(昭和 60 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

北極海用移動式人工島の構造解析

正員 根 木 勲* 正員 山 崎 敬 造*
正員 豊 英 明* 正員 田 伏 範 幸*

Structural Analysis of Arctic Mobile Island

by Isao Neki, *Member* Keizo Yamazaki, *Member*
Hideaki Tatami, *Member* Noriyuki Tabushi, *Member*

Summary

Artificial gravel or sand islands were constructed in shallow water of the Arctic Sea to drill explorative or productive wells. However as increasing the water depth of the site, it became difficult and expensive to complete an island in one season. So the mobile islands such as Mobile Arctic Caisson (MAC) have been developed in place of artificial gravel or sand islands.

In this paper, the authors studied the design criteria of a mobile caisson island, and investigated the structural strength analysis with its application to MAC, which was constructed in our yard.

In the structural analysis of a mobile caisson island, the effect of sand shall be the most important. Usually the sand shall be treated as simple lumped springs distributed on soil face and bottom of the caisson. But in this method, it is difficult to obtain the accurate results, because the calculation of the spring constant is very difficult, and it is impossible to be taken into account of the interaction of each spring.

So in this paper, to obtain the accurate results, the authors analyzed that interaction and contact problem of the sand and the steel structure with finite element model.

1 緒 言

近年北極海に有望な石油資源が発見され、この地域の石油開発が始まったが、この地域の海面は凍結や流氷が多く、通常のリグでは夏期の短期間しか石油掘削ができなかった。

これらの制限を解決するため、海底から土砂を盛り上げて人工島を構築し、その上で石油掘削を行う方法が考えられ、多数の人工島が造られた。しかしながら、この方法では石油掘削を行う場所の水深が増すに従い、多量の土砂を必要とするのみならず、1 ないし 2 シーズンの開氷期で構築することが困難となってきた。また掘削地点が変わるたびに人工島を構築する必要があり、試掘には不適であった。これを解決するために、移動式人工島が各種開発されるようになった。

移動式人工島は北極海で一年中使用されることから、いわゆる耐氷構造物であることが必要となるが、砕氷船と大きく異なり、流氷に対しこれを回避することはほと

んど不可能であり、また石油掘削中はこれらの氷荷重による、その設置場所からの移動は許されない。この氷による水平力に抵抗する方式としては、ケーソン方式と呼ばれるものと^{1),2)}、重力方式と呼ばれるものがある³⁾。ケーソン方式は人工島の内部に土砂を投入し、この土砂の剪断により人工島を海底に保持しようとする方式であり、重力方式は構造物の自重による海底との摩擦により保持しようとする方式である。

本論文では、当社にて建造されたケーソン型移動式人工島^{4),5)}を例にとり、構造設計に必要な設計条件を検討し、全体強度および局部強度に対する考え方と構造解析結果を示し、ケーソン型移動式人工島の構造解析法について述べる。

2 構 造 方 式

当社にて建造されたケーソン型移動式人工島は、Fig. 1 に示すような構造方式であり、八角形の環状のケーソンと、ケーソン内部のサンドコアおよび石油掘削装置を設備したボックスガーダデッキより成り立っている。ケ

* 石川島播磨重工業(株)船舶設計室第3船舶設計部

Fig.1 Structural arrangement of Mobile Arctic Caisson

ケーソン下部には設置場所の水深に応じ、吃水が一定となるよう、あらかじめ必要な高さまで海底から盛り上げられたサンドバームが準備される。

ケーソンはトップデッキおよびストレージデッキの2層のデッキ、アイスフェース(氷圧面)、ソイルフェース(土圧面)およびボトムから構成されている。アイスフェースの対氷部分は約7°傾斜しており、ソイルフェースの底部は、浮上時土砂との摩擦抵抗を減少するため、約6°逆傾斜している。ケーソン内部はバラスト水および燃料油タンクとして使用されており、各コーナー部のほか、各長辺の中央に水密隔壁が設けられている。ケーソン断面には、2.44m スペースでトランスリングが設けられ、アイスフェースにはその中間に水平ガルダで支持されたインターメディアットトランスが配置されている。耐氷構造部は400mm スペースで水平方向にスチフナで補強されている。この構造方式によりアイスフェースに作用する氷荷重は、トランスリングを介してサンドコアに伝達される。

