F_F^*\} &= [G_F^*]\{x_F^*\}+[C_F^*]\{\dot{x}_F^*\} \\ \{F_F^*\} &= [G_F^*]\{x_F^*\}+[C_F^*]\{\dot{x}_F^*\} \dots \dots \dots (4) \end{aligned}$$

ここに、 $\{\dot{x}_L\}$ は氷の、 $\{\dot{x}_R\}$ は地盤の粘性境界に接する節点の速度、 $\{x_F\}$ は自由地盤の節点変位ベクトルである。 $[C_L], [C_R], [G_F], [C_F]$ の誘導は、著者の一人がすでに三次元問題に対して仮想仕事の原理に基づいて同様の境界マトリックスを誘導して論文発表しているのを、それを参照されたい¹⁸⁾。その誘導結果、および自由地盤の運動方程式は付録に示す。ここで注意しなければならないのは、式(2)右辺の速度項が絶対速度であること、すなわち、氷の側方境界に設定した粘性境界は境界上節点の絶対速度に関係すること、一方、式(3)で表わされる地盤の側方境界に設定した粘性境界は境界上節点と

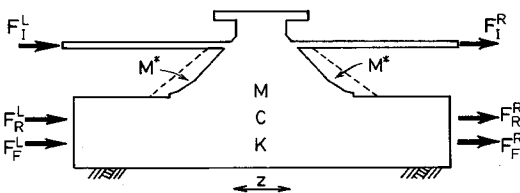


図-4 解析対象領域に作用する境界上の力

自由地盤の相対速度に関係するという点である。

さて、式(2)~(4)を式(1)へ代入し、既知の項と未知の項に分けて整理すると次式を得る。

$$\begin{aligned} &([M]+[M^*])\{\dot{x}\}+[C]\{\dot{x}\}+[C_L^*]\{\dot{x}_L^*\}+[C_R^*]\{\dot{x}_R^*\} \\ &+ [C_L^*]\{\dot{x}_L^*\}+[C_R^*]\{\dot{x}_R^*\}+[K]\{x\} \\ &= -([M]+[M^*])\{\ddot{z}_0\}-[C_L^*]\{\dot{z}_0\}-[C_R^*]\{\dot{z}_0\} \\ &+ [C_L^*]\{\dot{x}_L^*\}+[C_R^*]\{\dot{x}_R^*\}+[G_F^*]\{x_F^*\}+[G_F^*]\{x_F^*\} \\ &+ [C_F^*]\{\dot{x}_F^*\}+[C_F^*]\{\dot{x}_F^*\} \dots \dots \dots (5) \end{aligned}$$

さらに、上式左辺にあるベクトル $\{x_F^*\}$ 等は系全体の未知ベクトル $\{x\}$ の一部であるので、これにまとめることができ、結局、運動方程式として次式を得る。

$$\begin{aligned} &([M]+[M^*])\{\dot{x}\}+([C]+[C_L^*]+[C_R^*]+[C_L^*]+[C_R^*]) \\ &\{\dot{x}\}+[K]\{x\} \\ &= -([M]+[M^*])\{\ddot{z}_0\}-[C_L^*]\{\dot{z}_0\}-[C_R^*]\{\dot{z}_0\} \\ &+ ([C_L^*]+[C_R^*])\{\dot{x}_L^*\}+([C_L^*]+[C_R^*])\{\dot{x}_R^*\} \\ &+ [G_F^*]\{x_F^*\}+[G_F^*]\{x_F^*\} \dots \dots \dots (6) \end{aligned}$$

本研究では、上記運動方程式を解くのに、Newmarkの β 法 ($\beta=0.25$) を用い、時間刻みは0.002秒とした。入力地震波としては、卓越振動数の異なる以下の3通りの波形を用いた。

- (a) El Centro NS 成分 (Imperial Valley 地震, 1945)
- (b) JPL S 82 E 成分 (San Fernando 地震, 1971)
- (c) 八戸 EW 成分 (1968年十勝沖地震, 1968)