ボックスガダデッキは、ケーソンに作用する水平荷重が直接伝達されないように、ケーソンのストレージデ

ッキ上に配置されたゴム製支持台により、周辺を支持され、ケーソンとは分離された構造物となっている。

なお、本人工島には一般に降伏点 36 キロ級高張力鋼が使用されており、一部高応力部には降伏点 70 キロ級高張力鋼が使用されている。

3 荷重および構造設計条件

3.1 荷重条件

一般に氷海域で使用される海洋構造物に作用する荷重としては波浪、潮流、風、地震、氷、温度変化、水圧などによるものが考えられるが、人工島の構造強度に対しては氷荷重が最もきびしい。

人工島に作用する氷荷重の算定に対し、最も影響を及ぼす因子は氷と人工島との接触時の氷の破壊モードである。

代表的な氷の破壊モードとしては座屈、剪断、曲げ、圧砕、構造物との凍着からの解放による破壊があげられる⁶⁾。

本人工島の場合、人工島周囲の氷の性状は使用海域の水深が比較的深いことから氷厚は厚くなり、また氷の移動速度も速くなる、これはおもに薄氷で生じる座屈、剪断モードは起こりにくく、氷の歪速度が高い場合に見られる圧砕モードが起こり易いことを示している。また構造から見ると、アイスフェース部はほぼ直立形状になっており、曲げモードの破壊は生じにくく、ここでも圧砕モードになることを示している。

以上から本人工島に作用する氷荷重は圧砕モードによるものと考えればよい。

圧砕モードの氷荷重は次式で与えられる⁶⁾。

$$F = PDt \quad (1)$$

$$P = If_c \sigma_x \quad (2)$$

ここで、 F : 水平方向氷荷重

P : 氷圧力

I : Indentation Factor

f_c : 接触係数

σ_x : 氷の一軸圧縮強度

D : 接触幅(投影幅)

t : 氷厚さ

本人工島の全体強度を考える場合、文献 6) に記載の大型氷海構造物に対する値、 $I=1.2$ 、 $f_c=0.45$ を用いる。また σ_x に関しては σ_x と氷の歪速度との関係が実験により求められている⁶⁾。

氷の歪速度は次式で与えられる。

$$\dot{\epsilon} = \frac{V}{2D} \quad (3)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$: 氷の歪速度

V : 氷の移動速度

本人工島の場合、 $V=0.03\text{m/s}$ 、 $t=3.5\text{m}$ と仮定し、また $D=88.5\text{m}$ であることからこれらを(3)式に代入すると、 $\dot{\epsilon}=1.7\times 10^{-4}/\text{s}$ となる。この $\dot{\epsilon}$ に対して σ_x は文献6)により、 $\sigma_x=420\text{t/m}^2$ が与えられる。以上を(1)、(2)式へ代入すると、 $F=70,000\text{ton}$ となり、これが人工島に作用する氷荷重となる。

一方、局部強度に対しては(2)式で示される氷圧力荷重を適用する。

上記荷重は30年から60年に1回の発生頻度に相当するものと考えられている¹⁾。

3.2 構造設計条件

構造設計条件として、人工島の滑動抵抗については氷荷重に対する安全率、ケーソンの全体強度については構造部材の応力、局部強度についてはパネルおよびスチフナの塑性崩壊荷重に対する安全率で与えられる。

人工島内側のサンドコアとサンドバームの滑動抵抗は次式で与えられる。

$$R=(r_1V_1+r_2V_2)\tan\phi \quad (4)$$

ここで、 r_1 : 水線上の土の比重(排水)

V_1 : 水線上の土の容積(排水)

r_2 : 水線と滑動面間の土の比重(非排水)

V_2 : 水線と滑動面間の土の容積(非排水)

ϕ : 土の内部摩擦角

本人工島の場合、ケーソン内側にサンドコアが満たされた状態を考えると、サンドコアに浸透する海水は人工島に備えられた排水設備により、サンドコア表面から10m下の高さまで排水される。したがってその高さを境にして上側は排水土、下側は非排水土と考えられる、いま $r_1=1.9\text{t/m}^3$ 、 $r_2=1.1\text{t/m}^3$ 、 $\phi=35^\circ$ ⁸⁾とし、また $V_1=49,700\text{m}^3$ 、 $V_2=58,000\text{m}^3$ であることからこれらを(4)式に代入すると、 $R=110,800\text{ton}$ となり、さきに求めた氷荷重70,000tonに対し、安全率は1.58で十分な抵抗を有する。

氷荷重に対する全体強度の許容応力は前節で算出した氷荷重の発生頻度が低いこと、および本人工島の構造方式が冗長度の高いものであり、部分的な部材降伏は許容できると判断されることから考えて、構造部材の降伏応力の95%とする。

人工島の全体強度に対する構造変位については、人工島トップデッキから海底土まで貫通している掘削用ガイドパイプがトップデッキと海底土の相対変位により壊れない程度まで許される。本人工島の場合、ガイドパイプがサンドバームで固定された片持梁とみて、ガイドパイプの材質と剛性から考えるとトップデッキ高さでの水平方向許容変位は72cmとなる。

アイスフェースのパネルおよびスチフナの局部強度については塑性設計の立場から決められる。たとえば、長

方形板に対しては屋根型塑性関節、梁に対しては最終塑性関節が形成される荷重を崩壊荷重とし、この崩壊荷重と(2)式で求められる氷圧力荷重との比を安全率として、これを1.25程度以上になるよう設計すればよい。

4 構造解析

ケーソン型移動式人工島の構造解析の特徴は、ケーソン構造と砂の相互作用にある。したがって、砂の作用をどのように取扱うかが極めて重要になる。

コア内に投入された砂は塑性状態にあり、その砂の主働土圧がケーソンのタンク内の水圧と釣合っている。このような状態を解析の初期状態と考えると、その後の氷荷重による変形に対し、砂は塑性受働土圧を示すのではなく、弾性体としての挙動を示す。したがって、砂は荷重として考慮するのではなく、弾性体としてモデル化する必要がある。

一般に、構造物と土の相互作用の初期解析には、土をその剪断剛性を基にしたバネ(simple lumped spring)にモデル化する方法が用いられる。著者らはこの考え方にに基づき、ケーソンのソイルフェースとボトムにバネを分布させ解析を行ったが、この方法ではバネ定数の算定が難しいことと、おのおののバネの相関が考慮されないことのため、サンドコアの砂の挙動を表わすのは困難であることがわかった。そこで、本論文では砂を有限要素にモデル化し、ケーソンと砂を一体として解析する。

4.1 荷重ケース

前章で述べたように、荷重としては氷荷重を考えるわけであるが、氷が人工島に作用する代表的なケースとして次のようなものが考えられる。

(1) 氷荷重が人工島の両側から作用する場合

(2) 氷荷重が人工島の片側から作用する場合

したがって、荷重ケースとしてはFig.2に示すような4つのケースを考える。

4.2 モデル化

4.2.1 モデル化範囲と境界条件

モデル化の範囲は対称条件を考慮し、荷重ケース1と2は1/4モデル、荷重ケース3と4は1/2モデルとする。サンドバームは深さ5m、半径73.5mまでをモデル化する。なお、その深さの影響を検討するため10mとしたものも荷重ケース1について解析する。また、ボックスガーダは直接氷荷重を受けないため解析対象から除外する。例として、荷重ケース1に対するモデルをFig.3に示す。

次に、境界条件はサンドバーム底面を固着とし、ケーソンとサンドコアおよびサンドバームの境界は以下に示すような接触問題として扱う。

ケーソンと砂の静止摩擦係数は0.4とし、垂直力が圧

Fig. 2 Loading cases for structural analysis

縮であり、剪断力との比が0.4以下の部分は密着しており、それより大きい部分は滑るものとする。なお、この際の摩擦力は無視するが、これは安全側を考えることになる。また、垂直力が引張の部分はケーソンと砂は離れているものとして反復法により解析する。

4.2.2 ケーソン構造のモデル化

Fig. 3(b) に示すケーソン構造のモデル化は概略次の通りである。

(1) トランスリングはその剪断変形が等価な一枚板とし、場所に応じて水密隔壁とともに数枚をまとめてモデル化する。要素は面内要素とし、クロスタイ部には棒要素を付加する。なお、トランスリングの応力解析については、その詳細な平面モデルを作り、これに全体解析により得られた境界変位をかけることによって求める、いわゆるズームング手法を用いる。