卓越振動数は順に、1.15 Hz, 2.8 Hz, 0.83 Hz である。この海域における設計水平震度は0.05である。そこで、本研究では実効値等を勘案して振幅はすべて海底面(自由地盤)で100 galとなるように調整し、Deconvolution¹⁹⁾によって基盤波形を求め、これらを基盤から入力した。したがって、これらの応答を比較することによって、入力卓越振動数の影響を知ることができる。なお、ここで構造物-地盤-氷相互作用系の固有振動数を把握しておくことが望ましいが、地盤、氷は側方に無限の広がりをもっているため、これを正しく把握することはきわめて困難である。そこで、ここでは著者の一人が提案している次の簡便式²⁰⁾を用いて構造物-地盤相互作用系の基本固有振動数 F_b を参考までに示す。

$$F_b = 0.595 + 0.663 F_g \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 F_g は地盤のせん断振動に対する基本固有振動数であり、これに前述の1.94 Hzを代入すると F_b として1.88 Hzを得る。なお、この式は矩形断面を有する構造物に対する二次元解析から導かれたものであること、また氷の影響は入っていないことを付記しておく。

4. 解析結果

(1) 初期応力解析

構造物底面における滑動現象を考慮に入れるので、地

震応答解析に先立ち、自重に起因する構造物底面における初期せん断応力を求めた。その結果を図-5に示す。この初期応力を求めるに際しては、氷の重量は考えず、構造物の重量はその水中部分に対応する浮力を差し引いたものを用いている。なお、内部摩擦角は0度としているので(粘性土)、垂直応力のせん断強度への寄与はない。また、本研究では氷は流動していないと仮定しているので、氷圧は構造物に対して等方的に作用する。したがって、氷圧のせん断応力への影響もない。

図-5に示したせん断応力分布および表-2に示したせん断強度からわかるように、低面の両端近傍のせん断応力はせん断強度に近く、常時においても局所的に滑動しやすい状態にあることがわかる。事実、後述するように地震波入力時においてはここでは局所的な滑動が頻繁に起こっている。

(2) 変位、速度、加速度応答

図-6に構造物天端(図-2, 点A)における応答変位、速度、加速度の時刻歴を、氷が存在する場合と存在しない

場合とで比較して示した。実線が氷の存在する場合であり、破線が氷の存在しない場合である。また、図(a)がEl Centro波入力、(b)がJPL波入力、(c)が八戸波入力に対する応答である。図から明らかなように、変位、速度、加速度いずれの応答も、またどの波形入力に対しても、氷の存在する場合には氷の存在しない場合に比べて、応答が約1/2に低減している。この構造物は剛性が非常に高く、ほぼ剛体としての挙動をしており、天端の応答が1/2ということはそのまま構造物全体の応答が1/2ということになる。これより、氷の存在はこの

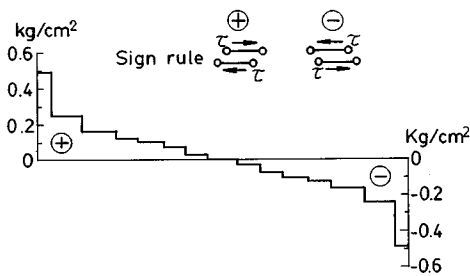
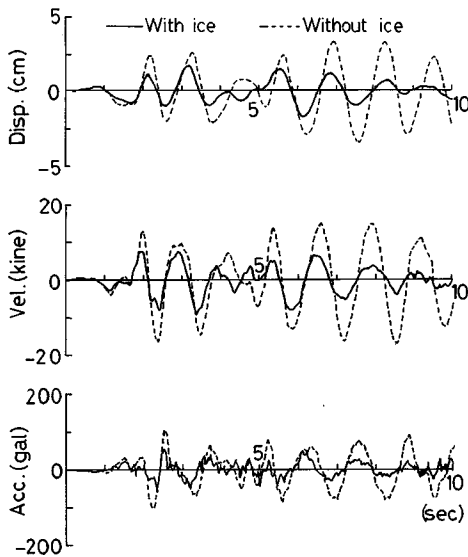
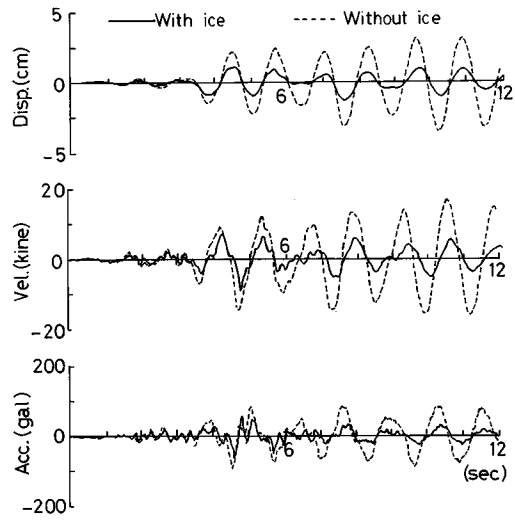