(2) 2層のデッキ、アイスフェース、ソイルフェースおよびボトムは、スチフナの効果を考慮した異方性板とし、要素は面内要素とする。

(3) ホリゾンタルガーダは梁要素にモデル化する。

Fig. 3 Model for loading case 1

(4) インターメディエイトトランスは無視する。

(5) 各部材の弾性係数は $21,000 \text{ kg/mm}^2$ 、ポアソン比は0.3とする。

4.2.3 砂のモデル化

砂はサンドコアおよびサンドバームともに Fig. 3(c) に示すようなソリッド要素にモデル化する。

次に材料定数についてであるが、砂の応力・ひずみ関係が非線形性を示す⁷⁾ことから、その応力依存性を決定するためには、実際にサンドコアとサンドバームに使用される砂を用いて三軸圧縮試験などを行う必要があり、さらに各場所の材料定数を知るためには、氷荷重を受ける時のその場所の応力状態を厳密に知る必要がある。いま、初期応力状態に比べて、その後の氷荷重による変形が微小であることから、砂は線形挙動を示すと考えてよいが、実際の初期応力状態を知ることは不可能である。

本論文では砂の材料定数は均一であるとする。また、砂の平均的な弾性係数 $5 \sim 15 \text{ kg/mm}^2$ ⁸⁾に基づき、まず、 10 kg/mm^2 として全体強度などを検討し、のちに弾性係数を変化させてその影響度を調べる。なお、ポアソン比は $0.3 \sim 0.5$ の範囲内にある⁹⁾が、その影響は弾性係数に比べて小さいと考え、すべての解析において0.3とする。

Fig. 4 Horizontal displacement at storage deck

Fig. 5 Stress distribution of top deck and ice face

Fig. 6 Displacement of whole model at center line

Fig. 7 Stress distribution of sand core in loading case 3

4.3 解析結果とその考察

4.3.1 全体構造解析

前節で述べた4つの荷重ケースについて砂を含めた全体構造解析を行った。その結果を Fig. 4~Fig. 6 に示す。Fig. 4 のストレージデッキの変形を見ると、最大変

位は荷重ケース3と4の場合が、荷重ケース1と2の場合の約1.4倍になっているが、前章で述べた掘削時の水平方向許容変位を充分下回っている。また、荷重ケース3と4では約10cm程度の剛体変位を含んでおり、全体的な変形も少なくなっている。次に、Fig. 5 の応力分

布では、荷重ケース1と3は、荷重辺コーナー部は剪断応力、その他は圧縮応力が支配的であり、荷重ケース2と4は、長辺の端部に圧縮と剪断の重畳したものが見られ、その他は圧縮応力が支配的であるというように、それぞれほぼ同様の応力分布を示しているが、応力値としては荷重ケース1と2の方が全般的に高い値を示している。したがってケーソン構造にとっては荷重ケース1と2の方が厳しいといえる。さらに、Fig. 6の断面の変形を見ると、氷荷重の作用位置とケーソン断面の剪断中心のずれのために振り変形を受けているが、Fig. 5において断面方向の応力が水平方向の応力に比べて非常に小さいことから、かなり剛体的な回転であると考えられる。

また、Fig. 6においてケーソンと砂の接触状況を見ると、氷荷重の作用側は振り変形によってケーソンのボトムがサンドバームから浮き上がっており、サンドコアの砂はソイルフェース上を滑り、盛り上がっているのがわかる。荷重ケース1と3を比較すると、荷重ケース3の方が荷重辺の変位が大きく、対辺はケーソンとサンドコアが離れている。したがって、砂にとっては荷重ケース3および4の方が厳しいと考えられる。そこで、荷重ケース3における砂の応力分布をFig. 7に示す。同図によると砂の応力分布は変位とほぼ同形であり、特に重要なサンドコア底面の剪断応力分布を見ると、ケーソンの荷重辺のボトムのすぐ内側から急激に立ち上がっている。これらは、砂の効き方がかなり局部的であることを示している。

4.3.2 トランスリングの応力解析

トランスリングの強度を検討するために、Fig. 8に示すような詳細モデルを作り、全体構造解析で得られた変形を強制変位として周囲に与え、各荷重ケースについてズーム計算を行った。その結果は各荷重ケースとも同様の傾向を示しており、代表として応力が最大であった荷重ケース2について変形と応力分布を同図に示す。前節で述べたように、全体の水平方向の変形に比べ断面