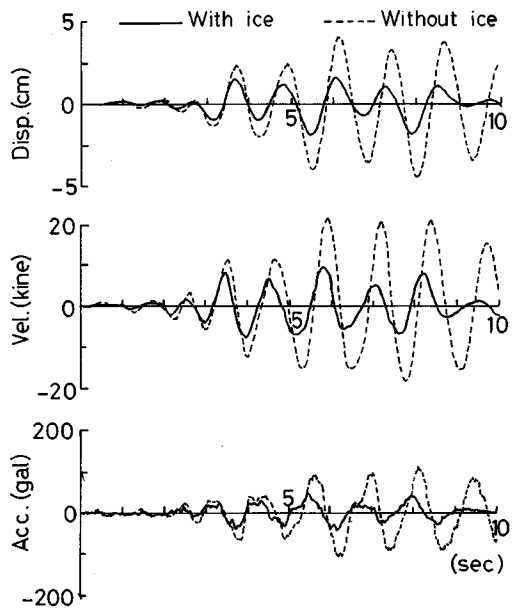
図-5 構造物底面における初期せん断応力の分布



(a) El Centro 波入力時



(b) JPL 波入力時



(c) 八戸波入力時

図-6 構造物の変位、速度、加速度応答に及ぼす氷の影響

構造物の応答を低下させることがわかる。

(3) 滑動安全性

前項の結果より、氷の存在は構造物天端の応答を低下させる働きのあることがわかった。しかし、まえがきで述べたように、これが構造物の滑動に対する安全性の向上に直接結びつくとは限らない。そこで、ここでは構造物の滑動安全性に対して検討を行う。

まず、図-7にEl Centro波入力時の構造物底面(図-2, 点B)における局所安全率²¹⁾の時刻歴を示す。これはこの点のジョイント要素のせん断強度とせん断応力の比である。図(a)が氷が存在する場合、(b)が氷が存在しない場合である。図中の破線は安全率1.0を表わしており、実線がこの線に接している間はこの点が滑動していることを意味する。図より、両ケースともこの点は頻りに滑動していることがわかるが、10秒間の応答計算中、滑動している時間は前者が約3.3秒、後者が約5.8秒と氷のある場合の方が滑動している時間は短い。他の地震波入力に対しても同様の結果が得られている。

次に、構造物全体の滑動に対する安全性を次式で定義される安全率, T.S.F.²¹⁾を用いて検討を行う。

$$T.S.F. = \left| \frac{\sum_{i=1}^{2N} \tau_{yi} l_i}{\sum_{i=1}^{2N} \tau_i l_i} \right|_{\min} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 τ_{yi} , τ_i はそれぞれ節点*i*における降伏せん断応力, せん断応力であり、 l_i は修正ジョイント要素の半分の長さ、 $|\dots|_{\min}$ 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-8に式(8)右辺の絶対値の時刻歴を示す。実線が氷の存在する場合であり、破線が氷の存在しない場合