Fig. 8 Structural analysis of trans. ring in loading case 2

の変形はかなり剛体的であるが、この図から、荷重点付近のトランスは曲げ変形しており、その上下の部分はトランスリングが剪断変形しているのがわかる。

4.3.3 砂の弾性係数の影響

前節で述べたように、砂の弾性係数を厳密に知ることには非常に困難である。したがって、その不確定要素の解析結果に対する影響度を把握することが極めて重要となる。そこで、荷重ケース1について砂の弾性係数を変えて解析を行った。その結果として、2つのデッキの最大変位をFig. 9に、トップデッキとアイスフェースの最大応力をFig. 10に示す。変位は砂の弾性係数が小さいところではサンドコアなし (0 kg/mm^2) から 3.0 kg/mm^2

Fig. 9 Displacement-sand rigidity relation in loading case 1

Fig. 10 Stress-sand rigidity relation in loading case 1

mm² で 32% 減と急激に変化しているが、5.0kg/mm² を越えると 6.0kg/mm² から 10.0kg/mm² で 15% 減とゆるやかになる。応力も同様の傾向を示し、0kg/mm² から 3.0kg/mm² で 20% 減、6.0kg/mm² から 10.0kg/mm² で 11% 減と、変化の割合はさらに少ない。以上のことから、砂の弾性係数の影響度は意外に低く、特に文献 8) で推奨される 5.0kg/mm² 以上のところではほとんど影響がないことがわかった。

4.3.4 サンドバームの深さの影響

サンドバームは剪断変形が支配的である。そこで、その深さ方向のモデル化範囲が解析結果に与える影響を検討するために、Fig. 6 に示すように荷重ケース 1 について、サンドバームの深さを 10m とした場合の解析を行った。同図に示すように、最大変位部であるトップデッキの変位は、深さが 5m の時の 1.5% しか増加していない。これはサンドバームの変形が深さ方向にも局部的であることを意味している。したがって、サンドバームのモデル化は 5m で十分であるといえる。

5 結 言

本論文では、北極海用移動式人工島の構造解析としてケーソン型人工島を例にとり、荷重条件および構造のモデル化など、構造設計に必要な設計条件および構造解析手法を示し、その有効性を確認し、以下の結論を得た。

(1) 人工島に作用する氷荷重の算定に対し、最も影響を及ぼす因子は、氷の人工島との接触時の破壊モードである。本例では、氷荷重として圧碎モードによるものを考えれば良い。

(2) ケーソン型人工島の構造解析においては、土砂の取扱い方が極めて重要であり、精度良く解析するためには、砂を有限要素にモデル化し、ケーソン構造と砂を一体として取扱い、接触問題として解析することが有効である。

(3) 氷荷重が人工島の片側から作用する場合の方が、両側からの場合より変位は大きい、ケーソンの構造強度上では逆に両側荷重の方がシビアである。

(4) 砂のモデル化には、実際に使用される砂の材料定数を用いる必要があるが、ケーソンの構造強度におよぼす砂のヤング率の影響は小さい。したがって初期設計時には概略値を用いて良い。

(5) ケーソン下部のサンドバームの深さの影響は小さい。

参 考 文 献

- 1) J. C. Bruce and A. G. Harrington : Design Aspects of a Mobile Arctic Caisson, OTC 4333 (1982), pp. 405-416.
- 2) J. J. A. de Jong and J. C. Bruce : Design and Construction of a Caisson Retained Island Drilling Platform for the Beafort Sea, OTC 3294 (1978), pp. 2111-2120.
- 3) S. B. Wetmore : The Concrete Island Drilling system : Super Series (Super CIDS), OTC 4801 (1984), pp. 215-226.
- 4) 奥城, 山崎, 景山, 小林, 川北 : 北極海用移動式人工島形石油掘削装置 ; MOLIKPAQ, 石川島播磨技報, 第 24 巻, 第 6 号 (1984).
- 5) 貝原, 他 : 極地むけ海洋構造物への高能率溶接法の適用, 石川島播磨技報, 第 24 巻, 第 2 号 (1984).
- 6) API Bulletin 2N (1981) : API Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Structure in Ice Environments, First Edition (1981).
- 7) J. M. Duncan and C. Y. Chang : Nonlinear Analysis of Stress Strain in Soils, ASCE, Vol. 96, No. SM 5, Proc. Paper, (September, 1970), pp. 1629-1653.
- 8) M. G. Hallam, N. J. Heaf and L. R. Wootton : Dynamics of Marine Structures, Report UR 8, 2nd Edition, CIRIA Underwater Engineering Group, (October, 1978).