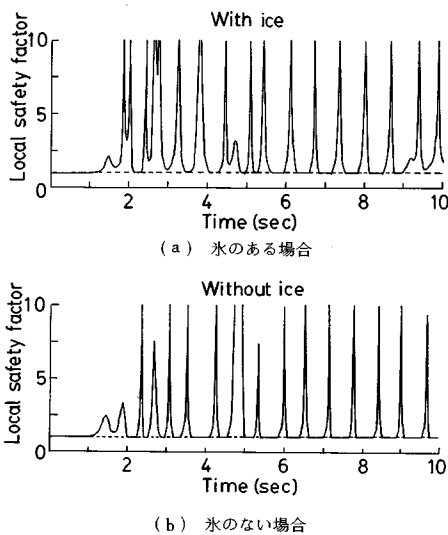


図-7 構造物底面端部における滑動に対する局所安全率

である。また、図(a)がEl Centro波入力、(b)がJPL波入力、(c)が八戸波入力に対する安全率である。これらの図より、一般に実線、すなわち、氷の存在する場合の方が高い安全率を示し、時間が経つに従って両者の差は大きくなる傾向にある。

この時刻歴中の最小値が式(8)で定義されるT.S.F.であり、その値を求めると表-3のようになる。この表には併せて氷のヤング率を1/2倍(1/2E)および2倍(2E)にしたときの安全率も示してある。また、図-9は氷の存在する場合の安全率と氷の存在しない場合の安全率の比を示したものである。これより、ヤング率が1/2Eのときにどの入射波に対してもT.S.F.の比は最大となっており、Eの増大とともにこの比は1に近づく傾向にあることがわかる。このことは、氷の存在によって構造物の運動がある程度抑えられて、底面での滑動に対する安全率は上昇するが、氷の剛性が高くなるにつれて氷による拘束が強くなり、この強い拘束が

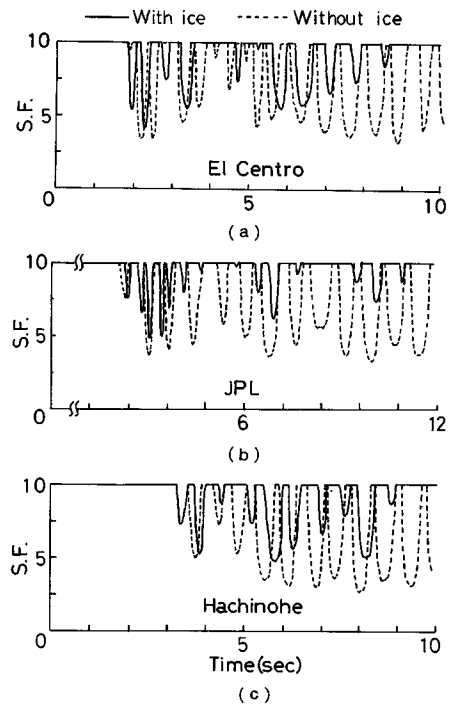


図-8 構造物全体の滑動に対する安全率(T.S.F.)に及ぼす氷の影響

表-3 T.S.F.の比較

入力波	氷無し	氷有り		
		E/2	E	2E
El Centro	3.43	4.95	4.15	4.04
J.P.L.	3.33	5.16	4.81	4.28
八戸	2.66	5.47	4.95	3.77

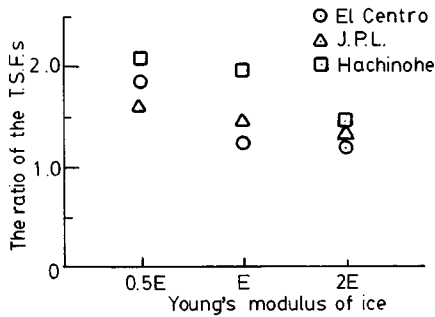


図-9 氷の存在による T. S. F. の増加の程度

ベースシアを増大させた結果、このように安全率の増加の割合が低下したものと考えられる。

しかし、いずれにしても安全率は 20~100 % 氷の存在によって高くなっていることがわかる。なお、これらは瞬間的な値に対する比であるが、地震波入力時間中における両者の差も図-8 からわかるように明らかである。

以上より、氷の存在は構造物の滑動に対する安全性に対して有利に作用するといえよう。

(4) 氷の破碎の可能性

ここでは、氷と構造物との間に配したジョイント要素の動的応力より、構造物の振動中に氷の付着が切れる可能性があるかどうかの検討を行う。これは、構造物と氷の付着が切れ破碎されると構造物の挙動が氷破碎前と異なってきて、氷のない場合の応答に近づくことが考えられる。そうすると、氷の存在する場合に比べて、応答が大きくなり、滑動に対する安全性も低下する可能性が出てくることも考えられるからである。

氷の付着強度およびせん断強度はそれぞれ 8.0 kg/cm²、2.5 kg/cm² である。これらの値に対して、ヤング率として E を用いたときの応答解析より求めた最大引張応力、最大せん断応力の値は表-4 に示したとおりである。これらの最大応力と強度とを比較すると、引張方向、せん断方向ともに、いずれの波形入力に対しても、応力が強度を越えることはなく、氷の付着が切れ、破碎される可能性のないことがわかる。

5. 結 論

本研究は、重力着定式構造物が氷海に建造される場合

表-4 構造物との付着面における氷の応力 (kg/cm²)

入力波	せん断強度	最大せん断応力	付着強度	最大引張応力
El Centro		1.07		0.87
JPL	2.5	0.95	8.0	0.65
八戸		1.12		0.88

を想定して、地震時における構造物の応答および滑動安全性に及ぼす氷の影響について考察を加えたものである。

構造物はほぼ軸対称形をしているが、ここでは同じ重量および基本固有振動数をもつ二次元平面ひずみモデルに置き換えて、二次元有限要素法を用いて解析を行った。地盤と氷は構造物に比べて無限の広がりを持っているとみなせるので、側方に粘性境界を導入して逸散波によるエネルギーの吸収を計った。地盤の下には剛な基盤を仮定し、ここから卓越振動数の異なる 3 種類の地震波を入力した。

滑動に対する安全性は、構造物底面と地盤との間に修正ジョイント要素を配列し、この動的応力から安全率を評価する手法によった。

動水圧は付加質量として取り扱った。また、氷の弾性定数は -25 °C におけるものを基本定数とし、ヤング率をその 1/2 および 2 倍と変えた場合についても解析を行った。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 氷の存在によって、構造物の最大加速度、速度、変位応答はほぼ半分まで低下した。
- (2) 構造物底面の端部では局所的な滑動が頻繁に起こっているが、氷が存在するとその程度が抑えられる。
- (3) 構造物全体の滑動に対する安全率は、入力波、氷のヤング率によって差はあるが、いずれの場合も氷のない場合に比べて安全率は高くなり、その割合は 20~100 % であった。
- (4) 構造物と氷との付着が切れるかどうかを調べた結果、本解析の加速度振幅では(地表面、すなわち海底面で 100 gal) 引張破壊もせん断破壊も起こらないことがわかった。

以上、本研究によって氷の存在は構造物の運動に対して危険性を高めることはなく、逆に構造物の安全性に対して有利に作用することがわかった。しかし、本解析においては以下のような仮定を用いている。すなわち、

- (1) 軸対称に近い構造物を二次元平面ひずみモデルで解析している。これによって、氷は構造物の左右両側だけで拘束していることになるが、実際は、前・後面での拘束もあるので、氷の拘束の影響はさらに大きくなることが考えられる。
- (2) 氷の存在する場合としない場合とでは応答が異なるにもかかわらず動水圧の影響は付加質量として扱い、一定値が用いられている。水を流体として扱った場合には、その影響は当然異ってくる。また、水と氷との動的相互作用によって、氷の破碎される可能性も異なってくるものと考えられる。
- (3) 地盤は材料非線形性を有し、氷は異方性が卓越した材料であるが、これらは等方、等質の線形弾性体と

仮定されている。

(4) 潮流、氷流はないものとして、これらによる一方向から作用する力の影響は考えられていない。これらが存在すれば、初期応力、動的応力は当然異なったものとなり、その結果、滑動に対する安全性も異なったものとなってくる。

以上のように、本テーマにはまだ多くの問題が残されており、これらを今後明らかにしていかなければならない。

最後に、本研究を進めるに際して、NKK 土木建築技術部土木技術室 大石 博氏から貴重な助言を頂いた。感謝の意を表する次第である。

付 録

(1) 式(2), (3), (4)中の $[C]$, $[C_n]$, $[G]$, $[C_f]$ 文献 18) において扱われている三次元問題を二次元問題に置き換えて誘導すればよい。その結果は以下に示すとおりである。

a) 粘性境界マトリックス $[C]$, $[C_n]$

$[C]$ も $[C_n]$ も同じマトリックスで与えられる。図-A-1 に示す境界上の要素 i (節点は $i, i+1$) に対する粘性境界マトリックスは次式となる。

$$[C]_i = \frac{\rho H}{6} \begin{bmatrix} 2V_p & 0 & V_p & 0 \\ 0 & 2V_s & 0 & V_s \\ V_p & 0 & 2V_p & 0 \\ 0 & V_s & 0 & 2V_s \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.1)$$

ここに、 ρ, H, V_p, V_s は要素 i のそれぞれ密度、要素高さ、縦波速度、横波速度である。

$[C]$, $[C_n]$ は境界面全体にわたって (A.1) で与えられるマトリックスを通常の方法で集成することによって求まる。ここで、次の関係が成立する。

$$[C] = [C^*], [C_n] = [C_n^*] \dots\dots\dots (A.2)$$

b) 境界剛性、粘性マトリックス $[G]$, $[C_f]$

境界上の要素 i に対する $[G]_i$ は次式で与えられる。

$$[G]_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\lambda & 0 & \lambda \\ -\mu & 0 & \mu & 0 \\ 0 & -\lambda & 0 & \lambda \\ -\mu & 0 & \mu & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.3)$$

ここに、 λ, μ は要素 i のラーメの定数である。マトリックスの集成の仕方は粘性マトリックスと同様である。また、次の関係がある。

$$[G] = -[G^*] \dots\dots\dots (A.4)$$

次に、 $[C_f]$, $[C_n^*]$ はレーレー減衰を仮定して次式で与えればよい。

$$[C_f]_i = \frac{h}{\pi f} [G]_i, [C_n^*]_i = \frac{h}{\pi f} [G_n^*]_i \dots\dots\dots (A.5)$$

ここに、 h は減衰定数、 f はそれに対応する振動数であ

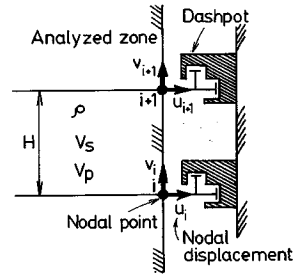


図-A-1 粘性境界の模式図と用いる記号

る。

(2) 自由地盤の運動方程式

自由地盤の運動方程式は次式で与えられる。

$$[M_F] \{\ddot{x}_F\} + [C_F] \{\dot{x}_F\} + [K_F] \{x_F\} = -[M_F] \{\ddot{z}_0\} \dots\dots\dots (A.6)$$

ここに、 $[M_F]$, $[C_F]$, $[K_F]$ は自由地盤の質量、減衰、剛性マトリックスであり、水平振動(せん断振動)の場合の要素質量、剛性マトリックスは次式で与えられる。

$$[M_F]_i = \frac{\rho H}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.7)$$

$$[K_F]_i = \frac{\mu}{H} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (A.8)$$

減衰マトリックスはレーレー減衰を仮定して次式で与えればよい。すなわち、

$$[C_F]_i = \frac{h}{\pi f} [K_F]_i \dots\dots\dots (A.9)$$

参 考 文 献

- 1) Imperial Oil Limited : Computer program to evaluate the forces generated by a moving ice field encountering a conical structure, APOA Project No. 87-1, Calgary, 1975.
- 2) Maattanen, M.P. and Mustamaki, W.O. : Ice forces exerted on a conical structure in the Gulf of Bothnia, Offshore Tech. Conf., Paper OTC 5054, Houston, 1985.
- 3) Cammaert, A.B., Kimura, T., Koma, N., Yashima, N., Yano, S. and Matsushima, Y. : Adfreeze forces on offshore platforms, Proc. of the 6th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Tokyo, pp. 541~548, 1987.
- 4) Koma, K., Tsutsumi, D., Yashima, N., Yano, S., Matsushima, Y., Kimura, T. and Cammaert, A.B. : Design consideration of global ice load distribution and local ice pressure on offshore structure, Proc. of the 6th Int. Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Tokyo, pp. 299~306, 1987.
- 5) Kamesaki, K. and Yashimura, N. : Multiyear ridge load on a conical structure, Proc. of the 9th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions,

- Fairbanks, Vol. I, pp. 307~316, 1987.
- 6) 小堀為雄・近田康夫：非軸対称荷重下の軸対称 JOINT 要素に関する若干の考察，構造工学論文集，Vol. 32 A, pp. 335~342, 1986.
 - 7) 土岐憲三・三浦房紀・大竹俊雄：3次元ジョイント要素による地盤-構造物系の非線形震動解析，土木学会論文報告集，第 322 号，pp. 51~61, 1982.
 - 8) American Petroleum Institute : Recommended Practice for Planning, Designing and constructing fixed offshore platforms, API RP 2 A, 17th Ed., 1987.
 - 9) Det Norske Veritas : Rules for the design construction and inspection of offshore structures, Dynamic analysis, Reprint with corrections, 1982.
 - 10) Faltinson, O. and Michelson, F. C. : Motions of large structures in waves at zero fruid number, Int. Symp. on the Dyn. of Marine Vehicles and Structures in Waves, 1974.
 - 11) Dobry, R., Oweis, I. and Urzua, A. : Simplified procedures for estimating the fundamental period of a soil profile, BSSA, Vol. 66, No. 4, pp. 1293~1321, 1976.
 - 12) Toki, K. and Miura, F. : Simulation of a fault rupture mechanism by a two-dimensional finite element method, J. Phys. Earth, 33, pp. 485~511, 1985.
 - 13) 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.
 - 14) Lainey, L. and Tinawi, R. : The mechanical properties of sea ice-A compilation of available data, Can. J. Civ. Eng., Vol. 11, No. 4, pp. 884~923, 1984.
 - 15) Inoue, M. and Koma, N. : Field identification tests on cylindrical structures, Proc. of the 8th Int. Conf. on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Vol. 2, pp. 555~568, 1985.
 - 16) 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.
 - 17) 土岐憲三・三浦房紀・寺田倫康：水-地盤-護岸構造物系の地震応答解析，京都大学防災研究所年報，第 25 号 B-2, pp. 67~83, 1982.
 - 18) 三浦房紀・沖中宏志：仮想仕事の原理に基づく粘性境界を用いた 3次元構造物-地盤系の動的解析手法，土木学会論文集，第 404 号，pp. 46~55, 1989.
 - 19) 三浦房紀：地盤-構造物系の非線形動的相互作用効果の評価，昭和 60 年度科学研究費補助金（総合研究 A）研究成果報告書，総合題目「構造物地盤系の終局安全性の分配とそれに基づく耐震設計法の開発」（代表・土岐憲三），pp. 76~87, 1986.
 - 20) Miura, F. and Toki, K. : Estimation of natural frequency and damping factor for dynamic soil structure interaction systems, Proc. of 3rd Int. Conf. on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Developments in Geotechnical Engineering, Vol. 43, Soil-Structure Interaction, pp. 73~87, 1987.
 - 21) Toki, K., Miura, F. and Oguni, Y. : Dynamic slope stability analyses with a nonlinear finite element method, Earthquake Enging. and Struct. Dyn., Vol. 13, pp. 151~171, 1985.

(1989. 3. 20・受付)